



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο:

Διερεύνηση της επιρροής διάνοιξης σηράγγων στα εντατικά μεγέθη γειτνιάζοντος φρέατος. Το παράδειγμα από την γραμμή επέκτασης του Μετρό Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά.

Παρασκευή Νουράκη, Πολιτικός Μηχανικός

Επιβλέπων : Δρ. Βασίλειος Μαρίνος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο:

Διερεύνηση της επιρροής διάνοιξης σηράγγων στα εντατικά μεγέθη γειτνιάζοντος φρέατος. Το παράδειγμα από την γραμμή επέκτασης του Μετρό Θεσσαλονίκης προς Καλαμαριά.

Παρασκευή Νουράκη, Πολιτικός Μηχανικός

Επιβλέπων : Δρ. Βασίλειος Μαρίνος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 4/11/2022

Δρ. Βασίλειος Μαρίνος, Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)

Δρ. Νικόλαος Γερόλυμος, Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δρ. Αχιλλέας Παπαδημητρίου Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2022

Copyright © Παρασκευή Νουράκη

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιο Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αποτελεί επιστέγασμα μιας προσπάθειας δύο ετών για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού τίτλου του προγράμματος Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Φυσικά τίποτα από όλα αυτά δεν θα γινόταν χωρίς την έμπρακτη στήριξη των γονιών μου και των ανθρώπων που στάθηκαν δίπλα μου σε αυτόν τον δύσκολο αλλά όμορφο δρόμο της γνώσης και της επιστήμης.

Για την εκπόνηση και ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας συνέβαλε καθοριστικά ο επίκουρος καθηγητής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και επιβλέπων αυτής της εργασίας Δρ. Βασίλειος Μαρίνος με την ιδέα του θέματος, την καθοδήγηση, τις συμβουλές και τις εξειδικευμένες γνώσεις του.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον κ. Δημήτρη Γεωργίου Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο οποίος συνέβαλε καθοριστικά στην ολοκλήρωση αυτής της έρευνας. Οι καίριες διορθώσεις, η συνεχή καθοδήγηση και η βαθιά γνώση του αντικειμένου από τον κύριο Γεωργίου συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

Σημαντική αποτέλεσε η συμβολή της κας. Δήμητρας Παπούλη, προϊσταμένης της γεωτεχνικής και δομητικής παρακολούθησης του Μετρό Θεσσαλονίκης, εκ μέρους της Άκτωρ Α.Ε. στην εύρεση και στην παροχή κατάλληλων δεδομένων και την καθοδήγηση ως προς τον τρόπο επεξεργασίας τους για την εκπόνηση αυτής της έρευνας.

Πίνακας περιεχομένων

I. Περίληψη	17
II. Abstract	21
1 Εισαγωγή-Σκοπός.....	23
1.1 Εισαγωγή.....	23
1.2 Σκοπός.....	23
2 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	27
2.1 Γεωτεχνική αξιολόγηση.....	27
2.1.1 Δοκιμή πρότυπης διεισδυσης (Standars Penetration Test – SPT)	27
2.1.2 Δοκιμή διεισδυσης πρότυπου κώνου (Cone penetration test CPT)	27
2.1.3 Δοκιμή Κυλινδρικής Τριαξονικής Φόρτισης	28
2.2 Κριτήριο Αστοχίας Mohr-Coulomb.....	29
2.3 Γεωμηχανική και δομητική παρακολούθηση κατασκευών.....	29
2.3.1 Μεγέθη μέτρησης.....	30
2.3.2 Επιλογή οργάνων μέτρησης	30
2.3.3 Μέτρηση μετακινήσεων	31
2.3.3.1 Μέτρηση επιφανειακών μετακινήσεων	31
2.3.3.2 Μέτρηση μετακινήσεων στο υπέδαφος.....	31
2.3.3.3 Επιμηκυσσιόμετρα (extensimeters).....	31
2.3.3.4 Επιμηκυσσιόμετρα με ράβδους (rod extensometers).....	33
2.3.3.4.1 Κλισιόμετρα και κλισίμετρα	35
2.3.4 Μέτρηση πίεσης των πόρων.....	39
2.3.4.1 Πιεζόμετρα ανοιχτού τύπου	39
2.3.4.2 Πιεζόμετρα ανοιχτού σωλήνα (open standpipe piezometers)	40
2.3.4.3 Πιεζόμετρα κλειστού τύπου (Closed piezometers).....	41
2.3.5 Μέτρηση φορτίων	43
2.3.6 Μέτρηση ολικής τάσης	44
2.3.6.1 Θαμμένος αισθητήρας πίεσης (embedment earth pressure cells)	44
2.3.6.2 Αισθητήρας πίεσης επαφής (contact earth pressure cells)	45
2.3.7 Μέτρηση σύγκλισης.....	45
2.3.7.1 Γεωδαιτικές μέθοδοι.....	46
2.3.7.2 Επιμηκυσσιόμετρο ταινίας (tape extensometer).....	46
2.3.7.3 Σύστημα μέτρησης συγκλίσεων “Bassett” (Bassett Convergence System).....	47
2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	48
3 Γεωτεχνική αξιολόγηση.....	55
3.1 Εισαγωγή.....	55
3.1.1 Θέση και στοιχεία έργου	55
3.2 Παρουσίαση Γεωτεχνικών Ερευνών.....	56
3.2.1 Εργασίες υπαίθρου.....	56
3.2.1.1 Γεωτρήσεις.....	56
3.2.1.2 Επιτόπου Δοκιμές	57
3.2.1.3 Εργαστηριακές Δοκιμές	58
3.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	58
3.3.1 Γεωλογικές Συνθήκες.....	58
3.4 Παράμετροι σχεδιασμού.....	61

4	Διοδιάστατη Αριθμητική Προσομοίωση Εκσκαφής Φρέατος και Σηράγγων	67
4.1	Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων RS2 – Rocscience	67
4.2	Γεωμετρία εκσκαφής φρέατος και σηράγγων	67
4.2.1	Γεωμετρία εκσκαφής φρέατος εξαερισμού	68
4.2.2	Γεωμετρία εκσκαφής σηράγγων TBMs	72
4.2.3	Γεωμετρία εκσκαφής εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM	72
4.3	Αριθμητικά προσομοιώματα	73
4.3.1	Προσομοίωση εδάφους	74
4.3.2	Προσομοίωση υποστήριξης	74
4.3.3	Διακριτοποίηση (Mesh)	74
4.3.4	Συνοριακές συνθήκες (Boundary restrains)	74
4.3.5	Φόρτιση (Loading)	75
4.4	Μηχανικές παράμετροι	75
4.4.1	Μηχανικές παράμετροι εδάφους	75
4.4.2	Μηχανικές παράμετροι υποστήριξης	76
4.4.2.1	Φρέαρ εξαερισμού	76
4.4.2.2	Σήραγγες TBMs	79
4.4.2.3	Σήραγγες τύπου NATM	80
4.5	Βασικές παραδοχές	83
4.5.1	Μηχανική συμπεριφορά μέτρων υποστήριξης	83
4.5.2	Αποτόνωση του περιβάλλοντος γεωυλικού	83
4.5.2.1	Σήραγγες TBMs	83
4.5.2.2	Σήραγγες τύπου NATM	87
4.6	Στάδια προσομοίωσης	91
4.6.1	Προσομοίωμα εκσκαφής φρέατος εξαερισμού	91
4.6.2	Προσομοίωμα εκσκαφής φρέατος εξαερισμού και διάνοιξη σηράγγων TBMs	92
4.6.3	Προσομοίωμα εκσκαφής σήραγγας τύπου NATM	93
4.6.4	Προσομοίωμα εκσκαφής φρέατος και σηράγγων TBMs και NATM	94
4.7	Μετρούμενα μεγέθη	97
5	Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων	99
5.1	Μοντέλο φρέατος εξαερισμού και σηράγγων TBMs	99
5.1.1	Κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας-καθιζήσεις	101
5.1.2	Πασσαλότοιχοι φρέατος αερισμού	104
5.1.2.1	Κατακόρυφες μετακινήσεις πασσαλότοιχων	105
5.1.2.2	Οριζόντιες μετακινήσεις πασσαλότοιχων	107
5.1.2.3	Αξονικές Δυνάμεις Πασσαλότοιχων	109
5.1.3	Εντατικά μεγέθη αντηρίδων του φρέατος αερισμού	112
5.1.3.1	Αξονική Δύναμη των αντηρίδων του φρέατος αερισμού	112
5.1.3.2	Ποσοστό Λειτουργίας των Αντηρίδων του φρέατος αερισμού	114
5.1.3.3	Καμπτικές ροπές των αντηρίδων του φρέατος αερισμού	116
5.1.3.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων με στοιχεία μελέτης	118
5.2	Διάνοιξη μόνο της σήραγγας τύπου NATM	119
5.2.1	Αποτελέσματα Μετακινήσεων	121
5.2.1.1	Ολικές μετακινήσεις σήραγγας	122
5.2.1.2	Κατακόρυφες μετακινήσεις σήραγγας	123
5.2.1.3	Οριζόντιες μετακινήσεις σήραγγας	124
5.2.1.4	Κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας - καθιζήσεις	126
5.2.1.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων με στοιχεία μελέτης	129
5.3	Προσομοίωση Συνολικού μοντέλου, που περιλαμβάνει το φρέαρ εξαερισμού, τις σήραγγες TBM και την προσομοίωση των εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM	131

5.3.1	Κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας – καθιζήσεις (Surface Settlements).....	133
5.3.2	Πασσαλότοιχοι.....	135
5.3.2.1	Κατακόρυφες μετακινήσεις πασσαλότοιχων.....	135
5.3.2.2	Οριζόντιες μετακινήσεις πασσαλότοιχων.....	138
5.3.2.3	Αξονικές Δυνάμεις πασσαλότοιχων.....	142
5.3.3	Εντατικά μεγέθη αντηρίδων του φρέατος αερισμού.....	144
5.3.3.1	Αξονική Δύναμη των αντηρίδων του φρέατος αερισμού.....	144
5.3.3.2	Μεταβολή των αξονικών δυνάμεων.....	146
5.3.3.3	Ποσοστό λειτουργίας των αντηρίδων (Working level).....	152
5.3.3.4	Καμπτικές ροπές των αντηρίδων του φρέατος αερισμού.....	153
5.3.3.5	Μεταβολή καμπτικών ροπών στις αντηρίδες του φρέατος αερισμού.....	155
5.3.4	TBM TUNNELS.....	160
5.3.5	Σήραγγες NATM.....	165
5.3.5.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων με στοιχεία μελέτης.....	167
6	Συμπεράσματα.....	169
7	Βιβλιογραφία.....	179

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1:	Συσκευή κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης.....	28
Εικόνα 2:	Γραφική απεικόνιση καταστατικού κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb.....	29
Εικόνα 3:	Μαγνητικό επιμηκυνσιόμετρο βολίδας.....	32
Εικόνα 4:	Διάταξη μαγνητικού επιμηκυνσιόμετρου βολίδας.....	33
Εικόνα 5:	Επιμηκυνσιόμετρο Borros Point.....	34
Εικόνα 6:	Πεδία εφαρμογής κλισιόμετρων.....	35
Εικόνα 7:	Τυπική διάταξη κλισιομέτρου.....	36
Εικόνα 8:	Τεχνική εγκατάστασης κλισιόμετρου.....	37
Εικόνα 9:	Συναγωγή εγκάρσιων μετακινήσεων.....	38
Εικόνα 10:	Συναγωγή εγκάρσιων μετακινήσεων.....	38
Εικόνα 11:	Τυπική διάταξη πηγαδιού παρατήρησης.....	40
Εικόνα 12:	Στάδια εγκατάστασης πιεζομέτρου ανοικτού σωλήνα Casagrande.....	41
Εικόνα 13 :	Πνευματικό πιεζόμετρο.....	42
Εικόνα 14:	Διάταξη πνευματικού πιεζομέτρου.....	42
Εικόνα 15:	Διάταξη ηλεκτρονικού πιεζομέτρου.....	43
Εικόνα 16:	Μετρητές φορτίου- Μετρητής φορτίου αγκυρίου σε βράχο.....	44
Εικόνα 17:	Θαμμένος αισθητήρας πίεσης.....	45
Εικόνα 18:	Αισθητήρες πίεσης επαφής.....	45
Εικόνα 19:	Διάταξη επιμηκυνσιόμετρου ταινίας σε σήραγγα.....	46
Εικόνα 20:	Επιμηκυνσιόμετρο ταινίας.....	47
Εικόνα 21:	Σύστημα μέτρηση συγκλίσεων "Bassett".....	47
Εικόνα 22:	Προφίλ και διάταξη γεωτρήσεων, τιμές RMR και Q στα κρίσιμα τμήματα και στην πύλη εξόδου της σήραγγας Konak. (Υν: Yamanli Volcanics, Nupp: Upper Sedimentary Sequence, Yd: Fill material).	48
Εικόνα 23:	Κάτοψη και τομή της σήραγγας και της υπόγειας διάβασης. (Με το γράμμα Μ συμβολίζονται τα σημεία στα οποία πραγματοποιείται δομητική παρακολούθηση (monitoring)).....	51
Εικόνα 24:	Αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης.....	52
Εικόνα 25:	Φωτογραφία και πλάνο της εκσκαφής του σταθμού του μετρό.....	54
Εικόνα 26:	Όργανα παρακολούθησης στην εκσκαφή του σταθμού του μετρό.....	54
Εικόνα 27:	Χάρτης της περιοχής Καλαμαριάς, Νομού Θεσσαλονίκης στον οποίον φαίνεται η χάραξη και οι κύριες κατασκευές του Μετρό της επέκτασης προς Καλαμαριά (Πηγή: Google Maps).....	55

Εικόνα 28: Γεωτρήσεις στην περιοχή του φρέατος κατα μήκος της χάραξης της γραμμής του μετρό (Πηγή: Άκτωρ ΑΕ)	56
Εικόνα 29: Γεωλογική τομή στη θέση του φρέατος.....	60
Εικόνα 30: Στρωματογραφία της περιοχής κατασκευής του φρέατος αερισμού Κρήτης (Πηγή: Άκτωρ ΑΕ) .	60
Εικόνα 31: Γεωλογική τομή στη θέση του φρέατος αερισμού	62
Εικόνα 32: Γεωλογική τομή στη θέση της σήραγγας NATM	62
Εικόνα 33: Θέση τομής αναλύσεων για την εκσκαφή του φρέατος και των δύο σηράγγων TBMs εκατέρωθεν αυτού. (Πηγή: Άκτωρ ΑΕ)	68
Εικόνα 34: Θέση τομής αναλύσεων για την εκσκαφή του φρέατος και των δύο σηράγγων TBMs εκατέρωθεν αυτού, με τις θέσεις κατασκευών και δρόμων (Πηγή: Google Earth).	69
Εικόνα 35: Κατασκευαστική τομή φρέατος εξαερισμού.	71
Εικόνα 36: Στάδια κατασκευής εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM. (Πηγή Άκτωρ ΑΕ).....	72
Εικόνα 37: Θέση εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM, σε σχέση με το φρέαρ. (Πηγή Άκτωρ ΑΕ)	73
Εικόνα 38: Συνοριακές συνθήκες προσομοιωμάτων.	75
Εικόνα 39: Φόρτιση αριθμητικού προσομοιώματος, λόγω κατασκευών και οδών.	75
Εικόνα 40: Διάταξη αντηρίδων εντός του φρέατος.	78
Εικόνα 41: Μηχανισμός άσκησης πίεσης μετώπου από το EPB – TBM (Herrenknecht AG).	83
Εικόνα 42: Εφαρμογή ισοδύναμης πίεσης υποστήριξης (pi) στην εκσκαφή, βάση του βαθμού αποτόνωσης (λ).....	84
Εικόνα 43: Τυπική καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης (M. Καββαδάς).	87
Εικόνα 44: Βαθμός αποτόνωσης σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος του άξονα εκσκαφής.....	88
Εικόνα 45: Μεταβολή του βαθμού αποτόνωσης σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής.	88
Εικόνα 46: Βάθη κάθε επιπέδου αντηρίδας	101
Εικόνα 47: Επιφανειακή καθίζηση στη Βόρεια πλευρά του φρέατος αερισμού, κατά την ολοκλήρωση της διάνοιξης των δύο σηράγγων TBM.	102
Εικόνα 48: Επιφανειακή καθίζηση στη Νότια πλευρά του φρέατος αερισμού, κατά την ολοκλήρωση της διάνοιξης των δύο σηράγγων TBM.	103
Εικόνα 49: Αξονικές δυνάμεις στις αντηρίδες και στους πασσαλότοιχους του φρέατος αερισμού κατά το τελικό στάδιο κατασκευής τους.....	113
Εικόνα 50: Καμπτικές ροπές των αντηρίδων και των πασσαλότοιχων του φρέατος αερισμού	117
Εικόνα 51. Αριθμητικό προσομοίωμα σήραγγας τύπου NATM.....	119
Εικόνα 52. Διατομή σήραγγας NATM, μετά την ολοκλήρωση της προσωρινής υποστήριξης.	120
Εικόνα 53. Θέσεις καταγραφής μετακινήσεων στο εσωτερικό της σήραγγας NATM.	121
Εικόνα 54. Ολικές μετακινήσεις περιμετρικά της σήραγγας NATM, με την ολοκλήρωση των εργασιών εκσκαφής της.....	122
Εικόνα 55. Κατακόρυφες μετακινήσεις περιμετρικά της σήραγγας NATM, με την ολοκλήρωση των εργασιών εκσκαφής της.....	124
Εικόνα 56. Οριζόντιες μετακινήσεις περιμετρικά της σήραγγας NATM, με την ολοκλήρωση των εργασιών εκσκαφής της.....	125
Εικόνα 57. Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων – καθιζήσεων έως την επιφάνεια του εδάφους.	129
Εικόνα 58: Αξονικές δυνάμεις αντηρίδων στο τελευταίο στάδιο της κατασκευής.	145
Εικόνα 59: Γεωλογική τομή στη θέση του φρέατος.....	169

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Σύγκριση των συνολικών κατακόρυφων μετακινήσεων που μετρήθηκαν κατά την διάνοιξη των σηράγγων στο πεδίο με αυτές που υπολογίστηκαν στην αριθμητική προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία για την σήραγγα 2 και 1 αντίστοιχα του έργου Konak.	50
--	----

Διάγραμμα 2: Παραμόρφωση της υπόγειας διάβασης πεζών μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης των σηράγγων	53
Διάγραμμα 3: Κατακόρυφη μετατόπιση των κυλιόμενων σκαλών.	53
Διάγραμμα 4: Συσχέτιση του συντελεστή ευστάθειας μετώπου (Λο) με την εξώθηση αυτού (Ωη). (D. Georgiou, 2021).....	86
Διάγραμμα 5: Μεταβολή βαθμού αποτόνωσης (λ), κατά μήκος του άξονα των σηράγγων, για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες IIa και IIb.	91
Διάγραμμα 6: Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής, λόγω της εκσκαφής του φρέατος αερισμού και των σηράγγων TBM για την Βόρεια πλευρά της επιφανείας.	102
Διάγραμμα 7: Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής, λόγω της εκσκαφής του φρέατος αερισμού και των σηράγγων TBM για την Νότια πλευρά της επιφανείας.	103
Διάγραμμα 8: Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων του Νότιου πασσαλότοιχου του φρέατος κατά την εκσκαφή και τοποθέτηση των αντηρίδων και την διάνοιξη των σηράγγων TBM.	105
Διάγραμμα 9: Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων του Βόρειου πασσαλότοιχου του φρέατος κατά την εκσκαφή και τοποθέτηση των αντηρίδων και την διάνοιξη των σηράγγων TBM.	106
Διάγραμμα 10: Μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον Νότιο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού.	107
Διάγραμμα 11: Μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον Βόρειο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού.	108
Διάγραμμα 12: Μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις για κάθε σημείο του πασσαλότοιχου σε κάθε έναν από τους πασσαλότοιχους.....	109
Διάγραμμα 13: Αξονικές δυνάμεις κατά το μήκος του Νότιου πασσαλότοιχου για κάθε στάδιο κατασκευής.	110
Διάγραμμα 14: Αξονικές δυνάμεις κατά το μήκος του Βόρειου πασσαλότοιχου για κάθε στάδιο κατασκευής.	111
Διάγραμμα 15: Μεταβολή των μέγιστων αξονικών δυνάμεων σε κάθε στάδιο κατασκευής για κάθε αντηρίδα του φρέατος εξαερισμού.	112
Διάγραμμα 16: Μέγιστες αξονικές δυνάμεις που ασκήθηκαν στις αντηρίδες του φρέατος αερισμού κατά την κατασκευή του φρέατος και των σηράγγων TBM.	114
Διάγραμμα 17: Μέγιστη τιμή λειτουργίας για κάθε αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής.	115
Διάγραμμα 18: Μέγιστες τιμές λειτουργίας για κάθε αντηρίδα.	116
Διάγραμμα 19: Μεταβολή της καμπτικής ροπής για κάθε αντηρίδα ανά στάδιο κατασκευής.	116
Διάγραμμα 20: Μέγιστη καμπτική ροπή για κάθε αντηρίδα.	118
Διάγραμμα 21. Μεταβολή των ολικών μετακινήσεων στο εσωτερικό της σήραγγας NATM, ανά φάση κατασκευής.	122
Διάγραμμα 22. Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων στο εσωτερικό της σήραγγας NATM, ανά φάση κατασκευής.	123
Διάγραμμα 23. Μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων στο εσωτερικό της σήραγγας NATM, ανά φάση κατασκευής.	125
Διάγραμμα 24. Προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης μόνο της σήραγγας NATM.....	126
Διάγραμμα 25. Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής, λόγω της διάνοιξης μόνο της σήραγγας NATM.....	127
Διάγραμμα 26. Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής, λόγω της διάνοιξης του φρέατος και των σηράγγων TBM και NATM.].....	127
Διάγραμμα 27: Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής στην Βόρεια πλευρά του φρέατος.	133
Διάγραμμα 28: Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής στην Νότια πλευρά του φρέατος.	134
Διάγραμμα 29: Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον Νότιο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού.	136

Διάγραμμα 30: Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον Βόρειο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού.	137
Διάγραμμα 31: Μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον φρεατοπάσσαλο	138
Διάγραμμα 32: Μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον Νότιο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού.	139
Διάγραμμα 33: Μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον Βόρειο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού.	140
Διάγραμμα 34: Μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις για κάθε σημείο του πασσαλότοιχου σε κάθε έναν από τους πασσαλότοιχους.....	141
Διάγραμμα 35: Μεταβολή των αξονικών δυνάμεων του Νότιου πασσαλότοιχου, ανάλογα με το βάθος και το στάδιο κατασκευής.	142
Διάγραμμα 36: Μεταβολή των αξονικών δυνάμεων του Βόρειου πασσαλότοιχου, ανάλογα με το βάθος και το στάδιο κατασκευής.	143
Διάγραμμα 37: Μεταβολή των μέγιστων αξονικών δυνάμεων σε κάθε στάδιο κατασκευής για κάθε αντηρίδα του φρέατος εξαερισμού	144
Διάγραμμα 38: Μέγιστες αξονικές δυνάμεις κάθε αντηρίδας	146
Διάγραμμα 39: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 1 ^η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της κατασκευής του φρέατος αερισμού.	147
Διάγραμμα 40: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 2η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της κατασκευής του φρέατος αερισμού.	147
Διάγραμμα 41: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 3η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της κατασκευής του φρέατος αερισμού.	148
Διάγραμμα 42: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 4η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της κατασκευής του φρέατος αερισμού.	148
Διάγραμμα 43: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 5η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της κατασκευής του φρέατος αερισμού.	149
Διάγραμμα 44: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 1 ^η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της διάνοιξης των σηράγγων TBM.....	150
Διάγραμμα 45: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 2η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της διάνοιξης των σηράγγων TBM.....	150
Διάγραμμα 46: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 3η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της διάνοιξης των σηράγγων TBM.....	151
Διάγραμμα 47: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 4η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της διάνοιξης των σηράγγων TBM.....	151
Διάγραμμα 48: Μέγιστη τιμή λειτουργίας για κάθε αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής.	152
Διάγραμμα 49: Μέγιστες τιμές λειτουργίας για κάθε αντηρίδα.	153
Διάγραμμα 50: Μεταβολή της καμπτικής ροπής για κάθε αντηρίδα ανά στάδιο κατασκευής.....	154
Διάγραμμα 51: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 1 ^{ης} αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής.....	155
Διάγραμμα 52: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 2ης αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής.....	156
Διάγραμμα 53: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 3ης αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής	156
Διάγραμμα 54: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 4ης αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής	157
Διάγραμμα 55: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 5ης αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής.....	157
Διάγραμμα 56: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 1 ^{ης} αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής των σηράγγων NATM.....	158
Διάγραμμα 57: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 2 ^{ης} αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής.....	158
Διάγραμμα 58: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 3 ^{ης} αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής.....	159
Διάγραμμα 59: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 4 ^{ης} αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής.....	159
Διάγραμμα 60: Μεταβολή των ολικών μετακινήσεων στη στέψη των δύο σηράγγων TBM, ανά φάση κατασκευής.	160

Διάγραμμα 61: Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων στη στέψη των δύο σηράγγων TBM, ανά φάση κατασκευής.	161
Διάγραμμα 62: Μεταβολή των αξονικών δυνάμεων στη στέψη των δύο σηράγγων TBM, ανά φάση κατασκευής.	162
Διάγραμμα 63: Ποσοστιαία μεταβολή των αξονικών δυνάμεων στη στέψη των δύο σηράγγων TBM, ανά φάση κατασκευής.	163
Διάγραμμα 64: Μεταβολή των καμπτικών ροπών στη στέψη των δύο σηράγγων TBM, ανά φάση κατασκευής.	163
Διάγραμμα 65: Ποσοστιαία μεταβολή των καμπτικών ροπών στη στέψη των δύο σηράγγων TBM, ανά φάση κατασκευής.	164
Διάγραμμα 66: Μεταβολή των ολικών μετακινήσεων στη στέψη των δύο σηράγγων NATM, ανά φάση κατασκευής.	165
Διάγραμμα 67: Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων στη στέψη των δύο σηράγγων NATM, ανά φάση κατασκευής.	166

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1: Σύνοψη των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και των συντελεστών παραμόρφωσης για τις γεωτεχνικές ενότητες.	49
Πίνακας 2: Τιμές μετακινήσεων που προέκυψαν από τις μετρήσεις στο πεδίο και από τις αριθμητικές αναλύσεις.	52
Πίνακας 3: Στοιχεία δειγματοληπτικών και πρεσσιομετρικών γεωτρήσεων.	57
Πίνακας 4: Εδαφικές κατηγορίες που προέκυψαν από ομαδοποίηση των εδαφικών χαρακτηριστικών.	61
Πίνακας 5 : Τυπικές τιμές για τα εδαφικά βάρη εδαφών (Βαλαλάς 1996).	63
Πίνακας 6 : Τυπικές τιμές για τα εδαφικά βάρη εδαφών (Holtz & Kovacs 1981)	63
Πίνακας 7: Μηχανικές ιδιότητες εδάφους (Βαλαλάς 1996)	64
Πίνακας 8. Μηχανικές παράμετροι εδαφικού υλικού.	65
Πίνακας 9: Αποστάσεις και περιγραφή κτηρίων και οδών εκατέρωθεν του φρέατος.	69
Πίνακας 10: Σύνολο στοιχείων και κόμβων ανά περίπτωση προσομοίωσης.	74
Πίνακας 11. Μηχανικές παράμετροι εδαφικού υλικού.	76
Πίνακας 12: Μηχανικές ιδιότητες τοίχου με πασσάλους.	77
Πίνακας 13. Μηχανικές ιδιότητες αντηρίδων.	78
Πίνακας 14. Μηχανικές ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος εσωτερικού φρέατος.	79
Πίνακας 15. Μηχανικές ιδιότητες οπλισμένου σκυροδέματος πλάκας θεμελίωσης.	79
Πίνακας 16. Μηχανικές ιδιότητες προκατασκευασμένων δακτυλίων σκυροδέματος (segments).	80
Πίνακας 17. Προσδιορισμός ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας (E_{FP}) «ενισχυμένης ζώνης» δοκών προπορείας.	81
Πίνακας 18. Μηχανικές ιδιότητες ομπρέλας δοκών προπορείας.	82
Πίνακας 19. Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών πλασιών σήραγγας τύπου NATM.	82
Πίνακας 20. Μηχανικές ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος σήραγγας τύπου NATM.	83
Πίνακας 21. Ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης (λ_{EPB}) για εκσκαφή με EPB-TBM.	87
Πίνακας 22: Ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης (λ) για εκσκαφή των σηράγγων τύπου NATM.	90
Πίνακας 23: Επιτρεπόμενα όρια καθιζήσεων και παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σηράγγων (Πηγή: Αττικό Μετρό)	104
Πίνακας 24: Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής ανάλυσης για το φρέαρ αερισμού, με αποτελέσματα μελέτης έργου.	118
Πίνακας 25. Επιτρεπόμενα όρια καθιζήσεων και παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας (Πηγή: Αττικό Μετρό)	128

Πίνακας 26. Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής ανάλυσης για διάνοιξη σήραγγας NATM, με αποτελέσματα μελέτης έργου.	130
Πίνακας 27: Επιτρεπόμενα όρια καθιζήσεων και παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σηράγγων (Πηγή: Αττικό Μετρό).....	135
Πίνακας 28: Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής ανάλυσης για το φρέαρ αερισμού, με αποτελέσματα μελέτης έργου.	167
Πίνακας 29: Εδαφικές κατηγορίες που προέκυψαν από ομαδοποίηση των εδαφικών χαρακτηριστικών. ..	170
Πίνακας 30:Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με αποτελέσματα μελέτης έργου και όρια επιτρεπόμενα όρια της Αττικό Μετρό..	176

I. Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την έρευνα επιρροής της διάνοιξης σηράγγων στα εντατικά μεγέθη του φρέατος αερισμού Κρήτης, που αποτελεί μέρος του έργου «Μετρό Θεσσαλονίκης – Επέκταση Καλαμαριάς». Για την εξέταση αυτής της αλληλεπίδρασης αρχικά απαιτείται η γνώση των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής που βρίσκεται το σύνολο της κατασκευής. Για αυτό τον λόγο αξιοποιούνται δεδομένα από γεωτρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί στην περιοχή κατά της φάση μελέτης της επέκτασης του μετρό Θεσσαλονίκης. Έπειτα από επεξεργασία των δεδομένων των επιτόπου αλλά και των εργαστηριακών δοκιμών γίνεται ομαδοποίηση των εδαφικών ζωνών και εξαγωγή των εδαφικών παραμέτρων. Με αυτές τις εδαφικές παραμέτρους γίνεται η προσομοίωση των κατασκευών σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Για την έρευνα αυτή γίνεται χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων RS2 της Rocscience. Για την προσομοίωση των κατασκευών ακολουθούνται δύο μεθοδολογίες προσομοίωσης. Η πρώτη μεθοδολογία περιλαμβάνει τον συνδυασμό δύο ξεχωριστά επιλυμένων αριθμητικών μοντέλων ενώ η δεύτερη ένα αριθμητικό μοντέλο. Στο τέλος της κάθε μεθοδολογίας λαμβάνονται τιμές της μεταβολής των εντατικών μεγεθών τόσο του φρέατος αερισμού όσο και των σηράγγων που βρίσκονται εκατέρωθεν και εγκάρσια του. Οι τιμές των δύο μεθοδολογιών συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά συγχρόνως και με της αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν από την μελέτη εφαρμογής αλλά και αυτές που μετρήθηκαν στο πεδίο κατά την κατασκευή του έργου.

Πιο αναλυτικά αρχικά γίνεται εξέταση των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής που αναμένεται να κατασκευαστεί το φρέαρ αερισμού καθώς και τα γεωτεχνικά στοιχεία των προς εκσκαφή γεωυλικών που αναμένεται να συναντηθούν κατά την διάνοιξη των σηράγγων του μετρό και των εγκάρσιων σηράγγων που θα τις ενώνουν με το φρέαρ εξαερισμού. Τα γεωτεχνικά στοιχεία λαμβάνονται από τη στατιστική επεξεργασία των εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών που ελήφθησαν από τις γεωτρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί κατά μήκος της υπό έρευνα χάραξης. Βάσει αυτών δημιουργείται το γεωτεχνικό μοντέλο της περιοχής και επιλέγονται οι εδαφικές μηχανικές παράμετροι με τις οποίες θα γίνει η προσομοίωση των κατασκευών και της αλληλεπίδρασης αυτών.

Για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών αλληλεπίδρασης δημιουργούνται τρία (3) μοντέλα προσομοίωσης. Το πρώτο περιλαμβάνει την προσομοίωση του φρέατος αερισμού και των σηράγγων του μετρό που έχουν διανοιχθεί με μηχανήματα TBM (Tunnel Boring Machine). Από αυτή την ανάλυση μπορεί να εκτιμηθεί η επιρροή που έχει η διάνοιξη σηράγγων TBM στο φρέαρ και πως συνολικά το έργο επηρεάζεται

από τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των εδαφών. Έπειτα στο δεύτερο μοντέλο προσομοιώνονται και οι εγκάρσιες σήραγγες που έχουν διανοιχτεί με τη Νέα Αυστριακή Μέθοδο (NATM) και ενώνουν το φρέαρ με τις σήραγγες TBM. Για την κατασκευή αυτού του μοντέλου λαμβάνεται υπόψιν η «χαλάρωση» που έχει προκληθεί στο περιβάλλον έδαφος του φρέατος που θα διανοιχθούν οι σήραγγες NATM λόγω της κατασκευής του φρέατος αλλά και των σηράγγων TBMs, μέσω της αποτόνωσης αυτού. Από το δεύτερο μοντέλο γίνεται αντιληπτή η επιρροή του εγκάρσιων σηράγγων στις κατακόρυφες μετακινήσεις της επιφανείας. Παράλληλα λαμβάνονται οι μεταβολές των εντατικών μεγεθών των σηράγγων σε κάθε φάση διάνοιξης τους. Τέλος στο τρίτο μοντέλο προσομοιώνονται το φρέαρ αερισμού, οι σήραγγες TBM και οι εγκάρσιες σήραγγες NATM. Μέσω αυτής της ανάλυσης γίνεται αντιληπτό το πώς επηρεάζονται τα εντατικά μεγέθη του φρέατος από τη διάνοιξη των σηράγγων TBM και αντίστοιχα τα εντατικά μεγέθη των σηράγγων TBM και του φρέατος από την διάνοιξη των σηράγγων NATM.

Για την καλύτερη και πολύπλευρη κατανόηση των εντατικών μεγεθών που λήφθηκαν από τα μοντέλα δισδιάστατης ανάλυσης της συγκεκριμένης έρευνας, από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, κρίθηκε σκόπιμη η σύγκριση τους με εντατικά μεγέθη της μελέτης εφαρμογής και τα αντίστοιχα που καταγράφηκαν στο πεδίο κατά την κατασκευή των έργων.

Τα δεδομένα μετρήσεων ελήφθησαν κατά την διάρκεια της κατασκευής μέσω ενός ολοκληρωμένου συστήματος γεωτεχνικής και δομητικής παρακολούθησης. Τα δεδομένα αυτά αφορούσαν τις κατακόρυφες μετακινήσεις της επιφανείας οι οποίες ελήφθησαν μέσω χωροσταθμικών ακίδων που είχαν τοποθετηθεί στο έδαφος στην ευρύτερη περιοχή του έργου. Για τα εντατικά μεγέθη των αντηρίδων αξιοποιήθηκαν δεδομένα που αφορούσαν την μέτρηση των φορτίων και ελήφθησαν μέσω κυψελών πίεσης και την μέτρηση των παραμορφώσεων που ελήφθησαν μέσω παραμορφωσίμετρων. Επιπλέον για την παρακολούθηση των οριζόντιων μετακινήσεων με το βάθος τοποθετήθηκαν αποκλισιόμετρα εντός των πασσάλων του φρέατος αερισμού. Τα δεδομένα των μετρήσεων από την κατασκευή που προαναφέρθηκαν αξιοποιήθηκαν σε αυτή την έρευνα μέσω σύγκρισης με των αντίστοιχων αποτελεσμάτων των αριθμητικών μοντέλων που προσομοίωσαν την κατασκευή. Επιπλέον τα αποτελέσματα από την γεωτεχνική και δομητική παρακολούθηση χρησιμοποιήθηκαν και ως μέσο επαλήθευσης των αποτελεσμάτων των αριθμητικών μοντέλων.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας με τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν στο πεδίο δείχνει ότι τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματικότητα. Επιπλέον μέσω της σύγκρισης προέκυψε ότι τα αποτελέσματα των μοντέλων

προσομοίωσης με τη χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ήταν κατά τι πιο συντηρητικά σε σχέση με αυτά που είχε υπολογίσει η μελέτη εφαρμογής και αυτά που μετρήθηκαν στο πεδίο κατά την κατασκευή των έργων. Η διαφορά αυτή πιθανώς οφείλεται στο διαφορετικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που έχει χρησιμοποιηθεί στη μελέτη του έργου, στις διαφορετικές παραδοχές ως προς τη μεθοδολογία ανάλυσης αλλά και παραμέτρων υποστήριξης και σίγουρα στις διαφορετικές γεωτεχνικές παραμέτρους του εδάφους, δεδομένου ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει γίνει εκ' του μηδενός γεωτεχνική αξιολόγηση και εκτίμηση εδαφικών παραμέτρων.

II. Abstract

The present MSc thesis was prepared within the framework of the postgraduate study program “Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures” for the National Technical University of Athens.

The scope of this thesis is to research on how stresses of the “Crete Steet” underground ventilation shaft structure, which is part of the "Metro Thessaloniki - Kalamaria Lina Extension" project, are effected by adjacent tunneling excavation works. Firstly, in order to study this interaction, knowledge of the geological conditions of the area where the structure is located is required. For this reason, data from boreholes carried out in the area during the design stage of the extension of the Thessaloniki metro line are used. After processing the data from the on-site and laboratory tests, the ground is grouped in soil zones and ground parameters for each zone are selected. Using these ground parameters the construction works are simulated in finite element software. For this research, Rocscience RS2 finite element software is used. For the simulation of the construction works, two simulation methodologies are followed. The first methodology involves the combination of two separate numerical models (shaft & adjacent tunnels) while the second methodology only one numerical model for the entire underground system. After completion of each methodology model, the values of the stress changes for both the ventilation shaft and the tunnels located either side of the shaft as well as the connecting cross passage tunnels are obtained. The stress values, extracted from the two models, are compared to each other and then correlated with the equivalent values calculated at the design phase as well as to those measured on-field during the construction of the project.

In detail, initially, the geological conditions of the area where the ventilation shaft is expected to be constructed, as well as the geotechnical properties of the excavated soils that are expected to be encountered during the excavation process of the underground tunnels and the cross passage tunnels that will connect them to the ventilation shaft, are examined. Geotechnical information is obtained from statistical processing of the laboratory and on-site testing data collected from boreholes that have been carried out along the area of the extension line under investigation. Based on these, a geotechnical model of the area is re-created with carefully selected soil mechanical parameters with which the construction works and the structures interaction will be simulated.

For better understanding the interaction mechanisms, three (3) simulation models are created. The first model includes the simulation of the ventilation shaft and the underground tunnels that have been bored by the TBM (Tunnel Boring Machine) machines. From the analysis, the influence of the TBM tunneling on the shaft can be estimated as well as how the overall system is affected by the geotechnical characteristics of the soil zones. Then, in the second model, the transverse tunnels that have been excavated with the New Austrian Method

(NATM) and connect the shaft with the TBM tunnels are simulated. For this model, the ground "relaxation" that has occurred in the soil surrounding the shaft at the areas where the NATM tunnels are to be excavated due to the construction of the shaft and the TBMs tunnels, is taken into account. From the second model, the influence that the excavation of the transverse tunnels has on the vertical movements of the surface is obvious. At the same time, the stress changes that happen on the tunnels in each phase of their excavation are recorded. Finally, in the third model, the ventilation shaft, the TBM tunnels and the NATM cross tunnels are simulated all together in this one model. Through this analysis it is understood how the stresses on the shaft are affected by the excavation of the TBM tunnels and respectively how the stresses of the TBM tunnels and the shaft are affected by the excavation of the NATM cross tunnels.

For a better and multi-faceted understanding of the stress values obtained from the above explained two-dimensional analysis models of the specific research, with the use of finite element software, it was considered suitable to compare them with the stresses calculated at the design stage as well as the ones recorded in the field during the construction of the project.

Measurements were recorded during construction through an integrated geotechnical and structural monitoring system. These data related to vertical movements measured at the ground surface and were obtained through geodetic pins that were placed in the ground throughout the wider area of the project. For the stress values of the supporting struts, data related to load measurements were obtained through pressure cells and measured deformations through strain gauges. In addition, inclinometers were placed inside the piles of the ventilation shaft to monitor the horizontal movements with depth. The aforementioned measurement data recorded during construction works were utilized in this research through comparison with the equivalent results of the numerical simulation models. Moreover, the results from the geotechnical and structural monitoring were also used as a mean to verifying the results of the numerical simulation models.

1 Εισαγωγή-Σκοπός

1.1 Εισαγωγή

Οι σύγχρονες αστικές ανάγκες καθιστούν ολοένα και πιο απαραίτητη την κατασκευή υπογείων έργων και τη διάνοιξη σηράγγων. Η εκσκαφή σηράγγων προκαλεί τη δημιουργία μιας ζώνης διαταραχής στον περιβάλλοντα χώρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή των εντατικών μεγεθών των υπερκείμενων κατασκευών. Οι υπερκείμενες κατασκευές αλληλοεπιδρούν με τις υπόγειες εκσκαφές γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες και σε μη αναστρέψιμες βλάβες των δομικών τους στοιχείων. Επομένως σημαντικός παράγοντας στην υλοποίηση ενός υπογείου έργου είναι η εξέταση της αλληλεπίδρασης του με τις υπόλοιπες κατασκευές στην ευρύτερη περιοχή. Ο σχεδιασμός τόσο περίπλοκων υπόγειων κατασκευών αποτελεί μεγάλη πρόκληση για τους μηχανικούς διότι περιέχει αστάθμητους παράγοντες και η ερμηνεία καθώς και η παραμετροποίηση των εδαφικών παραγόντων περιέχει αρκετές αβεβαιότητες. Το ποσοστό αβεβαιότητας ποικίλει κατά περίπτωση, επομένως είναι απαραίτητο ένα εργαλείο παρακολούθησης ώστε να αντισταθμιστούν αυτές οι αμφιβολίες και να διερευνηθεί το έδαφος. Για την βέλτιστη ασφάλεια και λειτουργία της κατασκευής απαιτείται αυξημένη παρακολούθηση του έργου τόσο για το έργο αυτό καθαυτό όσο και για τον αστικό πολεοδομικό ιστό στα πλαίσια του οποίου κατασκευάζεται. Λόγω αυτού χρησιμοποιούνται νέες τεχνολογίες που επιτρέπουν την παρακολούθηση των εντατικών μεγεθών του υπό κατασκευή έργου ή παρακείμενων έργων κατά την διάρκεια διάνοιξης ενός υπογείου έργου (monitoring).

Η γεωτεχνική και δομητική παρακολούθηση επιτρέπει την επαλήθευση ή την αναθεώρηση του σχεδιασμού της κατασκευής. Κατά τη φάση κατασκευής ελέγχονται αν οι μετρήσεις συνάδουν με αυτές που περιέχονται στη μελέτη ειδάλλως απαιτείται επανασχεδιασμός του έργου. Συγχρόνως συμβάλλει στη ελαχιστοποίηση των ζημιών στις παρακείμενες κατασκευές και επιτρέπει την κήρυξη συναγερμού σε έκτακτες καταστάσεις. Η γεωτεχνική και δομητική παρακολούθηση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στη βελτιστοποίηση της προόδου του έργου και στην ασφάλεια της κατασκευής, για τον λόγο αυτό τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται και κατά την λειτουργία του έργου για την έγκαιρη προειδοποίηση σε τυχόν αστοχίες ή έκτακτες περιπτώσεις από εξωγενείς παράγοντες όπως είναι τα έντονα καιρικά φαινόμενα ή οι σεισμοί. Η επιρροή των βαθιών κατασκευών, όπως είναι οι υπόγειες σήραγγες, στις παρακείμενες κατασκευές αποτελεί μια επιπλέον πρόκληση για τους μηχανικούς.

1.2 Σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία ερευνά την επιρροή στην κατασκευή του φρέατος αερισμού Κρήτης, που αποτελεί μέρος του έργου «Μετρό Θεσσαλονίκης – Επέκταση Καλαμαριάς», από τη διάνοιξη των σηράγγων

του μετρό που διέρχονται εκατέρωθεν του και των εγκάρσιων σηράγγων που ενώνουν το φρέαρ με τις σήραγγες του μετρό.

Πιο ειδικά αρχικά γίνεται εξέταση των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής που αναμένεται να κατασκευαστεί το φρέαρ αερισμού καθώς και τα γεωτεχνικά στοιχεία των προς εκσκαφή γεωυλικών που αναμένεται να συναντηθούν κατά την διάνοιξη των σηράγγων του μετρό και των εγκάρσιων σηράγγων που θα τις ενώνουν με το φρέαρ εξαερισμού. Τα γεωτεχνικά στοιχεία λαμβάνονται από τις εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές των δοκιμίων που προήλθαν από γεωτρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί κατά μήκος της χάραξης του μετρό. Στη συνέχεια έγινε ανάλυση και επεξεργασία των εδαφικών παραμέτρων που είχαν προκύψει από τις γεωτρήσεις και προέκυψε ομαδοποίηση σε τέσσερις εδαφικές ζώνες με τις εδαφικές τους παραμέτρους. Η ομαδοποίηση αυτή έγινε για την καλύτερη και αποδοτικότερη προσομοίωση της στρωματογραφίας σε δισδιάστατη ανάλυση μέσω λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων.

Έπειτα σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων γίνεται προσομοίωση του φρέατος αερισμού, των σηράγγων που έχουν διανοιχθεί με μηχανήματα TBM (Tunnel Boring Machine) και των εγκάρσιων σηράγγων, που ενώνουν το φρέαρ με τις σήραγγες TBM, οι οποίες έχουν διανοιχτεί με την Νέα Αυστριακή Μέθοδο (NATM). Για την προσομοίωση τόσο του φρέατος εξαερισμού, όσο και των σηράγγων (TBM και NATM) χρησιμοποιήθηκε η γεωμετρία των κατασκευαστικών σχεδίων της μελέτης εφαρμογής του φρέατος αερισμού. Επιπλέον τα στάδια και η σειρά προσομοίωσης του φρέατος και των σηράγγων (TBM και NATM) ακολούθησε την πραγματική αλληλουχία της κατασκευής. Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα είναι το RS2 της εταιρείας Rocscience.

Για την έρευνα της αλληλεπίδρασης της διάνοιξης των σηράγγων (TBM και NATM) στο φρέαρ αερισμού ακολούθηθηκαν δυο μεθοδολογίες προσομοίωσης. Στην πρώτη μεθοδολογία τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης λαμβάνονται έπειτα από τον συνδυασμό δύο αριθμητικών προσομοιωμάτων ενώ στην δεύτερη μεθοδολογία λαμβάνονται από ένα και μόνο αριθμητικό προσομοίωμα.

Πιο αναλυτικά, για την πρώτη μεθοδολογία αρχικά προσομοιώνεται σε ένα αριθμητικό μοντέλο το φρέαρ αερισμού και οι σήραγγες TBM που βρίσκονται εκατέρωθεν του. Στα πρώτα στάδια γίνεται η εφαρμογή των πασσάλων περιμετρικά του φρέατος, η εκσκαφή του φρέατος σε φάσεις και η τοποθέτηση των αντηρίδων και έπειτα η διάνοιξη της βόρειας σήραγγας TBM και η υποστήριξη της και τέλος η διάνοιξη και υποστήριξη της νότιας σήραγγας TBM. Από αυτήν την αριθμητική ανάλυση λαμβάνονται οι μεταβολές των εντατικών μεγεθών του φρέατος στις φάσεις κατασκευής των δύο σηράγγων TBM. Επιπλέον λαμβάνεται η μεταβολή του τασικού εδαφικού πεδίου και οι κατακόρυφες μετακινήσεις της επιφανείας κατά την ολοκλήρωση των

κατασκευών. Έπειτα σε δεύτερο μοντέλο προσομοιώνονται και οι εγκάρσιες σήραγγες NATM και ενώνουν το φρέαρ με τις σήραγγες TBM. Οι σήραγγες NATM διανοίγονται σε τρεις φάσεις. Για την κατασκευή αυτού του μοντέλου λαμβάνεται υπόψιν η «χαλάρωση» που έχει προκληθεί στο περιβάλλον έδαφος του φρέατος που θα διανοιχθούν οι σήραγγες NATM λόγω της κατασκευής του φρέατος αλλά και των σηράγγων TBMs, μέσω της αποτόνωσης αυτού. Από την δεύτερη ανάλυση λαμβάνονται αποτελέσματα που αφορούν τα εντατικά μεγέθη της σήραγγας NATM αλλά και η κατακόρυφες μετακινήσεις τις επιφανείας. Αυτά τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της μελέτης εφαρμογής αλλά και με τα μετρούμενα μεγέθη από το πεδίο κατά την κατασκευή αυτών των έργων. Μέσω της σύγκρισης αυτής έγινε επαλήθευση της μεθοδολογίας προσομοίωσης που εφαρμόστηκε σε αυτή την έρευνα και αναδείχτηκε η αλληλεπίδραση μεταξύ της διάνοιξης των σηράγγων και του φρέατος αερισμού.

Στη δεύτερη μεθοδολογία έγινε προσομοίωση με τη χρήση αριθμητικού μοντέλου η οποία περιλάμβανε το σύνολο των κατασκευών, δηλαδή, το φρέαρ, τις σήραγγες TBM και τις εγκάρσιες σήραγγες NATM. Αρχικά γίνεται η εφαρμογή των πασσάλων περιμετρικά του φρέατος, η εκσκαφή του φρέατος αερισμού και η τοποθέτηση των αντηρίδων, έπειτα η εκσκαφή και υποστήριξη της βόρειας σήραγγας TBM και η εκσκαφή και η υποστήριξη της νότιας σήραγγας TBM. Έπειτα η εκσκαφή δοκών προπορείας κάθετα στο φρέαρ και άνωθεν των σηράγγων, η εκσκαφή και υποστήριξη της νότιας σήραγγας NATM και η εκσκαφή και η υποστήριξη της βόρειας σήραγγας NATM. Μέσω αυτής της ανάλυσης γίνεται αντιληπτό το πώς επηρεάζονται τα εντατικά μεγέθη του φρέατος από τη διάνοιξη των σηράγγων TBM και αντίστοιχα τα εντατικά μεγέθη των σηράγγων TBM και του φρέατος από την διάνοιξη των σηράγγων NATM. Τα τελικά αποτελέσματα αυτής της έρευνας συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της μελέτης εφαρμογής αλλά και με τα μετρούμενα μεγέθη από το πεδίο κατά την κατασκευή των έργων. Η σύγκριση αυτή συμβάλει στην επικύρωση των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας. Παράλληλα αυτή η ενιαία προσομοίωση των κατασκευών δίνει την δυνατότητα της αναλυτικής καταγραφής της αλληλεπίδρασης μεταξύ της διάνοιξης των σηράγγων και του φρέατος αερισμού σε κάθε στάδιο κατασκευής.

Για την καλύτερη και πολύπλευρη κατανόηση των εντατικών μεγεθών που λήφθηκαν από τα μοντέλα δισδιάστατης ανάλυσης της παρούσας έρευνας, με τη χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, κρίθηκε σκόπιμη και η σύγκρισή των δύο μεθοδολογιών μεταξύ τους αλλά και με τα αποτελέσματα της μελέτης εφαρμογής και των τιμών που καταγράφηκαν στο πεδίο κατά τη φάση κατασκευής. Από την σύγκριση αυτή προέκυψε ότι τα αποτελέσματα των μοντέλων προσομοίωσης της παρούσας έρευνας με τη χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ήταν κατά τι πιο συντηρητικά σε σχέση με αυτά που είχε υπολογίσει η μελέτη εφαρμογής και με αυτά που μετρήθηκαν στο πεδίο. Η διαφορά αυτή πιθανώς οφείλεται στο διαφορετικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που έχει χρησιμοποιηθεί στη μελέτη του έργου, στις διαφορετικές

παραδοχές ως προς τη μεθοδολογία ανάλυσης αλλά και παραμέτρων υποστήριξης και σίγουρα στις διαφορετικές γεωτεχνικές παραμέτρους του εδάφους, δεδομένου ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει γίνει εκ' του μηδενός γεωτεχνική αξιολόγηση και εκτίμηση εδαφικών παραμέτρων

2 Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Γεωτεχνική αξιολόγηση

Σε αυτή την ενότητα αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο της γεωτεχνικής αξιολόγησης που αξιοποιήθηκε για την συγκεκριμένη έρευνα. Μέρος της γεωτεχνικής αξιολόγησης αποτελούν οι επί τόπου δοκιμές και οι εργαστηριακές δοκιμές των εδαφικών δοκιμών που προήλθαν από της δειγματοληπτικές γεωτρήσεις. Έπειτα από την γεωτεχνική αξιολόγηση πραγματοποιείται ομαδοποίηση σε εδαφικές κατηγορίες με γεωτεχνικές παραμέτρους για την κάθε κατηγορία. Στόχος της ομαδοποίησης είναι η αποδοτικότερη προσομοίωση της στρωματογραφίας μέσω λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων.

2.1.1 Δοκιμή πρότυπης διείσδυσης (Standars Penetration Test – SPT)

Αυτή η δοκιμή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντίστασης που προβάλλει το έδαφος στη διείσδυση ενός πρότυπου διαιρετού δειγματολήπτη που προωθείται κρουστικά από τον πυθμένα της γεώτρησης. Παράλληλα πραγματοποιείται και η λήψη διαταραγμένων δειγμάτων για την αναγνώριση των εδαφικών στρώσεων και τη διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών. Η δοκιμή SPT χρησιμοποιείται τόσο σε κοκκώδη εδάφη, όσο και σε άλλα υλικά (συνεκτικά και μαλακούς βράχους).

Το σε ελεύθερη πτώση προσπίπτον βάρος είναι 63.5kg και το ύψος επαναλαμβανόμενης πτώσης 0.76m. Η μέτρηση του αριθμού κτύπων γίνεται για διείσδυση 15cm σε τρεις διαδοχικές δοκιμές. Ο τελικός αριθμός κτύπων N που λαμβάνεται υπόψη είναι το άθροισμα των δύο τελευταίων μετρήσεων ανά 15cm, καθώς τα πρώτα 15cm είναι οπωσδήποτε διαταραγμένα από την προηγηθείσα γεώτρηση και ως εκ τούτου η μέτρηση δεν είναι αξιόπιστη. Ο αριθμός κτύπων N εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, την πλευρική οριζόντια γεωστατική τάση, την πυκνότητα του εδάφους καθώς και τον τρόπο που γίνεται η δοκιμή. Η μέτρηση γίνεται συνήθως ανά 1.0 έως 1.5m ανάλογα με τις ανάγκες του έργου και τη στρωματογραφία. Σε πολύ σκληρά εδάφη, όπως είναι το πυκνό αμμοχάλικο, οι πολύ στιφρές άργιλοι, ακόμα και οι μαλακοί βράχοι, η μέτρηση του αριθμού κτύπων συνήθως σταματά στους 50, με ταυτόχρονη μέτρηση του βάθους διείσδυσης.

2.1.2 Δοκιμή διείσδυσης πρότυπου κώνου (Cone penetration test CPT)

Πρόκειται για μια δοκιμή που χρησιμοποιείται για

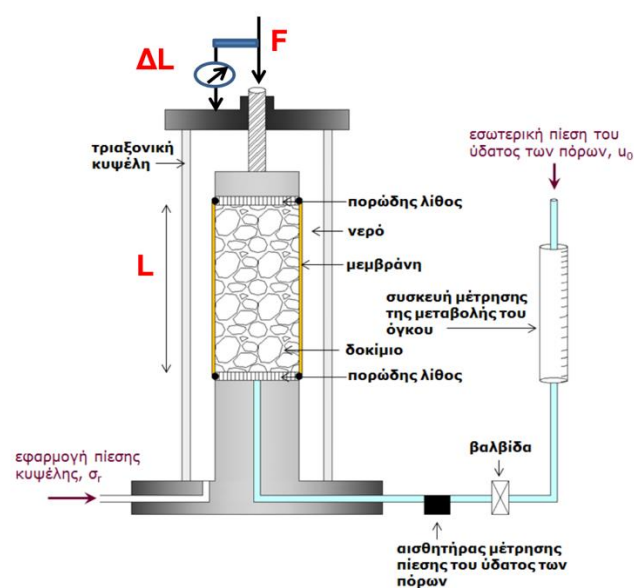
1. τον προσδιορισμό της στρωματογραφίας και της ομογένειας των εδαφικών σχηματισμών
2. τον προσδιορισμό του βάθους του (στερεού) και της ύπαρξης κοιλοτήτων και άλλων ασυνεχειών
3. την αναγνώριση των εδαφών
4. τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών (αντοχή και συμπιεστότητα)
5. τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας των πασσάλων

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι αποτελεί μια ταχεία και οικονομική μέθοδο προσδιορισμού της συνεχούς αντίστασης της στρωματογραφίας σε μη-συνεκτικά και συνεκτικά εδάφη. Τα αποτελέσματα της επιτρέπουν τον έμμεσο προσδιορισμό άλλων εδαφικών παραμέτρων και βρίσκουν επιτυχημένη εφαρμογή

σε προβλήματα θεμελιώσεων με την χρήση εμπειρικών σχέσεων. Η επεξεργασία των μετρήσεων, που καταγράφονται πλέον ηλεκτρονικά, γίνεται με αυτόματο τρόπο, οπότε είναι κατά τεκμήριο αντικειμενικές. Η κυριότερη αδυναμία της δοκιμής έγκειται στην αδυναμία διάτρησης, και επομένως μέτρησης, σε αμμοχάλικα. Επιπλέον, τα αποτελέσματα επηρεάζονται από την καλή κατάσταση και την ακεραιότητα της αιχμής και της πλευρικής επιφάνειας του πρότυπο κώνου, καθώς και από την καλή βαθμονόμηση του ηλεκτρονικού καταγραφικού εξοπλισμού. Το μεγάλο προτέρημα της δοκιμής είναι η συνεχής και ταυτόχρονη μέτρηση της αντίστασης αιχμής q_c , της πλευρικής τριβής f_s και της πίεσης των πόρων u . Με τον τρόπο αυτό έχουμε μια πλήρη εικόνα της στρωματογραφίας και της διακύμανσης της αντίστασης του εδάφους, εμμέσως λοιπόν και της αντοχής του. Η δοκιμή προτιμάται έναντι της δοκιμής SPT και με ειδικό εξοπλισμό είναι δυνατή και η δειγματοληψία μικρών δειγμάτων

2.1.3 Δοκιμή Κυλινδρικής Τριαξονικής Φόρτισης

Η δοκιμή της τριαξονικής φόρτισης εφαρμόζεται για την μέτρηση των παραμέτρων της διατμητικής αντοχής των εδαφών. Για την εκτέλεση της απαιτείται η διάταξη που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Το κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο περιβάλλεται με μια (αδιαπέρατη) ελαστική μεμβράνη, ενώ στη βάση και στην κεφαλή του είναι τοποθετημένοι άκαμπτοι πορώδεις δίσκοι. Το δοκίμιο τοποθετείται στο εσωτερικό μιας κυλινδρικής κυψέλης η οποία στη συνέχεια πληρώνεται με νερό που μπορεί να τεθεί υπό ελεγχόμενη πίεση. Τέλος, το έμβολο στο κέντρο της κυψέλης μπορεί να κινηθεί στην κατακόρυφη διεύθυνση και να συμπιέσει το δοκίμιο, αν του επιβληθεί μια κατάλληλη εξωτερική φόρτιση. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της δοκιμής της κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης είναι ο έλεγχος της στράγγισης και της υδατικής πίεσης στο εσωτερικό του δοκιμίου.

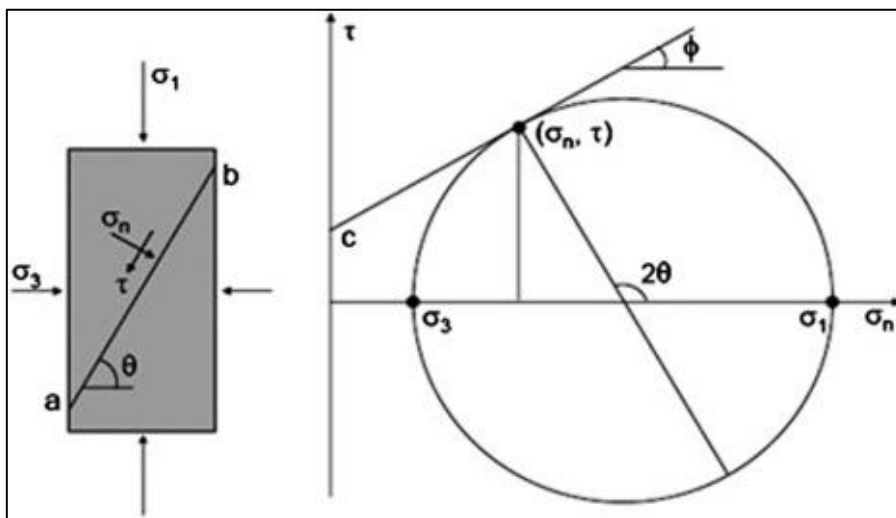


Εικόνα 1: Συσκευή κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης

2.2 Κριτήριο Αστοχίας Mohr-Coulomb

Για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους, χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Το καταστατικό κριτήριο Mohr-Coulomb ελέγχει την ελαστοπλαστική μηχανική συμπεριφορά του γεωυλικού, ενώ η γραμμική ισότροπη ελαστικότητα ελέγχει (ελαστικές) τασικές διαδρομές εντός της ελαστικής περιοχής.

Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, πρόκειται για το γραμμικό κριτήριο Coulomb, το οποίο αναφέρεται και ως κριτήριο των Coulomb-Navier, ή Mohr-Coulomb. Είναι το απλούστερο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της αστοχίας των γεωυλικών. Θεωρεί ότι η αστοχία συμβαίνει όταν η διατμητική τάση τ σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο ενός σώματος ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, που είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης σ_n , στο επίπεδο αυτό (**Error! Reference source not found.**)



Εικόνα 2: Γραφική απεικόνιση καταστατικού κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb.

2.3 Γεωμηχανική και δομητική παρακολούθηση κατασκευών

Στο πλαίσιο της κατασκευής ενός έργου πολιτικού μηχανικού απαιτείται αυξημένη παρακολούθηση έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η ασφάλεια της κατασκευής σύμφωνα με τους κανονισμούς και τις αρχές λειτουργίας του έργου. Η παρακολούθηση δεν αφορά μόνο το έργο που βρίσκεται υπό κατασκευή, αλλά και το σύνολο του πολεοδομικού ιστού που βρίσκεται περιμετρικά του έργου και μπορεί να επηρεαστεί από αυτό. Το σύνολο των εργασιών και ενεργειών που απαιτούνται για την επίτευξη της αυξημένης παρακολούθησης μαζί με τις απαραίτητες διαδικασίες αποτελούν τη γεωμηχανική και δομητική παρακολούθηση.

Σκοπός της γεωμηχανικής και δομητικής παρακολούθησης αποτελεί η καταγραφή της επίδρασης των κατασκευαστικών εργασιών στο έργο αλλά και η επιρροή οποιασδήποτε άλλης αιτίας στο ίδιο το έργο, στη ζώνη επιρροής του και στις κατασκευές εντός αυτής. Επιπλέον μέσω της έγκαιρης προειδοποίησης, σε περιπτώσεις εκτάκτων καταστάσεων, κατά τη διάρκεια της κατασκευής μπορούν να εφαρμοστούν διορθωτικά μέτρα που θα εξασφαλίσουν την ομαλή συνέχιση της κατασκευής του έργου. Τέλος η γεωμηχανική και δομητική παρακολούθηση συμβάλει στη συνολική αξιολόγηση της μελέτης και της κατασκευής του έργου. Οι πραγματικές συνθήκες επιτρέπουν την εφαρμογή ανάδρομων αναλύσεων που αξιολογούν την αλληλεπίδραση υπεδάφους κατασκευών και κτιρίων.

Η γεωτεχνική παρακολούθηση συμβάλει στην επαλήθευση του σχεδιασμού ή η αναθεώρηση του και στην ελαχιστοποίηση των ζημιών στις παρακείμενες κατασκευές. Επιπλέον μπορεί να δοθεί σήμα συναγερμού και να ληφθούν πρόσθετα μέτρα που θα συμβάλουν στη βελτιστοποίηση της προόδου του έργου και θα μειώσουν τις πιθανές δικαστικές προσφυγές.

Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της μελέτης του έργου μπορεί να γίνει η μέτρηση εδαφικών παραμέτρων στο πεδίο με τις εξής δοκιμές :

- Δοκιμή στατικής πενετομέτρησης CPT
- Field Vane test
- Πρεσσιομετρικές
- Dilatometer test
- Permeability tests – Δοκιμές Περρατότητας

Επιπλέον δεδομένα μπορούν να ληφθούν από την εργαστηριακή ανάλυση εδαφικών δειγμάτων ή γεωτρήσεων.

2.3.1 Μεγέθη μέτρησης

Τα συνήθη όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο των γεωτεχνικών έργων είναι όργανα μέτρησης:

- μετακίνησης - παραμόρφωσης στην επιφάνεια του εδάφους,
- μετακίνησης - παραμόρφωσης στο υπέδαφος,
- πίεσης πόρων
- φορτιών και τάσεων
- σύγκλισης

2.3.2 Επιλογή οργάνων μέτρησης

Η επιλογή των οργάνων συναρτάται ευθέως με την επιδιωκόμενη ακρίβεια των μετρήσεων. Κατά τον Peck, (1988): «Κάθε όργανο εγκατεστημένο σε ένα έργο θα πρέπει να έχει επιλεγεί και τοποθετηθεί εις τρόπον

ώστε να συνδράμει στην απάντηση μιας συγκεκριμένης ερώτησης. Η υιοθέτηση αυτού του απλού κανόνα αποτελεί το κλειδί για την επιτυχή υλοποίηση επί τόπου μετρήσεων».

Η επιλογή των οργάνων επηρεάζεται, επίσης, από τους εξής παράγοντες:

- Εδαφικές συνθήκες

Οι εδαφικές συνθήκες συχνά καθορίζουν τον τύπο του οργάνου. Διαφορετικά όργανα απαιτούνται σε βραχώδη και σε χαλαρά εδάφη.

- Κόστος

Ανάλογα με τον τρόπο χρήσης ενός οργάνου (μικρό ή μεγάλο χρονικό διάστημα) συνυπολογίζεται το κόστος εγκατάστασης, το κόστος αγοράς και το κόστος για τη λήψη των μετρήσεων. Παρόλα αυτά επισημαίνεται ότι το κριτήριο του κόστους δε θα πρέπει σε καμία περίπτωση να ορίζει την επιλογή του οργάνου μέτρησης.

2.3.3 Μέτρηση μετακινήσεων

2.3.3.1 Μέτρηση επιφανειακών μετακινήσεων

Οι επιφανειακές μετακινήσεις μετρώνται κυρίως με γεωδαιτικές μεθόδους. Τα αποτελέσματα είναι άμεσα, αξιόπιστα και ακριβή. Απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό για τη χρήση των οργάνων (θεοδόλιχοι, χωροβάτες, γεωδαιτικοί σταθμοί).

2.3.3.2 Μέτρηση μετακινήσεων στο υπέδαφος

Για την καταγραφή των μετακινήσεων που εκδηλώνονται στο εσωτερικό του εδάφους υπάρχουν δύο κατηγορίες οργάνων. Τα επιμηκυνσιόμετρα τα οποία εκτιμούν την μετακίνηση παράλληλα στον άξονα τους και τα κλισιόμετρα που καταγράφουν την μετακίνηση εγκάρσια στον άξονα τους.

2.3.3.3 Επιμηκυνσιόμετρα (extensimeters)

Πρόκειται για συσκευές που τοποθετούνται στο εσωτερικό μιας γεώτρησης με σκοπό την καταγραφή των μετακινήσεων που συμβαίνουν παράλληλα στον άξονα της. Εφαρμόζονται σε περιπτώσεις που απαιτείται:

- η καταγραφή των καθιζήσεων λόγω φόρτισης ή υποβιβασμού του υδροφόρου ορίζοντα (θεμελιώσεις, επιχώματα)
- η μέτρηση των συγκλίσεων των παρειών μιας σήραγγας
- η καταγραφή πλευρικών μετακινήσεων πρανών (φυσικών ή τεχνητών)
- η καταγραφή ανύψωσης του πυθμένα εκσκαφών

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι, επιμηκυνσιόμετρα με βολίδα και επιμηκυνσιόμετρα με ράβδους.

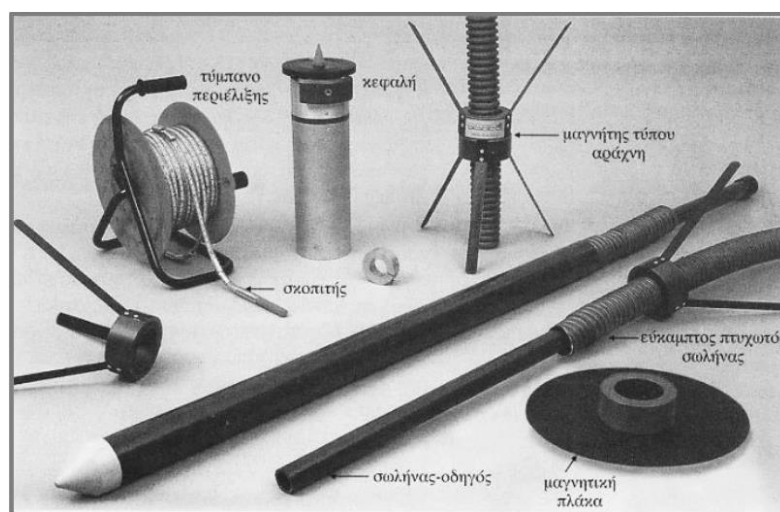
Επιμηκυνσιόμετρα με βολίδα (probe extensimeters)

Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εδάφη και σε περιπτώσεις με μεγάλες αναμενόμενες μετακινήσεις

Μαγνητικά επιμηκυνσιόμετρα (Magnetic extensometer)

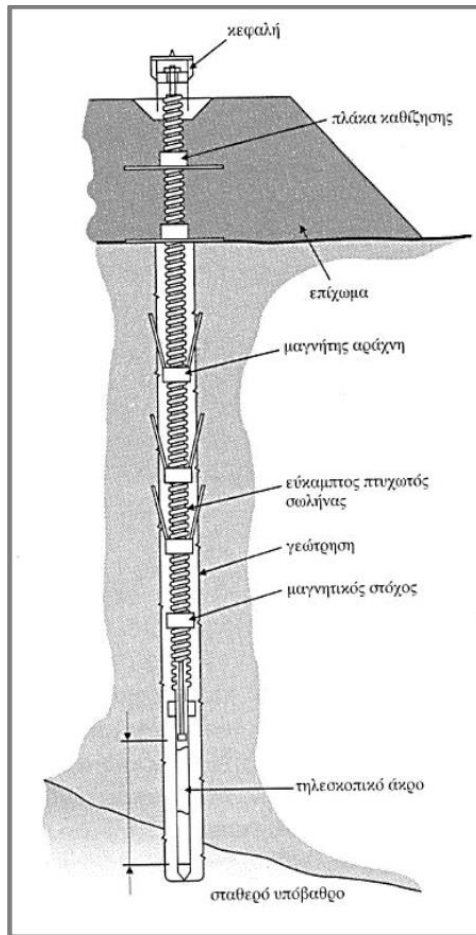
Τα μαγνητικά επιμηκυνσιόμετρα διαφέρουν ως προς τη διάταξη τους ανάλογα με το έδαφος στο οποίο γίνεται η εφαρμογή τους. Αν πρόκειται για επίχωμα οι μαγνήτες τοποθετούνται κατά την κατασκευή του και είναι πλακοειδείς. Στην περίπτωση φυσικού εδάφους τοποθετείται ένας κύλινδρος που περιέχει τους μαγνήτες και τμήματα του εγκυρώνονται σταθερά στο έδαφος. Σε όλες τις περιπτώσεις τοποθετείται μαγνήτης αναφοράς στη βάση της γεώτρησης για τη μέτρηση των συνολικών καθιζήσεων. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η βασική διάταξη του μαγνητικού επιμηκυνσιόμετρου που αποτελείται από :

- Το σωλήνα-οδηγό
- Τους μαγνητικούς στόχους τύπου αράχνης
- Το τύμπανο περιέλιξης της μετρικής ταινίας
- Τη μετρική βολίδα (σκοπίτης)



Εικόνα 3: Μαγνητικό επιμηκυνσιόμετρο βολίδας

Για τη μέτρηση των μετακινήσεων εισάγεται μια βολίδα μέσα στη σωλήνωση, η οποία φέρει ειδικό αισθητήρα. Όταν η βολίδα μπει μέσα στο μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη, ένα ηχητικό σήμα παράγεται από το τύμπανο περιέλιξης και η κίνηση της βολίδας σταματάει. Το ακριβές βάθος της βολίδας προσδιορίζεται σύμφωνα με την ένδειξη της διαβαθμισμένης μεταλλικής ταινίας. Σημειώνονται τα βάθη στα οποία βρίσκεται ο κάθε μαγνήτης μπορεί να προσδιοριστεί η σχετική μετακίνηση των μαγνητών. Προσθέτοντας τις διαφορικές καθιζήσεις μεταξύ των μαγνητών προκύπτει η συνολική μετακίνηση. Οι μετρήσεις που καταγράφονται αφορούν τις μετακινήσεις σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους. Για να προκύψουν οι απόλυτες μετακινήσεις χρειάζεται είτε η γεώτρηση να εδράζεται χωρικά από τοπογραφικές μεθόδους, ώστε να προσφέρουν ένα σταθερό σημείο αναφοράς (απόλυτο υψόμετρο).



Εικόνα 4: Διάταξη μαγνητικού επιμηκυσιόμετρου βολίδας

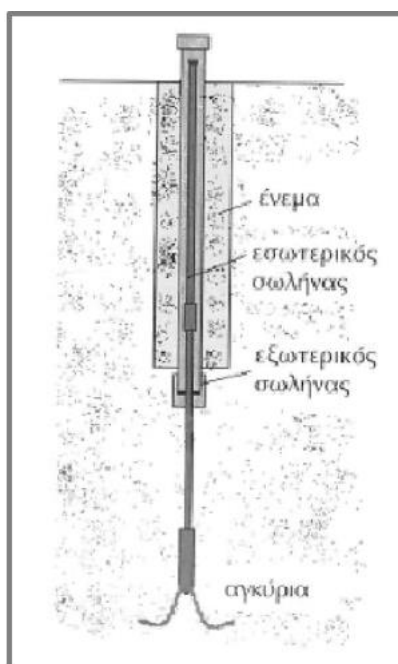
2.3.3.4 Επιμηκυσιόμετρα με ράβδους (rod extensometers)

Τα επιμηκυσιόμετρα με ράβδους χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που οι αναμενόμενες μετακινήσεις είναι μικρές και σε μαλακά εδάφη που επιτρέπουν την είσοδο της ράβδου. Η μέτρηση αφορά τον υπολογισμό της αλλαγής μήκους μιας ράβδου, εγκατεστημένης σε γεώτρηση, μεταξύ του κάτω πακτωμένου άκρου της και του ελεύθερου άνω άκρου της, χωρίς τη χρήση βολίδας.

Επιμηκυσιόμετρα Borros Point (Borros Point extensimeter)

Η τυπική διάταξη ενός επιμηκυσιόμετρου με ράβδους Borros Point αποτελείται από:

- ένα αγκύριο με τρεις προεκτάσεις ώστε να δένεται σταθερά στο έδαφος
- την εξωτερική σωλήνωση διαμέτρου 1.0in
- την εσωτερική σωλήνωση διαμέτρου 1/4 in



Εικόνα 5: Επιμηκυσιόμετρο Borros Point

Για την εγκατάσταση της διάταξης ακολουθούνται οι εξής φάσεις:

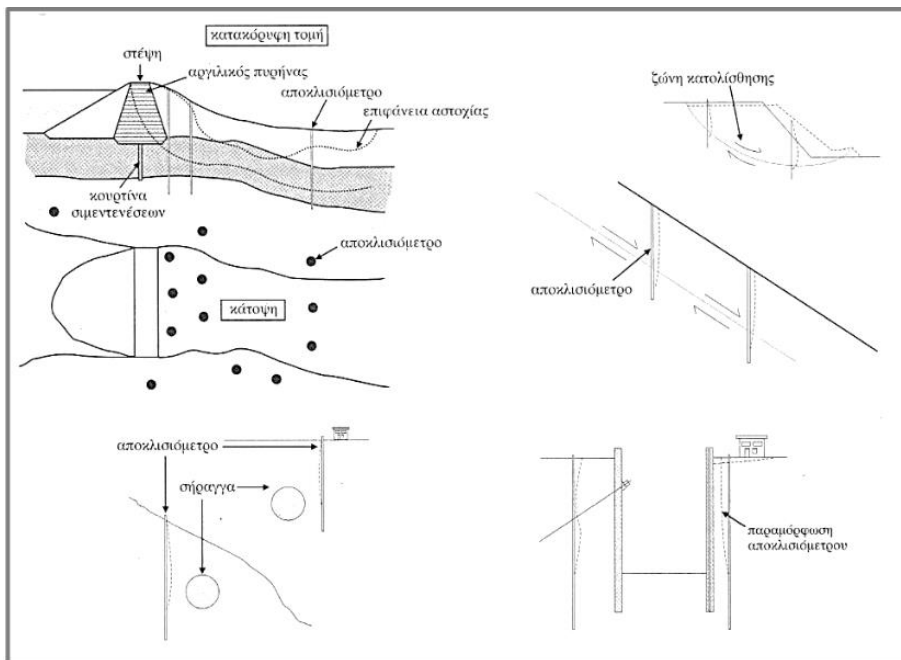
- Διάνοιξη γέωτρησης σε βάθος περίπου 1.0m ψηλότερα από την τελική θέση του αγκυρίου
- Εφαρμογή των δύο σωληνώσεων πάνω στο αγκύριο
- Εισαγωγή του συστήματος μέσα στη γέωτρηση (πιέζοντας τον εξωτερικό σωλήνα το αγκύριο εισέρχεται στο μαλακό έδαφος μέχρι το επιθυμητό βάθος)
- Επαλήθευση της ακριβούς θέσης του αγκυρίου με γεωδαιτικές μεθόδους (στα επόμενα στάδια δεν είναι δυνατή η μετακίνηση του)
- Αν η θέση του αγκυρίου είναι επιθυμητή, ο εσωτερικός σωλήνας εισέρχεται κατά 7.0in μέσα στο σώμα του αγκυρίου απελευθερώνοντας τις προεκτάσεις του
- Ξεβίδωση του εξωτερικού σωλήνα από το αγκύριο και ανέβασμα προς την επιφάνεια του εδάφους κατά απόσταση ίση ή λίγο μεγαλύτερη από την αναμενόμενη μετακίνηση
- Πλήρωση του κενού μεταξύ εξωτερικής σωληνώσης και γέωτρησης με κονίαμα

Με βάση την παραπάνω διάταξη ο εσωτερικός σωλήνας ακολουθεί τη θέση του αγκυρίου, ενώ ο εξωτερικός αυτήν του εδάφους. Μετρώντας την απόσταση μεταξύ των δύο σωληνών προσδιορίζεται η ολική μετακίνηση μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και της θέσης του αγκυρίου. Η μέτρηση γίνεται είτε με γεωδαιτικές μεθόδους είτε με τη χρήση κάποιου αισθητήρα μετακίνησης. Το επιμηκυσιόμετρο Borros Point αποτελεί μια φθηνή λύση για τη μέτρηση των μετακινήσεων στο έδαφος και είναι εύκολο στη χρήση. Ένα από τα μειονεκτήματά του είναι ότι παρέχει τη συνολική μετακίνηση μεταξύ αγκυρίου και της εδαφικής επιφάνειας και όχι ένα προφίλ μετακινήσεων συναρτήσεως του βάθους. Για τη γνώση των μετακινήσεων σε σχέση με το

βάθος απαιτούνται πολλά ακύρια πακτωμένα σε διαφορετικά βάθη. Επιπλέον η χρήση του αφορά μαλακά εδάφη καθώς δεν μπορεί να διεισδύσει σε σκληρά εδάφη.

2.3.3.4.1 Κλισιόμετρα και κλισίμετρα

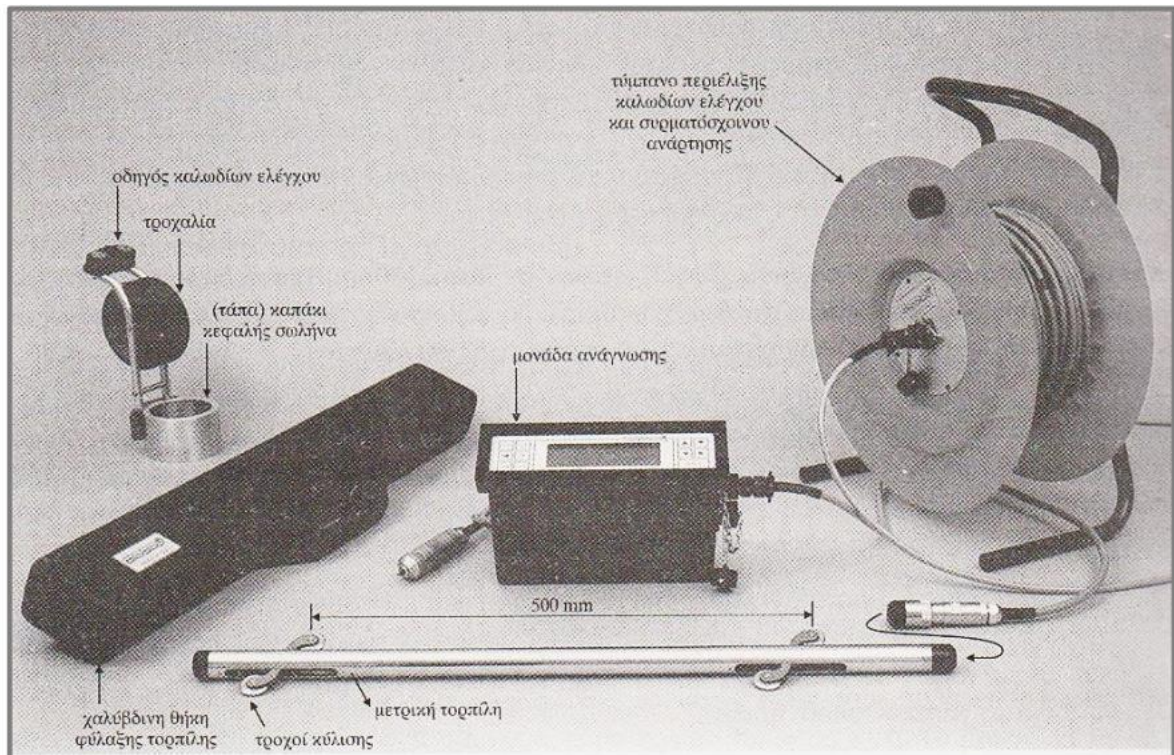
Τα κλισιόμετρα χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της οριζόντιας μετατόπισης πρανών, επιχωμάτων, φραγμάτων ή εκσκαφών, αλλά και της παραμόρφωσης τοίχων αντιστήριξης, πασσάλων ή άλλων δομικών στοιχείων. Τα κλισίμετρα αντίστοιχα βρίσκουν εφαρμογή στην παρακαλούθηση αντίστοιχων μετατοπίσεων σε κατασκευές.



Εικόνα 6: Πεδία εφαρμογής κλισιομέτρων

Κάθε διάταξη κλισιομέτρου αποτελείται από τέσσερα κύρια στοιχεία:

1. την ειδική σωλήνωση
2. τη μετρική βαλβίδα
3. το καλώδιο ελέγχου
4. την ψηφιακή μονάδα ανάγνωσης των μετρήσεων



Εικόνα 7: Τυπική διάταξη κλισιομέτρου

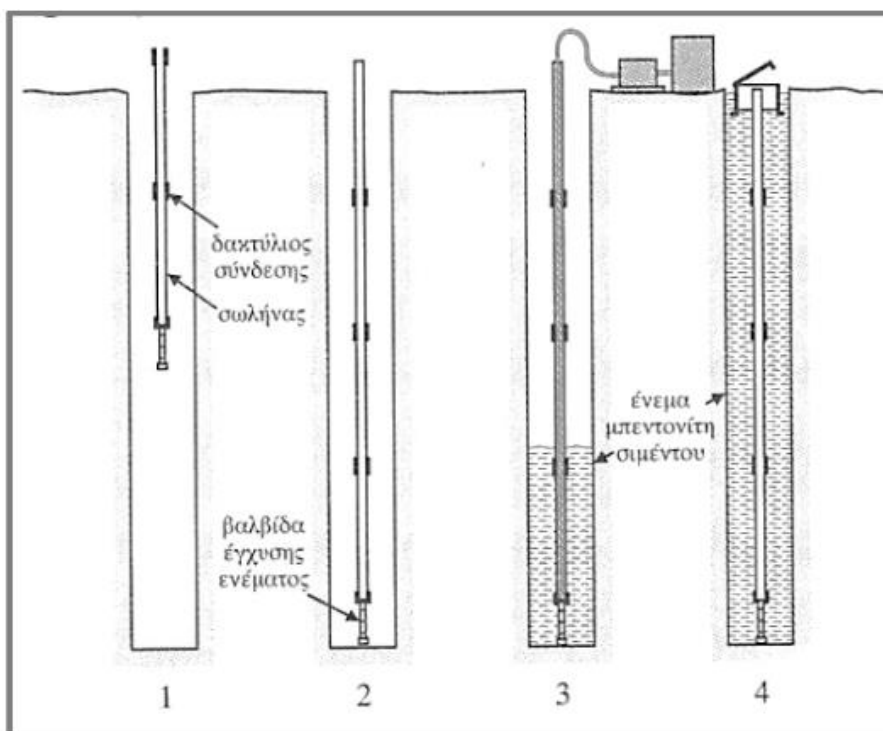
Η σωλήνωση του κλισιομέτρου έχει αύλακες εσωτερικά και κατά μήκος του άξονα της ώστε να εξασφαλίζεται καταρχήν η ευθυγράμμιση των στελεχών.

Εξυπηρετεί τρεις σκοπούς:

1. Παρέχει πρόσβαση στη μετρητική τορπίλη επιτρέποντας μετρήσεις στο εσωτερικό του υπεδάφους,
2. Παραμορφώνεται όπως και το παρακείμενο έδαφος, έτσι ώστε οι μετακινήσεις της σωλήνωσης να αντιπροσωπεύουν τις μετακινήσεις του εδάφους
3. Οι εσωτερικοί αύλακες ελέγχουν τον προσανατολισμό της βολίδας (η εγκατάσταση της σωλήνωσης πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το ένα ζεύγος αυλακώσεων να έχει τη διεύθυνση της αναμενόμενης μετακίνησης Α)

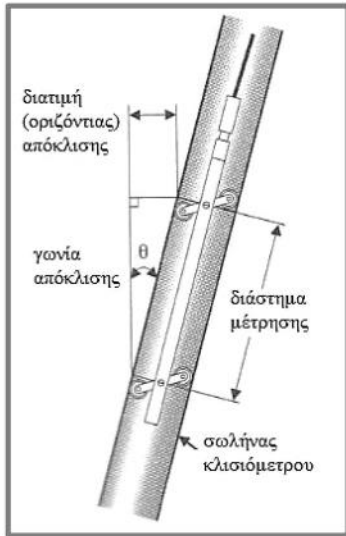
Η μετρική βολίδα φέρει κατάλληλο αισθητήρα για τη μέτρηση της γωνίας που σχηματίζει το σώμα της βολίδας από την κατακόρυφο. Η βολίδα τοποθετείται κατά τη διεύθυνση Α, δηλαδή τη διεύθυνση της αναμενόμενης μετακίνησης και καταγράφονται μετρήσεις. Έπειτα, τοποθετείται κατά τη διεύθυνση Β (κάθετη στην Α) και οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται. Οι μετρήσεις συνήθως γίνονται ανά 0.5m κατά μήκος της γεώτρησης. Στο τέλος με βάσει της μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν δημιουργείται το προφίλ των οριζόντιων μετακινήσεων με το βάθος. Η μετρική βολίδα εισέρχεται στη σωλήνωση με τη βοήθεια του καλωδίου ελέγχου. Το καλώδιο αυτό μεταφέρει σήμα στην ψηφιακή μονάδα ανάγνωσης των μετρήσεων.

Για την εγκατάσταση ενός κλισιόμετρου πραγματοποιείται γεώτρηση έως το επιθυμητό βάθος και ακολουθεί ο καθαρισμός της. Έπειτα γίνεται η εγκατάσταση της σωλήνωσης στη γεώτρηση και η έγχυση κονιάματος μεταξύ γεώτρησης και σωλήνωσης. Τέλος καλύπτεται η κεφαλή της σωλήνωσης με καπάκι.



Εικόνα 8: Τεχνική εγκατάστασης κλισιόμετρου

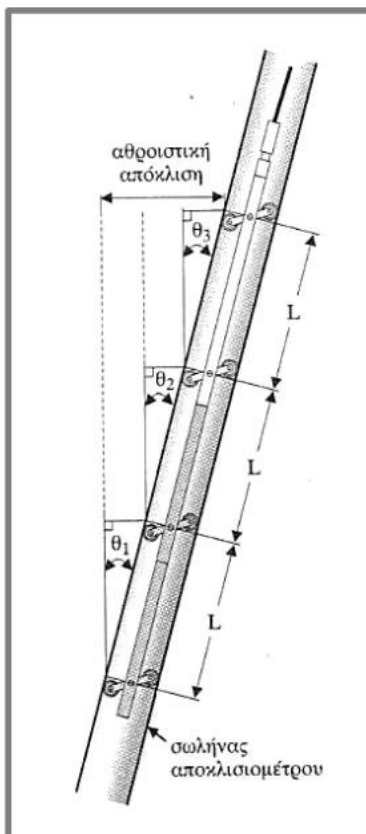
Μέτρηση σε συγκεκριμένο βάθος



Εικόνα 9: Συναγωγή εγκάρσιων μετακινήσεων

Ο αισθητήρας που φέρει η βολίδα καταγράφει τη γωνία θ που σχηματίζει το σώμα της βολίδας με την κατακόρυφο. Οπότε, η οριζόντια μετατόπιση Δx που παρουσιάζει το σώμα της βολίδας σε απόσταση L δίνεται από τη σχέση: $\Delta x = L \cdot \sin\theta$, όπου L το μήκος μεταξύ των τροχών της βολίδας.

Μέτρηση κατά μήκος βάθους γεώτρησης:



Εικόνα 10: Συναγωγή εγκάρσιων μετακινήσεων

Για να είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων από τη χρήση του κλισιόμετρου χρειάζεται ο υπολογισμός των οριζόντιων μετακινήσεων σε όλο το βάθος της γεώτρησης. Αυτό πραγματοποιείται με διαδοχικές μετρήσεις ανά διαστήματα ίσα με την απόσταση μεταξύ των τροχών, L . Ενώνοντας τα δεδομένα από κάθε μέτρηση προκύπτει η συνολική οριζόντια μετακίνηση της επιφάνειας του εδάφους και το προφίλ των οριζόντιων μετακινήσεων με το βάθος.

2.3.4 Μέτρηση πίεσης των πόρων

Η πίεση του νερού των πόρων αποτελεί πολύ σημαντική μεταβλητή για τον γεωτεχνικό σχεδιασμό και την κατασκευή ενός έργου, ενώ παράλληλα συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του εδάφους. Η έγκαιρη χρήση των μετρήσεων μπορεί να συμβάλει στην αποφυγή αστοχιών (ολισθήσεις, καθιζήσεις, ερπυσμοί) ή στον επανασχεδιασμό του έργου.

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της πίεσης των πόρων ονομάζονται πιεζόμετρα και διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

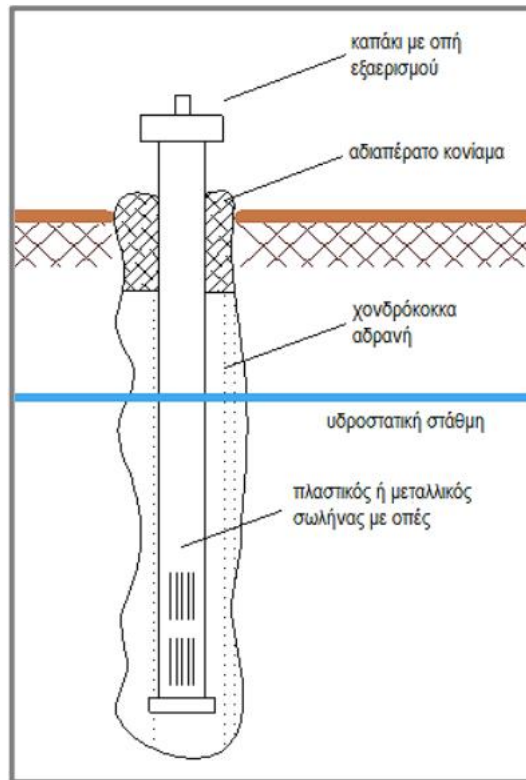
- Ανοιχτού τύπου (φρεάτια παρατήρησης, Casagrande)
- Κλειστού τύπου (υδραυλικά, ηλεκτρικά)

2.3.4.1 Πιεζόμετρα ανοικτού τύπου

Πρόκειται για συσκευές που χρησιμοποιούνται όταν αναζητείται κατά κύριο λόγο η υψομετρική θέση του υπόγειου ορίζοντα ή της φρεατικής γραμμής και οι εποχιακές διακυμάνσεις τους, καθώς και η ανίχνευση επικραμάμενου ορίζοντα ή αρτεσιανισμού. Στα πιεζόμετρα ανοικτού τύπου το νερό εισχωρεί από το διάτρητο τμήμα της σωλήνωσης (φίλτρο) έως ότου εξισορροπηθεί με την πιεζομετρική στάθμη. Το ύψος του νερού που αντιστοιχεί στην πιεζομετρική στάθμη καθορίζεται με τη βοήθεια βολίδας που παράγει ήχο μόλις εισέλθει σε αυτό.

Πηγάδια παρατήρησης

Αποτελούν έναν απλό, γρήγορο και φθηνό τρόπο παρατήρησης του υδροφόρου ορίζοντα. Για την κατασκευή του πηγαδιού παρατήρησης ανοίγεται γεώτρηση και τοποθετείται ένας σωλήνας, είτε πλαστικός είτε μεταλλικός, ο οποίος φέρει οπές που επιτρέπουν την είσοδο του νερού σε αυτόν. Ο σωλήνας καλύπτεται με προστατευτικό υλικό που εμποδίζει την εισχώρηση βρόχινου νερού αλλά επιτρέπει τον αερισμό. Ο χώρος ανάμεσα στο σωλήνα και στη γεώτρηση πληρώνεται με διαπερατό υλικό (χονδρόκοκα αδρανή) που επιτρέπει την εύκολη ροή του νερού, ενώ επιφανειακά τοποθετείται αδιαπέρατο κονίαμα που αποτρέπει τη διείσδυση του νερού της βροχής στη γεώτρηση. Η στάθμη του νερού στο σωλήνα καθορίζεται με τη χρήση ειδικής βολίδας που παράγει ηχητικό σήμα μόλις εισέλθει στο νερό. Η τυπική διάταξη ενός πηγαδιού παρατήρησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 11. Ωστόσο τα πηγάδια παρατήρησης μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα σε περιπτώσεις εδαφών με διαφορετική περατότητα. Η γεώτρηση δημιουργεί μια κατακόρυφη στήλη μεγάλης διαπερατότητας. Αν τα εδάφη που διαπερνά έχουν διαφορετική διαπερατότητα, τότε το ύψος του νερού που θα καταγραφεί, θα αφορά αυτό του εδάφους με τη χαμηλότερη διαπερατότητα. Για αυτό το λόγο συστήνεται η χρήση τους σε εδάφη με ομοιόμορφη διαπερατότητα.

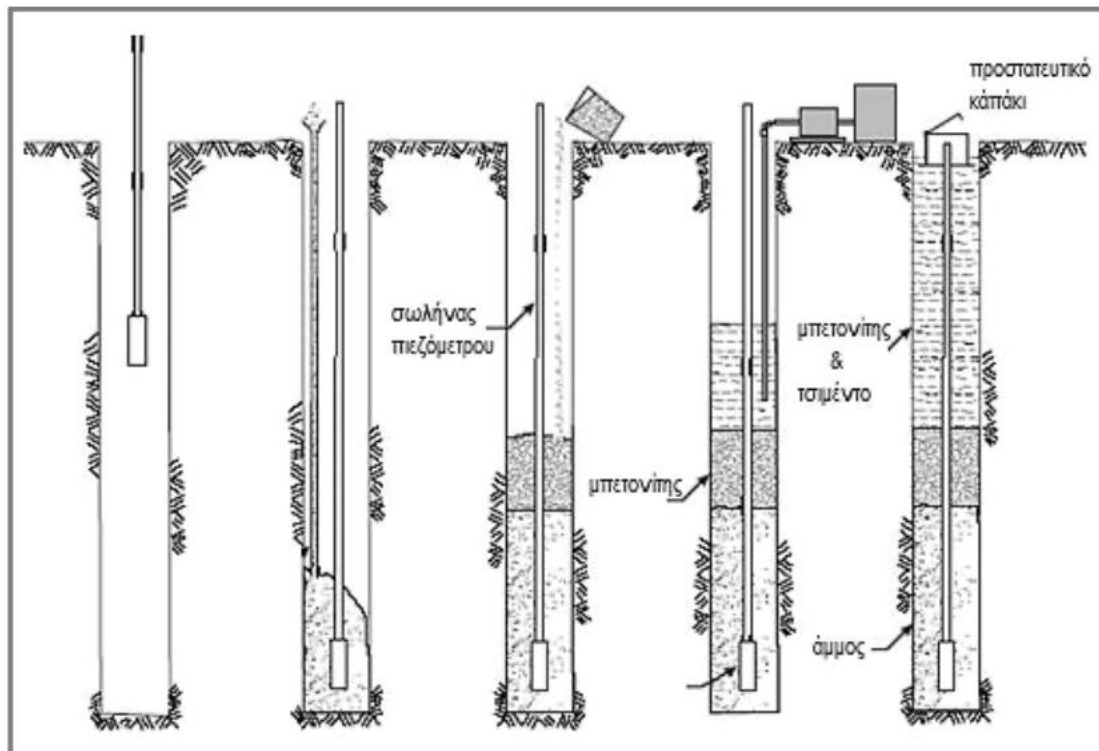


Εικόνα 11: Τυπική διάταξη πηγαδιού παρατήρησης

2.3.4.2 Πιεζόμετρα ανοιχτού σωλήνα (open standpipe piezometers)

Τα πιεζόμετρα ανοιχτού σωλήνα λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο με τα πηγάδια παρατήρησης. Κύρια διαφορά τους είναι ότι στα πιεζόμετρα ανοιχτού σωλήνα δεν επιτρέπεται η κατακόρυφη κίνηση του νερού λόγω της χρήσης αδιαπέρατων κονιαμάτων. Πιο συγκεκριμένα στη στάθμη του πιεζομέτρου τοποθετείται άμμος που επιτρέπει την κίνηση του νερού σε οριζόντια διεύθυνση και μειώνει το χρόνο απόκρισης του πιεζομέτρου. Πάνω από το στρώμα της άμμου τοποθετείται μπετονίτης με αποτέλεσμα να εμποδίζει την κίνηση του νερού στην κατακόρυφη διεύθυνση. Πιο πάνω τοποθετείται ένα μείγμα τσιμέντου μπετονίτη και νερού με τις παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες με αυτές του εδάφους και προσφέρει στεγανότητα Εικόνα 12. Τέλος η στήλη του νερού μέσα στο σωλήνα αντιπροσωπεύει την πίεση του νερού στο συγκεκριμένο βάθος που βρίσκεται το πιεζόμετρο. Είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της στάθμης του νερού μέσα στο σωλήνα για την μέτρηση της πίεσης του νερού των πόρων στο βάθος που τοποθετείται το πιεζόμετρο. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με κατάλληλες βολίδες όπως και στα πηγάδια παρατήρησης.

Τα πιεζόμετρα ανοιχτού σωλήνα προσφέρουν αξιόπιστες μετρήσεις σε συνδυασμό με εύκολη και φθηνή τοποθέτηση. Ωστόσο δεν προτείνονται για μετρήσεις όπου η πίεση των πόρων παρουσιάζει γρήγορες μεταβολές. Επιπλέον για την καταγραφή της πίεσης του νερού των πόρων απαιτείται ροή του νερού από το έδαφος μέσα στο σωλήνα. Αν πρόκειται για αργιλικό έδαφος, η ροή του νερού θα επιτευχθεί μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα. Συνεπώς το όργανο παρουσιάζει αργή απόκριση στα αργιλικά εδάφη.



Εικόνα 12: Στάδια εγκατάστασης πιεζόμετρου ανοικτού σωλήνα Casagrande

2.3.4.3 Πιεζόμετρα κλειστού τύπου (Closed piezometers)

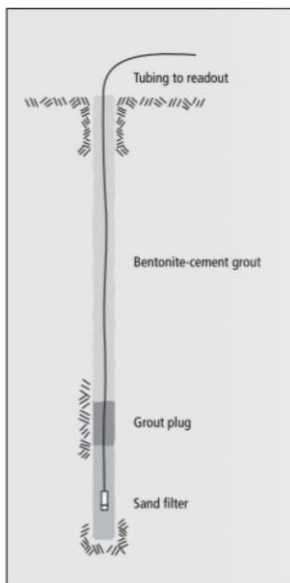
Πρόκειται για συσκευές κλειστού κυκλώματος διαφόρων τύπων. Χρησιμοποιούνται όταν αναζητείται η καταγραφή της ταχείας διακύμανσης των πιέσεων των πόρων στα διάφορα στάδια της κατασκευής. Η απόκριση της συσκευής είναι άμεση και με ακρίβεια ακόμα και σε συνθήκες παγετού. Επιπλέον είναι σχετικά φθηνές συσκευές που όμως δεν έχουν τη δυνατότητα μέτρησης αρνητικών πιέσεων. Διακρίνονται σε υδραυλικά, πνευματικά και ηλεκτρονικά.

Πνευματικά πιεζόμετρα (pneumatic piezometers)



Εικόνα 13 : Πνευματικό πιεζόμετρο

Το πιεζόμετρο βρίσκεται στο εσωτερικό του εδάφους και δέχεται εξωτερικά την πίεση του νερού των πόρων αναγκάζοντας το διάφραγμα να καμφθεί προς το εσωτερικό. Για την μέτρηση της πίεσης των πόρων, προσαρτάται στο όργανο μια ειδική συσκευή που τροφοδοτεί με άζωτο το σωλήνα εισόδου. Η πίεση του αζώτου αυξάνεται σταδιακά έως ότου η τιμή της ξεπεράσει την πίεση των πόρων και το διάφραγμα καμφθεί προς τα έξω. Επιτρέποντας τη ροή του αζώτου προς το σωλήνα εξόδου. Μόλις η συσκευή αντιληφθεί την παρουσία αζώτου στο σωλήνα εξόδου σταματάει την τροφοδοσία του αερίου μειώνοντας την πίεση του και το διάφραγμα σταδιακά επανέρχεται στην αρχική του θέση. Η πίεση του νερού των πόρων ισούται με την πίεση του αζώτου τη στιγμή που το διάφραγμα επανέλθει στην αρχική του θέση σταματώντας τη ροή του αζώτου.

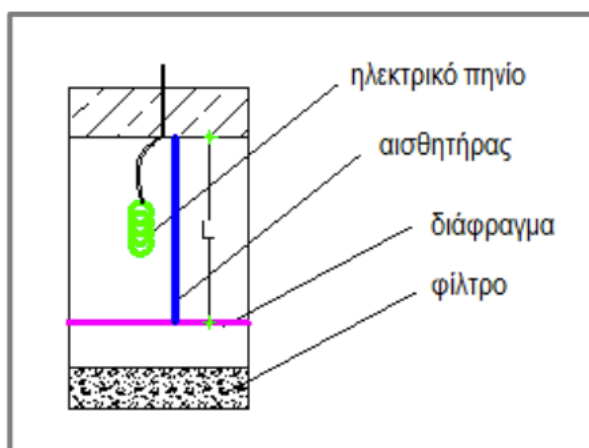


Εικόνα 14: Διάταξη πνευματικού πιεζομέτρου

Η εγκατάστασή τους είναι παρόμοια με αυτή των πιεζομέτρων ανοιχτού σωλήνα. Λόγω της υψηλής ευαισθησίας των πνευματικών πιεζομέτρων δεν απαιτείται φίλτρο άμμου. Απαιτείται μόνο το μείγμα τσιμέντου- μπετονίτη που επιτρέπει την σωστή και γρήγορη τοποθέτηση. Το μείγμα πρέπει να έχει μια με δύο τάξεις μεγαλύτερη διαπερατότητα από το έδαφος.

Ηλεκτρικά πιεζόμετρα (electrical piezometers)

Τα ηλεκτρικά πιεζόμετρα χαρακτηρίζονται από πολύ μικρό χρόνο υστέρησης και είναι εύκολα στη χρήση. Επιπλέον έχουν τη δυνατότητα μέτρησης αρνητικών πιέσεων. Η μακροχρόνια χρήση τους παρουσιάζει προβλήματα τα οποία διορθώνονται με την προσθήκη ειδικών διατάξεων. Η ηλεκτρονική φύση του οργάνου το καθιστά επιρρεπές σε κεραυνούς και απαιτείται κατάλληλη προστασία. Το πιεζόμετρο βρίσκεται εσωτερικά του εδάφους και δέχεται εξωτερικά την πίεση του νερού των πόρων αναγκάζοντας το διάφραγμα να καμφθεί προς το εσωτερικό. Η καμπυλότητα του διαφράγματος εκτιμάται με τον αισθητήρα παραμόρφωσης. Ανάλογα με τον αισθητήρα, σταθερές συνδέουν την εκτιμώμενη παραμόρφωση με την πίεση του νερού των πόρων.



Εικόνα 15: Διάταξη ηλεκτρονικού πιεζομέτρου

2.3.5 Μέτρηση φορτίων

Η μέτρηση του φορτίου πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικών συσκευών οι οποίες εγκαθίστανται κατά κανόνα εκτός της γεώμαζας ούτως ώστε το φέρον τη δύναμη στοιχείο να διέρχεται μέσα από τη συσκευή. Το πιο σύνηθες όργανο μέτρηση φορτίου είναι οι κυψέλες φορτίου (load cells) οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την καταγραφή του επιβαλλόμενου φορτίου σε αγκύρια βράχου, αγκύρια εδάφους, αντηρίδες, πασσάλους και επενδύσεις σηράγγων.

Μετρητές φορτίου αγκυρίου:

Οι μετρητές φορτίου αγκυρίου αποτελούνται από έναν κυλινδρικό δακτύλιο χάλυβα ή αλουμινίου. Η μέτρηση επιτυγχάνεται είτε από ηλεκτρική αντίσταση είτε από δονούμενη χορδή. Επίσης, υπάρχουν μετρητές φορτίου υδραυλικού τύπου, στους οποίους η επιβαλλόμενη εξωτερική φόρτιση μετατρέπεται σε πίεση του υγρού που υπάρχει μέσα στον δακτύλιο.



Εικόνα 16: Μετρητές φορτίου- Μετρητής φορτίου αγκυρίου σε βράχο

2.3.6 Μέτρηση ολικής τάσης

Η μέτρηση της ολικής τάσης στο έδαφος μετράται είτε στο εσωτερικό της γεώμαζας είτε στη διεπιφάνεια εδάφους-κατασκευής όπως για παράδειγμα στις περιπτώσεις μέτρηση της τάσης εδάφους σε επαφή με τοίχους αντιστήριξης, πασσαλότοιχους, διαφράγματα, αντιστηρίξεις εκσκαφών και επιφανειακές θεμελιώσεις. Η μέτρηση της τάσης είτε στο εσωτερικό του εδάφους είτε στη διεπιφάνεια επαφής με την γεωτεχνική κατασκευή, απαιτεί τη χρήση ενός αισθητήρα ο οποίος δέχεται την ασκούμενη πίεση.

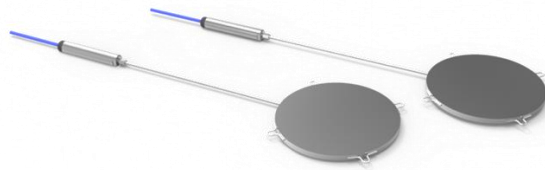
Για τη σωστή μέτρηση των τάσεων στο έδαφος τα όργανα χρειάζεται να καλύπτουν τις εξής απαιτήσεις:

- Η δυσκαμψία οργάνου-εδάφους χρειάζεται να είναι παρόμοια ώστε η εντατική κατάσταση στο έδαφος να μη μεταβληθεί σημαντικά με την παρουσία του οργάνου. Η παραπάνω απαίτηση ικανοποιείται δύσκολα μιας και είναι αρκετά απαιτητικός ο υπολογισμός της δυσκαμψίας του εδάφους και αρκετά κοστοβόρο το αντίστοιχο όργανο.
- Απαιτείται εξομάλυνση των τοπικών ανομοιομορφιών των τάσεων και για το λόγο αυτό χρειάζεται μεγάλη επιφάνεια στις μεμβράνες. Βέβαια η απαίτηση αυτή μπορεί να έρθει σε αντίθεση με την προηγούμενη διότι μεγάλη επιφάνεια μεμβρανών συνεπάγεται και μεγάλη δυσκαμψία.
- Δεν πρέπει να μεταβληθεί το τασικό πεδίο κατά την τοποθέτηση του οργάνου. Αυτό σημαίνει την κάλυψη του με έδαφος ίδιου βάρους και πυκνότητα με το αρχικό γεγονός αδύνατο στην πράξη.

Οι παραπάνω απαιτήσεις είναι σχεδόν αδύνατον να πραγματοποιηθούν για το λόγο αυτό η χρήση των οργάνων περιορίζεται μόνο στην περίπτωση των επιχωμάτων.

2.3.6.1 Θαμμένος αισθητήρας πίεσης (embedment earth pressure cells)

Αποτελείται από δύο δύσκαμπτες κυκλικές μεμβράνες και έναν αισθητήρα πίεσης. Οι κυκλικές μεμβράνες ενώνονται στεγανά με έναν μεταλλικό δίσκο. Ο χώρος ανάμεσα στις μεμβράνες πληρώνεται με ασυμπίεστο υγρό. Με αυτόν τον τρόπο η τάση που ασκείται από το έδαφος είναι ίδια με την τάση που αναπτύσσεται στο υγρό η οποία καταγράφεται με τον αισθητήρα.



Εικόνα 17: Θαμμένος αισθητήρας πίεσης

2.3.6.2 Αισθητήρας πίεσης επαφής (contact earth pressure cells)

Ο εν λόγω αισθητήρας μετρά έμμεσα την τάση στη διεπιφάνεια εδάφους-κατασκευής. Τα όργανα μέτρησης τάσεων αυτού του τύπου, που προσαρτώνται δηλαδή σε κατασκευές, παρουσιάζουν την ίδια λογική με τα προηγούμενα. Οι μόνες ίσως διαφορές είναι ότι:

- Φέρουν διατάξεις για την εύκολη τοποθέτηση τους στην κατασκευή
- Οι απαιτήσεις σχετικά με τη μεταβολή του τασικού πεδίου περιορίζονται

Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μέτρηση των τάσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια από πριν.



Εικόνα 18: Αισθητήρες πίεσης επαφής

2.3.7 Μέτρηση σύγκλισης

Μια σημαντική μέτρηση παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια κατασκευής μιας σήραγγας είναι οι συγκλίσεις, δηλαδή η συμπεριφορά της εξωτερικής επένδυσής της. Μεταξύ των διαφόρων μεθόδων ενόργανης παρακολούθησης σηράγγων οι μετρήσεις των συγκλίσεων έχουν εμπειρικά αποδειχτεί οι πιο χρήσιμες για τρεις κυρίως λόγους:

- Αποτελούν μια άμεσα και σχετικώς εύκολα μετρούμενη ποσότητα.
- Παρέχουν πληροφορίες για τη συνολική μετακίνηση του εδάφους εντός της μετρούμενης.
- Ελέγχουν την αποτελεσματικότητα των μέτρων αντιστήριξης.

Οι μετρήσεις των συγκλίσεων επιτυγχάνονται με τρεις τρόπους:

- Με γεωδαιτικές μεθόδους
- Με επιμηκυνσιόμετρο ταινίας

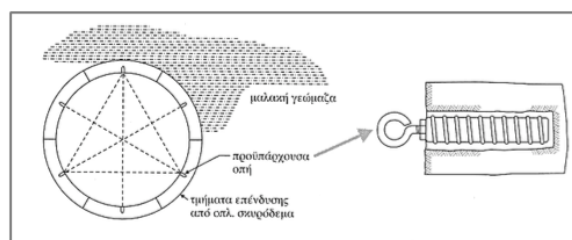
- Με το σύστημα μέτρησης συγκλίσεων “Bassett”

2.3.7.1 Γεωδαιτικές μέθοδοι

Πραγματοποιούνται μετρήσεις κατά τις τρεις διευθύνσεις x , y , z . Για αυτό το σκοπό τοποθετούνται στο εσωράχιο της σήραγγας ακίδες επί των οποίων είναι δυνατόν να εφαρμοστούν ανακλαστήρες. Με τη χρήση θεοδόλιχου μετρώνται οι απόλυτες συντεταγμένες των σημείων και υπολογίζονται οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις και οι συγκλίσεις. Οι απόλυτες συντεταγμένες καταγράφονται αυτόματα δια μέσου καταγραφικού στο γεωδαιτικό σταθμό και έπειτα μεταφέρονται στον Η/Υ. Με τη χρήση της μεθόδου μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια $\pm 2.0\text{mm}$ η οποία είναι ικανοποιητική για τη διερεύνηση της αντίδρασης του εδάφους και της επάρκειας των μέτρων υποστήριξης. Οι μετρήσεις λαμβάνονται τακτικά αναλόγως των γεωλογικών σχηματισμών. Σε δυσμενής συνθήκες γίνεται πύκνωση των σταθμών παρακολούθησης των συγκλίσεων. Οι μετακινήσεις που καταγράφονται συγκρίνονται με τις θεωρητικά υπολογισθείσες τιμές για να ελεγχθούν οι τιμές σχεδιασμού.

2.3.7.2 Επιμηκυνσιόμετρο ταινίας (tape extensometer)

Το επιμηκυνσιόμετρο ταινίας καταγράφει τις μετακινήσεις μεταξύ δύο σταθερών σημείων αναφοράς. Συσχετίζοντας τις μετρήσεις για διάφορα σημεία προκύπτουν οι συγκλίσεις στη σήραγγα. Οι συγκλίσεις μπορούν να υπολογιστούν και με χρήση επιμηκυνσιόμετρων, ωστόσο η τοποθέτησή τους είναι πολύ πιο δύσκολη. Στην περίπτωση αυτή οι καταγραφόμενες μετακινήσεις αφορούν το σύνολο των μετακινήσεων του εδαφικού σχηματισμού που περιβάλλει τη σήραγγα και όχι μόνο τις σχετικές μετακινήσεις της επένδυσης της σήραγγας. Για την ακριβή μέτρηση με επιμηκυνσιόμετρο απαιτείται η σωστή πάκτωση των σημείων αναφοράς στην επένδυση της σήραγγας. Τα σημεία αυτά παραμένουν μόνιμα στην επένδυση και χρειάζεται προσοχή ώστε να μην μετακινηθούν κατά την εκτέλεση διαφόρων εργασιών στη σήραγγα. Η σταθερότητά τους ελέγχεται σε συγκεκριμένη τάση. Το όργανο φέρει δυο άγκιστρα που δένονται στα σημεία αναφοράς. Η μετροταινία που φέρει το όργανο ξετυλίγεται καθώς αυτό συνδέεται με το δεύτερο άγκιστρο. Ο χειριστής ασκεί κατάλληλη εφελκυστική δύναμη στη μετροταινία. Στο όργανο αναγράφεται η μέτρηση. Το επιμηκυνσιόμετρο ταινίας είναι ανθεκτικό, ελαφρύ και εύκολο στη χρήση. Οι μετρήσεις αφορούν μόνο σχετικές μετακινήσεις και για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης των σημείων αναφοράς απαιτείται η χρήση γεωδαιτικών μεθόδων.



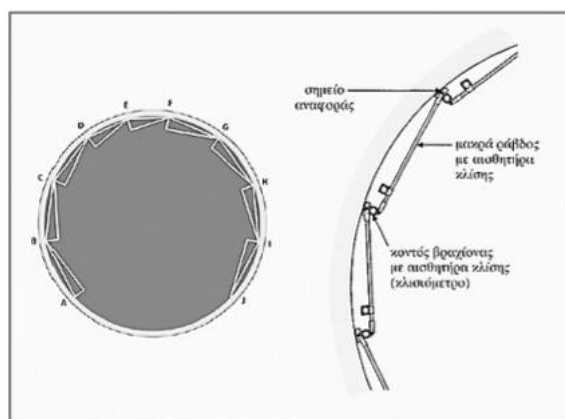
Εικόνα 19: Διάταξη επιμηκυνσιόμετρου ταινίας σε σήραγγα



Εικόνα 20: Επιμηκυνσιόμετρο ταινίας

2.3.7.3 Σύστημα μέτρηση συγκλίσεων “Bassett” (Bassett Convergence System)

Το σύστημα μέτρηση συγκλίσεων “Bassett” βρίσκει εφαρμογή αποκλειστικά στις σήραγγες. Αποτελείται από έναν μακρύ βραχίονα που φέρει EL αισθητήρα, έναν κοντό βραχίονα που φέρει EL αισθητήρα και σημεία αναφοράς πακτωμένα στην επένδυση. Το ένα άκρο από κάθε βραχίονα είναι δεμένο αρθρωτά με τα σημεία αναφοράς, όπως φαίνεται στο σχήμα. Τα σημεία αναφοράς πρέπει να βρίσκονται στην ίδια διατομή της σήραγγας. Οι δυο βραχίονες σχηματίζουν ένα νοητό τρίγωνο, του οποίου οι δυο πλευρές (αυτές με τους βραχίονες) είναι σταθερές. Γνωρίζοντας την κλίση των πλευρών αυτών είναι δυνατόν να υπολογιστεί το μήκος και η κλίση της τρίτης πλευράς που αντιπροσωπεύει τη μετακίνηση μεταξύ των δυο σημείων αναφοράς. Το σύστημα “Bassett” παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα με κυριότερο το ότι βρίσκεται μόνιμα τοποθετημένο στη σήραγγα, εφόσον δεν παρεμβάλλεται στις εργασίες πεδίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή λήψη δεδομένων, αν στο σύστημα τοποθετηθεί ειδική συσκευή καταγραφής τους. Επίσης, αν οι βραχίονες σχηματίζουν κλειστό κύκλο, υπάρχει μια εκτίμηση του σφάλματος στις μετρήσεις και μερικής διόρθωσής του. Οι μετρήσεις αφορούν μόνο σχετικές μετακινήσεις και για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης των σημείων αναφοράς απαιτείται η χρήση γεωδαιτικών μεθόδων.

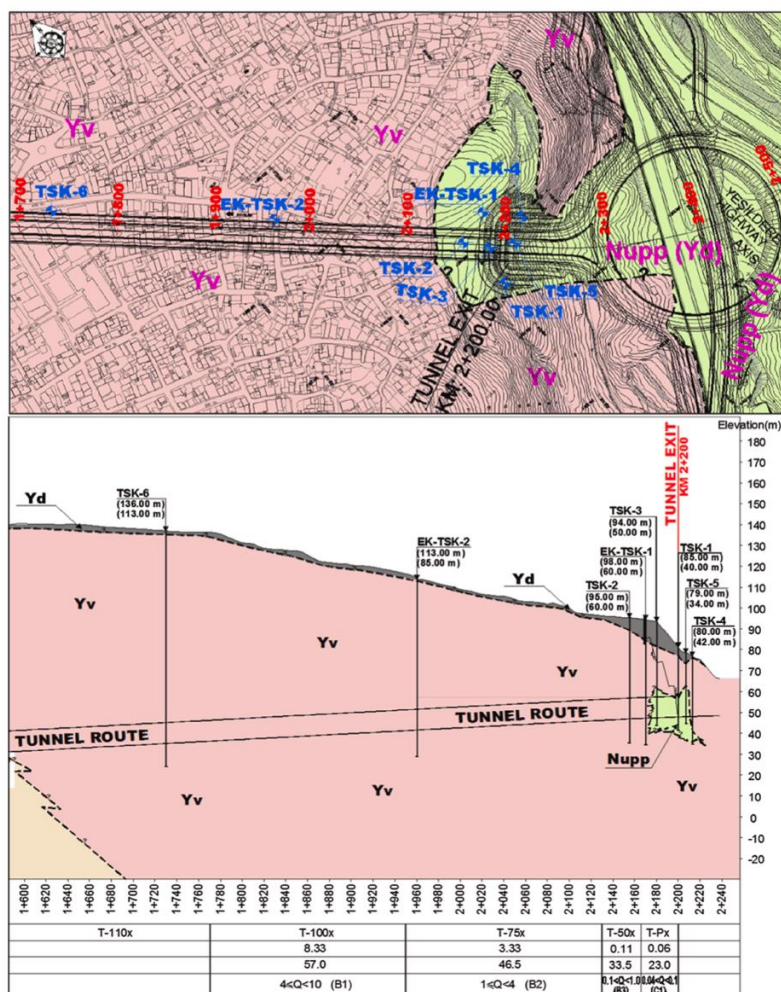


Εικόνα 21: Σύστημα μέτρηση συγκλίσεων “Bassett”

2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Για την καλύτερη κατανόηση των μεθόδων προσομοίωσης αλλά και την ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με τις πλέον σύγχρονες μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί σε αντίστοιχες περιπτώσεις. Επιπλέον λήφθηκε υπόψιν η συμπερασματολογία των επιστημόνων μέσω της οποίας αποφεύχθηκαν αστοχίες στην συγκεκριμένη έρευνα.

Οι (Yertunoι, et al., 2019) χρησιμοποίησαν γεωτεχνική και δομητική παρακολούθηση (monitoring) κατά την διάρκεια κατασκευής της δίδυμης σήραγγας του μετρό Konak στη πόλη της Σμύρνης στη Τουρκία. Αρχικά ερεύνησαν τα γεωλογικά δεδομένα, πραγματοποίησαν γεωτρήσεις και εδαφικές δοκιμές ώστε να υπολογιστούν οι μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων όπως φαίνεται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 22: Προφίλ και διάταξη γεωτρήσεων, τιμές RMR και Q στα κρίσιμα τμήματα και στην πύλη εξόδου της σήραγγας Konak. (Yv: Yamanli Volcanics, Nupp: Upper Sedimentary Sequence, Yd: Fill material).

Οι εδαφικές παράμετροι οι οποίες υπολογίστηκαν χρησιμοποιήθηκαν ως παράμετροι σχεδιασμού. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν τα εξής συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας : Q-System (NGI Tunneling Quality Index, Barton et al. 1974; Barton and Grimstad 1994; Grimstad and Barton 1993), Geological Strength

Index (GSI; Hoek and Marinos, 2000) and the Rock Mass Rating System (RMR; Bienawski, 1989). Μέσω των προαναφερθεισών συστημάτων επιλέχθηκαν οι κατηγορίες ταξινόμησης για την βραχώμαζα όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακας 1 παρακάτω.

Πίνακας 1: Σύνοψη των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και των συντελεστών παραμόρφωσης για τις γεωτεχνικές ενότητες.

Geotechnical sector		T-Px	T-50x	T-75x	T-100x
UCS (MPa)		10	15	40	45
RQD (%)		10	10	50	50
Q		0.06	0.11	3.33	8.33
RMR		23.0	33.5	46.5	57
GSI		20	30	40	50
Mean E_i^* (GPa)		6.42			
Deformation modulus of the rock mass					
Bieniawski (1978) (GPa) ⁽¹⁾		–	–	–	14.00
Serafim and Pereira (1983) (GPa) ⁽²⁾		2.11	3.87	8.18	–
Barton (2002) (GPa) ⁽³⁾		1.82	2.55	11.00	15.53
Nicholson and Bieniawski (1990) (GPa) ⁽⁴⁾		0.253	0.453	0.832	1.286
Gokceoglu et al. (2003) (GPa) ⁽⁵⁾		0.418	0.923	2.464	5.443
Zang and Einstein (2004) (GPa) ⁽⁶⁾		0.218	0.218	1.210	1.210
Hoek and Diederichs (2006) (GPa) ⁽⁷⁾		0.293	0.552	1.025	1.972
Shear strength parameters of the rock mass					
RMR	Cohesion (kPa)	100–200	100–200	200–300	200–300
	Friction angle (°)	15–25	15–25	25–35	25–35
GSI	Cohesion (kPa)	0.081	0.183	0.418	0.646
	Friction angle (°)	35.85	45.05	52.37	53.86
Barton and Pandey (2011) ⁽⁸⁾	Cohesion (kPa)	16.7	50.0	888.9	2500.0
	Friction angle (°)	18.26	18.26	56.31	56.31

*Mean intact rock Elastic Modulus values recommended for volcanic rocks, i.e., for andesite, agglomerate and tuff.

1) $E_m = 2RMR - 100$

2) $E_m = 10^{(RMR-10)/40}$

3) $E_m = 10Q_c^{1/3}$ where $Q_c = Q_{100}^{c_c}$

4) $E_m = (RF)E_{intact}$

5) $E_m = 0.0736e^{0.0755RMR}$

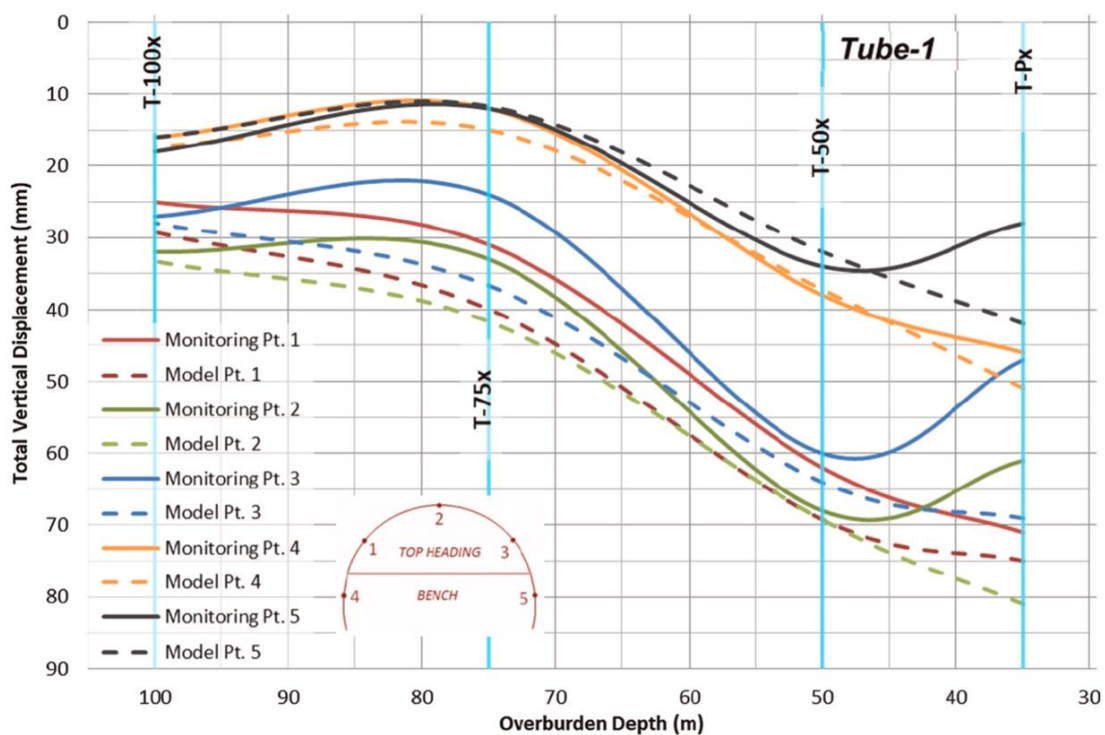
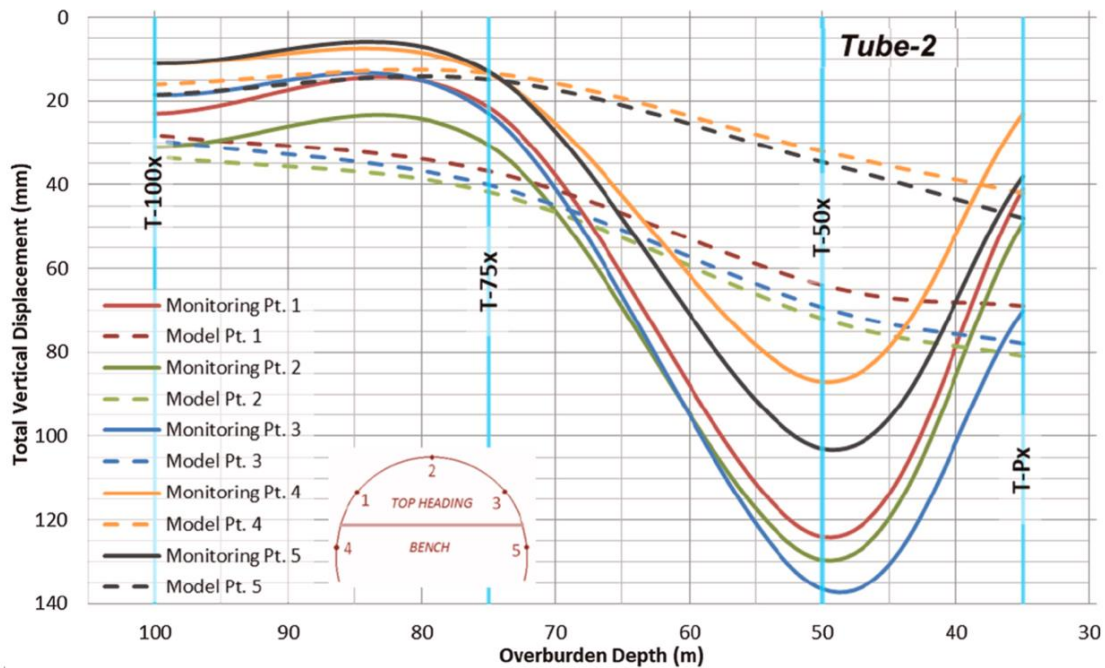
6) $E_m/E_r = 10^{0.0186RQD-1.91}$ (mean)

7) $E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1-D/2}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$

8) $\phi = \tan^{-1} [(J_r/J_n)J_\phi]$

$c = (RQD/J_n)(1/SRF)(c_r/100)$

Η αριθμητική ανάλυση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και πιο συγκεκριμένα του προγράμματος Phase 2.0 (RS2), για την αποτίμηση του σχεδιασμού στήριξης και την πρόβλεψη των κατακόρυφων μετακινήσεων σε πέντε (5) διαφορετικά σημεία της σήραγγας. Η διάνοιξη των σηράγγων ξεκίνησε με την 2^η σήραγγα και έπειτα με την 1^η σήραγγα. Στο Διάγραμμα 1 γίνεται σύγκριση των μετακινήσεων που μετρήθηκαν στο πεδίο σε σχέση με τις μετακινήσεις που είχαν υπολογιστεί από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.



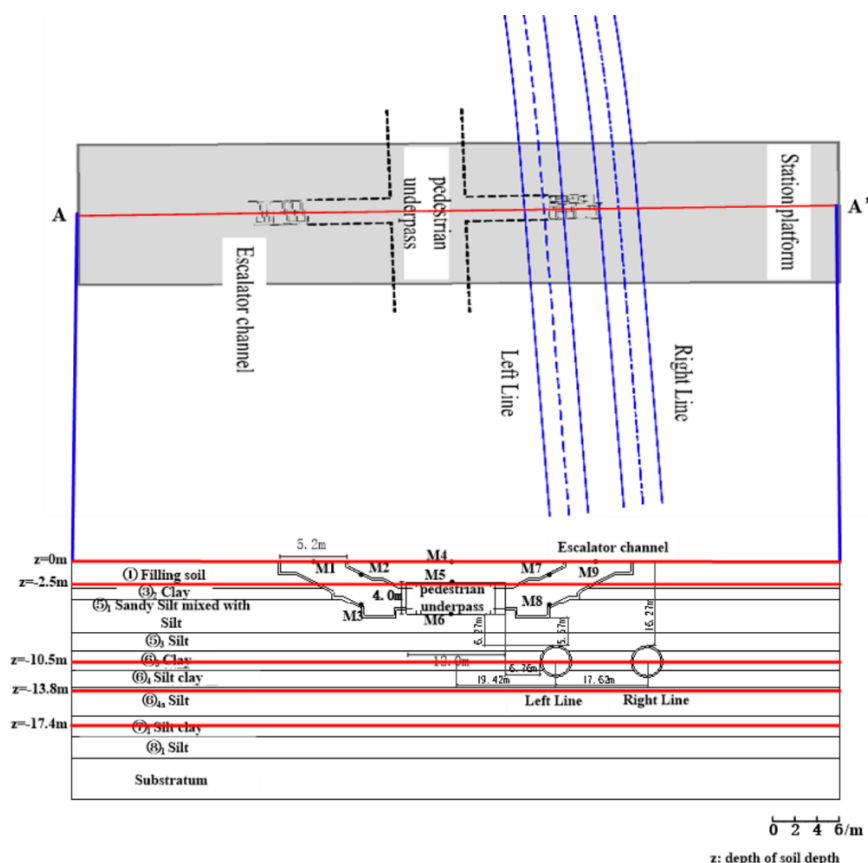
Διάγραμμα 1: Σύγκριση των συνολικών κατακόρυφων μετακινήσεων που μετρήθηκαν κατά την διάνοιξη των σηράγγων στο πεδίο με αυτές που υπολογίστηκαν στην αριθμητική προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία για την σήραγγα 2 και 1 αντίστοιχα του έργου Κοπάκ.

Οι μετακινήσεις οι οποίες υπολογίστηκαν από τις αριθμητικές αναλύσεις παρατηρήθηκε ότι σε γενικές γραμμές συνέπιπταν με τις μετρούμενες στο πεδίο κατά την κατασκευή του έργου. Εκτός από την γεωτεχνική

ενότητα T-50x, στις υπόλοιπες γεωτεχνικές ενότητες παρατηρείται ότι οι κατακόρυφες μετακινήσεις που υπολογίστηκαν τείνουν να είναι παράλληλες και σταθερές ως προς τις μετρούμενες μετακινήσεις του πεδίου. Επιπλέον παρατηρείται ότι στη σήραγγα 1 υπάρχει μεγαλύτερη ταύτιση των μετρούμενων μεγεθών με αυτά που προέκυψαν από τις αναλύσεις. Αντίθετα στη σήραγγα 2 δεν παρατηρείται η ίδια συνέχεια στη σύγκριση των αποτελεσμάτων ειδικά στη γεωτεχνική ενότητα T-50x. Αυτό συνέβη λόγω της ασθενούς αντοχής της βραχώμαζας η οποία δεν είχε ληφθεί υπόψιν κατά την προσομοίωση.

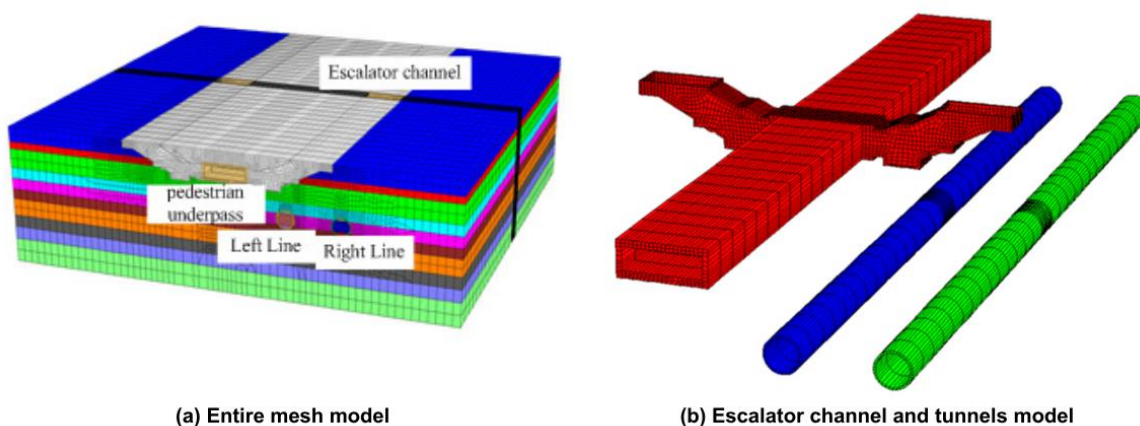
Οι μετακινήσεις που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας ταυτίζονται κατά 70% με τις τιμές που είχαν υπολογιστεί από την αριθμητική ανάλυση, ενώ μόνο το 12,5% των προβλεπόμενων μετακινήσεων υπερβαίνει τις πραγματικές. Παράλληλα τα αποτελέσματα των κατακόρυφων μετακινήσεων δείχνουν να επηρεάζονται από την ύπαρξη ή μη βραχώμαζας κατά μήκος της δίδυμης σήραγγας.

Οι (Zhenqiang, et al., 2020) (Ran, et al., 2011) ερεύνησαν την επίδραση που είχε η διάνοιξη σήραγγας του μετρό Changzhou σε υπόγεια διάβαση πεζών σε έναν από τους σταθμούς του μετρό όπως φαίνεται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23: Κάτοψη και τομή της σήραγγας και της υπόγειας διάβασης. (Με το γράμμα M συμβολίζονται τα σημεία στα οποία πραγματοποιείται δομτική παρακολούθηση (monitoring))

Η προσομοίωση έγινε σε τρεις διαστάσεις (3D) με τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία και πιο συγκεκριμένα το FLAC3D. Το μοντέλο προσομοίωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24: Αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης

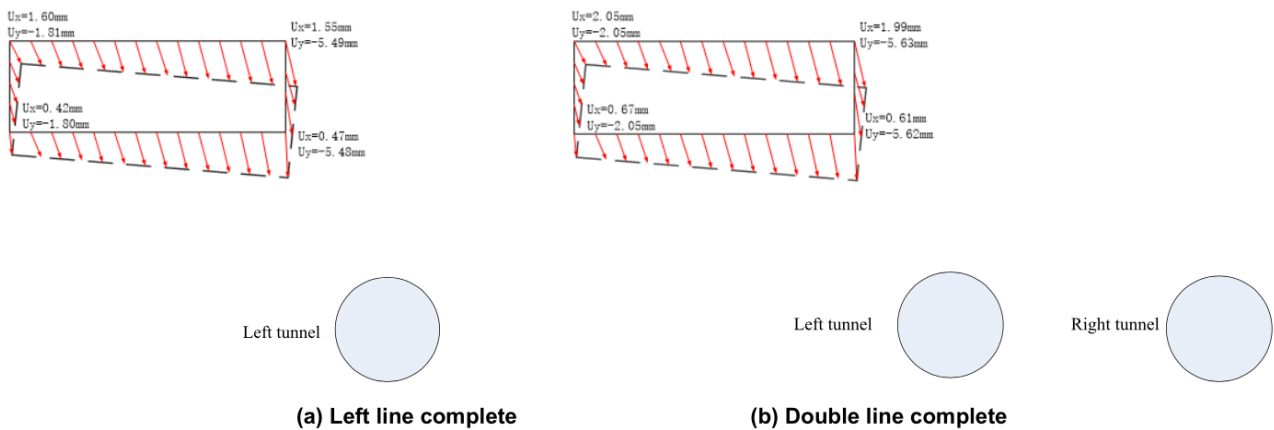
Για την εξαγωγή συμπερασμάτων έγιναν συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης και των αντίστοιχων που καταγράφηκαν στο πεδίο. Με αυτό τον τρόπο επαληθεύτηκε η ακρίβεια της αριθμητικής προσομοίωσης. Οι τιμές της μετρηθείσας μετατόπισης και της αντίστοιχης που προέκυψε από τις αριθμητικές αναλύσεις φαίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Τιμές μετακινήσεων που προέκυψαν από τις μετρήσεις στο πεδίο και από τις αριθμητικές αναλύσεις.

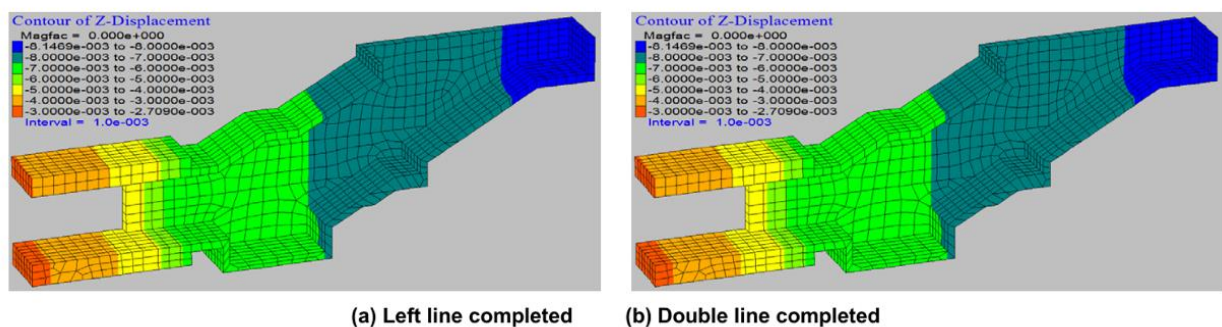
Monitoring points	Measured displacement	Simulated	Errors differences		allowable error percentage
	/mm	displacement /mm	/mm	Errors differences	
M1	2.0	2.14	0.14	4.7%	
M2	2.6	2.69	0.09	5.6%	
M3	3.1	3.29	0.19	7.4%	
M4	5.0	5.28	0.28	8.6%	
M5	6.0	6.61	0.61	6.1%	15.0%
M6	7.5	8.59	1.09	9.5%	
M7	8.0	9.02	1.02	14.1%	
M8	9.5	10.34	0.84	12.4%	
M9	12.0	13.91	1.91	15.1%	

Βάσει λοιπόν των παραπάνω αποτελεσμάτων η απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων είναι της τάξης του 3,0%-15,1%. Ωστόσο η αριθμητική προσομοίωση αποτύπωσε με ακρίβεια την παραμόρφωση της υπόγειας

διάβασης πεζών. Η γεωτεχνική και δομητική παρακολούθηση (monitoring) οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα. Η υπόγεια διάβαση χαρακτηρίζεται από μεγάλη δυσκαμψία και αυτό οδηγεί σε ανομοιόμορφη κατακόρυφη μετατόπιση σε σχέση με την μετατόπιση του εδάφους Διάγραμμα 2. Η ανομοιόμορφη μετατόπιση που προκαλείται από την εκσκαφή των σηράγγων χαρακτηρίζεται από μεγάλη πλευρική μετατόπιση της υπόγειας διάβασης κοντά στη σήραγγα και πολύ μικρές πλευρικές μετατοπίσεις μακριά από την σήραγγα. Επιπλέον η εκσκαφή της σήραγγας θα επηρεάσει την κλίση της υπόγειας διάβασης και θα προκαλέσει παραμόρφωση των κυλιόμενων σκαλιών Διάγραμμα 3. (Zhenqiang, et al., 2020) Ωστόσο τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης δείχνουν ότι η παραμόρφωση που θα προκληθεί πληροί τις απαιτήσεις των κανονισμών. Τέλος παρατηρήθηκε συγκέντρωση τάσεων σε συγκεκριμένο σημείο της υπόγειας διάβασης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Για το λόγο αυτό έγινε παρακολούθηση των τάσεων καθ' όλη τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας.

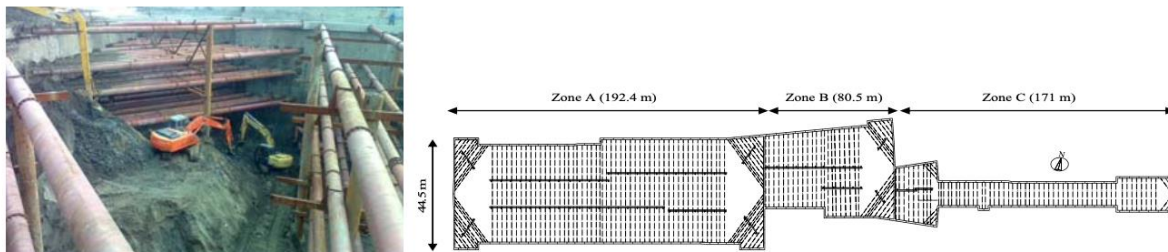


Διάγραμμα 2: Παραμόρφωση της υπόγειας διάβασης πεζών μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης των σηράγγων



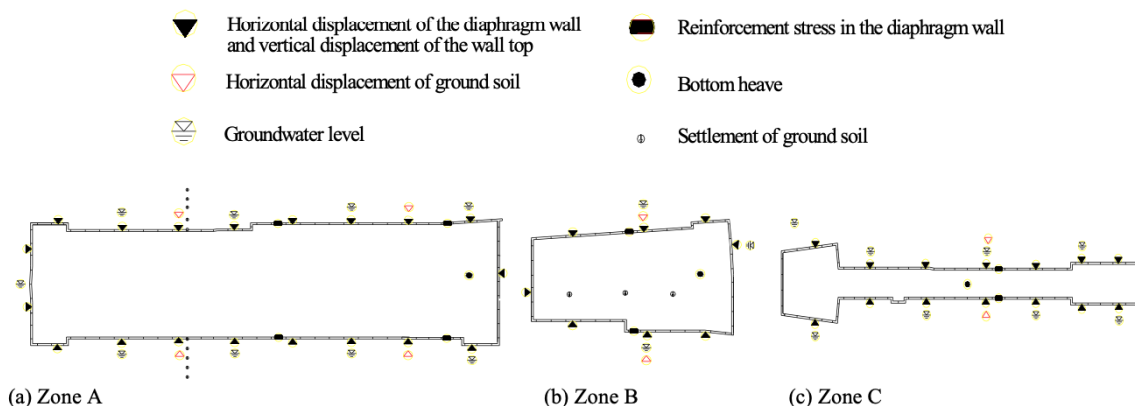
Διάγραμμα 3: Κατακόρυφη μετατόπιση των κυλιόμενων σκαλιών.

Η έρευνα των (Ran, et al., 2011) παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης κατά την κατασκευή ενός σταθμού του μετρό. Η κατασκευή του σταθμού γίνεται με την μέθοδο της ανοιχτής εκσκαφής και το συνολικό της μήκος είναι 443.9μ ενώ το πλάτος της 44.5μ όπως φαίνεται και στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25: Φωτογραφία και πλάνο της εκσκαφής του σταθμού του μετρό

Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια βάση δεδομένων, ένα δυναμικό σύστημα ενημέρωσης και ένα σύστημα πρόβλεψης μετακινήσεων. Τα όργανα παρακολούθησης που έχουν τοποθετηθεί φαίνονται στην Εικόνα 26.



Εικόνα 26: Όργανα παρακολούθησης στην εκσκαφή του σταθμού του μετρό

Τα δεδομένα παρακολούθησης έδειξαν ότι η παραμόρφωση του διαφραγματικού τοίχου και οι καθιζήσεις του εδάφους αυξήθηκαν με το βάθος της εκσκαφής. Η θέση των μέγιστων οριζόντιων μετακινήσεων μετατοπίστηκε κάτω από το μέτωπο της εκσκαφής. Οι αξονικές δυνάμεις των αντηρίδων μεταφέρθηκαν από την πρώτη σειρά προς τις άλλες κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Τα αποτελέσματα της καταγραφής δείχνουν ότι η εκσκαφή παρέμεινε ευσταθής κατά το στάδιο της κατασκευής.

3 Γεωτεχνική αξιολόγηση

3.1 Εισαγωγή

Η παρούσα γεωτεχνική αξιολόγηση συντάχθηκε στα πλαίσια προσομοίωσης του φρέατος αερισμού Κρήτης που αποτελεί μέρος του έργου «Μετρό Θεσσαλονίκης – Επέκταση Καλαμαριάς». Αντικείμενο της αξιολόγησης είναι η παρουσίαση και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των γεωτεχνικών ερευνών που εκτελέστηκαν στην ευρύτερη περιοχή του φρέατος αερισμού.

Το κεφάλαιο περιλαμβάνει συνοπτικά τα ακόλουθα:

- Προσδιορισμό της στρωματογραφίας του εδάφους και εκτίμηση ως προς τον υδροφόρο ορίζοντα.
- Παρουσίαση των γεωτεχνικών ερευνών (δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, επιτόπου δοκιμές, μετρήσεις στάθμης νερού, εργαστηριακές δοκιμές) που εκτελέστηκαν στην περιοχή κατασκευής του έργου.
- Γενική αξιολόγηση των ερευνών σύμφωνα με τα αποτελέσματα των επιτόπου και εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκαν.
- Προσδιορισμό παραμέτρων γεωτεχνικού σχεδιασμού για κάθε εδαφική στρώση που συναντάται.

3.1.1 Θέση και στοιχεία έργου

Πρόκειται για φρέαρ που κατασκευάζεται κοντά στη συμβολή των οδών Κρήτης και Βούλγαρη, μεταξύ των δύο σηράγγων TBM (Χ.Θ. ~0+625 ÷ Χ.Θ. ~0+643) και που θα λειτουργήσει σαν φρέαρ αερισμού και άντλησης καθώς και σαν έξοδος διαφυγής. Το φρέαρ θα κατασκευαστεί με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος (Cut and Cover).



Εικόνα 27: Χάρτης της περιοχής Καλαμαριάς, Νομού Θεσσαλονίκης στον οποίον φαίνεται η χάραξη και οι κύριες κατασκευές του Μετρό της επέκτασης προς Καλαμαριά (Πηγή: Google Maps)

Σύμφωνα με την μελέτη κατασκευής το Φρέαρ Κρήτης είναι ορθογωνικής διατομής με διαστάσεις ~9,9 m X ~18,8 m και φτάνει μέχρι το επίπεδο των σιδηροτροχιών των παρακείμενων σηράγγων σε βάθος 22.70m (Τ.Ο.Ρ.) από το επίπεδο οδού. Με τις σήραγγες TBM το φρέαρ συνδέεται με διασυνδετήριες στοές. Στην

επιφάνεια της οδού θα καταλήγει αφενός η απόληξη (εσχάρα) του φρεατίου απαγωγής/προσαγωγής αέρα, καθώς και η έξοδος διαφυγής. Η εσχάρα της απαγωγής / προσαγωγής χωροθετείται στην τριγωνική νησίδα στην συμβολή των οδών Κρήτης και Βούλγαρη, ενώ η έξοδος κινδύνου στο πεζοδρόμιο στην συμβολή των παραπάνω οδών.

Το φρέαρ θα κατασκευαστεί με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος (C + C) ενώ οι δύο συνδετήριες σήραγγες (διαστάσεων B=7m, H=9m) προς τις σήραγγες της κύριας γραμμής θα διανοιχτούν υπογείως με συμβατικά μηχανικά μέσα.

Η κατασκευαστική ακολουθία του έργου περιγράφεται όπως στη συνέχεια:

- Κατασκευή φρέατος
- Κατασκευή σηράγγων TBM και
- Διάνοιξη διασυνδετηρίων σηράγγων τύπου NATM

3.2 Παρουσίαση Γεωτεχνικών Ερευνών

3.2.1 Εργασίες υπαίθρου

3.2.1.1 Γεωτρήσεις

Για την περιοχή του φρέατος αερισμού χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τη γεωτεχνική αξιολογηση που είχε πραγματοποιηθεί για την υλοποίηση του έργου. Οι εκτελεσθέντες γεωτρήσεις φαίνονται στην Εικόνα 28.



Εικόνα 28: Γεωτρήσεις στην περιοχή του φρέατος κατά μήκος της χάραξης της γραμμής του μετρό (Πηγή: Άκτωρ ΑΕ)

Για την γεωτεχνική αξιολόγηση αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα από εννιά (9) δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και δύο (2) πρεσσιομετρικές γεωτρήσεις. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της κάθε γεώτρησης.

Πίνακας 3: Στοιχεία δειγματοληπτικών και πρεσσιομετρικών γεωτρήσεων

Γεώτρηση	Συντεταγμένες			Χιλιόμετρωση Χ.Θ. (νότιας σήραγγας)	Είδος γεώτρησης
	X (Easting)	Y (Northing)	Z (Elevation)		
KATP24	149992.368	247454.839	14.214	657.063	Δειγματοληπτική γεώτρηση
KATP26	149942.836	247254.748	16.559	846.429	Δειγματοληπτική γεώτρηση
T20P022	149908.571	247699.417	9.658	406.400	Δειγματοληπτική γεώτρηση
T20P023	149911.066	247649.422	9.576	454.513	Δειγματοληπτική γεώτρηση
T20P024	149915.077	247550.808	10.097	547.454	Δειγματοληπτική γεώτρηση
T20H069	149922.565	247529.385	11.850	570.760	Δειγματοληπτική γεώτρηση
T20P025	149967.295	247486.412	13.209	624.780	Δειγματοληπτική γεώτρηση
T20P026	149907.750	247271.927	17.120	849.743	Δειγματοληπτική γεώτρηση
T20P002	149950.025	247362.638	15.751	747.443	Δειγματοληπτική γεώτρηση
KATR23	149914.770	247652.456	9.570	453.110	Πρεσσιομετρική γεώτρηση
KATR25	149949.925	247360.746	25.360	748.650	Πρεσσιομετρική γεώτρηση

Το σύνολο των γεωτρήσεων αποσκοπεί στη διερεύνηση των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών κατά μήκος του έργου. Από τους πυρήνες των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, λήφθηκαν κατάλληλα δείγματα στα οποία διενεργήθηκαν αντίστοιχες εργαστηριακές δοκιμές.

3.2.1.2 Επιτόπου Δοκιμές

Για την αξιολόγηση και ταξινόμηση των εδαφών πραγματοποιήθηκαν οι εξής επιτόπου δοκιμές:

- Πενετόμετρο χειρός
- Μετρήσεις PID

- Δοκιμή Τυποποιημένης Διείσδυσης
- Δοκιμή Διαπερατότητας Μεταβλητού και σταθερού φορτίου

3.2.1.3 Εργαστηριακές Δοκιμές

Οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- Κοκκομετρική ανάλυση
- Όρια Atterberg
- Φυσικά χαρακτηριστικά, φυσική υγρασία, υγρό φαινόμενο βάρος, ξηρό φαινόμενο βάρος, πυκνότητα κ.α.
- Δοκιμές διάτμησης
- Τριαξονικές δοκιμές
- Δοκιμή συμπίεσομέτρου
- Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης
- Δοκιμή σημειακής φόρτισης

3.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

3.3.1 Γεωλογικές Συνθήκες-

Βάσει των εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών αξιολογήθηκαν τα διαθέσιμα γεωτεχνικά στοιχεία και δόθηκαν οι παράμετροι γεωτεχνικού σχεδιασμού της προσωρινής αντιστήριξης και της μόνιμης επένδυσης του Φρέατος Κρήτης και των διασυνδετήριων σηράγγων αυτού με τις εκατέρωθεν αυτού, κύριες σήραγγες TBM. Στην περιοχή του Φρέατος Κρήτης συναντώνται επιφανειακά Τεταρτογενείς αποθέσεις και Νεογενείς σχηματισμοί και βαθύτερα, αποκλειστικά Νεογενείς Σχηματισμοί, που ανήκουν στην ψαμμιτομαργαϊκή σειρά. Οι παραπάνω σχηματισμοί συνίστανται κυρίως από σταθερές έως πολύ σιφρές και τοπικά σκληρές, αμμώδεις ΑΡΓΙΛΟΥΣ (CL-CH) ή αμμώδεις ΙΛΥΕΣ (ML-MH) με έντονη παρουσία, κατά θέσεις, στους Νεογενείς σχηματισμούς ασβεστιτικών συγκριμάτων.

Οι αργιλικό Νεογενείς σχηματισμοί διακόπτονται από ενστρώσεις ή στρώσεις, ενίοτε σημαντικού πάχους, πυκνών έως τοπικά πολύ πυκνών ιλυωδών ΑΜΜΩΝ (SM), καστανού ή τεφρού μοβ χρώματος. Τοπικά οι σχηματισμοί αυτοί εμφανίζονται ισχυρά διαγενεμένοι με τη μορφή αργιολίθων, ιλυολίθων ή ψαμμιτών. Επιφανειακά συναντώνται κατά θέσεις τεχνητές επιχώσεις.

Τεχνητές επιχώσεις (Τ.Ε.)

Οι τεχνητές επιχώσεις αποτελούνται από μαλακές έως σταθερές αμμώδεις ΑΡΓΙΛΟΥΣ με χάλικες (CL-L) χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας, κυρίως μέτριας έως τοπικά υψηλής αντοχής και από χαλαρές έως μέτρια πυκνές αργιλώδεις ΑΜΜΟΥΣ με χάλικες (Sa) και από χαλαρούς έως μέτρια πυκνούς αργιλώδεις ΧΑΛΙΚΕΣ (Gr).

Εντός των παραπάνω υλικών συναντώνται υπολείμματα φυτικών ριζών, και υλικά προερχόμενα από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (κεραμικά, τούβλα, ξύλο, τεμάχια σιδήρου, κλπ). Οι τεχνητές επιχώσεις συναντώνται κατά θέσεις μέχρι βάθους ~1,50m.

Αργιλικό σχηματισμό A1 (Τεταρογενείς αποθέσεις)

Ο σχηματισμός A1 αποτελείται από σταθερή και κατά τόπους στιφρή έως πολύ στιφρή κυρίως καστανή έως καστανέρυθη αμμώδη ΑΡΓΙΛΟ (C1-L) με σποραδικούς χάλικες χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας, χαμηλής έως υψηλής αντοχής. Ο σχηματισμός εμφανίζεται κανονικά στερεοποιημένος. Στην περιοχή του φρέατος συναντάται μέχρι μέγιστου βάθους ~4m.

Αργιλικό σχηματισμού (Νεογενείς σχηματισμοί)

✓ Σχηματισμοί BC1

Ο σχηματισμός BC1 αποτελείται από σταθερή έως στιφρή και τοπικά πολύ στιφρή καστανή αμμώδη ΑΡΓΙΛΟ έως κατά θέσεις ΙΛΥ (C1-L, M1-L, C1-H, M1-H) μέσης έως υψηλής πλαστικότητας μέτριας έως υψηλής αντοχής. Ο σχηματισμός εμφανίζεται κυρίως κανονικά στερεοποιημένος έως ελαφρά υπερστερεοποιημένος. Στην περιοχή του σταθμού εμφανίζεται μέχρι μέγιστου βάθους 4m.

✓ Σχηματισμός BC23

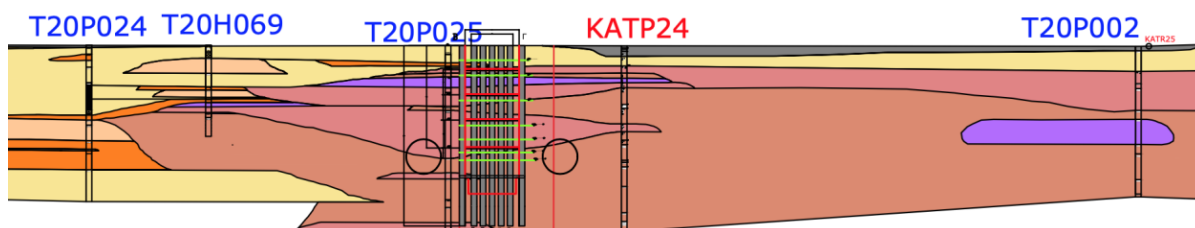
Ο σχηματισμός BC3 αποτελείται από σταθερή έως πολύ στιφρή και τοπικά σκληρή ΑΡΓΙΛΟ έως κατά θέσεις ΙΛΥ (C1-L, M1-L, C1-H, M1-H), με κυμαινόμενα ποσοστά άμμου και χαλίκων, μέσης έως υψηλής πλαστικότητας, μέτριας έως πολύ υψηλής αντοχής. Ο σχηματισμός, κατά τόπους, εμφανίζεται ως μαλακός βράχος. Μέσα στο σχηματισμό εμφανίζονται συχνά ενστρώσεις πυκνής, κυρίως αργιλώδους έως ιλυώδους ΑΜΜΟΥ. Είναι ο επικρατέστερος σχηματισμός της περιοχής του φρέατος και εμφανίζεται κυρίως κανονικά στερεοποιημένος έως ελαφρά υπερστερεοποιημένος. Ο σχηματισμός σε μικρά βάθη, έχει χρώμα ανοικτό καστανό έως μπεζ και βαθύτερα καστανό και καστανοπράσινο έως κυανοπράσινο.

Αμμώδεις Σχηματισμοί BS1

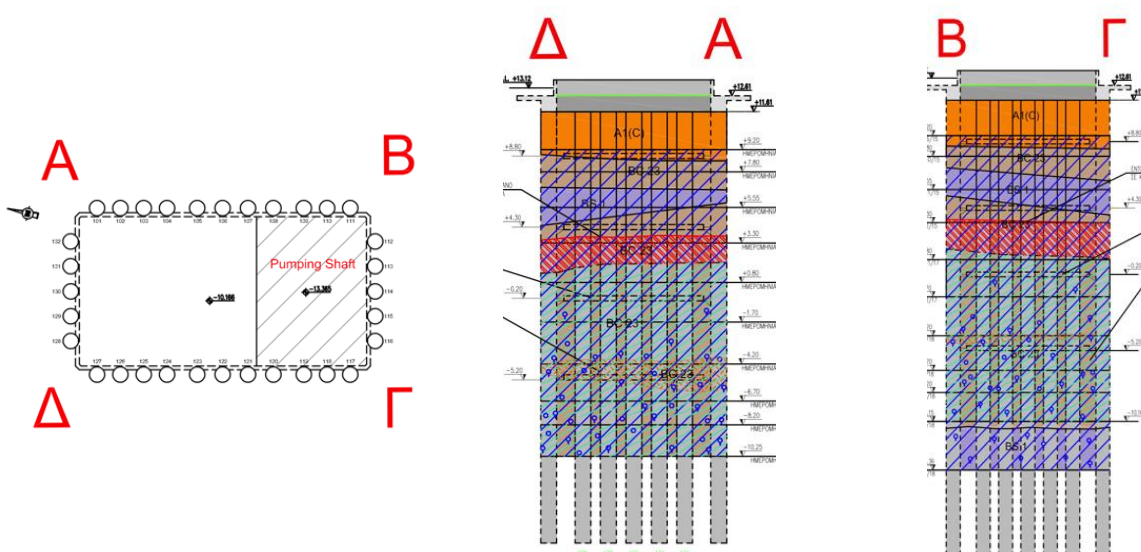
Ο σχηματισμός BS1 συνίσταται από μέτριας πυκνότητας έως πολύ πυκνή καστανή αργιλώδη έως ιλυώδη ΑΜΜΟ (Sa), με κυμαινόμενο ποσοστό λεπτόκοκκων και χαλίκων. Πρόκειται για σχηματισμό με έντονη διαγένεση. Το συνεκτικό του κλάσμα εμφανίζει ανάλογες ιδιότητες με τους συνεκτικούς σχηματισμούς. Ο σχηματισμός αυτός διακρίνεται αναλόγως του χρώματός του σε καστανός και τεφρό-μοβ. Ο σχηματισμός αυτός συναντάται σε στρώση που βρίσκεται σε βάθος από ~5m έως ~7,5m από την επιφάνεια και βαθύτερα μόνο με τη μορφή λεπτών ενστρώσεων.

Με βάση τα διαθέσιμα γεωτεχνικά στοιχεία κατά μήκος της περιοχής του σταθμού φαίνεται ότι οι γεωτεχνικές συνθήκες δεν διαφοροποιούνται ιδιαίτερα στρωματογραφικά. Οι όποιες διαφορές αφορούν κυρίως στην επικράτηση αμμώδους ή αργιλικού χαρακτήρα των συμμετεχόντων μικτών σχηματισμών. Για

την καλύτερη παρουσίαση και κατανόηση των δεδομένων δημιουργήθηκε γεωλογική τομή στην θέση του φρέατος Εικόνα 29.



Εικόνα 29: Γεωλογική τομή στη θέση του φρέατος



ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ/MANMADE DEPOSITS

■ Τεχνητές επιχώσεις

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ/ QUATERNARY DEPOSITS

- Σχηματισμός A1 (C): Μάλακη έως σιφρή καστανή - καστανέρυθρη αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ ή ΑΡΓΙΛΟΣ με άμμο (CL) χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας, με σποραδικούς χάλικες
- Σχηματισμός A1 (GS): Χαλαρή έως μέτριας πυκνότητας καστανή αργιλώδης / ιλυώδης ΑΜΜΟΣ με χάλικες (SC / SM) ή αργιλώδεις / ιλυώδεις ΧΑΛΙΚΕΣ με άμμο (GC / GM)
- Σχηματισμός A1: Μάλακη έως στάθμη καστανή - καστανέρυθρη ΑΡΓΙΛΟΣ (CL) με άμμο ή αμμώδης, χαμηλής έως υψηλής πλαστικότητας ή ΙΛΥΣ (MH) υψηλής πλαστικότητας.

ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΪΚΗ ΣΕΙΡΑ/ SANDSTONE- MARL SERIES

- Σχηματισμός BC1: Σταθερή έως σιφρή καστανή αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ / ΙΛΥΣ ή ΑΡΓΙΛΟΣ / ΙΛΥΣ (CL / ML) με άμμο, χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας και κατά τόπους με ασβεστικά συγκρίματα.
- Σχηματισμός BC23: Σιφρή έως σκληρή ανοικτή καστανή έως μπεζ ή καστανοπράσινη έως κυανοπράσινη ΑΡΓΙΛΟΣ (CL - CH), χαμηλής έως υψηλής πλαστικότητας, ή ιλύς (ML - MH) χαμηλής έως υψηλής πλαστικότητας με παρουσία, κατά τόπους έντονη, ασβεστικών συγκριμάτων και συχνές ενστρώσεις πολύ πυκνής αργιλώδους / ιλυώδους ΑΜΜΟΥ (SC / SM) στα βαθύτερα τμήματα. Κατά θέσεις εμφανίζονται ασθενείς ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΙ / ΙΛΥΟΛΙΘΟΙ.
- Σχηματισμός BS1: Μέτρια έως πολύ πυκνή καστανή ή τεφρή - μωβ αργιλώδης / ιλυώδης ΑΜΜΟΣ (SC / SM), με πολύ σποραδικές εμφανίσεις ασθενών ΨΑΜΜΙΤΩΝ

Εικόνα 30: Στρωματογραφία της περιοχής κατασκευής του φρέατος αερισμού Κρήτης (Πηγή: Άκτωρ ΑΕ)

3.4 Παράμετροι σχεδιασμού

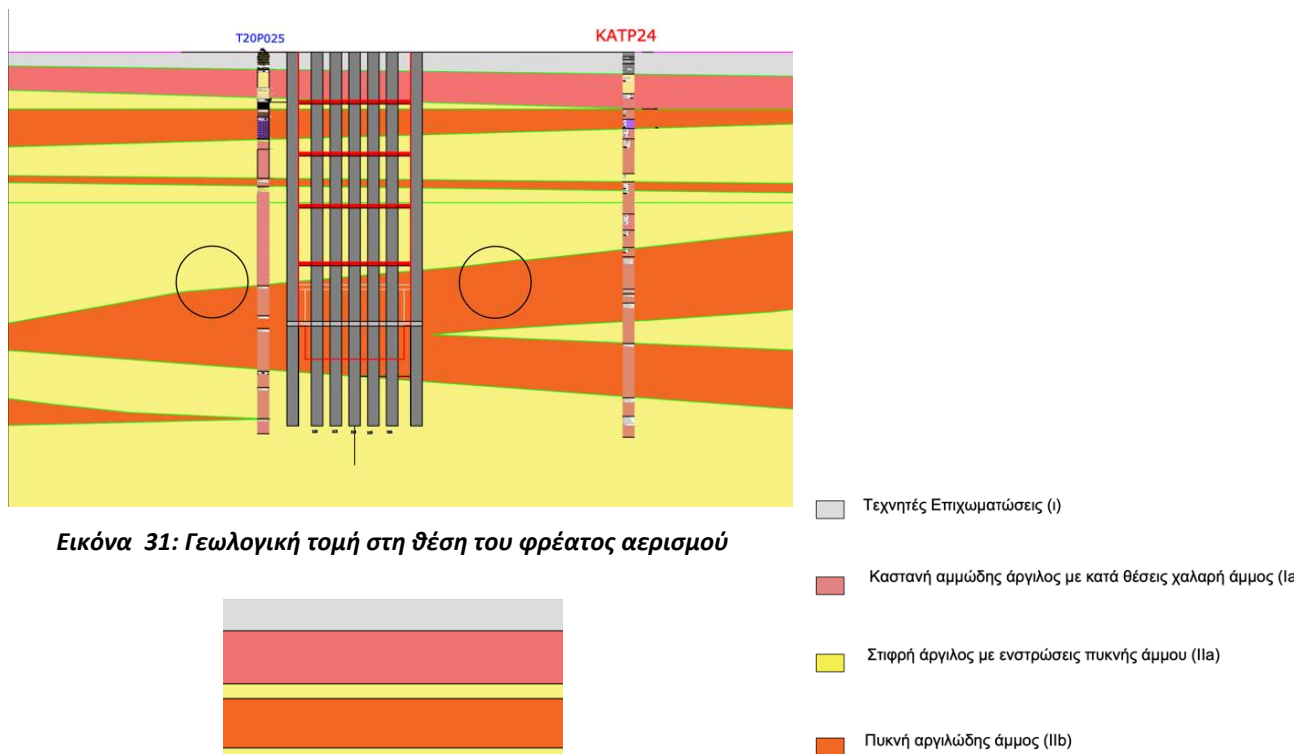
Η επιλογή των τιμών σχεδιασμού για τις γεωτεχνικές παραμέτρους της περιοχής έχει βασιστεί στην αξιολόγηση των διαθέσιμων δεδομένων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε ομαδοποίηση των εδαφικών κατηγοριών και εκ νέου εξαγωγή των εδαφικών χαρακτηριστικών βάσει των υπαρχόντων από τις εδαφικές δοκιμές. Η ομαδοποίηση των εδαφών παρουσιάζεται στον Πίνακας 4.

Πίνακας 4: Εδαφικές κατηγορίες που προέκυψαν από ομαδοποίηση των εδαφικών χαρακτηριστικών.

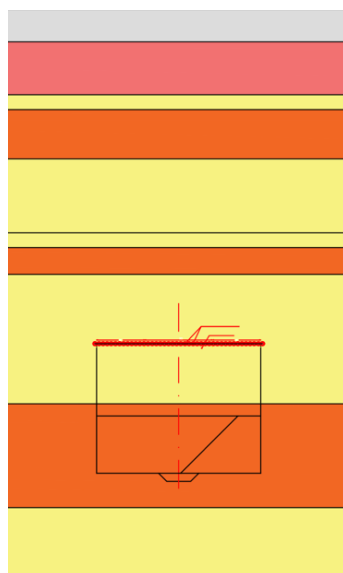
I	Τεχνητές επιχωματώσεις
Ia	Καστανή αμμώδης άργιλος με κατά θέσεις χαλαρή άμμος
IIa	Στιφρή άργιλος με ενστρώσεις πυκνής άμμου
IIb	Πυκνή αργιλώδης άμμος

Για την ομαδοποίηση και την εξαγωγή εδαφικών χαρακτηριστικών αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα των δειγματοληπτικών και πρεσσιομετρικών γεωτρήσεων τα οποία παρουσιάστηκαν στον Πίνακας 3.

Η στρωματογραφία η οποία προέκυψε από τις παραδοχές και τις ομαδοποιήσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως φαίνεται στις Εικόνα 31 Εικόνα 32. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 31 παρουσιάζεται η τομή του φρέατος με τις σήραγγες TBM και η στρωματογραφία που προήλθε από την ομαδοποίηση και τις παραδοχές που προαναφέρθηκαν προηγουμένως. Επιπλέον παρουσιάζονται οι δύο γεωτρήσεις που βρίσκονται εκατέρωθεν του φρέατος. Στην Εικόνα 32 φαίνεται η τομή της σήραγγας NATM και έχει γίνει η απλούστευση ότι κατά την διεύθυνση αυτή οι εδαφικές στρώσεις συνεχίζονται οριζόντια.



Εικόνα 31: Γεωλογική τομή στη θέση του φρέατος αερισμού



Εικόνα 32: Γεωλογική τομή στη θέση της σήραγγας NATM

Παρακάτω γίνεται παρουσίαση αναλυτικά του τυπολογίου που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εδαφικών χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν και στην αριθμητική προσομοίωση.

Προσδιορισμός ειδικού βάρους γ (kN/m^3)

Για τον προσδιορισμό του ειδικού βάρους (γ) χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (Βαλαλάς 1996) και (Holtz, et al., 1981) (J., 1944) (Fruguglietti, et al., 2001) (Mihalís, et al., 1999) (Ercelebi, et al., 2011) (Georgiou, et al., 2021) (Καββαδάς) (Καββαδάς) (Rankin, 1988) (Kavvas, 1998) οι οποίες παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες :

Classification	γ (kN/m ³)	Classification	γ (kN/m ³)	Classification	γ (kN/m ³)
GW	20±2.5	SW	19.5±2	ML	19±2.5
GP	19±3	SP	18.5±2.5	CL-ML	21±1.5
GM	21±2.5	SM	20±2.5	CL	20±1.5
GC	20.5±2	SC	19.5±2	CH	17.5±1.5
GM-ML	21.5±2.5	SM-ML	20±2	OL	17±1.5
GM-GC	21.5±2	SM-SC	21±2	OH	15.5±1.5
GC-CL	21±2	SC-CL	20.5±2	MH	15.5±1.5
GC-CH	19.5±2	SC-CH	18.5±2		

Πίνακας 5 : Τυπικές τιμές για τα εδαφικά βάρη εδαφών (Βαλαλάς 1996).

Soil type	γ_{sat}	γ_d	$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$
Sands and gravels	19 – 24	15 – 23	10 – 13
Silts and clays	14 – 21	6 – 18	4 – 11
Glacial tills	21 – 24	17 – 23	11 – 14
Crushed rock	19 – 22	15 – 20	9 – 12
Peats	10 – 11	1 – 3	0 – 1
Organic silts and clays	13 – 18	5 – 15	3 – 8

*Τροποποιημένο από Hansbo (1975).

Πίνακας 6 : Τυπικές τιμές για τα εδαφικά βάρη εδαφών (Holtz & Kovacs 1981)

Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας E (Μρα)

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας (E) χρησιμοποιήθηκαν :

- Η σχέση Webb (1969) : $E = 0.33 (N_{SPT} + 15)$
- Η σχέση Tassios & Anagnostopoulos (1974) :

$$\text{Για } N_{SPT} \leq 15 \text{ τότε } E = C * N_{SPT}$$

$$\text{Για } N_{SPT} > 15 \text{ τότε } E = 4 + (C * N_{SPT})$$

α/α	Τύπος του εδάφους	C
1	Ιλύς με άμμο	0,30
2	Λεπτή άμμος	0,35
3	Μέση άμμος	0,45
4	Χονδρή άμμος	0,70
5	Άμμος με χαλίκια	1,0
6	Χαλίκια με άμμο	1,2

- Η σχέση Papadopoulos & Anagnostopoulos (1987) : $E = C_1 + (C_2 * N_{SPT})$

α/α	Τύπος του εδάφους	C ₁	C ₂
1	Άμμος	7,50	0,80
2	Ιλυώδης άμμος SM	2,60	0,69
3	Αμμώδης ιλύς ML	3,20	0,49

- Η σχέση Bowles (1996) for sands : $E = 2.75 * N_{SPT}$
- Η σχέση Bowles (1996) for sand and gravel: $E = 19.2 + (N_{SPT} * 1.2)$
- Η σχέση Bowles (1996) for clays :

$$\text{Για } N_{SPT} \leq 15 \text{ τότε } E = 1.8 + (0.3 * N_{SPT})$$

$$\text{Για } N_{SPT} > 15 \text{ τότε } E = 2.2 + (0.3 * N_{SPT})$$

Γωνία τριβής ϕ (°)

Για τον προσδιορισμό της εσωτερικής γωνία τριβής (ϕ) λήφθηκαν υπόψιν τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές και αξιοποιήθηκαν οι εξής τύποι:

- Wolff (1989) : $\phi = 27.1 + (0.3 * N_{SPT}) - (5.4 * 10^{-4} * N_{SPT})$
- Texeira (1996) : $\phi = 15 + \sqrt[2]{24 * N_{SPT}}$
- Hatanaka & Unchida (1996) : $\phi = 20 + \sqrt[2]{15.4 * N_{SPT}}$
- Osaki : $\phi = 15 + \sqrt[2]{20 * N_{SPT}}$
- Dunham: $\phi = 25 + \sqrt[2]{12 * N_{SPT}}$
- Bowles (1996) : $\phi = 20 + (0.45 * N_{SPT})$

Συνοχή c (kPa)

Για τον προσδιορισμό της συνοχής (c) λήφθηκαν υπόψιν τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές και αξιοποιήθηκε ο Πίνακας 7 από Βαλαλάς (1996):

Classification	ϕ' (°)	c' (kPa)	Classification	ϕ' (°)	c' (kPa)	Classification	ϕ' (°)	c' (kPa)
GW	40±5	0±0	SW	38±5	0±0	ML	33±4	0±0
GP	33±6	0±0	SP	36±6	0±0	CL-ML	30±4	15±10
GM	36±4	0±0	SM	34±3	0±0	CL	27±4	20±10
GC	34±4	0±0	SC	32±4	0±0	CH	22±4	25±10
GM-ML	35±5	0±0	SM-ML	34±3	0±0	OL	25±4	10±5
GM-GC	33±3	2±2	SM-SC	31±3	5±5	OH	22±4	10±5
GC-CL	29±4	3±3	SC-CL	28±4	5±5	MH	24±5	5±5
GC-CH	28±4	4±4	SC-CH	27±3	1±1			

Πίνακας 7: Μηχανικές ιδιότητες εδάφους (Βαλαλάς 1996)

Για την επιλογή των παραμέτρων αντοχής της κάθε εδαφικής στρώσης λήφθηκαν υπόψιν όλες οι εξισώσεις που προαναφέρθηκαν και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών.

Να σημειωθεί ότι για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα (TE), λαμβάνεται διαφορετικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων (K_o), σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (Jaky, 1944) που βασίζεται στην γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους (ϕ):

$$K_o = 1 - \sin(\phi)$$

Επίσης, η γωνία διαστολικότητας (δ) του εδάφους, λαμβάνεται σε όλες τις περιπτώσεις $\delta = \phi/4$.

Για τις επιφανειακές τεχνητές αποθέσεις – επιχωματώσεις, λαμβάνονται συντηρητικά, παράμετροι διατρητικής αντοχής $c' = 10$ KPa και $\phi' = 30^\circ$, μέτρο ελαστικότητας $E = 50$ MPa και ειδικό βάρος $\gamma = 21$ kN/m³.

Στον ακόλουθο Πίνακας 11, παρουσιάζονται οι μηχανικές παράμετροι του εδάφους, που ελήφθησαν υπόψιν στις αναλύσεις.

Πίνακας 8. Μηχανικές παράμετροι εδαφικού υλικού.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα - Στρώση	Ειδικό βάρος (γ)	Συνοχή (c)	Γωνία τριβής (ϕ)	Γωνία διαστολικότητας (δ)	Λόγος Poisson (ν)	Μέτρο Ελαστικότητας (E)	Συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων (K_0)
Τεχνητές Επιχωματώσεις	21 kN/m ³	10 KPa	30°	7,5°	0,33	50 MPa	0,50
Ia	21 kN/m ³	20 KPa	28°	7,0°	0,33	14 MPa	0,53
IIa	20 kN/m ³	25 KPa	30°	7,5°	0,33	75 MPa	0,50
IIb	22 kN/m ³	5 KPa	34°	8,5°	0,33	45 MPa	0,44

4 Δισδιάστατη Αριθμητική Προσομοίωση Εκσκαφής Φρέατος και Σηράγγων

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, γίνεται προσομοίωση της εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης του φρέατος αερισμούς «Κρήτης», που αποτελεί μέρος του έργου «Μετρό Θεσσαλονίκης – Επέκταση Καλαμαριάς», ανάμεσα στους σταθμούς «25^{ης} Μαρτίου» και «Νομαρχία». Για την προσομοίωση της εκσκαφής του φρέατος, αλλά και των σηράγγων τόσο των TBMs, όσο και των εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM, από το φρέαρ προς τις σήραγγες TBMs, έγιναν δισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 της εταιρείας Rocscience, που διαθέτει ο Τομέας Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε ο συνδυασμός αναλύσεων των ακόλουθων τεσσάρων (4) περιπτώσεων:

1. Εκσκαφή και υποστήριξη μόνο του φρέατος εξαερισμού.
2. Εκσκαφή και υποστήριξη του φρέατος εξαερισμού, καθώς και των δύο (2) σηράγγων TBM εκατέρωθεν αυτού.
3. Εκσκαφή και υποστήριξη της εγκάρσιας σήραγγας τύπου NATM, από το φρέαρ προς την σήραγγα TBM.
4. Συνδυασμός όλων των παραπάνω, με την θεώρηση ότι οι σήραγγες τύπου NATM προσομοιώνονται εγκάρσια στη διατομή με μεγάλο πλάτος, λόγω της τριδιάστατης γεωμετρίας (κάθετη στην δισδιάστατη ανάλυση).

4.1 Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων RS2 – Rocscience

Ο δισδιάστατος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων RS2 της εταιρείας Rocscience, αποτελεί ένα σύγχρονο λογισμικό για δισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις γεωτεχνικής φύσεως. Μπορεί να πραγματοποιήσει αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain), καθώς και αξισυμμετρικές αναλύσεις (axisymmetric). Είναι κατάλληλο για προσομοιώσεις διάνοιξης υπόγειων εκσκαφών, βαθιών υποστηριζόμενων εκσκαφών, τοίχων αντιστήριξης, χωμάτων φραγμάτων, πρανών και υπολογισμό καθιζήσεων λόγω εξωτερικής φόρτισης του εδάφους. Επίσης είναι εφοδιασμένο με μία πληθώρα καταστατικών προσομοιωμάτων συμπεριφοράς του εδάφους τόσο για εδάφη όσο και για βραχώμαζες, ενώ περιλαμβάνει και ένα σύνολο από μέτρα υποστήριξης, όπως σκυρόδεμα και αγκυρώσεις.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέγεται η χρήση του λογισμικού RS2 – Rocscience, καθώς το «φιλικό» γραφικό του περιβάλλον επιτρέπει την εύκολη εισαγωγή της σύνθετης γεωμετρίας του φρέατος και των σηράγγων από περιβάλλον CAD. Επίσης ο ελάχιστος ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για κάθε ανάλυση, αποτελεί κριτήριο επιλογής του συγκεκριμένου λογισμικού.

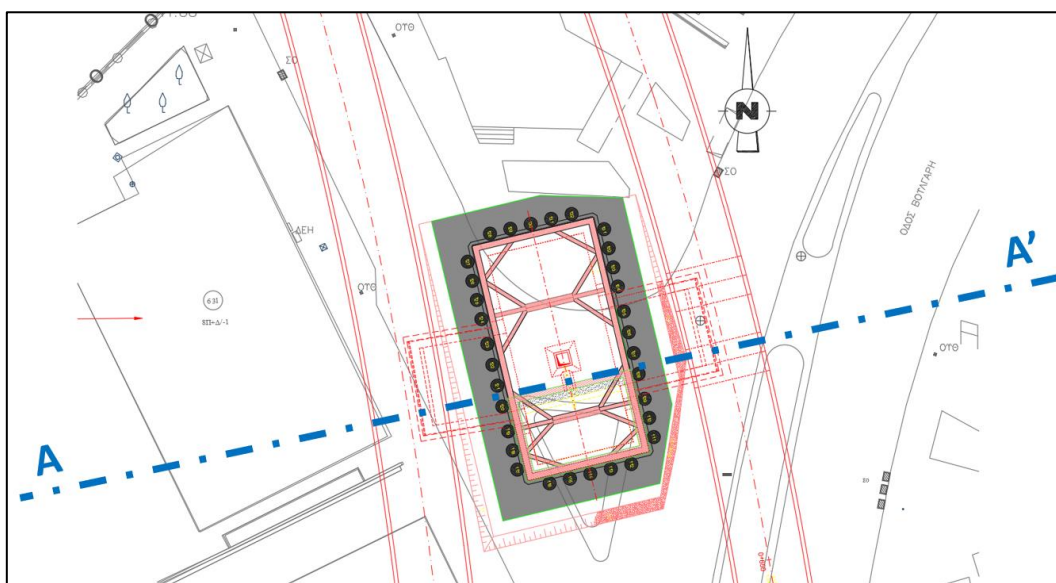
4.2 Γεωμετρία εκσκαφής φρέατος και σηράγγων

Για την προσομοίωση τόσο του φρέατος εξαερισμού, όσο και των σηράγγων (TBMs και NTAM), χρησιμοποιήθηκε η γεωμετρία των κατασκευαστικών σχεδίων της μελέτης εφαρμογής του φρέατος. Σε όλες

τις αναλύσεις, λαμβάνεται υπόψιν η γεωλογική στρωματογραφία του υπεδάφους στην περιοχή του φρέατος, όπως αυτή έχει περιγράψει στο Γεωτεχνική αξιολόγηση.

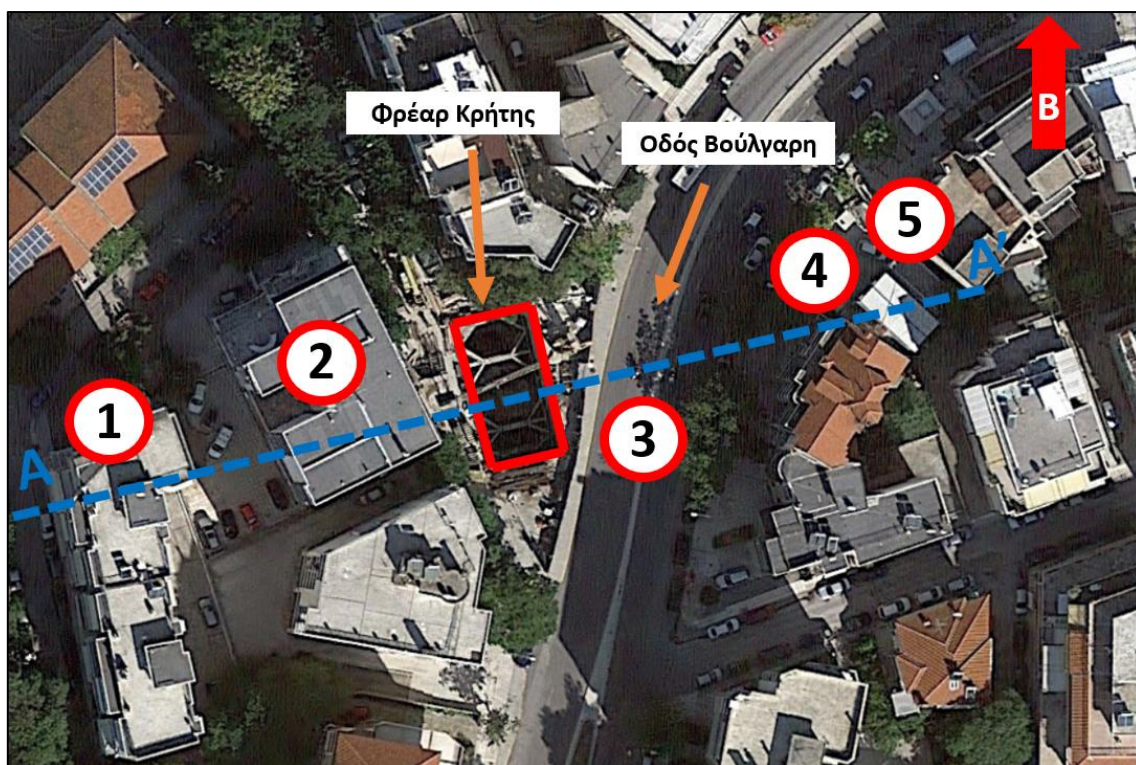
4.2.1 Γεωμετρία εκσκαφής φρέατος εξαερισμού

Για την προσομοίωση της εκσκαφής του φρέατος, αλλά και την επιρροή που θα έχει η διάνοιξη των δύο σηράγγων TBMs εκατέρωθεν αυτού, επιλέγεται η πραγματοποίηση ανάλυσης με χαρακτηριστική τομή περί το μέσο του φρέατος, και διεύθυνση τομής ABA – ΔΝΔ. Μέσω αυτής της χαρακτηριστικής τομής, η θέση της οποίας αποτυπώνεται στην Εικόνα 33, μπορεί να προσομοιωθεί τόσο το φρέαρ εξαερισμού, όσο και το εσωτερικό φρέαρ στο βαθύτερο σημείο του, καθώς και οι δύο σήραγγες TBMs εκατέρωθεν αυτού.



Εικόνα 33: Θέση τομής αναλύσεων για την εκσκαφή του φρέατος και των δύο σηράγγων TBMs εκατέρωθεν αυτού. (Πηγή: Άκτωρ ΑΕ)

Επίσης, στην θέση που επιλέγεται η τομή για τις αναλύσεις, μπορεί να προσδιοριστεί και η επιρροή που θα έχει η εκσκαφή του φρέατος αλλά και των σηράγγων TBMs, σε γειτνιάζουσες πολυκατοικίες αλλά και στην οδό Βούλγαρη, που διέρχεται ανατολικά αυτού. Στην ακόλουθη εικόνα αποτυπώνονται οι θέσεις κατασκευών εκατέρωθεν του φρέατος, ενώ στον Πίνακα γίνεται η περιγραφή αυτών και ορίζεται η απόστασή τους από τα όρια του φρέατος.



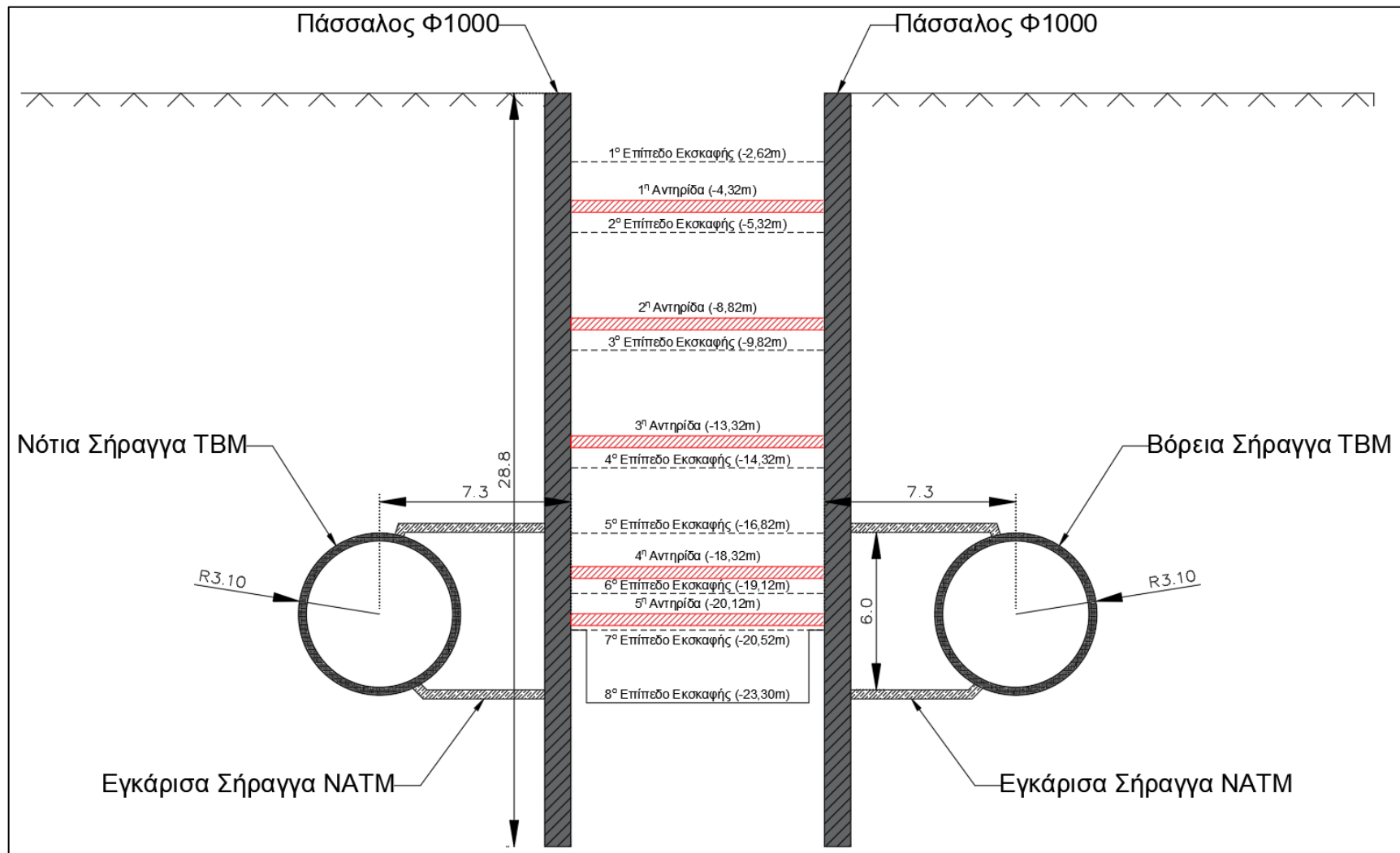
Εικόνα 34: Θέση τομής αναλύσεων για την εκσκαφή του φρέατος και των δύο σηράγγων TBMs εκατέρωθεν αυτού, με τις θέσεις κατασκευών και δρόμων (Πηγή: Google Earth).

Στον Πίνακα 9 γίνεται καταγραφή των αποστάσεων και του είδους των κτιρίων τα οποία βρίσκονται εκατέρωθεν του φρέατος αερισμού όπως παρουσιάστηκαν στην Εικόνα 34.

Πίνακας 9: Αποστάσεις και περιγραφή κτηρίων και οδών εκατέρωθεν του φρέατος.

Σημείο	Περιγραφή	Απόσταση από Δυτικό όριο φρέατος	Απόσταση από Ανατολικό όριο φρέατος	Πλάτος
1	Οκτώροφη (8) πολυκατοικία	10,0m	-	17,0m
2	Οκτώροφη (8) πολυκατοικία	39,8m	-	14,5m
3	Οδός Βούλγαρη	-	2,5m	21,0m
4	Επτάροφη (7) πολυκατοικία	-	36,0m	18,0m
5	Τριώροφη (8) πολυκατοικία	-	54,0m	6,0m

Με βάση την παραπάνω γεωμετρία εκσκαφής του φρέατος, στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται η χαρακτηριστική τομή εκσκαφής του φρέατος, με τις φάσεις εκσκαφής τόσο του φρέατος, όσο και την θέση των σηράγγων τύπου NATM και TBMs. Να σημειωθεί ότι σαν υψόμετρο αναφοράς ($\pm 0,00$) λαμβάνεται το επίπεδο του φυσικού εδάφους (κεφαλή κεφαλόδεσμου πασσάλων).



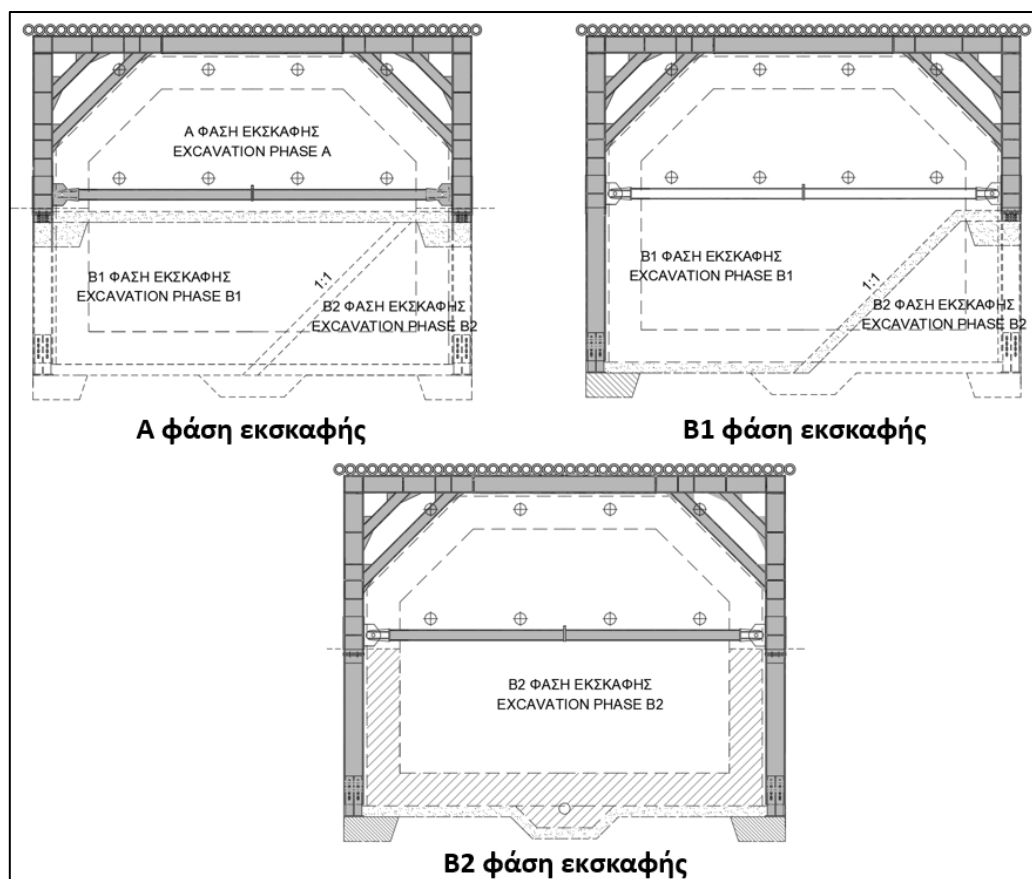
Εικόνα 35: Κατασκευαστική τομή φρέατος εξαερισμού.

4.2.2 Γεωμετρία εκσκαφής σηράγγων TBMs

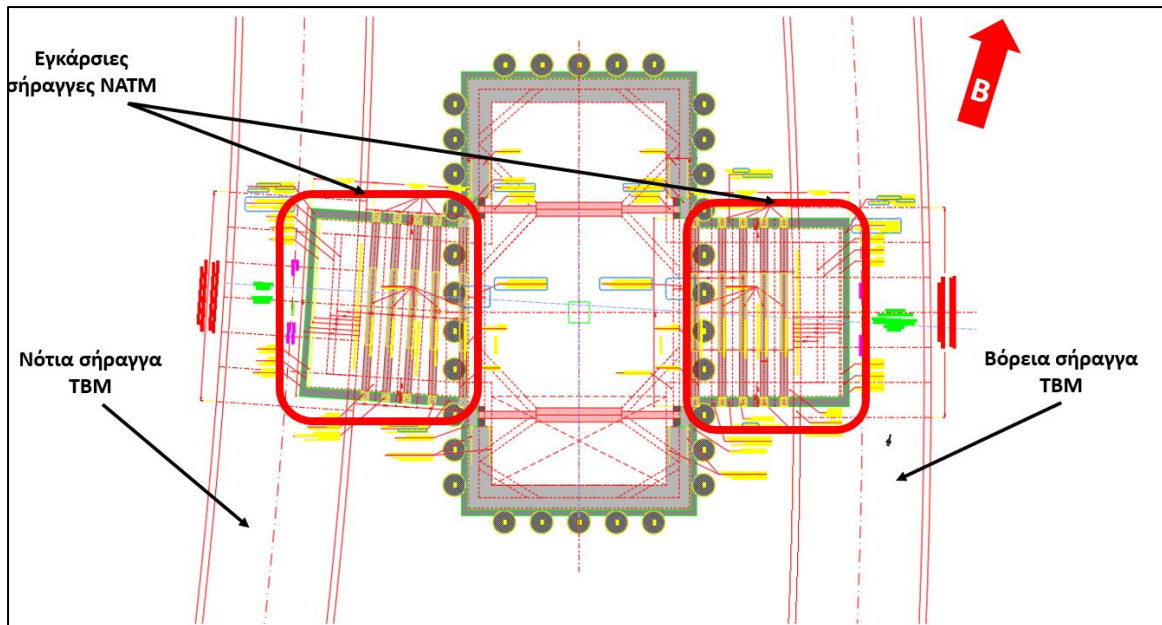
Οι σήραγγες TBMs που διέρχονται εκατέρωθεν του φρέατος εξαερισμού, έχουν κυκλική διατομή, ισοδύναμης ακτίνας $R=3,10\text{m}$. Ο άξονας των δύο σηράγγων, απέχει απόσταση $7,3\text{m}$ από την εσωτερική παρειά του φρέατος, ενώ ο άξονας τους τοποθετείται σε βάθος $20,0\text{m}$ από την επιφάνεια του εδάφους. Η χωροθέτηση αυτών σε σχέση με το φρέαρ, αποτυπώνεται στην Εικόνα 35.

4.2.3 Γεωμετρία εκσκαφής εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM

Οι σήραγγες αυτές διανοίγονται από το φρέαρ, εγκάρσια προς τις σήραγγες TBMs, με σκοπό την επικοινωνία των σηράγγων TBMs με το φρέαρ. Οι σήραγγες αυτές έχουν ορθογωνική διατομή, ύψους $H=8,3\text{m}$ και πλάτους $W=8,0\text{m}$. Η εκσκαφή τους πραγματοποιείται συνολικά σε τρεις (3) φάσεις, με την πρώτη φάση να αποτελεί τα πρώτα $3,4\text{m}$ ύψους της συνολικής διατομής και πλάτους $8,0\text{m}$, ενώ στην συνέχεια διανοίγεται το κατώτερο τμήμα της σήραγγας σε δύο (2) επιμέρους φάσεις, όπου διαφοροποιούνται μεταξύ τους με λοξό τοίχωμα. Στην ακόλουθη Εικόνα 36, παρουσιάζονται οι επιμέρους φάσεις εκσκαφής των εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM. Στην Εικόνα 36, αποτυπώνεται η διάταξη των εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM στον χώρο.



Εικόνα 36: Στάδια κατασκευής εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM. (Πηγή Άκτωρ ΑΕ)



Εικόνα 37: Θέση εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM, σε σχέση με το φρέαρ. (Πηγή Άκτωρ ΑΕ)

4.3 Αριθμητικά προσομοιώματα

Οι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων έχουν την δυνατότητα επίλυσης πάσης φύσεως γεωτεχνικών προβλημάτων αλλά και ειδικότερα θέματα υπογείων έργων. Οι μέθοδοι επίλυσης των συγκεκριμένων αριθμητικών αναλύσεων βασίζονται σε καταστατικά κριτήρια αστοχίας γεωυλικών και λαμβάνουν υπόψη την αλληλεπίδραση της εκσκαφής και της υποστήριξης της περιμετρικά.

Η χρήση αριθμητικών μοντέλων που χρησιμοποιούν μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων ενδείκνυται καθώς μέσω αυτών υπολογίζονται παράμετροι που δεν μπορούν να υπολογιστούν με εμπειρικές μεθόδους :

- Υπολογισμός συγκλίσεων σε οποιαδήποτε διατομή υπόγειας εκσκαφής
- Υπολογισμός συγκλίσεων εκσκαφής έπειτα από την τοποθέτηση υποστήριξης
- Υπολογισμός επιφανειακών καθιζήσεων για εκσκαφές μικρού βάθους
- Υπολογισμός εντατικού πεδίου περιμετρικά της υπόγειας εκσκαφής
- Υπολογισμός πλαστικής ζώνης και χωροθέτηση της πέριξ της υπόγειας διατομής
- Υπολογισμός εντατικών μεγεθών στην υποστήριξη

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μορφώθηκαν τα ακόλουθα τέσσερα (4) αριθμητικά προσομοιώματα στον διδιάστατο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2:

1. Εκσκαφή και υποστήριξη μόνο του φρέατος εξαερισμού.
2. Εκσκαφή και υποστήριξη του φρέατος εξαερισμού, καθώς και των δύο (2) σηράγγων TBM

εκατέρωθεν αυτού.

3. Εκσκαφή και υποστήριξη της εγκάρσιας σήραγγας τύπου NATM, από το φρέαρ προς την σήραγγα TBM.
4. Συνδυασμός όλων των παραπάνω, με την θεώρηση ότι οι σήραγγες τύπου NATM προσομοιώνονται εγκάρσια στη διατομή με μεγάλο πλάτος, λόγω της τριδιάστατης γεωμετρίας (κάθετη στην δισδιάστατη ανάλυση).

4.3.1 Προσομοίωση εδάφους

Η προσομοίωση του εδάφους έγινε μέσω γραμμικών τρικομβικών στοιχείων συνεχούς μέσου επίπεδης παραμόρφωσης (continuum plane strain elements). Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3.

4.3.2 Προσομοίωση υποστήριξης

Η προσομοίωση της υποστήριξης τόσο του φρέατος εξαερισμού, όσο και των σηράγγων TBMs αλλά και τύπου NATM, πραγματοποιήθηκε με στοιχεία δοκού (beam elements).

4.3.3 Διακριτοποίηση (Mesh)

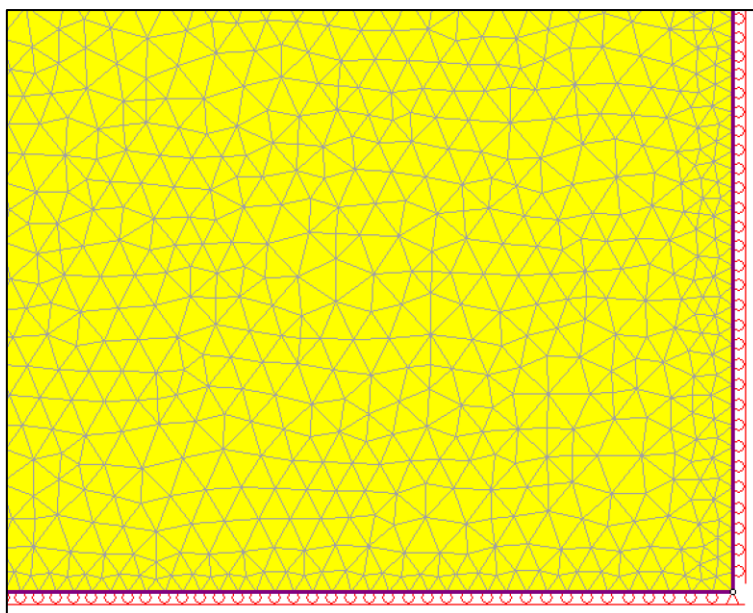
Επιλέχθηκαν τριγωνικά – τρικομβικά στοιχεία συνεχούς μέσου (3 nodes triangles elements). Το σύνολο των στοιχείων και των ενδιάμεσων κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε επιμέρους ανάλυση, παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα 10.

Πίνακας 10: Σύνολο στοιχείων και κόμβων ανά περίπτωση προσομοίωσης.

Μοντέλο Προσομοίωσης	Περιγραφή	Στοιχεία (elements)	Κόμβοι (nodes)
1 ^ο	Φρέαρ εξαερισμού	31313	61196
2 ^ο	Φρέαρ εξαερισμού και σήραγγες TBMs	31313	61196
3 ^ο	Σήραγγες NATM	17189	8737
4 ^ο	Συνδυασμός των παραπάνω	33221	65014

4.3.4 Συνοριακές συνθήκες (Boundary restrains)

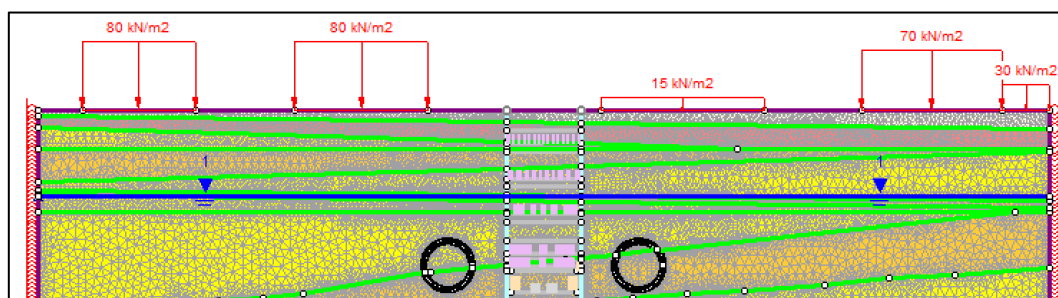
Χρησιμοποιήθηκαν κυλίσεις (rollers) τόσο κατά τον άξονα X, όσο και τον άξονα Y και τοπική άρθρωση (pinned) στην τομή των αξόνων X και Y, όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη Εικόνα 38.



Εικόνα 38: Συνοριακές συνθήκες προσομοιωμάτων.

4.3.5 Φόρτιση (Loading)

Στα αριθμητικά προσομοιώματα, η μόνη εξωτερική φόρτιση (loading) που επιβάλλεται, είναι αυτή που οφείλεται στις κατασκευές που βρίσκονται επιφανειακά και περιμετρικά του φρέατος αερισμού. Τα στοιχεία αυτών των κατασκευών, έχουν παρατεθεί στον Πίνακα 9. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, η κάθε οικοδομική πλάκα αντιστοιχεί σε 10kN/m^2 , ενώ η οδός σε 15kN/m^2 , όπως φαίνεται στην Εικόνα 39.



Εικόνα 39: Φόρτιση αριθμητικού προσομοιώματος, λόγω κατασκευών και οδών.

4.4 Μηχανικές παράμετροι

Στο μοντέλο της προσομοίωσης εισήχθησαν μηχανικές παράμετροι τόσο για την συμπεριφορά του περιβάλλοντος εδάφους της εκσκαφής του φρέατος και των σηράγγων, όσο και της υποστήριξης του φρέατος και των σηράγγων. Στην συνέχεια παρατίθενται οι μηχανικές παράμετροι για την συμπεριφορά του εδαφικού υλικού και των μέτρων υποστήριξης.

4.4.1 Μηχανικές παράμετροι εδάφους

Αφορά τις μηχανικές παραμέτρους του εδάφους ενός του οποίου εκσκάπτεται τόσο το φρέαρ εξαερισμού, όσο και το έδαφος που θα γίνει η εκσκαφή των σηράγγων TBMs και NATM.

Οι παράμετροι αντοχής του εδάφους, διαφοροποιούνται ανάλογα την τεχνικογεωλογική ενότητα (TE), όπως αναλυτικά έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3.

Να σημειωθεί ότι για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα (TE), λαμβάνεται διαφορετικός συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων (K_0), σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (Jaaky, 1944) που βασίζεται στην γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους (ϕ):

$$K_0 = 1 - \sin(\phi)$$

Επίσης, η γωνία διαστολικότητας (δ) του εδάφους, λαμβάνεται σε όλες τις περιπτώσεις $\delta = \phi/4$.

Για τις επιφανειακές τεχνητές αποθέσεις – επιχωματώσεις, λαμβάνονται συντηρητικά, παράμετροι διατρητικής αντοχής $c' = 10$ KPa και $\phi' = 30^\circ$, μέτρο ελαστικότητας $E = 50$ MPa και ειδικό βάρος $\gamma = 21$ kN/m³.

Στον ακόλουθο Πίνακα 11, παρουσιάζονται οι μηχανικές παράμετροι του εδάφους, που ελήφθησαν υπόψιν στις αναλύσεις.

Πίνακας 11. Μηχανικές παράμετροι εδαφικού υλικού.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα - Στρώση	Ειδικό βάρος (γ)	Συνοχή (c)	Γωνία τριβής (ϕ)	Γωνία διαστολικότητας (δ)	Λόγος Poisson (ν)	Μέτρο Ελαστικότητας (E)	Συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων (K_0)
Τεχνητές Επιχωματώσεις	21 kN/m ³	10 KPa	30°	7,5°	0,33	50 MPa	0,50
Ia	21 kN/m ³	20 KPa	28°	7,0°	0,33	14 MPa	0,53
IIa	20 kN/m ³	25 KPa	30°	7,5°	0,33	75 MPa	0,50
IIb	22 kN/m ³	5 KPa	34°	8,5°	0,33	45 MPa	0,44

4.4.2 Μηχανικές παράμετροι υποστήριξης

Η υποστήριξη που χρησιμοποιήθηκε, αφορά την υποστήριξη του φρέατος εκσκαφής (πάσσαλοι, αντηρίδες), την υποστήριξη των σηράγγων TBMs με προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος (segments) και την υποστήριξη των εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM με μεταλλικά πλαίσια (τύπου HEB), εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ομπρέλα δοκών προπορείας (forepoling umbrella). Στην συνέχεια παρατίθενται οι αναλυτικές παράμετροι αντοχής για την υποστήριξη, σε κάθε επιμέρους έργο εκσκαφής.

4.4.2.1 Φρέαρ εξαερισμού

Η υποστήριξη που χρησιμοποιήθηκε στο φρέαρ εξαερισμού, περιλαμβάνει πασσάλους, αντηρίδες, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στα προσωρινά τοιχεία του εσωτερικού φρέατος στον πυθμένα του κυρίως φρέατος και οπλισμένο σκυρόδεμα στον πυθμένα του εσωτερικού φρέατος (πλάκα θεμελίωσης).

- **Πάσσαλοι (piles)**

Οι πάσσαλοι που χρησιμοποιούνται για τον τοίχο αντιστήριξης περιμετρικά του φρέατος, αποτελείται από πασσάλους διαμέτρου 1,00m σε αξονική απόσταση 1,50m και μήκους 28,8m, οι οποία κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25. Για την προσομοίωσή τους, το λογισμικό RS2 επιτρέπει την δυνατότητα προσομοίωσης ως στοιχεία δοκού (beams), στα οποία λαμβάνεται υπόψιν και η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ πασσάλου και εδάφους. Συγκεκριμένα ορίστηκε συντελεστής τριβής μεταξύ πασσάλου και εδάφους, που αντιστοιχεί στα 2/3 της γωνίας τριβής (ϕ). Όσον αφορά τους πασσάλους, αυτοί προσομοιωθήκαν μέσω του ισοδύναμου εμβαδού (A) ανά τρέχον μήκος τοίχου, στο οποίο λαμβάνεται η αξονική απόσταση των πασσάλων (s) και της ροπής αδρανείας (I),

$$\text{Το ισοδύναμο εμβαδό, είναι: } A = \frac{A_{pile}}{s} = \frac{\frac{\pi \times d^2}{4}}{s} = \frac{\pi \times d^2}{4 \times s} = \frac{3,14 \times (1,00m)^2}{4 \times 1,50m} = 0,524 \text{ m}^2/m.$$

$$\text{Η ροπή αδρανείας, είναι: } I = \frac{\pi \times d^4}{64} = \frac{3,14 \times (1,00m)^4}{64} = 0,049 \text{ m}^4.$$

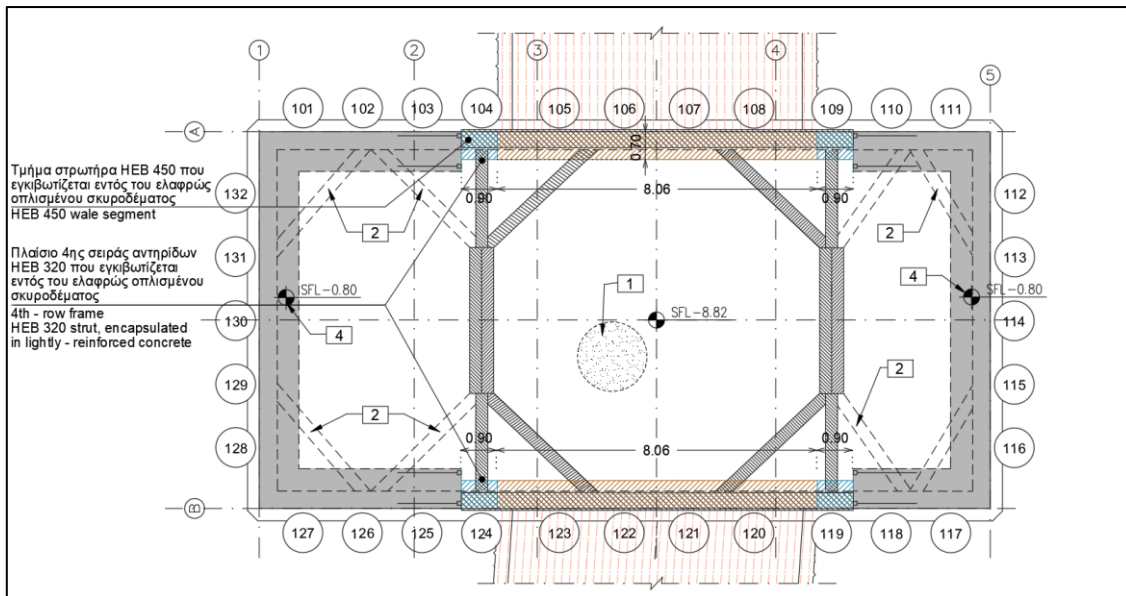
Το σύστημα του τοίχου με πασσάλους, προσομοιώθηκε με ελαστική συμπεριφορά. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά αυτού που ελήφθην υπόψιν στις προσομοιώσεις, είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 12: Μηχανικές ιδιότητες τοίχου με πασσάλους.

Ισοδύναμο εμβαδό (A)	0,524 m ²
Ροπή αδρανείας (I)	0,049 m ⁴
Μέτρο ελαστικότητας (E)	29.962 MPa, βάσει EC-2
Ειδικό βάρος (γ)	25 kN/m ³
Λόγος Poisson (ν)	0,20
Συντελεστής τριβής τοίχου -εδάφους	2/3 x ϕ
Συμπεριφορά	Γραμμικώς ελαστική

- **Αντηρίδες (struts)**

Οι αντηρίδες που χρησιμοποιούνται για την εσωτερική αντιστήριξη των τοιχίων του φρέατος, αποτελούνται από μεταλλικές διατομές τύπου HEB 320. Συγκεκριμένα, τοποθετούνται κατά μήκος του φρέατος δύο σειρές αντηρίδων (εγκάρσια στην τομή προσομοίωσης), σε αξονική απόσταση 8,80m, όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη Εικόνα 40.



Εικόνα 40: Διάταξη αντηρίδων εντός του φρέατος.

Επειδή χρησιμοποιείται ζεύγος αντηρίδων HEB 320, στις αναλύσεις παρομοιωθήκαν ως αντηρίδες σε μισή αξονική απόσταση, δηλαδή ανά 4,40m. Οι αντηρίδες παρομοιωθήκαν ως στοιχεία δοκού (beam elements) με ελαστική συμπεριφορά, ενώ οι μηχανικές τους παράμετροι παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακας 13

Πίνακας 13. Μηχανικές ιδιότητες αντηρίδων.

Διατομή	HEB 320
Αξονική απόσταση (s)	4,40m
Ισοδύναμο εμβαδό (A)	0,01613 m ²
Ροπή αδρανείας (I)	30,82 x 10 ⁻⁵ m ⁴
Μέτρο ελαστικότητας (E)	200 GPa
Συμπεριφορά	Γραμμικώς ελαστική

- **Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα**

Για την συγκράτηση των τοιχωμάτων του εσωτερικού φρέατος, χρησιμοποιείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους t= 20cm. Λόγω της μειωμένης αντοχής που έχει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά την τοποθέτησή του, λαμβάνεται μέτρο ελαστικότητας νωπού σκυροδέματος E= 15 GPa. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, προσομοιώθηκε ως στοιχείο δοκού (beam element) με ελαστική συμπεριφορά, ενώ οι μηχανικές του παράμετροι παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 14. Μηχανικές ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος εσωτερικού φρέατος.

Πάχος (t)	20 cm
Μέτρο ελαστικότητας (E)	15 GPa
Ειδικό βάρος (γ)	25 kN/m ³
Λόγος Poisson (ν)	0,20
Συμπεριφορά	Γραμμικώς ελαστική

- **Οπλισμένο σκυρόδεμα**

Κατά το τελικό στάδιο κατασκευής του εσωτερικού φρέατος, κατασκευάζεται στον πυθμένα πλάκα θεμελίωσης από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους $t= 100\text{cm}$, με σκυρόδεμα C30/37. Το οπλισμένο σκυρόδεμα της πλάκας θεμελίωσης, προσομοιώθηκε ως στοιχείο δοκού (beam element) με ελαστική συμπεριφορά, ενώ οι μηχανικές του παράμετροι παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 15. Μηχανικές ιδιότητες οπλισμένου σκυροδέματος πλάκας θεμελίωσης.

Πάχος (t)	100 cm
Μέτρο ελαστικότητας (E)	3.837 MPa, βάσει EC-2
Ειδικό βάρος (γ)	25 kN/m ³
Λόγος Poisson (ν)	0,20
Συμπεριφορά	Γραμμικώς ελαστική

4.4.2.2 Σήραγγες TBMs

Η υποστήριξη των σηράγγων TBMs, αποτελείται από προκατασκευασμένους δακτυλίους οπλισμένου σκυροδέματος (segments), πάχους $t= 30\text{cm}$ και σκυρόδεμα C40/50.

- **Προκατασκευασμένοι δακτύλιοι σκυροδέματος (segments)**

Για την συγκράτηση των τοιχωμάτων των σηράγγων TBMs, εφαρμόζεται υποστήριξη από προκατασκευασμένους δακτυλίους οπλισμένου σκυροδέματος (segments), πάχους $t= 30\text{cm}$. Τα στοιχεία σκυροδέματος, προσομοιώθηκαν ως στοιχεία δοκού (beam elements) με ελαστική συμπεριφορά, ενώ οι μηχανικές του παράμετροι παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 16. Μηχανικές ιδιότητες προκατασκευασμένων δακτυλίων σκυροδέματος (segments)

Πάχος (t)	30 cm
Μέτρο ελαστικότητας (E)	35.220 MPa
Ειδικό βάρος (γ)	25 kN/m ³
Λόγος Poisson (ν)	0,20
Συμπεριφορά	Γραμμικώς ελαστική

4.4.2.3 Σήραγγες τύπου NATM

Η υποστήριξη των σηράγγων τύπου NATM, αποτελούταν από συνδυασμό εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μεταλλικών πλαισίων, ενώ για την προστασία της οροφής και του μετώπου των σηράγγων προβλέπεται η τοποθέτηση ομπρέλας δοκών προπορείας και αγκυρίων μετώπου, τύπου fiberglass.

- **Ομπρέλα δοκών προπορείας (forepoling umbrella)**

Η ομπρέλα των δοκών προπορείας (forepoling umbrella), που προβλέπει η μελέτη του έργου, αποτελείται από κυκλικές δοκούς (σωλήνες) Φ139.7/129.7, μήκους L= 10,5m και σε αξονική απόσταση s= 20cm. Συνολικά τοποθετούνται 42 δοκοί στην στέψη της σήραγγας και παράλληλα με τον άξονά της, οι οποίοι καλύπτουν και την περιοχή της σήραγγας TBM, ενώ στηρίζονται στα μεταλλικά πλαίσια της σήραγγας.

Δεδομένου, ότι οι δοκοί προπορείας λειτουργούν κατά την τρίτη διεύθυνση (εγκάρσια στην τομή ανάλυσης), απαιτείται η τριδιάστατη (3D) ανάλυση με σκοπό να προσομοιωθεί η στατική τους λειτουργία και να προσδιοριστεί η συνεισφορά τους στην μείωση της εξώθησης του μετώπου, αλλά και την μείωση των προσυγκλίσεων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και δεδομένου ότι λόγω της σχεδόν μηδενικής απόστασης μεταξύ των τοιχωμάτων δύο συνεχόμενων δοκών (αλληλοτεμνόμενο σύστημα), η ομπρέλα των δοκών προπορείας θα δημιουργήσει μια «ενισχυμένη ζώνη» στη στέψη της σήραγγας που θα μεταβιβάζει τα φορτία εκτός από την περιοχή έμπροσθεν του μετώπου και εκατέρωθεν αυτού και για το λόγω αυτό θα προσομοιωθεί στη δισδιάστατη ανάλυση, ως μια «ενισχυμένη ζώνη» υλικού.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της «ενισχυμένης ζώνης» των δοκών προπορείας, θα ισχύει η ακόλουθη σχέση, όπου βασίζεται στο ποσοστό συνεισφοράς κάθε υλικού και στο μέτρο ελαστικότητας (E) αυτού.

$$A_{FP} \times E_{FP} = A_{SOIL} \times E_{SOIL} + A_{TUBE} \times E_{TUBE} + A_{CEMENT} \times E_{CEMENT}$$

, όπου:

- ✓ A_{FP} : ισοδύναμο εμβαδό «ενισχυμένης ζώνης» δοκών προπορείας, που προκύπτει από το ύψος της ενισχυμένη ζώνη επί το πλάτος αυτής.
- ✓ E_{FP} : ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας «ενισχυμένη ζώνη» δοκών προπορείας.
- ✓ A_{SOIL} : ισοδύναμο εμβαδό περιοχής εδάφους στην «ενισχυμένη ζώνη» δοκών προπορείας.
- ✓ E_{SOIL} : ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας εδάφους στην «ενισχυμένη ζώνη» δοκών προπορείας και ισούται με 75 MPa (μέτρο ελαστικότητας τεχνικογεωλογικής ενότητας IIa).
- ✓ A_{TUBE} : ισοδύναμο εμβαδό του συνόλου του μετάλλου των μεταλλικών σωλήνων στην «ενισχυμένη ζώνη» δοκών προπορείας.
- ✓ E_{SOIL} : ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας μετάλλου στην «ενισχυμένη ζώνης» δοκών προπορείας και ισούται με 200 GPa (μέτρο ελαστικότητας χάλυβα)
- ✓ A_{CEMENT} : ισοδύναμο εμβαδό του συνόλου του τσιμεντενέματος που θα τοποθετηθεί στο εσωτερικό των σωλήνων στην «ενισχυμένη ζώνη» δοκών προπορείας.
- ✓ E_{SOIL} : ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας του τσιμεντενέματος που θα τοποθετηθεί στο εσωτερικό των σωλήνων στην «ενισχυμένη ζώνη» δοκών προπορείας και ισούται με 25 GPa (μέτρο ελαστικότητα σκυροδέματος).

Επίσης για το εμβαδό, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$A_{FP} = A_{SOIL} + A_{TUBE} + A_{CEMENT}$$

Με βάση τους υπολογισμούς του ακόλουθου πίνακα, προκύπτει το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας (E_{FP}) της «ενισχυμένης ζώνης» που αντιστοιχεί σε $E_{FP} \approx 31$ GPa. Στις αριθμητικές αναλύσεις, η «ενισχυμένη ζώνη» της ομπρέλας των δοκών προπορείας, προσομοιώνεται με ελαστική συμπεριφορά και της μηχανικές παραμέτρους της τεχνικογεωλογικής ενότητας IIa (καθώς εκσκάπτεται σε αυτή) και το παραπάνω ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας (E_{FP}).

Πίνακας 17. Προσδιορισμός ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας (E_{FP}) «ενισχυμένης ζώνης» δοκών προπορείας.

Παράμετρος	A (m ²)	E (MPa)	E x A (MPa x m ²)
Έδαφος (Soil)	0,36	75	27,04
Δοκός (Tube)	42 x 0,00262 = 0,11	200000	22178,16
Τσιμεντένεμα (Cement)	42 x 0,02878 = 0,36	25000	30214,45
Σύνολο	1,68		52419,65
E_{FP} (MPa)			31202,17

Για τη περίπτωση όπου γίνεται αριθμητική προσομοίωση του συνδυασμού φρέατος, σιράγγων TBMs και σιράγγων τύπου NATM, η ομπρέλα των δοκών προπορείας προσομοιώθηκε με στοιχεία δοκού (beam elements), με τις ακόλουθες παραμέτρους:

Πίνακας 18. Μηχανικές ιδιότητες ομπρέλας δοκών προπορείας

Αξονική απόσταση (s)	20 cm
Μήκος (L)	10,5 m
Ροπή αδρανείας (I)	$1,44 \times 10^{-9} \text{ m}^4$
Εμβαδό (A)	$0,00264 \text{ m}^2$
Μέτρο ελαστικότητας (E)	200 GPa
Συμπεριφορά	Γραμμικώς ελαστική

- **Μεταλλικά πλαίσια (steel sets)**

Τα μεταλλικά πλαίσια που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του κελύφους της προσωρινής υποστήριξης περιμετρικά της εκσκαφής, είναι τύπου HEB 320. Αντίστοιχα τα μεταλλικά πλαίσια που χρησιμοποιούνται στο άνω τμήμα της διατομής για την επιπρόσθετη ενίσχυση του φορέα, όπως και η αντηρίδα που τοποθετείται στο πυθμένα της άνω ημιδιατομής της σήραγγας, είναι τύπου HEB 200. Τα μεταλλικά πλαίσια προσομοιώθηκαν ως στοιχεία δοκού (beam elements) με ελαστική συμπεριφορά, ενώ οι μηχανικές τους παράμετροι παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 19. Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών πλαισίων σήραγγας τύπου NATM..

Διατομή	HEB 200	HEB 320
Αξονική απόσταση (s)	0,9	0,90m
Ισοδύναμο εμβαδό (A)	$0,009104 \text{ m}^2$	$0,01613 \text{ m}^2$
Ροπή αδρανείας (I)	$8,09 \times 10^{-5} \text{ m}^4$	$30,82 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
Μέτρο ελαστικότητας (E)	200 GPa	200 GPa
Συμπεριφορά	Γραμμικώς ελαστική	Γραμμικώς ελαστική

- **Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα**

Για την συγκράτηση των τοιχωμάτων της σήραγγας τόσο της άνω όσο και της κάτω ημιδιατομής, χρησιμοποιείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $t=32\text{cm}$, ενώ στον προσωρινό πυθμένα της άνω ημιδιατομής αλλά και στο πυθμένα και στο προσωρινό τοίχωμα μεταξύ των δύο φάσεων της κάτω ημιδιατομής της σήραγγας, χρησιμοποιείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $t=20\text{cm}$. Λόγω της μειωμένης αντοχής που έχει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά την τοποθέτησή του, λαμβάνεται

μέτρο ελαστικότητας νωπού σκυροδέματος $E = 15 \text{ GPa}$. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, προσομοιώθηκε ως στοιχείο δοκού (beam element) με ελαστική συμπεριφορά, ενώ οι μηχανικές του παράμετροι παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 20. Μηχανικές ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος σήραγγας τύπου NATM.

Πάχος (t)	20, 32 cm
Μέτρο ελαστικότητας (E)	15 GPa
Ειδικό βάρος (γ)	25 kN/m ³
Λόγος Poisson (ν)	0,20
Συμπεριφορά	Γραμμικώς ελαστική

4.5 Βασικές παραδοχές

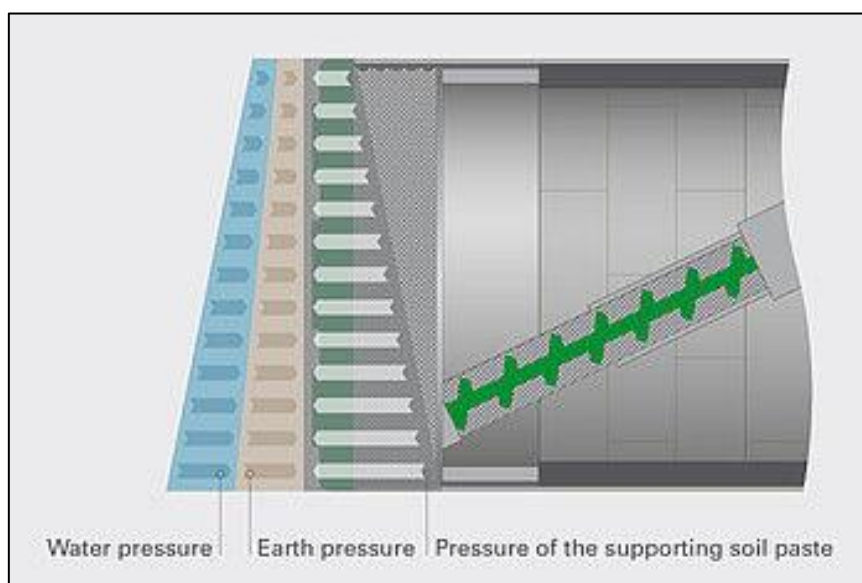
4.5.1 Μηχανική συμπεριφορά μέτρων υποστήριξης

Τα μέτρα υποστήριξης προσομοιώθηκαν ως ισότροπα γραμμικώς ελαστικά, συμπεριλαμβανομένου του ειδικού βάρους της επένδυσης.

4.5.2 Αποτόνωση του περιβάλλοντος γεωυλικού

4.5.2.1 Σήραγγες TBMs

Ο μηχανισμός λειτουργίας ενός μηχανήματος ολομέτρητης διάνοιξης σηράγγων με εξισορρόπηση πίεσης μετώπου (EPB – TBM), αποτελεί ένα κατεχοχόν τρισδιάστατο πρόβλημα, καθώς ο βασικός μηχανισμός λειτουργίας του μηχανήματος, είναι η άσκηση πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής με σκοπό την εξασφάλιση της σταθερότητάς του και αφετέρου την μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων, όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη Εικόνα 41.



Εικόνα 41: Μηχανισμός άσκησης πίεσης μετώπου από το EPB – TBM (Herrenknecht AG).

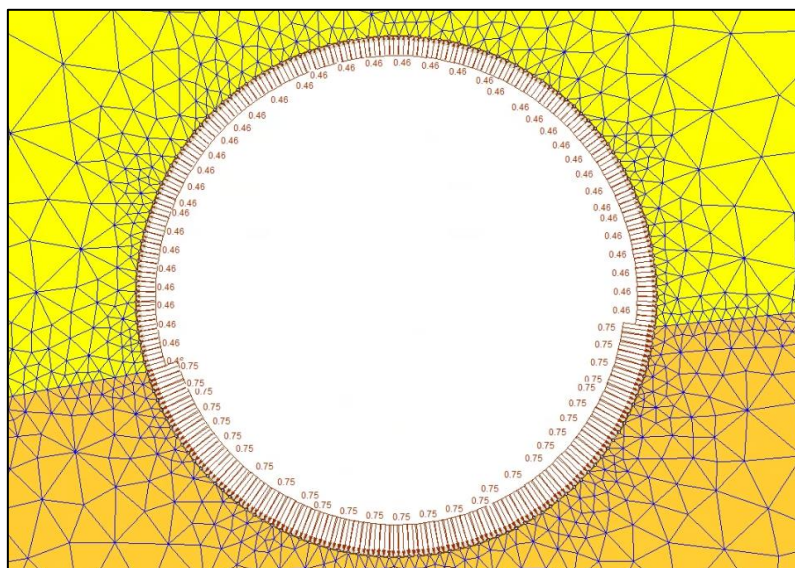
Καθώς η εδαφική πίεση που ασκεί το μηχάνημα στο μέτωπο, γίνεται παράλληλα με την διεύθυνση προχώρησής του, η αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος θα απαιτούσε μια τρισδιάστατη ανάλυση (3D), ώστε να γίνει προσομοίωση της πίεσης που ασκείται στο μέτωπο εκσκαφής (rface).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν δισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις (2D) με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 του οίκου Rocscience. Για την προσομοίωση της τρίτης διάστασης, όπως είναι σύνηθες στις δισδιάστατες αναλύσεις, γίνεται χρήση της μεθόδου της ελεγχόμενης χαλάρωσης της περιβάλλουσας βραχόμαζας (relaxation). Συγκεκριμένα, μέσω μια τυπικής καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης για την εκάστοτε βραχόμαζα, εφαρμόζεται ο αντίστοιχος βαθμός αποτόνωσης (λ), ώστε να προκληθούν οι επιθυμητές μετακινήσεις στην εκσκαφή (u). Ο βαθμός αποτόνωσης (λ), ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda = 1 - \frac{p_i}{p_o}$$

, όπου (p_i): η αντίστοιχη πίεση υποστήριξης της εκσκαφής και (p_o): η γεωστατική πίεση στο βάθος εκσκαφής.

Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, εφαρμόστηκε η ισοδύναμη πίεση υποστήριξης (p_i), βάση του επιθυμητού βαθμού αποτόνωσης (λ), όπως φαίνεται στην ακόλουθη Εικόνα 42.



Εικόνα 42: Εφαρμογή ισοδύναμης πίεσης υποστήριξης (p_i) στην εκσκαφή, βάση του βαθμού αποτόνωσης (λ).

Για την αντιστοίχιση της εκάστοτε πίεσης μετώπου (p_{face}) που θα ασκεί το μηχάνημα EPB-TBM με τον ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης (λ), εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία που παρουσιάζεται

στην διδακτορική διατριβή “Numerical Investigation of the tunnel face stability” (D. Georgiou, 2021), για προσομοίωση σε δύο διαστάσεις (2D) των αγκυρίων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, fiberglass.

Επιλέχθηκε αυτή η μεθοδολογία, καθώς ο τρόπος λειτουργίας ενός μηχανήματος EPB – TBM για την υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής είναι ισοδύναμος με αυτό της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής με αγκυρώσεις τύπου fiberglass, καθώς και τα δύο επιβάλλουν υψηλή πλευρική τάση σ_3 στο μέτωπο, το μεν πρώτο μέσω του εδαφικού πολφού και το δεύτερο μέσω της εφελκυστικής αντοχής των αγκυρίων.

Με βάση την μεθοδολογία που επιλέχθηκε, προτείνεται να υπολογίζεται ο βαθμός αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής (λ_{face}), από την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda_{face} = 0.25 + 0.75 \times \exp(-0.5 \times \Lambda_o)$$

, όπου Λ_o είναι ο συντελεστής ασφαλείας ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής.

Ο συντελεστής ασφαλείας μετώπου (Λ_o), υπολογίζεται βάση της ακόλουθης σχέσης:

$$\Lambda_o = \frac{3.8 \times \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma \times H} \right) \times \left(\frac{H}{D} \right)^{0.35}}{\sqrt{1 + \left(\frac{2}{3} \right) \times K_o}}$$

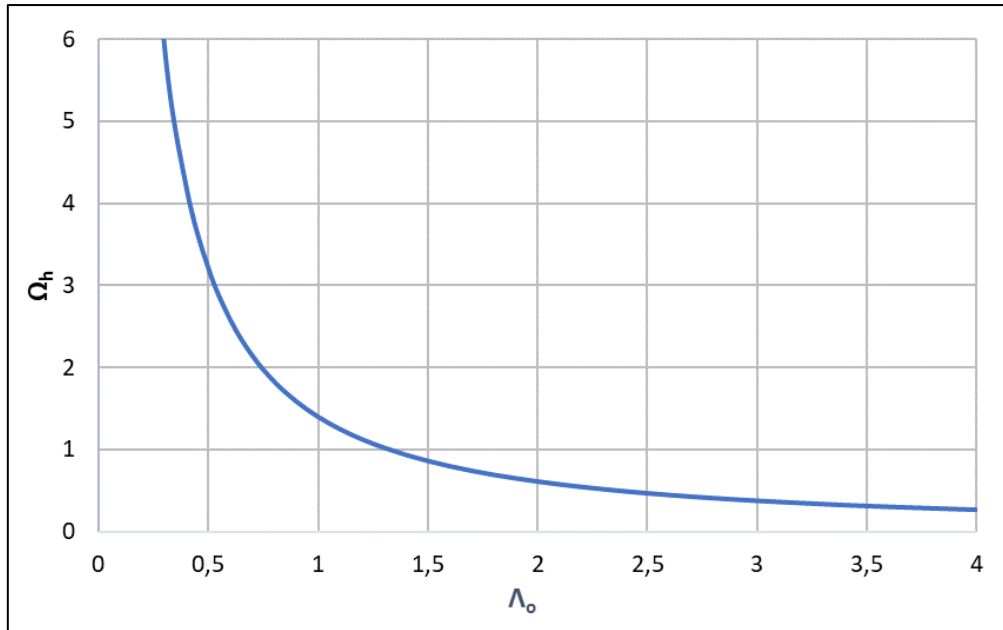
, όπου:

- σ_{cm} : η αντοχή της βραχώμαζας ($\sigma_{cm} = 0.02 \times \sigma_{ci} \times \exp\left(\frac{GSI}{25.5}\right)$)
- γ : το ειδικό βάρος της βραχώμαζας
- H : το βάθος εκσκαφής
- D : η διάμετρος της εκσκαφής
- K_o : ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων

Με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία, όταν ο συντελεστής $\Lambda_o < 1$ το μέτωπο είναι ασταθές, ενώ για $\Lambda_o \geq 1$ το μέτωπο είναι ευσταθές. Αυτό συμπεραίνεται και από το ακόλουθο Διάγραμμα 4, όπου γίνεται συσχέτιση της εξώθησης του μετώπου (Ω_h) με τον συντελεστή Λ_o και για τιμές του $\Lambda_o < 1$, η εξώθηση του μετώπου είναι πολύ μεγάλη, λόγω της αστάθειάς του.

Η εξώθηση (Ω_h), συσχετίζεται με τον συντελεστή (Λ_o) με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\Omega_h = 1.4 \times \Lambda_o^{-1.2}$$



Διάγραμμα 4: Συσχέτιση του συντελεστή ευστάθειας μετώπου (Λ_0) με την εξώθηση αυτού (Ω_h). (D. Georgiou, 2021).

Στην περίπτωση υποστήριξης του μετώπου με αγκυρώσεις fiberglass ή αντίστοιχα χρήσης EPB – TBM, η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτιμά την μείωση της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής ($\Delta\Omega_h$), με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\Delta\Omega_h}{\Omega_{ho}} = 0.35 \times \left(\frac{p_{face}}{\sigma_{cm}}\right)^{0.81} \times \left(\frac{H}{D}\right)^{0.18}$$

, όπου $\Delta\Omega_h = \Omega_{ho} - \Omega_h$ και Ω_{ho} : η εξώθηση του ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής.

Εφαρμόζοντας, όλες τις παραπάνω σχέσεις, ο ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής για εφαρμογή πίεσης μετώπου από EPB- TBM (λ_{EPB}), θα είναι:

$$\lambda_{EPB} = 0,25 + 0.75 \times \exp \left\{ -0,5 \times \left[\left(1 - 0.35 \times \left(\frac{p_{face}}{\sigma_{cm}}\right)^{0.81} \times \left(\frac{H}{D}\right)^{0.18} \right) \times \Lambda_0^{-1.2} \right]^{-0.8333} \right\}$$

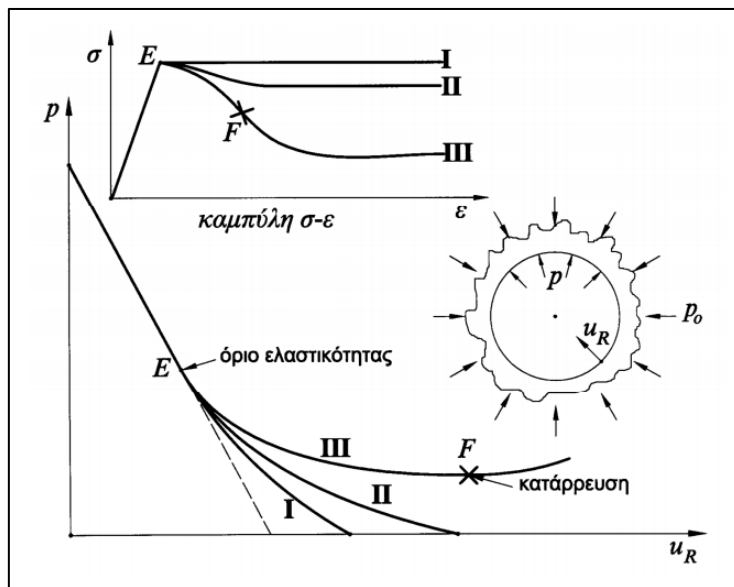
Με βάση τα δεδομένα από την διάνοιξη των δύο σηράγγων TBMs εκατέρωθεν του φρέατος εξαερισμού «ΚΡΗΤΗΣ», τα μηχανήματα ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων με εξισορρόπηση πίεσης μετώπου (EPB- TBMs), ασκούσαν πίεση μετώπου $P_{face} = 1 \text{ bar}$. Για αυτή την πίεση μετώπου και με βάση τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται ο ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης (λ_{EPB}) με βάση την προηγούμενη εξίσωση, για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες IIa και IIb, στις οποίες διανοίγονται οι σήραγγες TBMs.

Πίνακας 21. Ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης (λ_{EPB}) για εκσκαφή με EPB-TBM.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα	P_{face}	Λ_o	λ_{EPB}
IIa	1 bar	1,94	0,54
IIb	1 bar	31,74	0,25

4.5.2.2 Σήραγγες τύπου NATM

Επειδή πραγματοποιούνται δισδιάστατες (2D) αριθμητικές αναλύσεις, πρέπει να ληφθεί υπόψιν ο παράγοντας της τρίτης διάστασης, ως προς την χαλάρωση του γεωυλικού σε σχέση με το μέτωπο της εκσκαφής. Η τρίτη διάσταση θα ληφθεί υπόψιν με την χρήση του βαθμού αποτόνωσης (λ), όπου στην ακόλουθη Εικόνα 43, παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης.



Εικόνα 43: Τυπική καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης (Μ. Καθβαδάς).

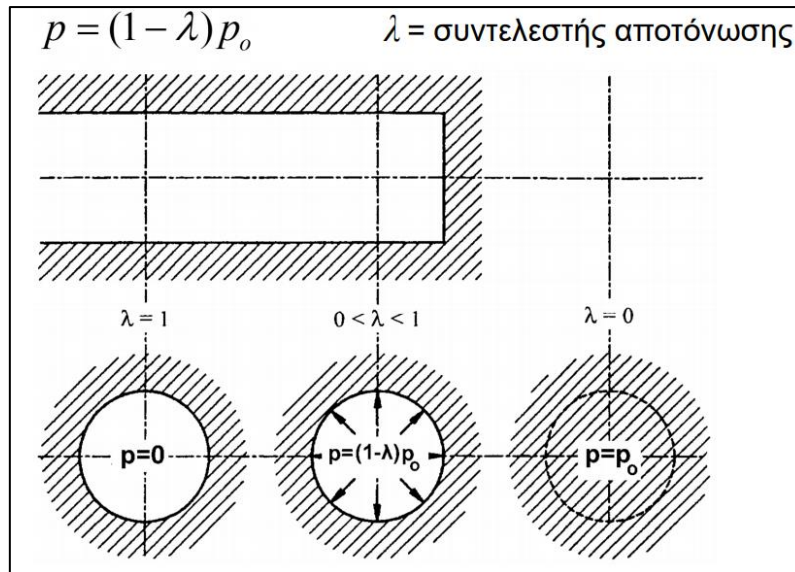
Ως βαθμός αποτόνωσης (λ), ορίζεται ο ακόλουθος λόγος:

$$\lambda = 1 - \frac{p_i}{p_o}$$

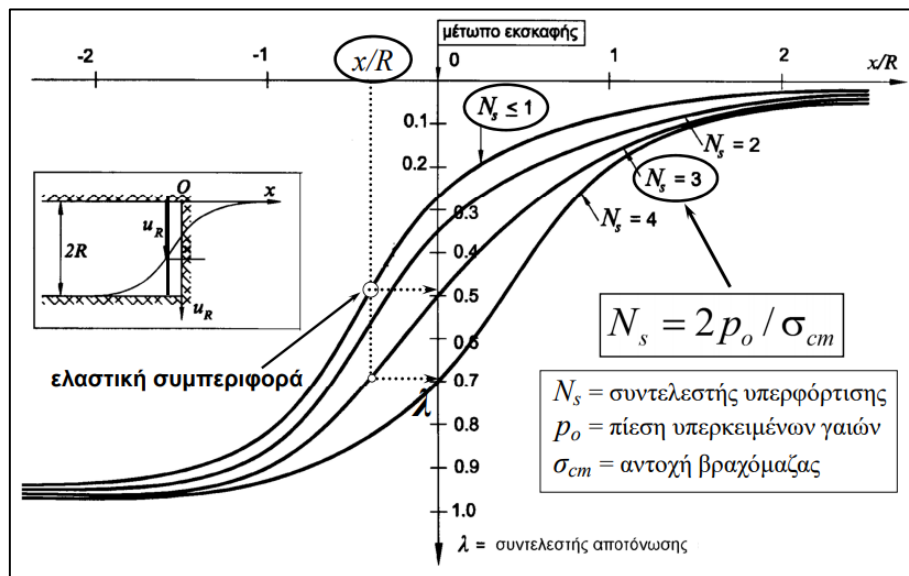
, όπου:

- p_i : η ισοδύναμη πίεση εσωτερικής υποστήριξης της εκσκαφής
- p_o : η γεωστατική τάση στο επίπεδο της εκσκαφής

Στις Εικόνα 44 και Εικόνα 45 παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού αποτόνωσης (λ), σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής.



Εικόνα 44: Βαθμός αποτόνωσης σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος του άξονα εκσκαφής.



Εικόνα 45: Μεταβολή του βαθμού αποτόνωσης σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής.

Η μορφή και το μέγεθος των συγκλίσεων (u_r) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (x) μπορούν να εκτιμηθούν μέσω εμπειρικών σχέσεων ή ακόμα καλύτερα μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Λόγω της δυσκολίας πραγματοποίησης αριθμητικών αναλύσεων στα προκαταρκτικά στάδια σχεδιασμού των σηράγγων, εφαρμόζονται κυρίως οι εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης των συγκλίσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (LDP methods). Στην παρούσα εργασία, γίνεται εφαρμογή της εμπειρικής σχέσης *Chern et al.* (1998).

Σύμφωνα με τους *Chern et al.* (1998) η σύγκλιση $u_r(x)$ του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε απόσταση (x/R) με τιμές $x < 0$ εντός της σήραγγας και τιμές $x > 0$ εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$u_R(x) = u_{R\infty} \times \left[1 + \exp \left(0.91 \times \frac{x}{R} \right) \right]^{-1.7}$$

, όπου:

- ✓ $u_{R\infty}$: η μέγιστη σύγκλιση της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής.
- ✓ x : η απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.
- ✓ R : η ακτίνα της σήραγγας.

Με την εφαρμογή της προηγούμενης εμπειρικής σχέσης προσδιορισμού του διαμήκους προφίλ μετακινήσεων και σε συνδυασμό με μία καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης, μπορεί να εκτιμηθεί ο βαθμός αποτόνωσης (λ) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας.

Για την ορθή προσομοίωση της διάνοιξης των σηράγγων τύπου NATM, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν η αρχική χαλάρωση – αποτόνωση των τάσεων που έχει πραγματοποιηθεί στην περιοχή των σηράγγων τύπου NATM, καθώς έχει προηγηθεί η κατασκευή τόσο του φρέατος όσο και των δύο σηράγγων τύπου TBM, με αποτέλεσμα να έχει μεταβληθεί το εντατικό πεδίο στην περιοχή αυτή.

Για τον λόγο αυτό στο αριθμητικό προσομοίωμα της εκσκαφής του φρέατος και των δύο σηράγγων TBMs, έγινε καταγραφή της κατακόρυφης τάσης (σ_1) περί το μέσο της περιοχής μεταξύ του φρέατος και των δύο σηράγγων TBMs, τόσο πριν της κατασκευής του φρέατος όσο και μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης των δύο σηράγγων TBMs. **Με βάση τις μετρούμενες τιμές της κατακόρυφης τάσης, προκύπτει ότι στην περιοχή αυτή, μετά την κατασκευή του φρέατος και των δύο σηράγγων TBMs, θα έχει πραγματοποιηθεί μία χαλάρωση των αρχικών τάσεων της τάξης του 20%.**

Δεδομένου ότι για την σήραγγα τύπου NATM, το βήμα προχώρησης της εκσκαφής είναι 0,90m, γίνεται εφαρμογή της παραπάνω εμπειρικής σχέσης για τις τεχνικογεωλικές ενότητες IIa και IIb και βάθος υπερκειμένων γαιών $H= 20m$ και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα. Για τον υπολογισμό του βαθμού αποτόνωσης (λ), λαμβάνεται ισοδύναμη διάμετρος σήραγγας $D=9,2m$, που αναφέρεται στην συνολική διατομή. Η αποτόνωση του εδάφους στις σήραγγες τύπου NATM, πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου της χαλάρωσης (relaxation), εφαρμόζοντας το εκάστοτε ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας (E) από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{E}{E_o} = \frac{(1 - 2\nu) \times (1 - \lambda)}{(1 - 2\nu) + \lambda}$$

, όπου:

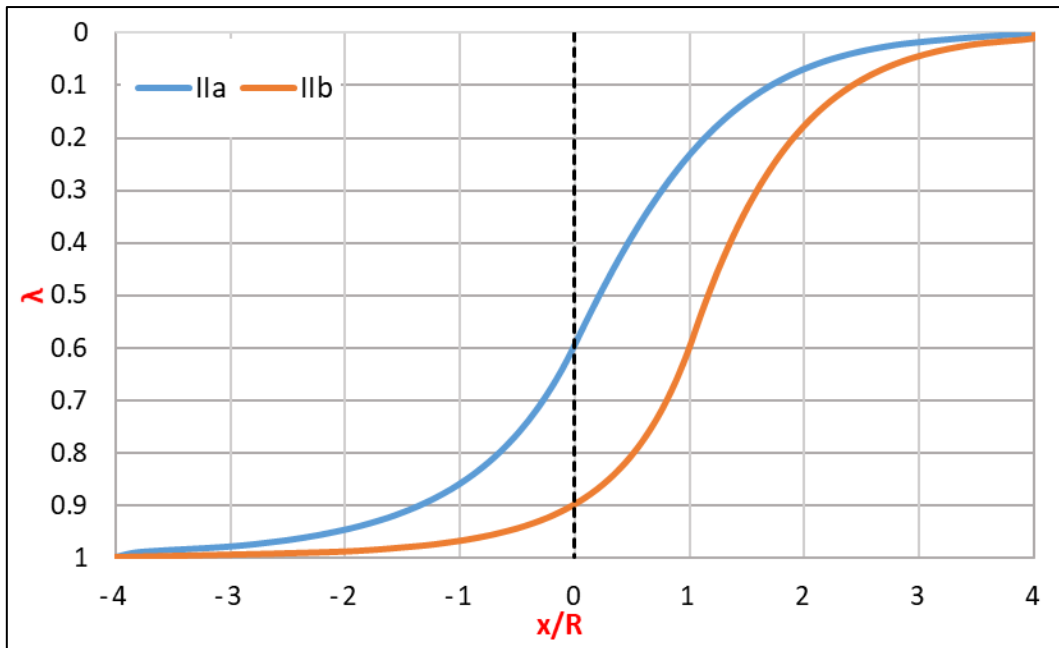
- ✓ E: το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας για χαλάρωση του εδάφους
- ✓ E₀: το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του εδάφους
- ✓ ν: ο λόγος Poisson του εδάφους
- ✓ λ: ο ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης

Πίνακας 22: Ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης (λ) για εκσκαφή των σηράγγων τύπου NATM.

Τεχνικογεωλογική Ενότητα	Θέση από μέτωπο εκσκαφής	λ	E
IIa	Αρχική χαλάρωση λόγω φρέατος	0,20	53,02 MPa
IIb		0,20	31,81 MPa
IIa	x= 0m	0,60	12,00 MPa
	x= -0,9m	0,68	8,99 MPa
	x= -1,8m	0,74	7,01 MPa
IIb	x= 0m	0,90	25,34 MPa
	x= -0,9m	0,93	17,74 MPa
	x= -1,8m	0,94	15,21 MPa

Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται ο ίδιος βαθμός αποτόνωσης (λ) σε όλες τις φάσεις εκσκαφής.

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού αποτόνωσης (λ) σε σχέση με την απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής, για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες IIa, IIb.



Διάγραμμα 5: Μεταβολή βαθμού αποτόνωσης (λ), κατά μήκος του άξονα των σηράγγων, για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες IIa και IIb.

4.6 Στάδια προσομοίωσης

Στην συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή των σταδίων προσομοίωσης, ανά αριθμητικό προσομοίωμα:

4.6.1 Προσομοίωμα εκσκαφής φρέατος εξαερισμού

Στάδιο	Περιγραφή
1	Γεωστατικές συνθήκες
2	Επιφανειακές φορτίσεις εκατέρωθεν του φρέατος από υπερκείμενες κατασκευές και οδούς
3	Εφαρμογή πασσάλων περιμετρικά του υπογείου φρέατος.
4	1 ^ο στάδιο εκσκαφής του φρέατος αερισμού σε βάθος -2.6 μέτρων
5	2^ο στάδιο εκσκαφής του φρέατος αερισμού σε βάθος -5.3 μέτρων
6	Τοποθέτηση 1 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -4.32 μέτρων
7	Εκσκαφή έως το βάθος των -9.8 μέτρων
8	Τοποθέτηση 2 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -8.82 μέτρων
9	Εκσκαφή έως το βάθος των -14.3 μέτρων
10	Τοποθέτηση 3 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -13.320 μέτρων
11	Εκσκαφή έως το βάθος των -16.8 μέτρων
12	Εκσκαφή έως το βάθος των -19.1 μέτρων
13	Τοποθέτηση 3 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -18.320 μέτρων

Στάδιο	Περιγραφή
14	Εκσκαφή έως το βάθος των -20.7 μέτρων
15	Τοποθέτηση 5 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -20.120 μέτρων
16	Εκσκαφή εσωτερικού φρέατος
17	Υποστήριξη εσωτερικού φρέατος

4.6.2 Προσομοίωμα εκσκαφής φρέατος εξαερισμού και διάνοιξη σήραγγων TBMs

Στάδιο	Περιγραφή
1	Γεωστατικές συνθήκες
2	Επιφανειακές φορτίσεις εκατέρωθεν του φρέατος από υπερκείμενες κατασκευές και οδούς
3	Εφαρμογή πασσάλων περιμετρικά του υπογείου φρέατος.
4	1 ^ο στάδιο εκσκαφής του φρέατος αερισμού σε βάθος -2.6 μέτρων
5	2 ^ο στάδιο εκσκαφής του φρέατος αερισμού σε βάθος -5.3 μέτρων
6	Τοποθέτηση 1 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -4.32 μέτρων
7	Εκσκαφή έως το βάθος των -9.8 μέτρων
8	Τοποθέτηση 2 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -8.82 μέτρων
9	Εκσκαφή έως το βάθος των -14.3 μέτρων
10	Τοποθέτηση 3 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -13.320 μέτρων
11	Εκσκαφή έως το βάθος των -16.8 μέτρων
12	Εκσκαφή έως το βάθος των -19.1 μέτρων
13	Τοποθέτηση 3 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -18.320 μέτρων
14	Εκσκαφή έως το βάθος των -20.7 μέτρων
15	Τοποθέτηση 5 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -20.120 μέτρων
16	Εκσκαφή εσωτερικού φρέατος
17	Υποστήριξη εσωτερικού φρέατος
18	Εκσκαφή και αποτόνωση βόρειας σήραγγας TBM
19	Υποστήριξη βόρειας σήραγγας TBM
20	Εκσκαφή και αποτόνωση νότιας σήραγγας TBM
21	Υποστήριξη νότιας σήραγγας TBM

4.6.3 Προσομοίωμα εκσκαφής σήραγγας τύπου NATM

Στάδιο	Περιγραφή
1	Γεωστατικές συνθήκες
2	Επιφανειακές φορτίσεις εκατέρωθεν της σήραγγας από υπερκείμενες οδούς
3	Αρχική αποτόνωση τάσεων στο σύνολο της σήραγγας, για την προσομοίωση του εντατικού πεδίου μετά τη κατασκευή του φρέατος και των σηράγγων TBMs
4	Ενεργοποίηση «ενισχυμένης ζώνης» δοκών προπορείας
5	Εφαρμογή γεωυλικού αποτόνωσης άνω ημιδιατομής σήραγγας (Α' φάση). Θέση ελέγχου $x=0m$.
6	Εφαρμογή γεωυλικού αποτόνωσης άνω ημιδιατομής σήραγγας (Α' φάση). Θέση ελέγχου $x=-0,9m$. Ενεργοποίηση μέτρων υποστήριξης, με πάχος 50% του τελικού και μέτρο ελαστικότητας 50% του τελικού. Ενεργοποίηση εσωτερικής αντηρίδας σήραγγας.
7	Εφαρμογή γεωυλικού αποτόνωσης άνω ημιδιατομής σήραγγας (Α' φάση). Θέση ελέγχου $x=-1,8m$. Ενεργοποίηση μέτρων υποστήριξης, με πάχος 100% του τελικού και μέτρο ελαστικότητας 50% του τελικού.
8	Αφαίρεση γεωυλικού από το εσωτερικό της άνω ημιδιατομής της σήραγγας (Α' φάση). Ενεργοποίηση μέτρων υποστήριξης, με πάχος 100% του τελικού και μέτρο ελαστικότητας 100% του τελικού.
9	Εφαρμογή γεωυλικού αποτόνωσης κάτω ημιδιατομής σήραγγας (Β1' φάση). Θέση ελέγχου $x=0m$.
10	Εφαρμογή γεωυλικού αποτόνωσης κάτω ημιδιατομής σήραγγας (Β1' φάση). Θέση ελέγχου $x=-0,9m$. Ενεργοποίηση μέτρων υποστήριξης, με πάχος 50% του τελικού και μέτρο ελαστικότητας 50% του τελικού.
11	Εφαρμογή γεωυλικού αποτόνωσης κάτω ημιδιατομής σήραγγας (Β1' φάση). Θέση ελέγχου $x=-1,8m$. Ενεργοποίηση μέτρων υποστήριξης, με πάχος 100% του τελικού και μέτρο ελαστικότητας 50% του τελικού.
12	Αφαίρεση γεωυλικού από το εσωτερικό της κάτω ημιδιατομής της σήραγγας (Β1' φάση). Ενεργοποίηση μέτρων υποστήριξης, με πάχος 100% του τελικού και μέτρο ελαστικότητας 100% του τελικού.
13	Εφαρμογή γεωυλικού αποτόνωσης κάτω ημιδιατομής σήραγγας (Β2' φάση). Θέση ελέγχου $x=0m$.

Στάδιο	Περιγραφή
14	Εφαρμογή γεωλυλικού αποτόνωσης κάτω ημιδιατομής σήραγγας (B2' φάση). Θέση ελέγχου $x = -0,9m$. Ενεργοποίηση μέτρων υποστήριξης, με πάχος 50% του τελικού και μέτρο ελαστικότητας 50% του τελικού.
15	Εφαρμογή γεωλυλικού αποτόνωσης κάτω ημιδιατομής σήραγγας (B2' φάση). Θέση ελέγχου $x = -1,8m$. Ενεργοποίηση μέτρων υποστήριξης, με πάχος 100% του τελικού και μέτρο ελαστικότητας 50% του τελικού.
16	Αφαίρεση γεωλυλικού από το εσωτερικό της κάτω ημιδιατομής της σήραγγας (B2' φάση). Ενεργοποίηση μέτρων υποστήριξης, με πάχος 100% του τελικού και μέτρο ελαστικότητας 100% του τελικού.
17	Αφαίρεση εσωτερικής αντηρίδας τύπου HEB 200, από το εσωτερικό της σήραγγας.

4.6.4 Προσομοίωμα εκσκαφής φρέατος και σιράγγων TBMs και NATM

Στάδιο	Περιγραφή
1	Γεωστατικές συνθήκες
2	Επιφανειακές φορτίσεις εκατέρωθεν του φρέατος από υπερκείμενες κατασκευές και οδούς
3	Εφαρμογή πασσάλων περιμετρικά του υπογείου φρέατος.
4	1 ^ο στάδιο εκσκαφής του φρέατος αερισμού σε βάθος -2.6 μέτρων
5	2 ^ο στάδιο εκσκαφής του φρέατος αερισμού σε βάθος -5.3 μέτρων
6	Τοποθέτηση 1 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -4.32 μέτρων
7	Εκσκαφή έως το βάθος των -9.8 μέτρων
8	Τοποθέτηση 2 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -8.82 μέτρων
9	Εκσκαφή έως το βάθος των -14.3 μέτρων
10	Τοποθέτηση 3 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -13.320 μέτρων
11	Εκσκαφή έως το βάθος των -16.8 μέτρων
12	Εκσκαφή έως το βάθος των -19.1 μέτρων
13	Τοποθέτηση 3 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -18.320 μέτρων
14	Εκσκαφή έως το βάθος των -20.7 μέτρων
15	Τοποθέτηση 5 ^{ης} σειράς αντηρίδων σε βάθος -20.120 μέτρων
16	Εκσκαφή εσωτερικού φρέατος
17	Υποστήριξη εσωτερικού φρέατος
18	Εκσκαφή και αποτόνωση βόρειας σήραγγας TBM

Στάδιο	Περιγραφή
19	Υποστήριξη βόρειας σήραγγας TBM
20	Εκσκαφή και αποτόνωση νότιας σήραγγας TBM
21	Υποστήριξη νότιας σήραγγας TBM
22	Εγκατάσταση δοκών προπορείας, κάθετα στο φρέαρ και άνωθεν των σηράγγων TBMs
23	Εκσκαφή Α φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 0 – 0,9m)
24	Εκσκαφή Α φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 0,9 – 1,8m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 0 – 0,9m.
25	Εκσκαφή Α φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 1,8 – 2,7m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 0,9 – 1,8m.
26	Εκσκαφή Α φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 2,7 – 3,6m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 1,8 – 2,7m.
27	Εκσκαφή Α φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 3,6 – 4,5m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 2,7 – 3,6m.
28	Εκσκαφή Α φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 4,5 – 5,4m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 3,6 – 4,5m.
29	Εκσκαφή Α φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 5,4 – 6,3m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 4,5 – 5,4m.
30	Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 5,4 – 6,3m της Α φάσης της αριστερής σήραγγας τύπου NATM.
31	Εκσκαφή Α φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 0 – 0,9m)
32	Εκσκαφή Α φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 0,9 – 1,8m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 0 – 0,9m.
33	Εκσκαφή Α φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 1,8 – 2,7m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 0,9 – 1,8m.
34	Εκσκαφή Α φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 2,7 – 3,6m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 1,8 – 2,7m.
35	Εκσκαφή Α φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 3,6 – 4,5m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 2,7 – 3,6m.
36	Εκσκαφή Α φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 4,5 – 5,4m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 3,6 – 4,5m.
37	Εκσκαφή Α φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 5,4 – 6,3m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 4,5 – 5,4m.

Στάδιο	Περιγραφή
38	Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 5,4 – 6,3m της Α φάσης της δεξιάς σήραγγας τύπου NATM.
39	Εκσκαφή Β φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 0 – 0,9m)
40	Εκσκαφή Β φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 0,9 – 1,8m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 0 – 0,9m.
41	Εκσκαφή Β φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 1,8 – 2,7m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 0,9 – 1,8m.
42	Εκσκαφή Β φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 2,7 – 3,6m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 1,8 – 2,7m.
43	Εκσκαφή Β φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 3,6 – 4,5m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 2,7 – 3,6m.
44	Εκσκαφή Β φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 4,5 – 5,4m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 3,6 – 4,5m.
45	Εκσκαφή Β φάσης αριστερής σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 5,4 – 6,3m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 4,5 – 5,4m.
46	Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 5,4 – 6,3m της Β φάσης της αριστερής σήραγγας τύπου NATM.
47	Εκσκαφή Β φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 0 – 0,9m)
48	Εκσκαφή Β φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 0,9 – 1,8m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 0 – 0,9m.
49	Εκσκαφή Β φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 1,8 – 2,7m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 0,9 – 1,8m.
50	Εκσκαφή Β φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 2,7 – 3,6m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 1,8 – 2,7m.
51	Εκσκαφή Β φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 3,6 – 4,5m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 2,7 – 3,6m.
52	Εκσκαφή Β φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 4,5 – 5,4m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 3,6 – 4,5m.
53	Εκσκαφή Β φάσης δεξιάς σήραγγας τύπου NATM. (Θέση 5,4 – 6,3m). Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 4,5 – 5,4m.
54	Ενεργοποίηση υποστήριξης στο τμήμα 5,4 – 6,3m της Β φάσης της δεξιάς σήραγγας τύπου NATM.

4.7 Μετρούμενα μεγέθη

Στις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, καταγράφηκαν τα ακόλουθα μεγέθη ανά έργο και ανά περιοχή:

- **Επιφάνεια εδάφους**
 - ✓ Επιφανειακές καθιζήσεις - Κατακόρυφες μετακινήσεις (vertical displacements)
 - ✓ Ολικές μετακινήσεις (total displacements)

- **Τοίχος αντιστήριξης – Πασσαλότοιχος**
 - ✓ Κατακόρυφες μετακινήσεις (vertical displacements)
 - ✓ Οριζόντιες μετακινήσεις (horizontal displacements)
 - ✓ Ολικές μετακινήσεις (total displacements)
 - ✓ Αξονικές δυνάμεις (axial forces)
 - ✓ Καμπτικές ροπές (bending moments)

- **Αντηρίδες**
 - ✓ Αξονικές δυνάμεις (axial forces)
 - ✓ Καμπτικές ροπές (bending moments)

- **Σήραγγες TBMs**
 - ✓ Ολικές μετακινήσεις οροφής (total displacements)
 - ✓ Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος (axial forces)
 - ✓ Καμπτικές ροπές σκυροδέματος (bending moments)

- **Σήραγγες NATM**
 - ✓ Ολικές μετακινήσεις οροφής και παρειών (total displacements)
 - ✓ Κατακόρυφες μετακινήσεις σήραγγας και επιφανείας (vertical displacements)
 - ✓ Οριζόντιες μετακινήσεις (horizontal displacements)

Να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις ελέγχου αλληλεπίδρασης του ενός έργου στο άλλο, γίνεται μηδενισμός των μετρούμενων μεγεθών στο στάδιο ολοκλήρωσης του πρώτου έργου. Όσον αφορά την αρχική κατασκευή του φρέατος εξαερισμού, εκεί γίνεται μηδενισμός των μετρούμενων μεγεθών ακριβώς μετά το στάδιο που επιβάλλεται η εξωτερική φόρτιση, λόγω των κατασκευών και της οδού.

5 Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων, που έχουν ως σκοπό να εξετάσουν την επιρροή της διάνοιξης των σηράγγων TBM και NATM, στο φρέαρ εξαερισμού.

Συγκεκριμένα, γίνεται παρουσίαση αποτελεσμάτων από τις ακόλουθες αναλύσεις:

5. Εκσκαφή και υποστήριξη του φρέατος εξαερισμού και των σηράγγων TBM.
6. Εκσκαφή και υποστήριξη της εγκάρσιας σήραγγας τύπου NATM, από το φρέαρ προς την σήραγγα TBM.
7. Συνδυασμός όλων των παραπάνω, με την θεώρηση ότι οι σήραγγες τύπου NATM προσομοιώνονται εγκάρσια στη διατομή με μεγάλο πλάτος, λόγω της τριδιάστατης γεωμετρίας (κάθετη στην δισδιάστατη ανάλυση).

5.1 Μοντέλο φρέατος εξαερισμού και σηράγγων TBMs

Κατά την αριθμητική προσομοίωση του φρέατος εξαερισμού, των σηράγγων TBM χρειάστηκε να ληφθούν κάποιες παραδοχές. Κατά τη δισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση των σηράγγων TBM χρειάστηκε να προσομοιωθεί πίεση μετώπου (p_{face}) που θα ασκεί το μηχάνημα EPB-TBM με τον ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης (λ). Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στη διδακτορική διατριβή “*Numerical Investigation of the tunnel face stability*” (D. Georgiou, 2021), για προσομοίωση σε δύο διαστάσεις (2D) των αγκυρίων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, fiberglass. Επιλέχθηκε η μεθοδολογία αυτή καθώς ο τρόπος λειτουργίας ενός μηχανήματος EPB – TBM για την υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής είναι ισοδύναμος με αυτό της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής με αγκυρώσεις τύπου fiberglass, καθώς και τα δύο επιβάλλουν υψηλή πλευρική τάση σ_3 στο μέτωπο, το μεν πρώτο μέσω του εδαφικού πολφού και το δεύτερο μέσω της εφελκυστικής αντοχής των αγκυρίων. Βάσει αυτή της μεθοδολογίας η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 προέκυψαν οι εξής ισοδύναμοι βαθμοί αποτόνωσης (λ_{EPB}) για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα :

Τεχνικογεωλογική Ενότητα	λ_{EPB}
IIa	0,54
IIb	0,25

Για την ανάλυση αυτή λήφθηκε υπόψιν η στρωματογραφία της περιοχής όπως αυτή αναλύθηκε και περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.

Στην ανάλυση αυτή γίνεται προσομοίωση της κατασκευής του φρέατος αερισμού και των σηράγγων TBMs. Η προσομοίωση αυτή γίνεται αρχικά για να προσδιοριστεί η επίδραση της διάνοιξης των σηράγγων TBM στο ήδη κατασκευασμένο φρέαρ. Αυτό αποτυπώνεται από τις μετακινήσεις που προκαλούνται στο φρέαρ αλλά και τη μεταβολή των εντατικών μεγεθών σε αυτό, όταν ολοκληρωθεί η διάνοιξη των σηράγγων TBM. Επιπλέον κατά την ολοκλήρωση της κατασκευής των δύο έργων προκαλούνται καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

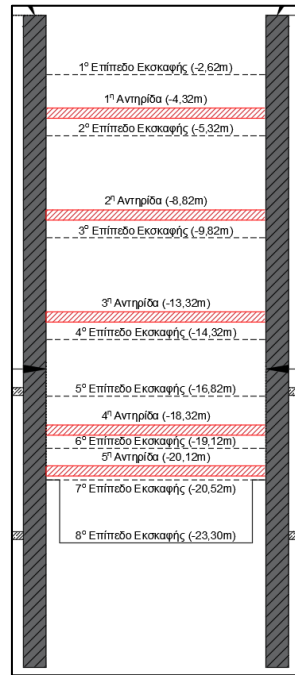
Η υποστήριξη του φρέατος εξαερισμού, περιλαμβάνει πασσάλους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται περιμετρικά για τον τοίχο αντιστήριξης, έχουν διάμετρο 1,00m, αξονική απόσταση 1,50m και μήκος 28,8m και κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25. Για την εσωτερική αντιστήριξη των τοιχίων του φρέατος χρησιμοποιούνται αντηρίδες οι οποίες αποτελούνται από μεταλλικές διατομές τύπου HEB 320. Για την συγκράτηση των τοιχωμάτων του εσωτερικού φρέατος χρησιμοποιείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $t=20\text{cm}$. Κατά το τελικό στάδιο κατασκευής του εσωτερικού φρέατος, κατασκευάζεται στον πυθμένα πλάκα θεμελίωσης από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους $t=100\text{cm}$, με σκυρόδεμα C30/37.

Για την συγκράτηση των τοιχωμάτων των σηράγγων TBMs, εφαρμόζεται υποστήριξη από προκατασκευασμένους δακτυλίους οπλισμένου σκυροδέματος (segments), πάχους $t=30\text{cm}$ και σκυροδέματος C40/50.

Ο τρόπος και τα στάδια προσομοίωσης των παραπάνω με αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων έχει περιγράψει αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

Συνοπτικά τα στάδια προσομοίωσης έχουν ως εξής :

1. Εκσκαφή και αντιστήριξη του φρέατος αερισμού
2. Εκσκαφή και υποστήριξη του εσωτερικού φρέατος
3. Εκσκαφή και αποτόνωση βόρειας σήραγγας TBM
4. Υποστήριξη βόρειας σήραγγας TBM
5. Εκσκαφή και αποτόνωση νότιας σήραγγας TBM
6. Υποστήριξη νότιας σήραγγας TBM



Εικόνα 46: Βάθη κάθε επιπέδου αντηρίδας

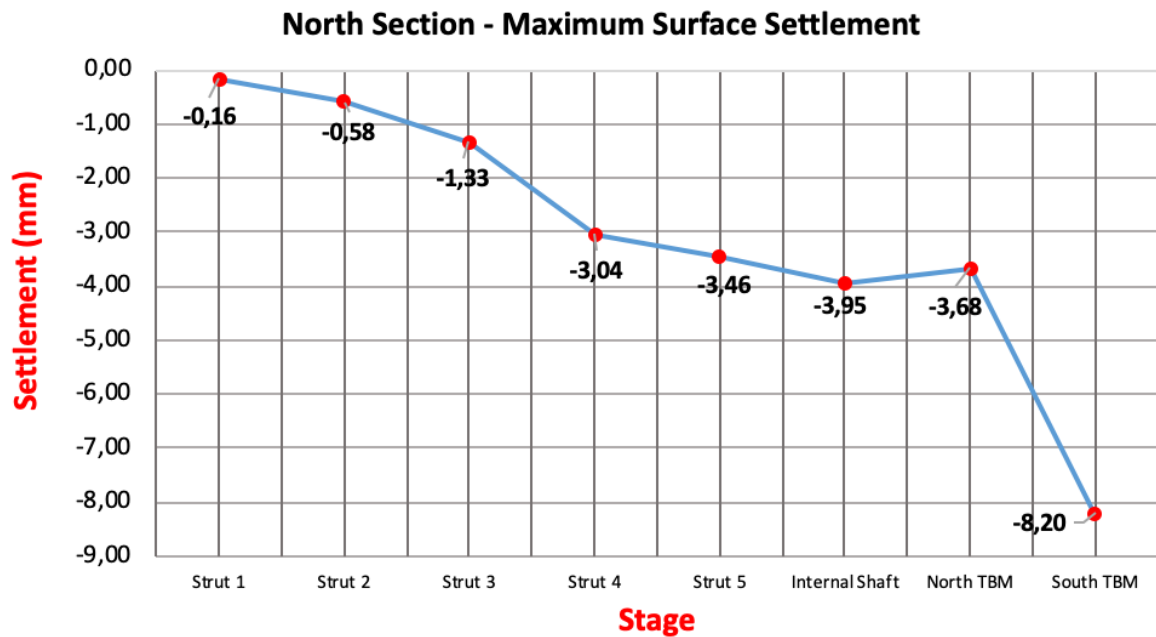
Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των βασικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων της συγκεκριμένης ανάλυσης.

Στην αριθμητική ανάλυση του φρέατος εξαερισμού και των σηράγγων TBM, γίνεται καταγραφή :

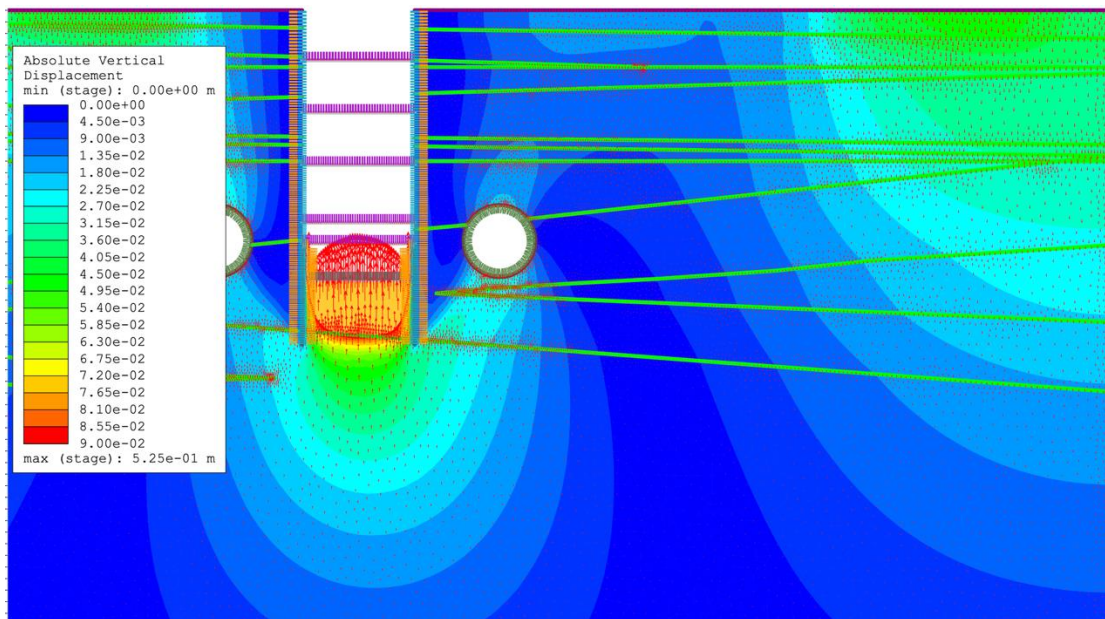
- ☞ Κατακόρυφων μετακινήσεων επιφανείας - καθιζήσεις (Surface Settlements)
- ☞ Μετακινήσεις και αξονικές δυνάμεις στους πασσαλότοιχους του φρέατος αερισμού
- ☞ Εντατικά μεγέθη αντηρίδων, αξονικές δυνάμεις (Axial Forces) και καμπτικές ροπές (Bending Moments)

5.1.1 Κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας-καθιζήσεις

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρατίθενται οι επιφανειακές καθιζήσεις που θα προκληθούν λόγω της διάνοιξης του φρέατος αερισμού και των δίδυμων σηράγγων TBM εκατέρωθεν του φρέατος. Συγκεκριμένα στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέγιστης καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής η οποία προκαλείται από την διάνοιξη του φρέατος αερισμού και των σηράγγων TBM στο Βόρειο κομμάτι της επιφανείας.



Διάγραμμα 6: Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής, λόγω της εκσκαφής του φρέατος αερισμού και των σηράγγων TBM για την Βόρεια πλευρά της επιφανείας.

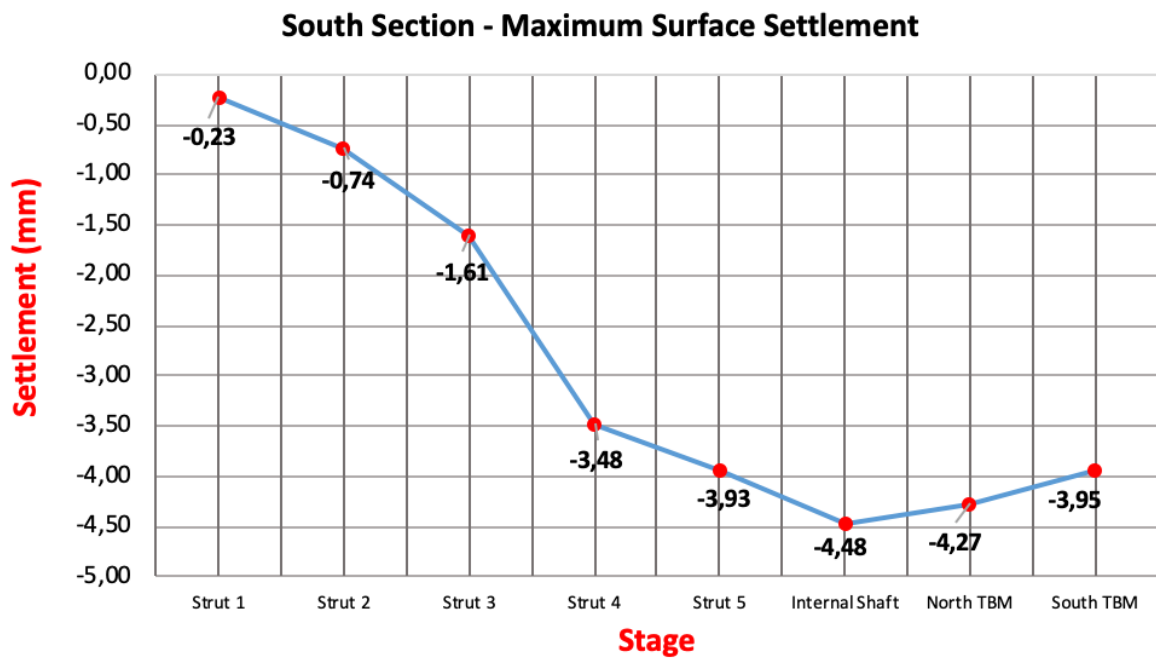


Εικόνα 47: Επιφανειακή καθίζηση στη Βόρεια πλευρά του φρέατος αερισμού, κατά την ολοκλήρωση της διάνοιξης των δύο σηράγγων TBM.

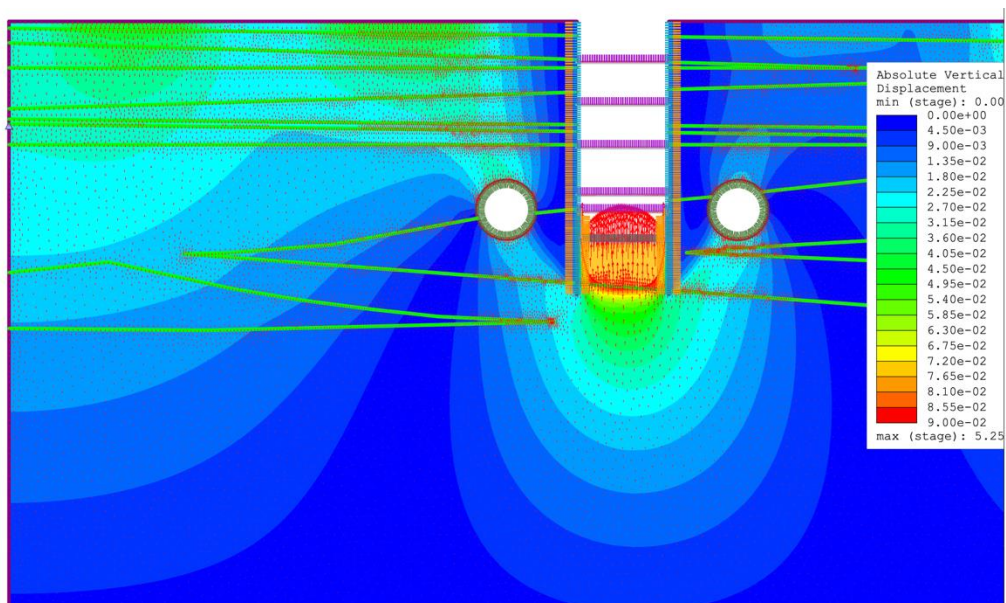
Με βάση το προηγούμενο Διάγραμμα 6 παρατηρείται ότι με την ολοκλήρωση κατασκευής του φρέατος αερισμού θα προκληθεί επιφανειακή καθίζηση της τάξης των 3,95mm, ενώ η συνολική καθίζηση μετά το πέρας κατασκευής και των σηράγγων TBM είναι της τάξης των 8,20mm. Η καθίζηση

αυτή συμβαίνει λόγω της αλλαγής των εδαφικών τάσεων κατά την εκσκαφή και την τάση των τοιχωμάτων να μετακινηθούν προς το εσωτερικό του φρέατος αερισμού.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το αντίστοιχο Διάγραμμα 7 για την Νότια πλευρά της επιφανείας. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται η μεταβολή της μέγιστης καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής η οποία προκαλείται από την διάνοιξη του φρέατος αερισμού και των σηράγγων TBM στο Νότιο κομμάτι της επιφανείας.



Διάγραμμα 7: Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής, λόγω της εκσκαφής του φρέατος αερισμού και των σηράγγων TBM για την Νότια πλευρά της επιφανείας.



Εικόνα 48: Επιφανειακή καθίζηση στη Νότια πλευρά του φρέατος αερισμού, κατά την ολοκλήρωση της διάνοιξης των δύο σηράγγων TBM.

Με βάση το Διάγραμμα 7 παρατηρείται ότι η μέγιστη καθίζηση που καταγράφεται κατά την ολοκλήρωση κατασκευής του φρέατος αερισμού, είναι της τάξης των 4,48mm. Ενώ κατά την διάνοιξη των σηράγγων TBM παρατηρείται μια μικρή ανίζηση της τάξης των 0,54mm.

Παρατηρείται ότι η Βόρεια πλευρά της επιφανείας λαμβάνει μεγαλύτερες καθιζήσεις σε σχέση με την Νότια. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική στρωματογραφία που υπάρχει εκατέρωθεν του φρέατος και επομένως στις διαφορετικές εδαφικές παραμέτρους.

Η μέγιστη καθίζηση η οποία καταγράφεται είναι της τάξης των 8.20mm και βάσει των ορίων της Αττικό Μετρό, όπως φαίνεται και στον Πίνακας 23, η καθίζηση αυτή είναι αποδεκτή για σήραγγες που διέρχονται είτε κάτω από άλλα κτίρια είτε από οδούς.

Πίνακας 23: Επιτρεπόμενα όρια καθιζήσεων και παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σηράγγων (Πηγή: Αττικό Μετρό)

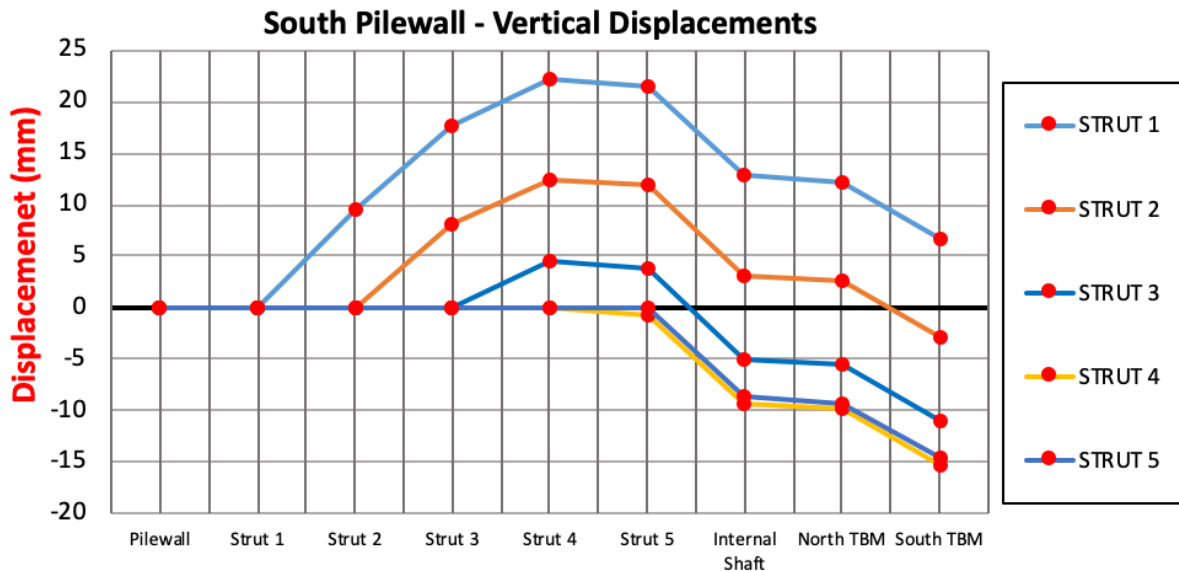
A/A	Μετακίνηση, παραμόρφωση, ρηγμάτωση κλπ.	Ευαίσθητο Κτίριο ή Κατασκευή	Άλλα Κτίρια	Οδοί, Πεζοδρόμια ή Δίκτυα Ο.Κ.Ω.
1	Συνολική καθίζηση (mm)	20	25	30
2	Γωνιακή παραμόρφωση	1:800	1:600	1:600
3	Ρυθμός συνολικής καθίζησης (mm/day)	3	3	4
4	Ρυθμός ανοίγματος ρωγμής (mm/day)	1	1	1
5	Οριζόντια παραμόρφωση (%)	0,15	0,25	0,30

5.1.2 Πασσαλότοιχοι φρέατος αερισμού

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει παρουσίαση των μετακινήσεων και των εντατικών μεγεθών που λαμβάνονται στις παρειές του φρέατος και πιο συγκεκριμένα στους πασσαλότοιχους του φρέατος εξαερισμού. Πιο συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν οι κατακόρυφες μετακινήσεις (Vertical Displacements) και οι αξονικές δυνάμεις (Axial Forces) στα σημεία του πασσαλότοιχου στα οποία εδράζονται οι αντηρίδες και για κάθε στάδιο κατασκευής.

5.1.2.1 Κατακόρυφες μετακινήσεις πασσαλότοιχων

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει παρουσίαση των κατακόρυφων μετακινήσεων (Vertical Displacements) που πραγματοποιήθηκαν στους πασσαλότοιχους του φρέατος κατά την εκσκαφή και τοποθέτηση των αντηρίδων και κατά την διάνοιξη των σηράγγων TBM. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις που αφορούν τον νότιο πασσαλότοιχο του φρέατος εξαερισμού.



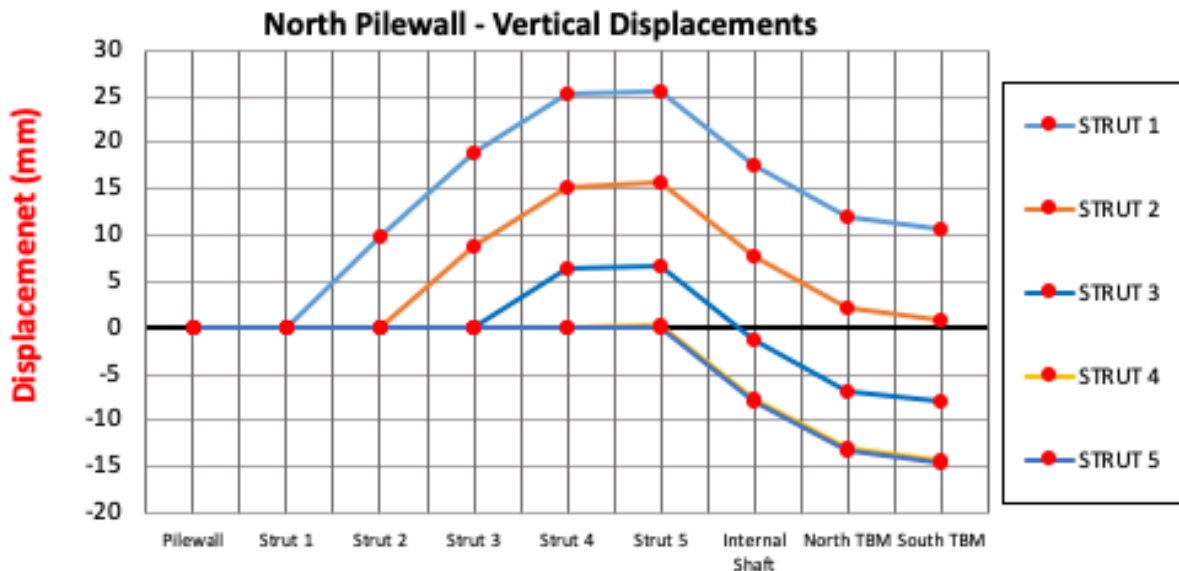
Stage

Διάγραμμα 8: Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων του Νότιου πασσαλότοιχου του φρέατος κατά την εκσκαφή και τοποθέτηση των αντηρίδων και την διάνοιξη των σηράγγων TBM.

Βάση του Διάγραμμα 8 παρατηρείται για τις πρώτες 3 αντηρίδες ότι κατά την τοποθέτησή τους ο πασσαλότοιχος λαμβάνει ανιζήσεις. Ενώ κατά την τοποθέτηση των αντηρίδων 4 και 5 καταγράφεται καθίζηση. Αυτό συμβαίνει λόγω των τοιχωμάτων του φρέατος που τείνουν να μετακινηθούν προς το εσωτερικό του και προκαλούν αυτή την μικρή ανιζήση στο ύψος του πασσαλότοιχου που εδράζονται οι πρώτες 3 αντηρίδες. Κατά τη διάνοιξη του φρέατος οι αντηρίδες που τοποθετούνται ασκούν πίεση ικανή ώστε να δημιουργήσει αυτή την μικρή ανιζήση και να αποτρέψει την σύγκλιση των τοιχωμάτων του φρέατος προς το εσωτερικό του. Επιπλέον παρατηρείται ότι κατά την εκσκαφή των σηράγγων TBM καταγράφεται καθίζηση του πασσαλότοιχου. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την διάνοιξη των σηράγγων TBM το έδαφος τείνει να συγκλείσει στο εσωτερικό της σήραγγας γεγονός που δημιουργεί μικρές καθιζήσεις στον πασσαλότοιχο. Οι καθιζήσεις που καταγράφονται για τον νότιο πασσαλότοιχο είναι πιο έντονες κατά την διάνοιξη της νότιας σήραγγας TBM, αυτό συμβαίνει λόγω της γειτνίασης

τους. Επομένως υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ της διάνοιξης των σηράγγων και του Νότιου πασσαλότοιχου.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα των κατακόρυφων μετακινήσεων (Vertical Displacements) για τον Βόρειο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού κατά την εκσκαφή και τοποθέτηση των αντηρίδων και την διάνοιξη των σηράγγων TBM.



Stage

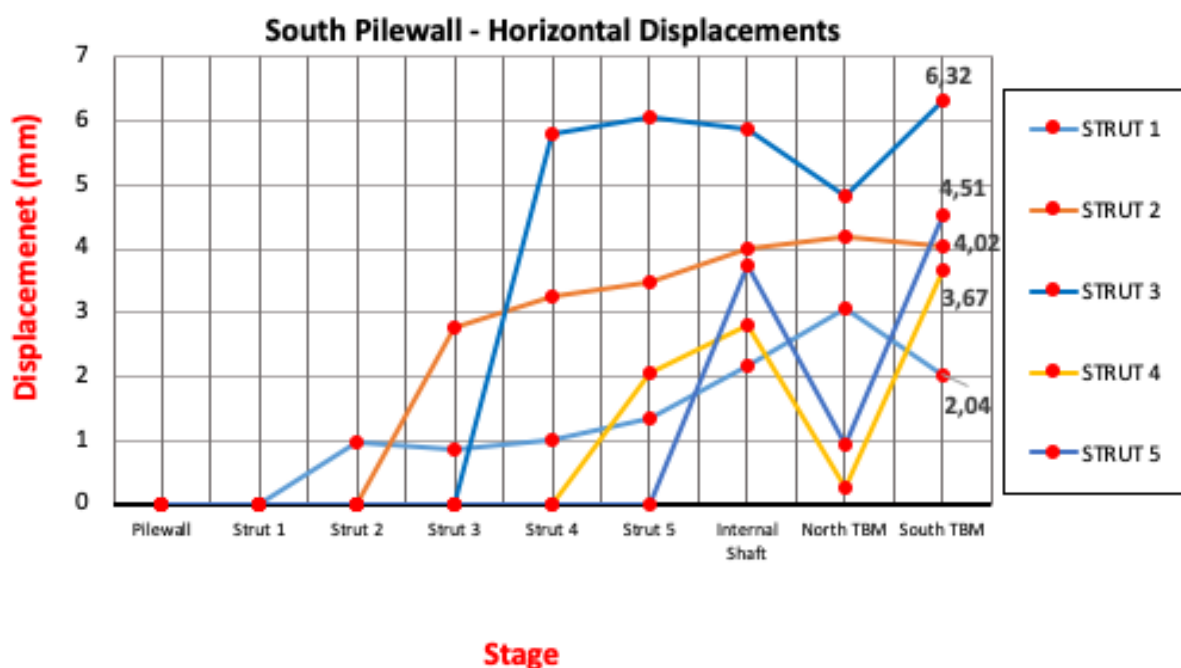
Διάγραμμα 9: Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων του Βόρειου πασσαλότοιχου του φρέατος κατά την εκσκαφή και τοποθέτηση των αντηρίδων και την διάνοιξη των σηράγγων TBM.

Βάση του Διάγραμμα 9 παρατηρείται για τις πρώτες 3 αντηρίδες ότι κατά την τοποθέτησή τους ο πασσαλότοιχος λαμβάνει ανιζήσεις. Ενώ κατά την τοποθέτηση των αντηρίδων 4 και 5 καταγράφεται καθίζηση. Αυτό συμβαίνει λόγω των τοιχωμάτων του φρέατος που τείνουν να μετακινηθούν προς το εσωτερικό του και προκαλούν αυτή την μικρή ανιζήση στο ύψος του πασσαλότοιχου που εδράζονται οι πρώτες 3 αντηρίδες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι κατά τη διάνοιξη του φρέατος οι αντηρίδες που τοποθετούνται ασκούν πίεση ικανή ώστε να δημιουργήσει αυτή την μικρή ανιζήση και να αποτρέψει την σύγκλιση των τοιχωμάτων του φρέατος προς το εσωτερικό του. Επιπλέον παρατηρείται ότι κατά την εκσκαφή των σηράγγων TBM καταγράφεται καθίζηση του πασσαλότοιχου. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την διάνοιξη των σηράγγων TBM το έδαφος τείνει να συγκλείσει στο εσωτερικό της σήραγγας γεγονός που δημιουργεί μικρές καθιζήσεις στον πασσαλότοιχο. Οι καθιζήσεις που καταγράφονται για τον Βόρειο πασσαλότοιχο είναι πιο έντονες κατά την διάνοιξη της

Βόρειας σήραγγας TBM, αυτό συμβαίνει λόγω της γειννίας τους. Επομένως υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ της διάνοιξης των σηράγγων και του Βόρειου πασσαλότοιχου.

5.1.2.2 Οριζόντιες μετακινήσεις πασσαλότοιχων

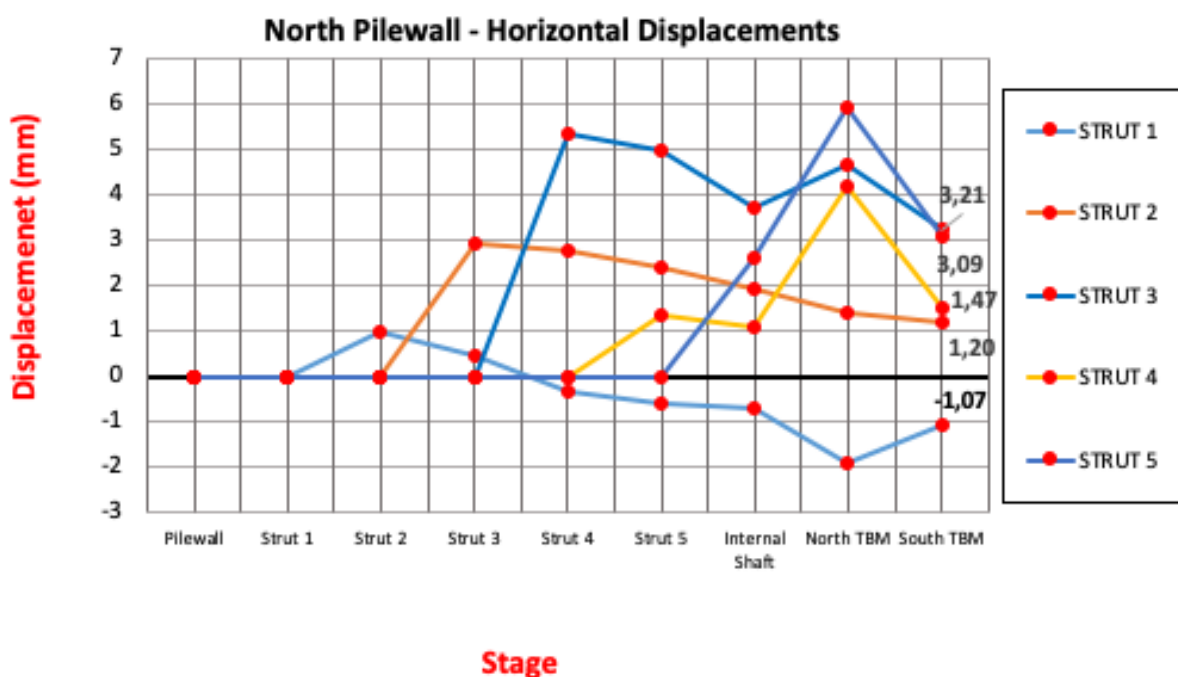
Στα διαγράμματα παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που καταγράφονται στους πασσαλότοιχους του φρέατος εξαερισμού. Τα σημεία στα οποία έγινε η καταγραφή των μετακινήσεων είναι τα σημεία που εδράζονται οι αντηρίδες στον πασσαλότοιχο για την κατασκευή του φρέατος. Το διάγραμμα αφορά τις οριζόντιες μετακινήσεις στον Νότιο πασσαλότοιχο ενώ το διάγραμμα αφορά τις οριζόντιες μετακινήσεις στο Βόρειο πασσαλότοιχο.



Διάγραμμα 10: Μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον Νότιο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού.

Στο Διάγραμμα 10 καταγράφονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που καταγράφονται στον Νότιο πασσαλότοιχο στα σημεία έδρασης των αντηρίδων. Στο 1^ο σημείο της 1^{ης} αντηρίδας παρατηρείται αρχικά μια αύξηση των οριζόντιων μετακινήσεων έως και την διάνοιξη της πρώτης σήραγγας TBM. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την διάνοιξη του φρέατος τα πλευρικά τοιχώματα τείνουν να μετακινηθούν προς το εσωτερικό του γεγονός που αυξάνει τις οριζόντιες μετακινήσεις. Κατά τα στάδια διανοίξεις των σηράγγων TBM το έδαφος τείνει προς το εσωτερικό των σηράγγων και αρά τα πασσαλότοιχοι του φρέατος τείνουν να μετακινηθούν προς την εξωτερική του κατεύθυνση γεγονός

συντελεί στη μείωση των οριζόντιων μετακινήσεων στα στάδια αυτά. Οι μέγιστες τιμές που καταγράφονται είναι 2.04mm στο σημείο της 1^{ης} αντηρίδας, 4.02mm στο σημείο της 2^{ης} αντηρίδας, 6.32mm στο σημείο της 3^{ης} αντηρίδας, 3.67mm στο σημείο της 4^{ης} αντηρίδας, 4.51mm στο σημείο της 5^{ης} αντηρίδας. Παρατηρείται λοιπόν ότι τις μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις της λαμβάνει ο πασσαλότοιχος στο ύψος της 3^{ης} αντηρίδας, αυτό συμβαίνει διότι σε αυτή τη στάθμη βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας και έτσι ασκούνται υδροστατικές πιέσεις στον πασσαλότοιχο. Επιπλέον παρατηρείται ότι στα στάδια διάνοιξης της Νότιας σήραγγας που γειτνιάζει με τον πασσαλότοιχο καταγράφονται μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ του φρέατος και της διάνοιξης της σήραγγας TBM.

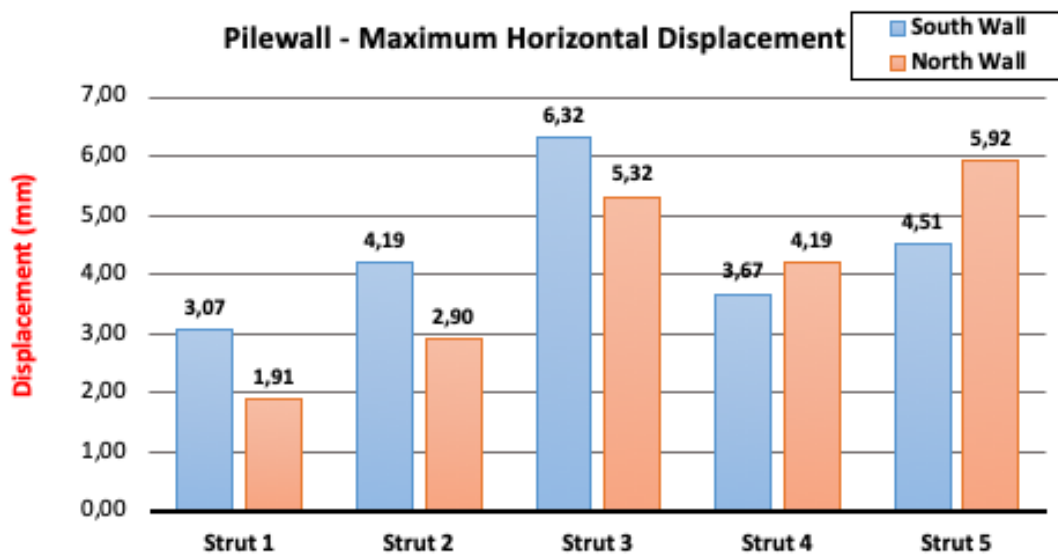


Διάγραμμα 11: Μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον Βόρειο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού.

Στο Διάγραμμα 11 καταγράφονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που καταγράφονται στον Βόρειο πασσαλότοιχο στα σημεία έδρασης των αντηρίδων. Παρατηρούνται και εδώ μεγάλες οριζόντιες μετακινήσεις στο ύψος της 3^{ης} σειράς αντηρίδων το οποίο, όπως προαναφέρθηκε, οφείλεται στις υδροστατικές πιέσεις που αρχίζει να δέχεται σε εκείνο το ύψος ο πασσαλότοιχος. Επιπλέον παρατηρείται ότι το σημείο της 5^{ης} σειράς αντηρίδων, το οποίο βρίσκεται και στο μεγαλύτερο βάθος, λαμβάνει τις μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις οι οποίες φτάνουν περί τα 6mm στο στάδιο διάνοιξης της Βόρειας σήραγγας TBM, ενώ στο τελικό στάδιο μειώνονται στα 3.09mm. Επιπλέον παρατηρείται

ότι στα στάδια διάνοιξης των σηράγγων που γειτνιάζουν με τον πασσαλότοιχο, δηλαδή την Βόρεια σήραγγα TBM, καταγράφονται μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ του φρέατος και της διάνοιξης των σηράγγων περίξ αυτού.

Για την καλύτερη σύγκριση των τιμών των οριζόντιων μετακινήσεων που λήφθηκαν σε κάθε θέση του κάθε πασσαλότοιχου, παρουσιάζεται παρακάτω το Διάγραμμα 12 το οποίο παρουσιάζει συγκριτικά τις μέγιστες τιμές που ελήφθησαν σε κάθε σημείο στον κάθε πασσαλότοιχο.

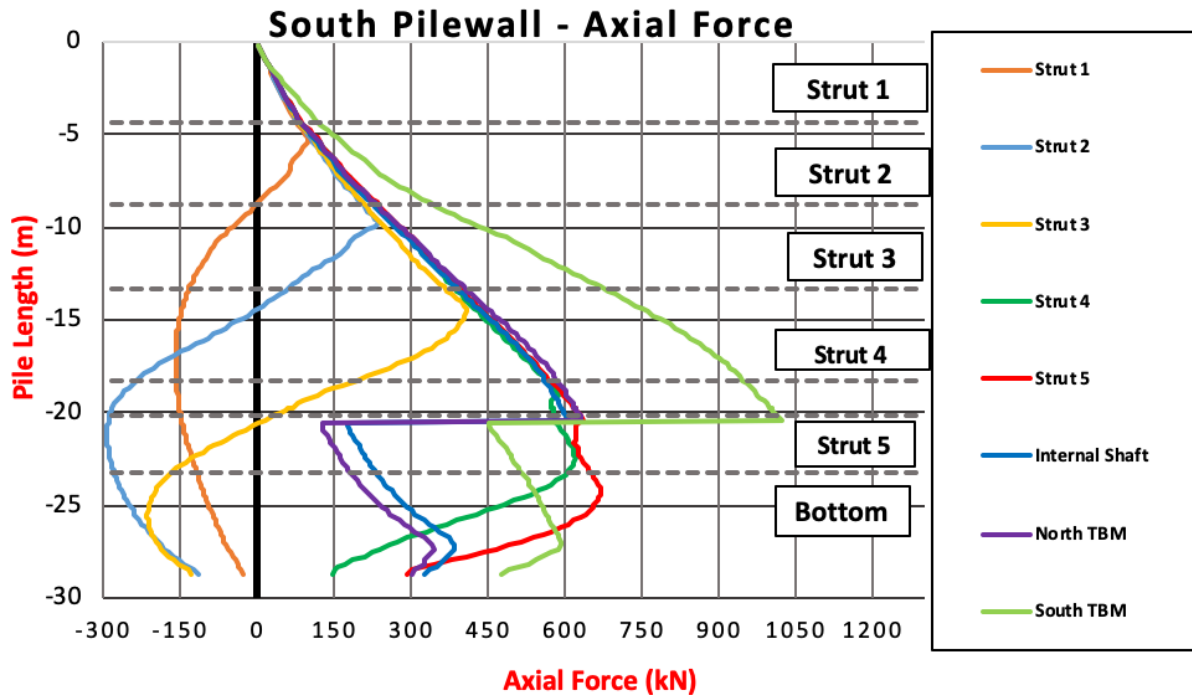


Διάγραμμα 12: Μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις για κάθε σημείο του πασσαλότοιχου σε κάθε έναν από τους πασσαλότοιχους.

Στο Διάγραμμα 12 παρατηρείται ότι στα σημεία των τριών πρώτων σειρών αντηρίδων, μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις λαμβάνονται στον Νότιο πασσαλότοιχο. Αυτό οφείλεται σε ασθενή εδαφικά χαρακτηριστικά σε αυτή την πλευρά του φρέατος αερισμού.

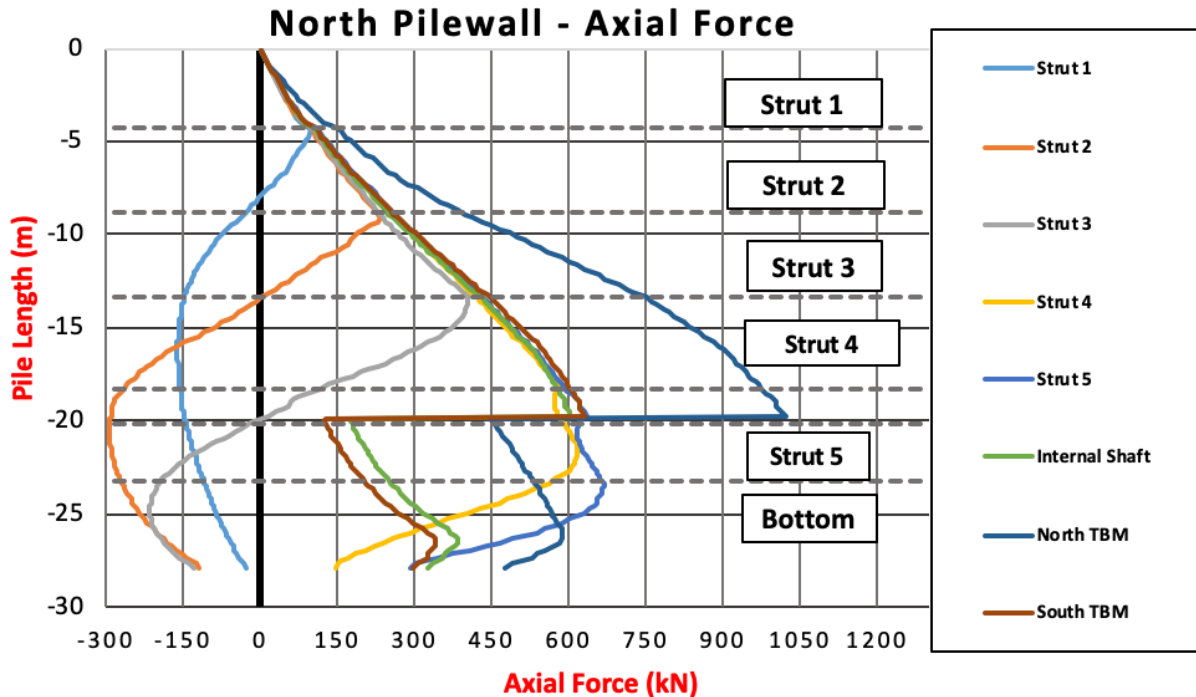
5.1.2.3 Αξονικές Δυνάμεις Πασσαλότοιχων

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει παρουσίαση και ανάλυση των διαγραμμάτων των αξονικών δυνάμεων (Axial Forces) που ασκήθηκαν στους πασσαλότοιχους του φρέατος εξαερισμού. Πιο συγκεκριμένα στα διαγράμματα παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις που καταγράφηκαν κατά μήκος του πασσάλου για κάθε στάδιο κατασκευής για τον Βόρειο και τον Νότιο πασσαλότοιχο.



Διάγραμμα 13: Αξονικές δυνάμεις κατά το μήκος του Νότιου πασσαλότοιχου για κάθε στάδιο κατασκευής.

Με βάση το Διάγραμμα 13 παρατηρείται, κατά την εφαρμογή της 1^{ης} σειράς αντηρίδων, θλίψη στο σημείο εφαρμογής της. Αυτό συμβαίνει διότι τα τοιχώματα του φρέατος τείνουν να μετακινηθούν προς το εσωτερικό του με αποτέλεσμα να ασκούνται θλιπτικές αξονικές δυνάμεις και στον πασσαλότοιχο. Το ίδιο παρατηρείται και κατά την εφαρμογή της 2^{ης} σειράς αντηρίδων. Στην εφαρμογή της 3^{ης} σειράς αντηρίδων η θλίψη η οποία προκαλείται είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τις προηγούμενες και αυτό οφείλεται στο ότι στο ίδιο βάθος βρίσκεται και ο υδροφόρος ορίζοντας και ασκούνται ταυτόχρονα και υδροστατικές πιέσεις. Κατά την διάνοιξη της Βόρειας σήραγγας TBM παρατηρείται θλιπτικό φορτίο στον πασσαλότοιχο στο υψόμετρο που βρίσκεται και η σήραγγα ενώ κατά την διάνοιξη της Νότιας σήραγγας TBM καταγράφονται μεγάλες θλιπτικές αξονικές δυνάμεις και αυτό οφείλεται στη γειννίαση της σήραγγας με τον πασσαλότοιχο, με αποτέλεσμα να του ασκεί μεγάλα φορτία. Ουσιαστικά πρόκειται για αλληλεπίδραση της σήραγγας TBM με το φρέαρ και αυτό καταγράφεται με την αύξηση των αξονικών δυνάμεων στον πασσαλότοιχο. Επίσης παρατηρείται ότι με την αύξηση του βάθους του φρέατος, υπάρχει σημαντική αύξηση στις αξονικές δυνάμεις επί του πασσαλότοιχου, καθώς οι εδαφικές ωθήσεις που δέχεται ο τοίχος είναι μεγαλύτερες και αφετέρου μετά την κατασκευή της 3^{ης} αντηρίδας, η παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα ασκεί σημαντικές ωθήσεις ως υδροστατική πίεση επί του πασσαλότοιχου.



Διάγραμμα 14: Αξονικές δυνάμεις κατά το μήκος του Βόρειου πασσαλότοιχου για κάθε στάδιο κατασκευής.

Βάση του Διάγραμμα 14 παρατηρείται θλίψη κατά την εφαρμογή των αντηρίδων στα σημεία έδρασης τους στον πασσαλότοιχο. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι κατά την εκσκαφή του φρέατος τα τοιχώματα του τείνουν να μετακινηθούν προς το εσωτερικό του γενοδός που ασκεί θλιπτικές αξονικές δυνάμεις στον πασσαλότοιχο. Στην 3^η σειρά αντηρίδων καταγράφεται μεγαλύτερη θλιπτική αξονική δύναμη διότι σε εκείνο το υψόμετρο βρίσκεται και ο υδροφόρος ορίζοντας και επομένως ασκούνται ταυτόχρονα και υδροστατικές πιέσεις. Τέλος κατά την διάνοιξη των σήραγγων TBM ασκούνται θλιπτικές αξονικές δυνάμεις στον πασσαλότοιχο και μεγαλύτερες θλιπτικές αξονικές δυνάμεις ασκούνται κατά τη διάνοιξη της Βόρειας σήραγγας. Αυτό οφείλεται στη γειτνίαση της σήραγγας με τον πασσαλότοιχο με αποτέλεσμα να του ασκεί μεγάλα φορτία. Δηλαδή υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ της Βόρειας σήραγγας TBM και του Βόρειου πασσαλότοιχου και αυτό καταγράφεται με την αύξηση των αξονικών δυνάμεων. Επιπλέον παρατηρείται ότι με την αύξηση του βάθους του φρέατος υπάρχει σημαντική αύξηση στις αξονικές δυνάμεις επί του πασσαλότοιχου καθώς οι εδαφικές ωθήσεις που δέχεται ο τοίχος είναι μεγαλύτερες και αφετέρου μετά την κατασκευή της 3^{ης} αντηρίδας, η παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα ασκεί σημαντικές ωθήσεις ως υδροστατική πίεση επί του πασσαλότοιχου.

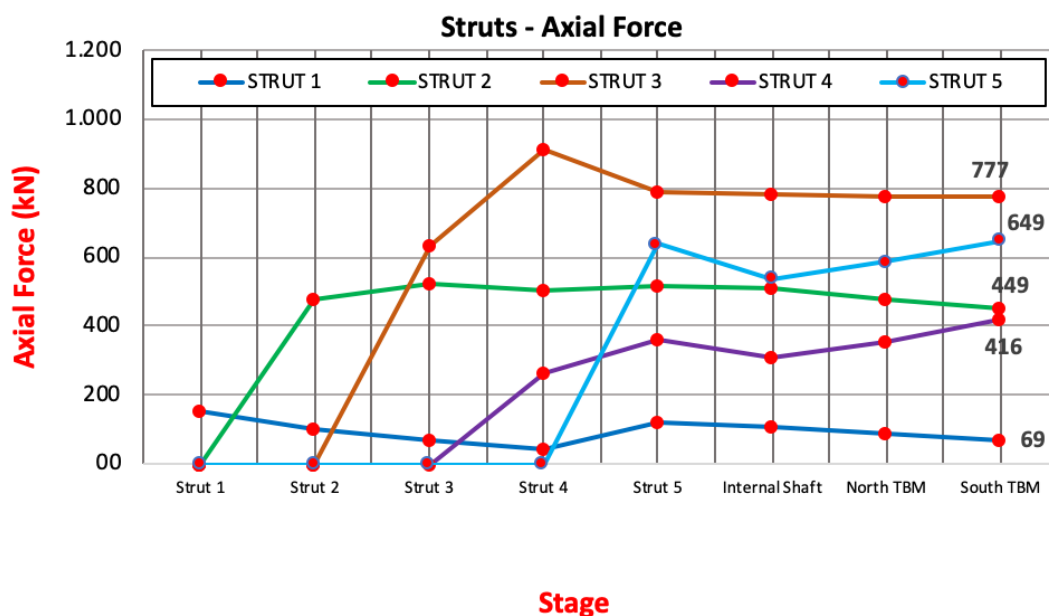
5.1.3 Εντατικά μεγέθη αντηρίδων του φρέατος αερισμού

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει αναλυτική παρουσίαση των εντατικών μεγεθών των αντηρίδων του φρέατος αερισμού. Αρχικά θα γίνει παρουσίαση των αξονικών δυνάμεων και η μεταβολή των αξονικών δυνάμεων που δέχονται οι αντηρίδες από τη στιγμή ενεργοποίησής τους έως και το τέλος της κατασκευής. Επιπλέον έχει υπολογιστεί το ποσοστό λειτουργίας των αντηρίδων (working level). Έπειτα θα παρουσιαστούν οι καμπτικές ροπές και η μεταβολή τους και οι οποίες παραλαμβάνονται από τις αντηρίδες και θα αναλυθεί η επίδραση που έχουν σε αυτές

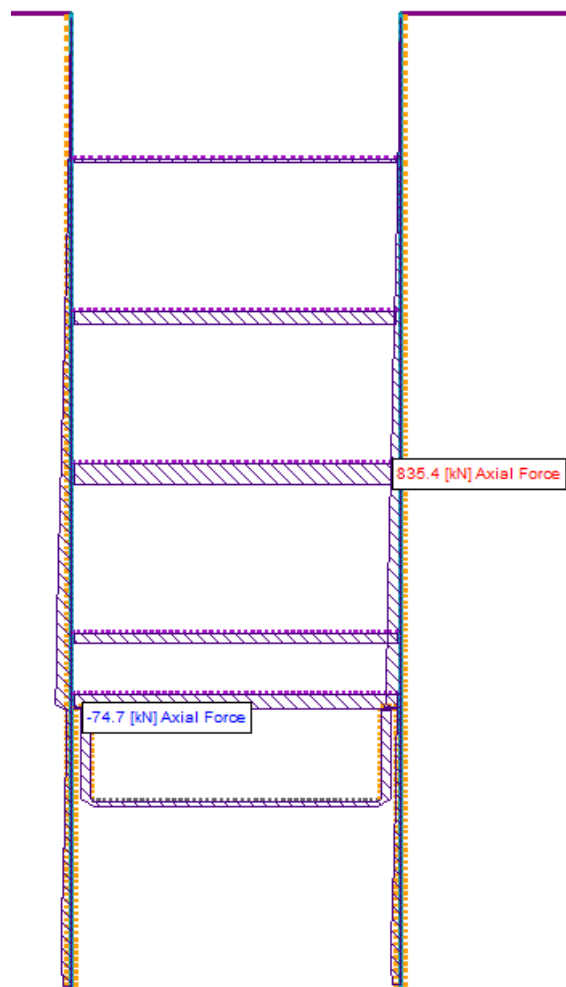
5.1.3.1 Αξονική Δύναμη των αντηρίδων του φρέατος αερισμού

Σε αυτή την ενότητα γίνεται παρουσίαση των αξονικών δυνάμεων οι οποίες παρελήφθησαν από τις αντηρίδες του φρέατος εξαερισμού σε κάθε στάδιο κατασκευής.

Στο Διάγραμμα 15 παρουσιάζεται η μέγιστη αξονική δύναμη των αντηρίδων σε κάθε στάδιο κατασκευής. Να σημειωθεί ότι το φορτίο μετριέται στο αμέσως επόμενο βήμα από την εγκατάσταση κάθε αντηρίδας. Αυτό συμβαίνει διότι όταν εγκαθίσταται μια αντηρίδα αρχικά είναι αφόρτιστη και η φόρτιση της ξεκινά στο αμέσως επόμενο στάδιο.



Διάγραμμα 15: Μεταβολή των μέγιστων αξονικών δυνάμεων σε κάθε στάδιο κατασκευής για κάθε αντηρίδα του φρέατος εξαερισμού.

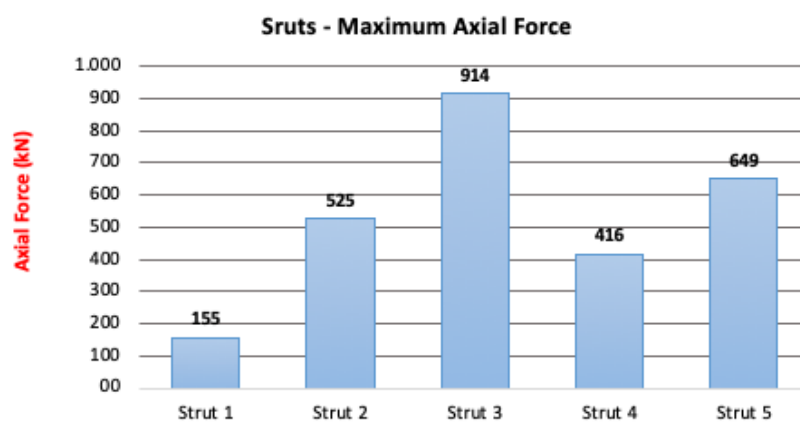


Εικόνα 49: Αξονικές δυνάμεις στις αντηρίδες και στους πασσαλότοιχους του φρέατος αερισμού κατά το τελικό στάδιο κατασκευής τους.

Στο Διάγραμμα 15 παρουσιάζεται η μεταβολή των μέγιστων αξονικών δυνάμεων για κάθε αντηρίδα του φρέατος αερισμού σε κάθε στάδιο κατασκευής. Για την 1^η αντηρίδα παρατηρείται ότι οι αξονικές δυνάμεις οι οποίες δέχεται δεν αυξάνονται ιδιαίτερα απεναντίας από την τοποθέτηση της 2^{ης} σειράς αντηρίδων καταγράφεται μια μικρή μείωση των αξονικών δυνάμεων και κατά την εφαρμογή της 5^{ης} σειράς αντηρίδων ξανά καταγράφεται μια μικρή αύξηση των αξονικών δυνάμεων. Η αξονική δύναμη η οποία δέχεται στο τελευταίο στάδιο της κατασκευής είναι της τάξης των 69kN. Η 2^η σειρά αντηρίδων φορτίζεται σχεδόν σταθερά όσον αφορά τις αξονικές δυνάμεις οι οποίες της ασκούνται και στο τελευταίο στάδιο η αξονική δύναμη που της ασκείται είναι της τάξης των 449kN. Η 3^η σειρά αντηρίδων είναι αυτή που φαίνεται να παραλαμβάνει τις μέγιστες αξονικές δυνάμεις και αυτό είναι αναμενόμενο διότι σε εκείνο το υψόμετρο του φρέατος βρίσκεται και ο υδροφόρος ορίζοντας, γεγονός που συμβάλει στην αύξηση των αξονικών δυνάμεων που δέχεται η σειρά αντηρίδων λόγω και της υδροστατικής πίεσης που δέχεται. Η 4^η σειρά αντηρίδων δέχεται αξονική δύναμη της τάξης των 416kN στο τελευταίο στάδιο της κατασκευής, η οποία αξονική δύναμη είναι ταυτόχρονα και η

μέγιστη που της ασκείται. Τέλος η 5^η σειρά αντηρίδων παρουσιάζει καταγράφει μεγάλες αξονικές δυνάμεις σε σχέση με τις υπόλοιπες και στο τελευταίο στάδιο η τιμή της είναι της τάξης των 649kN. Επιπρόσθετα με βάση το προηγούμενο διάγραμμα, παρατηρείται η σημαντική επιρροή της διάνοιξης των σηράγγων TBM στο φρέαρ, καθώς η 4^η και η 5^η αντηρίδα που βρίσκονται περί την στάθμη των σηράγγων TBM, κατά τη διάνοιξη αυτών των δύο σηράγγων παρουσιάζουν αύξηση της αξονικής τους δύναμης, αποτέλεσμα της επίδρασης που έχει η διάνοιξη των σηράγγων TBM στο φρέαρ.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το Διάγραμμα 16 που καταγράφει τις μέγιστες τιμές αξονικών δυνάμεων που δέχτηκαν οι αντηρίδες του φρέατος αερισμού κατά την κατασκευή του.



Διάγραμμα 16: Μέγιστες αξονικές δυνάμεις που ασκήθηκαν στις αντηρίδες του φρέατος αερισμού κατά την κατασκευή του φρέατος και των σηράγγων TBM.

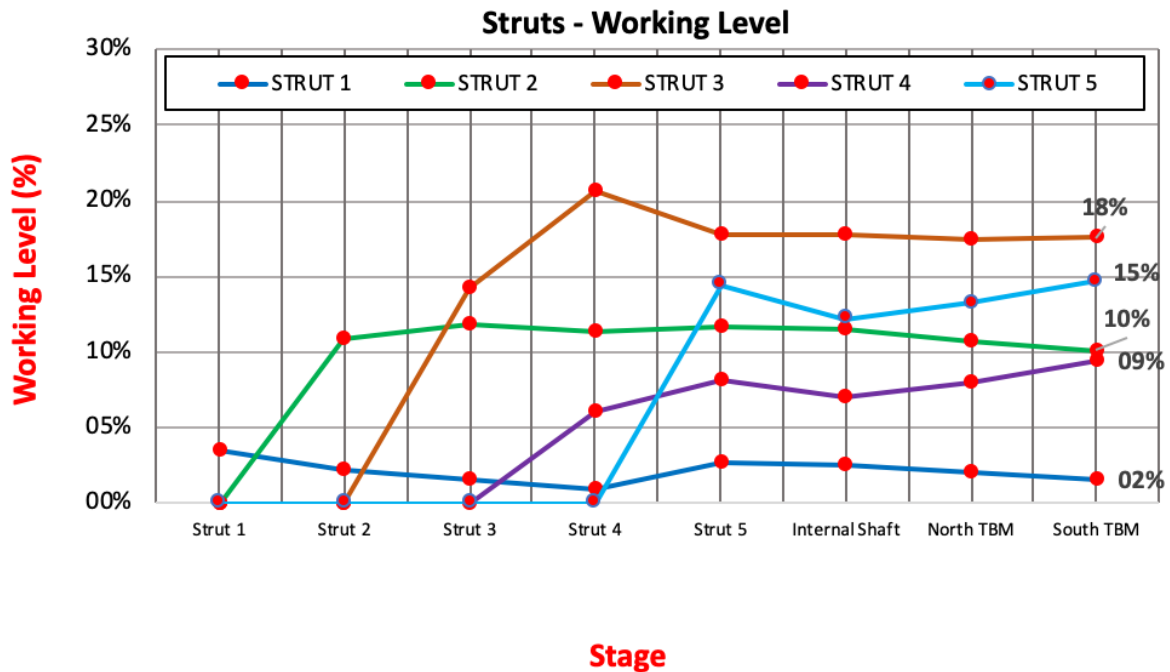
Με βάση το Διάγραμμα 16 παρατηρείται ότι η 3^η σειρά αντηρίδων είναι αυτή η οποία καταπονήθηκε περισσότερο. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως σε εκείνο το υψόμετρο του φρέατος αερισμού βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας γεγονός που συμβάλει σε αυτές τις μεγάλες φορτίσεις. Πιο συγκεκριμένα λόγω του υδροφόρου ορίζοντα σε εκείνο το σημείο ασκούνται υδροστατικές πιέσεις στην 3^η σειρά αντηρίδων και σε συνδυασμό και με τις δυνάμεις που ασκούν τα τοιχώματα του φρέατος καταγράφεται αξονική δύναμη της τάξης των 914kN. Επιπλέον παρατηρείται ότι τη μικρότερη αξονική δύναμη την δέχεται η 1^η σειρά αντηρίδων και αυτό διότι βρίσκεται σε πολύ μικρό βάθος και δεν μπορεί να δεχτεί μεγάλες εδαφικές αξονικές δυνάμεις. Επιπλέον η 5^η σειρά αντηρίδων που βρίσκεται και στο μεγαλύτερο βάθος λαμβάνει μεγάλη αξονική δύναμη της τάξης των 649kN.

5.1.3.2 Ποσοστό Λειτουργίας των Αντηρίδων του φρέατος αερισμού

Για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού καταπόνησης των αντηρίδων από τις αξονικές δυνάμεις υπολογίστηκε το ποσοστό λειτουργίας τους. Πρακτικά το ποσοστό λειτουργίας κάθε αντηρίδας (working level), αποτελεί το κλάσμα του αξονικού φορτίου που καταγράφηκε σε κάθε αντηρίδα προς

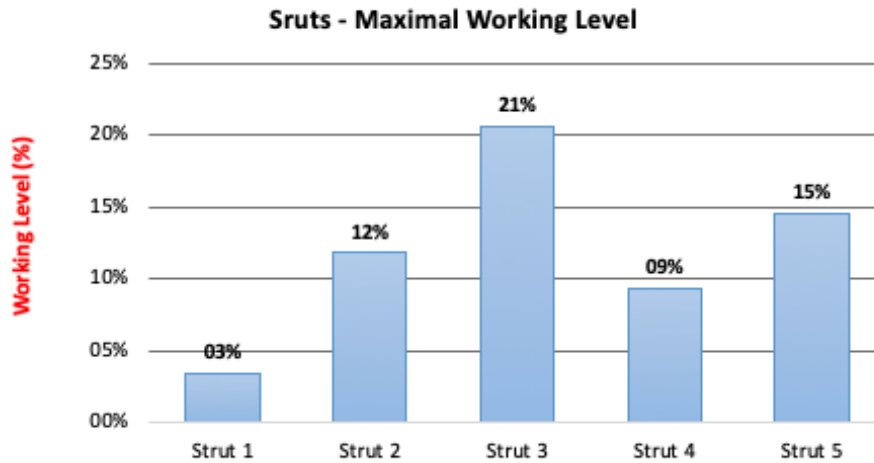
το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο χάλυβας χωρίς να διαρρεύσει, θεωρώντας χάλυβα με όριο διαρροής $\sigma_y = 275\text{MPa}$.

Στο Διάγραμμα 17 που παρουσιάζεται στη συνέχεια απεικονίζεται το μέγιστο ποσοστό καταπόνησης για κάθε αντηρίδα για κάθε στάδιο κατασκευής.



Διάγραμμα 17: Μέγιστη τιμή λειτουργίας για κάθε αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής.

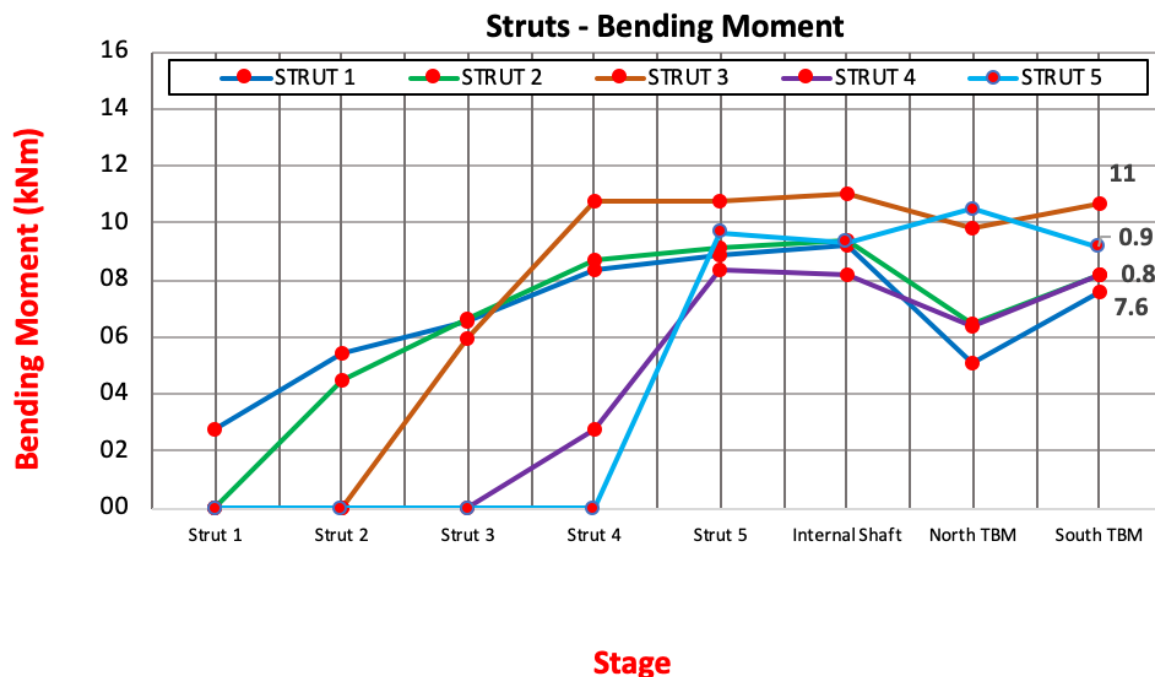
Το ποσοστό λειτουργίας (working level) σε κάθε αντηρίδα και ανά στάδιο κατασκευής, παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα. Όπως έχει προαναφερθεί, η 3^η αντηρίδα είναι αυτή που καταπονείται περισσότερο, καθώς βρίσκεται αφενός στην περιοχή της στάθμης του υδροφόρου οριζοντα και αφετέρου βρίσκεται σε περιοχή καθ' ύψος με ασθενή μηχανικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον παρατηρείται ότι οι αντηρίδες 4 και 5 κατά την διάνοιξη των σηράγγων TBM αυξάνουν το ποσοστό λειτουργίας τους. Αυτό συμβαίνει λόγω της αλληλεπίδρασης των σηράγγων TBM με το φρέαρ. Πιο συγκεκριμένα οι αντηρίδες 4 και 5 βρίσκονται στο υψόμετρο περί το οποίο γίνεται και η διάνοιξη των σηράγγων, γεγονός που τις επηρεάζει και αυξάνει το ποσοστό λειτουργίας τους. Το μέγιστο ποσοστό λειτουργίας κάθε αντηρίδας παρουσιάζεται στο παρακάτω Διάγραμμα 18.



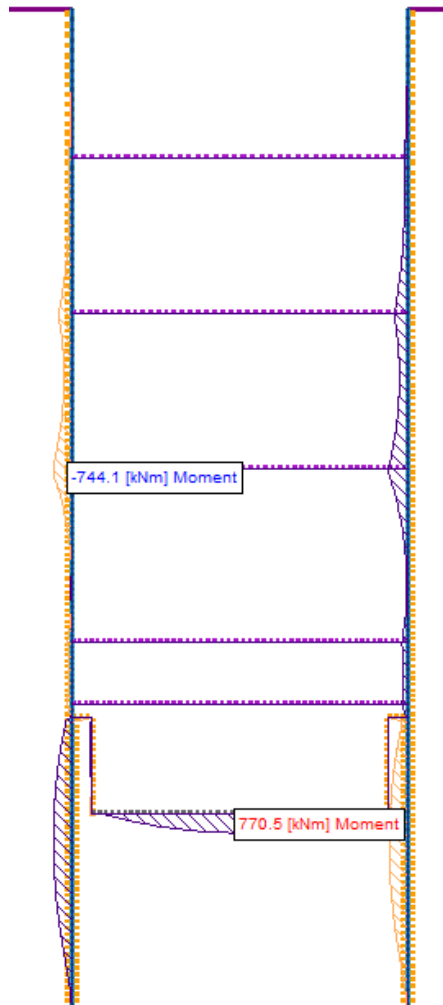
Διάγραμμα 18: Μέγιστες τιμές λειτουργίας για κάθε αντηρίδα.

5.1.3.3 Καμπτικές ροπές των αντηρίδων του φρέατος αερισμού

Στη συνέχεια θα γίνει ανάλυση και παρουσίαση των καμπτικών ροπών οι οποίες παρελήφθησαν από της αντηρίδες της κατασκευής από την στιγμή τοποθέτησης τους έως και την ολοκλήρωση των εκσκαφών των σηράγγων TBM. Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η μεταβολή των καμπτικών ροπών για κάθε αντηρίδα ανά φάση κατασκευής.



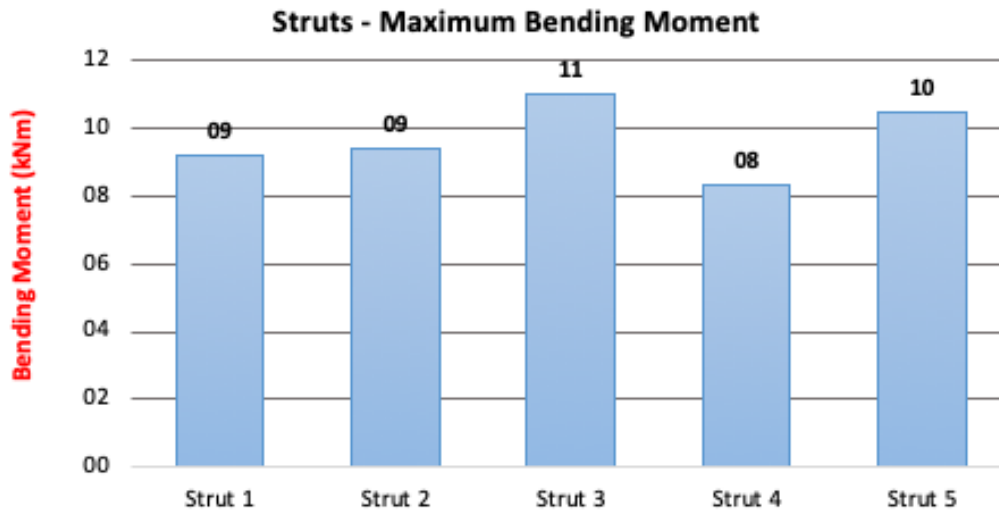
Διάγραμμα 19: Μεταβολή της καμπτικής ροπής για κάθε αντηρίδα ανά στάδιο κατασκευής.



Εικόνα 50: Καμπτικές ροπές των αντηρίδων και των πασσαλότοιχων του φρέατος αερισμού

Με βάση το Διάγραμμα 19 παρατηρείται η μεταβολή των καμπτικών ροπών για τις αντηρίδες του φρέατος αερισμού για κάθε στάδιο κατασκευής. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι κατά την κατασκευή του φρέατος οι καμπτικές ροπές που καταπονούν τις αντηρίδες κατά κύριο λόγο αυξάνονται ενώ κατά τη διάνοιξη των σηράγγων TBM οι καμπτικές ροπές αρχικά μειώνονται, κατά τη διάνοιξη της Νότιας σήραγγας, ενώ κατά τη διάνοιξη της Βόρειας σήραγγας ξανά παρατηρείται αύξηση των καμπτικών ροπών. Αυτή η μεταβολή στο μέγεθος των καμπτικών ροπών στα στάδια διάνοιξης των σηράγγων TBM, οφείλεται στο γεγονός ότι επειδή σκάβεται πρώτα η βόρεια σήραγγα, καταπονείται περισσότερο η βόρεια πλευρά του φρέατος και στη συνέχεια η νότια πλευρά του φρέατος από την αντίστοιχη σήραγγα TBM, που προκαλεί «στροφή» στις δύο κατώτερες αντηρίδες που γειτνιάζουν με τις σήραγγες TBM.

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η μέγιστη καμπτική ροπή ανά αντηρίδα, οι οποίες κυμαίνονται από 8 – 11kNm.



Διάγραμμα 20: Μέγιστη καμπτική ροπή για κάθε αντηρίδα.

5.1.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με στοιχεία μελέτης

Με βάση τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τη περίπτωση του φρέατος αερισμού και της διάνοιξης των σηράγγων TBM, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προβλέπονται στη μελέτη εφαρμογής του έργου.

Στον ακόλουθο πίνακα γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής με τα αντίστοιχα μεγέθη που προτείνει η μελέτη του έργου.

Πίνακας 24: Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής ανάλυσης για το φρέαρ αερισμού, με αποτελέσματα μελέτης έργου.

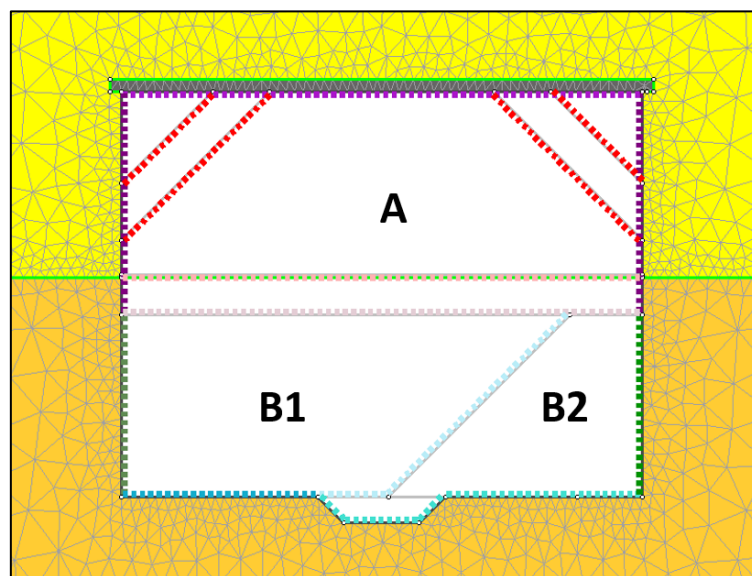
Μέγεθος	Φάση εκσκαφής φρέατος	Τιμή αριθμητικής ανάλυσης	Τιμές μελέτης	Διαφορά
Οριζόντιες μετακινήσεις πασσαλότοιχου	2 ^η αντηρίδα	4.19mm	9mm	-53.55%
	3 ^η αντηρίδα	6.32mm	10mm	-36.8%
	5 ^η αντηρίδα	5.92mm	14mm	-57.78%
Συνολική κατακόρυφη μετακίνηση επιφανείας	Τελικό στάδιο κατασκευής	8.20mm	29mm	-71.72%
Μέση τιμή				-54.96 %

Με βάση τον προηγούμενο πίνακα, καταγράφεται μια μέση διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων της μελέτης του έργου, της τάξης του 50%. Η διαφορά αυτή πιθανώς οφείλεται στο διαφορετικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που έχει χρησιμοποιηθεί στη μελέτη του έργου, στις διαφορετικές παραδοχές ως προς τη μεθοδολογία ανάλυσης αλλά και παραμέτρων υποστήριξης και σίγουρα στις διαφορετικές γεωτεχνικές παραμέτρους του εδάφους, δεδομένου ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει γίνει εκ' του μηδενός γεωτεχνική αξιολόγηση και εκτίμηση εδαφικών παραμέτρων.

5.2 Διάνοιξη μόνο της σήραγγας τύπου NATM

Κατά την αριθμητική προσομοίωση της σήραγγας NATM, πραγματοποιήθηκε δισδιάστατη ανάλυση μόνο της εκσκαφής της σήραγγας τύπου NATM, με τη χρήση του ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης του εδάφους (λ), λόγω της χαλάρωσης του εδάφους από την προπορεία του μετώπου εκσκαφής.

Συγκεκριμένα για την ανάλυση αυτή, όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη εικόνα, θεωρείτε οριζόντια η στρωματογραφία μεταξύ της κάθε τεχνικογεωλογικής ενότητας, με τα απόλυτα βάθη αυτών, να έχουν προκύψει από την διαμήκη γεωλογική τομή, κατά μήκος του φρέατος.



Εικόνα 51. Αριθμητικό προσομοίωμα σήραγγας τύπου NATM

Στην ανάλυση αυτή γίνεται προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας NATM, με σκοπό να προσδιοριστούν οι επιπρόσθετες επιφανειακές καθιζήσεις που θα επιφέρει η διάνοιξη των σηράγγων NATM, σε σχέση με αυτές που έχουν ήδη προκύψει λόγω της κατασκευής του φρέατος αλλά και των σηράγγων TBM.

Για να ληφθεί υπόψη η «χαλάρωση» που έχει προκληθεί στο περιβάλλον έδαφος του φρέατος που θα διανοιχθούν οι σήραγγες NATM λόγω της κατασκευής του φρέατος αλλά και των σηράγγων TBMs, γίνεται μια αρχική χαλάρωση του εδάφους μέσω της αποτόνωσης αυτού. Σκοπός της αποτόνωσης αυτής, είναι να προκληθούν οι ισοδύναμες επιφανειακές καθιζήσεις, που έχουν προκληθεί από την κατασκευή του φρέατος αλλά και των σηράγγων TBMs.

Η υποστήριξη της σήραγγας, περιλαμβάνει ένα περιμετρικό κέλυφος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $t = 34\text{cm}$ και μεταλλικά πλαίσια τύπου HEB 320 ανά 90cm , στην οροφή και τις παρειές της σήραγγας. Στο ενδιάμεσο και στο τελικό δάπεδο εκσκαφής καθώς και στο ενδιάμεσο τοίχωμα που θα δημιουργηθεί μεταξύ της Β1 και Β2 φάσης εκσκαφής, τοποθετείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $t = 20\text{cm}$. Επίσης στην περιοχή μεταξύ της άνω και κάτω ημιδιατομής της σήραγγας, τοποθετείται εγκάρσια μεταλλική αντηρίδα, τύπου HEB 200. Για την προστασία της οροφής από καταρρεύσεις, τοποθετείται ομπρέλα δοκών προπορείας.

Η αλληλουχία των σταδίων προσομοίωσης, έχει αναλυτικά περιγράψει στο Κεφάλαιο 4, και συνοπτικά είναι η ακόλουθη:

1. Αποτόνωση τάσεων για προσομοίωση της κατάστασης του εδάφους μετά τη κατασκευή του φρέατος και των δύο σηράγγων TBM
2. Κατασκευή ομπρέλας δοκών προπορείας
3. Εκσκαφή και υποστήριξη της Α' φάσης εκσκαφής της σήραγγας NATM
4. Εγκατάσταση της αντηρίδας HEB 200
5. Εκσκαφή και υποστήριξη της Β1' φάσης εκσκαφής της σήραγγας NATM
6. Εκσκαφή και υποστήριξη της Β2' φάσης εκσκαφής της σήραγγας NATM
7. Αφαίρεση της αντηρίδας HEB 200

Η τελική κατάσταση της σήραγγας NATM μετά την εφαρμογή των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, όπως κατασκευάστηκε, παρατίθεται στην ακόλουθη εικόνα, όπου διακρίνεται η εσωτερική αντηρίδα.



Εικόνα 52. Διατομή σήραγγας NATM, μετά την ολοκλήρωση της προσωρινής υποστήριξης. (Πηγή Άκτωρ ΑΕ)

Στη συνέχεια ακολουθεί η παράθεση των βασικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων της συγκεκριμένης ανάλυσης.

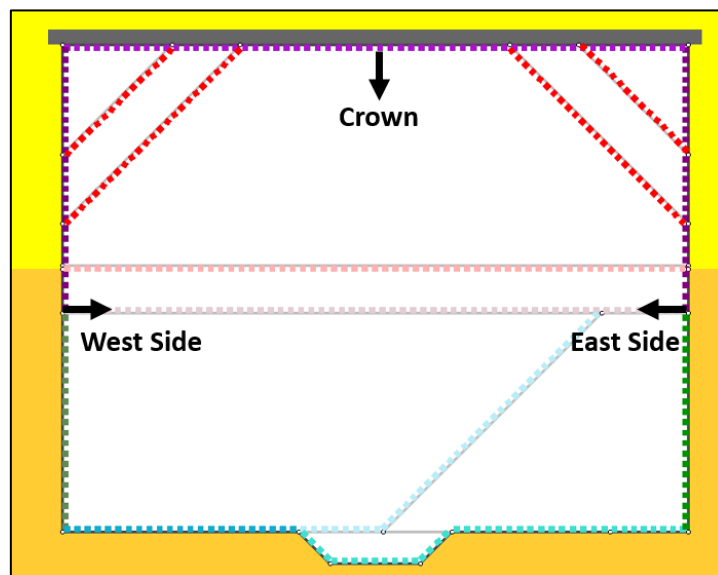
5.2.1 Αποτελέσματα Μετακινήσεων

Στην αριθμητική ανάλυση της εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας NATM, γίνεται καταγραφή:

- ⊗ Ολικών μετακινήσεων (Total displacements)
- ⊗ Κατακόρυφων μετακινήσεων (Vertical displacements)
- ⊗ Οριζόντιων μετακινήσεων (Horizontal displacements)
- ⊗ Κατακόρυφων μετακινήσεων επιφανείας - καθιζήσεις (Surface Settlements)

Στη συνέχεια γίνεται παράθεση σχετικών διαγραμμάτων και συμπερασμάτων, με βάση τις μετρούμενες μετακινήσεις. Να σημειωθεί ότι οι μετακινήσεις της επιφανείας – καθιζήσεις παρουσιάζονται τόσο ως συνολικές, λαμβάνοντας υπόψη την αρχική αποτόνωση των τάσεων που προσομοιώνει την επίδραση της εκσκαφής του φρέατος και των σηράγγων TBM, αλλά και τις σχετικές μετακινήσεις που προκαλεί μόνο η διάνοιξη της σήραγγας NATM, με στάδιο αναφοράς το στάδιο τοποθέτησης της ομπρέλας των δοκών προπορείας.

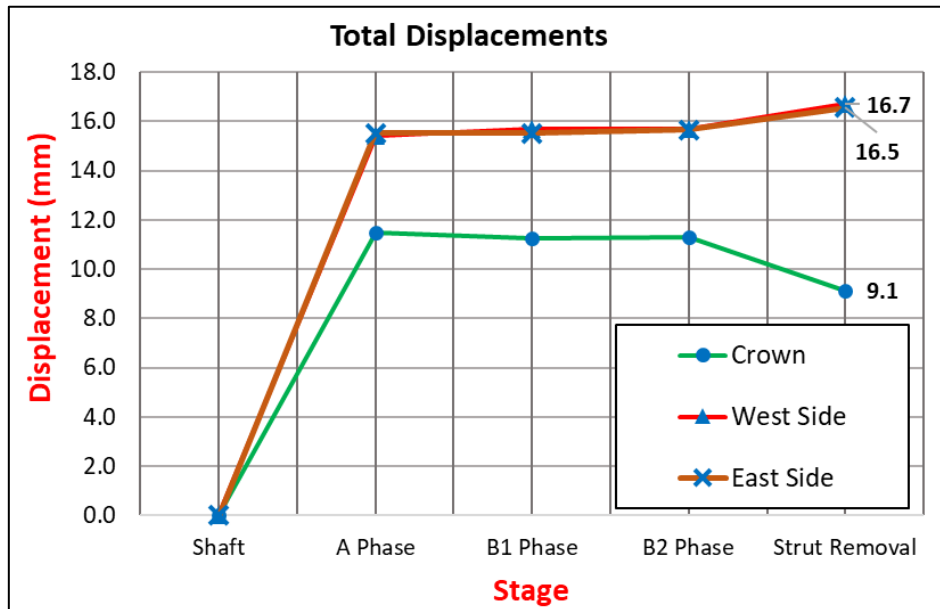
Οι θέσεις καταγραφής των μετακινήσεων στο εσωτερικό της σήραγγας, αφορούσαν την περιοχή της στέψης (crown) και των δύο παρειών μεταξύ άνω και κάτω ημιδιατομής (sides) και παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα.



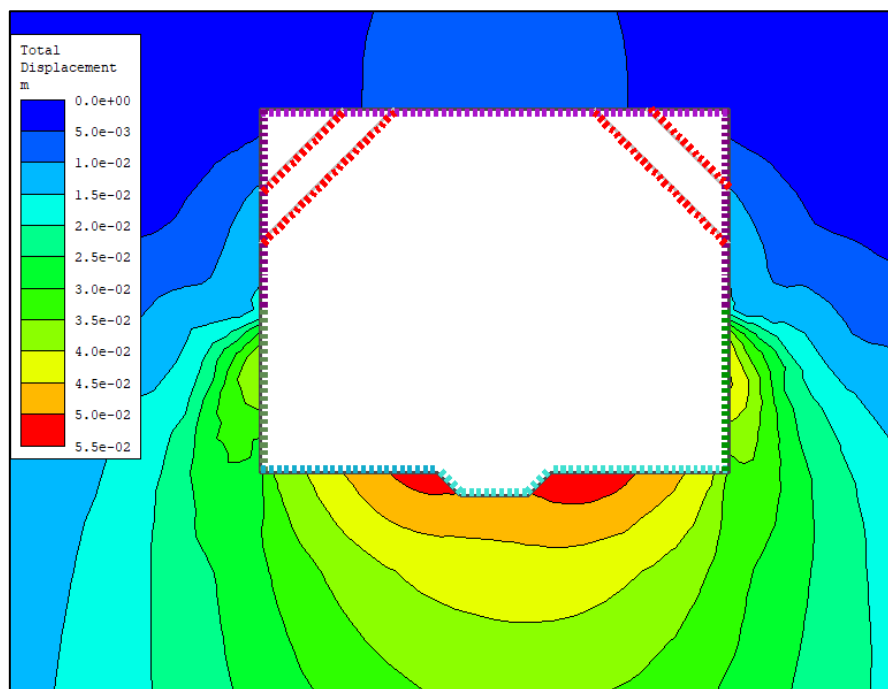
Εικόνα 53. Θέσεις καταγραφής μετακινήσεων στο εσωτερικό της σήραγγας NATM.

5.2.1.1 Ολικές μετακινήσεις σήραγγας

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρατίθενται οι ολικές μετακινήσεις (total displacements) που θα προκληθούν στο εσωτερικό της σήραγγας, ανά εξεταζόμενη θέση και ανά στάδιο κατασκευής. Αντίστοιχα στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται οι ολικές μετακινήσεις περίξ της υπόγειας εκσκαφής.



Διάγραμμα 21. Μεταβολή των ολικών μετακινήσεων στο εσωτερικό της σήραγγας NATM, ανά φάση κατασκευής.



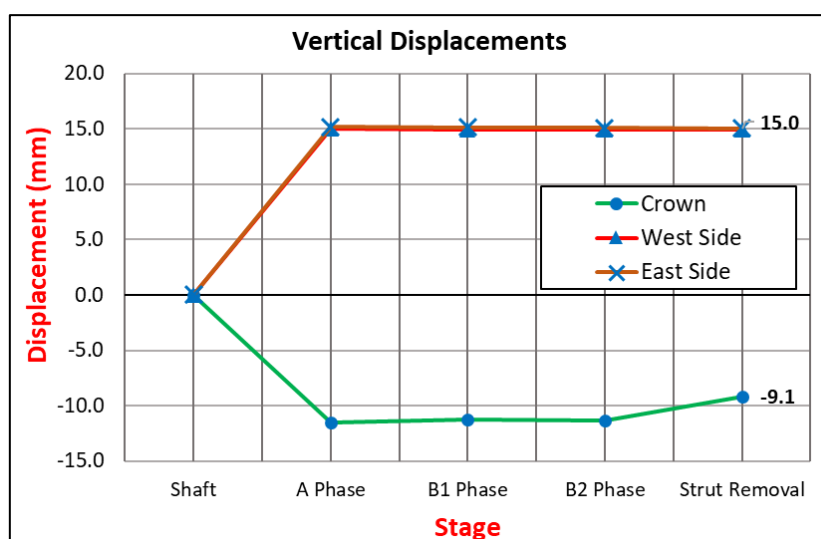
Εικόνα 54. Ολικές μετακινήσεις περιμετρικά της σήραγγας NATM, με την ολοκλήρωση των εργασιών εκσκαφής της.

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται ότι οι ολικές μετακινήσεις τόσο στη στέψη όσο και στις παρειές της σήραγγας NATM αναπτύσσονται έως την ολοκλήρωση της Α' φάσης εκσκαφής. Επιπλέον έως την Β2' φάση εκσκαφής οι μετακινήσεις παραμένουν σταθερές. Κατά το στάδιο ολοκλήρωσης των εκσκαφών (Β2' φάση) η μέγιστη μετακίνηση στη στέψη ήταν **11,5mm** και στις παρειές **15,7mm**. Κατά την αφαίρεση της εσωτερικής αντηρίδας Η200, τα πλευρικά τοιχώματα τείνουν να εισχωρήσουν προς το εσωτερικό της σήραγγας και για αυτό το λόγο έχουμε αύξηση των μετακινήσεων στις παρειές, οι οποίες φτάνουν στα **16,7mm** για την δυτική παρειά και **16,5mm** για την ανατολική παρειά. Παράλληλα παρατηρείται μια μικρή ανίζηση της σήραγγας για αυτό καταγράφεται και μια μικρή μείωση των μετακινήσεων στη στέψη της σήραγγας στα **9,1mm** από 11,5mm που ήταν σε προηγούμενο στάδιο πριν την αφαίρεση της εσωτερικής αντηρίδας.

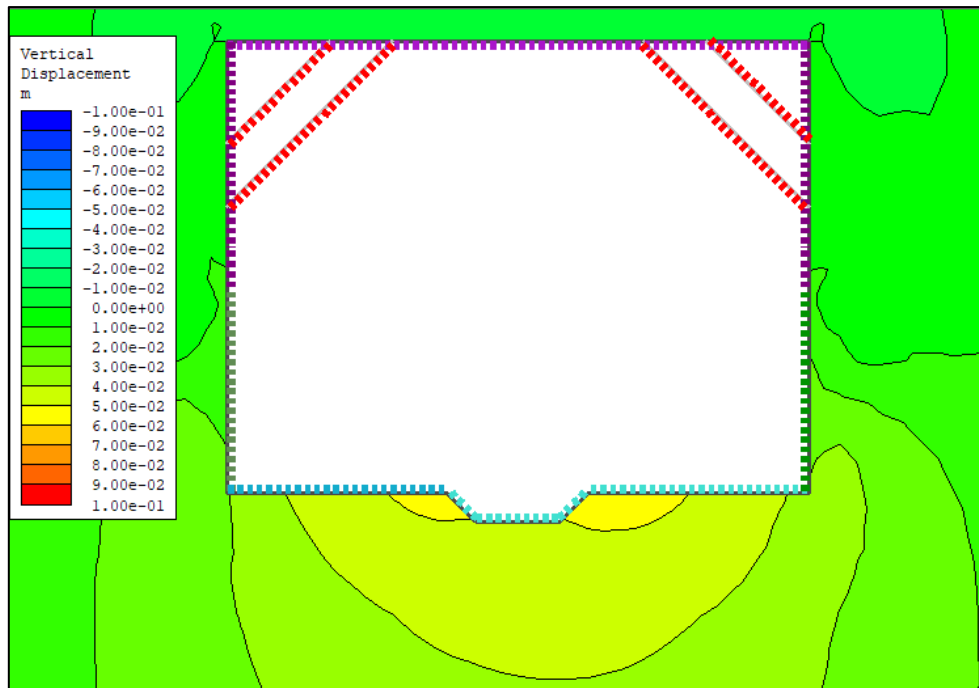
Από τα παραπάνω, καταλήγουμε στο βασικό συμπέρασμα ότι όλες οι ολικές μετακινήσεις δημιουργήθηκαν κατά την Α' φάση εκσκαφής και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η σήραγγα εξ' αρχής διανοίγεται σε έναν ασθενή εδαφικό σχηματισμό που προκαλεί μεγάλες παραμορφώσεις, με την αφαίρεση του γεωλυτικού. Παράλληλα η αφαίρεση της εσωτερικής αντηρίδας, προκαλεί ελάχιστες επιπρόσθετες μετακινήσεις στην διατομή της εκσκαφής.

5.2.1.2 Κατακόρυφες μετακινήσεις σήραγγας

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρατίθενται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (vertical displacements) που θα προκληθούν στο εσωτερικό της σήραγγας, ανά εξεταζόμενη θέση και ανά στάδιο κατασκευής. Αντίστοιχα στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις πέριξ της υπόγειας εκσκαφής. Να σημειωθεί ότι οι αρνητικές τιμές, αναφέρονται σε καθιζήσεις και οι θετικές σε ανιζήσεις.



Διάγραμμα 22. Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων στο εσωτερικό της σήραγγας NATM, ανά φάση κατασκευής.

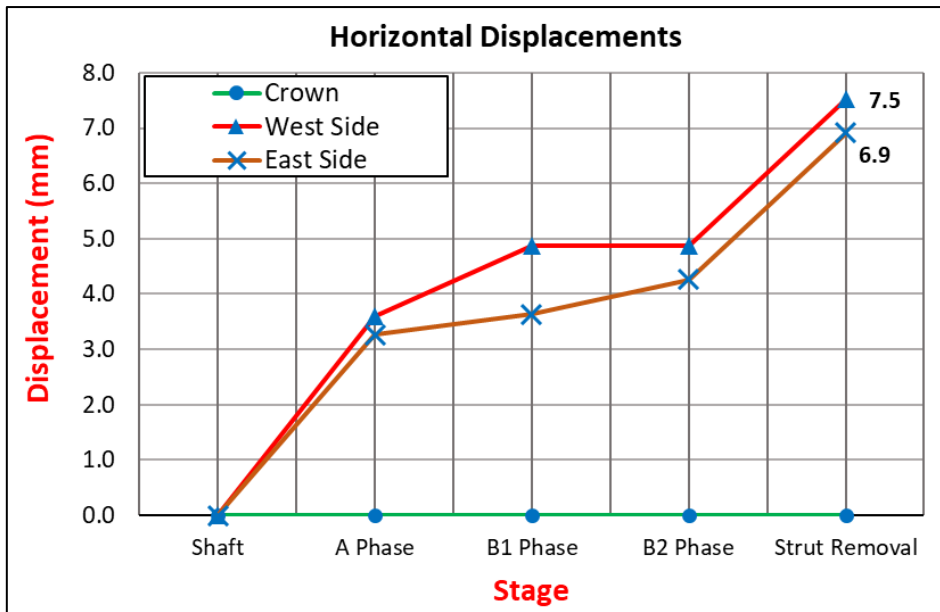


Εικόνα 55. Κατακόρυφες μετακινήσεις περιμετρικά της σήραγγας NATM, με την ολοκλήρωση των εργασιών εκσκαφής της.

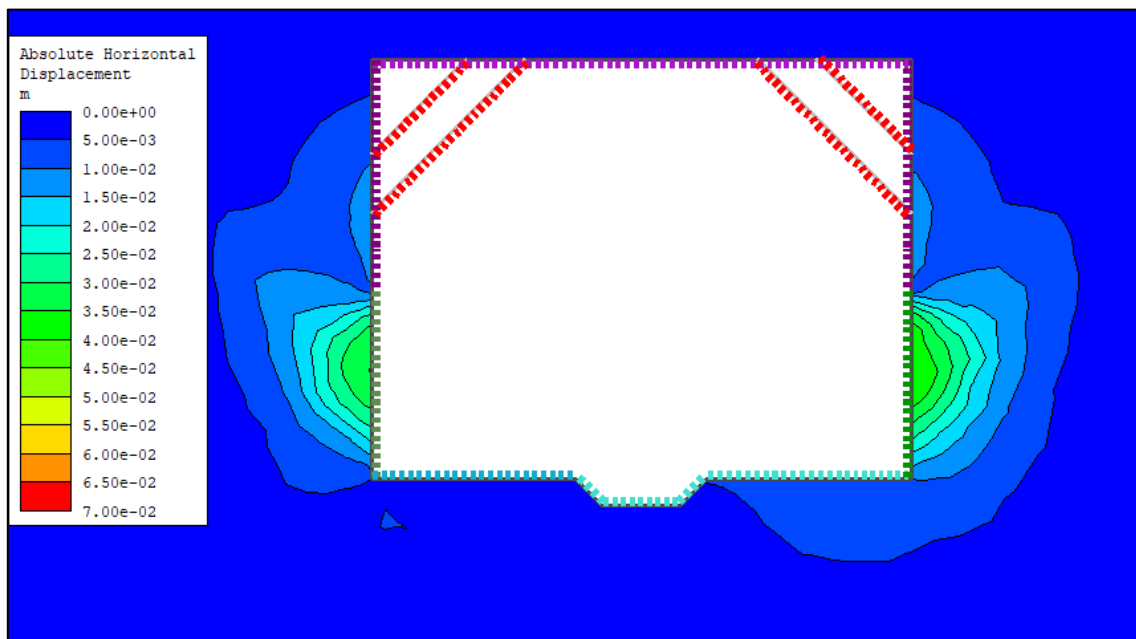
Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται ότι οι κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη είναι ίδιες με τις ολικές μετακινήσεις και αφορούν καθίζηση (κλείσιμο διατομής), ενώ στις παρειές είναι ανιζήσεις. Επίσης, παρατηρείτε όπως και στην περίπτωση των ολικών μετακινήσεων, ότι το σύνολο των μετακινήσεων προκαλείται από την κατασκευή της Α' φάσης εκσκαφής. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι λόγω της αφαίρεσης της αντηρίδας, η στέψη της σήραγγας τείνει να ανυψωθεί και για αυτό το λόγο παρατηρείται η μικρή μείωση στις κατακόρυφες μετακινήσεις της στέψης. Η ανύψωση όλης της διατομής, οφείλεται στην ανύψωση του πυθμένα εκσκαφής.

5.2.1.3 Οριζόντιες μετακινήσεις σήραγγας

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρατίθενται οι οριζόντιες μετακινήσεις (horizontal displacements) που θα προκληθούν στο εσωτερικό της σήραγγας, ανά εξεταζόμενη θέση και ανά στάδιο κατασκευής. Αντίστοιχα στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις περίξ της υπόγειας εκσκαφής.



Διάγραμμα 23. Μεταβολή των οριζόντιν μετακινήσεων στο εσωτερικό της σήραγγας NATM, ανά φάση κατασκευής.



Εικόνα 56. Οριζόντιες μετακινήσεις περιμετρικά της σήραγγας NATM, με την ολοκλήρωση των εργασιών εκσκαφής της.

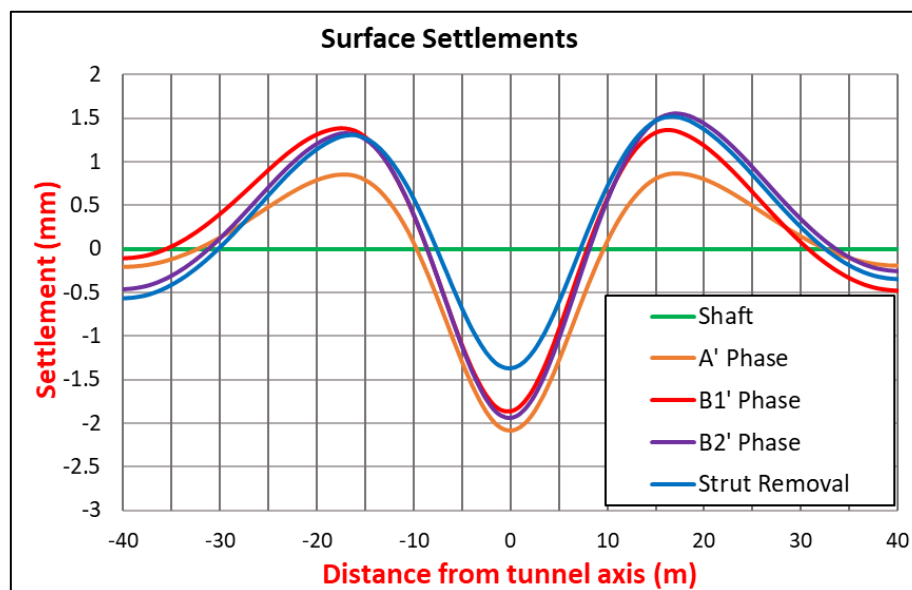
Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται ότι οι οριζόντιες μετακινήσεις στις παρειές της εκσκαφής, τόσο ανατολικά όσο και δυτικά, αυξάνονται με την διάνοιξη των φάσεων εκσκαφής της σήραγγας. Αντίθετα στη στέψη δεν καταγράφονται οριζόντιες μετακινήσεις, καθώς εκεί δημιουργούνται μόνο κατακόρυφες μετακινήσεις.

Όσον αφορά τις οριζόντιες μετακινήσεις της δυτικής παρειάς, αυτές αυξάνουν σημαντικά σε όλα τα στάδια εκσκαφής μετά την ολοκλήρωση εκσκαφής και υποστήριξης της άνω ημιδιατομής (Α' φάση). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς γίνεται εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής (B1 και B2 φάση εκσκαφής), χαλαρώνει σημαντικά το περιβάλλον έδαφος και επειδή το σημείο μετρήσεων βρίσκεται στην επαφή άνω και κάτω ημιδιατομής που αποτελεί σημείο συγκέντρωσης τάσεων και μεγάλων παραμορφώσεων.

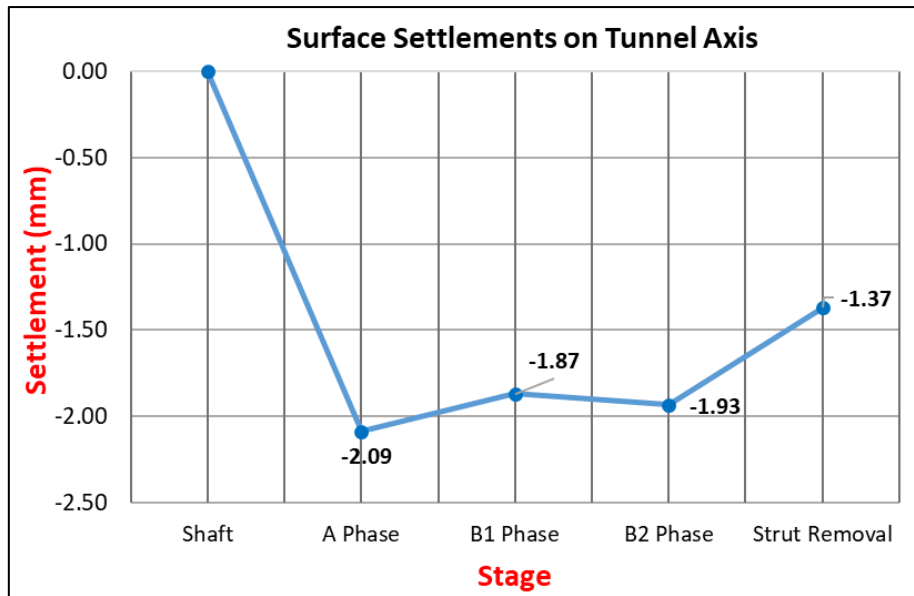
Επίσης οι οριζόντιες μετακινήσεις της δυτικής παρειάς είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της ανατολικής παρειάς, καθώς στην δυτική παρειά γίνεται εξολοκλήρου εκσκαφή του τμήματος της κάτω ημιδιατομής (B1' φάση), ενώ στην ανατολική παρειά γίνεται τμηματική εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής (B2' φάση). Επίσης τόσο στην ανατολική όσο και στη δυτική παρειά, παρατηρείται ραγδαία αύξηση στις οριζόντιες μετακινήσεις με την αφαίρεση της αντηρίδας, καθώς χάνεται η εσωτερική στήριξη στο σημείο αυτό και οι παρειές τείνουν να παραμορφωθούν προς το εσωτερικό.

5.2.1.4 Κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας - καθιζήσεις

Στα ακόλουθα διαγράμματα παρατίθενται οι επιφανειακές καθιζήσεις που θα προκληθούν λόγω της διάνοιξης της σήραγγας. Συγκεκριμένα στα Διάγραμμα 24 Διάγραμμα 25, παρουσιάζεται τόσο το τυπικό προφίλ των επιφανειακών καθιζήσεων, όσο και η μεταβολή της μέγιστης καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής, οι οποίες προκαλούνται μόνο από τη διάνοιξη της σήραγγας NATM, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η επιρροή της εκσκαφής του φρέατος και των σηράγγων TBM. Αντίστοιχα στο Διάγραμμα 26, παρουσιάζεται η μεταβολή της μέγιστης καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής, οι οποίες λαμβάνει υπόψιν και την επιρροή της εκσκαφής του φρέατος και των σηράγγων TBM.

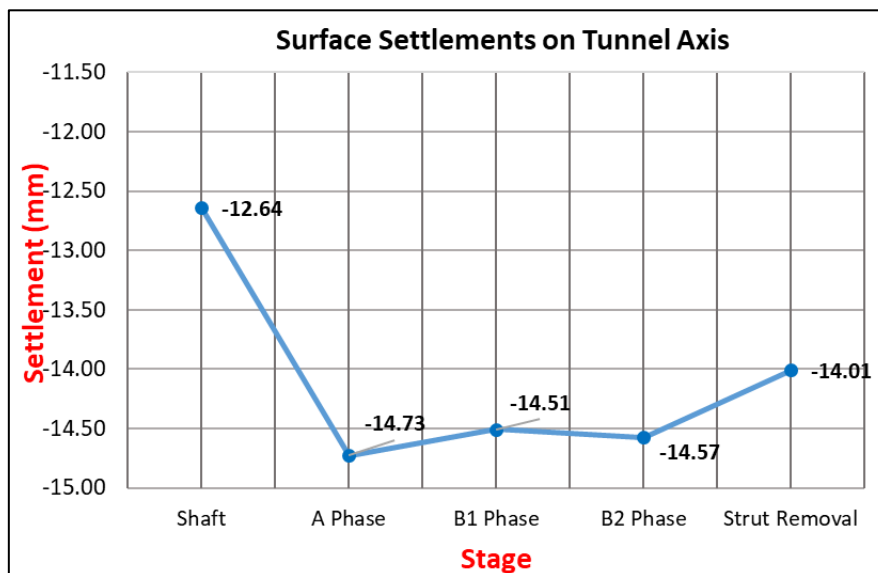


Διάγραμμα 24. Προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης μόνο της σήραγγας NATM.



Διάγραμμα 25. Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής, λόγω της διάνοιξης μόνο της σήραγγας NATM.

Με βάση τα δύο προηγούμενα διαγράμματα, παρατηρείται ότι με την διάνοιξη της σήραγγας NATM, θα προκληθεί μέγιστη επιφανειακή καθίζηση ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας, της τάξης των **2,1mm**. Η μείωση στις επιφανειακές καθιζήσεις που καταγράφεται στα παραπάνω διαγράμματα, είναι εικονική και οφείλεται στην αποφόρτιση του εδάφους κατά την διάνοιξη της κάτω ημιδιατομή της σήραγγας. Επίσης παρατηρείται ότι το προφίλ των επιφανειακών μετακινήσεων, ισορροπεί πολύ κοντά στον άξονα της σήραγγας.



Διάγραμμα 26. Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής, λόγω της διάνοιξης του φρέατος και των σηράγγων TBM και NATM.]

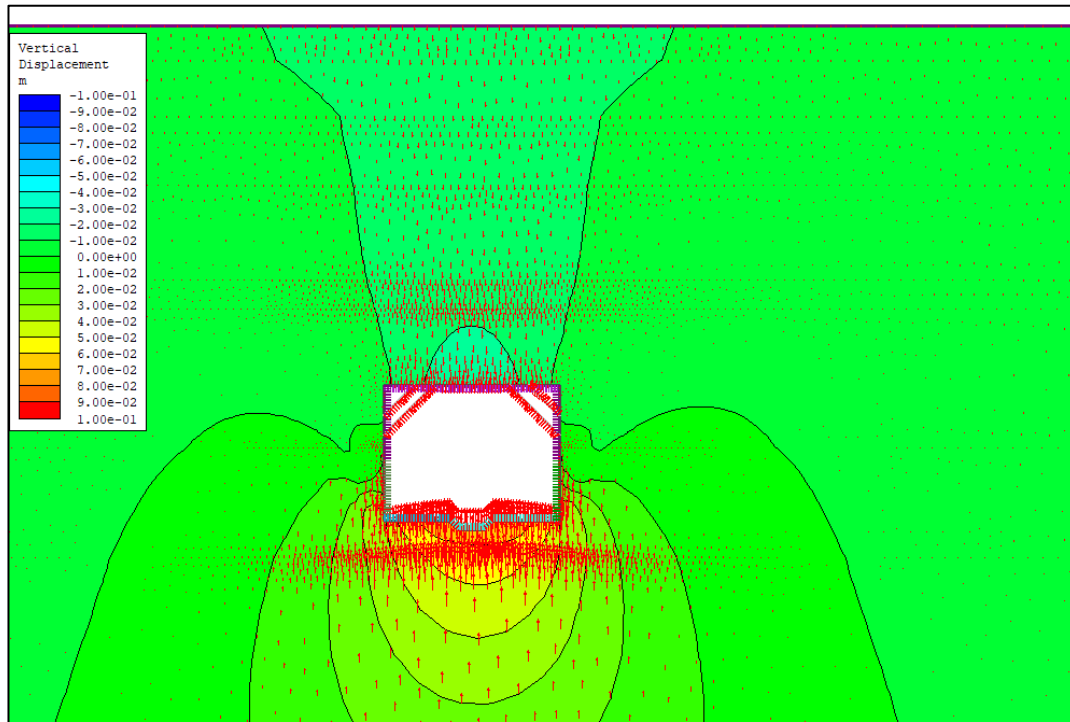
Με βάση το προηγούμενο διαγράμμα, παρατηρείται ότι κατά την ολοκλήρωση όλων των έργων (φρέαρ και σήραγγας TBM και NATM), θα προκληθεί μέγιστη επιφανειακή καθίζηση ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας, της τάξης των **14,8mm**. Από την καθίζηση αυτή, ήδη τα **12,7mm** έχουν προκληθεί από την κατασκευή του φρέατος και των σηράγγων TBM.

Με βάση τον ακόλουθο Πίνακα, οι καθιζήσεις αυτές είναι ανεκτές τόσο για περιπτώσεις διέλευσης σηράγγων κάτω από κατασκευές όσο και από οδούς, σύμφωνα με τα προβλεπόμενα όρια της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ.

Πίνακας 25. Επιτρεπόμενα όρια καθιζήσεων και παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας (Πηγή: Αττικό Μετρό).

A/A	Μετακίνηση, παραμόρφωση, ρηγμάτωση κλπ.	Ευαίσθητο Κτίριο ή Κατασκευή	Άλλα Κτίρια	Οδοί, Πεζοδρόμια ή Δίκτυα Ο.Κ.Ω.
1	Συνολική καθίζηση (mm)	20	25	30
2	Γωνιακή παραμόρφωση	1:800	1:600	1:600
3	Ρυθμός συνολικής καθίζησης (mm/day)	3	3	4
4	Ρυθμός ανοίγματος ρωγμής (mm/day)	1	1	1
5	Οριζόντια παραμόρφωση (%)	0,15	0,25	0,30

Στην ακόλουθη εικόνα, παρουσιάζεται η κατανομή των κατακόρυφων μετακινήσεων – καθιζήσεων, όπως αναπτύσσονται από την σήραγγα προς την επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 57. Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων – καθιζήσεων έως την επιφάνεια του εδάφους.

Επίσης από την ανάλυση, παρατηρείται ότι η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση στον άξονα της σήραγγας, είναι περί το 20% της μέγιστης κατακόρυφης μετακίνησης στην οροφής της σήραγγας. Αυτό υποδηλώνει τη σημαντική επίδραση που έχει η ομπρέλα των δοκών προπορείας στην μείωση των καθιζήσεων, που χωρίς την εφαρμογή της θα υπήρχε μεγάλη ανάπτυξη κατακόρυφων μετακινήσεων στην επιφάνεια.

5.2.1.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων με στοιχεία μελέτης

Με βάση τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τη περίπτωση μόνο της διάνοιξης της σήραγγας NATM, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προβλέπονται στη μελέτη του έργου.

Στον ακόλουθο πίνακα γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής με τα αντίστοιχα μεγέθη που προτείνει η μελέτη του έργου.

Πίνακας 26. Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής ανάλυσης για διάνοιξη σήραγγας NATM, με αποτελέσματα μελέτης έργου.

Μέγεθος	Φάση εκσκαφής σήραγγας NATM	Τιμή αριθμητικής ανάλυσης	Τιμές μελέτης	Διαφορά
Σύγκλιση οροφής σήραγγας NATM	A	11,5mm	16mm	-28,1%
	B1	11,3mm	23mm	-50,9%
	B2	11,3mm	26mm	-56,5%
Οριζόντιες μετακινήσεις παρειών εκσκαφής	A	3,6mm	6mm	-40,0%
	B1	4,9mm	9mm	-45,6%
	B2	7,5mm	9mm	-16,7%
Συνολική κατακόρυφη μετακίνηση επιφανείας	B2	14,8mm	29mm	-49,3%
Μέση τιμή				-41,01%

Με βάση τον προηγούμενο πίνακα, καταγράφεται μια μέση διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων της μελέτης του έργου, της τάξης του 40%. Η διαφορά αυτή πιθανώς οφείλεται στο διαφορετικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που έχει χρησιμοποιηθεί στη μελέτη του έργου, στις διαφορετικές παραδοχές ως προς τη μεθοδολογία ανάλυσης αλλά και παραμέτρων υποστήριξης και σίγουρα στις διαφορετικές γεωτεχνικές παραμέτρους του εδάφους, δεδομένου ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει γίνει εκ' του μηδενός γεωτεχνική αξιολόγηση και εκτίμηση εδαφικών παραμέτρων.

5.3 Προσομοίωση Συνολικού μοντέλου, που περιλαμβάνει το φρέαρ εξαερισμού, τις σήραγγες TBM και την προσομοίωση των εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM

Κατά την αριθμητική προσομοίωση του φρέατος εξαερισμού, των σηράγγων TBM και των εγκάρσιων σηράγγων NATM χρειάστηκε να ληφθούν κάποιες παραδοχές. Κατά τη δισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση των σηράγγων TBM χρειάστηκε να προσομοιωθεί πίεση μετώπου (p_{face}) που θα ασκεί το μηχάνημα EPB-TBM με τον ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης (λ). Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στη διδακτορική διατριβή “*Numerical Investigation of the tunnel face stability*” (D. Georgiou, 2021), για προσομοίωση σε δύο διαστάσεις (2D) των αγκυρίων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, fiberglass. Επιλέχθηκε η μεθοδολογία αυτή καθώς ο τρόπος λειτουργίας ενός μηχανήματος EPB – TBM για την υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής είναι ισοδύναμος με αυτό της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής με αγκυρώσεις τύπου fiberglass, καθώς και τα δύο επιβάλλουν υψηλή πλευρική τάση σ_3 στο μέτωπο, το μεν πρώτο μέσω του εδαφικού πολφού και το δεύτερο μέσω της εφελκυστικής αντοχής των αγκυρίων. Βάσει αυτή της μεθοδολογίας η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 προέκυψαν οι εξής ισοδύναμοι βαθμοί αποτόνωσης (λ_{EPB}) για κάθε τεχνικογεωλογική ενότητα :

Τεχνικογεωλογική Ενότητα	λ_{EPB}
IIa	0,54
IIb	0,25

Για την ανάλυση αυτή λήφθηκε υπόψιν η στρωματογραφία της περιοχής όπως αυτή αναλύθηκε και περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.

Στην ανάλυση αυτή γίνεται προσομοίωση της κατασκευής του φρέατος αερισμού, των σηράγγων TBM και των εγκάρσιων σηράγγων NATM. Η προσομοίωση αυτή γίνεται με σκοπό να προσδιοριστούν οι επιφανειακές καθιζήσεις που θα πραγματοποιηθούν από το σύνολο του έργου. Επιπλέον αναδεικνύει την επιρροή της μιας κατασκευής στην άλλη. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αντιληπτό το πόσο επηρεάζει τα εντατικά μεγέθη του φρέατος οι διάνοιξη των σηράγγων TMB και αντίστοιχα τα εντατικά μεγέθη των σηράγγων TBM και του φρέατος από την διάνοιξη των σηράγγων NATM.

Η υποστήριξη του φρέατος εξαερισμού, περιλαμβάνει πασσάλους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται περιμετρικά για τον τοίχο αντιστήριξης, έχουν διάμετρο 1,00m, αξονική απόσταση 1,50m και μήκος

28,8m και κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25. Για την εσωτερική αντιστήριξη των τοιχίων του φρέατος χρησιμοποιούνται αντηρίδες οι οποίες αποτελούνται από μεταλλικές διατομές τύπου HEB 320. Για την συγκράτηση των τοιχωμάτων του εσωτερικού φρέατος χρησιμοποιείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους $t=20\text{cm}$. Κατά το τελικό στάδιο κατασκευής του εσωτερικού φρέατος, κατασκευάζεται στον πυθμένα πλάκα θεμελίωσης από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους $t=100\text{cm}$, με σκυρόδεμα C30/37.

Για την συγκράτηση των τοιχωμάτων των σηράγγων TBMs, εφαρμόζεται υποστήριξη από προκατασκευασμένους δακτυλίου οπλισμένου σκυροδέματος (segments), πάχους $t=30\text{cm}$ και σκυροδέματος C40/50.

Για την προσομοίωση των εγκάρσιων σηράγγων NATM, δεδομένου ότι εκσκάπτονται εγκάρσια στο φρέαρ, δεν απαιτείται να ληφθεί υπόψιν ο βαθμός αποτόνωσης (λ) του περιβάλλοντος εδάφους, καθώς γίνεται εκσκαφή κάθετα στο αριθμητικό προσομοίωμα. Συγκεκριμένα, αρχικά γίνεται τοποθέτηση της ομπρέλας των δοκών προπορείας πάνω από την στέψη της σήραγγας και στη συνέχεια ακολουθεί η εκσκαφή της άνω ημιδιατομής της σήραγγας πρώτα για την νότια και μετά για την βόρεια. Έπειτα γίνεται αντίστοιχα και η εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής. Σε κάθε στάδιο αρχικά γίνεται εκσκαφή με βήμα προχώρησης 0,9m και στο ακόλουθο στάδιο γίνεται η τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας.

Ο τρόπος και τα στάδια προσομοίωσης των παραπάνω με αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων έχει περιγράψει αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Συνοπτικά τα στάδια προσομοίωσης έχουν ως εξής :

1. Εκσκαφή και αντιστήριξη του φρέατος αερισμού
2. Εκσκαφή και υποστήριξη του εσωτερικού φρέατος
3. Εκσκαφή και αποτόνωση βόρειας σήραγγας TBM
4. Υποστήριξη βόρειας σήραγγας TBM
5. Εκσκαφή και αποτόνωση νότιας σήραγγας TBM
6. Υποστήριξη νότιας σήραγγας TBM
7. Εγκατάσταση δοκών προπορείας κάθετα στο φρέαρ και άνωθεν των σηράγγων TBM
8. Εκσκαφή και υποστήριξη αριστερής σήραγγας τύπου NATM
9. Εκσκαφή και υποστήριξη δεξιάς σήραγγας τύπου NATM

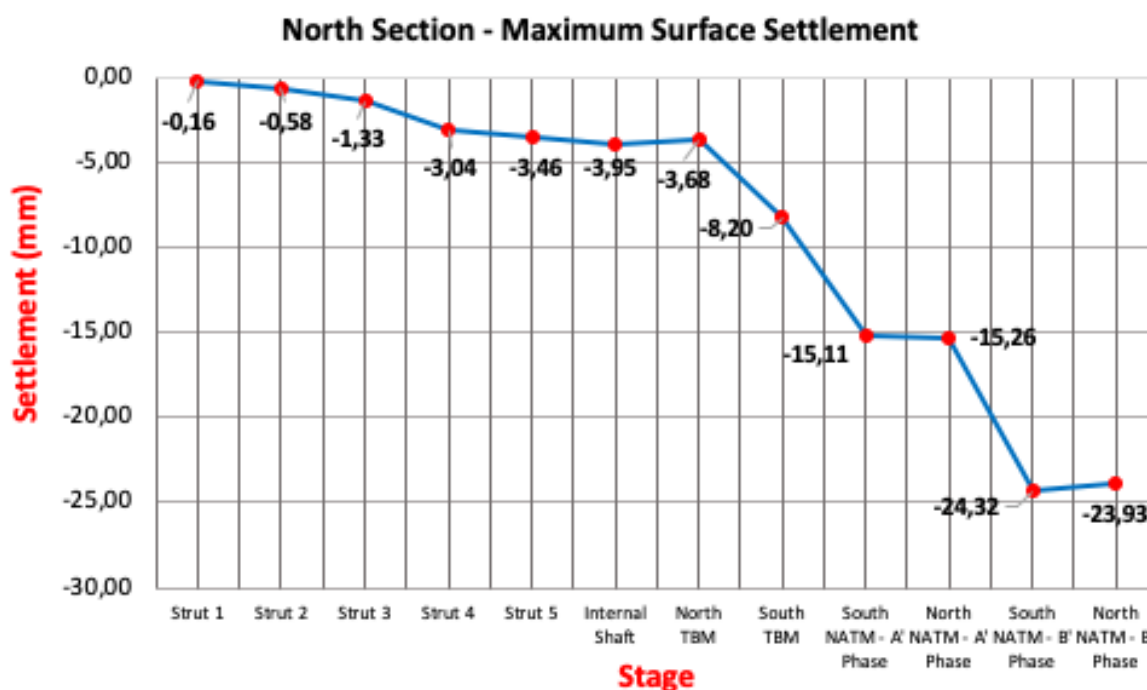
Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των βασικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων της συγκεκριμένης ανάλυσης.

Στην αριθμητική ανάλυση του φρέατος εξαερισμού, των σηράγγων TBM και των σηράγγων NATM, γίνεται καταγραφή :

- ∞ Κατακόρυφων μετακινήσεων επιφανείας - καθιζήσεις (Surface Settlements)
- ∞ Εντατικά μεγέθη αντηρίδων, αξονικές δυνάμεις (Axial Forces) και καμπτικές δυνάμεις (Bending Moments)
- ∞ Ολικές και κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη των σηράγγων TBM

5.3.1 Κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας – καθιζήσεις (Surface Settlements)

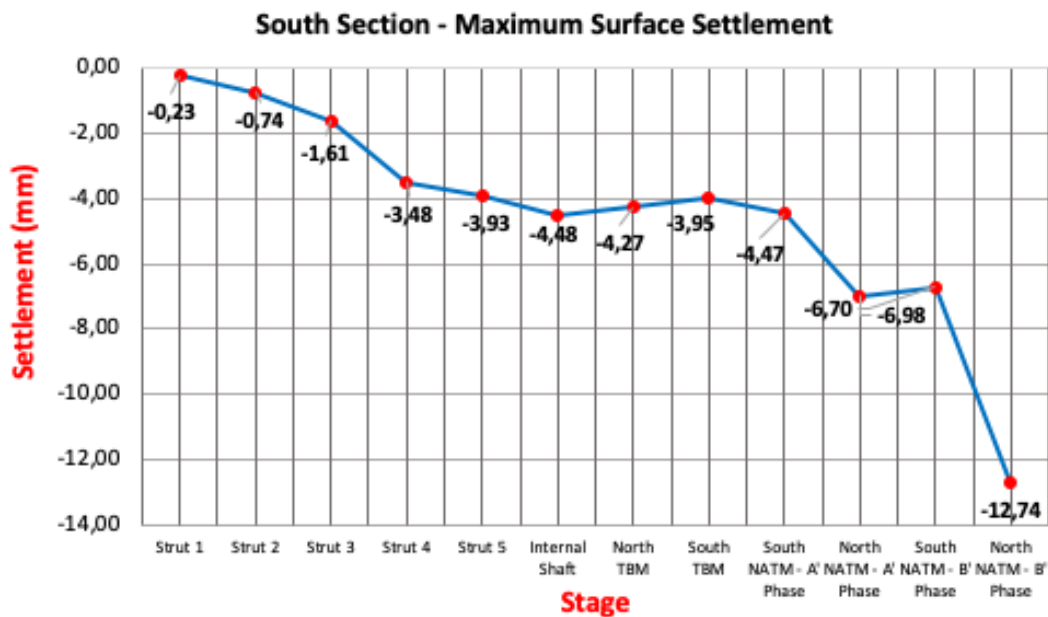
Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζονται οι επιφανειακές καθιζήσεις που καταγράφηκαν κατά την κατασκευή του φρέατος, των σηράγγων TBM και κατά την εκσκαφή των σηράγγων NATM. Συγκεκριμένα στα Διάγραμμα 27 Διάγραμμα 28 παρουσιάζεται τόσο το τυπικό προφίλ των επιφανειακών καθιζήσεων, όσο και η μεταβολή της μέγιστης καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής. Οι καθιζήσεις που παρουσιάζονται προκαλούνται από την διάνοιξη του φρέατος αερισμού, των σηράγγων TBM και των σηράγγων NATM.



Διάγραμμα 27: Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής στην Βόρεια πλευρά του φρέατος.

Με βάση το Διάγραμμα 27 που παρουσιάζει τις μέγιστες επιφανειακές καθιζήσεις στη Βόρεια πλευρά του φρέατος καταγράφεται μέγιστη επιφανειακή καθίζηση της τάξης των 24.32mm. Κατά την

ολοκλήρωση κατασκευής του φρέατος αερισμού η επιφανειακή καθίζηση που παρατηρείται είναι της τάξης των 3,95mm. Επιπλέον με την διάνοιξη των σηράγγων TBM οι επιφανειακές καθιζήσεις φτάνουν τα 8.22mm ενώ με την εκσκαφή των σηράγγων NATM καταγράφεται μια απότομη αύξηση, κατά τη Α Φάση εκσκαφής των NATM η επιφανειακή καθίζηση φτάνει τα 15,26mm και έπειτα κατά τη Β Φάση εκσκαφής των σηράγγων NATM τα 24,32mm για την Νότια σήραγγα και 23,93mm για την Βόρεια σήραγγα. Επομένως συμπεραίνεται ότι η διάνοιξη των σηράγγων TBM και των εγκάρσιων σηράγγων NATM επηρεάζουν και την επιφάνεια του έργου.



Διάγραμμα 28: Μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης ανά στάδιο εκσκαφής στην Νότια πλευρά του φρέατος.

Αντίστοιχα στο Διάγραμμα 28 παρουσιάζονται οι επιφανειακές καθιζήσεις που καταγράφηκαν στη Νότια πλευρά του φρέατος εξαερισμού. Η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση είναι της τάξης των 12,74mm και καταγράφεται στο τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης. Κατά την ολοκλήρωση κατασκευής του φρέατος αερισμού η επιφανειακή καθίζηση που καταγράφεται είναι της τάξης των 4,48mm. Κατά την διάνοιξη των σηράγγων TBM παρατηρείται μια μικρή ανίζηση του εδάφους. Έπειτα κατά τη διάνοιξη των σηράγγων NATM οι επιφανειακές καθιζήσεις αυξάνουν και με την ολοκλήρωση των σηράγγων φτάνουν τη μέγιστη τιμή η οποία είναι τα 12,74mm.

Βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων συμπεραίνεται ότι τα εδαφικά χαρακτηριστικά και η στρωματογραφία της περιοχής αποτελούν σημαντικό παράγοντα στον υπολογισμό εδαφικών καθιζήσεων. Για τον λόγο αυτό παρατηρείται αυτή η ανομοιομορφία στις επιφανειακές καθιζήσεις

μεταξύ βόρειας και νότιας πλευράς της επιφανείας του εδάφους. Παρατηρείται ότι η Βόρεια πλευρά λαμβάνει δυσμενέστερες καθιζήσεις σε σχέση με τη Νότια πλευρά.

Η μέγιστη καθίζηση η οποία καταγράφεται είναι της τάξης των 23.93mm και βάσει των ορίων της Αττικό Μετρό, όπως φαίνεται και στον Πίνακας 23, η καθίζηση αυτή είναι αποδεκτή για σήραγγες που διέρχονται είτε κάτω από άλλα κτίρια είτε από οδούς.

Πίνακας 27: Επιτρεπόμενα όρια καθιζήσεων και παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σηράγγων (Πηγή: Αττικό Μετρό)

A/A	Μετακίνηση, παραμόρφωση, ρηγμάτωση κλπ.	Ευαίσθητο Κτίριο ή Κατασκευή	Άλλα Κτίρια	Οδοί, Πεζοδρόμια ή Δίκτυα Ο.Κ.Ω.
1	Συνολική καθίζηση (mm)	20	25	30
2	Γωνιακή παραμόρφωση	1:800	1:600	1:600
3	Ρυθμός συνολικής καθίζησης (mm/day)	3	3	4
4	Ρυθμός ανοίγματος ρωγμής (mm/day)	1	1	1
5	Οριζόντια παραμόρφωση (%)	0,15	0,25	0,30

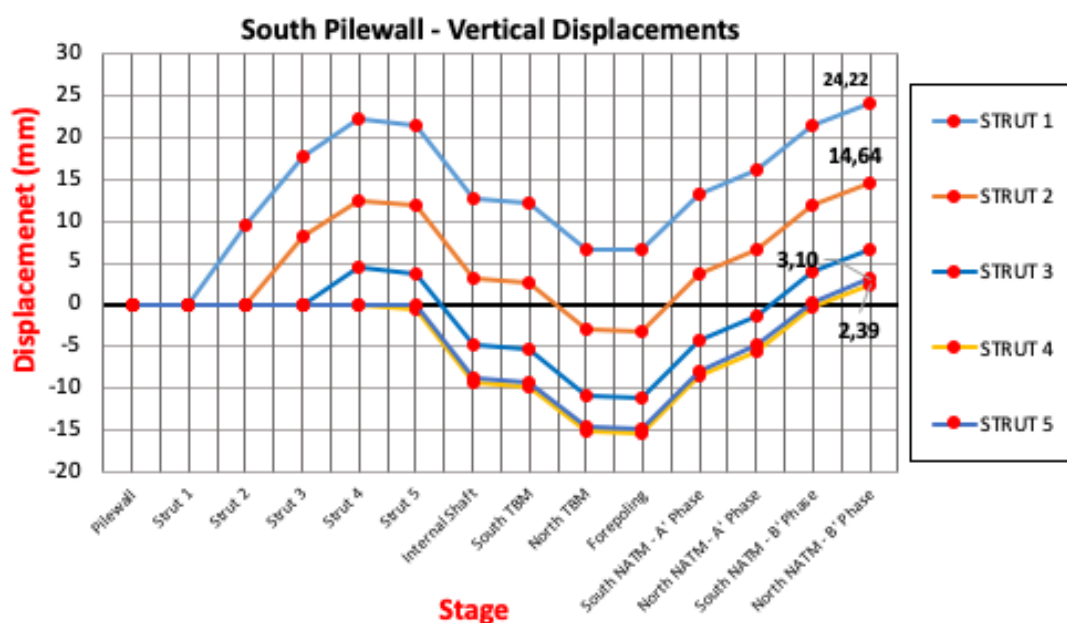
5.3.2 Πασσαλότοιχοι

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει παρουσίαση των μετακινήσεων και των εντατικών μεγεθών που λαμβάνονται στις παρειές του φρέατος και πιο συγκεκριμένα στους πασσαλότοιχους του φρέατος εξαερισμού. Πιο συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν οι κατακόρυφες μετακινήσεις (Vertical Displacements) και οι οριζόντιες μετακινήσεις (Horizontal Displacements) στα σημεία του πασσαλότοιχου στα οποία εδράζονται οι αντηρίδες και για κάθε στάδιο κατασκευής.

5.3.2.1 Κατακόρυφες μετακινήσεις πασσαλότοιχων

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις που καταγράφηκαν στον πασσαλότοιχο, στα σημεία έδρασης των αντηρίδων, για κάθε στάδιο κατασκευής. Το Διάγραμμα 29

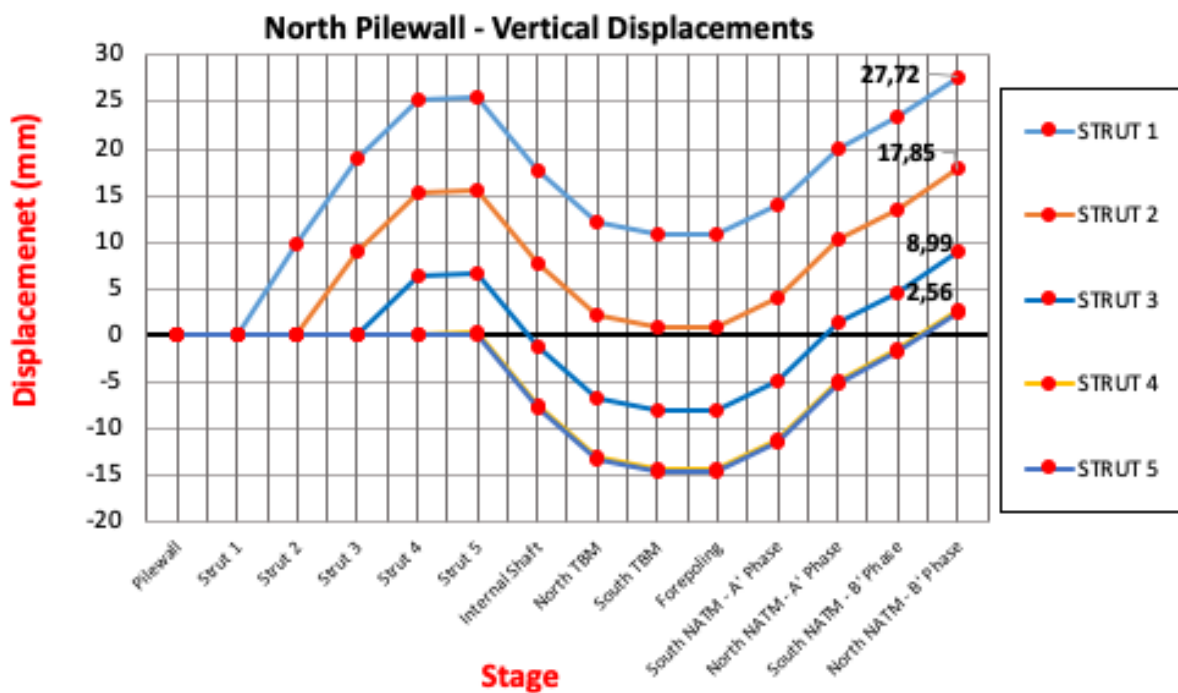
αφορά τις κατακόρυφες μετακινήσεις του Νότιου πασσαλότοιχου και το Διάγραμμα 30 τις κατακόρυφες μετακινήσεις του Βορείου πασσαλότοιχου.



Διάγραμμα 29: Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον Νότιο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού.

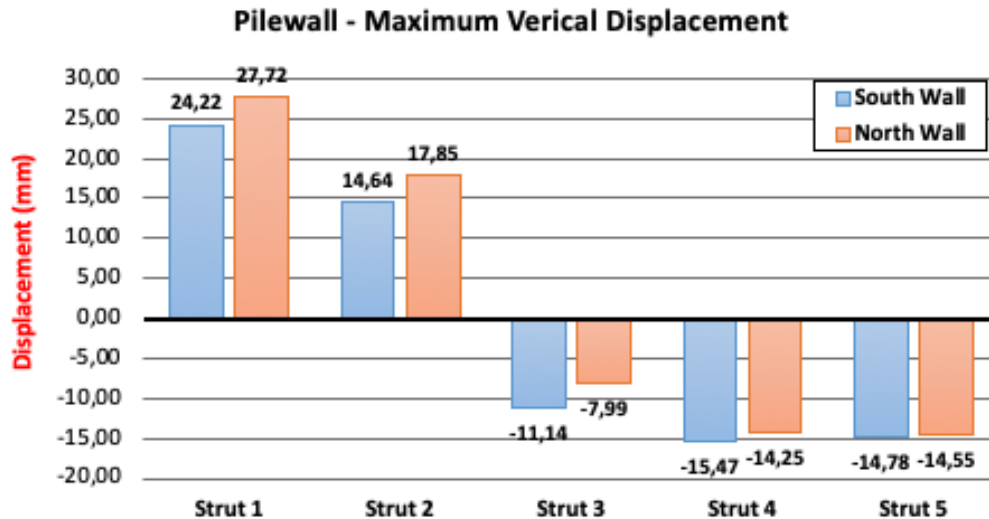
Στο Διάγραμμα 29 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις που καταγράφονται στον Νότιο πασσαλότοιχο, στη θέση κάθε αντηρίδας ανά στάδιο κατασκευής και αντίστοιχα στο διάγραμμα για τον Βόρειο πασσαλότοιχο. Οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν καθίζηση ενώ οι θετικές ανίζηση. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι στην θέση της πρώτης αντηρίδας κατά την κατασκευή του φρέατος έως και την τοποθέτηση της 4^{ης} αντηρίδας καταγράφεται ανίζηση, ενώ έπειτα κατά την ολοκλήρωση του φρέατος έως και την διάνοιξη των σηράγγων TBM καταγράφεται καθίζηση και τέλος κατά την διάνοιξη των σηράγγων NATM καταγράφεται ανίζηση που φτάνει τα 24,22mm. Αντίστοιχα ο ίδιος μηχανισμός παρατηρείται και στις υπόλοιπες θέσεις του πασσαλότοιχου στα σημεία που εδράζονται οι αντηρίδες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι κατά τη διάνοιξη του φρέατος οι αντηρίδες που τοποθετούνται ασκούν πίεση ικανή ώστε να δημιουργήσει αυτή την μικρή ανίζηση και να αποτρέψει την σύγκλιση των τοιχωμάτων του φρέατος προς το εσωτερικό του. Έπειτα κατά την διάνοιξη των σηράγγων TBM το έδαφος τείνει να συγκλείσει στο εσωτερικό της σήραγγας γεγονός που δημιουργεί μικρές καθιζήσεις στον πασσαλότοιχο. Τέλος κατά την διάνοιξη των σηράγγων NATM ασκούνται ισχυρές πιέσεις ώστε να αποτραπεί η σύγκλιση των τοιχωμάτων προς το εσωτερικό των σηράγγων γεγονός που οδηγεί σε ανίζηση στα σημεία καταγραφής του πασσαλότοιχου. Επομένως υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ της κατασκευής του φρέατος αερισμού και των σηράγγων TBM και NATM. Για αυτό το λόγο υπάρχει μεταβολή στα εντατικά μεγέθη των αντηρίδων κατά την κατασκευή των

σηράγγων. Αντίστοιχα ο μηχανισμός παραμόρφωσης που περιγράφηκε λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο και συμμετρικά για τα σημεία του Βόρειου πασσαλότοιχου όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 30.



Διάγραμμα 30: Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον Βόρειο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού.

Συμπεραίνεται από τα παραπάνω ότι οι μετακινήσεις στους πασσαλότοιχους είναι συμμετρικές και ακολουθούν τον ίδιο μηχανισμό αστοχίας. Αυτό που τους κάνει να διαφέρουν είναι στις τιμές που καταγράφονται, ο Νότιος πασσαλότοιχος καταγράφει μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της τάξης των 24,22mm ενώ ο Βόρειος της τάξης των 27,72mm. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται και στη διαφορετική στρωματογραφία που υπάρχει εκατέρωθεν του φρέατος και επομένως στις διαφορετικές εδαφικές παραμέτρους στα σημεία κατασκευής των δύο φρεατοπασσάλων. Συμπεραίνεται επομένως ότι, υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ της κατασκευής του φρέατος αερισμού και των σηράγγων TBM και NATM. Για αυτό το λόγο υπάρχει μεταβολή στα εντατικά μεγέθη των αντηρίδων κατά την κατασκευή των σηράγγων. Για την καλύτερη κατανόηση αυτής της διαφοροποίησης, στο διάγραμμα που παρουσιάζεται στη συνέχεια καταγράφονται οι μέγιστες τιμές κατακόρυφων μετακινήσεων σε κάθε σημείο έδρασης αντηρίδων επάνω στον Βόρειο και Νότιο φρεατοπάσσαλο.

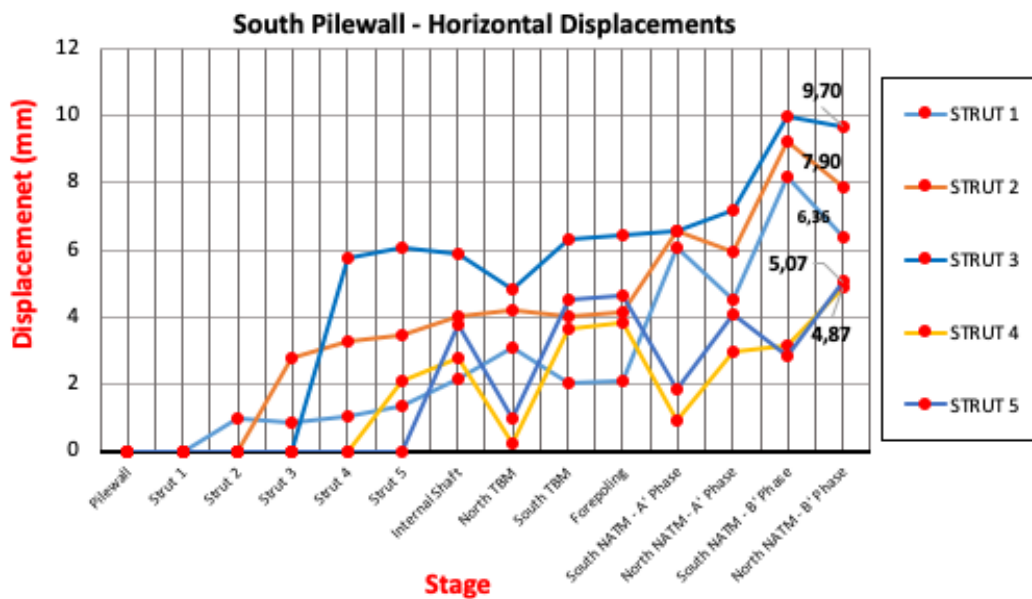


Διάγραμμα 31: Μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον φρεατοπάσσαλο

Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι η ανίζηση που καταγράφεται τον Βόρειο πασσαλότοιχο στα πρώτα δύο σημεία έδρασης των αντηρίδων είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του Νοτίου πασσαλότοιχου. Ενώ αντίθετα οι καθιζήσεις που καταγράφονται στα επόμενα σημεία έδρασης των αντηρίδων λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές στην Νότια αντηρίδα από ότι στη Βόρεια. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαφορετικής στρωματογραφίας που υπάρχει εκατέρωθεν του φρέατος και επομένως των διαφορετικών εδαφικών παραμέτρων γεγονός που οδηγεί σε διαφορετικές εδαφικές παραμορφώσεις.

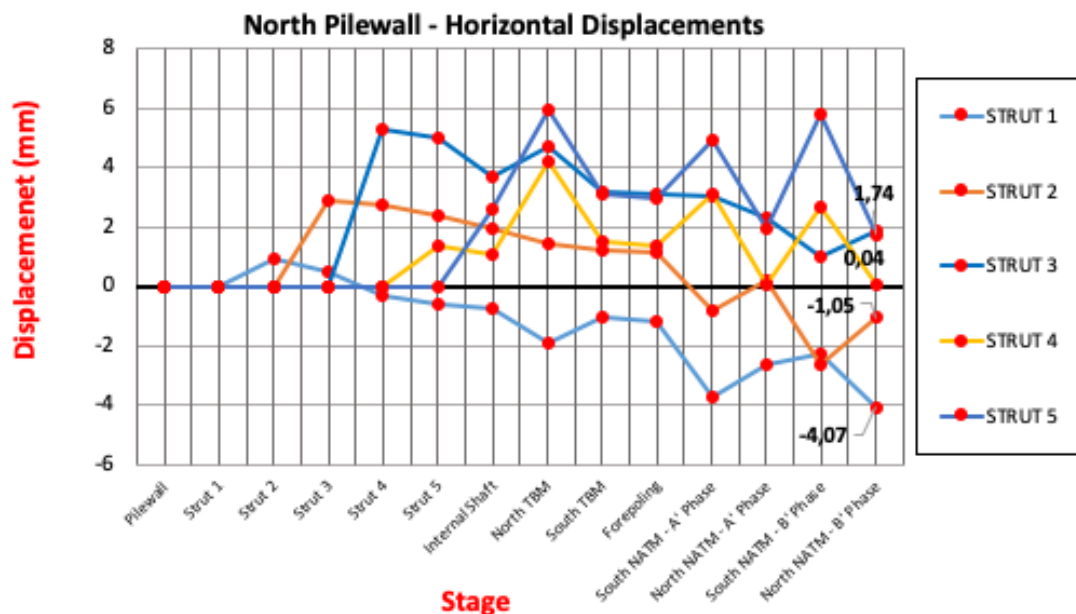
5.3.2.2 Οριζόντιες μετακινήσεις πασσαλότοιχων

Στα διαγράμματα παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που καταγράφονται στους πασσαλότοιχους του φρέατος εξαερισμού. Τα σημεία στα οποία έγινε η καταγραφή των μετακινήσεων είναι τα σημεία που εδράζονται οι αντηρίδες στον πασσαλότοιχο για την κατασκευή του φρέατος. Το διάγραμμα αφορά τις οριζόντιες μετακινήσεις στον Νότιο πάσσαλοτοιχο ενώ το διάγραμμα αφορά τις οριζόντιες μετακινήσεις στο Βόρειο πάσσαλοτοιχο.



Διάγραμμα 32: Μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον Νότιο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού.

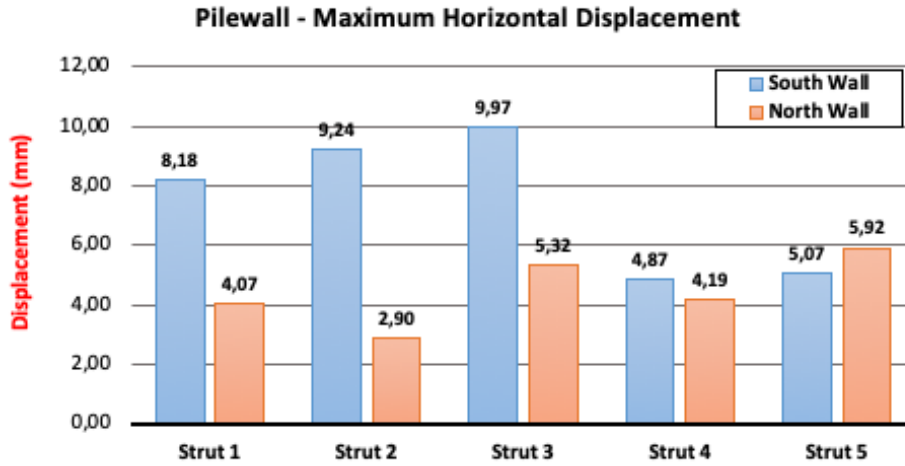
Στο Διάγραμμα 32 καταγράφονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που καταγράφονται στον Νότιο πασσαλότοιχο στα σημεία έδρασης των αντηρίδων. Στο 1^ο σημείο της 1^{ης} αντηρίδας παρατηρείται αρχικά μια αύξηση των οριζόντιων μετακινήσεων έως και την διάνοιξη της πρώτης σήραγγας TBM. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την διάνοιξη του φρέατος τα πλευρικά τοιχώματα τείνουν να μετακινηθούν προς το εσωτερικό του γεγονός που αυξάνει τις οριζόντιες μετακινήσεις. Κατά τα στάδια διανοίξεις των σηράγγων TBM το έδαφος τείνει προς το εσωτερικό των σηράγγων και αρά τα πασσαλότοιχοι του φρέατος τείνουν να μετακινηθούν προς την εξωτερική του κατεύθυνση γεγονός συντελεί στη μείωση των οριζόντιων μετακινήσεων στα στάδια αυτά. Οι μέγιστες τιμές που καταγράφονται είναι 6,36mm στο σημείο της 1^{ης} αντηρίδας, 7,90mm στο σημείο της 2^{ης} αντηρίδας, 9,70mm στο σημείο της 3^{ης} αντηρίδας, 4,87mm στο σημείο της 3^{ης} αντηρίδας, 5,07mm στο σημείο της 5^{ης} αντηρίδας. Παρατηρείται λοιπόν ότι τις μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις της λαμβάνει ο πασσαλότοιχος στο ύψος της 3^{ης} αντηρίδας, αυτό συμβαίνει διότι σε αυτή τη στάθμη βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας και έτσι ασκούνται υδροστατικές πιέσεις στον πασσαλότοιχο. Επιπλέον παρατηρείται ότι στα στάδια διάνοιξης των σηράγγων που γειτνιάζουν με τον πασσαλότοιχο, δηλαδή την Νότια σήραγγα TBM και την Νότια σήραγγα NATM, καταγράφονται μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ του φρέατος και της διάνοιξης των σηράγγων περίξ αυτού.



Διάγραμμα 33: Μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων στα σημεία έδρασης των αντηρίδων στον Βόρειο πασσαλότοιχο του φρέατος αερισμού.

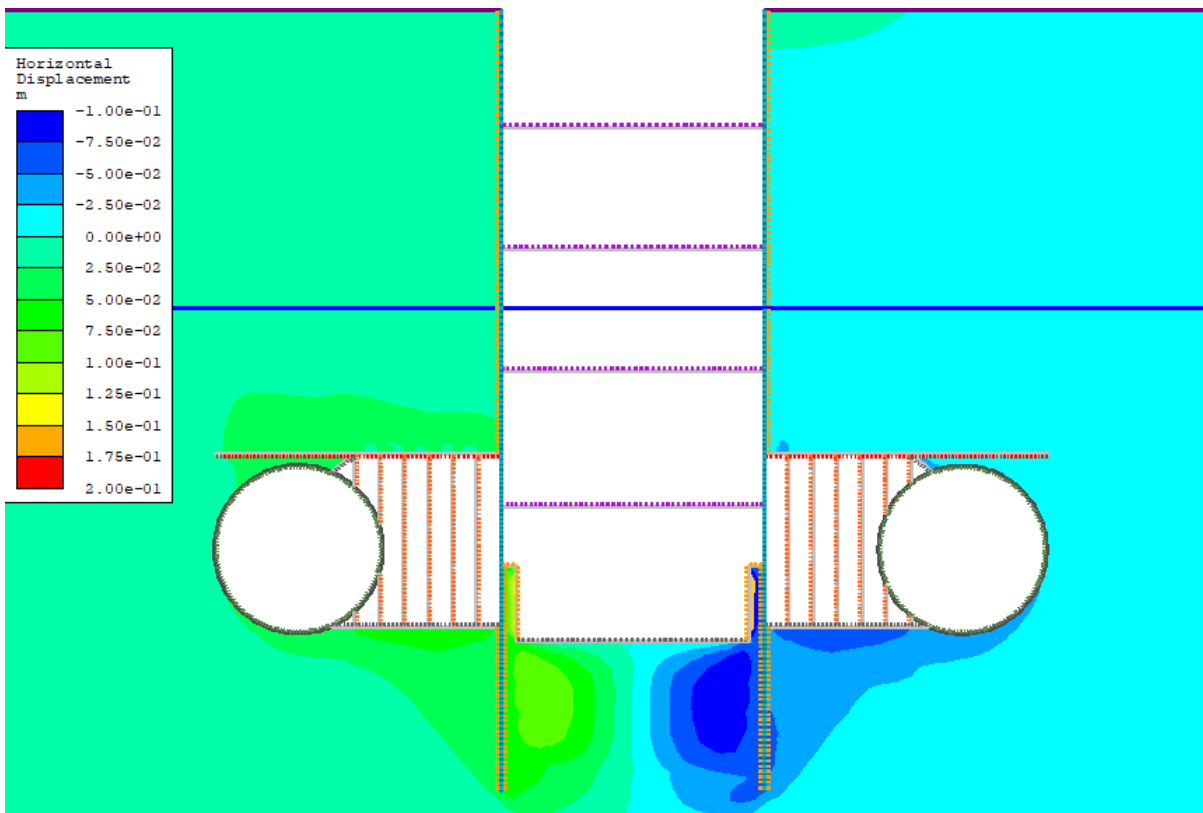
Στο Διάγραμμα 33 καταγράφονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που καταγράφονται στον Βόρειο πασσαλότοιχο στα σημεία έδρασης των αντηρίδων. Παρατηρούνται και εδώ μεγάλες οριζόντιες μετακινήσεις στο ύψος της 3^{ης} σειράς αντηρίδων το οποίο, όπως προαναφέρθηκε, οφείλεται στις υδροστατικές πιέσεις που αρχίζει να δέχεται σε εκείνο το ύψος ο πασσαλότοιχος. Επιπλέον παρατηρείται ότι το σημείο της 5^{ης} σειράς αντηρίδων, το οποίο βρίσκεται και στο μεγαλύτερο βάθος, λαμβάνει τις μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις οι οποίες φτάνουν περί τα 6mm στο στάδιο διάνοιξης της Βόρειας σήραγγας TBM, ενώ στο τελικό στάδιο μειώνονται στα 1,74mm. Επιπλέον παρατηρείται ότι στα στάδια διάνοιξης των σηράγγων που γειτνιάζουν με τον πασσαλότοιχο, δηλαδή την Βόρεια σήραγγα TBM και την Βόρεια σήραγγα NATM, καταγράφονται μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ του φρέατος και της διάνοιξης των σηράγγων περίξ αυτού.

Για την καλύτερη σύγκριση των τιμών των οριζόντιων μετακινήσεων που λήφθηκαν σε κάθε θέση του κάθε πασσαλότοιχου, παρουσιάζεται παρακάτω το Διάγραμμα 34 το οποίο παρουσιάζει συγκριτικά τις μέγιστες τιμές που ελήφθησαν σε κάθε σημείο στον κάθε πασσαλότοιχο.



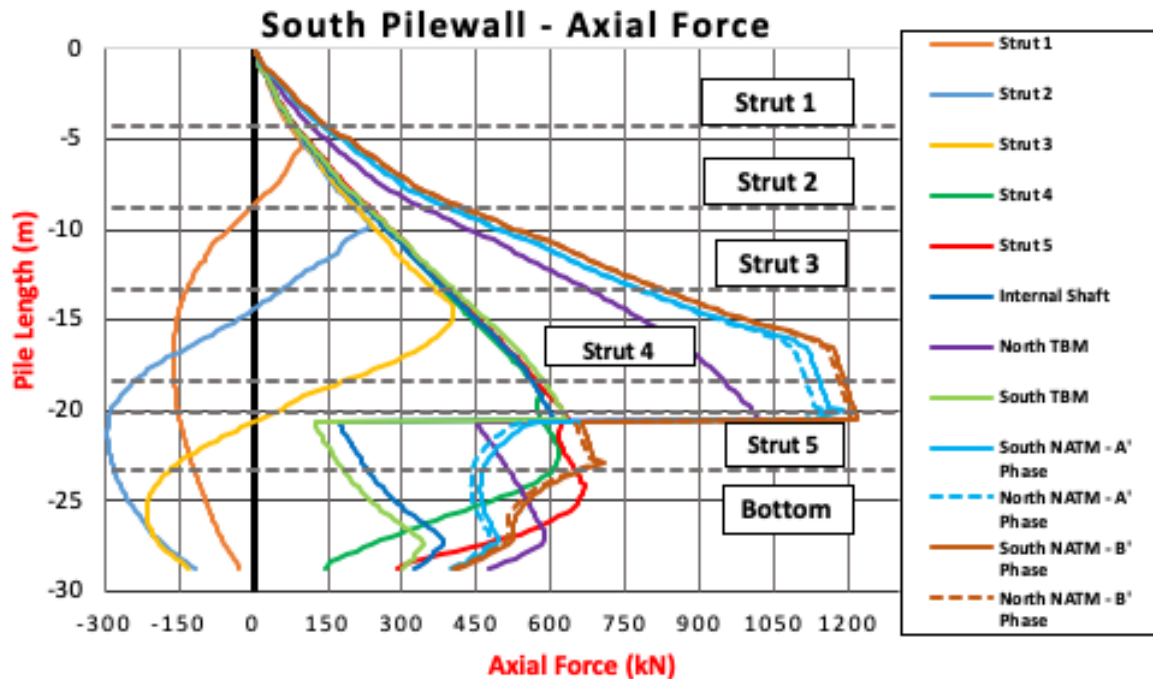
Διάγραμμα 34: Μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις για κάθε σημείο του πασσαλότοιχου σε κάθε έναν από τους πασσαλότοιχους.

Στο Διάγραμμα 34 παρατηρείται ότι στα σημεία των τριών πρώτων σειρών αντηρίδων, μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις λαμβάνονται στον Νότιο πασσαλότοιχο. Αυτό οφείλεται σε ασθενή εδαφικά χαρακτηριστικά σε αυτή την πλευρά του φρέατος αερισμού. Στη στάθμη των αντηρίδων τέσσερα και πέντε οι οριζόντιες μετακινήσεις και για τους δύο πασσαλότοιχους είναι παρεμφερείς.



5.3.2.3 Αξονικές Δυνάμεις πασσαλότοιχων

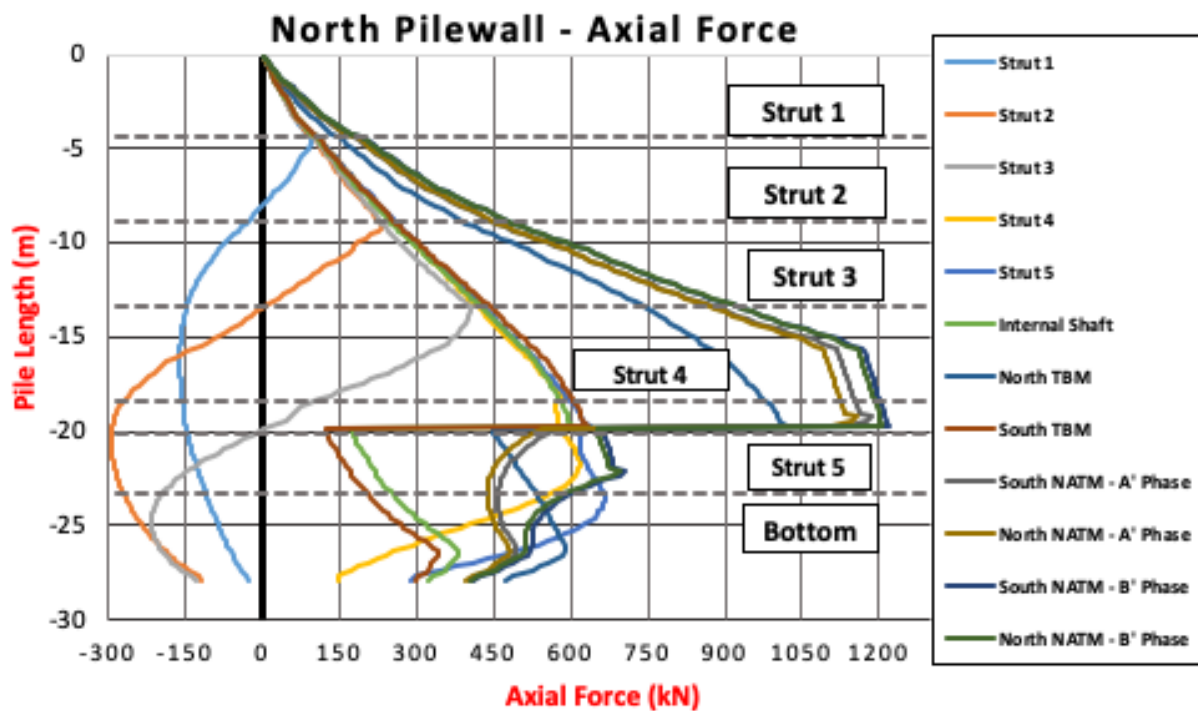
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις οι οποίες παραλαμβάνονται από τους πασσαλότοιχους του φρέατος αερισμού ανάλογα με το βάθος τους σε κάθε στάδιο κατασκευής. Τα σημεία στα οποία έγινε μέτρηση του αξονικού φορτίου είναι τα σημεία έδρασης των αντηρίδων του φρέατος εξαερισμού.



Διάγραμμα 35: Μεταβολή των αξονικών δυνάμεων του Νότιου πασσαλότοιχου, ανάλογα με το βάθος και το στάδιο κατασκευής.

Στο Διάγραμμα 35 παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις που παραλαμβάνονται από τον Νότιο πασσαλότοιχο σε συνάρτηση με το βάθος του ένα φάση κατασκευής. Παρατηρείται ότι κατά την εφαρμογή της 1^{ης} σειράς αντηρίδων, θλίψη στο σημείο εφαρμογής της. Αυτό συμβαίνει διότι τα τοιχώματα του φρέατος τείνουν να μετακινηθούν προς το εσωτερικό του με αποτέλεσμα να ασκούνται θλιπτικές αξονικές δυνάμεις και στον πάσσαλότοιχο. Το ίδιο παρατηρείται και κατά την εφαρμογή της 2^{ης} σειράς αντηρίδων. Στην εφαρμογή της 3^{ης} σειράς αντηρίδων η θλίψη η οποία προκαλείται είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τις προηγούμενες και αυτό οφείλεται στο ότι στο ίδιο βάθος βρίσκεται και ο υδροφόρος ορίζοντας και ασκούνται ταυτόχρονα και υδροστατικές πιέσεις. Κατά την διάνοιξη της Βόρειας σήραγγας TBM παρατηρείται θλιπτικό φορτίο στον πασσαλότοιχο στο υψόμετρο που βρίσκεται και η σήραγγα ενώ κατά την διάνοιξη της Νότιας σήραγγας TBM καταγράφονται μεγάλες θλιπτικές αξονικές δυνάμεις και αυτό οφείλεται στη γειτνίαση της σήραγγας με τον πασσαλότοιχο, με αποτέλεσμα να του ασκεί μεγάλα φορτία. Ουσιαστικά πρόκειται για αλληλεπίδραση της σήραγγας TBM με το φρέαρ και αυτό καταγράφεται

με την αύξηση των αξονικών δυνάμεων στον πασσαλότοιχο. Επίσης παρατηρείται ότι με την αύξηση του βάθους του φρέατος, υπάρχει σημαντική αύξηση στις αξονικές δυνάμεις επί του πασσαλότοιχου, καθώς οι εδαφικές ωθήσεις που δέχεται ο τοίχος είναι μεγαλύτερες και αφετέρου μετά την κατασκευή της 3^{ης} αντηρίδας, η παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα ασκεί σημαντικές ωθήσεις ως υδροστατική πίεση επί του πασσαλότοιχου. Όσον αφορά τη διάνοιξη των σηράγγων NATM παρατηρείται αύξηση των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων και κυρίως στη Νότια σήραγγα NATM που γειτνιάζει με τον πασσαλότοιχο και ουσιαστικά ασκεί επιρροή στα εντατικά μεγέθη του.



Διάγραμμα 36: Μεταβολή των αξονικών δυνάμεων του Βόρειου πασσαλότοιχου, ανάλογα με το βάθος και το στάδιο κατασκευής.

Βάση του Διάγραμμα 36 παρατηρείται θλίψη κατά την εφαρμογή των αντηρίδων στα σημεία έδρασης τους στον πασσαλότοιχο. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι κατά την εκσκαφή του φρέατος τα τοιχώματα του τείνουν να μετακινηθούν προς το εσωτερικό του γενοσός που ασκεί θλιπτικές αξονικές δυνάμεις στον πασσαλότοιχο. Στην 3^η σειρά αντηρίδων καταγράφεται μεγαλύτερη θλιπτική αξονική δύναμη διότι σε εκείνο το υψόμετρο βρίσκεται και ο υδροφόρος ορίζοντας και επομένως ασκούνται ταυτόχρονα και υδροστατικές πιέσεις. Τέλος κατά την διάνοιξη των σηράγγων TBM ασκούνται θλιπτικές αξονικές δυνάμεις στον πασσαλότοιχο και μεγαλύτερες θλιπτικές αξονικές δυνάμεις ασκούνται κατά τη διάνοιξη της Βόρειας σήραγγας. Αυτό οφείλεται στη γειτνίαση της σήραγγας με τον πασσαλότοιχο με αποτέλεσμα να του ασκεί μεγάλα φορτία. Δηλαδή υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ της Βόρειας σήραγγας TBM και του Βόρειου πασσαλότοιχου και αυτό καταγράφεται με την

αύξηση των αξονικών δυνάμεων. Επιπλέον παρατηρείται ότι με την αύξηση του βάθους του φρέατος υπάρχει σημαντική αύξηση στις αξονικές δυνάμεις επί του πασσαλότοιχου καθώς οι εδαφικές ωθήσεις που δέχεται ο τοίχος είναι μεγαλύτερες και αφετέρου μετά την κατασκευή της 3^{ης} αντηρίδας, η παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα ασκεί σημαντικές ωθήσεις ως υδροστατική πίεση επί του πασσαλότοιχου. Τέλος παρατηρείται ότι κατά τη διάνοιξη των σηράγγων NATM υπάρχει αύξηση των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων που ασκούνται στον πασσαλότοιχο και έτσι γίνεται αντιληπτή η αλληλεπίδραση τους των δύο κατασκευών.

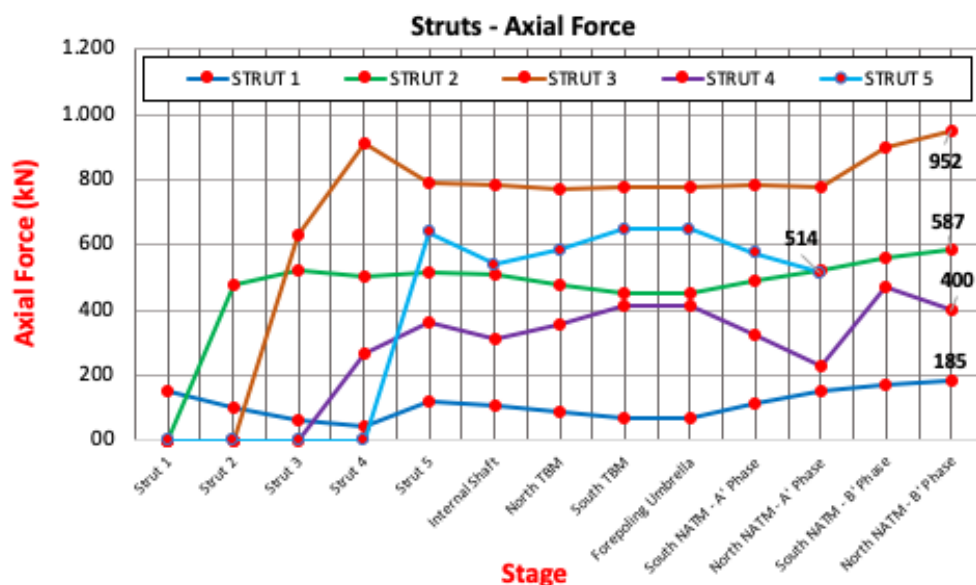
5.3.3 Εντατικά μεγέθη αντηρίδων του φρέατος αερισμού

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει αναλυτική παρουσίαση των εντατικών μεγεθών των αντηρίδων του φρέατος αερισμού. Αρχικά θα γίνει παρουσίαση των αξονικών δυνάμεων και η μεταβολή των αξονικών δυνάμεων που δέχονται οι αντηρίδες από τη στιγμή ενεργοποίησής τους έως και το τέλος της κατασκευής. Επιπλέον έχει υπολογιστεί το ποσοστό λειτουργίας των αντηρίδων (working level). Έπειτα θα παρουσιαστούν οι καμπτικές ροπές και η μεταβολή τους και οι οποίες παραλαμβάνονται από τις αντηρίδες και θα αναλυθεί η επίδραση που έχουν σε αυτές

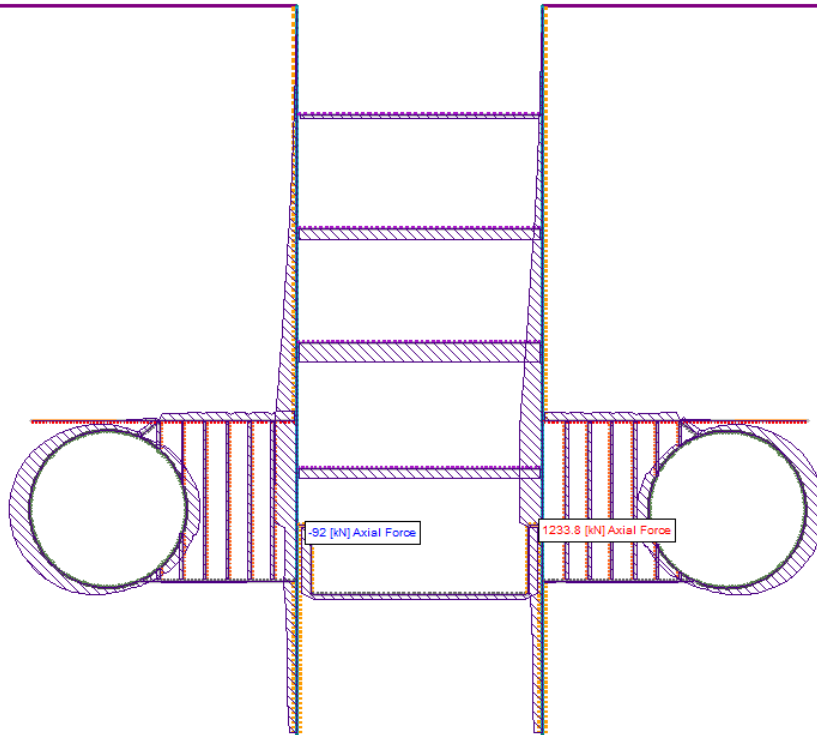
5.3.3.1 Αξονική Δύναμη των αντηρίδων του φρέατος αερισμού

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις οι οποίες παρελήφθησαν από τις αντηρίδες του φρέατος εξαερισμού σε κάθε στάδιο κατασκευής.

Στο Διάγραμμα 37 παρουσιάζεται η μέγιστη αξονική δύναμη των αντηρίδων σε κάθε στάδιο κατασκευής. Να σημειωθεί ότι το φορτίο μετριέται στο αμέσως επόμενο βήμα από την εγκατάσταση κάθε αντηρίδας. Αυτό συμβαίνει διότι όταν εγκαθίσταται μια αντηρίδα αρχικά είναι αφόρτιστη και η φόρτιση της ξεκινά στο αμέσως επόμενο στάδιο.



Διάγραμμα 37: Μεταβολή των μέγιστων αξονικών δυνάμεων σε κάθε στάδιο κατασκευής για κάθε αντηρίδα του φρέατος εξαερισμού



Εικόνα 58: Αξονικές δυνάμεις αντηρίδων στο τελευταίο στάδιο της κατασκευής.

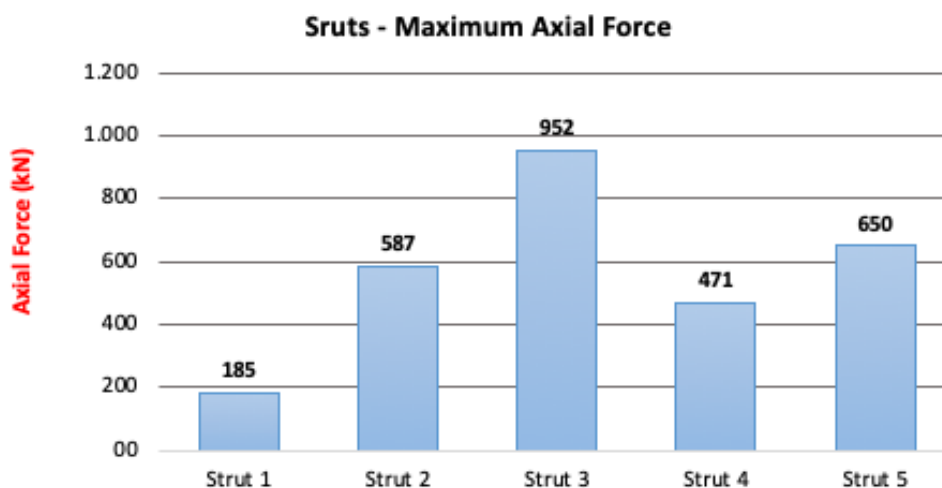
Με βάση το παραπάνω Διάγραμμα 37 παρατηρείται ότι οι αξονικές δυνάμεις κάθε αντηρίδας αναπτύσσονται έως και την ολοκλήρωση της Β' φάσης εκσκαφής. Εξαιρέση αποτελεί η 5^η αντηρίδα η οποία αφαιρείται για να ξεκινήσουν οι διανοίξεις των σηράγγων NATM. Οι τελικές αξονικές δυνάμεις που καταγράφονται έχουν ως εξής:

- ✓ 1^η αντηρίδα 185kN
- ✓ 2^η αντηρίδα 587kN
- ✓ 3^η αντηρίδα 952kN
- ✓ 4^η αντηρίδα 400kN
- ✓ 5^η αντηρίδα 514kN

Παρατηρείται ότι την μέγιστη αξονική δύναμη την λαμβάνει η 3^η αντηρίδα. Αυτό συμβαίνει διότι βρίσκεται ακριβώς επάνω στην μετάβαση με τον υδροφόρο ορίζοντα και λαμβάνει πολύ μεγάλες υδροστατικές πιέσεις. Επιπρόσθετα με βάση το προηγούμενο διάγραμμα, παρατηρείται η σημαντική επιρροή της διάνοιξης των σηράγγων TBM στο φρέαρ, καθώς η 4^η και η 5^η αντηρίδα που βρίσκονται περί την στάθμη των σηράγγων TBM, κατά τη διάνοιξη αυτών των δύο σηράγγων παρουσιάζουν αύξηση της αξονικής τους δύναμης, αποτέλεσμα της επίδρασης που έχει η διάνοιξη των σηράγγων TBM στο φρέαρ. Επιπλέον φαίνεται ότι όσο αυξάνεται το βάθος τόσο αυξάνεται και το αξονικό

φορτίο που ασκείται στις αντηρίδες. Αυτό συμβαίνει διότι με το βάθος αυξάνονται οι πλευρικές ωθήσεις που δέχονται οι αντηρίδες.

Στο Διάγραμμα 38 παρουσιάζονται οι μέγιστες αξονικές δυνάμεις που παρέλαβε κάθε αντηρίδα ίδιας στάθμης και έπειτα κατά τη διάνοιξη των σηράγγων TBM.

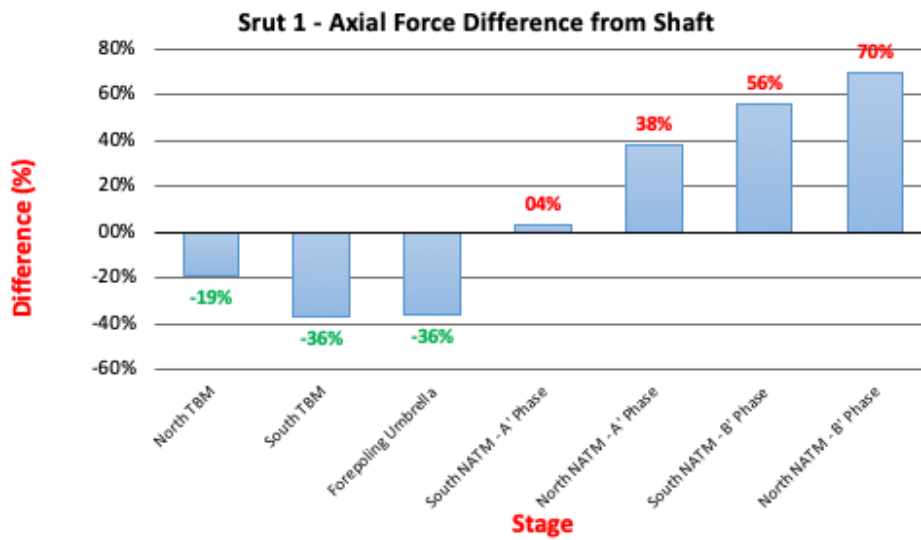


Διάγραμμα 38: Μέγιστες αξονικές δυνάμεις κάθε αντηρίδας

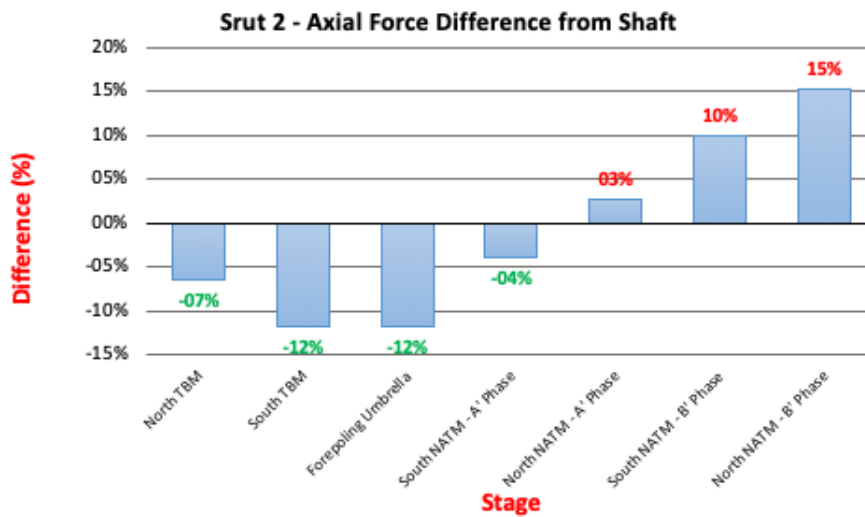
Βάσει του παραπάνω Διάγραμμα 38, παρατηρείται ότι την μέγιστη αξονική δύναμη την λαμβάνει η αντηρίδα 3. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως αυτό συμβαίνει διότι βρίσκεται ακριβώς πάνω στη μετάβαση με τον υδροφόρο ορίζοντα και λαμβάνει πολύ μεγάλες υδροστατικές πιέσεις. Επιπλέον παρατηρείται ότι η 5^η αντηρίδα λαμβάνει μεγάλες τιμές αλλά δεν μπορεί να υπάρξει ένα ολοκληρωμένο συμπέρασμα καθώς αφαιρείται κατά την ολοκλήρωση της κατασκευής του φρέατος αερισμού. Τέλος παρατηρείται ότι την μικρότερη αξονική δύναμη την λαμβάνει η 1^η αντηρίδα γεγονός που υποδηλώνει ότι επιφανειακά δεν υπάρχει μεγάλη οριζόντια φόρτιση του εδάφους και επομένως μεγάλη αλληλεπίδραση με τις υπόλοιπες κατασκευές.

5.3.3.2 Μεταβολή των αξονικών δυνάμεων

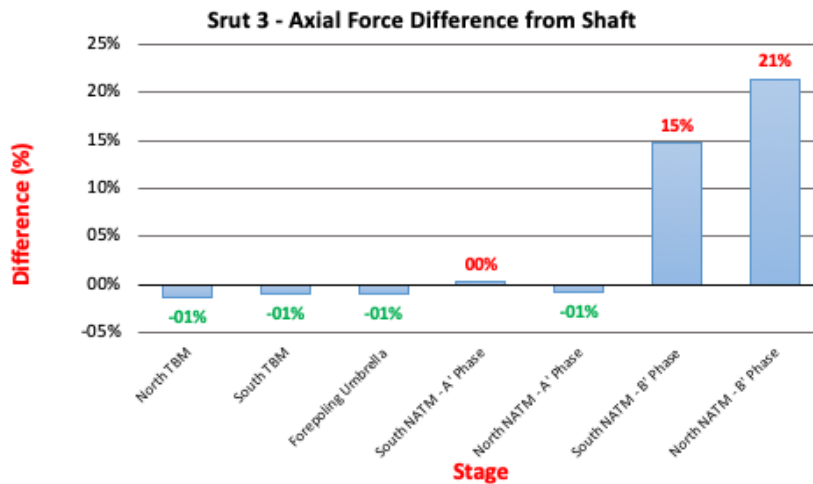
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή της αξονικής δύναμης που παραλαμβάνει κάθε αντηρίδα για κάθε στάδιο κατασκευής μετά το πέρας κατασκευής του φρέατος εξαερισμού. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται καλύτερα αντιληπτό σε ποιο στάδιο καταπονούνται περισσότερο οι αντηρίδες και σε τι βαθμό αλληλοεπιδρούν η κατασκευή των σηράγγων TBM και των σηράγγων NATM στο φρέαρ αερισμού.



Διάγραμμα 39: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 1^η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της κατασκευής του φρέατος αερισμού.

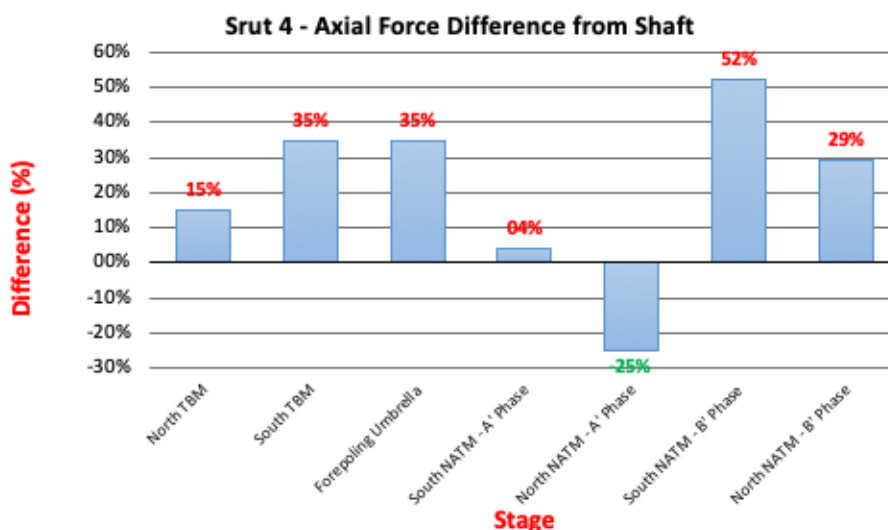


Διάγραμμα 40: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 2^η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της κατασκευής του φρέατος αερισμού.

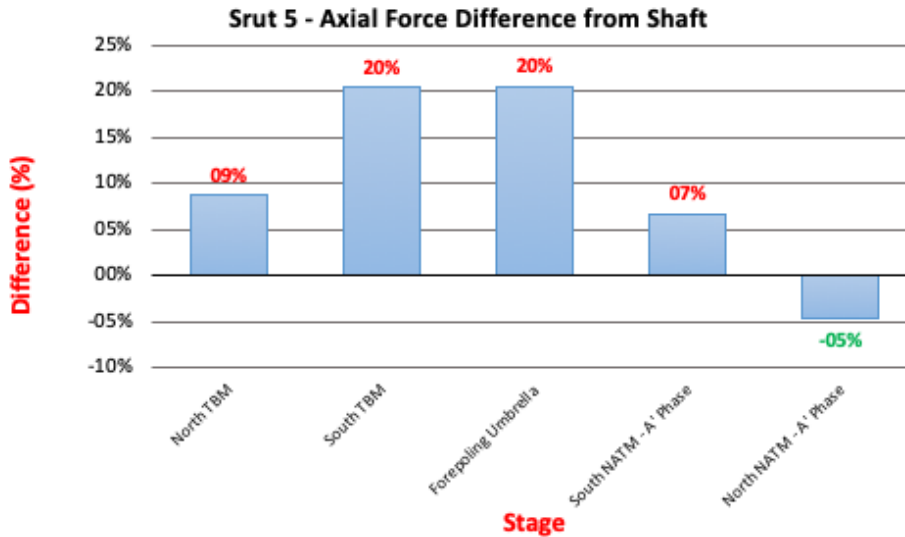


Διάγραμμα 41: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 3η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της κατασκευής του φρέατος αερισμού.

Στα Διάγραμμα 39 Διάγραμμα 40 και Διάγραμμα 41 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του αξονικού φορτίου στις αντηρίδες 1, 2, και 3 παρατηρείται ότι στα πρώτα στάδια καταγράφεται ένας εφελκυσμός στις αντηρίδες, γεγονός που οφείλεται στην αποτόνωση που λαμβάνει το έδαφος με την διάνοιξη των σηράγγων TBM. Κατά την διάνοιξη των σηράγγων NATM οι αντηρίδες αυτές αρχίζουν να δέχονται θλίψη η τιμή της οποίας αυξάνεται μέχρι και το τελευταίο στάδιο. Επομένως γίνεται με βάση τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται αντιληπτή η αλληλεπίδραση του φρέατος με την διάνοιξη των σηράγγων TBM και NATM.



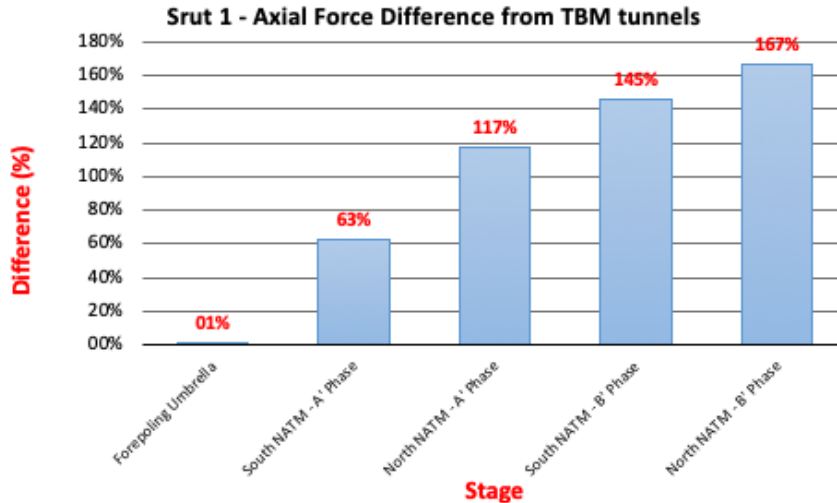
Διάγραμμα 42: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 4η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της κατασκευής του φρέατος αερισμού.



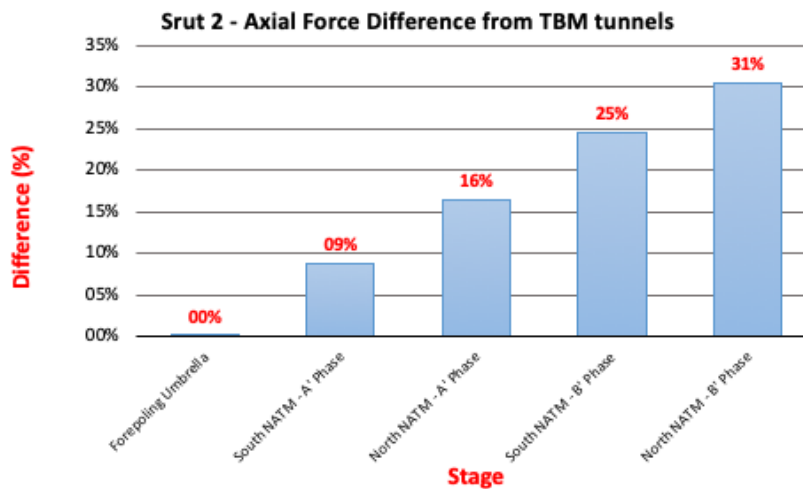
Διάγραμμα 43: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 5η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της κατασκευής του φρέατος αερισμού.

Στα Διάγραμμα 42 και Διάγραμμα 43 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης για τις αντηρίδες 4 και 5 αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι από την στιγμή διάνοιξης της Βόρειας σήραγγας TBM καταγράφεται θλίψη, γεγονός που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φρέατος με τις σήραγγες TBM. Η αντηρίδα 4 και η αντηρίδα 5 βρίσκονται περί το ίδιο υψόμετρο με τις σήραγγες TBM γεγονός που εξηγεί τις μεγάλες θλιπτικές αξονικές δυνάμεις που δέχονται κατά τα στάδια εκσκαφής τους. Κατά την Α' φάση εκσκαφής των σηράγγων NATM παρατηρείται μικρός εφελκυσμός στην αντηρίδα 4 και αυτό οφείλεται στην αποτόνωση του εδάφους και στην ανακατανομή των φορτίων. Έπειτα κατά την Β' φάση εκσκαφής των σηράγγων NATM η 4^η αντηρίδα δέχεται τα μέγιστα θλιπτικά φορτία γεγονός που υποδηλώνει την αλληλεπίδραση που έχει η διάνοιξη των σηράγγων NATM στο φρέαρ αερισμού. Η μέγιστη αύξηση της αξονικής δύναμης που δέχεται η 4^η αντηρίδα είναι της τάξης του 52%. Οι αντηρίδες 4 και 5 βρίσκονται περί την στάθμη των σηράγγων TBM και των σηράγγων NATM και κατά τη διάνοιξη αυτών των δύο σηράγγων παρουσιάζουν αύξηση της αξονικής τους δύναμης, αποτέλεσμα της επίδρασης που έχει η διάνοιξη των σηράγγων TBM και NATM στο φρέαρ.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που λαμβάνει η κάθε μια αντηρίδα από την στιγμή ολοκλήρωσης της εκσκαφής των σηράγγων TBM έως και την ολοκλήρωση της διάνοιξης των σηράγγων NATM.

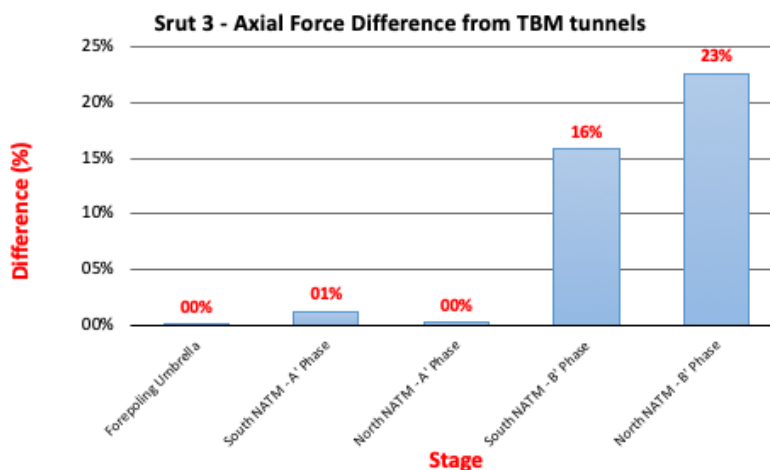


Διάγραμμα 44: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 1^η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της διάνοιξης των σηράγγων TBM.



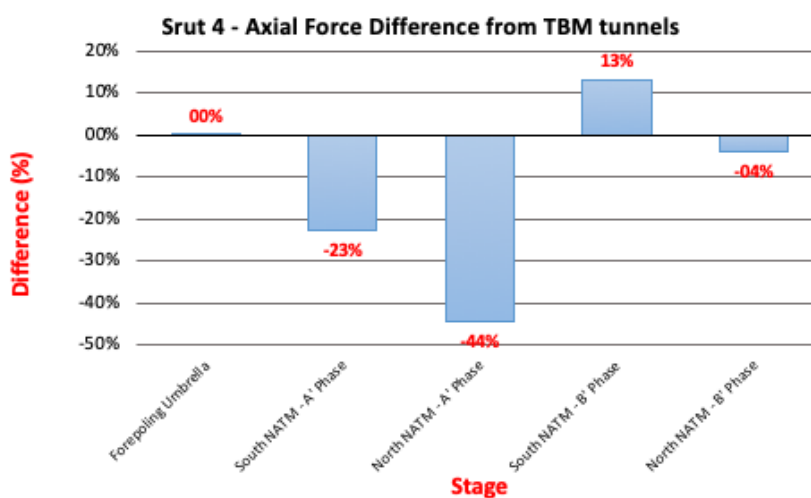
Διάγραμμα 45: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 2^η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της διάνοιξης των σηράγγων TBM.

Με βάση τα Διάγραμμα 44 Διάγραμμα 45 παρατηρείται στις αντηρίδες 1 και 2 δέχονται μεγάλες θλίπτικές αξονικές δυνάμεις κατά την διάνοιξη των σηράγγων NATM. Πιο συγκεκριμένα για την αντηρίδα 1 η ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που λαμβάνει φτάνει το 167% κατά τη Β' φάση εκσκαφής ενώ αντίστοιχα η αντηρίδα 2 φτάνει στο 31%. Αυτό συμβαίνει λόγω της αποτόνωσης του εδάφους και της ανακατανομής των φορτίων κατά την διάνοιξη των σηράγγων NATM. Επομένως η διάνοιξη των σηράγγων NATM ασκεί επιρροή στα εντατικά μεγέθη του φρέατος αερισμού.



Διάγραμμα 46: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 3η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της διάνοιξης των σηράγγων TBM.

Η ποσοστιαία μεταβολή της 3^{ης} αντηρίδας, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 46, παρατηρείται να αυξάνεται κατά τη Β' φάση εκσκαφής των σηράγγων NATM με μέγιστη ποσοστιαία μεταβολή της τάξης του 23%.



Διάγραμμα 47: Ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που δέχεται η 4η αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής από την στιγμή ολοκλήρωσης της διάνοιξης των σηράγγων TBM.

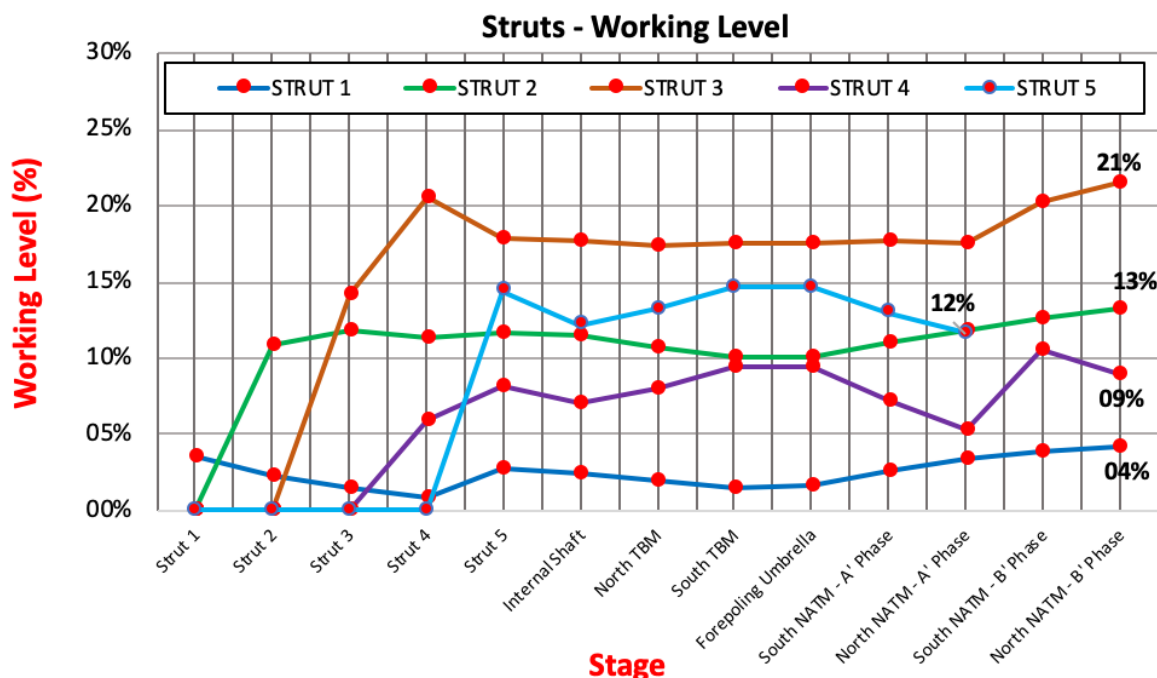
Με βάση το Διάγραμμα 47 παρατηρείται ότι η 4^η αντηρίδα αρχικά, κατά την Α' φάση διάνοιξης των σηράγγων NATM, εφελκύεται λόγω της οπτόνωσης του εδάφους σε εκείνη την περιοχή. Ενώ κατά την Β' φάση εκσκαφής των σηράγγων NATM αρχίζει να δέχεται θλιπτικό φορτίο.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι ανάλογα τη θέση και το βάθος στο οποίο έχει τοποθετηθεί κάθε αντηρίδα λαμβάνει και διαφορετική καταπόνηση. Επιπλέον γίνεται αντιληπτός ο μηχανισμός αποτόνωσης του εδάφους κατά την εκσκαφή των σηράγγων TBM, δηλαδή το άνω μέρος του φρέατος τείνει να παραμορφωθεί προς το εσωτερικό του ενώ το κάτω μέρος αποτονώνεται και τείνει να μετακινηθεί προς την εκσκαφή των σηράγγων TBM. Επιπλέον γίνεται αντιληπτή η επιρροή και η αλληλεπίδραση που δημιουργείται από την διάνοιξη των σηράγγων TBM και των σηράγγων NATM στο φρέαρ. Πιο ειδικά παρατηρείται ότι περισσότερο επηρεάζονται οι αντηρίδες οι οποίες βρίσκονται περί το ίδιο υψόμετρο είτε με τις σηράγγες TBM είτε με τις σηράγγες NATM, δηλαδή οι αντηρίδες 4 και 5.

5.3.3.3 Ποσοστό λειτουργίας των αντηρίδων (Working level)

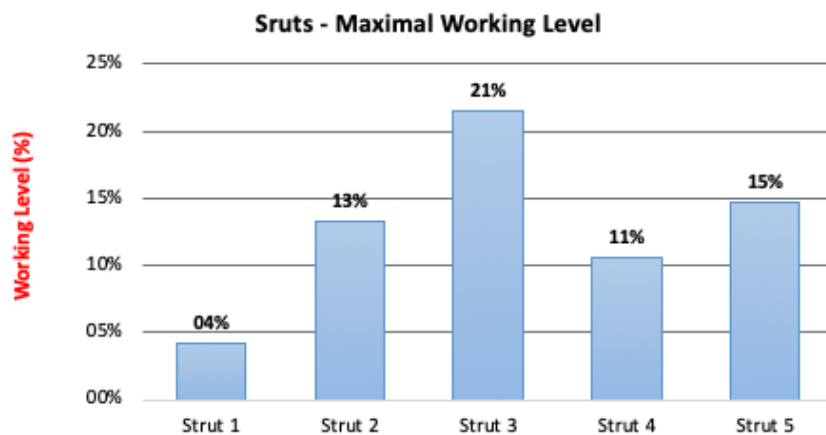
Για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού καταπόνησης των αντηρίδων από τις αξονικές δυνάμεις υπολογίστηκε το ποσοστό λειτουργίας τους. Πρακτικά το ποσοστό λειτουργίας κάθε αντηρίδας (working level), αποτελεί το κλάσμα του αξονικού φορτίου που καταγράφηκε σε κάθε αντηρίδα προς το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο χάλυβας χωρίς να διαρρεύσει, θεωρώντας χάλυβα με όριο διαρροής $\sigma_y = 275\text{MPa}$.

Στο διάγραμμα που παρουσιάζεται στη συνέχεια, απεικονίζεται το μέγιστο ποσοστό καταπόνησης για κάθε αντηρίδα για κάθε στάδιο κατασκευής.



Διάγραμμα 48: Μέγιστη τιμή λειτουργίας για κάθε αντηρίδα σε κάθε στάδιο κατασκευής.

Το ποσοστό λειτουργίας (working level) σε κάθε αντηρίδα και ανά στάδιο κατασκευής, παρουσιάζεται στο ακόλουθο Διάγραμμα 49. Όπως έχει προαναφερθεί, η 3^η αντηρίδα είναι αυτή που καταπονείται περισσότερο, καθώς βρίσκεται αφενός στην περιοχή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και αφετέρου βρίσκεται σε περιοχή καθ' ύψος με ασθενή μηχανικά χαρακτηριστικά.

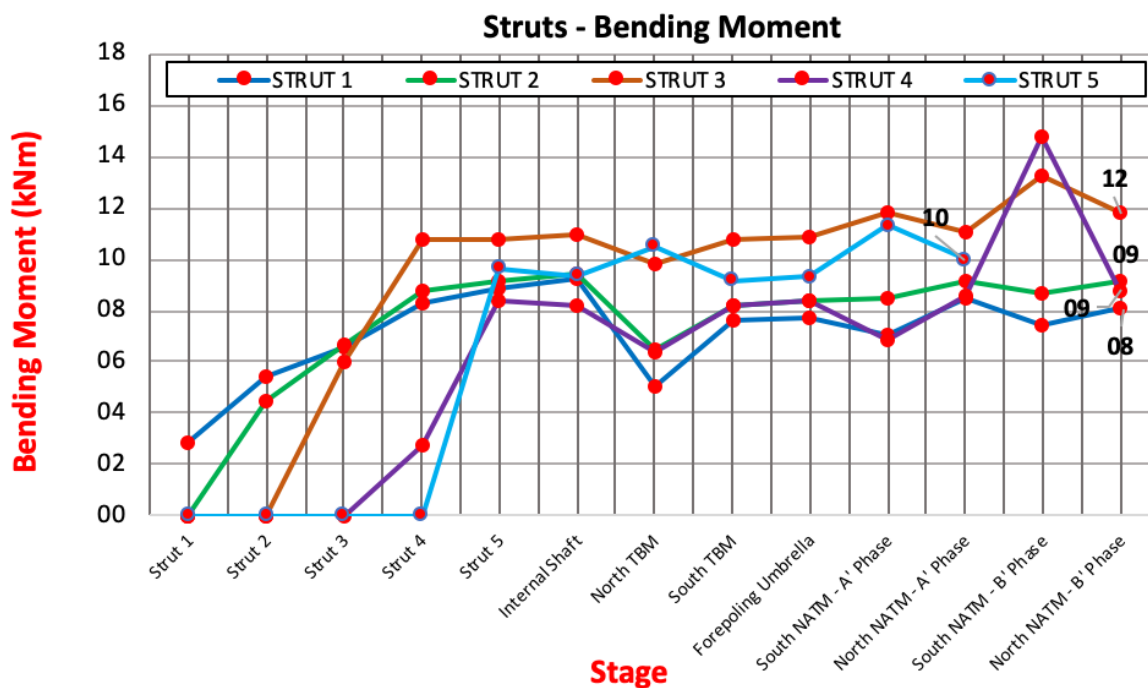


Διάγραμμα 49:Μέγιστες τιμές λειτουργίας για κάθε αντηρίδα.

Παρατηρείται ότι με την αύξηση του βάθους του φρέατος υπάρχει σημαντική αύξηση στην καταπόνηση των αντηρίδων καθώς οι εδαφικές ωθήσεις που δέχεται το φρέαρ είναι μεγαλύτερες. Επιπλέον η παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα μετά την κατασκευή της 3^{ης} αντηρίδας ασκεί σημαντικές αξονικές θλιπτικές δυνάμεις. Παράλληλα η διάνοιξη των σηράγγων TBM και των σηράγγων NATM στο υψόμετρο της αντηρίδας 4 και 5 επηρεάζει άμεσα την φόρτιση των αντηρίδων και επομένως το ποσοστό λειτουργίας τους.

5.3.3.4 Καμπτικές ροπές των αντηρίδων του φρέατος αερισμού

Σε αυτή την ενότητα αναλύονται οι καμπτικές ροπές οι οποίες παρελήφθησαν από της αντηρίδες της κατασκευής από την στιγμή τοποθέτησης τους έως και την ολοκλήρωση των εκσκαφών των σηράγγων. Στο παρακάτω Διάγραμμα 50 απεικονίζεται η μεταβολή των καμπτικών ροπών για κάθε αντηρίδα ανά φάση κατασκευής.



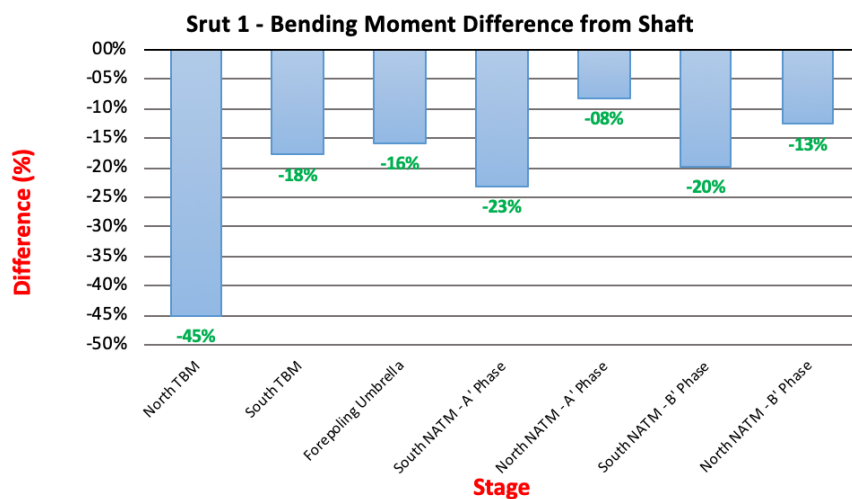
Διάγραμμα 50: Μεταβολή της καμπτικής ροπής για κάθε αντηρίδα ανά στάδιο κατασκευής.

Στο Διάγραμμα 50 απεικονίζεται η μεταβολή της καμπτικής ροπής για κάθε αντηρίδα ανά στάδιο κατασκευής. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι κατά την κατασκευή του φρέατος οι καμπτικές ροπές που καταπονούν τις αντηρίδες κατά κύριο λόγο αυξάνονται ενώ κατά τη διάνοιξη των σηράγγων TBM οι καμπτικές ροπές αρχικά μειώνονται, κατά τη διάνοιξη της βόρειας σήραγγας, ενώ κατά τη διάνοιξη της Νότιας σήραγγας ξανά παρατηρείται αύξηση των καμπτικών ροπών. Αυτή η μεταβολή στο μέγεθος των καμπτικών ροπών στα στάδια διάνοιξης των σηράγγων TBM, οφείλεται στο γεγονός ότι επειδή σκάβεται πρώτα η νότια σήραγγα, καταπονείται περισσότερο η νότια πλευρά του φρέατος και στη συνέχεια η βόρεια πλευρά του φρέατος από την αντίστοιχη σήραγγα TBM, που προκαλεί «στροφή» στις δύο κατώτερες αντηρίδες που γειτνιάζουν με τις σήραγγες TBM. Έπειτα κατά τη διάνοιξη των σηράγγων NATM παρατηρείται απότομη αύξηση της καμπτικής ροπής που παραλαμβάνουν οι αντηρίδες 3 και 4. Αυτό συμβαίνει λόγω της αλληλεπίδρασης του φρέατος με τις σήραγγες NATM. Επιπλέον επηρεάζει περισσότερο την 3^η και την 4^η αντηρίδα λόγω του ότι βρίσκονται σε πιο μεγάλο υψόμετρο σε σχέση με τις άλλες. Για την αντηρίδα 5 δεν μπορεί να εξαχθεί ολοκληρωμένο συμπέρασμα διότι αφαιρείται πριν την διάνοιξη της β' φάσης των σηράγγων NATM. Ωστόσο μέχρι εκείνο το σημείο καταγράφεται η επιρροή που της ασκείται από την διάνοιξη των σηράγγων. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι κατά την κατασκευή του φρέατος οι καμπτικές ροπές που καταπονούν τις αντηρίδες κατά κύριο λόγο αυξάνονται ενώ κατά τη διάνοιξη των σηράγγων TBM οι καμπτικές ροπές αρχικά μειώνονται, κατά τη διάνοιξη της Νότιας σήραγγας, ενώ κατά τη διάνοιξη της Βόρειας σήραγγας ξανά παρατηρείται αύξηση των καμπτικών ροπών. Έπειτα κατά τη διάνοιξη

των σηράγγων NATM παρατηρείται απότομη αύξηση των καμπτικών ροπών. Αυτή η μεταβολή στο μέγεθος των καμπτικών ροπών στα στάδια διάνοιξης των σηράγγων TBM και NATM οφείλεται στο γεγονός ότι επειδή σκάβεται πρώτα η βόρεια σήραγγα TBM καταπονείται περισσότερο η βόρεια πλευρά του φρέατος και στη συνέχεια η νότια πλευρά του φρέατος από την αντίστοιχη σήραγγα TBM, που προκαλεί «στροφή» στις δύο κατώτερες αντηρίδες που γειτνιάζουν με τις σήραγγες TBM. Αντίστοιχα ο ίδιος μηχανισμός λειτουργεί και κατά τη διάνοιξη των σηράγγων NATM οι οποίες από ότι καταγράφεται ασκούν μεγαλύτερη επιρροή στο φρέαρ αερισμού καθώς καταπονείται με πολύ μεγαλύτερες καμπτικές ροπές.

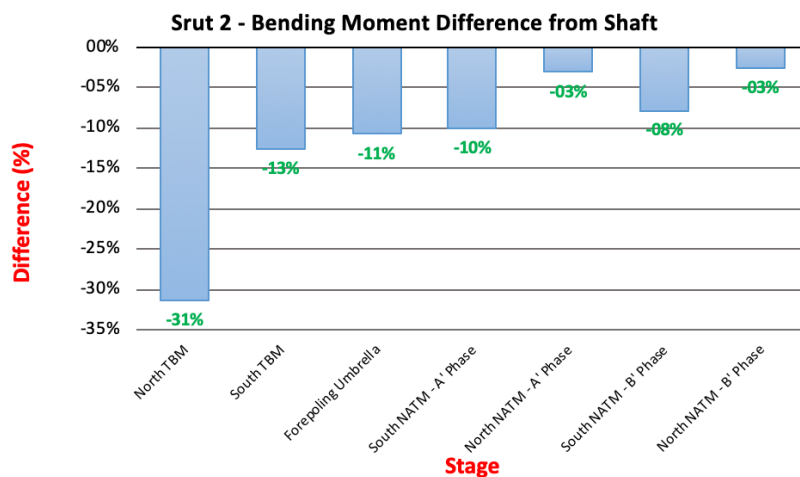
5.3.3.5 Μεταβολή καμπτικών ροπών στις αντηρίδες του φρέατος αερισμού

Για την καλύτερη ανάλυση και κατανόηση των καταπονήσεων που δέχονται οι αντηρίδες, παρουσιάζονται παρακάτω διαγράμματα που αφορούν ξεχωριστά κάθε αντηρίδα και τις ροπές τις οποίες αυτή παρέλαβε.



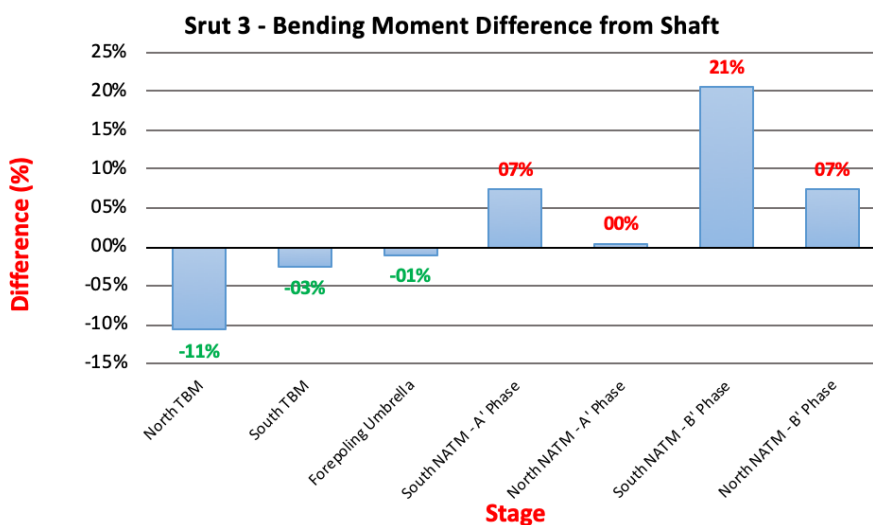
Διάγραμμα 51: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 1^{ης} αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής

Από το Διάγραμμα 51 παρατηρείται ότι η 1^η αντηρίδα δέχεται αποκλειστικά θλιπτικές καμπτικές ροπές. Κατά την διάνοιξη της Βόρεια σήραγγας TBM το ποσοστό της θλιπτικής ροπής αυξάνει στο 45% και έπειτα με την διάνοιξη και της Νότιας σήραγγας TBM μειώνεται στο 18%. Στην Α' φάση εκσκαφής της Νότιας σήραγγας NATM αυξάνεται στο 23% ενώ στην Α φάση εκσκαφής της Βόρεια σήραγγας μειώνεται στο 8%, αυτό οφείλεται στους ασθενέστερους εδαφικούς σχηματισμούς στη Νότια πλευρά του φρέατος. Αντίστοιχα παρατηρείται αύξηση και κατά τη Β φάση εκσκαφής των σηράγγων NATM, στη Νότια σήραγγα το ποσοστό είναι της τάξης του 20% και της Βόρεια της τάξης του 13%. Παρατηρείται δηλαδή ότι οι διάνοιξη των σηράγγων επηρεάζουν την φόρτιση που δέχεται η 1^η αντηρίδα, υπάρχει δηλαδή αλληλεπίδραση μεταξύ φρέατος και σηράγγων.



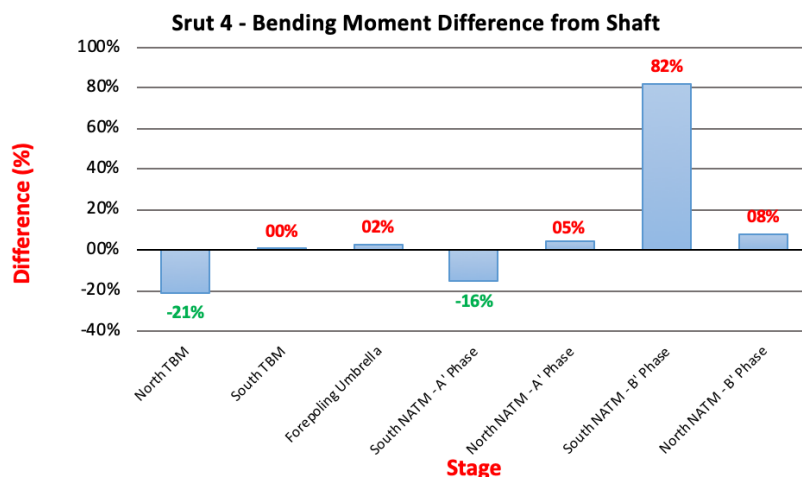
Διάγραμμα 52: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 2ης αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής

Στο Διάγραμμα 52 παρουσιάζεται η μεταβολή των καμπτικών ροπών της 2^{ης} αντηρίδας σε κάθε στάδιο εκσκαφής. Παρατηρείται ότι η μέγιστη μεταβολή που λαμβάνει, της τάξης του 31%, σημειώνεται κατά την εκσκαφή της Νότιας σήραγγας TBM.



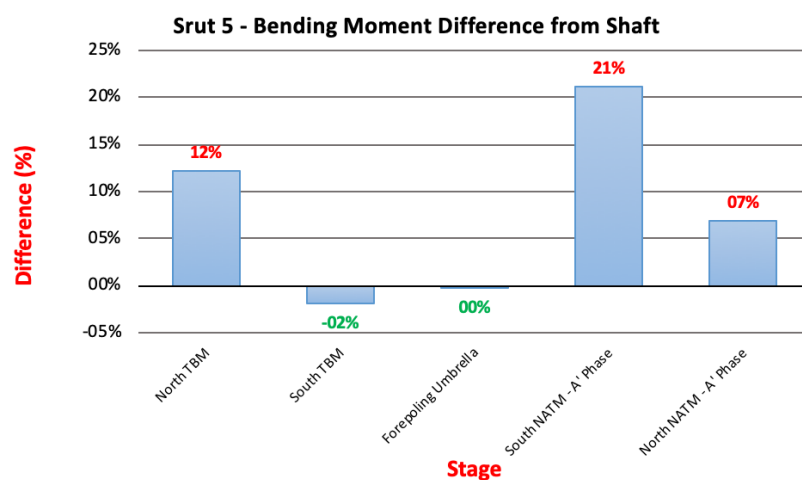
Διάγραμμα 53: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 3ης αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής

Βάση του Διάγραμμα 53 στο οποίο παρουσιάζεται η μεταβολή των καμπτικών ροπών της 3^{ης} αντηρίδας παρατηρείται στα στάδια διάνοιξης των σηράγγων TBM μια θλιπτική ροπή στη δοκό και έπειτα κατά την διάνοιξη των σηράγγων τύπου NATM εφελκυστική ροπή που η μεταβολή της φτάνει το 21%.



Διάγραμμα 54: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 4ης αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής

Στο Διάγραμμα 54 παρουσιάζεται η μεταβολή των καμπτικών ροπών για την 4^η αντηρίδα. Παρατηρείται ότι αρχικά κατά την διάνοιξη της βόρειας σήραγγας TBM λαμβάνει αυξημένες θλιπτικές καμπτικές ροπές. Γεγονός που υποδηλώνει την αλληλεπίδραση της διάνοιξης των σήραγγων TBM στην κατασκευή του φρέατος αερισμού, καθώς η 4^η αντηρίδα βρίσκεται περί το ίδιο υψόμετρο με τις σήραγγες TBM. Έπειτα κατά την Α' φάση εκσκαφής και Β' φάση εκσκαφής της Νότιας σήραγγας NATM καταγράφεται μεγάλη καταπόνηση από καμπτικές ροπές στην αντηρίδα 4. Αυτό υποδηλώνει την επιρροή της νότιας σήραγγας NATM στη 4^η αντηρίδα

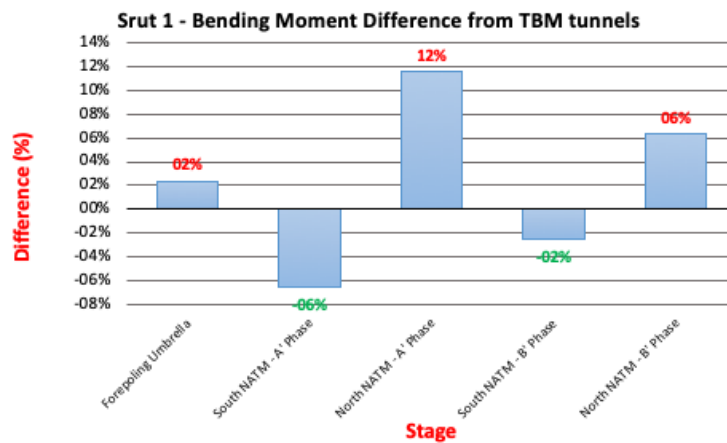


Διάγραμμα 55: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 5ης αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται αποφόρτιση των πρώτων αντηρίδων που βρίσκονται στα πρώτα μέτρα εκσκαφής του φρέατος και φόρτιση των αντηρίδων που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη διάνοιξη των σήραγγων TBM υπάρχει χαλάρωση της παραπάνω

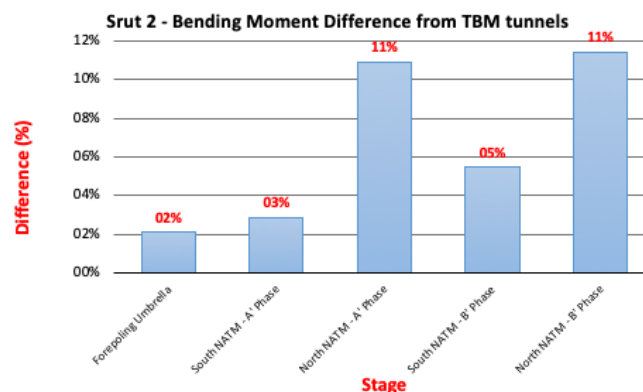
περιοχής. Αντιθέτως στα κατώτερα σημεία που γίνεται εκσκαφή της σήραγγας NATM τείνει να μετακινηθεί ο τοίχος στο οποίο αρθρώνονται οι αντηρίδες και για αυτό αναπτύσσονται σημαντικές ροπές.

Στη συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα που παρουσιάζουν την μεταβολή των καμπτικών ροπών για κάθε αντηρίδα από τη στιγμή ολοκλήρωσης της εκσκαφής των TBM έως και την ολοκλήρωση της διάνοιξης των σηράγγων NATM.

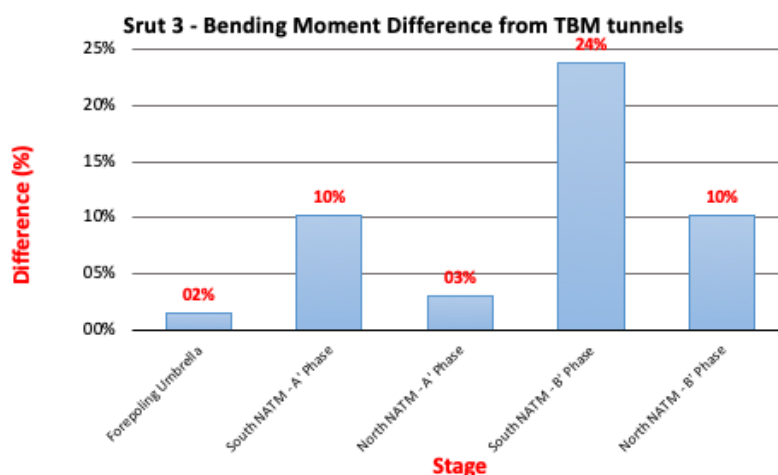


Διάγραμμα 56: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 1^{ης} αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής των σηράγγων NATM.

Στο Διάγραμμα 56 παρουσιάζεται η μεταβολή της καμπτικής ροπής στην 1^η αντηρίδα για κάθε στάδιο εκσκαφής των σηράγγων NATM. Αυτός ο τρόπος παρουσίασης των καμπτικών ροπών δημιουργεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τον τρόπο αλληλεπίδρασης των εγκάρσιων σηράγγων NATM με την κατασκευή του φρέατος αερισμού. Παρατηρείται ότι κατά την Α' φάση εκσκαφής της Βόρειας πλευράς οι αύξηση της καμπτικής ροπής έφτασε περί το 12%. Το ποσοστό αυτό είναι το μέγιστο ποσοστό μεταβολής των καμπτικών ροπών για την 1^η αντηρίδα κατά την διάνοιξη των σηράγγων NATM. Κατά την εκσκαφή των σηράγγων NATM τα πλευρικά τοιχώματα τείνουν να συγκλείσουν προς το εσωτερικό της εκσκαφής, γεγονός που δημιουργεί εφελκυστικές καμπτικές ροπές στην 1^η αντηρίδα.

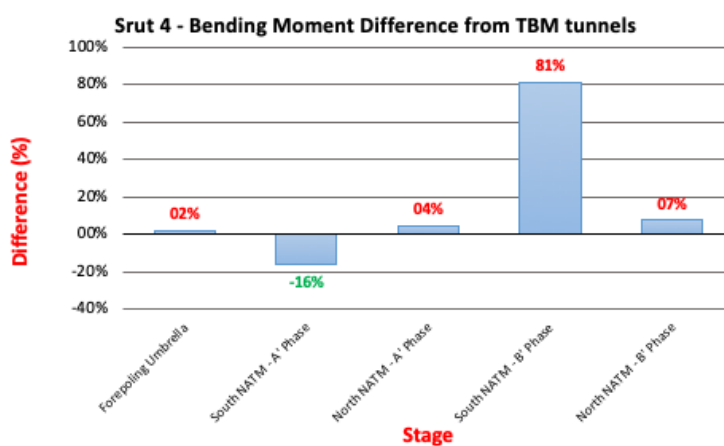


Διάγραμμα 57: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 2^{ης} αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής



Διάγραμμα 58: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 3^{ης} αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής

Στα Διάγραμμα 57 Διάγραμμα 58 παρουσιάζεται η μεταβολή της καμπτικής ροπής στην 2^η και 3^η αντηρίδα για κάθε στάδιο εκσκαφής των σηράγγων NATM. Παρατηρείται ότι και οι δύο αντηρίδες δέχονται θλιπτικές καμπτικές ροπές από την Α' Φάση της εκσκαφής των εγκάρσιων σηράγγων NATM. Η καμπτική ροπή της δεύτερης αντηρίδας μεταβάλλεται περί το 11% ενώ της τρίτης περί το 24%. Οι αυξημένες καμπτικές ροπές της 3^{ης} αντηρίδας οφείλονται πέρα από την επιρροή της εκσκαφής των σηράγγων NATM και στην παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα σε εκείνο το υψόμετρο, ασκώντας έτσι σημαντικές υδροστατικές πιέσεις.



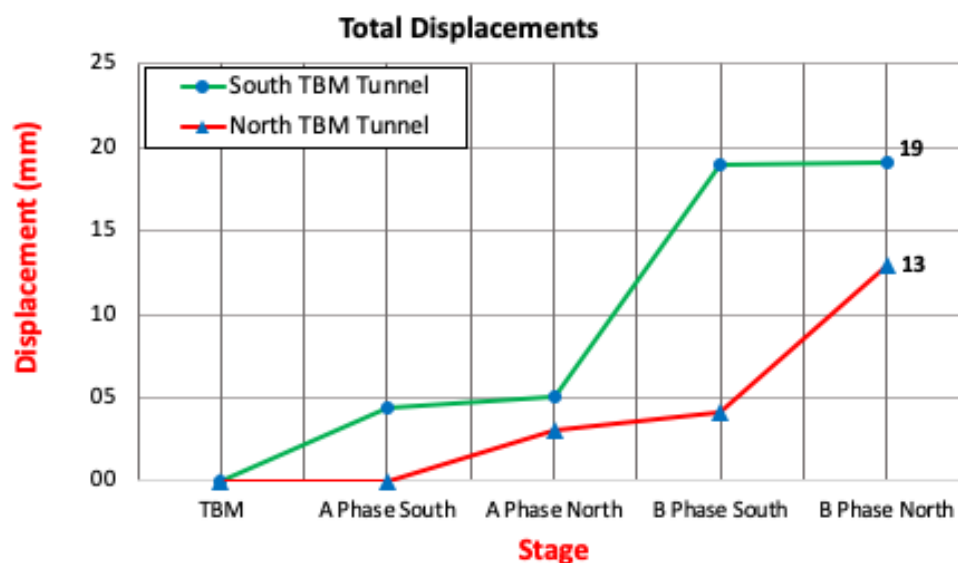
Διάγραμμα 59: Μεταβολή των καμπτικών ροπών της 4^{ης} αντηρίδας για κάθε στάδιο εκσκαφής

Στο Διάγραμμα 59 παρουσιάζεται η μεταβολή της καμπτικής ροπής στην 2^η και 3^η αντηρίδα για κάθε στάδιο εκσκαφής των σηράγγων NATM. Παρατηρείται πολύ μεγάλη αύξηση της καμπτικής ροπής κατά τη Β' φάση κατασκευής της Νότιας σήραγγας. Αυτό συμβαίνει διότι η αντηρίδα 4 βρίσκεται περί το ίδιο ύψος με τις σήραγγες NATM γεγονός που της προκαλεί αυξημένες ροπές. Η Β' φάση της Νότιας σήραγγας είναι η πρώτη φάση που αφαιρείται το προσωρινό πλευρικό τοίχωμα γεγονός που ασκεί πολύ μεγάλες εφελκυστικές ροπές στην 4^η αντηρίδα του φρέατος αερισμού. Ουσιαστικά πρόκειται

για αλληλεπίδραση των σιηράγγων NATM με το φρέαρ και αυτή καταγράφεται με την αύξηση των καμπτικών ροπών στις αντηρίδες.

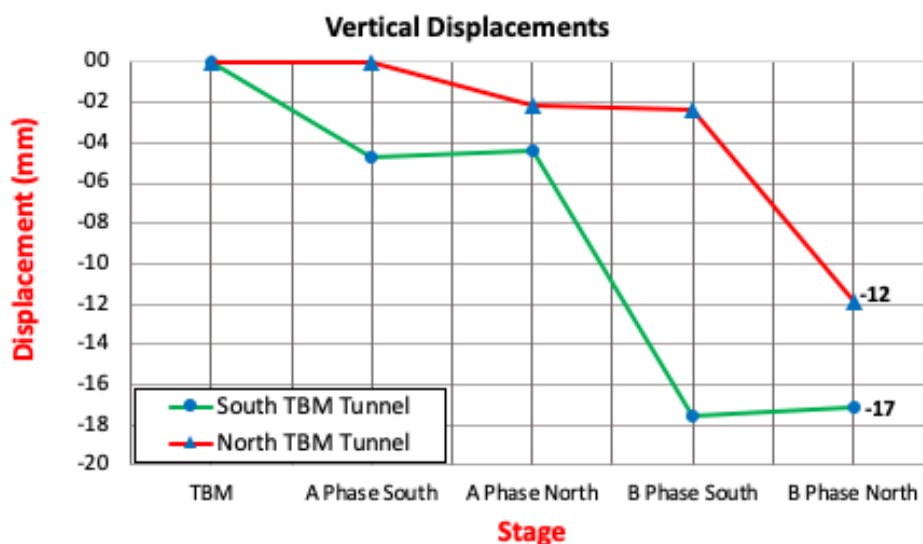
5.3.4 TBM TUNNELS

Στα Διάγραμμα 60 Διάγραμμα 61 παρατίθενται οι ολικές μετακινήσεις (Total Displacements) και κατακόρυφες μετακινήσεις (Vertical Displacements) που προκλήθηκαν στο εσωτερικό της σιηράγγας, ανά εξεταζόμενη θέση και ανά στάδιο κατασκευής. Οι θέσεις στις οποίες λήφθηκαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν την στέψη των σιηράγγων TBM.



Διάγραμμα 60: Μεταβολή των ολικών μετακινήσεων στη στέψη των δύο σιηράγγων TBM, ανά φάση κατασκευής.

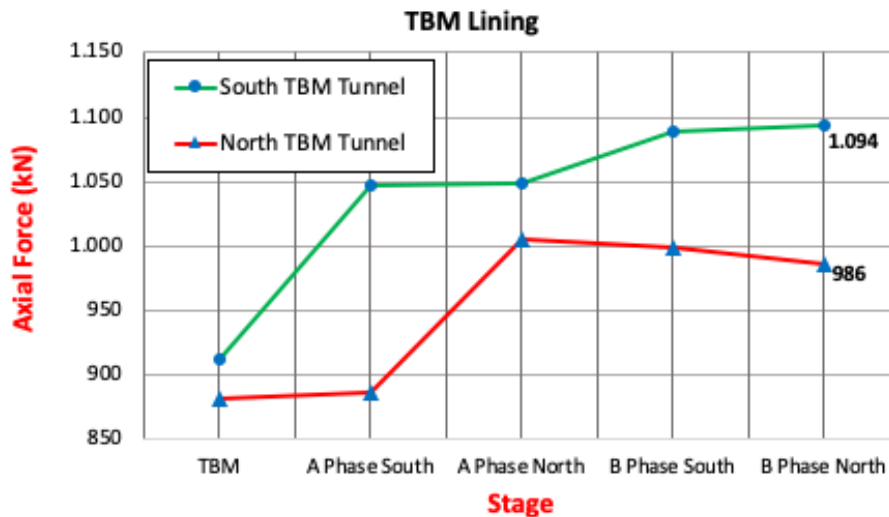
Παρατηρείται από το Διάγραμμα 60 που καταγράφει την μεταβολή των ολικών μετακινήσεων ότι η μέγιστη μετακίνηση που καταγράφεται στη στέψη του Νοτίου TBM είναι της τάξης των 19mm ενώ η αντίστοιχη του Βορείου TBM της τάξης των 13mm. Παρατηρείται επίσης μια απότομη αύξηση των ολικών μετακινήσεων της Νότιας σιηράγγας TBM κατά τη Β Φάση εκσκαφής της Νότιας σιηράγγας NATM αυτό συμβαίνει λόγω της γειννίας των δύο Νότιων σιηράγγων και της αλληλεπίδρασης που ασκεί η εκσκαφή της μίας στην άλλη. Αντίστοιχα παρατηρείται και για την Βόρεια σιηράγγα, δηλαδή στη στέψη της Βόρεια σιηράγγας λαμβάνονται μεγαλύτερες ολικές μετακινήσεις κατά την εκσκαφή της Α' και Β' φάσης της Βόρεια σιηράγγας NATM.



Διάγραμμα 61: Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων στη στέψη των δύο σηράγγων TBM, ανά φάση κατασκευής.

Στο Διάγραμμα 61 παρουσιάζεται η μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων στη στέψη των σηράγγων TBM κατά την εκσκαφή των εγκάρσιων σηράγγων NATM. Όσον αφορά τη στέψη της Νότιας σήραγγας παρατηρείται ότι καταγράφονται μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις κατά την διάνοιξη της Α' και Β' φάσης εκσκαφής της Νότιας σήραγγας NATM. Αυτό συμβαίνει λόγω της γειννίας των δύο σηράγγων με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις στις υφιστάμενες σήραγγες. Αντίστοιχα το ίδιο παρατηρείται και στη στέψη της Βόρειας σήραγγας TBM, δηλαδή κατά την εκσκαφή της Α' και Β' φάσης της Βόρειας σήραγγας NATM, η στέψη της Βόρειας σήραγγας TBM λαμβάνει μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις λόγω της αλληλεπίδρασης που της ασκείται.

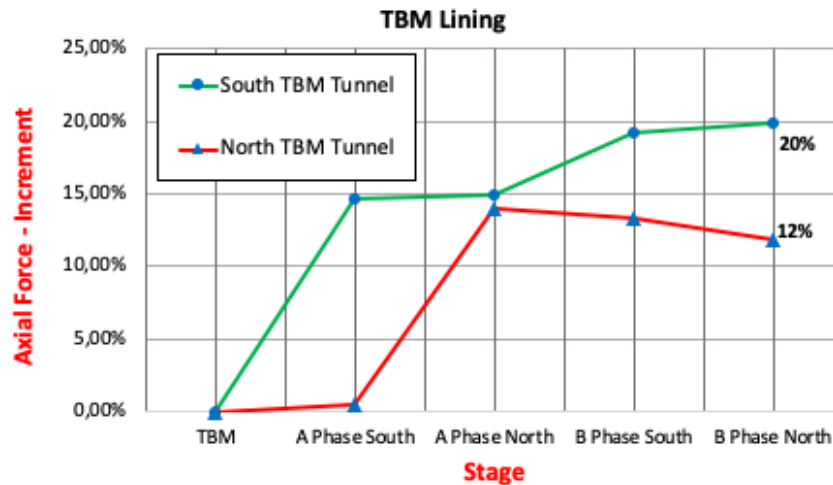
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών που παρελήφθησαν στο εσωτερικό της σήραγγας, ανά εξεταζόμενη θέση και ανά στάδιο κατασκευής. Οι θέσεις στις οποίες λήφθηκαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν την στέψη των σηράγγων TBM όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 62.



Διάγραμμα 62: Μεταβολή των αξονικών δυνάμεων στη στέψη των δύο σηράγγων TBM, ανά φάση κατασκευής.

Στο Διάγραμμα 62 παρουσιάζεται η αξονική δύναμη η οποία ασκείται στη στέψη των δύο σηράγγων TBM για κάθε στάδιο κατασκευής των εγκάρσιων σηράγγων NATM. Οι μέγιστες τιμές των αξονικών δυνάμεων οι οποίες ασκούνται είναι της τάξης των 1094kN για τη Νότια σήραγγα TBM και 1000kN για τη Βόρεια σήραγγα TBM. Επιπλέον παρατηρείται η απότομη αύξηση της τιμής της αξονικής δύναμης που παραλαμβάνει η Νότια σήραγγα κατά την Α' φάση εκσκαφής της Νότιας σήραγγας NATM, γεγονός που οφείλεται στη γειτνίαση και στην αλληλεπίδραση των δύο κατασκευών. Αντίστοιχα παρατηρείται και στη Βόρεια σήραγγα NATM απότομη αύξηση της αξονικής δύναμης που δέχεται κατά την διάνοιξη της Α' φάσης εκσκαφής της Βόρειας σήραγγας που επίσης οφείλεται στη γειτνίαση και στην αλληλεπίδραση των κατασκευών.

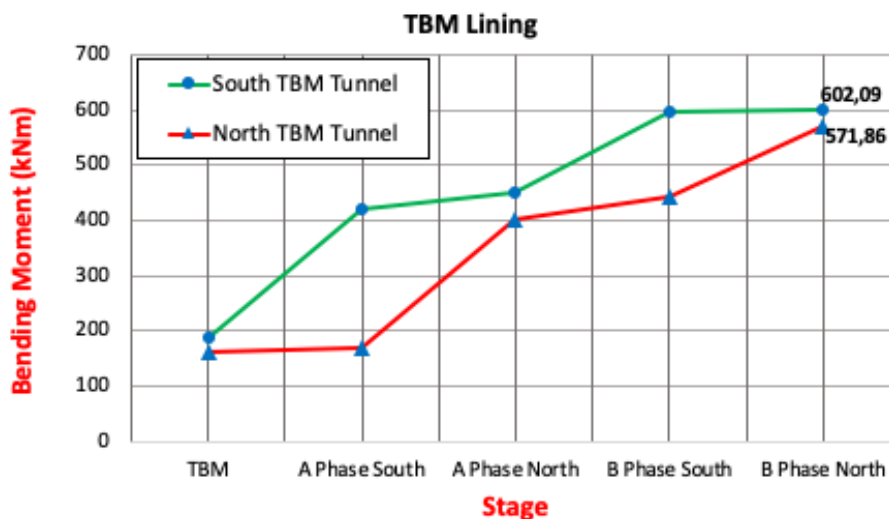
Στο Διάγραμμα 63 που παρουσιάζεται στη συνέχεια απεικονίζεται η ποσοστιαία μεταβολή της αξονικής δύναμης που καταπονεί τη στέψη των δύο σηράγγων TBM για κάθε στάδιο κατασκευής των εγκάρσιων σηράγγων NATM.



Διάγραμμα 63: Ποσοστιαία μεταβολή των αξονικών δυνάμεων στη στέψη των δύο σηράγγων TBM, ανά φάση κατασκευής.

Βάσει του διαγράμματος παρατηρείται ότι η αξονική δύναμη που ασκείται στη Νότια σήραγγα αυξάνεται κατά 20% σε σχέση με την αρχική της τιμή και η τελική τιμή αποτελεί και την μέγιστη τιμή. Αντιθέτως στη Βόρεια σήραγγα η τελική τιμή που λαμβάνει είναι 12% μεγαλύτερη από την αρχική ωστόσο δεν είναι η μέγιστη που έχει παραλάβει.

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι καμπτικές ροπές οι οποίες παρελήφθησαν στη στέψη των σηράγγων TBM για κάθε στάδιο κατασκευής των σηράγγων NATM.

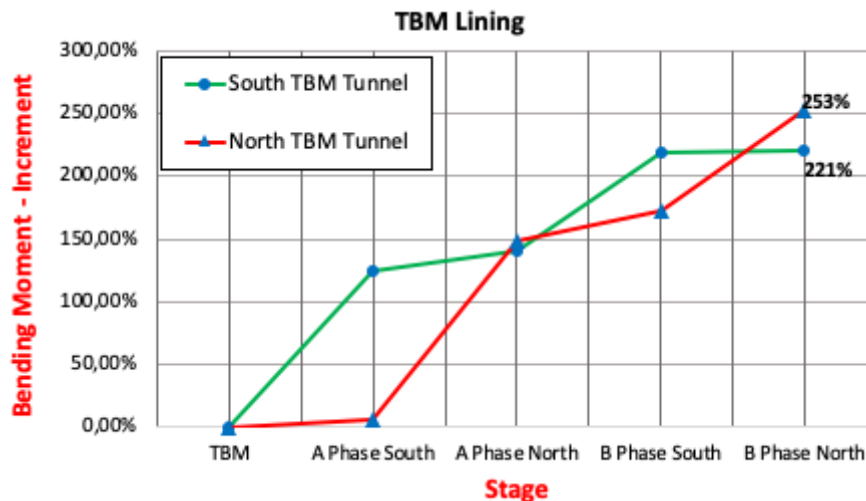


Διάγραμμα 64: Μεταβολή των καμπτικών ροπών στη στέψη των δύο σηράγγων TBM, ανά φάση κατασκευής.

Στο Διάγραμμα 64 παρουσιάζεται η μεταβολή των καμπτικών ροπών για κάθε σήραγγα, η μέγιστη τιμή που καταγράφεται για τη Νότια σήραγγα είναι της τάξης των 602,09kNm ενώ για τη Βόρεια σήραγγα της τάξης των 571,86kNm. Παρατηρείται ότι οι σήραγγες TBM με τις εγκάρσιες NATM αλληλοεπιδρούν για αυτό διότι στη στέψη της Νοτίου σήραγγας παρατηρείται μεγάλη αύξηση των

καμπτικών ροπών κατά την εκσκαφή της Α' και Β' φάσης της Νότιας σήραγγας NATM. Αντίστοιχα στη στέψη της Βόρειας σήραγγας TBM καταγράφονται μεγάλες αυξήσεις στις ροπές κατά την Α' και Β' φάση εκσκαφής της Βόρειας σήραγγας NATM.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή των καμπτικών ροπών που παραλαμβάνονται από τις σήραγγες TBM σε κάθε φάση κατασκευής των σηράγγων NATM.

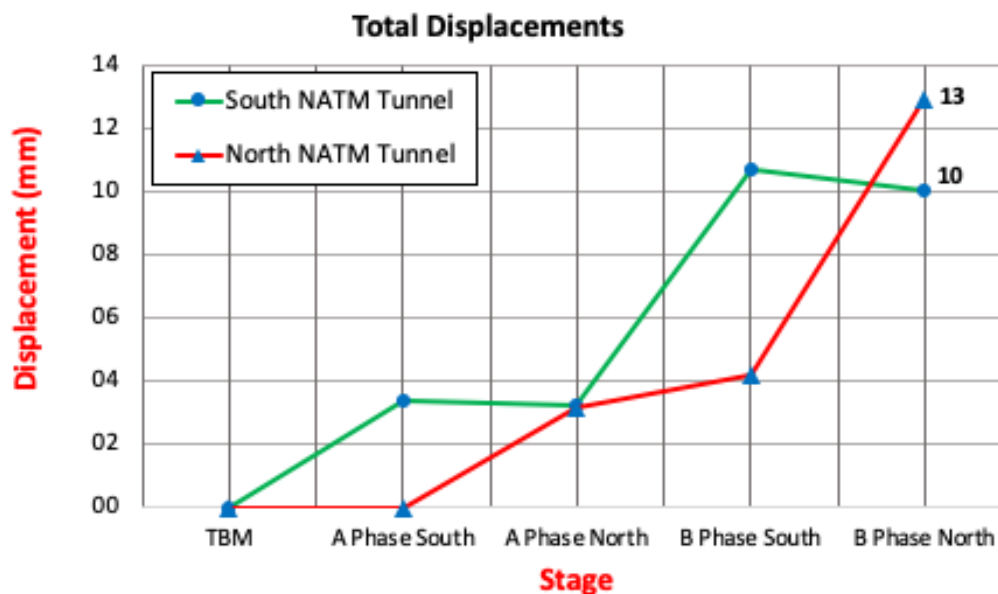


Διάγραμμα 65: Ποσοστιαία μεταβολή των καμπτικών ροπών στη στέψη των δύο σηράγγων TBM, ανά φάση κατασκευής.

Βάση του Διάγραμμα 65 παρατηρείται ότι η ποσοστιαία μεταβολή της καμπτικής ροπής της Νότιας σήραγγας είναι της τάξης του 221% ενώ αντίστοιχα της Βόρεια της τάξης του 253%. Επιπλέον παρατηρείται στη Βόρεια σήραγγα TBM ότι ενώ στην Α' φάση εκσκαφής της Βόρειας σήραγγας NATM υπάρχει μια πολύ μικρή αύξηση των καμπτικών ροπών, στη Β' φάση εκσκαφής η μεταβολή αυτή είναι της τάξης του 143,1%. Κάτι αντίστοιχο μπορεί να παρατηρηθεί και για την Νότια σήραγγα TBM, δηλαδή ότι κατά την Α' φάση εκσκαφής της Νότιας σήραγγας υπάρχει μια απότομη αύξηση της παραλαμβάνουσας ροπής της τάξης των 125,2%, γεγονός που δεν συμβαίνει κατά την Α' φάση εκσκαφής της Βόρειας σήραγγας. Αυτό οφείλεται στη γειτνίαση των σηράγγων και στην αλλαγή του των φορτίσεων του εδάφους κατά την διάνοιξη των εγκάρσιων σηράγγων. Ο ίδιος μηχανισμός φαίνεται να λειτουργεί και στη Β' φάση εκσκαφής των σηράγγων αλλά καταγράφοντας μικρότερες μεταβολές των καμπτικών ροπών.

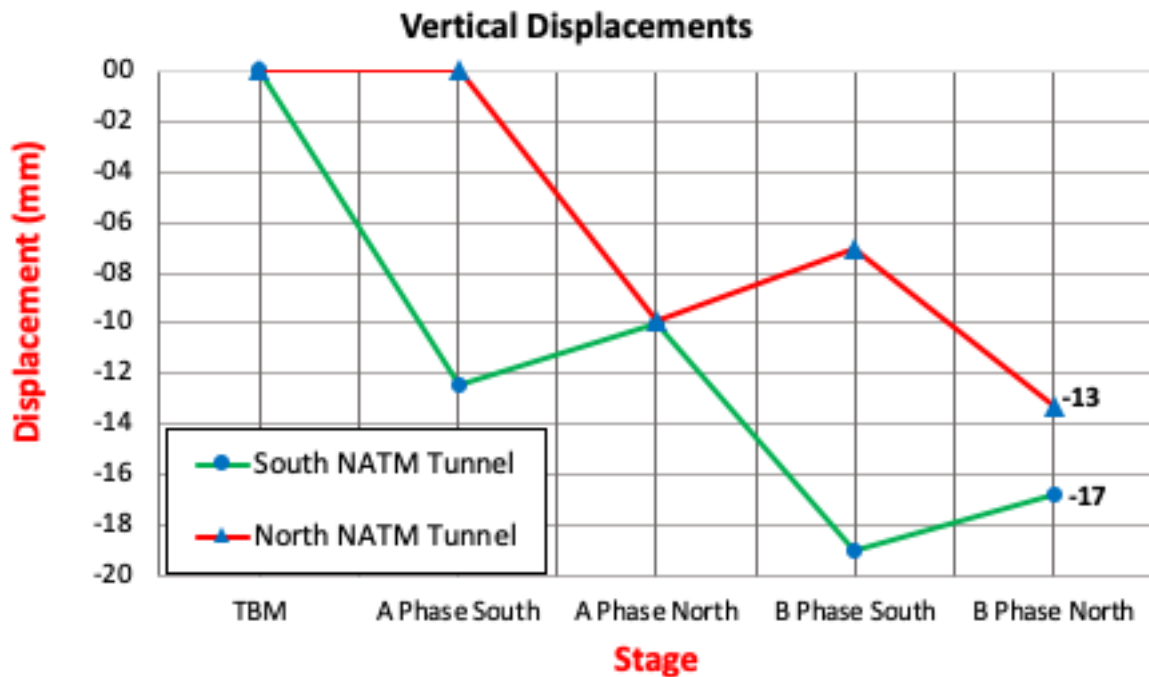
5.3.5 Σήραγγες NATM

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή των ολικών μετακινήσεων (Total Displacements) και των κατακόρυφων μετακινήσεων (Vertical Displacements) που καταγράφηκαν στη στέψη των σηράγγων NATM κατά τη φάση κατασκευής τους.



Διάγραμμα 66: Μεταβολή των ολικών μετακινήσεων στη στέψη των δύο σηράγγων NATM, ανά φάση κατασκευής.

Στο Διάγραμμα 66 παρατηρείται η μεταβολή των ολικών μετακινήσεων στη στέψη των σηράγγων NATM για κάθε στάδιο κατασκευής τους. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται για την Νότια σήραγγα είναι της τάξης των 10mm ενώ για τη Βόρεια σήραγγα της τάξης των 13mm. Επιπλέον παρατηρείται ότι οι μετακινήσεις στη στέψη της Νότιας σήραγγας αυξάνονται απότομα κατά την εκσκαφή της Α' και Β' φάσης της Νότιας σήραγγας NATM. Αυτό συμβαίνει λόγω γειννίας και αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων. Αντίστοιχα ο ίδιο μηχανισμός συμβαίνει ανάμεσα στην Βόρεια σήραγγα TBM και στην Α' και Β' φάση εκσκαφής της Βόρειας σήραγγας NATM.



Διάγραμμα 67: Μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων στη στέψη των δύο σηράγγων NATM, ανά φάση κατασκευής.

Στο Διάγραμμα 67 παρατηρείται ότι οι κατακόρυφες μετακινήσεις λαμβάνουν αρνητικές τιμές γεγονός που σημαίνει ότι πρόκειται για καθιζήσεις. Η Νότια σήραγγα παρατηρείται ότι λαμβάνει μεγάλες καθιζήσεις κατά την εκσκαφή της Νότιου σήραγγας NATM. Πιο συγκεκριμένα κατά την εκσκαφή της Α' φάσης της νοτίου σήραγγας NATM λαμβάνει καθίζηση περί τα 12.5mm ενώ κατά τη Β' φάση εκσκαφής της νοτίου σήραγγας NATM περί τα 19mm. Αντίστοιχα η Βόρεια σήραγγα TBM λαμβάνει μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη της κατά την Α' και Β' φάση εκσκαφής της εγκάρσιας σήραγγας NATM. Αυτό συμβαίνει λόγω της γειτνίασης των σηράγγων και της αλληλεπίδρασης που ασκείται στις σήραγγες TBM από τη διάνοιξη των σηράγγων του φρέατος.

5.3.5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με στοιχεία μελέτης

Με βάση τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τη περίπτωση του συνολικού μοντέλου που περιλαμβάνει το φρέαρ αερισμού, τις σήραγγες TBM και τις εγκάρσιες σήραγγες NATM, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προβλέπονται στη μελέτη του έργου.

Στον ακόλουθο πίνακα γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής με τα αντίστοιχα μεγέθη που προτείνει η μελέτη του έργου.

Πίνακας 28: Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής ανάλυσης για το φρέαρ αερισμού, με αποτελέσματα μελέτης έργου.

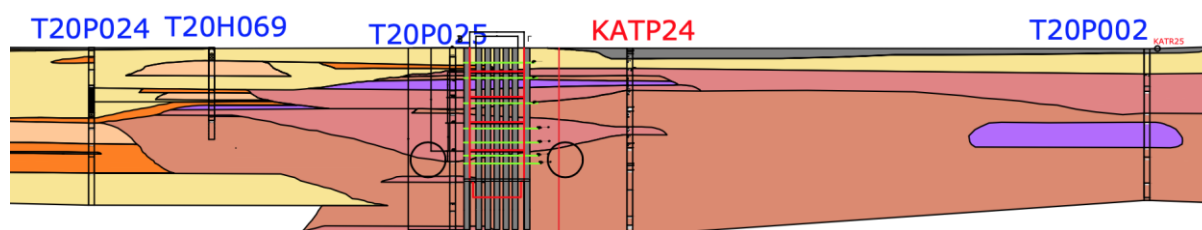
Μέγεθος	Φάση εκσκαφής φρέατος	Τιμή αριθμητικής ανάλυσης	Τιμές μελέτης	Διαφορά
Σύγκλιση οροφής σήραγγας NATM	A	12.5mm	16mm	-21.8%
	B	19mm	26mm	-26.92%
Οριζόντιες μετακινήσεις πασσαλότοιχου	2 ^η αντηρίδα	7.9mm	9mm	-12.2%
	3 ^η αντηρίδα	9.7mm	10mm	-3%
	5 ^η αντηρίδα	5.95mm	14mm	-57.5%
Συνολική κατακόρυφη μετακίνηση επιφανείας	Τελικό Στάδιο	8.20mm	29mm	-71.72
Μέση τιμή				-36.10%

Με βάση τον προηγούμενο πίνακα, καταγράφεται μια μέση διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων της μελέτης του έργου, της τάξης του 36%. Η διαφορά αυτή πιθανώς οφείλεται στο διαφορετικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που έχει χρησιμοποιηθεί στη μελέτη του έργου, στις διαφορετικές παραδοχές ως προς τη μεθοδολογία ανάλυσης αλλά και παραμέτρων υποστήριξης και σίγουρα στις διαφορετικές γεωτεχνικές παραμέτρους του εδάφους, δεδομένου ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει γίνει εκ' του μηδενός γεωτεχνική αξιολόγηση και εκτίμηση εδαφικών παραμέτρων.

6 Συμπεράσματα

Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι η διερεύνηση του μηχανισμού αλληλεπίδρασης μεταξύ του φρέατος αερισμού Κρήτης, των δίδυμων σηράγγων TBM και των συνδετήριων σηράγγων NATM. Για την προσομοίωση της εκσκαφής του φρέατος, αλλά και των σηράγγων, τόσο των TBM όσο και των εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM, από το φρέαρ προς τις σήραγγες TBM, έγιναν δισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με το λογισμικό προσομοίωσης RS2 της εταιρείας Rocscience.

Για την προσομοίωση των γεωτεχνικών παραμέτρων χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί γεωτεχνική αξιολόγηση για την περιοχή του φρέατος. Η γεωτεχνική αξιολόγηση βασίστηκε σε δεδομένα γεωτρήσεων που είχαν πραγματοποιηθεί κατά μήκος της χάραξης του μετρό Θεσσαλονίκης και στα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν είτε επιτόπου είτε εργαστηριακά. Αρχικά για την καλύτερη παρουσίαση και κατανόηση των δεδομένων δημιουργήθηκε γεωλογική τομή (Εικόνα 59) της περιοχής βάσει των δεδομένων των οποίων υπήρχαν διαθέσιμα από σειρά δειγματοληπτικών και πρεσσιομετρικών γεωτρήσεων. Με βάση τα διαθέσιμα γεωτεχνικά στοιχεία κατά μήκος της περιοχής του σταθμού φαίνεται ότι οι γεωτεχνικές συνθήκες δεν διαφοροποιούνται ιδιαίτερα στρωματογραφικά. Οι όποιες διαφορές αφορούν κυρίως στην επικράτηση αμμώδους ή αργιλικού χαρακτήρα των συμμετεχόντων μικτών σχηματισμών.



Εικόνα 59: Γεωλογική τομή στη θέση του φρέατος

Έπειτα πραγματοποιήθηκε ομαδοποίηση των εδαφικών κατηγοριών και εξαγωγή των εδαφικών χαρακτηριστικών βάσει των δεδομένων από τις εδαφικές δοκιμές. Η ομαδοποίηση των εδαφών παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 29: Εδαφικές κατηγορίες που προέκυψαν από ομαδοποίηση των εδαφικών χαρακτηριστικών.

I	Τεχνητές επιχωματώσεις
Ia	Καστανή αμμώδης άργιλος με κατά θέσεις χαλαρή άμμος
IIa	Στιφρή άργιλος με ενστρώσεις πυκνής άμμου
IIb	Πυκνή αργιλώδης άμμος

Στη συνέχεια ακολούθησε η εισαγωγή των εδαφικών χαρακτηριστικών στο λογισμικό προσομοίωσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων RS2 και έπειτα η προσομοίωση των κατασκευών. Για την προσομοίωση του φρέατος αερισμού, των σηράγγων TBM και των εγκάρσιων σηράγγων NATM προσομοιώθηκαν τρία (3) διαφορετικά μοντέλα τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίθηκαν με τα μετρούμενα μεγέθη κατά την κατασκευή και με τις τιμές της μελέτης εφαρμογής.

Πιο συγκεκριμένα κατά την κατασκευή του φρέατος αερισμού και των σηράγγων (TBM και NATM) καταγράφηκαν οι μεταβολές των μετακινήσεων και των εντατικών μεγεθών μέσω ενός ολοκληρωμένου συστήματος γεωτεχνικής και δομητικής παρακολούθησης. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις της επιφανείας καταγράφηκαν μέσω χωροσταθμικών ακίδων που τοποθετήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή του έργου ενώ η μεταβολή των εντατικών μεγεθών των αντηρίδων ελήφθησαν μέσω κυψελών πίεσης και παραμορφωσίμετρων. Επιπλέον για την παρακολούθηση των οριζόντιων μετακινήσεων σε σχέση με το βάθος τοποθετήθηκαν αποκλισιόμετρα εντός των πασσάλων του φρέατος αερισμού. Τα δεδομένα των μετρήσεων από την κατασκευή που προαναφέρθηκαν αξιοποιήθηκαν σε αυτή την έρευνα μέσω σύγκρισης με των αντίστοιχων αποτελεσμάτων των αριθμητικών μοντέλων που προσομοίωσαν την κατασκευή. Επιπλέον τα αποτελέσματα από την γεωτεχνική και δομητική παρακολούθηση χρησιμοποιήθηκαν και ως μέσο επαλήθευσης των αποτελεσμάτων των αριθμητικών μοντέλων.

Πιο αναλυτικά για την προσομοίωση των κατασκευών πραγματοποιήθηκε ο συνδυασμός αναλύσεων των ακόλουθων τριών (3) περιπτώσεων :

1. Εκσκαφή και υποστήριξη του φρέατος εξαερισμού, καθώς και των δύο σηράγγων TBM εκατέρωθεν αυτού.
2. Εκσκαφή και υποστήριξη της εγκάρσιας σήραγγας τύπου NATM από το φρέαρ προς τη σήραγγα TBM.

3. Συνδυασμός όλων των παραπάνω, με τη θεώρηση ότι οι σήραγγες τύπου NATM προσομοιώνονται εγκάρσια στη διατομή με μεγάλο πλάτος, λόγω της τρισδιάστατης γεωμετρίας (κάθετη στη δισδιάστατη ανάλυση).

Οι συνδυασμοί αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν το πρώτο (1^ο) και το δεύτερο (2^ο) μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα:

Μοντέλο φρέατος και σηράγγων TBM (1^ο)

Στην ανάλυση αυτή έγινε προσομοίωση της κατασκευής του φρέατος αερισμού και των σηράγγων TBMs. Η προσομοίωση αυτή γίνεται για να προσδιοριστεί η επίδραση των σηράγγων TBM στο ήδη κατασκευασμένο φρέαρ εξαερισμού. Η αλληλεπίδραση αυτή αποτυπώνεται από τις μετακινήσεις που λαμβάνει το φρέαρ αλλά και από την μεταβολή των εντατικών μεγεθών του κατά τα στάδια διάνοιξης των σηράγγων TBM. Ο τρόπος και τα στάδια προσομοίωσης του φρέατος αερισμού και των σηράγγων TBM με αριθμητικές αναλύσεις έχουν περιγραφεί αναλυτικά σε αυτή την εργασία.

Συνοπτικά τα στάδια προσομοίωσης έχουν ως εξής:

1. Εκσκαφή και αντιστήριξη του φρέατος αερισμού (Chern, et al., 1998) (Anagnostou, et al., 1996)
2. Εκσκαφή και υποστήριξη του εσωτερικού φρέατος
3. Εκσκαφή και αποτόνωση βόρειας σήραγγας TBM
4. Υποστήριξη βόρειας σήραγγας TBM
5. Εκσκαφή και αποτόνωση νότιας σήραγγας TBM
6. Υποστήριξη νότιας σήραγγας TBM

Στην αριθμητική ανάλυση του φρέατος αερισμού και των σηράγγων TBM γίνεται η καταγραφή:

- ⊗ Κατακόρυφων μετακινήσεων επιφανείας – καθιζήσεις.
- ⊗ Μετακινήσεις και αξονικές δυνάμεις στους πασσαλότοιχους του φρέατος αερισμού.
- ⊗ Εντατικά μεγέθη αντηρίδων αξονικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές.

Συμπεραίνεται από τις καταγραφές των μετακινήσεων και των εντατικών μεγεθών του φρέατος αερισμού ότι η διάνοιξη των σηράγγων TBM επηρεάζουν τα εντατικά μεγέθη του φρέατος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την φόρτιση των πασσαλότοιχων και των αντηρίδων του φρέατος εξαερισμού. Η φόρτιση των πασσαλότοιχων εξαρτάται από την κάθε σήραγγα TBM και είναι διαφορετική. Δηλαδή ο γειτνιαζών πασσαλότοιχος με την εκάστοτε διανοιγόμενη σήραγγα είναι αυτός που δέχεται

μεγαλύτερη μεταβολή των εντατικών του μεγεθών. Επιπλέον τόσο κατά την εκσκαφή του φρέατος όσο και κατά την διάνοιξη των σηράγγων εκατέρωθεν του, οι αντηρίδες μεταβάλουν τα εντατικά μεγέθη τους. Καθοριστικό ρόλο στη φόρτιση αυτή έχει το βάθος της κάθε αντηρίδας και το υψόμετρο το οποίο βρίσκεται αν συμπίπτει είτε με αυτό του υδροφόρου ορίζοντα είτε με του άξονα των σηράγγων. Παράλληλα με τις φορτίσεις του φρέατος καταγράφονται και κατακόρυφες μετακινήσεις της επιφανείας δηλαδή καθιζήσεις. Η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση η οποία καταγράφηκε κατά την ολοκλήρωση της διάνοιξης των σηράγγων TBM είναι της τάξης των 8.20mm και βρίσκεται μέσα στις προβλεπόμενες τιμές. Η μεταβολή των εντατικών μεγεθών του φρέατος, κατά την διάνοιξη των σηράγγων TBM, δεν δημιούργησε κάποια αστοχία σε αυτό και ούτε επηρέασε τη λειτουργικότητα του ως κατασκευή. Οι φορτίσεις που λήφθηκαν θα χαρακτηρίζονταν ως αναμενόμενες και μέσα στα όρια συναγερμού που είχε ορίσει και ο μελετητής του έργου.

Διάνοιξη μόνο της σήραγγας τύπου NATM (2^ο)

Συγκεκριμένα στην ανάλυση αυτή γίνεται προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας NATM, με σκοπό να προσδιοριστούν οι επιπρόσθετες επιφανειακές καθιζήσεις που θα επιφέρει η διάνοιξη των σηράγγων NATM, σε σχέση με αυτές που έχουν ήδη προκύψει λόγω της κατασκευής του φρέατος αλλά και των σηράγγων TBM.

Για να ληφθεί υπόψη η «χαλάρωση» που έχει προκληθεί στο περιβάλλον έδαφος του φρέατος που θα διανοιχθούν οι σήραγγες NATM λόγω της κατασκευής του φρέατος αλλά και των σηράγγων TBMs, γίνεται μια αρχική χαλάρωση του εδάφους μέσω της αποτόνωσης αυτού. Σκοπός της αποτόνωσης αυτής, είναι να προκληθούν οι ισοδύναμες επιφανειακές καθιζήσεις, που έχουν προκληθεί από την κατασκευή του φρέατος αλλά και των σηράγγων TBMs.

Η αλληλουχία των σταδίων προσομοίωσης, έχει αναλυτικά περιγράψει σε αυτή την εργασία και συνοπτικά είναι η ακόλουθη:

1. Αποτόνωση τάσεων για προσομοίωση της κατάστασης του εδάφους μετά τη κατασκευή του φρέατος και των δύο σηράγγων TBM.
2. Κατασκευή ομπρέλας δοκών προπορείας.
3. Εκσκαφή και υποστήριξη της Α' φάσης εκσκαφής της σήραγγας NATM.
4. Εγκατάσταση της αντηρίδας HEB 200.
5. Εκσκαφή και υποστήριξη της Β1' φάσης εκσκαφής της σήραγγας NATM.
6. Εκσκαφή και υποστήριξη της Β2' φάσης εκσκαφής της σήραγγας NATM.
7. Αφαίρεση της αντηρίδας HEB 200.

Στην αριθμητική ανάλυση της εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας NATM, γίνεται καταγραφή:

- ⊗ Ολικών μετακινήσεων (Total displacements)
- ⊗ Κατακόρυφων μετακινήσεων (Vertical displacements)
- ⊗ Οριζόντιων μετακινήσεων (Horizontal displacements)
- ⊗ Κατακόρυφων μετακινήσεων επιφανείας - καθιζήσεις (Surface Settlements)

Από τις καταγραφές και την ανάλυση των αποτελεσμάτων συμπεραίνεται ότι ο ασθενής εδαφικός σχηματισμός στον οποίο διανοίγεται η σήραγγα προκαλεί μεγάλες παραμορφώσεις με την αφαίρεση του γεωυλικού, γεγονός που γίνεται αντιληπτό από τις μετακινήσεις που λαμβάνονται κυρίως κατά την Α' φάση εκσκαφής. Επιπλέον κατά την αφαίρεση της εσωτερικής αντηρίδας παρατηρείται μικρή ανύψωση του πυθμένα εκσκαφής που έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση όλης της διατομής. Επιπλέον με την διάνοιξη της σήραγγας NATM, θα προκληθεί μέγιστη επιφανειακή καθίζηση ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας, της τάξης των 2,1mm. Κατά την ολοκλήρωση όλων των έργων (φρέαρ και σήραγγας TBM και NATM), θα προκληθεί μέγιστη επιφανειακή καθίζηση ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας, της τάξης των 14,8mm. Από την καθίζηση αυτή, ήδη τα 12,7mm έχουν προκληθεί από την κατασκευή του φρέατος και των σηράγγων TBM. Οι τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων βρίσκονται μέσα στα προβλεπόμενα όρια και αξιολογούνται ως αναμενόμενες.

Επομένως συμπεραίνουμε ότι από τον συνδυασμό των δύο μοντέλων που παρουσιάστηκαν μπορούμε να έχουμε μια συντηρητική εκτίμηση της επιρροής των σηράγγων NATM στις εδαφικές φορτίσεις. Ωστόσο αυτός ο τρόπος επίλυσης δεν είναι ικανός να παρουσιάσει τον τρόπο αλληλεπίδρασης του φρέατος εξαερισμού και των σηράγγων TBM με τις σήραγγες NATM. Για αυτό τον λόγο δημιουργήθηκε και ένα τρίτο μοντέλο (3^ο) που περιλαμβάνει και τις τρεις κατασκευές, φρέαρ, σήραγγες TBM και εγκάρσιες σήραγγες NATM.

Συνολικό μοντέλο, που περιλαμβάνει το φρέαρ εξαερισμού, τις σήραγγες TBM και την προσομοίωση των εγκάρσιων σηράγγων τύπου NATM (3^ο)

Στην ανάλυση αυτή γίνεται προσομοίωση της κατασκευής του φρέατος αερισμού, των σηράγγων TBM και των εγκάρσιων σηράγγων NATM. Η προσομοίωση αυτή γίνεται με σκοπό να προσδιοριστούν οι επιφανειακές καθιζήσεις που θα πραγματοποιηθούν από το σύνολο του έργου. Επιπλέον αναδεικνύει την επιρροή της μιας κατασκευής στην άλλη. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αντιληπτό το πόσο επηρεάζει τα εντατικά μεγέθη του φρέατος οι διάνοιξη των σηράγγων TBM και αντίστοιχα τα εντατικά μεγέθη των σηράγγων TBM και του φρέατος από την διάνοιξη των σηράγγων NATM.

Για την προσομοίωση των εγκάρσιων σηράγγων NATM, δεδομένου ότι εκσκάπτονται εγκάρσια στο φρέαρ, δεν απαιτείται να ληφθεί υπόψιν ο βαθμός αποτόνωσης (λ) του περιβάλλοντος εδάφους, καθώς γίνεται εκσκαφή κάθετα στο αριθμητικό προσομοίωμα. Συγκεκριμένα, αρχικά γίνεται τοποθέτηση της ομπρέλας των δοκών προπορείας πάνω από την στέψη της σήραγγας και στη συνέχεια ακολουθεί η εκσκαφή της άνω ημιδιατομής της σήραγγας πρώτα για την νότια και μετά για την βόρεια. Έπειτα γίνεται αντίστοιχα και η εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής.

Ο τρόπος, οι παραδοχές και τα στάδια προσομοίωσης των παραπάνω με αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων έχει περιγράψει αναλυτικά σε αυτή την εργασία. Συνοπτικά τα στάδια προσομοίωσης έχουν ως εξής :

1. Εκσκαφή και αντιστήριξη του φρέατος αερισμού
2. Εκσκαφή και υποστήριξη του εσωτερικού φρέατος
3. Εκσκαφή και αποτόνωση βόρειας σήραγγας TBM
4. Υποστήριξη βόρειας σήραγγας TBM
5. Εκσκαφή και αποτόνωση νότιας σήραγγας TBM
6. Υποστήριξη νότιας σήραγγας TBM
7. Εγκατάσταση δοκών προπορείας κάθετα στο φρέαρ και άνωθεν των σηράγγων TBM
8. Εκσκαφή και υποστήριξη αριστερής σήραγγας τύπου NATM
9. Εκσκαφή και υποστήριξη δεξιάς σήραγγας τύπου NATM

Στην αριθμητική ανάλυση του φρέατος εξαερισμού, των σηράγγων TBM και των σηράγγων NATM, γίνεται καταγραφή :

- ⊗ Κατακόρυφων μετακινήσεων επιφάνειας - καθιζήσεις (Surface Settlements)
- ⊗ Εντατικά μεγέθη αντηρίδων, αξονικές δυνάμεις (Axial Forces) και καμπτικές δυνάμεις (Bending Moments)
- ⊗ Ολικές και κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη των σηράγγων TBM

Συμπεραίνεται ότι από τις καταγραφές των μετακινήσεων και των εντατικών μεγεθών του φρέατος αερισμού ότι τόσο η διάνοιξη των σηράγγων TBM όσο και η διάνοιξη των σηράγγων NATM επηρεάζουν τα εντατικά μεγέθη του φρέατος αερισμού. Η αλληλεπίδραση αυτή αποτυπώνεται στην μεταβολή των εντατικών μεγεθών των αντηρίδων και των πασσαλότοιχων του φρέατος αερισμού.

Αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι ο γειτνιαζών πασσαλότοιχος με την εκάστοτε διανοιγόμενη σήραγγα είναι αυτός που δέχεται μεγαλύτερη μεταβολή των εντατικών του μεγεθών. Κατά τη διάνοιξη των σηράγγων TBM οι πασσαλότοιχοι του φρέατος παρέλαβαν μεγάλες αξονικές δυνάμεις οι οποίες έγιναν ακόμα μεγαλύτερες κατά την εκσκαφή των εγκαρσιων σηράγγων NATM. Για την Β' φάση εκσκαφής των σηράγγων NATM αφαιρείται η πέμπτη (5^η) αντηρίδα του φρέατος αερισμού καθώς η εκσκαφή θα γίνει σε εκείνο το υψόμετρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των εντατικών μεγεθών των πασσαλότοιχων και των υπόλοιπων τεσσάρων αντηρίδων του φρέατος. Τα εντατικά μεγέθη των αντηρίδων επηρεάζονται από το βάθος στο οποίο τοποθετούνται, όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος τόσο μεγαλύτερες είναι και οι εδαφικές ωθήσεις που παραλαμβάνουν. Επιπλέον καθοριστικό ρόλο στη φόρτιση τους έχει το αν το βάθος της αντηρίδας συμπίπτει είτε με τον υδροφόρο ορίζοντα είτε με τον άξονα των σηράγγων. Η πέμπτη (5^η) αντηρίδα βρίσκεται περί το ύψος των σηράγγων TBM και NATM και για αυτό τον λόγο αφαιρείται κατά τη Β' φάση εκσκαφής των σηράγγων NATM. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απότομη φόρτιση της τέταρτης (4^{ης}) αντηρίδας και τις μεγάλες αξονικές δυνάμεις στους πασσαλότοιχους του φρέατος αερισμού σε εκείνο το υψόμετρο. Όσον αφορά τις κατακόρυφες μετακινήσεις της επιφανείας κατά την εκσκαφή του φρέατος αερισμού καταγράφονται μικρές καθιζήσεις της τάξης των 4.5mm. Κατά την εκσκαφή των σηράγγων TBM οι καθιζήσεις της επιφανείας φτάνουν περί τα 8.20mm. Και τέλος με τη διάνοιξη των σηράγγων NATM η μέγιστη καθίζηση που καταγράφεται είναι της τάξης των 23.93mm. Η μέγιστη καθίζηση που καταγράφηκε στη στέψη των σηράγγων NATM είναι της τάξης των 19mm. Η τιμή της συνολικής καθιζήσεως της επιφανείας είναι αποδεκτή βάσει των ορίων της Αττικό Μετρό ΑΕ για σήραγγες που διέρχονται κάτω από άλλα κτίρια ή οδούς. Συνολικά τα εντατικά μεγέθη και οι μετακινήσεις που έλαβαν το φρέαρ, οι σήραγγες TBM και οι σήραγγες NATM ήταν μέσα στις προβλεπόμενες τιμές και δεν δημιούργησαν αστοχίες ούτε επηρέασαν την λειτουργικότητα των κατασκευών.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές για της καθιζήσεις της επιφανείας και τις κατακόρυφες μετακινήσεις της στέψης της σήραγγας NATM, που προέκυψαν από τον συνδυασμό του πρώτου και του δεύτερου μοντέλου και από το συνολικό μοντέλο. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τιμές της μελέτης και τα επιτρεπόμενα όρια της Αττικό Μετρό.

Πίνακας 30: Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με αποτελέσματα μελέτης έργου και όρια επιτρεπόμενα όρια της Αττικό Μετρό..

Μέγεθος	Φάση εκσκαφής φρέατος	Τιμή συνδυασμού μοντέλων	Τιμή συνολικού μοντέλου αριθμητικής ανάλυσης	Τιμές μελέτης	Επιτρεπόμενα Όρια Αττικό Μετρό
Συνολική κατακόρυφη μετακίνηση επιφανείας	Τελικό στάδιο κατασκευής	14.8mm	8.20mm	29mm	30mm
Συνολική κατακόρυφη μετακίνηση στέψης σήραγγας NATM	A	11.5mm	12.5mm	16mm	-
	B	11.3mm	19mm	26mm	-

Έχοντας προσομοιώσει τα παραπάνω μοντέλα συμπεραίνεται ότι το συνολικό μοντέλο (που περιλαμβάνει φρέαρ, σήραγγες TBM και εγκάρσιες σήραγγες NATM) περιέχει όλες τις κατασκευές και δίνει την δυνατότητα υπολογισμού της αλληλεπίδρασης της μίας κατασκευής στην άλλη, ωστόσο απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Αντιθέτως ο συνδυασμός των προσομοιώσεων των κατασκευών από δύο ξεχωριστά μοντέλα αδυνατεί να προσομοιώσει την αλληλεπίδραση της σήραγγας NATM στο φρέαρ και στις σήραγγες TBM ωστόσο δίνει μια τάξη μεγέθους για τις επιφανειακές καθιζήσεις και τις κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη της σήραγγας NATM.

Παράλληλα παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις τιμές που υπολογίστηκαν είτε στην μία είτε στην άλλη μεθοδολογία σε σχέση με τις τιμές του μελετητή. Η διαφορά αυτή πιθανώς οφείλεται στο διαφορετικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που έχει χρησιμοποιηθεί στη μελέτη του έργου, στις διαφορετικές παραδοχές ως προς τη μεθοδολογία ανάλυσης αλλά και παραμέτρων υποστήριξης και

σίγουρα στις διαφορετικές γεωτεχνικές παραμέτρους του εδάφους, δεδομένου ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει γίνει εκ' του μηδενός γεωτεχνική αξιολόγηση και εκτίμηση εδαφικών παραμέτρων.

Συγκρίνοντας όμως τις τιμές που προέκυψαν από την παρούσα έρευνα με τις τιμές που καταγράφηκαν κατά την κατασκευή παρουσιάζεται ικανοποιητική ακρίβεια. Η σύγκριση αυτή των αποτελεσμάτων που καταγράφηκαν κατά την κατασκευή με τις τιμές που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις δείχνει ότι τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας προσεγγίζουν την πραγματικότητα.

7 Βιβλιογραφία

Anagnostou G. και Kovari K. Face stability conditions with earth-pressure balanced shields, Tunnelling and Underground Space Technology, 1996.

Chern J.C., Shiao F.Y. και Yu C.W. An empirical safety criterion for tunnel construction, Proceedings of Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, 1998.

Ding X. και Qin H. Geotechnical instruments in structural monitoring, Journal of Geospatial Engineering, 2000.

Ercelebi G. S., Copur H. και Ocak I. Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM, Environmental Earth Sciences, 2011.

Fruguglietti A. et al. Influence of geotechnical conditions on the excavation methods of Metro do Porto project. ITA World Tunnelling Congress. - Milan, 2001.

Georgiou D. Numerical Investigation of the tunnel face stability, Doctoral Thesis, School of Civil Engineering of the National technical University of Athens.

Georgiou D., Kalos A. και Kavvadas M. 3D numerical investigation of face stability in tunnels with unsupported face, Geotechnical and Geological Engineering, 2021.

Holtz Robert D. και Kovacs William D. An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, 1981.

J. Jaky Pressure in Silos, 2nd ICSMFE.

J. Jaky The coefficient of earth pressure at rest, Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineering, 1944.

Kavvadas Michael Analysis and performance of the NATM excavation of an underground station for the Athens Metro, 1998.

Mihalis I. και Kavvadas M. Ground movements caused by TBM tunnelling in the Athens Metro Project, Proc. Int. Symp. on the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground.. - 1999.

Ran L., Ye X.W. και Zhu H. H Long-term monitoring and safety evaluation of a metro station during deep excavation, Elsevier, 2011.

Rankin J. W. Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects, Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 1988.

Yertunol Kadir, Haluk Akgun και Sopaci Evrim Displacement monitoring, displacement verification and stability assessment. of the critical sections of the Konak tunnel, Izmir, Turkey, Tunnelling and Underground Space Technology. - 2019.

Zhenqiang Yang και Xiutung Wang Influence of Metro Tunnel Excavation on Deformation of Existing Pedestrian Underpass in Changzhou Railway Station Platform, IEEE Access, 2020.

A. Αναγνωστόπουλος Επιφανειακές Θεμελιώσεις, 1989.

Θ. Βαλαλάς Εδαφομηχανική, 1996.

Καββαδάς Μ. Διαφάνειες Διαλέξεων του Μεταπτυχιακού Μαθήματος Υπολογιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Υπογείων Έργων 2021

Καββαδάς Μ. Στοιχεία Εδαφομηχανικής Εκδόσεις Συμεών, 2009

Μαρίνος Βασίλης Διαφάνειες Διαλέξεων του Μεταπτυχιακού Μαθήματος : Μέθοδοι Διευρέυσης του Υπεδάφους 2021.

Πιτλάκης Κ. Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική, Εκδόσεις Ζήτη

Τομπουλίδου Σ. Μεταπτυχική Διπλωμάτική Εργασία "έλεγχος της διακινδύνευσης έργων αντιστήριξης με ενόργανες καταγραφές".

<https://www.ametro.gr>

<https://www.rocscience.com>