



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ**

**«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ  
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΜΕ ΤΒΜ  
ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ  
ΣΤΟ ΤΜΗΜΑ  
ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ - ΕΛΛΗΝΙΚΟ»**

Διπλωματική Εργασία του : **Δημοσθένη Κοσκινιώτη**

Επιβλέπων :

**Πάυλος Π. Νομικός**

**Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ**

Αθήνα, 19 Ιουλίου 2019





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ**

**«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ**  
**ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΜΕ ΤΒΜ ΤΗΣ**  
**ΓΡΑΜΜΗΣ 2 ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ ΣΤΟ**  
**ΤΜΗΜΑ ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ - ΕΛΛΗΝΙΚΟ»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**του Δημοσθένη Κοσκιγιώτη**

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

**Εγκρίθηκε από την Τριμελή Επιτροπή στις : ..... /..... / .....**

Υπογραφές

Παύλος Νομικός, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Ανδρέας Μπενάρδος Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

**Αθήνα, 19 Ιουλίου 2019**



## Ευχαριστίες

Καταθέτοντας τη διπλωματική μου εργασία, η οποία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων και Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., οφείλω πρωτίστως να ευχαριστήσω, από καρδιάς, τον επιβλέποντα την εργασία μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κύριο Παύλο Νομικό, για την ανάθεση του θέματος και την επίβλεψη της εργασίας μου και ιδιαίτερα για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλο το διάστημα που διήρκησε η εκπόνηση της εργασίας μου, για τον χρόνο που διέθεσε για τη μελέτη, τη διόρθωση και την αξιολόγησή της, για τις συναντήσεις μαζί μου, αλλά και για την υπομονή και την προθυμία που έδειξε απέναντι μου.

Οφείλω επίσης, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα, τους Αναπληρωτές Καθηγητές κ.κ. Κωνσταντίνο Λουπασάκη και Ανδρέα Μπενάρδο που δέχθηκαν να συμμετάσχουν στην εξεταστική επιτροπή αλλά κυρίως για την προθυμία τους και την βοήθεια που μου προσέφεραν σε οποιοσδήποτε απορίες είχα κατά την διάρκεια της εργασίας.

Αποτελεί υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τον κ. Αντώνιο Παπαμακάριο, Υποδιευθυντή Μελετών Δομικών Έργων της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. καθώς και την ίδια την εταιρεία για τα δεδομένα που μου προσέφεραν, χωρίς τα οποία δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω, επίσης, στον ε.σ. Αναπληρωτή Καθηγητή κύριο Βασίλειο Παπαδόπουλο καθώς και στην κ. Παρασκευή Γιούτα - Μήτρα για την βοήθειά τους στην κατανόηση του λογισμικού PLAXIS.

Η βοήθεια που μου προσέφερε ο υποψήφιος διδάκτορας κ. Βασίλης Γκίκας, με τις συμβουλές του για την κατασκευή της αριθμητικής ανάλυσης, αλλά και μέσω της διπλωματικής του εργασίας, υπήρξε σημαντική και γι' αυτό τον ευχαριστώ θερμά.

Θα αποτελούσε παράλειψη να μην ευχαριστήσω όλους τους συμφοιτητές και τους φίλους που με στήριξαν και ήταν μαζί μου σε όλο αυτό το ταξίδι των φοιτητικών ετών μου και ιδιαίτερα τον Ηλία Ηλιάδη για την προθυμία του να με βοηθήσει στην επιμέλεια της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς, την αδελφή μου και όλη την οικογένειά μου για την αγάπη, την βοήθεια και την στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.



## Περίληψη

Η πρόληψη καθιζήσεων στη σήραγγοποιία αποτελεί υπόθεση μείζονος σημασίας καθότι επηρεάζει τόσο τις κατασκευές που υπέρκεινται των σήραγγων, όσο και την ασφαλή χρήση τους σε λειτουργία.

Η ανά χείρας διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μελέτη των καθιζήσεων που παρατηρήθηκαν κατά την κατασκευή της σήραγγας για την επέκταση της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας στο τμήμα Αργυρούπολη-Ελληνικό.

Η διάνοιξη της σήραγγας στο εν λόγω τμήμα της χάραξης του έργου έγινε με την χρήση Μηχανήματος Ολομέτωπης Κοπής με Εξισορρόπηση Εδαφικής Πίεσης (EPB) και η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε κυρίως μέσα σε αλπικούς σχηματισμούς που αποτελούνται κυρίως από Αθηναϊκό Σχιστόλιθο, όπου επίσης συναντώνται μεταψαμμίτες και μεταϊλύολιθοι, ενώ ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πάνω από το επίπεδο της εκσκαφής, στο μεγαλύτερο τμήμα της.

Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, στο πλαίσιο της μελέτης, επιχειρήθηκε ο υπολογισμός των αναμενόμενων επιφανειακών καθιζήσεων μέσω της κατασκευής αριθμητικών μοντέλων στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS 2D.

Η προσομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια προηγμένων καταστατικών μοντέλων, τα αποτελέσματα της οποίας συγκρίθηκαν με τις μετρηθείσες τιμές των καθιζήσεων από την γεωδελτική και τοπογραφική παρακολούθηση της περιοχής.

Η χρήση του μοντέλου Hardening Soil (HS) απέδωσε με επιτυχία την προσομοίωση των επιφανειακών καθιζήσεων, στο υπό μελέτη τμήμα της σήραγγας, με τις υπολογισθείσες τιμές να βρίσκονται μέσα στο εύρος των παρατηρούμενων τιμών από την γεωτεχνική παρακολούθηση.

Για να προσδιοριστούν, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη σαφήνεια, οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων υλοποιήθηκε παραμετρική μελέτη σε ένα από τα τμήματα της σήραγγας.

Συμπερασματικά, σε αυτή την εργασία, αναδείχθηκε η πληθώρα και η πολυπλοκότητα των φαινομένων που οδηγούν σε καθιζήσεις, οι παράμετροι των οποίων είναι αναγκαίο να αξιολογούνται και να μελετώνται επιστημονικά, ώστε να αντιμετωπίζονται με την πλέον προσηκούμενη μέθοδο.





**Abstract**

The prolepsis of surface settlements is always critical in tunneling, on the ground that whenever settlements take place, not only buildings above the construction sites, but also the tunnel usage in operation is affected.

The diploma thesis on hand, deals with the study of surface settlements that were observed during the excavation of the tunnel built for the extension of line 2 of the Athens Metro from Argiroupoli to Elliniko.

The excavation of the tunnel in this part of the project was done using an Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine, mainly in alpine formations that consist mainly of Athenian Schist, where meta-sandstones and meta-siltstones are also found, while the underground water table is lying above the tunnel, for the most part of it.

In order to draw safe conclusions during the study, the calculation of the expected surface settlements was attempted through the making of numerical models using the finite element software PLAXIS 2D.

The simulation of the excavation was achieved using advanced models and the results were compared to the measured values of the surface settlements from the geodetic and topographic monitoring of the area.

An excellent simulation of the surface settlements was achieved using the Hardening Soil model (HS) in this part of the tunnel, with the measured values being within the range of the geotechnical monitored values.

In order for the factors that affect the manifestation of surface settlements to be determined with the utmost clarity a parametric study was conducted in part of the tunnel.

Concluding, this thesis highlighted the plethora and complexity of phenomena that cause surface settlements, whose parameters need to be evaluated and thoroughly examined in order for them to be treated with the most suitable method possible.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1ο : Εισαγωγή.....	17
1.1 Σκοπός.....	17
1.2 Διάρθρωση της Εργασίας.....	17
1.3.1 Μετρό της Αθήνας .....	18
1.4 Επέκταση της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας στο Τμήμα ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ - ΕΛΛΗΝΙΚΟ .....	20
Κεφάλαιο 2ο : Μηχανική Όρυξη Σηράγγων με τη Χρήση Μηχανών Ολομέτρωτης Κοπής .....	25
2.1. Εισαγωγικά.....	25
2.2. Αβαθείς Σήραγγες .....	25
2.3. Τύποι Μηχανών Ολομέτρωτης Κοπής.....	26
2.3.1. Διάνοιξη από Μηχανές Κύριας Δοκού (χωρίς Ασπίδα) .....	26
2.3.2. Διάνοιξη από Μηχανές με Ασπίδα - Ανοικτή Λειτουργία.....	27
2.3.3. Μηχανές Διάτρησης με Μονή Ασπίδα.....	27
2.3.4. Μηχανές Διάτρησης με Διπλή Ασπίδα .....	28
2.3.5. Διάνοιξη από Μηχανές με Ασπίδα - Κλειστή Λειτουργία.....	29
2.3.6. Μηχανές Διάτρησης με Εξισορρόπηση Εδαφικής Πίεσης (EPB - Earth Pressure Balance) .....	29
2.3.7. Μηχανές Διάτρησης Πολφού Μπετονίτη (Slurry TBM) .....	31
2.3.8. Μηχανές Διάτρησης Μετατρεπόμενου Τύπου - Υβριδικά TBM.....	32
2.4. Μηχανή EPB της Επέκτασης του Μετρό στο Τμήμα ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ - ΕΛΛΗΝΙΚΟ .....	33
2.5. Επένδυση με Προκατασκευασμένους Δακτύλιους Οπλισμένου Σκυροδέματος .....	34
Κεφάλαιο 3ο : Καθιζήσεις κατά την Διάνοιξη Αβαθών Σηράγγων .....	37
3.1. Εισαγωγικά.....	37
3.2. Παράγοντες που Προκαλούν Καθιζήσεις λόγω της Απώλειας Όγκου.....	37
3.3. Στερεοποίηση και Επιφανειακές Καθιζήσεις.....	39
3.4. Επίδραση Υπογείου Υδροφόρου Ορίζοντα.....	40
3.5. Καθιζήσεις Λόγω Ποιότητας Εργασιών Διάνοιξης.....	41
3.6. Μέτρηση Επίγειων Μετακινήσεων του Εδάφους .....	41

3.7. Επικινδυνότητα Καθιζήσεων .....	42
3.8. Απώλεια Όγκου του Εδάφους .....	43
3.9. Μέθοδοι Περιορισμού των Επιφανειακών Καθιζήσεων .....	44
Κεφάλαιο 4ο : Γεωλογικές και Γεωτεχνικές Συνθήκες του Τμήματος Μελέτης .....	46
4.1. Εισαγωγικά .....	46
4.2. Γεωλογία και Εδαφικές Συνθήκες Μεσοδιαστήματος 7 (Χ.Θ. 14+067 έως Χ.Θ. 14+735) .....	48
4.3. Υδροφόρος Ορίζοντας Μεσοδιαστήματος 7 (Χ.Θ. 14+067 έως Χ.Θ. 14+735) .....	50
4.4. Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού Μεσοδιαστήματος 7 .....	51
4.5. Γεωτεχνικές Τομές Μεσοδιαστήματος 7 .....	57
4.6. Γεωλογία και Εδαφικές Συνθήκες Μεσοδιαστήματος 8 (Χ.Θ. 14+735 έως Χ.Θ. 15+051) .....	59
4.7. Υδροφόρος Ορίζοντας Μεσοδιαστήματος 8 (Χ.Θ. 14+735 έως Χ.Θ. 15+051) .....	61
4.8. Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού Μεσοδιαστήματος 8 .....	62
4.9. Γεωτεχνικές Τομές Μεσοδιαστήματος 8 .....	69
Κεφάλαιο 5ο : Πρόβλεψη Καθιζήσεων με την Χρήση Εμπειρικών και Αναλυτικών Μεθόδων .....	71
5.1. Εισαγωγικά .....	71
5.2. Συνάρτηση Gauss.....	71
5.3. Εμπειρικές Μέθοδοι.....	73
5.3.1. Cording & Hamshire .....	73
5.3.2. Ο'Rillley & New .....	74
5.3.3. Peck & Schmidt.....	75
5.4. Αναλυτικές Μέθοδοι .....	76
5.4.1. Loganathan & Poulos.....	76
5.4.2. Sagesta.....	77
5.5. Αριθμητικά Μοντέλα .....	78
5.6. Πρόβλεψη Απώλειας Όγκου κατά Peck & Schmidt για την Χ.Θ. 14+067 - 14+130.....	78
Κεφάλαιο 6ο : Καταστατικά Μοντέλα.....	79
6.1 Λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων PLAXIS 2D.....	79

6.2 Μοντέλο Mohr-Coulomb .....	79
6.3 Μοντέλο Hardening Soil.....	81
6.4. Ανάλυση υπό Διαφορετικές Συνθήκες Στράγγισης .....	84
6.5. Drained (Στραγγισμένες Συνθήκες).....	84
6.6. Undrained A (Αστράγγιστες Συνθήκες).....	85
Κεφάλαιο 7ο : Επιλογή Παραμέτρων Προσομοίωσης.....	87
7.1. Εισαγωγικά.....	87
7.2. Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά.....	87
7.3. Συνοχή $c$ .....	87
7.4. Γωνία Εσωτερικής Τριβής $\phi$ .....	87
7.5. Γωνία Διασταλτικότητας $\psi$ .....	88
7.6. Συντελεστής Ουδέτερων Πλευρικών Ωθήσεων $K_0$ .....	88
7.7. Υδροφόρος Ορίζοντας - Συντελεστές Διαπερατότητας $K_x$ και $K_y$ .....	89
7.8. Κορεσμένο Φαινόμενο Βάρος $\gamma_{sat}$ και Ακόρεστο Φαινόμενο Βάρος $\gamma_{unsat}$ .....	89
7.9. Μέτρο Ελαστικότητας $E$ .....	90
7.10. Εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας σε Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης $E_{oed}^{ref}$ .....	90
7.11. Τέμνον Μέτρο Ελαστικότητας $E_{50}^{ref}$ σε Πρότυπη Τριαξονική Δοκιμή.....	90
7.12. Μέτρο Ελαστικότητας σε Αποφόρτιση και Επαναφόρτιση $E_{ur}^{ref}$ .....	90
7.13. Δομοστατικός Σχεδιασμός Επένδυσης .....	91
7.14. Συνθήκες Στράγγισης .....	92
7.15. Απώλεια Εδαφικού Όγκου .....	93
7.16. Πίεση Ενέματος.....	93
7.17 Επιφανειακά Φορτία.....	93
Κεφάλαιο 8ο : Μεθοδολογία Κατασκευής Μοντέλων .....	95
8.1. Εισαγωγικά.....	95
8.2. Κατασκευή Προσομοιώματος.....	95
8.3. Φάσεις Κατασκευής.....	96

8.3.1 Αρχική Φάση.....	96
8.3.2 Επιβολή Επιφανειακής Φόρτισης .....	96
8.3.3. Εκσκαφή Σήραγγας.....	97
8.3.4. Συστολή .....	97
8.3.5. Ενεμάτωση .....	97
8.3.6. Τελική Επένδυση .....	97
Κεφάλαιο 9ο : Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων.....	99
9.1. Εισαγωγικά .....	99
9.2. Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης για την Χ.Θ. 14+735 - 14+950.....	99
9.2.1. Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+735 - 14+950.....	99
9.2.2. Επιφανειακές Καθιζήσεις στην Χ.Θ. 14+735 - 14+950.....	100
9.2.3. Κατανομή Μετακινήσεων .....	102
9.2.4. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων (σ'3).....	105
9.2.5. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση .....	108
9.3. Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης για την Χ.Θ. 14+067 - 14+130.....	113
9.3.1. Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+067 - 14+130.....	113
9.3.2. Επιφανειακές Καθιζήσεις στην Χ.Θ. 14+067 - 14+130.....	114
9.3.3. Κατανομή Μετακινήσεων .....	115
9.3.4. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων (σ'3).....	116
9.3.5. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση .....	117
9.4. Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης για την Χ.Θ. 14+130 - 14+735.....	119
9.4.1. Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+130 - 14+735.....	119
9.4.2. Επιφανειακές Καθιζήσεις στην Χ.Θ. 14+130 - 14+735.....	120
9.4.3. Κατανομή Μετακινήσεων .....	121
9.4.4. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων (σ'3).....	122
9.4.5. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση .....	123
9.5. Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης για την Χ.Θ. 14+950 - 15+051.....	125
9.5.1. Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+950 - 15+051.....	125

9.5.2. Επιφανειακές Καθιζήσεις στην Χ.Θ. 14+950 - 15+051 .....	126
9.5.3. Κατανομή Μετακινήσεων .....	127
9.5.4. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων (σ'3).....	129
9.5.5. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση.....	129
9.6. Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης περί την Χ.Θ. 14+960 .....	131
9.6.1. Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+960.....	131
9.6.2. Επιφανειακές Καθιζήσεις στην Χ.Θ. 14+960.....	132
9.6.3. Κατανομή Μετακινήσεων .....	135
9.6.4. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων (σ'3).....	135
9.6.5. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση.....	136
9.7. Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης περί την Χ.Θ. 15+010 .....	139
9.7.1. Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 15+010.....	139
9.7.2. Επιφανειακές Καθιζήσεις στην Χ.Θ. 15+010.....	140
9.7.3. Κατανομή Μετακινήσεων .....	141
9.7.4. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων (σ'3).....	142
9.7.5. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση.....	143
Κεφάλαιο 10ο : Παραμετρική Διερεύνηση Επιφανειακών Καθιζήσεων .....	147
10.1. Εισαγωγικά.....	147
10.2. Μέτρο Ελαστικότητας σε Αποφόρτιση και Επαναφόρτιση $E_{ur}^{ref}$ .....	147
10.3. Συνοχή $c$ και Γωνία Τριβής $\phi$ .....	148
10.4. Βάθος Διάνοιξης.....	150
10.5. Πίεση Ενεμάτωσης.....	151
10.6. Δυσκαμψία της Επένδυσης.....	152
10.7. Απώλεια Εδαφικού Όγκου .....	153
10.8. Επιφανειακά Φορτία.....	154
10.9. Συντελεστής Ουδέτερων Πλευρικών Ωθήσεων .....	155
10.10. Στάθμη Υπόγειου Υδροφόρου Ορίζοντα.....	156
10.11. Διαπερατότητα Εδαφικών Σχηματισμών.....	157

Κεφάλαιο 11ο : Συμπεράσματα και Προτάσεις .....	159
11.1. Ανακεφαλαίωση .....	159
11.2. Πρόβλεψη Καθιζήσεων με την Χρήση Εμπειρικών και Αναλυτικών Μεθόδων.....	159
11.3. Αριθμητικές Αναλύσεις .....	160
11.3.1. Επιφανειακές Καθιζήσεις .....	160
11.3.2. Κατανομές Μετακινήσεων .....	160
11.3.3. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων ( $\sigma'3$ ) .....	161
11.3.4. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση .....	162
11.4. Παραμετρική Ανάλυση .....	163
11.4.1. Μέτρο Ελαστικότητας σε Αποφόρτιση και Επαναφόρτιση $E_{ur}^{ref}$ .....	163
11.4.2. Συνοχή $c$ και Γωνία Τριβής $\phi$ .....	163
11.4.3. Βάθος Διάνοιξης .....	164
11.4.4. Πίεση Ενεμάτωσης .....	164
11.4.5. Δυσκαμψία της Επένδυσης .....	164
11.4.6. Απώλεια Εδαφικού Όγκου .....	165
11.4.7. Επιφανειακά Φορτία .....	165
11.4.8. Συντελεστής Ουδέτερων Πλευρικών Ωθήσεων .....	165
11.4.9. Στάθμη Υπόγειου Υδροφόρου Ορίζοντα .....	165
11.4.10. Διαπερατότητα Εδαφικών Σχηματισμών .....	165
11.5. Προτάσεις .....	166
Βιβλιογραφία.....	167
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	167
Παράρτημα «Α» : Αποτελέσματα Αναλύσεων υπό Στραγγισμένες Συνθήκες.....	171



## **Κεφάλαιο 1ο : Εισαγωγή**

### **1.1 Σκοπός**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των επιφανειακών καθιζήσεων που προκλήθηκαν από την διάνοιξη της σήραγγας TBM για την επέκταση της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας στο τμήμα από τον Σταθμό ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ έως το Σταθμό ΕΛΛΗΝΙΚΟ.

Αφού έγινε αριθμητική ανάλυση για τον προσδιορισμό των καθιζήσεων σε όλες τις θέσεις ενδιαφέροντος της σήραγγας, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση, ώστε να καθοριστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τις επιφανειακές καθιζήσεις.

### **1.2 Διάρθρωση της Εργασίας**

Η ανά χείρας διπλωματική εργασία αναπτύσσεται σε ένδεκα κεφάλαια, συνολικά.

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται γενικά στοιχεία για την κατασκευή του Μετρό της Αθήνας και της επέκτασης της Γραμμής 2 προς ΕΛΛΗΝΙΚΟ.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα βασικά στοιχεία που αφορούν την μηχανοποιημένη όρυξη σηράγγων και την χρήση Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής (TBM).

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τις βασικούς παράγοντες που προκαλούν επιφανειακές καθιζήσεις καθώς και τα φαινόμενα που τις διέπουν. Επιπρόσθετα αναφέρονται, συνοπτικά, τρόποι πρόληψης και αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκαλούν οι καθιζήσεις στην επιφάνεια.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γεωτεχνικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη τμήματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται μερικές από τις εμπειρικές και αναλυτικές μεθόδους πρόβλεψης καθιζήσεων και επιπρόσθετα γίνεται χρήση μιας από τις μεθόδους, με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πραγματικά δεδομένα.

Στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές αρχές των καταστατικών μοντέλων αστοχίας που χρησιμοποιήθηκαν με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράμετροι που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν στο λογισμικό, μετά από επεξεργασία.

Στο όγδοο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία κατασκευής των αριθμητικών μοντέλων για την προσομοίωση.

Στο ένατο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης για κάθε θέση του υπό μελέτη τμήματος μαζί με σχολιασμό για κάθε συμπέρασμα.

Στο δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για συγκεκριμένο τμήμα της σήραγγας.

Στο ενδέκατο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται παράθεση των συμπερασμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης και της παραμετρικής ανάλυσης και γενικότερα ολόκληρης της διπλωματικής εργασίας.

### **1.3.1 Μετρό της Αθήνας**

Παρότι η Αθήνα απέκτησε δίκτυο υπογείου σιδηροδρόμου σε πλήρη ανάπτυξη (Μετρό) μόλις το έτος 2000, μπορεί να καυχάται ότι εδώ λειτούργησε ένας από τους πρώτους σιδηροδρόμους Μετρό της Ευρώπης.

Το έτος 1895 η σιδηροδρομική γραμμή που συνέδεε τον Πειραιά με το Θησείο επεκτάθηκε μέχρι την Ομόνοια, διερχόμενη από το Μοναστηράκι, μέσω υπόγειας σήραγγας που ακολουθούσε τη χάραξη της οδού Αθηνάς και κατέληγε σε ανοικτό σκάμμα στο ύψος της οδού Λυκούργου.

Η κατασκευή αυτής της πρώτης σήραγγας θα διαρκέσει σχεδόν 6 χρόνια από το 1889 έως το 1895, οπότε ολοκληρώθηκε η κατασκευή του πρώτου, ημιυπόγειου σταθμού της Ομόνοιας, στη διασταύρωση των οδών Λυκούργου και Αθηνάς.

Η γραμμή ηλεκτροδοτήθηκε από το 1904 και με το πέρασμα των χρόνων ο σιδηρόδρομος της γραμμής Αθήνα - Πειραιάς θα αποκτήσει το προσωνύμιο «Ηλεκτρικός».

Από το 1928 μέχρι το 1949 το δίκτυο του «ηλεκτρικού» θα επεκταθεί μέχρι τον 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.

Το 1991 ξεκίνησε διαγωνιστική διαδικασία για την ανάδειξη αναδόχου, ο οποίος θα αναλάμβανε τη κατασκευή του νέου Μετρό της Αθήνας με ανάπτυξη υπόγειου δικτύου με συνολικό μήκος άνω των 20 χιλιομέτρων σε δύο γραμμές, ΣΕΠΟΛΙΑ - ΔΑΦΝΗ (Γραμμή 2) και ΚΕΡΑΜΕΙΚΟΣ - ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ (Γραμμή 3) καθώς και την κατασκευή 21 σταθμών.

Οι κατασκευαστικές εργασίες άρχισαν στην περιοχή του Σταθμού Λαρίσης το Νοέμβριο του 1992 και η παράδοση του έργου πραγματοποιήθηκε τμηματικά, τόσο για την αρχική του σχεδίαση, όσο και για τις επεκτάσεις που ακολούθησαν.

Για την εκσκαφή των σηράγγων χρησιμοποιήθηκαν δύο Μηχανήματα Ολομέτωπης Κοπής (TBM) τα οποία παραλήφθηκαν, το πρώτο τον Ιούνιο του 1993, και το δεύτερο τον Δεκέμβριο του ίδιου έτους.

Οι εργασίες εκσκαφής των σηράγγων ξεκίνησαν από τον Σταθμό Λαρίσης για την Γραμμή 2 και από τον Σταθμό ΚΑΤΕΧΑΚΗ για την Γραμμή 3, τον Απρίλιο και τον Αύγουστο του 1994, αντίστοιχα, για κάθε μια από τις δύο Γραμμές.

Το TBM2 έφθασε στο Σταθμό ΣΥΝΤΑΓΜΑ τον Ιούνιο του 1996 ολοκληρώνοντας την εκσκαφή στη Γραμμή 3, σε πρώτη φάση, και μετακινήθηκε για τη διάνοιξη του τμήματος ΔΑΦΝΗ - ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ της Γραμμής 2.

Το TBM1 ολοκλήρωσε τη διάνοιξη στο Σταθμό ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ της Γραμμής 2 τον Δεκέμβριο του 1998.

Τον Ιανουάριο του έτους 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, επτά σε κάθε Γραμμή.

Ο Σταθμός ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ, τελευταίος σταθμός της Γραμμής 3, για την έως τότε σχεδίαση, τέθηκε σε λειτουργία τον Απρίλιο του 2003.

Μέχρι το καλοκαίρι του 2004 και την έναρξη των Ολυμπιακών Αγώνων της Αθήνας, το Μετρό της Αθήνας έχει επεκταθεί στη Γραμμή 3 από το Σταθμό ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ έως το Α/Δ «ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΒΕΝΙΖΕΛΟΣ» και στη Γραμμή 2 από το Περιστερί, Σταθμός ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ έως τον Άγιο Δημήτριο, Σταθμός ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ/ΑΛΕΚΟΣ ΠΑΝΑΓΟΥΛΗΣ. Η Γραμμή 3 στο Τμήμα από Σταθμό ΔΟΥΚΙΣΣΗΣ ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ προς 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 συνεχισθεί η επέκταση του Μετρό της Αθήνας μέχρι τον Σταθμό ΑΓΙΑ ΜΑΡΙΝΑ για τη Γραμμή 3, προς τη δυτική απόληξή της και μέχρι το Σταθμό ΕΛΛΗΝΙΚΟ για τη Γραμμή 2 και τη νότια απόληξή της με 5,5 χλμ. υπόγειας γραμμής και 4 Σταθμούς (ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ, ΑΛΙΜΟΣ, ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ, ΕΛΛΗΝΙΚΟ). Έκτοτε θα λειτουργεί με την υφιστάμενη σχεδίαση .

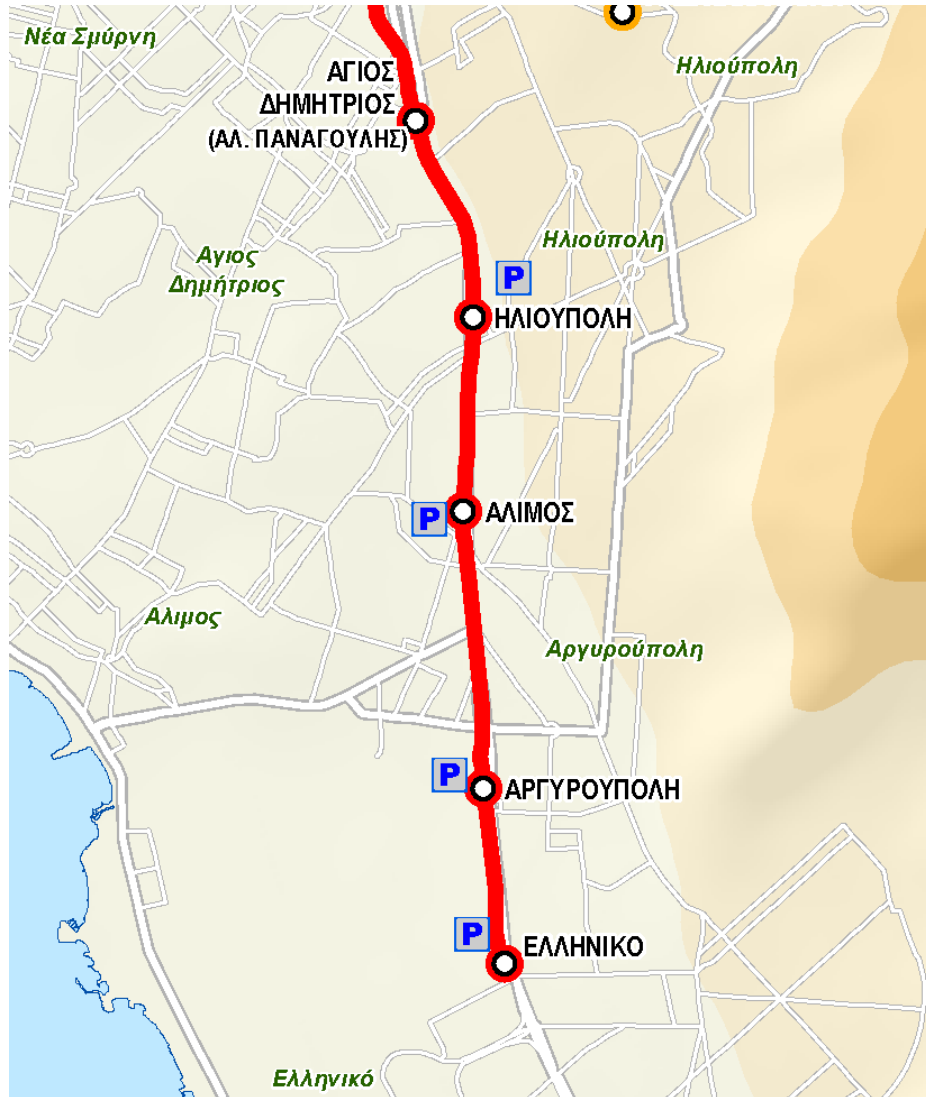
Οι δύο Γραμμές του Μετρό της Αθήνας έχουν σήμερα, συνολικό μήκος 59,7 χλμ. (συμπεριλαμβανομένου και του τμήματος των 20,7 χλμ. της γραμμής που χρησιμοποιείται από κοινού με τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο, από τον Σταθμό ΔΟΥΚΙΣΣΗΣ ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ μέχρι το Αεροδρόμιο. Η Γραμμή 1 εκτείνεται σε μήκος 25,6 χλμ. στο Τμήμα ΠΕΙΡΑΙΑΣ - ΚΗΦΙΣΙΑ.

Σήμερα, βρίσκεται υπό κατασκευή η επέκταση της Γραμμής 3 προς τα δυτικά, η οποία θα έχει μήκος 7,6 χλμ. και θα καταλήγει στον Πειραιά, διερχόμενη από την Αγία Βαρβάρα, τον Κορυδαλλό και τη Νίκαια εξυπηρετώντας 6 νέους σταθμούς.

Παράλληλα, εξελίσσεται σχέδιο για την ανάπτυξη νέας γραμμής του Μετρό, (Γραμμή 4) στον άξονα από το Άλσος Βεΐκου μέχρι το Μαρούσι, σχήματος «U», μέσω Ευαγγελισμού και Φάρου Ψυχικού, με επεκτάσεις προς Βύρωνα/Άνω Ηλιούπολη και προς Πετρούπολη και Εθνική Οδό, συνολικού μήκους 38,2 χλμ, με 35 σταθμούς. Ο προϋπολογισμός δημοπράτησης ανέρχεται σε 1.510.000.000 ευρώ και η προβλεπόμενη διάρκεια υλοποίησης του έργου ανέρχεται σε 8 χρόνια.

#### **1.4 Επέκταση της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας στο Τμήμα ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ - ΕΛΛΗΝΙΚΟ**

Το έργο επέκτασης της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας στο τμήμα ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ - ΕΛΛΗΝΙΚΟ, στο οποίο ανήκει και το υπό εξέταση σκέλος ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ - ΕΛΛΗΝΙΚΟ, δημοπρατήθηκε τον Οκτώβριο του 2004. Περιλάμβανε την κατασκευή υπόγειας σιδηροδρομικής γραμμής μήκους 5,5 χλμ. με 4 νέους σταθμούς (ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ, ΑΛΙΜΟΣ, ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ, ΕΛΛΗΝΙΚΟ), η οποία προκρίθηκε έναντι της εναλλακτικής πρότασης που προέβλεπε την κατασκευή γέφυρας πάνω από την Λεωφόρο Βουλιαγμένης.



Εικ.1.1 : Χάρτης Επέκτασης της Γραμμής 2 Άγιος Δημήτριος-Ελληνικό (Αττικό Μετρό, 2019)

Ανάδοχος του έργου ανακηρύχθηκε η κοινοπραξία ΑΚΤΩΡ Α.Τ.Ε. - SIEMENS A.G. - VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJECTS.

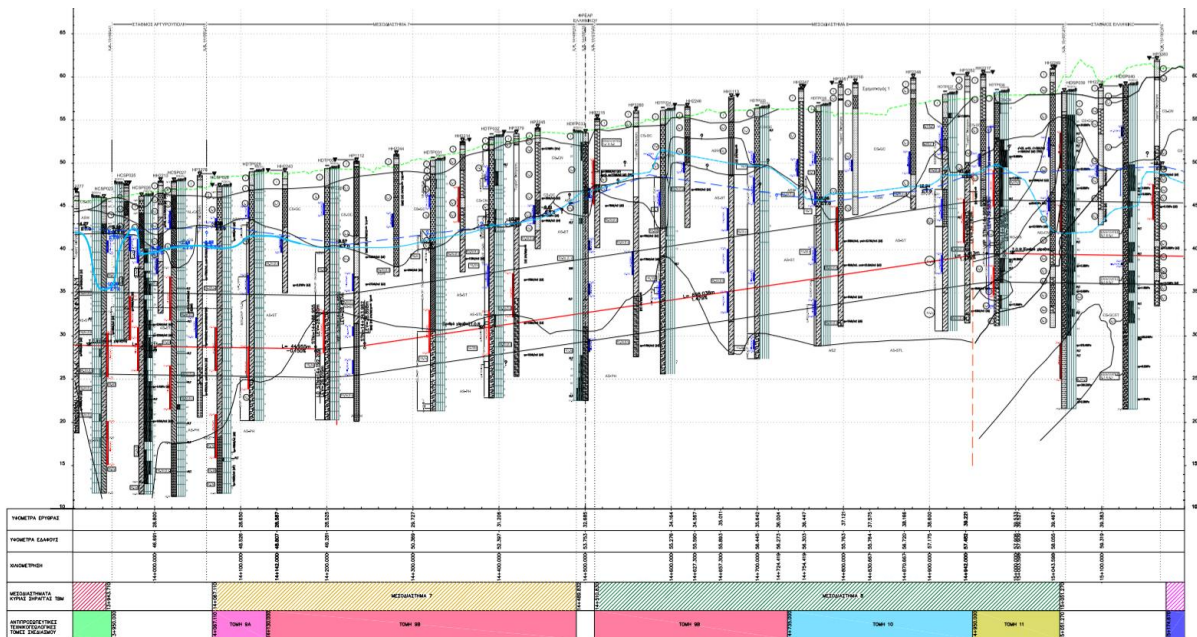
Το έργο είχε συνολικό προϋπολογισμό 350 εκατομμύρια ευρώ και η κατασκευή του ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2007 με την εκσκαφή του Σταθμού ΕΛΛΗΝΙΚΟ.

Τον Μάρτιο του ίδιου έτους ξεκίνησε η διάνοιξη της σήραγγας, η χάραξη της οποίας ακολουθεί τον οδικό άξονα της Λεωφόρου Βουλιαγμένης, με TBM.



Εικ.1.2 : Σήραγγα TBM από τον Σταθμό Αργυρούπολη με Κατεύθυνση τον Σταθμό Ελληνικό

Το TBM ολοκλήρωσε την διαδρομή του στο Σταθμό ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ τον Σεπτέμβριο του 2008, έχοντας κατασκευάσει 4.650μ. σήραγγας και τον Ιανουάριο του 2009 ολοκληρώθηκε και η αποσυναρμολόγησή του.



Εικ.1.3 : Γεωτεχνική Τομή των Μεσοδιαστημάτων 7 και 8 της Κύριας Σήραγγας TBM.

Με την μαύρη γραμμή απεικονίζεται η διατομή της σήραγγας TBM και με κόκκινη γραμμή η ερυθρά χάραξης (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Οι σταθμοί, τα φρέατα αερισμού και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, καθώς και ο χώρος εναπόθεσης συρμών κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο του ανοικτού ορύγματος με κοπή και επανεπίχωση. Οι σταθμοί έχουν μήκος 110 μ. και αποτελούνται από 3 επίπεδα με εισόδους και εξόδους και από τις δύο πλευρές της Λεωφόρου Βουλιαγμένης. Το έργο επίσης περιλαμβάνει και υπόγειο χώρο εναπόθεσης 8 συρμών για τις ανάγκες λειτουργίας της επέκτασης.

Η νέα επέκταση τέθηκε σε λειτουργία τον Ιούλιο του 2013.





## **Κεφάλαιο 2ο : Μηχανική Όρυξη Σηράγγων με τη Χρήση Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής**

### **2.1. Εισαγωγικά**

Οι σύγχρονες ανάγκες και απαιτήσεις για εκμηχανισμένη κατασκευή μεγάλου μήκους σηράγγων, ιδιαίτερα σε αστικό περιβάλλον, όπου απαιτείται εξάλειψη δονήσεων και όχλησης στην επιφάνεια, έχουν οδηγήσει στην χρήση Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής ή TBMs (Tunnel Boring Machines), σε ολοένα και περισσότερα έργα.

Πρόκειται για κινητές βιομηχανικές μονάδες, το τελικό προϊόν των οποίων είναι σήραγγες στην τελική τους μορφή, όπου αντί για συμβατικούς κύκλους διάνοιξης με σειριακές εργασίες διάτρησης-ανατίναξης, αερισμού, ξεσκαρώματος, υποστήριξης και αποκομιδής μπάζων, οι εργασίες γίνονται αυτοματοποιημένα, και σχεδόν ταυτόχρονα.

Το βασικό μειονέκτημα των TBM έγκειται στην ικανότητα της μηχανής να αντιμετωπίζει συγκεκριμένη γεωλογία χωρίς μεγάλη δυνατότητα προσαρμοστικότητας σε διαφοροποιήσεις. Το υψηλό κόστος της αρχικής επένδυσης για την χρήση TBM μπορεί να αντισταθμιστεί μόνο από τη συντόμευση του χρονοδιαγράμματος των έργων, λόγω του υψηλότερου βαθμού προχώρησης της εκσκαφής από μια συμβατική μέθοδο.

### **2.2. Αβαθείς Σήραγγες**

Η ολοένα αναπτυσσόμενη ανάγκη για έργα υποδομής, σε αστικούς χώρους, όπως είναι 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 διαμέτρου ανοίγματος κάτω από 5 (Κωστόπουλος, 2013).

Η υλοποίηση τέτοιου είδους έργων εμφανίζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά καθώς, από γεωλογικής απόψεως γίνεται μέσα σε σχετικά επιφανειακούς εδαφικούς σχηματισμούς πτωχής ποιότητας, και από σχεδιαστικής πλευράς, απαιτεί μεγάλες καμπυλότητες και κλίσεις. Ακριβώς επειδή τέτοιου είδους σήραγγες κατασκευάζονται εντός του αστικού ιστού, σε μικρό βάθος, χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής, τόσο στον σχεδιασμό, όσο και στην κατασκευή, καθώς οι επιπτώσεις

στην επιφάνεια έχουν άμεσο αντίκτυπο στις ανθρωπογενείς κατασκευές. Ο αποκλεισμός της χρήσης εκρηκτικών, με εξαίρεση πολύ ειδικές περιπτώσεις, ευνοεί την χρήση TBMs ιδιαίτερα σε χαράξεις μεγάλου μήκους.

Η σημαντικότερη από τις επιπτώσεις της εκσκαφής αβαθών σηράγγων που πρέπει να μελετάται ενδελεχώς και να προλαμβάνεται έγκαιρα κατά την κατασκευή είναι οι επιφανειακές καθιζήσεις που μπορεί να δημιουργηθούν.

Καθίσταται προφανές ότι οι αβαθείς σήραγγες αποτελούν ειδικό κομμάτι της σηραγγοποιίας, η επιτυχής ολοκλήρωσης των οποίων χρήζει άρτιας σχεδιαστικής γνώσης και κατασκευαστική εμπειρία.

Ο μηχανισμός εκδήλωσης επιφανειακών καθιζήσεων αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

### **2.3. Τύποι Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής**

Οι Μηχανές Ολομέτωπης Κοπής διακρίνονται με διάφορους τρόπους. Τις περισσότερες φορές τα TBMs σχεδιάζονται και κατασκευάζονται ειδικά για τις ανάγκες του έργου που θα εξυπηρετήσουν.

Σύμφωνα με την Γαλλική Ένωση Σηραγγοποιίας (AFTES), την οποία ακολουθεί και η προδιαγραφή του ΕΛΟΤ, γίνεται κατηγοριοποίηση με βάση την στήριξη που προσφέρεται κατά την όρυξη από κάθε μηχανή διάτρησης. Έτσι διακρίνονται σε Μηχανές με:

- Καθόλου στήριξη (χωρίς ασπίδα)
- Περιφερειακή στήριξη (ανοικτή ασπίδα)
- Περιφερειακή και μετωπική στήριξη (κλειστή ασπίδα)

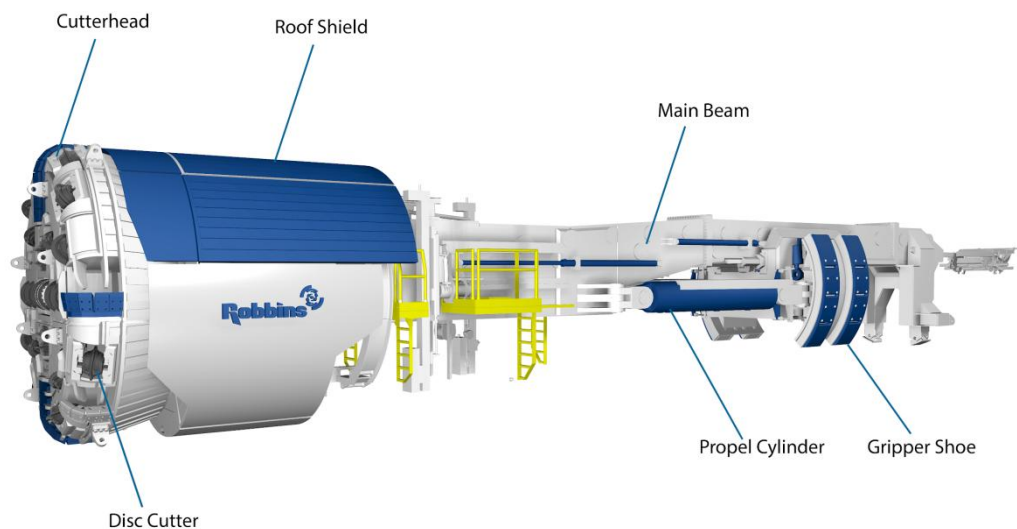
Η σωστή επιλογή του πλέον κατάλληλου τύπου μηχανής για τις εκάστοτε γεωλογικές συνθήκες αποτελεί βασική προϋπόθεση ομαλής και ασφαλούς διεξαγωγής των εργασιών εκσκαφής.

#### **2.3.1. Διάνοιξη από Μηχανές Κύριας Δοκού (χωρίς Ασπίδα)**

Οι μηχανές χωρίς ασπίδα ή αλλιώς και τύπου Gripper TBM χρησιμοποιούνται για την διάνοιξη σε σκληρά πετρώματα μεγάλης αντοχής, με ελάχιστες εισροές

υδάτων όπου ουσιαστικά δεν απαιτείται υποστήριξη στο τοιχώματα και στο μέτωπο της εκσκαφής.

Ένα σύστημα ωστήρων που πακτώνεται στις παρειές της σήραγγας πακτώνει την μηχανή ενώ τα έμβολα ώσης εκτείνονται με αποτέλεσμα το TBM να προχωρά. Με αυτόν τον τρόπο τα κοπτικά εργαλεία που είναι τοποθετημένα στην κοπτική κεφαλή διεισδύουν στο πέτρωμα προκαλώντας την ρωγμάτωση και τελικά την θραύση του.



Εικ.2.1 : Μηχανή Κύριας Δοκού (Robbins, 2019)

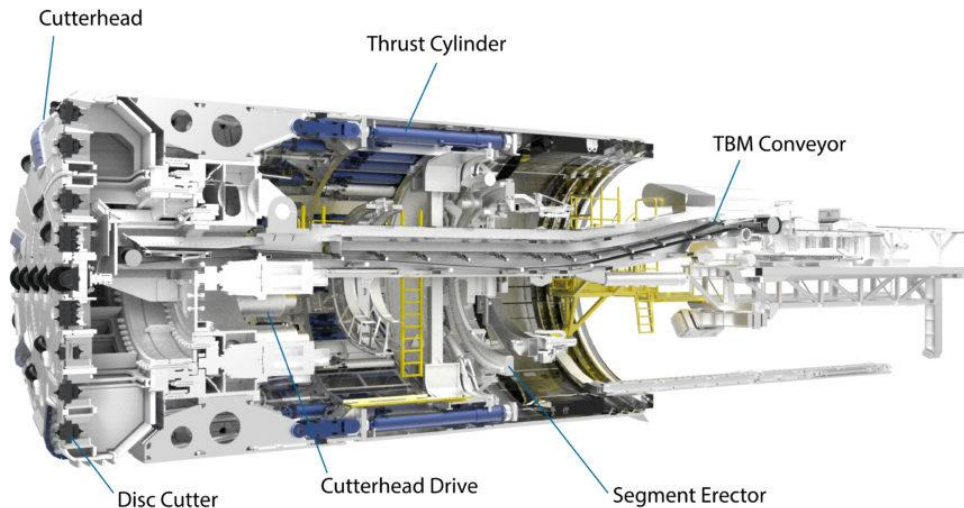
### 2.3.2. Διάνοιξη από Μηχανές με Ασπίδα - Ανοικτή Λειτουργία

Οι συγκεκριμένες μηχανές ολομέτωπης κοπής είναι εξοπλισμένες με προστατευτικό κάλυμμα ακριβώς πίσω από την κοπτική κεφαλή που ονομάζεται ασπίδα. Η ασπίδα προσφέρει ελεγχόμενο περιβάλλον όταν η εκσκαφή γίνεται μέσα σε διαταραγμένους σχηματισμούς μικρής αντοχής με προβλήματα ευστάθειας.

### 2.3.3. Μηχανές Διάτρησης με Μονή Ασπίδα

Τα TBM ανοικτής λειτουργίας με ασπίδα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις με μικρούς χρόνους ευστάθειας του περιβάλλοντος πετρώματος. Η ασπίδα προσφέρει στήριξη της εκσκαφής και ασφαλές περιβάλλον για τους εργαζόμενους μέχρι να τοποθετηθεί η μόνιμη επένδυση. Προϋπόθεση για την επιλογή αυτού του

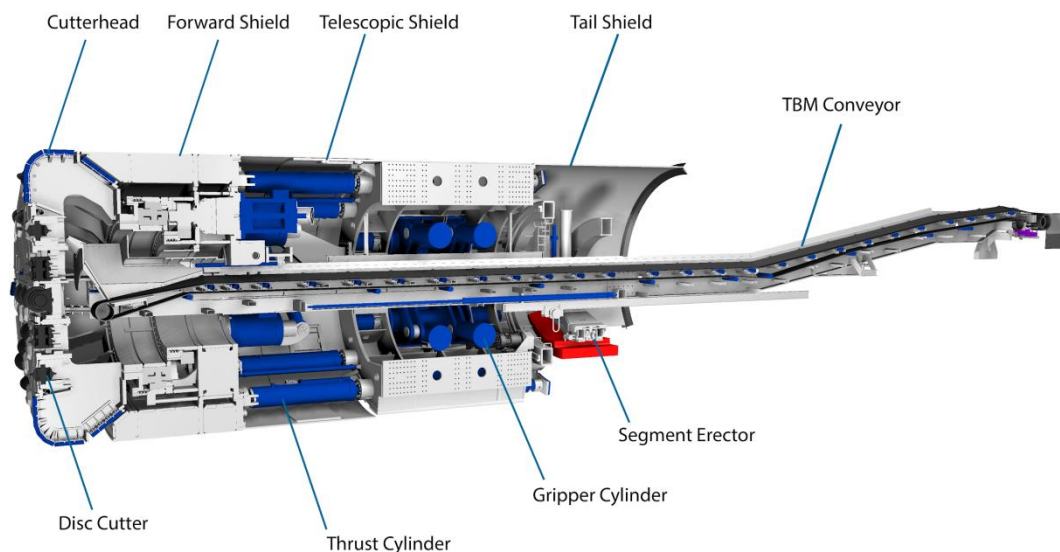
τύπου της μηχανής είναι η ευστάθεια του μετώπου της εκσκαφής και η απουσία εισρεόντων υδάτων. Η ώθηση της μηχανής πετυχαίνεται με την βοήθεια εμβόλων που εφαρμόζουν πίεση στα ήδη τοποθετημένα προκατασκευασμένα στοιχεία της επένδυσης.



Εικ.2.2 : Μηχανή Μονής Ασπίδας (Robbins, 2019)

#### 2.3.4. Μηχανές Διάτρησης με Διπλή Ασπίδα

Ο συγκεκριμένος τύπος TBM βρίσκει εφαρμογή σε γεωλικά με χαρακτηριστικά από μαλακό έδαφος έως κακής ποιότητας βράχο. Το σώμα της ασπίδας διαιρείται σε δύο επιμέρους τμήματα που ενώνονται τηλεσκοπικά. Φέρει έμβολα που ενεργούν είτε στα τοιχώματα της σήραγγας είτε στα προκατασκευασμένα στοιχεία της επένδυσης, ανάλογα με την ποιότητα των πετρωμάτων, που τοποθετούνται κάτω από το ασφαλές περιβάλλον της ασπίδας. Η προηγούμενη διαδικασία μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα με την εκσκαφή με αποτέλεσμα να πετυχαίνονται μεγάλοι ρυθμοί προχώρησης. Το ουραίο κενό (υπερεκσκαφή) που δημιουργείται από τις ασπίδες πληρώνεται με ένεμα.



Εικ.2.3 : Μηχανή Διπλής Ασπίδας (Robbins, 2019)

### 2.3.5. Διάνοιξη από Μηχανές με Ασπίδα - Κλειστή Λειτουργία

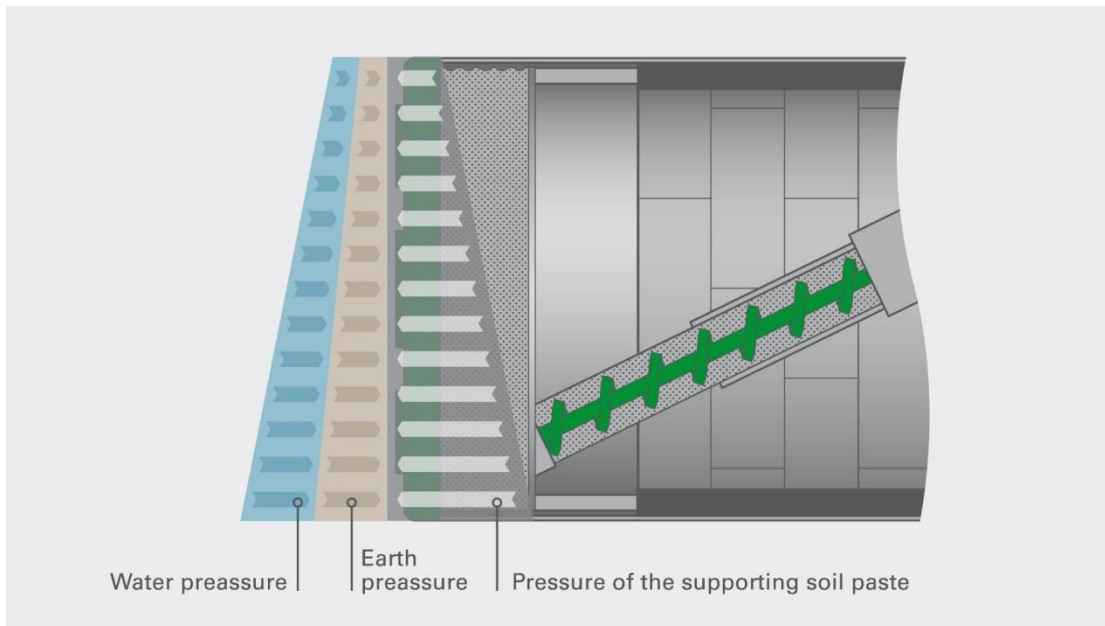
Η μηχανική στήριξη της γεωμάζας από την ασπίδα και την πίεση που ασκεί η κοπτική κεφαλή δεν είναι πάντα επαρκής ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου υπάρχει παρουσία υπόγειων υδάτων. Το πρόβλημα εντείνεται ιδιαίτερα σε αστικές αβαθείς σήραγγες όταν η ανεξέλεγκτη ροή υλικού από το μέτωπο είναι αιτία επιφανειακών καθιζήσεων. Σε αυτές τις συνθήκες επιβάλλεται χρήση μηχανής ολομέτωπης κοπής με ασπίδα κλειστής λειτουργίας.

Αυτές οι ασπίδες διατηρούν το θάλαμο εκσκαφής υπό πίεση είτε με την χρήση πολφού μπεντονίτη είτε με λάσπη του ίδιου του εκσκαπτούμενου υλικού ακόμα και με την χρήση πεπιεσμένου αέρα για την στήριξη του μετώπου.

### 2.3.6. Μηχανές Διάτρησης με Εξισορρόπηση Εδαφικής Πίεσης (EPB - Earth Pressure Balance)

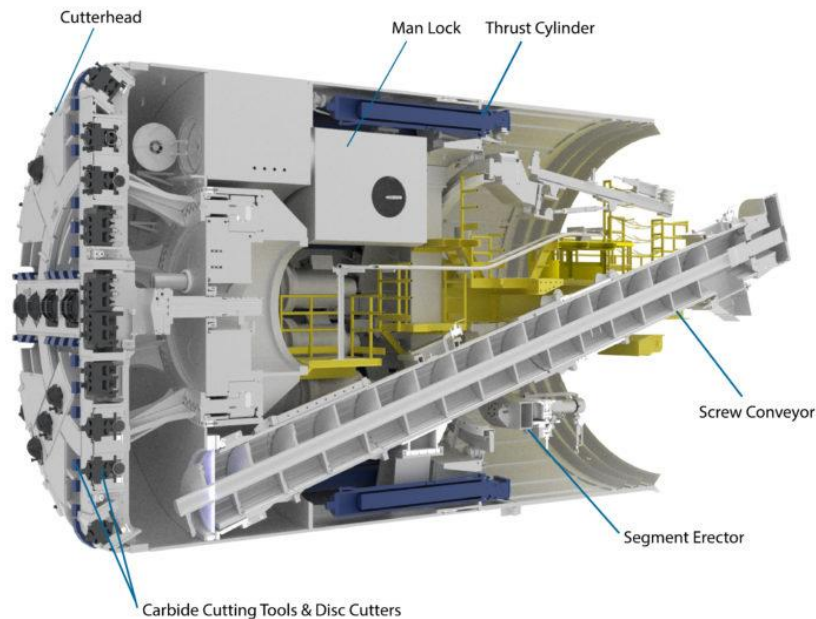
Οι μηχανές EPB είναι TBM με ασπίδα που ασκούν πίεση στο μέτωπο της εκσκαφής και χρησιμοποιούνται σε ασταθή εδαφικά γεωυλικά με σημαντικό ποσοστό σε αργίλους και ιλύ, όπου συμβαίνουν καταρρεύσεις μετώπου, με αποτέλεσμα την εκδήλωση καθιζήσεων στην επιφάνεια, ιδιαίτερα σε αβαθείς σήραγγες όπως είναι αυτές των Μετρό. Ο χώρος μπροστά από το διάφραγμα βρίσκεται υπό πίεση με την βοήθεια του ίδιου του εκσκαπτούμενου υλικού που

βρίσκεται υπό μορφή πάστας, ώστε να επιτευχθεί υποστήριξη του μετώπου. Η υπό συμπίεση πάστα εκτός από την υποστήριξη του μετώπου, χρησιμεύει στην αντιστάθμιση της πίεσης του νερού των πόρων. Για να υπάρξει πλήρης στήριξη του μετώπου πρέπει το εκσκαπώμενο γεωυλικό να αναζυμωθεί σε μια πλάσιμη μάζα με την βοήθεια χημικών πρόσθετων τα οποία ρυθμίζουν τα μηχανικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του υλικού.



Εικ.2.4 : Απεικόνιση Λειτουργίας Μηχανής EPB (Herrenknecht AG, 2019)

Η πίεση στο θάλαμο εκσκαφής ρυθμίζεται μέσω του ατέρμονα κοχλία που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση της πάστας. Οι μηχανές EPB δύνανται να εργάζονται και με ανοιχτή λειτουργία σε ευσταθείς συνθήκες, ενώ εκτός από κοπτικά συρόμενου τύπου φέρουν επίσης και κοπτικά εργαλεία τύπου δίσκου.

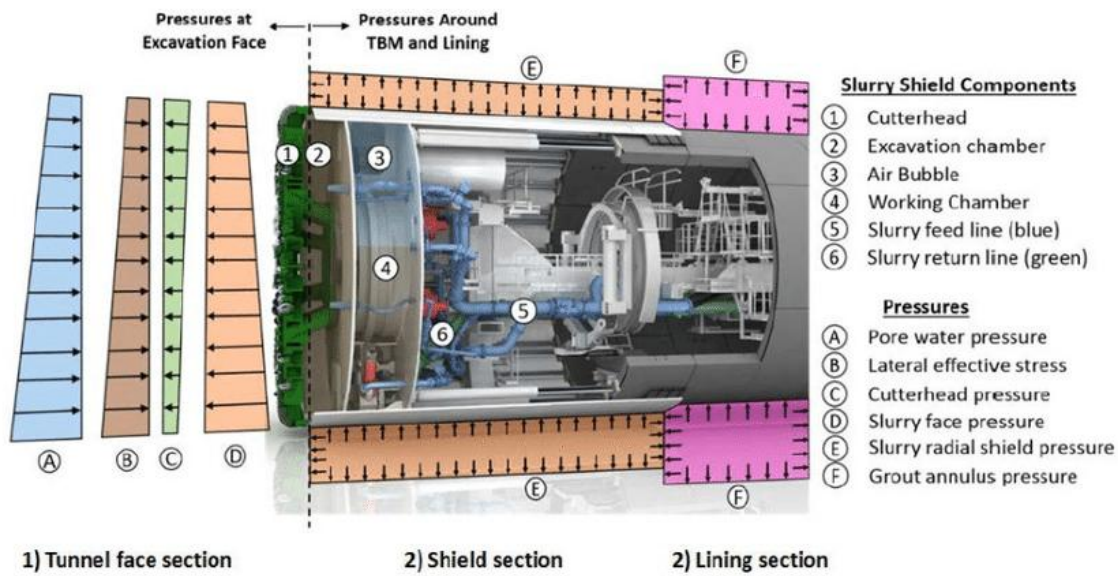


Εικ.2.5: Μηχανή EPB (Robbins, 2019)

### 2.3.7. Μηχανές Διάτρησης Πολφού Μπεντονίτη (Slurry TBM)

Ο συγκεκριμένος τύπος TBM χρησιμοποιεί πολφό μπεντονίτη για την αντιστήριξη του μετώπου εκσκαφής. Η ρύθμιση της πίεσης αντιστήριξης του μετώπου επιτυγχάνεται μέσω της πλήρωσης του θαλάμου εκσκαφής με πολφό μπεντονίτη, ο οποίος δημιουργεί μια μεμβράνη φίλτρου (filter cake) από το εμποτισμένο έδαφος, πάνω στο οποίο ασκείται η πίεση του υπόλοιπου πολφού του θαλάμου.

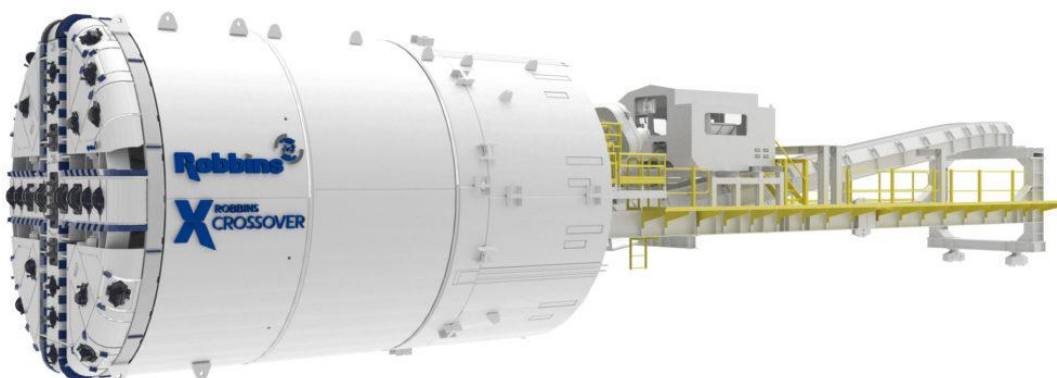
Τα TBMs πολφού χρησιμοποιούνται για μαλακές γεωμάζες που αποτελούνται από άμμους και χαλίκια με ιλύ κάτω από υψηλές υδροστατικές πιέσεις. Ο πολφός μεταφέρεται από τον θάλαμο εκσκαφής μέσω σωληνώσεων σε ειδική εγκατάσταση για τον καθαρισμό και την επαναχρησιμοποίησή του. Η μηχανή είναι δυνατό να εκσκάπτει και μέσα σε βράχο με την χρήση κατάλληλων δίσκων κοπής και την εγκατάσταση θραυστήρα στο σύστημα αποκομιδής του εκσκαπώμενου υλικού. Εδάφη με μεγάλο ποσοστό λεπτομερών όπως ιλύς ή άργιλοι μπορεί να οδηγήσουν σε φράξιμο των ανοιγμάτων της εισόδου της κεφαλής. Ωστόσο πολυμερή μπορεί να προστεθούν για την ρύθμιση της συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών.



Εικ.2.6: Μηχανή Πολφού (Herrenknecht AG, Jaafar Mohammed, 2017)

### 2.3.8. Μηχανές Διάτρησης Μετατρέπόμενου Τύπου - Υβριδικά TBM

Τα υβριδικά TBMs αναφέρονται σε μηχανές που μπορούν να εναλλάσσουν την λειτουργία τους από ασπίδες πολφού σε EPB αν οι γεωλογικές συνθήκες το επιβάλλουν. Η αλλαγή λειτουργίας απαιτεί παύση του μηχανήματος ενώ η χρήση τους πρέπει να δικαιολογείται από τεχνικοοικονομικά κριτήρια καθώς το κόστος επένδυσης είναι αρκετά υψηλό.



Εικ.2.7: Μηχανή Υβριδικού Τύπου (Robbins, 2019)



## 2.4. Μηχανή EPB της Επέκτασης του Μετρό στο Τμήμα ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ - ΕΛΛΗΝΙΚΟ

Η μηχανή EPB που χρησιμοποιήθηκε για την διάνοιξη της κύριας σήραγγας στην επέκταση του Μετρό της Αθήνας στο Τμήμα ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ - ΕΛΛΗΝΙΚΟ κατασκευάστηκε από την εταιρεία Herrenknecht AG.

Είχε συνολικό μήκος πάνω από 90m, μαζί με τον συρμό εξυπηρέτησης, διάμετρο εκσκαφής 9,47m και ζύγιζε 625tn.



Εικ.2.8: Μηχανή EPB της Επέκτασης του Μετρό προς Ελληνικό (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Η μέγιστη δύναμη ώθησης ήταν 70900kN με μέγιστη ροπή στρέψης 24000 kNm και εγκατεστημένη ισχύ 3,6MW. Η μέγιστη πίεση που μπορούσε να επιτευχθεί στον θάλαμο εκσκαφής ήταν 3 bar ενώ κατά την λειτουργία της μηχανής χρησιμοποιήθηκαν πρόσμικτα (αφρός) προκειμένου να διασφαλίζεται η συμπεριφορά του εκσκαπώμενου υλικού.



Εικ.2.9: Κύριο Εφέδρανο της Μηχανής EPB του Μετρό προς Ελληνικό (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

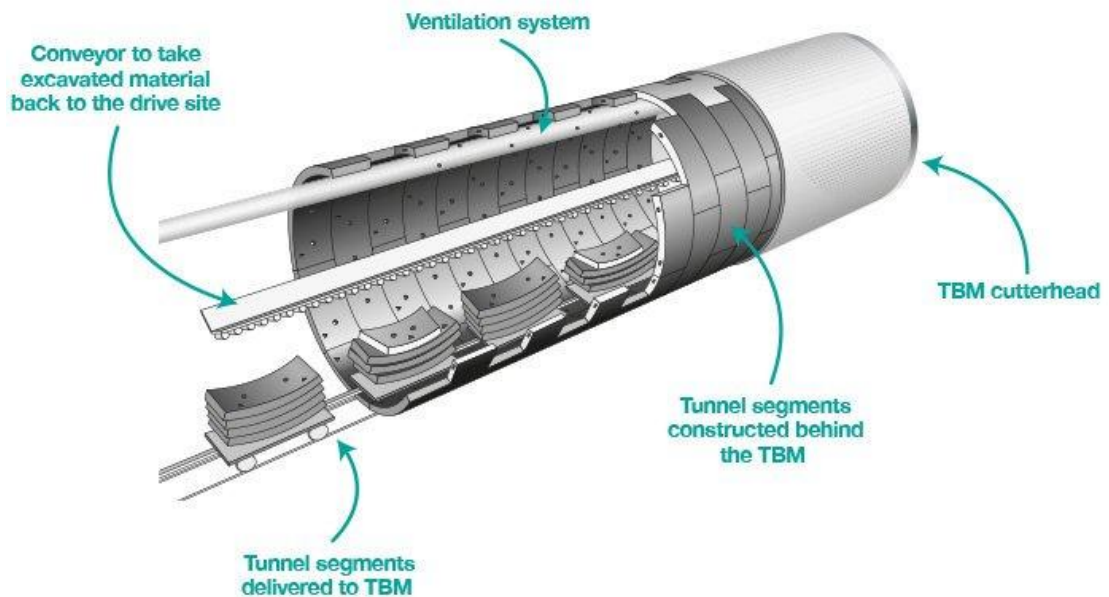
## 2.5. Επένδυση με Προκατασκευασμένους Δακτύλιους Οπλισμένου Σκυροδέματος

Μετά την εκσκαφή η σήραγγα επενδύεται με ειδικά προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η μηχανή TBM καθώς προχωρά, τοποθετεί, κάτω από την ασπίδα, τα προκατασκευασμένα τμήματα με την βοήθεια ειδικού συστήματος ανύψωσης (ερέκτορας), δημιουργώντας ένα δακτύλιο. Οι δακτύλιοι εφάπτονται στεγανά μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα σωλήνα. Το κενό μεταξύ της επένδυσης και της εκσκαφής πληρώνεται με ένεμα τσιμέντου, μπεντονίτη και άλλων χημικών πρόσθετων το οποίο πρέπει να αναπτύξει την κατάλληλη αντοχή μετά την πήξη ώστε να μεταφέρει ομοιόμορφα τα φορτία της εδαφομάζας στο κέλυφος της επένδυσης. Οι δακτύλιοι συνδέονται μεταξύ τους με ειδικούς κοχλίες και πείρους μεγάλης αντοχής. Τα υδραυλικά έμβολα εδράζονται πάνω στην επένδυση ώστε να επιτευχθεί η προχώρηση του μηχανήματος.



Εικ.2.10 : Δοκιμή Ανύψωσης Δακτυλίου Σκυροδέματος στην Θέση Τοποθέτησης (CBE Group, 2019)

Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της κύριας σήραγγας από ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ έως ΕΛΛΗΝΙΚΟ χρησιμοποιήθηκαν προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα κατηγορίας C40/50 και πάχους 35cm.



Εικ.2.11: Επένδυση Σήραγγας με Προκατασκευασμένους Δακτύλιους Σκυροδέματος (Tideway, 2017)



## **Κεφάλαιο 3ο : Καθιζήσεις κατά την Διάνοιξη Αβαθών Σηράγγων**

### **3.1. Εισαγωγικά**

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα κατά την διάρκεια κατασκευής αβαθών σηράγγων, όπως αυτές του Μετρό, είναι οι επιφανειακές μετατοπίσεις (καθιζήσεις) που εμφανίζονται έντονα σε εδαφικούς σχηματισμούς. Η εκδήλωση του φαινομένου των καθιζήσεων, ιδιαίτερα σε αστικό περιβάλλον, είναι δυνατό να βλάψει τις επιφανειακές κατασκευές σε σημαντικό βαθμό ώστε να προκύψουν ζητήματα ευστάθειας αυτών των κατασκευών.

Οι καθιζήσεις οφείλονται σε δύο βασικούς λόγους: στην στερεοποίηση του εδάφους που οφείλεται στην ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα και στην απώλεια όγκου λόγω της μετατόπισης του εδάφους προς το υπόγειο άνοιγμα με την πάροδο του χρόνου.

Το μέγεθος των καθιζήσεων επηρεάζεται επίσης από το μέγεθος του υπόγειου ανοίγματος, τον εδαφικό σχηματισμό το βάθος στο οποίο γίνεται η εκσκαφή και την ποιότητα των εργασιών διάνοιξης.

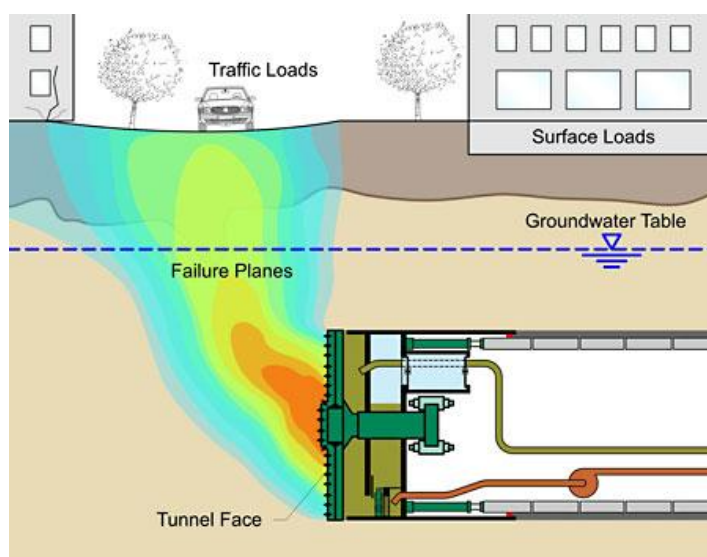
Έτσι κατά την κατασκευή τέτοιου είδους έργων είναι απαραίτητη η γεωτεχνική παρακολούθηση τόσο κατά την φάση της κατασκευής τόσο και κατά την φάση λειτουργίας τους.

### **3.2. Παράγοντες που Προκαλούν Καθιζήσεις λόγω της Απώλειας Όγκου**

Σύμφωνα με την Διεθνή Ένωση Σηραγγοποιίας (ITA-AITES) οι παράγοντες στους οποίους οφείλεται η απώλεια εδαφικού όγκου (Ground Loss) κατά την εκσκαφή και συμβάλλουν στην εκδήλωση καθιζήσεων στην επιφάνεια, κατά την εκμηχανισμένη διάνοιξη σηράγγων από TBM με ασπίδα, χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Καθιζήσεις έμπροσθεν και άνωθεν του μετώπου εκσκαφής

Οφείλονται σε μετακινήσεις της εδαφομάζας έμπροσθεν και άνωθεν της κεφαλής κοπής της μηχανής προς το άνοιγμα που δημιουργείται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας κατάρρευσης τύπου καμινάδας (chimney collapse) όταν το γεωυλικό ρέει ανεξέλεγκτα προς το άνοιγμα της εκσκαφής.



Εικ.3.1: Μηχανισμός Εκδήλωσης Καθιζήσεων στην Επιφάνεια λόγω Κατάρρευσης Μετώπου (Facesupport, 2019)

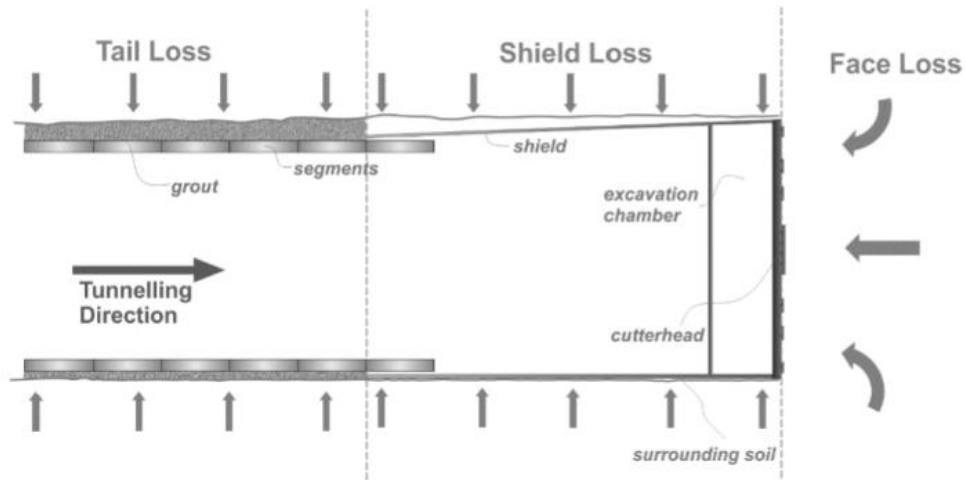
- Καθιζήσεις κατά μήκος της ασπίδας

Οι καθιζήσεις κατά μήκος της ασπίδας συμβαίνουν κυρίως λόγω της σκόπιμης υπερεκσκαφής από τα κοπτικά εργαλεία που βρίσκονται στην περιφέρεια της κοπτικής κεφαλής για να καθίσταται ευκολότερη η προχώρηση του TBM και της δυσκολίας οδήγησης της ασπίδας, ιδιαίτερα κατά την χάραξη καμπυλόγραμμης πορείας. Ουσιαστικά γίνεται διεύρυνση της ασταθούς ζώνης της εδαφομάζας και σε συνδυασμό με το μικρό ύψος υπερκειμένων αυτή η διεύρυνση διαδίδεται ως την επιφάνεια προκαλώντας καθιζήσεις.

- Καθιζήσεις κατά μήκος του ουραίου κενού της ασπίδας

Εδώ οι καθιζήσεις οφείλονται βασικά στο ουραίο κενό της ασπίδας με την εκσκαφή, το οποίο μένει ανυποστήρικτο μέχρι να πληρωθεί με ένεμα οπότε κατά την διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος εκδηλώνονται μετατοπίσεις του εδάφους προς το ελεύθερο κενό. Ένας ακόμη αρκετά σημαντικός παράγοντας που επιδρά στο μέγεθος των καθιζήσεων είναι και η ποιότητα ενεμάτωσης του ουραίου κενού. Όταν το ένεμα δεν έχει την σωστή αναλογία συστατικών και χημικών προσθέτων δεν αποκτά την απαιτούμενη αντοχή, μετά την πήξη του, με

αποτέλεσμα με τις φορτίσεις που θα δεχθεί να παραμορφώνεται και να εντείνεται το φαινόμενο των καθιζήσεων.



Εικ.3.2: Απώλειες Εδαφικού Όγκου κατά την Διάνοιξη Σήραγγας (Κυριακόπουλος, 2017)

- Καθιζήσεις λόγω παραμορφώσεων της επένδυσης

Τα προκατασκευασμένα τμήματα της επένδυσης από σκυρόδεμα πρέπει να είναι επαρκούς αντοχής ώστε να παραλαμβάνουν τόσο τις φορτίσεις από την υπερκείμενη εδαφομάζα όσο και τις πιέσεις από τους γρύλους του TBM που εδράζονται πάνω σε αυτά.

### 3.3. Στερεοποίηση και Επιφανειακές Καθιζήσεις

Τα περισσότερα δεδομένα για τις επιφανειακές καθιζήσεις είναι εμπειρικά καθώς αποκτήθηκαν από μετρήσεις κατά την διάρκεια της διάνοιξης σηράγγων και αφορούν κυρίως το χρονικό διάστημα στο οποίο εκτελούνταν εργασίες. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι γνωστό ότι επιφανειακές καθιζήσεις προκαλούνται σε βάθος χρόνου, δηλαδή ακόμα και μετά το πέρας της υπόγειας διάνοιξης. Δυστυχώς όμως για αυτού του είδους τις καθιζήσεις υπάρχουν ελάχιστα δεδομένα ως προς τα αίτια πρόκλησης τους.

Γενικότερα, τέτοιου είδους καθιζήσεις εμφανίζονται κυρίως κατά την εκσκαφή σε μη στερεοποιημένους εδαφικούς σχηματισμούς. Η βασική αιτία που δίνει το έναυσμα είναι η μείωση της πίεσης των πόρων που οφείλεται στην διάνοιξη μιας σήραγγας που με την σειρά της προκαλεί την αύξηση των ενεργών τάσεων. Πιο

συγκεκριμένα, από δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια διάνοιξης με μηχανή EPB της σήραγγας Furongjiang στην Κίνα, παρατηρούνται οι εξής μεταβολές των πιέσεων των πόρων (Yi et al, 1993):

- Αρχικά ανιχνεύονται πλεονάζουσες αρνητικές πιέσεις πόρων ως αντίδραση της μηχανής που πλησιάζει.
- Έπειτα μετρήθηκαν πλεονάζουσες θετικές πιέσεις πόρων καθώς η μηχανή περνούσε από το σημείο μέτρησης, λόγω της ασκούμενης πίεσης στο μέτωπο καθώς και της πίεσης που προκαλούν τα υπερκείμενα.
- Ακολούθως καθώς η μηχανή απομακρύνονταν, στο σημείο της ασπίδας μετρήθηκαν μηδενικές πλεονάζουσες πιέσεις καθώς το ουραίο κενό κατέρρευε.
- Στην συνέχεια ανιχνεύθηκαν ξανά πλεονάζουσες θετικές πιέσεις πόρων που μάλλον οφείλονταν στην ενεμάτωση του ουραίου κενού.
- Τέλος μετά την περαιτέρω απομάκρυνση του TBM γίνεται διάχυση των πλεοναζουσών θετικών πιέσεων πόρων με την τιμή τους να επανέρχεται σχεδόν στην αρχική.

Ωστόσο επειδή τα φαινόμενα στα οποία οφείλονται οι αλλαγές στις πιέσεις πόρων είναι αρκετά περίπλοκα και δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως, τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λαμβάνονται από την διάνοιξη σιηράγγων, αναφέρονται για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις και μόνο. Για την περαιτέρω κατανόηση των παραπάνω φαινομένων και την σύνδεση μεταξύ των διαφόρων περιπτώσεων, απαιτείται εκτενής συλλογή δεδομένων και μελέτη τόσο κατά την διάρκεια, αλλά και μετά το πέρας των υπόγειων διανοίξεων.

### **3.4. Επίδραση Υπογείου Υδροφόρου Ορίζοντα**

Οι επιπτώσεις των υπόγειων υδάτων στο φαινόμενο των καθιζήσεων στην επιφάνεια είναι ιδιαίτερα σημαντικές καθώς ενεργούν ως πολλαπλασιαστικός παράγοντας. Καθιζήσεις που οφείλονται στην ύπαρξη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα χωρίζονται σύμφωνα με τον χρόνο εκδήλωσής τους σε καθιζήσεις που συμβαίνουν, είτε ταυτόχρονα, είτε μετά την εκσκαφή.

Η υποβάθμιση του υδροφόρου ορίζοντα, είτε από την άντληση των υπογείων υδάτων για την ασφαλή πραγματοποίηση των εργασιών εκσκαφής στην περιοχή κατασκευής του έργου, είτε ως συνέπεια των εργασιών διάνοιξης της σήραγγας



έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση καθιζήσεων, ιδιαίτερα σε μη στερεοποιημένα εδάφη.

Επιπρόσθετα η ανεξέλεγκτη αποστράγγιση των υδάτων προς το άνοιγμα της σήραγγας ακόμα και μετά την τελική επένδυση της θα επιδεινώσει τα φαινόμενα στερεοποίησης σε μεγάλη ακτίνα γύρω από αυτή και κατά συνέπεια και τις επιφανειακές καθιζήσεις.

### **3.5. Καθιζήσεις Λόγω Ποιότητας Εργασιών Διάνοιξης**

Παρόλο που δεν είναι εμφανές, η ποιότητα με την οποία εκτελούνται οι εργασίες διάνοιξης παίζει σημαντικό ρόλο στην εκδήλωση των καθιζήσεων στην επιφάνεια. Όταν παρατηρούνται έντονες δονήσεις κατά την διάνοιξη ή όταν η απομάκρυνση του εκσκαφέντος γεωυλικού γίνεται ανεξέλεγκτα υπάρχει κίνδυνος επιβάρυνσης των παρατηρούμενων καθιζήσεων στην επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται έντονα σε μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς, σε επιφανειακές τεχνητές αποθέσεις πτωχών μηχανικών χαρακτηριστικών και σε τεχνητές αποθέσεις, στις οποίες δεν έχουν γίνει εργασίες συμπύκνωσης.

### **3.6. Μέτρηση Επίγειων Μετακινήσεων του Εδάφους**

Κατά την διάνοιξη αβαθών σηράγγων, παρατηρούνται μετακινήσεις των κατασκευών στην επιφάνεια, τόσο κατά την οριζόντιο 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 την χωροστάθμιση σημείων των κατασκευών, ενώ η μέτρηση των οριζόντιων μετακινήσεων γίνεται με την χρήση κλισημέτρων επί των κατασκευών (Σοφιανός, 2018).

Επιπρόσθετα μετρήσεις γίνονται και από το εσωτερικό της σήραγγας με την χρήση ειδικών διατάξεων με επιμηκυνσιόμετρα τα οποία τοποθετούνται συνήθως σε διατρήματα από αγκύρια της προσωρινής υποστήριξης.

Σύμφωνα με την ITA-AITES, τα τελευταία χρόνια, λόγω της αλματώδους ανάπτυξης της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας στην σήραγγοποιία και της εφαρμογής νέων και βελτιωμένων τεχνικών διάνοιξης, το μέγεθος των καθιζήσεων που παρατηρείται παγκοσμίως σε έργα σπανίως ξεπερνά τα 10-20mm.

Στην μείωση αυτού του φαινομένου έχει πρωταρχικό ρόλο η κατά κόρον χρήση TBMs που προσφέρουν στήριξη μετώπου (EPB, Slurry, Mixshields)

### 3.7. Επικινδυνότητα Καθιζήσεων

Για τον έλεγχο της επικινδυνότητας των καθιζήσεων έχουν θεσπιστεί όρια αναφορικά με τον αποδεκτό βαθμό ενδεχόμενης μετατοπίσεως των κατασκευών, τα οποία αναφέρονται σε τιμές:

- Γωνιακής παραμόρφωσης
- Ολικής καθίζησης
- Ρυθμού μεταβολής ολικής καθίζησης
- Ρυθμού μεταβολής ανοίγματος ρωγμών
- Οριζόντιας παραμόρφωσης

Τα αποδεκτά όρια για τις τιμές αυτές, σύμφωνα με το τεύχος Προδιαγραφών Μελετών Έργων Πολιτικού Μηχανικού της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε., παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

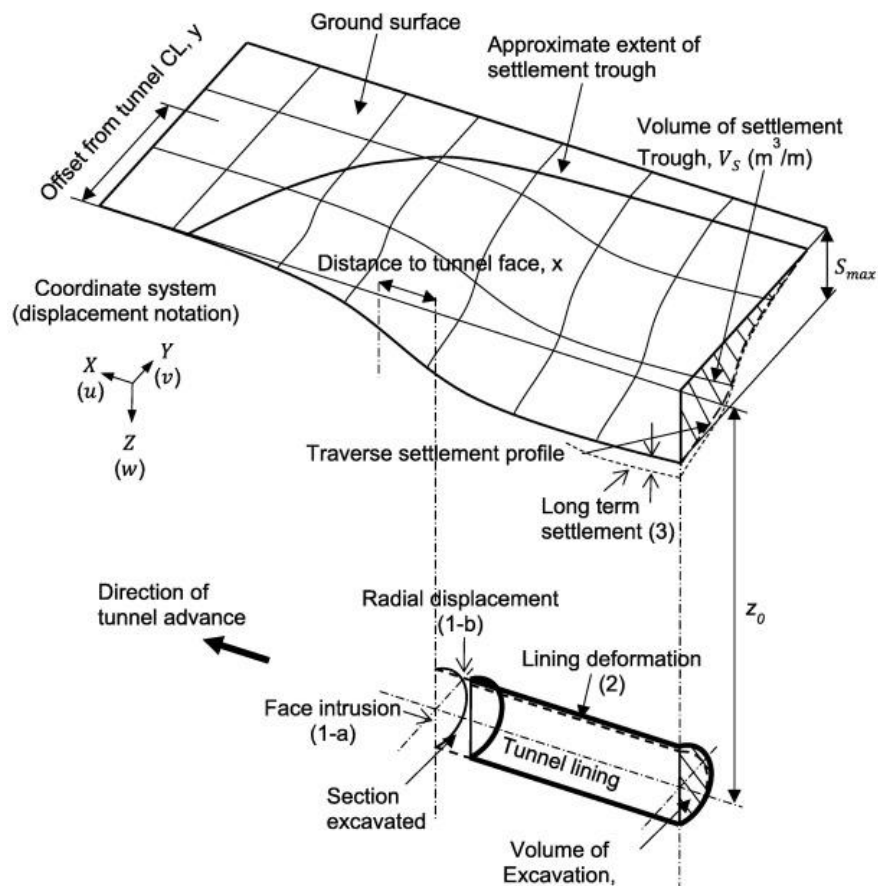
		Ευαίσθητο Κτίσμα	Κτίρια, Δρόμοι, Πεζοδρόμια, Δίκτυα ΟΚΩ
Όριο Επιφυλακής	Ολική Καθίζηση	15 mm	20 mm
	Γωνιακή Παραμόρφωση	0.83 mm/m	1.25 mm/m
	Ρυθμός μεταβολής ολικής καθίζησης	2.0 mm/ημέρα	3.0 mm/ημέρα
	Ρυθμός μεταβολής ανοίγματος ρωγμής	0.5 mm/ημέρα	0.5 mm/ημέρα
	Οριζόντια Παραμόρφωση	0.10 %	0.20%
Όριο Συναγερμού	Ολική Καθίζηση	20 mm	20 mm
	Γωνιακή Παραμόρφωση	1.25 mm/m	1.25 mm/m
	Ρυθμός μεταβολής ολικής καθίζησης	3.0 mm/ημέρα	4.0 mm/ημέρα
	Ρυθμός μεταβολής ανοίγματος ρωγμής	1.0 mm/ημέρα	1.0 mm/ημέρα
	Οριζόντια Παραμόρφωση	0.15%	0.30%

Πίνακας 3.1 : Οριακές Τιμές Μετατοπίσεων Κατασκευών (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

### 3.8. Απώλεια Όγκου του Εδάφους

Απώλεια όγκου του εδάφους (Ground Loss) ορίζεται ως ο όγκος του εδάφους μεταξύ της τελικής και της αρχικής θέσης της επιφάνειας εκσκαφής (Σοφιανός, 2018).

Μια άλλη προσέγγιση θεωρεί ότι η απώλεια όγκου είναι ο όγκος της υπερεκσκαφής του εδάφους από τις θεωρητικές προβλέψεις της εκσκαφής (Loganathan, Poulos & Bustos-Ramirez, 2000).



Εικ.3.3: Τρισδιάστατη Απεικόνιση Σκάφης Καθίζησης (Bihn Thanh Le & Taylor, 2018)

Οφείλεται στην εισροή του εδάφους από το μέτωπο της σήραγγας, στο κενό που ενεματώνεται μεταξύ της εκσκαφής και της επένδυσης και στην συνεπακόλουθη σύγκλιση της διατομής προς την επιφάνεια της επένδυσης ακόμα και μετά την τοποθέτησή της καθώς αυτή υποχωρεί (ερπυσμός). Σημαντική είναι η συμβολή του ενέματος καθώς και του πολφού μπεντονίτη που εισπιέζονται στο κενό μεταξύ του εκσκαφέντος τμήματος και της επένδυσης της σήραγγας. Η πίεση την οποία εφαρμόζουν τα ρευστά στις παρειές της σήραγγας καθώς και ο βαθμός

διείσδυσής τους με το περιβάλλον έδαφος θα έχει εμφανή επίπτωση στην εκδήλωση καθιζήσεων. Επιπρόσθετα η κωνικότητα της ασπίδας του TBM που αποσκοπεί στην διευκόλυνση της πορείας του μέσα στο εκσκαφέν τμήμα της σήραγγας δημιουργεί ένα ουραίο κενό το οποίο αυξάνει την απώλεια όγκου του εδάφους με αποτέλεσμα την επιδείνωση των καθιζήσεων.

Η απώλεια όγκου επίσης εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδαφικού σχηματισμού, τον τρόπο διάνοιξης καθώς την ποιότητα της εργασίας. Ο όγκος της καθιζήσης που εμφανίζεται στην επιφάνεια είναι θεωρητικά ίσος με την απώλεια όγκου κατά την εκσκαφή.

Μολαταύτα έχουν παρατηρηθεί περιπτώσεις όπου οι δύο όγκοι δεν είναι ίσοι. Αυτό είναι δυνατό να συμβεί για τους εξής λόγους:

- Σε περιβάλλον με άμμους ο όγκος αυτός είναι μικρότερος, λόγω του φαινομένου της διόγκωσης, ενώ σε περιβάλλον με άργιλο ο όγκος είναι μεγαλύτερος λόγω της στερεοποίησης που συμβαίνει (Σοφινός 2018).

- Όταν η εκσκαφή γίνεται σε μεγάλο βάθος, υπάρχει σημαντική απομείωση των τάσεων που μεταδίδονται μέχρι την επιφάνεια και προκαλούν την χαλάρωση του εδάφους και κατά συνέπεια οι καθιζήσεις που παρατηρούνται είναι αμυδρές.

- Την παρουσία ενός συνεκτικού στρώματος πάνω από την σήραγγα (ITA-AITES, 2007)

Με βάση τις γνώσεις και την εμπειρία από πληθώρα τεχνικών έργων μέχρι σήμερα παρατηρείται η εξής κατανομή για τα αίτια της απώλειας όγκου (ITA-AITES, 2007):

- 10-20% προκαλούνται λόγω εισροών των χαλαρών γεωυλικών του μετώπου

- 40-50% προκαλούνται κατά μήκος της ασπίδας

- 30-40% προκαλούνται λόγω του ουραίου κενού της ασπίδας

### **3.9. Μέθοδοι Περιορισμού των Επιφανειακών Καθιζήσεων**

Ιδανικά θα έπρεπε να γίνεται πλήρης μελέτη και εφαρμογή μεθόδων ελέγχου των καθιζήσεων πριν ακόμα αρχίσει η κατασκευή του έργου. Όμως μια τέτοια προσπάθεια θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη από οικονομική και τεχνική άποψη καθώς 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 των έργων.

Κατά το στάδιο της μελέτης επιβάλλεται έλεγχος για:

- Το βάθος εκσκαφής
- Την ύπαρξη εδαφικών στρωμάτων με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά
- Την χάραξη της πορείας του TBM
- Την επιλογή της μικρότερης δυνατής διατομής της σήραγγας

Οι πλέον ενδεδειγμένες μέθοδοι που αποσκοπούν στην ανακούφιση ή στην αποτροπή της εκδήλωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια, τόσο κατά την διάρκεια της κατασκευής, όσο και μετά το πέρας του έργου, (κατά ITA-AITES, 2007) αναφέρονται παρακάτω:

- Συμβατικές ενεματώσεις που αποσκοπούν στην αύξηση της αντοχής και την μείωση της υδροπερατότητας του εδάφους
- Ενεματώσεις συμπύκνωσης για αύξηση της αντοχής, σε περιπτώσεις όπου οι σχηματισμοί, όπως επιχώσεις, επιτρέπουν την διαφυγή του ενέματος λόγω του πορώδους τους με αποτέλεσμα την χρήση μεγάλων ποσοτήτων χωρίς ουσιαστική βελτίωση τους
- Jet Grouting με σκοπό την 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 την σταθερότητα του μετώπου
- Βελτιώσεις των υπαρχόντων κατασκευών στην επιφάνεια με υποθεμελιώσεις και υποστυλώσεις ακόμα και μετά την εκδήλωση καθιζήσεων ώστε να αποφευχθούν οι περαιτέρω αστοχίες (ITA-AITES, 2007).

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

## Κεφάλαιο 4ο : Γεωλογικές και Γεωτεχνικές Συνθήκες του Τμήματος Μελέτης

### 4.1. Εισαγωγικά

Το σύνολο του Έργου της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας, χωρίστηκε σε μεσοδιαστήματα επί του συνόλου της κύριας σήραγγας TBM.

Τα Μεσοδιαστήματα 7 και 8 αντιστοιχούν στους Σταθμούς ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ και ΕΛΛΗΝΙΚΟ, από την Χιλιομετρική Θέση (Χ.Θ.) 14+067,11 (Σταθμός ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ) μέχρι την Χ.Θ. 15+051,27 (Σταθμός ΕΛΛΗΝΙΚΟ).

Σε αυτή την διπλωματική εργασία θα μελετηθούν τα τμήματα από το Σταθμό ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ έως το Φρέαρ ΕΛΛΗΝΙΚΟ και από το Φρέαρ ΕΛΛΗΝΙΚΟ έως το Σταθμό ΕΛΛΗΝΙΚΟ, όπως παρουσιάζεται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα:

ΜΕΣΟΔΙΑΣΤΗΜΑ	Χ.Θ. ΜΕΣΟΔΙΑΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΑΣ TBM		ΜΗΚΟΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ TBM (σε m)
	Σταθμός ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ	Φρέαρ ΕΛΛΗΝΙΚΟ	
7	14+067,11	14+489,832	423,00
	Φρέαρ ΕΛΛΗΝΙΚΟ	Σταθμός ΕΛΛΗΝΙΚΟ	
8	14+510,832	15+051,27	540,50
	Φρέαρ ΕΛΛΗΝΙΚΟ	Σταθμός ΕΛΛΗΝΙΚΟ	

Πίνακας 4.1: Στοιχεία Μεσοδιαστημάτων 7 & 8 της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας

Από την εξέταση της χάραξης προκύπτει ότι, η σήραγγα ακολουθεί τον άξονα της Λεωφόρου Βουλιαγμένης και αποκλίνει από αυτή μόνο κοντά σε σημεία σταθμών ή φρεάτων. Παρακολουθώντας το ίχνος της Γραμμής και της σήραγγας διαπιστώνεται ότι στην ευρύτερη περιοχή υπάρχουν κατοικίες ενός ή δύο ορόφων με υπόγεια.

Στο πλαίσιο της κατασκευής του έργου και σε προγενέστερη φάση της μελέτης, η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. πραγματοποίησε πλήρες πρόγραμμα γεωτρήσεων για τον καθορισμό των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών του έργου.

Για το σκοπό αυτό στην ευρύτερη περιοχή της κατασκευής του έργου, εκτός των βασικών γεωτρήσεων, εκτελέστηκαν για την συμπληρωματική γεωτεχνική έρευνα, συνολικά 46 γεωτρήσεις και ειδικότερα στην υπό μελέτη περιοχή, εκτελέστηκαν 12 γεωτρήσεις στο τμήμα εκάστου μεσοδιαστήματος.

Για τον καθορισμό των αντιπροσωπευτικών τεχνικογεωλογικών τομών σχεδιασμού, έγινε διαχωρισμός των γεωτεχνικών συνθηκών, του εκάστοτε μεσοδιαστήματος, διακριτά στις ακόλουθες περιοχές:

- Ζώνη των υπερκειμένων της σήραγγας
- Ζώνη του επιπέδου της υπόγειας εκσκαφής
- Ζώνη των υποκειμένων της σήραγγας

Έτσι, για την γεωτεχνική έκθεση έγινε αξιολόγηση, από τους μελετητές, των στοιχείων της γεωτεχνικής έρευνας που διενεργήθηκε κατά μήκος της κύριας σήραγγας του έργου και εξειδικεύθηκαν τα αποτελέσματα του συνόλου των εργαστηριακών δοκιμών και της στατιστικής τους επεξεργασίας, βάσει των στοιχείων των εργαστηριακών δοκιμών σε δείγματα των εν λόγω γεωτρήσεων. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που έγιναν από τους μελετητές, για τα εδαφικά και αντίστοιχα για τα βραχώδη δείγματα, κρίνονται επαρκή λόγω της ομοιομορφίας τους ανά σχηματισμό.

Από την συναξιολόγηση των ανωτέρω στοιχείων προσδιορίστηκαν οι αντιπροσωπευτικές τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού του υπό μελέτη τμήματος της σήραγγας.

Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω δοκιμές σε δείγματα που προέκυψαν από τις γεωτρήσεις:

- ▶ Δοκιμές σε Εδαφικά δείγματα
  - Κατάταξη κατά ASTM
  - Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα
  - Κοκκομετρική ανάλυση με υδρόμετρο
  - Προσδιορισμός ορίων Atterberg
  - Προσδιορισμός φαινόμενου βάρους
  - Προσδιορισμός ειδικού βάρους
  - Προσδιορισμός φυσικής υγρασίας
  - Δοκιμές στερεοποίησης
  - Δοκιμές διόγκωσης

- Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης
- Ταχείες δοκιμές διάτμησης, χωρίς στερεοποίηση
- Ταχείες δοκιμές διάτμησης, με στερεοποίηση
- Βραδείες δοκιμές διάτμησης, με στερεοποίηση και αποστράγγιση
- Τριαξονικές δοκιμές θλίψης σε δοκίμια προφορτισμένα και στερεοποιημένα στην αντίστοιχη πλευρική πίεση, με μέτρηση πίεσης πόρων
- Ταχείες τριαξονικές δοκιμές, χωρίς στερεοποίηση και αποστράγγιση

► Δοκιμές σε Βραχώδη δείγματα

- Προσδιορισμός ειδικού βάρους
- Προσδιορισμός πορώδους
- Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης βραχωδών πυρήνων, με μέτρηση του Μέτρου Ελαστικότητας (E) και του Λόγου Poisson ( $\nu$ )
- Δοκιμές σημειακής φόρτισης
- Δοκιμές άμεσης διάτμησης σε προδιαγεγραμμένες ασυνέχειες

Επίσης εκτελέστηκαν:

- Δοκιμές βλαπτικότητας ύδατος
- Δοκιμές με πενετρόμετρο χειρός σε πυρήνες συνεκτικών υλικών και μαλακών βράχων
- Δοκιμές πρεσσιομέτρου

#### **4.2. Γεωλογία και Εδαφικές Συνθήκες Μεσοδιαστήματος 7 (Χ.Θ. 14+067 έως Χ.Θ. 14+735)**

Βάσει της αξιολόγησης των δεδομένων των γεωτρήσεων, ως προς τις συνθήκες που υφίστανται στο Μεσοδιάστημα 7 της κύριας σήραγγας, συνάγεται ότι οι γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες προσδιορίζονται με την απαιτούμενη αξιοπιστία, σύμφωνα με τους μελετητές και τον ανάδοχο του έργου.

Στην περιοχή του Μεσοδιαστήματος 7 εκτελέστηκαν 12 γεωτρήσεις σε βάθη από 14 έως 30m περίπου, από τις οποίες προέκυψαν στοιχεία αναφορικά με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που εντοπίστηκαν στις περιοχές ενδιαφέροντος, όπως παρακάτω:



► Στο Τμήμα της Κύριας Σήραγγας από την Χ.Θ. 14+067 έως την Χ.Θ. 14+130

- Τεχνητές επιχώσεις (Σχηματισμός 1). Καθ' όλο σχεδόν το μήκος του υπό μελέτη μεσοδιαστήματος εντοπίζονται επιφανειακά και μέχρι το βάθος των 1,5 με 2,0m περίπου, υλικά τεχνητών επιχώσεων.

- Συνεκτικά κορηματικά υλικά, πάχους 3,4m (Σχηματισμός 2). Τα συνεκτικά κορηματικά υλικά παρουσιάζονται ως ιλυώδεις - αργιλώδεις αμμώδεις χάλικες, καστανού χρώματος, μαλακά λεπτόκοκκα και ασβεστολιθικής σύστασης αδρόκοκκα συστατικά, τα οποία χαρακτηρίζονται ως συνεκτικά.

- Μεταψαμμίτες - μεταϊλυόλιθοι πάχους 20,2m (Σχηματισμός 3). Ο εν λόγω σχηματισμός αποτελείται από τμήματα κερματισμένου έως κατακερματισμένου βράχου, τα οποία εναλλάσσονται με τμήματα εδαφικά έντονα έως πλήρως αποσαθρωμένης και διατμημένης βραχώμαζας και παρουσιάζεται υπό μορφή πολύ ασθενούς βράχου, εδαφοποιημένου κατά θέσεις και διατμημένου, ο οποίος αποσυντίθεται σε ιλυώδη άμμο με χαλίκια και χάλικες κακής διαβάθμισης. Ο παραπάνω σχηματισμός παρουσιάζει μικτά χαρακτηριστικά εδάφους (Σχηματισμός 3.2) και ασθενούς βράχου (Σχηματισμός 3.1). Αναμένεται επίσης εν γένει μικρό ποσοστό εμφάνισης χαλαζία λόγω της σύστασης του σχηματισμού.

- Μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη - μεταϊλυόλιθου πάχους 3,5m περίπου (Σχηματισμός 4). Εμφανίζεται σε βάθος μεγαλύτερο των 25m. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται σε εδαφική φάση (Σχηματισμός 4.2) και ασθενή βραχώδη φάση (Σχηματισμός 4.1), έντονα διαταραγμένος και κερματισμένος που αποσυντίθεται σε ιλυώδη άμμο με λεπτά χαλίκια χωρίς πλαστικότητα.

► Στο Τμήμα της Κύριας Σήραγγας από την Χ.Θ. 14+130 έως την Χ.Θ. 14+735

- Συνεκτικά κορηματικά υλικά πάχους 7,0m, περίπου (Σχηματισμός 2). Τα συνεκτικά κορηματικά υλικά παρουσιάζονται ως ιλυώδεις - αργιλώδεις αμμώδεις χάλικες, καστανού χρώματος, με μαλακά λεπτόκοκκα και ασβεστολιθικής σύστασης αδρόκοκκα συστατικά. Τα εν λόγω εδαφικά υλικά χαρακτηρίζονται ως συνεκτικά.

- Μανδύας αποσάθρωσης μεταψαμμιτών - μεταίλυολίθων πάχους 1,50m, περίπου (Σχηματισμός 5). Ο εν λόγω σχηματισμός, ο οποίος είναι εδαφικής φύσης, παρουσιάζεται με τη μορφή αργιλώδους άμμου με χάλικες.

- Μεταψαμμίτες - Μεταίλυολίθοι, πάχους 11m, περίπου (Σχηματισμός 3). Ο εν λόγω σχηματισμός αποτελείται από τμήματα κερματισμένου έως κατακερματισμένου βράχου, τα οποία εναλλάσσονται με τμήματα εδαφικά έντονα έως πλήρως αποσαθρωμένης και διατμημένης βραχώμαζας. Ειδικότερα, διαπιστώθηκε ότι ο σχηματισμός παρουσιάζεται υπό μορφή πολύ ασθενούς έως ασθενούς βράχου εδαφοποιημένου κατά θέσεις και διατμημένου, ο οποίος αποσυντίθεται σε ιλυώδη έως αργιλώδη άμμο με χαλίκια. Όπως και στο προηγούμενο τμήμα ο σχηματισμός παρουσιάζει μικτά χαρακτηριστικά εδάφους (Σχηματισμός 3.2) και ασθενούς βράχου (Σχηματισμός 3.1) ενώ και εδώ αναμένεται μικρό ποσοστό χαλαζία.

- Μαύρος αργιλικός σχιστόλιθος με ενστρώσεις μεταψαμμίτη - μεταίλυολίθου πάχους 10m, περίπου (Σχηματισμός 4). Εμφανίζεται σε βάθος μεγαλύτερο των 21m ενώ διαπιστώθηκε ότι ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζεται σε φάσεις υπό μορφή πολύ ασθενούς βράχου, έντονα αποσαθρωμένου που αποσυντίθεται σε ιλυώδη έως αργιλώδη άμμο με χάλικες. Ο σχηματισμός παρουσιάζει μικτά χαρακτηριστικά εδάφους (Σχηματισμός 4.2) και ασθενούς βράχου (Σχηματισμός 4.1).

#### **4.3. Υδροφόρος Ορίζοντας Μεσοδιαστήματος 7 (Χ.Θ. 14+067 έως Χ.Θ. 14+735)**

Για τον προσδιορισμό της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο συγκεκριμένο μεσοδιάστημα αξιολογήθηκαν δεδομένα που λήφθηκαν από μετρήσεις πιεζομέτρων που ήταν εγκατεστημένα σε γεωτρήσεις τοποθετημένες στην ευρύτερη περιοχή από όπου διέρχεται η κύρια σήραγγα.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις των πιεζομέτρων, ο υδροφόρος ορίζοντας εντοπίζεται σε βάθος περίπου από 5,5 έως 11m.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα πραγματοποιήθηκαν στο τέλος της ξηρής περιόδου και στις αρχές της υγρής περιόδου του υδρολογικού έτους (μέσα Οκτωβρίου - Δεκεμβρίου και αρχές Ιανουαρίου - Απριλίου), οπότε κρίνεται ότι η προσδιοριζόμενη στάθμη των υπόγειων υδάτων αντιστοιχεί στα χαμηλότερα ενδεχόμενα επίπεδα. Επομένως,

κατά την υγρή περίοδο η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα θα διαμορφώνεται υψηλότερα, δηλαδή σε μικρότερο βάθος από την επιφάνεια.

Επιπρόσθετα αξίζει να σημειωθεί ότι, η διακύμανση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα οφείλεται και στην υδρολιθολογική συμπεριφορά των σχηματισμών εντός των οποίων αναπτύσσεται, καθώς και στο ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, από το οποίο εξαρτάται η τροφοδοσία του.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές σχεδιασμού για τις περατότητες των σχηματισμών του Μεσοδιαστήματος 7, μέσω των οποίων διέρχεται η κύρια σήραγγα :

- Σχηματισμός 2:  $3,65 \times 10^{-6}$  m/sec
- Σχηματισμός 3.1 - 3.2:  $3,60 \times 10^{-7}$  m/sec
- Σχηματισμός 4.1 - 4.2:  $4,00 \times 10^{-7}$  m/sec

#### **4.4. Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού Μεσοδιαστήματος 7**

Από την αξιολόγηση των δεδομένων από τις γεωτρήσεις στο Μεσοδιάστημα 7 της κύριας σήραγγας, καθώς και από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών προσδιορίστηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι καθενός από τους εντοπισθέντες γεωλογικούς σχηματισμούς, τα οποία παρατίθενται κατωτέρω.

Σημειώνεται ότι, για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού λήφθηκαν υπόψη, από τους μελετητές, τα εύρη τιμών από το λογισμικό RocLab της Rocscience και οι ταξινομήσεις κατά GSI (Marinos & Hoek, 2000), τα οποία δεν θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία, τόσο για την βραχώμαζα όσο και για τους σχηματισμούς που παρουσιάζουν μικτά χαρακτηριστικά μεταξύ εδάφους και βράχου. Παρόμοια για τους εδαφικούς σχηματισμούς χρησιμοποιήθηκε χαρακτηρισμός κατά ASTM.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών του υπό μελέτη τμήματος.

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	20 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	5 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	32°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	20 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	40 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	54 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	160 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	32 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,47

Πίνακας 4.2 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 1

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	21 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	40 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	30°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	120 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	240 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	320 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	960 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	192 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,40-0,60

Πίνακας 4.3 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 2

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	20 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	15 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\phi$ )	32°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	35 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	70 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	95 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	285 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	56 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,40-0,60

Πίνακας 4.4 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 5

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	23 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	40 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\phi$ )	35°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	250 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	500 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	675 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	1350 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	400 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,40-0,60

Πίνακας 4.5 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 3.1

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	23 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	25 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	33°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	120 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	240 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	325 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	975 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	192 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,40-0,60

Πίνακας 4.6 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 3.2

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	23 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	55 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	35°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	300 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	600 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	810 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	1620 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	480 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,40-0,60

Πίνακας 4.7 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 4.1

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	23 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	20 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	34°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	120 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	240 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	325 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	975 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	192 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,40-0,60

Πίνακας 4.8 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 4.2

Η απομείωση του Μέτρου Ελαστικότητας E σε μακροχρόνιες συνθήκες για τους παραπάνω σχηματισμούς, όπως αναφέρεται από τους μελετητές του έργου, δεν αποτελεί απαίτηση των κανονισμών σχεδιασμού αλλά πραγματοποιείται προς την κατεύθυνση της ασφάλειας του έργου.

Επιπροσθέτως, η τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας σε μακροχρόνιες συνθήκες  $E_{long}$  για τους σχηματισμούς, που λαμβάνεται ως 80% του αρχικού θεωρείται ικανοποιητική, από τους μελετητές, λαμβάνοντας υπόψη την εμπειρία από παρόμοια έργα καθώς περαιτέρω απομείωση του Μέτρου Ελαστικότητας δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή, αφού θα οδηγήσει σε αύξηση των εντατικών μεγεθών και πιθανώς των απαιτήσεων οπλισμού της μόνιμης επένδυσης της κύριας σήραγγας.

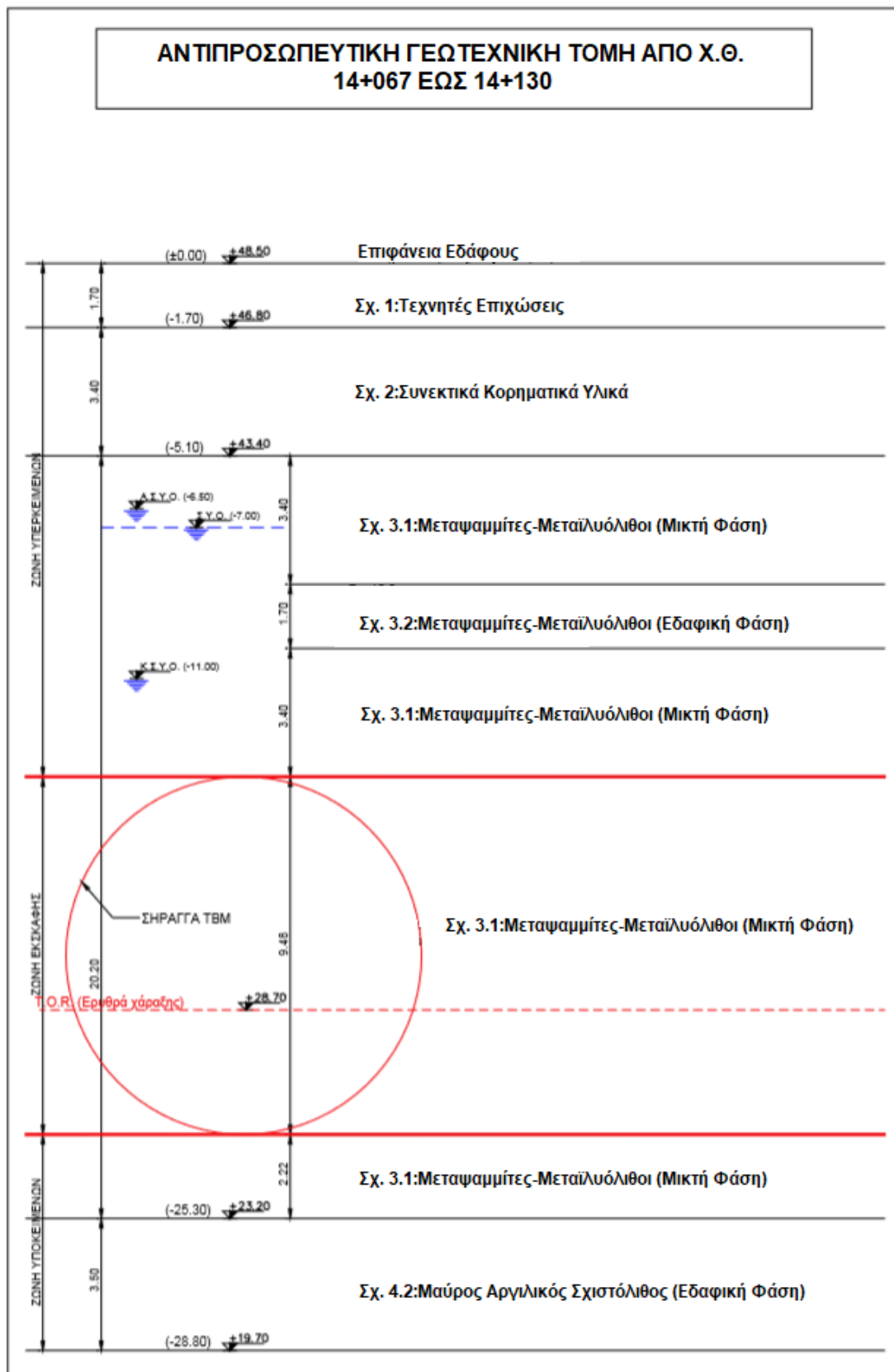
Όσον αφορά στο Μέτρο Ελαστικότητας του σχηματισμού των τεχνητών επιχώσεων προκύπτουν ιδιαίτερα χαμηλές και μη ρεαλιστικές τιμές από τις τριαξονικές δοκιμές που εκτελέστηκαν. Αντίθετα, η τιμή σχεδιασμού που λαμβάνεται για το μέτρο ελαστικότητας συνάδει με τη χαλικώδη σύσταση του Σχηματισμού 2 και σύμφωνα με τους μελετητές αποτελεί δόκιμη τιμή για τον

σχηματισμό, όπως άλλωστε καταδεικνύουν και οι ανάστροφες αναλύσεις που έχουν εκτελεστεί για τα Μεσοδιαστήματα 9 και 10 της κύριας σήραγγας.

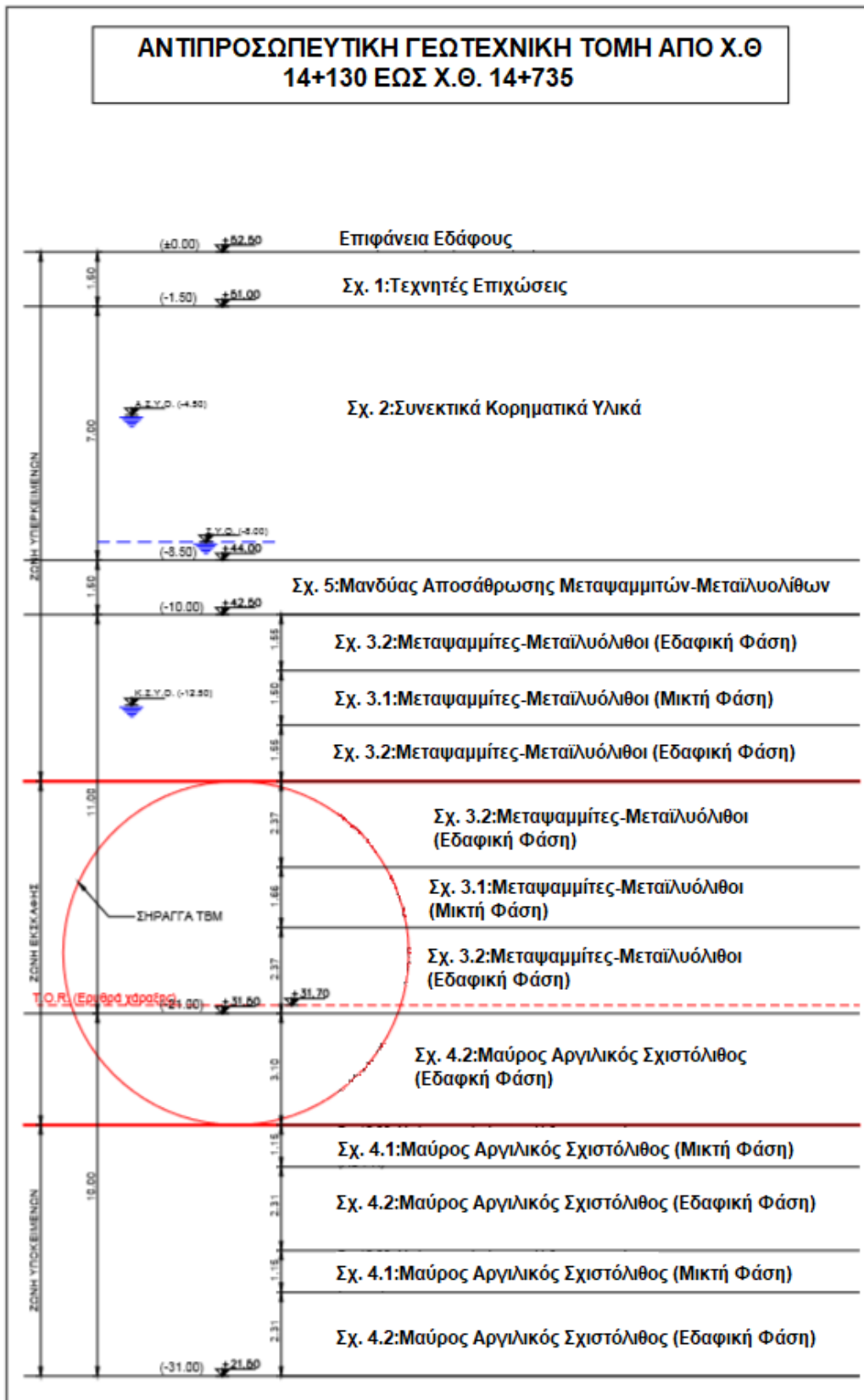
Επιπλέον για τον υπολογισμό του εύρους του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων  $K_0$ , που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του έργου, λήφθηκαν υπόψη δεδομένα από επί τόπου δοκιμές πρεσσιομέτρου ενώ παράλληλα έγινε εκτίμησή του βάσει εμπειρικών σχέσεων και σε συνδυασμό με στοιχεία από γειτονικά έργα όπως ο Σταθμός ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗΣ και το Φρέαρ ΕΛΛΗΝΙΚΟ επιλέχθηκε το παραπάνω εύρος τιμών του συντελεστή.



#### 4.5. Γεωτεχνικές Τομές Μεσοδιαστήματος 7



Εικ 4.1 : Γεωτεχνική Τομή 1 της Σήραγγας ΤΒΜ (Ομικρον Κάπτα Μελετητική)



Εικ. 4.2 : Γεωτεχνική Τομή 2 της Σηράγγας ΤΒΜ (Όμικρον Κάπτα Μελετητική)

#### 4.6. Γεωλογία και Εδαφικές Συνθήκες Μεσοδιαστήματος 8 (Χ.Θ. 14+735 έως Χ.Θ. 15+051)

Βάσει της αξιολόγησης των δεδομένων των παραπάνω γεωτρήσεων, ως προς τις συνθήκες που υφίστανται στο Μεσοδιάστημα 8 της κύριας σήραγγας, συνάγεται ότι οι γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες προσδιορίζονται με την απαιτούμενη αξιοπιστία, σύμφωνα με τους μελετητές και τον ανάδοχο του έργου.

Στην περιοχή του ογδού μεσοδιαστήματος της κύριας σήραγγας του έργου εκτελέστηκαν συνολικά 17 γεωτρήσεις, σε βάθη από 14 έως 37m περίπου, στο πλαίσιο προγενέστερης φάσης γεωτεχνικής έρευνας αλλά και μεταγενέστερης συμπληρωματικής γεωτεχνικής έρευνας, από τις οποίες προέκυψαν στοιχεία αναφορικά με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που εντοπίστηκαν στις περιοχές ενδιαφέροντος, όπως παρακάτω:

► Στο τμήμα της κύριας σήραγγας, από την Χ.Θ. 14+735 έως την Χ.Θ. 14+950 εμφανίζονται οι παρακάτω σχηματισμοί από πάνω προς τα κάτω:

- Τεχνητές επιχώσεις (Σχηματισμός 1). Ο σχηματισμός των τεχνητών επιχώσεων δεν συναντάται στο εν λόγω τμήμα της κύριας σήραγγας σύμφωνα με τα στοιχεία των βασικών γεωτρήσεων.
- Συνεκτικά κορηματικά υλικά, πάχους 11,0m, περίπου (Σχηματισμός 2). Τα συνεκτικά κορηματικά υλικά παρουσιάζονται ως αργιλοϊλυώδεις χάλικες με άμμο, ασύνδετοι και γωνιώδεις, ασβεστολιθικής και ψαμμιτικής σύστασης.
- Μανδύας αποσάθρωσης μεταψαμμιτών - μεταϊλυολίθων πάχους 1,0m, περίπου (Σχηματισμός 5). Ο εν λόγω σχηματισμός, ο οποίος είναι εδαφικής φύσης, παρουσιάζεται με τη μορφή σιφρής αμμώδους αργιλοϊλύος με χάλικες μεταψαμμιτικής σύστασης.
- Σχηματισμός μεταψαμμιτών - μεταϊλυολίθων, πάχους 15,1m περίπου (Σχηματισμός 3). Η γεωτεχνική συμπεριφορά του σχηματισμού εμφανίζει μικτά χαρακτηριστικά εδάφους (Σχηματισμός 3.2) και βράχου (Σχηματισμός 3.1) . Ο εν λόγω σχηματισμός στο συγκεκριμένο τμήμα του έργου αποτελείται από μεταψαμμίτη διατμημένο και εντελώς αποσαθρωμένο έως εδαφοποιημένο κατά

θέσεις υπό μορφή αργιλώδους άμμου με χάλικες. Παρουσιάζονται επίσης και βραχώδη τμήματα μεταψαμμίτη, ελαφρά έως μέτρια αποσθρωμένου και οξειδωμένου, με κατά θέσεις παρουσία ζωνών κατακερματισμού. Αναμένεται επίσης εν γένει μικρό ποσοστό εμφάνισης χαλαζία λόγω της σύστασης του σχηματισμού που περιέχει το συγκεκριμένο ορυκτό στη σύστασή του.

► Στο τμήμα της κύριας σήραγγας, από την Χ.Θ. 14+950 έως την Χ.Θ. 15+051 εμφανίζονται οι παρακάτω σχηματισμοί από πάνω προς τα κάτω:

- Τεχνητές επιχώσεις (Σχηματισμός 1). Σε όλο το συγκεκριμένο τμήμα της κύριας σήραγγας εντοπίζονται επιφανειακά και μέχρι το βάθος των 1,2m, περίπου, υλικά τεχνιτών επιχώσεων .

- Συνεκτικά κορηματικά υλικά, πάχους 4,3m, περίπου (Σχηματισμός 2). Τα συνεκτικά κορηματικά υλικά παρουσιάζονται ως αργιλώδεις χάλικες με άμμο έως αργιλώδης άμμος με χάλικες, ασύνδετοι και γωνιώδεις, ασβεστολιθικής κυρίως σύστασης.

- Τσιμεντωμένο και συνεκτικό κλαστικό υλικό, πάχους 8,8m, περίπου (Σχηματισμός 6.2). Στην εν λόγω ζώνη ο σχηματισμός παρουσιάζει εναλλαγές από άποψη αντοχής (από μέτρια ασθενή έως μέτρια ισχυρό βραχώδες υλικό και κατά θέσεις ισχυρό), καθώς και εδαφικές ζώνες (αργιλο-ιλυώδης άμμος με χάλικες, που χαρακτηρίζεται ως πολύ μαλακό έως σκληρό και συνεκτικό έδαφος, ανάλογα με το ποσοστό σε χάλικες και λεπτόκοκκα υλικά). Ο εν λόγω σχηματισμός διαφοροποιείται από τα ανώτερα κορήματα κυρίως ως προς τη σύσταση των χαλίκων, τα οποία είναι μεταψαμμιτικής προέλευσης, πράσινου χρώματος.

- Συνεκτικός κλαστικός σχηματισμός πάχους 1,8m, περίπου (Σχηματισμός 6.1). Πρόκειται για την εδαφική φάση του σχηματισμού που χαρακτηρίζεται ως αργιλο-ιλυώδης άμμος με χάλικες, και χαρακτηρίζεται ως πολύ μαλακό έως σκληρό και συνεκτικό έδαφος, ανάλογα με το ποσοστό σε χάλικες και λεπτόκοκκα υλικά. Ο εν λόγω σχηματισμός διαφοροποιείται από τα ανώτερα κορήματα κυρίως ως προς τη σύσταση των χαλίκων, τα οποία είναι μεταψαμμιτικής προέλευσης, πράσινου χρώματος.

- Ιλυόλιθοι - αργιλόλιθοι του νεογενούς, πάχους 4,9m, περίπου (Σχηματισμός 7). Πρόκειται για αργιλόλιθο καστανό και χαλικώδη, με τεμάχη

μαργαϊκού ασβεστολίθου, που χαρακτηρίζεται από άποψη κοκκομετρίας ως άργιλος υψηλής πλαστικότητας. Κατά θέσεις εμφανίζεται ως μαργαϊκό λατυποπαγές - ψηφιδοπαγές με μαργαϊκό συνδετικό υλικό και λατύπες. Στο συγκεκριμένο τμήμα του έργου, ο σχηματισμός εμφανίζεται με τη συνεκτική (εδαφική) μορφή του, σύμφωνα με μητρώα γεώτρησεων στην περιοχή.

- Ασβεστόλιθοι του νεογενούς, πάχους 2,3m περίπου, (Σχηματισμός 8). Ο σχηματισμός εμφανίζεται υπό μορφή μαργαϊκού ασβεστολίθου, υγιούς έως ελαφρά αποσπασμένου, ο οποίος από άποψη αντοχής χαρακτηρίζεται από ασθενής έως ισχυρός.

- Ιλυόλιθοι - αργιλόλιθοι του νεογενούς, πάχους 2,4m, περίπου (Σχηματισμός 7). Πρόκειται για αργιλόλιθο καστανό και χαλικώδη και εμφανίζεται με τη συνεκτική (εδαφική) μορφή του, σύμφωνα με μητρώα γεώτρησεων στην περιοχή.

- Κροκαλοπαγές του νεογενούς, πάχους 1,3m περίπου (Σχηματισμός 9). Ο σχηματισμός εμφανίζεται υπό μορφή τσιμεντωμένου λατυποπαγούς, ασθενούς έως ισχυρής αντοχής, καλά συγκολλημένο κατά θέσεις. Στο συγκεκριμένο τμήμα του έργου, ο σχηματισμός εμφανίζεται με τη τσιμεντωμένη (βραχώδη) μορφή του, σύμφωνα με μητρώα γεωτρήσεων στην περιοχή.

Αναμένεται εν γένει μικρό ποσοστό εμφάνισης χαλαζία λόγω της σύστασης των σχηματισμών που περιέχουν το συγκεκριμένο ορυκτό στη σύστασή τους.

Σημειώνεται επίσης ότι, η διαφοροποίηση των γεωλογικών συνθηκών εκατέρωθεν της Χ.Θ. 14+950, οφείλεται στην ύπαρξη τεκτονικής ασυνέχειας στην εν λόγω περιοχή, καθώς σε κάθε πλευρά εμφανίζονται τελείως διαφορετικοί σχηματισμοί.

#### **4.7. Υδροφόρος Ορίζοντας Μεσοδιαστήματος 8 (Χ.Θ. 14+735 έως Χ.Θ. 15+051)**

Για τον προσδιορισμό της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο συγκεκριμένο μεσοδιάστημα αξιολογήθηκαν και εδώ δεδομένα που λήφθηκαν από μετρήσεις πιεζομέτρων εγκατεστημένων σε γεωτρήσεις τοποθετημένες στην ευρύτερη περιοχή, από όπου διέρχεται η κύρια σήραγγα.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις των πιεζομέτρων ο υδροφόρος ορίζοντας εντοπίζεται σε βάθος περίπου από 4,5 έως 18m.

Όπως και στο Μεσοδιάστημα 7, έτσι και για το εν λόγω μεσοδιάστημα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα πραγματοποιήθηκαν στο τέλος της ξηρής περιόδου και στις αρχές της υγρής περιόδου του υδρολογικού έτους (μέσα Οκτωβρίου - Δεκεμβρίου και αρχές Ιανουαρίου - Απριλίου), οπότε κρίνεται ότι η προσδιοριζόμενη στάθμη των υπόγειων υδάτων αντιστοιχεί στα χαμηλότερα ενδεχόμενα επίπεδα. Επομένως, κατά την υγρή περίοδο η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα θα διαμορφώνεται υψηλότερα, δηλαδή σε μικρότερο βάθος από την επιφάνεια.

Επίσης η διακύμανση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα οφείλεται και στην υδρολιθολογική συμπεριφορά των σχηματισμών εντός των οποίων αναπτύσσεται, καθώς και το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, από το οποίο εξαρτάται η τροφοδοσία του.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές σχεδιασμού για τις περατότητες των σχηματισμών του Μεσοδιαστήματος 8 μέσω των οποίων διέρχεται η κύρια σήραγγα:

- Σχηματισμός 2 →  $k = 8,85 \times 10^{-6}$  m/sec.
- Σχηματισμός 3.1 – 3.2 →  $k = 1,20 \times 10^{-6}$  m/sec.
- Σχηματισμός 4 →  $k = 1,75 \times 10^{-6}$  m/sec.
- Σχηματισμός 6.1 – 6.2 →  $k = 1,00 \times 10^{-6}$  m/sec.
- Σχηματισμός 7 →  $k = 7,90 \times 10^{-8}$  m/sec.
- Σχηματισμός 8 →  $k = 9,50 \times 10^{-6}$  m/sec.
- Σχηματισμός 9 →  $k = 2,00 \times 10^{-6}$  m/sec.

#### **4.8. Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού Μεσοδιαστήματος 8**

Σύμφωνα με την αξιολόγηση των δεδομένων που προέκυψαν από τις γεωτρήσεις στο Μεσοδιάστημα 8 της κύριας σήραγγας καθώς και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών προέκυψαν οι παράμετροι σχεδιασμού των ανωτέρω γεωτεχνικών ενοτήτων. Σημειώνεται επίσης ότι για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού λήφθηκαν υπόψη, από τους μελετητές, τα εύρη τιμών από το λογισμικό RocLab της Rocscience και οι

ταξινομήσεις κατά GSI (Marinos & Hoek, 2000), τα οποία δεν θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία, για την βραχώμαζα αλλά και για τους σχηματισμούς που παρουσιάζουν μικτά χαρακτηριστικά μεταξύ εδάφους και βράχου. Ομοίως για τους εδαφικούς σχηματισμούς χρησιμοποιήθηκε χαρακτηρισμός κατά ASTM.

Για τον καθορισμό των βραχωδών και εδαφικών στρώσεων των σχηματισμών αξιολογήθηκαν, από τους μελετητές, οι πυρήνες των γεωτρήσεων στο συγκεκριμένο τμήμα του έργου. Προς την κατεύθυνση αυτή, για τον χαρακτηρισμό των στρώσεων χρησιμοποιήθηκαν πρωταρχικά τα κριτήρια που αφορούν στην περιγραφή, τη φύση και την αντοχή των σχηματισμών για τη διάκριση μεταξύ βραχωδών και εδαφικών ζωνών και δευτερευόντως ο δείκτης RQD.

Παρακάτω παρουσιάζονται πίνακες με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών του υπό μελέτη τμήματος.

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	20 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	5 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	32°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	20 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	40 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	54 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	160 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	32 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,47

Πίνακας 4.9 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 1

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	21 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	40 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	30°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	120 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	240 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	320 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	960 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	192 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,40-0,60

Πίνακας 4.10 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 2

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	23 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	50 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	28°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	120 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	240 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	320 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	960 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	192 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,40-0,60

Πίνακας 4.11 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 7



ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	23 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	170 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	50°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	800 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	1600 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	2160 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	4320 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	1360 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,35-0,60

Πίνακας 4.12 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 9

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	24 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	300 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	55°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	1000 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	2000 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	2700 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	5400 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	850 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,35-0,60

Πίνακας 4.13 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 8

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	21 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	50 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	35°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	100 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	200 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	270 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	810 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	80 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,40-0,60

Πίνακας 4.14 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 6.1

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	23 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	140 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	55°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	850 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	1700 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	2295 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	4590 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	680 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,35-0,60

Πίνακας 4.15 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 6.2

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	20 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	15 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	32°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	35 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	70 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	95 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	285 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	56 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,40-0,60

Πίνακας 4.16 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 5

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	23 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	40 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	35°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	250 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_o$ )	500 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	675 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	1350 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	400 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_o$ )	0,40-0,60

Πίνακας 4.17 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 3.1

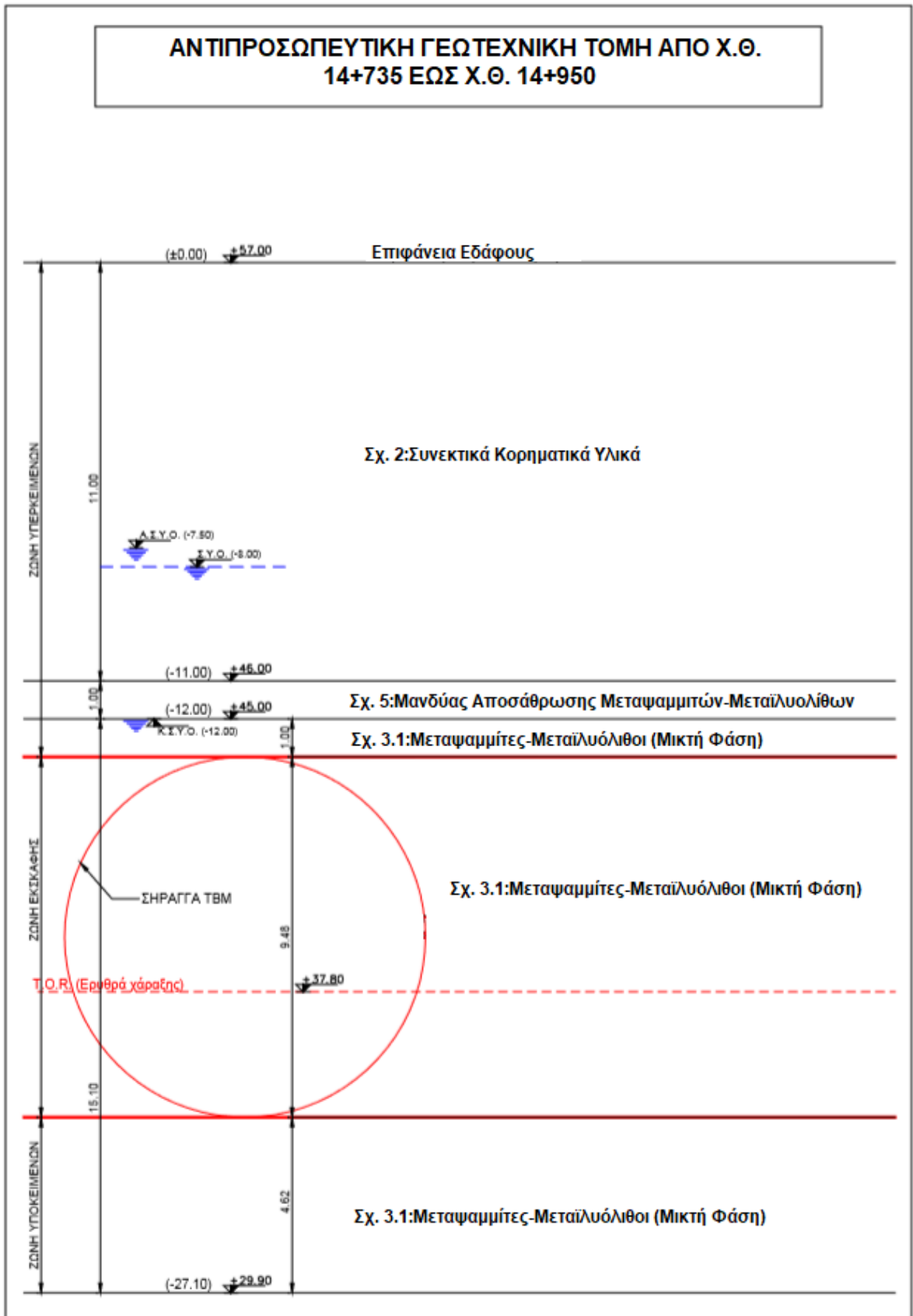
ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ
Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	23 kN/m <sup>3</sup>
Συνοχή (c)	25 kPa
Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $\varphi$ )	33°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	120 MPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0,30
Μέτρο Ελαστικότητας για Μικρές Μετακινήσεις ( $E_0$ )	240 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Φόρτισης ( $E_{SL}$ )	325 MPa
Μονοδιάστατο Μέτρο Συμπιεστότητας για Μικρές Μετακινήσεις και Συνθήκες Αποφόρτισης ( $E_{SU}$ )	975 MPa
Μακροχρόνια Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας - Συμπιεστότητας ( $E_{long}$ )	192 MPa
Συντελεστής Ουδέτερων Ωθήσεων : ( $K_0$ )	0,40-0,60

Πίνακας 4.18 : Μηχανικά Χαρακτηριστικά Σχηματισμού 3.2

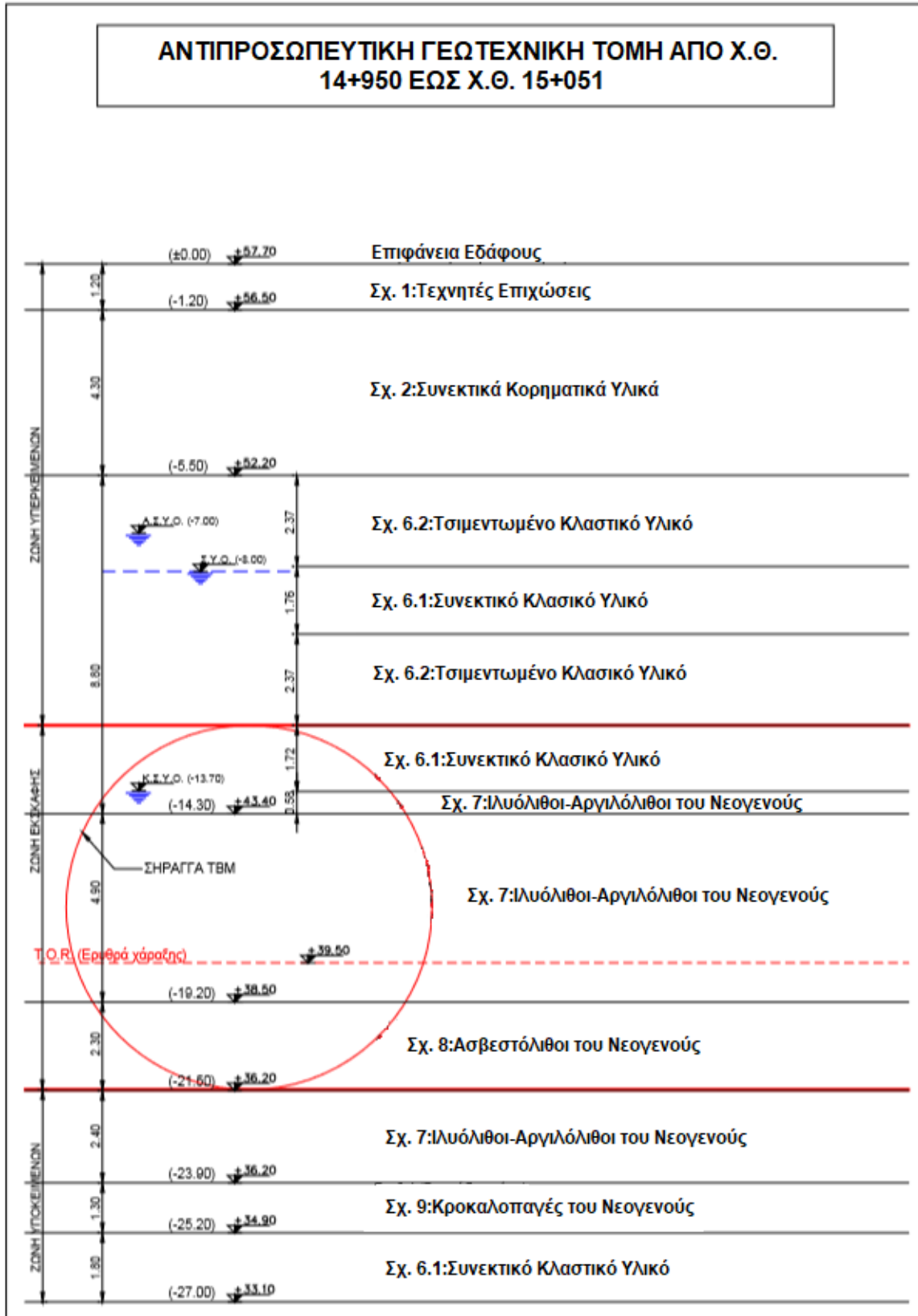
Όπως αναφέρθηκε και κατά την μελέτη του Μεσοδιαστήματος 7 έτσι και στο εν λόγω μεσοδιάστημα η απομείωση του μέτρου ελαστικότητας E σε μακροχρόνιες συνθήκες για τους παραπάνω σχηματισμούς, όπως αναφέρεται από τους μελετητές του έργου, δεν αποτελεί απαίτηση των κανονισμών σχεδιασμού αλλά πραγματοποιείται προς την κατεύθυνση της ασφάλειας του έργου.

Επιπροσθέτως, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας σε μακροχρόνιες συνθήκες  $E_{long}$  για τους σχηματισμούς, που λαμβάνεται ως 80 και 85% του αρχικού θεωρείται ικανοποιητική, από τους μελετητές, λαμβάνοντας υπόψη την εμπειρία από παρόμοια έργα καθώς περαιτέρω απομείωση του μέτρου ελαστικότητας δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή, αφού θα οδηγήσει σε αύξηση των εντατικών μεγεθών και πιθανώς των απαιτήσεων οπλισμού της μόνιμης επένδυσης της κύριας σήραγγας.

#### 4.9. Γεωτεχνικές Τομές Μεσοδιαστήματος 8



Εικ.4.3 : Γεωτεχνική Τομή 3 της Σήραγγας ΤΒΜ (Όμοιον Κάπα Μελετητική)



Εικ.4.4 : Γεωτεχνική Τομή 4 της Σήραγγας ΤΒΜ (Ομικρον Κάπτα Μελετητική)

## Κεφάλαιο 5ο : Πρόβλεψη Καθιζήσεων με την Χρήση Εμπειρικών και Αναλυτικών Μεθόδων

### 5.1. Εισαγωγικά

Για την εκτίμηση των καθιζήσεων κατά την διάνοιξη αβαθών σηράγγων, εκτός από τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης, έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπειρικές και αναλυτικές μέθοδοι. Αυτές λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως το βάθος στο οποίο γίνεται η διάνοιξη, η διάμετρος της σήραγγας, η μέθοδος διάνοιξης καθώς και ο τύπος των σχηματισμών.

Οι εμπειρικές και αναλυτικές μέθοδοι δίνουν την δυνατότητα για μια πρώτη γρήγορη εκτίμηση των καθιζήσεων που θα προκύψουν από την διάνοιξη της σήραγγας όμως η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μάλλον είναι μικρή καθώς γίνονται αρκετές παραδοχές ώστε να μπορέσουν να εφαρμοστούν.

Για τον λόγο αυτό τα αποτελέσματά τους πρέπει να πλαισιώνονται πάντα από αριθμητικές προσομοιώσεις.

Κατωτέρω παρουσιάζονται οι πιο γνωστές από αυτές τις μεθόδους.

### 5.2. Συνάρτηση Gauss

Γενικότερα έχει επικρατήσει ότι η κανονική κατανομή Gauss προσομοιώνει επαρκώς την καμπύλη των καθιζήσεων στην επιφάνεια. Η κατανομή της πιθανότητας ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{➤ } S(x) = S_{\max} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2Xi^2}\right)$$

$S(x)$  η καθίζηση σε απόσταση  $y$  από τον άξονα συμμετρίας και  $x$  η απόσταση από τον άξονα συμμετρίας, για την οποία βρίσκεται η  $S(x)$ .

$$\text{➤ } V_s = \sqrt{2\pi} \cdot S_{\max}$$

$V_s$  η απώλεια εδαφικού όγκου

$$\text{➤ } S_{\max} = \frac{V_s}{(\tan\beta \cdot z + R)} = \frac{V_s}{(2,5 \cdot Xi)}$$

$S_{max}$  η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους, στον άξονα της σήραγγας και  $R$  η ακτίνα του κυκλικού ανοίγματος.

$$\triangleright \tan \beta = \frac{(2,5 \cdot X_i - R)}{z}$$

$\beta$  η γωνία διάχυσης της απώλειας όγκου που εξαρτάται από τον τύπο του υπερκειμένου της εκσκαφής

- $X_i = k \cdot z$

$X_i$  η απόσταση του σημείου καμπής από τον άξονα συμμετρίας.

$$\triangleright k = \frac{(\tan \beta + \frac{R}{z})}{2,5}$$

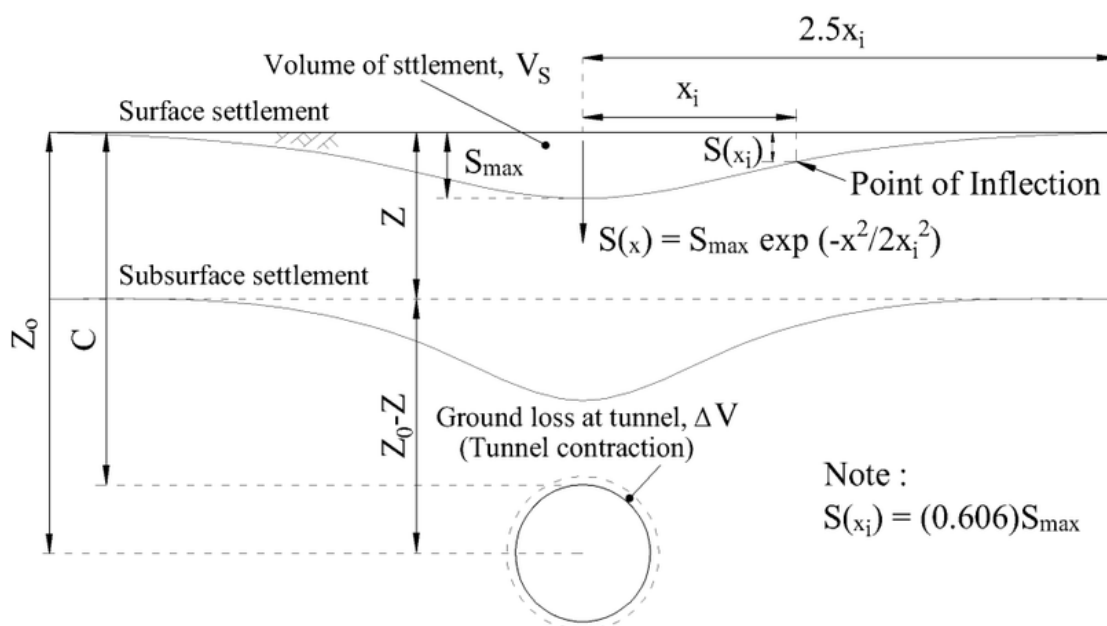
Οι οριζόντιες μετατοπίσεις ακολουθούν την συμμετρική εκθετική κατανομή, με την μέγιστη τιμή τους να βρίσκεται στη θέση του σημείου καμπής της καμπύλης των καθιζήσεων ( $x=i$ ). Η μέγιστη τιμή δίνεται από την σχέση:

$$\triangleright S_{h,max} = 0,606 \cdot S_{v,max} \cdot \left(\frac{\pm i}{z}\right)$$

Η απόκλιση της επίγειας επιφάνειας από την οριζόντια λόγω των καθιζήσεων έχει μέγιστη τιμή που δίνεται από την σχέση:

$$\triangleright \max S_v = 0,607 \cdot \left(\frac{S_{v,max}}{i}\right)$$

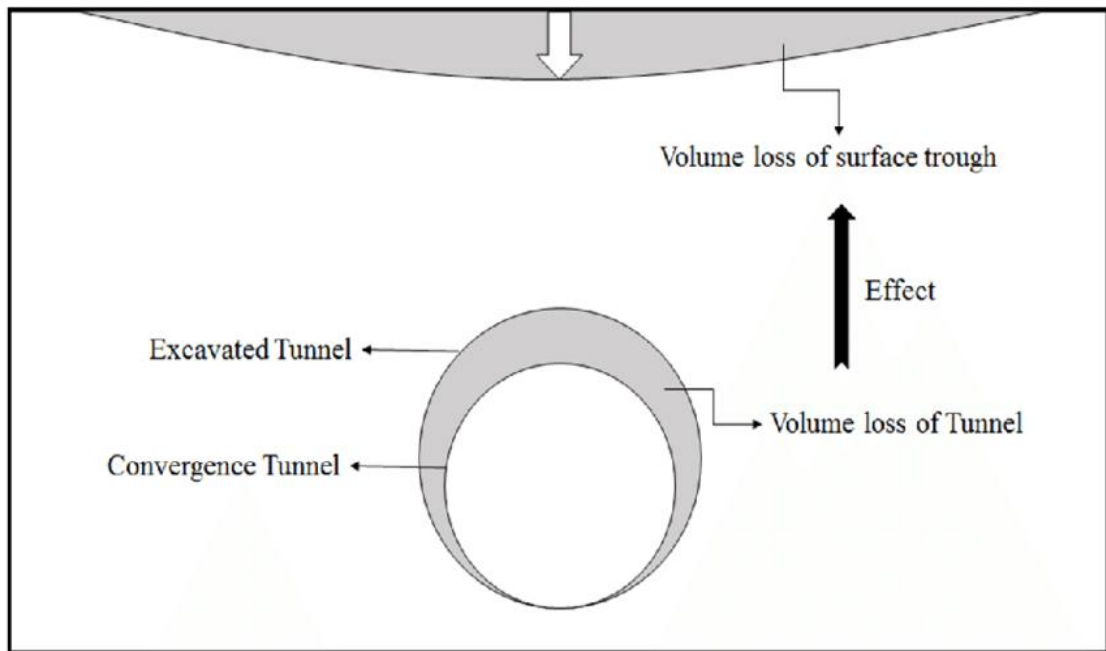
(Σοφιανός, 2018)



Εικ.5.1 : Σχηματική Αναπαράσταση Καθίζησης στην Επιφάνεια (Boonsiri & Takemura, 2015)



Η μορφή της καμπύλης του σχήματος αποτελεί απόδειξη ότι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει το εύρος της λεκάνης καθίζησης είναι το βάθος της εκσκαφής, ανεξάρτητα από τον τύπο του εδαφικού σχηματισμού. Ενδεικτικά η απώλεια όγκου ως ποσοστό επί τον συνολικό όγκο της σήραγγας κυμαίνεται από 0,5% για άριστο έλεγχο της εκσκαφής έως και περισσότερο από 4% για πτωχής ποιότητα εργασίες διάνοιξης (Σοφιανός, 2018).



Εικ.5.2 : Σχηματική Αναπαράσταση Απώλειας Όγκου του Εδάφους κατά την Διάνοιξη (Nam et al, 2017)

### 5.3. Εμπειρικές Μέθοδοι

#### 5.3.1. Cording & Hamshire

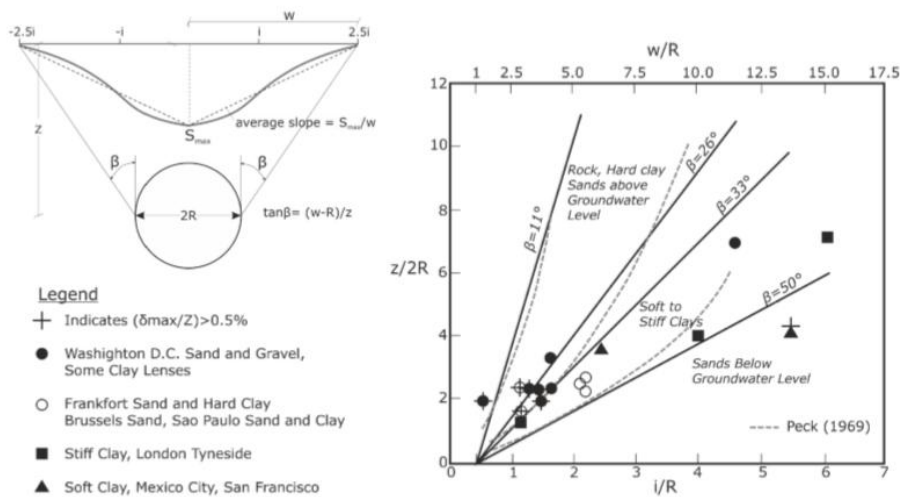
Οι Cording & Hamshire (1972) χρησιμοποίησαν μετρήσεις πεδίου για την εκτίμηση της απώλειας όγκου λόγω της διάνοιξης αβαθούς σήραγγας σε μαλακά εδάφη.

Διαπίστωσαν ότι η διαφορά στην απώλεια εδαφικού όγκου στην περιφέρεια της σήραγγας με την επιφάνεια, οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη θλιπτικού πεδίου στις παρειές του ανοίγματος σήραγγας. Θεώρησαν ότι το προφίλ των καθιζήσεων λαμβάνει την μορφή την καμπύλης Gauss με μόνη διαφορά την εισαγωγή της γωνίας  $\beta$  που σχετίζεται με τον τύπο του σχηματισμού. Η απώλεια όγκου υπολογίζεται από την παρακάτω απλή σχέση:

$$\triangleright V_L = w \cdot S_{\max}$$

όπου  $w$  είναι το πλάτος των καθιζήσεων και  $S_{\max}$  η μέγιστη καθίζηση.

Ωστόσο οι Cording & Hamshire υποστήριξαν ότι οι καθιζήσεις δεν αντιπροσωπεύονται πλήρως από την καμπύλη Gauss κυρίως στις περιοχές μακριά από τον άξονα της σήραγγας καθώς εκεί εμφανίζονται μικρότερες τιμές από τις αναμενόμενες.



Εικ.5.3 : Στα Αριστερά Παρουσιάζεται η Καμπύλη Gauss και στα Δεξιά το Διάγραμμα με την Σχέση μεταξύ της Γωνίας  $\beta$  και του Σημείου Καμπής  $i$  (Cording & Hamshire, 1972)

### 5.3.2. O'Rillley & New

Οι O'Rillley & New (1982) χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις και βάσει της μεθοδολογίας του Peck έδωσαν σχέσεις για τα σημεία καμπής της καμπύλης των καθιζήσεων.

Η βασική σχέση για το σημείο καμπής είναι:

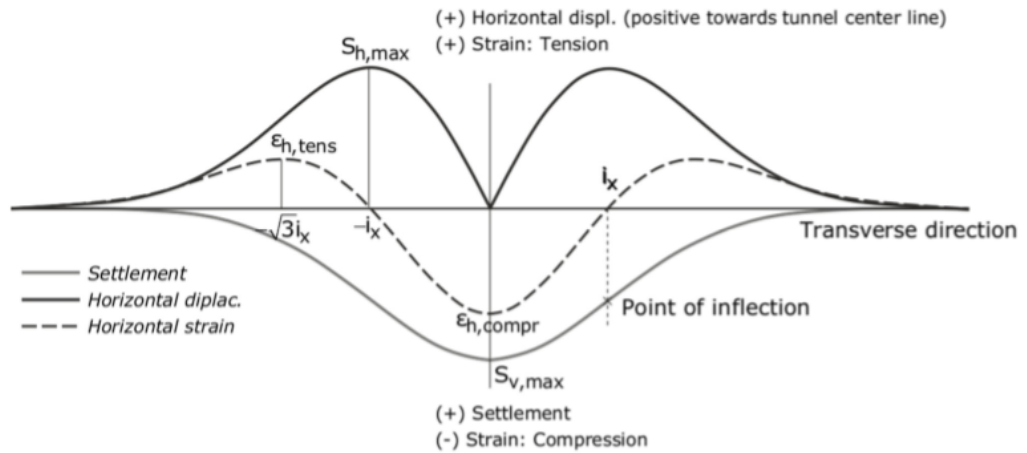
$$\triangleright i = K \cdot z_0$$

όπου το  $K$  είναι μια παράμετρος που σχετίζεται με τον τύπου του εδάφους με εύρος από 0,4 έως 0,7.

Επιπρόσθετα, όρισαν σχέση για τις οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν από την θεώρηση ότι η συνισταμένη περνά από το κέντρο της σήραγγας. Η σχέση αυτή είναι:

$$\triangleright S_h = \frac{x}{z_0 \cdot S_{v,max} \cdot \exp(-x^2/2i^2)}$$

όπου  $x$  η απόσταση από τον οριζόντιο άξονα και  $z$  η απόσταση από τον κατακόρυφο άξονα.



Εικ.5.4 : Οριζόντιες και Κατακόρυφες Μετακινήσεις και Οριζόντιες Παραμορφώσεις εξαιτίας Εκσκαφής (Franzius 2003)

### 5.3.3. Peck & Schmidt

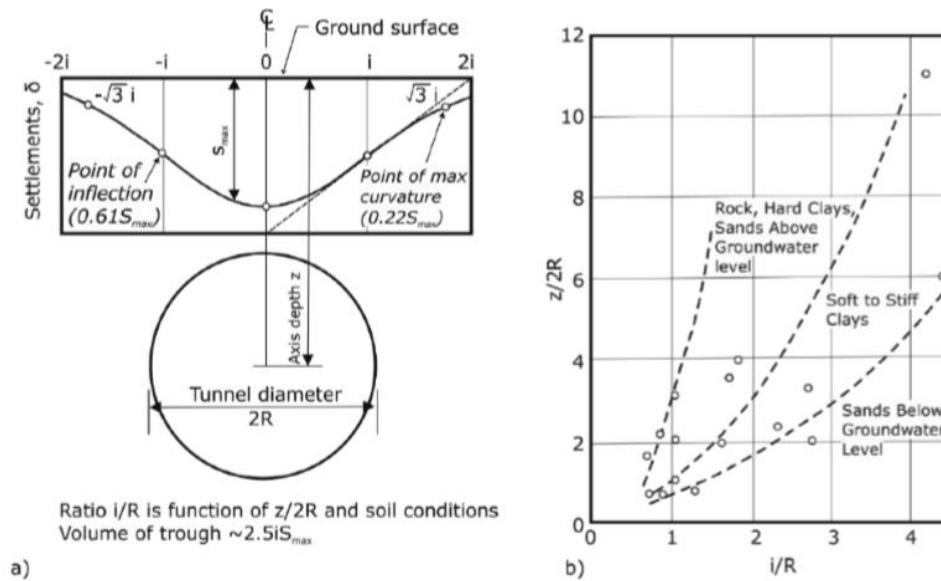
Οι Peck & Schmidt κατασκεύασαν μια απλοϊκή μέθοδο όπου θεωρούν ότι το προφίλ καθιζήσεων αντιπροσωπεύεται επαρκώς από την καμπύλη Gauss παρέχοντας έτσι μια χονδροειδή εκτίμηση των καθιζήσεων. Οι σχέσεις των επιφανειακών καθιζήσεων, της απώλειας όγκου και του σημείου καμπής είναι οι παρακάτω:

$$\triangleright S_z = S_{v,max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right)$$

$$\triangleright V_L = \frac{(\sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{v,max})}{\pi R^2}$$

$$\triangleright \frac{2i}{D} = \left(\frac{z}{D}\right)^{0,8-1}$$

όπου  $R$  η ακτίνα της σήραγγας  $i$  το σημείο καμπής  $D$  η διάμετρος της σήραγγας και  $V_L$  η απώλεια όγκου.



Εικ.5.5 : a) Καμπύλη Gauss που Χρησιμοποιείται για την Περιγραφή της Μεθόδου, b) Διάγραμμα κατά Peck που Δείχνει την Σχέση μεταξύ  $i/R$  και  $z/2R$  (Peck, 1969)

## 5.4. Αναλυτικές Μέθοδοι

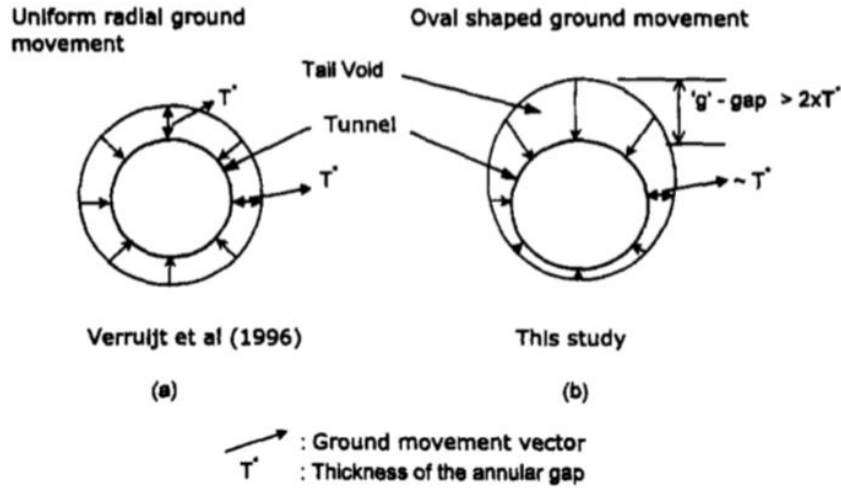
### 5.4.1. Loganathan & Poulos

Οι Loganathan & Poulos (1998) κατασκεύασαν μια αναλυτική μέθοδο με την οποία εισήγαν τις παραμέτρους της ισοδύναμης απώλειας εδάφους  $e_0$  και του κενού  $g$  έναντι της κλασικής θεώρησης της απώλειας όγκου, κατά την διάνοιξη αβαθών σηράγγων. Οι παράμετροι αυτοί ορίζονται ως εξής:

$$g = G_p + U_{3D} + \omega$$

όπου  $G_p$  το φυσικό κενό,  $U_{3D}$  οι τρισδιάστατες ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις και  $\omega$  ο συντελεστής εργασιμότητας.

Παρότι αυτές οι παράμετροι είχαν ήδη εισαχθεί σε άλλες αναλυτικές μεθόδους, η βασική διαφορά στην ανάλυση των Loganathan & Poulos είναι ότι οι μετακινήσεις του εδάφους στον περιβάλλοντα χώρο γύρω από την σήραγγα είναι ανομοιόμορφες πλησιάζοντας το οβάλ σχήμα με μεγαλύτερη σύγκλιση στην στέψη, παρά ομοιόμορφα ακτινικές.



Εικ.5.6 : Σχηματική Αναπαράσταση της α) Ομοιόμορφα Ακτινικής β) Ανομοιόμορφης Παραμόρφωσης του Γεωυλικού γύρω από το Άνοιγμα Σήραγγας (Loganathan & Poulos, 1998)

Επιπρόσθετα υποστήριξαν ότι η απώλεια εδάφους πραγματοποιείται σε δύο φάσεις: α) κατά την διάρκεια της προχώρησης του TBM και β) μετά από κάποιο χρονικό διάστημα όπου εκδηλώνονται φαινόμενα ερπυσμού και στερεοποίησης.

Οι σχέσεις που διέπουν την συγκεκριμένη αναλυτική μέθοδο είναι οι παρακάτω:

$$\triangleright \varepsilon_{x,z} = \varepsilon_0 \exp \left\{ - \left[ \frac{1.38x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\}$$

$$\triangleright S_x = -R^2 x \left\{ \frac{1}{x^2+(H-z)^2} + \frac{3-4\nu}{x^2+(z+H)^2} - \frac{4z(z+H)}{[x^2+(z+H)^2]^2} \right\} \frac{4gR+g^2}{4R^2} \exp \left\{ - \left[ \frac{1.38x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\}$$

$$\triangleright S_z = -R^2 \left\{ \frac{z-H}{x^2+(z-H)^2} + \frac{(3-4\nu)(z+H)}{x^2+(z+H)^2} - \frac{2z[x^2-(z+H)^2]}{[x^2+(z+H)^2]^2} \right\} \frac{4gR+g^2}{4R^2} \exp \left\{ - \left[ \frac{1.38x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\}$$

#### 5.4.2. Sagesta

Ο Sagesta (1982) θεώρησε ένα ισότροπο ομοιογενές μέσο για τις αναλύσεις του και ταυτόχρονα μελέτησε ισόογκες παραμορφώσεις για ελαστική συμπεριφορά των εδαφών. Βασική παραδοχή της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι η διάνοιξη πρέπει να γίνεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και ότι το έδαφος που βρίσκεται γύρω από την σήραγγα τείνει να γεμίσει πλήρως το κενό της εκσκαφής.

Για την επίλυση των εξισώσεων θεωρεί ότι η επίδραση της επιφανείας είναι αμελητέα και οι τάσεις υπολογίζονται σε μέσο απείρων διαστάσεων. Η θεώρηση της αφαίρεσης υλικού από την κατοπτρική θέση ως προς την επιφάνεια ικανοποιεί την ισορροπία των τάσεων.

Οι εναπομείνουσες ορθές και διατμητικές τάσεις στην επιφάνεια αφαιρούνται. Οι σχέσεις για τον υπολογισμό των καθιζήσεων είναι οι παρακάτω:

$$\triangleright S_{xo} = -\frac{v}{2\pi} \frac{x}{x^2+h^2} \left( 1 + \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2+h^2}} \right)$$

$$\triangleright S_{yo} = \frac{v}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2+h^2}}$$

$$\triangleright S_{zo} = \frac{v}{2\pi} \frac{h}{x^2+h^2} \left( 1 + \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2+h^2}} \right)$$

## 5.5. Αριθμητικά Μοντέλα

Στην προσπάθεια για την ακριβέστερη πρόβλεψη των επιφανειακών καθιζήσεων πολλοί μελετητές ανέπτυξαν αριθμητικά μοντέλα τα οποία προσομοιώνουν τις επιφανειακές μετακινήσεις με διάφορα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων. Έγιναν πολλές προσπάθειες, με τον κάθε μελετητή να επικεντρώνει την ανάλυσή του σε μια ή περισσότερες παραμέτρους που επηρεάζουν το πολύπλευρο πρόβλημα των καθιζήσεων.

## 5.6. Πρόβλεψη Απώλειας Όγκου κατά Peck & Schmidt για την Χ.Θ. 14+067 - 14+130

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί μια χονδροειδής πρόβλεψη της απώλειας όγκου  $V_L$  στην Χ.Θ. 14+067 - 14+130. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η εμπειρική μέθοδος κατά Peck & Schmidt ως μια απλοϊκή και γρήγορη λύση για μια πρώτη εκτίμηση της απώλειας όγκου πριν την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών:

- Η μέγιστη καθίζηση θεωρείται  $S_{v,max}$  γνωστή και ίση με  $S_{v,max} = 3,5\text{mm}$  από τα δεδομένα της ανάστροφης ανάλυσης του έργου, το μέγιστο βάθος της σήραγγας  $z = 14\text{m}$  και η διάμετρος  $D = 9,5\text{m}$ .

- Το σημείο καμπής  $i$  είναι:  $\frac{2i}{D} = \left(\frac{z}{D}\right)^{0,8-1} \Rightarrow i = 7$

- Η απώλεια όγκου είναι:  $V_L = \frac{(\sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{v,max})}{\pi R^2} \Rightarrow V_L = 0,22\%$

Η παραπάνω διαδικασία είναι η ανάστροφη της αριθμητικής ανάλυσης καθώς θεωρείται γνωστή η μέγιστη καθίζηση και γίνεται προσπάθεια υπολογισμού της απώλειας όγκου.

## Κεφάλαιο 6ο : Καταστατικά Μοντέλα

### 6.1 Λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων PLAXIS 2D

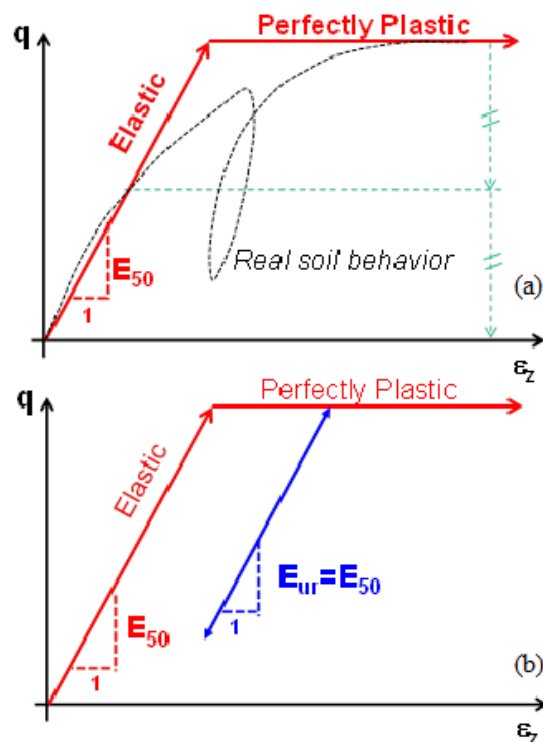
Για την παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό PLAXIS 2D 2015 με σκοπό την μελέτη των καθιζήσεων κατά την διάνοιξη αβαθούς σήραγγας του Μετρό της Αθήνας.

Το PLAXIS 2D είναι ένα ισχυρό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (FEM - Finite Element Method) που χρησιμοποιείται για τη επίλυση διδιάστατων προβλημάτων ευστάθειας και την ανάλυση μεγάλου εύρους τεχνικών έργων τόσο σε εδαφικούς όσο και σε βραχώδεις σχηματισμούς.

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά μοντέλα αστοχίας τα οποία είναι ενσωματωμένα στο λογισμικό και σύμφωνα με αυτά θα γίνει η μελέτη του τμήματος ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ-ΕΛΛΗΝΙΚΟ της κύριας σήραγγας της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας

### 6.2 Μοντέλο Mohr-Coulomb

Το Μοντέλο Mohr-Coulomb είναι ένα μοντέλο αστοχίας όπου η συμπεριφορά του εδάφους θεωρείται γραμμική στην ελαστική και στην πλαστική περιοχή.



Εικ. 6.1 : a) Καμπύλη Τάσεων-Παραμορφώσεων που Προσομοιώνει την Πραγματική Συμπεριφορά ενός Γεωλικού b) Καμπύλη Τάσεων-Παραμορφώσεων στο Μοντέλο Mohr-Coulomb (Tjje-Liong Gouw, 2014)

Οι παράμετροι που χρησιμοποιεί το μοντέλο είναι οι εξής:

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

Η Γωνία Εσωτερικής Τριβής  $\varphi$  είναι βασική παράμετρος για το μοντέλο και υπολογίζεται είτε εργαστηριακά μέσω είτε από την κλίση της περιβάλλουσας αστοχίας σε διάγραμμα ορθής τάσης-διατμητικής τάσης. Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι σε αστράγγιστες συνθήκες η γωνία τριβής είναι μηδέν.

- $c$  : Συνοχή ( $\text{kN/m}^2$ )

Όπως προαναφέρθηκε η Γωνία Τριβής  $\varphi$  μαζί με τη Συνοχή  $c$  αποτελούν βασικές παραμέτρους για το μοντέλο. Έτσι και εδώ η συνοχή μπορεί να υπολογιστεί εργαστηριακά ή μέσα από το διάγραμμα ορθής τάσης-διατμητικής τάσης ως η τεταγμένη του σημείου τομής της περιβάλλουσας αστοχίας με τον άξονα της διατμητικής τάσης (άξονας τεταγμένων).

- $E$  : Μέτρο Ελαστικότητας ( $\text{kN/m}^2$ )

Συνήθως το Μέτρο Ελαστικότητας υπολογίζεται μέσω μονοαξονικών και τριαξονικών θλιπτικών δοκιμών. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι τα περισσότερα γεωυλικά δεν παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά καθώς αυτή αλλάζει ανάλογα με την μορφή και το μέγεθος της φόρτισης όπως για παράδειγμα σε γεωτεχνικά έργα κατά την φόρτιση-αποφόρτιση και επαναφόρτιση του. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα χρήσης άλλων μέτρων ελαστικότητας όπως το Τέμνον ( $E_{50}$ ) (στο μισό της αντοχής του υλικού), το Εφαπτομενικό ( $E_0$ ), το Οιδημετρικό ( $E_{oed}$ ) ή ακόμα μπορεί να γίνει χρήση του Μέρου Διάτμησης ( $G$ ).

- $\nu$  : Λόγος του Poisson

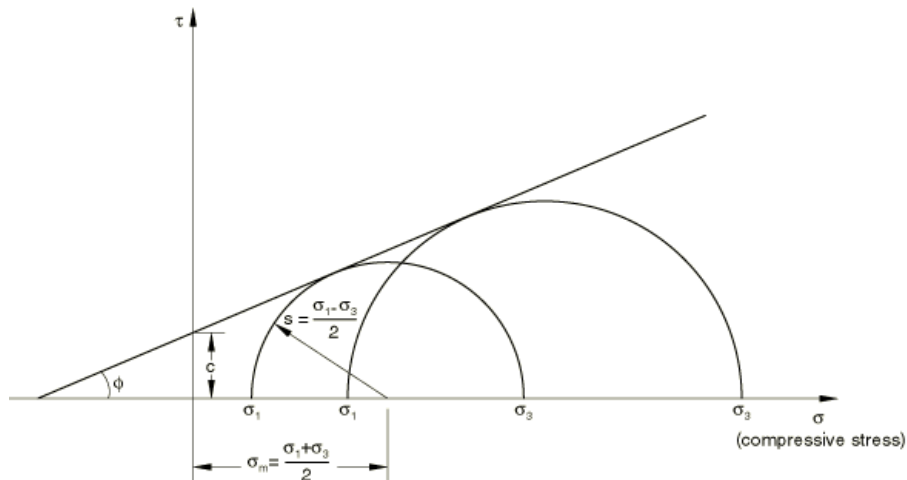
Λόγος Poisson ορίζεται ως ο λόγος της πλευρικής προς την εγκάρσια παραμόρφωση. Μπορεί να υπολογιστεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών.

- $\psi$  : Γωνία Διασταλτικότητας ( $^{\circ}$ )

Η Γωνία Διασταλτικότητας είναι ένας συντελεστής που εκφράζει την τάση ενός γεωυλικού να διογκώνεται όταν ασκείται σε αυτό διατμητική τάση. Σε αμμώδη γεωυλικά εξαρτάται από την πυκνότητα και την γωνία εσωτερικής τριβής. Σε



αργιλικά εδάφη, με εξαίρεση τα έντονα υπερστερεοποιημένα, η γωνία είναι σχεδόν μηδέν.



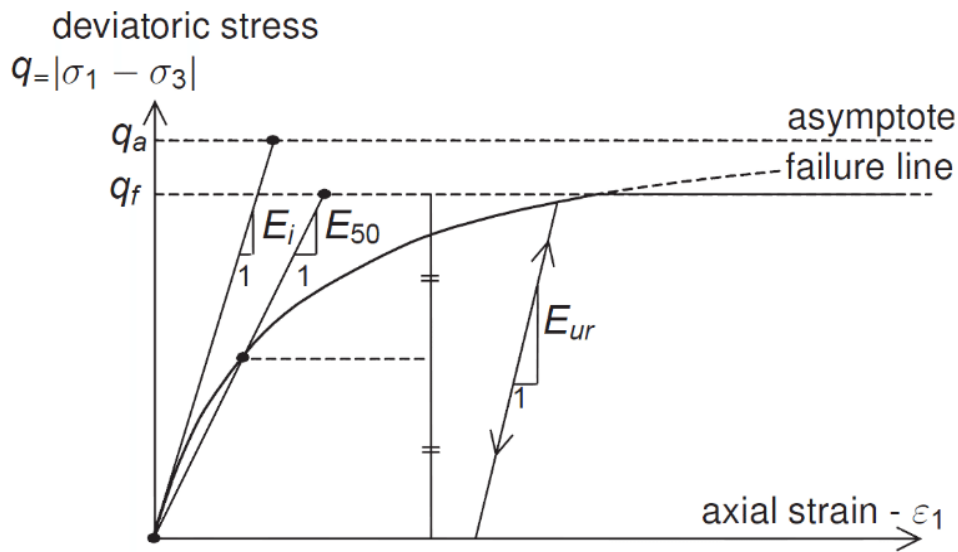
Εικ.6.2 : Διαγραμματική Απεικόνιση του Μοντέλου Mohr-Coulomb (Abaqus, 2010)

Τα πλεονεκτήματά του σε σχέση με άλλα μοντέλα αστοχίας αρχικά είναι ότι η εφαρμογή του είναι απλή και εύχρηστη και οι παράμετροι που απαιτούνται είναι συγκεκριμένες και έχουν ξεκάθαρη φυσική σημασία.

### 6.3 Μοντέλο Hardening Soil

Το Μοντέλο Hardening Soil είναι ένα προηγμένο καταστατικό μοντέλο αστοχίας το οποίο έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει την συμπεριφορά διάφορων εδαφικών σχηματισμών με ποικίλα χαρακτηριστικά. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο όταν το γεωυλικό υποστεί αρχική φόρτιση, αμέσως παρατηρείται μείωση της δυσκαμψίας του και ταυτόχρονα εμφανίζονται μη αναστρέψιμες διατμητικές παραμορφώσεις. Η βασική διαφοροποίηση με άλλα μοντέλα αστοχίας όπως στο ελαστικό-τέλεια πλαστικό μοντέλο, είναι ότι η δυσκαμψία του εδάφους εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη σε αυτό τάση, ανεξάρτητα για κάθε μια την κύρια φόρτιση και την αποφόρτιση-επαναφόρτιση. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται καλύτερα η πραγματική συμπεριφορά ενός γεωυλικού. Επιπλέον οι πλαστικές παραμορφώσεις που εμφανίζονται στο υλικό μπορούν να υπολογιστούν από ένα κριτήριο αστοχίας πολλαπλών επιφανειών.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η περιγραφή της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης από μια υπερβολική καμπύλη, σε πρότυπη τριαξονική δοκιμή.



Εικ.6.3 : Καμπύλη Τάσεων-Παραμορφώσεων σε Τριαξονική Δοκιμή (Ahmed et al. 2016)

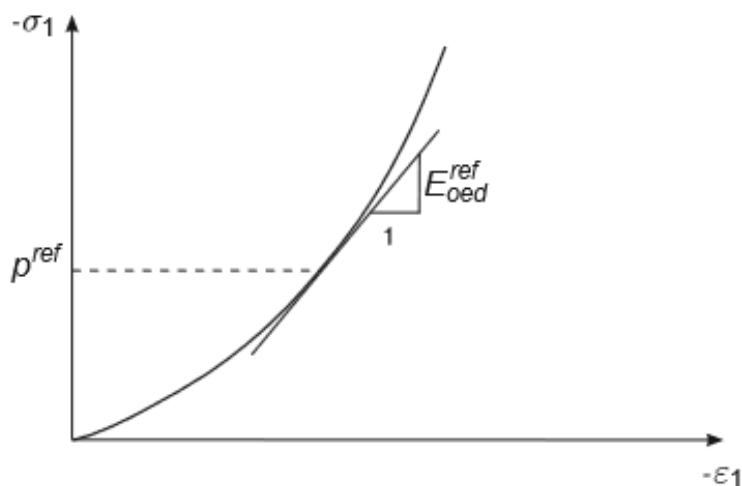
Οι βασικότερες παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι οι εξής:

- $\varphi$  : Γωνία Εσωτερικής Τριβής ( $^{\circ}$ )
- $c$  : Συνοχή ( $\text{kN/m}^2$ )
- $\psi$  : Γωνία Διασταλτικότητας ( $^{\circ}$ )

Η Γωνία Τριβής  $\varphi$ , η Γωνία Διασταλτικότητας  $\psi$  και η Συνοχή  $c$  είναι οι ίδιες παράμετροι όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως για το μοντέλο αστοχίας Mohr-Coulomb.

- $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$  : Εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας ( $\text{kN/m}^2$ )

Το Εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας υπολογίζεται από την κλίση της εφαπτομένης για μια πρότυπη Πίεση Αναφοράς  $p^{\text{ref}}$  σε διάγραμμα ορθής τροπής-κύριας τάσης για δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης. Αυτή η Πίεση  $p^{\text{ref}}$  χρησιμοποιείται ως τιμή αναφοράς καθώς η δυσκαμψία μεταβάλλεται ανάλογα με την βαθμίδα φόρτισης.



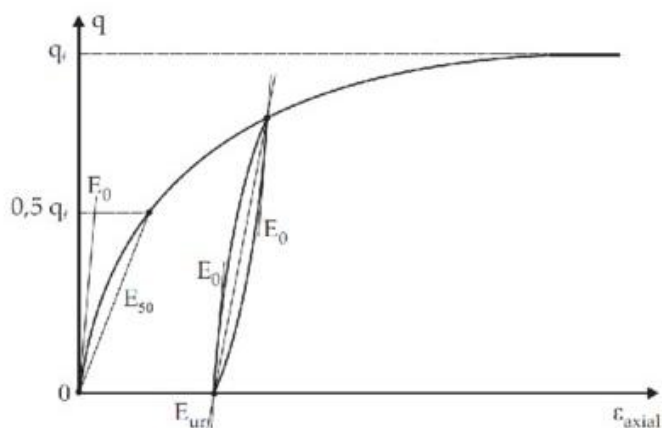
Εικ. 6.4: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης σε Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης (PLAXIS, 2018)

- $E_{50}^{ref}$  : 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 εξηγήθηκε και παραπάνω, επειδή στο συγκεκριμένο μοντέλο η δυσκαμψία μεταβάλλεται ανάλογα με την βαθμίδα φόρτισης και την πλευρική πίεση ( $\sigma_3$ ) που ασκείται, πρέπει να γίνει μετατροπή της τιμής του μέτρου ελαστικότητας για μια πίεση αναφοράς  $p^{ref}$ .

- $E_{ur}^{ref}$  : Μέτρο Ελαστικότητας κατά την Αποφόρτιση-Επαναφόρτιση ( $kN/m^2$ )

Σε περιπτώσεις αποφόρτισης-επαναφόρτισης χρησιμοποιείται το παραπάνω μέτρο ελαστικότητας για μία Πίεση Αναφοράς  $p^{ref}$ . Πολλές φορές για λόγους ευκολίας το  $E_{ur}^{ref}$  μπορεί να θεωρηθεί και ως 3 φορές το  $E_{50}^{ref}$ . Γραφικά, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, η κλίση της ευθείας που ενώνει την αρχή και το τέλος της αποφόρτισης με την επαναφόρτιση, δίνει το  $E_{ur}^{ref}$ .



Εικ.6.5 : Κύκλος Αποφόρτισης-Επαναφόρτισης σε Τριαξονική Δοκιμή (Vakili et al. 2013)

- $m$  : Βαθμός Εξάρτησης της Δυσκαμψίας από το Επίπεδο Φόρτισης

Η παράμετρος αυτή περιγράφει τον βαθμός εξάρτησης της δυσκαμψίας από το επίπεδο φόρτισης. Σύμφωνα με τον von Soos οι τιμές που λαμβάνει η συγκεκριμένη παράμετρος είναι  $0.5 < m < 1$ .

- $p^{ref}$  : 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  $p^{ref} = 100 kN/m^2$ .

- $R_f$  : Λόγος Αστοχίας

Ως Λόγος Αστοχίας ορίζεται ο λόγος της γραμμής αστοχίας  $q_f$  με την ασυμπτωτική γραμμή της καμπύλης  $q_a$  όπως φαίνεται στην εικόνα. Εδώ προτείνεται χρήση της τιμής  $R_f = 0.9$

- $\nu_{ur}$  : Λόγος του Poisson σε Αποφόρτιση-Επαναφόρτιση

#### 6.4. Ανάλυση υπό Διαφορετικές Συνθήκες Στράγγισης

Η ύπαρξη του νερού σε έναν εδαφικό σχηματισμό δημιουργεί πίεση πόρων η οποία συμβάλλει στις συνολικές τάσεις που ασκούνται στον σχηματισμό. Πρακτικά όμως το νερό των πόρων δεν υφίσταται καμία παραμόρφωση.

Για την προσομοίωση αυτών των συνθηκών το λογισμικό PLAXIS δίνει τις επιλογές για ανάλυση με διάφορους συνθήκες στράγγισης.

- Drained (Στραγγισμένες Συνθήκες)
- Undrained A (Αστράγγιστες Συνθήκες)
- Undrained B (Αστράγγιστες Συνθήκες)
- Undrained C (Αστράγγιστες Συνθήκες)

#### 6.5. Drained (Στραγγισμένες Συνθήκες)

Στην ανάλυση υπό στραγγισμένες συνθήκες η πίεση των πόρων είναι μηδενική όποτε ασκούνται μόνο ενεργές τάσεις στους σχηματισμούς. Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την μακροχρόνια επίδραση της κατασκευής της σήραγγας όταν πλέον θα επικρατούν στραγγισμένες συνθήκες στο περιβάλλοντα χώρο.

## 6.6. Undrained A (Αστράγγιστες Συνθήκες)

Σε αυτήν την περίπτωση στην ανάλυση λαμβάνεται υπόψη η πίεση πόρων που δημιουργείται όμως οι παράμετροι αντοχής είναι ενεργές. Επιπρόσθετα αξίζει να σημειωθεί ότι με την χρήση του συγκεκριμένου τύπου ανάλυσης υπάρχει περίπτωση να εμφανιστούν πλεονάζουσες πιέσεις πόρων κατά του υπολογισμού.

Στα περισσότερα μοντέλα η χρήση της ανάλυσης υπό αστράγγιστες συνθήκες είναι δυνατόν να δώσει λανθασμένες διαδρομές τάσεων κατά την φόρτιση με αποτέλεσμα οι υπολογιζόμενες διατμητικές αντοχές να μην είναι αντιπροσωπευτικές. Το παραπάνω πρόβλημα προκύπτει όταν η αντοχή των γεωυλικών υπολογίζεται με την χρήση ενεργών παραμέτρων.

Επιπλέον, είναι σύνηθες φαινόμενο, κατά την χρήση της συγκεκριμένης ανάλυσης να μην υπάρχουν δεδομένα για τις ενεργές παραμέτρους αντοχής των γεωυλικών καθώς αυτές δεν υπολογίζονται πάντοτε στο πλαίσιο των εργαστηριακών δοκιμών και των γεωτεχνικών μελετών.

Ένα πλεονέκτημα και συνάμα μειονέκτημα κατά την αστράγγιστη φόρτιση είναι ότι, μετά την στερεοποίηση των σχηματισμών, εμφανίζονται ελάχιστα αυξημένες διατμητικές αντοχές, πράγμα το οποίο δεν είναι πάντα ορθό, όπως εξηγήθηκε και παραπάνω.



## **Κεφάλαιο 7ο : Επιλογή Παραμέτρων Προσομοίωσης**

### **7.1. Εισαγωγικά**

Για την διεξαγωγή της προσομοίωσης των καθιζήσεων στην επιφάνεια από την διάνοιξη της σήραγγας είναι απαραίτητο να επιλεγούν οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν στα καταστατικά μοντέλα, από τις γεωτεχνικές μελέτες, καθώς επίσης να υπολογιστούν και να εκτιμηθούν όσοι παράγοντες δεν περιλαμβάνονται στις δεδομένες μελέτες.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται πίνακες με τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων για τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση .

### **7.2. Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά**

Η διάμετρος του ανοίγματος της σήραγγας είναι 9,5 m και το συνολικό ύψος του εδαφικού προσομοιώματος είναι 45 m.

Ο λόγος που επιλέχθηκε αυξημένο ύψος του εδαφικού προσομοιώματος είναι για να αποφευχθούν τα προβλήματα λόγω εγγύτητας των ορίων του μοντέλου που είναι πιθανό να εμφανιστούν εάν οι διαστάσεις του είναι περιορισμένες.

### **7.3. Συνοχή c**

Η Συνοχή των γεωυλικών υπολογίστηκε μέσω εργαστηριακών δοκιμών και λαμβάνεται ως έχει από την γεωτεχνική μελέτη.

### **7.4. Γωνία Εσωτερικής Τριβής $\phi$**

Όπως και για την Συνοχή, η Γωνία Εσωτερικής Τριβής των γεωυλικών υπολογίστηκε μέσω εργαστηριακών δοκιμών και λαμβάνεται ως έχει από την γεωτεχνική μελέτη.

## 7.5. Γωνία Διασταλτικότητας $\psi$

Η Γωνία Διασταλτικότητας  $\psi$  εκφράζει την τάση ενός γεωυλικού να διογκώνεται κατά την αστοχία του. Επειδή από τις γεωτεχνικές μελέτες του έργου δεν υπήρξαν επαρκή δεδομένα κρίθηκε ότι η γωνία  $\psi$  μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την πρόταση των Hoek & Brown, 1997. Για πετρώματα και γεωυλικά η γωνία διασταλτικότητας  $\psi$  ορίζεται ως εξής:

- Καλής ποιότητας ( $\sigma_{ci} = 150 - 80$  MPa):  $\psi = \frac{\varphi}{4}$
- Μέσης ποιότητας ( $\sigma_{ci} = 80 - 20$  MPa):  $\psi = \frac{\varphi}{8}$
- Κακής ποιότητας ( $\sigma_{ci} < 20$  MPa):  $\psi = 0$

Όπου  $\varphi$  η εσωτερική γωνία τριβής των γεωυλικών.

Σημειώνεται ότι λόγω έλλειψης δεδομένων για την αντοχή σε θλίψη  $\sigma_{ci}$  των γεωυλικών, έγινε εκτίμηση της ποιότητάς του χρησιμοποιώντας τους γεωλογικούς χαρακτηρισμούς των εκάστοτε σχηματισμών από την γεωτεχνική μελέτη.

Γεωλογικός Σχηματισμός	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\varphi$ (°)	$\psi$ (°)
Τεχνητές Επιχώσεις <b>Σχ. 1</b>	5	32	0
Συνεκτικά Κορηματικά Υλικά <b>Σχ. 2</b>	40	30	0
Μεταψαμμίτες-Μεταίλυόλιθοι (Μικτή Φάση) <b>Σχ. 3.1</b>	40	35	5
Μεταψαμμίτες-Μεταίλυόλιθοι (Εδαφική Φάση) <b>Σχ. 3.2</b>	25	33	0
Μαύρος Αργιλικός Σχιστόλιθος (Μικτή Φάση) <b>Σχ. 4.1</b>	55	35	5
Μαύρος Αργιλικός Σχιστόλιθος (Εδαφική Φάση) <b>Σχ. 4.2</b>	20	34	0
Μανδύας Αποσάθρωσης Μεταψαμμιτών-Μεταίλυολίθων <b>Σχ. 5</b>	15	32	0
Συνεκτικό Κλαστικό Υλικό <b>Σχ. 6.1</b>	50	35	5
Τσιμεντωμένο Κλαστικό Υλικό <b>Σχ. 6.2</b>	140	55	14
Ιλυόλιθοι-Αργιλόθοι του Νεογενούς <b>Σχ. 7</b>	50	28	0
Ασβεστόλιθοι του Νεογενούς <b>Σχ. 8</b>	300	55	14
Κροκαλοπαγές του Νεογενούς <b>Σχ. 9</b>	170	50	13

Πίνακας 7.1 : Χαρακτηριστικά Σχηματισμών μετά από Επεξεργασία

## 7.6. Συντελεστής Ουδέτερων Πλευρικών Ωθήσεων $K_0$

Η τιμή του Συντελεστή Ουδέτερων Πλευρικών Ωθήσεων  $K_0$  προκύπτει από την γεωτεχνική έρευνα, ότι κυμαίνεται από 0.35 έως 0.60. Έτσι κρίνεται ότι μια



μέση τιμή όπως το 0.50 επαρκεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των σχηματισμών.

### 7.7. Υδροφόρος Ορίζοντας - Συντελεστές Διαπερατότητας $K_x$ και $K_y$

Για κάθε γεωτεχνική τομή, η θέση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα που ορίζεται στην δεδομένη γεωτεχνική μελέτη, εξάγεται από τον μέσο όρο μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής στάθμης για κάθε μεσοδιάστημα.

Όσον αφορά τις τιμές του Συντελεστή Διαπερατότητας του κάθε σχηματισμού ανά μεσοδιάστημα, αυτές έχουν προκύψει από τις επί τόπου δοκιμές Maag και Lugeon σε διάφορα βάθη.

### 7.8. Κορεσμένο Φαινόμενο Βάρος $\gamma_{sat}$ και Ακόρεστο Φαινόμενο Βάρος $\gamma_{unsat}$

Το Ακόρεστο Φαινόμενο Βάρος των σχηματισμών προκύπτει από τις εργαστηριακές δοκιμές. Το Κορεσμένο Φαινόμενο Βάρος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση καθώς δεν έχει προσδιοριστεί από την γεωτεχνική μελέτη.

$$\gamma_{sat} = \gamma_d + n \cdot \gamma_w$$

Όπου  $\gamma_d$  το ξηρό φαινόμενο βάρος και  $\gamma_w$  το υγρό φαινόμενο που ταυτίζεται με το ακόρεστο φαινόμενο βάρος  $\gamma_{unsat}$ .

Γεωλογικός Σχηματισμός	$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_{unsat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$K_x$ (m/day)	$K_y$ (m/day)
Τεχνητές Επιχώσεις <b>Σχ. 1</b>	-	20,00	19,50	2,013	2,013
Συνεκτικά Κορηματικά Υλικά <b>Σχ. 2</b>	19,89	26,26	21,89	0,32	0,32
Μεταψαμμίτες-Μεταίλυόλιθοι (Μικτή Φάση) <b>Σχ. 3.1</b>	20,23	26,83	22,69	0,031	0,031
Μεταψαμμίτες-Μεταίλυόλιθοι (Εδαφική Φάση) <b>Σχ. 3.2</b>	19,41	24,52	21,06	0,031	0,031
Μαύρος Αργιλικός Σχιστόλιθος (Μικτή Φάση) <b>Σχ. 4.1</b>	21,65	26,18	23,38	0,034	0,034
Μαύρος Αργιλικός Σχιστόλιθος (Εδαφική Φάση) <b>Σχ. 4.2</b>	20,08	27,00	21,65	0,034	0,034
Μανδύας Αποσάθρωσης Μεταψαμμιτών-Μεταίλυόλιθων <b>Σχ. 5</b>	19,10	24,56	21,53	0,031	0,031
Συνεκτικό Κλαστικό Υλικό <b>Σχ. 6.1</b>	18,84	25,50	21,47	0,086	0,086
Τσιμεντωμένο Κλαστικό Υλικό <b>Σχ. 6.2</b>	21,03	25,54	23,76	0,086	0,086
Ιλυόλιθοι-Αργιλόθοι του Νεογενούς <b>Σχ. 7</b>	19,97	22,94	21,19	0,0068	0,0068
Ασβεστόλιθοι του Νεογενούς <b>Σχ. 8</b>	26,00	28,70	27,00	0,82	0,82
Κροκαλοπαγές του Νεογενούς <b>Σχ. 9</b>	21,85	27,15	23,03	0,17	0,17

Πίνακας 7.2 : Χαρακτηριστικά Σχηματισμών μετά από Επεξεργασία

## 7.9. Μέτρο Ελαστικότητας E

Το Μέτρο Ελαστικότητας E των σχηματισμών προκύπτει από τις τριαξονικές δοκιμές και τις επί τόπου πρεσσιομετρικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της γεωτεχνικής μελέτης. Το συγκεκριμένο μέτρο ελαστικότητας θα χρησιμοποιηθεί για το Μοντέλο MC.

## 7.10. Εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας σε Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης $E_{oed}^{ref}$

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το Εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας σε πρότυπη τριαξονική δοκιμή υπολογίζεται από την κλίση της εφαπτομένης για μια πρότυπη πίεση αναφοράς  $p^{ref}$  σε μια σε διάγραμμα ορθής τροπής-κύριας τάσης για δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης.

## 7.11. Τέμνον Μέτρο Ελαστικότητας $E_{50}^{ref}$ σε Πρότυπη Τριαξονική Δοκιμή

Η τιμή αυτή υπολογίζεται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από την κλίση της τέμνουσας στο 50% της αντοχής του εδαφικού υλικού σε τριαξονική δοκιμή υπό πρότυπη πίεση  $\sigma_3$  ίση με  $p^{ref}$ .

## 7.12. Μέτρο Ελαστικότητας σε Αποφόρτιση και Επαναφόρτιση $E_{ur}^{ref}$

Το συγκεκριμένο Μέτρο Ελαστικότητας υπολογίζεται μέσω τριαξονικών δοκιμών όπου το δείγμα υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις.

Το εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού PLAXIS προτείνει αυτή η τιμή να ληφθεί ως τρεις φορές μεγαλύτερη της τιμής του εφαπτομενικού Μέρους Ελαστικότητας  $E_{oed}^{ref}$ .

Γεωλογικός Σχηματισμός	E (kN/m <sup>2</sup> )	E <sub>oed</sub> <sup>ref</sup> (kN/m <sup>2</sup> )	E <sub>50</sub> <sup>ref</sup> (kN/m <sup>2</sup> )	E <sub>ur</sub> <sup>ref</sup> (kN/m <sup>2</sup> )
Τεχνητές Επιχώσεις <b>Σχ. 1</b>	20.000	40.000	54.000	160.000
Συνεκτικά Κορηματικά Υλικά <b>Σχ. 2</b>	120.000	240.000	320.000	960.000
Μεταψαμμίτες-Μεταίλυοίλιθοι (Μικτή Φάση) <b>Σχ. 3.1</b>	250.000	500.000	675.000	1.350.000
Μεταψαμμίτες-Μεταίλυοίλιθοι (Εδαφική Φάση) <b>Σχ. 3.2</b>	120.000	240.000	325.000	975.000
Μαύρος Αργιλικός Σχιστόλιθος (Μικτή Φάση) <b>Σχ. 4.1</b>	300.000	600.000	810.000	1.620.000
Μαύρος Αργιλικός Σχιστόλιθος (Εδαφική Φάση) <b>Σχ. 4.2</b>	120.000	240.000	325.000	975.000
Μανδύας Αποσάθρωσης Μεταψαμμιτών-Μεταίλυοίλιθων <b>Σχ. 5</b>	35.000	70.000	95.000	285.000
Συνεκτικό Κλαστικό Υλικό <b>Σχ. 6.1</b>	100.000	200.000	270.000	810.000
Τσιμεντωμένο Κλαστικό Υλικό <b>Σχ. 6.2</b>	850.000	1.700.000	2.295.000	4.590.000
Ιλυοίλιθοι-Αργιλόθοι του Νεογενούς <b>Σχ. 7</b>	120.000	240.000	320.000	960.000
Ασβεστόλιθοι του Νεογενούς <b>Σχ. 8</b>	1.000.000	2.000.000	2.700.000	5.400.000
Κροκαλοπαγές του Νεογενούς <b>Σχ. 9</b>	800.000	1.600.000	2.160.000	4.320.000

Πίνακας 7.3 : Χαρακτηριστικά Σχηματισμών μετά από Επεξεργασία

### 7.13. Δομοστατικός Σχεδιασμός Επένδυσης

Η εσωτερική επένδυση της σήραγγας γίνεται με προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος κατηγορίας C40/50. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η επένδυση θεωρείται μονολιθική. Για την προσομοίωση της υποστήριξης που προσφέρει η μόνιμη επένδυση πρέπει να υπολογιστούν οι παρακάτω παράμετροι:

- Ισοδύναμο Μέτρο Ελαστικότητας E<sub>cm</sub>

Από την αντοχή του κυλινδρικού δοκιμίου C40/50, που ισούται με f<sub>ck</sub> = 40 MPa, προκύπτει ότι το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της επένδυσης είναι ίσο με:

$$E_{cm} = 9.5 \times (f_{ck} + 8)^{1/3} \Rightarrow E_{cm} = 3.45 \times 10^7 \text{ kPa}$$

- Δυστένεια EA (Axial Stiffness)

Η δύναμη που απαιτείται για την παραμόρφωση της επένδυσης ή αλλιώς δυστένεια, υπολογίζεται από την σχέση:

$$EA = E_{cm} \times A$$

όπου A είναι το εμβαδόν του φορέα ανά μέτρο επένδυσης και ισούται με:

$$A = b \times h \Rightarrow A = 0.35\text{m} \times 1\text{m} \Rightarrow A = 0.35 \text{ m}^2$$

$$\text{Οπότε } EA = 3.45 \times 10^7 \text{ kPa} \times 0.35 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = 1.2 \times 10^7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

► Δυσκαμψία EI (Flexural Rigidity)

Η δυσκαμψία της επένδυσης υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$EI = E_{cm} \times I$$

όπου I η ροπή αδράνειας ανά μέτρο μήκους της επένδυσης και ισούται με:

$$\Rightarrow I = \frac{b \times h^3}{12} \Rightarrow I = \frac{(1\text{m} \times 0.353 \text{ m}^3)}{12} \Rightarrow I = 3.57 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$\text{Οπότε } EI = 3.45 \times 10^7 \text{ kPa} \times 3.57 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^4}{\text{m}} = 12.3 \times 10^4 \frac{\text{kNm}^2}{\text{m}}$$

► Βάρος Προκατασκευασμένων Στοιχείων της Επένδυσης w

Το βάρος των στοιχείων ανά μέτρο επένδυσης δίνεται από την σχέση:

$$\Rightarrow w = \gamma_c \times h \Rightarrow w = 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times 0.35 \frac{\text{m}}{\text{m}} \Rightarrow w = 8.75 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

όπου  $\gamma_c$  το ειδικό βάρος του σκυροδέματος.

► Λόγος Poisson Σκυροδέματος  $\nu_c$

Ο Λόγος Poisson του σκυροδέματος λαμβάνεται ίσος με  $\nu_c = 0.2$

## 7.14. Συνθήκες Στράγγισης

Για την αριθμητική ανάλυση που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκαν οι Στραγγισμένες (Drained) και οι Αστράγγιστες συνθήκες τύπου A (Undrained A), καθώς αυτές κρίθηκε ότι προσομοιώνουν επαρκώς τις επικρατούσες συνθήκες στράγγισης κατά την διάνοιξη της σήραγγας.

### 7.15. Απώλεια Εδαφικού Όγκου

Για την προσομοίωση της απώλειας όγκου κατά την εκσκαφή, εφαρμόζεται συστολή του εδάφους γύρω από το άνοιγμα της σήραγγας. Η συστολή αυτή εισάγεται με την μορφή του συντελεστή  $C_{ref}$ .

Η τιμή του συντελεστή εκφράζει το μισό του ποσοστού της απώλειας όγκου που έχει εκτιμηθεί κατά τον υπολογισμό με εμπειρικές μεθόδους.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε από τους μελετητές η μέθοδος κατά O'Rillley & New και αποφασίστηκε να ληφθεί μια μέση τιμή της απώλειας όγκου περίπου ίση με 0,1% καθώς η τιμή που υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 5, με την εμπειρική μέθοδο Peck & Schmidt, αποκλίνει αρκετά από τις πραγματικές τιμές.

Αυτό σημαίνει ότι για την προσομοίωση ο συντελεστής  $C_{ref}$  είναι ίσος με 0,05%.

### 7.16. Πίεση Ενέματος

Μετά την πλήρη ανέγερση κάθε δακτυλίου από προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος γίνεται ενεμάτωση του κενού μεταξύ της επένδυσης και του περιβάλλοντος εδαφικού υλικού. Την εργασία αυτή αντιπροσωπεύει η τέταρτη κατά σειρά, φάση της ενεμάτωσης (Grouting) στην προσομοίωση.

Για να προσομοιωθεί η πίεση του ενέματος εισάγεται ο συντελεστής  $P_{ref}$  που ερμηνεύεται ως μια εσωτερική πίεση που ασκείται στο περιβάλλον γεωυλικό.

Η πίεση αυτή ανέρχεται στα  $200 \frac{kN}{m^2}$  (2 bar) η οποία είναι μια μέση τιμή που εξάγεται από δεδομένα κατά την λειτουργία του TBM.

### 7.17 Επιφανειακά Φορτία

Σε όλες τις αναλύσεις λήφθηκε υπόψη ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο ίσο με 50 kPa σε όλο το πλάτος του αριθμητικού μοντέλου, με σκοπό την προσομοίωση των φορτίων που επιβάλλουν οι επιφανειακές κατασκευές και η οδική κυκλοφορία, η οποία είναι μια μέση τιμή που υπολογίστηκε κατά την μελέτη του έργου.

Επιπρόσθετα η χάραξη της σήραγγας συναντά δύο ιδιαίτερες κατασκευές για τις οποίες θα γίνουν ξεχωριστές αναλύσεις με φορτίο ίσο με 70 kPa.



## **Κεφάλαιο 8ο : Μεθοδολογία Κατασκευής Μοντέλων**

### **8.1. Εισαγωγικά**

Για την κατασκευή των μοντέλων του εδάφους που επρόκειτο να αναλυθούν από το λογισμικό, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά, έγινε τμηματοποίηση του συνόλου της σήραγγας σε τέσσερις γεωτεχνικές τομές, σε αντιστοιχία με την μελέτη, ώστε να υπάρξει ομαδοποίηση των γεωτεχνικών παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν.

Στην συνέχεια αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν δύο μοντέλα αστοχίας για τις αναλύσεις, το Mohr - Coulomb (MC) και το Hardening Soil (HS). Το Μοντέλο MC επιλέχθηκε να εφαρμοστεί πρώτο σε μία από τις τέσσερις γεωτεχνικές τομές αφενός, για την προσαρμογή και τον έλεγχο λειτουργίας του λογισμικού με τις δεδομένες γεωτεχνικές παραμέτρους και αφετέρου, για την εξαγωγή αποτελεσμάτων τα οποία μπορούν να αντιπαρατεθούν και να συγκριθούν με αυτά από τις αναλύσεις με το Μοντέλο HS.

Το Μοντέλο HS επιλέχθηκε ως ένα εξελεγμένο μοντέλο αστοχίας, το οποίο αντιπροσωπεύει με αρκετή ακρίβεια την αστοχία των εδαφών σε φόρτιση - αποφόρτιση, όπως ακριβώς συμβαίνει κατά την διάρκεια εκσκαφής της σήραγγας.

### **8.2. Κατασκευή Προσομοιώματος**

Η διαδικασία για την κατασκευή του εδαφικού προσομοιώματος, ακολουθήθηκε για κάθε μια από τις γεωτεχνικές τομές προς ανάλυση και είναι η εξής:

Ξεκινώντας, δίνονται οι διαστάσεις του εδαφικού προσομοιώματος και αμέσως μετά ο χρήστης καλείται να εισάγει την στρωματογραφία και τις γεωτεχνικές παραμέτρους των εδαφικών σχηματισμών. Στην συνέχεια σχεδιάζονται οι κατασκευές για τις οποίες γίνεται η ανάλυση, στην συγκεκριμένη περίπτωση η σήραγγα.

Έπειτα δημιουργείται ο κάνναβος των πεπερασμένων στοιχείων (meshing), ο οποίος έχει την δυνατότητα να είναι από πολύ αραιός (coarse) έως πολύ πυκνός (fine) ανάλογα με τις απαιτήσεις του μελετητή για ακρίβεια. Τέλος εισάγεται η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και καθορίζονται οι φάσεις κατασκευής της σήραγγας.

### 8.3. Φάσεις Κατασκευής

Οι φάσεις κατασκευής της σήραγγας αποτελούν από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες για την ακριβή προσομοίωση της εκσκαφής και γι αυτόν τον λόγο κρίθηκε ότι πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω. Οι φάσεις κατασκευής που αποφασίστηκε να εφαρμοστούν και θα παρουσιαστούν παρακάτω, βασίζονται στις προτάσεις που γίνονται στο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού. Αυτές είναι οι εξής:

- Αρχική Φάση (Initial Phase)
- Επιβολή Επιφανειακής Φόρτισης (Loading)
- Εκσκαφή Σήραγγας (Tunnel Construction)
- Συστολή (Contraction)
- Ενεμάτωση (Grouting)
- Τελική Επένδυση (Final Lining)

#### 8.3.1 Αρχική Φάση

Κατά την αρχική φάση ουσιαστικά, έχει προσδιοριστεί το εδαφικό προσομοίωμα, δηλαδή έχουν εισαχθεί όλες οι απαραίτητες παράμετροι, οι συνθήκες στράγγισης και το μοντέλο αστοχίας που θα εφαρμοστεί.

#### 8.3.2 Επιβολή Επιφανειακής Φόρτισης

Στην συγκεκριμένη φάση προστίθεται ένα φορτίο στην επιφάνεια, το οποίο καθορίζεται κάθε φορά από την μελέτη και αντιστοιχεί στα φορτία κυκλοφορίας και στα φορτία των υπέργειων κατασκευών που βρίσκονται κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας. Το φορτίο αυτό είναι ενεργό σε όλες τις φάσεις της προσομοίωσης εκτός από την αρχική φάση.



### **8.3.3. Εκσκαφή Σήραγγας**

Σε αυτή την φάση προσομοιώνεται η εκσκαφή της σήραγγας με την αφαίρεση του εδάφους μέσα από αυτή. Οι συνθήκες στο εσωτερικό της σήραγγας είναι πλήρως στραγγισμένες.

### **8.3.4. Συστολή**

Η φάση της συστολής προσομοιώνει την υποχώρηση του περιβάλλοντος εδάφους προς το άνοιγμα της σήραγγας λόγω της απώλειας όγκου που συμβαίνει.

Για να επιτευχθεί η προσομοίωση της απώλειας όγκου εφαρμόζεται συστολή στην επένδυση της σήραγγας ίση με την μισή τιμή  $C_{ref}$  που αντιστοιχεί σε ποσοστό της απώλειας όγκου του εδάφους. Εάν ένα ακριβέστερο μοντέλο είναι επιθυμητό από τον μελετητή τότε προτείνεται να δοθούν διαφορετικές ιδιότητες στην επένδυση της σήραγγας κατά την φάση της συστολής και της τελικής επένδυσης.

### **8.3.5. Ενεμάτωση**

Η φάση της ενεμάτωσης προσομοιώνει την πλήρωση με τσιμεντένεμα και άλλα πρόσμικτα που γίνεται μεταξύ των προκατασκευασμένων δακτυλίων της επένδυσης της σήραγγας με το άνοιγμα που έχει δημιουργηθεί κατά την εκσκαφή.

Η προσομοίωση γίνεται με την εφαρμογή εσωτερικής πίεσης ίσης με αυτής του ενέματος και την απενεργοποίηση της εσωτερικής επένδυσης.

### **8.3.6. Τελική Επένδυση**

Στην τελευταία φάση κατασκευής τοποθετείται η εσωτερική επένδυση της σήραγγας, η οποία προσομοιώνεται μονολιθικά, δηλαδή ως ενιαίος φορέας.



## Κεφάλαιο 9ο : Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων

### 9.1. Εισαγωγικά

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων που έγιναν για όλες τις θέσεις των μεσοδιαστημάτων της κύριας σήραγγας TBM.

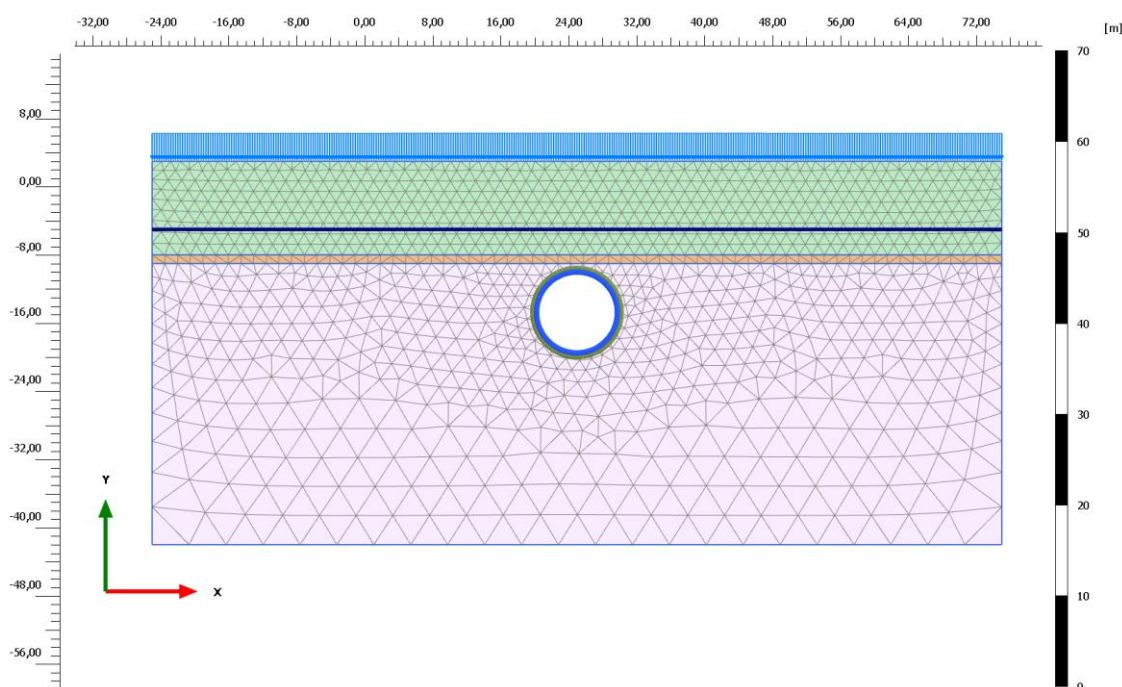
Αρχικά θα παρουσιαστεί η Χ.Θ. 14+735 - 14+950, η οποία μελετήθηκε και με τα δύο μοντέλα αστοχίας Mohr - Coulomb και Hardening Soil και στην συνέχεια θα παρουσιαστούν με την σειρά τα αποτελέσματα των αναλύσεων των υπολοίπων θέσεων που πραγματοποιήθηκαν μόνο με το Μοντέλο Hardening Soil.

### 9.2. Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης για την Χ.Θ. 14+735 - 14+950

#### 9.2.1. Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+735 - 14+950

Στην συγκεκριμένη θέση συναντάται ένα ανώτερο στρώμα συνεκτικών κορηματικών υλικών πάχους 11m το οποίο διαδέχεται ένα λεπτό στρώμα μανδύα αποσάθρωσης μεταψαμμιτών - μεταίλυολίθων πάχους 1m.

Ο κατώτερος σχηματισμός, μέσα στον οποίο γίνεται και η διάνοιξη, είναι κυρίως μεταψαμμίτες και μεταίλυολίθοι πάχους 31m. Ο υδροφόρος ορίζοντας απαντάται στα 8 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους και το συνολικό πάχος των υπερκειμένων της σήραγγας ανέρχεται στα 13m.

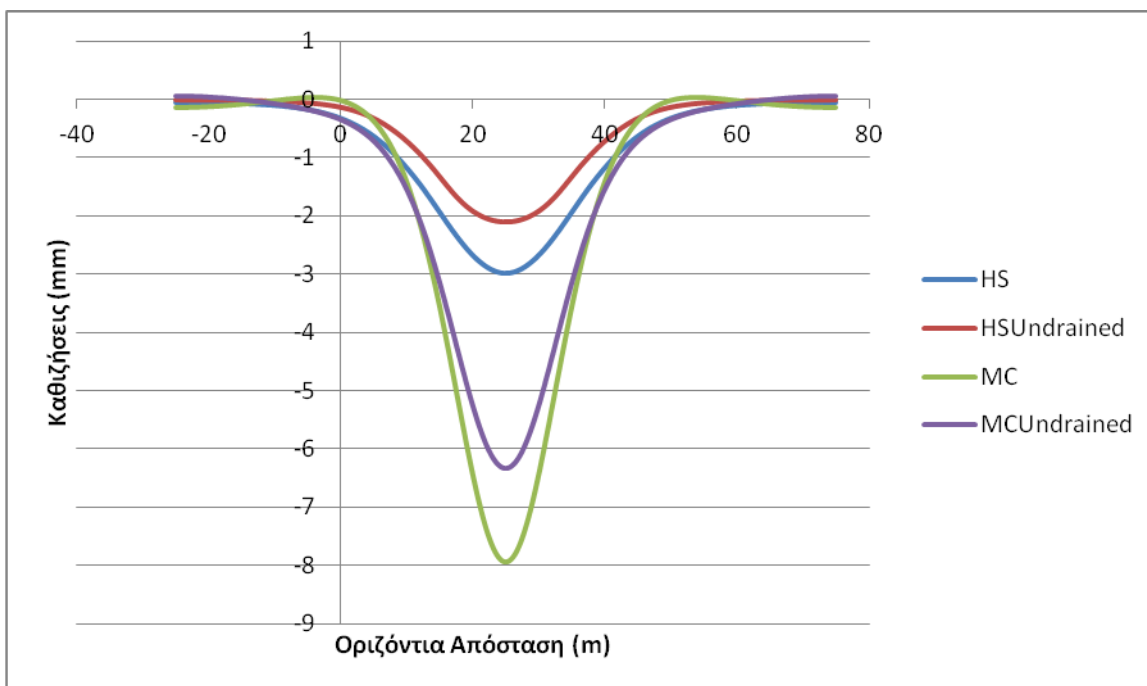


Εικ. 9.1 : Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+735 - 14+950

### 9.2.2. Επιφανειακές Καθιζήσεις στην Χ.Θ. 14+735 - 14+950

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται οι επιφανειακές καθιζήσεις όπως υπολογίσθηκαν από την αριθμητική προσομοίωση περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950 για στραγγισμένες (Drained) και αστράγγιστες (Undrained A) συνθήκες της εδαφομάζας.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, και μόνον, χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα αστοχίας, το Mohr - Coulomb (MC) και το Hardening Soil (HS), με σκοπό να επιδειχθούν οι διαφορές ανάμεσά τους και να συγκριθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων με τις μετρηθείσες τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων από την γεωτεχνική παρακολούθηση του έργου. Οι μετρηθείσες αυτές τιμές κυμαίνονται από 1,5-3,5mm.



Γράφημα 9.1 : Υπολογισθείσες Καμπύλες Καθιζήσεων περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950

Από το παραπάνω γράφημα είναι προφανές ότι υπάρχει έντονη διαφορά ανάμεσα στις υπολογισθείσες καθιζήσεις των δύο μοντέλων, με το Μοντέλο MC να παρουσιάζει τις μεγαλύτερες μέγιστες καθιζήσεις τάξεως των 7 και 8,5mm και στις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα με στραγγισμένες (Drained) και αστράγγιστες (Undrained A) συνθήκες.

Εν αντιθέσει, το Μοντέλο HS παρουσιάζει πολύ μικρότερες τιμές επιφανειακών καθιζήσεων, περίπου 3,5mm, για στραγγισμένες συνθήκες και 2mm για αστράγγιστες συνθήκες.

Και στις δύο περιπτώσεις οι υπολογισθείσες τιμές βρίσκονται εντός των ορίων των πραγματικών τιμών .

Η διαφορά στο μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων που παρατηρείται κατά την χρήση του Μοντέλου MC οφείλεται κυρίως στο μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα, το Μοντέλο MC, όπως έχει προαναφερθεί, χρησιμοποιεί την ίδια τιμή του μέτρου ελαστικότητας των σχηματισμών στο στάδιο της φόρτισης αλλά και στο στάδιο της αποφόρτισης κατά την εκσκαφή. Αντίθετα το Μοντέλο HS, στο στάδιο της αποφόρτισης, χρησιμοποιεί πολύ μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας με αποτέλεσμα η εδαφομάζα να αστοχεί σε αρκετά μικρότερο βαθμό. Ένα άλλο παράγωγο της χρήσης του ίδιου μέτρου ελαστικότητας είναι η ανύψωση δαπέδου της σήραγγας που εμφανίζεται κατά το στάδιο της εκσκαφής. Σε πολλές αναλύσεις βέβαια είναι πιθανό το Μοντέλο MC να μην δίνει τόσο μεγάλες τιμές καθιζήσεων καθώς η ανύψωση δαπέδου που παρατηρείται, δηλώνει ότι, η εδαφομάζα γύρω από την σήραγγα έχει αποτονωθεί κατ' αυτόν τρόπο, οπότε οι παραμορφώσεις πάνω από την στέψη της θα είναι αρκετά μικρότερες.

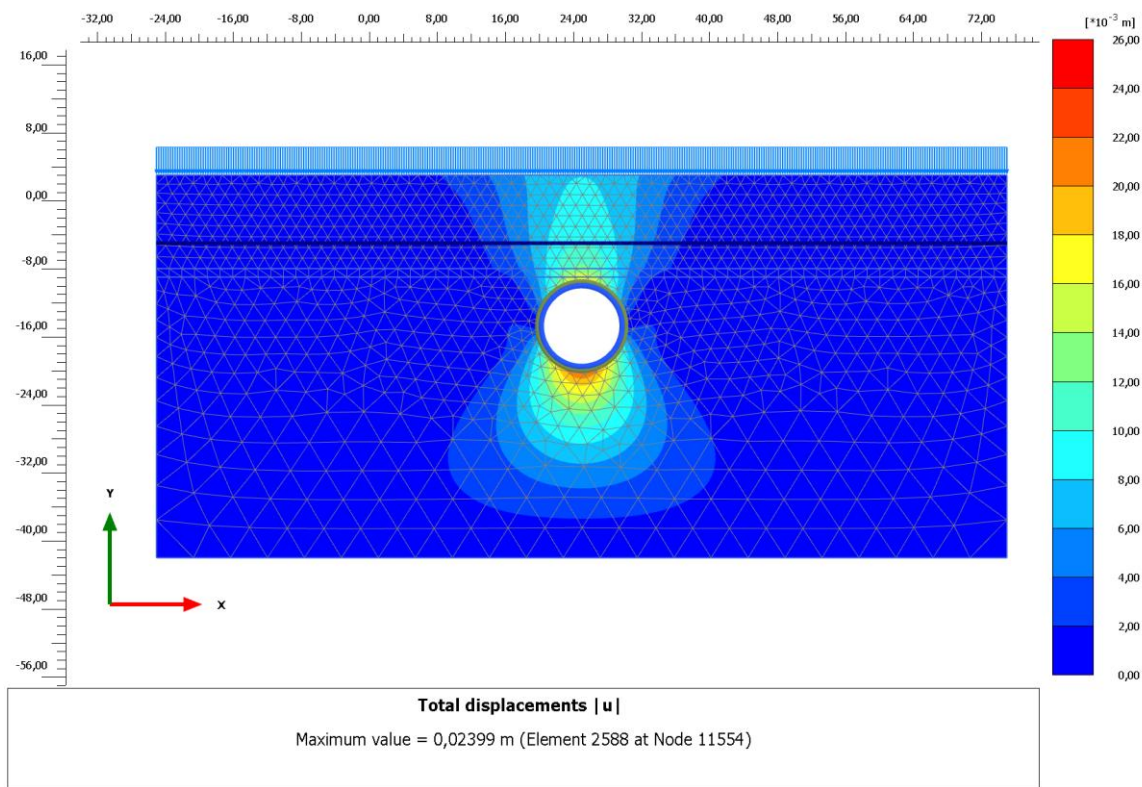
Όπως έχει αναφερθεί και στο 6ο Κεφάλαιο, όσον αφορά τις διαφορές μεταξύ των αναλύσεων με στραγγισμένες και αστράγγιστες συνθήκες, αυτές οφείλονται στην απουσία και ύπαρξη αντίστοιχα, της πίεσης πόρων στους σχηματισμούς. Ο λόγος λοιπόν για τον οποίο οι καθιζήσεις που σημειώνονται κατά την ανάλυση με στραγγισμένες συνθήκες είναι μεγαλύτερες είναι το γεγονός ότι, επειδή οι πιέσεις πόρων δεν λαμβάνονται υπόψη, στους σχηματισμούς ασκούνται μόνο ενεργές τάσεις. Γενικότερα οι αναλύσεις υπό αστράγγιστες συνθήκες θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν, με μεγαλύτερη ακρίβεια, τις καθιζήσεις που συμβαίνουν κατά την διάρκεια της υπόγειας διάνοιξης, ενώ οι στραγγισμένες προσομοιώνουν μια μακροχρόνια εικόνα των καθιζήσεων, η οποία σχετίζεται κυρίως με φαινόμενα στερεοποίησης των εδαφικών σχηματισμών.

Επειδή στην συγκεκριμένη εργασία δεν θα αναλυθούν περαιτέρω τα παραπάνω φαινόμενα, θεωρείται ότι οι αντιπροσωπευτικές αναλύσεις και οι καμπύλες επιφανειακών καθιζήσεων θα είναι αυτές που υπολογίστηκαν με

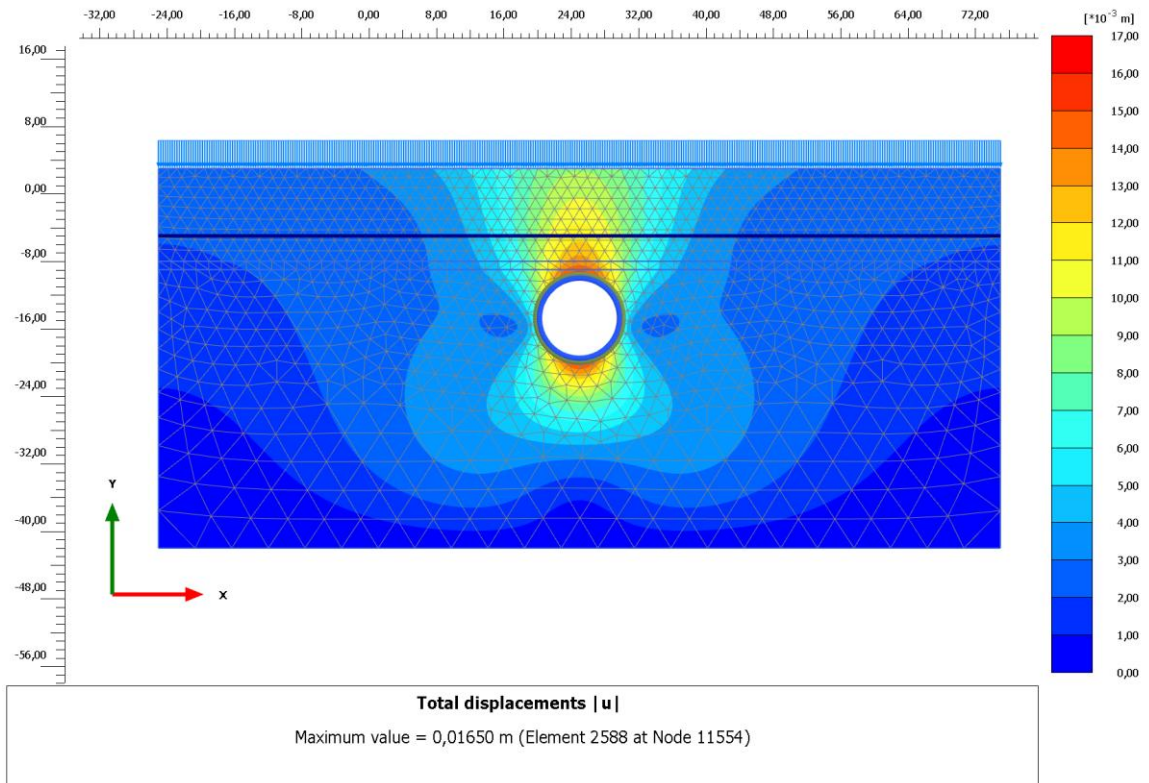
αστράγγιστες συνθήκες. Εικόνες από τα αποτελέσματα των αναλύσεων με στραγγισμένες συνθήκες βρίσκονται στο Παράρτημα «Α».

### 9.2.3. Κατανομή Μετακινήσεων

Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κατανομές των μετακινήσεων όπως αυτές υπολογίζονται σε στραγγισμένες και αστράγγιστες συνθήκες για τα δύο μοντέλα αστοχίας. Αρχικά έχουμε τις κατανομές για το Μοντέλο MC:



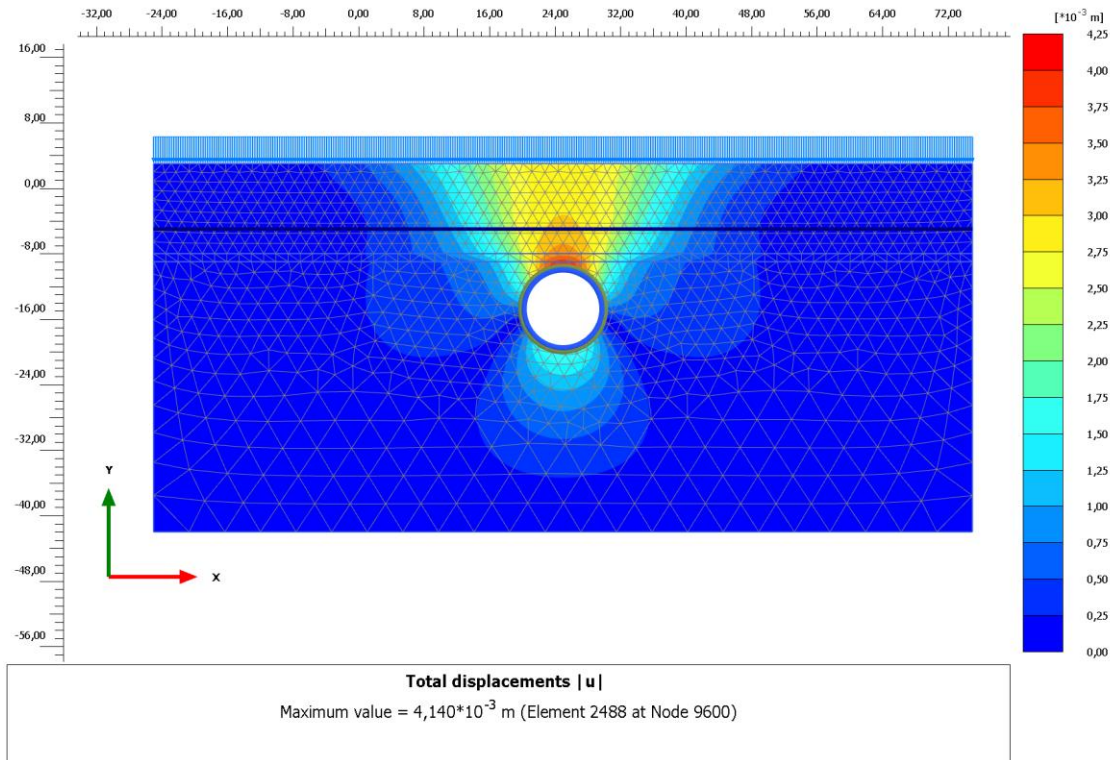
Εικ. 9.2 : Κατανομή Μετακινήσεων με το Μοντέλο MC για Στραγγισμένες Συνθήκες περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950



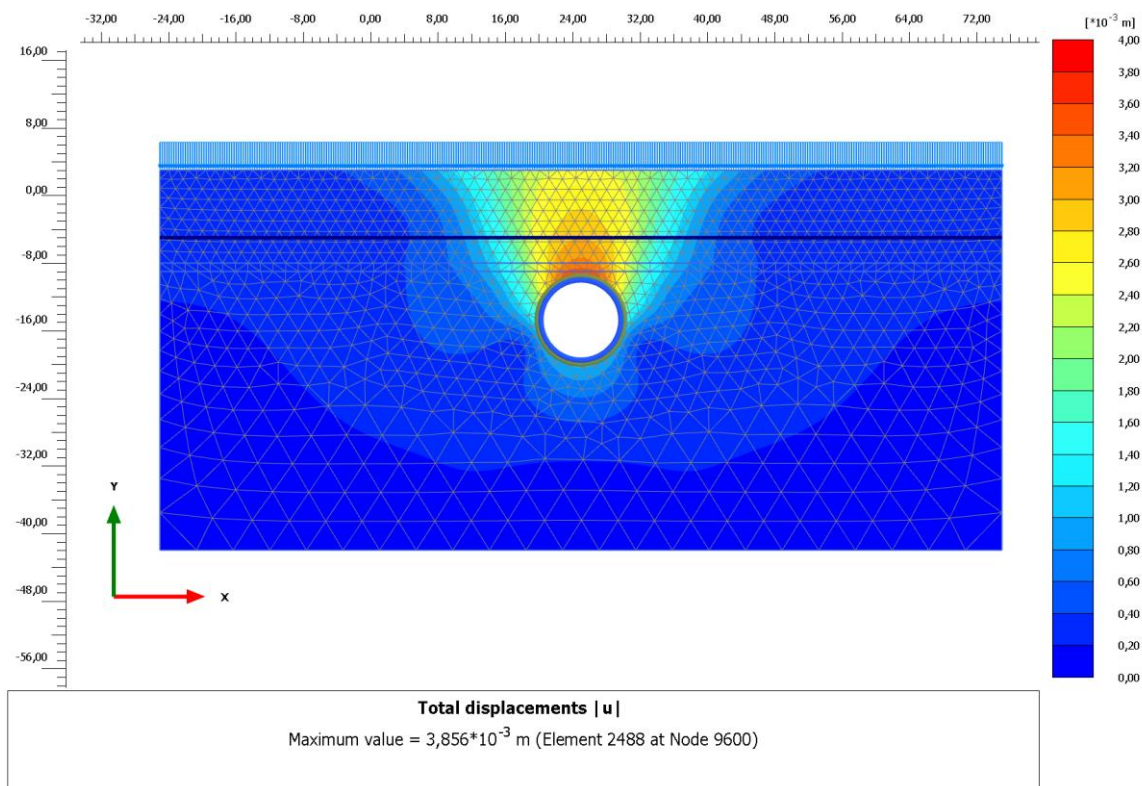
Εικ. 9.3 : Κατανομή Μετακινήσεων με το Μοντέλο MC για Αστράγγιστες Συνθήκες περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950

Στην περίπτωση των αστράγγιστων συνθηκών παρατηρείται μεγαλύτερη ανύψωση δαπέδου, μάλλον λόγω της ύπαρξης της πίεσης πόρων. Παρόλα αυτά, η μεγαλύτερη ανύψωση δαπέδου αυτόματα σημαίνει και μικρότερες παραμορφώσεις στην στέψη της σήραγγας άρα και μικρότερες επιφανειακές καθιζήσεις.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι κατανομές για το Μοντέλο HS:



Εικ. 9.4 : Κατανομή Μετακινήσεων με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένες Συνθήκες περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950



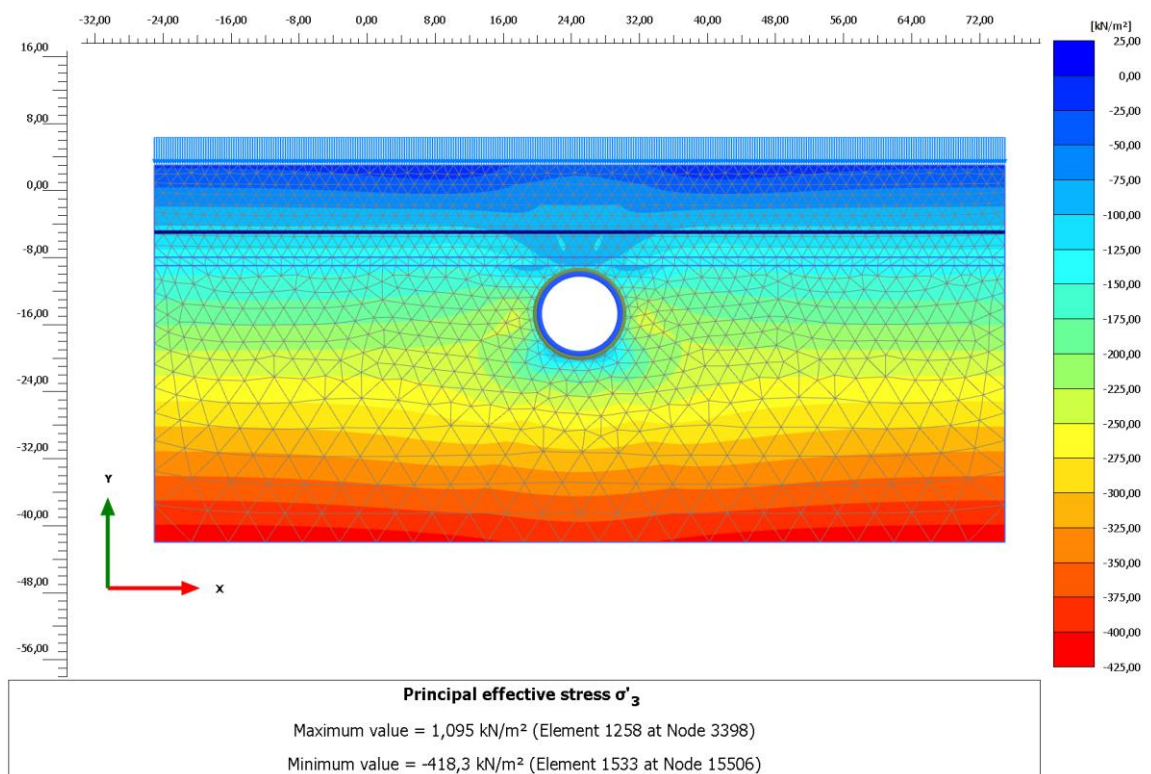
Εικ. 9.5 : Κατανομή Μετακινήσεων με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστες Συνθήκες περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950



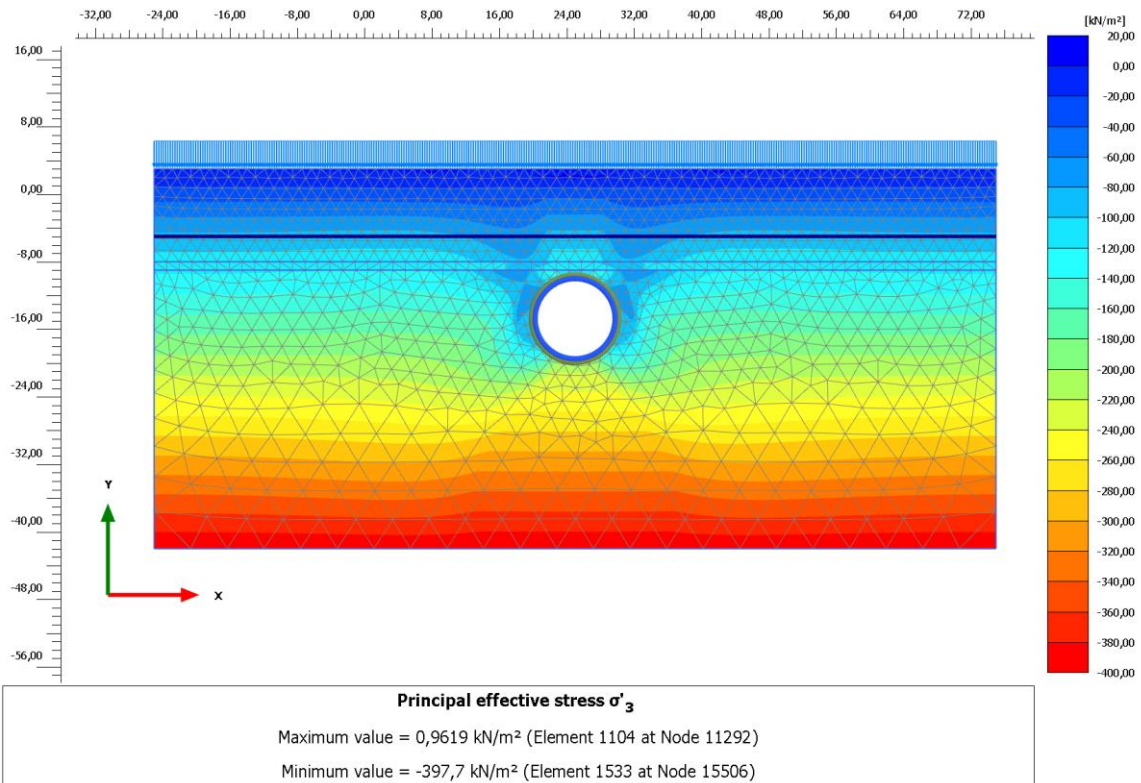
Όπως προαναφέρθηκε, το Μοντέλο HS προσομοιώνει τις επιφανειακές καθιζήσεις με αρκετά μεγάλη ακρίβεια και πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι μεγαλύτερη ακρίβεια για τις καθιζήσεις κατά την διάνοιξη προσδίδει η ανάλυση με αστράγγιστες συνθήκες.

#### 9.2.4. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων ( $\sigma'_3$ )

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί η κατανομή των ενεργών ελάχιστων κύριων τάσεων. Αρχικά παρουσιάζονται οι κατανομές του Μοντέλου MC.

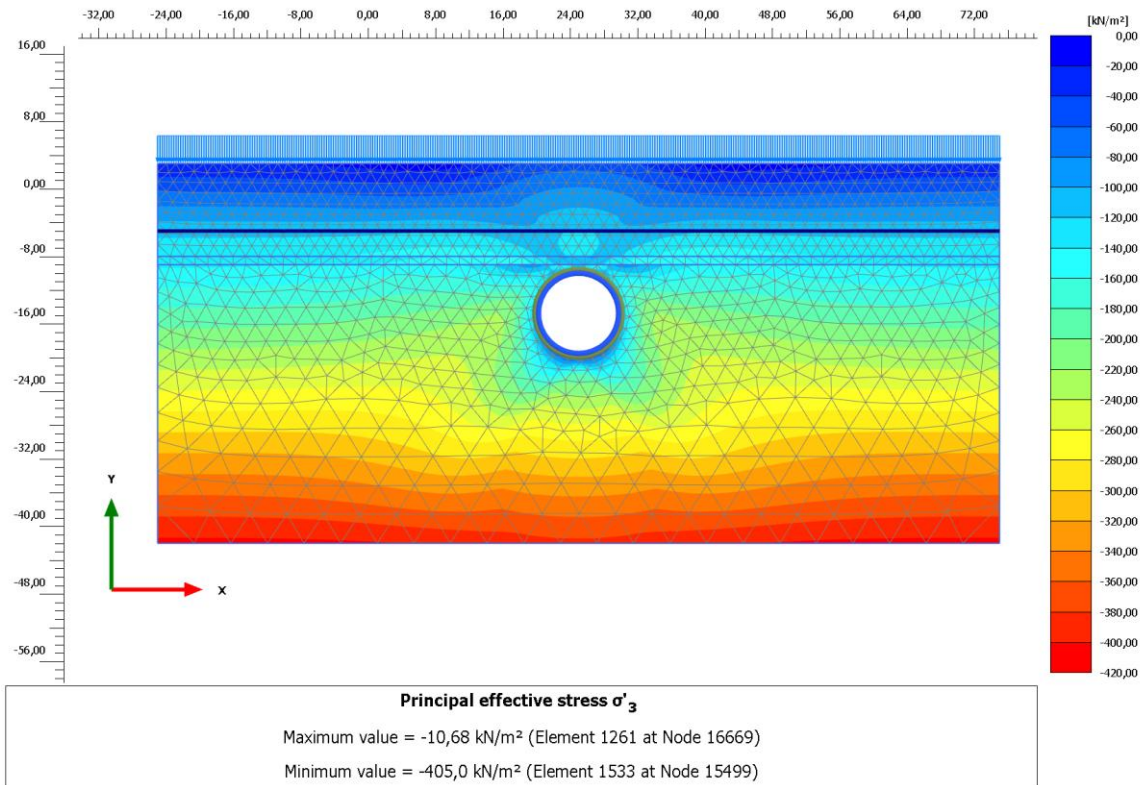


Εικ. 9.6 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων με το Μοντέλο MC για Στραγγισμένη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950

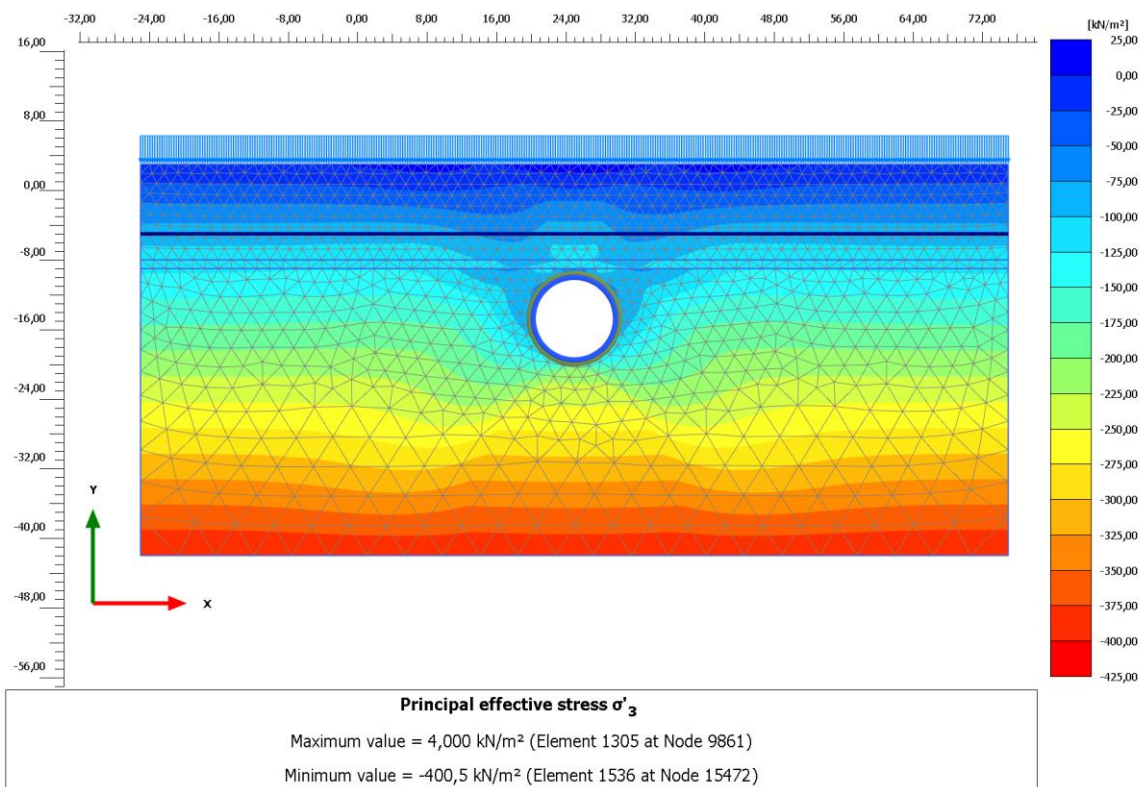


Εικ. 9.7 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων με το Μοντέλο MC για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι κατανομές ενεργών ελάχιστων κύριων τάσεων για το Μοντέλο HS.



Εικ. 9.8 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950



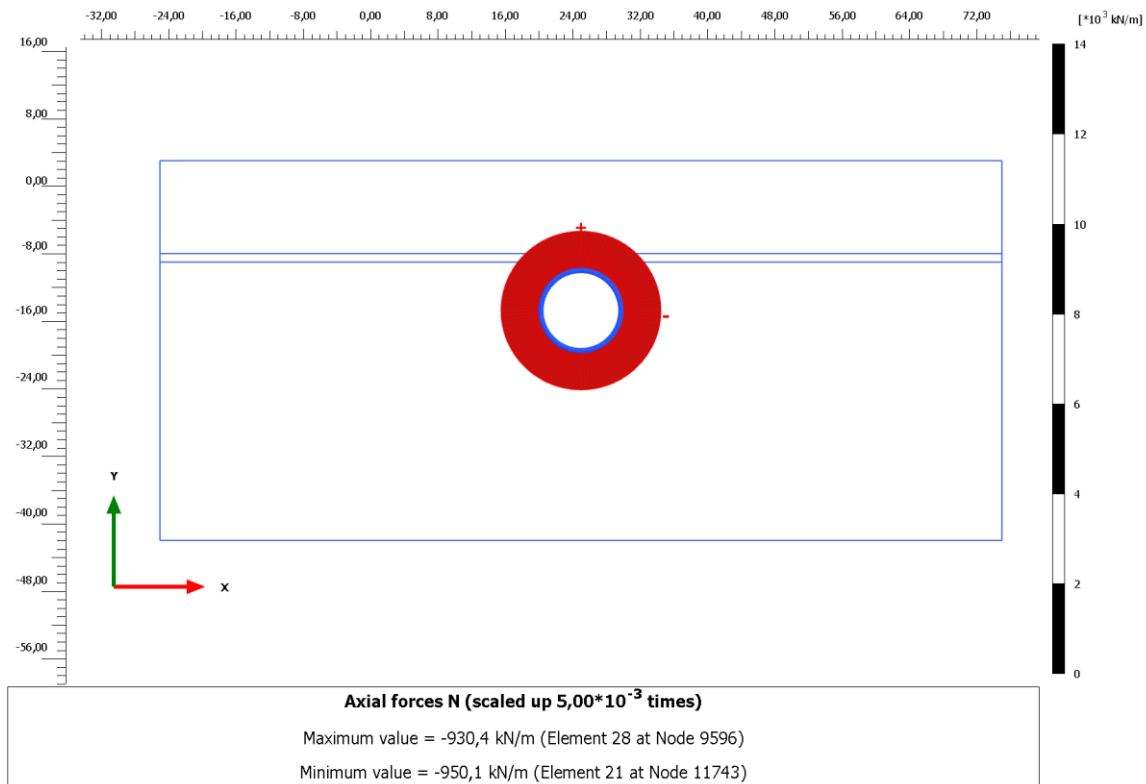
Εικ. 9.9 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950

Αναλύοντας όλες τις παραπάνω κατανομές των ενεργών ελάχιστων κυρίων τάσεων παρατηρείται, με μια πρώτη ματιά ότι, οι ενεργές ελάχιστες τάσεις εμφανίζονται ακτινικά στην περιφέρεια της σήραγγας. Αυτό σημαίνει χαλάρωση του τασικού πεδίου και υποδηλώνει την δημιουργία πλαστικής ζώνης γύρω από την σήραγγα.

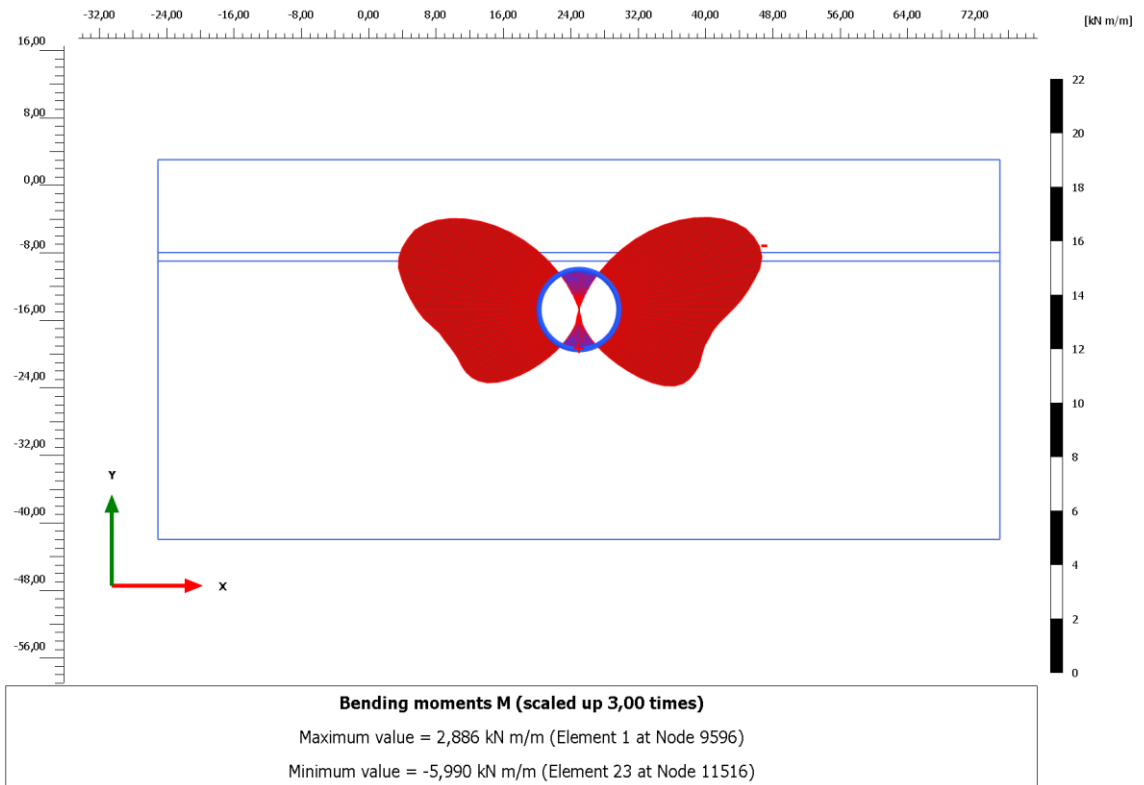
Όπως είναι προφανές, το Μοντέλο MC εμφανίζει, σε κάποιο ποσοστό, μεγαλύτερες ενεργές ελάχιστες κύριες τάσεις σε σχέση με το Μοντέλο HS καθώς το δεύτερο προσομοιώνει μεγαλύτερες αντοχές της εδαφομάζας.

### 9.2.5. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση

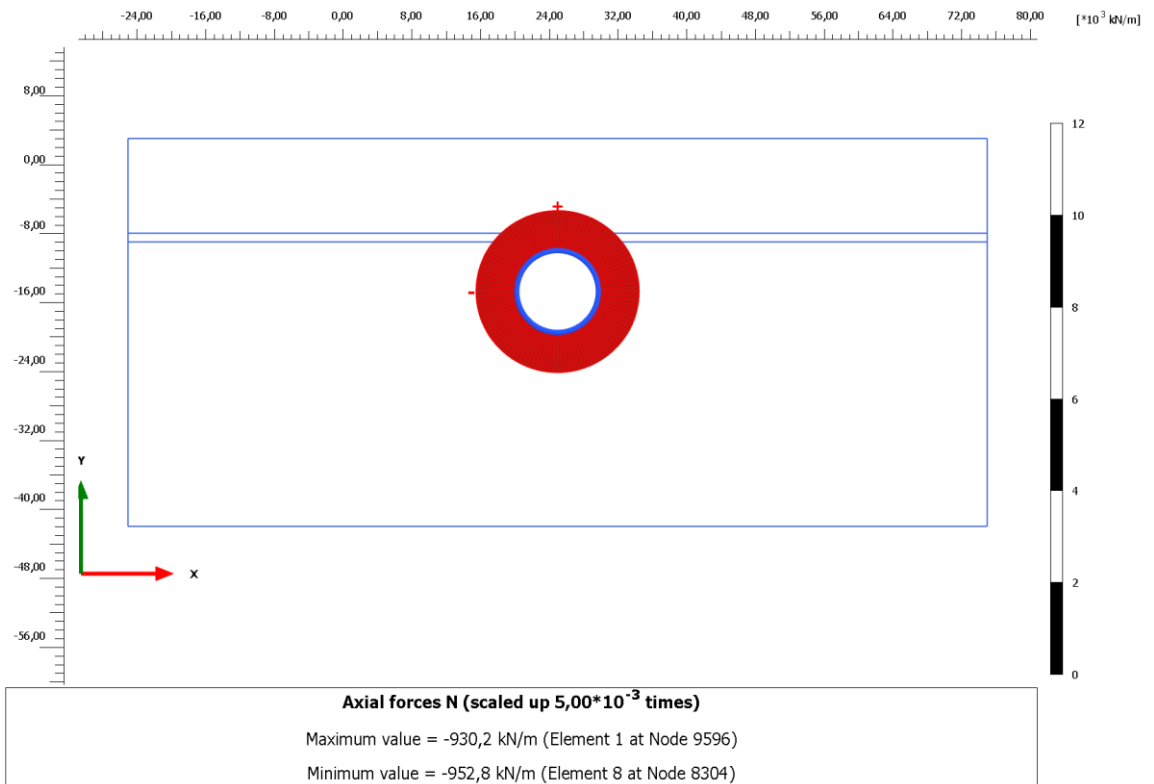
Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι κατανομές των αξονικών φορτίων και των ροπών κάμψης για καθένα από τα Μοντέλα MC και HS, αντίστοιχα. Πρώτα θα παρουσιαστούν οι κατανομές για το Μοντέλο MC:



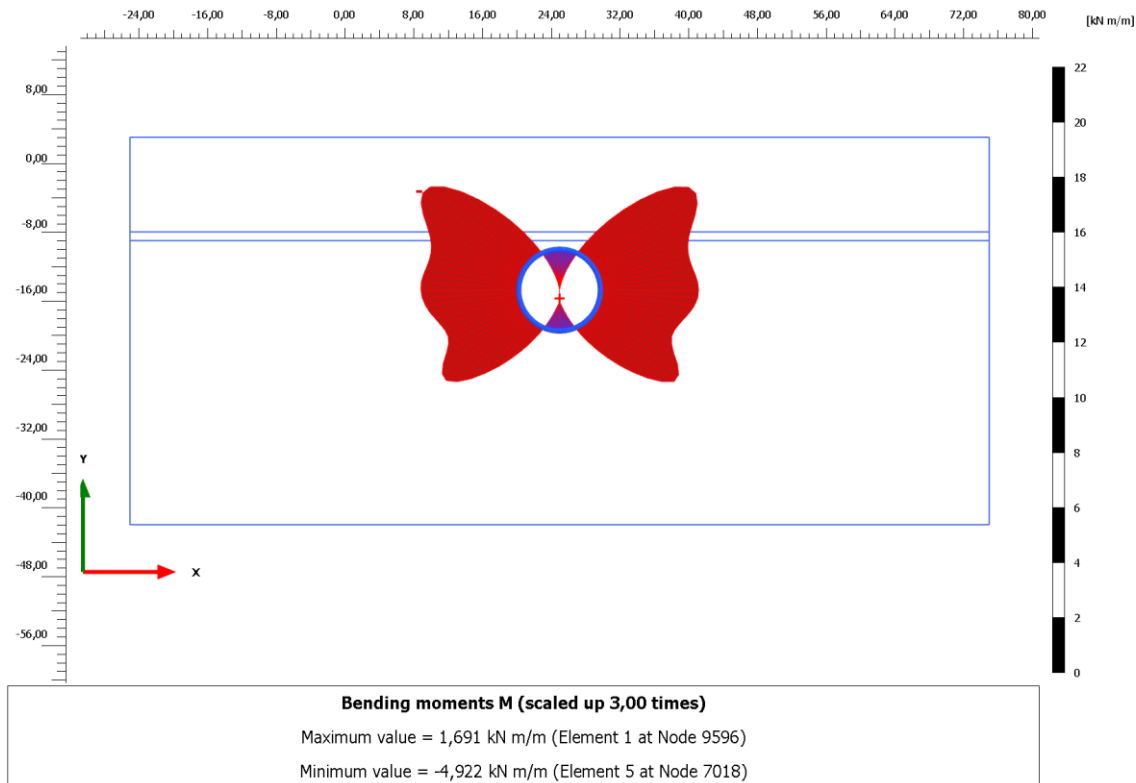
Εικ. 9.10 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο MC για Στραγγισμένη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950



Εικ. 9.11 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο MC για Στραγγισμένη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950



Εικ. 9.12 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο MC για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950



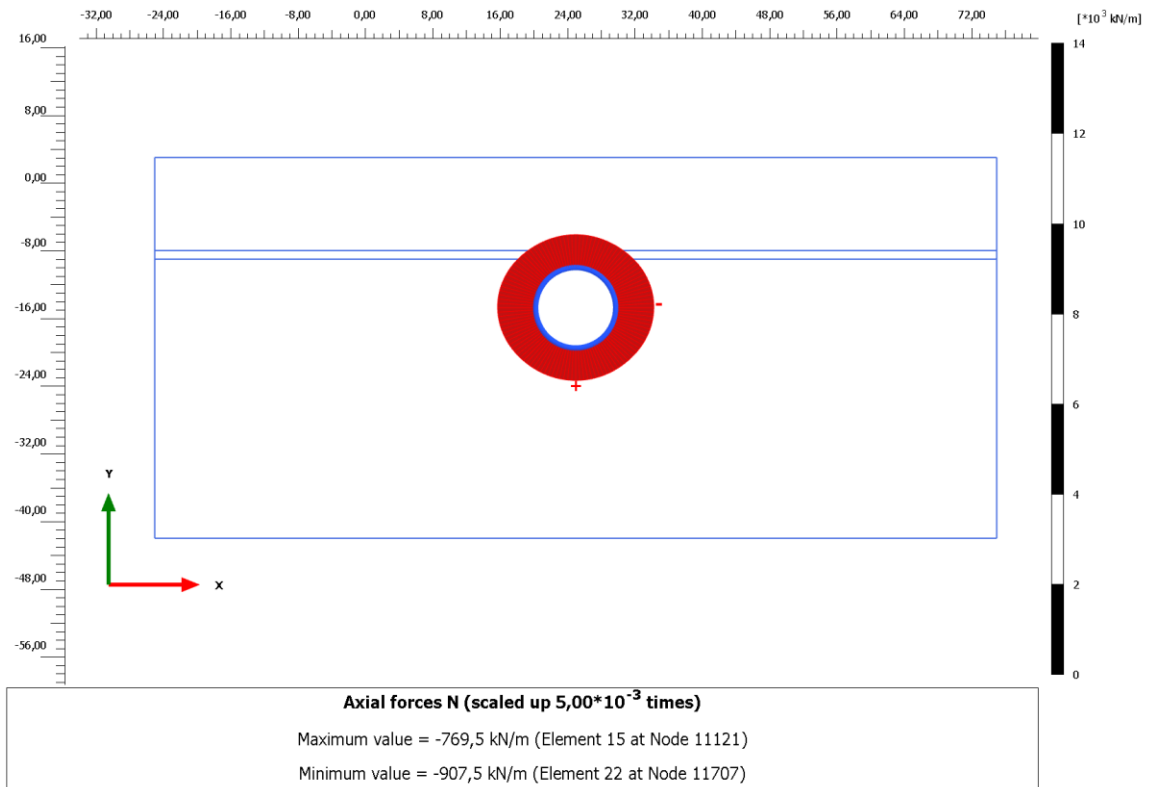
Εικ. 9.13 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο MC για Αστράγγιστη Ανάλυση περι την Χ.Θ. 14+735 - 14+950

Οι παραπάνω κατανομές των αξονικών φορτίων και για τις δύο αναλύσεις παρουσιάζουν ομοιομορφία, όπως είναι αναμενόμενο, με ελάχιστα μεγαλύτερη τιμή να παρατηρείται κατά την αστράγγιστη ανάλυση λόγω του φορτίου του νερού των πόρων που λαμβάνεται υπόψη. Επειδή όμως αυτή διαφορά είναι σχεδόν μηδαμινή μπορεί να θεωρηθεί και αμελητέα κατά τον δομοστατικό σχεδιασμό της επένδυσης.

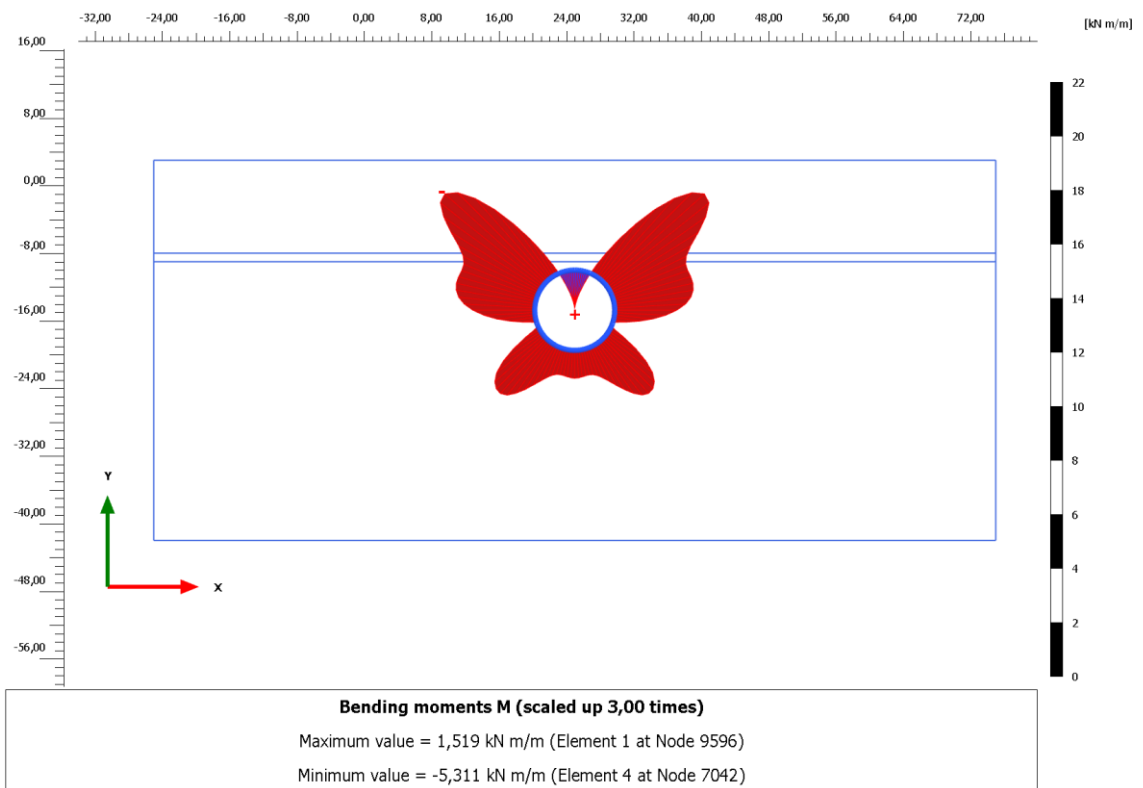
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι, ο τύπος της ανάλυσης δεν παίζει σημαντικό ρόλο για τον σχεδιασμό της επένδυσης, αναφερόμενοι πάντα σε αβαθείς σήραγγες, όπου το φορτίο του νερού είναι σχετικά μικρό λόγω του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα.

Όσον αφορά τις ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα της επένδυσης, παρατηρείται αρκετή ανομοιομορφία στις κατανομές, λόγω της διαφορετικής φόρτισης στο δάπεδο και στην οροφή της σήραγγας.

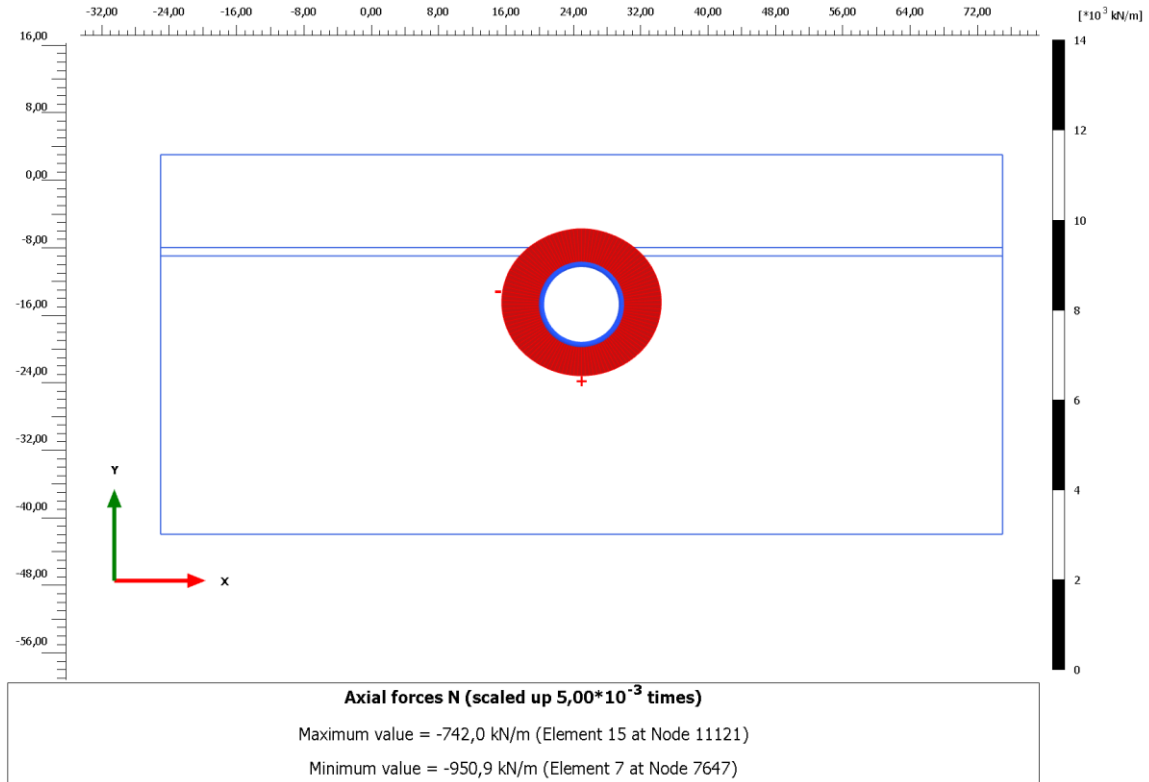
Παρακάτω παρουσιάζονται οι κατανομές για το Μοντέλο HS:



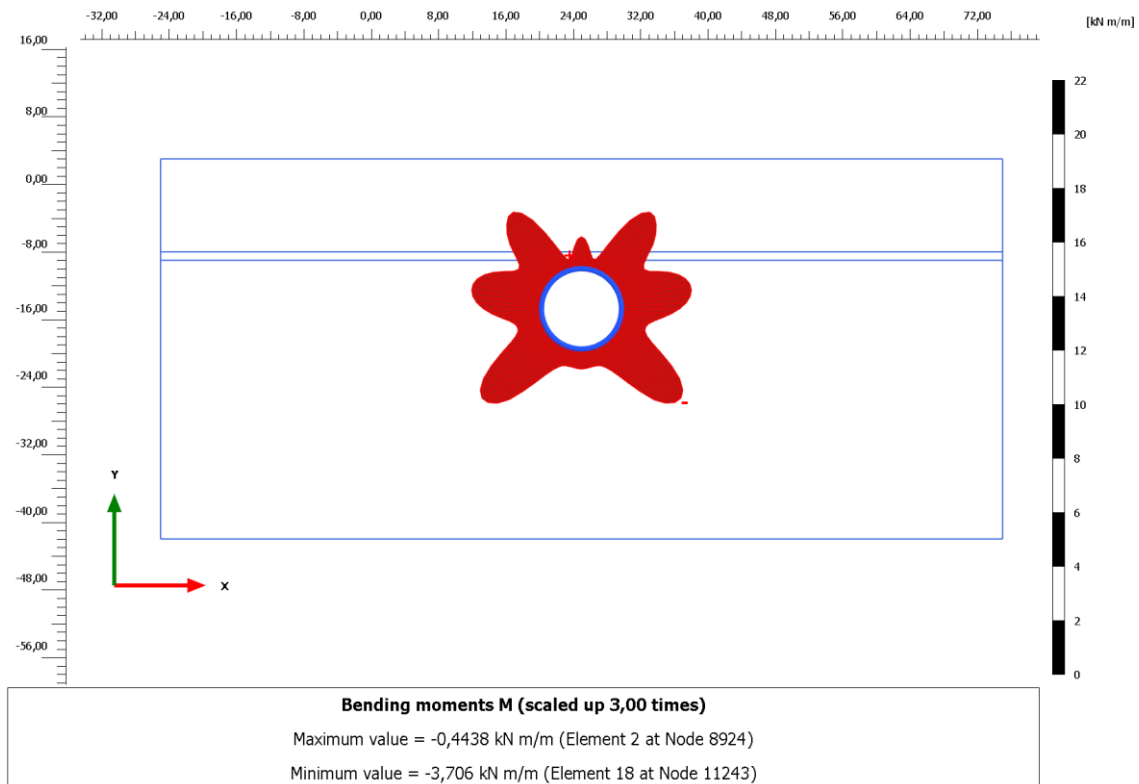
Εικ. 9.14 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950



Εικ. 9.15 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950



Εικ. 9.16 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950



Εικ. 9.17 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+735 - 14+950



Αντιπαραθέτοντας τις δύο αναλύσεις του Μοντέλου HS διαπιστώνεται, και εδώ ότι, τα αξονικά φορτία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στην περιφέρεια του σκυροδέματος. Όμως, εν αντιθέσει με το Μοντέλο MC, το Μοντέλο HS υπολογίζει αρκετά χαμηλότερες τιμές αξονικών φορτίων που ασκούνται στην επένδυση, λόγω της μεγαλύτερης αντοχής που παρουσιάζει το έδαφος.

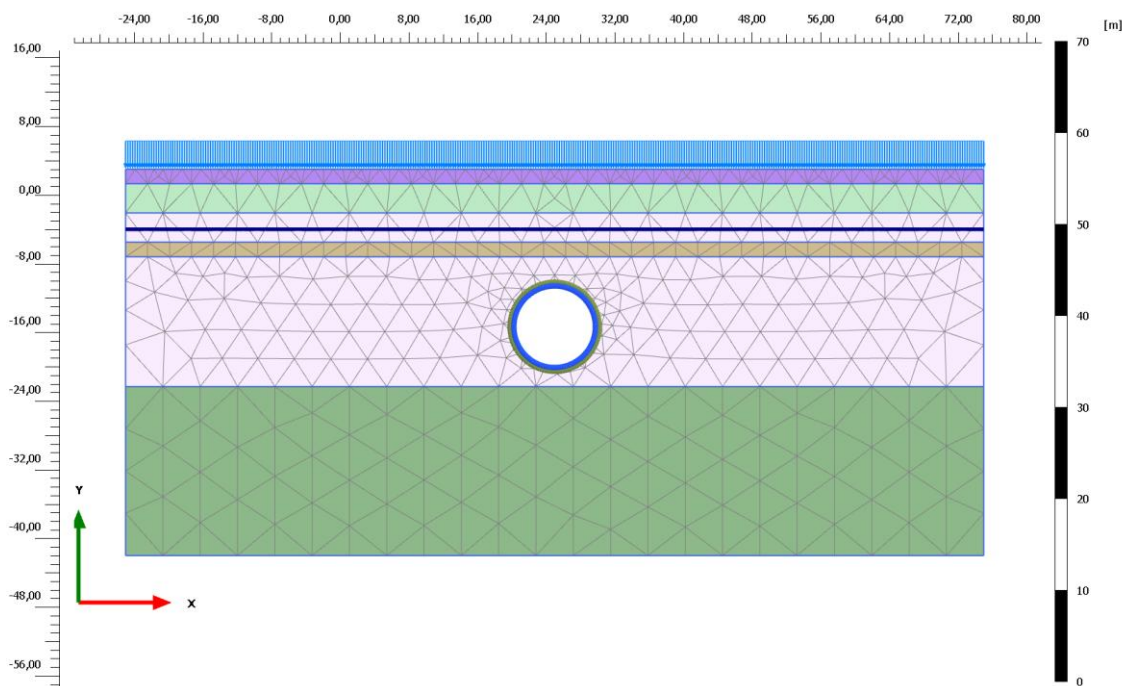
Το ίδιο ισχύει και για τις ροπές κάμψης, όπου σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται μεγαλύτερες μόνο πάνω από την στέψη της σήραγγας καθώς το έδαφος πλαστικοποιείται έντονα μόνο σε εκείνη την περιοχή, ενώ στο Μοντέλο MC η τάση για ανύψωση δαπέδου καταπονεί το σκυρόδεμα της επένδυσης και στο δάπεδο της σήραγγας.

### **9.3. Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης για την Χ.Θ. 14+067 - 14+130**

#### **9.3.1. Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+067 - 14+130**

Η στρωματογραφία της παρούσας Χ.Θ. αποτελείται από μια επιφανειακή στρώση τεχνητών επιχώσεων πάχους 2m περίπου, και μια στρώση συνεκτικών κορηματικών υλικών πάχους 3,5m περίπου, ακριβώς από κάτω. Στην συνέχεια υπάρχει μια εναλλαγή στρωμάτων μεταξύ της εδαφικής και μικτής φάσης μεταψαμμιτών και μεταίλυολίθων, με την διάνοιξη της σήραγγας να γίνεται μέσα στην μικτή φάση των μεταψαμμιτών και μεταίλυολίθων σε ένα στρώμα πάχους 15m, περίπου. Ο υποκείμενος σχηματισμός της εκσκαφής είναι αργιλικός σχιστόλιθος. Ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στα 8m από την επιφάνεια του εδάφους και το πάχος των υπερκειμένων της σήραγγας είναι 14,6m.

Κατωτέρω φαίνεται το εδαφικό προσομοίωμα:

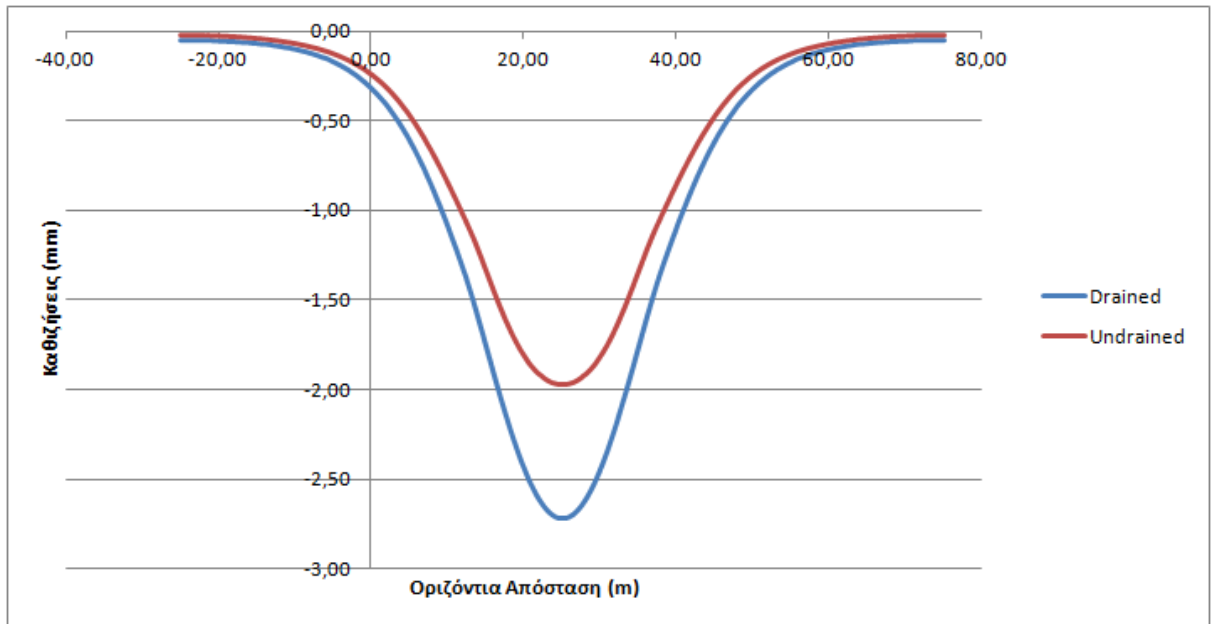


Εικ. 9.18 : Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+067 - 14+130

### 9.3.2. Επιφανειακές Καθιζήσεις στην Χ.Θ. 14+067 - 14+130

Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις όπως υπολογίστηκαν από την αριθμητική ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+067 - 14+130 για στραγγισμένες και αστράγγιστες συνθήκες της εδαφομάζας με το Μοντέλο HS.

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάστροφης ανάλυσης που έγιναν στο πλαίσιο της γεωτεχνικής παρακολούθησης του συγκεκριμένου τμήματος, οι μετρηθείσες επιφανειακές καθιζήσεις κυμαίνονται από 1,5 - 3,5mm.

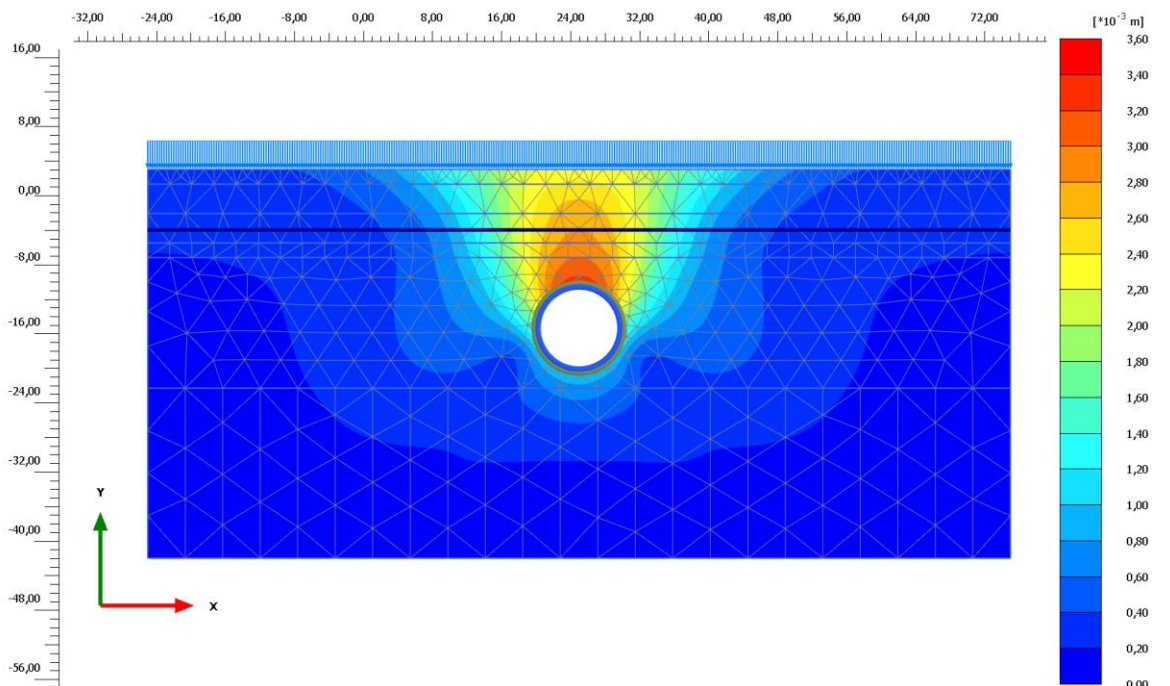


Γράφημα 9.2 : Υπολογισθείσες Καμπύλες Καθιζήσεων περί την Χ.Θ. 14+067 - 14+130

Η καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών επιφανειακών καθιζήσεων επιτυγχάνεται με την καμπύλη για αστράγγιστες συνθήκες, όπου η μέγιστη καθίζηση που υπολογίζεται, ανέρχεται στα 2,1mm περίπου.

### 9.3.3. Κατανομή Μετακινήσεων

Η κατανομή των μετακινήσεων για στραγγισμένες και αστράγγιστες συνθήκες, που υπολογίστηκαν με το Μοντέλο HS παρουσιάζεται στα γραφήματα που ακολουθούν:



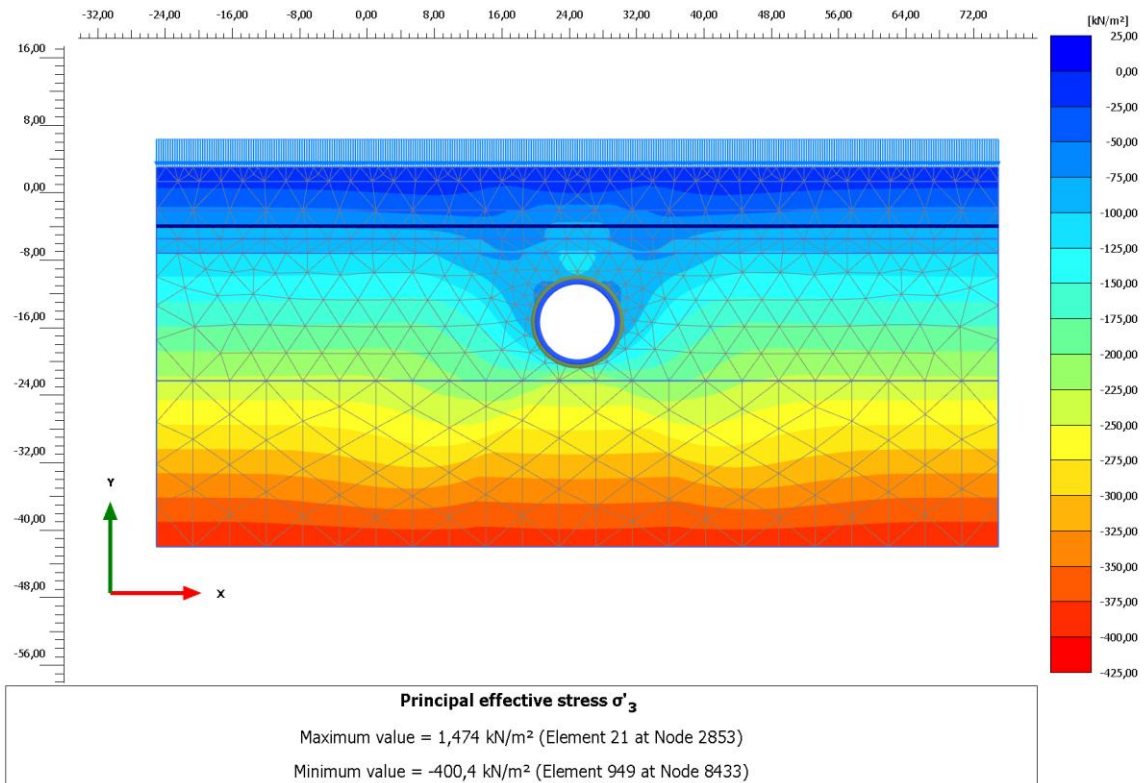
Εικ. 9.19 : Κατανομή Μετακινήσεων σε Αστράγγιστες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+067 - 14+130

Στο γράφημα φαίνεται η κατανομή των συνολικών μετακινήσεων περί την θέση 14+067 - 14+130.

Από αυτήν την κατανομή φαίνεται ξεκάθαρα ο σχηματισμός της τάφρου καθιζήσεων με τις μέγιστες καθιζήσεις να λαμβάνουν χώρα ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας.

#### 9.3.4. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων ( $\sigma_3$ )

Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα των ενεργών ελάχιστων κύριων τάσεων ( $\sigma_3$ ) για αστράγγιστες συνθήκες.

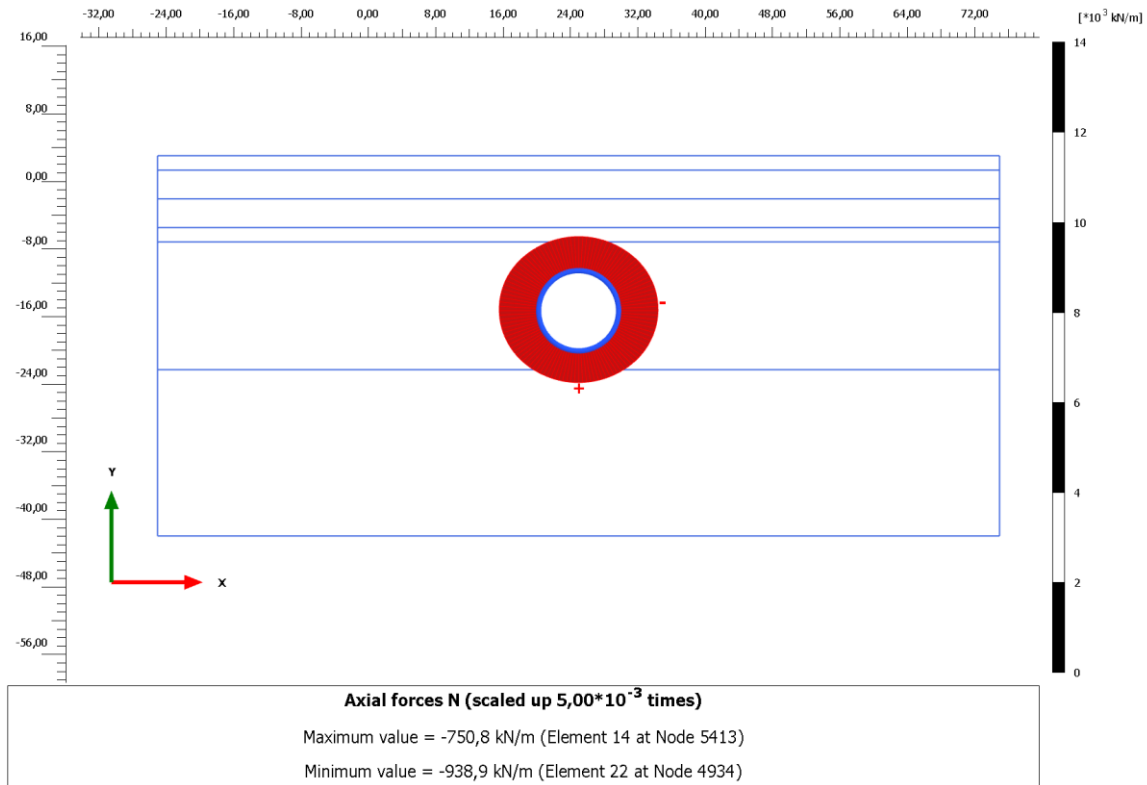


Εικ. 9.20 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων σε Αστράγγιστες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+067 - 14+130

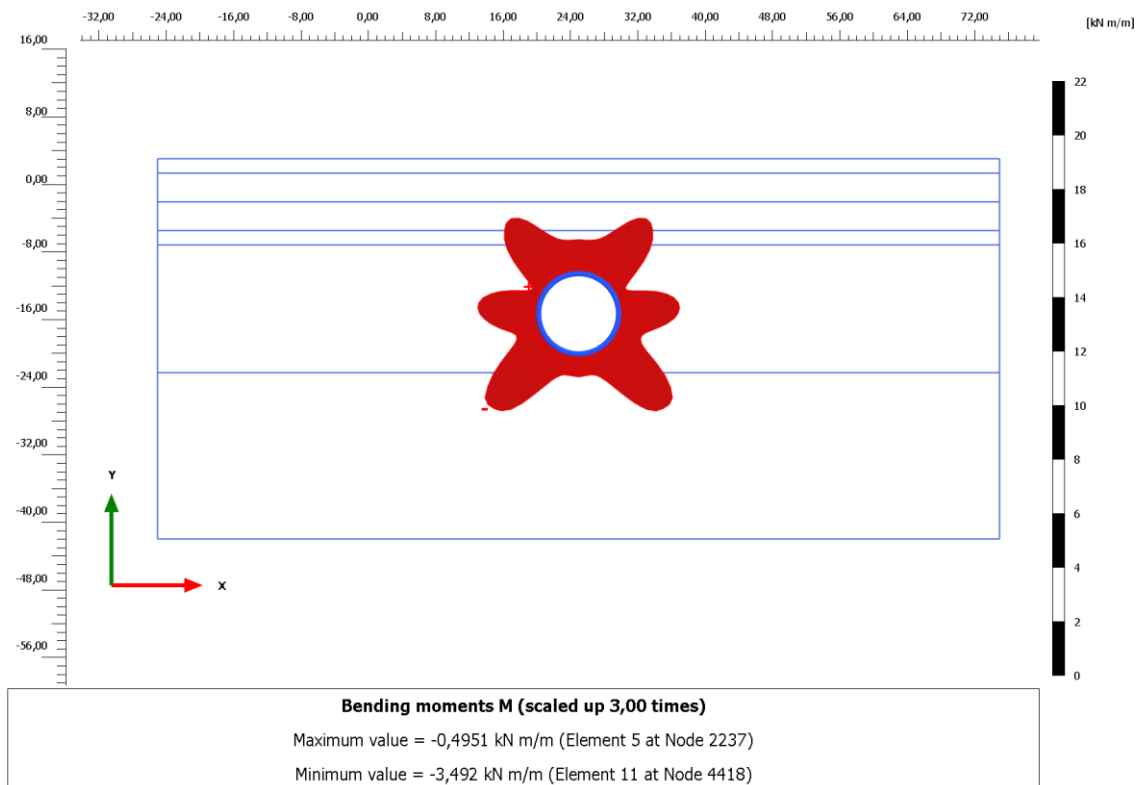
Και σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται η χαλάρωση του τασικού πεδίου στην περιφέρεια της σήραγγας λόγω της πλαστικοποίησης της εδαφομάζας.

### 9.3.5. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κατανομές αξονικών φορτίων και ροπών κάμψης για αστράγγιστες συνθήκες με το Μοντέλο HS.



Εικ. 9.21 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+067 - 14+130



Εικ. 9.22 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+067 - 14+130

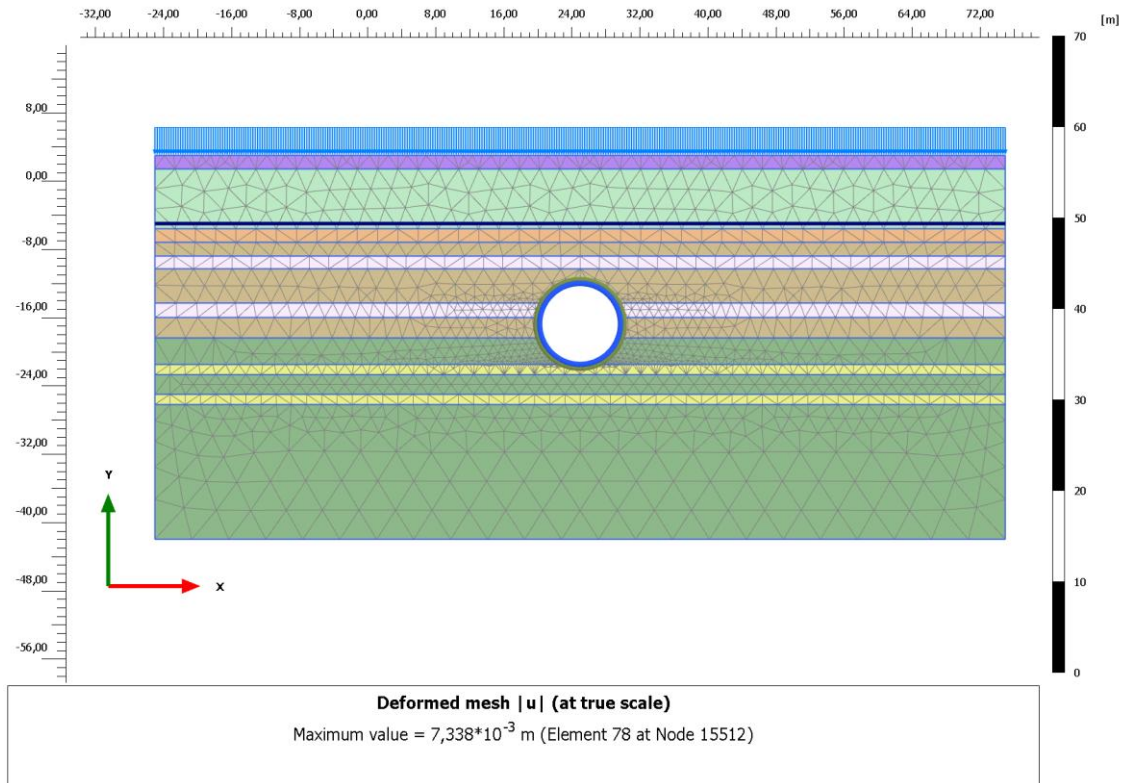
Οι παραπάνω κατανομές αξονικών φορτίων και ροπών κάμψης είναι όμοιες με την ανάλυση για την θέση 14+735 - 14+950 με την διαφορά ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση οι τιμές είναι κατά τι μεγαλύτερες, πιθανόν λόγω του φορτίου του μεγαλύτερο ύψους υπερκειμένων.

#### **9.4. Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης για την Χ.Θ. 14+130 - 14+735**

##### **9.4.1. Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+130 - 14+735**

Στην συγκεκριμένη θέση συναντώνται επιφανειακά, λεπτά στρώματα τεχνητών επιχώσεων και συνεκτικών κορηματικών υλικών πάχους 1,6 και 7m αντίστοιχα. Η διάνοιξη γίνεται κυρίως μέσα σε εναλλασσόμενα στρώματα μεταψαμμιτών - μεταίλυολίθων, μικτής και εδαφικής σύστασης και σε αργιλικό σχιστόλιθο στο κατώτερο τμήμα. Ο σχηματισμός που υπόκειται της εκσκαφής είναι κυρίως αργιλικός σχιστόλιθος μικτής και εδαφικής φάσης. Ο υδροφόρος ορίζοντας εντοπίζεται στα 8m από την επιφάνεια του εδάφους και το πάχος των υπερκειμένων της σήραγγας είναι 14,8m.

Παρακάτω φαίνεται το εδαφικό προσομοίωμα:



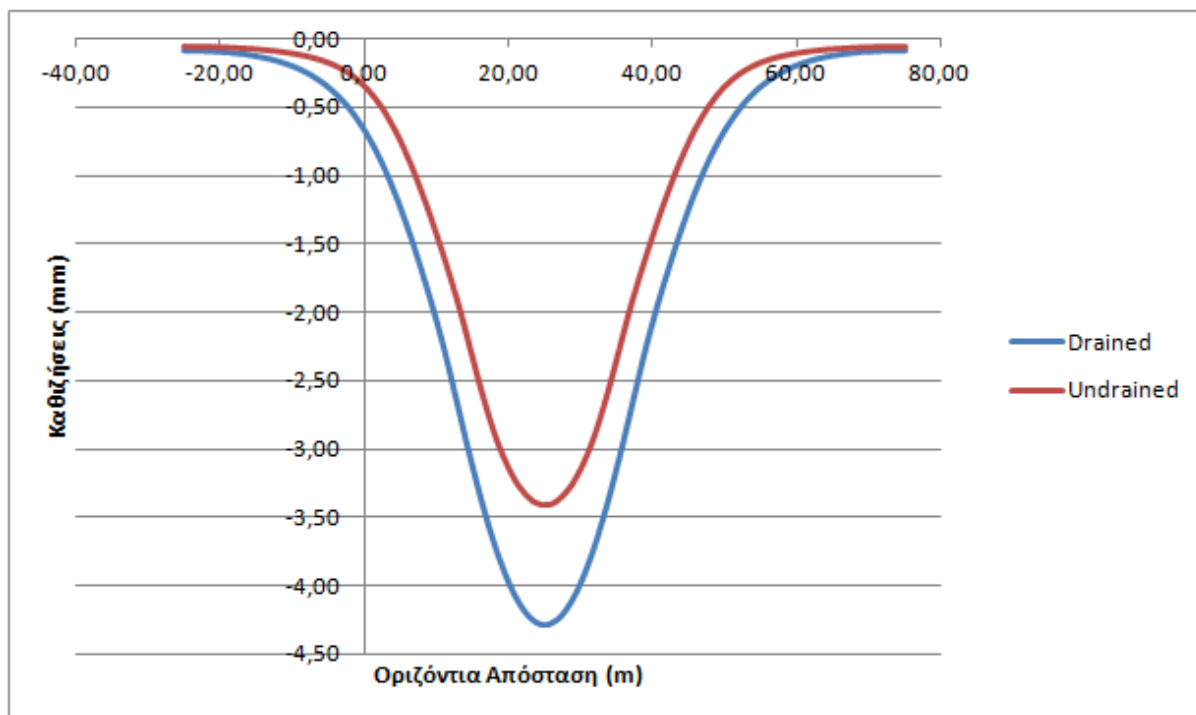
Εικ.9.23 : Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+130 - 14+735

#### 9.4.2. Επιφανειακές Καθιζήσεις στην Χ.Θ. 14+130 - 14+735

Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις όπως υπολογίστηκαν από την αριθμητική ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+130 - 14+735 για στραγγισμένες και αστραγγιστες συνθήκες της εδαφομάζας με το Μοντέλο HS.

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάστροφης ανάλυσης, οι μετρηθείσες επιφανειακές καθιζήσεις κυμαίνονται από 1,5 - 3,5mm.



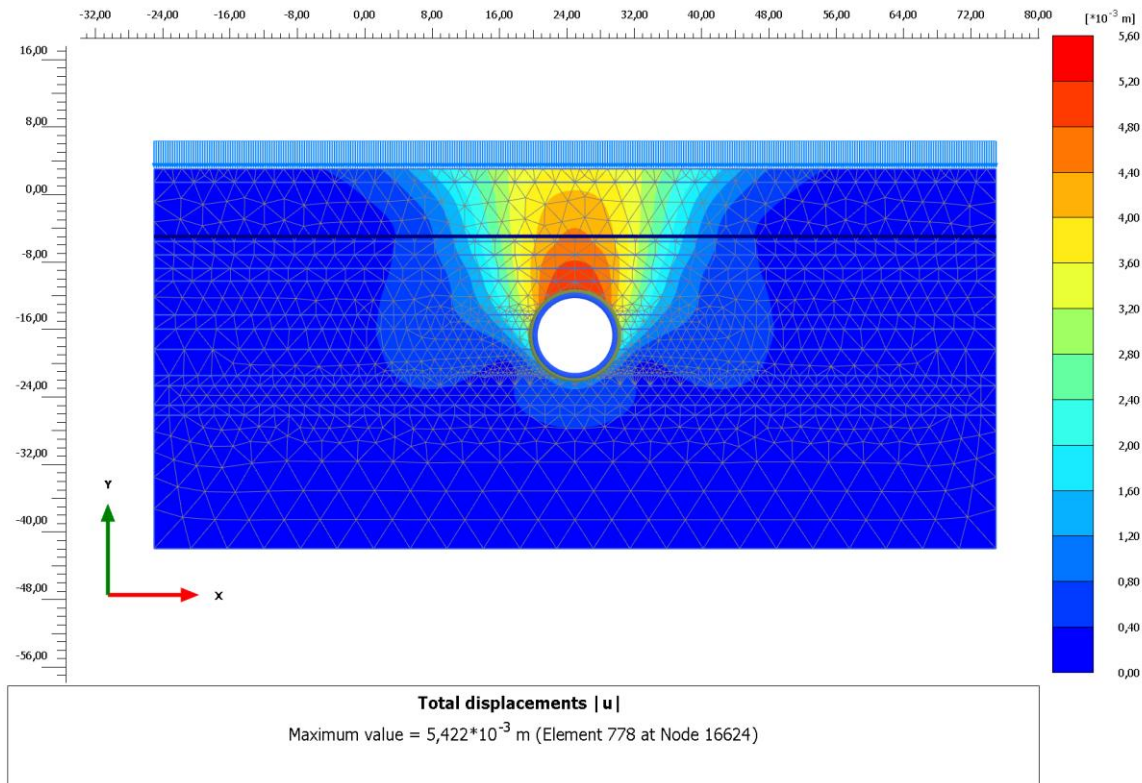


Γράφημα 9.3: Υπολογισθείσες Καμπύλες Καθιζήσεων περί την Χ.Θ. 14+130 - 14+735

Η καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών επιφανειακών καθιζήσεων επιτυγχάνεται με την καμπύλη για αστράγγιστες συνθήκες για λόγους που έχουν αναλυθεί παραπάνω, όπου η μέγιστη καθίζηση που υπολογίζεται, ανέρχεται στα 3,4mm περίπου.

#### 9.4.3. Κατανομή Μετακινήσεων

Στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή των μετακινήσεων περί την θέση 14+130 - 14+735 για αστράγγιστες συνθήκες ανάλυσης.

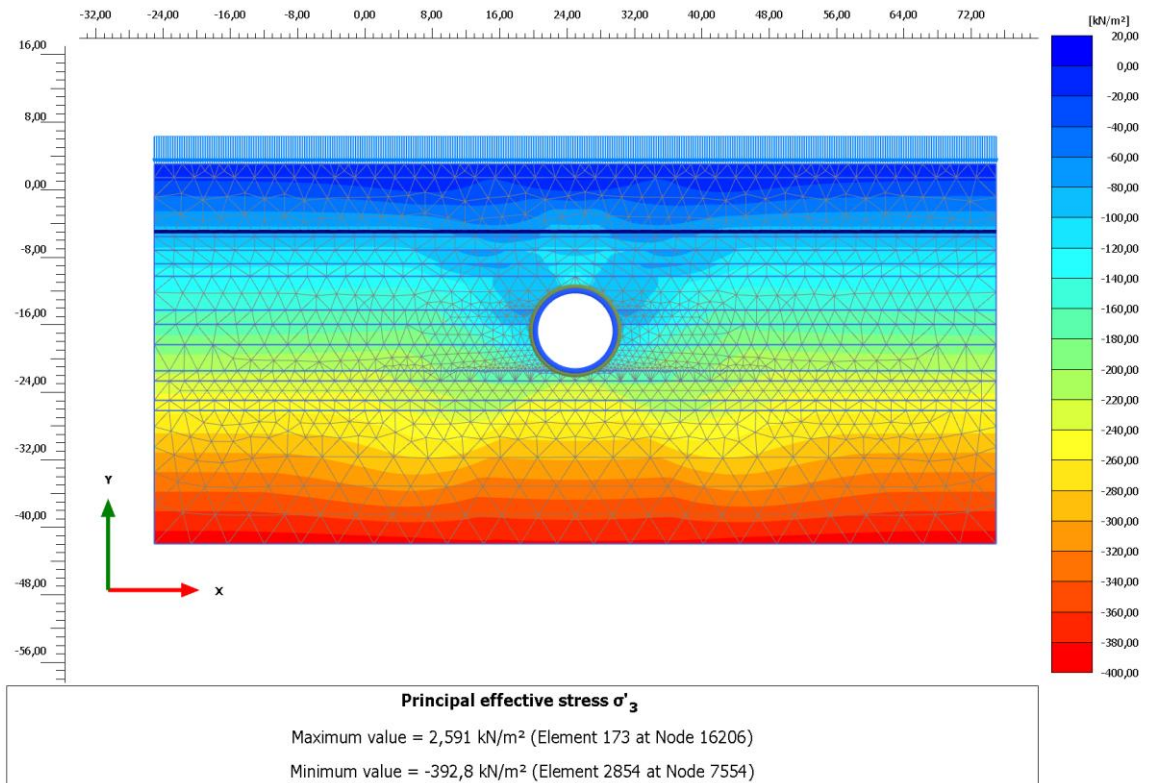


Εικ. 9.24 : Κατανομή Μετακινήσεων σε Αστράγγιστες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+130 - 14+735

Στο γράφημα φαίνεται η κατανομή των συνολικών μετακινήσεων περί την θέση 14+130 - 14+735. Σε σχέση με το μέγεθος των καθιζήσεων της προηγούμενης θέσης που αναλύθηκε, εδώ παρατηρούνται κάπως μεγαλύτερες τιμές πιθανότατα λόγω της διαφορετικής αντοχής των σχηματισμών μέσα στους οποίους γίνεται η διάνοιξη.

#### 9.4.4. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων ( $\sigma'3$ )

Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα των ενεργών ελάχιστων κύριων τάσεων ( $\sigma'3$ ) για αστράγγιστες συνθήκες.

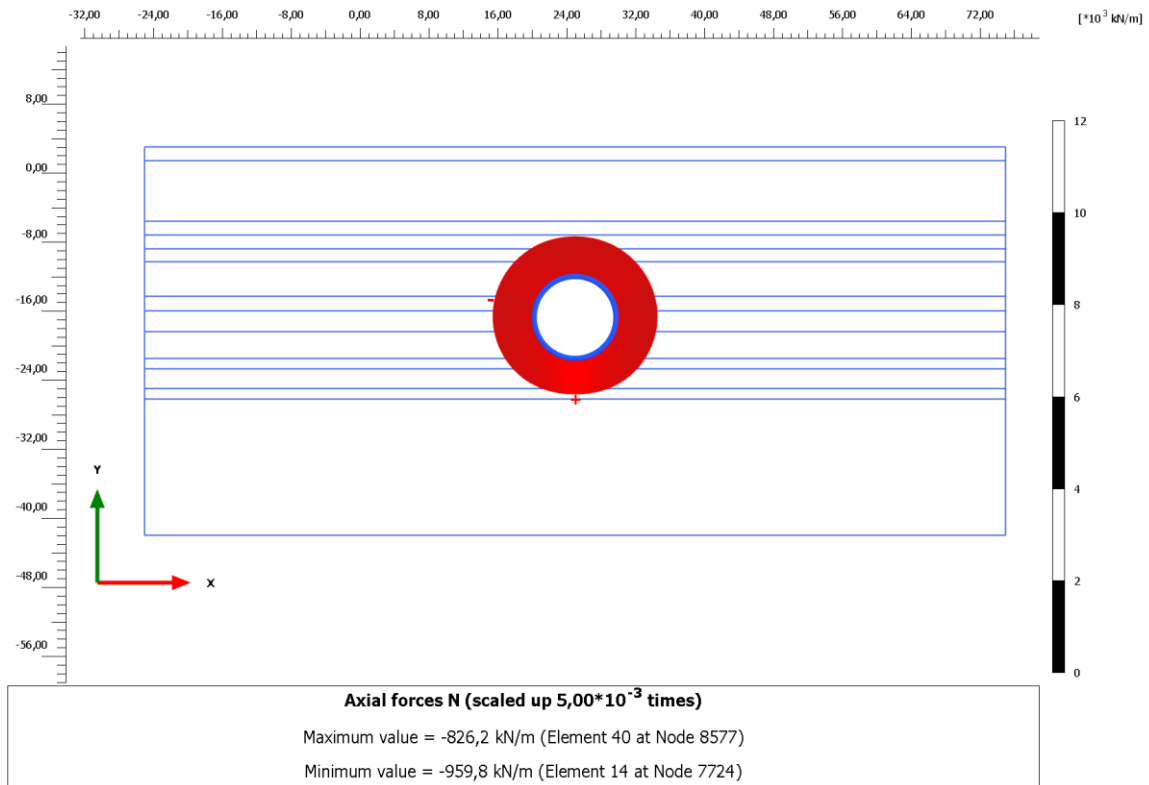


Εικ. 9.25 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων σε Αστράγγιστες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+130 - 14+735

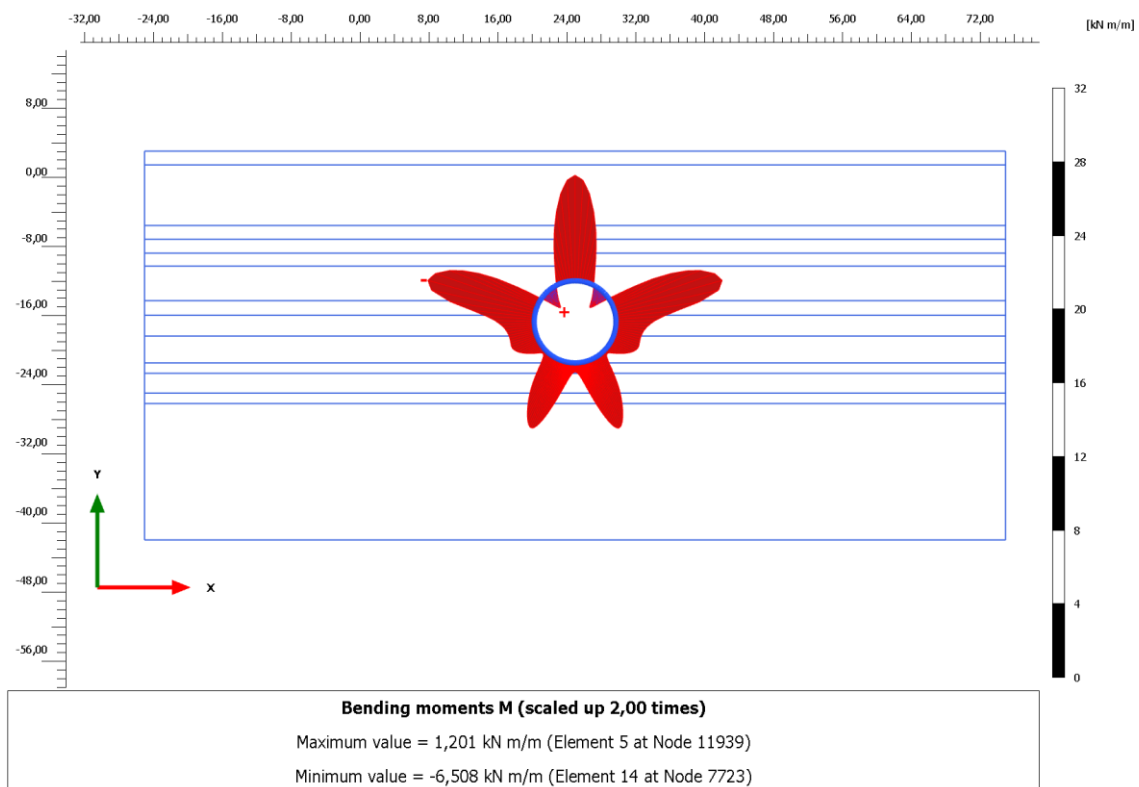
Όπως και παραπάνω, εδώ διακρίνεται καθαρά η χαλάρωση του τασικού πεδίου στην περιφέρεια της σήραγγας λόγω της πλαστικοποίησης της εδαφομάζας.

#### 9.4.5. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κατανομές αξονικών φορτίων και ροπών κάμψης για αστράγγιστες συνθήκες με το Μοντέλο HS.



Εικ. 9.26 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+130 - 14+735



Εικ. 9.27 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+130 - 14+735

Στην συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρούνται μεγαλύτερα αξονικά φορτία και ροπές κάμψης που καταπονούν το σκυρόδεμα της επένδυσης. Αυτό εξηγείται διότι όπως είναι προφανές και από τις τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων, μεγαλύτερο ποσοστό της εδαφομάζας έχει πλαστικοποιηθεί με συνέπεια την μεγαλύτερη φόρτιση της επένδυσης.

## **9.5. Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης για την Χ.Θ. 14+950 - 15+051**

Εκτός από τη συνολική ανάλυση του συγκεκριμένου τμήματος έχουν πραγματοποιηθεί και δύο ξεχωριστές αναλύσεις καθώς υπάρχουν δύο θέσεις ενδιαφέροντος στο ίχνος της χάραξης του συγκεκριμένου τμήματος της σήραγγας.

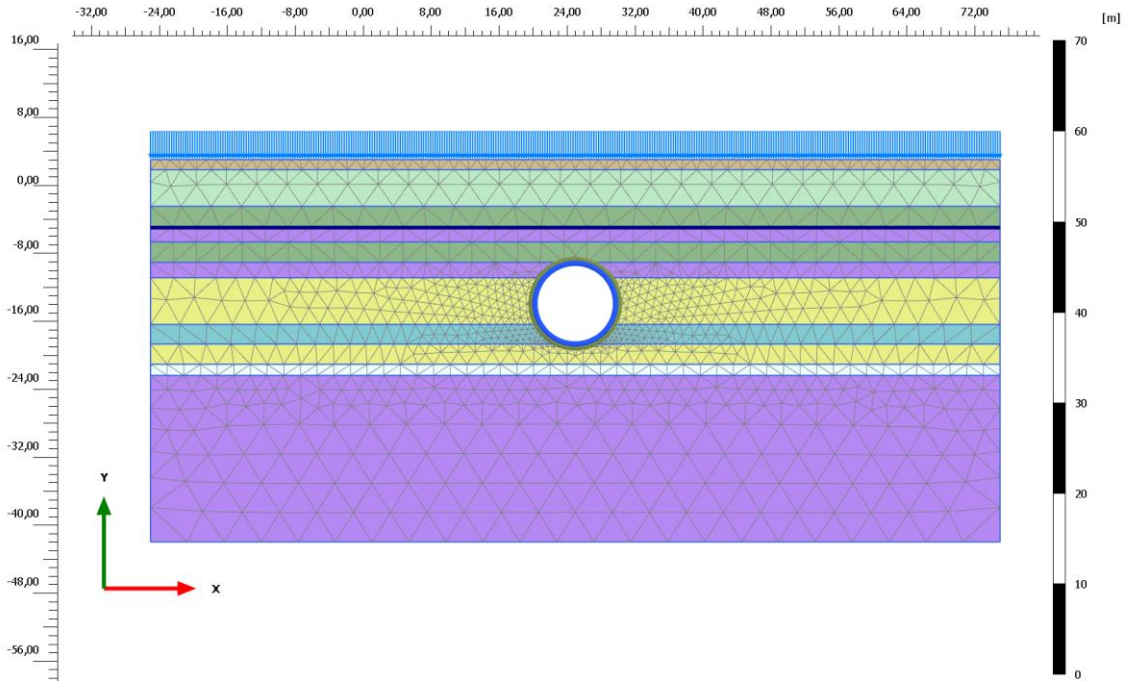
Οι αναλύσεις αυτές θα γίνουν περί την Χ.Θ. 14+960 και Χ.Θ. 15+010.

### **9.5.1. Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+950 - 15+051**

Η στρωματογραφία της συγκεκριμένης θέσης αποτελείται από δύο επιφανειακές στρώσεις τεχνητών επιχώσεων και συνεκτικών κορημάτων πάχους 1,2 και 4,3m αντίστοιχα. Στην συνέχεια ακολουθεί μια αλληλουχία τσιμεντωμένου και κλαστικού υλικού σε στρώσεις. Η διάνοιξη της σήραγγας γίνεται κυρίως μέσα σε ιλυόλιθους και αργιλόλιθους του νεογενούς με ένα μικρό στρώμα ασβεστολίθου να παρεμβάλλεται χαμηλά. Τέλος στην ζώνη υποκειμένων της σήραγγας συναντώνται στρώσεις από ιλυόλιθους, αργιλόλιθους καθώς και κροκαλοπαγή. Το ύψος των υπερκειμένων της σήραγγας είναι 12m περίπου, με τον υδροφόρο ορίζοντα να απαντάται στα 8m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι, η στρωματογραφία για τις υπόλοιπες δύο αναλύσεις είναι ακριβώς η ίδια, οπότε δεν θα ξαναδιατυπωθεί στις παρακάτω υποενότητες.

Παρακάτω παρουσιάζεται το εδαφικό προσομοίωμα:

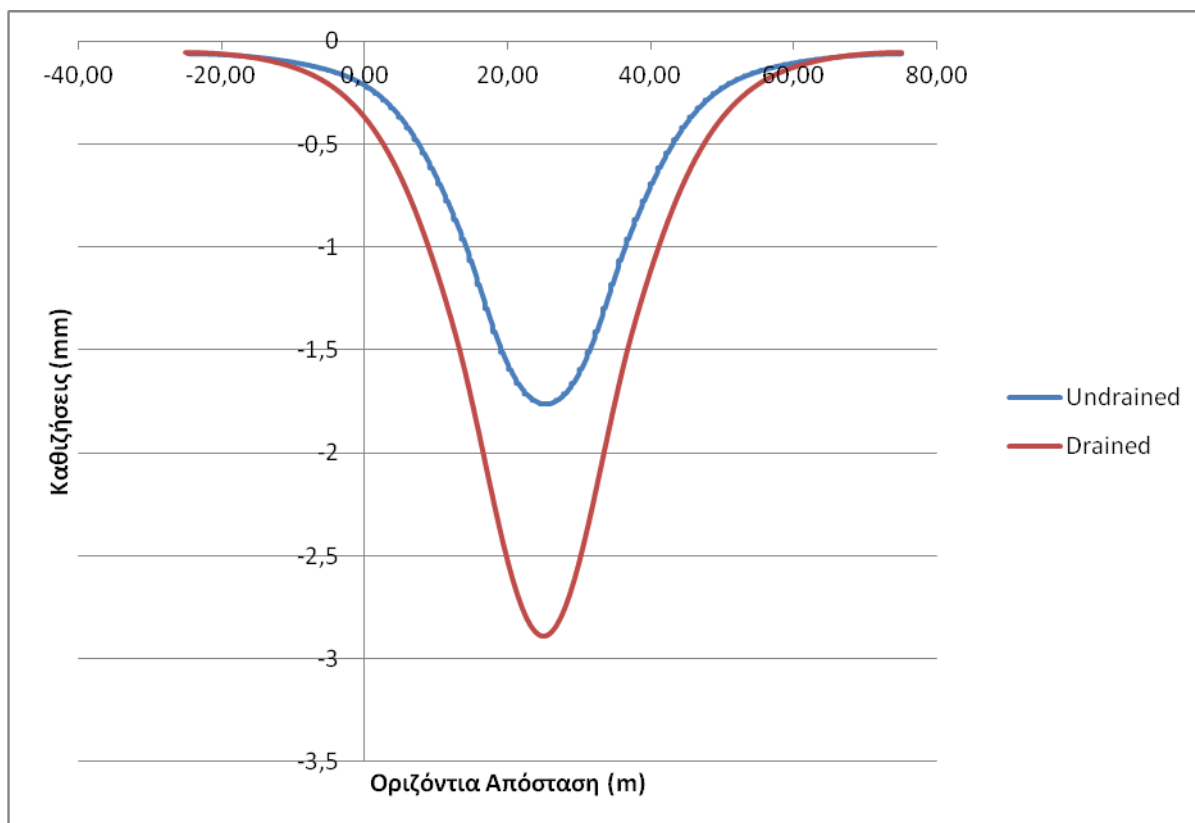


Εικ. 9.28 : Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+950 - 15+051

### 9.5.2. Επιφανειακές Καθιζήσεις στην Χ.Θ. 14+950 - 15+051

Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις όπως υπολογίστηκαν από την αριθμητική ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+950 - 15+051 για στραγγισμένες και αστράγγιστες συνθήκες της εδαφομάζας με το Μοντέλο HS.

Με βάση τα αποτελέσματα της αντίστροφης ανάλυσης, οι μετρηθείσες επιφανειακές καθιζήσεις κυμαίνονται από 1,5 - 3,5mm.

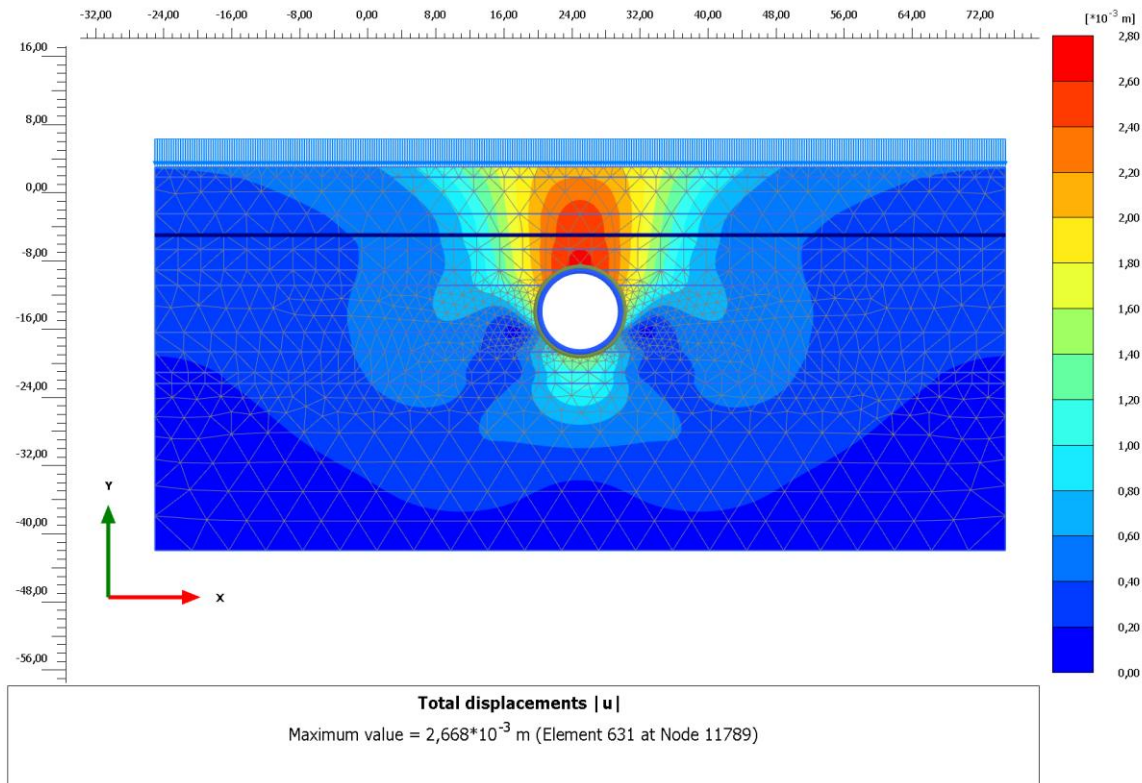


Γράφημα 9.4: Υπολογισθείσες Καμπύλες Καθιζήσεων περί την Χ.Θ. 14+950 - 15+051

Η καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών επιφανειακών καθιζήσεων επιτυγχάνεται με την καμπύλη για αστράγγιστες συνθήκες για λόγους που έχουν αναλυθεί παραπάνω, όπου η μέγιστη καθίζηση που υπολογίζεται, ανέρχεται στα 1,7mm περίπου. Οι καθιζήσεις που παρατηρούνται εδώ είναι ελάχιστες. Αυτό οφείλεται κυρίως στην μεγάλη αντοχή που παρουσιάζουν τα εδαφικά υλικά στην συγκεκριμένη περιοχή.

### 9.5.3. Κατανομή Μετακινήσεων

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή των μετακινήσεων περί την θέση 14+950 -15+051 για αστράγγιστες συνθήκες ανάλυσης.



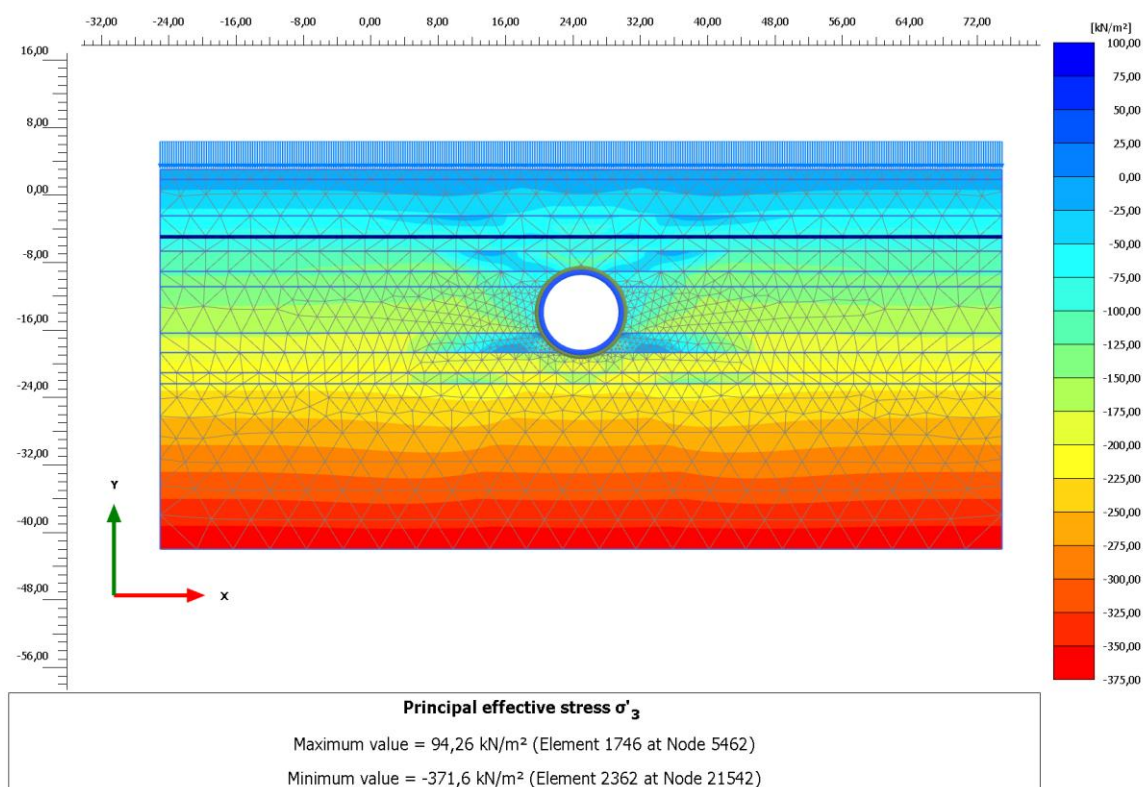
Εικ. 9.29 : Κατανομή Μετακινήσεων σε Αστράγγιστες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+950 - 15+051

Στην παραπάνω περίπτωση παρατηρούνται εκτός από τις μετακινήσεις πάνω από την στέψη της σήραγγας και κάποιες ελάχιστες μετακινήσεις στο δάπεδο. Αυτό το φαινόμενο έρχεται σε αντίθεση με τα συνήθη αποτελέσματα του Μοντέλου HS, που όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, δεν εμφανίζει ανύψωση δαπέδου λόγω της μεγαλύτερης αντοχής της εδαφομάζας σε συνθήκες αποφόρτισης. Η μετακίνηση που συμβαίνει στο δάπεδο πιθανά οφείλεται σε δύο λόγους. Ο ένας λόγος είναι ότι για κάθε γεωυλικό ορισμένες παράμετροι του Μοντέλου HS όπως αυτή του  $R_f$ , και  $m$  για ορισμένες τιμές του  $p^{ref}$  είναι συγκεκριμένες και πρέπει να εξάγονται από εργαστηριακές δοκιμές. Παρόλα αυτά, τα συγκεκριμένα δεδομένα δεν ήταν διαθέσιμα οπότε επιλέχθηκαν οι προτεινόμενες τιμές του λογισμικού. Ο δεύτερος λόγος έγκειται στην συμπεριφορά κράτυνσης των γεωυλικών καθώς και στην υψηλή γωνία διασταλτικότητας των υποκείμενων στη σήραγγα σχηματισμών καθώς και στη μεγάλη διαφορά αντοχής μεταξύ των στρωμάτων. Εκτός των δύο παραπάνω λόγων συτή η ανύψωση δαπέδου μπορεί να οφείλεται και στην ασυμβατότητα των γεωτεχνικών δεδομένων στο λογισμικό που έχουν ληφθεί από την μελέτη.



### 9.5.4. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων ( $\sigma'_3$ )

Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα των ενεργών ελάχιστων κύριων τάσεων ( $\sigma'_3$ ) για αστράγγιστες συνθήκες.

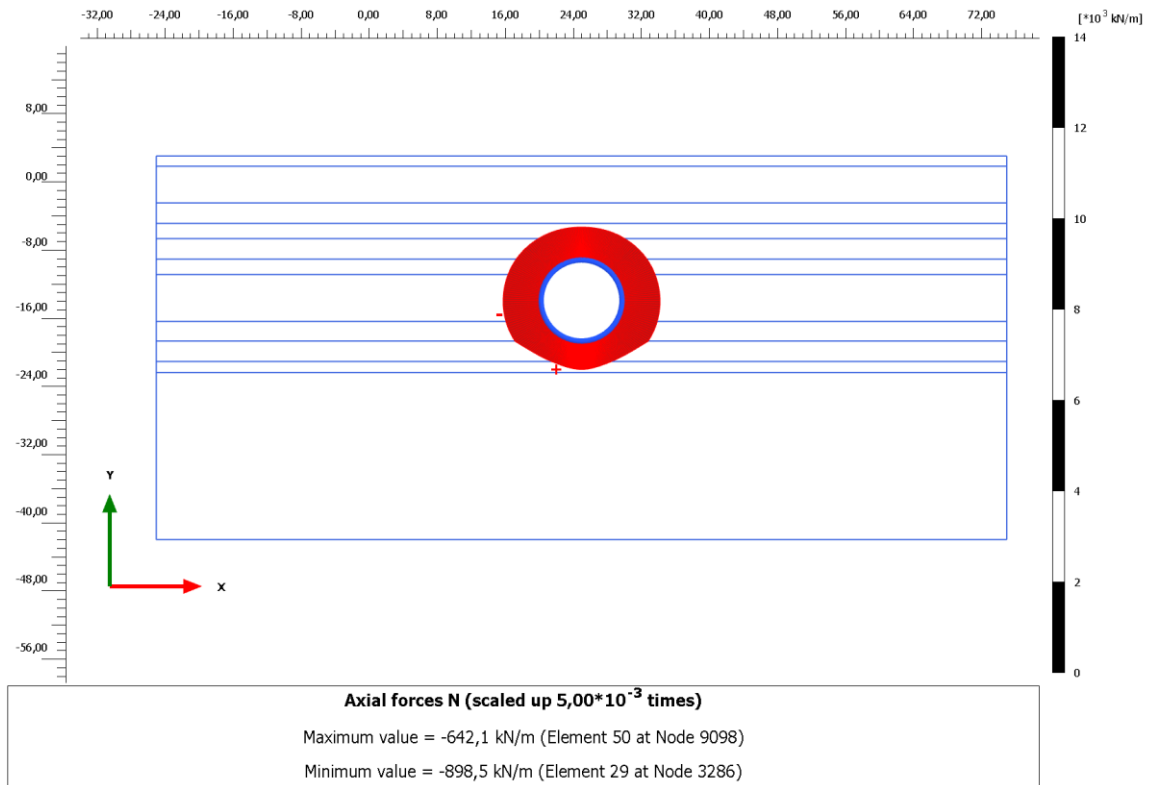


Εικ. 9.30 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων σε Αστράγγιστες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+950 - 15+051

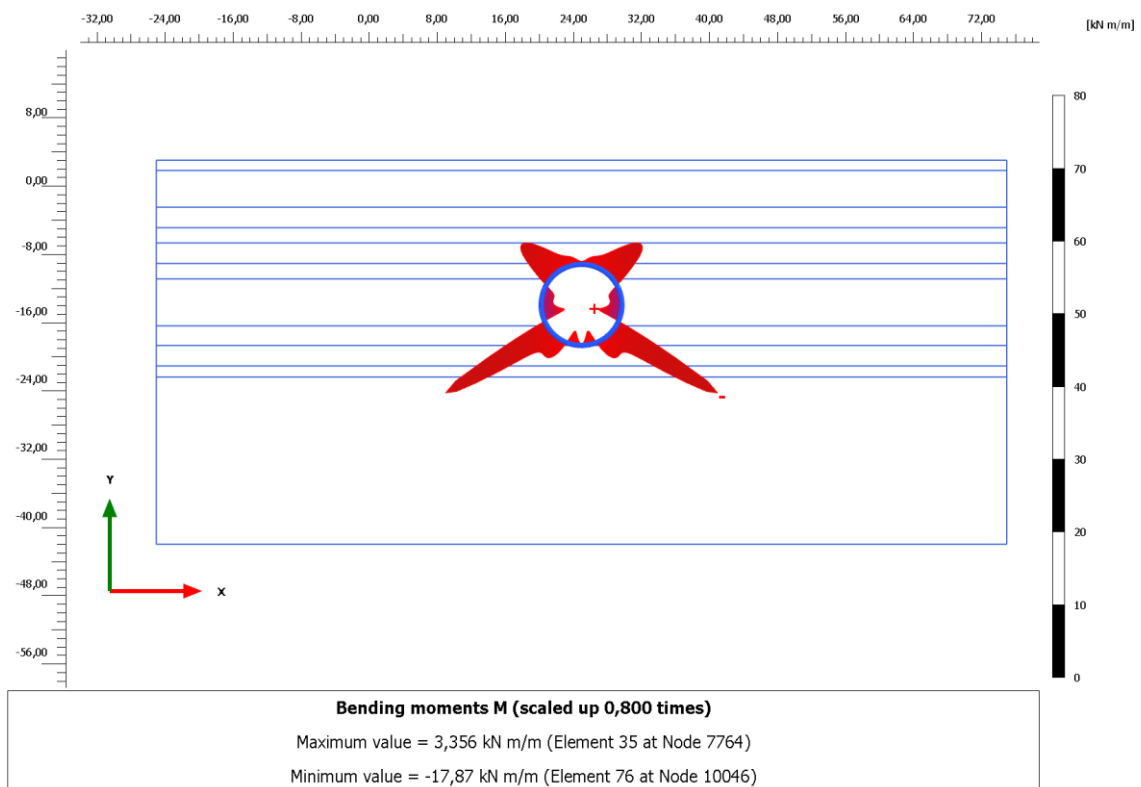
Εδώ παρατηρείται εντονότερα από τις προηγούμενες αναλύσεις η αξονική χαλάρωση του τασικού πεδίου.

### 9.5.5. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κατανομές αξονικών φορτίων και ροπών κάμψης για αστράγγιστες συνθήκες με το Μοντέλο HS.



Εικ. 9.31 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+950 - 15+051



Εικ. 9.32 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+950 - 15+051

Στην προκειμένη περίπτωση η κατανομή των αξονικών φορτίων αποκλίνει ελάχιστα από την ομοιομορφία λόγω της μικρής ανύψωσης που συμβαίνει στο δάπεδο της σήραγγας ενώ η κατανομή των ροπών κάμψης δείχνει ότι το σκυρόδεμα της επένδυσης καταπονείται εντονότερα στις παρειές και στο δάπεδο της σήραγγας.

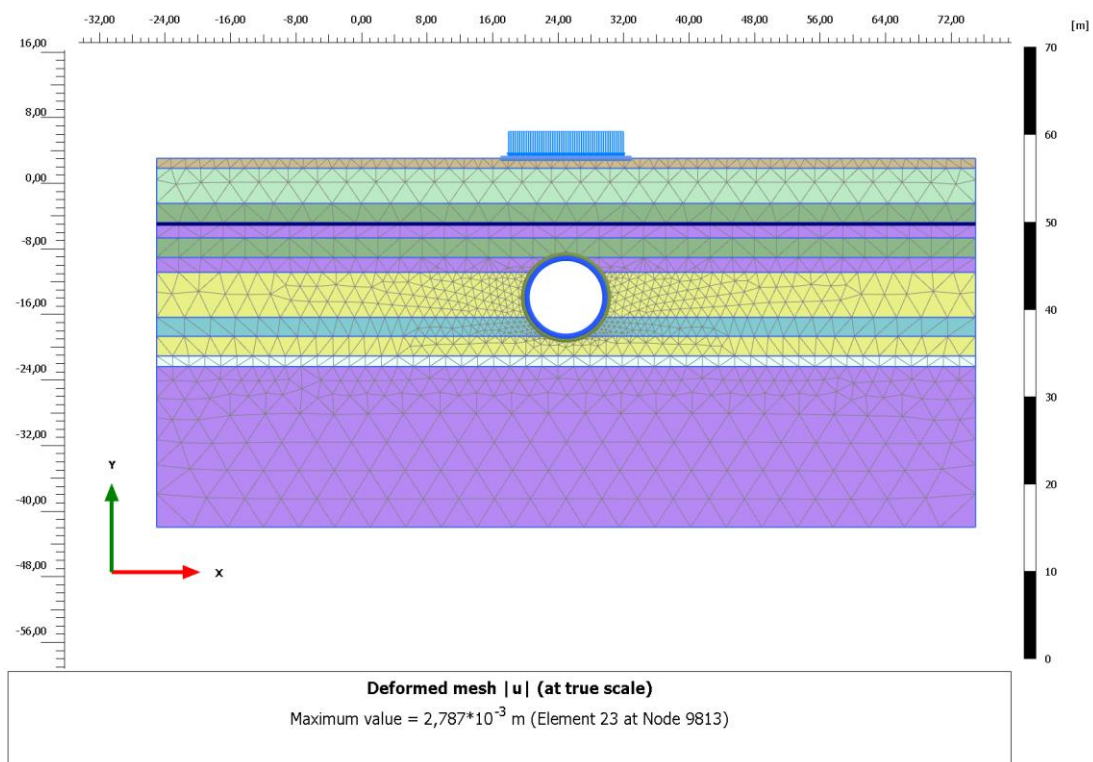
## 9.6. Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης περί την Χ.Θ. 14+960

### 9.6.1. Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+960

Η συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι κατά την χάραξη της σήραγγας συναντάται δεξαμενή νερού. Αυτή η κατασκευή χρήζει ιδιαίτερης προσοχής καθώς δεν πρέπει να προκληθεί καμμία ζημιά από τις καθιζήσεις που θα προκύψουν κατά την διάνοιξη της σήραγγας.

Για την προσομοίωση αυτής της δεξαμενής λήφθηκε υπόψη το φορτίο των 70kPa επί πλάτους επιρροής 14m ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας.

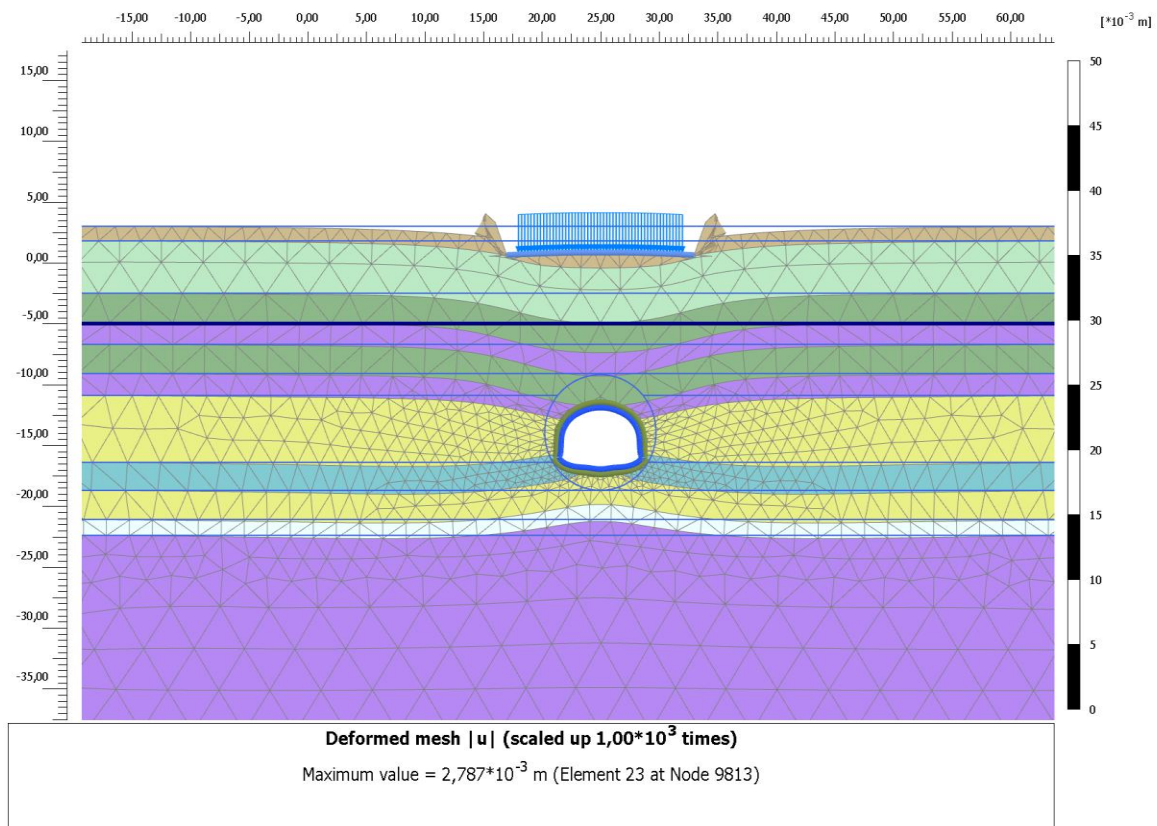
Παρακάτω παρουσιάζεται το εδαφικό προσομοίωμα:



Εικ. 9.33 : Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 14+960

### 9.6.2. Επιφανειακές Καθιζήσεις στην Χ.Θ. 14+960

Με την επιβολή του επιφανειακού φορτίου παρατηρήθηκε αστοχία του επιφανειακού σχηματισμού των τεχνητών επιχώσεων με αποτέλεσμα την αδυναμία προσομοίωσης. Γι' αυτόν τον λόγο επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί πλάκα θεμελίωσης πάνω στην οποία γίνεται η επιβολή του φορτίου η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικ. 9.34 : Προσομοίωση με Πλάκα Θεμελίωσης, υπό Κλίμακα

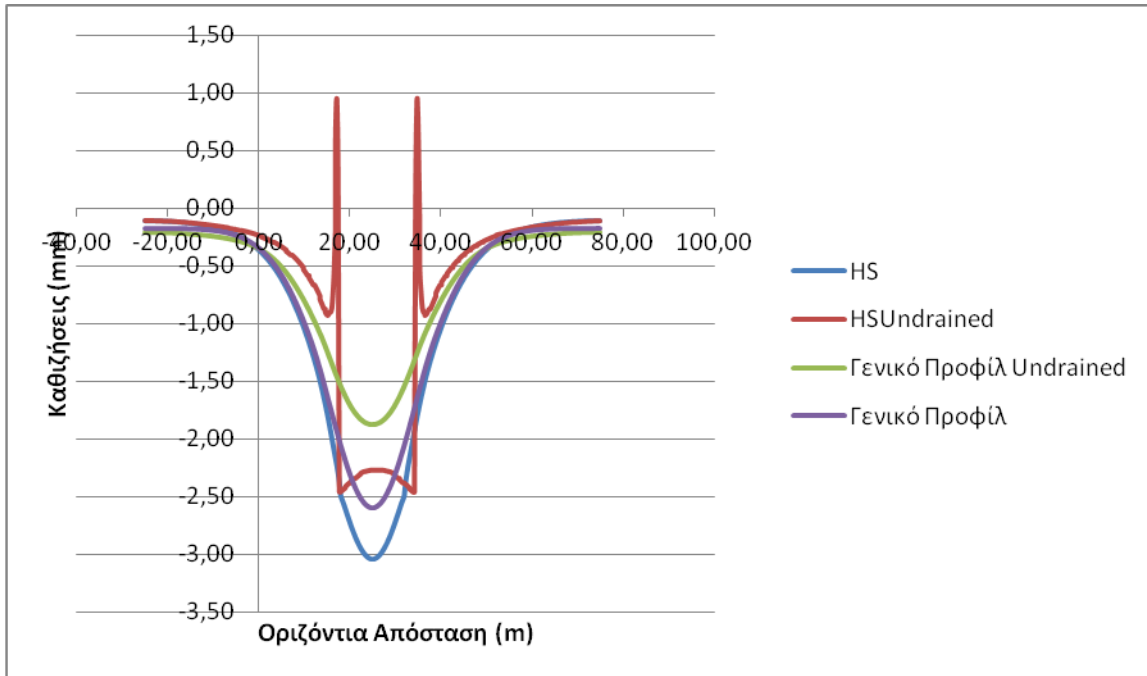
Η πλάκα θεμελίωσης σχεδιάστηκε με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

ΠΛΑΚΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ	ΤΙΜΗ
Δυσκαμψία EI (kN/m)	$40 \times 10^6$
Δυστένια EA (kNm <sup>2</sup> /m)	$420 \times 10^3$
Βάρος w (kN/m/m)	12,5
Διατομή d (m)	0,35
Λόγος Poisson Σκυροδέματος $\nu_c$	0,2

Πίνακας 9.1 : Χαρακτηριστικά Πλάκας Θεμελίωσης

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι ο επιφανειακός σχηματισμός των τεχνητών επιχώσεων δεν αστοχεί κατά την ανάλυση με στραγγισμένες συνθήκες.

Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις όπως υπολογίστηκαν από την αριθμητική ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+960 για στραγγισμένες και αστράγγιστες συνθήκες της εδαφομάζας με το Μοντέλο HS.

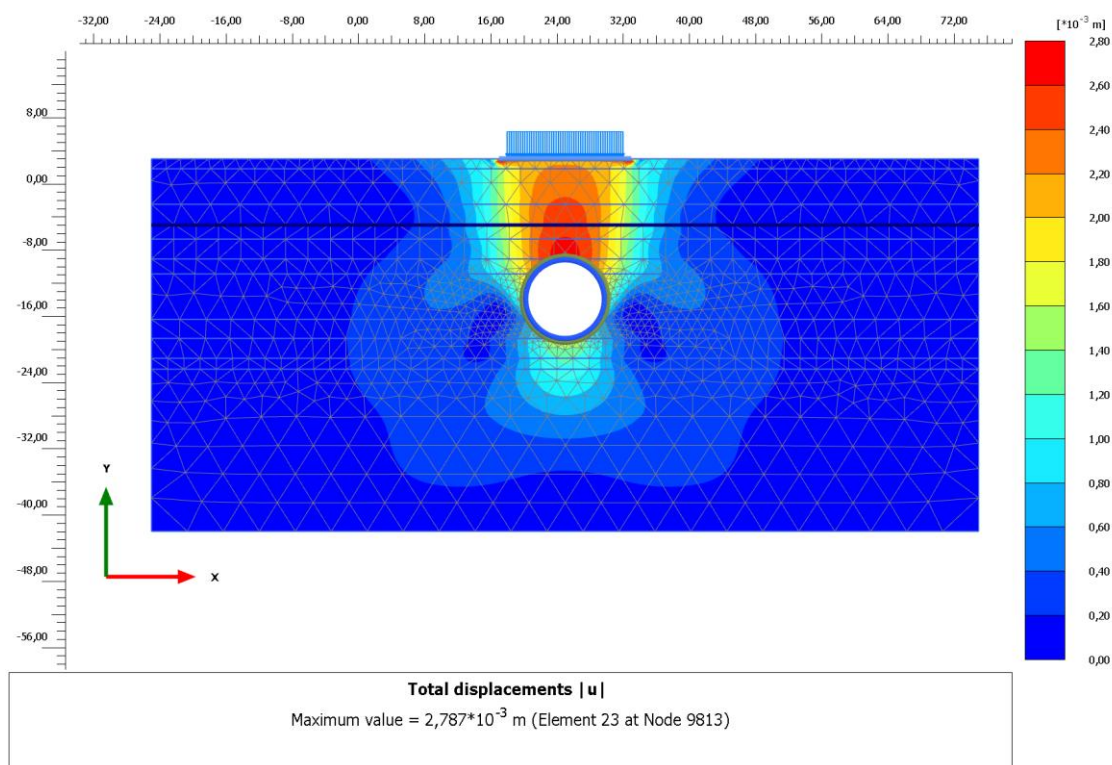


Γράφημα 9.5: Υπολογισθείσες Καμπύλες Καθιζήσεων περί την Χ.Θ. 14+960

Στο ανωτέρω γράφημα, εκτός από τις καμπύλες καθιζήσεων της συγκεκριμένης θέσης, παρατίθενται και οι καμπύλες από την προηγούμενη ανάλυση για όλο το τμήμα από 14+950 - 15+051, που αναφέρονται στο υπόμνημα ως Καμπύλη Γενικού Προφίλ, με σκοπό την σύγκριση μεταξύ τους. Τελικά αν εξαιρεθεί το σημείο της θεμελίωσης όπου οι καθιζήσεις αυξάνονται σημαντικά στο υπόλοιπο τμήμα και οι δύο καμπύλες πλησιάζουν σχεδόν το γενικό προφίλ καθιζήσεων για στραγγισμένες και αστράγγιστες συνθήκες αντίστοιχα.

### 9.6.3. Κατανομή Μετακινήσεων

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή των μετακινήσεων περί την θέση 14+960 για αστράγγιστες συνθήκες ανάλυσης.

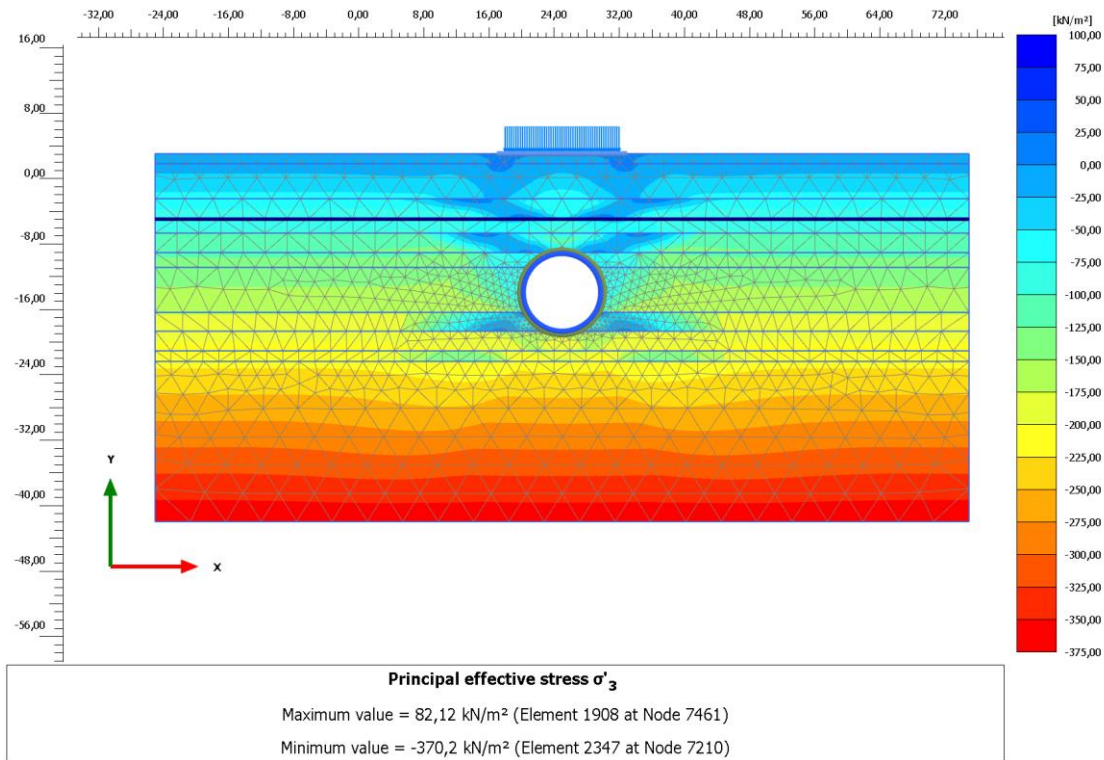


Εικ. 9.35 : Κατανομή Μετακινήσεων σε Αστράγγιστες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+960

Στην εξεταζόμενη κατανομή παρατηρούνται μετακινήσεις στην περιοχή πάνω από την οροφή της σήραγγας και ταυτόχρονα παρατηρούνται κάποιες ελάχιστες μετακινήσεις στο δάπεδο για λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω. Όπως είναι αναμενόμενο η επιβολή του φορτίου πάνω από τον άξονα της σήραγγας προκαλεί αύξηση της μέγιστης καθίζησης. Επίσης είναι εμφανές ότι η πλάκα θεμελίωσης δεν επηρεάζει την συνολική κατανομή παρά μόνο στην περιοχή ακριβώς κάτω από αυτήν όπου οι μετακινήσεις είναι ελάχιστα αυξημένες.

### 9.6.4. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων ( $\sigma_3$ )

Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα των ενεργών ελάχιστων κύριων τάσεων ( $\sigma_3$ ) για αστράγγιστες συνθήκες.



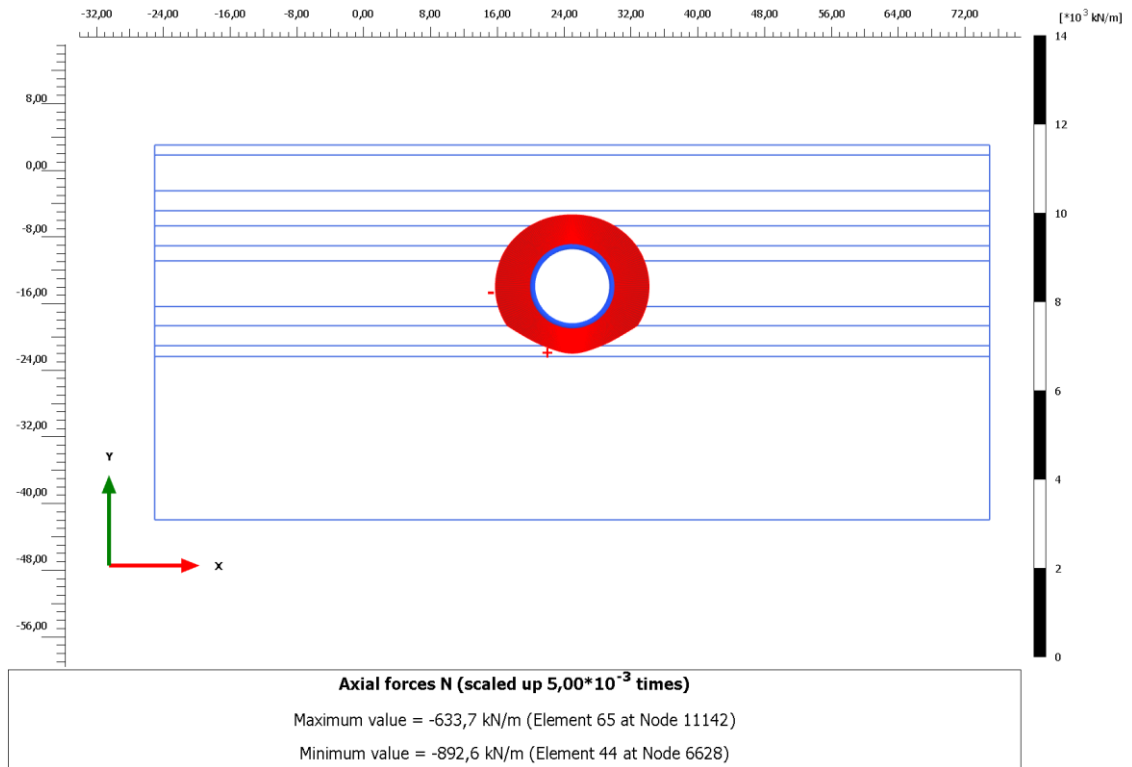
Εικ. 9.36 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων σε Αστράγγιστες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+960

Όσον αφορά τις ενεργές ελάχιστες κύριες τάσεις δεν παρουσιάζεται κάποια ιδιαίτερη ανωμαλία οπότε ισχύουν όσα έχουν αναφερθεί σε προηγούμενες αναλύσεις.

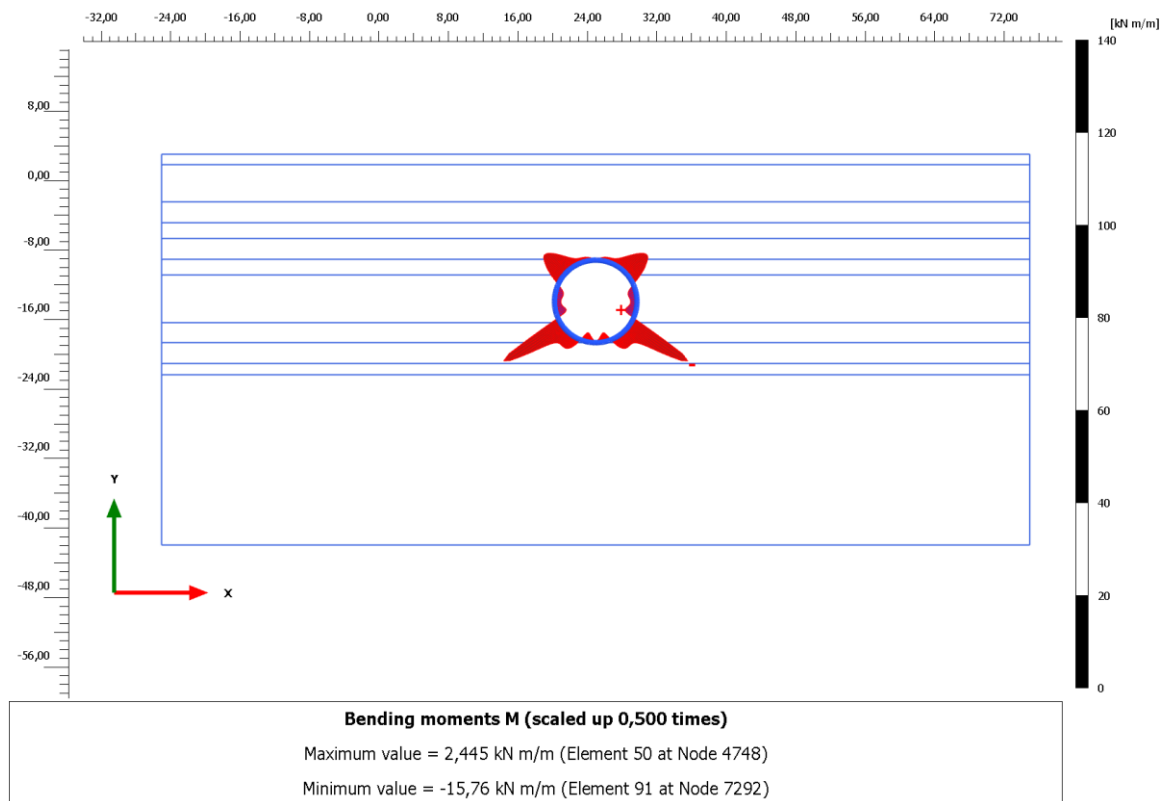
### 9.6.5. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κατανομές αξονικών φορτίων και ροπών κάμψης για αστράγγιστες συνθήκες με το Μοντέλο HS.





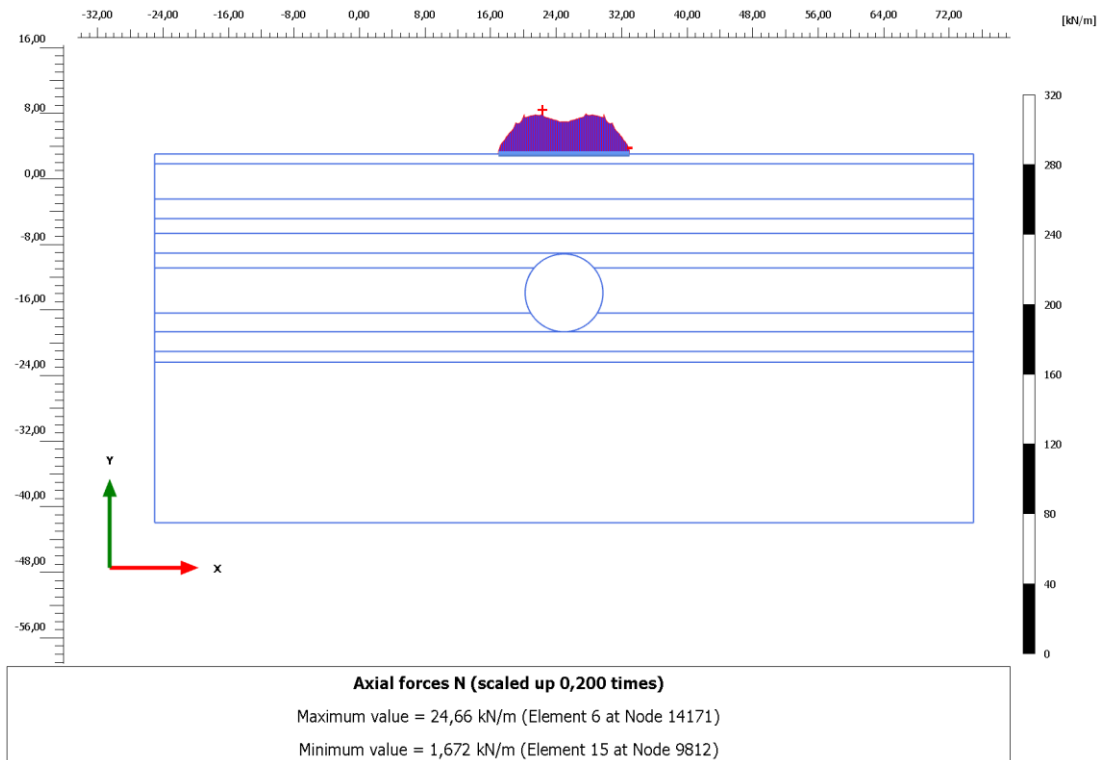
Εικ. 9.37 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+960



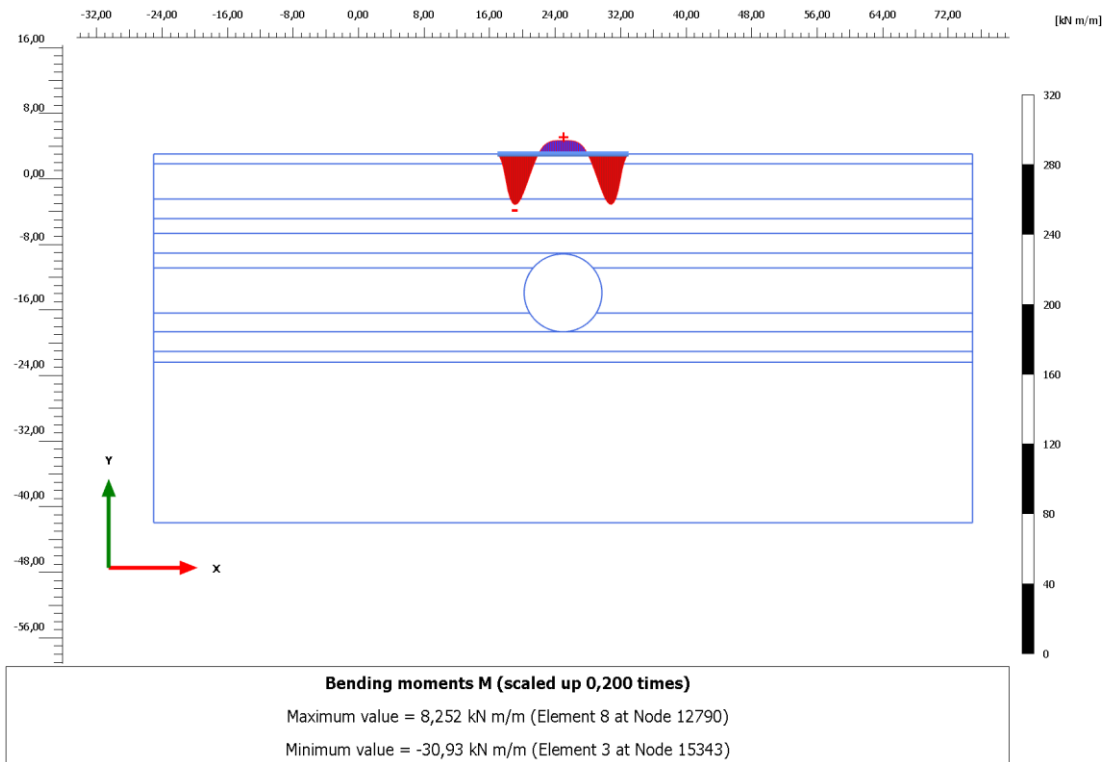
Εικ. 9.38 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+960

Από άποψη μορφής οι κατανομές αξονικών φορτίων και ροπών κάμψης δεν διαφέρουν από την προηγούμενη ανάλυση για όλο το τμήμα της σήραγγας. Εμφανίζουν όμως, ελάχιστα μικρότερες τιμές λόγω της περιορισμένης έκτασης της επιβολής του φορτίου παρόλο που είναι μεγαλύτερο.

Στο σημείο αυτό παρατίθενται ενδεικτικά τα αξονικά φορτία και οι ροπές κάμψης που ασκούνται στην θεμελίωση της δεξαμενής.



Εικ. 9.39 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων στην Θεμελίωση με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+960



Εικ. 9.40 : Κατανομή Ροπών Κάμψης στην Θεμελίωση με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+960

## 9.7. Αποτελέσματα Αριθμητικής Ανάλυσης περί την Χ.Θ. 15+010

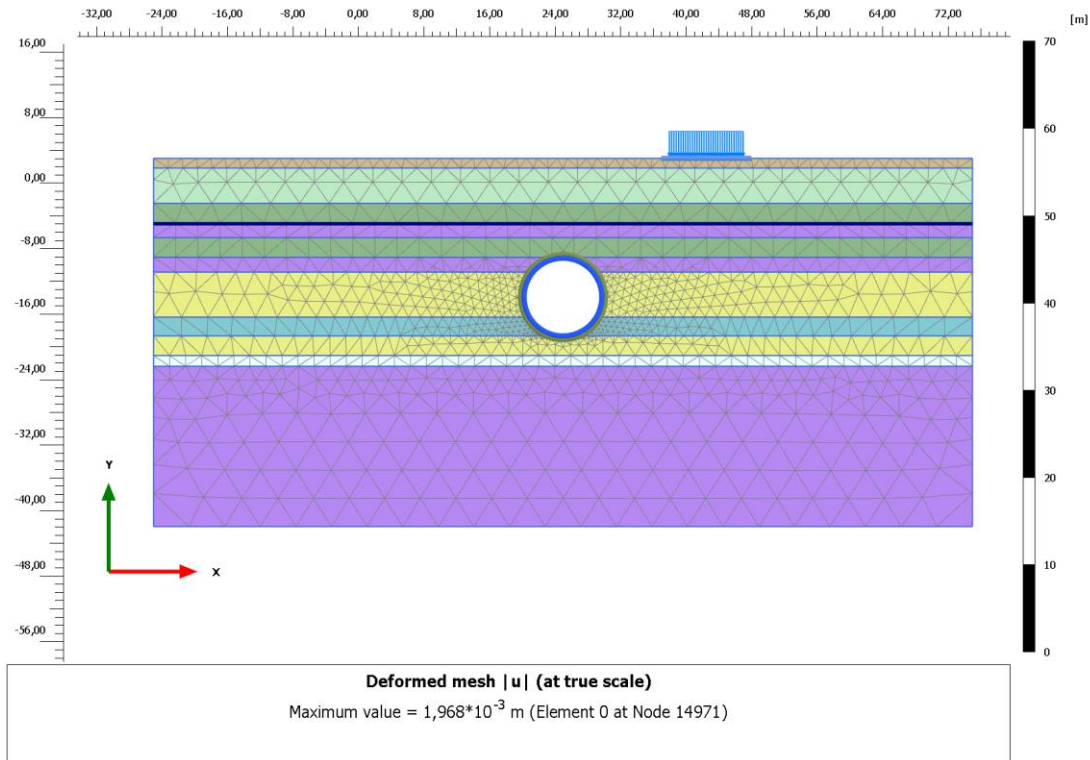
### 9.7.1. Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 15+010

Όπως και προηγουμένως και η συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι κατά την χάραξη της σήραγγας συναντάται υδατόπυργος που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την διάνοιξη της σήραγγας.

Για την προσομοίωση αυτής της δεξαμενής λήφθηκε υπόψη το φορτίο των 70kPa επί πλάτους επιρροής 9m σε απόσταση 13m δεξιά από τον άξονα της σήραγγας.

Και στην συγκριμένη περίπτωση η επιβολή του φορτίου του υδατόπυργου προκαλεί αστοχία του επιφανειακού σχηματισμού με αποτέλεσμα την αδυναμία προσομοίωσης, οπότε χρησιμοποιήθηκε πλάκα θεμελίωσης για την προσομοίωση, με τα ίδια χαρακτηριστικά της προηγούμενης περίπτωσης.

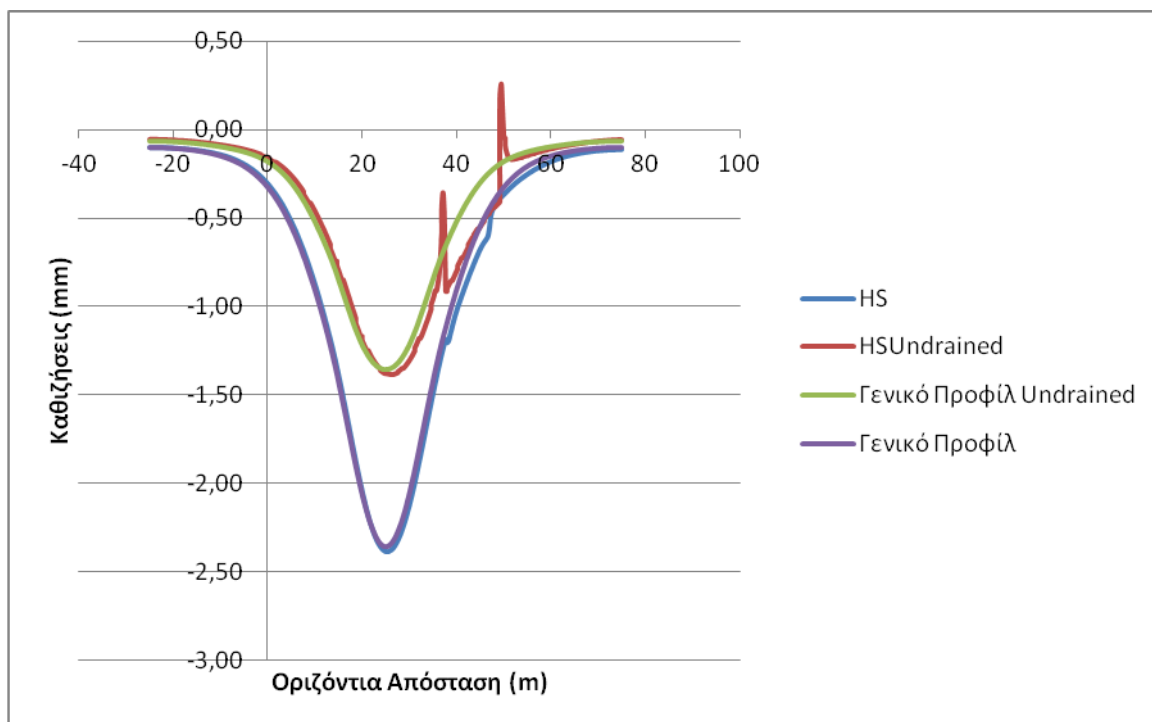
Παρακάτω παρουσιάζεται το εδαφικό προσομοίωμα:



Εικ. 9.41 : Εδαφικό Προσομοίωμα της Χ.Θ. 15+010

### 9.7.2. Επιφανειακές Καθιζήσεις στην Χ.Θ. 15+010

Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις όπως υπολογίστηκαν από την αριθμητική ανάλυση περί την Χ.Θ. 15+010 για στραγγισμένες και αστραγγιστες συνθήκες της εδαφομάζας με το Μοντέλο HS.

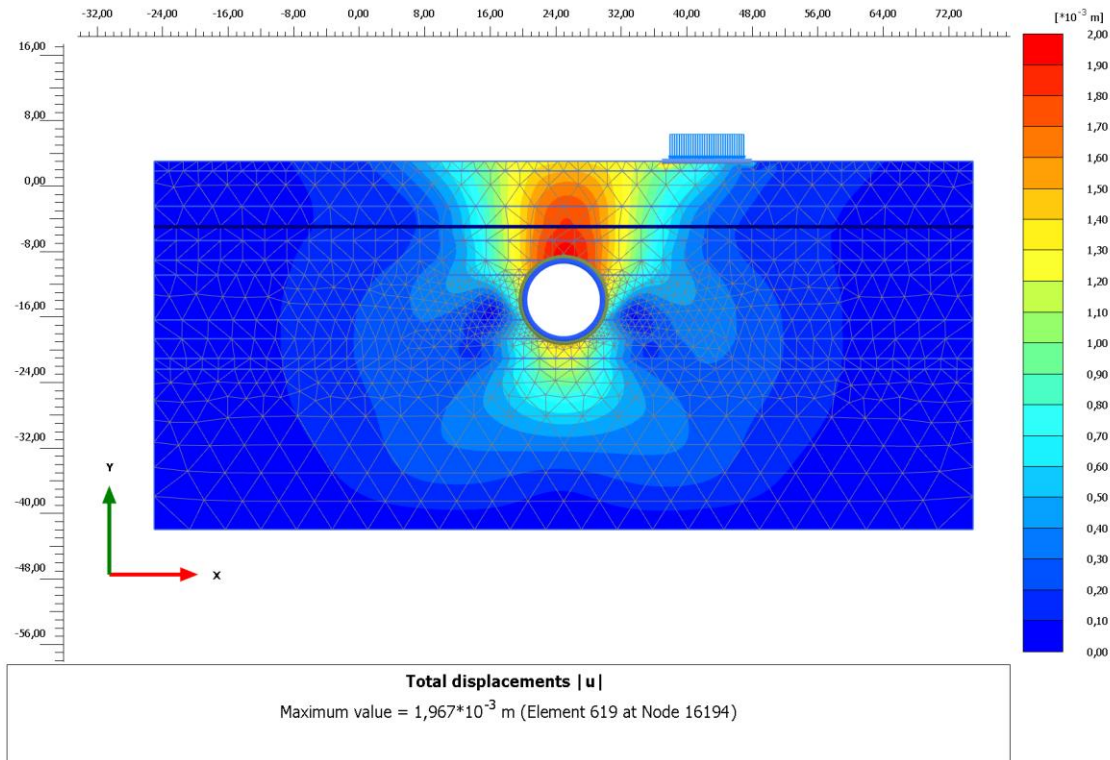


Γράφημα 9.6 : Υπολογισθείσες Καμπύλες Καθιζήσεων περί την Χ.Θ. 15+010

Και στην προκειμένη περίπτωση, το επιβαλλόμενο φορτίο προκαλεί αστοχία των επιφανειακών στρωμάτων οπότε και εδώ χρησιμοποιείται θεμελίωση. Αυτή την φορά όμως ο υδατόπυργος βρίσκεται σε απόσταση από τον άξονα της σήραγγας και απ' ό τι φαίνεται δεν επηρεάζει την μέγιστη καθίζηση, που ανέρχεται στα 1,4mm περίπου. Αυτό φαίνεται και από την πλήρη ταύτιση των καμπυλών HS και HS Undrained με το Γενικό Προφίλ καθιζήσεων, με εξαίρεση την περιοχή που βρίσκεται ο υδατόπυργος. Η ανωμαλία που παρατηρείται στις καμπύλες οφείλεται στην επιβολή της φόρτισης του υδατόπυργου στην πλάκα θεμελίωσης.

### 9.7.3. Κατανομή Μετακινήσεων

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή των μετακινήσεων περί την Χ.Θ. 15+051 για αστράγγιστες συνθήκες ανάλυσης.



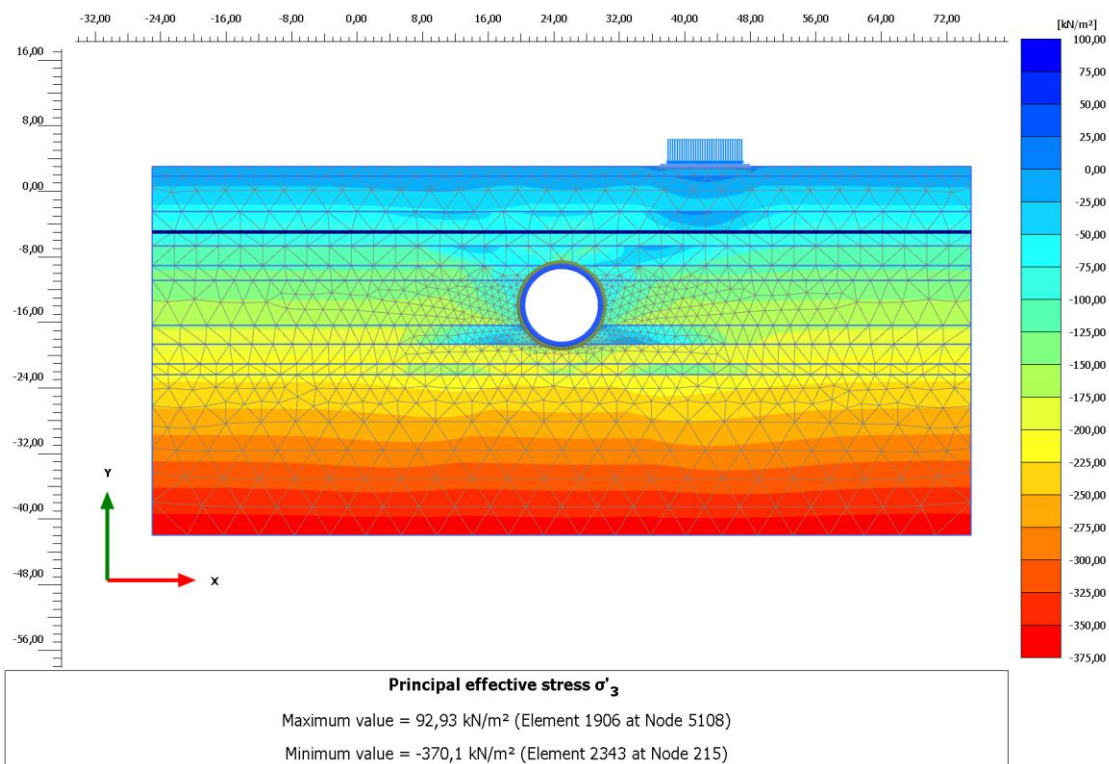
Εικ. 9.42 : Κατανομή Μετακινήσεων σε Αστράγγιστες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 15+010

Όπως και στις δύο προηγούμενες αναλύσεις, με μια πρώτη ματιά, είναι εμφανές ότι το μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων είναι σχετικά μικρό και μέσα στα αναμενόμενα όρια των 1,5 - 3,5mm. Επίσης και εδώ παρατηρείται μια μικρής κλίμακας ανύψωση δαπέδου της σήραγγας για τους ίδιους λόγους όπως εξηγήθηκε και παραπάνω.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη επιδείνωση των μετακινήσεων κάτω από την πλάκα θεμελίωσης που να οφείλεται στην διάνοιξη, όπως στην προηγούμενη περίπτωση καθώς αυτή δεν βρίσκεται πάνω στον άξονα της σήραγγας που αποτελεί μια ζώνη διατάραξης λόγω των επιφανειακών καθιζήσεων.

#### 9.7.4. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων ( $\sigma_3$ )

Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα των ενεργών ελάχιστων κύριων τάσεων ( $\sigma_3$ ) για αστράγγιστες συνθήκες.

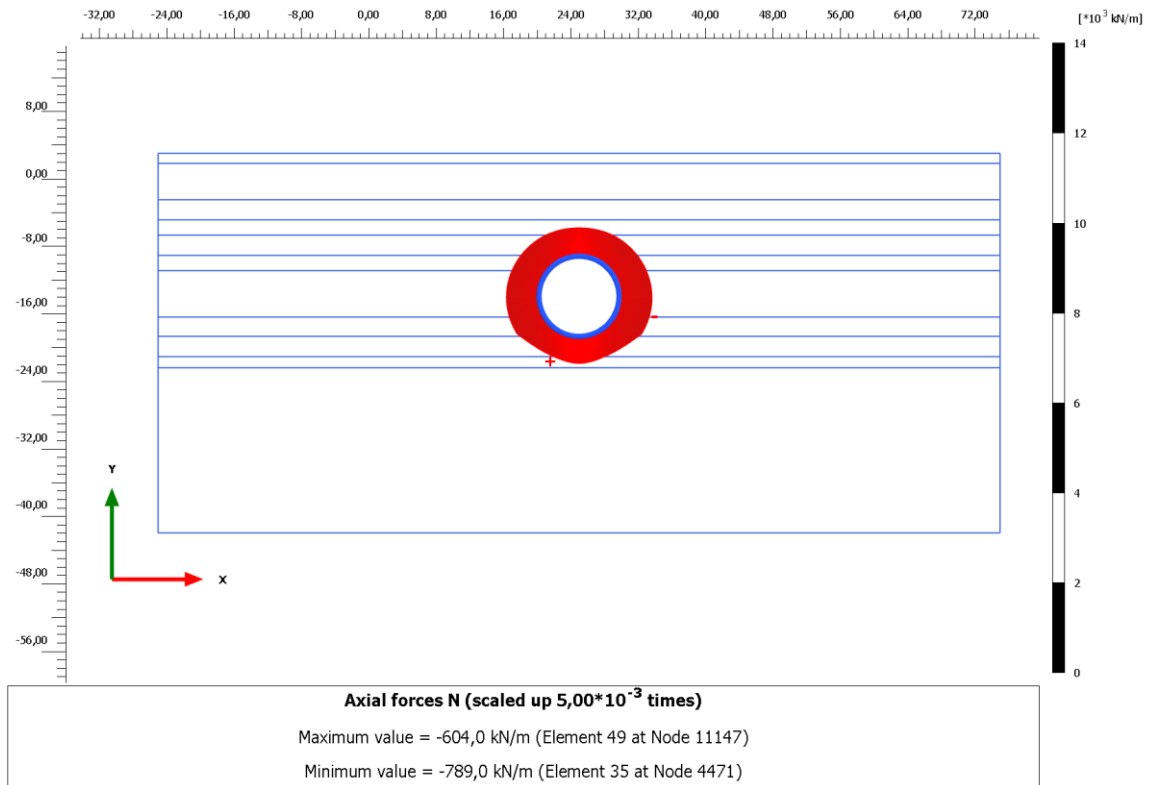


Εικ. 9.43 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων σε Αστράγγιστες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 15+010

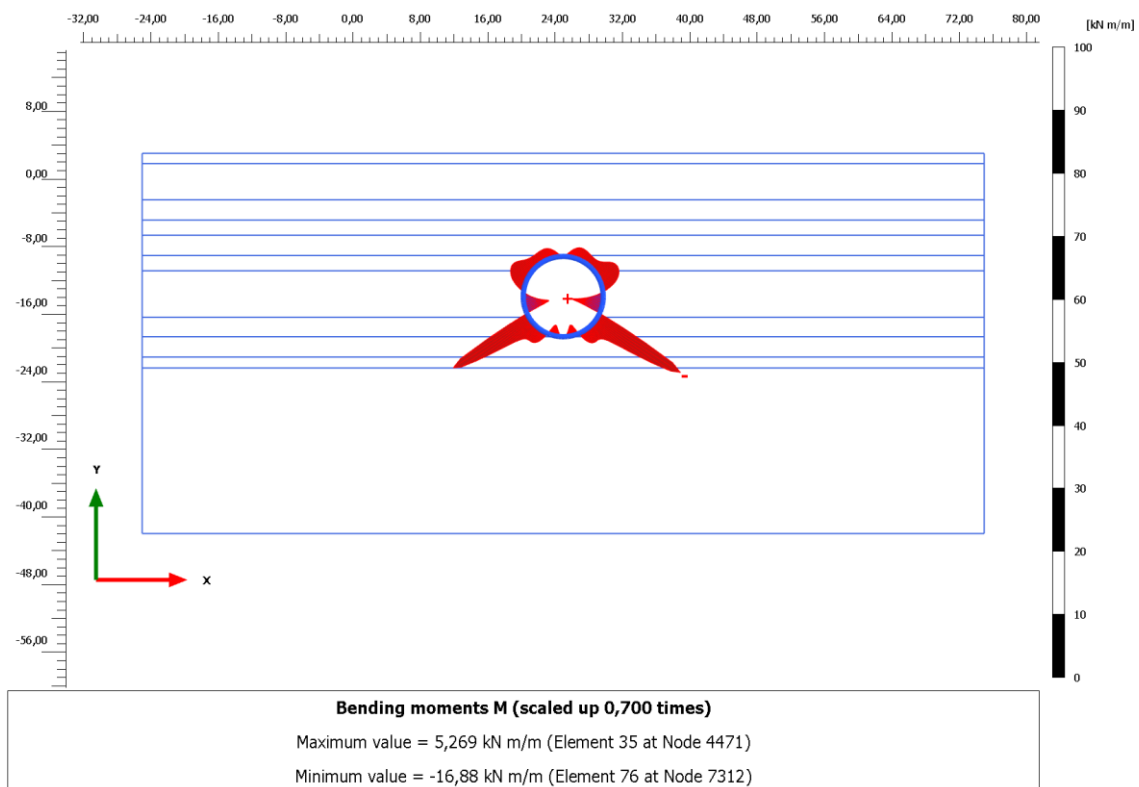
Όσον αφορά τις ενεργές ελάχιστες κύριες τάσεις, όπως και για την παραπάνω ανάλυση, έτσι και εδώ, δεν παρουσιάζεται κάποια ιδιαίτερη ανωμαλία, οπότε ισχύουν όπως έχουν αναφερθεί προηγουμένως.

### 9.7.5. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κατανομές αξονικών φορτίων και ροπών κάμψης για αστράγγιστες συνθήκες με το Μοντέλο HS.



Εικ. 9.44 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 15+010

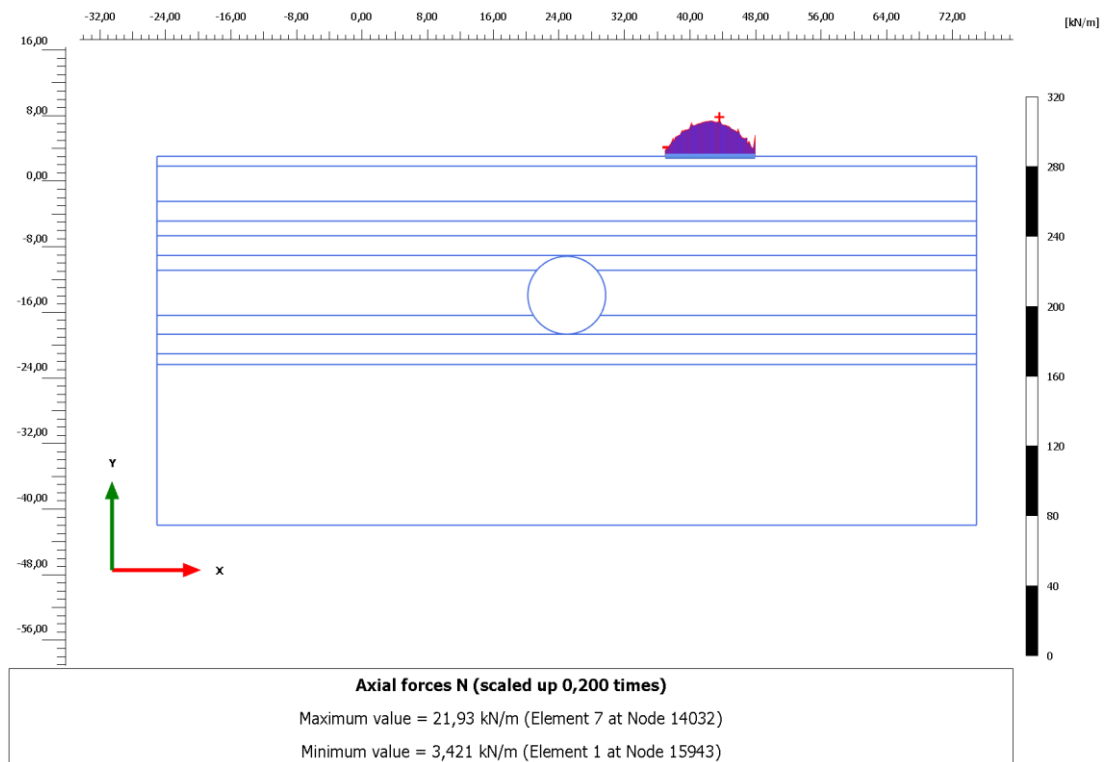


Εικ. 9.45 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 15+010

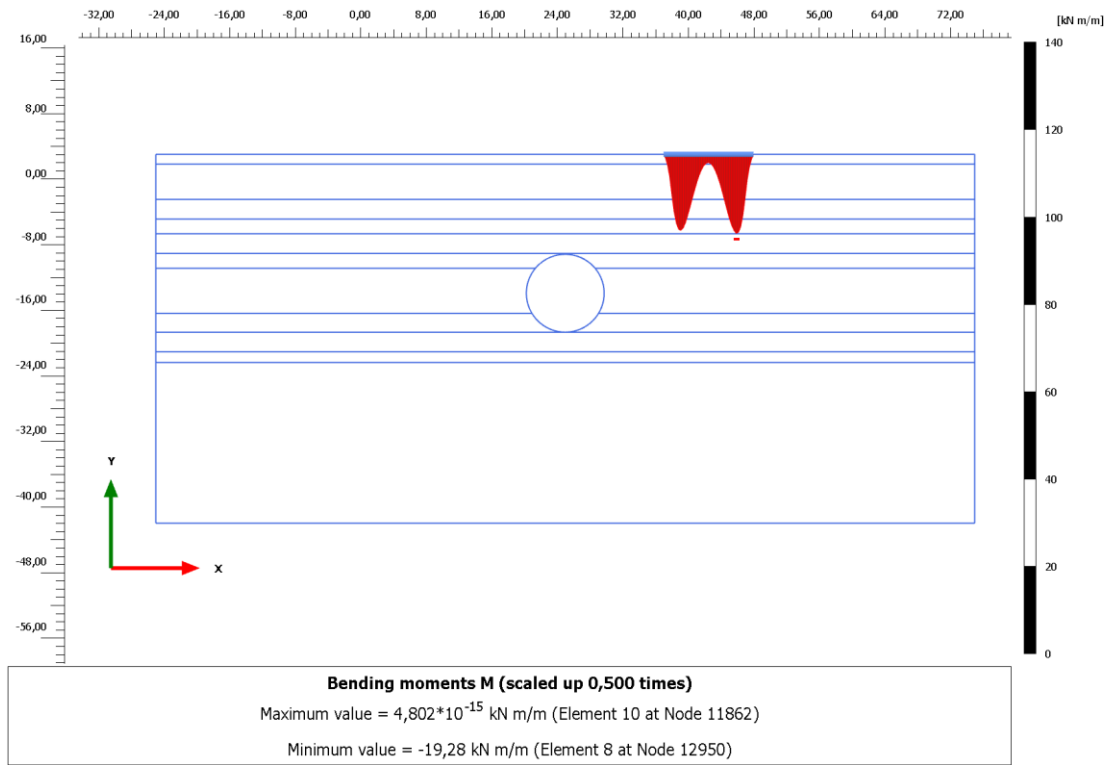


Από άποψη μορφής, και σε αυτή την περίπτωση, οι κατανομές αξονικών φορτίων και ροπών κάμψης δεν παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά με την προηγούμενη ανάλυση, με μόνη εξαίρεση τις ροπές κάμψης που φαίνεται να είναι ελάχιστα μεγαλύτερες στην δεξιά παρειά της σήραγγας, πράγμα αναμενόμενο, καθώς η επιβολή της φόρτισης από τον υδατόπυργο γίνεται στην δεξιά πλευρά από τον άξονα της σήραγγας

Στο σημείο αυτό παρατίθενται ενδεικτικά τα αξονικά φορτία και οι ροπές κάμψης που ασκούνται στην θεμελίωση του υδατόπυργου:



Εικ. 9.46 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων στην Θεμελίωση με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 15+010



Εικ. 9.47 : Κατανομή Ροπών Κάμψης στην Θεμελίωση με το Μοντέλο HS για Αστράγγιστη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 15+010

## Κεφάλαιο 10ο : Παραμετρική Διερεύνηση Επιφανειακών Καθιζήσεων

### 10.1. Εισαγωγικά

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί μια παραμετρική ανάλυση για την Χ.Θ. 14+067 - 14+130 με σκοπό τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τις επιφανειακές καθιζήσεις καθώς και το μέγεθος της μεταβολής που προκαλούν.

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί από τους παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν τις καθιζήσεις.

Η σύγκριση θα γίνεται για μία μεγαλύτερη και μία μικρότερη τιμή από αυτές που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν στις αναλύσεις του Κεφαλαίου 9 και πάντα με γνώμονα τις υπολογισθείσες επιφανειακές καθιζήσεις στην συγκεκριμένη θέση, σε αστράγγιστες συνθήκες με μέγιστη καθίζηση 2,1mm περίπου.

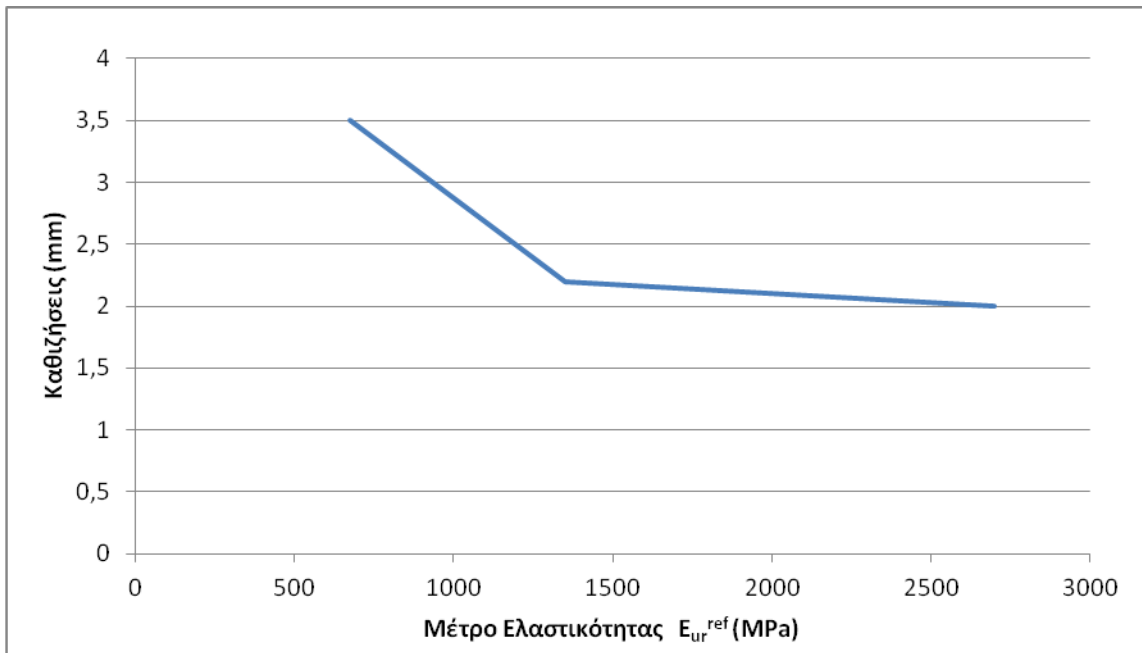
### 10.2. Μέτρο Ελαστικότητας σε Αποφόρτιση και Επαναφόρτιση $E_{ur}^{ref}$

Για τον έλεγχο του Μέτρου Ελαστικότητας του σχηματισμού, μέσα στον οποίο έγινε η διάνοιξη, επιλέχθηκαν δύο τιμές, μια μικρότερη και μια μεγαλύτερη της δεδομένης τιμής στην συγκεκριμένη θέση.

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μέτρο Ελαστικότητας $E_{ur}^{ref}$ (MPa)	Καθιζήσεις (σε mm)
675	3,5
1350	2,2
2700	2

Πίνακας 10.1 : Παραμετρική Διερεύνηση του Μέτρου Ελαστικότητας



Γράφημα 10.1 : Παρατηρούμενες Καθιζήσεις κατά την Μεταβολή του Μέτρου Ελαστικότητας

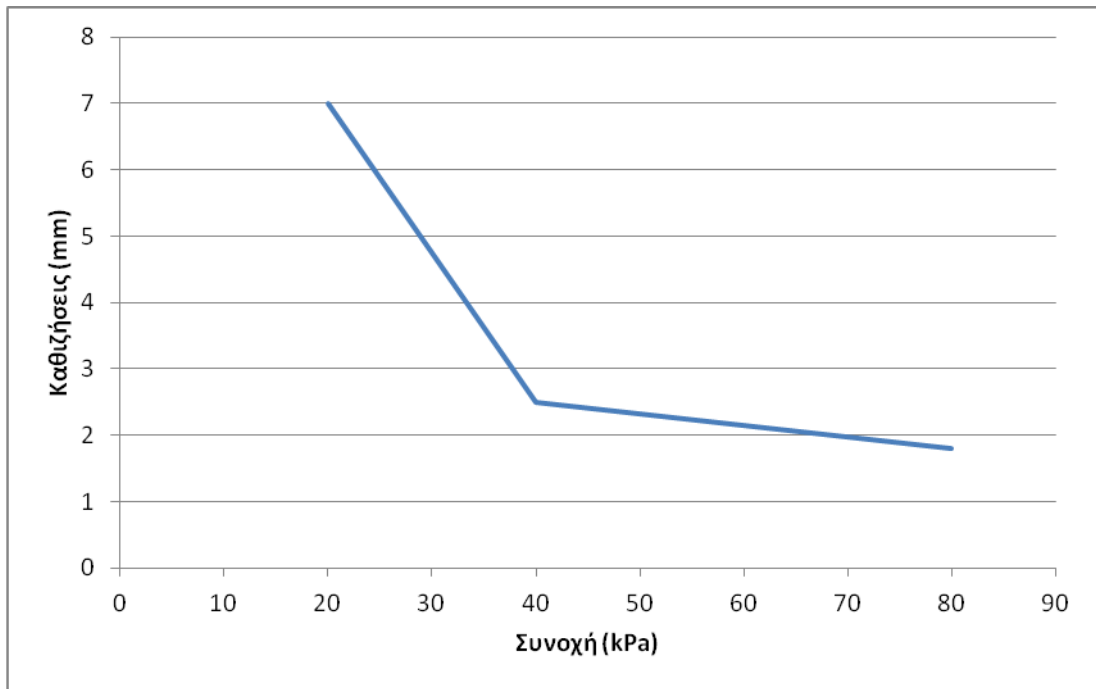
Συμπερασματικά παρατηρείται ότι, με την αύξηση του Μέτρου Ελαστικότητας μειώνονται οι καθιζήσεις σε μικρό βαθμό, όμως μετά από κάποια τιμή περαιτέρω αύξηση του Μέτρου Ελαστικότητας δεν επιφέρει ουσιαστικό αποτέλεσμα.

### 10.3. Συνοχή $c$ και Γωνία Τριβής $\phi$

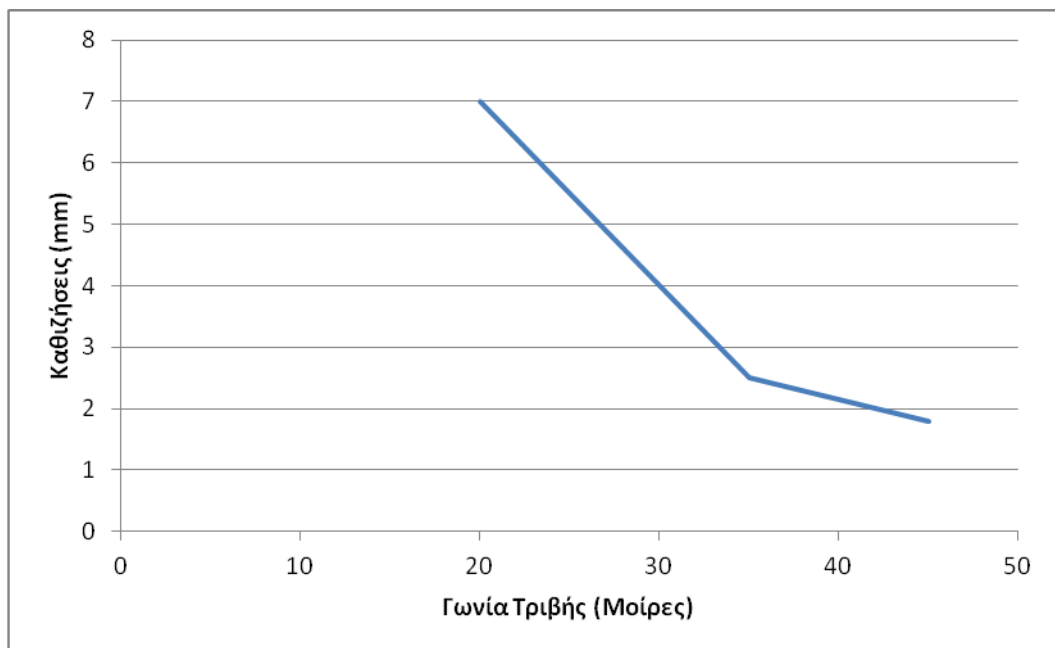
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η ανάλυση για την Γωνία Τριβής και την Συνοχή του στρώματος μέσα στο οποίο γίνεται η διάνοιξη της σήραγγας:

Συνοχή $c$ (kPa)	Γωνία Τριβής $\phi$ ( $^{\circ}$ )	Καθιζήσεις (σε mm)
20	20	7
40	35	2,2
80	45	1,8

Πίνακας 10.2 : Παραμετρική Διερεύνηση Συνοχής και Γωνίας Τριβής



Γράφημα 10.2 : Παρατηρούμενες Καθιζήσεις κατά την Μεταβολή της Συνοχής



Γράφημα 10.3 : Παρατηρούμενες Καθιζήσεις κατά την Μεταβολή της Γωνίας Τριβής

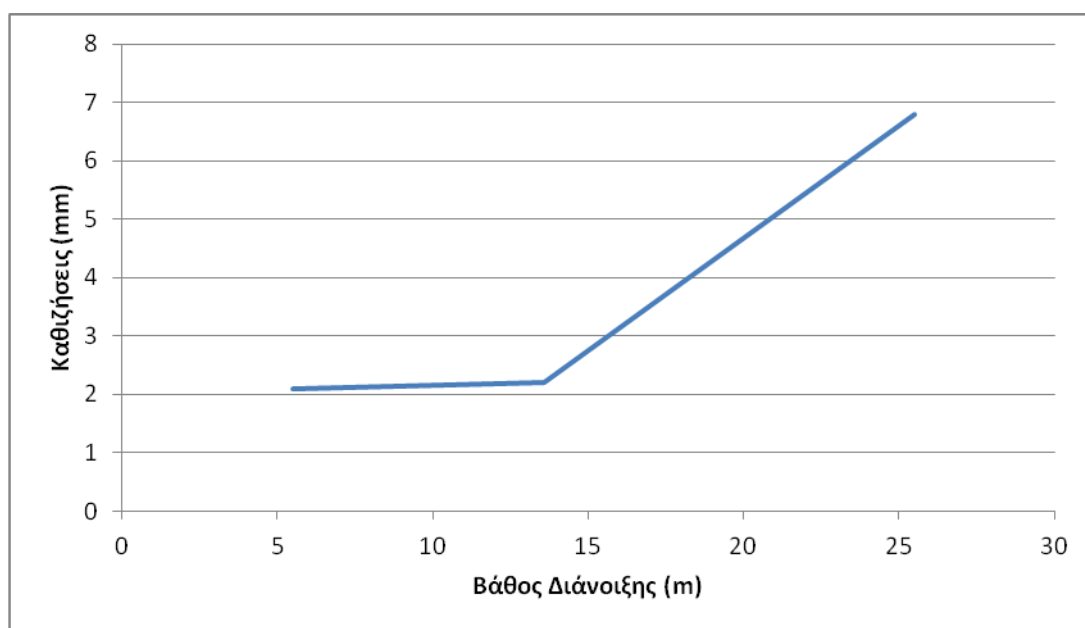
Μειώνοντας τις τιμές της Συνοχής και της Γωνίας Τριβής παρατηρείται αξιοσημείωτη αύξηση των καθιζήσεων, ενώ αυξάνοντας τις τιμές τους παρατηρείται ελαφρά μικρή μείωση των καθιζήσεων.

#### 10.4. Βάθος Διάνοιξης

Παρακάτω παρουσιάζονται στοιχεία που προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση των καθιζήσεων για διαφορετικά βάθη διάνοιξης της σήραγγας:

Βάθος Διάνοιξης (σε m)	Καθιζήσεις (σε mm)
5,5	2,1
13,6	2,2
25,5	6,8

Πίνακας 10.3 : Παραμετρική Διερεύνηση του Βάθους Διάνοιξης



Γράφημα 10.4 : Παρατηρούμενες Καθιζήσεις κατά την Μεταβολή του Βάθους Διάνοιξης

Εδώ παρατηρείται ότι, όσο αυξάνεται το βάθος διάνοιξης, τόσο αυξάνονται οι καθιζήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι αυξάνεται το φορτίο λόγω της αύξησης των υπερκειμένων με αποτέλεσμα να επιδεινώνονται οι καθιζήσεις. Για να μην είναι παρατηρήσιμο το φαινόμενο των καθιζήσεων στην επιφάνεια, το βάθος διάνοιξης πρέπει να αυξηθεί σημαντικά. Η Διεθνής Ένωση Σηραγγοποιίας (ITA) δηλώνει ότι η σχέση μεταξύ βάθους διάνοιξης και καθιζήσεων σίγουρα δεν είναι απλή, ούτε

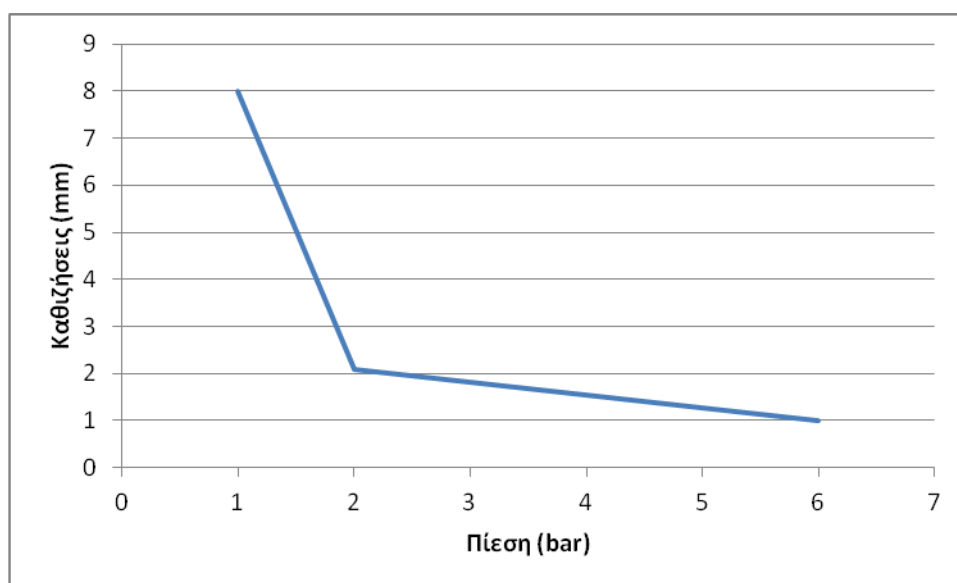
γραμμική, ενώ ρόλο παίζουν και άλλοι πολλοί παράγοντες, όπως το είδος των εδαφικών σχηματισμών και η στερεοποίηση. Συνεπώς, δεν είναι εύκολη η εξαγωγή συμπερασμάτων για την σχέση μεταξύ της μεταβολής του βάθους διάνοιξης και των επιφανειακών καθιζήσεων. Θα περίμενε κανείς ότι, με την αύξηση του βάθους, όπως είναι λογικό, θα μειωνόταν οι επιφανειακές καθιζήσεις, ωστόσο, στην συγκεκριμένη περίπτωση, με τους δεδομένους εδαφικούς σχηματισμούς και αυτές τις γεωτεχνικές συνθήκες, παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το βάθος διάνοιξης της σήραγγας, τόσο αυξάνουν οι επιφανειακές καθιζήσεις.

### 10.5. Πίεση Ενεμάτωσης

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση με διαφορετικές πιέσεις ενεμάτωσης του ουραίου κενού:

Πίεση Ενεμάτωσης (σε bar)	Καθιζήσεις (σε mm)
1	8
2	2,1
6	1

Πίνακας 10.4 : Παραμετρική Διερεύνηση της Πίεσης Ενεμάτωσης



Γράφημα 10.5 : Παρατηρούμενες Καθιζήσεις κατά την Μεταβολή της Πίεσης Ενεμάτωσης

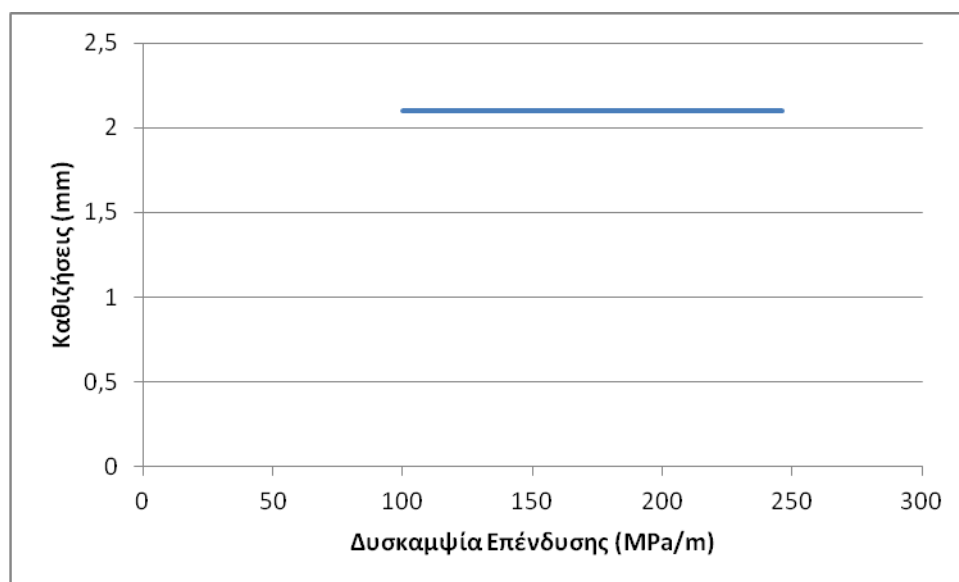
Όσο μειώνεται η πίεση ενεμάτωσης, τόσο αυξάνονται οι καθιζήσεις και σε αρκετά χαμηλές πιέσεις η αύξηση είναι δραματική.

### 10.6. Δυσκαμψία της Επένδυσης

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται πίνακας με τις αλλαγές των καθιζήσεων σε σχέση με την δυσκαμψία της επένδυσης:

Δυσκαμψία EI (σε $\text{kNm}^2/\text{m}$ )	Καθιζήσεις (σε mm)
100.000	2,1
123.000	2,1
246.000	2,1

Πίνακας 10.5 : Παραμετρική Διερεύνηση της Δυσκαμψίας της Επένδυσης



Γράφημα 10.6 : Παρατηρούμενες Καθιζήσεις κατά την Μεταβολή της Δυσκαμψίας της Επένδυσης

Από τα παραπάνω αποτελέσματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αλλαγή της δυσκαμψίας του σκυροδέματος της επένδυσης δεν επηρεάζει καθόλου το μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων.

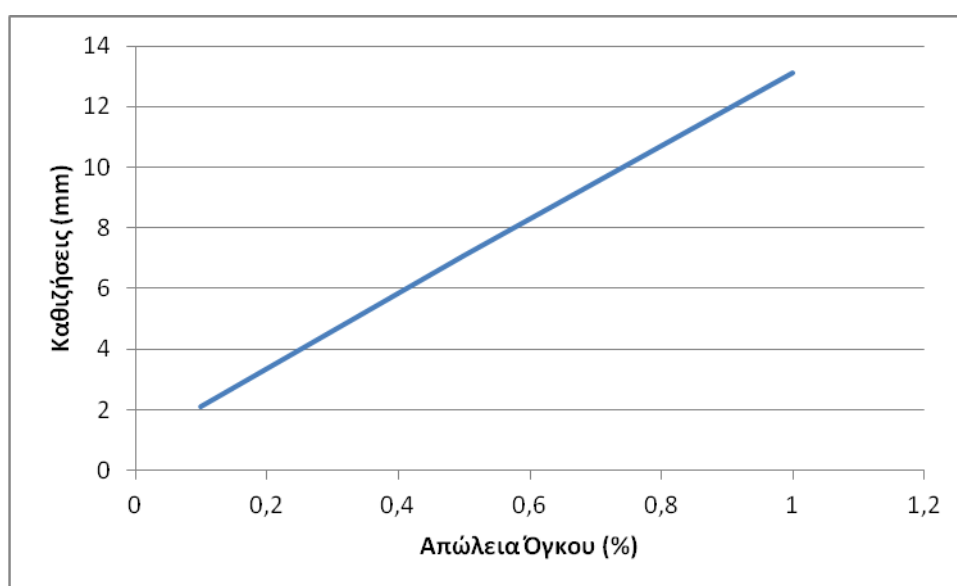


## 10.7. Απώλεια Εδαφικού Όγκου

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με το μέγεθος των καθιζήσεων ανάλογα με την μεταβολή της απώλειας εδαφικού όγκου:

Απώλεια Εδαφικού Όγκου $V_L$ (%)	Καθιζήσεις (σε mm)
0,1	2,1
0,5	7,1
1	13,2

Πίνακας 10.6 : Παραμετρική Διερεύνηση της Απώλειας Εδαφικού Όγκου



Γράφημα 10.7 : Παρατηρούμενες Καθιζήσεις κατά την Μεταβολή της Απώλειας Εδαφικού Όγκου

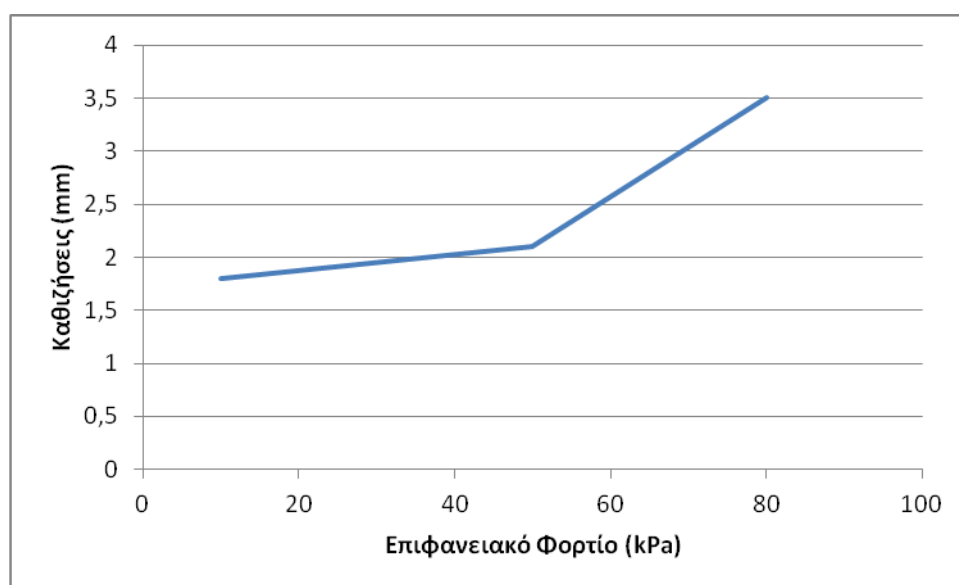
Όπως είναι αναμενόμενο, η απώλεια εδαφικού όγκου είναι παράγοντας στενά συνδεδεμένος με τις επιφανειακές καθιζήσεις και αυτό φαίνεται ξεκάθαρα και στα αποτελέσματα της ανάλυσης. Όσο αυξάνεται η απώλεια εδαφικού όγκου τόσο εντονότερες επιφανειακές καθιζήσεις εκδηλώνονται.

## 10.8. Επιφανειακά Φορτία

Σε αυτό το σημείο εξετάζεται η μεταβολή των επιφανειακών καθιζήσεων ανάλογα με την μεταβολή των επιφανειακών φορτίων των κατασκευών και της κυκλοφορίας:

Επιφανειακό Φορτίο (σε kPa)	Καθιζήσεις (σε mm)
10	1,8
50	2,1
80	3,5

Πίνακας 10.7 : Παραμετρική Διερεύνηση των Επιφανειακών Φορτίων



Γράφημα 10.8 : Παρατηρούμενες Καθιζήσεις κατά την Μεταβολή των Επιφανειακών Φορτίων

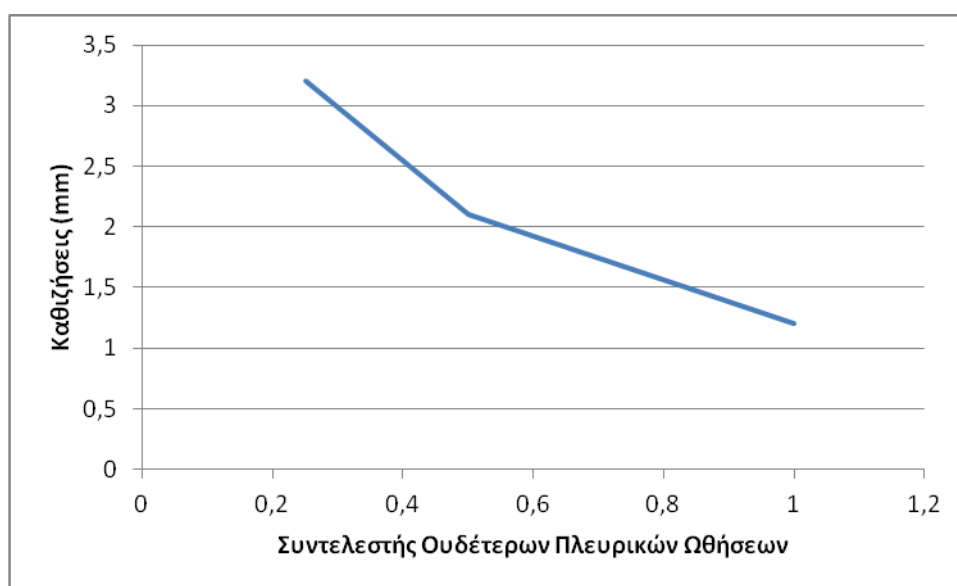
Και εδώ είναι εμφανές ότι αυξάνοντας τα επιφανειακά φορτία αυξάνεται και το μέγεθος των καθιζήσεων, σε μικρό βαθμό. Η σήραγγα βρίσκεται αρκετά κοντά στην επιφάνεια και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζεται από τις μεταβολές των επιφανειακών φορτίων.

### 10.9. Συντελεστής Ουδέτερων Πλευρικών Ωθήσεων

Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας με την μεταβολή των καθιζήσεων ανάλογα με τον Συντελεστή  $K_0$ :

Συντελεστής $K_0$	Καθιζήσεις (σε mm)
0,25	3,2
0,5	2,1
1	1,2

Πίνακας 10.8 : Παραμετρική Διερεύνηση του Συντελεστή  $K_0$



Γράφημα 10.9 : Παρατηρούμενες Καθιζήσεις κατά την Μεταβολή του Συντελεστή  $K_0$

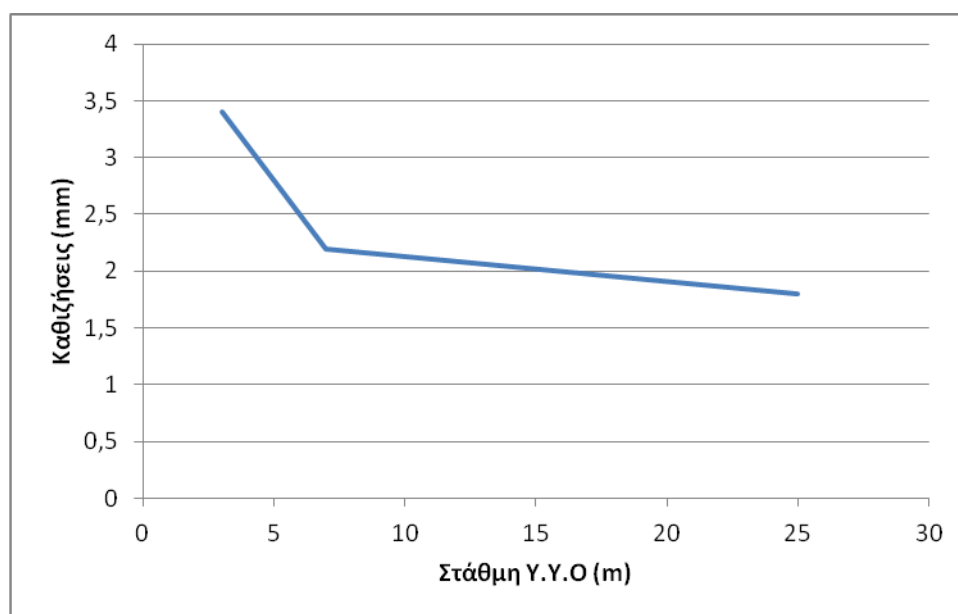
Ο Συντελεστής  $K_0$  έχει σχέση με το τασικό πεδίο που επικρατεί στην εδαφομάζα, οπότε κάθε αλλαγή αυτού έχει συνέπειες στις ασκούμενες τάσεις και άρα και στο μέγεθος των καθιζήσεων. Παρατηρείται ότι, όσο το τασικό πεδίο γίνεται υδροστατικό, τόσο μειώνονται οι καθιζήσεις.

### 10.10. Στάθμη Υπόγειου Υδροφόρου Ορίζοντα

Σημαντική είναι επίσης η παράμετρος της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η μεταβολή των καθιζήσεων σε σχέση με την στάθμη του:

Στάθμη από την Επιφάνεια (σε m)	Καθιζήσεις (σε mm)
3 (πάνω από την σήραγγα)	3,4
7 (πάνω από την σήραγγα)	2,2
25 (κάτω από την σήραγγα)	1,8

Πίνακας 10.9 : Παραμετρική Διερεύνηση της Στάθμης του Υδροφόρου Ορίζοντα



Γράφημα 10.10 : Παρατηρούμενες Καθιζήσεις κατά την Μεταβολή της Στάθμης του Υδροφόρου Ορίζοντα

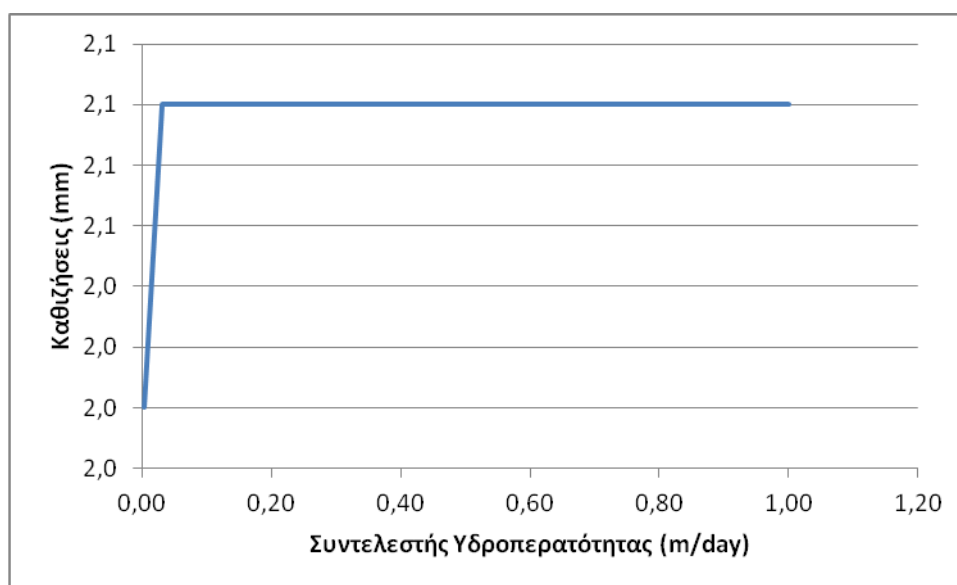
Από τα στοιχεία της ανάλυσης εξάγεται το συμπέρασμα ότι, όσο μεγαλύτερο ύψος έχει η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από την σήραγγα, δηλαδή όσο μικρότερο είναι το βάθος στο οποίο βρίσκεται, τόσο μεγαλύτερες καθιζήσεις παρατηρούνται, λόγω των μεγαλύτερων φορτίων που ασκεί το νερό στην εδαφομάζα.

### 10.11. Διαπερατότητα Εδαφικών Σχηματισμών

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την ανάλυση, με διαφορετικούς συντελεστές διαπερατότητας, του στρώματος μέσα στο οποίο γίνεται η διάνοιξη.

Συντελεστής Διαπερατότητας K (m/day)	Καθιζήσεις (mm)
0,003	2
0,031	2,1
1	2,1

Πίνακας 10.10 : Παραμετρική Διερεύνηση της Διαπερατότητας των Εδαφικών Σχηματισμών



Γράφημα 10.11 : Παρατηρούμενες Καθιζήσεις κατά την Μεταβολή της Διαπερατότητας των Εδαφικών Σχηματισμών

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι φανερό ότι η διαπερατότητα των σχηματισμών δεν επηρεάζει τις επιφανειακές καθιζήσεις.



## **Κεφάλαιο 11ο : Συμπεράσματα και Προτάσεις**

### **11.1. Ανακεφαλαίωση**

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας υπήρξε η μελέτη των καθιζήσεων που παρατηρήθηκαν κατά την κατασκευή της σήραγγας για την επέκταση της Γραμμής 2 του Μετρό της Αθήνας στο τμήμα Αργυρούπολη-Ελληνικό.

Στα κεφάλαια της εργασίας, αρχικά παρουσιάστηκαν οι μηχανισμοί που επηρεάζουν το φαινόμενο των επιφανειακών καθιζήσεων κατά την διάνοιξη αβαθών σηράγγων με την χρήση TBM και στη συνέχεια μελετήθηκαν, με την χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, οι επιφανειακές καθιζήσεις που προκλήθηκαν από την διάνοιξη της εν λόγω αβαθούς σήραγγας.

Ειδικότερα, έγινε προσομοίωση των επιφανειακών καθιζήσεων με τη χρήση προηγμένων καταστατικών μοντέλων και πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση, ώστε να προσδιοριστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκδήλωση των επιφανειακών καθιζήσεων, εστιάζοντας σε μια από τις θέσεις του υπό μελέτη τμήματος της κύριας σήραγγας.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν με βάση την μελέτη των στοιχείων στα οποία βασίσθηκε η παρούσα εργασία, παρατίθενται στη συνέχεια.

### **11.2. Πρόβλεψη Καθιζήσεων με την Χρήση Εμπειρικών και Αναλυτικών Μεθόδων**

Οι εμπειρικές και αναλυτικές μέθοδοι πρόβλεψης καθιζήσεων δίνουν μια πρώτη εικόνα για τις αναμενόμενες καθιζήσεις, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως το βάθος διάνοιξης ή η διάμετρος της σήραγγας, ωστόσο πολλές φορές τα αποτελέσματα που προκύπτει είναι πιθανό να έχει μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα.

Ανάλογα με την μέθοδο που επιλέγεται και τις εκτιμήσεις που γίνονται, τα αποτελέσματα είναι πολύ πιθανό να είναι παντελώς αναξιόπιστα.

Το παραπάνω φάνηκε σε ένα βαθμό κατά την απόπειρα υπολογισμού της απώλειας εδαφικού όγκου με την μέθοδο Peck & Schmidt, η οποία ακόμα και με δεδομένες τις μέγιστες καθιζήσεις, την γεωμετρία και το βάθος της διάνοιξης έδωσε διπλάσια τιμή απώλειας εδαφικού όγκου.

### **11.3. Αριθμητικές Αναλύσεις**

#### **11.3.1. Επιφανειακές Καθιζήσεις**

Μέσω των αριθμητικών προσομοιώσεων αποδείχθηκε ότι το μοντέλο Hardening Soil είναι ικανό να προσομοιώσει με αρκετή ακρίβεια τις πραγματικές μετρηθείσες επιφανειακές καθιζήσεις για κάθε Χιλιομετρική Θέση της κύριας σήραγγας.

Αυτό που παρατηρήθηκε σε όλες τις αναλύσεις είναι ότι, οι καμπύλες επιφανειακών καθιζήσεων που υπολογίστηκαν για αστράγγιστες συνθήκες παρουσιάζουν τιμές μέγιστων καθιζήσεων εντός των μετρηθέντων ορίων. Το παραπάνω συμβαίνει διότι οι στραγγισμένες αναλύσεις δεν λαμβάνουν υπόψη την πίεση πόρων της εδαφομάζας με αποτέλεσμα να ασκούνται μόνο ενεργές τάσεις.

Οι αστράγγιστες αναλύσεις εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύουν καλύτερα, τις καθιζήσεις που εκδηλώνονται κατά την διάρκεια της υπόγειας διάνοιξης, ενώ οι στραγγισμένες παρουσιάζουν μια μακροχρόνια εικόνα του προφίλ των καθιζήσεων που σχετίζεται κυρίως με φαινόμενα στερεοποίησης της εδαφομάζας.

#### **11.3.2. Κατανομές Μετακινήσεων**

Από την ενδελεχή διερεύνηση των μετακινήσεων για κάθε μια ανάλυση προκύπτει ότι Μοντέλο MC παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με το Μοντέλο HS. Αυτό συμβαίνει διότι το μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιεί το Μοντέλο HS είναι πολύ μεγαλύτερο κατά την αποφόρτιση, με αποτέλεσμα η εδαφομάζα να έχει μεγαλύτερη αντοχή οπότε εμφανίζει πολύ μικρότερες μετακινήσεις.

Επιπρόσθετη απόρροια την χρήσης του ίδιου Μέτρου Ελαστικότητας στο Μοντέλο MC είναι η ανύψωση του δαπέδου της σήραγγας καθώς η εδαφομάζα εκεί παρουσιάζει μικρότερη αντοχή.

Η ανύψωση δαπέδου είναι πιθανό να οδηγήσει σε μικρότερες επιφανειακές καθιζήσεις λόγω της αποτόνωσης των τάσεων στην στέψη της σήραγγας, όμως κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε εδώ με την χρήση του Μοντέλου MC.

Στην περίπτωση των αστράγγιστων συνθηκών για το Μοντέλο MC παρατηρείται μεγαλύτερη ανύψωση δαπέδου πιθανόν λόγω της ύπαρξης πίεσης πόρων.



Στην θέση όπου υπάρχει η δεξαμενή και ο υδατόπυργος πάνω από τον άξονα της σήραγγας παρατηρήθηκε αστοχία του επιφανειακού στρώματος των τεχνητών επιχώσεων σε αστράγγιστη ανάλυση. Αυτό συνέβη λόγω των χαμηλών μηχανικών χαρακτηριστικών του στρώματος. Η ίδια ανωμαλία δεν παρατηρήθηκε για στραγγισμένη ανάλυση λόγω της απουσίας της πίεσης πόρων. Επειδή ο υπολογισμός του πραγματικού προφίλ καθιζήσεων καθίσταται δυσχερής, επιλέχθηκε να τοποθετηθεί πλάκα θεμελίωσης κάτω από τις δύο παραπάνω υπέργειες κατασκευές με σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου στον εδαφικό σχηματισμό ώστε να μην αστοχεί. Με την εφαρμογή του παραπάνω τεχνάσματος είναι δυνατό να υπολογιστούν με επιτυχία οι μέγιστες καθιζήσεις στην συγκεκριμένη θέση. Στην περίπτωση του υδατόπυργου που βρίσκεται σε απόσταση από τον άξονα της σήραγγας δεν αλλοιώνεται σημαντικά το προφίλ καθιζήσεων και ειδικότερα την τιμή της μέγιστης καθίζησης που παρατηρείται ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας.

Επιπρόσθετα στις αναλύσεις για τις περιοχές ενδιαφέροντος που αναφέρθηκαν παραπάνω, παρατηρήθηκε κάποια ελάχιστη ανύψωση του δαπέδου της σήραγγας. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στο ότι για κάθε γεωυλικό ορισμένες παράμετροι του Μοντέλου HS όπως αυτή του  $R_f$ , και  $m$  για ορισμένες τιμές του  $p^{ref}$  είναι συγκεκριμένες και πρέπει να εξάγονται από εργαστηριακές δοκιμές. Επειδή όμως συνήθως αυτά τα δεδομένα είναι δυσεύρετα οι τιμές λαμβάνονται αυθαίρετα (όπως προτείνονται από κάθε λογισμικό) με σκοπό την διευκόλυνση των αναλύσεων. Ο δεύτερος λόγος έγκειται στην συμπεριφορά κράτυνσης των γεωυλικών καθώς και στην υψηλή γωνία διασταλτικότητας των υποκείμενων στη σήραγγα, σχηματισμών καθώς και στη μεγάλη διαφορά αντοχής μεταξύ των στρωμάτων. Εκτός των δύο παραπάνω λόγων συτή η ανύψωση δαπέδου μπορεί να οφείλεται και στην ασυμβατότητα των γεωτεχνικών δεδομένων στο λογισμικό που έχουν ληφθεί από την μελέτη.

### **11.3.3. Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων (σ'3)**

Οι κατανομές των ελάχιστων κύριων ενεργών όλων των αναλύσεων εμφανίζονται ακτινικά στην περιφέρεια της σήραγγας. Αυτή η χαλάρωση του τασικού πεδίου σημαίνει ότι η εδαφομάζα αδυνατεί να αναλάβει περισσότερες μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις και οδηγείται στην πλαστικοποίησή της γύρω από την σήραγγα.

Το Μοντέλο MC εμφανίζει, σε κάποιο ποσοστό, μεγαλύτερες ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις σε σχέση με το Μοντέλο HS, όπως είναι προφανές, λόγω της μικρότερης αντοχής της εδαφομάζας που παρουσιάζει.

Δεν παρουσιάζονται ουσιώδεις διαφορές ανάμεσα στις αναλύσεις με αστράγγιστες και στραγγισμένες συνθήκες με εξαίρεση μια ελάχιστη μεταβολή των μέγιστων τιμών.

Στις τελευταίες αναλύσεις για την Χ.Θ. 14+950 - 15+051 και στις δύο θέσεις ενδιαφέροντος που υπάγονται σε αυτή, παρατηρείται μια συγκέντρωση ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στο δάπεδο της σήραγγας που οφείλεται στην πλαστικοποίηση της εδαφομάζας λόγω της ανύψωσης δαπέδου.

#### **11.3.4. Εντατικά Μεγέθη στην Επένδυση**

Στο Μοντέλο MC, τα αξονικά φορτία παρουσιάζονται ομοιόμορφα κατανομημένα σε όλη της περιφέρεια της σήραγγας λόγω της ομοιόμορφης κατανομής των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων.

Το Μοντέλο HS παρουσιάζει την ίδια ομοιομορφία στη κατανομή όμως οι τιμές των μέγιστων αξονικών φορτίων είναι αρκετά μικρότερες. Αυτό αποδίδεται στην μεγαλύτερη αντοχή της εδαφομάζας που χρησιμοποιείται σε σχέση με το Μοντέλο MC.

Τα αξονικά φορτία ανάμεσα σε στραγγισμένες και αστράγγιστες αναλύσεις δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη διαφορά παρά μόνο ότι τα μέγιστα φορτία στις στραγγισμένες αναλύσεις είναι ελάχιστα μεγαλύτερα λόγω της απουσίας πίεσης πόρων. Οπότε συμπεραίνεται ότι ο τύπος της ανάλυσης δεν παίζει σημαντικό ρόλο για τον σχεδιασμό της επένδυσης, αναφερόμενοι πάντα σε αβαθείς σήραγγες όπου το φορτίο του νερού είναι σχετικά μικρό λόγω του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα.

Στις τρεις τελευταίες αναλύσεις, όπου εμφανίζεται η ανύψωση του δαπέδου της σήραγγας, υπάρχει μια τοπική μείωση των αξονικών φορτίων καθώς η εδαφομάζα αποτονώνεται σε εκείνη την περιοχή.

Όσον αφορά τις ροπές κάμψης, η κατανομή τους στο Μοντέλο MC παίρνει αυτή την μορφή καθώς η φόρτιση της επένδυσης από την πλαστικοποιημένη εδαφομάζα γίνεται στην στέψη και στο δάπεδο από την ανύψωση.

Επιπρόσθετα επειδή όπως ήδη έχει αναφερθεί το μέτρο ελαστικότητας στο Μοντέλο MC είναι ίδιο κατά την φόρτιση και αποφόρτιση η αντοχή της εδαφομάζας

σε σχέση με το Μοντέλο HS είναι πολύ μικρότερη και κατά συνέπεια οι τιμές των μέγιστων ροπών στις αναλύσεις με το Μοντέλο MC είναι αρκετά μεγαλύτερες.

Στο Μοντέλο HS, λόγω της προσομοίωσης μεγαλύτερης αντοχής της εδαφομάζας, εμφανίζονται ροπές σε μικρές τιμές, κυρίως στην στέψη, όπου υπάρχει πλαστικοποίηση της εδαφομάζας, ενώ στην περιφέρεια της σήραγγας οι τιμές θεωρούνται αμελητέες.

Εξαιρέση αποτελούν οι Χ.Θ. 14+950 - 15+051 μαζί με τις δύο θέσεις ενδιαφέροντος (υδατόπυργος - δεξαμενή νερού), όπου εμφανίζονται ροπές στις παρειές και στο δάπεδο της σήραγγας λόγω της ανύψωσης.

Όπως και τα αξονικά φορτία έτσι και οι ροπές κάμψης εμφανίζουν ελάχιστα μικρότερες τιμές για τις στραγγισμένες αναλύσεις καθώς οι τάσεις που ασκούνται στους σχηματισμούς είναι μόνο ενεργές με αποτέλεσμα να φορτίζεται περισσότερο η επένδυση από την εδαφομάζα που έχει διαρρεύσει.

Γενικότερα όμως, λόγω της μορφής της φόρτισης και της γεωμετρίας της σήραγγας, σε όλες τις αναλύσεις, οι τιμές των ροπών κάμψης που εμφανίζονται στη επένδυση δεν θεωρούνται σημαντικές.

#### **11.4. Παραμετρική Ανάλυση**

##### **11.4.1. Μέτρο Ελαστικότητας σε Αποφόρτιση και Επαναφόρτιση $E_{ur}^{ref}$**

Κατά την μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε αποφόρτιση και επαναφόρτιση του σχηματισμού, μέσα στον οποίο γίνεται η διάνοιξη, οι μεταβολές στις επιφανειακές καθιζήσεις δεν έχουν μεγάλο εύρος καθώς παρεμβάλλονται και άλλα στρώματα που μειώνουν την επιρροή του συγκεκριμένου στρώματος μέχρι την επιφάνεια.

##### **11.4.2. Συνοχή $c$ και Γωνία Τριβής $\phi$**

Με την αύξηση της συνοχής και της γωνίας τριβής, του στρώματος μέσα στο οποίο έγινε η διάνοιξη, παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει μεγάλη βελτίωση των επιφανειακών καθιζήσεων. Ωστόσο με τον υποδιπλασιασμό των παραπάνω, οι καθιζήσεις αυξήθηκαν αρκετά.

### **11.4.3. Βάθος Διάνοιξης**

Η μεταβολή του βάθους διάνοιξης της σήραγγας εμφάνισε ανάλογη μεταβολή των τιμών των καθιζήσεων, δηλαδή παρατηρήθηκε ότι, όσο αυξάνεται το βάθος διάνοιξης, τόσο αυξάνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι καθώς αυξάνεται το βάθος αυξάνονται τα υπερκείμενα της σήραγγας με αποτέλεσμα να δημιουργούνται όλο και μεγαλύτερες τάσεις που οδηγούν σε ανάλογου μεγάλου μεγέθους επιφανειακές καθιζήσεις. Για να εξαλειφθεί η επίδραση της διάνοιξης της σήραγγας στην επιφάνεια, το βάθος πρέπει να αυξηθεί σημαντικά.

Παρότι η λογική οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, με την αύξηση του βάθους, θα μειώνονται οι επιφανειακές καθιζήσεις, η παραμετρική ανάλυση έδειξε ότι, στην συγκεκριμένη περίπτωση, με τους δεδομένους εδαφικούς σχηματισμούς και αυτές τις γεωτεχνικές συνθήκες, οι επιφανειακές καθιζήσεις αυξάνονται με την αύξηση του βάθους διάνοιξης της σήραγγας. Δηλαδή, τα αποτελέσματα της ανάλυσης συμφωνούν με την άποψη ότι, η σχέση μεταξύ του βάθους διάνοιξης και των επιφανειακών καθιζήσεων δεν είναι γραμμική.

### **11.4.4. Πίεση Ενεμάτωσης**

Η κατάλληλη πίεση με την οποία εισπνέζεται το ένεμα ανάμεσα στην εδαφομάζα και στην επένδυση παίζει μεγάλο ρόλο στο μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων που είναι πιθανόν να εκδηλωθούν. Εδώ παρατηρείται ότι, με την μείωση της πίεσης έχουμε δραματική αύξηση των επιφανειακών καθιζήσεων. Τουναντίον η υπερβολική αύξηση της πίεσης μάλλον δεν θα έχει ιδιαίτερη επίδραση στην μείωση των καθιζήσεων.

### **11.4.5. Δυσκαμψία της Επένδυσης**

Η μεταβολή της δυσκαμψίας της επένδυσης δεν φαίνεται να συνδέεται άμεσα με την μεταβολή στις επιφανειακές καθιζήσεις καθώς δεν παρατηρήθηκε καμία αλλαγή κατά την παραμετρική ανάλυση. Αυτό οφείλεται και στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η προσομοίωση της διάνοιξης στο πρόγραμμα PLAXIS.

#### **11.4.6. Απώλεια Εδαφικού Όγκου**

Καθίσταται προφανές ότι, όσο αυξάνεται η απώλεια του εδαφικού όγκου κατά την εκσκαφή τόσο μεγαλύτερες επιφανειακές καθιζήσεις θα παρατηρούνται.

#### **11.4.7. Επιφανειακά Φορτία**

Με την αύξηση των επιφανειακών φορτίων και των φορτίων κυκλοφορίας παρατηρείται μια μικρή επιδείνωση των επιφανειακών καθιζήσεων λόγω της αύξησης των τάσεων στους σχηματισμούς, όπως είναι αναμενόμενο.

#### **11.4.8. Συντελεστής Ουδέτερων Πλευρικών Ωθήσεων**

Αξιοσημείωτη είναι και η μεταβολή των επιφανειακών καθιζήσεων με την μεταβολή του συντελεστή  $K_0$ . Καθώς ο συντελεστής αυξάνεται και τείνει προς το 1, δηλαδή το τασικό πεδίο γίνεται υδροστατικό, τόσο οι καθιζήσεις μειώνονται, καθώς υπάρχει ισορροπία των ελάχιστων και μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων που ασκούνται στην εδαφομάζα.

#### **11.4.9. Στάθμη Υπόγειου Υδροφόρου Ορίζοντα**

Από την παραμετρική ανάλυση εξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερο ύψος έχει η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από την σήραγγα τόσο μεγαλύτερες καθιζήσεις παρατηρούνται λόγω των μεγαλύτερων φορτίων που επιβάλλει το νερό.

#### **11.4.10. Διαπερατότητα Εδαφικών Σχηματισμών**

Η διαπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών δεν φαίνεται να επηρεάζει άμεσα το μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων καθώς δεν υπήρξε καμία μεταβολή σε αυτές, με την μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας  $k$ .

### 11.5. Προτάσεις

Δεδομένης της αρκετά μεγάλης ακρίβειας του καταστατικού μοντέλου Hardening Soil, προτείνεται η συλλογή δεδομένων για την χρήση ενός ακόμα πιο εξελιγμένου μοντέλου, του Hardening Soil with Small Stain Stiffness, που δίνει την δυνατότητα της προσομοίωσης της συμπεριφοράς της εδαφομάζας κάτω από ανακυκλιζόμενη φόρτιση με σκοπό την διαφοροποίηση μεταξύ τους.

Προτείνεται επίσης να διερευνηθεί, περαιτέρω, η συμπεριφορά της επένδυσης των σηράγγων κατά την απώλεια όγκου όχι ως μονολιθικός φορέας.

Επιπρόσθετα μια τρισδιάστατη ανάλυση (3D) μπορεί να δώσει πολλά παραπάνω στοιχεία για τις επιφανειακές καθιζήσεις καθώς παρέχει την δυνατότητα προσομοίωσης πολλών επιπλέον παραμέτρων όπως η πίεση που ασκείται στο μέτωπο.

Τέλος, σημαντική θα ήταν η μελέτη της ταχύτητας ροής και σκλήρυνσης του ενέματος στο ουραίο κενό καθώς δεν υπάρχουν πολλά δεδομένα για αυτήν την διαδικασία και όπως προκύπτει από τις παραπάνω αναλύσεις, ο παράγοντας του ενέματος είναι καθοριστικός για την εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική Βιβλιογραφία

Γραμματικόπουλος Ι., Ανδρεάδου - Μάνου Ν., Χατζηγώγος Θ., *Εδαφομηχανική*, Εκδόσεις Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη, 2016.

Καββαδάς Μιχαήλ, *Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων*, Αθήνα, 2005.

Κωστόπουλος Σπύρος, *Σήραγγες*, Εκδοτικός Όμιλος Ίων, Αθήνα, 2013.

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, *Βελτίωση Γεωτεχνικής Συμπεριφοράς Γεωλογικών Σχηματισμών*, Αθήνα, 2015.

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, *Εδαφομηχανική & Στοιχεία Θεμελιώσεων*, Αθήνα, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2015.

Νομικός Παύλος, *Εισαγωγή στην Μηχανική Πετρωμάτων*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2018.

Παπαχαρίσης Ν., Γραμματικόπουλος Ι., Ανδρεάδου - Μάνου Ν., *Γεωτεχνική Μηχανική*, Εκδόσεις Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη, 2015.

Σοφιανός Αλέξανδρος, *Διάνοιξη Σηράγγων*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2018.

Σοφιανός Αλέξανδρος, *Υποστήριξη Υπογείων Έργων*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2018.

Σοφιανός Αλέξανδρος, Νομικός Παύλος, *Στοιχεία Οπλισμένου Σκυροδέματος Σημειώσεις Διαλέξεων*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2014.

### Ξένη Βιβλιογραφία

Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu S., 2008, *Mechanized Tunnelling in Urban Areas*, Taylor & Francis Group, London.

Shirlaw N., & Busbridge J.R., & Yi X., 1994, *Consolidation Settlements Over Tunnels: A review*, Ontario, Canada, 253-265.

Loganathan, N & Poulos, Harry., 1998, *Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays*, Journal of Geotechnic.

Leca E. & New B, 2007, *Settlements Induced by Tunneling in Soft Ground*, ITA - AITES World Tunnel Congress, Prague.

## **Μελέτες Έργων**

Όμικρον Κάππα Μελετητική, Έκθεση Γεωτεχνικής Αξιολόγησης, *Κύρια Σήραγγα Διανοιγμένη με Μηχάνημα TBM Τμήματα από Σταθμό Αργυρούπολη - Φρέαρ Ελληνικού & από Φρέαρ Ελληνικού - Σταθμό Ελληνικό (Μεσοδιαστήματα 7 & 8 Κύριας Σήραγγας).*

Όμικρον Κάππα Μελετητική, Ανάδρομος Υπολογισμός, *Φάκελος Μεσοδιαστημάτων 8 (Σταθμός Ελληνικού - Φρέαρ Ελληνικού) και 7 (Φρέαρ Ελληνικού - Σταθμός Αργυρούπολης ) και Προχώρησης TBM.*

## **Εγχειρίδια**

Plaxis, 2019, Material Models Manual

Plaxis, 2015, Tutorial 5, *Settlements Due to Tunnel Construction*

## **Διατριβές - Μελέτες**

Γκίκας Βασίλης, *Διερεύνηση των Καθιζήσεων του Μετρό της Θεσσαλονίκης με Προηγμένα Καταστατικά Πρότυπα*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2012.

Κουκουτάς Στυλιανός, *Επιτελεστικότητα Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής Αβαθών Σηράγγων*, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.

Κυριακόπουλος Θεόδωρος, *Αριθμητική Διερεύνηση της Επιρροής της Ενεμάτωσης και της Κωνικότητας της Ασπίδας του TBM στη Μηχανοποιημένη Εκσκαφή Σηράγγων*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2017.

Μπενάρδος Ανδρέας, *Εκτίμηση Επικινδυνότητας κατά την Όρυξη Σηράγγων με Μηχανές Ολομέτωπης Κοπής*, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001.

Ρίζος Παντελής, *Καθιζήσεις Λόγω της Διάνοιξης Δίδυμης Σήραγγας του Μετρό της Θεσσαλονίκης στο Τμήμα Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός-Αγία Σοφία*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.



**Ιστοσελίδες Διαδικτύου**

<https://www.ametro.gr/> (Αττικό Μετρό, 2019)

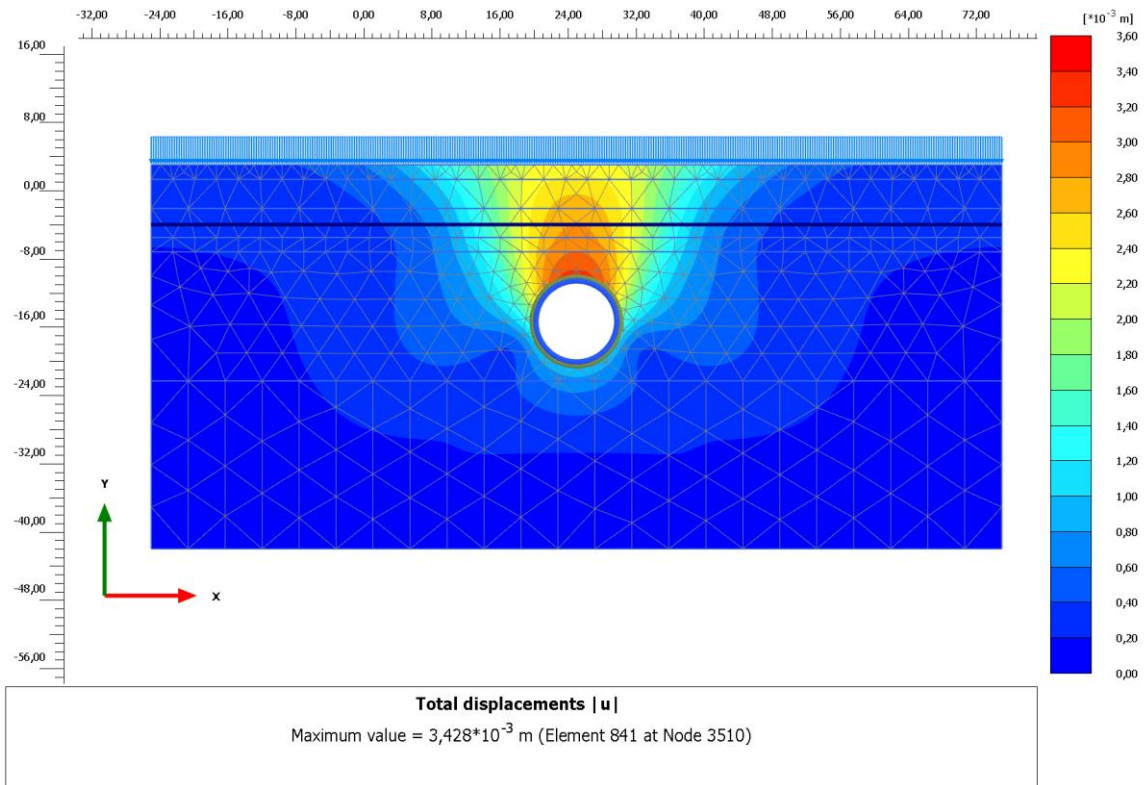
<https://www.therobbinscompany.com/> (The Robbins Company, 2019)

<https://www.herrenknecht.com/en/> (Herrenknecht AG, 2019)

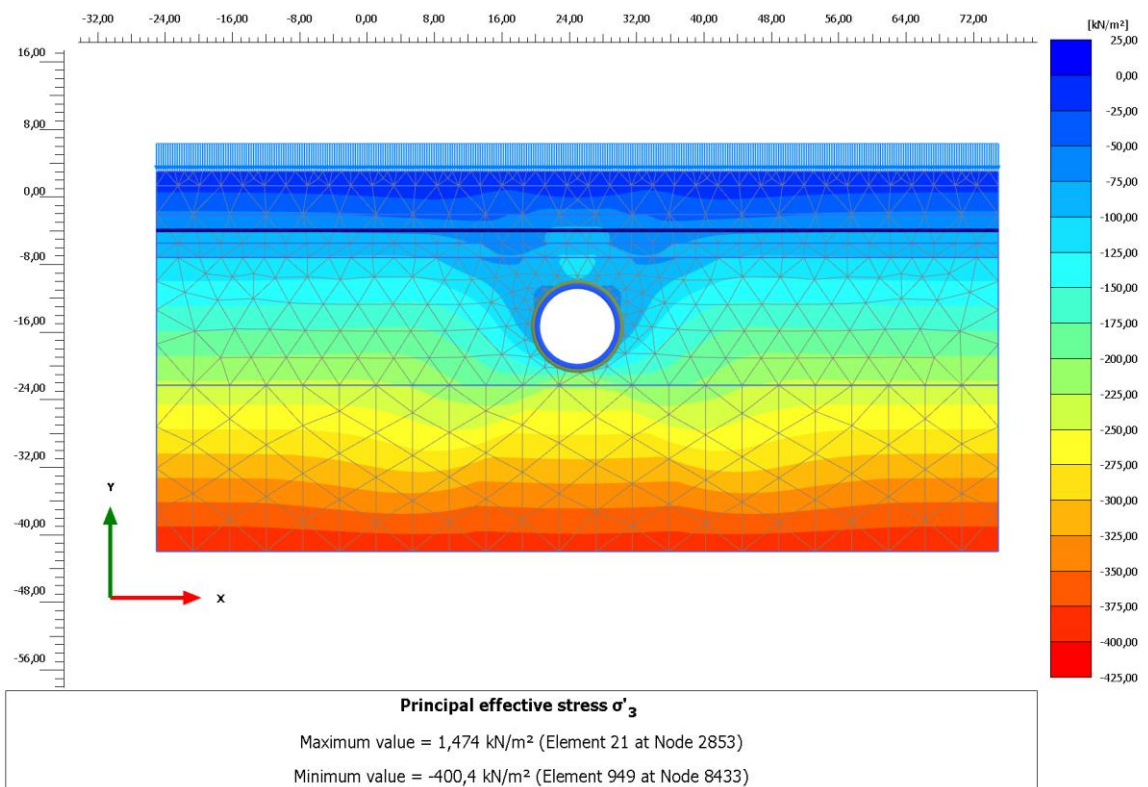
<https://www.tideway.london/> (Tideway, 2019)



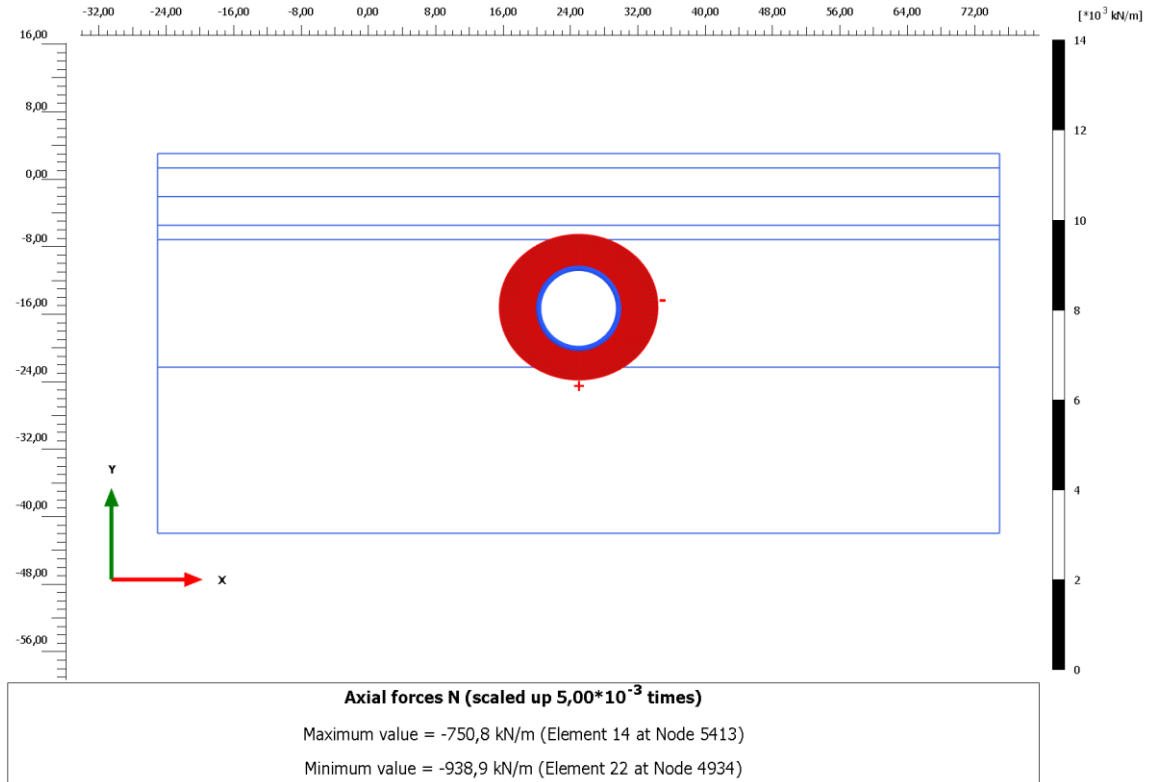
## Παράρτημα «Α» : Αποτελέσματα Αναλύσεων υπό Στραγγισμένες Συνθήκες



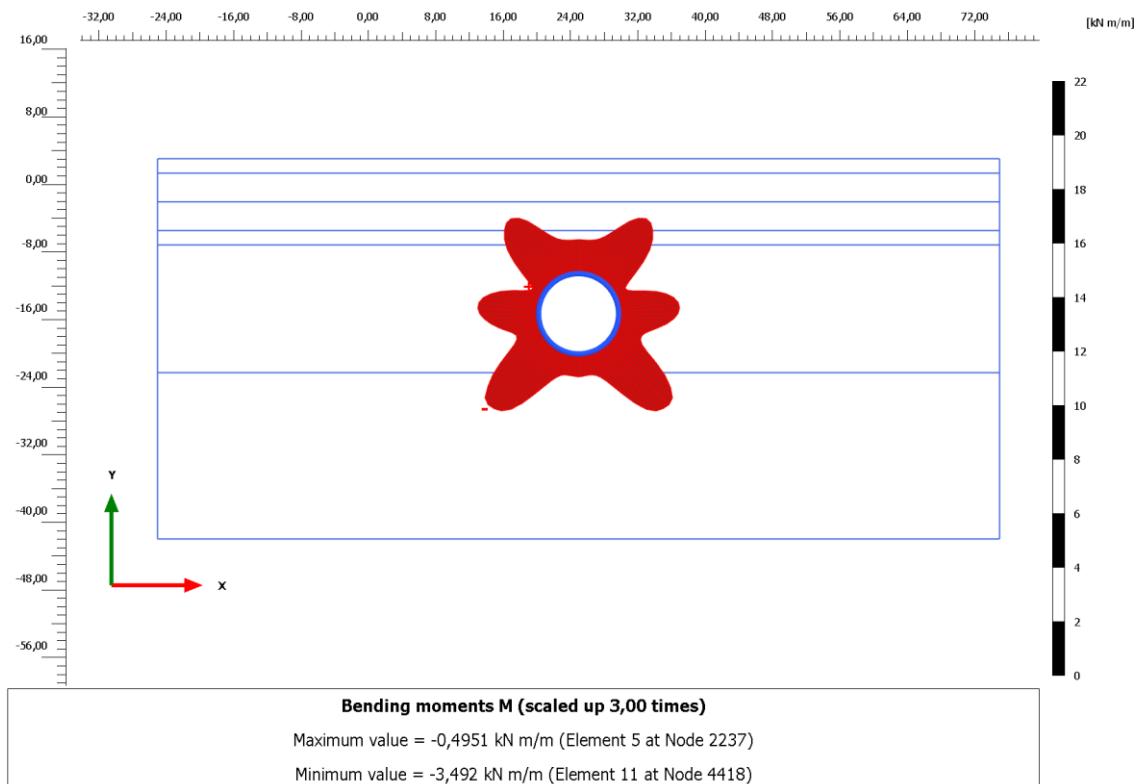
Εικ. Α.1 : Κατανομή Μετακινήσεων σε Στραγγισμένες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+067 - 14+130



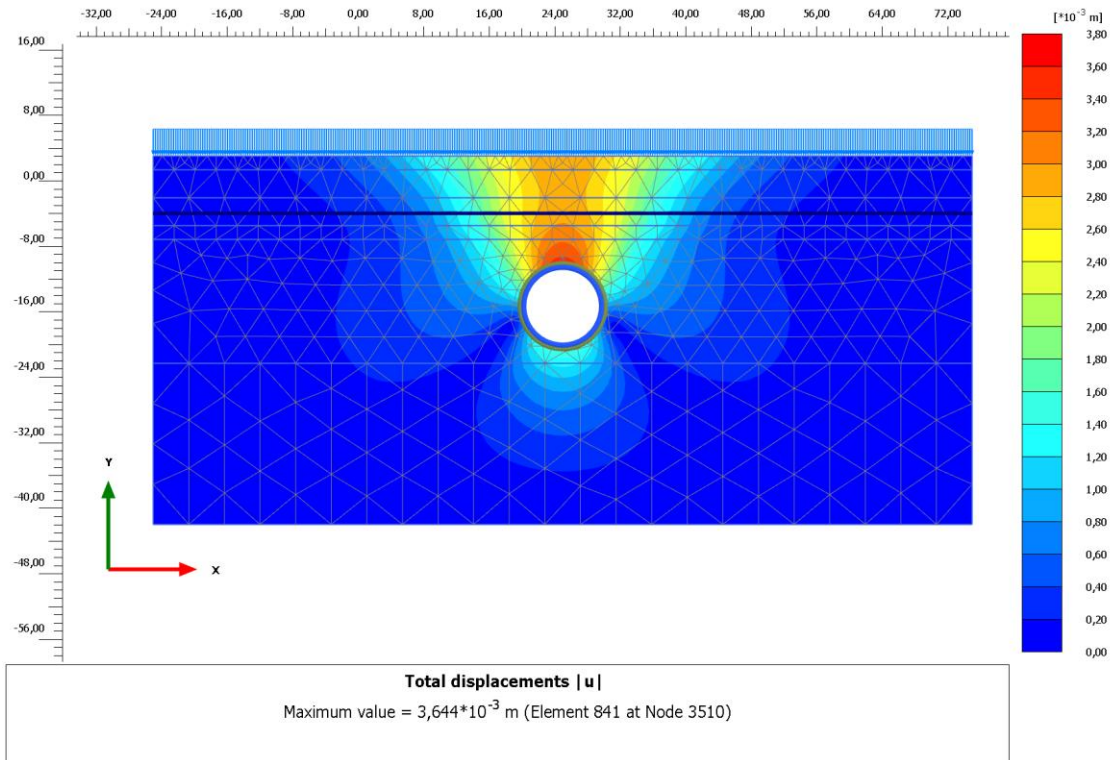
Εικ. Α.2 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων σε Στραγγισμένες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+067 - 14+130



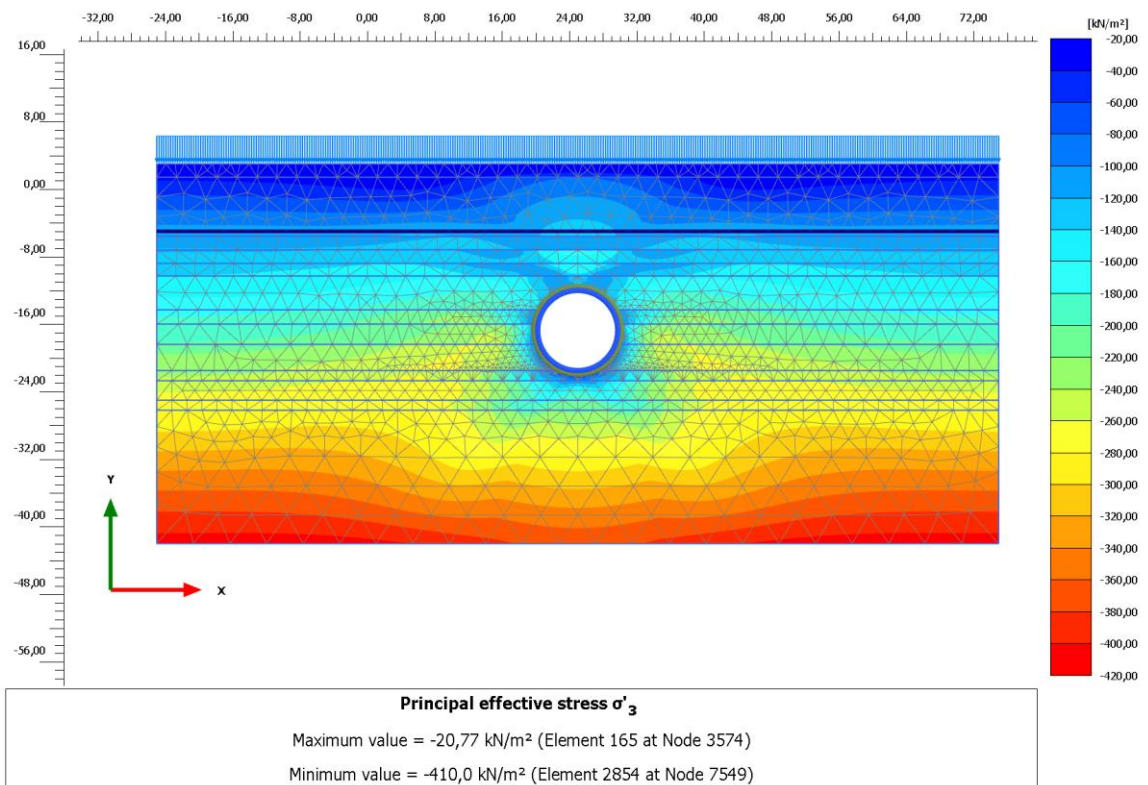
Εικ. Α.3 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένη Ανάλυση περι την Χ.Θ. 14+067 - 14+130



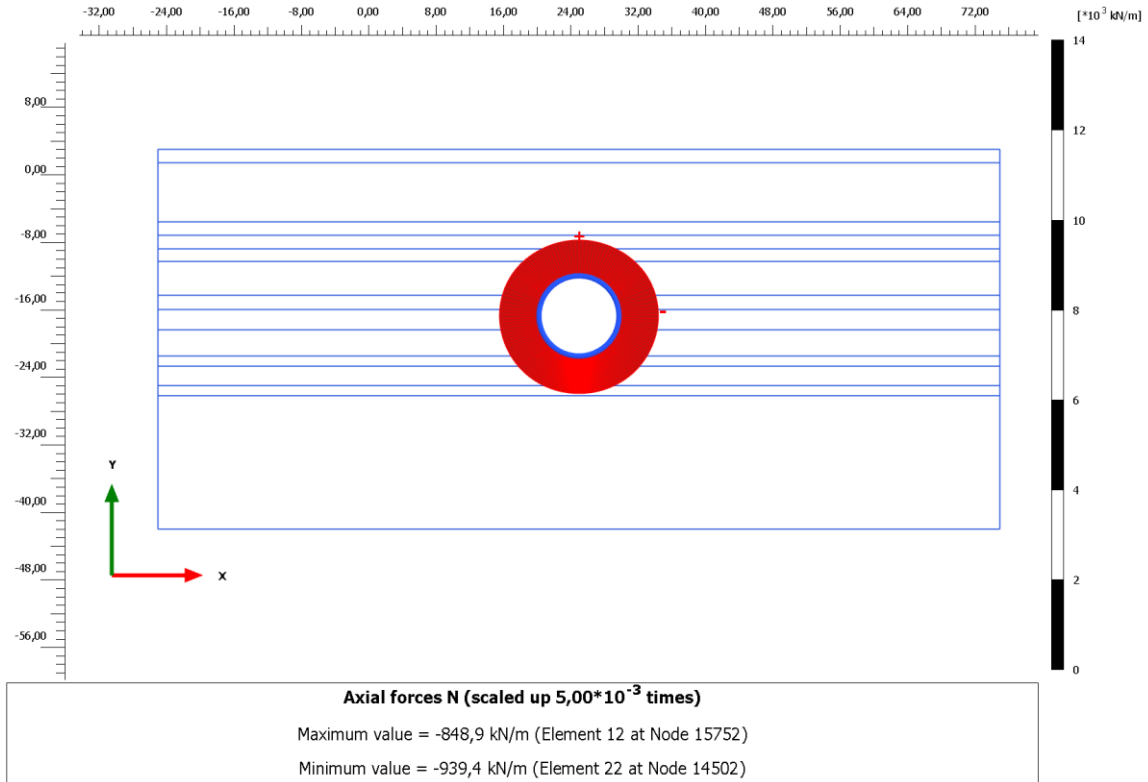
Εικ. Α.4 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένη Ανάλυση περι την Χ.Θ. 14+067 - 14+130



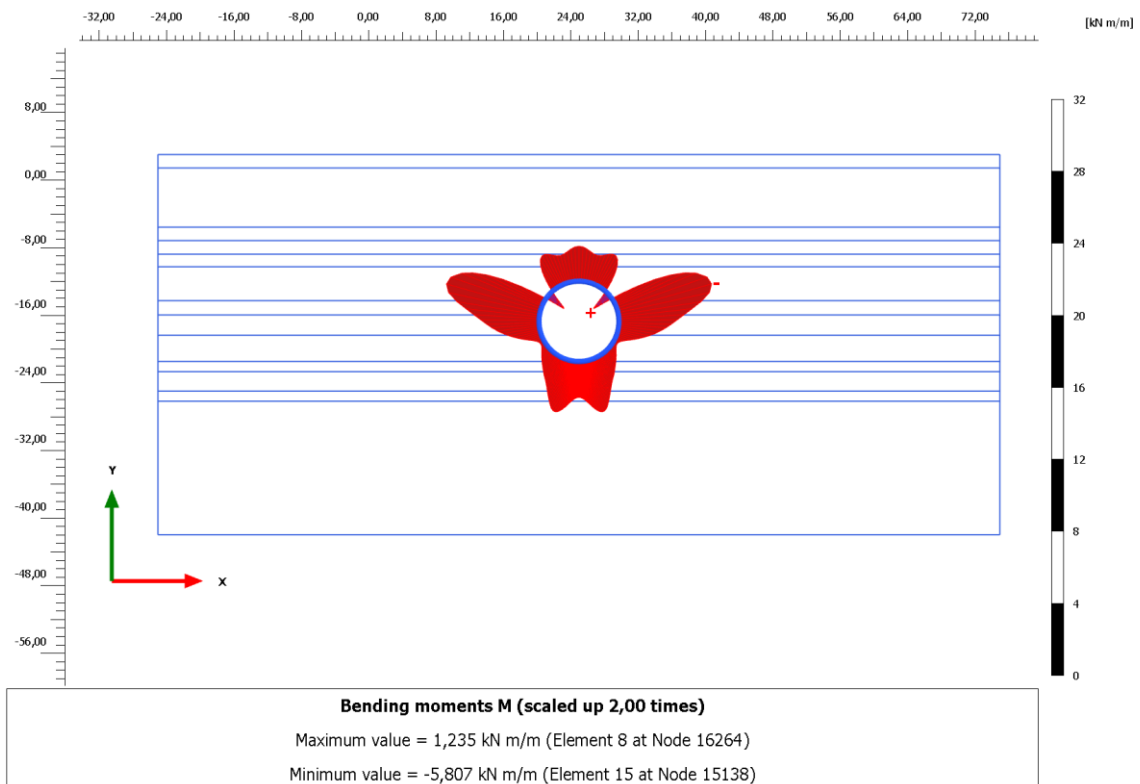
Εικ. Α.5 : Κατανομή Μετακινήσεων σε Στραγγισμένες Συνθήκες για το μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+130 - 14+735



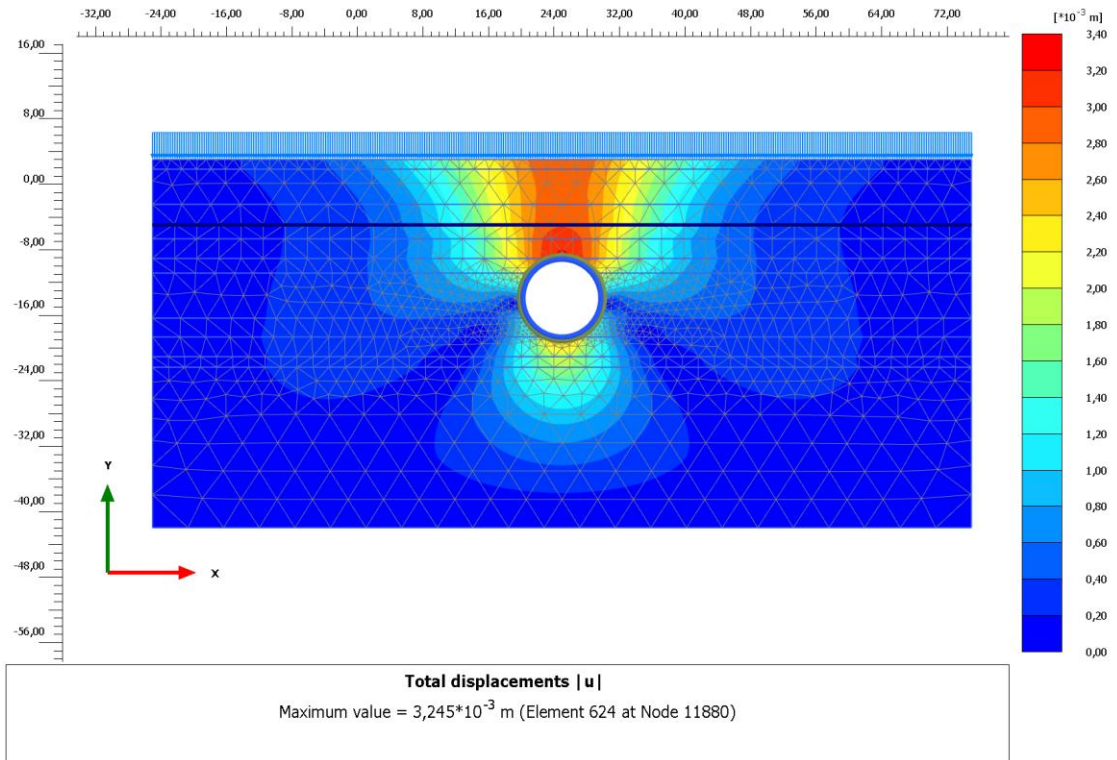
Εικ. Α.6 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων σε Στραγγισμένες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+130 - 14+735



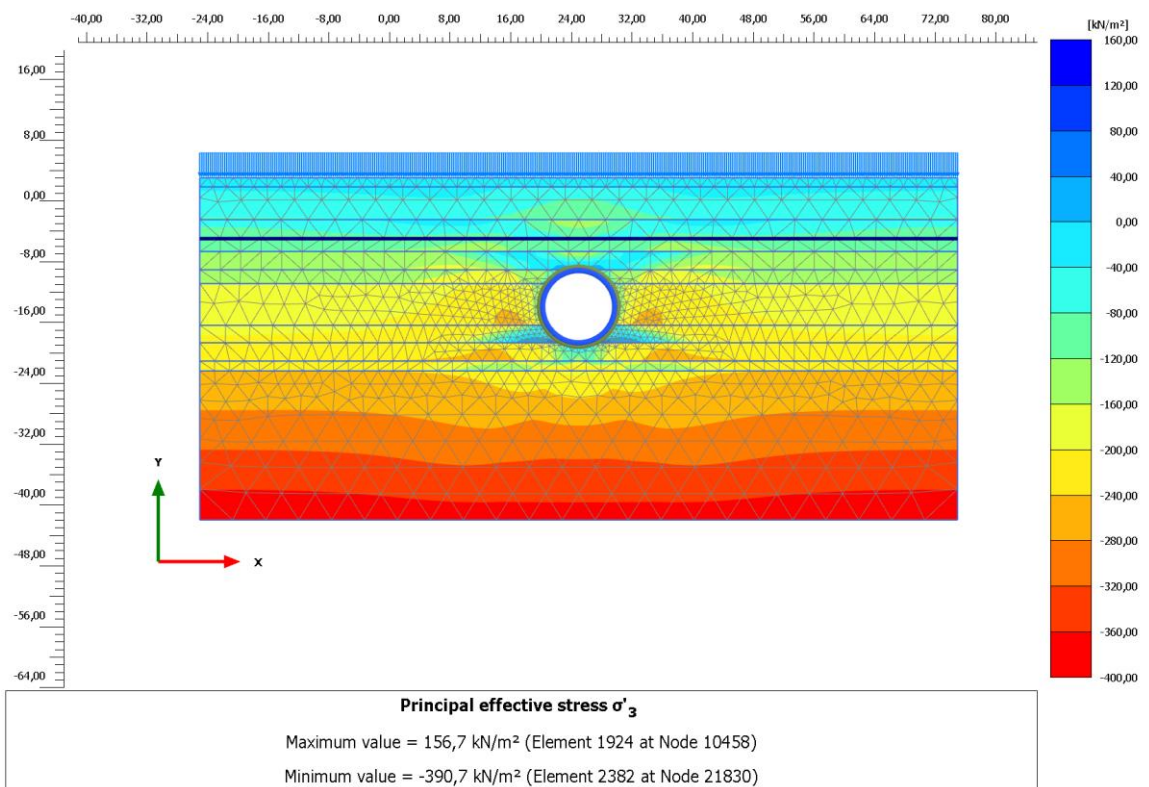
Εικ. Α.7 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+130 - 14+735



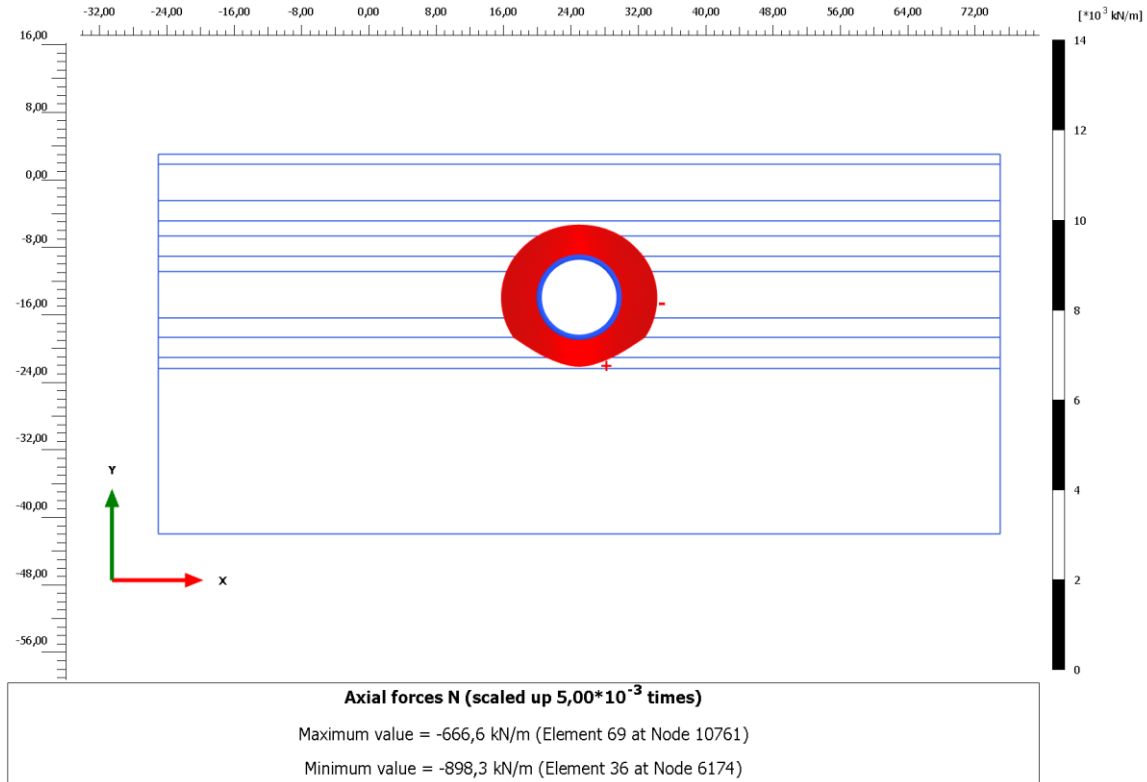
Εικ. Α.8 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+130 - 14+735



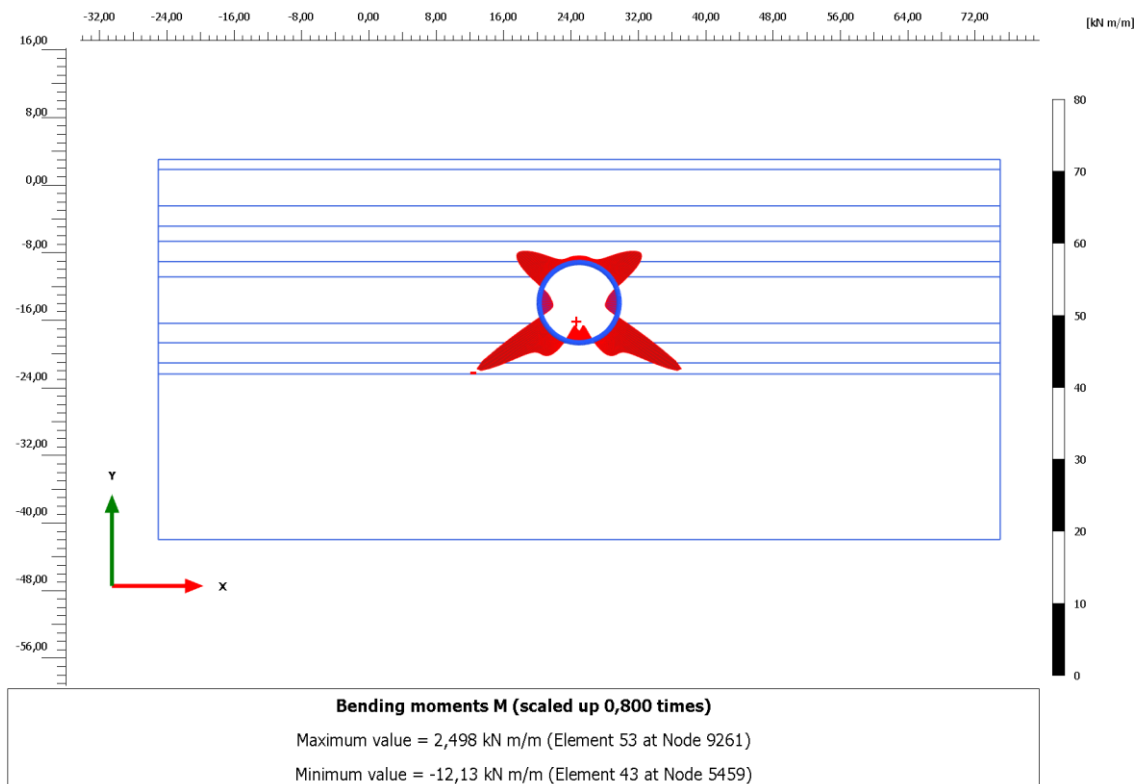
Εικ. Α.9 : Κατανομή Μετακινήσεων σε Στραγγισμένες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+950 - 15+051



Εικ. Α.10 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων σε Στραγγισμένες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+950 - 15+051

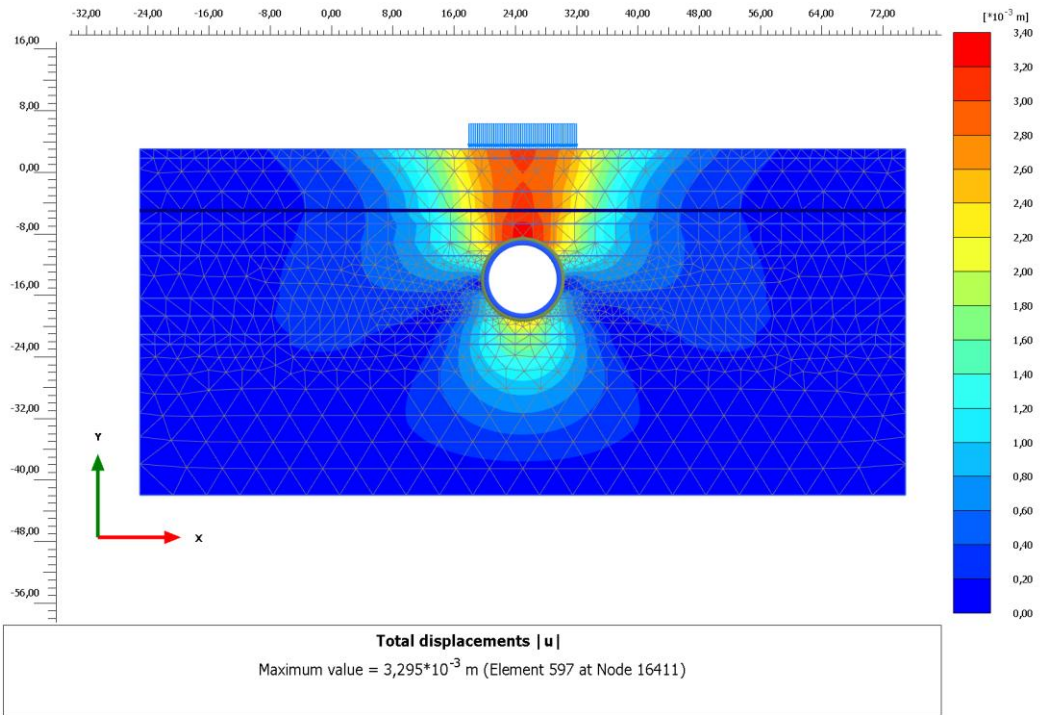


Εικ. Α.11 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+950 - 15+051

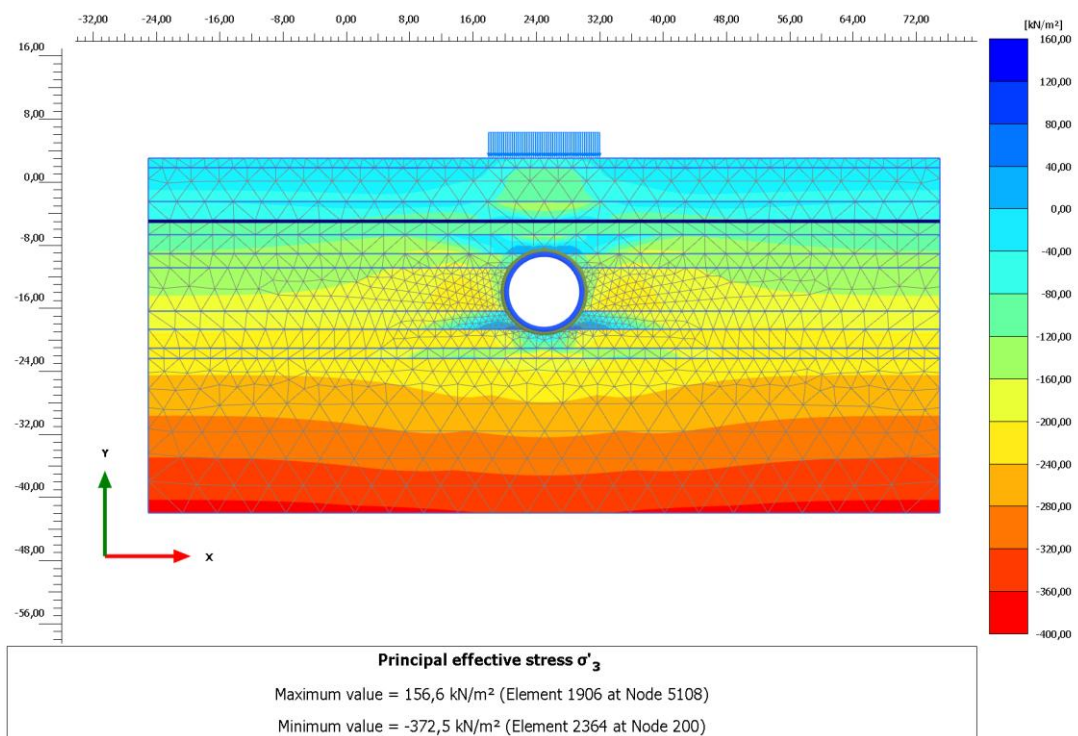


Εικ. Α.12 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+950 - 15+051

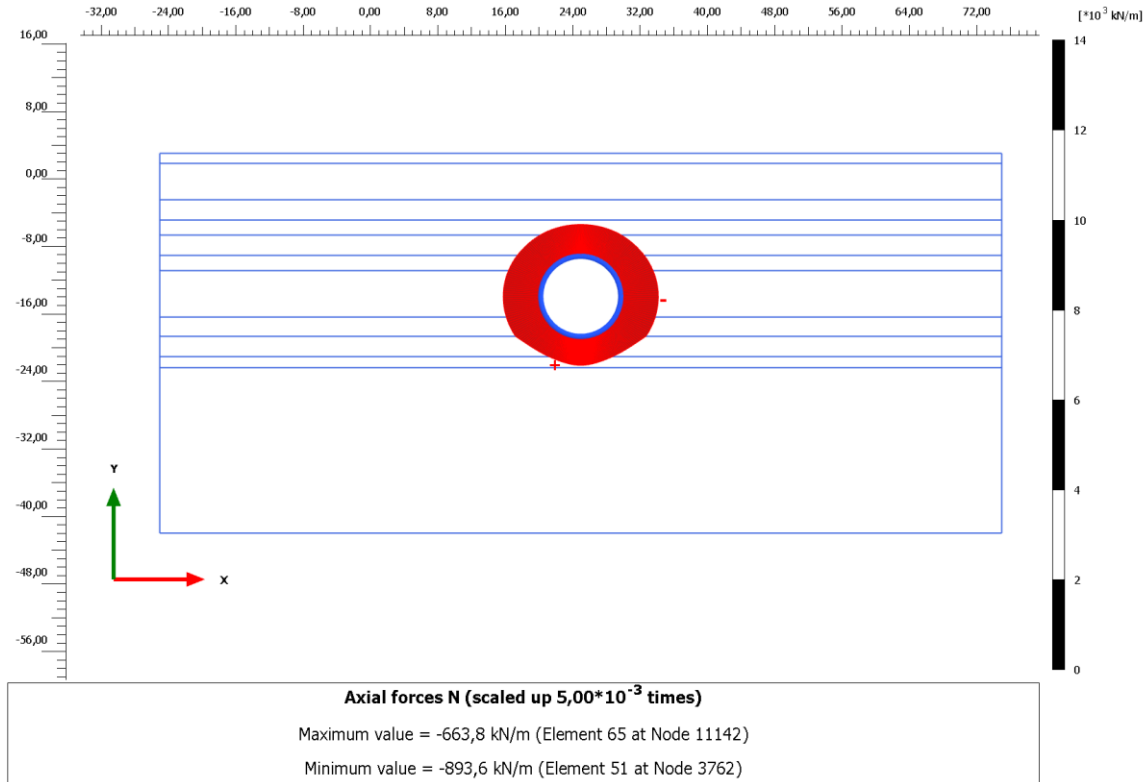




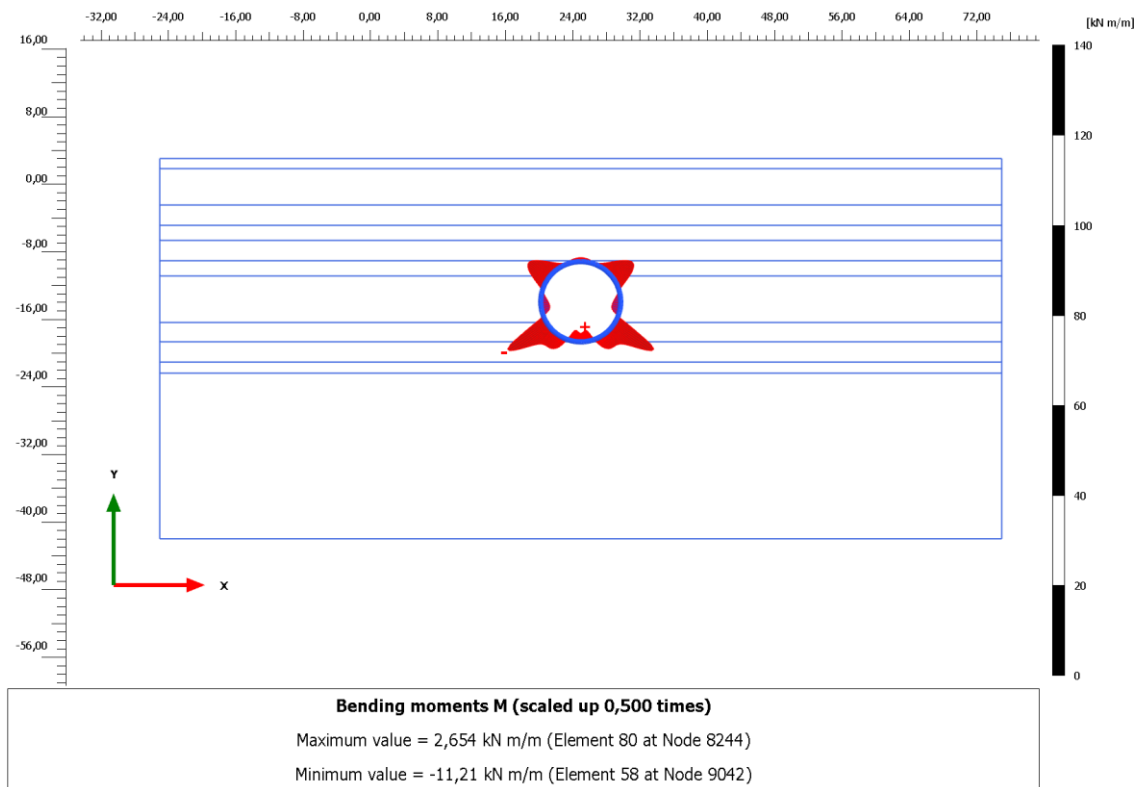
Εικ. Α.13 : Κατανομή Μετακινήσεων σε Στραγγισμένες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+960



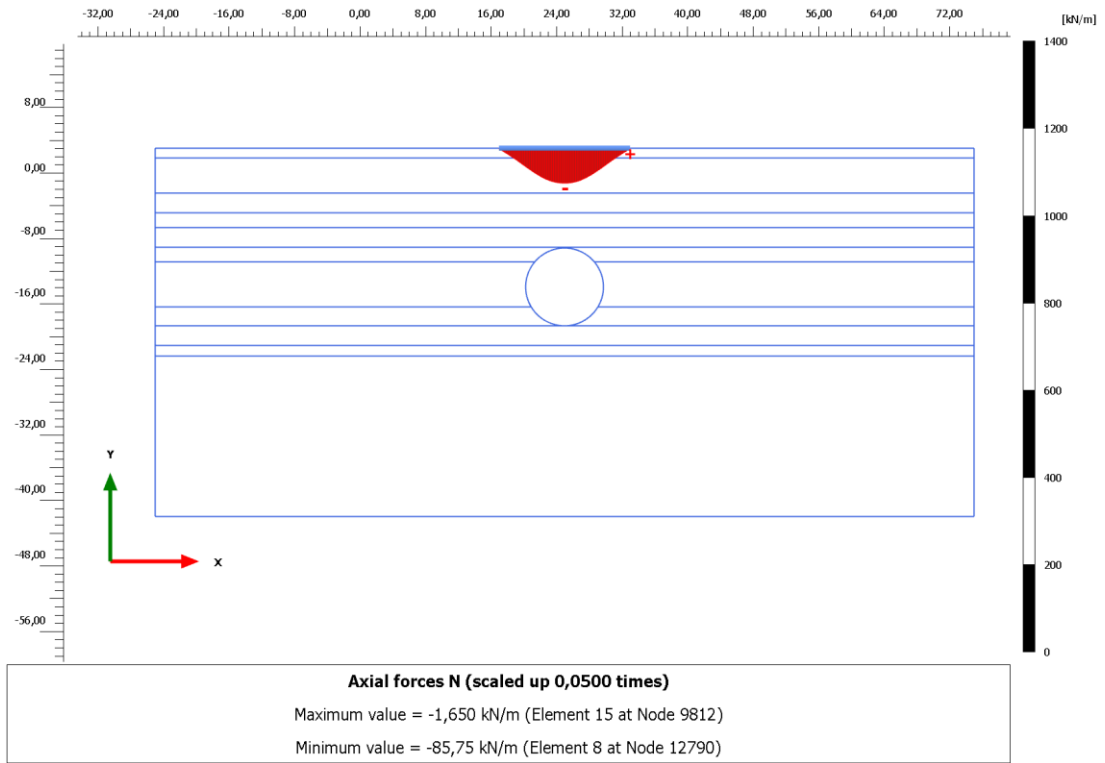
Εικ. Α.14 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων σε Στραγγισμένες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 14+960



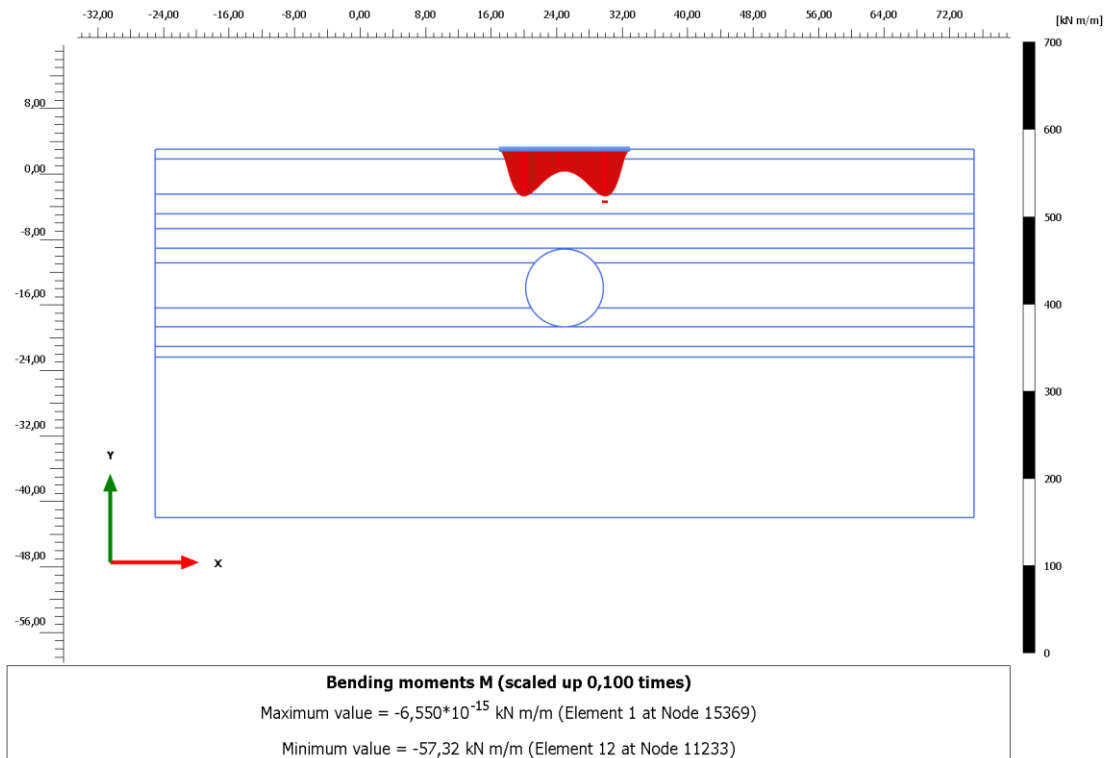
Εικ.Α.15 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένες Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+960



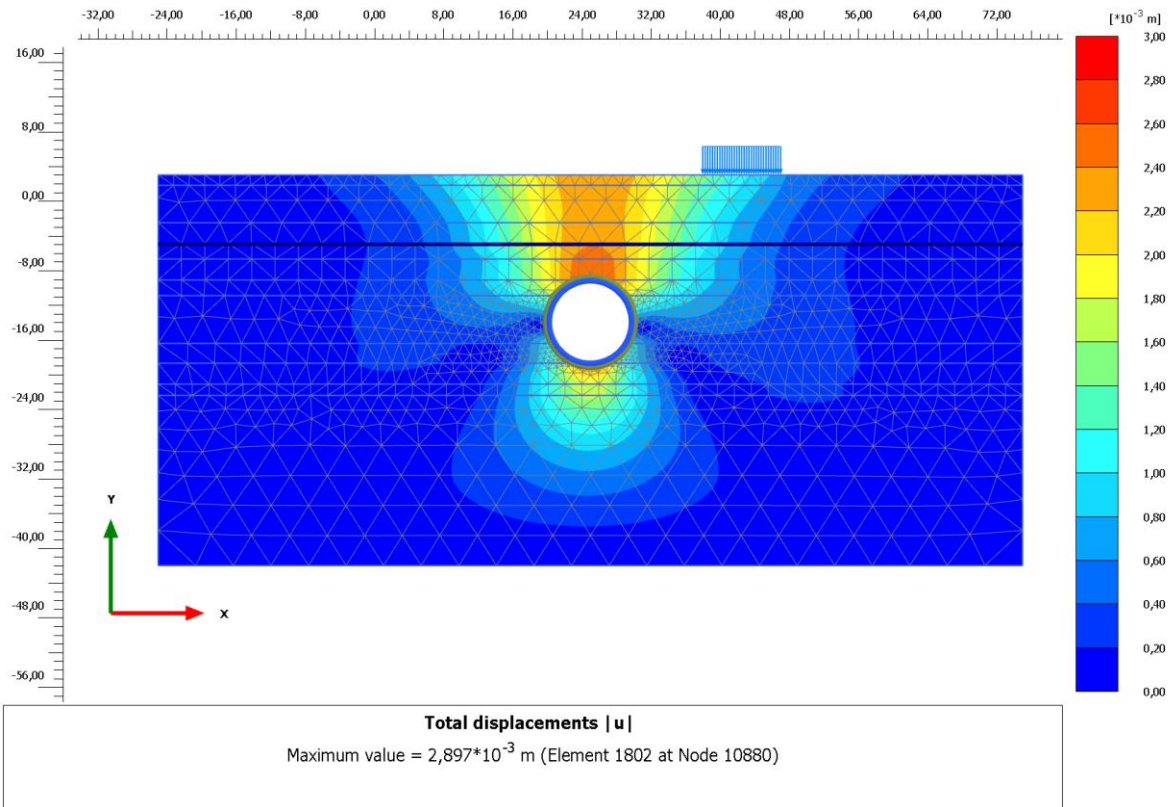
Εικ. Α.16 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένες Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+960



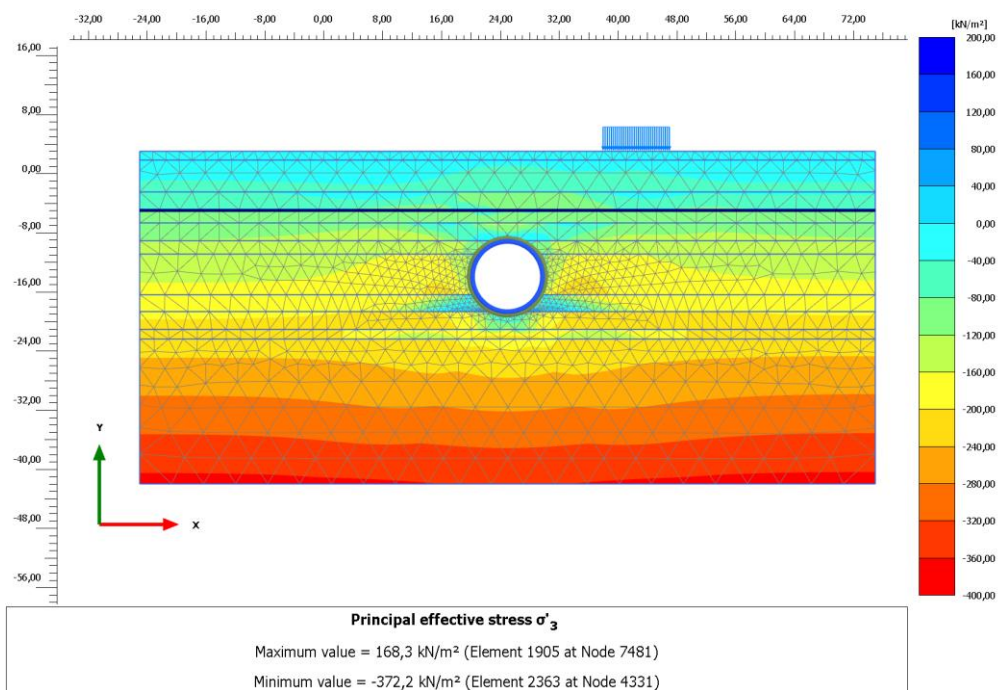
Εικ. Α.17 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων στην Θεμελίωση με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένες Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+960



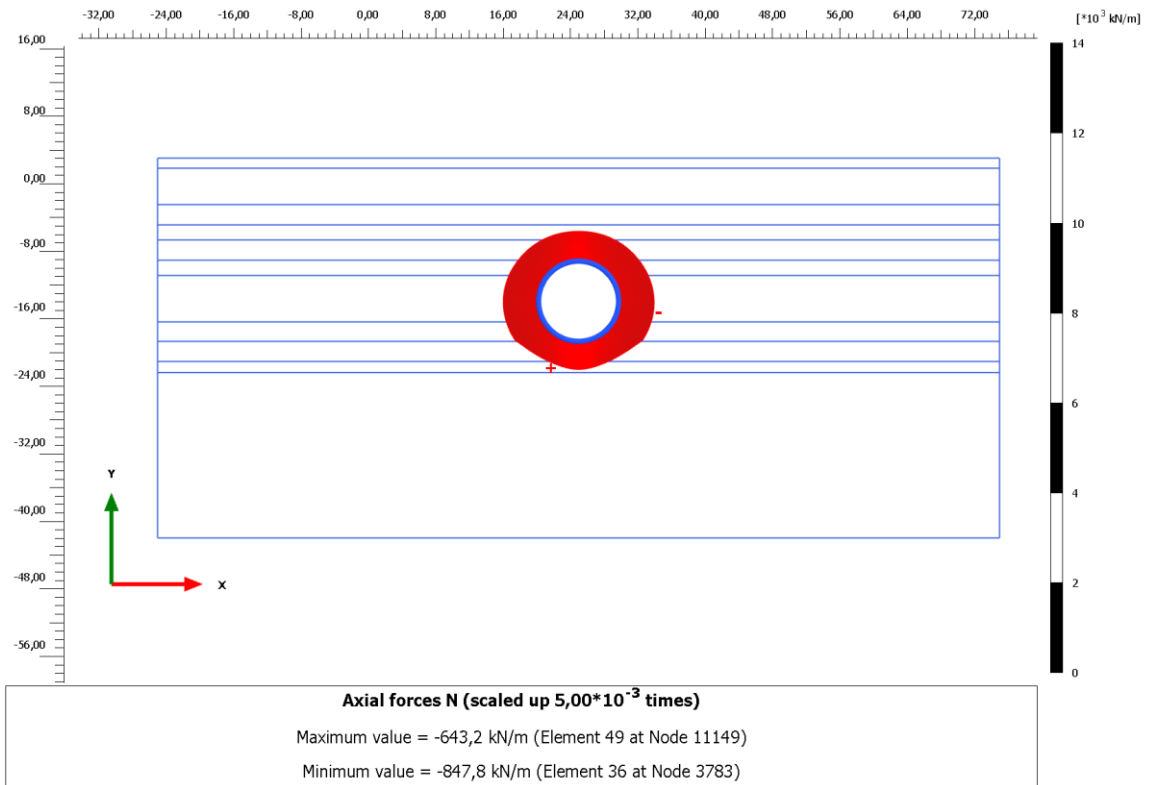
Εικ. Α.18 : Κατανομή Ροπών Κάμψης στην Θεμελίωση με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένες Ανάλυση περί την Χ.Θ. 14+960



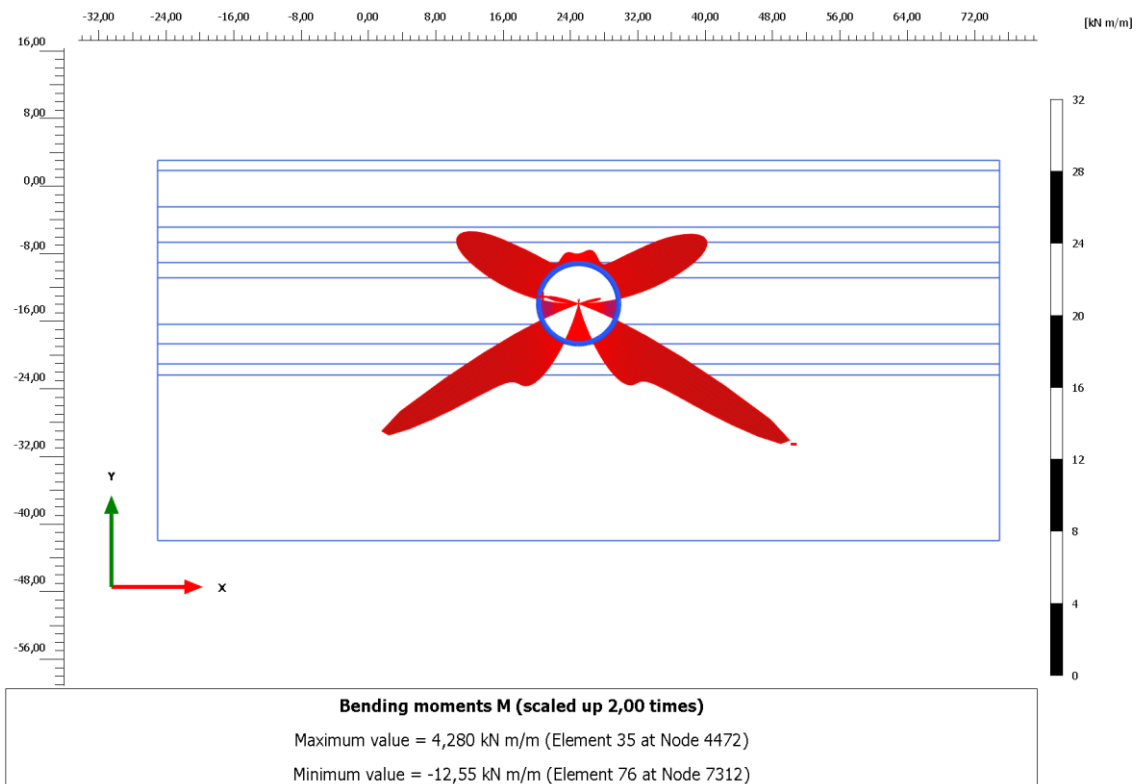
Εικ. Α.19 : Κατανομή Μετακινήσεων σε Στραγγισμένες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 15+010



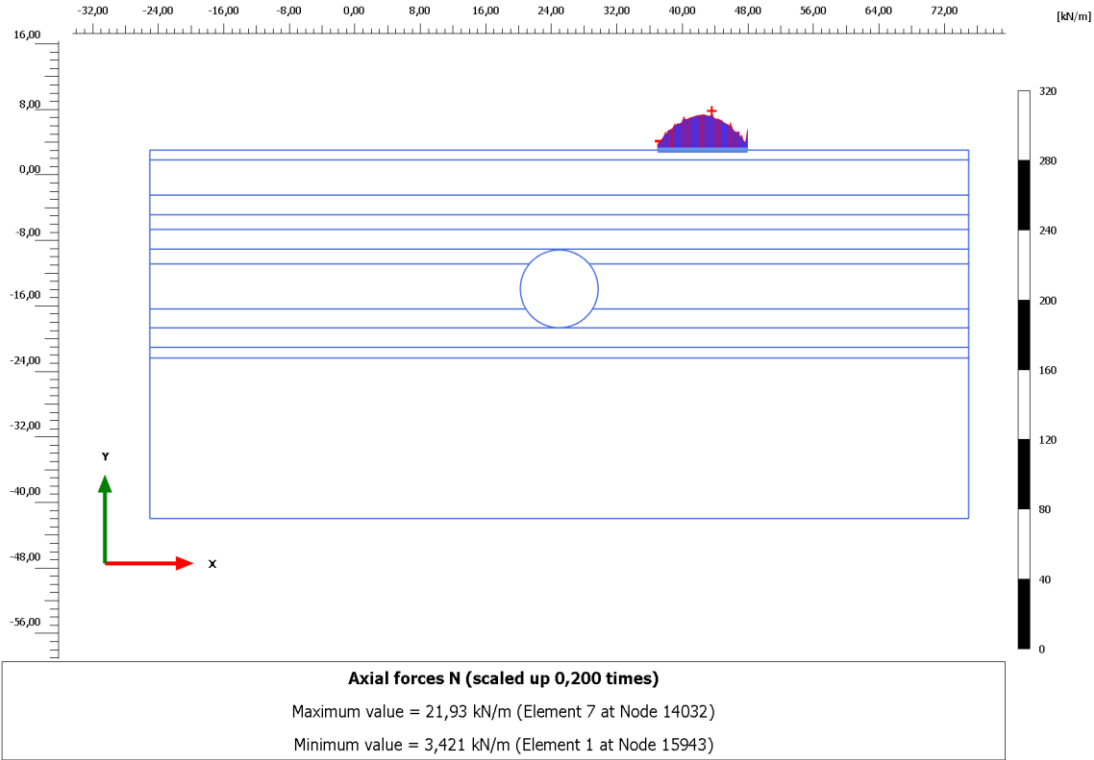
Εικ. Α.20 : Κατανομή Ενεργών Ελάχιστων Κύριων Τάσεων σε Στραγγισμένες Συνθήκες για το Μοντέλο HS περί την Χ.Θ. 15+010



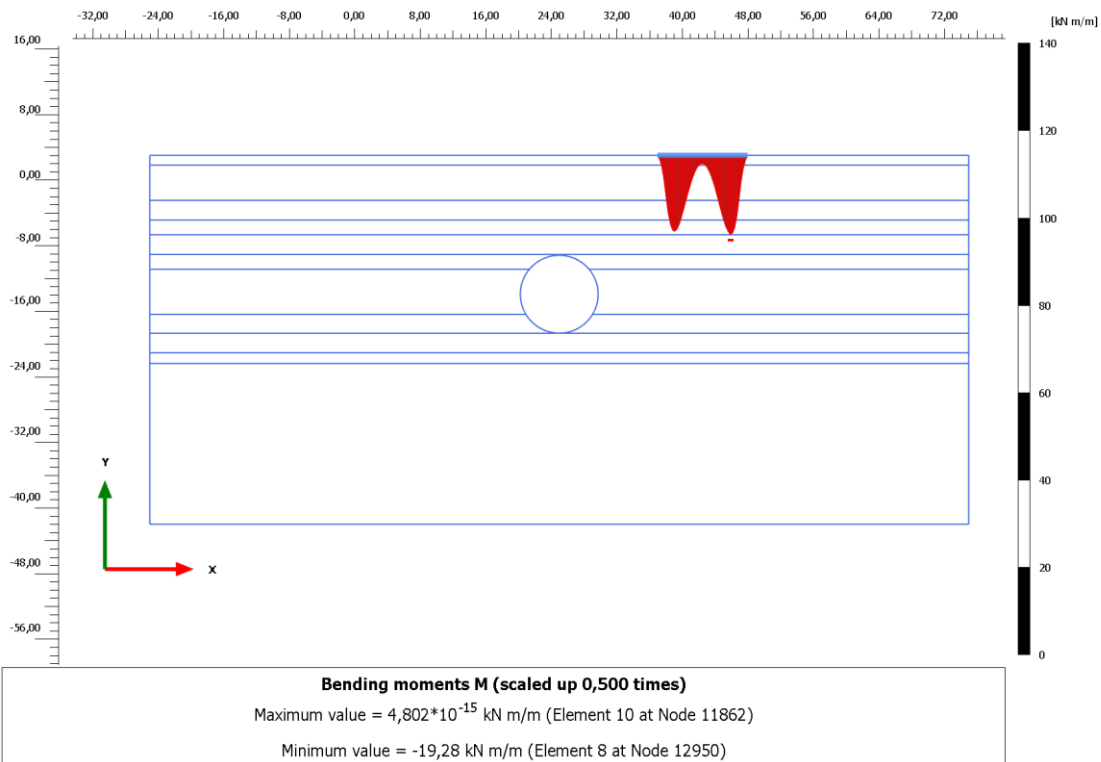
Εικ. Α.21 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 15+010



Εικ. Α.22 : Κατανομή Ροπών Κάμψης με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένη Ανάλυση περί την Χ.Θ. 15+010



Εικ. Α.23 : Κατανομή Αξονικών Φορτίων στην Θεμελίωση με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένες Ανάλυση περί την Χ.Θ. 15+010



Εικ. Α.24 : Κατανομή Ροπών Κάμψης στην Θεμελίωση με το Μοντέλο HS για Στραγγισμένες Ανάλυση περί την Χ.Θ. 15+010

**Τέλος και τω Θεώ, δόξα!**