



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ΔΠΜΣ Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων

**Σταθμός Μετρό “Πειραιάς”: Σύγκριση αποτελεσμάτων
αριθμητικών αναλύσεων με μετρήσεις ενόργανης παρακολούθησης**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνος Σαμψάκης-Μπακόπουλος

Επιβλέπων: Νικόλαος Γερόλυμος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2023



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ΔΠΜΣ Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων

**Σταθμός Μετρό “Πειραιάς”: Σύγκριση αποτελεσμάτων
αριθμητικών αναλύσεων με μετρήσεις ενόργανης παρακολούθησης**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνος Σαμψάκης-Μπακόπουλος

Επιβλέπων: Νικόλαος Γερόλυμος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 04/07/2021:

Νικόλαος Γερόλυμος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Βασίλειος Παπαδόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Νομικός Παύλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2023

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Εικόνων	iii
Ευρετήριο Πινάκων	vi
Σύνοψη	ix
Abstract	x
A Extended Abstract	xi
2 Εισαγωγή	1
2.1 Η επέκταση προς Πειραιά	1
2.2 Ο σταθμός “Πειραιά”	2
3 Στοιχεία του Έργου και Δεδομένα	9
3.1 Διαφραγματικοί τοίχοι	10
3.1.1 Προεκσκαφή	12
3.1.2 Κατασκευή οδηγών τοιχωμάτων	12
3.1.3 Προετοιμασία αιωρήματος μπεντονίτη	13
3.1.4 Κύρια εκσκαφή διαφράγματος	14
3.1.5 Τοποθέτηση σιδηρού οπλισμού	15
3.1.6 Τελική σκυροδέτηση	17
3.2 Αντηρίδες	19
3.3 Πάσσαλοι	20
3.4 Πλάκα θεμελίωσης-Πάσσαλοι θεμελίωσης	21
4 Γεωτεχνικές συνθήκες και παράμετροι σχεδιασμού	24
4.1 Εδαφική στρωματογραφία στην θέση του έργου	24
4.1.1 Τεχνητές αποθέσεις [AL]	25
4.1.2 Ελώδεις αποθέσεις “Αλίπεδον” [SW]	25
4.1.3 Παράκτιες αποθέσεις [PT]	25
4.1.4 Θαλάσσιες μαργαϊκές αποθέσεις [NM]	26
4.1.5 Καθεστώς και στάθμη υπογείων υδάτων	26
4.1.6 Διαπερατότητα γεωτεχνικών σχηματισμών	26
4.2 Γεωτεχνικές-Ιδεατές τομές σχεδιασμού	26
4.3 Παράμετροι γεωτεχνικού σχεδιασμού	27
4.3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά	27
4.3.2 Ενεργές παράμετροι διατμητικής αντοχής	30
4.3.3 Ενεργές παράμετροι διατμητικής αντοχής	31
4.3.4 Παράμετροι Αντοχής και Παραμορφωσιμότητας	32
4.3.5 Διαπερατότητα	34
4.4 Ανακεφαλαίωση	34

5	Όργανα γεωμηχανικής και δομητικής παρακολούθησης του έργου	36
5.1	Αναγκαιότητα σχεδιασμού συστήματος παρακολούθησης	36
5.2	Πιεζόμετρα	38
5.2.1	Πιεζόμετρα Κατακόρυφου Σωλήνα (Ανοικτού Τύπου)	38
5.2.2	Πιεζόμετρα Τύπου Διαφράγματος (Δονούμενης Χορδής)	40
5.3	Αποκλισιόμετρα	42
5.4	Σύστημα Χωροσταθμικών Μετρήσεων	44
6	Αριθμητική ανάλυση	48
6.1	Γεωμετρία Εκσκαφής	48
6.2	Στάδια Εκσκαφής	48
6.3	Σύστημα Αντιστήριξης	50
6.4	Αριθμητική Προσομοίωση	53
6.5	Αποτελέσματα προσομοίωσης	56
7	Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής ανάλυσης και οργάνων παρακολούθησης	59
7.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων αποκλισιομέτρων	59
7.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων χωροσταθμικών μετρήσεων	62
7.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων πιεζομέτρων	64
7.4	Μετρήσεις πιεζομέτρων δονούμενης χορδής	65
7.5	Μετρήσεις πιεζομέτρων ανοικτού τύπου	69
8	Παραμετρική διερεύνηση των αριθμητικών προσομοιώσεων	71
8.1	1η παραμετρική διερεύνηση	72
8.2	2η παραμετρική διερεύνηση	75
8.3	3η παραμετρική διερεύνηση	80
8.4	4η παραμετρική διερεύνηση	83
8.5	5η παραμετρική διερεύνηση	86
8.6	6η παραμετρική διερεύνηση	88
9	Συμπεράσματα	91
9.1	Οριζόντιες μετακινήσεις Δ.Τ και αποκλισιόμετρο	91
9.2	Κατακόρυφες μετακινήσεις και χωροσταθμικά επιφανείας	92
9.3	Υδατικές πιέσεις, στάθμη υδροφόρου ορίζοντα και πιεζόμετρα	93
	Βιβλιογραφίες	95

Ευρετήριο Εικόνων

A.1	Top view of the Piraeus Station Outline	xi
A.2	Side view of the retaining structure	xii
A.3	Automated Monitoring System in Piraeus Station	xiv
A.4	Side view of the retaining structure	xv
A.5	Horizontal displacement of the diaphragm wall in comparison with readings from inclinometer	xvi
A.6	Settlement curves in the east bank of the excavation in comparison with readings from the 3D movement measurement system	xvii
A.7	Pore water pressures at the depth of -37.6m and -39.6m during the excavation process	xviii
2.1	Επέκταση γραμμής 3 προς Δημοτικό Θέατρο Πειραιά (www.ametro.gr)	1
2.2	Κάτοψη της μηκοτομής του σταθμού	2
2.3	Επίπεδο αποβαθρών και σιδηροτροχιών	3
2.4	Επίπεδο ηλεκτρομηχανολογικών χώρων	4
2.5	Επίπεδο έκδοσης εισιτηρίων και διακίνησης επιβατών	4
2.6	Επίπεδο οδού Ακτής Καλλιμασιώτη	5
2.7	Κάτοψη του περιγράμματος του σταθμού	6
2.8	Πλάγια όψη σταθμού στην οποία φαίνεται η πρόσβαση 1 και το κτήριο του ΗΣΑΠ	6
2.9	Πρόσβαση 1 του σταθμού κατά το στάδιο εκσκαφής της	7
2.10	Πρόσβαση 2 του σταθμού κατά το στάδιο εκσκαφής της	7
2.11	Πρόσβαση 3 του σταθμού κατά το στάδιο εκσκαφής της	8
3.1	Όψη των πανέλων των διαφραγματικών τοίχων κατά τη διαδικασία καθαίρεσής τους για την κατασκευή της πρόσβασης 1	10
3.2	Διαδικασία προεκσκαφής για μετεγκατάσταση ΟΚΩ	12
3.3	Οδηγία τοιχώματα των διαφραγματικών τοίχων στο εργοτάξιο του σταθμού Πειραιά	13
3.4	Δεξαμενές τροφοδοσίας αιωρήματος μεντονίτη για την υποστήριξη της εκσκαφής των Δ.Τ	14
3.5	Μηχανική αρπάγη κατά την εκσκαφή του Δ.Τ	14
3.6	Ένωση δύο κλωβών οπλισμού μεταξύ τους κατά τη διάρκεια τοποθέτησης του οπλισμού	15
3.7	Τοποθέτηση κλωβού οπλισμού	16
3.8	Σκυροδέτηση διαφραγματικών τοίχων	17
3.9	Καθαίρεση Δ.Τ για την διάνοιξη της πρόσβασης 2	18
3.10	Διαστάσεις των πέντε σειρών αντηρίδων	19
3.11	Διάταξη αντηρίδων στο σκάμμα εκσκαφής του σταθμού	20
3.12	Τοποθέτηση των πασσάλων εμπροσθεν του ΗΣΑΠ	21
3.13	Τομή του σταθμού Πειραιά με την πλάκα θεμελίωσης	22
4.1	Στρωματογραφική αναπαράσταση της ιδεατής τομής σχεδιασμού ΓΤΣ-2 στο σημείο της τομής Α-Α'	28
4.2	Απόσπασμα οριζοντιογραφίας με τις περιοχές εφαρμογής των γεωτεχνικών τομών σχεδιασμού ΓΤΣ-1 και ΓΤΣ-2	30

5.1	Οριζοντιογραφία του σταθμού Πειραιά με τα όργανα παρακολούθησης του έργου	37
5.2	Πιεζόμετρο ανοικτού τύπου (Γεωργιάννου, 2000)	38
5.3	Θέσεις πιεζομέτρων παρακολούθησης μεταβολής στάθμης υπόγειου ύδατος	39
5.4	Θέσεις πιεζομέτρων ελέγχου συστήματος ανατροφοδοσίας του υδροφόρου ορίζοντα	40
5.5	Πιεζόμετρα Τύπου Διαφράγματος (Γεωργιάννου, 2000)	41
5.6	Θέσεις πιεζομέτρων δονούμενης χορδής	42
5.7	a) Αρχή λειτουργίας διάταξης αποκλισιομέτρου και εξοπλισμού. b) Απεικόνιση της λειτουργίας αποκλισιομέτρου (Stark and Choi, 2008), [5]	43
5.8	Θέση αποκλισιομέτρου	44
5.9	Χωροσταθμικά επιφανείας	45
5.10	Χωροσταθμικά ΗΣΑΠ	46
6.1	Διαστάσεις προσομοιώματος αριθμητικής ανάλυσης	48
6.2	Στάδια εκσκαφής και εγκατάστασης των αντηρίδων σύμφωνα με τα όργανα μέτρησης	49
6.3	Οπλισμοί Διαφραγματικών Τοίχων	51
6.4	Τομή σχεδιασμού A-A', στην οποία αποτυπώνονται οι αντηρίδες, οι πάσσαλοι και οι διαφραγματικοί τοίχοι	52
6.5	Διακριτοποιημένος κάρναβος	53
6.6	Φάσεις υπολογισμού αριθμητικής προσομοίωσης	55
6.7	Παραμορφωμένο σχήμα του καννάβου	56
6.8	Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικού τοίχου	56
6.9	Καμπύλη καθιζήσεων στην ανατολική πλευρά	57
6.10	Κίνηση του υπόγειου νερού διαμέσω των εδαφικών στρώσεων	57
6.11	Κατακόρυφες μετακινήσεις	58
6.12	Οριζόντιες μετακινήσεις	58
7.1	Πανέλα διαφραγματικών τοίχων (εντός των οποίων έγινε η εγκατάσταση των αποκλισιομέτρων) κατά το στάδιο καθαίρεσής τους για την κατασκευή της εισόδου πρόσβασης 1 του σταθμού	59
7.2	Ενδείξεις αποκλισιομέτρου BNDF06 σε διάφορες χρονικές περιόδους κατά τον άξονα A	60
7.3	Οριζόντιες μετακινήσεις Δ.Τ από την αριθμητική ανάλυση στο Plaxis	61
7.4	Καμπτικές ροπές Δ.Τ από την αριθμητική ανάλυση στο Plaxis	62
7.5	Τύποι μετακίνησης διαφραγματικού τοίχου και της συνεπαγόμενης καθίζησης στην επιφάνεια	63
7.6	Καμπύλη καθιζήσεων της ανατολικής παρειάς	63
7.7	Διάγραμμα χωροσταθμικών σημείων	64
7.8	Σημεία παρακολούθησης πιέσεων των πόρων στο Plaxis	65
7.9	Δίκτυο ροής για την περίπτωση του σταθμού Πειραιά	66
7.10	Διάγραμμα πίεσης πόρων αριθμητικής ανάλυσης μέσω Plaxis, για το πιεζόμετρο BNHC08	67
7.11	Μετρηθείσες τιμές πιέσεων πόρων πιεζομέτρου BNHC08	67
7.12	Διάγραμμα πίεσης πόρων αριθμητικής ανάλυσης μέσω Plaxis, για το πιεζόμετρο BNHC07	68

7.13	Διάγραμμα πίεσης πόρων αριθμητικής ανάλυσης μέσω Plaxis, για το πιεζόμετρο BNHC07	68
7.14	Στάθμη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα στην ανατολική παρειά	69
7.15	Στάθμη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα στην ανατολική παρειά	70
7.16	Ενδεικτικό σχήμα κώνου ταπείνωσης υδροφόρου ορίζοντα	70
8.1	Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων	72
8.2	Οριζόντιες μετακινήσεις Δ.Τ της πρώτης παραμετρικής διερεύνησης, όπως υπολογίστηκε από το Plaxis	72
8.3	Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς	73
8.4	Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς της πρώτης παραμετρικής διερεύνησης, όπως υπολογίστηκε από το Plaxis	73
8.5	Καμπτικές ροπές της πρώτης παραμετρικής διερεύνησης, όπως υπολογίστηκαν από το Plaxis	74
8.6	Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στον παραμορφωμένο κάρναβο	74
8.7	Δημιουργία κώνου ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα γύρω από το σκάμμα του σταθμού	75
8.8	Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων	77
8.9	Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς	77
8.10	Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς	78
8.11	Υδροστατικές πιέσεις λόγω της ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα	79
8.12	Υδατικές πιέσεις στα δύο σημεία παρακολούθησης του Plaxis	79
8.13	Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων	80
8.14	Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς	81
8.15	Καθιζήσεις δυτικής παρειάς	81
8.16	Υδατικές πιέσεις εντός του σκάμματος εκσκαφής	82
8.17	Υδατικές πιέσεις στα δύο σημεία παρακολούθησης του Plaxis	82
8.18	Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων	83
8.19	Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς	84
8.20	Καθιζήσεις δυτικής παρειάς	84
8.21	Κατανομή των υδατικών πιέσεων στη στάθμη των -38m	85
8.22	Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων	86
8.23	Καθιζήσεις στην ανατολική παρειά	87
8.24	Παραμορφωμένος κάρναβος κατά το τελικό στάδιο υπολογισμού	87
8.25	Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων	88
8.26	Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς	89
8.27	Καθιζήσεις δυτικής παρειάς	89
8.28	Πιέσεις υδάτων στις δύο στάθμες ελέγχου, κατά τη διάρκεια των αντλήσεων	90
9.1	Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων και ένδειξη αποκλισημέτρου BNDF06	91
9.2	Κατακόρυφες μετακινήσεις στην ανατολική παρειά του σκάμματος	92
9.3	Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα κατά την ταπείνωσή του	93
9.4	Πιέσεις πόρων του νερού στα σημεία Upper και Lower	94

Ευρετήριο Πινάκων

A.1	Stratigraphic succession in GDP-2	xiii
A.2	Geotechnical Design Parameters	xiv
4.1	Τυπική διάκριση στρώσεων στην περιοχή του σταθμού Πειραιάς	27
4.2	Στρωματογραφική διαδοχή στην ΓΤΣ-1	29
4.3	Στρωματογραφική διαδοχή στην ΓΤΣ-2	29
4.4	Παράμετροι Γεωτεχνικού Σχεδιασμού	35
5.1	Πιεζόμετρα ανοικτού τύπου	39
5.2	Πιεζόμετρα ανοικτού τύπου ελέγχου ανατροφοδосίας	39
5.3	Πιεζόμετρα δονούμενης χορδής	41
5.4	Αποκλισιόμετρα εντός των Δ.Τ	42
5.5	Χωροσταθμικές ακίδες επιφανείας	44
5.6	Χωροσταθμικές ακίδες κτηρίου ΗΣΑΠ	45
5.7	Όρια επιφυλακής και συναγερμού παραμορφώσεων ελεύθερου πεδίου σύμφωνα με την παράγραφο 13.2.4.2 των ΠΜΕΠΜ	46
5.8	Όρια επιφυλακής και συναγερμού σύμφωνα με την Μελέτη Προσωρινής Αντιστήριξης	47
6.1	Στάδια εκσκαφής και ημερομηνίες σταθμοί κατά τη διάρκεια εργασιών του σταθμού Πειραιά	50
6.2	Βάθη τοποθέτησης αντηρίδων	51
6.3	Παράμετροι σχεδιασμού αντηρίδων	53
6.4	Φάσεις κατά την αριθμητική προσομοίωση	54
8.1	Στάδια και βάθη εκσκαφής με βάση τη μελέτη εφαρμογής και με βάση τα δεδομένα από τη ΓΔΠ	71
8.2	Παραμετρικές διερευνήσεις με τις εκάστοτε αλλαγές	71
8.3	Φάσεις εκσκαφής κατά την αριθμητική προσομοίωση με στερεοποίηση	76

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένα άτομα, τα οποία με βοήθησαν με διάφορους τρόπους κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Αρχικά, οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Νίκο Γερόλυμο για τις πολύτιμες ώρες που αφιέρωσε, καθ' όλη τη διάρκεια και κυρίως όταν είχαν παρουσιαστεί διάφορα προβλήματα όσον αφορά τις αριθμητικές αναλύσεις.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αττικό Μετρό Α.Ε για την παροχή διάφορων δεδομένων και της στήριξης που δείχνει στους φοιτητές της ακαδημαϊκής κοινότητας, δίνοντας τους ευκαιρίες να εντρυφήσουν σε τόσο ενδιαφέροντα και πολυσχιδή θέματα.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γεωλόγους από το τμήμα Τεχνικής Γεωλογίας της Αττικό Μετρό για την πολύτιμη συνεισφορά τους και οδηγίες που έδωσαν αυτό το διάστημα. Ευχαριστώ τον κ. Άρη Γιακουμή για την επεξήγηση και την παρουσίαση των μετρήσεων των οργάνων της ΓΔΠ του σταθμού. Ευχαριστώ τον κ. Γιώργο Στούμπο, που ήταν πάντα αρωγός στην προσπάθεια κατανόησης διάφορων ζητημάτων σχετικά με την γεωλογία της ευρύτερης περιοχής, και τον κ. Γιάννη Μηλιώτη για την ερμηνεία διάφορων τεχνικών προβλημάτων που προέκυψαν. Είναι εξαιρετικοί επιστήμονες και άνθρωποι, ενώ ήταν πάντα πρόθυμοι να βοηθήσουν στις διάφορες και αρκετές απορίες που είχα κατά τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας.

Ακρωνύμια

ΓΔΠ	Γεωμηχανική και Δομητική Παρακολούθηση
ΑΣΠ	Αυτοματοποιημένο Σύστημα Παρακολούθησης
ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Χ.Θ	Χιλιομετρική Θέση
ΟΛΠ	Οργανισμός Λιμένος Πειραιώς
ΗΣΑΠ	Ηλεκτρικοί Σιδηρόδρομοι Αθηνών-Πειραιώς
Δ.Τ	Διαφραγματικός Τοίχος
ΟΚΩ	Οργανισμοί Κοινής Ωφέλειας
ΓΤΣ	Γεωλογική Τομή Σχεδιασμού
Υ.Ο	Υδροφόρος Ορίζοντας
ΠΜΕΠΜ	Προδιαγραφές Μελετών Έργων Πολιτικού Μηχανικού

F.C.F.D	Fully Coupled Flow-Deformation
WL	Liquid Limit
PL	Plastic Limit
AMS	Automated Monitoring System
TBM	Tunnel Boring Machine
NTUA	National Technical University of Athens
HSM	Hardening Soil Model

Σύνοψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος “Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων”. Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αναλυτικού προσομοιώματος του σταθμού, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη γεωμετρία και τη γεωλογία της περιοχής όσο και τα κατασκευαστικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή του.

Η εργασία χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη, τα οποία όμως είναι άκρως αλληλένδετα. Στο πρώτο μέρος γίνεται η παρουσίαση οργάνων παρακολούθησης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή του σταθμού, καθώς και οι γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού, που έχουν προκύψει από την *Έκθεση Γεωλογικής Αξιολόγησης Παραμέτρων Σχεδιασμού*. Λαμβάνοντας αυτά υπόψη γίνεται η εισαγωγή των τιμών για τη δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης του σταθμού του Πειραιά και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Στο δεύτερο μέρος συγκρίνονται σε πρώτο στάδιο τα αποτελέσματα της αρχικής αριθμητικής ανάλυσης με τις μετρήσεις των οργάνων της ΓΔΠ, ενώ σε δεύτερο στάδιο τροποποιείται το αρχικό προσομοίωμα, έτσι ώστε να ταυτιστούν, όσο αυτό είναι δυνατό, οι συνθήκες με τις πραγματικές που καταγράφηκαν. Με αυτόν τον τρόπο, παρατηρούνται και αναλύονται οι διαφορές στις τιμές που προκύπτουν από όλες τις παραμετρικές διερευνήσεις και εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα.

Συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των βασικών στοιχείων του τεχνικού έργου, και γενικότερα της επέκτασης της γραμμής 3 προς τον Πειραιά.

Το δεύτερο κεφάλαιο πραγματεύεται τα κύρια συστήματα προσωρινής αντιστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή του έργου καθώς και τους λόγους που επιλέχθηκαν. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής των διαφραγματικών τοίχων, που αποτελούν το κύριο σύστημα αντιστήριξης του σταθμού.

Στο τρίτο κεφάλαιο ακολουθεί εκτενής ανάλυση του γεωλογικού υποβάθρου στην περιοχή κατασκευής του σταθμού, καθώς και η παρουσίαση των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των μοντέλων προσομοίωσης, οι οποίοι έχουν προκύψει από την *Έκθεση Γεωλογικής Αξιολόγησης Παραμέτρων Σχεδιασμού*.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του συστήματος οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για τη γεωτεχνική και δομητική παρακολούθηση του σταθμού και πως αυτά θα αξιοποιηθούν στην εργασία.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η κατασκευή του αρχικού προσομοιώματος του σταθμού, ενώ αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτό.

Στο έκτο κεφάλαιο ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του πέμπτου κεφαλαίου με τα αποτελέσματα των οργάνων της ΓΔΠ και αναλύονται οι λόγοι στις διαφορές και αποκλίσεις που προκύπτουν.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνονται παραμετρικές διερευνήσεις με σκοπό την επίτευξη των πλησιέστερων στην πραγματικότητα συνθηκών που επικράτησαν κατά την κατασκευή του έργου. Κύριος στόχος είναι η σύγκλιση των τιμών των οριζοντίων μετακινήσεων των διαφραγματικών τοίχων, των καθιζήσεων στην επιφάνεια, και των πιέσεων των πόρων του νερού σε συγκεκριμένες θέσεις με αυτές των οργάνων της ΓΔΠ.

Στο όγδοο κεφάλαιο ανακεφαλαιώνονται τα αποτελέσματα των έξι παραμετρικών διερευνήσεων, αποτυπώνοντάς τα σε κοινά διαγράμματα με τις μετρήσεις των οργάνων της ΓΔΠ και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.

Abstract

Athens's Metro "Piraeus" Station: Numerical analysis versus observational method

Diploma Thesis

by

Konstantinos Sampsakis-Bakopoulos

Supervisor: Nikolaos Gerolymos, Associate Professor at NTUA

Athens, 2023

Piraeus, Europe's busiest passenger port and primary gateway to the Greek islands, required a vital metro connection to address the significant tourist influx and resulting traffic congestion during the summer.

The inclusion of Piraeus in the Line 3 extension project not only met this demand but also served as a compelling case study for exemplary infrastructure development. The station's underground location, just 40 meters from the sea and 2 meters from the historic ISAP terminal, presented intricate challenges. These challenges involved managing surface traffic diversion and adhering to regulatory guidelines for settlements due to the station's proximity to the ISAP terminal.

To overcome the complex hydrogeological conditions and limited surface area, the construction employed the cut-and-cover method with diaphragm walls and prestressed steel struts as temporary support. This approach ensured stability and structural integrity while providing an opportunity for an in-depth case study on implementing the cut-and-cover method in challenging hydrogeological conditions. An array of geotechnical monitoring instruments were meticulously installed, which played a pivotal role in measuring structural displacements of the diaphragm walls and nearby structures, variations in groundwater levels due to dewatering processes and settlements arising from the construction activities. By utilizing the geological and mechanical parameters, finite element calculations were utilized to determine the displacements of all monitored points.

This comprehensive case study focuses on comparing the monitored data gathered during the construction phase with the corresponding values obtained through finite element analysis, with particular emphasis on settlement curves at the surface and displacements arising from significant uplift forces attributed to high groundwater conditions. The results derived from the aforementioned back analysis exhibit a high degree of concordance with the measured values, affirming the reliability and accuracy of the applied methodologies.

A Extended Abstract

The Piraeus station, is situated adjacent to the terminal of line 1 within the Piraeus port area. Its boundaries are defined by Akti Kallimasioti and Ludovikou streets. The station is positioned in close proximity, approximately 2 meters, to the ISAP station on its eastern side, while on its western side lies the sea at a distance of 40 meters.

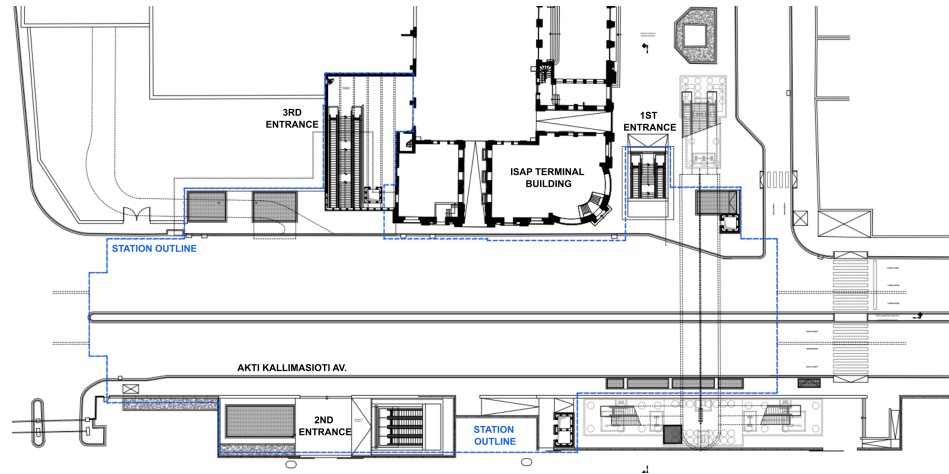


Figure A.1: Top view of the Piraeus Station Outline

Numerous challenges arose during the construction of the Piraeus station, encompassing various aspects. Firstly, the proximity of the station to the aged and historically significant ISAP terminal building posed a distinct challenge. Additionally, the station's close proximity to the Piraeus port led to prevailing hydrogeological conditions, resulting in a water table that reached surface level. This circumstance gave rise to several complications due to the additional pressure exerted by water on the station's diaphragm walls, necessitating careful consideration of the additional load. Moreover, the excavation process induced water due to the head difference. This water flow led to increased pore water pressures beneath the excavation level and subsequent reduction of effective stresses, thereby creating potential risks of uplift.

To address these challenges, the construction implemented 80cm thick diaphragm walls, that were constructed in 240cm panels, reaching a depth of 38m, with the reinforced concrete portion spanning up to 29.5m depth. To reinforce the diaphragm walls, a system of five rows of prestressed struts was installed. These struts were progressively added as the excavation deepened, allowing for minimal movements and deformations to prevent an active state.

Specifically, the Piraeus station incorporated a total of five rows of prestressed metal supports within its primary trench. The horizontal spacing between the struts was equal to 5.4m, although slight variations in distance occurred in certain areas, especially the corner sections of the station. A visual representation depicting the arrangement of the struts relative to the station trench, both vertically and horizontally, can be observed in the provided image.

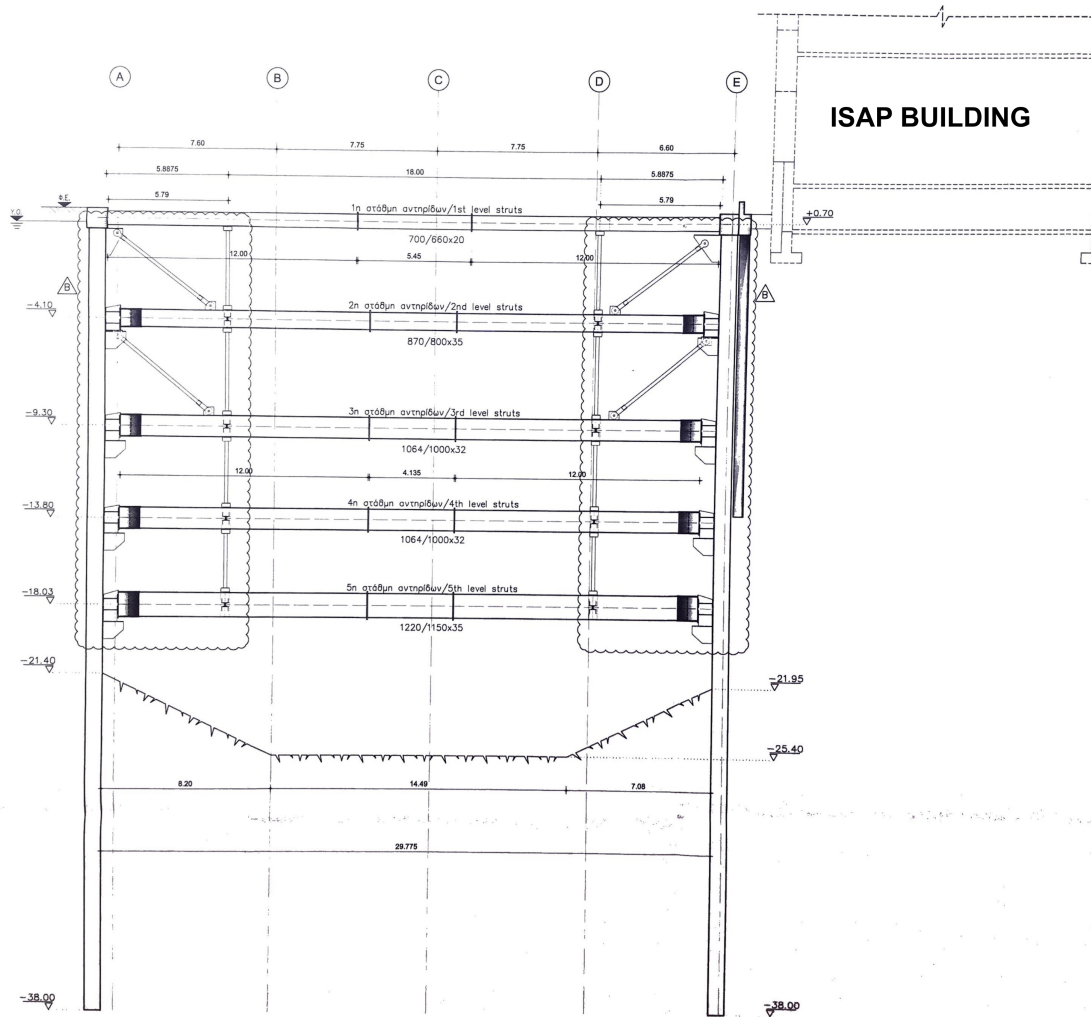


Figure A.2: Side view of the retaining structure

Based on the findings of the geotechnical investigations, which involved sampling and pressure borings, the geological formations encountered within the construction vicinity of the Piraeus station primarily consist of recent Quaternary sediments. Furthermore, in certain deep positions, the presence of the *Marl of Piraeus* formations has been identified. The stratigraphic succession of these units, arranged according to their depth, is as follows:

- [AL] Artificial/Alluvial Deposits
- [SW] “Alipedon” Marsh Deposits
- [PT] Coastal Deposits

- [PT-CN] Conglomerate-breccia-microconglomerate, exhibiting varying degrees of cementation from light to strong
- [PT-SD] Sands, silty Sands, silty Sandstones
- [PT-SM] Silts, sandy Silts, sandy Siltstones
- [NM] Marga Piraeus
 - [NM-CN] Conglomerate-breccia-microconglomerate, occasionally featuring sandstone horizons or layers of calcite silt in specific locations.

The design of the GDP-2 section, developed utilizing stratigraphy within the study area and encompasses a wide spectrum of anticipated geotechnical conditions. Upon this section geotechnical calculations were conducted to facilitate the design process for the excavation, temporary support systems, and permanent construction of the Piraeus Station.

Specifically, in the construction of the GDP-2 section a unification of the fractional relatives approach was employed between the geotechnical formations sands-sandstones and silts-siltstones. This procedure was also used for the slightly and strongly bound cobblestones of the coastal deposits but also of the cobblestones of the *Marl of Piraeus* .

The area that will be simulated in Plaxis is the section A-A') of the deep excavation, while the subsequent calculations and simulations that will take place will be done with based on the stratigraphy of the ideal design section GDP-2, the elements of which are presented in the following table:

Table A.1: Stratigraphic succession in GDP-2

Idealized Geotechnical Profile GDP-2	
Layer I	Level from +2 to +0.20 m (Artificial/Alluvial Deposits)
Layer II	Level from +0.20 to -2.60 m (“Alipedon” Marsh Deposits)
Layer III	Level from -2.60 to -4.80 m (Conglomerate-breccia)
Layer IV	Level from -4.80 to -17.30 m (Silty Sands, Sandstones)
Layer V	Level >-17,30 m (Sandy Silts, Siltstones)

The geotechnical design parameters utilized in this study were established in accordance with the guidelines outlined in paragraph 2.4.5.2 of Eurocode 7, specifically the Geotechnical Design Part 1: General Rules. These parameters were estimated by considering the outcomes and derived values from laboratory tests, as well as the findings from field tests. This comprehensive approach ensured the incorporation of reliable and relevant data to accurately determine the geotechnical design parameters for the project.

All the values of the geotechnical design parameters that will be implemented in this thesis are summarized in the following table:

Given the extensive nature of projects of such magnitude, continuous monitoring is imperative throughout both the construction phase and subsequent to its completion. In line

Table A.2: Geotechnical Design Parameters

Parameters	Layers						Units of Measurement
	Layer I [AL]	Layer II [SW]	Layer III [PT-CN]	Layer IV [PT-SD]	Layer V [PT-SM]	Layer VI [NM-CN]	
Unit Weight, γ	19	20	23	21,5	20,5	23,5	kN/m ³
Friction angle ϕ	28	26	40	36	34	40	°
Cohesion, c	10	0	5	10	45	50	kPa
Dilatancy Angle, ψ	9	0	-	12	10	-	°
E_{50}^{ref}	40	10	-	190	110	-	MPa
E_{oed}^{ref}	30	8	-	165	110	-	MPa
E_{ur}^{ref}	120	30	-	570	330	-	MPa
Permeability, k	10^{-5}	$3 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$ - $5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-8}$ - $4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	m/sec

with this requirement, the Piraeus Station implemented a comprehensive array of monitoring instruments to track movements, settlements, and potential deformations that may arise.

Consequently, the Automated Monitoring System (AMS) program was implemented, encompassing the measurement and recording of various data points, including:

- Vertical and horizontal movements of buildings and structures, facilitated by a volumetric measurement system and a 3D movement measurement system.
- Monitoring the level and water pore pressures of groundwater through the utilization of piezometers.
- Tracking horizontal movements of the diaphragm walls of the trench via the installation of inclinometers.

This study incorporated data obtained from the aforementioned piezometers, inclinometers, and the 3D movement measurement system to enhance the accuracy of simulating the authentic conditions that prevailed during the construction of the project. By leveraging the measurements obtained from these monitoring instruments, a more robust and realistic representation of the project's construction environment is expected to be achieved.

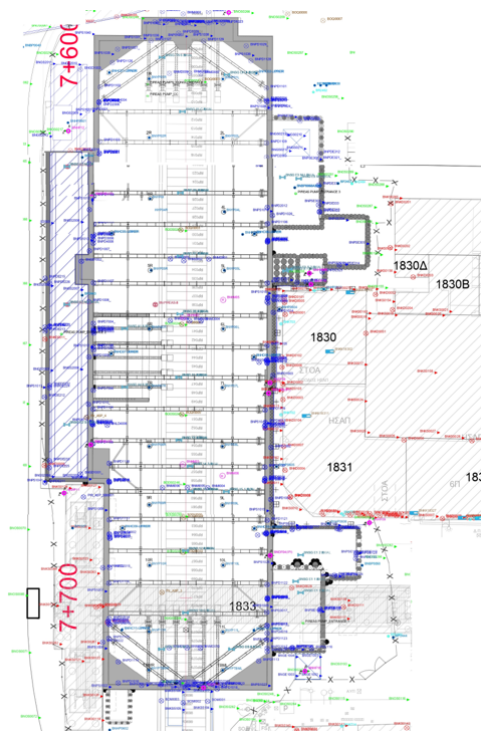


Figure A.3: Automated Monitoring System in Piraeus Station

In order to simulate the model as efficiently and realistically as possible, a fully coupled flow-deformation analysis is used, where it is an ideal case when it is necessary to analyze the simultaneous development of deformations and pore pressures in saturated and partially saturated soils, as a result of a time-dependent change in hydraulic thresholds conditions. All twelve calculation phases of the numerical analysis in Plaxis can be identified in the following image:

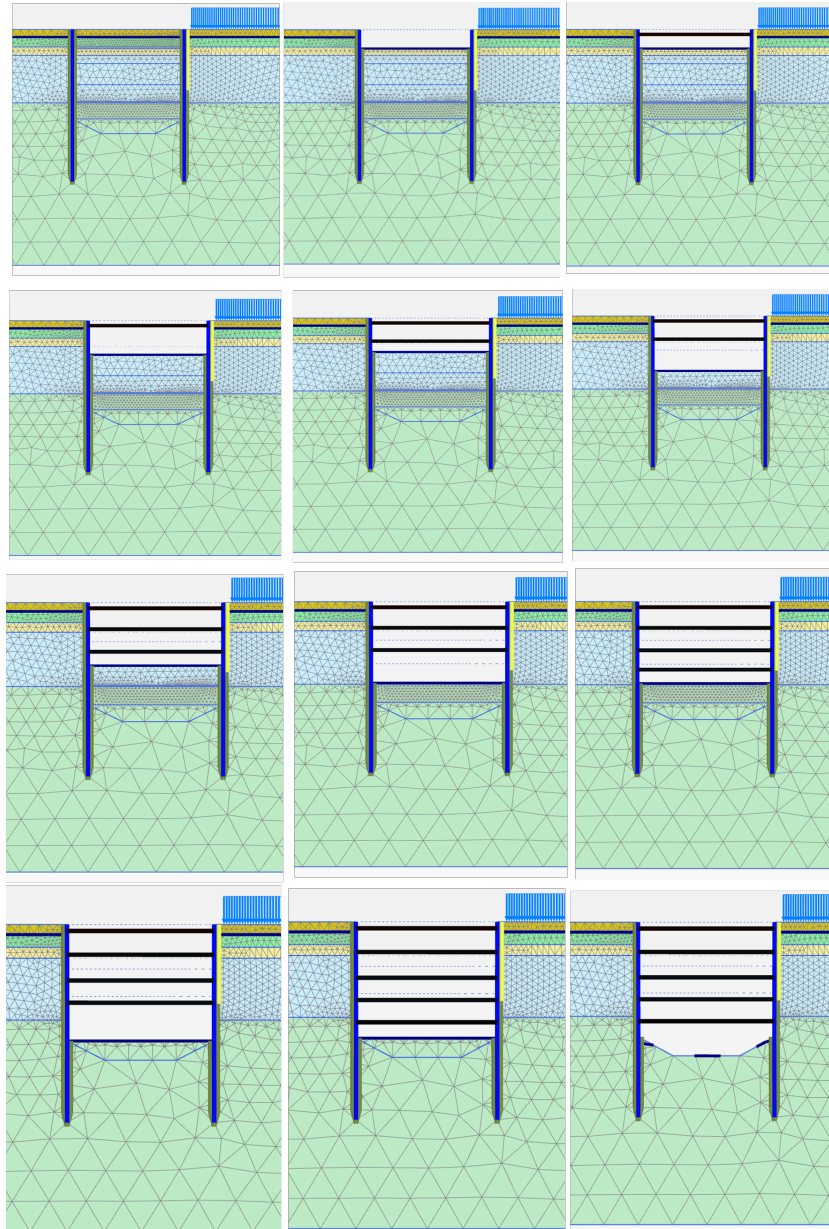


Figure A.4: Side view of the retaining structure

The main purpose of this study was on comparing the monitored data gathered during the construction phase with the corresponding values obtained through finite element analysis, with particular emphasis on settlement curves at the surface and displacements arising from significant uplift forces attributed to high groundwater conditions. After the initial calculation, a parametric analysis consisting of six different investigations was held.

The parametric investigations undertaken involved the examination of the effects of multiple factors, including different excavation levels, variations in the water table, characteristics of soil layers, and the impact of water pumping within the pit. The objective of these analyses was to establish a correlation between the readings obtained from the instruments and the readings from specific monitoring points from Plaxis. By pursuing this approach, the study aimed to ascertain the closest possible approximation of shared conditions, thereby facilitating the final comparison of data from the instruments employed by the GDP organs.

The results derived from some of the aforementioned back analyses exhibit a high degree of concordance with the measured values, affirming the reliability and accuracy of the applied methodologies.

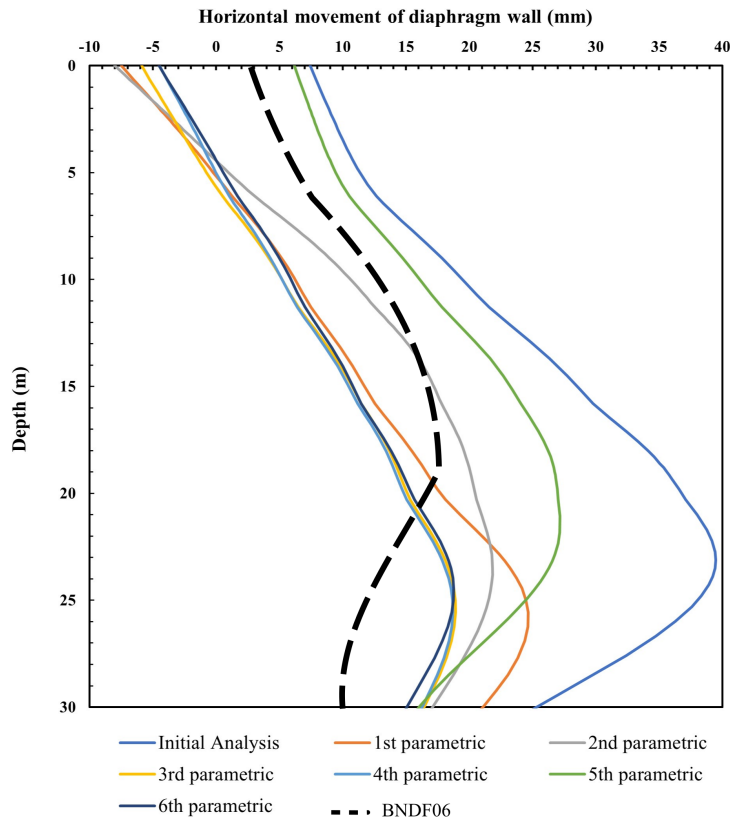


Figure A.5: Horizontal displacement of the diaphragm wall in comparison with readings from inclinometer

The 3rd, 4th, and 6th parametric investigations have demonstrated a significant level of accuracy in approximating the actual horizontal movement of the diaphragm wall, with the closest value derived from the 6th investigation differing by only 20%. These differences of 3mm, which fall well within acceptable limits, do not raise any concerns and remain considerably distant from the alert and alarm thresholds established.

It is evident that the calculations based on the depths specified in the design study yield values that closely align with the measured data. Conversely, the horizontal movements derived from analyses utilizing excavation levels as depicted in the GDP diagrams show a slight increase, yet still remain below the alert and alarm limits. As a result, both types of parametric investigations adhere to the safety regulations.

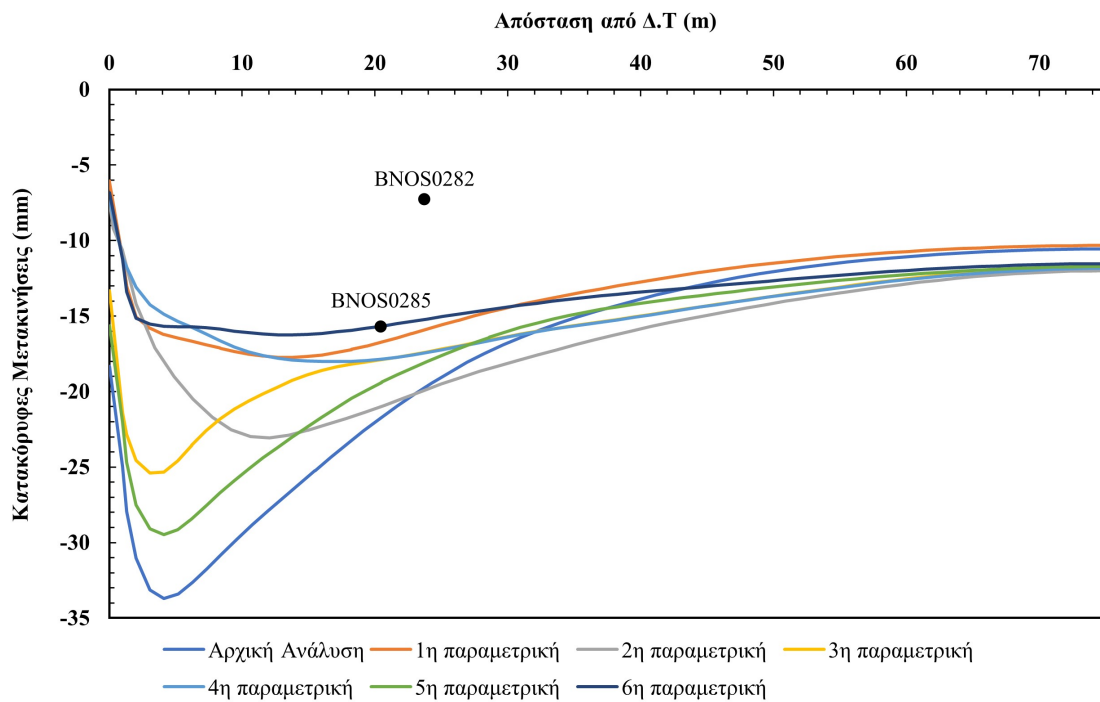


Figure A.6: Settlement curves in the east bank of the excavation in comparison with readings from the 3D movement measurement system

The initial analysis conducted resulted in exceeding both safety limits, rendering it unsafe. However, as mentioned previously, the 6th parametric analysis exhibited the smallest settlements, with a maximum settlement of 16.25mm that fell within the safe zone.

Examining the 3D movement data reveals that, based on the surface station BNOS0282, the maximum settlements at a distance of 24m from the station upon completion of the excavation pit were recorded as 6-7mm. In contrast, the numerical analyses yielded minimum settlements of approximately 15mm. Notably, in the BNOS0285 surface station, a settlement of 15mm was observed at a distance of 20m from the eastern diaphragm wall, which aligns well with the settlement observed in the 6th parametric investigation.

It is important to note that the geodetic BNOS0285 measurements appear to have been initiated after the excavation of the station's main trench, introducing uncertainty regarding the actual settlements that occurred during the excavation process.

Without a doubt, the measurements provided by the vibrating wire piezometers were of paramount importance in terms of comparison, aiming to achieve a more precise simulation through the analyses.

The image presented below illustrates the water pressures observed at the Upper and Lower points, which were incorporated as monitoring points in Plaxis at depths of -37.6m and -39.6m, respectively. It is evident that in the initial analysis, the pore pressures consistently exhibit higher values attributable to the high groundwater flow and the resulting additional pressure exerted.

Conversely, in the 2nd, 3rd, and 4th analyses, it becomes apparent that the curves of the Upper and Lower points closely approximate the curves derived from the piezometers. Lastly, in the 6th parametric analysis, the pore water pressure aligns to a significant extent with the indications provided by the piezometers, thereby representing the analysis that most closely corresponds to reality.

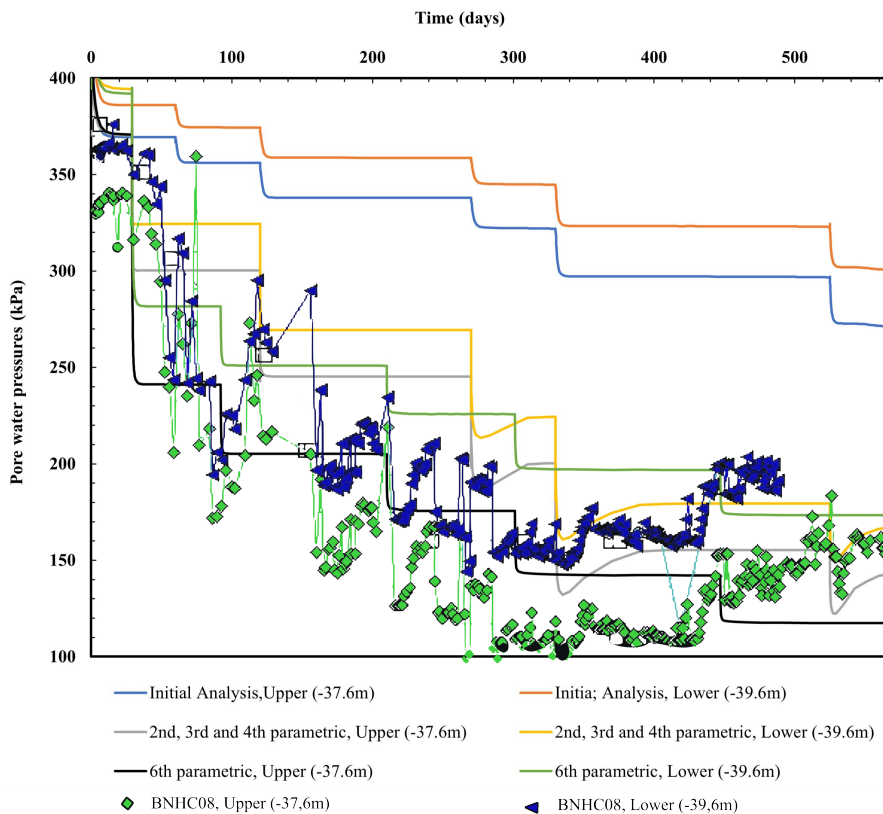


Figure A.7: Pore water pressures at the depth of -37.6m and -39.6m during the excavation process

2 Εισαγωγή

2.1 Η επέκταση προς Πειραιά

Η συνεχής και αυξανόμενη ζήτηση της ένωσης με μέσο σταθερής τροχιάς ενός από των πιο πυκνοκατοικημένων δήμων της χώρας με την πρωτεύουσα είχε ως αποτέλεσμα την υπογραφή της σύμβασης επέκτασης της γραμμής 3 προς Πειραιά το 2012, συνολικής απόστασης 7,6 χιλιομέτρων. Η επέκταση αυτή περιλάμβανε την κατασκευή έξι σταθμών από τον τότε τερματικό σταθμό της “Αγίας Μαρίνας” μέχρι τον σταθμό “Δημοτικό Θέατρο” στον Πειραιά (εικόνα 2.1). Με αυτή την επέκταση ο Δήμος Πειραιά επρόκειτο να αποκτήσει τρεις νέους σταθμούς Μετρό, καθώς και οι γειτονικοί δήμοι του Κορυδαλλού, Νίκαιας και Αγίας Βαρβάρας που μέχρι σήμερα είχαν έντονα κυκλοφοριακά προβλήματα και ελάχιστο επίπεδο εξυπηρέτησης από μέσα μαζικής μεταφοράς. Με την ολοκλήρωση του έργου, θα επιτευχθεί η σύνδεση του λιμανιού του Πειραιά με τον κεντρικό αερολιμένα της Αθήνας «Ελευθέριος Βενιζέλος».



Εικόνα 2.1: Επέκταση γραμμής 3 προς Δημοτικό Θέατρο Πειραιά (www.ametro.gr)

Η επέκταση, λόγω απρόβλεπτων επιπλοκών και καθυστερήσεων που προέκυψαν κατά την πορεία των έργων είχε ως αποτέλεσμα την τμηματική της παράδοση στις 7/7/2020 των τριών πρώτων σταθμών, που περιλάμβαναν τους σταθμούς “Αγία Βαρβάρα”, “Κορυδαλλός” και “Νίκαια”. Μια από αυτές τις απρόβλεπτες δυσκολίες που καθυστέρησε την πρόοδο των εργασιών ήταν η συνάντηση καρστικών σχηματισμών από τον μετροπόντικα στο μέσον της

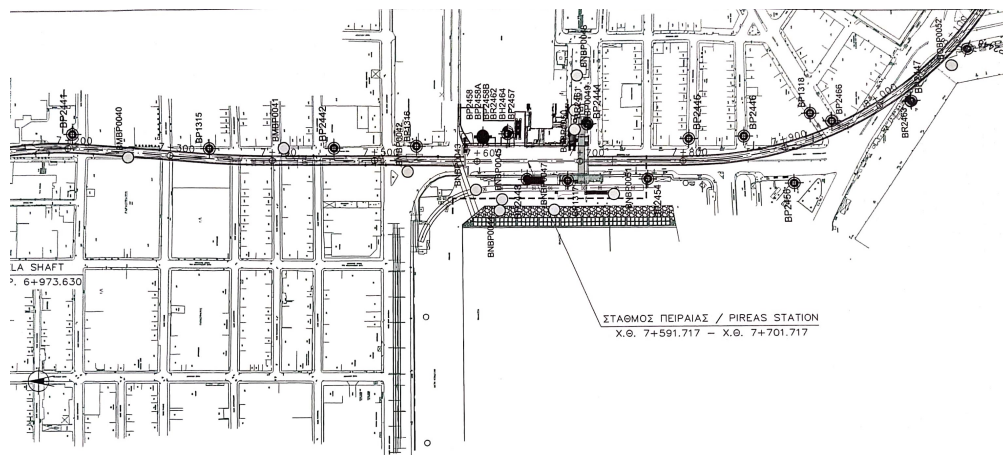
διαδρομής μεταξύ των σταθμών “Νίκαια” και “Μανιάτικα”. Ως εκ τούτου, οι εργασίες καθυστέρησαν μέχρι την πλήρωση των καρστικών κοιλοτήτων με ενέσεις τσιμέντου, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ευστάθεια της σήραγγας.

Κατά την περίοδο συγγραφής της παρούσας διπλωματικής τα έργα των υπολοίπων σταθμών (Μανιάτικα, Πειραιάς και Δημοτικό Θέατρο) βρίσκονται σε αρκετά προχωρημένο στάδιο. Συγκεκριμένα, όλα τα κατασκευαστικά έργα έχουν ολοκληρωθεί και υπολείπονται ελάχιστα έργα ηλεκτροδότησης και λοιπά αρχιτεκτονικά τελειώματα. Το σύνολο της επέκτασης της γραμμής 3 αναμένεται να παραδοθεί το καλοκαίρι του 2022.

Σύμφωνα με στατιστικά δεδομένα της Αττικό Μετρό με τη λειτουργία του έργου θα κυκλοφορούν καθημερινά περίπου 23.000 ΙΧ οχήματα λιγότερα, επιφέροντας αντίστοιχα μείωση των ρύπων CO₂ κατά 120 τόνους ημερησίως. Ιδιαίτερα δε, στον σταθμό “Πειραιά” προβλέπεται να δημιουργηθεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό κοινωνιακό κέντρο, συνδέοντας λειτουργικά τις δύο γραμμές του μετρό (γραμμή 1 και γραμμή 3), τον εμπορικό λιμένα, τον προαστιακό σιδηρόδρομο και το τραμ, το οποίο προβλέπεται επίσης να διέλθει από την περιοχή αυτή, διευκολύνοντας έτσι τις μετεπιβιβάσεις μεταξύ όλων των μέσων μεταφοράς.

2.2 Ο σταθμός “Πειραιά”

Ο σταθμός “Πειραιά” είναι υπόγειος, χωροθετημένος έμπροσθεν του τερματικού σταθμού της γραμμής 1 που βρίσκεται στο λιμάνι του Πειραιά και οριοθετείται από τις οδούς Ακτή Καλλιμασιώτη και Λουδοβίκου. Ο σταθμός βρίσκεται σε ευθύγραμμο τμήμα της χάραξης και έχει τοποθετηθεί σύμφωνα με τη μελέτη χάραξης τροχιών μεταξύ των Χ.Θ 7+591,717 έως Χ.Θ 7+701,717 (εικόνα 2.2). Από την ανατολική πλευρά του σταθμού και σε μικρή απόσταση περίπου 2 μέτρων βρίσκεται ο σταθμός ΗΣΑΠ, ενώ από τη δυτική πλευρά βρίσκεται η προβλήτα του λιμανιού σε απόσταση περίπου 40 μέτρων.



Εικόνα 2.2: Κάτοψη της μηκοτομής του σταθμού

Ο σταθμός βρίσκεται σε ευθύγραμμο τμήμα της χάραξης και κατασκευάστηκε με τη μέθοδο (cut & cover- bottom up) με διαφραγματικούς τοίχους. Ο σταθμός έχει συνολικό μήκος 121 m και πλάτος 29,7 m, με την εκσκαφή να φτάνει τα 25,4 m βάθος. Το κυρίως υπόγειο κτήριο

του σταθμού αποτελείται από τρία επίπεδα με ίδιο περίπου περίγραμμα, καθώς και το τέταρτο επίπεδο όπου βρίσκονται οι χώροι αερισμού και διέλευσης καλωδίων κάτω από την στάθμη των αποβαθρών.

Τα επίπεδα του σταθμού είναι:

- Το επίπεδο (-3) των σιδηροτροχιών και αποβαθρών 2.3
- Το επίπεδο (-2) των ηλεκτρομηχανολογικών (Η/Μ) χώρων 2.4
- Το επίπεδο (-1) έκδοσης εισιτηρίων και διακίνησης επιβατών 2.5
- Το επίπεδο (0) της οδού Ακτή Καλλιμασιώτη 2.6

Στο επίπεδο των αποβαθρών (-3) χωροθετούνται τέσσερα κλιμακοστάσια κινδύνου, τα οποία συνδέουν τις αποβάθρες με το επίπεδο (-1), ενώ ένα εκ των τεσσάρων συνδέει τις αποβάθρες με το επίπεδο της οδού. Στο επίπεδο (-2), χωροθετούνται όλοι οι ηλεκτρομηχανολογικοί χώροι, οι οποίοι συνδέονται με το επίπεδο (-1) και το επίπεδο (-3) μέσω τριών κλιμακοστάσιων κινδύνου. Στο νότιο και βόρειο άκρο του σταθμού θα τοποθετηθούν συμμετρικά οι χώροι των ανεμιστήρων και των εγκαταστάσεων αερισμού της σήραγγας. Οι χώροι αυτοί επικοινωνούν με τον εξωτερικό χώρο μέσω των φρεάτων αερισμού.



Εικόνα 2.3: Επίπεδο αποβαθρών και σιδηροτροχιών

Στο επίπεδο (-1) χωροθετούνται οι τρεις προσβάσεις και οι ανελκυστήρες από το επίπεδο της οδού (0). Σε ορισμένη απόσταση από τον χώρο των εισόδων τοποθετείται η ζώνη ελέγχου, με τα ακυρωτικά μηχανήματα, ενώ μια δεύτερη ζώνη τοποθετείται κεντρικά στο σημείο μετεπιβίβασης



Εικόνα 2.4: Επίπεδο ηλεκτρομηχανολογικών χώρων



Εικόνα 2.5: Επίπεδο έκδοσης εισιτηρίων και διακίνησης επιβατών

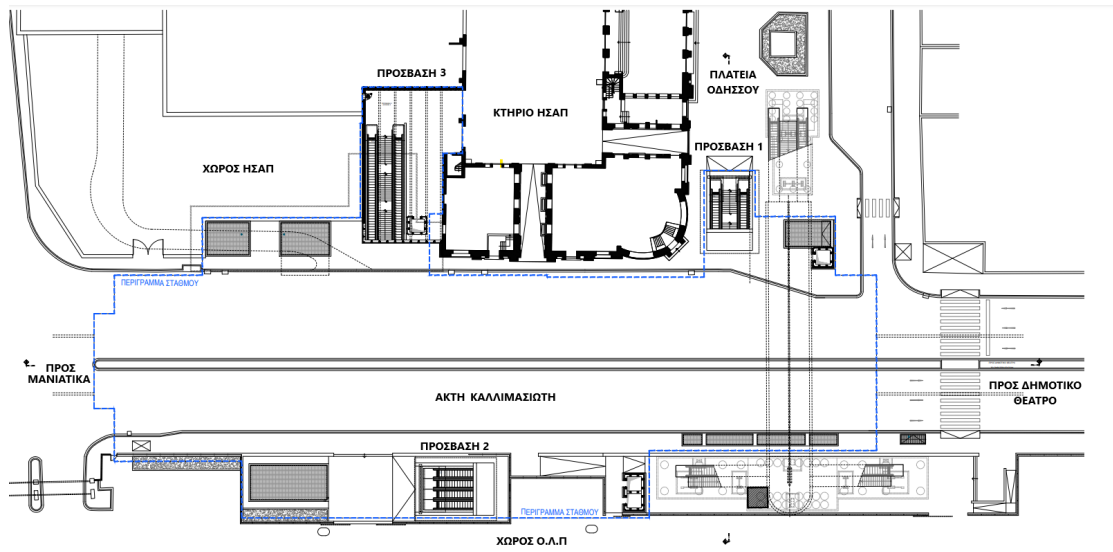


Εικόνα 2.6: Επίπεδο οδού Ακτής Καλλιμασιώτη

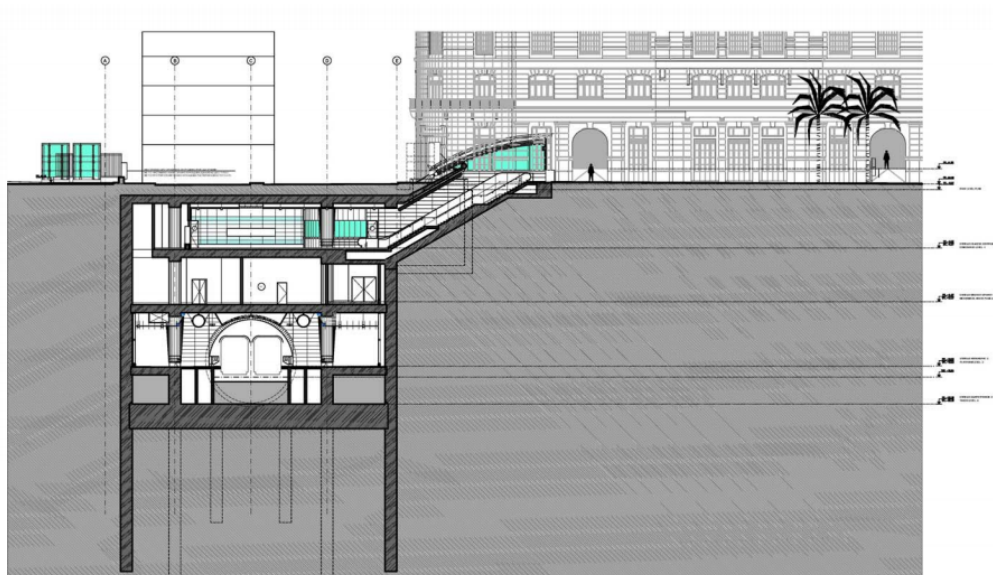
από και προς τον ΗΣΑΠ και τη γραμμή 1. Σε αυτό το σημείο απολήγουν οι σταθερές και οι κυλιόμενες κλίμακες ανόδου και καθόδου και οι ανελκυστήρες που συνδέουν τη στάση των εισιτηρίων με τις δύο αποβάθρες.

Τέλος, ο σταθμός θα έχει τρεις στεγασμένες προσβάσεις:

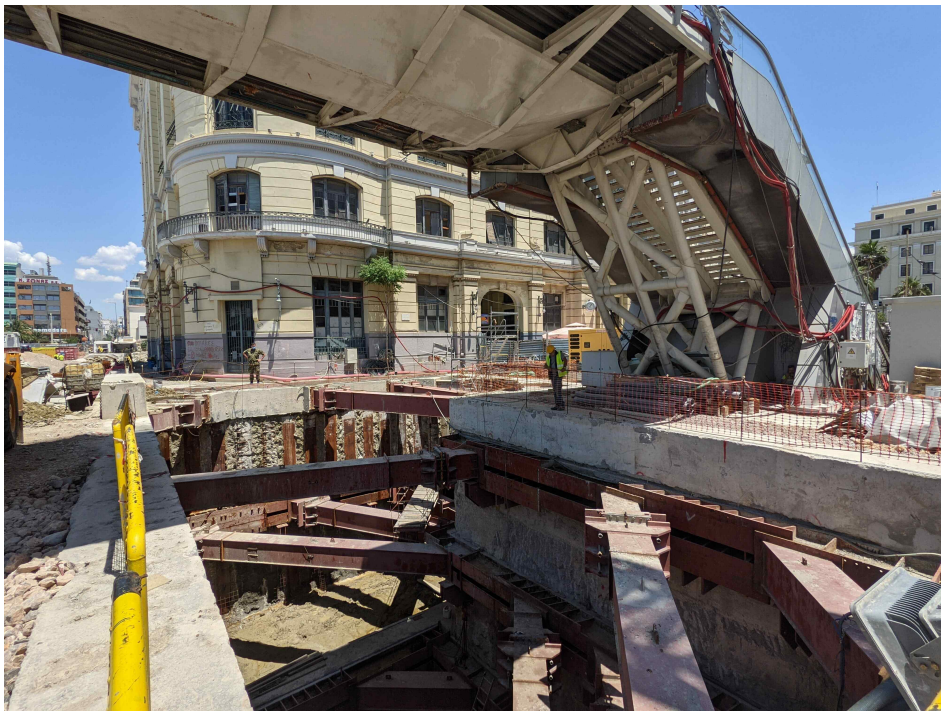
- Την πρόσβαση 1, που χωροθετείται στην πλατεία Οδησού (εικόνα 2.8),
- Την πρόσβαση 2, που χωροθετείται στην πλευρά του λιμένα και εντός της περιφραξής του χώρου του ΟΛΠ (εικόνα 2.10) και
- Την πρόσβαση 3, που χωροθετείται σε τμήμα οικοπέδου που ανήκει στον ΗΣΑΠ και βρίσκεται σε άμεση γειτνίαση με το υφιστάμενο κτήριο του τερματικού σταθμού του ΗΣΑΠ και τελικά κατασκευάστηκε μερικώς (εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.7: Κάτοψη του περιγράμματος του σταθμού



Εικόνα 2.8: Πλάγια όψη σταθμού στην οποία φαίνεται η πρόσβαση 1 και το κτήριο του ΗΣΑΠ



Εικόνα 2.9: Πρόσβαση 1 του σταθμού κατά το στάδιο εκσκαφής της



Εικόνα 2.10: Πρόσβαση 2 του σταθμού κατά το στάδιο εκσκαφής της



Εικόνα 2.11: Πρόσβαση 3 του σταθμού κατά το στάδιο εκσκαφής της

Το σύνολο της Επέκτασης της Γραμμής 3 παραδόθηκε σε εμπορική λειτουργία στις 10 Οκτωβρίου 2022 με αρκετά χρόνια καθυστέρηση, ωστόσο αποτελεί ένα έργο που αντιμετώπισε πολλά ταυτόχρονα προβλήματα και χρειάστηκε πρωτοποριακές λύσεις προκειμένου να αντιμετωπιστούν.

Ο σταθμός του Πειραιά είναι ο μοναδικός σταθμός στην Ελλάδα που βρίσκεται τόσο κοντά στην θάλασσα και τα προβλήματα που προκάλεσαν ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας αποτέλεσε αντικείμενο πολλών μελετών.

Για αυτό το λόγο έγινε εγκατάσταση συστήματος οργάνων γεωμηχανικής και δομητικής παρακολούθησης για τη συνεχή εποπτεία των καθιζήσεων, της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και των μετακινήσεων.

Η συσχέτιση και η σύγκριση των πραγματικών μετρηθέντων δεδομένων από τα όργανα αυτά με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων αποτελεί και το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας.

3 Στοιχεία του Έργου και Δεδομένα

Ο σταθμός του Πειραιά, κατασκευάστηκε κάτω από τη λεωφόρο της Ακτής Καλλιμασιώτη. Στην ανατολική πλευρά του νέου σταθμού και σε απόσταση περίπου 2 m, βρίσκεται ο σταθμός του ΗΣΑΠ, ενώ στη δυτική πλευρά του νέου σταθμού βρίσκεται η προβλήτα του λιμανιού (το οποίο βρίσκεται σε απόσταση μόλις 40 m). Η θέση που θα κατασκευαστεί ο σταθμός “Πειραιάς” λόγω της γειννίασης του με το λιμάνι, τον σταθμό του ΗΣΑΠ και το εμπορικό κέντρο του Πειραιά, είναι περιοχή με σημαντικό κυκλοφοριακό φόρτο. Η σχεδίαση της προσωρινής αντιστήριξης, λοιπόν, γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτευχθεί η συγκράτηση των γαιών και νερού. Η επιλογή της μεθόδου κατασκευής με διαφραγματικούς τοίχους με πολλαπλές σειρές αντηρίδων, του συγκεκριμένου σταθμού έγινε με βάση τα παρακάτω βασικά κριτήρια:

- Ελαχιστοποίηση της όχλησης στην επιφάνεια και διασφάλιση της δυνατότητας εξυπηρέτησης της κίνησης των οχημάτων με κατάλληλες παρακάμψεις καθ’ όλη τη διάρκεια κατασκευής του έργου.
- Ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων προς την πλευρά του κτηρίου του σταθμού ΗΣΑΠ, για να αποτραπούν βλάβες στο παρακείμενο υφιστάμενο παλαιό κτήριο.
- Αντιμετώπιση του προβλήματος που δημιουργείται από την υψηλή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και την αδυναμία άντλησης των υδάτων του ορύγματος, λόγω της μικρής απόστασης του έργου από τη θάλασσα.
- Προσαρμογή της θέσης και της γεωμετρίας του περιγράμματος του σταθμού στις ιδιαιτερότητες της περιοχής, δεδομένου ότι ο μόνος διαθέσιμος χώρος είναι εκείνος που αντιστοιχεί στη λεωφόρο της Ακτής Καλλιμασιώτη και σε τμήμα της προβλήτας του λιμανιού. Ο διαθέσιμος χώρος οριοθετείται προς βοράν από υφιστάμενο αποχετευτικό αγωγό μεγάλης διατομής, ανατολικά από τον σταθμό του ΗΣΑΠ, προς δυσμάς από το λιμάνι και τέλος προς νότο από τις υπόγειες κατασκευές της θεμελίωσης της υφιστάμενης πεζογέφυρας του ΟΛΠ.

Λόγω των παραπάνω συνθηκών και απαιτήσεων κρίθηκε ως πλέον κατάλληλη μέθοδος για την κατασκευή του σταθμού η μέθοδος κοπής και επικάλυψης εκ των κάτω προς τα πάνω (cut & cover - bottom up) μετά την κατασκευή στην περίμετρο Δ.Τ. Η μέθοδος αυτή, εξασφαλίζει τις απαιτήσεις για ελαχιστοποίηση των οριζόντων και κατακόρυφων μετακινήσεων στην επιφάνεια, ενώ με κατάλληλες κυκλοφοριακές ρυθμίσεις εξασφαλίζεται η κίνηση καθ’ όλη τη διάρκεια που θα εκτελείται το έργο.

Στον σχεδιασμό των Δ.Τ θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικός ο επιτυχής προσδιορισμός του απαιτούμενου μήκους έμπηξης (μήκος κάτω από την πλάκα θεμελίωσης), ώστε, αφ’ ενός να εξασφαλίζεται η ελεγχόμενη εισροή ύδατος στο όρυγμα σε όλες τις φάσεις της κατασκευής και αφ’ ετέρου να αποτρέπεται σε κάθε περίπτωση ο κίνδυνος υδραυλικής υποσκαφής του πυθμένα των Δ.Τ, η οποία πιθανώς δημιουργήσει προβλήματα ασφάλειας και ευστάθειας στο έργο.



Εικόνα 3.1: Όψη των πανέλων των διαφραγματικών τοίχων κατά τη διαδικασία καθαίρεσής τους για την κατασκευή της πρόσβασης Ι

3.1 Διαφραγματικοί τοίχοι

Οι διαφραγματικοί τοίχοι είναι λεπτές δύσκαμπτες κατασκευές από υλικά υψηλής διατμητικής αντοχής, οι οποίοι σχεδιάζονται έτσι ώστε να μεταβιβάζουν τις ενεργές ωθήσεις στους σχηματισμούς που εκτείνονται κάτω από τη στάθμη της εκσκαφής. Οι σχηματισμοί αυτοί ασκούν ισχυρές παθητικές ωθήσεις στο εμπηγμένο τμήμα των τοίχων με την ενεργοποίηση της διατμητικής αντοχής τους [10]. Πρόκειται για αντιστηρίξεις με κατάληψη του ελάχιστου δυνατού χώρου, σε αντίθεση με τους τοίχους βαρύτητας, και επιπλέον δεν απαιτούν έδαφος θεμελίωσης υψηλής αντοχής [9]. Για την ασφαλέστερη σχεδίασή τους υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης αγκυρίων ή αντηρίδων στο μη πακτωμένο τμήμα τους για τη μετρίαση των απαιτούμενων παθητικών ωθήσεων [10].

Οι Δ.Τ κατασκευάζονται επιτόπου πριν από την εκσκαφή, έτσι ώστε να υποστηρίξουν το έδαφος. Όπως προαναφέρθηκε, το κύριο χαρακτηριστικό της κατασκευής τους είναι η λυγεράδα και αυτό σημαίνει ότι [1]:

- i. Το ίδιο το βάρος τους αγνοείται και, κανονικά, δεν αλληλεπιδρούν κατακόρυφα με το έδαφος από κάτω τους.

- ii. Δε χρειάζονται έλεγχο ολίσθησης ή αστοχίας φέρουσας ικανότητας· η ανατροπή είναι η κύρια ολική προς έλεγχο ευστάθεια.
- iii. Βασίζονται στην ανάπτυξη της παθητικής ώθησης στο εμπρός τμήμα τους για στήριξη κάτω από τη στάθμη εκσκαφής.
- iv. Αναμένεται ότι θα παραμορφωθούν, τουλάχιστον επάνω από την στάθμη της εκσκαφής.
- v. Συνήθως αντιστηρίζονται ή αγκυρώνονται επάνω από το βάθος εκσκαφής, ώστε οι πιέσεις που δύναται να αναπτυχθούν πίσω από έναν τοίχο εξαρτώνται από την ευκαμψία του τοίχου, το μέγεθος της αντιστήριξης που παρέχεται, και τη στάθμη στην οποία εφαρμόζεται. Γι' αυτό, η πραγματική κατανομή των πιέσεων είναι πολύπλοκη και, σε ένα βαθμό, εξαρτάται από τη μέθοδο κατασκευής.

Οι εφαρμογές των διαφραγματικών τοίχων διακρίνονται σε [10]:

- Δομικές, δηλαδή οι εφαρμογές στις οποίες οι Δ.Τ οπλίζονται, σκυροδετούνται και τελικά ενσωματώνονται σε μια δομική κατασκευή (όπως στην περίπτωση του σταθμού “Πειραιά”, όπου οι Δ.Τ ενσωματώθηκαν στην τελική κατασκευή του σταθμού).
- Μη δομικές, δηλαδή οι εφαρμογές στις οποίες οι τελικοί Δ.Τ δε μπορούν να φέρουν φορτία. Οι συγκεκριμένοι τοίχοι χρησιμοποιούνται μόνο για τη διακοπή της υδραυλικής επικοινωνίας σχηματισμών.

Οι κύριες φάσεις κατασκευής ενός έγχυτου διαφράγματος είναι οι ακόλουθες [6]:

- i. Προεκσκαφή (όχι πάντα αναγκαία)
- ii. Κατασκευή οδηγών τοιχωμάτων
- iii. Προετοιμασία αιωρήματος μπεντονίτη
- iv. Κύρια εκσκαφή διαφράγματος
- v. Τοποθέτηση σιδηρού οπλισμού
- vi. Τελική σκυροδέτηση

Η εκσκαφή γίνεται συνήθως σε τμήματα των 2,5 - 8,00 m και στην τελική τους μορφή μπορεί να έχουν σχήμα συνεχούς τοίχου ή άλλη σύνθετη μορφή, αναλόγως τις ανάγκες του έργου. Το πάχος και το βάθος του Δ.Τ ποικίλλει, ενώ η μορφή σε κάτοψη μπορεί να είναι ευθύγραμμη ή καμπύλη. Το βάθος των πανέλων μπορεί να φτάσει και σε ακραίες περιπτώσεις έως και τα 60 m (με ειδικές διαμορφώσεις αρμών), ενώ το πάχος τους κυμαίνεται συνήθως από 500 – 1500 mm [11].

3.1.1 Προεσκαφή

Η προεσκαφή στον χώρο ανάπτυξης του Δ.Τ δεν είναι υποχρεωτική σε όλες τις περιπτώσεις. Είναι αναγκαία εκεί όπου πιθανά αναμένεται η παρουσία αγωγών, καλωδιώσεων και γενικά δικτύων Ο.Κ.Ω, που είτε πρέπει να προστατευθούν είτε να απομακρυνθούν [11]. Στην περίπτωση του σταθμού του Πειραιά, έλαβαν χώρα τέσσερις ρηχές γεωτρήσεις για τις ανάγκες της μελέτης των έργων εκτροπής των δικτύων Ο.Κ.Ω. Τα δίκτυα αυτά μάλιστα μετατοπίστηκαν προς δυσμάς, εκτός του ορύγματος του σταθμού σε ένα νέο κανάλι παράκαμψης (εικόνα 3.2), το οποίο χωρίστηκε σε τρία ανεξάρτητα διαμερίσματα ορθογωνικής διατομής από οπλισμένο σκυρόδεμα.



(a) Εργασίες κατά την εκτροπή των δικτύων

(b) Βύθιση αγωγού

Εικόνα 3.2: Διαδικασία προεσκαφής για μετεγκατάσταση ΟΚΩ

3.1.2 Κατασκευή οδηγών τοιχωμάτων

Κατασκευάζονται πριν από την εκσκαφή του τοίχου από σκυρόδεμα, μερικές φορές οπλισμένο ελαφρά, και έχουν κατά κύριο λόγο τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Να προσδιορίσουν με ακρίβεια την ευθυγράμμιση της διαφραγματικής εκσκαπτικής αρπάγης
- Σωστή προσαρμογή του διαφράγματος στον χώρο.
- Υποστήριξη της ανώτερης εδαφικής περιοχής
- Εξισορρόπηση των διακυμάνσεων της στάθμης του υποστηρικτικού υγρού
- Στήριξη για μέρη της εσωτερικής κατασκευής όπως για κλωβούς οπλισμών, υποστυλώματα, δοκούς κλπ.
- Στήριξη για τις υδραυλικές πρέσες που συμβάλλουν στην ανέλκυση των σωληνώσεων προώθησης.

Σε αντίξοες εδαφικές συνθήκες και υψηλό υδροφόρο ορίζοντα μπορεί να χρειαστεί , το οδηγό τοίχωμα να σκυροδετηθεί και πάνω από το επίπεδο εργασίας, ώστε να επιτευχθεί μια υψηλότερη στάθμη αιωρήματος και με αυτό τον τρόπο μια μεγαλύτερη υποστηρικτική δράση.



Εικόνα 3.3: Οδηγά τοιχώματα των διαφραγματικών τοίχων στο εργοτάξιο του σταθμού Πειραιά

3.1.3 Προετοιμασία αιωρήματος μπεντονίτη

Για την υποστήριξη των κατακόρυφων τοιχωμάτων κατά τη διάρκεια της εκσκαφής χρησιμοποιείται το αιώρημα από μπεντονίτη και νερό, των οποίων η σύνθεση καθορίζεται ανάλογα με την περίπτωση. Η προετοιμασία του κατάλληλου αιωρήματος μπεντονίτη είναι πρωταρχικής σημασίας για την κατασκευή του διαφράγματος. Ο μπεντονίτης στην εμπορική του συσκευασία είναι σε μορφή σκόνης και η ανάμιξή του με το νερό προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή πυκνότητα του αιωρήματος γίνεται με ειδικό σύστημα ανάδευσης. Μια εμπειρικός ρεαλιστική αναλογία είναι 50 kg ανά 1 m³ νερού. Οι απώλειες σε υποστηρικτικό υγρό με την εκσκαφή πρέπει να συμπληρώνονται διαρκώς δια της προσθήκης μέσω αντλίας νέου αιωρήματος μπεντονίτη. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι, η στάθμη του υγρού στην περιοχή των οδηγών τοιχωμάτων, κατά τις διακυμάνσεις της, να μην υπολείπεται σε καμία περίπτωση της ελάχιστης στάθμης [11].

Στην περίπτωση του έργου είχε δημιουργηθεί μια εγκατάσταση παραγωγής μπεντονιτικού αιωρήματος σε κατάλληλη θέση, ώστε να είναι εύκολα προσβάσιμη. Στον χώρο αυτό, λοιπόν, υπήρχε εγκατάσταση παραγωγής μίγματος, που αποτελούταν από δεξαμενές αποθήκευσης και ωρίμανσης του νεπού μπεντονίτη, εγκατάσταση αποάμμωσης και καθαρισμού μπεντονίτη καθώς και δεξαμενές που εξασφάλιζαν υπερεπάρκεια σε ποσοστό 30 % τουλάχιστον. Επίσης, προβλέφθηκε η κατασκευή μιας κύριας δεξαμενής όγκου 240 m³ και μιας δευτερεύουσας 50 m³, η οποίας επικοινωνούσε με την κύρια μέσω υπερχειλίσης. Τέλος, η εγκατάσταση περιείχε αντλίες μεταφοράς από και προς τους διαφραγματικούς τοίχους (εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4: Δεξαμενές τροφοδοσίας αιωρήματος μπεντονίτη για την υποστήριξη της εκσκαφής των Δ.Τ

3.1.4 Κύρια εκσκαφή διαφράγματος

Η συνήθης μέθοδος εκσκαφής είναι αυτή που αναφέρεται στην απομάκρυνση του εδάφους από το όρυγμα με τη χρήση ειδικής διαφραγματικής αρπάγης (μπένας), διατηρώντας συνεχώς την εκσκαφή πλήρη με το αιώρημα του μπεντονίτη.

Στην περίπτωση όμως πολύ συνεκτικών εδαφικών υλικών, η εκσκαφή γίνεται με θρυμματισμό του εδάφους και αναρρόφηση των θραυσμάτων που εμπεριέχονται πλέον στο μπεντονιτικό αιώρημα. Τότε το υλικό αναρρόφησης, δηλαδή τα θραύσματα του εδάφους και το μπεντονιτικό αιώρημα, με τη βοήθεια ισχυρής φυγοκεντρικής αντλίας αποτίθενται σε κατάλληλη δεξαμενή, όπου το αιώρημα αφού καθαριστεί από τα εδαφικά θραύσματα επαναχρησιμοποιείται [11].



Εικόνα 3.5: Μηχανική αρπάγη κατά την εκσκαφή του Δ.Τ

Για την εκσκαφή του διαφραγματικού τοίχου χρησιμοποιήθηκε μηχανική αρπάγη, η οποία ήταν αναρτημένη σε ερπυστριοφόρο γερανό με κατάλληλη ανυψωτικής ικανότητα. Η εκσκαφή έγινε σε πάνελα πλάτους 2,8 m, ενώ η σύνδεση των παρακείμενων πινέλων μεταξύ τους επιτεύχθηκε με κατάλληλους στεγανοποιητικούς αρμούς. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην περίπτωση της εκσκαφής των διαφραγματικών τοίχων που βρίσκονταν κάτω από την αερογέφυρα του Ο.Λ.Π (λόγω περιορισμένου ελεύθερου ύψους περί των 5,8 m), χρησιμοποιήθηκε μια ειδικά διαμορφωμένη αρπάγη μικρότερου ύψους (κατά παραγγελία), έτσι ώστε να μπορεί να κινείται ανενόχλητα κάτω από αυτήν (εικόνα 3.5).

Για ιδιαίτερα μεγάλου βάθους εκσκαφές ή επαναλαμβανόμενες εκσκαφές, μπορούν να τοποθετηθούν και δύο ή περισσότεροι κλωβοί σε παράθεση.

3.1.5 Τοποθέτηση σιδηρού οπλισμού

Ο οπλισμός του διαφράγματος προκατασκευάζεται στο εργοτάξιο και με τη βοήθεια γερανού τοποθετείται μέσα στη γεμάτη μπεντονιτικό αιώρημα εκσκαφή (εικόνα 3.6). Οι διαστάσεις των κλωβών είναι ανάλογες των διαστάσεων της εκσκαφής, εξαρτώνται όμως και από τα διατιθέμενα ανυψωτικά μηχανήματα.



Εικόνα 3.6: Ένωση δύο κλωβών οπλισμού μεταξύ τους κατά τη διάρκεια τοποθέτησης του οπλισμού

Στις περιπτώσεις ιδιαίτερα βαθιών εκσκαφών ή όταν το ύψος εργασίας για την κατασκευή του έργου είναι περιορισμένο, δηλαδή ο κλωβός του οπλισμού δεν μπορεί να τοποθετηθεί με όλο του το μήκος εντός της εκσκαφής, τότε ένα τμήμα του κλωβού κρέμεται μέσα σε αυτήν και το επόμενο μοντάρεται με αυτό. Ως συνδετήρια μέσα, χρησιμοποιούνται οπλισμοί περίσφυξης στις περιοχές των ενώσεων και κοχλιωτές μορφές (εικόνα 3.6). Για την ακριβή τοποθέτηση στο κέντρο και την εξασφάλιση της κατακορυφότητας του οπλισμού, ώστε να είναι πλήρης η επικάλυψη του από το σκυρόδεμα, αλλά και για να μην διαταραχθεί η μπεντονιτική κρούστα στις παρειές του ορύγματος, χρησιμοποιούνται κατάλληλοι οδηγοί (π.χ τροχίσκοι από μπετό), οι οποίοι προσαρμόζονται στην εξωτερική επιφάνεια του οπλισμού. Επίσης, λαμβάνεται μέριμνα για την αντιμετώπιση της άνωσης του οπλισμού προ της σκυροδέτησης, με την τοποθέτηση

επάνω σε αυτόν κατάλληλου φορτίου. Τέλος, τα τμήματα των Δ.Τ που αποκόπηκαν κατά τη διέλευση του TBM, είχαν οπλιστεί με ειδικές ράβδους από υαλονήματα, με τη διάσταση των τμημάτων αυτών να λαμβάνει υπόψη ανοχή 35 cm από την εξωτερική διάμετρο της κεφαλής του TBM. [11].



Εικόνα 3.7: Τοποθέτηση κλωβού οπλισμού

3.1.6 Τελική σκυροδέτηση

Για τη διάστρωση του σκυροδέματος απαγορεύεται κάθε δόνηση που δύναται να το αναμίξει με το αιώρημα του μπετονίτη. Για να έχουν οι γραμμές ροής του ανερχόμενου νωπού σκυροδέματος μια προσεγγιστικά κάθετη πορεία σε όλη τη διατομή της εκσκαφής, εμβαπτίζεται ο αγωγός σκυροδέτησης βαθιά μέσα στο σκυρόδεμα, σε βάθος τόσο, τουλάχιστον όσο το μήκος του εκάστοτε προς σκυροδέτηση τμήματος. Το σκυρόδεμα πρέπει να είναι πλαστικό έτσι ώστε να περιβάλλει τον οπλισμό. Με την προοδευτική εκροή του σκυροδέματος από τους σωλήνες, αυτοί μετακινούνται προς τα επάνω, έτσι ώστε ο κόνος εκροής που διαμορφώνεται ποτέ να μην ξεπεράσει το κρίσιμο σημείο πλευρικής ολίσθησης που ενέχει κίνδυνο εγκλωβισμού αιωρήματος μπετονίτη.

Φυσικά, με την όλη διαδικασία οι πρώτες ποσότητες του πλαστικού σκυροδέματος αναπόφευκτα αναμιγνύονται με το αιώρημα και έτσι με την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης, η επάνω στρώση αφαιρείται μέχρι του βάθους εμφάνισης του υγιούς υλικού. Σημαντικές λεπτομέρειες που δίνεται ιδιαίτερη έμφαση κατά τη σκυροδέτηση είναι:

- Η αποφυγή μεγάλων διακοπών σκυροδέτησης.
- Η ταχύτητα ανόδου του σκυροδέματος να είναι τουλάχιστον 3 m/hr
- Πριν τη σκυροδέτηση ομογενοποίηση του υποστηρικτικού υγρού ή αντικατάσταση με ισχυρά αμμώδες υποστηρικτικό υγρό.



Εικόνα 3.8: Σκυροδέτηση διαφραγματικών τοίχων

Τέλος, για την καλύτερη προσαρμογή των επιμέρους στοιχείων του διαφράγματος, τοποθετείται στα άκρα του κάθε υπό σκυροδέτηση φατνίου μεταλλικός σωλήνας εξωτερικής διαμέτρου ίσης με το πάχος του φατνίου. Έτσι, διασφαλίζεται με την απομάκρυνση του σωλήνα, ημικυκλική εσοχή (αρμός) σε όλο το ύψος του φατνίου, για την καλύτερη προσαρμογή του γειτονικού τμήματος του διαφράγματος.

Για τους διαφραγματικούς τοίχους χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα C35/45, με ελάχιστο ποσοστό τσιμέντου 400 kg/m^3 και αδρανή καλής διαβάθμισης. Απαραίτητη ήταν η παρουσία

κατάλληλου πρόσμικτου, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος ξεπλύματος ή διαχωρισμού κατά την σκυροδέτηση [11] [8].

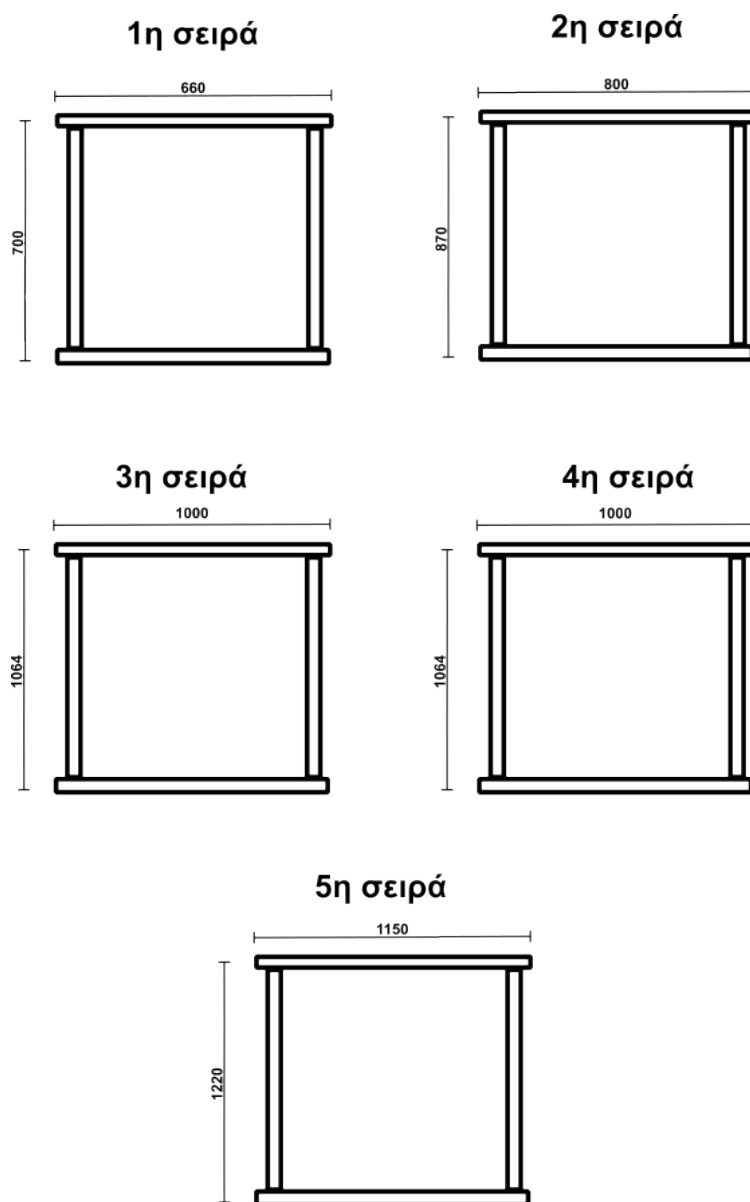
Οι Δ.Τ στον σταθμό του Πειραιά έχουν συνολικό μήκος 38 m και πλάτος 0,8 m. Τα πρώτα 29,50 m του διαφραγματικού τοίχου είναι οπλισμένα, ενώ τα τελευταία 8,5 m είναι άοπλα, λειτουργώντας ως εμπόδιο στη διαδρομή του νερού με στόχο την αύξηση της διαδρομής του. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη δυτική παρειά του σταθμού θα κατασκευαστεί και μια επιπλέον σειρά Δ.Τ πάχους 0,6 m, η οποία θα ορίζει την πρόσβαση 2. Μέρος των πρώτων 12,5 m του αρχικού Δ.Τ των 0,8 m θα καθαιρεθεί μελλοντικά για τη διάνοιξη αυτής της πρόσβασης, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.9: Καθαίρεση Δ.Τ για την διάνοιξη της πρόσβασης 2

3.2 Αντηρίδες

Σε μια αντιστηριζόμενη εκσκαφή, μετά την έμπηξη των Δ.Τ στο απαιτούμενο πλήρες βάθος, ακολουθεί μια μικρή εκσκαφή και τοποθετείται η πρώτη σειρά αντηρίδων. Καθώς η εκσκαφή προχωράει, οι αντηρίδες της πρώτης σειράς εμποδίζουν την προς τα μέσα διαρροή του εδάφους σε αυτή τη στάθμη. Οι αντηρίδες τοποθετούνται προοδευτικά καθώς βαθαίνει η εκσκαφή, με αποτέλεσμα να επιτρέπονται μόνο μικρές μετακινήσεις και παραμορφώσεις και επομένως να μην αναπτύσσεται ενεργητική ώθηση [1].



Εικόνα 3.10: Διαστάσεις των πέντε σειρών αντηρίδων

Στην περίπτωση του σταθμού Πειραιά τοποθετήθηκαν συνολικά 5 σειρές προεντεταμένων μεταλλικών αντηρίδων στο κύριο όρυγμα του σταθμού. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των αντηρίδων ήταν 5,4 m, ωστόσο σε ορισμένες περιοχές υπήρχαν κάποιες διακυμάνσεις της απόστασης. Επίσης, σε ορισμένα σημεία του ορύγματος, όπως στους μετωπικούς τοίχους, προστέθηκε μια επιπλέον σειρά αντηρίδων. Η στήριξη των αντηρίδων έγινε πάνω στους διαφραγματικούς τοίχους μέσω περιμετρικών μεταλλικών δοκών. Η διάταξη τους σε σχέση με το όρυγμα του σταθμού, τόσο σε κατακόρυφη, όσο και σε οριζόντια διάταξη φαίνεται στην εικόνα 3.11.



Εικόνα 3.11: Διάταξη αντηρίδων στο σκάμμα εκσκαφής του σταθμού

3.3 Πάσσαλοι

Άλλα μέτρα αντιστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν στον σταθμό του Πειραιά ήταν η τοποθέτηση 75 πασσάλων από οπλισμένο σκυρόδεμα διατομής $\Phi 50\text{cm}$, με μεταξύ τους απόσταση 0,545 m και βάθους 14 m εμπροσθεν του κτηρίου ΗΣΑΠ, με κύριο σκοπό την αποτροπή οποιασδήποτε αρνητικής επιρροής σε αυτό (εικόνα 3.13). Οι πάσσαλοι τοποθετήθηκαν πριν από την κατασκευή των Δ.Τ, σε απόσταση μικρότερη του 1 m από το κτήριο με τη μέθοδο C.F.A, η οποία προτιμάται σε περιοχές που πρέπει να αποφεύγονται ενοχλητικές δονήσεις και κυρίως σε περιοχές με γειτνιάζοντα κτήρια. Η αφαίρεση του εδάφους γίνεται με ειδικό γεωτρητικό εξοπλισμό που διαθέτει ατέρμονα κοχλία και μεταφέρει σταδιακά το υλικό που εκσκάπτεται στην επιφάνεια. Με την ολοκλήρωση της διάτρησης, αποσύρεται η έλικα και γίνεται ο τελικός καθαρισμός του φρέατος με ειδικά μηχανήματα και στη συνέχεια τοποθετείται ο οπλισμός [11]. Ακολουθεί η σκυροδέτηση με τη βοήθεια ειδικού σωλήνα, ο οποίος εμβαπτίζεται εντός του ενέματος. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για τους πασσάλους στον σταθμό ήταν κατηγορίας C35/45.



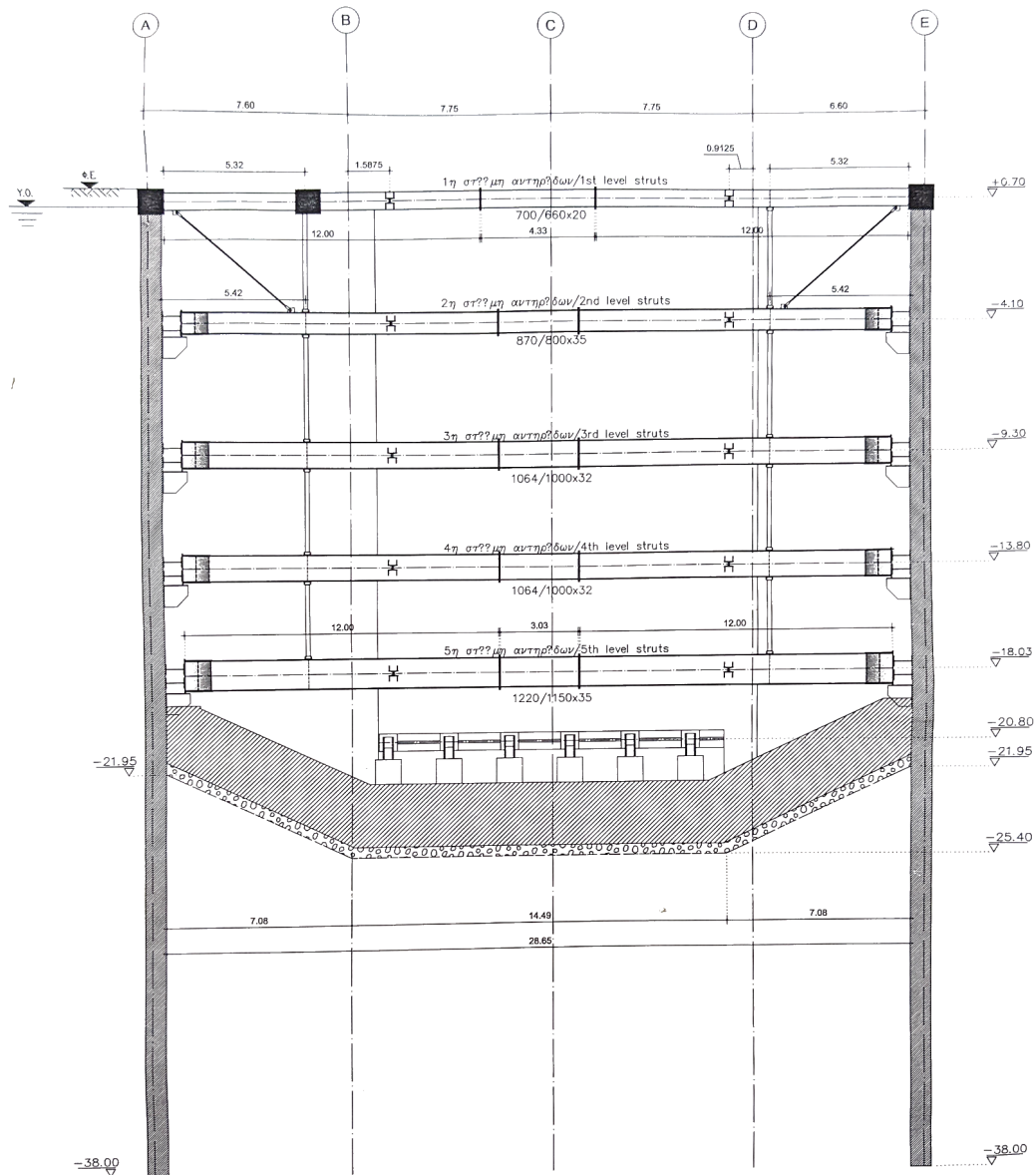
Εικόνα 3.12: Τοποθέτηση των πασσάλων έμπροσθεν του ΗΣΑΠ

3.4 Πλάκα θεμελίωσης-Πάσσαλοι θεμελίωσης

Η υψηλή στάθμη του Υ.Ο λόγω της θάλασσας, σε συνδυασμό με το μεγάλο βάθος στο οποίο βρίσκεται η πλάκα θεμελίωσης του σταθμού, οδήγησαν στην ανάγκη εφαρμογής ιδιαίτερων μέτρων για την προστασία του έργου έναντι της άνωσης, για όλες τις φάσεις κατασκευής και καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του. Για την εξασφάλιση του έργου από την άνωση προβλέφθηκε, εκτός των άλλων, η κατασκευή πλάκας θεμελίωσης μεγάλου πάχους και η 'αγκύρωσή της' στο έδαφος μέσω πασσάλων, οι οποίοι κατασκευάζονται με κατάλληλο μήκος κάτω από τα μόνιμα και τα προσωρινά υποστυλώματα, ώστε να αντιστέκονται στην άνωση μέσω τριβής. Οι παραπάνω πάσσαλοι μελετήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις δυσμενείς συνθήκες έντασής τους και κατασκευάστηκαν με τρόπο που διασφάλισε την αποτελεσματική λειτουργία τους για όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Κατά τις ενδιάμεσες φάσεις κατασκευής (σκυροδετήσεις των ενδιάμεσων πλακών), ελήφθησαν μέτρα εκτόνωσης της υδροστατικής πίεσης μέσω ανοιγμάτων στις πλάκες για την αποτροπή των δυσμενών συνεπειών από την άνωση.

Η σκυροδέτηση όλων των πλακών του κυρίως σταθμού έγινε επί του εδάφους, μετά την απαιτούμενη εκσκαφή και τη διαμόρφωση επαρκούς αποστραγγιστικής στρώσης. Σε όλη τη διάρκεια των σκυροδετήσεων και μέχρι την απόκτηση πλήρους αντοχής από την πλάκα θεμελίωσης, έγινε ασφαλής άντληση των υδάτων από το σύνολο του εκάστοτε πυθμένα του

ορύγματος, με τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η μηδενική υδραυλική πίεση στις πλάκες. Η αποτελεσματική άντληση των εισερχόμενων στο ορύγμα υδάτων διασφαλίστηκε με κατάλληλο σχεδιασμό της αποστραγγιστικής στρώσης κάθε επιπέδου, λαμβάνοντας υπ' όψη τις φάσεις σκυροδέτησης της κάθε πλάκας, τα υπάρχοντα στις ενδιάμεσες πλάκες ανοίγματα κ.λπ. Απαιτήθηκε ιδιαίτερη μελέτη για το σύστημα της προσωρινής αποστράγγισης και άντλησης των υδάτων κατά τη φάση σκυροδέτησης και μέχρι την πλήρη ωρίμανση του σκυροδέματος της πλάκας θεμελίωσης.



Εικόνα 3.13: Τομή του σταθμού Πειραιά με την πλάκα θεμελίωσης

Κατά τη μελέτη του συστήματος αποστράγγισης της τελικής αυτής φάσης ελήφθησαν υπόψη και τα ακόλουθα:

- Το σημαντικό πάχος της πλάκας θεμελίωσης.
- Η αυξημένη διαφορά δυναμικού, η οποία υπήρχε στη φάση αυτή, με αποτέλεσμα την πιθανή αύξηση του ρυθμού εισροών. Η ταχύτητα εισροής, ήταν ελεγχόμενη και έπρεπε να παραμένει εντός των επιτρεπόμενων ορίων της μελέτης, ώστε να μη δημιουργηθεί πρόβλημα στους Δ.Τ.
- Η πλήρης απουσία ανοιγμάτων στην πλάκα θεμελίωσης, μέσω των οποίων θα ήταν δυνατή η εκτόνωση των υδροστατικών πιέσεων.
- Η παρουσία σε όλη την έκταση του πυθμένα συστήματος υδατοστεγάνωσης (μεμβράνη, δύο στρώσεις προστατευτικού γεωφάσματος, σκυρόδεμα καθαριότητας κ.λπ.).

Λαμβάνοντας όλα αυτά υπόψη, η πλάκα θεμελίωσης έχει συνολικό πάχος 5 μέτρων περίπου και εκτείνεται από τα -20,06 έως τα -25,40 m. Η πλάκα θεμελίωσης σκυροδετήθηκε σε δύο φάσεις, με την πρώτη από τα -25,40 έως -22,48 m να αποτελείται από άοπλο σκυρόδεμα, ενώ η δεύτερη φάση, δηλαδή από τα -22,48 έως -20,06 m να αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Και στις δύο φάσεις χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο C35/45. Επειδή, το πάχος της πλάκας θεμελίωσης είναι μεγαλύτερο από 60 cm η σκυροδέτηση έγινε σε στρώσεις με πάχος όχι μεγαλύτερο αυτού του μήκους. Κάθε στρώση σκυροδετούνταν όσο η προηγούμενη στρώση ήταν ακόμα σε πλαστική μορφή προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία αρμού εργασίας. Με το πέρας κάθε σκυροδέτησης, όλη η μάζα του στρωμένου πλέον τσιμέντου σκεπάστηκε με φύλλα πλαστικού και θερμομονώθηκε με πλάκες πολυστερίνης.

4 Γεωτεχνικές συνθήκες και παράμετροι σχεδιασμού

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση της γεωλογίας της περιοχής του Πειραιά, έτσι ώστε να γίνει κατανοητό το περιβάλλον και το υπόβαθρο που εκτελείται το έργο. Στις επόμενες υποενότητες θα ακολουθήσει λεπτομερής ανάλυση των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών στην περιοχή του σταθμού του Πειραιά, ενώ θα γίνει επεξήγηση του τρόπου υπολογισμού των διάφορων παραμέτρων γεωτεχνικού σχεδιασμού που λήφθηκαν υπόψη για την παρούσα εργασία.

4.1 Εδαφική στρωματογραφία στην θέση του έργου

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών ερευνών (που περιλάμβαναν δειγματοληπτικές και πρεσσιομετρικές γεωτρήσεις), οι γεωλογικές ενότητες που συναντώνται περί την περιοχή κατασκευής του σταθμού Πειραιά αφορούν πρόσφατα τεταρτογενή ιζήματα, ενώ κατά θέσεις σε μεγάλο βάθος έχει εντοπιστεί και η επαφή τους με τους υποκείμενους σχηματισμούς της Μάργας του Πειραιά. Η στρωματογραφική διαδοχή των ενοτήτων κατά αύξοντα αριθμό βάθους έχει ως εξής :

- [AL] Τεχνητές/Αλλουβιακές Αποθέσεις
- [SW] Ελώδεις Αποθέσεις «Αλίπεδον»
- [PT] Παράκτιες Αποθέσεις
 - [PT-CN] Κροκαλοπαγή-Λατυποπαγή-Ψηφιδοπαγή ελαφρά έως ισχυρά συγκολλημένα
 - [PT-SD] Άμμοι, ιλυώδεις Άμμοι, ιλυώδεις Ψαμμίτες
 - [PT-SM] Ιλύες, αμμώδεις Ιλύες, αμμώδεις Ιλυόλιθοι
- [NM] Μάργα Πειραιά
 - [NM-CN] Κροκαλοπαγή-Λατυποπαγή-Ψηφιδοπαγή, παρουσία κατά θέσεις ψαμμιτικών οριζόντων ή ενστρώσεις ασβεστιτικής ιλύος.

Σε γενικές γραμμές επικρατούν εδαφικής φύσεως υλικά, τα οποία παρουσιάζουν κυμαινόμενο βαθμό διαγένεσης. Τα εδαφικά υλικά χαρακτηρίζονται από μέση έως ενδιάμεση πλαστικότητα ($WL < 50\%$ και $PI < 17\%$), ενώ κατά θέσεις μεταπίπτουν σε ασθενείς βράχους (ψαμμίτες ιλυόλιθους), η εξάπλωση των οποίων δεν έχει σαφή όρια. Παρόλα αυτά, η έκταση τους και η συμβολή τους στην ευστάθεια της αντιστήριξης του ορύγματος που απαιτείται για την κατασκευή του σταθμού είναι σημαντική.

Η διαπερατότητα των ανώτερων οριζόντων των παράκτιων αποθέσεων (ιλυώδεις άμμοι, ψαμμίτες) και τα κροκαλοπαγή της Μάργας του Πειραιά, αναμένεται να είναι ελαφρά πιο διαπερατοί σχηματισμοί σε σχέση με τα πιο λεπτομερή στρώματα (αμμώδεις ιλύες, ιλυόλιθοι), τα οποία εμφάνισαν μια ελαφρώς χαμηλότερη διαπερατότητα. Όπως έχει προαναφερθεί, ο σταθμός του “Πειραιά” βρίσκεται σε πολύ μικρή απόσταση από την θάλασσα, επομένως η στάθμη του υδροφόρου ορίζονται βρίσκεται σε ισορροπία με τη στάθμη της θάλασσας.

4.1.1 Τεχνητές αποθέσεις [AL]

Οι τεχνητές αποθέσεις συναντώνται επιφανειακά στην ευρύτερη περιοχή του σταθμού, σε βάθος από την επιφάνεια του φυσικού εδάφους, που κυμαίνεται από 1,5 έως 4 m. Στην περιοχή του κρηπιδώματος, τα πάχη των τεχνητών αποθέσεων είναι εμφανώς μεγαλύτερα, αφού αποτελούν τα υλικά επίχωσης πίσω από το παλαιό και το πιο πρόσφατο κρηπίδωμα. Η ενότητα των τεχνητών αποθέσεων περιλαμβάνει σύγχρονες επιχώσεις χαλαρών εδαφικών υλικών και λιγότερων αδρόκοκκων υλικών (αργιλώδεις-αμμώδεις χάλικες), όπως επίσης τεμάχια σκυροδέματος και ογκόλιθους ασβεστολιθικής σύστασης που συναντήθηκαν κυρίως στην περιοχή του κρηπιδώματος του λιμανιού .

4.1.2 Ελώδεις αποθέσεις “Αλίπεδον” [SW]

Οι ελώδεις αποθέσεις εντοπίζονται στους ανώτερους ορίζοντες της περιοχής μελέτης και υπόκεινται των τεχνητών αποθέσεων, με πάχος στρώσης, το οποίο κυμαίνεται κατά μήκος του σταθμού, από 2,5 έως 3,5 m περίπου. Η στρώση αυτή απουσιάζει πλήρως, σύμφωνα με τα ευρήματα των γεωτρήσεων, στο βόρειο τμήμα της δυτικής παρειάς του σταθμού και στην θέση όπου έχει κατασκευαστεί το κρηπίδωμα. Αποτελούνται από μαλακές, τεφρές, κυανότεφρες αμμώδεις αργίλους έως χαλικώδεις αμμώδεις ιλύες, πλούσιες σε οργανικά, με χαλίκια, θραύσματα, κελύφη, ενώ περιλαμβάνουν και ενστρώσεις αμμωδών ιλυωδών χαλίκων .

4.1.3 Παράκτιες αποθέσεις [PT]

Τα ελαφρά έως ισχυρά συγκολλημένα κροκαλοπαγή-λατυποπαγή-ψηφιδοπαγή [PT-CN] εντοπίζονται κάτω από τον σχηματισμό των ελωδών αποθέσεων και υπέρκεινται των πιο αδρομερών σχηματισμών (άμμων και ψαμμιτών) των παράκτιων αποθέσεων, με μέσο πάχος στρώσης που μειώνεται, αυξανόμενης της χιλιομέτρησης, από 6,5 έως 2 m περίπου. Πρόκειται για εξαιρετικά ασθενή έως ασθενή, άστρωτα, τεφρού έως ανοιχτού καστανού χρώματος, ελαφρά έως ισχυρά συγκολλημένα πολύμικτα κροκαλοπαγή/ψηφίτοπαγή με ιλυοαμμώδεις συνδετικό υλικό. Με το θρυμματισμό τους αποσυντίθεται σε πολύ πυκνούς, τεφρούς ελαφρώς αμμώδεις έως αμμώδεις χάλικες, χωρίς πλαστικότητα .

Οι άμμοι, ιλυώδεις άμμοι, ιλυώδεις ψαμμίτες [PT-SD] αντιπροσωπεύουν τους ανώτερους ορίζοντες των παράκτιων αποθέσεων που βρίσκονται πάνω από τους πιο λεπτομερείς σχηματισμούς των αμμωδών ιλύων/ιλυολίθων με μέσο πάχος στρώσης που αυξάνεται αυξανόμενης της χιλιομέτρησης, από 6 έως 12,5 m περίπου. Πρόκειται για πυκνή έως πολύ πυκνή, γκριζοπράσινη έως καστανή, ιλυώδη άμμο χωρίς πλαστικότητα έως χαμηλής πλαστικότητας, με ενστρώσεις αμμωδών χαλίκων κατά τόπους, η οποία κατά θέσεις μεταπίπτει σε ασθενή έως πολύ ασθενή, ανοικτού γκριζοκάστανου έως γκριζοπράσινου χρώματος, λεπτόκοκκο έως αδρόκοκκο, ασθενώς συγκολλημένο κατά θέσεις εύθρυπτο, ιλυώδη ψαμμίτη .

Οι ιλύες, αμμώδεις ιλύες και αμμώδεις ιλυόλιθοι [PT-SM] συνιστούν τον κατώτερο και τον πλέον λεπτομερή ορίζοντα των παράκτιων αποθέσεων με μέσο πάχος στρώσης που κυμαίνεται, αυξανόμενης της χιλιομέτρησης, από 15 έως >20 m περίπου. Πρόκειται για πολύ πυκνή, ανοιχτού καστανοκίτρινου χρώματος, αμμώδη ιλύ χωρίς πλαστικότητα έως χαμηλής πλαστικότητας, με ενστρώσεις αμμώδους αργίλου χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας, και σπανιότερα ιλυωδών χαλίκων που τοπικά και κυρίως σε μεγαλύτερα βάθη μεταπίπτει σε

ασθενή έως πολύ ασθενή, ανοιχτού γκριζοκάστανου έως καστανοπράσινου χρώματος, ασθενώς έως μέτρια συγκολλημένο αμμώδη ιλυόλιθο .

4.1.4 Θαλάσσιες μαργαϊκές αποθέσεις [NM]

Τα ελαφρά έως ισχυρά συγκολλημένα κροκαλοπαγή-λατυποπαγή-ψηφιδοπαγή [NM-CN] εντοπίζονται στην επαφή των παράκτιων αποθέσεων με τους υποκείμενους σχηματισμούς της Μάργας του Πειραιά σε βάθος που αυξάνεται αυξανομένης της χλιομέτρησης και κυμαίνεται από 32,5 έως 43 m περίπου. Πρόκειται για την πιο αδρομερή φάση των θαλάσσιων μαργαϊκών αποθέσεων, η οποία στην περιοχή του σταθμού συνίσταται από πολύ ασθενή έως ασθενή, ελαφρά έως ισχυρά συγκολλημένο, υπόλευκο έως τεφρόλευκο, πολύμικτο, κροκαλοπαγές/τοπικά ψηφιδοπαγές, με παρουσία ψαμμιτικών και μαργαϊκών εναλλαγών/ενστρώσεων .

4.1.5 Καθεστώς και στάθμη υπογείων υδάτων

Από διαδοχικές μετρήσεις στάθμης υπογείων υδάτων που καταγράφηκαν, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα διαπιστώθηκε ότι ταυτίζεται με τη στάθμη της θάλασσας (υψόμετρο +0,00) και σε βάθος από την επιφάνεια του φυσικού εδάφους που κυμαίνεται από 1,00 έως 2,5 m περίπου .

4.1.6 Διαπερατότητα γεωτεχνικών σχηματισμών

Στους σχηματισμούς που αποτελούν την ενότητα των παράκτιων αποθέσεων η διαπερατότητα είναι γενικώς χαμηλή. Ελαφρώς υψηλότερες τιμές αφορούν σε ενστρώσεις άμμων που εμφανίζονται κυρίως πιο επιφανειακά και στους ορίζοντες των θαλάσσιων κροκαλοπαγών. Οι ανώτεροι αυτοί, πιο διαπερατοί ορίζοντες δεν επηρεάζουν άμεσα τις εισροές στο όρυγμα κατασκευής του σταθμού, διότι απομονώνονται από τους διαφραγματικούς τοίχους κατασκευής που φτάνουν μέχρι το στρώμα χαμηλής διαπερατότητας. Επομένως, οι εισροές στο αντισηριζόμενο όρυγμα του σταθμού κατά τη φάση κατασκευής του ελέγχονται κυρίως από τους κατώτερους ορίζοντες των ιλύων/ιλυολίθων, καθώς και από τα υποκείμενα σε αυτούς μαργαϊκά κροκαλοπαγή, τα οποία παρουσιάζουν μια σχετικά χαμηλή διαπερατότητα.

4.2 Γεωτεχνικές-Ιδεατές τομές σχεδιασμού

Οι ιδεατές τομές σχεδιασμού ΓΤΣ1 και ΓΤΣ2, καταστρώθηκαν μέσω της στρωματογραφίας στην περιοχή μελέτης και καλύπτουν υπολογιστικά όλο το φάσμα των αναμενόμενων γεωτεχνικών συνθηκών. Πάνω σε αυτές βασίστηκαν οι γεωτεχνικοί υπολογισμοί για το σχεδιασμό της εκσκαφής, της προσωρινής αντιστήριξης και μόνιμης κατασκευής των έργων που συμπεριλήφθηκαν στο συγκρότημα του σταθμού Πειραιά. Με βάση τα διαθέσιμα γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία στην περιοχή μελέτης, συναντώνται κατά κύριο λόγο οι μεικτοί σχηματισμοί των παράκτιων αποθέσεων.

Σε γενικές γραμμές, στους ανώτερους ορίζοντες επικρατούν ενότητες των πιο αδρομερών κλασμάτων, άμμοι-ψαμμίτες, οι οποίες υπέρκεινται των πιο λεπτομερών ενοτήτων, ιλύων-ιλυολίθων. Βαθύτερα στην επαφή των αποθέσεων αυτών με τους υποκείμενους

θαλάσσιους σχηματισμούς (μάργα Πειραιά) παρεμβάλλονται πιο αδρομερή κλάσματα, κυρίως συγκολλημένα κροκαλοπαγή σε εναλλαγές με ψαμμίτες και ασβεστιτικές ιλύες .

Στην κατάσταση των τομών σχεδιασμού, ενοποιήθηκαν οι συγγενείς κλασματικά μεταξύ τους γεωτεχνικοί σχηματισμοί άμμοι-ψαμμίτες και ιλύες-ιλυόλιθοι. Για τους σκοπούς των υπολογισμών ενοποιήθηκαν επίσης και τα ελαφρώς με τα ισχυρώς συνδεδεμένα κροκαλοπαγή των παράκτιων αποθέσεων αλλά και των κροκαλοπαγών της Μάργας Πειραιά. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, οι διακριθείσες γεωτεχνικές στρώσεις στην περιοχή του σταθμού Πειραιά από πάνω προς τα κάτω φαίνονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Τυπική διάκριση στρώσεων στην περιοχή του σταθμού Πειραιάς

Στρώση	Τεχνικογεωλογική Ενότητα	Γεωτεχνικοί Σχηματισμοί
Στρώση I	AL	Τεχνητές Αποθέσεις
Στρώση II	SW	Ελώδεις Αποθέσεις
Στρώση III	PT-CN	Κροκαλοπαγή-Ψηφιδοπαγή
Στρώση IV	PT-SD	Ιλυώδεις Άμμοι, Ιλυώδεις Ψαμμίτες
Στρώση V	PT-SM	Αμμώδεις Ιλύες, Αμμώδεις Ιλυόλιθοι
Στρώση VI	NM-CN	Κροκαλοπαγή-Ψηφιδοπαγή

Με βάση τα διαθέσιμα γεωτεχνικά στοιχεία κατά μήκος της περιοχής του σταθμού φαίνεται ότι οι γεωτεχνικές συνθήκες δεν διαφοροποιούνται ιδιαίτερα. Οι όποιες μικρές διαφορές αφορούν κυρίως στην στρωματογραφία και οφείλονται στην κλίση των παράκτιων στρώσεων και την παρουσία των κροκαλοπαγών της Μάργας του Πειραιά που υπόκεινται των παράκτιων αποθέσεων σε βάθος που κυμαίνεται από 32 έως 40 m περίπου. Έτσι, κατά μήκος του σταθμού διακρίνονται δύο στρωματογραφικές ζώνες, το προφίλ των οποίων σχεδιάζεται με βάση τις γεωτεχνικές συνθήκες που επικρατούν στις Χ.Θ 7+607 και 7+699 (εικόνα 4.2).

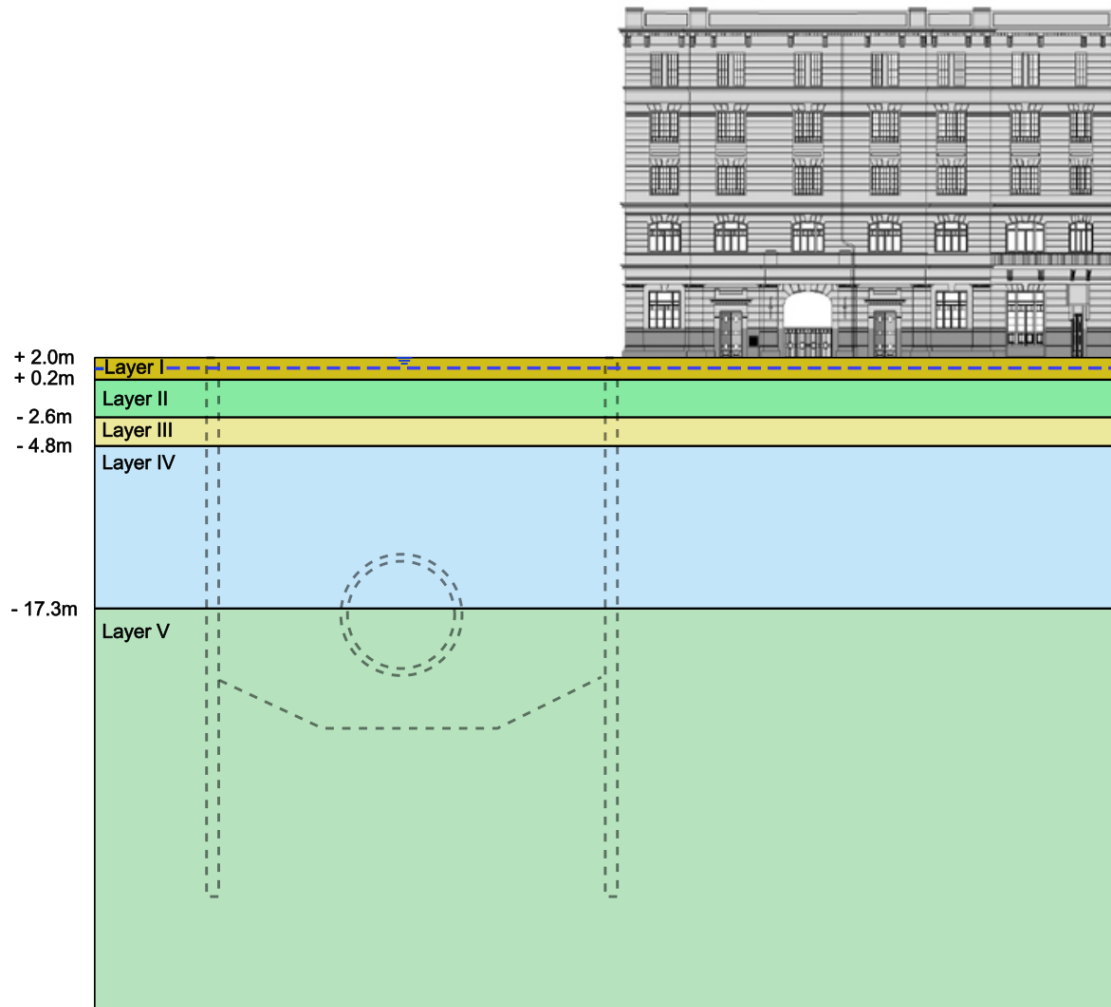
Η περιοχή που θα προσομοιωθεί στο Plaxis είναι η τομή A-A' (βλ. εικόνα 4.1) της βαθιάς εκσκαφής, ενώ οι μετέπειτα υπολογισμοί και προσομοιώσεις που θα λάβουν χώρα θα γίνουν με βάση την στρωματογραφία της ιδεατής τομής σχεδιασμού ΓΤΣ-2, τα στοιχεία της οποίας παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

4.3 Παράμετροι γεωτεχνικού σχεδιασμού

Οι παράμετροι γεωτεχνικού σχεδιασμού προσδιορίστηκαν με βάση όσα προβλέπει η παράγραφος 2.4.5.2 του Ευρωκώδικα 7, Γεωτεχνικός Σχεδιασμός Μέρος 1: Γενικοί Κανόνες. Η εκτίμηση των παραμέτρων βασίστηκε σε αποτελέσματα και παράγωγες τιμές εργαστηριακών δοκιμών και σε αποτελέσματα επί τόπου δοκιμών.

4.3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά

Το φαινόμενο βάρος για την κάθε στρώση προκύπτει από το φαινόμενο βάρος των εκάστοτε γεωτεχνικών σχηματισμών που τη συνιστούν, όπως έχει μετρηθεί στα πλαίσια εργαστηριακών δοκιμών αντοχής και παραμορφωσιμότητας.



Εικόνα 4.1: Στρωματογραφική αναπαράσταση της ιδεατής τομής σχεδιασμού ΓΤΣ-2 στο σημείο της τομής Α-Α΄

- Στρώση I-Τεχνητές Αλλουβιακές Αποθέσεις

Λόγω της ασύνδετης φύσης των αποθέσεων στην στρώση I δεν κατέστη δυνατόν να μορφωθούν δοκίμια προκειμένου να προσδιοριστεί το φαινόμενο βάρος. Λαμβάνοντας υπόψη την ποικίλη σύσταση των αποθέσεων λήφθηκε η τιμή $\gamma=19 \text{ kN/m}^3$.

- Στρώση II-Ελώδεις αποθέσεις

Το φαινόμενο βάρος της στρώσης II, από τις δοκιμές συμπιεσόμετρου προέκυψε ίσο με $\gamma=19,5 \text{ kN/m}^3$, όμως λαμβάνοντας υπόψη και την παρουσία πιο αδρομερών εμφανίσεων του σχηματισμού (χαλικώδεις ενστρώσεις) για τον σχεδιασμό λήφθηκε η τιμή $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$.

Πίνακας 4.2: Στρωματογραφική διαδοχή στην ΓΤΣ-1

Τομή Σχεδιασμού ΓΤΣ-1 (Χ.Θ 7+590 έως την Χ.Θ 7+650)	
Στρώση I	Στάθμη από +2 έως +0,10 m (Τεχνητές Αποθέσεις)
Στρώση II	Στάθμη από +0,10 έως -3,00 m (Ελώδεις Αποθέσεις)
Στρώση III	Στάθμη από -3,00 έως -9,50 m (Κροκαλοπαγή/Ψηφιδοπαγή)
Στρώση IV	Στάθμη από -9,50 έως -15,90 m (Ιλυώδεις Άμμοι/Ψαμμίτες)
Στρώση V	Στάθμη από -15,90 έως -32,00 m (Αμμώδεις Ιλύες/Ιλυόλιθοι)
Στρώση VI	Στάθμη >-32,00 m (Κροκαλοπαγή/Λατυποπαγή)

Πίνακας 4.3: Στρωματογραφική διαδοχή στην ΓΤΣ-2

Τομή Σχεδιασμού ΓΤΣ-2 (Χ.Θ 7+650 έως την Χ.Θ 7+720)	
Στρώση I	Στάθμη από +2 έως +0,20 m (Τεχνητές Αποθέσεις)
Στρώση II	Στάθμη από +0,20 έως -2,60 m (Ελώδεις Αποθέσεις)
Στρώση III	Στάθμη από -2,60 έως -4,80 m (Κροκαλοπαγή/Ψηφιδοπαγή)
Στρώση IV	Στάθμη από -4,80 έως -17,30 m (Ιλυώδεις Άμμοι/Ψαμμίτες)
Στρώση V	Στάθμη >-17,30 m (Αμμώδεις Ιλύες/Ιλυόλιθοι)

- Στρώση III-Κροκαλοπαγή/Ψηφιδοπαγή

Για τη στρώση III των θαλάσσιων κροκαλοπαγών από μία δοκιμή προσδιορισμού πυκνότητας ρ , σε πυρήνα ελαφρά συγκολλημένου κροκαλοπαγούς προέκυψε $\rho=23 \text{ kN/m}^3$. Έτσι, για το σχεδιασμό λήφθηκε η τιμή $\gamma=23 \text{ kN/m}^3$.

- Στρώση IV-Ιλυώδεις Άμμοι-Ιλυώδεις Ψαμμίτες

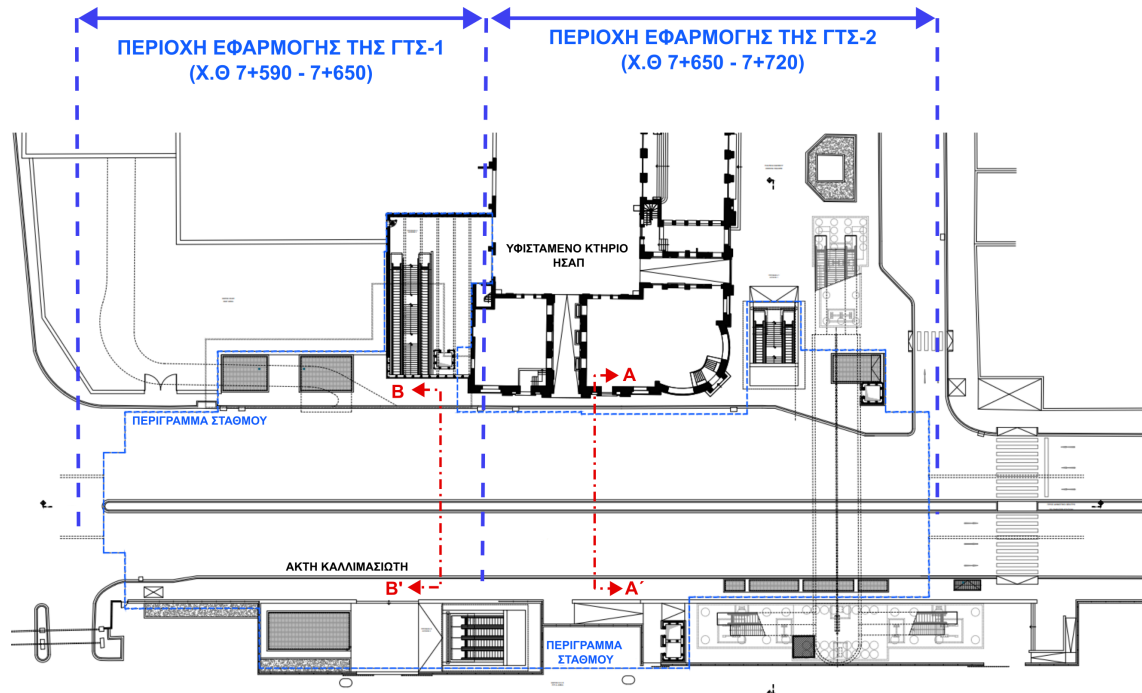
Το φαινόμενο βάρος γ της στρώσης IV, προσδιορίστηκε στα πλαίσια των δοκιμών άμεσης διάτμησης, μονοδιάστατης συμπίεσης και αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Το φαινόμενο βάρος για τον σχεδιασμό λήφθηκε συντηρητικά ίσο με $\gamma=21,5 \text{ kN/m}^3$.

- Στρώση V-Αμμώδεις Ιλύες-Αμμώδεις Ιλυόλιθοι

Ομοίως, στην στρώση V το φαινόμενο βάρος προσδιορίστηκε στα πλαίσια των δοκιμών άμεσης διάτμησης, μονοδιάστατης συμπίεσης και αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Για τον σχεδιασμό λήφθηκε ίσο με $\gamma=20,5 \text{ kN/m}^3$.

- Στρώση VI-Κροκαλοπαγή/Ψηφιδοπαγή Μάργας Πειραιά

Το φαινόμενο βάρος γ της στρώσης VI, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα κροκαλοπαγή εμφανίζονται από ασύνδετα έως καλά συγκολλημένα με ενστρώσεις πιο λεπτομερών σχηματισμών έλαβε την τιμή $\gamma=23,5 \text{ kN/m}^3$.



Εικόνα 4.2: Απόσπασμα οριζοντιογραφίας με τις περιοχές εφαρμογής των γεωτεχνικών τομών σχεδιασμού ΓΤΣ-1 και ΓΤΣ-2

4.3.2 Ενεργές παράμετροι διατμητικής αντοχής

- Στρώση I-Τεχνητές Αλλουβιακές Αποθέσεις

Οι τεχνητές αποθέσεις της στρώσης I που βρίσκονται στην περιοχή του σταθμού διακρίνονται, εν γένει, από σημαντική συμμετοχή του λεπτόκοκκου κλάσματος, παρόλα αυτά, κατά θέσεις υπάρχουν και τεχνητές αποθέσεις όπου κυριαρχούν τα χαλίκια. Προκειμένου να καλυφθεί η διακύμανση της σύστασης των υλικών αυτών στην περιοχή του έργου, ο σχεδιασμός μπορεί να γίνει με συντηρητική θεώρηση παραμέτρων αντοχής $c'=10$ kPa και $\phi'=28^\circ$ [12].

- Στρώση II-Ελώδεις αποθέσεις

Ο σχηματισμός των ελωδών αποθέσεων της στρώσης II είναι ένας σχηματισμός, όπου οι άργιλοι δεν περιέχουν χάλικες και η αντίσταση σε διείσδυση της δοκιμής SPT είναι πολύ χαμηλή ($N_{SPT}=1-10$). Μια ένδειξη της γωνίας τριβής μπορεί να ληφθεί από την εμπειρική σχέση που παραθέτει ο Mitchell (1976):

$$\sin\phi_{cv} = 0,8 - 0,094 \cdot \ln(I_p) \quad (4.1)$$

και για δείκτη πλαστικότητας $I_p=14\%$ προκύπτει $\phi_{cv}=33^\circ$. Για τον σχεδιασμό λήφθηκε $c'=0$ kPa και $\phi'=26^\circ$, που αποτελεί μια συντηρητική παραδοχή [12].

- Στρώση III-Κροκαλοπαγή/Ψηφιδοπαγή

Στην εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής της στρώσης III, συντηρητικά, αμελούνται οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης που πραγματοποιήθηκαν σε καλά συγκολλημένους πυρήνες κροκαλοπαγών, λόγω της ασύνδετης φύσης των υλικών που κυριαρχεί εν γένει στον σχηματισμό. Με βάση τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά της απόθεσης των κροκαλοπαγών και την εικόνα των δειγμάτων η γωνία τριβής λαμβάνεται $\phi'=40^\circ$, ενώ για να ληφθεί υπόψη και η ασθενής σιμέντωση του σχηματισμού λαμβάνεται συνοχή $c'=5$ kPa [12].

- Στρώση IV-Ιλυώδεις Άμμοι-Ιλυώδεις Ψαμμίτες

Στην στρώση IV που συναντώνται οι γεωτεχνικοί σχηματισμοί των ιλυωδών άμμων/ψαμμιτών λαμβάνονται παράμετροι διατμητικής αντοχής $c'=10$ kPa και $\phi'=36^\circ$, ώστε η περιβάλλουσα σχεδιασμού να αποτελεί μία συντηρητική εκτίμηση της αντοχής αυτών των σχηματισμών.

- Στρώση V-Αμμώδεις Ιλύες-Αμμώδεις Ιλυόλιθοι

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής για την στρώση V έγινε με χρήση, κατά κύριο λόγο, των αποτελεσμάτων ενός ικανοποιητικού αριθμού δοκιμών άμεσης διάτμησης με στερεοποίηση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Η γωνία τριβής λήφθηκε ίση με $\phi'=34^\circ$, ενώ η συνοχή $c'=45$ kPa. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής που προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών άμεσης διάτμησης ελέγχθηκαν με τη χρήση δοκιμών τριαξονικής φόρτισης που πραγματοποιήθηκαν σε επιλεγμένα δείγματα αμμωδών ιλύων/αργίλων.

- Στρώση VI-Κροκαλοπαγή/Ψηφιδοπαγή Μάργας Πειραιά

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής για την στρώση VI λαμβάνεται συντηρητικά ίσος με $c'=50$ kPa και $\phi'=40^\circ$, έχοντας λάβει υπόψη ότι η παρουσία ψαμμιτικών ή/και μαργαϊκών ενστρώσεων στη μάζα των κροκαλοπαγών ενδεχομένως να οδηγήσει σε απώλεια ενός σημαντικού μέρους της ενεργούς συνοχής [12].

4.3.3 Ενεργές παράμετροι διατμητικής αντοχής

- Στρώση I-Τεχνητές Αλλουβιακές Αποθέσεις

Οι τεχνητές αποθέσεις της στρώσης I που βρίσκονται στην περιοχή του σταθμού διακρίνονται, εν γένει, από σημαντική συμμετοχή του λεπτόκοκκου κλάσματος, παρόλα αυτά, κατά θέσεις υπάρχουν και τεχνητές αποθέσεις όπου κυριαρχούν τα χαλίκια. Προκειμένου να καλυφθεί η διακύμανση της σύστασης των υλικών αυτών στην περιοχή του έργου, ο σχεδιασμός μπορεί να γίνει με συντηρητική θεώρηση παραμέτρων αντοχής $c'=10$ kPa και $\phi'=28^\circ$

- Στρώση II-Ελωδείς αποθέσεις

Ο σχηματισμός των ελωδών αποθέσεων της στρώσης II είναι ένας πολύμικτος σχηματισμός όπου κυριαρχούν οι μαλακές αργλικές αποθέσεις, ενώ κατά θέσεις εντοπίζονται και στρώσεις αργιλωδών χαλικιών. Όπου οι άργιλοι δεν περιέχουν χάλικες η αντίσταση σε διείδυση της δοκιμής SPT είναι πολύ χαμηλή ($N_{SPT}=1-10$). Μια

ένδειξη της γωνίας τριβής μπορεί να ληφθεί από την εμπειρική σχέση που παραθέτει ο Mitchell (1976):

$$\sin\phi_{cv} = 0,8 - 0,094 \cdot \ln(Ip) \quad (4.2)$$

και για δείκτη πλαστικότητας $Ip=14\%$ προκύπτει $\phi_{cv}=33^\circ$. Για τον σχεδιασμό λήφθηκε $c'=0$ kPa και $\phi'=26^\circ$, που αποτελεί μια συντηρητική παραδοχή

- Στρώση III-Κροκαλοπαγή/Ψηφιδοπαγή

Στην εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής της στρώσης III, συντηρητικά, αμελούνται οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης που πραγματοποιήθηκαν σε καλά συγκολλημένους πυρήνες κροκαλοπαγών, λόγω της ασύνδετης φύσης των υλικών που κυριαρχεί εν γένει στον σχηματισμό. Με βάση τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά της απόθεσης των κροκαλοπαγών και την εικόνα των δειγμάτων η γωνία τριβής λαμβάνεται $\phi'=40^\circ$, ενώ για να ληφθεί υπόψη και η ασθενής σιμέντωση του σχηματισμού λαμβάνεται συνοχή $c'=5$ kPa

- Στρώση IV-Ιλυώδεις Άμμοι-Ιλυώδεις Ψαμμίτες

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών άμεσης διάτμησης με στερεοποίηση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες και τα αποτελέσματα των αστράγγιστων δοκιμών τριαξονικής φόρτισης με ισότροπη στερεοποίηση. Με βάση αυτές τις δοκιμές, λαμβάνονται παράμετροι διατμητικής αντοχής $c'=10$ kPa και $\phi'=36^\circ$, ώστε η περιβάλλουσα σχεδιασμού να αποτελεί μία συντηρητική εκτίμηση της αντοχής αυτών των σχηματισμών.

- Στρώση V-Αμμώδεις Ιλύες-Αμμώδεις Ιλυόλιθοι

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής για την στρώση V έγινε με χρήση, κατά κύριο λόγο, των αποτελεσμάτων ενός ικανοποιητικού αριθμού δοκιμών άμεσης διάτμησης με στερεοποίηση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Η γωνία τριβής λήφθηκε ίση με $\phi'=34^\circ$, ενώ η συνοχή $c'=45$ kPa. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής που προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών άμεσης διάτμησης ελέγχθηκαν με τη χρήση δοκιμών τριαξονικής φόρτισης που πραγματοποιήθηκαν σε επιλεγμένα δείγματα αμμοδών ιλύων/αργίλων.

- Στρώση VI-Κροκαλοπαγή/Ψηφιδοπαγή Μάργας Πειραιά

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής για την στρώση VI λαμβάνεται συντηρητικά ίσος με $c'=50$ kPa και $\phi'=40^\circ$, οι οποίοι προσδιορίστηκαν με τη χρήση του λογισμικού Roclab, λαμβάνοντας $GSI=35$, $\sigma_{ci} = 5$ MPa και $m_i=18$.

4.3.4 Παράμετροι Αντοχής και Παραμορφωσιμότητας

- Στρώση I-Τεχνητές Αλλουβιακές Αποθέσεις

Όπως αναφέρθηκε και στο 4.3.3, οι παράμετροι διατμητικής αντοχής για την στρώση I λαμβάνονται ίσες με $c'=10$ kPa και $\phi'=28^\circ$. Η γωνία διόγκωσης ψ , λαμβάνεται ίση με $\phi'/3$, δηλαδή $\psi \approx 9^\circ$.

Όσον αφορά τις παραμέτρους παραμορφωσιμότητας που υπεισέρχονται στο καταστατικό προσομοίωμα HS, αυτές προκύπτουν με βάση την εμπειρία σε ανάλογους σχηματισμούς και τη μακροσκοπική περιγραφή των δειγμάτων. Έτσι, για τον σχηματισμό της στρώσης I, για τάση αναφοράς P_{ref} ίση με 30 kPa λαμβάνονται:

- $E_{50}^{ref} = 40$ MPa και
- $E_{oed}^{ref} = 30$ MPa, ενώ
- E_{ur}^{ref} (μέτρο αποφόρτισης-επαναφόρτισης) λαμβάνεται ίσο με $3 \cdot E_{50}^{ref} = 120$ MPa.

Ο εκθέτης m (power in stiffness laws) λαμβάνεται ίσος με $m=0,5$, ο λόγος του Poisson για τον κλάδο αποφόρτισης επαναφόρτισης ν_{ur} λαμβάνεται ίσος με 0,2, ενώ ο λόγος R_f (failure ratio) ίσος με 0,9. Οι τιμές m , ν_{ur} και R_f είναι ίδιες σε όλες τις περιπτώσεις των στρώσεων για το καταστατικό προσομοίωμα Hardening Soil Model.

- Στρώση II-Ελώδεις αποθέσεις

Ομοίως, στο προηγούμενο υποκεφάλαιο 4.3.3, οι παράμετροι διατμητικής αντοχής της στρώσης II λαμβάνονται ίσες με $c'=0$ kPa και $\phi'=26^\circ$. Η γωνία διόγκωσης ψ , λαμβάνεται ίση με 0° . Όσον αφορά τις παραμέτρους παραμορφωσιμότητας που υπεισέρχονται στο καταστατικό προσομοίωμα HS, αυτές και πάλι προκύπτουν με βάση την εμπειρία σε ανάλογους σχηματισμούς και τη μακροσκοπική περιγραφή των δειγμάτων. Για τον σχηματισμό της στρώσης II, για τάση αναφοράς P_{ref} ίση με 50 kPa λαμβάνονται:

- $E_{50}^{ref} = 10$ MPa
- $E_{oed}^{ref} = 8$ MPa
- E_{ur}^{ref} λαμβάνεται ίσο με $3 \cdot E_{50}^{ref} = 30$ MPa.

- Στρώση IV-Ιλυώδεις Άμμοι-Ιλυώδεις Ψαμμίτες

Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής της στρώσης IV λαμβάνονται ίσες με $c'=10$ kPa και $\phi'=38^\circ$. Η γωνία διόγκωσης ψ , λαμβάνεται ίση με $\phi'/3$, δηλαδή $\psi \approx 12^\circ$. Οι παράμετροι προκύπτουν με βάση τα αποτελέσματα τριαξονικής φόρτισης και τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης που έχουν εκτελεσθεί στο οιδήμετρο σε μερικώς έως καθόλου διαγενεμένα δείγματα.

Για τάση αναφοράς P_{ref} ίση με 100 kPa:

- $E_{50}^{ref} = 190$ MPa (Μέση Τιμή), αφού το τέμνον μέτρο ελαστικότητας στο 50 % της θραύσης κυμαίνεται από $E_{50}^{ref} = 31,1-828$ MPa
- E_{ur}^{ref} λαμβάνεται ίσο με $3 \cdot E_{50}^{ref} = 570$ MPa
- $E_{oed}^{ref} = 165$ MPa (Μέση Τιμή), αφού Το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης για τάση αναφοράς P_{ref} ίση με 100 kPa κυμαίνεται από $E_{oed}^{ref} = 120,1-133,5$ MPa

- Στρώση V-Αμμώδεις Ιλύες-Αμμώδεις Ιλυόλιθοι

Η στρώση V, από το 4.3.3, είχε παραμέτρους διατμητικής αντοχής ίσες με $c'=45$ kPa και $\phi'=34^\circ$. Η γωνία διόγκωσης ψ , λαμβάνεται ίση με $\phi'/3$, δηλαδή $\psi \approx 10^\circ$. Οι παράμετροι έχουν προκύψει από τα αποτελέσματα των ιδίων δοκιμών με την περίπτωση της στρώσης IV.

Για τάση αναφοράς P_{ref} ίση με 100 kPa

- $E_{50}^{ref} = 110$ MPa (Μέση Τιμή), αφού το τέμνον μέτρο ελαστικότητας στο 50 % της θραύσης κυμαίνεται από $E_{50}^{ref} = 20-620$ MPa
- E_{ur}^{ref} λαμβάνεται ίσο με $3 \cdot E_{50}^{ref} = 330$ MPa
- $E_{oed}^{ref} = 130$ MPa (Μέση Τιμή), αφού Το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης για τάση αναφοράς P_{ref} ίση με 100 kPa κυμαίνεται από $E_{oed}^{ref} = 80-224,8$ MPa

Σύμφωνα με τους Vermeer Schanz (1998) με βάση δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε άμμους γενικότερα προκύπτει ότι $E_{50}^{ref} \approx E_{oed}^{ref}$. Για αυτό το λόγο λαμβάνεται η συντηρητική προσέγγιση για τις αμμώδεις ιλύες $E_{oed}^{ref} \approx E_{50}^{ref} = 110$ MPa.

4.3.5 Διαπερατότητα

Οι τομές σχεδιασμού της διαπερατότητας των σχηματισμών του υποβάθρου που συναντώνται στην περιοχή του σταθμού “Πειραιάς” βασίστηκαν στην ειδικά σχεδιασμένη δοκιμή άντλησης, η οποία εκτελέστηκε στην περιοχή του σταθμού.

Για τη μελέτη του σταθμού θεωρείται ότι μια αντιπροσωπευτική τιμή της διαπερατότητας για τις στρώσεις II και VI είναι η τιμή $k = 3 \cdot 10^{-6}$ m/sec, ενώ για τη στρώση III, η οποία είναι πιο διαπερατή, είναι η τιμή $k = 8 \cdot 10^{-6}$ m/sec. Για τις στρώσεις IV και V δίνεται μια ελάχιστη και μια μέγιστη προτεινόμενη τιμή μεταξύ των οποίων δύναται η διαπερατότητα να κυμανθεί (με $k = 2 \cdot 10^{-6}$ m/sec έως $k = 5 \cdot 10^{-6}$ m/sec και $k = 4 \cdot 10^{-8}$ m/sec έως $k = 4 \cdot 10^{-6}$ m/sec αντίστοιχα). Τέλος, για τις τεχνητές αποθέσεις, δηλαδή την στρώση I, ελλείπει άμεσων μετρήσεων, εκτιμάται $k = 10^{-5}$ m/sec .

4.4 Ανακεφαλαίωση

Όλες οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρωμάτων του υπεδάφους συνοψίζονται στον πίνακα 4.4:

Πίνακας 4.4: Παράμετροι Γεωτεχνικού Σχεδιασμού

Παράμετροι Σχεδιασμού	Στρώσεις						Μονάδες Μέτρησης
	Στρώση I [AL]	Στρώση II [SW]	Στρώση III [PT-CN]	Στρώση IV [PT-SD]	Στρώση V [PT-SM]	Στρώση VI [NM-CN]	
Φαινόμενο Βάρος, γ	19	20	23	21,5	20,5	23,5	kN/m ³
Γωνία Τριβής ϕ	28	26	40	36	34	40	°
Συνοχή, c	10	0	5	10	45	50	kPa
Γωνία Διαστολικότητας, ψ	9	0	-	12	10	-	°
Τέμνον Μέτρο Ελαστικότητας, E_{50}^{ref}	40	10	-	190	110	-	MPa
Μέτρο Μονοδιάστατης Συμπίεσης, E_{oed}^{ref}	30	8	-	165	110	-	MPa
Μέτρο Αποφόρτισης-Επαναφόρτισης, E_{ur}^{ref}	120	30	-	570	330	-	MPa
Διαπερατότητα, k	10^{-5}	$3 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$ - $5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-8}$ - $4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	m/sec

5 Όργανα γεωμηχανικής και δομητικής παρακολούθησης του έργου

5.1 Αναγκαιότητα σχεδιασμού συστήματος παρακολούθησης

Η πολυπλοκότητα έργων τέτοιου βεληνεκούς απαιτεί και την συνεχή παρακολούθηση τους καθ' όλη τη διάρκεια των εργασιών, αλλά και μετά την ολοκλήρωσή τους. Έτσι και στον σταθμό του Πειραιά, έγινε εγκατάσταση μιας πληθώρας οργάνων για την παρακολούθηση των μετακινήσεων, καθιζήσεων αλλά και πιθανών παραμορφώσεων που ενδέχονταν να προκληθούν (εικόνα 5.1).

Η Γεωμηχανική και Δομητική Παρακολούθηση (ΓΔΠ) έχει σαν αντικείμενο την παρακολούθηση και καταγραφή της συμπεριφοράς των κατασκευών του έργου καθώς και των επιπτώσεων που προκαλούν στο υπέδαφος, τον περιβάλλοντα ακάλυπτο χώρο και τα κτήρια ή και τις κατασκευές τρίτων εντός της ζώνης επιρροής του έργου.

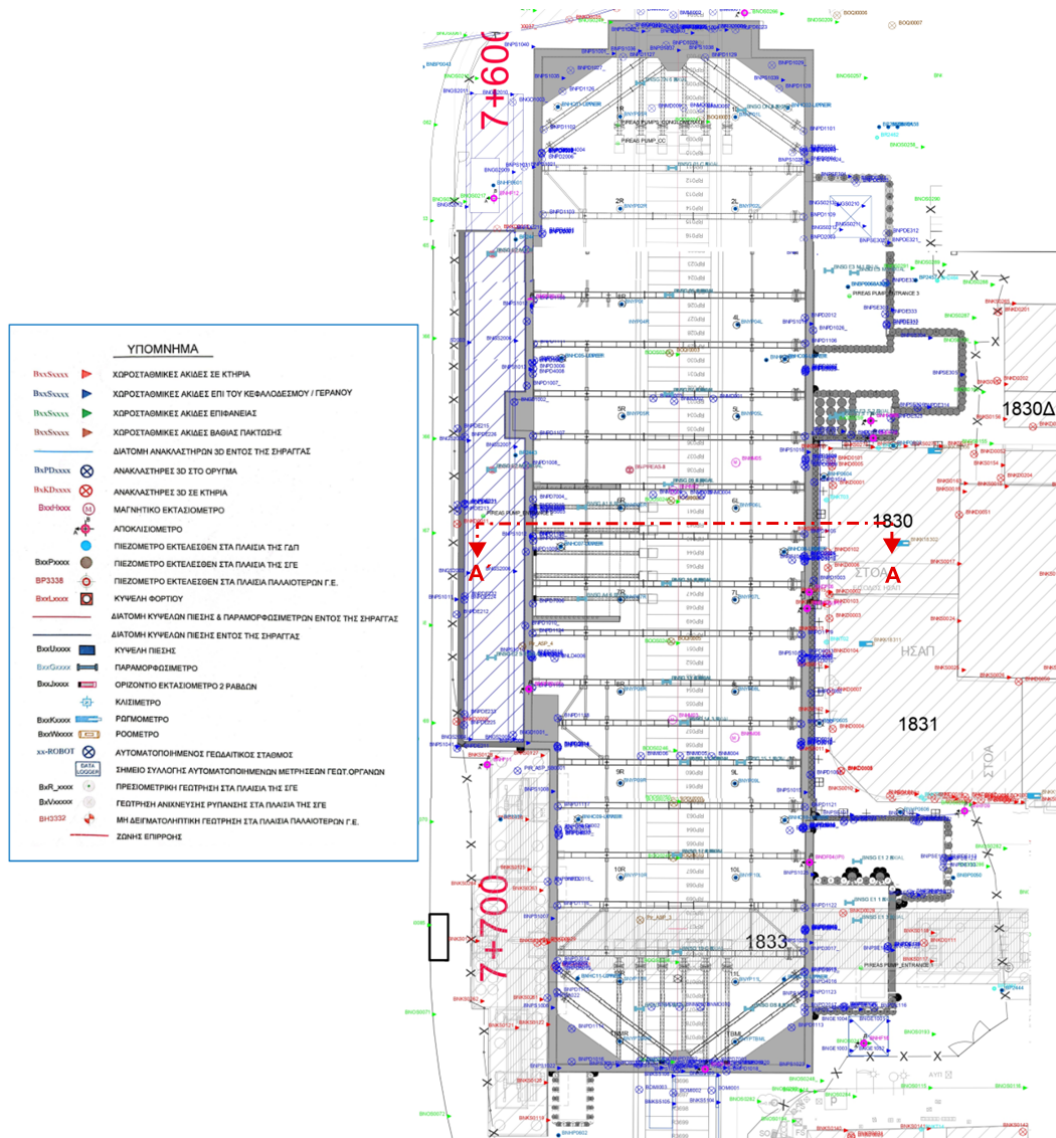
Αναλυτικότερα, η ΓΔΠ για τον σταθμό Πειραιά πραγματοποιείται για την επίτευξη των παρακάτω στόχων:

- Την παρακολούθηση της αλληλεπίδρασης εδάφους και κατασκευής, προκειμένου να καταστεί δυνατή η εφαρμογή συμπληρωματικών μέτρων αντιστήριξης, εφ' όσον απαιτηθεί
- Την καταγραφή των μετακινήσεων κτηρίων και οποιασδήποτε άλλης υποδομής εντός της ζώνης επιρροής με σκοπό την πρόληψη και αποφυγή οποιασδήποτε πιθανής βλάβης
- Τη συμβολή στην βελτιστοποίηση της μεθόδου εκσκαφής και αντιστήριξης
- Την έγκαιρη προειδοποίηση εκτάκτων καταστάσεων
- Τη συγκέντρωση, οργάνωση, ανάλυση και ομαδοποίηση των πληροφοριών και δεδομένων
- Τη συμπλήρωση και επαναξιολόγηση των εδαφικών συνθηκών κατά τη διάρκεια της κατασκευής
- Τον έλεγχο παραδοχής των μελετών, τη βαθμονόμηση των αριθμητικών προσομοιωμάτων, τη συσχέτιση της Μελέτης Εφαρμογής με τις συναντηθείσες συνθήκες και τις κατασκευαστικές εργασίες, και
- Τη συμβολή στη συνολική αξιολόγηση της μελέτης της κατασκευής του έργου σε σχέση με τις συναντηθείσες συνθήκες, ώστε να πραγματοποιηθούν οι απαιτούμενες ανάδρομες αναλύσεις για την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευών και κτηρίων και να εξαχθούν τελικά συμπεράσματα χρήσιμα για τα υπόλοιπα και τα μελλοντικά έργα του ΜΕΤΡΟ.

Έτσι, το πρόγραμμα Ενόργανης Παρακολούθησης και Αυτοματοποιημένο Σύστημα Παρακολούθησης (ΑΣΠ), περιλαμβάνει την μέτρηση και καταγραφή των κάτωθι στοιχείων:

- Κατακόρυφες και οριζόντιες μετακινήσεις κτηρίων και κατασκευών μέσω συστήματος χωροσταθμικών μετρήσεων και συστήματος μέτρησης Τρισδιάστατων (3D) Μετακινήσεων

- Στάθμη και πίεση των πόρων των υπογείων υδάτων με χρήση πιεζομέτρων
- Συγκλίσεις και οριζόντιες μετακινήσεις του κεφαλόδεσμου και των διαφραγματικών τοίχων του ορύγματος μέσω της εγκατάστασης αποκλισίμετρων
- Παραμορφώσεις των αντηρίδων με χρήση παραμορφωσίμετρων
- Μεταβολή ανοίγματος ρωγμών κτηρίων και κατασκευών με ρωγμόμετρα
- Μεταβολή κλίσης κτηρίων με χρήση κλισίμετρων



Εικόνα 5.1: Οριζοντιογραφία του σταθμού Πειραιά με τα όργανα παρακολούθησης του έργου

5.2 Πιεζόμετρα

Για τη παρακολούθηση της μεταβολής της στάθμης του υπόγειου ύδατος κατά την κατασκευή του σταθμού χρησιμοποιήθηκαν πιεζόμετρα ανοικτού τύπου (κατακόρυφου σωλήνα) και πιεζόμετρα δονούμενης χορδής (τύπου διαφράγματος).

Για τον έλεγχο των υδατικών πιέσεων στη διεπιφάνεια των στρώσεων V-VI τοποθετήθηκε δίκτυο πιεζομέτρων δονούμενης χορδής σε κρίσιμες θέσεις κατά μήκος του σταθμού. Οι μετρήσεις των πιέσεων έγινε σε δύο καθ' ύψος θέσεις 0.5m-1m άνω και κάτω από της διαπιστωμένη διεπιφάνεια των στρώσεων V και VI (Upper:-37,6m και Lower:-39,6m).

5.2.1 Πιεζόμετρα Κατακόρυφου Σωλήνα (Ανοικτού Τύπου)

Αυτή η κατηγορία πιεζομέτρων αποτελείται από μια κοιλότητα/φίλτρο, η οποία συνδέεται με ένα σωλήνα που εξέρχεται από το έδαφος. Με την αύξηση ή μείωση της πίεσης του νερού των πόρων αντίστοιχα η στάθμη του νερού στον σωλήνα παρουσιάζει ανύψωση ή πτώση. Η πίεση πόρων του νερού στο έδαφος, αντιστοιχεί στο ύψος του νερού πάνω από το ακραίο τμήμα του οργάνου. (εικόνα 5.2)

Για αυτού του είδους τα πιεζόμετρα απαιτείται η στεγάνωση του πορώδους στοιχείου, έτσι ώστε το όργανο να μπορεί να ανταποκριθεί σε μεταβολές πίεσης γύρω από το φίλτρο και όχι σε μεταβολές πίεσης σε άλλα βάθη.

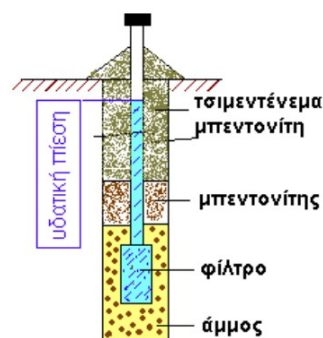
Τα πιεζόμετρα ανοικτού τύπου αποτελούν τον πλέον αξιόπιστο τύπο πιεζομέτρου που επιλέγονται, μιας και λειτουργούν αποτελεσματικά μακροπρόθεσμα, έχουν χαμηλό κόστος και έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν και για τη μέτρηση της διαπερατότητας του εδάφους.

Ωστόσο, κάποια από τα αρνητικά χαρακτηριστικά τους είναι ότι απαιτείται μεγάλος χρόνος για να εξισορροπηθεί η πίεση, το πορώδες υλικό δύναται να αποφραχθεί εξαιτίας της ποσότητας νερού, ενώ το ανώτερο τμήμα του μπορεί να υποστεί κάποια φθορά ή και βλάβη κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου. [7]

Τα πιεζόμετρα εγκαθίστανται είτε μέσα σε γεωτρήσεις είτε με έμπηξη στο έδαφος. Στην αρχή ετοιμάζεται και καθαρίζεται η γεώτρηση, ενώ τοποθετείται το φίλτρο στο ακραίο τμήμα του σωλήνα και υποβιβάζεται στη βάση της γεώτρησης. Στη συνέχεια, τοποθετείται η στρώση άμμου γύρω από το ακραίο τμήμα του οργάνου και έπειτα η στεγανωτική στρώση από τον μπεντονίτη. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια όλων αυτών των σταδίων γίνεται πάντα μετρήσεις του βάθους, ώστε να ελέγχονται οι στάθμες των διαφόρων υλικών. Τέλος, ο σωλήνας αποκόπτεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και περιβάλλεται με ένεμα και καλύπτεται με ειδικό κάλυπτρο για προστασία. [7]

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα πιεζόμετρα ανοικτού τύπου χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της μεταβολής της στάθμης του υπόγειου ύδατος. Εκείνα που θα ληφθούν υπόψη στην παρούσα εργασία είναι τα παρακάτω (πίνακας 5.1).

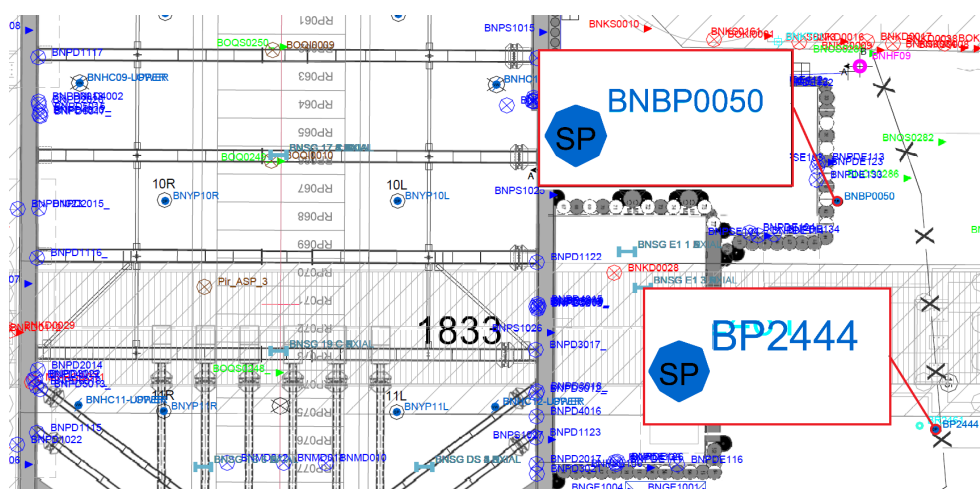
Κατά την κατασκευή του έργου και περίξ του κτηρίου του ΗΣΑΠ έγινε τοποθέτηση



Εικόνα 5.2: Πιεζόμετρο ανοικτού τύπου (Γεωργιάννου, 2000)

Πίνακας 5.1: Πιεζόμετρα ανοικτού τύπου

Κωδικός Οργάνου	Τύπος Οργάνου	Θέση Τοποθέτησης
BNBP0067-A1	Πιεζόμετρο Ανοικτού Τύπου	Εντός Γεώτρησης
BNBP0067-A2	Πιεζόμετρο Ανοικτού Τύπου	Εντός Γεώτρησης
BNBP0067-A3	Πιεζόμετρο Ανοικτού Τύπου	Εντός Γεώτρησης
BNBP0049	Πιεζόμετρο Ανοικτού Τύπου	Εντός Γεώτρησης
BNBP0050	Πιεζόμετρο Ανοικτού Τύπου	Εντός Γεώτρησης
BP2444	Πιεζόμετρο Ανοικτού Τύπου	Εντός Γεώτρησης



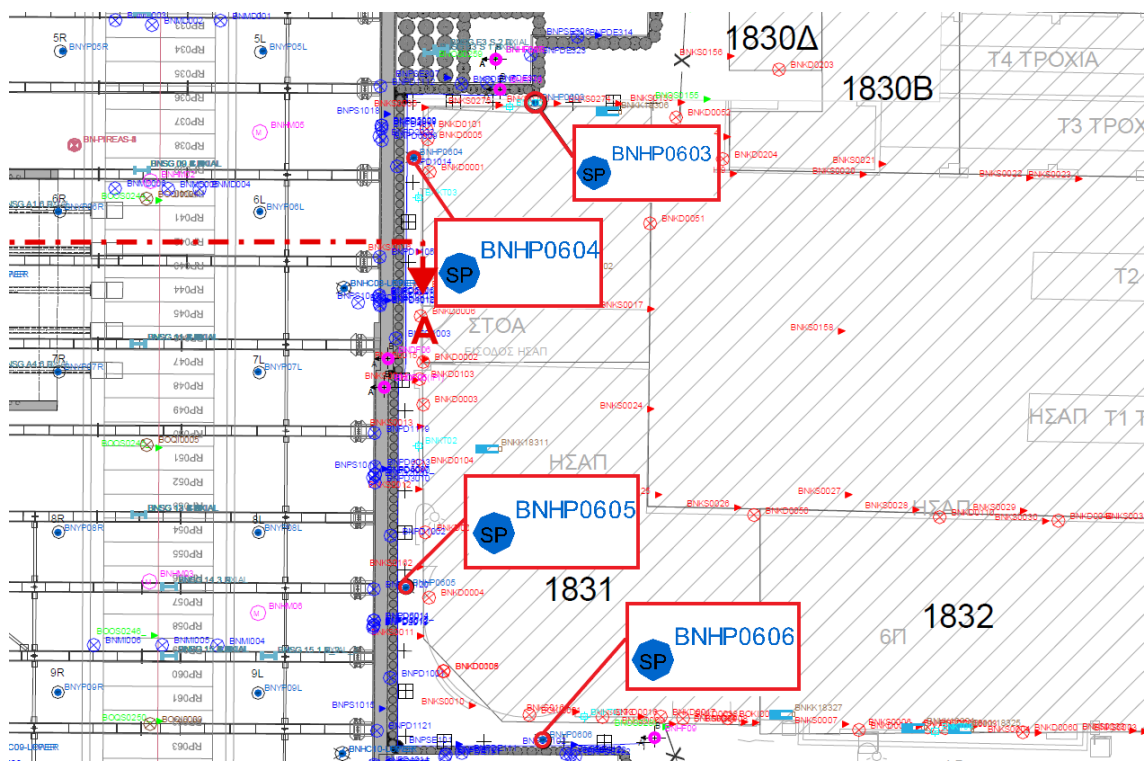
Εικόνα 5.3: Θέσεις πιεζομέτρων παρακολούθησης μεταβολής στάθμης υπόγειου ύδατος

τεσσάρων πιεζομέτρων ανοικτού τύπου για τον έλεγχο του συστήματος ανατροφοδοσίας του υδροφόρου ορίζοντα.

Πίνακας 5.2: Πιεζόμετρα ανοικτού τύπου ελέγχου ανατροφοδοσίας

Κωδικός Οργάνου	Τύπος Οργάνου	Θέση Τοποθέτησης
BNHP0603	Πιεζόμετρο Ανοικτού Τύπου	Εντός Γεώτρησης
BNHP0604	Πιεζόμετρο Ανοικτού Τύπου	Εντός Γεώτρησης
BNHP0605	Πιεζόμετρο Ανοικτού Τύπου	Εντός Γεώτρησης
BNHP0606	Πιεζόμετρο Ανοικτού Τύπου	Εντός Γεώτρησης

Οι θέσεις των πιεζομέτρων για τον έλεγχο του συστήματος ανατροφοδοσίας του υδροφόρου ορίζοντα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



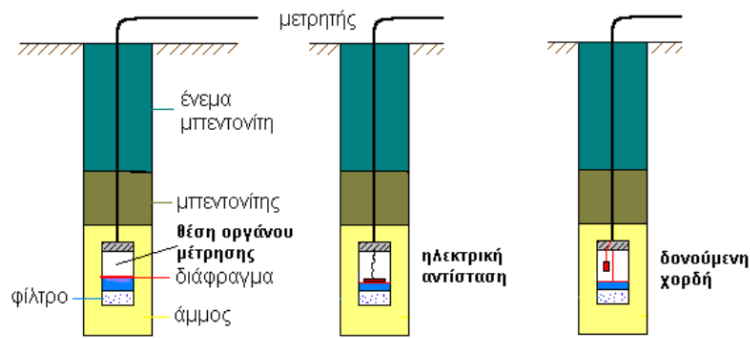
Εικόνα 5.4: Θέσεις πιεζομέτρων ελέγχου συστήματος ανατροφοδοσίας του υδροφόρου ορίζοντα

5.2.2 Πιεζόμετρα Τύπου Διαφράγματος (Δονούμενης Χορδής)

Τα πιεζόμετρα αυτής της κατηγορίας έχουν ως αρχή λειτουργίας την ύπαρξη ενός ευλύγιστου διαφράγματος, το οποίο έρχεται σε επαφή με το νερό του εδάφους. Η συνοδεία φίλτρου είναι απαραίτητη προϋπόθεση κατά την εγκατάσταση του διαφράγματος, ενώ όταν ασκείται η οποιαδήποτε πίεση από το νερό στο διάφραγμα, αυτό μεταβάλλεται και μετακινείται αναλόγως. Στην άλλη επιφάνεια του διαφράγματος τοποθετούνται διάφορα όργανα μέτρησης, τα οποία μπορούν να μετρήσουν είτε την πίεση του νερού είτε τη μετακίνηση του διαφράγματος, η οποία με κατάλληλες βαθμονομήσεις μετατρέπεται σε πίεση [7]. Τα πιεζόμετρα τύπου διαφράγματος, αναλόγως με τον τρόπο που μετρούν την πίεση του νερού, διακρίνονται σε (εικόνα 5.5):

- Πεπιεσμένου αέρα
- Δονούμενης χορδής
- Ηλεκτρικής αντίστασης

Στην περίπτωση του σταθμού του Πειραιά χρησιμοποιήθηκαν μόνο διαφράγματα δονούμενης χορδής από αυτή τη κατηγορία. Αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της πίεσης του νερού σε συγκεκριμένα βάθη. Τα πιεζόμετρα δονούμενης χορδής αποτελούνται από



Εικόνα 5.5: Πιεζόμετρα Τύπου Διαφράγματος (Γεωργιάννου, 2000)

ένα τεντωμένο χαλύβδινο σύρμα, το ένα άκρο του οποίου είναι αγκυρωμένο, ενώ το άλλο άκρο είναι συνδεδεμένο στο διάφραγμα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ελεύθερη ταλάντωση της χορδής σε συνθήκες ιδιοσυχνότητας.

Η συχνότητα της δόνησης μεταβάλλεται αναλόγως το βαθμός της έντασης της χορδής και επομένως λόγω μικρών σχετικών μετατοπίσεων στα δύο άκρα της. Με αυτή την αρχή λειτουργίας της, η διάταξη χρησιμοποιείται ως μετρητής παραμορφώσεων με την καταγραφή της συχνότητας ταλάντωσης [7].

Η ταλάντωση προκαλεί ηλεκτρικό σήμα, που μεταφέρεται στον μετρητή και εν τέλει μετατρέπεται σε μονάδες πίεσης. Επομένως, μόλις υπάρξει η οποιαδήποτε αλλαγή στην πίεση του νερού των πόρων, αυτή η αλλαγή μεταφέρεται στην τάση της χορδής [7].

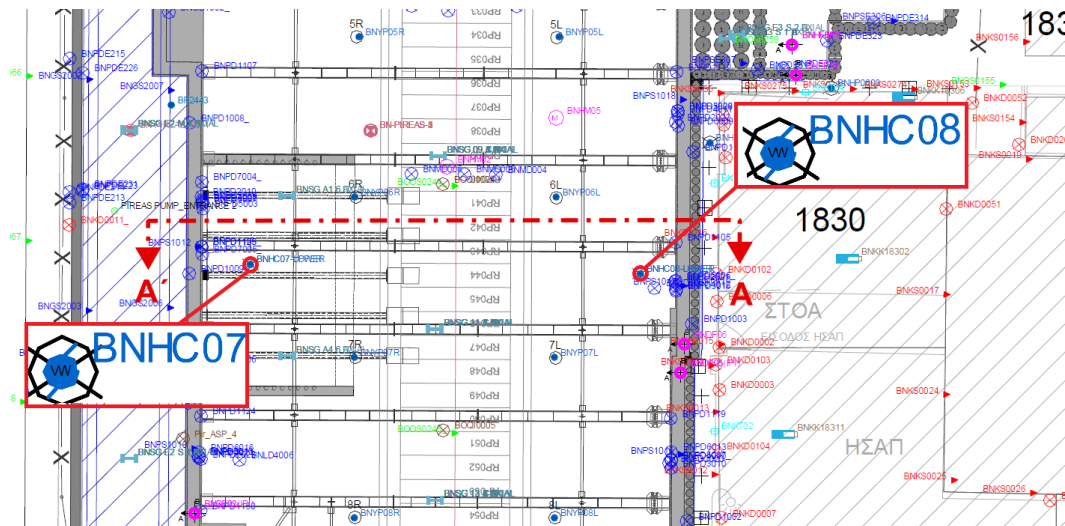
Το σύρμα της δονούμενης χορδής είναι επιρρεπές στη διάβρωση, επομένως, επιβάλλεται να είναι τοποθετημένο σε χώρο με ξηρές συνθήκες και στεγανό. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτού του είδους των πιεζομέτρων είναι ότι επιτρέπουν τις μετρήσεις να γίνονται μακριά από τον χώρο των εργασιών. Απαιτείται μικρός χρόνος απόκρισης, ενώ η διαδικασία αυτοματοποιείται σχετικά εύκολα [7].

Στην προκειμένη περίπτωση θα γίνει χρήση των δεδομένων από πιεζόμετρα δονούμενης χορδής που βρίσκονται εκατέρωθεν του σκάμματος του σταθμού, δηλαδή το ένα θα βρίσκεται από την ανατολική πλευρά (κτήριο ΗΣΑΠ), ενώ το άλλο από την δυτική πλευρά (λιμάνι Πειραιά). Τα πιεζόμετρα, λοιπόν, που θα ληφθούν υπόψη είναι τα παρακάτω (πίνακας 5.3):

Πίνακας 5.3: Πιεζόμετρα δονούμενης χορδής

Κωδικός Οργάνου	Τύπος Οργάνου	Θέση Τοποθέτησης
BNHC07 (UPPER & LOWER)	Πιεζόμετρο Δονούμενης Χορδής	Εντός Γεώτρησης
BNHC08 (UPPER & LOWER)	Πιεζόμετρο Δονούμενης Χορδής	Εντός Γεώτρησης

Η θέση αυτών των πιεζομέτρων, συναρτήσει και των υπολοίπων οργάνων παρακολούθησης αποτυπώνεται παρακάτω (εικόνα 5.6).



Εικόνα 5.6: Θέσεις πιεζομέτρων δονούμενης χορδής

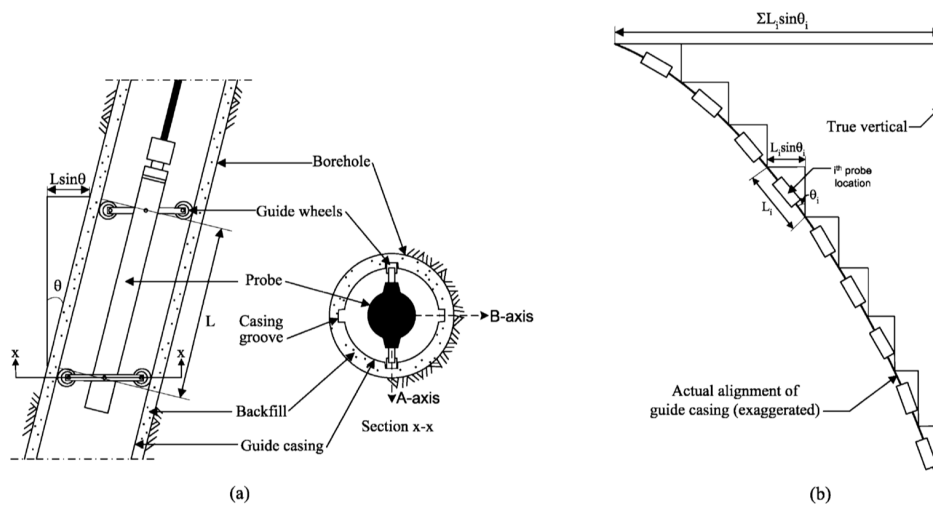
5.3 Αποκλισιόμετρα

Τα αποκλισιόμετρα είναι όργανα, τα οποία μετρούν εγκάρσιες μετατοπίσεις μέσω ενός ανιχνευτή, που έχει προωθηθεί εντός του κατακόρυφου σωλήνα. Ο ανιχνευτής αποτελείται από έναν αισθητήρα βαρύτητας, με την τάση του εξερχόμενου ρεύματος στον ανιχνευτή να μεταβάλλεται αναλόγως την κλίση που έχει ο αισθητήρας από την κατακόρυφο. Η κλίση από την κατακόρυφο μετατρέπεται σε απόσταση από την κατακόρυφο για συγκεκριμένο μήκος, ενώ ο σωλήνας που διέρχεται ο ανιχνευτής εγκαθίσταται σε γεώτρηση, όπως στην προκειμένη περίπτωση (εικόνα 5.7) [7].

Στην περίπτωση του έργου, οι οριζόντιες μετατοπίσεις των διαφραγματικών τοίχων θα μετρηθούν με τη χρήση αποκλισιομέτρων, τα οποία θα τοποθετηθούν εντός αυτών, σύμφωνα με τον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Αποκλισιόμετρα εντός των Δ.Τ

Κωδικός Οργάνου	Τύπος Οργάνου	Θέση Τοποθέτησης	A/A Διαφραγματικού Τοίχου
BNDF01	Αποκλισιόμετρο	Εντός Δ.Τ	13
BNDF02	Αποκλισιόμετρο	Εντός Δ.Τ	52
BNDF03	Αποκλισιόμετρο	Εντός Δ.Τ	76
BNDF04	Αποκλισιόμετρο	Εντός Δ.Τ	109
BNDF05	Αποκλισιόμετρο	Εντός Δ.Τ	87
BNDF06	Αποκλισιόμετρο	Εντός Δ.Τ	87
BNDF07	Αποκλισιόμετρο	Εντός Δ.Τ	108



Εικόνα 5.7: α) Αρχή λειτουργίας διάταξης αποκλισομέτρου και εξοπλισμού. β) Απεικόνιση της λειτουργίας αποκλισομέτρου (Stark and Choi, 2008), [5]

Η σωλήνωση των αποκλισομέτρων εγκαθίσταται μέσα σε πλαστικό σωλήνα, ο οποίος είναι κλειστός στο κάτω άκρο του, που στηρίζεται στον κλωβό οπλισμού του Δ.Τ και ο οποίος είναι ανθεκτικός στις πιέσεις που θα αναπτυχθούν κατά τη σκυροδέτηση. Εντός των σωληνώσεων των αποκλισομέτρων του σταθμού εγκαθίστανται αισθητήρες ανά 3m, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με συνεχείς, αδιάστατες, ανοξειδωτές ράβδους. Οι καλωδιώσεις των αισθητήρων καταλήγουν στο πλησιέστερο κουτί συλλογής μετρήσεων.

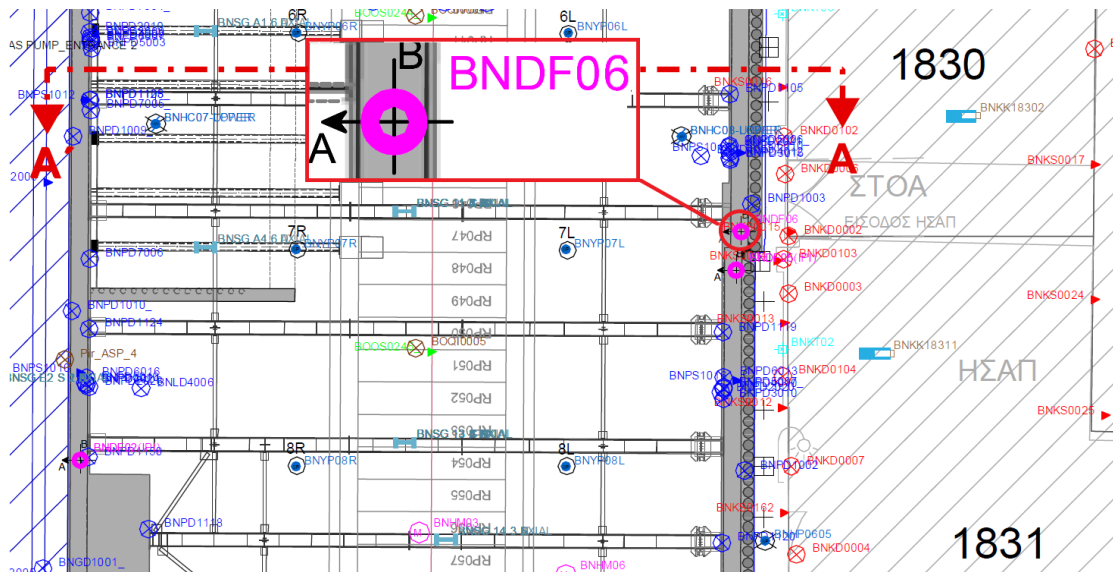
Οι οριζόντιες μετατοπίσεις σε βάθος μετρώνται με τη χρήση αποκλισομέτρων, τα οποία εγκαθίστανται μέσα σε κατακόρυφες γεωτρήσεις. Οι μετρήσεις λαμβάνονται κάθε 0.5m με χρήση ηλεκτρονικής βολίδας, η οποία εισέρχεται εντός των σωληνώσεων. Η διακριτή ικανότητα των οργάνων είναι κατά μέγιστο $\pm 0.02\text{mm}$ και η ακρίβεια του συστήματος μέτρησης είναι κατά μέγιστο $\pm 6\text{mm}$ στα 25m μήκος.

Η αποκλισομετρική βολίδα με τροχούς αποτελείται από ένα σύστημα εκκρεμούς με δύο ηλεκτρικά μηχανοσκόμια ακριβείας για την μέτρηση των αποκλίσεων από την κατακόρυφο. Τα μηχανοσκόμια είναι κάθετα μεταξύ τους σε 2 άξονες, με τον άξονα Α να είναι παράλληλος στην διεύθυνση μετακίνησης, ενώ ο άξονας Β να είναι κάθετος σε αυτήν.

Στην παρούσα διπλωματική θα γίνει χρήση των δεδομένων από το αποκλισομέτρο με αριθμό BNDF06, το οποίο βρίσκεται στην θέση της διατομής που εξετάζεται και είναι πλησίον του κτηρίου του ΗΣΑΠ (εικόνα 5.8).

Από την παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι οι διευθύνσεις των ημιαξόνων που ορίζονται είναι:

- Α+ προς την εκσκαφή και κάθετος στην σήραγγα του μετρό
- Α- προς το κτήριο ΗΣΑΠ και κάθετος στην σήραγγα του μετρό



Εικόνα 5.8: Θέση αποκλισιομέτρου

- B+ παράλληλος προς την σήραγγα με φορά προς τον Βορρά
- B- παράλληλος προς την σήραγγα με φορά προς τον Νότο

5.4 Σύστημα Χωροσταθμικών Μετρήσεων

Η μέτρηση των κατακόρυφων μετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους (ελεύθερο πεδίο, οδοί πεζοδρόμια, δίκτυα ΟΚΩ κλπ) επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση δικτύου χωροσταθμικών ακίδων σε κάναβο πυκνότητας 10x10m που θα καλύπτει τη ζώνη επιρροής του σταθμού.

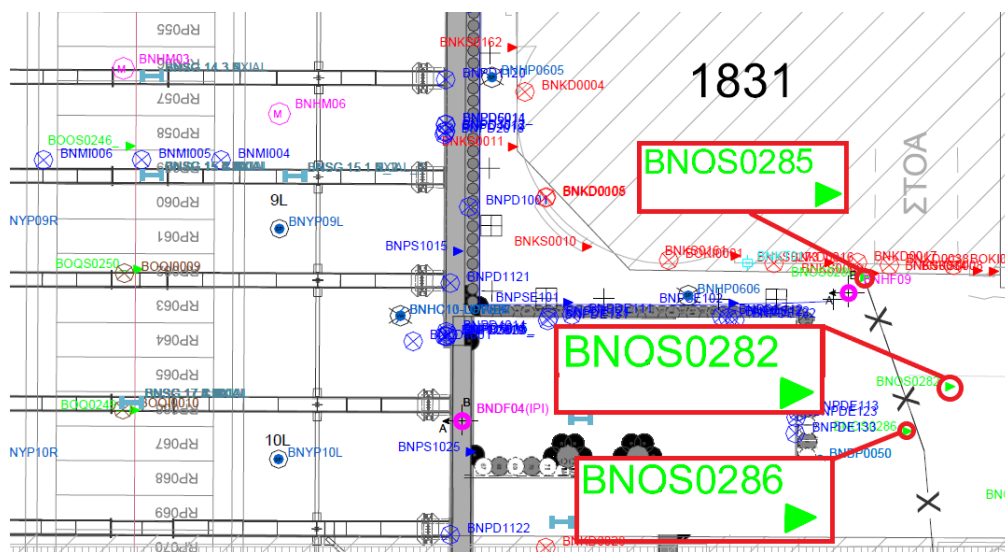
Οι χωροσταθμικές ακίδες τοποθετήθηκαν σε κάθε πλάκα έδρασης γερανού για την παρακολούθηση των μετακινήσεων, όπως επίσης και επί του κεφαλόδεσμου των διαφραγματικών τοίχων με μέση απόσταση τα 10m. Επίσης, έγινε πρόβλεψη εγκατάστασης χωροσταθμικών ακίδων στα υποστυλώματα των κτηρίων που βρίσκονται εντός της ζώνης επιρροής καθώς και στη θεμελίωση της πεζογέφυρας ΟΛΠ.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι χωροσταθμικές ακίδες που τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια της πλατείας έμπροσθεν του κτηρίου ΗΣΑΠ και δίπλα στο όρυγμα του σταθμού.

Πίνακας 5.5: Χωροσταθμικές ακίδες επιφανείας

Κωδικός Οργάνου	Τύπος Οργάνου	Θέση Τοποθέτησης
BNOS0282	Χωροσταθμική Ακίδα	Ελεύθερο Πεδίο
BNOS0285	Χωροσταθμική Ακίδα	Ελεύθερο Πεδίο
BNOS0286	Χωροσταθμική Ακίδα	Ελεύθερο Πεδίο

Οι θέσεις κάποιων εξ' αυτών των χωροσταθμικών αποτυπώνονται στην εικόνα 5.9



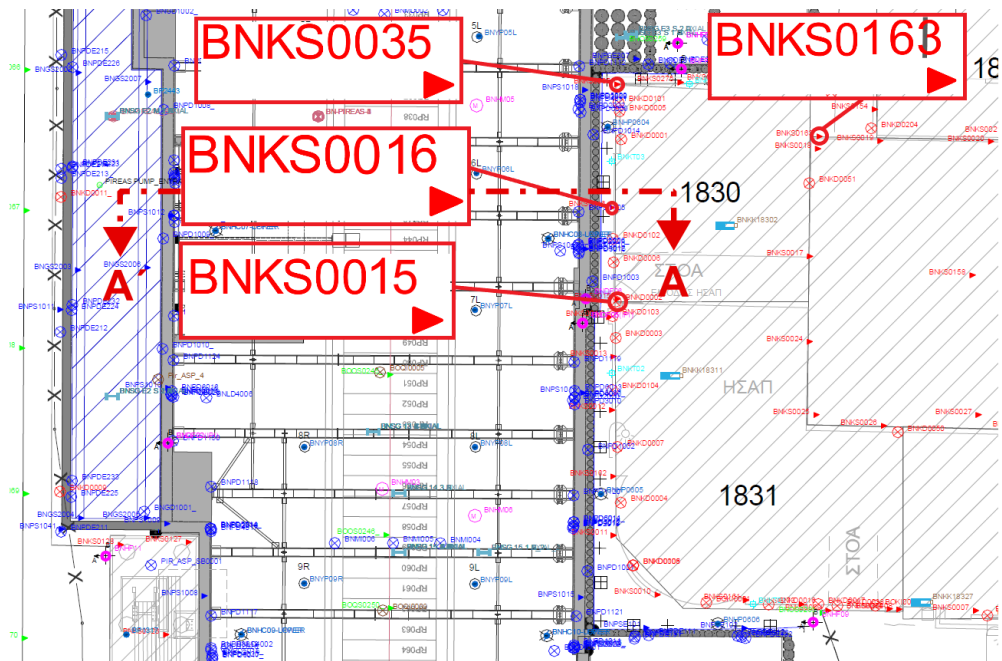
Εικόνα 5.9: Χωροσταθμικά επιφανείας

Επιπλέον, έγινε χρήση χωροσταθμικών ακίδων και έμπροσθεν του κτηρίου του ΗΣΑΠ για την μέτρηση των κατακόρυφων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, σύμφωνα με τον πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Χωροσταθμικές ακίδες κτηρίου ΗΣΑΠ

Κωδικός Οργάνου	Τύπος Οργάνου	Θέση Τοποθέτησης
BNKS0035	Χωροσταθμική Ακίδα	Κτήριο ΗΣΑΠ
BNKS0015	Χωροσταθμική Ακίδα	Κτήριο ΗΣΑΠ
BNKS0163	Χωροσταθμική Ακίδα	Κτήριο ΗΣΑΠ
BNKS0275	Χωροσταθμική Ακίδα	Κτήριο ΗΣΑΠ
BNKS0153	Χωροσταθμική Ακίδα	Κτήριο ΗΣΑΠ
BNKS0016	Χωροσταθμική Ακίδα	Κτήριο ΗΣΑΠ
BNKS0017	Χωροσταθμική Ακίδα	Κτήριο ΗΣΑΠ
BNKS0206	Χωροσταθμική Ακίδα	Κτήριο ΗΣΑΠ
BNKS0274	Χωροσταθμική Ακίδα	Κτήριο ΗΣΑΠ

Οι θέσεις μερικών από των χωροσταθμικών ακίδων που έχουν τοποθετηθεί σε πολύ κοντινή απόσταση του κτηρίου του ΗΣΑΠ φαίνεται στην εικόνα 5.10



Εικόνα 5.10: Χωροσταθμικά ΗΣΑΠ

Σε επόμενα κεφάλαια λοιπόν θα γίνει σύγκριση αλλά και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων που έγιναν με το Plaxis.

Ωστόσο, τα αποτελέσματα των καθιζήσεων αλλά και των παραμορφώσεων, που είναι και εκείνα που χρήζουν περισσότερη παρακολούθηση οφείλουν να πληρούν κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι ορίζονται από τις Προδιαγραφές Μελετών Έργων Πολιτικού Μηχανικού, οι οποίοι φαίνονται στους πίνακες 5.7 και 5.8.

Ως όριο επιφυλακής ορίζεται συνήθως από ένα εύρος τιμών, που αν παρατηρηθεί στο εργοτάξιο, τότε αυξάνεται η συχνότητα των μετρήσεων και γίνεται παρακολούθηση του έργου και επί τόπου αυτοψία για τυχόν ρωγματώσεις στα μέτρα υποστήριξης ή εμφανείς αστοχίες και λαμβάνονται τα απαραίτητα έργα υποστήριξης. Το όριο συναγερμού, από την άλλη, ορίζεται από μια κατώτατη τιμή, που αν ξεπεραστεί διακόπτονται άμεσα οι εργασίες και εφαρμόζονται μέτρα έκτακτης ανάγκης.

Πίνακας 5.7: Όρια επιφυλακής και συναγερμού παραμορφώσεων ελεύθερου πεδίου σύμφωνα με την παράγραφο 13.2.4.2 των ΠΜΕΠΜ

Παράμετρος	Όριο Επιφυλακής	Όριο Συναγερμού
Συνολική κατακόρυφη μετακίνηση (mm)	22	30
Γωνιακή Παραμόρφωση	1:650	1:500
Ρυθμός Μεταβολής ολικής καθίζησης (mm/day)	3	4

Πίνακας 5.8: Όρια επιφυλακής και συναγερμού σύμφωνα με την Μελέτη Προσωρινής Αντιστήριξης

	Τιμές Μελέτης	Προδιαγραφές Έργων Πολιτικού Μηχανικού, Πίνακες 13.1 & 13.2	
		Όρια Επιφυλακής	Όρια Συναγερμού
Γωνιακή Παραμόρφωση	1:1242	1:650	1:500
Οριζόντια Παραμόρφωση	0,09%	0,1%	0,15%
Ρυθμός Μεταβολής Ολικής Καθίζησης	-	Κατασκευές: 2 mm/day Ελεύθερο Πεδίο, οδοί: 3 mm/day	Κτήρια- Κατασκευές: 3 mm/day Ελεύθερο Πεδίο, οδοί: 4 mm/day
Ρυθμός Μεταβολής Ανοίγματος Ρωγμής	-	Κτήρια-Κατασκευές: 0,5 mm/day	Κτήρια-Κατασκευές: 1 mm/day

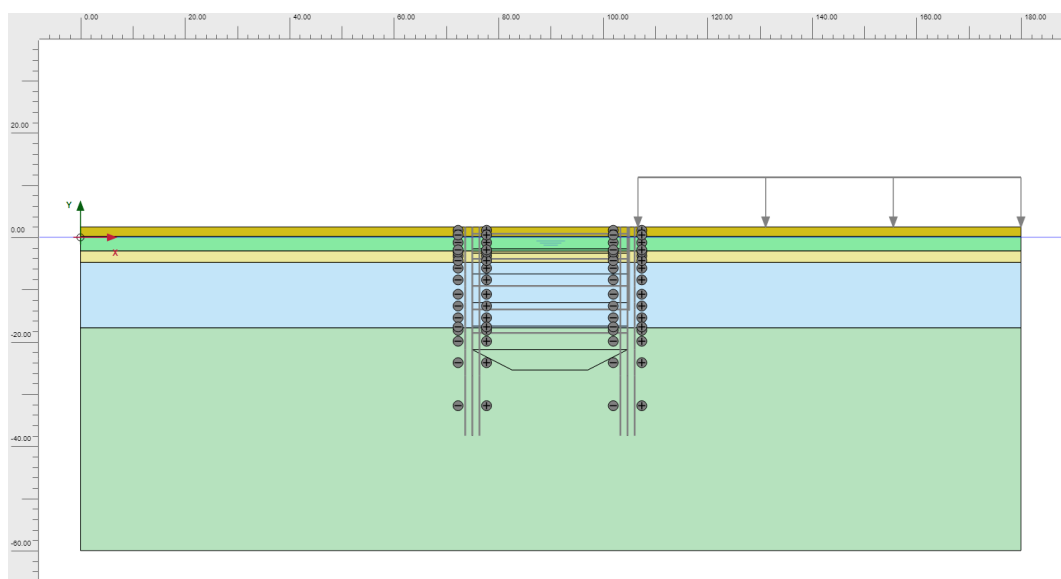
6 Αριθμητική ανάλυση

Στο παρόν κεφάλαιο θα διερευνηθεί η συμπεριφορά της βαθιάς εκσκαφής σε πρωταρχικό στάδιο, καθώς και η πιθανή αλλαγή όλων εκείνων των παραμέτρων, έτσι ώστε να μπορέσουν τα τελικά αποτελέσματα να ταυτίζονται στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό με τα όργανα παρακολούθησης.

6.1 Γεωμετρία Εκσκαφής

Το όρυγμα του σταθμού έχει διαστάσεις 120x30m, ενώ η εξεταζόμενη τομή A-A' φτάνει σε βάθος τα -25,4m. Για εκσκαφές που ισχύει $L/B < 4$ η δισδιάστατη προσομοίωση αποδεικνύεται υπερσυντηρητική, ειδικά όσο μειώνεται ο λόγος αυτός, αφού βασίζεται στην παραδοχή της απειρομήκου εκσκαφής. Ο λόγος μήκους προς πλάτους του σταθμού είναι $L/B=4$, δηλαδή βρίσκεται στο όριο, επομένως ενδέχεται να οδηγήσει σε δυσμενέστερα αποτελέσματα σχετικά με τις καθιζήσεις [4], τις πλευρικές μετακινήσεις, τα εντατικά μεγέθη του διαφραγματικού τοίχου, αλλά και την ανύψωση του πυθμένα.

Τα πλευρικά σύνολα του μοντέλου λαμβάνονται σε απόσταση 74m που βρίσκεται εντός του ορίου 2,5-3·H, όπου H το βάθος της εκσκαφής. Το βάθος του μοντέλου λαμβάνεται σε απόσταση τουλάχιστον 1,5·B, όπου B το πλάτος της εκσκαφής, ήτοι 30m. Έτσι, το συνολικό πλάτος του μοντέλου είναι 180m, ενώ το βάθος είναι 60m [3].

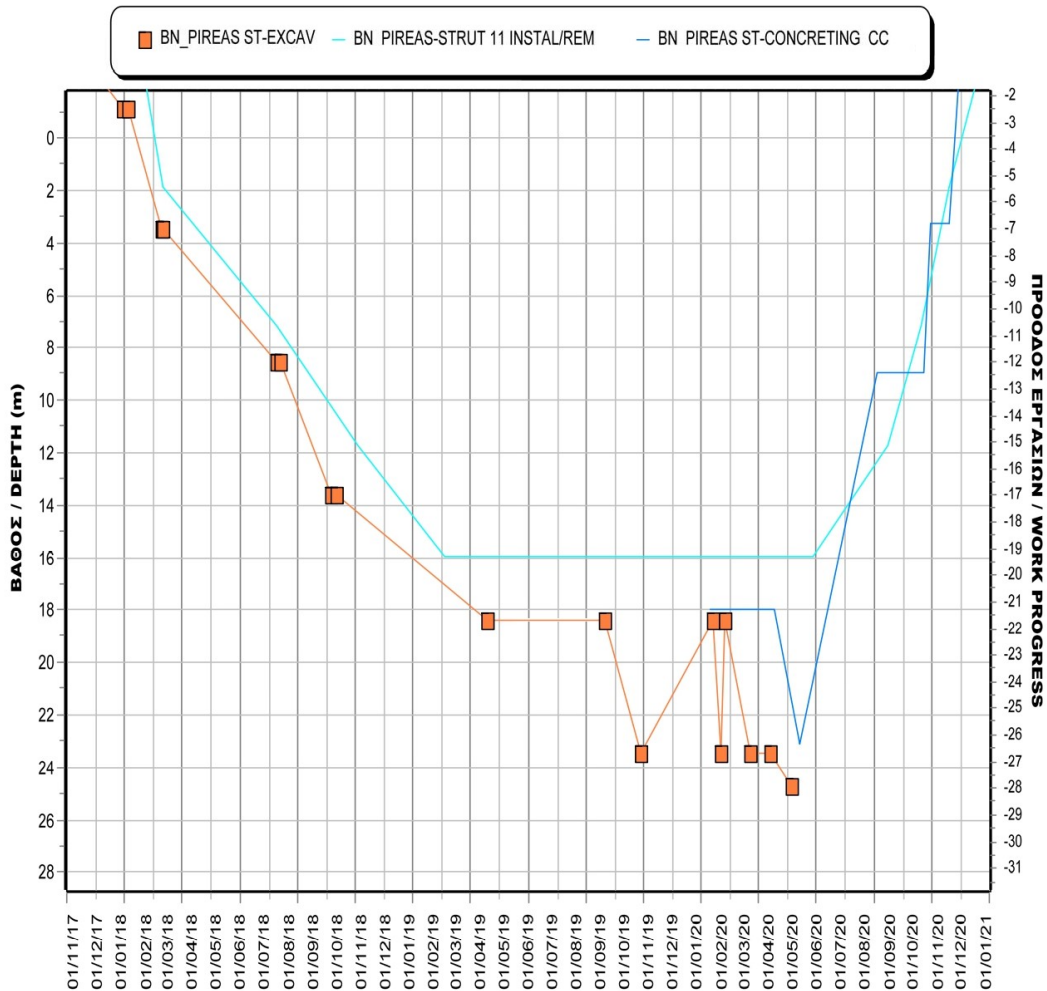


Εικόνα 6.1: Διαστάσεις προσομοιώματος αριθμητικής ανάλυσης

6.2 Στάδια Εκσκαφής

Σύμφωνα με τα στοιχεία από τα όργανα μέτρησης, μπορούν να γίνουν αντιληπτά τα βάθη εκσκαφής και η χρονική διάρκεια που απαιτήθηκε για να εκσκαφεί το κάθε στάδιο. Στην εικόνα

6.2 φαίνονται οι καμπύλες των σταδίων εκσκαφής και εγκατάστασης των αντηρίδων για τον σταθμό του Πειραιά, καθώς και οι διάφορες ημερομηνίες σταθμοί. Τα συγκεντρωτικά δεδομένα που μπορούν να εξαχθούν από αυτό το διάγραμμα αποτυπώνονται στον πίνακα 6.1.



Εικόνα 6.2: Στάδια εκσκαφής και εγκατάστασης των αντηρίδων σύμφωνα με τα όργανα μέτρησης

Γίνεται αντιληπτό ότι η συνολική διάρκεια εκσκαφής του σταθμού διήρκησε περίπου 2 έτη, που οφείλεται στο ότι η εκσκαφή έγινε τμηματικά καθ' όλο το μήκος του σταθμού.

Η καμπύλη που αποτυπώνει την εγκατάσταση των αντηρίδων φαίνεται ότι ακολουθεί χρονικά την καμπύλη εκσκαφής του σταθμού με μικρή χρονική διάρκεια. Αυτό είναι λογικό, αφού μετά την εκσκαφή ενός τμήματος μέχρι ένα συγκεκριμένο βάθος, ακολουθούσε η εγκατάσταση των αντηρίδων.

Η καμπύλη της σκυροδέτησης φαίνεται ότι ξεκινάει στο σημείο που έχει τελειώσει η εκσκαφή μέχρι την κατώτατη στάθμη, δηλαδή τα -26,5m. Όσο συνεχίζεται η σκυροδέτηση,

φαίνεται ότι αφαιρούνται σταδιακά οι αντηρίδες στα αντίστοιχα ύψη, αφού τα φορτία πλέον τα αναλαμβάνει η μόνιμη κατασκευή.

Πίνακας 6.1: Στάδια εκσκαφής και ημερομηνίες σταθμοί κατά τη διάρκεια εργασιών του σταθμού Πειραιά

Ημερομηνίες	Διάρκεια Εργασιών	Περιγραφή Εργασιών
20/02/2016-14/07/2017	1,5 έτος	Εγκατάσταση Πασσάλων (Ø50/0,545m) και Δ.Τ
11/11/2017-10/01/2018	60 μέρες (5,184 · 10 ⁶ sec)	Εκσκαφή έως τα -3m
10/01/2018-11/03/2018	60 μέρες (5,184 · 10 ⁶ sec)	Εκσκαφή έως τα -7m
11/03/2018-08/08/2018	150 μέρες (12,96 · 10 ⁶ sec)	Εκσκαφή έως τα -12,5m
08/08/2018-07/10/2018	60 μέρες (5,184 · 10 ⁶ sec)	Εκσκαφή έως τα -17m
07/10/2018-20/04/2019	195 μέρες (16,85 · 10 ⁶ sec)	Εκσκαφή έως τα -21,5m
15/09/2019-01/11/2019	47 μέρες (4,06 · 10 ⁶ sec)	Εκσκαφή έως τα -25,4m

6.3 Σύστημα Αντιστήριξης

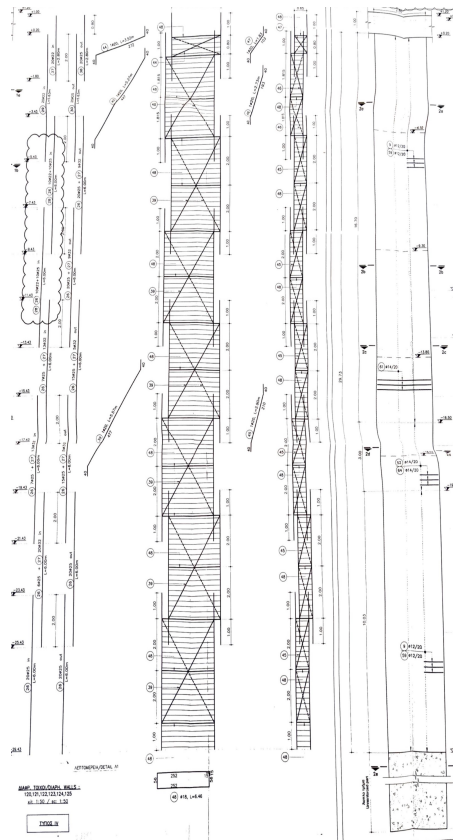
Οι Δ.Τ στον σταθμό “Πειραιά” έχουν συνολικό μήκος 38 m και πλάτος 0,8 m. Τα πρώτα 29,50 m του διαφραγματικού τοίχου είναι οπλισμένα, ενώ τα τελευταία 8,5 m είναι άοπλα, λειτουργώντας ως εμπόδιο στη διαδρομή του νερού με στόχο την αύξηση της διαδρομής του.

Συγκεκριμένα, οι Δ.Τ κατασκευάζονται από σκυρόδεμα ποιότητας C35/45, έχοντας E=34 GPa. Στα πλαίσια της προσομοίωσης λαμβάνεται υπόψη μια απομείωση του μέτρου ελαστικότητας, λόγω της πιθανής ρωγμάτωσής του κατά 25%, επομένως λαμβάνεται ίσο με E=25 GPa. Επομένως, η αξονική δυσκαμψία είναι $E \cdot A = 20 \cdot 10^6 \text{ kN/m}$, ενώ η καμπτική δυσκαμψία είναι $E \cdot I = 1,066 \cdot 10^6 \text{ kNm}^2/\text{m}$.

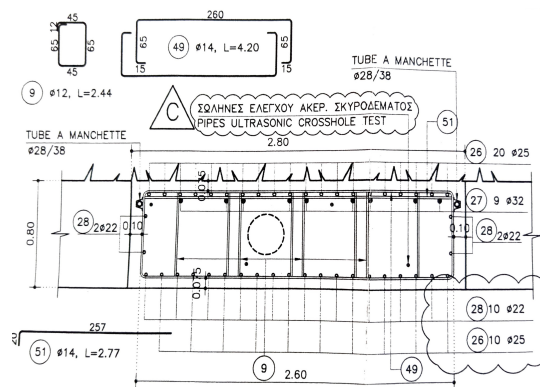
Ο χαλύβδινος οπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι κατηγορίας B500C, έχοντας όριο διαρροής $f_{yk}=500 \text{ MPa}$, ενώ το όριο θραύσης είναι $f_{uk}=575 \text{ MPa}$. Η ροπή αντοχής, λοιπόν των Δ.Τ συνυπολογίζοντας την αξονική δύναμη είναι $M_p=2000 \text{ kNm/m}$ (6.3a, 6.3b).

Πέραν των Δ.Τ που τοποθετήθηκαν, η βαθιά εκσκαφή αντιστηρίζεται σε ορισμένα σημεία και με πασσάλους. Συγκεκριμένα, έμπροσθεν του κτηρίου του ΗΣΑΠ, τοποθετήθηκαν 75 πάσσαλοι διαμέτρου Ø50cm, μεταξύ τους απόστασης 0,545m και βάθους 14m, με σκοπό την περαιτέρω προστασία του κτηρίου από οποιεσδήποτε μεταβολές. Όπως και στην περίπτωση

των Δ.Τ έτσι και στους πασσάλους, το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν κατηγορίας C35/45.



(α) Πλάγια όψη οπλισμού Δ.Τ



(β) Εγκάρσια τομή οπλισμού διαφραγματικού τοίχου

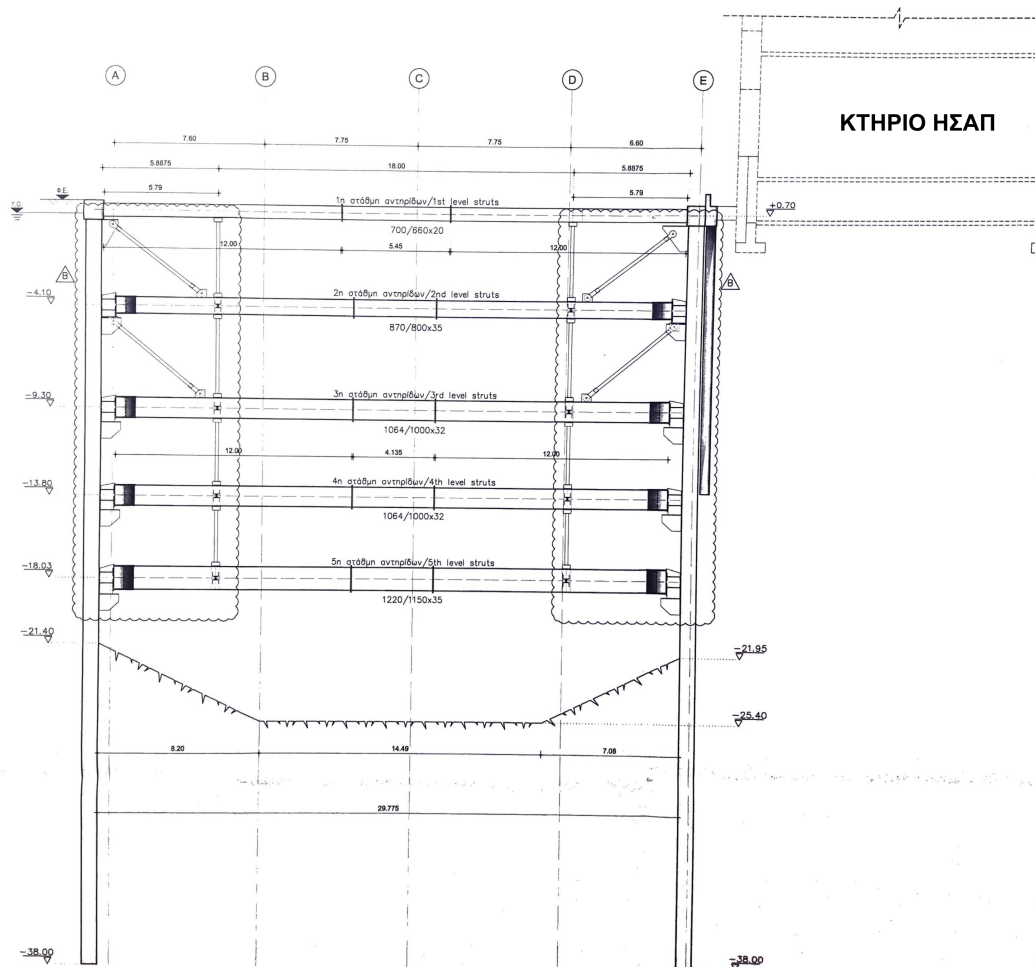
Εικόνα 6.3: Οπλισμοί Διαφραγματικών Τοίχων

Τέλος, τοποθετούνται 5 σειρές αντηρίδων μήκους 30m (όσο και το πλάτος του σταθμού), με σκοπό την αντιστήριξη του ορύγματος και τοποθετούνται μετά από κάθε στάδιο εκσκαφής, όπως αποτυπώνεται και στο διάγραμμα 6.2.

Η εκσκαφή πραγματοποιείται σε φάσεις που κυμαίνονται από 3 έως και 5m, με τις αντηρίδες να τοποθετούνται μετά από κάθε φάση εκσκαφής. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.4 οι αντηρίδες τοποθετήθηκαν στα βάθη που αποτυπώνονται στον πίνακα 6.2 και προεντάθηκαν ώστε να προσφέρουν περαιτέρω προστασία από τις ωθήσεις των γαιών που θα ασκηθούν στο διαφραγματικό τοίχο.

Πίνακας 6.2: Βάθη τοποθέτησης αντηρίδων

Σειρά Αντηρίδων	Βάθος (m)
1 ^η	0,7
2 ^η	-4,1
3 ^η	-9,3
4 ^η	-13,8
5 ^η	-18,3



Εικόνα 6.4: Τομή σχεδιασμού A-A', στην οποία αποτυπώνονται οι αντηρίδες, οι πάσσαλοι και οι διαφραγματικοί τοίχοι

Οι αντηρίδες τοποθετήθηκαν σε 5 σειρές και με μέση μεταξύ τους απόσταση 3 έως 4m , ενώ η απόσταση στην τρίτη διεύθυνση ήταν 5,4m. Η προσομοίωση τους γίνεται με τον προσδιορισμό των εξής ιδιοτήτων:

- Αξονική Δυσκαμψία ($E \cdot A$)
- Αξονική Απόσταση ($L_{spacing}$)

Η αξονική δυσκαμψία των αντηρίδων αυξάνεται όσο αυξάνεται το βάθος, αφού χρησιμοποιήθηκαν μεγαλύτερες αντηρίδες, προκειμένου να αναλάβουν τα μεγαλύτερα φορτία. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι παράμετροι σχεδιασμού των αντηρίδων:

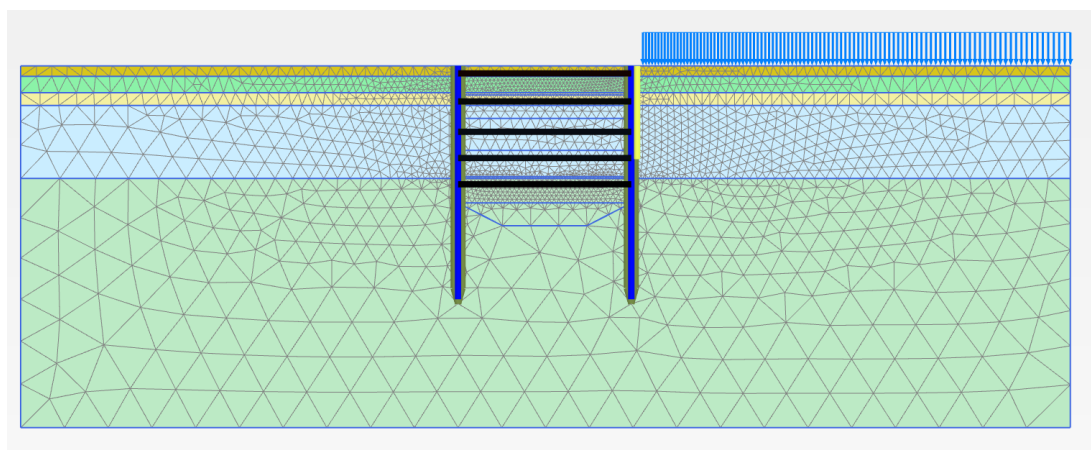
Πίνακας 6.3: Παράμετροι σχεδιασμού αντηρίδων

Σειρά Αντηρίδων	Διαστάσεις (mm)	Εμβαδό (m ²)	EA (kN)	Προένταση
1 ^η	700x660x20	0,0528	11,088·10 ⁶ kN	1500kN
2 ^η	870x800x35	0,1141	23,961·10 ⁶ kN	2080kN
3 ^η	1064x1000x32	0,1295	27,195·10 ⁶ kN	2080kN
4 ^η	1064x1000x32	0,1295	27,195·10 ⁶ kN	2080kN
5 ^η	1220x1150x35	0,1631	34,251·10 ⁶ kN	2970kN

6.4 Αριθμητική Προσομοίωση

Όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα 4.1.5 η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταυτίζεται με τη στάθμη της θάλασσας, ενώ η απόλυτη στάθμη στην επιφάνεια του εδάφους είναι +2m, με τον υδροφόρο να βρίσκεται στα +0m.

Ακολουθεί η διακριτοποίηση του καννάβου, στην οποία επιλέγεται να γίνει πολύ πυκνή η δομή του. Επίσης, επιλέγεται να γίνει περαιτέρω πύκνωση στα σημεία κοντά στα κατασκευαστικά στοιχεία και στα όρια της εκσκαφής, μιας και εκεί αναμένονται μεγαλύτερες μετακινήσεις. Τα στοιχεία μετά τη διακριτοποίηση του καννάβου είναι 5.300, ενώ οι κόμβοι 11.138.



Εικόνα 6.5: Διακριτοποιημένος κάνναβος

Προκειμένου να προσομοιωθεί όσο πιο αποτελεσματικά και ρεαλιστικά το μοντέλο, χρησιμοποιείται η πλήρως συζευγμένη ανάλυση ροής-παραμόρφωσης (fully coupled flow-deformation), όπου αποτελεί ιδανική περίπτωση όταν είναι απαραίτητο να αναλυθεί η ταυτόχρονη ανάπτυξη παραμορφώσεων και πιέσεων των πόρων σε κορεσμένα και μερικώς κορεσμένα εδάφη, ως αποτέλεσμα χρονοεξαρτώμενης μεταβολής των υδραυλικών οριακών συνθηκών.

Σε αντίθεση με την ανάλυση στερεοποίησης, η οποία επηρεάζει πρωτίστως τις υπερπίεσεις

των πόρων του νερού, η πλήρως συζευγμένη ανάλυση ροής-παραμόρφωσης λειτουργεί με βάση τις συνολικές πιέσεις πόρων, δηλαδή το άθροισμα των υπερπιέσεων και των υδροστατικών.

Έτσι λοιπόν τα στάδια κατά τον υπολογισμό της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 6.4.

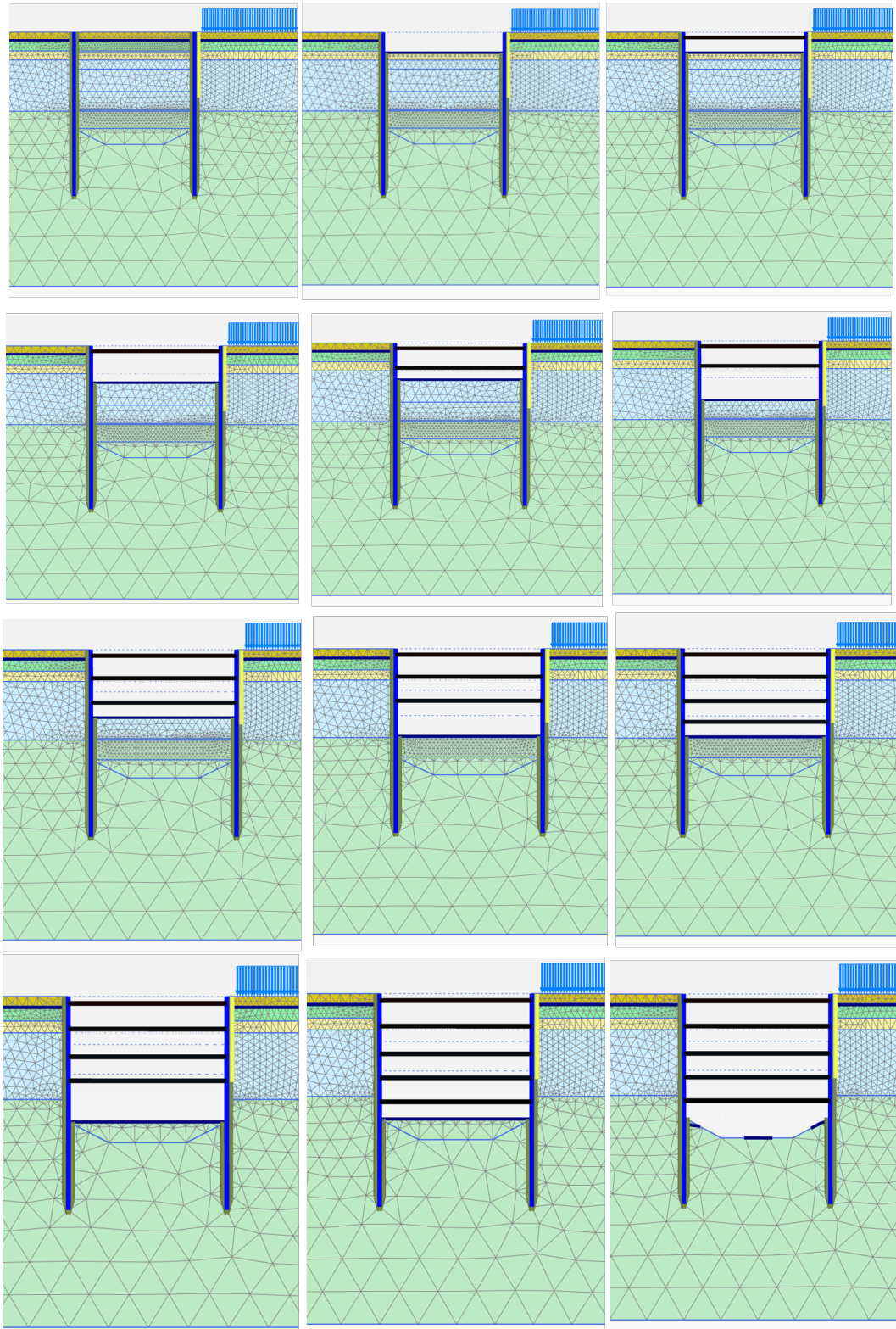
Πίνακας 6.4: Φάσεις κατά την αριθμητική προσομοίωση

Φάση Υπολογισμού	Επεξήγηση Φάσης
Αρχική Φάση	Υπολογισμός γεωστατικών τάσεων
1 ^η	Εγκατάσταση διαφραγματικών τοίχων/πασσάλων και ενεργοποίηση φορτίου λόγω του κτηρίου ΗΣΑΠ
2 ^η	Εκσκαφή έως τα -3m, σε διάρκεια 60 ημερών. Μηδενισμός των μετακινήσεων που υπολογίστηκαν από το προηγούμενο στάδιο
3 ^η	Εγκατάσταση 1ης σειράς αντηρίδων στα +0,7m και προέντασής της
4 ^η	Εκσκαφή έως τα -7m, σε διάρκεια 60 ημερών
5 ^η	Εγκατάσταση 2ης σειράς αντηρίδων στα -4,1m και προέντασής της
6 ^η	Εκσκαφή έως τα -12,5m, σε διάρκεια 150 ημερών
7 ^η	Εγκατάσταση 3ης σειράς αντηρίδων στα -9,3m και προέντασής της
8 ^η	Εκσκαφή έως τα -17m, σε διάρκεια 60 ημερών
9 ^η	Εγκατάσταση 4ης σειράς αντηρίδων στα -13,8m και προέντασής της
10 ^η	Εκσκαφή έως τα -21,5m, σε διάρκεια 195 ημερών
11 ^η	Εγκατάσταση 5ης σειράς αντηρίδων στα -18,3m και προέντασής της
12 ^η	Εκσκαφή έως τα -25,4m, σε διάρκεια 47 ημερών

Στην αρχή λοιπόν, εισάγονται όλες οι παράμετροι σχεδιασμού των εδαφικών στρώσεων σύμφωνα με τον πίνακα 4.4, αλλά και οι παράμετροι των κατασκευαστικών στοιχείων σύμφωνα με τον πίνακα 6.3. Στη συνέχεια, στην τομή Α-Α', από την εικόνα 6.2 εισήχθησαν τα στάδια εκσκαφής που λήφθηκαν υπόψη από τα όργανα μέτρησης. Η προσομοίωση του κτηρίου του ΗΣΑΠ έγινε με τη χρήση ομοιόμορφα κατανομημένου φορτίου ίσο με 40 kPa καθ' όλο το μήκος του, αφού πρόκειται για ένα τετραόροφο κτήριο και έγινε η παραδοχή ότι η πίεση που ασκεί ο κάθε όροφος είναι περίπου 10 kPa.

Όλα τα στάδια που προαναφέρθηκαν φαίνονται κατά τον υπολογισμό τους μέσω του Plaxis στην εικόνα 6.6.

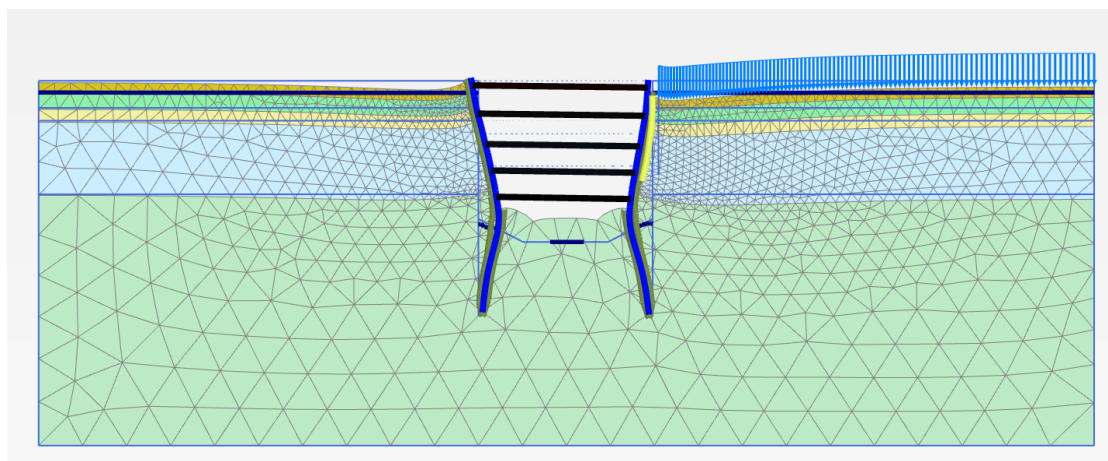
Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στην αρχική προσομοίωση θα καθορίζεται από τις διαπερατότητες των εδαφικών στρώσεων, και δε θα γίνει κάποια περαιτέρω άντληση, προκειμένου να ταπεινωθεί. Σκοπός είναι να παρουσιαστεί πώς ο υδροφόρος ορίζοντας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις μετακινήσεις στα διάφορα σημεία.



Εικόνα 6.6: Φάσεις υπολογισμού αριθμητικής προσομοίωσης

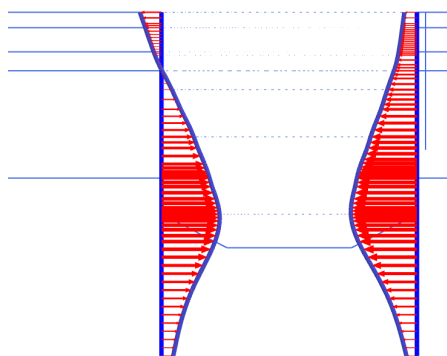
6.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Σκοπός των αποτελεσμάτων είναι να πλησιάσουν στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τις ενδείξεις των πιεζομέτρων, αποκλισιομέτρων και χωροσταθμικών που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο. Αρχικά θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ΓΤΣ-2, δίνοντας έμφαση στις οριζόντιες μετακινήσεις των διαφραγματικών τοίχων, στις καθιζήσεις στην επιφάνεια, στην ανύψωση του πυθμένα, αλλά και στην στάθμη της επιφάνειας του υδροφόρου καθώς και τον πίεσεων των πόρων του νερού σε συγκεκριμένες στάθμες.



Εικόνα 6.7: Παραμορφωμένο σχήμα του καννάβου

Στην εικόνα 6.6, τα σημεία του καννάβου που υφίστανται μετακινήσεις παρουσιάζονται υπό κλίμακα, πολλαπλάσια της πραγματικότητας, ώστε να γίνονται πιο ευδιάκριτα. Στην προκειμένη περίπτωση, το πρόγραμμα έχει πολλαπλασιάσει τις μετακινήσεις των σημείων αυτών επί 100 φορές.



Total displacements u_x (scaled up 200 times) (Time 572.0 day)

Maximum value = 0.03381 m (Element 51 at Node 1012)

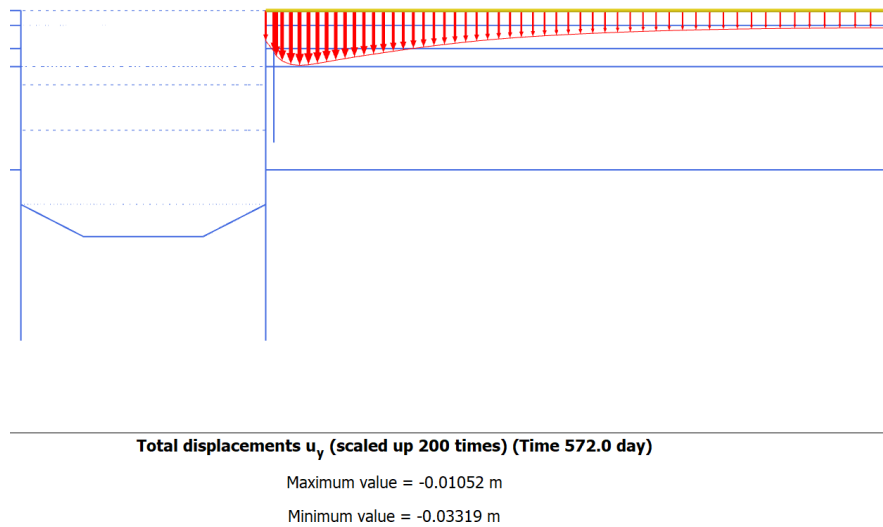
Minimum value = -0.03840 m (Element 50 at Node 5280)

Εικόνα 6.8: Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικού τοίχου

Επίσης, από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα φαίνεται ότι δεν έχει καταβιβαστεί, παρά μόνο 5cm. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαπερατότητας του στρώματος V ($k = 4 \cdot 10^{-8}$ m/s), που δυσχεραίνει την κίνηση του νερού μέσα από αυτό (6.10).

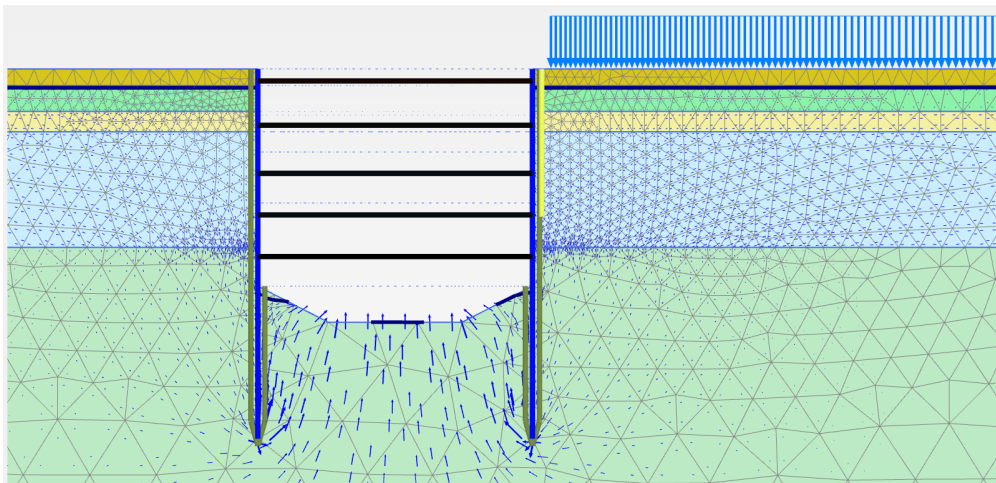
Η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους εμφανίζεται από την ανατολική πλευρά και είναι ίση με 3,37cm, ενώ από την δυτική πλευρά είναι 1,56cm (6.9).

Η μέγιστη μετακίνηση που παρουσιάζει ο ανατολικός διαφραγματικός τοίχος είναι 3,95cm, ενώ ο δυτικός Δ.Τ παρουσιάζει μέγιστη μετακίνηση 3,47cm (6.8).

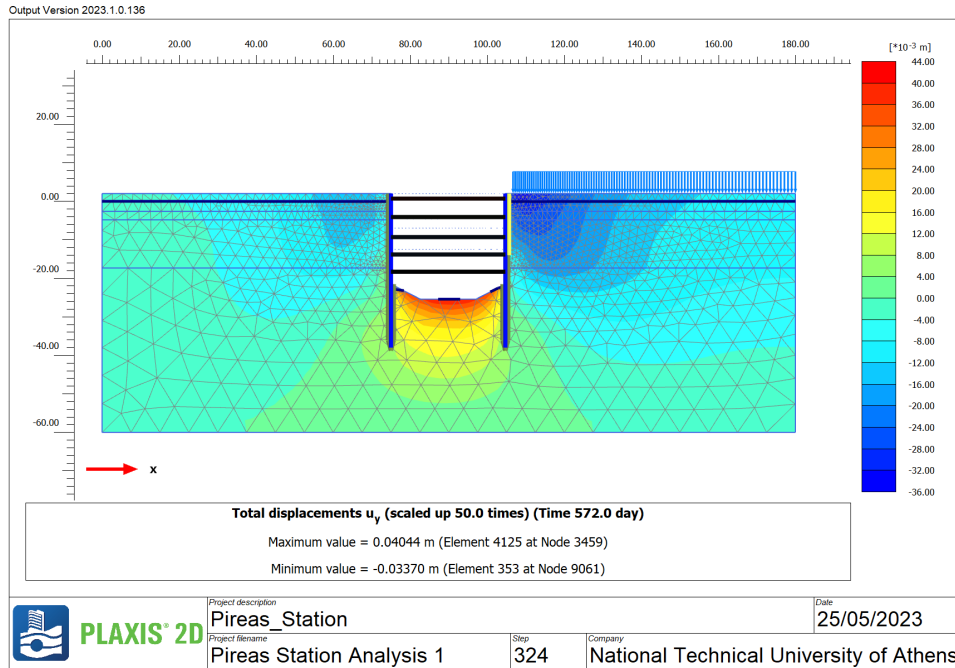


Εικόνα 6.9: Καμπύλη καθιζήσεων στην ανατολική πλευρά

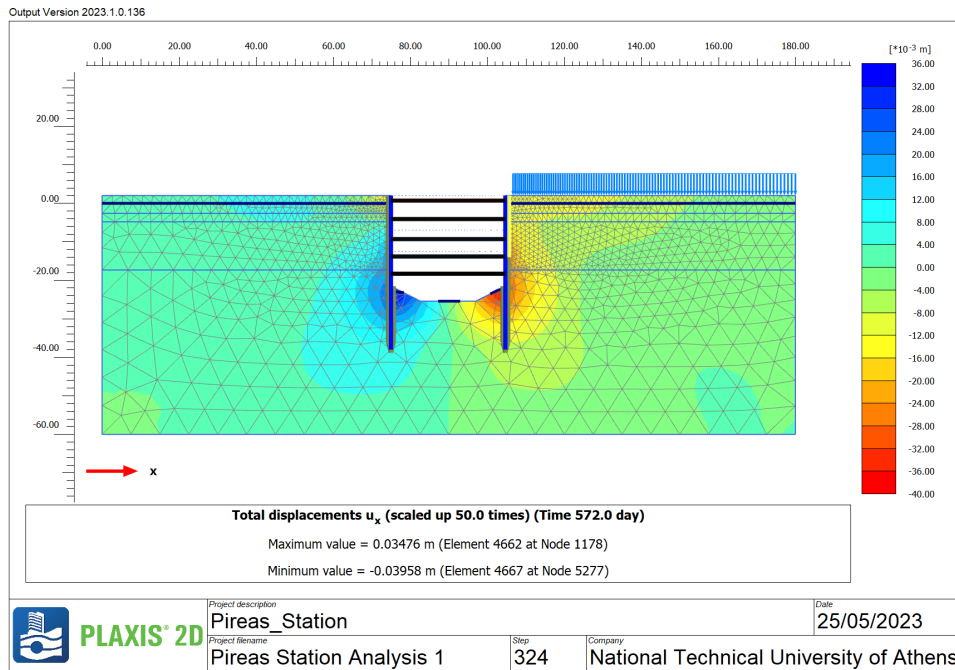
Ο πυθμένας ανυψώνεται κατά 4,0cm, ενώ οι πιέσεις των πόρων του νερού στο σημείο του πυθμένα στο βάθος των -39,6m είναι 276kPa, ενώ στο βάθος των -37,6m είναι 240 kPa.



Εικόνα 6.10: Κίνηση του υπόγειου νερού διαμέσω των εδαφικών στρώσεων



Εικόνα 6.11: Κατακόρυφες μετακινήσεις



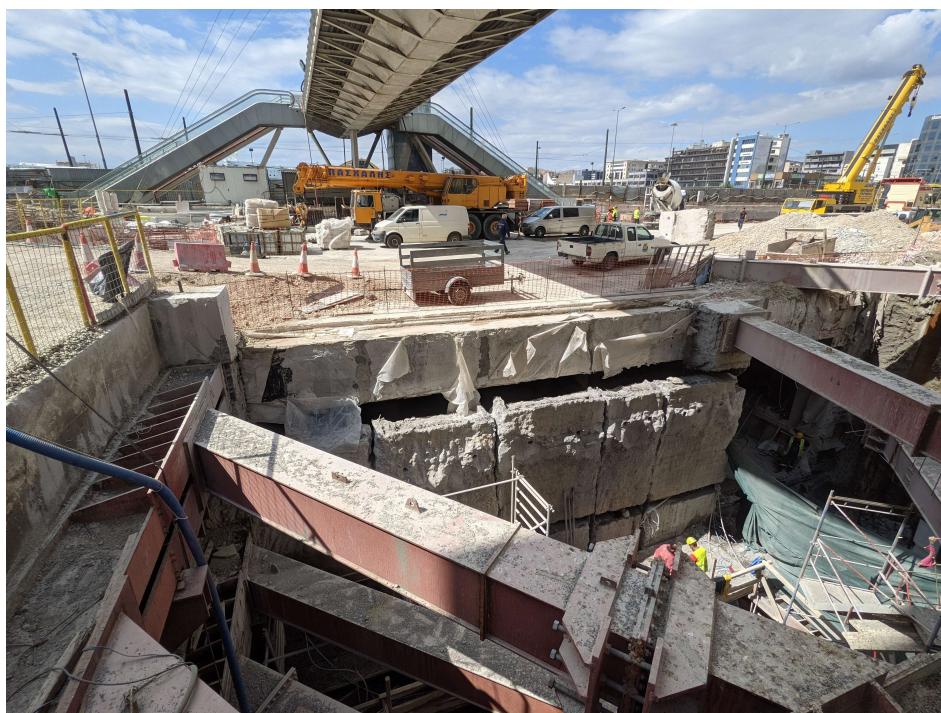
Εικόνα 6.12: Οριζόντιες μετακινήσεις

7 Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής ανάλυσης και οργάνων παρακολούθησης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ακολουθήσει περαιτέρω σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με τα αποτελέσματα των οργάνων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Συγκεκριμένα θα γίνει σύγκριση των καθιζήσεων στην επιφάνεια τόσο στην ανατολική όσο και δυτική παρειά του σταθμού, όπως επίσης και σύγκριση των οριζοντίων μετακινήσεων του διαφραγματικού τοίχου με τα αποτελέσματα των αποκλισιομέτρων που εγκαταστάθηκαν εντός αυτών. Τα πιεζόμετρα που αναφέρθηκαν στα υποκεφάλαια 5.2.1 και 5.2.2 θα χρησιμοποιηθούν προκειμένου να συγκριθούν οι πιέσεις των πόρων σε επιλεγμένα ύψη, όσο και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στην παρειά του σταθμού. Με αυτόν τον τρόπο το θα γίνει αντιληπτό εάν το προσομοίωμα του προηγούμενου κεφαλαίου προσεγγίζει τις πραγματικές συνθήκες κατά την κατασκευή του σταθμού και κατά συνέπεια τι διορθώσεις θα πρέπει να ακολουθήσουν προκειμένου να αναπαριστά την πραγματικότητα.

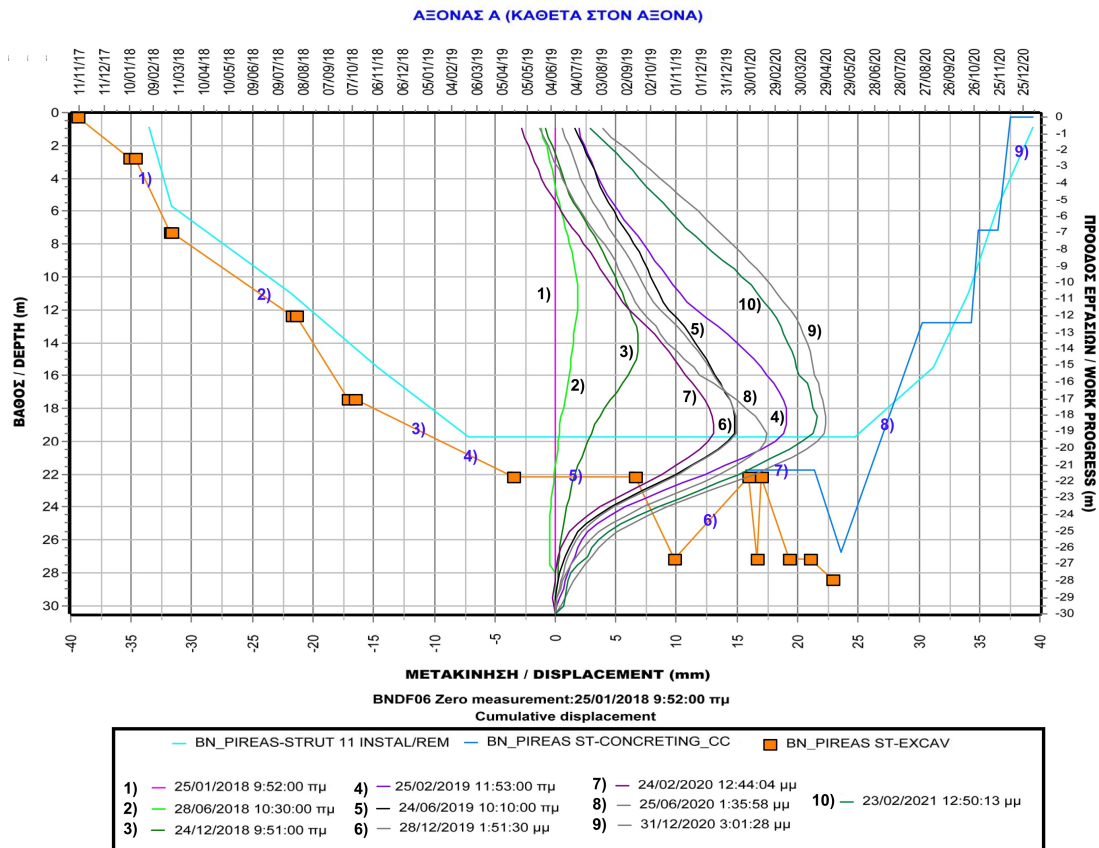
7.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων αποκλισιομέτρων

Οι οριζόντιες μετακινήσεις των διαφραγματικών τοίχων μετρήθηκαν με τη χρήση αποκλισιομέτρων, τα οποία τοποθετήθηκαν εντός αυτών (7.1).



Εικόνα 7.1: Πανέλα διαφραγματικών τοίχων (εντός των οποίων έγινε η εγκατάσταση των αποκλισιομέτρων) κατά το στάδιο καθαίρεσής τους για την κατασκευή της εισόδου πρόσβασης 1 του σταθμού

Η σωλήνωση των αποκλισιομέτρων εγκαταστάθηκε μέσα σε πλαστικό σωλήνα, κλειστό στο κάτω άκρο του στηριζόμενος στον κλωβό οπλισμού του διαφραγματικού τοίχου, όντας ανθεκτικός στις πιέσεις που αναπτύσσονται κατά τη σκυροδέτηση. Εντός των σωληνώσεων των αποκλισιομέτρων του σταθμού εγκαταστάθηκαν αισθητήρες ανά 3m, οι οποίοι συνδέθηκαν μεταξύ τους με συνεχείς, αδιάστατες, ανοξείδωτες ράβδους. Οι καλωδιώσεις των αισθητήρων καταλήγουν στο πλησιέστερο κουτί συλλογής μετρήσεων, από όπου στέλνονται όλα τα στοιχεία που προκύπτουν από την Γεωλογική και Ενόργανη Παρακολούθηση στο Σύστημα Διαχείρισης Δεδομένων.

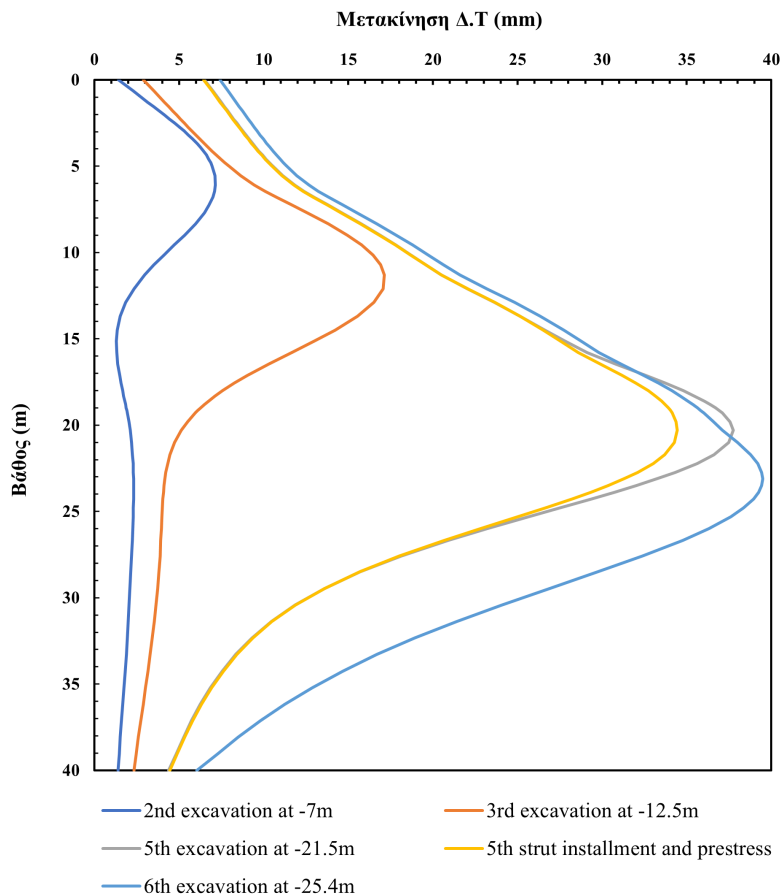


Εικόνα 7.2: Ενδείξεις αποκλισιομέτρου BNDF06 σε διάφορες χρονικές περιόδους κατά τον άξονα Α

Στην εικόνα 7.2 αποτυπώνονται τα στάδια της εκσκαφής του σταθμού (πορτοκαλί καμπύλη), τα στάδια εγκατάστασης των αντηρίδων (γαλάζια καμπύλη) καθώς και τα στάδια της σκυροδέτησης του σταθμού (μπλε καμπύλη), που ξεκινάει περίπου στις 15/01/2020 και γίνεται τμηματικά. Οι καμπύλες του αποκλισιομέτρου BNDF06 (η θέση του οποίου αποτυπώνεται στην εικόνα 5.8) επεξηγούνται στο υπόμνημα του διαγράμματος, και έχουν αντιστοιχηθεί με εκείνες στο διάγραμμα με αριθμούς επάνω στην καμπύλη εκσκαφής/σκυροδέτησης προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητό το χρονικό σημείο των

μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα των οριζόντιων μετακινήσεων από την αρχική προσομοίωση στο Plaxis φαίνονται στην εικόνα 7.3. Η επιλογή των καμπυλών έγινε έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερη με τις χρονικές στιγμές των μετρήσεων κατά την κατασκευή του σταθμού.

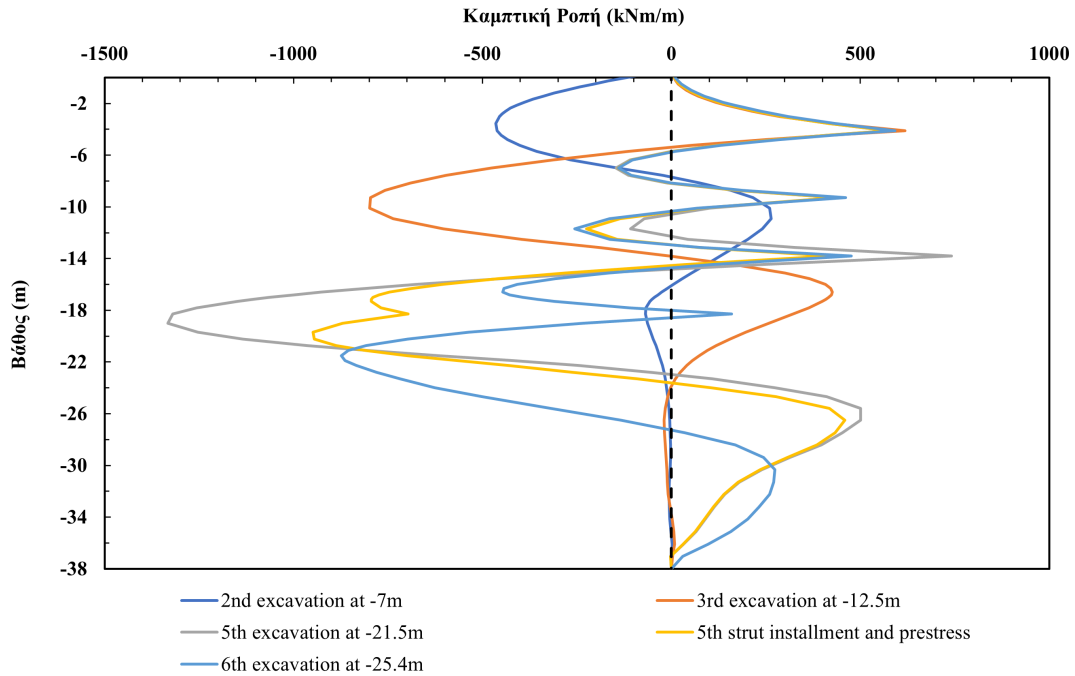


Εικόνα 7.3: Οριζόντιες μετακινήσεις Δ.Τ από την αριθμητική ανάλυση στο Plaxis

Η σύγκριση των δύο προηγούμενων διαγραμμάτων δείχνει ότι οι οριζόντιες μετακινήσεις του διαφραγματικού τοίχου σύμφωνα με τις πραγματικές μετρήσεις δεν ξεπέρασε σε κανένα στάδιο τα 23mm, ενώ η προσομοίωση στο τελευταίο στάδιο (εκσκαφή στην στάθμη των -25,4m) έδειξε μετακίνηση 39,5mm. Η αντίστοιχη καμπύλη από τις μετρηθείσες τιμές έχει μέγιστη οριζόντια μετακίνηση 15mm. Η διαφορά της τάξης των περίπου 24mm που παρατηρείται οφείλεται στις πολύ μεγαλύτερες ωθήσεις που δέχεται ο διαφραγματικός τοίχος από το έδαφος. Από τις καμπύλες των διαγραμμάτων 7.3 και 7.4 φαίνεται ότι το βάθος της μεγιστοποίησης των οριζοντίων μετατοπίσεων αυξάνεται όσο προχωράει η εκσκαφή και να μεγιστοποιείται στο βάθος των 22m περίπου.

Ένα πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι η παρουσία του υπόγειου υδροφόρου επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις συνολικές πιέσεις που δέχονται οι

διαφραγματικοί τοίχοι. Και στις δύο περιπτώσεις φαίνεται ότι στις καμπύλες που έχουν τοποθετηθεί οι αντηρίδες αμέσως μετά την εκσκαφή, οι μετακινήσεις του διαφραγματικού τοίχου μειώνονται.

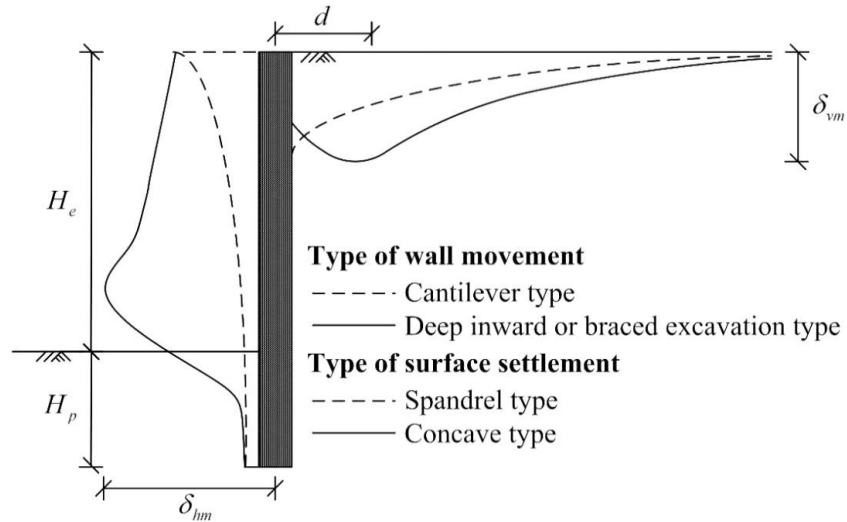


Εικόνα 7.4: Καμπτικές ροπές Δ.Τ από την αριθμητική ανάλυση στο Plaxis

7.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων χωροσταθμικών μετρήσεων

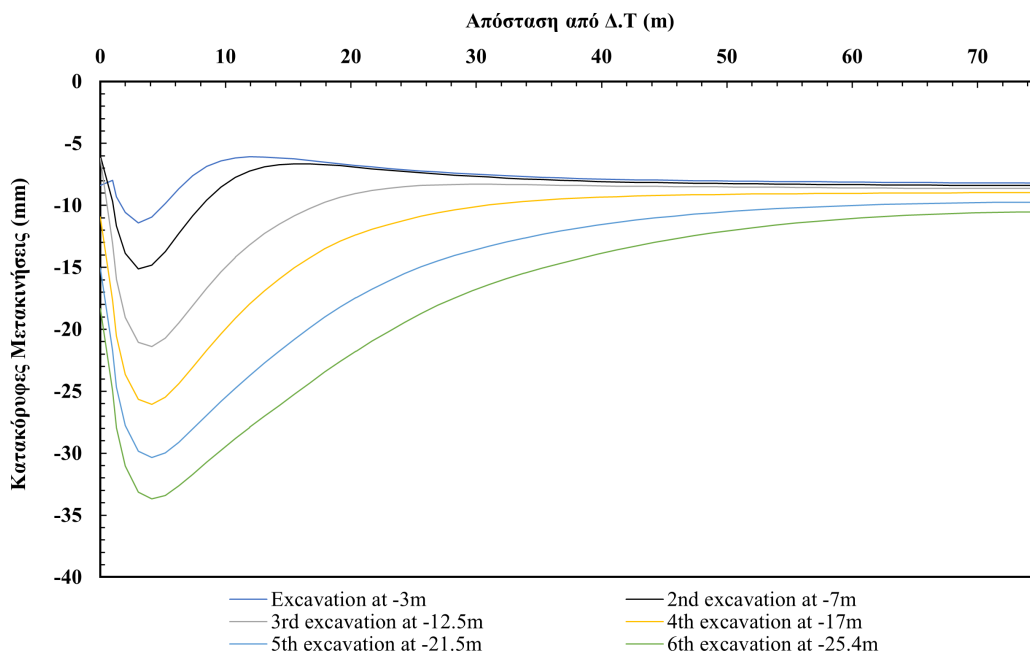
Η καταγραφή των μετακινήσεων των κτηρίων και οποιασδήποτε άλλης υποδομής εντός της ζώνης επιρροής με σκοπό την πρόληψη και αποφυγή οποιασδήποτε πιθανής βλάβης έγινε με τη χρήση συστήματος χωροσταθμικών μετρήσεων και συστήματος μέτρησης τρισδιάστατων μετακινήσεων (3D).

Σύμφωνα με μελέτη των Ou et al [2] εξήχθη το συμπέρασμα ότι εμφανίζονται δύο ειδών καμπύλων καθιζήσεων στην επιφάνεια: τριγωνικής (spandrel) και κοίλης (concave) μορφής, όπως εμφανίζονται στην εικόνα 7.6. Η τριγωνική μορφή καθιζήσεων αντιστοιχεί σε περιπτώσεις διαφραγματικών τοίχων που συμπεριφέρονται ως πρόβολοι, ενώ η κοίλη μορφή αντιστοιχεί σε περιπτώσεις όπου παρουσιάζεται μεγάλη παραμόρφωση προς το εσωτερικό της εκσκαφής.



Εικόνα 7.5: Τύποι μετακίνησης διαφραγματικού τοίχου και της συνεπαγόμενης καθίζησης στην επιφάνεια

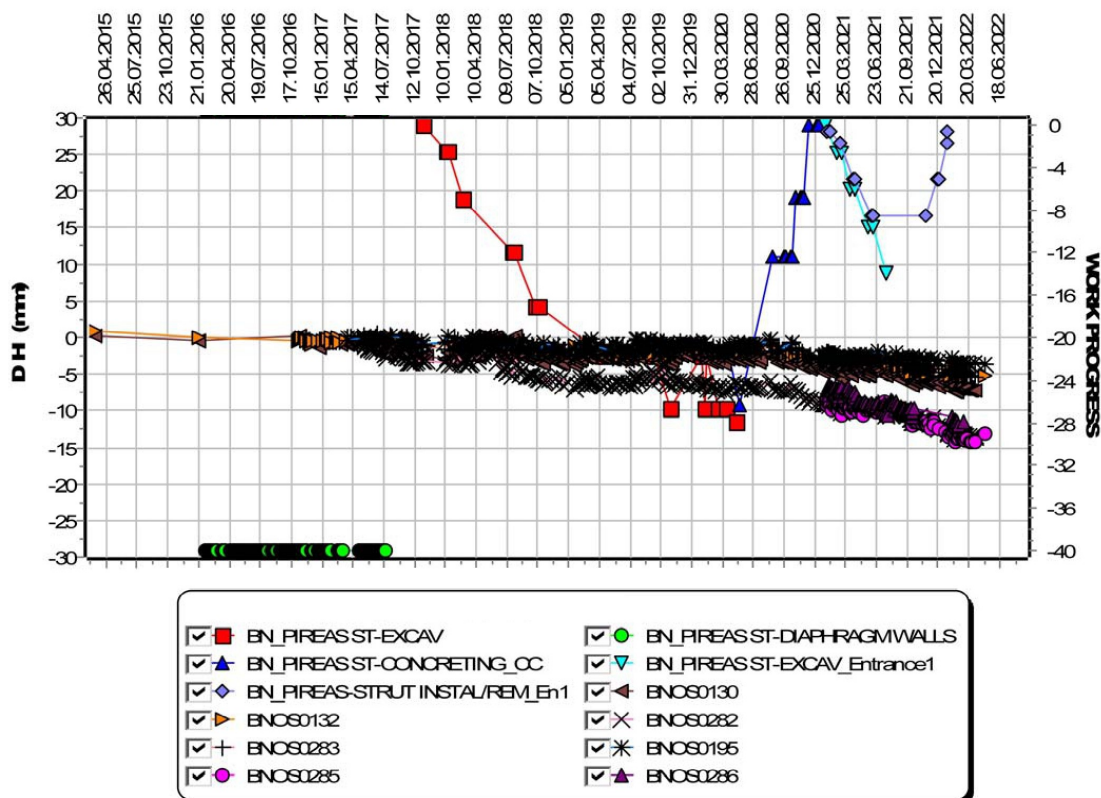
Όπως είναι λογικό, οι καμπύλες των καθιζήσεων θα έχουν κοίλη μορφή, λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων που δέχεται ο διαφραγματικός τοίχος σε μεγαλύτερα βάθη. Οι καμπύλες ανά βήμα εκσκαφής αποτυπώνονται στην εικόνα 7.6, με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται σε απόσταση περίπου 4m από την παρειά της εκσκαφής.



Εικόνα 7.6: Καμπύλη καθιζήσεων της ανατολικής παρειάς

Σε όλα τα στάδια εκσκαφής η καθίζηση παρουσιάζει μεγάλη μείωση όσο αυξάνεται η απόσταση από τον σταθμό, με τις κατακόρυφες μετακινήσεις να είναι κάτω από 20mm σε όλες τις περιπτώσεις σε απόσταση 25m από την εκσκαφή. Στο διάγραμμα τα χωροσταθμικά σημεία BNOS0285 και BNOS0282, η θέση των οποίων αποτυπώνεται στην εικόνα 5.9 απέχουν 19m και 23m αντίστοιχα από το όρυγμα του σταθμού.

Οι κατακόρυφες μετακινήσεις των σημείων αυτών κατά το στάδιο της εκσκαφής στην τελική στάθμη του σταθμού αγγίζουν τα 7,5mm, ενώ σύμφωνα με την εικόνα 7.6 στην αντίστοιχη απόσταση οι μετακινήσεις είναι 22,5mm και 20mm αντίστοιχα. Παρουσιάζεται λοιπόν μια μεγάλη διαφορά της τάξης του 300% μεταξύ των μετρηθέντων και υπολογισθέντων τιμών.



Εικόνα 7.7: Διάγραμμα χωροσταθμικών σημείων

7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πιεζομέτρων

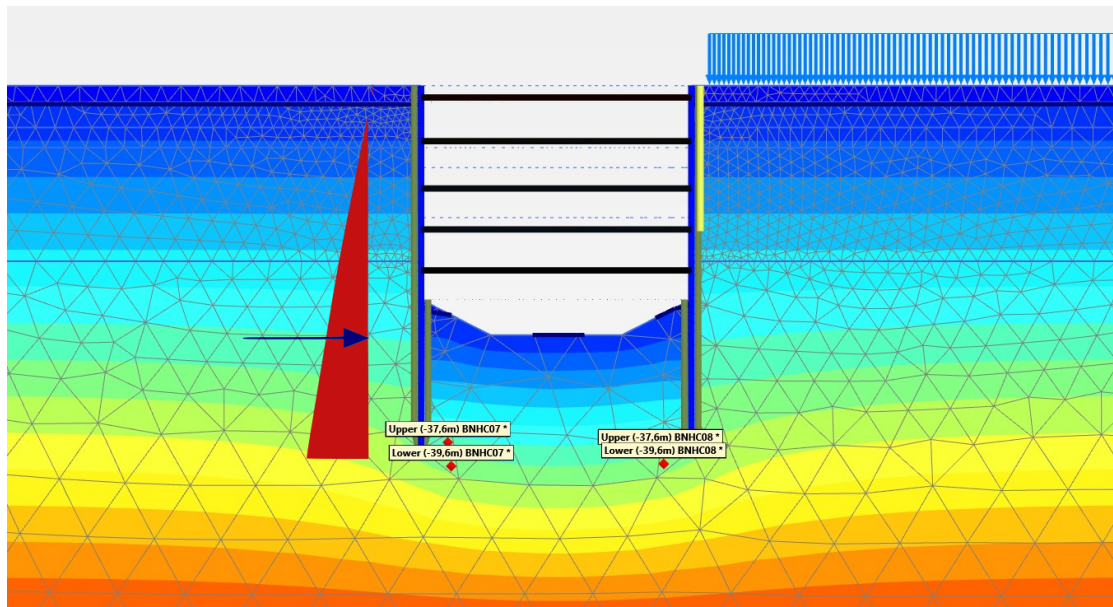
Στο υποκεφάλαιο 5.2 αναφέρθηκαν τα είδη πιεζομέτρων που εγκαταστάθηκαν τόσο για την παρακολούθηση της στάθμης των υδροφόρου ορίζοντα και για τον έλεγχο ανατροφοδοσίας του υδροφόρου ορίζοντα, όσο και για την μέτρηση της πίεσης των πόρων σε συγκεκριμένα βάθη (-37,6m και -39,6m). Με αυτό τον τρόπο θα γίνει αντιληπτό τι περαιτέρω τροποποιήσεις θα

πρέπει να γίνουν, έτσι ώστε τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων να συγκλίνουν στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό με τα μετρηθέντα.

7.4 Μετρήσεις πιεζομέτρων δονούμενης χορδής

Τα πιεζόμετρα δονούμενης χορδής εγκαταστάθηκαν εντός του σκάμματος του σταθμού, δηλαδή το ένα βρίσκεται από την ανατολική πλευρά (κτήριο ΗΣΑΠ), ενώ το άλλο από την δυτική πλευρά (λιμάνι Πειραιά). Τα πιεζόμετρα αυτά (BNHC07 και BNHC08) λαμβάνουν ταυτόχρονα μετρήσεις σε διαφορετικά βάθη, με το Upper να βρίσκεται στα -37,6m και το Lower να βρίσκεται στα -39,6m βάθος.

Στην αρχική αριθμητική ανάλυση που έγινε στο Plaxis επιλέχθησαν κάποια αντίστοιχα σημεία για την παρακολούθηση της πίεσης των πόρων κατά τη διάρκεια των διάφορων σταδίων υπολογισμού. Αυτά τα σημεία απέχουν περίπου 3m από την δεξιά και αριστερή παρειά του σκάμματος του σταθμού σε βάθος -37,6m και -39,6m, έτσι ώστε να ταυτίζονται με τα αντίστοιχα Upper & Lower των πιεζομέτρων.



Εικόνα 7.8: Σημεία παρακολούθησης πιέσεων των πόρων στο Plaxis

Στο διάγραμμα της εικόνας 7.9 παρουσιάζονται οι τιμές των πιέσεων των πόρων του νερού στις θέσεις Upper & Lower όπως υπολογίστηκαν από το Plaxis. Αντίστοιχα, οι μετρηθείσες ενδείξεις του πιεζομέτρου BNHC08 στις στάθμες των -37,6m και -39,6m παρουσιάζονται στην εικόνα 7.10 μαζί με τις καμπύλες των σταδίων εκσκαφής και σκυροδέτησης του σταθμού.

Οι τιμές των διαγραμμάτων 7.9 και 7.11 παρουσιάζουν μεταβολές μόνο στα στάδια εκσκαφής ενώ στη συνέχεια έχουν σταθερή τιμή. Στη πραγματικότητα όμως, σύμφωνα με τα πιεζόμετρα παρατηρείται ότι οι τιμές έχουν μεν σταδιακή πτώση (λόγω της εκσκαφής), ωστόσο έχουν πολλές και μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές τους.

Στο σημείο που αντιστοιχεί πριν το πρώτο στάδιο εκσκαφής οι τιμές της πίεσης των πόρων είναι 396 kPa (Lower) και 376 kPa (Upper), τόσο στα διάγραμμα τα 7.10 και 7.12 , όσο και στα διαγράμματα 7.11 και 7.13 αφού ισοδυναμεί με την υδροστατική πίεση για τα αντίστοιχα βάθη. Σε αυτό το στάδιο δεν έχει δημιουργηθεί συνθήκη ροής, αφού δεν έχει δημιουργηθεί κάποια διαφορά στο ενεργειακό επίπεδο.

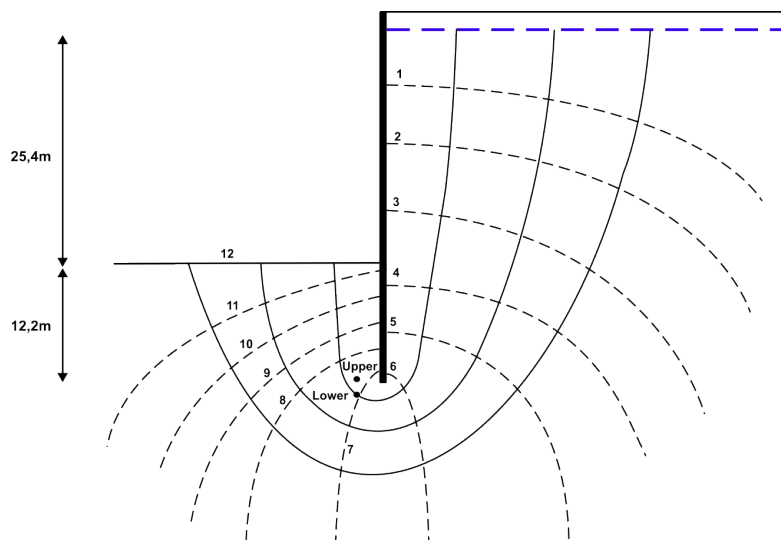
Όταν υπάρξει διαφορά στο υδραυλικό ύψος στις δύο πλευρές της κατασκευής συγκράτησης υδάτων (διαφραγματικός τοίχος), το νερό θα ρέει κάτω και γύρω από την κατασκευή. Αυτό επιτυγχάνεται με το πρώτο στάδιο εκσκαφής.

Κατά το 6ο στάδιο εκσκαφής, η ελάχιστη τιμή πίεσης των πόρων του νερού στις ενδείξεις των σημείων παρακολούθησης του Plaxis είναι 255kPa (BNHC07) και 270 kPa (BNHC08) για τα Upper (-37,6m), ενώ για τα Lower είναι 303 kPa και 300 kPa αντίστοιχα. Οι διαφορές στις τιμές (ιδίως στο Upper) ενδεχομένως να οφείλεται στην μη απόλυτη συμμετρία των σημείων παρακολούθησης. Στο αντίστοιχο βάθος του πιεζομέτρου η μετρηθείσα τιμή κυμαίνεται μεταξύ 110-120kPa, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.11 αλλά και 7.13.

Η τελική στάθμη εκσκαφής, που είναι τα -25,4m απέχει από τις δύο στάθμες των πιεζομέτρων κατά 12,2m και κατά 14,2m. Επομένως σε περίπτωση που δεν υπήρχε ροή και το νερό ήταν ακίνητο, η πίεση του νερού θα ήταν υδροστατική και ίση με $u = \gamma_w \cdot d$, άρα θα ήταν μεταξύ 120-140 kPa για τις δύο θέσεις. Ωστόσο, λόγω της διαφοράς υψομέτρου του υδροφόρου ορίζοντα μεταξύ της τελικής στάθμης εκσκαφής και της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα , δημιουργούνται συνθήκες ροής (εικόνα 7.9). Επομένως, η υδατική πίεση στα σημεία Upper & Lower θα είναι αυξημένη λόγω της ροής, ενώ η ενεργός τάση σε αυτά τα δύο σημεία είναι μειωμένη. Στα σημεία παρακολούθησης του Plaxis, αποτυπώνεται αυτή η αυξημένη πίεση των πόρων που οφείλεται στην ροή με την πρόσθετη πίεση να είναι περίπου 130 kPa. Στην κάθε θέση λοιπόν ισχύει:

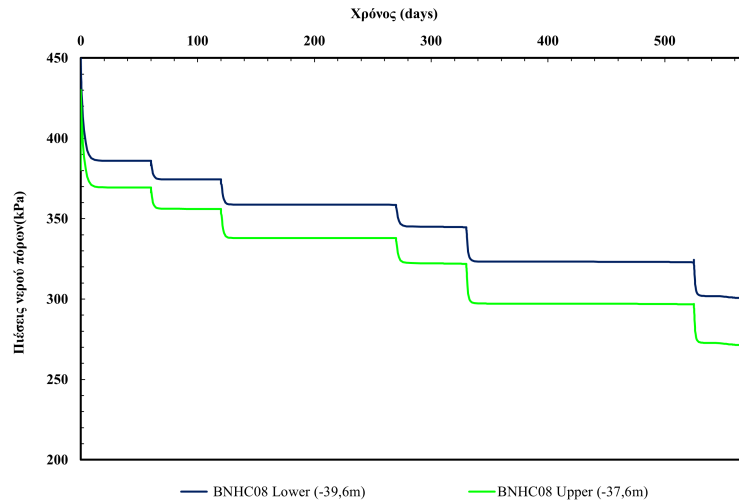
$$\text{Πιεζομετρικό ύψος } H_w (m) = \text{ολικό υδραυλικό ύψος } (m) - \text{ύψος θέσης } (m)$$

,με την πίεση των πόρων να υπολογίζεται από την σχέση $u = \gamma_w \cdot H_w$

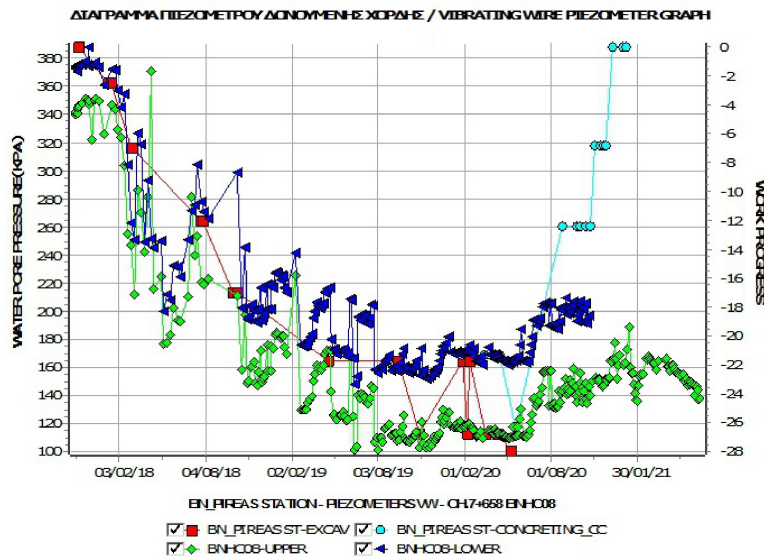


Εικόνα 7.9: Δίκτυο ροής για την περίπτωση του σταθμού Πειραιά

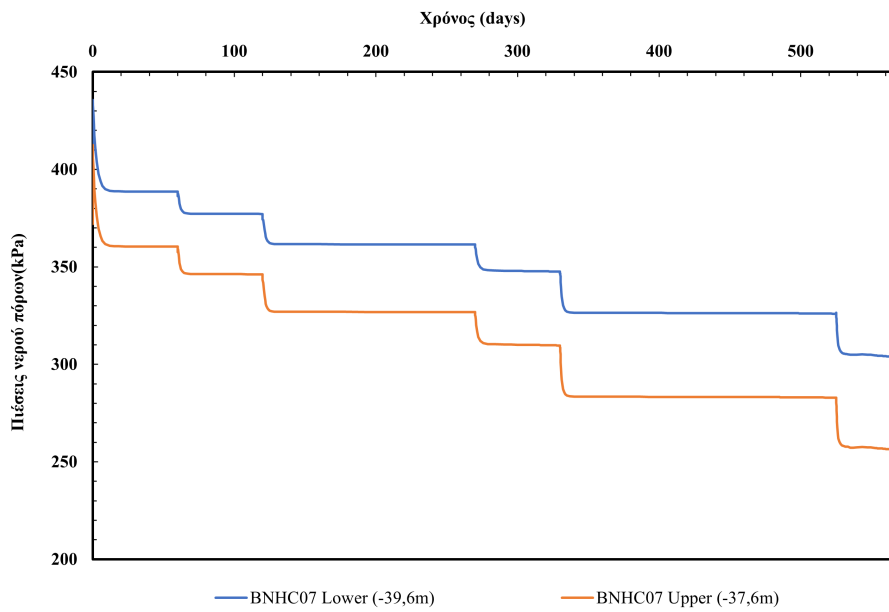
Στην θέση Upper μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά η τιμή της υδατικής πίεσης σε συνθήκες ροής, με το *Ολικό Υδραυλικό Ύψος*: $5/12 \cdot 25,4 = 10,6m$, το *Ύψος θέσης* = $-12,2m$ και το $H_w \approx 23m$. Έτσι, υπολογίζεται ότι η πίεση των πόρων στη θέση Upper είναι 230kPa, που αποτελεί μια ενδεικτική τιμή, ενώ όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα 7.10 και 7.12 οι υδατικές πιέσεις είναι 255 και 270kPa.



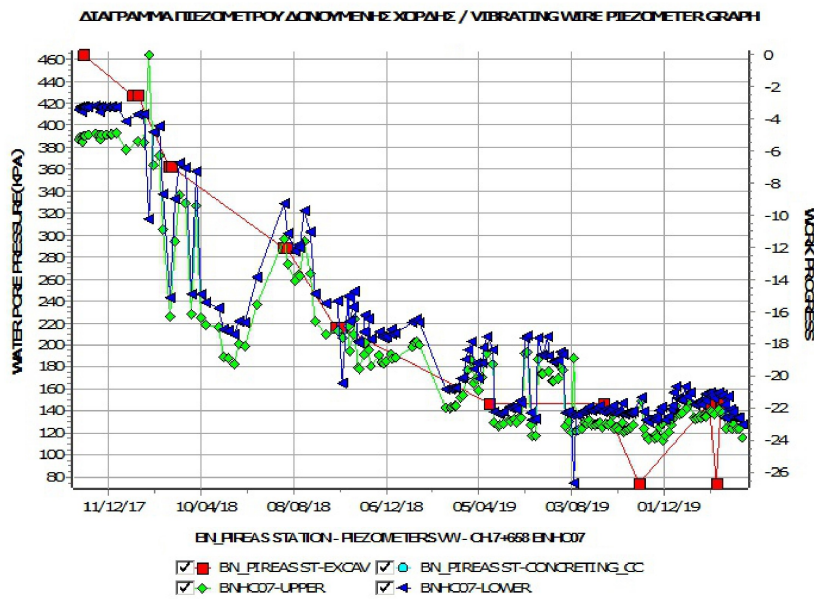
Εικόνα 7.10: Διάγραμμα πίεσης πόρων αριθμητικής ανάλυσης μέσω Plaxis, για το πιεζόμετρο BNHC08



Εικόνα 7.11: Μετρηθείσες τιμές πιέσεων πόρων πιεζόμετρο BNHC08



Εικόνα 7.12: Διάγραμμα πίεσης πόρων αριθμητικής ανάλυσης μέσω Plaxis, για το πιεζόμετρο BNHC07

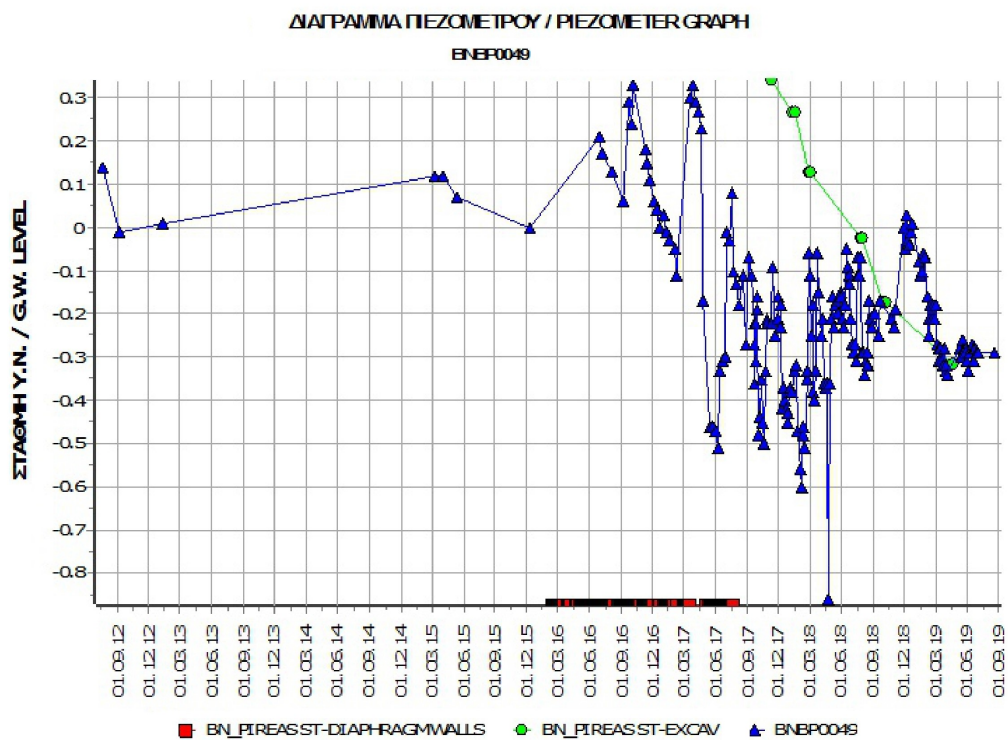


Εικόνα 7.13: Διάγραμμα πίεσης πόρων αριθμητικής ανάλυσης μέσω Plaxis, για το πιεζόμετρο BNHC07

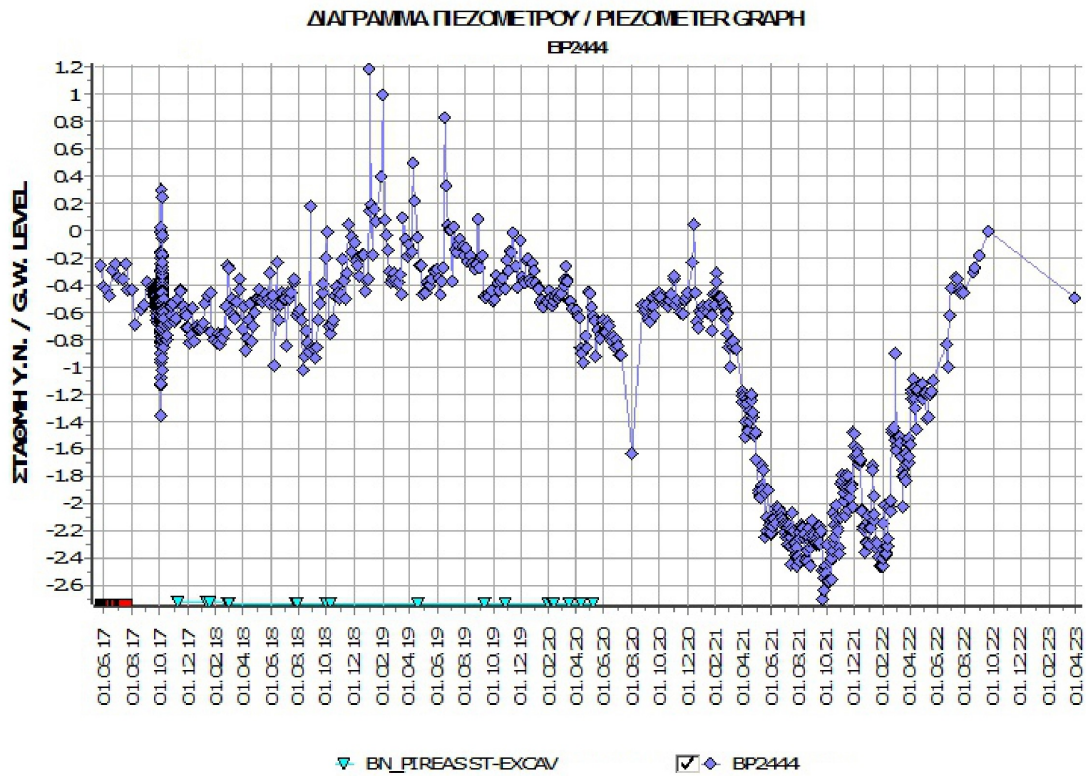
Από τα δεδομένα των εικόνων 7.11 και 7.13 φαίνεται ότι σχεδόν σε όλα τα στάδια εκσκαφής η υδατική πίεση στις δύο καθ' ύψος θέσεις ισούται με την υδροστατική πίεση, δηλώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο ότι δεν παρουσιάζονται συνθήκες ροής στα αντίστοιχα στάδια εκσκαφών. Ο υδροφόρος ορίζοντας ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια βρίσκεται στα +0m, με αποτέλεσμα να εξάγεται το συμπέρασμα ότι έγιναν αντλήσεις με σκοπό τον υποβιβασμό του υδροφόρου ορίζοντα σε κάθε στάδιο εκσκαφής.

7.5 Μετρήσεις πιεζομέτρων ανοικτού τύπου

Τα πιεζόμετρα ανοικτού τύπου χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της μεταβολής της στάθμης του υπόγειου ύδατος και τον έλεγχο του συστήματος ανατροφοδοσίας του υδροφόρου ορίζοντα. Τα πιεζόμετρα της εικόνας 7.14 και 7.15 και συγκεκριμένα τα BNP0049 και BP244 βρίσκονται σε απόσταση 35m και 23m αντίστοιχα από την παρειά της εκσκαφής του σταθμού. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα όπως φαίνεται από τα διαγράμματα παραμένει σχετικά σταθερή με μικρές αυξομειώσεις. Το μέγιστο βάθος που φτάνει ο υδροφόρος ορίζοντας είναι τα -2,6m. Η άντληση, λοιπόν που λαμβάνει χώρα, σχηματίζει έναν κώνο ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα, που όμως η αρχική στάθμη του επανέρχεται σε απόσταση περίπου 25m από το σκάμμα του σταθμού.

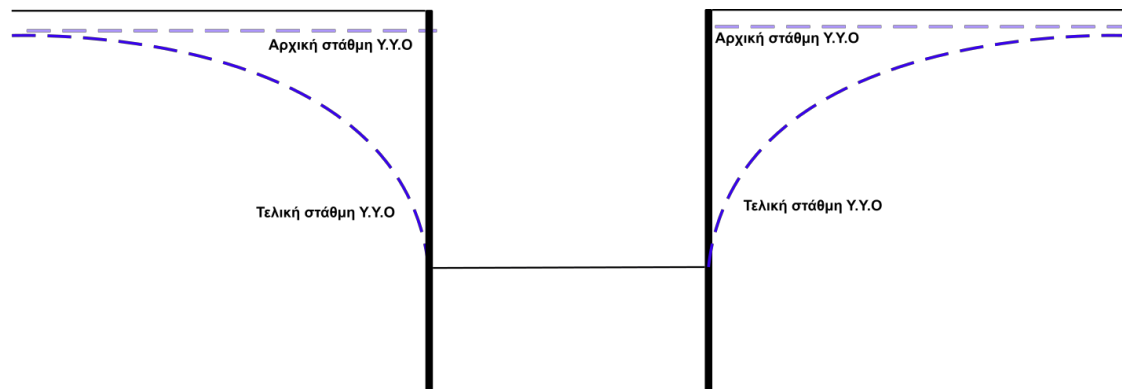


Εικόνα 7.14: Στάθμη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα στην ανατολική παρειά



Εικόνα 7.15: Στάθμη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα στην ανατολική παρειά

Η μορφή του αντλούμενου υδροφόρου ορίζοντα πέριξ του σταθμού θα έχει μια κωνοειδή μορφή όπως στην εικόνα 7.16



Εικόνα 7.16: Ενδεικτικό σχήμα κώνου ταπείνωσης υδροφόρου ορίζοντα

8 Παραμετρική διερεύνηση των αριθμητικών προσομοιώσεων

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η επίτευξη της περαιτέρω σύγκλισης των τιμών που προκύπτουν μέσα από τις αριθμητικές αναλύσεις, πλησιάζοντας στον καλύτερο δυνατό βαθμό τις συνθήκες που επικρατούσαν στο έργο. Στην περίπτωση του σταθμού του Πειραιά, όπως και στις περισσότερες περιπτώσεις μεγάλων έργων, οι κατασκευαστικές ακολουθίες που εφαρμόζονται στο εργοτάξιο δεν συμβαδίζουν πάντα στο 100% με αυτές που έχουν σχεδιαστεί στην μελέτη εφαρμογής, που δύναται να συμβαίνει λόγω απρόοπτων συμβάντων που ενδεχομένως προκύπτουν.

Πίνακας 8.1: Στάδια και βάθη εκσκαφής με βάση τη μελέτη εφαρμογής και με βάση τα δεδομένα από τη ΓΔΠ

Στάδια Εκσκαφής	Βάθος Εκσκαφής	
	Μελέτη Εφαρμογής	ΓΔΠ
1ο	-0,4m	-3m
2ο	-5.1m	-7m
3ο	-10,3m	-12,5m
4ο	-14,8m	-17m
5ο	-19,7m	-21,5m
6ο	-25,4m	-25,4m

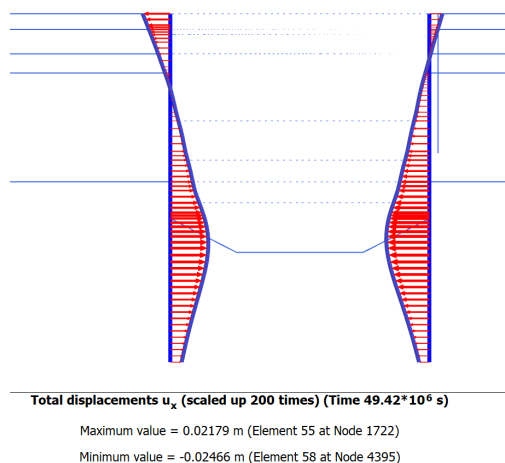
Με βάση τον παραπάνω πίνακα και λαμβάνοντας υπόψη τα βάθη τοποθέτησης των αντηρίδων όπως αποτυπώνονται στον πίνακα 6.2 γίνεται αντιληπτό ότι τα βάθη εκσκαφής βρίσκονται κατά $\approx 1\text{m}$ βαθύτερα από τα βάθη τοποθέτησης των αντηρίδων, με αποτέλεσμα η οριζόντια μετακίνηση των διαφραγματικών τοίχων και κατά συνέπεια οι δευτερογενείς καθιζήσεις να αναμένονται μικρότερες. Στον πίνακα 8.2 φαίνονται οι εκάστοτε αλλαγές στις παραμετρικές διερευνήσεις:

Πίνακας 8.2: Παραμετρικές διερευνήσεις με τις εκάστοτε αλλαγές

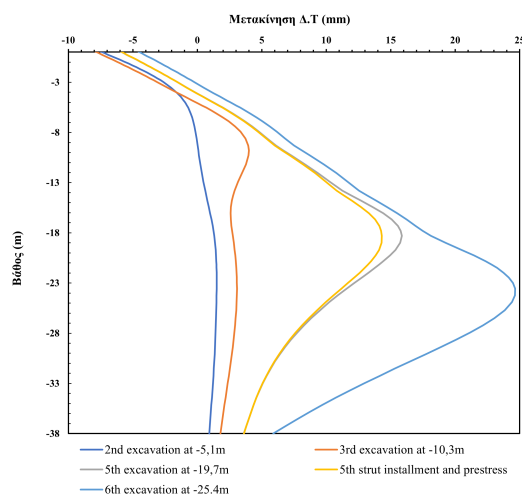
Παράμετροι	Παραμετρικές Διερευνήσεις					
	1η	2η	3η	4η	5η	6η
Βάθη Σταδίων Εκσκαφής	Μελέτη Εφαρμογής	Monitoring Data	Μελέτη Εφαρμογής	Μελέτη Εφαρμογής	Monitoring Data	Μελέτη Εφαρμογής
Υδροφόρος Ορίζοντας	Αρχ. Επιφάνεια (+0m)	Κώνος Ταπεινώσης	Κώνος Ταπεινώσης	Κώνος Ταπεινώσης	Αρχ. Επιφάνεια (+0m)	Αρχ. Επιφάνεια (+0m)
Αντλήσεις	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι
Είδος Υπολογισμού	Plastic-F.C.F.D	Plastic-Consolidation	Plastic-Consolidation	Plastic-Consolidation	Plastic-F.C.F.D	Plastic-F.C.F.D
Ιδιότητες Layer II (Ελώδεις Αποθέσεις)	Αρχικές	Αρχικές	Αρχικές	Αυξημένες	Αρχικές	Αρχικές

8.1 1η παραμετρική διερεύνηση

Η προσομοίωση που ακολουθεί έγινε με βάση τις στάθμες εκσκαφής που ορίζει η μελέτη εφαρμογής. Η αλλαγή των βαθών στα στάδια εκσκαφής έχει ήδη σημαντική επίπτωση τόσο στα εντατικά μεγέθη των κατασκευαστικών στοιχείων, όσο και στις μετακινήσεις τους. Η μέγιστη μετακίνηση που παρουσιάζει ο δεξιός (ανατολικός) διαφραγματικός τοίχος είναι 24,66mm, ενώ ο αριστερός (δυτικός) είναι 21,79mm (εικόνα 8.1), έναντι 39,48mm και 34,71mm αντίστοιχα. Παρατηρείται δηλαδή μια μείωση της τάξης των 13mm.

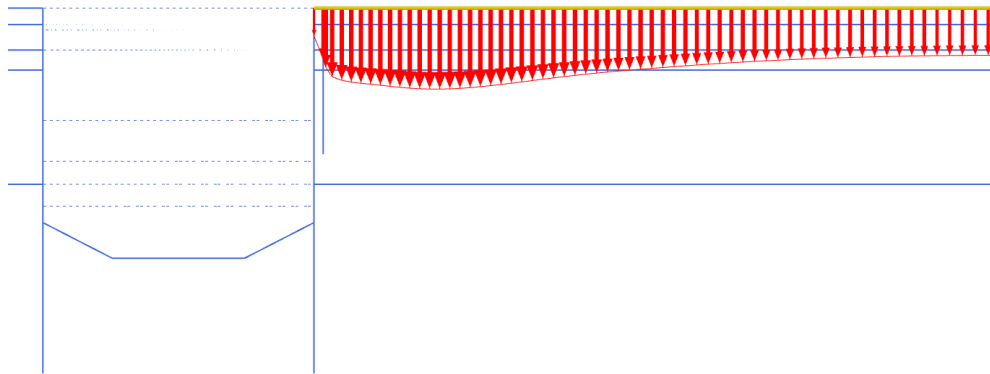


Εικόνα 8.1: Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων



Εικόνα 8.2: Οριζόντιες μετακινήσεις $\Delta.T$ της πρώτης παραμετρικής διερεύνησης, όπως υπολογίστηκε από το Plaxis

Οι μέγιστες καθιζήσεις από την άλλη, ενώ στην αρχική προσομοίωση ήταν 33,70mm τώρα είναι 17,74mm, μειώθηκε δηλαδή σχεδόν στο μισό.

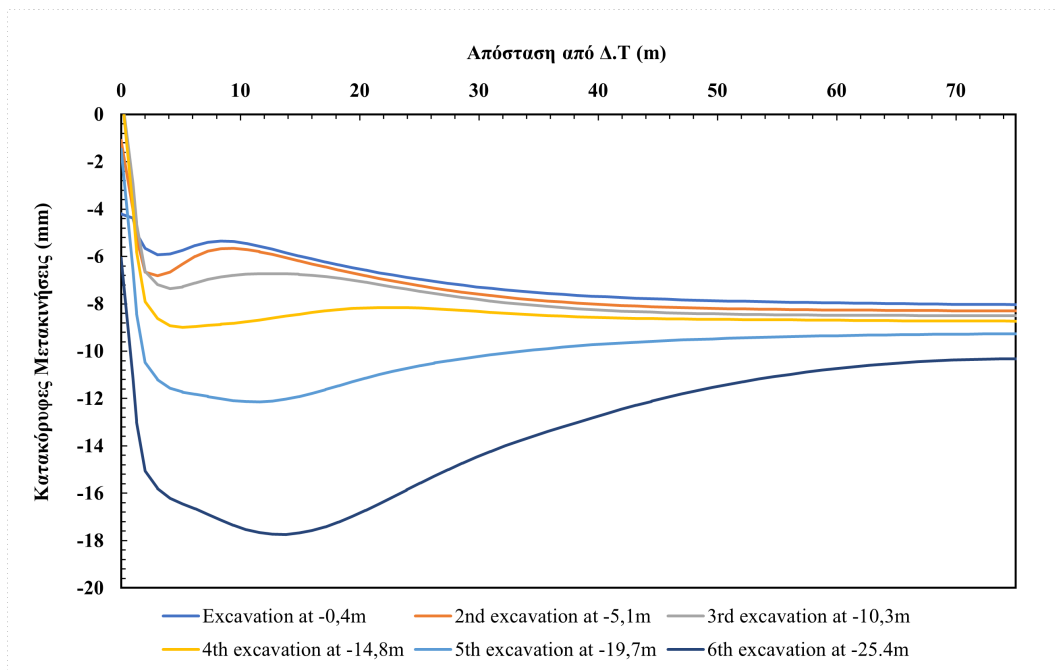


Total displacements u_y (scaled up 500 times) (Time $49.42 \cdot 10^6$ s)

Maximum value = $-6.060 \cdot 10^{-3}$ m

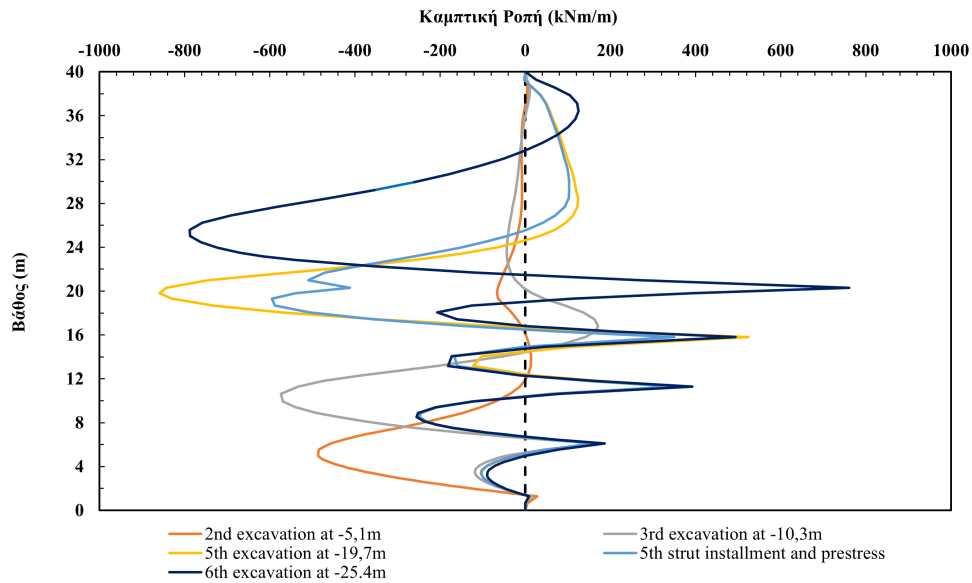
Minimum value = -0.01774 m

Εικόνα 8.3: Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς



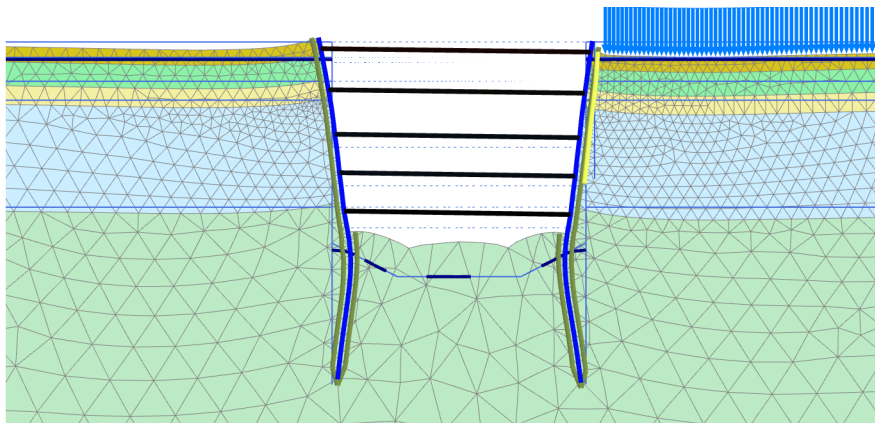
Εικόνα 8.4: Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς της πρώτης παραμετρικής διερεύνησης, όπως υπολογίστηκε από το Plaxis

Η μείωση των εντατικών μεγεθών ομοίως είναι εμφανής με την καμπτική ροπή στο τελευταίο στάδιο εκσκαφής να είναι 788kNm/m, αντί για 850kNm/m. Οι καμπτικές ροπές όπως φάνηκε και στο διάγραμμα 7.4 μεγιστοποιούνται στο 5ο στάδιο εκσκαφής και είναι 1328 kNm/m, ενώ σε αυτήν την περίπτωση είναι 859kNm/m.



Εικόνα 8.5: Καμπτικές ροπές της πρώτης παραμετρικής διερεύνησης, όπως υπολογίστηκαν από το Plaxis

Τέλος, όσον αφορά τις πιέσεις των πόρων του νερού στα σημεία Upper και Lower αυτές είναι 265kPa και 302kPa αντίστοιχα, όσο δηλαδή και στην αρχική προσομοίωση, αφού η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα έχει παραμείνει πρακτικά στα +0m.

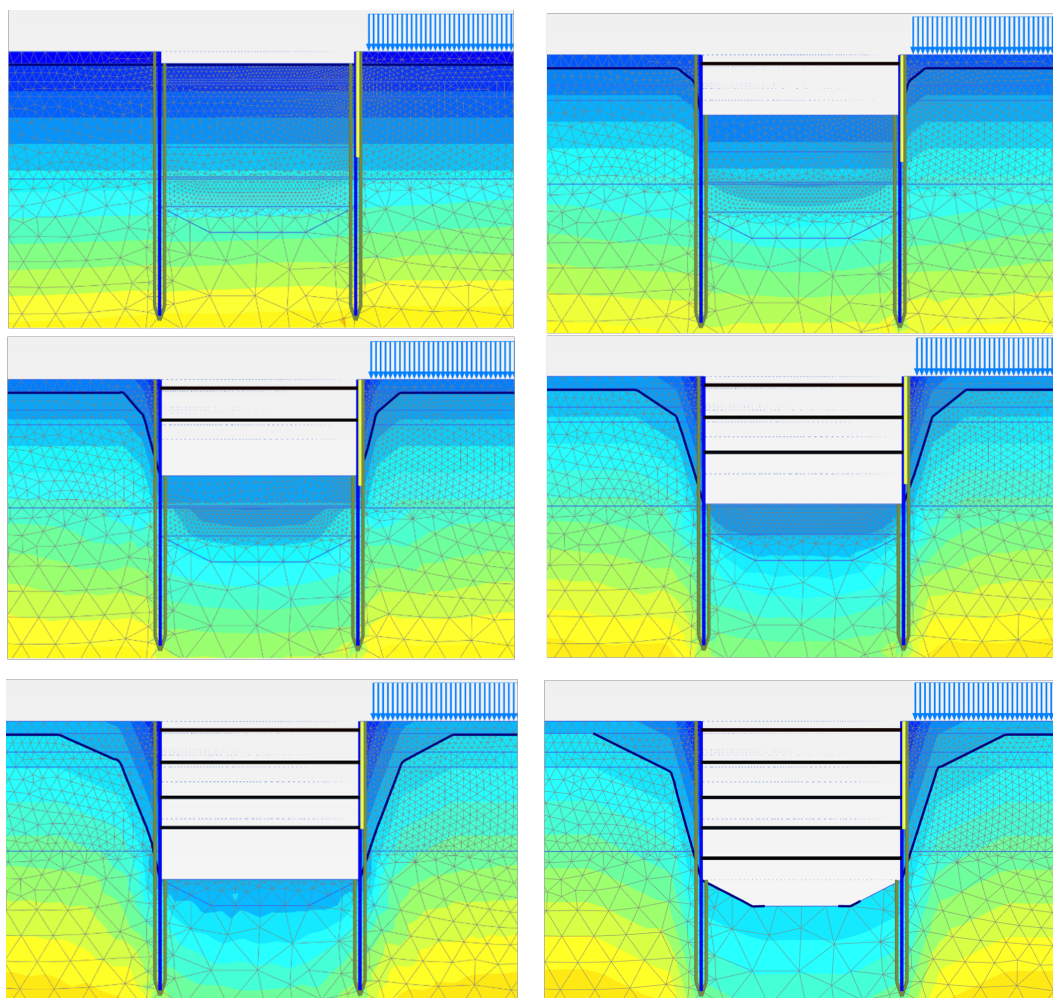


Εικόνα 8.6: Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στον παραμορφωμένο κάρναβο

8.2 2η παραμετρική διερεύνηση

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι ενδείξεις των πιεζομέτρων αποτυπώνουν μια πιθανή πτώση του υδροφόρου ορίζοντα γύρω από το σκάμμα, αφού οι ενδείξεις τους είναι ίσες με την υδροστατική πίεση. Για το λόγο αυτό, τα φαινόμενα ροής έχουν μειωθεί σε τέτοιο βαθμό που δικαιολογείται αυτή η προσέγγιση. Έτσι λοιπόν, σε αυτήν την παραμετρική διερεύνηση εξετάζεται η επιρροή της πτώσης του υδροφόρου ορίζοντα στην αρχική αριθμητική ανάλυση, όταν δημιουργείται ένας κώνος ταπείνωσης γύρω από το σκάμμα, όπως αποτυπώθηκε στην εικόνα 7.16.

Ο κώνος ταπείνωσης σε κάθε στάδιο εκσκαφής άπτεται της κατώτερης στάθμης και μετά επιστρέφει στην αρχική του θέση στην στάθμη των +0m σε απόσταση περίπου 15m από τους Δ.Τ (εικόνα 8.7).



Εικόνα 8.7: Δημιουργία κώνου ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα γύρω από το σκάμμα του σταθμού

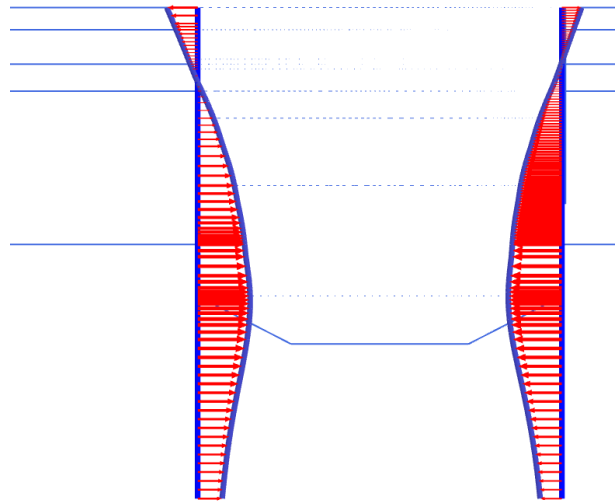
Τα στάδια της προσομοίωσης της πτώσης του υδροφόρου ορίζοντα έγιναν με ανάλυση στερεοποίησης. Τα στάδια αυτά είναι τα παρακάτω:

Πίνακας 8.3: Φάσεις εκσκαφής κατά την αριθμητική προσομοίωση με στερεοποίηση

Φάση Υπολογισμού	Επεξήγηση Φάσης
Αρχική Φάση	Υπολογισμός γεωστατικών τάσεων
1 ^η	Εγκατάσταση διαφραγματικών τοίχων/πασσάλων και ενεργοποίηση φορτίου λόγω του κτηρίου ΗΣΑΠ
2 ^η	Εκσκαφή έως τα -3m. Μηδενισμός των μετακινήσεων που υπολογίστηκαν από το προηγούμενο στάδιο
3 ^η	Ανάλυση στερεοποίησης διάρκειας 60 ημερών
4 ^η	Εγκατάσταση 1ης σειράς αντηρίδων στα +0,7m και προέντασής της
5 ^η	Εκσκαφή έως τα -7m
6 ^η	Ανάλυση στερεοποίησης διάρκειας 60 ημερών
7 ^η	Εγκατάσταση 2ης σειράς αντηρίδων στα -4,1m και προέντασής της
8 ^η	Εκσκαφή έως τα -12,5m
9 ^η	Ανάλυση στερεοποίησης διάρκειας 150 ημερών
10 ^η	Εγκατάσταση 3ης σειράς αντηρίδων στα -9,3m και προέντασής της
11 ^η	Εκσκαφή έως τα -17m
12 ^η	Ανάλυση στερεοποίησης διάρκειας 60 ημερών
13 ^η	Εγκατάσταση 4ης σειράς αντηρίδων στα -13,8m και προέντασής της
14 ^η	Εκσκαφή έως τα -21,5m
15 ^η	Ανάλυση στερεοποίησης διάρκειας 195 ημερών
16 ^η	Εγκατάσταση 5ης σειράς αντηρίδων στα -18,3m και προέντασής της
17 ^η	Εκσκαφή έως τα -25,4m
18 ^η	Ανάλυση στερεοποίησης διάρκειας 47 ημερών

Οι φάσεις εκσκαφής εναλλάσσονται με τις φάσεις στερεοποίησης. Όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις έτσι και σε αυτήν τοποθετούνται οι αντηρίδες μετά από κάθε στάδιο εκσκαφής.

Σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι η επίτευξη της προσομοίωσης της πίεσης των πόρων του νερού στα σημεία Upper Lower, έτσι ώστε οι συνθήκες να ταυτίζονται στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό με τις πραγματικές. Αυτό, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δύναται να επιτευχθεί με την δημιουργία ενός κώνου ταπείνωσης γύρω από το σκάμμα, έτσι ώστε να μειωθούν έως και να μηδενιστούν οι συνθήκες ροής και κατά συνέπεια να μειωθούν οι πιέσεις των πόρων του νερού στα δύο αυτά σημεία.



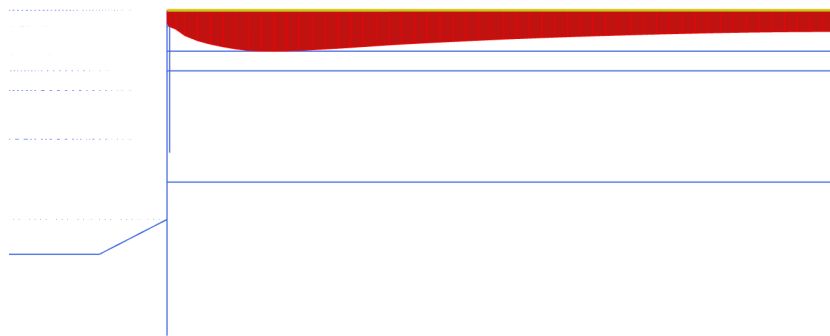
Total displacements u_x (scaled up 200 times) (Time 572.0 day)

Maximum value = 0.02136 m (Element 76 at Node 4877)

Minimum value = -0.02185 m (Element 75 at Node 4403)

Εικόνα 8.8: Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων

Στην εικόνα 8.8 οι οριζόντιες μετακινήσεις φαίνεται ότι είναι μειωμένες σε σχέση με τις προηγούμενες δύο αναλύσεις. Ο δεξιός διαφραγματικός τοίχος παρουσιάζει μέγιστη μετακίνηση 21,85mm, ενώ ο αριστερός 21,36mm αντίστοιχα. Γίνεται αντιληπτό ότι ενώ οι στάθμες εκσκαφής είναι αυτές που έχουν εξαχθεί από τα δεδομένα της ΓΔΠ, η πτώση του υδροφόρου ορίζοντα έχει απομειώσει τις οριζόντιες μετακινήσεις των διαφραγματικών τοίχων κατά 18mm και 13mm αντίστοιχα. Οι οριζόντιες πιέσεις που ασκεί το νερό έχουν απομειωθεί σε τέτοιο βαθμό που πλέον κατά κύριο λόγο ασκούνται μόνο οι ωθήσεις γαιών στους διαφραγματικούς.



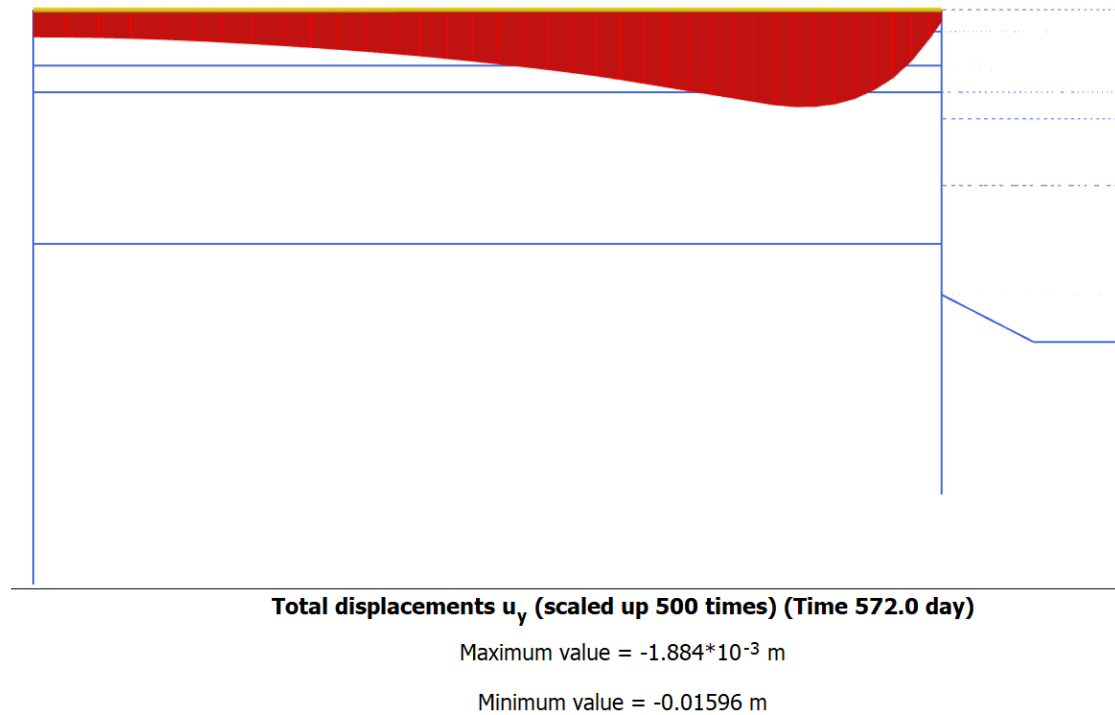
Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 572.0 day)

Maximum value = $-7.417 \cdot 10^{-3}$ m

Minimum value = -0.02307 m

Εικόνα 8.9: Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς

Οι καθιζήσεις, όπως φαίνεται λόγω της μείωσης των οριζοντίων μετακινήσεων των διαφραγματικών τοίχων είναι απομειωμένες, με τη μέγιστη τιμή στην ανατολική παρειά να αγγίζει τα 23,07mm. Σε περίπτωση όμως που ο κώνος ταπείνωσης ήταν πιο ανοικτός στο σχήμα του, δηλαδή επανερχόταν στην αρχική του στάθμη ο υδροφόρος σε απόσταση μεγαλύτερη των 15m, οι οριζόντιες μετακινήσεις των διαφραγματικών τοίχων θα ήταν περαιτέρω μειωμένες. Το ίδιο δε θα ίσχυε όμως και για τις καθιζήσεις που θα παρουσιάζονταν αυξημένες, λόγω της αφαίρεσης του νερού που κατά συνέπεια αυξάνεται το ενεργό βάρος και των ιδιοτήτων του στρώματος II που έχει αρκετά μικρές ιδιότητες αντοχής.

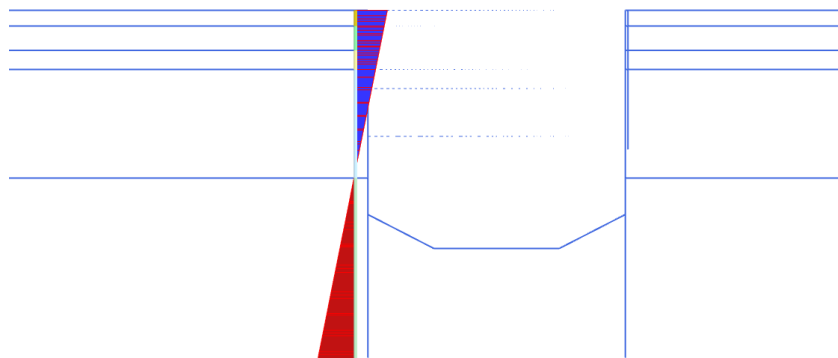


Εικόνα 8.10: Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς

Οι καθιζήσεις της δυτικής παρειάς όπως είναι αναμενόμενο είναι αρκετά μικρότερες σε σχέση με τις καθιζήσεις της ανατολικής, κυρίως λόγω της πίεσης που ασκεί και το κτήριο του ΗΣΑΠ. Συγκεκριμένα, δεν παρουσιάζουν κάποια μεταβολή, αφού η μέγιστη τιμή τους είναι 15,96mm, ενώ στην αρχική προσομοίωση ήταν 15,60mm.

Οι πιέσεις των πόρων του νερού είναι αρκετά μειωμένες σε σχέση με τις προηγούμενες αναλύσεις και προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τις μετρηθείσες από τα πιεζόμετρα.

Στο Upper η ένδειξη από το σημείο παρακολούθησης είναι 147kPa, ενώ στο Lower η ένδειξη είναι 167kPa. Όπως ήταν αναμενόμενο, η πίεση των πόρων του νερού είναι αρκετά μειωμένη και σχεδόν ίση με την υδροστατική, λόγω της ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα.

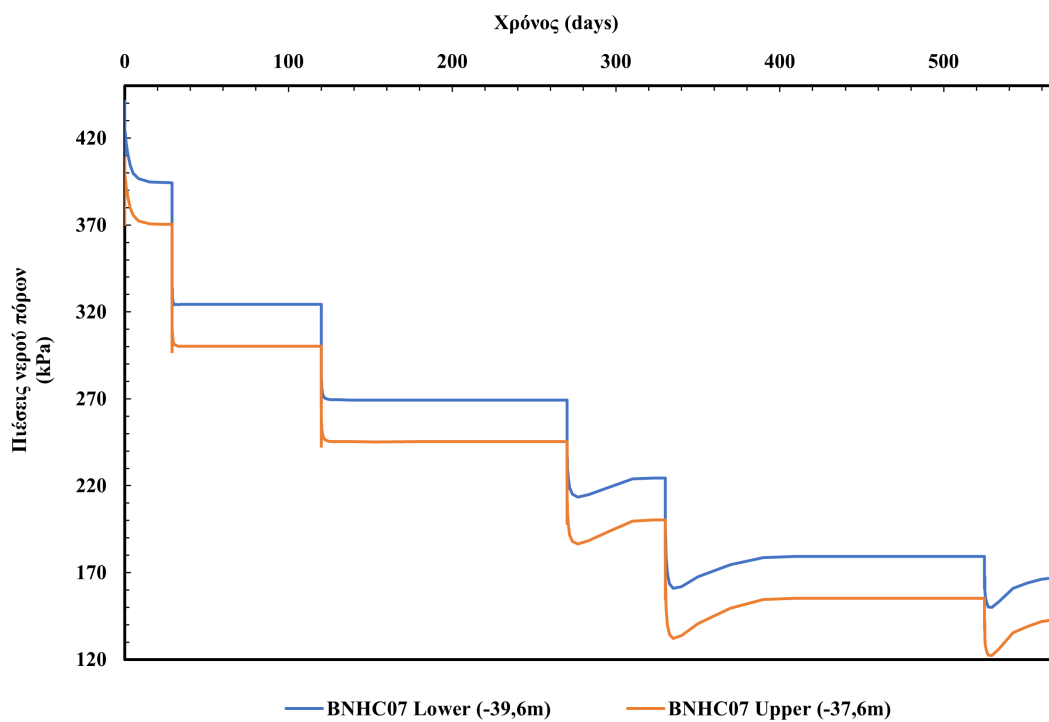


Pore water pressures p_{water} (scaled up 0.0200 times) (Pressure = negative) (Time 572.0 day)

Maximum value = 184.1 kN/m²

Minimum value = -216.2 kN/m²

Εικόνα 8.11: Υδροστατικές πιέσεις λόγω της ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα

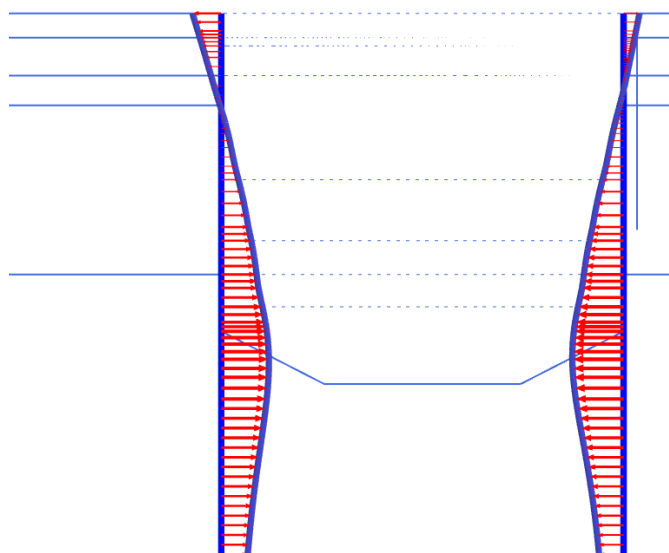


Εικόνα 8.12: Υδατικές πιέσεις στα δύο σημεία παρακολούθησης του Plaxis

8.3 3η παραμετρική διερεύνηση

Σε αυτήν την ανάλυση ακολουθήθηκε η ίδια ακριβώς διαδικασία με την προηγούμενη παραμετρική διερεύνηση, αλλά χρησιμοποιήθηκαν οι στάθμες εκσκαφής που όριζε η μελέτη εφαρμογής, σύμφωνα με τον πίνακα 8.1.

Αποτελεί ένα κατατοπιστικό μέτρο σύγκρισης μεταξύ των δύο αναλύσεων και πως επηρεάζουν ταυτόχρονα η πτώση στάθμης του υδροφόρου καθώς και των σταθμών εκσκαφής τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις.



Total displacements u_x (scaled up 200 times) (Time 572.0 day)

Maximum value = 0.01756 m (Element 54 at Node 1721)

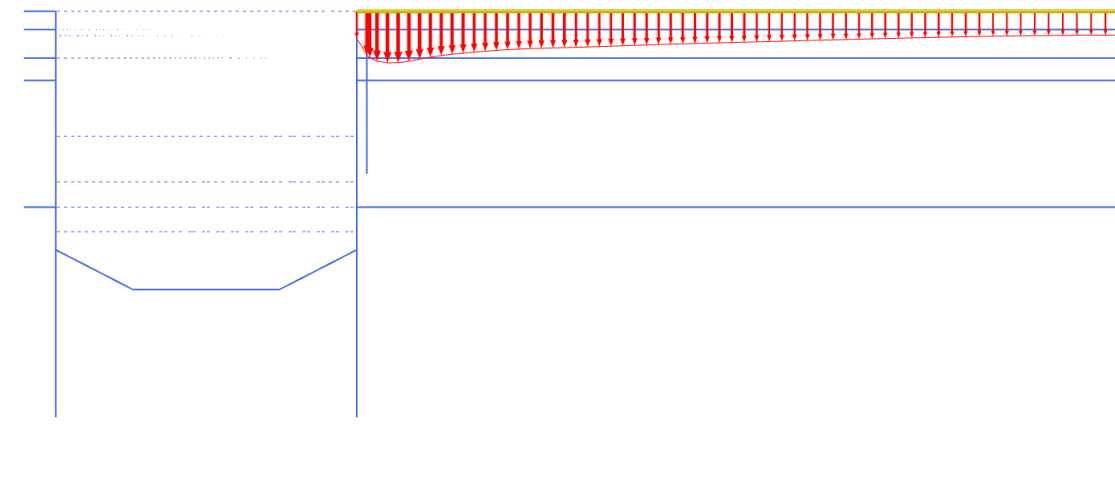
Minimum value = -0.01892 m (Element 58 at Node 4395)

Εικόνα 8.13: Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων

Οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι αρκετά μειωμένες και σε συνδυασμό με τη δημιουργία του κώνου ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα είναι μικρότερες των 20mm. Για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, η αλλαγή των βαθών στα στάδια εκσκαφής λειτουργεί υπέρ της ασφάλειας. Ο ανατολικός διαφραγματικός τοίχος παρουσιάζει μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις 18,92mm, ενώ ο δυτικός διαφραγματικός τοίχος παρουσιάζει μέγιστες μετακινήσεις 17,56mm. Επομένως, σε σχέση και με την 1η παραμετρική διερεύνηση έχει παρατηρηθεί μείωση της τάξης των 8mm και 4mm αντίστοιχα.

Όπως και στην 2η διερεύνηση, έτσι και σε αυτήν οι καθιζήσεις είναι ελαφρά αυξημένες, λόγω της πτώσης του υδροφόρου ορίζοντα. Ενώ οι οριζόντιες μετακινήσεις των Δ.Τ είναι μειωμένες, λόγω της χαλαρότητας που παρουσιάζει το στρώμα II και της μηδενικής συνοχής και γωνίας τριβής, με την αλλαγή της στάθμης του υδροφόρου θα παρουσιάσουν αύξηση οι κατακόρυφες μετακινήσεις. Ενδεικτικά, σε περίπτωση που ο κώνος ταπείνωσης ήταν πιο ανοικτός, δηλαδή επανερχόταν στην αρχική του στάθμη ο Υ.Ο σε απόσταση 30m, τότε οι καθιζήσεις θα έφταναν

τα 33,42mm. Επομένως, φαίνεται ότι η απόσταση επαναφοράς της στάθμης του Υ.Ο επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις καθιζήσεις.

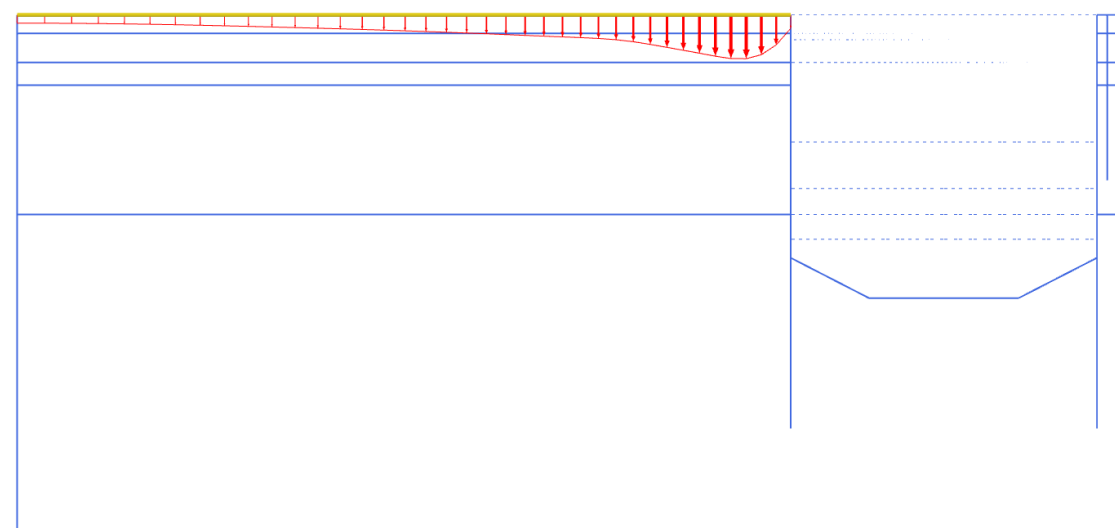


Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 572.0 day)

Maximum value = -0.01174 m

Minimum value = -0.02539 m

Εικόνα 8.14: Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς



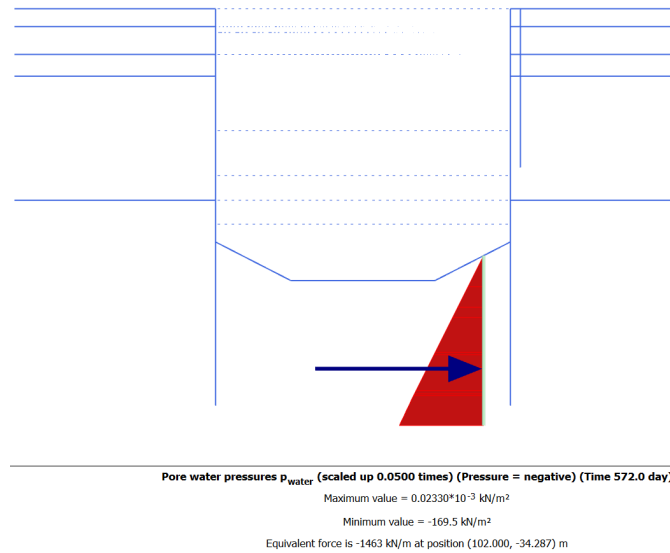
Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 572.0 day)

Maximum value = $-3.991 \cdot 10^{-3}$ m

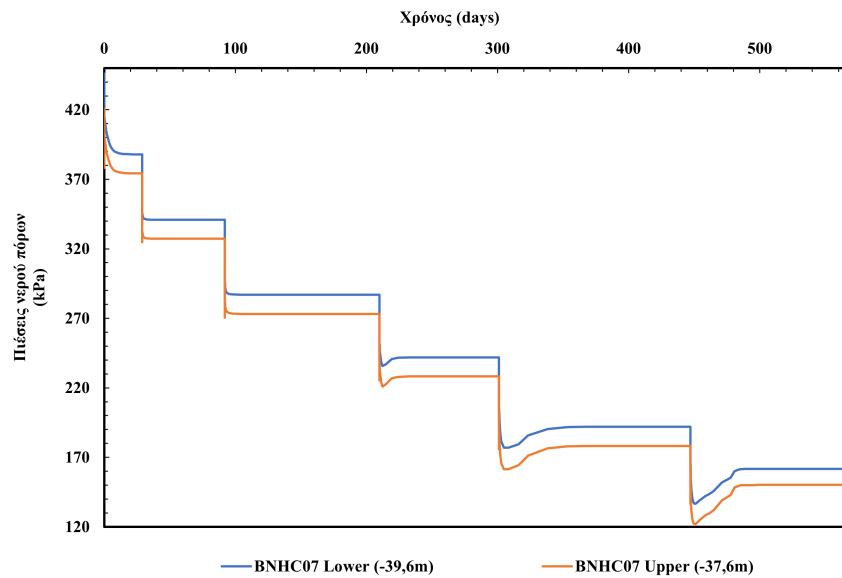
Minimum value = -0.02118 m

Εικόνα 8.15: Καθιζήσεις δυτικής παρειάς

Ο κώνος ταπείνωσης που δημιουργήθηκε είχε παρόμοιες διαστάσεις με του προηγούμενου, επομένως και οι πιέσεις των πόρων στα σημεία ενδιαφέροντος αναμένονται να είναι παραπλήσιες. Ομοίως, επιλέχθηκαν τα σημεία Upper και Lower μέσω του Plaxis για την παρακολούθηση των πιέσεων των πόρων του νερού καθ' όλη τη διάρκεια της εκσκαφής του έργου, όπου στο τελευταίο στάδιο έχουν πιέσεις 150kPa και 160kPa αντίστοιχα.



Εικόνα 8.16: Υδατικές πιέσεις εντός του σκάμματος εκσκαφής



Εικόνα 8.17: Υδατικές πιέσεις στα δύο σημεία παρακολούθησης του Plaxis

8.4 4η παραμετρική διερεύνηση

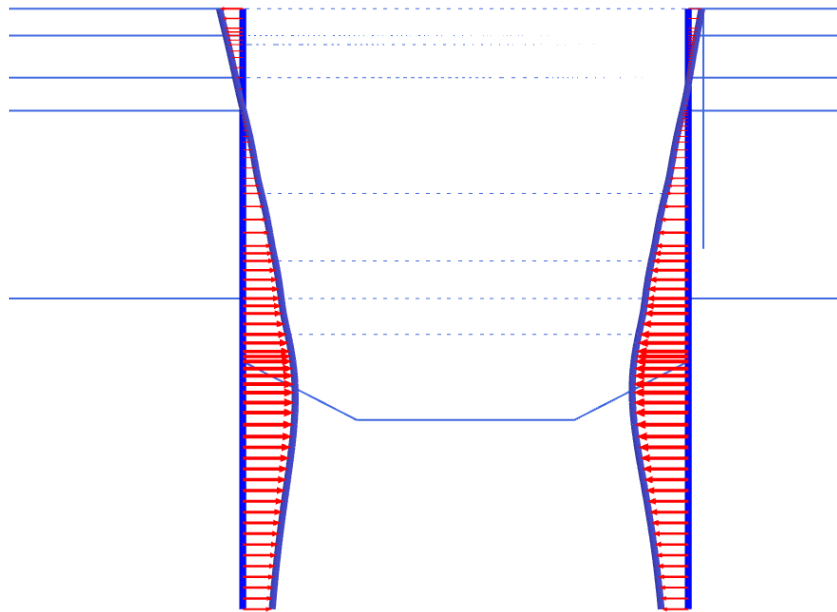
Στις προηγούμενες δύο αναλύσεις εξετάστηκε η ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, ενώ επιβεβαιώθηκε και η αρνητική επιρροή του Layer II, δηλαδή των ελώδων αποθέσεων στις κατακόρυφες μετακινήσεις, τόσο στην ανατολική όσο και στη δυτική πλευρά του σταθμού.

Σε αυτή την παραμετρική διερεύνηση εξετάστηκε η αύξηση των γεωτεχνικών παραμέτρων του στρώματος αυτού, μιας και οι δοθείσες παράμετροι θεωρούνται αρκετά συντηρητικές.

Επομένως, θεωρήθηκαν παράμετροι που είναι πιο αντιπροσωπευτικές για το στρώμα των ελώδων αποθέσεων. Έτσι, επιλέχθηκε συνοχή $c=5\text{kPa}$ και γωνία τριβής $\varphi=25^\circ$, ενώ οι παράμετροι παραμορφωσιμότητας θεωρήθηκαν:

- $E_{50}^{\text{ref}}=80\text{ MPa}$ και
- $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}=64\text{ MPa}$, ενώ
- $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (μέτρο αποφόρτισης-επαναφόρτισης) λαμβάνεται ίσο με $3 \cdot E_{50}^{\text{ref}}=240\text{ MPa}$.

Με τον επανακαθορισμό των ιδιοτήτων του δεύτερου στρώματος και την διατήρηση όλων των υπολοίπων παραμέτρων και κατασκευαστικών ακολουθιών, ακολουθεί η αριθμητική ανάλυση του προσομοιώματος.



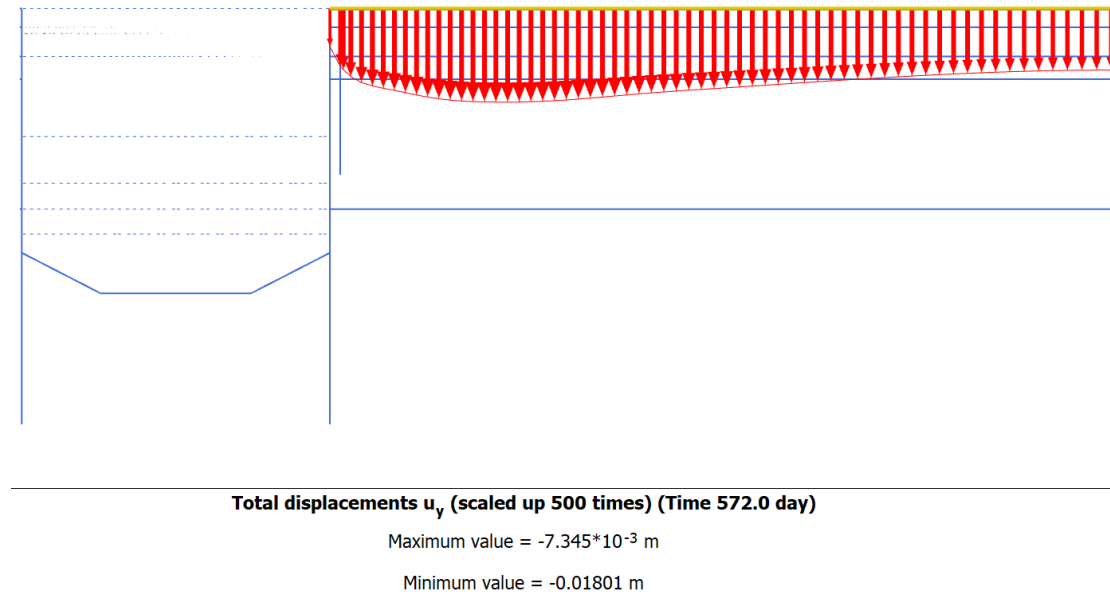
Total displacements u_x (scaled up 200 times) (Time 572.0 day)

Maximum value = 0.01744 m (Element 55 at Node 1722)

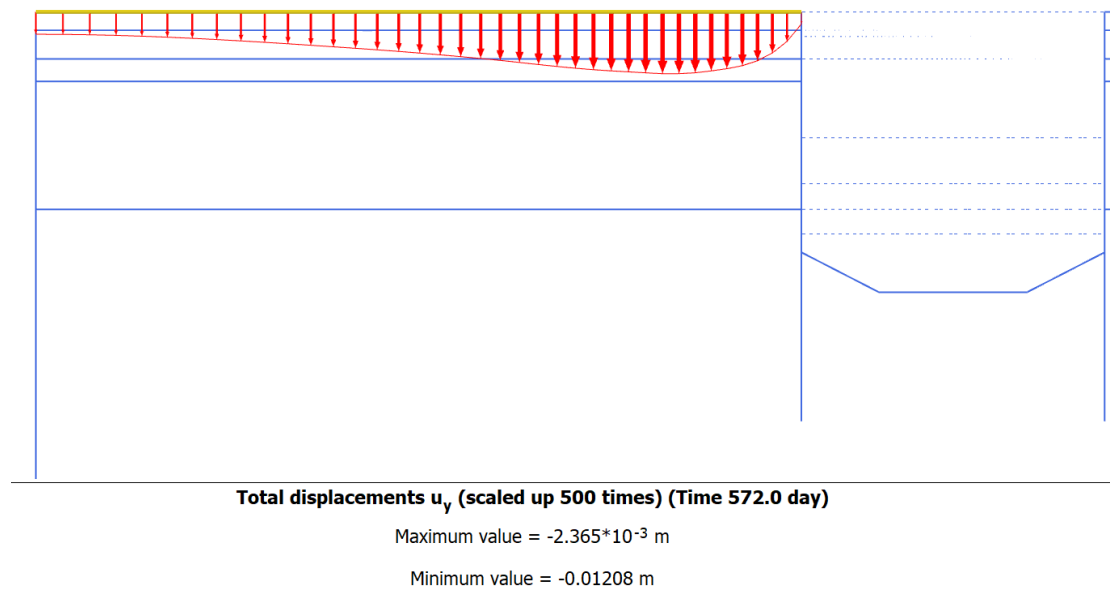
Minimum value = -0.01870 m (Element 58 at Node 4395)

Εικόνα 8.18: Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων

Οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι μειωμένες κατά λιγότερο από 1mm, και στις δύο περιπτώσεις των διαφραγματικών τοίχων. Ωστόσο, η διαφορά στις τιμές σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση αναμένεται να φανεί στις καθιζήσεις.

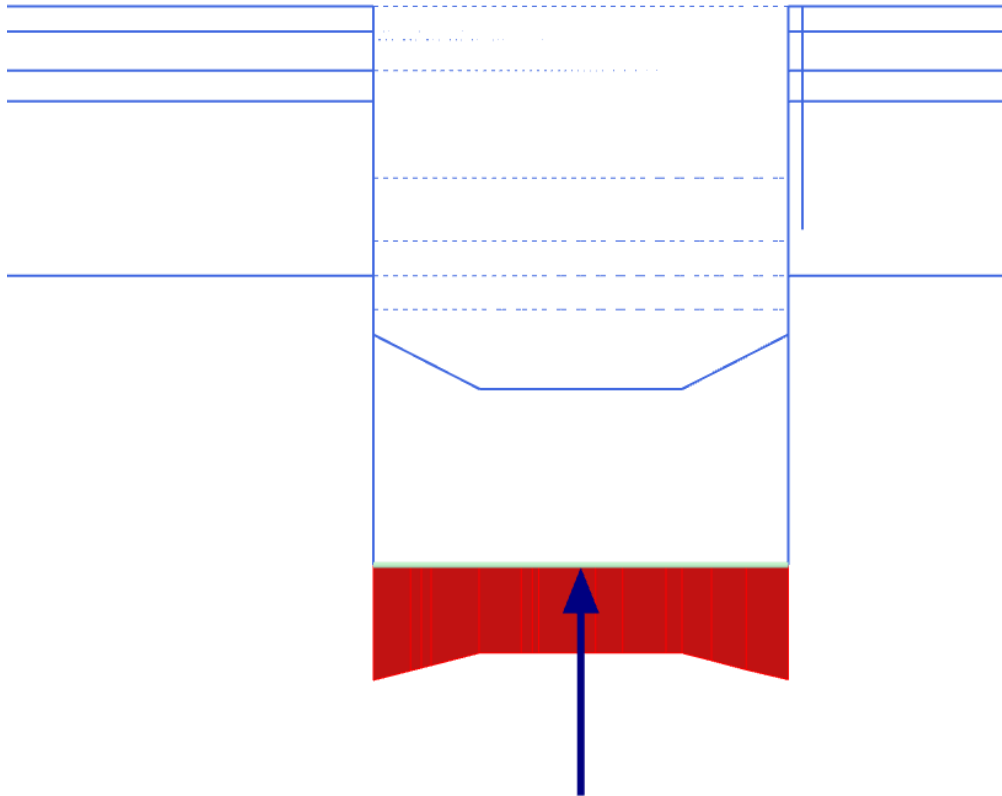


Εικόνα 8.19: Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς



Εικόνα 8.20: Καθιζήσεις δυτικής παρειάς

Οι καθιζήσεις, όπως ήταν αναμενόμενο, παρουσιάζονται αρκετά μειωμένες σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση. Συγκεκριμένα, οι μέγιστες καθιζήσεις στην ανατολική παρειά είναι 18,01mm έναντι των 25,39mm, ενώ στην δυτική παρειά είναι 12,08mm έναντι των 21,18mm. Επομένως φαίνεται ότι οι καθιζήσεις μειώθηκαν κατά 7mm και 9mm αντίστοιχα. Είναι λοιπόν προφανές, ότι οι αρκετά συντηρητικές γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού για το στρώμα II είχαν σαν αποτέλεσμα τις πολύ υψηλότερες καθιζήσεις και από τις δύο πλευρές του σκάμματος.



Pore water pressures p_{water} (scaled up 0.0500 times) (Pressure = negative) (Time 572.0 day)

Maximum value = -126.0 kN/m²

Minimum value = -165.0 kN/m²

Equivalent force is -4039 kN/m at position (89.850, -38.000) m

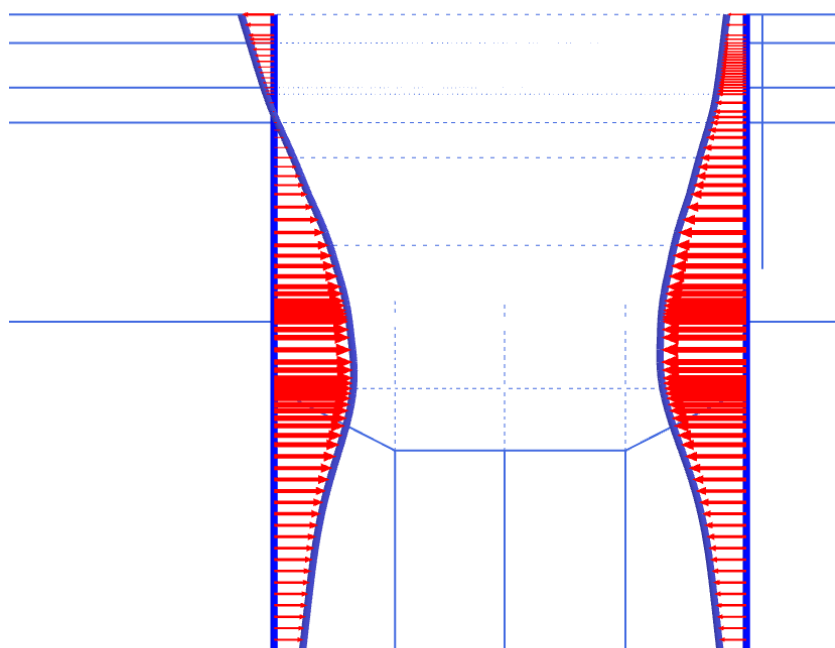
Εικόνα 8.21: Κατανομή των υδατικών πιέσεων στη στάθμη των -38m

Τέλος, λόγω της ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα, οι υδατικές πιέσεις είναι και πάλι μειωμένες, έχοντας τις ίδιες τιμές με αυτές της προηγούμενης ανάλυσης, ενώ στην εικόνα 8.21 αποτυπώνεται η κατανομή των πιέσεων στη στάθμη των -38m και πως αυτή μεταβάλλεται κατά μήκος. Στο κέντρο του σκάμματος οι πιέσεις είναι οι ελάχιστες με τιμή 126kPa, λόγω των δικτύων ροής, ενώ στις άκρες είναι οι μέγιστες με τιμή 165kPa.

8.5 5η παραμετρική διερεύνηση

Στις προηγούμενες παραμετρικές αναλύσεις (8.2, 8.3), προσομοιώθηκαν με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια οι υδατικές πιέσεις που δημιουργήσε η πτώση του υδροφόρου ορίζοντα. Ωστόσο, σε αυτήν την ανάλυση, σκοπός είναι η προσομοίωση της επιθυμητής πίεσης με την χρήση αντλήσεων και όχι με ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα.

Σε αυτήν την περίπτωση έγινε η ανάλυση με fully coupled flow deformation analysis, όπως δηλαδή η αρχική προσομοίωση και η πρώτη παραμετρική διερεύνηση. Στη συνέχεια εγκαταστάθηκαν 3 συστήματα άντλησης, που προσομοιώθηκαν με τη χρήση drains στο Plaxis και ενεργοποιήθηκαν κατά το 2ο στάδιο εκσκαφής, ορίζεται ως κατώτατη στάθμη άντλησης το εκάστοτε βάθος εκσκαφής αφαιρώντας 13m, που είναι η διαφορά της πίεσης που προσθέτει η ροή, όπως έχει υπολογιστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η ανάλυση αυτή έγινε για τις στάθμες που φάνηκαν από τις μετρήσεις της ΓΔΠ.



Total displacements u_x (scaled up 200 times) (Time $49.42 \cdot 10^6$ s)

Maximum value = 0.02511 m (Element 50 at Node 2957)

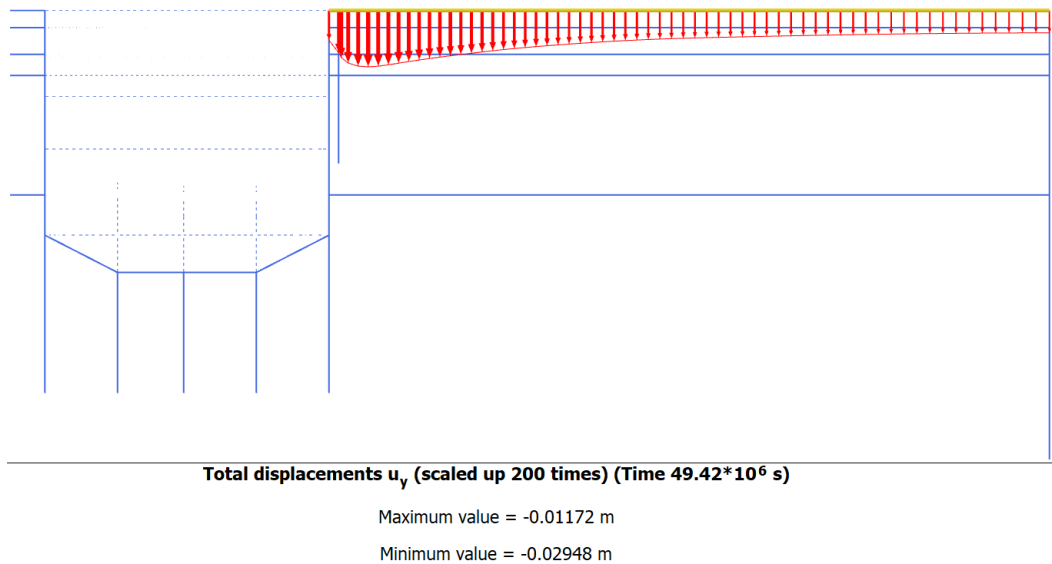
Minimum value = -0.02716 m (Element 52 at Node 7261)

Εικόνα 8.22: Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων

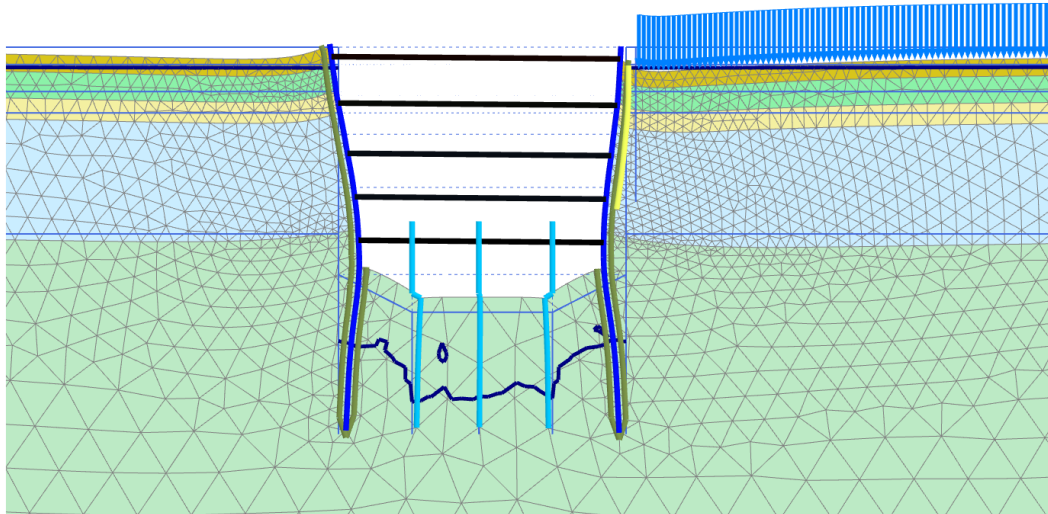
Οι οριζόντιες μετακινήσεις παρουσιάζονται μειωμένες με τον δεξιό διαφραγματικό τοίχο να έχει μέγιστη οριζόντια μετακίνηση 27,16mm ενώ ο αριστερός να έχει 25,11mm. Σε σχέση με την αρχική ανάλυση παρατηρείται μείωση της τάξης των 11mm και 7mm αντίστοιχα. Φαίνεται

λοιπόν ότι η άντληση των υδάτων έχει επηρεάσει σε κάποιο βαθμό τις οριζόντιες μετακινήσεις (βλ. 8.22).

Οι καθιζήσεις τόσο από την ανατολική όσο και από τη δυτική παρειά παρουσιάζουν μια μικρή μείωση της τάξης των 4mm (βλ. 8.23).



Εικόνα 8.23: Καθιζήσεις στην ανατολική παρειά

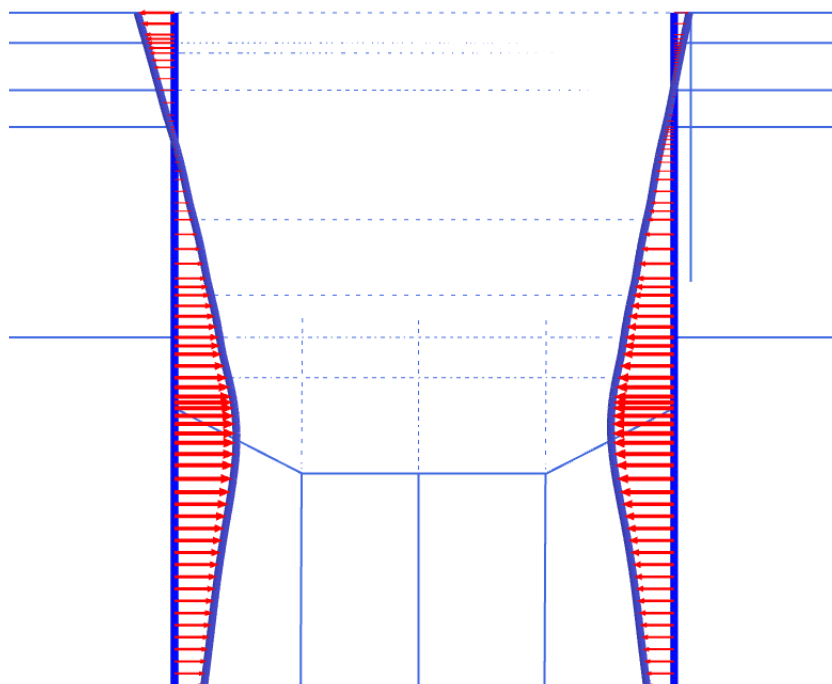


Εικόνα 8.24: Παραμορφωμένος κάρναβος κατά το τελικό στάδιο υπολογισμού

Οι πιέσεις του νερού των πόρων παρουσιάζονται μειωμένες εντός του ορύγματος στα βάθη των -37,6m και -39,6m, με τιμές 131kPa και 180kPa αντίστοιχα.

8.6 6η παραμετρική διερεύνηση

Τέλος, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με την προηγούμενη παραμετρική ανάλυση, δηλαδή την εγκατάσταση συστημάτων άντλησης των υδάτων, ενώ χρησιμοποιήθηκαν οι στάθμες εκσκαφής που όριζε η μελέτη εφαρμογής. Τα συστήματα άντλησης και πάλι ενεργοποιήθηκαν κατά το 5ο στάδιο εκσκαφής.



Total displacements u_x (scaled up 200 times) (Time 49.42*10⁶ s)

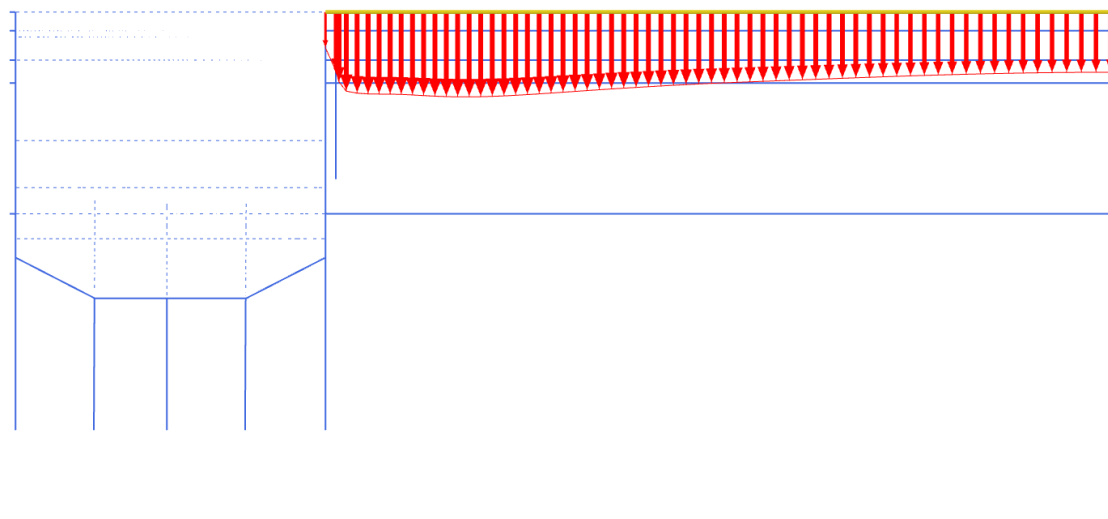
Maximum value = 0.01841 m (Element 54 at Node 3910)

Minimum value = -0.01879 m (Element 57 at Node 7346)

Εικόνα 8.25: Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων

Οι οριζόντιες μετακινήσεις παρουσιάζονται αρκετά μειωμένες σε σχέση με την πρώτη παραμετρική διερεύνηση, με τον ανατολικό διαφραγματικό τοίχο να μετακινείται κατά 18,79mm, έναντι των 24,66mm, ενώ ο δυτικός τοίχος κατά 18,41mm, έναντι των 21,79mm.

Οι καθιζήσεις παρουσιάζονται και αυτές μειωμένες, ωστόσο όχι στον ίδιο βαθμό με τις οριζόντιες μετακινήσεις των διαφραγματικών τοίχων, μιας και η άντληση των υδάτων αυξάνει τη διατμητική αντοχή του εδάφους εντός του σκάμματος εκσκαφής.

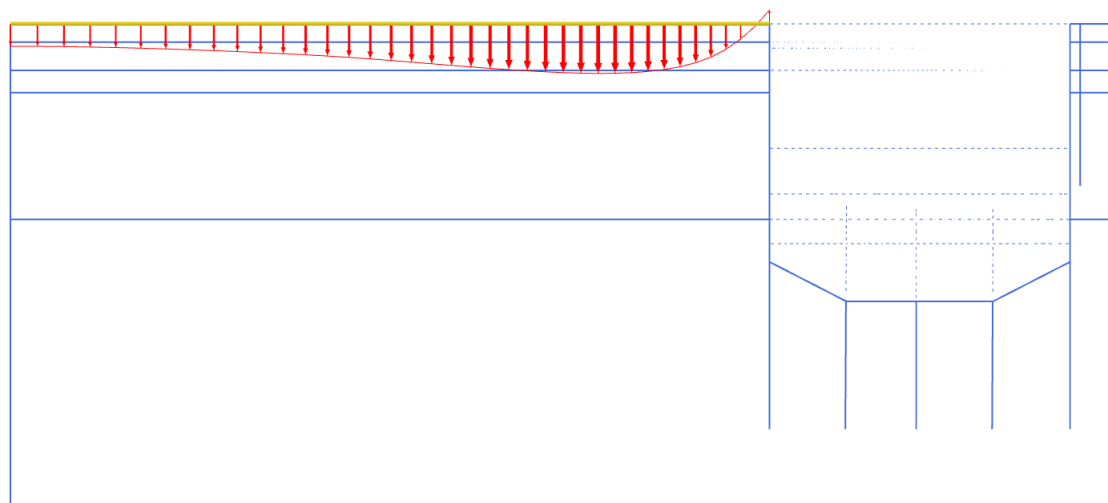


Total displacements u_y (scaled up 500 times) (Time 49.42*10⁶ s)

Maximum value = $-6.830 \cdot 10^{-3}$ m

Minimum value = -0.01625 m

Εικόνα 8.26: Καθιζήσεις ανατολικής παρειάς



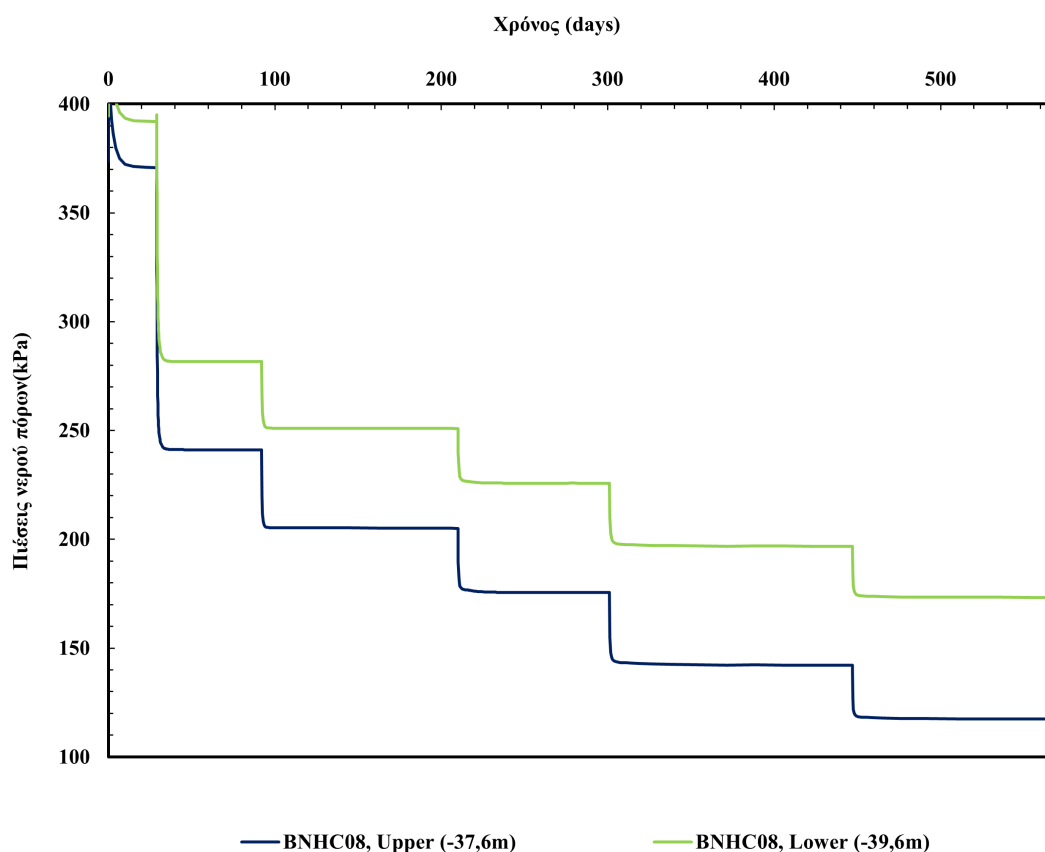
Total displacements u_y (scaled up 500 times) (Time 49.42*10⁶ s)

Maximum value = $2.710 \cdot 10^{-3}$ m

Minimum value = $-9.789 \cdot 10^{-3}$ m

Εικόνα 8.27: Καθιζήσεις δυτικής παρειάς

Οι καθιζήσεις των 16,25mm και 9,79mm αντίστοιχα για τις δύο παρειές αποτελούν την ελάχιστη καθίζηση που έχει επιτευχθεί από όλες τις αναλύσεις.



Εικόνα 8.28: Πιέσεις υδάτων στις δύο στάθμες ελέγχου, κατά τη διάρκεια των αντλήσεων

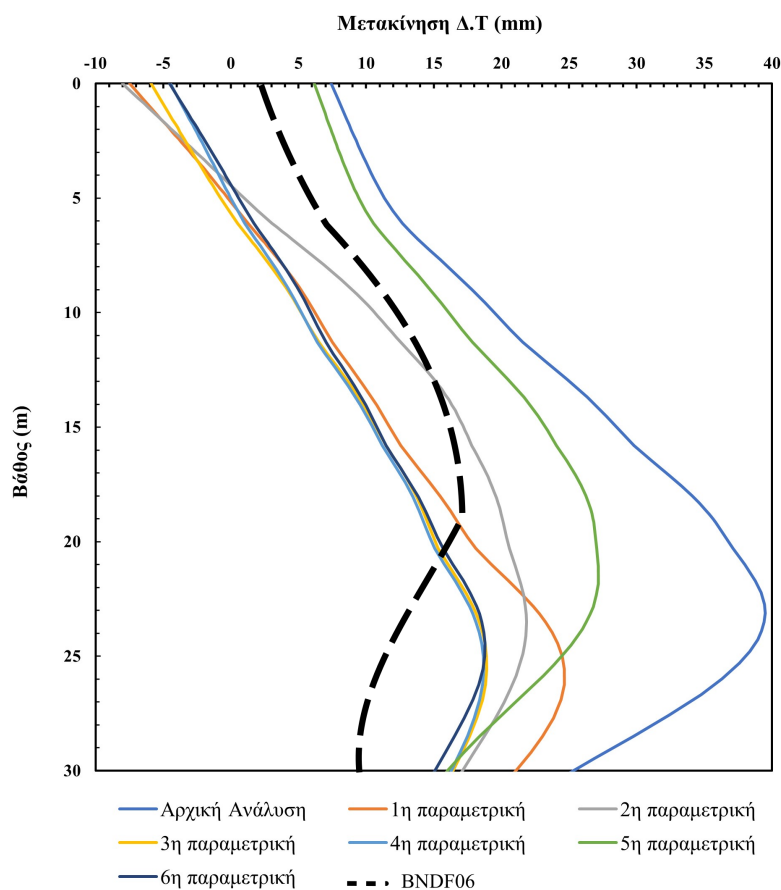
Στο παραπάνω διάγραμμα αποτυπώνονται οι υδατικές πιέσεις στα δύο σημεία παρακολούθησης μέσω του Plaxis, ενώ φαίνονται μετά το 5ο στάδιο εκσκαφής η απότομη πτώση των υδατικών πιέσεων που οφείλεται στις αντλήσεις που έχουν λάβει χώρα. Οι τελικές πιέσεις στις δύο θέσεις ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τις ενδείξεις από τα πιεζόμετρα της ΓΔΠ, με το Upper να έχει πίεση 117kPa και το Lower 173kPa.

9 Συμπεράσματα

Στις παραμετρικές διερευνήσεις που αναλύθηκαν, εξετάστηκε η επιρροή διαφόρων παραγόντων, όπως η διάφορες στάθμες εκσκαφής, η επιρροή του υδροφόρου ορίζοντα, των εδαφικών στρωμάτων, καθώς και οι αντλήσεις των υδάτων εντός του σκάμματος. Σκοπός όλων αυτών των αναλύσεων ήταν η προσπάθεια ταύτισης των ενδείξεων των οργάνων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5 με τις ενδείξεις κάποιων σημείων παρακολούθησης που εισήχθησαν στο Plaxis. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίστηκε στον πλησιέστερο δυνατό βαθμό η ταύτιση κάποιων κοινών συνθηκών προκειμένου να γίνει η τελική σύγκριση των τιμών από τα όργανα της ΓΔΠ.

9.1 Οριζόντιες μετακινήσεις Δ.Τ και αποκλισίμετρο

Οι μετακινήσεις του ανατολικού διαφραγματικού τοίχου αποτυπώνονται στην εικόνα 9.1.



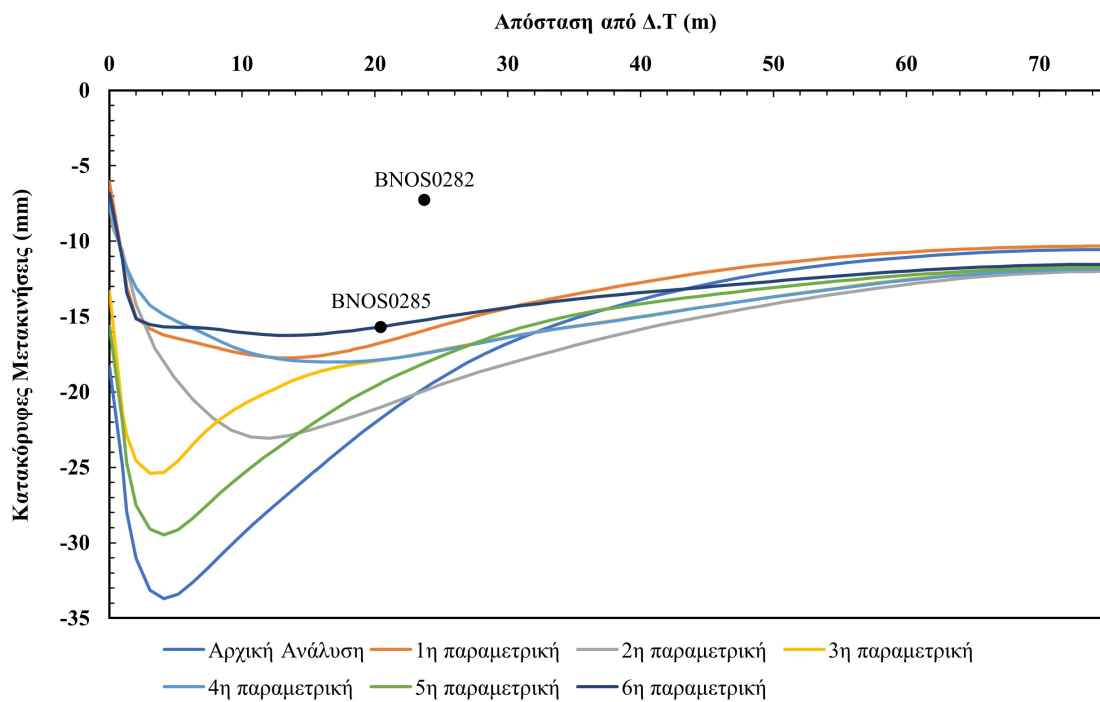
Εικόνα 9.1: Οριζόντιες μετακινήσεις διαφραγματικών τοίχων και ένδειξη αποκλισιόμετρου BDNF06

Είναι φανερό ότι η 3η, η 4η και η 6η παραμετρική διερεύνηση προσέγγισαν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό την πραγματική οριζόντια μετακίνηση του διαφραγματικού τοίχου. Η πιο κοντινή τιμή, που έχει προκύψει από την 6η παραμετρική διερεύνηση διαφέρει κατά 20%. Οι διαφορές αυτές των 3mm ουσιαστικά δεν αποτελούν λόγο ανησυχίας και απέχουν αρκετά από τα όρια επιφυλακής και συναγερμού που έχουν οριστεί.

Γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές που πλησίασαν τις πραγματικές μετρηθείσες τιμές είναι εκείνες που υπολογίστηκαν με τα βάθη που έχουν οριστεί από την μελέτη εφαρμογής. Αντιθέτως, οι οριζόντιες μετακινήσεις που έχουν προκύψει από τις αναλύσεις που χρησιμοποιήθηκαν οι στάθμες εκσκαφής όπως αποτυπώνονται στα διαγράμματα της ΓΔΠ είναι ελαφρά αυξημένες, χωρίς όμως να ξεπερνούν τα όρια επιφυλακής και συναγερμού. Επομένως, και τα δύο είδη παραμετρικών διερευνήσεων όσον αφορά τους κανονισμούς που έχει θέσει η Αττικό Μετρό κρίνονται ασφαλή.

9.2 Κατακόρυφες μετακινήσεις και χωροσταθμικά επιφανείας

Κατά την κατασκευή του σταθμού, οι καθιζήσεις αποτέλεσαν το σημαντικότερο αντικείμενο παρακολούθησης, κυρίως λόγω της έδρασης του κτηρίου του ΗΣΑΠ στην ανατολική παρειά του σκάμματος του σταθμού. Τα αυστηρά όρια των κατακόρυφων μετακινήσεων που έπρεπε να τηρηθούν ήταν εκείνα που κατέστησαν το έργο ως υψηλής δυσκολίας. Συγκεκριμένα, το όριο συναγερμού των καθιζήσεων ήταν 22mm, ενώ το όριο συναγερμού 33mm.



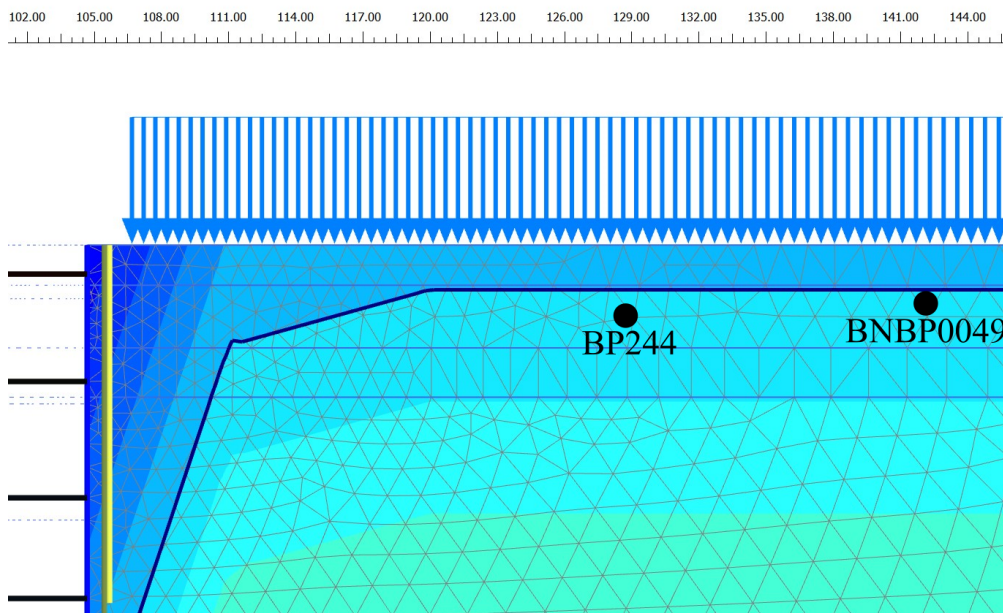
Εικόνα 9.2: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην ανατολική παρειά του σκάμματος

Η αρχική ανάλυση ξεπέρασε και τα δύο όρια, με αποτέλεσμα να μην κρίνεται ασφαλής. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η 6η παραμετρική ανάλυση εμφάνισε τις μικρότερες καθιζήσεις, με την μέγιστη να είναι 16,25mm και να βρίσκεται εντός της ασφαλούς ζώνης. Από τα χωροσταθμικά επιφανείας (βλ. εικόνα 7.7, οι θέσεις των οποίων αποτυπώνονται στην εικόνα 5.9) μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι κατά την ολοκλήρωση του σκάμματος εκσκαφής, σύμφωνα με το BNOS0282 οι μέγιστες καθιζήσεις σε απόσταση 24m από τον σταθμό ήταν 6-7mm, ενώ οι ελάχιστες που επιτεύχθηκαν από τις αριθμητικές αναλύσεις ήταν περίπου 15mm. Ωστόσο, στα χωροσταθμικά επιφανείας, και συγκεκριμένα στο BNOS0285 αποτυπώνεται καθίζηση 15mm σε απόσταση 20m από τον ανατολικό διαφραγματικό τοίχο, η οποία ταυτίζεται απόλυτα με την καθίζηση της 6ης παραμετρικής διερεύνησης. Το χωροσταθμικό BNOS0285, ωστόσο, φαίνεται να ενεργοποιήθηκε η λειτουργία του μετά το πέρας της εκσκαφής του κυρίως ορύγματος του σταθμού, επομένως υπάρχει μια αβεβαιότητα όσον αφορά τις πραγματικές καθιζήσεις κατά την εκσκαφή του σταθμού.

9.3 Υδατικές πιέσεις, στάθμη υδροφόρου ορίζοντα και πιεζόμετρα

Αναμφισβήτητα, οι ενδείξεις των πιεζομέτρων ανοικτού τύπου, αλλά και της δονούμενης χορδής αποτέλεσαν το σημαντικότερο μέτρο σύγκρισης προκειμένου να προσομοιωθεί με την μεγαλύτερη ακρίβεια η ανάλυση.

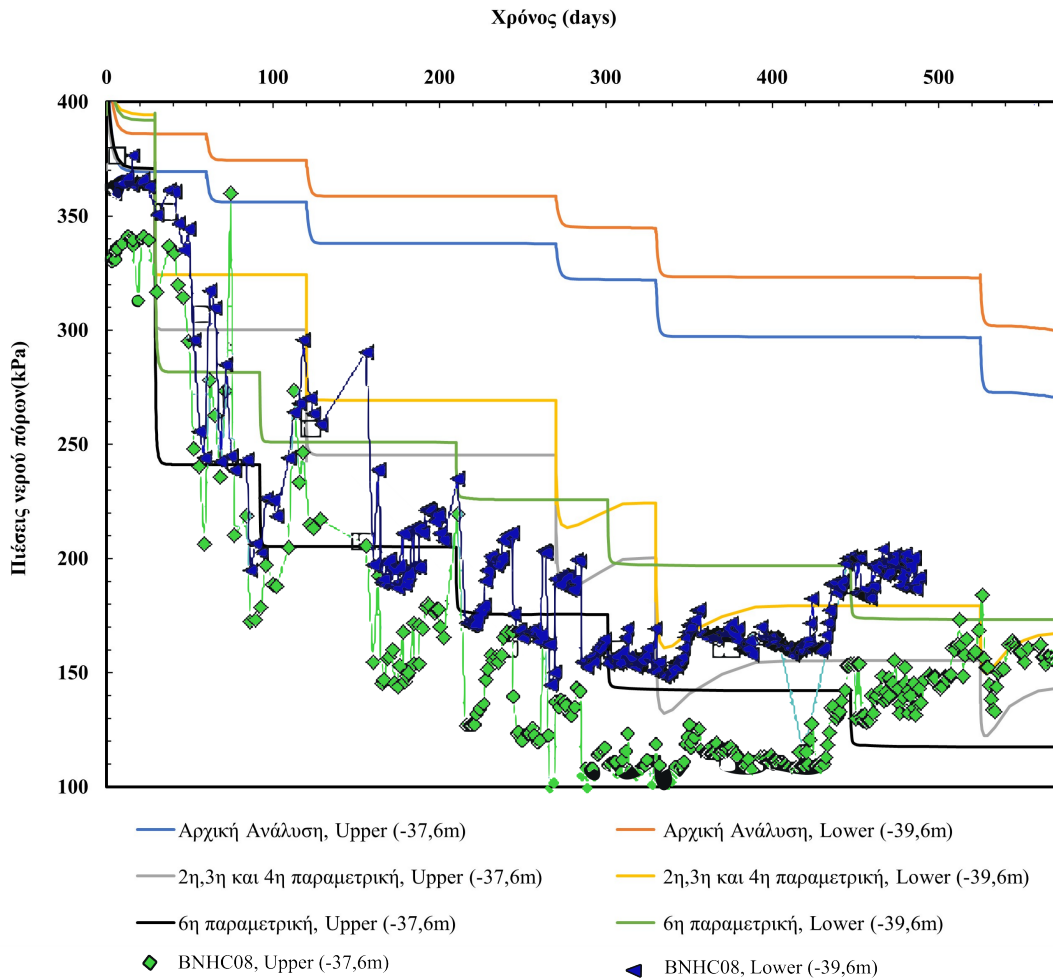
Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα από τα διαγράμματα 7.14 και 7.15 έχει επηρεαστεί σε μικρό βαθμό από τις αντλήσεις. Ομοίως και στα προσομοιώματα στα οποία έγινε ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα, η στάθμη του υδροφόρου είχε επανέλθει σε απόσταση 15m από τον διαφραγματικό τοίχο (9.3).



Εικόνα 9.3: Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα κατά την ταπείνωσή του

Στην εικόνα 9.3 αποτυπώνονται οι υδατικές πιέσεις στα σημεία Upper και Lower που εισήχθησαν ως σημεία παρακολούθησης στο Plaxis σε βάθη -37,6m και -39,6m αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι στην αρχική ανάλυση οι πιέσεις των πόρων είναι σταθερά υψηλότερες λόγω της ροής που δημιουργείται και της επιπρόσθετης πίεσης λόγω αυτής.

Αντιθέτως, στην 2η, 3η και 4η ανάλυση φαίνεται ότι οι καμπύλες των Upper και Lower έχουν πλησιάσει σε μεγάλο βαθμό τις καμπύλες από το πιεζόμετρο της ΓΔΠ. Τέλος, στην 6η παραμετρική ανάλυση η πίεση των πόρων του νερού φαίνεται ότι ταυτίζεται με τις ενδείξεις των πιεζομέτρων σε μεγάλο βαθμό, και αποτελεί την πιο κοντινή στην πραγματικότητα ανάλυση.



Εικόνα 9.4: Πιέσεις πόρων του νερού στα σημεία Upper και Lower

Βιβλιογραφίες

- [1] Graham Barnes. *Εδαφομηχανική, Αρχές και εφαρμογές*. Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2014.
- [2] Chang-Yu Ou, Pio-Go Hsieh, and Dar-Chang Chiou. Characteristics of ground surface settlement during excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(5):758–767, 1993. arXiv:https://doi.org/10.1139/t93-068, doi:10.1139/t93-068.
- [3] Maria Spanea and Nikos Gerolymos. *Comparative Study between Two-and Three-Dimensional Analyses of a Deep Excavation*. 09 2022.
- [4] Maria Spanea and Nikos Gerolymos. Finite element analysis of deep excavation: Comparison between 2d and 3d models. 08 2022.
- [5] Timothy Stark and Hangseok Choi. Slope inclinometers for landslides. *Landslides*, 5:339–350, 08 2008. doi:10.1007/s10346-008-0126-3.
- [6] Μπάστος Γ. Έγχυτα διαφράγματα. *Σεμινάριο Εδαφομηχανικής-Θεμελιώσεων*, 1980.
- [7] Β. Ν. Γεωργιάννου. *Χρήση Γεωτεχνικών Οργάνων*. Επιστημονικές Εκδόσεις Γρ. Παρισιάνος, Αθήνα, 2000.
- [8] Πλούταρχος Γιαννόπουλος. *Διαφραγματικοί Τοίχοι*. 2010.
- [9] Ιωάννης Ζευγώλης. *Ωθήσεις Γαιών-Αντιστηρίξεις*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα: Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, 2014.
- [10] Κωνσταντίνος Λουπασάκης. *Βελτίωση Γεωτεχνικής Συμπεριφοράς Γεωλογικών Σχηματισμών*. Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα: Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, 2015.
- [11] Δημήτριος Ρόζος. *Μέθοδοι Βελτίωσης-Αντιστήριξης Εδάφους-Υπεδάφους*. Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα: Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, 2007.
- [12] Κωνσταντίνος Σαμψάκης-Μπακόπουλος. *Παραμετρικές αναλύσεις επί της ενδοσιμότητας συστημάτων αντιστήριξης βαθιάς εκσκαφής. Το παράδειγμα του σταθμού “Πειραιά” του Μετρό της Αθήνας*. Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2021.