

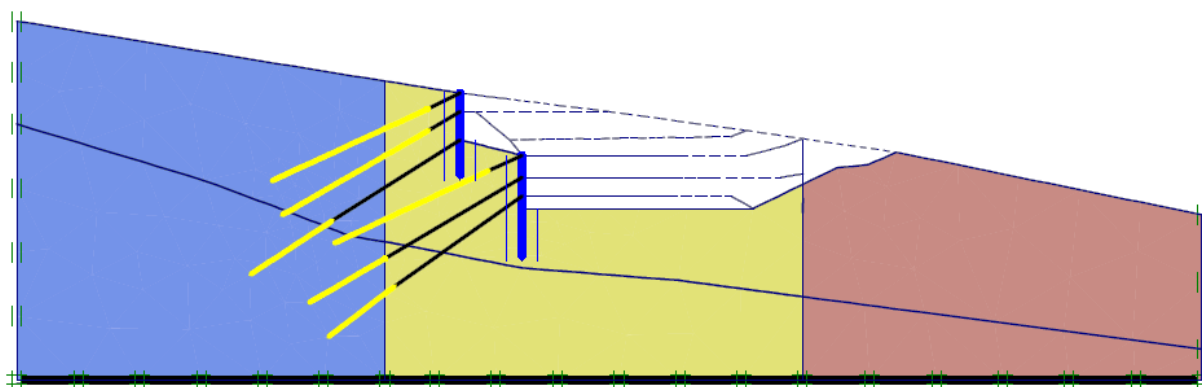


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**«Προσομοίωση συνθηκών ευστάθειας ορύγματος σε αργιλικά εδάφη
με διπλή πασσαλοστοιχία. Η περίπτωση του αυτοκινητόδρομου
Sebes – Turda, Romania»**



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άγγελου Γύφτουλα

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Λουπασάκης
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**«Προσομοίωση συνθηκών ευστάθειας ορύγματος σε αργιλικά εδάφη
με διπλή πασσαλοστοιχία. Η περίπτωση του αυτοκινητόδρομου
Sebes – Turda, Romania»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άγγελου Γύφτουλα

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Λουπασάκης
Αναπλ Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις:

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Μπενάρδος Ανδρέας, Αναπλ Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Νομικός Παύλος, Αναπλ. Καθηγητής .Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021

ΣΥΝΟΨΗ

«Προσομοίωση συνθηκών ευστάθειας ορύγματος σε αργιλικά εδάφη με διπλή πασσαλοστοιχία. Η περίπτωση του αυτοκινητόδρομου Sebes – Turda, Romania»

Στην διάρκεια της κατασκευής, κατά την εκσκαφή, όταν παρατηρούνται μετακινήσεις πολύ μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες οι εργασίες σταματούν προκειμένου να επανεκτιμηθούν οι συνθήκες ευστάθειας και να παρθούν μέτρα σταθεροποίησης. Το ορύγμα της Χ.Θ. 20+000 του έργου “Autostrada Sebes-Turda, lot.2”, στην επαρχία Alba της Ρουμανίας, αποτελεί μια τέτοια περίπτωση.

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται προσομοίωση χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS v.8.2 προκειμένου να διερευνηθούν οι συνθήκες ευστάθειας του υποστηριζόμενου από αγκυρωμένη διπλή πασσαλοστοιχία ορύγματος.

Προσδιορίζονται οι γεωτεχνικές συνθήκες προκειμένου να δημιουργηθεί το βασικό σενάριο προσομοίωσης εκσκαφής του ορύγματος, αγκυρωμένης διπλής πασσαλοστοιχίας και στην συνέχεια επινοούνται σενάρια προσομοίωσης τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται με το αρχικό. Στα σενάρια αυτά δοκιμάζεται η αποτελεσματικότητα του μικρού μήκους και μειωμένης προέντασης αγκυρίων σχεδιασμού, με αντίστοιχα αυξημένου μήκους και ισχυρής προέντασης. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η τοποθέτηση μακρύτερων και ισχυρότερης έντασης αγκυρίων αποτελεί μια καλή πρόταση ως μέτρο έναντι των μετακινήσεων.

Περαιτέρω διερεύνηση, για τον συντελεστή ασφαλείας έδειξε ότι παρά τις υψηλές τιμές του συντελεστή, στην περιοχή πιθανά υπάρχει ένας κύριος μηχανισμός αστοχίας κυκλικής ολίσθησης, ο οποίος επιδρά σε όλη την έκταση του ορύγματος. Υπάρχουν επίσης δευτερεύοντες μηχανισμοί αστοχίας κάτω από την κάθε πασσαλοστοιχία. Εξτρά σειρές αγκυρίων, στην υπάρχουσα κατασκευαστική φάση, μακριών και ισχυρής έντασης, φαίνεται να παρεμποδίζουν την λειτουργία του μηχανισμού αστοχίας κάτω από την κατάντη πασσαλοστοιχία, με αποτέλεσμα την προστασία της.

ABSTRACT

“Simulation of the stability conditions of a clay slope by using double pile walls. The case of Autostrada Sebes – Turda, Romania”

In construction, during excavation, when the actual displacements exceed the anticipated ones, then works are paused. The stability conditions of the affected area have to be re-evaluated in order to take the appropriate measures. The cut of km 20+000 of the “Autostrada Sebes-Turda, lot.2” project, in Alba county in Romania, is a case study of the above scenario.

In this thesis, using PLAXIS v.8.2 finite element software, a simulation of this anchored,-double-pile-wall-supported cut, is performed, to investigate its stability conditions.

Geotechnical conditions are evaluated in order create the base scenario of the cut excavation with the anchored double pile wall support. Base scenario results are then compared to extra scenarios. These include one where the effectiveness of the designed short and weak tensioned anchors is tested versus one, with long and higher tension values anchors. The results point out that longer anchors with higher tension values ought to one of the decent measures versus displacements.

Further investigation for the safety factor show that despite its high-values a main slide failure mechanism affecting all the area is probable and lying there, along with secondary ones affecting just each of the pile-walls. Extra lines of long and strong anchors, in the current excavation phase, seem to prevent the activity of secondary failure mechanism below the lower pile wall, thus protecting it.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους χωρίς την βοήθεια και συμπαράστατη των οποίων δεν θα ήταν δυνατή η συγγραφή και ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Κωσταντίνο Λουπασάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π. για την πίστη, υποστήριξη, καθοδήγηση και βοήθεια του (ενίοτε και σε ανορθόδοξα οράρια) όλον αυτό το διάστημα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επιτροπής εξέτασης της διπλωματικής (και υπεύθυνους του τμήματος), κ. Παύλο Νομικό, Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π. και τον κ. Ανδρέα Μπενάρδο Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π. για την υπομονή τους και την πίστη τους στο άτομο μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες και ευγνωμοσύνη απευθύνω στους φίλους και συναδέλφους, Νίκο Ρούσσο για τις πολύτιμες συμβουλές του και καθοδήγηση σχετικά με το PLAXIS (και όχι μόνον), τον Γιώργο Καμάρη για την υποστήριξη και πρακτική βοήθεια του κατά την συγγραφή της παρούσας και τον Γιώργο Γεωργακόπουλο για την ψυχική υποστήριξη και συμπαράσταση του κατά την διάρκεια του εν λόγω μεταπτυχιακού προγράμματος.

Αδιαμφισβήτητα, θερμές ευχαριστίες στην Ρόη Παπακωνσταντινοπούλου, υπεύθυνη Γραμματείας ΔΠΜΣ, για την ανιδιοτελή υποστήριξη και ενδιαφέρον της.

Τέλος, να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη και κατανόηση τους όλο αυτό το διάστημα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	2
1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΓΟΥ	3
2. ΕΡΓΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ	4
2.1. Κατασκευές αντιστήριξης	5
2.1.1. Τοίχοι από τοιχοποιία ή από σκυρόδεμα	7
2.1.2. Τοίχοι υπογείων	7
2.1.3. Βάθρα Γεφυρών	7
2.1.4. Συρματοκυβώτια (ζαρζανέτια) & ξύλινοι τοίχοι	7
2.1.5. Διαφραγματικοί τοίχοι.....	8
2.2. Σχεδιασμός έργων αντιστήριξης	10
3. ΩΘΗΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ	11
3.1. Θεωρία ωθήσεων γαιών Rankine	11
3.2. Μέθοδος Coulomb	14
4. ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ	17
4.1. Ταξινόμηση αγκυρίων	17
4.2. Ταξινόμηση με βάση τον τόπο κατασκευής	18
4.2.1. Τύπος A: Λείο διάτρημα, ένεμα χωρίς πίεση.....	18
4.2.2. Τύπος B: Ένεμα με ελαφρά πίεση	18
4.2.3. Τύπος C: Ένεμα με υψηλή πίεση.....	19
4.2.4. Τύπος D: Βολβοί από διαδοχικές διευρύνσεις	19
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΡΓΟΥ	21
5.1. Γεωμορφολογία περιοχής μελέτης.....	21
5.2. Γεωλογικές συνθήκες περιοχής μελέτης	22
5.2.1. Γεωλογία περιοχής ορύγματος	24
5.3. Υδρογεωλογικές συνθήκες περιοχής μελέτης	25
5.3.1. Υδρογεωλογία Ορύγματος.....	26
5.4. Γεωτεχνική αξιολόγηση περιοχής	26
5.4.1. Αξιολόγηση διαθέσιμων γεωτεχνικών μελετών	26
5.4.2. Αποτελέσματα επεξεργασίας διαθέσιμων αποτελεσμάτων εργ. δοκιμών.....	27
5.4.3. Συμπεράσματα γεωτεχνικής αξιολόγησης:	31

6.	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (PLAXIS 2D)	33
6.1.	Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων	33
6.2.	Προσομοίωση του εδάφους	34
6.2.1.	Το Μοντέλο Mohr – Coulomb	36
6.2.2.	Το Μοντέλο HARDENING	38
6.3.	Προσομοίωση δομικών στοιχείων μέσω του κώδικα PLAXIS.....	40
6.3.1.	Προσομοίωση στοιχείων αγκύρωσης μέσω του κώδικα PLAXIS.....	40
6.3.2.	Προσομοίωση στοιχείων διεπιφάνειας μέσω του κώδικα PLAXIS.....	41
6.4.	Υπολογισμός Συντελεστή ασφαλείας	42
7.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	43
7.1.	Κατάστρωση εννοιολογικού μοντέλου	43
7.1.1.	Γεωμετρία μοντέλου	43
7.1.2.	Γεωτεχνικές παράμετροι μοντέλου	45
7.1.3.	Παραμετρικά στοιχεία κατασκευών μοντέλου.....	47
7.2.	Οριακές συνθήκες.....	53
7.3.	Διακριτοποίηση χώρου – δημιουργία κανάβου υπολογισμών.....	53
7.4.	Αρχικές συνθήκες μοντέλου (initial conditions)	54
7.5.	Εκτέλεση υπολογισμών – στάδια προσομοίωσης.....	56
8.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	57
9.	ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	62
9.1.	Σενάρια 1,2 -Αποτελέσματα.....	62
9.2.	Σενάριο 3 - Αποτελέσματα.....	68
9.3.	Προσδιορισμός συντελεστή ασφαλείας.....	75
10.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	80
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	84
	Παράρτημα Π.1 – Πίνακας αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών.....	
	Παράρτημα Π.2 – Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών.....	
	Παράρτημα Π.3 – Επεξεργασμένα αποτελέσματα δοκιμών SPT	
	Παράρτημα Π.4 – Αναφορές δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης (UCS).....	
	Παράρτημα Π.5 – Αποτελέσματα δοκιμών Στερεοποίησης	

Περιεχόμενες εικόνες

Εικόνα 1. Αεροφωτογραφία περιοχής μελέτης (πηγή: Google Earth)	3
Εικόνα 2. Κοινοί τύποι κατασκευών αντιστήριξης (πηγή εικόνας: Barnes 2005).....	6
Εικόνα 3. Στάδια κατασκευής πασσαλοστοιχίας (πηγή εικόνας: https://www.keller-africa.co.za/).....	10
Εικόνα 4. Αεροφωτογραφία περιοχής μελέτης (πηγή: Google Earth).....	21
Εικόνα 5. Απόσπασμα γεωμορφολογικού χάρτη περιοχής μελέτης (πηγή εικόνας: Geosearch 2016).....	22
Εικόνα 6. Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη περιοχής μελέτης (πηγή εικόνας: Geosearch 2016).....	23
Εικόνα 7. Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS	54
Εικόνα 8. Αρχικές συνθήκες γεωστατικών πιέσεων (Gravity Loading).....	55
Εικόνα 9. Κάναβος μετακινήσεων “μηδενικού” σεναρίου (50.000 x scale).....	57
Εικόνα 10. Συνολικές μετακινήσεις μοντέλου	57
Εικόνα 11. Συνολικές οριζόντιες μετακινήσεις μοντέλου.....	58
Εικόνα 12. Συνολικές κατακόρυφες μετακινήσεις μοντέλου.	58
Εικόνα 13. Διανυσματική κατανομή των ενεργών τάσεων	59
Εικόνα 14. Διανυσματική κατανομή των κύριων παραμορφώσεων (+5,31%).....	59
Εικόνα 15. Σημεία πλαστικών παραμορφώσεων στην έκταση του μοντέλου (λευκό: εφελκυστική διαρροή, κόκκινο: διατμητική διαρροή, πράσινο/μπλε: διαρροή παραμορφώσεων όγκου)	60
Εικόνα 16. Αποτελέσματα προσομοίωσης (S0) κατάντη πασσαλοστοιχία (L1)	60
Εικόνα 17. Αποτελέσματα προσομοίωσης (S0) ανάντη πασσαλοστοιχία (L2).....	61
Εικόνα 18. Διανύσματα κύριων παραμορφώσεων κατά το Σενάριο 1.....	66
Εικόνα 19. Διανύσματα κύριων παραμορφώσεων κατά το Σενάριο 2.....	66
Εικόνα 20. Ανάπτυξη πλαστικών περιοχών κατά το Σενάριο 1	67
Εικόνα 21. Ανάπτυξη πλαστικών περιοχών κατά το Σενάριο 2	67
Εικόνα 22. Κάναβος μετακινήσεων Σεναρίου 3 σεναρίου (50.000 x scale)	70
Εικόνα 23. Συνολικές μετακινήσεις μοντέλου Σεναρίου 3	71
Εικόνα 24. Διανυσματική κατανομή των κύριων παραμορφώσεων (-2,92%)	71
Εικόνα 25. Σημεία πλαστικών παραμορφώσεων στην έκταση του μοντέλου του Σεναρίου 3.....	72
Εικόνα 26. Διανυσματική κατανομή των ενεργών τάσεων	72
Εικόνα 27. Διανυσματική κατανομή πιέσεων πόρων	73

Περιεχόμενα σχήματα

Σχήμα 1. Ενεργές – παθητικές ωθήσεις σε ένα διάφραγμα	12
Σχήμα 2. Επιφάνειες αστοχίας κατά Rankine	13
Σχήμα 3. Διαγράμματα ωθήσεων σε ένα διάφραγμα	16
Σχήμα 5. Διάγραμμα συσχέτισης παραμέτρων, ϕ & c , αποτελεσμάτων Slow Shear test.....	28
Σχήμα 6. Συσχέτιση αποτελεσμάτων παραμέτρων δοκιμών άμεσης διάτμησης με το βάθος διάτμησης.	29
Σχήμα 7. Σχέση βάθους διάτμησης και αντοχής ανεμπόδιστης θλίψης	29
Σχήμα 8. Συσχέτιση αποτελεσμάτων παραμέτρων ανεμπόδιστης θλίψης με το βάθος διάτμησης ή το πραγματικό υψόμετρο.....	30
Σχήμα 9. Διάγραμμα SPT συναρτήσει του βάθους διάτμησης.....	31
Σχήμα 10. Στοιχεία κάναβου PLAXIS και κατανομή σημείων υπολογισμού μετατοπίσεων (nodes) και τάσεων (stress).....	34
Σχήμα 11. Υπερβολική καμπύλη σχέσης τάσης παραμόρφωσης κατά την κύρια φόρτιση σε τριαξονική δοκιμή	35
Σχήμα 12. Προσομοίωση του εδάφους κατά το τέλεια ελαστικό – τέλεια πλαστικό μοντέλο Mohr-Coulomb (διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων).....	36
Σχήμα 13. Η επιφάνεια διαρροής Mohr-Coulomb σε χώρο κύριων τάσεων	37
Σχήμα 14. Φθίνουσα μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας E_{50} , καθώς εξελίσσεται η εκτροπική φόρτιση μιας τυπικής τριαξονικής δοκιμής	38
Σχήμα 15. Ο φορέας (στοιχείο), Plate, που χρησιμοποιεί το PLAXIS και η κατανομή των σημείων υπολογισμών μετατοπίσεων (nodes) και τάσεων (stress)	40
Σχήμα 16. Σχέση στοιχείου διεπιφάνειας με το έδαφος και η κατανομή των σημείων υπολογισμών μετατοπίσεων (nodes) και τάσεων (stress).	41
Σχήμα 17. Παράδειγμα δισδιάστατων προσομοιωμάτων Plain strain και axisymmetric (πηγή εικόνας: PLAXIS v8 Reference manual)	44
Σχήμα 18. Στοιχεία ισοδύναμου φορέα.....	48
Σχήμα 19. Διαγράμματα καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων σεναρίων 0,2,3.	65
Σχήμα 20. Αναπαράσταση ορύγματος κατά την τελική στάθμη εκσκαφής , Σενάριο 3 (S3).	69
Σχήμα 21. Μείωση Οριζόντιας μετακίνηση σημείου B (κορυφή κατάντη πασσαλοστοιχίας) κατά το Σενάριο 3 σε σχέση με το αρχικό.....	73
Σχήμα 22. Διαγράμματα καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων σεναρίων 03.	74

Σχήμα 23. Διαγράμματα μηχανισμών αστοχίας στις φάσεις εκσκαφών.....76

Περιεχόμενοι πίνακες

Πίνακας 1 Γενικές κατηγορίες έργων αντιστήριξης.....	5
Πίνακας 2. Τύποι υπολογισμού ενεργών και παθητικών ωθήσεων Rankine.....	12
Πίνακας 3. Τύποι υπολογισμού ενεργών και παθητικών ωθήσεων Coulomb.....	14
Πίνακας 4. Τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σχηματισμών αρχικής μελέτης ορύγματος	26
Πίνακας 5. Τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σχηματισμών 2015.....	27
Πίνακας 6. Τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σχηματισμών του ορύγματος 2017	27
Πίνακας 7. Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων όπως προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία:	32
Πίνακας 8. Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά μοντέλου	45
Πίνακας 9. Τιμές δεικτών δοκιμών στερεοποίησης.....	46
Πίνακας 10. Υπολογισμοί παραμέτρων αγκυρίων.....	51
Πίνακας 11. Υπολογισμοί παραμέτρων πακτωμένου τμήματος αγκυρίων.	52
Πίνακας 12. Παραμετρικά αποτελέσματα Σεναρίων (1/2).....	63
Πίνακας 13. Παραμετρικά αποτελέσματα Σεναρίων (2/2).....	64
Πίνακας 14. Παραμετρικά αποτελέσματα Σεναρίου 3 (1/2)	69
Πίνακας 15. Παραμετρικά αποτελέσματα Σεναρίου 3 (2/2)	70
Πίνακας 16. Συντελεστές ασφαλείας σεναρίων	75

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται διερεύνηση των συνθηκών ευστάθειας ενός υπό κατασκευή ορύγματος οδοποιίας, σε αργλικούς σχηματισμούς, μέσω προσομοίωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό PLAXIS.

Το όρυγμα κατασκευάζεται με αγκυρωμένη διπλή πασσαλοστοιχία. Κατά την κατασκευή καταγράφηκαν αξιοσημείωτες μετακινήσεις οι οποίες δεν είχαν προβλεφθεί από την αρχική μελέτη. Προέκυψαν λοιπόν ερωτήματα σχετικά με την ασφάλεια της κατασκευής, την επάρκεια των μέτρων αντιστήριξης, τις γεωτεχνικές συνθήκες, των αρχικών μελετητικών επιλογών για το σχεδιασμό της αντιστήριξης και φυσικά τις κατασκευές πρακτικές που ακολουθήθηκαν.

Τα ερωτήματα αυτά αποτέλεσαν και το έναυσμα της παρούσας διερεύνησης. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η κατά το δυνατόν καλύτερη περιγραφή-προσομοίωση των στοιχείων που απαρτίζουν το εν λόγω έργο (πασσαλοστοιχίες, αγκυρώσεις, γεωτεχνικά χαρακτηριστικά εδάφους κλπ) και των συνθηκών κατασκευής, με σκοπό την απάντηση κάποιων, αν όχι όλων των παραπάνω ερωτημάτων

Οι εργασίες κατασκευής στο όρυγμα έχουν σταματήσει μέχρι οι μελετητές να ολοκληρώσουν τις μελέτες τους. Η παρούσα εργασία δεν αποτελεί τμήμα αυτών των μελετών, αποτελεί όμως ένα case study ενός εκ λύσεων που έχουν προταθεί.

ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το έργο και την περιοχή μελέτης όπου βρίσκεται

Το 2^ο κεφάλαιο αποτελεί εισαγωγικό κεφάλαιο για τα έργα αντιστήριξης, με ορισμούς, τύπους κατασκευών και συνήθεις χρήσεις αυτών αναλόγως τις ανάγκες. Σκοπός είναι να γίνει κατανοητή η ευρεία χρήση των έκχυτων πασσαλοστοιχιών.

Το 3^ο κεφάλαιο, αναφέρει συνοπτικά στοιχεία της θεωρίας ώθησης γαιών του Rankine που αποτελεί την βασική θεώρηση επίλυσης ευστάθειας των κατασκευών αντιστήριξης.

Στο κεφάλαιο 4, γίνεται λόγος για τις αγκυρώσεις οι οποίες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των αντιστηρίξεων

Στο 5^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται περιγραφή των συνθηκών (γεωμορφολογικών, γεωλογικών, γεωτεχνικών κλπ) που επικρατούν στην περιοχή μελέτης.

Το 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζει το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS και τις βασικές έννοιες που υπεισέρχονται για την ορθή χρήση του.

Στο 7^ο κεφάλαιο καταστρώνεται το εννοιολογικό μοντέλο της προσομοίωσης, υπολογίζονται οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν, και καθορίζονται οι οριακές και συνοριακές συνθήκες του μοντέλου.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 8, ενώ στο κεφάλαιο 9 καταστρώνονται εξτρά σενάρια προσομοίωσης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά τους.

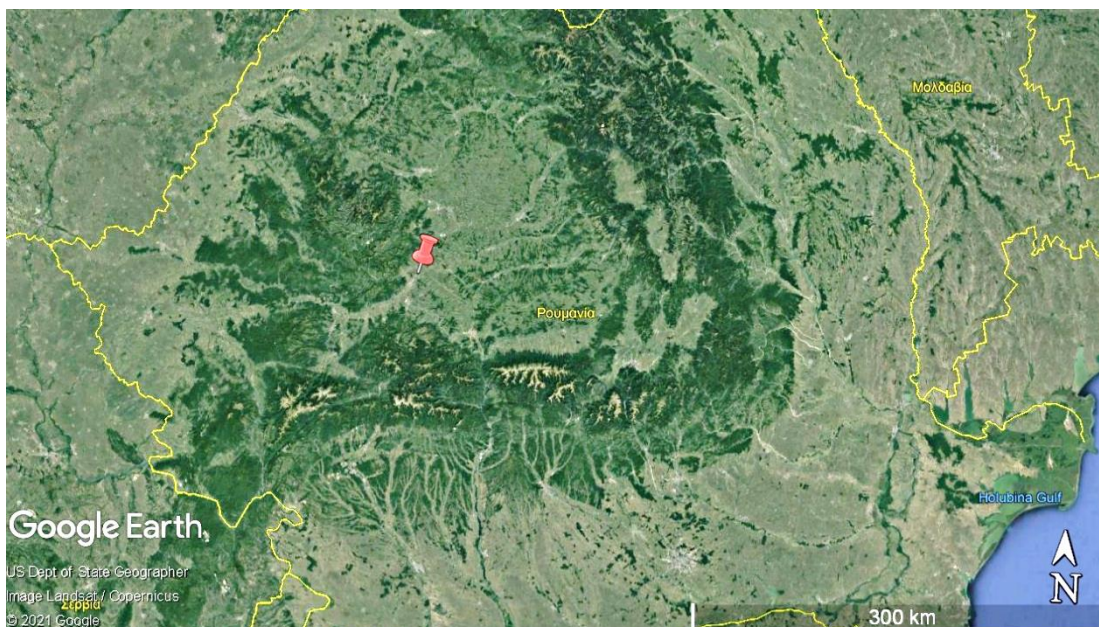
Τέλος στο κεφάλαιο 10, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρουσίας.

Ακολουθεί η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την συγγραφή της παρούσας και τα παραρτήματα τα οποία περιέχουν δεδομένα (πίνακες, διαγράμματα και εικόνες) των οποίων η σύνοψη μόνο παρουσιάστηκε.

1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΓΟΥ

Γεωγραφική θέση

Το έργο τοποθετείται στο κεντρικό τμήμα της Ρουμανίας, στην εσωτερική πεδιάδα της οροσειράς των Καρπαθίων (δες παρακάτω αεροφωτογραφία) στην επαρχία (νομό) Alba. Η περιοχή θεωρείται πρόποδας των εσωτερικών όρεων Apusemi.



Εικόνα 1. Αεροφωτογραφία περιοχής μελέτης (πηγή: Google Earth)

Τεχνικά Χαρακτηριστικά έργου

Το υπό μελέτη όρυγμα βρίσκεται μεταξύ των Χ.Θ. 19+596 - 20+288 του έργου: **Autostrada Sebes Turda - lot.2 - KM 17+000 - KM 41+250** (Αυτοκινητόδρομος Sebes - Turda, Τμήμα 2)

Τεχνικά Χαρακτηριστικά:

- Μέγιστο πλάτος ορύγματος: 66μ (ωφέλιμο οδού κ συνοδων υδραυλικων έργων ~37μ.)
- Μέγιστο ύψος ορύγματος: 16μ.
- Μονή πασσαλοστοιχία: Χ.Θ. 19+596 – Χ.Θ. 20+288
- Διπλή πασσαλοστοιχία: Χ.Θ.19+835 - Χ.Θ. 20+190

Η υπό κατασκευή οδός αποτελεί το τμήμα 2 (από 3) του υπό κατασκευή Αυτοκινητόδρομου που ενώνει το την πόλη Cluj-Napoca με την πόλη του Sibiu. Αυτός με την σειρά του αποτελεί τμήμα του Εθνικού Οδικού Δικτύου

2. ΕΡΓΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ

Η πραγματοποίηση διάφορων τεχνικών έργων απαιτεί πολύ συχνά την αφαίρεση μεγάλων εδαφικών μαζών μέσω της διαδικασίας της εκσκαφής. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αναγκαία η κατασκευή ενός έργου, το οποίο θα συγκρατεί και θα αντιστηρίζει τις εναπομένουσες εδαφικές μάζες. Στην κατηγορία αυτών των έργων, τα οποία ονομάζονται **έργα αντιστήριξης**, ανήκουν τα διαφράγματα πασσαλοσανίδων, τα ακρόβαθρα γεφυρών και άλλα, με πλέον όμως συνηθέστερους, τους τοίχους αντιστήριξης.

Γενικά, ως κατασκευές αντιστηρίξεως εδαφών ορίζονται τα έργα τα οποία επιτρέπουν την πραγματοποίηση μιας απότομης αλλαγής στην στάθμη της γήινης επιφάνειας, με τέτοιο τρόπο ώστε το σύστημα έδαφος-κατασκευή να έχει περιορισμένες μετακινήσεις ή να συγκρατείται οριακά. Οι κατασκευές αντιστηρίξεως εδαφών χρησιμοποιούνται κυρίως στις περιπτώσεις όπου απαιτείται η πραγματοποίηση εκσκαφής κάτω από την υφιστάμενη εδαφική επιφάνεια, όπως στη διάνοιξη μιας υπόγειας σήραγγας. Επιπλέον όμως έργα αντιστηρίξεως εφαρμόζονται στις περιπτώσεις όπου επιβάλλεται υπερύψωση της υφιστάμενης εδαφικής επιφάνειας με επίχωση, όπως σε λιμενικά έργα. Τέλος, κατασκευάζονται έργα αντιστήριξης για την αντιμετώπιση του φαινομένου της κατολίπησης φυσικών ή τεχνητών πρανών με στόχο την επίτευξη της επαρκούς και διαρκούς ευστάθειάς τους.

Σε κάθε περίπτωση, είτε πρόκειται για εκσκαφή, επίχωση ή σταθεροποίηση πρανών, ένα έργο αντιστήριξης οφείλει να παρέχει προστασία τόσο στις γειτονικές κατασκευές όσο και στο ευρύτερο περιβάλλον του έργου, κυρίως έναντι των κινδύνων της μείωσης της φέρουσας ικανότητας και της αύξησης των καθιζήσεων του εδάφους της περιοχής

2.1. Κατασκευές αντιστήριξης

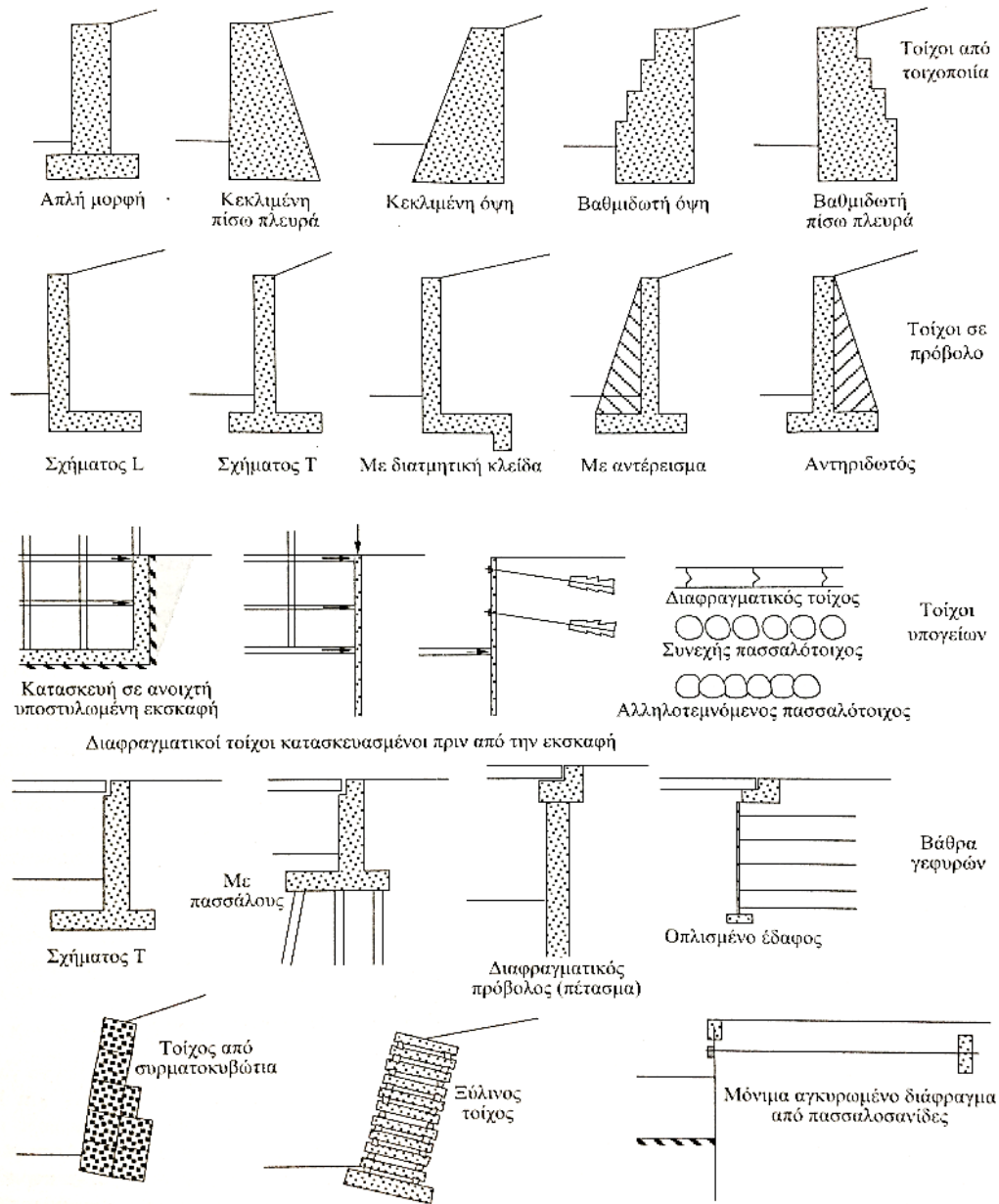
Υπάρχει μια ευρεία κλίμακα κατασκευών που χρησιμοποιούνται για να αντιστηρίξουν το έδαφος, τόσο για προσωρινές όσο και μόνιμες εργασίες.

Τα έργα αντιστήριξης είναι δυνατόν να διαχωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες (κατηγοριοποίηση κατά Κούστα 2007):

Πίνακας 1 Γενικές κατηγορίες έργων αντιστήριξης

Μόνιμες		Προσωρινές	
Συνεχείς	Ασυνεχείς	Συνεχείς	Ασυνεχείς
Τοίχοι Βαρύτητας	Πάσσαλοι με ελεύθερο χώρο ανάμεσά τους	Διαφράγματα Μεταλλικών Πασσαλοσανίδων	Μεταλλικοί Πάσσαλοι (Soldier piles)
Διαφράγματα Σκυροδέματος			
Επικαλυπτόμενοι Πάσσαλοι	Αλληλοεφαπτόμενοι πάσσαλοι χωρίς δοκούς σύζευξης		
Πάσσαλοι με ενδιάμεσους θόλους			
Αλληλοεφαπτόμενοι πάσσαλοι με δοκούς σύζευξης			

Στην παρακάτω εικόνα (εικ.2) παρουσιάζονται μερικοί από τους πιο κοινούς τύπους κατασκευών αντιστήριξης για διάφορους σκοπούς



Εικόνα 2. Κοινός τύποι κατασκευών αντιστήριξης (πηγή εικόνας: Barnes 2005)

2.1.1. Τοίχοι από τοιχοποιία ή από σκυρόδεμα

Οι τοίχοι από τοιχοποιία ή από σκυρόδεμα στηρίζονται κυρίως στο βάρος τους, για ευστάθεια έναντι ανατροπής και ολίσθησης. Είναι άοπλοι και έτσι το ύψος τους πρέπει να περιορίζεται ώστε να εξασφαλίζει την εσωτερική ευστάθεια του τοίχου σε κάμψη και διάτμηση, όταν υπόκεινται σε εγκάρσιες τάσεις.

Οι τοίχοι από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι πιο οικονομικοί με τον οπλισμό τοποθετημένο έτσι ώστε να επιτρέπει στον κορμό και την βάση του τοίχου να σχεδιάζονται ως πρόβολοι. Η ολική ευστάθεια εξασφαλίζεται από επαρκές πλάτος βάσης και από το βάρος του επιχώματος που πατάει σε μια πλάκα πίσω από τον κορμό (Barnes 2005).

2.1.2. Τοίχοι υπογείων

Αντίθετα με τους παραπάνω τοίχους, οι οποίοι είναι ελεύθεροι, οι τοίχοι υπογείων περιορίζονται στην μετακίνηση τους λόγω πάκτωσης στο έδαφος, από την πλάκα βάσης, την οροφή του υπογείου και πιθανόν από εξωτερικά αγκύρια. Τα τελευταία χρησιμοποιούνται περισσότερο για προσωρινή στήριξη κατά την διάρκεια της κατασκευής, ενώ η μόνιμη στήριξη εξασφαλίζεται από την μεταγενέστερη πλάκα του υπογείου και το δάπεδο. Εναλλακτικά μπορεί να εξασφαλισθεί η προσωρινή εσωτερική στήριξη με αντηρίδες που θα αντικατασταθούν στο τέλος από την μόνιμη πλάκα της βάσης και τα δάπεδα (Barnes 2005)

2.1.3. Βάθρα Γεφυρών

Αυτοί οι τοίχοι εξασφαλίζουν στήριξη στο έδαφος και λειτουργούν ως θεμέλια του καταστρώματος. Εκτός από την εξασφάλιση κανονικών συνθηκών ευστάθειας πρέπει να εξασφαλίζονται και ανεκτές καθιζήσεις για το κατάστρωμα της γέφυρας.

2.1.4. Συρματοκυβώτια (ζαρζανέτια) & ξύλινοι τοίχοι

Οι τοίχοι από σκυρόδεμα ακόμα και όταν επενδύονται με τοιχοποιία ή άλλα υλικά μπορεί να φαίνονται ασύμβατοι με το περιβάλλον. Τα συρματοκυβώτια μπορούν να ενσωματωθούν αρμονικά στο περιβάλλον καθώς μοιάζουν με ξερολιθιές. Οι δε ξύλινοι τοίχοι είναι περιβαλλοντικά ηπιότεροι.

Και οι δύο τύποι έχουν υψηλή διαπερατότητα και έτσι δεν απαιτείται πρόσθετη αποστράγγιση. Εξασφαλίζουν της αντοχή τους από την αλληλεπίδραση των εφελκυστικών ιδιοτήτων του συρμάτινου πλέγματος ή του χαλύβδινου κλωβού και τον τρόπο σύνδεσης των ξύλων, που συνδυάζονται με την διατμητική αντοχή των λίθων που περικλείουν.

Το έδαφος που στηρίζουν πρέπει να έχει σε κάποιο βαθμό την ικανότητα αυτό-υποστήριξης κατά την διάρκεια της κατασκευής και για αυτό χρησιμοποιούνται για πρόσθετη υποστήριξη σε αναβαθμίδες και φυσικά πρανή. Επίσης επιλέγονται για προστασία οχθών ποταμών λόγω σημαντικής αντοχής τους στην διάβρωση.

2.1.5. Διαφραγματικοί τοίχοι

Οι διαφραγματικοί τοίχοι είναι λεπτές δύσκαμπτες κατασκευές από υλικά υψηλής διατμητικής αντοχής οι οποίοι σχεδιάζονται έτσι ώστε να μεταβιβάζουν τις ενεργές ωθήσεις στους σχηματισμούς που εκτείνονται κάτω από το δάπεδο του πρανούς ή τη στάθμη της εκσκαφής. Οι σχηματισμοί αυτοί ασκούν ισχυρές παθητικές ωθήσεις στο εμπηγμένο τμήμα των τοίχων με την ενεργοποίηση της διατρητικής αντοχής τους. Για την οικονομικότερη και ασφαλέστερη σχεδίαση τους υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης αγκυρίων ή αντηρίδων στο μη πακτωμένο τμήμα τους για τη μετρίαση των απαιτούμενων παθητικών ωθήσεων. Ανάλογα με τη χρήση ή μη επιπρόσθετων στηρίξεων διακρίνονται σε διαφράγματα με ελεύθερο ή μη άκρο. Οι διαφραγματικοί τοίχοι διακρίνονται σε πασσαλοσανίδες, οπλισμένα έγχυτα διαφράγματα και σε τοίχους τύπου Βερολίνου. (Λουπασάκης, 2015)

Πασσαλότοιχοι

Γενικά ως πάσσαλος ορίζεται μια μακρόστενη δύσκαμπτη κατασκευή, από ξύλο, μπετό, μέταλλο ή άλλα υλικά, η οποία λόγω του σχήματος και της στατικής λειτουργίας της, αντιστηρίζει και θεμελιώνει οποιοδήποτε φρέαρ στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί (π.χ. οικοδομές με την έννοια του θεμελίου, τοίχου αντιστήριξης, φράχτες). Ο πάσσαλος ως μέλος ενός τοίχου αντιστήριξης αναπτύσσει μεταξύ του ίδιου και του εδάφους δράσεις τριβής και αντιδράσεις αιχμής (Παπαβασιλείου κ.α. 2017)

Οι πάσσαλοι μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με: (Σπηλιωτοπούλου et. al.,2016 από Παναγόπουλος 2020)

Τη μέθοδο εγκατάστασης τους:

- Πάσσαλοι έμπηξης
- Έγχυτοι πάσσαλοι (φρεατοπάσσαλοι)

Το είδος του υλικού τους:

- Ξύλινοι
- Χαλύβδινοι
- Από σκυρόδεμα προκατασκευασμένοι ή έγχυτοι επί τόπου, μονοκόμματοι ή σύνθετοι

Το είδος του συστήματος εγκατάστασης τους:

- Πασσαλομπήκτης δονητικός
- Πασσαλομπήκτης περιστροφικός με αφαίρεση εδάφους
- Διατρητικό μηχάνημα

Το μέγεθος τους:

- Έγχυτοι μικρής διαμέτρου
- Έγχυτοι μεγάλης διαμέτρου
- Ριζοπάσσαλοι
- Μικροπάσσαλοι

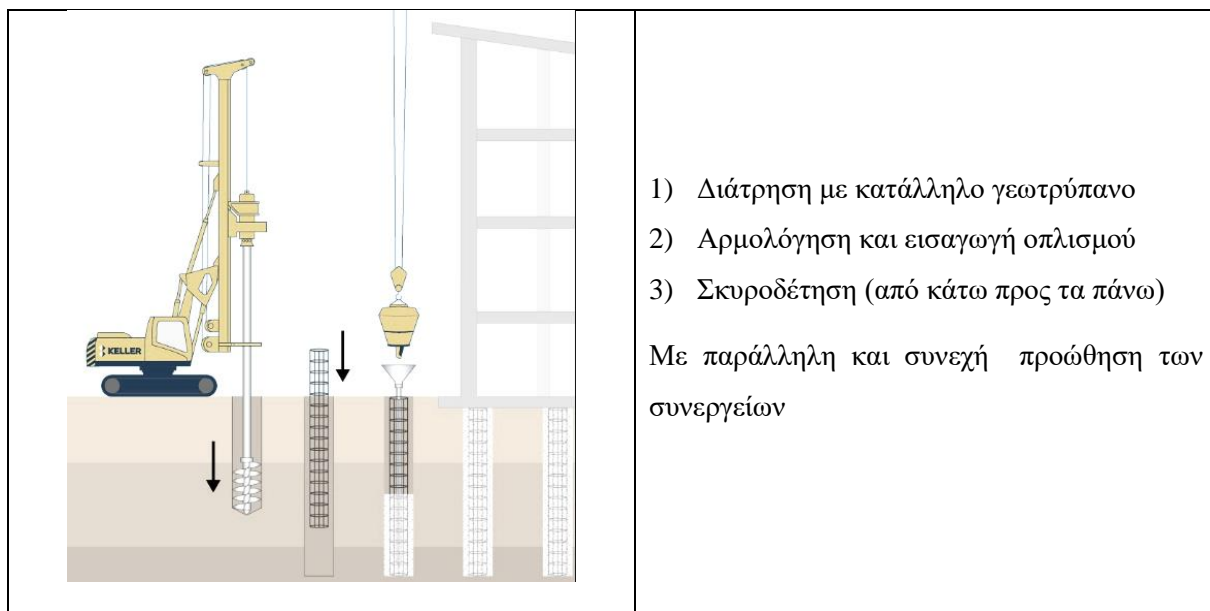
τις επιδράσεις κατά την τοποθέτηση:

- Εκτόπισης υλικού
- Αντικατάστασης υλικού

τον τρόπο που εξασφαλίζουν την ικανότητα ανάληψης φορτίου:

- Πάσσαλοι αιχμής
- Πάσσαλοι τριβής
- Εφελκούμενοι πάσσαλοι
- Κεκλιμένοι πάσσαλοι
- Πάσσαλοι βελτίωσης χαρακτηριστικών εδάφους

Στην παρούσα εργασία ο τοίχος αντιστήριξης του ορύγματος είναι κατασκευασμένος από εκχυτους πασσάλους, διαμέτρου 1,4m, κατασκευασμένους με γεωτρύπανο τύπου CASAGRANDE.



- 1) Διάτρηση με κατάλληλο γεωτρύπανο
- 2) Αρμολόγηση και εισαγωγή οπλισμού
- 3) Σκυροδέτηση (από κάτω προς τα πάνω)

Με παράλληλη και συνεχή προώθηση των συνεργείων

Εικόνα 3. Στάδια κατασκευής πασσαλοστοιχίας (πηγή εικόνας: <https://www.keller-africa.co.za/>)

2.2. Σχεδιασμός έργων αντιστήριξης

Τα συνήθη ζητούμενα μεγέθη - στοιχεία κατά τον σχεδιασμό έργων αντιστήριξης είναι τα εξής (Κούστα 2007):

- Η εύρεση των εντατικών μεγεθών του στοιχείου αντιστήριξης, προκειμένου να ελεγχθεί αν η αντοχή του επαρκεί και εν συνεχεία να διαστασιολογηθεί κατάλληλα.
- Η εύρεση της έντασης όποιου άλλου στοιχείου συμμετέχει στο σύστημα αντιστήριξης, προκειμένου να ελεγχθεί αν η αντοχή του επαρκεί και εν συνεχεία να διαστασιολογηθεί κατάλληλα.
- Η τοπική ευστάθεια του έργου αντιστήριξης.
- Η συνολική ευστάθεια της περιοχής που επηρεάζεται από το έργο.
- Το μέγεθος και η διεύθυνση των παραμορφώσεων, είτε του εδάφους είτε παρακείμενων κατασκευών που επηρεάζονται από την εκσκαφή και το έργο αντιστήριξης, στα κρίσιμα σημεία όπου είναι απαραίτητη η γνώση τους.

Η θεωρία Rankine, πλευρικών ωθήσεων γαιών, ίσως είναι η πιο κλασσική θεώρηση προσδιορισμού φορτίου στις κατασκευές, λόγω της εκσκαφής και αφαίρεσης υλικού, και προβλέπει ενεργητικές και παθητικές ώθησης των γαιών, για τους οποίες γίνεται λόγος στο επόμενο κεφάλαιο.

3. ΩΘΗΣΕΙΣ ΕΛΑΦΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ

Η εκτίμηση των ωθήσεων του εδάφους είναι απαραίτητη σε πολλούς τύπους κατασκευών όπως τοίχοι αντιστήριξης γαιών, περιμετρικά τοιχεία υπογείων, αντιστηρίξεις εκσκαφών, επενδύσεις σηράγγων κλπ.

Τα εδάφη, λόγω του βάρους τους, ασκούν πιέσεις στα κατακόρυφα στοιχεία που τα περιορίζουν. Η πιο συνηθισμένη ίσως περίπτωση είναι η πλευρική ώθηση που ασκείται όταν παρεμποδίζεται η πλευρική παραμόρφωση.

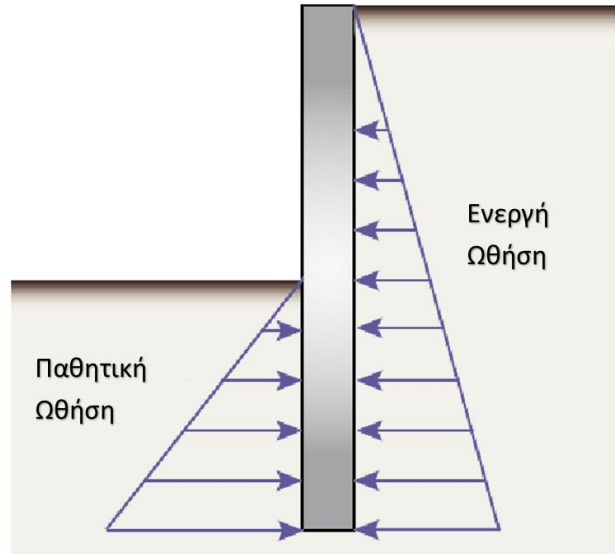
3.1. Θεωρία ωθήσεων γαιών Rankine

Η θεωρία Rankine, πλευρικών ωθήσεων γαιών, ίσως είναι η πιο κλασσική θεώρηση προσδιορισμού φορτίου στις κατασκευές, λόγω της εκσκαφής και αφαίρεσης υλικού, και προβλέπει ενεργητικές και παθητικές ώθησης των γαιών.

Αν ο τοίχος απομακρυνθεί από το έδαφος, αυτό χάνει την πλευρική του στήριξη, μειώνεται τότε η πλευρική τάση σ_h ενώ διατηρείται σταθερή η κατακόρυφη σ_v . Η διάμετρος του κύκλου Mohr, που ισούται με $\sigma_v - \sigma_h$, μεγαλώνει και τελικά ακουμπάει στην περιβάλλουσα αστοχίας Mohr – Coulomb. Η κατάσταση που δημιουργείται με την κίνηση του τοίχου προς τα έξω λέγεται ενεργητική κατάσταση.

Αν ο τοίχος μετακινηθεί προς εδάφους, του ασκεί πλευρική οριζόντια τάση σ_h μεγαλύτερη από αυτή που ήδη δέχεται μέχρι να ακουμπήσει στην περιβάλλουσα αστοχίας. Η κατάσταση που δημιουργείται με την κίνηση του τοίχου προς τα μέσα λέγεται παθητική κατάσταση.

Σε ένα διάφραγμα αντιστήριξης, ενεργητική είναι η ώθηση που ασκείται από το έδαφος στην κατασκευή (διαστολή εδάφους), ενώ παθητική είναι η ώθηση που ασκείται κατά την συστολή του εδάφους (δες σχ.1).



Σχήμα 1. Ενεργές – παθητικές ωθήσεις σε ένα διάφραγμα

Το κυριότερο χαρακτηριστικό της ώθησης γαιών είναι ότι το μέγεθος της εξαρτάται από την πλευρική μετακίνηση, δηλαδή από τη δυνατότητα του στοιχείου που δέχεται την ώθηση να ενδώσει στην οριζόντια διεύθυνση ή να κινηθεί προς το έδαφος και να το συμπιέσει.

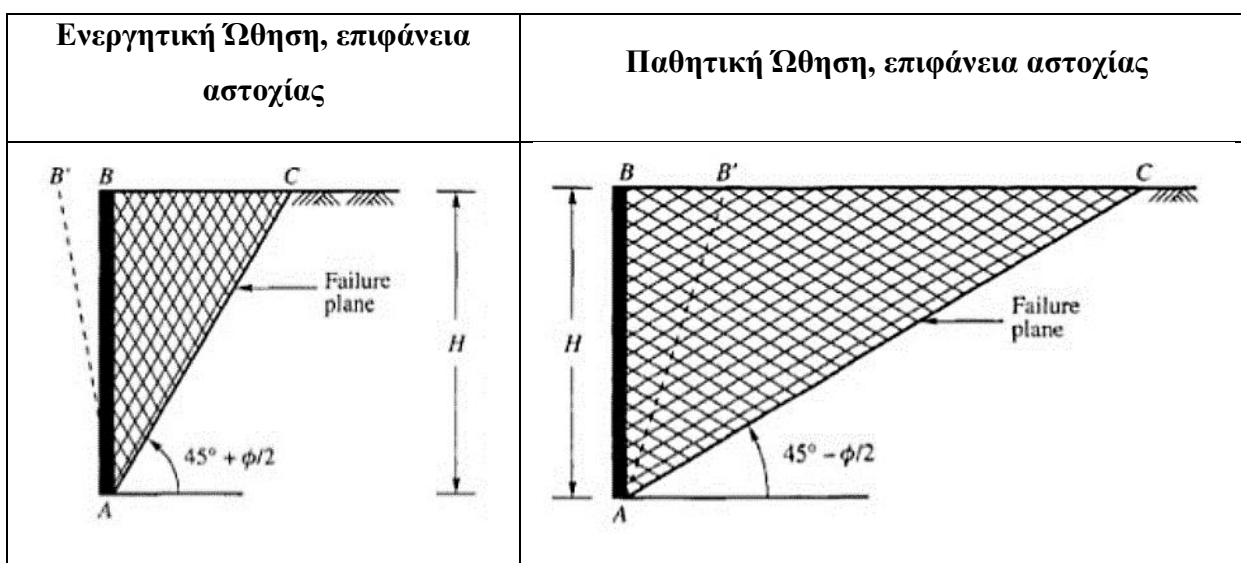
Οι υπολογισμοί των ενεργητικών και παθητικών ωθήσεων για συνεκτικά εδάφη γίνεται με τους παρακάτω τύπους του πίνακα Πιν.2

Πίνακας 2. Τύποι υπολογισμού ενεργών και παθητικών ωθήσεων Rankine

Ενεργητική Ωθηση (Pa)	Παθητική Ωθηση (Pp)
$P_a = K_a \left(\frac{1}{2} \gamma H^2 + q_s H \right) - 2cH \frac{1}{\sqrt{N_\phi}}$	$P_p = K_p \left(\frac{1}{2} \gamma H^2 + q_s H \right) + 2cH \sqrt{N_\phi}$
$K_a \equiv \frac{\sigma'_{ha}}{\sigma'_{vo}} = \frac{1}{N_\phi} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$	$K_p \equiv \frac{\sigma'_{hp}}{\sigma'_{vo}} = N_\phi = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$
$N_\phi = \tan^2 (45 + \phi/2)$	

Όπου:

P_a : ολική ενεργός ώθηση	P_p : ολική παθητική ώθηση
σ'_{ha} : ενεργητική τάση	σ'_{hp} : παθητική τάση
K_a : συντελεστής ενεργητικών ωθήσεων	K_p : συντελεστής παθητικών ωθήσεων
γ : ειδικό βάρος του εδάφους	
H : ύψος του τοίχου	
ϕ : εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους	
c : συνοχή του εδάφους	



Σχήμα 2. Επιφάνειες αστοχίας κατά Rankine

Ας σημειωθεί ότι το σημείο εφαρμογής των ενεργητικών και παθητικών πιέσεων τοποθετείται στο 1/3 του ύψους του τμήματος του τοίχου όπου αυτές ενεργούν.

Στην περίπτωση που υπάρχει υδροφόρος ορίζοντας στην οριακή ενεργό ώθηση προστίθεται η ώθηση που προκύπτει από τις υδροστατικές πιέσεις στον τοίχο αντιστήριξης:

$$P_w = \frac{1}{2} \gamma_w (H - Z_w)^2$$

Όπου: Z_w είναι το βάθος του υπογείου ορίζοντα από την επιφάνεια του εδάφους και γ_w , το ειδικό βάρος του νερού.

Σε περιπτώσεις που δεν ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις της κατάστασης Rankine (όχι οριζόντια επιφάνεια αντιστηριζόμενου εδάφους), ο υπολογισμός των ωθήσεων μπορεί να γίνει με την μέθοδο Coulomb.

3.2. Μέθοδος Coulomb

Διαφοροποιείται από την θεωρία Rankine στον προσδιορισμό της επιφάνειας αστοχίας.

Βασική παραδοχή της μεθόδου είναι κατά την μετακίνηση του τοίχου από το έδαφος μια εδαφική μάζα αποχωρίζεται από το υπόλοιπο έδαφος και ολισθαίνει κατά μήκος μιας επιφάνειας αστοχίας. Για τον προσδιορισμό των K_a και K_p αντίστοιχα, χρησιμοποιούνται οι οριακές οριζόντιες πιέσεις κατά την αποτυχία σε επέκταση ή συμπίεση. Εξετάζονται μόνον επίπεδες επιφάνειες ολίσθησης και προσδιορίζεται η δυσμενέστερη, που αποτελεί την οριακή επιφάνεια ολίσθησης.

Οι βασικές παραδοχές της θεωρίας του Coulomb είναι:

- Μεταξύ της επιφάνειας τοίχου και εδάφους αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής
- Η επιφάνεια θραύσης είναι επίπεδη
- Οι δυνάμεις τριβής κατανέμονται ομοιόμορφα κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης
- Το εδαφικό τμήμα που αποχωρίζεται κινείται σαν στερεό σώμα

Σύμφωνα με τη μέθοδο Coulomb ο υπολογισμός της ωθήσεων δίνονται από τις σχέσεις:

Πίνακας 3. Τύποι υπολογισμού ενεργών και παθητικών ωθήσεων Coulomb

Ενεργητική Ώθηση (P_a)	Παθητική Ώθηση (P_p)
$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cdot K'_a$	$P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cdot K'_p$
$K'_a = \frac{\sin^2(\beta - \phi)}{\sin^2 \beta \cdot \left\{ \sqrt{\sin(\beta + \delta)} + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - i)}{\sin(\beta - i)}} \right\}^2}$	$K'_p = \frac{\sin^2(\beta + \phi)}{\sin^2 \beta \cdot \left\{ \sqrt{\sin(\beta - \delta)} - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi + i)}{\sin(\beta - i)}} \right\}^2}$

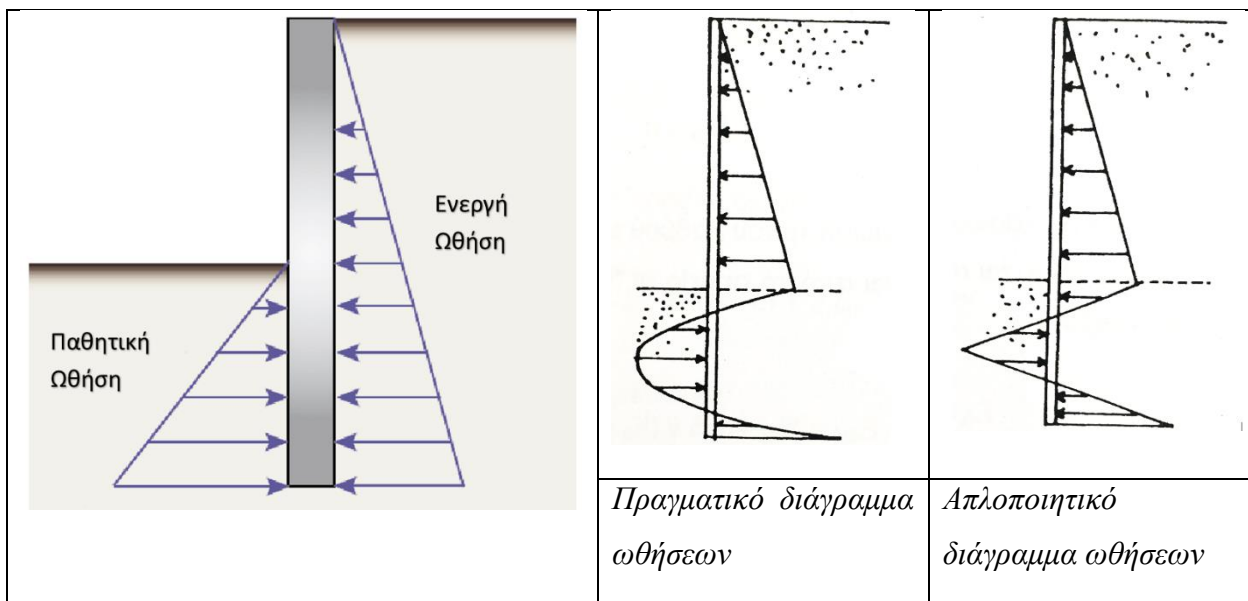
Όπου:

Pa: ολική ενεργός ώθηση K'α : συντελεστής ενεργητικών ωθήσεων	Pp: ολική παθητική ώθηση K'p: συντελεστής παθητικών ωθήσεων
γ: ειδικό βάρος του εδάφους H: ύψος του τοίχου i: γωνία της επιφάνειας του εδάφους ως προς την οριζόντια φ: εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους β: η γωνία της παρειάς του τοίχου ως προς τη οριζόντια δ: γωνία τριβής μεταξύ εδάφους και πλάτης του τοίχου συγκράτησης	

Ο υπολογισμός της ενεργητικής ώθησης με τη μέθοδο Coulomb συνήθως οδηγεί σε μικρά μόνον σφάλματα, επειδή η επιφάνεια ολίσθησης κατά την ενεργητική κατάσταση είναι πρακτικά επίπεδη, ακόμη και στις περιπτώσεις που δεν ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις Rankine. Επιπλέον, η μέθοδος Coulomb υπερεκτιμά την ενεργητική ώθηση, γεγονός που είναι προς την πλευρά της ασφάλειας. Αντίθετα, η επιφάνεια ολίσθησης κατά την παθητική κατάσταση δεν είναι επίπεδη, όταν η γωνία τριβής γαιών-τοίχου είναι μεγάλη και συνεπώς η μέθοδος Coulomb υπερεκτιμά σημαντικά την παθητική ώθηση, γεγονός που δεν είναι προς την πλευρά της ασφάλειας. Συνεπώς, η μέθοδος Coulomb πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή σε εκτιμήσεις της παθητικής ώθησης γαιών (Καβαδάς 2006).

Ο υπολογισμός των οριακών πλευρικών ωθήσεων γαιών γίνονται με την παραδοχή ότι στο σύνολο της εδαφικής μάζας πίσω από τον τοίχο αναπτύσσεται η εντατική κατάσταση Rankine (ενεργητική ή παθητική).

Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα (σχ.3), υπάρχει ένα σημείο, κάτω από την στάθμη εκσκαφής στην πίσω πλευρά του διαφράγματος, όπου οι ωθήσεις μηδενίζονται (λόγω αλληλεξουδετέρωσης).



Σχήμα 3. Διαγράμματα ωθήσεων σε ένα διάφραγμα

Το ύψος του τοίχου και το βάθος έμπτυξης αυτού, προκειμένου να εξασφαλισθεί η ευστάθεια της αντιστήριξης, προκύπτει από την επίλυση της ισορροπίας ωθήσεων στο σημείο μηδενισμού (κατά τους υπολογισμούς υπεισέρχονται δοκιμές και παραδοχές) (Αναγνωστόπουλος 2004, Παπαδόπουλος 2017).

Στα περισσότερα πρακτικά προβλήματα όμως, δεν ικανοποιούνται κάποιες από τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη της κατάστασης Rankine, όπως ότι ο τοίχος δεν είναι λείος και κατακόρυφος, η επιφάνεια του εδάφους δεν είναι επίπεδη, η επιφόρτιση q δεν είναι σταθερή ή η αρχική κατάσταση δεν είναι γεωστατική. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο προσδιορισμός των οριακών ωθήσεων πρέπει να γίνει με αριθμητικές μεθόδους (συνήθως με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων) και χρήση κατάλληλων καταστατικών νόμων συμπεριφοράς του εδάφους.

Σε περιπτώσεις εκσκαφών ή επιχώσεων με ύψος μεγαλύτερο από 5-6m πολλές φορές είναι οικονομικότερο τα πετάσματα να αγκυρώνονται. Η αγκύρωση μειώνει το απαιτούμενο βάθος έμπτυξης καθώς και την απαιτούμενη διατομή του πετάσματος.

Σχετικά με τις αγκυρώσεις, γίνεται λόγος στο επόμενο κεφάλαιο.

4. ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ

Γενικά, τα αγκύρια μπορούν να θεωρούν ως μεταλλικοί γραμμικοί φορείς ικανής εφελκυστικής αντοχής προκειμένου να παραλάβουν αξονικές κυρίως δυνάμεις αφού τοποθετηθούν μέσα στο γεωυλικό.

Σκοπός τους, είναι η μεταφορά φορτίων εφελκυστικών στα διάφορα εδάφη/πετρώματα ώστε να επιτύχουν την εσωτερική στήριξη ή ενίσχυση αυτών ή άλλων κατασκευών όπως πασσάλων, τοίχων κλπ.

Τα αγκύρια κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την διάρκεια της ζωής τους, το υλικό κατασκευής τους, τον τρόπο που μεταβιβάζουν την δύναμη στο έδαφος ή με το ρόλο που παίζουν στην στατική ισορροπία του χώρου (πηγή πληροφοριών αγκυρώσεων: Παπασπύρου 1985).

4.1. Ταξινόμηση αγκυρίων

Ανάλογα με την διάρκεια ζωής τους διακρίνονται σε:

- Προσωρινά αγκύρια με περιορισμένο χρόνο λειτουργίας (προορίζονται συνήθως για προσωρινές αντιστηρίξεις μέχρι κατασκευής του έργου ή σκυροδέτησης αυτού) και
- Μόνιμα αγκύρια των οποίων η διάρκεια ζωής ταυτίζεται με τον χρόνο λειτουργίας του έργου. Αντέχουν ή προστατεύονται από την διάβρωση και αποτελούν αναφαιρέτο λειτουργικό κομμάτι του έργου.

Από άποψη στατικής λειτουργίας του αγκυρίου και του ρόλου του στην εντατική κατάσταση του χώρου διακρίνονται σε Ενεργά και Παθητικά:

- Ενεργά θεωρούνται τα προεντεταμένα αγκύρια, τα οποία προεντείνονται στην τελευταία φάση της κατασκευής τους παρέχοντας μια εξτρά δύναμη στο πεδίο την δύναμη προέντασης.
- Τα παθητικά αγκύρια δεν παραλαμβάνουν καμία δύναμη μόλις κατασκευαστούν. Όταν αρχίσει η παραμόρφωση του πετρώματος, μέσα στο οποίο βρίσκονται, αναπτύσσουν δυνάμεις που αντιτίθενται στην παραμόρφωση.

Τα αγκύρια μεταβιβάζουν την δύναμη στο έδαφος με 3 τρόπους:

- Με πρόσφυση. Ένα τμήμα του τένοντα πακτώνεται στο έδαφος με την βοήθεια τσιμεντοπολτού ή ρητίνης και μεταφέρει την δύναμη με πρόσφυση του ενέματος στο περιβάλλον πέτρωμα. Η δύναμη κατανέμεται σε όλο το πακτωμένο τμήμα.
- Με σφήνωση: Ένας απλός μηχανισμός σφίγγει το αγκύριο και το στερεώνει στο περιβάλλον πέτρωμα.
- Με πλάκα ή σώμα αγκύρωσης: Τα αγκύρια καταλήγουν σε τοίχωμα από μπετόν ή μεταλλικές πασσαλοσανίδες και στερεώνεται σε αυτό. Το τοίχωμα μεταβιβάζει την δύναμη στο έδαφος.

4.2. Ταξινόμηση με βάση τον τόπο κατασκευής

Σχετικά με τον τρόπο κατασκευής διακρίνονται σε 4 τύπους: A, B, C, D, οι οποίοι διαφέρουν στο σχήμα που δίνεται στο πακτωμένο τμήμα του αγκυρίου.

4.2.1. Τύπος A: Λείο διάτρημα, ένεμα χωρίς πίεση.

Εφαρμόζεται κυρίως σε σκληρά ή μαλακά βραχώδη πετρώματα, σε μάργες ή σε συνεκτικά εδάφη που βρίσκονται σε στιφρή ημιστερεά κατάσταση. Στα εδάφη αυτά η διάτρηση έχει λεία τοιχώματα τα οποία δεν παρουσιάζουν καταπτώσεις και έτσι η διάμετρος του πακτωμένου τμήματος διατηρείται σταθερή και ίση με την διάμετρο της διάτρησης. Το ένεμα εισάγεται με απλή πίεση από το άκρο του αγκυρίου προς την κεφαλή χρησιμοποιώντας αντλία ή απλά με βαρύτητα. Πλεονέκτημα αποτελεί ότι δεν απαιτείται πολύπλοκος εξοπλισμός για την άσκηση υψηλών τάσεων.

4.2.2. Τύπος B: Ένεμα με ελαφρά πίεση

Εφαρμόζεται κυρίως σε αμμώδη εδάφη με χαλαρή πυκνότητα και γενικότερα σε πολύ διαπερατούς σχηματισμούς, όπως αδρόκοκκη άμμος, τα αμμοχάλικα, οι ρηγματωμένοι και κατακερματισμένοι βράχοι. Η εφαρμογή μπορεί να επεκταθεί και σε λεπτόκοκκους σχηματισμούς άμμους ή ιλυοαμμώδη στρώματα χαλαρής πυκνότητας, στα οποία η εξάσκηση πίεσης προκαλεί κάποια συμπύκνωση του εδάφους με αντίστοιχη διόγκωση του κορμού του αγκυρίου. Η εισαγωγή του ενέματος γίνεται με μικρή πίεση διευκολύνοντας τη διείσδυση του ενέματος στο εσωτερικό του

πετρώματος και έχοντας ως αποτέλεσμα το πακτωμένο τμήμα να έχει ακανόνιστο σχήμα και μεγαλύτερη διάμετρο από αυτή του διατρήματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η καλύτερη πρόσφυση και η αύξηση της φέρουσας ικανότητας του αγκυρίου.

4.2.3. Τύπος C: Ένεμα με υψηλή πίεση

Οι υψηλές πιέσεις όταν εφαρμόζονται σε ρηγματωμένα ή κατακερματισμένα πετρώματα και σε διαπερατά εδάφη, έχουν σαν αποτέλεσμα την διείσδυση και διασπορά του ενέματος γύρω από το αρχικό διάτρημα (έγκοιλα ή ρωγμές) και την ενσωμάτωση ενός σημαντικού όγκου εδάφους, όπου αυξάνει την θεωρητική διάμετρο του πακτωμένου τμήματος. Η υψηλή πίεση του ενέματος εφαρμόζεται με διάφορους τρόπους:

- Με σωλήνωση της διάτρησης σε ανιόντα βήματα κατά τη διάρκεια της εξαγωγής της σωλήνωσης.
- Με βύσματα (racker). Σε ασωλήνωτες διατρήσεις, σε βραχώδη ή συνεκτικά εδάφη αποκλείεται με βύσματα ένα τμήμα της διάτρησης μέσα στο οποίο εισπνέζεται το ένεμα.
- Σε δεύτερη φάση, εισπνέζεται ένεμα (μετένεση) αφού έχει ήδη στερεοποιηθεί το αρχικό ένεμα.

4.2.4. Τύπος D: Βολβοί από διαδοχικές διευρύνσεις

Εντός του πακτωμένου τμήματος του αγκυρίου κατασκευάζονται διαδοχικές διευρύνσεις πριν από την εισπίεση του ενέματος. Οι τρόποι εκσκαφής της διεύρυνσης είναι ανάλογοι με τις αντίστοιχες μεθόδους που εφαρμόζονται για την διεύρυνση βολβού του πασσάλου. Η διάμετρος των διευρύνσεων καθώς και οι αποστάσεις μεταξύ τους δεν είναι καθορισμένες και εξαρτώνται από τα μηχανικά μέσα και τον χειριστή. Εφαρμόζονται κυρίως σε συνεκτικά εδάφη που βρίσκονται σε στιφρή έως στερεά κατάσταση, σε μάργες και σπανιότερα σε μαλακούς βράχους. Το χρονικό διάστημα μεταξύ διεύρυνσης των βολβών και εισπίεσης του ενέματος πρέπει να διατηρείται όσον το δυνατόν βραχύτερο διότι κατά την διάρκεια του ενυδατώνεται η άργιλος των τοιχωμάτων, σχηματίζει λάσπη και η διατμητική αντοχή περιορίζεται πρακτικά σε έναν τοπικό μανδύα αποσάθρωσης χωρίς συνοχή.

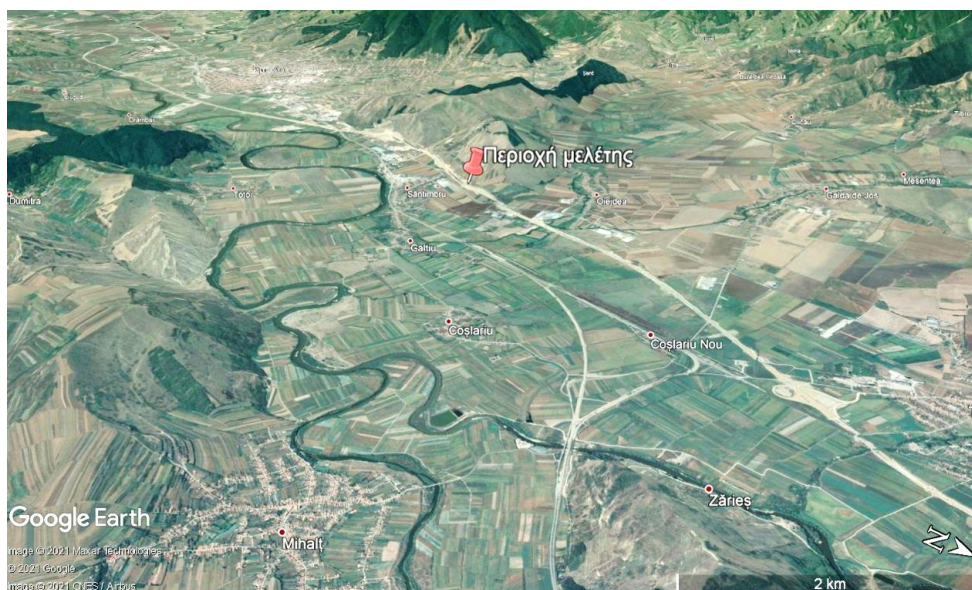
Συνοπτικά οι διαδοχικές φάσεις εργασιών κατασκευής αγκυρίων είναι οι εξής:

- Διάτρηση
- Καθαρισμός διατρήματος
- Δοκιμή εισπίεσης
- Εισαγωγή τένοντα
- Τσιμεντένεση για την πάκτωση
- Προένταση και έλεγχος της αντοχής
- Διαμόρφωση της κεφαλής

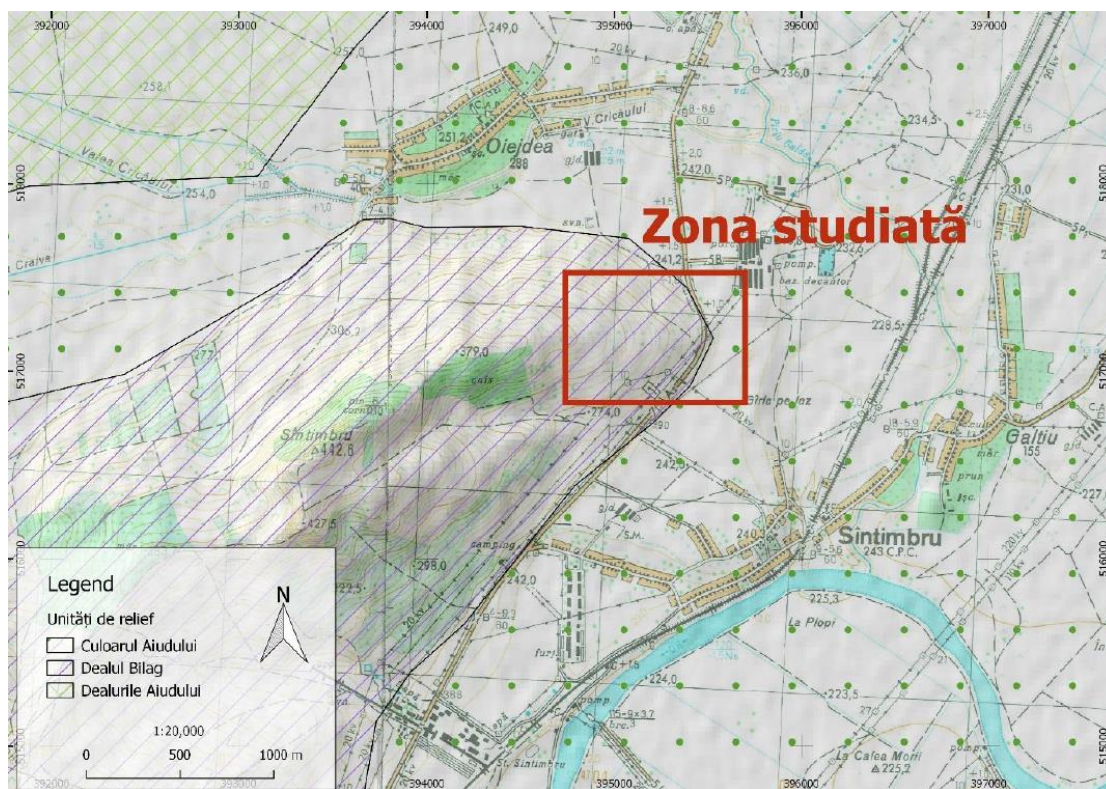
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΡΓΟΥ

5.1. Γεωμορφολογία περιοχής μελέτης

Το υπό μελέτη όρυγμα βρίσκεται στην βάση πεδινού λόφου εντός της κοιλάδας του ποταμού Mures, πλησίον του οικισμού Santimbru (εικ.5 - Απόσπασμα γεωμορφολογικού χάρτη) . Η κοιλάδα έχει διεύθυνση BBA-NNΔ με εξαιρετικά ήπιες κλίσεις και υψόμετρο 220-240m. Ο λόφος έχει μέγιστο υψόμετρο 442m και η πλησιέστερη στο όρυγμα κορυφή 343m. Οι κλίσεις του πεδινού λόφου είναι ομαλές και στην θέση του έργου ήπια ομαλές (είναι χαρακτηριστική η ύπαρξη καλλιεργειών αραβοσίτου και η αίσθηση έλλειψης υπερκείμενου μετά την εκσκαφή του ορύγματος).



Εικόνα 4. Αεροφωτογραφία περιοχής μελέτης (πηγή: Google Earth)



Εικόνα 5. Απόσπασμα γεωμορφολογικού χάρτη περιοχής μελέτης (πηγή εικόνας: Geosearch 2016)

5.2. Γεωλογικές συνθήκες περιοχής μελέτης

Γεωλογικά, η περιοχή δομείται από:

- Προσχώσεις ολοκαινικής ηλικίας του ποταμού Mures οι οποίες απαντώνται στην ευρύτερης κοιλάδας του ποταμού.
- Μαργαϊκές αποθέσεις Μειοκαινικής ηλικίας,
- Ολιγοκαινικής ηλικίας αποθέσεις και
- Μεσοζωικής ηλικίας πετρώματα. Οι οποίες απαντώνται στους περιφερειακούς πεδινούς λόφους της κοιλάδας.

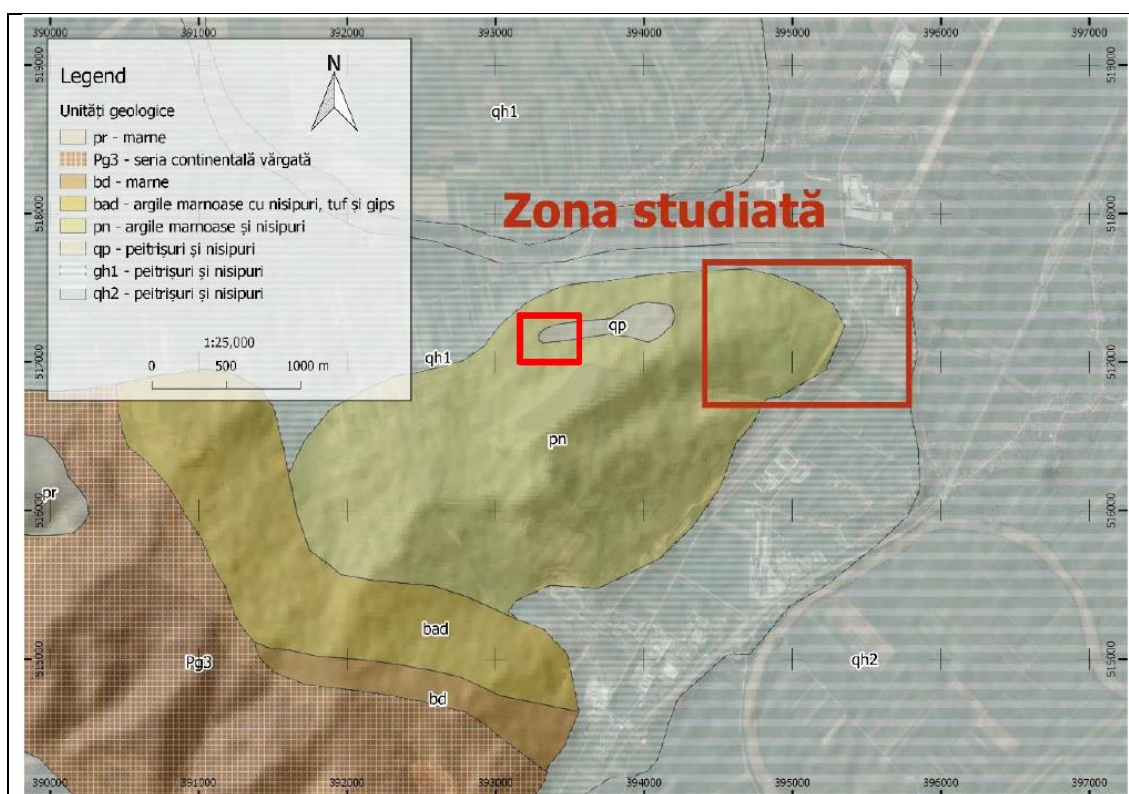
Οι ολοκαινικής ηλικίας αποθέσεις αποτελούνται από εναλλαγές κροκαλοπαγών, άμμων, ιλύων, μαργών και σπανιότερα ψαμμιτών και τύρφης. Επικρατούν τα χαλαρά συνδεδεμένα κροκαλοπαγή με συνδετικό υλικό αμμο-μαργαϊκό με ενδιάμεσες ενστρώσεις μαργών (αργιλικών ενστρώσεων).

Οι Μειοκαινικές αποθέσεις, οι οποίες δομούν και τον πεδινό λόφο του ορύγματος αποτελούνται στα ανώτερα στρώματα από εναλλαγές λεπτοστρωματωδών ή άστρωτων μαλακών καφέ-γκρι μαργών, κατά θέσεις με λεπτές ενδιαστρώσεις άμμων ή και σπανιότερα κροκαλοπαγών. Στα βαθύτερα στρώματα επικρατούν σκληρές γκρι μάργες, και κατά θέσεις γύψοι και τύρφη.

Οι Ολιγοκαινικής ηλικίας αποθέσεις αποτελούνται από χαλαρές σχετικά, ανάμεικτες χερσαίες αποθέσεις με κοκκινωπές μάργες αργίλους και άμμους με ποικίλου μεγέθους κροκάλες και χάλικες.

Τα Μεσοζωικής ηλικίας πετρώματα αποτελούνται κυρίως από μάργες και ψαμμίτες σε εναλλαγές.

Η γεωγραφική κατανομή των παραπάνω σχηματισμών στην περιοχή μελέτης παρουσιάζεται στο παρακάτω απόσπασμα γεωλογικού χάρτη (εικ.7



ΥΠΟΜΝΗΜΑ:

Γκρι ανοιχτό χρώμα: Ολοκαινικές αποθέσεις (qr, qh1, qh2)

Κίτρινο/Καφέ χρώμα: Μειοκαινικές αποθέσεις (pn, bd, bad)

Καφέ: Ολιγοκαινικές αποθέσεις (Pg3)

Γκρι σκούρο χρώμα: Μεσοζωικά στρώματα (Pr)

Εικόνα 6. Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη περιοχής μελέτης (πηγή εικόνας: Geosearch 2016)

Ας σημειωθεί ότι οι κοκκινωπές χερσαίες αποθέσεις Ολιγοκαινικής ηλικίας και οι ορίζοντες κροκαλοπαγών Ολοκαινικής ή και Μειοκαινικής ηλικίας αποτελούν πηγές δανειοθαλάμων των διαφορών εργοταξίων οδοποιίας της ευρύτερης περιοχής.

5.2.1. Γεωλογία περιοχής ορύγματος

Όπως έγινε γνωστό από το γεωτρητικό πρόγραμμα στην περιοχή του ορύγματος, αυτό δομείται από πάνω προς τα κάτω από:

- Αργίλους Ιλυώδεις έως αμμώδεις αργίλους, πολύ πιθανά με πλούσια παρουσία οργανικών υλικών, χρώματος καφέ σκούρο, πάχους έως 2m. Το στρώμα αυτό αποτελεί τον εδαφικό ορίζοντα πάνω στο οποίο εκτείνονται καλλιέργειες αραβοσίτου.
- Αργίλους Ιλυώδεις (αδιαγένετες μάργες), άστρωτες, χρώματος καφέ έως γκρι στα ανώτερα στρώματα, μέγιστου πάχους 25m, με ανά θέσεις ενδιαστρώσεις αμμοιλύων πάχους έως 20cm
- Αργίλους Ιλυώδεις (αδιαγένετες μάργες), άστρωτες, χρώματος γκρι έως καφέ, με εναλλαγές καφέ αργίλων, μέγιστου πάχους 8m
- Μάργα γκρι, σχετικά συμπαγής, άστρωτη, σχετικά στεγνή και κατά θέσεις σπασμένη. Αποτελεί πιθανά το τοπικό υπόβαθρο (οι γεωτρήσεις δεν προχώρησαν σε μεγαλύτερο βάθος).

Οι κλίσεις των παραπάνω στρωμάτων είναι ομόρροπες του πρανούς και ήπιες. Στα ανάντη παρατηρήθηκε ότι η γκρι μάργα βρίσκεται σε μικρότερα σχετικά βάθη από ότι στα κατόντη του πρανούς, δηλαδή παρατηρήθηκε μια λέπτυνση των «μαλακότερων» αργιλικών στρωμάτων. Αυτό πιθανά οφείλεται στην διαφορετική ελαστικότητα των δύο αυτών γεωλογικών ενοτήτων (αργίλων μαργών) κατά την ανύψωση τους.

5.3. Υδρογεωλογικές συνθήκες περιοχής μελέτης

Στις ολοκαινικές προσχώσεις παρουσιάζονται υδροφόροι ορίζοντες χαμηλής έως μέτριας δυναμικότητας εντός των κροκαλοπαγών ενστρώσεων. Η απορροή τους ελέγχεται από τα τοπικά αδιαπέρατα που δημιουργούν οι μαργαϊκοί ορίζοντες είτε αποφορτίζονται στο ποτάμι όπου το πρηνές τμήσει την ισοδυναμική επιφάνεια.

Οι ολοκαινικές μαργαϊκές ενστρώσεις δεν παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία. Το νερό είτε κυκλοφορεί στις διάσπαρτες αμμώδεις ενστρώσεις που παρουσιάζουν μικρή περατότητα, είτε λόγω τριχοειδών φαινομένων διαποτίζουν τις υποκείμενες μάργες.

Όσον αφορά τις Πλειστοκαινικές – Μειοκαινικές αποθέσεις των περιφερειακά της κοιλάδας λόφων, δεν παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία. Οι αμμώδεις και ψαμμιτικοί ορίζοντες συγκρατούν νερό βροχοπτώσεως ενώ οι μαργαϊκοί ορίζοντες εμποτίζονται λόγω τριχοειδών φαινομένων.

Αυτό που είναι αξιόλογο για την υδρογεωλογία της περιοχής είναι το υψηλό υδατικό δυναμικό της. Η περιοχή το μεν θέρος παρουσιάζει τις υψηλότερες βροχοπτώσεις την δε χειμερινή περίοδο οι χιονοπτώσεις είναι πολύ συχνές και τα φαινόμενα νυχτερινής υψηλής υγρασίας καθημερινά σχεδόν.

Στην κοιλάδα του ποταμού, η στάθμη είναι σχετικά υψηλή, κοντά στην επιφάνεια καθώς ο ποταμός Mures διατηρεί σχετικά υψηλή ροή καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Η μεγάλη λεκάνη απορροής του, η μαιανδρική μορφή του ποταμού, το λιώσιμο των χιονιών τον χειμώνα στις ανάντη ορεινές περιοχές της μεγάλης λεκάνης απορροής και οι καλοκαιρινές βροχοπτώσεις έχουν σαν συνέπεια την συχνή δημιουργία επεισοδίων πλημμυρών στην κοιλάδα. Για την κατασκευή αυτό δεν αποτελεί απαραίτητα μεγάλο πρόβλημα, παρά μάλλον σταθερά προβληματική κατάσταση.

5.3.1. Υδρογεωλογία Ορύγματος

Όσον αφορά την στενή περιοχή μελέτης του ορύγματος, κατά την κατασκευή των ερευνητικών γεωτρήσεων (2015, 2016, 2020) βρέθηκε στάθμη υπογείου υδροφόρου σε 3 συνολικά θέσεις από τα δελτία των γεωτρήσεων, όπου φαίνεται ότι ήταν τοπικό φαινόμενο καθώς οι διατρήσεις δεν συνεχίστηκαν εντός υδροφόρου.

Επίσης κατά την διάτρηση των αγκυρίων μόνο σε κάποιες θέσεις εντοπίστηκαν υπόγεια ύδατα χωρίς συνέχεια όμως.

Τέλος κατά την διάρκεια το 2020, όπου είχαν τοποθετηθεί και τα οριζόντια στραγγιστήρια κατά μήκος του πασσαλότοιχου, παρατηρήθηκε ότι η ροή ήταν σταγονώδης, διαλειματική έως ανύπαρκτη στις περισσότερες θέσεις. Ελάχιστα μόνο στραγγιστήρια παρουσίασαν αυξημένη σταγονοροή και αυτό κατά την αρχή της άνοιξης ή μετά από μακρά περίοδο βροχοπτώσεων.

Με δεδομένη την αναμενόμενη χαμηλή υδροπερατότητα των αργιλικών σχηματισμών μπορεί κανείς να πει ότι αυτοί δεν διατηρούν στάθμη υπογείων υδάτων παρά τον αυξημένο βαθμό κορεσμού των δειγμάτων των γεωτρήσεων.

5.4. Γεωτεχνική αξιολόγηση περιοχής

Για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης:

- Αξιολογήθηκαν οι προηγούμενες γεωτεχνικές έρευνες
- Έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων δοκιμών δειγμάτων γεωτρήσεων

5.4.1. Αξιολόγηση διαθέσιμων γεωτεχνικών μελετών

Με βάση την αρχική μελέτη σχεδιασμού η περιοχή γεωτεχνικά δομείται από δύο γεωτεχνικές ενότητες με τα εξής γεωτεχνικά χαρακτηριστικά:

Πίνακας 4. Τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σχηματισμών αρχικής μελέτης ορύγματος

	Ανώτερη καφέ άργιλος	Κατώτερη γκρι Μάργα
Συνοχή (c):	15 - 25 kPa	75 - 95 kPa
Γωνία εσωτερικής τριβής (φ):	15° – 20°	18° – 22°

Στα παρακάτω απόσπασμα πινάκων παρουσιάζονται οι τιμές παραμέτρων σχηματισμών που λήφθηκαν υπόψιν το 2015 (πριν αρχίσει η κατασκευή του ορύγματος) και το 2017 (αλλαγή σχεδιασμού αγκυρίων) (Geosearch 2016, UTCB 2017).

Πίνακας 5. Τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σχηματισμών 2015

Strat	Tip pământ	γ [kN/m ³]	E [kPa]	ϕ' [°]	c' [kPa]
0	Umplutură	19.00	6500	10.00	12.00
I	Complex coeziv la slab coeziv aluvionar	19.60	4840	15.00	15.00
II	Complex necoeziv aluvionar	19.00	15040	18	-
III	Complex coeziv – rocă de bază	21.40	11960	18	75

Πίνακας 6. Τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σχηματισμών του ορύγματος 2017

Strat	Tip pământ	γ [kN/m ³]	E [kPa]	ϕ' [°]	c' [kPa]
0	Umplutură	19.00	6500	10.00	12.00
I	Argilă	19.60	9800	15.00	40.00

(Umpultura= επίχωμα)

Οι πρώτες γεωερευνητικές εργασίες στην περιοχή έγιναν το 2015 με τέσσερις (4) γεωτρήσεις στην περιοχή του ορύγματος (2 θέσεις εκατέρωθεν του οδικού άξονα). Το 2016 επαναλήφθηκε το πρόγραμμα με τρεις (3) γεωτρήσεις και το 2020 πραγματοποιήθηκε εκ νέου ερευνητικό πρόγραμμα γεωτρήσεων/κλισιομέτρων άνω των 15 γεωτρήσεων, τα εργαστηριακά αποτελέσματα του οποίου ακόμη εκκρεμούν.

5.4.2. Αποτελέσματα επεξεργασίας διαθέσιμων αποτελεσμάτων εργ. δοκιμών

Τα συνοπτικά συμπεράσματα της επεξεργασίας των διαθέσιμων αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών παρουσιάζονται στην συνέχεια.

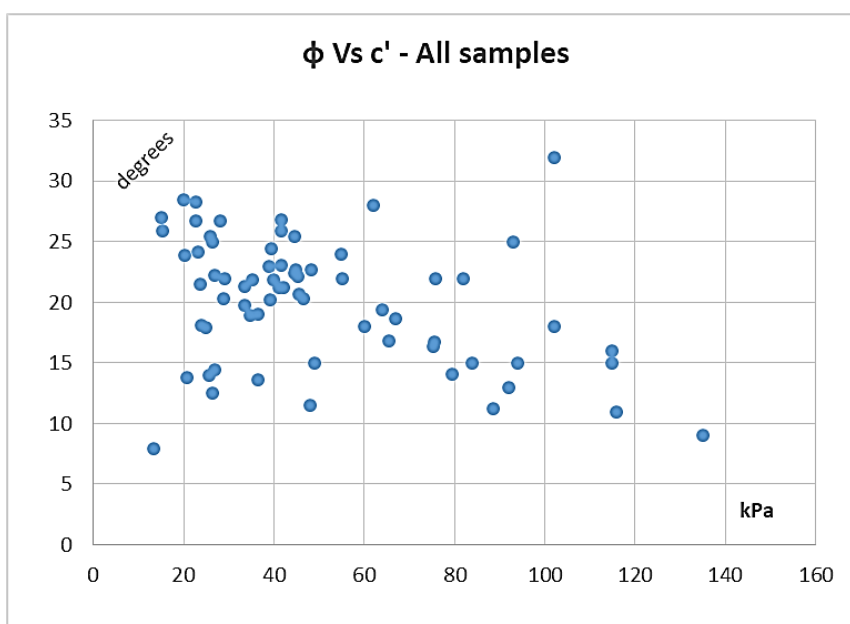
Στο παράρτημα Π.1 παρουσιάζονται υπό μορφή πίνακα οι τιμές αποτελεσμάτων των διαθέσιμων εργαστηριακών δοκιμών.

Επίσης, έγινε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών προκειμένου εκτιμηθούν οι γεωτεχνικοί παράμετροι των σχηματισμών που δομούν το ορύγμα. Στο παράρτημα Π.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης (Slow shear test)

Από τα 74 δείγματα, αφού αφαιρέθηκαν τα δείγματα με ακραίες τιμές (outlier) προέκυψαν: 47 που αφορούν καφέ αργίλους, 4 που αφορούν γκρι μάργες και 12 που αφορούν γκρι αργίλους.

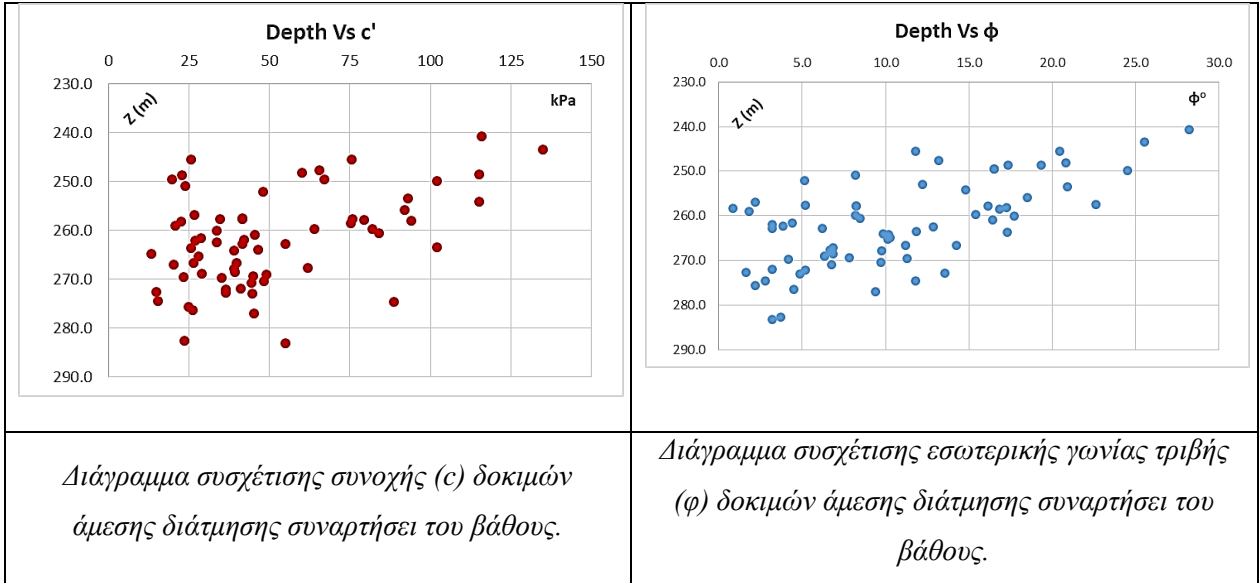
Στο παρακάτω διάγραμμα (σχ.5), παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της εσωτερικής γωνίας τριβής (ϕ) και της συνοχής (c) και από τα τρία ερευνητικά προγράμματα. Φαίνεται σαν γενική τάση, ότι η γωνία τριβής μειώνεται με την αύξηση της συνοχής.



Σχήμα 4. Διάγραμμα συσχέτισης παραμέτρων, ϕ & c , αποτελεσμάτων Slow Shear test

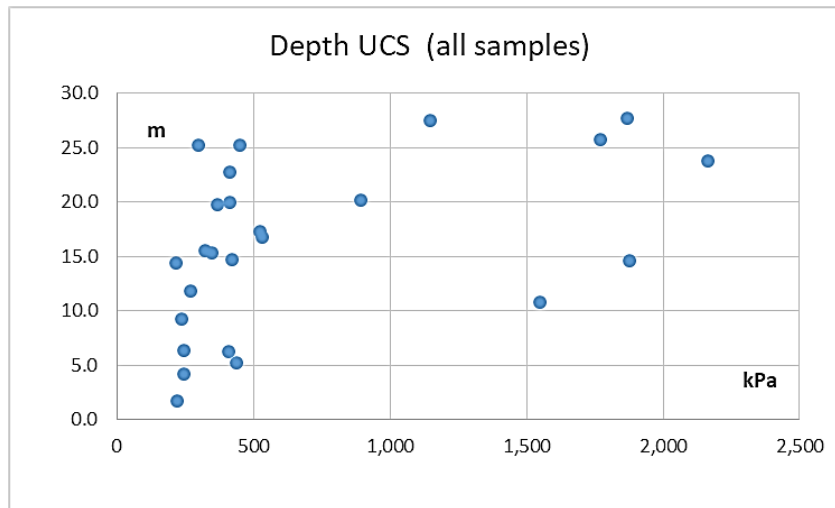
Από τα παρακάτω διαγράμματα (σχ.6) συσχέτισης συνοχής (c) και εσωτερικής γωνίας τριβής (ϕ), όπως προέκυψαν από αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών άμεσης διάτμησης (Slow Shear test) φαίνεται ότι:

- η γωνία τριβής μειώνεται με το απόλυτο βάθος (!)
- η συνοχή αυξάνει με το βάθος αλλά με πολύ μεγάλη διασπορά. Μια ομάδα δειγμάτων διατηρεί μια τιμή γύρω από την τιμή 25kPa και μια άλλη ομάδα δειγμάτων φαίνεται να δείχνει μείωση με το απόλυτο βάθος (!).



Σχήμα 5. Συσχέτιση αποτελεσμάτων παραμέτρων δοκιμών άμεσης διάτμησης με το βάθος διάτμησης.

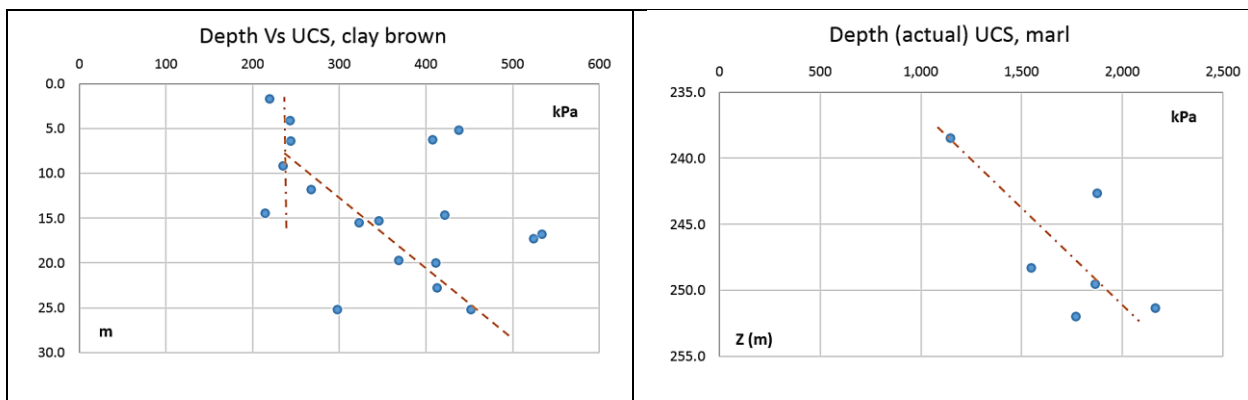
Αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης (Unconfined Compression Strength)



Σχήμα 6. Σχέση βάθους διάτμησης και αντοχής ανεμπόδιστης θλίψης

Στο παραπάνω διάγραμμα (σχ.8) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και από τα τρία ερευνητικά προγράμματα. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι μέχρι το βάθος των 15-20m η αντοχή έχει μικρές διακυμάνσεις και μπορεί να θεωρήσει κανείς ότι πρόκειται για τον ίδιο σχηματισμό. Σε βάθη μεγαλύτερα των 25m η αντοχή είναι πολύ διαφορετική, ενώ σε ενδιάμεσα βάθη, 20-25m, απλά αναμένει κανείς η αντοχή να παρουσιάζει σταδιακή αύξηση.

Με κατά γεωλογικό σχηματισμό συσχέτιση προκύπτουν τα παρακάτω γραφήματα (σχ.8):



Σχήμα 7. Συσχέτιση αποτελεσμάτων παραμέτρων ανεμπόδιστης θλίψης με το βάθος διάτρησης ή το πραγματικό υψόμετρο.

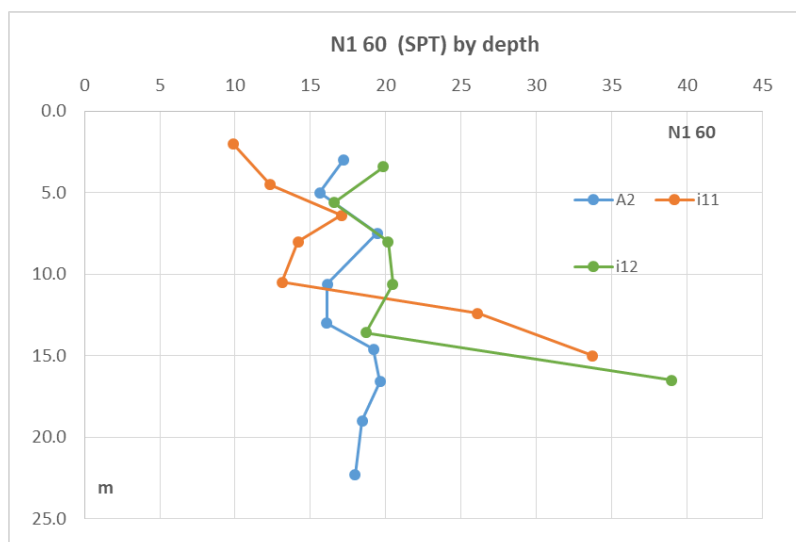
Τα δείγματα καφέ αργίλου φαίνεται να διατηρούν μια σχετικά σταθερή τιμή μέχρι βάθους 15m, ενώ βαθύτερα παρουσιάζουν αύξηση της αντοχής. Τα δείγματα γκρι μάργας φανερώουν μόνο μία τάση, την αύξηση αντοχής μειωμένου του υψόμετρου.

Όμοια εικόνα με αυτή των αντοχών σε ανεμπόδιστη θλίψη παρουσιάζουν και οι τιμές SPT σε αρκετές γεωτρήσεις εκατέρωθεν του άξονα του ορύγματος.

Αποτελέσματα δοκιμών SPT

Πιο συγκεκριμένα, στο παρακάτω γράφημα (σχ.9) τιμές SPT- βάθος παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα (N_{160}) αποτελέσματα δοκιμών SPT συναρτήσει του βάθους από γεωτρήσεις του 2020..

Όπως μπορεί κανείς να δει από το διάγραμμα η γεώτρηση A2 η οποία βρίσκεται κατόντη του πασσαλότοιχου, (εκτός ορύγματος), συναντά μόνο τις καφέ αργίλους (και κάποιες λεπτές στρώσεις άμμου) και παρουσιάζει μια σχεδόν μονότονη ακολουθία κρούσεων. Οι γεωτρήσεις i11, i12 που βρίσκονται ανάντη του πασσαλότοιχου παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια εικόνα με την A2 μέχρι βάθους 15m και ύστερα εισέρχονται σε σκληρότερα υλικά και τελικά στην γκρι μάργα (όπως διαπιστώθηκε και από τα κασάκια των γεωτρήσεων).



Σχήμα 8. Διάγραμμα SPT συναρτήσει του βάθους διάτρησης

Ο πίνακας τιμών SPT και η μετατροπή σε κανονικοποιημένες τιμές SPT παρουσιάζεται στο παράρτημα Π.3

5.4.3. Συμπεράσματα γεωτεχνικής αξιολόγησης:

- Οι αρχικές τιμές σχεδιασμού, των γεωτεχνικών παραμέτρων των σχηματισμών, επαναπροσδιορίστηκαν
- Με βάση τα εργαστηριακά αποτελέσματα Slow shear test, γίνεται φανερό ότι η γωνία εσωτερικής τριβής μειώνεται με την αύξηση της συνοχής και με το βάθος.
- Με βάση τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης (UCS) και τις δοκιμές SPT: Διακρίνεται ένας σχηματισμός ανάντη της γκρι μάργας με συνοχή c , που πιθανά αυξάνει στα βαθύτερα μέχρι να έρθει σε επαφή με την μάργα
- Στην περιοχή απαντούν δύο τεχνικογεωλογικές ενότητες: Από τα ανώτερα στα κατώτερα Καφέ άργιλος, και Γκρι μάργα. Γκρι άργιλος και καφέ άργιλος, δηλαδή, αποτελούν έναν τεχνικογεωλογικό σχηματισμό του οποίου η συνοχή αυξάνει σταδιακά με το βάθος, μετά το βάθος των 15m (πολύ πιθανά βέβαια η γωνία του ϕ να μειώνεται ..)

Στον παρακάτω πίνακα (πιν.2) παρουσιάζονται συνοπτικά οι τιμές των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών όπως προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία λαμβάνοντας υπόψιν και τις παραπάνω συσχετίσεις.

Πίνακας 7. Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων όπως προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία:

		Καφέ Άργιλος (Clay Brown)	Μάργα γκρι (Marl)
Ποκνότητα ακόρεστ/κορεσμ.	$\gamma_{\text{unsat/sat}}$	18.5 / 21 kN/m ³	19 / 21 kN/m ³
Μέτρο ελαστικότητας*	E_{50}	25 10 ³ kN/m ³	110 10 ³ kN/m ³
Συνοχή	c	39 kN/m ²	90 kN.m ²
Γωνία εσωτερικής τριβής	ϕ	22°	20°
Τιμές αντοχής Ανεμπόδιστης Θλίψης	q_u	357.5 kPa	1820 kPa
* οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας προέκυψαν από γραφικό υπολογισμό καμπυλών δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης χαρακτηριστικών δειγμάτων (δες Παράρτημα Π.4)			

6. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (PLAXIS 2D)

Το πλεονέκτημα της ανάλυσης ενός έργου αντιστήριξης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι μπορεί να δώσει απαντήσεις στο σύνολο των απαιτούμενων στοιχείων που σχεδιασμό του: ευστάθεια κατασκευής, συνολική ευστάθεια, υπολογισμός αναλήψιμων φορτίων, εκτίμηση/υπολογισμός μετακινήσεων, παραμορφώσεων και ασκούμενων τάσεων κατασκευής και εδάφους.

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS (v.8.2).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων συνίσταται στην διακριτοποίηση του χώρου των διαφόρων στοιχείων που περιέχονται σε αυτόν, σε τμήματα πεπερασμένου μεγέθους. Σε κάθε στοιχείο αποδίδεται ο νόμος του υλικού που το χαρακτηρίζει (καταστατικός νόμος) και στην συνέχεια εφόσον οριστούν οι οριακές και συνοριακές συνθήκες, επιλύεται το πρόβλημα.

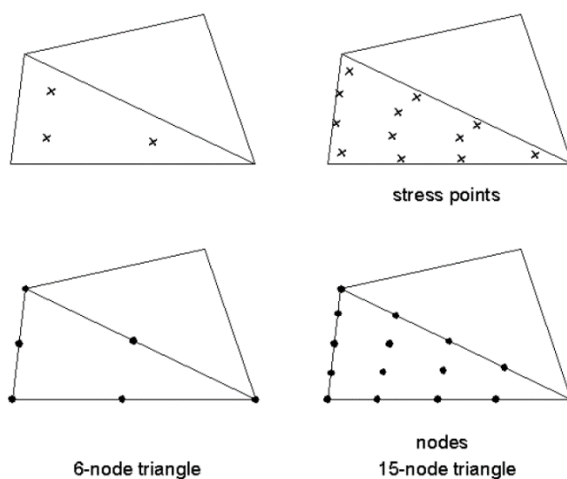
Σε ένα πρόβλημα αντιστήριξης, τα στοιχεία που εμφανίζονται είναι:

- Το έδαφος
- το πάσης φύσεως διάφραγμα,
- το αγκύριο που υποστηρίζει το διάφραγμα,
- το σώμα αγκύρωσης,
- η αλληλεπίδραση εδάφους και κατασκευαστικών στοιχείων που έρχονται σε επαφή

6.1. Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων

Πέραν του καταστατικού νόμου, είναι σημαντικός και ο καθορισμός κατάλληλου κανάβου πεπερασμένων στοιχείων.

Στο PLAXIS, είναι διαθέσιμα δύο ειδών στοιχεία (elements): στοιχεία με έξι (6) κόμβους (nodes) και στοιχεία με δεκαπέντε (15) κόμβους στους οποίους υπολογίζονται οι μετατοπίσεις. Τα σημεία υπολογισμού των τάσεων (stress) βρίσκονται σε άλλες θέσεις από αυτές για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων. Οι θέσεις αυτών παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (σχημ.10)



Σχήμα 9. Στοιχεία κάναβου PLAXIS και κατανομή σημείων υπολογισμού μετατοπίσεων (nodes) και τάσεων (stress).

(πηγή εικόνας: PLAXIS v8, Reference manual).

Για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων στα υπόλοιπα σημεία του στοιχείου χρησιμοποιείται ένας προσεγγιστικός κανόνας. Τα στοιχεία με δεκαπέντε κόμβους δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα από τα στοιχεία με έξι κόμβους, αλλά η ανάλυση διαρκεί περισσότερο χρόνο.

6.2. Προσομοίωση του εδάφους

Η προσομοίωση του εδάφους πραγματοποιείται με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, των οποίων η συμπεριφορά καθορίζεται από τον καταστατικό νόμο που χρησιμοποιεί το μοντέλο εδάφους στα σημεία υπολογισμού των τάσεων και των παραμορφώσεων.

Το μοντέλο εδάφους αποτελεί μια σειρά μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφουν τη σχέση των τάσεων με τις παραμορφώσεις.

Το PLAXIS διαθέτει μοντέλα εδάφους για την προσομοίωση του εδάφους ανάλογα με τις γεωτεχνικές συνθήκες και τις ανάγκες σχεδιασμού. Αυτά είναι τα παρακάτω:

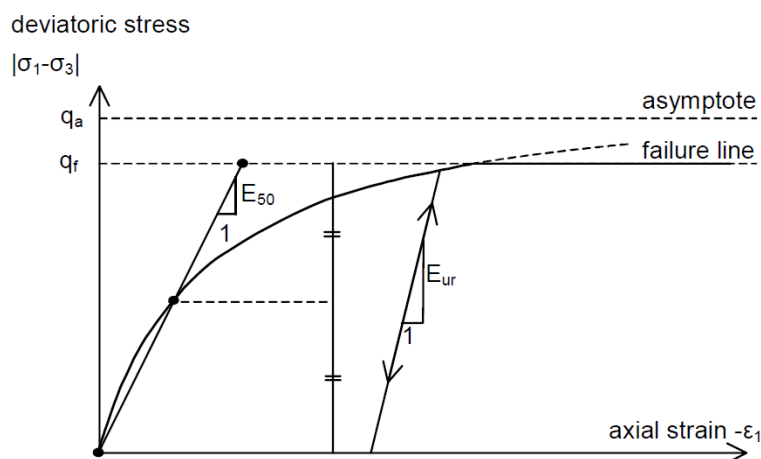
Linear Elastic: είναι ένα γραμμικό μοντέλο, που ακολουθεί τον νόμο ελαστικότητας του Hooke και οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι το μέτρο ελαστικότητας (E) και ο λόγος Poisson (ν).

Mohr- Coulomb: είναι ένα ελαστικό – τέλεια πλαστικό μοντέλο. Βασίζεται στην εφαρμογή του κριτηρίου Mohr-Coulomb για την διαρροή. Στο μοντέλο αυτό οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι το μέτρο ελαστικότητας (E), ο λόγος του Poisson (ν), η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ), η συνοχή (c) και η γωνία διογκωσιμότητας (ψ)

Soft soil model: χρησιμοποιείται για να περιγράψει την συμπεριφορά των μαλακών εδαφικών υλικών δίνοντας πολύ καλά αποτελέσματα σε περιπτώσεις κανονικά στερεοποιημένων εδαφών.

Soft soil creep model: χρησιμοποιείται για να περιγράψει την συμπεριφορά μαλακών εδαφικών υλικών λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο του ερπυσμού και του χρόνου, για εδάφη που η συμπεριφορά τους εξαρτάται από αυτόν. Η παράμετρος που χρησιμοποιείται σε αυτό το μοντέλο είναι το μέτρο ελαστικότητας (E).

Hardening soil model: προβλέπει μεταβολή μεταξύ διατμητικής τάσης και αξονικής παραμόρφωσης ($q - \epsilon_1$) μέσα από μία συνάρτηση υπερβολικού τύπου που ομοιάζει την συνήθη εικόνα μονοαξονικής θλίψης. (σχ.11). Επίσης ένα βασικό χαρακτηριστικό του μοντέλου ότι για τον καθορισμό του μέτρου ελαστικότητας συνυπολογίζει το μέτρο ελαστικότητας και κατά την αποφόρτιση.

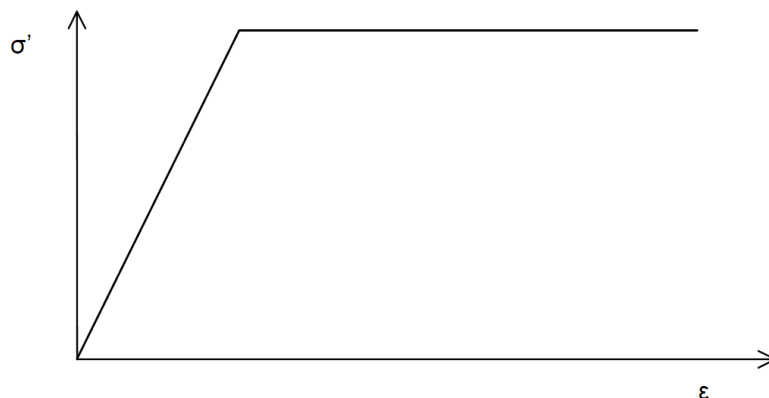


Σχήμα 10. Υπερβολική καμπύλη σχέσης τάσης παραμόρφωσης κατά την κύρια φόρτιση σε τριαξονική δοκιμή

Όλα τα μοντέλα του λογισμικού PLAXIS υπολογίζουν τη συμπεριφορά του εδαφικού υλικού σύμφωνα με τις ενεργές τάσεις. Όλες οι παραμορφώσεις, οποιουδήποτε τύπου, είναι γνωστό ότι δεν πραγματοποιούνται αμέσως, αλλά μεσολαβεί χρονικό διάστημα ώσπου να πραγματοποιηθούν. Παρόλα αυτά το λογισμικό θεωρεί ότι συμβαίνουν αμέσως, εκτός της ανάλυση στερεοποίησης, οπότε οι παραμορφώσεις συμβαίνουν στο χρονικό διάστημα που προσδιορίζεται από τον χρήστη.

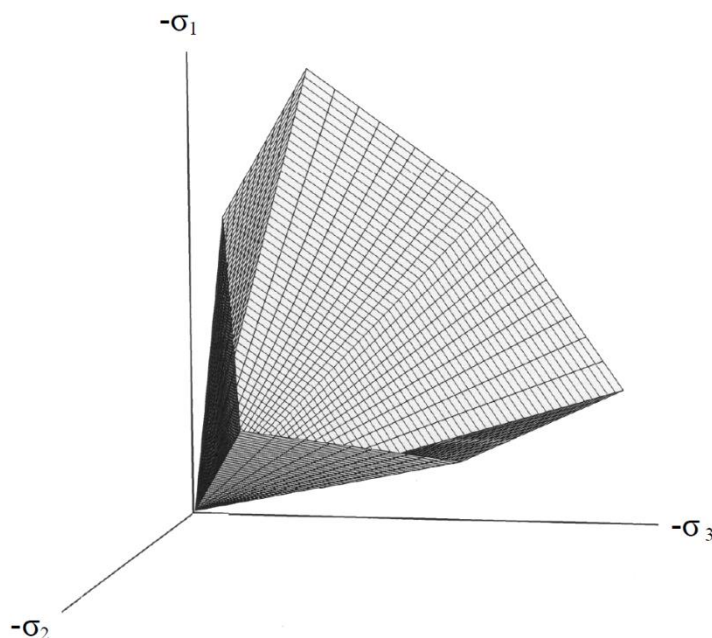
6.2.1. Το Μοντέλο Mohr – Coulomb

Πρόκειται για τέλεια ελαστικό - τέλεια πλαστικό μοντέλο εδάφους.



Σχήμα 11. Προσομοίωση του εδάφους κατά το τέλεια ελαστικό – τέλεια πλαστικό μοντέλο Mohr-Coulomb (διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων).

Το κριτήριο διαρροής Mohr - Coulomb είναι η επέκταση του νόμου του Coulomb σε οποιαδήποτε εντατική κατάσταση. Η γραφική παράσταση των συναρτήσεων που ορίζουν το κριτήριο διαρροής Mohr - Coulomb σε σύστημα συντεταγμένων $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ είναι μία επιφάνεια σε σχήμα εξαγωνικού πρίσματος.



**Σχήμα 12. Η επιφάνεια διαρροής Mohr-Coulomb σε χώρο κύριων τάσεων
(πηγή εικόνας: PLAXIS v8 Reference manual).**

Το PLAXIS χρησιμοποιεί το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb προκειμένου να καθορίσει αν το εδαφικό στοιχείο έχει περάσει το όριο διαρροής ή όχι.

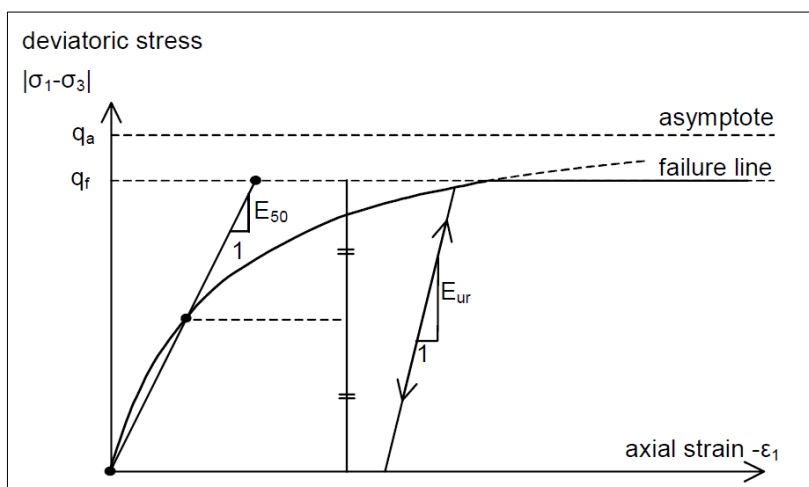
Αν δεν το έχει περάσει τότε εφαρμόζει τον καταστατικό νόμο της γραμμικής ελαστικότητας του Hooke. Συνδέει τις τάσεις με τις ανηγμένες παραμορφώσεις με τον απλούστερο τρόπο, ο οποίος είναι η σύνδεση μέσω διαφόρων ελαστικών μέτρων, ανάλογα με το είδος της ανηγμένης παραμόρφωσης με το οποίο συνδέεται το κάθε μέτρο (μέτρο διάτμησης για τις παραμορφώσεις και το μέτρο διόγκωσης για τις διατμητικές και αξονικές παραμορφώσεις αντίστοιχα (Κούστα 2007).

Αν το έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής τότε θεωρεί ότι το εδαφικό στοιχείο βρίσκεται σε πλαστική κατάσταση. Μετά τη διαρροή, το έδαφος μπορεί να αποφορτιστεί ή να συνεχίσει να διαρρέει υπό σταθερή τάση, την τάση διαρροής του. Για την εύρεση των πλαστικών παραμορφώσεων στο μοντέλο αυτό έχουν συνταχθεί ειδικές εξισώσεις πλαστικού δυναμικού σε τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων (δες PLAXIS v.8 Materials manual).

Το PLAXIS δεν λογίζει την αστοχία ως κινηματική αστοχία πάνω σε μία επιφάνεια ολίσθησης αλλά μια εξαιρετική αποδυνάμωση της αντοχής κάποιας ζώνης η οποία είναι κρίσιμη για την ευστάθεια. Όταν συμβεί αυτό οι υπολογισμοί διακόπτονται.

6.2.2. Το Μοντέλο HARDENING

Το «σκληρυνόμενο» εδαφικό μοντέλο που θα εφαρμοσθεί στην παρούσα εργασία χρησιμοποιεί τον υπερβολικό νόμο του μοντέλου που αναπτύχθηκε από τους Duncan και Chung (PLAXIS v8 Materialw manual) για να περιγράψει τη σχέση εκτροπικής τάσης – πλαστικών εκτροπικών παραμορφώσεων (πλαστική κράτυνσης). Σύμφωνα με αυτό, Υπό την εκτροπική φόρτιση (τριαξονική δοκιμή) τα εδάφη χάνουν την δυσκαμψία τους και αναπτύσσουν μη αναστρέψιμες πλαστικές παραμορφώσεις. Η σχέση αυτή της εκτροπικής τάσης με την πλαστική κράτυνση μπορεί να παρασταθεί με μια υπερβολική καμπύλη, κατά την οποία το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται. Σχηματικά (σχ.14):



Σχήμα 13. Φθίνουσα μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας E_{50} , καθώς εξελίσσεται η εκτροπική φόρτιση μιας τυπικής τριαξονικής δοκιμής

Οι βασικές παραδοχές είναι οι εξής:

- Η εκτροπική τάση προκαλεί την ανάπτυξη πλαστικών διατμητικών παραμορφώσεων (μεταβολή σχήματος χωρίς να μεταβάλλεται ο όγκος) και πλαστικών παραμορφώσεων όγκου.
- Κατά την αποφόρτιση της εκτροπικής τάσης, το μοντέλο συμπεριφέρεται ελαστικά (όπως περίπου είναι και η πραγματική συμπεριφορά του εδάφους κατά την αποφόρτιση).
- Οι προκαλούμενες πλαστικές και οι ελαστικές παραμορφώσεις προστίθενται διανυσματικά και
- Χρησιμοποιούνται εφαπτομενικοί τανυστές για την εύρεση των παραμορφώσεων από τις τάσεις και άλλοι για την εύρεση των εφαπτομενικών μέτρων ελαστικότητας.

Βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου κατά την χρήση του λογισμικού είναι:

1. Δυσκαμψία (E_{50}) εξαρτώμενη από το μέγεθος της τάσης σ'_3 , σύμφωνα με εκθετικό νόμο (ελέγχεται από την παράμετρο m).
2. Πλαστική παραμόρφωση λόγω αρχικής εκτροπικής φόρτισης (ελέγχεται από την παράμετρο E_{50}^{ref})

Η εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας E_{50} από την τάση σ'_3 : και από το E_{50}^{ref} σε ορθή τάση αναφοράς $p^{ref} = 100$ kPa

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

3. Μη πλήρως αναστρέψιμη πλαστική παραμόρφωση (διατμητική κράτυνση) λόγω αρχικής συμπίεσης (ελέγχεται από την παράμετρο E_{oed}^{ref} στην ορθή τάση αναφοράς $p^{ref} = 100$ kPa)

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

4. Ελαστική παραμόρφωση και επαναφόρτιση (ελέγχεται από τις παραμέτρους E_{ur}^{ref} & ν_{ur})

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

5. Αστοχία σύμφωνα με το κριτήριο διαρροής Mohr - Coulomb.

Με παραμέτρους την συνοχή c και την γωνία εσωτερικής τριβής φ .

Ας σημειωθεί ότι εναλλακτικά των παραμέτρων E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} και E_{ur}^{ref} το PLAXIS παρέχει την δυνατότητα χρήσης εναλλακτικών παραμέτρων από δοκιμές στεριοποίησης:

- Του δείκτη συμπίεστικότητας (Compression index – C_c)
- Του δείκτη διόγκωσης (Swelling index - C_s)
- Του αρχικού δείκτη κενών (e_{int})

Πρακτικά το λογισμικό τις χρησιμοποιεί προς υπολογισμό των κύριων παραμέτρων.

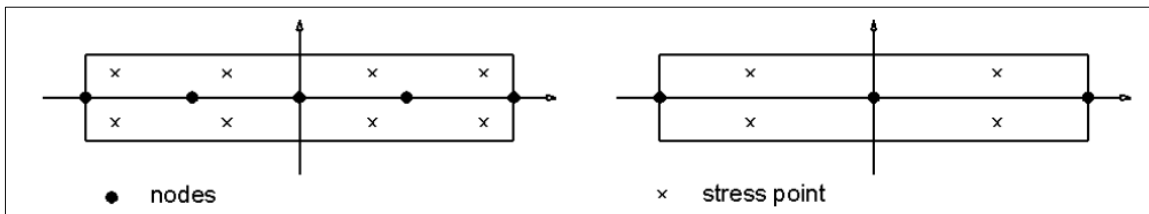
Στην προσομοίωση σε επόμενο κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθούν οι εναλλακτικές.

6.3. Προσομοίωση δομικών στοιχείων μέσω του κώδικα PLAXIS

Τα δομικά στοιχεία που εμφανίζονται συνήθως σε ένα πρόβλημα αντιστήριξης είναι τα προσομοιώματα του διαφράγματος αντιστήριξης, κάποιας υπόγειας κατασκευής που βρίσκεται κοντά στην εκσκαφή, ή κάποιου παρακείμενου κτηρίου

Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS αντιμετωπίζει τα δομικά στοιχεία ως πλάκες (φορείς) κάθετες στο επίπεδο ανάλυσης. Πάνω στο επίπεδο ανάλυσης εμφανίζονται ως γραμμικά στοιχεία. Η θεωρία που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς τις λαμβάνει υπόψη και τη διατμητική παραμόρφωση του στοιχείου (Κούστα 2007). Η εντατική κατάσταση των στοιχείων αυτών διατυπώνεται με τις όρους των γνώριμων εντατικών μεγεθών τις ροπής, τέμνουσας και αξονικής δύναμης.

Οι φορείς αυτοί καλούνται “Plates” και στο σχήμα που ακολουθεί (σχ.15), παρουσιάζονται ενδεικτικά.



Σχήμα 14. Ο φορέας (στοιχείο), Plate, που χρησιμοποιεί το PLAXIS και η κατανομή των σημείων υπολογισμών μετατοπίσεων (nodes) και τάσεων (stress)

6.3.1. Προσομοίωση στοιχείων αγκύρωσης μέσω του κώδικα PLAXIS

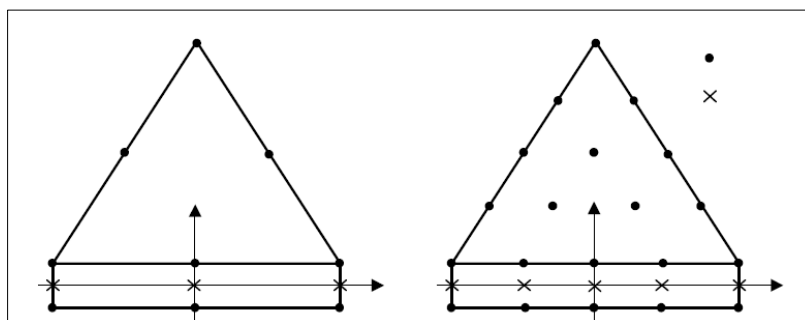
Τα αγκύρια στο PLAXIS αντιμετωπίζονται σαν γραμμικά στοιχεία τα οποία δέχονται αξονικές τάσεις και στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των διατμητικών παραμορφώσεων. Σε αντίθεση με το διάφραγμα και κάθε είδους πλακοειδές στοιχείο που έρχεται σε επαφή με το έδαφος σε μεγάλη έκταση, τα αγκύρια έρχονται σε επαφή με άλλα στοιχεία μόνο μέσω των άκρων τους.

6.3.2. Προσομοίωση στοιχείων διεπιφάνειας μέσω του κώδικα PLAXIS

Κατά την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται – συχνά – δυσκολίες στην προσομοίωση των περιοχών επαφής μεταξύ σωμάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Αυτό ως ένα βαθμό αποτελεί συνοριακή συνθήκη. Η αμοιβαία μεταφορά τάσεων, που παρατηρείται τις συγκεκριμένες θέσεις, έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση σχετικών μετακινήσεων και έντονων μεταβολών στα διανύσματα των τάσεων-παραμορφώσεων.

Για τη βελτίωση/αντιμετώπιση τέτοιων περιπτώσεων το PLAXIS χρησιμοποιεί ειδικά πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία είναι γνωστά ως στοιχεία διεπιφάνειας (interface elements).

Το ακόλουθο σχήμα (σχ.16) που δείχνει τον τρόπο που συνδέεται το στοιχείο διεπιφάνειας με το στοιχείο του εδάφους.



Σχήμα 15. Σχέση στοιχείου διεπιφάνειας με το έδαφος και η κατανομή των σημείων υπολογισμών μετατοπίσεων (nodes) και τάσεων (stress).

Ας σημειωθεί ότι τα interfaces διαθέτουν «εικονικό» πάχος στον κάναβο των πεπερασμένων στοιχείων και αυτό ενεργοποιείται μόνο για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς της και με τέτοιο τρόπο ώστε το στοιχείο να έχει πάντοτε επαρκή δυσκαμψία ώστε να μην εμφανίζει είτε μη-ρεαλιστικά μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις (που θα συνέβαινε για μικρή δυσκαμψία) είτε προβληματική αριθμητική διευθέτηση (που θα συνέβαινε για μεγάλη δυσκαμψία) (Κούστα 2007).

Τα στοιχεία διεπιφάνειας έχουν ιδιότητες που προκύπτουν από τις ιδιότητες του εδάφους στο οποίο ανήκουν ή είναι δυνατόν να τις αποδοθούν ιδιότητες που κάποιου άλλου εδαφικού υλικού που θα οριστεί από τον χρήστη.

6.4. Υπολογισμός Συντελεστή ασφαλείας

Το PLAXIS προκειμένου να προσδιορίσει τον συντελεστή ασφαλείας ακολουθεί μια διαδικασία/ρουτίνα υπολογισμών (Phi-c reduction), κατά την οποία σταδιακά μειώνει τις τιμές συνοχής c και της εσωτερικής γωνίας τριβής φ (υπό την μορφή $\tan\varphi$) του εδαφικού υλικού, έως ότου επέλθει η αστοχία της κατασκευής. Ο υπολογισμός του λόγου των αρχικών τιμών, c , $\tan\varphi$ προς τις τελικές παρέχει τιμή που ισοδυναμεί σε τιμή συντελεστή ασφαλείας :

$$\sum Msf = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{C_{input}}{C_{reduced}}$$

Υπό την προϋπόθεση της αστοχίας της κατασκευής (ολοκλήρωση διαδικασίας πρόκλησης αστοχίας) τότε η τιμή του ισοδύναμου συντελεστή $\sum Msf$ όντως αποτελεί των συντελεστή ασφαλείας SF της κατασκευής:

$$SF = \frac{\text{available strength}}{\text{strength at failure}} = \text{value of } \sum Msf \text{ at failure}$$

Κατά την διαδικασία Phi-c reduction το πρόγραμμα υπολογίζει κανονικά τάσεις και μετακινήσεις και το μοντέλο οδεύει σταδιακά σε ένα μηχανισμό αστοχίας.

Αν και αυτές οι μετακινήσεις δεν έχουν καμία πραγματική αξία, η απεικόνιση τους με ισοδιατηρικές σκιάσεις, μπορεί να δώσει μια πολύ καλή εικόνα πιθανών μηχανισμών αστοχίας.

7. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

7.1. Κατάστρωση εννοιολογικού μοντέλου

Προκειμένου να προσομοιωθεί με τον καλύτερο τρόπο ένα σύστημα, καταστρώνεται το εννοιολογικό μοντέλο. Αυτό γενικά, έχει την έννοια της αντιστοίχισης μιας παραμέτρου του συστήματος σε όρους μαθηματικούς και σε όρους λογισμικού. Έχει ιδιαίτερη σημασία η κατάστρωση του, καθώς δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί σε πλήρη κλίμακα η πολυπλοκότητα της πραγματικής κατάστασης του συστήματος.

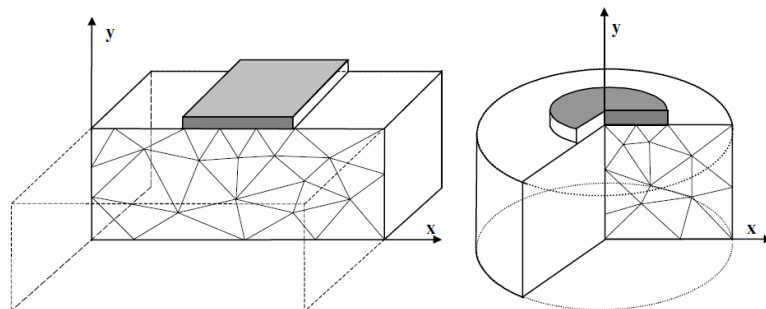
Η μετατροπή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του έργου και των κατασκευών σε αυτό, των γεωτεχνικών ιδιοτήτων του εδάφους, των παραμέτρων των στοιχείων κατασκευής, των σχέσεων μεταξύ εδάφους-στοιχείων κατασκευής, καθώς και των σταδίων κατασκευής και της συμπεριφοράς του εδάφους, σε αντίστοιχες οντότητες του λογισμικού πακέτου PLAXIS, αποτελεί το βασικό στόχο υλοποίησης του συγκεκριμένου εννοιολογικού μοντέλου.

7.1.1. Γεωμετρία μοντέλου

Η ανάλυση που γίνεται στο λογισμικό είναι δισδιάστατη οπότε η προσομοίωση πρακτικά αφορά μια τομή του έργου.

Η ανάλυση της τομής στο PLAXIS γίνεται είτε μέσω δισδιάστατων αξονοσυμμετρικών (axisymmetric) προσομοιωμάτων είτε δισδιάστατων προσομοιωμάτων με επίπεδη παραμόρφωση (plain strain), δες παρακάτω σχήμα (σχ.17).

Τα axisymmetric προσομοιώματα χρησιμοποιούνται για κατασκευές με ομοιόμορφη ακτινική διατομή και φορτία τα οποία ασκούνται σε έναν κεντρικό άξονα, όπου οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι ίδιες σε όλες τις ακτινικές διευθύνσεις. Αντίθετα τα plain strain προσομοιώματα επίπεδης παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται για την σχεδίαση κατασκευών με ομοιόμορφη διατομή και αντίστοιχη κατάσταση τάσεων και φορτίσεων για ένα συγκεκριμένο μήκος κάθετα στο επίπεδο.



Σχήμα 16. Παράδειγμα δισδιάστατων προσομοιωμάτων Plain strain και axisymmetric (πηγή εικόνας: PLAXIS v8 Reference manual)

Για τις ανάγκες της παρούσας επιλέχθηκε η plain strain ανάλυση.

Όσον αφορά την επιλογή τομής, επιλέχθηκε η τομή στην Χ.Θ. 20+075. Η τομή αυτή:

- Βρίσκεται σχεδόν στο κέντρο του ορύγματος με θεωρητικά μέγιστο βάθος εκσκαφής
- Βάθος εκσκαφής, 13m,
- το πλάτος του ορύγματος είναι: 58m και
- το μέγιστο ύψος υπερκείμενων: 10m (παρακείμενη κορυφή λόφου σε απόσταση 65m).

Οι ενεργές διαστάσεις του μοντέλου, για υπολογιστικούς λόγους επιλεχθήκαν:

- Πλάτος: 180m
- Ύψος: 60m

Αν και το μοντέλο έχει τις πραγματικές του διαστάσεις το ενεργό εύρος υπολογισμών επιλέγεται αρκετά μεγαλύτερο προκειμένου κατά τους υπολογισμούς να αποφεύγονται οι επιρροές των «ακραίων» τιμών ορίου στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Το φύλλο εργασίας του PLAXIS καθορίζεται από το λογισμικό ακόμα μεγαλύτερο από επιλεγμένο μοντέλο και είναι 230 x 100m, με βοηθητικό κάναβο διάστασης 1x1m.

Ας σημειωθεί ότι οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιεί το λογισμικό είναι οι συνήθεις (m, kN).

7.1.2. Γεωτεχνικές παράμετροι μοντέλου

Όπως έγινε αντιληπτό (δες παρ. 5.2.1 Γεωτεχνικών χαρακτηριστικών) το υπόβαθρο του ορύγματος χαρακτηρίζεται από δύο γεωτεχνικές ενότητες με τα εξής γεωτεχνικά χαρακτηριστικά (πιν.3):

Πίνακας 8. Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά μοντέλου

		Καφέ Άργιλος (Clay Brown)	Μάργα γκρι (Marl)
Πυκνότητα ακόρεστ/κορεσμ.	$\gamma_{\text{unsat/sat}}$	18.5 / 21 kN/m ³	19 / 21 kN/m ³
Υδροπερατότητα	kx, ky	10 ⁻⁶ m/day	10 ⁻⁷ m/day
Μέτρο ελαστικότητας	E₅₀	25 10 ³ kN/m ³	110 10 ³ kN/m ³
Συντελεστής Poisson	v	0.2	0.2
Συνοχή	c	39 kN/m ²	95 kN.m ²
Γωνία εσωτερικής τριβής	φ	22°	20°
Διασταλτικότητα	ψ	0°	0°

- Οι τιμές ξηρής πυκνότητας προέκυψαν από εργαστηριακά αποτελέσματα. Για τιμές κορεσμένης πυκνότητας επιλέχθηκαν οι τιμές πεδίου, καθώς τα δείγματα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων είναι ως ένα βαθμό κορεσμένα ενώ δεν ανευρέθη υδροφόρος ορίζοντας.
- Οι τιμές c, φ προέκυψαν από την επεξεργασία των εργαστηριακών αποτελεσμάτων
- Το Μέτρο ελαστικότητας (E) προέκυψε από την ανάλυση αποτελεσμάτων μονοαξονικής θλίψης δοκιμίων (παράρτημα Π.4)
- Ο συντελεστής Poisson (v) προέκυψε από πίνακες.
- Οι τιμές kx,ky υδροπερατότητας προέκυψαν από πίνακες.
- Οι τιμές διασταλτικότητας προέκυψαν με βάση την βιβλιογραφία: $\psi = 30 - \phi$ (Waterman 2006, Grow 2014)

Όσον αφορά τον καταστατικό νόμο του υλικού επιλέχθηκε το μοντέλο Hardening Soil του PLAXIS. Κυρίως λόγω:

- Βιβλιογραφικών αναφορών περί της καλύτερης συμπεριφοράς κατά στην αποφόρτιση (εκσκαφή) «μαλακών» υλικών.
- Διαθέσιμα εργαστηριακά αποτελέσματα δοκιμών στερεοποίησης (consolidation tests).

Το μοντέλο Hardening, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο (παρ. 6.2.2) πέραν των άνωθεν παραμέτρων, χρησιμοποιεί για τους υπολογισμούς τα μέτρα ελαστικότητας φόρτισης και αποφόρτισης όπως προέκυψαν από δεδομένα τριαξονικών δοκιμών. Εναλλακτικά, δύναται να τα προσδιορίσει έμμεσα από τον δείκτη συμπίεσης (C_c), τον δείκτη διόγκωσης (C_s) και τον αρχικού δείκτη κενών (e_{int}) δοκιμών στερεοποίησης (PLAXIS v.8 – Material models manual).

- Οι τιμές του δείκτη συμπίεστικότητας (C_c) και του δείκτη διόγκωσης (C_s), καθώς και του αρχικού δείκτη κενών (e_{int}) που χρησιμοποιήθηκαν για τους δύο σχηματισμούς παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (πιν.4):

Πίνακας 9. Τιμές δεικτών δοκιμών στερεοποίησης

	C_c	C_s	e_{int}
Καφέ άργιλος	0,0890	0,0120	0.818
Γκρι Μάργα	0,1901	0,0610	1,020

Ας σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές αποτελούν τον μέσο όρο (διάμεσος) των τιμών από δοκιμές 15 δειγμάτων γεωτρήσεων. Ο πίνακας αποτελεσμάτων των δοκιμών αυτών και τα στατιστικά αποτελέσματα της επεξεργασίας βρίσκονται στο παράρτημα Π.5α, β.

- Η τιμή του εκθέτη μεταβολής πλευρικής τάσης “ m ”, επειδή πρόκειται για μαλακές αργίλους, επιλέχθηκε $m=1$.
- Ενώ η τιμή του λόγου Poisson κατά την αποφόρτιση, ν_{ur} , λόγω έλλειψης στοιχείων, επιλέχθηκε η προτεινόμενη τιμή του PLAXIS, $\nu_{ur} = 0,2$.

- Όσον αφορά τις συνθήκες στράγγισης των αργιλικών σχηματισμών θεωρήθηκαν ότι οι αστράγγιστες συνθήκες (undrained) αντιπροσωπεύουν πιο ρεαλιστικό σενάριο σε σχέση με τις στραγγισμένες συνθήκες (undrained), για τους παρακάτω λόγους:
 - Ανυπαρξία υδροφόρου ορίζοντα
 - Πολύ χαμηλή υδροπερατότητα των αργιλικών σχηματισμών
 - Οι τιμές πεδίου πυκνότητας ($\gamma=21 \text{ kN/m}^3$) των σχηματισμών είναι υψηλή σε σχέση με τις τιμές ξηρής πυκνότητας των δειγμάτων όπως προέκυψε από τα εργαστηριακά αποτελέσματα.
 - Ο βαθμός κορεσμού όπως προέκυψε από τις εργαστηριακές αναλύσεις είναι πολύ υψηλός (80-90 %)
 - Τις παρατηρήσεις κατά τις διατρήσεις των αγκυρίων.

Ας σημειωθεί ότι στο PLAXIS κατά την επιλογή undrained σε καθεστώς ενεργών τάσεων επανυπολογίζει το μέτρο ελαστικότητας και τον συντελεστή Poisson για αστράγγιστες συνθήκες και προσθέτει και έναν μαζικό συντελεστή για το νερό προκειμένου να υπολογίζει την ενεργή πίεση πόρων (PLAXIS v8 – Materials manual).

7.1.3. Παραμετρικά στοιχεία κατασκευών μοντέλου

Πασσαλοστοιχία

Τα γεωμετρικά στοιχεία των πασσάλων είναι:

- Διάμετρος: 1m
- Απόσταση πασσάλων: 1.4m
- Ύψος πασσάλου ανάντη πασσαλοστοιχίας: 13m
- Ύψος πασσάλου κατάντη πασσαλοστοιχίας: 16m
- Κάθετη απόσταση πασσαλοστοιχιών: 10m.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα δομικά στοιχεία (φορείς) στο Plaxis προσομοιώνονται ως ελαστικά ή άκαμπτα γραμμικά στοιχεία, “Plates”, με τέτοιες ιδιότητες ώστε να μπορούν να δεχτούν την δράση αξονικών και διατμητικών τάσεων. Πρακτικά το γραμμικό στοιχείο κατέχει την θέση ισοδύναμου πρότυπου δομικού φορέα με συγκεκριμένες τιμές

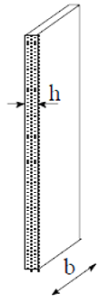
ελαστικών παραμέτρων και πάχους. Ο χρήστης αποδίδει τιμές στα χαρακτηριστικά τέτοια ώστε να ισοδυναμούν με το προς προσομοίωση δομικό στοιχείο, εν προκειμένω, την πασσαλοστοιχία.

Τα στοιχεία αυτά είναι πρακτικά τα στοιχεία του φορέα του ορθογωνικού φορέα Plaxis ύψους h ανά τρέχον μέτρο (b), οπότε πρακτικά ο οποιοδήποτε φορέας του χρήστη θα πρέπει να αναχθεί σε αυτόν.

Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης καλείται να προσδιορίσει τα εξής στοιχεία:

- Δυστένεια (EA),
- Καμπτική δυσκαμψία (EI)
- Πάχος φορέα (d)
- Βάρος φορέα (w)
- Λόγος poisson και
- Απόσβεση rayleigh a και b (αν πρόκειται να γίνει δυναμική ανάλυση για τα σεισμικά φορτία, κάτι που δεν γίνεται στην παρούσα εργασία).

Ενδεικτικό σχήμα:

Καμπτική δυσκαμψία (Flexural rigidity)	$EI = E \cdot \frac{h^3 \cdot b}{12}$	
Δυστένεια (Normal Stiffness)	$EA = E \cdot h \cdot b$	
Πάχος στοιχείου Plate	$d = h = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}}$	
Βάρος (w)	$w = (\gamma_{concrete} - \gamma_{soil}) \cdot d_{real}$	

Σχήμα 17. Στοιχεία ισοδύναμου φορέα

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι υπολογισμοί των παραπάνω στοιχείων.

$$EA = E \cdot A = E \cdot \pi d^2 / 4 = 25 \cdot 10^6 \text{ KPa} \cdot \pi \cdot 1^2 / 4 = 19,62 \cdot 10^6 \text{ kN}$$

$$EA' = EA/\delta = 14,02 * 10^6 \text{ kN} \quad (\text{ανά τρέχον m})$$

$$EI = E * I = E * \pi d^4 / 64 = 25 * 10^6 \text{ KPa} * \pi * 1^4 / 64 = 1,226 * 10^6 \text{ kN m}^2$$

$$EI' = EI/\delta = 0.876 * 10^6 \text{ kN m}^2 \quad (\text{ανά τρέχον m})$$

$$d' = h' = \sqrt{\frac{12 EI}{EA}} = 0.866 \text{ m}$$

$$w = \gamma \times d' = 24 \text{ kN m}^3 \times 0.866 \text{ m} = 20.78 \text{ kN m}^2$$

Όπου:

- E: το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος
- γ: το ειδικό βάρος του σκυροδέματος
- ν: ο λόγος Poisson του σκυροδέματος
- d: η διάμετρος του πασσάλου
- δ: η απόσταση των πασσάλων
- d': Η ισοδύναμη διάμετρος φορέα
- w: το ισοδύναμο βάρος φορέα
- EI', EA' = οι ισοδύναμες ιδιότητες του φορέα

Επομένως στο λογισμικό ως ιδιότητες του ισοδύναμου φορέα εισάγονται τα παρακάτω:

Δυστένεια (EA),	EA = 14,02 * 10 ⁶ kN
Καμπτική δυσκαμψία (EI)	EI = 0.876 * 10 ⁶ kN m ²
Πάχος φορέα (d)	d = 0.866m
Βάρος φορέα (w)	w = 20.78 kN m ²
Λόγος poisson και	ν = 0.15

Αγκύρια

Με βάση τον σχεδιασμό, τα γεωμετρικά στοιχεία της αγκύρωσης είναι τα εξής:

- Δύο σειρές αγκυρίων ανά πασσαλοστοιχία με κάθετη μεταξύ τους απόσταση 3m (συνολικά 4).
- Απόσταση αγκυρίων μεταξύ τους: 2,4m
- Γωνία εισαγωγής 30°
- Συνολικό μήκος μεμονωμένου αγκυρίου: 33m
- Μήκος πακτωμένου τμήματος: 27m
- Ελεύθερο μήκος: 6m

Χαρακτηριστικές τιμές ανά τύπο αγκυρίου:

- Παθητικά (αυτοδιάτρητα)
 - Μέγιστη δύναμη θραύσης: 920 kN
 - Επιφάνεια διατομής οπλισμού 500mm²
 - Αρχική τάση: 270 kN / ανά αγκύριο
- Ενεργά με προένταση
 - Μέγιστη δύναμη θραύσης: 1000 kN
 - Επιφάνεια διατομής οπλισμού 4x150 mm² (4 κλώνοι)
 - Αρχική τάση προέντασης: 270 kN / ανά αγκύριο

Ας σημειωθεί ότι τα παθητικά αγκύρια αποτελούσε επιλογή αρχικού σχεδιασμού, η οποία τροποποιήθηκε σε ενεργητικά αγκύρια με προένταση . Οπότε μόνο η ανώτερη σειρά αγκυρίων διαθέτει παθητικά αγκύρια.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα αγκύρια στο Plaxis προσομοιώνονται σαν γραμμικά στοιχεία/φορείς με ελαστική ή ελαστοπλαστική συμπεριφορά, με ιδιότητες, δυστένειας (EA), αποστάσεις αγκυρίων μεταξύ τους (L) και μέγιστη δύναμη εφελκυσμού (F_{max tens}) και συμπίεσης, αν επιλεγθεί η ελαστοπλαστική συμπεριφορά.

Οπότε όσον αφορά την γεωμετρία τους στο Plaxis, σχεδιάστηκαν γραμμικά στοιχεία με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού. Όσον αφορά τις τιμές παραμέτρων των αγκυρίων/ γραμμικών φορέων στο Plaxis, ακολουθεί ο υπολογισμός των ζητούμενων μεγεθών στον πίνακα που ακολουθεί (πιν.5):

Πίνακας 10. Υπολογισμοί παραμέτρων αγκυρίων

Προεντεταμένα αγκύρια (PS):	$EA = 210 \times 10^6 \text{ kPa} \times 600 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 126 \cdot 10^{-3} \text{ kN}$
	L spacing: Απόσταση αγκυρίων μεταξύ τους: 2,4m
	F max tens (μέγιστη δύναμη εφελκυσμού): Μέγιστη δύναμη θραύσης: 1000 kN (από τον σχεδιασμό)
	F max comp (μέγιστη συμπιεστική δύναμη): 1000 kN (=F max tens)
	Προένταση: $270 \text{ kN} / 2,4\text{m} = 115 \text{ kN/m}$ (ενεργοποιείται σε κατοπινό στάδιο της προσομοίωσης)

Παθητικά αγκύρια (SF):	$EA = 210 \times 10^6 \text{ kPa} \times 500 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 105 \cdot 10^{-3} \text{ kN}$
	L spacing: Απόσταση αγκυρίων μεταξύ τους: 2,4m
	F max tens (μέγιστη δύναμη εφελκυσμού): Μέγιστη δύναμη θραύσης: 920 kN (από τον σχεδιασμό)
	F max comp (μέγιστη συμπιεστική δύναμη): 920 kN (=F max tens)
<i>Όπου E: το μέτρο ελαστικότητας τους χάλυβα (= 210 10⁶ kPa)</i>	

Πακτωμένο τμήμα αγκυρίων

Όσον αφορά το πακτωμένο τμήμα του αγκυρίου, προσομοιώνεται σαν ένα γραμμικό ελαστικό στοιχείο στο οποίο ασκείται αξονική τάση με στοιχεία αναφορά την δυστένια του (EA). Δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας του υλικού x την επιφάνεια διατομής του.

$EA = E$ (απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος κατά 50%) x A (επιφάνεια διατομής πάκτωσης)

Οι υπολογισμοί των τιμών δυστένιας του πακτωμένου τμήματος για τους δύο τύπους αγκυριών παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (πιν. 6):

Πίνακας 11. Υπολογισμοί παραμέτρων πακτωμένου τμήματος αγκυριών.

	Προεντεταμένα αγκύρια (PS)	Παθητικά αγκύρια (SF)
Μέτρο ελαστικότητας (E)	12.5 * 10 ⁶ kPa	12.5 * 10 ⁶ kPa
Διατομή διάτρησης (D)	150 mm	150 mm
Επιφάνεια διατομής διάτρησης (AD)	$\pi \times 150^2 / 4 = 17.662 \text{ mm}^2$	$\pi \times 150^2 / 4 = 17.662.5$
Επιφάνεια διατομής αγκυρίου (Ag)	4 x 150 = 600 mm ²	750 mm ²
Επιφάνεια διατομής πάκτωσης (Ac)	AD – Ag = 17.062 mm ²	AD – Ag = 16.912 mm ²
Δυστένια (EA)	213.281 kN ή 88.867 kN/m	211.406 kN ή 88.086 kN/m

7.2. Οριακές συνθήκες

Τα κάτω περιθώρια της περιοχής προσομοίωσης θεωρήθηκαν περιοχές όπου δεν πραγματοποιείται μετακίνηση ($U_x=U_y=0$), ενώ τα πλαϊνά περιθώρια όπου δεν πραγματοποιείται κύλιση ($U_x=0$). Αυτό στο λογισμικό πραγματοποιείται με την τοποθέτηση/θεώρηση «Σταθερών ορίων» στην ενεργή γεωμετρία (standard fixities).

Σχεδιάσθηκαν επίσης στοιχεία διεπιφάνειας (interface) στους γύρω από τα στοιχεία “plate” (τα οποία αντιπροσωπεύουν την πασσαλοστοιχία) προκειμένου να αποδοθούν υπολογιστικά καλύτερα οι τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των εδαφικών στοιχείων και του πασαλλότοιχου.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο στα interfaces αποδίδονται τιμές δυσκαμψίας (R_{inter}), από 0.1 έως 1. Η κατώτερη τιμή συμβολίζει την μέγιστη ευχέρεια μετακίνησης μεταξύ κατασκευών και εδάφους σχεδόν χωρίς αλληλεπίδραση, ενώ η ανώτερη τιμή την «κοινή πορεία».

- Επιλέχθηκαν τιμές ενδιάμεσης κατάστασης αλληλεπίδρασης, $R_{inter} = 0,65$ σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Waterman 2006, Grow 2014).

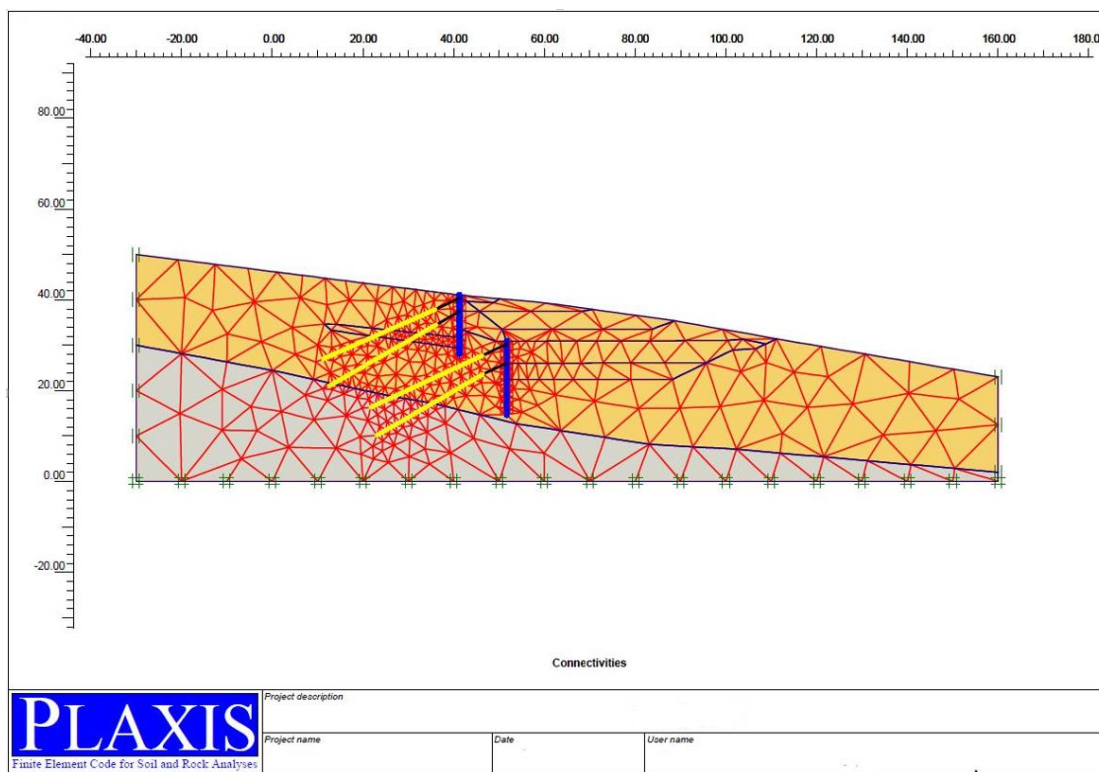
7.3. Διακριτοποίηση χώρου – δημιουργία κανάβου υπολογισμών

Η διακριτοποίηση του χώρου του μοντέλου γίνεται με πολυγωνικά στοιχεία (elements) στα οποία ο χρήστης μπορεί να καθορίσει, ως ένα βαθμό, το μέγεθος και το πλήθος των κόμβων, όπου γίνονται οι υπολογισμοί μετατόπισης και τάσης

Αδρομερέστερα στοιχεία ισοδυναμούν με ταχύτερους υπολογισμούς αλλά και με αδρομερέστερα κατανεμημένη πληροφορία πεδίου τάσεων με αντίστοιχη επιρροή των τάσεων αυτών στις προσομοιωμένες κατασκευές οι οποίες καταλαμβάνουν, συγκριτικά, μικρό ποσοστό του χώρου.

- Όσον αφορά τους κόμβους υπολογισμών (nodes) επιλέχθηκαν elements με 15 αντί για 6 κόμβους υπολογισμών για καλύτερη ακρίβεια.
- Όσον αφορά το μέγεθος (άρα και το πλήθος) των elements, από τις 5 επιλογές μεγέθους στοιχείων επιλέχθηκε η μεσαία (η οποία αντιστοιχεί και με μεσαίου μεγέθους στοιχεία (Mesh/Global coarseness/medium), με εξτρά επιλογή την λεπτομερέστερη διακριτοποίηση (Mesh/Refine line) του χώρου γύρω από τους πασσάλους και τα αγκύρια.

Ο κάρναβος που προέκυψε παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (εικ.7):



Εικόνα 7. Κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS

7.4. Αρχικές συνθήκες μοντέλου (initial conditions)

Για τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών απαιτείται ο υπολογισμός:

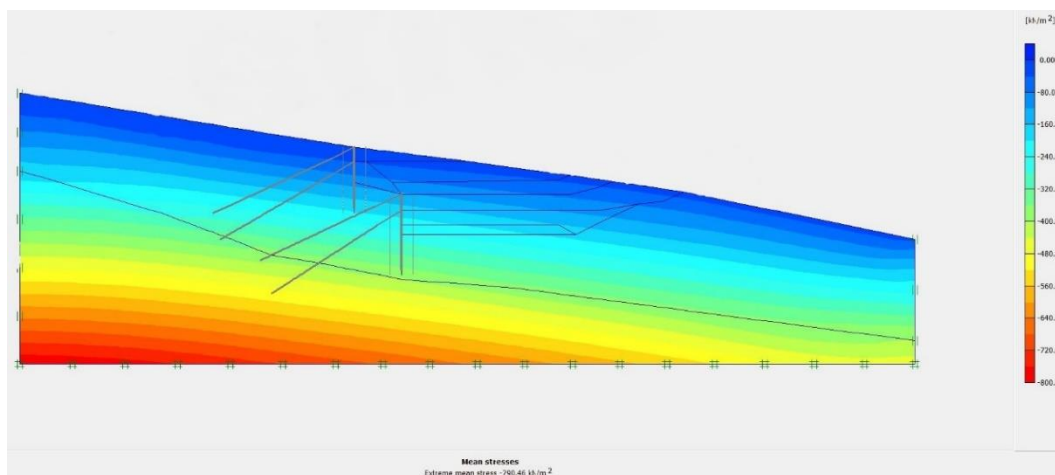
- Των γεωστατικών τάσεων
- Των υδροστατικών τάσεων

Οι υδροστατικές τάσεις προσδιορίζονται με επιλογή ενεργοποίησης αυτών (Generate water pressures) αφού ορισθεί το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα, οπότε υπολογίζονται οι πιέσεις από το PLAXIS οι ενεργές πιέσεις πόρων (active pore pressure).

Κατά τον υπολογισμό των γεωστατικών πιέσεων πρακτικά το λογισμικό προσδιορίζει τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων (K_0) για κάθε γεωλογικό στρώμα και υπολογίζει τις αρχικές ενεργές τάσεις (effective stresses). Βασικές προϋποθέσεις: είναι η μη ενεργή κατάσταση των κατασκευαστικών στοιχείων (ή και τον επιβαλλόμενων φορτίων, αν υπάρχουν) και ο ορισμός του συντελεστή βαρύτητας ΣΜ-weight (συνήθως ΣΜ-weight =1).

Ας σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις τα προς προσομοίωση γεωλογικά στρώματα ή η επιφάνεια του εδάφους είναι κεκλιμένα, το PLAXIS αστοχεί να προσδιορίσει σωστά τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων και άρα και τις ενεργές τάσεις. Ο προσδιορισμός των αρχικών γεωστατικών τάσεων δύναται να πραγματοποιεί στην συνέχεια κατά τους υπολογισμούς των διαφόρων σταδίων με την διαδικασία του Gravity Loading. Κατά την διαδικασία αυτή το PLAXIS πραγματοποιεί πλαστική ανάλυση όπου ο συντελεστής βαρύτητας ΣΜ-weight αυξάνεται προοδευτικά έως την τιμή ΣΜ-weight =1 όπου και επιτυγχάνεται ισορροπία (εικ.8).

Το υπό εξέταση όρυγμα ανήκει σε αυτήν την κατηγορία περίπτωσης, οπότε κατά το στάδιο των αρχικών συνθηκών (initial conditions) ενεργοποιούνται μόνο οι υδροστατικές πιέσεις οι οποίες είναι ίσες με το μηδέν, καθώς όπως αναφέρθηκε δεν ανευρέθει υδροφόρος ορίζοντας.



Εικόνα 8. Αρχικές συνθήκες γεωστατικών πιέσεων (Gravity Loading)

7.5. Εκτέλεση υπολογισμών – στάδια προσομοίωσης

Η εκσκαφή του ορύγματος και η υποστήριξη προσομοιώνεται σε φάσεις/στάδια. Σε κάθε μία από αυτές προσδιορίζεται ξεχωριστά η φάση εκσκαφής και η φάση κατασκευής αντιστήριξης. Πρακτικά τα κατασκευαστικά στοιχεία “ενεργοποιούνται” όσο η εκσκαφή βαθαίνει αντικατοπτρίζοντας όσο το δυνατόν τις πραγματικές φάσεις κατασκευής.

Ας σημειωθεί ότι προτιμάται το κάθε στάδιο προσομοίωσης να περιγράφει μία κατασκευαστική πράξη ώστε κατά τον έλεγχο αποτελεσμάτων να είναι σαφές ποια ενέργεια προκάλεσε το αντίστοιχο αποτέλεσμα.

Η εκσκαφή λοιπόν προσομοιώθηκε από τα εξής στάδια/φάσεις:

- Φάση 1: Εκσκαφή πρόσβασης
- Φάση 2: Ενεργοποίηση άνω πασσαλότοιχου
- Φάση 3: Ενεργοποίηση 1^{ης} σειράς αγκυρίων (παθητικά) άνω πασσαλότοιχου
- Φάση 4: Εκσκαφή μέχρι την 2^η σειρά αγκυρίων άνω πασσαλότοιχου
- Φάση 5: Ενεργοποίηση και προένταση 2^{ης} σειράς αγκυρίων άνω πασσαλότοιχου
- Φάση 6: Εκσκαφή μέχρι το επίπεδο του κάτω πασσαλότοιχου
- Φάση 7: Ενεργοποίηση κάτω πασσαλότοιχου
- Φάση 8: Ενεργοποίηση και προένταση 1^{ης} σειράς αγκυρίων άνω πασσαλότοιχου
- Φάση 9: Εκσκαφή μέχρι την 2^η σειρά αγκυρίων κάτω πασσαλότοιχου Φάση 10: Ενεργοποίηση και προένταση 2^{ης} σειράς αγκυρίων κάτω πασσαλότοιχου
- Φάση 11: Εκσκαφή μέχρι το υψόμετρο της ερυθράς της οδού
- Φάση 12: Εκσκαφή μέχρι τελικού βάθους, βάσης του επιχώματος της οδού.

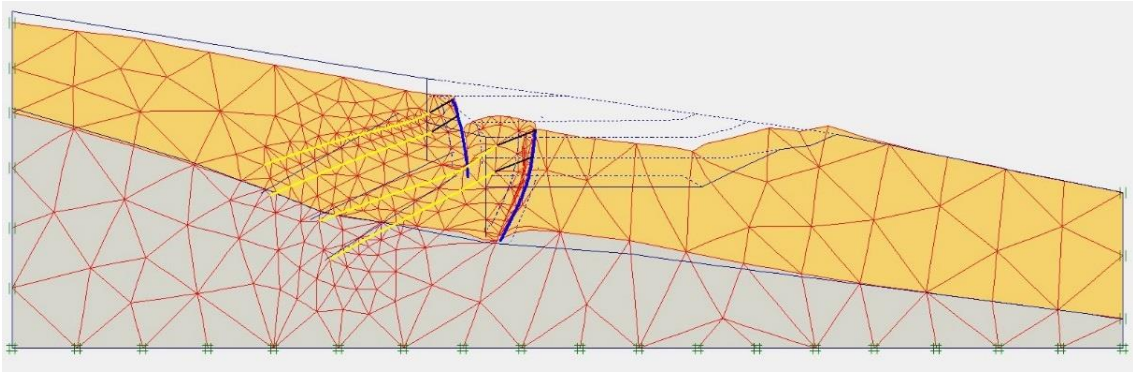
Σχηματικά οι φάσεις κατασκευής/προσομοίωσης παρουσιάζονται στο παράρτημα Π.6.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

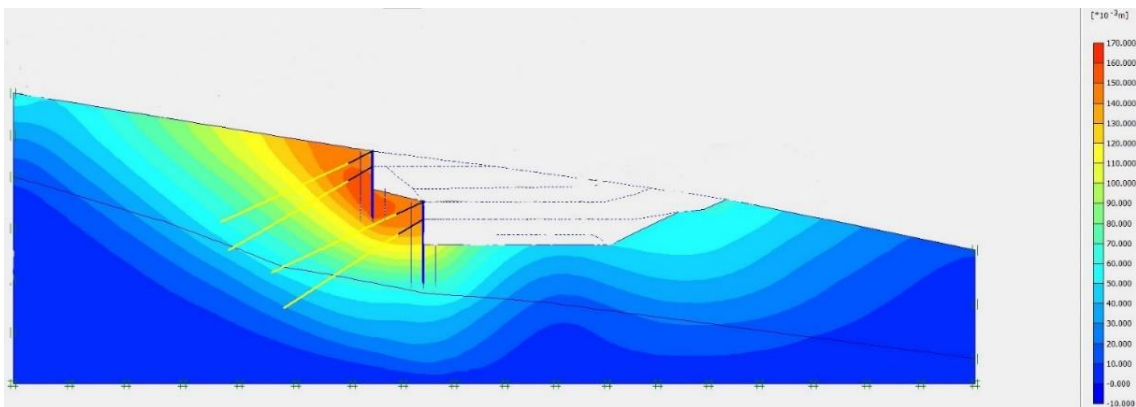
Στο παρόν κεφαλαίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης/ επίλυσης του μοντέλου που περιγράφηκε παραπάνω.

Ο τελικός κánaβος μετακινήσεων (μεγεθυμένη κλίμακα κατά 50.000 φορές):



Εικόνα 9. Κánaβος μετακινήσεων “μηδενικού” σεναρίου (50.000 x scale)

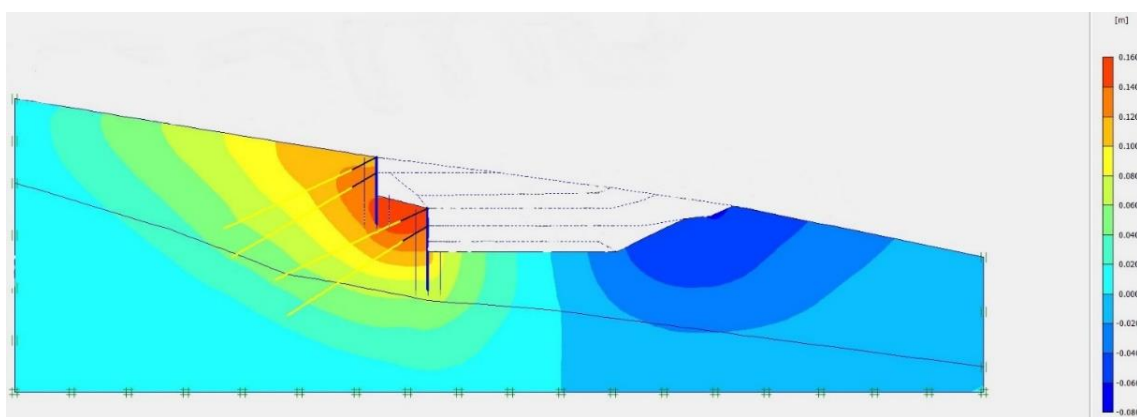
Όπως φαίνεται και από την παρακάτω εικόνα (εικ.10) Συνολικών μετακινήσεων, οι μέγιστες μετακινήσεις (20,5cm) παρουσιάζονται στην βάση της εκσκαφής της κάτω πασσαλοστοιχίας, και στο πρανάς ανάντη αυτής.



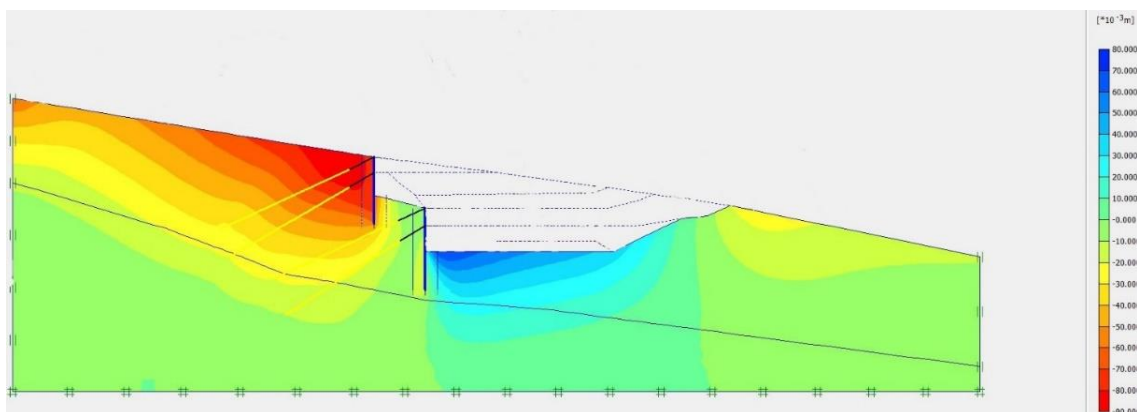
Εικόνα 10. Συνολικές μετακινήσεις μοντέλου

Αυτές οι μετακινήσεις, όπως γίνεται φανερό από τις παραπάνω εικόνες (εικ.11, 12) αντιστοιχούν σε:

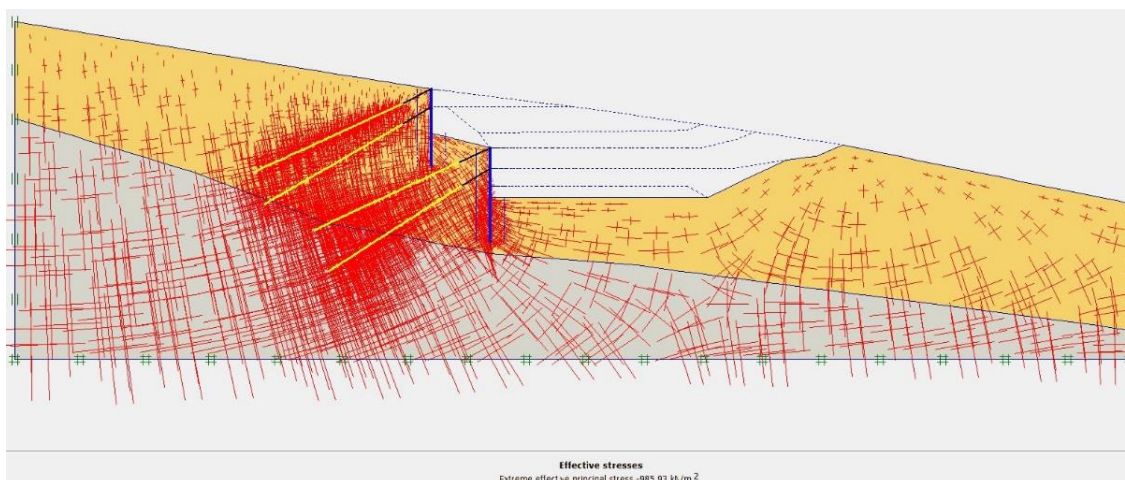
- μέγιστες μετακινήσεις στον οριζόντιο άξονα χ κατά (->) 15,1cm
 - οι οποίες εκδηλώνονται ως «ολίσθηση» του πρανούς ανάντη προς τον κάτω πασσαλότοιχο
- μέγιστες μετακινήσεις στον κατακόρυφο άξονα ψ , κατά (+) 8,8cm
 - οι οποίες εκδηλώνονται ως ανίζηση στο πυθμένα της εκσκαφής και
 - καθιζήσεις του πρανούς ανάντη ως αποτέλεσμα της οριζόντιας μετακίνησης (max = - 9cm)



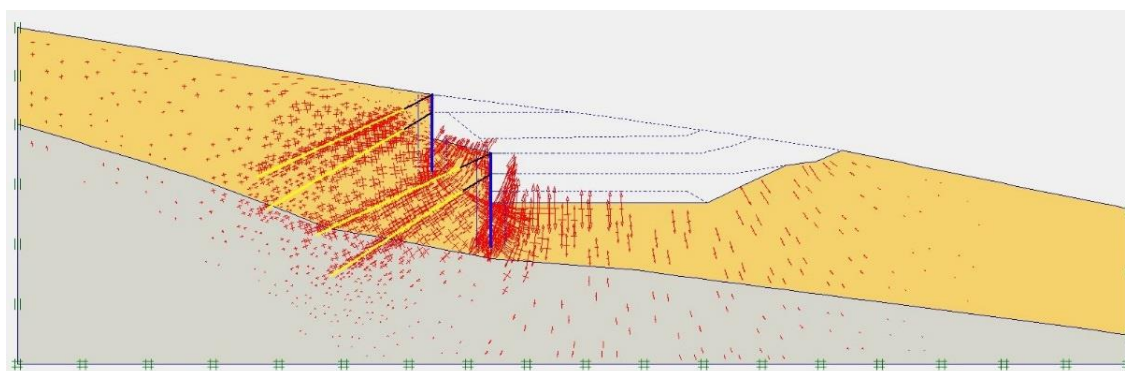
Εικόνα 11. Συνολικές οριζόντιες μετακινήσεις μοντέλου.



Εικόνα 12. Συνολικές κατακόρυφες μετακινήσεις μοντέλου.



Εικόνα 13. Διανυσματική κατανομή των ενεργών τάσεων

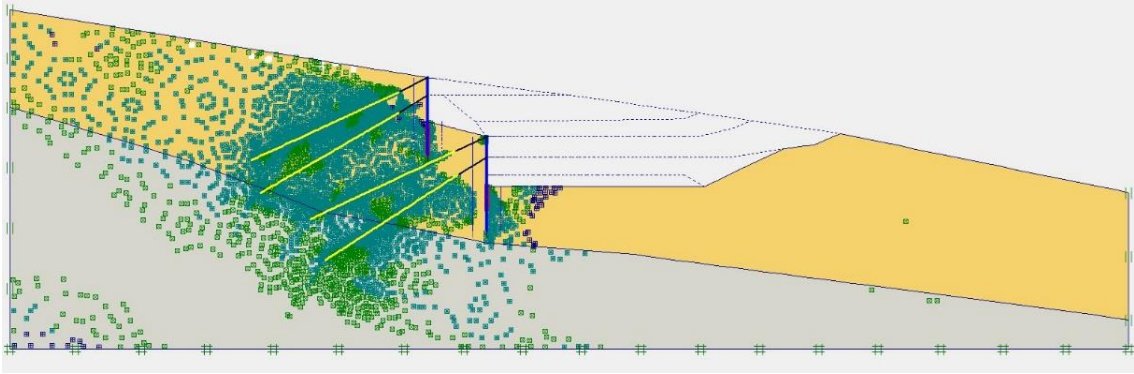


Εικόνα 14. Διανυσματική κατανομή των κύριων παραμορφώσεων (+5,31%)

Από την ανυσματική κατανομή των παραμορφώσεων (εικ. 14) παρατηρούνται τα εξής:

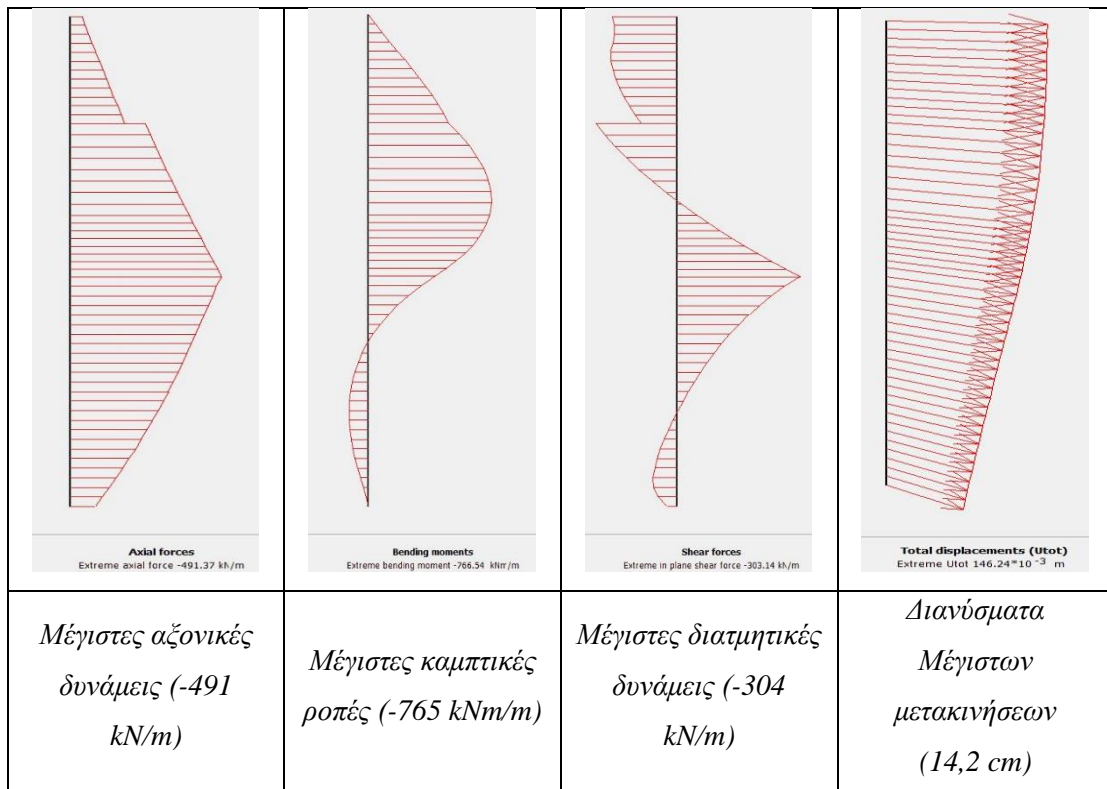
- Εξαιρετικά αυξημένες παραμορφώσεις παρουσιάζονται στις βάσεις των εκσκαφών και στο υπόγειο τμήμα των πασσάλων, ιδιαίτερα του κατάντη, ο οποίος όπως φάνηκες δέχεται ισχυρή ενεργητική πίεση.
- Ιδιαίτερα αυξημένες παραμορφώσεις παρουσιάζονται γύρω από τα πακτωμένα τμήματα των αγκυριών. Αυτό μπορεί κανείς να το ερμηνεύσει κανείς ως κίνδυνο ολίσθησης αυτών.

Οι αυξημένες παραμορφώσεις δημιουργούν πλαστικές ζώνες στις περιοχές αυτές και οι οριζόντιες μετακινήσεις δημιουργούν εφελκυστικές ζώνες στο πρηνές ανάντη, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα των αποτελεσμάτων πλαστικών παραμορφώσεων (εικ.15).

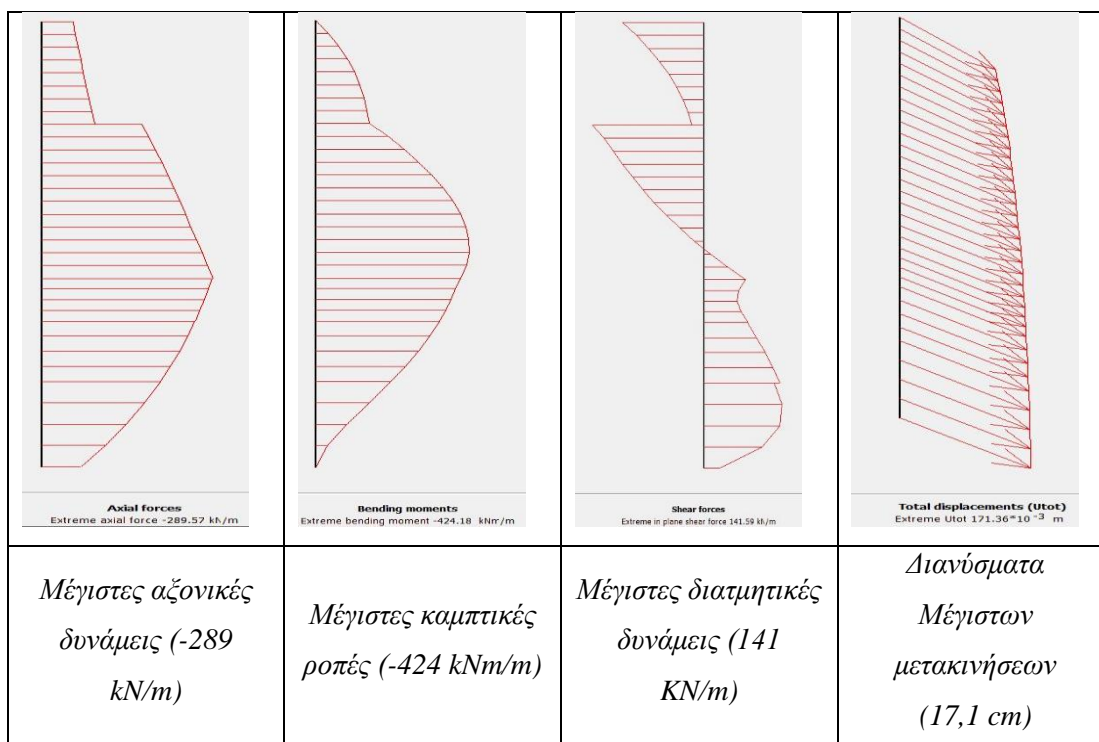


Εικόνα 15. Σημεία πλαστικών παραμορφώσεων στην έκταση του μοντέλου (λευκό: εφελκυστική διαρροή, κόκκινο: διατμητική διαρροή, πράσινο/μπλε: διαρροή παραμορφώσεων όγκου)

Στις παρακάτω εικόνες (εικ.16 & 17) παρουσιάζονται οι κατανομές ροπών, δυνάμεων και μετακινήσεων στις πασσαλοστοιχίες.



Εικόνα 16. Αποτελέσματα προσομοίωσης (S0) κατάντη πασσαλοστοιχία (L1)



Εικόνα 17. Αποτελέσματα προσομοίωσης (S0) ανάντη πασσαλοστοιχία (L2)

Από το διάγραμμα καμπτικών ροπών φαίνεται ότι στην κάτω πασσαλοστοιχία (L1) δεν αναπτύσσονται παθητικές δυνάμεις παρά μόνο ενεργητικές. Στην ανάντη πασσαλοστοιχία (L2) αυτές αναπτύσσονται οριακά. Οι μετακινήσεις είναι αξιόλογες αφού η τελική οριζόντια μετακίνηση είναι 14.8cm και 14.6cm για την ανάντη και κατάντη πασσαλοστοιχία αντίστοιχα.

Η μετακίνηση της άνω πασσαλοστοιχίας φαίνεται ότι μετατρέπεται σε έξτρα ενεργητικές δυνάμεις της κατάντη πασσαλοστοιχίας γι' αυτό και οι πιο έντονες μετακινήσεις και παραμορφώσεις παρατηρούνται στην κάτω πασσαλοστοιχία.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, προκειμένου να αναγνωρισθούν οι αιτίες μετακινήσεων των πασσαλότοιχων και να ληφθούν ορθά μέτρα αντιμετώπισής τους, πραγματοποιήθηκαν κάποια θεωρητικά σενάρια προσομοίωσης (παραμετρικές ανάλυσης) των οποίων τα αποτελέσματα του παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

9. ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

9.1. Σενάρια 1,2 -Αποτελέσματα

Προκειμένου να ληφθούν μέτρα αντιμετώπισης των μετακινήσεων που παρατηρήθηκαν κατά την κατασκευή του ορύγματος, στο προσομοιωμένο μοντέλο, θεωρήθηκαν κάποια σενάρια. Στο κάθε ένα, τροποποιείται μία παράμετρος και εξετάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μοντέλου.

Ας σημειωθεί ότι θεωρείται ότι η εκσκαφή του ορύγματος γίνεται εξ' αρχής με αυτά τα αντίστοιχα τροποποιημένα χαρακτηριστικά και εξετάζονται τα αποτελέσματα (ολικές μετακινήσεις, μετακινήσεις πασσαλότοιχων, ένταση αγκυρίων) μετά την τελική στάθμη εκσκαφής.

Τα σενάρια που εξετάστηκαν είναι τα εξής:

- Σενάριο 1: Αλλαγή της δύναμης προέντασης των αγκυρίων
- Σενάριο 2: Αλλαγή του ελεύθερου μήκους των αγκυρίων

Στο Σενάριο 1,

- θεωρείται ότι η απόσταση των αγκυρίων είναι 1.4m, αντί για 2,4 m αρχικά
- στην ανάντη πασσαλοστοιχία η προένταση των αγκυρίων είναι 420 kN ή 300 kN/m και
- στην κατάντη πασσαλοστοιχία 700 kN ανά αγκύριο ή 400 kN/m.

Στο Σενάριο 2:

- Το ελεύθερο μήκος των αγκυρίων είναι 30m και 25m, στην ανάντη και κατάντη πασσαλοστοιχία αντίστοιχα, αντί για 6m της αρχικής ρύθμισης (αρχικού σχεδιασμού).
- Το πακτωμένο μήκος των αγκυρίων είναι 15m (έναντι 27m αρχικά)
- Διατηρούνται οι προεντάσεις του Σεναρίου 1

Ας σημειωθεί ότι το μήκος των αγκυρίων επιλέχθηκε με βάση το κριτήριο το πακτωμένο τμήμα να βρίσκεται σε περιοχή που δεν λαμβάνουν χώρα έντονες μετακινήσεις (σκούρο μπλε χρώμα στην εικ.10 - Συνολικές μετακινήσεις μοντέλου).

Στους παρακάτω πίνακες (πιν.7 & 8) παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των παραπάνω 2 σεναρίων σε σχέση με το αρχικό (στην τελική στάθμη εκσκαφής):

Πίνακας 12. Παραμετρικά αποτελέσματα Σεναρίων (1/2)

(cm)	Αρχική ρύθμιση (S0)	Σεν. 1 (S1)	% διαφορά με το S0	Σεν. 2 (S2)	% διαφορά με το S0
Μέγιστες Οριζόντιες μετακινήσεις (Ux tot)	15,1	14,6	-3.3%	9,8	-35.1%
Μέγιστες Κατακόρυφες μετακινήσεις (Uy tot)	7,0	7,6	+8.6%	5,8	-17.1%
Αν. Πασσαλ. Οριζόντιες μετακινήσεις (L2 Ux)	14,8	14,2	-4.1%	9,8	-33.8%
Αν. Πασσαλ. Κατακόρυφες μετακινήσεις (L2 Uy)	-8,8	-9,1	+3.4%	-6,7	-23.9%
Κατ. Πασσαλ. Οριζόντιες μετακινήσεις (L1 Ux)	14,6	12,6	-13.7%	8,1	-44.5%
Κατ. Πασσαλ. Κατακόρυφες μετακινήσεις (L2 Uy)	-3,0	-3,5	+16.7%	-2,7	-10.0%

Από την σύγκριση γίνεται φανερό ότι μόνο η αύξηση της έντασης των αγκυρίων δεν επιφέρει σοβαρές αλλαγές στα αποτελέσματα.

Με την αύξηση του μήκους των αγκυρίων, φαίνεται ότι αυτά λειτουργούν καλύτερα (κάτι που ήταν αναμενόμενο εξ' άλλου) στην συγκράτηση του πρανούς, με αποτέλεσμα να περιορίζονται σημαντικά οι συνολικές οριζόντιες μετακινήσεις αλλά και οι μετακινήσεις των πασσάλων.

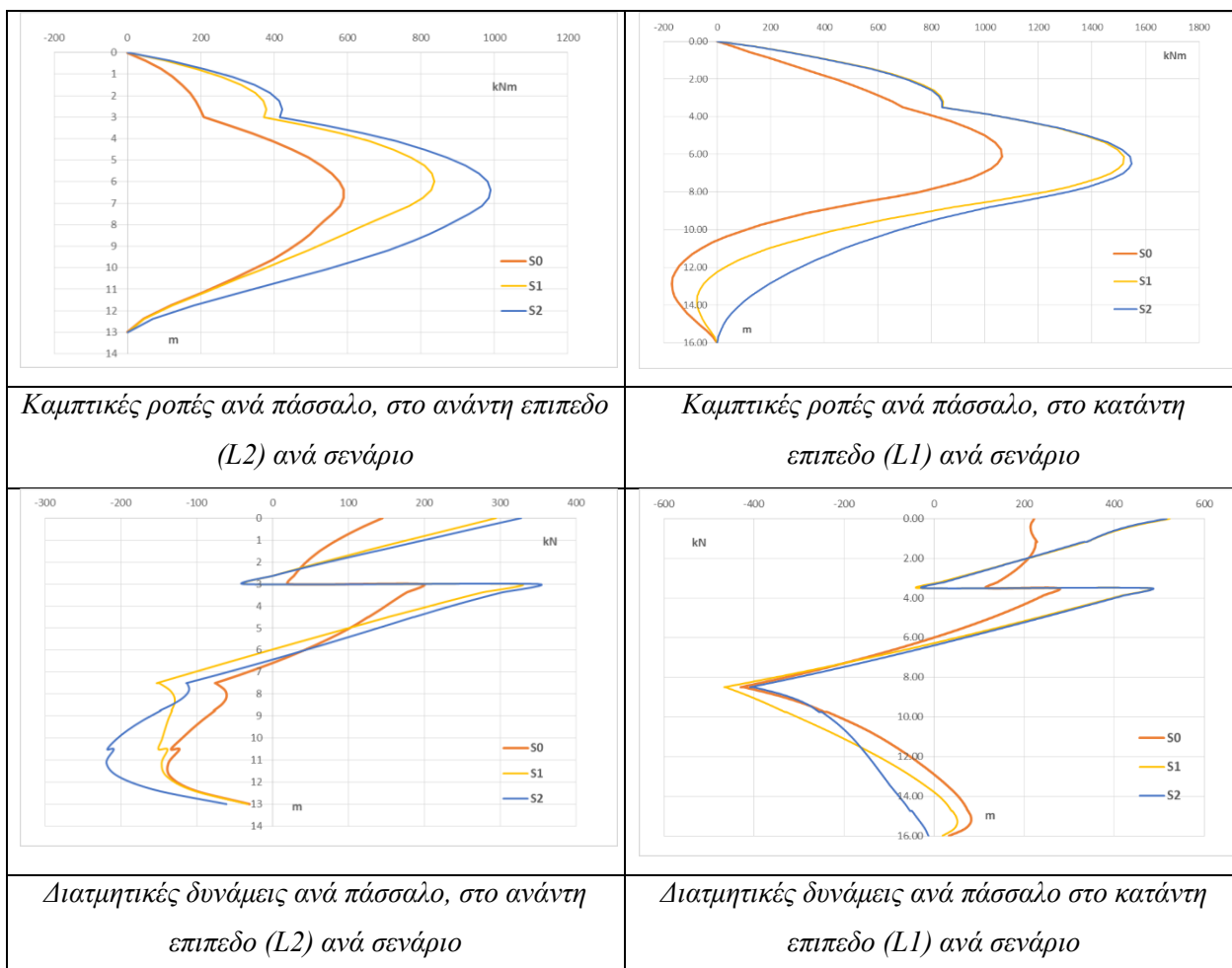
Πίνακας 13. Παραμετρικά αποτελέσματα Σεναρίων (2/2)

(kN/m)	Αρχική ρύθμιση (S0)	% της προέντασης	Σεν. 1 (S1)	% της προέντασης	Σεν. 2 (S2)	% της προέντασης
1^η σειρά αγκυρίων (kN/m)	118	102.6%	235	78.3%	260	86.7%
2^η σειρά αγκυρίων (kN/m)	152	75.7%	302	100.7%	326	108.7%
3^η σειρά αγκυρίων (kN/m)	162	113.0%	365	91.3%	418	104.5%
4^η σειρά αγκυρίων (kN/m)	130	113.0%	380	95.0%	428	107.0%

Όσον αφορά τις εντάσεις των αγκυρίων, μετά το πέρας της εκσκαφής, φαίνεται η ένταση των αγκυρίων είναι μικρότερη της αρχικής τους προέντασης τους και στο Σενάριο 2 λίγο υψηλότερη. Δηλαδή η επιλεγμένη ένταση (ίδια και στα δύο σενάρια) επαρκεί για να κρατήσει το μικρής έκτασης πρανές του σεναρίου 1 ενώ δεν επαρκεί για το μεγαλύτερης έκτασης πρανούς του σεναρίου 2 (ας σημειωθεί ότι με βάση τις γενικές αρχές σχεδιασμού η προένταση των αγκυρίων δεν πρέπει να ξεπερνάει το 65-65% της αντοχής τους).

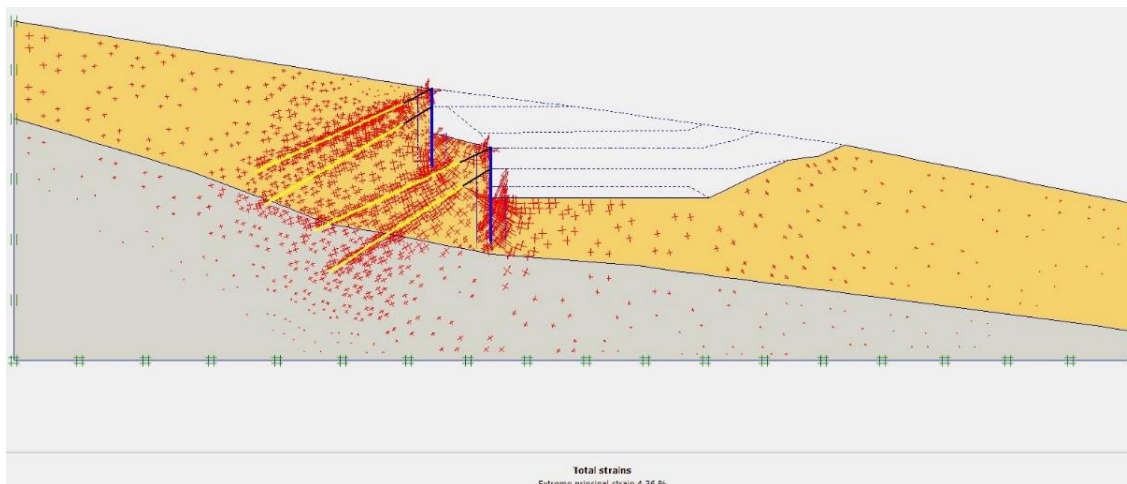
Στα επόμενα διαγράμματα (σχ. 19) παρουσιάζονται οι καμπτικές ροπές και οι διατμητικές δυνάμεις στον μεμονωμένο πάσσαλο ανά επίπεδο πασσαλοστοιχίας.

Στους κατάντη πασσάλους κατά το σενάριο όπου αυξάνεται το μήκος των αγκυρίων παρατηρείται, αύξηση των μεγεθών όχι όμως σημαντική.

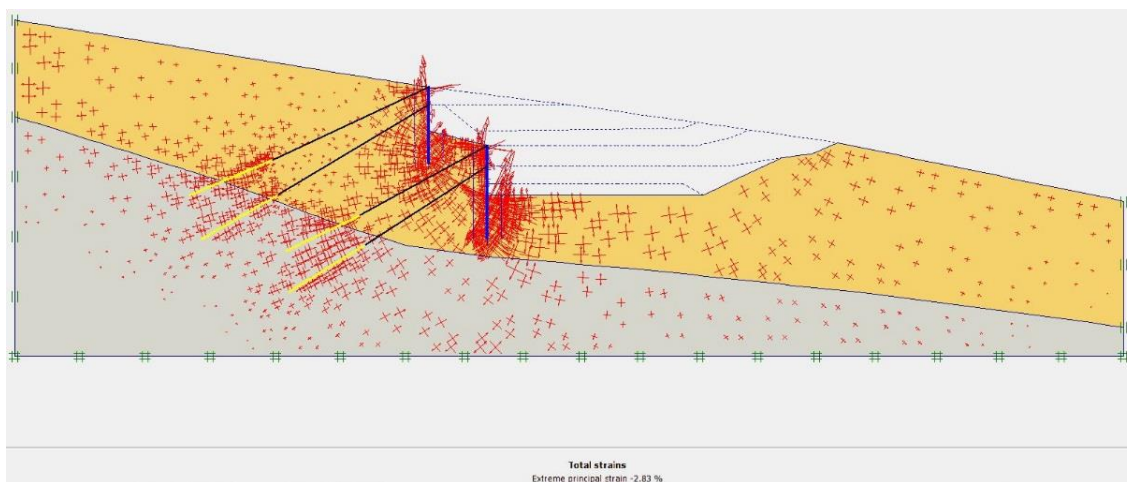


Σχήμα 18. Διαγράμματα καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων σεναρίων 0,2,3.

Στις παρακάτω εικόνες (εικ.18, 19) παρουσιάζεται η μείωση των παραμορφώσεων (4,36% / 2,43%) στην περιοχή πίσω από τους πασσάλους, αλλά όπως φαίνεται παραμένουν οι παραμορφώσεις γύρω από τα πακτωμένα τμήματα των αγκυρίων.

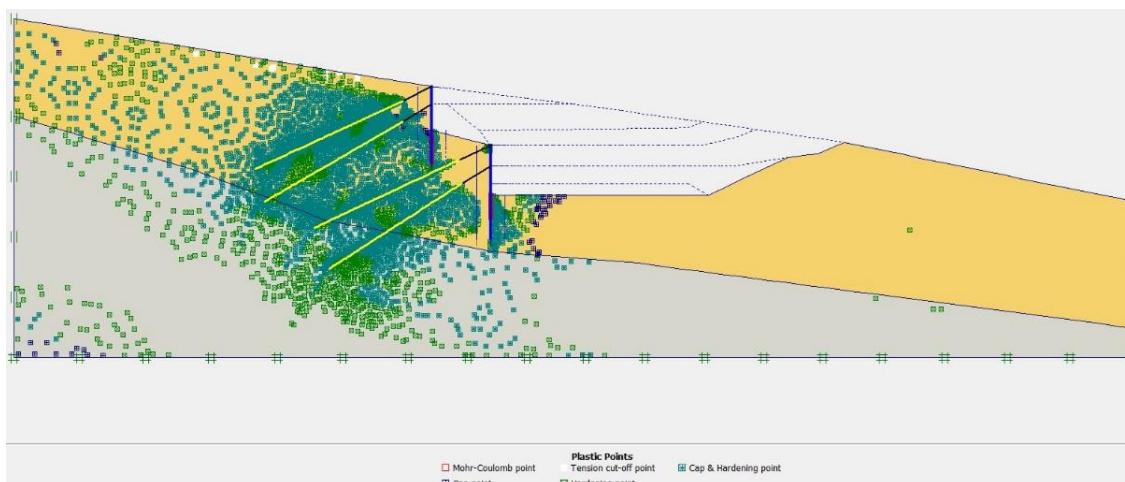


Εικόνα 18. Διανύσματα κύριων παραμορφώσεων κατά το Σενάριο 1

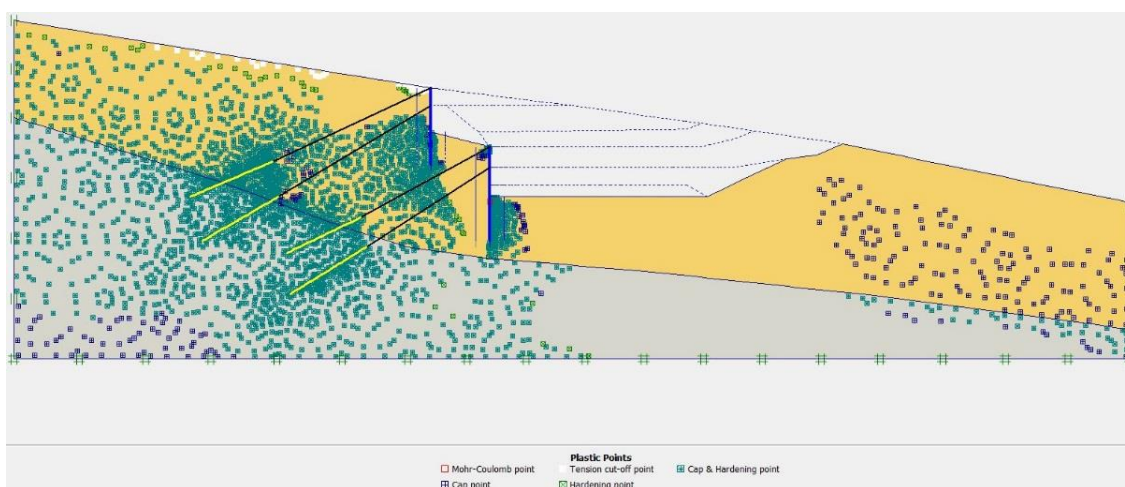


Εικόνα 19. Διανύσματα κύριων παραμορφώσεων κατά το Σενάριο 2

Και τέλος όπως παρατηρούμε στις παρακάτω εικόνες (εικ. 20, 21) μειώνεται αισθητά η πυκνότητα των πλαστικών περιοχών στα αγκύρια και πίσω από τους πασσάλους.



Εικόνα 20. Ανάπτυξη πλαστικών περιοχών κατά το Σενάριο 1



Εικόνα 21. Ανάπτυξη πλαστικών περιοχών κατά το Σενάριο 2

Συμπερασματικά, το επαρκές μήκος αγκυρίων, με την αντίστοιχη προένταση, είναι πιο λειτουργικό καθώς:

- Μειώνει τις αρχικά αναμενόμενες τιμές συνολικής μετακίνησης κατά σημαντικό ποσοστό
- Μειώνει τις μετακινήσεις των πασσάλων
- Οι εδαφικές παραμορφώσεις γύρω από το πακτωμένο τμήμα των αγκυρίων απομακρύνεται από το πρίσμα ωθήσεων όπισθεν των πασσάλων
- Δεν δημιουργεί σημαντικές διαφορές στις διατμητικές δυνάμεις που ασκούνται στους πασσάλους. Το ίδιο ισχύει και για τις καμπτικές ροπές.

9.2. Σενάριο 3 - Αποτελέσματα

Τα παραπάνω σενάρια εξετάσθηκαν υπό το πρίσμα να παρέχουν κατάλληλες κατευθύνσεις προκειμένου να ληφθούν μέτρα ώστε να προληφθούν οι περαιτέρω μετακινήσεις στην φάση εκσκαφής που βρίσκεται το υπό διερεύνηση όρυγμα.

Το όρυγμα, αναφορικά με τις φάσεις εκσκαφής του μοντέλου, βρίσκεται στην φάση 9, εκσκαφή προς την 2^η στάθμη αγκυρίων της κατάντη πασσαλοστοιχίας. Δηλαδή έχουν ήδη τοποθετηθεί 3 σειρές αγκυρίων ανεπαρκούς μήκους και ανεπαρκούς προέντασης. Αυτό που φάνηκε στα από τα Σενάρια 1 & 2 είναι ότι απαιτούνται μακριά αγκύρια ισχυρής προέντασης.

Στην συνέχεια εξετάζεται σαν πιθανή λύση για τον περιορισμό των μετακινήσεων το Σενάριο 3.

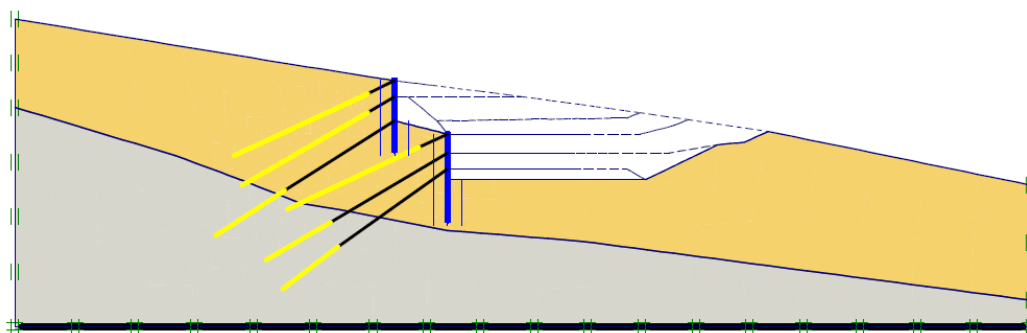
Κατά το Σενάριο 3:

- Προστίθενται και στις δύο πασσαλοστοιχίες από μία σειρά αγκυρίων, με τα χαρακτηριστικά όμοια με του Σεναρίου 2 και
- Το ίδιο και στην 2^η στάθμη αγκυρίων της κατάντη πασσαλοστοιχίας

Δηλαδή:

- 30m ελεύθερο τμήμα, με 420kN προένταση ανά αγκύριο (ή 300kN/m πασσαλοστοιχίας) ανά πάσσαλο (1,4m) και 15m πακτωμένο τμήμα, για την ανάντη πασσαλοστοιχία (3^η σειρά)
- 25m ελεύθερο τμήμα, με 700kN προένταση ανά αγκύριο (ή 400kN/m πασσαλοστοιχίας) ανά πάσσαλο (1,4m) και 15m πακτωμένο τμήμα για την κατάντη πασσαλοστοιχία (5^η & 6^η σειρά)

Σχηματικά:



Σχήμα 19. Αναπαράσταση ορύγματος κατά την τελική στάθμη εκσκαφής, Σενάριο 3 (S3).

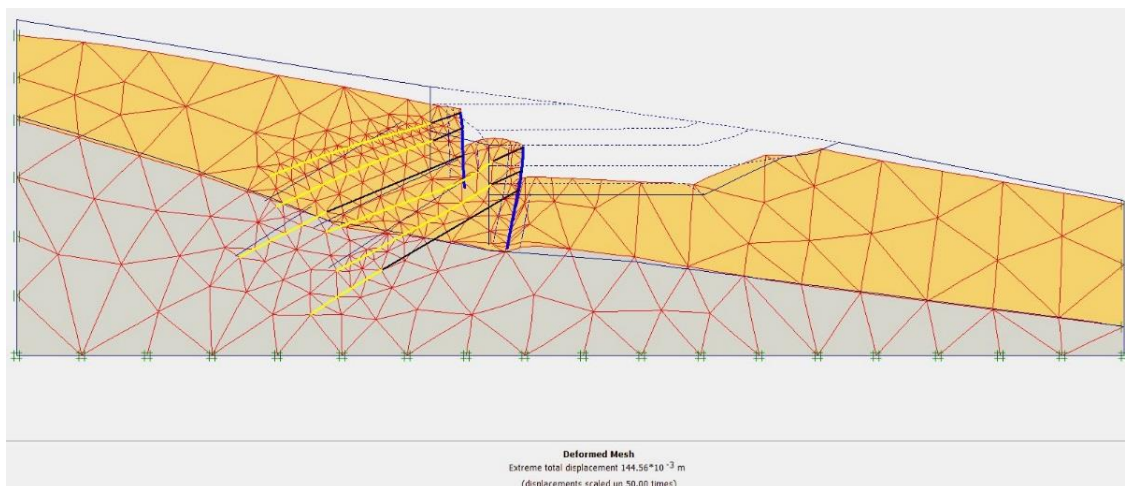
Στους παρακάτω πίνακες (πιν.9, 10) παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα του Σεναρίου 3 σε σχέση με το αρχικό (στην τελική στάθμη εκσκαφής):

Πίνακας 14. Παραμετρικά αποτελέσματα Σεναρίου 3 (1/2)

(cm)	Αρχική ρύθμιση (S0)	Σεν. 3 (S3)	% διαφορά με το S0	Στοιχεία φάσης 9 μοντέλου	% διαφορά με το S0
Μέγιστες Οριζόντιες μετακινήσεις (Ux tot)	15,1	11.5	23.8%	8.7	58.0%
Μέγιστες Κατακόρυφες μετακινήσεις (Uy tot)	7,0	-6.2	11.4%	-5.1	72.9%
Αν. Πασσαλ. Οριζόντιες μετακινήσεις (L2 Ux)	14,8	10.8	27.0%	8.0	54.5%
Αν. Πασσαλ. Κατακόρυφες μετακινήσεις (L2 Uy)	-8,8	-8.1	8.0%	-5.4	62.0%
Κατ. Πασσαλ. Οριζόντιες μετακινήσεις (L1 Ux)	14,6	10.2	30.1%	8.1	55.5%
Κατ. Πασσαλ. Κατακόρυφες μετακινήσεις (L2 Uy)	-3,0	-3.1	-3.3%	-1.7	56.7%
Σημ: στην φάση 9 έχει πραγματοποιηθεί το ~60% των αρχικά αναμενόμενων μετακινήσεων					

Πίνακας 15. Παραμετρικά αποτελέσματα Σεναρίου 3 (2/2)

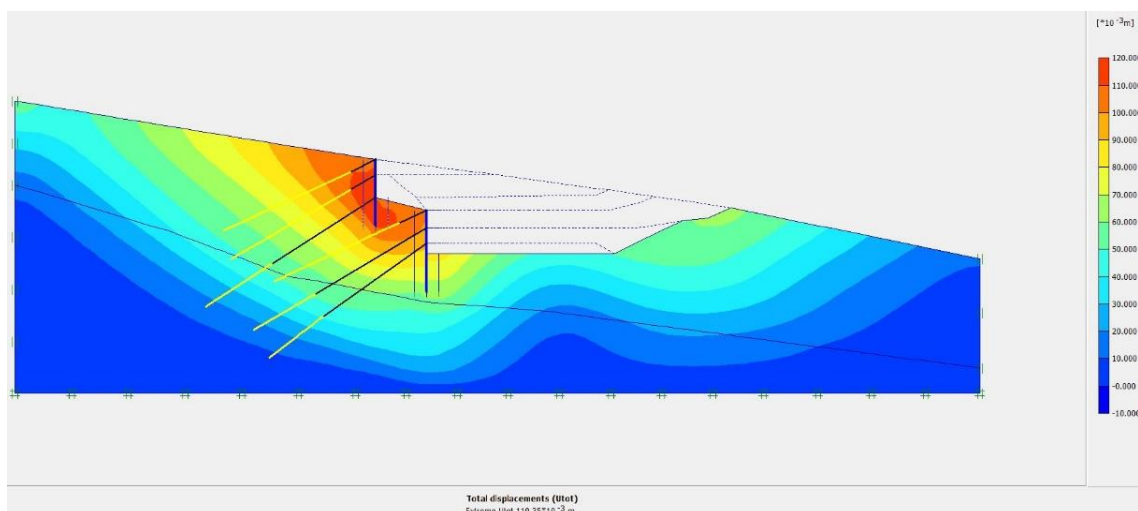
(kN/m)	Αρχική ρύθμιση (S0)	% της προέντασης	Σεν. 3 (S3)	% της προέντασης
1^η σειρά αγκυρίων (kN/m)	118	102.6%	93	80.9%
2^η σειρά αγκυρίων (kN/m)	152	75.7%	95	82.6%
3^η σειρά αγκυρίων (kN/m)			315	105.0%
4^η σειρά αγκυρίων (kN/m)	162	113.0%	91	79.1%
5^η σειρά αγκυρίων (kN/m)	130	113.0%	403	100.8%
6^η σειρά αγκυρίων (kN/m)			403	99.3%



Εικόνα 22. Κάναβος μετακινήσεων Σεναρίου 3 σεναρίου (50.000 x scale)

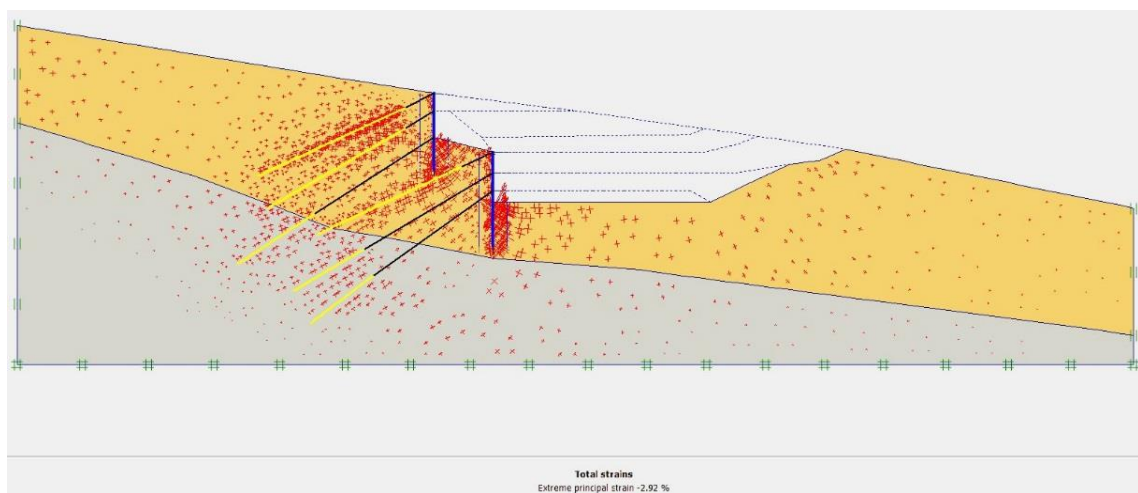
Στον τελικό κάναβο του Σεναρίου 3, ίδιας μεγέθυνσης παραμορφώσεων (εικ.22), φαίνεται ότι η παραμορφωμένη εικόνα των πασσαλότοιχων είναι σαφώς βελτιωμένη.

Από την εικόνα των συνολικών μετακινήσεων (εικ.23), φαίνεται ότι τα αυξημένου μήκους αγκύρια πακτώνονται σε περιοχές μικρών μετακινήσεων.



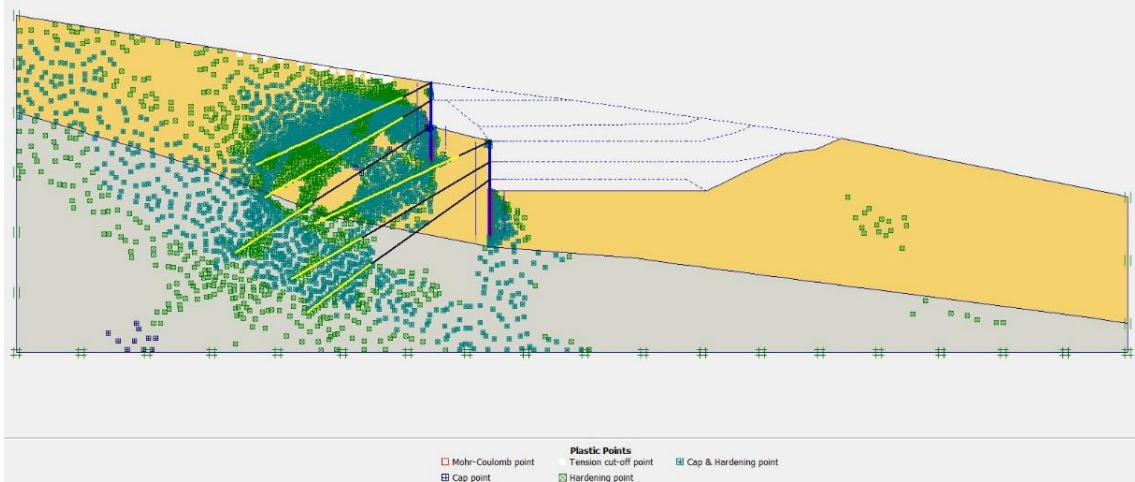
Εικόνα 23. Συνολικές μετακινήσεις μοντέλου Σεναρίου 3

Όσον αφορά της παραμορφώσεις, στην παρακάτω εικόνα (εικ.24) διαπιστώνεται ότι είναι μειωμένες. Τα πακτωμένα τμήματα των νέων αγκυρίων δέχονται παραμορφώσεις, αυτές δεν είναι υψηλές όπως στα πακτωμένα τμήματα των αρχικών κοντών αγκυρίων.



Εικόνα 24. Διανοσματική κατανομή των κύριων παραμορφώσεων (-2,92%)

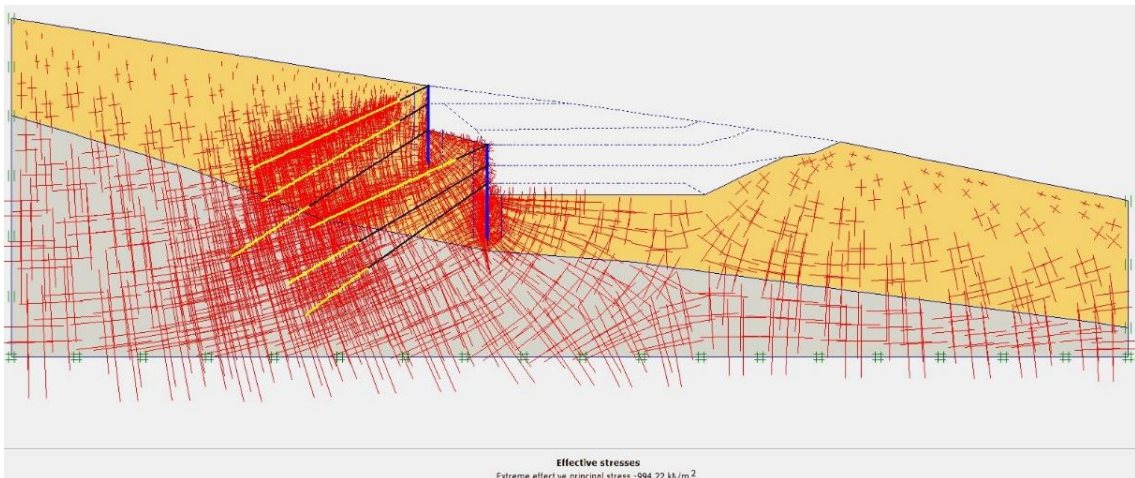
Αντίστοιχα συμπεράσματα, όσον αφορά τις πλαστικές ζώνες, εξάγονται και από την παρακάτω εικόνα (εικ.25) πλαστικών ζωνών. Δηλαδή, η πυκνή πλαστική ζώνη διατηρείται στις περιοχές των πακτωμένων τμημάτων των κοντών αγκυρίων, ενώ η συνολική εικόνα είναι βελτιωμένη με λιγότερες και λιγότερες πυκνές πλαστικές ζώνες, ιδιαίτερα πίσω από την κατάντη πασσαλοστοιχία.



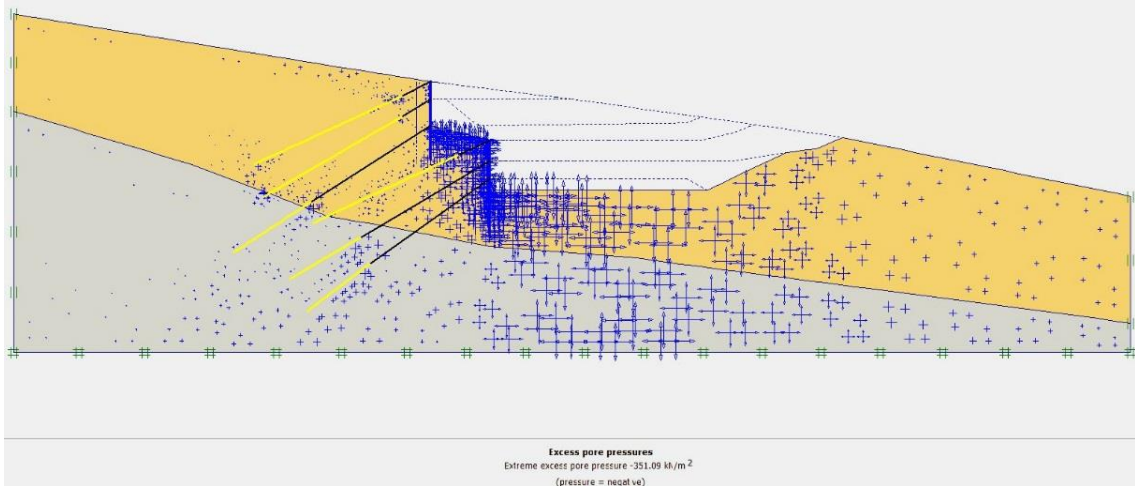
Εικόνα 25. Σημεία πλαστικών παραμορφώσεων στην έκταση του μοντέλου του Σεναρίου 3 (λευκό: εφελκυστική διαρροή, κόκκινο: διατμητική διαρροή, πράσινο/μπλε: διαρροή παραμορφώσεων όγκου)

Η κατανομή των ενεργών τάσεων (εικ.26) και της πίεσεως πόρων (εικ.27) δεν φαίνεται να αλλάζει ιδιαίτερα.

Όσον αφορά της ενεργές πιέσεις πόρων, πρακτικά εμφανίζονται αυξημένες στο δάπεδο της εκσκαφής στην κατάντη πασσαλοστοιχία και στο δεξί πρυνές του ορύγματος.

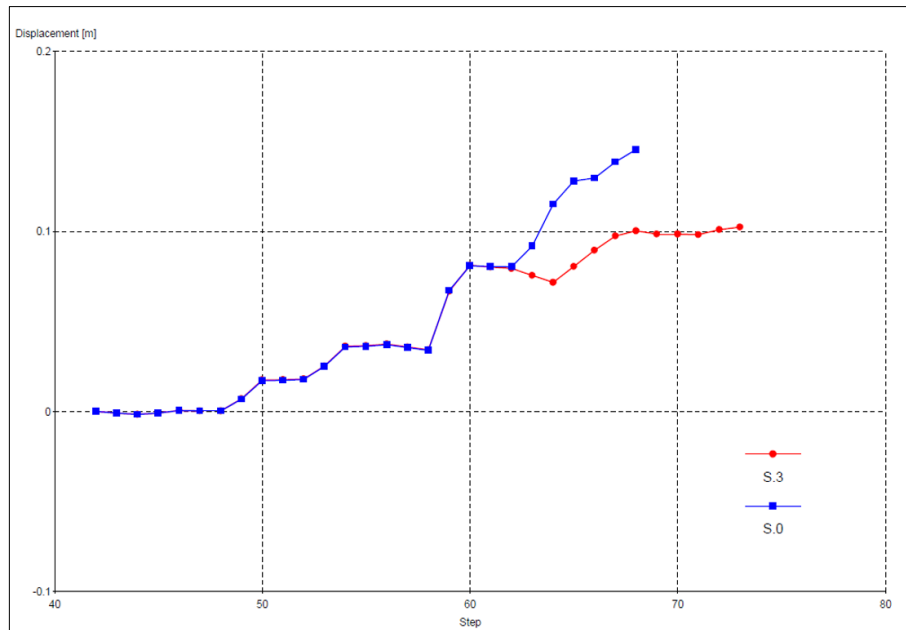


Εικόνα 26. Διανυσματική κατανομή των ενεργών τάσεων



Εικόνα 27. Διανυσματική κατανομή πιέσεως πόρων

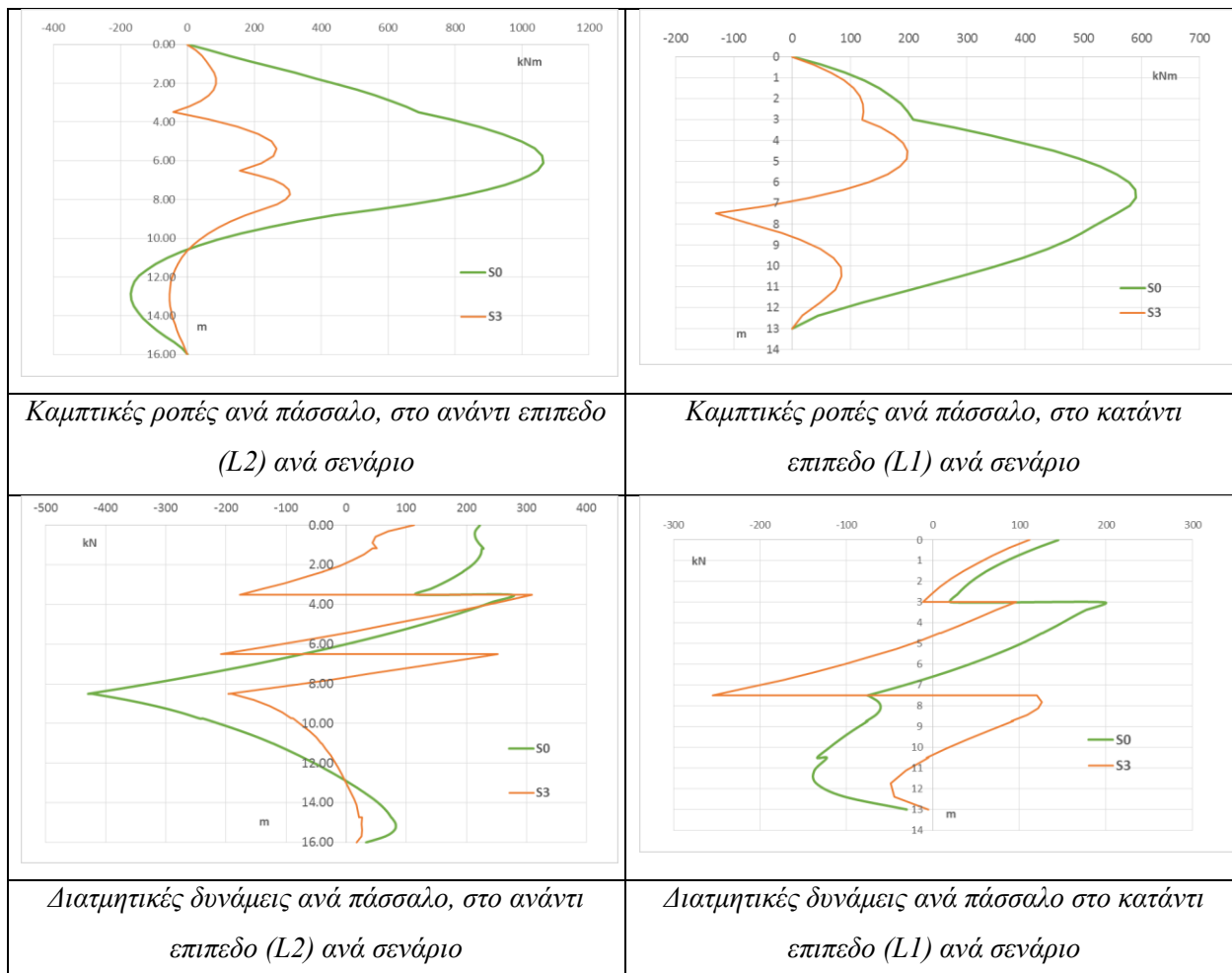
Στο παρακάτω γράφημα του σχ.21 παρουσιάζεται η μείωση της οριζόντιας μετακίνησης του σημείου Β στην κατάντη πασσαλοστοιχία, ανά βήμα υπολογισμών του μοντέλου



Σχήμα 20. Μείωση Οριζόντιας μετακίνηση σημείου Β (κορυφή κατάντη πασσαλοστοιχίας) κατά το Σενάριο 3 σε σχέση με το αρχικό.

Στα παρακάτω διαγράμματα (σχ. 22) παρουσιάζονται οι καμπτικές ροπές και διατμητικές τάσεις που δέχονται μεμονωμένα οι πάσσαλοι ανά πασσαλοστοιχία, στο τελικό στάδιο εκσκαφής, σε σύγκριση με την αρχικό σχεδιασμό.

Οι καμπτικές ροπές μειώνονται αρκετά και στις 2 σειρές πασσάλων ενώ οι μέγιστες τέμνουσες αυξάνεται κατά λίγο στους πασσάλους της ανάντη πασσαλοστοιχίας (σχ.22).



Σχήμα 21. Διαγράμματα καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων σεναρίων 03.

Στην επόμενη παράγραφο γίνεται υπολογισμός των συντελεστών ασφαλείας για τα Σενάρια 0 και 3 (S.0 & S.3).

9.3. Προσδιορισμός συντελεστή ασφαλείας

Στον παρακάτω πίνακα (πιν.11) παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας ανά φάση του μοντέλου όπως υπολογίσθηκαν από την διαδικασία Phi-c reduction του PLAXIS, για κάθε φάση ανά σενάριο:

Πίνακας 16. Συντελεστές ασφαλείας σεναρίων

Φάση	Περιγραφή φάσης	S.0	S.3	Περιγραφή φάσης για το S.3
Φάση 1	Εκσκαφή πρόσβασης	1.39	1.39	Φάσεις κοινές
Φάση 2	Ενεργοποίηση άνω πασσαλότοιχου	3.67	3.67	
Φάση 3	Ενεργοποίηση 1ης σειράς	3.68	3.68	
Φάση 4	Εκσκαφή μέχρι την 2η σειρά αγκυρίων	3.31	3.31	
Φάση 5	Ενεργοποίηση και προένταση 2ης σειράς	3.28	3.28	
Φάση 6	Εκσκαφή μέχρι το επίπεδο του κάτω πασσαλότοιχου	2.73	2.73	
Φάση 7	Ενεργοποίηση κάτω πασσαλότοιχου	2.90	2.90	
Φάση 8	Ενεργοποίηση και προένταση 3ης σειράς αγκυρίων	2.95	2.95	
Φάση 9	Εκσκαφή μέχρι την 4η σειρά αγκυρίων	2.87	2.87	
Φάση 10	Ενεργοποίηση και προένταση 4 ^{ης} σειράς αγκυρίων	3.04	2.88	Ενεργοποίηση και προένταση νέας 3ης σειράς αγκυρίων (ανάντη πασσάλων)
Φάση 11	Εκσκαφή μέχρι το υψόμετρο της ερυθράς της οδού	2.61	2.88	Ενεργοποίηση και προένταση νέας 5ης σειράς αγκυρίων (πρώην 4η)
Φάση 12	Εκσκαφή μέχρι τελικού βάθους, βάσης του επιχώματος της οδού.	2.41	2.62	Εκσκαφή μέχρι το υψόμετρο της ερυθράς της οδού
Φάση 13	-		2.71	Ενεργοποίηση και προένταση νέας 6ης σειράς αγκυρίων
Φάση 14	-		2.46	Εκσκαφή μέχρι τελικού βάθους, βάσης του επιχώματος της οδού.

Τα χρώματα του πίνακα (πιν.11) δηλώνουν την αντιστοιχία φάσης προκειμένου να γίνουν συγκρίσεις.

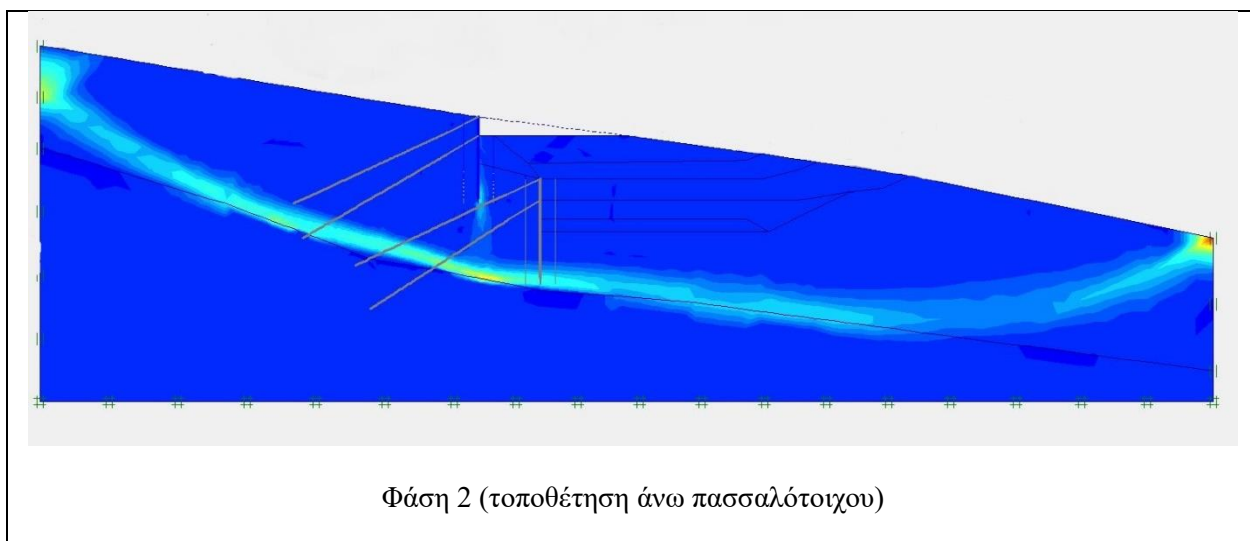
Από την σύγκριση συντελεστών ασφαλείας των δύο σεναρίων παρατηρούνται τα εξής:

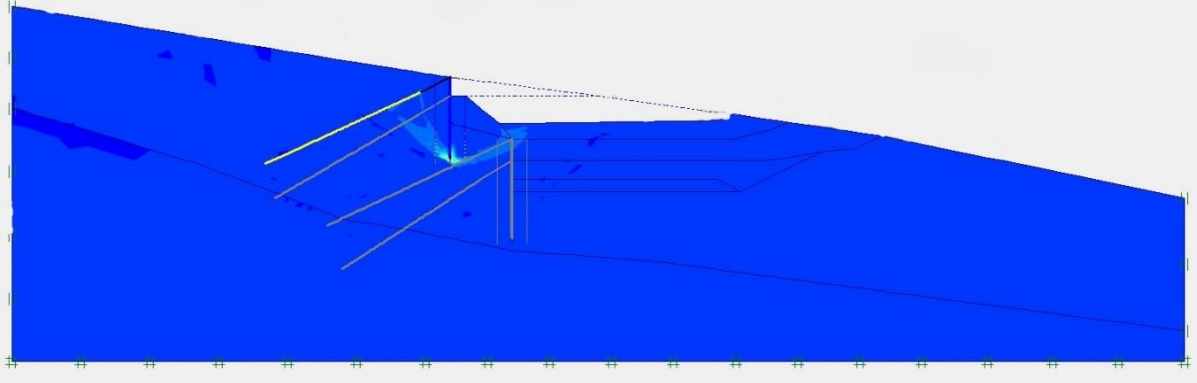
- Γενικά οι συντελεστές ασφαλείας είναι υψηλοί σε κάθε φάση πλην της Φάσης 1
- Στην Φάση 10 κατά την οποία τοποθετούνται αγκύρια στον κάτω και στον άνω πασσαλότοχο αντίστοιχα υπάρχει διαφορά μικρή η οποία μπορεί να οφείλεται ότι η σταθεροποίηση της κατασκευής προέρχεται από τον κάτω πασσαλότοχο
- Στην επόμενη Φάση (12) αυτό αντιστρέφεται με ένα προβάδισμα στην τιμή του συντελεστή του Σεναρίου 3 επειδή τοποθετείται σειρά αγκυριών
- Τέλος, κατά την τελική φάση, κάτι που δεν ήταν αναμενόμενο, ίδιοι συντελεστές ασφαλείας.

Με βάση τις διαφορές των σεναρίων όπως φανήκαν στην προηγούμενη παράγραφο εξετάστηκαν οι αιτίες αυτής της απουσίας διαφοράς στον συντελεστή ασφαλείας στους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας σε κάθε φάση.

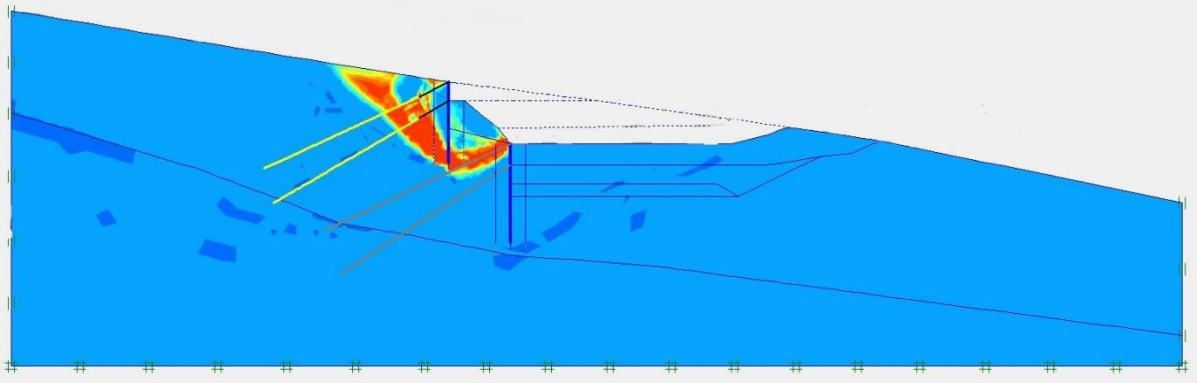
Από την διαδικασία phi-c reduction με προβολή των παραμορφώσεων σε shear shadings, προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα (σχ.23) Μηχανισμών Αστοχίας ανά Φάση:

Σχήμα 22. Διαγράμματα μηχανισμών αστοχίας στις φάσεις εκσκαφών

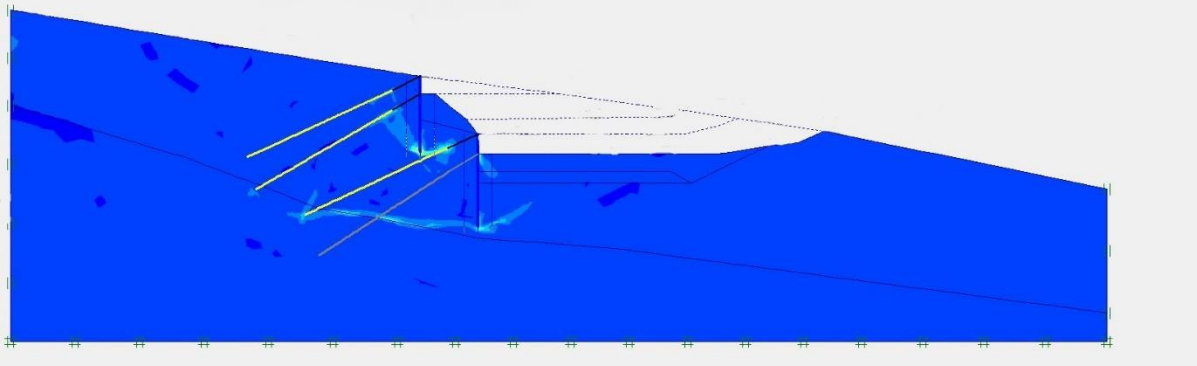




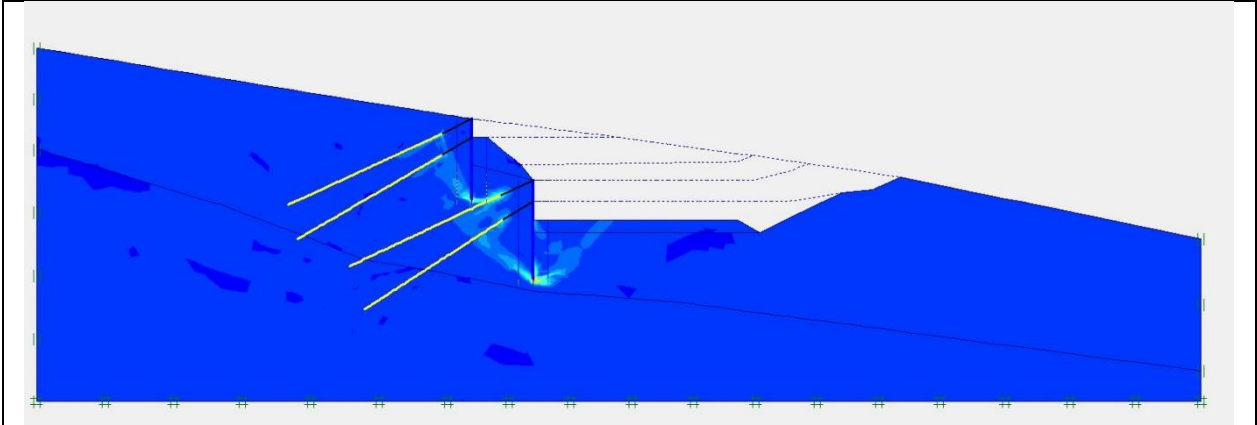
Φάση 5



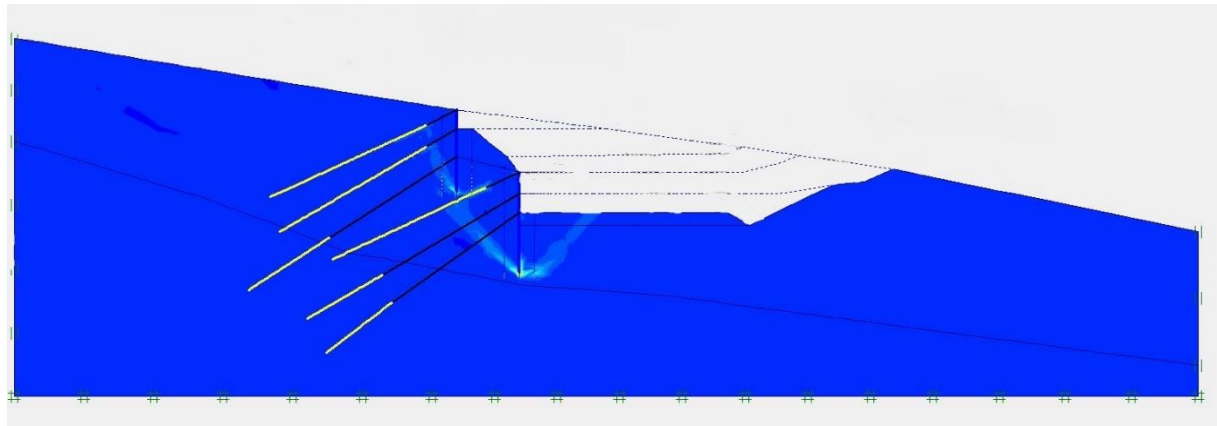
Φάση 7



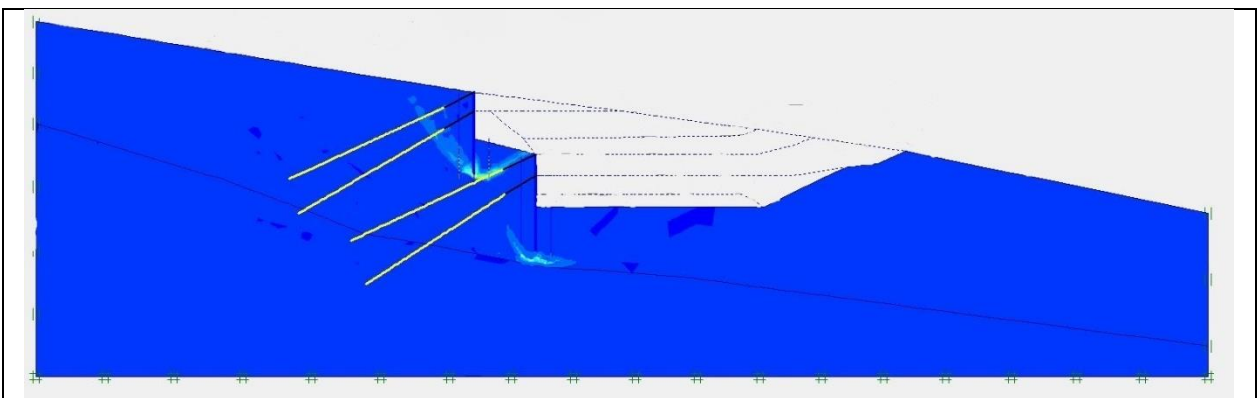
Φάση 9



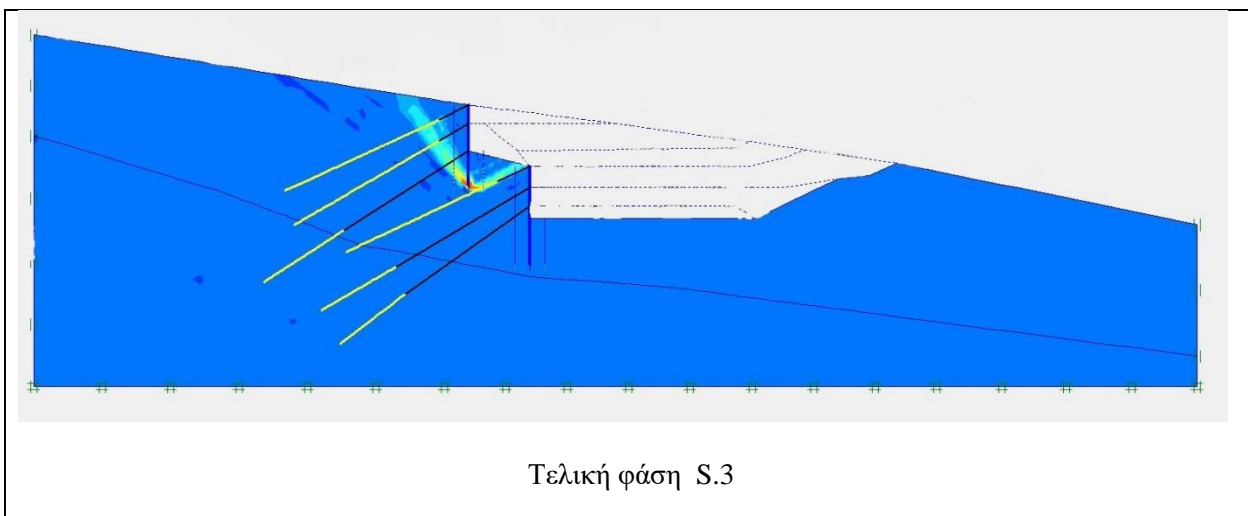
Φάση Εκσκαφής μέχρι την ερυθρά S.0



Φάση Εκσκαφής μέχρι την ερυθρά S.3



Τελική φάση S.0



Από τα παραπάνω διαγράμματα μηχανισμών αστοχίας γίνονται αντιληπτά τα εξής:

- Η περιοχή του ορύγματος είναι μια πιθανά ασταθής περιοχή καθώς υπάρχει ένα μηχανισμός αστοχίας σε χαμηλό βάθος ο οποίος διατρέχει όλο το ορύγμα και πριν καλά καλά ξεκινήσουν οι εκσκαφείς δύναται να ενεργοποιηθεί.
- Αφού ξεκινήσουν οι εκσκαφές μηχανισμοί αστοχίας εμφανίζονται στην ανάντη πασσαλοστοιχία
- Όσο προχωράει η κατά βάθος εκσκαφή μηχανισμοί αστοχίας ενεργοποιούνται και στη κατάντη πασσαλοστοιχία.
- Τα μακριά αγκύρια του S.3 φαίνεται ότι μπορούν να συγκρατήσουν τον μηχανισμό αστοχίας στην κατάντη πασσαλοστοιχία, αλλά παραμένει η αστοχία στην ανάντη πασσαλοστοιχία¹
- Με την διαδικασία υπολογισμού phi-c reduction και αυτούς τους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας, οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας όπως προέκυψαν δεν εκφράζουν την συνολική ευστάθεια του πρανούς.

¹ Ας σημειωθεί ότι τα αντίστοιχα διαγράμματα του S.2 (κατασκευή εξ' αρχής με μακριά αγκύρια ικανής έντασης) δεν παρουσιάζουν τους μηχανισμούς αστοχίας του S.0 στις αντίστοιχες φάσεις προσομοίωσης.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκαν οι συνθήκες ευστάθειας του ορύγματος (της Χ.Θ.20+075 του υπό κατασκευή Αυτοκινητοδρόμου: Autostrada Sebes – Turda, lot 2) μέσω της προσομοίωσης με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS v.8.2. Σκοπός της είναι απαντηθούν (οριστικώς ή έστω μερικώς) σε κάποια ερωτήματα σχετικά με την ασφάλεια της κατασκευής, την επάρκεια των μέτρων αντιστήριξης, τις γεωτεχνικές συνθήκες, των αρχικών μελετητικών επιλογών για το σχεδιασμό της αντιστήριξης και φυσικά τις κατασκευές πρακτικές που ακολουθήθηκαν.

Κατά την διερεύνηση:

- Περιεγράφηκαν οι γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωμορφολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή
- Προσδιορίστηκαν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών που δομούν την περιοχή του έργου μέσω της επεξεργασίας των εργαστηριακών δεδομένων που ήταν διαθέσιμα κατά την συγγραφή της παρούσας
- Προσδιορίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων των κατασκευών και του εδάφους που απαιτεί το λογισμικό PLAXIS.
- Καταστρώθηκαν εναλλακτικά σενάρια κατασκευαστικών επιλογών
- Υπολογίστηκαν συντελεστές ασφαλείας
- Εκτιμήθηκαν τα αποτελέσματα της βασικής προσομοίωσης και των εναλλακτικών σεναρίων

Προέκυψαν τελικά τα εξής συμπεράσματα:

Όσον αφορά την **ασφάλεια – ευστάθεια του πρανούς**:

- Το πρανές είναι γενικά ασταθές με μηχανισμό αστοχίας κυκλικής ολίσθησης με επιφάνεια αστοχίας κοντά στην επιφάνεια, κοντά στην βάση της κατάντη πασσαλοστοιχίας.
- Κατά την εκσκαφή του πρανούς ενεργοποιούνται μηχανισμοί αστοχίας με επιφάνειες ολίσθησης, πίσω ακριβώς από τις πασσαλοστοιχίες.

Όσον αφορά την **ποιότητα των σχηματισμών**:

- Η ποιότητα των σχηματισμών που δομούν την περιοχή είναι μέτρια. Οι γεωτεχνικές παράμετροι έχουν σχετικά χαμηλές τιμές.

Όσον αφορά τον **αρχικό σχεδιασμό μέτρων υποστήριξης**

- Η αρχική επιλογή σχεδιασμού με τα κοντά αγκύρια (6m ελεύθερο μήκος) κρίθηκε προβληματική, καθώς αυτά δεν καταφέρνουν να ενσωματώσουν την πιθανή επιφάνεια αστοχίας.
- Η αρχική προένταση (270kN) είναι πολύ μικρή για να κρατήσει τις αναπτυσσόμενες εντάσεις κατά την μετακίνηση.
- Το αρχικό μήκος (27m) του πακτωμένου τμήματος των αγκυρίων κρίνεται δυσλειτουργικό

Όσον αφορά τα **μέτρα που εξετάστηκαν (Σενάριο 3)**:

- προσθήκη 2 εξτρά σειρών αγκυρίων
 - και αντικατάσταση της 4^{ης} σειράς
με μακριά αγκύρια (ελεύθερου μήκους 25-30m) ικανής προέντασης (420–500 kN) ανά πάσσαλο
- ✓ **σταθεροποιεί** τους μηχανισμούς αστοχίας κοντά στον κατάντη πασσαλότοιχο και
- ✓ **συγκρατεί** και την περαιτέρω μετακίνηση του ανάντη πασσαλότοιχου.

Τα παραπάνω συμπεράσματα απαντούν έως ένα βαθμό στα αρχικά ερωτήματα. Οι κατασκευαστικές πρακτικές δεν εξετάστηκαν στην παρούσα διερεύνηση. Κατά την προσομοίωση θεωρήθηκε ότι τα κατασκευαστικά στάδια ήταν τα προβλεπόμενα χωρίς παρεκκλίσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Αναγνωστόπουλος Α., Μιχάλης Η., 2004. Σημειώσεις Αντιστηρίξεων και Καθιζήσεων λόγω Εκσκαφών. *Σημειώσεις μαθήματος «Αστικές Σήραγγες και Σταθμοί Μετρό»*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Καββαδάς Μ. 2006. Στοιχεία Εδαφομηχανικής. *Σημειώσεις μαθήματος*. Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Αθήνα.

Κούστα Α., 2007. Αριθμητική προσομοίωση διατάξεων αντιστήριξης. *Διπλωματική Εργασία, Παν. Θεσσαλίας, Πολ/χνική Σχολή, Τμ. Πολ. Μηχ., Βόλος*.

Λουπασάκης Κ., 2015, Βελτίωση Γεωτεχνικής Συμπεριφοράς Γεωλογικών Σχηματισμών *Σημειώσεις Διαλέξεων*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Αθήνα.

Παναγόπουλος Ν. 2020. Αριθμητική προσομοίωση των γεωτεχνικών συνθηκών ευστάθειας σε συνοδά έργα μεταλλευτικών εγκαταστάσεων. Παραδείγματα τοίχων αντιστήριξης των τελμάτων Κοκκινόλακκα. *Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ-Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Αθήνα*

Παπαβασιλείου Β., Σαλάκος Μ., 2017. Πασσαλότοιχος προσωρινής αντιστήριξης ύψους 17.5μ. στα έργα διάνοιξης της οδού Κανακάρη στην Πάτρα. *Πτυχιακή εργασία. ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα*.

Παπαδόπουλος Β. 2017. Προεντεταμένες Αγκυρώσεις. *Σημειώσεις μαθήματος «Αστικές Σήραγγες και Σταθμοί Μετρό»*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Παπασπύρου Σ. 1985. Αγκυρώσεις. Μονογραφία. Αθήνα.

Ξενόγλωσση

Barnes G. 2005, Εδαφομηχανική – Αρχές και Εφαρμογές. 2^η Αγγλική έκδοση. Εκδ. Κλειδάριθμος. Αθήνα.

Brinkgreve R.B.J., 1999. Beyond 2000 in Computational Geotechnics. 10 Years of Plaxis International. *Proceedings of Int. Symposium. Publ. Taylor & Francis Group. Rotterdam, The Netherlands.*

Gouw T.L., 2014. Common Mistakes on the Application of Plaxis 2D in Analyzing Excavation Problems. *International Journal of Applied Engineering Research, Vol.9, No. 21, 8291-8311.*

Plaxis V.8 Material Manual

Plaxis V.8 Reference Manual

S.C. Geosearch SRL, 2016, Studiu Geotehnic de detaliu, “Proiectare si Executie Autostrada Sebes – Turda Lot.2 Km 17+000 – Km 41+250”. Privind pentru S.C. DP Consult SA, Cluj-Napoca, Romania.

Terzaghi K., Peck R.B., 1994. Εφαρμοσμένη Εδαφομηχανική. Τόμ.Α. Εκδ. Γκιούρδας. Αθήνα.

Waterman D., 2006. Structural Elements & Modelling Excavations in Plaxis, *Power Point Presentation File. CGI Workshop, Chile.*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Π.1 – Πίνακας αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών

Παράρτημα Π.2 – Αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών

Παράρτημα Π.3 – Επεξεργασμένα αποτελέσματα δοκιμών SPT

Παράρτημα Π.4 – Αναφορές δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης (UCS)

Παράρτημα Π.5 – Αποτελέσματα δοκιμών Στερεοποίησης

Παράρτημα Π.5α – Πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμών Στερεοποίησης

Παράρτημα Π.5β – Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων δοκιμών Στερεοποίησης

Παράρτημα Π.6 – Φάσεις εκσκαφής

Παράρτημα Π.1 – Πίνακας αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών

a/a	Drill name	Sample NAME	Shear test c'	Shear test ϕ'	UCS	Layer	Sample z	Depth aver	Depth min	Depth max	Drill z	Year	Comments
1	Gi11	P8	13.3	7.9	-	clay	264.9	10.25	10.1	10.4	275.1	2020	possible whethereed sample or sandy
2	i11	P8	13.0	7.9	-	clay	252.9	12.2	12.0	12.4	265.1	2020	outlier (clay/marl)
3	FC14d	P5	135.0	9.0	-	clay grey	243.5	25.5	25.3	25.7	269.0	2015	
4	FC14d	P6	116.0	11.0	-	clay grey	240.8	28.2	28.0	28.4	269.0	2015	
5	Gi5	P9	88.6	11.2	-	clay grey	274.6	11.8	11.6	12.0	286.4	2020	clay intercallations
6	i10	P6	48.0	11.5	-	clay	252.1	5.15	5.0	5.3	257.3	2020	
7	Gi13	S1	26.3	12.5	-	clay	276.4	4.5	4.0	5.0	280.9	2020	
8	FC14s	P4	92.0	13.0	-	marl	255.8	18.5	18.3	18.7	274.3	2015	
9	Gi3	P3	36.5	13.6	-	clay	272.1	5.2	5.0	5.4	277.3	2020	
10	i1	P1	20.8	13.8	-	clay	259.0	1.8	1.6	2.0	260.8	2020	
11	Gi13	S8	25.6	14.0	-	marl	263.6	17.3	17.0	17.6	280.9	2020	possible whethereed sample or sandy
12	i2	S3	79.5	14.1	-	clay	257.8	8.25	8.0	8.5	266.0	2020	
13	i2	P1	26.9	14.4	-	clay	262.2	3.85	3.7	4.0	266.0	2020	
14	FC13s	P3	94.0	15.0	-	clay	258.1	17.25	17.1	17.4	275.4	2015	
15	FC13s	P1	49.0	15.0	-	clay	269.0	6.35	6.1	6.6	275.4	2015	
16	FC14d	P2	84.0	15.0	-	clay	260.5	8.45	8.2	8.7	269.0	2015	
17	FC14d	P3	115.0	15.0	-	clay	254.2	14.8	14.6	15.0	269.0	2015	
18	FC13d	P2	115.0	16.0	-	clay grey	248.6	19.35	19.2	19.5	268.0	2015	
19	FG3	P3	75.2	16.4	-	clay grey	258.6	16.85	16.7	17.0	275.4	2016	intercallations
20	i10	P12	75.6	16.7	-	marl	245.5	11.80	11.6	12.0	257.3	2020	
21	i1	P11	65.5	16.8	-	clay	247.6	13.20	13.0	13.4	260.8	2020	
22	Gi7	P1	24.9	17.9	-	clay	275.6	2.20	2.0	2.4	277.8	2020	
23	FC13s	P2	102.0	18.0	-	clay	263.5	11.85	11.7	12.0	275.4	2015	
24	FC14d	P4	60.0	18.0	-	clay	248.2	20.80	20.6	21.0	269.0	2015	
25	i8	P6	23.9	18.1	-	marl	250.9	8.20	8.0	8.4	259.1	2020	marl contact
26	i2	P8	67.0	18.7	-	clay	249.5	16.50	16.2	16.8	266.0	2020	
27	i4	P4	34.8	18.9	-	clay	257.7	5.20	5.0	5.4	262.9	2020	
28	Gi5	S3	36.5	19.0	-	clay	272.8	13.55	13.2	13.9	286.4	2020	
29	Gi11	P12	63.9	19.4	-	clay	259.7	15.40	15.2	15.6	275.1	2020	
30	Gi7	P12	33.6	19.8	-	clay	260.1	17.70	17.5	17.9	277.8	2020	
31	FC14s	P7	254.0	20.0	-	marl	274.3		29.3	29.7	274.3	2015	outlier but marl
32	SP1	S5	39.1	20.2	-	clay	267.8	9.75	9.5	10.0	277.6	2020	
33	FG2	P3	46.5	20.3	-	clay	264.1	9.85	9.7	10.0	273.9	2016	
34	i2	S2	28.8	20.3	-	clay	261.6	4.40	4.0	4.8	266.0	2020	
35	Gi3	P10	45.5	20.7	-	clay	260.9	16.40	16.2	16.6	277.3	2020	
36	i10	P2	5.0	21.0	-	clay	257.3		1.3	1.7	257.3	2020	possible whethereed sample or sandy
37	Gi11	P2	41.2	21.2	-	clay	271.9	3.20	3.0	3.4	275.1	2020	
38	i11	P2	42.1	21.2	-	clay	261.9	3.20	3.0	3.4	265.1	2020	
39	FG1	P1	33.6	21.3	-	clay	262.5	12.85	12.7	13.0	275.3	2016	
40	Gi5	S1	23.7	21.5	-	clay	282.7	3.70	3.4	4.0	286.4	2020	
41	Gi7	P8	39.9	21.9	-	clay	266.6	11.20	11.0	11.4	277.8	2020	
42	FG2	P1	35.2	21.9	-	clay	269.8	4.15	4.0	4.3	273.9	2016	
43	A2	S3	75.8	21.9	-	clay	257.7	8.25	8.0	8.5	266.0	2020	
44	FG1	P2	29.0	22.0	-	clay	269.0	6.35	6.1	6.6	275.3	2016	
45	Gi5	P3	55.1	22.0	-	clay	283.2	3.20	3.0	3.4	286.4	2020	
46	FC13d	P1	82.0	22.0	-	clay	259.8	8.20	8.4	8.0	268.0	2015	
47	Gi5	S2	45.3	22.1	-	clay	277.0	9.40	9.0	9.8	286.4	2020	
48	i8	P2	26.8	22.2	-	clay	256.9	2.20	2.0	2.4	259.1	2020	
49	Gi7	P3	44.6	22.4	-	clay	273.0	4.85	4.7	5.0	277.8	2020	
50	Gi12	P6	44.9	22.7	-		269.3	7.80	7.6	8.0	277.1	2020	
51	Gi4	S2	48.2	22.7	-	clay	270.4	9.70	9.4	10.0	280.1	2020	
52	FC14s	P3	39.0	23.0	-	clay	264.1	10.20	10.0	10.4	274.3	2015	
53	Gi4	S5	41.6	23.1	-	marl	257.5	22.60	22.2	23.0	280.1	2020	possible whethereed
54	FG2	P2	20.2	23.9	-	clay	267.1	6.85	6.7	7.0	273.9	2016	
55	FC14d	P1	55.0	24.0	-	clay	262.8	6.20	6.0	6.4	269.0	2015	
56	Gi13	S5	23.3	24.2	-	clay	269.6	11.30	11.0	11.6	280.9	2020	
57	FG3	P1	39.4	24.4	-	clay	268.6	6.85	6.7	7.0	275.4	2016	
58	FC14s	P5	93.0	25.0	-	marl	253.4	20.90	20.7	21.1	274.3	2015	
59	Gi13	S7	26.5	25.0	-	clay	266.7	14.25	14.0	14.5	280.9	2020	
60	Gi5	S4	2.5	5.2	-		286.4		17.4	17.9	286.4	2020	possible whethereed sample or sandy
61	SP1	S4	44.5	25.4	-	clay	270.8	6.75	6.5	7.0	277.6	2020	
62	A2	S6	25.8	25.4	-	clay	245.5	20.45	20.0	20.9	266.0	2020	
63	Gi3	P1	15.4	25.9	-	clay	274.5	2.80	2.6	3.0	277.3	2020	
64	FG2	P4	41.7	25.9	-	clay	257.8	16.15	16.0	16.3	273.9	2016	
65	FG3	P2	28.0	26.7	-	clay	265.3	10.15	10.0	10.3	275.4	2016	
66	A2	S5	22.8	26.7	-	clay	248.6	17.35	17.1	17.6	266.0	2020	
67	A2	S1	41.6	26.8	-	clay	262.8	3.20	3.0	3.4	266.0	2020	
68	Gi8	S4	5.1	26.9	-	clay	280.3		14.3	15.0	280.3	2020	possible whethereed sample or sandy

a/a	Drill name	Sample NAME	Shear test c'	Shear test ϕ'	UCS	Layer	Sample z	Depth aver	Depth min	Depth max	Drill z	Year	Comments
69	FC14s	P1	15.0	27.0	-	clay	272.7	1.65	1.5	1.8	274.3	2015	possible whethereed sample or sandy
70	FC14s	P2	62.0	28.0	-	clay	267.7	6.65	6.4	6.9	274.3	2015	
71	i8	P1	22.7	28.3	-	clay	258.3	0.83	0.7	1.0	259.1	2020	
72	i2	S6	19.9	28.5	-	clay	249.5	16.50	16.2	16.8	266.0	2020	
73	FC14s	P6	102.0	32.0	-	marl	249.8	24.50	24.3	24.7	274.3	2015	
74	i4	P9	0.0	36.5	-	clay	262.9		10.3	10.7	262.9	2020	possible whethereed sample or sandy
86	i2	p13	-	-	1146.5	marl	238.5	27.55	27.1	28.0	266.0	2020	
92	Gi3	p18	-	-	1868.0	marl	249.6	27.70	27.5	27.9	277.3	2020	
93	Gi7	p18	-	-	1772.0	marl	252.0	25.80	25.6	26.0	277.8	2020	
95	i8	p8	-	-	1548.0	marl	248.3	10.80	10.6	11.0	259.1	2020	
98	Gi11	p17	-	-	2164.0	marl	251.3	23.80	23.6	24.0	275.1	2020	
99	i10	p14	-	-	1876.0	marl	242.7	14.60	14.4	14.8	257.3	2020	
75	Gi11	p11	-	-	215.0	clay	260.7	14.45	14.3	14.6	275.1	2020	
76	Gi11	p1	-	-	220.0	clay	273.4	1.70	1.5	1.9	275.1	2020	
77	i2	p4	-	-	235.6	clay	256.8	9.20	9.0	9.4	266.0	2020	
78	i1	p3	-	-	243.8	clay	256.7	4.15	4.0	4.3	260.8	2020	
79	i1	p5	-	-	244.0	clay	254.4	6.40	6.0	6.8	260.8	2020	
80	i4	p10	-	-	268.0	clay	251.0	11.85	11.7	12.0	262.9	2020	
81	i2	p12	-	-	298.3	clay	240.8	25.25	25.1	25.4	266.0	2020	
82	i4	p13	-	-	323.3	clay	247.4	15.50	15.3	15.7	262.9	2020	
83	i1	p13	-	-	345.9	clay	245.5	15.30	15.1	15.5	260.8	2020	
84	i2	p9	-	-	368.8	clay	246.3	19.75	19.5	20.0	266.0	2020	
85	i1	p15	-	-	524.6	clay	243.5	17.30	17.1	17.5	260.8	2020	
87	i4	p16	-	-	412.0	clay	242.9	20.00	19.8	20.2	262.9	2020	
88	Gi3	p4	-	-	408.0	clay	271.0	6.30	6.2	6.4	277.3	2020	
89	Gi3	p9	-	-	422.0	clay	262.6	14.70	14.5	14.9	277.3	2020	
90	Gi3	p14	-	-	413.0	clay	254.5	22.80	22.6	23.0	277.3	2020	
91	Gi3	p16	-	-	452.0	clay	252.1	25.20	25.0	25.4	277.3	2020	
94	i8	p4	-	-	438.0	clay	253.9	5.20	5.0	5.4	259.1	2020	
96	Gi11	p13	-	-	534.0	clay	258.3	16.80	16.6	17.0	275.1	2020	
97	Gi11	p15	-	-	893.0	clay	254.9	20.20	20.0	20.4	275.1	2020	maybe clay grey ?

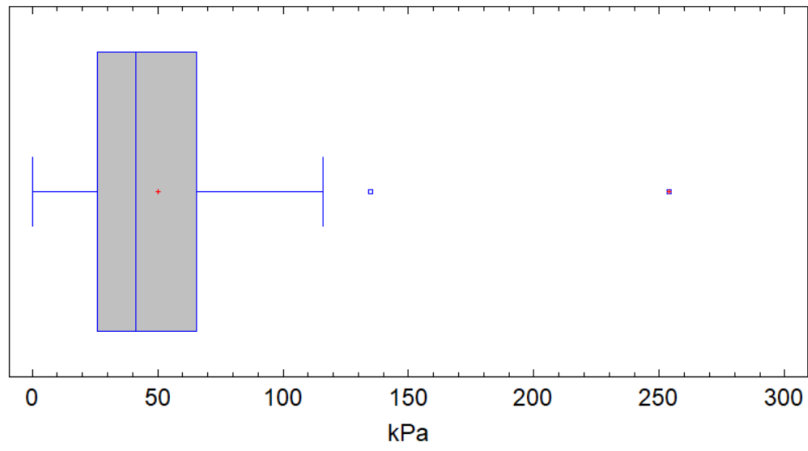
Παράρτημα Π.2 – Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

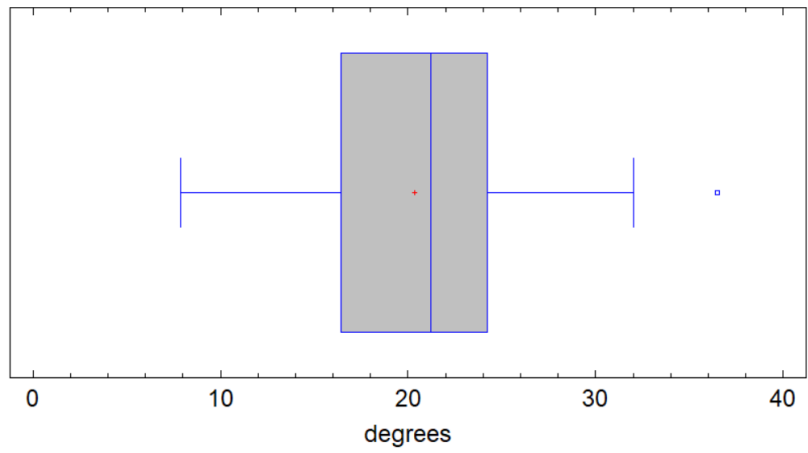
Όλα τα δείγματα : Slow Shear test & Unconfined Compression

ALL SAMPLES statistics	Slow Shear test c'	Slow Shear test ϕ'	UCS
Count	74	74	25
Average	50.20	20.36	705.40
Median	41.40	21.20	413.00
Mode		15.00	244.00
Geometric mean		19.50	519.03
5% Trimmed mean	46.82	20.38	654.76
5% Winsorized mean	48.15	20.31	694.08
Variance	1478.38	31.49	388889.00
Standard deviation	38.45	5.61	623.61
Coeff. of variation	0.77	0.28	0.88
Standard error	4.47	0.65	124.72
5% Winsorized sigma	31.48	5.25	624.06
MAD	17.60	3.80	145.00
Sbi	29.42	5.65	211.54
Minimum	0.00	7.90	215.00
Maximum	254.00	36.50	2164.00
Range	254.00	28.60	1949.00
Lower quartile	25.80	16.40	298.00
Upper quartile	65.50	24.20	893.00
Interquartile range	39.70	7.80	595.00
1/6 sextile	22.80	14.40	244.00
5/6 sextile	82.00	25.40	1548.00
Intersextile range	59.20	11.00	1304.00
Skewness	2.40	-0.07	1.35
Std. skewness	8.43	-0.25	2.75
Kurtosis	9.78	0.14	0.29
Std. kurtosis	17.17	0.24	0.30
Sum	3715.00	1506.92	17635.00
Sum of squares	2.94E+05	3.30E+04	2.18E+07

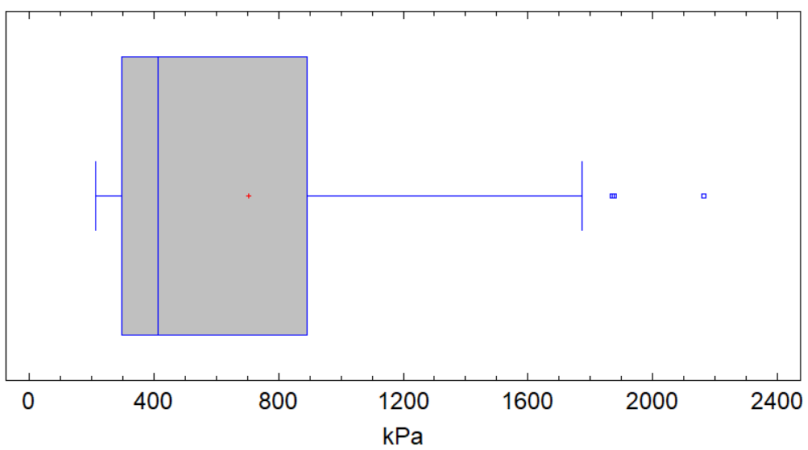
Shear test results - Cohesion coefficient (c)



Shear tests results - Internal friction angle (fi)



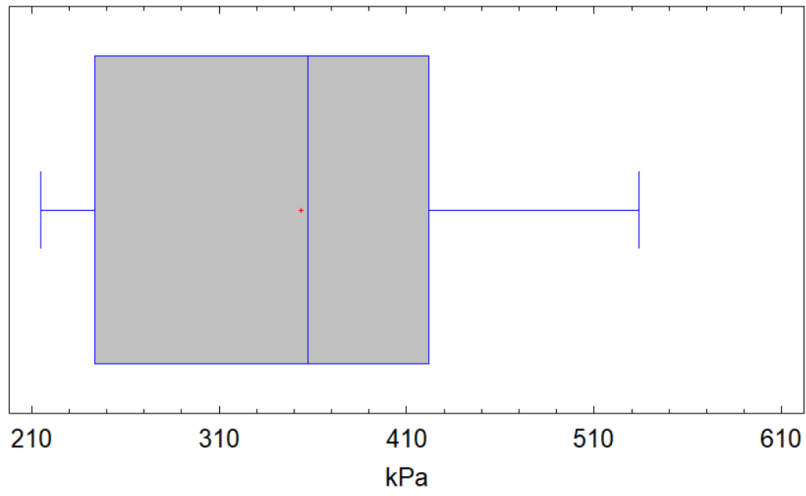
UCS Results (qu)



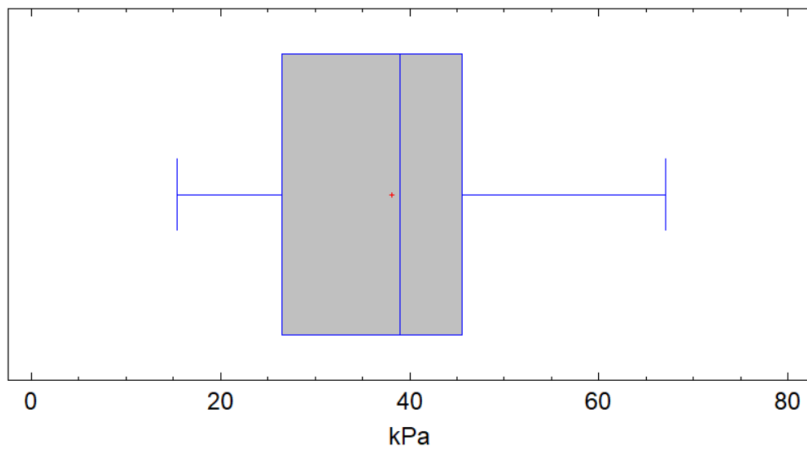
Στατιστική επεξεργασία δειγμάτων ΚΑΦΕ ΑΡΓΙΛΟΥ (Slow shear & UCS)

Clay Brown samples statistic analysis	Slow Shear test c'	Slow Shear test ϕ'	UCS
Count	47	47	18
Average	38.11	21.45	353.72
Median	39.00	21.90	357.50
Mode			244.00
Geometric mean	35.84	21.00	339.34
5% Trimmed mean	37.68	21.58	351.41
5% Winsorized mean	38.11	21.50	353.72
Variance	176.36	17.66	10580.40
Standard deviation	13.28	4.20	102.86
Coeff. of variation	0.35	0.20	0.29
Standard error	1.94	0.61	24.24
5% Winsorized sigma	13.50	4.21	102.86
MAD	10.00	2.50	85.00
Sbi	13.60	4.21	104.33
Minimum	15.40	11.50	215.00
Maximum	67.00	28.50	534.00
Range	51.60	17.00	319.00
Lower quartile	26.50	19.00	244.00
Upper quartile	45.50	24.40	422.00
Interquartile range	19.00	5.40	178.00
1/6 sextile	23.70	17.90	240.00
5/6 sextile	49.00	25.90	445.00
Intersextile range	25.30	8.00	205.00
Skewness	0.45	-0.51	0.19
Std. skewness	1.25	-1.43	0.33
Kurtosis	-0.50	-0.10	-1.10
Std. kurtosis	-0.70	-0.15	-0.96
Sum	1791.00	1008.00	6367.00
Sum of squares	7.64E+04	2.24E+04	2.43E+06

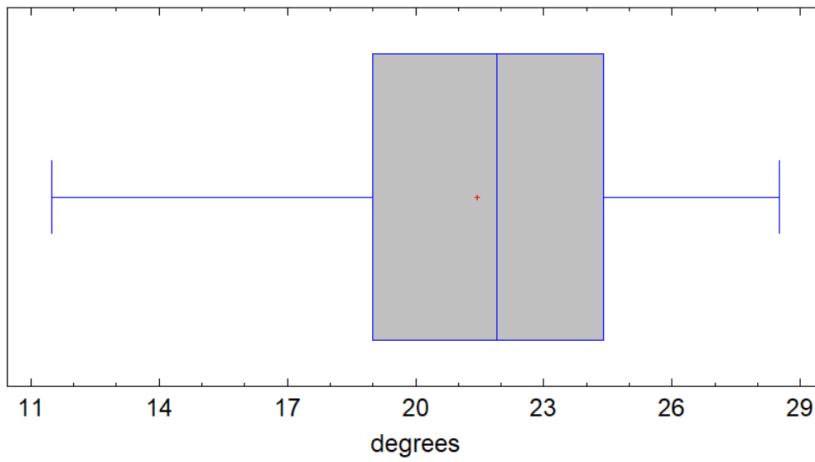
UCS Results - q_u (Brown Clay)



Clay brown - Shear tests results - c'



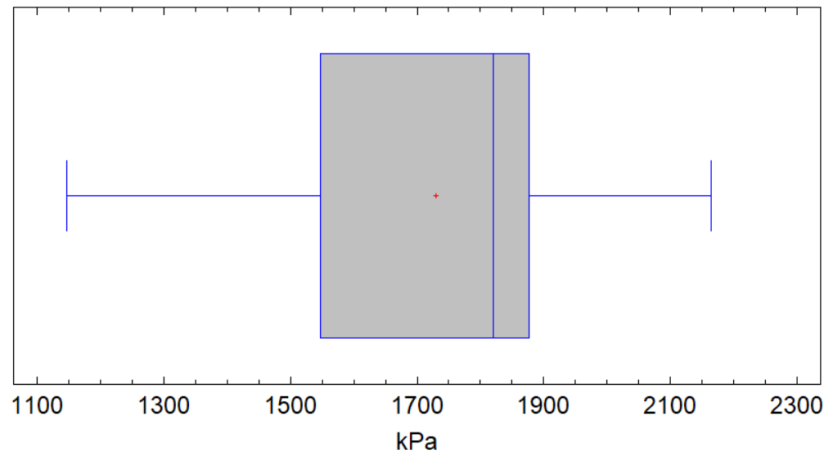
Clay brown - Shear tests results - ϕ_i



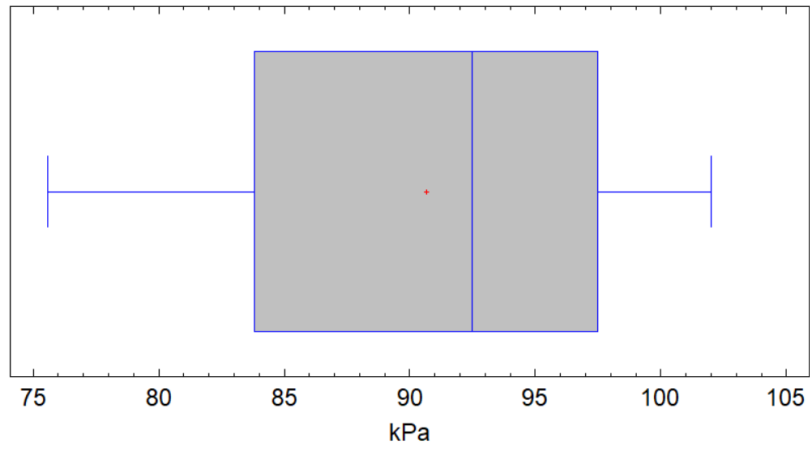
Στατιστική επεξεργασία δειγμάτων ΓΚΡΙ ΜΑΡΓΑΣ (Slow shear & UCS)

Marl samples statistic analysis	Slow Shear test c'	Slow Shear test ϕ'	UCS
Count	4	4	6
Average	90.65	21.68	1729.17
Median	92.50	20.85	1820.00
Mode			
Geometric mean	90.13	20.41	1696.72
5% Trimmed mean	90.86	21.58	1737.35
5% Winsorized mean	90.65	21.68	1729.17
Variance	120.89	72.56	120698.00
Standard deviation	11.00	8.52	347.42
Coeff. of variation	0.12	0.39	0.20
Standard error	5.50	4.26	141.83
5% Winsorized sigma	11.00	8.52	347.42
MAD	5.00	6.00	164.00
Sbi	10.16	7.84	324.21
Minimum	75.60	13.00	1147.00
Maximum	102.00	32.00	2164.00
Range	26.40	19.00	1017.00
Lower quartile	83.80	14.85	1548.00
Upper quartile	97.50	28.50	1876.00
Interquartile range	13.70	13.65	328.00
1/6 sextile	75.60	13.00	1347.50
5/6 sextile	102.00	32.00	2020.00
Intersextile range	26.40	19.00	672.50
Skewness	-0.97	0.39	-0.82
Stnd. skewness	-0.79	0.32	-0.82
Kurtosis	1.99	-2.25	1.08
Stnd. kurtosis	0.81	-0.92	0.54
Sum	362.60	86.70	10375.00
Sum of squares	3.32E+04	2.10E+03	1.85E+07

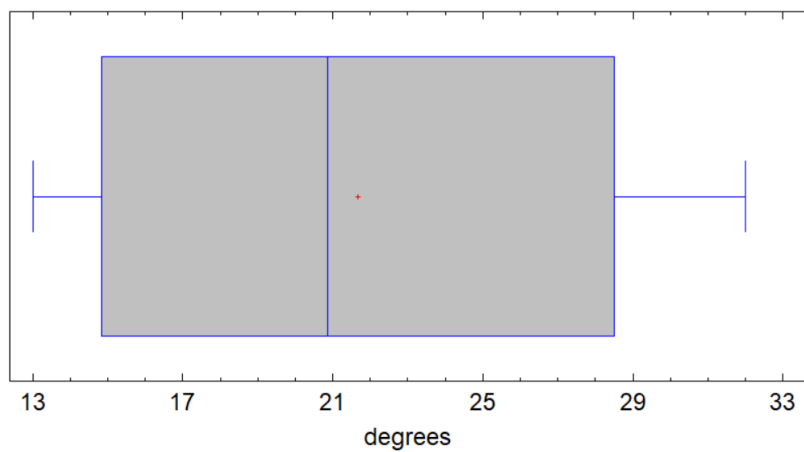
UCS Results - qu (Grey Marl)



Marl grey - Shear tests results - c
(outliers)



Marl grey - Shear tests results - fi



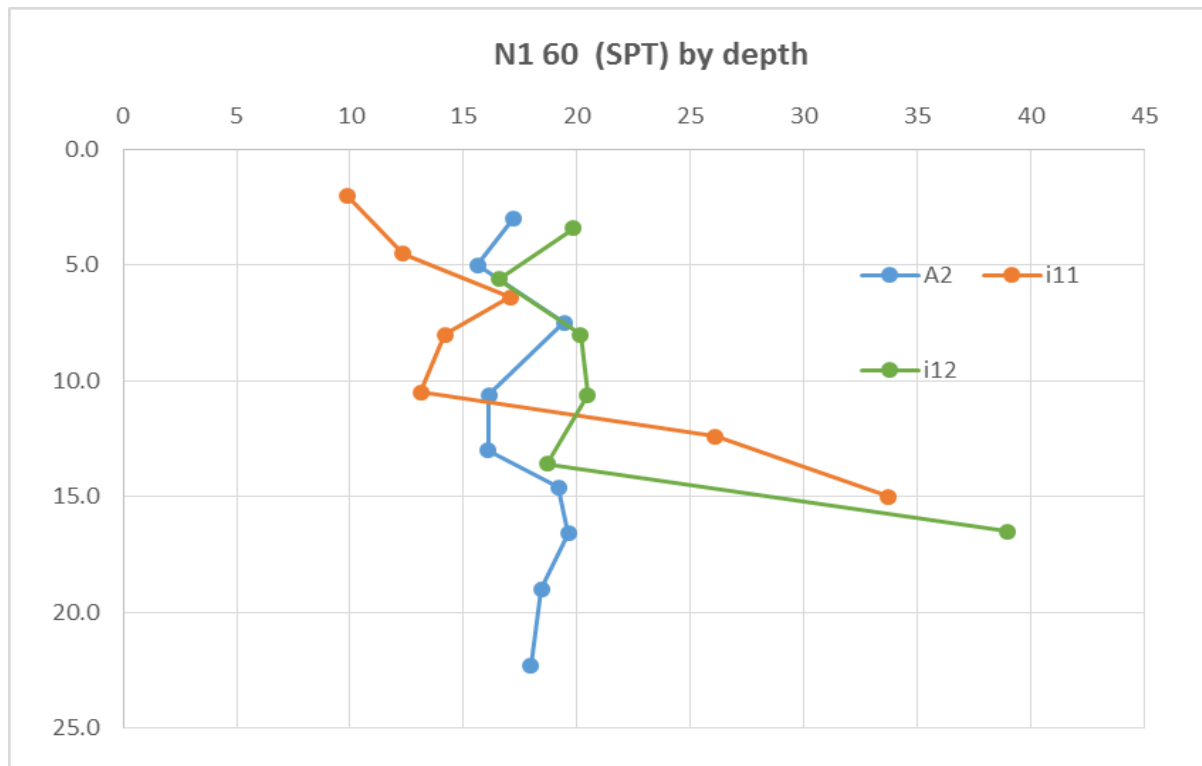
Παράρτημα Π.3 – Επεξεργασμένα αποτελέσματα δοκιμών SPT

SPT RESULTS

Drill name	Depth	z	S1	S2	S3	N	ERr/60	λ	CB	N60	CN	N1(60)
A2	3.0	263.0	5	8	11	19	1.00	0.75	1.00	14	1.23	17
	5.0	261.0	4	7	12	19	1.00	0.85	1.00	16	0.98	16
z=	7.5	258.5	5	12	14	26	1.00	0.95	1.00	25	0.78	19
265.996	10.6	255.4	8	11	15	26	1.00	1.00	1.00	26	0.62	16
km:	13.0	253.0	6	13	17	30	1.00	1.00	1.00	30	0.54	16
20+100	14.6	251.4	9	16	23	39	1.00	1.00	1.00	39	0.49	19
	16.6	249.4	13	18	26	44	1.00	1.00	1.00	44	0.45	20
	19.0	247.0	11	19	27	46	1.00	1.00	1.00	46	0.40	18
	22.3	243.7	12	22	29	51	1.00	1.00	1.00	51	0.35	18

i11	2.0	263.1	2	3	6	9	1.00	0.75	1.00	7	1.41	10
	4.5	260.6	3	6	8	14	1.00	0.85	1.00	12	1.03	12
z=	6.4	258.7	5	8	13	21	1.00	0.95	1.00	20	0.85	17
265.121	8.0	257.1	6	9	11	20	1.00	0.95	1.00	19	0.75	14
km:	10.5	254.6	5	8	13	21	1.00	1.00	1.00	21	0.62	13
20+200	12.4	252.7	14	21	26	47	1.00	1.00	1.00	47	0.55	26
	15.0	250.1	12	28	42	70	1.00	1.00	1.00	70	0.48	34

i12	3.4	265.5	6	10	13	23	1.00	0.75	1.00	17	1.17	20
	z=	5.6	263.3	5	9	12	21	1.00	0.85	1.00	18	0.92
268.88	8.0	260.9	7	12	16	28	1.00	0.95	1.00	27	0.75	20
km:	10.6	258.3	9	14	19	33	1.00	1.00	1.00	33	0.62	20
20+200	13.6	255.3	8	16	20	36	1.00	1.00	1.00	36	0.52	19
	16.5	252.4	23	37	50	87	1	1.00	1.00	87	0.45	39



Παράρτημα Π.4 – Αναφορές δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης (UCS)

ΑΠΟΣΠΑΣΜΑΤΑ ΔΕΛΤΙΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Περιεχόμενα:

Άργιλος Καφέ

i1 – P4

i2 - P4

i2 – P12

Μάργα γκρι

i1 – P15

i2 – P13

AST Lot 2 km19=20

Raport de incercare - Compresiune monoaxiala / Test Report - unconfined compression test

conform / according to STAS 8942/6-76

Forajul/Borehole: F11

Proba/Sample: P5' (P4)

Adancimea/Depth: 6.40÷6.80m

Geometria probelor

- diametrul (d): 38 mm
- inaltimea (h): 76 mm
- aria (A): 11.34 cm²
- volumul (V): 86.19 cm³

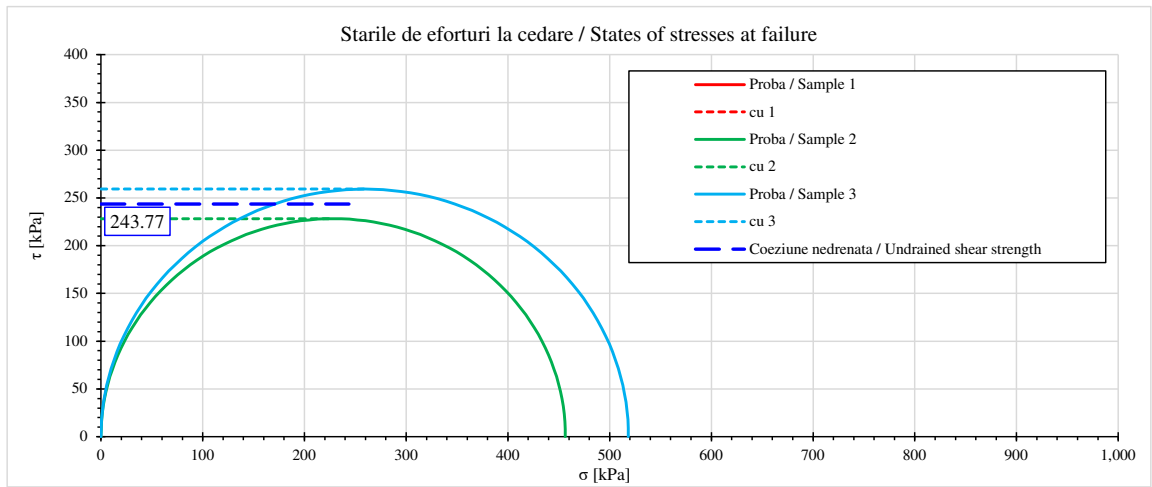
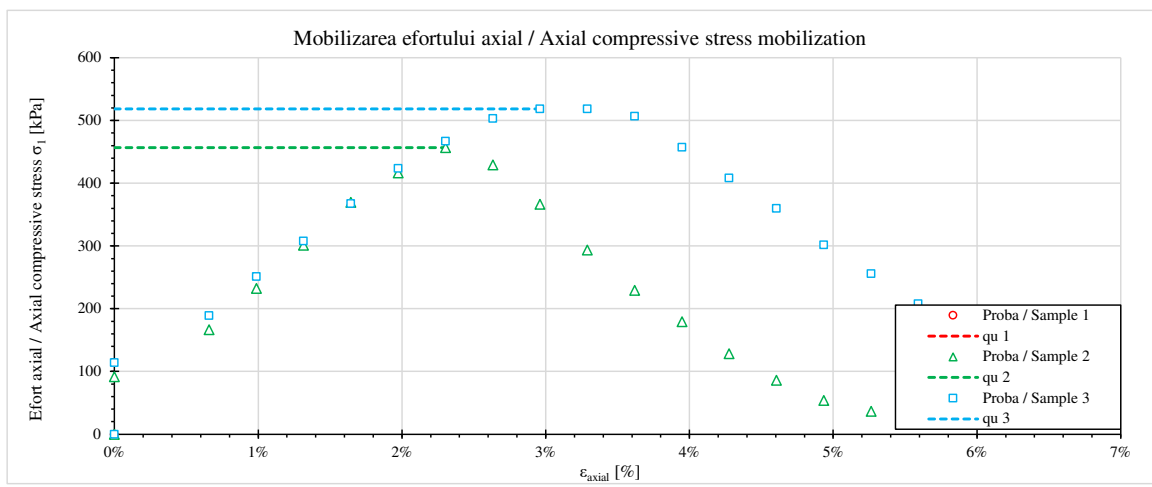
	m	m _d	w	ρ	ρ _d	q _u	ε _r	c _u	c _{u mediu}
	[g]	[g]	[%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[kPa]	[%]	[kPa]	[kPa]
Proba / Sample 1	180.69					0	0.0%	0	244
Proba / Sample 2	182.3					457	2.3%	228	
Proba / Sample 3	183.44					519	3.0%	259	

v [mm/min]: .50

v [%/min]: .66%

Rezistenta la compresiune mono-axiala /
 unconfined compression strength (q_u): **488 kPa**

Rezistenta nedrenata / undrained shear strength (c_u): **243.8 kPa**



Intocmit/Made by:
 dr. ing. Andrei Olteanu

Data / Date:
 Februarie / February 2021

Verificat/Checked by:
 Sef laborator, dr. ing. Daniel Marcel Manoli

AST Lot 2 km19±20

Raport de incercare - Compresiune monoaxiala / Test Report - unconfined compression test

conform / according to STAS 8942/6-76

Forajul/Borehole: Fi2

Proba/Sample: S-3 (P2)

Adancimea/Depth: 8.00±8.50m
(9.00±9.40m)

Geometria probelor

- diametrul (d): 38 mm
- inaltimea (h): 76 mm
- aria (A): 11.34 cm²
- volumul (V): 86.19 cm³

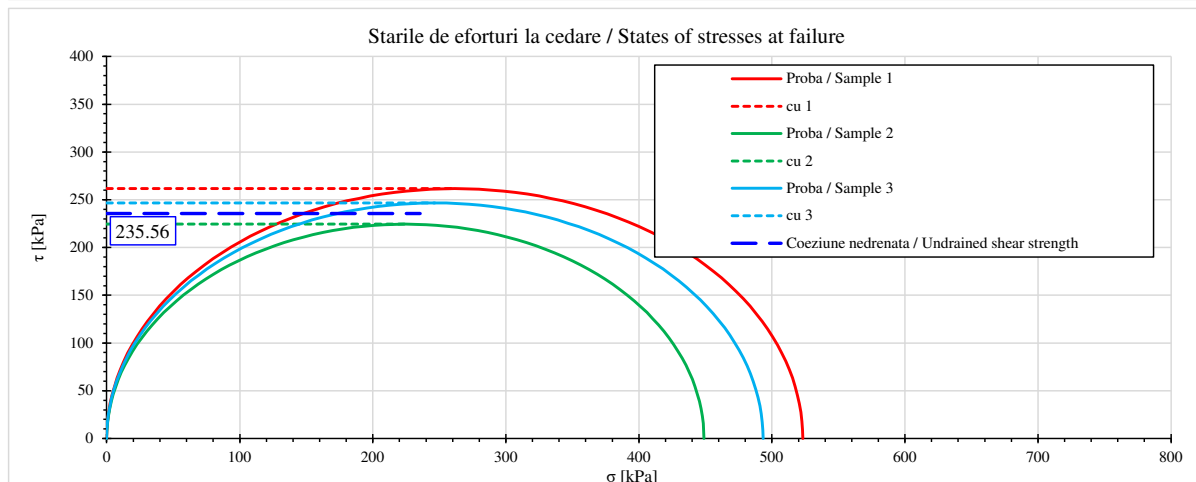
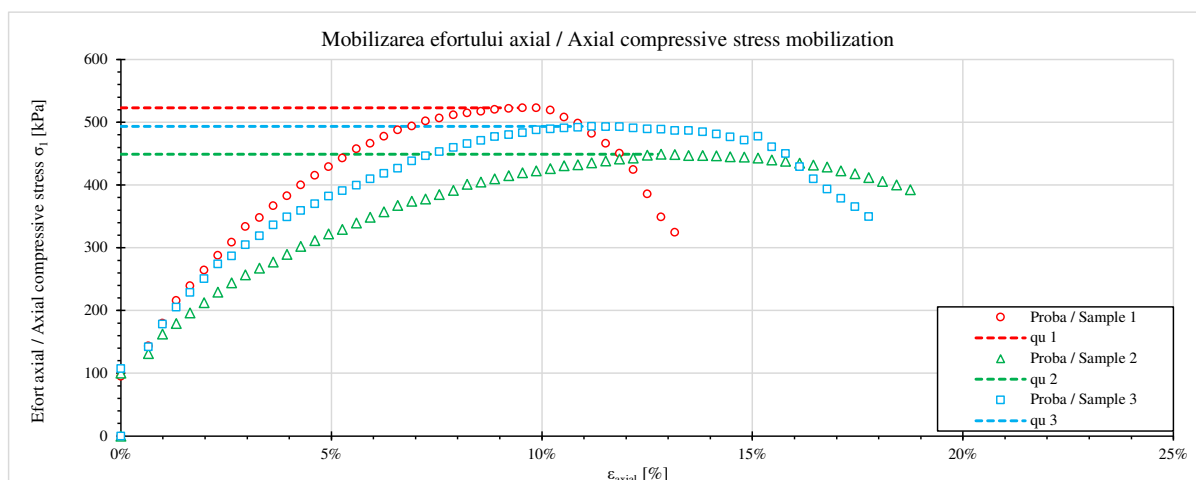
	m	m _d	w	ρ	ρ _d	q _u	ε _f	c _u	c _u mediu
	[g]	[g]	[%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[kPa]	[%]	[kPa]	[kPa]
Proba / Sample 1	181.85					523	9.5%	262	236
Proba / Sample 2	181.19					449	12.8%	224	
Proba / Sample 3	180.4					493	11.2%	247	

v [mm/min]: .50

v [%/min]: .66%

Rezistenta la compresiune mono-axiala /
unconfined compression strength (q_u): **471 kPa**

Rezistenta nedrenata / undrained shear strength (c_u): **235.6 kPa**



Intocmit/Made by:
Dr. ing. Andrei Constantin Olteanu

Data / Date:
Februarie / February 2021

Verificat/Checked by:
Sef Laborator, Dr. ing. Daniel Marcel Manoli

AST Lot 2 km19÷20

Raport de incercare - Compresiune monoaxială / Test Report - unconfined compression test

conform / according to STAS 8942/6-76

Forajul/Borehole: Fi2

Proba/Sample: S-8 (P12)

Adancimea/Depth: 25.10÷25.40m

Geometria probelor

- diametrul (d): 38 mm
- înălțimea (h): 76 mm
- aria (A): 11.34 cm²
- volumul (V): 86.19 cm³

	m	m _d	w	ρ	ρ _d	q _u	ε _r	c _u	c _u mediu
	[g]	[g]	[%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[kPa]	[%]	[kPa]	[kPa]
Proba / Sample 1	182.69					567	2.6%	283	298
Proba / Sample 2	187.21					592	3.0%	296	
Proba / Sample 3	187.29					601	2.3%	301	

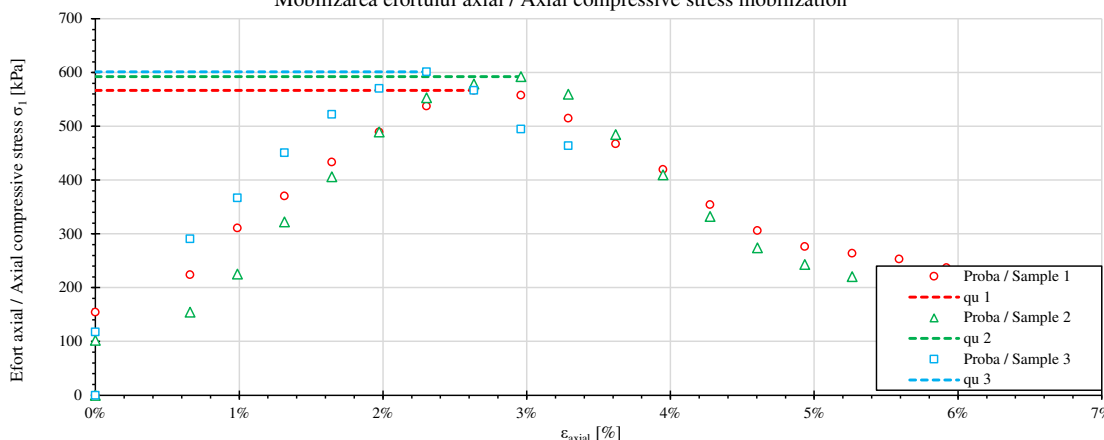
v [mm/min]: .50

v [%/min]: .66%

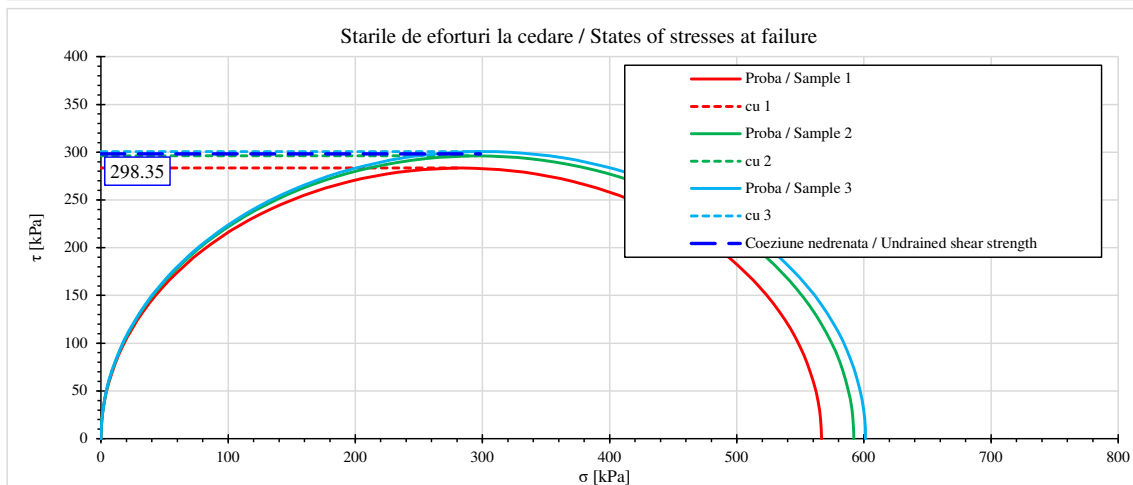
Rezistența la compresiune mono-axială /
unconfined compression strength (q_u): 597 kPa

Rezistența nedrenată / undrained shear strength (c_u): 298.3 kPa

Mobilizarea efortului axial / Axial compressive stress mobilization



Stările de eforturi la cedare / States of stresses at failure



Intocmit/Made by:
Dr. ing. Andrei Constantin Olteanu

Data / Date:
Februarie / February 2021

Verificat/Checked by:
Sef Laborator, Dr. ing. Daniel Marcel Manoli

AST Lot 2 km19±20

Raport de incercare - Compresiune monoaxiala / Test Report - unconfined compression test

conform / according to STAS 8942/6-76

Forajul/Borehole: F11

Proba/Sample: P15' (P15)

Adancimea/Depth: 17.10±17.50m

Geometria probelor

- diametrul (d): 38 mm
- inaltimea (h): 76 mm
- aria (A): 11.34 cm²
- volumul (V): 86.19 cm³

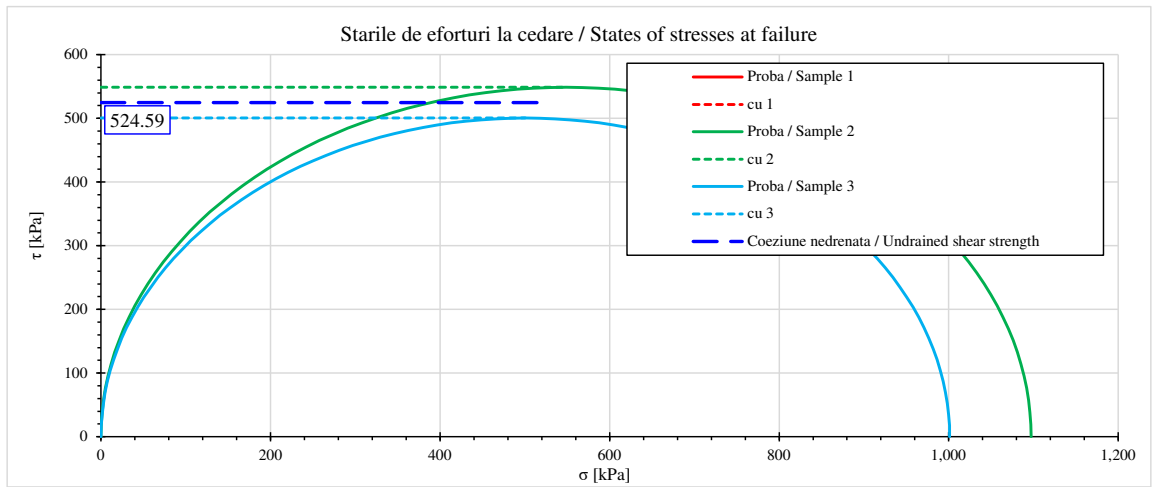
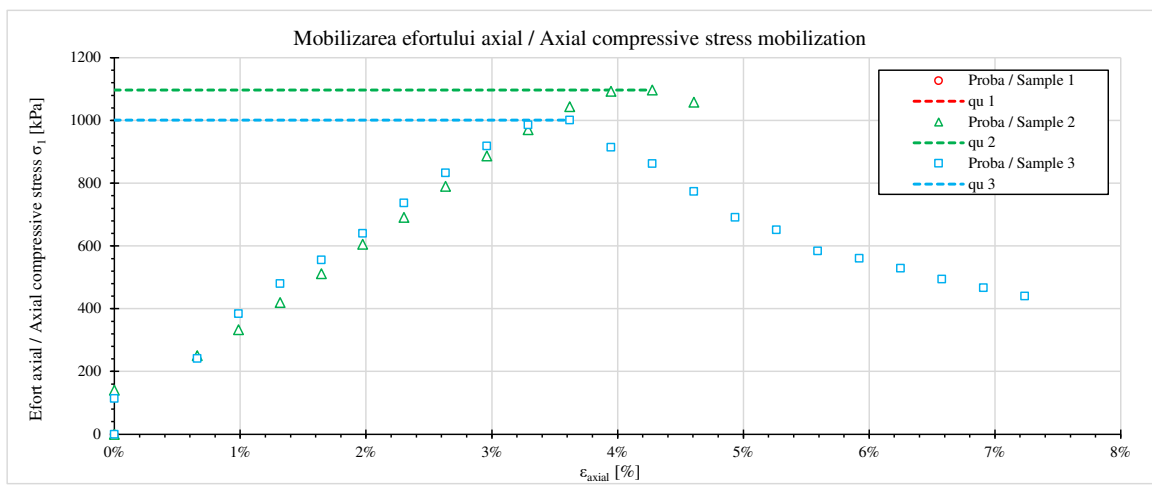
	m	m _d	w	ρ	ρ _d	q _u	ε _r	c _u	c _u mediu
	[g]	[g]	[%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[kPa]	[%]	[kPa]	[kPa]
Proba / Sample 1	186.21					0	0.0%	0	525
Proba / Sample 2	188.9					1097	4.3%	549	
Proba / Sample 3	188.9					1001	3.6%	501	

v [mm/min]: .50

v [%/min]: .66%

Rezistenta la compresiune mono-axiala /
 unconfined compression strength (q_u): **1049 kPa**

Rezistenta nedrenata / undrained shear strength (c_u): **524.6 kPa**



Intocmit/Made by:
 dr. ing. Andrei Olteanu

Data / Date:
 Februarie / February 2021

Verificat/Checked by:
 Sef laborator, dr. ing. Daniel Marcel Manoli

AST Lot 2 km19÷20

Raport de incercare - Compresiune monoaxiala / Test Report - unconfined compression test
 conform / according to STAS 8942/6-76

Forajul/Borehole: FI2
 Proba/Sample: P13 (S-9)
 Adancimea/Depth: 27.60÷28.00m

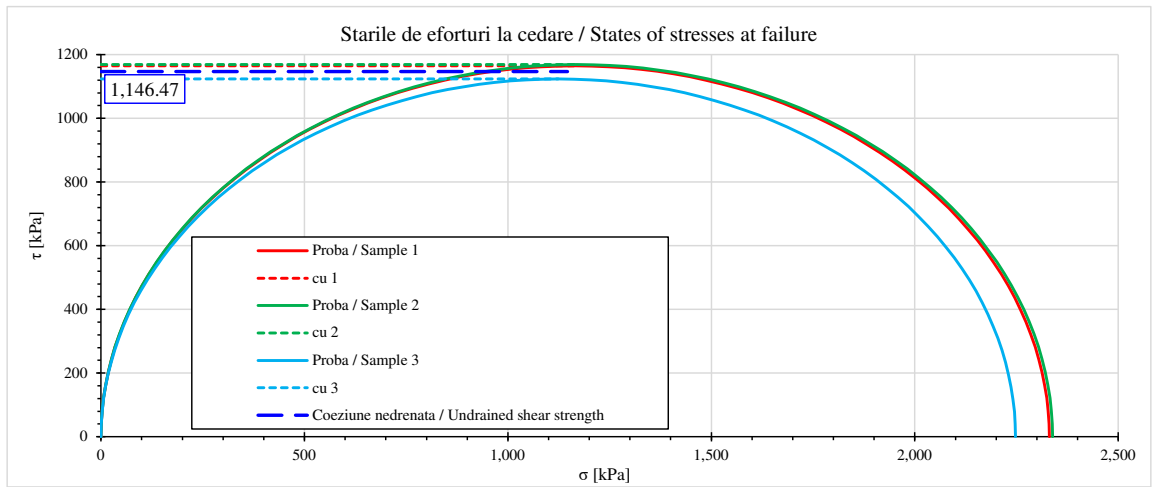
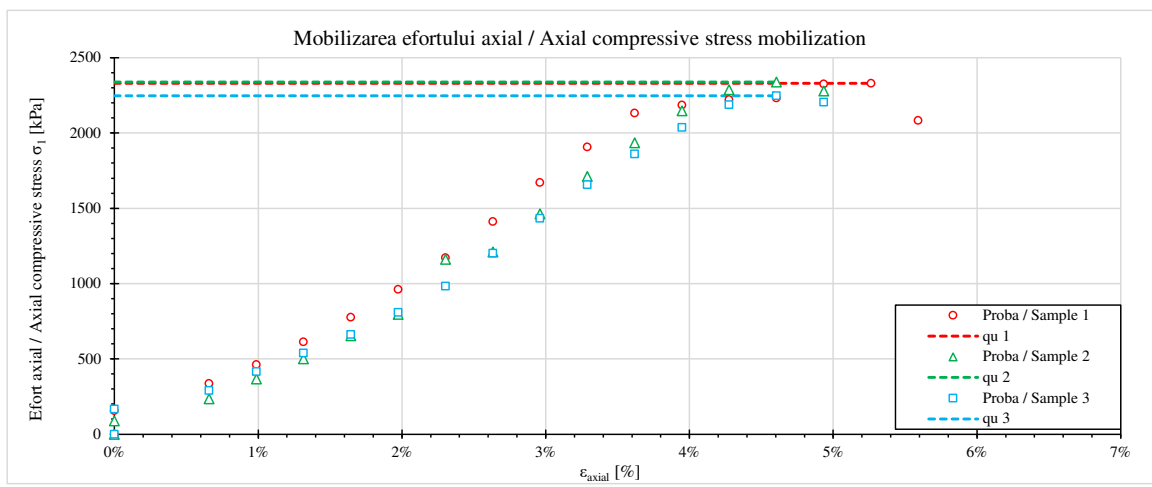
Geometria probelor
 - diametrul (d): 38 mm
 - inaltimea (h): 76 mm
 - aria (A): 11.34 cm²
 - volumul (V): 86.19 cm³

	m	m _d	w	ρ	ρ _d	q _u	ε _r	c _u	c _u mediu
	[g]	[g]	[%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[kPa]	[%]	[kPa]	[kPa]
Proba / Sample 1	191.59					2331	5.3%	1165	1146
Proba / Sample 2	190.98					2338	4.6%	1169	
Proba / Sample 3	190.97					2248	4.6%	1124	

v [mm/min]: .50
 v [%/min]: .66%

Rezistenta la compresiune mono-axiala /
 unconfined compression strength (q_u): **2293 kPa**

Rezistenta nedrenata / undrained shear strength (c_u): **1146.5 kPa**



Intocmit/Made by:
 Dr. ing. Andrei Constantin Olteanu

Data / Date:
 Decembrie / December 2020

Verificat/Checked by:
 Sef Laborator, Dr. ing. Daniel Marcel Manoli

Παράρτημα Π.5 – Αποτελέσματα δοκιμών Στερεοποίησης

Παράρτημα Π.5α – Πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμών Στερεοποίησης

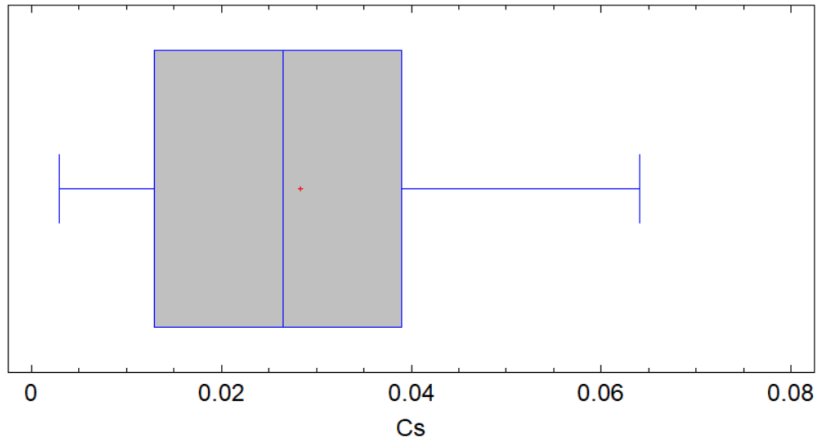
a/a	Drill	R/L	Sample name	Depth	Formation	γ	Cc	Cs	e int	σ_p	natural/sub merged	M0.5-1	M1-2	M2-3	M3-5	M5-7	M7-9	km	Year
1	FC14 dr	R	P6	6.2	clay	18.48	0.104	0.013	0.818	150	n	8,462	9,565	12,941	19,130	27,500		20100	2015
2	FC14 dr	R	P6	6.2	clay	18.50	0.104	0.048	0.820	150	s	4,583	7,333	10,476	15,172	23,158		20100	2015
3	FC14 dr	R	P7	8.5	clay	18.77	0.089	0.011	0.745	200	n	9,167	11,000	12,222	16,923	25,882		20100	2015
4	FC14 dr	R	P7	8.5	clay	19.13	0.083	0.030	0.749	97.6	s	5,656	6,718					20100	2015
5	FC14 dr	R	P7	8.5	clay	19.48	0.092	0.038	0.688	200	s	5,139	8,409	11,563	17,619	19,474		20100	2015
6	FC14 dr	R	P8	10.6	clay	18.44	0.073	0.009	0.813	300	n	15,714	24,444	22,000	31,429	25,882	40,000	20100	2015
7	FC14 dr	R	P8	10.6	clay	18.62	0.104	0.051	0.845	250	s	4,625	7,708	12,333	15,417	23,125	30,833	20100	2015
8	FC14 dr	R	P9	12.9	clay	18.67	0.182	0.024	0.803	400	n	7,333	9,565	11,579	12,222	13,750	15,714	20100	2015
9	FC14 dr	R	P9	12.9	clay	18.59	0.115	0.045	0.861	75	s	3,438	5,366	9,565	14,667	20,000	24,444	20100	2015
10	FC14 dr	R	P10	14.8	clay	18.66	0.073	0.011	0.759	400	n	8,462	16,923	22,000	27,500	33,846	40,000	20100	2015
11	FC14 dr	R	P10	14.8	clay	18.99	0.096	0.044	0.820	150	s	5,789	7,333	10,476	17,600	24,444	33,846	20100	2015
12	FC14 dr	R	P10	14.8	clay	19.72	0.085	0.052	0.770	75	s	4,545	6,897	11,765	16,667	26,667	33,333	20100	2015
13	FC14 dr	R	P15	18.8	clay	18.22	0.087	0.012	0.850	250	n	7,333	14,667	14,667	20,952	27,500	33,846	20100	2015
14	FC14 dr	R	P15	18.8	clay	17.64	0.084	0.036	0.961	200	s	7,857	9,649	14,103	21,569	27,500	26,190	20100	2015
15	FC14 dr	R	P16	20.8	clay	17.81	0.135	0.017	0.901	300	n	12,222	11,579	13,750	15,172	19,130	20,000	20100	2015
16	FC14 dr	R	P16	20.8	clay	20.64	0.111	0.033	0.656	250	s	7,107	11,062	13,342	18,771	17,937	19,484	20100	2015
17	FC14 dr	R	P20	25.5	clay	17.80	0.172	0.020	0.955	300	n	6,111	9,167	12,941	13,333	14,667	15,172	20100	2015
18	FC14 dr	R	P20	25.5	marl	17.79	0.191	0.061	1.020	200	s	3,333	5,500	6,875	9,778	12,571	16,296	20100	2015
19	FC14 dr	R	P22	28.2	clay	19.19	0.120	0.019	0.704	250	n	5,789	8,148	13,750	15,714	18,333	16,923	20100	2015
20	FC14 st	L	P1	1.7	clay	17.47	0.074	0.003	0.837	200	n	22,000	20,000	18,333	23,158	25,882		20100	2015
21	FC14 st	L	P1	1.7	clay	17.42	0.192	0.056	0.894	100	s	3,793	5,116	6,286	6,667	9,167		20100	2015
22	FC14 st	L	P2	3.8	clay	18.00	0.084	0.013	0.815	200	n	7,857	12,222	14,667	20,000	24,444		20100	2015
23	FC14 st	L	P2	3.8	clay	17.70	0.109	0.042	0.893	150	s	5,789	7,857	10,476	15,172	20,000		20100	2015
24	FC14 st	L	P4	6.6	clay	18.02	0.047	0.009	0.861	150	n	18,333	22,000	24,444	36,667	40,000		20100	2015
25	FC14 st	L	P4	6.6	clay	19.86	0.063	0.024	0.715	150	s	9,294	12,602	15,911	24,722	32,415		20100	2015
26	FC14 st	L	P6	10.2	clay	18.63	0.061	0.008	0.818	200	n	8,462	16,923	20,000	27,500	36,667	48,889	20100	2015
27	FC14 st	L	P6	10.2	clay	18.53	0.111	0.039	0.836	250	s	3,667	7,097	11,000	16,923	20,952	25,882	20100	2015
28	FC14 st	L	P8	13.2	clay	18.93	0.116	0.012	0.821	250	n	7,857	12,941	15,714	16,296	19,130	20,952	20100	2015
29	FC14 st	L	P8	13.2	clay	20.33	0.125	0.046	0.716	100	s	6,177	6,213	9,363	11,044	16,006	15,662	20100	2015
30	FC14 st	L	P9	15.2	clay	17.54	0.089	0.009	0.942	300	n	6,471	11,957	23,913	24,719	30,137	28,205	20100	2015
31	FC14 st	L	P9	15.2	clay	17.54	0.075	0.028	0.946	250	s	8,462	12,941	22,917	27,160	28,205	41,509	20100	2015
32	FC14 st	L	P9	15.2	clay	17.45	0.068	0.026	0.935	100	s	8,209	10,280	14,103				20100	2015
33	FC14 st	L	P11	18.5	clay	18.19	0.090	0.034	0.905	100	s	5,000	7,857	12,941	20,000	24,444	27,500	20100	2015
34	FC14 st	L	P13	20.9	clay	18.43	0.099	0.012	0.815	300	n	4,074	8,800	14,667	19,130	23,158	29,333	20100	2015
35	FC14 st	L	P13	20.9	clay	18.43	0.080	0.031	0.856	300	s	7,857	10,000	14,667	23,158	29,333	36,667	20100	2015
36	FC14 st	L	P16	24.5	clay	18.74	0.062	0.013	0.729	250	n	18,333	20,000	22,000	24,444	40,000	44,000	20100	2015
37	FC14 st	L	P17	26.4	clay	20.91	0.065	0.027	0.549	100	s	12,225	11,154	14,472	17,881	25,413	35,336	20100	2015
38	FC13 st	L	P3	3.1	clay	17.71	0.091	0.023	0.905	100	s	6,044	8,088	13,253	17,460	21,359	36,667	19950	2015
39	FC13 st	L	P8	9.8	clay	20.19	0.170	0.064	0.707	150	s	4,413	6,031	6,410	8,554	11,167	15,582	19950	2015
40	FC13 st	L	P11	14.1	clay	21.27	0.063	0.025	0.564	300	s	15,552	15,962	17,123	23,938	30,418	43,764	19950	2015
41	FC13 dr	R	P3	3.1	clay	20.60	0.106	0.038	0.597	200	s	6,868	8,478	9,926	13,578	19,157	24,450	19950	2015
42	FC13 dr	R	P5	6.3	clay	20.95	0.093	0.035	0.588	250	s	8,803	9,381	12,430	15,674	22,235	28,839	19950	2015

Παράρτημα Π.5β – Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων δοκιμών Στερεοποίησης

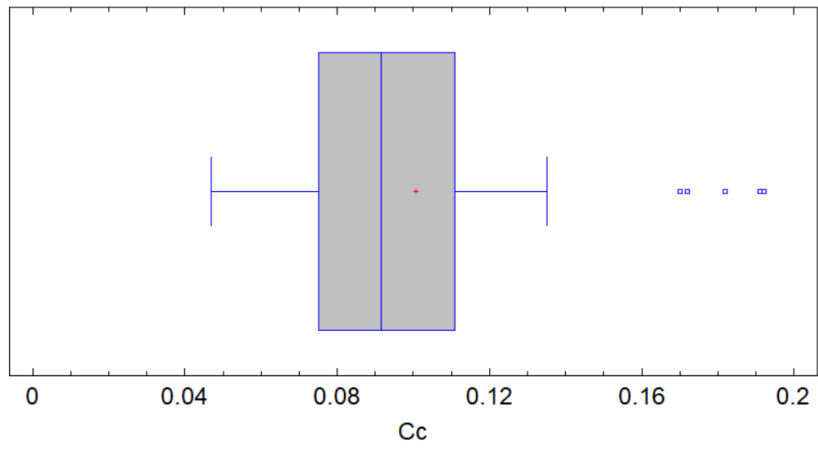
Όλα τα δείγματα από Swelling test

All samples statistic analysis	Cs	Cc	e int
Count	42	42	42
Average	0.03	0.10	0.80
Median	0.03	0.09	0.82
Mode		0.10	
Geometric mean	0.02	0.10	0.80
5% Trimmed mean	0.03	0.10	0.81
5% Winsorized mean	0.03	0.10	0.80
Variance	0.00	0.00	0.01
Standard deviation	0.02	0.04	0.11
Coeff. of variation	0.57	0.35	0.14
Standard error	0.00	0.01	0.02
5% Winsorized sigma	0.02	0.04	0.11
MAD	0.01	0.02	0.07
Sbi	0.02	0.03	0.11
Minimum	0.00	0.05	0.55
Maximum	0.06	0.19	1.02
Range	0.06	0.15	0.47
Lower quartile	0.01	0.08	0.73
Upper quartile	0.04	0.11	0.89
Interquartile range	0.03	0.04	0.16
1/6 sextile	0.01	0.07	0.71
5/6 sextile	0.05	0.12	0.91
Intersextile range	0.03	0.05	0.20
Skewness	0.42	1.24	-0.53
Std. skewness	1.12	3.28	-1.39
Kurtosis	-0.76	1.14	-0.06
Std. kurtosis	-1.01	1.51	-0.08
Sum	1.19	4.23	33.78
Sum of squares	4.45E-02	4.79E-01	2.77E+01

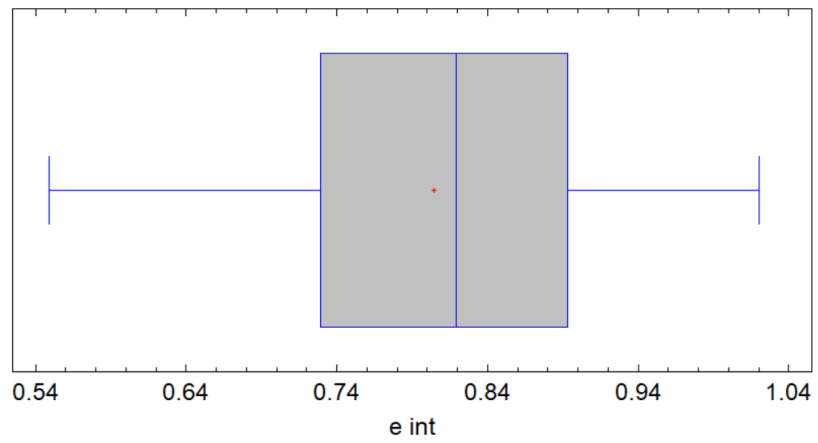
Swelling index - C_s (all samples)



Compression index - C_c (all samples)



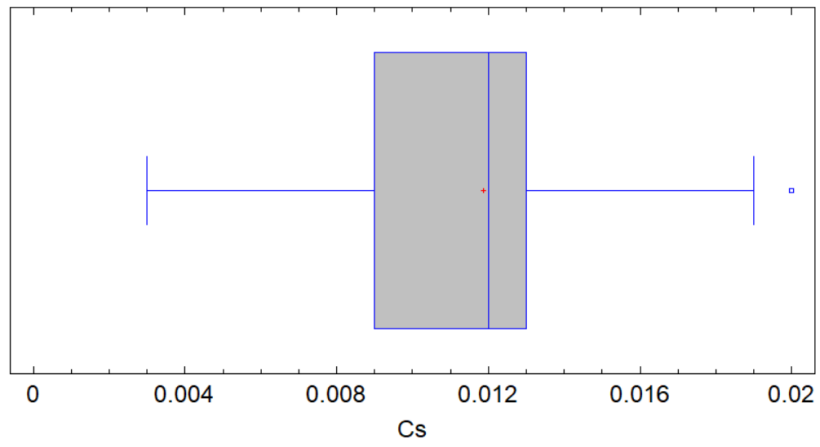
Void ratio initial e_{int} (all samples)



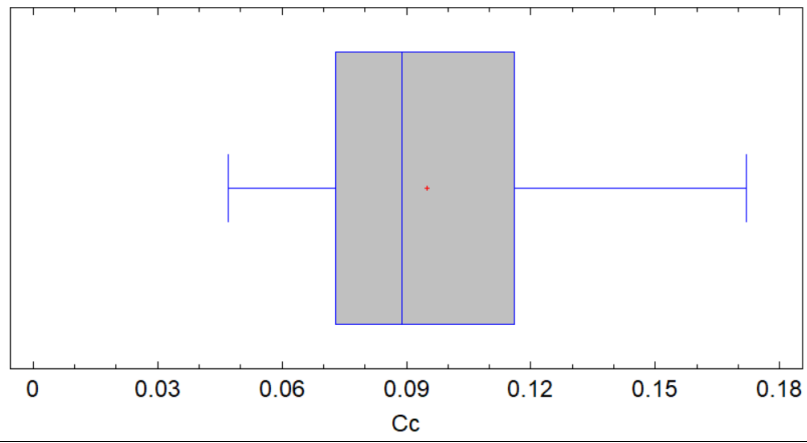
Στατιστική επεξεργασία δειγμάτων ΚΑΦΕ ΑΡΓΙΛΟΥ (Swelling tests)

Natural Clay brown statistic analysis	Cs	Cc	e int
Count	15	15	15
Average	0.01	0.09	0.83
Median	0.01	0.09	0.82
Mode			
Geometric mean	0.01	0.09	0.83
5% Trimmed mean	0.01	0.09	0.83
5% Winsorized mean	0.01	0.09	0.83
Variance	0.00	0.00	0.00
Standard deviation	0.00	0.03	0.07
Coeff. of variation	0.37	0.33	0.08
Standard error	0.00	0.01	0.02
5% Winsorized sigma	0.00	0.03	0.07
MAD	0.00	0.02	0.03
Sbi	0.00	0.03	0.07
Minimum	0.00	0.05	0.70
Maximum	0.02	0.17	0.96
Range	0.02	0.13	0.25
Lower quartile	0.01	0.07	0.81
Upper quartile	0.01	0.12	0.86
Interquartile range	0.00	0.04	0.05
1/6 sextile	0.01	0.07	0.76
5/6 sextile	0.02	0.12	0.90
Intersextile range	0.01	0.05	0.14
Skewness	0.21	0.98	0.19
Std. skewness	0.33	1.55	0.30
Kurtosis	0.58	1.40	0.23
Std. kurtosis	0.46	1.11	0.18
Sum	0.18	1.42	12.45
Sum of squares	2.38E-03	1.49E-01	1.04E+01

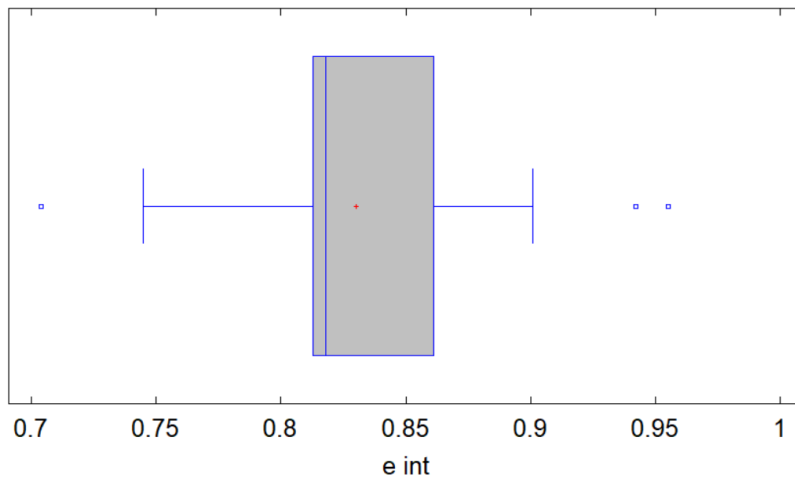
Swelling index - C_s (natural sample)



Compression index - C_c (natural sample)



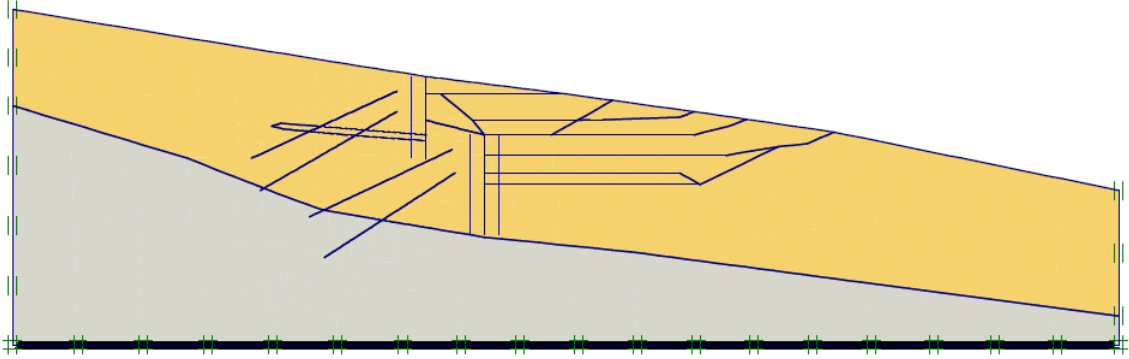
Void ratio initial e int. (natural)



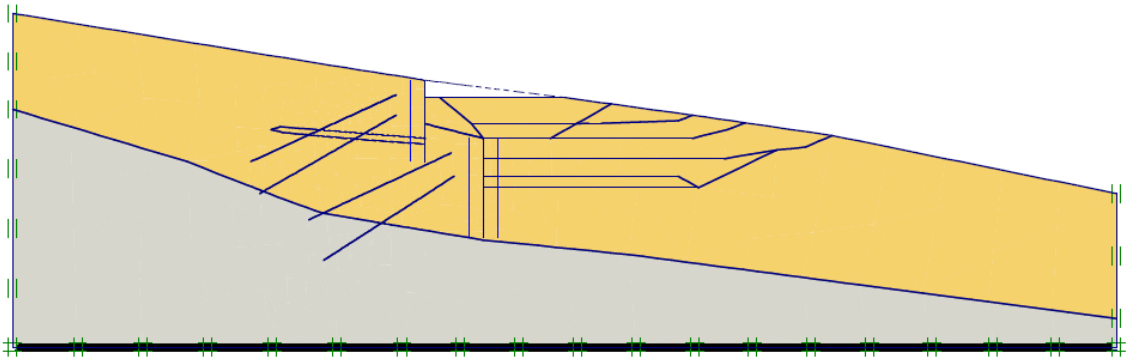
Παράρτημα Π.6 – Φάσεις εκσκαφής

ΣΤΑΔΙΑ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

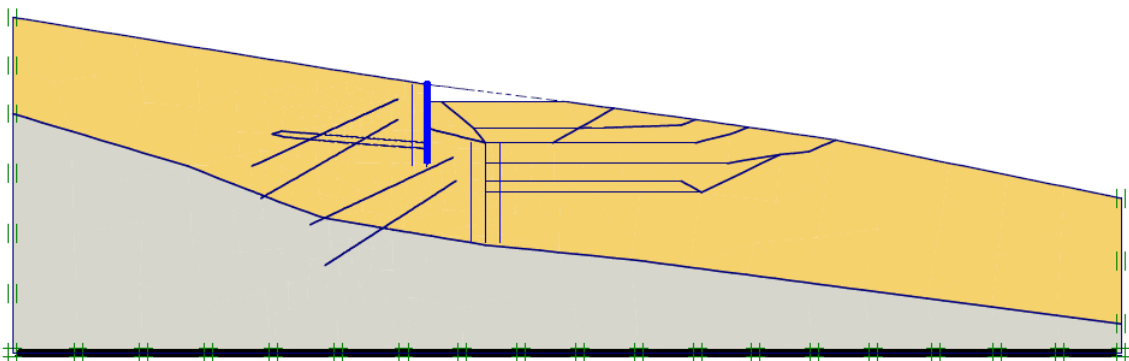
Αρχική κατάσταση



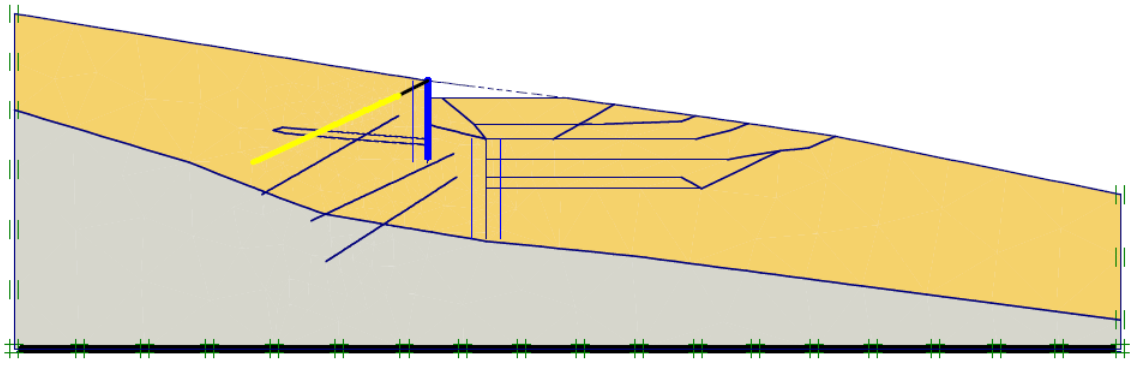
Στάδιο 1: Εκσκαφή πρόσβασης



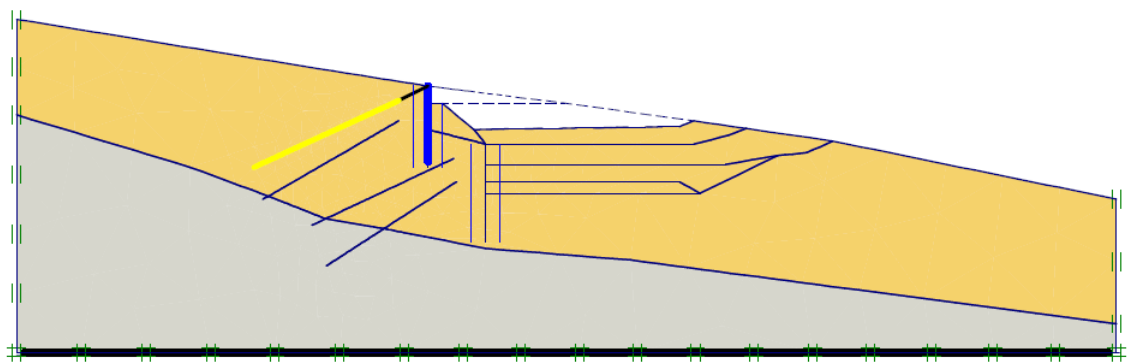
Στάδιο 2: Ενεργοποίηση άνω πασσαλότοιχου



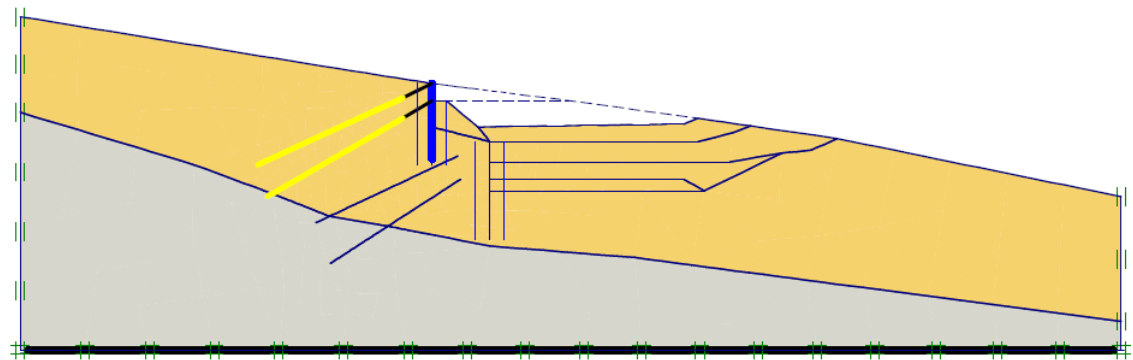
Στάδιο 3: Ενεργοποίηση 1^{ης} σειράς αγκυρίων (παθητικά) άνω πασσαλότοιχου



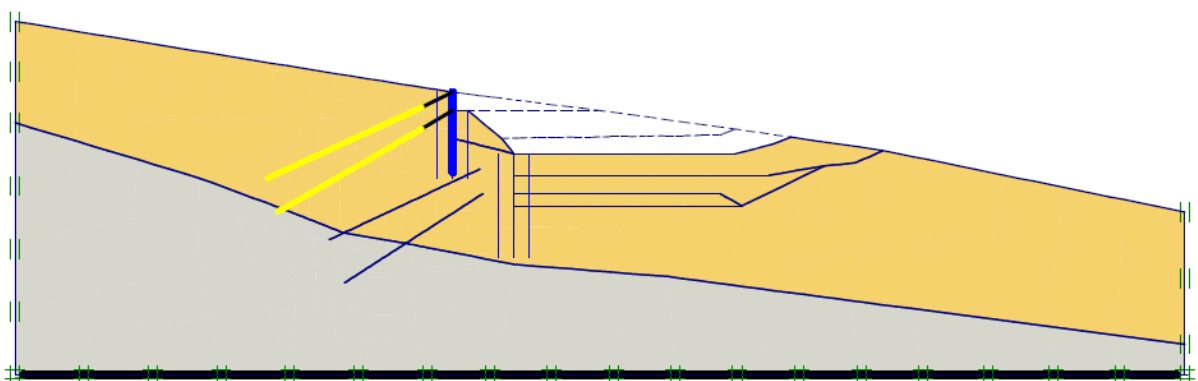
Στάδιο 4: Εκσκαφή μέχρι την 2^η σειρά αγκυρίων άνω πασσαλότοιχου



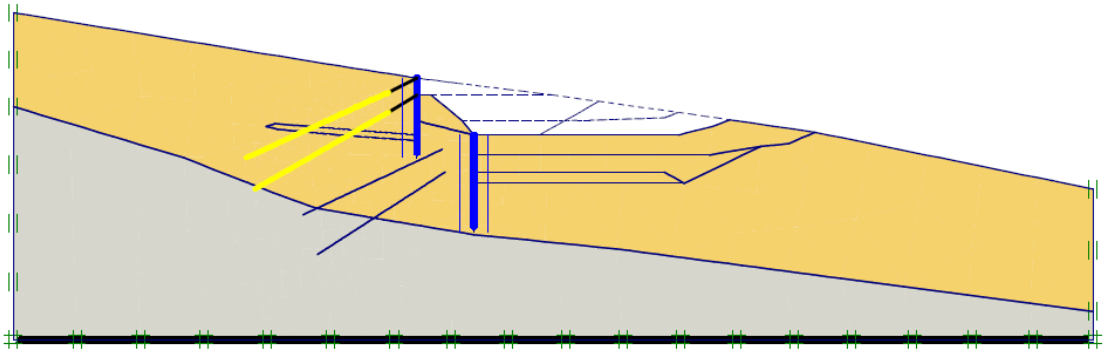
Στάδιο 5: Ενεργοποίηση και προένταση 2^{ης} σειράς αγκυρίων άνω πασσαλότοιχου



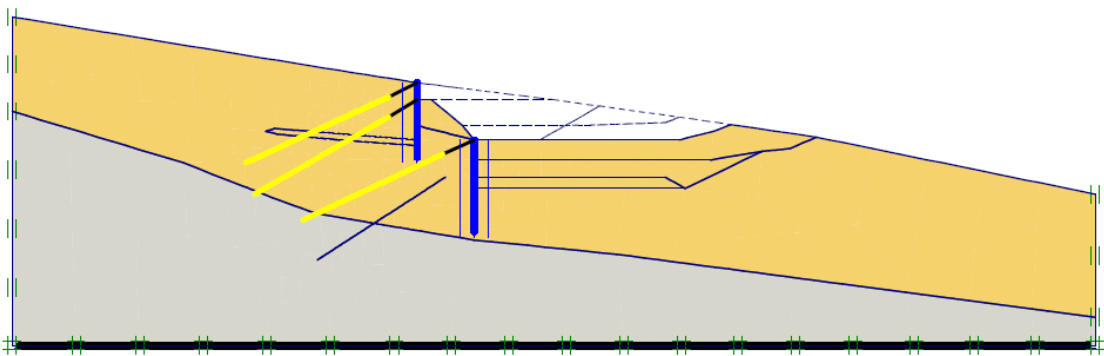
Στάδιο 6: Εκσκαφή μέχρι το επίπεδο του κάτω πασσαλότοιχου



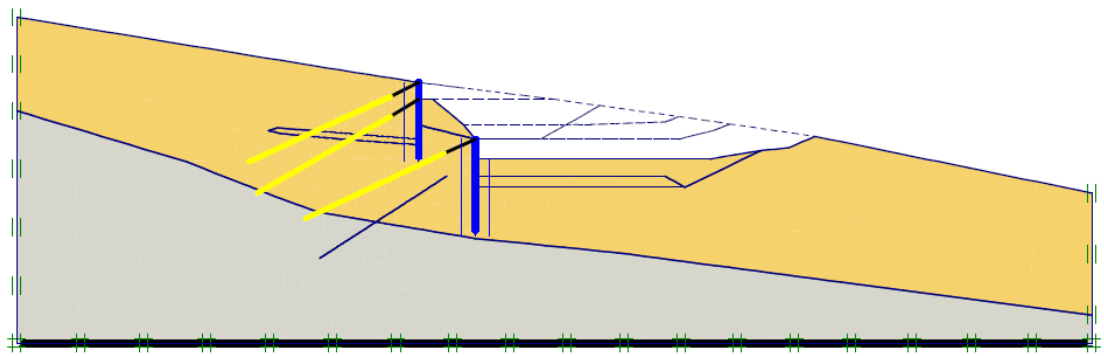
Στάδιο 7: Ενεργοποίηση κάτω πασσαλότοιχου



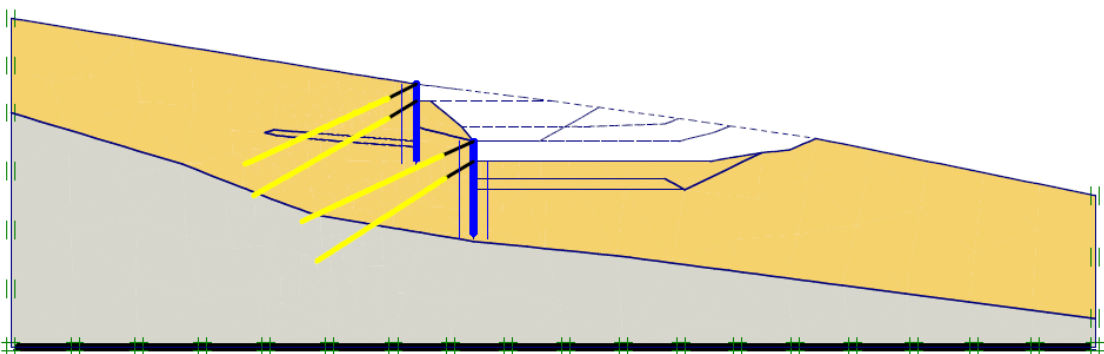
Στάδιο 8: Ενεργοποίηση και προένταση 1^{ης} σειράς αγκυρίων άνω πασσαλότοιχου



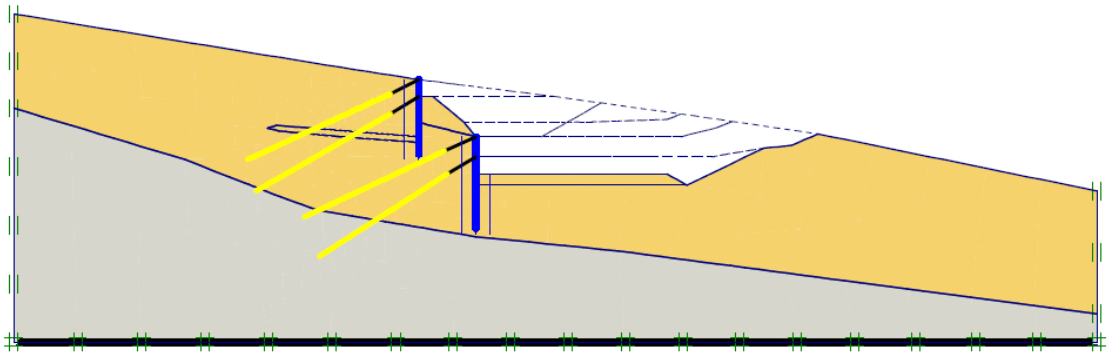
Στάδιο 9: Εκσκαφή μέχρι την 2^η σειρά αγκυρίων κάτω πασσαλότοιχου



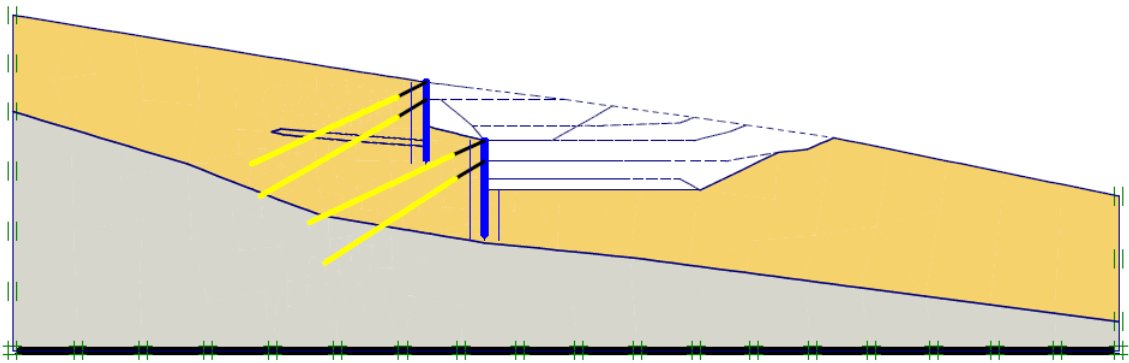
Στάδιο 10: Ενεργοποίηση και προένταση 2^{ης} σειράς αγκυρίων κάτω πασσαλότοιχου



Στάδιο 11: Εκσκαφή μέχρι το υψόμετρο της ερυθράς της οδού



Στάδιο 12: Εκσκαφή μέχρι τελικού βάθους, βάσης του επιχώματος της οδού.



Επιλεγμένα σημεία στον κάναβο πεπερασμένων στοιχείων για παρακολούθηση των μετακινήσεων

