

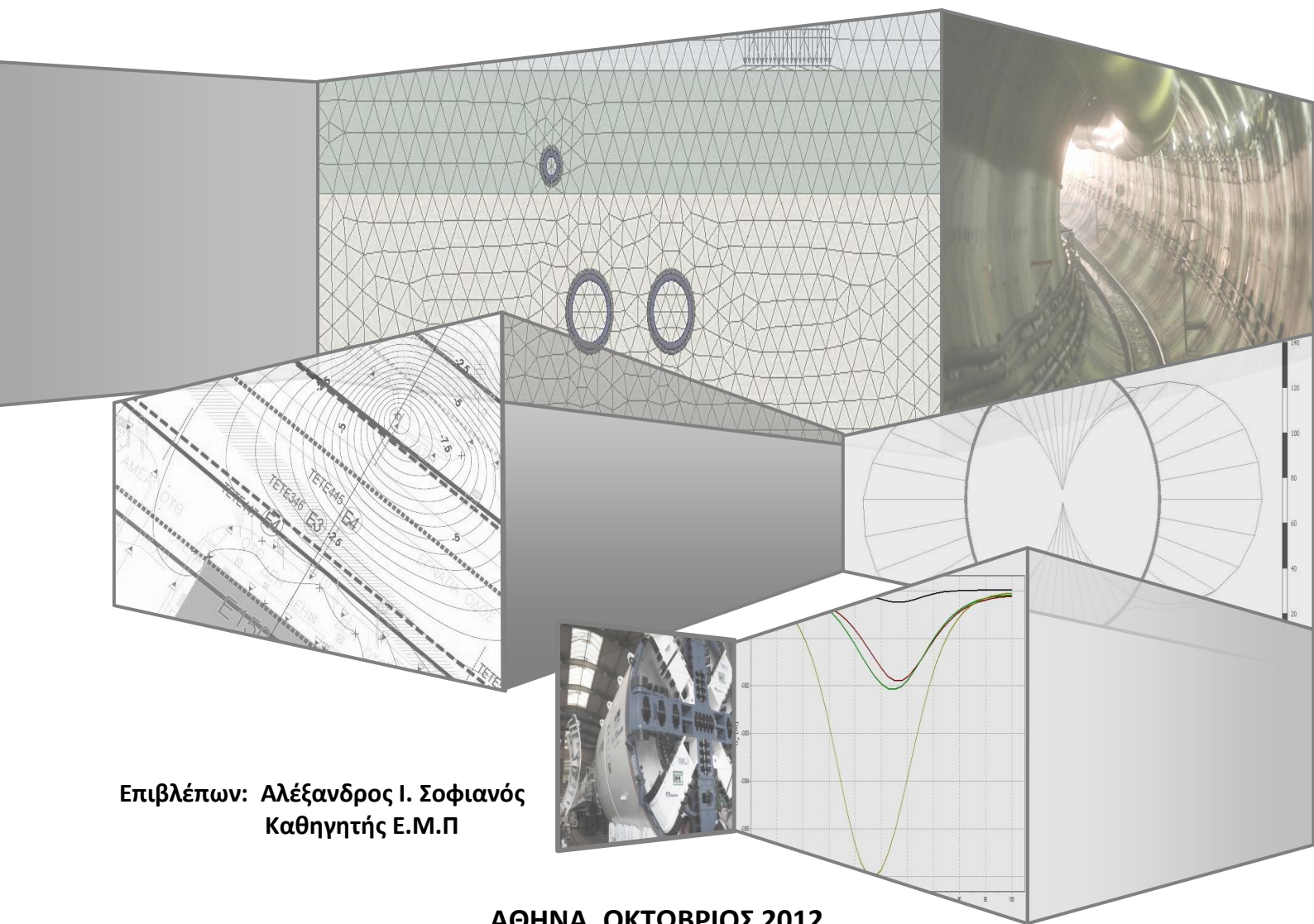


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**« ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΜΕ
ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ »**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γκίκας Βασίλειος



Επιβλέπων: Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός
Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**« ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΜΕ
ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ »**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γκίκας Βασίλειος

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός
Καθηγητής Ε.Μ.Π

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

Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός, Καθηγητής Ε.Μ.Π (Υπογραφή)

Παύλος Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π (Υπογραφή)

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π(Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012

Ευχαριστίες

Με το πέρας της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου Καθηγητή Α.Ι. Σοφιανό για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και μου ανέθεσε το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και για την υποστήριξη και βοήθεια που μου παρείχε.

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως, την Υποψήφια Διδάκτωρ Παρασκευή Γιούτα-Μήτρα για την πολύτιμη βοήθειά της και συνεχή συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια της συγκεκριμένης διπλωματικής.

Ευχαριστώ, επίσης, τον κ. Στέλιο Κουκουτά, μηχανικό της Αττικό Μετρό Α.Ε., και την Αττικό Μετρό Α.Ε. για την παροχή σημαντικών πληροφοριών και στοιχείων για το έργο.

Οφείλω να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Παύλο Νομικό, καθώς συνέβαλλε στην αρχική μου επαφή με την συμπεριφορά των γεωυλικών σε εργαστηριακό επίπεδο και για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον Λέκτορα Κωνσταντίνο Λουπασάκη για τις πληροφορίες που μου παρείχε σχετικά με το καταστατικό μοντέλο Hardening Soil, καθώς και για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Κυρίως ευχαριστώ τους γονείς μου, Γιάννη και Ευτυχία, για την στήριξη και την υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων και την αδερφή μου, Όλγα, για την ανεκτίμητη βοήθειά της που οδήγησε στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας .

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και ειδικότερα την Κωνσταντίνα για το κουράγιο και την υπομονή που επέδειξε στους ορθογραφικούς και γραμματικούς μου κανόνες.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την αποτίμηση των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους κατά την κατασκευή των δίδυμων σηράγγων του μετρό Θεσσαλονίκης στο τμήμα Αγία Σοφία έως Σιντριβάνι. Οι καθιζήσεις λόγω κατασκευής σηράγγων εντός αστικού ιστού, πέραν ενός ορίου είναι ικανές να δημιουργήσουν σοβαρές καταστροφές, για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να μετρώνται και να εντοπίζονται έγκαιρα οι θέσεις όπου το φαινόμενο εξελίσσεται.

Η γεωλογία της περιοχής διερεύνησης αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα τεχνητών επιχώσεων στο οποίο υπόκεινται νεογενείς σιφρές ερυθρές άργιλοι. Η διάνοιξη των σηράγγων γίνεται εντός της σειράς των ερυθρών αργίλων, μέσω δύο Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής με Ασπίδα και Εξισορρόπηση της Πίεσης του Εδάφους (EPBS – TBM).

Αρχικά, μέσω των μετρήσεων των γεωδαιτικών οργάνων και με γεωστατιστικές μεθόδους εντοπίζονται οι θέσεις που σημειώθηκαν καθιζήσεις καθ' όλο το μήκος του μεσοδιαστήματος Αγία Σοφία έως Σιντριβάνι. Από τις τρεις θέσεις που εντοπίστηκαν λεκάνες καθιζήσεων μόνο σε μία μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια ότι οι καθιζήσεις οφείλονται αποκλειστικά στην διάνοιξη των σηράγγων.

Στη θέση αυτή σημαντικές καθιζήσεις καταγράφηκαν από δύο όργανα. Το ένα όργανο βρίσκεται κοντά στην Καμάρα και το άλλο στον Ιερό Ναό Παναγίας της Δεξιάς. Σε τομές εγκάρσια στον άξονα των σηράγγων, στις θέσεις των οργάνων αυτών, έγινε προσαρμογή της κανονικής κατανομής Gauss στα αποτελέσματα της γεωστατιστικής. Μέσω της κατανομής Gauss βρέθηκε η απώλεια εδαφικού όγκου που προκλήθηκε τόσο από την διέλευση του TBM1 όσο και του TBM2. Ελέγχθηκε, επίσης, το κατά πόσο οι παράμετροι λειτουργίας των TBM στις θέσεις αυτές δικαιολογούν την δημιουργία καθιζήσεων.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάστροφη ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων κάνοντας χρήση τριών καταστατικών μοντέλων εδάφους. Του Mohr-Coulomb, του Hardening Soil και του προηγμένου HSsmall. Οι παράμετροι των μοντέλων αυτών υπολογιστήκαν αναλυτικά από τις δοκιμές που έγιναν στην περιοχή διερεύνησης.

Κανένα καταστατικό μοντέλο δεν προσέγγισε επαρκώς την μέγιστη καθίζηση που σημειώθηκε στις δύο αυτές θέσεις. Το γεγονός αυτό αν συνυπολογιστούν και η πολύ μικρή καθίζηση των γειτονικών οργάνων και οι παράμετροι λειτουργίας των TBM, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μετακίνηση των οργάνων αυτών ενδέχεται να μην οφείλεται στην κατασκευή των σηράγγων.

Το μοντέλο Mohr-Coulomb υπολογίζει τη μικρότερη μέγιστη καθίζηση, το εύρος όμως της οποίας είναι το μεγαλύτερο. Η μη διαρροή του εδάφους που προσομοιώνεται με το μοντέλο αυτό στην περιφέρεια των εκσκαφών, οδηγεί στον υπολογισμό των μεγαλύτερων φορτίων στην υποστήριξη.

Τα μοντέλα Hardening Soil και HSsmall επιδεικνύουν παρεμφερή αποτελέσματα, με την μέγιστη καθίζηση να προσεγγίζει καλύτερα από ότι με το μοντέλο Mohr – Coulomb και τα φορτία της υποστήριξης να είναι σημαντικά μικρότερα λόγω της πλήρους πλαστικοποίησης του εδάφους στην περιφέρεια των εκσκαφών.

Abstract

This thesis deals with the settlements due to the construction of the twin tunnels, that pass through Agia Sofia to Sintrivani, of Thessaloniki's metro. Settlements due to tunnel construction in urban environment are capable of creating serious damages, if they fail to respect settlement limits for structures above the tunnels. For this reason, it is necessary to identify in time and measure the sites, where the settlements evolve.

The geology of the envisaged section consists of an upper thin layer of manmade deposits, underneath of which exists a layer of red stiff clay. The boring of the tunnels takes place in between the red stiff clay layer, with two "Earth Pressure Balance with Shield Tunnel Boring Machines" (EPBS-TBM).

Initially, through the measurements of geodetic instruments and the elaboration with geostatical analysis, the sites can be determined, where settlements occurred throughout the section Agia Sofia – Sintrivani. From the three detected sites, only in one case can it be safely assumed that the settlements are entirely due to tunneling.

In this particular site only two instrument measured important displacements. The first one is situated near the Arch of Galerius, the other one near the Church Panagia Deksia. A Gaussian curve was fitted to the results of the geostatical analysis for cross-sections containing those instruments. Through the Gaussian equation fit, the volume loss was calculated independently for the two TBMs.

A back analysis was held with Finite Element Method, using three particular Material Models. Those three Material Models are: the Mohr-Coulomb model, the Hardening Soil model and the advanced Hardening Soil with Small Strain Stiffness model. The parameters were chosen from the soil tests at the selected site.

None of the Material Models managed to approximate the maximum settlements measured. According to this, if the low displacement of the nearby instruments and the TBM operational parameters are taken into account, we can conclude that the settlements of the specific instruments are not due to the tunnel construction.

The Mohr-Coulomb material model calculates the lowest settlements, while the Hardening Soil and the HSsmall material models calculate higher and more identical to each other settlements.

The Mohr-Coulomb material model calculates the highest lining forces due to its permanent elastic behavior.

Περιεχόμενα:

Περιεχόμενα:.....	1
Εικόνες	4
Πίνακες.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1. Σκοπός	13
1.2. Διάρθρωση	13
1.3. Γενικά στοιχεία του έργου.....	13
1.4. Μέθοδος κατασκευής.	15
1.5. Γεωλογικά δεδομένα.....	16
1.5.1. Τεχνητές Επιχώσεις.....	17
1.5.2. Τεταρτογενείς Αποθέσεις	17
1.5.3. Σειρά Ερυθρών Αργίλων	17
1.6. Γεωλογικά δεδομένα Υποτμήματος 3 (Χ.Θ. 1+908 – Χ.Θ. 3+630).....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ.....	20
2.1. Γενικά	20
2.2. Εντοπισμός Λεκανών Καθιζήσεων.....	21
2.3. Εξίσωση Gauss.....	22
2.4. Διερεύνηση Καθιζήσεων από Χ.Θ. 2+330 έως Χ.Θ.2+490	24
2.4.1. ΘΕΣΗ ΚΑΜΑΡΑ (Χ.Θ. 2+361)	26
2.4.1.1. Υπολογισμός Λεκάνης Καθιζήσεων	26
2.4.1.2. Υπολογισμός απώλειας εδαφικού όγκου από τις παραμέτρους λειτουργίας του TBM	30
2.4.1.3. Κατασκευή λεκάνης καθιζήσεων χωρίς το Γεωδαιτικό σημείο TETS 2361_99 ..	32
2.4.2. ΘΕΣΗ Ι.Ν. ΠΑΝΑΓΙΑΣ ΔΕΞΙΑΣ (Χ.Θ.2+450).....	36
2.4.2.1. Υπολογισμός Λεκάνης Καθιζήσεων	36
2.4.2.2. Διερεύνηση Παραμέτρων Λειτουργίας TBM 2	40
2.5. Ανακεφαλαίωση	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	44
3.1. Mohr - Coulomb	44
3.1.1. Γενικά	44
3.1.2. Παράμετροι του μοντέλου Mohr- Coulomb	44
3.1.2.1. Μέτρο ελαστικότητας (E):	45
3.1.2.2. Λόγος του Poisson (ν):	45
3.1.2.3. Συνοχή (c) και γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ):	46
3.1.2.4. Γωνία διασταλτικότητας (ψ):.....	46
3.2. Hardening Soil Model	46
3.2.1. Γενικά	46
3.2.2. Παράμετροι του μοντέλου Hardening Soil:	47

3.2.2.1. Τέμνον μέτρο ελαστικότητας σε πρότυπη τριαξονική δοκιμή με στράγγιση (E50ref):	48
3.2.2.2. Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης (Eoedref):	49
3.2.2.3. Μέτρο ελαστικότητας σε αποφόρτιση και επαναφόρτιση(Eurref).....	50
3.2.2.4. Βαθμός εξάρτισης της δυσκαμψίας από το επίπεδο φόρτισης (m)	50
3.2.2.5. Πίεση αναφοράς των μέτρων δυσκαμψίας P^{ref}	51
3.2.2.6. Λόγος αστοχίας R_f	51
3.3. Hardening Soil with Small- Strain Stiffness	51
3.3.1. Γενικά	51
3.3.2. Παράμετροι του μοντέλου Hardening Soil with small-strain stiffness:.....	55
3.3.2.1. Μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις G0ref	55
3.3.2.2. Γωνιακή παραμόρφωση για $G_s=0.722G_0[\gamma_{0.7}]$	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	58
4.1. Γενικά	58
4.2. ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ.....	58
4.3. ΕΡΥΘΡΕΣ ΑΡΓΙΛΟΙ (A2)	59
4.3.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση	61
4.3.2. Τέμνον μέτρο ελαστικότητας (E50ref):	62
4.3.3. Αστράγγιστη διατμητική αντοχή (s_u)	66
4.3.4. Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης (Eoedref):	67
4.3.5. Μέτρο ελαστικότητας σε αποφόρτιση και επαναφόρτιση(Eurref).....	69
4.3.6. Συνοχή (c') και γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ')	69
4.3.7. Μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις G0ref	71
4.3.7.1. Υπολογισμός G0ref μέσω της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων (V_s).....	71
4.3.7.2. Υπολογισμός G0ref μέσω του αρχικού λόγου κενών (e_0).....	73
4.3.8. Γωνιακή παραμόρφωση για $G_s=0.722G_0(\gamma_{0.7})$	75
4.3.9. Πρεσσιομετρικό μέτρο ελαστικότητας (E_m).....	76
4.3.10. Συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία (K_0)	78
4.3.11. Λόγος υπερστερεοποίησης.....	78
4.3.12. Συντελεστής διαπερατότητας.....	78
4.4. Σύγκριση πραγματικής και προσομοιούμενης συμπεριφοράς του εδάφους	79
4.5. Υπολογισμός παραμέτρων υποστήριξης	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αριθμητικές αναλύσεις.....	84
5.1. Γενικά	84
5.2. Ανάλυση υπό αστράγγιστες συνθήκες με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής (Undrained B)	85
5.2.1. Τομή ΚΑΜΑΡΑ	86
5.2.1.1. Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.	87
5.2.1.2. Κατανομή μετακινήσεων.....	88
5.2.1.3. Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων(σ'_1).	93

5.2.1.4. Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3).....	95
5.2.1.5. Φορτία υποστήριξης.....	98
5.2.1.6. Υπολογισμός απώλειας εδαφικού όγκου μέσω των αριθμητικών αναλύσεων.	100
5.2.2. Τομή Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς.....	101
5.2.2.1. Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.	102
5.2.2.2. Κατανομή μετακινήσεων.....	104
5.2.2.3. Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1).	108
5.2.2.4. Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3).....	110
5.2.2.5. Φορτία υποστήριξης.....	113
5.2.2.6. Υπολογισμός απώλειας εδαφικού όγκου μέσω των αριθμητικών αναλύσεων.	115
5.3. Ανάλυση υπό αστράγγιστες συνθήκες με ενεργές παραμέτρους αντοχής (Undrained A) A) 116	
5.3.1. Τομή Καμάρα.....	119
5.3.1.1. Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.	119
5.3.1.2. Κατανομή μετακινήσεων.....	121
5.3.1.3. Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1).	122
5.3.1.4. Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3).....	123
5.3.1.5. Κατανομή ελαστικών παραμέτρων.	124
5.3.1.6. Φορτία υποστήριξης.....	126
5.3.2. Τομή Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς.....	128
5.3.2.1. Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.	128
5.3.2.2. Κατανομή μετακινήσεων.....	130
5.3.2.3. Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1).	131
5.3.2.4. Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3).....	132
5.3.2.5. Κατανομή ελαστικών παραμέτρων.	133
5.3.2.6. Φορτία υποστήριξης.....	135
5.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων με αστράγγιστες (Undrained B) και ενεργές (Undrained A) παραμέτρους αντοχής.....	137
5.4.1. Υπολογισμός αντοχής του εδάφους.	137
5.4.2. Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.	139
5.4.3. Κατανομή μετακινήσεων.....	140
5.4.4. Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1).	141
5.4.5. Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3).....	142
5.4.6. Κατανομή μέτρου διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις.....	144
5.5. Ανακεφαλαίωση.....	145
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα.....	152
6.1. Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.....	152
6.2. Κατανομή μετακινήσεων.....	152
6.3. Κατανομή κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1 , σ'_3).....	152
6.4. Φορτία υποστήριξης.....	153

6.5. Ανάλυση με ενεργές ή αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.....	153
6.6. Προτάσεις.....	153
Βιβλιογραφία	154

Εικόνες

Εικόνα 1.3-1: Σχέδιο Ανάπτυξης Γραμμών Μετρό Θεσσαλονίκης. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)	14
Εικόνα 1.4-1: Σκαρίφημα EPBS-TBM (ROCKSOIL S.p.A, 2008)	15
Εικόνα 2.2-1: Ισοβαθείς κατανομές μεσοδιαστήματος Αγία Σοφία- Σιντριβάνι (Δημακόπουλος, 2010).....	21
Εικόνα 2.3-1: Γεωδαιτικά σημεία και ερυθρά TBM.....	22
Εικόνα 2.3-2: Κατανομή καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. (Παναγόπουλος, 2008).....	23
Εικόνα 2.3-3: Απώλεια εδαφικού όγκου σήραγγας (Ρίζος, 2010)	24
Εικόνα 2.4-1 Ισοβαθείς μετά το πέρας του TBM1	25
Εικόνα 2.4-2 Ισοβαθείς μετά το πέρας του TBM2	26
Εικόνα 2.4-3: Ισοβαθείς στη θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM1	27
Εικόνα 2.4-4 Διαχρονική καθίζηση οργάνου TETS2361_99 (Δημακόπουλος, 2010)	28
Εικόνα 2.4-5 Ισοβαθείς στη θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM2	28
Εικόνα 2.4-6: Ισοβαθείς αποκλειστικά από την διέλευση του TBM2 στη θέση ΚΑΜΑΡΑ	29
Εικόνα 2.4-7: Εκσκαφή και ενεμάτωση σήραγγας με την προχώρηση του TBM	31
Εικόνα 2.4-8: Ισοβαθείς στη θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM1 χωρίς το όργανο TETS2364_33	33
Εικόνα 2.4-9 Ισοβαθείς στη θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM2 χωρίς το όργανο TETS2364_33	34
Εικόνα 2.4-10 :Ισοβαθείς αποκλειστικά από την διέλευση του TBM2 στη θέση ΚΑΜΑΡΑ χωρίς το όργανο TETS2364_33.....	35
Εικόνα 2.4-11: Ισοβαθείς στη θέση CHPD μετά το πέρας του TBM1	37
Εικόνα 2.4-12: Διαχρονική καθίζηση οργάνου TETS2453_12. (Δημακόπουλος, 2010)	37
Εικόνα 2.4-13: Ισοβαθείς στη θέση CHPD μετά το πέρας του TBM2	38
Εικόνα 2.4-14: :Ισοβαθείς αποκλειστικά από την διέλευση του TBM2 στη θέση CHPD	39
Εικόνα 2.5-2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα κεφαλαίου 2.....	43
Εικόνα 3.1-1: Καμπύλη Τάσεων- Παραμορφώσεων σε διγραμμικό μοντέλο.	44
Εικόνα 3.1-2 Μέτρα Ελαστικότητας E_0 και E_{50} από τριαξονική δοκιμή. (PLAXIS, 2011)	45
Εικόνα 3.1-3: Διαγράμματα Κύριας -διατμητικής τάσης υπό αστράγγιστες και στραγγισμένες συνθήκες. (PLAXIS, 2011)	46
Εικόνα 3.2-1 : Υπερβολική σχέση Τάσεων- Παραμορφώσεων σε τριαξονική φόρτιση. (PLAXIS, 2011)	47
Εικόνα 3.2-2: Διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης. (PLAXIS, 2011)	49
Εικόνα 3.2-3: Αποφόρτιση και επαναφόρτιση σε τριαξονική δοκιμή. (PLAXIS, 2011)	50
Εικόνα 3.3-1: Μικρές παραμορφώσεις σε γεωτεχνικά έργα. (PLAXIS, 2011)	51
Εικόνα 3.3-2: Διαγράμματα μέτρου διάτμησης – γωνιακής παραμόρφωσης στα μοντέλα HS και Hssmall. (Obrzud, 2011)	52

Εικόνα 3.3-3: Καμπύλη Hardin & Drnevich. (PLAXIS, 2011).....	53
Εικόνα 3.3-4: Βρόχος υστέρησης. (Brinkgreve, Kappert, & Bonnier, 2007).....	54
Εικόνα 3.3-5: Προσδιορισμός G_{max} μέσω της αντίστασης αιχμής. (Obrzud, 2011).....	56
Εικόνα 3.3-6: Διάγραμμα $G/G_0 - \gamma$ συναρτήσεως του δείκτη πλαστικότητας. (PLAXIS, 2011) ...	57
Εικόνα 4.3-1: Θέσεις γεωτρήσεων στην περιοχή μελέτης. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007).....	59
Εικόνα 4.3-2: Γεωτεχνική τομή μεσοδιαστήματος Αγία Σοφία – Σιντριβάνι. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007).....	60
Εικόνα 4.3-3: Δείγματα γεωτρήσεων ενότητας A2b. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007).....	60
Εικόνα 4.3-4 Δείγματα γεωτρήσεων ενότητας A2c (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007).....	60
Εικόνα 4.3-5 :Κοκκομετρική διαβάθμιση ενότητας A2b (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007).....	61
Εικόνα 4.3-6 :Κοκκομετρική διαβάθμιση ενότητας A2c (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007).....	61
Εικόνα 4.3-7: Ποσοστό κάθε κοκκομετρικού κλάσματος για τους σχηματισμούς που μελετώνται. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007).....	62
Εικόνα 4.3-8: Περιβάλλουσα αστοχίας σε διάγραμμα κύριων – διατμητικών τάσεων για την ενότητα A2b. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007).....	66
Εικόνα 4.3-9: Διαγράμματα Χρόνου- Αξονικής παραμόρφωσης σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007).....	67
Εικόνα 4.3-10: Μέτρο συμπίεστικότητας για κάθε ενεργό ορθή τάση στερεοποίησης. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007).....	68
Εικόνα 4.3-11: Διαγράμματα Διατμητικής παραμόρφωσης- Διατμητικής αντοχής σε δοκιμή CD. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007).....	69
Εικόνα 4.3-12: Διάγραμμα διατμητικής παραμόρφωσης – λόγου κενών σε δοκιμή CD. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007).....	70
Εικόνα 4.3-13: Περιβάλλουσα αστοχίας από δοκιμές CD. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007).....	70
Εικόνα 4.3-14: Θέσεις Εδαφοδυναμικών τομών. (Κ.Πιτιλάκης & Συνεργάτες, 2004).....	72
Εικόνα 4.3-15:Αριστερά: Εδαφοδυναμική τομή I-6. (Κ.Πιτιλάκης & Συνεργάτες, 2004), Δεξιά: Λόγος πλαστικότητας σχηματισμών. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007).....	73
Εικόνα 4.3-16: Δείκτης πλαστικότητας και υδαρότητας των σχηματισμών. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007).....	75
Εικόνα 4.3-17: Μεταβολή του λόγου G/G_0 με τη διατμητική παραμόρφωση γ για την σειρά των ερυθρών αργίλων (A2). (Αναστασιάδης, 1994).....	76
Εικόνα 4.3-18: Διάγραμμα λόγου απόσβεσης (D_s)– διατμητικής παραμόρφωσης (γ) για την σειρά των ερυθρών αργίλων (A2). (Αναστασιάδης, 1994).....	76
Εικόνα 4.3-19: Πρεσσιομετρική τομή στην γεώτρηση TETP25. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007).....	77
Εικόνα 4.3-20: Αποτελέσματα πρεσσιομετρικών δοκιμών στην γεώτρηση TETP25. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007).....	77
Εικόνα 4.3-21: Μέσες τιμές πρεσσιομετρικών δοκιμών υποτμήματος 3 (Χ.Θ.1+908 έως Χ.Θ.3+630) (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007).....	78
Εικόνα 4.3-22: Διακύμανση συντελεστή ωθήσεων σε ηρεμία. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007).....	78
Εικόνα 4.4-1: Μεταβολή του G_t και του G_s συναρτήσεως του γ για τον σχηματισμό A2b κάνοντας χρήση των παραμέτρων του Πίνακα 4.4-1.....	82

Εικόνα 4.4-2: Μεταβολή του G_t και του G_s συναρτήσει του γ για τον σχηματισμό A2c κάνοντας χρήση των παραμέτρων του Πίνακα 4.4-1.	83
Εικόνα 5.1-1 Συγκεντρωτικό διάγραμμα διάρθρωσης αριθμητικών αναλύσεων.	84
Εικόνα 5.2-1: Γεωμετρία τομής ΚΑΜΑΡΑ.	86
Εικόνα 5.2-2: Αριθμητικό πλέγμα τομής ΚΑΜΑΡΑ.	87
Εικόνα 5.2-3: Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.	89
Εικόνα 5.2-4: : Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.	89
Εικόνα 5.2-5: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.	90
Εικόνα 5.2-6: Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.	90
Εικόνα 5.2-7: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.	91
Εικόνα 5.2-8: : Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.	92
Εικόνα 5.2-9: Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.	92
Εικόνα 5.2-10: Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.	92
Εικόνα 5.2-11: Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.	93
Εικόνα 5.2-12: Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.	93
Εικόνα 5.2-13: Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.	94
Εικόνα 5.2-14: Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.	94
Εικόνα 5.2-15: Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.	95
Εικόνα 5.2-16: Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.	95
Εικόνα 5.2-17: Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.	96
Εικόνα 5.2-18: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.	96
Εικόνα 5.2-19: Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.	97
Εικόνα 5.2-20: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.	97
Εικόνα 5.2-21: Γεωμετρία τομής CHPD.	102
Εικόνα 5.2-22: Αριθμητικό πλέγμα τομής CHPD.	102
Εικόνα 5.2-23: : Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.	104

Εικόνα 5.2-24: Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.	104
Εικόνα 5.2-25: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.	105
Εικόνα 5.2-26: Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.	105
Εικόνα 5.2-27: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.	106
Εικόνα 5.2-28: : Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.	107
Εικόνα 5.2-29: Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.	107
Εικόνα 5.2-30: Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.	107
Εικόνα 5.2-31: Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.	108
Εικόνα 5.2-32: Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.	108
Εικόνα 5.2-33: Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.	109
Εικόνα 5.2-34: Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.	109
Εικόνα 5.2-35: Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.	110
Εικόνα 5.2-36: Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.	110
Εικόνα 5.2-37: : Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.	111
Εικόνα 5.2-38: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.	111
Εικόνα 5.2-39: Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.	112
Εικόνα 5.2-40: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.	112
Εικόνα 5.3-1: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετακινήσεων των HSsmall και HS (Undrained A).	121
Εικόνα 5.3-2: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετακινήσεων των MC και HS(Undrained A).	121
Εικόνα 5.3-3 : Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση KAMAPA μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.	122
Εικόνα 5.3-4: Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση KAMAPA μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.	123

Εικόνα 5.3-5 :Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση KAMAPA μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.	123
Εικόνα 5.3-6: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση KAMAPA μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.....	124
Εικόνα 5.3-7: Μεταβολή ελαστικών παραμέτρων με το μοντέλο HSsmall στην τομή KAMARA	124
Εικόνα 5.3-8: Μεταβολή ελαστικών παραμέτρων με το μοντέλο HS στην τομή KAMARA ..	125
Εικόνα 5.3-9: Διαφορά τελικών ελαστικών παραμέτρων των μοντέλων HSsmall και HS στην θέση KAMARA	125
Εικόνα 5.3-10: Μεταβολή του μέτρου διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις στην θέση Καμάρα με ενεργές παραμέτρους αντοχής με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.....	126
Εικόνα 5.3-11: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετατοπίσεων με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση CHPD ανάμεσα στα μοντέλα HSsmall και HS.	130
Εικόνα 5.3-12: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετατοπίσεων με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση CHPD ανάμεσα στα μοντέλα MC και HS.	131
Εικόνα 5.3-13 : Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.....	131
Εικόνα 5.3-14: Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.....	132
Εικόνα 5.3-15: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.....	132
Εικόνα 5.3-16: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.....	133
Εικόνα 5.3-17: Μεταβολή ελαστικών παραμέτρων με το μοντέλο HSsmall στην τομή CHPD	133
Εικόνα 5.3-18: Μεταβολή ελαστικών παραμέτρων με το μοντέλο HS στην τομή CHPD.....	134
Εικόνα 5.3-19: Διαφορά τελικών ελαστικών παραμέτρων των μοντέλων HSsmall και HS στην θέση CHPD	134
Εικόνα 5.3-20 :Μεταβολή του μέτρου διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις στην θέση I.N. Παναγίας Δεξιάς με ενεργές παραμέτρους αντοχής με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.	135
Εικόνα 5.4-1: Διαφορά κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση KAMAPA με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.....	140
Εικόνα 5.4-2 Διαφορά κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση CHPD με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.....	141
Εικόνα 5.4-3 :Διαφορά μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων στην θέση KAMAPA με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.....	141
Εικόνα 5.4-4:Διαφορά μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων στην θέση CHPD με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.....	142

Εικόνα 5.4-5: Διαφορά ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.....	143
Εικόνα 5.4-6: Διαφορά ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στην θέση CHPD με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.....	143
Εικόνα 5.4-7: Διαφορά μέτρου διάτμησης στην θέση ΚΑΜΑΡΑ με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.	144
Εικόνα 5.4-8: Διαφορά μέτρου διάτμησης στην θέση CHPD με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.	144

Γραφήματα

Γράφημα 2.4-1: Καθιζήσεις στην τομή ΚΑΜΑΡΑ και προσαρμογή κατανομής Gauss.	29
Γράφημα 2.4-2 : Καθιζήσεις στη τομή ΚΑΜΑΡΑ χωρίς το όργανο TETS2364_33	36
Γράφημα 2.4-3: Καθιζήσεις στην τομή CHPD και προσαρμογή κατανομής Gauss.....	39
Γράφημα 2.4-4: Πίεση υποστήριξης μετώπου TBM2.....	40
Γράφημα 2.4-5: Βάρος υλικού εκσκαφής TBM2	41
Γράφημα 2.4-6: Πίεση ενέματος TBM2.....	41
Γράφημα 2.4-7: Όγκος ενέματος TBM2.....	42
Γράφημα 4.3-1: Τριαξονικές δοκιμές UU στην ενότητα A2b.....	63
Γράφημα 4.3-2: Τριαξονικές δοκιμές με E_{50} και E50ref στην ενότητα A2b.....	64
Γράφημα 4.3-3: Τριαξονικές δοκιμές UU στον σχηματισμό A2c	64
Γράφημα 4.3-4: Τριαξονικές δοκιμές με E_{50} και E50ref στην ενότητα A2c.	65
Γράφημα 4.4-1: Αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές στην ενότητα A2b με τα τρία καταστατικά μοντέλα και τριαξονική δοκιμή UU του δείγματος 7 της Γεώτρησης 27 υπό πλευρική πίεση 434kPa.....	79
Γράφημα 4.4-2: Αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές στην ενότητα A2c με τα τρία καταστατικά μοντέλα και τριαξονική δοκιμή UU του δείγματος 9 της Γεώτρησης 24 υπό πλευρική πίεση 744kPa.....	80
Γράφημα 4.4-3: Συμπεριφορά σε τριαξονική φόρτιση υπό πλευρική πίεση 500kPa του σχηματισμού A2b κάνοντας χρήση των παραμέτρων του Πίνακα 4.4-1.....	81
Γράφημα 4.4-4: Συμπεριφορά σε τριαξονική φόρτιση υπό πλευρική πίεση 500kPa του σχηματισμού A2c κάνοντας χρήση των παραμέτρων του Πίνακα 4.4-1.	82
Γράφημα 5.2-1: Καθιζήσεις στην τομή ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM1 για τα τρία καταστατικά μοντέλα και κατανομή Gauss συγχρόνως.	87
Γράφημα 5.2-2: Καθιζήσεις στην τομή ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM2 για τα τρία καταστατικά μοντέλα και κατανομή Gauss συγχρόνως.	88
Γράφημα 5.2-3: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.	98
Γράφημα 5.2-4: Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.	99
Γράφημα 5.2-5: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.	99
Γράφημα 5.2-6: Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.	100
Γράφημα 5.2-7: Επιρροή της απώλειας εδαφικού όγκου στην δημιουργία επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης του TBM2 σύμφωνα με το μοντέλο HS στην τομή ΚΑΜΑΡΑ...	101

Γράφημα 5.2-8: Καθιζήσεις στην τομή CHPD μετά το πέρας του TBM1 για τα τρία καταστατικά μοντέλα και κατανομή Gauss την ίδια χρονική στιγμή.	103
Γράφημα 5.2-9: Καθιζήσεις στην τομή CHPD μετά το πέρας του TBM2 για τα τρία καταστατικά μοντέλα και κατανομή Gauss την ίδια χρονική στιγμή.	103
Γράφημα 5.2-10: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση CHPD.	113
Γράφημα 5.2-11: Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση CHPD.	114
Γράφημα 5.2-12: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση CHPD.	114
Γράφημα 5.2-13: Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση CHPD.	115
Γράφημα 5.2-14: Επιρροή της απώλειας εδαφικού όγκου στην δημιουργία επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης του TBM2 σύμφωνα με το μοντέλο HS στην τομή CHPD.	116
Γράφημα 5.3-1: Συμπεριφορά του σχηματισμού A2b σε τριαξονική δοκιμή με $\sigma_3=500\text{kPa}$ και ενεργές παραμέτρους αντοχής.	118
Γράφημα 5.3-2: Συμπεριφορά του σχηματισμού A2c σε τριαξονική δοκιμή με $\sigma_3=500\text{kPa}$ και ενεργές παραμέτρους αντοχής.	119
Γράφημα 5.3-3: Καθιζήσεις στην τομή KAMAPA μετά το πέρας του TBM1 για τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής και κατανομή Gauss την ίδια χρονική στιγμή.	120
Γράφημα 5.3-4: Καθιζήσεις στην τομή KAMAPA μετά το πέρας του TBM2 για τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής και κατανομή Gauss την ίδια χρονική στιγμή.	120
Γράφημα 5.3-5: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση KAMAPA.	126
Γράφημα 5.3-6 :Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση KAMAPA.	127
Γράφημα 5.3-7: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση KAMAPA.	127
Γράφημα 5.3-8:Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση KAMAPA. ...	128
Γράφημα 5.3-9: Καθιζήσεις στην τομή CHPD μετά το πέρας του TBM1 για τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής και κατανομή Gauss την ίδια χρονική στιγμή.	129
Γράφημα 5.3-10: Καθιζήσεις στην τομή CHPD μετά το πέρας του TBM2 για τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής και κατανομή Gauss την ίδια χρονική στιγμή.	129
Γράφημα 5.3-11 :Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση CHPD.	135

Γράφημα 5.3-12 :Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση CHPD.	136
Γράφημα 5.3-13: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση CHPD.	136
Γράφημα 5.3-14:Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση CHPD.	137
Γράφημα 5.4-1: Συμπεριφορά του καταστατικού μοντέλου HSsmall στην ενότητα A2b, σε αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή με αστράγγιστες και ενεργές παραμέτρους αντοχής.	138
Γράφημα 5.4-2 Συμπεριφορά του καταστατικού μοντέλου HSsmall στην ενότητα A2c, σε αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή με αστράγγιστες και ενεργές παραμέτρους αντοχής.	138
Γράφημα 5.4-3: Καθιζήσεις στην θέση Καμάρα με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.	139
Γράφημα 5.4-4 :Καθιζήσεις στην θέση CHPD με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.	139

Πίνακες

Πίνακας 1.4-1 : Γεωμετρικά στοιχεία (ROCKSOIL S.p.A, 2008)	16
Πίνακας 2.1-1: Επίπεδο επιφυλακής και συναγερμού καθιζήσεων.	20
Πίνακας 2.1-2 Όρια επιφυλακής και συναγερμού για ευαίσθητες κατασκευές	20
Πίνακας 2.4-1 : Μεγέθη που υπολογίστηκαν από την κατανομή Gauss στην τομή KAMAPA 30	
Πίνακας 2.4-2 Όγκος εκσκαφής στη θέση KAMAPA.....	31
Πίνακας 2.4-3: Όγκος ενέματος στη θέση KAMAPA.....	32
Πίνακας 2.4-4 Απώλεια Εδαφικού όγκου από παραμέτρους λειτουργίας TBM στη θέση KAMAPA	32
Πίνακας 2.4-5: Μεγέθη που υπολογίστηκαν από την κατανομή Gauss στην τομή CHPD.....	40
Πίνακας 4.2-1 : Παράμετροι Τεχνητών Επιχώσεων.....	58
Πίνακας 4.3-1: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών UU στην ενότητα A2b	63
Πίνακας 4.3-2: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών UU στην ενότητα A2c.....	65
Πίνακας 4.3-3: Υπολογισμός ϕ_u και s_u από περιβάλλουσες για την ενότητα A2b.....	66
Πίνακας 4.3-4: Υπολογισμός ϕ_u και s_u από περιβάλλουσες για την ενότητα A2c.....	67
Πίνακας 4.3-5: Αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης για την ενότητα A2b	68
Πίνακας 4.3-6: Αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης για την ενότητα A2c	68
Πίνακας 4.3-7: Αποτελέσματα δοκιμών CD για την ενότητα A2b	70
Πίνακας 4.3-8: Αποτελέσματα δοκιμών CD για την ενότητα A2c.....	71
Πίνακας 4.3-9: Υπολογισμός Goref μέσω του λόγου κενών της ενότητας A2b.....	74
Πίνακας 4.3-10: Υπολογισμός Goref μέσω του λόγου κενών της ενότητας A2c.....	74
Πίνακας 4.3-11: Λόγος υπερστερεοποίησης ενοτήτων A2b και A2c.....	78
Πίνακας 4.3-12 : Διαπερατότητα ενοτήτων A2b και A2c.....	79

Πίνακας 4.4-1: Γεωτεχνικές παράμετροι σχηματισμών.	80
Πίνακας 5.2-1: Παράμετροι σχηματισμών με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής	86
Πίνακας 5.3-1: Παράμετροι σχηματισμών με ενεργές παραμέτρους αντοχής	117
Πίνακας 5.5-1: Σύγκριση αποτελεσμάτων μέγιστων καθιζήσεων με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής και κατανομών Gauss.	145
Πίνακας 5.5-2: Σύγκριση αποτελεσμάτων μέγιστων καθιζήσεων με ενεργές παραμέτρους αντοχής και κατανομών Gauss.	146
Πίνακας 5.5-3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα απόκλισης μέγιστων καθιζήσεων από κατανομές Gauss με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.	146
Πίνακας 5.5-4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα απόκλισης μέγιστων καθιζήσεων από κατανομές Gauss ανά καταστατικό μοντέλο.	147
Πίνακας 5.5-5: Συγκεντρωτικές διαφορές μοντέλων Hsmall και HS με ενεργές παραμέτρους αντοχής.	147
Πίνακας 5.5-6 Συγκεντρωτικές διαφορές μοντέλων MC και HS με ενεργές παραμέτρους αντοχής.	148
Πίνακας 5.5-7: Συγκεντρωτικές διαφορές μοντέλων Hsmall και HS με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.....	149
Πίνακας 5.5-8: Συγκεντρωτικές διαφορές μοντέλων MC και HS με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.....	150
Πίνακας 5.5-9: Συγκεντρωτικές διαφορές αναλύσεων με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής με το μοντέλο HSmall.....	151

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η αποτίμηση των καθιζήσεων που προκλήθηκαν από την κατασκευή των σηράγγων του Μετρό Θεσσαλονίκης. Αφού εντοπιστούν οι θέσεις όπου έχουν σημειωθεί καθιζήσεις, γίνεται υπολογισμός της απώλειας εδαφικού όγκου. Στην συνέχεια γίνεται ανάστροφη ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καθώς επίσης και παραμετρική ανάλυση, έτσι ώστε να προσεγγιστούν οι καθιζήσεις όπου έχουν υπολογιστεί.

1.2. Διάρθρωση

Στο αυτό το κεφάλαιο δίνονται τα γενικά στοιχεία του έργου. Τα στοιχεία αυτά αφορούν την χάραξη του έργου, την μέθοδο κατασκευής, καθώς επίσης και τα γεωλογικά ευρήματα της περιοχής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αρχικά εντοπισμός των θέσεων όπου σημειώθηκαν καθιζήσεις. Αφού εντοπιστούν οι θέσεις αυτές κατασκευάζονται εγκάρσιες στην πορεία των TBM τομές. Στις τομές αυτές εμφανίζεται η κατανομή των καθιζήσεων τόσο μετά το πέρας του πρώτου TBM, όσο και μετά το πέρας του δεύτερου. Στις κατανομές αυτές γίνεται προσαρμογή της βέλτιστης καμπύλης κανονικής κατανομής Gauss, έτσι ώστε να υπολογιστεί η απώλεια εδαφικού όγκου.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των καταστατικών μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν στις αριθμητικές αναλύσεις. Τα μοντέλα αυτά είναι το Mohr – Coulomb το Hardening Soil και το HSsmall.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία επιλογής της κάθε παραμέτρου των μοντέλων. Η διαδικασία αυτή γίνεται για κάθε εργαστηριακή και επιτόπου δοκιμή που έχει πραγματοποιηθεί στην περιοχή όπου εντοπίστηκαν καθιζήσεις.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων. Οι αναλύσεις αυτές διεξάγονται βάση των παραμέτρων που έχουν υπολογιστεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Από τα αποτελέσματα αυτά συμπεραίνεται η ικανότητα του κάθε καταστατικού μοντέλου να προσεγγίσει τις καθιζήσεις που είχαν μετρηθεί.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν καθώς και κάποιες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

1.3. Γενικά στοιχεία του έργου

Τον Ιανουάριο του 2009 ξεκίνησε η διάνοιξη του υπεδάφους της Θεσσαλονίκης για την κατασκευή της κύριας γραμμής Μετρό (κόκκινη γραμμή). Η γραμμή αυτή περιλαμβάνει 9,6 χλμ. δίδυμης σήραγγας και 13 σταθμούς που θα εξυπηρετούν το επιβατικό κοινό της συμπρωτεύουσας. Η χάραξη ξεκινά από την βορειοδυτική πλευρά της πόλης «Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός» και ακολουθώντας τους κύριους οδικούς άξονες (οδός

Μοναστηρίου, Εγνατία, Δελφών και Σόλωνος) καταλήγει στον τερματικό σταθμό «Νέα Ελβετία» (Εικόνα 1.3-1). Επίσης περιλαμβάνεται η δημιουργία αμαξοστασίου 50.000τ.μ. στην περιοχή της Πυλαίας.



Εικόνα 1.3-1: Σχέδιο Ανάπτυξης Γραμμών Μετρό Θεσσαλονίκης. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.)

Οι σταθμοί που πρόκειται να κατασκευαστούν είναι:

- Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός
- Πλατεία Δημοκρατίας
- Βενιζέλου
- Αγία Σοφία
- Σιντριβάνι
- Παπάφη
- Ευκλείδη
- Φλέμινγκ
- Αναλήψεως
- Πατρίκιου
- Βούλγαρη
- Νέα Ελβετία

Υπάρχει επίσης πρόβλεψη για την κατασκευή των εξής επεκτάσεων:

- Επέκταση Καλαμαριάς (μπλε γραμμή)
- Επέκταση Τούμπα- Χαριλάου (πράσινη γραμμή)
- Επέκταση Σταυρούπολης (καφέ γραμμή)
- Επέκταση Ευόσμου (κίτρινη γραμμή)

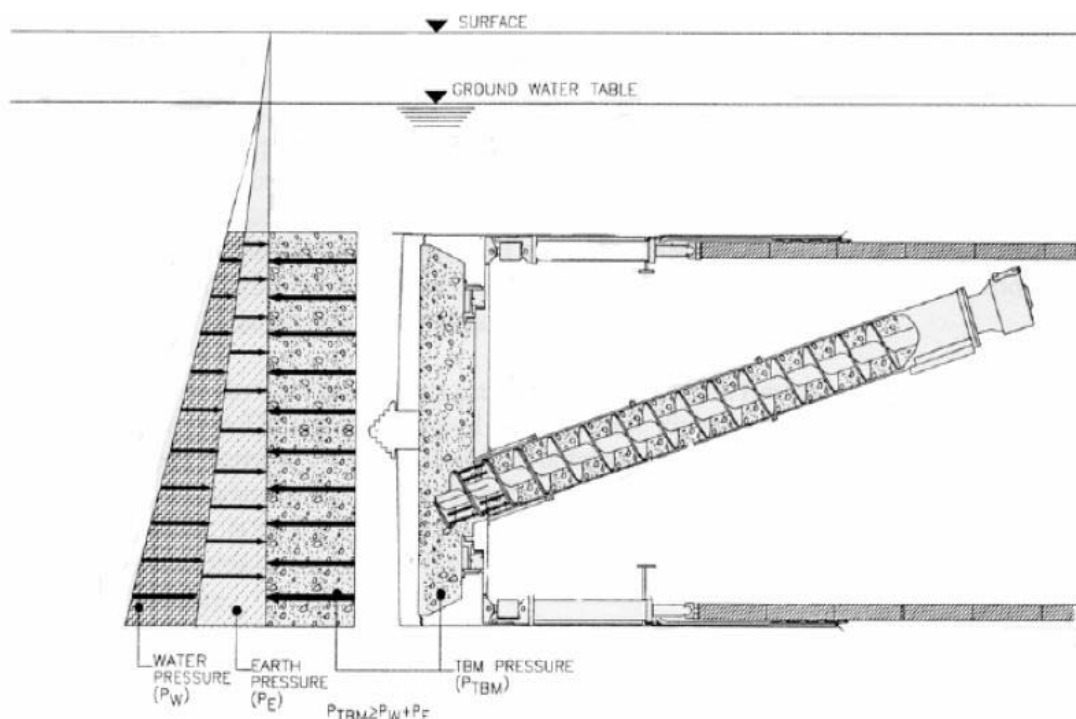
- Επέκταση προς Αεροδρόμιο (γαλάζια γραμμή)

1.4. Μέθοδος κατασκευής.

Η κατασκευή των δίδυμων σηράγγων γίνεται μέσω δύο Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής με Ασπίδα και Εξισορρόπηση της Πίεσης του Εδάφους (EPBS – TBM). Η επιλογή αυτού του τύπου μηχανημάτων έχει γίνει σύμφωνα με τις απαιτήσεις που αφορούν στην αποφυγή της επιρροής του υδροφόρου ορίζοντα, την αποφυγή διαταραχής και πρόκλησης ζημιών στα κτίρια και στις κατασκευές που βρίσκονται εντός των ορίων της ζώνης επιρροής, την ελαχιστοποίηση της καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους, και την πρόληψη ζημιών σε δίκτυα κοινωφελών υπηρεσιών, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ασφάλεια των κατασκευαζόμενων σηράγγων.

Μετά από την εκσκαφή, τα τμήματα της σήραγγας θα επενδυθούν στο πίσω μέρος της ασπίδας του TBM με προκατασκευασμένους σπονδύλους επένδυσης από οπλισμένο σκυρόδεμα, η οποία θα φέρει στεγανοποίηση με σύστημα διπλού παρεμβύσματος.

Το δακτυλιοειδές κενό μεταξύ της εξωτερικής επένδυσης σπονδύλων και του προφίλ εκσκαφής θα ενεματώνεται πλήρως, στο πίσω μέρος της ασπίδας του TBM, προκειμένου να σταθεροποιηθεί η απαιτούμενη γεωμετρία των τοποθετούμενων δακτυλίων, να εξασφαλιστούν οι επιτρεπόμενες ανοχές στους αρμούς των σπονδύλων, να κινητοποιηθεί η φέρουσα ικανότητα της επένδυσης και να μειωθεί η απώλεια εδαφικού όγκου. (ROCKSOIL S.p.A, 2008)



Εικόνα 1.4-1: Σκαρίφημα EPBS-TBM (ROCKSOIL S.p.A, 2008)

Στην Εικόνα 1.4-1 φαίνεται το σκαρίφημα του EPBS-TBM, όπου περιγράφεται η βασική αρχή λειτουργίας του για την εξισορρόπηση της εδαφικής πίεσης του μετώπου εκσκαφής. Η πίεση του TBM πρέπει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη ή ίση με την πίεση του εδάφους και

την υδροστατική πίεση. Η πίεση του TBM ρυθμίζεται από τον όγκο του εσκαμμένου υλικού που αφαιρεί από το μέτωπο ο ατέρμωννας κοχλίας.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα γεωμετρικά στοιχεία του μηχανήματος, της ασπίδας και των προκατασκευασμένων σπονδύλων επένδυσης από σπλισμένο σκυρόδεμα.

Γεωμετρικά Στοιχεία		
Περιγραφή	Μονάδα	Τιμή
Διάμετρος Εκσκαφής	m	6,19
Διάμετρος Εμπρόσθιας Ασπίδας	m	6,17
Διάμετρος Οπίσθιας Ασπίδας	m	6,15
Εξωτερική διάμετρος σπονδύλων	m	5,90
Εσωτερική διάμετρος σπονδύλων	m	5,30

Πίνακας 1.4-1 : Γεωμετρικά στοιχεία (ROCKSOIL S.p.A, 2008)

1.5. Γεωλογικά δεδομένα.

Το σύνολο του Έργου από Ν.Σ.Σ. (Χ.Θ. 0-249) έως και το Αμαξοστάσιο Πυλαίας (Χ.Θ. 9+572) χωρίστηκε σε τρία κύρια τμήματα (Α, Β και Γ). Το κάθε κύριο τμήμα χωρίστηκε σε επί μέρους υποτμήματα βάση των κατά θέση γεωλογικών συνθηκών, όπως αυτά προέκυψαν από τις γεωτεχνικές έρευνες που εκτελέστηκαν. Αναλυτικά τα τμήματα και τα υποτμήματα τους φαίνονται στην συνέχεια:

- **Τμήμα Α:** Ν.Σ.Σ. (Χ.Θ. 0-249) έως Πανεπιστήμιο (Χ.Θ. 3+630)
 - Υποτμήμα 1: Ν.Σ.Σ. (Χ.Θ.0-249) έως Διασταύρωση Δημοκρατίας (Χ.Θ. 0+443)
 - Υποτμήμα 2: Διασταύρωση Δημοκρατίας (Χ.Θ. 0+443) έως Αγίας Σοφίας (Χ.Θ. 1+908)
 - Υποτμήμα 3: Αγίας Σοφίας (Χ.Θ. 1+908) έως Πανεπιστήμιο (Χ.Θ. 3+630)
- **Τμήμα Β:** Πανεπιστήμιο (Χ.Θ. 3+630) έως Βούλγαρη (Χ.Θ. 7+140)
 - Υποτμήμα 1: Πανεπιστήμιο (Χ.Θ. 3+630) έως Παπάφη (Χ.Θ. 4+240)
 - Υποτμήμα 2: Παπάφη (Χ.Θ. 4+240) έως Αναλήψεως (Χ.Θ. 5+815)
 - Υποτμήμα 3: Αναλήψεως (Χ.Θ. 5+815) έως Βούλγαρη (Χ.Θ. 7+140)
- **Τμήμα Γ:** Βούλγαρη (Χ.Θ. 7+140) έως Αμαξοστάσιο Πυλαίας (Χ.Θ. 9+572)

Κάθε υποτμήμα χωρίζεται επίσης στα μεσοδιαστήματα των σταθμών του. Για το Υποτμήμα 3 του Τμήματος Α τα μεσοδιαστήματα είναι τα εξής:

- Αγίας Σοφίας (Χ.Θ. 1+908) έως Σιντριβάνι (Χ.Θ. 2+539)
- Σιντριβάνι (Χ.Θ. 2+539) έως Πανεπιστήμιο (Χ.Θ. 3+630)

Στην συγκεκριμένη διπλωματική, αναφορά γίνεται κυρίως στο μεσοδιάστημα Αγίας Σοφίας (Χ.Θ. 1+908) έως Σιντριβάνι (Χ.Θ. 2+539) του Υποτμήματος 3 του Τμήματος Α.

Οι γεωλογικές ενότητες του Τμήματος Α, όπως αυτές εντοπίστηκαν από την επισκόπηση των γεωτρήσεων σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των επί τόπου και εργαστηριακών δοκιμών είναι οι εξής:

- Τεχνητές Επιχώσεις/ Αρχαιολογικό Στρώμα
- Τεταρτογενείς/ Πλειστοκαινικές αποθέσεις
- Νεογενής Σειρά Ερυθρών Αργίλων

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της κάθε ενότητας.

1.5.1. Τεχνητές Επιχώσεις

Η Γεωλογική Ενότητα των Τεχνητών Επιχώσεων εντοπίζεται καθ' όλο το μήκος του συνολικού τμήματος που αξιολογείται και αποτελείται κυρίως από μαλακές έως τοπικά σταθερές, καστανές έως σκούρες καστανές, αμμώδεις ΑΡΓΙΛΟΥΣ (CL-CI) χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας, με χαλίκια, από χαλαρές έως μέτρια πυκνές, ανοιχτές καστανές έως καστανοπράσινες, αργιλώδεις ΑΜΜΟΥΣ (SC) με χάλικες καθώς και από επίσης χαλαρούς έως μέτρια πυκνούς, αργιλώδεις ΧΑΛΙΚΕΣ (GC) με άμμο. Στο εσωτερικό των παραπάνω γεωτεχνικών σχηματισμών εντοπίζονται και τεμάχια κεραμικών και τούβλων, ενώ στα τμήματα όπου οι Τεχνητές Επιχώσεις παρουσιάζουν το μέγιστο πάχος τους, στο ιστορικό κέντρο της πόλης, εντοπίζονται υπολείμματα τοιχοποιίας, τμήματα από μαρμάρινες κολόνες και ίχνη καύσης.

Το πάχος της γεωλογικής ενότητας κυμαίνεται από 2.0 έως 6.0m στο τμήμα από τον Επίσταθμο του ΝΣΣ έως και τον Σταθμό Δημοκρατίας, στην συνέχεια αυξάνει μπαίνοντας στο ιστορικό κέντρο (από Σταθμό Δημοκρατίας έως Σταθμό Σιντριβάνι) και κυμαίνεται από 5.0m έως 11.0m, ενώ στο τελευταίο κομμάτι από Σταθμό Σιντριβάνι έως και το πέρασ του τμήματος που μελετάται (Χ.Θ. 3+630), το πάχος μειώνεται πάλι και κυμαίνεται από 2.0m έως και τοπικά 6.0m.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες θέσεις στο εσωτερικό των Τεχνητών Επιχώσεων κατά την εκτέλεση των γεωτρήσεων εντοπίστηκαν κενά. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007)

1.5.2. Τεταρτογενείς Αποθέσεις

Η γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών ιζημάτων, η οποία εμφανίζεται κάτω από τις Τεχνητές Επιχώσεις, αποτελείται εν γένει από κανονικά στερεοποιημένους σχηματισμούς όπως μαλακές έως σταθερές και τοπικά στιφρές, σκούρες καστανές έως καστανές αμμώδεις ΑΡΓΙΛΟΥΣ (CL) χαμηλής κυρίως και τοπικά μέσης πλαστικότητας, από χαλαρές έως μέτρια πυκνές, καστανές έως καστανοπράσινες αργιλώδεις / ιλυώδεις ΑΜΜΟΥΣ (SC-SM) με χάλικες και από επίσης χαλαρούς έως μέτρια πυκνούς αργιλώδεις ΧΑΛΙΚΕΣ (GC) με άμμο. Οι παραπάνω γεωτεχνικοί σχηματισμοί δεν εμφανίζονται σε συνεχείς στρώσεις σημαντικού πάχους, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζουν μια σαφή στρωματογραφία. Απεναντίας, αλληλοτέμνονται, οδηγώντας σε συνεχείς εναλλαγές αργίλων – άμμων και χαλίκων τόσο κατά την κατακόρυφο όσο και κατά την οριζόντια διεύθυνση.

Το πάχος της γεωλογικής ενότητας των Τεταρτογενών ιζημάτων ποικίλει κατά μήκος του τμήματος Α. Πιο συγκεκριμένα εντοπίζονται περιοχές (Υποτμήμα 1) στις οποίες η εν λόγω ενότητα εντοπίζεται κάτω από τις Τεχνητές Επιχώσεις και εκτείνεται τουλάχιστον ως το πέρασ των γεωτρήσεων που ανορύχθηκαν (≈30 – 35m) και άλλες (Υποτμήμα 3) στις οποίες τα Τεταρτογενή ιζήματα απουσιάζουν εντελώς. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007)

1.5.3. Σειρά Ερυθρών Αργίλων

Η γεωλογική ενότητα των Ερυθρών Αργίλων αποτελείται από υπερστερεοποιημένους, Νεογενείς – Πλειοκαινικούς, γεωτεχνικούς σχηματισμούς, οι οποίοι παρουσιάζουν σαφώς αυξημένα μηχανικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με αυτούς της γεωλογικής ενότητας των Τεταρτογενών αποθέσεων. Πιο συγκεκριμένα, ο κύριος γεωτεχνικός σχηματισμός που

συνιστά την ενότητα είναι στιφρές έως σκληρές, καστανέρυθρες έως ερυθρές ΑΡΓΙΛΟΙ με άμμο έως αμμώδεις ΑΡΓΙΛΟΙ (CL-CI) χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας. Τοπικά στο εσωτερικό των παραπάνω αργίλων εντοπίζονται ενστρώσεις πυκνών έως πολύ πυκνών, καστανέρυθρων, αργιλωδών ΑΜΜΩΝ (SC) με χάλικες και αργιλωδών ΧΑΛΙΚΩΝ (GC) με άμμο. Επισημαίνεται ότι ο βαθμός διαγένεσης της γεωλογικής ενότητας των Ερυθρών Αργίλων είναι υψηλός με αποτέλεσμα στο εσωτερικό τους να εντοπίζονται και ημιβραχώδεις σχηματισμοί όπως πολύ ασθενείς έως ασθενείς ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΙ / ΙΛΥΟΛΙΘΟΙ και καλά συγκολλημένα ΛΑΤΥΠΟ-ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΗ.

Η ενότητα των Ερυθρών Αργίλων εμφανίζεται σχεδόν συστηματικά μέχρι το πέρας των γεωτρήσεων, με εξαίρεση τον Σταθμό Αγίας Σοφίας όπου κάτω από την εν λόγω ενότητα εμφανίζεται το βραχώδες Αλπικό υπόβαθρο της πόλης της Θεσσαλονίκης αποτελούμενο από ΓΝΕΥΣΙΟΥΣ. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007)

Όπως αναφέρθηκε, στην συγκεκριμένη διπλωματική, αναφορά γίνεται κυρίως στο Υποτμήμα 3. Στην συνέχεια αναλύονται οι γεωλογικές συνθήκες του υποτμήματος αυτού.

1.6. Γεωλογικά δεδομένα Υποτμήματος 3 (Χ.Θ. 1+908 – Χ.Θ. 3+630)

Στο τρίτο και τελευταίο επί μέρους τμήμα από τον Σταθμό Αγίας Σοφίας έως και μετά τον Σταθμό Πανεπιστήμιο (Χ.Θ. 1+908 – Χ.Θ. 3+630), η γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών αποθέσεων απουσιάζει με αποτέλεσμα κάτω από τις Τεχνητές Επιχώσεις να εμφανίζονται γεωτεχνικοί σχηματισμοί της Σειράς των Ερυθρών Αργίλων, οι οποίοι εκτείνονται τουλάχιστον ως το πέρας των γεωτρήσεων ($\approx 50\text{m}$) που ανορύχθησαν. Πρόκειται για ένα σχεδόν αποκλειστικά ημιβραχώδες τμήμα με ακόμα υψηλότερα μηχανικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με το προηγούμενα, καθώς σχεδόν στο σύνολό του εντοπίζονται σκληρές ΑΡΓΙΛΟΙ (CL-CI) με άμμο και με σποραδικές ψηφίδες, χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας έως ασθενείς ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΙ-ΙΛΥΟΛΙΘΟΙ.

Αναφορικά με το χρώμα των παραπάνω αργίλων επισημαίνεται ότι αρχικά εμφανίζονται κυανοπράσινες έως πρασινοκάστανες άργιλοι με διαποτισμούς οξειδίων ερυθρού χρώματος, ενώ κάτω από αυτές εμφανίζονται οι τυπικές ερυθρές έως καστανέρυθρες άργιλοι της Σειράς που εντοπίστηκαν και στο προηγούμενο υποτμήμα. Η παραπάνω διακύμανση του χρώματος εντοπίστηκε συστηματικά στον Σταθμό Πανεπιστήμιο με το όριο μεταξύ των κυανών και ερυθρών αργίλων να τοποθετείται περί τα 25 – 30m από την επιφάνεια του εδάφους.

Τοπικά, εντοπίζονται επίσης ημιβραχώδεις ενστρώσεις καλά συγκολλημένων έως μέτρια ισχυρών ΨΗΦΙΔΟ-ΛΑΤΥΠΟΠΑΓΩΝ και πυκνών έως πολύ πυκνών, αργιλωδών ΑΜΜΩΝ (SC) με χάλικες και αργιλωδών ΧΑΛΙΚΩΝ (GC) με άμμο. Στο εσωτερικό των σκληρών αργίλων εμφανίζονται οξειδώσεις μαγγανίου καθώς και πολλά ασβεστιτικά συγκρίματα. Πιο συγκεκριμένα στο τρίτο αυτό τμήμα επικρατεί η γεωτεχνική, ημιβραχώδης ενότητα Α2γ με εξαίρεση το τμήμα από Σταθμό Σιντριβάνι έως Διασταύρωση Σιντριβάνι όπου πάνω από την Α2γ εμφανίζονται οι γεωτεχνικές ενότητες Α2α και Α2β, με την Α2α να εμφανίζεται μόνο στην Διασταύρωση Σιντριβάνι μέχρι το βάθος των -13m και την Α2β να εμφανίζεται καθ' όλο το τμήμα που προαναφέρθηκε μέχρι το βάθος των -25m περίπου.

Σχετικά με την γεωτεχνική διαίρεση της Α2 στις Α2α, Α2β και Α2γ, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι αν και κατά μήκος της χάραξης οι συνθήκες βελτιώνονται με αποτέλεσμα να περνάμε από την μία γεωτεχνική ενότητα στην άλλη (Α2α σε Α2β και Α2β σε Α2γ) είναι δυνατό στο εσωτερικό της Α2γ να εμφανίζονται μικρότερες ζώνες χαμηλότερης αντοχής σε

θλίψη (A2β) όπως και στην A2β είναι δυνατό τοπικά να εντοπίζονται ζώνες υψηλότερων αντοχών (A2γ). (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ

2.1. Γενικά

Το σημαντικότερο πρόβλημα που δημιουργείται από την κατασκευή αβαθών σηράγγων σε αστικό περιβάλλον, είναι οι μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της υπόγειας εκσκαφής. Οι μετακινήσεις – καθιζήσεις αυτές, πέραν κάποιου ορίου, είναι πιθανό να βλάψουν επιφανειακές κατασκευές. Απαραίτητη είναι λοιπόν η μέτρηση αυτών, και η παρακολούθησή τους, τόσο κατά την κατασκευή, όσο και μετά το πέρας αυτής. Η μέτρηση των καθιζήσεων γίνεται μέσω χωροσταθμικών σημείων.

Έχουν θεσπιστεί όρια για την προστασία των επιφανειακών κατασκευών που αφορούν:

- τις μετακινήσεις της επιφάνειας του εδάφους, τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα
- τη γωνιακή παραμόρφωση
- τον ρυθμό εξέλιξης των καθιζήσεων
- τον ρυθμό ανοίγματος ρωγμών

Οι τιμές επιφυλακής και συναγερού για τις εδαφικές παραμορφώσεις στην επιφάνεια του εδάφους, σύμφωνα με τις προδιαγραφές μελετών και επιδόσεων για έργα Πολιτικού Μηχανικού, των Προδιαγραφών Υλικών και Εργασιών καθώς επίσης και των Διευκρινιστικών Εγγράφων φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Συνολικά μετά το πέρας του κάθε TBM.

Διέλευση	Επίπεδο επιφυλακής	Επίπεδο συναγερού
TBM 1	10 mm	15mm
TBM 2	18 mm	24 mm

Πίνακας 2.1-1: Επίπεδο επιφυλακής και συναγερού καθιζήσεων.

Για κάθε κτίριο ανεξάρτητα έχουν θεσπιστεί ξεχωριστά όρια επιφυλακής και συναγερού, ενδεικτικά παρατίθενται στον Πίνακα 2.1-2 συγκεντρωτικά οι τιμές των ευαίσθητων κατασκευών. Αναφέρονται επίσης τα αποτελέσματα της ανάλυσης επικινδυνότητας .

ΟΡΙΟ ΕΠΙΦΥΛΑΚΗΣ	Καθίζηση (mm)	10
	Γωνιακή Παραμόρφωση	1/1200
	Ρυθμός Καθίζησης (mm/day)	2
	Ρυθμός ανοίγματος Ρωγμών (mm/day)	0,5
ΟΡΙΟ ΣΥΝΑΓΕΡΜΟΥ	Καθίζηση (mm)	15
	Γωνιακή Παραμόρφωση	1/800
	Ρυθμός Καθίζησης (mm/day)	3
	Ρυθμός ανοίγματος Ρωγμών (mm/day)	1
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ	Καθίζηση (mm)	15
	Γωνιακή Παραμόρφωση	1/800

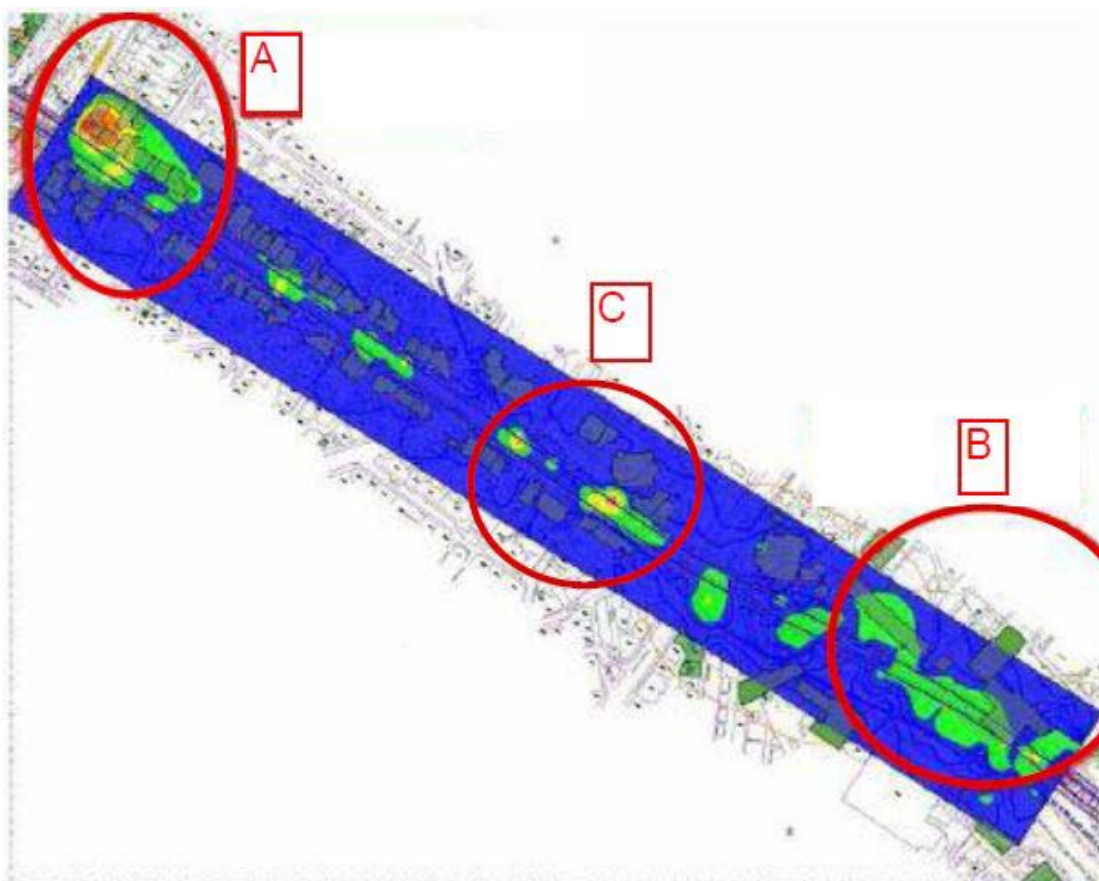
Πίνακας 2.1-2 Όρια επιφυλακής και συναγερού για ευαίσθητες κατασκευές

2.2. Εντοπισμός Λεκανών Καθιζήσεων

Ο υπολογισμός των καθιζήσεων γίνεται με τη χρήση γεωδαιτικών σημείων που τοποθετούνται καθ' όλο το μήκος της χάραξης της γραμμής του μετρό. Στη συνέχεια και ανά τακτά χρονικά διαστήματα λαμβάνει χώρα η μέτρηση των μετακινήσεων των σημείων αυτών. Με αυτό τον τρόπο εξετάζεται η διαχρονική εξέλιξη του φαινομένου, καθώς και εντοπίζονται τυχόν σημεία όπου υπερβαίνονται τα όρια που έχουν θεσπιστεί. Με βάση τα δεδομένα αυτά, και με τη χρήση γεωστατιστικών μεθόδων ακολουθεί η κατασκευή ισοβαθών κατανομών για τον εντοπισμό των σημείων όπου υπάρχουν σημαντικές καθιζήσεις.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής με τη γεωστατιστική μέθοδο Kriging και με χρήση του προγράμματος Surfer. Έτσι κατασκευάστηκαν τα γραφήματα ισοβαθών που ακολουθούν.

Στην Εικόνα 2.2-1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ισοβαθείς κατανομές του μεσοδιαστήματος Αγία Σοφία- Σιντριβάνι.



Εικόνα 2.2-1: Ισοβαθείς κατανομές μεσοδιαστήματος Αγία Σοφία- Σιντριβάνι (Δημακόπουλος, 2010)

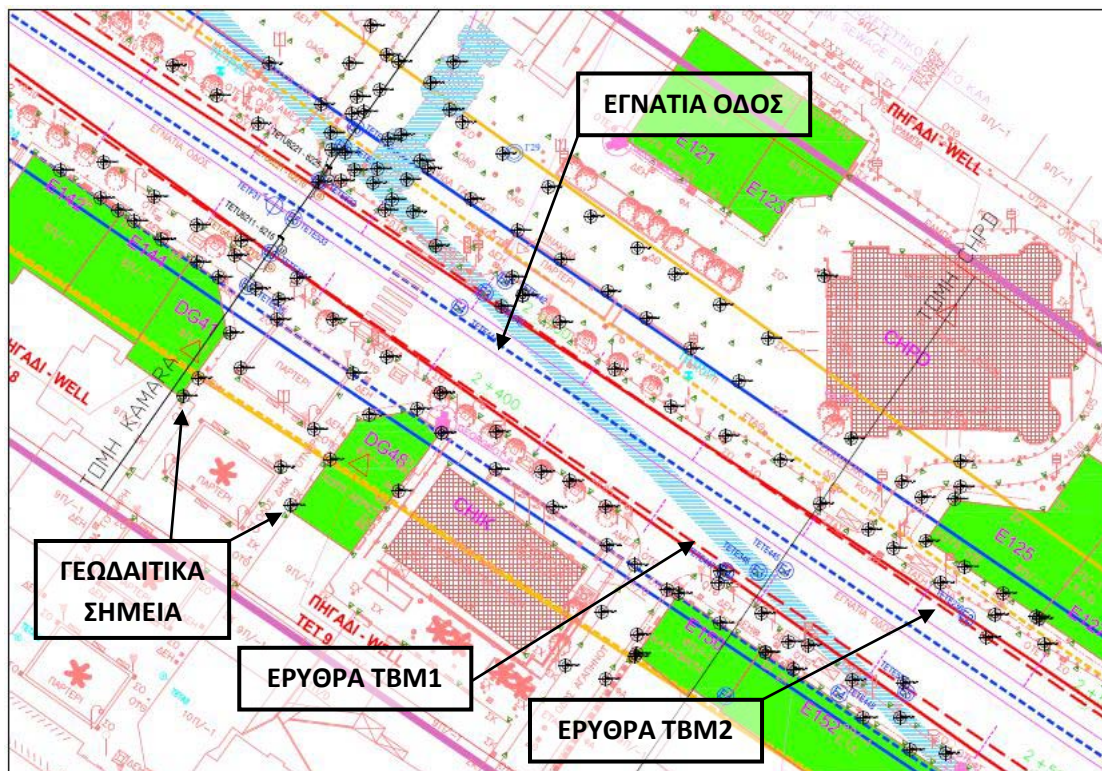
Για την κατασκευή της κατανομής αυτής έχουν χρησιμοποιηθεί οι μετρήσεις μετά το πέρας και των δύο TBM, άρα αφορά τις συνολικές καθιζήσεις. Εντοπίζονται καθιζήσεις σε τρεις θέσεις του μεσοδιαστήματος. Η πρώτη λεκάνη καθιζήσεων (Θέση A) βρίσκεται εντός της ακτίνας επιρροής του σταθμού Αγίας Σοφίας. Η δεύτερη (Θέση B) βρίσκεται εντός της ακτίνας επιρροής του σταθμού Σιντριβάνι. Η θέση C βρίσκεται εκτός της ακτίνας επιρροής των σταθμών. Στη θέση αυτή καταγράφηκαν καθιζήσεις, οι οποίες δεν επηρεάζονται από

τις μετακινήσεις λόγω της εκσκαφής των σταθμών και οφείλονται αποκλειστικά στη διάνοιξη των σηράγγων. Με βάση τη συνολική εικόνα των καθιζήσεων του μεσοδιαστήματος αυτού επιλέχθηκε να γίνει περαιτέρω διερεύνηση στη θέση C και συγκεκριμένα από τη Χ.Θ. 2+330 έως τη Χ.Θ. 2+490 όπου παρουσιάζεται στην Ενότητα 2.4.

2.3. Εξίσωση Gauss

Έχει παρατηρηθεί εμπειρικά και πειραματικά ότι η εξίσωση κανονικής κατανομής Gauss περιγράφει επαρκώς την κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων στην επιφάνεια του εδάφους, εγκάρσια στον άξονα διάνοιξης αβαθούς σήραγγας.

Η ακρίβεια των ισοβαθών που προκύπτουν με τη χρήση γεωστατιστικής μεθόδου εξαρτάται από την θέση και την πυκνότητα των επί τόπου μετρήσεων των γεωδαιτικών σημείων. Επιπλέον οι καθιζήσεις αποκτούν την μέγιστη τιμή τους στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από τον άξονα της σήραγγας όπου βρίσκεται η Εγνατία οδός. Δεδομένης της έλλειψης μετρήσεων γεωδαιτικών σημείων πάνω από τις θέσεις κατασκευής των σηράγγων, κρίθηκε απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων των ισοβαθών κατανομών.



Εικόνα 2.3-1: Γεωδαιτικά σημεία και ερυθρά ΤΒΜ

Προκειμένου να διορθωθεί το σφάλμα που προκύπτει από την έλλειψη γεωδαιτικών μετρήσεων στο κρισιμότερο σημείο δημιουργίας καθιζήσεων, κατασκευάστηκαν τομές στις θέσεις ενδιαφέροντος, όπου έγινε επίλυση της εξίσωσης Gauss. Η επίλυση βασίστηκε στα σημεία των ισοβαθών σε θέσεις όπου υπήρχε πλήθος γεωδαιτικών σημείων και η γεωστατιστική επεξεργασία έδινε αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η μαθηματική έκφραση της εξίσωσης Gauss δίνεται από τη σχέση:

$$s_v = s_{vmax} e^{-\left(\frac{y^2}{2i^2}\right)} \quad (2.3-1)$$

Όπου:

S_v : Η καθίζηση σε απόσταση y από τον άξονα συμμετρίας.

S_{vmax} : Η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους, στον άξονα της σήραγγας.

i : Η απόσταση του σημείου καμπής από τον άξονα συμμετρίας.

y : Η απόσταση από τον άξονα συμμετρίας, για την οποία βρίσκεται η s_v .

Με λογαρίθμηση της σχέσης 2.3-1 προκύπτει:

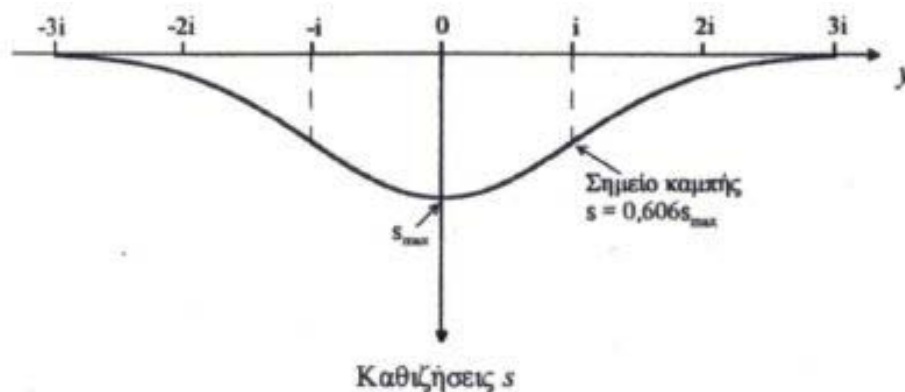
$$\ln(S_v) = -\frac{1}{2i^2} y^2 + \ln(S_{vmax}) \quad (2.3-2)$$

Η μορφή αυτή έχει μετασχηματιστεί σε εξίσωση ευθείας $Y=AX+B$ και απλοποιεί τους υπολογισμούς. Έτσι:

$$A = -\frac{1}{2i^2} \rightarrow i = \sqrt{\frac{-1}{2A}} \quad (2.3-3)$$

και

$$B = \ln(S_{vmax}) \Rightarrow S_{vmax} = e^B \quad (2.3-4)$$



Εικόνα 2.3-2: Κατανομή καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. (Παναγόπουλος, 2008)

Περιγράφοντας την κατανομή των καθιζήσεων εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας με μία μαθηματική σχέση, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού σημαντικών παραμέτρων. Η σημαντικότερη παράμετρος που μπορεί να υπολογισθεί είναι η απώλεια εδαφικού όγκου (V_s). Το μέγεθος αυτό εκφράζει τον όγκο του εδάφους που υποχώρησε ανά μονάδα μήκους σήραγγας. Υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την εξίσωση Gauss. Έτσι:

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} S_v dy = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{vmax} e^{\left(\frac{y^2}{2i^2}\right)} dy \approx \sqrt{2\pi} i s_{vmax} \quad (2.3-5)$$

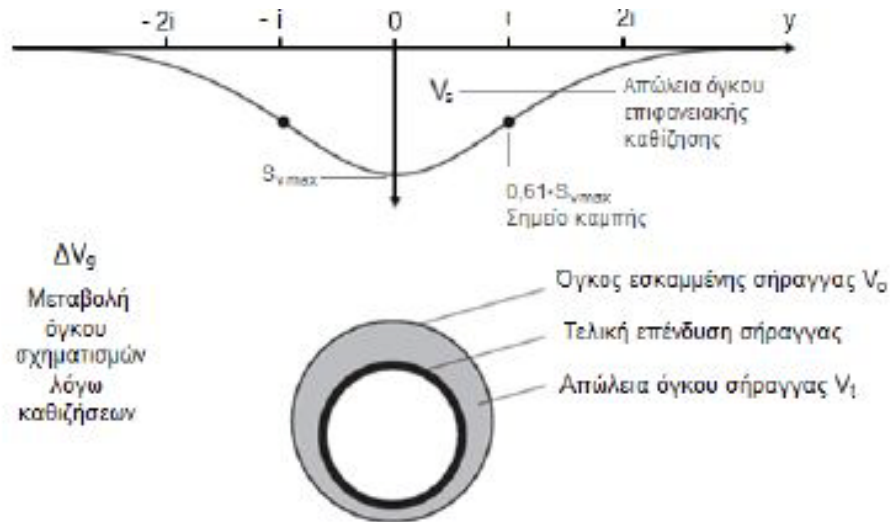
Το μέγεθος αυτό ανοιγμένο προς τον όγκο εκσκαφής της σήραγγας ονομάζεται σχετική απώλεια εδαφικού όγκου (V_l). Πιο συγκεκριμένα:

$$V_l = \frac{V_s}{V} \% \quad (2.3-6)$$

όπου V ο όγκος εκσκαφής της σήραγγας.

Η απώλεια εδαφικού όγκου γενικά προκαλείται από την διαφορά του όγκου εκσκαφής από τον όγκο που καταλαμβάνει η επένδυση της σήραγγας, συνυπολογίζοντας και τον όγκο του ενέματος που εισπίζεται στον κενό χώρο που δημιουργείται. Έτσι αφαιρώντας από τον όγκο εκσκαφής τον όγκο της επένδυσης και του ενέματος προκύπτει ο κενός όγκος που δημιουργήθηκε. Το μέγεθος των καθιζήσεων καθώς και το κατά πόσο θα υπάρξει η

μεταφορά του κενού όγκου εξ' ολοκλήρου στην επιφάνεια του εδάφους εξαρτάται από την συμπεριφορά του εδάφους που διανοίγεται.



Εικόνα 2.3-3: Απώλεια εδαφικού όγκου σήραγγας (Ρίζος, 2010)

Σε περίπτωση διάνοιξης αβαθούς σήραγγας σε έδαφος υπό αστραγγιστες συνθήκες προκύπτει ότι η απώλεια εδαφικού όγκου μεταφέρεται πρακτικά ολόκληρη στην επιφάνεια. Από την περίπτωση αυτή εξαιρούνται μαλακοί σχηματισμοί με μεγάλες δυνατότητες στερεοποίησης, καθώς λόγω της στερεοποίησης αναπτύσσονται μακροχρόνιες καθιζήσεις. Υπό στραγγισμένες συνθήκες, για παράδειγμα σε αμμώδης σχηματισμούς, λόγω της αναδιάταξης των κόκκων της άμμου και της αύξησης του όγκου που καταλαμβάνει (φαινόμενο διασταλτικότητας), ο όγκος της μετακίνησης στην επιφάνεια δεν ταυτίζεται με τον όγκο της μετακίνησης στην εκσκαφή.

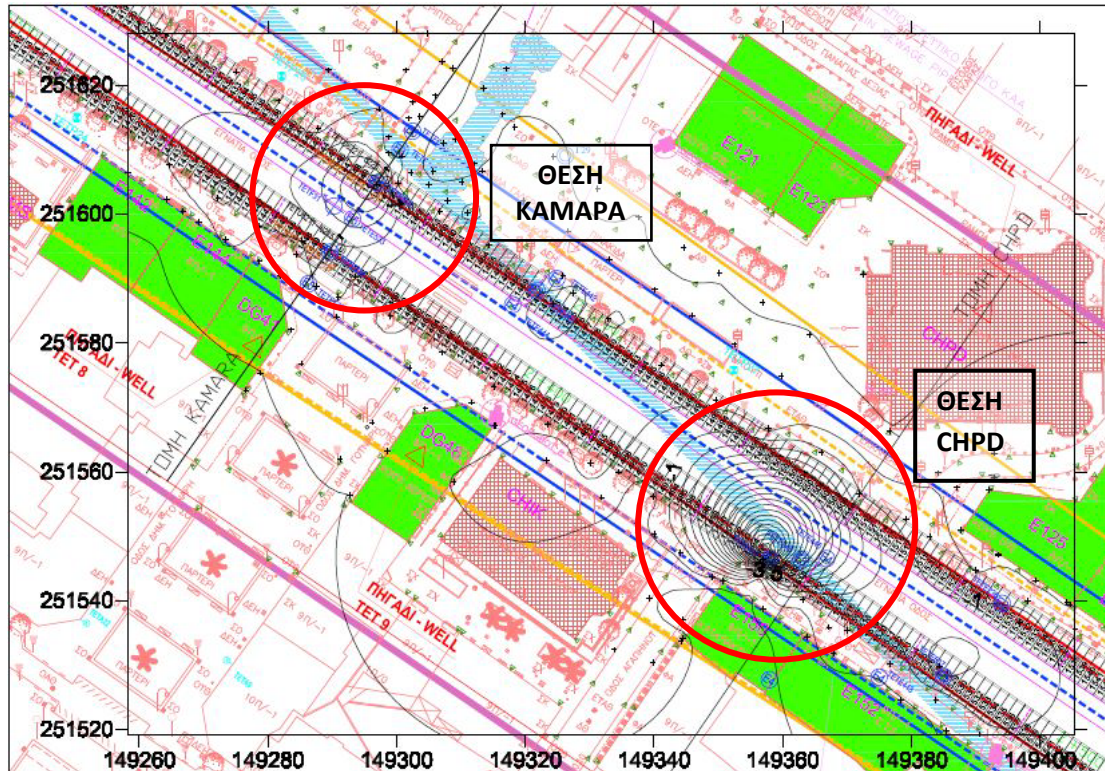
2.4. Διερεύνηση Καθιζήσεων από Χ.Θ. 2+330 έως Χ.Θ.2+490

Όπως αναφέρθηκε το τμήμα της χάραξης του μετρό Θεσσαλονίκης από τη Χ.Θ. 2+330 έως τη Χ.Θ. 2+490 θα αποτελέσει το τμήμα διερεύνησης της συγκεκριμένης εργασίας. Αυτό προέκυψε από το γεγονός ότι αποτελεί το μοναδικό σημείο του μεσοδιαστήματος στο οποίο οι καθιζήσεις οφείλονται αποκλειστικά στην διάνοιξη των σηράγγων και όχι σε μετακινήσεις λόγω της αντιστήριξης των σταθμών.

Από τα γεωδαιτικά σημεία του τμήματος αυτού κατασκευάστηκαν χάρτες ισοβαθών κατανομών. Βάση της ημερομηνίας της μέτρησης του οργάνου και της ημερομηνίας όπου πέρασε το κάθε TBM, έγινε ξεχωριστή κατασκευή χαρτών για τις καθιζήσεις μετά το πέρας του TBM1 και του TBM2. Στη συνέχεια αφαιρετικά από τους δύο αυτούς χάρτες κατασκευάστηκε χάρτης καθιζήσεων που οφείλονται αποκλειστικά στο πέρας του TBM2. Η υπόθεση αυτή εμπεριέχει σφάλματα, αλλά λαμβάνοντας υπόψη ότι τα δύο TBM περνάνε με χρονική διαφορά περίπου τριών μηνών, μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Οι τρεις αυτοί μήνες μπορούν να θεωρηθούν επαρκές χρονικό διάστημα, όπου έχουν ολοκληρωθεί οι καθιζήσεις από το πέρας του TBM1 και η περαιτέρω εξέλιξη του φαινομένου οφείλεται αποκλειστικά στο TBM2.

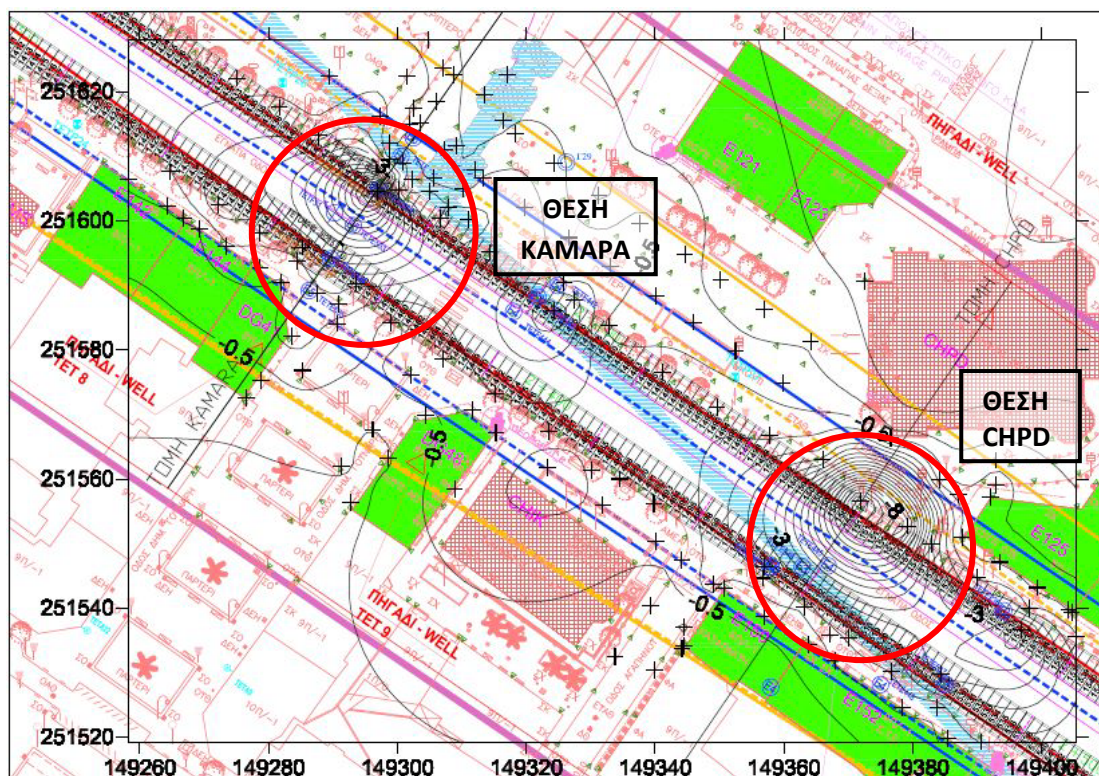
Στην Εικόνα 2.4-1 που ακολουθεί φαίνονται οι ισοβαθείς μετά το πέρας του TBM1 από την περιοχή μελέτης. Καθιζήσεις εντοπίζονται σε δύο θέσεις κοντά των οποίων βρίσκονται

σημαντικές κατασκευές. Στην πρώτη θέση βρίσκεται η αψίδα του Γαλέριου (Καμάρα) και στη δεύτερη θέση ο Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς.



Εικόνα 2.4-1 Ισοβαθείς μετά το πέρας του TBM1

Στην Εικόνα 2.4-2 φαίνεται η κατάσταση των καθιζήσεων αφού ακολούθησε και το πέρας του TBM2. Το μέγεθος των καθιζήσεων αυξάνεται κοντά στις θέσεις των κατασκευών της αψίδας του Γαλέριου (Καμάρα) και του Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς.



Εικόνα 2.4-2 Ισοβαθείς μετά το πέρας του TBM2

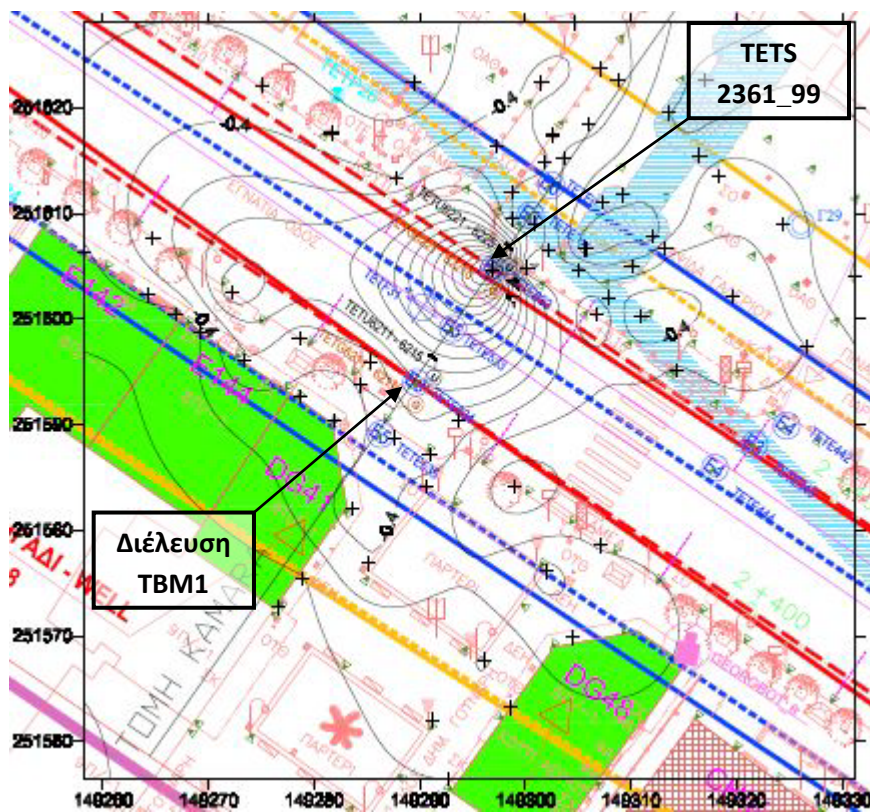
Στις Χ.Θ. που διερευνήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι οι καθιζήσεις συγκεντρώνονται στις θέσεις Καμάρα και Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς. Στις θέσεις αυτές έγινε πιο αναλυτική επεξεργασία των δεδομένων για την καλύτερη ερμηνεία τους.

2.4.1. ΘΕΣΗ ΚΑΜΑΡΑ (Χ.Θ. 2+361)

2.4.1.1. Υπολογισμός Λεκάνης Καθιζήσεων

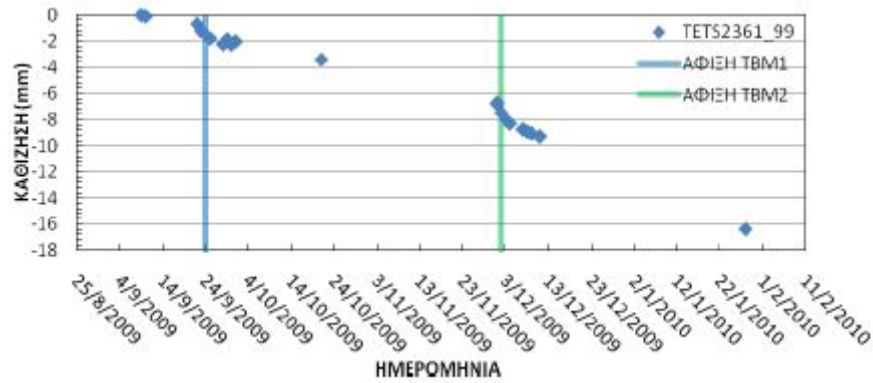
Η θέση αυτή αποτελεί θέση υψηλού ενδιαφέροντος, καθώς η προβολή της ερυθράς του TBM2 στην επιφάνεια του εδάφους, βρίσκεται σε απόσταση περίπου 7m από την Θριαμβική Αψίδα του Γαλερίου (Καμάρα). Πρόκειται για ένα από τα πιο χαρακτηριστικά μνημεία της Θεσσαλονίκης που χρονολογείται από τα χρόνια της Ρωμαϊκής «Τετραρχίας» στις αρχές του 4^{ου} μ.Χ. αιώνα.

Απομονώνοντας τις μετρήσεις των οργάνων στις θέσεις κοντά στην Καμάρα, σε χρονικό διάστημα μετά το πέρας του TBM1, κατασκευάστηκε ο χάρτης ισοβαθών κατανομών της Εικόνας 2.4-3. Τη μεγαλύτερη μετακίνηση κατέγραψε το γεωδαιτικό όργανο TETS 2361_99, με τιμή -2,22mm. Το όργανο αυτό βρίσκεται πάνω από την ερυθρά της χάραξης του TBM2 σε απόσταση περίπου 12,7 m από την ερυθρά του TBM1. Δεδομένου ότι κοντινότερα όργανα έχουν καταγράψει μικρότερες μετακινήσεις, η τιμή αυτή μπορεί να οφείλεται σε εξωγενείς παράγοντες και όχι στις μετακινήσεις λόγω της διάνοιξης.

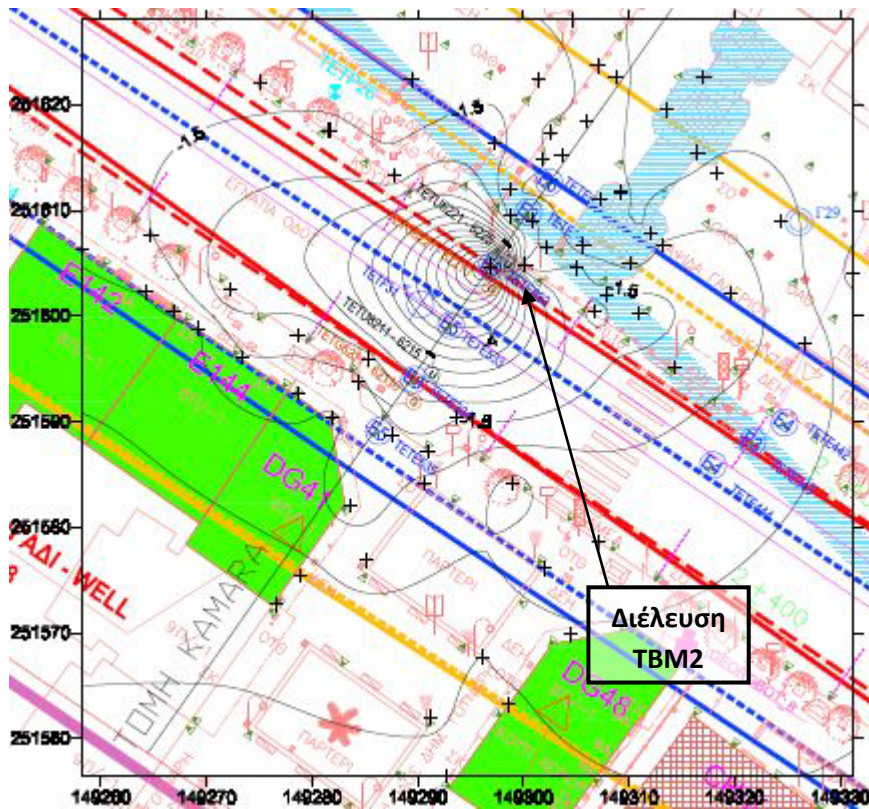


Εικόνα 2.4-3: Ισοβαθείς στη θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM1

Τα ίδια όργανα μετρημένα σε χρονικό διάστημα μετά το πέρας του TBM2 παράγγααν τον χάρτη ισοβαθών της Εικόνας 2.4-5. Οι καθιζήσεις εντοπίζονται στην ίδια θέση όπου βρίσκονταν και πριν το πέρας του TBM2. Τη μεγαλύτερη μετακίνηση κατέγραψε ξανά το γεωδαιτικό όργανο TETS 2361_99, με τιμή $-9,29\text{mm}$. Τα γειτονικά όργανα έχουν καταγράψει σημαντικά μικρότερες μετρήσεις, με μέγιστη τιμή τα $-1,82\text{mm}$. Το γεγονός αυτό μπορεί να θέσει υπό αμφισβήτηση την μέτρηση του οργάνου TETS 2361_99. Ειδικότερα αν συνυπολογιστεί ότι η μετακίνηση του οργάνου αυτού ξεκίνησε μήνες πριν την διέλευση του TBM2, στου οποίου την ερυθρά έχει τοποθετηθεί, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η υψηλή τιμή του οργάνου αυτού πιθανόν να οφείλεται σε κακή τοποθέτηση του ή σε κάποια τοπική γεωλογική ανωμαλία. Η πιθανότητα λανθασμένης μέτρησης αποκλείεται καθώς υπάρχει μεγάλο πλήθος μετρήσεων του οργάνου, όπου η μετακίνηση του αυξάνει διαχρονικά, γεγονός που καθιστά την συνεχώς λανθασμένη μέτρηση του ίδιου οργάνου απίθανη. Οι μετρήσεις του οργάνου TETS 2361_99 για τις διάφορες χρονικές στιγμές φαίνονται στην Εικόνα 2.4-4 που ακολουθεί.

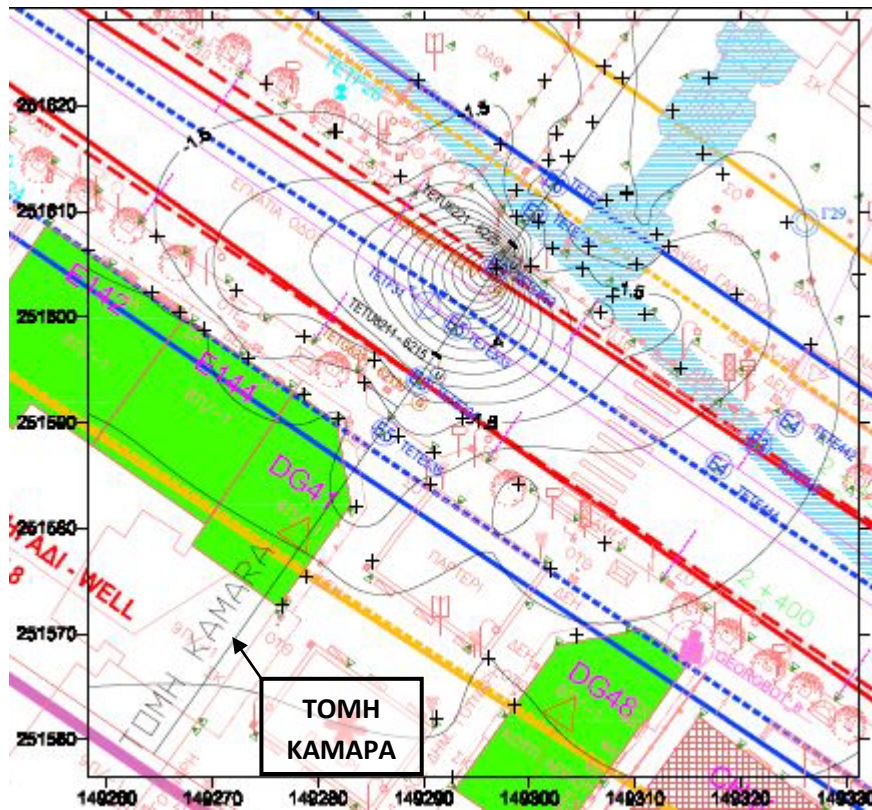


Εικόνα 2.4-4 Διαχρονική καθίζηση οργάνου TETS2361_99 (Δημακόπουλος, 2010)



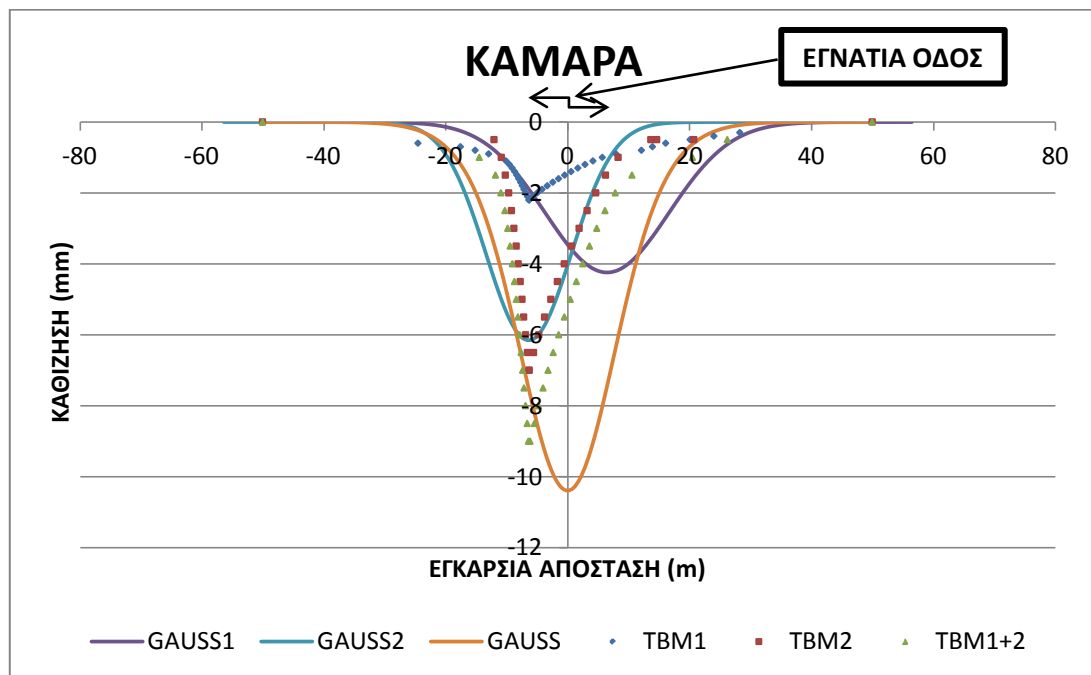
Εικόνα 2.4-5 Ισοβαθείς στη θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM2

Για την περαιτέρω ανάλυση των καθιζήσεων, είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός της επιρροής του κάθε TBM ξεχωριστά. Για να επιτευχθεί ο διαχωρισμός αυτός αφαιρέθηκαν οι τιμές των οργάνων μετά την διέλευση του TBM1 και μετά την διέλευση του TBM2. Με τη διαδικασία αυτή παράχθηκε ο χάρτης της Εικόνας 2.4-6, όπου απεικονίζονται οι ισοβαθείς που θα δημιουργούνταν αποκλειστικά από την διέλευση του TBM2. Η μέγιστη μετακίνηση καταγράφηκε από το όργανο TETS 2361_99. Πρακτικά, πρόκειται για τη διαφορά της τελικής καθίζησης μετά το πέρας του TBM2 (9,29mm) και της καθίζησης μετά το πέρας του TBM1 (2,22mm). Έτσι η μετακίνηση του οργάνου αυτού που οφείλεται αποκλειστικά στην διέλευση του TBM2 είναι 7,07mm (9,26mm – 2.22mm).



Εικόνα 2.4-6: Ισοβαθείς αποκλειστικά από την διέλευση του TBM2 στη θέση ΚΑΜΑΡΑ

Στη θέση όπου εντοπίζεται η μέγιστη τιμή των καθιζήσεων κατασκευάστηκε τομή εγκάρσια στην χάραξη της πορείας των TBM. Τα σημεία τομής με τις ισοβαθείς καταγράφηκαν στο Γράφημα 2.4-1, όπου στην συνέχεια έγινε επίλυση της εξίσωσης Gauss.



Γράφημα 2.4-1: Καθιζήσεις στην τομή ΚΑΜΑΡΑ και προσαρμογή κατανομής Gauss.

Στο παραπάνω γράφημα ως σημεία εμφανίζονται οι θέσεις τομής με τις ισοβαθείς για το πέρασ του TBM1, το πέρασ και των δυο TBM (TBM1+2) και ξεχωριστά η επιρροή από το TBM2. Θεωρητικά οι καθιζήσεις λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους πάνω από τον άξονα διάνοιξης της σήραγγας. Όπως αναφέρθηκε στις θέσεις αυτές βρίσκεται η Εγνατία οδός στην οποία δεν έχουν τοποθετηθεί γεωδαιτικά όργανα. Για να διορθωθεί το σφάλμα αυτό έγινε επίλυση της εξίσωσης Gauss. Η επίλυση έγινε με γνώμονα δύο βασικούς περιορισμούς. Να βασίζεται στα σημεία όπου έχουν τοποθετηθεί γεωδαιτικά όργανα με μεγάλη πυκνότητα, όπου και τα αποτελέσματα της γεωστατιστικής είναι αξιόπιστα. Επιπλέον οι καθιζήσεις που προκαλούνται από κάθε TBM να λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους πάνω από τον άξονα διάνοιξης του. Έτσι παράχθηκαν οι καμπύλες Gauss, ξεχωριστά για το πέρασ του TBM1 (GAUSS1), το πέρασ και των δυο TBM (GAUSS), και την επιρροή από το πέρασ του TBM2 (GAUSS2).

Η σημαντική απόκλιση της καμπύλης Gauss και των σημείων των ισοβαθών, ειδικότερα στην περίπτωση του TBM1, οφείλεται στην εξαιρετικά μεγάλη τιμή του οργάνου TETS 2361_99, σε σχέση με τις υπόλοιπες μετρήσεις. Το γεγονός αυτό καθιστά εξαιρετικά δύσκολη την προσαρμογή μιας κανονικής κατανομής, με τους περιορισμούς να πρέπει να τηρηθούν. Για τον λόγο αυτό, και καθώς όπως έχει αναφερθεί η μέτρηση του οργάνου TETS 2361_99 είναι πιθανώς λανθασμένη, στην συνέχεια θα γίνει επεξεργασία χωρίς το όργανο αυτό.

Στον Πίνακα 2.4-1 που ακολουθεί φαίνονται τα μεγέθη που υπολογίστηκαν βάση των κατανομών Gauss για το TBM1 και το TBM2. Τα μεγέθη αυτά υπολογίστηκαν κάνοντας χρήση των τύπων 3.3-3 έως 3.3-6.

TBM1		TBM2	
i (m)	10,101	i (m)	6,967
S_{max} (mm)	4,238	S_{max} (mm)	6,150
V_s (m³)	0,107	V_s (m³)	0,107
Excavation (m³)	30,093	Excavation (m³)	30,093
V_L (%)	0,356	V_L (%)	0,356

Πίνακας 2.4-1 : Μεγέθη που υπολογίστηκαν από την κατανομή Gauss στην τομή ΚΑΜΑΡΑ

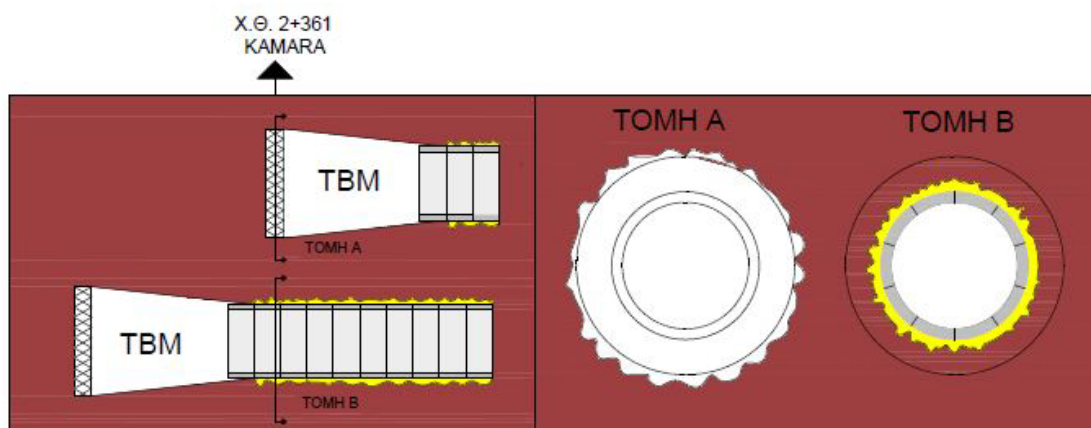
2.4.1.2. Υπολογισμός απώλειας εδαφικού όγκου από τις παραμέτρους λειτουργίας του TBM

Ο υπολογισμός της απώλειας εδαφικού όγκου στα προηγούμενα κεφάλαια γινόταν έμμεσα, μέσω των καθιζήσεων. Στην πραγματικότητα η καθίζηση είναι το αποτέλεσμα της απώλειας εδαφικού όγκου. Ο υπολογισμός της πηγής ενός φαινομένου μέσω του αποτελέσματος εμπειρέχει υποθέσεις που οδηγούν εύκολα σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

Στο παρόν κεφάλαιο, ακολουθείται η αντίστροφη πορεία. Μέσω των παραμέτρων λειτουργίας των TBM, υπολογίζεται άμεσα ο κενός χώρος που δημιουργείται από την κατασκευαστική διαδικασία. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται μέσω των παρακάτω βημάτων.

Αρχικά η κοπτική κεφαλή του TBM βρίσκεται στην Χ.Θ. 2+361 (Θέση ΚΑΜΑΡΑ). Μόλις το TBM (Εικόνα 2.4-7) διανοίξει το μετωπικό έδαφος στην θέση αυτή δημιουργείται ο κενός

χώρος που φαίνεται στην ΤΟΜΗ Α. Από την ζύγιση του εσκαμμένου εδάφους, και ανά μέτρο μήκους μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος εκσκαφής στην συγκεκριμένη θέση βάση του επιτόπου ειδικού βάρους του εδάφους. Τη χρονική στιγμή όπου η ουρά του TBM έχει φτάσει στη θέση ΚΑΜΑΡΑ (Χ.Θ. 2+361) τοποθετούνται τα προκατασκευασμένα πλαίσια και ενεματώνεται ο κενός χώρος ανάμεσα στην επένδυση και το έδαφος (ΤΟΜΗ Β).



Εικόνα 2.4-7: Εκσκαφή και ενεμάτωση σήραγγας με την προχώρηση του TBM

Στον Πίνακα 2.4-2 που ακολουθεί φαίνεται το βάρος του εσκαμμένου σε σχέση με την προχώρηση της κοπτικής κεφαλής του κάθε TBM στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.

ΕΚΣΚΑΦΗ					
TBM1			TBM2		
Χ.Θ. ΚΟΠΤΙΚΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΠΡΟΧΩΡΗΣΗ	ΒΑΡΟΣ ΛΑΣΠΗΣ	Χ.Θ. ΚΟΠΤΙΚΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ	ΠΡΟΧΩΡΗΣΗ	ΒΑΡΟΣ ΛΑΣΠΗΣ
m	m	tn	m	m	tn
2357,890	-	-	2357,940	-	-
2359,430	1,540	99,011	2359,450	1,510	91,300
2360,890	1,460	98,206	2360,970	1,520	91,496
2362,420	1,530	97,833	2362,470	1,500	91,082
2363,920	1,500	94,965	2363,960	1,490	92,344
ΜΗΚΟΣ	6,030	m	ΜΗΚΟΣ	6,020	m
ΟΓΚΟΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ	30,083	m ³ /m	ΟΓΚΟΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ	28,295	m ³ /m

Πίνακας 2.4-2 Όγκος εκσκαφής στη θέση ΚΑΜΑΡΑ

Διαιρώντας το βάρος της λάσπης με το in situ ειδικό βάρος του σχηματισμού έχουμε τον όγκο του πετρώματος που διανοίχθηκε. Για να υπολογιστεί ο όγκος εκσκαφής ανά μέτρο μήκους διαιρούμε με το μήκος προχώρησης.

Στον Πίνακα 2.4-3 που ακολουθεί φαίνεται ο όγκος του ενέματος σε σχέση με την προχώρηση της κοπτικής κεφαλής του κάθε TBM στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.

ΕΝΕΜΑΤΩΣΗ							
TBM1				TBM2			
Χ.Θ. ΔΑΧΤΥΛΙΔΙΟΥ	ΠΡΟΧΩΡΗΣΗ	ΟΓΚΟΣ	ΠΙΕΣΗ	Χ.Θ. ΔΑΧΤΥΛΙΔΙΟΥ	ΠΡΟΧΩΡΗΣΗ	ΟΓΚΟΣ	ΠΙΕΣΗ
m	m	lt	bar	m	m	lt	bar
2359,000	-	-	2,449	2357,530	-	-	1,919
2359,000	0,000	4015,627	2,422	2359,030	1,500	4168,331	1,792
2362,000	3,000	4030,315	2,858	2360,520	1,490	4155,423	2,044
2363,510	1,510	4012,623	2,275	2362,030	1,510	4313,143	2,066
2364,980	1,470	4014,208	1,708	2363,530	1,500	4272,220	2,090
ΜΗΚΟΣ	5,980		m	ΜΗΚΟΣ	6,000		m
ΟΓΚΟΣ ΕΝΕΜΑΤΟΣ	2,688		m ³ /m	ΟΓΚΟΣ ΕΝΕΜΑΤΟΣ	2,818		m ³ /m

Πίνακας 2.4-3: Όγκος ενέματος στη θέση ΚΑΜΑΡΑ

Για τον υπολογισμό της απώλειας εδαφικού όγκου ακολουθείται η εξής διαδικασία. Από των όγκο εκσκαφής, αφαιρούνται ο όγκος που καταλαμβάνει η επένδυση και το ένεμα που χρησιμοποιήθηκε ανά μέτρο μήκους. Δεδομένου ότι η εξωτερική διάμετρος της επένδυσης είναι 5,9m (Πίνακας 1.4-1), ο όγκος που καταλαμβάνει είναι σταθερά 27,34m³/m. Ο όγκος εκσκαφής και ο όγκος του ενέματος έχουν υπολογιστεί στους πίνακες 2.4-2 & 2.4-3.

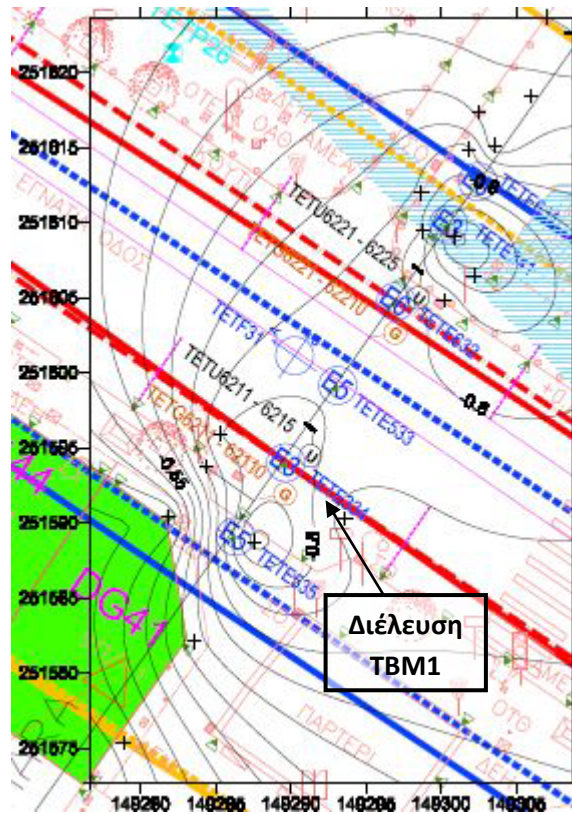
ΑΠΩΛΕΙΑ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΟΓΚΟΥ		
	TBM1	TBM2
V _s (m ³ /m)	0,055	-1,863
V _i (%)	0,002	-0,062

Πίνακας 2.4-4 Απώλεια Εδαφικού όγκου από παραμέτρους λειτουργίας TBM στη θέση ΚΑΜΑΡΑ

Παρατηρούμε ότι και για τα δύο TBM η απώλεια εδαφικού όγκου είναι σχεδόν μηδενική. Με βάση το γεγονός αυτό δεν δικαιολογούνται οι καθιζήσεις που καταγράφηκαν στην θέση ΚΑΜΑΡΑ. Οι μικρές μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν (της τάξης των 2mm) πιθανόν να οφείλονται σε στερεοποίηση του υλικού ή αποτόνωση του εδάφους μπροστά από το μέτωπο. Οι μετρήσεις του οργάνου TETS 2361_99 και σε αυτή την περίπτωση δεν δικαιολογούνται.

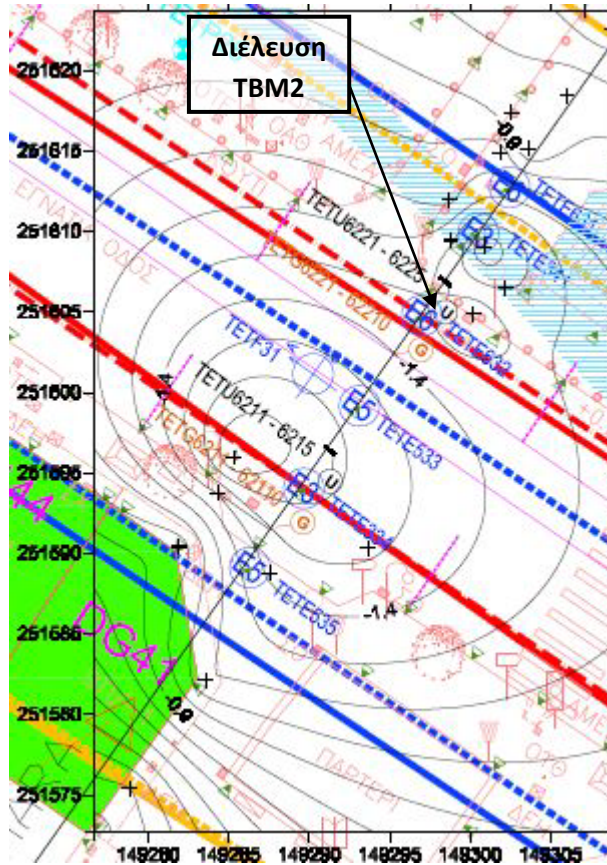
2.4.1.3. Κατασκευή λεκάνης καθιζήσεων χωρίς το Γεωδαιτικό σημείο TETS 2361_99

Όπως αναφέρθηκε, η μέτρηση του οργάνου TETS 2361_99 δεν θεωρείται απόλυτα αξιόπιστη. Απαραίτητη είναι λοιπόν η κατασκευή της λεκάνης των καθιζήσεων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι μετρήσεις του. Ακολουθώντας την διαδικασία που έχει περιγραφεί κατασκευάζονται οι χάρτες ισοβαθών κατανομών μέσω γεωστατιστικής επεξεργασίας. Στον χάρτη της Εικόνας 2.4-8 που ακολουθεί φαίνεται ο χάρτης ισοβαθών κατανομών που οφείλεται στην διέλευση του TBM1.



Εικόνα 2.4-8: Ισοβαθείς στη θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM1 χωρίς το όργανο TETS2364_33

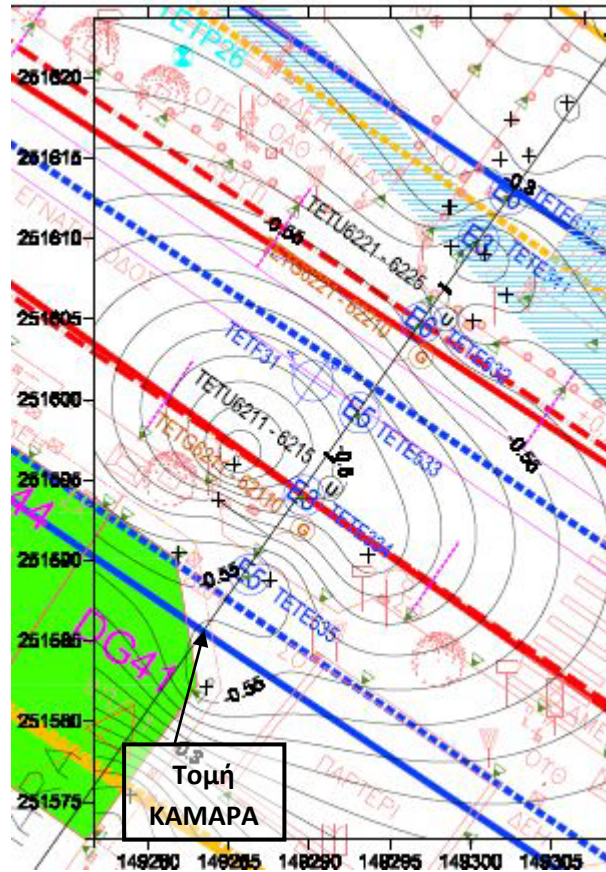
Την μεγαλύτερη καθίζηση κατέγραψε το όργανο TETS2364_33 και είναι ίση με $-1,03\text{mm}$. Δεδομένου ότι η ακρίβεια του γεωδαιτικού οργάνου είναι της τάξης των 2mm , στην συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ότι πρακτικά δεν σημειώνονται καθιζήσεις. Η κατανομή των καθιζήσεων στην ίδια θέση μετά το πέρας του TBM2 φαίνεται στον χάρτη της Εικόνα 2.4-9. Οι καθιζήσεις αυτές οφείλονται στην επιρροή και των δύο TBM.



Εικόνα 2.4-9 Ισοβαθείς στη θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του ΤΒΜ2 χωρίς το όργανο ΤΕΤΣ2364_33

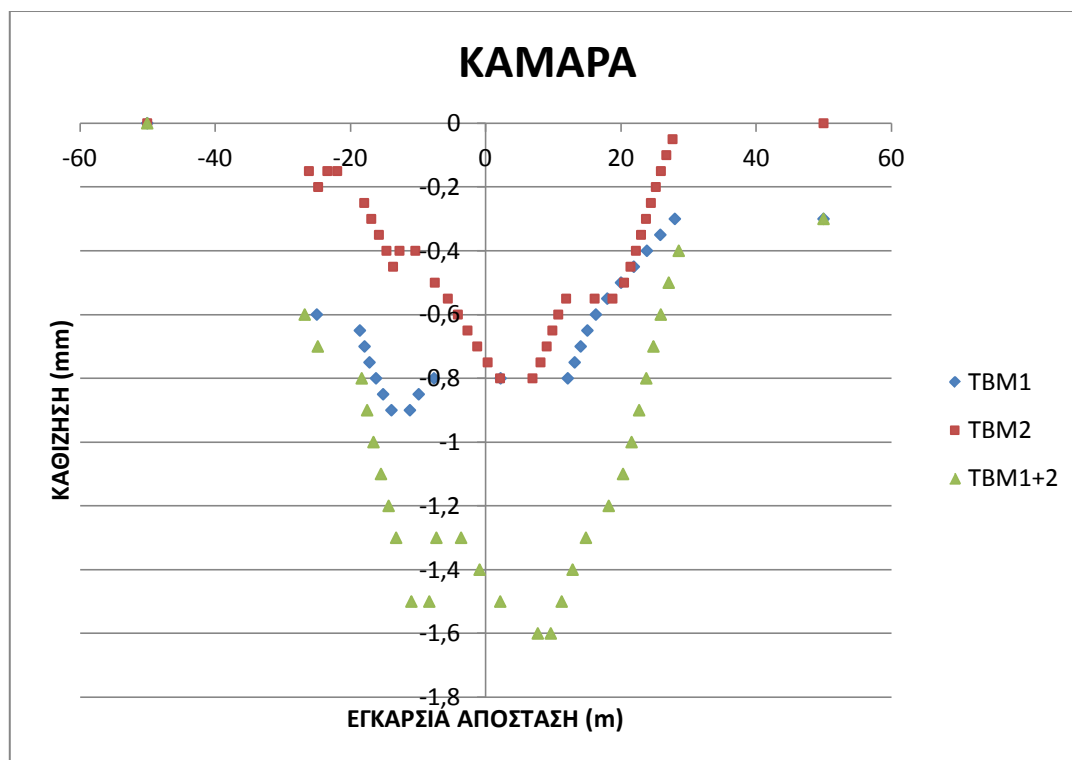
Η μέγιστη καθίζηση σε αυτή την περίπτωση καταγράφηκε από το όργανο ΤΕΤΣ2360_97, και είναι -1,82 mm. Σε αυτή την περίπτωση η τιμή της μέγιστης καθίζησης βρίσκεται στα όρια της ακρίβειας του γεωδαιτικού οργάνου.

Απομονώνοντας τις καθιζήσεις που οφείλονται αποκλειστικά στην επιρροή του ΤΒΜ 2 κατασκευάζεται ο χάρτης της Εικόνας 2.4-10.



Εικόνα 2.4-10 :Ισοβαθείς αποκλειστικά από την διέλευση του TBM2 στη θέση ΚΑΜΑΡΑ χωρίς το όργανο TETS2364_33

Την μέγιστη τιμή σε αυτή την περίπτωση κατέγραψε το όργανο TETS2360_97, και είναι -1,02mm. Στην τομή στην θέση ΚΑΜΑΡΑ, κατασκευάζεται το Γράφημα 2.4-1. Στο γράφημα αυτό απεικονίζονται οι θέσεις όπου η τομή τέμνει τις ισοβαθείς, ξεχωριστά για κάθε χρονική στιγμή. Με μπλε (TBM1) φαίνονται οι θέσεις τομής με τις ισοβαθείς τη χρονική στιγμή μετά το πέρας του TBM1. Με κόκκινο φαίνονται οι θέσεις τομής με τις ισοβαθείς που προέκυψαν αποκλειστικά από την επιρροή του TBM2 και με πράσινο η τελική κατάσταση μετά το πέρας και των δύο TBM.



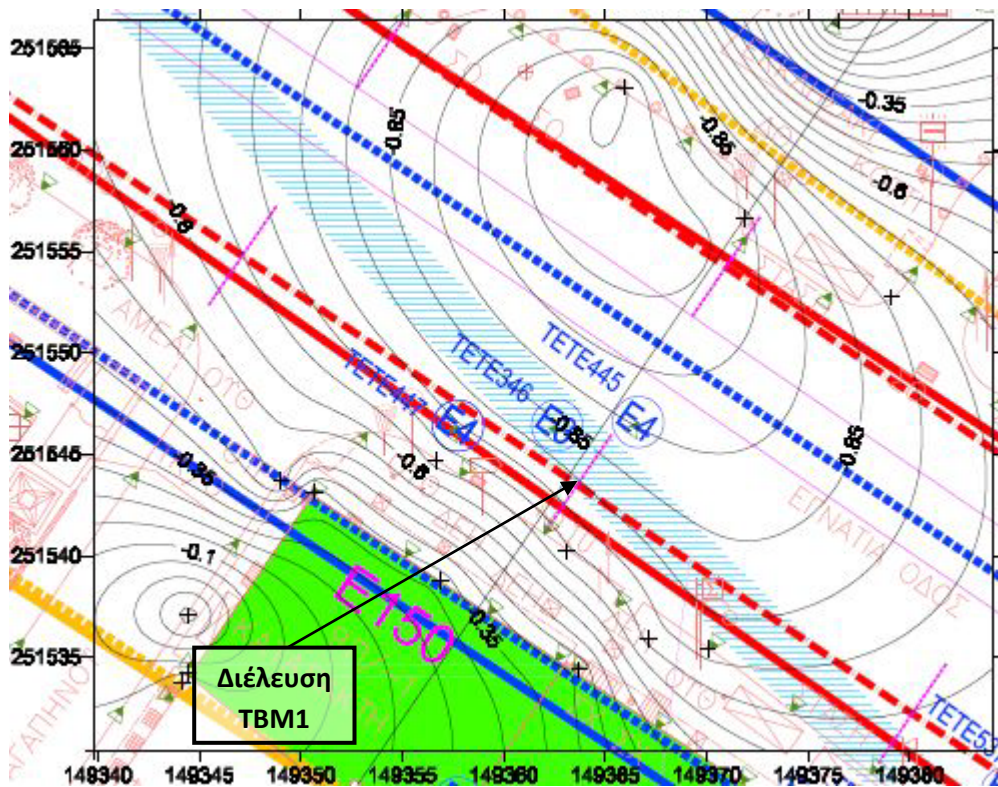
Γράφημα 2.4-2 : Καθιζήσεις στη τομή ΚΑΜΑΡΑ χωρίς το όργανο TETS2364_33

Σε όλες τις περιπτώσεις χωρίς το όργανο TETS 2361_99, οι καθιζήσεις που καταγράφηκαν είναι εξαιρετικά χαμηλές. Καθώς, όπως αναφέρθηκε η ακρίβεια του γεωδαιτικού οργάνου είναι 2mm, όλες οι τιμές στην τομή αυτή βρίσκονται στα όρια της ακρίβειας του οργάνου. Για το λόγο αυτό δεν έγινε προσαρμογή της κανονικής κατανομής Gauss.

2.4.2. ΘΕΣΗ Ι.Ν. ΠΑΝΑΓΙΑΣ ΔΕΞΙΑΣ (Χ.Θ.2+450)

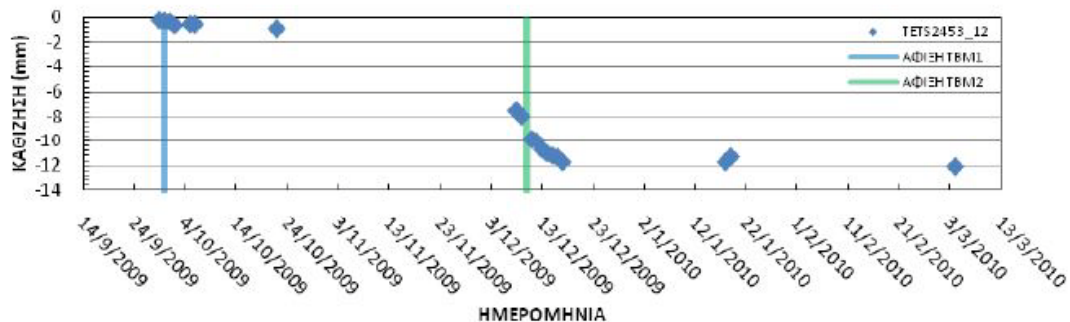
2.4.2.1. Υπολογισμός Λεκάνης Καθιζήσεων

Η δεύτερη θέση στην οποία εντοπίστηκε λεκάνη καθιζήσεων στο κεφάλαιο 3.4 είναι αυτή κοντά στον Ι.Ν. Παναγίας της Δεξιάς. Κατά τον ίδιο τρόπο, απομονώνοντας τις μετρήσεις των οργάνων κοντά στην θέση αυτή, σε χρονικό διάστημα μετά το πέρας του TBM1, κατασκευάστηκε ο χάρτης ισοβαθών κατανομών της Εικόνας 2.4-11. Τη μεγαλύτερη μετακίνηση κατέγραψε το γεωδαιτικό όργανο TETS2442_12, με τιμή -1,06mm.



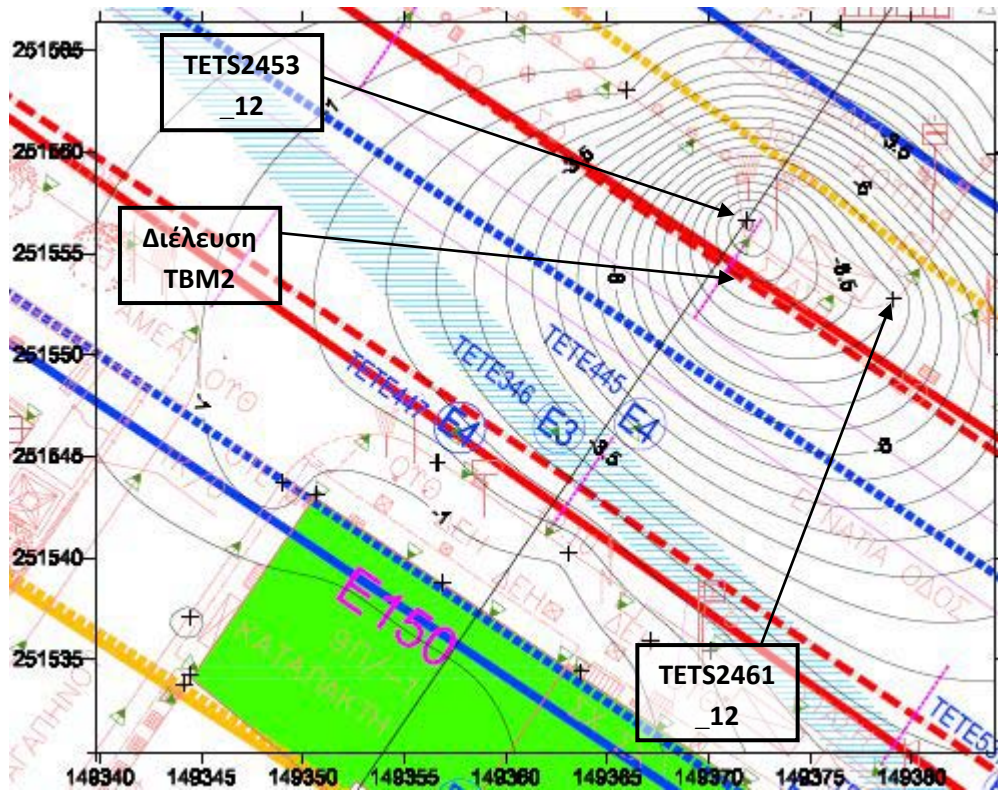
Εικόνα 2.4-11: Ισοβαθείς στη θέση CHPD μετά το πέρασ του TBM1

Τα ίδια όργανα μετρημένα σε χρονικό διάστημα μετά το πέρασ του TBM2 παρήγαγαν τον χάρτη ισοβαθών της Εικόνας 2.4-13. Τη μεγαλύτερη μετακίνηση κατέγραψε το γεωδαιτικό όργανο TETS2453_12, με τιμή -11,24 mm. Οι μετρήσεις του TETS2453_12 για τις διάφορες χρονικές στιγμές φαίνονται στο γράφημα της Εικόνας 2.4-12 που ακολουθεί.



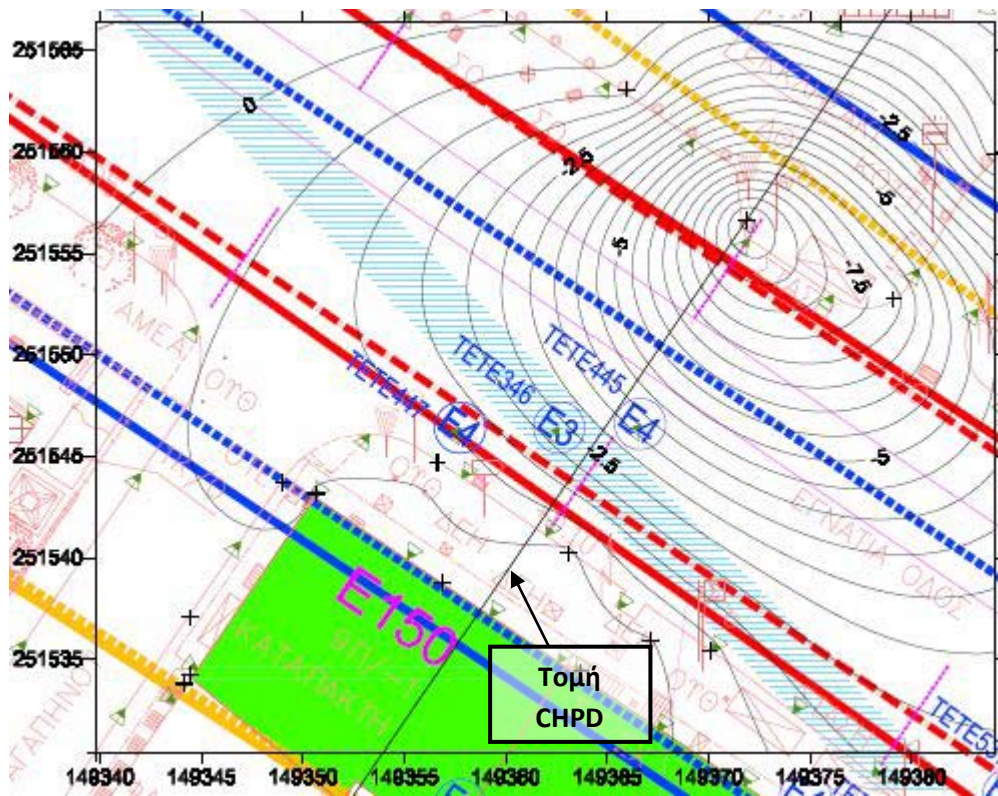
Εικόνα 2.4-12: Διαχρονική καθίζηση οργάνου TETS2453_12. (Δημακόπουλος, 2010)

Πέραν από το όργανο TETS2453_12, σημαντικές μετακινήσεις κατέγραψε και το όργανο TETS2461_12. Η μέγιστη μετακίνηση του οργάνου αυτού ήταν -8,06mm. Το όργανο αυτό βρίσκεται περίπου 8 μέτρα μπροστά από το TETS2453_12(Εικόνα 2.4-13).



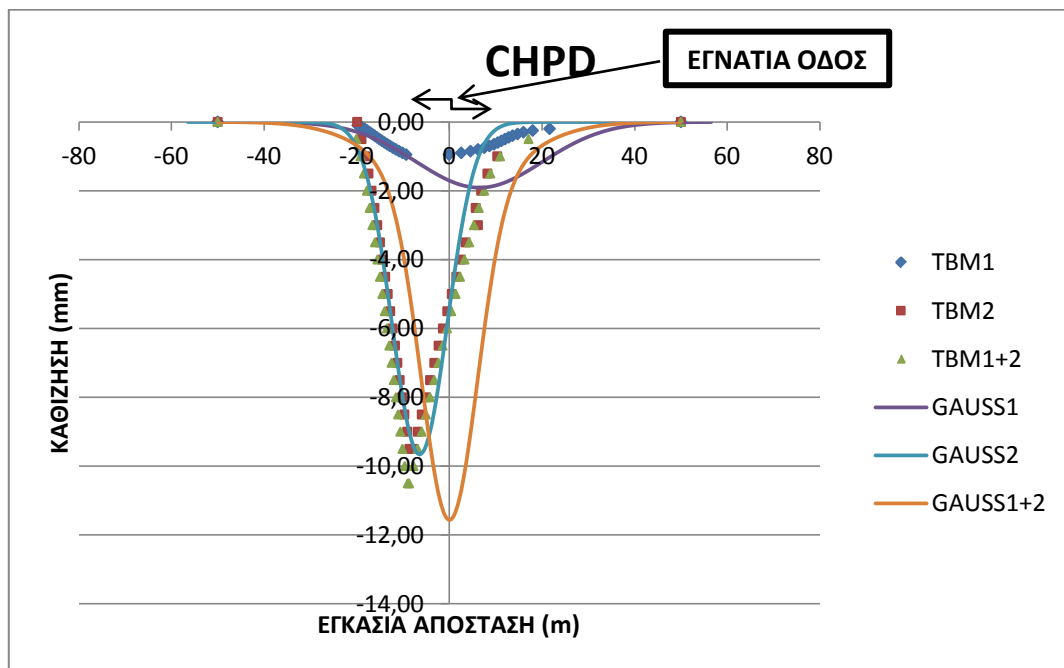
Εικόνα 2.4-13: Ισοβαθείς στη θέση CHPD μετά το πέρας του TBM2

Για την περαιτέρω ανάλυση των καθιζήσεων, είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός της επιρροής του κάθε TBM ξεχωριστά. Για να επιτευχθεί ο διαχωρισμός αυτός αφαιρέθηκαν οι τιμές των οργάνων μετά την διέλευση του TBM1 και μετά την διέλευση του TBM2. Με τη διαδικασία αυτή παράχθηκε ο χάρτης της Εικόνας 2.4-14, όπου απεικονίζονται οι ισοβαθείς που θα δημιουργούνται αποκλειστικά από την διέλευση του TBM2. Η μέγιστη μετακίνηση καταγράφηκε από το όργανο TETS2453_12. Πρακτικά, πρόκειται για τη διαφορά της τελικής καθίζησης μετά το πέρας του TBM2 (11,24mm) και της καθίζησης μετά το πέρας του TBM1 (0,63 mm). Έτσι η μετακίνηση του οργάνου αυτού που οφείλεται αποκλειστικά στην διέλευση του TBM2 είναι -10,61 mm (11,24 mm – 0,63 mm).



Εικόνα 2.4-14: :Ισοβαθείς αποκλειστικά από την διέλευση του TBM2 στη θέση CHPD

Στη θέση όπου εντοπίζεται η μέγιστη τιμή των καθιζήσεων κατασκευάστηκε τομή εγκάρσια στην χάραξη της πορείας των TBM. Τα σημεία τομής με τις ισοβαθείς καταγράφηκαν στο Γράφημα 2.4-3 όπου στην συνέχεια έγινε επίλυση της εξίσωσης Gauss.



Γράφημα 2.4-3: Καθιζήσεις στην τομή CHPD και προσαρμογή κατανομής Gauss.

Στο παραπάνω Γράφημα 2.4-3 ως σημεία εμφανίζονται οι θέσεις τομής με τις ισοβαθείς για το πέρας του TBM1, το πέρας και των δυο TBM (TBM1+2) και ξεχωριστά η επιρροή από το TBM2.

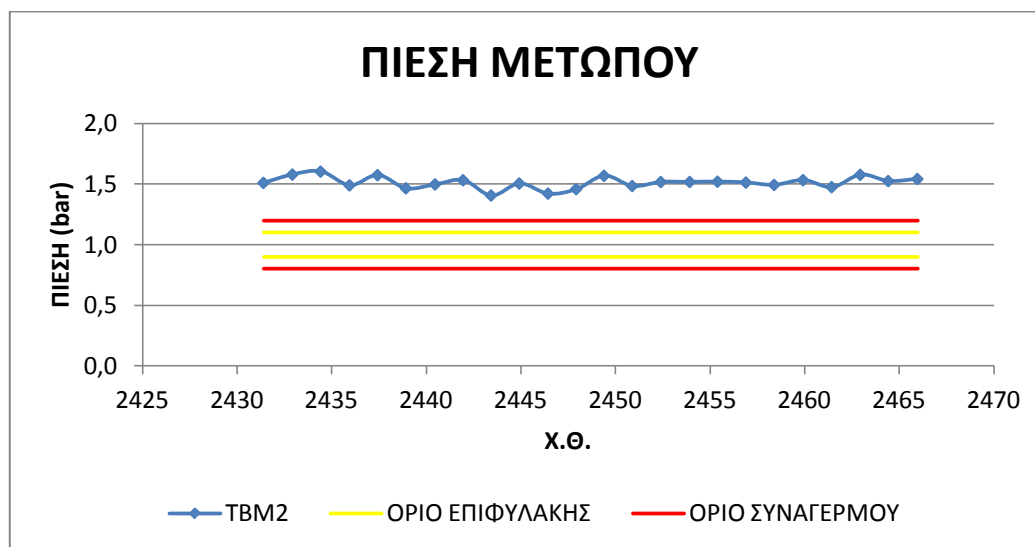
Στον Πίνακα 2.4-5 που ακολουθεί φαίνονται τα μεγέθη που υπολογίστηκαν βάση των κατανομών Gauss για το TBM1 και το TBM2.

TBM1		TBM2	
i (m)	13,60827635	i (m)	5,976143047
Smax (mm)	1,903891596	Smax (mm)	9,653301682
Vs (m ³)	0,064943437	Vs (m ³)	0,144606161
Excavation (m ³)	30,09339457	Excavation (m ³)	30,09339457
VL (%)	0,215806287	VL (%)	0,480524591

Πίνακας 2.4-5: Μεγέθη που υπολογίστηκαν από την κατανομή Gauss στην τομή CHPD

2.4.2.2. Διερεύνηση Παραμέτρων Λειτουργίας TBM 2

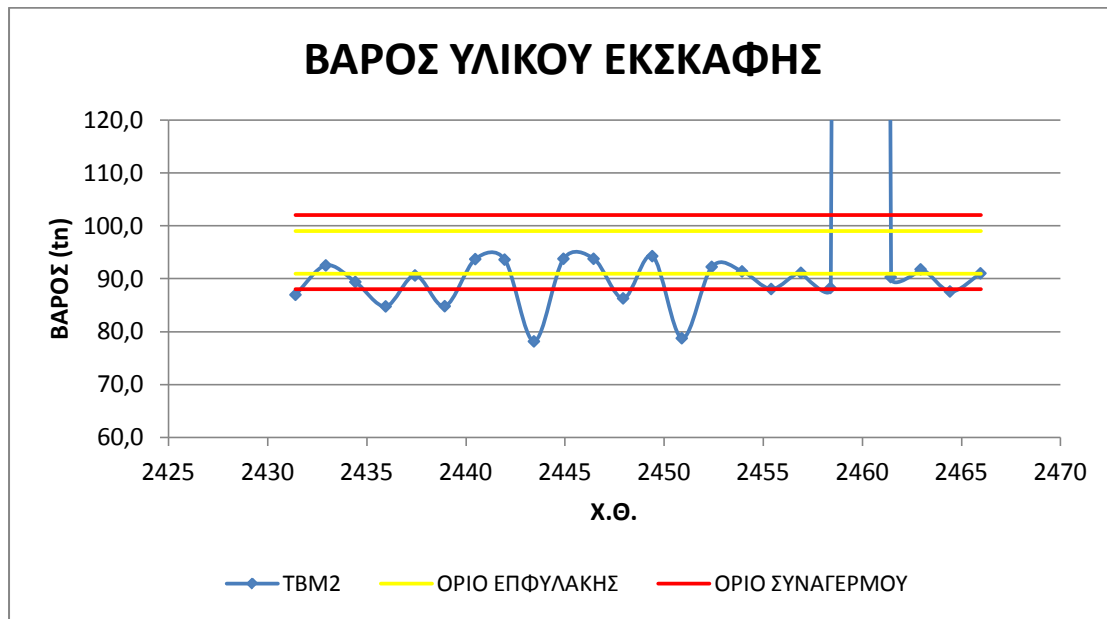
Καθώς η μετακίνηση του οργάνου TETS2453_12 ήταν πολύ υψηλή μετά το πέρας του TBM2, έγινε διερεύνηση των παραμέτρων λειτουργίας του TBM2, για να εξηγηθεί το φαινόμενο αυτό. Στο Γράφημα 2.4-4 που ακολουθεί φαίνεται η πίεση υποστήριξης του μετώπου, καθώς επίσης τα όρια επιφυλακής και συναγερμού. Η πίεση στη Χ.Θ. 2+450 βρίσκεται πάνω από το όριο συναγερμού. Η υψηλή αυτή πίεση υποστήριξης μετώπου δεν μπορεί να εξηγήσει το γεγονός της δημιουργίας τέτοιας μετακίνησης του οργάνου TETS2453_12.



Γράφημα 2.4-4: Πίεση υποστήριξης μετώπου TBM2

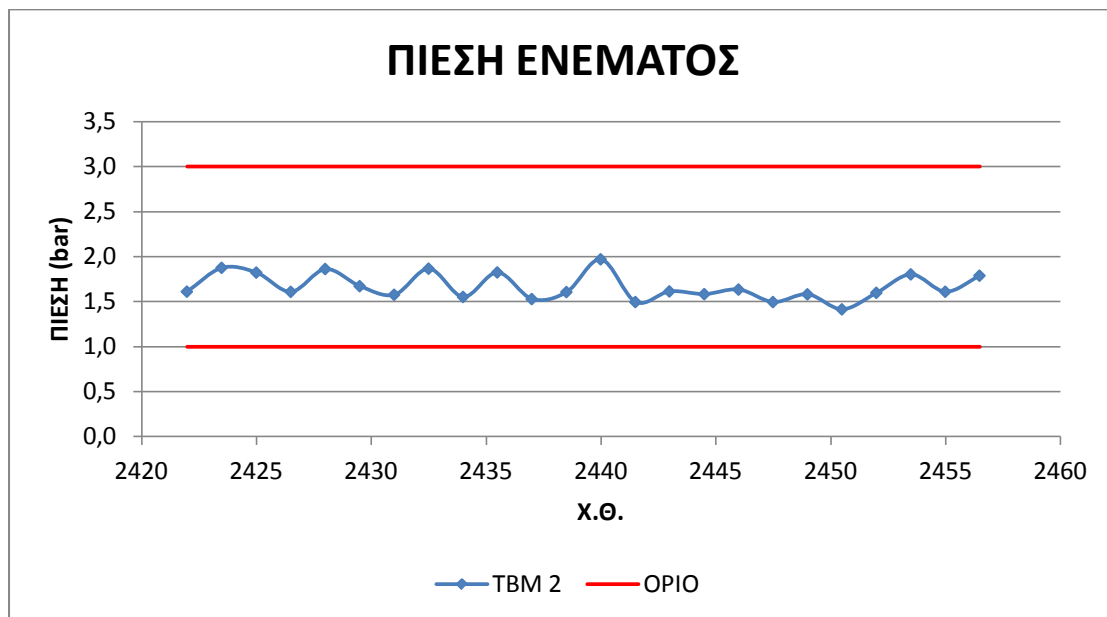
Στο Γράφημα 2.4-5 που ακολουθεί φαίνεται το βάρος του υλικού εκσκαφής, καθώς επίσης και τα όρια επιφυλακής και συναγερμού που έχουν θεσπιστεί. Το βάρος του υλικού εκσκαφής στην Χ.Θ. 2459,9 σύμφωνα με τα αρχεία των παραμέτρων λειτουργίας του TBM 2 βρέθηκε 2414,3 τόνους. Η μέτρηση αυτή σίγουρα δεν ανταποκρίνεται στην

πραγματικότητα. Οδηγεί όμως στο συμπέρασμα ότι πιθανόν να υπήρξε πρόβλημα στην κατασκευή στη θέση αυτή γεγονός που δικαιολογεί τις καθιζήσεις που σημειώθηκαν στην θέση Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς πάνω από την ερυθρά του TBM2.



Γράφημα 2.4-5:Βάρος υλικού εκσκαφής TBM2

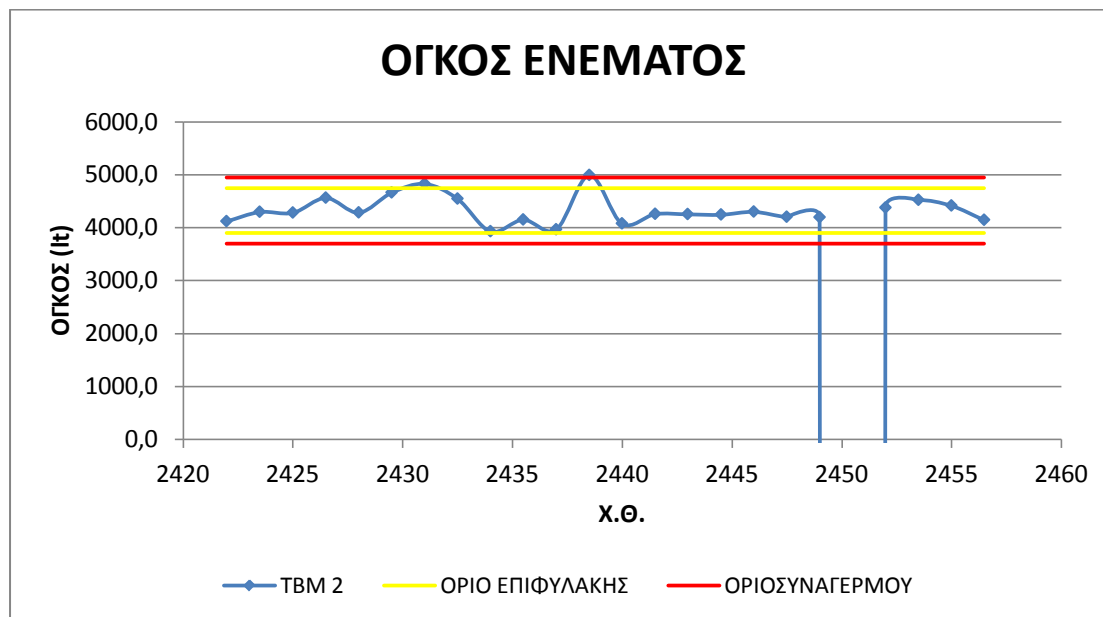
Στα δύο προηγούμενα γραφήματα αναλύθηκαν οι συνθήκες που επικρατούσαν κατά την διάνοιξη των Χ.Θ. που μελετώνται. Στο ακόλουθο Γράφημα 2.4-6 φαίνεται η πίεση του ενέματος στις αντίστοιχες Χ.Θ. Η πίεση του ενέματος βρίσκεται εντός φυσιολογικών ορίων.



Γράφημα 2.4-6: Πίεση ενέματος TBM2

Στο Γράφημα 2.4-7 που ακολουθεί αναγράφεται ο όγκος του ενέματος που εισπνέζεται και τα όρια συναγερμού και επιφυλακής. Ο όγκος του ενέματος στη Χ.Θ. 2+450 (θέση CHPD) βρέθηκε -1108438,38605 lt. Η τιμή αυτή σε συνδυασμό με τον όγκο εκσκαφής στην ίδια

θέση καθιστά εξαιρετικά πιθανή την δημιουργία καθιζήσεων λόγω της κατασκευής της σήραγγας του TBM2.



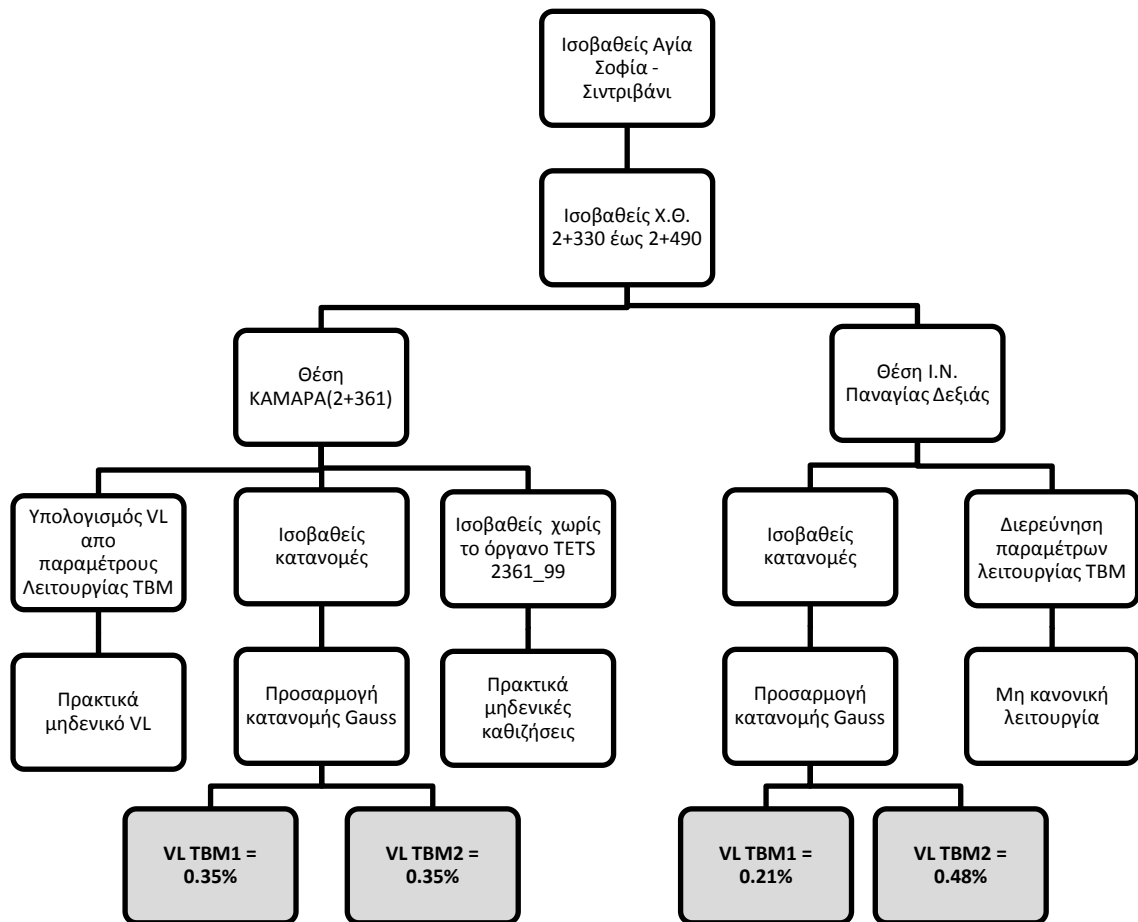
Γράφημα 2.4-7: Όγκος ενέματος TBM2

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι στην συγκεκριμένη θέση η σημαντική μετακίνηση των οργάνων TETS2453_12 και TETS2453_12 είναι πιθανό να οφείλεται στην διάνοιξη της σήραγγας του TBM2.

2.5. Ανακεφαλαίωση

Στο κεφάλαιο αυτό επεξεργάστηκαν τα δεδομένα των γεωδαιτικών οργάνων του μεσοδιαστήματος Αγία Σοφία- Σιντριβάνι. Εντοπίστηκαν τα σημεία όπου υπήρξαν καθιζήσεις και υπολογίστηκε η απώλεια εδαφικού όγκου, μέσω των κατανομών Gauss. Στην συνέχεια ελέγχθηκαν οι παράμετροι λειτουργίας των TBM όταν αυτά διάνοιγαν τις θέσεις όπου εντοπίστηκαν οι καθιζήσεις.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί συγκεντρώνεται το σύνολο των υπολογισμών που έγιναν στο κεφάλαιο αυτό.



Εικόνα 2.5-1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα κεφαλαίου 2

Από όλους τους υπολογισμούς του κεφαλαίου αυτού μόνο δύο κατέληξαν στον υπολογισμό της απώλειας εδαφικού όγκου. Μία τομή στην θέση ΚΑΜΑΡΑ και μία τομή στη Θέση Ι.Ν. Παναγίας Δεξιιάς. Στην συνέχεια της διπλωματικής αυτής, αναφορά θα γίνεται σε αυτές τις δύο θέσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

3.1. Mohr - Coulomb

3.1.1. Γενικά

Το μοντέλο Mohr-Coulomb αποτελεί ένα διγραμμικό μοντέλο αστοχίας του εδάφους, όπου η συμπεριφορά του υλικού είναι γραμμική τόσο στην ελαστική όσο και στην πλαστική περιοχή παραμορφώσεων. Με τον όρο πλαστικότητα εννοείται η δημιουργία μη αναστρέψιμων, μόνιμων παραμορφώσεων στο υλικό. Η βασική αρχή της ελαστοπλαστικότητας είναι ότι οι παραμορφώσεις αναλύονται στο ελαστικό και το πλαστικό τους μέρος. Έτσι:

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^e} + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^p} \quad (3.1-1)$$

Με βάση το νόμο του Hook, η σχέση τάσεων παραμορφώσεων δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}'}} = \underline{\underline{D}}^e \cdot \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^e} = \underline{\underline{D}}^e \cdot (\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} - \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^p}) \quad (3.1-2)$$

Όπου:

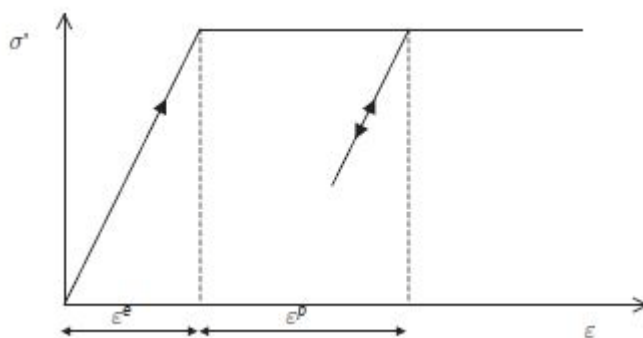
$\underline{\underline{\dot{\sigma}'}}$: Ο ταυστής των μεταβολών των ενεργών τάσεων.

$\underline{\underline{D}}^e$: Το μητρώο παραμορφωσιμότητας.

$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}^e}$: Ο ταυστής των μεταβολών των ελαστικών παραμορφώσεων.

$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}$: Ο ταυστής των μεταβολών των συνολικών παραμορφώσεων.

$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}^p}$: Ο ταυστής των μεταβολών των πλαστικών παραμορφώσεων.



Εικόνα 3.1-1: Καμπύλη Τάσεων- Παραμορφώσεων σε διγραμμικό μοντέλο.

3.1.2. Παράμετροι του μοντέλου Mohr- Coulomb

Οι παράμετροι που περιγράφουν την ελαστικότητα και την αντοχή του εδάφους σύμφωνα με το μοντέλο Mohr-Coulomb είναι οι ακόλουθες:

E : Μέτρο ελαστικότητας [kN/m^2]

ν : Λόγος του Poisson [-]

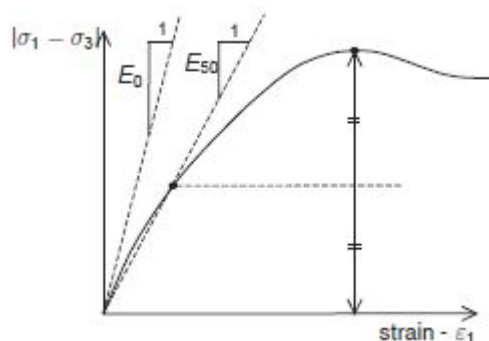
c : Συνοχή [kN/m^2]

φ : Γωνία εσωτερικής τριβής [$^\circ$]

ψ : Γωνία διασταλτικότητας [$^\circ$]

3.1.2.1. Μέτρο ελαστικότητας (E):

Στο μοντέλο Mohr – Coulomb ως βασικό μέτρο ελαστικότητας χρησιμοποιείται το μέτρο του Young. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα χρήσης εναλλακτικών μέτρων όπως το μέτρο διάτμησης (G) και το οιδημετρικό μέτρο ελαστικότητας (E_{oed}). Δεδομένου ότι πολλά γεωυλικά παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά ακόμα και σε μικρές βαθμίδες φόρτισης, απαιτείται μεγάλη προσοχή για την επιλογή του μέτρου που αντιπροσωπεύει ορθότερα την συμπεριφορά του υλικού. Έτσι σε τριαξονικές δοκιμές εδαφικών δειγμάτων όπου παρουσιάζουν σημαντική ελαστική περιοχή η χρήση του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας στην αρχή της καμπύλης (E_0) είναι πιο αντιπροσωπευτικό της πραγματικότητας. Μια τέτοια συμπεριφορά είναι πολύ σπάνια σε γεωυλικά οπότε η χρήση του τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας στο 50% της αντοχής του υλικού, θα δώσει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Σε γεωτεχνικά έργα όπου δημιουργούνται προβλήματα αποφόρτισης του εδάφους, όπως σήραγγες και εκσκαφές, το μέτρο ελαστικότητας σε αποφόρτιση και επαναφόρτιση κρίνεται αποτελεσματικότερο.



Εικόνα 3.1-2 Μέτρα Ελαστικότητας E_0 και E_{50} από τριαξονική δοκιμή. (PLAXIS, 2011)

3.1.2.2. Λόγος του Poisson (ν):

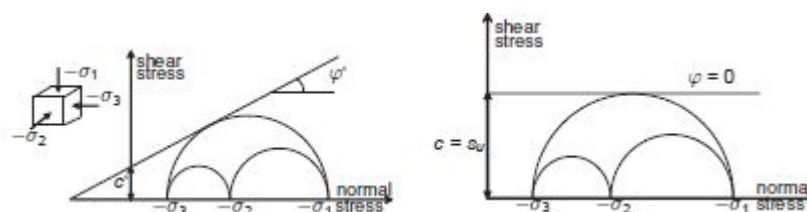
Ο λόγος της πλευρικής (εγκάρσιας) προς την αξονική παραμόρφωση ονομάζεται λόγος Poisson. Η επιλογή του λόγου του Poisson είναι γενικά απλή όταν γίνεται χρήση του μοντέλου Mohr – Coulomb σε συνθήκες ελεύθερου βαρυτικού πεδίου. Σε αυτού του τύπου τις φορτίσεις η κρίσιμη παράμετρος για ρεαλιστικά αποτελέσματα είναι ο λόγος γεωστατικών πιέσεων $K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\nu}{1-\nu}$. Δεδομένου ότι για το μοντέλο αυτό η προηγούμενη σχέση πρέπει να ισχύει, σε περίπτωση που έχουν πραγματοποιηθεί επιτόπου δοκιμές και υπολογισμός του K_0 , ο λόγος του Poisson πρέπει να υπολογίζεται έμμεσα έτσι ώστε η τιμή του K_0 να προσεγγίζει την πραγματικότητα. Αντίθετα σε περίπτωση που δεν έχουν γίνει επιτόπου δοκιμές ο υπολογισμός του ν γίνεται μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Οι τιμές του ν κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 0,3 και 0,4. Σε συνθήκες αποφόρτισης οι τιμές ελαττώνονται σε 0,15 έως 0,25.

Σε περίπτωση που οι συνθήκες είναι αστράγγιστες πρέπει να χρησιμοποιείται ο λόγος Poisson σε αναφορά ενεργών τάσεων, για να διασφαλίζεται ότι η παραμορφωσιμότητα

αφορά τον εδαφικό σκελετό και όχι το πρακτικά μη παραμορφώσιμο νερό των πόρων του εδάφους.

3.1.2.3. Συνοχή (c) και γωνία εσωτερικής τριβής (φ):

Η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής είναι οι βασικές παράμετροι του μοντέλου Mohr – Coulomb. Ο προσδιορισμός τους γίνεται απλά μέσω εργαστηριακών δοκιμών και ιδιαίτερα μέσω της περιβάλλουσας αστοχίας σε διάγραμμα κύριας – διατμητικής τάσης, όπου η τεταγμένη στο σημείο τομής της περιβάλλουσας με τον άξονα των τεταγμένων αποτελεί την συνοχή, ενώ η κλίση της περιβάλλουσας την γωνία εσωτερικής τριβής. Προσοχή πρέπει να δοθεί όταν οι συνθήκες είναι αστράγγιστες, όπου η γωνία εσωτερικής τριβής είναι μηδέν ($\varphi=0$) ενώ η συνοχή ισούται με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή (c_u ή s_u). Εξαιρέση αποτελεί η επίλυση υπό αστράγγιστες συνθήκες με αναφορά ενεργών τάσεων (Undrained A).



Εικόνα 3.1-3: Διαγράμματα Κύριας -διατμητικής τάσης υπό αστράγγιστες και στραγγισμένες συνθήκες. (PLAXIS, 2011)

3.1.2.4. Γωνία διασταλτικότητας (ψ):

Η γωνία διασταλτικότητας εκφράζει την τάση του εδάφους να διογκώνεται όταν παραμορφώνεται σε διάτμηση. Με εξαίρεση τις έντονα υπερστερεοποιημένες αργίλους, η γωνία διασταλτικότητας των αργίλων είναι σχεδόν μηδενική. Αντίθετα η γωνία διασταλτικότητας σε αμμώδη γεωυλικά εξαρτάται τόσο από την πυκνότητα όσο και από την γωνία εσωτερικής τριβής. Για χαλαζιακές άμμους μπορούμε να θεωρήσουμε ότι $\psi \approx \varphi - 30$. Ελαφρώς αρνητικές τιμές θεωρούνται ρεαλιστικές σε εξαιρετικά χαλαρές άμμους.

3.2. Hardening Soil Model

3.2.1. Γενικά

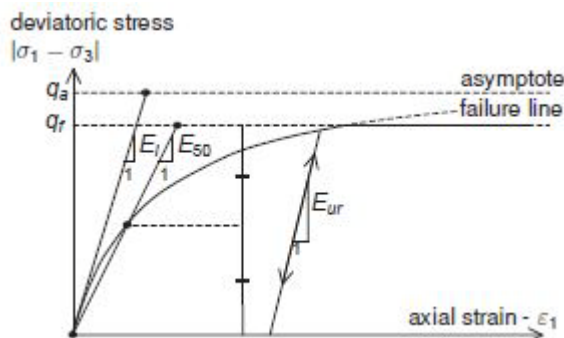
Το μοντέλο Hardening Soil είναι ένα εξελιγμένο μοντέλο που προσομοιώνει την συμπεριφορά διαφόρων τύπων εδάφους, τόσο μαλακών όσο και σκληρών. Η δυσκαμψία του εδάφους σε αυτό το μοντέλο εξαρτάται από την τάση που δέχεται το έδαφος (ανεξάρτητα για την κύρια φόρτιση και την αποφόρτιση-επαναφόρτιση), γεγονός που επηρεάζει τις συνολικές παραμορφώσεις που τελικά δημιουργούνται. Γενικά η δυσκαμψία του εδάφους όταν αυτό φορτίζεται έχει την τάση να μειώνεται, ενώ στο σώμα του δημιουργούνται πλαστικές – μη αναστρέψιμες παραμορφώσεις. Οι πλαστικές παραμορφώσεις υπολογίζονται από ένα κριτήριο αστοχίας πολλαπλών επιφανειών. Η

κράτυνση του εδάφους θεωρείται ισότροπη και εξαρτάται τόσο από την πλαστική διατμητική όσο και ογκομετρική παραμόρφωση.

Η βασική ιδέα του μοντέλου αυτού είναι η περιγραφή της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων σε τριαξονική φόρτιση μέσω μίας υπερβολικής σχέσης. Σε πρότυπη τριαξονική δοκιμή με στράγγιση η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{E_t} \frac{q}{q - q_a} \quad \text{για } q < q_f \quad (3.2-1) \quad (\text{PLAXIS, 2011})$$

Όπου το q_a είναι η ασυμπτωτική διατμητική τάση, q_f η τάση αστοχίας και E_t η αρχική δυσκαμψία.



Εικόνα 3.2-1 : Υπερβολική σχέση Τάσεων- Παραμορφώσεων σε τριαξονική φόρτιση. (PLAXIS, 2011)

Η συσχέτιση του E_t με το E_{50} δίνεται από τη σχέση:

$$E_t = \frac{2E_{50}}{2-R_f} \quad (3.2-2)$$

Και οι q_f και q_a δίνονται από τις σχέσεις :

$$q_f = (c \cot \varphi - \sigma'_3) \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3.2-3)$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (3.2-4)$$

3.2.2. Παράμετροι του μοντέλου Hardening Soil:

Η επιλογή των παραμέτρων του κάθε μοντέλου πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά στα απλούστερα μοντέλα, αλλά ιδιαίτερα στα πολυπαραμετρικά μοντέλα όπως αυτό. Πέραν του γεγονότος ότι πρέπει να έχει προηγηθεί εκτενής γεωτεχνική έρευνα, με πλήθος εργαστηριακών, πρέπει να γίνει και προσεκτική επεξεργασία αυτών πριν από τη χρήση τους. Το γεγονός αυτό καθιστά το μοντέλο αυτό δύσχρηστο σε μικρής κλίμακας έργα με έλλειψη γεωτεχνικών δεδομένων, όπου και η χρήση απλούστερων μοντέλων όπως το Mohr Coulomb θα δώσει καλύτερα αποτελέσματα.

Το μοντέλο αυτό αρχικά κάνει χρήση παραμέτρων του Mohr Coulomb. Οι παράμετροι αυτές είναι :

c : συνοχή [kN/m^2]

φ : Γωνία εσωτερικής τριβής [$^\circ$]

ψ : Γωνία διασταλτικότητας [$^\circ$]

Η επιλογή των παραμέτρων αυτών πρέπει να γίνει σύμφωνα με την ανάλυση που έχει γίνει για το μοντέλο Mohr Coulomb.

Οι επιπλέον βασικές παράμετροι δυσκαμψίας του μοντέλου Hardening Soil είναι οι εξής:

E_{50}^{ref} : Τέμνον μέτρο ελαστικότητας σε πρότυπη τριαξονική δοκιμή με στράγγιση [kN/m^2]

E_{oed}^{ref} : Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης [kN/m^2]

E_{ur}^{ref} : Μέτρο ελαστικότητας σε αποφόρτιση και επαναφόρτιση [kN/m^2]

m : Βαθμός εξάρτησης της δυσκαμψίας από το επίπεδο φόρτισης. [-]

Και επιπλέον οι παράμετροι:

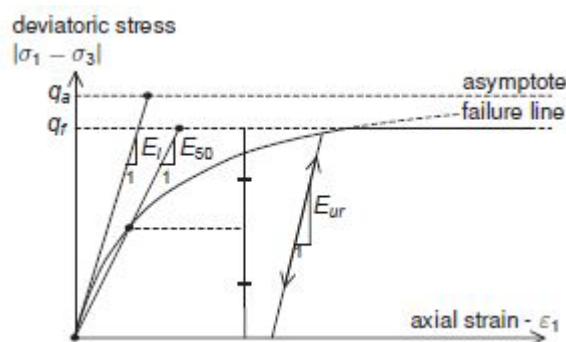
p^{ref} : Πίεση αναφοράς των μέτρων δυσκαμψίας [kN/m^2]

R_f : Λόγος αστοχίας [-]

Για τον υπολογισμό των παραπάνω παραμέτρων και δεδομένου ότι όπως αναφέρθηκε η διαφοροποίηση του μοντέλου αυτού από τα άλλα μοντέλα είναι η μεταβολή της δυσκαμψίας βάσει της βαθμίδας φόρτισης για να παραχθεί το υπερβολικό κριτήριο έναντι του διγραμμικού πρέπει να γίνει συγκεκριμένη επεξεργασία για κάθε παράμετρο.

3.2.2.1. Τέμνον μέτρο ελαστικότητας σε πρότυπη τριαξονική δοκιμή με στράγγιση (E_{50}^{ref}):

Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται από την κλίση της τέμνουσας στο 50% της αντοχής του υλικού στη πρότυπη τριαξονική δοκιμή με στράγγιση (όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2-1).



Εικόνα 3.2-1 : Υπερβολική σχέση Τάσεων- Παραμορφώσεων σε τριαξονική φόρτιση. (PLAXIS, 2011)

Η τιμή αυτή βέβαια ανταποκρίνεται στην δυσκαμψία που έχει το υλικό για την συγκεκριμένη πλευρική πίεση σ'_3 . Καθώς το μοντέλο αυτό μεταβάλλει την δυσκαμψία ανάλογα με την βαθμίδα φόρτισης, απαραίτητο είναι να δοθεί η πίεση στην οποία ανταποκρίνεται αυτή η τιμή (μέσο της p^{ref}) ή να μετατραπεί η τιμή στην πρότυπη πίεση αναφοράς του προγράμματος ($p^{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$). Η μετατροπή αυτή γίνεται μέσω του τύπου:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (3.2-5) \text{ (PLAXIS, 2011)}$$

Όπου:

E_{50} : Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας σε πρότυπη τριαξονική δοκιμή με στράγγιση στην πλευρική πίεση που εκτελέστηκε η δοκιμή.

E_{50}^{ref} : Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας σε πρότυπη τριαξονική δοκιμή με στράγγιση στην πλευρική πίεση $\sigma_3 = p^{ref}$.

σ_3 : Η πλευρική πίεση στην οποία έγινε η δοκιμή.

P^{ref} : Η πίεση αναφοράς στην οποία θέλουμε την δυσκαμψία (προτείνεται $P^{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$).

m : Ο βαθμός εξάρτησης της δυσκαμψίας από το επίπεδο φόρτισης.

c, φ : Η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής αντίστοιχα.

Σε περίπτωση που δεν έχουμε στράγγιση ο τύπος μπορεί να μετατραπεί σε:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{s_u \cos \varphi_u - \sigma'_3 \sin \varphi_u}{s_u \cos \varphi_u + p^{ref} \sin \varphi_u} \right)^m \quad (3.2-6)$$

Όπου :

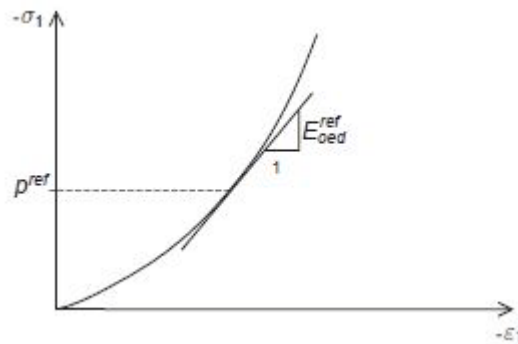
s_u : αστράγγιστη διατμητική ($s_u = c_u$) [kN/m^2]

φ_u : αστράγγιστη γωνία εσωτερικής τριβής (συνήθως θεωρείται μηδενική, μπορεί όμως να βρεθεί σε αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές).

3.2.2.2. Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης

(E_{oed}^{ref}) :

Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης βρίσκεται από την κλίση της εφαπτομένης στην συγκεκριμένη ορθή- κύρια τάση σ_1 .



Εικόνα 3.2-2: Διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης. (PLAXIS, 2011)

Ομοίως με το E_{50}^{ref} , το μέτρο στο οποίο αναφερόμαστε πρέπει να ταυτίζεται με την βαθμίδα φόρτισης ($\sigma_1 = P^{ref}$). Για να επιτευχθεί αυτό, αν δεν έχει υπολογισθεί από τα εργαστηριακά για την συγκεκριμένη πίεση αναφοράς (P^{ref}) μπορεί να γίνει μετατροπή κάνοντας χρήση του τύπου:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (3.2-7) \text{ (PLAXIS, 2011)}$$

Όπου :

E_{oed} : Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης στην πίεση που έχει βρεθεί.

E_{oed}^{ref} : Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης στην πίεση $\sigma_1 = P^{ref}$.

σ_1 : Η ορθή τάση για την οποία υπολογίστηκε το E_{oed} . $\left(\sigma'_1 = \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \right)$

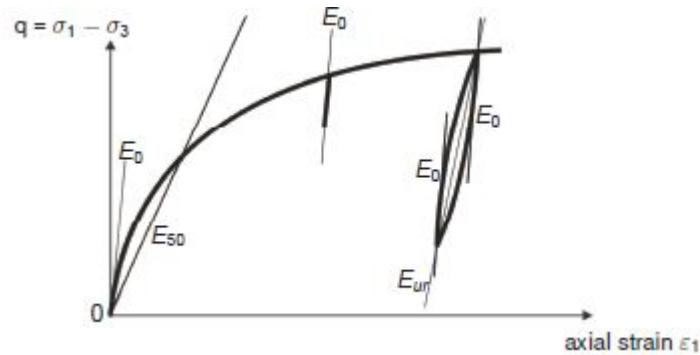
P^{ref} : Η πίεση αναφοράς στην οποία θέλουμε την δυσκαμψία (προτείνεται $P^{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$)

m : Ο βαθμός εξάρτησης της δυσκαμψίας από το επίπεδο φόρτισης

c, φ : Η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής αντίστοιχα.

3.2.2.3. Μέτρο ελαστικότητας σε αποφόρτιση και επαναφόρτιση (E_{ur}^{ref})

Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται μέσω τριαξονικών δοκιμών όπου το υλικό αποφορτίζεται και επαναφορτίζεται. Η κλίση της ευθείας που ενώνει την αρχή της αποφόρτισης με το πέρας της και στην συνέχεια την επαναφόρτιση, δίνει το μέτρο αυτό.



Εικόνα 3.2-3: Αποφόρτιση και επαναφόρτιση σε τριαξονική δοκιμή. (PLAXIS, 2011)

Καθώς τέτοιου τύπου δοκιμές διεξάγονται σπάνια, μπορεί να θεωρηθεί ότι:

$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref} \quad (3.2-8)$$

Σε περίπτωση που το μέτρο αυτό έχει βρεθεί άμεσα από δοκιμές, για να μετατραπεί μπορεί να γίνει χρήση του τύπου:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (3.2-9)$$

Όπου:

E_{ur} : Το μέτρο ελαστικότητας σε αποφόρτιση και επαναφόρτιση στην πλευρική πίεση που εκτελέστηκε η δοκιμή.

E_{ur}^{ref} : Το μέτρο ελαστικότητας σε αποφόρτιση και επαναφόρτιση στην πλευρική πίεση $\sigma_3 = p^{ref}$

σ_3 : Η πλευρική πίεση στην οποία έγινε η δοκιμή

p^{ref} : Η πίεση αναφοράς στην οποία θέλουμε την δυσκαμψία (προτείνεται $p^{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$)

m : Ο βαθμός εξάρτησης της δυσκαμψίας από το επίπεδο φόρτισης

c, φ : Η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής αντίστοιχα.

Σε περίπτωση που δεν έχουμε στράγγιση ο τύπος μπορεί να μετατραπεί σε:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{s_u \cos \varphi_u - \sigma'_3 \sin \varphi_u}{s_u \cos \varphi_u + p^{ref} \sin \varphi_u} \right)^m \quad (3.2-10)$$

Όπου :

s_u : Αστράγγιστη διατμητική ($s_u = c_u$) [kN/m^2]

φ_u : Αστράγγιστη γωνία εσωτερικής τριβής.

3.2.2.4. Βαθμός εξάρτησης της δυσκαμψίας από το επίπεδο φόρτισης (m)

Η παράμετρος αυτή εκφράζει τον βαθμό εξάρτησης της δυσκαμψίας από την βαθμίδα φόρτισης. Οι τιμές της κυμαίνονται από μηδέν έως ένα ($0 \leq m \leq 1$). Για να προσομοιωθεί η λογαριθμική συμπίεση, έχει παρατηρηθεί ότι η τιμή του βρίσκεται κοντά στο 1.0. Ο Janbu

(1963) προτείνει τιμές κοντά στο 0.5 για Νορβηγικές άμμους και ιλύες, ενώ ο von Soos (1990) αναφέρει τιμές του m σε ένα φάσμα από 0.5 μέχρι 1 (PLAXIS, 2011).

Για τον ακριβή προσδιορισμό της τιμής του, πρέπει να γίνει προσαρμογή εκτελώντας τριαξονικές δοκιμές μέσω του προγράμματος, και συγκρίνοντας τες με τις πραγματικές δοκιμές.

3.2.2.5. Πίεση αναφοράς των μέτρων δυσκαμψίας P^{ref}

Όπως έχει αναφερθεί είναι η πίεση για την οποία έχουν εισαχθεί τα μέτρα δυσκαμψίας. Ο κατασκευαστής του προγράμματος προτείνει η τιμή να μην μεταβάλλεται από την αρχική τιμή των 100kN/m^2 .

3.2.2.6. Λόγος αστοχίας R_f

Ο λόγος αυτός εκφράζει την σχέση της ασυμπτωτικής γραμμής της υπερβολής και της γραμμής αστοχίας του υλικού. Έτσι:

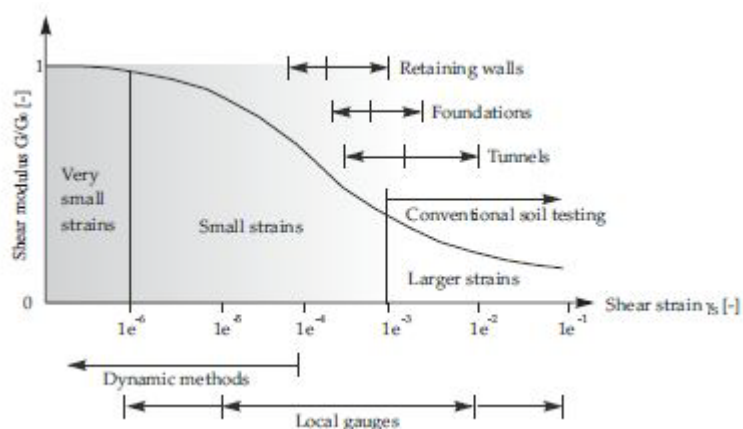
$$R_f = \frac{q_f}{q_a} \quad (3.2-11)$$

Η προτιμώμενη τιμή για την παράμετρο αυτή είναι 0.9. Για περαιτέρω διερεύνηση πρέπει να γίνει προσαρμογή της τιμής εκτελώντας τριαξονικές δοκιμές μέσω του προγράμματος, και συγκρίνοντας τες με τις πραγματικές δοκιμές.

3.3. Hardening Soil with Small- Strain Stiffness

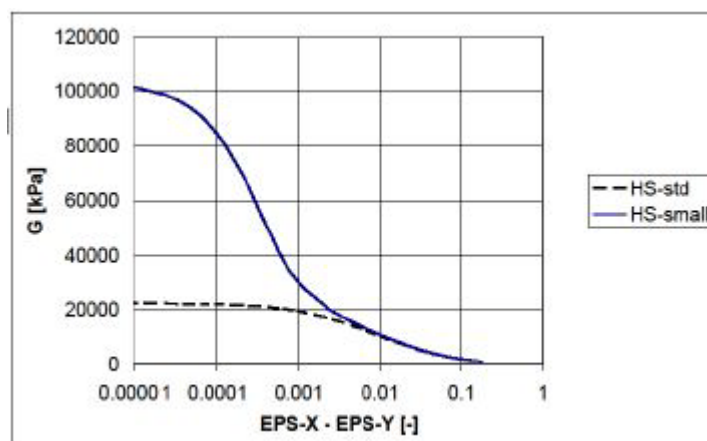
3.3.1. Γενικά

Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο μοντέλο Hardening Soil, με την διαφοροποίηση ότι πέραν της μεταβολής της δυσκαμψίας ανάλογα με την βαθμίδα φόρτισης, λαμβάνεται υπόψη και η υψηλή δυσκαμψία των γεωλικών σε μικρές παραμορφώσεις καθώς επίσης και η μεταβολή αυτής. Η μη γραμμική μεταβολή της δυσκαμψίας σε μικρές παραμορφώσεις, καθώς επίσης και το εύρος των τιμών των παραμορφώσεων σε συνήθη γεωτεχνικά έργα, φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.3-1: Μικρές παραμορφώσεις σε γεωτεχνικά έργα. (PLAXIS, 2011)

Η μέτρηση της συμπεριφοράς των υλικών σε μικρές παραμορφώσεις, αποτελεί και το πρόβλημα στην χρήση αυτού του μοντέλου, καθώς βρίσκονται εκτός της ευαισθησίας των συνήθων γεωτεχνικών οργάνων. Έχει παρατηρηθεί όμως, ότι για την ελάχιστη παραμόρφωση που μπορεί να μετρηθεί από τις συνήθεις γεωτεχνικές δοκιμές το μέτρο ελαστικότητας (δυσκαμψίας) έχει ήδη μειωθεί στο μισό της αρχικής του τιμής. Το χάσμα αυτό ανάμεσα στο πραγματικό – αρχικό μέτρο ελαστικότητας και το μετρήσιμο από συνήθη όργανα μπορεί να δώσει σημαντικές αποκλίσεις στα τελικά αποτελέσματα. Η μεταβολή της δυσκαμψίας του εδάφους συγκριτικά για τα μοντέλα Hardening Soil και HSsmall φαίνεται στο γράφημα της Εικόνας 3.3-2.



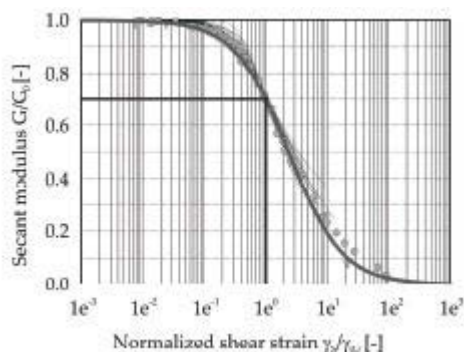
Εικόνα 3.3-2: Διαγράμματα μέτρου διάτμησης – γωνιακής παραμόρφωσης στα μοντέλα HS και Hsmall. (Obrzud, 2011)

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς αυτής του εδάφους σε μικρές παραμορφώσεις, είναι απαραίτητη η εισαγωγή νέων παραμέτρων που περιγράφουν το φαινόμενο αυτό. Οι παράμετροι αυτές είναι:

G_0 : Το αρχικό μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις ($\epsilon < 10^{-6}$)

$\gamma_{0.7}$: Η γωνιακή παραμόρφωση στο σημείο όπου το τέμνον μέτρο διάτμησης G_s έχει μειωθεί στο 70% περίπου του αρχικού G_0 .

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών γίνεται συνήθως μέσω εδαφοδυναμικών δοκιμών. Έχει παρατηρηθεί μέσω μετρήσεων ότι η σχέση τάσεων παραμορφώσεων για μικρές παραμορφώσεις μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από μια υπερβολική σχέση. Ίσως η πιο διαδεδομένη σχέση στην εδαφοδυναμική να είναι η σχέση Hardin & Drnevich (1972). Μια τέτοια προσαρμογή υπερβολής σε μετρήσεις πεδίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Έτσι :



Εικόνα 3.3-3: Καμπύλη Hardin & Drnevich. (PLAXIS, 2011)

Μαθηματικά η σχέση δίνεται:

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + \left| \frac{\gamma}{\gamma_r} \right|} \quad (3.3-1) \quad (\text{PLAXIS, 2011})$$

Όπου η μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση γ_r ορίζεται ως :

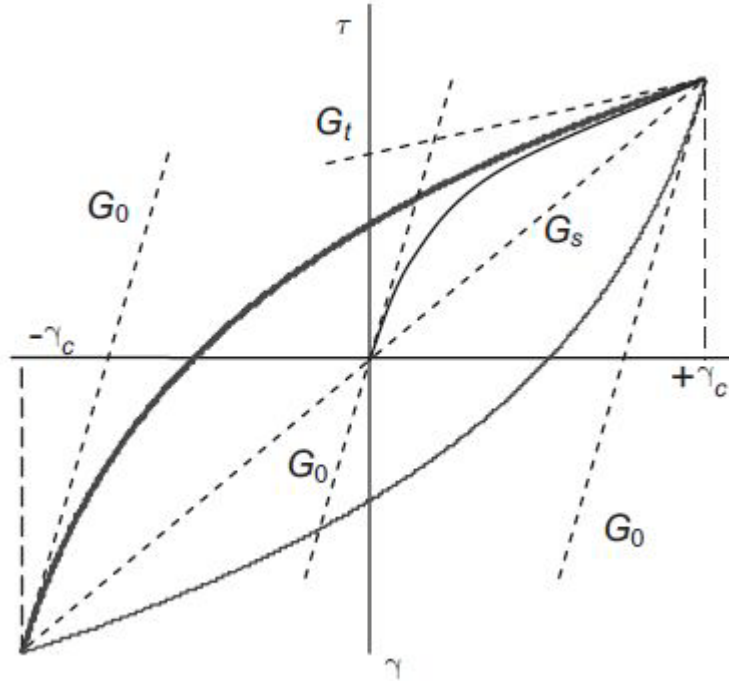
$$\gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_0} \quad (3.3-2)$$

Με τ_{max} να είναι η διατμητική τάση αστοχίας .

Για την αποφυγή σφαλμάτων χρησιμοποιείται μικρότερη γωνιακή παραμόρφωση ($\gamma = \gamma_{0,7}$) στο σημείο όπου το τέμνον μέτρο διάτμησης (G_s) έχει μειωθεί στο 72,2% της αρχικής του τιμής. Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί :

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + a \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0,7}} \right|} \quad \text{με } a = 0,385 \quad (3.3-3)$$

Ως τώρα περιγράφηκε ο τρόπος απομείωσης του μέτρου διάτμησης κατά την κύρια φόρτιση σε μικρές παραμορφώσεις. Όταν το έδαφος υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, κατά την αντιστροφή της φόρτισης το μέτρο διάτμησης αυξάνεται φτάνοντας την αρχική του τιμή (G_0) και στην συνέχεια ξαναμειώνεται μέχρι την επόμενη αντιστροφή της φόρτισης (Brinkgreve, Kappert, & Bonnier, 2007). Ο βρόχος κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση είναι διπλάσιος από την διατμητική παραμόρφωση ($\gamma_{0,7}$) κατά την κύρια φόρτιση, σύμφωνα με τον κανόνα του Masing (1926) (PLAXIS, 2011).



Εικόνα 3.3-4: Βρόχος υστέρησης. (Brinkgreve, Kappert, & Bonnier, 2007)

Έτσι:

$$\gamma_{0,7}^{re-loading} = 2\gamma_{0,7}^{virgin-loading} \quad (3.3-4)$$

Στην Εικόνα 3.3-4 φαίνεται κυκλική φόρτιση έως μια συγκεκριμένου μεγέθους διατμητική παραμόρφωση γ_c . Η απορροφώμενη ενέργεια σε ένα πλήρη κύκλο όπου η διατμητική παραμόρφωση μεταβάλλεται από $-\gamma_c$ σε $+\gamma_c$ και ξανά σε $-\gamma_c$ ισούται με το εμβαδόν του βρόχου (Brinkgreve, Kappert, & Bonnier, 2007). Έτσι:

$$E_D = \frac{4G_0\gamma_{0,7}}{\alpha} \left(2\gamma_c - \frac{\gamma_c}{1 + \frac{\gamma_{0,7}}{\alpha\gamma_c}} - \frac{2\gamma_{0,7}}{\alpha} \ln \left(1 + \frac{\alpha\gamma_c}{\gamma_{0,7}} \right) \right) \quad (3.3-5)$$

Και ο λόγος απόσβεσης ορίζεται ως

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_s} \quad (3.3-6)$$

Όπου E_s είναι η αποθηκευμένη ενέργεια στη μέγιστη διατμητική παραμόρφωση γ_c :

$$E_s = \frac{1}{2} G_s \gamma_c^2 = \frac{G_0 \gamma_c^2}{2 + 2\alpha \frac{\gamma_c}{\gamma_{0,7}}} \quad (3.3-7)$$

Ο λόγος απόσβεσης (ξ) αυξάνεται όσο τηρείται η σχέση :

$$\gamma_c \leq \frac{\gamma_{0,7}}{\alpha} \left(\sqrt{\frac{G_0}{G_{ur}}} - 1 \right) \quad (3.3-8)$$

Δηλαδή όσο το μέτρο διάτμησης δεν φτάνει την τιμή G_{ur} και η συμπεριφορά του εδάφους παραμένει ελαστική με το μέτρο διάτμησης να μειώνεται σύμφωνα με την σχέση 3.3-3. Με:

$$G_{ur} = \frac{E_{ur}}{2(1+\nu_{ur})} \quad (3.3-9)$$

3.3.2. Παράμετροι του μοντέλου Hardening Soil with small-strain stiffness:

Όπως έχει αναφερθεί πέραν των παραμέτρων του Hardening Soil στο μοντέλο αυτό υπάρχουν άλλες δυο παράμετροι. Οι:

G_0^{ref} : Μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις ($\epsilon < 10^{-6}$)

$\gamma_{0.7}$: Γωνιακή παραμόρφωση για $G_s = 0.722G_0$

3.3.2.1. Μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις G_0^{ref}

Πρόκειται για το μέτρο διάτμησης για παραμορφώσεις μικρότερες του 10^{-6} . Εξαρτάται κυρίως από τον λόγο κενών (e) την εκάστοτε χρονική στιγμή. Ο υπολογισμός του μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Όπως :

- Μέσω της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων - διατμητικών κυμάτων (V_s).

$$G_0 = \rho V_s^2 [MPa] \quad (3.3-10)$$

Όπου :

ρ : Η πυκνότητα του σχηματισμού [ton/m³]

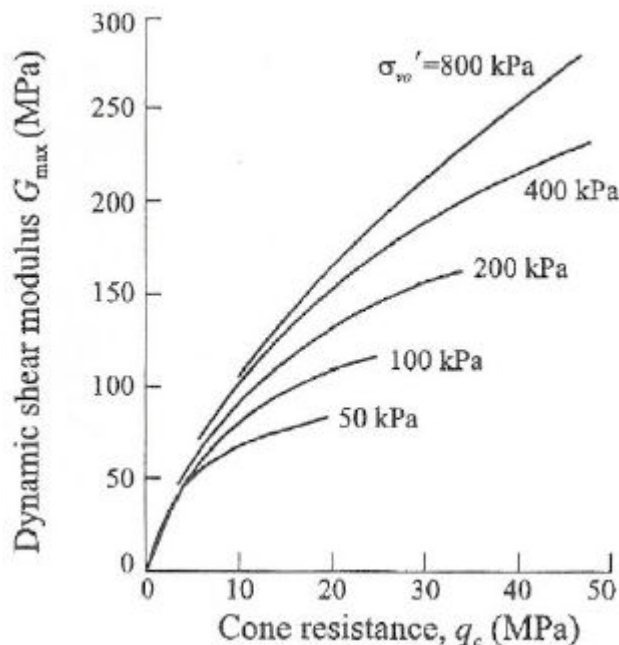
V_s : Η ταχύτητα του κύματος, όπως έχει βρεθεί από τα γεωφυσικά. [m/sec]

- Μέσω του λόγου κενών (e)

Όπως αναφέρθηκε ο λόγος κενών είναι η βασική παράμετρος που επηρεάζει το μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις. Μια καλή προσέγγιση του για πολλούς τύπους εδαφών μπορεί να γίνει από τον τύπο που πρότειναν οι Hardin & Black (1969):

$$G_0^{ref} = \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} 33 [MPa] \text{ για } P^{ref} = 100 \text{ kPa} \quad (3.3-11) \text{ (PLAXIS, 2011)}$$

- Μέσω εμπειρικών γραφημάτων. Οι Robertson και Campanella (1983) προτείνουν για αμμώδης σχηματισμούς, μεταβολή του G_0 συναρτήσει της αντίστασης αιχμής.



Εικόνα 3.3-5: Προσδιορισμός G_{max} μέσω της αντίστασης αιχμής. (Obrzud, 2011)

- Μέσω άλλων σύνθετων επιτόπου δοκιμών όπως SCPT, SDMT
- Μέσω εργαστηριακών δοκιμών όπως ανακυκλιζόμενη τριαξονική φόρτιση και δοκιμή στήλης συντονισμού.

Ο νόμος που διέπει την μεταβολή του μέτρου διάτμησης ανάλογα με την βαθμίδα φόρτισης και σε αυτή την περίπτωση είναι:

$$G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (3.3-12)$$

Όπου:

G_0 : Το μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις για την εκάστοτε πλευρική πίεση.

G_0^{ref} : Το μέτρο διάτμησης στην πίεση $\sigma_3 = p^{ref}$.

σ_3 : Η πλευρική πίεση στην οποία έγινε η δοκιμή.

p^{ref} : Η πίεση αναφοράς στην οποία θέλουμε την δυσκαμψία (προτείνεται $p^{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$).

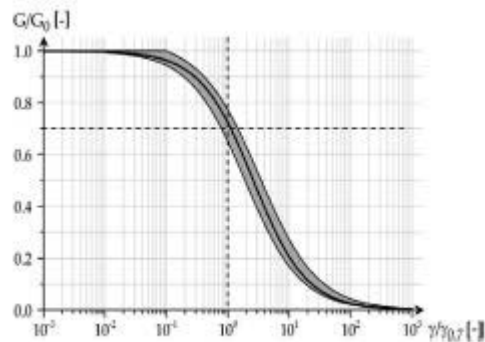
m : Ο βαθμός εξάρτησης της δυσκαμψίας από το επίπεδο φόρτισης.

c, φ : Η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής αντίστοιχα.

Οι σχέσεις αυτές για όλα τα μέτρα δυσκαμψίας, όπου έχουν αναφερθεί, χρησιμοποιούνται τόσο για την μετατροπή όλων των μέτρων στην πίεση αναφοράς, όσο και από τον κώδικα για να μεταβάλλει την τιμή της δυσκαμψίας ανάλογα με το φορτίο κάθε στοιχείου του αριθμητικού πλέγματος.

3.3.2.2. Γωνιακή παραμόρφωση για $G_s=0.722G_0 [\gamma_{0.7}]$

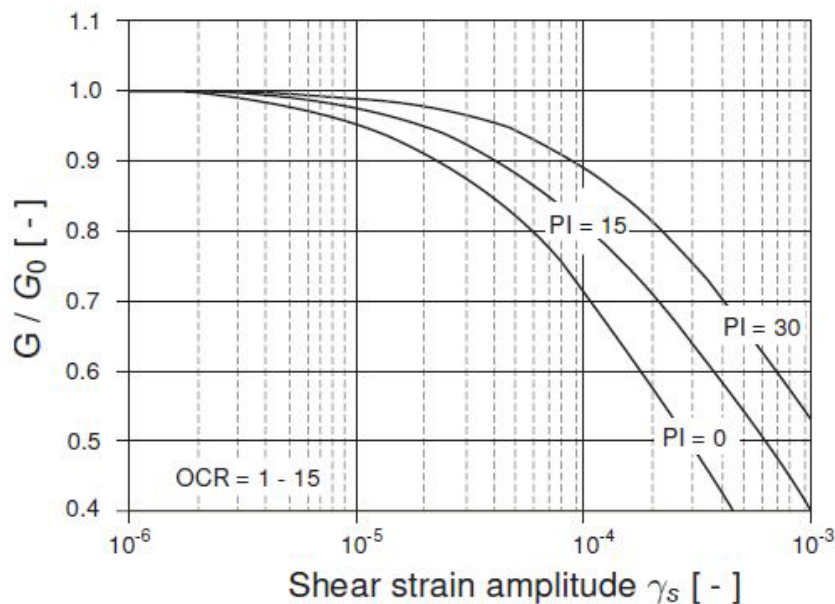
Η παράμετρος αυτή μπορεί να βρεθεί από τα διαγράμματα Hardin & Drnevich , βρίσκοντας την τιμή της γωνιακής παραμόρφωσης (γ) που αντιστοιχεί στον λόγο $G/G_0 =0,722$, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Μπορεί να γίνει επίσης χρήση του τύπου που προκύπτει από τον συνδυασμό της σχέσης Hardin & Drnevich με το κριτήριο Mohr- Coulomb.

$$\gamma_{0,7} \approx \frac{1}{9G_0} [2c'(2 + \cos 2\varphi') - \sigma'_1(1 + K_0) \sin 2\varphi'] \quad (3.3-13)$$

Έχουν βρεθεί επίσης εμπειρικά γραφήματα. Οι Vucetic & Dobry προτείνουν για συνεκτικά εδάφη, συναρτήσει του δείκτη πλαστικότητας (PI):



Εικόνα 3.3-6: Διάγραμμα $G/G_0 - \gamma$ συναρτήσει του δείκτη πλαστικότητας. (PLAXIS, 2011)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ**4.1. Γενικά**

Για τον υπολογισμό των καθιζήσεων από τις μελέτες που έχουν εκπονηθεί για την κατασκευή του έργου, έχει γίνει χρήση ελαστικών παραμέτρων και παραμέτρων αντοχής του εδάφους, που προέκυψαν ως μέσοι όροι από ένα πλήθος δοκιμών. Οι δοκιμές αυτές έχουν πραγματοποιηθεί σε δείγματα από διάφορα βάθη, που έχουν ληφθεί από γεωτρήσεις καθ' όλο το μήκος του υποτμήματος 3. Επιλογή παραμέτρων έχει γίνει και από δοκιμές πεδίου, όπως πρεσσιομετρήσεις και δοκιμές πρότυπης διείσδυσης.

Το τμήμα που μελετάται σύμφωνα με τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 2.5 αποτελεί ένα μικρό κομμάτι του υποτμήματος 3 από τη Χ.Θ. 2+330 έως τη Χ.Θ. 2+490. Στη θέση αυτή συναντώνται δύο γεωτεχνικές ενότητες. Οι Τεχνητές επιχώσεις (Τ.Ε.) και η σειρά των Ερυθρών Αργίλων (Α2) που με βάση την αντοχή τους διακρίνονται σε Α2b και Α2c.

Δεδομένου ότι τα καταστατικά μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν απαιτούν ειδική επεξεργασία των παραμέτρων του εδάφους, απαραίτητη είναι η επιλογή παραμέτρων από την αρχή, βάσει των δοκιμών που έχουν γίνει στο συγκεκριμένο τμήμα.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου αυτού αναλύεται η διαδικασία επιλογής και επεξεργασίας των παραμέτρων.

4.2. ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ

Η συγκεκριμένη ενότητα αποτελεί ένα επιφανειακό στρώμα πάχους μερικών μέτρων. Καθώς, οι δοκιμές που έχουν γίνει στην συγκεκριμένη ενότητα είναι λίγες και η επιρροή της στον σχηματισμό καθιζήσεων μικρή, έγινε χρήση αποκλειστικά του καταστατικού μοντέλου Mohr- Coulomb. Το συγκεκριμένο μοντέλο δεν απαιτεί επεξεργασία των παραμέτρων ελαστικότητας. Ως εκ τούτου, έγινε χρήση των παραμέτρων όπως αυτές υπολογίστηκαν από τον μελετητή.

ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ					
General			Strength		
γ_{unsat}	kN/m ²	19,5	c'	kN/m ²	7
γ_{sat}	kN/m ²	20	ϕ	°	32
Stiffness			Flow parameters		
E_{50}	kN/m ²	7500	K_x	m/day	2,013
ν	-	0,3	K_y	m/day	2,013
			Initial		
			K_0	-	0,47

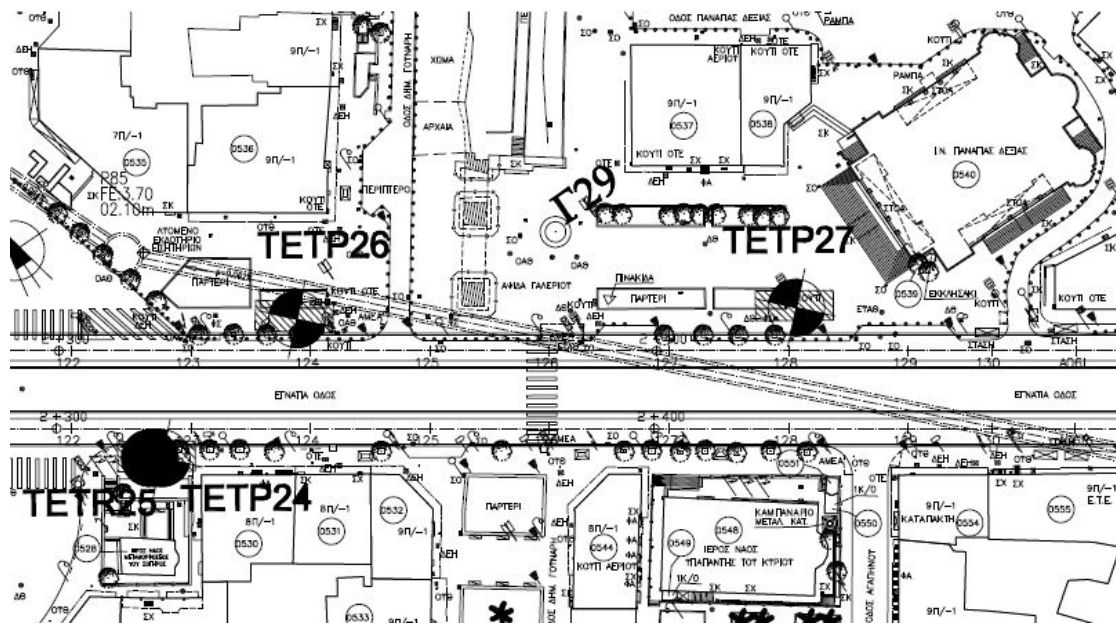
Πίνακας 4.2-1 : Παράμετροι Τεχνητών Επιχώσεων.

Εδώ επισημαίνεται ότι οι παράμετροι αντοχής εκτιμήθηκαν κυρίως μέσω των κοκκομετρικών αναλύσεων του εδάφους.

4.3. ΕΡΥΘΡΕΣ ΑΡΓΙΛΟΙ (A2)

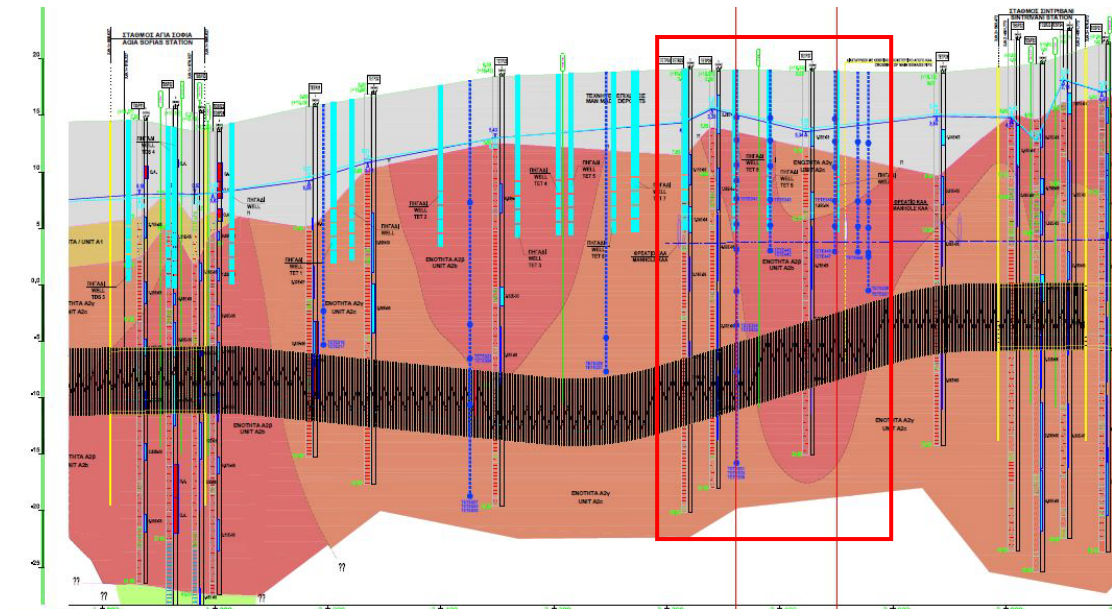
Η σειρά των ερυθρών αργίλων είναι ο σχηματισμός που επικρατεί στο υπέδαφος της περιοχής διερεύνησης. Διακρίνεται, σύμφωνα με την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη, σε τρεις κατηγορίες. Την A2a όταν η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι μικρότερη από 300kPa, την A2b όταν η αντοχή είναι ανάμεσα στα 300 kPa και τα 600 kPa και την A2c όταν η αντοχή είναι μεγαλύτερη από 600kPa.

Υπάρχει πλήθος γεωτεχνικών δεδομένων για τον συγκεκριμένο σχηματισμό. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο επεξεργάζονται τα δεδομένα από τις γεωτρήσεις κοντά στην περιοχή μελέτης. Στην Εικόνα 4.3-1 φαίνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων αυτών.



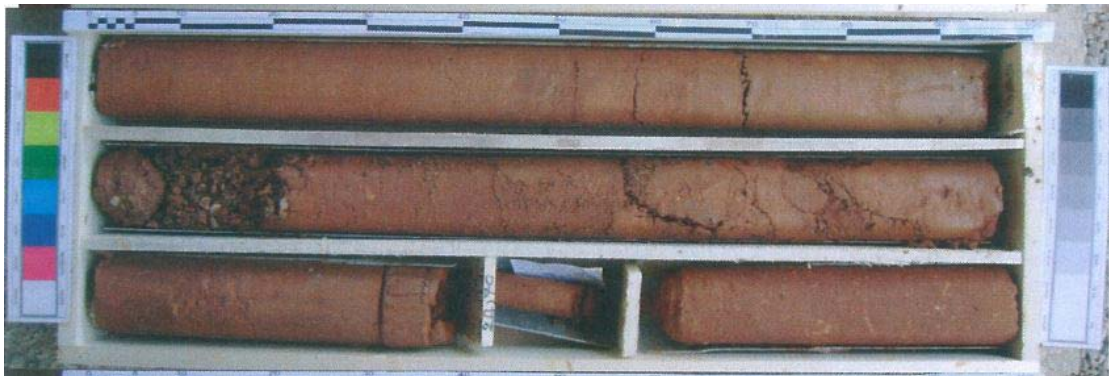
Εικόνα 4.3-1: Θέσεις γεωτρήσεων στην περιοχή μελέτης. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007)

Μέσω των μητρώων των γεωτρήσεων έχει κατασκευαστεί η γεωτεχνική τομή της Εικόνας 4.3-2 που αφορά όλο το μεσοδιάστημα Αγία Σοφία – Σιντριβάνι. Με σκούρο καφέ εμφανίζεται η ενότητα A2b και με ανοιχτό καφέ η A2c. Το επιφανειακό στρώμα αποτελεί την ενότητα των Τεχνητών Επιχώσεων. Η περιοχή διερεύνησης βρίσκεται εντός του κόκκινου πλαισίου. Εδώ σημειώνεται ότι η κλίμακα του άξονα των τετμημένων είναι δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτήν του άξονα των τεταγμένων.



Εικόνα 4.3-2: Γεωτεχνική τομή μεσοδιαστήματος Αγία Σοφία – Σιντριβάνι. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007)

Όπως φαίνεται, στο συγκεκριμένο τμήμα εντοπίστηκαν οι δύο από τις τρεις κατηγορίες της σειράς των ερυθρών αργίλων. Η A2b (Εικόνα 4.3-3) και η A2c (Εικόνα 4.3-4). Για τους σχηματισμούς αυτούς, βάσει των εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών, υπολογίζονται στην συνέχεια οι γεωτεχνικές παράμετροι. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού των παραμέτρων αυτών.

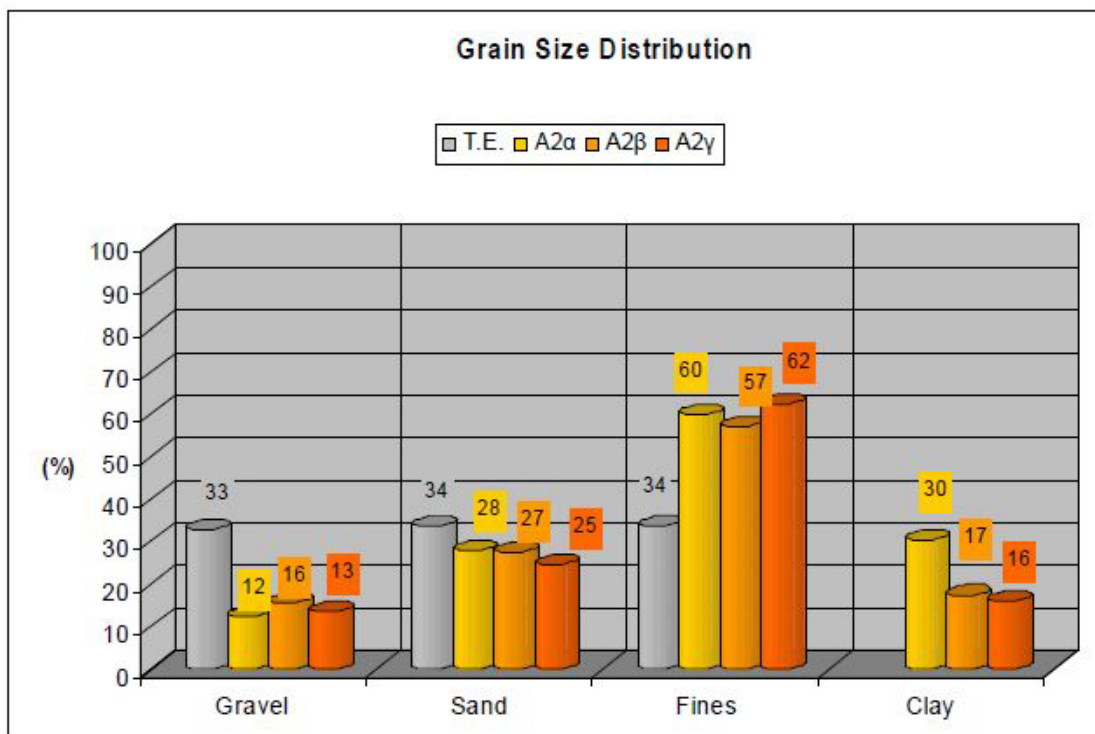


Εικόνα 4.3-3: Δείγματα γεωτρήσεων ενότητας A2b. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007)



Εικόνα 4.3-4 Δείγματα γεωτρήσεων ενότητας A2c (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007)

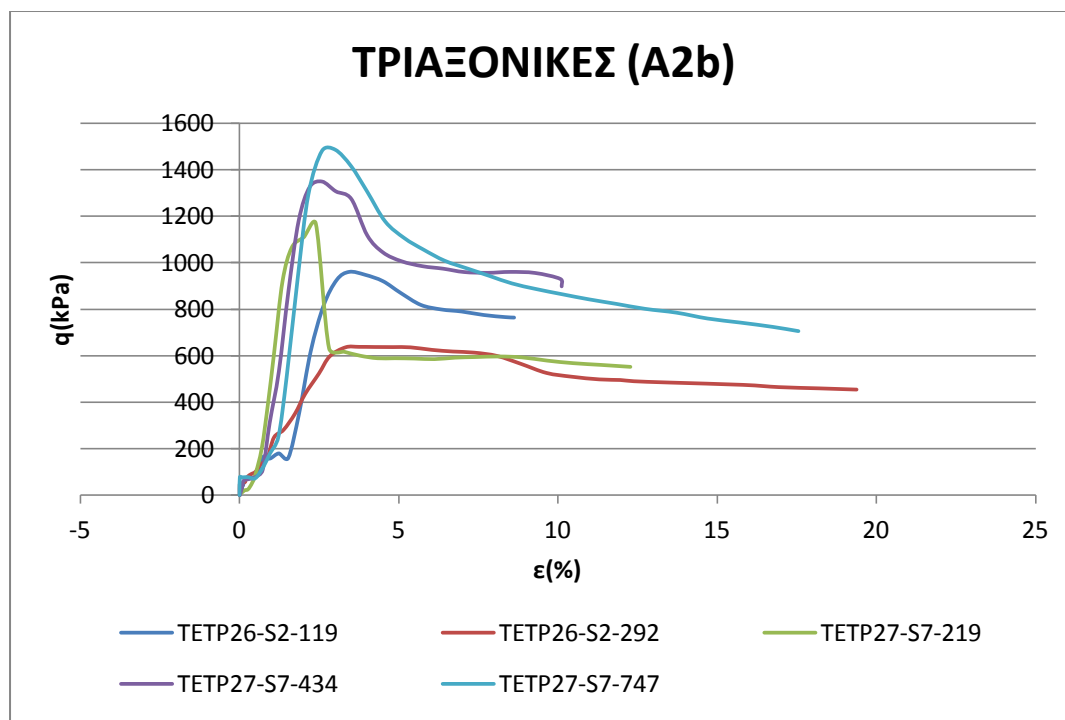
Ο μέσος όρος των ποσοστών συμμετοχής της αργίλου, της ιλύς, της άμμου και των κροκάλων, σε κάθε τύπο εδάφους φαίνεται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα της Εικόνας 4.3-7



Εικόνα 4.3-7: Ποσοστό κάθε κοκκομετρικού κλάσματος για τους σχηματισμούς που μελετώνται. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007)

4.3.2. Τέμνον μέτρο ελαστικότητας (E_{50}^{ref}):

Η συγκεκριμένη παράμετρος υπολογίζεται μέσω των τριαξονικών δοκιμών που έχουν γίνει στα δείγματα των γεωτρήσεων TETR 24 έως TETR 27 και ανήκουν στην ενότητα A2. Οι δοκιμές αυτές είναι χωρίς στερεοποίηση και χωρίς αποστράγγιση (UU). Στο Γράφημα 4.3-1 φαίνονται οι τριαξονικές δοκιμές για τον σχηματισμό A2b.



Γράφημα 4.3-1: Τριαξονικές δοκιμές UU στην ενότητα Α2b

Για κάθε τριαξονική δοκιμή υπολογίζεται το τέμνον μέτρο ελαστικότητας (E_{50}), που αναφέρεται στην πλευρική πίεση που έγινε η δοκιμή, και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.2.1.1, τα μέτρα ελαστικότητας πρέπει να αναφέρονται στην πίεση αναφοράς ($p^{ref} = 100\text{kPa}$). Αυτό στην περίπτωση αστράγγιστων συνθηκών γίνεται μέσω του τύπου:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{s_u \cos \varphi_u - \sigma'_3 \sin \varphi_u}{s_u \cos \varphi_u + p^{ref} \sin \varphi_u} \right)^m$$

Ως βαθμός εξάρτησης της δυσκαμψίας από το επίπεδο φόρτισης (m), πάρθηκε η τιμή $m=0.5$, που είναι τυπική τιμή για σκληρά εδάφη.

Στον Πίνακα 4.3-1, φαίνονται τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών, και η επεξεργασία αυτών για τον σχηματισμό Α2b.

ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ UU (Α2b)							
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ	E_{50} (kPa)	σ_3 (kPa)	E_{50}^{ref} (kPa)	p^{ref} (kPa)	s_u (kPa)	φ_u ($^\circ$)
TETP 26	2	33700	119	38108,71858	100	271,4	16,7
TETP 26	2	18800	292	23120,57779	100	317,1	16,7
TETP 27	7	80400	219	85779,44476	100	583,1	13
TETP 27	7	83800	434	92417,68131	100	670,3	13
TETP 27	7	51000	747	59159,63283	100	738,3	13
M.O.	-	53540	-	59717,21105	-	516,04	14,48

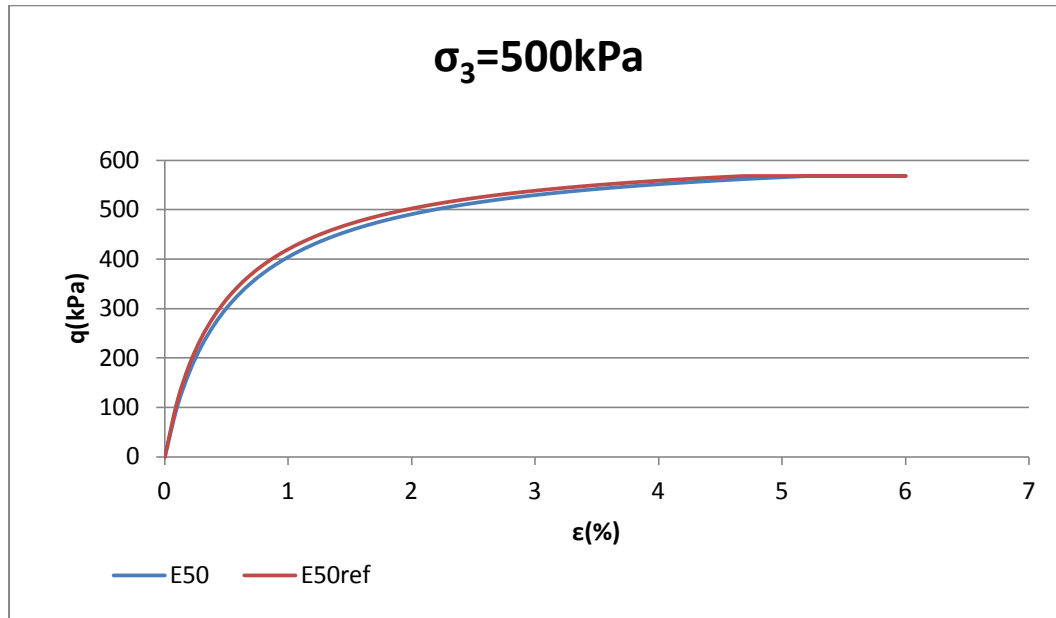
Πίνακας 4.3-1: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών UU στην ενότητα Α2b

Βάσει της διαδικασίας αυτής έγινε μετατροπή του μέτρου ελαστικότητας E_{50} , που προέκυπτε από κάθε δοκιμή, στην τιμή που θα είχε στην πίεση αναφοράς E_{50}^{ref} . Ως τέμνον

μέτρο ελαστικότητας λαμβάνεται ο μέσος όρος των τιμών όλων των δοκιμών που αφορούν την συγκεκριμένη κατηγορία εδάφους. Έτσι:

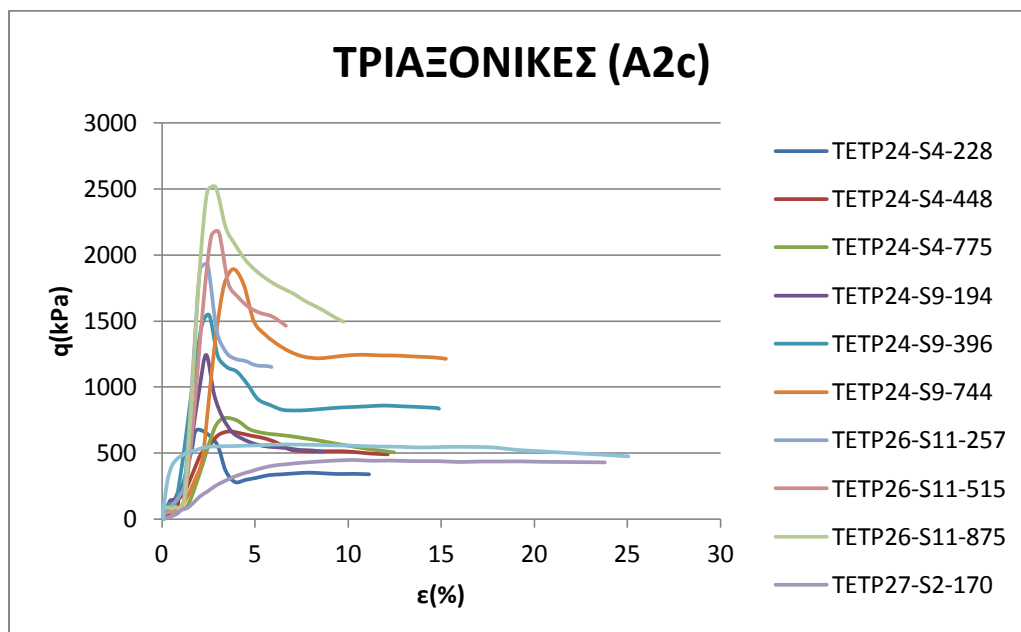
$$E_{50}^{ref} = 59717kPa$$

Αν γινόταν απευθείας χρήση του μέσου όρου των τιμών E_{50} , η τιμή αυτή θα ήταν 53540 kPa. Στο Γράφημα 4.3-2 που ακολουθεί φαίνεται η επιρροή του E_{50} , σε τριαξονική δοκιμή χωρίς αποστράγγιση με $\sigma_3 = 500kPa$.



Γράφημα 4.3-2: Τριαξονικές δοκιμές με E_{50} και E_{50}^{ref} στην ενότητα A2b.

Οι τριαξονικές δοκιμές (UU) που εκτελέστηκαν στον σχηματισμό A2c φαίνονται στο Γράφημα 4.3-3.



Γράφημα 4.3-3: Τριαξονικές δοκιμές UU στον σχηματισμό A2c

Μέσω της ίδια διαδικασίας με τον σχηματισμό A2b, γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων και για τον σχηματισμό A2c (Πίνακας 4.3-2).

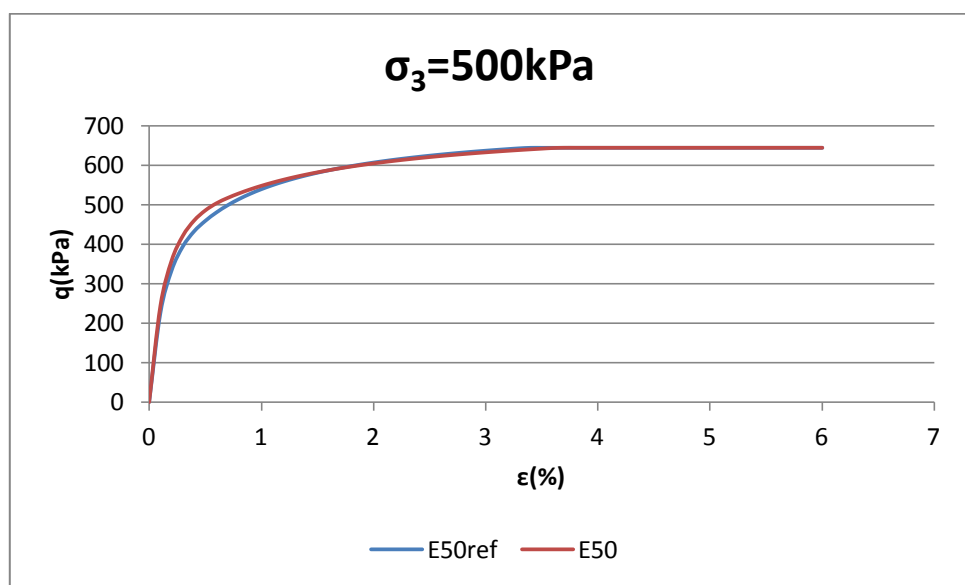
ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ UU							
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ	E_{50} (kPa)	σ_3 (kPa)	E_{50}^{ref} (kPa)	p^{ref} (kPa)	s_u (kPa)	φ_u ($^\circ$)
ΤΕΤΡ 24	4	33500	228	34854,6	100	338,2	4,6
ΤΕΤΡ 24	4	31900	448	34199	100	331,3	4,6
ΤΕΤΡ 24	4	24000	775	26516,05	100	381,4	4,6
ΤΕΤΡ 24	9	5000	194	5501,389	100	629,5	21,6
ΤΕΤΡ 24	9	87400	396	100251,9	100	778,8	21,6
ΤΕΤΡ 24	9	65200	744	80042,94	100	953,5	21,6
ΤΕΤΡ 26	11	109000	257	116399,4	100	958,7	18,9
ΤΕΤΡ 26	11	105200	515	116772,3	100	1083,5	18,9
ΤΕΤΡ 26	11	216300	875	251254,6	100	1255,2	18,9
ΤΕΤΡ 27	2	10000	170	11809,43	100	222,5	14,6
ΤΕΤΡ 27	2	164400	347	208448,2	100	282	14,6
Μ.Ο.	-	77445,45	-	89640,9	-	655,8727	14,95455

Πίνακας 4.3-2: Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών UU στην ενότητα A2c

Ως τέμνον μέτρο ελαστικότητας λαμβάνεται ο μέσος όρος των τιμών όλων των δοκιμών που αφορούν την κατηγορία εδάφους A2c. Έτσι:

$$E_{50}^{ref} = 89640 \text{ kPa}$$

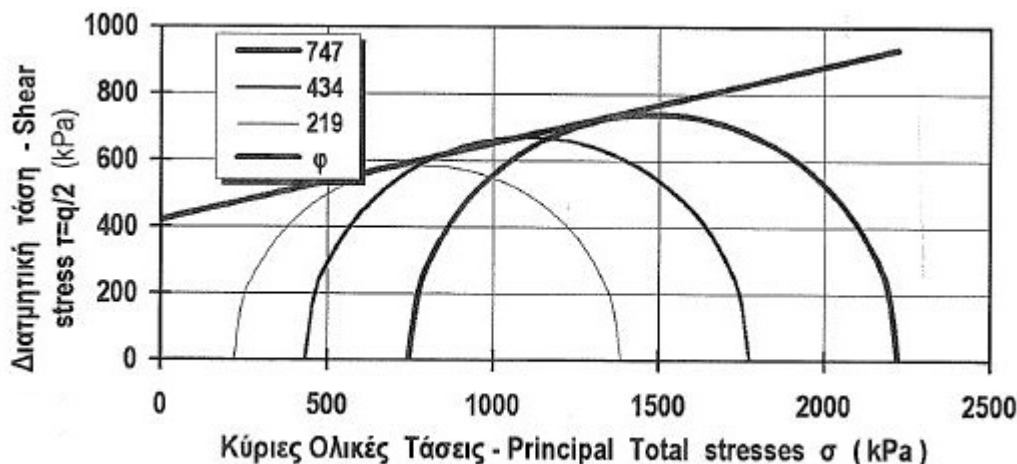
Αν γινόταν απευθείας χρήση του μέσου όρου των τιμών E_{50} η τιμή αυτή θα ήταν 77445 kPa. Στο Γράφημα 4.3-4 που ακολουθεί φαίνεται η επιρροή του E_{50} , σε τριαξονική δοκιμή χωρίς αποστράγγιση στην ενότητα A2c με $\sigma_3 = 500 \text{ kPa}$.



Γράφημα 4.3-4: Τριαξονικές δοκιμές με E_{50} και E_{50}^{ref} στην ενότητα A2c.

4.3.3. Αστράγγιστη διατμητική αντοχή (s_u)

Για κάθε τριαξονική δοκιμή χαράσσεται ο κύκλος του Mohr που την περιγράφει. Έχοντας τριαξονικές δοκιμές (UU) του ίδιου δείγματος σε διαφορετική πλευρική πίεση, χαράσσεται η περιβάλλουσα αστοχίας της Εικόνας 4.3-8. Μέσω της περιβάλλουσας αυτής αστοχίας υπολογίζεται η αστράγγιστη γωνία εσωτερικής τριβής και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή.



Εικόνα 4.3-8: Περιβάλλουσα αστοχίας σε διάγραμμα κύριων – διατμητικών τάσεων για την ενότητα A2b. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007)

Στον Πίνακα 4.3-3 που ακολουθεί φαίνονται η αστράγγιστη γωνία εσωτερικής τριβής και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή, που υπολογίστηκαν από τις περιβάλλουσες αστοχίες των κύκλων του Mohr, όπως αυτές προέκυψαν από τις τριαξονικές δοκιμές με διαφορετική πλευρική πίεση για το ίδιο δείγμα.

ΚΥΚΛΟΙ ΜΟHR			
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ	ϕ_u (°)	s_u (kPa)
ΤΕΤΡ 26	2	16,7	148
ΤΕΤΡ 27	7	13	421
Μ.Ο.	-	14,85	284,5

Πίνακας 4.3-3: Υπολογισμός ϕ_u και s_u από περιβάλλουσες για την ενότητα A2b.

Από τους μέσους όρους των τιμών αυτών υπολογίζεται η:

- Αστράγγιστη διατμητική αντοχή του σχηματισμού A2b: $s_u = 284$ kPa.
- Αστράγγιστη γωνία εσωτερικής τριβής του σχηματισμού A2b: $\phi_u = 14.85^\circ$

Ο Πίνακας 4.3-4 προέκυψε από την περιβάλλουσα των κύκλων του Mohr που χαράχθηκε από τις δοκιμές στον A2c

ΚΥΚΛΟΙ ΜΟΗΡ			
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ	φ_u (kPa)	s_u
ΤΕΤΡ 24	4	4,6	285
ΤΕΤΡ 24	9	21,6	359
ΤΕΤΡ 26	11	18,9	597
ΤΕΤΡ 27	2	14,6	128
Μ.Ο.	-	13,1	322

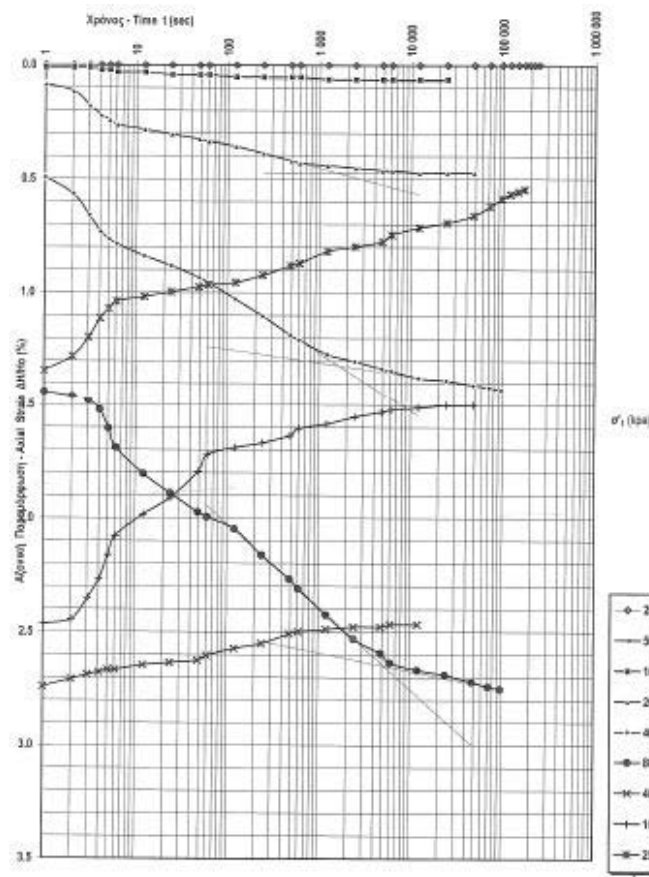
Πίνακας 4.3-4: Υπολογισμός φ_u και s_u από περιβάλλουσες για την ενότητα A2c

Από τους μέσους όρους των τιμών αυτών υπολογίζεται η:

- Αστράγγιστη διατμητική αντοχή του σχηματισμού A2c: $s_u = 322$ kPa.
- Αστράγγιστη γωνία εσωτερικής τριβής του σχηματισμού A2c: $\varphi_u = 13.1^\circ$

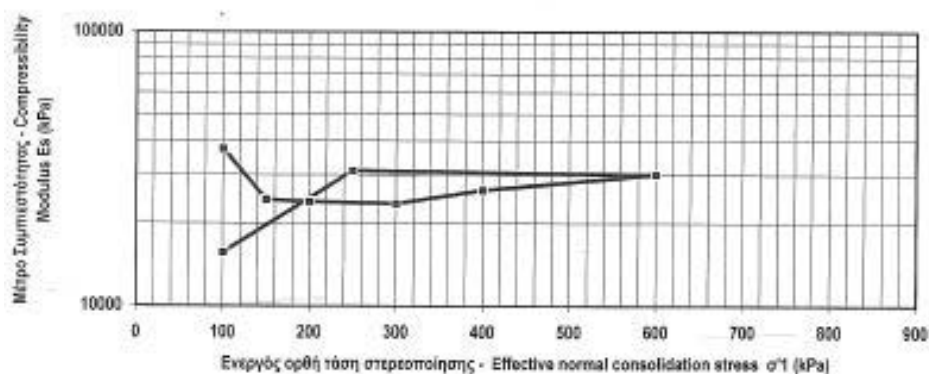
4.3.4. Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης (E_{oed}^{ref}):

Η παράμετρος αυτή υπολογίστηκε από τις δοκιμές μονοδιάστατης στερεοποίησης που έγιναν στα δείγματα από τις γεωτρήσεις της περιοχής διερεύνησης. Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.3-9 φαίνεται ενδεικτικά η αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου 5 της γεώτρησης ΤΕΤΡ27, για κάθε βαθμίδα φόρτισης. Το δοκίμιο αυτό ανήκει στην ενότητα A2b.



Εικόνα 4.3-9: Διαγράμματα Χρόνου- Αξονικής παραμόρφωσης σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007)

Σε κάθε μία από τις βαθμίδες υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας. Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.3-10 φαίνεται η επιρροή του μέτρου αυτού από την ορθή τάση, στην ίδια δοκιμή.



Εικόνα 4.3-10: Μέτρο συμπίεσότητας για κάθε ενεργό ορθή τάση στερεοποίησης. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007)

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο το μέτρο συμπίεσότητας (μέτρο ελαστικότητας σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης) για την κύρια φόρτιση και ορθή τάση ίση με 100kPa ($=P^{ref}$) είναι 37653 kPa. Σε περίπτωση που δεν ήταν εφικτό να γίνει άμεσος προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης στην πίεση αναφοράς P^{ref} , μπορεί να γίνει χρήση της σχέσης 3.2-7 που έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3.2.2.2

Τα μέτρα συμπίεσότητας, από τις δοκιμές μονοδιάστατης στερεοποίησης που έγιναν σε δοκίμια κατηγορίας εδάφους A2b, και η πίεση που έχουν υπολογιστεί δίνονται στον Πίνακα 4.3-5.

ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ			
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ	E_{oed} (kPa)	σ_1 (kPa)
TETR 27	5	37653	100
TETR 27	9	34018	100
M.O.	-	35835,5	-

Πίνακας 4.3-5: Αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης για την ενότητα A2b

Οι τιμές αυτές, καθώς έχουν υπολογιστεί για ορθή τάση ίση με 100kPa είναι οι τιμές του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας σε δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης στην πίεση αναφοράς (E_{oed}^{ref}).

Η μέση τιμή των τιμών αυτών θεωρείται η αντιπροσωπευτική τιμή του σχηματισμού. Έτσι :

$$E_{oed}^{ref} = 35835 \text{ kPa}$$

Τα αποτελέσματα για την κατηγορία εδάφους A2c φαίνονται στον Πίνακα 4.3-6

ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ			
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ	E_{oed} (kPa)	σ_1 (kPa)
TETR 24	9	54429	100
TETR 24	16	40532	100
M.O.	-	47480,5	-

Πίνακας 4.3-6: Αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης για την ενότητα A2c

Από την μέση τιμή των δοκιμών έχουμε

$$E_{oed}^{ref} = 47480 \text{ kPa}$$

4.3.5. Μέτρο ελαστικότητας σε αποφόρτιση και επαναφόρτιση (E_{ur}^{ref})

Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται από τριαξονικές δοκιμές με αποφόρτιση και επαναφόρτιση του δοκιμίου. Δοκιμές αυτού του τύπου δεν έχουν πραγματοποιηθεί στο πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών για το συγκεκριμένο έργο. Για το λόγο αυτό έγινε χρήση του τύπου 3.2-8:

Για τον σχηματισμό A2b:

$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref} \rightarrow E_{ur}^{ref} = 3 \times 59717 \text{ kPa} \rightarrow E_{ur}^{ref} = 179151 \text{ kPa}$$

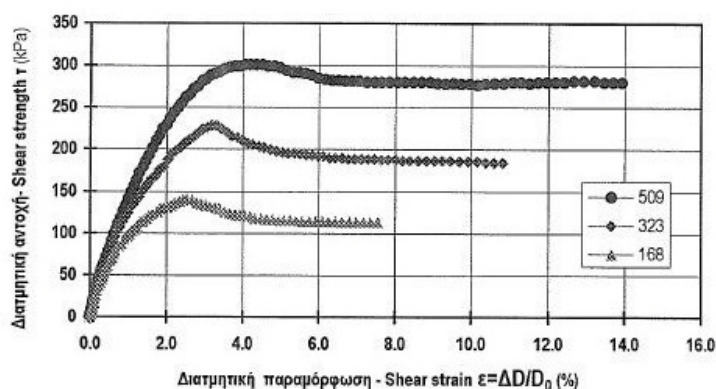
Και για τον σχηματισμό A2c:

$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref} \rightarrow E_{ur}^{ref} = 3 \times 89640 \text{ kPa} \rightarrow E_{ur}^{ref} = 268920 \text{ kPa}$$

4.3.6. Συνοχή (c') και γωνία εσωτερικής τριβής (φ')

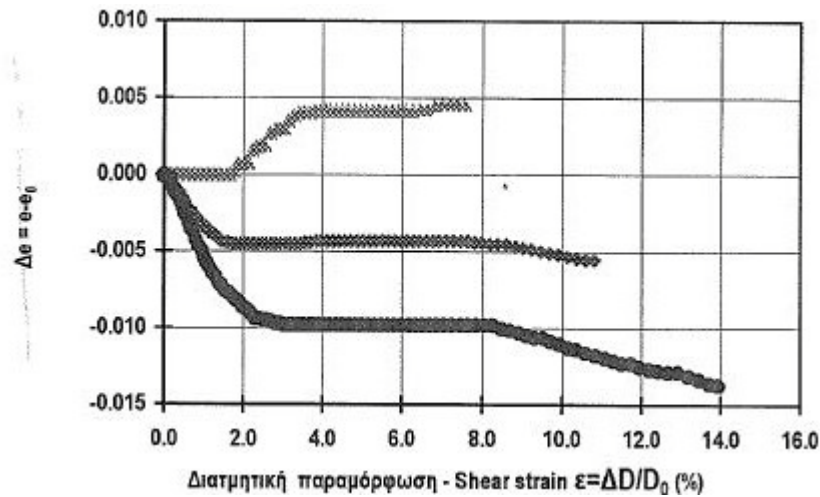
Πρόκειται για τις βασικές παραμέτρους αντοχής σε αναφορά ενεργών τάσεων. Ο προσδιορισμός τους έγινε από τις δοκιμές βραδείας άμεσης διάτμησης με στερεοποίηση και αποστράγγιση (CD). Από κάθε δείγμα, στην συγκεκριμένη δοκιμή, διαμορφώθηκαν τρία δοκίμια, τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμές άμεσης διάτμησης με διαφορετική κύρια τάση (σ_1). Ενδεικτικά, τα παραγόμενα διαγράμματα για το δείγμα 7 της γεώτρησης ΤΕΤΡ24 ακολουθούν. Το δείγμα αυτό ανήκει στην ενότητα A2b.

Στο πρώτο διάγραμμα της Εικόνας 4.3-11 φαίνεται η διατμητική παραμόρφωση σε σχέση με τη διατμητική τάση (τ).



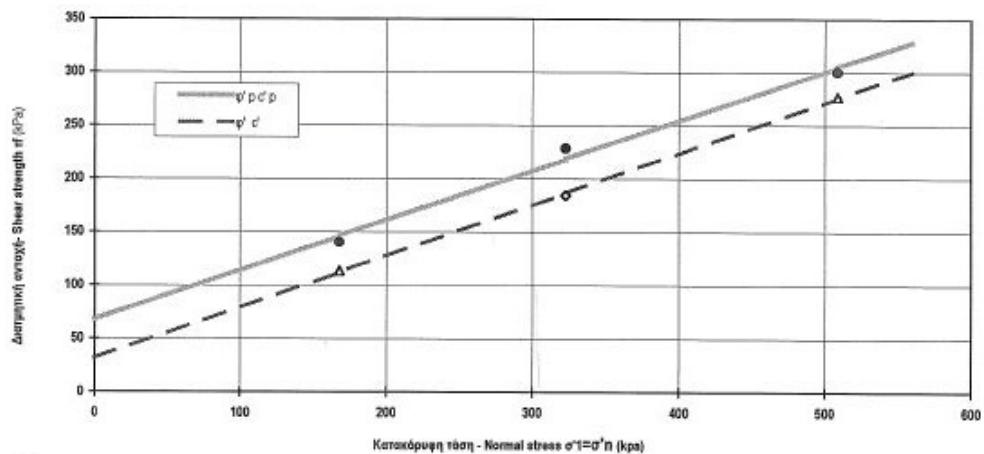
Εικόνα 4.3-11: Διαγράμματα Διατμητικής παραμόρφωσης- Διατμητικής αντοχής σε δοκιμή CD. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007)

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 4.3-12) εμφανίζεται η μεταβολή του λόγου κενών ($e-e_0$) σε σχέση με την διατμητική παραμόρφωση.



Εικόνα 4.3-12: Διάγραμμα διατμητικής παραμόρφωσης – λόγου κενών σε δοκιμή CD. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007)

Παριστάνοντας τα αποτελέσματα και των τριών δοκιμών του δείγματος σε άξονες κύριας-διατμητικής τάσης, έχουμε την περιβάλλουσα αστοχίας, από όπου και βρίσκονται η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής, σε αναφορά ενεργών τάσεων.



Εικόνα 4.3-13: Περιβάλλουσα αστοχίας από δοκιμές CD. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007)

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών άμεσης διάτμησης του σχηματισμού A2b φαίνονται στον Πίνακα 4.3-7.

ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ (CD)			
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ	c'(kPa)	φ'(°)
TETR 27	2	25	26,5
TETR 27	6	44	24,9
TETR 27	8	53	31,7
M.O.	-	40,66667	27,7

Πίνακας 4.3-7: Αποτελέσματα δοκιμών CD για την ενότητα A2b

Βρίσκοντας τους μέσους όρους της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής βρίσκουμε μια αντιπροσωπευτική τιμή του σχηματισμού A2b. Έτσι :

$$c' = 40,6 \text{ kPa}$$

$$\varphi' = 27,7^\circ$$

τα αποτελέσματα του σχηματισμού A2c φαίνονται στον Πίνακα 4.3-8

ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ (CD)			
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ	c'(kPa)	ϕ' ($^\circ$)
TETP 24	7	31	25,7
TETP 24	11	76	28,2
TETP 24	16	170	20,2
TETP 24	17	100	23,1
TETP 26	3	133	15,4
TETP 26	12	124	18,8
M.O.	-	105,6667	21,9

Πίνακας 4.3-8: Αποτελέσματα δοκιμών CD για την ενότητα A2c

Από τους μέσους όρους της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής βρίσκουμε για τον σχηματισμό A2c :

$$c' = 105,6 \text{ kPa}$$

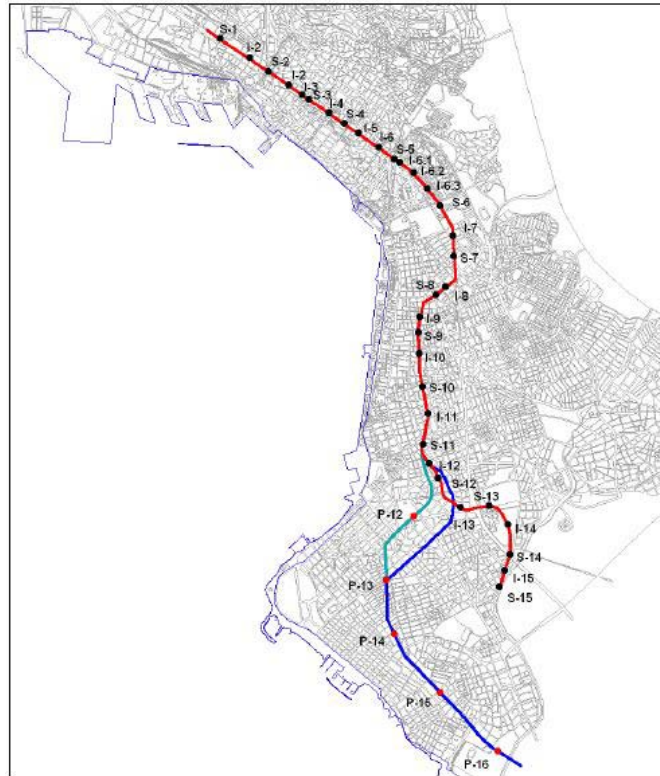
$$\varphi' = 21,9^\circ$$

4.3.7. Μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις G_0^{ref}

Η παράμετρος αυτή αφορά μόνο το μοντέλο HSsmall. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκαν δύο μεθοδολογίες. Η μία μέσω της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων, και η άλλη μέσω του λόγου κενών. Στη συνέχεια αναλύονται και οι δύο μέθοδοι.

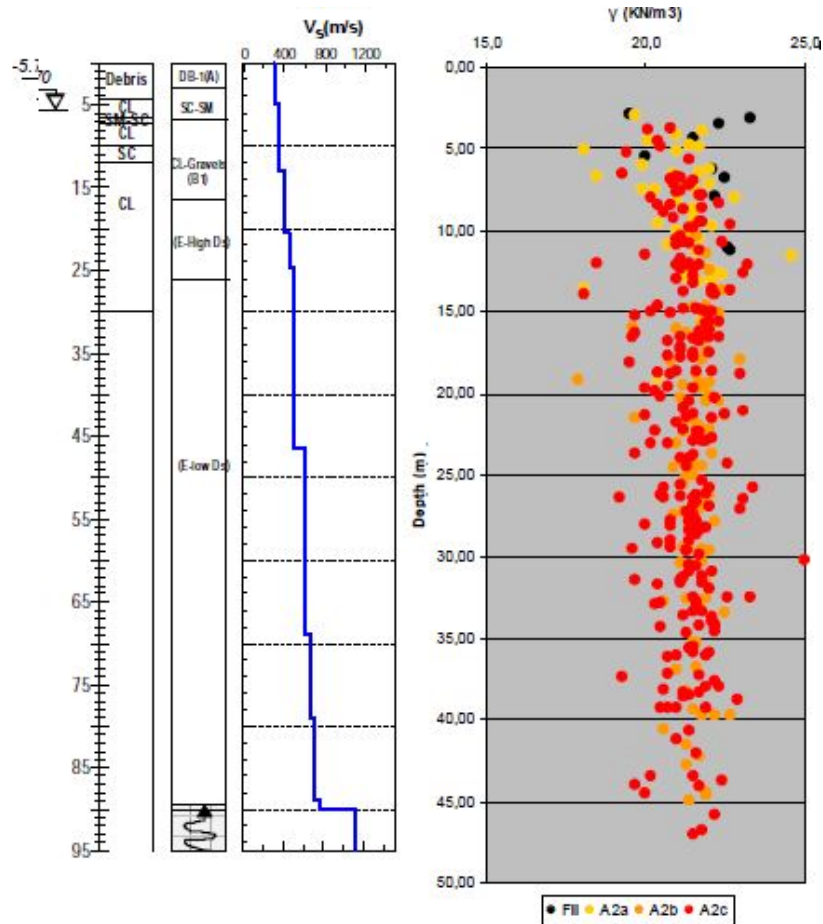
4.3.7.1. Υπολογισμός G_0^{ref} μέσω της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων (V_s).

Για τον υπολογισμό του G_0 μέσω της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s), απαραίτητη είναι η γνώση της ταχύτητας αυτής. Για τις ανάγκες του συγκεκριμένου έργου πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές διασκοπήσεις στο πλαίσιο της « Μελέτη Σεισμικής Επικινδυνότητας και Προσδιορισμός των Παραμέτρων της Ισχυρής Εδαφικής Κίνησης Σχεδιασμού κατά μήκος του Άξονα Χάραξης του Μετρό Θεσσαλονίκης» (Κ.Πιτιλάκης & Συνεργάτες, 2004). Μέσω αυτών κατασκευάστηκαν σε διάφορες θέσεις της χάραξης του μετρό εδαφοδυναμικές τομές. Οι θέσεις αυτές φαίνονται στο χάρτη της Εικόνας 4.3-14 που ακολουθεί.



Εικόνα 4.3-14: Θέσεις Εδαφοδυναμικών τομών. (Κ.Πιτλάκης & Συνεργάτες, 2004)

Η τομή που βρίσκεται πλησιέστερα στη θέση διερεύνησης είναι η I-6, η οποία και φαίνεται στο γράφημα της Εικόνας 4.3-15.



Εικόνα 4.3-15: Αριστερά: Εδαφοδυναμική τομή I-6. (Κ.Πιτιλάκης & Συνεργάτες, 2004), Δεξιά: Λόγος πλαστικότητας σχηματισμών. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007)

Ο σχηματισμός A2b εμφανίζεται ως E-High Ds, καθώς πρόκειται για παλαιότερη μελέτη όπου η σειρά των ερυθρών αργίλων αναφερόταν ως E, και είχε διαχωριστεί σύμφωνα με το λόγο απόσβεσης, σε υψηλού και χαμηλού λόγου (High Ds και low Ds αντίστοιχα).

Η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) για τον σχηματισμό A2b βρίσκεται περίπου 400 m/sec. Βάσει του τύπου 3.3-10, και για την πυκνότητα $2,15 \text{ ton/m}^3$ του σχηματισμού αυτού υπολογίζεται:

$$G_0 = \rho V_s^2 \rightarrow G_0 = 2.15 \times 400^2 \rightarrow G_0 = 344000 \text{ kPa}$$

Η τιμή αυτή είναι η επιτόπου τιμή του G_0 και δεν βρίσκεται στην πίεση αναφοράς $P^{ref} = 100 \text{ kPa}$. Δεν πρόκειται δηλαδή για την G_0^{ref} αλλά για την In situ τιμή του G_0 .

Ο σχηματισμός A2c εμφανίζεται ως E-low Ds, και η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων είναι περίπου 480 m/sec. Για την πυκνότητα $2,15 \text{ ton/m}^3$ του σχηματισμού A2c υπολογίζεται:

$$G_0 = \rho V_s^2 \rightarrow G_0 = 2.15 \times 480^2 \rightarrow G_0 = 495360 \text{ kPa}$$

4.3.7.2. Υπολογισμός G_0^{ref} μέσω του αρχικού λόγου κενών (e_0).

Ο αρχικός λόγος κενών (e_0) έχει υπολογιστεί σε κάθε εργαστηριακή δοκιμή που διεξήχθη. Μέσω του τύπου 3.3-11 μπορεί να υπολογιστεί το G_0^{ref} κατευθείαν για τη πίεση αναφοράς

$p^{ref} = 100 \text{ kPa}$. Στον Πίνακα 4.3-9 που ακολουθεί φαίνεται το G_0^{ref} που προέκυψε βάσει του λόγου κενών του κάθε δοκιμίου της ενότητας A2b.

ΛΟΓΟΣ ΚΕΝΩΝ			
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ	e_o	G_0^{ref} (MPa)
TETP 26	2	0,49	136,2169
TETP 26	2	0,489	136,4183
TETP 27	2	0,448	144,9558
TETP 27	5	0,459	142,6107
TETP 27	6	0,436	147,5614
TETP 27	7	0,458	142,8222
TETP 27	7	0,445	145,6025
TETP 27	7	0,461	142,1887
TETP 27	8	0,402	155,223
TETP 27	9	0,504	133,4296
M.O.	-	-	142,7029

Πίνακας 4.3-9: Υπολογισμός G_0^{ref} μέσω του λόγου κενών της ενότητας A2b

Από τον μέσο όρο των τιμών αυτών υπολογίζεται το

$$G_0^{ref} = 142709 \text{ kPa}$$

Ο αντίστοιχος Πίνακας 4.3-10 για την ενότητα A2c ακολουθεί:

ΛΟΓΟΣ ΚΕΝΩΝ			
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ	e_o	G_0^{ref} (MPa)
TETP 24	4	0,37	162,8321
TETP 24	4	0,388	158,5028
TETP 24	4	0,368	163,3211
TETP 24	7	0,352	167,2925
TETP 24	9	0,384	159,4538
TETP 24	9	0,387	158,74
TETP 24	9	0,375	161,6166
TETP 24	9	0,393	157,3228
TETP 24	11	0,362	164,798
TETP 24	16	0,434	148,0005
TETP 24	16	0,431	148,6619
TETP 24	17	0,495	135,2145
TETP 26	3	0,459	142,6107
TETP 26	11	0,425	149,9943
TETP 26	11	0,408	153,8401
TETP 26	11	0,414	152,4706
TETP 26	12	0,485	137,2272
TETP 27	2	0,437	147,3423
TETP 27	2	0,436	147,5614
M.O.	-	0,410684	153,516

Πίνακας 4.3-10: Υπολογισμός G_0^{ref} μέσω του λόγου κενών της ενότητας A2c

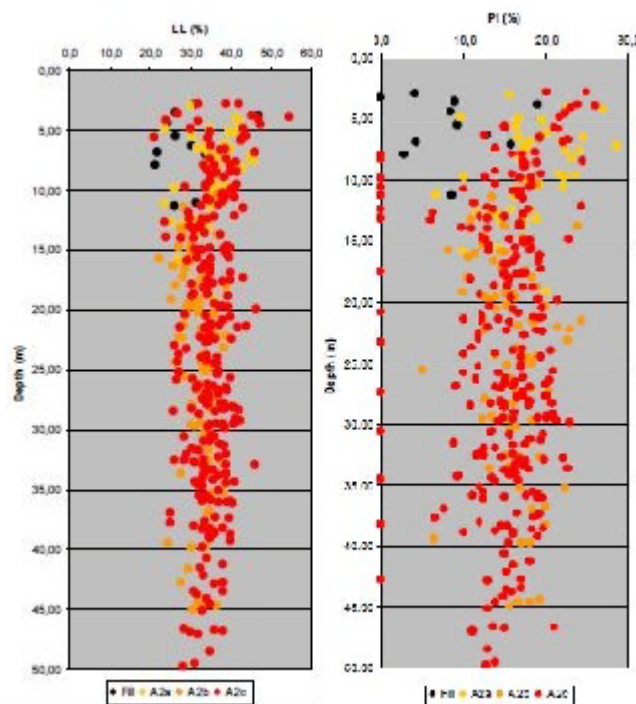
Από τον μέσο όρο των τιμών αυτών υπολογίζεται για τον σχηματισμό A2c

$$G_0^{ref} = 153516 \text{ kPa}$$

4.3.8. Γωνιακή παραμόρφωση για $G_s=0.722G_0 (\gamma_{0,7})$

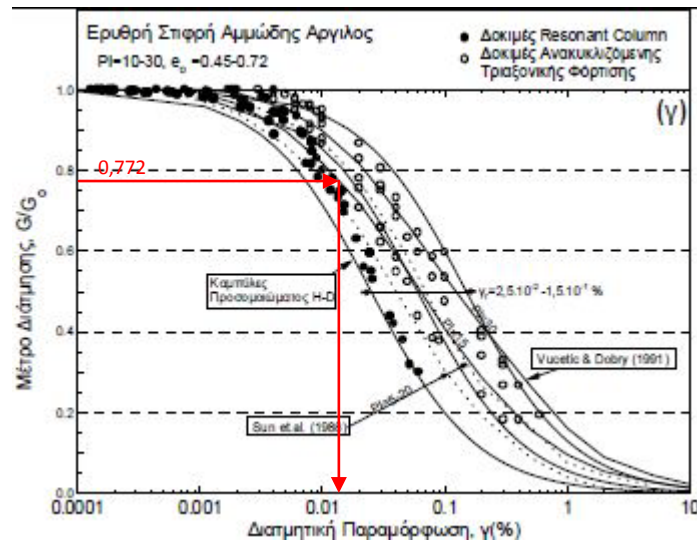
Η παράμετρος αυτή υπολογίστηκε από τις καμπύλες Hardin & Drnevich που κατασκευάστηκαν στο πλαίσιο της μικροζωνικής μελέτης (Αναστασιάδης, 1994). Καθώς η παράμετρος αυτή εξαρτάται από τον δείκτη πλαστικότητας (PI), είναι απαραίτητο να υπολογιστεί ο δείκτης αυτός.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.3-16 φαίνεται η μεταβολή του δείκτη πλαστικότητας (PI) για τους σχηματισμούς του τμήματος συναρτήσε του βάθους. Ένας μέσος δείκτης πλαστικότητας (PI), τόσο για την ενότητα A2b όσο και για την A2c, είναι ίσος με 15 %.



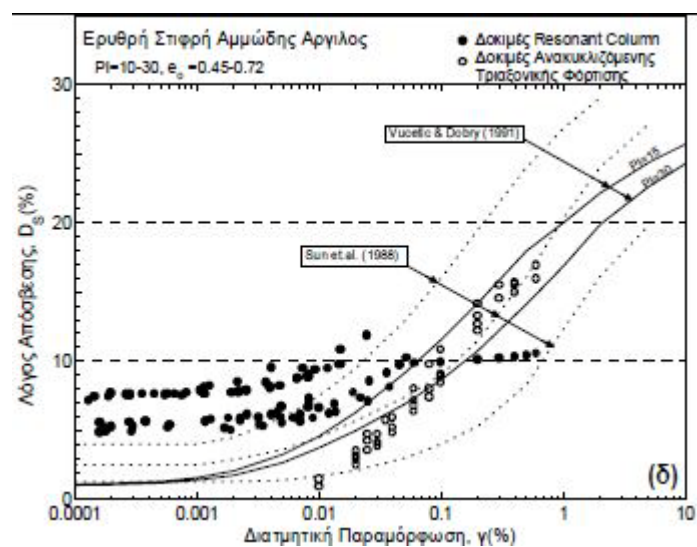
Εικόνα 4.3-16: Δείκτης πλαστικότητας και υδαρότητας των σχηματισμών. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007)

Ακολουθεί το διάγραμμα μεταβολής του λόγου G/G_0 με τη διατμητική παραμόρφωση γ (Εικόνα 4.3-17). Το διάγραμμα αυτό έχει προκύψει από δοκιμές ανακυκλιζόμενης τριαξονικής φόρτισης και δοκιμές στήλης συντονισμού στην ενότητα των ερυθρών αργίλων (Αναστασιάδης, 1994). Για την εύρεση της γωνιακής παραμόρφωσης $\gamma_{0,7}$, πρέπει από την θέση που ο λόγος G/G_0 είναι ίσος με 0,772 να χαραχθεί κάθετος. Στο σημείο τομής με την καμπύλη Hardin & Drnevich για $PI=15\%$, βρίσκεται η τιμή του $\gamma_{0,7}$.



Εικόνα 4.3-17: Μεταβολή του λόγου G/G_0 με τη διατμητική παραμόρφωση γ για την σειρά των ερυθρών αργίλων (A2). (Αναστασιάδης, 1994)

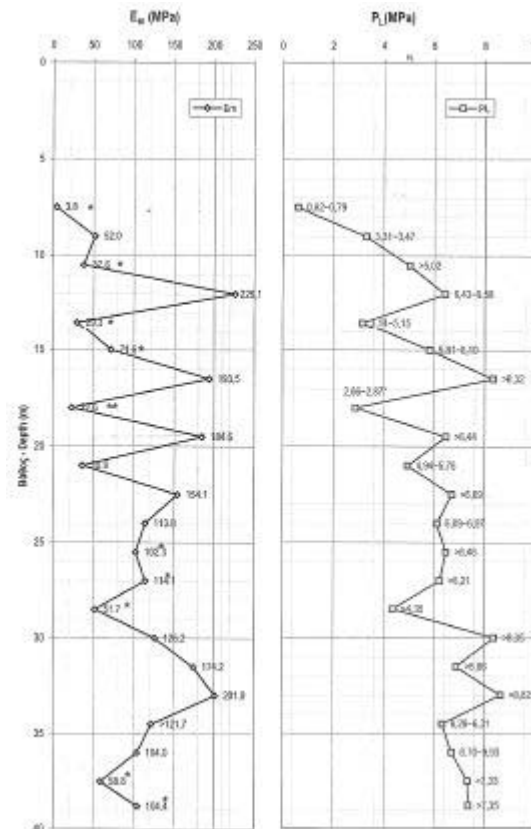
Και για τους δύο σχηματισμούς, βρίσκεται μέσω του διαγράμματος αυτού $\gamma_{0,7} = 0,015 \%$. Από τις ίδιες δοκιμές έχει προκύψει και το διάγραμμα λόγου απόσβεσης (D_s)– διατμητικής παραμόρφωσης (γ) που φαίνεται στην Εικόνα 4.3-18



Εικόνα 4.3-18: Διάγραμμα λόγου απόσβεσης (D_s)– διατμητικής παραμόρφωσης (γ) για την σειρά των ερυθρών αργίλων (A2). (Αναστασιάδης, 1994)

4.3.9. Πρεσσιομετρικό μέτρο ελαστικότητας (E_m)

Στη περιοχή διερεύνησης έγιναν πρεσσιομετρικές δοκιμές σε διάφορα βάθη της γεώτρησης ΤΕΤΡ25. Η πρεσσιομετρική τομή στην συγκεκριμένη γεώτρηση δίνεται στο σχήμα της Εικόνας 4.3-19. Στο αριστερό διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή του πρεσσιομετρικού μέτρου ελαστικότητας E_m σε συνάρτηση με το βάθος. Στο δεξί διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της οριακής πίεσης P_L σε συνάρτηση με το βάθος.



Εικόνα 4.3-19: Πρεσσιομετρική τομή στην γεώτρηση ΤΕΤΡ25. (ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., 2007)

Στον πίνακα της Εικόνας 4.3-20 φαίνονται οι μέσες τιμές των μετρήσεων που θεωρήθηκαν αξιόπιστες στις μελέτες. Από τις μετρήσεις αυτές εξαιρέθηκαν αυτές που υπήρξε χαλάρωση των τοιχωμάτων ή κακή επαφή της βολίδας με τα τοιχώματα της γεώτρησης.

	Τ.Ε.	ΕΝΟΤΗΤΑ Α2γ
P_{lim} (MPa)	-	3.31, 6.43, 5.81, 8.32, 6.44, 4.94, 6.69, 6.09, 8.35, 6.86, 8.62, 6.28, 6.70 (6.50)
E_m (MPa)	-	52.0, 226.1, 71.6, 193.5, 184.6, 35.9, 154.1, 113.8, 126.2, 174.2, 201.0, 121.7, 104.0 (135.3)
E_m/P_{lim}	-	20

Εικόνα 4.3-20: Αποτελέσματα πρεσσιομετρικών δοκιμών στην γεώτρηση ΤΕΤΡ25. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007)

Η μέση τιμή για την ενότητα Α2c είναι 135350 kPa. Καθώς στην περιοχή διερεύνησης δεν έγιναν πρεσσιομετρικές δοκιμές στην ενότητα Α2b, στην συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικά οι μέσοι όροι του υποτιμήματος 3.

	T.E	A2α	A2β	A2γ
P_{lim} (MPa)	0.82 – 2.19 (M.O: 1.25)	1,90 -3.77 (M.O: 2,60)	3.85 – 6,52 (M.O: 4.61)	4.36 – 8.65 (M.O: 6.46)
E_m (MPa)	5.50 – 45.60 (M.O: 29.91)	11,3-47.6 (M.O: 31,16)	44.83 – 61.40 (M.O: 52,83)	49,30 – 146.70 (M.O: 98,46)

Εικόνα 4.3-21: Μέσες τιμές πρεσσιομετρικών δοκιμών υποτμήματος 3 (Χ.Θ.1+908 έως Χ.Θ.3+630) (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007)

Ο μέσος όρος του του πρεσσιομετρικού μέτρου ελαστικότητας E_m όλου του υποτμήματος 3 για την κάθε ενότητα αντίστοιχα είναι :

$$E_m^{A2b} = 52830 \text{ kPa}$$

$$E_m^{A2c} = 98460 \text{ kPa}$$

Οι τιμές αυτές είναι κοντά στις τιμές του τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας E_{50}^{ref} που υπολογίστηκε για την κάθε ενότητα στο κεφάλαιο 4.3.2.

4.3.10. Συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία (K_0)

Από τις πρεσσιομετρικές δοκιμές υπολογίστηκε επίσης ο συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία. Στην Εικόνα 4.3-22 φαίνονται οι τιμές του για κάθε ενότητα.

	ΑΠΟ	ΕΩΣ
A2α	0.43	0.68
A2β	0.38	0.69
A2γ	0.51	0.75

Εικόνα 4.3-22: Διακύμανση συντελεστή ωθήσεων σε ηρεμία. (ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ, 2007)

4.3.11. Λόγος υπερστερεοποίησης

Από τις εργαστηριακές δοκιμές μονοδιάστατης στερεοποίησης υπολογίστηκε και ο λόγος υπερστερεοποίησης (OCR). Οι τιμές του λόγου αυτού φαίνονται στον Πίνακα 4.3-11

OCR	
ΕΝΟΤΗΤΑ	-
A2b	1,5
A2c	2

Πίνακας 4.3-11: Λόγος υπερστερεοποίησης ενότητων A2b και A2c.

4.3.12. Συντελεστής διαπερατότητας

Από τις δοκιμές Maag υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι του συντελεστή διαπερατότητας των σχηματισμών αυτών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.3-12

ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	
ΕΝΟΤΗΤΑ	m/day
A2b	0,0431
A2c	0,0431

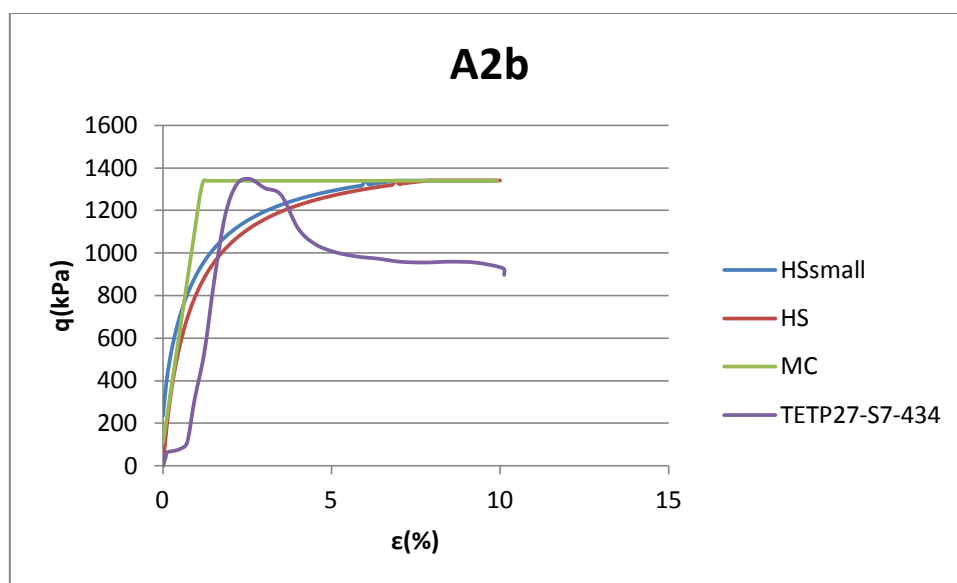
Πίνακας 4.3-12 : Διαπερατότητα ενότητων A2b και A2c

Η περατότητα θεωρείται ίδια και στον οριζόντιο και στον κατακόρυφο άξονα.

4.4. Σύγκριση πραγματικής και προσομοιούμενης συμπεριφοράς του εδάφους

Στο κεφάλαιο αυτό συγκρίνεται η συμπεριφορά που επέδειξε το έδαφος σε τριαξονικές δοκιμές UU με την θεωρητική συμπεριφορά του εδάφους, που προσομοιώνεται με τα καταστατικά μοντέλα Mohr-Coulomb, Hardening Soil και HSsmall, στην αντίστοιχη τριαξονική δοκιμή με τις παραμέτρους αντοχής που προέκυψαν από αυτήν.

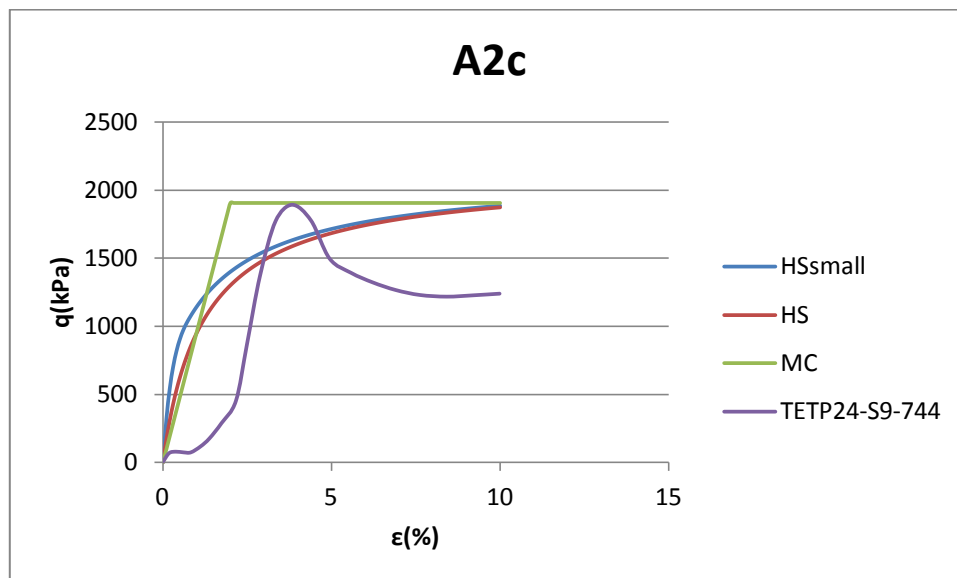
Στο Γράφημα 4.4-1 που ακολουθεί φαίνεται ενδεικτικά, η καμπύλη αποκλίνουσας τάσης – τροπής που προέκυψε από την τριαξονική δοκιμή υπό πλευρική πίεση $\sigma_3=434$ kPa, στο δείγμα 7 της γεώτρησης TETP27, που ανήκει στην ενότητα A2b. Με τις παραμέτρους που προέκυψαν για το δοκίμιο αυτό κατασκευάζονται και οι τριαξονικές δοκιμές υπό τις ίδιες συνθήκες, σύμφωνα με τα καταστατικά μοντέλα που αναφέρονται.



Γράφημα 4.4-1: Αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές στην ενότητα A2b με τα τρία καταστατικά μοντέλα και τριαξονική δοκιμή UU του δείγματος 7 της Γεώτρησης 27 υπό πλευρική πίεση 434kPa.

Καθώς οι τριαξονικές δοκιμές είναι χωρίς αποστράγγιση και χωρίς στερεοποίηση, η σύγκλιση των καμπυλών είναι εξαιρετικά δύσκολη. Οι διαταραχές του δείγματος που εξετάζεται και η μη προστερεοποίησή του δημιουργούν μη κανονική συμπεριφορά στις πρώτες βαθμίδες φόρτισης. Η συμπεριφορά αυτή δεν μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις που διέπουν το κάθε καταστατικό μοντέλο. Βάσει των παραπάνω η προσαρμογή των καταστατικών στην τριαξονική δοκιμή θεωρείται αποδεκτή.

Ακλουθώντας την ίδια διαδικασία κατασκευάστηκε η αντίστοιχη δοκιμή για το δοκίμιο 9 της γεώτρησης TETP 24, που ανήκει στην ενότητα A2c. Η δοκιμή αυτή είναι υπό πλευρική πίεση $\sigma_3=744$ kPa.



Γράφημα 4.4-2: Αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές στην ενότητα A2c με τα τρία καταστατικά μοντέλα και τριαξονική δοκιμή UU του δείγματος 9 της Γεώτρησης 24 υπό πλευρική πίεση 744kPa.

Τηρουμένων των αναλογιών, οι συγκλίσεις αυτές για την κάθε δοκιμή μπορούν να θεωρηθούν προσεγγιστικές. Καθώς για να προκύψουν οι παράμετροι της κάθε δοκιμής ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία, οι μέσες τιμές των δοκιμών του κάθε εδάφους αντιπροσωπεύουν κατά το δυνατόν τη συμπεριφορά του.

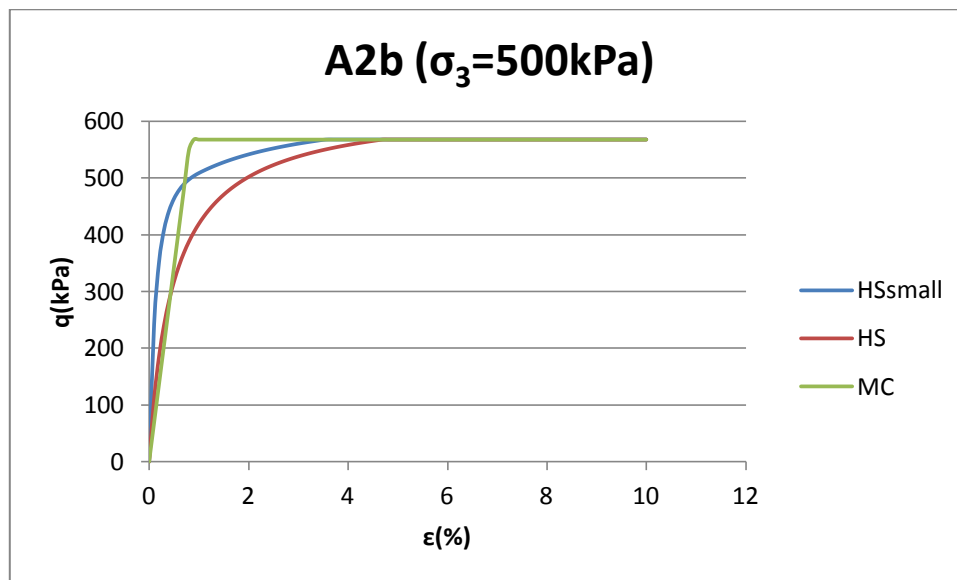
Στον Πίνακα 4.4-1, φαίνονται οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για κάθε τύπο εδάφους από τους μέσους όρους όλων των δοκιμών.

ΕΙΔΟΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΟΝΑΔΕΣ	ΕΝΟΤΗΤΑ		
			T.E.	A2b	A2c
ΒΑΡΟΣ	γ_{unsat}	KN/m ²	19,5	21,5	21,5
	γ_{sat}	KN/m ²	20	22	22
ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	E_{50}	KN/m ²	7500	59717	89460
	E_{oed}	KN/m ²	-	35835	47480
	E_{ur}	KN/m ²	-	179151	268920
	E_m	KN/m ²	-	52830	98460
	ν	-	0,3	0,3	0,25
ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ	S_u	KN/m ²	-	284	322
	ϕ_u	°	-	14,85	13,1
ΕΝΕΡΓΟΣ ΑΝΤΟΧΗ	c'	KN/m ²	7	40,6	105,6
	ϕ'	°	32	27,7	21,9
ΜΙΚΡΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ	$\gamma_{0,7}$		-	0,015	0,015
	G_o	KN/m ²	-	142709	153516
ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	K_x	m/day	2,013	0,0431	0,0431
	K_y	m/day	2,013	0,0431	0,0431
ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	K_o	-	-	0,55	0,62
	OCR	-	-	1,5	2

Πίνακας 4.4-1: Γεωτεχνικές παράμετροι σχηματισμών.

Έχοντας επιλέξει στον παραπάνω πίνακα τις παραμέτρους που περιγράφουν κατά το δυνατόν τη συμπεριφορά του εδάφους, γίνεται σύγκριση των τριών καταστατικών μοντέλων.

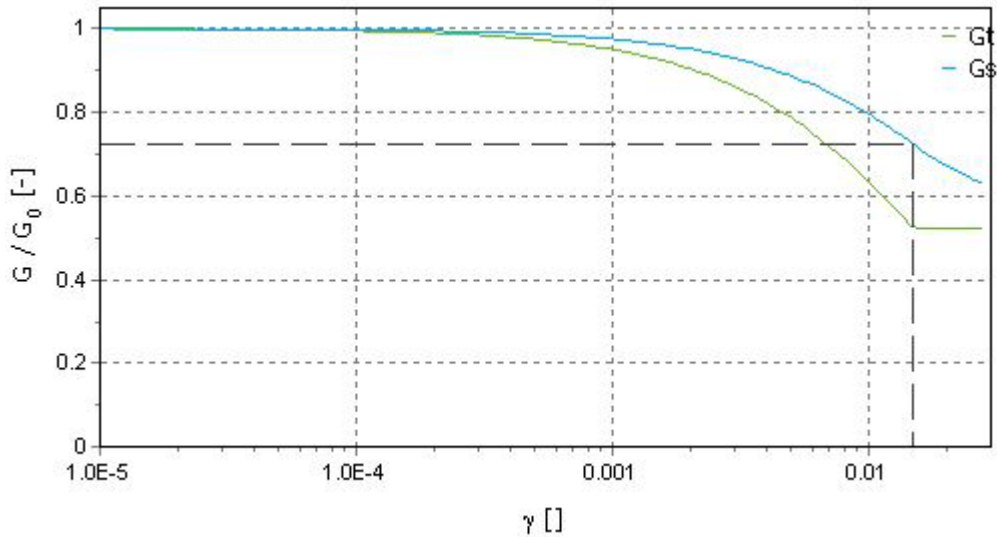
Θεωρώντας μια μέση πλευρική πίεση 500kPa, κατασκευάζονται οι τριαξονικές δοκιμές, υπό αστράγγιστες συνθήκες, βάσει των τελικών παραμέτρων που επιλέχθηκαν. Για την ενότητα A2b έχουμε:



Γράφημα 4.4-3: Συμπεριφορά σε τριαξονική φόρτιση υπό πλευρική πίεση 500kPa του σχηματισμού A2b κάνοντας χρήση των παραμέτρων του Πίνακα 4.4-1.

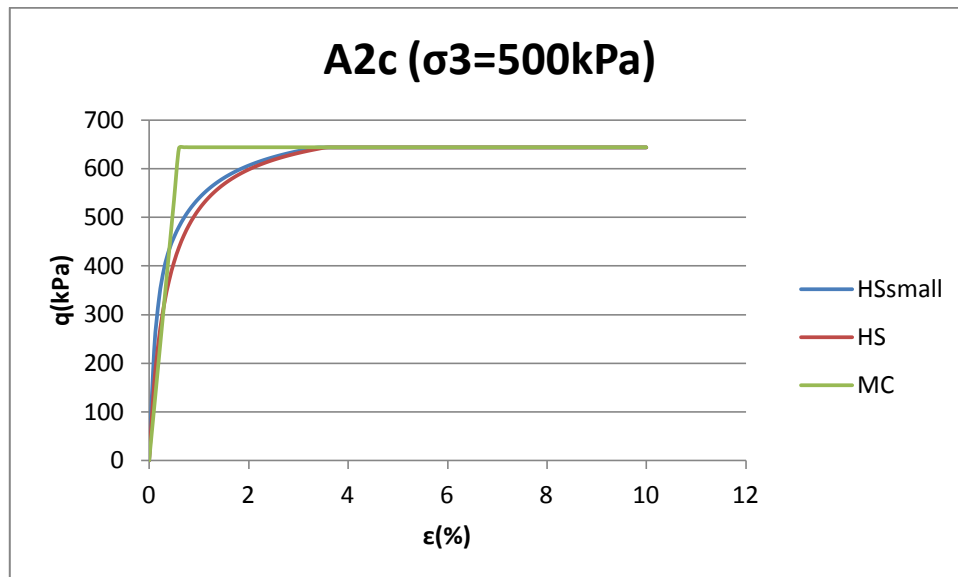
Στην ενότητα αυτή των ερυθρών αργίλων όταν το έδαφος προσομοιώνεται με το μοντέλο HS παρουσιάζει την χαμηλότερη αντοχή κατά τις πρώτες βαθμίδες φόρτισης μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή, όπου είναι κοινή και με τα τρία καταστατικά μοντέλα. Το μοντέλο HSsmall κατά την αρχική φόρτιση παρουσιάζει την μεγαλύτερη αντοχή, λόγω του υψηλού μέτρου διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις της συγκεκριμένης ενότητας. Για τιμές της ανοιγμένης παραμόρφωσης μεγαλύτερες από 0,4%, το μοντέλο MC παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή από όλα τα καταστατικά μοντέλα.

Η μεταβολή του τέμνοντος μέτρου διάτμησης (G_t) και του εφαπτομενικού μέτρου διάτμησης (G_s) σε μικρές παραμορφώσεις συναρτήσει της γωνιακής παραμόρφωσης φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 4.4-1.



Εικόνα 4.4-1: Μεταβολή του G_t και του G_s συναρτήσει του γ για τον σχηματισμό A2b κάνοντας χρήση των παραμέτρων του Πίνακα 4.4-1.

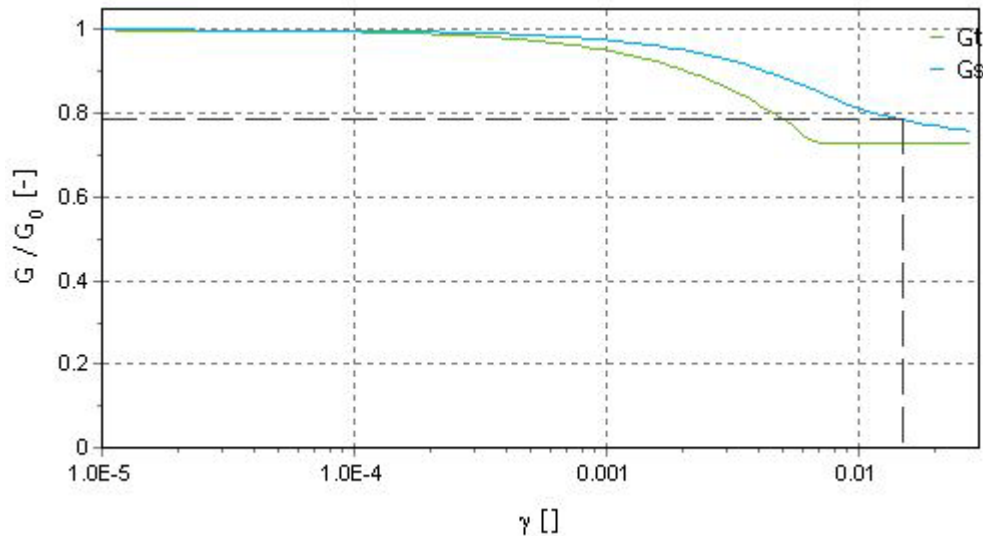
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για την ενότητα A2c παράγεται το ακόλουθο γράφημα τριαξονικών δοκιμών:



Γράφημα 4.4-4: Συμπεριφορά σε τριαξονική φόρτιση υπό πλευρική πίεση 500kPa του σχηματισμού A2c κάνοντας χρήση των παραμέτρων του Πίνακα 4.4-1.

Στην ενότητα A2c της σειράς των ερυθρών αργίλων, το καταστατικό μοντέλο MC εμφανίζει τις μεγαλύτερες αντοχές στις πρώτες βαθμίδες φόρτισης μέχρι και την μέγιστη αντοχή του εδάφους, που είναι κοινή και για τα τρία καταστατικά μοντέλα. Η συμπεριφορά του εδάφους με τα μοντέλα HS και HSsmall είναι παραπλήσια.

Η μεταβολή του τέμνοντος μέτρου διάτμησης (G_t) και του εφαπτομενικού μέτρου διάτμησης (G_s) σε μικρές παραμορφώσεις συναρτήσει της γωνιακής παραμόρφωσης για την ενότητα A2c, φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 4.4-2.



Εικόνα 4.4-2: Μεταβολή του G_t και του G_s συναρτήσει του γ για τον σχηματισμό A2c κάνοντας χρήση των παραμέτρων του Πίνακα 4.4-1.

4.5. Υπολογισμός παραμέτρων υποστήριξης

Η υποστήριξη των σηράγγων γίνεται με προκατασκευασμένα στοιχεία πάχους 30cm, από σκυρόδεμα κατηγορίας C40/50. Η υποστήριξη αυτή, παρότι τοποθετείται ακριβώς μετά την εκσκαφή, αποτελεί και την μόνιμη επένδυση των σηράγγων. Η ενεμάτωση που γίνεται δεν θεωρείται ότι συμβάλει στην στατική λειτουργία των σηράγγων.

Από την κατηγορία του σκυροδέματος γνωρίζουμε την χαρακτηριστική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$. Το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από τον τύπο :

$$E_{cm} = 9.5(f_{ck} + 8)^{1/3} \rightarrow E_{cm} = 3.57 \times 10^7 \text{ kPa} \quad (4.5-1)$$

Ο υπολογισμός της δυστένειας (axial stiffness, EA) γίνεται μέσω του τύπου:

$$EA = E_{cm} \times A \quad (4.5-2)$$

Όπου A το εμβαδόν του φορέα σε επίπεδη παραμόρφωση. Έτσι ανά μέτρο μήκους επένδυσης έχουμε:

$$A = b \times h = 1\text{m} \times 0.30\text{m} \rightarrow A = 0.30\text{m}^2$$

Και

$$EA = E_{cm} \times A \rightarrow EA = 3.57 \times 10^7 \text{ kPa} \times 0.30\text{m}^2 \rightarrow EA = 1.071 \times 10^7 \text{ kN/m}$$

Ο υπολογισμός της δυσκαμψίας (flexural rigidity, EI) γίνεται μέσω του τύπου:

$$EI = E_{cm} \times I \quad (4.5-3)$$

Με I την ροπή αδράνειας, όπου ανά μέτρο μήκους επένδυσης:

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \rightarrow I = \frac{1\text{m} \times 0.30^3\text{m}^3}{12} \rightarrow I = 0.00225\text{m}^4 \quad (4.5-4)$$

Άρα η δυσκαμψία υπολογίζεται :

$$EI = E_{cm} \times I \rightarrow EI = 3.57 \times 10^7 \text{ kPa} \times 0.00225\text{m}^4 \rightarrow EI = 8.0325 \times 10^4 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

Το βάρος των στοιχείων βρίσκεται:

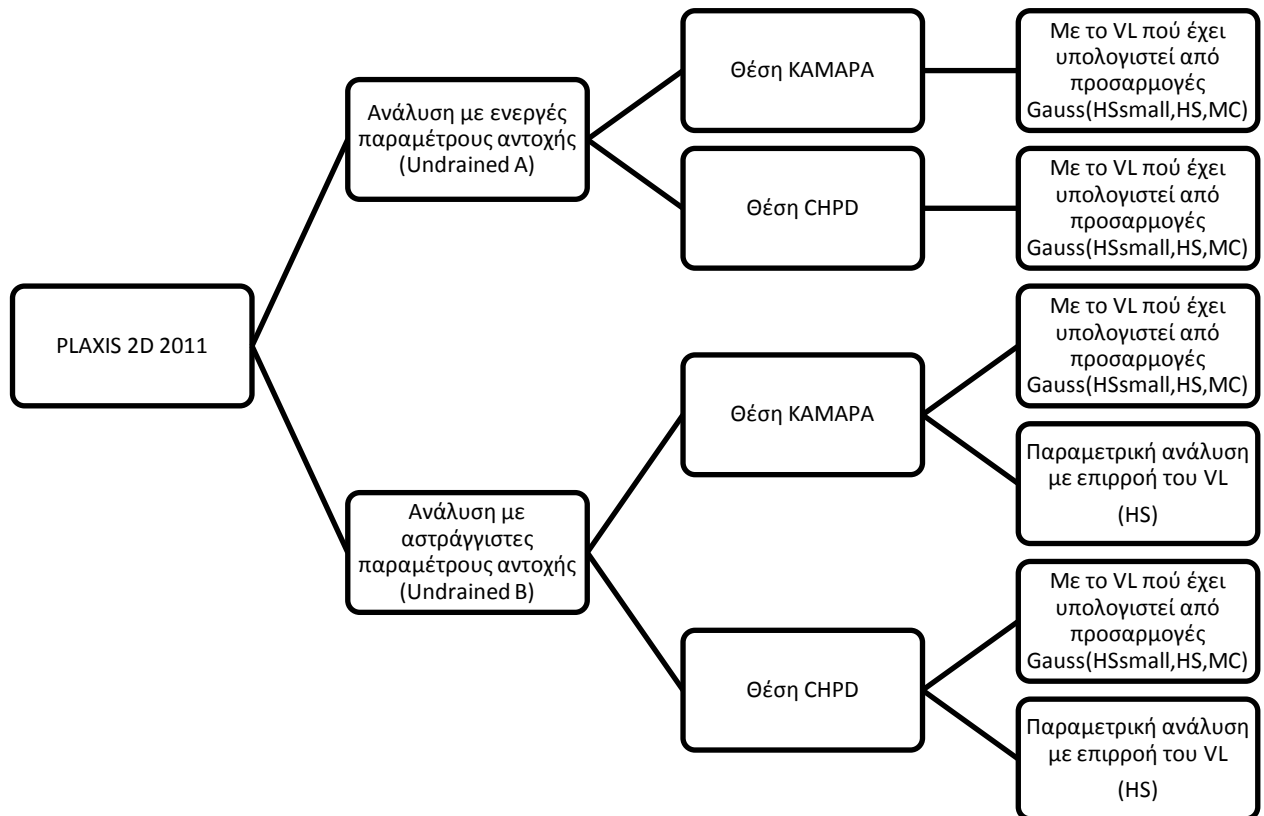
$$w = \gamma_c \times h \rightarrow w = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0.3\text{m} \rightarrow w = 7.5 \text{ kN/m/m}$$

Ο συντελεστής Poisson για το σκυρόδεμα λαμβάνεται ίσος με 0,2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αριθμητικές αναλύσεις

5.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό, βάση των ως τώρα δεδομένων, γίνεται ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι αναλύσεις αυτές γίνονται μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS 2D 2011. Στην Εικόνα 5.1-1 φαίνεται η διάρθρωση των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο κεφάλαιο αυτό.



Εικόνα 5.1-1 Συγκεντρωτικό διάγραμμα διάρθρωσης αριθμητικών αναλύσεων.

Στην πρώτη σειρά αναλύσεων (Undrained A) οι επί τόπου συνθήκες του εδάφους είναι αστράγγιστες, αλλά οι διδόμενες παράμετροι αντοχής είναι ενεργές. Στη δεύτερη σειρά αναλύσεων (Undrained B) οι επί τόπου συνθήκες του εδάφους είναι αστράγγιστες όπως και οι διδόμενες παράμετροι αντοχής.

Οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν σε όλες τις αναλύσεις φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.4-1. Η απώλεια εδαφικού όγκου για την κάθε τομή και την κάθε σήραγγα βρίσκονται στο κεφάλαιο 2.5.

Έχοντας επιλέξει όλες τις παραμέτρους, πραγματοποιούνται οι αναλύσεις σε κάθε τομή τόσο με ενεργές παραμέτρους αντοχής (Undrained A) όσο και με αστράγγιστες (Undrained B). Η διαδικασία των αναλύσεων σε κάθε τομή και με κάθε μοντέλο περιγράφεται συνοπτικά:

- 1) Εισαγωγή γεωμετρίας προβλήματος.
- 2) Εισαγωγή γεωτεχνικών παραμέτρων κάθε εδαφικού σχηματισμού.
- 3) Γένεση αριθμητικού πλέγματος.
- 4) Καθορισμός φάσεων κατασκευής:
 - Αρχική κατάσταση
 - Επιβολή φορτίσεων από κατασκευές
 - Εκσκαφή και υποστήριξη σήραγγας TBM1
 - Απώλεια εδαφικού όγκου λόγω κατασκευής σήραγγας TBM1
 - Εκσκαφή και υποστήριξη σήραγγας TBM2
 - Απώλεια εδαφικού όγκου λόγω κατασκευής σήραγγας TBM2
- 5) Υπολογισμός κάθε φάσης.

Τα αναλυτικά αποτελέσματα για κάθε τομή (ΚΑΜΑΡΑ και Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς) περιγράφονται στην συνέχεια.

5.2. Ανάλυση υπό αστράγγιστες συνθήκες με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής (Undrained B)

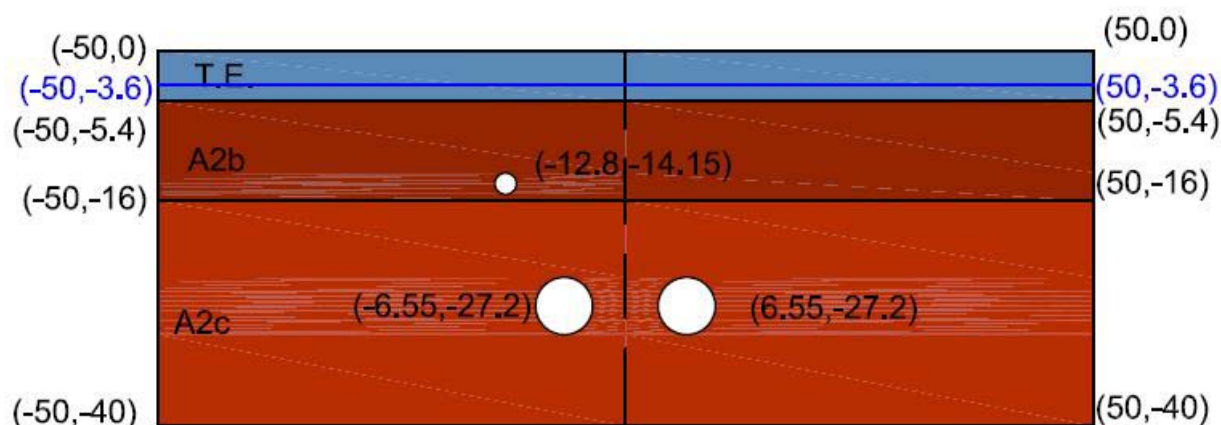
Οι υπολογισμοί που γίνονται από τον κώδικα, γίνονται πάντα σε αναφορά ενεργών τάσεων για να διασφαλίζεται ότι η παραμορφωσιμότητα αφορά τον εδαφικό σκελετό και όχι, το πρακτικά μη παραμορφώσιμο νερό των πόρων του εδάφους. Ωστόσο, μπορεί να γίνει χρήση τόσο ενεργών όσο και αστράγγιστων παραμέτρων αντοχής του εδάφους. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο οι αναλύσεις πραγματοποιούνται με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής. Η μόνη παράμετρος που περιγράφει την αντοχή του εδάφους στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή (s_u), καθώς η αστράγγιστη γωνία εσωτερικής τριβής θεωρείται μηδενική ($\varphi_u=0$). Χρησιμοποιώντας αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής η πίεση του νερού των πόρων και η διαδρομή των ενεργών τάσεων (Effective stress path), δεν υπολογίζονται απολύτως σωστά. Αντίθετα η αντοχή του εδάφους είναι ακριβώς προσδιορισμένη μέσω της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Σημαντικό ελάττωμα του συγκεκριμένου τύπου ανάλυσης είναι η μη μεταβολή των ελαστικών παραμέτρων ανάλογα με την βαθμίδα φόρτισης. Στον Πίνακα 5.2-1 φαίνονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στον συγκεκριμένο τύπο ανάλυσης ανά τύπο εδάφους.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΟΝΑΔΑ	T.E.	A2b	A2c
Mohr - Coulomb				
Drainage type	-	Drained	Undrained B	Undrained B
γ_{unsat}	KN/m ²	19,5	21,5	21,5
γ_{sat}	KN/m ²	20	22	22
E_{50}	KN/m ²	7500	59717	89460
ν	-	0,3	-	-
S_u	KN/m ²	7 (c')	284	322
ϕ'	ο	32	-	-
$K_{x,y}$	m/day	2,013	0,043	0,043
Hardening Soil				
E_{oed}	KN/m ²	-	35835	47480
E_{ur}	KN/m ²	-	179151	268920
K_o	-	-	0,55	0,62
OCR	-	-	1,5	2
Hssmall				
$\gamma_{0,7}$	-	-	0,015	0,015
G_o	KN/m ²	-	142709	153516

Πίνακας 5.2-1: Παράμετροι σχηματισμών με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής

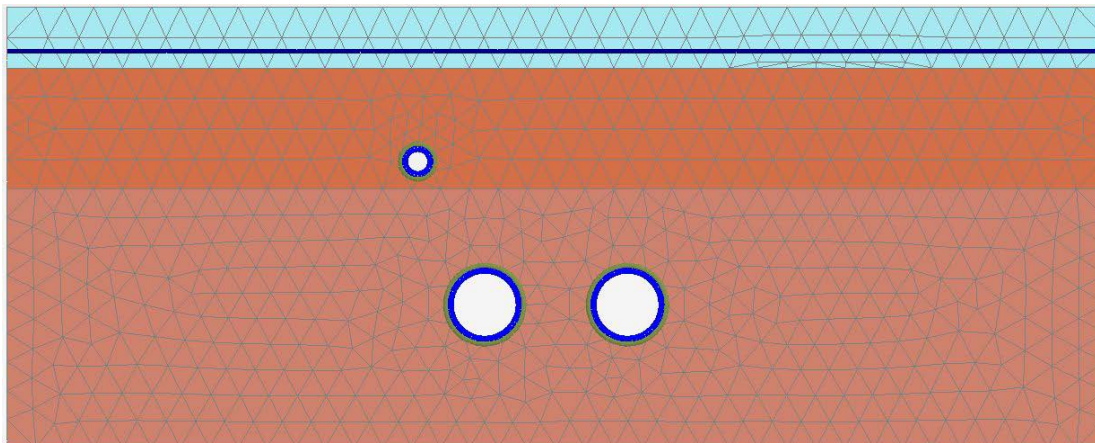
5.2.1. Τομή ΚΑΜΑΡΑ

Η στρωματογραφία στην συγκεκριμένη τομή αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα τεχνητών επιχώσεων, πάχους περίπου 5,4 μέτρων. Υποκείμενα στις τεχνητές επιχώσεις είναι η ενότητα A2b πάχους περίπου 10,6 μέτρων και ακολουθεί η ενότητα A2c. Ο φρεάτιος υδροφόρος βρίσκεται περίπου στα -3,6 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους. Η γεωμετρία της τομής στην θέση αυτή φαίνεται στην Εικόνα 5.2-1.



Εικόνα 5.2-1: Γεωμετρία τομής ΚΑΜΑΡΑ.

Εισάγοντας τη γεωμετρία στον κώδικα, παράγεται το αριθμητικό πλέγμα, όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 5.2-2

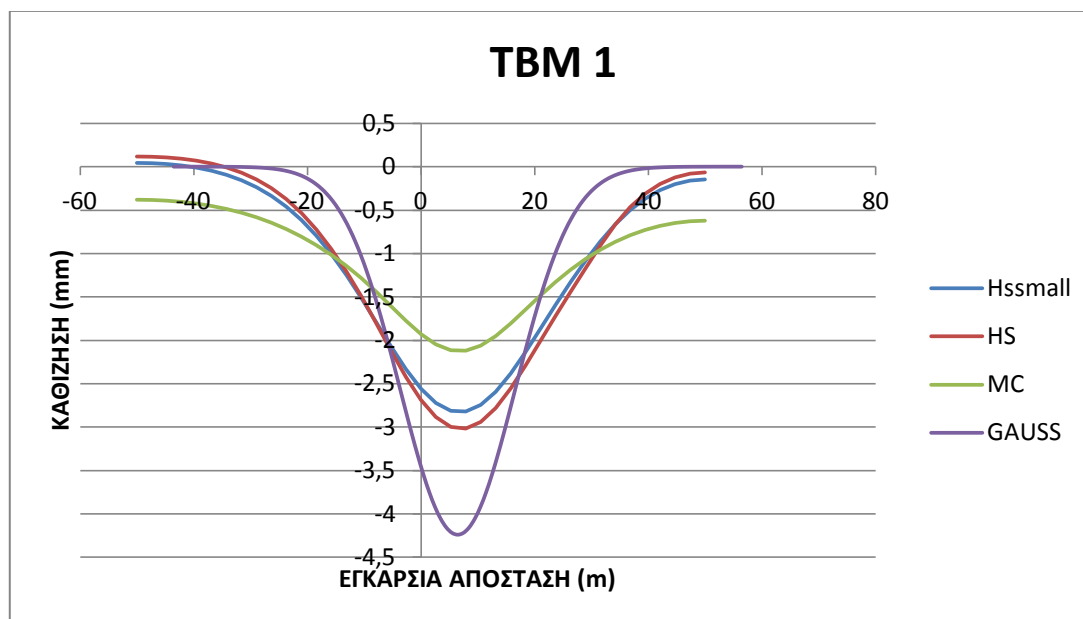


Εικόνα 5.2-2: Αριθμητικό πλέγμα τομής ΚΑΜΑΡΑ

Στις φάσεις κατασκευής εισάγεται η σχετική απώλεια εδαφικού όγκου, όπως αυτή υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 3.5. Για το TBM1 έχουμε $V_1 = 0.35\%$ και για το TBM2 $V_1 = 0.35\%$.

5.2.1.1. Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Τα αποτελέσματα της κατακόρυφης μετακίνησης στην επιφάνεια του εδάφους και για τα τρία καταστατικά μοντέλα, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής την σήραγγας του TBM1, φαίνονται στο Γράφημα 5.2-1. Είναι επίσης χαραγμένη η κατανομή Gauss μέσω της οποίας υπολογίστηκε η σχετική απώλεια όγκου.

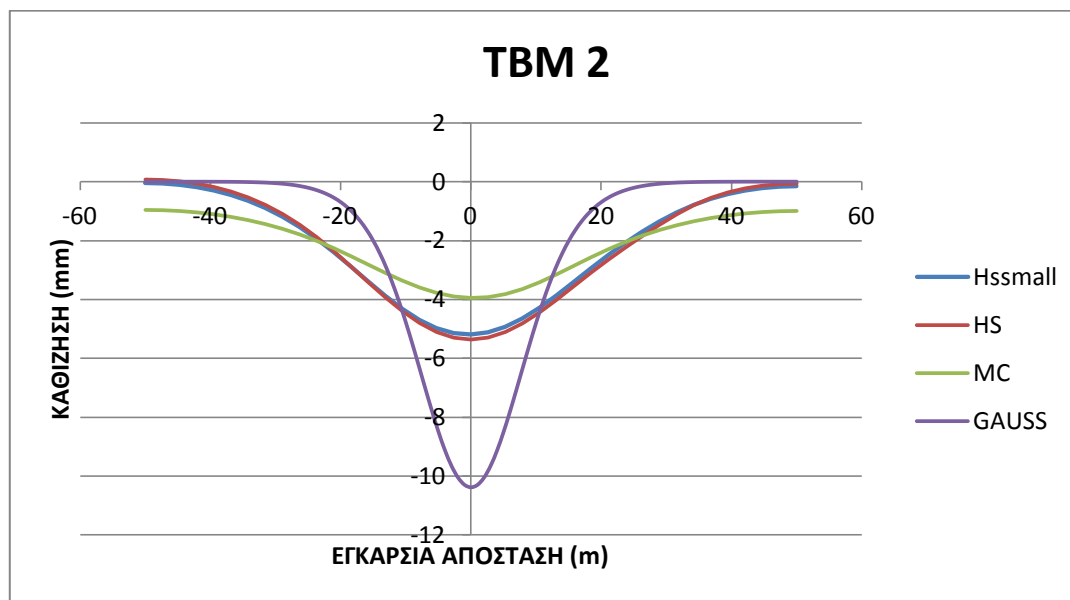


Γράφημα 5.2-1: Καθιζήσεις στην τομή ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM1 για τα τρία καταστατικά μοντέλα και κατανομή Gauss συγχρόνως.

Την καλύτερη προσέγγιση επιτυγχάνει το καταστατικό μοντέλο Hardening Soil. Μικρή διαφοροποίηση από αυτό έχει το HSsmall, ενώ το Mohr Coulomb έχει σημαντική απόκλιση.

Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο μεγαλύτερο εύρος της κατανομής των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, όταν γίνεται χρήση του καταστατικού μοντέλου MC. Έτσι η μέγιστη τιμή της καθίζησης είναι σημαντικά μικρότερη, αλλά καταγράφονται καθιζήσεις σε απόσταση μεγαλύτερη από 50 μέτρα από τον άξονα συμμετρίας των σηράγγων. Αυτό ενδέχεται να οφείλεται στην μεγαλύτερη αντοχή του εδάφους όταν προσομοιώνεται με το μοντέλο MC. Περεταίρω διερεύνηση της αιτίας της συμπεριφοράς αυτής πραγματοποιείται στην συνέχεια.

Το ίδιο γράφημα μετά το πέρας και των δύο TBM φαίνεται στο Γράφημα 5.2-2.



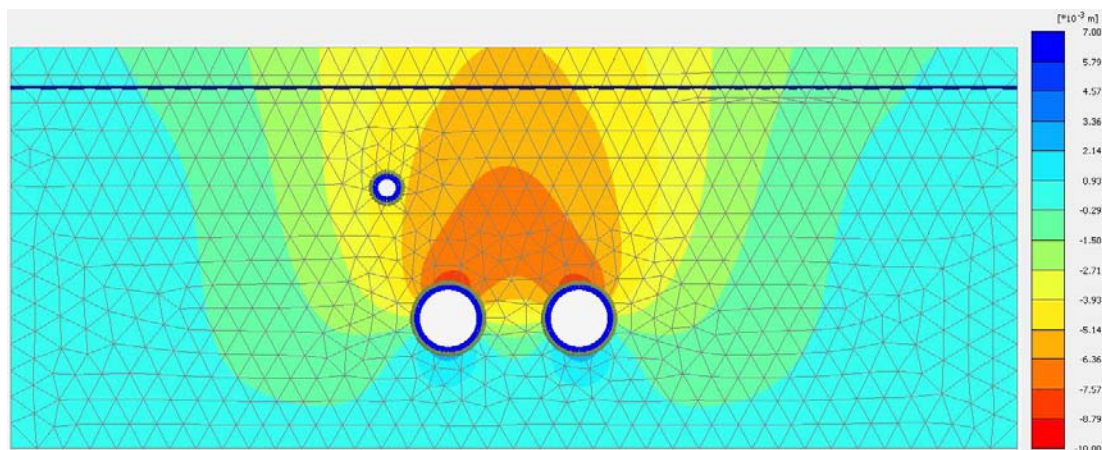
Γράφημα 5.2-2: : Καθιζήσεις στην τομή ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM2 για τα τρία καταστατικά μοντέλα και κατανομή Gauss συγχρόνως.

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.4.1 η κατανομή Gauss στην συγκεκριμένη θέση, μετά το πέρας και των δύο TBM, έχει σημαντική αύξηση εξαιτίας της μέτρησης του οργάνου TETS 2361_99. Κανένα από τα καταστατικά μοντέλα δεν καταφέρνει να προσεγγίσει επαρκώς αυτή την κατανομή Gauss. Την μέγιστη καθίζηση, με μικρή διαφορά από το HSsmall, κατέγραψε το καταστατικό μοντέλο HS. Το μοντέλο MC και σε αυτή την περίπτωση έχει καταγράψει σημαντικά μεγαλύτερου εύρους καθιζήσεις.

5.2.1.2. Κατανομή μετακινήσεων

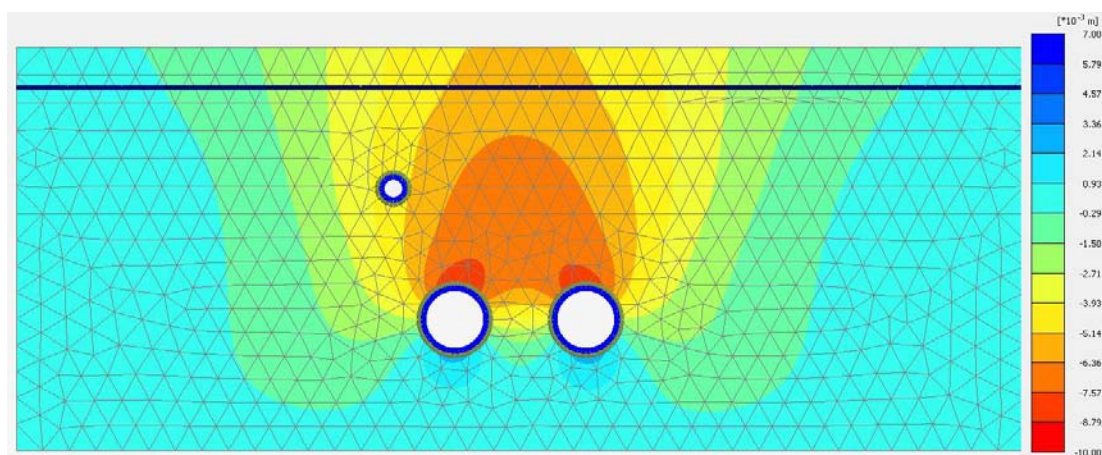
Στα γραφήματα 5.2-1 & 5.2-2 φαίνεται η κατανομή των καθιζήσεων μόνο στην επιφάνεια του εδάφους. Για να εντοπιστεί ο παράγοντας που οδηγεί στην διαφοροποίηση των καταστατικών μοντέλων μεταξύ τους, διερευνάται η κατανομή των κατακόρυφων και οριζόντιων μετατοπίσεων στις δύο διαστάσεις.

Στην Εικόνα 5.2-3 φαίνεται η κατανομή των τελικών κατακόρυφων μετατοπίσεων όπως αυτές προέκυψαν από την επίλυση με το μοντέλο HSsmall.



Εικόνα 5.2-3: Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.

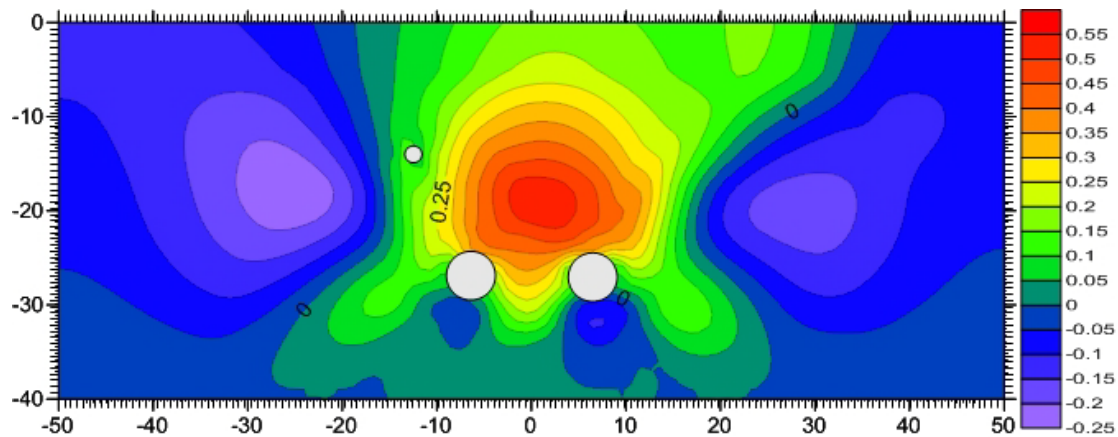
Το ίδιο γράφημα κάνοντας χρήση του μοντέλου HS φαίνεται στην Εικόνα 5.2-3. Η κλίμακα είναι ίδια με αυτή της Εικόνας 5.2-4.



Εικόνα 5.2-4: Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.

Για να είναι δυνατή η σύγκρισή αυτών των δύο διαγραμμάτων κατανομών των κατακόρυφων μετατοπίσεων σε δύο διαστάσεις, έγινε αφαίρεση τους. Για να επιτευχθεί αυτό αφαιρέθηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις του κάθε κόμβου του κάθε στοιχείου του αριθμητικού πλέγματος, των δύο αυτών κατανομών. Η διαδικασία αυτή έγινε μέσω του προγράμματος surfer.

Το αποτέλεσμα την αφαίρεσης των μετατοπίσεων του HS από τις μετατοπίσεις του HSsmall φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-5.

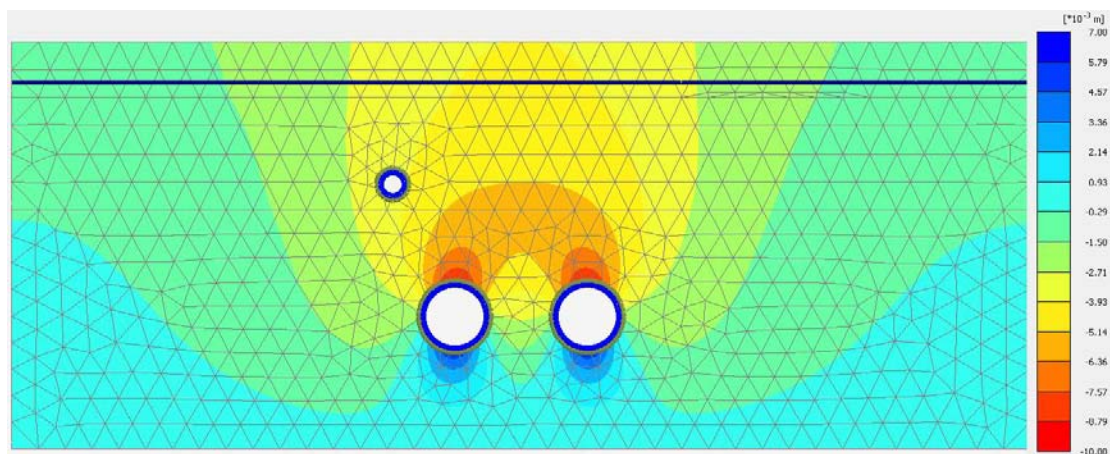


Εικόνα 5.2-5: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.

Θετικές είναι οι τιμές όπου η κατακόρυφη καθοδική μετακίνηση ήταν μεγαλύτερη με το μοντέλο HS. Παρατηρείται ότι στη θέση (0,-18) ανάμεσα και πάνω από τις σήραγγες το μοντέλο HS κατέγραψε μεγαλύτερη μετακίνηση από το HSsmall κατά 0,54mm (HSsmall=-6.81mm και HS=-7.35mm) ή 8,01%. Στο ίδιο βάθος και στις θέσεις εκατέρωθεν των σηράγγων (-28,-18) και (28,-18) οι μετακινήσεις κάνοντας επίλυση με το μοντέλο HSsmall είναι μεγαλύτερες κατά 0,234mm (HSsmall=-1,092mm και HS=-0,858mm) ή 21,42%.

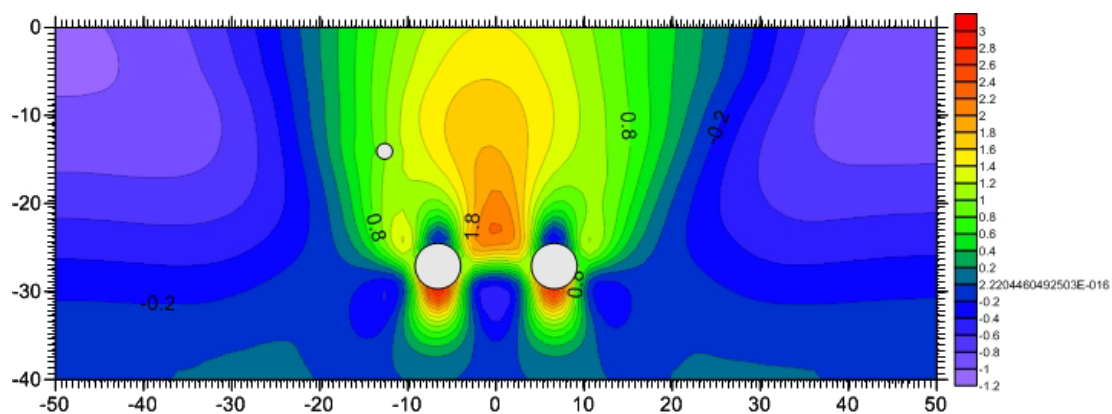
Η μέγιστη διαφορά εντοπίζεται στην ενότητα A2c και οφείλεται στην διαφορετική τιμή της αντοχής που παρουσιάζει το έδαφος που προσομοιώνεται με τα δύο αυτά μοντέλα. Πιο συγκεκριμένα η τιμή της αντοχής του εδάφους σε μικρού μεγέθους παραμορφώσεις κατά την προσομοίωση εμφανίζεται μεγαλύτερη στο μοντέλο HSsmall κάτι που δικαιολογεί την καταγραφή μικρότερων μετακινήσεων.

Οι κατακόρυφες μετακινήσεις όπως προέκυψαν με την επίλυση κάνοντας χρήση του μοντέλου MC φαίνονται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-6.



Εικόνα 5.2-6: Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με παραπάνω αφαιρούνται οι μετατοπίσεις αυτές από τις μετατοπίσεις που υπολογίστηκαν βάσει του HS. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής φαίνεται στην Εικόνα 5.2-7.

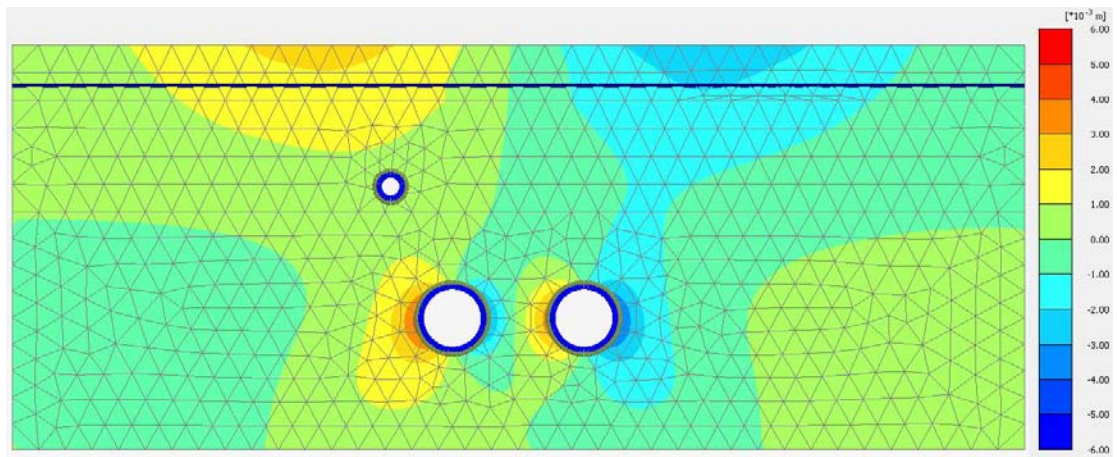


Εικόνα 5.2-7: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο ΤΒΜ για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.

Παρατηρείται ότι στην περιφέρεια των εκσκαφών οι μετακινήσεις που υπολογίζονται κάνοντας χρήση του καταστατικού μοντέλου MC είναι μεγαλύτερες, με μέγιστη διαφορά την ανύψωση του δαπέδου κατά 2,8128mm (MC=6.41mm και HS=3.59mm) ή 43,88%. Οι παραμορφώσεις στην περιφέρεια των εκσκαφών μπορούν να διαχωριστούν σε δύο τύπων παραμορφώσεις. Στις παραμορφώσεις που οφείλονται στην απώλεια εδαφικού όγκου και στις παραμορφώσεις λόγω του φορτίου που μεταβιβάζεται στην επένδυση. Οι παραμορφώσεις λόγω της απώλειας εδαφικού όγκου είναι ταυτόσημες και στις δύο περιπτώσεις λόγω της κοινής τιμής της, άρα η διαφοροποίηση στην κατανομή των κατακόρυφων παραμορφώσεων έγκειται στην κατανομή των τάσεων. Για την καλύτερη κατανόηση της κατανομής των μετακινήσεων στην περιφέρεια των εκσκαφών απαραίτητη είναι η μελέτη της κατανομής των τάσεων που ακολουθεί στα κεφάλαια 5.2.1.3 και 5.2.1.4. Στη θέση πάνω και ανάμεσα από τις σήραγγες (0,-20) το μοντέλο HS υπολογίζει μεγαλύτερες μετακινήσεις καθώς το έδαφος όταν προσομοιώνεται με το μοντέλο αυτό παρουσιάζει χαμηλότερες αντοχές.

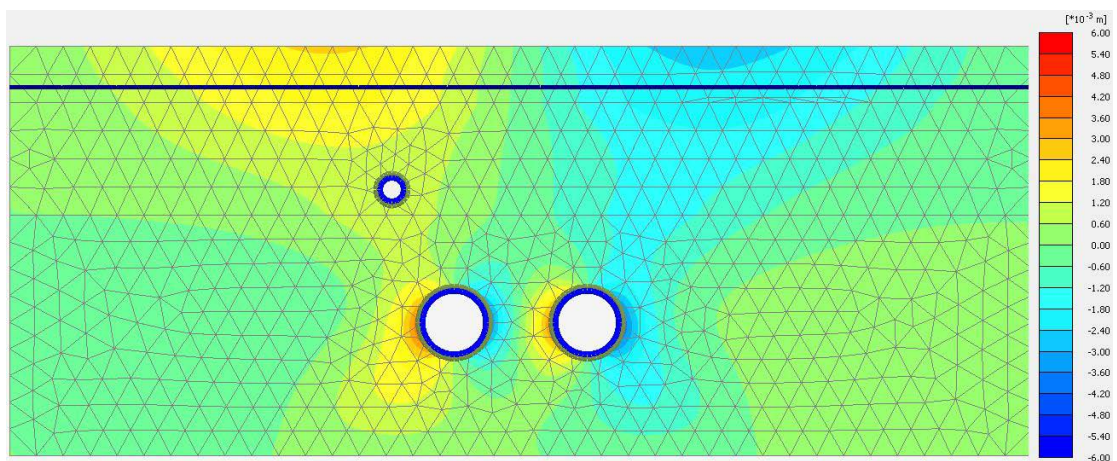
Στην επιφάνεια του εδάφους όπως έχει ήδη διαπιστωθεί στις κεντρικές θέσεις οι καθιζήσεις υπολογίζονται μεγαλύτερες με το μοντέλο HS. Όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο η διαφορά των δύο μοντέλων ελαττώνεται μέχρι στις θέσεις (-50,0) και (50,0) το μοντέλο MC να έχει υπολογίσει μεγαλύτερη καθίζηση κατά 1,0347mm (MC=-0.87mm και HS=0.16mm) ή 118,62%.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνονται οι τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις κάνοντας χρήση του μοντέλου Hsmall.



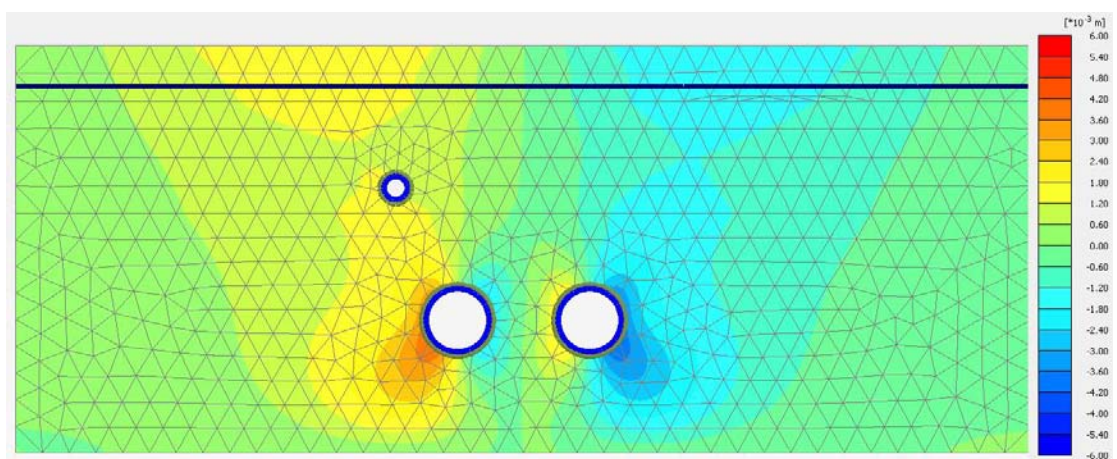
Εικόνα 5.2-8: : Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.

Το ίδιο διάγραμμα για το μοντέλο HS.



Εικόνα 5.2-9: Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.

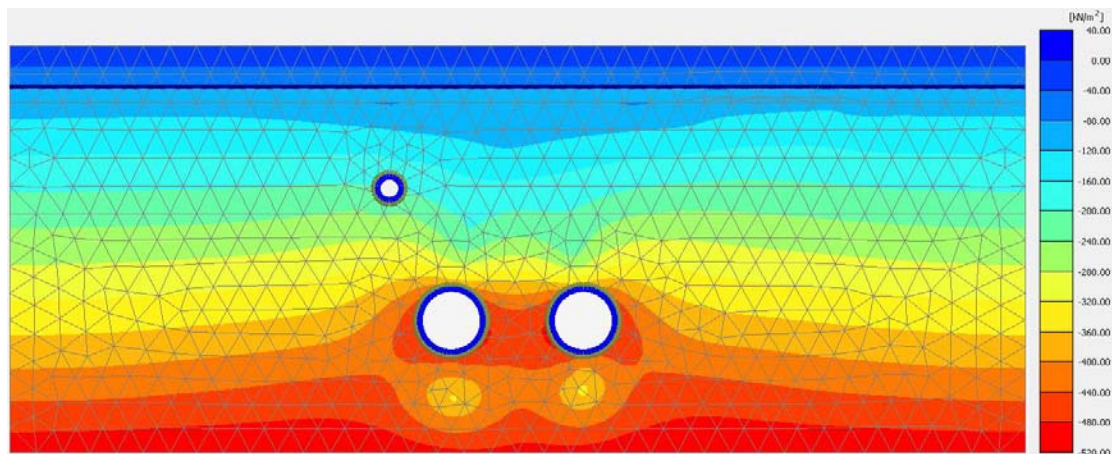
Και για το μοντέλο MC.



Εικόνα 5.2-10: Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.

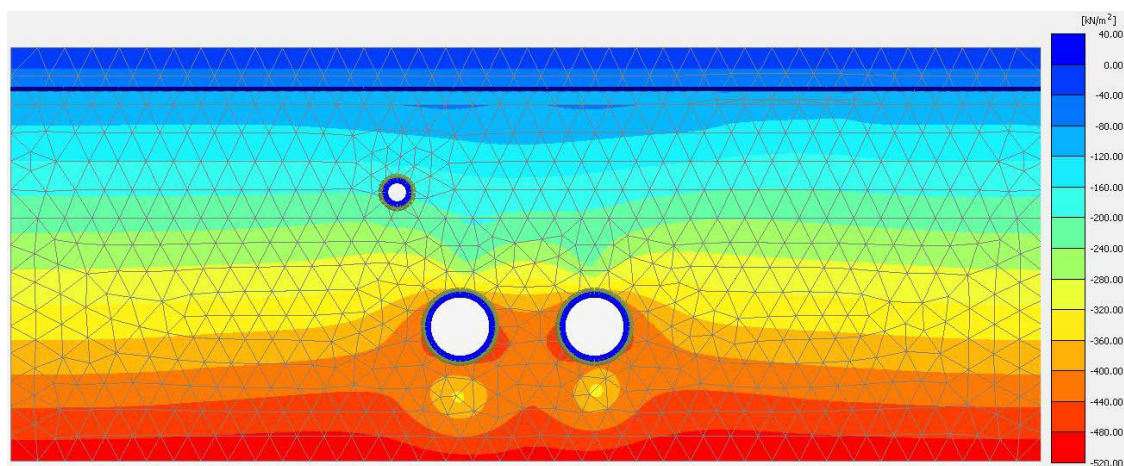
5.2.1.3. Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1).

Στην συνέχεια αναλύεται το τασικό πεδίο που δημιουργείται μετά την εκσκαφή και των δύο σηράγγων. Στην Εικόνα 5.2-11 φαίνεται η κατανομή των μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1), όπως αυτές προέκυψαν κάνοντας επίλυση με το μοντέλο HSsmall.



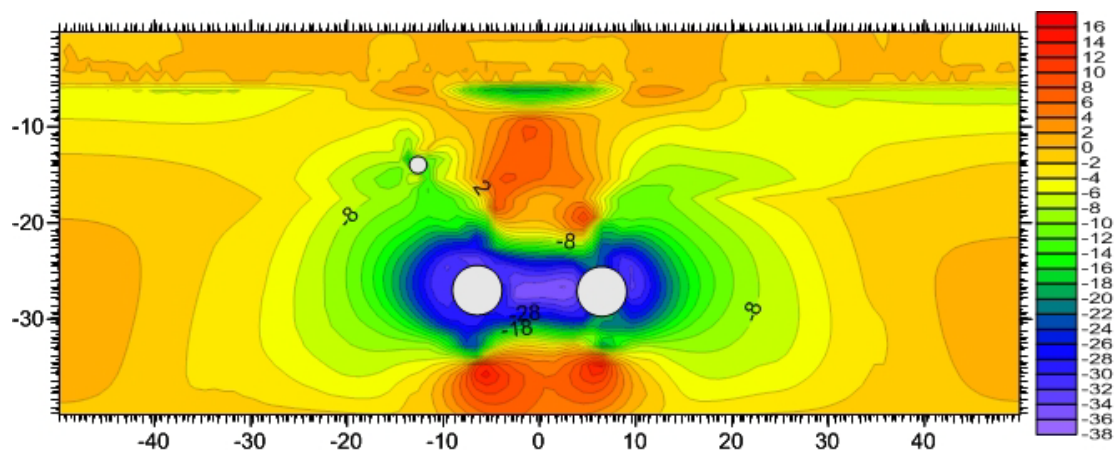
Εικόνα 5.2-11: Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.

Κάνοντας τον ίδιο υπολογισμό με το μοντέλο HS προκύπτει το τασικό πεδίο της Εικόνας 5.2-12.



Εικόνα 5.2-12: Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.

Για να φανούν οι διαφορές ανάμεσα στα δύο μοντέλα, αφαιρέθηκαν οι μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις του κάθε κόμβου του κάθε στοιχείου που προέκυψαν από την επίλυση με τα μοντέλα HSsmall και HS. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-13.

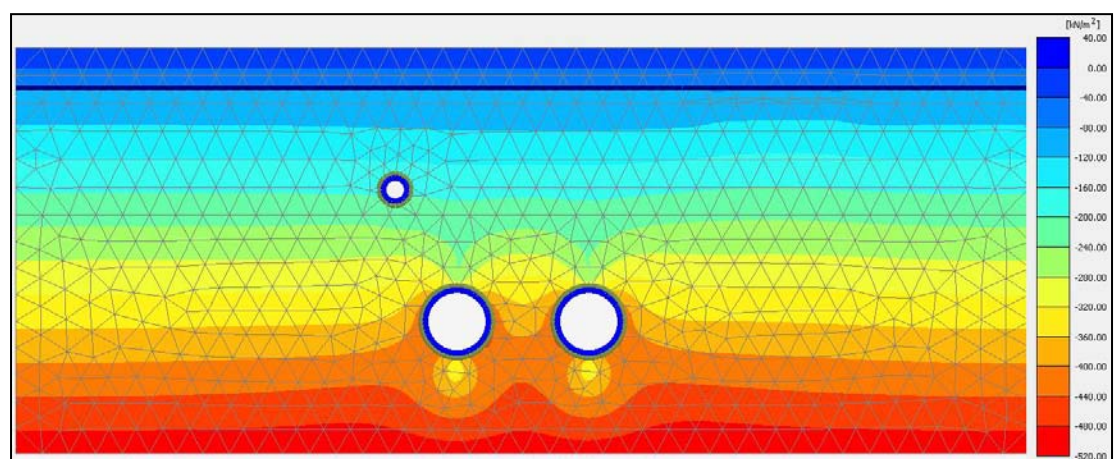


Εικόνα 5.2-13: Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.

Παρατηρείται ότι οι μέγιστες κύριες τάσεις γύρω από τις σήραγγες είναι μεγαλύτερες κάνοντας χρήση του μοντέλου HSsmall. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη αντοχή που παρουσιάζει το έδαφος κατά τις πρώτες βαθμίδες φόρτισης όταν προσομοιώνεται με το μοντέλο HSsmall με αποτέλεσμα να δύναται να μεταφέρει μεγαλύτερα φορτία. Η μέγιστη διαφορά που εντοπίστηκε στη θέση ανάμεσα στις σήραγγες είναι $36,35 \text{ KN/m}^2$ (HSsmall= $-484,7 \text{ KN/m}^2$ και HS= $-448,4 \text{ KN/m}^2$) όπου η τιμή του HSsmall είναι μεγαλύτερη κατά 7,5%.

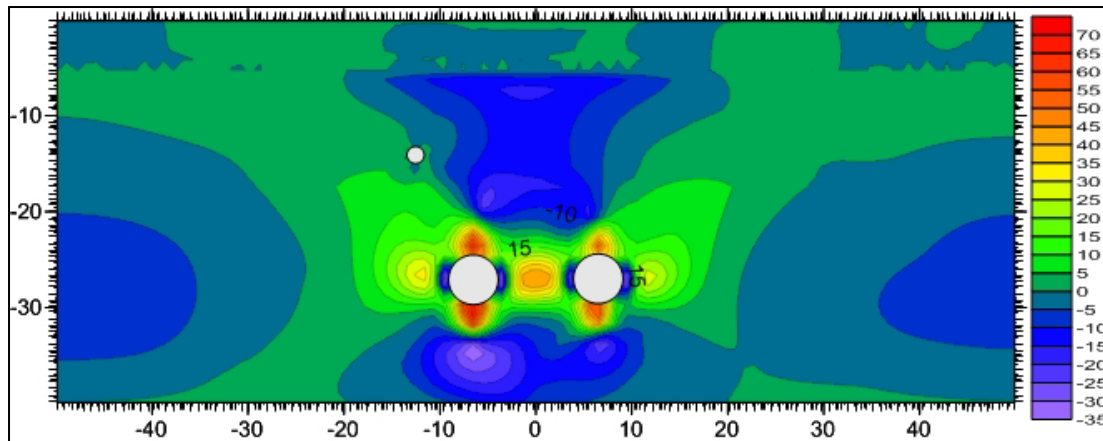
Όσο απομακρυνόμαστε από τις εκσκαφές η διαφορά των κύριων μέγιστων ενεργών τάσεων που υπολογίζονται από τα δύο μοντέλα μειώνεται μέχρι στις θέσεις πάνω και κάτω από τις σήραγγες το μοντέλο HS να παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή κατά $17,96 \text{ KN/m}^2$ (HSsmall= $-357,1 \text{ KN/m}^2$ και HS= -375 KN/m^2) ή 5,03%.

Η κατανομή των μέγιστων κύριων τάσεων κάνοντας χρήση του μοντέλου MC φαίνονται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-14.



Εικόνα 5.2-14: Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.

Αφαιρώντας τις μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις του κάθε κόμβου του κάθε στοιχείου που προέκυψαν από την επίλυση με το μοντέλο MC και HS προκύπτει η διαφορά των τασικών πεδίων τους όπως φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-15.

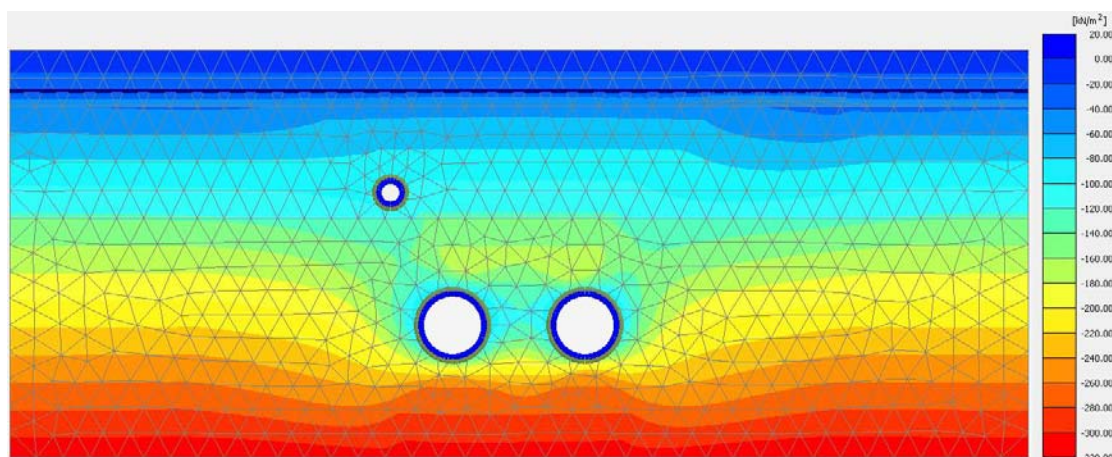


Εικόνα 5.2-15: Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.

Σε αυτή την περίπτωση προκύπτουν σημαντικές διαφορές, με τις κύριες τάσεις του HS να είναι σημαντικά μεγαλύτερες στην οροφή και το δάπεδο των εκσκαφών. Η μέγιστη διαφορά που εντοπίζεται στην οροφή και το δάπεδο είναι $77,35 \text{ kN/m}^2$ ($\text{MC}=-370.2 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS}=-447.5 \text{ kN/m}^2$) στις οποίες το μοντέλο HS έχει υπολογίσει κατά 20,9% μεγαλύτερη τάση. Αντίθετα στις παρειές των σηράγγων η διαφορά είναι $36,58 \text{ kN/m}^2$ ($\text{MC}=-394.27 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS}=-375.6 \text{ kN/m}^2$) όπου οι τάσεις υπολογισμένες με το MC είναι κατά 9,28% μεγαλύτερες. Η συμπεριφορά αυτή του καταστατικού μοντέλου MC, οφείλεται στο γεγονός ότι λειτουργεί στην ελαστική περιοχή. Σύμφωνα με την ελαστική θεωρία οι μέγιστες κύριες τάσεις στις παρειές κυκλικού ανοίγματος χωρίς την επιρροή της υποστήριξης βρίσκονται από τον τύπο $\sigma_{\theta\theta} = p_0(3 - K_0)$, ενώ στο δάπεδο και την οροφή $\sigma_{\theta\theta} = p_0(3K_0 - 1)$, όπου p_0 η κατακόρυφη συνιστώσα της τάσης και K_0 ο λόγος γεωστατικών ωθήσεων (Σοφιανός, Υποστηριξη Υπογείων Έργων, 2010). Σύμφωνα με τα παραπάνω σε ελαστικό μέσο και για τυπικές τιμές του λόγου γεωστατικών ωθήσεων, οι μέγιστες κύριες τάσεις συγκεντρώνονται στις παρειές της εκσκαφής.

5.2.1.4. Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3).

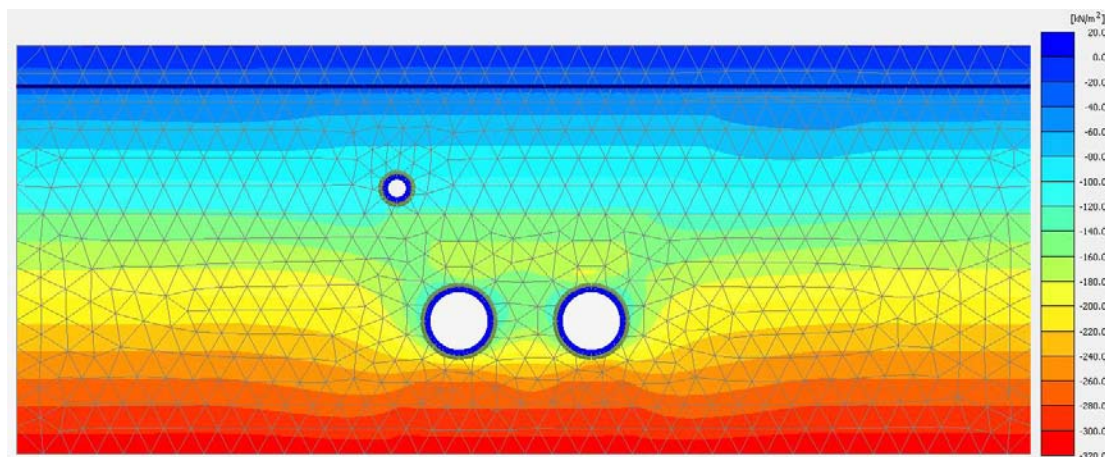
Η κατανομή των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων κάνοντας χρήση του μοντέλου HSsmall φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-16.



Εικόνα 5.2-16: Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.

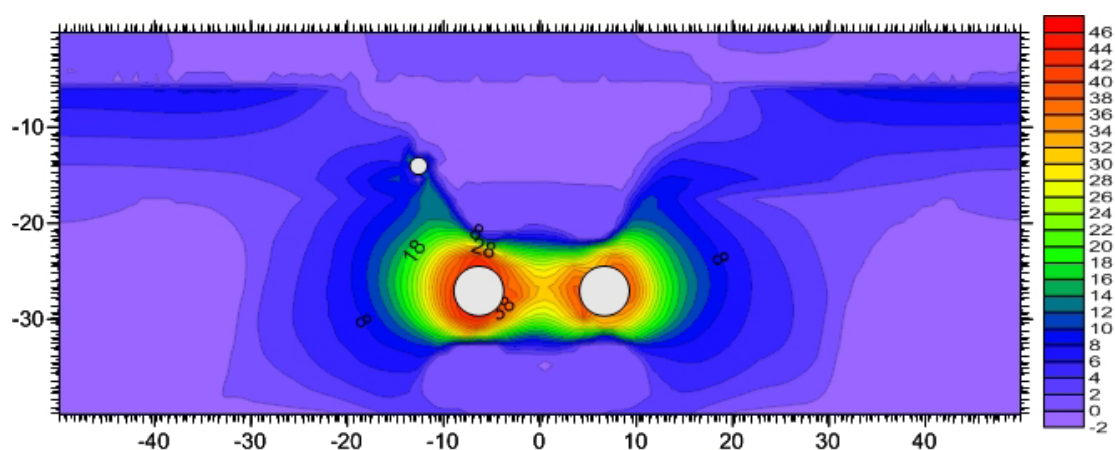
Δεδομένου ότι οι ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις στην περιφέρεια των εκσκαφών έχουν ακτινική διεύθυνση, από το σχήμα της Εικόνας 5.2-16 φαίνεται η χαλάρωση του τασικού πεδίου της εδαφομάζας, λόγω της πλαστικής ζώνης που δημιουργείται. Το τασικό πεδίο στην περιφέρεια των εκσκαφών, κάνοντας χρήση του μοντέλου αυτού, προσεγγίζει την υδροστατική συμπεριφορά.

Το ίδιο διάγραμμα κάνοντας χρήση του μοντέλου HS φαίνεται στην Εικόνα 5.2-17.



Εικόνα 5.2-17: Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.

Για να φανούν οι διαφορές ανάμεσα στα δύο μοντέλα αφαιρούνται τα τασικά πεδία που υπολογίστηκαν. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής φαίνονται στην Εικόνα 5.2-18.



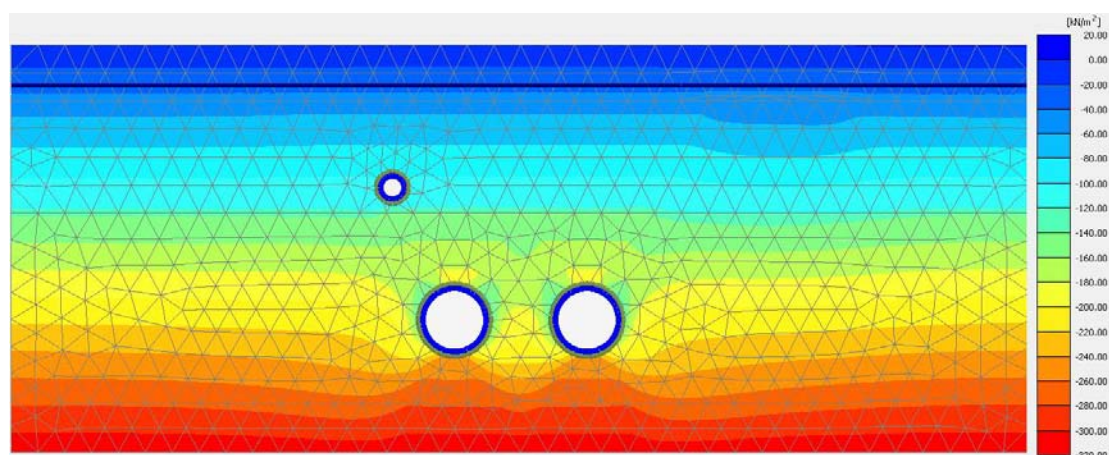
Εικόνα 5.2-18: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.

Από την εικόνα αυτή φαίνεται η δημιουργία μεγαλύτερων ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στην περιφέρεια των εκσκαφών, κάνοντας χρήση του μοντέλου HS. Η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στα δύο αυτά καταστατικά μοντέλα είναι $43,31 \text{ kN/m}^2$ ($\text{HSsmall} = -158 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS} = -239.3 \text{ kN/m}^2$), όπου οι τάσεις που υπολογίζονται από το μοντέλο HS είναι μεγαλύτερες κατά 37,76%. Όσο απομακρυνόμαστε από τις εκσκαφές οι διαφορές μειώνονται μέχρι πρακτικά να εξαλειφθούν φτάνοντας την διαφορά $1,84 \text{ kN/m}^2$ ($\text{HSsmall} = -54.6 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS} = -52.76 \text{ kN/m}^2$), όπου το μοντέλο HSsmall έχει υπολογίσει κατά 3,38% μεγαλύτερη τάση.

Και τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν πρακτικά υδροστατικό πεδίο στην περιφέρεια των εκσκαφών, με το μοντέλο HS να υπολογίζει μεγαλύτερη ελάχιστη κύρια ενεργή τάση. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερα φορτία στην υποστήριξη των σηράγγων όταν γίνεται υπολογισμός μέσω του μοντέλου HS.

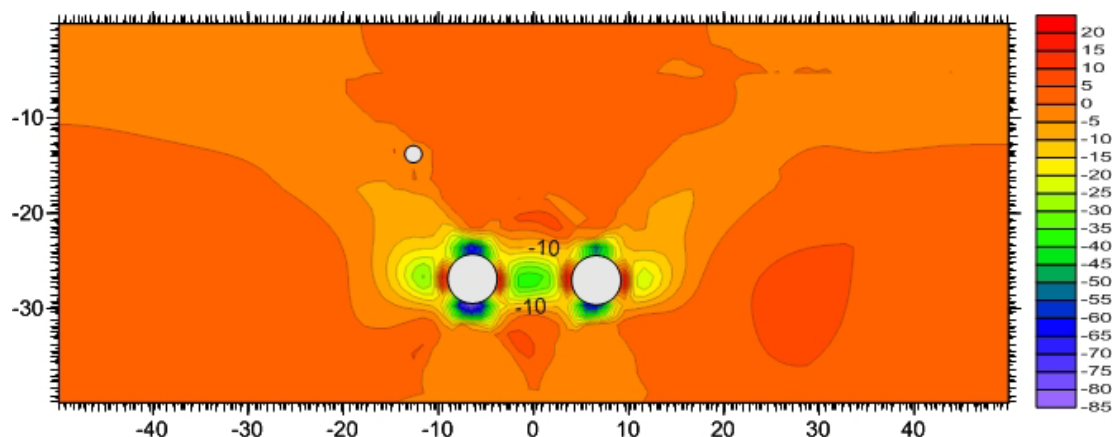
Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στην ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή του εδάφους που προσομοιώνεται με το μοντέλο HSsmall, παρέχοντας του την ικανότητα να μεταφέρει περισσότερες μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις άρα η διαρροή του να είναι μικρότερη αναπτύσσοντας έτσι μικρότερες ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις.

Η κατανομή των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων κάνοντας χρήση του μοντέλου MC φαίνονται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-19.



Εικόνα 5.2-19: Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.

Αφαιρώντας το ελάχιστο κύριο τασικό πεδίο που έχει προκύψει από το μοντέλο MC και από το μοντέλο HS, προκύπτει η διαφορά των τασικών πεδίων τους της Εικόνας 5.2-20.



Εικόνα 5.2-20: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.

Παρατηρείται ότι οι ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις στην οροφή των σηράγγων είναι σημαντικά μεγαλύτερες κάνοντας επίλυση με το μοντέλο MC, με τη μέγιστη διαφορά να είναι $82,80 \text{ kN/m}^2$ ($\text{MC} = -239.37 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS} = -159.57 \text{ kN/m}^2$) ή 34.59%.

Η σημαντικά μεγαλύτερη τάση του μοντέλου MC στη θέση αυτή οφείλεται στην μόνιμη λειτουργία του στην ελαστική περιοχή, λόγω της σημαντικά μεγαλύτερης αντοχής του

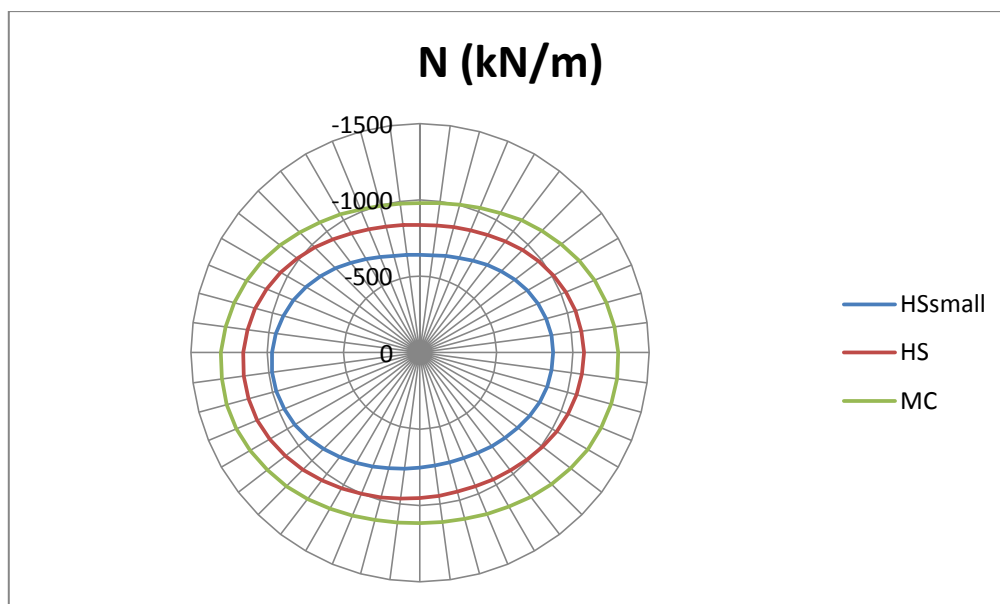
εδάφους που προσομοιώνει. Η συμπεριφορά αυτή οδηγεί στην συσσώρευση τάσεων στην οροφή και στο δάπεδο των σηράγγων. Το συγκεντρωμένο αυτό φορτίο οδηγεί σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις στην επένδυση, εξηγώντας τις μεγαλύτερες μετακινήσεις στην περιφέρεια των εκσκαφών που εντοπίστηκαν στο κεφάλαιο 5.2.1.2.

Αντίθετα, στις παρειές οι ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις είναι μεγαλύτερες κάνοντας επίλυση με το μοντέλο HS, με τη μεγαλύτερη διαφορά να είναι $17,43 \text{ kN/m}^2$ ($MC=-108.4 \text{ KN/m}^2$ και $HS=-125.8 \text{ KN/m}^2$) ή 16,08%.

5.2.1.5. Φορτία υποστήριξης.

Όπως αναφέρθηκε η υποστήριξη των σηράγγων γίνεται με προκατασκευασμένα πλαίσια από σκυρόδεμα πάχους 30cm, οι παράμετροι των οποίων υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 4.5. Λόγω των σημαντικών διαφοροποιήσεων που εντοπίστηκαν στην κατανομή των τάσεων ανάμεσα στα τρία καταστατικά μοντέλα, κρίθηκε απαραίτητο να διερευνηθεί η κατανομή των αξονικών φορτίων και των ροπών κάμψης που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα.

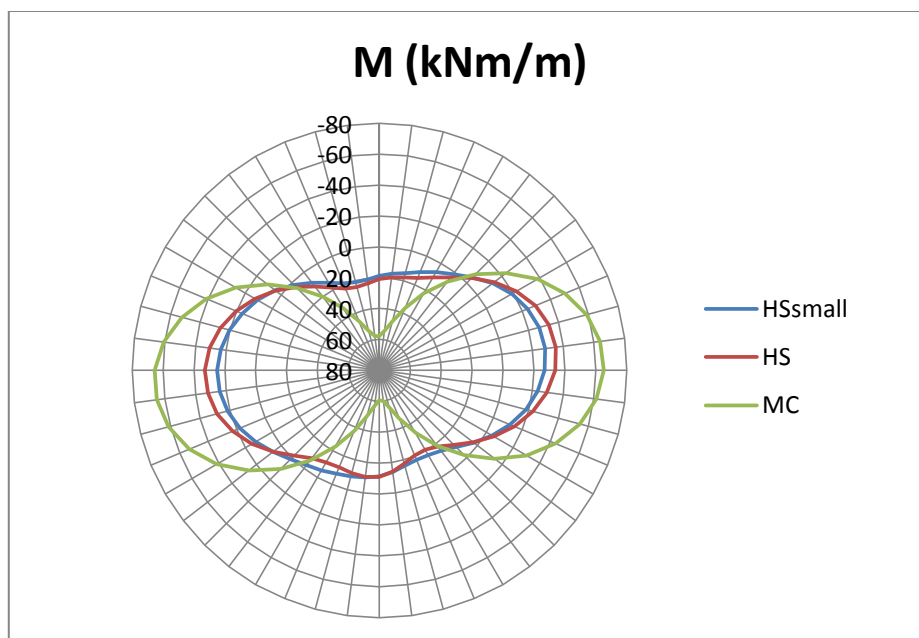
Στο ακόλουθο Γράφημα 5.2-3 φαίνεται η κατανομή των αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 όπως αυτά έχουν προκύψει από τις επιλύσεις και των τριών μοντέλων.



Γράφημα 5.2-3: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.

Παρατηρείται ότι τα αξονικά φορτία μειώνονται από το HSsmall στο HS και από το HS στο MC. Το γεγονός αυτό είχε διαπιστωθεί και από τις κατανομές των ενεργών κύριων τάσεων στη μάζα του εδάφους.

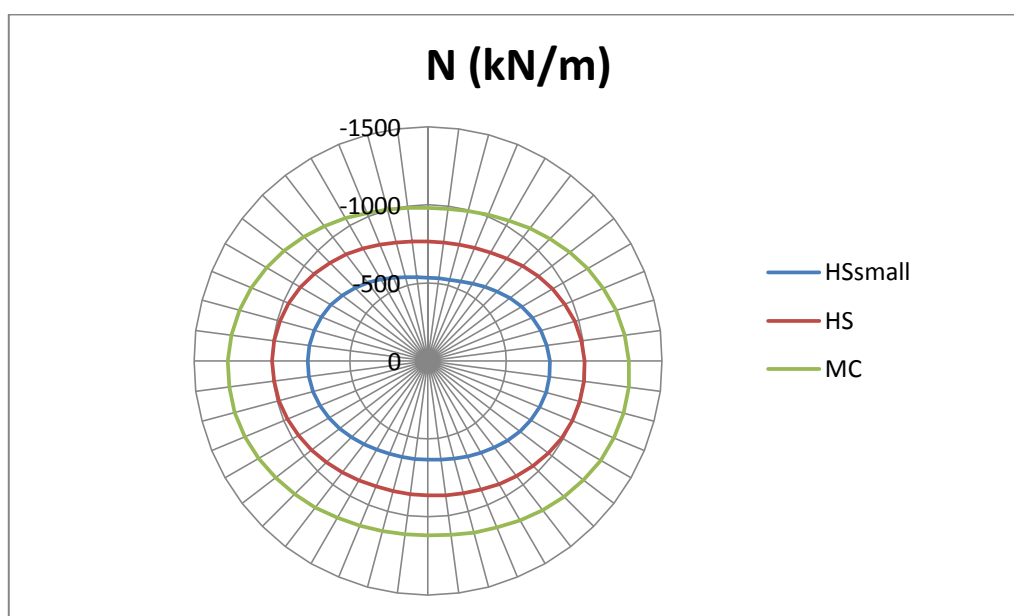
Η κατανομή των ροπών κάμψης και για τα τρία καταστατικά μοντέλα στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 φαίνεται στο Γράφημα 5.2-4.



Γράφημα 5.2-4: Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.

Οι ροπές για τα μοντέλα HSsmall και HS συγκλίνουν αρκετά και είναι εξαιρετικά μικρές, λόγω του σχεδόν υδροστατικού πεδίου που δημιουργείται από την πρακτικά ομοιόμορφη κατανομή των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων. Αντίθετα, το μοντέλο MC λόγω της διαφορετικής φόρτισης στην οροφή-δάπεδο και στις παρειές, που φάνηκε από το σχήμα της Εικόνας 5.2-20, δημιουργεί σημαντικά μεγαλύτερες ροπές σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα. Ο συνδυασμός της συγκεντρωμένης ροπής και του μεγάλου αξονικού φορτίου στην οροφή και το δάπεδο, δημιουργούν σημαντικές παραμορφώσεις στην επένδυση και στο περιβάλλον έδαφος.

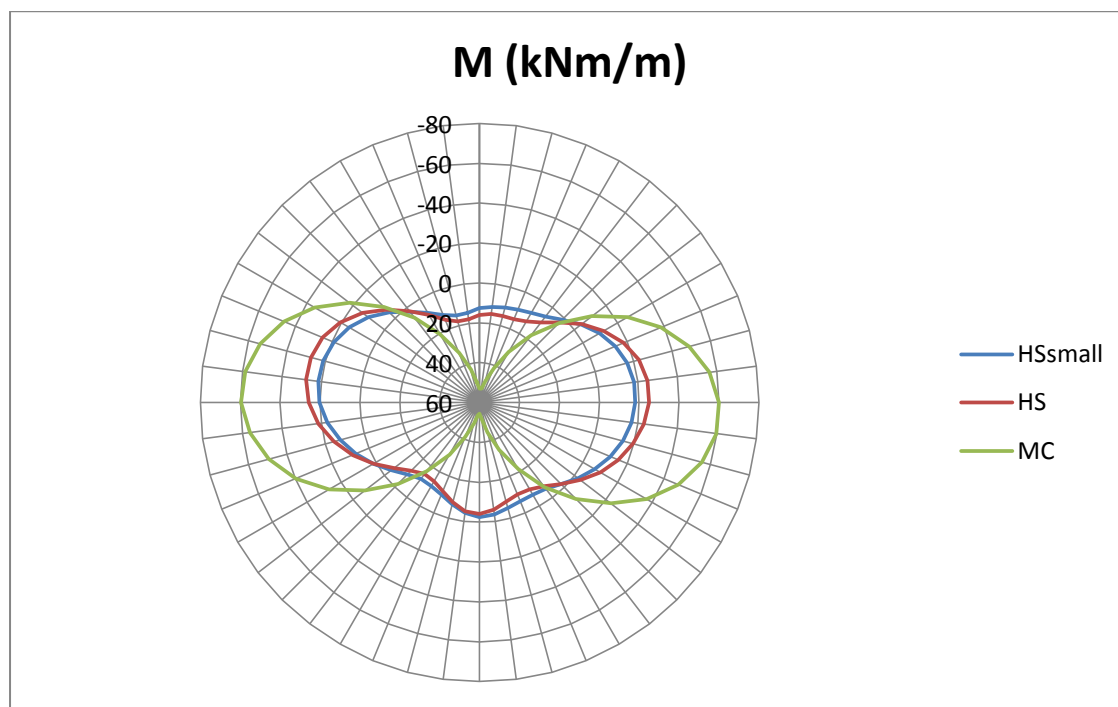
Το διάγραμμα των αξονικών τάσεων για την επένδυση της σήραγγας του TBM2 φαίνεται στο Γράφημα 5.2-5.



Γράφημα 5.2-5: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.

Η κατανομή των αξονικών τάσεων για τα τρία μοντέλα στη επένδυση της σήραγγας του TBM2, είναι πανομοιότυπη με αυτές της σήραγγας του TBM1.

Το διάγραμμα ροπών κάμψης για την επένδυση της σήραγγας του TBM2 φαίνεται στο Γράφημα 5.2-6.



Γράφημα 5.2-6: Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.

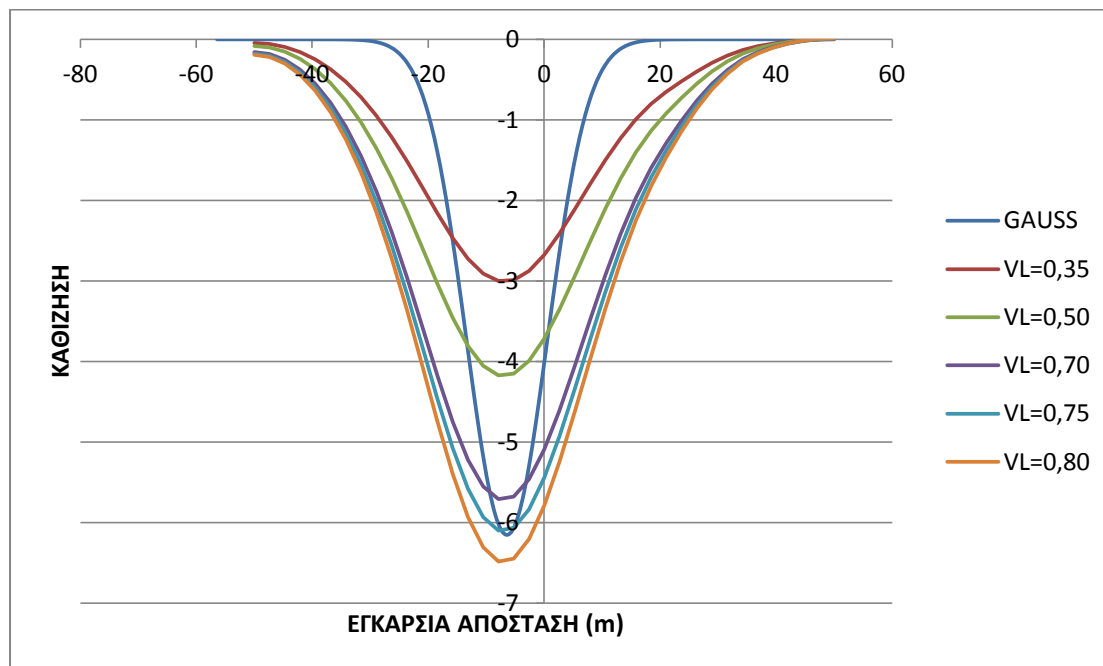
Και σε αυτή την περίπτωση οι ροπές που προκύπτουν από τα μοντέλα HSsmall και HS συγκλίνουν, ενώ αντίθετα το μοντέλο MC εμφανίζει σημαντικά μεγαλύτερες ροπές.

Συνολικά, το μοντέλο MC υπολογίζει τη μεγαλύτερη καταπόνηση της επένδυσης των σηράγγων, λόγω του συγκεντρωμένου ανισότροπου εντατικού πεδίου που αναπτύσσεται στο περιβάλλον πέτρωμα. Τα μοντέλα HSsmall και HS εμφανίζουν σχεδόν τις ίδιες ροπές, με τα αξονικά φορτία του HS να είναι μεγαλύτερα από αυτά του HSsmall, λόγω της μεγαλύτερης ελάχιστης κύριας τάσης.

5.2.1.6. Υπολογισμός απώλειας εδαφικού όγκου μέσω των αριθμητικών αναλύσεων.

Από τις αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και για τα τρία καταστατικά μοντέλα, παρατηρήθηκε ότι με την απώλεια εδαφικού όγκου που υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 2.4.1, τα αποτελέσματα των επιφανειακών καθιζήσεων δεν προσεγγίζουν επαρκώς την κατανομή Gauss. Αυτό προκύπτει κυρίως λόγω της μέτρησης ενός γεωδαιτικού οργάνου που κατέγραψε μεγάλη τιμή, καθιστώντας την κατανομή Gauss για το TBM2 εξαιρετικά απότομη. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η τιμή της απώλειας εδαφικού όγκου που πρέπει να δοθεί στον κώδικα για να προσεγγιστεί η μέγιστη καθίζηση που εντοπίστηκε πάνω από τη χάραξη του TBM2. Στο Γράφημα 5.2-7 φαίνεται η κατανομή Gauss

που έχει προκύψει αποκλειστικά από την επιρροή του TBM2, και οι καθιζήσεις μόνον από το TBM2 για τις διάφορες απώλειες εδαφικού όγκου με το καταστατικό μοντέλο HS.

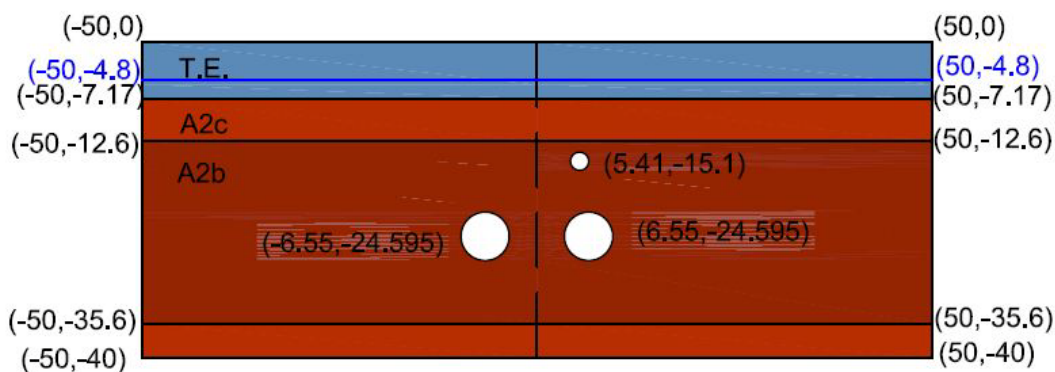


Γράφημα 5.2-7: Επιρροή της απώλειας εδαφικού όγκου στην δημιουργία επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης του TBM2 σύμφωνα με το μοντέλο HS στην τομή ΚΑΜΑΡΑ.

Η απώλεια εδαφικού όγκου, για να προσεγγιστεί η μέγιστη τιμή της κατανομής Gauss, πρέπει να πάρει την τιμή 0,75. Η τιμή αυτή σε σχέση με την τιμή 0,35 που υπολογίστηκε είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο πλάτος των καθιζήσεων που προκύπτουν από τον κώδικα. Βάσει των παραπάνω, αν συνυπολογιστούν και τα συμπεράσματα του κεφαλαίου 2.4.1.1, προκύπτει ότι η καθίζηση στην θέση αυτή οφείλεται σε εξωγενείς παράγοντες και όχι στην διάνοιξη του TBM.

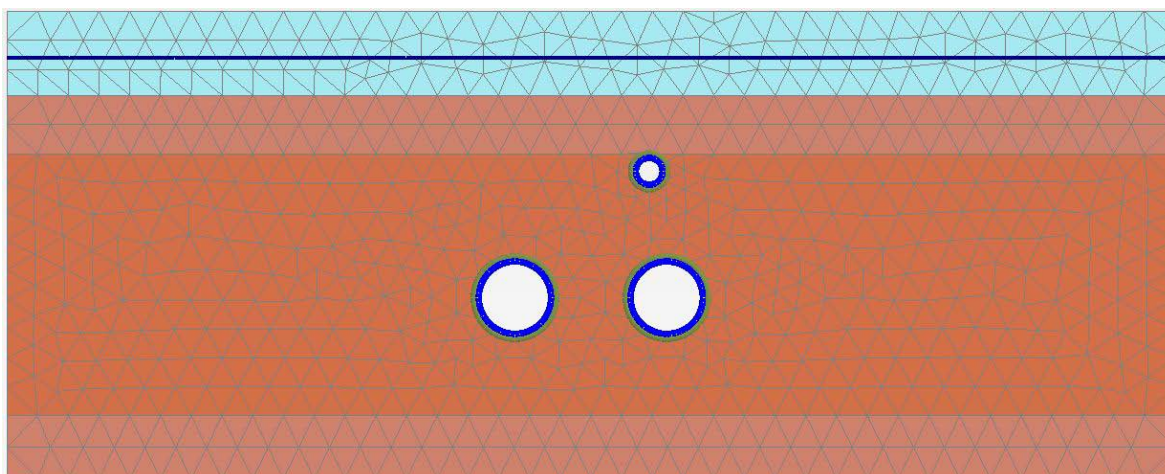
5.2.2. Τομή Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς.

Η στρωματογραφία στην συγκεκριμένη τομή αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα Τεχνητών επιχώσεων, πάχους περίπου 7,17 μέτρων. Υποκείμενα στις τεχνητές επιχώσεις είναι η ενότητα A2c πάχους περίπου 5,43 μέτρα και ακολουθεί η ενότητα A2b με πάχος περίπου 23 μέτρα. Κάτω από την A2b εντοπίζεται ξανά η A2c. Ο φρεάτιος υδροφόρος βρίσκεται περίπου στα -4.8 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους. Η γεωμετρία της τομής στην θέση αυτή φαίνεται στην Εικόνα 5.2-21.



Εικόνα 5.2-21: Γεωμετρία τομής CHPD.

Εισάγοντας την γεωμετρία στον κώδικα, παράγεται το αριθμητικό πλέγμα όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 5.2-22.



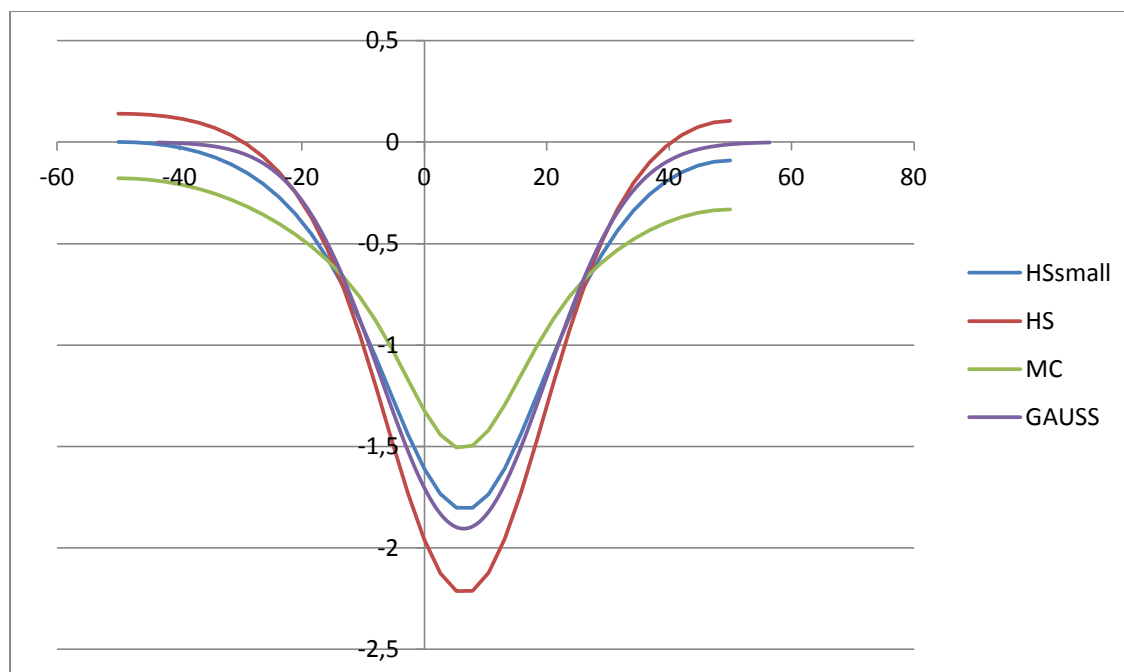
Εικόνα 5.2-22: Αριθμητικό πλέγμα τομής CHPD.

Στις φάσεις κατασκευής εισάγεται η σχετική απώλεια εδαφικού όγκου όπως αυτή υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 2.4.2. Για το TBM1 έχουμε $V_1 = 0.21\%$ και για το TBM2 $V_1 = 0.48\%$.

5.2.2.1. Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Τα αποτελέσματα της κατακόρυφης μετακίνησης στην επιφάνεια του εδάφους και για τα τρία καταστατικά μοντέλα, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής της σήραγγας του TBM1 φαίνονται στο Γράφημα 5.2-8. Είναι, επίσης, χαραγμένη η κατανομή Gauss μέσω της οποίας υπολογίστηκε η σχετική απώλεια όγκου.

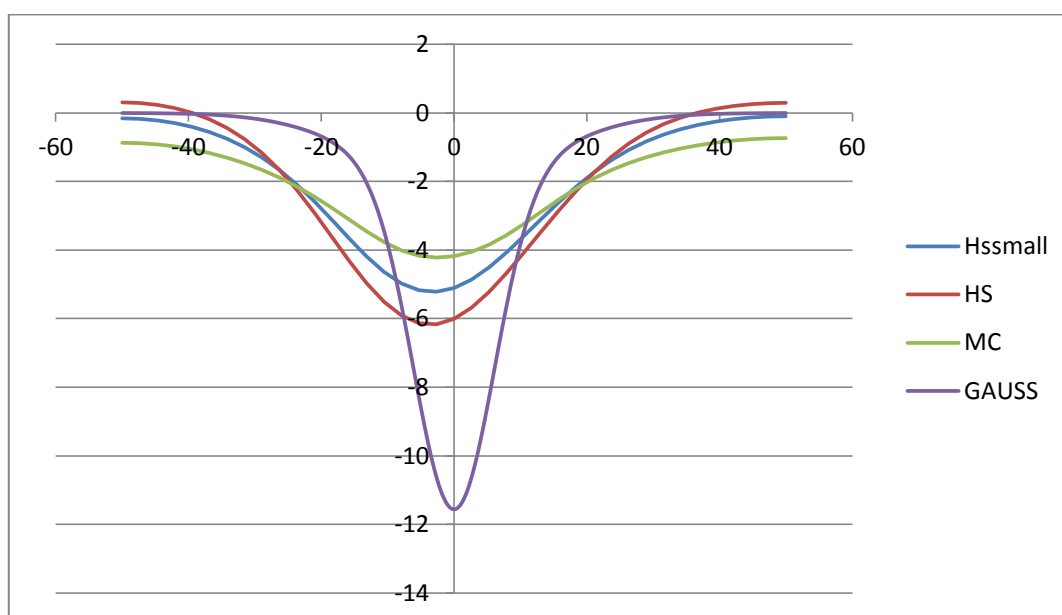
Την καλύτερη προσέγγιση επιτυγχάνει το καταστατικό μοντέλο HSsmall. Ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές κατέγραψε το HS, ενώ το MC εμφανίζει σημαντικά μικρότερες.



Γράφημα 5.2-8: Καθιζήσεις στην τομή CHPD μετά το πέρασμα του TBM1 για τα τρία καταστατικά μοντέλα και κατανομή Gauss την ίδια χρονική στιγμή.

Οι σημαντικά μικρότερες μέγιστες μετακινήσεις, κάνοντας επίλυση με το καταστατικό μοντέλο MC, οφείλονται στο μεγαλύτερο εύρος της καμπύλης των καθιζήσεων, όπως διαπιστώθηκε και στην τομή στη θέση KAMAPA.

Το ίδιο γράφημα μετά το πέρασμα και των δύο TBM φαίνεται στο Γράφημα 5.2-9.



Γράφημα 5.2-9: Καθιζήσεις στην τομή CHPD μετά το πέρασμα του TBM2 για τα τρία καταστατικά μοντέλα και κατανομή Gauss την ίδια χρονική στιγμή.

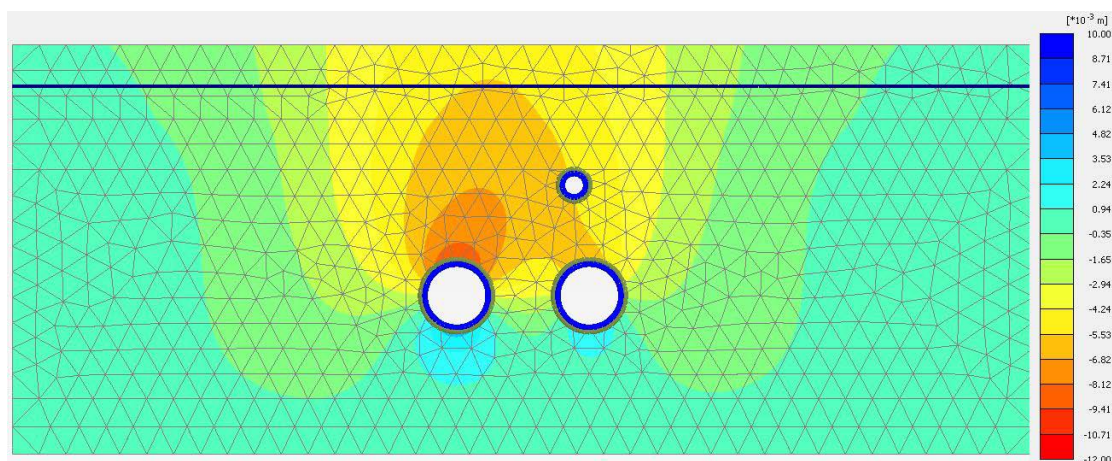
Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.4.2, η κατανομή Gauss στην συγκεκριμένη θέση, μετά το πέρασμα και των δύο TBM, έχει σημαντική αύξηση εξαιτίας της μέτρησης του οργάνου TETS2453_12. Κανένα από τα καταστατικά μοντέλα δεν καταφέρνει να προσεγγίσει

επαρκώς αυτή την κατανομή Gauss. Την μέγιστη καθίζηση κατέγραψε το καταστατικό μοντέλο HS.

5.2.2.2. Κατανομή μετακινήσεων

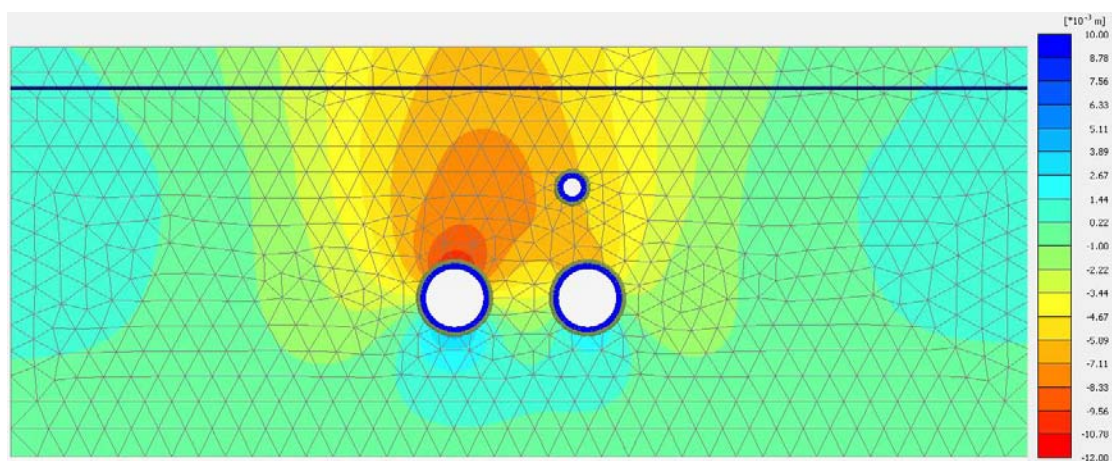
Στα γραφήματα 5.2-8 και 5.2-9 φαίνεται η κατανομή των καθιζήσεων μόνο στην επιφάνεια του εδάφους. Για να εντοπιστεί ο παράγοντας που οδηγεί στην διαφοροποίηση των καταστατικών μοντέλων μεταξύ τους, διερευνάται η κατανομή των κατακόρυφων και οριζόντιων μετατοπίσεων στις δύο διαστάσεις.

Στην Εικόνα 5.2-23 φαίνεται η κατανομή των τελικών κατακόρυφων μετατοπίσεων όπως αυτές προέκυψαν από την επίλυση με το μοντέλο HSsmall. Παρατηρείται ότι οι μετακινήσεις πάνω από την σήραγγα του TBM2 είναι μεγαλύτερες. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη απώλεια εδαφικού όγκου που υπολογίστηκε για το TBM2.



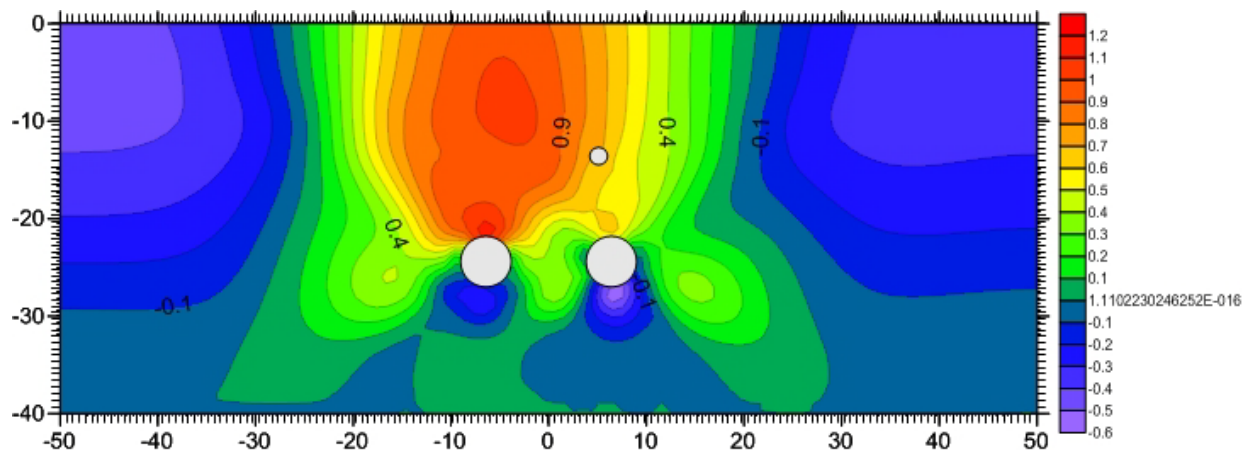
Εικόνα 5.2-23: Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.

Το ίδιο γράφημα κάνοντας χρήση του μοντέλου HS φαίνεται στην Εικόνα 6.3-4. Η κλίμακα είναι ίδια με αυτή της Εικόνας 5.2-23.



Εικόνα 5.2-24: Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.

Για να είναι δυνατή η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων κατανομών των κατακόρυφων μετατοπίσεων σε δύο διαστάσεις, έγινε αφαίρεση τους. Η διαδικασία αυτή έγινε με την μέθοδο που έχει ήδη περιγραφεί. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης των μετατοπίσεων του HS από τις μετατοπίσεις του HSsmall φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-25.



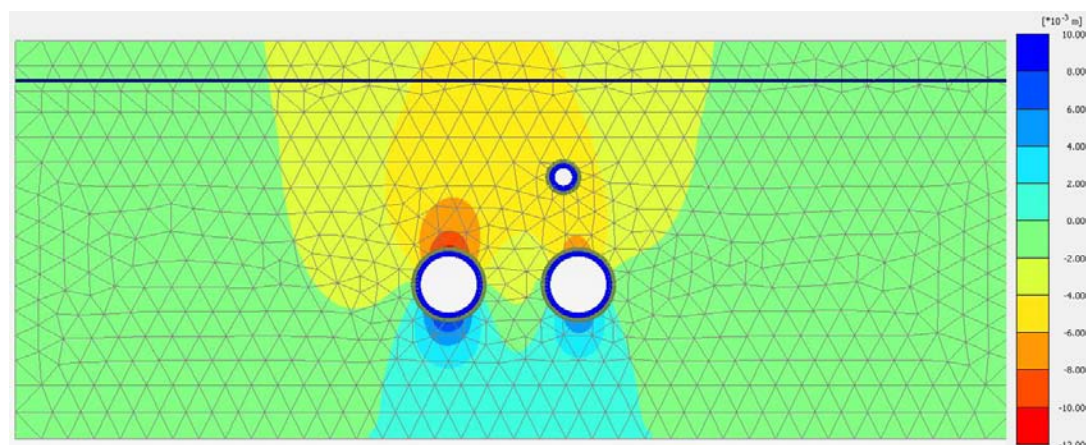
Εικόνα 5.2-25: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρασμα και των δύο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.

Θετικές είναι οι τιμές όπου, η κατακόρυφη καθοδική μετακίνηση ήταν μεγαλύτερη με το μοντέλο HS. Παρατηρείται ότι οι σημαντικότερες διαφορές εντοπίζονται στις θέσεις πάνω από την σήραγγα του TBM2, όπου είναι και οι θέσεις που υπολογίστηκαν οι μεγαλύτερες μετακινήσεις. Η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στα δύο αυτά καταστατικά μοντέλα στη θέση αυτή είναι 1.28mm (HSsmall=-10,36mm και HS=-11.65 mm), όπου οι μετατοπίσεις που υπολογίζονται από το μοντέλο HS είναι μεγαλύτερες κατά 12,41%.

Μεγαλύτερες ανυψώσεις έχει υπολογίσει και στα δάπεδα των σηράγγων το μοντέλο HS. Η μεγαλύτερη διαφορά στη θέση αυτή είναι 0,59mm (HSsmall=2.5mm και HS=3.09 mm), όπου το μοντέλο HS έχει υπολογίσει κατά 23,65% μεγαλύτερη ανύψωση.

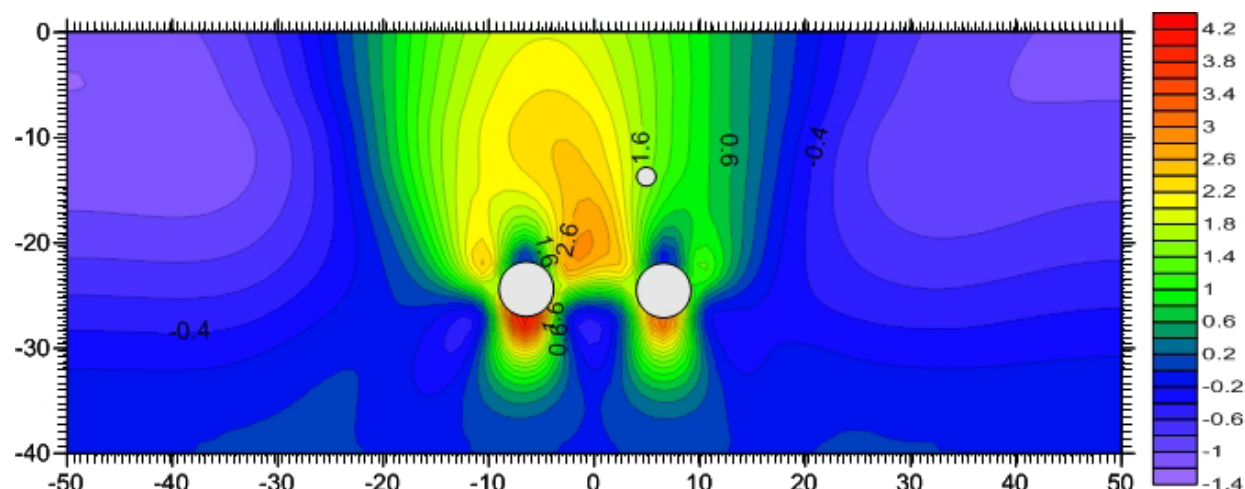
Η διαφορά αυτή οφείλεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ελαφρώς μικρότερη αντοχή που έχει το έδαφος όταν προσομοιώνεται με το καταστατικό μοντέλο HS.

Οι κατακόρυφες μετακινήσεις, όπως προέκυψαν με την επίλυση κάνοντας χρήση του μοντέλου MC, φαίνονται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-26.



Εικόνα 5.2-26: Κατανομή κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρασμα και των δύο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.

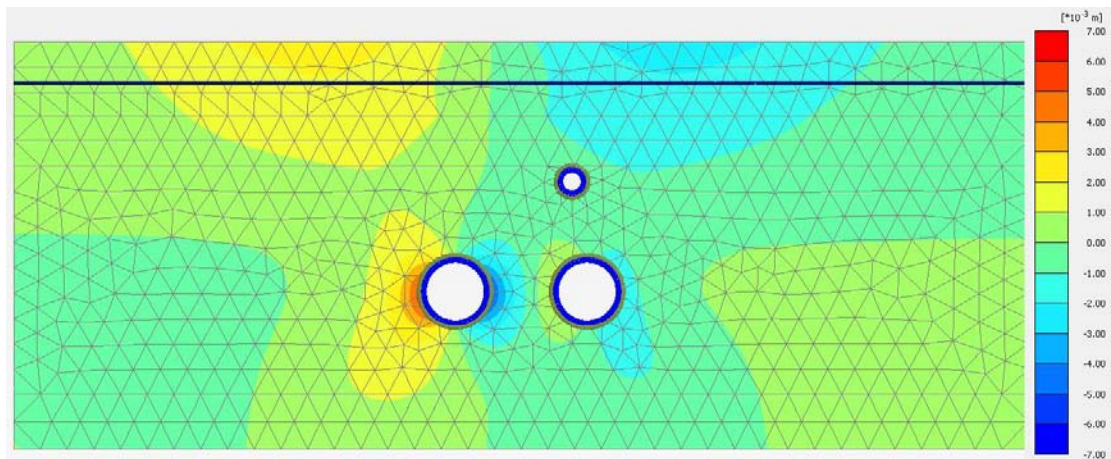
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με την Εικόνα 5.2-25, αφαιρούνται οι μετατοπίσεις που υπολογίστηκαν μέσω του μοντέλου MC από τις μετατοπίσεις που υπολογίστηκαν βάσει του HS. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής φαίνεται στην Εικόνα 5.2-27.



Εικόνα 5.2-27: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρασ και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.

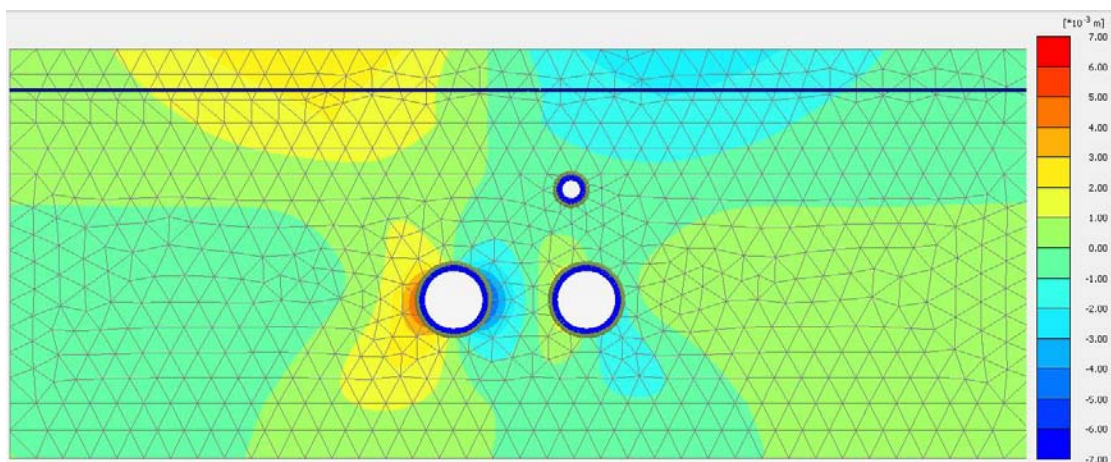
Στην περιφέρεια των εκσκαφών όπως έχει ήδη διαπιστωθεί το μοντέλο MC υπολογίζει μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο συγκεντρωμένο φορτίο, λόγω της μη πλαστικοποίησης του εδάφους που προσομοιώνεται με το μοντέλο MC μετά από την διαδικασία της απώλειας εδαφικού όγκου. Η μεγαλύτερη διαφορά εντοπίζεται στο δάπεδο και είναι 4,17mm (MC=9,71 mm και HS=5.53 mm), όπου η ανύψωση δαπέδου που υπολογίζεται από το μοντέλο MC είναι μεγαλύτερη κατά 43%. Στις θέσεις πάνω από τις σήραγγες και μέχρι την επιφάνεια του εδάφους οι μετατοπίσεις που υπολογίζονται από το HS είναι μεγαλύτερες, λόγω της χαμηλότερης αντοχής του εδάφους με το καταστατικό μοντέλο HS. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα στην επιφάνεια του εδάφους ελαττώνεται με την απομάκρυνση από το κέντρο συμμετρίας της τομής, μέχρι που στα άκρα εκατέρωθεν του κέντρου συμμετρίας οι μετακινήσεις να είναι μεγαλύτερες, κάνοντας χρήση του μοντέλου MC, κατά 1,2mm (MC=-0.73mm και HS=0.47mm) ή 3,38%. Η μεγαλύτερη τιμή των μετακινήσεων στις πιο απομακρυσμένες θέσεις, κάνοντας χρήση του καταστατικού μοντέλου MC, οφείλονται στην λειτουργία του στην ελαστική περιοχή, άρα και στην ικανότητα του να μεταβιβάζει τα φορτία σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνονται οι τελικές οριζόντιες μετατοπίσεις κάνοντας χρήση του μοντέλου HSsmall.



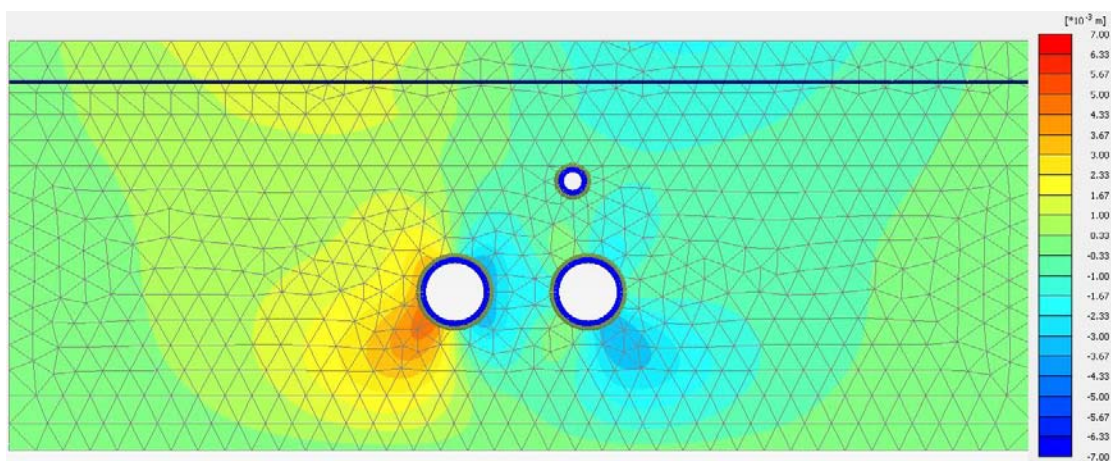
Εικόνα 5.2-28: Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.

Το ίδιο διάγραμμα για το μοντέλο HS.



Εικόνα 5.2-29: Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.

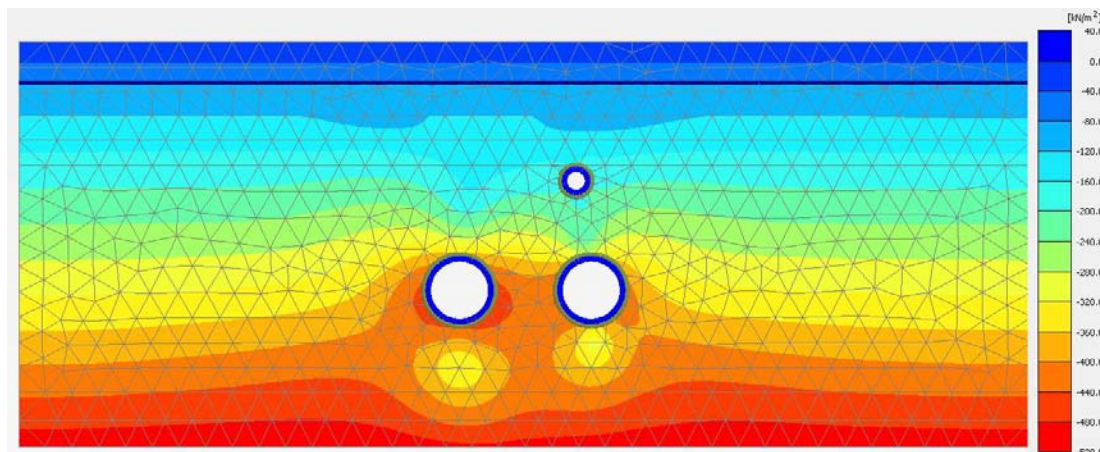
Και για το μοντέλο MC.



Εικόνα 5.2-30: Κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.

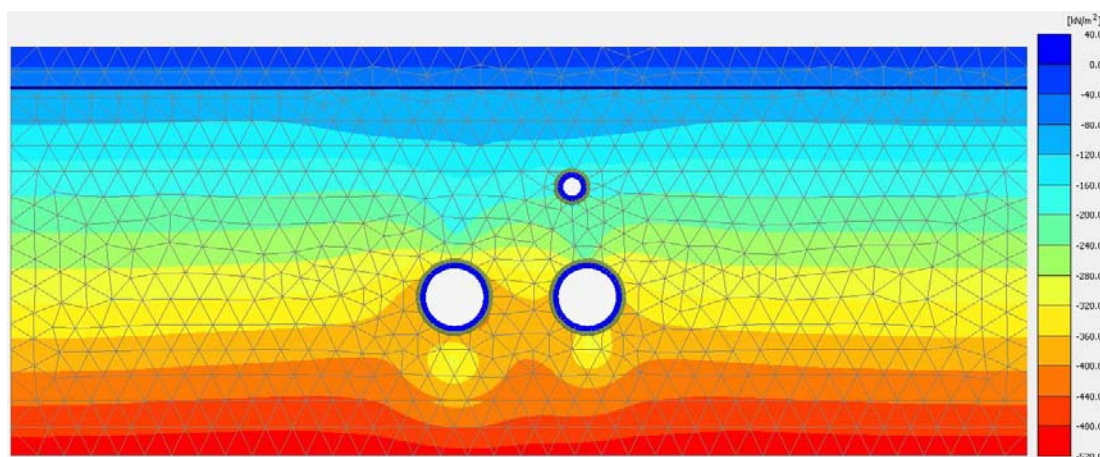
5.2.2.3. Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1).

Στην συνέχεια αναλύεται το τασικό πεδίο που δημιουργείται μετά την εκσκαφή και των δύο σηράγγων. Στην Εικόνα 5.2-31 φαίνεται η κατανομή των μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1), όπως αυτές προέκυψαν κάνοντας επίλυση με το κριτήριο HSsmall.



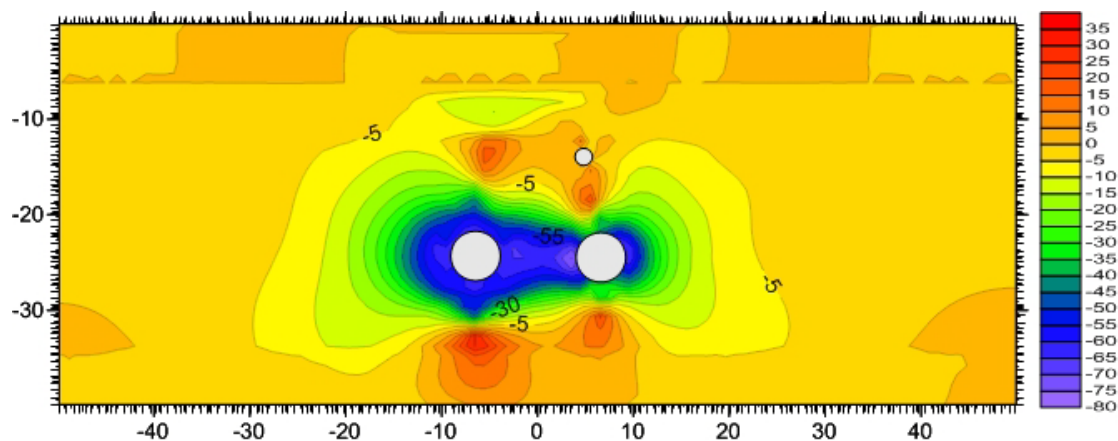
Εικόνα 5.2-31: Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.

Κάνοντας τον ίδιο υπολογισμό με το μοντέλο HS προκύπτει το τασικό πεδίο της Εικόνας 5.2-32.



Εικόνα 5.2-32: Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.

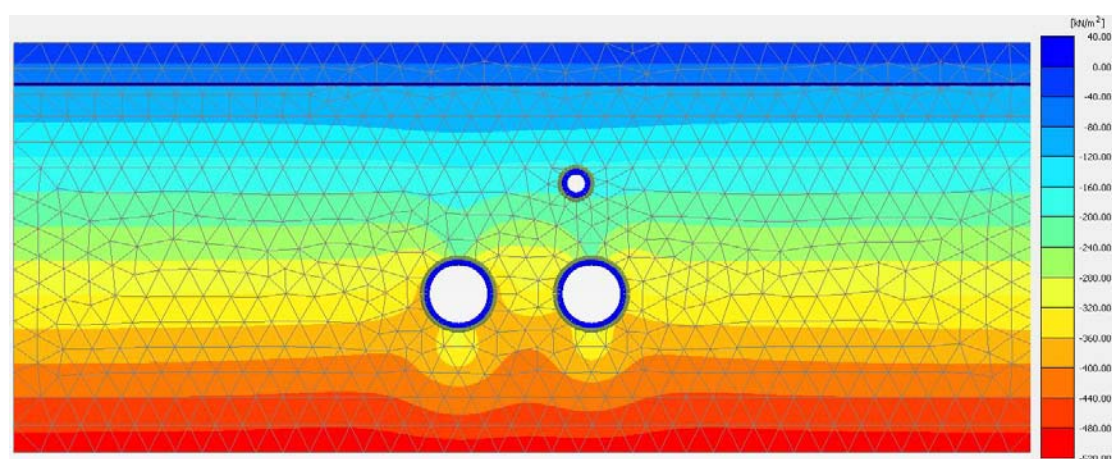
Για να φανούν οι διαφορές ανάμεσα στα δύο μοντέλα, αφαιρέθηκαν οι μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις με τη μέθοδο που έχει περιγραφεί. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-33.



Εικόνα 5.2-33: Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.

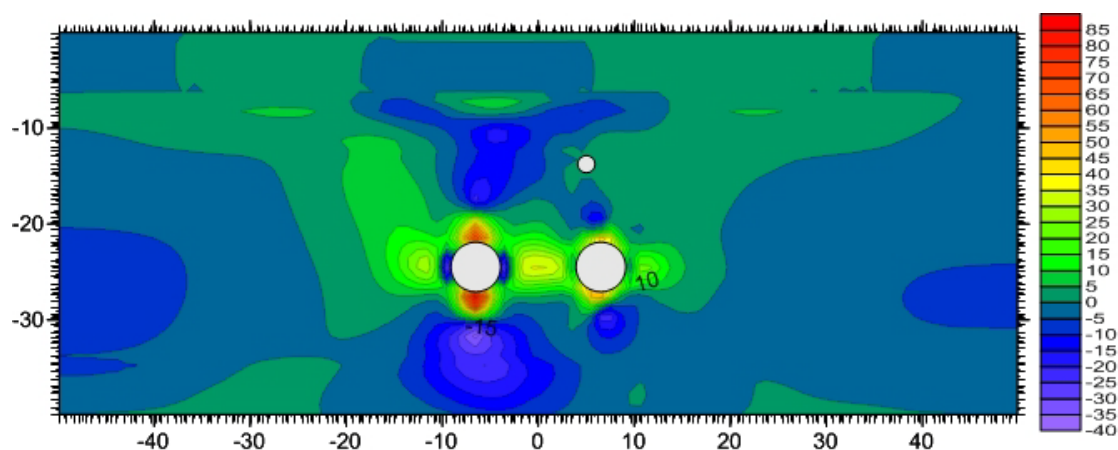
Παρατηρείται ότι οι μέγιστες κύριες τάσεις γύρω από τις σήραγγες είναι μεγαλύτερες κάνοντας χρήση του μοντέλου HSsmall. Η μεγαλύτερη διαφορά στην θέση αυτή είναι $75,91 \text{ kN/m}^2$ ($\text{HSsmall} = -446.9 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS} = -371 \text{ kN/m}^2$) ή $16,98\%$. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται, όπως έχει ήδη αναλυθεί, στην ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή του εδάφους όταν προσομοιώνεται με το καταστατικό μοντέλο HSsmall. Σε πιο απομακρυσμένες θέσεις από τις εκκαφές, οι μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις είναι μεγαλύτερες όταν υπολογίζονται με το μοντέλο HS. Η μεγαλύτερη διαφορά στις θέσεις αυτές ανάμεσα σε αυτά τα καταστατικά μοντέλα είναι $31,66 \text{ kN/m}^2$ ($\text{HSsmall} = -330.3 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS} = -362 \text{ kN/m}^2$), όπου οι τάσεις που υπολογίζονται από το μοντέλο HS είναι μεγαλύτερες κατά $9,59\%$. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην μεγαλύτερη ζώνη διαρροής στις επιλύσεις με το μοντέλο HS, άρα και στον αναγκαστικό διαβιβασμό των τάσεων σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Η κατανομή των μέγιστων κύριων τάσεων κάνοντας χρήση του μοντέλου MC φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-34.



Εικόνα 5.2-34: Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.

Αφαιρώντας τις μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις του κάθε κόμβου του κάθε στοιχείου που προέκυψαν από την επίλυση με το μοντέλο MC και HS, προκύπτει η διαφορά των τασικών πεδίων τους όπως φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-35.

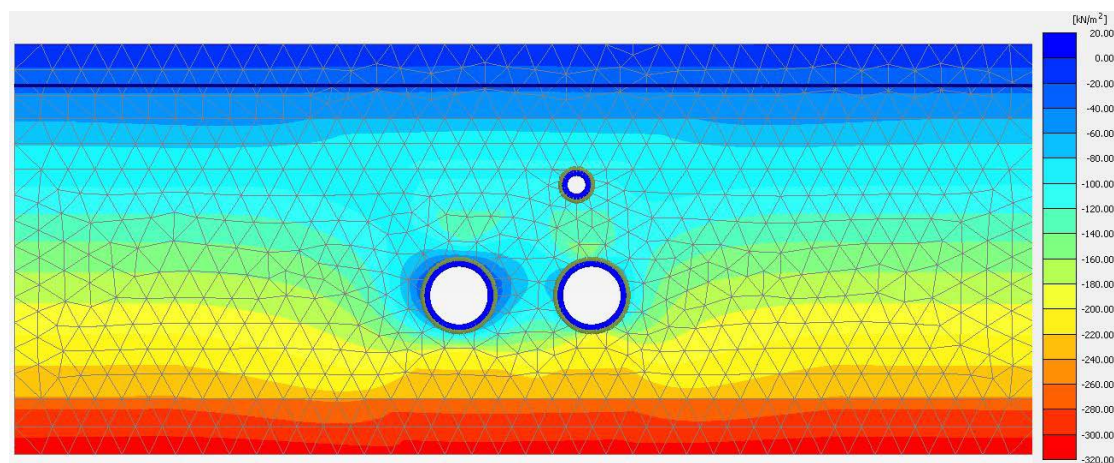


Εικόνα 5.2-35: Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) στην θέση CHPD μετά το πέρασ και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.

Σε αυτή την περίπτωση προκύπτουν σημαντικές διαφορές με τις κύριες τάσεις του HS να είναι σημαντικά μεγαλύτερες στην οροφή και το δάπεδο των εκσκαφών και αρκετά μικρότερες στα πλευρά αυτών. Η μεγαλύτερη διαφορά στην οροφή και το δάπεδο των σήραγγων είναι $84,2 \text{ kN/m}^2$ ($\text{MC}=-312.2 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS}=-396.4 \text{ kN/m}^2$), όπου οι τάσεις που υπολογίζονται από το μοντέλο HS είναι μεγαλύτερες κατά 26,96%. Στις παρειές των εκσκαφών και σε πιο απομακρυσμένες θέσεις, με κυρίως τις θέσεις κάτω από τις σήραγγες, το μοντέλο MC υπολογίζει μεγαλύτερες μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις με τη μέγιστη διαφορά στις θέσεις αυτές να είναι $38,20 \text{ kN/m}^2$ ($\text{MC}=-351.61 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS}=-313.4 \text{ kN/m}^2$) ή 10,86%. Η συμπεριφορά αυτή έχει διαπιστωθεί ήδη, και οφείλεται στην ελαστική συμπεριφορά του μοντέλου MC.

5.2.2.4. Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3).

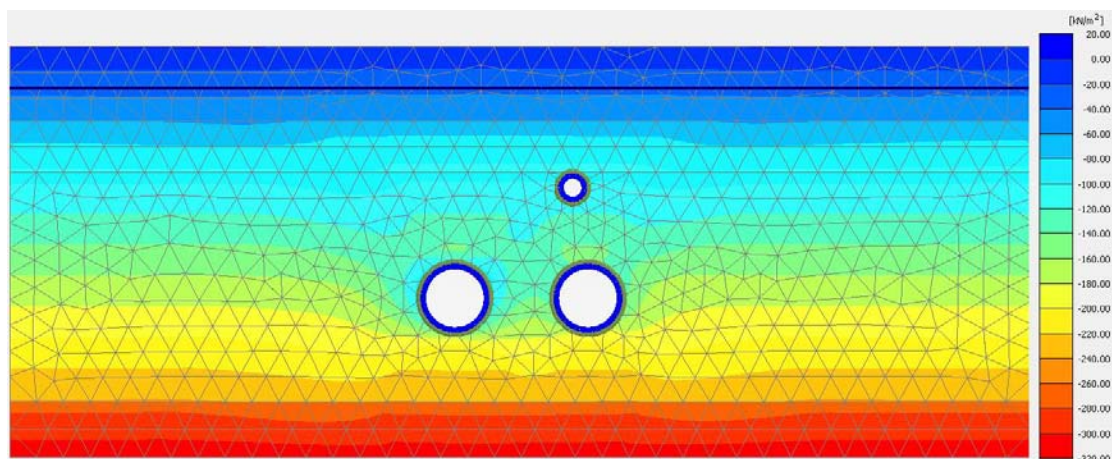
Η κατανομή των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων κάνοντας χρήση του μοντέλου HSsmall φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-36.



Εικόνα 5.2-36: Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση CHPD μετά το πέρασ και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.

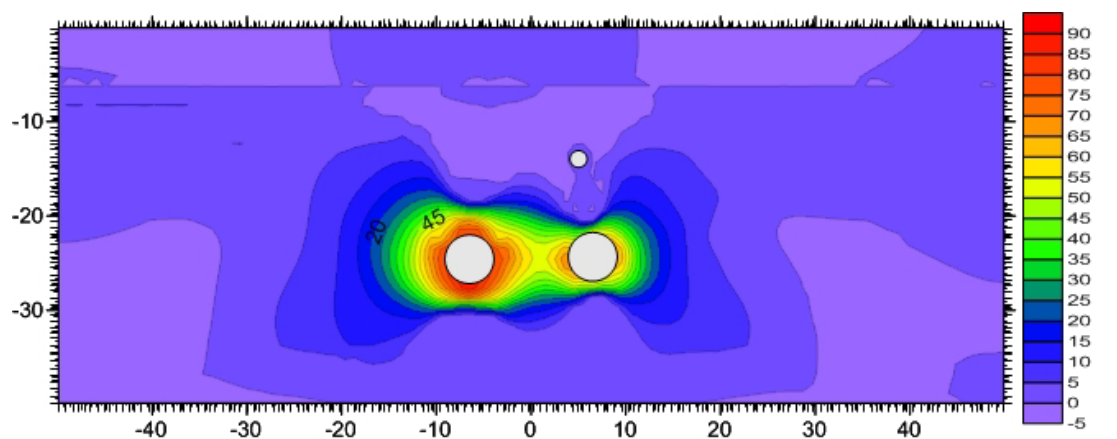
Η σημαντική ελάττωση των ελάχιστων κύριων τάσεων στην περιφέρεια των εκσκαφών βεβαιώνει την διαρροή του εδάφους και την χαλάρωση του τασικού του πεδίου.

Το ίδιο διάγραμμα κάνοντας χρήση του μοντέλου HS φαίνεται στην Εικόνα 5.2-37.



Εικόνα 5.2-37: Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο HS.

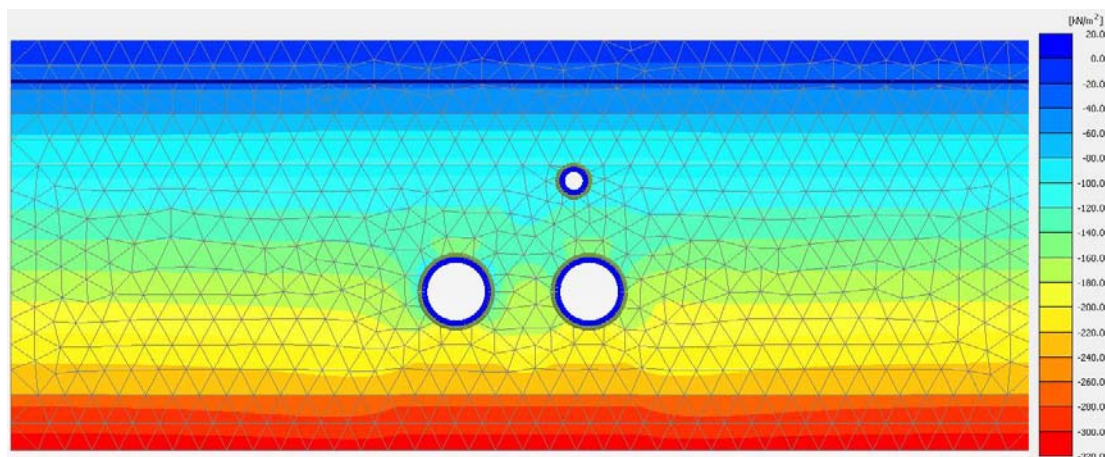
Για να φανούν οι διαφορές ανάμεσα στα δύο μοντέλα αφαιρούνται τα τασικά πεδία που υπολογίστηκαν. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής φαίνονται στην Εικόνα 5.2-38.



Εικόνα 5.2-38: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.

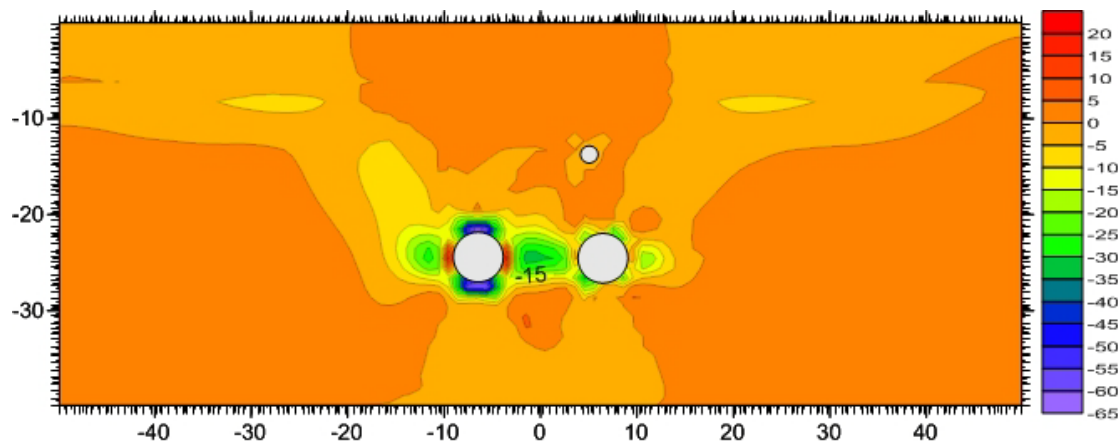
Από την εικόνα αυτή φαίνεται η δημιουργία μεγαλύτερων ακτινικών τάσεων στην περιφέρεια των εκσκαφών, κάνοντας χρήση του μοντέλου HS. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερα φορτία στην υποστήριξη των σηράγγων, όταν γίνεται υπολογισμός μέσω του μοντέλου HS. Η μεγαλύτερη διαφορά των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στην περιφέρεια των εκσκαφών είναι $88,61 \text{ kN/m}^2$ ($\text{HSsmall} = -50 \text{ kN/m}^2$, $\text{HS} = -138,6 \text{ kN/m}^2$) ή $177,2\%$. Η διαφορά αυτή, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οφείλεται στην ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή που έχει το έδαφος που προσομοιώνεται με το μοντέλο HSsmall, παρέχοντας του την δυνατότητα να μεταφέρει περισσότερες μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις παρουσιάζοντας μικρότερη διαρροή και ανάπτυξη ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων. Με την απομάκρυνση από τις εκσκαφές μειώνεται και η διαφορά των δύο αυτών καταστατικών μοντέλων, μέχρι το μοντέλο HSsmall να υπολογίζει μεγαλύτερη τάση κατά $4,21 \text{ kN/m}^2$ ($\text{HSsmall} = -107,38 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS} = -103,16 \text{ kN/m}^2$) ή $3,92\%$.

Η κατανομή των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων κάνοντας χρήση του μοντέλου MC φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 5.2-39.



Εικόνα 5.2-39: Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ_3) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM με το καταστατικό μοντέλο MC.

Αφαιρώντας το ελάχιστο κύριο τασικό πεδίο που έχει προκύψει από το μοντέλο MC και από το μοντέλο HS, προκύπτει η διαφορά των τασικών τους πεδίων στην Εικόνα 5.2-40.



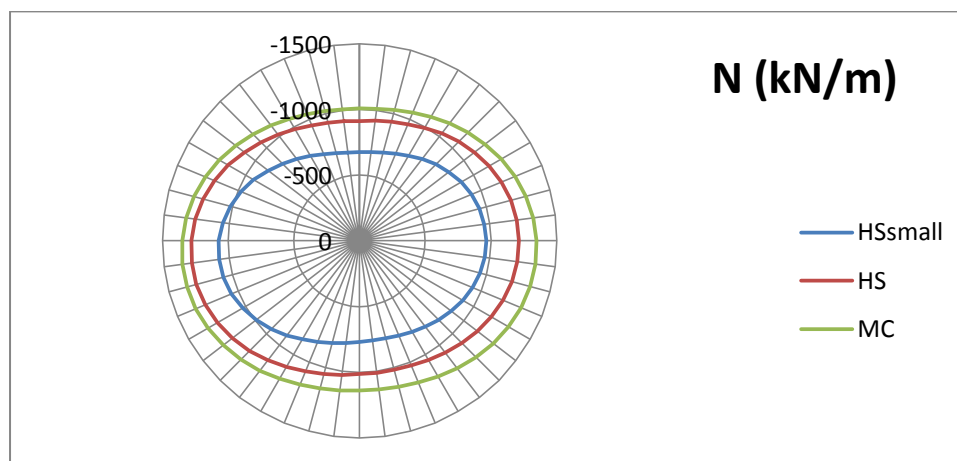
Εικόνα 5.2-40: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ_3) στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.

Παρατηρείται ότι οι ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις στην οροφή των σηράγγων είναι σημαντικά μεγαλύτερες κάνοντας επίλυση του μοντέλου MC, ενώ αντίθετα στις παρειές είναι μικρότερες από αυτές του HS. Η μεγαλύτερη διαφορά στις παρειές των σηράγγων ανάμεσα στα δύο αυτά καταστατικά μοντέλα είναι $16,68 \text{ kN/m}^2$ ($\text{MC} = -71,6 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS} = -88,29 \text{ kN/m}^2$), όπου οι τάσεις που υπολογίζονται από το μοντέλο HS είναι μεγαλύτερες κατά 23,3%. Στην οροφή και το δάπεδο η μέγιστη διαφορά είναι $63,53 \text{ kN/m}^2$ ($\text{MC} = -193,16 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS} = -129,62 \text{ kN/m}^2$), όπου το μοντέλο MC έχει υπολογίσει κατά 32,89% μεγαλύτερη τάση. Η συμπεριφορά αυτή έχει ήδη εξηγηθεί στην αντίστοιχη διερεύνηση στη θέση KAMAPA. Διαφοροποίηση με την κατανομή των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στην θέση KAMAPA παρατηρείται στην περιστροφή της διαφοράς των τασικών πεδίων γύρω από την εκσκαφή της σήραγγας του TBM1, η οποία οφείλεται στην σημαντικά

μεγαλύτερη απώλεια εδαφικού όγκου της σήραγγας του TBM2 στην θέση Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς.

5.2.2.5. Φορτία υποστήριξης.

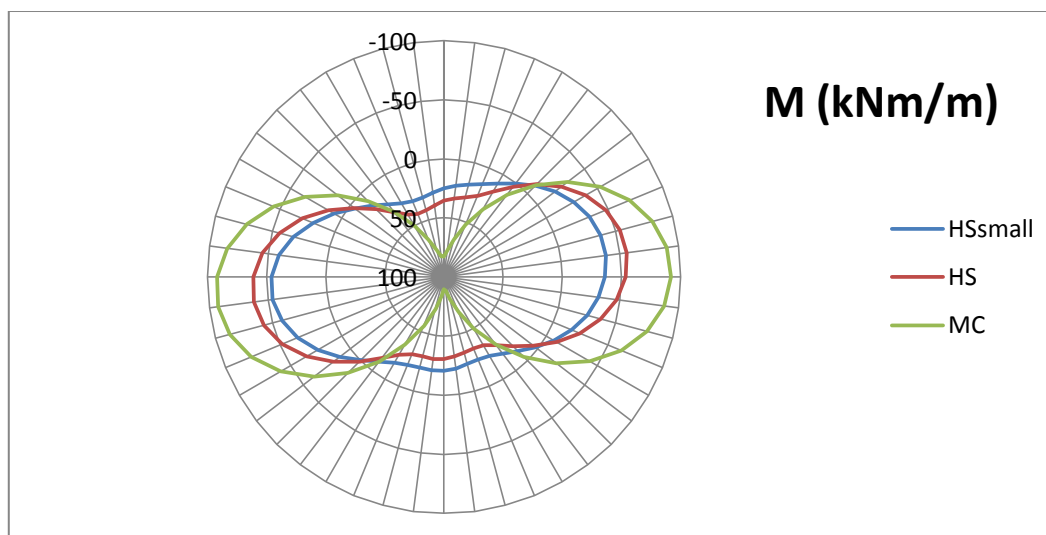
Όπως ήδη αναφέρθηκε η υποστήριξη των σηράγγων γίνεται με προκατασκευασμένα πλαίσια από σκυρόδεμα πάχους 30cm, οι παράμετροι των οποίων υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 5.4. Λόγω των σημαντικών διαφοροποιήσεων που εντοπίστηκαν στην κατανομή των τάσεων ανάμεσα στα τρία καταστατικά μοντέλα, κρίθηκε απαραίτητο να διερευνηθεί η κατανομή των αξονικών φορτίων και των ροπών κάμψης όπου αναλαμβάνει το σκυρόδεμα. Στο ακόλουθο Γράφημα 5.2-10 φαίνεται η κατανομή των αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 όπως αυτά έχουν προκύψει από τις επιλύσεις και των τριών μοντέλων.



Γράφημα 5.2-10: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση CHPD.

Παρατηρείται ότι τα αξονικά φορτία μειώνονται από το HSsmall στο HS και από το HS στο MC. Το γεγονός αυτό είχε διαπιστωθεί και από τις κατανομές των ενεργών κύριων τάσεων στη μάζα του εδάφους.

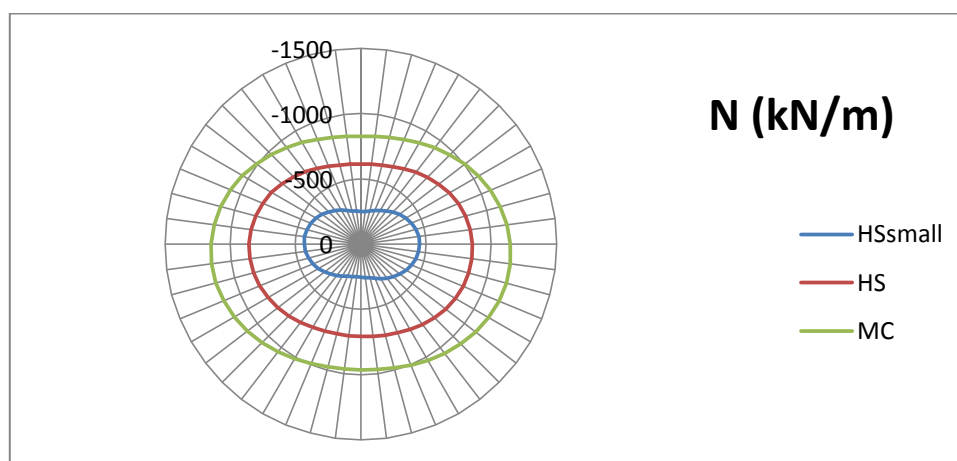
Η κατανομή των ροπών κάμψης και για τα τρία καταστατικά μοντέλα στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 φαίνεται στο Γράφημα 5.2-11.



Γράφημα 5.2-11: Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση CHPD.

Οι ροπές για τα μοντέλα HSsmall και HS συγκλίνουν αρκετά. Αντίθετα το μοντέλο MC λόγω της διαφορετικής φόρτισης στην οροφή-δάπεδο και στις παρειές, που φάνηκε από το σχήμα της Εικόνας 5.2-39, δημιουργεί σημαντικά μεγαλύτερες ροπές σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα.

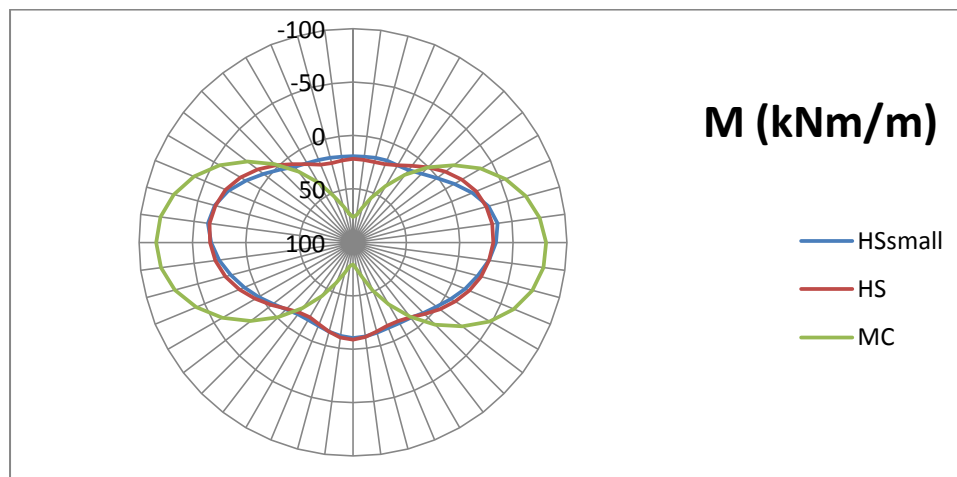
Το διάγραμμα των αξονικών τάσεων για την επένδυση της σήραγγας του TBM2 φαίνεται στο Γράφημα 5.2-12.



Γράφημα 5.2-12: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση CHPD.

Η κατανομή των αξονικών τάσεων κάνοντας χρήση του καταστατικού μοντέλου HSsmall είναι σημαντικά μικρότερη από τα άλλα δυο καταστατικά μοντέλα. Το γεγονός αυτό ενδέχεται να οφείλεται στην ικανότητα του μοντέλου αυτού να μεταβάλλει τις ελαστικές παραμέτρους του εδάφους σε συνθήκες αποφόρτισης και επαναφόρτισης, όπου και επικρατούν στην περιφέρεια των εκσκαφών μετά την διαδικασία της απώλειας εδαφικού όγκου. Η πρόβλεψη αυτή ενισχύεται, λαμβάνοντας υπόψη το συγκριτικά υψηλό μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις που έχει ο σχηματισμός A2b, όπου και διανοίγεται στην συγκεκριμένη θέση.

Το διάγραμμα ροπών κάμψης για την επένδυση της σήραγγας του TBM2 φαίνεται στο Γράφημα 5.2-13 .

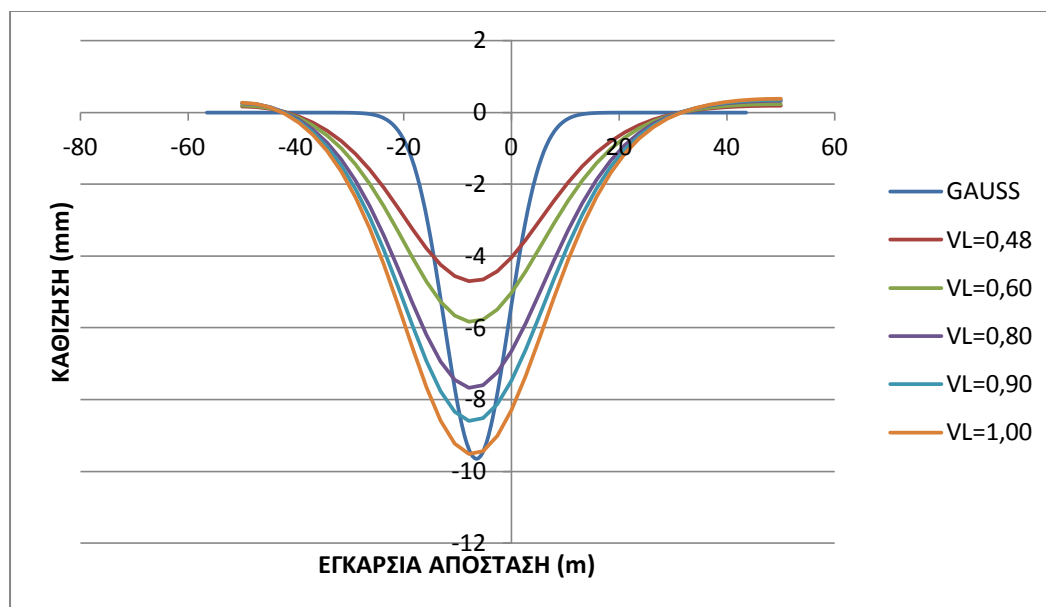


Γράφημα 5.2-13: Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα στη θέση CHPD.

Και σε αυτή την περίπτωση οι ροπές που προκύπτουν από τα μοντέλα HSsmall και HS συγκλίνουν, ενώ αντίθετα το μοντέλο MC εμφανίζει σημαντικά μεγαλύτερες ροπές. Συνολικά το μοντέλο MC υπολογίζει τη μεγαλύτερη καταπόνηση της επένδυσης των σηράγγων. Τα μοντέλα HSsmall και HS εμφανίζουν σχεδόν τις ίδιες ροπές, με τα αξονικά φορτία του HS να είναι μεγαλύτερα από αυτά του HSsmall.

5.2.2.6. Υπολογισμός απώλειας εδαφικού όγκου μέσω των αριθμητικών αναλύσεων.

Από τις αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, και για τα τρία καταστατικά μοντέλα, παρατηρήθηκε ότι με την απώλεια εδαφικού όγκου που υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 3.5, τα αποτελέσματα των επιφανειακών καθιζήσεων δεν προσεγγίζουν επαρκώς την κατανομή Gauss. Αυτό προκύπτει κυρίως λόγω της μέτρησης ενός γεωδαιτικού οργάνου που κατέγραψε μεγάλη τιμή, καθιστώντας την κατανομή Gauss για το TBM2 εξαιρετικά απότομη. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η τιμή της απώλειας εδαφικού όγκου που πρέπει να δοθεί στον κώδικα για να προσεγγιστεί η μέγιστη καθίζηση που εντοπίστηκε πάνω από τη χάραξη του TBM2. Στο Γράφημα 5.2-14 φαίνεται η κατανομή Gauss που έχει προκύψει αποκλειστικά από την επιρροή του TBM2, και οι καθιζήσεις για τις διάφορες απώλειες εδαφικού όγκου μόνον του TBM2 με το καταστατικό μοντέλο HS.



Γράφημα 5.2-14: Επιρροή της απώλειας εδαφικού όγκου στην δημιουργία επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης του TBM2 σύμφωνα με το μοντέλο HS στην τομή CHPD.

Η απώλεια εδαφικού όγκου, για να προσεγγιστεί η μέγιστη τιμή της κατανομής Gauss, πρέπει να πάρει την τιμή 1,00. Η τιμή αυτή σε σχέση με την τιμή 0,48 που υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 3.5 είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο πλάτος των καθιζήσεων που προκύπτουν από τον κώδικα.

5.3. Ανάλυση υπό αστράγγιστες συνθήκες με ενεργές παραμέτρους αντοχής (Undrained A)

Όταν γίνεται ανάλυση με ενεργές παραμέτρους αντοχής (c' και ϕ') παίζει σημαντικό ρόλο η δημιουργία σωστής πίεσης του νερού των πόρων, ώστε η διαδρομή των ενεργών τάσεων να οδηγήσει σε σωστό υπολογισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους. Στα περισσότερα εδάφη αυτό δεν είναι εφικτό, γεγονός που οδηγεί σε λανθασμένο υπολογισμό της αντοχής του εδάφους. Σημαντικό ελάττωμα είναι, επίσης, ότι στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα για την αστράγγιστη συμπεριφορά του εδάφους. Για την αποφυγή σφαλμάτων ο κώδικας θέτει αυστηρούς περιορισμούς στις τιμές που μπορούν να δοθούν στις παραμέτρους του εδάφους. Το πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου υπολογισμού είναι ότι δεν χάνεται η μεταβολή των ελαστικών παραμέτρων ανάλογα με την βαθμίδα φόρτισης του εδάφους καθώς επίσης και ο άμεσος υπολογισμός των ενεργών τάσεων.

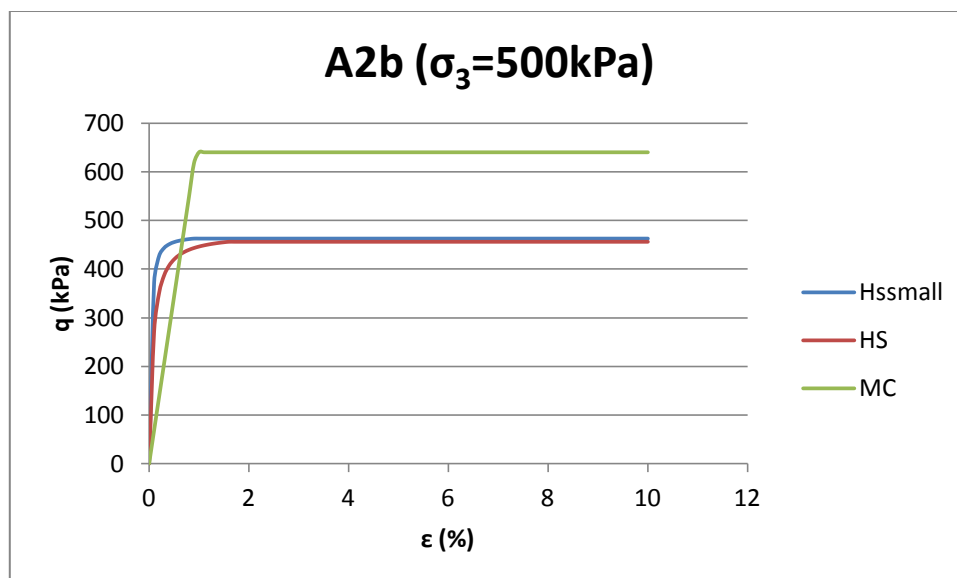
Στον πίνακα φαίνονται οι παράμετροι που επιλέχθηκαν σε αυτού του τύπου τις αναλύσεις.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΟΝΑΔΑ	T.E.	A2b	A2c
Mohr - Coulomb				
Drainage type	-	Drained	Undrained A	Undrained A
γ_{unsat}	KN/m ²	19,5	21,5	21,5
γ_{sat}	KN/m ²	20	22	22
E_{50}	KN/m ²	7500	59717	89460
ν	-	0,3	0,3	0,25
c'	KN/m ²	7	40,6	105,6
ϕ'	ο	32	27,7	21,9
$K_{x,y}$	m/day	2,013	0,043	0,043
Hardening Soil				
E_{oed}	KN/m ²	-	35835	54429
E_{ur}	KN/m ²	-	179151	268920
K_o	-	-	0,55	0,62
OCR	-	-	1,5	2
Hssmall				
$\gamma_{0,7}$		-	0,015	0,015
G_o	KN/m ²	-	142709	153516

Πίνακας 5.3-1: Παράμετροι σχηματισμών με ενεργές παραμέτρους αντοχής

Το E_{oed} στην περίπτωση της ενότητας A2c πάρθηκε αποκλειστικά από τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοδιάστατης στερεοποίησης του δείγματος 9 της Γεώτρησης 24, καθώς ο μέσος όρος των τιμών που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής (Undrained B) βρέθηκε εκτός των κατώτερων ορίων που θέτει ο κώδικας κάνοντας υπολογισμούς με ενεργές παραμέτρους αντοχής.

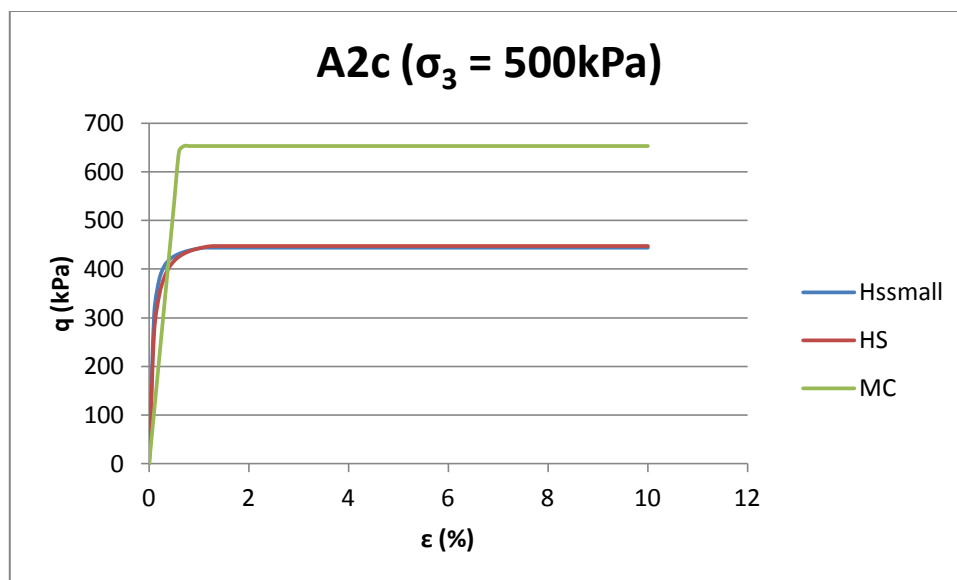
Στο Γράφημα 5.3-1 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του σχηματισμού A2b κάνοντας χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής σε τριαξονική δοκιμή με πλευρική πίεση 500kPa για κάθε καταστατικό μοντέλο.



Γράφημα 5.3-1: Συμπεριφορά του σχηματισμού A2b σε τριαξονική δοκιμή με $\sigma_3=500\text{kPa}$ και ενεργές παραμέτρους αντοχής.

Η αστράγγιστη αντοχή του εδάφους που υπολογίζεται με ενεργές παραμέτρους αντοχής για τα μοντέλα HSsmall και HS είναι σημαντικά μικρότερη από την πραγματική. Συγκεκριμένα έχοντας $c_u = \frac{q_f}{2}$ βρίσκεται η αστράγγιστη αντοχή του εδάφους, που προσομοιώνεται με το μοντέλο HSsmall με πλευρική πίεση 500kPa ίση με 231,5kPa, ενώ με το μοντέλο HS ίση με 228kPa. Στις πρώτες βαθμίδες φόρτισης η αντοχή του εδάφους που προσομοιώνεται με το μοντέλο HSsmall είναι ακόμα μεγαλύτερη από αυτή του HS. Όσον αφορά την αστράγγιστη αντοχή του εδάφους, κάνοντας χρήση του μοντέλου MC με ενεργές παραμέτρους αντοχής, βρίσκεται ίση με 320kPa και είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αντοχή του εδάφους με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής στην ίδια πλευρική πίεση. Από τα παραπάνω παρατηρείται ότι κάνοντας χρήση του καταστατικού μοντέλου MC με ενεργές παραμέτρους αντοχής επιτυγχάνεται καλύτερος υπολογισμός της αστράγγιστης αντοχής του εδάφους.

Στο Γράφημα 5.3-2 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του σχηματισμού A2c κάνοντας χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής σε τριαξονική δοκιμή με πλευρική πίεση 500kPa για κάθε καταστατικό μοντέλο.



Γράφημα 5.3-2: Συμπεριφορά του σχηματισμού A2c σε τριαξονική δοκιμή με $\sigma_3=500\text{kPa}$ και ενεργές παραμέτρους αντοχής.

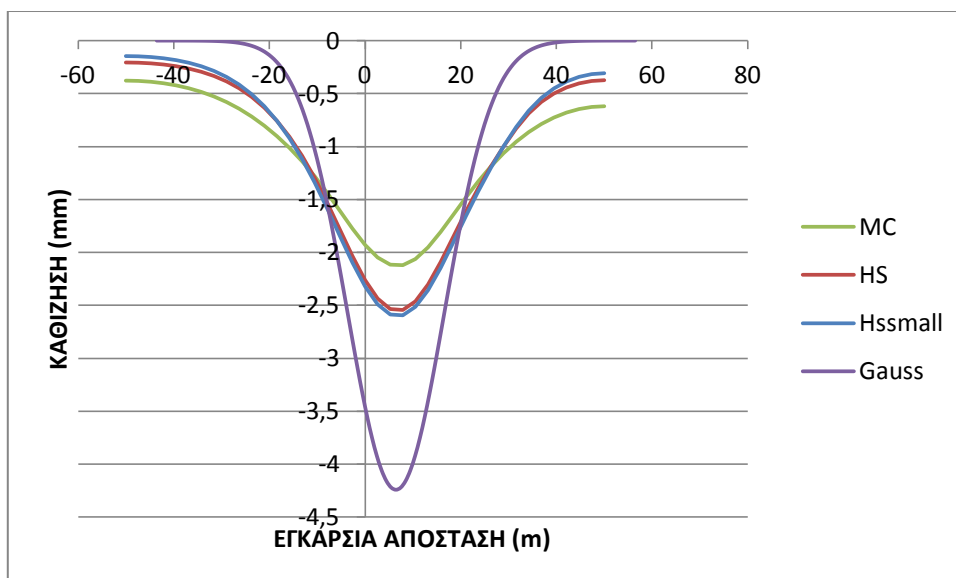
Ομοίως με την ενότητα A2b και στην ενότητα A2c τα μοντέλα HSsmall και HS με ενεργές παραμέτρους αντοχής υπολογίζουν σημαντικά μικρότερη αστράγγιστη αντοχή ενώ το καταστατικό μοντέλο MC προσεγγίζει σε σημαντικό βαθμό την αστράγγιστη αντοχή του εδάφους σε πλευρική πίεση 500kPa. Αναλυτικά, η αστράγγιστη αντοχή του εδάφους όταν αυτό προσομοιώνεται με το μοντέλο HSsmall, με ενεργές παραμέτρους αντοχής και για πλευρική πίεση 500kPa, είναι 222,5kPa. Για τα μοντέλα HS και MC βρίσκεται αντίστοιχα 223,5kPa και 326,5kPa. Παρατηρείται ότι για την ενότητα αυτή η μέγιστη αστράγγιστη αντοχή υπολογίζεται μεγαλύτερη με το καταστατικό μοντέλο HS σε σχέση με το HSsmall.

5.3.1. Τομή Καμάρα.

Η γεωμετρία της τομής παραμένει ίδια με αυτή του κεφαλαίου 5.2.1, με μόνη διαφορά την χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής αντί για αστράγγιστων. Η απώλεια εδαφικού όγκου και για τα δύο TBM είναι 0,35%.

5.3.1.1. Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

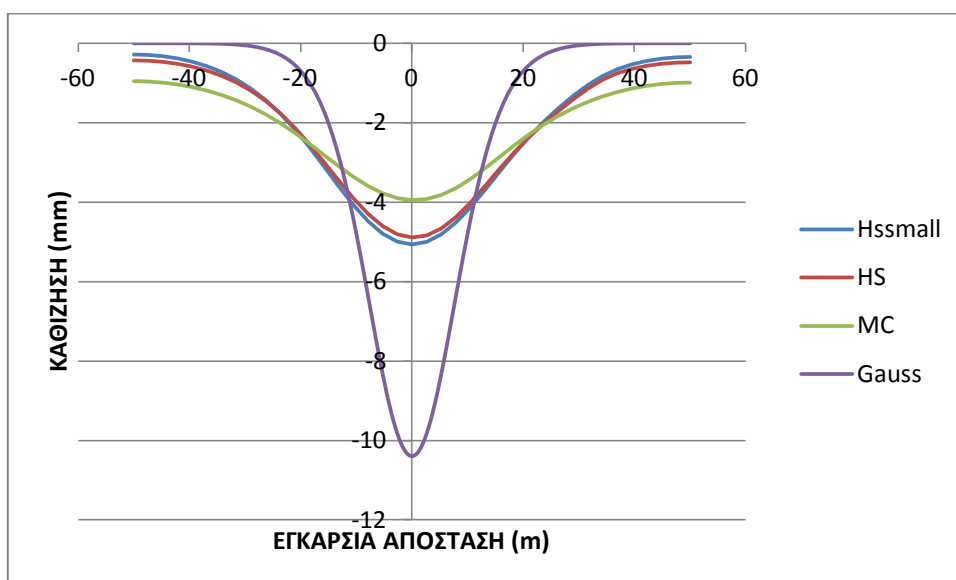
Οι καθιζήσεις που υπολογίστηκαν από τις αναλύσεις με ενεργές παραμέτρους αντοχής και για τα τρία καταστατικά μοντέλα μετά την διέλευση του TBM1 φαίνονται στο Γράφημα 5.3-3. Στο ίδιο γράφημα εμφανίζεται και η κατανομή Gauss στην ίδια θέση την ίδια χρονική στιγμή.



Γράφημα 5.3-3: Καθιζήσεις στην τομή ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM1 για τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής και κατανομή Gauss την ίδια χρονική στιγμή.

Κανένα καταστατικό μοντέλο δεν δύναται να προσεγγίσει την κατανομή Gauss. Σε αυτού του τύπου την ανάλυση, όπως παρατηρήθηκε και στις αναλύσεις με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής, οι καθιζήσεις που υπολογίζονται με τα μοντέλα HS και HSsmall είναι παρεμφερείς, ενώ το μοντέλο MC παρουσιάζει μικρότερη τιμή μέγιστης καθίζησης και μεγαλύτερο εύρος.

Ακολουθεί το ίδιο γράφημα κατασκευασμένο μετά την διέλευση του TBM 2.

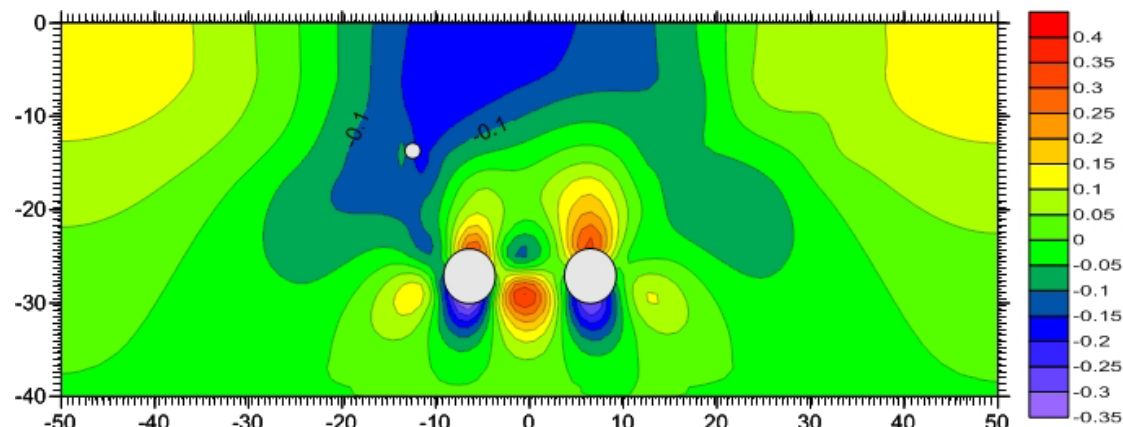


Γράφημα 5.3-4: Καθιζήσεις στην τομή ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας του TBM2 για τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής και κατανομή Gauss την ίδια χρονική στιγμή.

Και μετά την διάνοιξη της σήραγγας του TBM2 κανένα καταστατικό μοντέλο δεν προσεγγίζει την μέγιστη τιμή της κατανομής Gauss. Τα καταστατικά μοντέλα HSsmall και HS έχουν υπολογίσει πρακτικά την ίδια κατανομή των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Αντίθετα, το μοντέλο MC έχει υπολογίσει και πάλι σημαντικά μικρότερες και μεγαλύτερου εύρους καθιζήσεις.

5.3.1.2. Κατανομή μετακινήσεων

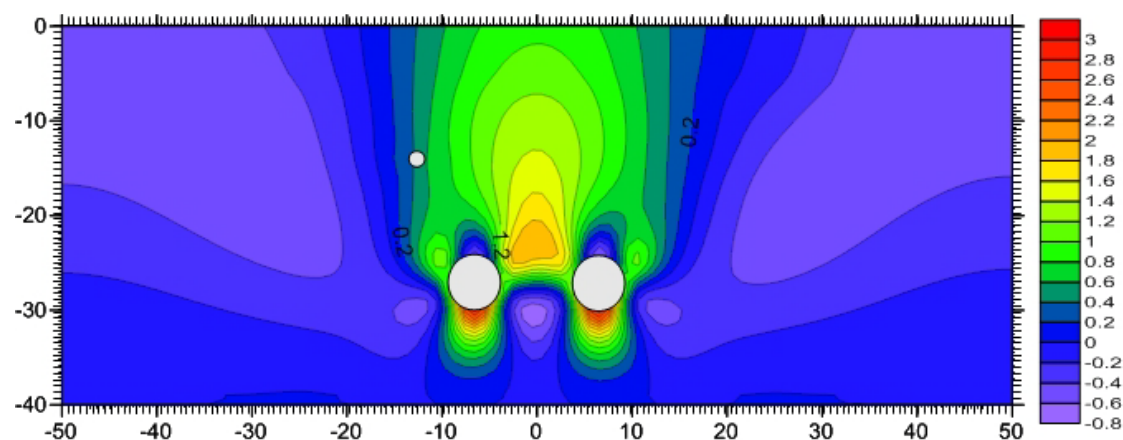
Συγκρίνοντας την κατανομή των κατακόρυφων μετακινήσεων όπως αυτές υπολογίστηκαν με τα καταστατικά μοντέλα HSsmall και HS, διαπιστώνεται ότι οι διαφορές τους είναι εξαιρετικά μικρές.



Εικόνα 5.3-1: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετακινήσεων των HSsmall και HS (Undrained A).

Οι σημαντικότερες διαφορές ανάμεσα στα καταστατικά μοντέλα HSsmall και HS εντοπίζονται στην περιφέρεια των εκσκαφών. Στην οροφή των σηράγγων το μοντέλο HS έχει υπολογίσει κατά 0,35mm (HSsmall=-1.04mm και HS=-1.397 mm) μεγαλύτερες μετατοπίσεις, που ως ποσοστό βρίσκεται 33,86%. Στο δάπεδο των σηράγγων η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στα δύο αυτά καταστατικά μοντέλα είναι 0,343mm (HSsmall=-3.22 mm και HS=-3.57 mm), όπου και πάλι το μοντέλο HS έχει υπολογίσει κατά 10.62% μεγαλύτερη μετατόπιση. Οι μεγαλύτερες αυτές μετατοπίσεις οφείλονται στην μικρότερη αντοχή που παρουσιάζει το έδαφος όταν προσομοιώνεται με το καταστατικό μοντέλο HS.

Η διαφορά ανάμεσα στα μοντέλα HS και MC υπολογίζεται στην συνέχεια.



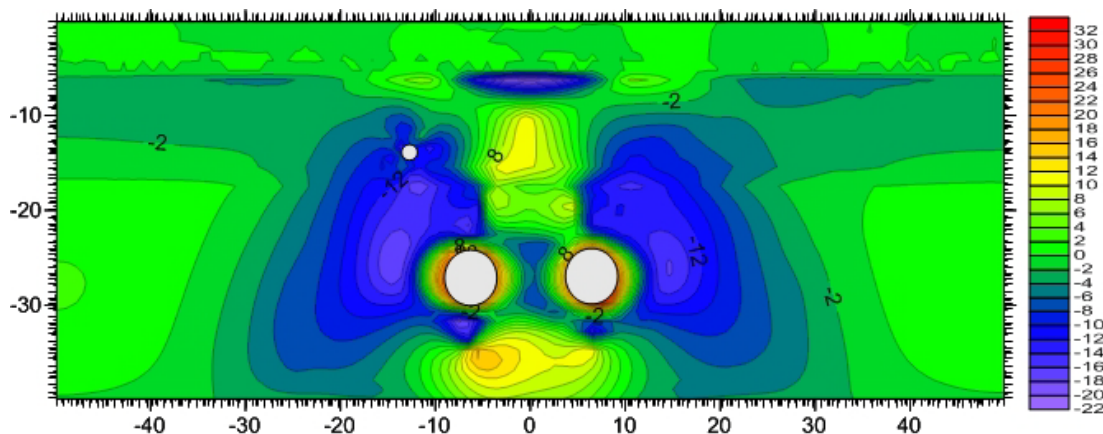
Εικόνα 5.3-2: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετακινήσεων των MC και HS(Undrained A).

Η αστράγγιστη αντοχή του εδάφους όταν γίνεται χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχή, όπως έχει ήδη διαπιστωθεί, είναι σημαντικά μεγαλύτερη όταν γίνεται χρήση του καταστατικού μοντέλου MC σε σχέση με την αστράγγιστη αντοχή που παρουσιάζει με το μοντέλο HS. Η σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή οδηγεί στην συμπεριφορά του μοντέλου MC όπως αυτή έχει

περιγραφεί στις αναλύσεις με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής. Οι μεγαλύτερες διαφορές που εντοπίζονται στο δάπεδο και την οροφή των σηράγγων είναι αντίστοιχα 2,92mm (MC=6.43 mm, HS=3.51 mm) ή 45,44% και 0.73mm (MC=-1.48 mm, HS=-0.75 mm) ή 49,19%.

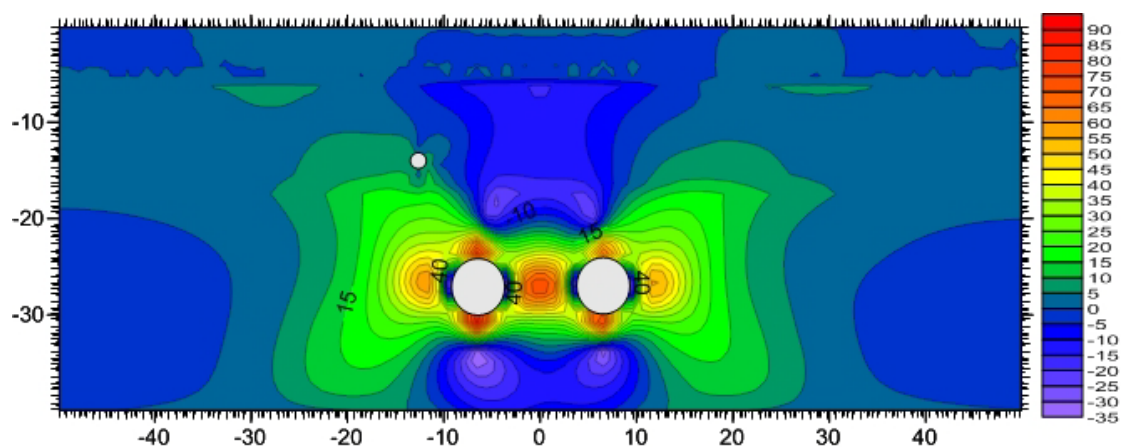
5.3.1.3. Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1).

Η διαφορά των μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων μεταξύ των μοντέλων HSsmall και HS φαίνεται στην Εικόνα 5.3-3. Σε μία λεπτή ζώνη στην περιφέρεια των εκσκαφών οι κύριες ενεργές τάσεις που έχουν υπολογιστεί από το μοντέλο HS είναι μεγαλύτερες, με μέγιστη διαφορά τα 26,65 kN/m² (HSsmall=-428.49 kN/m², HS=-455.15 kN/m²), που ως ποσοστό μεταφράζεται σε 6,22%. Το γεγονός αυτό δεν μπορεί να εξηγηθεί από τις διαφορές των αστράγγιστων αντοχών που υπολογίζονται με τα δύο αυτά καταστατικά μοντέλα, δεδομένου ότι η αντοχή του εδάφους που προσομοιώνεται με το καταστατικό μοντέλο HSsmall είναι γενικά ελαφρώς μεγαλύτερη. Εκτός της ζώνης αυτής και κοντά στις εκσκαφές το HSsmall έχει υπολογίσει μεγαλύτερες κύριες ενεργές τάσεις, με την μεγαλύτερη διαφορά να είναι 21,71 (HSsmall=-99.47 kN/m², HS=-77.75 kN/m²) ή 21,83%. Για την εξήγηση του φαινομένου στην περιφέρεια των εκσκαφών απαραίτητη είναι η διερεύνηση των ελαστικών παραμέτρων που υπολογίζονται από τα δύο αυτά καταστατικά μοντέλα, που γίνεται στην συνέχεια.



Εικόνα 5.3-3 : Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση KAMAPA μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.

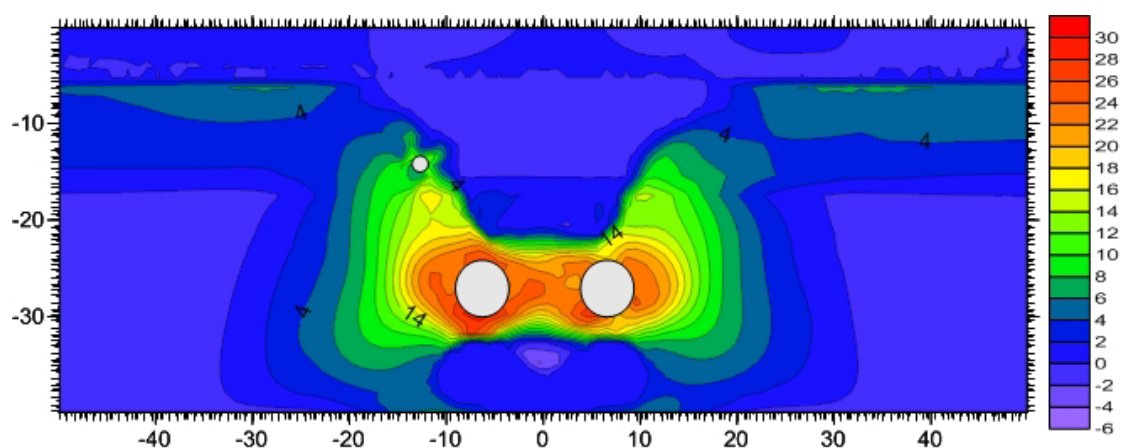
Στην Εικόνα 5.3-4 που ακολουθεί εμφανίζονται οι διαφορές των κύριων ενεργών τάσεων ανάμεσα στα καταστατικά μοντέλα HS και MC. Οι διαφορές τους είναι σημαντικές, με το μοντέλο HS να υπολογίζει μεγαλύτερα φορτία στο δάπεδο και την οροφή των σηράγγων και μικρότερα στις παρειές. Η μεγαλύτερη διαφορά που εντοπίζεται στο δάπεδο και την οροφή των σηράγγων είναι 92,15 kN/m² (MC=370.27 kN/m² και HS=-462.45 kN/m²), όπου οι τάσεις που υπολογίζονται από το μοντέλο HS είναι μεγαλύτερες κατά 24,88%. Στις παρειές των σηράγγων η μεγαλύτερη διαφορά είναι 38,9 kN/m² (MC=-394.27 kN/m², HS=-355.37 kN/m²), όπου το μοντέλο MC έχει υπολογίσει κατά 9,86% μεγαλύτερη τάση. Η διαφορά αυτή ανάμεσα στα δύο αυτά καταστατικά μοντέλα, έχει ήδη εντοπιστεί που οφείλεται.



Εικόνα 5.3-4: Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.

5.3.1.4. Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3).

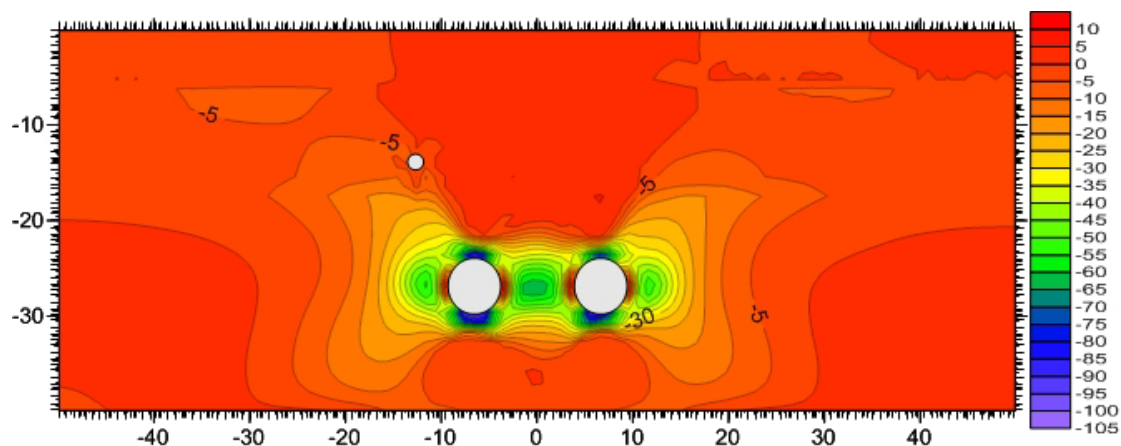
Οι διαφορές στις ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις ανάμεσα στα μοντέλα HSsmall και HS με ενεργές παραμέτρους αντοχής φαίνονται στην Εικόνα 5.3-5. Οι ελάχιστες κύριες τάσεις που έχουν υπολογιστεί από το μοντέλο HS είναι μεγαλύτερες από αυτές που έχουν υπολογιστεί από το μοντέλο HSsmall στην περιφέρεια των εκσκαφών. Η μεγαλύτερη διαφορά τους είναι $29,96 \text{ kN/m}^2$ ($\text{HSsmall} = -110,9 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS} = -140,86 \text{ kN/m}^2$), που ως ποσοστό μεταφράζεται σε 27,01%. Με την αύξηση της απόστασης από τις εκσκαφές η διαφορά τους μειώνεται μέχρις ότου το μοντέλο HSsmall να υπολογίζει μεγαλύτερη ελάχιστη κύρια τάση κατά $4,56 \text{ kN/m}^2$ ($\text{HSsmall} = -269,95 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS} = -265,38 \text{ kN/m}^2$) ή 1,6%. Η συμπεριφορά αυτή ανάμεσα σε αυτά τα καταστατικά μοντέλα έχει ήδη εξηγηθεί.



Εικόνα 5.3-5 : Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση ΚΑΜΑΡΑ μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.

Για τα μοντέλα HS και MC παρατηρείται ότι οι ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις στην οροφή και το δάπεδο των σηράγγων είναι μεγαλύτερες με το μοντέλο MC, κατά 108 kN/m^2 ($\text{MC} = -239,37 \text{ kN/m}^2$, $\text{HS} = -131,35 \text{ kN/m}^2$) ή 45%. Αντίθετα, στις παρειές είναι μικρότερες του MC κατά $5,55 \text{ kN/m}^2$ ($\text{MC} = -144,38 \text{ kN/m}^2$, $\text{HS} = -149,94 \text{ kN/m}^2$) ή 3,8%. Η ανισότροπη αυτή

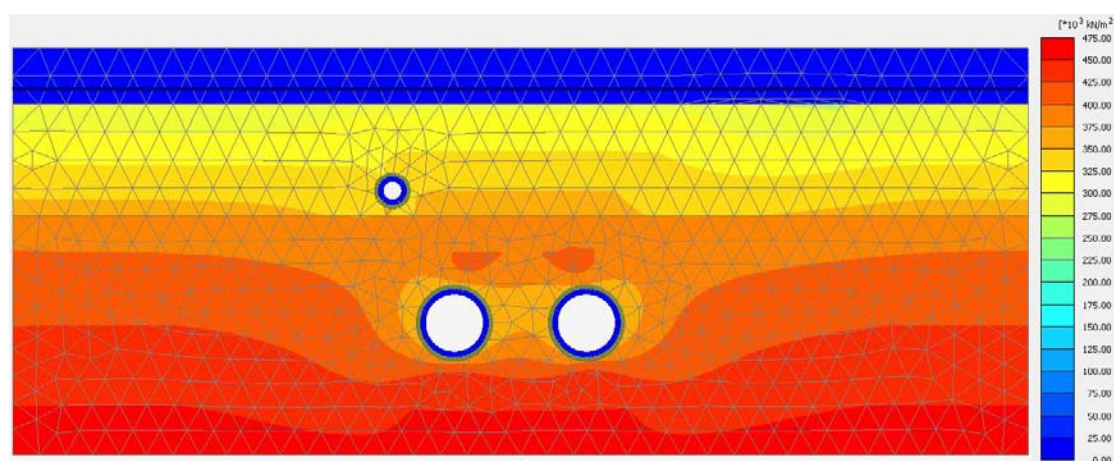
κατανομή των ελάχιστων κύριων τάσεων με το μοντέλο MC θα επιβαρύνει σημαντικά την υποστήριξη των σηράγγων.



Εικόνα 5.3-6: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση KAMARA μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.

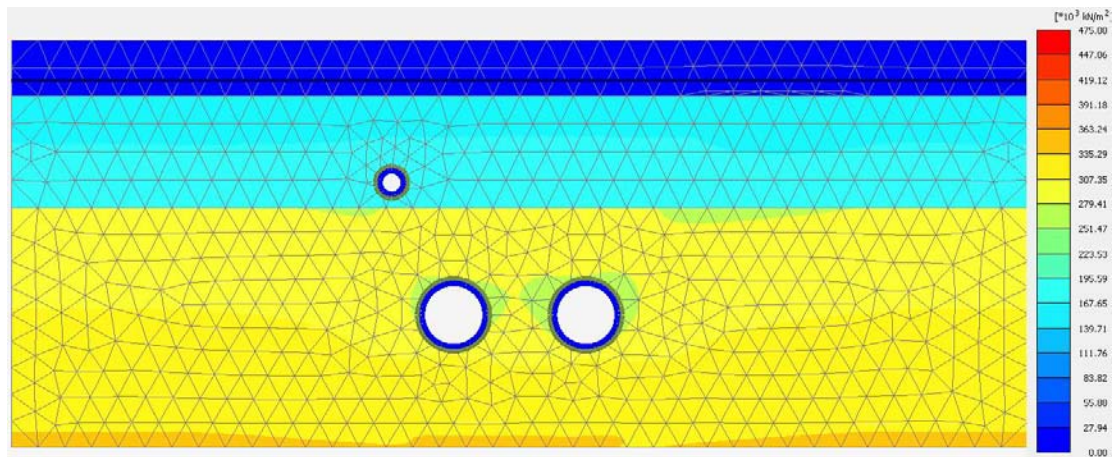
5.3.1.5. Κατανομή ελαστικών παραμέτρων.

Όπως έχει αναφερθεί τα μοντέλα HSsmall και HS, όταν γίνεται επίλυση με ενεργές παραμέτρους αντοχής μεταβάλουν τις παραμέτρους ελαστικότητας ανάλογα με την βαθμίδα φόρτισης. Οι τελικές ελαστικές παράμετροι, κάνοντας επίλυση με το μοντέλο HSsmall, φαίνονται στην Εικόνα 5.3-7. Παρατηρείται η απομείωση των ελαστικών παραμέτρων στην περιφέρεια των εκσκαφών.



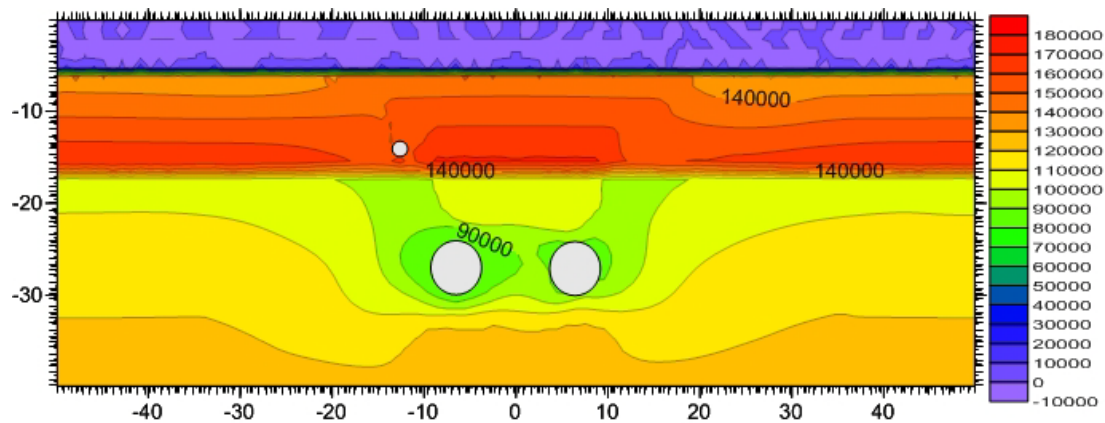
Εικόνα 5.3-7: Μεταβολή ελαστικών παραμέτρων με το μοντέλο HSsmall στην τομή KAMARA

Κάνοντας χρήση του μοντέλου HS η κατανομή του μέτρου ελαστικότητας κατά την τελική φάση κατασκευής φαίνεται στην Εικόνα 5.3-8



Εικόνα 5.3-8: Μεταβολή ελαστικών παραμέτρων με το μοντέλο HS στην τομή KAMARA

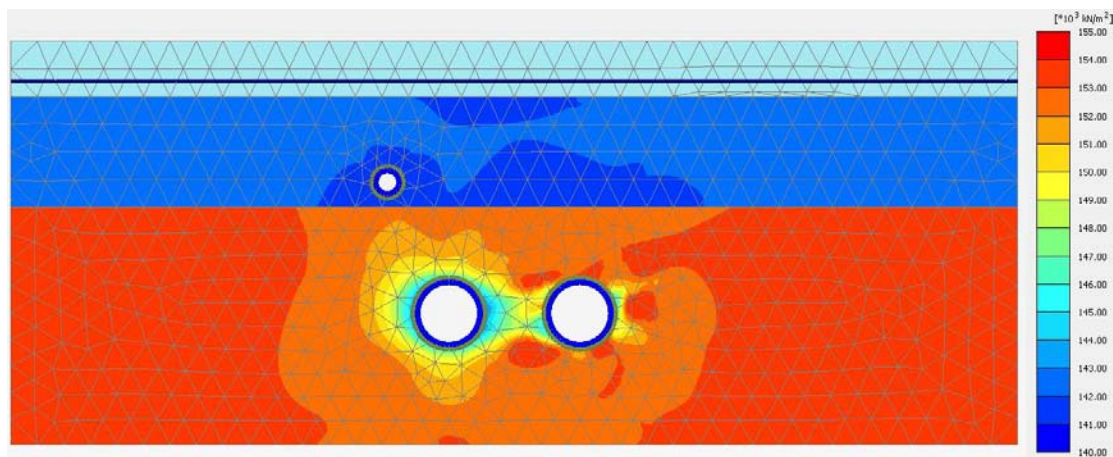
Η διαφορά των τελικών μέτρων ελαστικότητας που έχουν υπολογιστεί από τα μοντέλα HSsmall και HS ακολουθούν στην Εικόνα 5.3-9. Η μέγιστη διαφορά είναι 173678 kN/m^2 (HSsmall= -364099 kN/m^2 και HS= -190420 kN/m^2), που ως ποσοστό μεταφράζεται σε 47,7%.



Εικόνα 5.3-9: Διαφορά τελικών ελαστικών παραμέτρων των μοντέλων HSsmall και HS στην θέση KAMARA

Είναι φανερό ότι το μοντέλο HSsmall έχει υπολογίσει σημαντικά αυξημένα μέτρα ελαστικότητας ειδικά στην γεωτεχνική ενότητα A2b.

Η μεταβολή του μέτρου διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις στην τομή αυτή φαίνεται στην Εικόνα 5.3-10.

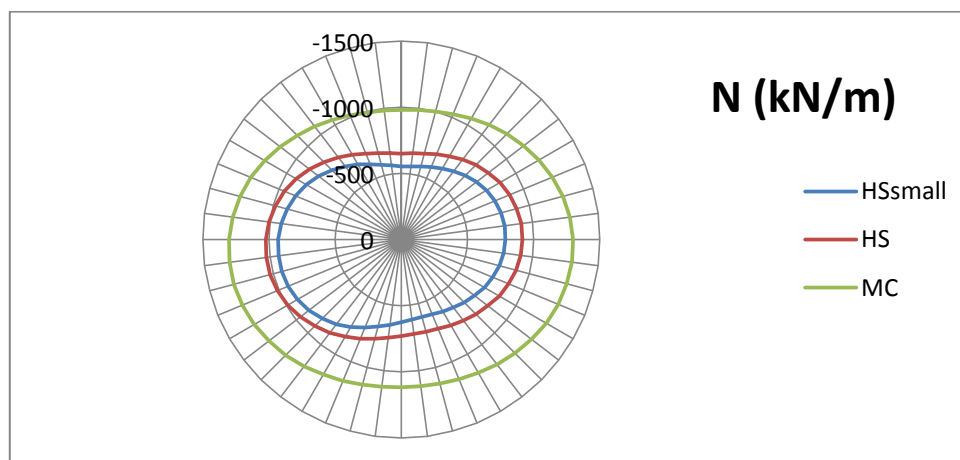


Εικόνα 5.3-10: Μεταβολή του μέτρου διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις στην θέση Καμάρα με ενεργές παραμέτρους αντοχής με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.

Από την εικόνα αυτή παρατηρείται η απομείωση του μέτρου διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις στην περιφέρεια των εκσκαφών, όπως αυτή υπολογίζεται με το καταστατικό μοντέλο HSsmall. Την συμπεριφορά αυτή του εδάφους σε μικρές παραμορφώσεις δεν μπορεί να την προσομοιώσει το καταστατικό μοντέλο HS. Στην διαφορά τους αυτή έγκειται και ο υπολογισμός μεγαλύτερων μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων στην περιφέρεια των εκσκαφών με το μοντέλο HS.

5.3.1.6. Φορτία υποστήριξης.

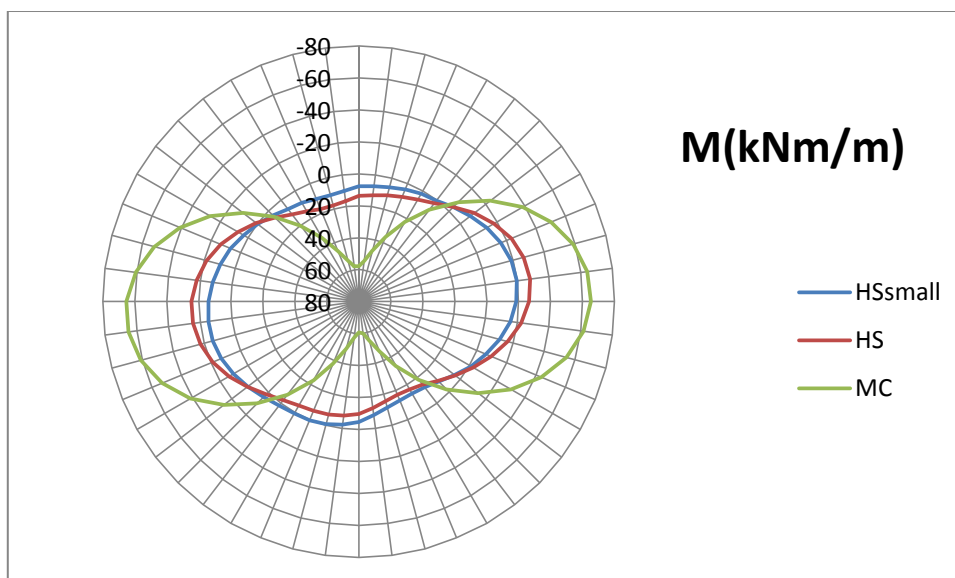
Ως τώρα εντοπίστηκαν οι διαφορές των τασικών πεδίων. Η κατανομή των τάσεων αυτών, και κυρίως της ελάχιστης κύριας ενεργής τάσης, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία φορτίων στην επένδυση. Τα αξονικά φορτία στην επένδυση της σήραγγας του TBM1, όπως αυτά έχουν υπολογιστεί και με τα τρία καταστατικά μοντέλα με χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής φαίνονται στο Γράφημα 5.3-5.



Γράφημα 5.3-5: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.

Τα αξονικά φορτία με το μοντέλο MC έχουν σημαντικά μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα.

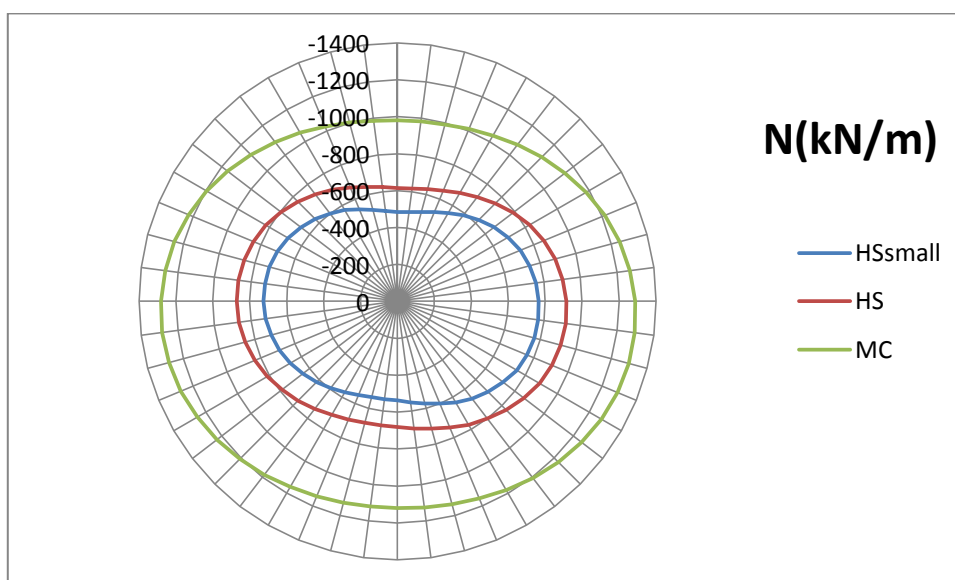
Η κατανομή των ροπών κάμψης στην ίδια θέση δίνονται στο Γράφημα 5.3-6.



Γράφημα 5.3-6 :Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.

Όπως έχει αναφερθεί, λόγω της κατανομής των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στην περιφέρεια των εκσκαφών, με το μοντέλο MC δημιουργούνται σημαντικές ροπές.

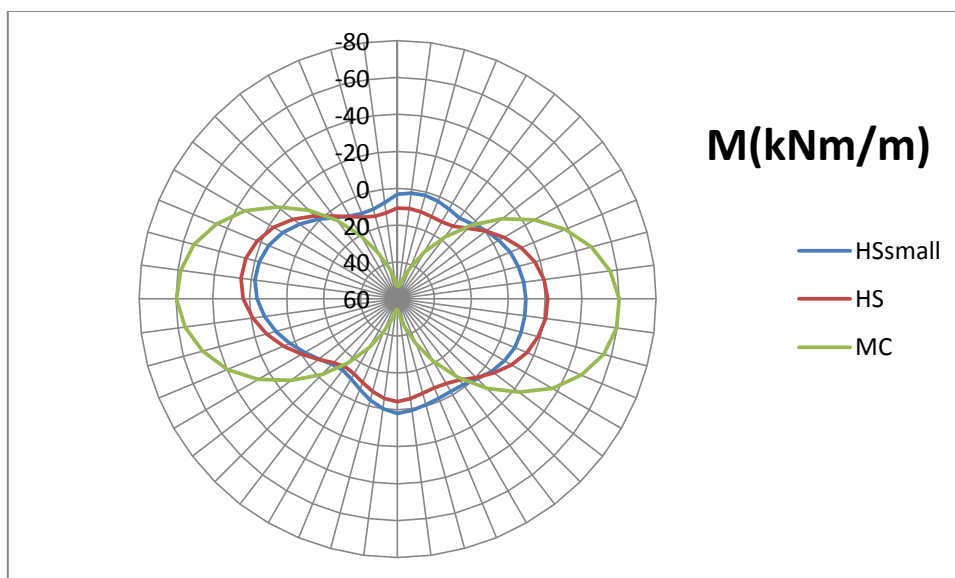
Τα αξονικά φορτία της επένδυσης της σήραγγας του TBM2 στην θέση Καμάρα, φαίνονται στο Γράφημα 5.3-7



Γράφημα 5.3-7: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.

Και σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο MC υπολογίζει σημαντικά μεγαλύτερα φορτία στην επένδυση.

Στο Γράφημα 5.3-8 φαίνονται οι ροπές κάμψης που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 και για τα τρία καταστατικά μοντέλα.



Γράφημα 5.3-8: Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.

Λόγω της κατανομής των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στην περιφέρεια της εκσκαφής της σήραγγας του TBM2 από το μοντέλο MC και σε αυτή την περίπτωση αναπτύσσονται σημαντικές ροπές.

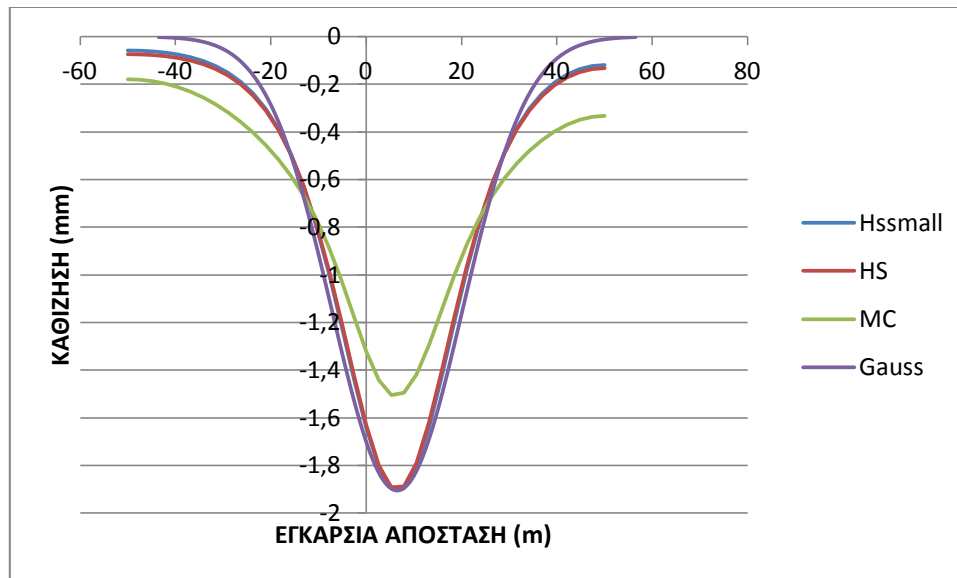
5.3.2. Τομή Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς.

Η γεωμετρία της τομής παραμένει ίδια με αυτή του κεφαλαίου 5.2.2, με μόνη διαφορά την χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής αντί για αστράγγιστων. Η απώλεια εδαφικού όγκου και σε αυτή την περίπτωση για το TBM1 είναι 0,21% ενώ για το TBM2 0,48%

5.3.2.1. Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, όπως προέκυψαν από τους υπολογισμούς στην θέση CHPD, με ενεργές παραμέτρους αντοχής και για τα τρία καταστατικά μοντέλα παρατίθενται στην συνέχεια.

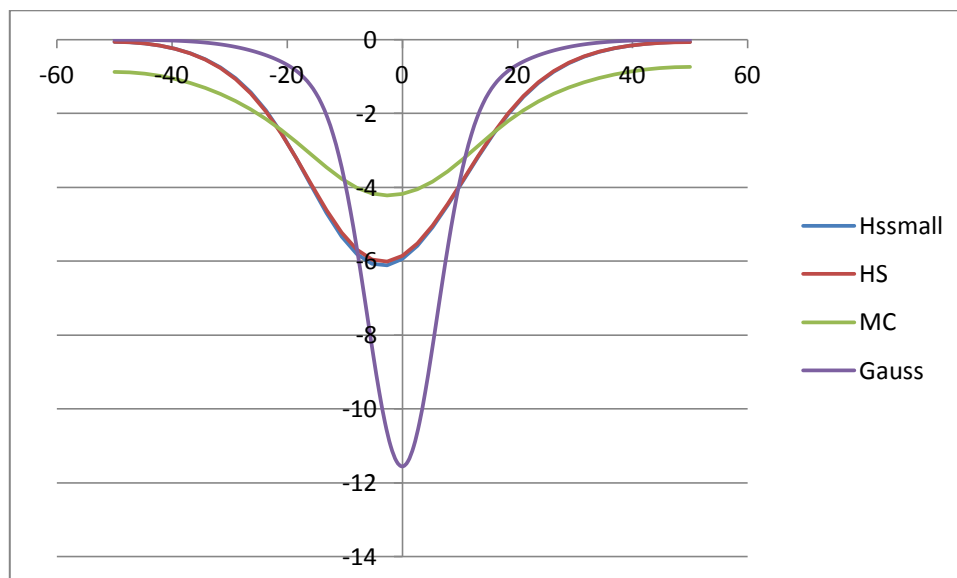
Μετά το πέρας του TBM1 και με $V_L = 0.21\%$, τα καταστατικά μοντέλα HSsmall και HS, προσαρμόστηκαν ικανοποιητικά στην κατανομή Gauss που έχει υπολογιστεί σε αυτή τη θέση (Γράφημα 5.3-9).



Γράφημα 5.3-9: Καθιζήσεις στην τομή CHPD μετά το πέρασμα του TBM1 για τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής και κατανομή Gauss την ίδια χρονική στιγμή.

Το μοντέλο MC κατέγραψε μικρότερες μετακινήσεις για τους λόγους που ήδη έχουν αναφερθεί.

Μετά το πέρασμα του TBM2, με το VL που έχει υπολογιστεί (0,48%), τα αποτελέσματα των υπολογισμών του κάθε καταστατικού μοντέλου φαίνονται στο Γράφημα 5.3-10. Η κατανομή Gauss δεν προσεγγίζεται σε αυτή την περίπτωση από κανένα καταστατικό μοντέλο.

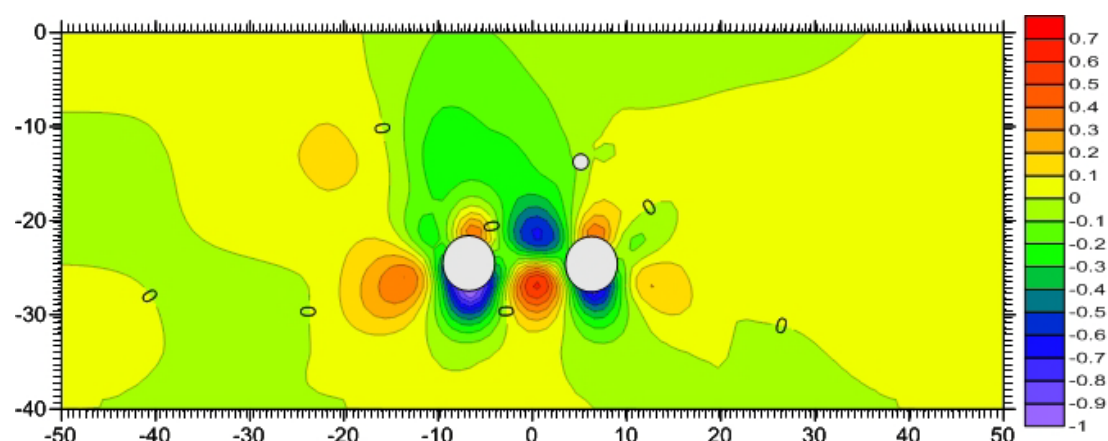


Γράφημα 5.3-10: Καθιζήσεις στην τομή CHPD μετά το πέρασμα του TBM2 για τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής και κατανομή Gauss την ίδια χρονική στιγμή.

Τα αποτελέσματα των μοντέλων Hssmall και HS είναι πρακτικά ίδια, ενώ το MC υπολογίζει και σε αυτή την περίπτωση μικρότερες μετακινήσεις.

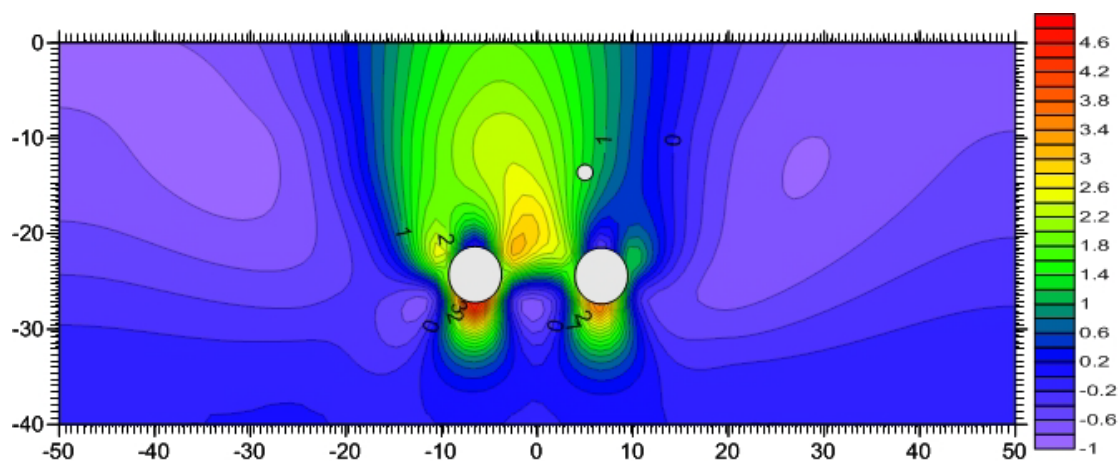
5.3.2.2. Κατανομή μετακινήσεων

Η διαφορά στην κατανομή των μετακινήσεων που υπολογίστηκαν με ενεργές παραμέτρους αντοχής, ανάμεσα στα μοντέλα HSsmall και HS φαίνονται στην Εικόνα 5.3-11. Η διαφορά των μετακινήσεων στην τομή αυτή, είναι σημαντικά αυξημένη σε σχέση με την διαφορά των μοντέλων HSsmall και HS στην τομή στη θέση KAMAPA (Εικόνα 5.3-1). Το γεγονός αυτό εξηγείται από την ικανότητα των μοντέλων να επηρεάζουν τις ελαστικές παραμέτρους του εδάφους, ανάλογα με την βαθμίδα φόρτισης, καθώς γίνεται χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής. Η μεγαλύτερη διαφορά στο δάπεδο των σιράγγων είναι 0,99 mm (HSsmall=3.99mm και HS=4.99 KN/m²), όπου και πάλι το μοντέλο HS έχει υπολογίσει κατά 24,99% μεγαλύτερη μετατόπιση στο δάπεδο των σιράγγων. Άλλη σημαντική διαφορά που εντοπίζεται είναι 0,62 mm (HSsmall=-0.642mm, HS=-1.27 KN/m²), όπου οι μετατοπίσεις που υπολογίζονται από το μοντέλο HS είναι μεγαλύτερες κατά 97,62% στη θέση ανάμεσα στις σήραγγες.



Εικόνα 5.3-11: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετατοπίσεων με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση CHPD ανάμεσα στα μοντέλα HSsmall και HS.

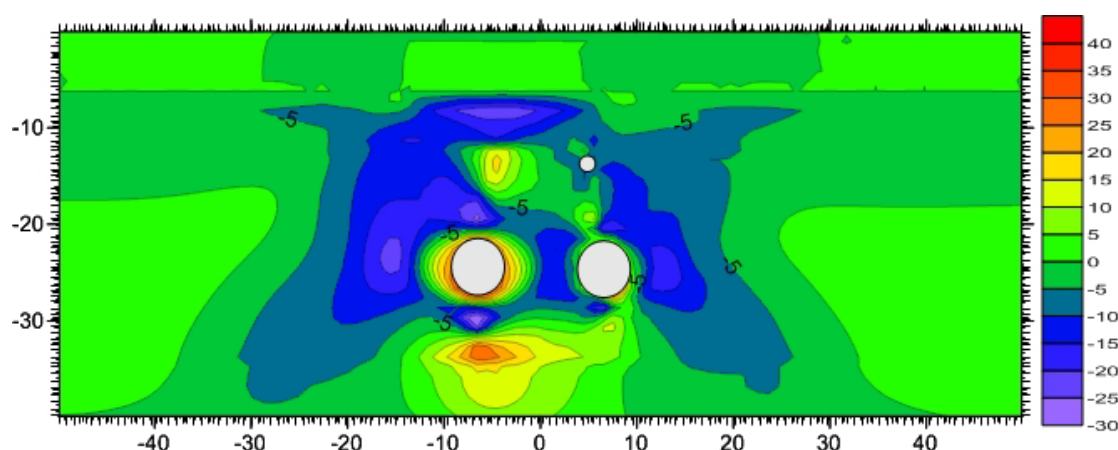
Στην Εικόνα 5.3-12, υπολογίζεται η αντίστοιχη μεταβολή, ανάμεσα στα μοντέλα MC και HS. Οι μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους του μοντέλου HS, είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές του μοντέλου MC. Η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στα δύο αυτά καταστατικά μοντέλα είναι 4,72mm (MC=9.71mm, HS=4.99 KN/m²), όπου οι μετατοπίσεις που υπολογίζονται από το μοντέλο MC είναι μεγαλύτερες κατά 48,62% στο δάπεδο των σιράγγων. Άλλη σημαντική διαφορά είναι 0,906 mm (MC=-1.09mm και HS=-0.19 mm), όπου και πάλι το μοντέλο MC έχει υπολογίσει κατά 82,52% μεγαλύτερη μετατόπιση στην οροφή. Γενικά, το μοντέλο MC υπολογίζει μεγαλύτερες μετατοπίσεις στην περιφέρεια των εκσκαφών, λόγω της σημαντικά μεγαλύτερης συσσώρευσης τάσεων, αλλά μικρότερες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, λόγω της μεγαλύτερης αντοχής του. Η συμπεριφορά αυτή του καταστατικού μοντέλου MC έχει αναλυθεί εκτενέστερα σε προηγούμενες αναλύσεις.



Εικόνα 5.3-12: Διαφορά κατανομής κατακόρυφων μετατοπίσεων με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση CHPD ανάμεσα στα μοντέλα MC και HS.

5.3.2.3. Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1).

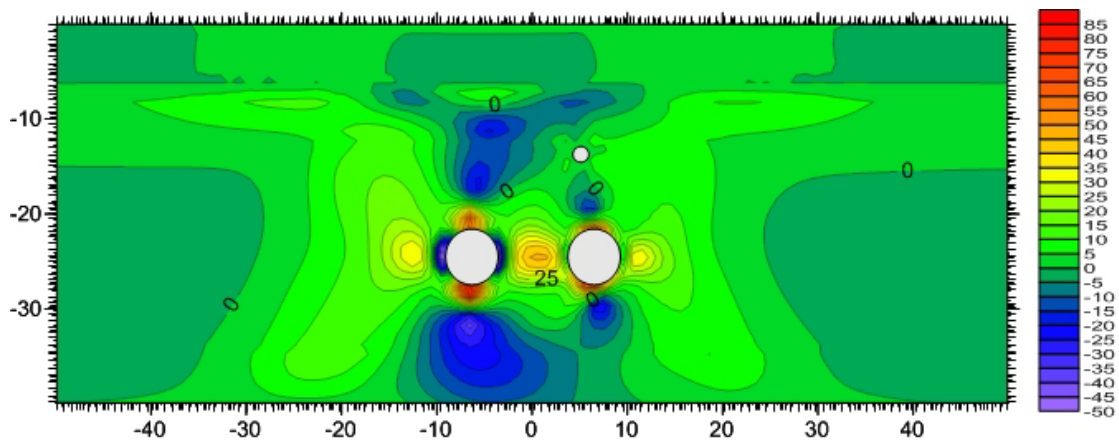
Η διαφορά των μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων μεταξύ των μοντέλων HSsmall και HS, φαίνεται στην Εικόνα 5.3-13. Σε μία λεπτή ζώνη στην περιφέρεια των εκσκαφών οι κύριες ενεργές τάσεις, που έχουν υπολογιστεί από το μοντέλο HS, είναι μεγαλύτερες κατά $29,73 \text{ kN/m}^2$ ($\text{HSsmall} = -316,35 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS} = -346 \text{ kN/m}^2$) ή $9,39\%$. Το γεγονός αυτό, όπως διαπιστώθηκε, οφείλεται στην απομείωση του μέτρου διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις κάνοντας χρήση του καταστατικού μοντέλου HSsmall. Εκτός της ζώνης αυτής και κοντά στις εκσκαφές το HSsmall έχει υπολογίσει μεγαλύτερες κύριες ενεργές τάσεις κατά $29,8 \text{ kN/m}^2$ ($\text{HSsmall} = -368 \text{ kN/m}^2$, $\text{HS} = -338 \text{ kN/m}^2$) ή $8,09\%$, λόγω της ελαφρώς μεγαλύτερης αντοχής του εδάφους που προσομοιώνει. Αναλυτικότερη περιγραφή του φαινομένου αυτού έχει προηγηθεί.



Εικόνα 5.3-13 : Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση CHPD μετά το πέρας και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.

Στην Εικόνα 5.3-14 που ακολουθεί εμφανίζονται οι διαφορές των κύριων ενεργών τάσεων ανάμεσα στα καταστατικά μοντέλα HS και MC. Οι διαφορές τους είναι σημαντικές, με το μοντέλο HS να υπολογίζει μεγαλύτερα φορτία στο δάπεδο και την οροφή των σηράγγων κατά $82,8 \text{ kN/m}^2$ ($\text{MC} = -312,27 \text{ kN/m}^2$, $\text{HS} = -395 \text{ kN/m}^2$) ή $26,52\%$ και μικρότερα στις παρείees

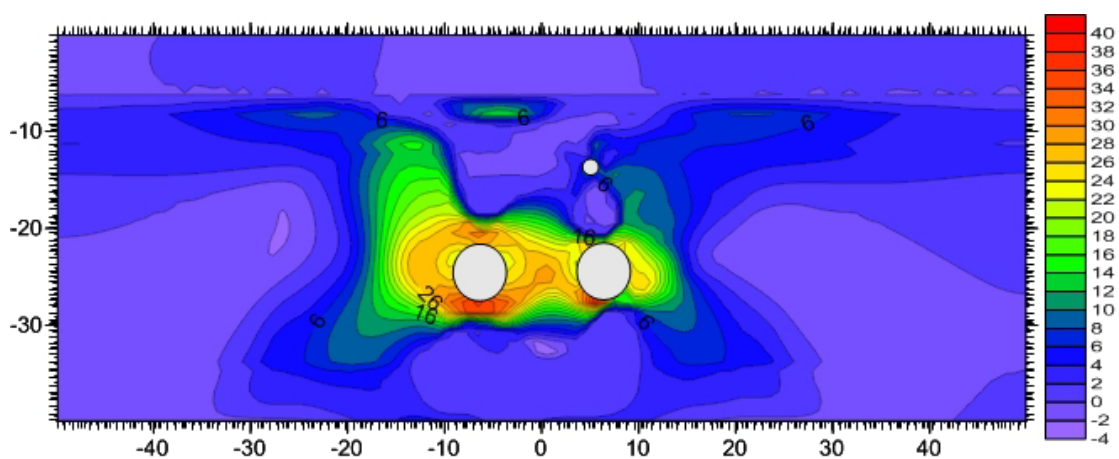
κατά $44,45 \text{ kN/m}^2$ ($MC=-413.57 \text{ kN/m}^2$, $HS=-369.11 \text{ kN/m}^2$) ή 10,74%. Η διαφορά αυτή στην συμπεριφορά των καταστατικών μοντέλων MC και HS έγκειται στην ελαστική συμπεριφορά του καταστατικού μοντέλου MC, όπως έχει ήδη περιγραφεί.



Εικόνα 5.3-14: Διαφορά κατανομής μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση CHPD μετά το πέρασμα και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.

5.3.2.4. Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3).

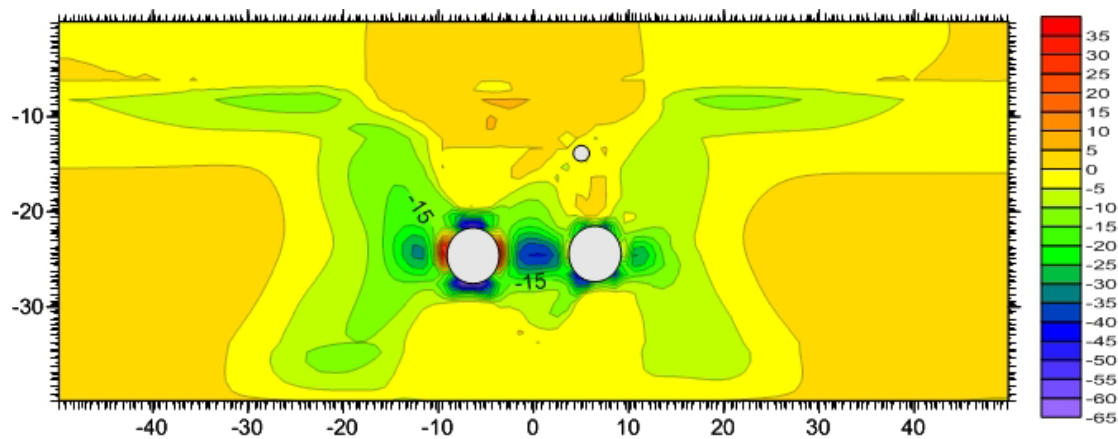
Οι διαφορές στις ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις ανάμεσα στα μοντέλα HSsmall και HS με ενεργές παραμέτρους αντοχής φαίνονται στην Εικόνα 5.3-15. Οι ελάχιστες κύριες τάσεις που έχουν υπολογιστεί από το μοντέλο HS είναι μεγαλύτερες από αυτές που έχουν υπολογιστεί από το μοντέλο HSsmall στην περιφέρεια των εκσκαφών κατά $41,6 \text{ kN/m}^2$ ($HS_{small}=-118.86 \text{ kN/m}^2$, $HS=-160.46 \text{ kN/m}^2$) ή 35%. Η διαφορά αυτή ατονεί μέχρι το μοντέλο HSsmall να αποκτήσει μεγαλύτερη τιμή κατά $4,79 \text{ kN/m}^2$ ($HS_{small}=-223.1 \text{ kN/m}^2$ και $HS=-218.32 \text{ kN/m}^2$) ή 2,14%. Η συμπεριφορά αυτή έχει ήδη διερευνηθεί.



Εικόνα 5.3-15: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση CHPD μετά το πέρασμα και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και HSsmall.

Για τα μοντέλα HS και MC παρατηρείται ότι οι ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις στην οροφή και το δάπεδο των σηράγγων είναι μεγαλύτερες με το μοντέλο MC, κατά $65,62 \text{ kN/m}^2$ ($MC=-119.16 \text{ kN/m}^2$, $HS=-127.5 \text{ kN/m}^2$) ή 33,97%. Αντίθετα στις παρειές είναι μικρότερες του MC

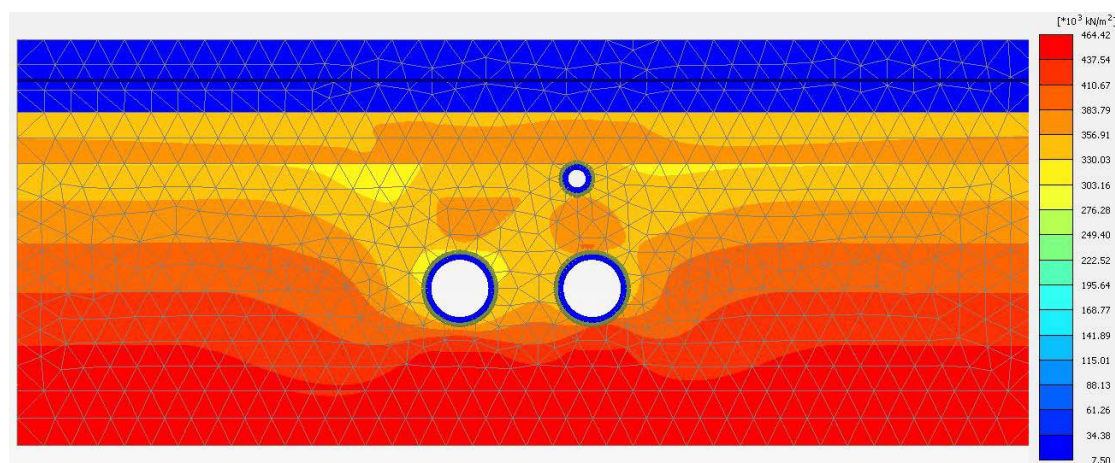
με τη διαφορά να είναι $33,53 \text{ kN/m}^2$ ($MC=-71.6 \text{ kN/m}^2$, $HS=-105.1 \text{ kN/m}^2$) ή 46%. Η κατανομή αυτή των ελάχιστων κύριων τάσεων με το μοντέλο MC, η πηγή της οποίας έχει εντοπιστεί, επιβαρύνει σημαντικά την υποστήριξη των σηράγγων.



Εικόνα 5.3-16: Διαφορά κατανομής ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ_3) με ενεργές παραμέτρους αντοχής στην θέση CHPD μετά το πέρασ και των δυο TBM για τα καταστατικά μοντέλα HS και MC.

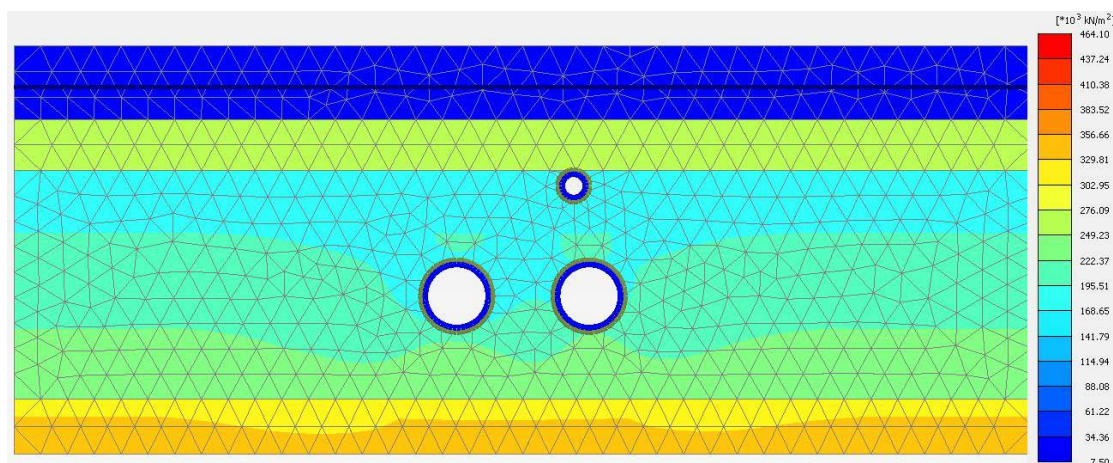
5.3.2.5. Κατανομή ελαστικών παραμέτρων.

Όπως έχει αναφερθεί τα μοντέλα HSsmall και HS, όταν γίνεται επίλυση με ενεργές παραμέτρους αντοχής, μεταβάλουν τις παραμέτρους ελαστικότητας ανάλογα με την βαθμίδα φόρτισης. Οι τελικές ελαστικές παράμετροι, κάνοντας επίλυση με το μοντέλο HSsmall, φαίνονται στην Εικόνα 5.3-17.



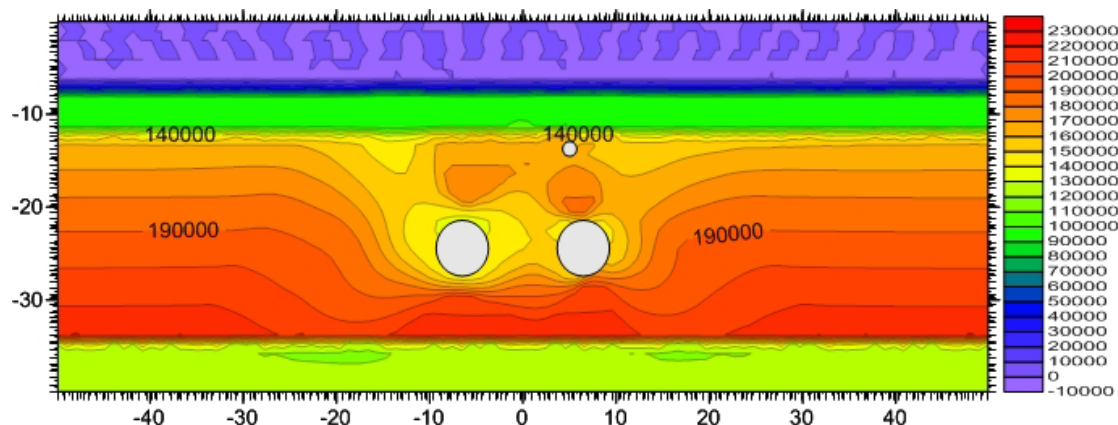
Εικόνα 5.3-17: Μεταβολή ελαστικών παραμέτρων με το μοντέλο HSsmall στην τομή CHPD

Ενώ κάνοντας χρήση του μοντέλου HS φαίνονται στην Εικόνα 5.3-18.



Εικόνα 5.3-18: Μεταβολή ελαστικών παραμέτρων με το μοντέλο HS στην τομή CHPD

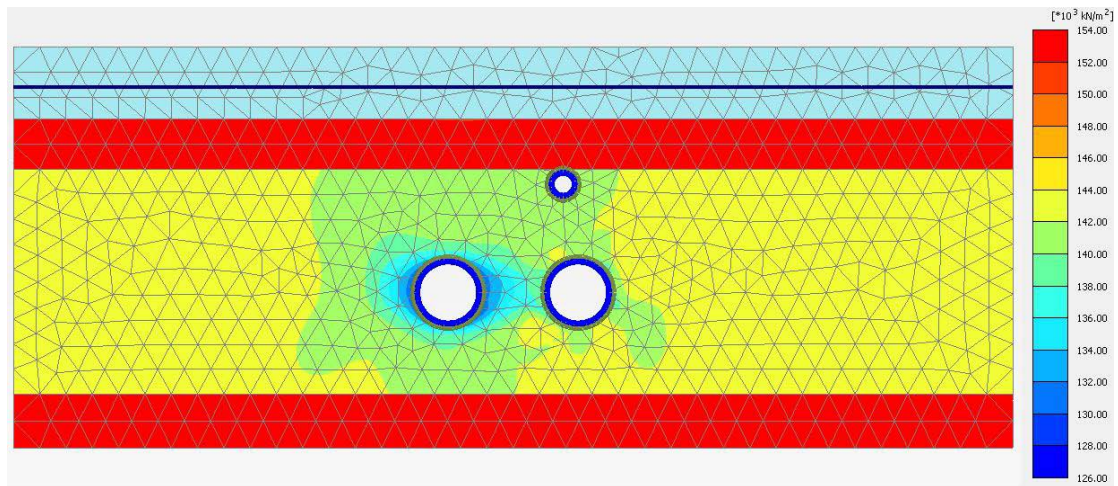
Η διαφορά των τελικών μέτρων ελαστικότητας, που έχουν υπολογιστεί από τα μοντέλα HSsmall και HS, ακολουθούν στην Εικόνα 5.3-19. Η μεγαλύτερη διαφορά που εντοπίζεται είναι 219300 kN/m^2 ($\text{HSsmall}=459055 \text{ kN/m}^2$ και $\text{HS}=-239754 \text{ kN/m}^2$), που αν εκφραστεί ως ποσοστό είναι 47,77%



Εικόνα 5.3-19: Διαφορά τελικών ελαστικών παραμέτρων των μοντέλων HSsmall και HS στην θέση CHPD

Και σε αυτή την περίπτωση, όπως και στην τομή ΚΑΜΑΡΑ, η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας από το μοντέλο HSsmall είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του HS, ιδιαίτερα στην ενότητα Α2b.

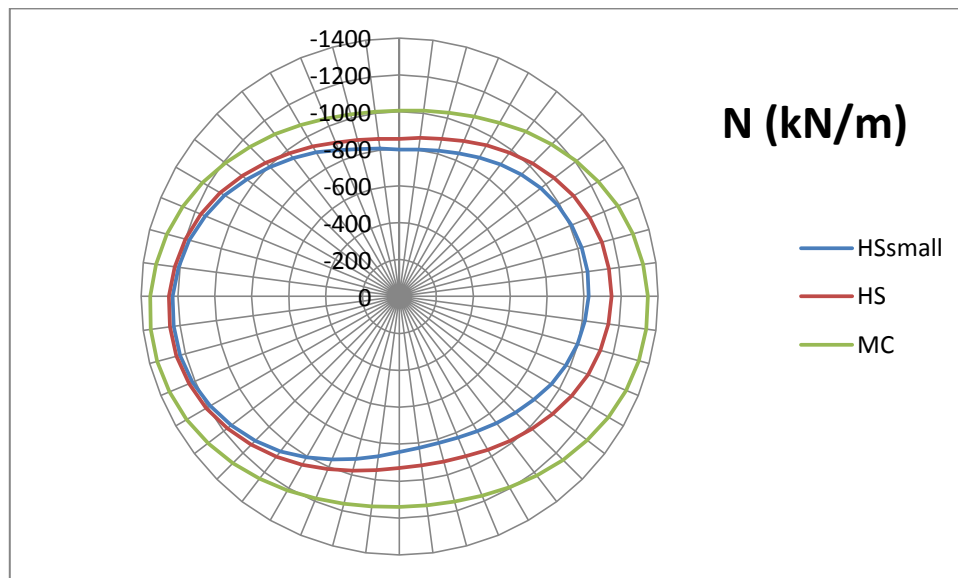
Στην Εικόνα 5.3-20 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέτρου διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις στην τομή στη θέση Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς, κάνοντας χρήση του καταστατικού μοντέλου HSsmall. Η απομείωση του μέτρου διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις στην περιφέρεια των εκσκαφών είναι εμφανής όπου, όπως έχει διαπιστωθεί, είναι και ο λόγος της ανάπτυξης μικρότερων μέγιστων κύριων τάσεων στην περιφέρεια των εκσκαφών.



Εικόνα 5.3-20 :Μεταβολή του μέτρου διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις στην θέση Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς με ενεργές παραμέτρους αντοχής με το καταστατικό μοντέλο HSsmall.

5.3.2.6. Φορτία υποστήριξης.

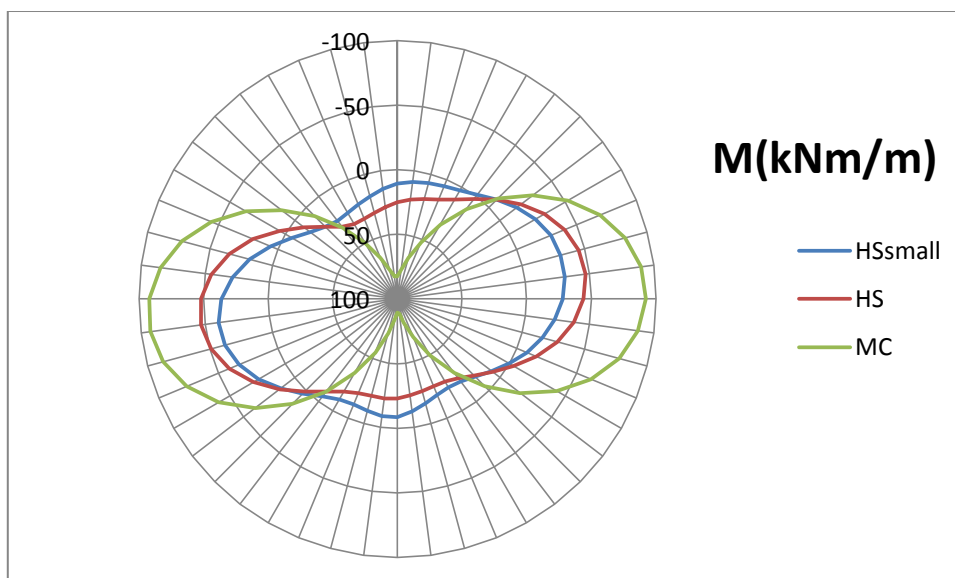
Η κατανομή της ελάχιστης κύριας ενεργής τάσης, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία φορτίων στην επένδυση. Τα αξονικά φορτία στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 στη θέση του Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς, όπως αυτά έχουν υπολογιστεί και με τα τρία καταστατικά μοντέλα με χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής, φαίνονται στο Γράφημα 5.3-11.



Γράφημα 5.3-11 :Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση CHPD.

Τα αξονικά φορτία με το μοντέλο MC έχουν μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα.

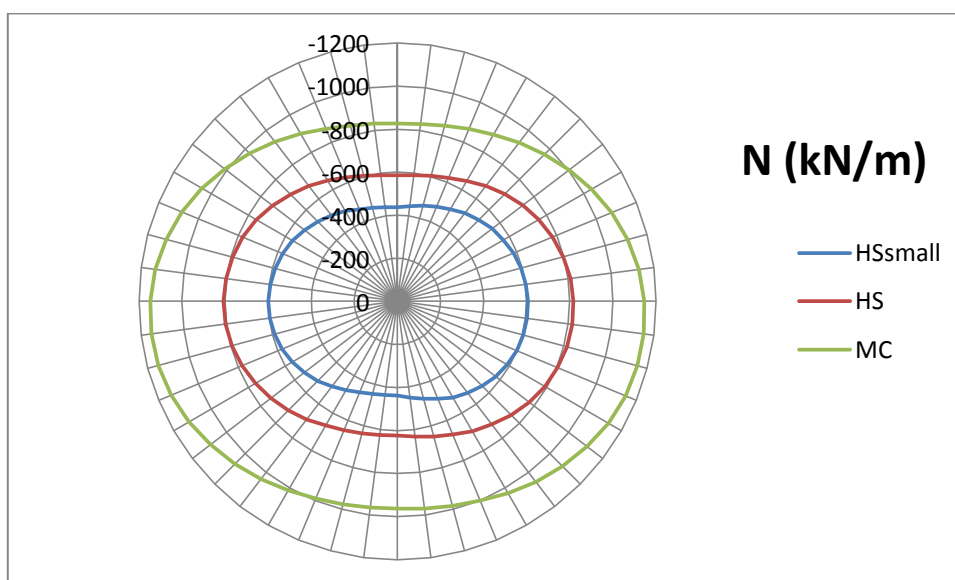
Η κατανομή των ροπών κάμψης στην ίδια θέση δίνονται στο Γράφημα 5.3-12.



Γράφημα 5.3-12 :Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM1 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση CHPD.

Όπως έχει αναφερθεί, λόγω της κατανομής των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στην περιφέρεια των εκσκαφών, με το μοντέλο MC δημιουργούνται σημαντικές ροπές.

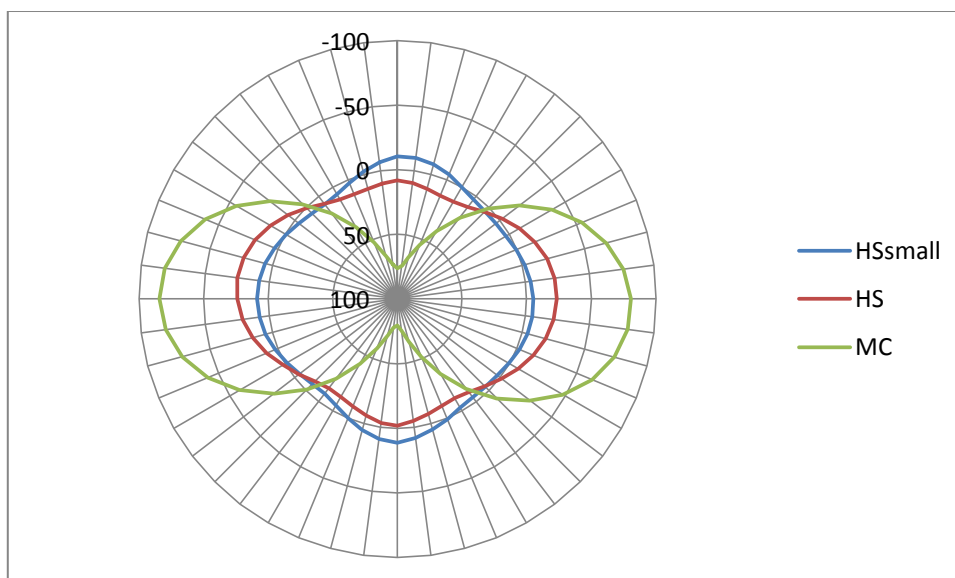
Τα αξονικά φορτία της επένδυσης της σήραγγας του TBM2 στην θέση Καμάρα, με ενεργές παραμέτρους, αντοχής φαίνονται στο Γράφημα 5.3-13.



Γράφημα 5.3-13: Κατανομή αξονικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση CHPD.

Και σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο MC υπολογίζει σημαντικά μεγαλύτερα φορτία στην επένδυση. Σημαντική διαφορά εντοπίζεται και ανάμεσα στα μοντέλα HSsmall και HS. Ο λόγος της διαφοράς αυτής έχει εντοπιστεί σε προηγούμενες αναλύσεις.

Στο Γράφημα 5.3-14 φαίνονται οι ροπές κάμψης που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 και για τα τρία καταστατικά μοντέλα.



Γράφημα 5.3-14: Κατανομή ροπών κάμψης στην επένδυση της σήραγγας του TBM2 σύμφωνα με τα τρία καταστατικά μοντέλα με ενεργές παραμέτρους αντοχής στη θέση CHPD.

Λόγω της κατανομής των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στην περιφέρεια της εκκαψής της σήραγγας του TBM2, από το μοντέλο MC, και σε αυτή την περίπτωση αναπτύσσονται σημαντικές ροπές.

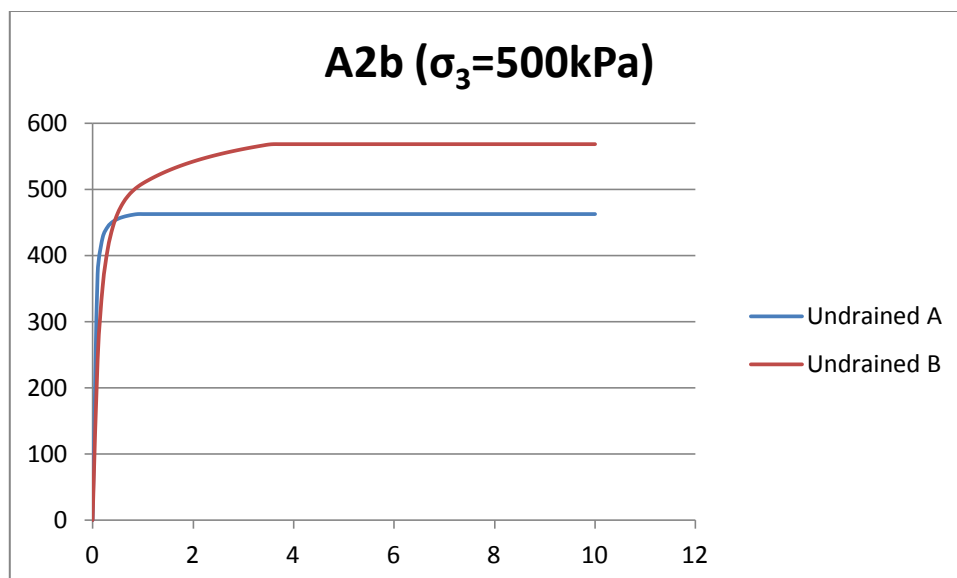
5.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων με αστράγγιστες (Undrained B) και ενεργές (Undrained A) παραμέτρους αντοχής.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του καταστατικού μοντέλου HSsmall με ενεργές παραμέτρους αντοχής και με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.

5.4.1. Υπολογισμός αντοχής του εδάφους.

Όπως έχει αναφερθεί, το σημαντικότερο μειονέκτημα όταν γίνεται ανάλυση με ενεργές παραμέτρους αντοχής σε αστράγγιστες συνθήκες, είναι ο υπολογισμός της πίεσης του νερού των πόρων όπου η πορεία των ενεργών τάσεων θα οδηγήσει σε σωστό υπολογισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Για να βρεθεί αν η αστράγγιστη διατμητική αντοχή, που έχει υπολογιστεί από την πορεία των ενεργών τάσεων, προσεγγίζει την άμεσα προσδιορισμένη αστράγγιστη διατμητική αντοχή, βρίσκεται η συμπεριφορά που έχει ο κάθε σχηματισμός με το καταστατικό μοντέλο HSsmall, σε αστράγγιστη τριαξονική φόρτιση με πλευρική πίεση 500kPa. Το αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής συγκρίνεται με την συμπεριφορά που έχει το ίδιο καταστατικό μοντέλο με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.

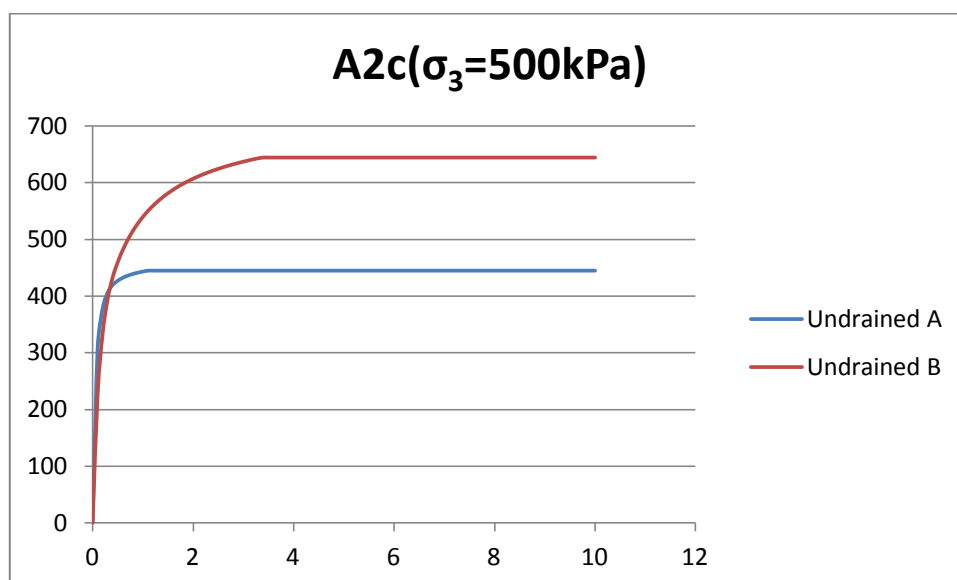
Για την ενότητα A2b τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών φαίνονται στο Γράφημα 5.4-1.



Γράφημα 5.4-1: Συμπεριφορά του καταστατικού μοντέλου HSsmall στην ενότητα A2b, σε αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή με αστράγγιστες και ενεργές παραμέτρους αντοχής.

Από το γράφημα αυτό φαίνεται ότι η μέγιστη αντοχή του εδάφους με ενεργές παραμέτρους αντοχής (Undrained A) είναι μικρότερη από την αντοχή του με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής (Undrained B) υπό πλευρική πίεση 500kPa. Όταν γίνεται χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής το έδαφος φτάνει την μέγιστη αντοχή του έχοντας πολύ μικρές παραμορφώσεις.

Η ίδια διαδικασία για την ενότητα A2c φαίνεται στο Γράφημα 5.4-2.

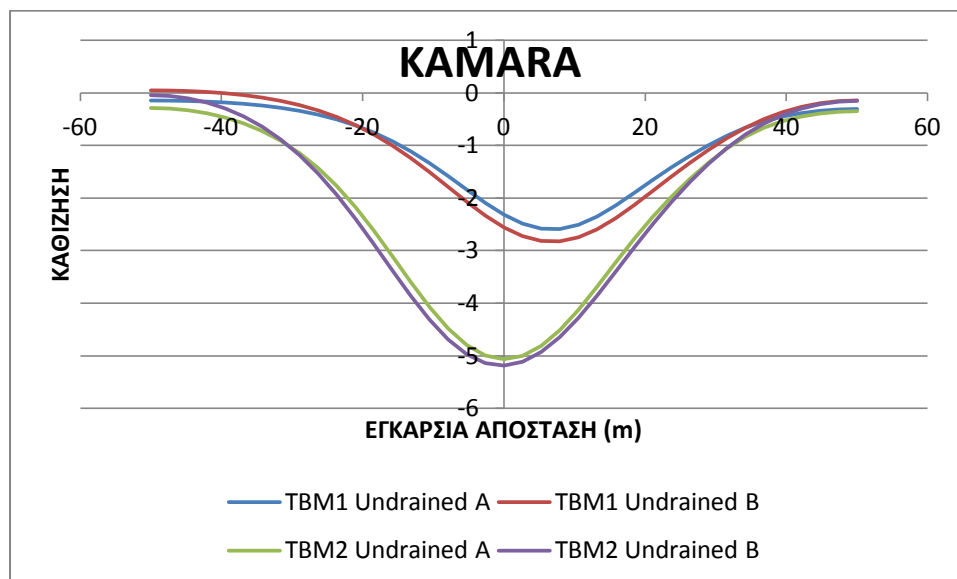


Γράφημα 5.4-2 Συμπεριφορά του καταστατικού μοντέλου HSsmall στην ενότητα A2c, σε αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή με αστράγγιστες και ενεργές παραμέτρους αντοχής.

Η αντοχή του εδάφους με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής και για την ενότητα A2c είναι σημαντικά μικρότερη. Η διαφορά τους είναι ακόμα μεγαλύτερη από αυτή που είχαν στην ενότητα A2b. Και σε αυτή την περίπτωση, κάνοντας χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής, το έδαφος φτάνει την μέγιστη αντοχή του έχοντας σημειώσει εξαιρετικά μικρές παραμορφώσεις.

5.4.2. Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

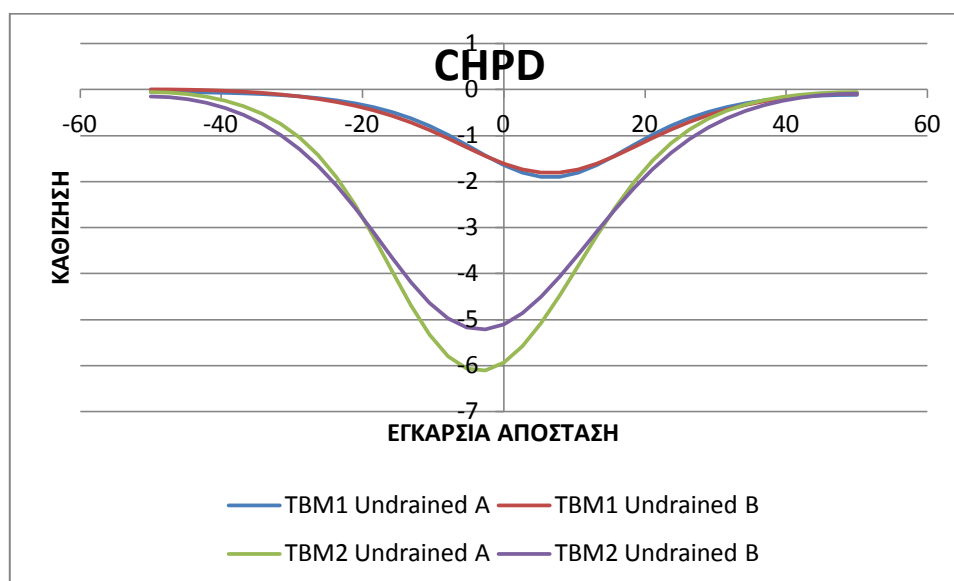
Στο Γράφημα 5.4-3 φαίνονται οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους μετά το πέρας του TBM1 και μετά το πέρας του TBM2, όπως αυτές υπολογίστηκαν από το καταστατικό μοντέλο HSsmall με ενεργές και με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής στη θέση ΚΑΜΑΡΑ.



Γράφημα 5.4-3: Καθιζήσεις στην θέση Καμάρα με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.

Οι αναλύσεις με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής μετά την διέλευση του TBM1, αλλά και μετά τη διέλευση του TBM2, υπολόγισαν μεγαλύτερες τιμές καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους.

Το αντίστοιχο διάγραμμα για την τομή στη θέση Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς είναι το Γράφημα 5.4-4.



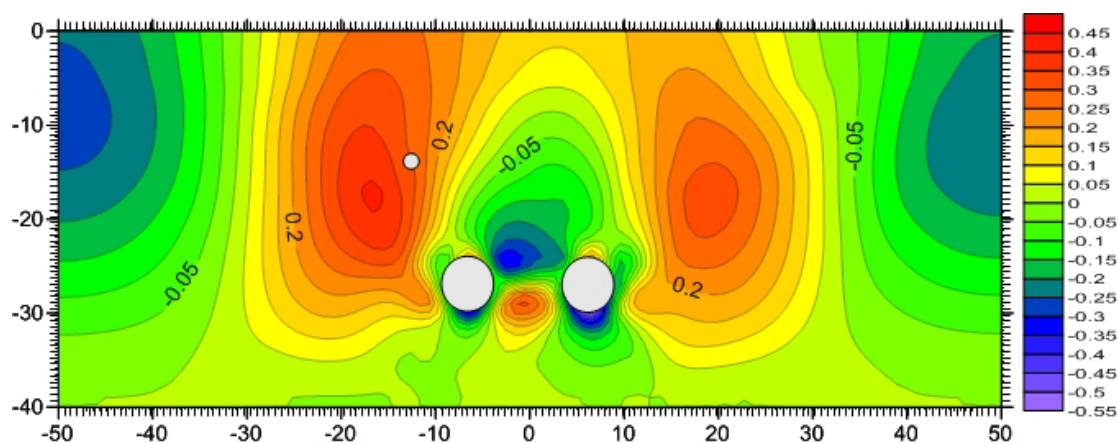
Γράφημα 5.4-4: Καθιζήσεις στην θέση CHPD με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.

Σε αυτή την περίπτωση, οι αναλύσεις με ενεργές παραμέτρους αντοχής υπολόγισαν μεγαλύτερες καθιζήσεις. Η διαφορά αυτή οφείλεται στον συνδυασμό του καλύτερου

υπολογισμού της αστράγγιστης αντοχής του εδάφους, κάνοντας χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής στην ενότητα A2b, όπου και γίνεται η διάνοιξη στη θέση αυτή και στην ικανότητα της ανάλυσης με ενεργές παραμέτρους αντοχής να μεταβάλει τις ελαστικές παραμέτρους του εδάφους.

5.4.3. Κατανομή μετακινήσεων

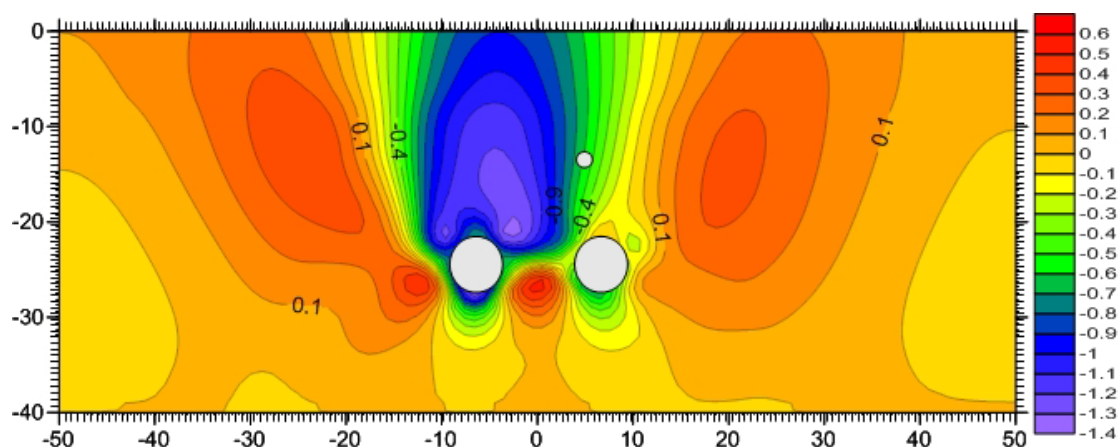
Η διαφορά στην κατανομή των κατακόρυφων μετακινήσεων, που υπολογίστηκαν μέσω του καταστατικού μοντέλου HSsmall με ενεργές και με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής, στη θέση ΚΑΜΑΡΑ φαίνεται στην Εικόνα 5.4-1.



Εικόνα 5.4-1: Διαφορά κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.

Η μεγαλύτερη διαφορά εντοπίζεται στα δάπεδα των σηράγγων και είναι 0,52mm (Undrained A=3.09 mm και Undrained B=3.62 mm), όπου η επίλυση με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής έχει υπολογίσει κατά 16,95% μεγαλύτερη μετατόπιση. Μεγαλύτερη μετατόπιση υπολογίζεται και εκατέρωθεν των σηράγγων και ανάμεσα από αυτές με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής κατά 0,40mm (Undrained A=-2.70 mm, Undrained B=-3.11 mm) ή 15,02%. Η μεγαλύτερη αυτή μετατόπιση, όταν γίνεται χρήση αστράγγιστων παραμέτρων αντοχής, οφείλεται στην μικρή παραμόρφωση του εδάφους μέχρι και την μέγιστη αντοχή του όταν γίνεται χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής.

Το αντίστοιχο διάγραμμα για την θέση Ι.Ν. Παναγίας Δεξιάς είναι αυτό της Εικόνας 5.4-2.

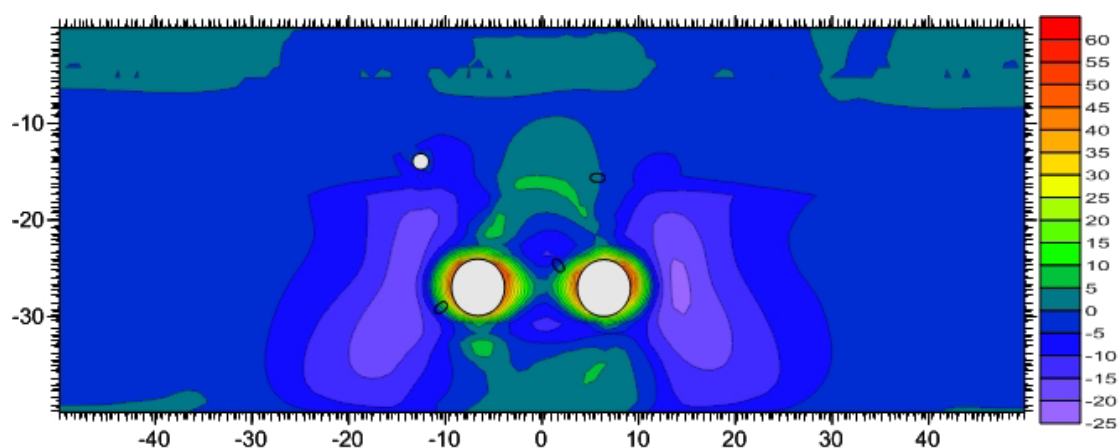


Εικόνα 5.4-2 Διαφορά κατακόρυφων μετατοπίσεων στην θέση CHPD με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.

Στην περίπτωση αυτή, όπως φάνηκε και από τις καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους οι αναλύσεις με ενεργές παραμέτρους αντοχής κατέγραψαν μεγαλύτερες μετακινήσεις. Η μεγαλύτερη διαφορά που εντοπίζεται είναι 1,34mm (Undrained A=-8,30 mm, Undrained B=-6,95 mm) ή 16,24% πάνω από την σήραγγα του TBM2, όπου υπήρξε και η μεγαλύτερη απώλεια εδαφικού όγκου. Η διαφορά μειώνεται ανάμεσα και εκατέρωθεν των σηράγγων μέχρι οι αναλύσεις με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής να υπολογίζουν κατά 0,55mm μεγαλύτερη μετατόπιση (Undrained A=-0.919 mm, Undrained B=-1.471 mm) ή 60%.

5.4.4. Κατανομή μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1).

Η διαφορά στην κατανομή των μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων στις επιλύσεις με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής μέσω του καταστατικού μοντέλου HSsmall στη θέση KAMARA φαίνονται στην Εικόνα 5.4-3.

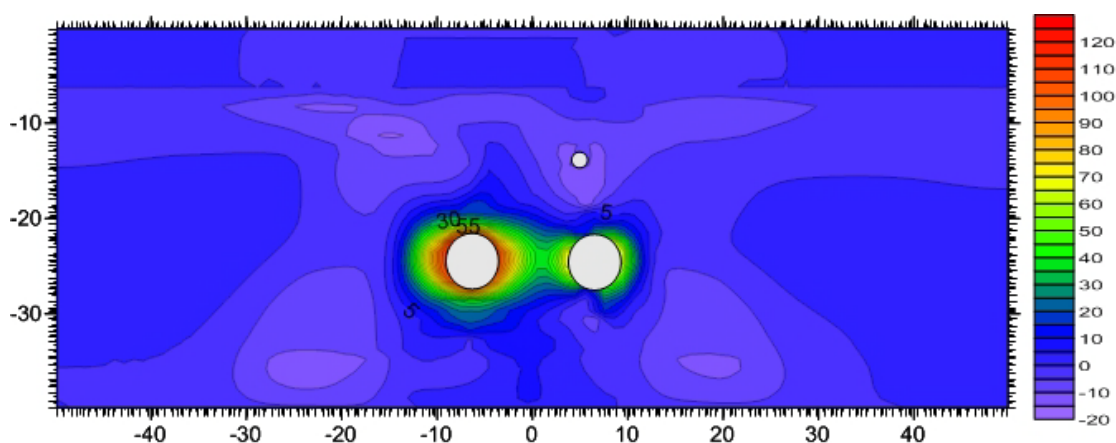


Εικόνα 5.4-3 : Διαφορά μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων στην θέση KAMARA με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.

Στην περίμετρο των εκσκαφών η επίλυση με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής δίνει μεγαλύτερες μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις κατά 48,7 kN/m² (Undrained A=-413,24 kN/m² και Undrained B=-461,95 kN/m²) ή 11,78%. Με την απομάκρυνση από τις παρειές των

εκσκαφών η διαφορά μειώνεται, μέχρι η ανάλυση με ενεργές παραμέτρους αντοχής να υπολογίζει μεγαλύτερες μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις κατά $21,7 \text{ kN/m}^2$ (Undrained A= $-421,41 \text{ kN/m}^2$ και Undrained B= $-399,7 \text{ kN/m}^2$) ή 5,15%.

Το αντίστοιχο διάγραμμα κατανομής στην θέση CHPD παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.4-4

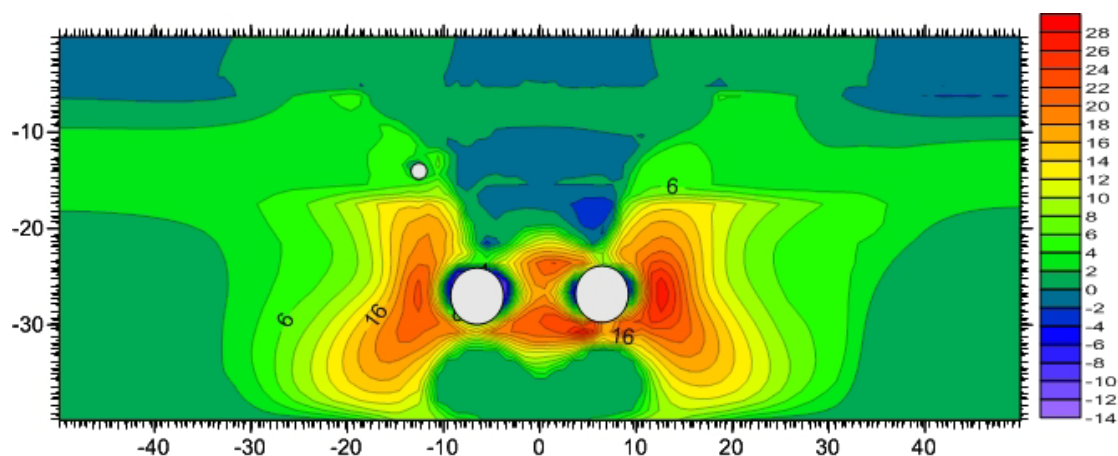


Εικόνα 5.4-4: Διαφορά μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων στην θέση CHPD με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.

Και σε αυτή την περίπτωση, στην περίμετρο των εκσκαφών η επίλυση με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής δίνει μεγαλύτερες μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις κατά $105,5 \text{ kN/m}^2$ (Undrained A= $-328,5 \text{ kN/m}^2$, Undrained B= -434 kN/m^2) ή 32,1%. Η διαφορά των τάσεων αυτών είναι συγκριτικά ακόμα μεγαλύτερη από αυτή στη θέση KAMARA. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη διαφορά της αστράγγιστης αντοχής ανάμεσα στους υπολογισμούς με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής για την ενότητα A2c, όπου και διανοίγεται στη θέση KAMARA. Με την απομάκρυνση από τις εκσκαφές, η διαφορά μειώνεται μέχρι οι αναλύσεις με ενεργές παραμέτρους αντοχής να υπολογίζουν μεγαλύτερη τιμή μέγιστης κύριας ενεργής τάσης κατά $16,5 \text{ kN/m}^2$ (Undrained A= $-189,58 \text{ kN/m}^2$, Undrained B= $-173,07 \text{ kN/m}^2$) ή 8,71%.

5.4.5. Κατανομή ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων (σ'_3).

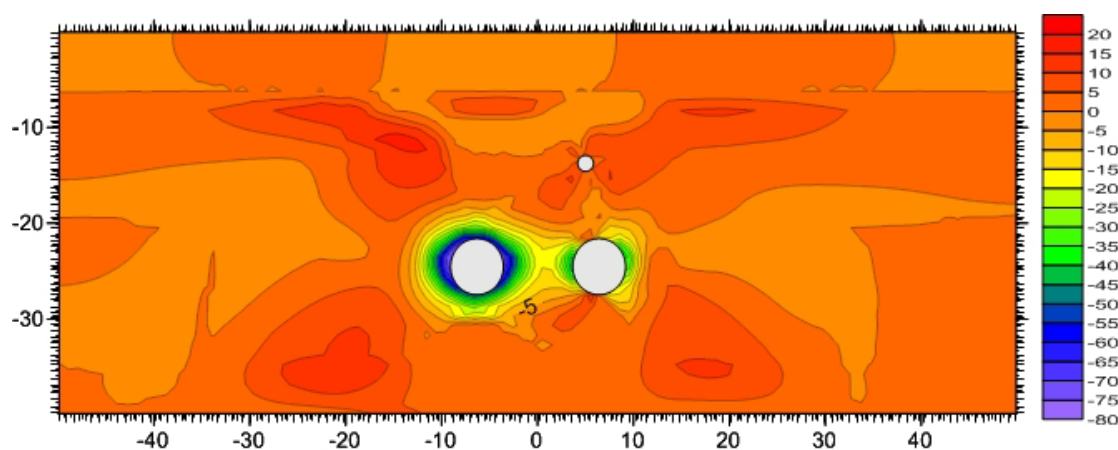
Η κατανομή της διαφοράς των ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στην θέση KAMARA από τις επιλύσεις με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής φαίνεται στην Εικόνα 5.4-5.



Εικόνα 5.4-5: Διαφορά ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στην θέση ΚΑΜΑΡΑ με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.

Στην περιφέρεια των εκσκαφών οι ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις είναι μικρότερες με αναλύσεις με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής κατά $10,03 \text{ kN/m}^2$ (Undrained A = $-68,67 \text{ kN/m}^2$, Undrained B = $-58,64 \text{ kN/m}^2$) ή 14,61%. Σε μεγαλύτερη απόσταση από τις εκσκαφές η επίλυση με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής δίνει μεγαλύτερες τιμές κατά $30,99 \text{ kN/m}^2$ (Undrained A = $-122,7 \text{ kN/m}^2$, Undrained B = $-153,69 \text{ kN/m}^2$) ή 25,25%

Στην θέση CHPD η μεταβολή της ελάχιστης κύριας ενεργής τάσης είναι σημαντικά μεγαλύτερη ανάμεσα στις επιλύσεις με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής (Εικόνα 5.4-6).



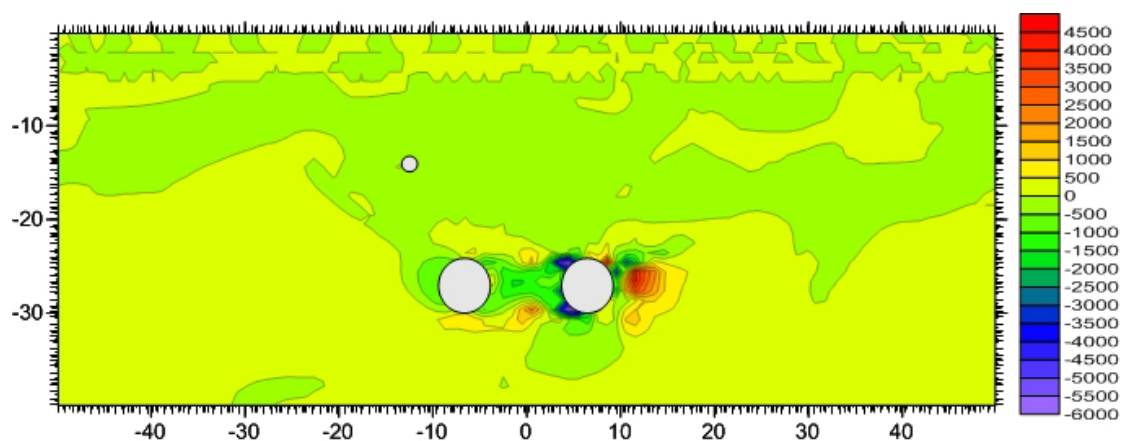
Εικόνα 5.4-6: Διαφορά ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων στην θέση CHPD με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.

Στην περιφέρεια των εκσκαφών οι ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις είναι μικρότερες στις αναλύσεις με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής κατά 72 kN/m^2 (Undrained A = $-81,87 \text{ kN/m}^2$, Undrained B = $-9,81 \text{ kN/m}^2$) ή 88%. Σε μεγαλύτερη απόσταση από τις εκσκαφές οι ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις είναι μεγαλύτερες κατά $20,64 \text{ kN/m}^2$ (Undrained A = $-118,86 \text{ kN/m}^2$, Undrained B = $-139,51 \text{ kN/m}^2$) ή 17,37% κάνοντας αναλύσεις με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.

5.4.6. Κατανομή μέτρου διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις.

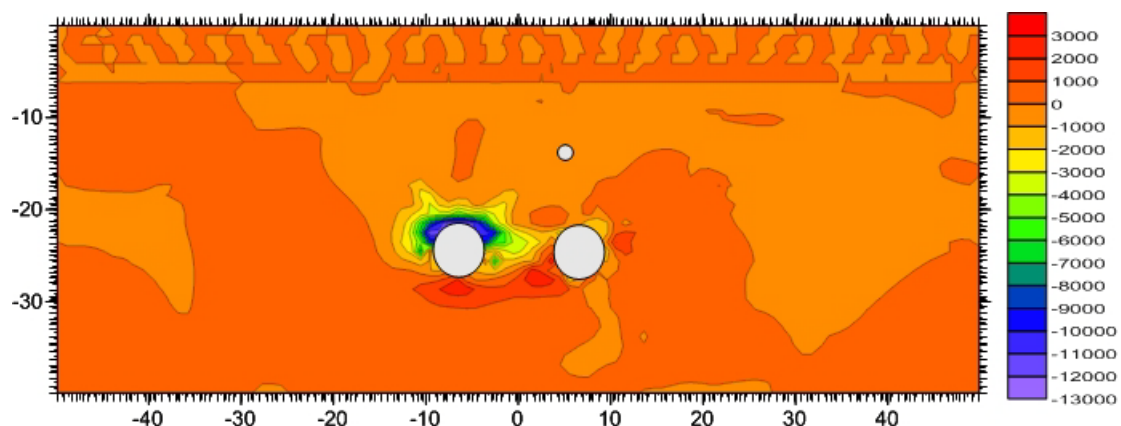
Όπως έχει αναφερθεί, το μεγαλύτερο ελάττωμα των αναλύσεων με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής είναι η μη μεταβολή των ελαστικών παραμέτρων ανάλογα με τη βαθμίδα φόρτισης.

Στην περίπτωση του καταστατικού μοντέλου HSsmall, οι παράμετροι ελαστικότητας σε κανονικές παραμορφώσεις διατηρούν την αρχική τους τιμή. Το μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις όμως διατηρεί την εξάρτησή του από την βαθμίδα φόρτισης. Στην Εικόνα 5.4-7 φαίνεται η διαφορά ανάμεσα στα τελικά μέτρα διάτμησης, κάνοντας επίλυση με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.



Εικόνα 5.4-7: Διαφορά μέτρου διάτμησης στην θέση ΚΑΜΑΡΑ με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.

Η μεγαλύτερη διαφορά που εντοπίζεται είναι 5228 kN/m^2 (Undrained A=153508 kN/m^2 , Undrained B=148279 kN/m^2) ή 3,4% και η ελάχιστη διαφορά -6572 kN/m^2 (Undrained A=146388 kN/m^2 , Undrained B=152961 kN/m^2) ή 4,4%. Η Εικόνα 5.4-8 δείχνει την διαφορά αυτή για την θέση CHPD.



Εικόνα 5.4-8: Διαφορά μέτρου διάτμησης στην θέση CHPD με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο HSsmall.

Η μεγαλύτερη διαφορά που εντοπίζεται είναι 3364 kN/m^2 (Undrained A=136392 kN/m^2 , Undrained B=133027 kN/m^2) ή 2,4% και η ελάχιστη διαφορά -14054 kN/m^2 (Undrained A=128540 kN/m^2 , Undrained B=142595 kN/m^2) ή 10,93%

Από τις διαφορές μεταξύ των μέτρων διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις, δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συγκεκριμένο συμπέρασμα λόγω της μη ύπαρξης κάποιας κανονικότητας στην κατανομή τους.

5.5. Ανακεφαλαίωση

Στο κεφάλαιο αυτό συγκεντρώνονται τα ως τώρα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που έχουν γίνει. Στον Πίνακα 5.5-1 φαίνονται τα αποτελέσματα των μέγιστων καθιζήσεων που υπολόγισε το κάθε καταστατικό μοντέλο με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής τόσο μετά την διάνοιξη της σήραγγας του TBM1, όσο και μετά την διάνοιξη της σήραγγας του TBM2 στις δύο θέσεις διερεύνησης. Γίνεται, επίσης, σύγκριση της μέγιστης καθιζήσης των αποτελεσμάτων του κάθε μοντέλου με την καμπύλη Gauss με την οποία υπολογίστηκε η απώλεια εδαφικού όγκου για το εκάστοτε TBM.

UNDRAINED B					
ΜΟΝΤΕΛΟ	ΘΕΣΗ	TBM1/TBM2	GAUSS (mm)	PLAXIS (mm)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ (%)
Hssmall	KAMARA	TBM1	-4,238	-2,555	39,701
		TBM2	-10,389	-5,191	50,026
	CHPD	TBM1	-1,903	-1,609	15,475
		TBM2	-11,557	-5,105	55,827
HS	KAMARA	TBM1	-4,238	-2,684	36,667
		TBM2	-10,389	-5,360	48,407
	CHPD	TBM1	-1,903	-1,958	-2,872
		TBM2	-11,557	-6,005	48,038
MC	KAMARA	TBM1	-4,238	-1,929	54,473
		TBM2	-10,389	-3,949	61,981
	CHPD	TBM1	-1,903	-1,322	30,555
		TBM2	-11,557	-4,174	63,878

Πίνακας 5.5-1: Σύγκριση αποτελεσμάτων μέγιστων καθιζήσεων με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής και κατανομών Gauss.

Ο αντίστοιχος πίνακας για τις αναλύσεις που έγιναν με ενεργές παραμέτρους αντοχής είναι ο Πίνακας 5.5-2

UNDRAINED A					
ΜΟΝΤΕΛΟ	ΘΕΣΗ	TBM1/TBM2	GAUSS (mm)	PLAXIS (mm)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ (%)
Hssmall	KAMARA	TBM1	-4,238	-2,318	45,303
		TBM2	-10,389	-5,068	51,212
	CHPD	TBM1	-1,903	-1,641	13,782
		TBM2	-11,557	-5,932	48,664
HS	KAMARA	TBM1	-4,238	-2,261	46,642
		TBM2	-10,389	-4,893	52,898
	CHPD	TBM1	-1,903	-1,630	14,383
		TBM2	-11,557	-5,859	49,297
MC	KAMARA	TBM1	-4,238	-1,929	54,473
		TBM2	-10,389	-3,949	61,981
	CHPD	TBM1	-1,903	-1,322	30,555
		TBM2	-11,557	-4,174	63,878

Πίνακας 5.5-2: Σύγκριση αποτελεσμάτων μέγιστων καθιζήσεων με ενεργές παραμέτρους αντοχής και κατανομών Gauss.

Βρίσκοντας τους μέσους όρους των αποκλίσεων των τιμών του κάθε καταστατικού μοντέλου από την κατανομή Gauss στις δύο θέσεις διερεύνησης προκύπτει ο Πίνακας 5.5-3

	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ TBM1 (%)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ TBM2 (%)
UNDRAINED B	Hssmall	27,588	52,926
	HS	16,897	48,223
	MC	42,514	62,930
UNDRAINED A	Hssmall	29,542	49,938
	HS	30,513	51,097
	MC	42,514	62,930

Πίνακας 5.5-3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα απόκλισης μέγιστων καθιζήσεων από κατανομές Gauss με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.

Από αυτόν το πίνακα φαίνεται ότι η επίλυση με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής με το μοντέλο Hssmall δίνει παρεμφερή αποτελέσματα. Το μοντέλο HS στην επίλυση με ενεργές παραμέτρους αντοχής και για την διάνοιξη της σήραγγας του TBM1 έχει υπολογίζει σημαντικά μικρότερες καθιζήσεις. Για το μοντέλο MC παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα ανάμεσα στην επίλυση με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής είναι ακριβώς ίδια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι και στις δύο περιπτώσεις το μοντέλο αυτό δουλεύει στην ελαστική περιοχή του, που όπως έχει αναλυθεί είναι γραμμική.

Στον Πίνακα 5.5-4 έχουν υπολογιστεί οι μέσοι όροι της απόκλισης του κάθε μοντέλου, ανεξάρτητα αν η επίλυση ήταν με ενεργές παραμέτρους αντοχής ή με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΒΜ1 (%)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΒΜ2 (%)
Hssmall	28,565	51,432
HS	23,705	49,660
MC	42,514	62,930

Πίνακας 5.5-4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα απόκλισης μέγιστων καθιζήσεων από κατανομές Gauss ανά καταστατικό μοντέλο.

Τα αποτελέσματα των μοντέλων Hssmall και HS είναι παρεμφερή. Η απόκλιση τους από την καμπύλη Gauss παίρνει σημαντικά μεγαλύτερη τιμή για την διάνοιξη του ΤΒΜ2. Αυτό, όπως έχει αναφερθεί, οφείλεται στην εξαιρετικά απότομη μορφή της καμπύλης Gauss λόγω των δύο οργάνων που κατέγραψαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές. Το μοντέλο MC αποκλίνει σε όλες τις περιπτώσεις σε μεγάλο βαθμό από τις καμπύλες Gauss. Και στην περίπτωση του MC η διαφοροποίηση είναι μεγαλύτερη μετά την διάνοιξη του ΤΒΜ2

Στον Πίνακα 5.5-5 φαίνονται οι διαφορές που εντοπίστηκαν από τα διαγράμματα κατανομής των μετατοπίσεων, μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων, ελάχιστων κύριων ενεργών τάσεων καθώς επίσης και του μέτρου ελαστικότητας ανάμεσα στα μοντέλα Hssmall και HS στις επιλύσεις που έγιναν με ενεργές παραμέτρους αντοχής. Βρίσκεται, επίσης, το ποσοστό της διαφοράς τους. Ως θετικά ορίζονται τα ποσοστά για τα οποία τα μεγέθη που έχουν υπολογιστεί μέσω του μοντέλου HS είναι μεγαλύτερα.

ΔΙΑΦΟΡΕΣ HSsmall ΚΑΙ HS ΜΕ ΕΝΕΡΓΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ						
ΘΕΣΗ	ΜΕΓΕΘΟΣ	MIN/ MAX	Hssmall	HS	Διαφορά	Ποσοστό (%)
ΚΑΜΑΡΑ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	min	3,229	3,572	0,343	10,623
		max	-1,044	-1,398	0,354	33,868
	σ_1 (kN/m ²)	min	-99,474	-77,759	-21,716	-21,831
		max	-428,499	-455,155	26,657	6,221
	σ_3 (kN/m ²)	min	-269,952	-265,390	-4,562	-1,690
		max	-110,90	-140,864	29,963	27,018
	E (kN/m ²)	min	7500,00	7500,00	0,00	0,00
		max	364099,77	190420,83	-173678,94	-47,70
CHPD	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	min	3,992	4,990	0,998	24,995
		max	-0,643	-1,270	0,627	97,620
	σ_1 (kN/m ²)	min	-368,200	-338,397	-29,803	-8,094
		max	-316,355	-346,085	29,731	9,398
	σ_3 (kN/m ²)	min	-223,123	-218,328	-4,795	-2,149
		max	-118,865	-160,468	41,603	35,001
	E (kN/m ²)	min	7500,000	7500,000	0,000	0,000
		max	459055,46	239754,84	-219300,62	-47,772
ΜΕΣΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (%)						7,219
ΜΕΣΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΧΩΡΙΣ ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ ΤΟ Ε(%)						17,58

Πίνακας 5.5-5: Συγκεντρωτικές διαφορές μοντέλων Hssmall και HS με ενεργές παραμέτρους αντοχής.

Η συνολική μέση απόκλιση των τιμών τους είναι περίπου 7,21%. Αν δεν συμπεριληφθεί η επιρροή του μέτρου ελαστικότητας, η τιμή αυτή γίνεται 17,58%. Δηλαδή, τα μεγέθη που έχουν υπολογιστεί μέσω του μοντέλου HS είναι κατά μέσο όρο 17.85% μεγαλύτερα από του μοντέλου Hsmall. Ο αντίστοιχος πίνακας για τα μοντέλα MC και HS είναι ο Πίνακας 5.5-6.

ΔΙΑΦΟΡΕΣ MC ΚΑΙ HS ΜΕ ΕΝΕΡΓΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ						
ΘΕΣΗ	ΜΕΓΕΘΟΣ	MIN/ MAX	MC	HS	Διαφορά	Ποσοστό (%)
ΚΑΜΑΡΑ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	min	-1,484	-0,754	-0,730	-49,191
		max	6,437	3,512	-2,926	-45,446
	σ_1 (kN/m ²)	min	-394,277	-355,374	-38,902	-9,867
		max	-370,278	-462,435	92,157	24,889
	σ_3 (kN/m ²)	min	-239,372	-131,358	-108,014	-45,124
		max	-144,387	-149,944	5,556	3,848
CHPD	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	min	-1,098	-0,192	-0,906	-82,525
		max	9,714	4,990	-4,723	-48,626
	σ_1 (kN/m ²)	min	-413,575	-369,118	-44,458	-10,750
		max	-312,273	-395,093	82,820	26,522
	σ_3 (kN/m ²)	min	-193,165	-127,537	-65,628	-33,975
		max	-71,606	-105,145	33,539	46,838
ΜΕΣΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (%)						-18,617

Πίνακας 5.5-6 Συγκεντρωτικές διαφορές μοντέλων MC και HS με ενεργές παραμέτρους αντοχής.

Κατά την ίδια έννοια, προκύπτει ότι τα μεγέθη που υπολογίζονται από το μοντέλο HS είναι κατά 18.61% μικρότερα από του μοντέλου MC. Αυτό οφείλεται στην σημαντική συγκέντρωση τάσεων, με το μοντέλο MC, στην περιφέρεια των εκσκαφών λόγω του μεγάλου εύρους της ελαστικής περιοχής του. Η μεγάλη εύρους ελαστική περιοχή δεν οδηγεί σε καμία θέση σε πλαστικές παραμορφώσεις και χαλάρωση της εδαφομάζας. Τα σημαντικά φορτία που συγκεντρώνονται στην περίμετρο των εκσκαφών οδηγούν και σε σημαντικές παραμορφώσεις, οι οποίες όμως δεν μεταφέρονται στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της μεγάλης αντοχής του εδάφους που υπολογίζεται κάνοντας χρήση αυτού του μοντέλου.

Στον Πίνακα 5.5-7 φαίνονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των μοντέλων Hsmall και HS όταν γίνεται χρήση αστράγγιστων παραμέτρων αντοχής.

ΔΙΑΦΟΡΕΣ Hsmall ΚΑΙ HS ΜΕ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ						
ΘΕΣΗ	ΜΕΓΕΘΟΣ	MIN/ MAX	Hsmall	HS	Διαφορά	Ποσοστό (%)
ΚΑΜΑΡΑ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	min	-1,092	-0,858	-0,234	-21,429
		max	-6,814	-7,359	0,546	8,010
	σ_1 (kN/m ²)	min	-484,799	-448,441	-36,358	-7,500
		max	-357,120	-375,084	17,964	5,030
	σ_3 (kN/m ²)	min	-54,608	-52,764	-1,844	-3,377
		max	-158,025	-239,380	81,355	51,483
CHPD	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	min	2,505	3,098	0,593	23,658
		max	-10,368	-11,656	1,287	12,418
	σ_1 (kN/m ²)	min	-446,960	-371,043	-75,917	-16,985
		max	-330,367	-362,055	31,689	9,592
	σ_3 (kN/m ²)	min	-107,381	-103,163	-4,218	-3,928
		max	-50,001	-138,614	88,612	177,221
ΜΕΣΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (%)						19,516

Πίνακας 5.5-7: Συγκεντρωτικές διαφορές μοντέλων Hsmall και HS με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.

Τα μεγέθη που υπολογίζονται με το μοντέλο HS και σε αυτή την περίπτωση είναι κατά 19,51% μεγαλύτερα από αυτά του μοντέλου Hsmall. Το ποσοστό αυτό είναι παρεμφερές με το 17,58% που υπολογίστηκε συγκρίνοντας τα μοντέλα αυτά με ενεργές παραμέτρους αντοχής.

Στον Πίνακα 5.5-8 φαίνεται η ίδια διαδικασία ανάμεσα στα μοντέλα MC και HS. Το μοντέλο MC, στην περίπτωση αυτή, έχει υπολογίσει κατά 30,87% μεγαλύτερα μεγέθη. Το ποσοστό αυτό είναι συγκριτικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο όταν γίνεται επίλυση με ενεργές παραμέτρους αντοχής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην σημαντικά μεγαλύτερη διαφορά στην αντοχή του εδάφους ανάμεσα στα δύο αυτά καταστατικά μοντέλα όταν γίνεται χρήση αστράγγιστων παραμέτρων αντοχής διευρύνοντας ακόμα περισσότερο την γραμμική ελαστική περιοχή του μοντέλου MC.

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜC ΚΑΙ ΗS ΜΕ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ						
ΘΕΣΗ	ΜΕΓΕΘΟΣ	MIN/ MAX	MC	HS	Διαφορά	Ποσοστό (%)
ΚΑΜΑΡΑ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	min	-0,872	0,162	-1,035	-118,625
		max	6,410	3,597	-2,813	-43,881
	σ_1 (kN/m ²)	min	-394,277	-357,693	-36,583	-9,279
		max	-370,278	-447,594	77,316	20,881
	σ_3 (kN/m ²)	min	-239,372	-156,572	-82,801	-34,591
		max	-108,402	-125,833	17,431	16,080
CHPD	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	min	-0,730	0,471	-1,202	-164,550
		max	9,714	5,537	-4,177	-43,001
	σ_1 (kN/m ²)	min	-351,618	-313,415	-38,203	-10,865
		max	-312,273	-396,482	84,209	26,966
	σ_3 (kN/m ²)	min	-193,165	-129,630	-63,535	-32,892
		max	-71,606	-88,291	16,684	23,300
ΜΕΣΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (%)						-30,871

Πίνακας 5.5-8: Συγκεντρωτικές διαφορές μοντέλων MC και HS με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.

Στον Πίνακα 5.5-9 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου Hsmall με αστράγγιστες και ενεργές παραμέτρους αντοχής. (Σοφιανός & Νομικός, Μηχανική των Πετρωμάτων, 2011) (Παπαδόπουλος, 2008) (Σοφιανός, Τεχνικές Διάνοιξης Σηράγγων, 2010)

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΕΝΕΡΓΕΣ ΚΑΙ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΟ Hsmall						
ΘΕΣΗ	ΜΕΓΕΘΟΣ	MIN/ MAX	Undrained A	Undrained B	Διαφορά	Ποσοστό (%)
ΚΑΜΑΡΑ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	min	3,098	3,62	0,52	16,95
		max	-2,707	-3,11	0,40	15,02
	σ_1 (kN/m ²)	min	-421,41	-399,70	-21,70	-5,15
		max	-413,24	-461,95	48,70	11,78
	σ_3 (kN/m ²)	min	-68,67	-58,64	-10,03	-14,61
		max	-122,70	-153,69	30,99	25,25
	G (kN/m ²)	min	146388,49	152961,06	6572,57	4,48
		max	153508,49	148279,85	-5228,64	-3,41
CHPD	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	min	-8,30	-6,95	-1,34	-16,24
		max	-0,91	-1,47	0,55	60,06
	σ_1 (kN/m ²)	min	-189,58	-173,07	-16,51	-8,71
		max	-328,50	-434,01	105,50	32,11
	σ_3 (kN/m ²)	min	-81,87	-9,81	-72,06	-88,02
		max	-118,86	-139,51	20,64	17,37
	G (kN/m ²)	min	128540,60	142595,16	14054,56	10,93
		max	136392,34	133027,97	-3364,36	-2,46
ΜΕΣΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (%)						7,219
ΜΕΣΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΧΩΡΙΣ ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΠΟ ΤΟ Ε(%)						17,58

Πίνακας 5.5-9: Συγκεντρωτικές διαφορές αναλύσεων με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής με το μοντέλο HSsmall.

Η μέση διαφορά των μεγεθών, όταν γίνεται χρήση του μοντέλου HSsmall με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής, είναι 3,46%. Το ποσοστό αυτό είναι μικρό και εκφράζει την μικρή διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων όταν γίνεται ανάλυση με ενεργές και αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής με το μοντέλο αυτό. Η αντοχή του εδάφους είναι μεν μικρότερη κάνοντας χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής, διατηρείται όμως η εξάρτηση των ελαστικών παραμέτρων από τη βαθμίδα φόρτισης γεγονός που οδηγεί σε μικρές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα

6.1. Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους

Όσον αφορά τις καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, ήδη από το ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 υπήρχαν ενδείξεις ότι οι μετρήσεις των οργάνων TETS 2361_99 , TETS2453_12 και TETS2461_12, που είναι και τα μόνα που πρακτικά κατέγραψαν καθιζήσεις δεν είναι απόλυτα αξιόπιστες. Στο συμπέρασμα αυτό οδήγησε η δυσανάλογα μεγαλύτερη τιμή τους από τα γειτνιάζοντα όργανα, καθώς επίσης και η μελέτη των παραμέτρων λειτουργίας των TBM στις θέσεις των οργάνων.

Μέσω των αριθμητικών αναλύσεων κανένα καταστατικό μοντέλο σε καμία τομή δεν κατάφερε να προσεγγίσει επαρκώς τις καθιζήσεις που υπολογίστηκαν μέσω των μετρήσεων των γεωδαιτικών οργάνων αυτών, ειδικά μετά την διέλευση του TBM2. Το γεγονός αυτό ενισχύει του ισχυρισμούς ότι οι σημαντικές μετακινήσεις που εντοπίστηκαν στα όργανα, δεν οφείλονται άμεσα στην κατασκευή του Μετρό. Η μη εξάρτηση των μετακινήσεων των οργάνων αυτών από την κατασκευή του Μετρό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρακτικά δεν σημειώθηκαν καθιζήσεις σε καμία θέση του μεσοδιαστήματος.

Η μέτρηση των οργάνων δεν μπορεί να θεωρηθεί λανθασμένη εφόσον είναι μεγαλύτερη από την ακρίβεια των 2mm, και υπάρχει πλήθος διαχρονικών μετρήσεων που επιβεβαιώνει τη συμπεριφορά τους. Η τιμή τους αυτή όμως ενδέχεται να οφείλεται σε τοπικές γεωλογικές ανωμαλίες, όπως τα κενά που εντοπίστηκαν στο επιφανειακό στρώμα των τεχνιτών Επιχώσεων ή κάποια εξωγενή διατάραξη της θέσης των οργάνων.

6.2. Κατανομή μετακινήσεων

Από την διερεύνηση της κατανομής των μετακινήσεων προκύπτει ότι τα μοντέλα Hssmall και HS παρουσιάζουν παρεμφερή συμπεριφορά. Το μοντέλο MC υπολογίζει μεγαλύτερες μετακινήσεις στην περιφέρεια των εκσκαφών λόγω της συσσώρευσης τάσεων στις θέσεις αυτές. Οι μετακινήσεις αυτές, λόγω της υψηλής αντοχής του εδάφους όταν γίνεται χρήση του μοντέλου αυτού, δεν δημιουργούν σημαντικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, αλλά μεγαλύτερου εύρους και μικρότερης μέγιστης καθίζησης λεκάνες.

6.3. Κατανομή κύριων ενεργών τάσεων (σ'_1 , σ'_3).

Όσον αφορά την κατανομή των τάσεων, το μοντέλο Hssmall υπολογίζει γενικά μεγαλύτερες τιμές μέγιστων κύριων ενεργών τάσεων από το μοντέλο HS. Αντίθετα, οι ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις είναι μικρότερες. Αυτό οφείλεται στην ελαφρώς χαμηλότερη αντοχή του εδάφους όταν γίνεται χρήση του καταστατικού μοντέλου HS. Έτσι, αδυνατεί να αναλάβει τις ίδιες μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις με το Hssmall και διαρρέει αναπτύσσοντας μεγαλύτερες ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις.

Το έδαφος, όταν γίνεται χρήση του μοντέλου MC, παρουσιάζει την μεγαλύτερη αντοχή από όλα τα καταστατικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν. Η υψηλή αυτή αντοχή οδηγεί στην μόνιμη λειτουργία του στην ελαστική περιοχή. Η μη διαρροή του εδάφους στην περιφέρεια

των εκσκαφών έχει ως αποτέλεσμα την μη χαλάρωση- αποτόνωση των τάσεων του εδάφους, άρα και την συγκέντρωση φορτίων στην περίμετρο των εκσκαφών. Τα φορτία αυτά δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα, αλλά συγκεντρώνονται οι μέγιστες κύριες ενεργές τάσεις στις παρειές και οι ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις στην οροφή και το δάπεδο των σηράγγων.

6.4. Φορτία υποστήριξης.

Τα φορτία που αναλαμβάνει η υποστήριξη κάνοντας χρήση του καταστατικού μοντέλου Hsmall είναι τα μικρότερα σε όλες τις περιπτώσεις. Όπως αναφέρθηκε, στην περίμετρο των εκσκαφών εμφανίζει τις μικρότερες ελάχιστες κύριες ενεργές τάσεις, οι οποίες κατανέμονται ομοιόμορφα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία των μικρότερων αξονικών φορτίων στην επένδυση και σχεδόν μηδενικών ροπών. Το μοντέλο HS εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές κύριων ενεργών τάσεων, αλλά σχεδόν μηδενικές ροπές. Όσον αφορά το καταστατικό μοντέλο MC έχει εμφανίσει σημαντικά μεγαλύτερα αξονικά φορτία και ροπές κάμψης.

6.5. Ανάλυση με ενεργές ή αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής.

Τα αποτελέσματα ανάμεσα στους δύο τύπους αναλύσεων δεν επέδειξαν σημαντικές διαφορές. Η ανάλυση με ενεργές παραμέτρους αντοχής υπολογίζει μικρότερη αντοχή, αλλά η κατανομή των ενεργών τάσεων και η μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας επιτυγχάνεται σωστά. Αντίθετα, στην ανάλυση με αστράγγιστες παραμέτρους αντοχής δεν μπορεί να γίνει απόλυτα σωστός υπολογισμός των κύριων τάσεων, αλλά η αντοχή του εδάφους είναι σωστά προκαθορισμένη.

Ως βέλτιστη λύση θεωρείται η χρήση ενεργών παραμέτρων αντοχής, οι οποίες όμως θα ελέγχονται και θα τροποποιούνται ώστε να προσεγγίσει το καταστατικό μοντέλο την αντοχή που επέδειξε το έδαφος σε αστράγγιστες συνθήκες.

6.6. Προτάσεις

Δεδομένου ότι η πιο ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στα καταστατικά μοντέλα Hsmall και HS είναι η ικανότητα του Hsmall να προσομοιώνει την συμπεριφορά του εδάφους σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, μια περαιτέρω σύγκριση τους σε σεισμικές αναλύσεις θα παρουσίαζε ουσιαστικές διαφοροποιήσεις.

Προτείνεται επίσης η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με τις μετρήσεις των κυψελών πίεσης που είναι τοποθετημένες στην επένδυση των σηράγγων. Μία τέτοια σύγκριση αναμένεται ότι θα ενισχύσει τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας εμπλουτίζοντάς τα με στοιχεία από τη συμπεριφορά της μόνιμης υποστήριξης.

Βιβλιογραφία

- Brinkgreve, R., Kappert, M., & Bonnier, P. (2007). *Hysteretic damping in small-strain stiffness model*.
- Obrzud, R. (2011). *The Hardening Soil model with small strain stiffness*. Lausanne.
- PLAXIS. (2011). *Material Models Manual*. Delft.
- ROCKSOIL S.p.A. (2008). *Σχέδιο Υλοποίησης Κατασκευής Σηράγγων*.
- ROCKSOIL S.p.A. (2009). *Σταθμός Αγίας Σοφίας - Σιντριβάνι-Σήραγγες TBM - Φάκελος Μεσοδιαστήματος- Τεχνική Έκθεση*.
- Sture, S. (2004). *Non-Linear Hyperbolic Model & Parameter Selection*. Boulder.
- Αναστασιάδης, Α. (1994). *Δυναμικά Χαρακτηριστικά τυπικών Ελληνικών Εδαφών*.
- ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. (n.d.). ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ. Retrieved 2012, from <http://www.ametro.gr/page/>: <http://www.ametro.gr/page/default.asp?la=1&id=132>
- ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε. (2007). *Έκθεση Παρουσίασης Αποτελεσμάτων Συμπληρωματικής Γεωτεχνικής Έρευνας*. Θέρμη.
- Δημακόπουλος, Α. (2010). *Μελέτη των καθιζήσεων λόγω διάνοιξης δίδυμης σήραγγας μετρό Θεσσαλονίκης στο τμήμα Αγία Σοφία- Πανεπιστήμιο*. Αθήνα.
- Κ.Πιτλάκης & Συνεργάτες. (2004). *Μελέτη Σεισμικής Επικινδυνότητας και Προσδιορισμός των Παραμέτρων της Ισχυρής Εδαφικής Κίνησης Σχεδιασμού κατά μήκος του Άξονα Χάραξης του Μετρό Θεσσαλονίκης*. Θεσσαλονίκη.
- Κανακάρη, Ε. (2011). *Μετρό Θεσσαλονίκης - Πρόβλεψη εδαφικών μετατοπίσεων*. Αθήνα.
- ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ. (2007). *Έκθεση Αξιολόγησης Συμπληρωματικής Γεωτεχνικής Έρευνας, Τμήμα Α : ΝΣΣ έως Σταθμός Πανεπιστήμιο*.
- Παναγόπουλος, Γ. (2008). *Ο Ρόλος του Καταστατικού Μοντέλου της Γεωμάζας στον Υπολογισμό των Επιφανειακών Καθιζήσεων Λόγω Διάνοιξης Αβαθούς Σήραγγας*. Αθήνα.
- Παπαδόπουλος, Β. (2008). *Στοιχεία Γεωτεχνικής*. Αθήνα.
- Ρίζος, Π. (2010). *Καθιζήσεις λόγω της διάνοιξης δίδυμης σήραγγας του Μετρό Θεσσαλονίκης στο τμήμα Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός - Αγία Σοφία*. Αθήνα.
- Σοφιανός, Α. (2010). *Τεχνικές Διάνοιξης Σηράγγων*. Αθήνα.
- Σοφιανός, Α. (2010). *Υποστηριξη Υπογείων Έργων*. Αθήνα.
- Σοφιανός, Α., & Νομικός, Π. (2011). *Μηχανική των Πετρωμάτων*. Αθήνα.