



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κατασκευαστικά θέματα και αριθμητική προσομοίωση της διάνοιξης με TBM του τμήματος Σταθμός Αγ. Βαρβάρα-Σταθμός Κορυδαλλός, της επέκτασης της Γραμμής 3 του μετρό της Αθήνας προς Πειραιά.

ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ - ΜΑΡΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΝΟΜΙΚΟΣ ΠΑΥΛΟΣ, ΑΝΑΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Κατασκευαστικά θέματα και αριθμητική προσομοίωση της διάνοιξης με TBM του τμήματος Σταθμός Αγ. Βαρβάρα - Σταθμός Κορυδαλλός, της επέκτασης της Γραμμής 3 του μετρό της Αθήνας προς Πειραιά.

Χριστοδούλου Βασιλική-Μαρία

Επιβλέπων: Νομικός Παύλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις/...../2020

Νομικός Παύλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μπενάρδος Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2019

**ΑΦΙΕΡΩΝΕΤΑΙ ΣΤΟΝ ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΧΩΡΟ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ,
ΠΟΥ 30 ΧΡΟΝΙΑ ΤΩΡΑ ΕΙΝΑΙ ΕΔΩ
ΚΟΝΤΡΑ ΣΤΟ ΣΥΜΒΙΒΑΣΜΟ!
ΑΦΙΕΡΩΝΕΤΑΙ ΣΤΟΥ ΣΥΝΤΡΟΦΟΥΣ ΤΟΥ ΑΧΗΜΕΤ...**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έγινε υπό τη επίβλεψη του κύριου Παύλου Νομικού, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την ανάθεση του θέματος, την επίβλεψη της εργασίας και την πολύτιμη υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής. Τον ευχαριστώ, παράλληλα, για το χρόνο που διέθεσε για τη μελέτη και τη διόρθωση της εργασίας, καθώς και για την υπομονή και κατανόηση που έδειξε απέναντι στις όποιες δυσκολίες υπήρξαν.

Οφείλω να ευχαριστήσω του μηχανικούς της εταιρείας ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. που μας παρέιχαν τα απαραίτητα στοιχεία και πληροφορίες που χρειάστηκαν από την πρώτη στιγμή της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου, Στέλιο, Μαρία και Ηρακλή, για την αφοσίωση και την υπομονή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και συνολικότερα της ζωής μου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στο θείο μου Νίκο που είναι πάντα δίπλα μου τόσα χρόνια και με έχει στηρίξει με τις πολύτιμες συμβουλές του στις σπουδές μου και όχι μόνο. Ακόμα, ευχαριστώ τον Αντώνη για την κατανόηση και βοήθεια που μου προσφέρει τόσα χρόνια δίπλα μου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους συντρόφους της οργάνωσης μου, της Αριστερής Συσπείρωσης, που θα συνεχίσουμε μαζί να δίνουμε τους αγώνες μας για ένα καλύτερο αύριο. Και φυσικά να μην ξεχάσω την αξέχαστη «κοριτσοπαρέα» του έτους μου (και όχι μόνο Τζο)...

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται τα κατασκευαστικά θέματα και την αριθμητική προσομοίωση της διάνοιξης με TBM του τμήματος Σταθμός Αγ. Βαρβάρα – Σταθμός Κορυδαλλός, της επέκτασης της Γραμμής 3 του Μετρό της Αθήνας προς Πειραιά. Προκειμένου να διαμορφωθούν τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και έπειτα να πραγματοποιηθεί η αριθμητική ανάλυση, χρησιμοποιήθηκε το δισδιάστατο υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Rocscience (2019), RS2 2019.

Αρχικά, αναλύθηκαν οι συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη και το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου που εφαρμόστηκε. Με άλλα λόγια, παρατίθενται οι παράμετροι λειτουργίας του TBM, οι παράγοντες των καθιζήσεων, η γεωλογία και οι εδαφικές συνθήκες του τμήματος που μελετήθηκε.

Στη συνέχεια, ακολούθησε η διαδικασία για την κατασκευή του εδαφικού προσομοιώματος της γεωτεχνικής τομής που θα αναλυόταν. Η διαδικασία αυτή περιείχε πέντε (5) διαφορετικά μοντέλα, τα στάδια των οποίων διέφεραν μεταξύ τους.

Έπειτα, δοκιμάστηκε η χρήση δύο διαφορετικών καταστατικών μοντέλων, με τα οποία επιδιώχτηκε να αποφευχθούν επιδράσεις από παραδοχές που υπήρξαν. Ακολούθησε η ανάλυση των αποτελεσμάτων που πάρθηκαν από το κάθε μοντέλο ξεχωριστά, συγκρίνοντας τις διαφορές που υπήρχαν μεταξύ τους.

Τέλος, αντλήθηκαν συγκεκριμένα συμπεράσματα σχετικά με τις καθιζήσεις που εμφανίστηκαν στο τμήμα της διάνοιξης, με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που πάρθηκαν από τα δύο διαφορετικά καταστατικά μοντέλα.

ABSTRACT

The present thesis deals with the construction issues and the numerical simulation of the TBM opening of Ag. Barbara – Korydallos Station, extension of Athens Metro Line 3 to Piraeus. In order to formulate the models used and then perform the numerical analysis, the two – dimensional finite element calculator Rocscience (2019), RS2 2019 was used.

Initially, the conditions under which the drilling was carried out and the theoretical background of the method applied were analyzed. In other words, listed are the operating parameters of the TBM, the sedimentation factors, the geology and the soil conditions of the section studied are listed.

Next, the process of constructing the soil model of the geotechnical section to be analyzed was followed. This procedure contained five (5) different models, the stages of which differed from one another.

Then, the use of two different statutory models was tested, which sought to avoid the effects of assumptions that existed. This was followed by the analysis of the results obtained from each model separately, comparing the difference that existed between them.

Finally, concrete conclusions were drawn about the slumps that occurred in the opening section, with the results of the numerical analyses carried out, along with the comparison between those results and the results obtained from the two different statutory models.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ, ΠΙΝΑΚΩΝ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	8

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας	11
1.2 Διάρθρωση της εργασίας	11
1.3 Η ιστορία του μετρό της Αθήνας	11
1.4 Επέκταση της γραμμής 3 του μετρό, Χαϊδάρη - Πειραιάς	13

Κεφάλαιο 2. Μηχανική όρυξη σπράγγων με τη χρήση μηχανών ολομέτωπης κοπής

2.1 Εισαγωγικά	15
2.2 Αβαθείς Σήραγγες	15
2.3 Τύποι Μηχανών Ολομέτωπης κοπής	16
2.4 Μηχανή EPB - TBM της επέκτασης της γραμμής 3 του μετρό, Χαϊδάρη - Πειραιάς	16
2.5 Επένδυση με προκατασκευασμένους δακτυλίους οπλισμένου σκυροδέματος	19
2.6 Χαρακτηριστικά των προκατασκευασμένων στοιχείων και του δακτυλίου	20
2.7 Όγκος και Πίεση Ενέματος	22
2.8 Ρυθμοί Παραγωγής του TBM	23
2.9 Δυνάμεις Ώσης, Ροπές Στρέψης, Ρυθμοί Εκσκαφής και Ταχύτητες Περιστροφής του ατέρωνος κοκλίου	24
2.10 Πίεση Υποστήριξης Μετώπου και Καθιζήσεις στην επιφάνεια	25

Κεφάλαιο 3. Καθιζήσεις κατά τη διάνοιξη αβαθών σπράγγων

3.1 Εισαγωγικά	26
3.2 Παράγοντες που προκαλούν καθιζήσεις λόγω απώλειας όγκου	26
3.3 Ευστάθεια μετώπου και επέκταση μετακινήσεων προς την επιφάνεια	28
3.4 Επίδραση υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα	28
3.5 Καθιζήσεις λόγω ποιότητας εργασιών διάνοιξης	29
3.6 Μέτρηση επίγειων μετακινήσεων στο έδαφος	29
3.7 Επικινδυνότητα καθιζήσεων	30
3.8 Απώλεια όγκου εδάφους	31
3.9 Μέθοδοι περιορισμού των επιφανειακών καθιζήσεων	31
3.10 Καθιζήσεις που μετρήθηκαν στην επιφάνεια του έργου	32

Κεφάλαιο 4. Γεωλογικές και Γεωτεχνικές συνθήκες τμήματος μελέτης

4.1 Εισαγωγικά	36
4.2 Γεωλογία και εδαφικές συνθήκες 1 ^{ου} Μεσοδιαστήματος	36
4.3 Γεωλογία και εδαφικές συνθήκες 2 ^{ου} Μεσοδιαστήματος	39

Κεφάλαιο 5. Καταστατικό μοντέλο προσομοίωσης

5.1 Υπολογιστικό πρόγραμμα RS2 2019	43
5.2 Μοντέλο Mohr - Coulomb	44
5.3 Μοντέλο Hardening Soil	49

Κεφάλαιο 6. Επιλογή παραμέτρων και μεθοδολογία κατασκευής μοντέλου

6.1 Εισαγωγικά	52
6.2 Γεωμετρικά στοιχεία και μηχανικά χαρακτηριστικά γεωλογικών σχηματισμών των τομών	52
6.3 Κατασκευή προσομοιώματος	59

Κεφάλαιο 7. Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

7.1 Εισαγωγικά	65
7.2 Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης Χ.Θ. 2 + 398 με χρήση μοντέλου Mohr - Coulomb	65
7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με χρήση μοντέλου Mohr - Coulomb	83
7.4 Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης Χ.Θ. 2 + 398 με χρήση μοντέλου Hardening Soil	84
7.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων με χρήση μοντέλου Hardening Soil	106
7.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ μοντέλων Mohr - Coulomb και Hardening Soil	107

Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	112
---------------------	-----

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ, ΠΙΝΑΚΩΝ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1: Χάρτης επέκτασης της Γραμμής 3 ΑΓΙΑ ΜΑΡΙΝΑ – ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΘΕΑΤΡΟ ΠΕΙΡΑΙΑ	13
Εικόνα 1.2: Σήραγγα TBM από τον Σταθμό ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ	14
Εικόνα 2.1: Χαρακτηριστικά της μηχανής TBM που χρησιμοποιήθηκε	17
Εικόνα 2.2: Κεφαλή μηχανήματος EPB σε ξετρύπωμα σταθμού	17
Εικόνα 2.3: Κοπτική Κεφαλή EPB	18
Εικόνα 2.4: Σύστημα τοποθέτησης προκατασκευασμένων στοιχείων μετρό Αγ. Βαρβάρας	19
Εικόνα 2.5: Γεωμετρία του δακτυλίου των προκατασκευασμένων στοιχείων «6+1»	20
Εικόνα 2.6: Θεώρηση σύλληψης του δακτυλίου τύπου Universal	21
Εικόνα 2.7: Όψη κεφαλής EPB – TBM με τις θέσεις και την αρίθμηση των αισθητήρων μέτρησης της πίεσης υποστήριξης του μετώπου	25
Εικόνα 3.1: Σχήμα επιφάνειας καθίζησης λόγω της εκσκαφής της σήραγγας (συνθήκες ελεύθερου πεδίου)	27
Εικόνα 3.2: Κόκκινη και μπλέ καμπύλη: μετρηθείσες και θεωρητικές καθιζήσεις στη Χ.Θ. 2+401	35
Εικόνα 4.1: Στρωματογραφία κατά μήκος της χάραξης από τη Χ.Θ. 1+540 έως τη Χ.Θ. 2+600	37
Εικόνα 4.2: Στρωματογραφία κατά μήκος της χάραξης από τη Χ.Θ. 2+600 έως τη Χ.Θ. 3+940	40
Εικόνα 5.1: Καρτέλα εισαγωγής δεδομένων για τον ορισμό του μοντέλου Mohr – Coulomb	46
Εικόνα 5.2: Διαδρομές τάσεων των στραγγιζόμενων τριαξονικών δοκιμών σε υλικά με καταστατικό μοντέλο Mohr – Coulomb	46
Εικόνα 5.3: Διαδρομές τάσεων των αστράγγιστων τριαξονικών δοκιμών σε υλικά με καταστατικό μοντέλο Mohr – Coulomb	47
Εικόνα 5.4: Επιφάνεια διαρροής μοντέλου Mohr - Coulomb σε 3D χώρο τάσης	47
Εικόνα 5.5: Καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων σε Τριαξονική Δοκιμή (Ahmedetal. 2016)	49
Εικόνα 5.6: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης σε Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης	50
Εικόνα 5.7: Κύκλος Αποφόρτισης-Επαναφόρτισης σε Τριαξονική Δοκιμή (Vakilietal. 2013)	51
Εικόνα 6.1: Απεικόνιση του stage 1 των model 1 έως 5	60
Εικόνα 6.2: Απεικόνιση του stage 2 των model 3, 4 και 5	60
Εικόνα 6.3: Απεικόνιση των stage 2 και 3 των model 1 και 3 αντίστοιχα	61
Εικόνα 6.4: Απεικόνιση των stage 2 και 3 των model 2 και 4 αντίστοιχα	62
Εικόνα 6.5: Απεικόνιση του stage 3 του model 5	62
Εικόνα 6.6: Απεικόνιση του stage 4 του model 5	63
Εικόνα 6.7: Απεικόνιση της ύπαρξης του grout μεταξύ του Concrete lining και του TBM shield, στο stage 4 του model 5	63
Εικόνα 6.8: Ονοματολογία υλικών	64
Εικόνα 7.1: stage 1 – s_{yy} & stress trajectories	65
Εικόνα 7.2: stage 1 – s_{xx} & stress trajectories	66
Εικόνα 7.3: stage 2 – σ_1 & stress trajectories	66
Εικόνα 7.4: stage 2 – σ_3 & stress trajectories	67
Εικόνα 7.5: stage 2 – σ_1 & yielded elements	67
Εικόνα 7.6: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	67
Εικόνα 7.7: Υπολογισθείσες καθιζήσεις στο stage 2 (reference stage = stage 1)	68
Εικόνα 7.8: stage 2 - axial force στο liner	68
Εικόνα 7.9: stage 2 - bending moment στο liner	68
Εικόνα 7.10: stage 2 - shear force στο liner	68
Εικόνα 7.11: stage 2 – σ_1 & stress trajectories	69
Εικόνα 7.12: stage 2 – σ_3 & stress trajectories	69
Εικόνα 7.13: stage 2 – σ_1 & yielded elements	70
Εικόνα 7.14: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	70
Εικόνα 7.15: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στο stage 2 (reference stage = stage 1)	71
Εικόνα 7.16: stage 2 - axial force στο liner	71
Εικόνα 7.17: stage 2 - bending moment στο liner	71
Εικόνα 7.18: stage 2 - shear force στο liner	71
Εικόνα 7.19: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	72
Εικόνα 7.20: stage 3 – σ_1 & stress trajectories	72

Εικόνα 7.21: stage 3 – sigma 3 & stress trajectories	73
Εικόνα 7.22: stage 3 – sigma 1 & yielded elements	73
Εικόνα 7.23: stage 3 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	73
Εικόνα 7.24: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στα stage 2 και 3 (reference stage = stage 1)	74
Εικόνα 7.25: stage 3 - axial force στο liner	74
Εικόνα 7.26: stage 3 - bending moment στο liner	74
Εικόνα 7.27: stage 3 - shear force στο liner	74
Εικόνα 7.28: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	77
Εικόνα 7.29: stage 3 – sigma 1 & stress trajectories	77
Εικόνα 7.30: stage 3 – sigma 3 & stress trajectories	76
Εικόνα 7.31: stage 3 – sigma 1 & yielded elements	76
Εικόνα 7.32: stage 3 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	76
Εικόνα 7.33: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στα stage 2 και 3 (reference stage = stage 1)	77
Εικόνα 7.34: stage 3 - axial force στο liner	77
Εικόνα 7.35: stage 3 - bending moment στο liner	77
Εικόνα 7.36: stage 3 - shear force στο liner	77
Εικόνα 7.37: stage 2 – sigma 1 & yielded elements	78
Εικόνα 7.38: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	78
Εικόνα 7.39: stage 3 – sigma 1 & yielded elements	79
Εικόνα 7.40: stage 3 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	79
Εικόνα 7.41: stage 4 – sigma 1 & stress trajectories	79
Εικόνα 7.42: stage 4 – sigma 3 & stress trajectories	80
Εικόνα 7.43: stage 4 – sigma 1 & yielded elements	80
Εικόνα 7.44: stage 4 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	80
Εικόνα 7.45: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στα stage 2, 3 και 4 (reference stage = stage 1)	81
Εικόνα 7.46: stage 3 - axial force στο TBM shield	81
Εικόνα 7.47: stage 3 - bending moment στο TBM shield	82
Εικόνα 7.48: stage 3 - shear force στο TBM shield	82
Εικόνα 7.49: stage 4 - axial force στο liner	82
Εικόνα 7.50: stage 4 - bending moment στο liner	82
Εικόνα 7.51: stage 4 - shear force στο liner	82
Εικόνα 7.52: stage 1 – syy & stress trajectories	84
Εικόνα 7.53: stage 1 – sxx & stress trajectories	84
Εικόνα 7.54: stage 2 – sigma 1 & stress trajectories	85
Εικόνα 7.55: stage 2 – sigma 3 & stress trajectories	85
Εικόνα 7.56: stage 2 – sigma 1 & yielded elements	86
Εικόνα 7.57: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	86
Εικόνα 7.58: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στο stage 2 (reference stage = stage 1)	87
Εικόνα 7.59: stage 2 - axial force στο liner	87
Εικόνα 7.60: stage 2 - bending moment στο liner	87
Εικόνα 7.61: stage 2 - shear force στο liner	87
Εικόνα 7.62: stage 2 – sigma 1 & stress trajectories	88
Εικόνα 7.63: stage 2 – sigma 3 & stress trajectories	88
Εικόνα 7.64: stage 2 – sigma 1 & yielded elements	89
Εικόνα 7.65: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	89
Εικόνα 7.66: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στο stage 2 (reference stage = stage 1)	90
Εικόνα 7.67: stage 2 - axial force στο interface	90
Εικόνα 7.68: stage 2 - bending moment στο interface	90
Εικόνα 7.69: stage 2 - shear force στο interface	90
Εικόνα 7.70: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	91
Εικόνα 7.71: stage 3 – sigma 1 & stress trajectories	91
Εικόνα 7.72: stage 3 – sigma 3 & stress trajectories	92
Εικόνα 7.73: stage 3 – sigma 1 & yielded elements	92
Εικόνα 7.74: stage 3 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	93
Εικόνα 7.75: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στα stage 2 και 3 (reference stage = stage 1)	93
Εικόνα 7.76: stage 3 - axial force στο liner	94

Εικόνα 7.77: stage 3 - bending moment στο liner	94
Εικόνα 7.78: stage 3 - shear force στο liner	94
Εικόνα 7.79: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	95
Εικόνα 7.80: stage 3 - sigma 1 & stress trajectories	95
Εικόνα 7.81: stage 3 - sigma 3 & stress trajectories	96
Εικόνα 7.82: stage 3 - sigma 1 & yielded elements	96
Εικόνα 7.83: stage 3 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	96
Εικόνα 7.84: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στα stage 2 και 3 (reference stage = stage 1)	97
Εικόνα 7.85: stage 3 - axial force στο liner	97
Εικόνα 7.86: stage 3 - bending moment στο liner	98
Εικόνα 7.87: stage 3 - shear force στο liner	98
Εικόνα 7.88: stage 2 - sigma 1 & yielded elements	99
Εικόνα 7.89: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	100
Εικόνα 7.90: stage 3 - sigma 1 & yielded elements	100
Εικόνα 7.91: stage 3 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	101
Εικόνα 7.92: stage 4 - sigma 1 & stress trajectories	101
Εικόνα 7.93: stage 4 - sigma 3 & stress trajectories	102
Εικόνα 7.94: stage 4 - sigma 1 & yielded elements	102
Εικόνα 7.95: stage 4 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors	103
Εικόνα 7.96: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στα stage 2, 3 και 4 (reference stage = stage 1)	103
Εικόνα 7.97: stage 3 - axial force στοTBM shield	104
Εικόνα 7.98: stage 3 -bending moment στοTBM shield	104
Εικόνα 7.99: stage 3 - shear force στοTBM shield	104
Εικόνα 7.100: stage 4 - axial force στο liner	104
Εικόνα 7.101: stage 4 - bending moment στο liner	105
Εικόνα 7.102: stage 4 - shear force στο liner	105

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 3.1: Επιτρεπόμενες Καθιζήσεις	30
Πίνακας 3.2: Επιτρεπόμενες Καθιζήσεις – Κτίσματα από οπλισμένο σκυρόδεμα	30
Πίνακας 3.3: Επιτρεπόμενες Καθιζήσεις – Κτίσματα από φέρουσα τοιχοποιία	31
Πίνακας 6.1: Συμβολισμοί γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού	52
Πίνακας 6.2: Σχηματισμός (1.1)	53
Πίνακας 6.3: Σχηματισμός (3.1)	53
Πίνακας 6.4: Σχηματισμός (3.2)	53
Πίνακας 6.5: Σχηματισμός (5.1)	54
Πίνακας 6.6: Σχηματισμός (5.2)	54
Πίνακας 6.7: Σχηματισμός (5.3)	54
Πίνακας 6.8: Σχηματισμός (5.4)	55
Πίνακας 6.9: Σχηματισμός (5.5)	55
Πίνακας 6.10: Σχηματισμός (5.6)	55
Πίνακας 6.11: Σχηματισμός (7.1)	56
Πίνακας 6.12: Σχηματισμός (7.2)	56
Πίνακας 6.13: Σχηματισμός (7.3)	56
Πίνακας 6.14: Σχηματισμός (7.4)	57
Πίνακας 6.15: Σχηματισμός (7.5)	57
Πίνακας 6.16: Σχηματισμός (8.1)	57
Πίνακας 6.17: Σχηματισμός (8.2)	58
Πίνακας 7.1: Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης με χρήση Mohr - Coulomb	83
Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης με χρήση Hardening Soil	106
Πίνακας 7.3: Σχέση model – stage	107
Πίνακας 7.4: Σύγκριση Κατακόρυφων Μετατοπίσεων	107
Πίνακας 7.5: Σύγκριση Αξονικών Δυνάμεων	108
Πίνακας 7.6: Σύγκριση Ροπών Κάμψης	108
Πίνακας 7.7: Σύγκριση Διατμητικών Δυνάμεων	109

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση των κατασκευαστικών θεμάτων και η αριθμητική προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας με TBM για την επέκταση της Γραμμής 3 της Αττικό Μετρό προς Πειραιά από τον Σταθμό «Αγία Βαρβάρα» έως το Σταθμό «Κορυδαλλός».

Αφού μελετήθηκαν τα γεωτεχνικά στοιχεία σε διάφορες χιλιομετρικές θέσεις, καθώς και οι χιλιομετρικές θέσεις με τις μεγαλύτερες καθιζήσεις, προχωρήσαμε στην αναλυτική περιγραφή τους και έπειτα στην αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιώντας τα.

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη περιγραφή του θέματος της διπλωματικής και παρατίθενται γενικά στοιχεία της Αττικό Μετρό και της επέκτασης της Γραμμής 3 προς Πειραιά.

Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα βασικά στοιχεία που αφορούν την μηχανοποιημένη όρυξη σπράγγων και τη χρήση Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής (TBM).

Στο 3^ο Κεφάλαιο αναλύονται οι κύριοι παράγοντες που προκαλούν επιφανειακές καθιζήσεις και τα φαινόμενα που τις ενισχύουν, καθώς και οι τρόποι πρόληψης και αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκαλούν στην επιφάνεια, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρατίθενται τα γεωτεχνικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη τμήματος.

Στο 5^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η λειτουργία του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση τους τμήματος που επιλέξαμε.

Στο 6^ο Κεφάλαιο περιγράφονται οι παράμετροι που επιλέχθηκαν καθώς και η μεθοδολογία κατασκευής των αριθμητικών μοντέλων, στα οποία και πραγματοποιήθηκε η αριθμητική ανάλυση.

Στο 7^ο Κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στο 8^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που αντλήθηκαν από την παρούσα εργασία.

1.3 Η ιστορία του μετρό στην Αθήνα

Είναι γεγονός ότι στην Αθήνα υπήρξε η λειτουργία ενός από τους πρώτους σιδηροδρόμους Μετρό στην Ευρώπη, παρά το γεγονός ότι η Αθήνα απέκτησε δίκτυο υπόγειου σιδηροδρόμου σε πλήρη ανάπτυξη μόλις το έτος 2000. Η ιστορία του Μετρό στην Αθήνα ξεκινάει από το 1869, όταν εγκαινιάζεται η σιδηροδρομική γραμμή που ενώνει το Θησείο με τον Πειραιά. Λίγο αργότερα, το 1895 η σιδηροδρομική γραμμή αυτή επεκτείνεται μέχρι την Ομόνοια, διερχόμενη από το Μοναστηράκι μέσω υπόγειας σήραγγας που ακολουθούσε τη χάραξη της οδού Αθηνάς και κατέληγε σε ανοιχτό σκάμμα στο ύψος της οδού Λυκούργου. Η κατασκευή αυτής της πρώτης σήραγγας διήρκεσε περίπου 6 χρόνια, με αποτέλεσμα τη δημιουργία του πρώτου ημιυπόγειου σταθμού της Ομόνοιας, στη διασταύρωση των οδών Λυκούργου και Αθηνάς. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Αυτό το δίκτυο αποτέλεσε τον τότε Σιδηρόδρομο Αθηνών – Πειραιώς, ο οποίος ηλεκτροδοτήθηκε στις 16 Σεπτέμβρη 1904 και «μετατράπηκε» σε ένα από τους πρώτους σιδηρόδρομους Μετρό της Ευρώπης. Ο ηλεκτροκίνητος, πλέον, σιδηρόδρομος της γραμμής Αθηνών – Πειραιώς θα αποκτήσει με το πέρασ των χρόνων το προσωνύμιο «Ηλεκτρικός». Από το 1928 έως το 1949 το δίκτυο του «ηλεκτρικού» θα επεκταθεί μέχρι το Σταθμό Πλατεία Αττικής μέσω υπόγειας σήραγγας και θα κατασκευασθούν επιπλέον ο νέος υπόγειος Σταθμός Ομόνοιας (1930) και οι υπόγειοι σταθμοί Πλατεία Βικτωρίας και Πλατεία Αττικής. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Το 1991 ξεκίνησε η διαγωνιστική διαδικασία για την ανάδειξη αναδόχου, ο οποίος θα αναλάμβανε την κατασκευή του νέου Μετρό της Αθήνας με ανάπτυξη υπόγειου δικτύου, με συνολικό μήκος άνω των 20 χιλιομέτρων, σε δύο γραμμές. Οι γραμμές αυτές ήταν η μία ΣΕΠΟΛΙΑ – ΔΑΦΝΗ (Γραμμή 2) και ΚΕΡΑΜΕΙΚΟΣ – ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ (Γραμμή 3), όπου συνολικά περιείχαν 21 σταθμούς. Οι κατασκευαστικές εργασίες άρχισαν στην περιοχή του Σταθμού Λαρίσης το Νοέμβρη του 1992 και το έργο παραδόθηκε τμηματικά, τόσο για την αρχική του σχεδίαση, όσο και για τις επεκτάσεις που ακολούθησαν. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Για την εκσκαφή των σπράγγων χρησιμοποιήθηκαν δύο Μηχανήματα Ολομέτωπης Κοπής (TBM) τα οποία παραλήφθηκαν τον Ιούνιο (το 1ο) και το Δεκέμβρη (το 2ο) του 1993. Οι εργασίες εκσκαφής των σπράγγων ξεκίνησαν από το Σταθμό Λαρίσης (Γραμμή 2) τον Απρίλη του 1994 και από τον Σταθμό ΚΑΤΕΧΑΚΗ (Γραμμή 3) τον Αύγουστο του 1994. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Πρώτα έφτασε τα TBM στο σταθμό ΣΥΝΤΑΓΜΑ, τον Ιούνιο του 1996, ολοκληρώνοντας έτσι την εκσκαφή στη Γραμμή 3, σε πρώτη φάση. Έπειτα, μετακινήθηκε για τη διάνοιξη του τμήματος ΔΑΦΝΗ – ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, της Γραμμής 2, της οποίας η διάνοιξη ολοκληρώθηκε το Δεκέμβρη του 1998. Τον Ιανουάριο του 2000 δόθηκαν σε λειτουργία οι δύο γραμμές του Μετρό της Αθήνας στα τμήματα ΣΥΝΤΑΓΜΑ – ΣΕΠΟΛΙΑ και ΣΥΝΤΑΓΜΑ – ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ, τα οποία συνέδεαν συνολικά 14 σταθμούς, 7 σε κάθε γραμμή. Ο Σταθμός ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ, ο τελευταίος της Γραμμής 3, για την έως τότε σχεδίαση, τέθηκε σε λειτουργία τον Απρίλιο του 2003. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μέχρι το καλοκαίρι του 2004 και την έναρξη των Ολυμπιακών Αγώνων στην Αθήνα, το Μετρό της Αθήνας είχε επεκταθεί στη Γραμμή 3 από το Σταθμό ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ έως το Α/Δ «ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΒΕΝΙΖΕΛΟΣ» και στη Γραμμή 2 από το Σταθμό ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ, στο Περιστέρι έως το Σταθμό ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, στον Άγιο Δημήτριο. Η Γραμμή 3 στο τμήμα από το Σταθμό ΔΟΥΚΙΣΣΗΣ ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ έως το Α/Δ «ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΒΕΝΙΖΕΛΟΣ» αναδύεται στην επιφάνεια του εδάφους και χρησιμοποιείται από κοινού με τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο. Από τον Μάιο του 2007 έως τον Ιούλιο του 2013, θα συνεχιστεί η επέκταση του Μετρό της Αθήνας μέχρι τον Σταθμό ΑΓΙΑ ΜΑΡΙΝΑ, για την Γραμμή 3, προς τη δυτική απόληξη της και μέχρι το Σταθμό ΕΛΛΗΝΙΚΟ για τη Γραμμή 2 και τη νότια απόληξή της με 5,5 χλμ. υπόγειας γραμμής και 4 σταθμούς. Έκτοτε θα λειτουργεί με την υφιστάμενη σχεδίαση. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Σήμερα το συνολικό μήκος των δύο γραμμών του Μετρό της Αθήνας ανέρχεται στα 59,7 χλμ (συμπεριλαμβανομένου και του τμήματος των 20,7 χλμ. της γραμμής που χρησιμοποιείται από κοινού με τον προαστιακό). Επιπλέον, η Γραμμή 1 εκτείνεται σε μήκος 25,6 χλμ. στο τμήμα ΠΕΙΡΑΙΑΣ – ΚΗΦΙΣΙΑ. Τα τελευταία χρόνια βρίσκεται υπό κατασκευή η επέκταση της Γραμμής 3 προς τα δυτικά, η οποία θα έχει συνολικό μήκος 7,6 χλμ. και θα καταλήγει στον Πειραιά, η οποία μάλιστα πρόκειται σύντομα να παραδοθεί στο κοινό. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

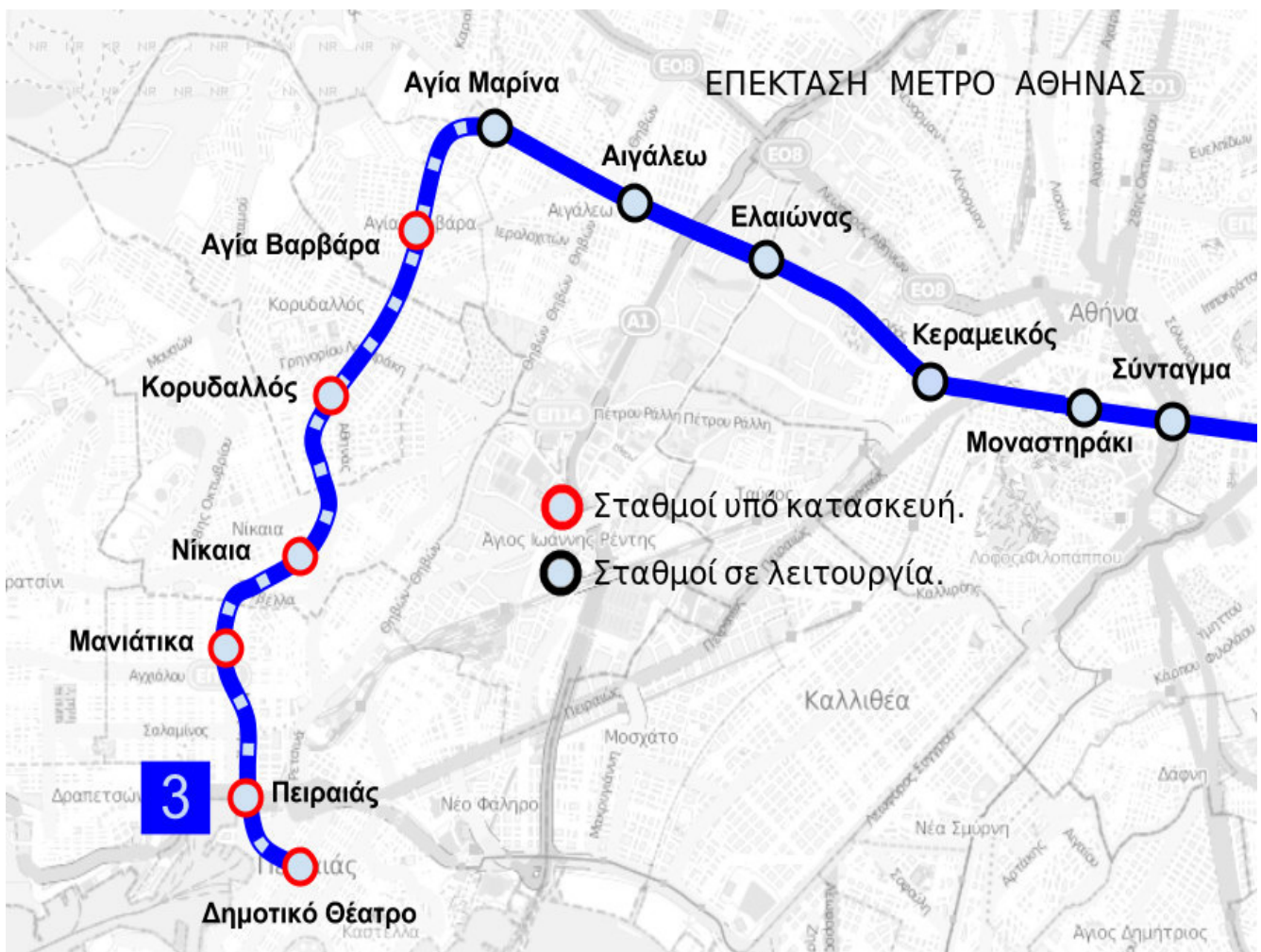
Παράλληλα, έχει ξεκινήσει το σχέδιο ανάπτυξης της Γραμμής 4 του Μετρό, στον άξονα Άλσος Βεΐκου μέχρι το Μαρούσι, σχηματίζοντας «U» μέσω Ευαγγελισμού και Φάρου Ψυχικού, με περαιτέρω επεκτάσεις και συνολικό μήκος 38,2 χλμ. και 35 σταθμούς. Το Σεπτέμβρη του 2014 παρουσιάστηκε το πρώτο τμήμα της νέας γραμμής, Άλσος Βεΐκου – Γουδί, το οποίο θα έχει συνολικό μήκος 11,7 χλμ. συν 800 μέτρα συνδετήριας σήραγγας με τις γραμμές 2 και 3 και 15 σταθμούς. Η κατασκευή αυτής της γραμμής αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2027. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

1.4 Επέκταση της Γραμμής 3 του Μετρό της Αθήνας Χαιδάρη –Πειραιάς

Το Νοέμβριο του 2008 η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. επαναδημοπράτησε το έργο για την επέκταση της Γραμμής 3 προς τα Δυτικά Προάστια με κατάληξη τον Πειραιά. Περιλάμβανε την κατασκευή υπόγειας σιδηροδρομικής γραμμής συνολικού μήκους 7,6 χλμ. με 6 σύγχρονους σταθμούς.

Οι σταθμοί αυτοί είναι οι εξής: ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ, ΚΟΥΡΔΑΛΛΟΣ, ΝΙΚΑΙΑ ΜΑΝΙΑΤΙΚΑ, ΠΕΙΡΑΙΑΣ, ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΘΕΑΤΡΟ ΠΕΙΡΑΙΑ. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Η κατασκευή της σήραγγας του Μετρό πραγματοποιήθηκε με «μετροπόντικα» (TBM) προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η αναπόφευκτη όχληση στη λειτουργία των Δήμων. Συνολικά 6,5 χλμ. σήραγγας της επέκτασης κατασκευάστηκαν με Μηχάνημα Διάνοιξης Σηράγγων (TBM), ενώ το υπόλοιπο τμήμα στην αρχή και στο τέλος του έργου υλοποιήθηκε με υπόγεια εκσκαφή. Το σύνολο των φρεάτων αερισμού κατά μήκος της νέας Γραμμής είναι 8 και έξτρα άλλα 2 για την είσοδο και έξοδο του TBM. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)



Εικόνα 1.1: Χάρτης επέκτασης της Γραμμής 3 Αγ. Μαρίνα-Δημοτικό Θέατρο Πειραιά (Αττικό ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Την 1η Μαρτίου 2012 υπογράφηκε η σχετική σύμβαση με την ανάδοχο κοινοπραξία J&P – ΑΒΑΞ Α.Ε., GHELLA SPA, ALSTOM TRANSPORT S.A. για την κατασκευή της επέκτασης της Γραμμής 3 του Μετρό από την Αγία Μαρίνα προς τον Πειραιά. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Πρόκειται για μια επένδυση ύψους 730.000.000 ευρώ σε περιοχές του Δήμου Πειραιά και των Δήμων της ευρύτερης περιοχής (Νίκαια, Κορυδαλλός, Αγία Βαρβάρα) που σήμερα έχουν έντονα προβλήματα κυκλοφορίας και χαμηλό επίπεδο εξυπηρέτησης από ΜΜΜ. Με

την κατασκευή της επέκτασης του Μετρό προς τον Πειραιά θα εξυπηρετούνται καθημερινά 132.000 επιβάτες, ενώ ο συνολικός χρόνος από το Λιμάνι έως το Αεροδρόμιο θα διανύεται με το Μετρό μόλις σε 45 λεπτά. Επιπρόσθετα, με τη λειτουργία του έργου θα κυκλοφορούν καθημερινά περίπου 23.000 ΙΧ οχήματα λιγότερα, επιφέροντας αντίστοιχα μείωση των ρύπων CO₂ κατά 120 τόνους ημερησίως. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Ιδιαίτερα δε, στο Σταθμό ΠΕΙΡΑΙΑ προβλέπεται να δημιουργηθεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό Συγκοινωνιακό Κέντρο, συνενώνοντας λειτουργικά δύο γραμμές Μετρό (Γραμμή 1 και Γραμμή 3), το Λιμάνι, τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο και το Τραμ, το οποίο προβλέπεται επίσης να διέλθει από την περιοχή αυτή, διευκολύνοντας έτσι τις μετεπιβιβάσεις μεταξύ όλων των μέσων μεταφοράς. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)



Εικόνα 1.2: Σήραγγα TBM από το Σταθμό ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ

Το Νοέμβριο του 2017 το TBM ολοκλήρωσε τη διαδρομή του στο Σταθμό ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΘΕΑΤΡΟ ΠΕΙΡΑΙΑ και εκ τότε ξεκίνησε η αποσυναρμολόγησή του. Αυτή τη στιγμή το έργο βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη. Η παράδοση των σταθμών θα γίνει τμηματικά, με τους σταθμούς έως τη Νίκαια να παραδίδονται στις αρχές του 2020 και οι υπόλοιποι τον Ιούνιο του 2021. Μια απρόβλεπτη δυσκολία που καθυστέρησε την πρόοδο των εργασιών, ήταν ότι στο μέσον της διαδρομής από τη Νίκαια ως τα Μανιάτικα ο μετροπόντικας συνάντησε υπόγειες σπηλαιώσεις, οι οποίες έπρεπε να κλειστούν με «ενέσεις» τσιμέντου προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευστάθεια της σήραγγας. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Κεφάλαιο 2

Μηχανική Όρυξη Σηράγγων με τη χρήση Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής

2.1 Εισαγωγικά

Οι ανάγκες της εποχής μας για εκμηχανισμένη κατασκευή μίας μεγάλης μήκους σήραγγας και παράλληλα η αποφυγή των δονήσεων από τις ανατινάξεις όταν συμβαίνει σε αστική περιοχή, είναι δύο από τους σημαντικότερους λόγους για να επιλεγεί μία μέθοδος διάνοιξης από Μηχάνημα Διάνοιξης Σηράγγων (Tunnel Boring Machine – TBM). Έχουμε να κάνουμε με κινητές βιομηχανικές μονάδες όπου, αντί για συμβατικούς κύκλους διάνοιξης με σειριακές εργασίες εκσκαφής ή διάτρησης – ανατίναξης, ξεσκαρώματος, αποκόμισης των μπαζών και υποστήριξης σε αντίστοιχες εργασίες, πραγματοποιούνται αυτοματοποιημένα και ταυτόχρονα. Αυτές οι μηχανές υποκαθιστούν ολόένα και περισσότερο τις συμβατικές μεθόδους διάνοιξης. Η επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος οφείλεται στην ποιότητα του πετρώματος και σε κριτήρια οικονομικά ή διαθεσιμότητας της μηχανής. (Σοφιανός, 2018)

2.2 Αβαθείς Σήραγγες

Η αναπτυσσόμενη ανάγκη για έργα υποδομής, εντός των αστικών κέντρων, όπως είναι δηλαδή οι μητροπολιτικοί σιδηρόδρομοι (μετρό), έχει οδηγήσει στην κατασκευή σηράγγων που βρίσκονται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Ως αβαθείς σήραγγες ορίζονται οι σήραγγες με λόγο υπερκειμένων προς διάμετρο ανοίγματος μικρότερο από 5. (Κοσκινιώτης, 2019)

Η υλοποίηση τέτοιων έργων παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά διότι, από γεωλογικής απόψεως γίνεται μέσα σε σχετικά επιφανειακούς εδαφικούς σχηματισμούς πτωχής ποιότητας και από σχεδιαστικής πλευράς απαιτεί μεγάλες καμπυλότητες και κλίσεις. Το γεγονός ότι τέτοιου είδους σήραγγες κατασκευάζονται εντός του αστικού ιστού, σε μικρό βάθος, απαιτούν μεγάλη προσοχή και στο σχεδιασμό και στην κατασκευή τους, αφού οι επιπτώσεις στην επιφάνεια έχουν άμεσο αντίκτυπο στις ανθρωπογενείς κατασκευές. Η ρητή απαγόρευση της χρήσης εκρηκτικών, με ελάχιστες εξαιρέσεις ειδικών περιπτώσεων, ευνοεί τη χρήση των TBM, ιδιαίτερα σε χαράξεις μεγάλης μήκους. (Κοσκινιώτης, 2019)

Η σημαντικότερη επίπτωση της εκσκαφής αβαθών σηράγγων που οφείλει να μελετάται αδιάλειπτα και να προβλέπεται έγκαιρα κατά την κατασκευή, είναι οι επιφανειακές καθιζήσεις που μπορεί να δημιουργηθούν. Οι αβαθείς σήραγγες σε αστικό περιβάλλον συνήθως προκαλούν καθιζήσεις στην επιφάνεια, ακόμα και κάτω από την πιο αυστηρή μέθοδο διάνοιξης. Η έκταση των καθιζήσεων είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται από πολλούς αλληλένδετους παράγοντες, όπως είναι η ποιότητα του εδάφους, η συμπεριφορά του κατά την εκσκαφή, η άσκηση πίεσης στο μέτωπο κατά τη διάνοιξη, ο χρόνος αυτό υποστήριξης του σχηματισμού, η παρουσία υπόγειων νερών, το υδρογεωλογικό καθεστώς κ.α. όλα αυτά μας δείχνουν γιατί οι αβαθείς σήραγγες αποτελούν ειδικό κομμάτι της σηραγγοποιίας και για την πετυχημένη ολοκλήρωσή τους απαιτείται άρτια σχεδιαστική γνώση και κατασκευαστική εμπειρία. (Γιαταγάνα, 2014)

2.3 Τύποι Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής

Ο όρος Μηχάνημα Διάνοιξης Σηράγγων (TBM) χρησιμοποιείται πλέον παγκόσμια για όλες τις μηχανές που έχουν έναν ολομέτωπο τροχό κοπής του πετρώματος για τη διάνοιξη της σήραγγας. Σύμφωνα με τη Γαλλική Ένωση Σηραγγοποιίας (AFTES), την οποία ακολουθεί και η ελληνική προδιαγραφή (ΕΛΟΤ) προτείνεται η ταξινόμηση των μηχανών με βάση τη στήριξη που είναι σε θέση να παράσχουν κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Με αυτόν τον τρόπο διακρίνονται σε Μηχανές με:

- Καθόλου στήριξη (μηχανή χωρίς ασπίδα)
- Στήριξη μόνο περιφερειακή (ανοιχτή ασπίδα)
- Στήριξη τόσο περιφερειακή όσο και μετωπική με κλειστό σύστημα πίεσης (κλειστή ασπίδα) (Σοφιανός, 2018)


Η επιλογή του κατάλληλου τύπου μηχανής οφείλει να γίνεται παίρνοντας υπόψη τις εκάστοτε γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή της διάνοιξης. Και αυτό διότι αποτελεί την κύρια προϋπόθεση για μία ομαλή και ασφαλή διεξαγωγή των εργασιών εκσκαφής. (Σοφιανός, 2018)

Οι τύποι μηχανών που υπάρχουν είναι οι εξής:

- **Μηχανές Κύριας Δοκού (χωρίς ασπίδα)**
- **Μηχανές με Ασπίδα – Ανοιχτή Λειτουργία**
- **Μηχανές Διάτρησης με Μονή Ασπίδα**
- **Μηχανές Διάτρησης με Διπλή Ασπίδα**
- **Μηχανές με Ασπίδα – Κλειστή Λειτουργία**
- **Μηχανές Διάτρησης με Εξισορρόπηση Εδαφικής Πίεσης (EPB – Earth Pressure Balance)**
- **Μηχανές Διάτρησης Πολφού Μπετονίτη (Slurry TBM)**
- **Μηχανές Διάτρησης Μετατρεπόμενου Τύπου – Υδραυλικά TBM (Σοφιανός, 2018)**

2.4 Μηχανή EPB – TBM της επέκτασης της Γραμμής 3 του Μετρό στο τμήμα «Χαιδάρη – Πειραιάς»

Η διάνοιξη της σήραγγας διπλής τροχιάς της επέκτασης της Γραμμής 3 στο τμήμα «Χαιδάρη – Πειραιάς», κατασκευάσθηκε με μηχανή ολομέτωπης κοπής ως Μηχανή Διάτρησης με Εξισορρόπηση Εδαφικής Πίεσης (EPB). Το Μηχάνημα Διάνοιξης έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από την εταιρεία CATERPILLAR με αριθμό εργοστασιακής σειράς: RME372SE. Τα κύρια χαρακτηριστικά της μηχανής EPB-TBM (εδαφικής εξισοροπτικής πίεσης με ασπίδα), φαίνονται παρακάτω. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Στοιχεία TBM	Προδιαγραφές
Τύπος	<p>Ασπίδα εδαφικής εξισορροπητικής πίεσης (EPB-TBM) LOVAT (RME-370SE)</p> 
Προμηθευτής	LOVAT
Ονομαστική διάμετρος διάτρησης	9.495m
Οριζοντιογραφική καμπύλη (ελάχιστη ακτίνα καμπύλης που μπορεί να ακολουθήσει το TBM)	300m
Ονομαστική Δύναμη ώθησης (μεγ. τιμή)	70.000kN
Μεγ. Δύναμη ώθησης	122400 (3400×36)
Μήκος Ασπίδας	10.7m
Μέγιστη πίεση EPB	3.5 bar
Αριθμός κυλίνδρων	36
Διαστάσεις πεδίων	508mm×347mm

Εικόνα 2.1: Χαρακτηριστικά της μηχανής TBM που χρησιμοποιήθηκε (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Η επιλογή του μηχανήματος έχει γίνει σύμφωνα με τις αναμενόμενες γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες σε ολόκληρο το μήκος της υπό κατασκευήν σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή έγινε σύμφωνα με τις απαιτήσεις που αφορούν στην αποφυγή διαταραχής και πρόκλησης ζημιών στα κτίρια και στις κατασκευές που βρίσκονται εντός των ορίων της ζώνης επιρροής της σήραγγας, την ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους και την πρόληψη ζημιών στα δίκτυα κοινωφελών οργανισμών, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ασφάλεια των κατασκευαζόμενων σηράγγων. Στο σύνολό της σχεδόν η σήραγγα θα διανοιχτεί κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και το υπερκείμενο κυμαίνεται μεταξύ 10 – 12m. (Γιαταγάνα, 2014)



Εικόνα 2.2: Κεφαλή μηχανήματος EPB σε ξετρύπωμα σταθμού (Γιαταγάνα, 2014)

Το μχάνημα έχει συνολικό μήκος 130m και αποτελείται από μια περιστρεφόμενη κεφαλή ολομέτωπης κοπής, ίδιας διαμέτρου με αυτήν της εκσκαφής (9,457m) καθώς και το σύστημα υποστήριξης του μηχανήματος. Στην κοπτική κεφαλή προσαρμόζονται κοπτικοί δίσκοι για διάνοιξη σε εδάφη με μη χαλαρούς σχηματισμούς, σιαγώνες σύνθλιψης για αμμώδη εδάφη και οδόντες απόξεσης για συνεκτικά εδάφη. Η διαδικασία απομάκρυνσης των προϊόντων εκσκαφής πραγματοποιείται με μεταφορικό (ατέρμονα) κοχλία και (μεταφορική) ταινία. (Γιαταγάνα, 2014)

Το μχάνημα EPB - TBM προωθείται μέσω των υδραυλικών γρύλων, οι οποίοι πιέζουν τα ήδη τοποθετημένα προκατασκευασμένα στοιχεία επένδυσης της σήραγγας από οπλισμένο σκυρόδεμα, με εσωτερική διάμετρο σήραγγας 8,48m και τα οποία τοποθετούνται εντός του ουραίου περιβλήματος της ασπίδας με την χρήση του ανυψωτήρα προκατασκευασμένων στοιχείων. Τέλος, το μχάνημα είναι εφοδιασμένο με όλα εκείνα τα συστήματα, τον εξοπλισμό και τις εγκαταστάσεις οι οποίες προβλέπονται από τη Αττικό Μετρό και είναι απαραίτητες για την απρόσκοπτη και ασφαλή λειτουργία του. (Γιαταγάνα, 2014)



Εικόνα 2.3: Κοπτική Κεφαλή EPB (Γιαταγάνα, 2014)

Η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στην επιλογή της κατάλληλης και αποτελεσματικής μεθόδου εκσκαφής μιας σήραγγας. Αυτή η θεώρηση είναι ακόμα σημαντικότερη στην μηχανοποιημένη σήραγγοποιία, όπου ειδικές μηχανές TBM, όπως για παράδειγμα η μηχανή με ασπίδα με Εξισορρόπηση Εδαφικής Πίεσης (Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine – EPB-TBM) και η μηχανή με ασπίδα μπεντονιτικού πολφού (Slurry - TBM) έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί τα τελευταία χρόνια για την αντιμετώπιση της αστάθειας του εκσκαπόμενου μετώπου σε δυσμενείς γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές συνθήκες με σημαντικούς εξωτερικούς περιορισμούς. Συνεπώς, η αξιολόγηση και ο υπολογισμός της σταθεροποιητικής πίεσης μετώπου είναι κρίσιμο στοιχείο, τόσο στη μελέτη, όσο και στη φάση της κατασκευής. Παρόλη τη μεγάλη σπουδαιότητα του θέματος,

στην παρούσα φάση της διεθνούς πρακτικής δεν υπάρχουν επαρκείς Τεχνικές Συστάσεις και Κανονισμοί στον σχεδιασμό. Στη σύγχρονη πρακτική χρησιμοποιούνται συνήθως διαφορετικές προσεγγίσεις για την αξιολόγηση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής. (Γιαταγάνα, 2014)

2.5 Επένδυση με Προκατασκευασμένους Δακτυλίους Οπλισμένου Σκυροδέματος

Μετά την εκσκαφή η σήραγγα επενδύεται με ειδικά προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η μηχανή TBM καθώς προχωράει, τοποθετεί, κάτω από την ασπίδα, τα προκατασκευασμένα τμήματα με τη βοήθεια ειδικού συστήματος ανύψωσης (ερέκτορας), δημιουργώντας ένα δακτύλιο. Οι δακτύλιοι εφάπτονται στεγανά μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα σωλήνα. Συνδέονται μεταξύ τους με ειδικούς κοχλίες και πείρους μεγάλης αντοχής. Τα υδραυλικά έμβολα εδράζονται πάνω στην επένδυση, ώστε να επιτευχθεί η προχώρηση. (Σοφιανός, 2018)

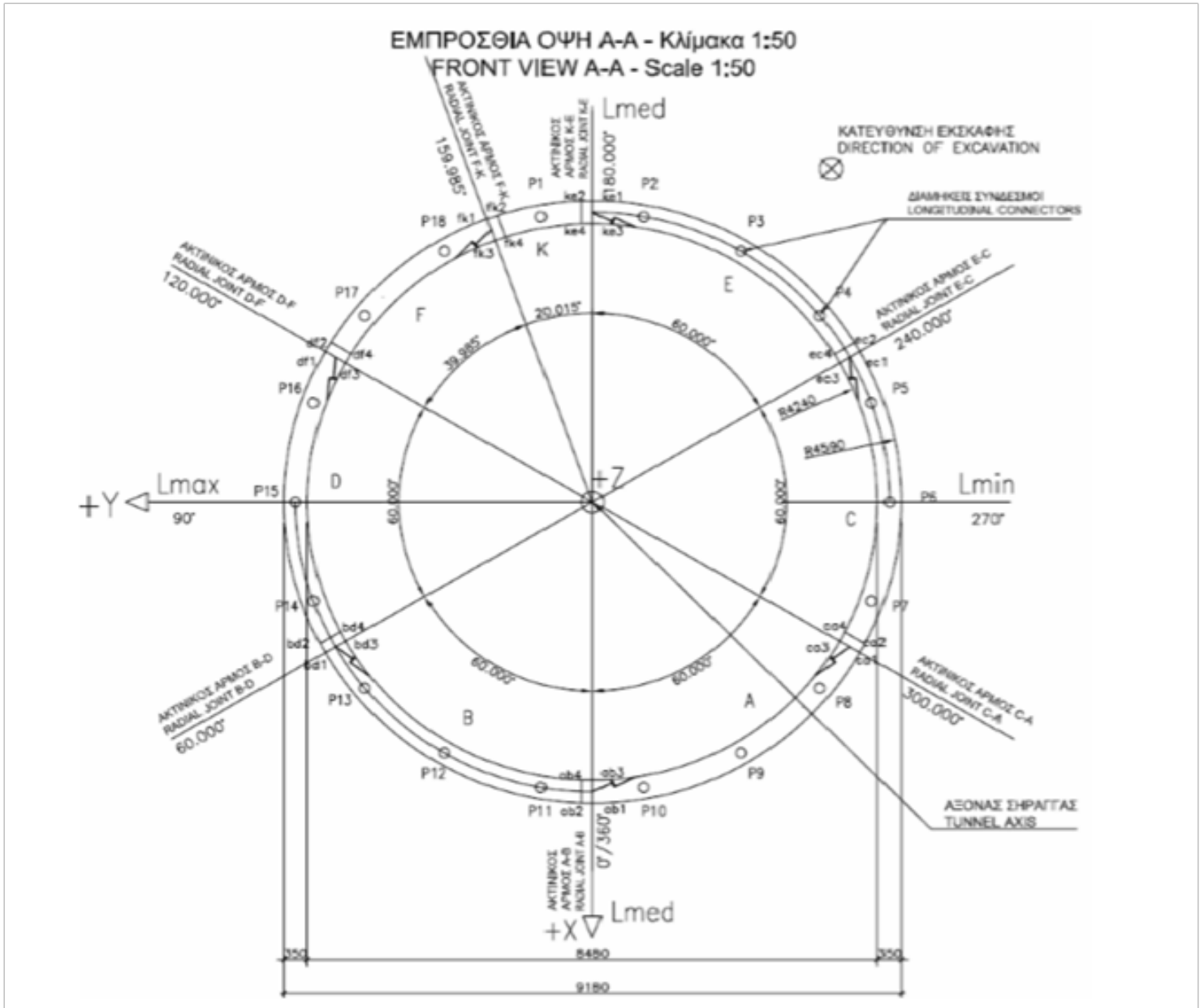


Εικόνα 2.4: Σύστημα τοποθέτησης προκατ. στοιχείων μετρό Αγ. Βαρβάρας (Γιαταγάνα, 2014)

Τα σημεία επαφής μεταξύ της επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία και της καμπύλης της εκσκαφής, δημιουργούν το «δακτυλιοειδές κενό», το οποίο συνήθως πληρώνεται με ένεμα με τη χρήση σωλήνων έγχυσης υπό πίεση που είναι ενσωματωμένες στο ουραίο περίβλημα. Το ένεμα στο δακτυλιοειδές κενό δημιουργεί μία στρώση επένδυσης περιφερειακά των προκατασκευασμένων στοιχείων διατηρώντας σε χαμηλά επίπεδα τις ροπές και τις παραμορφώσεις της επένδυσης. Μεταξύ του περιβλήματος της ασπίδας και της επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία πραγματοποιείται «σφράγιση του ουραίου περιβλήματος» προς αποφυγήν διαρροής του ενέματος από το δακτυλιοειδές κενό εντός του χώρου εργασίας του μηχανήματος. (Γιαταγάνα, 2014)

2.6 Χαρακτηριστικά των προκατασκευασμένων στοιχείων και του δακτυλίου

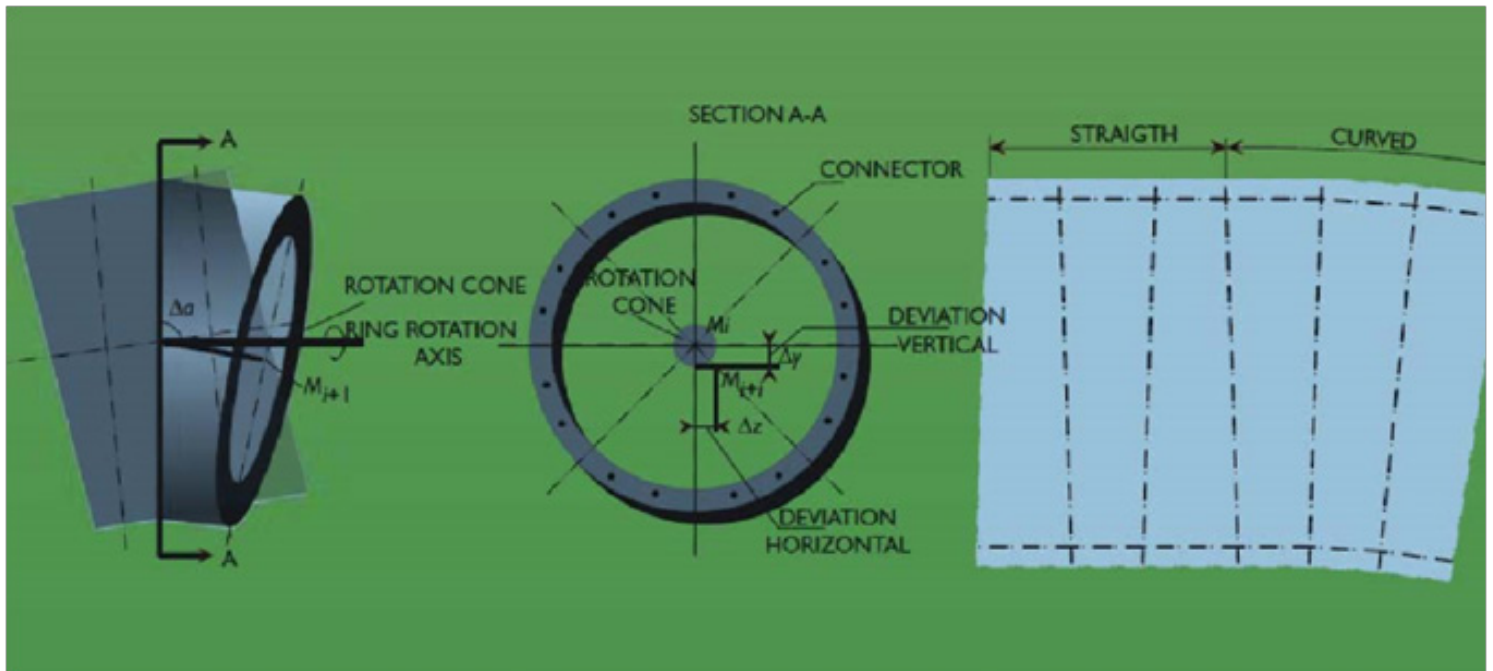
Η τυπική διατομή της επένδυσης από προκατασκευασμένα στοιχεία τύπου Universal που χρησιμοποιήθηκε έχει πάχος 35cm και εσωτερική διάμετρο 8.48m. Ο τύπος δακτυλίου επιλέχθηκε για να επιτελέσει τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Έξι προκατασκευασμένα στοιχεία και ένα κλειδί (A, B, C, D, E, F και K) αποτελούν τον κάθε δακτύλιο. Με τη χρήση προγράμματος βασισμένο σε CAD, που αναπτύχθηκε εσωτερικά στη GEODATA, σχεδιάστηκε η γενική γεωμετρία του δακτυλίου. Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζεται η γεωμετρία του δακτυλίου που χρησιμοποιήθηκε. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)



Εικόνα 2.5: Γεωμετρία δακτυλίου των προκατ. στοιχείων «6+1» (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Ο δακτύλιος universal μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ευθύγραμμα και σε καμπύλα τμήματα της σήραγγας. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την οριζοντιογραφική και μηκοτομική παρακολούθηση της χάραξης χωρίς τη χρήση ειδικών στοιχείων και επίσης τη διόρθωση πιθανών αποκλίσεων του TBM, κατά τη διάρκεια της προχώρησης. Σκοπός χρήσης του δακτυλίου

τμηματικής επένδυσης σήραγγας τύπου universal είναι η εφαρμογή του να ακολουθήσει την πορεία του TBM. Για να ακολουθηθούν οι οριζοντιογραφικές και οι μηκοτομικές καμπύλες, οι δακτύλιοι τύπου universal μοντάρονται με επί μέρους στοιχεία που έχουν κωνικές τις δύο απέναντι πλευρές. Αυτού του τύπου ο δακτύλιος μπορεί να βολευτεί σε όλες τις διευθύνσεις με αντίστοιχη στροφή του δακτυλίου περί τον άξονα της σήραγγας και αναφορικά με τον προηγούμενο και τον επόμενο δακτύλιο. Το γεωμετρικό χαρακτηριστικό που εξειδικεύει τον δακτύλιο τύπου universal είναι η κωνικότητά του, ήτοι η διαφορά μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου μήκους του. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)



Εικόνα 2.6: Θεώρηση σύλληψης του δακτυλίου τύπου Universal (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Επιπρόσθετα, για να αποφευχθούν προβλήματα αναφορικά με τους αρμούς, οι διαμήκεις αρμοί διαδοχικών δακτυλίων διατάσσονται πεσσοειδώς. Αυτή η διάταξη αυξάνει την ακαμψία του συστήματος της τμηματικής επένδυσης, καθώς οποιοδήποτε άνοιγμα διαμήκους αρμού λόγω στροφής δύο διαδοχικών στοιχείων εμποδίζεται από το επικαλυπτόμενο στοιχείο του γειτονικού δακτυλίου. Ο δακτύλιος τύπου universal μπορεί να περιστραφεί. Σημειώνεται, ότι οι δακτύλιοι μπορούν να περιστραφούν με γωνία που είναι ίση με το πολλαπλάσιο της γωνιακής απόστασης μεταξύ μιας διαμήκους σύνδεσης και μιας άλλης (20°), και ότι δεν επιτρέπονται να υλοποιηθούν όλες οι φυσικές περιστροφές, λόγω της συνέχειας των αρμών. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

2.7 Όγκος και πίεση ενέματος

Ο όγκος του ενέματος προσδιορίζεται από το γινόμενο της επιφάνειας του δακτυλιοειδούς κενού (μεταξύ εξωραχίου της τμηματικής επένδυσης και εσωραχίου εκσκαφής) επί το μήκος του δακτυλίου της τμηματικής επένδυσης, ως εξής:

$$V_i = L * \pi * (r_e^2 - r_i^2)$$

όπου:

r_e : ακτίνα εσωραχίου εκσκαφής = $9.495/2 = 4.7475$ m

r_i : ακτίνα εξωραχίου της τμηματικής επένδυσης = $9.18/2 = 4.59$ m

L: μήκος δακτυλίου τμηματικής επένδυσης = 1,50 m.

Από την παραπάνω εξίσωση ο όγκος του ενέματος προκύπτει ίσος με 6.93m^3 . Η τιμή αυτή παραμένει σταθερή καθ' όλο το μήκος του 1^{ου} και του 2^{ου} μεσοδιαστήματος. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Οι τιμές μελέτης της πίεσης του ενέματος έχουν υπολογιστεί με χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$P_i = \text{Πίεση υποστήριξης μετώπου (τιμή μελέτης)} + 50 \text{ kPa}$

Η εξίσωση αυτή θα μπορούσε, κατά τη διάνοιξη, να τροποποιηθεί ανάλογα με τις ιδιότητες του ενέματος. Καθώς με βάση την παραπάνω εξίσωση, η απαιτούμενη πίεση του ενέματος εξαρτάται αποκλειστικά από την απαιτούμενη πίεση υποστήριξης μετώπου, η ίδια λειτουργική ανοχή που θεωρήθηκε για την πίεση υποστήριξης μετώπου θεωρείται και για την πίεση ενέματος και είναι ίση με $\pm 30\text{kPa}$. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Όπως και στην περίπτωση της πίεσης υποστήριξης μετώπου, στα τμήματα όπου υπάρχουν ρήγματα ή γεωυλικά με διαπερατότητα $k \geq 10^{-6}\text{m/s}$, η κατώτερη τιμή της λειτουργικής ανοχής $P_{i,\min}$ περιορίζεται ώστε να μην είναι μικρότερη από την υδροστατική πίεση P_w . Στις άλλες περιπτώσεις ισχύει $P_{i,\min} = P_i - 30\text{kPa}$. Ο περιορισμός αυτός τίθεται ώστε να παρεμποδιστεί η ροή νερού προς τη σήραγγα σε περιοχές μέτριας και υψηλής διαπερατότητας, όπου η ροή αυτή είναι σημαντική και μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα αστάθειας ή καθιζήσεις. Τονίζεται και πάλι ότι οι προτεινόμενες τιμές της πίεσης ενέματος αντιστοιχούν στο κέντρο της κυκλικής σήραγγας. Σημειώνεται, ότι όλες οι παράμετροι λειτουργίας του TBM μπορεί να μεταβληθούν κατά την εκσκαφή, ανάλογα με τα δεδομένα της γεωμηχανικής και δομητικής παρακολούθησης. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

2.8 Ρυθμοί Παραγωγής του TBM

Ο ρυθμός παραγωγής του TBM, εξελίχθηκε με την ακόλουθη πορεία. Από τον 400° μέχρι τον 558° δακτύλιο, ο μέσος χρόνος τοποθέτησης δακτυλίων ήταν 58 λεπτά. Από τον 559° μέχρι τον 809° δακτύλιο μειώθηκε στα 52 λεπτά. Από τον 810° μέχρι τον 920° μειώθηκε και άλλο στα 48 λεπτά. Τέλος, από τον 921° μέχρι τον 1280° μειώθηκε ακόμη περισσότερο στα 45 λεπτά. Να σημειωθεί ότι στο τέλος του πρώτου μεσοδιαστήματος ο μέσος όρος τοποθέτησης δακτυλίων ήταν 60 λεπτά. Παρατηρείται, επομένως, συνεχής αύξηση της ταχύτητας τοποθέτησης των δακτυλίων, η οποία και συνέβαλε στην αύξηση των ρυθμών παραγωγής. Ακολουθεί αναλυτικότερος σχολιασμός των ρυθμών παραγωγής:

- **Πλήρης παραγωγή (από 14/07/2014 έως 08/08/2014):**

Τοποθετήθηκαν 199 δακτύλιοι σε 26 ημέρες. Επιτεύχθηκε, έτσι, ένας μέσος ρυθμός παραγωγής 7.7 δακτ./ημέρα, με μέγιστη τιμή 16 δακτ./ημέρα. Ο ρυθμός παραγωγής ήταν σαφώς βελτιωμένος σε σχέση με τον μέσο ρυθμό 6.2 δακτ./ημέρα, που είχε επιτευχθεί στο τελευταίο τμήμα του 1ου Μεσοδιαστήματος (αύξηση κατά 24%).

- **Αργία (από 09/08/2014 έως 17/08/2014):**

Οι εργασίες διάνοιξης διακόπηκαν λόγω των θερινών διακοπών. Η κεφαλή του TBM ήταν στη Χ.Θ. 2+610.

- **Πλήρης παραγωγή (από 18/08/2014 έως 06/10/2014):**

Τοποθετήθηκαν 429 δακτύλιοι σε 49 ημέρες. Επιτεύχθηκε, έτσι, ένας μέσος ρυθμός παραγωγής 8.8 δακτ./ημέρα, με μέγιστη τιμή 15 δακτ./ημέρα. Ο μέσος ρυθμός παραγωγής, επομένως, αυξήθηκε κατά 14% σε σχέση με το αμέσως προηγούμενο διάστημα.

- **Εργασίες συντήρησης της κεφαλής και βελτίωσης του ταινιόδρομου (από 07/10/2014 έως 13/10/2014):**

Κατά το χρονικό αυτό διάστημα πραγματοποιήθηκε στάση του TBM στη Χ.Θ. 3+254 για λόγους συντήρησης της κεφαλής, καθώς και για την εγκατάσταση πρόσθετου μηχανολογικού εξοπλισμού για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του ταινιόδρομου.

- **Πλήρης παραγωγή (από 14/10/2014 έως 13/11/2014):**

Τοποθετήθηκαν 248 δακτύλιοι σε 30 ημέρες. Επιτεύχθηκε, έτσι, ένας μέσος ρυθμός παραγωγής 8.3 δακτ./ημέρα, με μέγιστη τιμή 14 δακτ./ημέρα. Ο μέσος ρυθμός παραγωγής, επομένως, διατηρήθηκε σε πολύ υψηλά επίπεδα. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Συμπερασματικά, παρατηρήθηκε σταδιακή και σημαντική αύξηση του μέσου ρυθμού παραγωγής, ο οποίος έφτασε και διατηρείται σε επίπεδα μεγαλύτερα των 8 δακτ./ημέρα. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

2.9 Δυνάμεις ώσης, ροπές στρέψης, ρυθμοί εκσκαφής και ταχύτητες περιστροφής του ατέρμονος κοχλία

Αρχικά, από τη Χ.Θ. 2+297 (έξοδος του TBM από τον Σταθμό Αγίας Βαρβάρας) μέχρι τη Χ.Θ. 2+335, ο θάλαμος εκσκαφής δεν ήταν πλήρης, πράγμα το οποίο και φαίνεται από τις πολύ χαμηλές τιμές (από 0 έως 0.15 bar) της πίεσης μετώπου στους δύο ανώτερους αισθητήρες. Λόγω της μερικής και μόνο πλήρωσης του θαλάμου εκσκαφής, η δύναμη ώσης που εφαρμόστηκε ήταν μικρή και ήταν της τάξεως των 11 MN. Ομοίως, η ροπή στρέψης ήταν επίσης μικρή, καθώς διακυμάνθηκε από 4.0 έως 8.0 MN*m. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Από τη Χ.Θ. 2+335 έως τη Χ.Θ. 2+500, όπου η διάνοιξη έγινε σε λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις με τον θάλαμο εκσκαφής γεμάτο, η δύναμη ώσης ήταν περίπου 16 MN. Από τη Χ.Θ. 2+500 έως τη Χ.Θ. 2+705, όπου στο κάτω μέρος του μετώπου εμφανιζόταν σταδιακά ολοένα και περισσότερο ο σχετικά σκληρότερος, σε σχέση με τις λιμναίες μάργες, αθηναϊκός σχιστόλιθος, η δύναμη ώσης αυξήθηκε σταδιακά από τα 16 στα 18 MN. Από τη Χ.Θ. 2+705 μέχρι τη Χ.Θ. 3+345, όπου η διάνοιξη έγινε στον αθηναϊκό σχιστόλιθο, η δύναμη ώσης που εφαρμόστηκε αυξήθηκε σταδιακά από τα 18 στα 23 MN, ενώ από τη Χ.Θ. 3+345 και μέχρι το τέλος του εξεταζόμενου τμήματος στη Χ.Θ. 3+625, όπου η διάνοιξη εξακολουθούσε να γίνεται στον αθηναϊκό σχιστόλιθο, η δύναμη ώσης που εφαρμόστηκε μειώθηκε σταδιακά από τα 23 στα 20 MN. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι δυνάμεις ώσης που εφαρμόστηκαν στο 2ο Μεσοδιάστημα ήταν σημαντικά μικρότερες από ότι στο 1ο Μεσοδιάστημα, όπου στον αθηναϊκό σχιστόλιθο εφαρμόστηκε δύναμη ώσης της τάξεως των 25 MN, ενώ στις λιμναίες μάργες της τάξεως των 20.5 MN. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

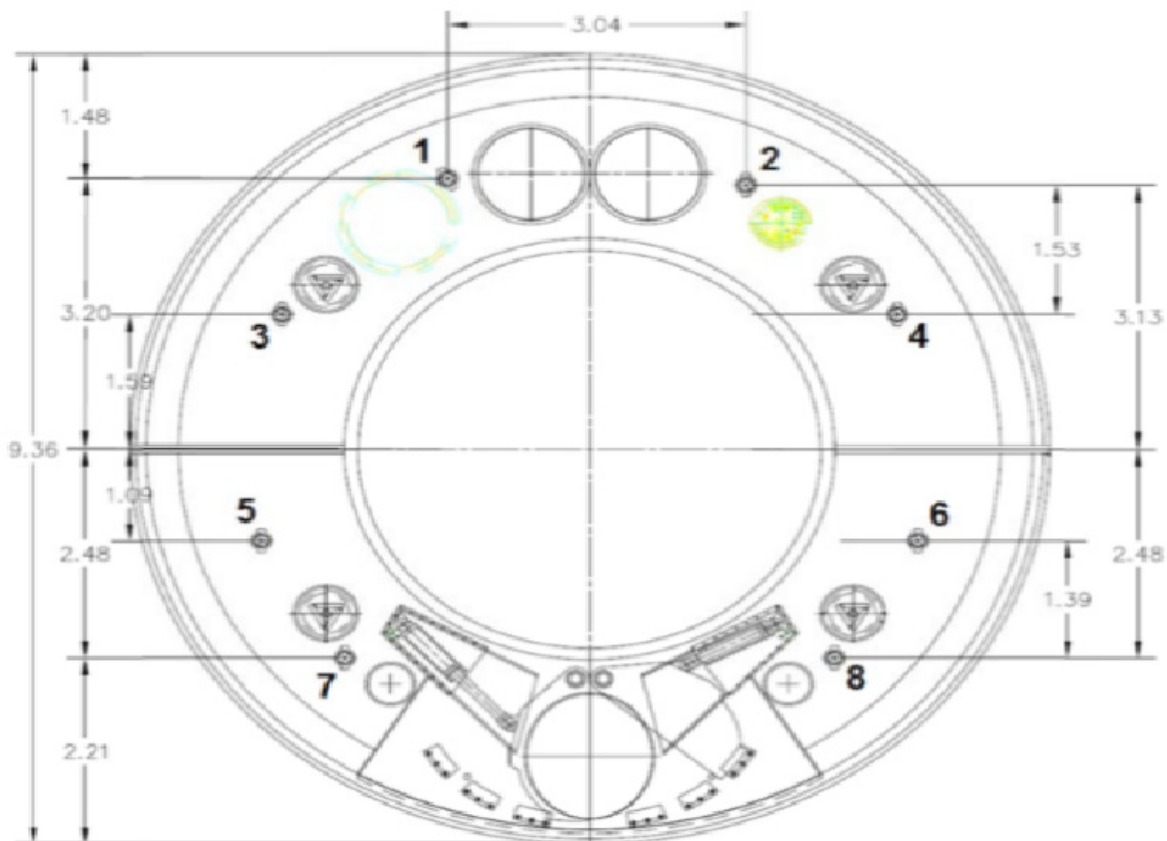
Από τη Χ.Θ. 2+335, όπου ο θάλαμος εκσκαφής γέμισε μέχρι το τέλος του εξεταζόμενου τμήματος στη Χ.Θ. 3+625, η ροπή στρέψης διακυμάνθηκε από 7.5 έως 11.5 MN*m, δηλαδή ήταν ακριβώς στα ίδια επίπεδα με το 1ο Μεσοδιάστημα. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Ο ρυθμός εκσκαφής, από την αρχή του 2ου Μεσοδιαστήματος μέχρι τη Χ.Θ. 2+380, ήταν της τάξεως των 30 mm/min, δηλαδή ήταν σχετικά αργός. Από τη Χ.Θ. 2+380, ο ρυθμός εκσκαφής αυξήθηκε απότομα σε υψηλά επίπεδα. Συγκεκριμένα, ήταν περίπου 50 mm/min στις σχετικά μαλακότερες λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις και μειώθηκε στα 42 mm/min στο τμήμα της σήραγγας όπου επικρατούσαν συνθήκες μικτού μετώπου, λόγω της εμφάνισης του σχετικά σκληρότερου αθηναϊκού σχιστόλιθου στο κάτω μέρος του μετώπου. Από τη Χ.Θ. 2+705 μέχρι το τέλος του εξεταζόμενου τμήματος στη Χ.Θ. 3+625, όπου η διάνοιξη έγινε στον αθηναϊκό σχιστόλιθο, ο ρυθμός εκσκαφής κυμάνθηκε από 30 έως 44 mm/min. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι ρυθμοί εκσκαφής ήταν περίπου κατά 25% αυξημένοι σε σχέση με τους αντίστοιχους σχηματισμούς στο 1ο Μεσοδιάστημα, κάτι που συνέβαλλε στην αύξηση των ρυθμών παραγωγής. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Ο ρυθμός περιστροφής του κοχλία απόληψης και μεταφοράς προϊόντων εκσκαφών ακολουθεί παρόμοια διακύμανση με τον ρυθμό εκσκαφής. Συγκεκριμένα, από την πλήρωση του θαλάμου και μέχρι τη Χ.Θ. 2+380 ήταν σχετικά αργός (5 περιστροφές ανά λεπτό). Από τη Χ.Θ. 2+380 αυξήθηκε απότομα σε 12.5 περιστροφές ανά λεπτό στις λιμναίες μάργες, ενώ μετά από την εμφάνιση του αθηναϊκού σχιστολίθου στο κάτω μέρος του μετώπου μειώθηκε στις 9.5 περιστροφές ανά λεπτό. Μετά από τη Χ.Θ. 2+705 και μέχρι το τέλος του εξεταζόμενου τμήματος στη Χ.Θ. 3+625, όπου η διάνοιξη έγινε αποκλειστικά στον αθηναϊκό σχιστόλιθο, ο ρυθμός περιστροφής κυμάνθηκε από 4.5 έως 8.0 περιστροφές ανά λεπτό. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

2.10 Πίεση υποστήριξης μετώπου και καθιζήσεις στην επιφάνεια

Στην κεφαλή του TBM υπήρχαν 8 αισθητήρες πίεσης διατεταγμένοι σε 4 επίπεδα. Η μέση πίεση που καταγράφηκε στους 8 αισθητήρες κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου παραγωγής, ξεκινώντας από την έναρξη της εκσκαφής και συμπεριλαμβανόμενου του χρόνου τοποθέτησης του δακτυλίου, βρέθηκε στα περίπου 1.6 με 1.8 bar. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η όψη της κεφαλής του EPB – TBM με τις θέσεις και την αρίθμηση των αισθητήρων μέτρησης της πίεσης υποστήριξης του μετώπου. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)



Εικόνα 2.7: Όψη κεφαλής EPB – TBM με τις θέσεις και την αρίθμηση των αισθητήρων μέτρησης της πίεσης υποστήριξης του μετώπου (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Έπειτα από σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των τιμών της πίεσης υποστήριξης που καταγράφηκαν από τον αισθητήρα 1 και από τον αισθητήρα 2, με τις τιμές μελέτης και τις τιμές ανώτερης και κατώτερης λειτουργικής ανοχής της πίεσης μετώπου στον ανώτατο αισθητήρα 1, παρατηρούμε ότι σχεδόν σε όλο το εξεταζόμενο μήκος του 2ου Μεσοδιαστήματος η εφαρμοσθείσα πίεση υποστήριξης ήταν μεγαλύτερη από την κατώτερη τιμή λειτουργικής ανοχής της μελέτης. Μάλιστα, στο μεγαλύτερο μήκος ήταν ελαφρώς και μόνο μικρότερη από την τιμή μελέτης. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Κεφάλαιο 3

Καθιζήσεις κατά τη διάνοιξη Αβαθών Σηράγγων

3.1 Εισαγωγικά

Στην κατασκευή των υπογείων έργων έχει μεγάλη σημασία η κίνηση του εδάφους. Με άλλα λόγια οι καθιζήσεις είναι αναπόφευκτες συνέπειες της κατασκευής σηράγγων, αποτελώντας το σημαντικότερο πρόβλημα κατά την κατασκευή τους. Η σχέση μεταξύ των επιφανειακών καθιζήσεων και βάθους εκσκαφής δεν είναι γραμμική. Παρόλα αυτά, η εκδήλωση των καθιζήσεων, και μάλιστα σε αστικό περιβάλλον, υπάρχει πιθανότητα να προκαλέσει ζημιές στις επιφανειακές κατασκευές σε μεγάλο βαθμό, σε σημείο τέτοιο που να προκύψουν θέματα ευστάθειας στις κατασκευές αυτές. (Γιαταγάνα, 2014)

Κατά την διάρκεια της εκσκαφής οι εδαφικές συνθήκες γύρω από τη σήραγγα διαταράσσονται. Πάντα ο όγκος του εδάφους που απομακρύνεται είναι μεγαλύτερος από τον όγκο που θα καταλαμβάνει η σήραγγα. Στην πραγματικότητα οι καθιζήσεις εξαρτώνται από έναν αριθμό παραγόντων όπως οι γεωλογικές και οι υδρογεωλογικές συνθήκες, η γεωμετρία του ανοίγματος, το βάθος της εκσκαφής, η μέθοδος εκσκαφής η εμπειρία των τεχνιτών και η διαχείριση. Ωστόσο, είναι ξεκάθαρο ότι μια αβαθής σήραγγα παρουσιάζει πιο έντονες καθιζήσεις σε σχέση με μια βαθιά. (Γιαταγάνα, 2014)

Καθιζήσεις μπορεί να υπάρξουν εξαιτίας είτε της ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα είτε της ύπαρξης στρωμάτων συμπίεσιμων υλικών όπως επίσης και διαβρωμένων βραχωδών υλικών. Έτσι, λοιπόν, κατά τη διάρκεια κατασκευής τέτοιων έργων είναι επιτακτική η γεωτεχνική παρακολούθηση όχι μόνο στη φάση κατασκευής τους, αλλά και στη φάση λειτουργίας τους. (Γιαταγάνα, 2014)

3.2 Παράγοντες που προκαλούν καθιζήσεις λόγω Απώλειας Όγκου

Οι παράγοντες στους οποίους οφείλεται η απώλεια εδαφικού όγκου κατά την εκσκαφή και συμβάλλουν στην εκδήλωση καθιζήσεων στην επιφάνεια, κατά την εκμηχανισμένη διάνοιξη σηράγγων από TBM με ασπίδα, χωρίζονται στις εξής κατηγορίες: (σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Σηραγγοποιίας):

Καθιζήσεις έμπροσθεν και άνωθεν του μετώπου εκσκαφής

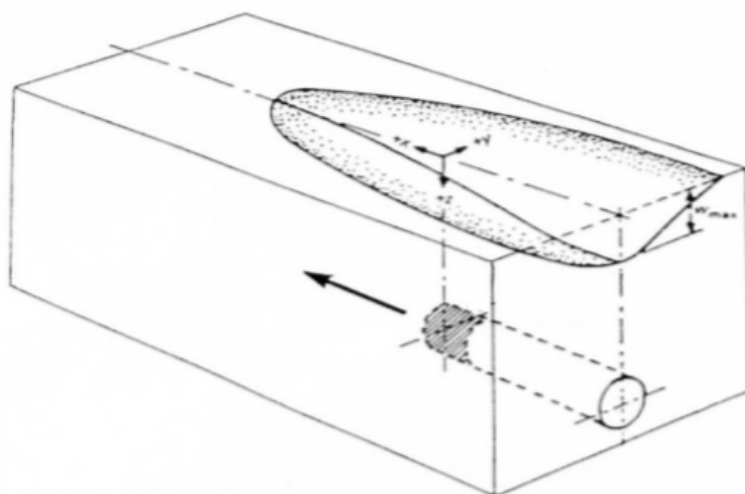
Συμβαίνουν εξαιτίας των μετακινήσεων της εδαφομάζας έμπροσθεν και άνωθεν της κεφαλής κοπής της μηχανής προς το άνοιγμα που δημιουργείται. Εάν αφεθούν ανεξέλεγκτες είναι δυνατό να δημιουργηθεί μία κατάρρευση τύπου καμινάδας καθώς το γεωυλικό θα ρέει ανεξέλεγκτα προς το άνοιγμα της εκσκαφής. (Κοσκινιώτης, 2019)

Καθιζήσεις κατά μήκος της ασπίδας

Οι καθιζήσεις κατά μήκος της ασπίδας παρουσιάζονται κατά κύριο λόγο εξαιτίας της σκόπιμης υπερεκσκαφής από τα κοπτικά εργαλεία που υπάρχουν στην περιφέρεια της κοπτικής κεφαλής για να γίνεται ευκολότερη η προχώρηση του TBM και της δυσκολίας οδήγησης της ασπίδας, ιδιαίτερα κατά τη χάραξη καμπυλόγραμμης πορείας. Στην ουσία γίνεται διεύρυνση της ασταθούς ζώνης της εδαφομάζας και σε συνδυασμό με το μικρό ύψος υπερκειμένων αυτή η διεύρυνση διαδίδεται ως την επιφάνεια προκαλώντας καθιζήσεις. (Κοσκινιώτης, 2019)

Καθιζήσεις κατά μήκος του ουραίου κενού της ασπίδας

Στο κομμάτι αυτό οι καθιζήσεις οφείλονται βασικά στο ουραίο κενό της ασπίδας με την εκσκαφή, το οποίο μένει ανυποστήρικτο μέχρι να πληρωθεί με ένεμα, όπου κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος εκδηλώνονται μετατοπίσεις του εδάφους προς το ελεύθερο κενό. Πολύ ουσιαστικός παράγοντας που επιδρά στο μέγεθος των καθιζήσεων είναι και η ποιότητα ενεμάτωσης του ουραίου κενού. Όταν το ένεμα δεν έχει τη σωστή αναλογία συστατικών και χημικών πρόσθετων δεν αποκτά την απαιτούμενη αντοχή μετά την πήξη του, με αποτέλεσμα με τις φορτίσεις που θα δεχτεί να παραμορφώνεται και να εντείνεται το φαινόμενο των καθιζήσεων. (Κοσκινιώτης, 2019)



Εικόνα 3.1: Σχήμα επιφάνειας καθίζησης λόγω της εκσκαφής της σήραγγας (συνθήκες ελεύθερο πεδίου) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Καθιζήσεις λόγω παραμορφώσεων της επένδυσης

Θεωρούνται γενικά αμελητέες για αβαθείς σήραγγες. Τα προκατασκευασμένα τμήματα της επένδυσης από σκυρόδεμα οφείλουν να είναι επαρκούς αντοχής, με σκοπό να μπορούν να παραλάβουν τόσο τις φορτίσεις από την υπερκείμενη εδαφομάζα όσο και τις πιέσεις από τους γρύλους του TBM που εδράζονται πάνω σε αυτά. (Κοσκινιώτης, 2019)

3.3 Ευστάθεια μετώπου και επέκταση μετακινήσεων προς την επιφάνεια

Η ανάλυση της ευστάθειας του μετώπου προσφέρει ενδείξεις των πιθανότερων μηχανισμών αστοχίας, καθώς και διευκρινίζει τις παραμέτρους εκείνες οι οποίες πρέπει να αξιολογηθούν για την εκτίμηση των προκαλούμενων από την διάνοιξη εδαφικών μετακινήσεων. Βάσει της φύσης των εδαφών τα οποία απαντώνται, παρατηρούνται δύο τύποι μηχανισμών αστοχίας. Στην περίπτωση συνεκτικών εδαφών, η αστοχία του μετώπου επηρεάζει μεγάλου μεγέθους εδαφικό όγκο μπροστά από αυτό. Ο μηχανισμός αυτός οδηγεί σε κατακρήμνιση η οποία επεκτείνεται μέχρι την επιφάνεια δημιουργώντας οπή πλάτους μεγαλύτερου της διαμέτρου της σήραγγας. Στην περίπτωση των μη συνεκτικών εδαφών, η αστοχία έχει τη μορφή καμινάδας η οποία επεκτείνεται πάνω από το μέτωπο της σήραγγας. Αυτοί οι μηχανισμοί είναι βασισμένοι στην θεώρηση ιδανικών συνθηκών και επομένως πρέπει να προσαρμόζονται αναλόγως στις επί τόπου συνθήκες όπως μη ομογενή εδάφη, παρουσία υπογείων υδάτων και υφιστάμενη υδραυλική κλίση. (Δημακόπουλος, 2010)

Οι εδαφικές μετακινήσεις οι οποίες ξεκινούν στην υπό διάνοιξη σήραγγα τείνουν να επεκταθούν στην επιφάνεια. Η έκτασή τους και η χρονική τους εξέλιξη, τυπικά εξαρτάται από τις γεωτεχνικές συνθήκες, τις γεωμετρικές συνθήκες καθώς και τις εφαρμοσμένες κατασκευαστικές μεθόδους. Βάσει των επί τόπου μετρήσεων και παρατηρήσεων έχουν αναγνωρισθεί δύο τύποι επέκτασης των μετακινήσεων. Οι τύποι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση, σε ένα εγκάρσιο επίπεδο, του βαθμού της επέκτασης των μετακινήσεων οι οποίες αρχικά εμφανίζονται στο υπόγειο άνοιγμα. (Δημακόπουλος, 2010)

Οι τύποι εδαφικής απόκρισης συνήθως οδηγούν σε οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις οι οποίες τείνουν να αναπτύσσονται στην επιφάνεια καθώς η διάνοιξη εξακολουθεί. Αποτέλεσμα αυτού είναι η λεκάνη καθιζήσεων. Προς ευχέρεια αξιολόγησης η παρατηρούμενη στο χώρο λεκάνη καθιζήσεων τυπικά περιγράφεται από τις καμπύλες που την περιγράφουν σε εγκάρσια και κατά μήκος τομή σε αναφορά με τον άξονα της σήραγγας. (Δημακόπουλος, 2010)

3.4 Επίδραση Υπόγειου Υδροφόρου Ορίζοντα

Πληθώρα παραδειγμάτων τόσο δυσχερειών όσο και ατυχημάτων (αστοχιών) κατά την κατασκευή υπογείων έργων οφείλονται στην παρουσία υπογείων υδάτων. Τονίζεται ότι ο έλεγχος των υπογείων υδάτων αποτελεί προϋπόθεση για την επιτυχή ολοκλήρωση υπογείων έργων. Οι καθιζήσεις οι οποίες οφείλονται στην παρουσία υπογείων μπορούν κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- **1^η περίπτωση: εκδήλωση καθιζήσεων κατά την διάρκεια της κατασκευής του έργου.**

Ο καταβιβασμός της στάθμης του υδροφόρου, πριν την διάνοιξη (με αποστράγγιση) ή ως συνέπεια αυτής, μπορεί να οδηγήσει στην άμεση εμφάνιση καθιζήσεων σε στρώματα ή φακούς συμπιεστών εδαφών, καθώς και σε αποσαθρωμένα βραχώδη υλικά. Η επίδραση του καταβιβασμού του υδροφόρου ποικίλει αναλόγως με το μέγεθος και την ακτίνα επιρροής. Όταν αυτός είναι τοπικός, οι προκαλούμενες παραμορφώσεις συχνά οδηγούν στην δημιουργία μεγάλων διαφορικών καθιζήσεων οι οποίες επηρεάζουν τις υπερκείμενες κατασκευές. Στην περίπτωση που αυτός είναι μεγαλύτερης έκτασης, οι επιπτώσεις είναι λιγότερο σοβαρές.

Η παρουσία υπογείων υδάτων στην περιοχή του μετώπου της διάνοιξης μπορεί να προκαλέσει καθιζήσεις ως αποτέλεσμα:

i. της απομείωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών και επακόλουθης αύξησης των εδαφικών παραμορφώσεων στην περιοχή του μετώπου καθώς και στις παρειές της σήραγγας, εξαιτίας της υδραυλικής κλίσης

ii. επιδείνωσης των επιπτώσεων προϋπάρχων μηχανικών ασταθειών

iii. επιδείνωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών στο επίπεδο του ανάστροφου τόξου, ειδικά στην περίπτωση της εφαρμογής μεθόδου τμηματικής εκσκαφής όπου παρίσταται κίνδυνος διάτρησης του εδάφους στο επίπεδο αυτό από την προσωρινή υποστήριξη εξαιτίας της απώλειας περιορισμού. (Δημακόπουλος, 2010)

- **2^η περίπτωση: καθιζήσεις οι οποίες εμφανίζονται με χρονική υστέρηση και συνήθως παρατηρούνται σε μαλακά συμπιεστά εδάφη.**

Η διαδικασία διάνοιξης μίας σήραγγας μπορεί να οδηγήσει σε τοπικού χαρακτήρα αύξηση των τάσεων και συνεπακόλουθη αύξηση της πίεσης των πόρων. Αντίστοιχοι μηχανισμοί μπορούν να αναπτυχθούν σε μεγαλύτερη κλίμακα στην περίπτωση εφαρμογής μεθόδων μηχανοποιημένης όρυξης με μηχανήματα εξισορρόπησης πίεσης μετώπου. Επιπλέον, η διήθηση προς τις παρειές της σήραγγας, η οποία αναπόφευκτα λαμβάνει χώρα κατά την κατασκευή ή/και μετά το πέρας αυτή, είτε κατά μήκος των περισσότερο περατών σχηματισμών του ανοίγματος είτε μέσω της επένδυσης της σήραγγας, προκαλεί την στερεοποίηση της εδαφομάζας στο σύνολό της. Είναι σαφές ότι το μέγεθος των καθιζήσεων εκ στερεοποίησης θα είναι μεγαλύτερο στις περιοχές όπου η μείωση της πίεσης πόρων είναι αντιστοίχως, μεγαλύτερη. (Δημακόπουλος, 2010)

3.5 Καθιζήσεις λόγω ποιότητας εργασιών διάνοιξης

Οι εργοταξιακές συνθήκες μπορούν να λειτουργήσουν καθοριστικά στην ανάπτυξη καθιζήσεων. Κύριος παράγοντας είναι οι δονήσεις που προκαλούνται από τη διαδικασία όρυξης, είτε αυτή πραγματοποιείται με τμηματική εκσκαφή είτε με μηχανοποιημένες μεθόδους. Καθιζήσεις οι οποίες οφείλονται στα ως άνω αίτια, παρατηρούνται σε μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς ή σε εδάφη καλών μηχανικών χαρακτηριστικών με πτωχό επιφανειακό εδαφικό κάλυμμα. (Δημακόπουλος, 2010)

3.6 Μέτρηση επίγειων μετακινήσεων στο έδαφος

Κατά τη διάνοιξη αβαθών σιράγγων, παρατηρούνται μετακινήσεις των κατασκευών στην επιφάνεια, τόσο κατά την οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Για τον έλεγχο του μεγέθους αυτών των μετακινήσεων είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών οργάνων παρακολούθησης. Η μέτρηση των κατακόρυφων μετακινήσεων πραγματοποιείται με τη χωροστάθμηση σημείων επί της επιφανείας ή επί των υφιστάμενων σε αυτή κατασκευών, ενώ η μέτρηση των οριζόντιων μετακινήσεων γίνεται με τη χρήση κλισιμέτρων επί των κατασκευών. Επιπλέον μετρήσεις πραγματοποιούνται και στο εσωτερικό της σήραγγας με τη χρήση ειδικών διατάξεων με επιμηκυνσιόμετρα διατρήματος. (Κοσκινιώτης, 2019)

Είναι γεγονός ότι, τα τελευταία χρόνια, λόγω της αλματώδους ανάπτυξης της εφαρμοσμένης τεχνολογίας στη σιραγγοποιία και της εφαρμογής νέων και βελτιωμένων τεχνικών διάνοιξης,

το μέγεθος των καθιζήσεων που παρατηρείται παγκοσμίως σε έργα σπανίως ξεπερνά τα 10 – 20mm. Στη μείωση αυτού του φαινομένου έχει πρωταρχικό ρόλο η χρήση TBM που προσφέρουν στήριξη μετώπου. (Κοσκινιώτης, 2019)

3.7 Επικινδυνότητα Καθιζήσεων

Προκειμένου να πετύχουμε τον έλεγχο της επικινδυνότητας των καθιζήσεων έχουν θεσπιστεί όρια αναφορικά με τον αποδεκτό βαθμό ενδεχόμενων μετατοπίσεων των κατασκευών, τα οποία αναφέρονται σε τιμές:

- Γωνιακής παραμόρφωσης
- Ολικής καθίζησης
- Ρυθμού μεταβολής ολικής καθίζησης
- Ρυθμού μεταβολής ανοίγματος ρωγμών
- Οριζόντιας παραμόρφωσης (Κοσκινιώτης, 2019)

Οι επιτρεπόμενες τιμές εντός της ζώνης επιρροής (σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.) που εφαρμόζονται, παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 3.1: Επιτρεπόμενες Καθιζήσεις (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

	Οδοί, Πεζοδρόμια, ή Δίκτυα Ο.Κ.Ω
Συνολική Καθίζηση	30mm
Γωνιακή Παραμόρφωση	1/500
Οριζόντια Παραμόρφωση	0,15%

Πίνακας 3.2: Επιτρεπόμενες Καθιζήσεις – Κτίσματα από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

	Κτίρια ζωτική σημασίας (π.χ. τηλεπικοινωνιών, ενέργειας, νοσοκομεία κλπ)	Κτίρια δημόσιων συναθροίσεων (εκπαιδευτήρια, αεροδρόμια κλπ)	Συνήθη κτίρια κατοικιών και γραφείων, βιομηχανικά κτίρια, ξενοδοχεία κτλ	Κτίρια μικρής σπουδαιότητας ως προς την ασφάλεια του κόσμου
Συνολική Καθίζηση	15mm	20mm	25mm	30mm
Γωνιακή Παραμόρφωση	1/800	1/700	1/600	1/500

Πίνακας 3.3: Επιτρεπόμενες Καθιζήσεις – Κτίσματα από φέρουσα τοιχοποιία (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

	Κτίρια ζωτική σημασίας (π.χ. τηλεπικοινωνιών, ενέργειας, νοσοκομεία κλπ)	Κτίρια δημόσιων συναθροίσεων (εκπαιδευτήρια, αεροδρόμια κλπ)	Συνήθη κτίρια κατοικιών και γραφείων, βιομηχανικά κτίρια, ξενοδοχεία κτλ	Κτίρια μικρής σπουδαιότητας ως προς την ασφάλεια του κόσμου
Συνολική Καθίζηση	10mm	12mm	15mm	20mm
Γωνιακή Παραμόρφωση	1/1000	1/900	1/800	1/700

3.8 Απώλεια όγκου του εδάφους

Απώλεια όγκου λόγω της διάνοιξης της σήραγγας ορίζεται ο όγκος εδάφους μεταξύ της τελικής θέσης της επιφάνειας εκσκαφής και της αρχικής θέσης της. Οφείλεται στην εκβολή του εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας και τη συνεπακόλουθη σύγκλιση έμπροσθεν του μετώπου, στο κενό που αφήνεται μεταξύ επιφάνειας όρυξης και επένδυσης της σήραγγας, καθώς και στην υποχώρηση της επένδυσης της σήραγγας. Η απώλεια όγκου σαν ποσοστό του όγκου της σήραγγας, κυμαίνεται από 0,5% για πολύ καλό έλεγχο του εδάφους, μέχρι και πιο πολύ από 4% για φτωχής ποιότητας εργασία διάνοιξης. (Σοφιανός, 2018)

Πολύ σημαντική, στην απώλεια όγκου, είναι η συμβολή του ενέματος καθώς και του πολφού μπετονίτη που εισπνέζονται στο κενό μεταξύ του εκσκαφθέντος τμήματος και της επένδυσης της σήραγγας. Η πίεση που εφαρμόζουν τα ρευστά στις παρειές της σήραγγας καθώς και ο βαθμός διεύθυνσής τους με το περιβάλλον έδαφος θα έχει εμφανή επίπτωση στην εκδήλωση καθιζήσεων. Επιπλέον, η κωνικότητα της ασπίδας του TBM που αποσκοπεί στη διευκόλυνση της πορείας του μέσα στο εκσκαφθέν τμήμα της σήραγγας, δημιουργεί ένα ουραίο κενό το οποίο αυξάνει την απώλεια όγκου του εδάφους με αποτέλεσμα την επιδείνωση των καθιζήσεων. (Κοσκινιώτης, 2019)

Ακόμη, η απώλεια του όγκου εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδαφικού σχηματισμού, τον τρόπο διάνοιξης και την ποιότητα της εργασίας. Ο όγκος της καθίζησης που εμφανίζεται στην επιφάνεια είναι θεωρητικά ίσος με την απώλεια όγκου κατά την εκσκαφή. Παρόλα αυτά, έχουν παρατηρηθεί περιπτώσεις κατά τις οποίες οι δύο όγκοι δεν είναι ίσοι. (Κοσκινιώτης, 2019)

3.9 Μέθοδοι Περιορισμού των Επιφανειακών Καθιζήσεων

Είναι γεγονός ότι θα έπρεπε να γίνεται πλήρης μελέτη και εφαρμογή μεθόδων ελέγχου των καθιζήσεων πριν καν αρχίσει η κατασκευή του έργου. Βέβαια μία τέτοια προσπάθεια θα ήταν φοβερά δύσκολη λόγω οικονομικής και τεχνικής άποψης, διότι υπάρχουν αβεβαιότητες και αποκλίσεις των αρχικών σχεδίων σε σχέση με την πραγματική απόκριση των σχηματισμών, μέσα στους οποίους γίνεται η διάνοιξη. Παρόλα αυτά, ενδείκνυται η ύπαρξη σχεδίου αντιμετώπισης των καθιζήσεων παράλληλα με την κατασκευή και μετά το πέρας του έργου. (Κοσκινιώτης, 2019)

Κατά το στάδιο της μελέτης επιβάλλεται έλεγχος για τα παρακάτω:

- ο **Βάθος εκσκαφής**
- ο **Ύψαρξη εδαφικών στρωμάτων με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά**
- ο **Χάραξη της πορείας του TBM**
- ο **Επιλογή μικρότερης διατομής της σήραγγας (Κοσκινιώτης, 2019)**

Οι πλέον συνιστούμενες μέθοδοι που αποσκοπούν στην ανακούφιση ή στην αποτροπή της εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια, τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής, όσο και μετά το πέρας του έργου, παρατίθενται παρακάτω:

• Συμβατικές ενεματώσεις που αποσκοπούν στην αύξηση της αντοχής και τη μείωση της υδροπερατότητας του εδάφους

• Ενεματώσεις συμπύκνωσης για αύξηση της αντοχής, σε περιπτώσεις όπου οι σχηματισμοί, όπως επικώσεις, επιτρέπουν τη διαφυγή του ενέματος λόγω του πορώδους τους με αποτέλεσμα τη χρήση μεγάλων ποσοτήτων χωρίς ουσιαστική βελτίωσή τους

• Jet Grouting με σκοπό τη μερική ή πλήρη αντικατάσταση σχηματισμών, συνήθως λεπτόκοκκων, που είναι επιρρεπείς στις καθιζήσεις

• Ψύξη του εδάφους μέσα στο οποίο θα γίνει η διάνοιξη ώστε να επιτευχθεί σταθερότητα και έλεγχος των συνθηκών

• Αποστραγγίσεις για την αποκοπή των υπόγειων υδάτων που μπορεί να επηρεάσουν τη σταθερότητα του μετώπου

• Βελτιώσεις των υπάρχοντων κατασκευών στην επιφάνεια με υποθεμελιώσεις και υποστυλώσεις ακόμα και μετά την εκδήλωση καθιζήσεων ώστε να αποφευχθούν οι περαιτέρω αστοχίες. (Κοσκινιώτης, 2019)

Τέλος, εκτός από τη βελτίωση του εδάφους μέσα στο οποίο γίνεται η διάνοιξη, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη λειτουργία του TBM. Κατά τη διάρκεια των εργασιών, όσον αφορά τις πιέσεις λειτουργίας του μηχανήματος, πρέπει να επιτυγχάνεται σταθερή πίεση στο μέτωπο χωρίς υπερβολικές διακυμάνσεις που ευνοούν τις καθιζήσεις στην επιφάνεια ή ακόμα και τις διογκώσεις αν ξεπερασθούν συγκεκριμένα όρια. (Κοσκινιώτης, 2019)

3.10 Καθιζήσεις που μετρήθηκαν στην επιφάνεια του έργου

Από τη γεωτεχνική μελέτη του έργου, είχαν υπολογιστεί οι πιθανές καθιζήσεις του εδάφους κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας. Ωστόσο, όπως συνήθως συμβαίνει στην πράξη, οι τελικές καθιζήσεις μπορεί να είναι διαφορετικές από εκείνες που είχαν αρχικά εκτιμηθεί. Παρακάτω αναφέρονται οι καθιζήσεις που προκλήθηκαν καθώς και οι θεωρητικές καθιζήσεις, που είχαν προβλεφτεί από τη μελέτη:

•Τμήμα από τη Χ.Θ. 2+297 (αρχή του 2ου Μεσοδιαστήματος) έως τη Χ.Θ. 2+335:

Η διάνοιξη της σήραγγας έγινε αποκλειστικά σε σχηματισμούς των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων. Οι πιέσεις που εφαρμόστηκαν κυμαίνονται από 0 έως 0.2bar, κάτι που δείχνει ότι ο θάλαμος εκσκαφής δεν είχε γεμίσει πλήρως. Παρ' όλα αυτά, οι καθιζήσεις που προκλήθηκαν εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας, δεν ξεπέρασαν τα 3.0mm, έναντι 11mm που προβλέπονταν από τη μελέτη. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Τμήμα από τη Χ.Θ. 2+335 έως τη Χ.Θ. 2+405:

Η διάνοιξη της σήραγγας έγινε αποκλειστικά σε σχηματισμούς των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων. Οι πιέσεις που εφαρμόστηκαν ήταν ελαφρώς μεγαλύτερες των τιμών μελέτης. Οι καθιζήσεις που προκλήθηκαν εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας, δεν ξεπέρασαν τα 4.5mm, έναντι 11mm που προβλέπονταν από τη μελέτη. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Τμήμα από τη Χ.Θ. 2+405 έως τη Χ.Θ. 2+500:

Η διάνοιξη της σήραγγας έγινε υπό συνθήκες μικτού μετώπου, με σχηματισμούς της ανώτερης και της κατώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστολίθου στο κάτω μέρος του μετώπου και σχηματισμούς των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων στο πάνω μέρος. Οι πιέσεις που εφαρμόστηκαν ήταν γενικά λίγο μικρότερες των τιμών μελέτης, αν και πάντα αρκετά μεγαλύτερες από τις κατώτερες τιμές λειτουργικής ανοχής της μελέτης. Οι καθιζήσεις που προκλήθηκαν εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας, δεν ξεπέρασαν τα 7.0mm, έναντι 18mm που προβλέπονταν από τη μελέτη. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Τμήμα από τη Χ.Θ. 2+500 έως τη Χ.Θ. 2+610:

Η διάνοιξη της σήραγγας έγινε υπό συνθήκες μικτού μετώπου, με σχηματισμούς της ανώτερης και της κατώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστολίθου στο κάτω μέρος του μετώπου και σχηματισμούς των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων στο πάνω μέρος. Οι πιέσεις που εφαρμόστηκαν ήταν γενικά μικρότερες των τιμών μελέτης, αν και πάντα μεγαλύτερες από τις κατώτερες τιμές λειτουργικής ανοχής της μελέτης. Οι καθιζήσεις που προκλήθηκαν εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας, δεν ξεπέρασαν τα 5.5mm, έναντι 9.0mm που προβλέπονταν από τη μελέτη. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Στάση του TBM στη Χ.Θ. 2+610:

Στη Χ.Θ. 2+610 η εκσκαφή διακόπηκε για 11 ημέρες, λόγω των θερινών διακοπών. Κατά τη στάση του TBM ο θάλαμος εκσκαφής διατηρήθηκε συνεχώς γεμάτος. Στο μέτωπο της σήραγγας υπήρχαν συνθήκες μικτού μετώπου, με σχηματισμούς της ανώτερης και της κατώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστολίθου στο κάτω μέρος του μετώπου και σχηματισμούς των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων στο πάνω μέρος. Η μέση πίεση στους δύο ανώτερους αισθητήρες ήταν 0.9 bar, έναντι κατώτερης τιμής της λειτουργικής ανοχής της μελέτης 0.8 bar και τιμής μελέτης 1.15 bar. Μάλιστα, καθ' όλο το διάστημα της στάσης, η πίεση στους δύο ανώτερους αισθητήρες δεν έπεσε κάτω από 0.76 bar. Οι καθιζήσεις που προκλήθηκαν στην επιφάνεια δεν ξεπέρασαν τα 3.5mm, έναντι 8.0mm που προβλέπονταν από τη μελέτη. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Τμήμα από τη Χ.Θ. 2+610 έως τη Χ.Θ. 2+705:

Η διάνοιξη της σήραγγας έγινε υπό συνθήκες μικτού μετώπου, με σχηματισμούς της ανώτερης και της κατώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστολίθου στο κάτω μέρος του μετώπου και σχηματισμούς των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων στο πάνω μέρος.

Οι πιέσεις που εφαρμόστηκαν ήταν γενικά λίγο μικρότερες των τιμών μελέτης, αν και πάντα αρκετά μεγαλύτερες από τις κατώτερες τιμές λειτουργικής ανοχής της μελέτης. Οι καθιζήσεις που προκλήθηκαν εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας, δεν ξεπέρασαν τα 3.5mm, έναντι 7.5mm που προβλέπονταν από τη μελέτη. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Τμήμα από τη Χ.Θ. 2+705 έως τη Χ.Θ. 2+900:

Η διάνοιξη της σήραγγας έγινε αποκλειστικά σε σχηματισμούς του αθηναϊκού σχιστολίθου. Οι πιέσεις που εφαρμόστηκαν ήταν γενικά λίγο μικρότερες των τιμών μελέτης, αν και πάντα αρκετά μεγαλύτερες από τις κατώτερες τιμές λειτουργικής ανοχής της μελέτης. Οι καθιζήσεις που προκλήθηκαν εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας, δεν ξεπέρασαν τα 3.5mm, έναντι 7.5mm που προβλέπονταν από τη μελέτη. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Τμήμα από τη Χ.Θ. 2+900 έως τη Χ.Θ. 2+980:

Η διάνοιξη της σήραγγας έγινε αποκλειστικά σε σχηματισμούς του αθηναϊκού σχιστολίθου. Οι πιέσεις που εφαρμόστηκαν ήταν γενικά αντίστοιχες των τιμών μελέτης. Οι καθιζήσεις που προκλήθηκαν εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας, δεν ξεπέρασαν το 1.5mm, έναντι 5.5mm που προβλέπονταν από τη μελέτη. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Τμήμα από τη Χ.Θ. 2+980 έως τη Χ.Θ. 3+254:

Η διάνοιξη της σήραγγας έγινε αποκλειστικά σε σχηματισμούς του αθηναϊκού σχιστολίθου. Οι πιέσεις που εφαρμόστηκαν ήταν γενικά ελαφρώς μικρότερες των τιμών μελέτης και πάντα μεγαλύτερες από τις κατώτερες τιμές λειτουργικής ανοχής της μελέτης. Οι καθιζήσεις, που προκλήθηκαν εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας, δεν ξεπέρασαν τα 2.0mm, έναντι 5.5mm που προβλέπονταν από τη μελέτη. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Στάση του TBM στη Χ.Θ. 3+254:

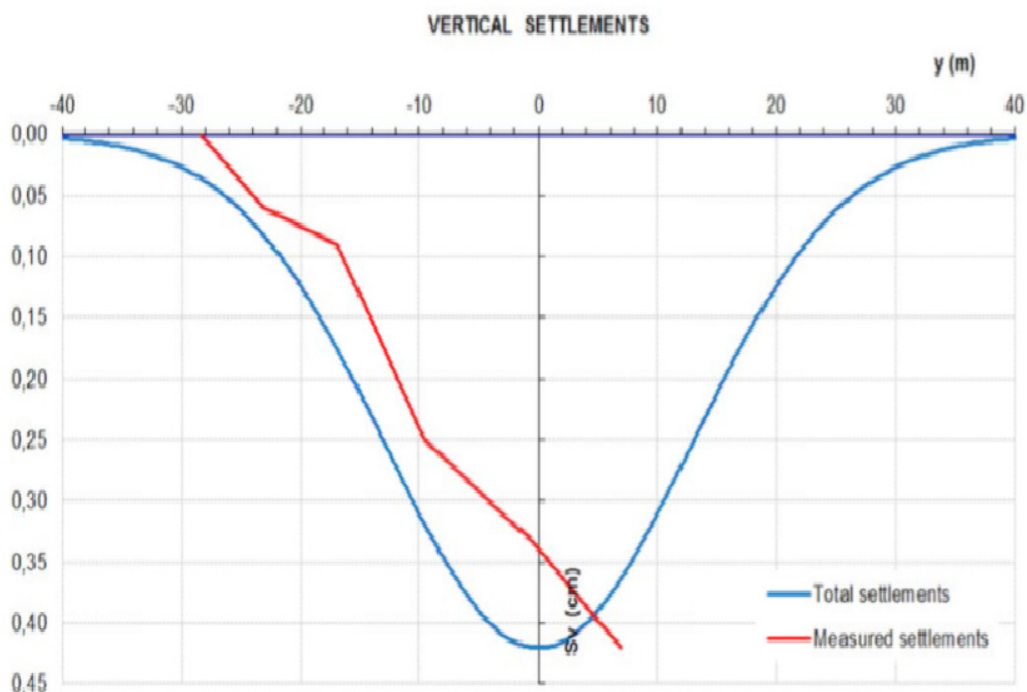
Στη θέση αυτή, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.1, το μηχάνημα παρέμεινε στάσιμο για 7 ημέρες (από 07/10/2014 έως 13/10/2014), για λόγους συντήρησης της κεφαλής, καθώς και για την εγκατάσταση πρόσθετου μηχανολογικού εξοπλισμού για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του ταινιοδρόμου. Οι εργασίες συντήρησης της κεφαλής πραγματοποιήθηκαν υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ωστόσο, οι καθιζήσεις, που προκλήθηκαν εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας, δεν ξεπέρασαν τα 3.0mm, έναντι 5.5mm που προβλέπονταν από τη μελέτη. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Τμήμα από τη Χ.Θ. 3+254 έως τη Χ.Θ. 3+625:

Η διάνοιξη της σήραγγας έγινε αποκλειστικά σε σχηματισμούς του αθηναϊκού σχιστολίθου. Οι πιέσεις που εφαρμόστηκαν ήταν γενικά ελαφρώς μικρότερες των τιμών μελέτης και πάντα μεγαλύτερες από τις κατώτερες τιμές λειτουργικής ανοχής της μελέτης. Οι καθιζήσεις, που προκλήθηκαν εξαιτίας της διάνοιξης της σήραγγας, δεν ξεπέρασαν τα 2.5mm, έναντι 5.5-7.0mm που προβλέπονταν από τη μελέτη. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Παρατηρώντας, με μία γρήγορη ματιά, τις καθιζήσεις που προβλέφθηκαν και τις καθιζήσεις που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρούμε ότι οι μέγιστες καθιζήσεις που σημειώθηκαν κυμάνθηκαν γενικά περίπου στο 30 - 60% των προβλεπόμενων μέγιστων τιμών της μελέτης. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Παρακάτω, παρατίθεται ένα διάγραμμα στο οποίο φαίνονται οι καθιζήσεις που μετρήθηκαν στην ακριβή περιοχή την οποία και μελετήσαμε στην παρούσα διπλωματική. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)



Εικόνα 3.2: Κόκκινη και μπλέ καμπύλη: μετρηθείσες και θεωρητικές καθιζήσεις στη Χ.Θ. 2+401

Μπλε καμπύλη: θεωρητική καμπύλη Gauss, που έχει προσαρμοστεί στα δεδομένα των μετρήσεων (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Κεφάλαιο 4

Γεωλογικές και Γεωτεχνικές Συνθήκες του Τμήματος Μελέτης

4.1 Εισαγωγικά

Το σύνολο του έργου της Γραμμής 3 του Μετρό της Αθήνας χωρίστηκε σε μεσοδιαστήματα επί του συνόλου της κυρίας σήραγγας. Οι Σταθμοί Αγία Βαρβάρα και Κορυδαλλός, το τμήμα μεταξύ των οποίων μελετάμε στην παρούσα εργασία, αντιστοιχούν στα Μεσοδιαστήματα 1 και 2. Οι χιλιομετρικές θέσεις για το 1ο Μεσοδιάστημα είναι από Χ.Θ. 1+583 (φρέαρ εκκίνησης TBM) έως Χ.Θ. 2+187 (αρχή Σταθμού Αγία Βαρβάρα) και για το 2ο Μεσοδιάστημα είναι από Χ.Θ. 2+297 (τέλος Σταθμού Αγία Βαρβάρα) έως Χ.Θ. 3+825 (αρχή Σταθμού Κορυδαλλού). (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Πρόκειται για σήραγγα διπλής τροχιάς που διανοίχθηκε με TBM, εκτός των πρώτων 12m (από Χ.Θ. 1+583 έως Χ.Θ. 1+595), που διανοίχθηκε με συμβατικό τρόπο, το υπόλοιπο τμήμα της σήραγγας (από τη Χ.Θ. 1+596 μέχρι τη Χ.Θ. Χ.Θ.3+825)θα επενδυθεί προσωρινά με κέλυφος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, χαλύβδινα πλαίσια κλπ και τελικά θα επενδυθεί με δακτυλίους από προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος για την απρόσκοπτη λειτουργία του TBM. Το μήκος διάνοιξης του 1ου μεσοδιαστήματος είναι 604m και του 2ου μεσοδιαστήματος είναι 1.528m. Η διάνοιξη της σήραγγας με το TBM και η εφαρμογή αντίστοιχα της τμηματική επένδυσης των δακτυλίων μετά το πέρας του TBM, άρχισε από το Φρέαρ εκκίνησης του TBM και κατευθύνθηκε αρχικά προς τον Σταθμό Αγίας Βαρβάρας (του οποίου οι εκσκαφές και οι προσωρινές αντιστηρίξεις είχαν περατωθεί μέχρι την άφιξη του TBM), διήλθε μέσα από αυτόν και στη συνέχεια κατευθύνθηκε προς τον Σταθμό Κορυδαλλού. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Η διάνοιξη της σήραγγας TBM έγινε στην αρχή σε σχηματισμούς των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων (από τη Χ.Θ. 2+297 έως τη Χ.Θ. 2+500). Στη συνέχεια και μέχρι τη Χ.Θ. 2+705 πραγματοποιήθηκε υπό συνθήκες μικτού μετώπου, με σχηματισμούς της ανώτερης και της κατώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου στο κάτω μέρος του μετώπου και σχηματισμούς των λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων στο άνω μέρος. Από τη Χ.Θ. 2+705 και μέχρι το τέλος του εξεταζόμενου τμήματος στη Χ.Θ. 3+625 η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκε σε σχηματισμούς κυρίως της ανώτερης και τοπικά της κατώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

4.2 Γεωλογία και Εδαφικές Συνθήκες 1^{ου} Μεσοδιαστήματος (από Χ.Θ. 1+583 έως Χ.Θ. 2+187)

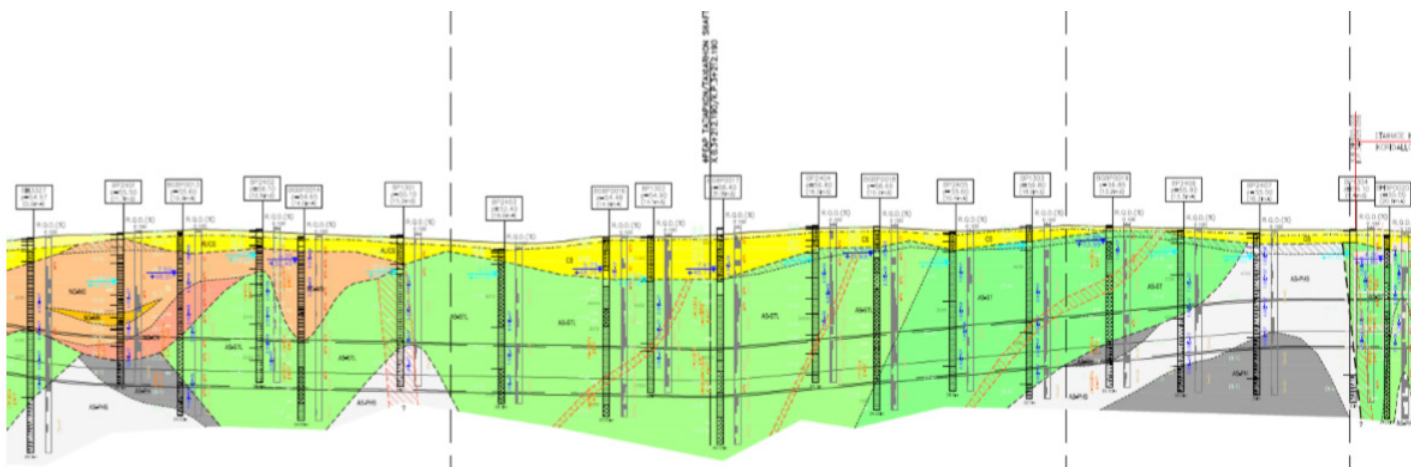
• Υποτμήμα από Χ.Θ. 1+583 έως Χ.Θ. 1+900:

Το σύνολο της υπόγειας διάνοιξης έγινε αποκλειστικά στην κατώτερη ενότητα του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου», με επικράτηση της τεχνικογεωλογικής ενότητας του τεφρού μεταϊλυόλιθου – μελανού αργιλικού σχίστη, κατά θέσεις με ενστρώσεις γκρίζου μεταψαμμίτη. Υπερκείμενα υπήρχαν σε εναλλαγές οριζόντων μεταϊλυολίθων – μεταψαμμιτώνης ανώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου. Στην επαφή της ενότητας αυτής με την κατώτερη και κυρίως μετά τη Χ.Θ. 1+660, συναντήθηκε κατά κανόνα ζώνη τεκτονισμού/διάτμησης πάχους της τάξης των 6 – 8 m. Περί τις Χ.Θ. 1+660 και Χ.Θ. 1+900 παρουσιάστηκε η συνάντηση τοπικών και μικρού

σχετικά πάχους ζωνών εντονότερου τεκτονισμού, λόγω δευτερευόντων ρηγμάτων. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Όπως προέκυψε από τις αναλύσεις του δείκτη ποιότητας πετρώματος (RQD) που πραγματοποιήθηκαν για το τμήμα αυτό της χάραξης, το γεωυλικό είναι κυρίως πολύ πτωχής έως πτωχής ποιότητας και κατά τόπους μέτριας έως καλής ποιότητας. Οι εκτελεσθείσες Δοκιμές Τυποποιημένης Διείσδυσης (SPT) κατέγραψαν στο σύνολο τους άρνηση σε διείσδυση ή πολύ μεγάλο αριθμό κρούσεων (πάνω από 40), το οποίο θεωρείται αναμενόμενο λόγω της βραχώδους φύσης του σχηματισμού. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Η πλειονότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν στο τμήμα αυτό προσδιόρισαν σχηματισμούς κυρίως ασθενούς έως πολύ ασθενούς αντοχής και μόνο τοπικά μετρίως ισχυρής αντοχής. Οι εδαφοποιημένες ζώνες και τμήματα ημιβραχωδών φάσεων έδωσαν τιμές αντοχών πολύ μικρότερες, που δεν ξεπέρασαν κατά μέσο όρο τα 0,2 MPa. Σχετικά με τη διαπερατότητα στο τμήμα αυτό της χάραξης όπου επικρατούσαν οι σχηματισμοί της κατώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου, παρουσιάστηκε κατά κανόνα χαμηλή έως πολύ χαμηλή διαπερατότητα, μειούμενη γενικά από τις πιο μεταψαμμιτικές φάσεις προς τις πιο μεταίλυολιθικές και περισσότερο στους αργιλικούς σχίστες. Από τις διαθέσιμες μετρήσεις στάθμης υπογείου νερού, σε παλαιότερες και νέες γεωτρήσεις, προέκυψαν ενδείξεις για στάθμη νερού σε μέσο βάθος 5 m. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)



Εικόνα 4.1: Στρωματογραφία κατά μήκος της χάραξης από τη Χ.Θ. 1+540 έως τη Χ.Θ. 2+600

• Υπομήμα από Χ.Θ. 1+900 έως Χ.Θ. 2+125

Το σύνολο σχεδόν της υπόγειας διάνοιξης πραγματοποιήθηκε στις εναλλαγές οριζόντων μεταίλυολιθων – μεταψαμμιτών της ανώτερης ενότητας του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου». Τοπική και περιορισμένη σχετικά παρουσία της τεχνικογεωλογικής ενότητας του τεφρού μεταίλυολιθου – μελανού αργιλικού σχίστη της κατώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου υπήρξε στο δάπεδο κυρίως του υπόγειου έργου, περί τις Χ.Θ. 2+025 και μετά τη Χ.Θ. 2+080. Περί τη Χ.Θ. 2+025 υπήρξε συνάντηση τοπικής και μικρού σχετικά πάχους ζώνης εντονότερου τεκτονισμού, λόγω δευτερεύοντος ρήγματος. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Όπως προέκυψε από τις αναλύσεις του δείκτη ποιότητας πετρώματος (RQD) που πραγματοποιήθηκαν για το τμήμα αυτό της χάραξης, το γεωυλικό ήταν κυρίως πολύ πτωχής και δευτερευόντως πτωχής ποιότητας. Οι εκτελεσθείσες Δοκιμές Τυποποιημένης Διείσδυσης (SPT) κατέγραψαν στο σύνολο τους άρνηση σε διείσδυση ή πολύ μεγάλο αριθμό κρούσεων (πάνω από 33), γεγονός το οποίο θεωρήθηκε αναμενόμενο λόγω της βραχώδους φύσης του σχηματισμού. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Η πλειονότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν στο τμήμα αυτό προσδιόρισαν σχηματισμούς κυρίως ασθενούς αντοχής και δευτερευόντως πολύ ασθενούς αντοχής και μόνο τοπικά μετρίως ισχυρή. Οι εδαφοποιημένες ζώνες και τμήματα ημιβραχώδων φάσεων έδωσαν τιμές αντοχών πολύ μικρότερες, που δεν ξεπέρασαν κατά μέσο όρο τα 0,2 MPa. Σχετικά με την διαπερατότητα στο τμήμα αυτό της χάραξης όπου επικρατούσαν οι σχηματισμοί της ανώτερης ενότητας του «Αθηναϊκού σχιστόλιθου», κατά κανόνα να ακολουθήθηκε η γενικότερη συμπεριφορά του γεωλογικού αυτού στρώματος, δηλαδή εμφανίστηκε χαμηλή έως πολύ χαμηλή διαπερατότητα. Από τις διαθέσιμες μετρήσεις στάθμης υπογείου νερού, σε παλαιότερες και νέες γεωτρήσεις, προέκυψαν ενδείξεις για στάθμη νερού σε βάθος από 4m έως 6 m. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Υποτμήμα από Χ.Θ. 2+125 έως Χ.Θ. 2+187

Το σύνολο σχεδόν της υπόγειας διάνοιξης της σήραγγας πριν από τον προβλεπόμενο Σταθμό της Αγ. Βαρβάρας (Χ.Θ. 2+187 – Χ.Θ. 2+297) πραγματοποιήθηκε εντός των λιμναίων μαργαϊκών ιζημάτων της νότιας απόληξης της Νεογενούς λιγνιτοφόρου λεκάνης του Περιστερίου. Κυριάρχησαν οι ασβεστιτικοί αργιλόλιθοι και ιλυόλιθοι, με ενστρώσεις και ορίζοντες μαργαϊκών ασβεστολίθων στο ανώτερο τμήμα τους και έως βάθη της τάξης των 10 – 25m περίπου. Ορίζοντες με σημαντική επικράτηση των μαργαϊκών ασβεστολίθων συναντήθηκαν πιο περιορισμένα, σε πάχη τα οποία κατά κανόνα δεν ξεπερνούν τα 2.5m και μέγιστο πάχος τα 10m περίπου. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Τεφροί μεταίλυόλιθοι – μελανοί αργιλικοί σχίστες της κατώτερης ενότητας των αθηναϊκών σχιστόλιθων συναντήθηκαν οριακά στο δάπεδο και στα κατώτερα τμήματα των εκσκαφών, στο βορειοδυτικό τμήμα του σταθμού και έως τη Χ.Θ. 2+200 περίπου. Τα όρια της Νεογενούς λεκάνης στην περιοχή αυτή οριοθετήθηκαν κατά βάση από επάλληλα κανονικά ρήγματα, τα σημαντικότερα από τα οποία συναντήθηκαν περί τις Χ.Θ. 2+125 (αρχή τμήματος), Χ.Θ. 2+200 (εντός των εκσκαφών του σταθμού) και Χ.Θ. 2+380. Ποικίλων διαστάσεων τεμάχια βραχώδους των αθηναϊκών σχιστόλιθων του αλπικού υποβάθρου, συναντήθηκαν εντός των λιμναίων ιζημάτων, στα περιθώρια της λεκάνης. Το πάχος των επιφανειακών εδαφικών υλικών (αλλουβιακές αποθέσεις, κώνοι κορημάτων, τεχνητές επιχώσεις αδιαίρετα) στις εκσκαφές του σταθμού συναντήθηκαν της τάξης των 4 – 5 m. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Αναφορικά με το δείκτη ποιότητας πετρώματος (RQD) των λιμναίων μαργαϊκών σχηματισμών, όπως αυτός προέκυψε από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων για το τμήμα αυτό της χάραξης, το γεωυλικό ήταν κυρίως πτωχής έως μέτριας ποιότητας και δευτερευόντως πολύ πτωχής και κατά τόπους καλής ποιότητας. Οι λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις που εμφανίστηκαν στην περιοχή της σήραγγας παρουσίασαν ήπιες γενικά κλίσεις στρωμάτων και μικρή καταπόνηση, η οποία εκφράστηκε από αραιά κατά θέσεις συστήματα διακλάσεων και τοπικά μικρού σχετικά πάχους ρηξιγενείς ζώνες. Γενικά, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι εμφάνισαν εντονότερο κερματισμό. Οι εκτελεσθείσες Δοκιμές Τυποποιημένης Διείσδυσης (SPT) κατέγραψαν στο σύνολο τους άρνηση, το οποίο θεωρήθηκε αναμενόμενο λόγω της βραχώδους φύσης του σχηματισμού. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Η πλειονότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν στο τμήμα αυτό (λιμναία μαργαϊκά ιζήματα) προσδιόρισαν σχηματισμούς κυρίως ασθενούς αντοχής και δευτερευόντως πολύ ασθενούς αντοχής και μόνο τοπικά μετρίως ισχυρή. Οι εδαφοποιημένες ζώνες και τμήματα ημιβραχώδων φάσεων έδωσαν τιμές αντοχών πολύ μικρότερες, που δεν ξεπέρασαν κατά μέσο όρο τα 0.6 MPa. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή μελέτης ήταν γενικά σταθερή και το βάθος της κυμάνθηκε εποχιακά από -4.0m έως -7.0m από την στάθμη του φυσικού εδάφους. Παρατηρήθηκε επίσης

ότι οι γεωτεχνικοί σχηματισμοί στην περιοχή δεν διαφοροποιήθηκαν σε ότι αφορά την διαπερατότητα τους η οποία είναι γενικά από χαμηλή έως πολύ χαμηλή. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

4.3 Γεωλογία και Εδαφικές Συνθήκες 2^{ου} Μεσοδιαστήματος (από Χ.Θ. 2+297 έως Χ.Θ. 3+550)

• Υπομήμα από Χ.Θ. 2+297 έως Χ.Θ. 2+500:

Το σύνολο σχεδόν της υπόγειας διάνοιξης της σήραγγας μετά τον προβλεπόμενο Σταθμό της Αγ. Βαρβάρας (Χ.Θ. 2+187 – Χ.Θ. 2+297) πραγματοποιήθηκε εντός των λιμναίων μαργαϊκών ιζημάτων της νότιας απόληξης της Νεογενούς λιγνιτοφόρου λεκάνης του Περιστερίου. Κυριάρχησαν οι ασβεστιτικοί αργιλόλιθοι και ιλυόλιθοι, με ενστρώσεις και ορίζοντες μαργαϊκών ασβεστολίθων στο ανώτερο τμήμα τους και έως βάθη της τάξης των 10 – 25m περίπου. Ορίζοντες με σημαντική επικράτηση των μαργαϊκών ασβεστολίθων συναντήθηκαν πιο περιορισμένα, σε πάχη τα οποία κατά κανόνα δεν ξεπέρασαν τα 2.5 m και μέγιστο πάχος τα 10 m περίπου. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

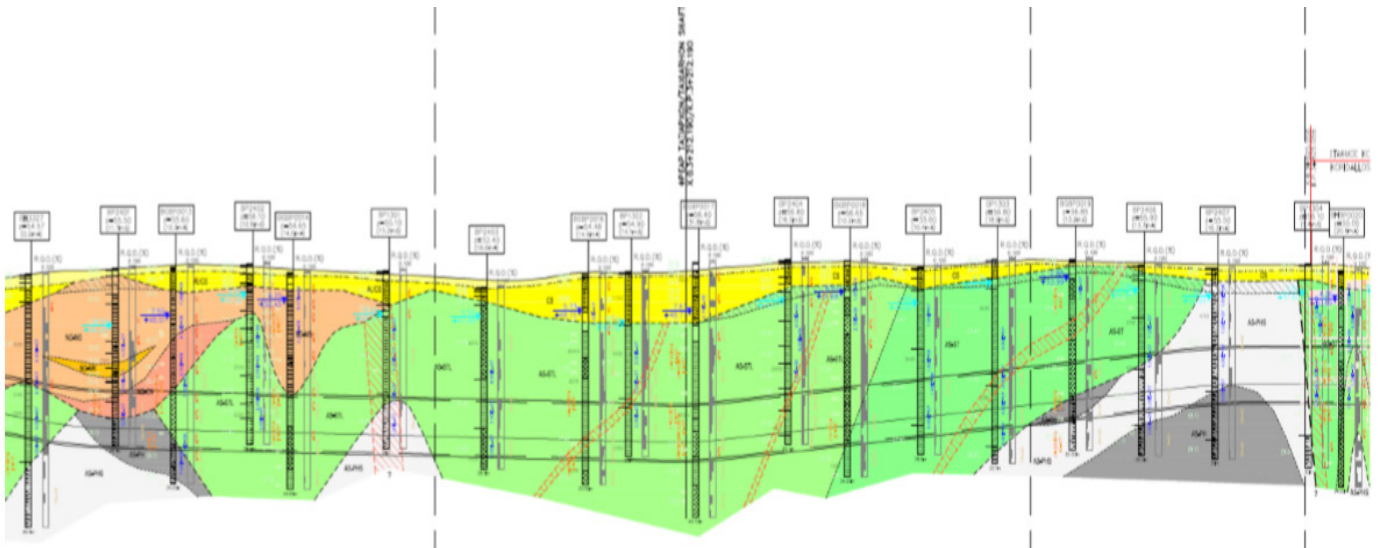
Προς το τέλος του τμήματος, μετά τη Χ.Θ. 2+380 περίπου, συναντήθηκαν μαργαϊκά κροκαλολατυποπαγή στο κατώτερο τμήμα της διάνοιξης. Λεπτή ένστρωση λιγνίτη παρουσιάστηκε σε μία από τις ερευνητικές γεωτρήσεις. Όπως έχει αναφερθεί, αξιολογήθηκε ότι τα όρια της Νεογενούς λεκάνης στην περιοχή αυτή οριοθετήθηκαν κατά βάση από επάλληλα κανονικά ρήγματα, τα σημαντικότερα από τα οποία παρουσιάστηκαν περί τις Χ.Θ. 2+125 (αρχή τμήματος), Χ.Θ. 2+200 (εντός των εκσκαφών του σταθμού) και Χ.Θ. 2+380 και ενδεχομένως και σε άλλες περιοχές. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Ποικίλων διαστάσεων τεμάχια βραχώμαζας των αθηναϊκών σχιστολίθων του αλπικού υποβάθρου, συναντήθηκαν εντός των λιμναίων ιζημάτων, στα περιθώρια της λεκάνης. Το πάχος των επιφανειακών εδαφικών υλικών (αλλουβιακές αποθέσεις, κώνοι κορημάτων, τεχνητές επιχώσεις αδιαίρετα) στις εκσκαφές του σταθμού παρουσιάστηκαν της τάξης των 4 – 5 m. Στο τμήμα αυτό συναντήθηκε το μικρότερο πάχος υπερκειμένων, της τάξης των 11m, περί τη Χ.Θ. 2+390. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Αναφορικά με το δείκτη ποιότητας πετρώματος (RQD) των λιμναίων μαργαϊκών σχηματισμών, όπως αυτός προέκυψε από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων για το τμήμα αυτό της χάραξης, το γεωυλικό ήταν κυρίως πτωχής έως μέτριας ποιότητας και δευτερευόντως πολύ πτωχής και κατά τόπους καλής ποιότητας. Οι λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις που εμφανίστηκαν στην περιοχή της σήραγγας παρουσίασαν ήπιες γενικά κλίσεις στρωμάτων και μικρή καταπόνηση, η οποία εκφράστηκε από αραιά κατά θέσεις συστήματα διακλάσεων και τοπικά μικρού σχετικά πάχους ρηξιγενείς ζώνες. Γενικά, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι εμφάνισαν εντονότερο κερματισμό. Οι εκτελεσθείσες Δοκιμές Τυποποιημένης Διείσδυσης (SPT) κατέγραψαν στο σύνολο τους άρνηση, το οποίο θεωρήθηκε αναμενόμενο λόγω της βραχώδους φύσης του σχηματισμού. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Η πλειονότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν στο τμήμα αυτό (λιμναία μαργαϊκά ιζήματα) προσδιόρισαν σχηματισμούς κυρίως ασθενούς αντοχής και δευτερευόντως πολύ ασθενούς αντοχής και μόνο τοπικά μετρίως ισχυρής. Οι εδαφοποιημένες ζώνες και τμήματα ημιβραχώδων φάσεων έδωσαν τιμές αντοχών πολύ μικρότερες, που δεν ξεπέρασαν κατά μέσο όρο τα 0.6 MPa. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή μελέτης ήταν γενικά σταθερή και το βάθος της κυμάνθηκε εποχιακά από -4,0m έως -7.0m από την στάθμη του φυσικού εδάφους. Παρατηρήθηκε επίσης ότι οι γεωτεχνικοί

σχηματισμοί στην περιοχή δεν διαφοροποιήθηκαν σε ότι αφορά την διαπερατότητα τους η οποία είναι γενικά από χαμηλή έως πολύ χαμηλή. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)



Εικόνα 4.2: Στρωματογραφία κατά μήκος της χάραξης από τη Χ.Θ. 2+600 έως τη Χ.Θ. 3+940

• Υπομήμα από Χ.Θ. 2+500 έως Χ.Θ. 2+965:

Το μεγαλύτερο μέρος της υπόγειας διάνοιξης πραγματοποιήθηκε στις εναλλαγές οριζόντων μεταίλυολίθων - μεταψαμμιτών της ανώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου. Τοπική παρουσία της τεχνικογεωλογικής ενότητας του τεφρού μεταίλυολίθου – μελανού αργιλικού σχίστη με ενστρώσεις γκρίζου μεταψαμμίτητης κατώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου συναντήθηκε στο δάπεδο κυρίως του υπόγειου έργου, μεταξύ Χ.Θ. 2+590 – Χ.Θ. 2+720 και μετά τη Χ.Θ. 2+880. Περί τη Χ.Θ. 2+915 αξιολογήθηκε η συνάντηση τοπικής ζώνης εντονότερου τεκτονισμού/διάτμησης, στο υπόβαθρο των αθηναϊκών σχιστόλιθων. Τα λιμναία μαργαϊκά ιζήματα του Νεογενούς, ασβεστιτικοί αργιλόλιθοι – ιλυόλιθοι και κροκαλολατυποπαγή, παρουσιάστηκε στην οροφή του υπόγειου έργου από την αρχή του τμήματος έως τη Χ.Θ. 2+710 και οριακά περί τη Χ.Θ. 2+825. Το αναμενόμενο πάχος των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών (κυρίως υλικά κώνων κορημάτων και αλλουβιακών αποθέσεων), έφτασε τοπικά τα 6 m περίπου (π.χ. Φρέαρ Μ. Αλεξάνδρου, Χ.Θ. 2+486). Οι εναλλαγές διαφορετικών και ποικίλων γεωτεχνικών/γεωλογικών σχηματισμών κατά μήκος της υπόγειας διάνοιξης δημιούργησαν μικτές γεωτεχνικές συνθήκες. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Σχετικά με το δείκτη ποιότητας πετρώματος (RQD) των μαργαϊκών σχηματισμών, το γεωυλικό ήταν κυρίως πτωχής έως μέτριας ποιότητας και δευτερευόντως πολύ πτωχής και κατά τόπους καλής ποιότητας, ενώ των αθηναϊκών σχιστόλιθων η ανώτερη ενότητα ήταν κυρίως πτωχής έως πολύ πτωχής ποιότητας και δευτερευόντως μέτριας έως καλής ποιότητας ενώ η κατώτερη ενότητα ήταν κυρίως πτωχής έως πολύ πτωχής ποιότητας. Οι εκτελεσθείσες Δοκιμές Τυποποιημένης Διείσδυσης (SPT) ακολούθησαν στο σύνολο τους τα χαρακτηριστικά των γεωτεχνικών σχηματισμών στις προαναφερθείσες περιοχές, δηλαδή κυρίως άρνηση σε διείσδυση. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν στο τμήμα αυτό για τα λιμναία μαργαϊκά ιζήματα προσδιόρισαν σχηματισμούς κυρίως ασθενούς αντοχής και δευτερευόντως πολύ ασθενούς αντοχής και μόνο τοπικά μετρίως ισχυρής (μαργαϊκός ασβεστόλιθος). Οι εδαφοποιημένες ζώνες και τμήματα ημιβραχώδων φάσεων

έδωσαν τιμές αντοχών πολύ μικρότερες, που δεν ξεπέρασαν κατά μέσο όρο τα 0,4 MPa. Αντίστοιχα για τους Αθηναϊκούς Σχιστόλιθους (ανώτερη και κατώτερη ενότητα), η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης προσδιόρισαν σχηματισμούς κυρίως πολύ ασθενούς αντοχής και δευτερευόντως ασθενούς αντοχής. Οι εδαφοποιημένες ζώνες και τμήματα ημιβραχώδων φάσεων έδωσαν τιμές αντοχών πολύ μικρότερες, που δεν ξεπέρασαν κατά μέσο όρο τα 0,2 MPa. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Η στάθμη του υπογείου νερού στην περιοχή μελέτης ήταν γενικά σταθερή και το βάθος της κυμάνθηκε εποχιακά από 3 m έως 7 m και τοπικά 9 m. Παρατηρήθηκε επίσης ότι οι γεωτεχνικοί σχηματισμοί στην περιοχή δεν διαφοροποιήθηκαν σε ότι αφορά την διαπερατότητα τους η οποία ήταν γενικά από χαμηλή έως πολύ χαμηλή. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Υποτμήμα από Χ.Θ. 2+965 έως Χ.Θ. 3+550:

Το σύνολο της υπόγειας διάνοιξης παρουσιάστηκε αποκλειστικά στις εναλλαγές οριζόντων μεταίλουλιθων – μεταψαμμιτών της ανώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου, με πιθανή επικράτηση της μεταψαμμιτικής φάσης μετά τη Χ.Θ. 3+375. Στη μάζα του σχηματισμού συναντήθηκαν κατά θέσεις και λεπτές ζώνες διάτμησης, ήπιας έως μέτριας κλίσης. Στο τμήμα αυτό, το αναμενόμενο πάχος των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών (κυρίως υλικά κώνων κορημάτων), έφτασε τοπικά τα 10 m (π.χ. Φρέαρ Ταξαρχών, Χ.Θ. 3+212). (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Όπως προέκυψε από τις αναλύσεις του δείκτη ποιότητας πετρώματος (RQD) που πραγματοποιήθηκαν για το τμήμα αυτό της χάραξης, το γεωυλικό ήταν κυρίως πτωχής έως πολύ πτωχής ποιότητας και δευτερευόντως μέτριας έως καλής ποιότητας. Οι εκτελεσθείσες Δοκιμές Τυποποιημένης Διείσδυσης (SPT) κατέγραψαν στο σύνολο τους άρνηση σε διείσδυση, το οποίο θεωρήθηκε αναμενόμενο λόγω της βραχώδους φύσης του σχηματισμού. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν στο τμήμα αυτό προσδιόρισαν σχηματισμούς κυρίως ασθενούς έως πολύ ασθενούς αντοχής (<10MPa) και μόνο τοπικά μετρίως ισχυρούς σχηματισμούς. Οι εδαφοποιημένες ζώνες και τμήματα ημιβραχώδων φάσεων έδωσαν τιμές αντοχών πολύ μικρότερες, που δεν ξεπέρασαν κατά μέσο όρο τα 0,2 MPa με εξαίρεση εδαφοποιημένες ζώνες μεταψαμμιτών. Σχετικά με την διαπερατότητα στο τμήμα αυτό της χάραξης όπου επικράτησαν οι σχηματισμοί της ανώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου, παρουσιάστηκε οι γεωτεχνικοί σχηματισμοί κατά κανόνα να ακολουθήσουν τη γενικότερη συμπεριφορά του γεωλογικού αυτού στρώματος, δηλαδή εμφάνισαν χαμηλή έως πολύ χαμηλή διαπερατότητα. Από τις διαθέσιμες μετρήσεις στάθμης υπογείου νερού, σε παλαιότερες και νέες γεωτρήσεις, προέκυψαν ενδείξεις για στάθμη νερού από 5m έως 7m βάθος. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

•Υποτμήμα από Χ.Θ. 3+550 έως Χ.Θ. 3+825:

Προοδευτικά από το δάπεδο προς την οροφή του υπογείου έργου και καθολικά μετά τη Χ.Θ. 3+675 περίπου, η υπόγεια διάνοιξη πέρασε σε συνέχεια του προηγούμενου τμήματος από την επικράτηση των μεταψαμμιτών της ανώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου στην κατώτερη ενότητα. Στην τελευταία επικράτησε του τεφρού μεταίλουλιθου – μελανού αργιλικού σχίστη με τις ενστρώσεις γκρίζων μεταψαμμιτών. Ορίζοντες τεφρού μεταίλουλιθου – μελανού αργιλικού σχίστη συναντήθηκαν τοπικά, κυρίως περί τις Χ.Θ. 3+580, Χ.Θ. 3+745 και κατά κανόνα στο δάπεδο της διάνοιξης. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Όπως προέκυψε από τις αναλύσεις του δείκτη ποιότητας πετρώματος (RQD) που πραγματοποιήθηκαν για το τμήμα αυτό της χάραξης, το γεωλικό ήταν κυρίως πολύ πτωχής έως πτωχής ποιότητας. Η πλειονότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν στο τμήμα αυτό προσδιόρισαν σχηματισμούς κυρίως ασθενούς έως πολύ ασθενούς αντοχής. Οι εδαφοποιημένες ζώνες και τμήματα ημιβραχώδων φάσεων δίνουν τιμές αντοχών πολύ μικρότερες, που δεν ξεπέρασαν κατά μέσο όρο τα 0,2 MPa. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Σχετικά με την διαπερατότητα στο τμήμα αυτό της χάραξης όπου επικράτησαν οι σχηματισμοί της κατώτερης ενότητας του αθηναϊκού σχιστόλιθου, υπήρξε κατά κανόνα χαμηλή έως πολύ χαμηλή διαπερατότητα. Από τις διαθέσιμες μετρήσεις στάθμης υπογείου νερού, σε παλαιότερες και νέες γεωτρήσεις, προέκυψαν ενδείξεις για στάθμη νερού σε μέσο βάθος από 3m έως 5m. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Καταστατικό Μοντέλο προσομοίωσης

5.1 Υπολογιστικό Πρόγραμμα RS2 2019

Το πρόγραμμα RS2 2019 χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, με σκοπό τη μελέτη των καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη αβαθούς σήραγγας του Μετρό της Αθήνας. Είναι ένας δισδιάστατος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων γύρω από υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές. Τα προβλήματα που θα μπορούσαν να επιλυθούν μέσω του προγράμματος αυτού, περιλαμβάνουν τα εξής:

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

(Χαλαστάνης, 2016)

Προετοιμασία Μοντέλου

Η προετοιμασία του μοντέλου στο πρόγραμμα RS2 2019 πραγματοποιείται με γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας του και με εισαγωγή των παραμέτρων σε αντίστοιχες φόρμες εισαγωγής. Η γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας γίνεται σε αυτόνομο περιβάλλον, μορφής CAD. Η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόματα μέσω ενσωματωμένης γεννήτριας, ικανής να χειριστεί πολύπλοκες και σύνθετες εκσκαφές. Τα στοιχεία του πλέγματος μπορεί να είναι τριγωνικά τριών ή έξι κόμβων ή τετραπλευρικά τεσσάρων ή οκτώ κόμβων. Για την αρχική φόρτιση των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη είτε το ίδιο το βάρος των στοιχείων, είτε οι αρχικές τάσεις της γεωμάζας, είτε και τα δύο ταυτόχρονα. (Χαλαστάνης, 2016)

Στάδια Εκσκαφής – Υποστήριξης:

Τα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης προσομοιώνονται στο RS2 2019 μέσω σταδίων προσομοίωσης όπου είναι δυνατή η αφαίρεση στοιχείων της γεωμάζας, η αλλαγή των ιδιοτήτων τους και της αρχικής τους φόρτισης, η προσθήκη ή αφαίρεση των στοιχείων της υποστήριξης και η αλλαγή των ιδιοτήτων τους. Επίσης είναι δυνατή η προσθήκη ή αφαίρεση εξωτερικής φόρτισης σε κάθε στάδιο προσομοίωσης. (Χαλαστάνης, 2016)

Ιδιότητες Υλικών Γεωμάζας:

Τα στοιχεία που προσομοιώνουν το υλικό της γεωμάζας μπορεί να έχουν ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά. Το υλικό μπορεί να είναι ισότροπο, εγκαρσίως ισότροπο ή ορθότροπο.

Προκειμένου να αναλυθεί η πλαστική συμπεριφορά υλικών, διατίθενται διάφορα κριτήρια αστοχίας. Πιο σχετικά με τη συμπεριφορά της βραχομάζας είναι τα κριτήρια Mohr – Coulomb, Hoek – Brown και Drucker – Prager. Υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης δύο ειδών

πλαστικής συμπεριφοράς:

- 1. Ελαστικά – τελείως πλαστικά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής ισούνται με τις αρχικές.**
- 2. Ψαθυρά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής είναι μικρότερες των αρχικών.**

Οι ιδιότητες των υλικών της γεωμάζας μπορούν να διαφοροποιούνται μεταξύ των διαδοχικών σταδίων της προσομοίωσης. (Χαλαστάνης, 2016)

5.2 Μοντέλο Mohr - Coulomb

Το μοντέλο Mohr - Coulomb είναι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε αρχικά κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης μέσω του προγράμματος RS2 2019. Αποτελεί ένα μοντέλο αστοχίας κατά το οποίο η συμπεριφορά του εδάφους θεωρείται γραμμική ελαστική - πλαστική. (tutorials RS2 2019)

Το μοντέλο Mohr - Coulomb είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο μοντέλο αστοχίας των γεωυλικών και ειδικότερα των εδαφών (π.χ., Owenand Hinton 1980, Pietruszczak 2010). Οι προδιαγραφές αυτού του μοντέλου και του κριτηρίου απόδοσής του, περιλαμβάνουν την υπόθεση Coulomb, η οποία υποθέτει μια γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής αντοχής σε ένα επίπεδο και της ορθής (κάθετης) τάσης που ενεργεί επ' αυτής:

$$\tau = c - \sigma_n \tan\varphi \quad (5.1)$$

όπου τ είναι η διατμητική αντοχή, σ_n είναι η ορθή τάση (θετική τάση), φ είναι η γωνία εσωτερικής τριβής και c είναι η συνοχή. (tutorials RS2 2019)

Η μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού που διαμορφώνεται με μοντέλο Mohr - Coulomb περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως:

Ισοτροπική αντοχή σε διάτμηση (κορυφαία και παραμένουσα) που έχει χαρακτηριστική συνοχή-τριβή και αυξάνεται γραμμικά με το επίπεδο καταπόνησης/περιορισμού)

Αντοχή σε εφελκυσμό (με τη χρήση αποκοπής)

Διαστολή (αύξηση όγκου) ή κρίσιμη κατάσταση (σταθερός όγκος) κατά την αστοχία

Εξάρτηση της διατμητικής αντοχής στη γωνία Lode (παρατηρήθηκε για τα περισσότερα γεωυλικά). (tutorials RS2 2019)

Το μοντέλο είναι κατάλληλο για τη μελέτη γεωτεχνικών προβλημάτων που δεν περιλαμβάνουν ευρεία μεταβολή της πλευρικής πίεσης. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μείωσης της διατμητικής αντοχής (SSR), αυτό το μοντέλο μπορεί να αξιολογήσει συντελεστές ασφαλείας ισοδύναμους με αυτούς που υπολογίζονται με βάση την ανάλυση οριακής ισορροπίας (π.χ. με το πρόγραμμα Slide προκειμένου για την μελέτη ευστάθειας πρανών) και σε ορισμένες περιπτώσεις παρέχουν καλύτερη πρόβλεψη των τρόπων αστοχίας και των συντελεστών ασφαλείας. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για υπολογισμούς μετατόπισης και τάσης σε προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν βραχώδη ή εδαφικά γεωυλικά. (tutorials RS2 2019)

Συνδυάζοντας το κριτήριο Coulomb με τον κύκλο του Mohr για την αναπαράσταση της κατάστασης τάσης και λαμβάνοντας υπόψη τις αποδεκτές εντατικές καταστάσεις, το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb όσον αφορά τις κύριες τάσεις μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F_s = 1/2 (\sigma_1 - \sigma_3) + 1/2 (\sigma_1 + \sigma_3) \sin\varphi - c \cdot \cos\varphi = 0 \quad (5.2)$$

Ως προς τις αναλλοίωτες της τάσης, το κριτήριο Mohr - Coulomb διατυπώνεται ως:

$$F_s = I_1/3 \sin(\varphi) + \sqrt{J_2} [\cos(\theta) - 1/\sqrt{3} \sin(\theta) \sin(\varphi)] - \cos(\varphi) = 0 \quad (5.3)$$

Ή σε άλλους όρους αναλλοίωτων της τάσης:

$$F_s = q + M_p - N_c = 0 \quad (5.4)$$

Όπου:

$$M = 3 \sin\varphi / (\sqrt{3} \cos\theta - \sin\theta \sin\varphi)$$

$$N = 3 \cos\varphi / (\sqrt{3} \cos\theta - \sin\theta \sin\varphi) \quad (5.5)$$

Το RS2 δέχεται κορυφαίες και παραμένουσες τιμές της γωνίας τριβής και της συνοχής. Αυτό σημαίνει ότι μετά την διαρροή η αντοχή του υλικού πέφτει αμέσως από την κατάσταση κορυφαίας αντοχής σε μια χαμηλότερη παραμένουσα τιμή. Το μοντέλο Mohr - Coulomb στα RS2 είναι ένα μοντέλο ελαστικό - ψαθυρό ή πλαστικό γενικά. Στην περίπτωση όπου οι παραμένουσες τιμές είναι οι ίδιες με τις μέγιστες τιμές, η συμπεριφορά είναι ελαστική - τέλεια πλαστική. (tutorials RS2 2019)

Η συνάρτηση πλαστικού δυναμικού έχει την ίδια μορφή με την επιφάνεια διαρροής:

$$Q_s = I_1/3 \sin(\psi) + \sqrt{J_2} [\cos(\theta) - 1/\sqrt{3} \sin(\theta) \sin(\psi)] = \text{const} \quad (5.6)$$

όπου ψ είναι η γωνία διαστολής. Αυτή η παράμετρος θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με τη γωνία τριβής (παραμένουσα) η οποία καθιστά το νόμο ροής συσχετισμένο ή μη. (tutorials RS2 2019)

Η καρτέλα εισαγωγής δεδομένων για τον ορισμό αυτού του καταστατικού μοντέλου στο πρόγραμμα RS2 παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1.

Ενδεικτικές διαδρομές τάσεων δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες δίνονται στις εικόνες 5.2 και 5.3. Όλες οι δοκιμές αρχίζουν από ένα υδροστατικό περιορισμό των $p = p' = 100$ kPa. (tutorials RS2 2019)

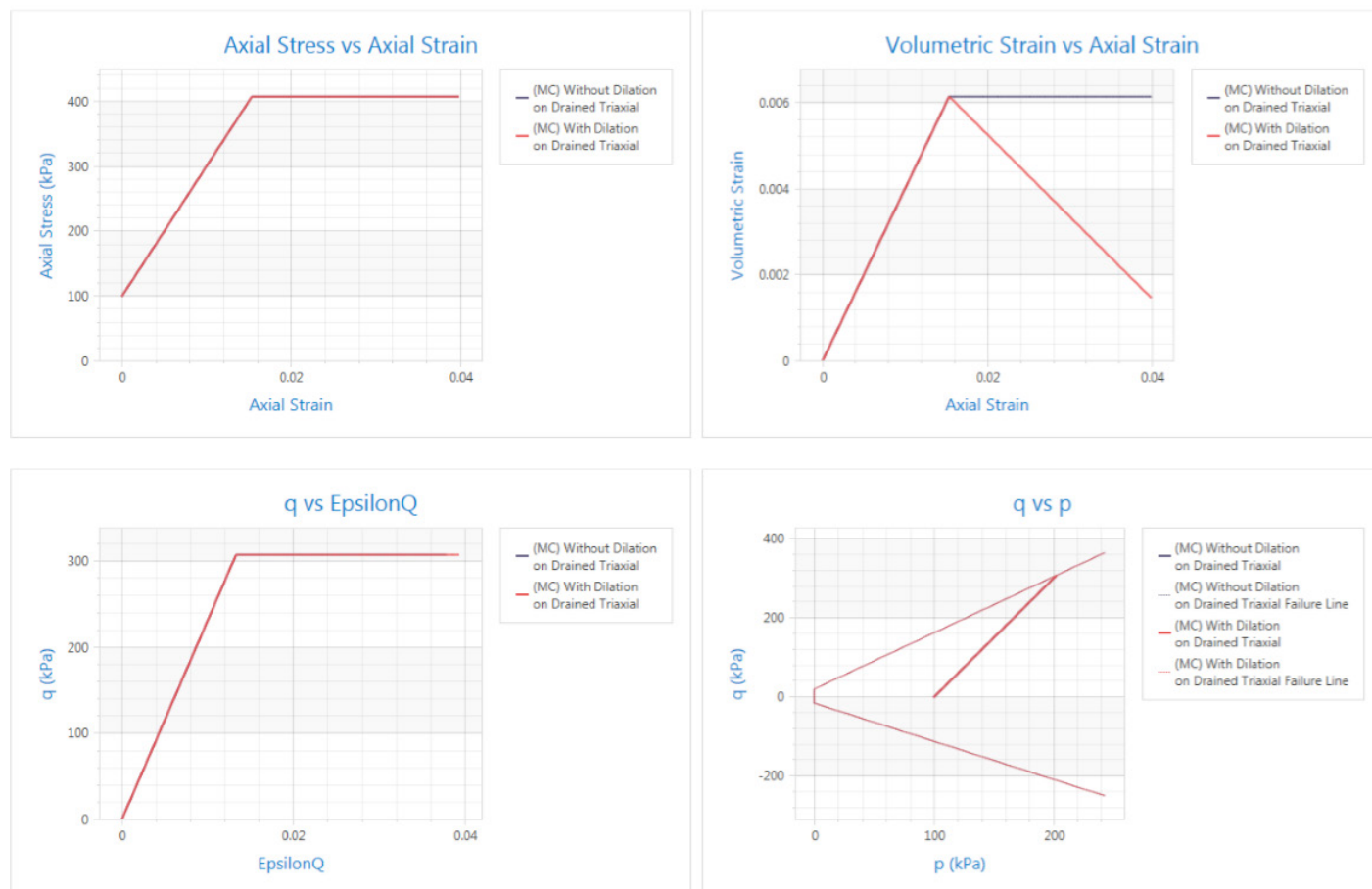
Οι διαδρομές των τάσεων των στραγγιζόμενων δοκιμών περιλαμβάνουν μεταβολές της αξονικής τάσης και της ογκομετρικής τροπής με την αύξηση της αξονικής καταπόνησης, μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης με την αποκλίνουσα τροπή και τη διαδρομή τάσης στο επίπεδο $p - q$. Η επιφάνεια διαρροής παρουσιάζεται επίσης στο επίπεδο $p - q$. Η προσομοιωμένη συμπεριφορά είναι μια ελαστική - τέλεια πλαστική συμπεριφορά. Η διασταλτικότητα απεικονίζεται στην μεταβολή της ογκομετρικής τροπής με την αξονική τροπή. (tutorials RS2 2019)

Οι διαδρομές των τάσεων των αστράγγιστων δοκιμών περιλαμβάνουν τη μεταβολή της αξονικής τάσης και της πίεσης του νερού των πόρων με την αυξανόμενη αξονική καταπόνηση, τη μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης με την αποκλίνουσα τάση και τη διαδρομή τάσης στο επίπεδο $p - q$. Η επιφάνεια διαρροής παρουσιάζεται επίσης στο επίπεδο $p - q$. Η διασταλτική

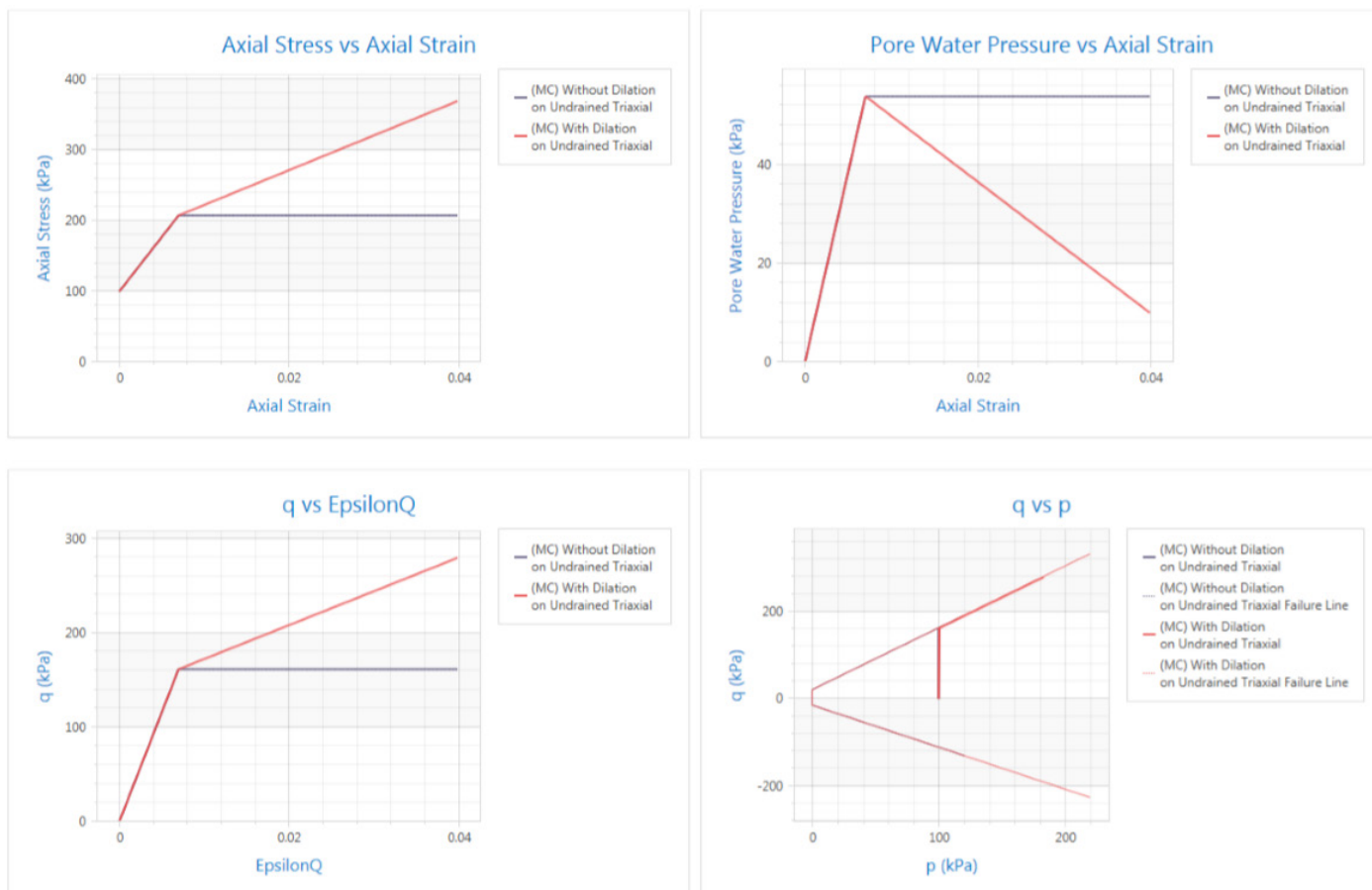
συμπεριφορά απεικονίζεται στο γράφημα της διαδρομής τάσεων στο επίπεδο $p - q$ που περιλαμβάνει επίσης την επιφάνεια διαρροής. Η δημιουργία αρνητικής πίεσης νερού των πόρων σε υλικό με διαστολή οδηγεί στην αύξηση της ενεργούς μέσης τάσης, καθώς η διαδρομή της τάσης παραμένει στην επιφάνεια της διαρροής και ακολουθείται σε υψηλότερα επίπεδα αποκλίνουσας τάσης. (tutorials RS2 2019)

Initial Conditions		Stiffness		Strength		Hydraulic Properties		Datum Dependency	
Failure Criterion: Mohr-Coulomb									
Type					Data				
Material Type					Plastic				
Peak Strength									
Peak Tensile Strength (kPa)					0				
Peak Friction Angle (degrees)					35				
Peak Cohesion (kPa)					10.5				
Residual Strength									
Residual Tensile Strength (kPa)					0				
Residual Friction Angle (degrees)					35				
Residual Cohesion (kPa)					10.5				
Dilation Angle (degrees)					0				

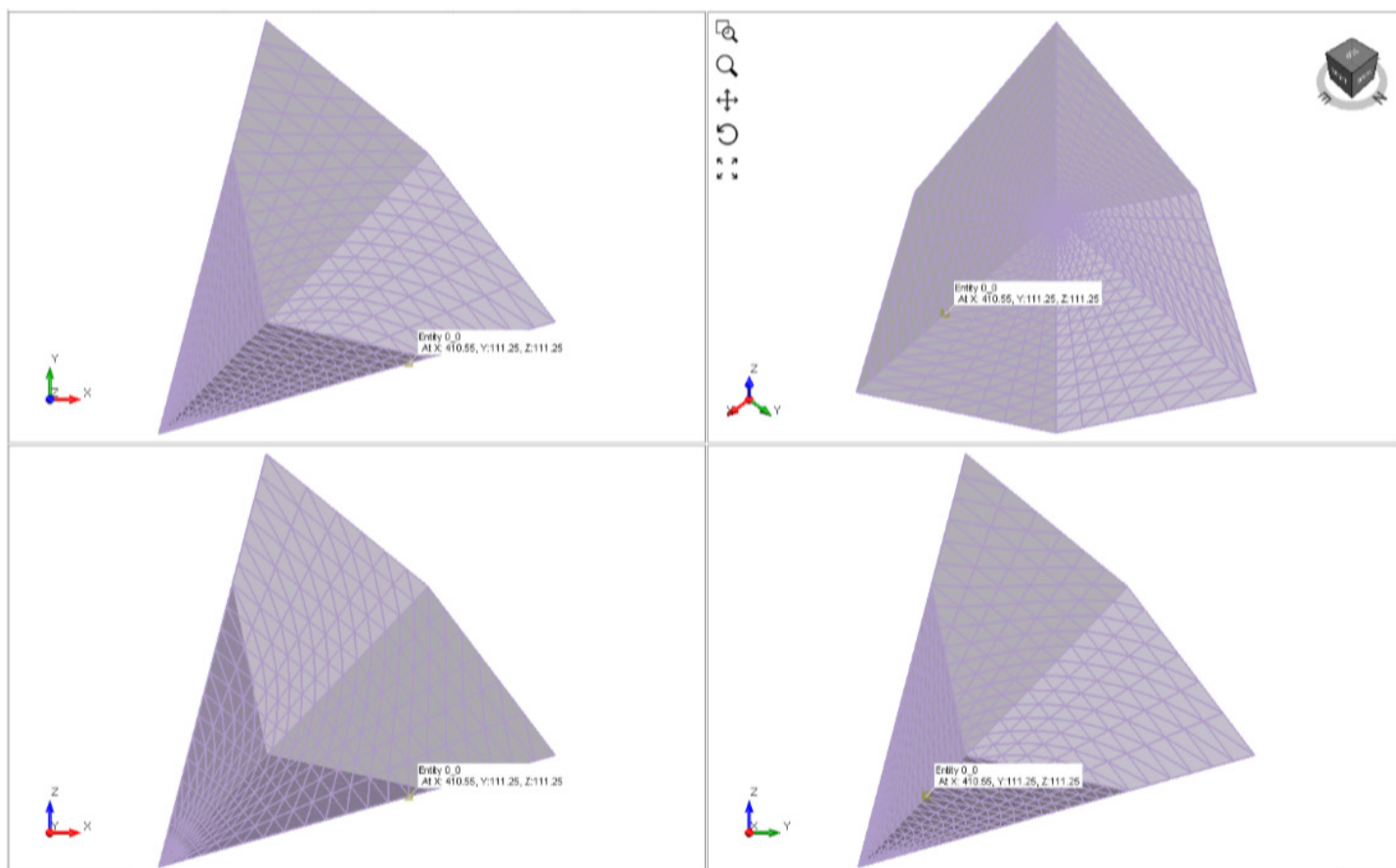
Εικόνα 5.1: Καρτέλα εισαγωγής δεδομένων για ορισμό μοντέλου Mohr-Coulomb (tutorials RS2 2019)



Εικόνα 5.2: Διαδρομές τάσεων των στραγγιζόμενων τριαξονικών δοκιμών σε υλικά με καταστατικό μοντέλο Mohr - Coulomb (tutorials RS2 2019)



Εικόνα 5.3: Διαδρομές τάσεων των αστράγγιστων τριαξονικών δοκιμών σε υλικά με καταστατικό μοντέλο Mohr – Coulomb (tutorials RS2 2019)



Εικόνα 5.4: Επιφάνεια διαρροής μοντέλου Mohr - Coulomb σε 3D χώρο τάσης (tutorials RS2 2019)

Η επιφάνεια διαρροής αυτού του μοντέλου είναι μια γραμμή στο 2D χώρο τάσης όπως φαίνεται στις Εικόνες 5.2 και 5.3 και έχει ένα ανώμαλο σχήμα εξαγωνικής πυραμίδας σε χώρο τρισδιάστατης τάσης όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.4. Ο ορισμός της επιφάνειας διαρροής περιλαμβάνει τη γωνία του Lode και συνεπώς η προβολή αυτής της επιφάνειας διαρροής στο επίπεδο Π, με την ορθή κατεύθυνση να είναι η διαγώνιος του χώρου τάσης, αποκλίνει από το κυκλικό σχήμα του μοντέλου Drucker - Prager. (tutorials RS2 2019)

Το μοντέλο δέχεται επίσης μια αποκοπή της εφελκυστικής τάσης. Η επιφάνεια διαρροής σε εφελκυσμό είναι αποκομμένη:

$$F_T = \sigma_1 - T = 0 \quad (5.7)$$

Στο παραπάνω T είναι η εφελκυστική αντοχή του υλικού. Ο νόμος ροής για την εφελκυστική αστοχία είναι συσχετισμένος. (tutorials RS2 2019)

Οι παράμετροι τους οποίους και χρησιμοποιεί το μοντέλο είναι οι παρακάτω:

• φ: Γωνία Εσωτερικής Τριβής (°)

Η γωνία εσωτερικής τριβής φ είναι μία από τις βασικές παραμέτρους για το μοντέλο και υπολογίζεται εργαστηριακά από τριαξονικές δοκιμές από την κλίση της περιβάλλουσας αστοχίας σε διάγραμμα ορθής τάσης – διατμητικής τάσης. Να σημειωθεί ότι η γωνία τριβής είναι ίση με μηδέν σε αστράγγιστες συνθήκες. (Κοσκινιώτης, 2019)

• c: Συνοχή (kN/m²)

Η συνοχή c αποτελεί, επίσης, μία από τις βασικές παραμέτρους για το μοντέλο. Η συνοχή, ομοίως με τη γωνία τριβής φ, μπορεί να υπολογιστεί εργαστηριακά από το διάγραμμα ορθής τάσης – διατμητικής τάσης ως η τεταμένη του σημείου τομής της περιβάλλουσας αστοχίας με τον άξονα την διατμητικής τάσης (άξονα τεταμένων). (Κοσκινιώτης, 2019)

• E: Μέτρο Ελαστικότητας (kN/m²)

Συνήθως το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται μέσω των μονοαξονικών και τριαξονικών θλιπτικών δοκιμών. Να επισημανθεί ότι τα πιο πολλά γεωυλικά δεν παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά καθώς αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με τη μορφή και το μέγεθος της φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα χρήσης άλλων μέτρων ελαστικότητας. (Κοσκινιώτης, 2019)

• ν: Λόγος του Poisson

Ως λόγος Poisson ορίζεται ο λόγος την πλευρικής προς την εγκάρσια παραμόρφωση. Μπορεί να υπολογιστεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών. (Κοσκινιώτης, 2019)

• ψ: Γωνία Διασταλτικότητας (°)

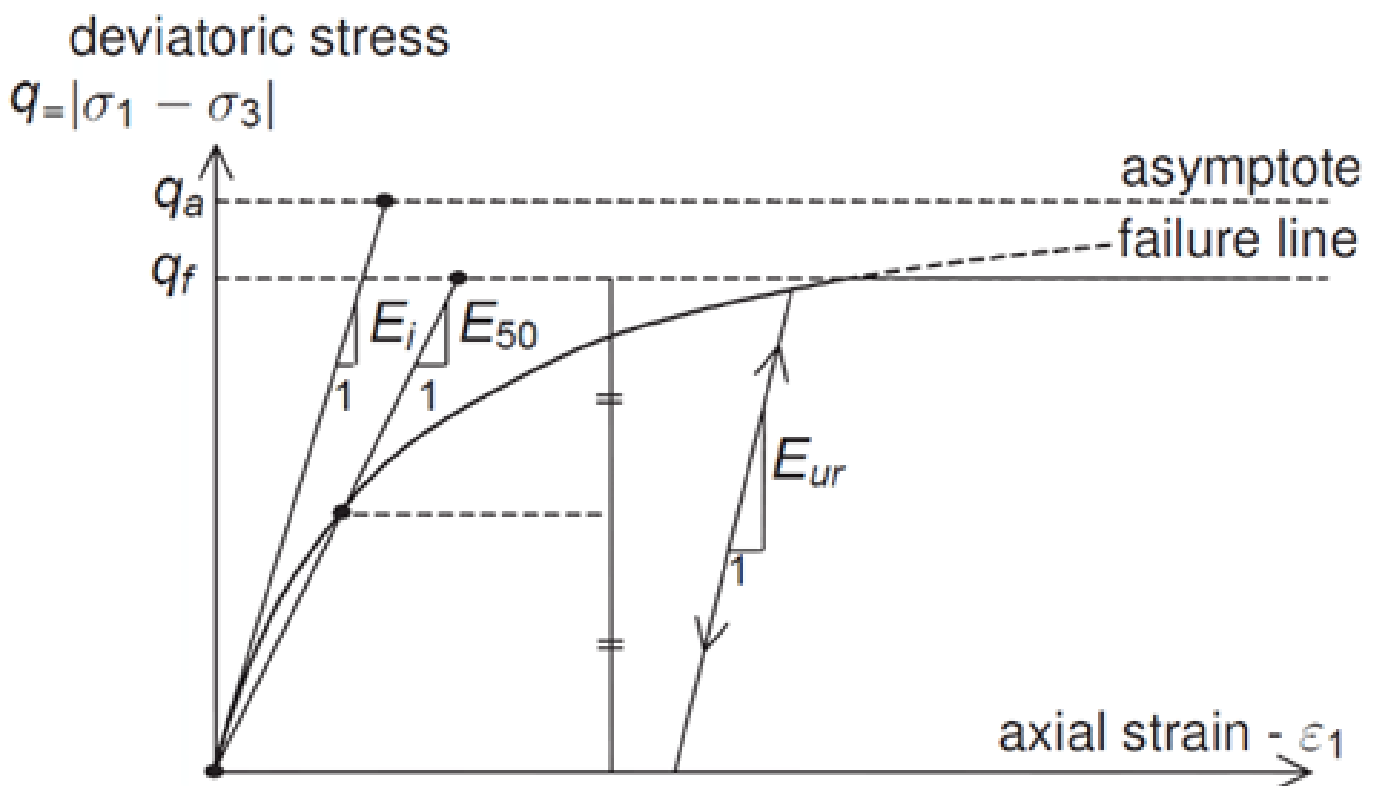
Η γωνία διασταλτικότητας είναι ένας συντελεστής ο οποίος εκφράζει την τάση ενός γεωυλικού να διογκώνεται όταν ασκείται σε αυτό διατμητική τάση. Στην περίπτωση των αμμωδών γεωυλικών εξαρτάται από την πυκνότητα και τη γωνία εσωτερικής τριβής, ενώ σε αυτή των αργιλικών εδαφών, με εξαίρεση τα έντονα υπερστερεοποιημένα, η γωνία είναι σχεδόν μηδέν. (Κοσκινιώτης, 2019)

Τα κύρια πλεονεκτήματα του Μοντέλου Mohr – Coulomb, συγκριτικά με άλλα μοντέλα αστοχίας, είναι το γεγονός ότι η εφαρμογή του είναι απλή και εύχρηστη και ότι οι παράμετροι που απαιτούνται είναι συγκεκριμένες και έχουν ξεκάθαρη φυσική σημασία. (Κοσκινιώτης, 2019)

5.3 Μοντέλο Hardening Soil

Το μοντέλο Hardening Soil αποτελεί ένα προηγούμενο καταστατικό μοντέλο αστοχίας, το οποίο έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει τη συμπεριφορά διάφορων εδαφικών σχηματισμών με ποικίλα χαρακτηριστικά. Με βάση αυτό το μοντέλο όταν το γεωυλικό υποστεί αρχική φόρτιση, αμέσως παρατηρείται μείωση της δυσκαμψίας του και παράλληλα εμφανίζονται μη αναστρέψιμες διατμητικές παραμορφώσεις. Η βασική του διαφοροποίηση με άλλα μοντέλα αστοχίας, όπως το ελαστικό – τέλεια πλαστικό μοντέλο, είναι ότι η δυσκαμψία του εδάφους εξαρτάται από την εφαρμοσμένη σε αυτό τάση, ανεξάρτητα για κάθε μία την κύρια φόρτιση και την αποφόρτιση – επαναφόρτιση. Βάση αυτού του τρόπου προσομοιώνεται καλύτερα η πραγματική συμπεριφορά ενός γεωυλικού. Ακόμη, οι πλαστικές παραμορφώσεις που εμφανίζονται στο υλικό μπορούν να υπολογιστούν από ένα κριτήριο αστοχίας πολλαπλών επιφανειών. (tutorials RS2 2019)

Άλλο ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του εν λόγω μοντέλου είναι η περιγραφή της σχέσης τάσης - παραμόρφωσης από μία υπερβολική καμπύλη, σε πρότυπη τριαξονική δοκιμή. (tutorials RS2 2019)



Εικόνα 5.5: Καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων σε Τριαξονική Δοκιμή (Ahmedetal. 2016). (tutorials RS2 2019)

Οι βασικότερες παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι οι εξής:

ϕ : Γωνία Εσωτερικής Τριβής ($^{\circ}$)

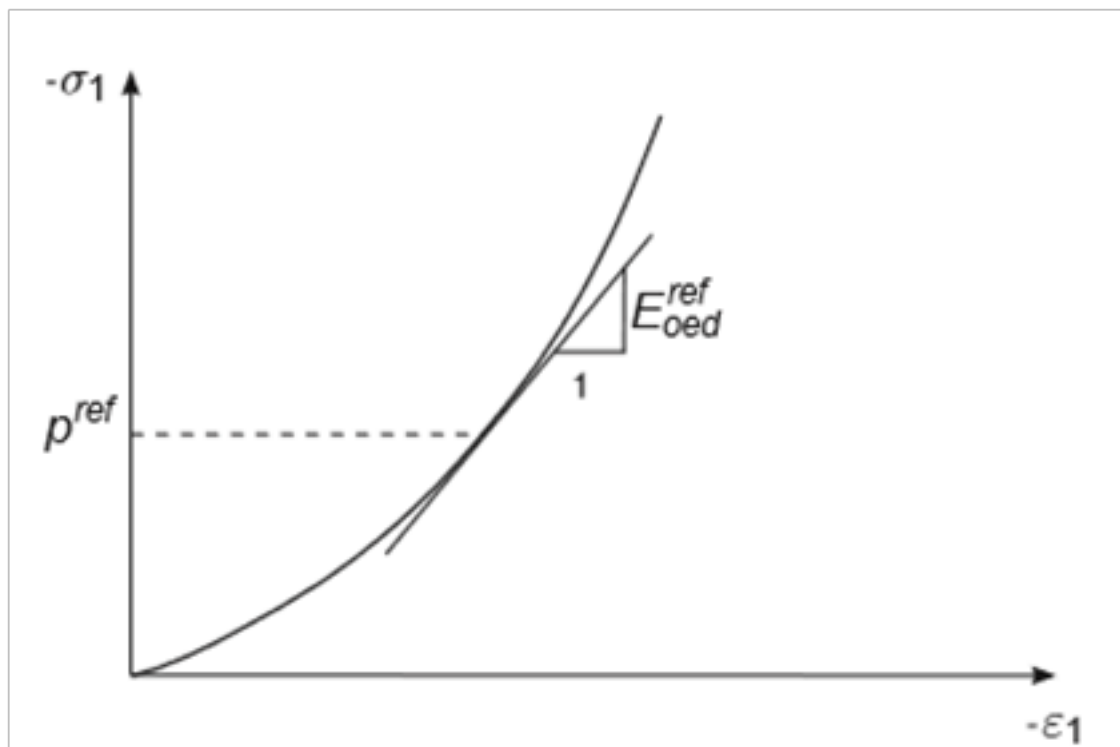
c : Συνοχή (kN/m^2)

ψ : Γωνία Διασταλτικότητας ($^{\circ}$)

Η γωνία τριβής ϕ , η γωνία διασταλτικότητας ψ και η συνοχή c είναι οι ίδιες παράμετροι όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω στο μοντέλο αστοχίας Mohr – Coulomb. (tutorials RS2 2019)

E_{oed}^{ref} : Εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας (kN/m^2)

Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την κλίση της εφαπτόμενης για μία πρότυπη πίεση αναφοράς p^{ref} σε διάγραμμα ορθής τροπής – κύριας τάσης για δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης. Αυτή η πίεση p^{ref} χρησιμοποιείται ως τιμή αναφοράς καθώς η δυσκαμψία μεταβάλλεται ανάλογα με τη βαθμίδα φόρτισης. (tutorials RS2 2019)



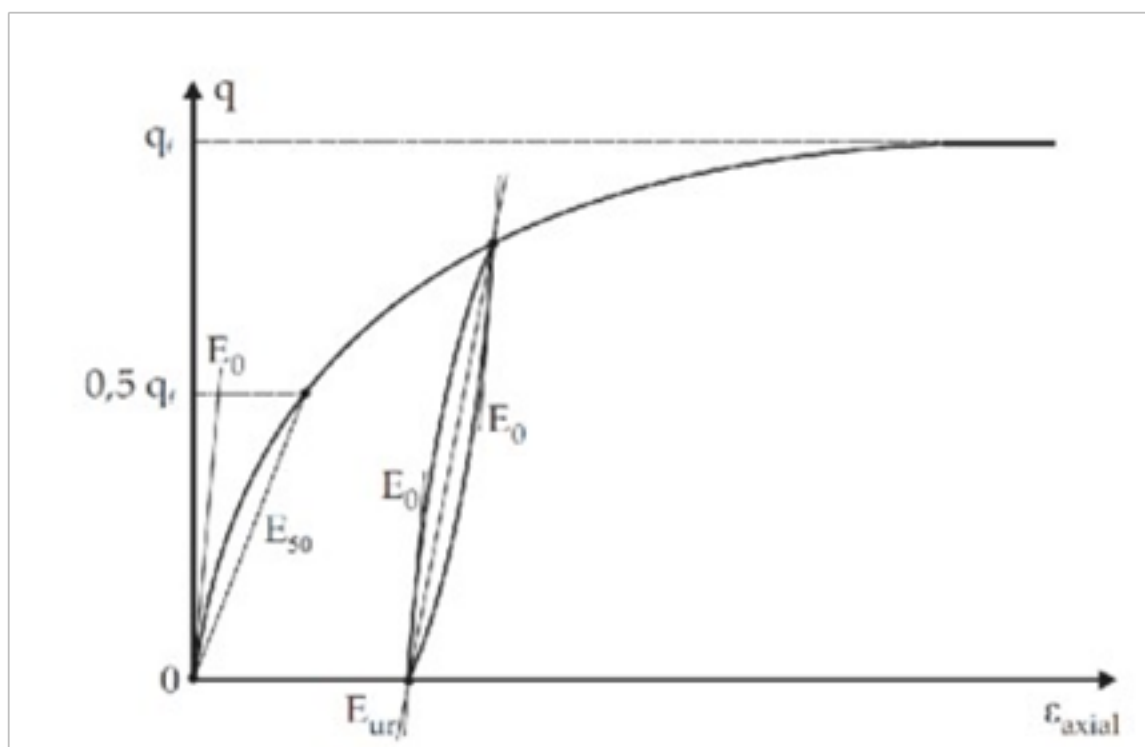
Εικόνα 5.6: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης σε Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης (tutorials RS2 2019)

E_{50}^{ref} : Τέμνον Μέτρο Ελαστικότητας (kN/m^2)

Το μέτρο αυτό υπολογίζεται από την κλίση της τέμνουσας στο 50% της αντοχής του υλικού σε τριαξονική δοκιμή. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, επειδή στο συγκεκριμένο μοντέλο η δυσκαμψία μεταβάλλεται ανάλογα με τη βαθμίδα φόρτισης και την πλευρική πίεση (σ_3) που ασκείται, πρέπει να γίνει μετατροπή της τιμής του μέτρου ελαστικότητας για μία πίεση αναφοράς p^{ref} . (tutorials RS2 2019)

E_{ur}^{ref} : Μέτρο Ελαστικότητας κατά την αποφόρτιση – επαναφόρτιση (kN/m^2)

Σε περιπτώσεις αποφόρτισης – επαναφόρτισης χρησιμοποιείται το παραπάνω μέτρο ελαστικότητας για μία πίεση αναφοράς p_{ref} . Συχνά για λόγους ευκολίας το E_{ur}^{ref} μπορεί να θεωρηθεί έως και 3 φορές το E_{50}^{ref} . Γραφικά, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, η κλίση της ευθείας που ενώνει την αρχή και το τέλος της αποφόρτισης με την επαναφόρτιση, δίνει το E_{ur}^{ref} . (tutorials RS2 2019)



Εικόνα 5.7: Κύκλος Αποφόρτισης-Επαναφόρτισης σε Τριαξονική Δοκιμή (Vakilietal. 2013)
(tutorials RS2 2019)

• m : Βαθμός Εξάρτησης της δυσκαμψίας από το επίπεδο φόρτισης

Η παράμετρος αυτή περιγράφει τον βαθμό εξάρτησης της δυσκαμψίας από το επίπεδο φόρτισης. Με βάση τον Von Soos, οι τιμές που λαμβάνει η συγκεκριμένη παράμετρος είναι $0.5 < m < 1$. (tutorials RS2 2019)

• p^{ref} : Πίεση Αναφοράς των μέτρων δυσκαμψίας (kN/m^2)

Η πίεση αναφοράς p^{ref} είναι η πρότυπη τιμή πίεσης για την οποία έχουν υπολογιστεί τα μέτρα ελαστικότητας. Η τιμή της πίεσης που προτείνεται να χρησιμοποιηθεί είναι $p^{ref} = 100 kN/m^2$. (tutorials RS2 2019)

• R_f : Λόγος Αστοχίας

Ο λόγος αστοχίας ορίζεται ως ο λόγος της γραμμής αστοχίας q_{fme} την ασυμπτωτική γραμμή της καμπύλης q_a , όπως φαίνεται και στην εικόνα. Εδώ προτείνεται χρήση της τιμής $R_f = 0.9$. (tutorials RS2 2019)

• ν_{ur} : Λόγος του Poisson σε αποφόρτιση – επαναφόρτιση (tutorials RS2 2019)

Κεφάλαιο 6

Επιλογή Παραμέτρων και Μεθοδολογία Κατασκευής Μοντέλων

6.1 Εισαγωγικά

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση των καθιζήσεων, των μετατοπίσεων καθώς και της εντατικής κατάστασης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, επιλέχθηκαν συγκεκριμένες γεωτεχνικές παράμετροι. Αυτές οι παράμετροι προήλθαν από τη γεωτεχνική μελέτη της σήραγγας και χρησιμοποιήθηκαν στα καταστατικά μοντέλα που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία. Παρακάτω αναλύονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που χρειάστηκαν για την αναπαράσταση, καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

6.2 Γεωμετρικά στοιχεία και Μηχανικά Χαρακτηριστικά Γεωλογικών Σχηματισμών των Τομών

Η διάμετρος του ανοίγματος της σήραγγας είναι 9.18m. Το συνολικό ύψος του εδαφικού προσομοιώματος είναι 38m, ενώ το συνολικό μήκος του είναι 90m. Το ύψος του εδαφικού προσομοιώματος επιλέχθηκε να είναι λίγο αυξημένο, με σκοπό να αποφευχθούν τα προβλήματα λόγω εγγύτητας των ορίων του μοντέλου, που ίσως εμφανιζόταν εάν τα όρια μου ήταν μικρότερα.

Σε αυτό το σημείο δίνονται οι γεωτεχνικές τομές και οι γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού. Χρησιμοποιούνται οι συμβολισμοί που δίνονται στον ακόλουθο πίνακα. Οι θέσεις των γεωτεχνικών τομών σχεδιασμού δίνονται στο σχέδιο της μπκοτομής των παραμέτρων λειτουργίας του TBM, που συνοδεύει τη μελέτη που μας δόθηκε από την αρμόδια εταιρία. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Πίνακας 6.1: Συμβολισμοί γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Συμβολισμός	Γεωτεχνική Παράμετρος
γ (kN/m ³)	Μοναδιαίο (ειδικό) βάρος
GSI	Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής
σ_{ci} (MPa)	Αντοχή Ανεμπόδιστης θλίψης του άρρηκτου βράχου
m_i	Σταθερά m_i του κριτηρίου Hoek - Brown
c (kPa)	Συνοχή
ϕ (°)	Γωνία τριβής
E_m (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας
E_{long} (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας σε μακροχρόνιες συνθήκες φόρτισης
ν	Λόγος Poisson
k (m/sec)	Συντελεστής διαπερατότητας
K_o	Συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαίων

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών του υπό μελέτη τμήματος:

Πίνακας 6.2: Σχηματισμός (1.1) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c'	0
ϕ'	30°
E_m	40 MPa
E_{long}	32 MPa
γ	19.5 kN/m ³
ν	0.30
k	10 ⁻⁴ m/sec
K_o	0.5

Πίνακας 6.3: Σχηματισμός (3.1) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c'	5 kPa
ϕ'	30°
E_m	50 MPa
E_{long}	40 MPa
γ	21.3 kN/m ³
ν	0.30
k	10 ⁻⁵ m/sec
K_o	0.5

Πίνακας 6.4: Σχηματισμός (3.2) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c'	10 kPa
ϕ'	35°
E_m	80 MPa
E_{long}	65 MPa
γ	22.7 kN/m ³
ν	0.25
k	10 ⁻⁵ m/sec
K_o	0.5

Πίνακας 6.5: Σχηματισμός (5.1) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c'	10 kPa
ϕ'	28°
E_m	50 MPa
E_{long}	40MPa
γ	20.5 kN/m ³
ν	0.30
k	10 ⁻⁴ m/sec
K_o	0.5

Πίνακας 6.6: Σχηματισμός (5.2) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c	310 kPa
ϕ	58°
E_m	6900 MPa
E_{long}	5900 MPa
γ	24.3 kN/m ³
ν	0.20
k	10 ⁻⁶ m/sec
K_o	0.5
GSI	54
σ_{ci}	30 MPa
m_i	12

Πίνακας 6.7: Σχηματισμός (5.3) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c	80 kPa
ϕ	43°
E_m	420 MPa
E_{long}	360 MPa
γ	20.9 kN/m ³
ν	0.25
k	5*10 ⁻⁷ m/sec
K_o	0.5
GSI	62
σ_{ci} (MPa)	3 MPa
m_i	7

Πίνακας 6.8: Σχηματισμός (5.4) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c	69 kPa
ϕ	36.6°
E_m	345 MPa
E_{long}	295 MPa
γ	22 kN/m ³
ν	0.25
k	5*10 ⁻⁷ m/sec
K_o	0.5
GSI	50
σ_{ci} (MPa)	3 MPa
m_i	7

Πίνακας 6.9: Σχηματισμός (5.5) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
C	70 kPa
ϕ	33°
E_m	300 MPa
E_{long}	255 MPa
γ	21.6 kN/m ³
ν	0.25
k	5*10 ⁻⁷ m/sec
K_o	0.5

Πίνακας 6.10: Σχηματισμός (5.6) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c	63 kPa
ϕ	48.7°
E_m	200 MPa
E_{long}	170 MPa
γ	22.2 kN/m ³
ν	0.25
k	10 ⁻⁶ m/sec
K_o	0.5
GSI	35
σ_{ci} (MPa)	5 MPa
m_i	21

Πίνακας 6.11: Σχηματισμός (7.1) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c'	5 kPa
ϕ'	30°
E_m	50 MPa
E_{long}	40 MPa
γ	22 kN/m ³
ν	0.30
k	5*10 ⁻⁶ m/sec
K_o	0.5

Πίνακας 6.12: Σχηματισμός (7.2) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c	39 kPa
ϕ	27.1°
E_m	300 MPa
E_{long}	255 MPa
γ	22.8 kN/m ³
ν	0.25
k	5*10 ⁻⁷ m/sec
K_o	0.5
GSI	23
σ_{ci} (MPa)	2 MPa
m_i	10

Πίνακας 6.13: Σχηματισμός (7.3) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c	68 kPa
ϕ	37.7°
E_m	560 MPa
E_{long}	475 MPa
γ	23.7 kN/m ³
ν	0.25
k	10 ⁻⁶ m/sec
K_o	0.5
GSI	29
σ_{ci} (MPa)	3.5 MPa
m_i	17

Πίνακας 6.14: Σχηματισμός (7.4) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c	78 kPa
ϕ	41.4°
E_m	750 MPa
E_{long}	635 MPa
γ	21.5 kN/m ³
ν	0.25
k	10 ⁻⁶ m/sec
K_o	0.5
GSI	31
σ_{ci} (MPa)	5 MPa
m_i	17

Πίνακας 6.15: Σχηματισμός (7.5) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c	22 kPa
ϕ	40.7°
E_m	435 MPa
E_{long}	370 MPa
γ	22.9 kN/m ³
ν	0.25
k	5*10 ⁻⁷ m/sec
K_o	0.5
GSI	26
σ_{ci} (MPa)	3 MPa
m_i	10

Πίνακας 6.16: Σχηματισμός (8.1) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c	25 kPa
ϕ	23°
E_m	190 MPa
E_{long}	160 MPa
γ	23.3 kN/m ³
ν	0.25
k	2*10 ⁻⁷ m/sec
K_o	0.5
GSI	15
σ_{ci} (MPa)	2 MPa
m_i	8

Πίνακας 6.17: Σχηματισμός (8.2) (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Μηχανικά Χαρακτηριστικά	Τιμές που μετρήθηκαν
c	40 kPa
ϕ	21.4°
E_m	235 MPa
E_{long}	200 MPa
γ	22.9 kN/m ³
ν	0.25
k	7*10 ⁻⁷ m/sec
K_o	0.5
GSI	19
σ_{ci} (MPa)	2 MPa
m_i	8

Η αντιστοίχιση της αρίθμησης των σχηματισμών με τα εκάστοτε υλικά φαίνεται παρακάτω:

Σχηματισμός	Όνομα Υλικού
1.1	Τεχνητές Αποθέσεις
3.1	Κροκαλοπαγές, λατυποπαγές χαλαρό ή ασθενώς συγκολλημένο
3.2	Κροκαλοπαγές, λατυποπαγές συγκολλημένο
5.1	Μανδύας αποσάθρωσης λιμναίων μαργαϊκών αποθέσεων
5.2	Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος
5.3	Μάργα (αργιλόλιθος ασβεστιτικός)
5.4	Ιλυόλιθος
5.5	Αργιλόλιθος
5.6	Κροκαλοπαγές, λατυποπαγές, ψηφιδοπαγές, ασθενώς συγκολλημένο
7.1	Μανδύας αποσάθρωσης αθηναϊκού σχιστολίθου
7.2	Μεταϊλυόλιθος
7.3	Μεταψαμμίτης
7.4	Ασβεστιτικός μεταψαμμίτης, ασβεστιτικός σχιστόλιθος, ψαμμιτικός σχιστόλιθος
7.5	Εναλλαγές μεταψαμμίτη, μεταϊλυολίθου
8.1	Τεφρός μεταϊλυόλιθος, μελανός αργιλικός σχίστης
8.2	Εναλλαγές μελανού αργιλικού σχίστη και τεφρού μεταϊλυόλιθου με τεφρό μεταψαμμίτη

(ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

6.3 Κατασκευή Προσομοιώματος

Η διαδικασία για την κατασκευή των μοντέλων του εδάφους που επρόκειτο να αναλυθούν από το λογισμικό ακολουθήθηκε με τον παρακάτω τρόπο.

Αρχικά, από όλες τις τομές που παρατέθηκαν από τα γεωτεχνικά στοιχεία της εταιρείας, επιλέχθηκε η τομή που ήταν στο σημείο όπου εμφανίστηκαν οι μεγαλύτερες καθιζήσεις κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Έπειτα, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο αστοχίας για τις αναλύσεις και αυτό ήταν το Mohr – Coulomb (MC).

Στη συνέχεια, ακολούθησε η διαδικασία για την κατασκευή του εδαφικού προσομοιώματος της γεωτεχνικής τομής που θα αναλυόταν. Η διαδικασία αυτή περιείχε πέντε (5) διαφορετικά μοντέλα, τα στάδια των οποίων διέφεραν μεταξύ τους. Σε όλα τα μοντέλα το stage 1 ήταν κοινό.

• Για τα Model 1 έως 5, η διαδικασία δημιουργίας του stage 1 είναι η εξής:

Boundaries – Add External – enter, με αυτόν τον τρόπο δόθηκαν οι διαστάσεις του εδαφικού προσομοιώματος.

Έπειτα, ακολούθησε ο σχεδιασμός της σήραγγας, δίνοντας την ακτίνα της και τις συντεταγμένες της με τις εντολές **Boundaries – Add excavation – i – enter**.

Μετά, κλίθηκε να εισαχθεί η στρωματογραφία και οι γεωτεχνικές παράμετροι των εδαφικών σχηματισμών που περιβάλλουν τη σήραγγα, ακολουθώντας τις εντολές **Boundaries – Add material – enter** για τα όρια του κάθε υλικού στον κάρναβο, **Properties – define materials** για να δοθούν οι ιδιότητες του κάθε υλικού και τέλος **Assign material** για την τοποθέτηση κάθε υλικού στη θέση του.

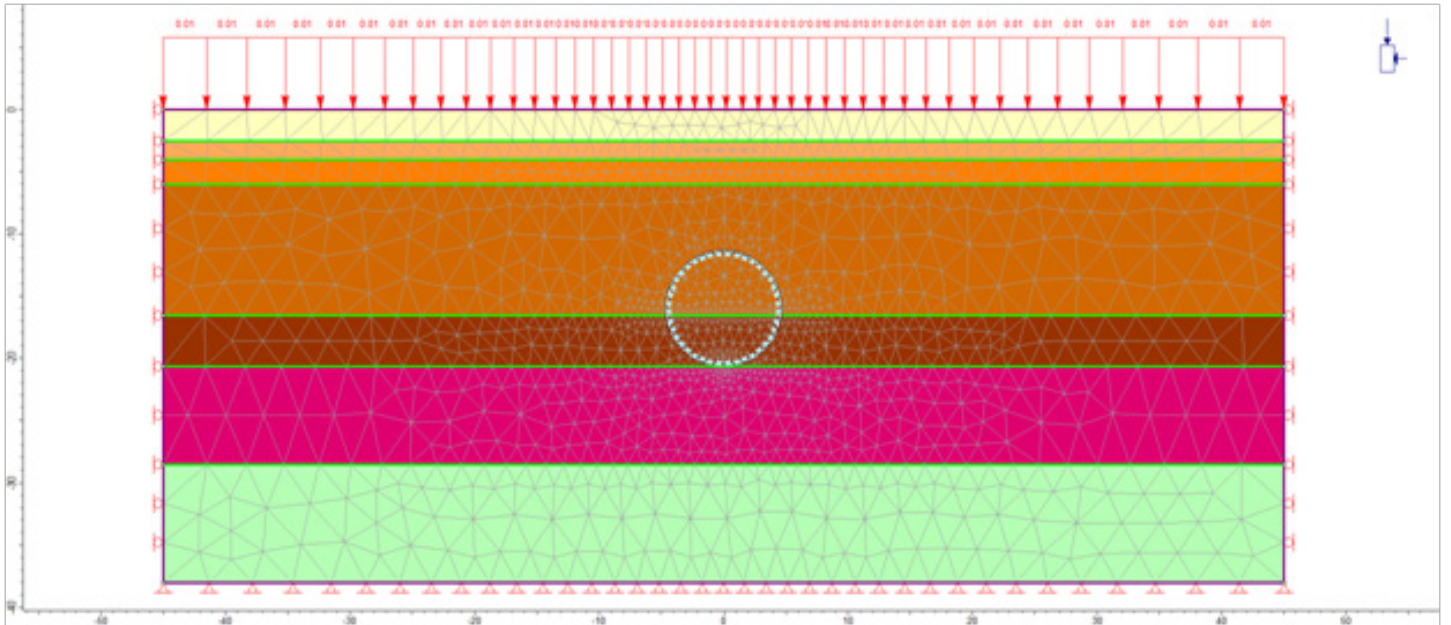
Στη συνέχεια, ακολούθησαν οι εντολές **Loading – field stress properties** με σκοπό να οριστεί **field stress type = gravity**, να επιλεγεί use actual ground surface και use effective stress ratio και να οριστεί effective stress ratio = 0.5 (k_0).

Το επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Η διαδικασία αυτή έγινε σε δύο βήματα, όπου το πρώτο αφορούσε τη διακριτοποίηση των ορίων και το δεύτερο τη δημιουργία του πλέγματος. Οι εντολές που ακολουθήθηκαν για τα βήματα ήταν **Mesh – Mesh setup – Discretize – Mesh – ok**.

Καθώς έχει δημιουργηθεί το πλέγμα, όλοι οι κόμβοι των εξωτερικών ορίων είναι ήδη προκαθορισμένοι να έχουν μηδενική μετατόπιση. Το μόνο τμήμα του οποίου επιλέχθηκε να έχει μηδενική μετατόπιση είναι το άνω όριο του μοντέλου και γι αυτό επιλέγουμε **Free Boundary**. Στο αριστερό και στο δεξιό όριο επιλέχθηκε να υπάρχει κύλιση γι αυτό και επιλέχθηκε **Restrain X**. Στο κάτω όριο, το οποίο και έμεινε τελευταίο, επιλέχθηκε να υπάρχει πάκτωση γι αυτό επιλέχθηκε **Restrain X, Y**.

Επόμενο βήμα είναι να τεθούν τα φορτία που υπάρχουν γύρω από τη σήραγγα μας, όπου στην περίπτωση αυτή υπάρχει μόνο το φορτίο οδικής κυκλοφορίας. Αυτό δηλώθηκε ακολουθώντας τις εντολές **Loading – Distributed Loads – Add uniform load**, επιλέγοντας vertical.

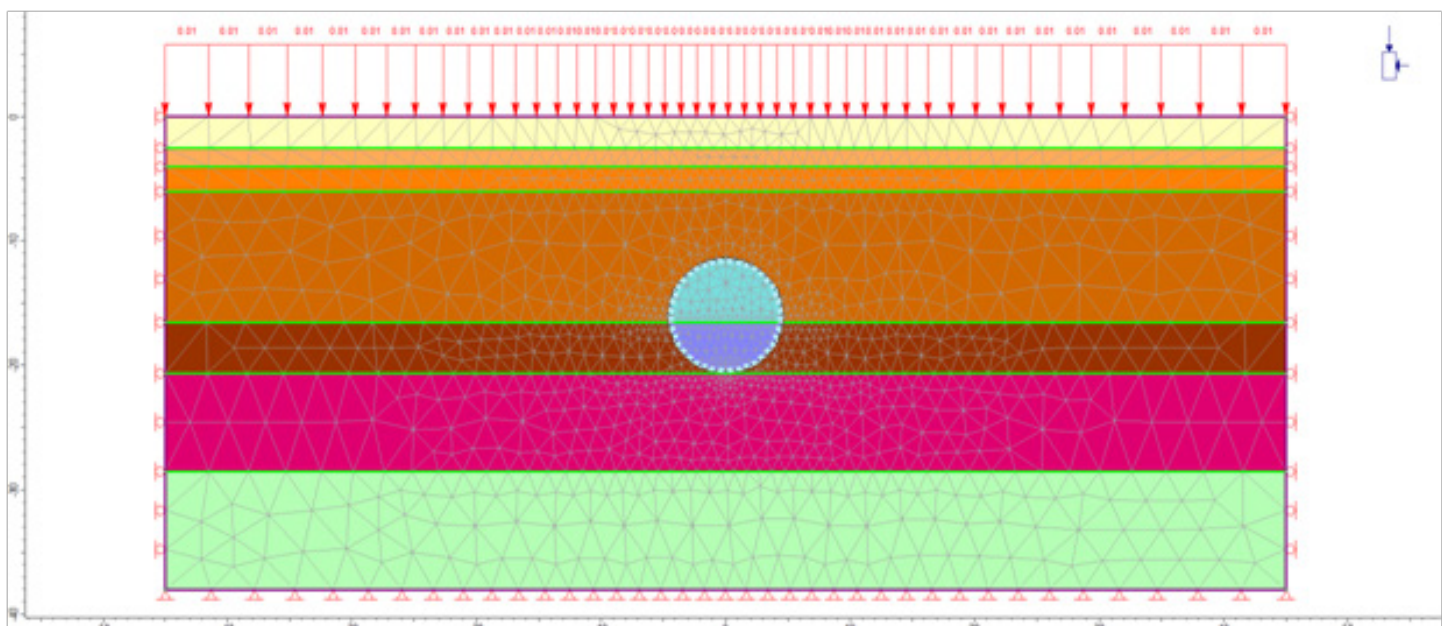
Κάπως έτσι ολοκληρώθηκε η δημιουργία τους stage 1. Τελευταία εντολή που δόθηκε, ήταν η εντολή με την οποία επιλέχθηκε σε κάθε model πόσα stage θα αναλυθούν και έγινε επιλέγοντας **Analysis – Project Settings – Stages**.



Εικόνα 6.1: Απεικόνιση του stage 1 των model 1 έως 5

• Για τα Model 3,4 και 5 η δημιουργία του stage 2 έγινε ως εξής:

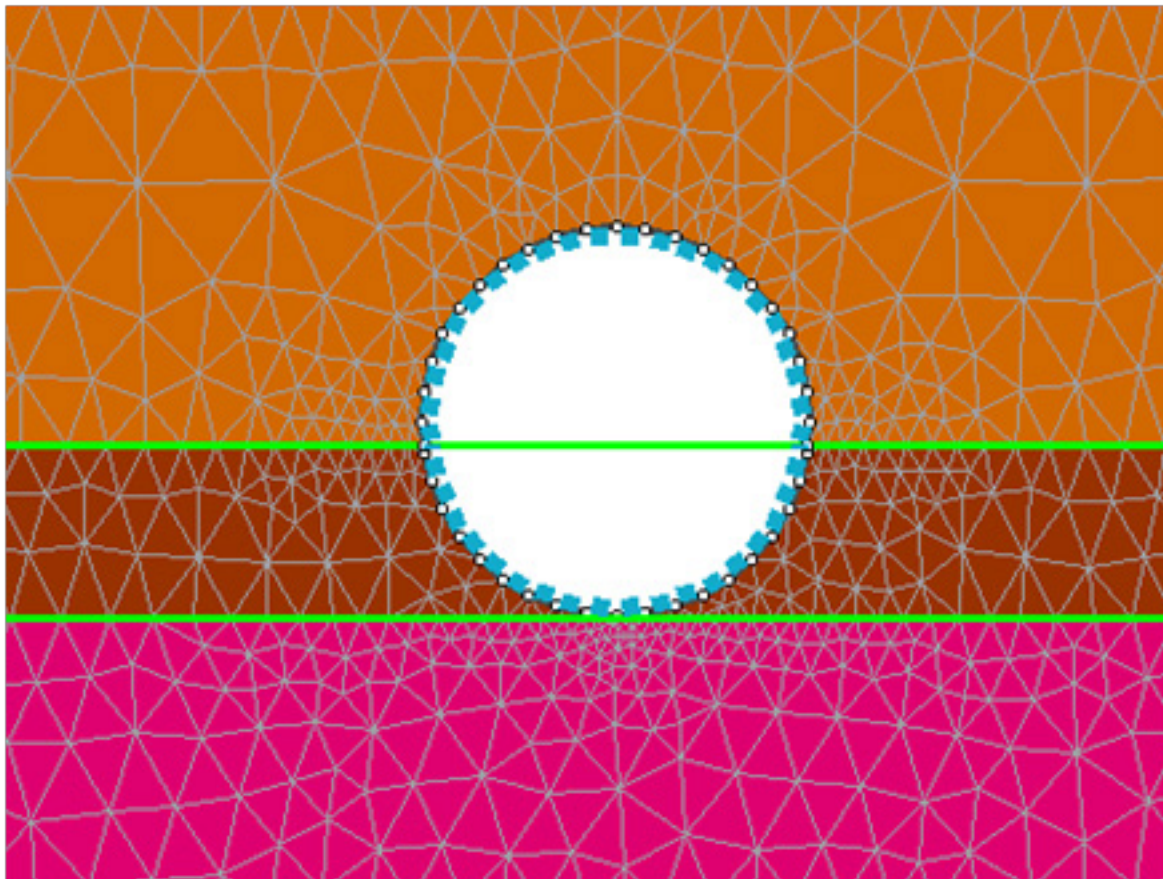
Στο stage 2 αυτών των μοντέλων εφαρμόστηκε η διαδικασία της αποτόνωσης, κατά την οποία άλλαξαν τα υλικά μέσα στην σήραγγα, θέτοντας σαν τιμή του μέτρου ελαστικότητας ίση με το 1/5 της αρχικής τιμής. Οι εντολές ήταν: **Properties – Define Material** και μετά τη δημιουργία των νέων υλικών αυτά τοποθετούνται αντίστοιχα στη σήραγγα επιλέγοντας **Assign Material**.



Εικόνα 6.2: Απεικόνιση του stage 2 των model 3, 4 και 5

• Για το Model 1 και 3 η δημιουργία του stage 2 και 3 αντίστοιχα έγινε ως εξής:

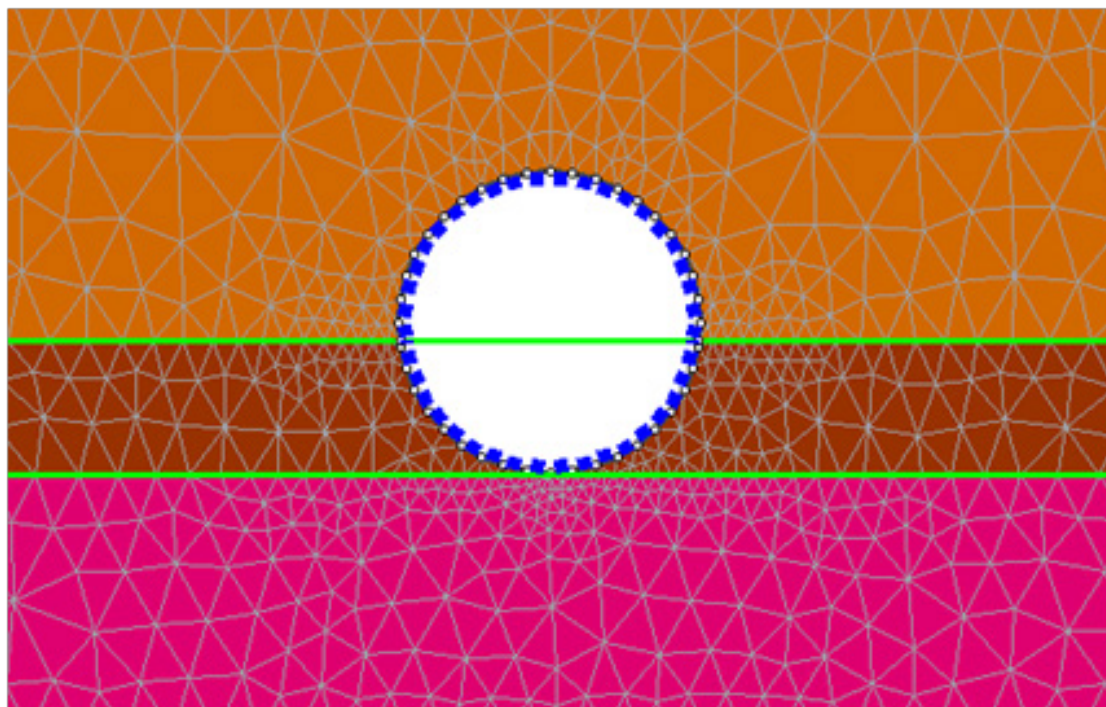
Στόχος ήταν η εκσκαφή της σήραγγας και η τοποθέτηση ενός liner σε αυτό το στάδιο. Για την εκσκαφή πρώτα επιλέχθηκε **Assign Material – Excavate** και έπειτα για την τοποθέτηση του liner επιλέχθηκε **Support – Add Liner – ok**. Αφού τοποθετήθηκε γύρω από τη σήραγγα, επόμενο βήμα ήταν να δοθεί στο liner το όνομα και τα στοιχεία που επιλέχθηκαν, τα οποία δεν ήταν άλλα από τις ιδιότητες του οπλισμένου σκυροδέματος που πάρθηκε από τα γεωτεχνικά στοιχεία της μελέτης της εταιρείας. Οι εντολές ήταν **Properties – Define Liners** και το όνομα του liner ήταν concrete lining.



Εικόνα 6.3: Απεικόνιση των stage 2 και 3 των model 1 και 3 αντίστοιχα

• Για το Model 2 και 4 η δημιουργία του stage 2 και 3 αντίστοιχα έγινε ως εξής:

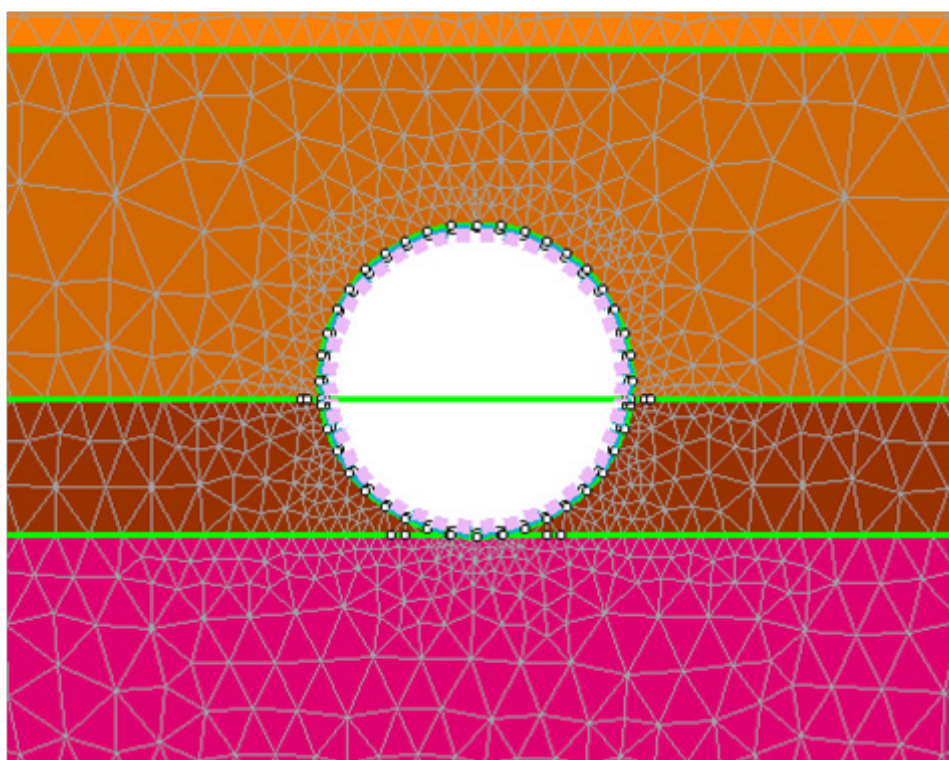
Σε αυτό το stage, στόχος ήταν η εκσκαφή της σήραγγας και η τοποθέτηση ενός interface γύρω από τη σήραγγα. Για την εκσκαφή πρώτα επιλέχθηκε **Assign Material – Excavate**, όπως έχει ήδη ειπωθεί. Για την τοποθέτηση του interface επιλέχθηκε **Support – Add Liner – ok**. Αφού τοποθετήθηκε γύρω από τη σήραγγα, επόμενο βήμα ήταν να επιλεχθεί **Properties – Define Composite** και να μείνει μόνο ένα liner και να επιλεχθεί **Joint Interface**. Έπειτα, για να επιτευχθεί διεπαφή με τη βραχομάζα, ακολουθήθηκαν οι εντολές **Properties – Define Structural Interface** για να τεθούν οι προϋποθέσεις στο Joint 1 και τις ιδιότητες του οπλισμένου σκυροδέματος στο Concrete lining. Τέλος, για την τοποθέτηση του γύρω από τη σήραγγα επιλέχθηκε **Support – Add Liner – Composite Liner – ok**.



Εικόνα 6.4: Απεικόνιση των stage 2 και 3 των model 2 και 4 αντίστοιχα

• Για το Model 5 η δημιουργία του stage 3 έγινε ως εξής:

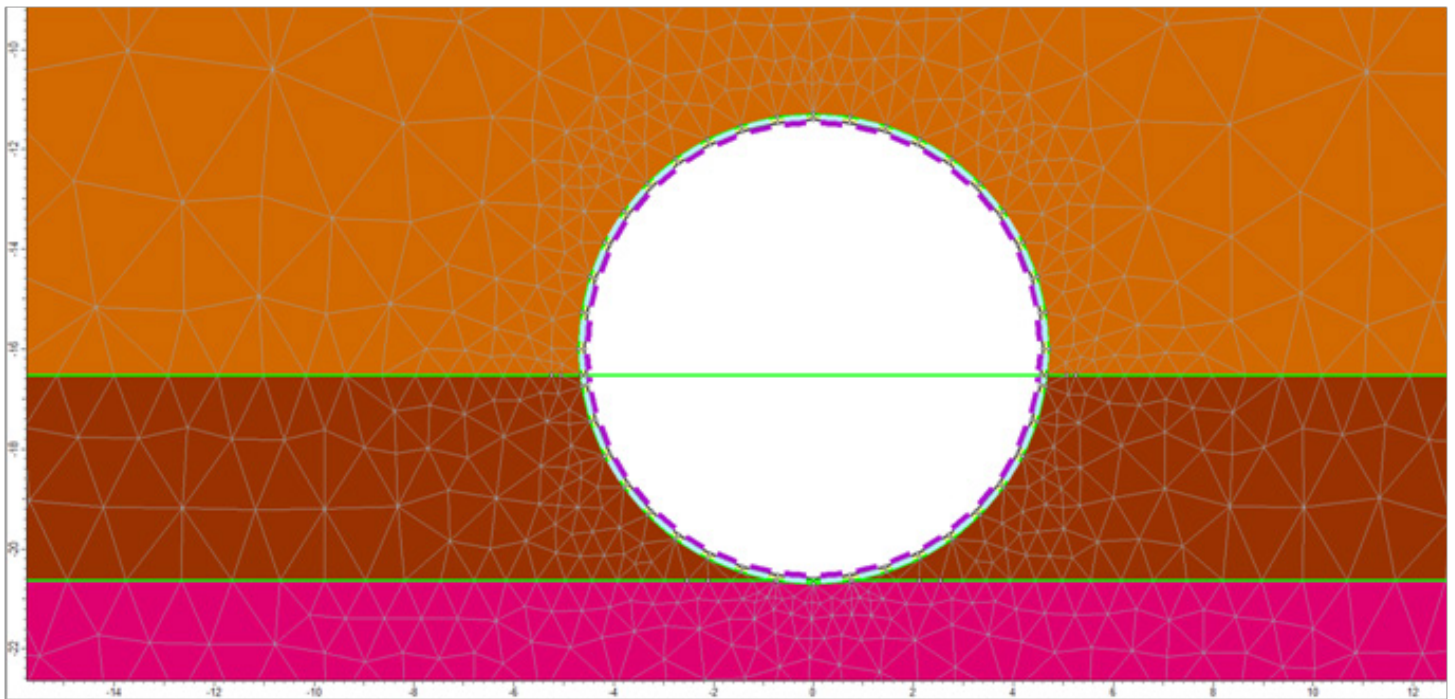
Σε αυτό το stage, στόχος ήταν η εκσκαφή της σήραγγας και η τοποθέτηση ενός χαλύβδινου δακτυλίου (με σκοπό την προσομοίωση της ασπίδας του EPB) γύρω τη σήραγγα, με διάμετρο περίπου 5cm μεγαλύτερη από αυτή της σήραγγας. Για την εκσκαφή πρώτα επιλέχθηκε **Assign Material – Excavate**, όπως έχει ήδη ειπωθεί. Για την τοποθέτηση του TBM shield επιλέχθηκε **Boundaries – Add material – ok** και έπειτα δίνοντας την εντολή **i – enter**, έχοντας το ίδιο κέντρο με τη σήραγγα και εφαρμόζοντας ακτίνα τόσο μεγαλύτερη όσο η διαφορά που έπρεπε να έχει το TBM shield από τη σήραγγά, φτιάχνοντας τον επιθυμητό κύκλο. Δόθηκαν τα χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν ακολουθώντας τις εντολές **Properties – Define Liners – ok**.



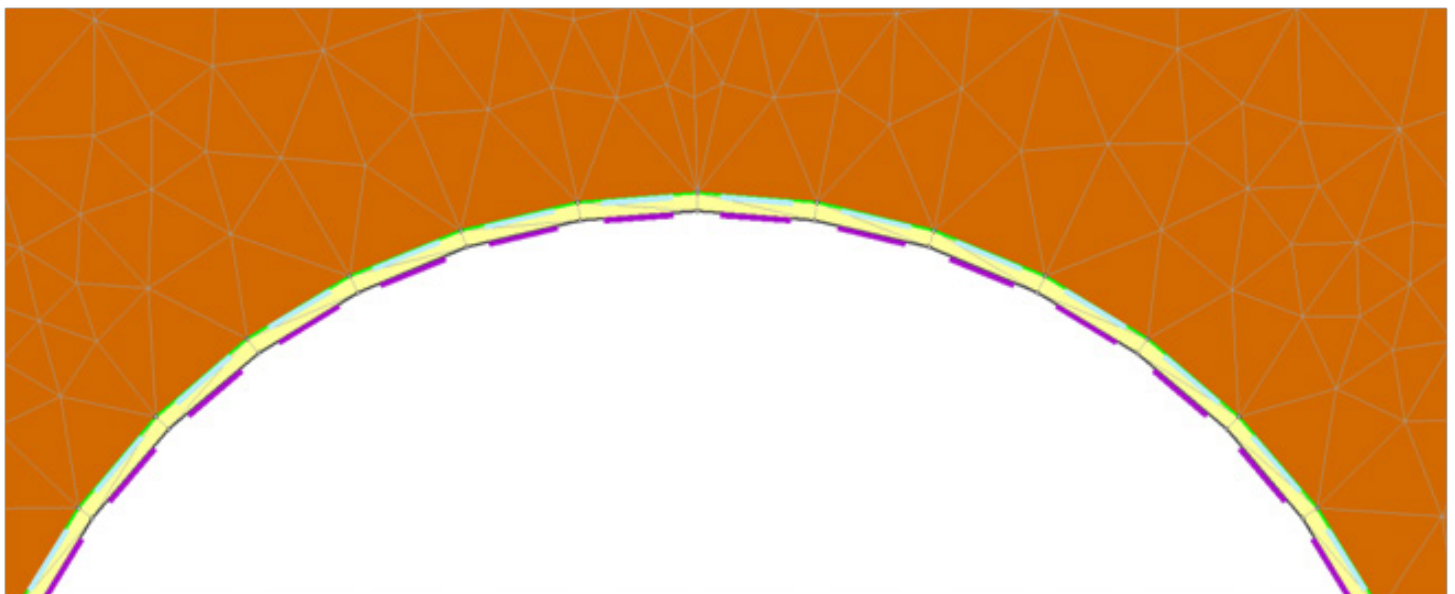
Εικόνα 6.5: Απεικόνιση του stage 3 του model 5

• Για το Model 5 η δημιουργία του stage 4 έγινε ως εξής:

Στο stage αυτό απενεργοποιήθηκε το TBM shield του προηγούμενου stage και προστέθηκε πάνω στη σήραγγα ένα Concrete lining και στο κενό ανάμεσα στο Concrete lining και στο TBM shield τοποθετήθηκε ένα υλικό grout. Αρχικά, η δημιουργία του Concrete lining έγινε ακολουθώντας τις εντολές **Properties – Define liners – Concrete lining – ok**, μέσα από τις οποίες δόθηκαν στο Concrete lining τα στοιχεία του οπλισμένου σκυροδέματος που τοποθετήθηκε γύρω από τη σήραγγα. Έπειτα, ακολούθησαν οι εντολές **Support – Add Liner – Concrete lining – ok**, ώστε να τοποθετηθεί γύρω από τη σήραγγα. Για τη δημιουργία του υλικού grout, επιλέχθηκαν οι εντολές **Properties – Define Material** και μετά τη δημιουργία του νέου υλικού, τοποθετήθηκε επιλέγοντας **Assign Material**.



Εικόνα 6.6: Απεικόνιση του stage 4 του model 5

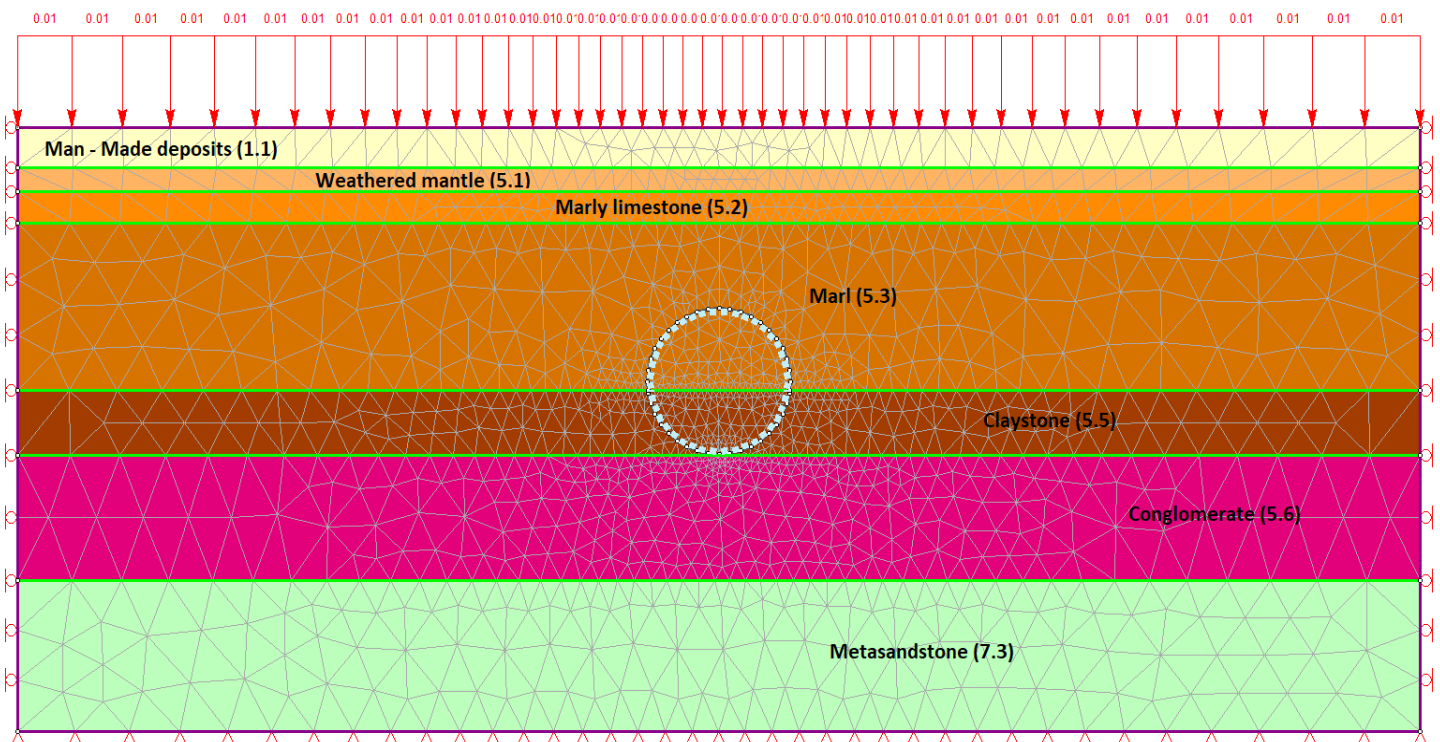


Εικόνα 6.7: Απεικόνιση της ύπαρξης του grout μεταξύ του Concrete lining και του TBM shield, στο stage 4 του model 5

Αφού, λοιπόν, ολοκληρώθηκε η δημιουργία πέντε διαφορετικών μοντέλων με διαφορετικά στάδια στο καθένα, ξεκίνησε η αριθμητική προσομοίωση του καθενός ξεχωριστά, με στόχο να αντληθούν συγκεκριμένα συμπεράσματα. Οι εντολές που ακολουθήθηκαν ήταν αρχικά **Analysis - Compute και μετά Analysis - Interpet.**

Πρώτα πάρθηκαν αποτελέσματα με τη χρήση του μοντέλου Mohr – Coulomb και αξιολογήθηκαν. Έπειτα, δοκιμάστηκε η χρήση ενός άλλου μοντέλου, του Hardening Soil, με το οποίο επιδιώχτηκε να αποφευχθούν επιδράσεις από παραδοχές που είναι εγγενείς στο πρώτο μοντέλο. Στο τέλος, αναλύθηκαν τα αποτελέσματα που πάρθηκαν από το κάθε μοντέλο ξεχωριστά, συγκρίνοντας τις διαφορές που υπήρχαν μεταξύ των stages του εκάστοτε μοντέλου. Στη συνέχεια, ακολούθησε ένας δεύτερος κύκλος συγκρίσεων των συνολικών αποτελεσμάτων και των διαφορών που υπήρχαν με τη χρήση του Mohr – Coulomb και του Hardening Soil.

Παρακάτω, παρουσιάζεται η φωτογραφία του αρχικού μοντέλου, πάνω στην οποία είναι σημειωμένα τα υλικά από τα οποία αποτελούνταν το τμήμα μελέτης. Σημειώνονται και οι εκάστοτε κωδικοί των σχηματισμών, όπως αυτοί αναφέρθηκαν στην ενότητα 6.2.



Εικόνα 6.8: Ονοματολογία υλικών

Κεφάλαιο 7

Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων

7.1 Εισαγωγικά

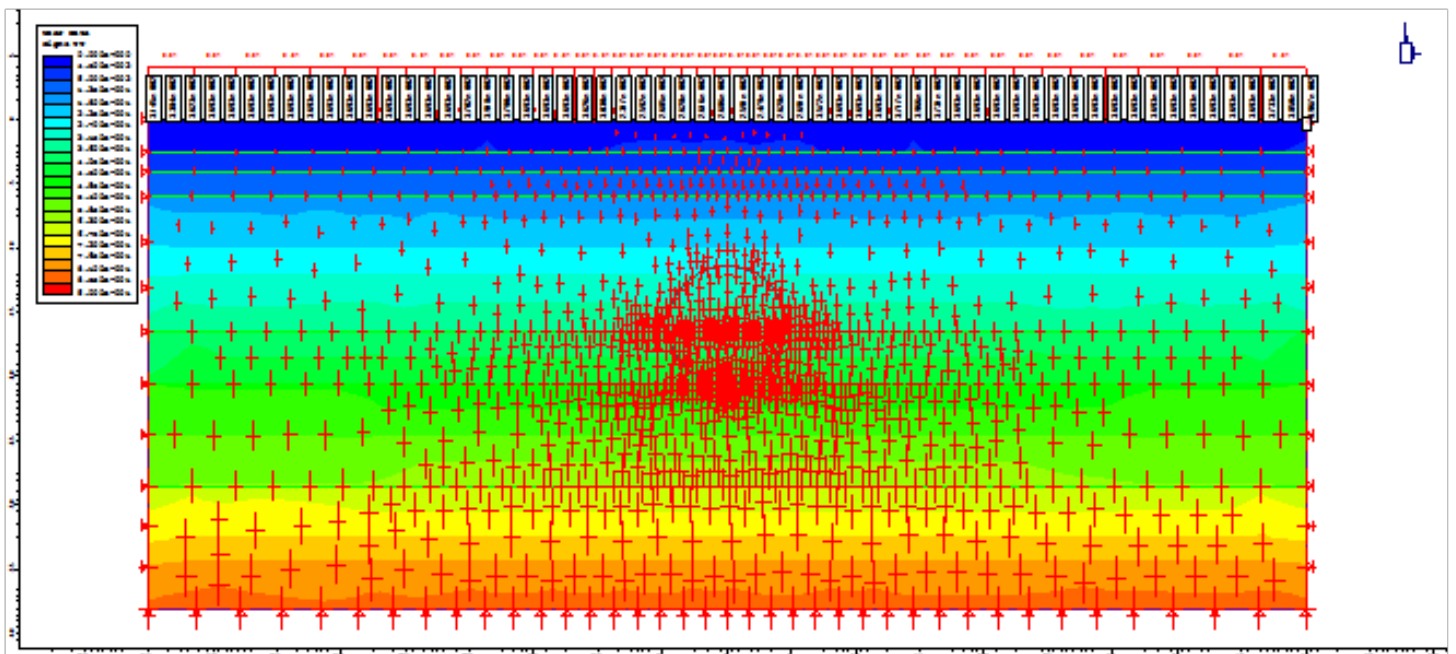
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρατεθούν όλες οι αριθμητικές αναλύσεις που έχουν γίνει στα 5 μοντέλα που δημιουργήθηκαν. Θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των αντίστοιχων σταδίων (stages) κάθε model.

7.2 Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης για τη Χ.Θ. 2+398.0 με χρήση μοντέλου Mohr – Coulomb

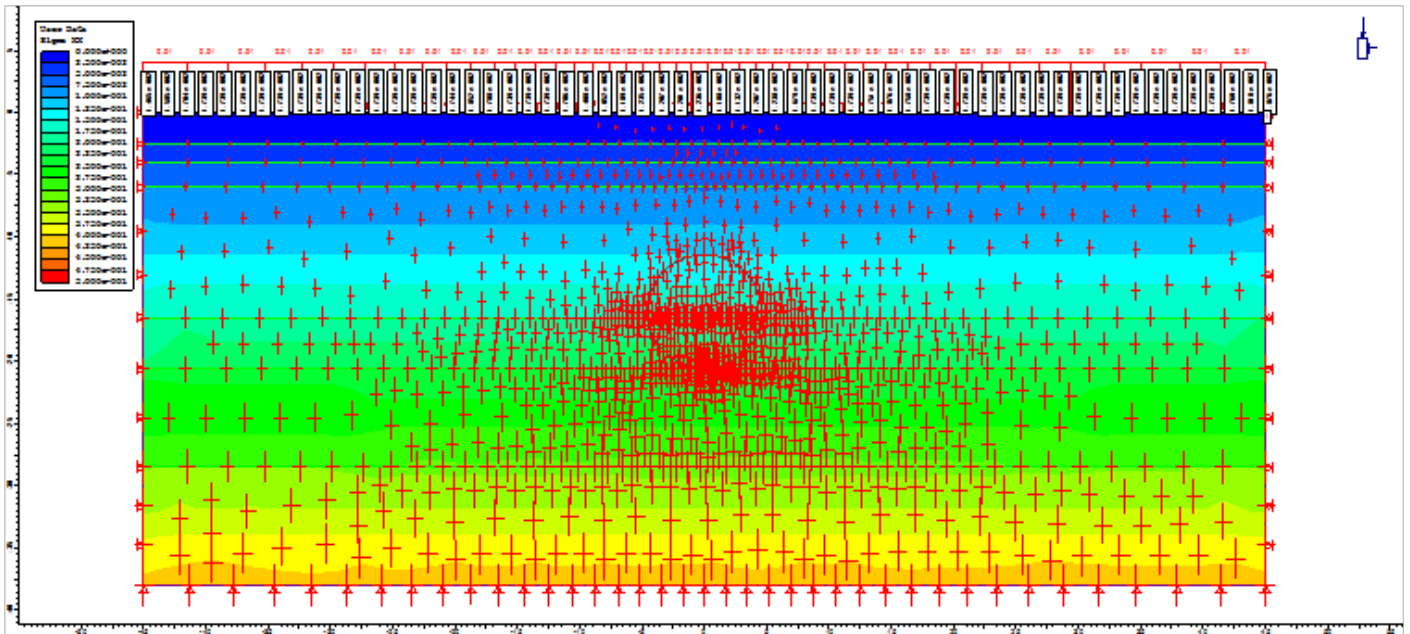
Η τομή στη Χ.Θ. 2+398.0 μελετήθηκε, αρχικά με τη χρήση του μοντέλου Mohr – Coulomb, σε πέντε διαφορετικά μοντέλα. Παρακάτω θα ακολουθήσει η ανάλυση των αποτελεσμάτων σε αυτά τα πέντε διαφορετικά μοντέλα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

----- Model 1

Για το stage 1, το οποίο και είναι κοινό και στα 5 μοντέλα, εξετάστηκαν αρχικά τα μεγέθη και οι τροχιές των τάσεων στον άξονα yy και στον άξονα xx . Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εικόνες:

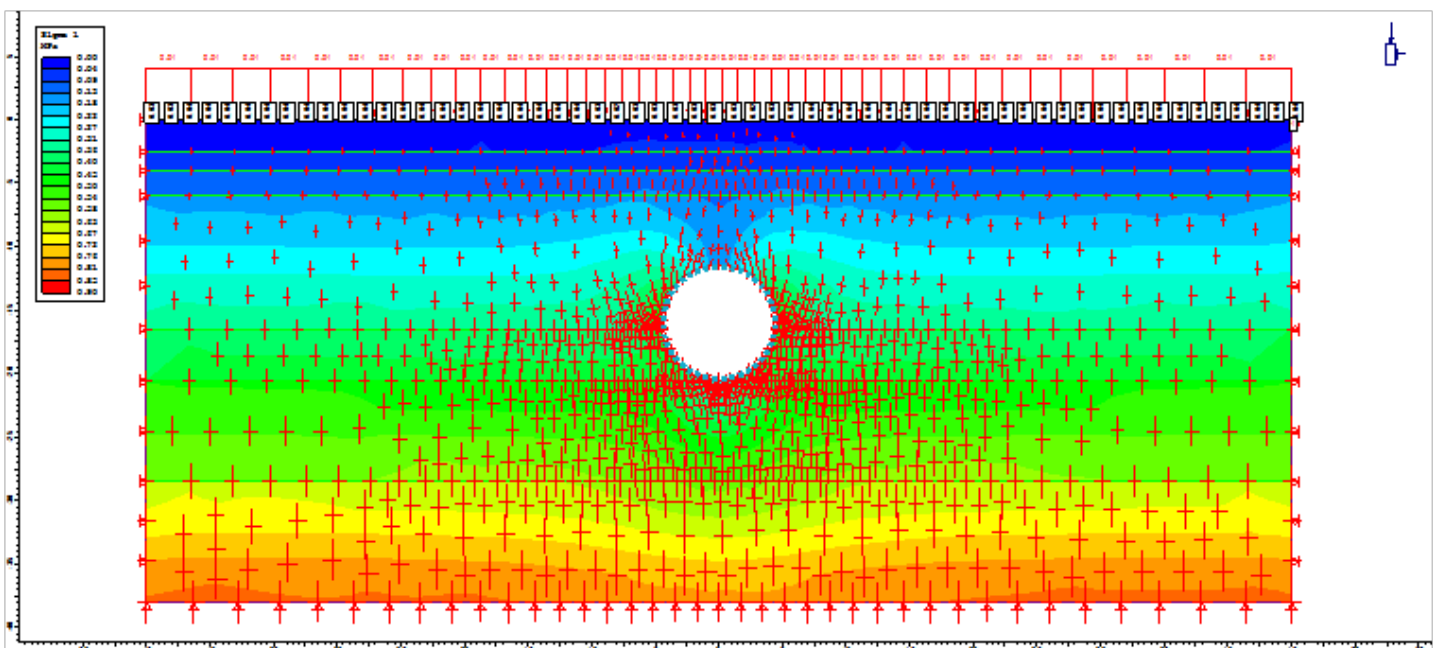


Εικόνα 7.1: stage 1 – s_{yy} & stress trajectories

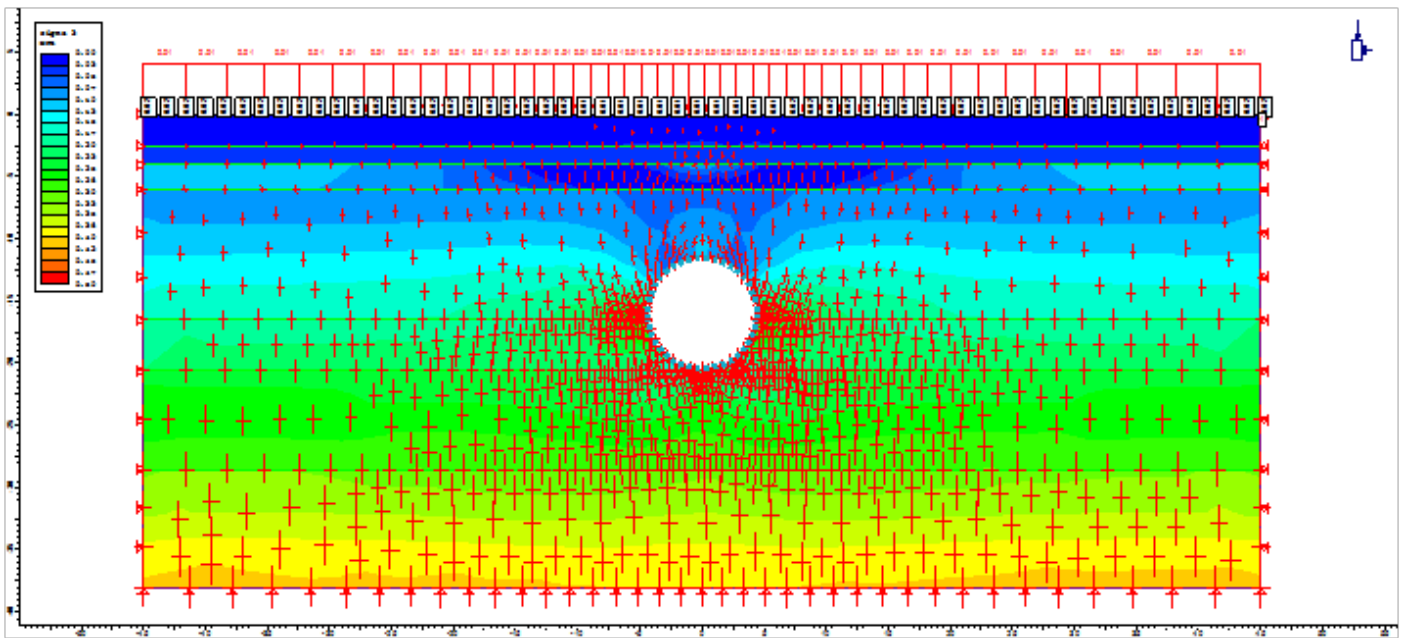


Εικόνα 7.2: stage 1 – s_{xx} & stress trajectories

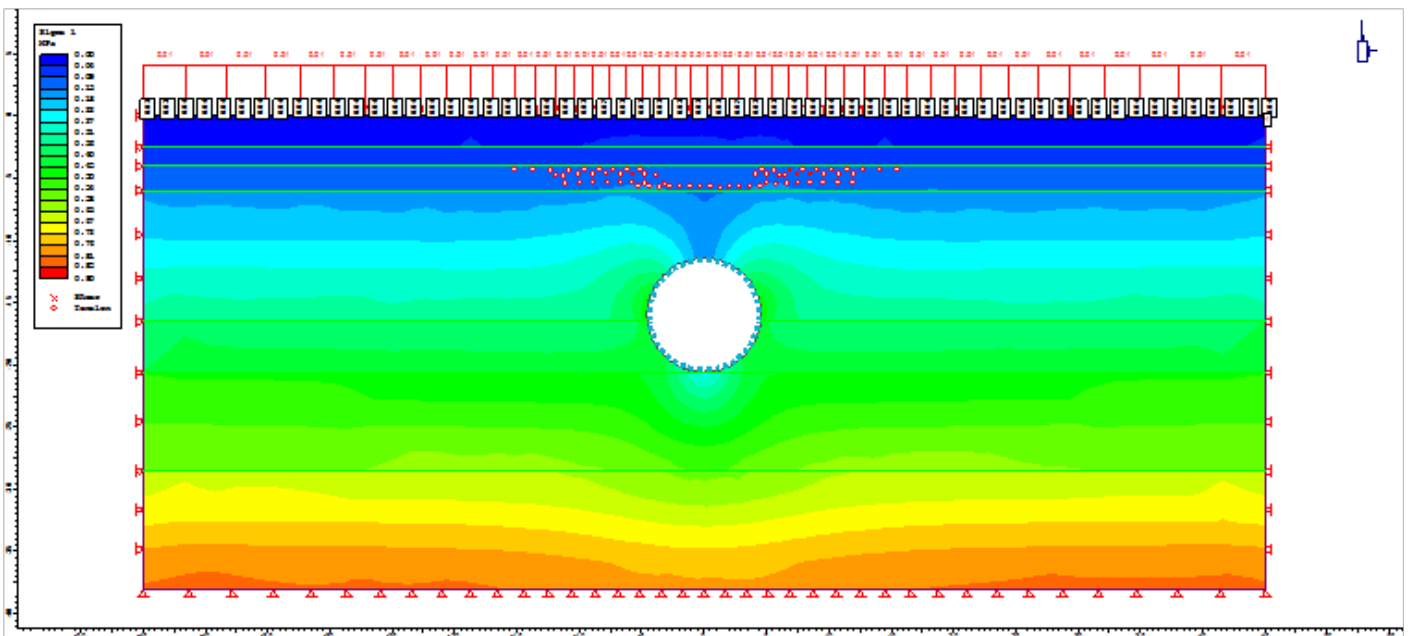
Για το stage 2, πραγματοποιήθηκε εκσκαφή της σήραγγας και η τοποθέτηση ενός liner σε αυτό. Εξετάσθηκαν τα μεγέθη και οι τροχιές των κυρίων τάσεων σ_1 και σ_3 , καθώς και τα στοιχεία που διέρρευσαν μαζί με την κύρια τάση σ_1 . Επίσης, υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1.



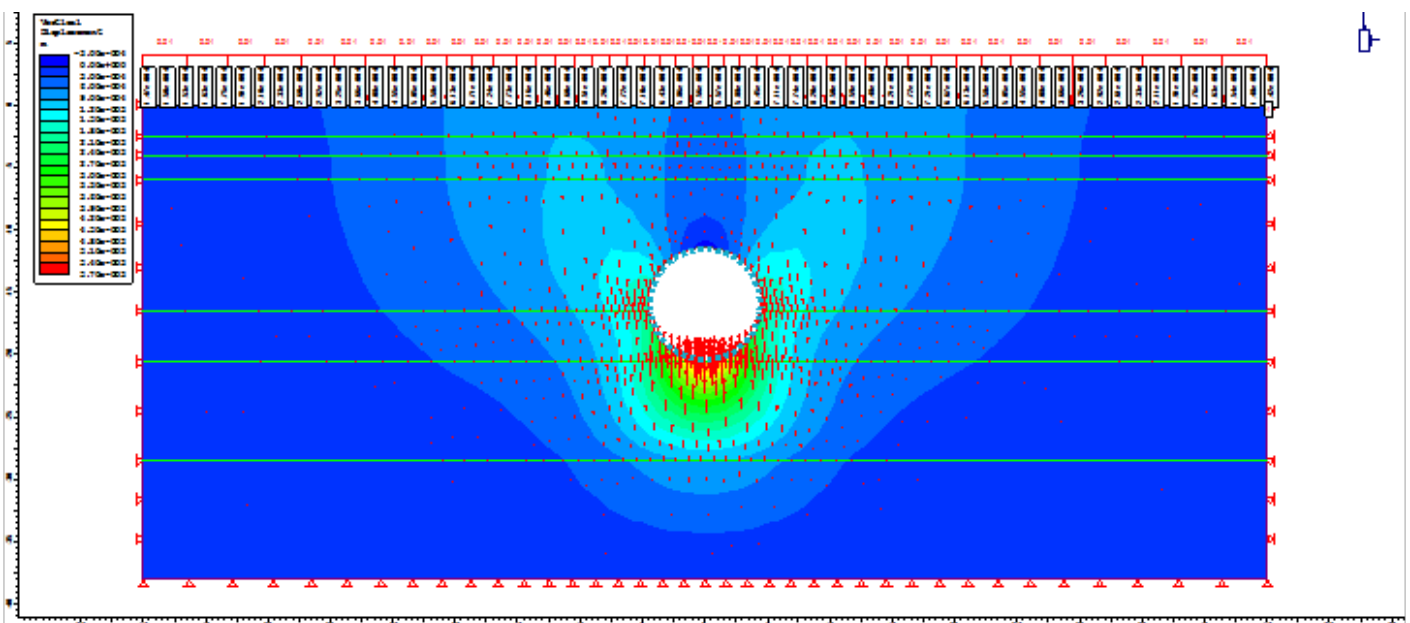
Εικόνα 7.3: stage 2 – σ_1 & stress trajectories



Εικόνα 7.4: stage 2 – sigma 3 & stress trajectories



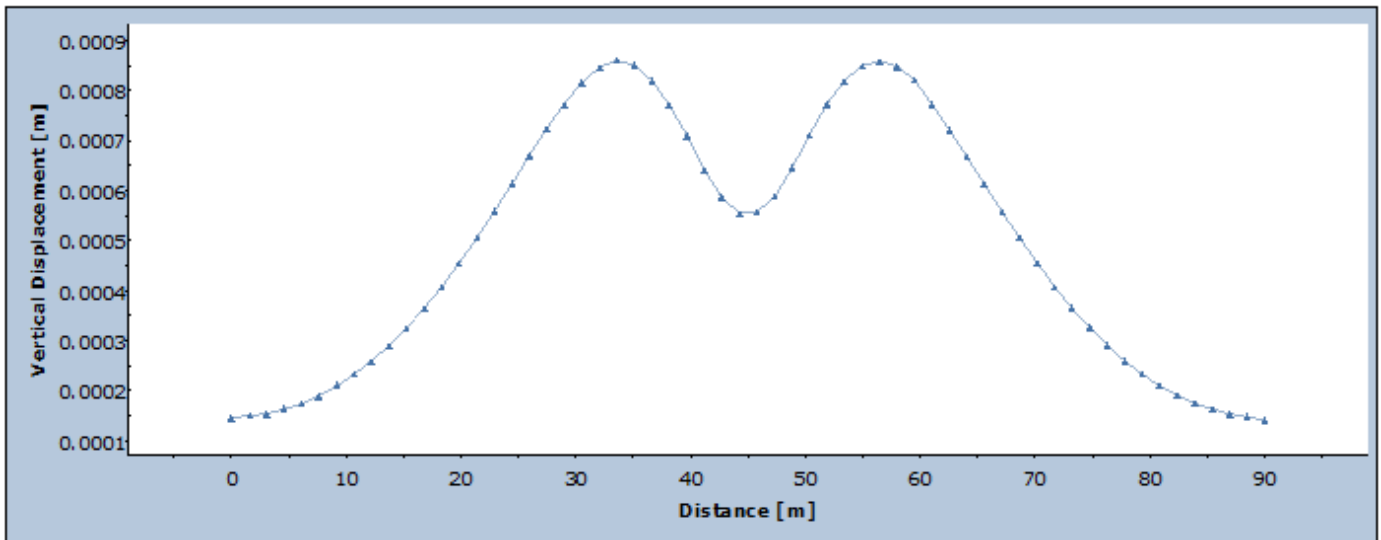
Εικόνα 7.5: stage 2 – sigma 1 & yielded elements



Εικόνα 7.6: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors

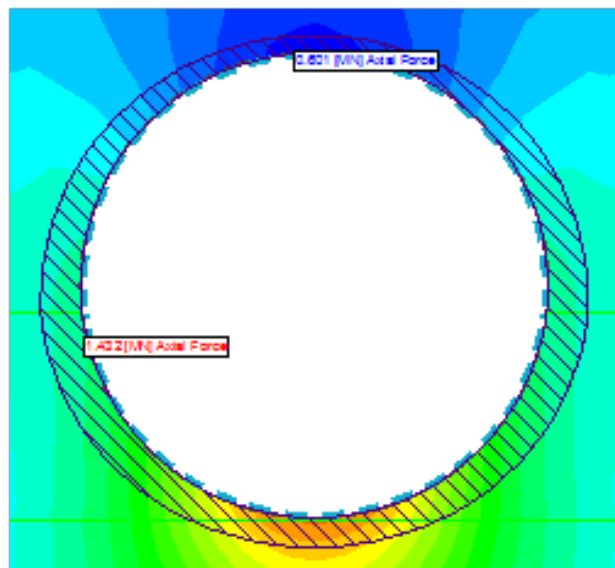
Έπειτα, μεταφέρθηκαν σε γράφημα οι υπολογισθείσες καθιζήσεις ώστε να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο stage 2, υπολογίστηκαν η αξονική δύναμη, η ροπή κάμψης και η διατμητική δύναμη στο liner.

Vertical Displacement

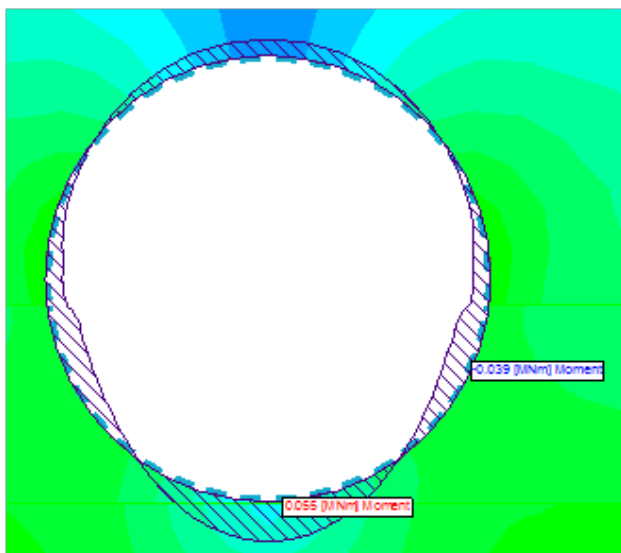


Query #1 Stage 2 - Stage 1

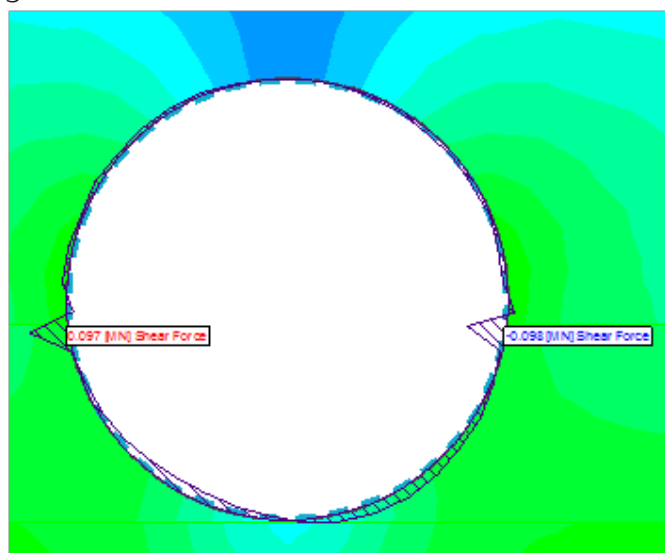
Εικόνα 7.7: Υπολογισθείσες καθιζήσεις στο stage 2 (reference stage = stage 1)



Εικόνα 7.8: stage 2 - axial force στο liner



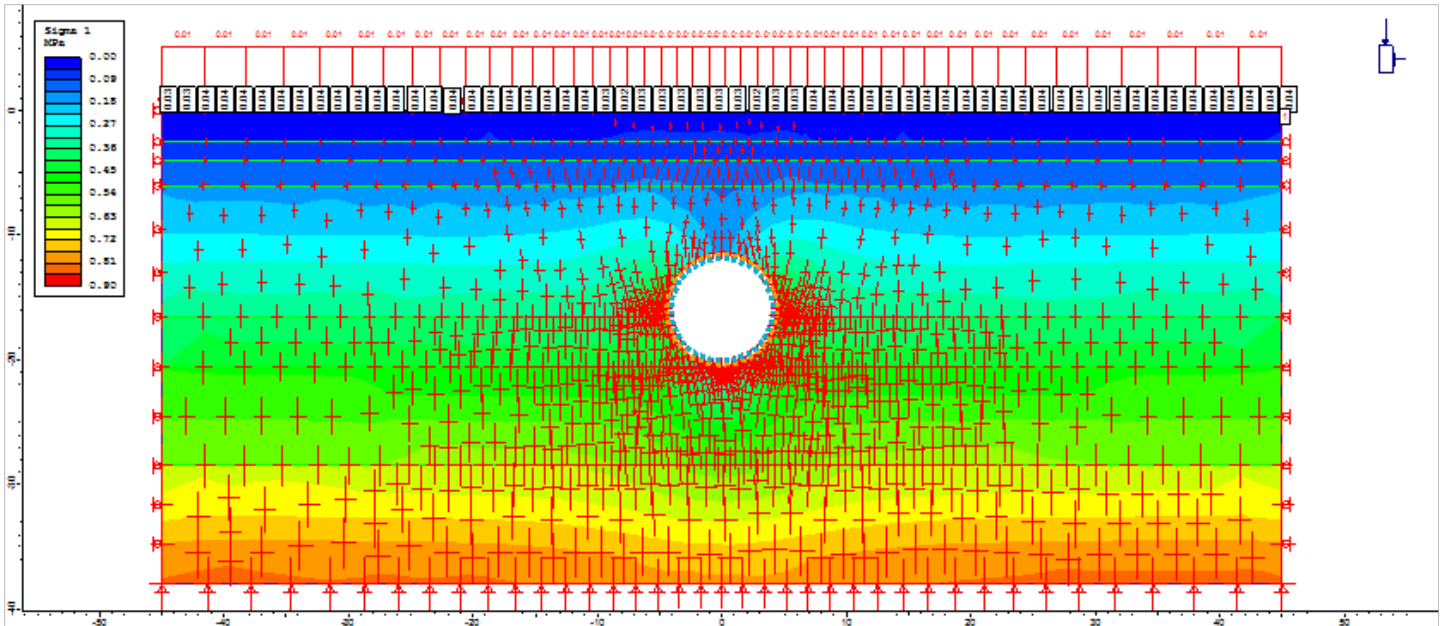
Εικόνα 7.9: stage 2 - bending moment στο liner



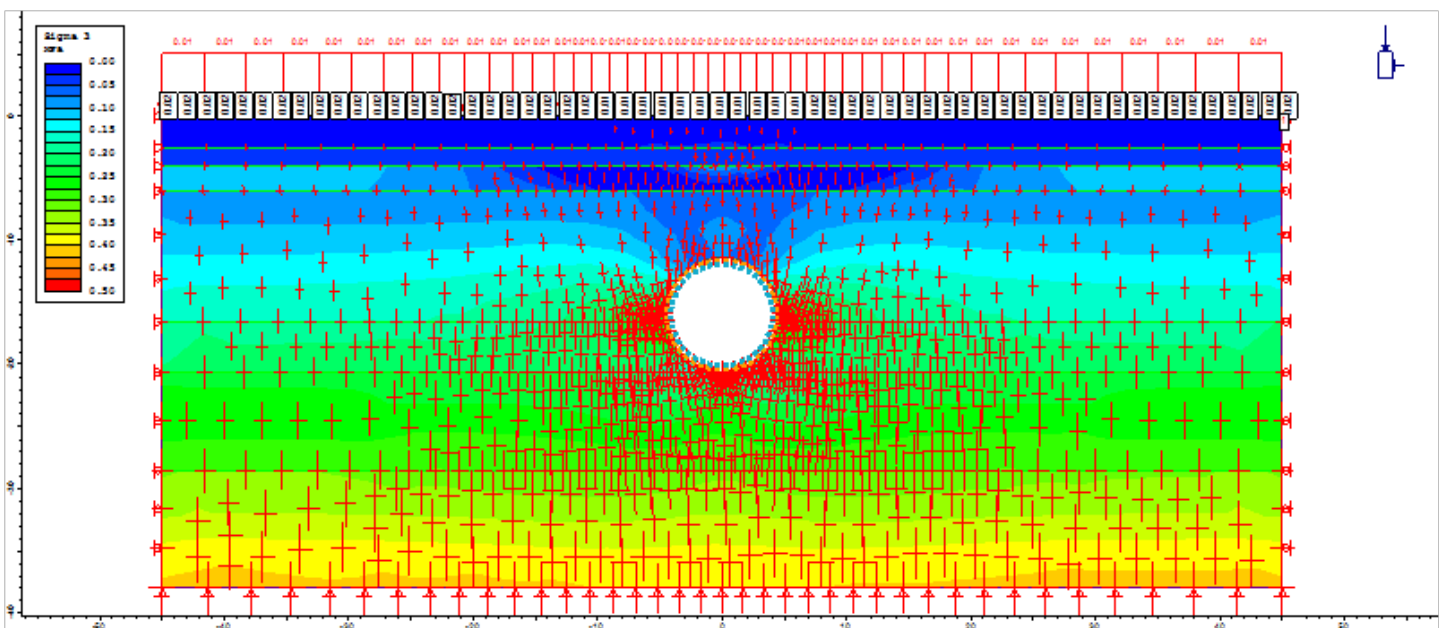
Εικόνα 7.10: stage 2 - shear force στο liner

----- *Model 2*

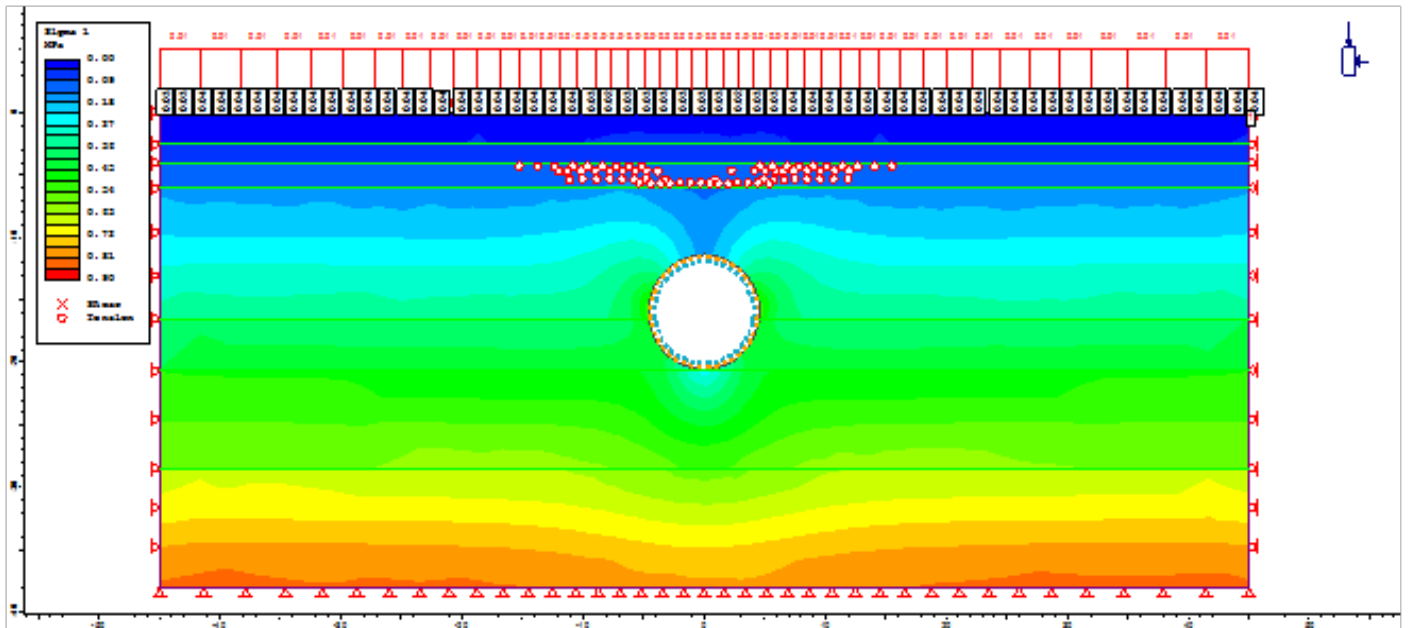
Για το stage 1 δεν υπήρξε κάτι διαφορετικό, καθώς είναι όμοιο με αυτό του model 1. Στο stage 2 πραγματοποιήθηκε εκσκαφή της σήραγγας και η τοποθέτηση ενός interface μεταξύ του liner και της γεωμάζας. Υπολογίστηκαν οι τροχιές των κυρίων τάσεων sigma 1 και sigma 3, καθώς και τα στοιχεία που διέρρευσαν μαζί με τη sigma 1. Επίσης, υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1.



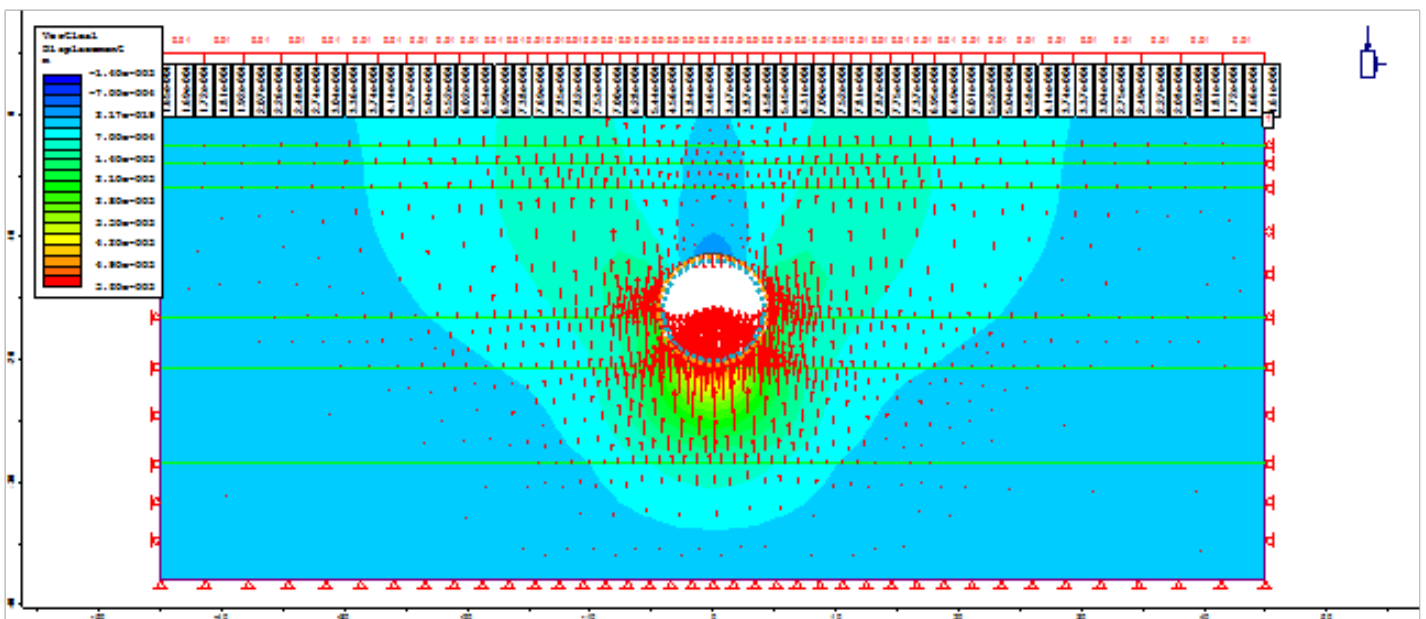
Εικόνα 7.11: stage 2 – sigma 1 & stress trajectories



Εικόνα 7.12: stage 2 – sigma 3 & stress trajectories

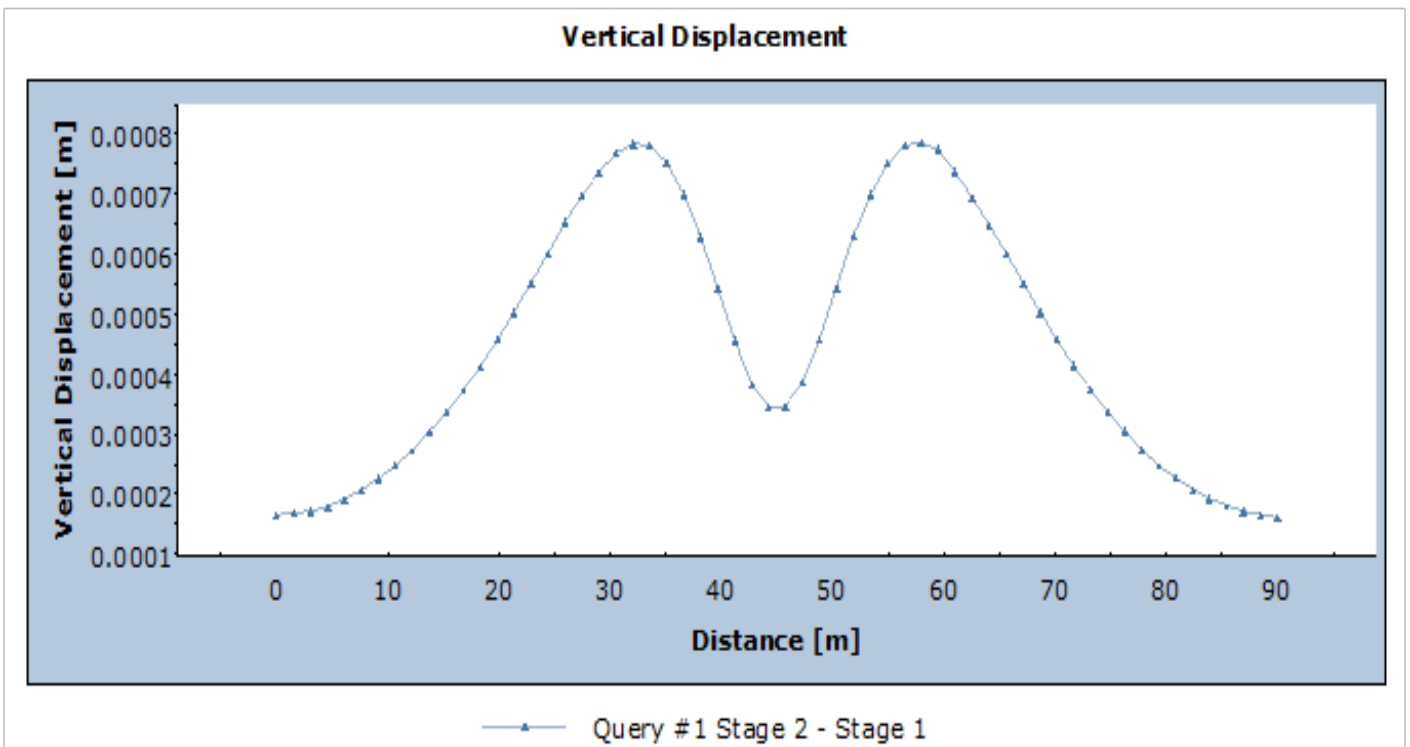


Εικόνα 7.13: stage 2 – sigma 1 & yielded elements

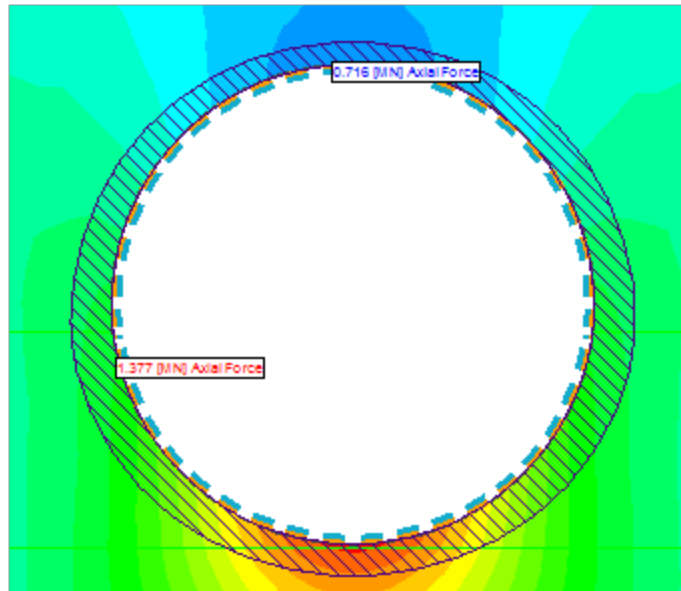


Εικόνα 7.14: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors

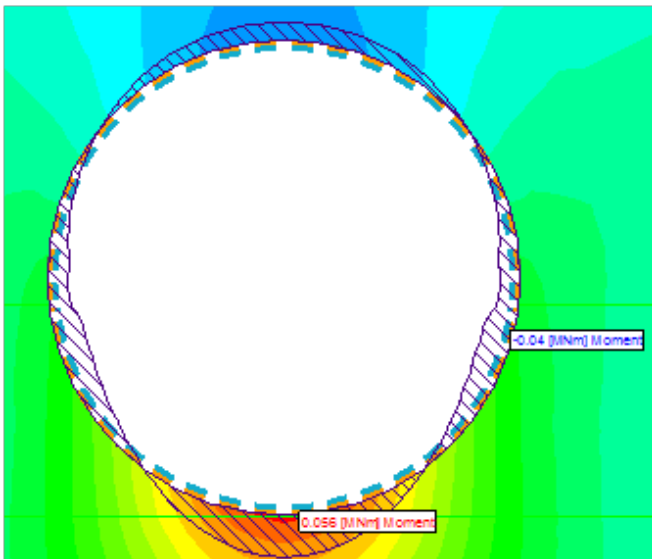
Έπειτα, μεταφέρθηκαν σε γράφημα οι υπολογισθείσες καθιζήσεις ώστε να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο stage 2, υπολογίστηκαν η αξονική δύναμη, η ροπή κάμψης και η διατμητική δύναμη στο liner.



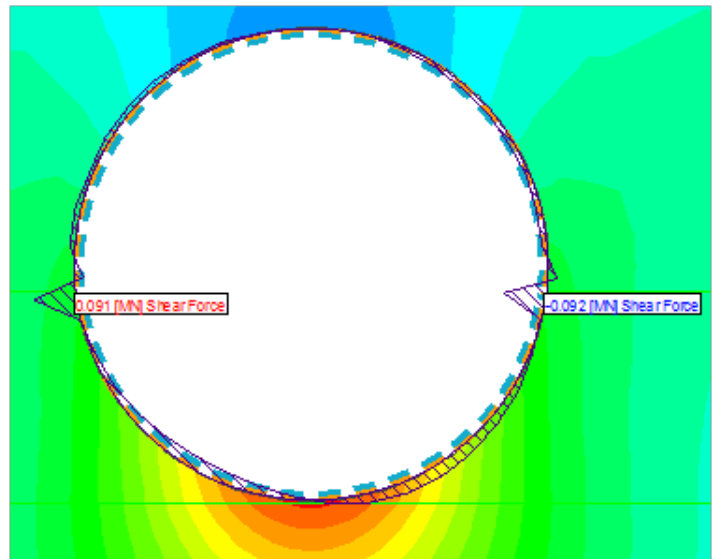
Εικόνα 7.15: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στο stage 2 (reference stage = stage 1)



Εικόνα 7.16: stage 2 - axial force στο liner



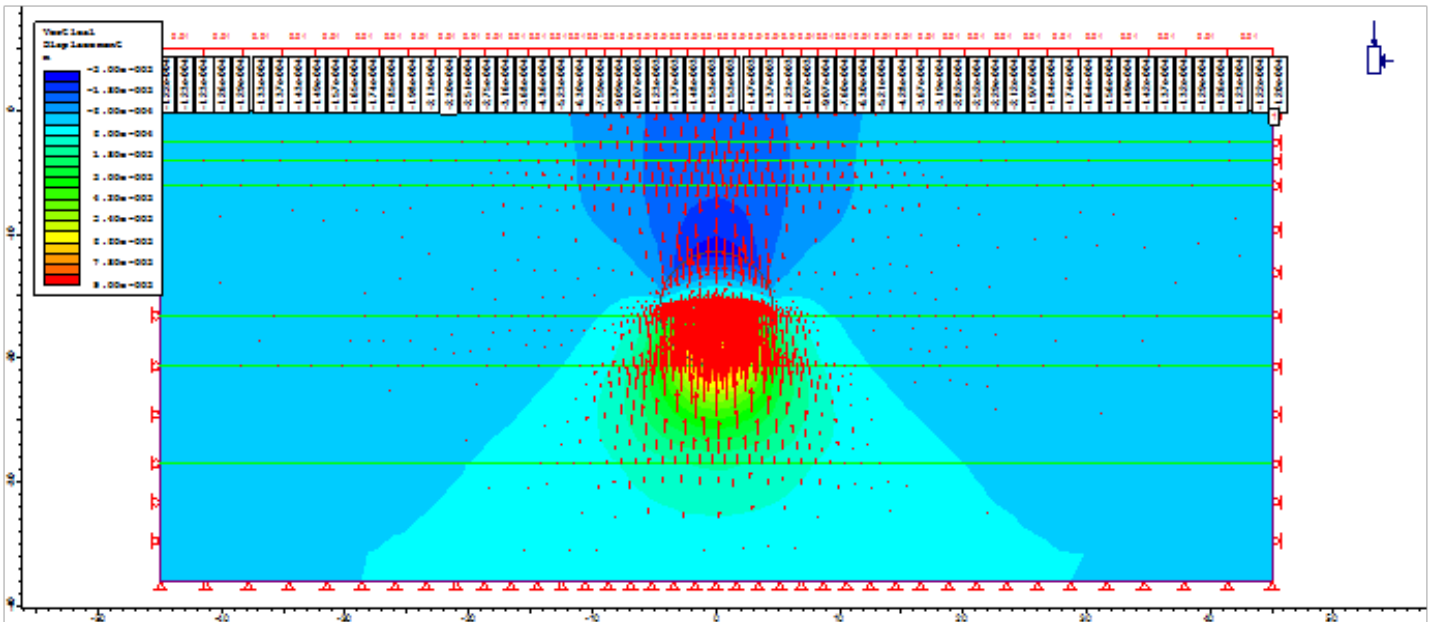
Εικόνα 7.17: stage 2 - bending moment στο liner



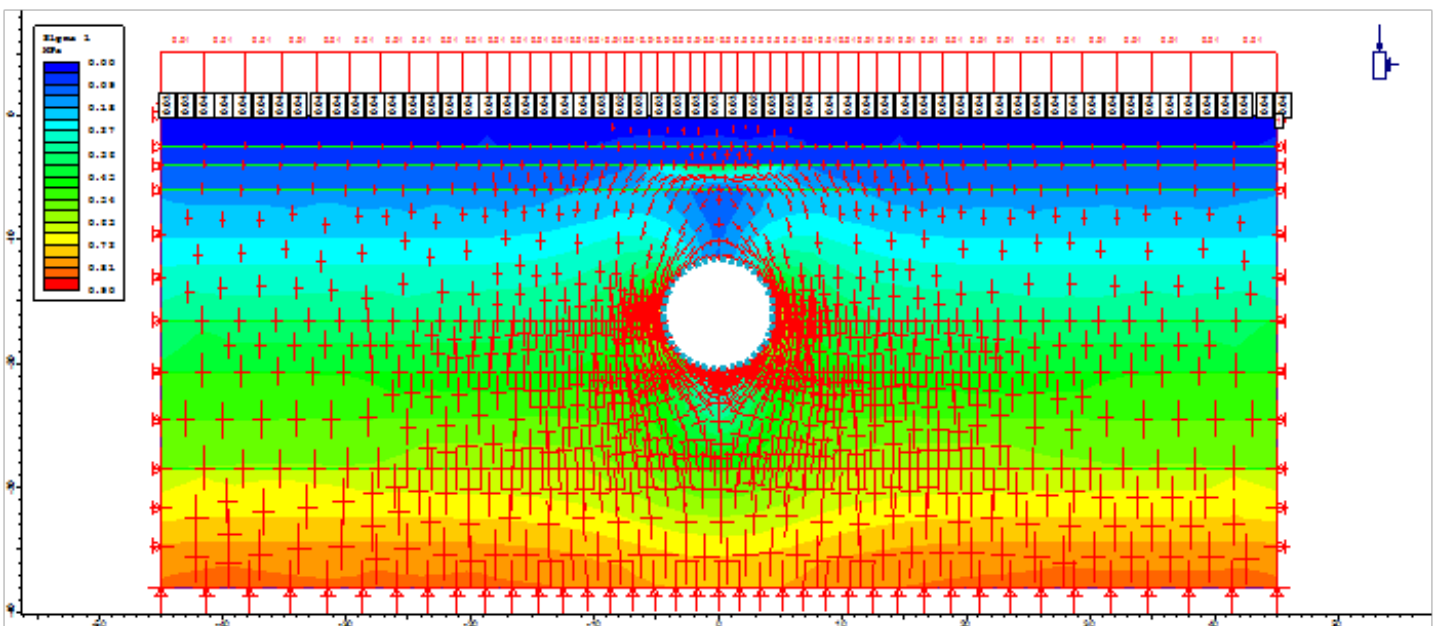
Εικόνα 7.18: stage 2 - shear force στο liner

Model 3

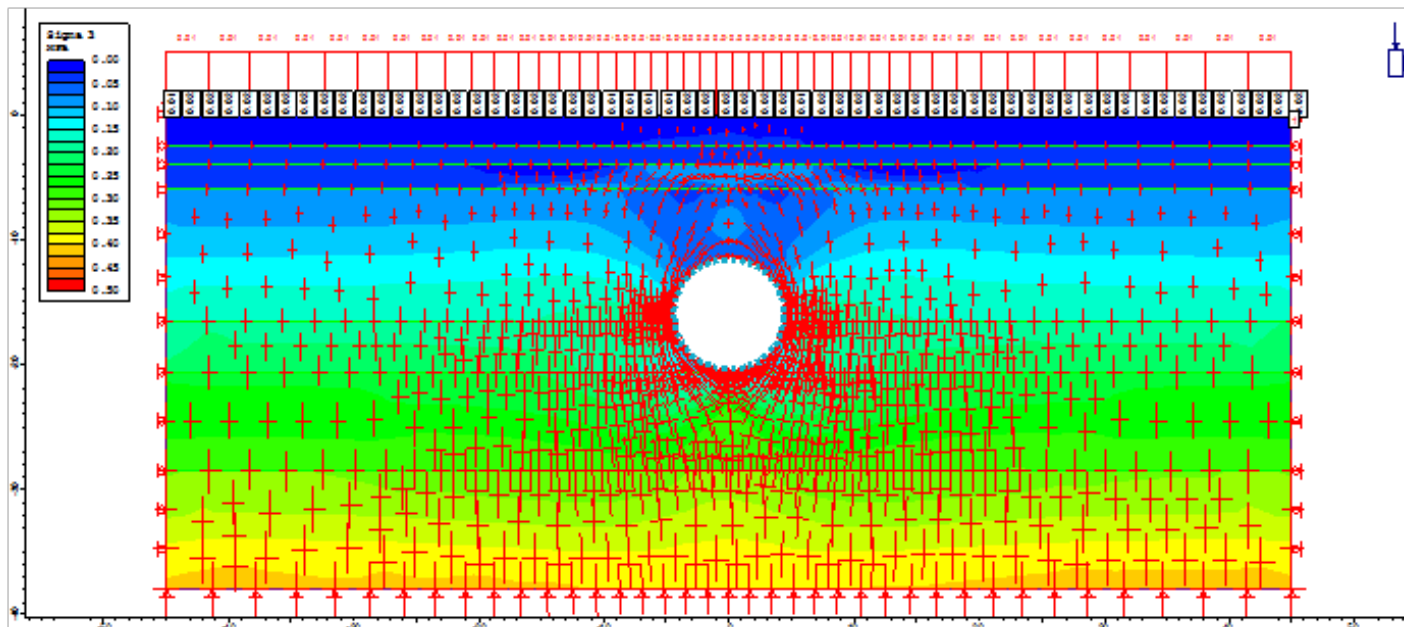
Για το stage 1 δεν υπήρξε κάτι διαφορετικό, καθώς είναι όμοιο με αυτό του model 1. Στο stage 2 πραγματοποιήθηκε αποτόνωση των υλικών μέσα στη σήραγγα. Υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1. Στο stage 3 υπήρξε εκσκαφή της σήραγγας και τοποθέτηση Liner. Υπολογίστηκαν οι τροχιές των κυρίων τάσεων σ_1 και σ_3 , καθώς και τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει μαζί με τη σ_1 . Ομοίως με το stage 2, υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1.



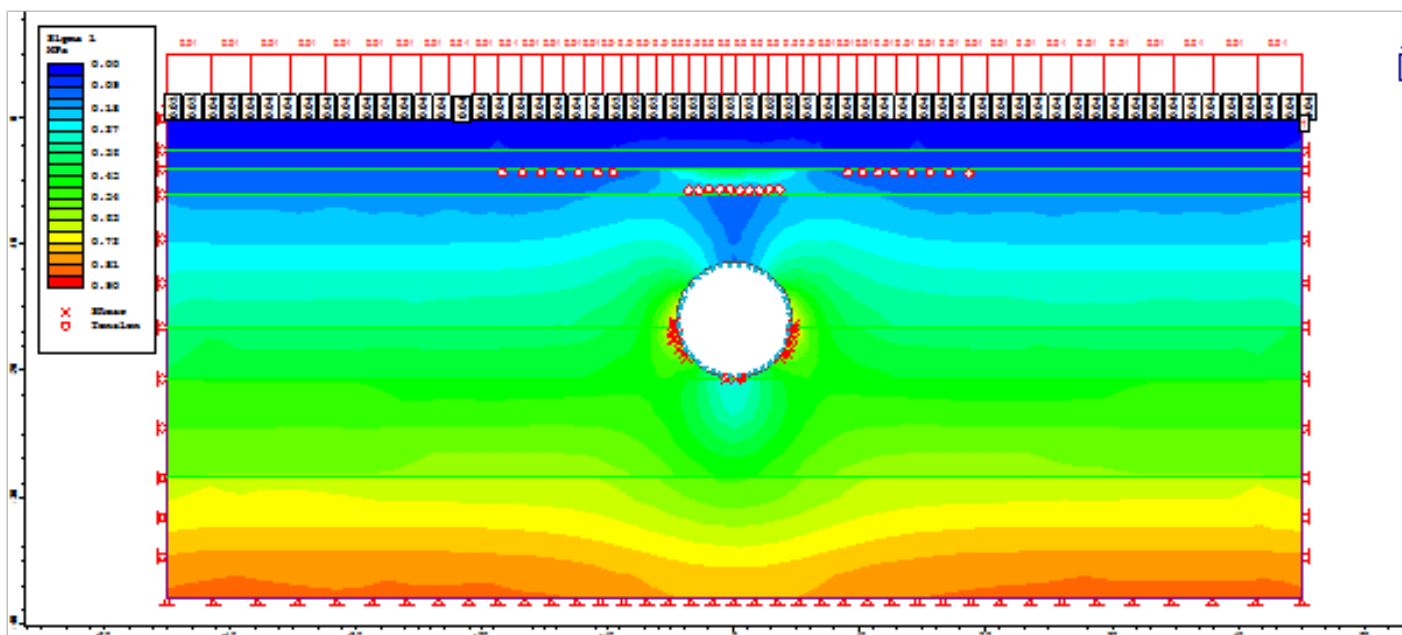
Εικόνα 7.19: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors



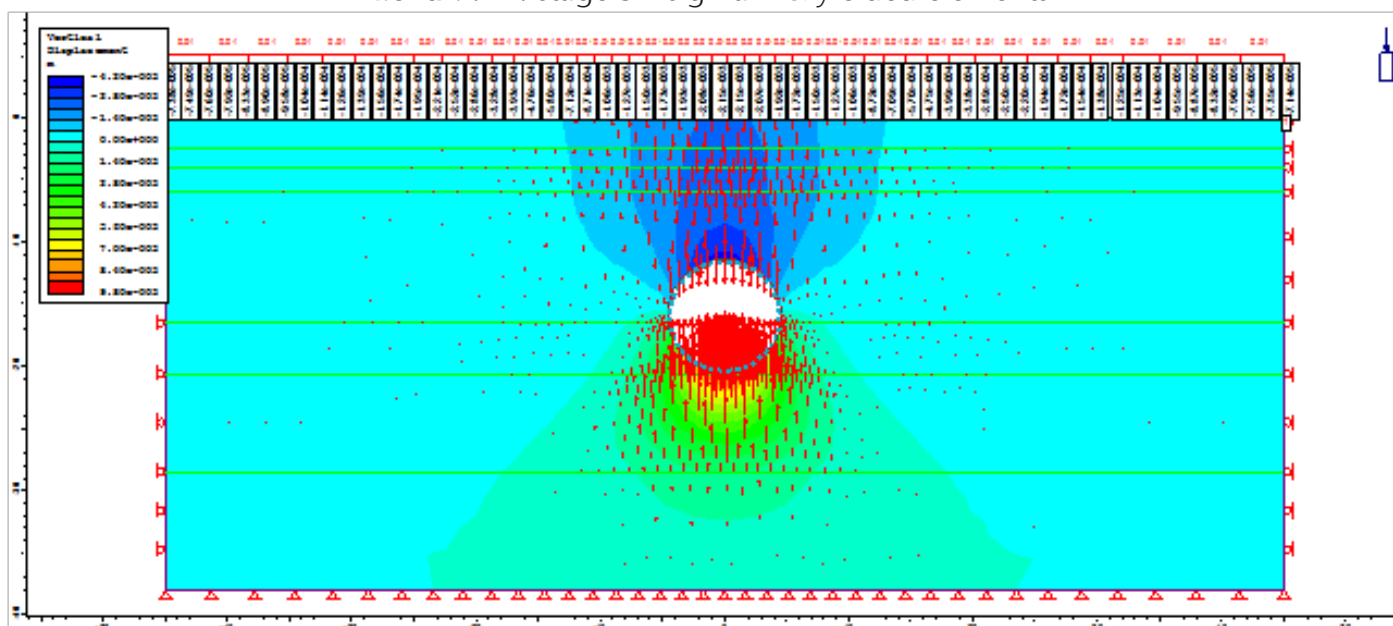
Εικόνα 7.20: stage 3 – sigma 1 & stress trajectories



Εικόνα 7.21: stage 3 – sigma 3 & stress trajectories

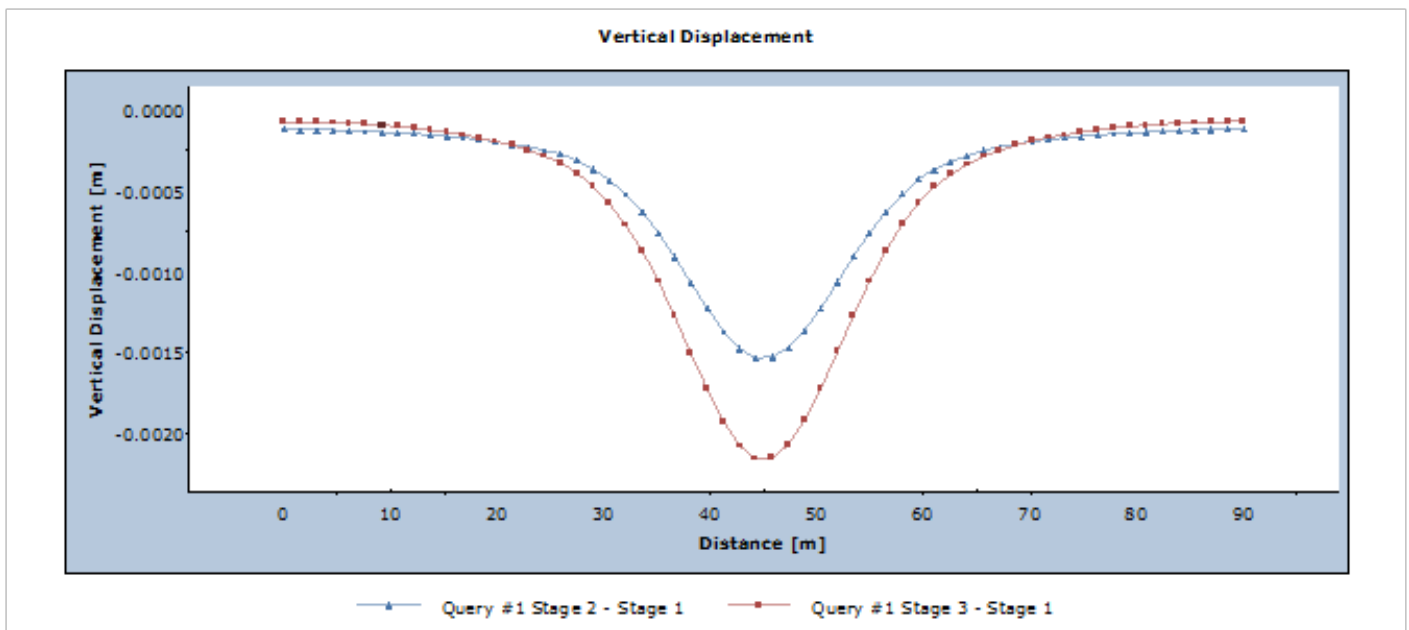


Εικόνα 7.22: stage 3 – sigma 1 & yielded elements

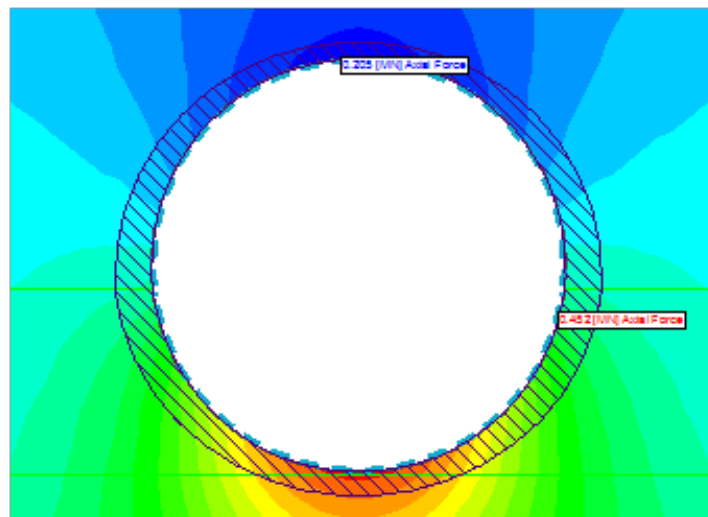


Εικόνα 7.23: stage 3 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors

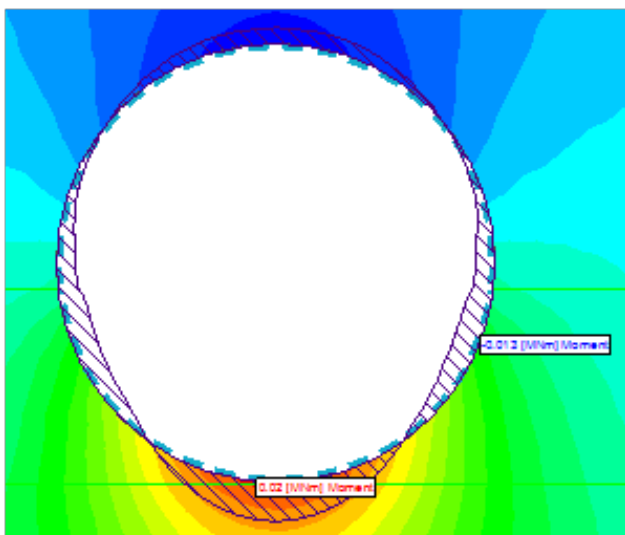
Έπειτα, μεταφέρθηκαν σε γράφημα οι υπολογισθείσες καθιζήσεις των stage 2 και 3, ώστε να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο stage 3, υπολογίστηκαν η αξονική δύναμη, η ροπή κάμψης και η διατμητική δύναμη στο liner.



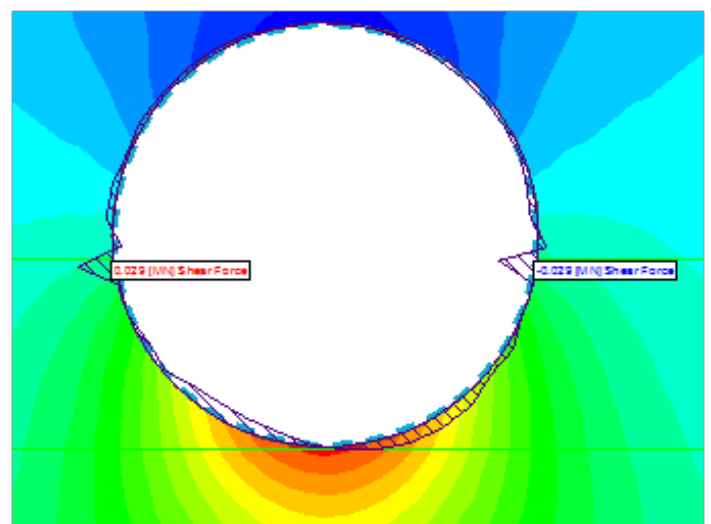
Εικόνα 7.24: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στα stage 2 και 3 (reference stage = stage 1)



Εικόνα 7.25: stage 3 - axial force στο liner



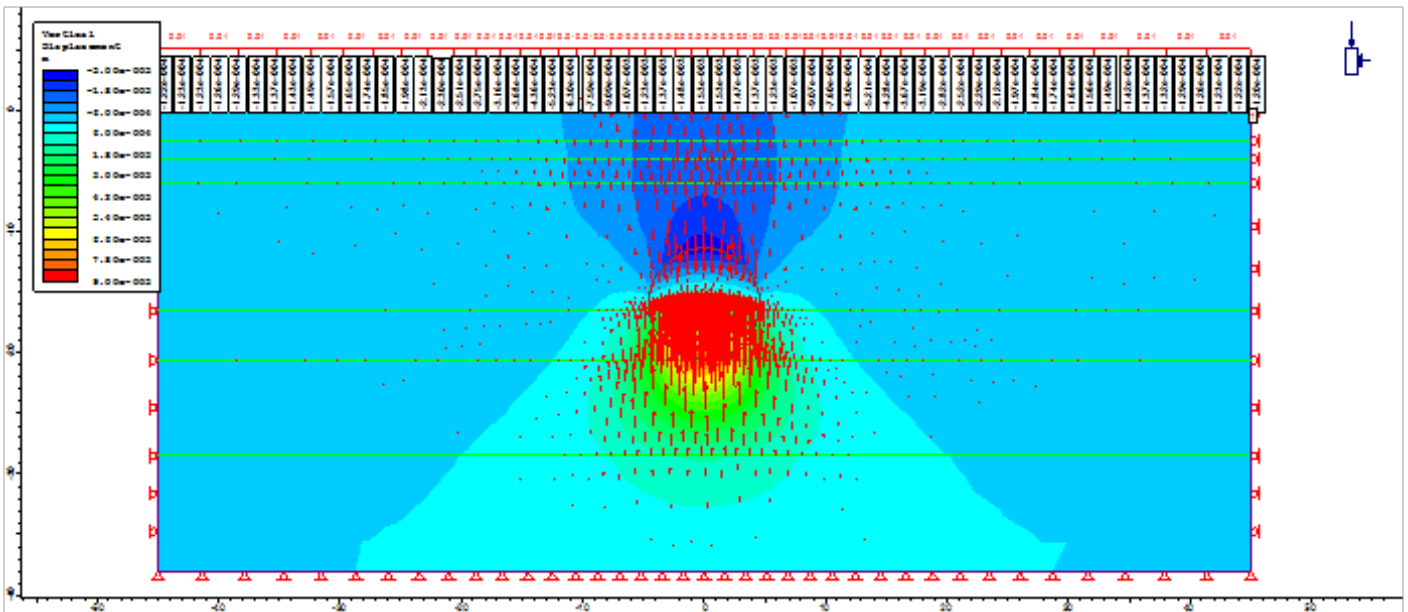
Εικόνα 7.26: stage 3 - bending moment στο liner



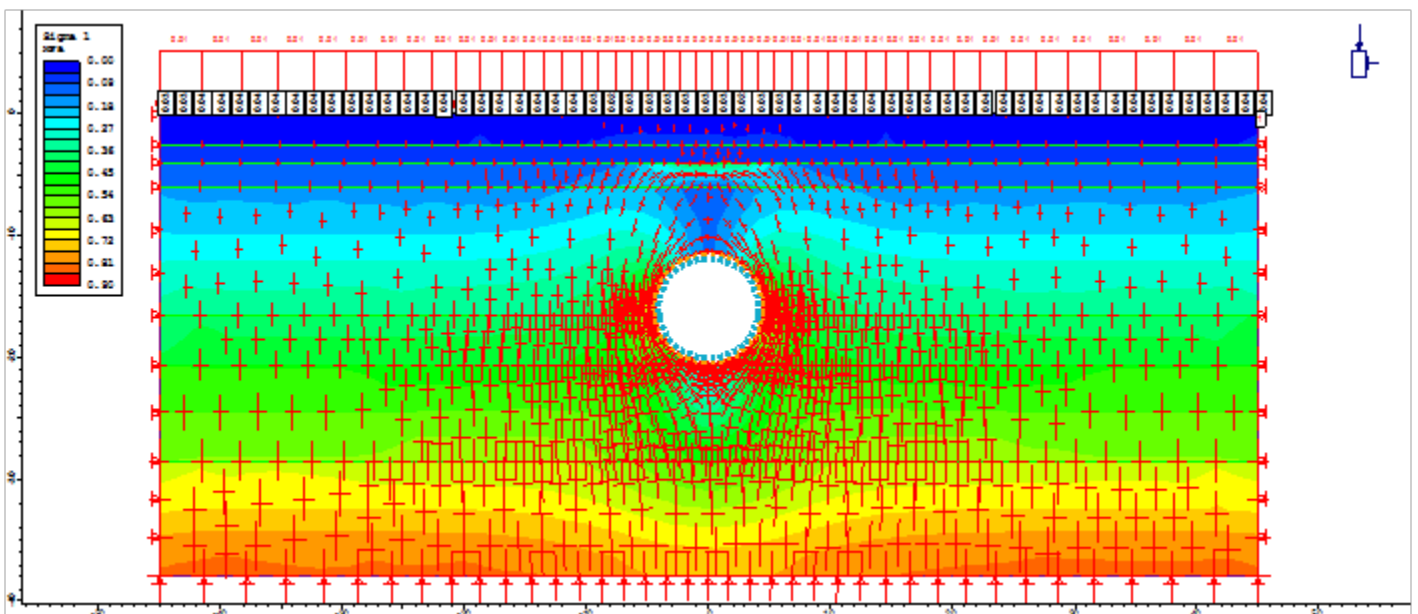
Εικόνα 7.27: stage 3 - shear force στο liner

Model 4

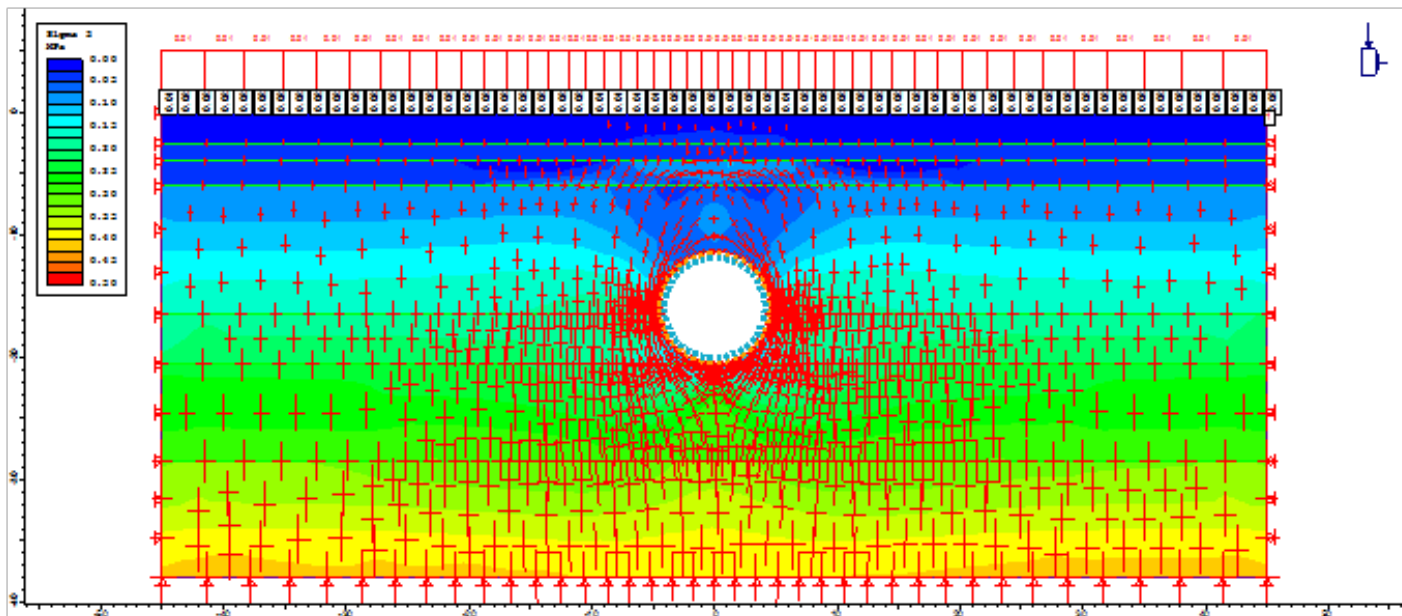
Για το stage 1 δεν υπήρξε κάτι διαφορετικό, καθώς είναι όμοιο με αυτό του model 1. Στο stage 2 πραγματοποιήθηκε αποτόνωση των υλικών μέσα στη σήραγγα. Υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1. Στο stage 3 υπήρξε εκσκαφή της σήραγγας και τοποθέτηση liner με interface. Υπολογίστηκαν οι τροχιές των τάσεων των σ_1 και σ_3 , καθώς και τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει της σ_1 . Ομοίως με το stage 2, υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1.



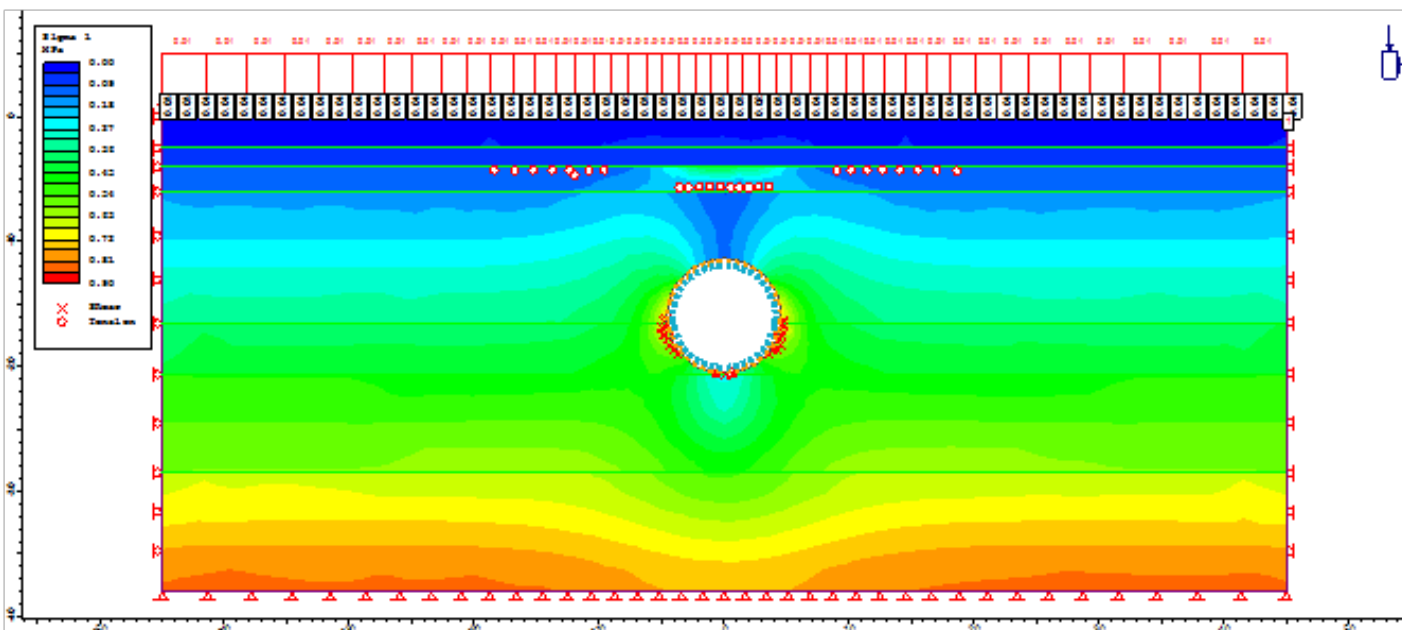
Εικόνα 7.28: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors



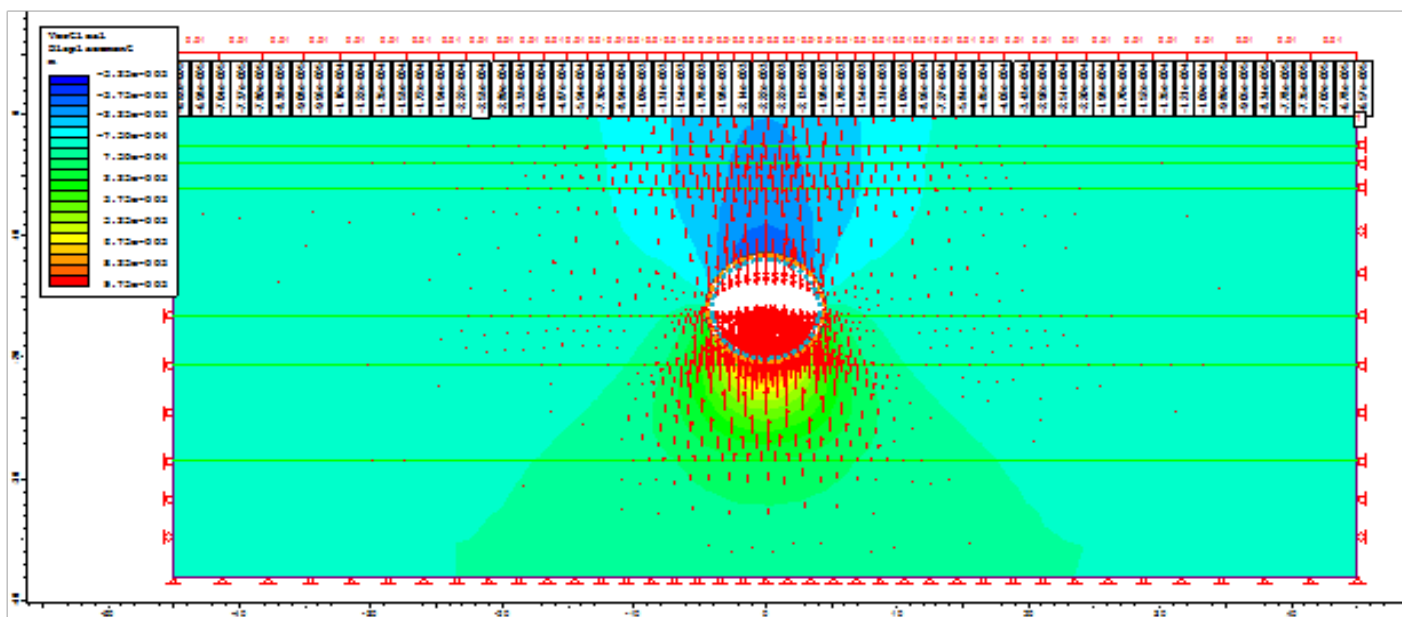
Εικόνα 7.29: stage 3 – sigma 1 & stress trajectories



Εικόνα 7.30: stage 3 – sigma 3 & stress trajectories



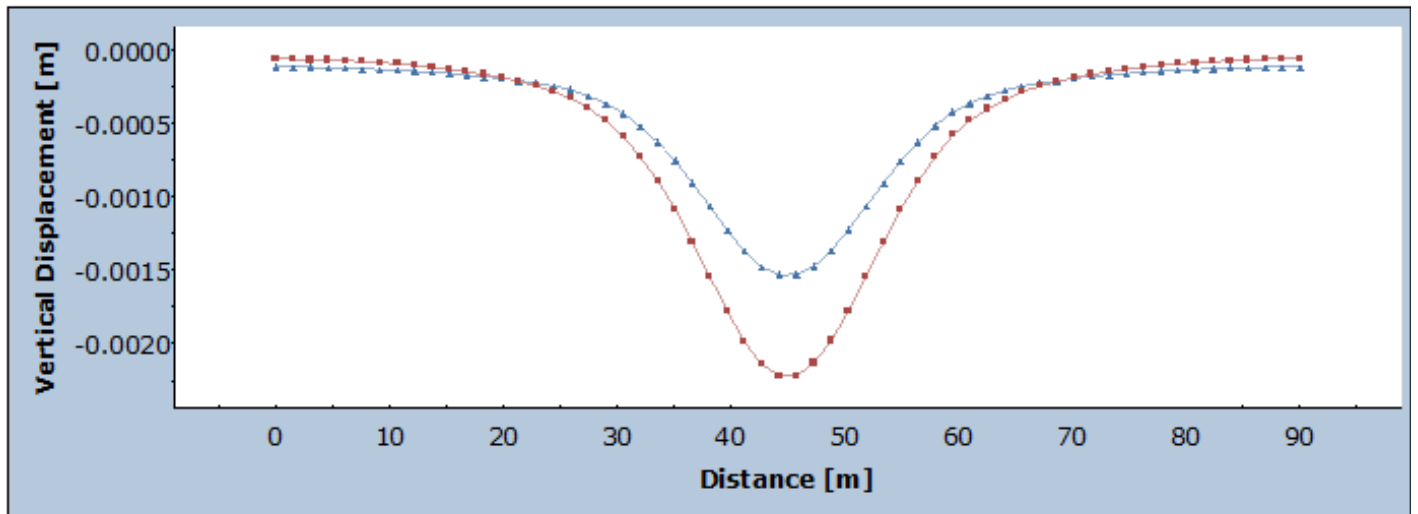
Εικόνα 7.31: stage 3 – sigma 1 & yielded elements



Εικόνα 7.32: stage 3 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors

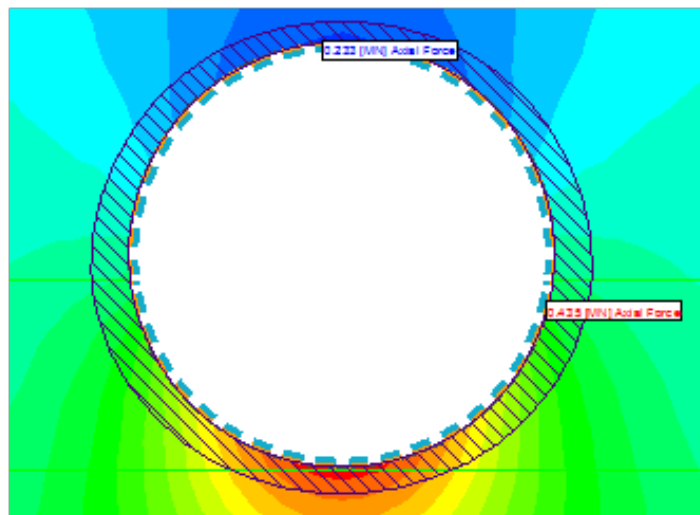
Έπειτα, μεταφέρθηκαν σε γράφημα οι κατακόρυφες καθιζήσεις των stage 2 και 3, ώστε να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο stage 3, υπολογίστηκαν η αξονική δύναμη, η ροπή κάμψης και η διατμητική δύναμη στο liner.

Vertical Displacement

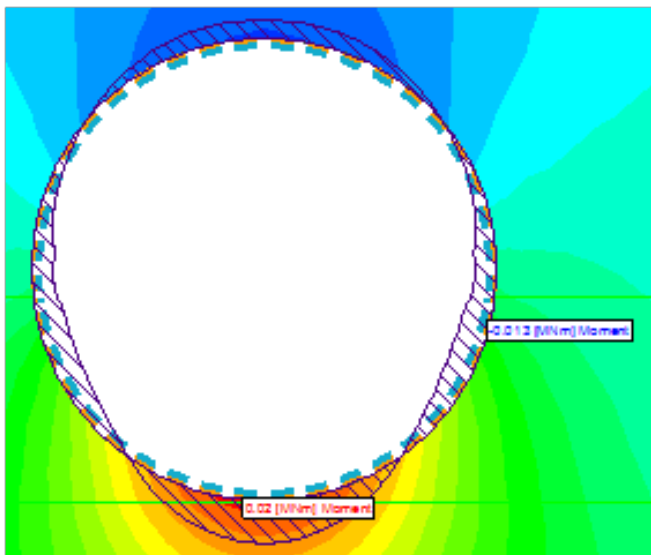


—▲— Query #1 Stage 2 - Stage 1 —■— Query #1 Stage 3 - Stage 1

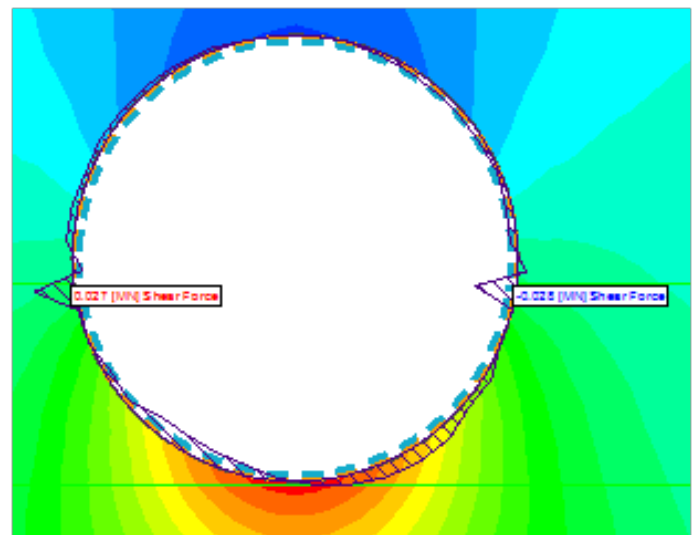
Εικόνα 7.33: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στα stage 2 και 3 (reference stage = stage 1)



Εικόνα 7.34: stage 3 - axial force στο liner



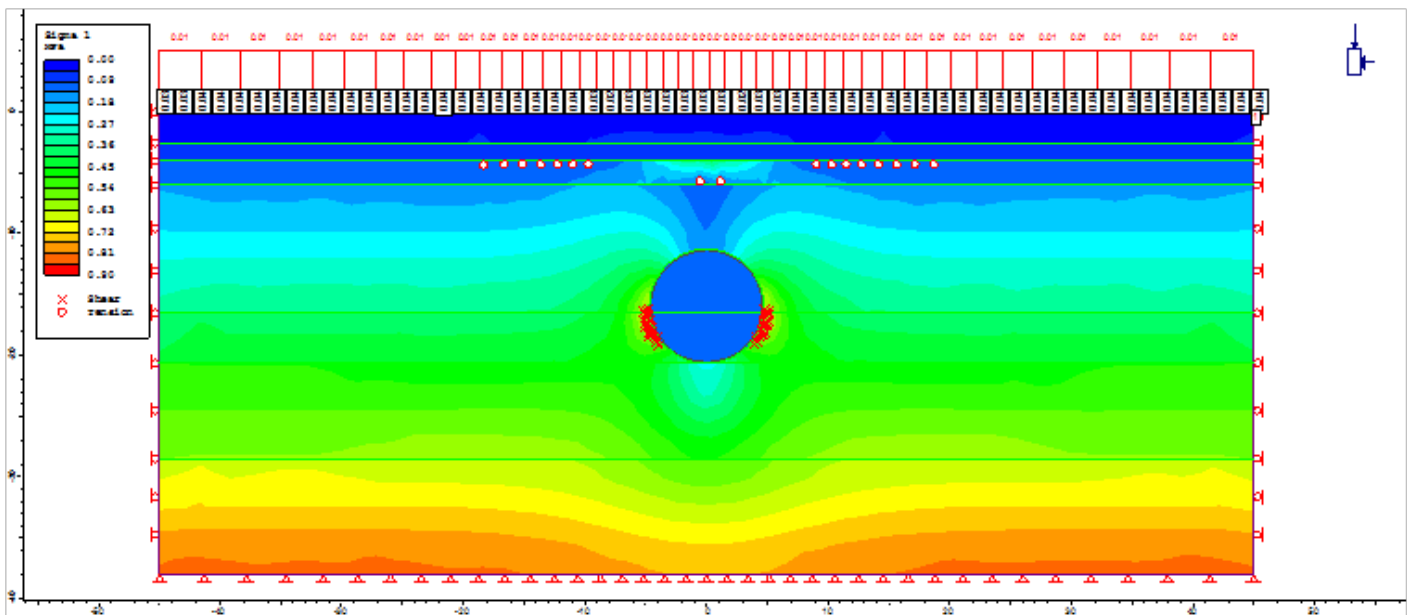
Εικόνα 7.35: stage 3 - bending moment στο liner



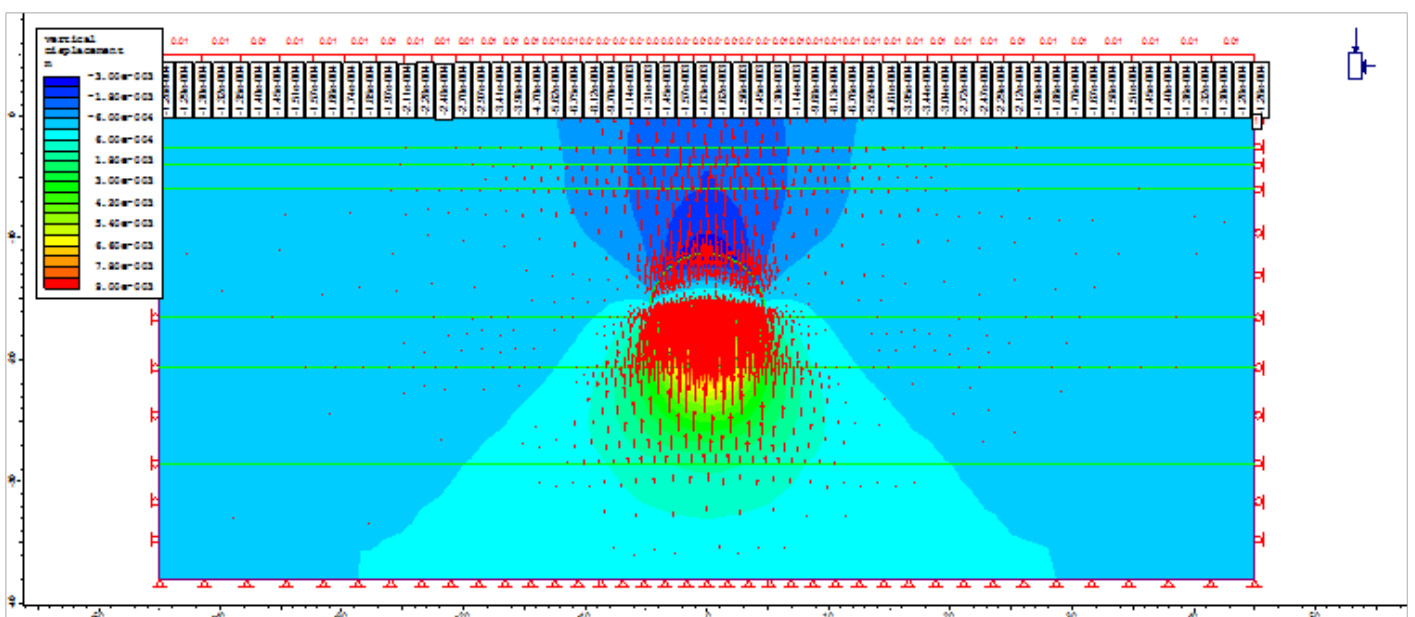
Εικόνα 7.36: stage 3 - shear force στο liner

----- Model 5

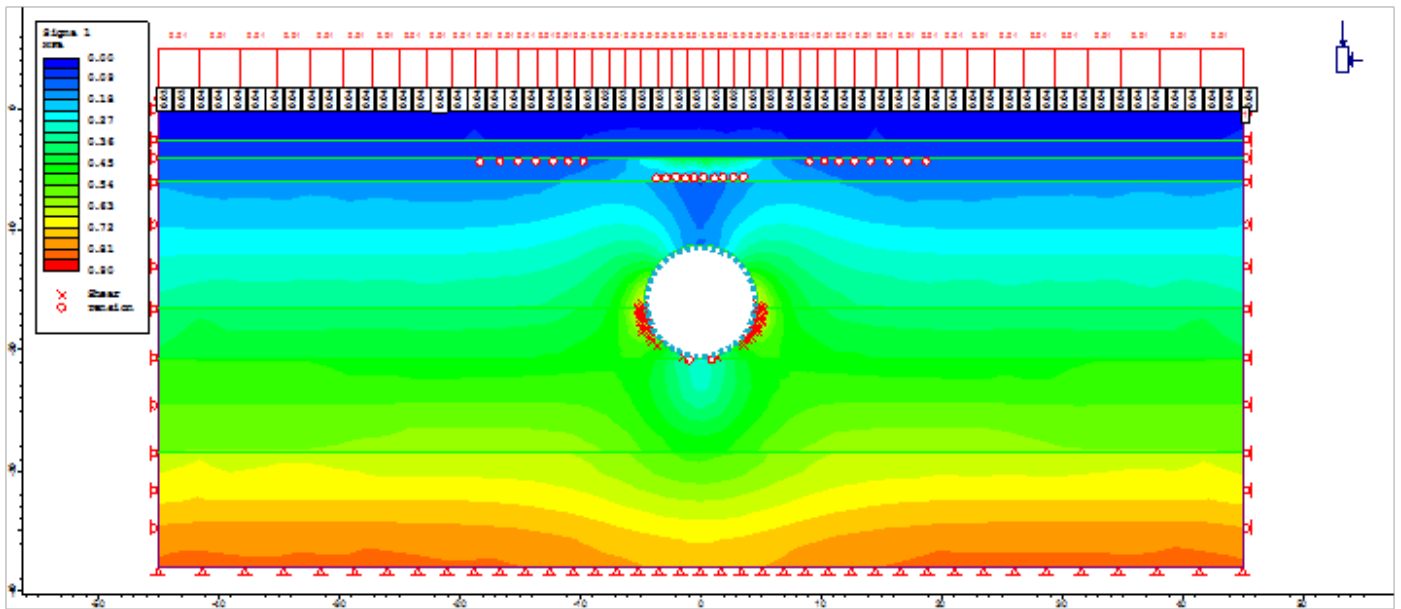
Για το stage 1 δεν υπήρξε κάτι διαφορετικό, καθώς είναι όμοιο με αυτό του model 1. Στο stage 2 πραγματοποιήθηκε αποτόνωση των υλικών μέσα στη σήραγγα. Στο stage 3 υπήρξε εκσκαφή της σήραγγας και τοποθέτηση ενός χαλύβδινου δακτυλίου (TBM shield) με διάμετρο περίπου 5cm μεγαλύτερη από αυτή της σήραγγας. Στα stage 2 και 3 υπολογίστηκαν τα στοιχεία που έχουν διαρρέυσει της σ_1 , καθώς και οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1. Έπειτα, στο stage 4, έγινε η τοποθέτηση του liner στη σήραγγα, καθώς και η τοποθέτηση του grout στο χώρο μεταξύ του Liner και του TBM shield. Υπολογίστηκαν οι τροχιές των τάσεων των σ_1 και σ_3 , καθώς και τα στοιχεία που έχουν διαρρέυσει της σ_1 . Ομοίως με τα stage 2 και 3, υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1.



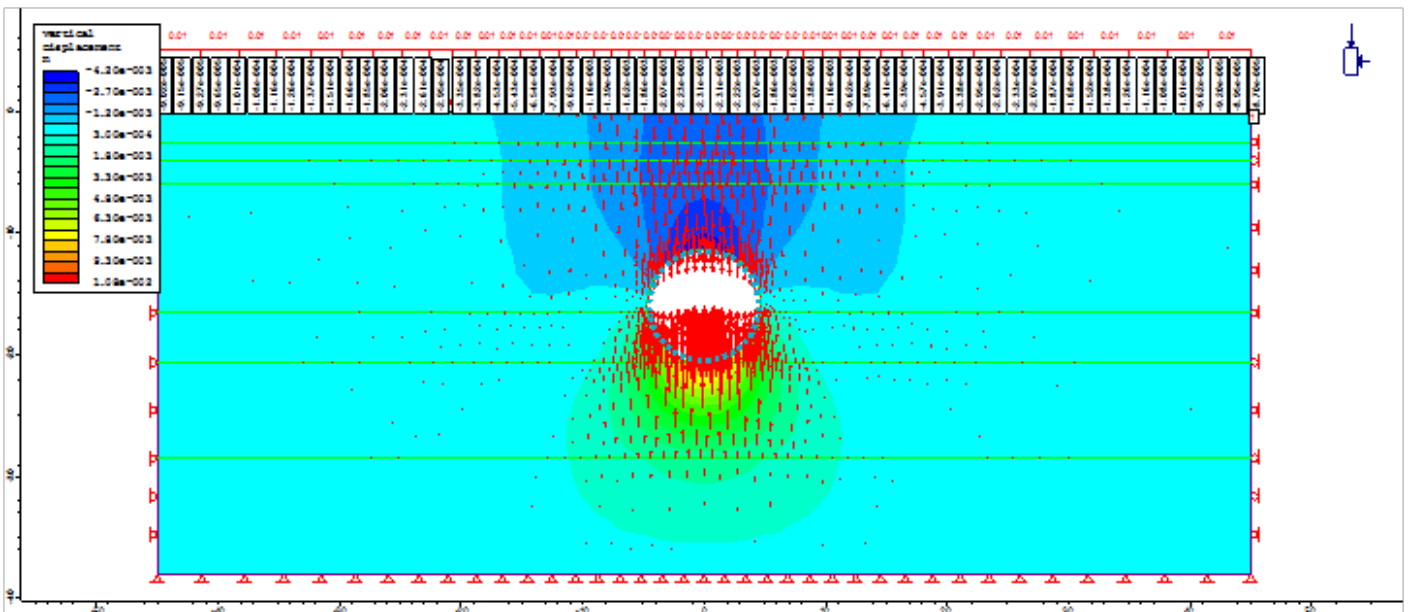
Εικόνα 7.37: stage 2 – σ_1 & yielded elements



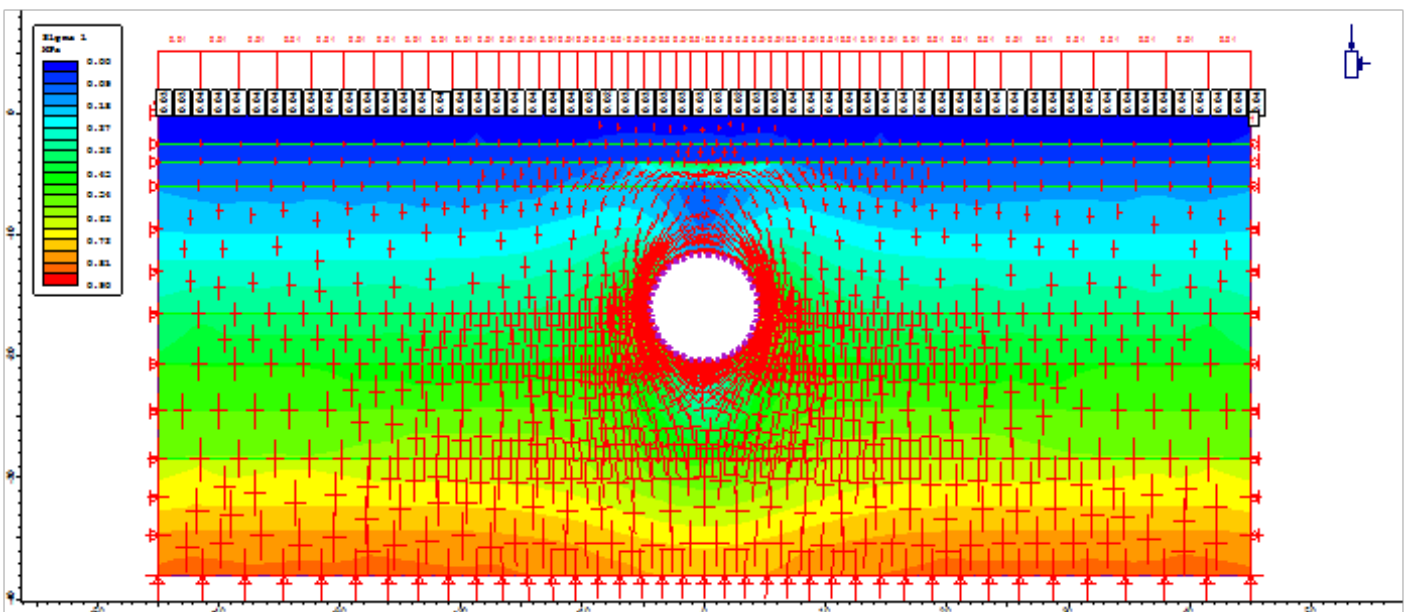
Εικόνα 7.38: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors



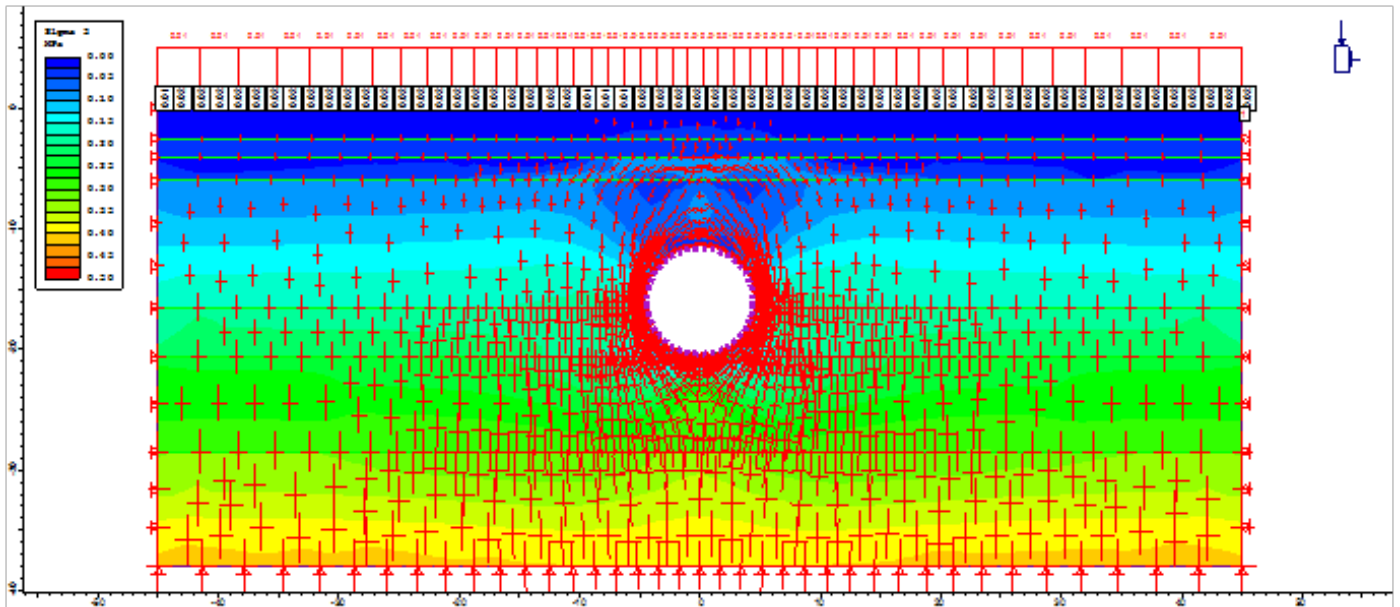
Εικόνα 7.39: stage 3 – sigma 1 & yielded elements



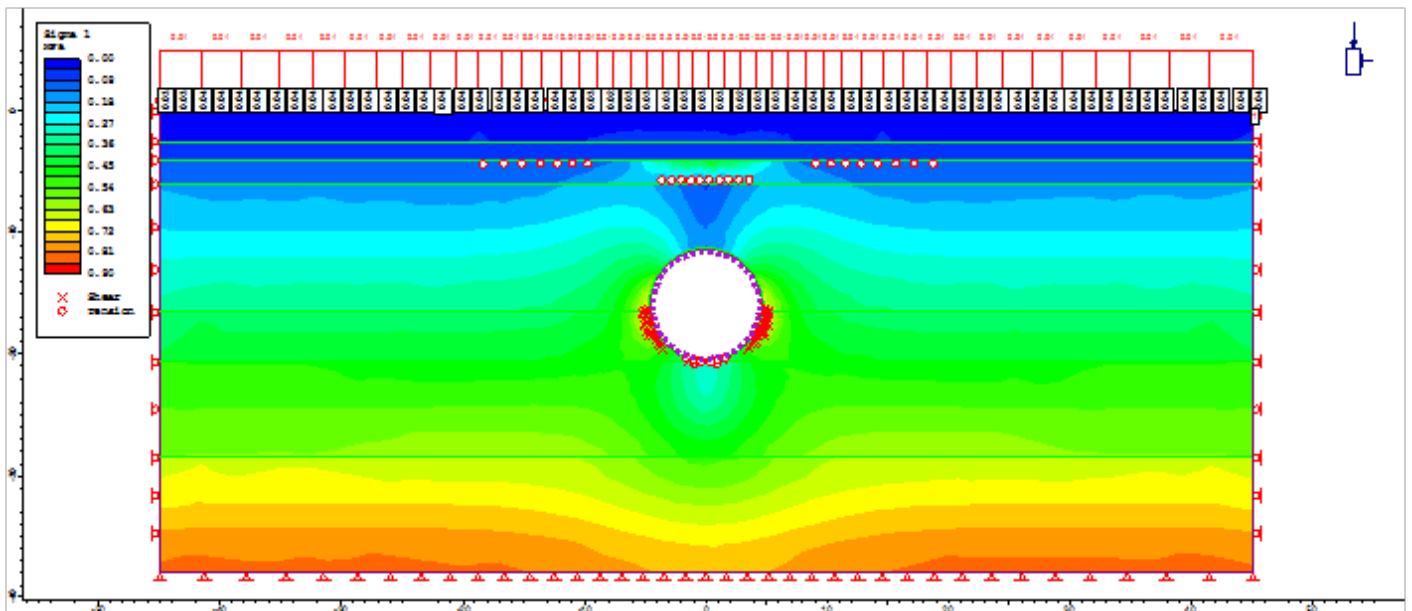
Εικόνα 7.40: stage 3 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors



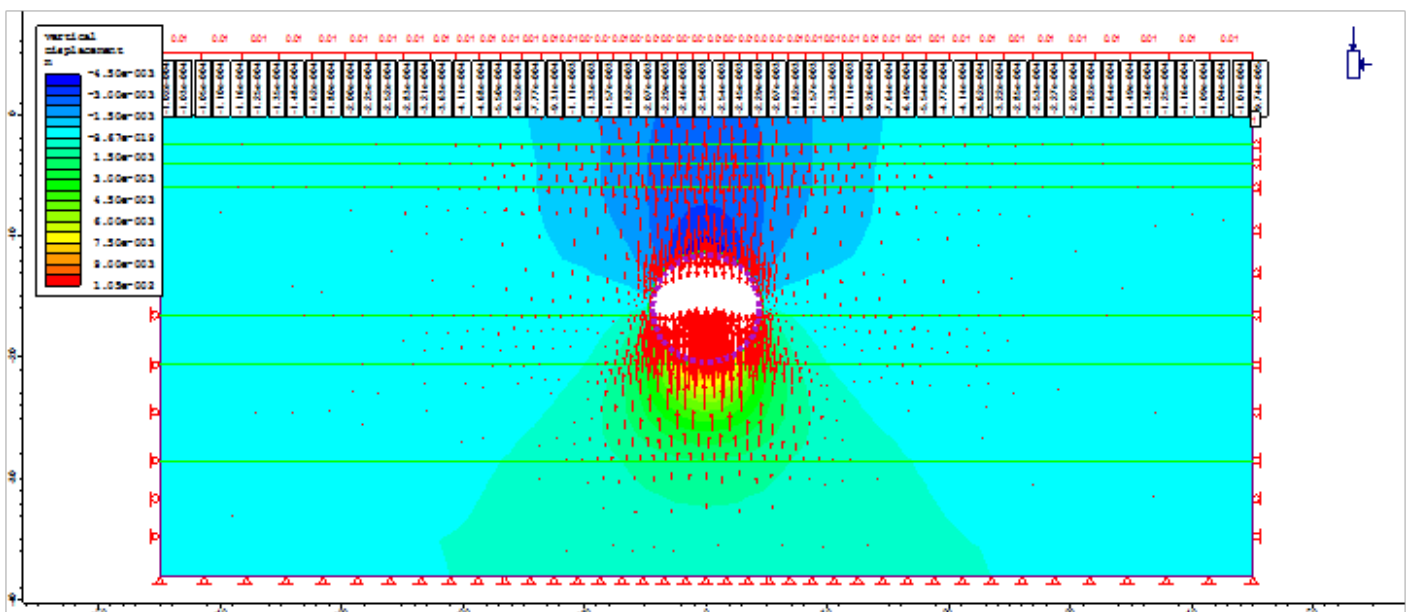
Εικόνα 7.41: stage 4 – sigma 1 & stress trajectories



Εικόνα 7.42: stage 4 – sigma 3 & stress trajectories

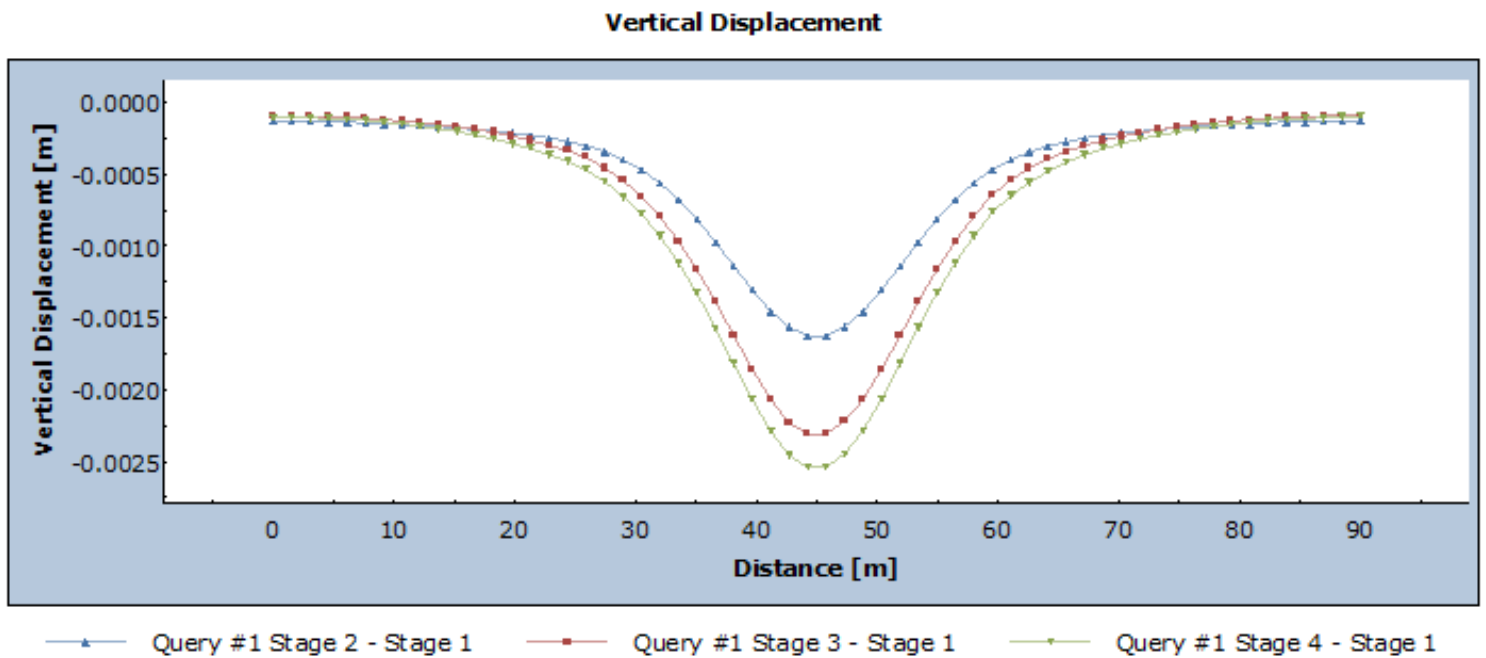


Εικόνα 7.43: stage 4 – sigma 1 & yielded elements

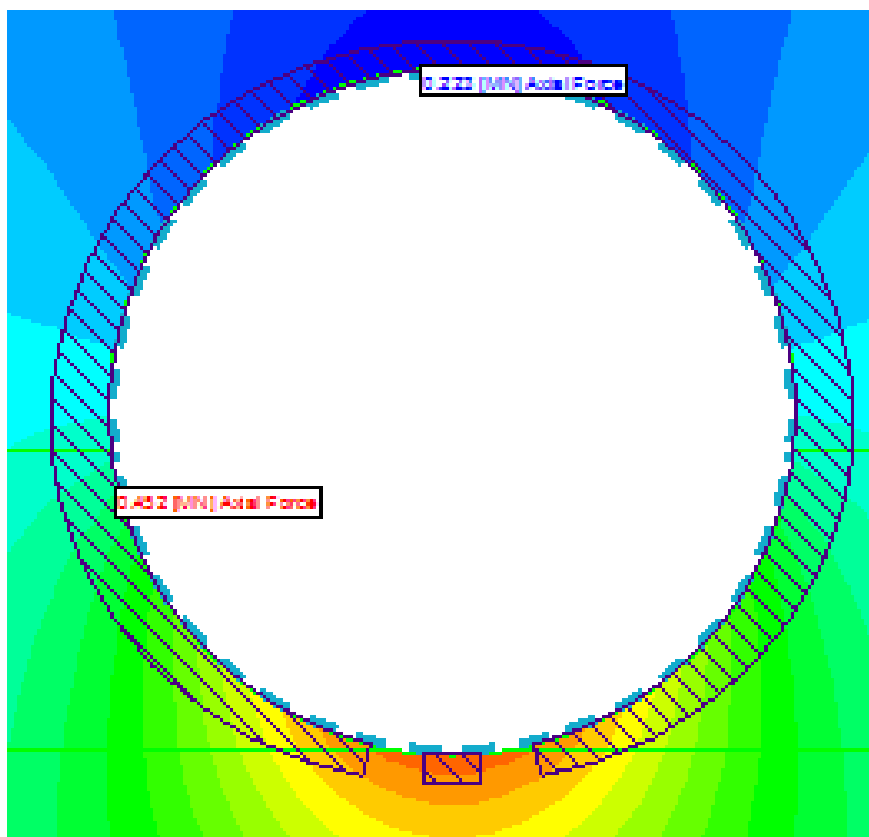


Εικόνα 7.44: stage 4 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors

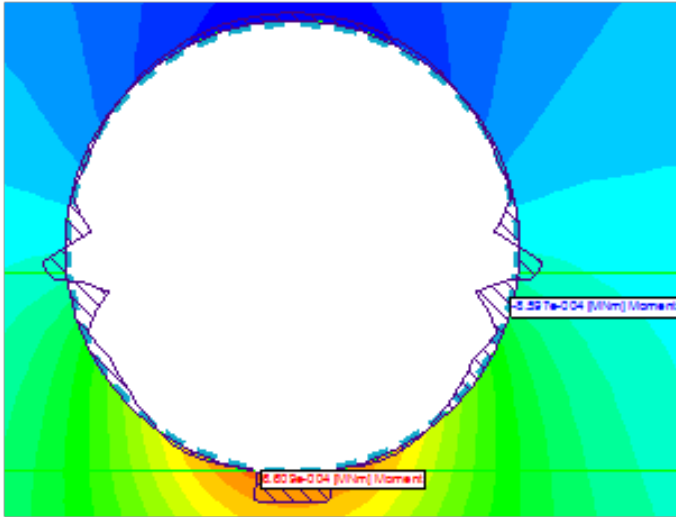
Έπειτα, μεταφέρθηκαν σε γράφημα οι κατακόρυφες καθιζήσεις των stage 2, 3 και 4, ώστε να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο stage 3 και 4, υπολογίστηκαν η αξονική δύναμη, η ροπή κάμψης και η διατμητική δύναμη στο TBM shield και στο liner αντίστοιχα.



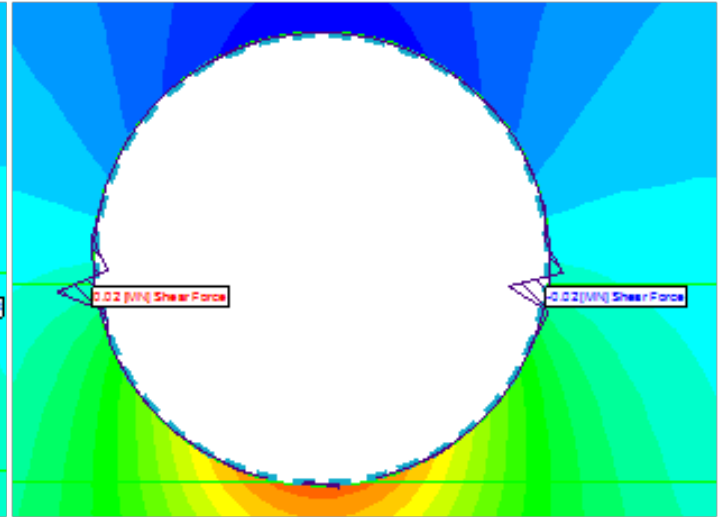
Εικόνα 7.45: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στα stage 2, 3 και 4 (reference stage = stage 1)



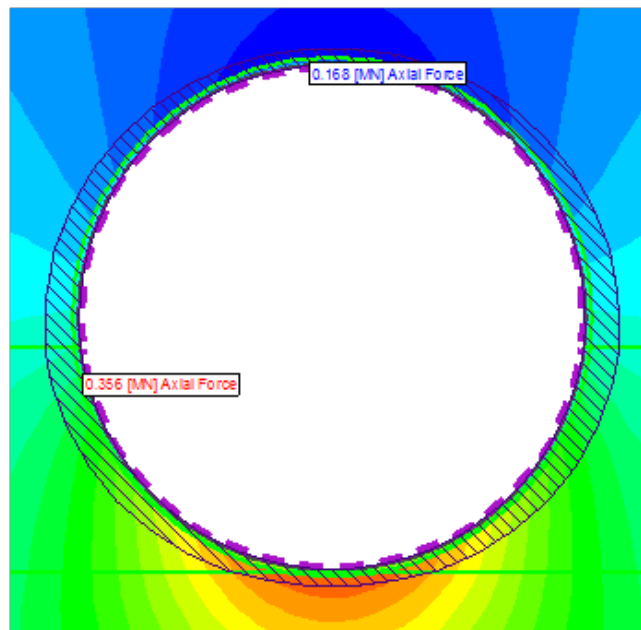
Εικόνα 7.46: stage 3 - axial force στο TBM shield



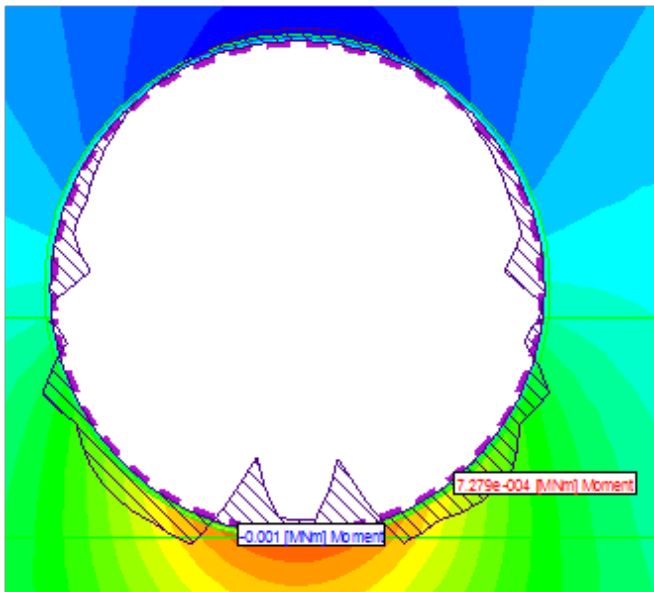
Εικόνα 7.47: stage 3-bending moment στοTBM shield



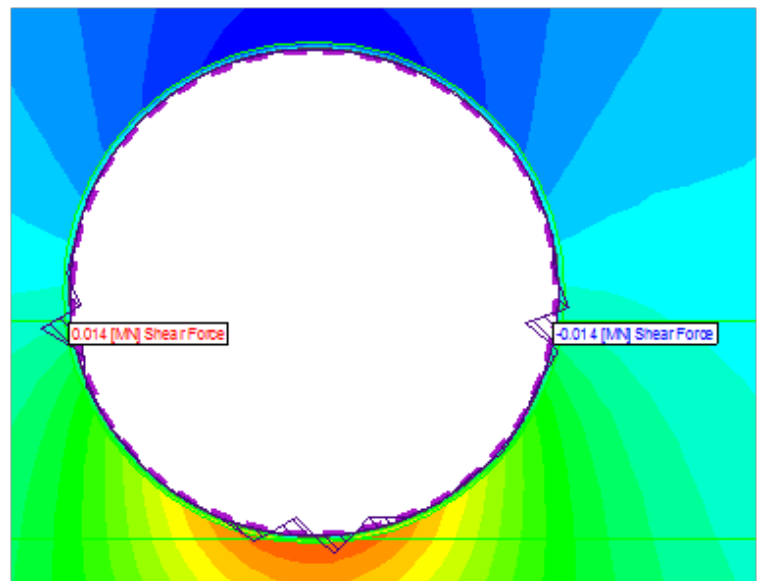
Εικόνα 7.48: stage 3 - shear force στο TBM shield



Εικόνα 7.49: stage 4 - axial force στο liner



Εικόνα 7.50: stage 4 - bending moment στο liner



Εικόνα 7.51: stage 4 - shear force στο liner

7.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων με χρήση μοντέλου Mohr-Coulomb

Αφού πάρθηκαν τα αποτελέσματα σε κάθε στάδιο των μοντέλων, ακολούθησε η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους. Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας που περιγράφει αναλυτικά τα αποτελέσματα των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων, των ροπών κάμψης και των διατμητικών δυνάμεων. Σε όλα αυτά παρατίθενται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές τους.

Πίνακας 7.1: Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης με χρήση Mohr - Coulomb

Model	Stage	Vertical displacement max (m)	Axial force max (MN)	Axial force min (MN)	Bending moment max (MNm)	Bending moment min (MNm)	Shear force max (MN)	Shear force min (MN)
1	2	0.00086	1.432	0.601	0.055	-0.039	0.097	-0.098
2	2	0.00077	1.377	0.716	0.056	-0.04	0.091	-0.092
3	2	-0.0015						
	3	-0.0023	0.452	0.205	0.02	-0.013	0.029	-0.029
4	2	-0.0014						
	3	-0.0022	0.435	0.233	0.02	-0.013	0.027	-0.028
5	2	-0.0016						
	3	-0.0023	0.452	0.223	0.0007	-0.0009	0.02	-0.02
	4	-0.0025	0.356	0.168	0.0007	-0.001	0.014	-0.014

Βασική παρατήρηση είναι το γεγονός ότι οι κατακόρυφες μετατοπίσεις (vertical displacement) στα model 1 και 2, εμφανίζουν μία ανύψωση. Ωστόσο, στα model 3, 4 και 5 δε συμβαίνει το παραπάνω.

Η αξονική δύναμη (axial force) στα stage 2 των μοντέλων model 1 και 2 έχει πολύ υψηλότερη τιμή (και η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της) από ότι στα stage των υπόλοιπων μοντέλων. Με μία πιο καλή παρατήρηση, θα δούμε ότι στα stage 3 των model 3, 4 και 5 έχει μειωθεί αρκετά, αλλά είναι πάνω κάτω η ίδια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτά τα stage έχει ήδη πραγματοποιηθεί η αποτόνωση των υλικών μέσα στη σήραγγα και έχει επέλθει η εκσκαφή της σήραγγας και η τοποθέτηση ενός liner διαφορετικού τύπου κάθε φορά ή ενός liner με interface. Βέβαια, όσο αφορά το stage 4 του model 5, η αξονική δύναμη διαφοροποιείται και μειώνεται κι άλλο. Η μόνη εξήγηση σε αυτό είναι πιθανώς η ύπαρξη του υλικού grout, που υπάρχει μόνο σε αυτό το stage και σε κανένα άλλο.

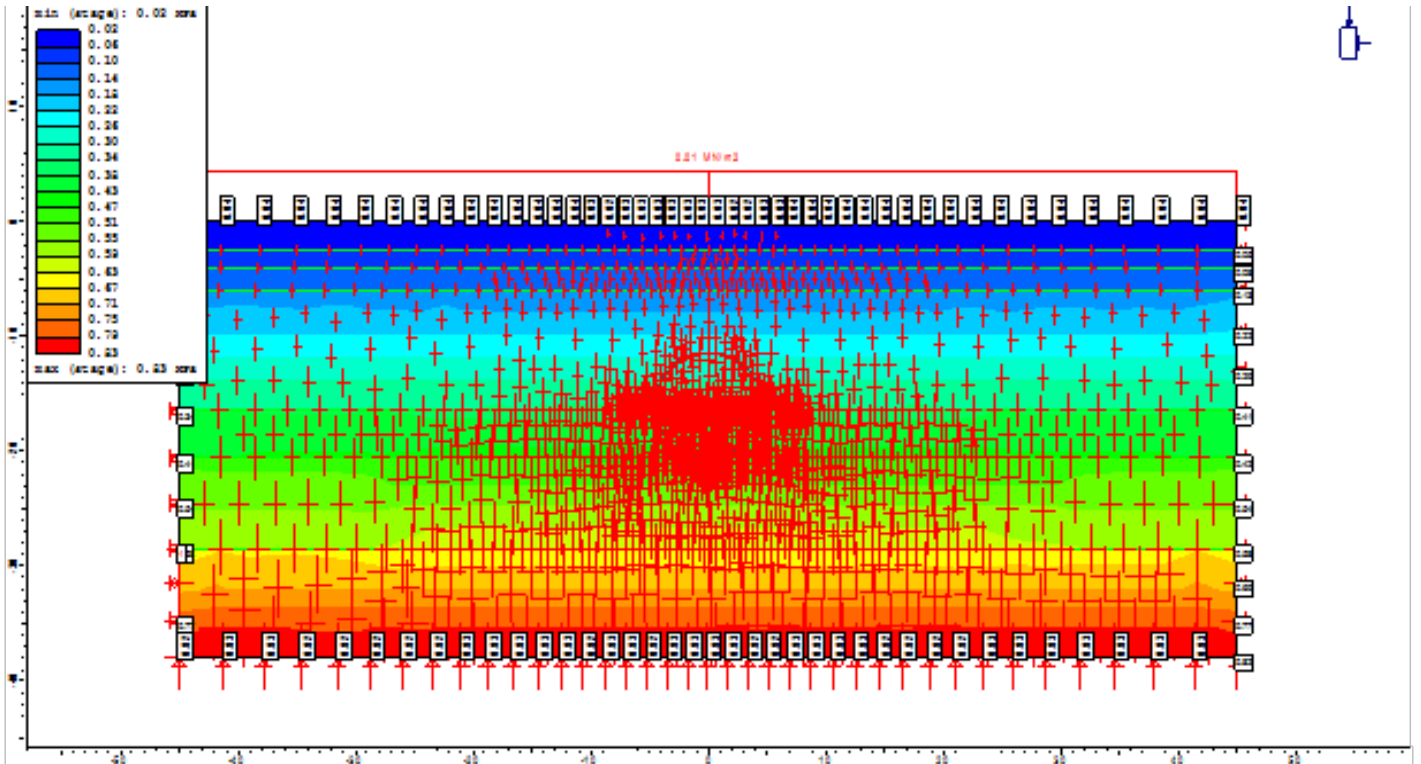
Τέλος, όσο αφορά τη ροπή κάμψης (bending moment) και τη διατμητική δύναμη (shear force), και στις δύο συμβαίνει ότι ακριβώς αναφέραμε και στην αξονική δύναμη. Η μόνη διαφορά τους είναι ότι και στις δυο στο stage 4 του model 5 δεν υπάρχει αυτή η μείωση που υπήρχε στην αξονική δύναμη.

7.4 Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης για τη Χ.Θ. 2+398.0 με χρήση μοντέλου Hardening Soil

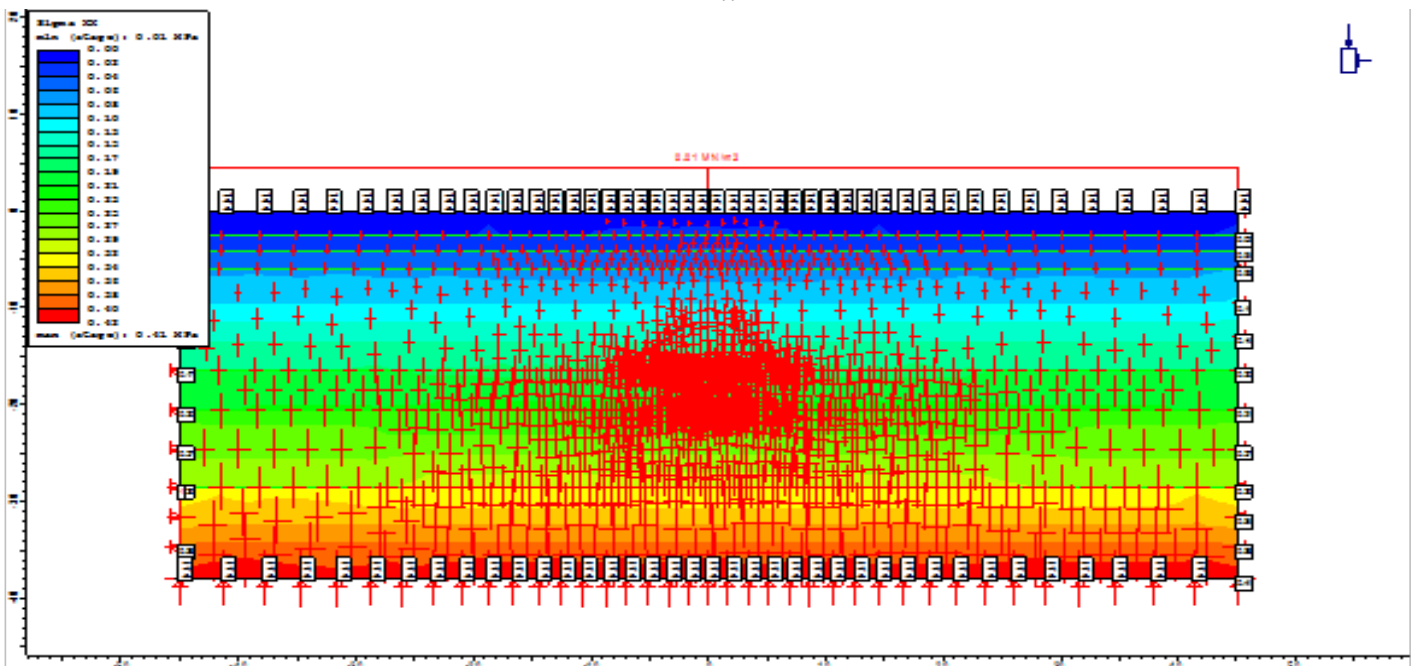
Η τομή στη Χ.Θ. 2+398.0 μελετήθηκε, σε δεύτερη φάση με τη χρήση του μοντέλου Hardening Soil, σε πέντε διαφορετικά μοντέλα. Παρακάτω, θα ακολουθήσει η ανάλυση των αποτελεσμάτων σε αυτά τα πέντε διαφορετικά μοντέλα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

└ - - - - Model 1

Για το stage 1, το οποίο και είναι κοινό και στα 5 μοντέλα, μετρήθηκαν οι τροχιές των τάσεων στον άξονα yy και στον άξονα xx . Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εικόνες:

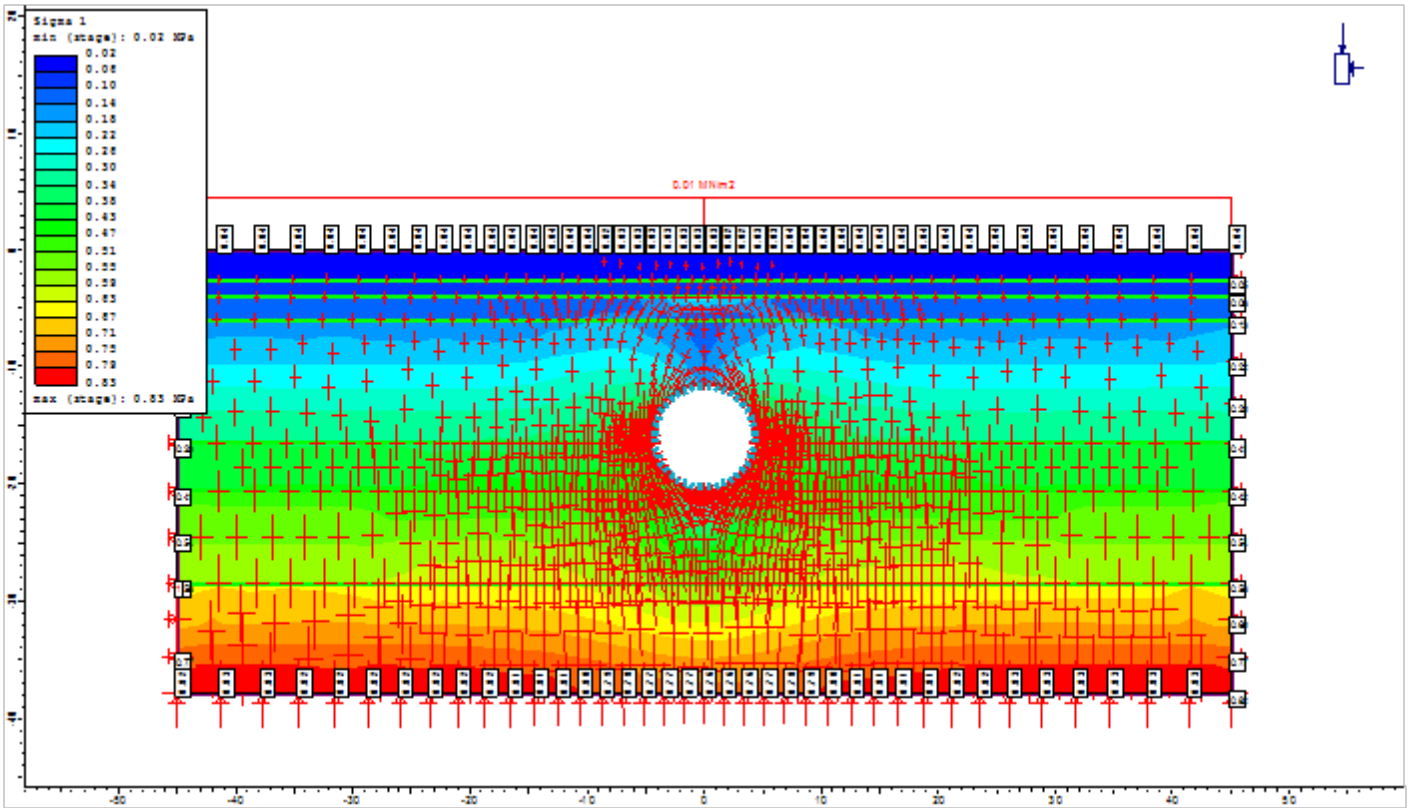


Εικόνα 7.52: stage 1 – s_{yy} & stress trajectories

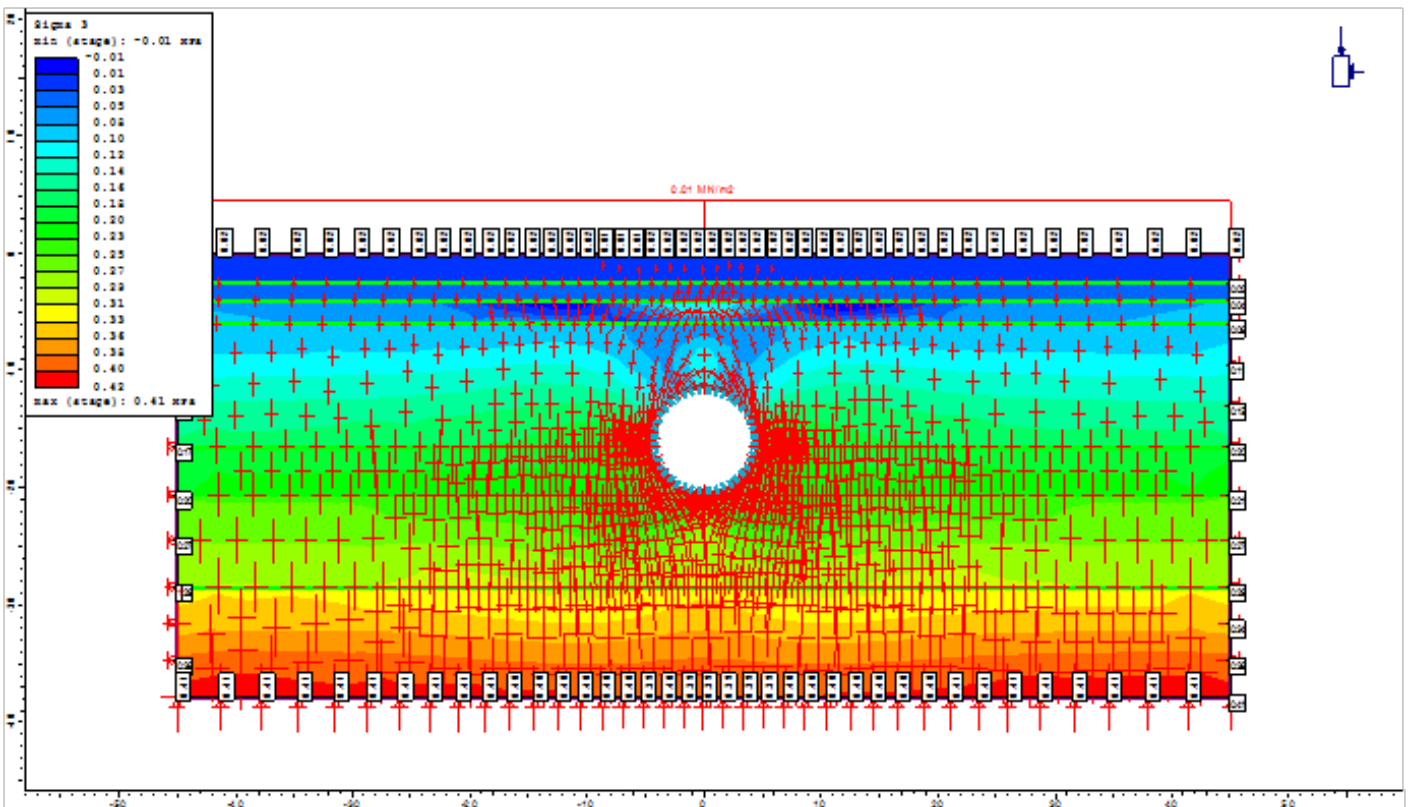


Εικόνα 7.53: stage 1 – s_{xx} & stress trajectories

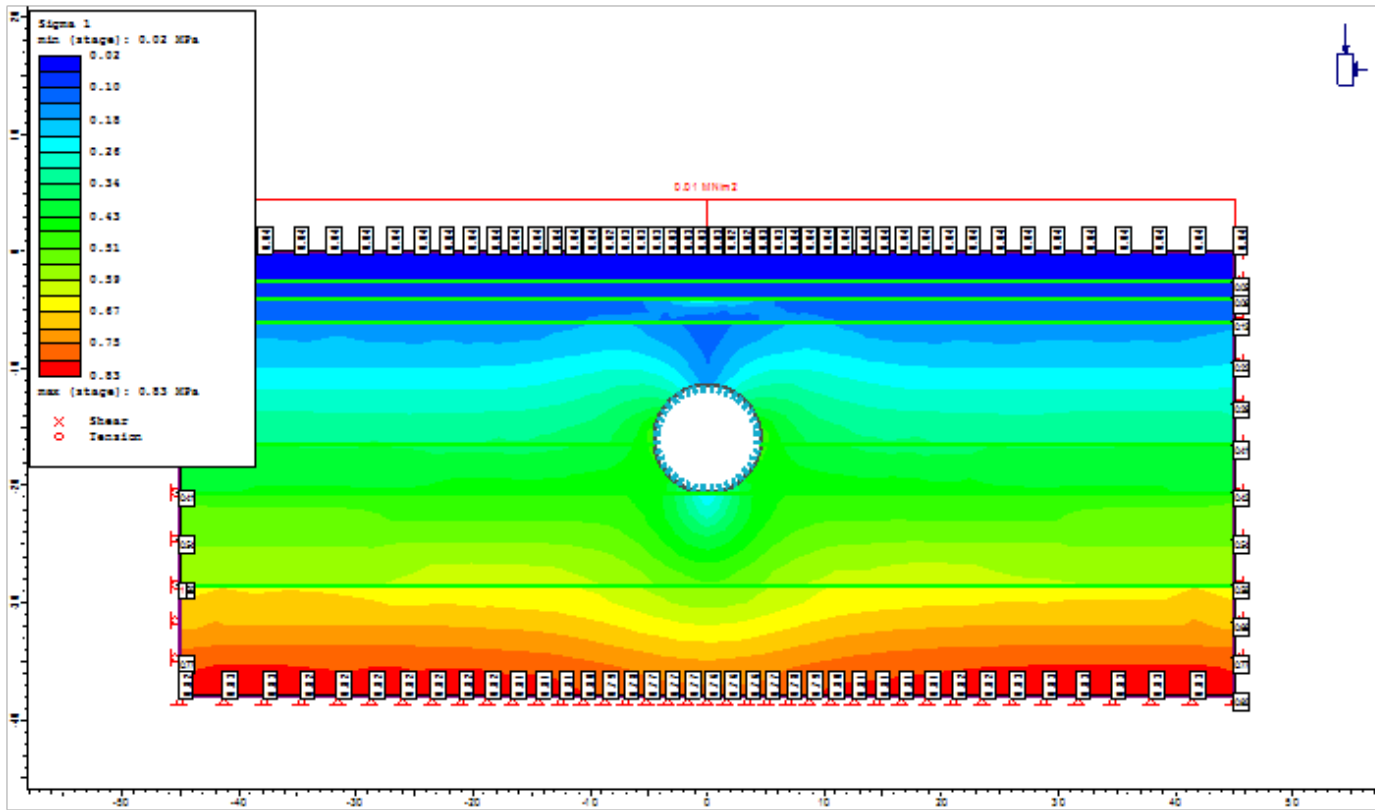
Για το stage 2, πραγματοποιήθηκε εκσκαφή της σήραγγας και η τοποθέτηση ενός liner σε αυτό. Υπολογίστηκαν οι τροχιές των τάσεων των σ_1 και σ_3 , καθώς και τα παραγόμενα στοιχεία της σ_1 . Επίσης, υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1.



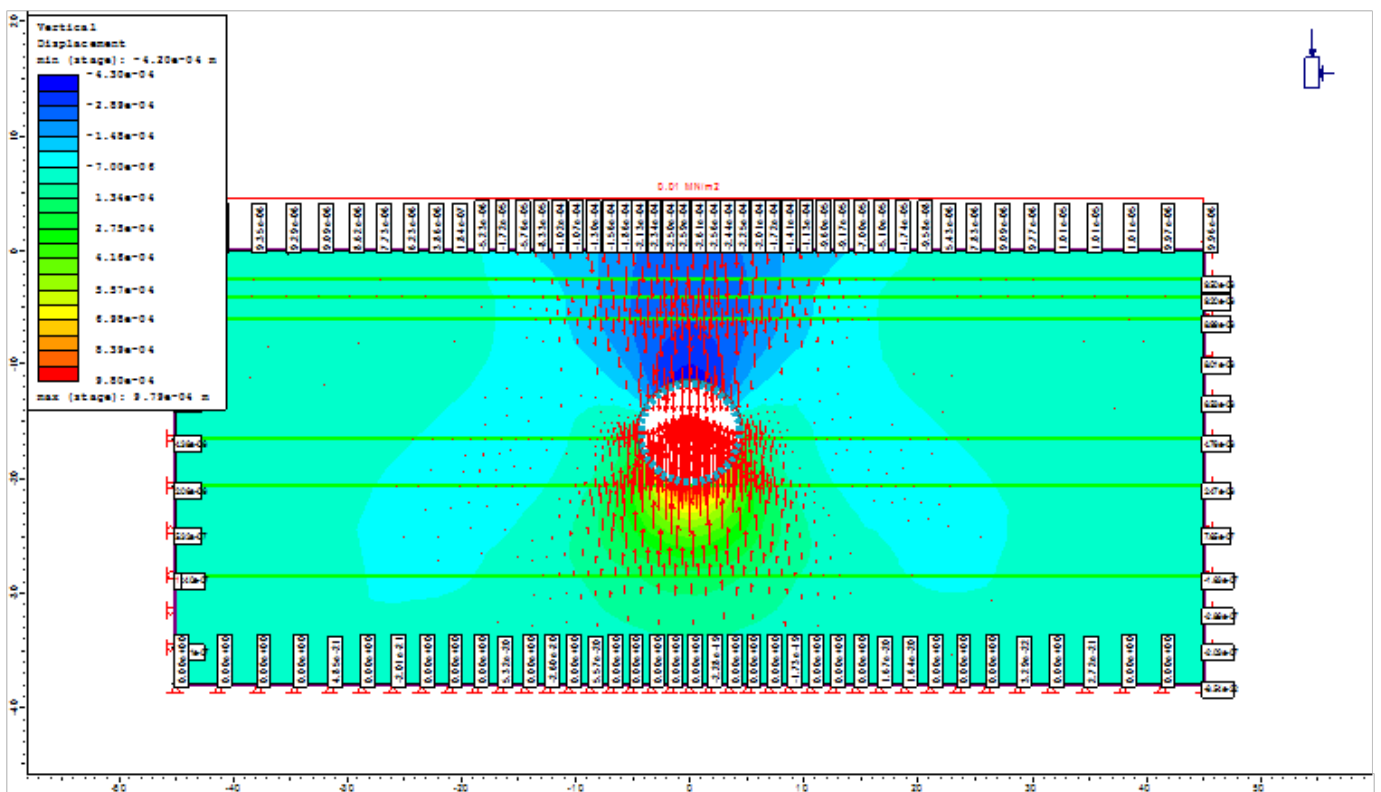
Εικόνα 7.54: stage 2 – σ_1 & stress trajectories



Εικόνα 7.55: stage 2 – σ_3 & stress trajectories

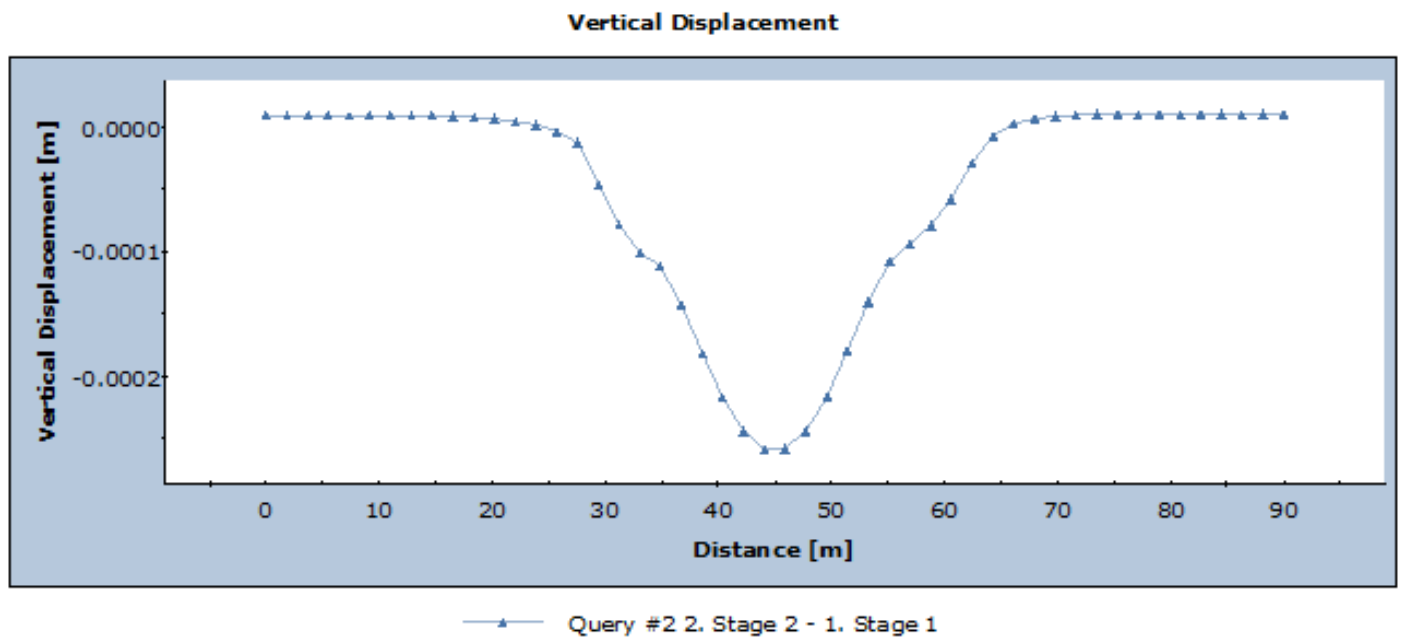


Εικόνα 7.56: stage 2 – sigma 1 & yielded elements

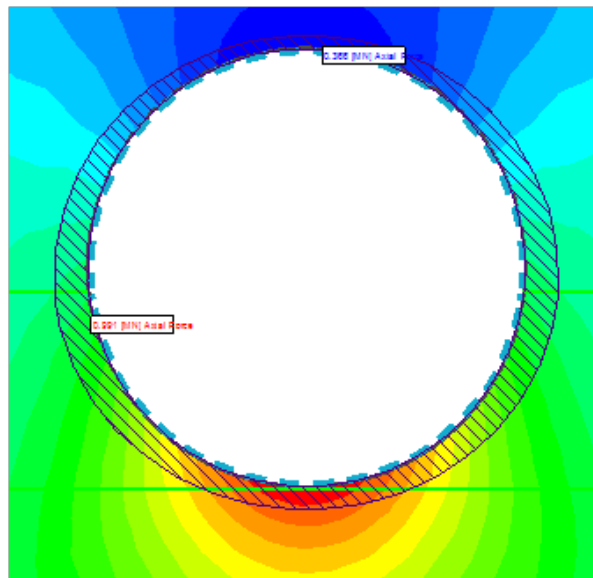


Εικόνα 7.57: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors

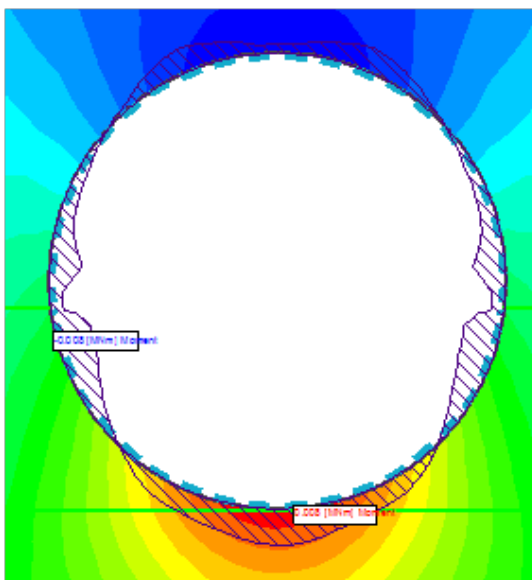
Έπειτα, μεταφέρθηκαν σε γράφημα οι κατακόρυφες καθιζήσεις ώστε να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο stage 2, υπολογίστηκαν η αξονική δύναμη, η ροπή κάμψης και η διατμητική δύναμη στο liner.



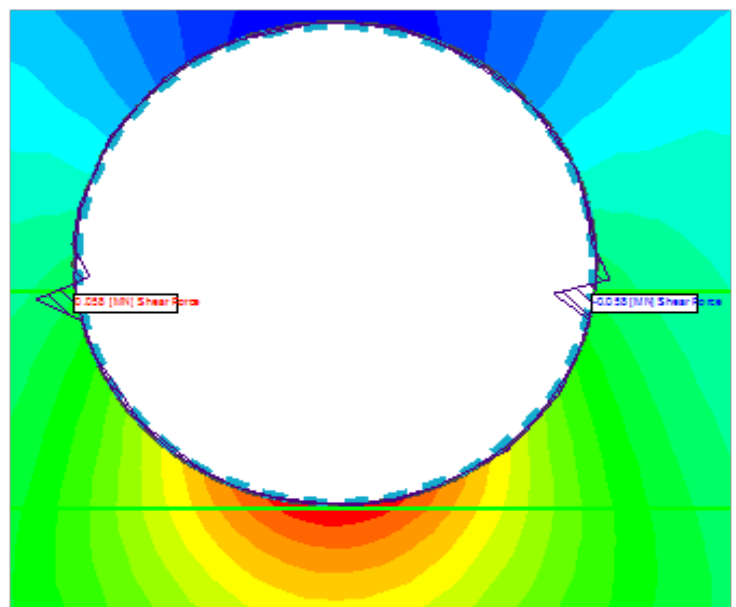
Εικόνα 7.58: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στο stage 2 (reference stage = stage 1)



Εικόνα 7.59: stage 2 - axial force στο liner



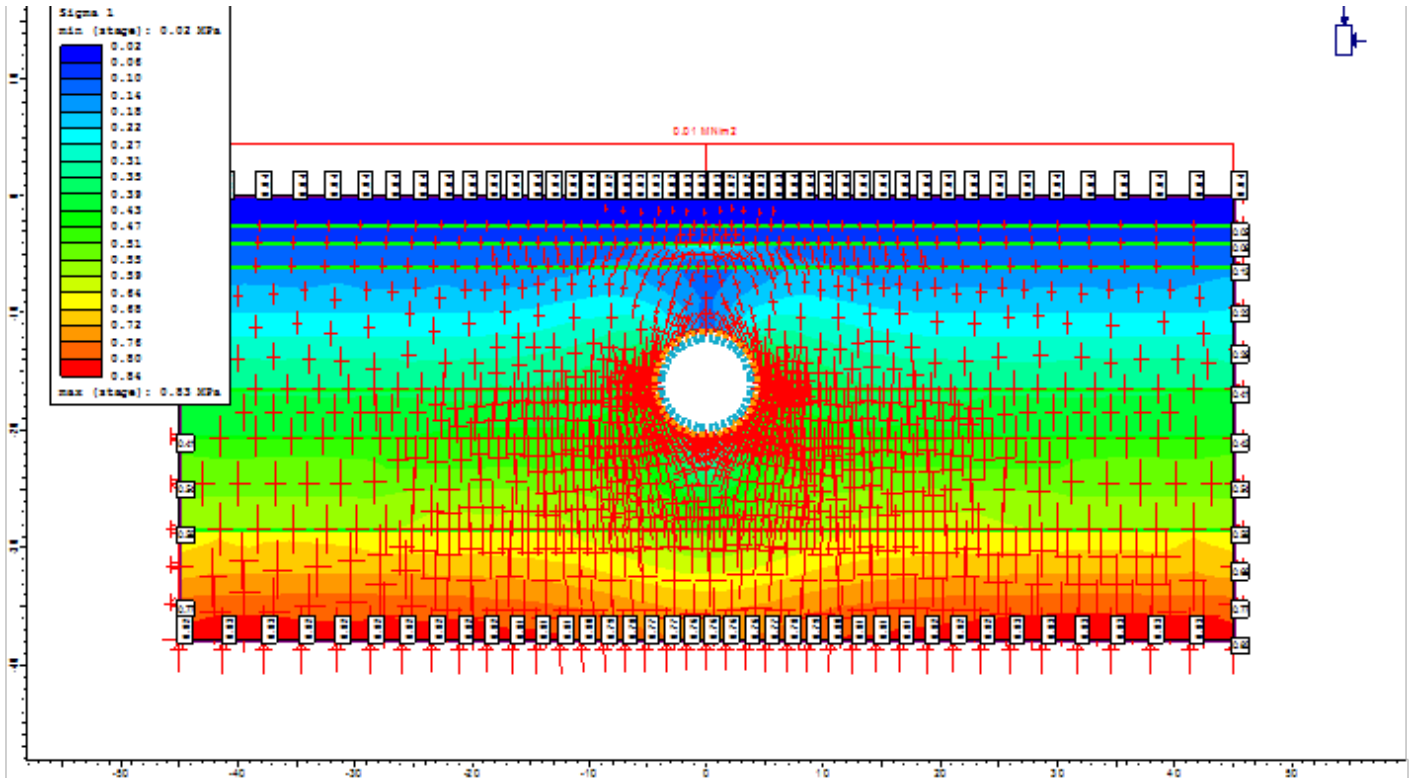
Εικόνα 7.60: stage 2 - bending moment στο liner



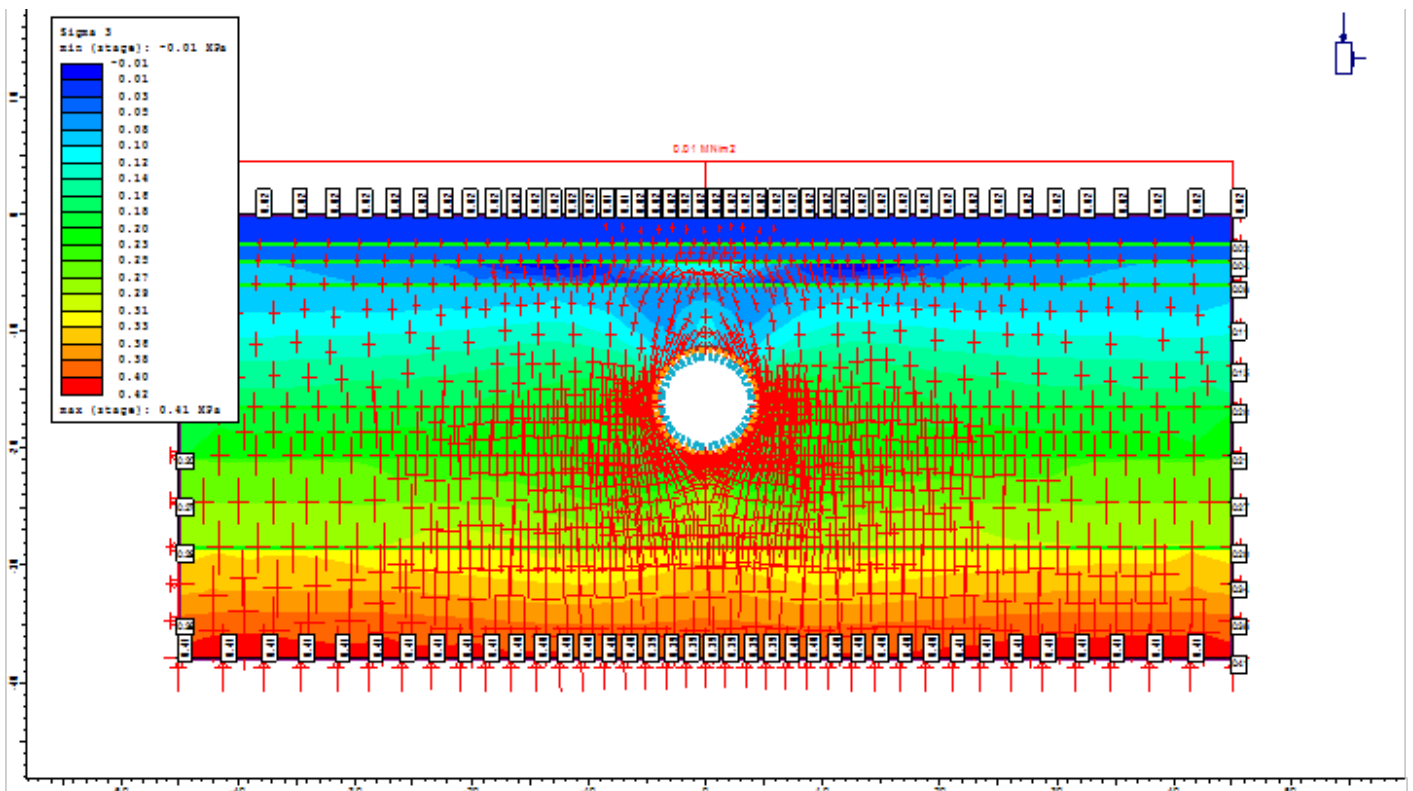
Εικόνα 7.61: stage 2 - shear force στο liner

----- *Model 2*

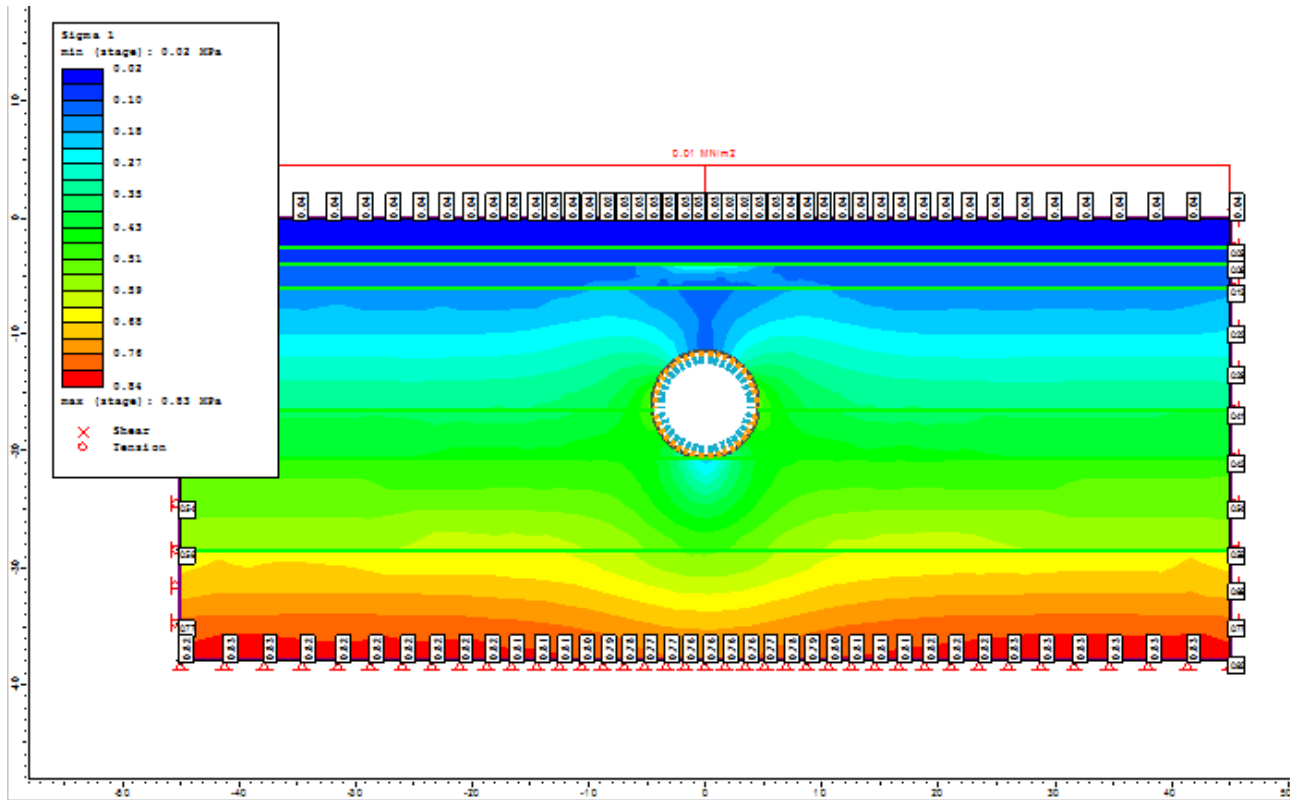
Για το stage 1 δεν υπήρξε κάτι διαφορετικό, καθώς είναι όμοιο με αυτό του model 1. Στο stage 2 πραγματοποιήθηκε εκσκαφή της σήραγγας και η τοποθέτηση ενός interface σε αυτό. Υπολογίστηκαν οι τροχιές των τάσεων των sigma 1 και sigma 3, καθώς και τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει της sigma 1. Επίσης, υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1.



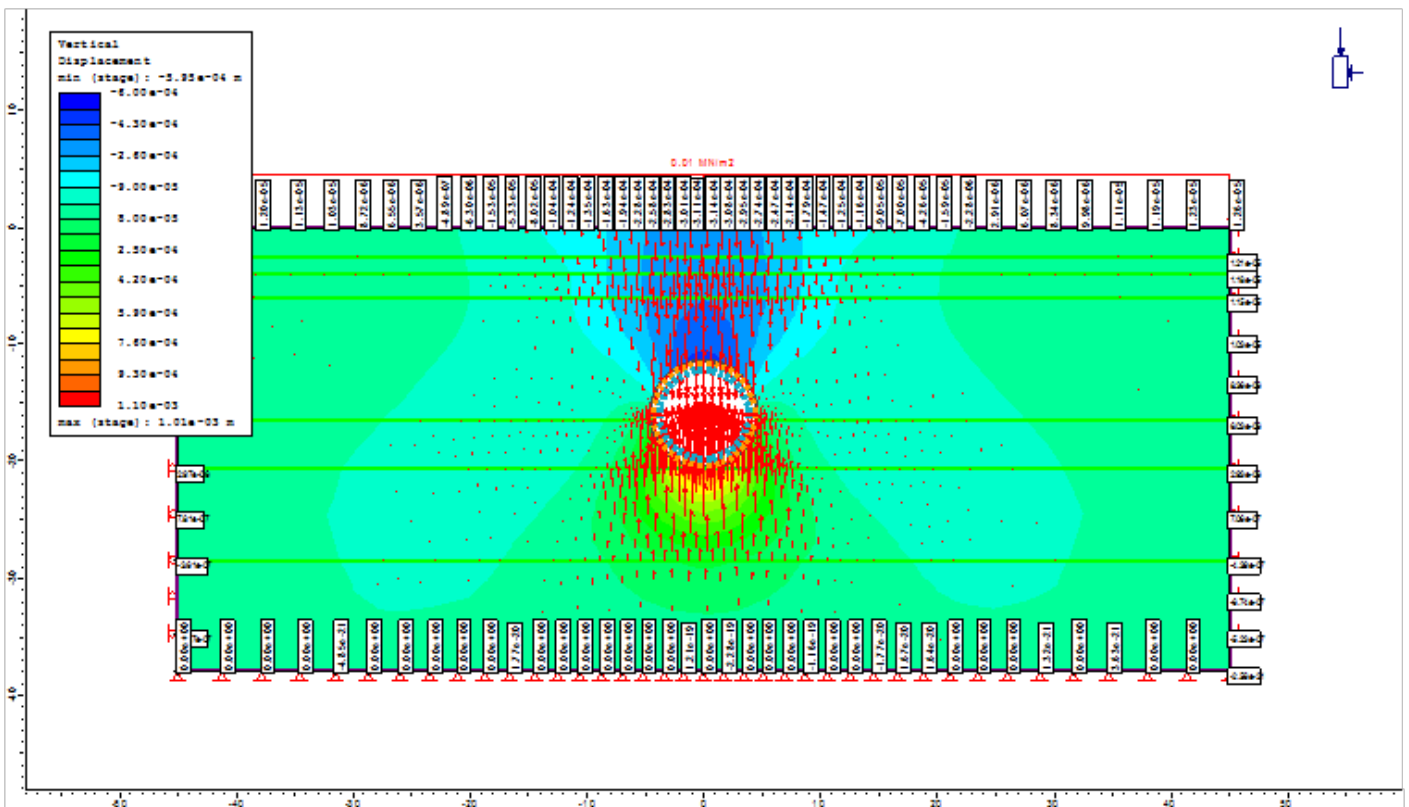
Εικόνα 7.62: stage 2 – sigma 1 & stress trajectories



Εικόνα 7.63: stage 2 – sigma 3 & stress trajectories

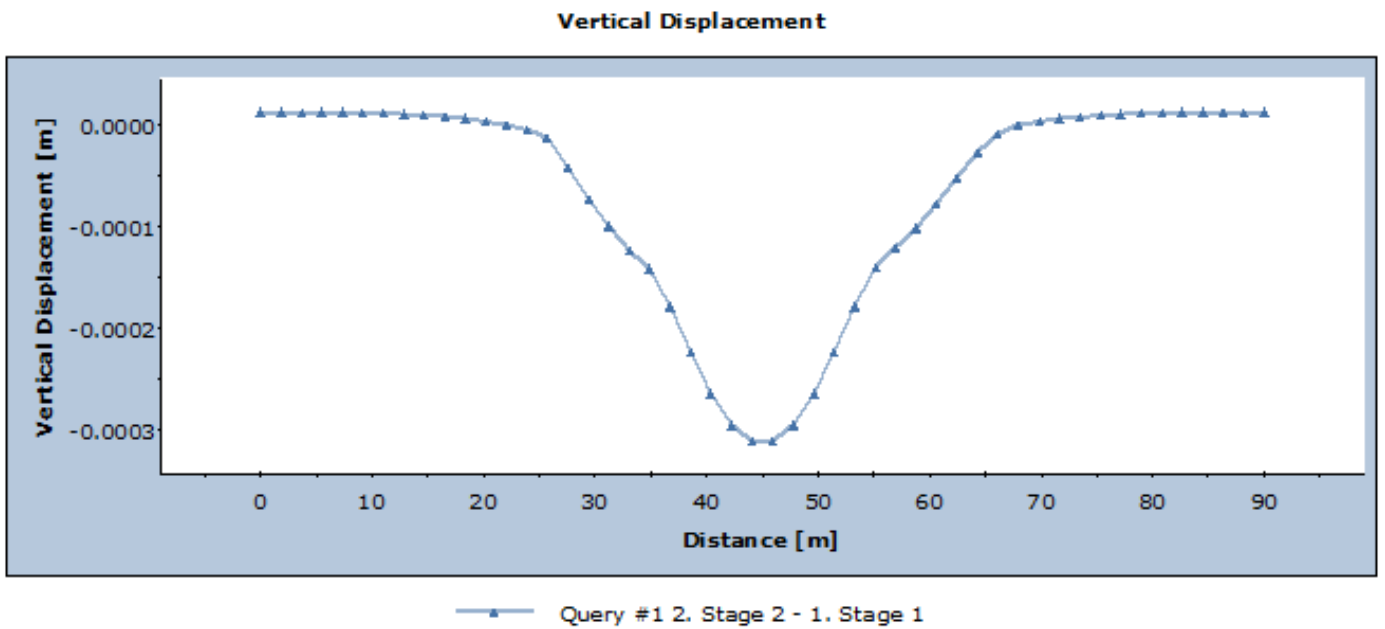


Εικόνα 7.64: stage 2 – sigma 1 & yielded elements

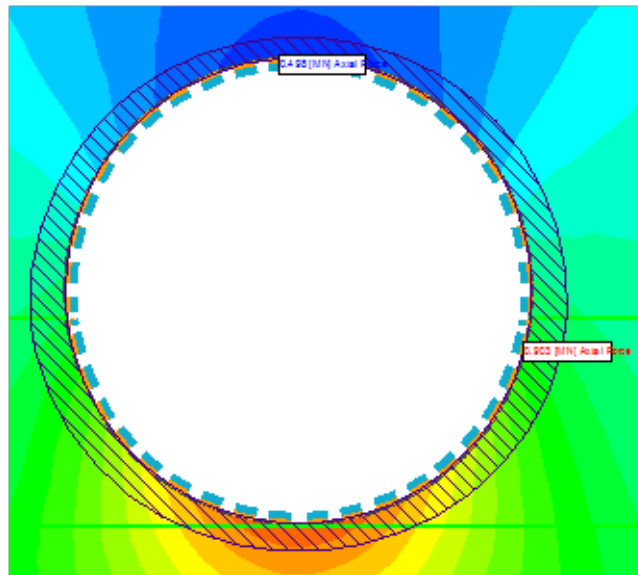


Εικόνα 7.65: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors

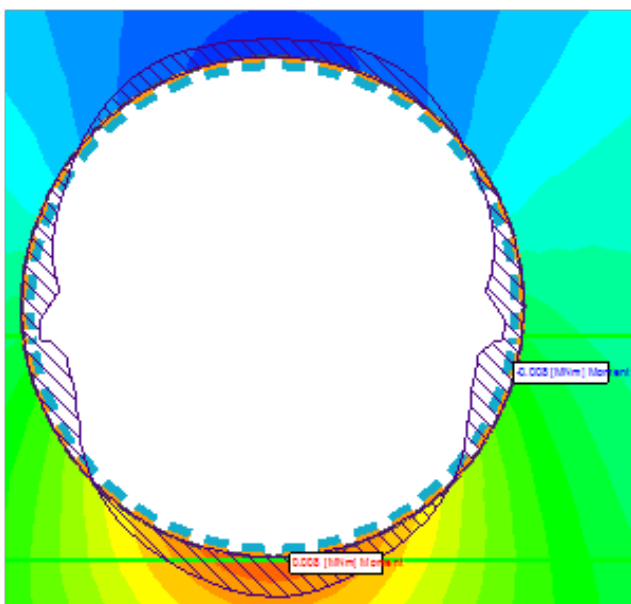
Έπειτα, μεταφέρθηκαν σε γράφημα οι κατακόρυφες καθιζήσεις ώστε να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο stage 2, υπολογίστηκαν η αξονική δύναμη, η ροπή κάμψης και η διατμητική δύναμη στο interface.



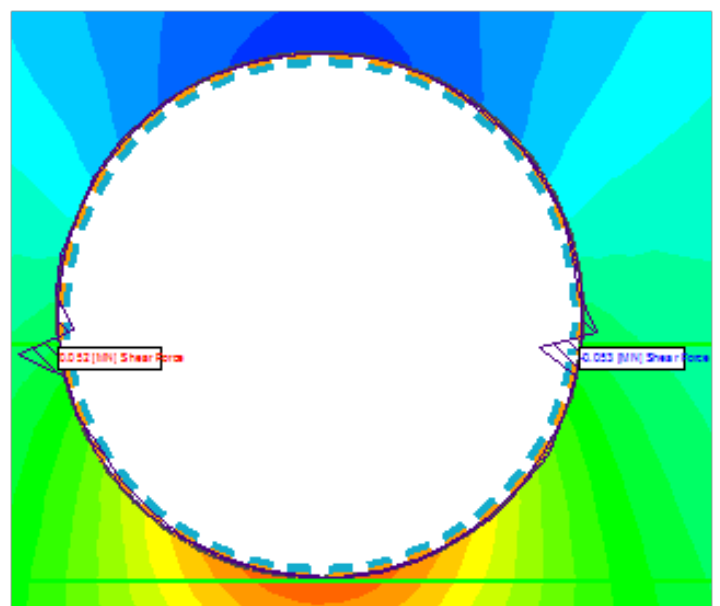
Εικόνα 7.66: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στο stage 2 (reference stage = stage 1)



Εικόνα 7.67: stage 2 - axial force στο interface



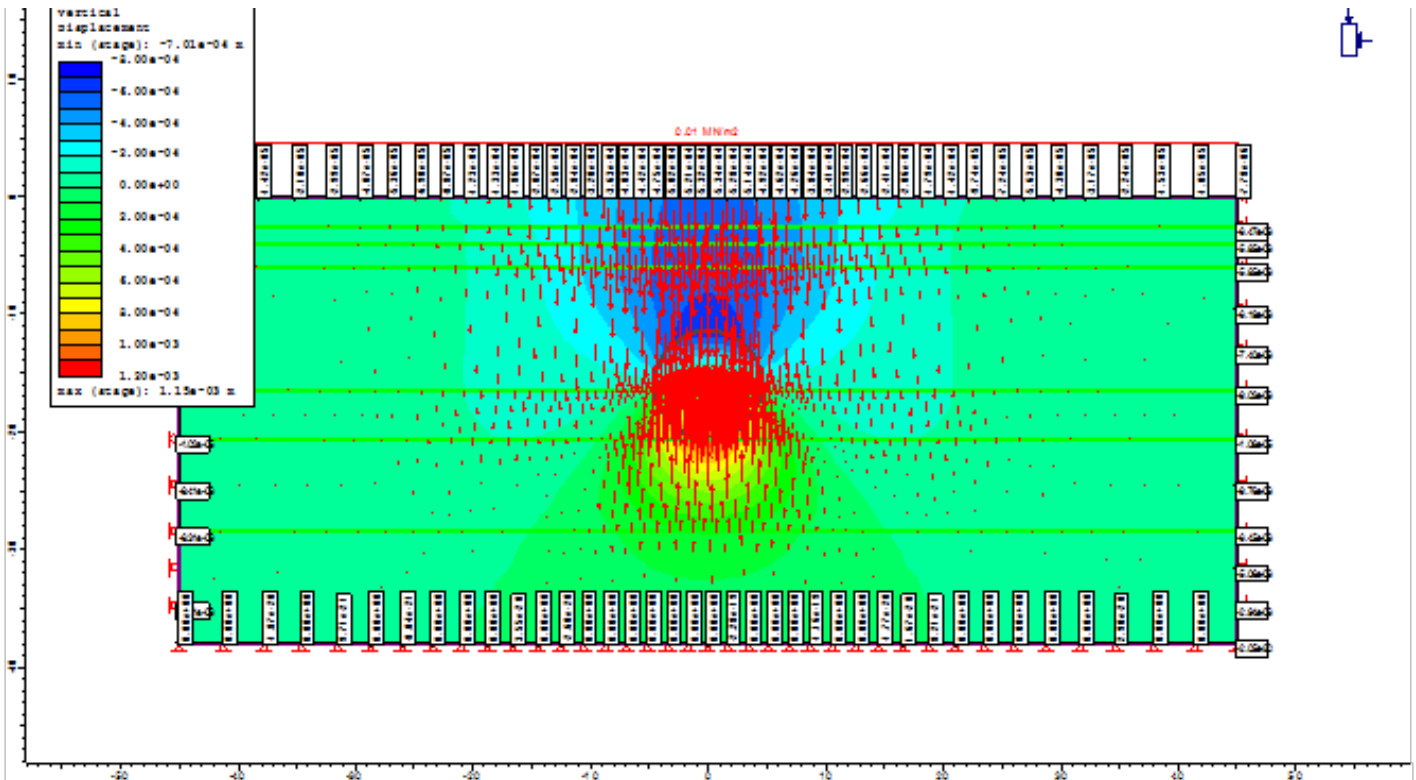
Εικόνα 7.68: stage 2 - bending moment στο interface



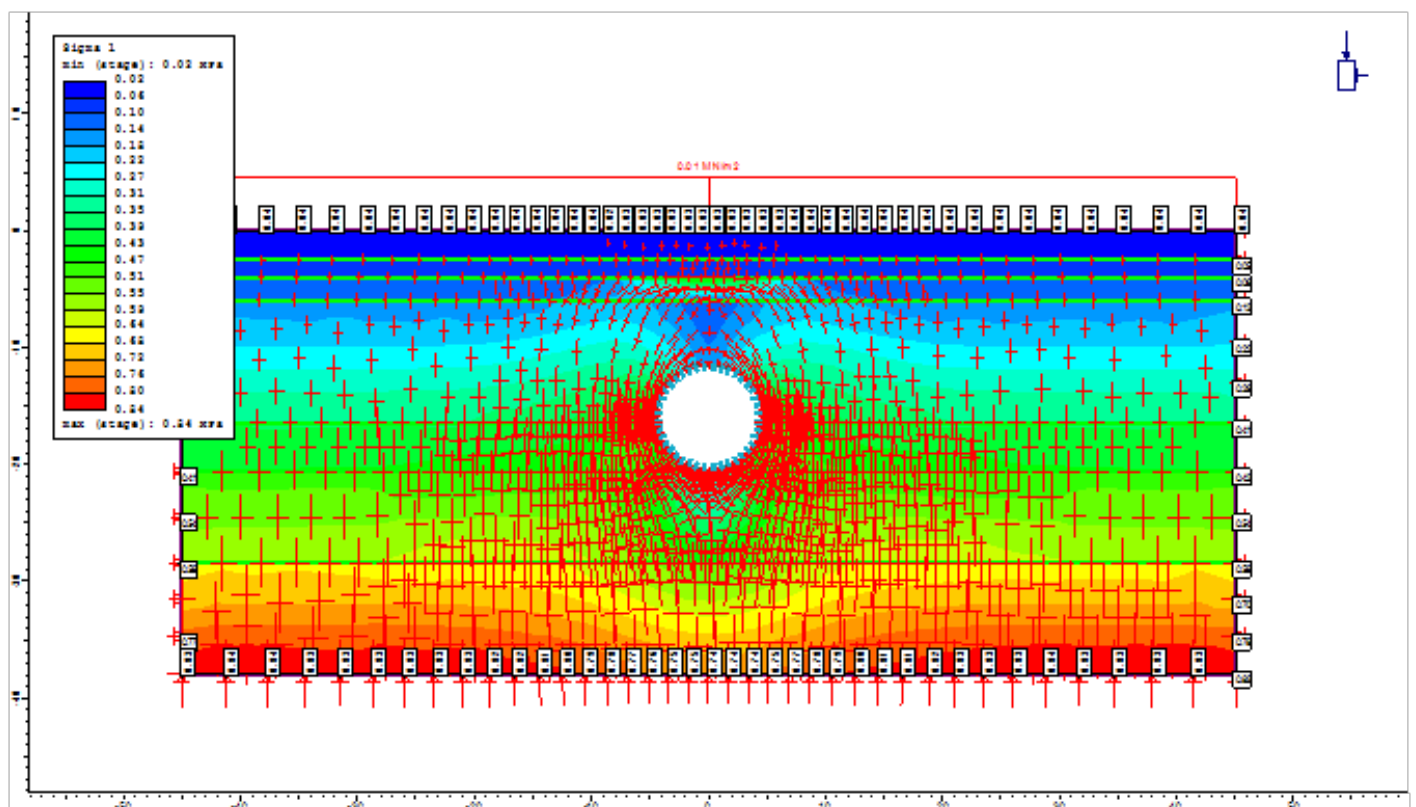
Εικόνα 7.69: stage 2 - shear force στο interface

Model 3

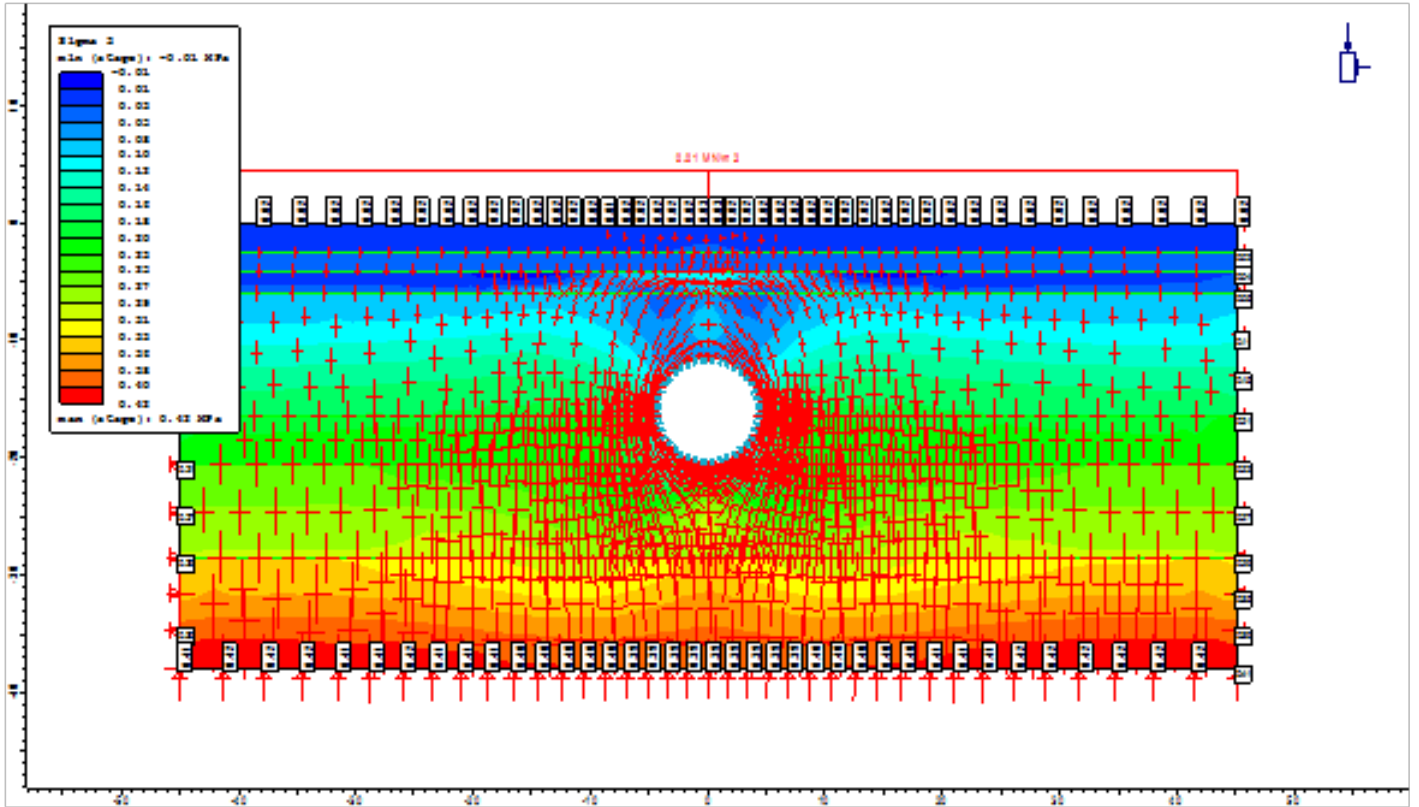
Για το stage 1 δεν υπήρξε κάτι διαφορετικό, καθώς είναι όμοιο με αυτό του model 1. Στο stage 2 πραγματοποιήθηκε αποτόνωση των υλικών μέσα στη σήραγγα. Υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1. Στο stage 3 υπήρξε εκσκαφή της σήραγγας και τοποθέτηση Liner. Υπολογίστηκαν οι τροχιές των τάσεων των σ_1 και σ_3 , καθώς και τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει της σ_1 . Ομοίως με το stage 2, υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1.



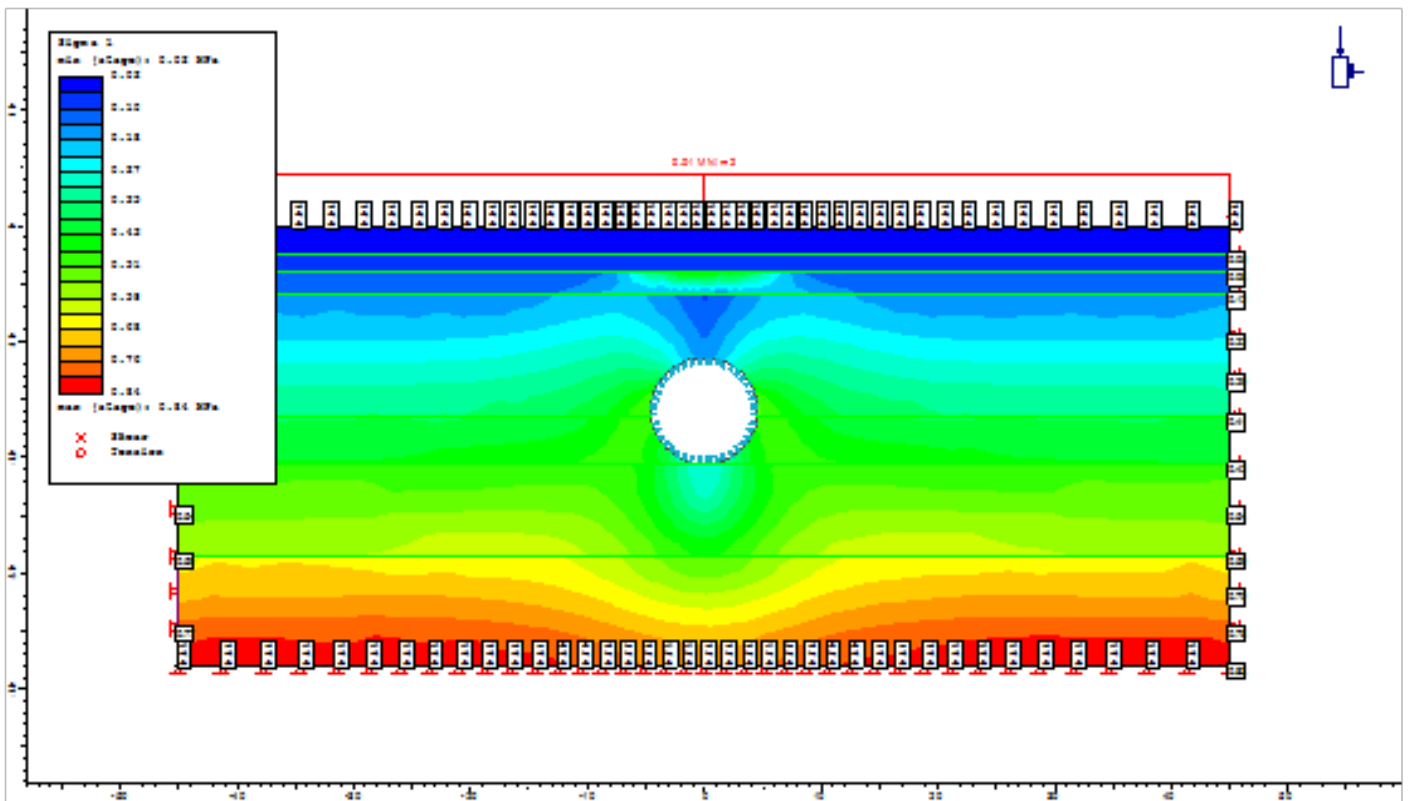
Εικόνα 7.70: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors



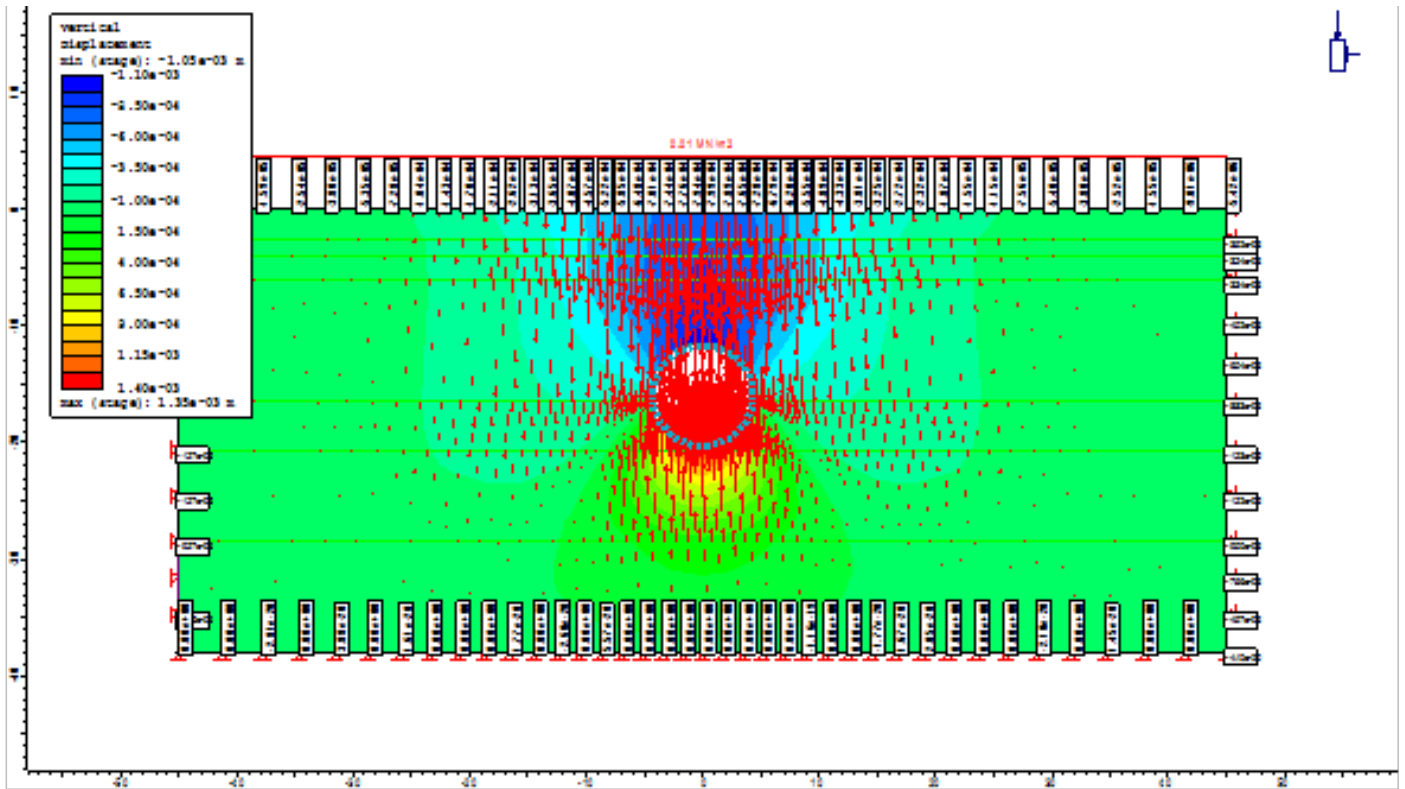
Εικόνα 7.71: stage 3 – σ_1 & stress trajectories



Εικόνα 7.72: stage 3 – sigma 3 & stress trajectories

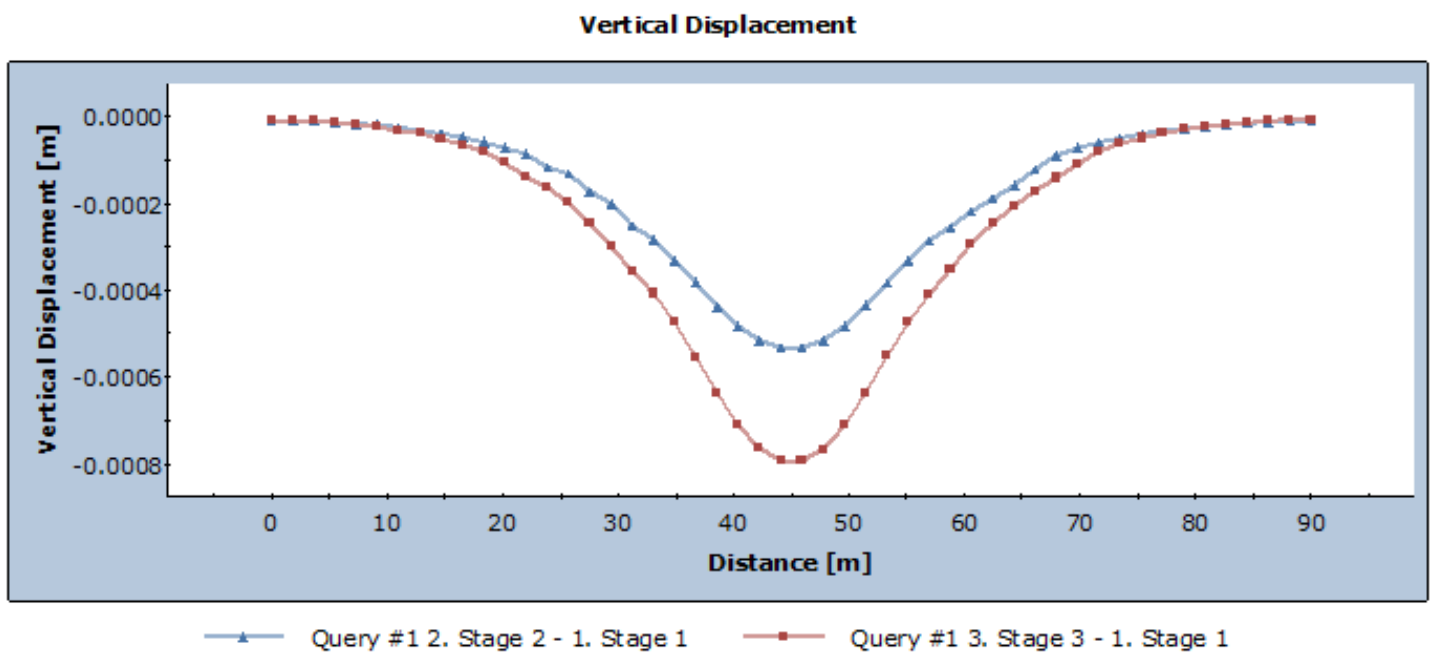


Εικόνα 7.73: stage 3 – sigma 1 & yielded elements

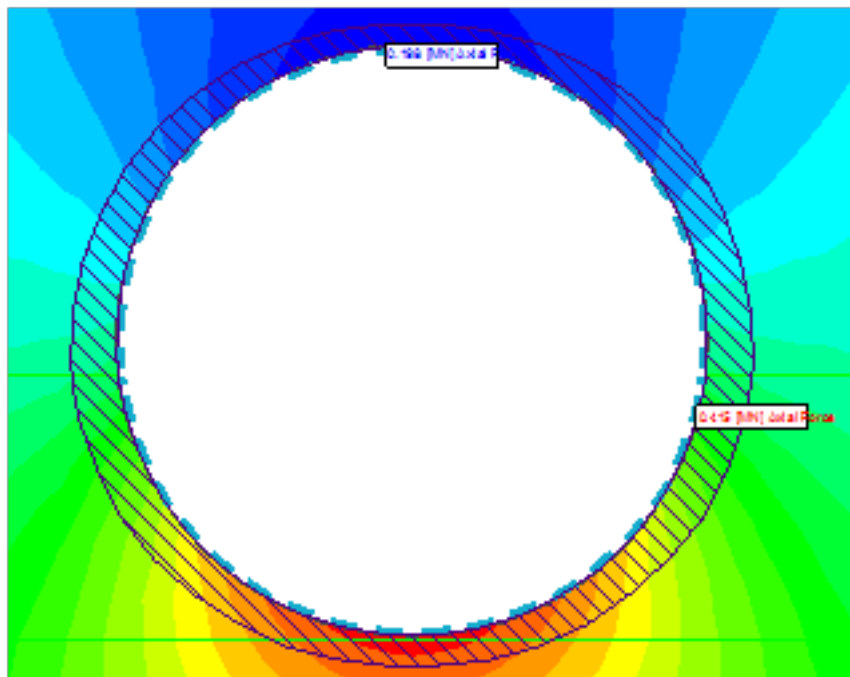


Εικόνα 7.74: stage 3 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors

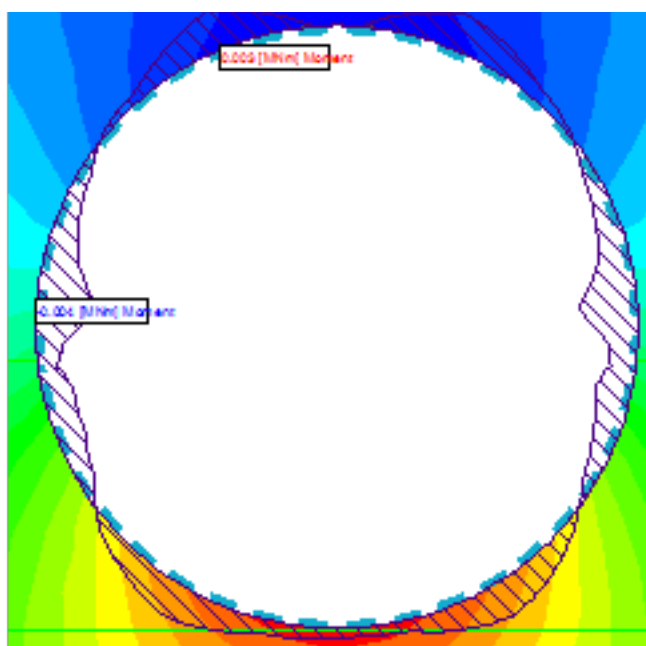
Έπειτα, μεταφέρθηκαν σε γράφημα οι κατακόρυφες καθιζήσεις των stage 2 και 3, ώστε να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο stage 3, υπολογίστηκαν η αξονική δύναμη, η ροπή κάμψης και η διατμητική δύναμη στο liner



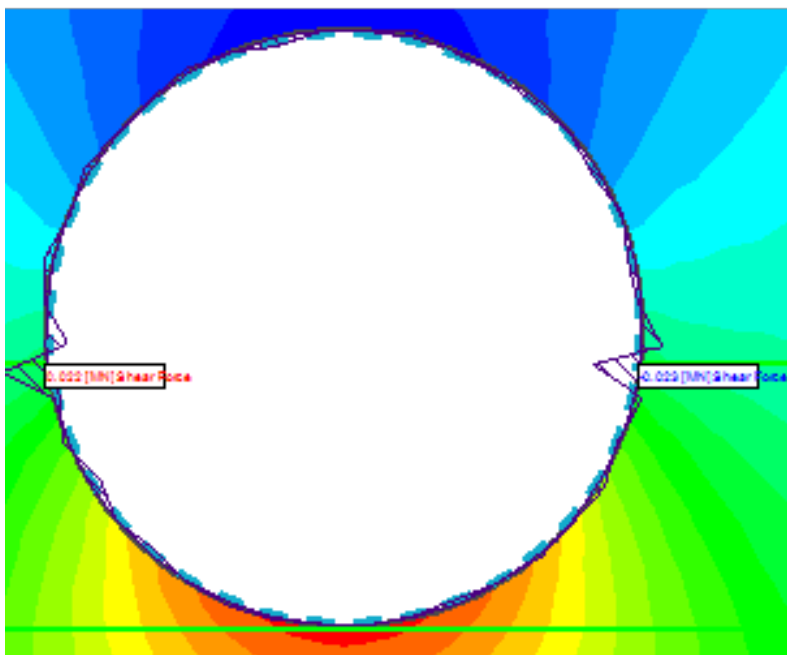
Εικόνα 7.75: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στα stage 2 και 3 (reference stage = stage 1)



Εικόνα 7.76: stage 3 - axial force στο liner



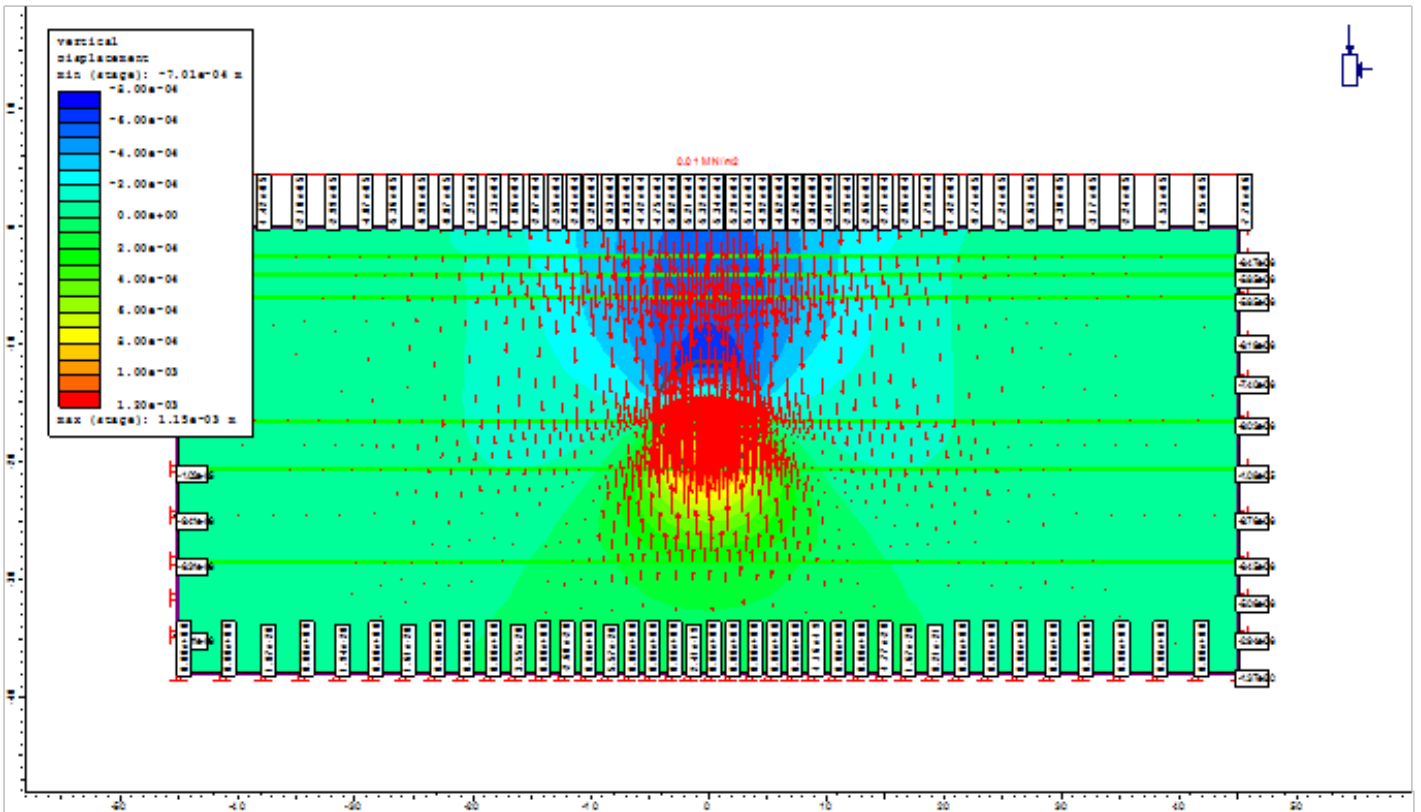
Εικόνα 7.77: stage 3 - bending moment στο liner



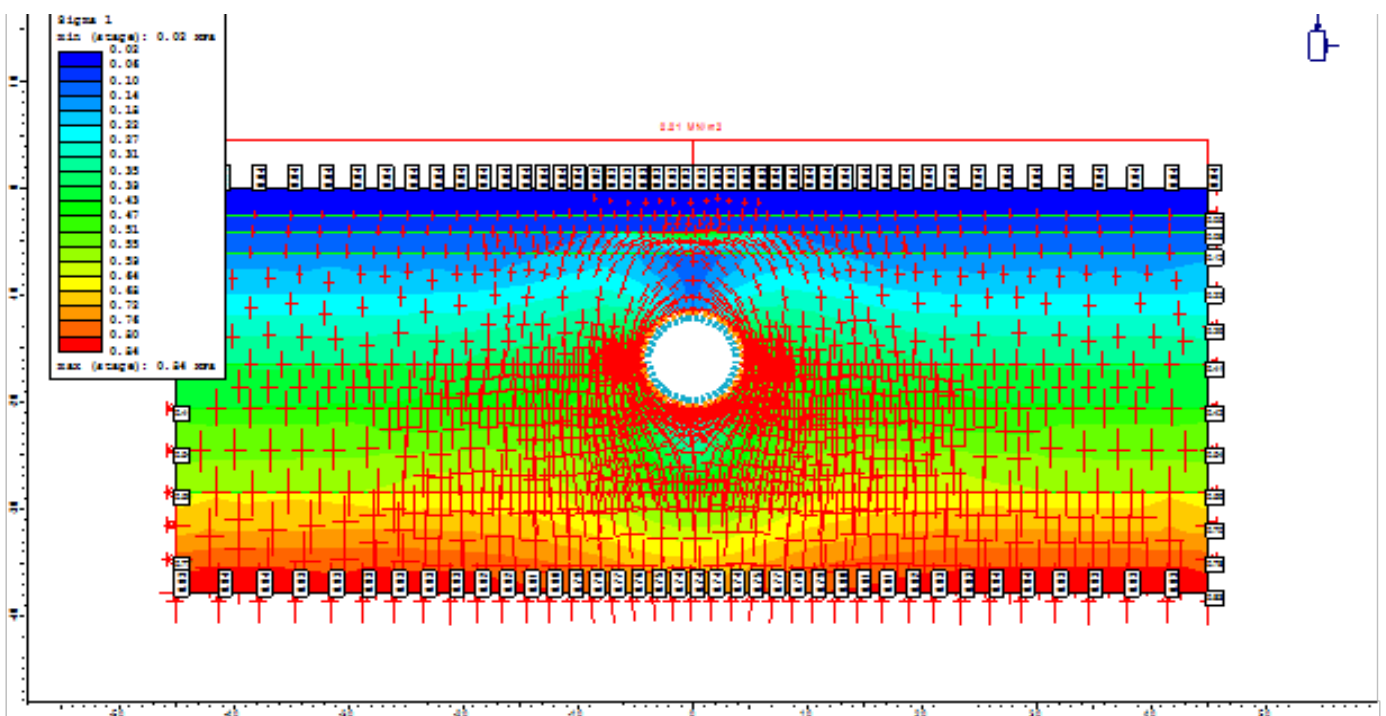
Εικόνα 7.78: stage 3 - shear force στο liner

Model 4

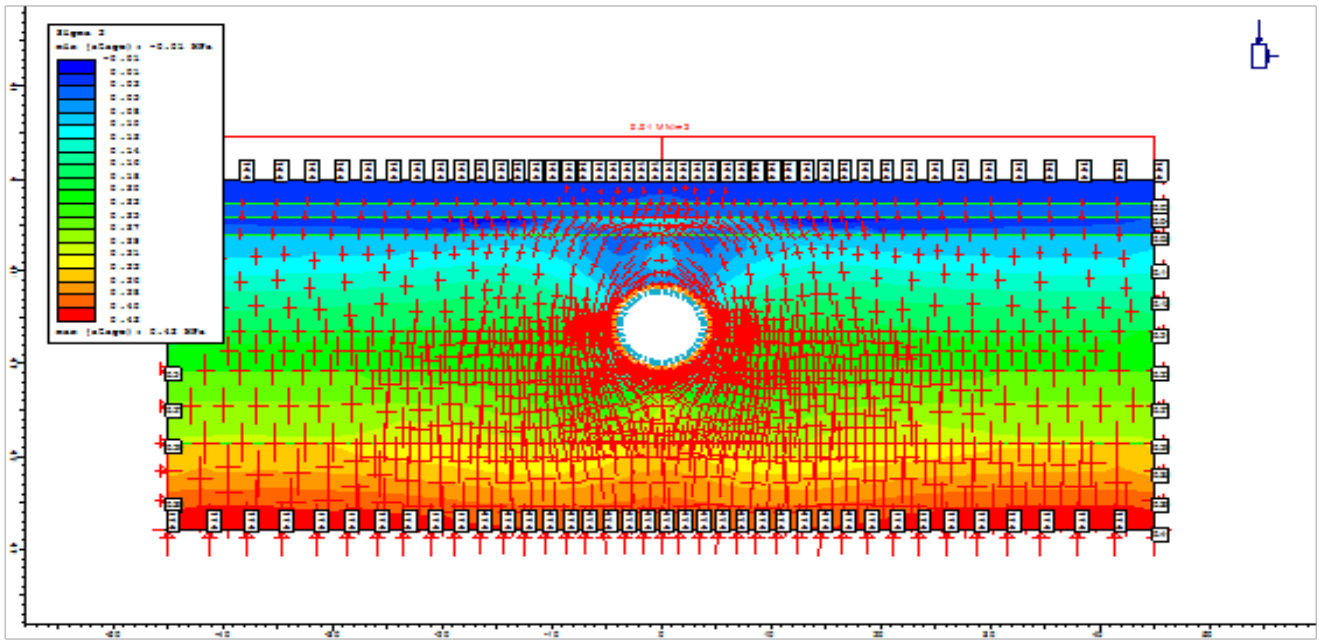
Για το stage 1 δεν έχουμε κάτι διαφορετικό, καθώς είναι όμοιο με αυτό του model 1. Στο stage 2 πραγματοποιήθηκε αποτόνωση των υλικών μέσα στη σήραγγα. Υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1. Στο stage 3 υπήρξε εκσκαφή της σήραγγας και τοποθέτηση interface. Υπολογίστηκαν οι τροχιές των τάσεων των σ_1 και σ_3 , καθώς και τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει της σ_1 . Ομοίως με το stage 2, υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1.



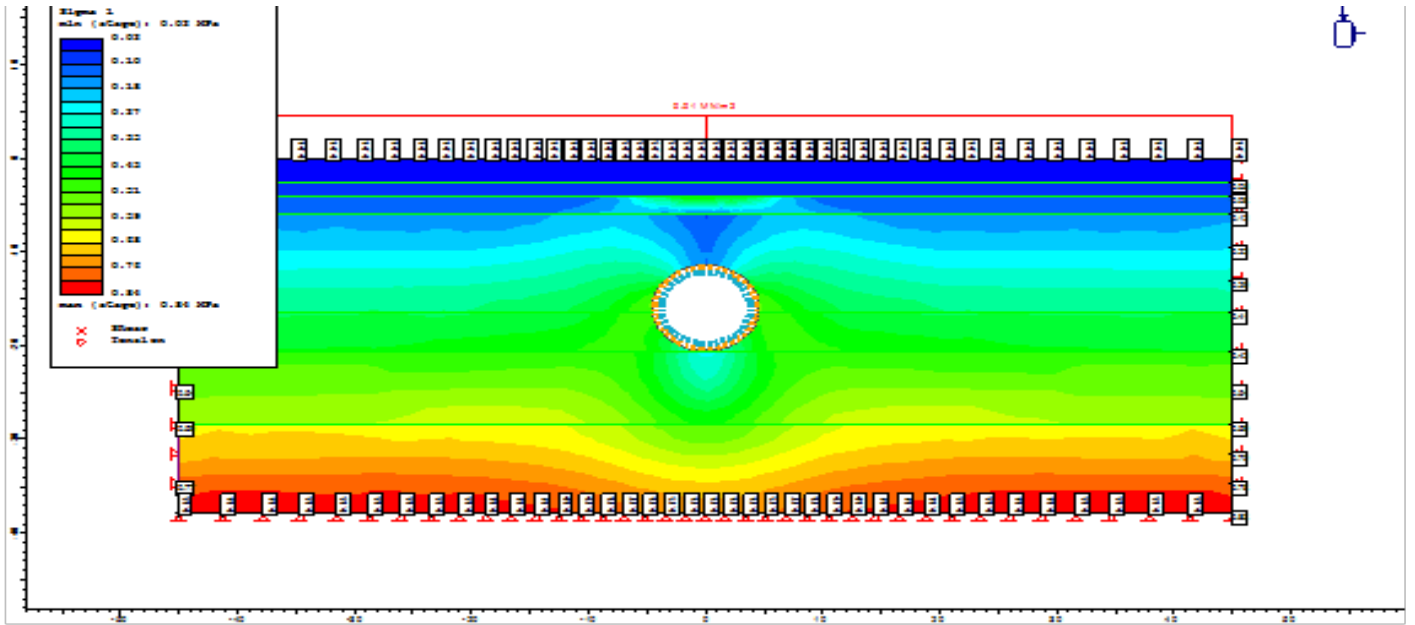
Εικόνα 7.79: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors



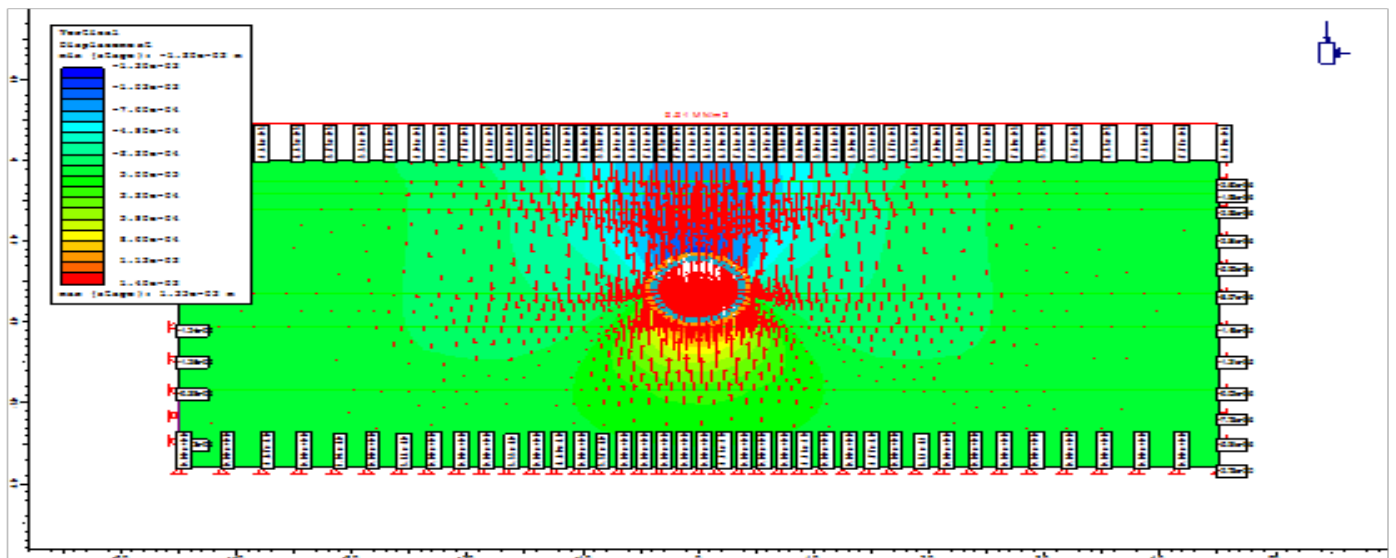
Εικόνα 7.80: stage 3 - σ_1 & stress trajectories



Εικόνα 7.81: stage 3 – sigma 3 & stress trajectories

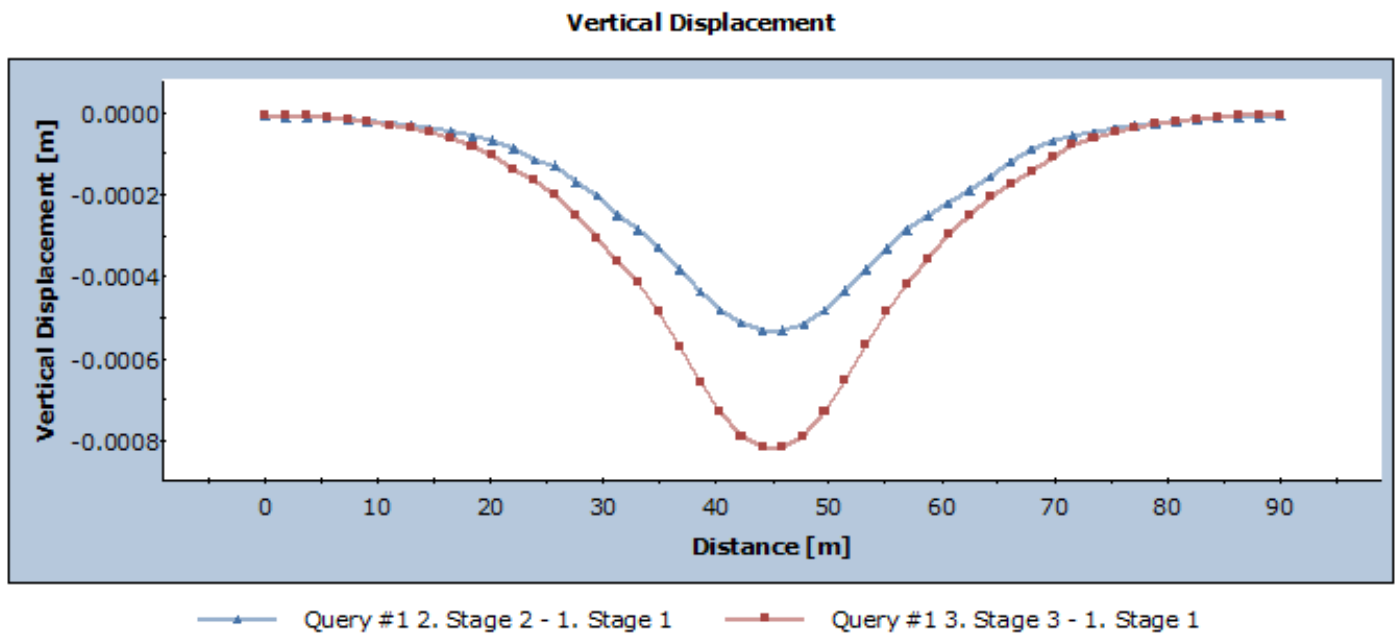


Εικόνα 7.82: stage 3 – sigma 1 & yielded elements

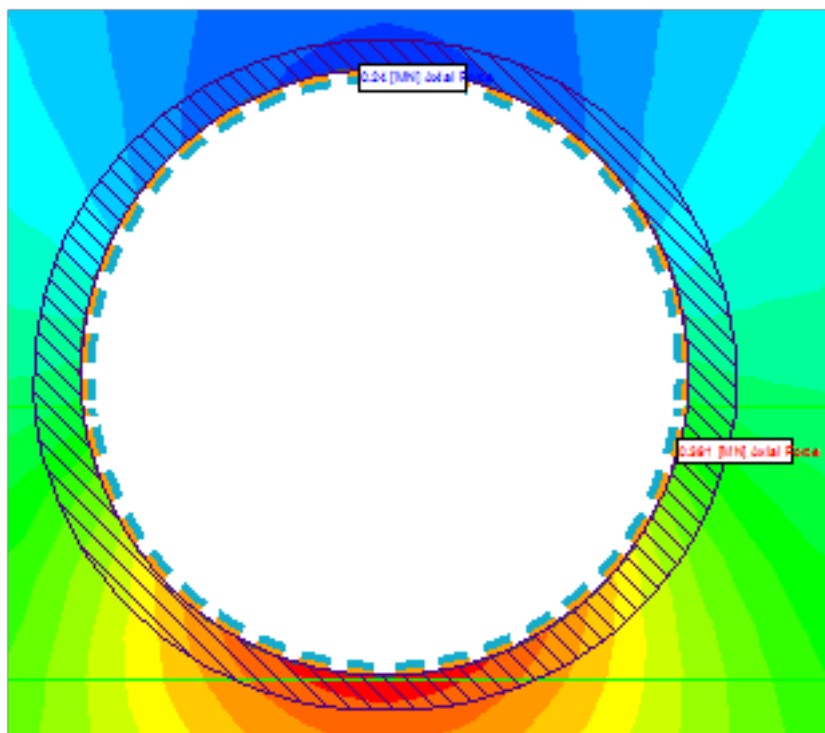


Εικόνα 7.83: stage 3 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors

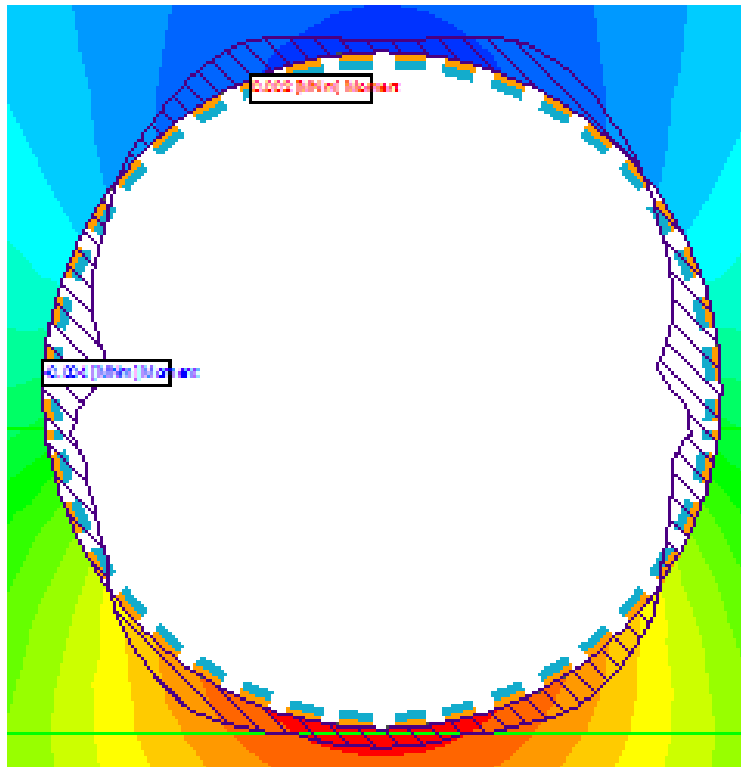
Έπειτα, μεταφέρθηκαν σε γράφημα οι κατακόρυφες καθιζήσεις των stage 2 και 3, ώστε να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο stage 3, υπολογίστηκαν η αξονική δύναμη, η ροπή κάμψης και η διατμητική δύναμη στο liner.



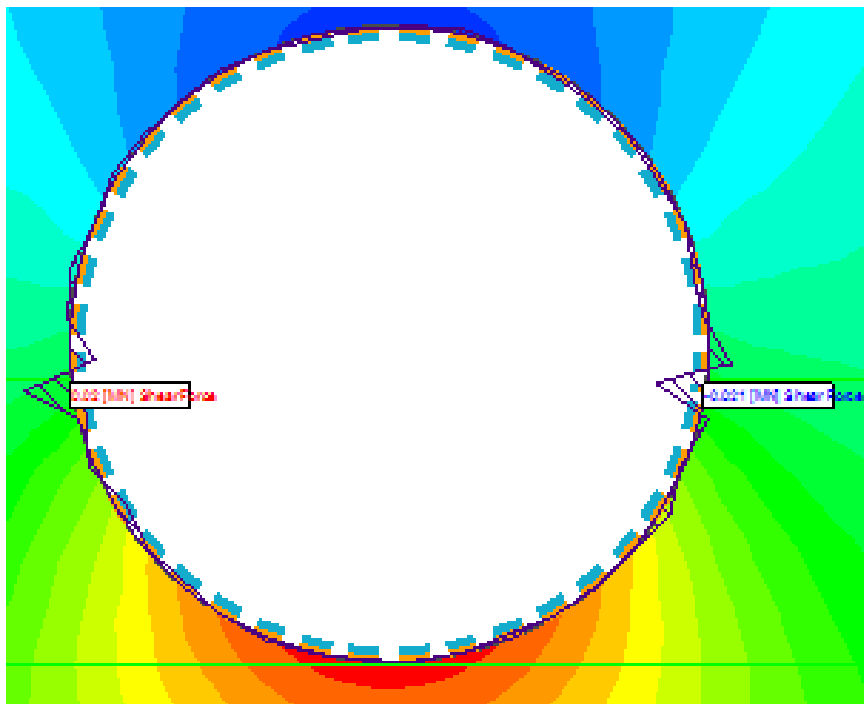
Εικόνα 7.84: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στα stage 2 και 3 (reference stage = stage 1)



Εικόνα 7.85: stage 3 - axial force στο liner



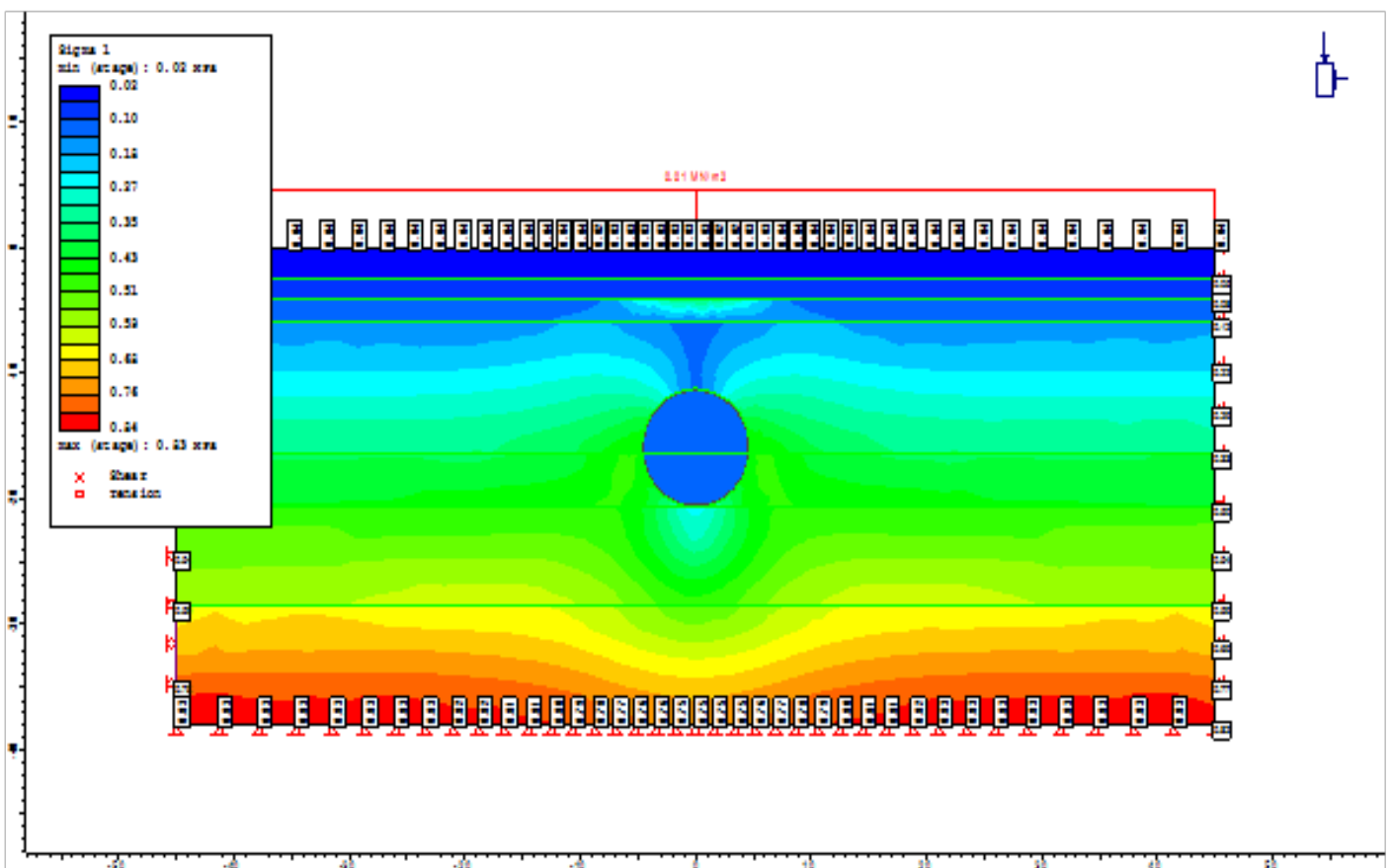
Εικόνα 7.86: stage 3 - bending moment στο liner



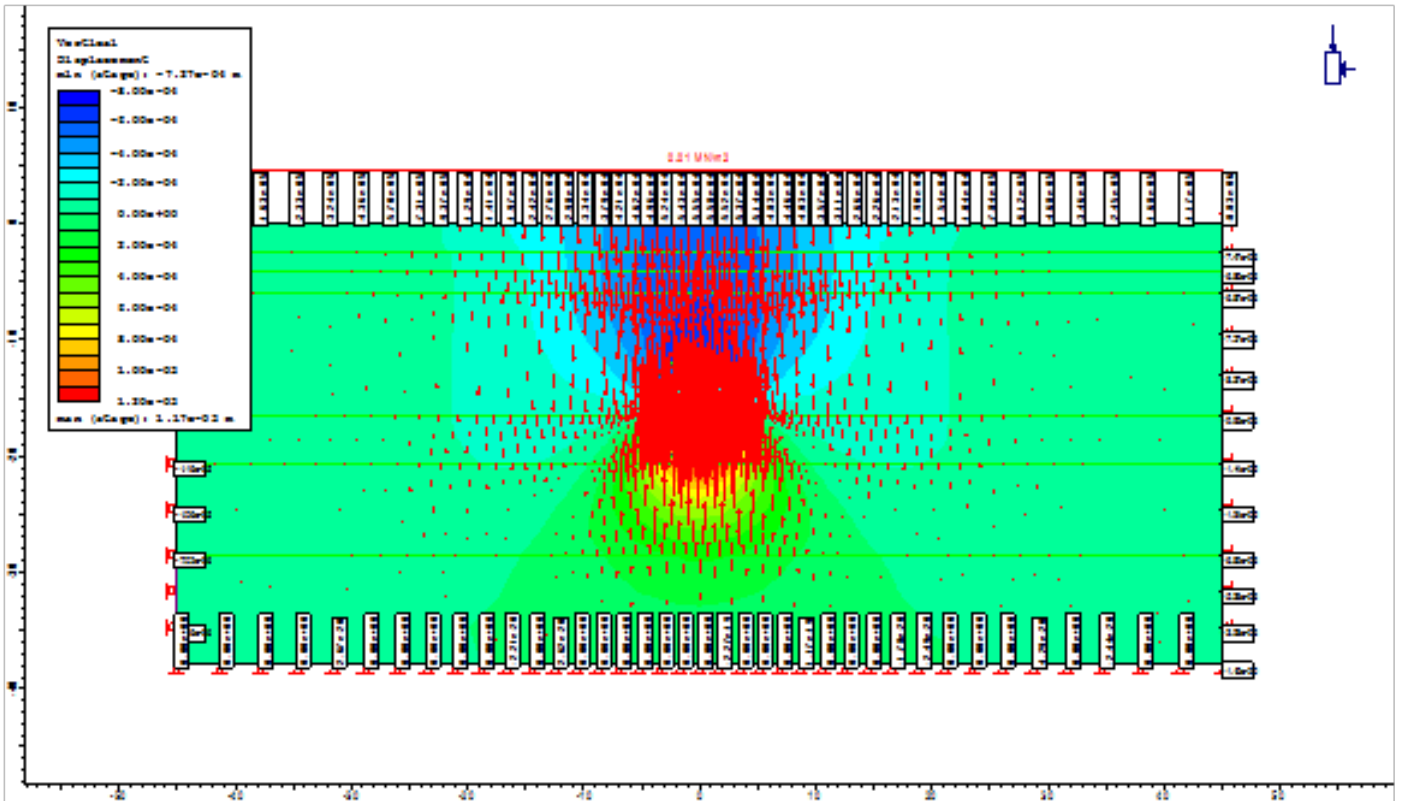
Εικόνα 7.87: stage 3 - shear force στο liner

Model 5

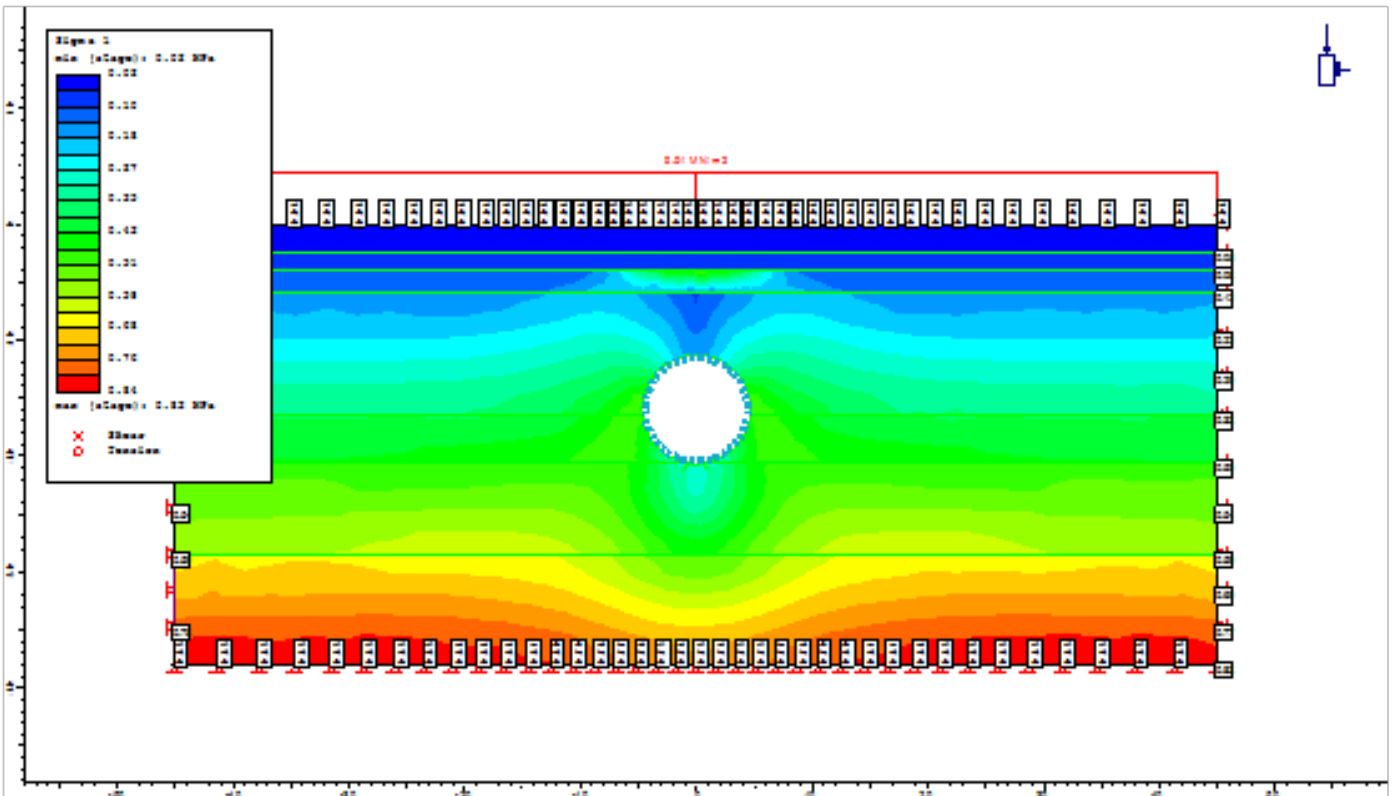
Για το stage 1 δεν υπήρξε κάτι διαφορετικό, καθώς είναι όμοιο με αυτό του model 1. Στο stage 2 πραγματοποιήθηκε αποτόνωση των υλικών μέσα στη σήραγγα. Στο stage 3 υπήρξε εκσκαφή της σήραγγας και τοποθέτηση ενός χαλύβδινου TBM shield εκτός της σήραγγας με διάμετρο περίπου 5cm μεγαλύτερη από αυτή της σήραγγας. Στα stage 2 και 3 υπολογίστηκαν τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει της σ_1 , καθώς και οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1. Έπειτα, στο stage 4, έγινε η τοποθέτηση του liner στη σήραγγα, καθώς και η τοποθέτηση του grout στο χώρο μεταξύ του Liner και του TBM shield. Υπολογίστηκαν οι τροχιές των τάσεων των σ_1 και σ_3 , καθώς και τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει της σ_1 . Ομοίως με τα stage 2 και 3, υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μαζί με τα διανύσματα μετατόπισης, αφαιρώντας τις μετατοπίσεις από το stage 1.



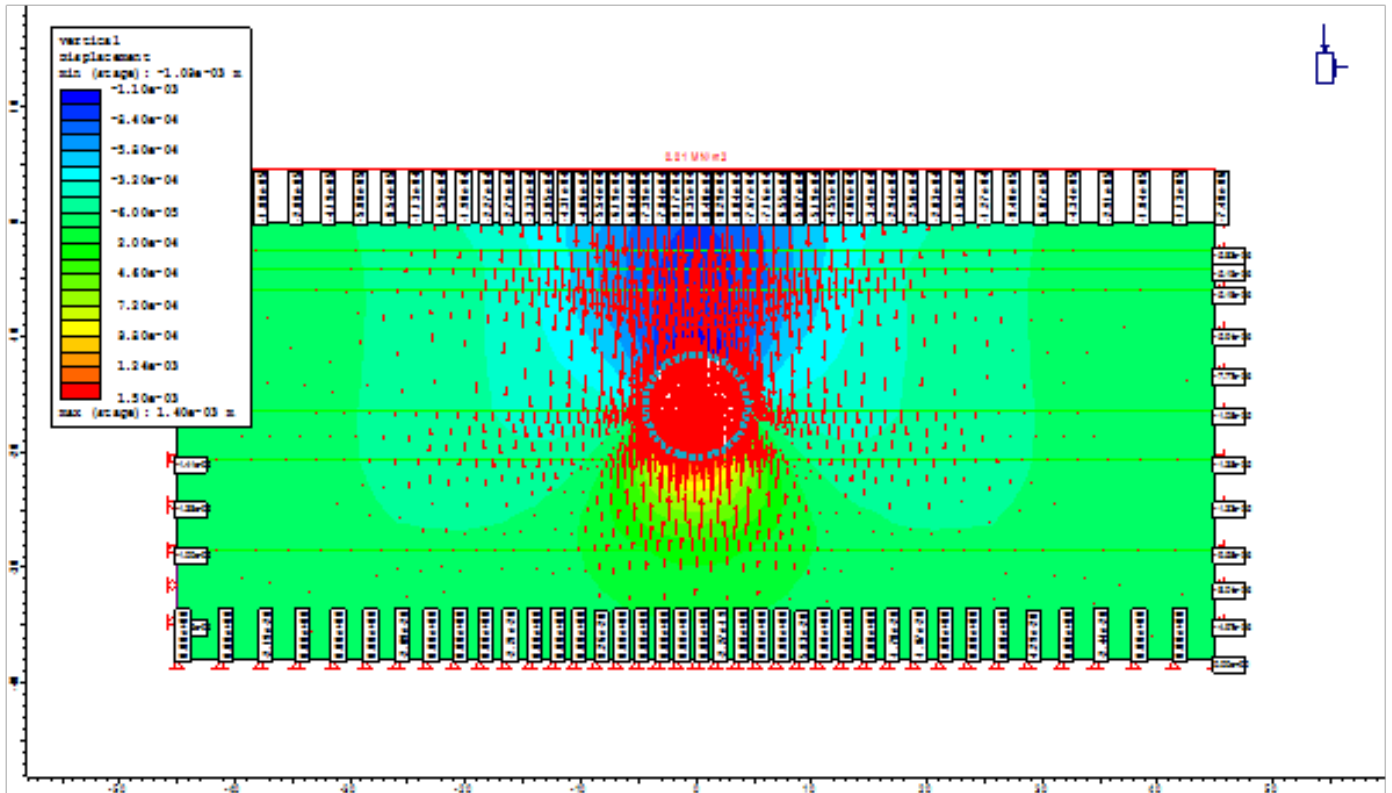
Εικόνα 7.88: stage 2 – σ_1 & yielded elements



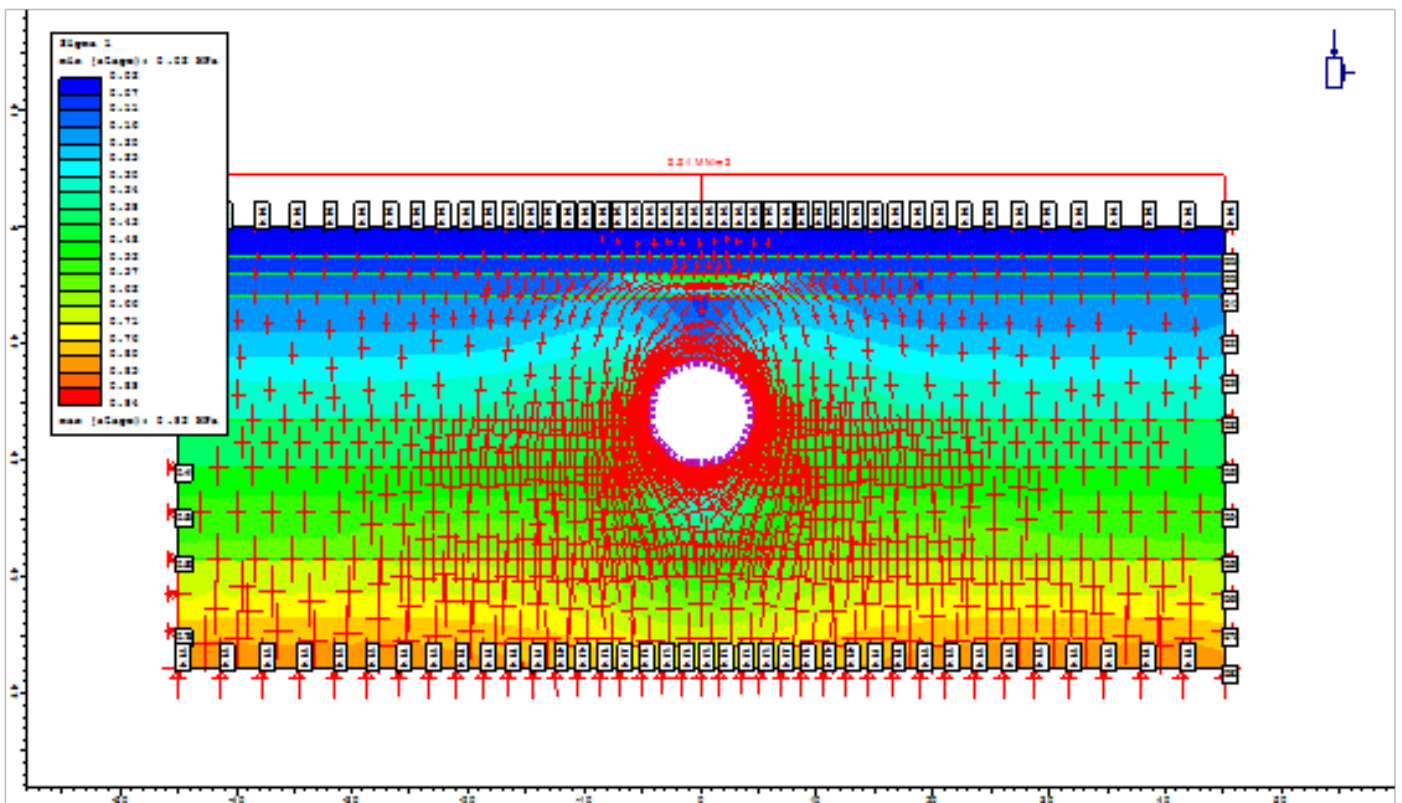
Εικόνα 7.89: stage 2 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors



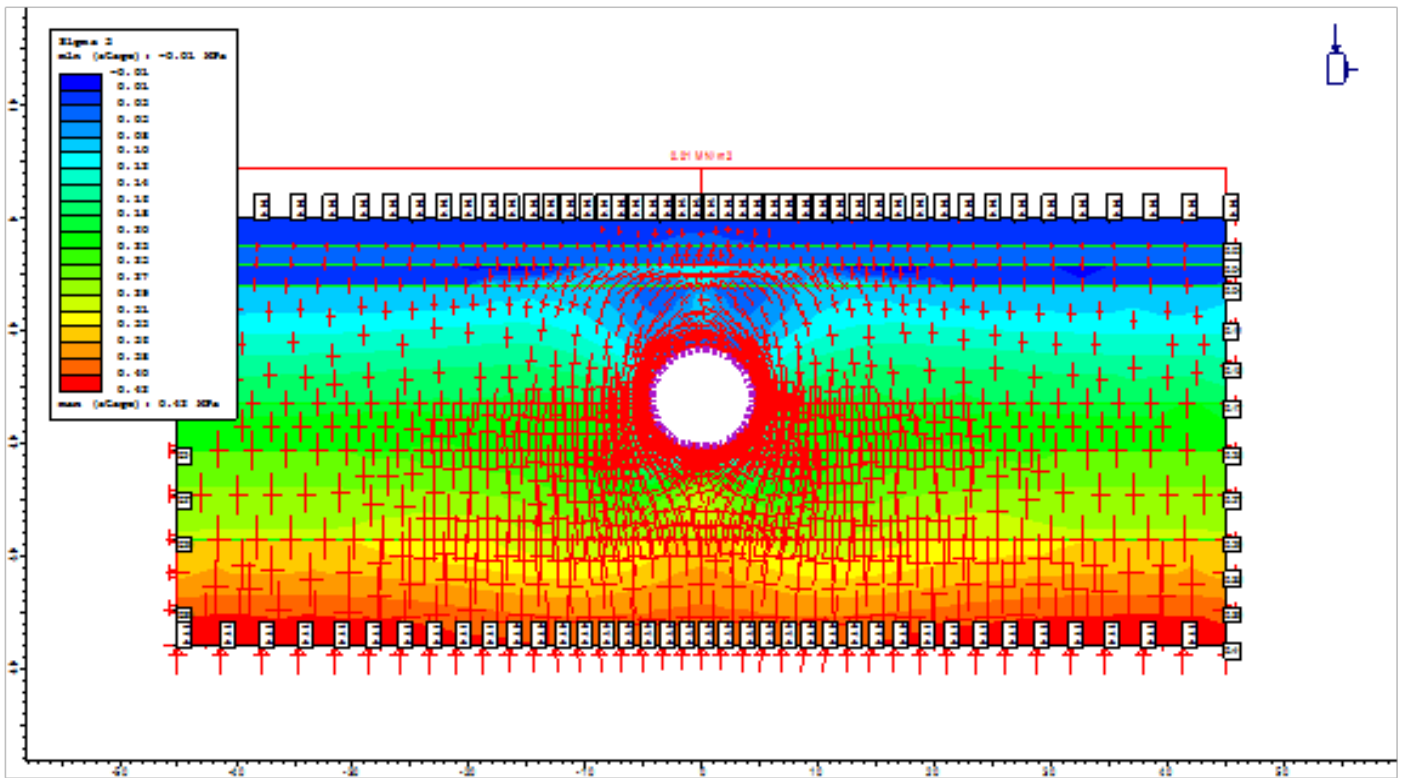
Εικόνα 7.90: stage 3 – sigma 1 & yielded elements



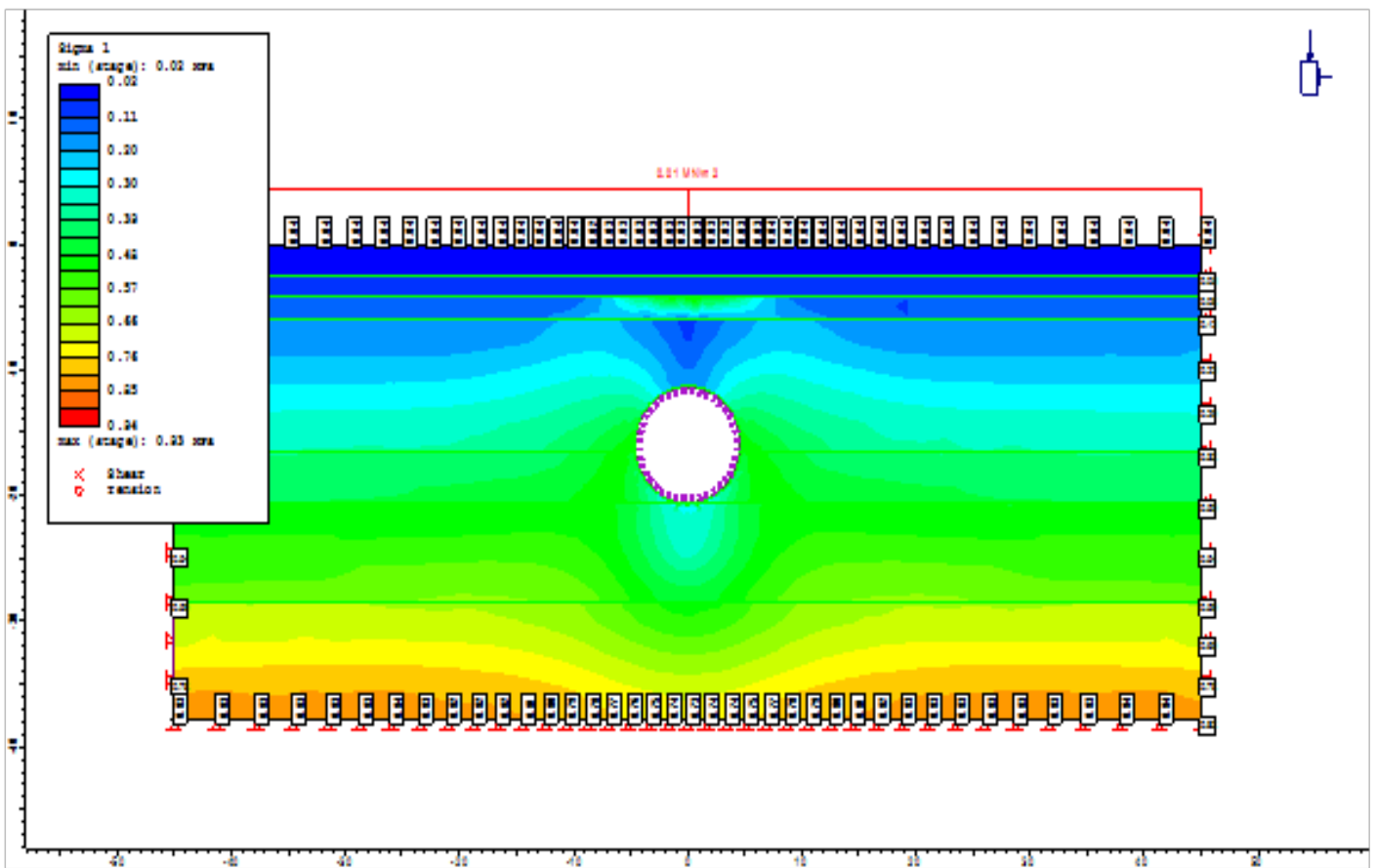
Εικόνα 7.91: stage 3 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors



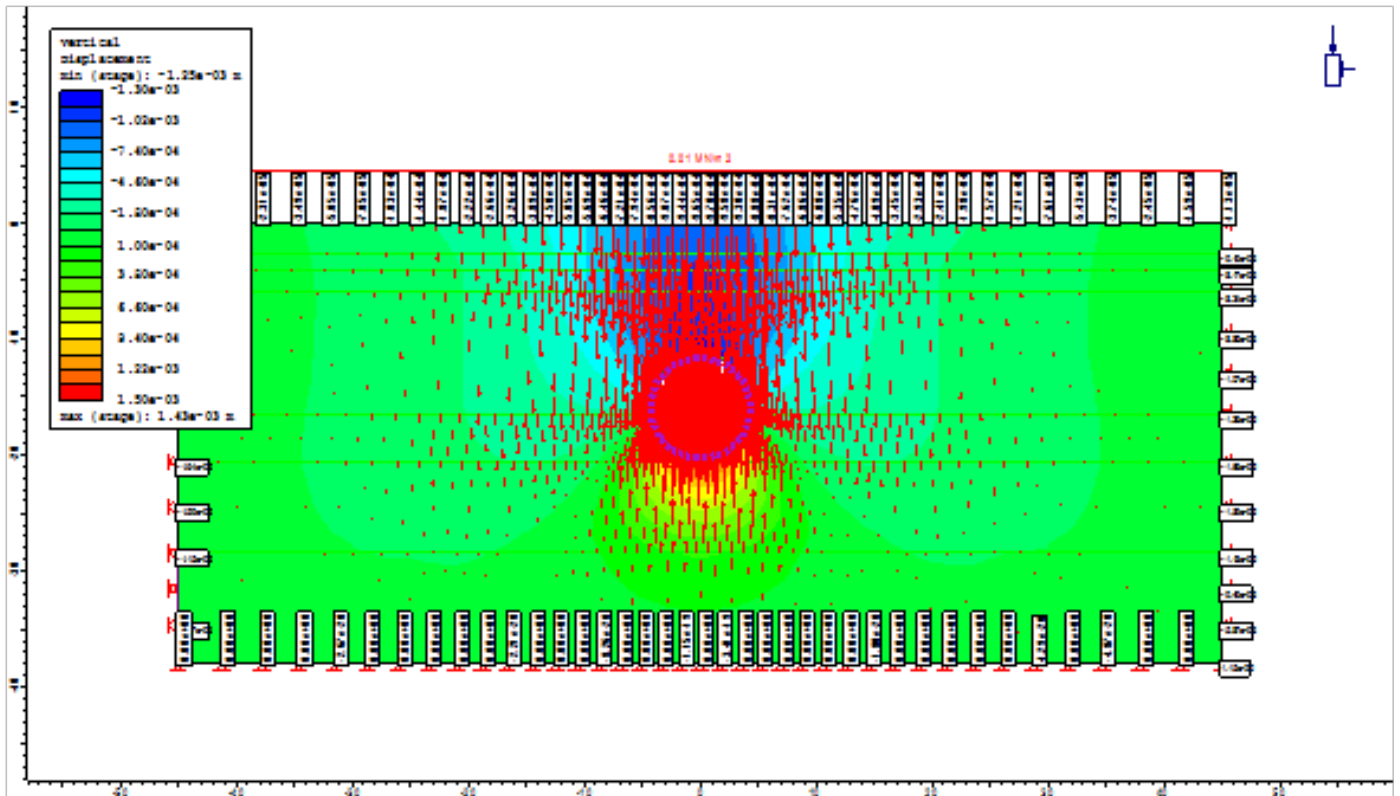
Εικόνα 7.92: stage 4 – sigma 1 & stress trajectories



Εικόνα 7.93: stage 4 – sigma 3 & stress trajectories



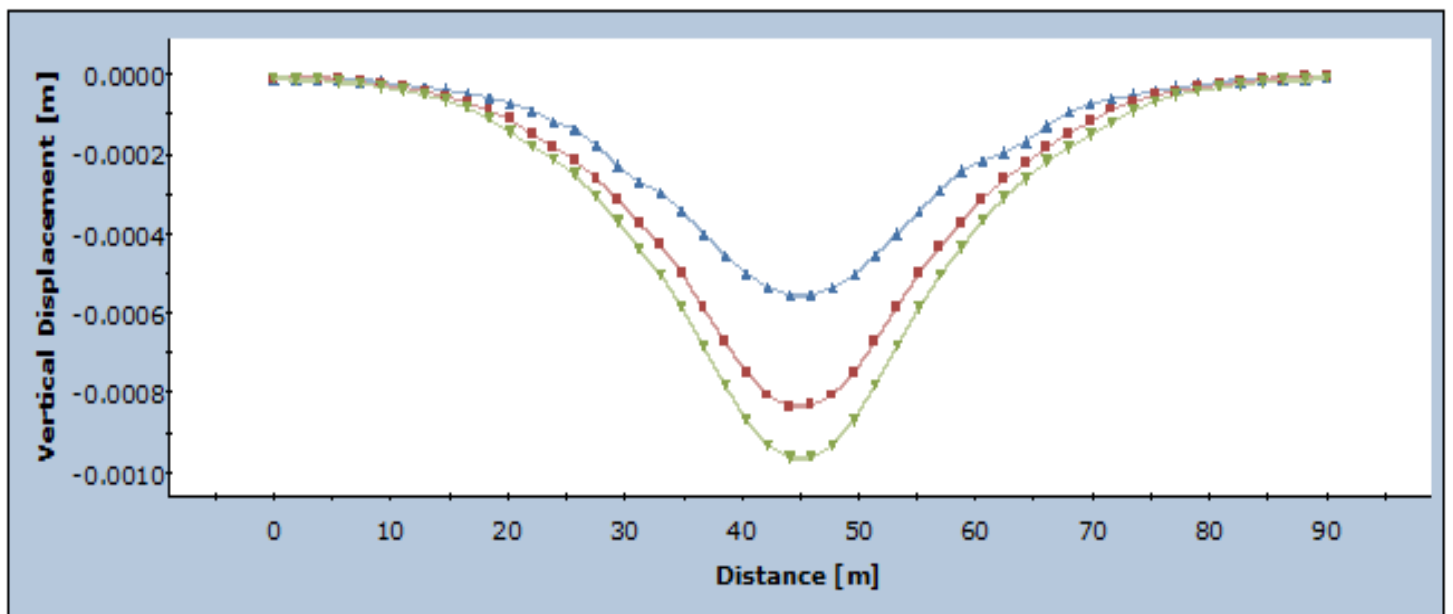
Εικόνα 7.94: stage 4 – sigma 1 & yielded elements



Εικόνα 7.95: stage 4 - vertical displacements (reference stage = stage 1) & displacement vectors

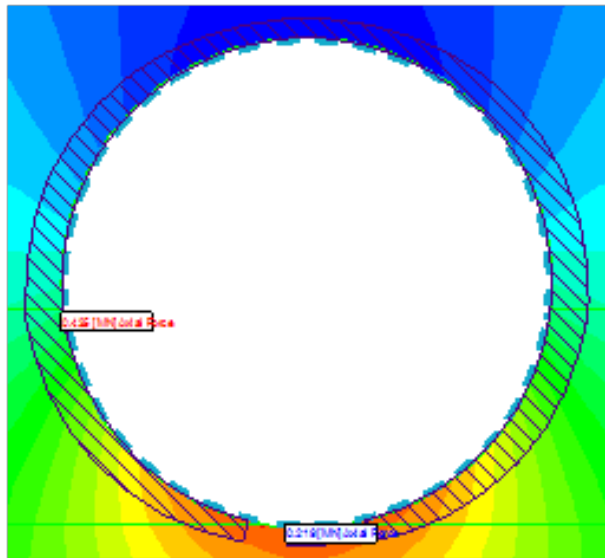
Έπειτα, μεταφέρθηκαν σε γράφημα οι κατακόρυφες καθιζήσεις των stage 2, 3 και 4, ώστε να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο stage 3 και 4, υπολογίστηκαν η αξονική δύναμη, η ροπή κάμψης και η διατμητική δύναμη στο TBM shield και στο liner αντίστοιχα.

Vertical Displacement

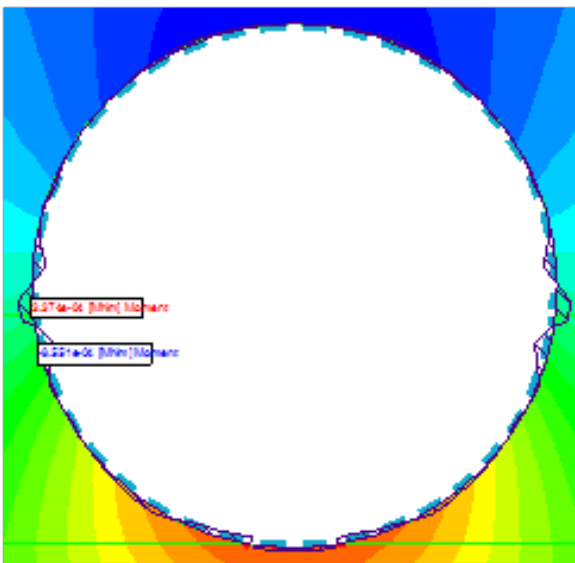


- ▲— Query #1 2. Stage 2 - 1. Stage 1
- Query #1 3. Stage 3 - 1. Stage 1
- ▼— Query #1 4. Stage 4 - 1. Stage 1

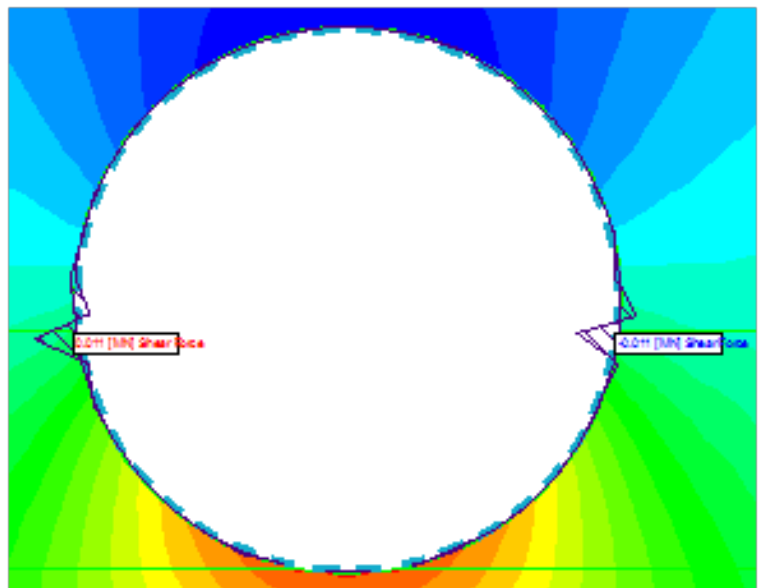
Εικόνα 7.96: Υπολογισθέντες καθιζήσεις στα stage 2, 3 και 4 (reference stage = stage 1)



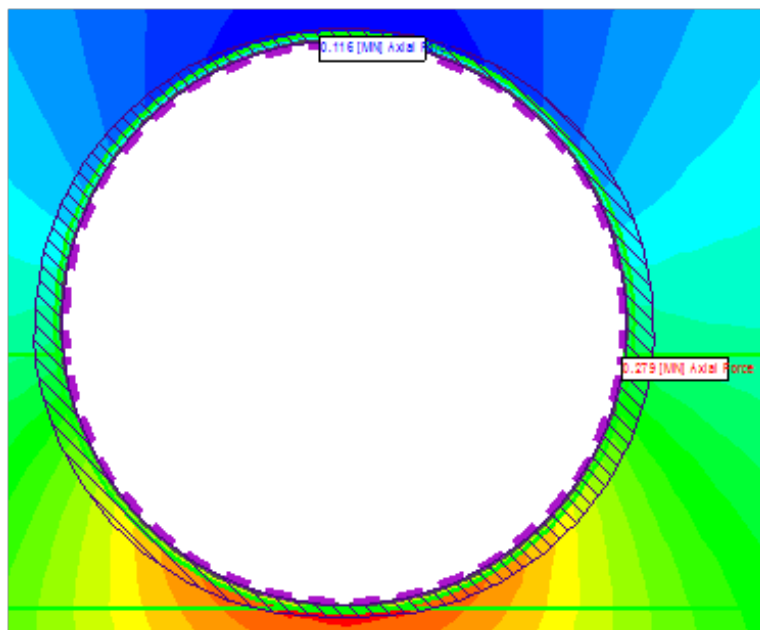
Εικόνα 7.97: stage 3 - axial force στοTBM shield



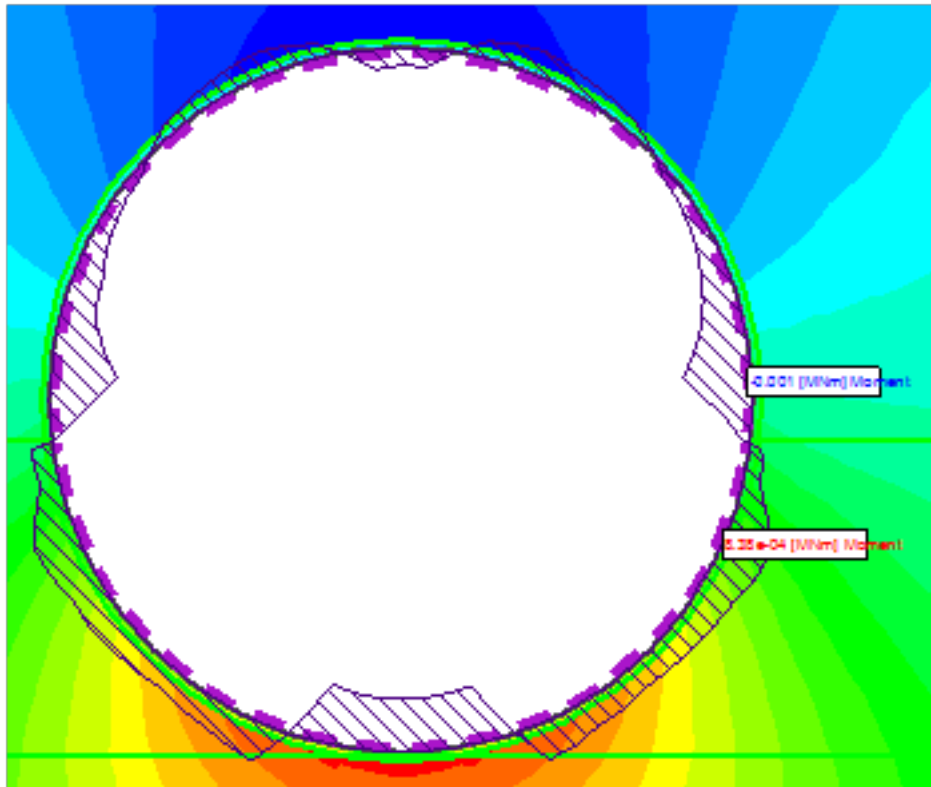
Εικόνα 7.98: stage 3 -bending moment στο TBM shield



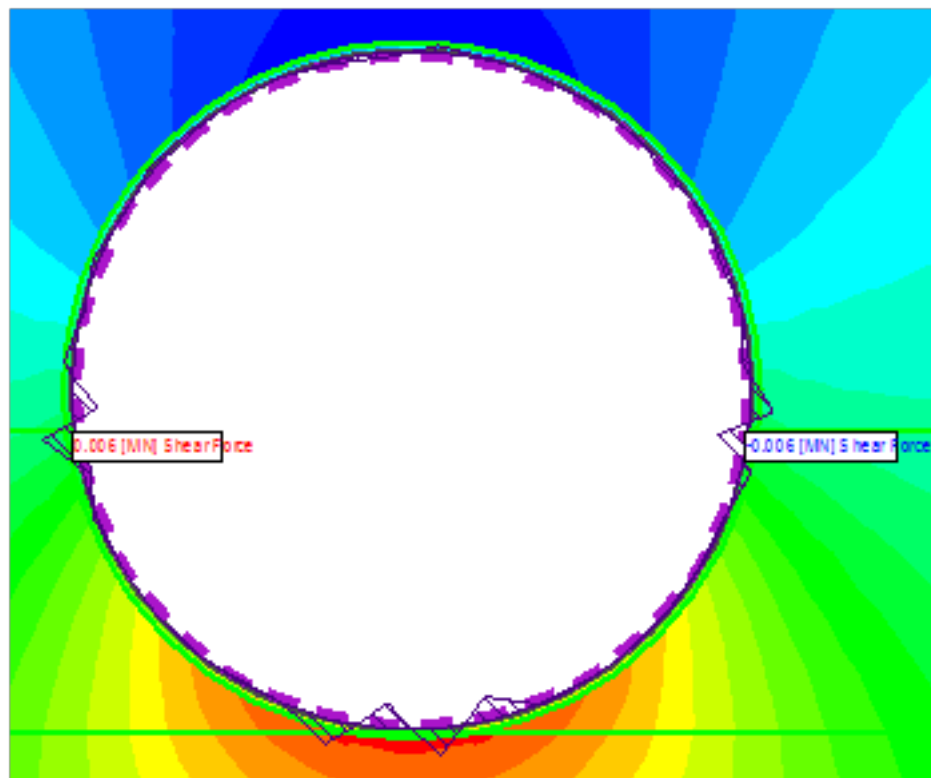
Εικόνα 7.99: stage 3 - shear force στοTBM shield



Εικόνα 7.100: stage 4 - axial force στο liner



Εικόνα 7.101: stage 4 - bending moment στο liner



Εικόνα 7.102: stage 4 - shear force στο liner

7.5 Σύγκριση Αποτελεσμάτων με χρήση μοντέλου *Hardening Soil*

Αφού πάρθηκαν τα αποτελέσματα σε κάθε στάδιο των μοντέλων που δημιουργήθηκαν, ακολούθησε η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους. Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας που περιγράφει αναλυτικά τα αποτελέσματα των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων, των ροπών κάμψης και των διατμητικών δυνάμεων. Σε όλα αυτά παρατίθενται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές τους.

Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης με χρήση *Hardening Soil*

Model	Stage	Vertical displacement max (m)	Axial force max (MN)	Axial force min (MN)	Bending moment max (MNm)	Bending moment min (MNm)	Shear force max (MN)	Shear force min (MN)
1	2	-0.00025	0.991	0.366	0.008	-0.008	0.058	-0.058
2	2	-0.0003	0.903	0.498	0.008	-0.008	0.052	-0.053
3	2	-0.00045						
	3	-0.0008	0.415	0.198	0.003	-0.004	0.022	-0.023
4	2	-0.00045						
	3	-0.0008	0.391	0.24	0.002	-0.004	0.02	-0.021
5	2	-0.00045						
	3	-0.0008	0.435	0.219	0.0003	-0.0004	0.011	-0.011
	4	-0.00095	0.279	0.116	0.0008	-0.001	0.006	-0.006

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, φαίνεται ότι, με τη χρήση του μοντέλου *Hardening Soil*, οι κατακόρυφες μετατοπίσεις (vertical displacement) εμφανίζουν τάση μείωσης σε όλα τα stage.

Η αξονική δύναμη (axial force) στα stage 2 των model 1 και 2 έχει πολύ υψηλότερη τιμή (και η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της) από ότι στα stage των υπόλοιπων model. Με μία πιο καλή παρατήρηση, θα δούμε ότι στα stage 3 των model 3, 4 και 5 έχει μειωθεί αρκετά, αλλά είναι πάνω κάτω η ίδια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτά τα stage έχει ήδη πραγματοποιηθεί η αποτόνωση των υλικών μέσα στη σήραγγα και έχει επέλθει η εκσκαφή της σήραγγας και η τοποθέτηση ενός liner διαφορετικού τύπου κάθε φορά ή ενός interface. Βέβαια, όσο αφορά το stage 4 του model 5, η αξονική δύναμη διαφοροποιείται και μειώνεται στο μισό περίπου των άλλων stage. Η μόνη εξήγηση σε αυτό είναι πιθανώς η ύπαρξη του υλικού grout, που υπάρχει μόνο σε αυτό το stage και σε κανένα άλλο.

Τέλος, όσο αφορά τη ροπή κάμψης (bending moment) και τη διατμητική δύναμη (shear force), και στις δύο συμβαίνει ότι ακριβώς αναφέρθηκε και στην αξονική δύναμη. Η μόνη διαφορά τους είναι ότι και στις δυο στο stage 4 του model 5 δεν υπάρχει αυτή η μείωση που υπήρχε στην αξονική δύναμη. Αντιθέτως, η μέγιστη τιμή της ροπής κάμψης παρουσιάζει μία μικρή αύξηση.

7.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων μεταξύ των μοντέλων Mohr – Coulomb και Hardening Soil

Η χρήση δύο διαφορετικών μοντέλων μεταξύ τους, δεν έγινε τυχαία. Αποσκοπούσε στη μεταξύ τους σύγκριση, προκειμένου να επιλεγεί ένα από τα δύο ως το προτιμότερο μοντέλο για μία ανάλογη αριθμητική προσομοίωση. Παρακάτω, θα αναλυθούν σε πίνακες οι διαφορές των αποτελεσμάτων των κατακόρυφων μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων, των ροπών κάμψης και των διατμητικών δυνάμεων που πήραμε με τη χρήση κάθε μοντέλου. Αρχικά όμως, για να είναι πιο ξεκάθαρο, θα παρουσιαστεί ένας πίνακας μέσα από τον οποίο θα φαίνεται ο αριθμός των stage που είχε το κάθε model. Να σημειωθεί πως αυτό ήταν κοινό στα μοντέλα Mohr – Coulomb και Hardening Soil.

Πίνακας 7.3: Σχέση model – stage

Model	Stage			
	1	2	3	4
1	•	•		
2	•	•		
3	•	•	•	
4	•	•	•	
5	•	•	•	•

• Κατακόρυφες Μετατοπίσεις:

Πίνακας 7.4: Σύγκριση Κατακόρυφων Μετατοπίσεων

Model	Stage	Vertical displacement max (m)	
		Mohr – Coulomb	Hardening Soil
1	2	0.00086	-0.00025
2	2	0.00077	-0.0003
3	2	-0.0015	-0.00045
	3	-0.0023	-0.0008
4	2	-0.0014	-0.00045
	3	-0.0022	-0.0008
5	2	-0.0016	-0.00045
	3	-0.0023	-0.0008
	4	-0.0025	-0.00095

Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις που έχουν προκύψει με τη χρήση του μοντέλου Mohr – Coulomb είναι εμφανώς μεγαλύτερες από αυτές που προέκυψαν με το μοντέλο Hardening Soil.

• Αξονικές Δυνάμεις:

Πίνακας 7.5: Σύγκριση Αξονικών Δυνάμεων

Model	Stage	Axial Force max (MN)		Axial Force min (MN)	
		Mohr – Coulomb	Hardening Soil	Mohr – Coulomb	Hardening Soil
1	2	1.432	0.991	0.601	0.366
2	2	1.377	0.903	0.716	0.498
3	2				
	3	0.452	0.415	0.205	0.198
4	2				
	3	0.435	0.391	0.233	0.24
5	2				
	3	0.452	0.435	0.223	0.219
	4	0.356	0.279	0.168	0.116

Οι αξονικές δυνάμεις που έχουν προκύψει με τη χρήση του μοντέλου Mohr – Coulomb είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που προέκυψαν με το μοντέλο Hardening Soil, τόσο στις μέγιστες όσο και στις ελάχιστες τιμές τους.

• Ροπή Κάμψης:

Πίνακας 7.6: Σύγκριση Ροπών Κάμψης

Model	Stage	Bending moment max (MNm)		Bending moment min (MNm)	
		Mohr – Coulomb	Hardening Soil	Mohr – Coulomb	Hardening Soil
1	2	0.055	0.008	-0.039	-0.008
2	2	0.056	0.008	-0.04	-0.008
3	2				
	3	0.02	0.003	-0.013	-0.004
4	2				
	3	0.02	0.002	-0.013	-0.004
5	2				
	3	0.0007	0.0003	-0.0009	-0.0004
	4	0.0007	0.0008	-0.001	-0.001

Οι τιμές της ροπής κάμψης που έχουν προκύψει με τη χρήση του μοντέλου Mohr – Coulomb είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που προέκυψαν με το μοντέλο Hardening Soil, τόσο στις μέγιστες όσο και στις ελάχιστες τιμές της.

• Διατμητικές Δυνάμεις:

Πίνακας 7.7: Σύγκριση Διατμητικών Δυνάμεων

Model	Stage	Shear force max (MN)		Shear force min (MN)	
		Mohr – Coulomb	Hardening Soil	Mohr – Coulomb	Hardening Soil
1	2	0.097	0.058	-0.098	-0.058
2	2	0.091	0.052	-0.092	-0.053
3	2				
	3	0.029	0.022	-0.029	-0.023
4	2				
	3	0.027	0.02	-0.028	-0.021
5	2				
	3	0.02	0.011	-0.02	-0.011
	4	0.014	0.006	-0.014	-0.006

Οι τιμές των διατμητικών δυνάμεων που έχουν προκύψει με τη χρήση του μοντέλου Mohr – Coulomb είναι αρκετά μεγαλύτερες από αυτές που προέκυψαν με το μοντέλο Hardening Soil, τόσο στις μέγιστες όσο και στις ελάχιστες τιμές τους.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

Η ιστορία του Μετρό της Αθήνας ξεκινάει από το 1869, όταν εγκαινιάζεται η πρώτη σιδηροδρομική γραμμή (υπαίθρια) και μέχρι το 1895 έχει κατασκευαστεί το πρώτο υπόγειο τμήμα. Το 1991 είναι η χρονιά όπου ξεκινάει η κατασκευή του νέου Μετρό της Αθήνας με ανάπτυξη υπόγειου δικτύου. Έπειτα από την ολοκλήρωση του πρώτου τμήματος των 2 Γραμμών του Μετρό, ακολούθησε η επέκταση στους. Έτσι, φτάνουμε στο 2008 όπου και ξεκινάει η κατασκευή της επέκτασης της Γραμμής 3 προς τα Δυτικά Προάστια με κατάληξη τον Πειραιά. Περιλάμβανε την κατασκευή υπόγειας σιδηροδρομικής γραμμής συνολικού μήκους 7,6 χλμ. με 6 σύγχρονους σταθμούς. Οι σταθμοί αυτοί είναι οι εξής: ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ, ΚΟΥΡΥΔΑΛΛΟΣ, ΝΙΚΑΙΑ ΜΑΝΙΑΤΙΚΑ, ΠΕΙΡΑΙΑΣ, ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΘΕΑΤΡΟ ΠΕΙΡΑΙΑ. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζονται οι εδαφικές συνθήκες και οι λειτουργίες διάνοιξης της σήραγγας του Μετρό στο κομμάτι της επέκτασης 3 από το Σταθμό «ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ» έως το Σταθμό «ΚΟΥΡΥΔΑΛΛΟ». Έπειτα, εντοπίστηκε το σημείο αυτού του τμήματος όπου εμφάνισε τις μεγαλύτερες καθιζήσεις, προκειμένου να μελετηθεί. Στο σημείο αυτό δημιουργήθηκε μία τομή της σήραγγας, στο πρόγραμμα RS2, και αφού προσομοιώθηκε σε κανονικές συνθήκες, πραγματοποιήθηκε η αριθμητική προσομοίωσή της και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Μάλιστα, η αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε δύο διαφορετικά καταστατικά μοντέλα του ίδιου προγράμματος, με στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στοιχεία Κατασκευής της σήραγγας:

Αρχικά, το σημείο της τομής της σήραγγας που πάρθηκε για τη μελέτη, βρισκόταν γύρω από διάφορα εδαφικά υλικά. Πιο συγκεκριμένα, το πέριξ της σήραγγας αποτελούνταν από μάρμα και αργιλόλιθο. Βέβαια, σε ανώτερα και κατώτερα σημεία από το τμήμα της σήραγγας σε εκείνη τη θέση συναντήθηκαν τεχνητές αποθέσεις, μανδύας αποσάθρωσης λιμναίες μαργαϊκές αποθέσεις, μαργαϊκός ασβεστόλιθος, κροκαλοπαγές, λατυποπαγές, ψηφιδωπαγές, ασθενώς συγκολλημένο και μεταψαμμίτες. Κάθε υλικό από αυτά έπαιξε το ρόλο του στη διάρκεια της διάνοιξης.

Προκειμένου να κατασκευαστεί και να επενδυθεί η σήραγγα, μετά την του TBM, τοποθετούνταν αυτόματα κάτω από την ασπίδα, τα ειδικά προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, δημιουργώντας έτσι ένα δακτύλιο. Οι δακτύλιοι συνδέονται μεταξύ τους με ειδικούς κοχλίες και πείρους μεγάλης αντοχής. Τα σημεία επαφής μεταξύ της επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία και της καμπύλης της εκσκαφής, δημιουργούν το «δακτυλιοειδές κενό», το οποίο συνήθως πληρώνεται με ένεμα με τη χρήση σωλήνων έγχυσης υπό πίεση που είναι ενσωματωμένες στο ουραίο περίβλημα. Κάπως έτσι κατασκευάζεται η σήραγγα. Το εκτοξευμένο σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν κατηγορίας C20/25.

Οι παράμετροι υλικού και γεωμετρίας διατομής που αντιστοιχούν σε αυτό, είναι οι παρακάτω:

- **Διατομή: Ορθογωνική πάχους 0.25 x μήκους 0.30 (m)**
- **Χαρακτηριστική Αντοχή: $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$**
- **Μέτρο Ελαστικότητας: $E = 30 \text{ GPa}$**
- **Λόγος Poisson: $\nu = 0.20$**
- **Ειδικό Βάρος: $\gamma = 2.5 \text{ t/m}^3$ (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)**

Παράμετροι Λειτουργίας του TBM:

Οι παράμετροι λειτουργίας του TBM που πάρθηκαν υπόψη είναι οι παρακάτω:

- **Ρυθμοί Παραγωγής**
- **Δυνάμεις ώσης, ροπές στρέψης, ρυθμοί εκσκαφής και ταχύτητες περιστροφής του ατέρμονος κοχλία**
- **Πίεση υποστήριξης μετώπου και καθιζήσεις στην επιφάνεια**
- **Πίεση ενέματος**
- **Βάρος του εκσκαφθέντος υλικού**
- **Όγκος του ενέματος**

Καθιζήσεις που εμφανίστηκαν:

Πριν τη διάνοιξη της σήραγγας, είχε πραγματοποιηθεί μελέτη προκειμένου να προβλεφτούν οι καθιζήσεις που θα προκληθούν έπειτα από τη διάνοιξη. Στο σημείο της τομής που μελετήθηκε είχαν προβλεφτεί καθιζήσεις της τάξης των 18mm, πολύ χαμηλότερες από τις επιτρεπόμενες καθιζήσεις. Ωστόσο, μετά το πέρας της διάνοιξης παρατηρήθηκε ότι οι καθιζήσεις που προέκυψαν στο εν λόγω σημείο, δεν ξεπέρασαν τα 7mm. Αυτό σημαίνει πως οι καθιζήσεις ήταν μικρές και εντός των αποδεκτών ορίων.

Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων:

Μέσα από την αριθμητική ανάλυση με τα δύο διαφορετικά καταστατικά μοντέλα, αντλήθηκαν διάφορα στοιχεία για το καθένα. Αφ' ενός, με τη χρήση του μοντέλου Mohr - Coulomb η μέγιστη κατακόρυφη καθίζηση έφτασε τα 2.5mm και η μέγιστη αξονική δύναμη έφτασε τα 1.43MN. Όσο αφορά τη ροπή κάμψης και τη διατμητική δύναμη, παρέμειναν σε χαμηλές τιμές και οι δύο. Αφ' ετέρου, με τη χρήση του μοντέλου Hardening Soil η μέγιστη κατακόρυφη καθίζηση έφτασε τα 0.95mm και η μέγιστη αξονική δύναμη έφτασε τα 0.99MN. Όσο αφορά τη ροπή κάμψης και τη διατμητική δύναμη, παρέμειναν πολύ χαμηλές και οι δύο.

Σύγκριση αποτελεσμάτων Mohr - Coulomb με Hardening Soil:

- 1) Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι με τη χρήση του καταστατικού μοντέλου Mohr - Coulomb παρατηρήθηκε ότι, σε κάποια από τα μοντέλα που εξετάστηκαν, εμφανίστηκαν κάποιες κατακόρυφες μετατοπίσεις με ανύψωση. Αντίθετα, με τη χρήση του Hardening Soil δε συνέβη τίποτα τέτοιο.
- 2) Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις που προέκυψαν με το Mohr - Coulomb ήταν αρκετά μεγαλύτερες από αυτές που προέκυψαν με τη χρήση του Hardening Soil.
- 3) Ομοίως, οι αξονικές δυνάμεις που προέκυψαν με τη χρήση του Mohr - Coulomb ήταν πολύ μεγαλύτερες από ότι με το Hardening Soil, τόσο στις μέγιστες όσο και στις ελάχιστες τιμές τους.
- 4) Κοινό σημείο από τη χρήση και των δύο καταστατικών μοντέλων είναι το γεγονός πως και στα δύο οι ροπές κάμψης και οι διατμητικές δυνάμεις παρέμειναν αρκετά χαμηλές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε., Ιούνης 2019, «Αναδρομική Ανάλυση Μεσοδιαστήματος 2 έως Χ.Θ. 3+625».
- ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε., Ιούνης 2019, «Γεωτεχνική Μελέτη Μεσοδιαστήματος 2 έως Χ.Θ. 3+625».
- Σοφιανός Α. Ι. (2018), «Διάνοιξη Σηράγγων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Γιαταγάνα Ξ. (2014), «Επέκταση του μετρό Αθήνας, γραμμή 3, τμήμα Χαϊδάρι – Πειραιάς», Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κοσκινιώτης Δ. (2019), «Μελέτη Καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη με ΤΒΜ της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας στο τμήμα Αργυρούπολη – Ελληνικό», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Δημακόπουλος Α. (2010), «Μελέτη των καθιζήσεων λόγω διάνοιξης δίδυμης σήραγγας μετρό Θεσσαλονίκης στο τμήμα Αγία Σοφία - Πανεπιστήμιο», Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Χαλαστάνης Γ. (2016), «Αριθμητική Προσομοίωση της Μηχανικής Συμπεριφοράς της Βραχόμαζας σε Υπόγειες Εκμεταλλεύσεις Θαλάμων και Στύλων», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Rocscience (2019), RS2 2019Q User's Manual – Tutorials RS2 2019

