



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

*«Ευστάθεια πρανών επιφανειακών εκμεταλλεύσεων στο στάδιο της
αποκατάστασης (πλήρωση της εκσκαφής με νερό)»*



ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ι. ΣΥΛΛΙΓΝΑΚΗΣ

Εξεταστική Επιτροπή

Εμμανουήλ Στειακάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής (Επιβλέπων)

Μιχαήλ Γαλετάκης, Καθηγητής

Ιωάννης Τσομπανάκης, Καθηγητής

Χανιά

Απρίλιος, 2022

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα, που περιέχονται σε αυτή την εργασία, εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν θα πρέπει να ερμηνευθούν ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος RAFF (Risk Assessment of Final Pits During Flooding) με την συγχρηματοδότηση του Research Fund for Coal and Steel (RFCS) No-847299-RAFF.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έχει ως στόχο τη διερεύνηση της ευστάθειας των πρανών της λίμνης Most που βρίσκεται στην Τσεχία περίπου 2 χιλιόμετρα βόρεια από την πόλη Most. Αυτό επιτυγχάνεται διερευνώντας τα γεωλογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών και προσομοιώνοντας την κινητική συμπεριφορά των πρανών της λίμνης με τη χρήση του λογισμικού (Plaxis 2D V20) πεπερασμένων στοιχείων (FEM).

Η αυξημένη ανάγκη για αξιοποίηση και αποκατάσταση των επιφανειακών εκμεταλλεύσεων μετά το πέρας της εκμετάλλευσης τους οδήγησε στην επιλογή του συγκεκριμένου θέματος.

Από τη θέση αυτή, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου διατριβής Αν. Καθηγητή Εμμανουήλ Στειακάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την υπομονή του, την πολύτιμη συνεισφορά του, τις κατευθυντήριες γραμμές και τα εκτενή και ουσιαστικά σχόλια του.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω και στους Καθηγητές Μιχ. Γαλετάκη και Ιωαν. Τσομπανάκη, τα δύο άλλα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της εργασίας μου, για τη διόρθωση και αξιολόγηση της εργασίας καθώς και για τις πολύ χρήσιμες υποδείξεις τους.

Ευχαριστώ επίσης τον Διονύση Βαβαδάκη για την αμέριστη βοήθεια του καθώς και τον χρόνο που αφιέρωσε για την εκφραστική διαμόρφωση του κειμένου της εργασίας μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που με στήριξαν υλικά και ηθικά καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησής μου καθώς και όλους τους συναδέλφους και καλούς μου φίλους για τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια οι περισσότερες επιφανειακές εκσκαφές (open pits) σε όλο τον κόσμο έχουν διαμορφωθεί σε λίμνες μετά το πέρας της εκμετάλλευσής τους. Η δημιουργία λιμνών αποτελεί πλέον τον πιο κοινό τρόπο αποκατάστασης των κενών (ορυγμάτων) που δημιουργούνται μετά την εκμετάλλευση. Οι λίμνες αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για ψυχαγωγικούς σκοπούς.

Αυτή η εργασία έχει σκοπό να μελετήσει την επίδραση της μεταβολής της στάθμης στην ευστάθεια των πρανών της λίμνης Most στη Τσεχία. Η επίδραση αυτή μελετάται μέσω πλήρως συζευμένων αναλύσεων ροής – παραμόρφωσης (fully Coupled flow deformation). Οι αναλύσεις αυτές λαμβάνουν υπόψη τους το υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten, που εκφράζει την ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί το νερό κυρίως στην ακόρεστη ζώνη και συνδυάζεται με τα ελαστοπλαστικά μοντέλα των εδαφικών υλικών. Οι μηχανικές παράμετροι που καθορίζουν την συμπεριφορά των σχηματισμών εκτιμήθηκαν από εργαστηριακές δοκιμές και δοκιμές πεδίου και πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της κινητικής συμπεριφοράς της λίμνης με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Plaxis V20.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η ευστάθεια των πρανών εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβολής της στάθμης του νερού της λίμνης, την περατότητα των εδαφικών σχηματισμών που επηρεάζονται και τον ρυθμό μεταβολής της στάθμης του νερού της λίμνης. Τα αποτελέσματα της εργασίας μπορεί να έχουν εφαρμογή και σε άλλες θέσεις, και μπορούν να αξιοποιηθούν για τον βέλτιστο σχεδιασμό της πλήρωσης και λειτουργίας λιμνών.

ABSTRACT

Nowadays, most open-pit excavations around the world after the exploitation are flooded with water and artificial lakes are created.

The creation of lakes is now the most common use of post exploitation voids. These lakes are mainly used for recreational purposes.

This thesis aims to study the effect of the water level changes on the stability of the slopes of Lake Most in Czech Republic. This effect is studied through fully coupled flow-deformation analyses. The analyses has taken into account the Van Genuchten hydraulic model that expresses the soil's ability to retain water mainly in the vandose zone and is combined with the elastic-plastic models of soil materials. The mechanical parameters that determine the behavior of the formations were determined by laboratory and field tests and the kinetic behavior of the slopes of the lake was simulated using the Plaxis 2D V16 finite element software.

The simulation results showed that the stability of the slopes depends on the magnitude of the water level variation, the permeability of the affected soil formations and the rate of the water level change of the lake. The results of the work can be applied in other places, and they can be used for the optimal design of the filling and operation of lakes.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	4
1.1. Γεωλογία – Γεωμορφολογία	4
1.2. Λιθοστρωματογραφία περιοχής μελέτης.....	7
1.3. Γεωτεχνικές έρευνες στην περιοχή της λίμνης Most	10
2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	14
2.1. Εργαστηριακή Τριαξονική δοκιμή	14
2.1.1. Εργαστηριακό σύστημα τριαξονικής φόρτισης	15
2.1.2. Διεξαγωγή των δοκιμών.....	17
2.1.3. Αποτελέσματα	22
2.2. Εργαστηριακή δοκιμή προσδιορισμού της ακαμψίας με τη μέθοδο των Bender Elements System (BES)	23
2.2.1. Μέθοδος πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (BES)	24
2.2.2. Εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων.....	41
2.2.3. Μετρήσεις - Αποτελέσματα	42
3. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ – ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ (ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΕΣ).....	45
3.1. Δοκιμή στατικής πενетроμέτρησης (CPT).....	45
3.1.1. Δοκιμή πιεζοκώνου (CPTU)	46
3.1.2. Ταξινόμηση εδάφους	49
3.1.3. Εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων σε εδάφη χωρίς συνοχή	54
3.1.4. Εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων σε συνεκτικά εδάφη.....	59
3.1.5. Εκτίμηση μοναδιαίου βάρους γ	64
3.1.6. Εκτίμηση διαπερατότητας k	65
3.1.7. Εκτίμηση συντελεστή πλευρικής ώθησης K_0	65
3.2. Επεξεργασία μετρήσεων CPTU στις αποθέσεις Strimice	66
3.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών και δοκιμής CPTU	74
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	77

4.1.	Προσομοίωση κινητικής συμπεριφοράς με πεπερασμένα στοιχεία (FEM)	77
4.2.	Καταστατικά μοντέλα συμπεριφοράς εδάφους.....	79
4.2.1.	Μοντέλο Mohr – Coulomb (MC).....	79
4.2.2.	Μοντέλο Hardening Soil (HS)	82
4.3.	Προσομοίωση της ροής του νερού και των παραμορφώσεων.....	87
4.3.1.	Μοντέλο πλήρους συζευγμένης ροής – παραμόρφωσης (Fully coupled flow – deformation).....	89
4.3.2.	Υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten.....	96
5.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ MOST	101
5.1.	Γεωμετρία	102
5.2.	Οριακές συνθήκες.....	105
5.3.	Αρχικές συνθήκες.....	105
5.4.	Εκτίμηση της κινητικής συμπεριφοράς των πρανών της λίμνης Most	106
5.5.	Αξιολόγηση επιτόπου μετρήσεων και σύγκριση με την προβλεπόμενη συμπεριφορά της προσομοίωσης κατά την πλήρωση	110
5.6.	Επιλύσεις.....	112
5.7.	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	114
5.7.1.	Υφιστάμενη κατάσταση της λίμνης Most (στάθμη +199 m).....	114
5.7.2.	Ταπείνωση της στάθμης κατά 5 και 10 m.....	114
5.7.3.	Διακύμανση της στάθμης ± 60 cm	120
5.7.4.	Ανύψωση της στάθμης κατά 5 και 10 m.....	123
5.7.5.	Ταπείνωση της στάθμης κατά 30 m.....	128
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	129
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	131
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Γεωλογικός χάρτης στην περιοχή της λίμνης Most (πηγή: RAFF, 2022).....	5
Σχήμα 1.2: Γεωμορφολογικός χάρτης λίμνης Most (πηγή: RAFF, 2022).	6
Σχήμα 1.3: Γεωγραφικός χάρτης λίμνης Most (πηγή: RAFF, 2022).....	6
Σχήμα 1.4: Σχηματική απεικόνιση της λιθοστρωματογραφίας της περιοχής μελέτης: 1) Μόνιμα πρηνή, 2) Αποθέσεις (RAFF, 2022).	9
Σχήμα 1.5: Θέσεις κλισιμέτρων στην περιοχή γύρω από τη λίμνη Most.	11
Σχήμα 1.6: Θέσεις εγκατάστασης πιεζομέτρων στη περιοχή γύρω από τη λίμνη Most. .	12
Σχήμα 1.7: Απεικόνιση των θέσεων εκτέλεσης των δοκιμών CPT.	13
Σχήμα 2.1: Χαρακτηριστικά εύρη προσδιορισμού εδαφικής ακαμψίας με εργαστηριακές δοκιμές (Atkinson, 1993).	24
Σχήμα 2.2: Κατεύθυνση κίνησης των σωματιδίων λόγω διαμήκων κυμάτων (P-waves) (GDS Instruments Ltd, 2013).	25
Σχήμα 2.3: Κατεύθυνση κίνησης των σωματιδίων λόγω διατμητικών κυμάτων (S-waves) (GDS Instruments Ltd, 2013).	26
Σχήμα 2.4: Συνδεσμολογία πομπού (αριστερή πλευρά) – δέκτη (δεξιά πλευρά) (GDS Instruments Ltd, 2013).	27
Σχήμα 2.5: Σχηματική διάταξη των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων για παραγωγή α) διατμητικών κυμάτων και β) διαμήκων κυμάτων (GDS Instruments Ltd, 2013).	27
Σχήμα 2.6: Τρόποι τοποθέτησης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στο δοκίμιο (GDS Instruments Ltd, 2013).	28
Σχήμα 2.7: Σχηματική απεικόνιση της δοκιμής Bender Elements (Karg, 2005).	29
Σχήμα 2.8: Δημιουργία και επίδραση του Near Field Effect (Lee and Santamarina, 2005).	30
Σχήμα 2.9: Απεικόνιση των σημάτων πομπού (κόκκινο) – δέκτη (πράσινο) ανάλογα με την τοποθέτηση των αισθητήρων Bender Elements (GDS Instruments Ltd, 2013).	31
Σχήμα 2.10: Εκτίμηση του χρόνου άφιξης διαμήκων κυμάτων χρησιμοποιώντας τετραγωνικό παλμό.	32

Σχήμα 2.11: Εκτίμηση του χρόνου άφιξης διαμήκων κυμάτων χρησιμοποιώντας την τεχνική αντιστροφής του ληφθέντος σήματος (Reversing Traces).....	33
Σχήμα 2.12: Αρχικά σημεία διέγερσης του σήματος του δέκτη (πηγή: Λαζαρόπουλος, 2013).....	33
Σχήμα 2.13: Απεικόνιση σημείων επιλογής χρόνου με την τεχνική peak to peak.	35
Σχήμα 2.14: Παράδειγμα εφαρμογής της τεχνικής Cross Correlation στα σήματα πομπού και δέκτη (Yamashita et al., 2003).....	36
Σχήμα 2.15: Σήματα πομπού και δέκτη (5 kHz) (Viggiani and Atkinson, 1995).	38
Σχήμα 2.16: Γραμμικό συχνοτικό ενεργειακό φάσμα σημάτων πομπού και δέκτη (αντίστοιχα) (Jovicic et al., 1996).....	38
Σχήμα 2.17: Πλάτος και φάση στο ενεργειακό φάσμα συνέλιξης των δυο σημάτων (Jovicic et al., 1996).	39
Σχήμα 2.18: Διάγραμμα αθροιστικής μεταβολής φάσης συναρτήσει της συχνότητας (Jovicic et al., 1996).	40
Σχήμα 3.1: Απεικόνιση των αισθητήρων μέτρησης της πίεσης των πόρων, του πιεζοκώνου (Robertson et al., 2010).....	48
Σχήμα 3.2: Προτεινόμενο σύστημα ταξινόμησης του εδάφους χρησιμοποιώντας δεδομένα από CPTu δοκιμές (Robertson et al., 1986).....	51
Σχήμα 3.3: Σύστημα ταξινόμησης για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του εδάφους χρησιμοποιώντας κανονικοποιημένες τιμές από CPT/CPTU δοκιμές (Robertson, 1990).	52
Σχήμα 3.4: Απεικόνιση ζωνών με βάση τον δείκτη Ic σε κανονικοποιημένες μετρήσεις (Robertson, 2009).....	53
Σχήμα 3.5: Εκτίμηση του μέτρου παραμόρφωσιμότητας από CPT δοκιμές σε άμμους (Robertson, 1986).....	57
Σχήμα 3.6: Θεωρητική σχέση για το G_0/q_c και το q_{c1} (Schnaid, 2009).	58
Σχήμα 3.7: Βαθμονόμηση συντελεστών N_k και N_{kt} για τον καθορισμό του c_u	60
Σχήμα 3.8: Κανονικοποιημένη τιμή μοναδιαίου βάρους σε σχέση με τον λόγο τριβής (Robertson and Cabal, 2010).....	64
Σχήμα 3.9: Απεικόνιση της αντίστασης κώνου q_c , της πλευρικής τριβής f_s και της πίεσης πόρων u_2 συναρτήσει του βάθους στη θέση P4/13.....	67

Σχήμα 3.10: Ταξινόμηση εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος στην θέση P4/13 (σύμφωνα με τη μέθοδο Jefferies and Davies, 1993).	68
Σχήμα 3.11: Ταξινόμηση εδάφους χρησιμοποιώντας τα κανονικοποιημένα δεδομένα από CPTU δοκιμές στη θέση P4/13 (μέθοδος Robertson, 1990).	70
Σχήμα 3.12: Ταξινόμηση εδάφους χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από CPT/CPTU δοκιμές στη θέση P4/13 (μέθοδος Robertson, 1986).	71
Σχήμα 3.13: Λιθοστρωματογραφία της απόθεσης Strimice.	72
Σχήμα 3.14: Μεταβολή των παραμέτρων V_s , G_{max} , E και C_u συναρτήσει του βάθους στη θέση P4/13	73
Σχήμα 4.1: Ελαστικό τέλεια πλαστικό μοντέλο Mohr Coulomb (Plaxis 2D, 2020b).	80
Σχήμα 4.2: Επιφάνεια διαρροής του μοντέλου Mohr Coulomb στο χώρο των κύριων τάσεων (Plaxis 2D, 2020b).	80
Σχήμα 4.3: Απεικόνιση των μέτρων δυσκαμψίας E_0 , E_{50} , E_{ur} για στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές (CD) (Plaxis 2D, 2020a).	81
Σχήμα 4.4: Απεικόνιση της υπερβολικής καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης κατά την τυπική στραγγιζόμενη τριαξονική δοκιμή (CD) (Plaxis 2D, 2020b).	83
Σχήμα 4.5: Απεικόνιση των περιβαλλουσών επιφανειών διαρροής (Plaxis 2D, 2020b). ..	85
Σχήμα 4.6: Απεικόνιση επιφανειών διαρροής για καθορισμό της ελαστικής περιοχής στο χώρο των $p - q$ τάσεων (Plaxis 2D, 2020b).	85
Σχήμα 4.7: Απεικόνιση της συνολικής επιφάνειας διαρροής του μοντέλου Hardening Soil στο χώρο των κύριων τάσεων (Plaxis 2D, 2020b).	86
Σχήμα 4.8: Μεταβολή της στάθμης της λίμνης: α) αργή μεταβολή της στάθμης, β) μεταβατική μεταβολή της στάθμης, γ) γρήγορη μεταβολή της στάθμης (López-Acosta, 2013).	88
Σχήμα 4.9: Κατανομή μύζησης με το βάθος μετά από σταθερή βροχόπτωση 8.1×10^{-7} m/s για χρονικά βήματα $\Delta t = 1, 2$ και 3 ημέρες (Συλλινγάκης κ.α., 2022).	97
Σχήμα 4.10: Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού (Galavi, 2010).	98
Σχήμα 4.11: Καμπύλη σχετικής διαπερατότητας σε συνάρτηση με τη μύζηση (Galavi, 2010).	100

Σχήμα 5.1: Γεωγραφικός χάρτης και αντιπροσωπευτική τομή για την εκτίμηση της ευστάθειας της λίμνης (RAFF, 2022).	102
Σχήμα 5.2: Τομή της γεωμετρίας – λιθοστρωματογραφίας της περιοχής μελέτης.	104
Σχήμα 5.3: Απεικόνιση του πλέγματος του μοντέλου της λίμνης Most.	105
Σχήμα 5.4: Απεικόνιση του αρχικού και τελικού σταδίου πλήρωσης της λίμνης.	106
Σχήμα 5.5: Μεταβολή των υπερπιέσεων πόρων Pexcess πριν και μετά την πλήρωση της λίμνης με νερό.	108
Σχήμα 5.6: Μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων ux πριν και μετά την πλήρωση της λίμνης με νερό.	109
Σχήμα 5.7: Απεικόνιση της θέσης του πιεζομέτρου MPT 5/2 και του κλισιόμετρου IMV 5/2 στην τομή που μελετάται στην λίμνη Most.	110
Σχήμα 5.8: Απεικόνιση οριζόντιων μετακινήσεων Ux που προκύπτουν από το κλισίμετρο IMV 5/2 και την προσομοίωση.	111
Σχήμα 5.9: Απεικόνιση της μεταβολής της πίεσης του νερού των πόρων από το πιεζόμετρο MPT 5/2 και την προσομοίωση.	112
Σχήμα 5.10: Απεικόνιση των αρχικών συνθηκών του μοντέλου στην υφιστάμενη κατάσταση της λίμνης Most (στάθμη +199 m).	114
Σχήμα 5.11: Συσχέτιση του ρυθμού πτώσης με τον συντελεστή ασφάλειας και την μύζηση. α) Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με την αύξηση του ρυθμού πτώσης της στάθμης της λίμνης, β) Μεταβολή της μύζησης με την αύξηση του ρυθμού πτώσης της στάθμης της λίμνης.	115
Σχήμα 5.12: Απεικόνιση των αυξητικών παραμορφώσεων στην φάση υπολογισμού της ευστάθειας της λίμνης Most (επισφαλής ζώνη αστοχίας).	116
Σχήμα 5.13: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας συναρτήσει των συνολικών μετακινήσεων U σε κόμβο κοντά στο πρανές.	116
Σχήμα 5.14: Απεικόνιση των υπερβολικών πιέσεων πόρων rexcess σε πτώση στάθμης 5 m. α) υπερπιέσεις πόρων σε ρυθμό πτώσης 0.003 cm/day, β) υπερπιέσεις πόρων σε ρυθμό πτώσης 2040 cm/day.	118
Σχήμα 5.15: Απεικόνιση των μετακινήσεων συναρτήσει του ρυθμού πτώσης της στάθμης της λίμνης στην θέση του κλισιόμετρου IMV 5/2. α) Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων της απόθεσης Strimice σε σχέση με τον ρυθμό πτώσης, β) Μεταβολή των	

οριζόντιων μετατοπίσεων στα μόνιμα πρανή σε σχέση με τον ρυθμό πτώσης (η θετική τιμή σημαίνει κίνηση προς την λίμνη), γ) Μεταβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων στην απόθεση Strimice σε σχέση με τον ρυθμό πτώσης (η αρνητική τιμή σημαίνει κίνηση προς την λίμνη).....	119
Σχήμα 5.16: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με την διακύμανση της στάθμης ± 60 cm με διαφορετικούς ρυθμούς και συγκεκριμένο αριθμό διακυμάνσεων (2, 32 και 128) (ανοικτές οριακές συνθήκες).	120
Σχήμα 5.17: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με την διακύμανση της στάθμης ± 60 cm με διαφορετικούς ρυθμούς και συγκεκριμένο αριθμό διακυμάνσεων (2, 32 και 128) (Κλειστές Οριακές συνθήκες).	121
Σχήμα 5.18: Απεικόνιση κατακόρυφων μετακινήσεων u_y με την διακύμανση της στάθμης ± 60 cm. α) κατακόρυφες μετακινήσεις u_y σε ρυθμό πτώσης 0.003 cm/day, β) κατακόρυφες μετακινήσεις u_y σε ρυθμό πτώσης 2040 cm/day.	122
Σχήμα 5.19: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας συναρτήσει των συνολικών μετακινήσεων U σε κόμβο κοντά στο πρανές.....	123
Σχήμα 5.20: Συσχέτιση του ρυθμού αύξησης της στάθμης της λίμνης με τον συντελεστή ασφάλειας και την μύζηση. α) Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με την αύξηση του ρυθμού, β) Μεταβολή της μύζησης με την αύξηση του ρυθμού.	124
Σχήμα 5.21: Απεικόνιση των υπερπιέσεων πόρων p_{excess} . α) υπερπιέσεις πόρων σε ρυθμό αύξησης 0.003 cm/day, β) υπερπιέσεις πόρων σε ρυθμό αύξησης 2040 cm/day.	125
Σχήμα 5.22: Μετακινήσεις συναρτήσει του ρυθμού αύξησης της στάθμης της λίμνης στην θέση του κλισιμέτρου IMV 5/2. α) Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων της απόθεσης Strimice σε σχέση με τον ρυθμό αύξησης, β) Μεταβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων στην απόθεση Strimice σε σχέση με τον ρυθμό αύξησης (η θετική τιμή σημαίνει κίνηση προς τα πρανή), γ) Μεταβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων στα μόνιμα πρανή σε σχέση με τον ρυθμό αύξησης (η αρνητική τιμή σημαίνει κίνηση προς τα πρανή).....	127
Σχήμα 5.23: Απεικόνιση των αυξητικών παραμορφώσεων στην φάση ευστάθειας (οριακή κατάσταση αστοχίας).....	128

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής.	22
Πίνακας 2.2: Γεωτεχνικές παράμετροι των δειγμάτων του σχηματισμού NS – TV1 στην φυσική του υγρασία.	43
Πίνακας 2.3: Γεωτεχνικές παράμετροι των δειγμάτων του σχηματισμού NS – TV1 μετά τον κορεσμό και την εφαρμογή των επί τόπου τάσεων.	43
Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση εδάφους κατά (Jefferies and Davies, 1993).	53
Πίνακας 3.2: Περατότητα από CPT αποτελέσματα (Robertson and Cabal, 2010)	65
Πίνακας 3.3: Συγκεντρωτικός πίνακας με την μέση αριθμητική τιμή των γεωτεχνικών παραμέτρων για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες NS – TV1 και TV2.	72
Πίνακας 3.4: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωτεχνικών παραμέτρων για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες NS – TV1 και TV2 συναρτήσει του βάθους.	74
Πίνακας 3.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ τριαξονικής δοκιμής και δοκιμής στατικής πενетроμέτρησης (CPT), στην τεχνικογεωλογική ενότητα NS – TV1.	74
Πίνακας 3.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ CPT και Bender Elements πριν τον κορεσμό, στην τεχνικογεωλογική ενότητα NS – TV1.	75
Πίνακας 3.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ CPT και Bender Elements μετά τον κορεσμό, στην τεχνικογεωλογική ενότητα NS – TV1.	75
Πίνακας 5.1: Γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της εκσκαφής.	103
Πίνακας 5.2: Φάσεις προσομοίωσης της ανύψωσης της στάθμης της λίμνης Most.	107
Πίνακας 5.3: Φάσεις υπολογισμού για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της λίμνης Most.	113

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετά την ολοκλήρωση μιας επιφανειακής εξορυκτικής δραστηριότητας, η αποκατάσταση των ανοικτών εκσκαφών προκαλεί μεγάλο προβληματισμό. Η δημιουργία λιμνών είναι συνήθως μια αισθητικά ελκυστική και πρακτική λύση, εάν προγραμματιστεί και υλοποιηθεί σωστά με κύριο σκοπό την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού κινδύνου.

Οι διαστάσεις και το βάθος των λιμνών αυτών ποικίλλει ανάλογα με την έκταση της επιφανειακής εκσκαφής. Συχνά θεωρούνται ως πολύ μικρές λεκάνες απορροής με μοναδικά χαρακτηριστικά. Το τελικό βάθος της λίμνης συνδέεται στενά με την ισορροπία μεταξύ εισροών και εκροών και ο χρόνος σταθεροποίησης της στάθμης μπορεί να κυμαίνεται από μερικά χρόνια έως πολλές δεκαετίες.

Η διερεύνηση της βιωσιμότητας των λιμνών σε περιοχές μετά από εξόρυξη είναι ένα σημαντικό ερευνητικό πρόβλημα, καθώς αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την ποιότητα του νερού τους. Ο ρόλος των γεωλογικών, υδρογεωλογικών, υδρολογικών και γεωχημικών συνθηκών στις περιοχές εξόρυξης είναι πολύ σημαντικός στην πρόβλεψη της χημείας των υδάτων, την εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών και κατ' επέκταση της βιωσιμότητας των λιμνών. Όλοι αυτοί οι παράγοντες θα πρέπει να αναλυθούν σε σχέση με τις κλιματικές αλλαγές.

Πολλά από τα φαινόμενα αστάθειας πρανών (π.χ. λιμνών, φραγμάτων κ.α.) που έχουν καταγραφεί οφείλονται κυρίως στην μεταβολή της στάθμης λόγω κλιματολογικών ή ανθρωπογενών συνθηκών. Οι κλιματολογικοί παράγοντες όπως η βροχόπτωση, η εξατμισοδιαπνοή και η απορροή έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ευστάθεια των πρανών (Josifoski and Lenart, 2016). Επιπλέον η διακύμανση της στάθμης, ο ρυθμός μεταβολής της και η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους αποτελούν μερικούς από τους κυρίαρχους παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα την σταθερότητα των πρανών. (Xia, 2014).

Η εργασία αυτή έχει σκοπό:

- να προσδιορίσει τις γεωτεχνικές παραμέτρους των εδαφικών σχηματισμών των πρανών της απόθεσης Strimice που διαμορφώνουν τα όρια της λίμνης Most, η οποία αναπτύσσεται στο πλαίσιο περιβαλλοντικής αποκατάστασης της περιοχής.
- να μελετήσει την επίδραση της μεταβολής της στάθμης της λίμνης στην ευστάθεια των πρανών,
- να εκτιμήσει το πιθανό μηχανισμό αστοχίας κάτω από την επίδραση της μεταβολής της στάθμης της λίμνης.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων προσδιορίσθηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι των εδαφικών σχηματισμών των πρανών της λίμνης αξιολογώντας επί τόπου δοκιμές (CPTU) που είχαν πραγματοποιηθεί στην περιοχή μελέτης και πραγματοποιώντας εργαστηριακές δοκιμές σε αδιατάρακτα δείγματα που προέρχονται από την περιοχή μελέτης.

Με βάση την δομή της εργασίας αρχικά αναφέρονται γενικές πληροφορίες για την εξορυκτική δραστηριότητα στην περιοχή της πόλης Most (Τσεχία) και η γεωμορφολογία – γεωλογία – λιθοστρωματογραφία της ευρύτερης περιοχής καθώς και η περιγραφή των γεωερευνητικών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν στη περιοχή μελέτης (κεφάλαιο 1).

Στην συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των εργαστηριακών δοκιμών σε αδιατάρακτα δοκίμια με σκοπό την διερεύνηση των γεωτεχνικών παραμέτρων των εδαφικών σχηματισμών των πρανών του αναχώματος Strimice της λίμνης Most (κεφάλαιο 2).

Ακολουθεί η αξιολόγηση των δεδομένων από τις επί τόπου δοκιμές πιεζοκώννου (CPTU). Από τις δοκιμές αυτές εκτιμήθηκε η λιθοστρωματογραφία του αναχώματος Strimice και εκτιμήθηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι των εδαφικών σχηματισμών με τη χρήση εμπειρικών τύπων. Τα αποτελέσματα CPTU συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών και προσδιορίσθηκαν οι αντιπροσωπευτικές τιμές παραμέτρων για κάθε ορίζοντα (κεφάλαιο 3).

Στο πλαίσιο προσομοίωσης της κινητικής συμπεριφοράς των πρανών της λίμνης, αναλύθηκαν τα κυριότερα καταστατικά μοντέλα που περιγράφουν τις σχέσεις τάσης –

παραμόρφωσης των εδαφικών σχηματισμών καθώς και το μοντέλο Van Genuchten που χρησιμοποιεί την χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους (SWCC). Επιπλέον αναφέρεται ένας τύπος ανάλυσης (Fully Coupled flow deformation), που εξετάζει την επίδραση της κίνησης του νερού στο έδαφος μέσω πλήρως συνδυασμένων αναλύσεων ροής – παραμόρφωσης (κεφάλαιο 4).

Με την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης, εξετάσθηκε η επίδραση της μεταβολής της στάθμης στην ευστάθεια των πρανών της λίμνης. Σκοπός της προσομοίωσης ήταν ο προσδιορισμός του μηχανισμού αστοχίας των πρανών της λίμνης κάτω από διαφορετικούς ρυθμούς μεταβολής της στάθμης (κεφάλαιο 5).

1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η εργασία εξετάζει την ευστάθεια των πρανών της λίμνης Most που βρίσκεται στην Τσεχία περίπου 2 χιλιόμετρα βόρεια από την πόλη Most.

Η εκμετάλλευση του άνθρακα στην περιοχή άρχισε με υπόγειες μεθόδους εξόρυξης και συνδέθηκε με τη βιομηχανική ανάπτυξη της πόλης Most. Μετά το 1948 υπήρξε μια ταχεία ανάπτυξη της εξορυκτικής δραστηριότητας με τη μορφή υπαίθριων ορυχείων.

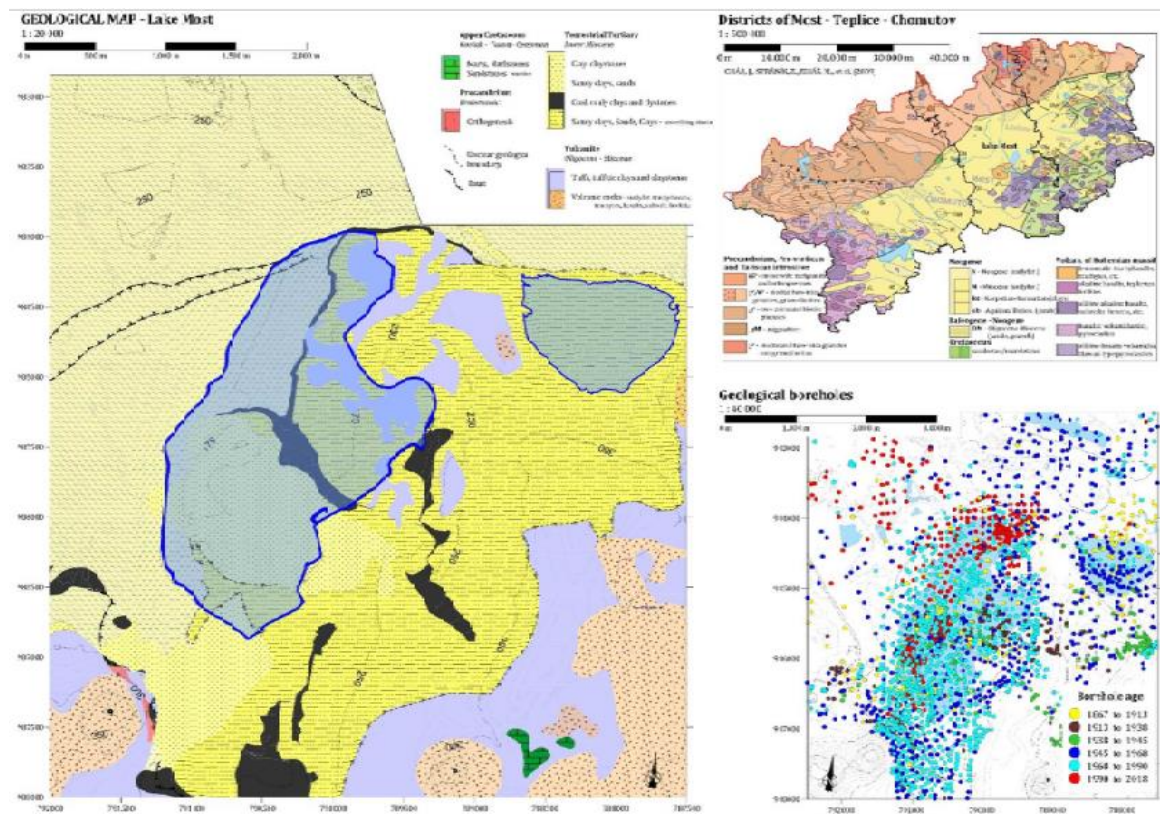
Η λίμνη Most σχηματίστηκε στην εκσκαφή που διαμορφώθηκε λόγω της εξόρυξης του μεγάλου ορυχείου Most – Lekazy και τα μικρά ορυχεία Richard, Bedřich, Evžen - Ležáky II, Jan, Segen Gottes, Mariahilf (RAFF, 2022).

Το νερό της λίμνης προέρχεται από το φράγμα Nechranice που μεταφέρεται στην λίμνη μέσω ενός αγωγού με συνολικό μήκος 4.9 km και παροχής $0.6 - 1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Μέρος του νερού της λίμνης προέρχεται από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και από πηγές στα πρανή του ορυχείου.

Η επιφάνεια της λίμνης είναι 309.09 εκτάρια και έχει χωρητικότητα περίπου $70.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ νερού. Η περίμετρος της λίμνης είναι περίπου 8.9 km. Η στάθμη της λίμνης διαμορφώνεται στα +199 m με μια διακύμανση της στάθμης σε ένα εύρος $\pm 60 \text{ cm}$.

1.1. Γεωλογία – Γεωμορφολογία

Η λίμνη Most αποτελεί μέρος ιζηματογενούς λεκάνης του Τριτογενούς. Περισσότερο από 500 m οργανικής ύλης, αργίλου και άμμου έχουν συσσωρευτεί στη βάση αυτής της λεκάνης. Κάτω από αυτά τα υλικά υπάρχει μια στρώση υποκάστανου άνθρακα έχει αναπτυχθεί στο μεγαλύτερο μέρος της ιζηματογενούς λεκάνης του Τριτογενούς που σχηματίζεται από στρώματα τύρφης. Τα υπερκείμενα εδάφη είναι κυρίως άργιλος, αμμοχάλικο ή ακόμα και χαλίκι και αποτελούν τα Τεταρτογενή ιζήματα της περιοχής (βλέπε Σχήμα 1.1) (RAFF, 2022).



Σχήμα 1.1: Γεωλογικός χάρτης στην περιοχή της λίμνης Most (πηγή: RAFF, 2022).

Οι όχθες της λίμνης διαμορφώνονται σε πρανή από αποθέσεις (εδάφη απόρριψης) που προέρχονται από την εξορυκτική δραστηριότητα ή τροποποιημένες βαθμίδες υπερκειμένων σχηματισμών. Οι εδαφικές αποθέσεις εντοπίζονται κυρίως στις νότιες και ανατολικές πλαγιές της λίμνης (Σχήμα 1.2).

Στην περιοχή κάτω από το λόφο Hněvín (όπου υπάρχει η τεχνητή κοίτη του ποταμού Bílina) έχει διαμορφωθεί μια απόθεση με 1.200 m μήκος, 250 m πλάτος και 15 m ύψος (Σχήμα 1.3). Η απόθεση αυτή διαχωρίζει μορφολογικά και υδρολογικά την κοίτη του ποταμού Bílina από την υπόλοιπη εκσκαφή της λίμνης Most (RAFF, 2022).

Οι νότιες πλαγιές της λίμνης σχηματίζονται από εσωτερικές αποθέσεις του ορυχείου Most (Lekazy – Most dump) έχουν γενική κλίση 5-10° προς τον Βορρά. Οι επιμέρους βαθμίδες έχουν κλίση έως 2°, ύψος 10 - 15 m και χαρακτηρίζονται ως ελαφρώς κεκλιμένες.

Σε μια μεγάλη περιοχή της απόθεσης η κλίση γίνεται πιο ομαλή, δημιουργώντας μια επίπεδη έκταση σε υψόμετρο +250 m, στην οποία βρίσκεται η βιομηχανική περιοχή RICO και ο καθεδρικός ναός της Κοίμησης της Θεοτόκου Μαρίας (RAFF, 2022).

Πιο ανατολικά προς την κατεύθυνση της απόθεσης Rudolice συνεχίζεται η απόθεση της λίμνης Most σε υψόμετρο +290 m (Σχήμα 1.3). Η κλίση του πρανούς έχει νότιο προσανατολισμό με γενική κλίση 1: 17 (5°).

Η ανατολική ακτή της λίμνης Most σχηματίζεται από τα εδάφη της απόθεσης Střimická (Střimická dump).

Βόρειο ανατολικά της απόθεσης Střimická έχει κατασκευαστεί η απόθεση Paridla (Paridla dump). Η απόθεση αυτή έχει γενική κλίση πρανών 1: 3 έως 1: 5 και είναι γενικά σταθερή αλλά επιρρεπής σε επιφανειακή διάβρωση (RAFF, 2022).

Οι βόρειες πλαγιές της λίμνης σχηματίζονται από ένα και μόνο εδαφικό υλικό και αποτελούν την απόθεση Konobřže (Konobřže dump). Η απόθεση αυτή κατασκευάστηκε μεταξύ 1997-1999 σε τρία επίπεδα απόθεσης. Ο κύριος στόχος ήταν να περιοριστεί η πιθανή διαρροή νερού από τη Λίμνη Venuše μέσω των αποθέσεων της άμμου και χαλικιού του Τεταρτογενούς που εμφανίζονται στη θέση αυτή.

Η γενική κλίση του πρανούς με προσανατολισμό προς τα νοτιοδυτικά, είναι 1:8.7 ενώ η απόθεση Konobřžská έχει πιο απότομη κλίση 1: 5.7 (RAFF, 2022). Η γενική κλίση των βορειοδυτικών πρανών (μόνιμα πρανή) φτάνει το 1: 4.7.

1.2. Λιθοστρωματογραφία περιοχής μελέτης

Οι διαφορετικές τεχνικογεωλογικές ενότητες που καθορίστηκαν στην περιοχή μελέτης λαμβάνοντας υπόψη την λιθοστρωματογραφία περιοχής (Σχήμα 1.4), είναι οι εξής (RAFF, 2022):

Μόνιμα Πρανή

Τεταρτογενή ιζήματα: Πρόκειται για ιζήματα που αποτελούνται κυρίως από άργιλο, χαλίκια, αμμοχάλικο και λίθους. Το πάχος τους είναι αρκετά μεγάλο σε κάποιες περιοχές. Τα χαλίκια και τα αμμοχάλικα αποτελούν τις αλλουβιακές αποθέσεις.

Jil1: Πρόκειται για καολίνη - ιλιτικούς αργιλολίθους και άργιλους υψηλής πλαστικότητας δηλαδή εδάφη F7 (MH) έως F8 (CH) με δείκτη πλαστικότητας $PI = 40$. Στο στρώμα αυτό υπάρχει έντονη στρώση με κλίση και παρουσία μεγάλων και μικρών ρωγμών. Τα εδάφη του γεωτεχνικού τύπου Jil1 αποτελούν το κυρίαρχο τμήμα των βόρειων και δυτικών πρανών της λίμνης.

Jil2: Πρόκειται για αργίλους με δείκτη πλαστικότητας $PI=40$. Χαρακτηρίζονται ως F7 (MH) – F8 (CH) με χαρακτήρα ημίβραχου. Η συνοχή τους αυξάνει με το βάθος. Ο σχηματισμός αυτός συχνά καλύπτεται από εδαφικά υλικά (αποθέσεις) της εκμετάλλευσης δημιουργώντας μια επιφάνεια αδυναμίας.

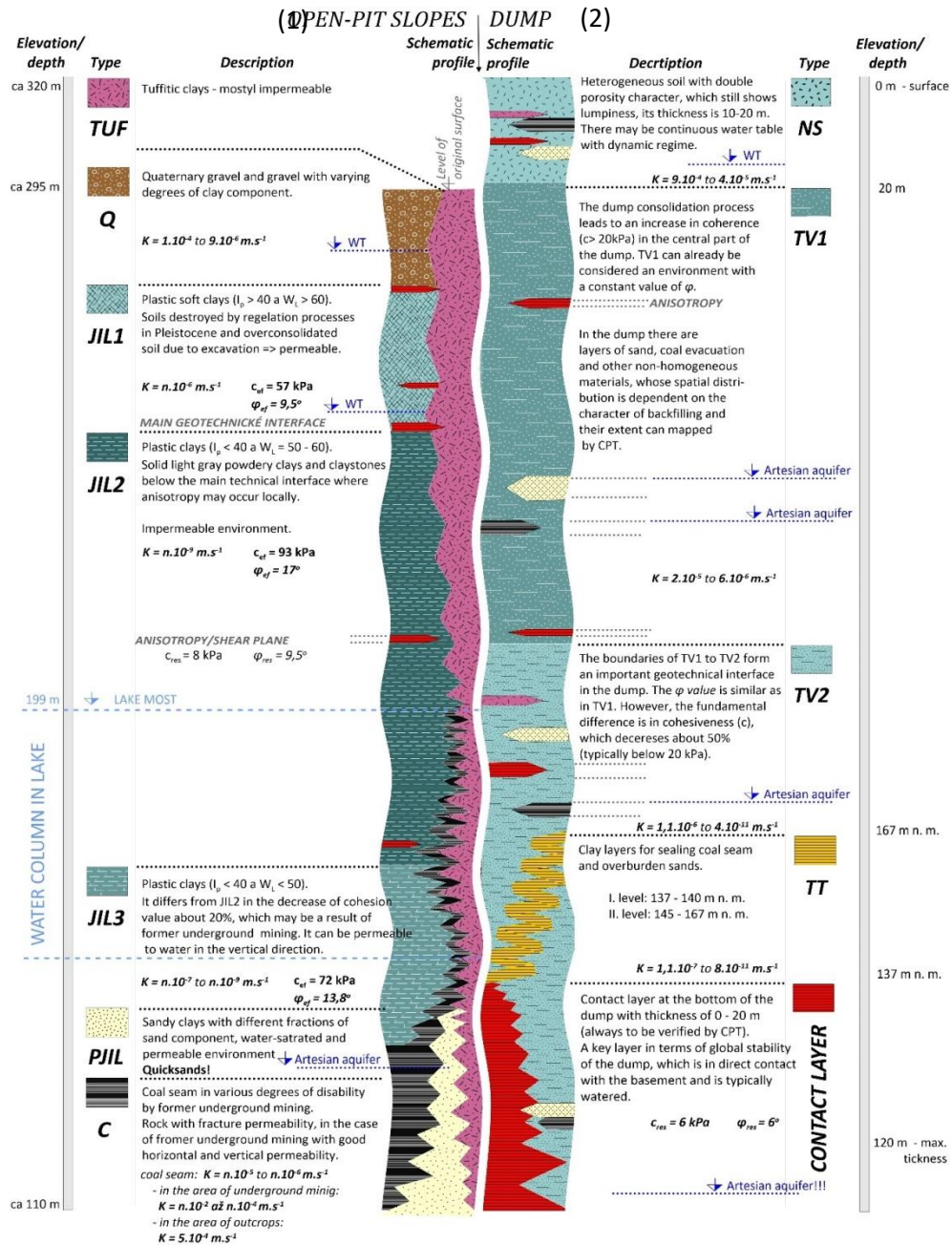
Jil3: Πρόκειται για αργίλους που εμφανίζονται σε βάθος 80 - 120 μ. πάνω από την στρώση άνθρακα. Διαφοροποιούνται από τους υπόλοιπους αργιλικούς σχηματισμούς λόγω της μειωμένης διατμητικής αντοχής κατά περίπου 20%. Έχουν πάχος συνήθως 20 μέτρα. Ο jil 3 είναι ένας γεωτεχνικός τύπος που εμφανίζεται σε ελάχιστη έκταση κάτω από την επιφάνεια της λίμνης χωρίς να εντοπίζεται σε κανένα πρανές.

Pjil: Πρόκειται για αμμώδεις αργίλους και αργιλικούς σχηματισμούς της εποχής του Μειοκαίνου με λεπτές στρώσεις άνθρακα. Ο σχηματισμός αναπτύσσεται προς την επιφάνεια στην περιοχή κοντά στο λόφο Κοϊτζί και τον λόφο Ηνένι διαμορφώνοντας το πρανές της λίμνης. Στον σχηματισμό αυτόν δημιουργείται αρτεσιανός υδροφόρας.

Αποθέσεις

NS - TV1: Πρόκειται για την ανώτερη απόθεση υλικών και θεωρείται γενικά ως σταθερός χαλαρός σχηματισμός ο οποίος δεν επηρεάζεται από κλιματικούς παράγοντες. Βρίσκεται σε ένα στάδιο στερεοποίησης και μπορεί να ληφθεί υπόψη ως αδιαπέρατος σχηματισμός. Σε γενικές γραμμές η απόθεση TV1 στις λεκάνες Most και Sokolon μπορεί να χαρακτηριστεί από αύξηση της συνοχής με το βάθος.

MAIN GEOTECHNICAL UNITS AND SOIL TYPES



Σχήμα 1.4: Σχηματική απεικόνιση της λιθοστρωματογραφίας της περιοχής μελέτης: 1) Μόνιμα πρανή, 2) Αποθέσεις (RAFF, 2022).

TV2: Οι δύο αποθέσεις των NS - TV1 και TV2 παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές της εσωτερικής γωνίας τριβής αλλά το TV2 παρουσιάζει σημαντικά μειωμένη τιμή της συνοχής. Οι τιμές της συνοχής εκτιμώνται με τη μέθοδο CPT. Το πάχος του ομοιόμορφου σχηματισμού NS - TV1 και του TV2 διαφοροποιείται από εμφανίσεις ετερογενών υλικών, στις οποίες μπορεί να αναπτύσσονται υδροφορείς.

Contact Layer: Πρόκειται για στρώση με χαλαρό υλικό στην περιοχή των αποθέσεων ή για ζώνη αδυναμίας στην πλευρά των μόνιμων πρανών. Αυτό οδηγεί στην μείωση της αντοχής των υπερκείμενων σχηματισμών στο μέγεθος της παραμένουσας αντοχής των υπερκείμενων σχηματισμών.

Υπόβαθρο

Coal Seam Strata: Πρόκειται για στρώματα γαιάνθρακα με διαφορετικό βαθμό κερματισμού που οφείλεται στην υπόγεια εξόρυξη που προηγήθηκε της επιφανειακής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πολύ καλής οριζόντιας και κατακόρυφης διαπερατότητας.

Τριτογενείς ηφαιστειακοί βράχοι: Παρουσιάζονται συχνότερα με μορφή αργίλων από τόφφων. Οι ηφαιστειακοί βράχοι εμφανίζονται βαθύτερα και έχουν το χαρακτήρα βράχου έως ημίβραχου με πιθανή μεγάλη διαπερατότητα λόγω ρωγμών. Οι αργιλικοί τόφφοι εμφανίζονται στο υπόβαθρο της λίμνης. Αποτελούν μεγάλο μέρος του πρανούς της λίμνης στο λόφο Κοϊσί.

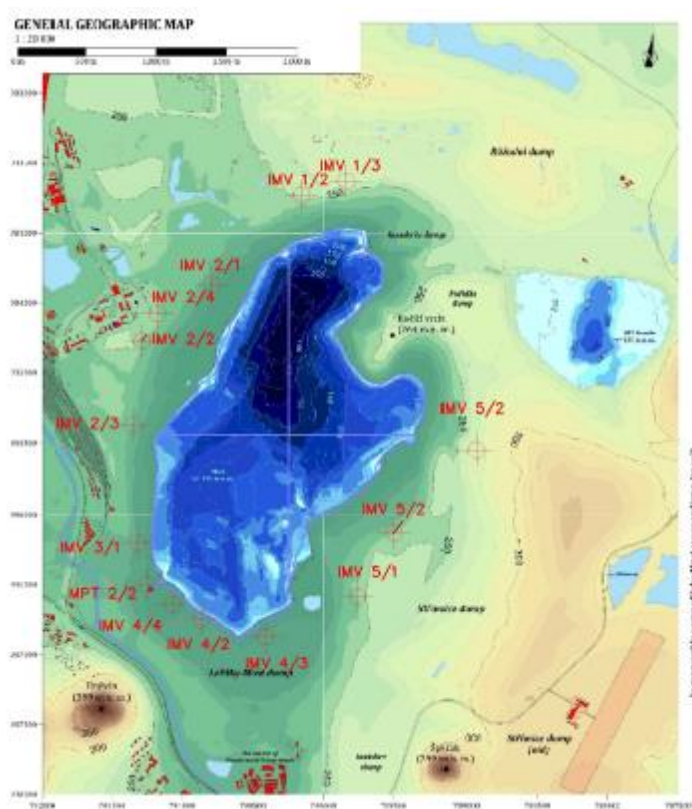
Κρητιδικό: Ο σχηματισμός αποτελείται από υπολείμματα κρητιδικών ιζημάτων (π.χ. μάργα, αργιλική μάργα) και ασβεστόλιθο. Αυτά τα ιζήματα έχουν σημαντικό πάχος (δεκάδες μέτρων) και εμφανίζονται στα ανατολικά και βόρεια τμήματα της περιοχής μελέτης (προς το ορυχείο Bílina).

Πρωτοζωικό: Το υπόβαθρο αποτελείται από Βιοτιτικό – Μοσχοβιτικό γνεύσιο. Εξαίρεση αποτελούν οι ανατολικές και νοτιοανατολικές πλαγιές του λόφου Hněvín, όπου ένα τεράστιο τμήμα του σχηματισμού καλύπτει υπερκείμενους σχηματισμούς που αποτέθηκαν κατά τη διάρκεια έντονης ηφαιστειακής δραστηριότητας.

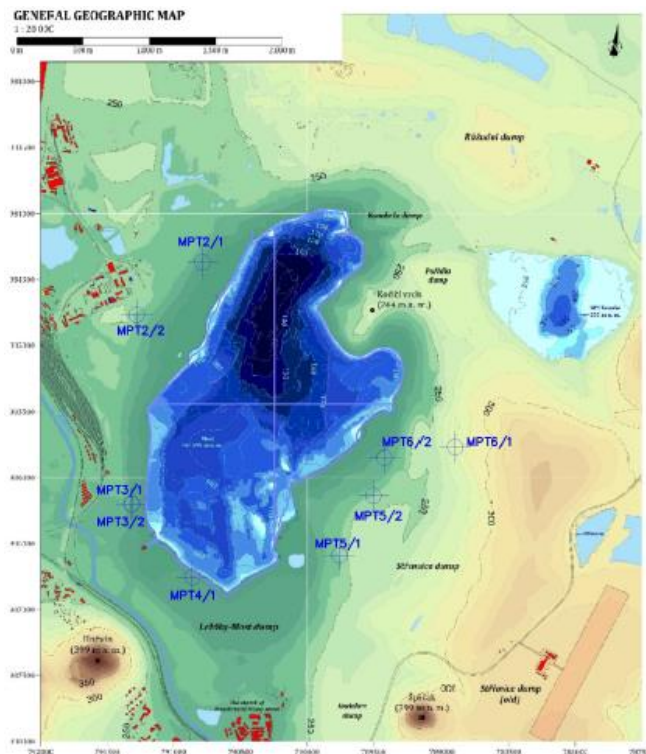
1.3. Γεωτεχνικές έρευνες στην περιοχή της λίμνης Most

Στη περιοχή της λίμνης Most εκτελέστηκαν γεωερευνητικά προγράμματα για την διερεύνηση των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή.

Επιπλέον στην περιοχή έγινε εγκατάσταση 14 κλισιμέτρων (σημείων ελέγχου) σε γεωτρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί στις όχθες της λίμνης Most για τον έλεγχο της κινητικότητας των πρανών της (βλέπε Σχήμα 1.5).



Επίσης, μετρήσεις της πίεσης των πόρων πραγματοποιήθηκαν σε διάφορα βάθη με την εγκατάσταση πιεζόμετρων σε επιλεγμένες γεωτρήσεις (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6: Θέσεις εγκατάστασης πιεζομέτρων στη περιοχή γύρω από τη λίμνη Most.

Στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές Στατικής Πενетроμέτρησης (CPT). Η δοκιμή αυτή εφαρμόζεται σε περιοχές όπου εμφανίζονται μαλακά και συμπιεσμένα εδάφη. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε κυρίως στην περιοχή της απόθεσης Strimice. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν συνολικά 31 δοκιμές CPT συνολικού μήκους 1065.5 m (βλέπε Σχήμα 1.6) καθώς και 14 δοκιμές εκτόνωσης της πίεσης των πόρων (dissipation test) σε επιλεγμένες θέσεις και βάθη.

Τα εδαφικά δείγματα προέρχονται από γεωτρήσεις δειγματοληψίας που πραγματοποιήθηκαν στην τοποθεσία του ορυχείου CSA και της απόθεσης Slatinice με ιδιότητες παρόμοιες με αυτές της απόθεσης Strimice (VUCHU) (συνολικά ελήφθησαν 13 δείγματα πυρήνα).

2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Η διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών της απόθεσης Strimice (π.χ. αντοχή ανάλογα με την περιεχόμενη υγρασία κ.α.) πραγματοποιήθηκε με την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών (τριαξονικές δοκιμές, δοκιμές με την μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (BES)) σε αδιατάρακτα δείγματα.

2.1. Εργαστηριακή Τριαξονική δοκιμή

Η εργαστηριακή τριαξονική δοκιμή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής (συνοχή c και εσωτερική γωνία τριβής ϕ), της ακαμψίας E , του λόγου Poisson ν , το μέτρο διάτμησης G και το μέτρο μεταβολής του όγκου K).

Υπάρχουν δύο συσκευές τριαξονικής δοκιμής:

1) Συμβατική τριαξονική συσκευή

2) Υδραυλική τριαξονική συσκευή

Στη συμβατική τριαξονική δοκιμή το δοκίμιο τοποθετείται σε μια κυψέλη και μέσω ενός πλαισίου φόρτισης επιβάλλεται σταθερός ρυθμός μετατόπισης σ' ένα έμβολο που φορτίζει το δοκίμιο. Ωστόσο με τη τεχνική αυτή προκύπτουν σφάλματα που οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι δεν εφαρμόζουν ελεγχόμενες αξονικές τάσεις και παραμορφώσεις στο δοκίμιο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται μόνο για τη διερεύνηση βασικών χαρακτηριστικών παραμόρφωσης του εδάφους (Στειακάκης, 2003).

Σε αντίθεση η υδραυλική τριαξονική συσκευή είναι πιο αξιόπιστη καθώς η αξονική φόρτιση του δοκιμίου εφαρμόζεται μέσω μιας υδραυλικής διάταξης. Η αξονική φόρτιση εφαρμόζεται μέσω ενός εμβόλου που είναι σε συναρμογή με την κατώτερη πλάκα φόρτισης του δοκιμίου. Με αυτόν τον τρόπο η φόρτιση επιβάλλεται υδραυλικά με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης και με δυνατότητα αλλαγής της φόρτισης με ελεγχόμενη τάση. Η συσκευή αυτή έχει τη δυνατότητα α) εφαρμογής ομοιόμορφων τάσεων και παραμορφώσεων στο δοκίμιο (ελαχιστοποιώντας σφάλματα που μπορεί να

προκύψουν λόγω κάμψης και τριβών στις επαφές του δοκιμίου), β) ελέγχου της στράγγισης του δοκιμίου και γ) μέτρησης της πίεσης των πόρων. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής του φορτίου είτε με ελεγχόμενη τάση είτε με ελεγχόμενη παραμόρφωση επί του δοκιμίου καθώς και η πραγματοποίηση συγκεκριμένων τασικών διαδρομών ανάλογα με τις τασικές συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο.

2.1.1. Εργαστηριακό σύστημα τριαξονικής φόρτισης

Οι τριαξονικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο εφαρμοσμένης Γεωλογίας σ' ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα υδραυλικής τριαξονικής φόρτισης (βλέπε Εικόνες 2.1 και 2.2). Το σύστημα αυτό αποτελείται από (Στειακάκης, 2003):

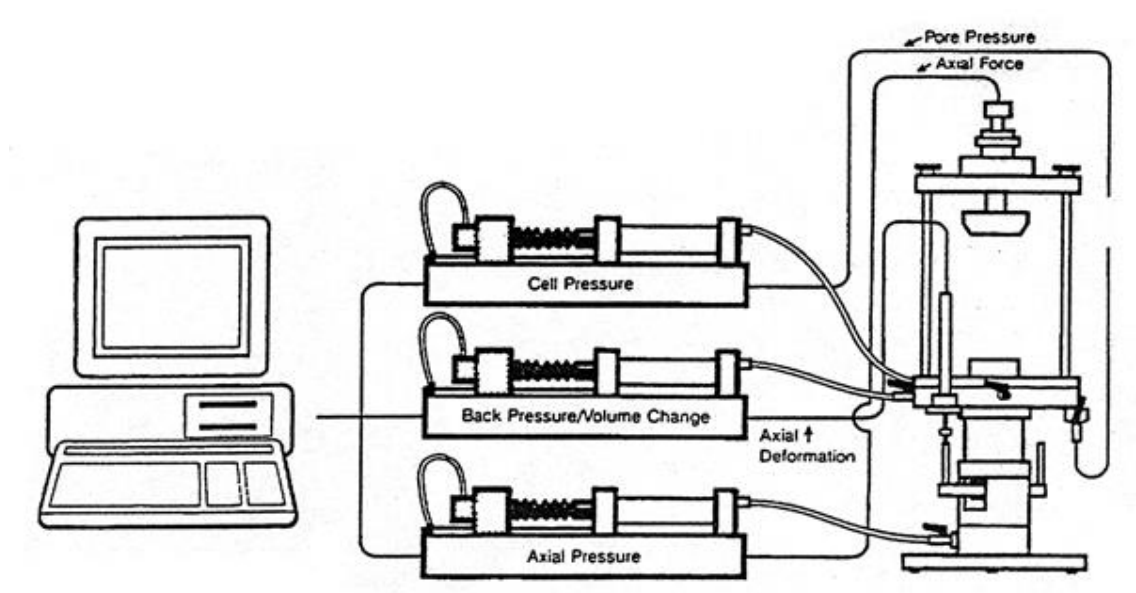
- A. Την τριαξονική κυψέλη τασικών διαδρομών τύπου Bishop and Wesley με δυνατότητα εφαρμογής πίεσης στην κυψέλη μέχρι 1700 kPa και επιβολής αξονικού φορτίου 7 kN σε δοκίμια διαμέτρου 50 mm.
- B. Ένα εσωτερικό (καταδυόμενο) κελί φορτίου 2 kN & 4 kN, έναν αισθητήρα πίεσης των πόρων με δυνατότητα μέτρησης μέχρι 2000 kPa και ένα μετρητή της μετατόπισης (LVDT) με εύρος μέτρησης ± 20 mm.
- C. Τρεις ελεγκτές (controllers) πίεσης - όγκου (3 MPa / 200 cc) με δυνατότητα μέτρησης της μεταβολής του όγκου.

Το σύστημα είναι πλήρως ελεγχόμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του λογισμικού STDITS (Standard Triaxial Testing System) και έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά (GDS, 2000):

- 1) Από τις μετρήσεις της μεταβολής του όγκου και της αξονικής παραμόρφωσης (μετατόπισης του εμβόλου) υπολογίζει τη μέση τρέχουσα επιφάνεια του δοκιμίου, η οποία λαμβάνεται υπόψη σε όλους τους υπολογισμούς ελέγχου της δοκιμής.
- 2) Η πίεση του νερού των πόρων μετράται στο βάθος έδρασης του δοκιμίου με τη χρήση ενός άκαμπτου αισθητήρα πίεσης πόρων.



Εικόνα 2.1: Σύστημα τριαξονικής φόρτισης για τη διερεύνηση των παραμέτρων αντοχής.



Εικόνα 2.2: Σχηματική διάταξη του συστήματος τριαξονικής δοκιμής (GDS, 2000).

- 3) Οι συνέπειες των τριβών του συστήματος περιορίζονται με τη μέτρηση του αξονικού φορτίου που επιβάλλεται στο δοκίμιο με καταδυόμενο κελί φορτίου

(μέσα στην τριαξονική κυψέλη). Επίσης, η επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση ελέγχεται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με βάση τις εξισώσεις των Bishop and Wesley (1975).

- 4) Η λήψη και η καταγραφή των μετρήσεων πίεσης γίνεται μέσω των ηλεκτρονικών μονάδων ανάδρασης (RFMs) και των ελεγκτών πίεσης - όγκου.
- 5) Η αξονική μετατόπιση μετράται με τα μηχανοσκόπια του συστήματος και υπολογίζεται έμμεσα με βάση τη μεταβολή του όγκου στον κατώτερο θάλαμο εφαρμογής του αξονικού φορτίου. Ο έλεγχος της μετατόπισης πραγματοποιήθηκε μέσω της μεταβολής του όγκου του νερού στον κατώτερο θάλαμο της κυψέλης, αλλά και μέσω του εξωτερικού αισθητήρα μετατόπισης.
- 6) Το σύστημα έχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης κλασσικών τριαξονικών δοκιμών (U-U, C-U, C-D) είτε με ελεγχόμενη παραμόρφωση είτε με ελεγχόμενη τάση (σε συμπίεση ή εφελκυσμό).
- 7) Τέλος, το σύστημα επιτρέπει τον προγραμματισμό τασικών διαδρομών.

2.1.2. Διεξαγωγή των δοκιμών

Διαμόρφωση του δοκιμίου και εγκατάστασή του στη συσκευή

Από τα δείγματα που ελήφθησαν από γεώτρηση δειγματοληψίας (Εικόνα 2.3), διαμορφώθηκαν δοκίμια χρησιμοποιώντας αυτοσχέδιο διαμορφωτή δοκιμίων με διάμετρο 50 mm που διαθέτει το εργαστήριο (βλέπε Εικόνα 2.4). Με οδηγούς τα άκρα της μεταλλικής μήτρας και τη χρήση λεπίδας, οι επιφάνειες των άκρων διαμορφώνονται ώστε να είναι επίπεδες, παράλληλες και κάθετες στον άξονα του δοκιμίου.

Οι πορώδεις δίσκοι που τοποθετούνται στη βάση και την κορυφή του δοκιμίου, καθαρίζονται με επιμέλεια και στη συνέχεια γίνεται κορεσμός με απιονισμένο - απαερωμένο νερό, με βρασμό για περίπου 30 min. Στην συνέχεια γίνεται απαέρωση του συστήματος και ορισμός της μηδενικής πίεσης αναφοράς, τοποθετώντας τον πορώδη δίσκο στην βάση έδρασης του δοκιμίου.



Εικόνα 2.3: Αδιατάρακτο δείγμα που προέρχεται από γεώτρηση δειγματοληψίας.



Εικόνα 2.4: Διαμορφωτής δοκιμίων του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

Ακολουθώς γίνονται οι απαραίτητες μετρήσεις για τον ακριβή προσδιορισμό των διαστάσεων του δοκιμίου.

Το δοκίμιο τοποθετείται πάνω στον πορόλιθο της βάσης έδρασης της κυψέλης. Τέσσερις λωρίδες από χαρτί Whitman No. 54, πλάτους 5 mm τοποθετούνται περιμετρικά του δοκιμίου για να επιτύχουν το κορεσμό του.

Πάνω στο δοκίμιο προσαρμόζεται η μεμβράνη κάλυψης και σφραγίζεται στο βάθρο έδρασης του με λαστιχένια δακτυλίδια. Στην κορυφή του δοκιμίου τοποθετείται ο δεύτερος πορόλιθος, το κορυφαίο κάλυμμα του δοκιμίου και η μεμβράνη σφραγίζεται με δύο ακόμα λαστιχένιους δακτυλίους (Εικόνα 2.5).



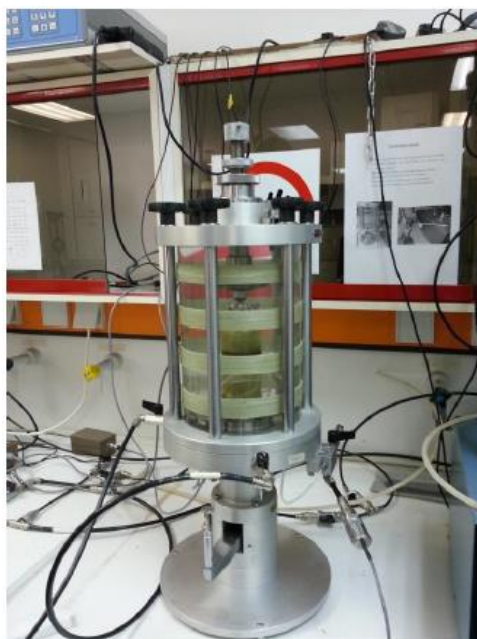
Εικόνα 2.5: Δοκίμιο με που έχει εγκατασταθεί στην βάση έδρασης της τριαξονικής κυψέλης.

Η κυψέλη γεμίζει με απιονισμένο – απαερωμένο νερό και ακολουθεί μια περίπου ώρα αναμονής, για εξισορρόπηση της θερμοκρασίας του συστήματος με εκείνη του περιβάλλοντος και την σταθεροποίηση της ένδειξης των αισθητήρων πίεσης και παραμόρφωσης (Στειακάκης, 2003) (βλέπε Εικόνα 2.6).

Τέλος, με την περιστροφή του κατάλληλου κοχλία ρυθμίζεται η θέση του καταδυόμενου κελιού φόρτισης προκειμένου να έρθει σε επαφή με το κορυφαίο κάλυμμα του δοκιμίου.

Κορεσμός

Για την επίτευξη γρήγορου κορεσμού πραγματοποιήθηκε κορεσμός του δοκιμίου με διοξείδιο του άνθρακα απομακρύνοντας τον αέρα που περιέχει.



Εικόνα 2.6: Απεικόνιση της τριαξονικής κυψέλης.

Αυτή η διαδικασία μειώνει τον χρόνο κορεσμού με νερό στο δοκίμιο (λόγω του ότι η υδατοδιαλυτότητα του CO_2 στο νερό είναι μεγαλύτερη από του αέρα στο νερό). Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- 1) Αρχικά συνδέουμε την είσοδο της αντιπίεσης με μια φιάλη CO_2 και στην έξοδο της αντιπίεσης τοποθετούμε ένα κατακόρυφο σωλήνα που εδράζεται στην βάση του κελιού. Ο σωλήνας αυτός γεμίζει με νερό.
- 2) Εφαρμόζουμε μια πλευρική πίεση σ_3 με κλειστή την βαλβίδα εξόδου και εισόδου της αντιπίεσης για να μην επιτραπεί αποστράγγιση του δοκιμίου. Στην συνέχεια ανοίγουμε την βαλβίδα εισόδου και εξόδου της αντιπίεσης για να επιτραπεί η είσοδος του αερίου, του οποίου η πίεση αυξάνεται αργά (δεν επιτρέπεται ή αύξηση της πίεσης του CO_2 σε τιμές μεγαλύτερες της πλευρική πίεση σ_3 που έχουμε εφαρμόζεται στο κελί).
- 3) Καθώς αυξάνει η πίεση του αερίου αυξάνεται και ο αριθμός των φυσαλίδων που εμφανίζονται στην έξοδο της αντιπίεσης (κατακόρυφο σωλήνα με νερό). Η πίεση αυτή πρέπει να ρυθμιστεί έτσι ώστε ο αριθμός των φυσαλίδων να μην ξεπερνά τις 2 - 4/sec. Για να είναι επιτυχής ο κορεσμός με CO_2 , οι φυσαλίδες θα πρέπει να απελευθερώνονται για 1 – 3 λεπτά.

- 4) Στην συνέχεια κλείνουμε την βαλβίδα εισόδου και εξόδου της αντιπίεσης καθώς και της φιάλης εισαγωγής του αερίου και την αποσυνδέουμε από την θέση της αντιπίεσης. Στη θέση αυτή συνδέουμε τον ελεγκτή (controller) της αντιπίεσης. Ο κατακόρυφος σωλήνας που είναι τοποθετημένος στην έξοδο της αντιπίεσης γεμίζει με νερό μέχρι ένα σημείο το οποίο και σημειώνεται.
- 5) Μετά ανοίγουμε τις βαλβίδες εισόδου και εξόδου της αντιπίεσης και εφαρμόζουμε μια αντιπίεση μεγαλύτερη από αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στο CO₂ (Η πλευρική πίεση της κυψέλης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτήν της αντιπίεσης). Μόλις το νερό στον κατακόρυφο σωλήνα στην έξοδο αυξηθεί κλείνει η βαλβίδα εξόδου της αντιπίεσης.

Στην συνέχεια πραγματοποιείται έλεγχος του κορεσμού μέσω του συντελεστή B που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$B = \frac{\delta u_w}{\delta \sigma_3} \quad [2.1]$$

όπου,

δu_w η αύξηση της πίεσης των πόρων, και

$\delta \sigma_3$ η αύξηση του νερού της κυψέλης

Εάν το B είναι μικρότερο από το 95% τότε εφαρμόζεται η διαδικασία κορεσμού. Στην ουσία με την μέθοδο αυτή, η πίεση των πόρων μέσα στο δοκίμιο αυξάνεται σταδιακά με ταυτόχρονη αύξηση της πλευρικής πίεσης, προκειμένου ο παγιδευμένος αέρας μέσα στο σύστημα της αντιπίεσης και στο δοκίμιο να διαλυθεί στο εισπνεζόμενο νερό.

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε μέσω της επιλογής αυτόματου κορεσμού και μέχρι αντιπίεσης 590 kPa και πλευρικής πίεσης 600 KPa. Με τις πιέσεις αυτές παρατηρείται για τα εδαφικά υλικά που μελετώνται, ότι επιτυγχάνεται ένας κορεσμός του δοκιμίου που προσεγγίζει το 98 %.

Στερεοποίηση

Η στερεοποίηση πραγματοποιείται σε ισότροπες συνθήκες και με σταθερή πίεση της κυψέλης. Στο δοκίμιο εφαρμόζονται οι τάσεις που αναπτύσσονται στο πεδίο (υψηλές τάσεις πεδίου ≈ 800 kPa). Μέσω του λογισμικού ελέγχου της δοκιμής γίνεται εφαρμογή της αποκλίνουσας τάσης, της αντιπίεσης πόρων και της πίεσης του κελιού και στη συνέχεια, με το άνοιγμα της βαλβίδας της αντιπίεσης αρχίζει η στερεοποίηση.

2.1.3. Αποτελέσματα

Πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές (CUPP) καθώς το εδαφικό υλικό ήταν κυρίως αργιλικό και σύμφωνα με την γεωτεχνική τομή (βλέπε Σχήμα 1.4) αναφέρεται στη γεωτεχνική ενότητα NS –TV1. Τα εδαφικά δοκίμια διαμορφώθηκαν από αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα που προέρχονται από την απόθεση Slatinice με χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά της απόθεσης Strimice.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται σε διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης (q) - αξονικής παραμόρφωσης (ϵ), πίεσης πόρων (p_{wp}) - αξονικής παραμόρφωσης (ϵ) και διατμητικής τάσης (τ) – ορθής τάσης (σ'), συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.1 και αναλυτικά στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών**.

Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής.

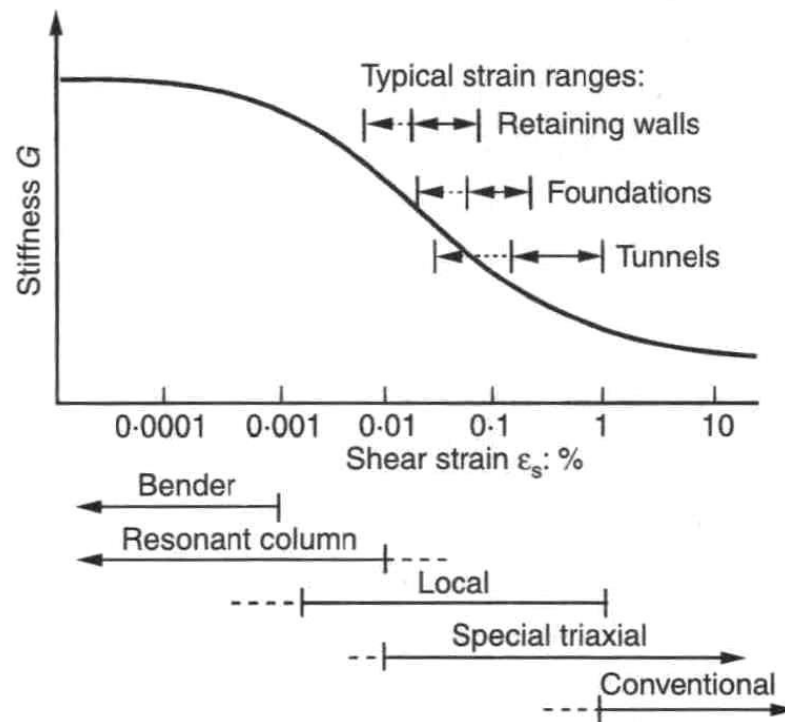
Δοκίμιο	Αρχικές φυσικές ιδιότητες			Συνθήκες αστοχίας				Παράμετροι Αντοχής	
	Υγρασία (%)	Μον. βάρος γ_b (kN/m ³)	Ξηρό μον. βάρος γ_d (kN/m ³)	ϵ (%)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kN/m ²)	u_f (kN/m ²)	σ_{3f} (kN/m ²)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)
I11A_7_α	44.32	19.4	12.7	0.96	58.57	837	851	21.8	18.4
I11A_8	36.25	17.5	12.0	3.74	397	467	840		
I11A_9_α	28.26	18.1	13.8	9.85	325.98	589	851		
I11A_11	35.00	15.8	10.9	6.5	480	468	801	24.3	22.5
I11A_13	27.13	18.8	14.7	2.6	86	564	597		
I11A_14	28.41	19.5	15.3	5.5	253	349	474		

2.2. Εργαστηριακή δοκιμή προσδιορισμού της ακαμψίας με τη μέθοδο των Bender Elements System (BES)

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι προσδιορισμού του Μέτρου διάτμησης (G), Μέτρου ελαστικότητας (E) και του Λόγου Poisson (ν) για ένα δεδομένο γεωτεχνικό πρόβλημα γίνεται:

1. Με την τριαξονική δοκιμή σε συνδυασμό με σύγχρονα συστήματα μέτρησης μικρών παραμορφώσεων,
2. Με μέτρηση ταχυτήτων σεισμικών κυμάτων σε δοκίμια με τη χρήση bender elements / στήλη συντονισμού και
3. Με επί τόπου δοκιμές πεδίου (γεωφυσικές μεθόδους).

Από τον συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων μπορεί να προσδιοριστεί η μη γραμμική σχέση του μέτρου διάτμησης G και της διατμητικής παραμόρφωσης ϵ_s (Σχήμα 2.1).



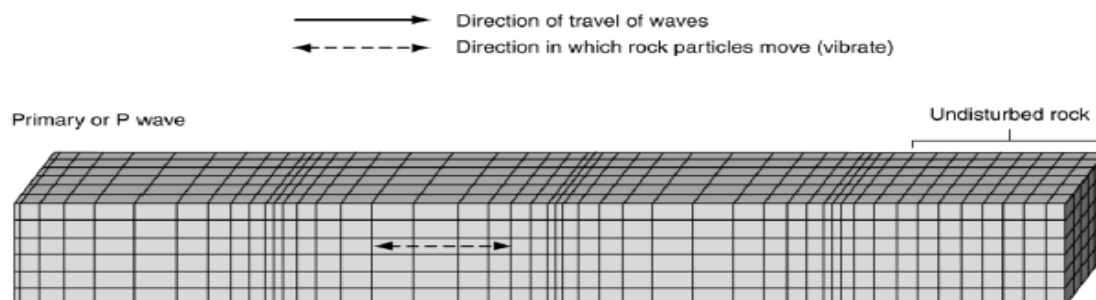
Σχήμα 2.1: Χαρακτηριστικά εύρη προσδιορισμού εδαφικής ακαμψίας με εργαστηριακές δοκιμές (Atkinson, 1993).

Για πολύ μικρές παραμορφώσεις (κάτω από 0.001%) η εκτίμηση της ακαμψίας μπορεί να γίνει με μετρήσεις της ταχύτητας εγκαρσίων και διαμηκών κυμάτων επί του δοκιμίου, χρησιμοποιώντας τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία (αισθητήρες Bender Elements).

2.2.1. Μέθοδος πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (BES)

Η μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (BES) αποτελεί μια μη καταστροφική μέθοδο. Χρησιμοποιεί την ιδιότητα του πιεζοηλεκτρισμού (δηλαδή η ικανότητα ορισμένων κεραμικών υλικών να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν υποβάλλονται σε μηχανική παραμόρφωση και αντίστροφα). Χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό της ακαμψίας του εδάφους (μέτρο διάτμησης G_{max} , μέτρο ελαστικότητας E_{in} και του λόγου Poisson ν). Αυτό επιτυγχάνεται με την μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης διαμήκων και εγκαρσίων κυμάτων σε εδαφικά δοκίμια (Λαζαρόπουλος, 2013).

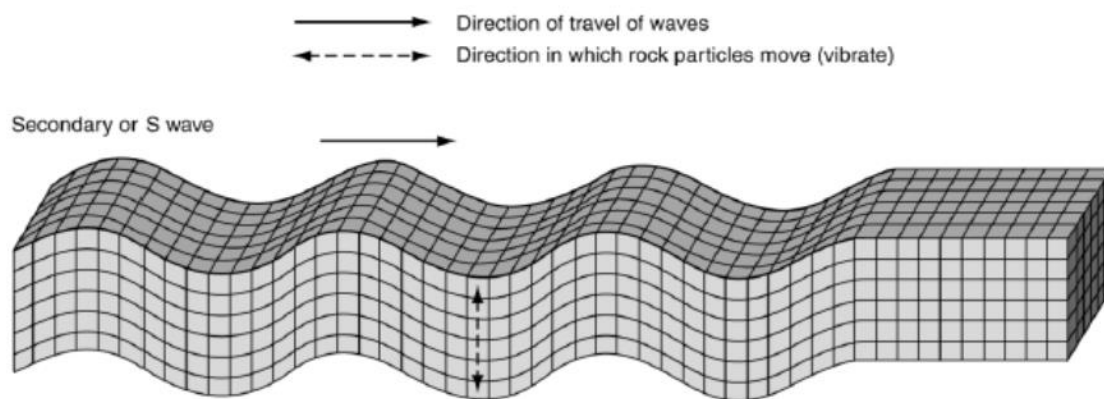
Στα διαμήκη κύματα ή κύματα συμπίεσης (P-waves) η κατεύθυνση κίνησης των σωματιδίων είναι προς την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος (Σχήμα 2.2). Τα κύματα αυτά προκαλούν ογκομετρικές παραμορφώσεις στο έδαφος, και ελέγχονται κυρίως από το συντελεστή μεταβολής όγκου (K) του εδάφους.



Σχήμα 2.2: Κατεύθυνση κίνησης των σωματιδίων λόγω διαμήκων κυμάτων (P-waves) (GDS Instruments Ltd, 2013).

Μπορούν να μεταδοθούν μέσω του περιεχομένου υγρού και του σκελετού του εδάφους (V_p (υερού) = 1400 m/sec) και αποτελούν μια ένδειξη του βαθμού κορεσμού του εδάφους. Είναι τα πρώτα κύματα που φθάνουν στον δέκτη καθώς έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα από τα διατμητικά κύματα V_s .

Στα διατμητικά κύματα (S-waves), η κατεύθυνση κίνησης των σωματιδίων είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της διάδοσης (Σχήμα 2.3). Για τον λόγο τα διατμητικά κύματα εφαρμόζουν κυρίως παραμόρφώσεις διάτμησης ϵ_s .



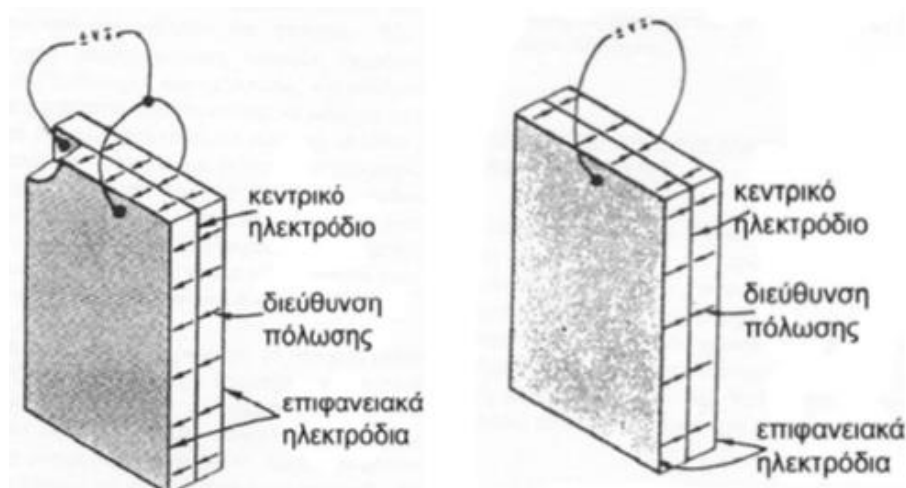
Σχήμα 2.3: Κατεύθυνση κίνησης των σωματιδίων λόγω διατμητικών κυμάτων (S-waves) (GDS Instruments Ltd, 2013).

Τρόποι σύνδεσης και λειτουργίας των αισθητήρων (BES) στο κυλινδρικό δοκίμιο

Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (Σχήμα 2.4) αποτελείται από τρία ηλεκτρόδια, ανάμεσα τους παρεμβάλλεται το πιεζοηλεκτρικό υλικό.

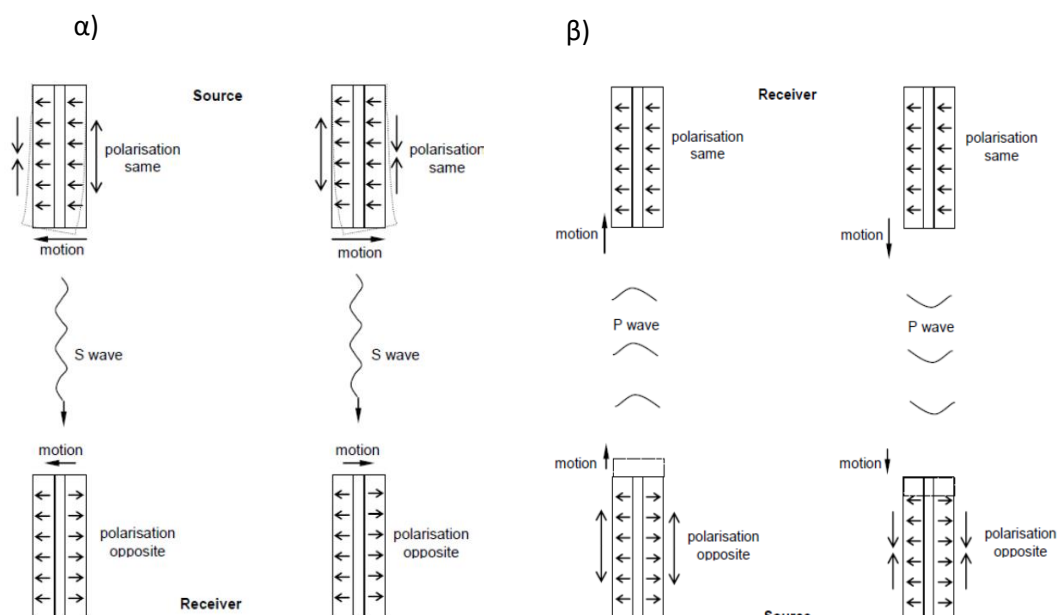
Όταν το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο χρησιμοποιείται ως πομπός, με την βοήθεια μιας γεννήτριας συναρτήσεων εφαρμόζεται θετική τάση στο κεντρικό ηλεκτρόδιο και αρνητική στα δύο εξωτερικά ή το αντίστροφο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το στοιχείο να διεγείρεται προκαλώντας την στρέψη του προς μια συγκεκριμένη φορά (μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική) μεταδίδοντας την κίνηση αυτή στο δοκίμιο.

Το πιεζοηλεκτρικό υλικό στην θέση του δέκτη είναι αντίρροπα πολωμένο και εμφανίζει ηλεκτρική τάση στα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια.



Σχήμα 2.4: Συνδεσμολογία πομπού (αριστερή πλευρά) – δέκτη (δεξιά πλευρά) (GDS Instruments Ltd, 2013).

Για τα διατμητικά κύματα (S-waves), η πηγή κύματος αποτελείται από δύο πιεζοκεραμικές λωρίδες που είναι πολωμένες στην ίδια κατεύθυνση (Σχήμα 2.5). Όταν εφαρμόζεται μία τάση διέγερσης, η μία λωρίδα επεκτείνεται και η άλλη συστέλλεται προκαλώντας τη κάμψη των λωρίδων.



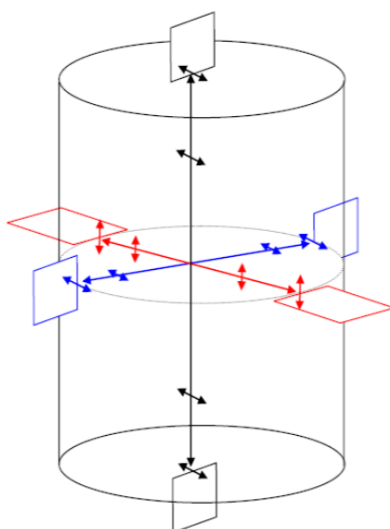
Σχήμα 2.5: Σχηματική διάταξη των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων για παραγωγή α) διατμητικών κυμάτων και β) διαμήκων κυμάτων (GDS Instruments Ltd, 2013).

Όταν η τάση διέγερσης αντιστρέφεται, η λωρίδα κάμπτεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τότε οι δύο λωρίδες στον δέκτη είναι πολωμένες σε αντίθετες κατευθύνσεις (Σχήμα 2.5).

Στα διαμήκη κύματα ή κύματα συμπίεσης (P-waves), η πηγή κύματος P αποτελείται από δύο πιεζοκεραμικές λωρίδες που είναι πολωμένες σε αντίθετες κατευθύνσεις. Όταν εφαρμόζεται τάση διέγερσης, οι δύο λωρίδες εκτείνονται (βλέπε Σχήμα 2.5).

Το κύμα της ταλάντωσης που δημιουργεί ο πομπός, διεγείρει το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο – δέκτη το οποίο παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα. Το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται καταγράφεται σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Γενικά υπάρχουν πολλοί τρόποι σύνδεσης των αισθητήρων bender elements πάνω στο κυλινδρικό δοκίμιο και εξαρτάται κυρίως από την θέση του πομπού και του δέκτη. Οι συνδεσμολογίες αυτές είναι οι ακόλουθες (Σχήμα 2.6) (GDS Instruments Ltd, 2013):



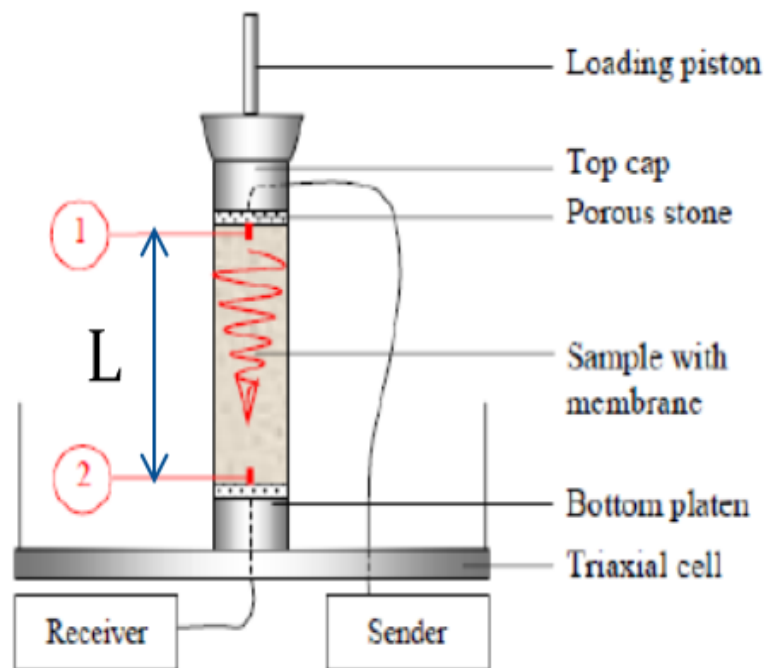
Σχήμα 2.6: Τρόποι τοποθέτησης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στο δοκίμιο (GDS Instruments Ltd, 2013).

- Οριζόντιας διάδοσης και οριζόντιας πόλωσης (μπλε διάταξη).
- Οριζόντιας διάδοσης και κάθετης πόλωσης (κόκκινη διάταξη).
- Κάθετης διάδοσης και οριζόντιας πόλωσης (μαύρη διάταξη).

Οι παραπάνω τρόποι σύνδεσης επιτρέπουν την αξιολόγηση της ανισοτροπίας της ακαμψίας του δείγματος.

Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος υπολογίζεται από το μήκος του δοκιμίου (L) προς το χρόνο διάδοσης (t) του κύματος (βλέπε Σχήμα 2.7) με βάση την εξίσωση:

$$V(m/sec) = \frac{L}{t} \quad [2.2]$$



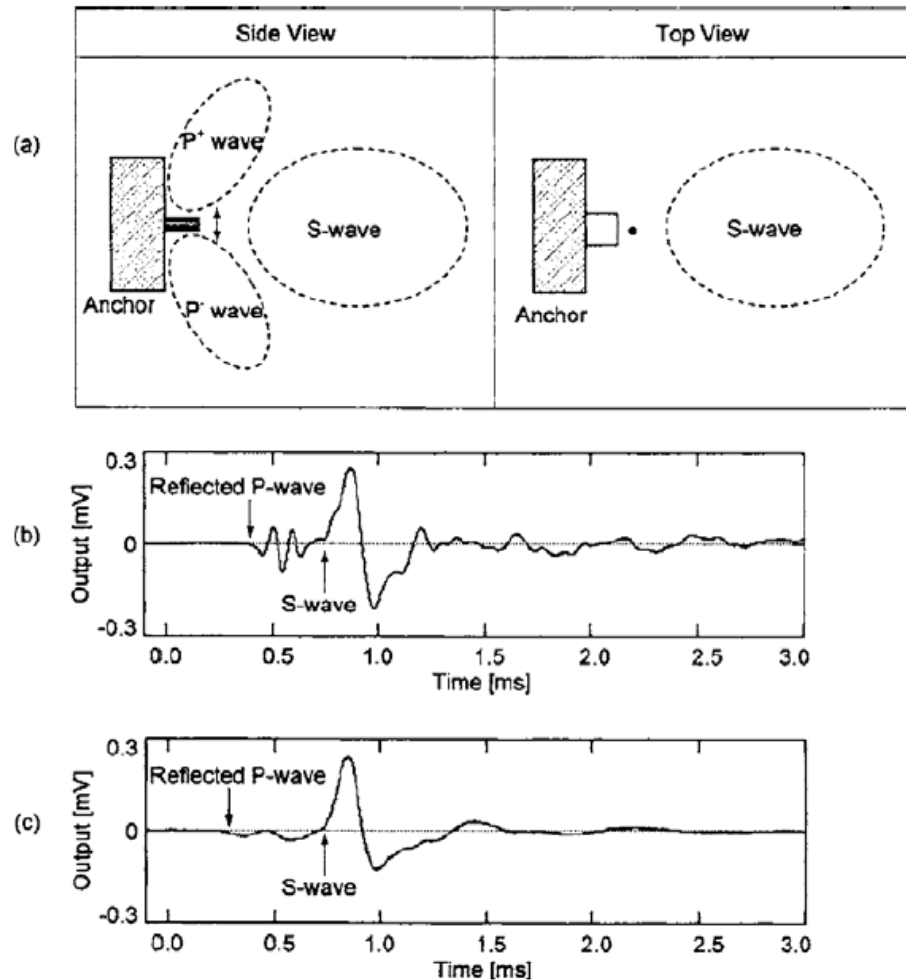
Σχήμα 2.7: Σχηματική απεικόνιση της δοκιμής Bender Elements (Karg, 2005).

Φαινόμενο επίδρασης κοντινού πεδίου (NFE)

Οι έρευνες των Salinero, Roesset & Stokoe (1986) δείχνουν ότι η πρώτη άφιξη μπορεί να μην αποτελεί ένα διατμητικό κύμα (S). Στην πραγματικότητα πρόκειται για την άφιξη του Near Field Effect (NFE) που διαδίδεται με την ταχύτητα διαμήκους κύματος (P).

Το φαινόμενο NFE δημιουργείται με την πύκνωση – αραίωση του διαμήκους κύματος στο μέσο διάδοσης στις περιοχές γύρω από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (Σχήμα 2.8a)

(Lee and Santamarina, 2005). Πρόκειται για ένα φαινόμενο που μπορεί επηρεάσει την εκτίμηση του χρόνου διάδοσης με την μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

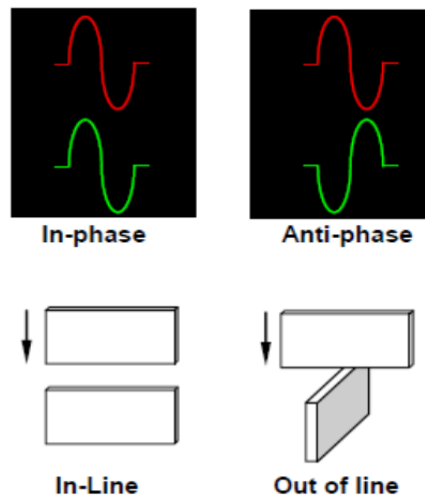


Σχήμα 2.8: Δημιουργία και επίδραση του Near Field Effect (Lee and Santamarina, 2005).

Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται το πρόβλημα λόγω του φαινομένου NFE, στο οποίο η αρχική διέγερση του σήματος οφείλεται στην άφιξη του ανακλώμενου κύματος συμπίεσης. Αυτό το φαινόμενο:

1. Οφείλεται στις διαστάσεις του δείγματος σε σχέση με το μήκος του κύματος λ .
Η επίδραση του φαινομένου Near Field Effect είναι έντονη όταν το μήκος του δοκιμίου είναι σε ένα εύρος από $0.25 \cdot \lambda$ - $4 \cdot \lambda$ του διατμητικού κύματος (Viggiani and Atkinson, 1995).

2. Εξαρτάται από τις τάσεις που εφαρμόζονται στο δείγμα (βαθμό στερεοποίησης).
Όταν εφαρμόζονται μεγάλες τάσεις στο δοκίμιο αυξάνεται η συνοχή άρα αυξάνεται η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων συμπίεσης (P-waves).
3. Επηρεάζεται από τη Γεωμετρία – διάταξη των αισθητήρων.
Κατά την λήψη των μετρήσεων με την μέθοδο των Bender Elements, τα σήματα του πομπού και του δέκτη θα πρέπει να είναι στην ίδια φάση (Σχήμα 2.9). Αυτό βοηθά στην επεξεργασία των σημάτων για την εξαγωγή των χρόνων άφιξης και εξαλείφει το φαινόμενο NFE (GDS Instruments Ltd, 2013). Επομένως οι αισθητήρες Bender elements πρέπει να τοποθετούνται «σε σειρά» έτσι ώστε τα δύο σήματα να είναι σε «φάση» (βλέπε Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9: Απεικόνιση των σημάτων πομπού (κόκκινο) – δέκτη (πράσινο) ανάλογα με την τοποθέτηση των αισθητήρων Bender Elements (GDS Instruments Ltd, 2013).

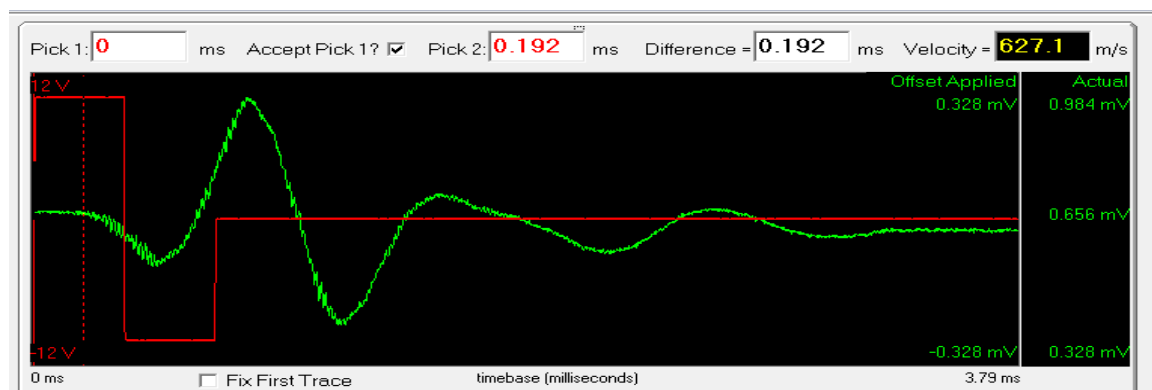
Τεχνικές προσδιορισμού της ταχύτητας των κυμάτων

Οι κύριες τεχνικές μέτρησης της ταχύτητας των κυμάτων βασίζονται είτε σε μετρήσεις στο πεδίο του χρόνου είτε σε μετρήσεις στο πεδίο της συχνότητας.

Στο πεδίο του χρόνου υπάρχουν κυρίως τρεις τεχνικές υπολογισμού του χρόνου διάδοσης του κύματος: η τεχνική point to point, η τεχνική peak to peak και η cross correlation.

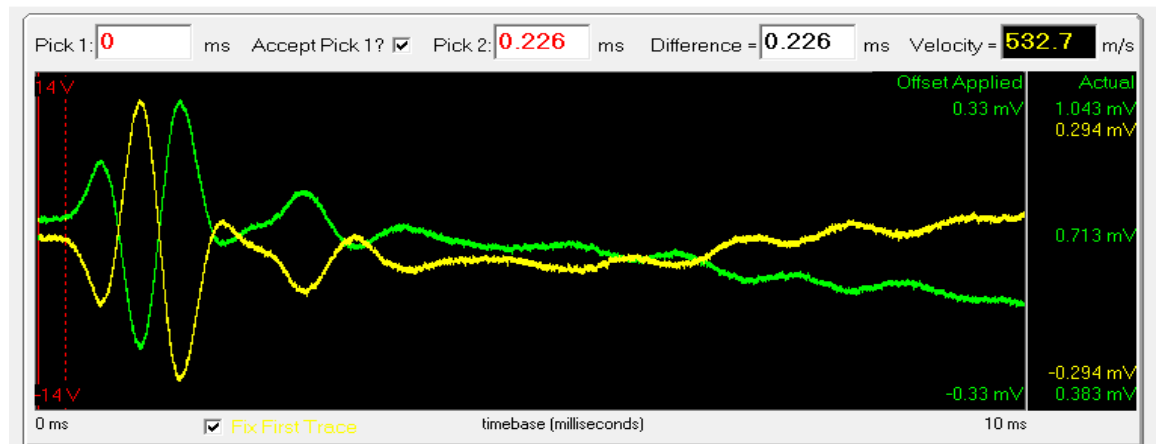
Η μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων γίνεται με την τεχνική Frequency domain που χρησιμοποιεί τον μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transformation ή FFT (Λαζαρόπουλος, 2013).

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος παραγωγής ενός κύματος είναι με την διέγερση του πομπού από ένα και μοναδικό ημιτονοειδή παλμό. Για την παραγωγή διαμήκων – διατμητικών κυμάτων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί τετραγωνικός παλμός. Με τον τρόπο αυτό, το σημείο αρχικής διέγερσης μπορεί να είναι πιο σαφές και γίνεται πιο εύκολος ο προσδιορισμός του (βλέπε Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10: Εκτίμηση του χρόνου άφιξης διαμήκων κυμάτων χρησιμοποιώντας τετραγωνικό παλμό.

Μια άλλη τεχνική για την εκτίμηση του χρόνου άφιξης διαμήκων κυμάτων είναι η αντιστροφή του σήματος του δέκτη (Reversing Traces) (Σχήμα 2.11). Η τεχνική αυτή βοηθά στην επιλογή του αρχικού σημείου του ληφθέντος σήματος και στον εντοπισμό S-wave στο ίχνος της κυματομορφής P-wave.

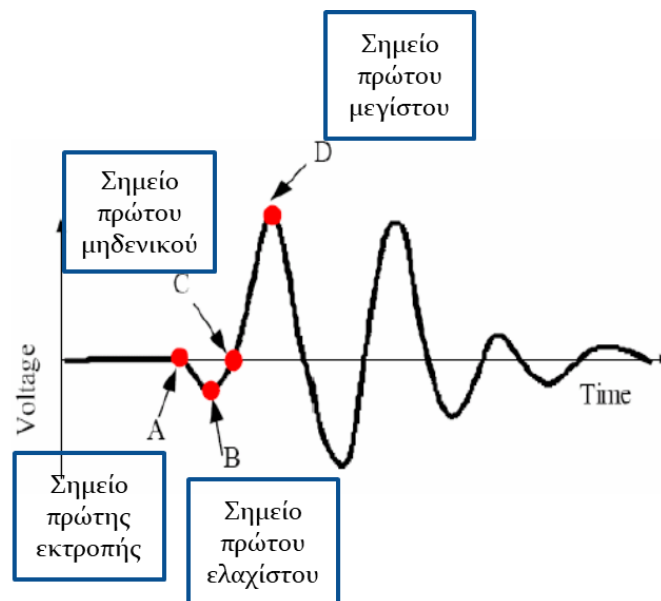


Σχήμα 2.11: Εκτίμηση του χρόνου άφιξης διαμήκων κυμάτων χρησιμοποιώντας την τεχνική αντιστροφής του ληφθέντος σήματος (*Reversing Traces*).

Ανάλογα με το είδος των κυμάτων που μετρούνται, χρησιμοποιούνται και διαφορετικές τεχνικές.

Τεχνική *point to point*

Η τεχνική αυτή βασίζεται στην εκτίμηση του χρόνου Δt_s μεταξύ της έναρξης διάδοσης του κύματος εισόδου και του πρώτου σημείου (αρχικής διέγερσης) του λαμβανόμενου σήματος (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12: Αρχικά σημεία διέγερσης του σήματος του δέκτη (πηγή: Λαζαρόπουλος, 2013).

Για την σωστή επιλογή του πρώτου σημείου (σημείο αρχικής διέγερσης) του λαμβανόμενου κύματος έχουν δημοσιευτεί πολλές ερευνητικές εργασίες, όπως των Jovicic et al. (1996), Lee and Santamarina (2005) και Viggiani and Atkinson (1995).

Για παράδειγμα το **σημείο A** (σημείο πρώτης εκτροπής) είναι συνήθως σημείο κυμάτων συμπίεσης (διαμήκων). Το σημείο αυτό δεν συνιστάται ως επιλογή πρώτου σημείου (σημείο αρχικής διέγερσης) για τα διατμητικά κύματα (S-waves) γιατί πιθανόν να υπάρχει η επίδραση από το φαινόμενο Near Field Effect (Λαζαρόπουλος, 2013). Το σημείο αυτό αποτελεί μια καλή επιλογή για τα διαμήκη κύματα (P-waves). Επομένως το σημείο A είναι μια καλή επιλογή μόνο όταν μετρώνται διαμήκη κύματα.

Το **σημείο B** (σημείο πρώτου ελαχίστου) αποτελεί μια πιθανή επιλογή πρώτου σημείου (σημείο αρχικής διέγερσης) για την εκτίμηση του χρόνου άφιξης διατμητικών κυμάτων (S-waves), καθώς μετά ακολουθούν μεγάλα μεγέθη πλάτους που υποδηλώνουν την ύπαρξη των κυμάτων αυτών.

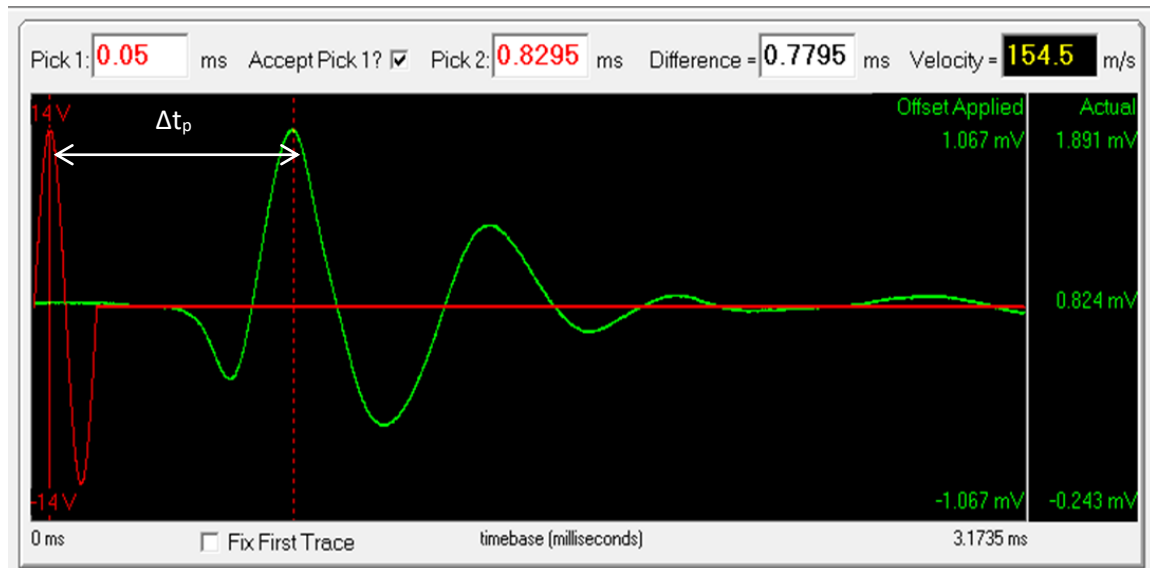
Επίσης, το **σημείο C** (σημείο πρώτου μηδενικού) έχει τις ίδιες πιθανότητες ορθότητας με το B αλλά πολλές φορές παρατηρείται μικρή μετατόπιση προς τα κάτω δημιουργώντας ένα σφάλμα στην εκτίμηση των διατμητικών κυμάτων (S-waves).

Τέλος το **σημείο D** (σημείο πρώτου μεγίστου) είναι το μέγιστο σημείο του σήματος και δίνει αποκλίσεις στην εκτίμηση της ταχύτητας σε σχέση με τα άλλα σημεία.

Γενικά, η επιλογή του σημείου B ή του σημείου C είναι οι πιο συνηθισμένες για την εκτίμηση του χρόνου άφιξης των διατμητικών κυμάτων (S-waves) και το σημείο A για τα διαμήκη κύματα (P-waves) (GDS Instruments Ltd, 2013).

Τεχνική peak to peak

Η τεχνική αυτή βασίζεται στην εκτίμηση της διαφοράς χρόνου Δt_p μεταξύ της πρώτης μέγιστης κορυφής του μεταδιδόμενου σήματος και της πρώτης μέγιστης κορυφής του λαμβανόμενου σήματος (Σχήμα 2.13). Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του χρόνου άφιξης διατμητικών κυμάτων (S-waves). Η τεχνική αυτή επηρεάζεται σημαντικά από την ποιότητα των λαμβανόμενων σημάτων για τον λόγο αυτό μπορεί να περιέχει διάφορες πηγές σφαλμάτων (Viggiani and Atkinson, 1995).



Σχήμα 2.13: Απεικόνιση σημείων επιλογής χρόνου με την τεχνική peak to peak.

Τεχνική cross correlation

Πρόκειται για μια μαθηματική διεργασία που χρησιμοποιεί την θεωρία της συνέλιξης των Viggiani and Atkinson (1995). Η τεχνική αυτή υπολογίζει τον βαθμό συσχέτισης - ομοιότητας μεταξύ του μεταδιδόμενου $Y(t)$ και του ληφθέντος σήματος $X(t)$. Ο βαθμός συσχέτισης υποδηλώνει τον αντίστοιχο συντελεστή χρονικής μετατόπισης μεταξύ των υπό ανάλυση σημάτων (Steiakakis et al., 2017).

Η συνάρτηση της θεωρίας της συνέλιξης (CC_{xy}) δίνεται από την παρακάτω σχέση (Viggiani and Atkinson, 1995):

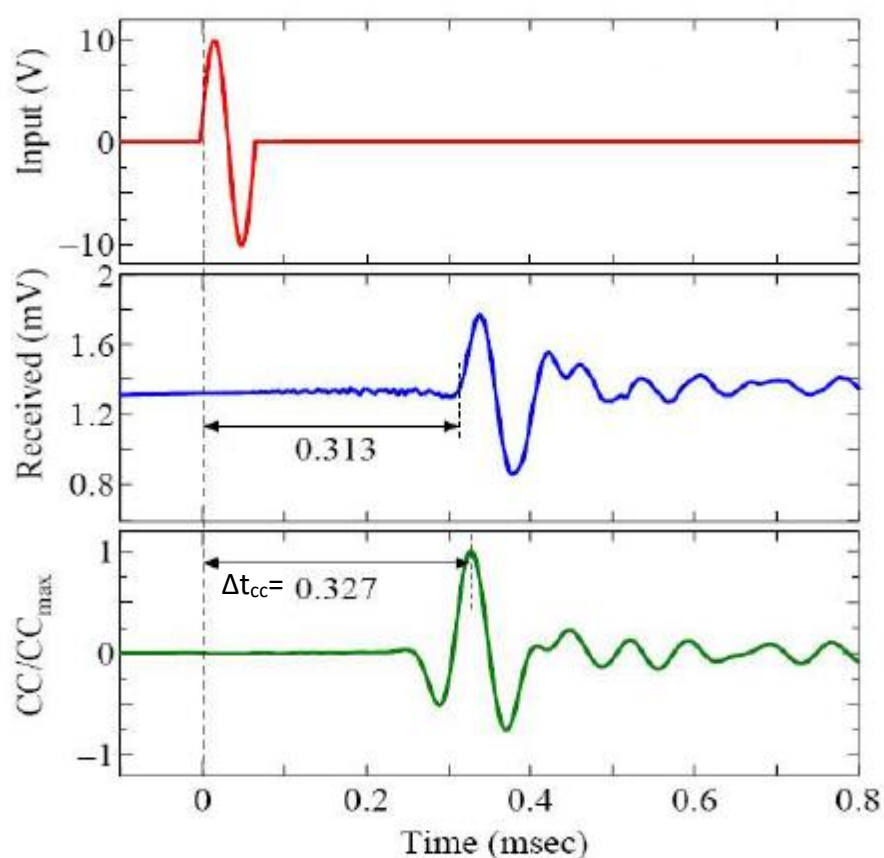
$$CC_{xy}(t) = \lim_{T_r \rightarrow \infty} \frac{1}{T_r} \cdot \int [x(T) \cdot y(T + t) \cdot dt] \quad [2.3]$$

όπου,

T_r είναι ουσιαστικά η καταγραφή του χρόνου για την ακολουθία, και

t το μέγεθος της ολίσθησης του ενός σήματος ως προς το άλλο (δηλαδή, το χρονικό διάστημα που απέχουν δυο διαδοχικές τιμές πλάτους της ακολουθίας του ενός ή του άλλου σήματος).

Η ύπαρξη του ορίου στην εξίσωση 2.3 υποδηλώνει ότι οι ακολουθίες των σημάτων πομπού και δέκτη έχουν πεπερασμένες διαστάσεις στο πεδίο του χρόνου, ενώ το ολοκλήρωμα εισάγει την έννοια της εξαγωγής ενός γραφήματος της συνέλιξης των δυο σημάτων συναρτήσει του χρόνου. Στην ουσία στο γράφημα εμφανίζεται ένα μέγιστο σημείο το οποίο θεωρείται ως η πρώτη άφιξη του διατμητικού κύματος (S-wave) (βλέπε Σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14: Παράδειγμα εφαρμογής της τεχνικής Cross Correlation στα σήματα πομπού και δέκτη (Yamashita et al., 2003).

Επομένως η τεχνική αυτή εξάγει μια ακολουθία που δείχνει τον βαθμό συσχέτισης των δυο σημάτων και βασίζεται στην υπόθεση ότι ο χρόνος διαδρομής (Δt_{cc}) είναι ίσος με τη χρονική μετατόπιση (t) που αντιστοιχεί στο πρώτο μέγιστο της εξίσωσης (Σχήμα 2.14) (Yamashita et al., 2003).

Ο χρόνος που προκύπτει είναι λίγο μεγαλύτερος από αυτόν της τεχνικής point to point, καθώς η τεχνική point to point επιλέγει ως σημείο άφιξης το αρχικό σημείο διέγερσης το οποίο μπορεί να είναι εσφαλμένο λόγω της επίδρασης του φαινομένου near effect (NFE). Για τον λόγο αυτό η τεχνική Cross Correlation θεωρείται πιο αξιόπιστη.

Τεχνική frequency domain

Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται η μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Αυτό πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transformation ή FFT). Ο μετασχηματισμός Fourier δίνει το ενεργειακό γραμμικό φάσμα ενός σήματος (π.χ. $X(T)$ για τον πομπό και $Y(T)$ για τον δεκτή) σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$S_x(f) = X(F) = \int_{-\infty}^{+\infty} [X(T) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot F \cdot t} dt] \quad [2.4]$$

$$S_y(f) = Y(F) = \int_{-\infty}^{+\infty} [Y(T) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot F \cdot t} dt] \quad [2.5]$$

Το γραμμικό ενεργειακό φάσμα είναι ένα διάνυσμα στο μιγαδικό επίπεδο, το πλάτος και η φάση του είναι αντίστοιχα η ολίσθηση του πλάτους και της φάσης κάθε αρμονικού στοιχείου του σήματος (Spiegel, 1978).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ενεργειακό φάσμα της συνέλιξης (cross power spectrum) δυο σημάτων $x(T)$ και $y(T)$ δίνεται από την σχέση:

$$S_{xy}(f) = S_x(f) \cdot S_y^*(f) \quad [2.6]$$

όπου,

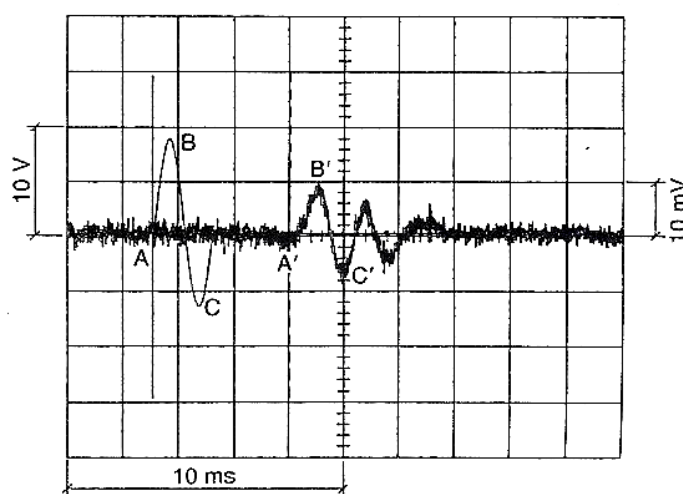
S^* ο συζυγής μιγαδικός του γραμμικού ενεργειακού φάσματος του $Y(T)$, και

S_{xy} ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης $CC_{xy}(t)$ (σχέση 2.3).

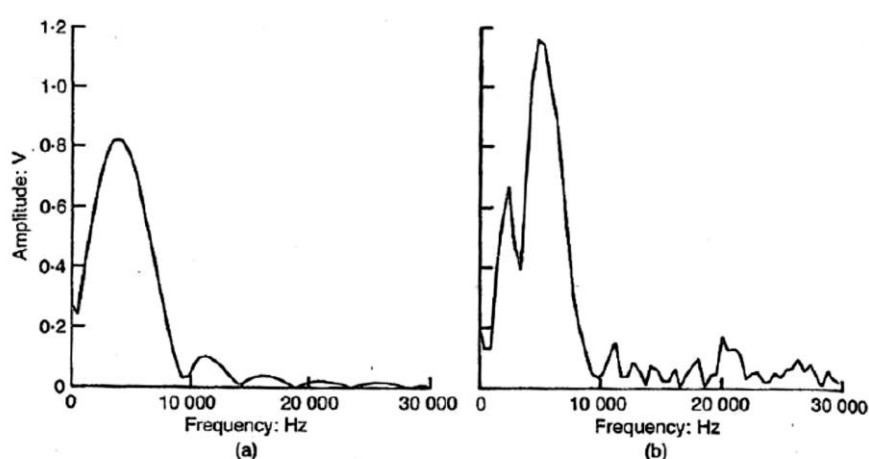
Επομένως, σε κάθε συχνότητα προκύπτει το πλάτος και η φάση στο ενεργειακό φάσμα της συνέλιξης που είναι αντίστοιχα το αποτέλεσμα του πλάτους και των διαφορών φάσης των στοιχείων των δυο σημάτων στη συγκεκριμένη συχνότητα. Από το πλάτος δίνεται η δυνατότητα να βρεθεί το εύρος των συχνοτήτων που είναι κοινές για τα δυο

σήματα, ενώ από την φάση του ενεργειακού φάσματος της συνέλιξης μπορεί να προσδιορισθεί η ταχύτητα φάσης για κάθε συχνοτικό στοιχείο (Spiegel, 1978).

Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε ότι διατίθενται δύο σήματα διέγερσης (πομπού και δέκτη) (βλέπε Σχήμα 2.15), τα γραμμικά συχνοτικά ενεργειακά φάσματα του σήματος του πομπού και του σήματος του δέκτη θα έχουν την μορφή που παρατηρείται στο Σχήμα 2.16 (a και b, αντίστοιχα).



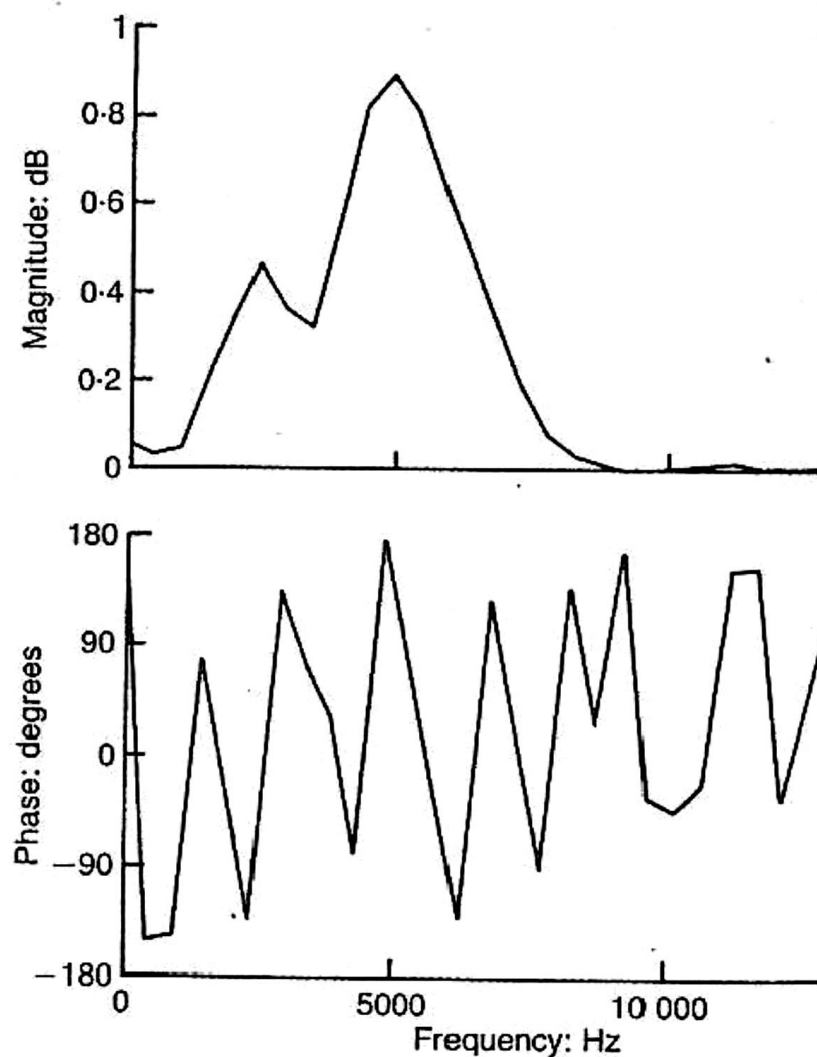
Σχήμα 2.15: Σήματα πομπού και δέκτη (5 kHz) (Viggiani and Atkinson, 1995).



Σχήμα 2.16: Γραμμικό συχνοτικό ενεργειακό φάσμα σημάτων πομπού και δέκτη (αντίστοιχα) (Jovicic et al., 1996).

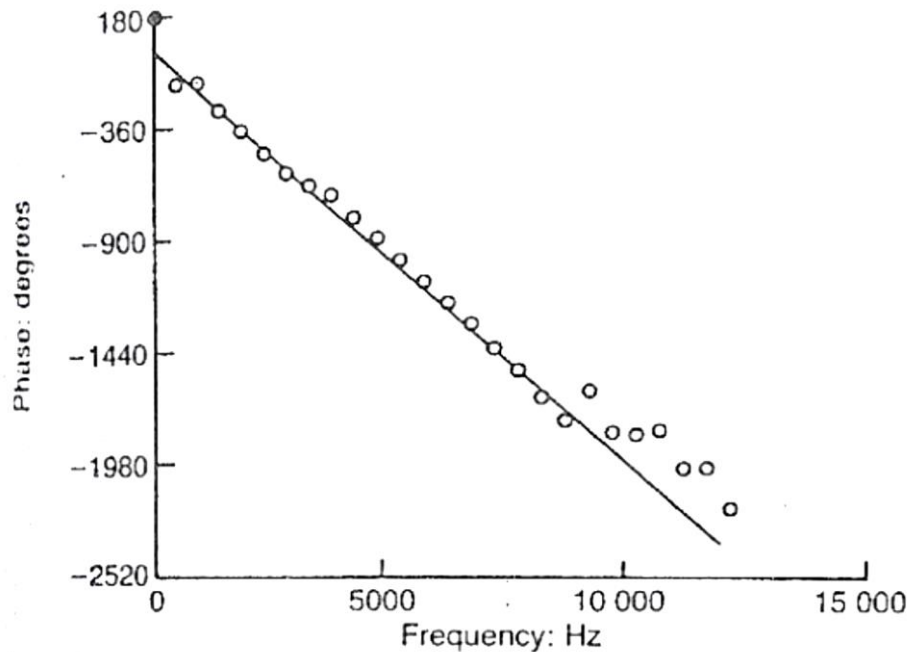
Στο παραπάνω γράφημα φαίνεται ότι οι περισσότερες φασματικές συνιστώσες είναι γύρω από την περιοχή της συχνότητας του σήματος διέγερσης. Σε μεγαλύτερες συχνότητες οι φασματικές συνιστώσες που παρατηρούνται αποτελούν θόρυβο.

Το ενεργειακό φάσμα της συνέλιξης των δυο σημάτων φαίνεται στο Σχήμα 2.17. Από το γράφημα του πλάτους υπάρχει η δυνατότητα εκτίμησης της περιοχής συχνοτήτων που είναι κοινή για τα δυο σήματα. Στο άλλο γράφημα (Σχήμα 2.17 β) παρατηρείται η μεταβολή των διαφορών φάσεων των δυο σημάτων για κάθε συχνότητα.



Σχήμα 2.17: Πλάτος και φάση στο ενεργειακό φάσμα συνέλιξης των δυο σημάτων (Jovicic et al., 1996).

Από την αθροιστική μεταβολή της φάσης προκύπτει μια ευθεία (βλέπε Σχήμα 2.18), από την κλίση της οποίας υπολογίζεται ο χρόνος διάδοσης του διατμητικού κύματος.



Σχήμα 2.18: Διάγραμμα αθροιστικής μεταβολής φάσης συναρτήσει της συχνότητας (Jovicic et al., 1996).

Η ταχύτητα φάσης για κάθε συχνότητα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$V(f) = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{L}{\Phi(f)} \quad [2.7]$$

όπου,

λ το μήκος κύματος,

L το μήκος του δοκιμίου, και

f η συχνότητα.

Επομένως, ο χρόνος διάδοσης για μια δεδομένη περιοχή συχνοτήτων υπολογίζεται από την κλίση α της ευθείας στην δεδομένη αυτή περιοχή συχνοτήτων και υπολογίζεται αναλύοντας την παραπάνω σχέση:

$$\frac{L}{t} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{L}{\Phi(f)} \rightarrow t = \frac{\Phi(f)}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{a}{2 \cdot \pi} \quad [2.8]$$

2.2.2. Εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων

Με την μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (BES) και το λογισμικό GDS Bender Elements έγινε η μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων (V_s) και διαμήκων κυμάτων (V_p). Με βάση τις μετρήσεις αυτές προέκυψε το Μέτρο διάτμησης (G), το Μέτρο ελαστικότητας (E) και ο Λόγος Poisson (ν).

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποιείται η σχέση (Ameratunga et al., 2016):

$$E \text{ (MPa)} = 2 \cdot \rho \cdot V_s^2 \cdot (1 + \nu) \quad [2.9]$$

όπου

ρ η πυκνότητα (kg/m^3),

V_s η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων (m/sec), και

ν ο λόγος Poisson.

Ο λόγος Poisson (ν) δίνεται από την σχέση (Sheriff and Geldart, 1995):

$$\nu = \frac{0,5 \cdot \left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \quad [2.10]$$

όπου

V_p η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων (m/sec), και

V_s η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων (m/sec).

Το μέτρο διάτμησης G_{\max} δίνεται από την σχέση:

$$G_{\max} \text{ (MPa)} = \frac{E}{2 + 2 \cdot \nu} \quad [2.11]$$

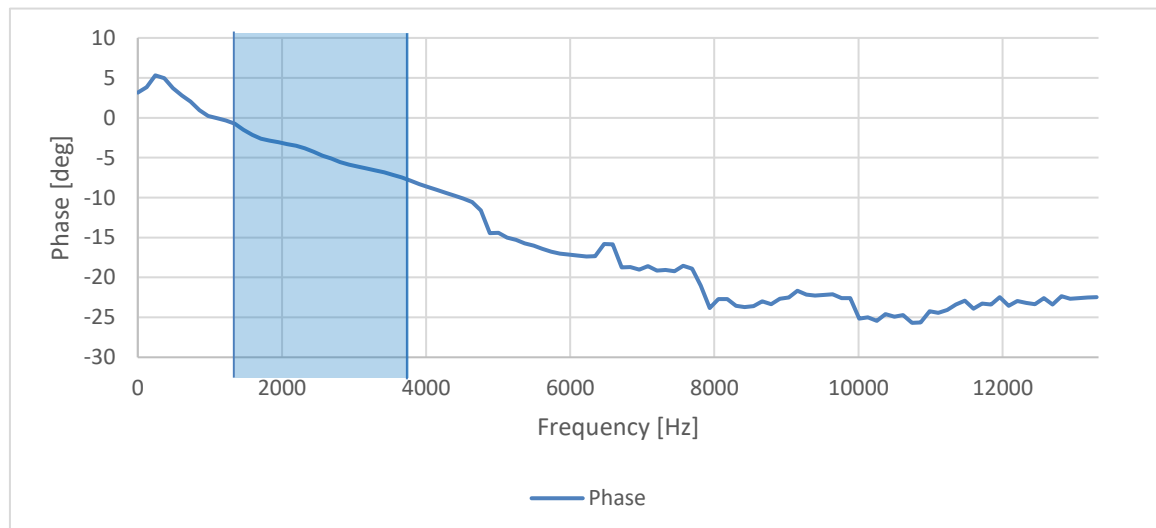
ή

$$G_{max}(MPa) = \rho \cdot V_s^2 \quad [2.12]$$

2.2.3. Μετρήσεις - Αποτελέσματα

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές Bender Elements για την αξιολόγηση της ακαμψίας των δειγμάτων εδάφους σε πολύ μικρές παραμορφώσεις. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα διαμέτρου 50 mm, στο τριαξονικό κελί.

Οι τεχνικές Cross Correlation και Frequency Domain πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας ένα πρόσθετο (add-in) στο λογισμικό Microsoft Excel της εταιρείας GDS (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7: Επιλογή εύρους συχνότητας – φάσης στο λογισμικό Microsoft Excel της εταιρείας GDS.

Οι μετρήσεις των V_s και V_p πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα στην φυσική τους υγρασία και στα ίδια δείγματα μετά τον κορεσμό και τη στερεοποίηση τους κοντά στις επιτόπου τάσεις (πριν από την έναρξη της φόρτισης για την τριαξονική δοκιμή CUPP).

Με βάση τις τιμές V_s και V_p , προσδιορίστηκαν οι αντίστοιχες παράμετροι E και ν και το G_{max} .

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το κάθε δοκίμιο που αφορά τον σχηματισμό NS – TV1 φαίνονται στους Πίνακες 2.2 και 2.3. Αναλυτικά τα αποτελέσματα για το κάθε δοκίμιο δίνονται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα δοκιμών Bender Elements**.

Πίνακας 2.2: Γεωτεχνικές παράμετροι των δειγμάτων του σχηματισμού NS – TV1 στην φυσική του υγρασία.

Δείγμα	Βάθος (m)	S (%)	V_s (m/sec)	V_p (m/sec)	E (MPa)	ν	G_{max} (MPa)
I11A-7	35.0 - 35.4	71.68	166.9	617.0	163	0.461	56
I11A-8	41.2 - 41.4	67.23	182.8	791.3	178	0.471	61
I11A-9	45.5 - 45.9	79.63	166.4	813.3	164	0.478	55
I11A-10	51.6 - 52.0	95.00	118.4	337.2	76	0.430	27
I11A-11	56.6 - 56.9	82.60	176.1	609.8	144	0.454	50
I11A-12	61.7 - 62.0	84.30	203.2	498.7	197	0.400	70
I11A-13	65.5 - 65.8	96.40	155.2	486.8	133	0.442	46
I11A-14	71.7 - 72.0	98.30	185.7	523.0	197	0.428	69

Πίνακας 2.3: Γεωτεχνικές παράμετροι των δειγμάτων του σχηματισμού NS – TV1 μετά τον κορεσμό και την εφαρμογή των επί τόπου τάσεων.

Δείγμα	Βάθος (m)	V_s (m/sec)	V_p (m/sec)	E (MPa)	ν	G_{max} (MPa)
I11A-7	35.0 - 35.4	132.3	1547.0	94	0.496	32
I11A-8	41.2 - 41.4	306.4	1696.4	502	0.483	169
I11A-9	45.5 - 45.9	255.2	1481.2	387	0.485	130
I11A-10	51.6 - 52.0	141.2	1427.7	113	0.495	38
I11A-11	56.6 - 56.9	304.7	1663.0	441	0.483	149
I11A-12	61.7 - 62.0	192.0	1490.8	187	0.492	63
I11A-13	65.5 - 65.8	142.7	1467.4	116	0.495	39
I11A-14	71.7 - 72,0	235.0	1480.3	329	0.487	111

Από τον Πίνακα 2.2 προκύπτουν οι εξής τιμές για τον σχηματισμό NS – TV1 στην φυσική του υγρασία: Μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_s = 169.3 \text{ m/sec}$, μέση ταχύτητα διαμήκων κυμάτων $V_p = 584.6 \text{ m/sec}$, μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας $E = 156.6$

MPa, μέση τιμή του λόγου Poisson $\nu = 0.45$ και μέση τιμή του μέτρου διάτμησης $G_{\max} = 54.2 \text{ MPa}$.

Επίσης, από τον Πίνακα 2.3 μετά τον κορεσμό και την εφαρμογή των επί τόπου τάσεων, προκύπτουν οι παρακάτω τιμές για τον σχηματισμό NS – TV1: Μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_s = 213.7 \text{ m/sec}$, μέση ταχύτητα διαμήκων κυμάτων $V_p = 1531.7 \text{ m/sec}$, μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας $E = 271 \text{ MPa}$, μέση τιμή του λόγου Poisson $\nu = 0.49$ και μέση τιμή του μέτρου διάτμησης $G_{\max} = 91.2 \text{ MPa}$.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι ο βαθμός κορεσμού και οι τάσεις που επιβάλλονται στο δοκίμιο επηρεάζουν τις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων και συνεπώς το μέτρο ελαστικότητας (E), το μέτρο διάτμησης (G) και τον λόγο Poisson.

3. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ – ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ (ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΕΣ)

Για την διερεύνηση της κινητικής συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών και κατ' επέκταση της ευστάθειάς τους, είναι απαραίτητη η γνώση των υδραυλικών των μηχανικών παραμέτρων που καθορίζουν την μηχανική συμπεριφοράς τους.

Οι μηχανικές παράμετροι μπορούν να εκτιμηθούν με επιτόπου δοκιμές (π.χ. δοκιμή πρότυπης διείσδυσης SPT, δοκιμή στατικής πενетроμέτρησης CPT κ.α.), σε συνδυασμό με εμπειρικούς τύπους. Αν και οι επιτόπου δοκιμές δεν διαθέτουν την ακρίβεια των εργαστηριακών δοκιμών στον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων, σε πολλές οι περιπτώσεις δίνουν μία πολύ καλή εκτίμηση των ιδιοτήτων του εδάφους και αποφεύγεται η κοστοβόρα δειγματοληψία δειγμάτων.

3.1. Δοκιμή στατικής πενетроμέτρησης (CPT)

Μια από τις πιο δημοφιλείς επιτόπου δοκιμές για την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων και της λιθοστρωματογραφίας είναι η δοκιμή Στατικής Πενетроμέτρησης (CPT). Χρησιμοποιείται κυρίως για αργιλικούς και αμμώδεις σχηματισμών.

Το κύριο μειονέκτημα του CPT είναι ότι δεν παρέχει απόλυτες τιμές για τις παραμέτρους του εδάφους και τα αποτελέσματα πρέπει να βαθμονομηθούν έναντι άλλων δοκιμών όπως η δοκιμή πτεριγίου ή εργαστηριακές δοκιμές (π.χ. τριαξονικές δοκιμές) (Ameratunga et al., 2016).

Υπάρχουν γενικά τρεις κύριοι τύποι διεισδυτικών κώνων:

- **Μηχανικός κώνος πενетроμέτρου**

Ο κώνος αυτός χρησιμοποιεί έναν αριθμό από στελέχη με παχιά τοιχώματα για τη λειτουργία του πενетроμέτρου. Το άκρο του ωθείται αρχικά 4 cm και καταγράφεται η αντίσταση του άκρου. Στη συνέχεια τόσο ο κώνος όσο και ο μανδύας ωθούνται μεταξύ τους για να καταγραφεί η συνδυασμένη αντίσταση

του μανδύα και του κώνου. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται με την αύξηση του βάθους για να παρέχει την αντίσταση του κώνου και της πλευρικής τριβής σε συνάρτηση με το βάθος. Μια μέτρηση πραγματοποιείται περίπου κάθε 20 cm.

- **Ηλεκτρονικός κώνος**

Μια εξέλιξη του μηχανικού κώνου αποτελεί ο ηλεκτρονικός κώνος, ο οποίος έχει ηλεκτρονικούς αισθητήρες για την καταγραφή της αντίστασης στο άκρο του κώνου και στον μανδύα ξεχωριστά. Επομένως, έχει το πλεονέκτημα να προωθεί συνεχώς τον κώνο για να λαμβάνει την αντίσταση με το βάθος.

Ηλεκτρονικός κώνος με μετρήσεις πίεσης πόρων ή πιεζοκώνος (Piezocone)

Μια επιπλέον προσθήκη στο πενετρόμετρο είναι οι αισθητήρες πίεσης πόρων στο άκρο του κώνου ή στο μανδύα για τη καταγραφή της μέτρησης της πίεσης πόρων. Η δοκιμή είναι ευρέως γνωστή με τη συντομογραφία **CPTU**. Το πιο δημοφιλές όνομα για τον εξοπλισμό CPTU είναι ο πιεζοκώνος.

- **Σεισμικό πενετρόμετρο**

Επιτρέπει τη μέτρηση της ταχύτητας του διατμητικού κύματος με το βάθος. Ανά διαστήματα 1 m, δημιουργείται ένα κύμα διάτμησης και καταγράφεται ο χρόνος άφιξης του σεισμικού κύματος στην επιφάνεια του εδάφους. Η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του συντελεστή με χρήση εμπειρικών συσχετισμών.

3.1.1. Δοκιμή πιεζοκώνου (CPTU)

Η δοκιμή πιεζοκώνου παρέχει πληθώρα δεδομένων και βοηθάει στην διάκριση διαφορετικών τύπων εδάφους. Πιο συγκεκριμένα ο κώνος ωθείται με τυπικό ρυθμό διείσδυσης 20.5 mm /sec και μετράται :

- **Αντίσταση του κώνου (q_c) (kPa)**

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad [3.1]$$

όπου,

Q_c η δύναμη που εφαρμόζεται στο κώνο (kN), και

A_c το εμβαδόν του κώνου (m^2).

- **Πλευρική τριβή (f_s) (kPa)**

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s} \quad [3.2]$$

όπου,

Q_s η δύναμη που απαιτείται για την προώθηση του μανδύα, δηλαδή η πλευρική τριβή (kN), και

A_s το εμβαδόν επιφάνειας του μανδύα (m^2).

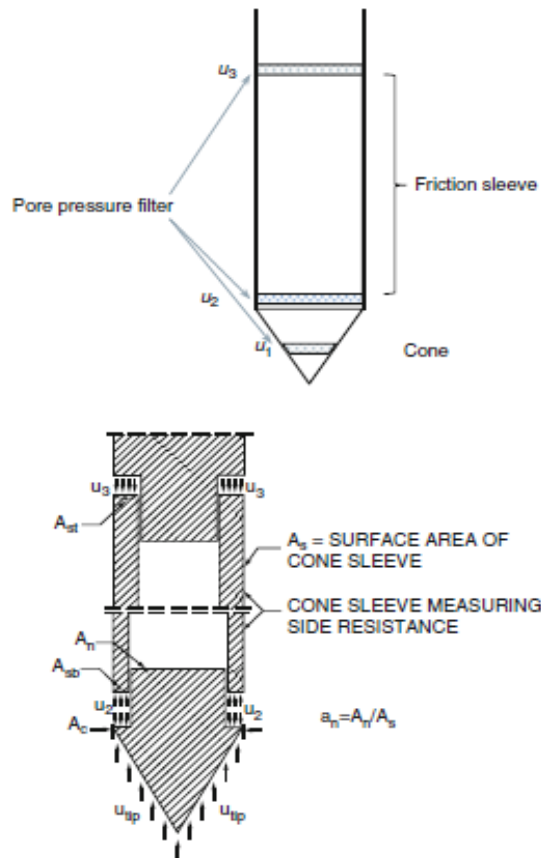
- **Πίεση νερού πόρων (u) (kPa)**, στην θέση που έχει τοποθετηθεί ο αισθητήρας (βλέπε Σχήμα 3.1).

Γενικά η δοκιμή αυτή επιτρέπει την ταξινόμηση του εδάφους και την εκτίμηση πολλών γεωτεχνικών παραμέτρων. Οι κύριες χρήσεις της δοκιμής είναι οι εξής:

1. Ταξινόμηση εδάφους.
2. Εκτίμηση παραμέτρων σε εδάφη χωρίς συνοχή (π.χ. σχετική πυκνότητα D_r , γωνία εσωτερικής τριβής ϕ' , μέτρο παραμόρφωσης E , μέτρο διάτμησης G_{max}).
3. Εκτίμηση παραμέτρων σε συνεκτικά εδάφη (π.χ. αστράγγιστη αντοχή σε διάτμηση c_u , ευαισθησία, λόγος προστερεοποίησης (OCR), μέτρο παραμόρφωσης E , μέτρο διάτμησης G_{max} , γωνία εσωτερικής τριβής ϕ').
4. Εκτίμηση του μοναδιαίου βάρους γ .
5. Συσχέτιση των μετρήσεων με την αντίσταση σε θεμέλιο (εκτίμηση της επιτρεπόμενης τάσης).
6. Συσχέτιση των μετρήσεων CPT με τις μετρήσεις SPT.
7. Εκτίμηση της διαπερατότητας.

Διορθώσεις

Οι μετρήσεις αντίστασης επηρεάζονται από την πίεση του νερού που δρα στο πίσω άκρο του κώνου και την άκρη του μανδύα. Επομένως πρέπει γίνει **διόρθωση** στις μετρήσεις του αισθητήρα που βρίσκεται στην θέση u_2 (Σχήμα 3.1) σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση των αισθητήρων μέτρησης της πίεσης των πόρων, του πιεζοκώνου (Robertson et al., 2010).

$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a_n) \quad [3.3]$$

όπου,

q_t η διορθωμένη αντίσταση άκρου (kPa),

u_2 η πίεση πόρων μετρούμενη στην θέση 2 (kPa) (βλέπε Σχήμα 3.1), και

a_n ο λόγος καθαρού εμβαδόν ή συντελεστής εμβαδού του κώνου, είναι περίπου ίσος με τον λόγο του εμβαδόν διατομής του άξονα και του μανδύα του κώνου.

Ένας διορθωτικός συντελεστής εφαρμόζεται επίσης για την τριβή του μανδύα (Lunne et al., 1997):

$$f_t = f_s + \frac{(u_3 \cdot A_{st} - u_2 \cdot A_{sb})}{A_s} \quad [3.4]$$

όπου,

A_{sb} το εμβαδόν διατομής του μανδύα στη βάση (m^2) (βλέπε Σχήμα 3.1),

A_{st} το εμβαδόν διατομής του μανδύα στην κορυφή (m^2) (βλέπε Σχήμα 3.1), και

A_s το εμβαδόν επιφάνειας του μανδύα (m^2) (βλέπε Σχήμα 3.1)

Η δοκιμή πιεζοκώνου έχει την δυνατότητα πραγματοποίησης δοκιμών εκτόνωσης της πίεσης πόρων που προκαλεί. Αυτό βοηθά στην εκτίμηση του συντελεστή στερεοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους (κυρίως των αργιλικών εδαφών) (Ameratunga et al., 2016).

Οι εξισώσεις και οι εμπειρικές σχέσεις που είναι διαθέσιμες για το CPT ισχύουν εξίσου για το CPTU με επιπλέον σχέσεις που έχουν δημιουργηθεί λόγω πρόσθετων πληροφοριών όσον αφορά τις μετρήσεις πίεσης πόρων (Ameratunga et al., 2016).

3.1.2. Ταξινόμηση εδάφους

Ένας από τους βασικούς σκοπούς μιας δοκιμής πενετρόμετρου είναι να προσδιορίσει τη λιθοστρωματογραφία της υπό μελέτη περιοχής. Αυτό επιτυγχάνεται αξιοποιώντας τις μετρήσεις αντίστασης κώνου, τον λόγο τριβής, καθώς και τις μετρήσεις της πίεσης των πόρων (για δοκιμές CPTU).

Η μέτρηση της πίεσης των πόρων επιτρέπει την καλύτερη ταξινόμηση των εδαφών χρησιμοποιώντας μια πρόσθετη παράμετρο η οποία είναι ο λόγος πίεσης πόρων B_q που ορίζεται ως:

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{vo}} \quad [3.5]$$

όπου,

u_2 η πίεση πόρων μετρούμενη στην θέση 2 (kPa)(βλέπε Σχήμα 3.1),

u_0 η πίεση πόρων ηρεμίας (λόγω της στάθμης των υπόγειων υδάτων) (kPa),

q_t η διορθωμένη αντίσταση κώνου (kPa), και

σ_{vo} η ολική κατακόρυφη τάση λόγω υπερκευμένων (kPa).

Ο λόγος τριβής R_f που ορίζεται ως:

$$R_f = \frac{f_t}{q_t} \quad [3.6]$$

όπου,

f_t η διορθωμένη πλευρική τριβή (kPa), και

q_t η διορθωμένη αντίσταση κώνου (kPa).

Η κανονικοποιημένη αντίσταση κώνου Q_t ορίζεται ως:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \quad [3.7]$$

Ο κανονικοποιημένος λόγος τριβής F_r ορίζεται ως

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \cdot 100\% \quad [3.8]$$

όπου,

q_t η διορθωμένη αντίσταση κώνου (kPa),

f_s η πλευρική τριβή (kPa),

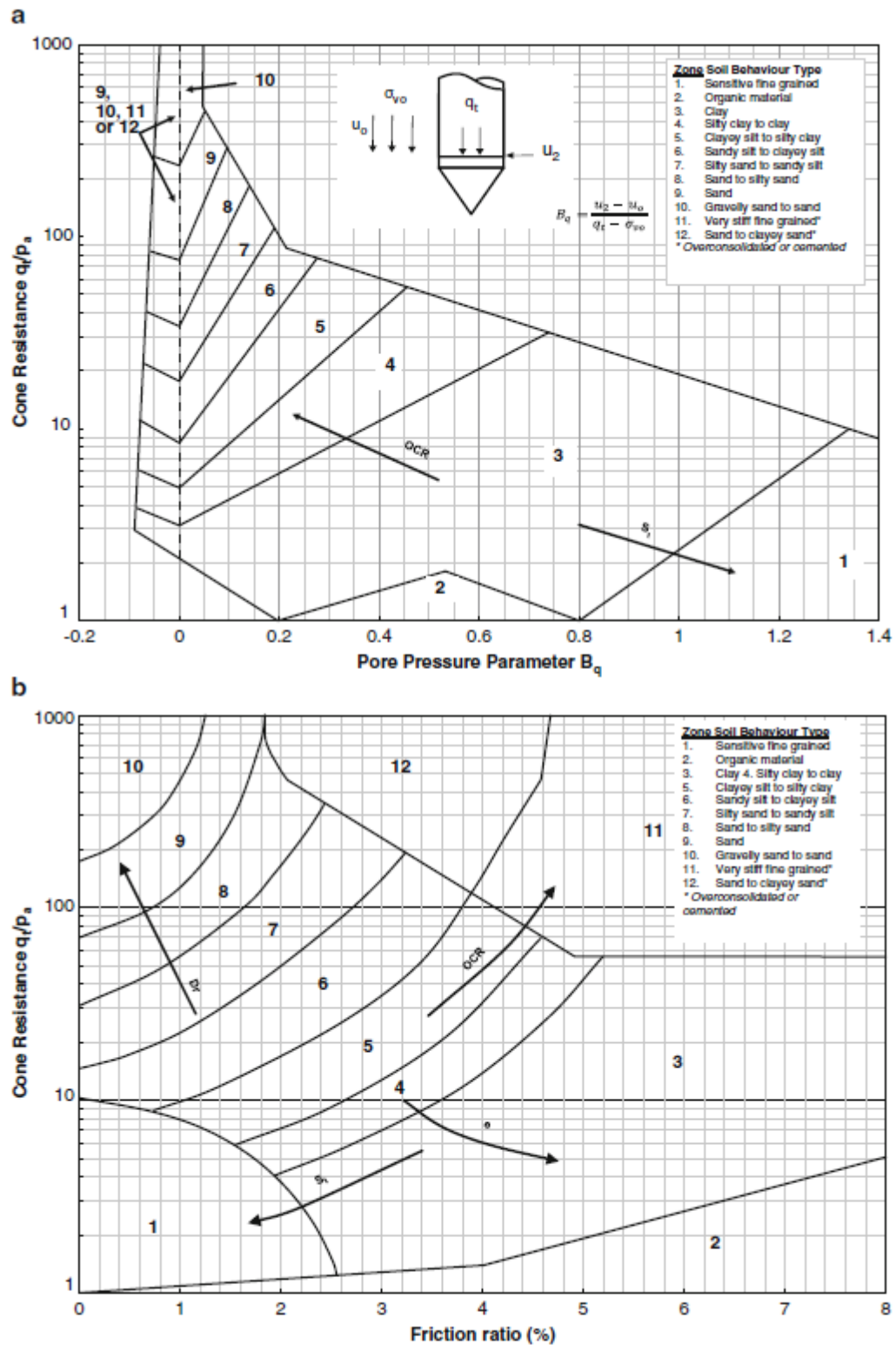
σ_{vo} η ολική τάση λόγω υπερκείμενων στρωμάτων (kPa), και

σ'_{vo} η ολική ενεργή κατακόρυφη τάση λόγω υπερκείμενων στρωμάτων (kPa), η οποία δίνεται από τη σχέση:

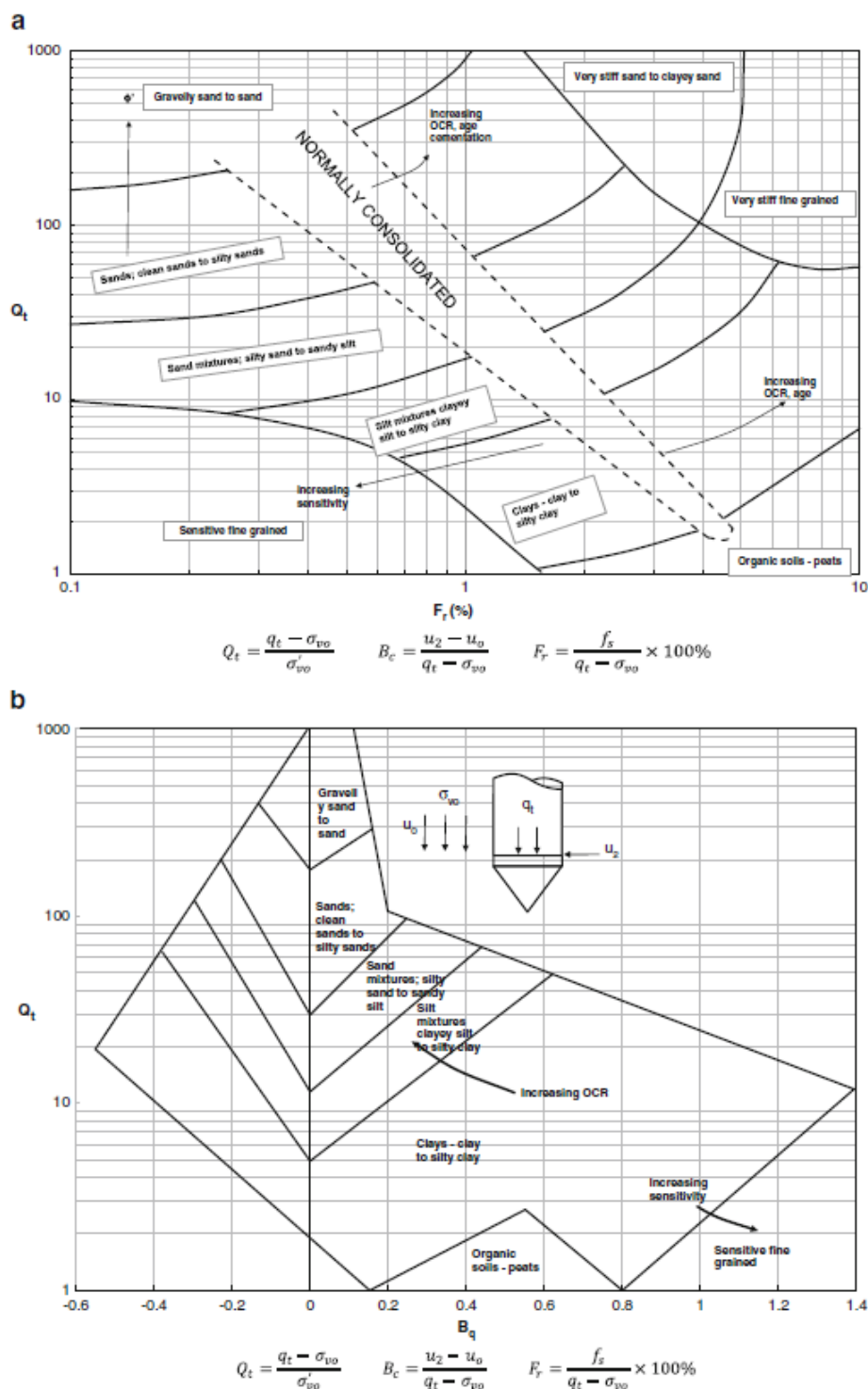
$$\sigma'_{vo} = \sigma_{vo} - u_0 \quad [3.9]$$

Γενικά χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι για την ταξινόμηση του εδάφους (με βάση την συμπεριφορά):

- Η μέθοδος του Robertson et al. (1986) που χρησιμοποιεί τις παραμέτρους q_t , B_q και R_f (βλέπε Σχήμα 3.2).
- Η μέθοδος του Robertson (1990) που χρησιμοποιεί τις παραμέτρους Q_t (κανονικοποιημένο q_t), B_q και F_r (κανονικοποιημένος λόγος τριβής) (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.2: Προτεινόμενο σύστημα ταξινόμησης του εδάφους χρησιμοποιώντας δεδομένα από CPTu δοκιμές (Robertson et al., 1986).



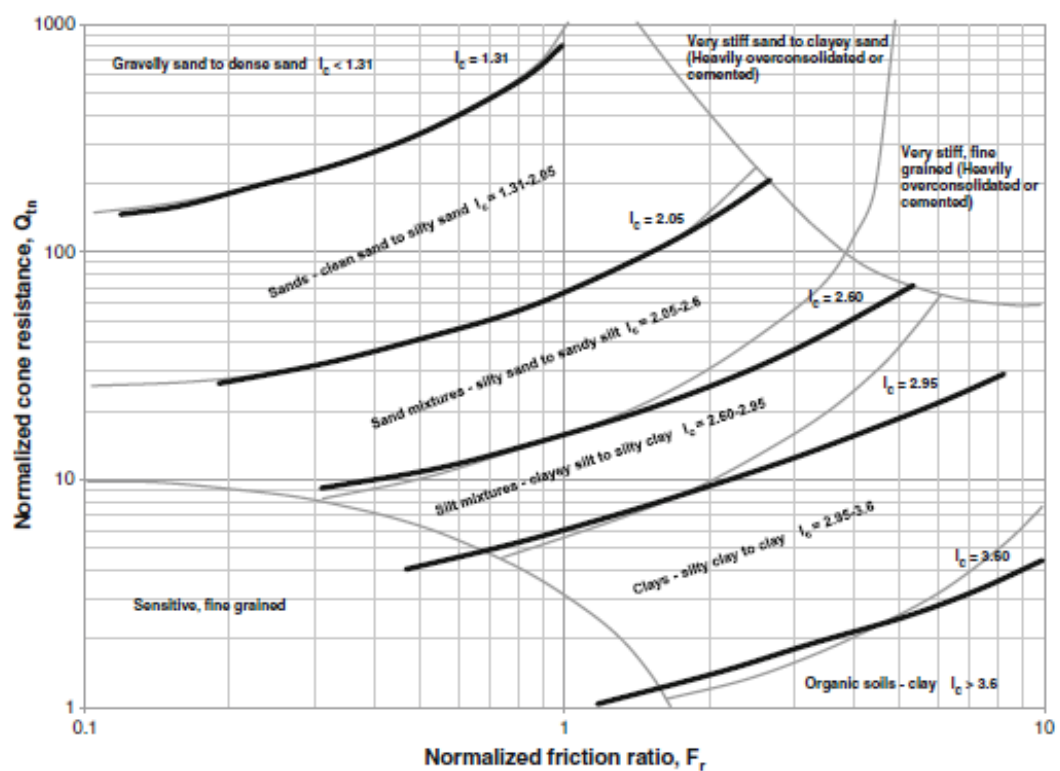
Σχήμα 3.3: Σύστημα ταξινόμησης για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του εδάφους χρησιμοποιώντας κανονικοποιημένες τιμές από CPT/CPTU δοκιμές (Robertson, 1990).

- Η μέθοδος Jefferies and Davies (1993) χρησιμοποιεί τις κανονικοποιημένες παραμέτρους Q_t , F_r , καθώς και ένα δείκτη I_c που λειτουργεί ως ευρετήριο και

αντιπροσωπεύει ζώνες διαφορετικής συμπεριφοράς του εδάφους (Πίνακας 3.1 και Σχήμα 3.4).

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση εδάφους κατά (Jefferies and Davies, 1993).

Ζώνες	Κατηγορία Εδάφους	I_c
2	Οργανικό έδαφος / Τύρφη	3.6
3	Άργιλος	2.95
4	Ιλυώδης Άργιλος – Αργιώδης Ιλύς	2.6
5	Αμμώδης Ιλύς – Ιλυώδης Άμμος	2.05
6	Άμμος (Λεπτόκοκκη – Μεσόκοκκη)	1.31
7	Χαλικώδης Άμμος	0



Σχήμα 3.4: Απεικόνιση ζωνών με βάση τον δείκτη I_c σε κανονικοποιημένες μετρήσεις (Robertson, 2009).

Ο δείκτης συμπεριφοράς εδάφους I_c δεν ισχύει για ευαίσθητα λεπτόκοκκα εδάφη, για αμμώδη έως αργιλώδη άμμο και για δύσκαμπτα λεπτόκοκκα εδάφη. Δίνεται δε από τον παρακάτω τύπο:

$$I_c = [(3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2]^{0.5} \quad [3.10]$$

3.1.3. Εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων σε εδάφη χωρίς συνοχή

Η δοκιμή πενетроμέτρησης με πιεζοκώνο σε μη συνεκτικά εδάφη πραγματοποιείται σε στραγγιζόμενες συνθήκες, ώστε η μετρούμενη πίεση πόρων να αποδίδεται στην πίεση πόρων ηρεμίας (u_0).

Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αντίσταση κώνου (q_c) αντί της διορθωμένης τιμής (q_t).

Σχετική πυκνότητα (D_r)

Η σχετική πυκνότητα D_r είναι μια παράμετρος που χρησιμοποιείται κυρίως στην άμμο για τον προσδιορισμό του επιπέδου συμπίκνωσης του υλικού και δίνεται από την σχέση:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad [3.11]$$

όπου,

e_{max} ο μέγιστος λόγος κενού,

e_{min} ο ελάχιστος λόγος κενού, και

e ο λόγος κενού επιτόπου.

Ο Mayne (2007) πρότεινε την ακόλουθη σχέση για την εκτίμηση της σχετικής πυκνότητας από CPT δοκιμές, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως:

$$D_r = 100 \cdot [0.268 \cdot \ln \left(\frac{q_t/P_a}{\sqrt{\sigma'_{vo}/P_a}} \right) - 0.675] \quad [3.12]$$

όπου,

q_t η διορθωμένη αντίσταση κώνου (kPa),

P_a Ατμοσφαιρική πίεση (100 kPa), και

σ'_{vo} η ενεργή κατακόρυφη τάση λόγω υπερκειμένων στρωμάτων (kPa).

Εκτός από την σχέση του Mayne (σχέση 3.12) έχουν προταθεί και άλλες σχέσεις για την εκτίμηση της σχετικής πυκνότητας. Οι σχέσεις αυτές λαμβάνουν υπόψη τους την συμπίεστικότητα, τον λόγο προστερεοποίησης OCR, την ηλικία του εδάφους, καθώς και αποτελέσματα από την δοκιμή SPT (Δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης).

Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ')

Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες εκτίμησης της γωνίας εσωτερικής τριβής από το CPT, και συγκεκριμένα με την αντίσταση του κώνου q_c .

Η πιο πρόσφατη έρευνα είναι του Mayne (2007), η οποία αναφέρει την ακόλουθη συσχέτιση:

$$\phi' = 17.6 + 11 \cdot \log(q_{t1}) \quad [3.13]$$

όπου,

$$q_{t1} = \frac{(q_{ct}/P_a)}{(\sigma'_{vo}/P_a)^{0.5}} \quad [3.14]$$

q_{ct} η αντίσταση του κώνου (q_c) ή η διορθωμένη αντίσταση κώνου q_t (kPa),

P_a η ατμοσφαιρική πίεση (100 kPa), και

σ'_{vo} η ολική ενεργή κατακόρυφη τάση λόγω υπερκειμένων στρωμάτων (kPa).

Μέτρο συμπίεσης (M)

Το μέτρο συμπίεσης αναφέρεται στο εφαπτομενικό μέτρο όπως αυτό προσδιορίζεται από τις δοκιμές οιδήμετρου.

$$M = 1/m_v \quad [3.15]$$

όπου, m_v ο συντελεστής μεταβολής όγκου (m^2/MN).

Από τις δοκιμές CPT το μέτρο συμπίεσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$M = a \cdot q_c \quad [3.16]$$

όπου,

M το μέτρο συμπίεσης (KPa),

q_c η αντίσταση του κώνου q_c (KPa), και

a ο συντελεστής του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης. Συνήθως παίρνει την τιμή 3, η οποία παρέχει μια συντηρητική εκτίμηση.

Γενικά έχουν αναπτυχθεί και άλλες σχέσεις για την εκτίμηση του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης M . Η πιο πρόσφατη είναι αυτή που πρότειναν οι Robertson and Cabal (2014):

$$M = a_M \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad [3.17]$$

Όταν $I_c < 2.2$ (χονδρόκοκκα εδάφη, π.χ. άμμος) το a_M δίνεται από την σχέση:

$$a_M = 0.0188 \cdot 10^{(0.55 \cdot I_c + 1.68)} \quad [3.18]$$

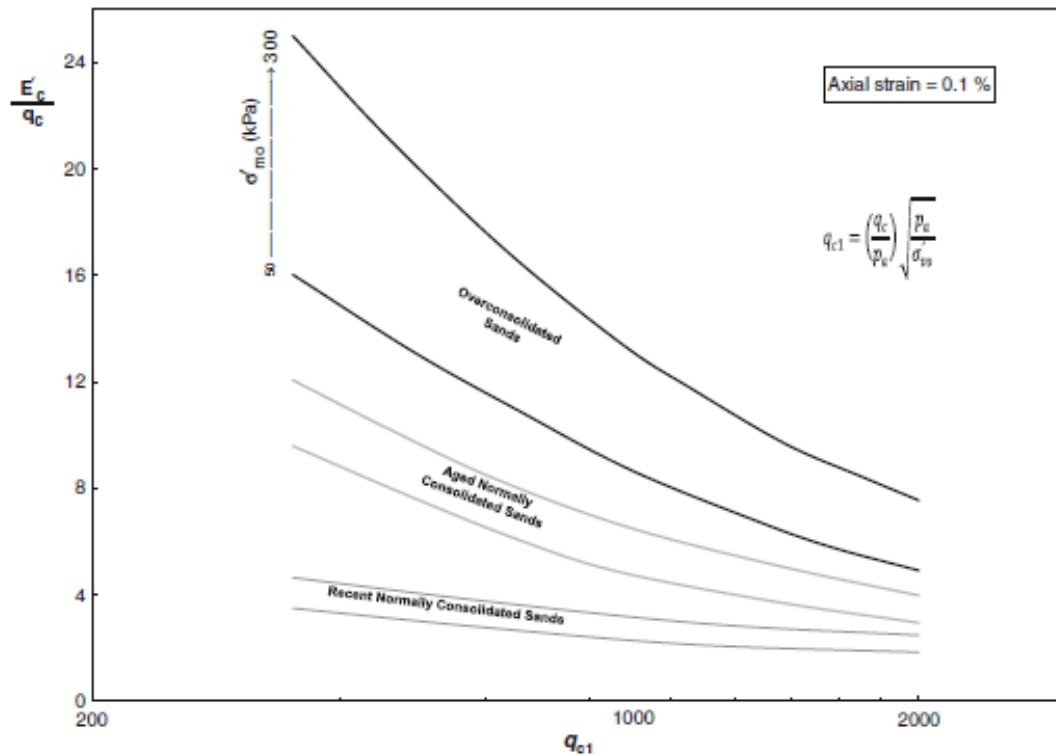
όπου, το I_c δίνεται από την σχέση 3.10.

Μέτρο παραμόρφωσης (E)

Η ακαμψία των εδαφών χωρίς συνοχή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η κατηγορία του εδάφους, την ορυκτολογία, το σχήμα, το μέγεθος των κόκκων, το ιστορικό τάσης - παραμόρφωσης, τις ενεργές τάσεις, τις συνθήκες στράγγισης κ.α.

Η αντίσταση στη διείσδυση q_c ελέγχεται κυρίως από τον λόγο κενών, τη σχετική πυκνότητα και τις ενεργές τάσεις. Με βάση ένα μεγάλο αριθμό επιτόπου δοκιμών, οι προτεινόμενοι συσχετισμοί για την απόκτηση του μέτρου παραμόρφωσης σε συνθήκες στράγγισης μη συνεκτικών εδαφών (κυρίως άμμος) βασίζονται στην αντίσταση διείσδυσης κώνου q_c , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.

Επίσης το μέτρο παραμόρφωσης του Young θα μπορούσε να εκτιμηθεί με βάση την ταχύτητα του διατμητικού κύματος V_s από την παρακάτω σχέση:



Σχήμα 3.5: Εκτίμηση του μέτρου παραμόρφωσιμότητας από CPT δοκιμές σε άμμους (Robertson, 1986).

$$E = 2 \cdot \rho \cdot V_s^2 \cdot (1 + \nu) \quad [3.19]$$

όπου,

ρ η πυκνότητα (kg/m^3),

V_s η ταχύτητα του διατμητικού κύματος (m/sec), και

ν ο λόγος Poisson.

Μέτρο διάτμησης (G_0)

Το μέτρο διάτμησης G_0 εκτιμάται σε πολύ μικρά επίπεδα παραμόρφωσης. Ο πιο κατάλληλος τρόπος αξιολόγησης του G_0 είναι με μέτρηση της ταχύτητας του διατμητικού κύματος, V_s .

Το G_0 θα μπορούσε τότε να υπολογιστεί ως εξής:

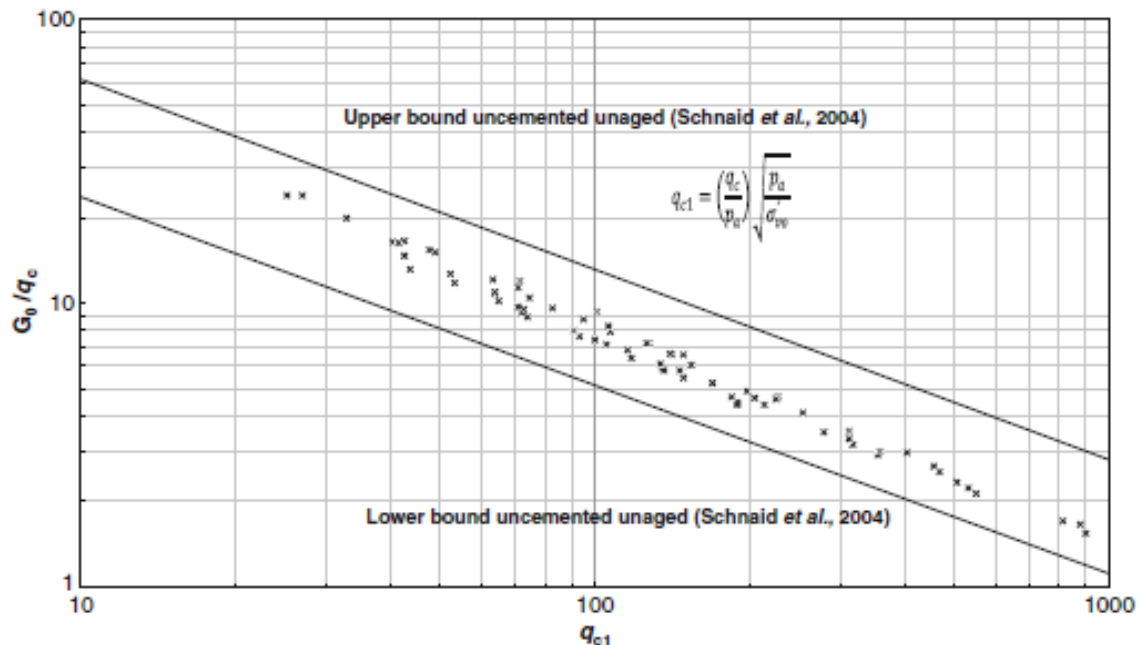
$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad [3.20]$$

όπου,

ρ η πυκνότητα (kg/m^3), και

V_s η ταχύτητα του διατμητικού κύματος (m/sec).

Ο Schnaid (2009) παρουσίασε μια θεωρητική σχέση του (G_0) με το q_c χωρίς να λάβει υπόψη του τα όρια που χαρακτηρίζουν την ηλικία απόθεσης του εδάφους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Θεωρητική σχέση για το G_0/q_c και το q_{c1} (Schnaid, 2009).

Οι Robertson and Cabal (2014) πρότειναν τα ακόλουθα κατώτερα και ανώτερα όρια τιμών G_0 σε μη συνεκτικά εδάφη (κυρίως άμμους):

$$G_0 = b \cdot (q_t \cdot \sigma'_{v0} \cdot P_a)^{0.3} \quad [3.21]$$

όπου, b είναι μια σταθερά ίση με 280 για το ανώτερο όριο και 110 για το κατώτερο όριο του G_0 (βλέπε Σχήμα 3.6). Υψηλότερες τιμές υποδηλώνουν πιθανή συνεκτικότητα.

3.1.4. Εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων σε συνεκτικά εδάφη

Η δοκιμή πενετρομέτρησης με πιεζοκώνο σε συνεκτικά εδάφη πραγματοποιείται σε αστράγγιστες συνθήκες. Έτσι η μετρούμενη πίεση πόρων U_T αποδίδει τις ολικές πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται κατά την διείσδυση:

$$U_T = u_0 + \Delta u \quad [3.22]$$

όπου,

u_0 η πίεση πόρων ηρεμίας (λόγω της στάθμης των υπόγειων νερών) (kPa), και

Δu οι υπερπιέσεις που αναπτύσσονται λόγω διείσδυσης του κώνου (kPa).

Αντοχή σε διάτμηση (c_u)

Το c_u προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

$$c_u = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{N_k} \quad [3.23]$$

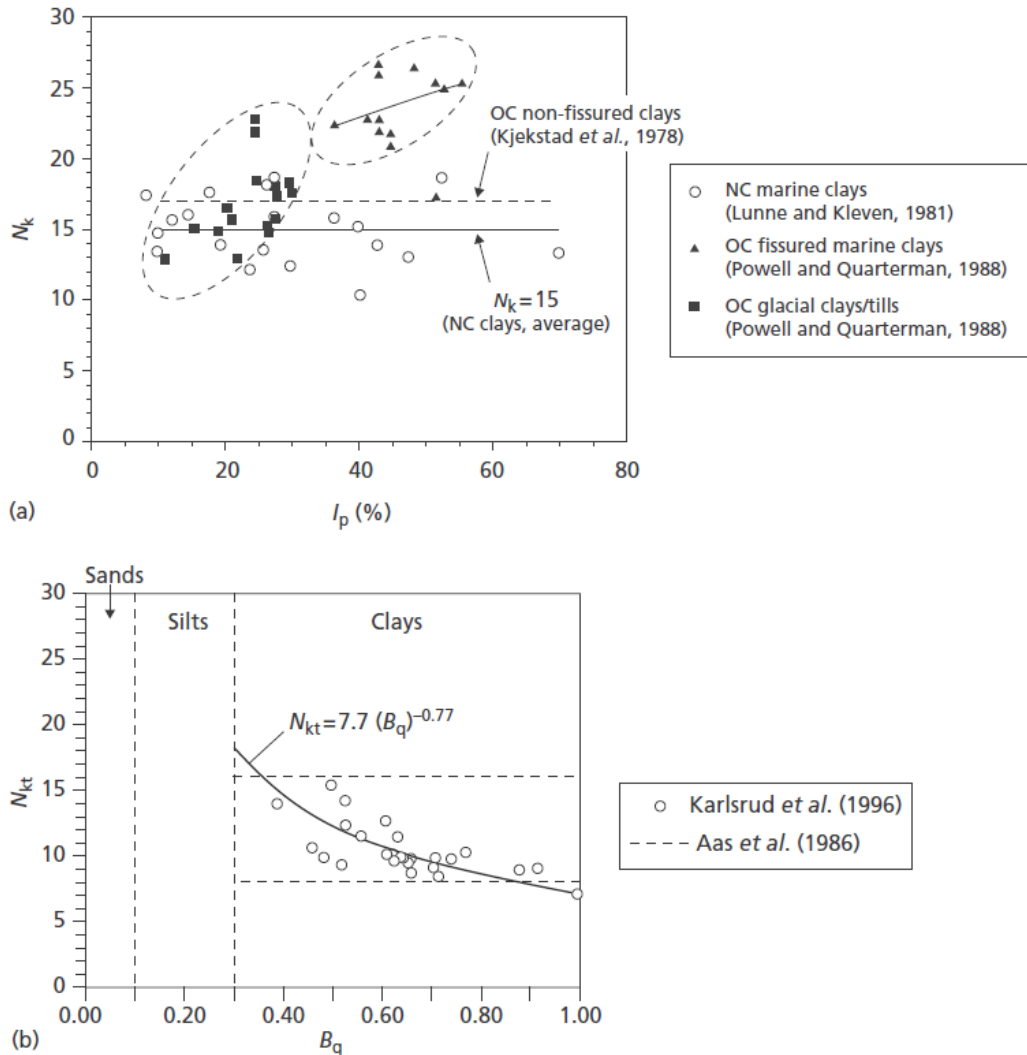
όπου,

q_c η αντίσταση του κώνου (kPa),

σ_{v0} η ολική κατακόρυφη τάση λόγω υπερκειμένων (kPa), και

N_k είναι ο «παράγοντας βαθμονόμησης», ο οποίος μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα μιας σειράς εργαστηριακών δοκιμών (π.χ. UU τριαξονική δοκιμή).

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.7 (α) η τιμή του $N_k = 15$ είναι μια καλή πρώτη προσέγγιση για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους και η τιμή $N_k = 17$ είναι μια καλή πρώτη προσέγγιση για υπερστερεοποιημένες αργίλους. Για σχιστοποιημένες αργίλους θεωρούνται μεγαλύτερες τιμές N_k .



Σχήμα 3.7: Βαθμονόμηση συντελεστών N_k και N_{kt} για τον καθορισμό του c_u .

Εάν διατίθενται δεδομένα CPTU η διαδικασία είναι η ίδια. Ωστόσο, η τιμή q_t αντικαθιστά το q_c έτσι ώστε οι υπερπιέσεις πόρων που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της διεύδυσης να διορθώνονται. Η τιμή c_u δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad [3.24]$$

όπου,

q_t η διορθωμένη αντίσταση κώνου (kPa),

σ_{v0} η ολική τάση λόγω υπερκειμένων (kPa), και

N_{kt} ο συντελεστής βαθμονόμησης για δεδομένα CPTU (kPa).

Πολλές μελέτες έχουν προβλέψει τιμές N_{kt} στην περιοχή 10 – 20, αλλά δεν θεωρείται ως μια γενικά αποδεκτή τιμή και συνιστάται να γίνεται βαθμονόμηση έναντι άλλων δοκιμών (π.χ. τριαξονικές δοκιμές), καθορίζοντας μια αποδεκτή τιμή N_{kt} . Συνήθως λαμβάνουν τιμές σ' ένα εύρος 14 – 16 (Ameratunga et al., 2016).

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.7 (b) η καλύτερη προσέγγιση δίνεται από την σχέση:

$$N_{kt} = 7.2 \cdot B_q^{-0.7} \quad [3.25]$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για αργίλους δηλαδή για τιμές $0.3 < B_q \leq 1$.

Μια εναλλακτική λύση για την εκτίμηση του c_u από τις υπερπιέσεις πόρων δίνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$c_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} \quad [3.26]$$

όπου,

$\Delta u = u_2 - u_0$ = η υπερβολική πίεση πόρων μετρούμενη στη θέση u_2 (kPa), και

$N_{\Delta u}$ ο συντελεστής κώνου πίεσης πόρων, ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{\Delta u} = B_q \cdot N_{kt} \quad [3.27]$$

Οι Robertson and Cabal (2014) δείχνουν ότι το $N_{\Delta u}$ κυμαίνεται μεταξύ 4 και 10.

Λόγος προστερεοποίησης (OCR)

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για τον προσδιορισμό του λόγου προστερεοποίησης OCR από δεδομένα πενετρομέτρου. Η πιο πρόσφατη μέθοδος προτάθηκε από τον Mayne (2007), σύμφωνα με την οποία το OCR εκτιμάται από την παρακάτω σχέση:

$$OCR = 0.33 \cdot \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \quad [3.28]$$

όπου,

q_t η διορθωμένη αντίσταση κώνου (kPa),

σ_{v0} η ολική τάση λόγω υπερκειμένων (kPa),

σ'_{v0} η ολική ενεργή κατακόρυφη τάση λόγω υπερκειμένων στρωμάτων (kPa), και

Μέτρο συμπίεσης (M)

Το μέτρο συμπίεσης προσδιορίζεται κυρίως από την δοκιμή στερεοποίησης χρησιμοποιώντας τη σχέση 3.15.

Με τις CPT – CPTU δοκιμές, το μέτρο συμπίεσης προσδιορίζεται από τη σχέση 3.30, η οποία είναι παρόμοια με αυτήν που χρησιμοποιείται για τα μη συνεκτικά εδάφη (σχέση 3.17).

Το a_M υπολογίζεται με βάση τον δείκτη I_c που προσδιορίζεται από την (σχέση 3.10) (Robertson, 2009):

Όταν $I_c > 2.2$ και $Q_t \leq 14$ το $a_M = Q_t$

Όταν $I_c > 2.2$ και $Q_t > 14$ το $a_M = 14$

Όταν $I_c < 2.2$ το $a_M = 0.03 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$ [3.29]

Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ')

Η γωνία εσωτερικής τριβής σε μαλακή έως σταθερή άργιλο μπορεί να εκτιμηθεί από την παρακάτω σχέση θεωρώντας το $c'=0$ (Mayne & Campanella, 2014).

$$\phi'_{max} = 29.5 \cdot B_q^{0.121} \cdot [0.256 + 0.336 \cdot B_q + \log \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right)] \quad [3.30]$$

Η σχέση 3.31 ισχύει για $0.1 < B_q < 1.0$.

Για εδάφη με $B_q < 0.1$ (δηλαδή για άμμο) θα πρέπει να χρησιμοποιείται η Σχέση 3.13.

Μέτρο διάτμησης (G_{max})

Το μέτρο διάτμησης G_{\max} (που αναφέρεται κυρίως σε μικρές παραμορφώσεις) σχετίζεται με την ταχύτητα του διατμητικού κύματος V_s . Ο Mayne και Rix (1995) πρότειναν την παρακάτω σχέση για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων V_s :

$$V_s = 1.75 \cdot q_c^{0.627} \quad [3.31]$$

όπου,

V_s η ταχύτητα του διαμήκους κύματος σε m/s, και

q_c η αντίσταση του κώνου σε kPa.

Θα ήταν πιο κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί μια καθαρή αντίσταση κώνου (π.χ. $q_c - \sigma_{v0}$ ή πιο σωστά το $q_t - \sigma_{v0}$) (Mayne and Rix, 1993).

Γενικά έχουν αναπτυχθεί πολλές σχέσεις για την εκτίμηση της ταχύτητας του V_s που βασίζονται στον τύπο του εδάφους καθώς και στον χρόνο απόθεσης. Μια από τις πιο πρόσφατες σχέσεις αναπτύχθηκε από τον Robertson (2009) και ισχύει για όλα τα εδάφη της Τεταρτογενούς περιόδου.

$$V_s = \left\{ \frac{(10^{0.55 \cdot I_c + 1.68})(q_t - \sigma_v)}{p_a} \right\}^{0.5} \quad [3.32]$$

όπου,

I_c δείκτης που προσδιορίζεται από την σχέση 3.10,

q_t η διορθωμένη αντίσταση κώνου (kPa),

σ_v η ολική κατακόρυφη τάση λόγω υπερκειμένων στρωμάτων (kPa), και

p_a η ατμοσφαιρική πίεση (100 kPa).

Το μέτρο διάτμησης στην συνέχεια υπολογίζεται από την σχέση 3.20.

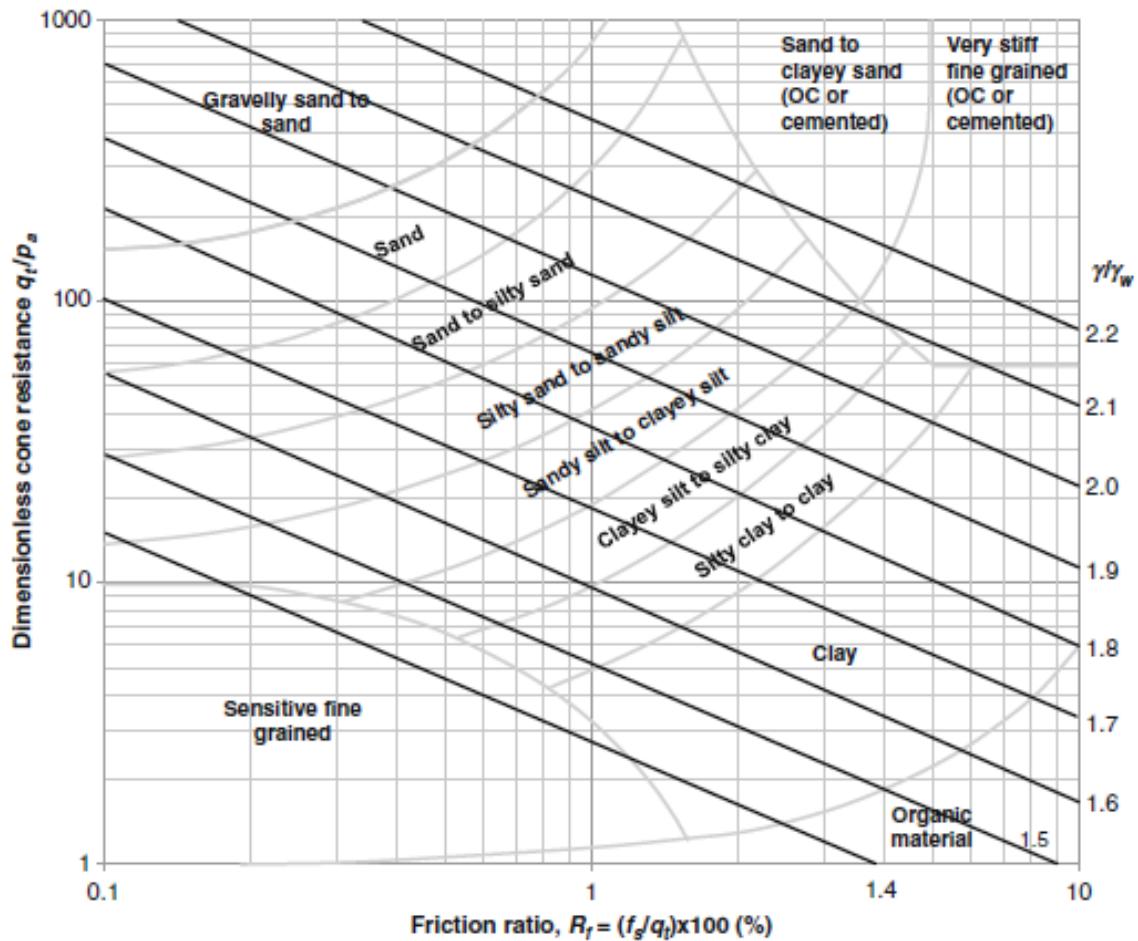
Μέτρο παραμορφωσιμότητας (E)

Το μέτρο παραμόρφωσης του Young θα μπορούσε να εκτιμηθεί με βάση την ταχύτητα του διατμητικού κύματος V_s από τη σχέση 3.19.

3.1.5. Εκτίμηση μοναδιαίου βάρους γ

Αρκετές μελέτες που συνδέουν το μοναδιαίο βάρος (γ) με τις μετρήσεις CPT. Δύο από τους πιο πρόσφατους συσχετισμούς για την εκτίμηση του μοναδιαίου βάρους με βάση τις μετρήσεις του CPT είναι του Robertson and Cabal (2010) και του Mayne et al. (2010) που έχουν χρησιμοποιούν εκτός από την αντίσταση στο άκρο την πλευρική τριβή του μανδύα (βλέπε Σχήμα 3.8):

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = 0.27 \cdot [\log R_f] + 0.36 \cdot [\log (q_t/p_a)] + 1.236 \quad [3.33]$$



Σχήμα 3.8: Κανονικοποιημένη τιμή μοναδιαίου βάρους σε σχέση με τον λόγο τριβής (Robertson and Cabal, 2010).

3.1.6. Εκτίμηση διαπερατότητας k

Οι Robertson and Cabal (2010) διατύπωσαν ότι η μέση διαπερατότητα (k) εκτιμάται χρησιμοποιώντας τον δείκτη I_c (σχέση 3.10) και δίδεται από τις σχέσεις 3.34 και 3.35. Τα αποτελέσματα για διάφορους τύπους εδαφών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

$$\text{Όταν } 1.0 < I_c \leq 3.27 \text{ το } k = 10^{(0.952 - 3.04 \cdot I_c)} \text{ m/sec} \quad [3.34]$$

$$\text{Όταν } 3.27 < I_c \leq 4 \text{ το } k = 10^{(-4.52 - 1.37 \cdot I_c)} \text{ m/sec} \quad [3.35]$$

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της διαπερατότητας του εδάφους (k) με το βάθος σε μια δοκιμή CPT.

Πίνακας 3.2: Περαιτότητα από CPT αποτελέσματα (Robertson and Cabal, 2010) .

Κατηγορίες εδαφών ανάλογα με την συμπεριφορά	Περαιτότητα (m/sec)
Ευαίσθητα λεπτόκοκκα εδάφη	$3 \times 10^{-9} - 3 \times 10^{-8}$
Οργανικό έδαφος / τύρφη	$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-6}$
Άργιλοι – άργιλοι έως ιλυώδης άργιλος	$1 \times 10^{-10} - 1 \times 10^{-7}$
Ιλύς με προσμίξεις αργιλώδης ιλύς – ιλυώδης αργίλου	$3 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-7}$
Άμμος με προσμίξεις ιλυώδους άμμου – αμμώδους ιλύος	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-5}$
Άμμος – ιλυώδης άμμος	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$
Χαλίκια – άμμος	$1 \times 10^{-3} - 1$
Άκαμπτη άμμος – αργιλώδης άμμος (*)	$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-6}$
Πολύ άκαμπτο λεπτόκοκκο υλικό (*)	$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-7}$

(*) Υπερστερεοποιημένα υλικά

3.1.7. Εκτίμηση συντελεστή πλευρικής ώθησης K_0

Το CPT μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των επιτόπου οριζόντιων τάσεων στο έδαφος. [3.37]

Με βάση τα αποτελέσματα από τις δοκιμές CPT ο συντελεστής πλευρικής ώθησης K_0 εκτιμάται από την εμπειρική σχέση (Kulhawy and Mayne, 1990):

$$K_0 = 0.1 \cdot \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \quad [3.36]$$

όπου,

q_t η διορθωμένη αντίσταση κώνου (kPa),

σ_{v0} η ολική τάση λόγω υπερκειμένων (kPa), και

σ'_{v0} η ολική ενεργή κατακόρυφη τάση λόγω υπερκειμένων στρωμάτων (kPa).

Γενικά, υπάρχει μεγάλη διασπορά στα αποτελέσματα που προκύπτουν με την παραπάνω σχέση. Για τον λόγο αυτό συχνά προτείνεται η σχέση του Jaky (1948) που δίνει μία πιο συντηρητική εκτίμηση του K_0 και αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένα εδάφη:

$$K_0 = 1 - \varphi' \quad [3.37]$$

όπου, φ' είναι η γωνία εσωτερικής τριβής που προκύπτει από το CPT.

3.2. Επεξεργασία μετρήσεων CPTU στις αποθέσεις Strimice

Για την ερμηνεία των δεδομένων CPTU που πραγματοποιήθηκαν στην απόθεση Strimice, χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό φύλλο CPTProfiler_CSM9.xls (Knappett et al., 2019).

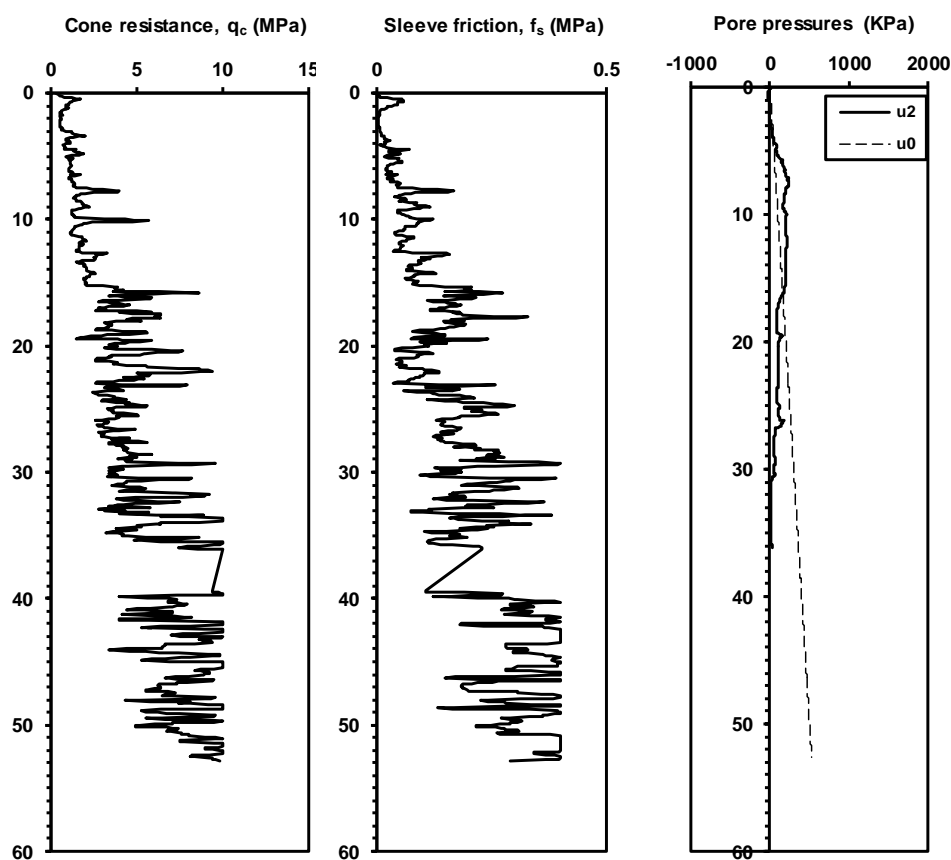
Το φύλλο αυτό υπολογίζει τη συνολική και ενεργή κατακόρυφη τάση στο έδαφος χρησιμοποιώντας μια απλή μέθοδο πεπερασμένων διαφορών.

Στην συνέχεια, προσδιορίζει την κανονικοποιημένη αντίσταση κώνου Q_t , τον κανονικοποιημένο λόγο τριβής F_t , τον τύπο του εδάφους και την διαστρωμάτωση εδαφικού υλικού, χρησιμοποιώντας την μέθοδο Jefferies and Davies (1993).

Οι μηχανικές παράμετροι στις διαφορετικές τεχνικογεωλογικές ενότητες εκτιμήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη την διαστρωμάτωση του εδαφικού υλικού και την διαφοροποίηση των μηχανικών παραμέτρων από τις δοκιμές CPTU σε συνάρτηση με το βάθος.

Το μέγιστο βάθος διεξόδους στις θέσεις που αναλύθηκαν ήταν 65.6 m. Λόγω έλλειψης δεδομένων, οι συνολικές και ενεργές τάσεις προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας το μοναδιαίο βάρος (σχέση 3.33) των στρωμάτων που προέκυψε από την διαστρωμάτωση του εδαφικού υλικού με την αξιολόγηση των μετρήσεων CPTU εντοπίστηκαν από την γεωτεχνική τομή και τα δεδομένα CPTU.

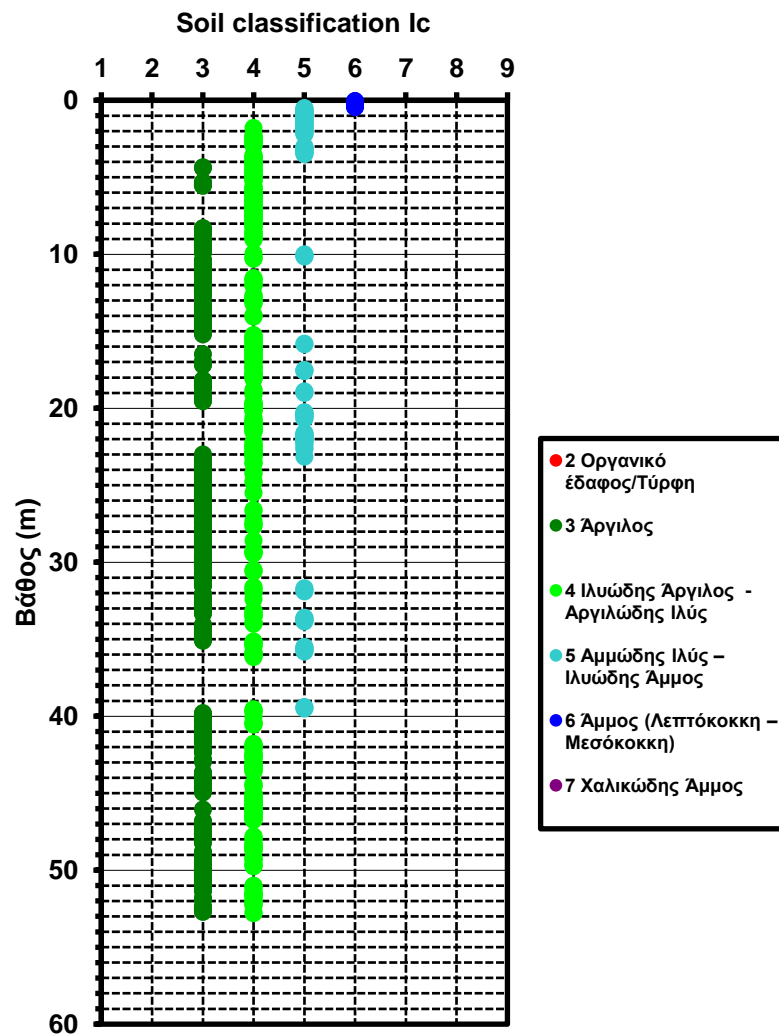
Η μεταβολή της αντίστασης του κώνου q_c , της πλευρικής τριβής f_s και της πίεσης πόρων u_2 συναρτήσει του βάθους στην θέση P4/13 φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Τα αποτελέσματα που μελετήθηκαν για τις θέσεις P4/14, P4/15, P4/16, P4/17 δίνονται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα δοκιμής στατικής πενетроμέτρησης (CPT)**.



Σχήμα 3.9: Απεικόνιση της αντίστασης κώνου q_c , της πλευρικής τριβής f_s και της πίεσης πόρων u_2 συναρτήσει του βάθους στη θέση P4/13.

Οι θέσεις P4/13, P4/14 και P4/15 παρέχουν πληροφορίες για δύο τεχνικογεωλογικές ενότητες NS – TV1 και TV2 που αναπτύσσονται στην περιοχή ενώ οι θέσεις P4/16 και P4/17 παρέχουν πληροφορίες μόνο για την τεχνικογεωλογική ενότητα NS – TV1.

Το διάγραμμα που προκύπτει από τη μέθοδο Jefferies and Davies (1993), για την ταξινόμηση εδάφους στη θέση P4/13, με αριθμό ταξινόμησης μεταξύ 2 και 7 έναντι του βάθους, φαίνεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Ταξινόμηση εδάφους σε συνάρτηση με το βάθους στην θέση P4/13 (σύμφωνα με τη μέθοδο Jefferies and Davies, 1993)¹.

¹ Η ανάλυση της εικόνας δεν επιτρέπει την λεπτομερή απεικόνιση της στρωματογραφίας.

Για το 1ο στρώμα (NS – TV1), τα δεδομένα υποδηλώνουν ένα στρώμα αργίλου – ιλυώδους αργίλου (ζώνες 3 – 4 με παρεμβολές ιλυώδους άμμου, ζώνη 5). Στο 2ο στρώμα (TV2) φαίνεται ένα στρώμα αργίλου (ζώνη 3) με παρεμβολές ιλυώδους αργίλου (ζώνη 4) με ένα μικρό ποσοστό ιλυώδους άμμου (ζώνη 5) (βλέπε Πίνακα 3.1 και Σχήμα 3.10).

Σύμφωνα με τη μέθοδο ταξινόμησης του Robertson (1990), το στρώμα 1 (NS – TV1) στην θέση P4/13 εμφανίζεται αργιλικό έως ιλυοαργιλώδες με παρεμβολές ιλυώδους άργιλου και άμμου. Το στρώμα 2 (TV2) χαρακτηρίζεται ως αργιλικό έως ιλυοαργιλώδες με παρεμβολές ιλυώδους άργιλου. Αυτά τα εδαφικά υλικά χαρακτηρίζονται ως υπερστερεοποιημένα (Σχήμα 3.11).

Σύμφωνα με τη μέθοδο ταξινόμησης του Robertson (1986), το στρώμα 1 (NS – TV1) στην συγκεκριμένη θέση εμφανίζεται ως ιλυοαργιλώδες έως ιλυοαμμώδες υλικό με παρεμβολές άμμου. Το στρώμα 2 (TV2) χαρακτηρίζεται ως ιλυώδης άμμος με παρεμβολές ιλυώδους αργίλου. Τα εδαφικά υλικά χαρακτηρίζονται ως υπερστερεοποιημένα (βλέπε Σχήμα 3.12).

Για την επιβεβαίωση της παραπάνω λιθοστρωματογραφίας, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν γεωτρήσεις δειγματοληψίας.

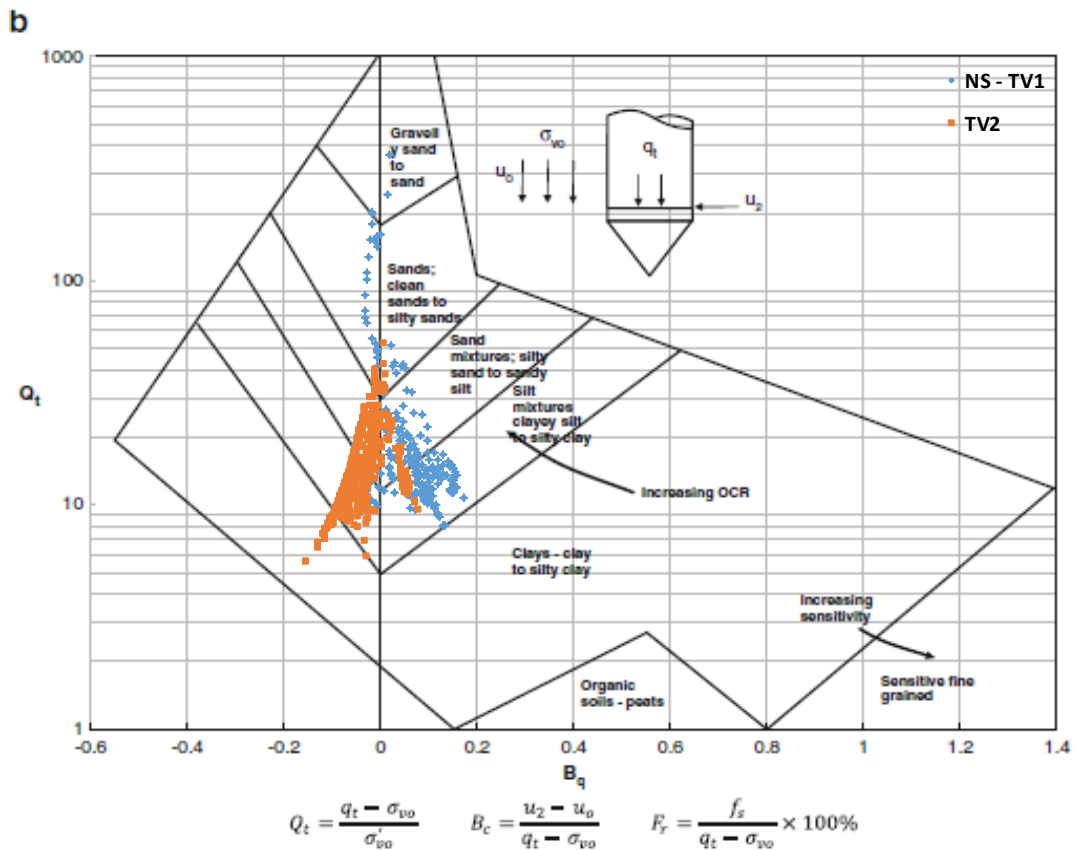
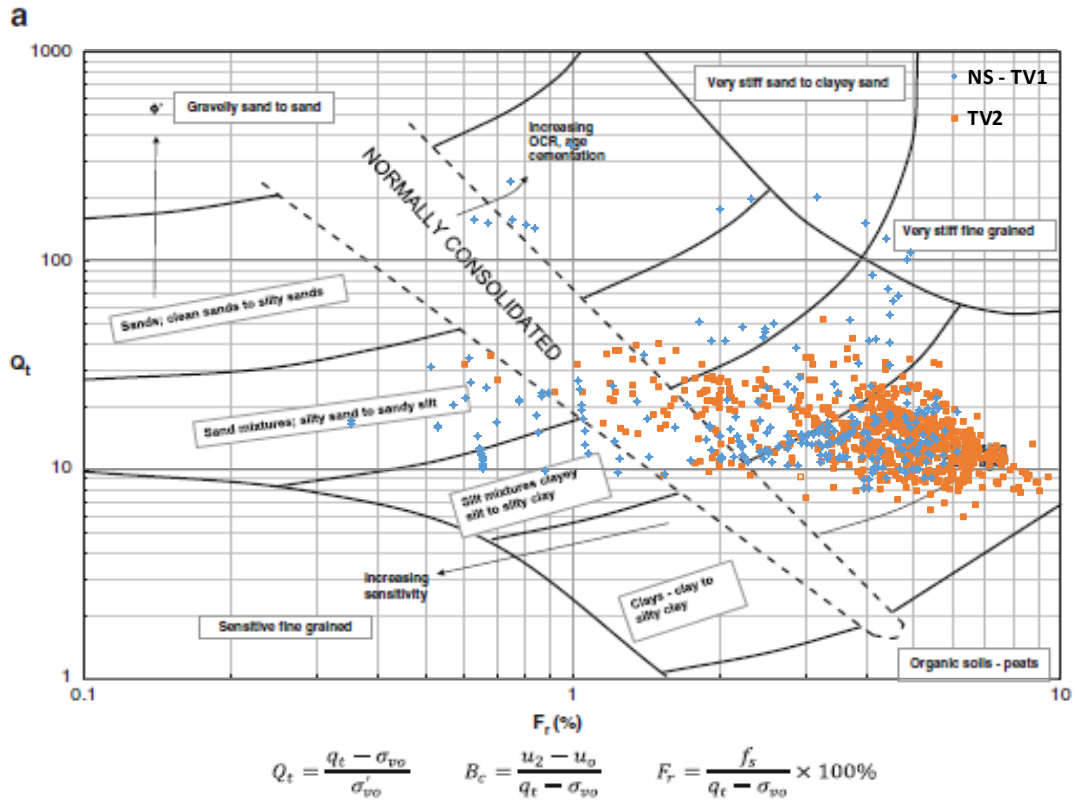
Τα διαγράμματα ταξινόμησης για τις υπόλοιπες θέσεις CPTU δίνονται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα Δοκιμής Στατικής Πενετρομέτρησης (CPT)**. Από την ανάλυση όλων των θέσεων CPTU προκύπτει ότι τα εδαφικά υλικά στην περιοχή μελέτης χαρακτηρίζονται ως (Σχήμα 3.13):

1^ο στρώμα (NS – TV1)

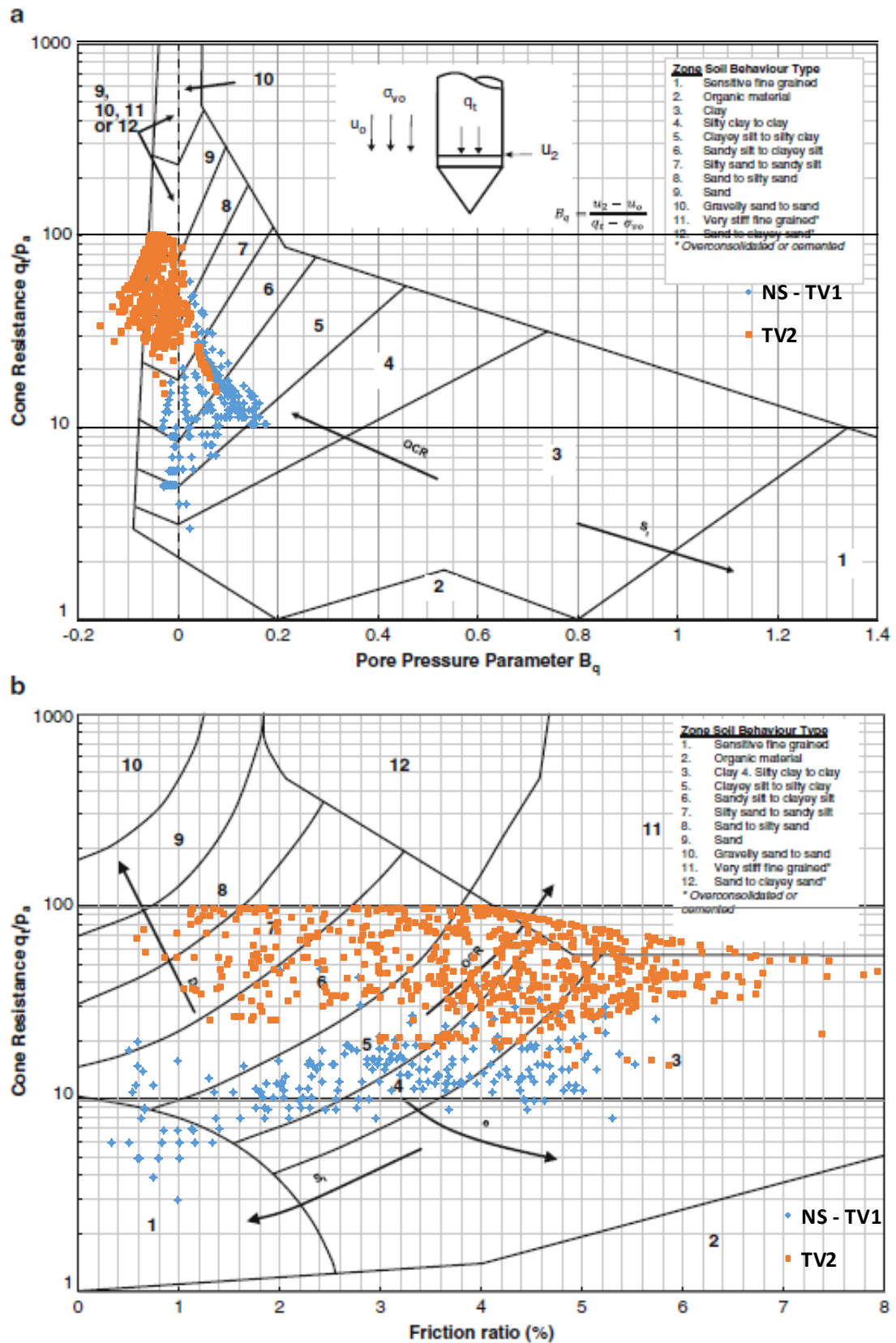
Άργιλος με παρεμβολές ιλυώδους άργιλου και ιλυώδους άμμου με μικρό ποσοστό οργανικού υλικού. Πρόκειται για ένα προστερεοποιημένο εδαφικό στρώμα.

2^ο στρώμα (TV2)

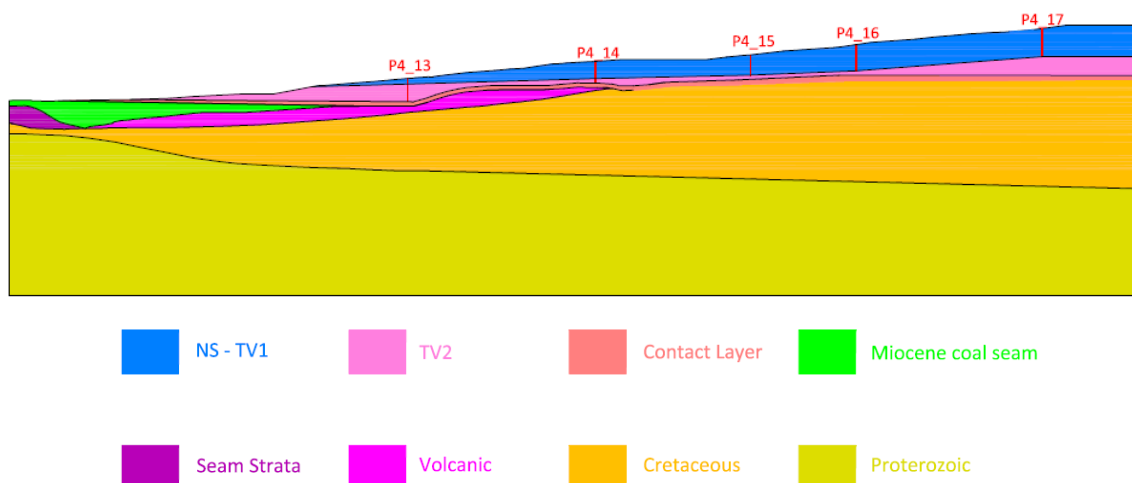
Άργιλος με παρεμβολές ιλυώδους αργίλου και μικρό ποσοστό ιλυώδους άμμου. Είναι προστερεοποιημένο εδαφικό στρώμα.



Σχήμα 3.11: Ταξινόμηση εδάφους χρησιμοποιώντας τα κανονικοποιημένα δεδομένα από CPTU δοκιμές στη θέση P4/13 (μέθοδος Robertson, 1990).



Σχήμα 3.12: Ταξινόμηση εδάφους χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από CPT/CPTU δοκιμές στη θέση P4/13 (μέθοδος Robertson, 1986).



Σχήμα 3.13: Λιθοστρωματογραφία της απόθεσης Strimice.

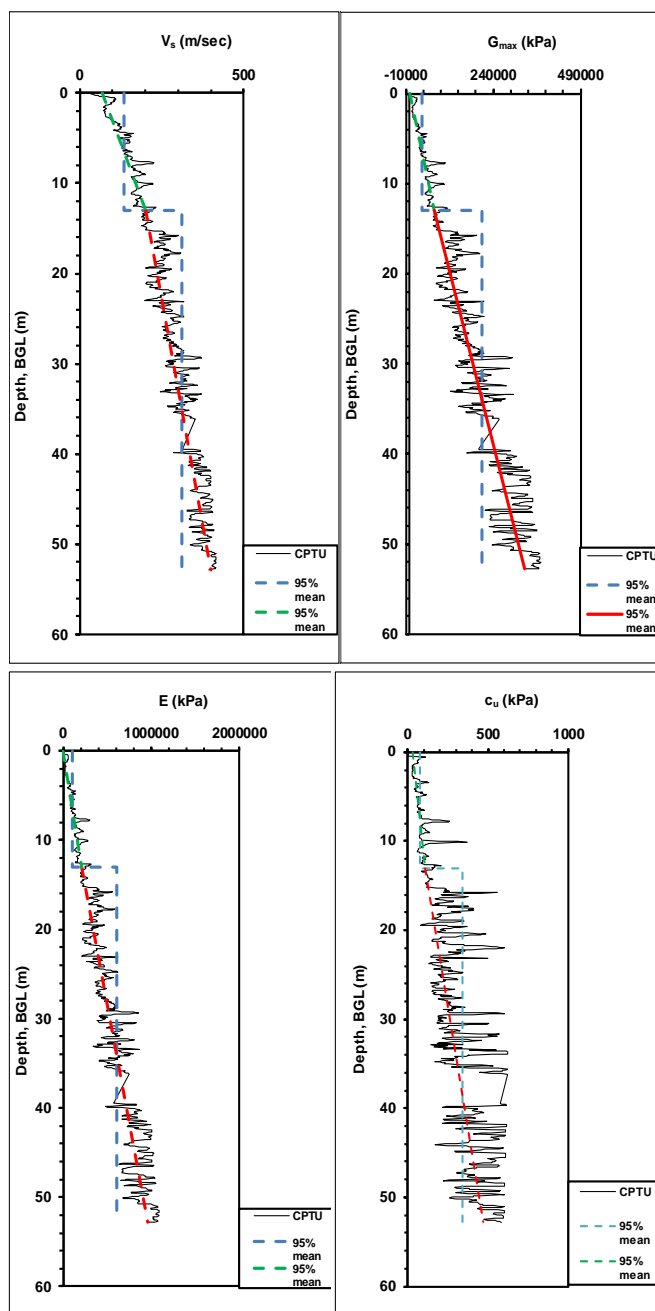
Εκτίμηση μηχανικών παραμέτρων από τις δοκιμές CPTU

Από την επεξεργασία των δεδομένων CPTU και τις σχέσεις που αναφέρονται στην Ενότητα 3.1, προκύπτουν οι γεωτεχνικές παράμετροι για τις δύο τεχνικογεωλογικές ενότητες NS – TV1 και TV2 (Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3.3: Συγκεντρωτικός πίνακας με την μέση αριθμητική τιμή των γεωτεχνικών παραμέτρων για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες NS – TV1 και TV2.

Γεωτεχνικές παράμετροι		NS – TV1	TV2
Μοναδιαίο βάρος εδάφους γ	[kN/m ³]	18.6	19.9
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u	[kN/m ²]	161.3	302.0
Συνοχή c'	[kPa /m]	24.2	45.3
Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ' (fractile 5%)	[°]	23.8	25.9
Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ'	[°]	29.7	29.5
Μέτρο παραμόρφωσης E'	[MPa]	327.3	613.3
Λόγος Poisson ν	-	0.45	0.45
Συντελεστής συμπίεσης M	[MPa]	28.3	52.0
Λόγος προστερεοποίησης OCR	-	3.7	3.7
Συντελεστής πλευρικής ώθησης K_o (CPT)	-	1.3	1.2
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_s	[m/sec]	223.2	316.6
Μέτρο διάτμησης G_{max}	[MPa]	114.0	211.5
Περατότητα k	[m/sec]	1.35E-06	2.07E-08

Τα αποτελέσματα για κάθε θέση CPTU ξεχωριστά, καθώς και η μεταβολή τους με το βάθος δίνονται στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα δοκιμής στατικής πενетроμέτρησης (CPT)**. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι η συνοχή c_u , το μέτρο ελαστικότητας E , το μέτρο διάτμησης G_{max} και η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων V_s αυξάνονται με το βάθος (βλέπε Σχήμα 3.14 και Πίνακας 3.4).



Σχήμα 3.14: Μεταβολή των παραμέτρων V_s , G_{max} , E και C_u συναρτήσει του βάθους στη θέση

P4/13 .

Πίνακας 3.4: Συγκεντρωτικός πίνακας γεωτεχνικών παραμέτρων για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες NS – TV1 και TV2 συναρτήσει του βάθους.

Γεωτεχνικές παράμετροι		NS – TV1	TV2
Μοναδιαίο βάρος εδάφους γ	[kN/m ³]	18.6	19.9
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u	[kN/m ²]	$2.85 \cdot d + 30.4$	$5.46 \cdot d + 51.9$
Συνοχή c'	[kPa /m]	$0.42 \cdot d + 4.56$	$0.82 \cdot d + 7.8$
Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ' (fractile 5%)	[°]	23.8	25.9
Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ'	[°]	29.7	29.5
Μέτρο παραμόρφωσης E'	[MPa]	$6.75 \cdot d + 17.9$	$10 \cdot d + 160$
Λόγος Poisson ν	-	0.45	0.45
Συντελεστής συμπίεσης M	[MPa]	$0.56 \cdot d + 2.60$	$1.1 \cdot d + 2$
Λόγος προστερεοποίησης OCR	-	3.7	3.7
Συντελεστής πλευρικής ώθησης K_0 (CPT)	-	1.3	1.2
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_s	[m/sec]	$2.48 \cdot d + 109.5$	$4.73 \cdot d + 100$
Μέτρο διάτμησης G_{max}	[MPa]	$2.35 \cdot d + 6.2$	$3 \cdot d + 74$
Περατότητα k	[m/sec]	1.35E-06	2.07E-08

d = το βάθος του εδαφικού σχηματισμού

3.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών και δοκιμής CPTU

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της τριαξονικής δοκιμής με τα αποτελέσματα CPTU, όσον αφορά τις παραμέτρους αντοχής, προκύπτει **απόκλιση 5%** για την συνοχή (c') και **απόκλιση 14%** για την γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ'). Η μέση τιμή των παραμέτρων αυτών είναι: $c' = 23.6 \text{ KN/m}^2$ και $\phi' = 22^\circ$ (Πίνακας 3.5).

Πίνακας 3.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ τριαξονικής δοκιμής και δοκιμής στατικής πενетроμέτρησης (CPT), στην τεχνικογεωλογική ενότητα NS – TV1.

Παράμετρος		Τριαξονική δοκιμή	CPT	Μέση τιμή δοκιμών	Απόκλιση μεταξύ των δοκιμών (%)
Συνοχή c'	[KN/m ²]	23	24.2	23.6	5
Γωνία τριβής ϕ'	[°]	20	23	22.1	14

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Bender Elements πριν τον κορεσμό και μετά τον κορεσμό με τα αποτελέσματα CPT προκύπτει επίσης απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων (Πίνακες 3.6 και 3.7). Μικρότερη πάντως απόκλιση παρουσιάζεται στα Bender Elements μετά τον κορεσμό (βλέπε Πίνακα 3.7).

Πίνακας 3.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ CPT και Bender Elements πριν τον κορεσμό, στην τεχνικογεωλογική ενότητα NS – TV1.

Παράμετρος		Bender Elements	CPT	Μέση τιμή δοκιμών	Απόκλιση μεταξύ των δοκιμών (%)
Μέτρο παραμόρφωσης E'	[MPa]	156.6	327.3	242.0	52
Λόγος Poisson ν	-	0.45	0.45	0.45	1
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_s	[m/sec]	169.3	223.2	196.3	24
Μέτρο διάτμησης G_{max}	[MPa]	54.2	114	84.1	52

Πίνακας 3.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ CPT και Bender Elements μετά τον κορεσμό, στην τεχνικογεωλογική ενότητα NS – TV1.

Παράμετρος		Bender Elements	CPT	Μέση τιμή δοκιμών	Απόκλιση μεταξύ των δοκιμών (%)
Μέτρο παραμόρφωσης E'	[MPa]	271	327.3	299.2	17
Λόγος Poisson ν	-	0.49	0.45	0.47	8
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_s	[m/sec]	213.7	223.2	218.5	4
Μέτρο διάτμησης G_{max}	[MPa]	91.2	114	102.6	19

Οι μηχανικές παράμετροι και το μέτρο δυστροπίας που προκύπτει από δοκιμές πεδίου συχνά διαφέρουν από τις δοκιμές του εργαστηρίου.

Γενικά, από την σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει μικρή απόκλιση όσον αφορά τις παραμέτρους αντοχής της τριαξονικής δοκιμής από τα αποτελέσματα της δοκιμής CPTU. Επίσης, τα μέτρα δυστροπίας που προκύπτουν από την μέθοδο των Bender Elements (E_{in}) είναι λίγο μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά της δοκιμής πεδίου CPTU.

Συμπερασματικά, από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι τα αποτελέσματα CPTU δίνουν πολύ καλή εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων.

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

4.1. Προσομοίωση κινητικής συμπεριφοράς με πεπερασμένα στοιχεία (FEM)

Η κινητική συμπεριφορά ενός εδαφικού πρανούς εξαρτάται κυρίως από την γεωμετρία, τις ιδιότητες του εδάφους και τις τασικές συνθήκες. Οποιαδήποτε μεταβολή αυτών των παραγόντων μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στις δυνάμεις που ενεργούν εντός του όγκου του εδάφους (δυνάμεις κίνησης, δυνάμεις αντίστασης στην κίνηση και πιέσεις του νερού των πόρων). Αυτό πιθανόν να οδηγήσει σε κινητικότητα της εδαφικής μάζας πάνω σε μια επιφάνεια ολίσθησης και να προκύψει αστάθεια του πρανούς (Johanson and Edeskar, 2014).

Γενικά η κινητική συμπεριφορά ενός εδαφικού πρανούς προσεγγίζεται καλύτερα από τις τάσεις παρά από τις δυνάμεις που ενεργούν σε αυτό (Johanson and Edeskar, 2014). Για τον λόγο αυτό αλλά και η ανάγκη για την ανάπτυξης μεθόδων προσομοίωσης της κινητικής συμπεριφοράς των πρανών με μεγαλύτερη ακρίβεια, οδήγησε στην χρήση αριθμητικών μεθόδων, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method).

Σύμφωνα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η περιοχή μελέτης υποδιαιρείται σε έναν αριθμό διακριτών στοιχείων που σχηματίζουν το πλέγμα. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται μεταξύ τους σε κάποια σημεία που ονομάζονται κόμβοι. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία εκφράζει ένα γεωϋλικό με συγκεκριμένες ιδιότητες κάποιες σταθερές (π.χ. η συνοχή c , η εσωτερική γωνία τριβής ϕ , η ακαμψία E κ.α.) και κάποιες μεταβλητές (π.χ. παραμόρφωση). Συνήθως χρησιμοποιούνται τριγωνικά ή τετραγωνικά στοιχεία 6 ή 15 κόμβων ανάλογα με την ακρίβεια και την ταχύτητα που απαιτείται για των υπολογισμό των τάσεων, των φορτίων και των παραμορφώσεων.

Γενικά η δυναμική αναβάθμιση του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (και τα βήματα χρόνου) κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας έχει αποδειχθεί ότι

είναι σημαντική για τη διασφάλιση της σωστής σύγκλισης της αριθμητικής λύσης (Pichler and Schweiger, 2020).

Εκτός από την εξέταση των τάσικών συνθηκών και της γεωμετρίας πρέπει να περιγραφούν οι σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο καταστατικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό περιέχει τις εξισώσεις που συνδέουν τις μετατοπίσεις με τις δυνάμεις στους κόμβους του κάθε στοιχείου και αποδίδονται με την μορφή πινάκων που ονομάζονται μητρώα ακαμψίας. Από τον συνδυασμό των μητρώων ακαμψίας κάθε στοιχείου προκύπτει ο ολικός πίνακας ακαμψίας για το εδαφικό υλικό.

Η επιλογή του κατάλληλου καταστατικού μοντέλου εξαρτάται κυρίως από την απαιτούμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων και τα διαθέσιμα δεδομένα. Επιπλέον, ο καθορισμός των οριακών συνθηκών καθώς και άλλοι παράγοντες (π.χ. εφαρμοσμένα φορτία – μετατοπίσεις, τοίχοι αντιστήριξης (άκαμπτοι) κ.α.) περιλαμβάνουν επιπλέον εξισώσεις οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων και των δυνάμεων στους κόμβους του κάθε στοιχείου και κατ' επέκταση στην δημιουργία του ολικού πίνακα ακαμψίας. Στην συνέχεια η λύση προκύπτει μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση της λύσης (Fredlund, 2016).

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων (π.χ. Plaxis) που έχουν την δυνατότητα επιλογής των κατάλληλων καταστατικών (π.χ. ελαστικά – ελαστοπλαστικά κ.α.) και υδραυλικών μοντέλων (π.χ. Van Genuchten κ.α.). Αυτό μας δίνει την δυνατότητα ανάλυσης κορεσμένων, μερικώς κορεσμένων και ακόρεστων εδαφών.

Επιπλέον μπορεί να ληφθεί υπόψη η επίδραση της κίνησης του νερού στο έδαφος, η οποία μελετάται μέσω πλήρως συνδυασμένης ανάλυσης ροής – παραμόρφωσης (Fully Coupled flow deformation). Οι αναλύσεις αυτές χρησιμοποιούνται για την απόδοση της χρόνο - εξαρτώμενης συμπεριφοράς του εδάφους (μεταβαλλόμενη ανάλυση ροής) λαμβάνοντας υπόψη τόσο την παραμόρφωση όσο και τη ροή του υπόγειου νερού και χρησιμοποιούν συνδυασμό εξισώσεων μετατόπισης - πίεσης πόρων στους κόμβους των στοιχείων.

Για την ανάλυση της ευστάθειας χρησιμοποιείται η τεχνική υπολογισμού που ονομάζεται $\Phi - c$ reduction. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η μείωση των παραμέτρων αντοχής σε διάτμηση ($\tan \phi'$ και c) του εδάφους καθώς και της αντοχής σε εφελκυσμό διαδοχικά μέχρι να επέλθει αστοχία (Plaxis 2D, 2020b).

Συμπερασματικά η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται ευρέως στα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα. Αποτελεί μια γρήγορη μέθοδο επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων παρέχοντας με ακρίβεια την εκτίμηση της κινητικής συμπεριφοράς (παραμόρφωσης) των εδαφικών πρανών.

4.2. Καταστατικά μοντέλα συμπεριφοράς εδάφους

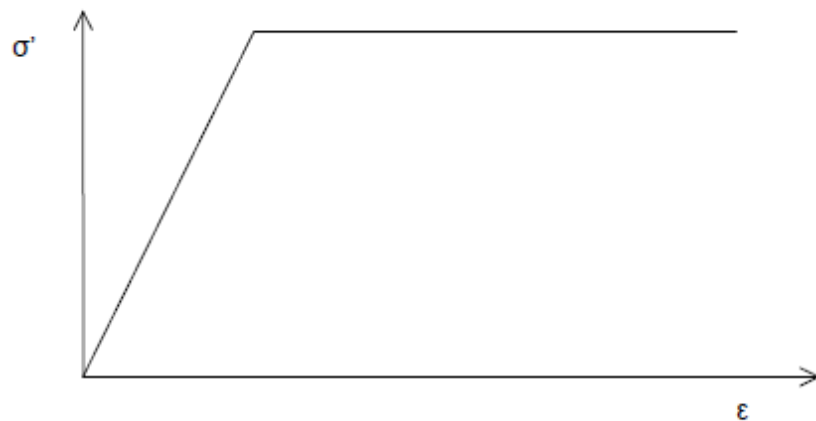
4.2.1. Μοντέλο Mohr – Coulomb (MC)

Το μοντέλο Mohr Coulomb αποτελεί ένα μοντέλο ελαστικής – πλαστικής συμπεριφοράς. Χρησιμοποιείται για προσέγγιση της συμπεριφοράς του εδάφους ή του βράχου δίνοντας την δυνατότητα για μια πρώτη και γρήγορη εκτίμηση των παραμορφώσεων και των τάσεων των εδαφικών υλικών στην υπό μελέτη περιοχή.

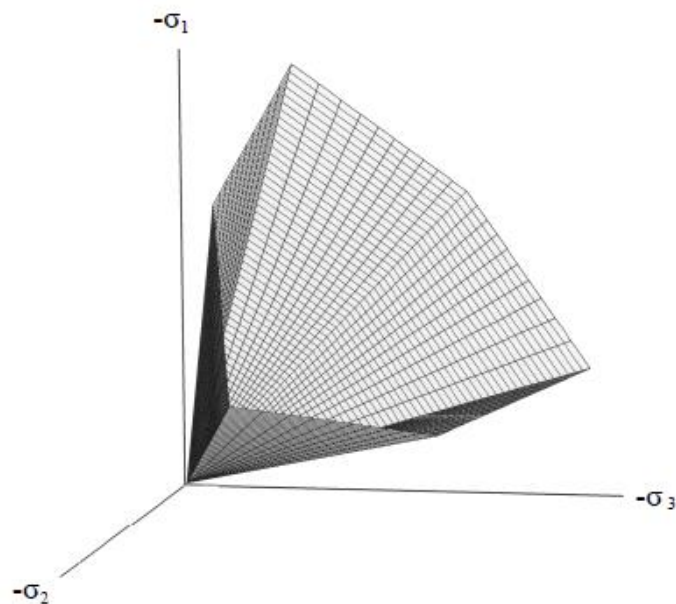
Χρησιμοποιεί τη βασική αρχή της ελαστοπλαστικότητας, η οποία θεωρεί ότι οι τάσεις (ρυθμοί αύξησης των τάσεων) και οι παραμορφώσεις (ρυθμοί αύξησης των παραμορφώσεων) αναλύονται σε ένα ελαστικό και ένα πλαστικό τμήμα.

Στην ουσία πρόκειται για ένα ελαστικά τέλεια πλαστικό μοντέλο το οποίο ορίζεται από μια σταθερή επιφάνεια διαρροής, η οποία καθορίζεται πλήρως από τις παραμέτρους του μοντέλου και δεν επηρεάζεται από την πλαστική παραμόρφωση (Σχήματα 4.1 και 4.2).

Η επιφάνεια διαρροής ορίζεται από έξι συναρτήσεις διαρροής, οι οποίες διαμορφώνονται υπό όρους των κύριων τάσεων ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) (Σχήμα 4.2). Οι συναρτήσεις λαμβάνουν υπόψη τους τις παραμέτρους πλαστικότητας, δηλαδή τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ και τη συνοχή c .



Σχήμα 4.1: Ελαστικό τέλεια πλαστικό μοντέλο Mohr Coulomb (Plaxis 2D, 2020b).



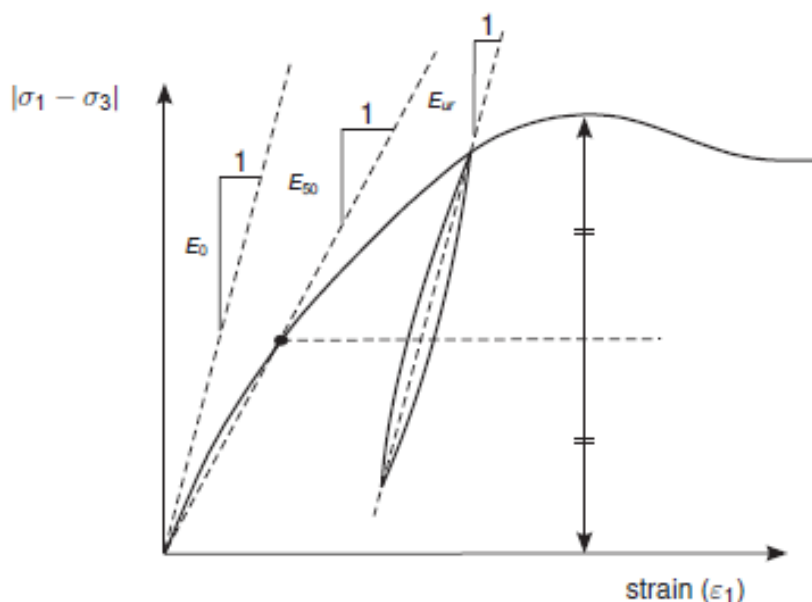
Σχήμα 4.2: Επιφάνεια διαρροής του μοντέλου Mohr Coulomb στο χώρο των κύριων τάσεων (Plaxis 2D, 2020b).

Οι συναρτήσεις αυτές πολλές φορές οδηγούν σε υπερβολική εκτίμηση της διαστολής. Για τον λόγο αυτό, το μοντέλο Mohr Coulomb χρησιμοποιεί επιπλέον έξι πλαστικές δυνητικές συναρτήσεις για να διαμορφωθούν σωστά θετικές (εφελκυστικές) παραμορφώσεις που πιθανόν να συμβούν. Οι πλαστικές δυνητικές συναρτήσεις λαμβάνουν υπόψη τους μια τρίτη παράμετρο πλαστικότητας, τη γωνία διαστολής ψ .

Οι συναρτήσεις αυτές συνδυάζονται με σκοπό να προκύψουν όσον το δυνατόν πιο αξιόπιστες παραμορφώσεις. Για καταστάσεις τάσεων που αντιπροσωπεύονται από σημεία εντός της επιφάνειας διαρρόης, η συμπεριφορά είναι καθαρά ελαστική και οι παραμορφώσεις που παρουσιάζονται είναι αναστρέψιμες (βλέπε Σχήμα 4.2).

Γενικά για το μοντέλο Mohr-Coulomb απαιτούνται συνολικά πέντε παραμέτροι εισόδου, δηλαδή το μέτρο δυσκαμψίας E και ο λόγος Poisson ν για την ελαστικότητα του εδάφους, η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ και η συνοχή c για την πλαστικότητα του εδάφους και η γωνία διαστολής ψ που εκφράζει την μικρή διαστολή που μπορεί να παρουσιάσει το έδαφος. Επιπλέον η συνοχή c και η γωνία εσωτερική τριβής ϕ καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την αντοχή σε διάτμηση του υπό εξεταζόμενου εδάφους.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή του κατάλληλου μέτρου δυσκαμψίας καθώς πολλά εδαφικά υλικά δείχνουν μια μη γραμμική συμπεριφορά από την αρχή της φόρτισης τους. Στην εδαφομηχανική το αρχικό μέτρο ελαστικότητας στην αρχή της φόρτισης (κλίση της εφαπτόμενης στο αρχικό τμήμα της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης) υποδεικνύεται ως E_0 και το τέμνον μέτρο δυσκαμψίας στο 50% της αντοχής του εδάφους υποδεικνύεται ως E_{50} (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Απεικόνιση των μέτρων δυσκαμψίας E_0 , E_{50} , E_{ur} για στραγγιζόμενες τριαξονικές δοκιμές (CD) (Plaxis 2D, 2020a).

Για τα υλικά με μεγάλη γραμμική ελαστική περιοχή είναι ρεαλιστικό να χρησιμοποιηθεί το E_0 , αλλά συνήθως κατά την φόρτιση των εδαφών χρησιμοποιείται το E_{50} . Σε προβλήματα εκφόρτισης, όπως στην περίπτωση σήραγγων και εκσκαφών χρησιμοποιείται το μέτρο αποφόρτισης – επαναφόρτισης E_{ur} αντί το E_{50} . Γενικά, στα εδάφη τα μέτρα δυσκαμψίας E_{ur} και E_{50} τείνουν να αυξάνονται με την αύξηση της πλευρικής τάσης και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις τασικές διαδρομές που ακολουθούνται (π.χ. μεγαλύτερη ακαμψία κατά την εκφόρτιση – επαναφόρτιση σε σχέση με αυτήν κατά την αρχική φόρτιση).

Η φόρτιση ενός εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό ρυθμό μείωσης του όγκου στην αρχή της φόρτισης. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται μια χαμηλή αρχική τιμή του λόγου Poisson (ν_0). Κατά την διάρκεια της φόρτισης όμως ο ρυθμός αυτός μειώνεται και το ν λαμβάνει τιμές συνήθως στην περιοχή 0,3 – 0,4. Χαμηλές τιμές ν χρησιμοποιούνται κατά την εκφόρτιση ενός εδαφικού υλικού (Plaxis 2D, 2020a).

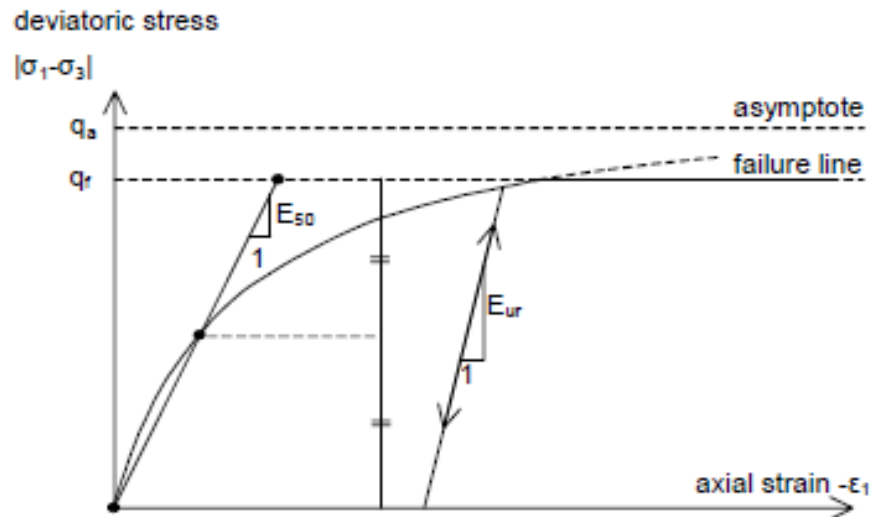
4.2.2. Μοντέλο Hardening Soil (HS)

Το μοντέλο κράτυνσης εδάφους (Hardening Soil Model) είναι ένα προηγμένο μοντέλο προσομοίωσης της συμπεριφοράς τόσο των μαλακών όσο και των σκληρών εδαφών (Schanz, 1998). Χρησιμοποιεί τη θεωρία της πλαστικότητας αντί της θεωρίας της ελαστικότητας λαμβάνοντας υπόψη τη διαστολή του εδάφους και έχει δυνατότητα καθορισμού του ανώτατου ορίου διαρροής. Ένα βασικό χαρακτηριστικό του μοντέλου κράτυνσης - εδάφους είναι η εξάρτηση της ακαμψίας από τις τάσεις.

Το μοντέλο αυτό περιγράφει μια υπερβολικού τύπου καμπύλη (βλέπε Σχήμα 4.4) και αποδίδεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{2 \cdot E_{50}} \cdot \frac{q}{1 - q/q_a} \quad \text{για } q < q_f \quad [4.1]$$

όπου,



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση της υπερβολικής καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης κατά την τυπική στραγγιζόμενη τριαξονική δοκιμή (CD) (Plaxis 2D, 2020b).

q_a η ασυμπτωτική τιμή της αποκλίνουσας τάσης διάτμησης (Σχήμα 4.4),

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad [4.2]$$

R_f εκφράζει την αναλογία μεταξύ της ασυμπτωτικής τάσης διάτμησης q_a και της τελικής αποκλίνουσας τάσης q_f (τυπική τιμή $R_f = 0.9$),

q_f η τελική αποκλίνουσα τάση που προέρχεται από το κριτήριο Mohr Coulomb. Στην περίπτωση που $q = q_f$, ικανοποιείται το κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb (τέλεια πλαστική συμπεριφορά) και η τιμή q_f δίνεται από τη σχέση:

$$q_f = (c \cdot \cot \varphi - \sigma'_3) \frac{2 \cdot \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad [4.3]$$

E_{50} : ο συντελεστής ακαμψίας εξαρτάται από τη ελάχιστη κύρια τάση φόρτισης και δίνεται από την εξίσωση:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{ref} \cdot \sin \varphi} \right)^m \quad [4.4]$$

όπου,

E_{50}^{ref} ο συντελεστής ακαμψίας αναφοράς που αντιστοιχεί σε μια πλευρική τάση αναφοράς ($p^{ref} = 100$ μονάδες τάσης),

m εκθέτης που εκφράζει το ποσοστό εξάρτησης της ακαμψίας από την πλευρική τάση σ_3 και εξαρτάται από το εδαφικό υλικό,

c η συνοχή (σε μονάδες τάσης), και

ϕ η γωνία εσωτερικής τριβής (°).

Η εξίσωση 4.1 αποδίδει την υπερβολική σχέση μεταξύ της κατακόρυφης παραμόρφωσης, ϵ_1 , και της αποκλίνουσας τάσης, q , στην πρωτογενή τριαξονική φόρτιση (βλέπε Σχήμα 4.4).

Σε προβλήματα αποφόρτισης επαναφόρτισης, χρησιμοποιείται ο συντελεστής ακαμψίας E_{ur} και εξαρτάται και αυτός από τις τάσεις:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos \phi - \sigma'_3 \cdot \sin \phi}{c \cdot \cos \phi + p^{ref} \cdot \sin \phi} \right)^m \quad [4.5]$$

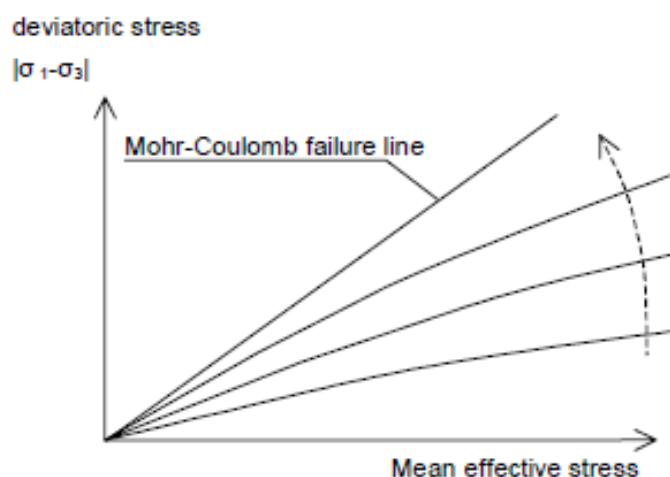
όπου, E_{ur}^{ref} το μέτρο ακαμψίας του Young για αποφόρτιση και επαναφόρτιση σε μια πλευρική τάση αναφοράς ($p^{ref} = 100$ μονάδες τάσης). Σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις ορίζεται ως:

$$E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref} \quad [4.6]$$

Με το μοντέλο αυτό μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ δύο κύριων τύπων κράτυνσης: την κράτυνση σε διάτμηση και την κράτυνση συμπίεσης. Η κράτυνση διάτμησης χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μη αναστρέψιμων παραμορφώσεων που οφείλονται στην αποκλίνουσα φόρτιση. Η κράτυνση συμπίεσης χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση μη αναστρέψιμων πλαστικών παραμορφώσεων λόγω συμπίεσης σε ιστροπική φόρτιση και σε φόρτιση τύπου οιδημέτρου του εδάφους.

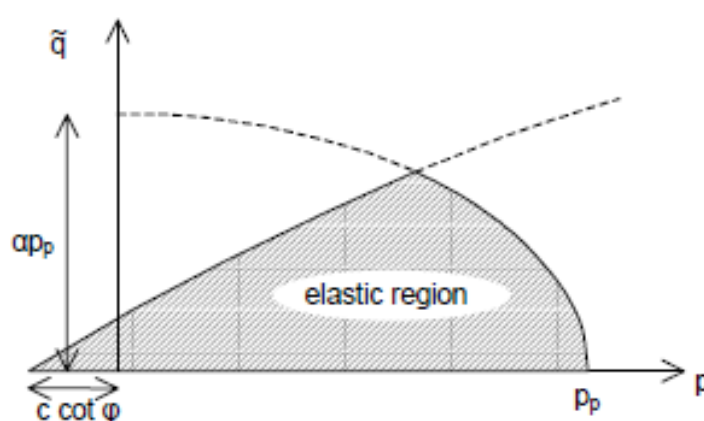
Το πλαστικό μοντέλο κράτυνσης αυτό ορίζεται από μια επιφάνεια διαρροής η οποία δεν είναι σταθερή στον χώρο των κύριων τάσεων όπως στο μοντέλο Mohr Coulomb. Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο αυτό θεωρεί κάποιες περιβάλλουσες επιφάνειες διαρροής που οφείλονται κυρίως στην σκλήρυνση διάτμησης και ελέγχονται κυρίως από το E_{50}^{ref}

που καθορίζει το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής σε διάτμηση. Οι επιφάνειες αυτές δεν αποδίδουν την μεταβολή του όγκου λόγω πλαστικής παραμόρφωσης σε ισοτροπική φόρτιση (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση των περιβαλλουσών επιφανειών διαρροής (Plaxis 2D, 2020b).

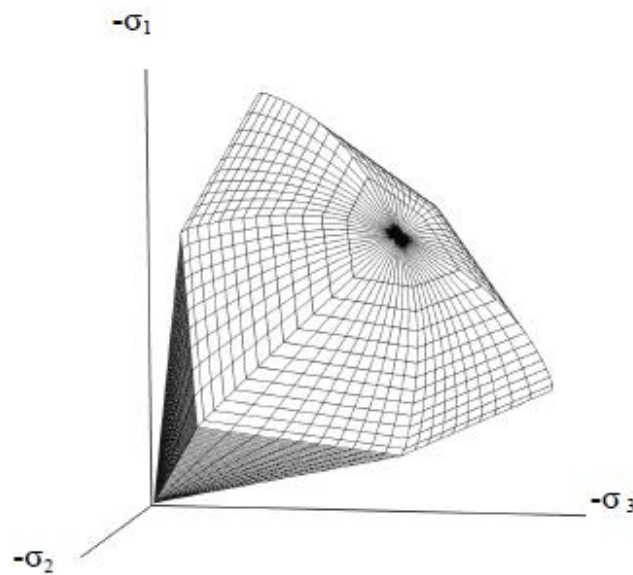
Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται και μια δεύτερη επιφάνεια που ονομάζεται επιφάνεια διαρροής και ορίζει την ελαστική περιοχή ως προς την κατεύθυνση της μέσης ενεργής τάσης (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Απεικόνιση επιφανειών διαρροής για καθορισμό της ελαστικής περιοχής στο χώρο των $p - q$ τάσεων (Plaxis 2D, 2020b).

Το μέγεθος του ανώτατου ορίου διαρροής καθορίζεται από την **ισοτροπική τάση προστερεοποίησης p_p** και τον συντελεστή ώθησης σε ηρεμία $\alpha = k_0^{nc}$ (βλέπε Σχήμα 4.6). Το p_p υπολογίζεται είτε από τον αναγραφόμενο λόγο προστερεοποίησης (OCR) ή από τη πίεση προφόρτισης (POP).

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι επιφάνειες διαρροής που χρησιμοποιεί το μοντέλο κράτυνσης για να ορίσει την ελαστική περιοχή εκτός της οποίας υπάρχουν ογκομετρικές πλαστικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 4.7: Απεικόνιση της συνολικής επιφάνειας διαρροής του μοντέλου *Hardening Soil* στο χώρο των κύριων τάσεων (Plaxis 2D, 2020b).

Το μέγεθος των πλαστικών παραμορφώσεων σε ισοτροπική συμπίεση καθορίζεται κυρίως από τον συντελεστή ακαμψίας E_{oed}^{ref} , την παράμετρο m και την πίεση αναφοράς p^{ref} . Ο συντελεστής ακαμψίας E_{oed}^{ref} προκύπτει από τον εφαπτομενικό δείκτη ακαμψίας E_{oed} στην καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης από δοκιμές οιδημέτρου και υπολογίζεται με βάση την εξίσωση:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos \varphi - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi}{c \cdot \cos \varphi + p^{ref} \cdot \sin \varphi} \right)^m \quad [4.7]$$

όπου, E_{oed}^{ref} ο συντελεστής ακαμψίας σε μια πλευρική τάση αναφοράς ($p^{ref} = 100$ μονάδες τάσης).

Όπως και για το μοντέλο Mohr-Coulomb, οι οριακές καταστάσεις τάσεων περιγράφονται μέσω της γωνία τριβής, ϕ , τη συνοχή, c και τη γωνία διαστολής, ψ . Ωστόσο, η ακαμψία του εδάφους περιγράφεται με μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιώντας τις τρεις διαφορετικές ακαμψίες: την τριαξονική ακαμψία φόρτισης E_{50} , την τριαξονική ακαμψία αποφόρτισης E_{ur} και την ακαμψία φόρτισης οιδημέτρου E_{oed} .

Ως μέσες τιμές για διάφορους τύπους εδάφους, έχουμε $E_{ur} \approx 3 E_{50}$ και $E_{oed} \approx E_{50}$, αλλά για τα πολύ μαλακά όσο και για τα πολύ δύσκαμπτα εδάφη συχνά δίνονται και άλλες αναλογίες E_{oed} / E_{50} .

Σε αντίθεση με το μοντέλο Mohr-Coulomb, το μοντέλο Hardening-Soil λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση των συντελεστών ακαμψίας από τις τάσεις. Αυτό σημαίνει ότι η ακαμψία αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης. Ως εκ τούτου, και οι τρεις ακαμψίες που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο κράτυνσης (Hardening Soil Model) σχετίζονται με τάση αναφοράς που συνήθως λαμβάνεται ίση με 100 kPa (1 bar).

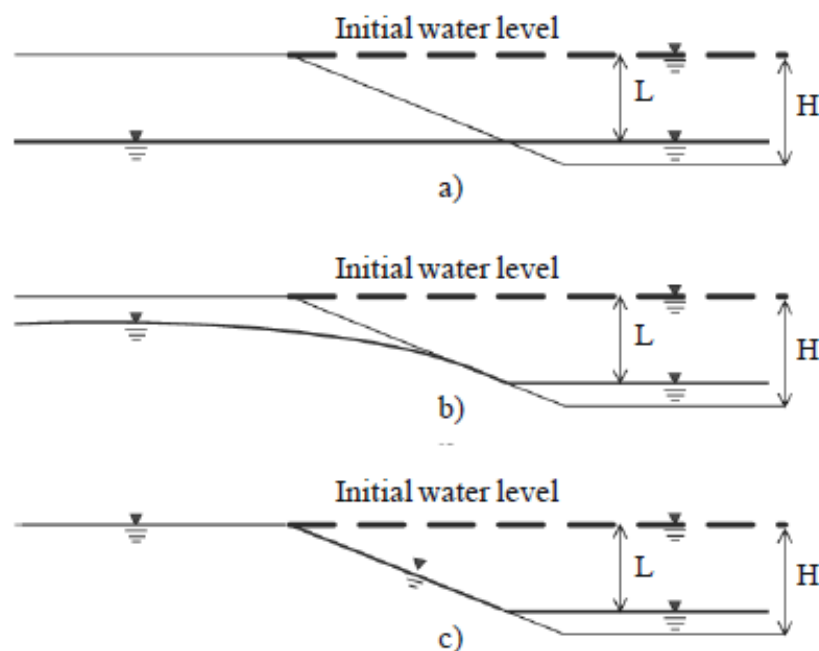
4.3. Προσομοίωση της ροής του νερού και των παραμορφώσεων

Για την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των κορεσμένων ή μερικώς κορεσμένων εδαφών είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη τόσο η παραμόρφωση όσο και η ροή των υπόγειων υδάτων. Η συμπεριφορά των εδαφών εξαρτάται από τον χρόνο, οδηγώντας σε συνδυασμό των εξισώσεων μετατόπισης και πίεσης πόρων (Josifoski and Lenart, 2016).

Για την προσομοίωση της κινητικής συμπεριφοράς χρησιμοποιούνται τα καταστατικά μοντέλα (π.χ. Hardening Soil model, Mohr Coulomb κ.α.) τα οποία συνδυάζονται με διάφορες θεωρήσεις όσον αφορά τα εδαφικά υλικά (π.χ. στραγγιζόμενες ή

αστραγγιστες συνθήκες) καθώς και υδραυλικά μοντέλα (π.χ. υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten).

Οι Lopez – Acosta et al. (2013) αναφέρουν ότι η κίνηση του νερού λόγω της μεταβολής της στάθμης της λίμνης και με σταθερή την πιεζομετρική επιφάνεια του πρανούς μπορεί να αναλυθεί με τρεις τρόπους θεωρώντας: α) κατάσταση αργής μεταβολής της στάθμης της λίμνης (Drained), b) μεταβατική κατάσταση ροής – παραμόρφωσης (fully Coupled Flow deformation), και c) κατάσταση γρήγορης μεταβολής της στάθμης της λίμνης (Undrained). Οι αναλύσεις αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8: Μεταβολή της στάθμης της λίμνης: α) αργή μεταβολή της στάθμης, b) μεταβατική μεταβολή της στάθμης, c) γρήγορη μεταβολή της στάθμης (López-Acosta, 2013).

Στην πρώτη περίπτωση το έδαφος θεωρείται ότι αποστραγγίζεται ταυτόχρονα με την ταπείνωση της στάθμης της λίμνης. Σε κάθε μεταβολή της στάθμης της λίμνης, η πιεζομετρία στο επίχωμα ταυτίζεται με τη στάθμη του νερού. Αυτό δημιουργεί μια σταθερή κατάσταση ροής (Σχήμα 4.8 α). Σε αυτήν την περίπτωση δεν προκύπτει μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων λόγω παραμόρφωσης που οφείλεται στις δυνάμεις διαρροής.

Στη μεταβατική κατάσταση ροής – παραμόρφωσης (Fully Coupled flow deformation) λόγω μεταβολής της στάθμης της λίμνης δημιουργείται μια καμπυλόγραμμη πιεζομετρική επιφάνεια εντός του εδαφικού πρηνούς, της οποίας η θέση εξαρτάται από τη μεταβολή της στάθμης της λίμνης και τις ιδιότητες του υλικού (όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, το πορώδες κ.λπ.) (Σχήμα 4.8 b). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η πίεση του νερού πόρων στο επίχωμα να διαφοροποιείται ανάλογα με το χρόνο, αλλά και με την ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί το νερό.

Στην κατάσταση γρήγορης μεταβολής της στάθμης της λίμνης, το έδαφος θεωρείται ότι δεν στραγγίζει και η στάθμη του νερού μέσα στο επίχωμα διατηρείται στο αρχικό επίπεδο της στάθμης της λίμνης (Σχήμα 4.8 c). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η πίεση του νερού στους πόρους μέσα στο επίχωμα να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την πίεση που εφαρμόζεται στο πρηνές από το νερό της λίμνης. Αυτή η περίπτωση λαμβάνει υπόψη της μόνο την αλλαγή της πίεσης του νερού των πόρων λόγω μεταβολής των τάσεων που σχετίζονται με τη μεταβολή της στάθμης του νερού και η μεταβολή του νερού είναι αμελητέα λόγω του γρήγορου ρυθμού μεταβολής της στάθμης.

4.3.1. Μοντέλο πλήρους συζευγμένης ροής – παραμόρφωσης (Fully coupled flow – deformation)

Για την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των κορεσμένων ή μερικώς κορεσμένων εδαφών με αριθμητικές μεθόδους (π.χ. μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων), είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη η ροή των υπόγειων υδάτων (επιλογή κατάλληλων υδραυλικών μοντέλων για τον προσδιορισμό των υδραυλικών τους παραμέτρων), όσο και η παραμόρφωση. Η εξάρτηση της συμπεριφοράς των εδαφών από τον χρόνο οδηγεί σε συνδυασμό εξισώσεων μετατόπισης (παραμόρφωσης) και πίεσης πόρων, οι οποίες πρέπει να λυθούν ταυτόχρονα. Αυτό ονομάζεται συζευγμένη ροή – παραμόρφωση (Fully Coupled Flow – Deformation Model).

Το μοντέλο συζευγμένης ροής – παραμόρφωσης χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ροής και της παραμόρφωσης σε κορεσμένα και μερικώς κορεσμένα εδάφη. Στην ουσία αναλύεται η ταυτόχρονη ανάπτυξη παραμορφώσεων και πιέσεων πόρων στο έδαφος που οφείλονται σε αλλαγές των υδραυλικών οριακών συνθηκών με το χρόνο

(Plaxis 2D, 2020b). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί τις συνολικές πιέσεις του νερού των πόρων, δηλαδή, το άθροισμα των πιέσεων σταθερής κατάστασης και της υπερπίεσης λόγω τασικών μεταβολών:

$$p_{water} = p_{steady} + p_{excess} \quad [4.8]$$

Οι πιέσεις λόγω σταθερής κατάστασης υπολογίζονται με βάση τις υδραυλικές συνθήκες. Οι πιέσεις αυτές δεν μεταβάλλονται κατά την παραμόρφωση. Επίσης, επιτρέπουν τον υπολογισμό (ανάλυση προς τα πίσω) των υπερπιέσεων από τις συνολικές πιέσεις του νερού των πόρων:

$$p_{excess} = p_{water} - p_{steady} \quad [4.9]$$

Οι υπερπιέσεις του νερού των πόρων P_{excess} προκύπτουν από αλλαγές στην τάση (π.χ. λόγω φόρτισης, αποφόρτισης, αλλαγών στις υδραυλικές συνθήκες ή στερεοποίησης σε συνδυασμό με την αστράγγιστη συμπεριφορά του εδαφικού υλικού). Παρόλα αυτά για το μοντέλο συζευγμένης ροής παραμόρφωσης (Fully Coupled flow deformation), οι υπερπιέσεις προκύπτουν σε οποιοδήποτε υλικό (σταγγιζόμενο ή αστράγγιστο) ανάλογα με την διαπερατότητά του (Plaxis 2D, 2020b).

Το μοντέλο συζευγμένης ροής – παραμόρφωσης χρησιμοποιεί τη θεωρία στερεοποίησης του Biot (1941), η οποία υπολογίζει ταυτόχρονα την παραμόρφωση και τη ροή των υπόγειων υδάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις χρονικά εξαρτώμενες οριακές συνθήκες σε κορεσμένα και μερικώς κορεσμένα εδάφη. Εφαρμόζει την θεώρηση του Bishop για τις ενεργές τάσεις και την μύζηση στην ακόρεστη ζώνη (πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα) που την θεωρεί ως μεταβλητή κατάσταση (Sheng et al., 2003). Επίσης, λαμβάνει υπόψη την μειωμένη διαπερατότητα και το βαθμό κορεσμού στην ακόρεστη ζώνη (Plaxis 2D, 2020b).

Πραγματοποιεί δύο τύπους υπολογισμών, δηλαδή, υπολογισμούς σταθερής και μεταβατικής κατάστασης ροής για κορεσμένα και ακόρεστα εδάφη.

Συμπερασματικά, μπορεί να προσομοιώσει αξιόπιστα τη συμπεριφορά του ακόρεστου εδάφους.

Παρακάτω αναλύονται οι παράμετροι του μοντέλου συζευγμένης ροής - παραμόρφωσης που θεωρούνται στο λογισμικό Plaxis 2D V20.

Μύζηση

Η ροή σε ακόρεστες ζώνες σχετίζεται με τη συνολική μύζηση που είναι το άθροισμα της ελκτικής (S) και της οσμωτικής μύζησης (π):

$$S_t = S + \pi \quad [4.10]$$

Όμως στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές δεν αναπτύσσεται η οσμωτική μύζηση, επομένως:

$$S_t = S \quad [4.11]$$

Η ελκτική μύζηση σχετίζεται με το σκελετό του εδάφους (δυνάμεις προσρόφησης και τριχοειδείς δυνάμεις του εδάφους) και είναι η διαφορά μεταξύ πίεσης αερίου και της πίεσης νερού του εδάφους:

$$S = p_a - p_w \quad [4.12]$$

όπου, p_w και p_a οι πιέσεις του νερού και του αέρα των πόρων, αντίστοιχα.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η πίεση του αέρα των πόρων είναι σταθερή και αρκετά μικρή ώστε να παραμεληθεί. Επομένως, η ελκτική μύζηση είναι αρνητική λόγω της πίεσης του νερού των πόρων:

$$S = -p_w \quad [4.13]$$

Ενεργές τάσεις κατά Bishop

Οι εξισώσεις που διέπουν την στερεοποίηση βασίζονται στις συνολικές πιέσεις πόρων ακλουθώντας τη θεωρία του Biot (1941). Η θεωρία αυτή βασίζεται στη θεωρία των μικρών παραμορφώσεων και λαμβάνει υπόψη το νόμο του Darcy για τη ροή του υγρού. Οι ενεργές τάσεις του Bishop (Bishop and Blight, 1963) δίνονται από τη σχέση 4.14, με την θεώρηση ότι οι συμπιεστικές τάσεις είναι αρνητικές.

$$\sigma = \sigma' + m \cdot (x \cdot p_w + (1 - x) \cdot p_a) \quad [4.14]$$

όπου,

$$\sigma = (\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{zx})^T \quad [4.15]$$

$$m = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^T \quad [4.16]$$

σ το διάνυσμα με τις ολικές τάσεις,

σ' οι ενεργές τάσεις,

m το μοναδιαίο διάνυσμα που περιέχει μονάδες για τα στοιχεία κύριας τάσης και μηδενικούς όρους για τα στοιχεία διατμητικής τάσης,

x μια ενεργή παράμετρος τάσης που ονομάζεται συντελεστής μύζησης και κυμαίνεται από 0 έως 1, καλύπτοντας το εύρος από ξηρές έως πλήρως κορεσμένες συνθήκες. Ο συντελεστής μύζησης x καθορίζεται πειραματικά. Εξαρτάται από τον βαθμό κορεσμού, το πορώδες και την ελκτική μύζηση ($p_a - p_w$) (Bishop and Blight, 1963, Bolzon et al., 1996). Επειδή συνήθως τα πειραματικά στοιχεία δεν είναι διαθέσιμα, στο Plaxis θεωρείται ίση με τον ενεργό βαθμό κορεσμού S_e .

Λαμβάνοντας υπόψη ότι για ένα πλήρως κορεσμένο έδαφος $x = 1$, η κλασική εξίσωση ενεργών τάσεων γίνεται:

$$\sigma = \sigma' + m \cdot p_w \quad [4.17]$$

και για ένα πλήρως ξηρό έδαφος ($x = 0$):

$$\sigma = \sigma' + m \cdot p_a \quad [4.18]$$

Με την υπόθεση ότι η πίεση του αέρα πόρων είναι σταθερή ή αρκετά μικρή ώστε να παραληφθεί (δηλαδή, $p_a \approx 0$), για ένα εντελώς ξηρό έδαφος, οι ενεργές και ολικές τάσεις είναι ουσιαστικά ίσες.

Από τα παραπάνω η εξίσωση ενεργών τάσεων μπορεί να απλοποιηθεί (θεωρώντας $x = S_e$) στη σχέση:

$$\sigma = \sigma' + m \cdot S_e \cdot p_w \quad [4.19]$$

όπου, S_e ο ενεργός κορεσμός που είναι συνάρτηση της πίεσης των πόρων λόγω μύζησης.

Για να ληφθεί υπόψη η μύζηση (αρνητική πίεση πόρων) και ο βαθμός κορεσμού στο μοντέλο συζευγμένης ροής – παραμόρφωσης (fully coupled flow – deformation model), καθίσταται απαραίτητη η επιλογή κατάλληλων υδραυλικών μοντέλων που καθορίζουν τη σχέση μεταξύ μύζησης και κορεσμού, καθώς και τη σχέση μεταξύ μύζησης και σχετικής διαπερατότητας (π.χ. το υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten) (Plaxis 2D, 2020b).

Νόμος Darcy

Η ροή του νερού σε ένα κορεσμένο έδαφος περιγράφεται συνήθως χρησιμοποιώντας τον νόμο του Darcy (1856). Ο νόμος αυτός θεωρεί ότι ο ρυθμός ροής του νερού μέσω μιας εδαφικής μάζας εξαρτάται από την υδραυλική κλίση.

Η εξίσωση ισορροπίας για τη ροή των υπόγειων υδάτων (σε κορεσμένο έδαφος) είναι:

$$\nabla p_w + \rho_w \cdot g + \varphi = 0 \quad [4.20]$$

όπου,

$g = (0, -g, 0)^T$ είναι το διάνυσμα της επιτάχυνσης βαρύτητας, και

φ το διάνυσμα της δύναμης τριβής (ανά μονάδα όγκου, μεταξύ του ρέοντος υγρού και του σκελετού του εδάφους):

$$\varphi = -\frac{\mu}{K} \cdot q \rightarrow q = -\frac{K}{\mu} \cdot \varphi \rightarrow q = -\frac{K}{\mu} \cdot (\nabla p_w + \rho_w \cdot g) \quad [4.21]$$

όπου,

q η ειδική εκφόρτιση (discharge) (ταχύτητα ρευστού),

μ το δυναμικό ιξώδες του υγρού, και

K η διαπερατότητα του πορώδους μέσου που δίδεται από την σχέση:

$$K = \frac{k \cdot \mu}{\rho_w \cdot g} \quad [4.22]$$

όπου,

ρ_w η πυκνότητα του νερού, και

k ο συντελεστής διαπερατότητας (m/sec), ο οποίος με τη σειρά του δίνεται από την σχέση:

$$k = k_{rel} \cdot k_{sat} \quad [4.23]$$

όπου,

k_{rel} η σχετική υδραυλική αγωγιμότητα, και

k_{sat} η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα.

Εξίσωση συνέχειας (αρχή διατήρησης μάζας)

Η συνολική μάζα νερού που μπορεί να συγκεντρώσει κάθε επιμέρους όγκος εδάφους είναι:

$$m_v = \rho_w \cdot n \cdot S \quad [4.24]$$

όπου,

ρ_w η πυκνότητα του νερού,

n το πορώδες, και

S ο βαθμός κορεσμού.

Η εξίσωση συνέχειας εκφράζει ότι η εκροή νερού από αυτόν τον όγκο είναι ανάλογη με τις αλλαγές στη συγκέντρωση μάζας νερού (απόκλιση της πυκνότητας ροής του εναπομείναντος νερού q).

Επομένως, η εξίσωση συνέχειας έχει τη μορφή (Song, 1990):

$$\nabla^T \left[\rho_w \cdot \frac{k_{rel}}{\rho_w \cdot g} \cdot k_{sat} \cdot (\nabla p_w + \rho_w \cdot g) \right] = -\frac{\theta}{\theta_t} \cdot (\rho_w \cdot n \cdot S) \quad [4.25]$$

Παραγωγίζοντας την δεξιά πλευρά της εξίσωσης 4.25 ως προς τον χρόνο:

$$-\frac{\theta}{\theta_t} (\rho_w \cdot n \cdot S) = -n \cdot S \cdot \frac{\theta \cdot \rho_w}{\theta_t} - \rho_w \cdot n \cdot \frac{\theta S}{\theta_t} - \rho_w \cdot S \cdot \frac{\theta n}{\theta_t} \quad [4.26]$$

Από τον συνδυασμό των δύο παραπάνω σχέσεων 4.25 και 4.26, προκύπτει η τελική εξίσωση συνέχειας:

$$\rho_w \cdot S \cdot m^T \cdot \frac{\theta \varepsilon}{\theta_t} - \rho_w \cdot S \cdot \left(\frac{n}{K_w} + \frac{(1-n)}{K_s} \right) \cdot \frac{\theta \cdot p_w}{\theta_t} + n \cdot \rho_w \cdot \frac{\theta S}{\theta \cdot p_w} \cdot \frac{\theta \cdot p_w}{\theta_t} + \nabla^T \left[\rho_w \cdot \frac{k_{rel}}{\rho_w \cdot g} \cdot k_{sat} \cdot (\nabla p_w + \rho_w \cdot g) \right] = 0 \quad [4.27]$$

Ο πρώτος όρος εκφράζει την συνολική συμπίεση (μετατοπίσεις) της δομής του εδάφους λόγω ενεργών τάσεων και πιέσεων πόρων. Ο δεύτερος όρος εκφράζει την συμπίεση των στερεών σωματιδίων που σχηματίζουν τον εδαφικό σκελετό, καθώς και τις αλλαγές στην πυκνότητα του νερού, λαμβάνοντας υπόψη τη συμπιεστότητα του αέρα – νερού ($\beta = 1/K_w$). Ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει αλλαγές στον βαθμό κορεσμού λόγω ροής και ο τέταρτος όρος εκφράζει την απόκλιση της μάζας νερού στην πυκνότητα ροής του εναπομείναντος νερού.

Σταθερές και μεταβατικές συνθήκες ροής

Σε σταθερές συνθήκες ροής, το υδραυλικό φορτίο (Head) και ο συντελεστής διαπερατότητας σε οποιοδήποτε σημείο της μάζας του εδάφους παραμένουν σταθερές σε σχέση με το χρόνο. Σε αυτήν την ανάλυση η διακύμανση της πίεσης του νερού πόρων σε σχέση με το χρόνο είναι μηδενική και ισχύει η εξίσωση συνέχειας (Galani, 2010):

$$\nabla^T = \left[\frac{k_{rel}}{\rho_w \cdot g} \cdot k_{sat} \cdot (\nabla p_w + \rho_w \cdot g) \right] = 0 \quad [4.28]$$

Αντίθετα, σε συνθήκες μεταβατικής ροής, το υδραυλικό φορτίο (και πιθανώς ο συντελεστής διαπερατότητας) αλλάζει σε σχέση με το χρόνο. Οι αλλαγές αφορούν συνήθως μια μεταβολή στις οριακές συνθήκες. Η εξίσωση συνέχειας (σχέση 4.27) μπορεί να απλοποιηθεί για παροδική ανάλυση, παραλείποντας τις μετατοπίσεις στερεών σωματιδίων, δηλαδή:

$$-n \cdot \left(\frac{S}{K_w} - \frac{\partial}{\partial p_w} \right) \frac{\partial p_w}{\partial t} + \nabla^T \left[\frac{k_{rel}}{\rho_w \cdot g} \cdot k_{sat} \cdot (\nabla p_w + \rho_w \cdot g) \right] = 0 \quad [4.29]$$

Η παραπάνω εξίσωση περιγράφει τη ροή κορεσμένων – ακόρεστων υπόγειων υδάτων.

Μοντέλο συζευγμένης ροής – παραμόρφωσης

Από την εξίσωση του Biot που αποτελείται τόσο από την εξίσωση ισορροπίας όσο και από την εξίσωση συνέχειας του μίγματος νερού-εδάφους προκύπτει σχέση που αντιπροσωπεύει την μηχανική συμπεριφορά των κορεσμένων ή μερικώς κορεσμένων εδαφών.

Οι μετατοπίσεις του στερεού σκελετού και οι πιέσεις του νερού πόρων επιλέγονται ως βασικές μεταβλητές. Η χωρική διαφοροποίηση αποδίδεται από το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} K & Q \\ 0 & -H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ C & -S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dv}{dt} \\ \frac{d \cdot p_w}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u \\ G + q_p \end{bmatrix} \quad [4.30]$$

όπου,

K πίνακας ακαμψίας του εδαφικού σκελετού,

Q πίνακας σύζευξης τάσεων – παραμορφώσεων,

C πίνακας σύζευξης ροής – μετατόπισης,

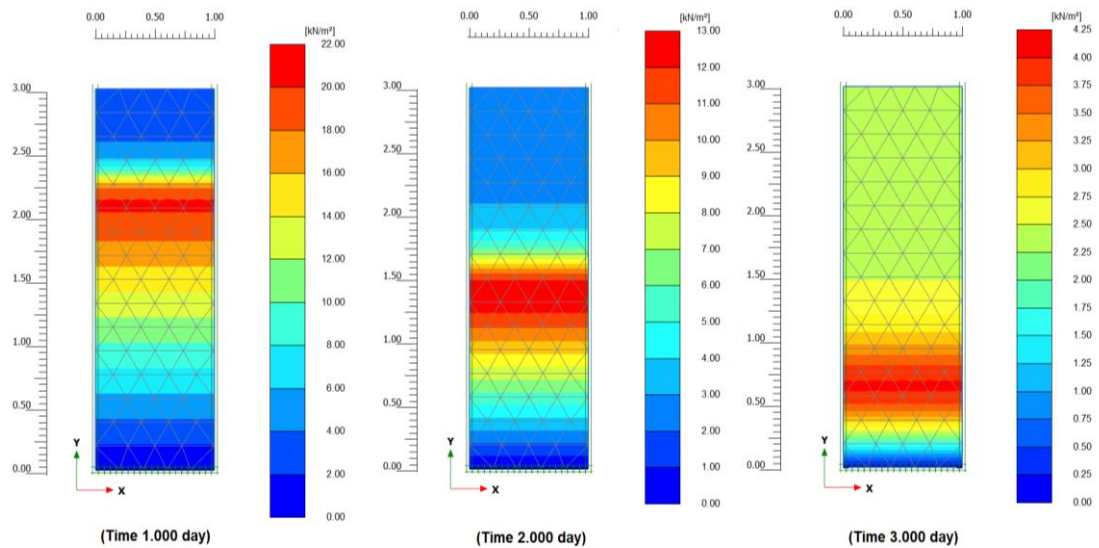
S πίνακας συμπιεστότητας,

q_p η ροή στα όρια του μοντέλου, και

G το διάνυσμα που λαμβάνει υπόψη την επίδραση της βαρύτητας στη ροή.

4.3.2. Υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten

Η θέση της αρχικής στάθμης των υπόγειων υδάτων, τα στρώματα εδάφους με διαφορετική υδραυλική συμπεριφορά και οι κλιματικοί παράγοντες (π.χ. βροχόπτωση) ορίζουν την αρχική σχέση μύζησης – κορεσμού του εδάφους (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9: Κατανομή μύζησης με το βάθος μετά από σταθερή βροχόπτωση 8.1×10^{-7} m/s σε ένα ακόρεστο στρώμα ιλύος για χρονικά βήματα $\Delta t = 1, 2$ και 3 ημέρες (Συλλιγνάκης κ.α., 2022).

Το υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten χρησιμοποιεί την χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους SWCC για να περιγράψει τις παραμέτρους ροής των υπόγειων υδάτων, κυρίως στην ακόρεστη ζώνη (Galavi, 2010).

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού συσχετίζει το ποσοστό υγρασίας κατ' όγκο και τη μύζηση στο ακόρεστο έδαφος (βλέπε Σχήμα 4.10). Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των υδραυλικών παραμέτρων που περιγράφουν πλήρως την υδραυλική συμπεριφορά των μερικώς κορεσμένων εδαφών (Plaxis 2D, 2020a).

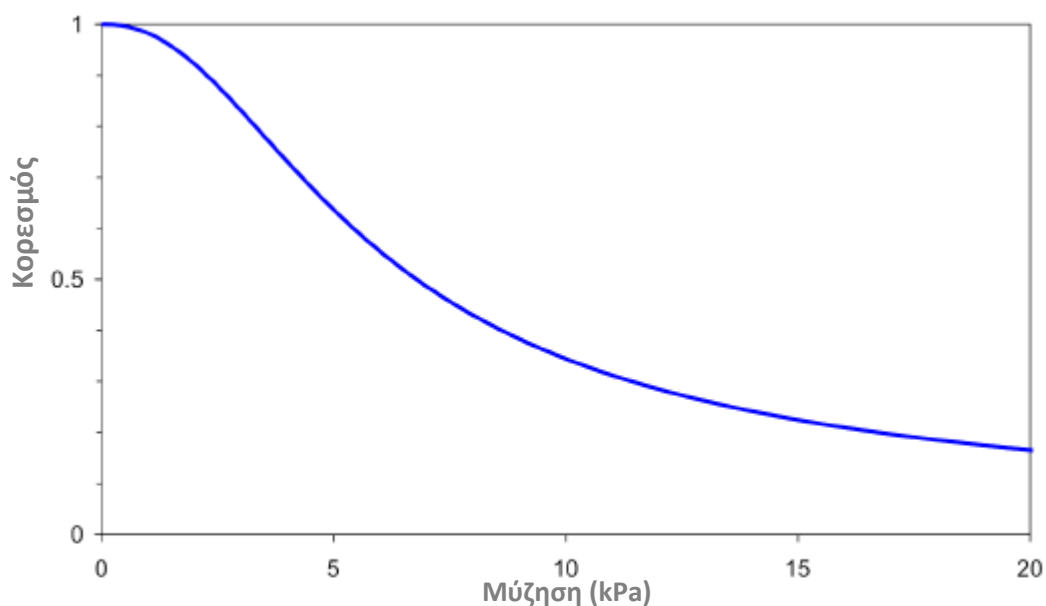
Συνάρτηση Van Genuchten

Η συνάρτηση Van Genuchten είναι μια εξίσωση τριών παραμέτρων που συνδέει τον κορεσμό με την πίεση φορτίου λόγω μύζησης ψ :

$$S(\psi) = S_{res} + (S_{sat} - S_{res})[1 + (g_a \cdot |\psi|^{g_n})]^{g_c} \quad [4.33]$$

όπου,

$$\psi = -\frac{p_w}{\gamma_w} \quad [4.34]$$



Σχήμα 4.10: Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού (Galani, 2010).

ρ_w η μύζηση που αναπτύσσεται στους πόρους,

γ_w το μοναδιαίο βάρος του νερού των πόρων,

S_{res} ο παραμένων βαθμός κορεσμού που αναφέρεται στο μέρος του νερού που παραμένει στους πόρους, ακόμη και σε υψηλά επίπεδα μύζησης,

S_{sat} ο κορεσμός των πόρων του εδάφους σε πλήρως κορεσμένες συνθήκες $S_{sat} = 1.0$. Στην πραγματικότητα οι πόροι δεν είναι πλήρως γεμάτοι με νερό, καθώς ο αέρας μπορεί να παγιδευτεί και ο κορεσμός σε αυτήν την κατάσταση θα είναι μικρότερος από 1,

g_α μια παράμετρος προσαρμογής που σχετίζεται με την τιμή εισόδου αέρα (Air Entry Value) στο έδαφος,

g_n μια παράμετρος προσαρμογής που είναι συνάρτηση του ρυθμού εκροής του νερού από το έδαφος μετά την τιμή εισόδου αέρα (Air Entry Value) (δηλαδή, όταν η μύζηση συνεχίσει να αυξάνεται πέραν της τιμής αυτής) και

g_c μια παράμετρος προσαρμογής της καμπύλης στα πειραματικά δεδομένα (μετρήσεις) η οποία χρησιμοποιείται στην γενική εξίσωση Van Genuchten. Στο PLAXIS γίνεται η ακόλουθη υπόθεση:

$$g_c = \left(\frac{1-g_n}{g_n} \right) \quad [4.35]$$

Η σχέση Van Genuchten παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα για χαμηλές και ενδιάμεσες τιμές μύζησης. Για πολύ υψηλές τιμές μύζησης ο κορεσμός προσεγγίζει τον παραμένον κορεσμό S_{res} (Plaxis 2D, 2020a).

Σχετική διαπερατότητα

Η διαπερατότητα εξαρτάται από τον κορεσμό του εδάφους. Ο λόγος της διαπερατότητας σε δεδομένο βαθμό κορεσμού (k_i) σε σχέση με την διαπερατότητα σε κορεσμένη κατάσταση (k_{sat}) ονομάζεται σχετική διαπερατότητα k_{rel} .

$$k_{rel} = \frac{k_i}{k_{sat}} \quad [4.36]$$

Η σχετική διαπερατότητα σχετίζεται με τον κορεσμό μέσω του ενεργού κορεσμού, S_{eff} (βλέπε Σχήμα 4.10), με την εξίσωση:

$$S_{eff} = \frac{S-S_{res}}{S_{sat}-S_{res}} \quad \text{ή} \quad S_{eff} = \frac{\theta-\theta_{res}}{\theta_s-\theta_{res}} \quad [4.37]$$

όπου,

S ένας δεδομένος κορεσμός,

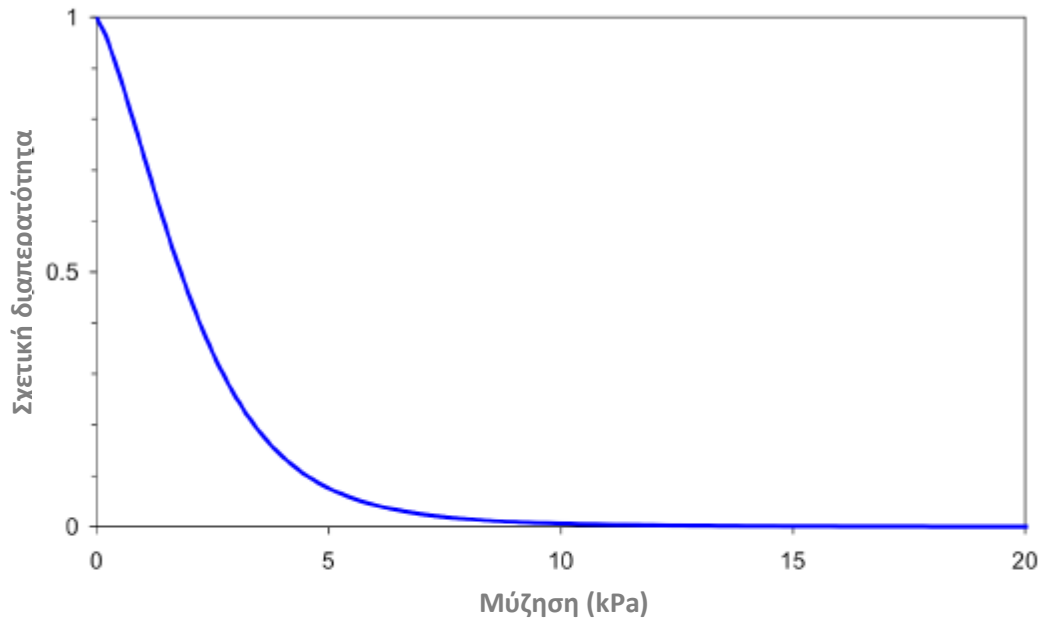
S_{res} ο παραμένων κορεσμός του εδάφους που εκφράζει ένα μέρος του υγρού που παραμένει στους πόρους ακόμη και σε υψηλά επίπεδα μύζησης,

S_{sat} ο κορεσμός των πόρων του εδάφους σε πλήρως κορεσμένες συνθήκες (= 1.0),

θ μια δεδομένη ογκομετρική υγρασία,

θ_{res} η παραμένουσα ογκομετρική υγρασία του εδάφους που παραμένει στο εδαφικό μέσο ακόμα και σε υψηλά επίπεδα μύζησης, και

θ_s η ογκομετρική υγρασία που αναφέρεται σε πλήρως κορεσμένες συνθήκες.



Σχήμα 4.11: Καμπύλη σχετικής διαπερατότητας σε συνάρτηση με τη μύζηση (Galani, 2010).

Η σχετική διαπερατότητα, σύμφωνα με τον Van Genuchten, ορίζεται ως:

$$k_{rel}(S) = \max \left[(S_{eff})^{g_l} \left(1 - \left[1 - S_{eff} \left(\frac{g_n}{g_n - 1} \right) \right]^{\frac{g_n - 1}{g_n}} \right)^2, 10^{-4} \right] \quad [4.38]$$

Η σχετική διαπερατότητα σχετίζεται με την πίεση του νερού των πόρων (την μύζηση) χρησιμοποιώντας την παράγωγο του βαθμού κορεσμού σε σχέση με την μύζηση, και η συσχέτιση δίδεται από την εξίσωση:

$$\frac{\partial S(p_w)}{\partial p_w} = (S_{sat} - S_{res}) \cdot \left[\frac{1 - g_n}{g_n} \right] \cdot \left[g_n \cdot \left(\frac{g_a}{\gamma_w} \right)^{g_n} \cdot (p_w)^{g_n - 1} \right] \cdot \left[1 + \left(g_a \cdot \frac{p_w}{\gamma_w} \right) \right]^{\left(\frac{1 - 2 \cdot g_n}{g_n} \right)} \quad [4.39]$$

Συμπερασματικά, το μοντέλο Van Genuchten προσομοιώνει την καθορίζει τις τιμές μύζησης και υδροπερατότητας στην ακόρεστη ζώνη.

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ MOST

Για την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των κορεσμένων ή μερικώς κορεσμένων εδαφών με αριθμητικές μεθόδους είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη τόσο η παραμόρφωση όσο και η ροή των υπόγειων υδάτων. Η εξαρτώμενη από τον χρόνο συμπεριφορά των εδαφών οδηγεί σε μικτές εξισώσεις μετατόπισης και πίεσης πόρων. Αυτό ονομάζεται συνδυασμένη υδρομηχανική προσέγγιση και οι εξισώσεις πρέπει να λυθούν ταυτόχρονα (Josifoski and Lenart, 2016).

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των πρανών της λίμνης Most πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Plaxis V16 που επιτρέπει μια πλήρως συνδυασμένη υδρομηχανική ανάλυση. Αυτός ο τύπος ανάλυσης μπορεί να αξιολογήσει σωστά τις επιπτώσεις της μεταβολής της στάθμης στη ευστάθεια των πρανών.

Η αντοχή σε διάτμηση του ακόρεστου εδάφους εξετάστηκε με βάση την έννοια της ενεργής τάσης του Bishop, λαμβάνοντας υπόψη την μύζηση. Για την ανάλυση της συμπεριφοράς του ακόρεστου εδάφους χρησιμοποιείται το υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten για τον προσδιορισμό των υδραυλικών παραμέτρων.

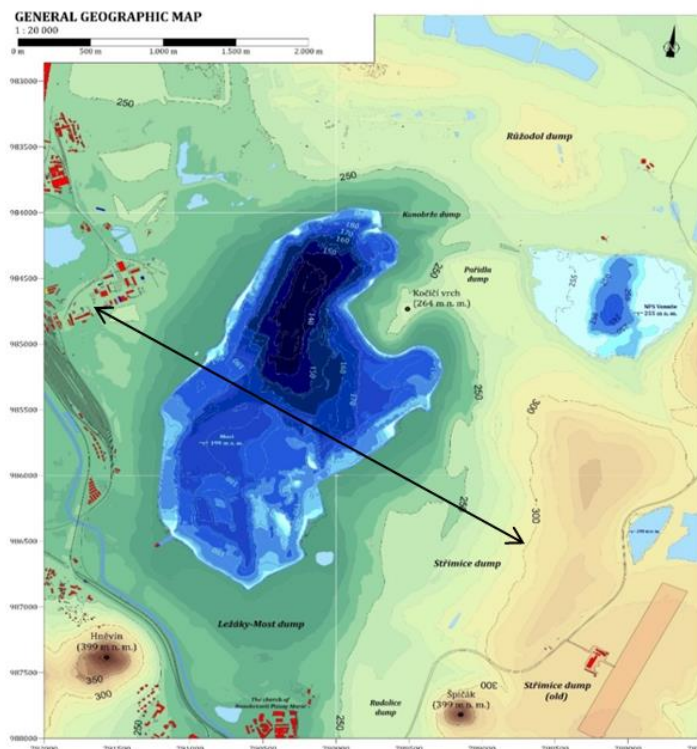
Για τα εδαφικά υλικά χρησιμοποιήθηκε το ελαστοπλαστικό μοντέλο Mohr-Coulomb (MC), το οποίο έχει τη δυνατότητα εκτίμησης των παραμορφώσεων και των τάσεων χωρίς τις απαιτήσεις προσδιορισμού της ακαμψίας του εδάφους με μεγαλύτερη ακρίβεια (π.χ. μοντέλο κράτυνσης Hardening Soil model).

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί την τεχνική μείωσης της αντοχής σε διάτμηση για την εκτίμηση της ευστάθειας της λίμνης στην περιοχή των μόνιμων πρανών και τις εσωτερικές αποθέσεις (Strimice), χρησιμοποιώντας τον συντελεστή ασφάλειας (SMsf). Για τον σκοπό αυτό ορίστηκε τομή με έκταση 3.5 Km.

Τα πλευρικά όρια στο μοντέλο της λίμνης ορίστηκαν με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain analyses).

5.1. Γεωμετρία

Η τομή που μελετήθηκε προέκυψε από τη λιθοστρωματογραφία και την τοπογραφία της περιοχής που μελετάται (βλέπε Σχήματα 1.5 και 1.6). Η θέση της τομής που μελετάται για την παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1. Οι σχηματισμοί θεωρήθηκαν ως ισότροποι με ελαστοπλαστική συμπεριφορά.



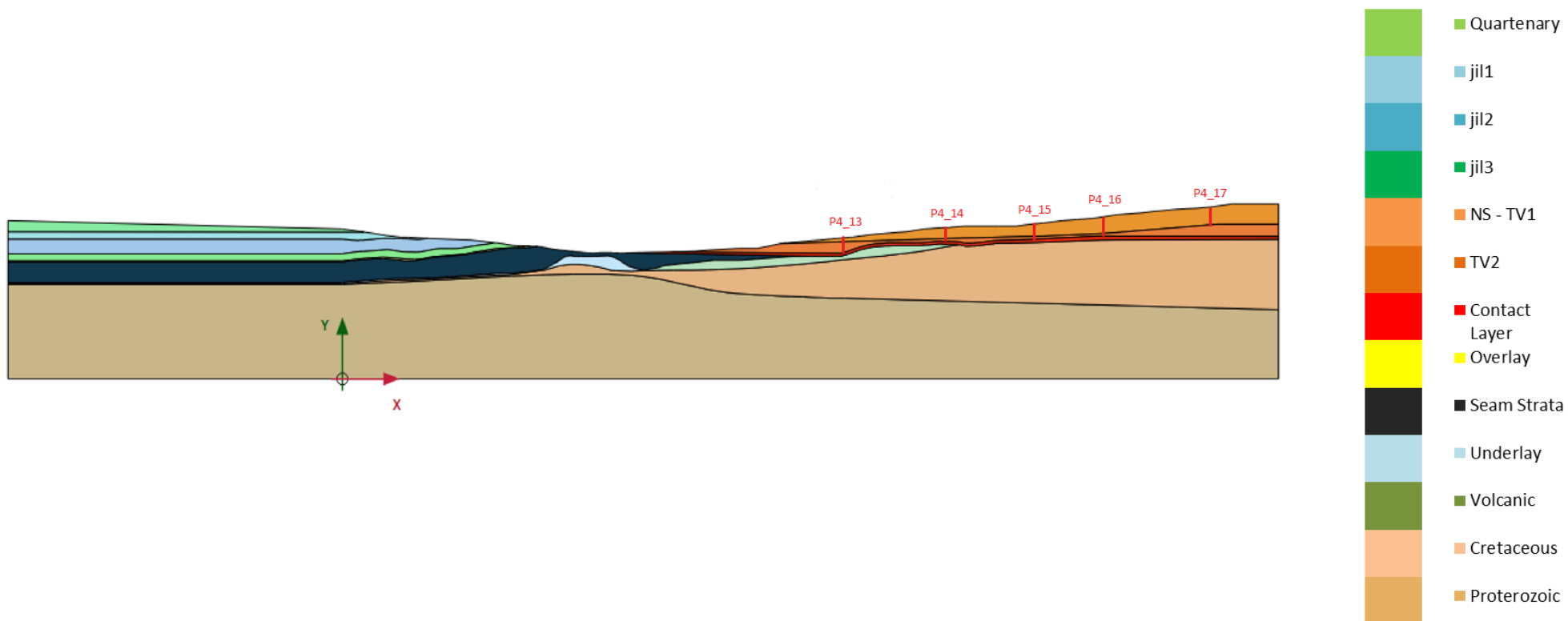
Σχήμα 5.1: Γεωγραφικός χάρτης και αντιπροσωπευτική τομή για την εκτίμηση της ευστάθειας της λίμνης (RAFF, 2022).

Οι γεωτεχνικές παράμετροι εκτιμήθηκαν από μετρήσεις που προέκυψαν από επιτόπου δοκιμές CPTU και τις τριαξονικές εργαστηριακές δοκιμές (για τους σχηματισμούς NS – TV1 και TV2). Οι παράμετροι των άλλων σχηματισμών καθώς και των παραμέτρων που δεν είχαν εκτιμηθεί από τις παραπάνω δοκιμές (π.χ. λόγος Poisson κ.α.) εκτιμήθηκαν με βάση την βιβλιογραφία (Πίνακας 5.1).

Η λιθοστρωματογραφία της περιοχής καθώς και η θέση των δοκιμών CPTU απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2.

Πίνακας 5.1: Γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της εκσκαφής.

Geotechnical parameters		Geological formations												
		Quaternary	jil 1	jil 2	Jil3	NS – TV1	TV2	Contact Layer	Overlay	Seam Strata	Underlay	Volcanic	Cretaceous	Proterozoic
Soil unit weight above phreatic level γ_{unsat}	[kN/m ³]	21	20	20	17	17.6	18.9	17	14	15	14	21	23	23
Soil unit weight below phreatic level γ_{sat}	[kN/m ³]	22	22	22	18	18.6	19.9	20	15	18	15	23	25	25
Cohesion c'	[kN/m ²]	70	57	93	72	4.56	7.8	8	50	50	35	500	elastic	elastic
Cohesion c'_{inc}	[kN/m ² /m]	-	-	-	-	0.42	0.82	-	-	-	-	-	-	-
Friction angle ϕ'	[°]	15	9.5	17	13.8	22.10	25	7	30	35	38	25	elastic	elastic
Dilatancy angle ψ	[°]	2	0	0	4.6	7.9	8.6	0	5	11.70	0	8.3	elastic	elastic
Young's modulus E'	MPa	70	70	80	60	17.9	160	70	120	150	200	3000	5000	30000
Young's modulus E'_{inc}	MPa	-	-	-	-	6.750	10	-	-	-	-	-	-	-
Poisson's ratio ν'	-	0.35	0.35	0.35	0.35	0.4	0.4	0.3	0.3	0.30	0.30	0.35	0.35	0.35
Permeability k	[m/sec]	1.00E-07	1.04E-06	1.03E-09	1.03E-07	1.35E-06	2.07E-08	1.04E-07	1.00E-04	1.00E-05	1.03E-06	1.04E-12	1.04E-13	1.16E-14

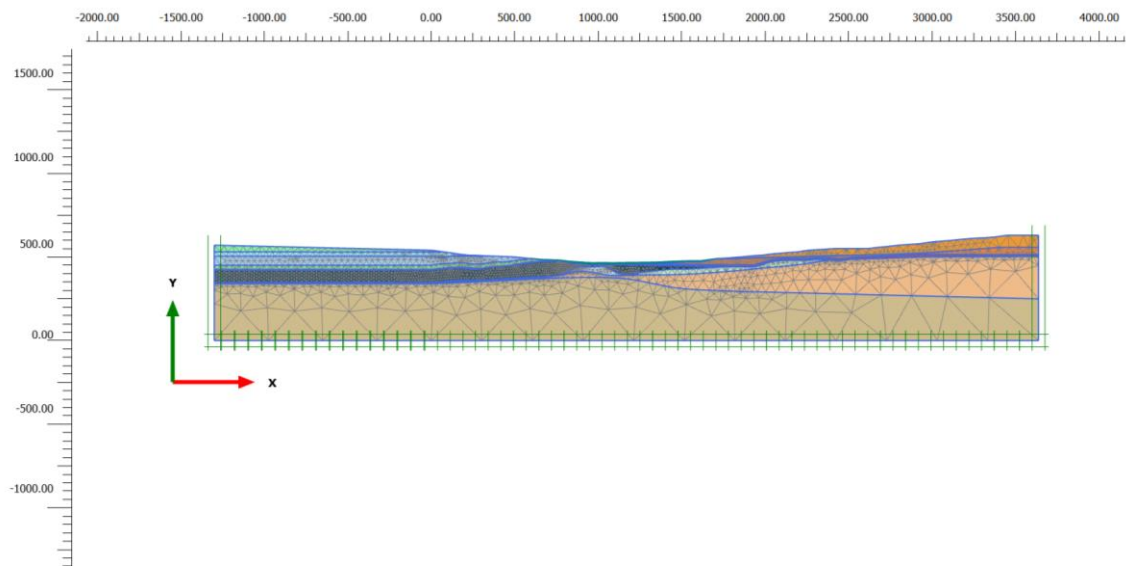


Σχήμα 5.2: Τομή της γεωμετρίας – λιθοστρωματογραφίας της περιοχής μελέτης.

5.2. Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες του προβλήματος επιτρέπουν την παραμόρφωση του μοντέλου ως προς τον κατακόρυφο άξονα ενώ το κατώτερο όριο του μοντέλου θεωρείται πακτωμένο (βλέπε Σχήμα 5.3).

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα τριγωνικά στοιχεία 15 κόμβων. Το δίκτυο που προέκυψε αποτελείται από 5619 εδαφικά στοιχεία και 45519 κόμβους με μέσο μέγεθος στοιχείων 22.62 m (βλέπε Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Απεικόνιση του πλέγματος του μοντέλου της λίμνης Most.

5.3. Αρχικές συνθήκες

Ως αρχική συνθήκη ροής για το μοντέλο θεωρείται η αρχική επιφάνεια της στάθμης της λίμνης (+199 m).

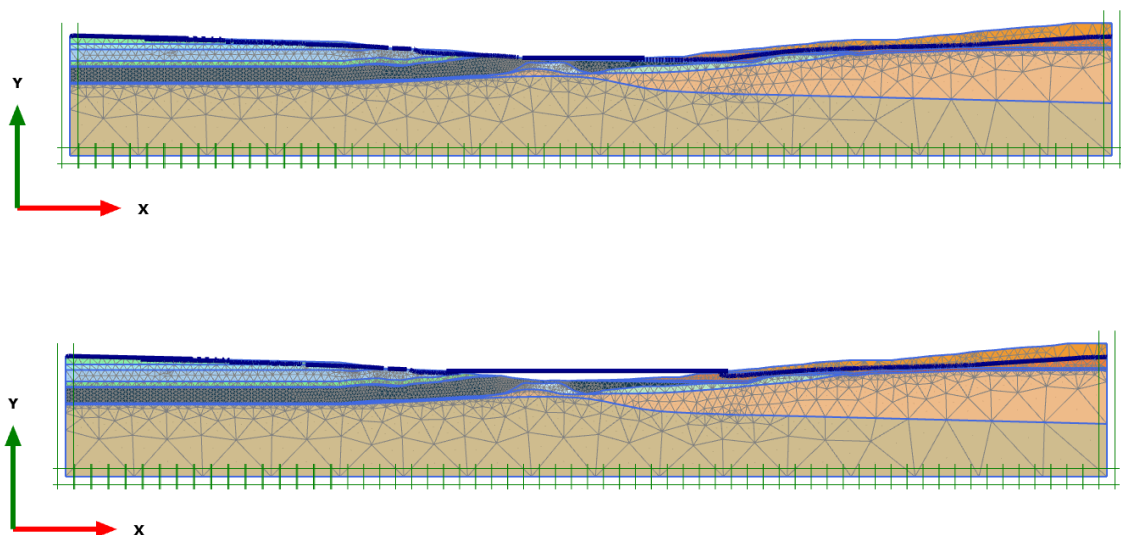
Στην περιοχή των αποθέσεων η υδραυλική κλίση κυμαίνεται από 0.05 έως 0.07 (δεξί όριο) και στην περιοχή των μόνιμων πρηνών κυμαίνεται από 0.01 έως 0.03. Σε όλες τις φάσεις τα πλευρικά όρια θεωρούνται ανοικτά με σταθερό υδραυλικό φορτίο.

5.4. Εκτίμηση της κινητικής συμπεριφοράς των πρανών της λίμνης Most

Για τον υπολογισμό της κινητικής και υδραυλικής συμπεριφοράς του μοντέλου προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της πλήρωσης της λίμνης Most με νερό. Η προσομοίωση αυτή πραγματοποιήθηκε σε στάδια λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο πλήρωσης, τις μηχανικές παραμέτρους των εδαφικών υλικών, τις υδραυλικές παραμέτρους και τις οριακές και αρχικές συνθήκες.

Η επίλυση της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τον τύπο ανάλυσης Fully Coupled Flow deformation και το υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten.

Πιο συγκεκριμένα η πλήρωση της λίμνης ξεκίνησε στις 24 Οκτωβρίου 2008. Το νερό που είχε συσσωρευτεί μέσα στην λίμνη προέρχονταν από βροχόπτωση και πηγές στα πρανή του ορυχείου. Το επίπεδο της στάθμης ήταν στα +145.12 m (αρχικό στάδιο). Η τελική στάθμη της λίμνης είναι στα +199.14 m (τελικό στάδιο) (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4: Απεικόνιση του αρχικού και τελικού σταδίου πλήρωσης της λίμνης.

Οι υπολογιστικές φάσεις που προσομοιώθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Φάσεις προσομοίωσης της ανύψωσης της στάθμης της λίμνης Most.

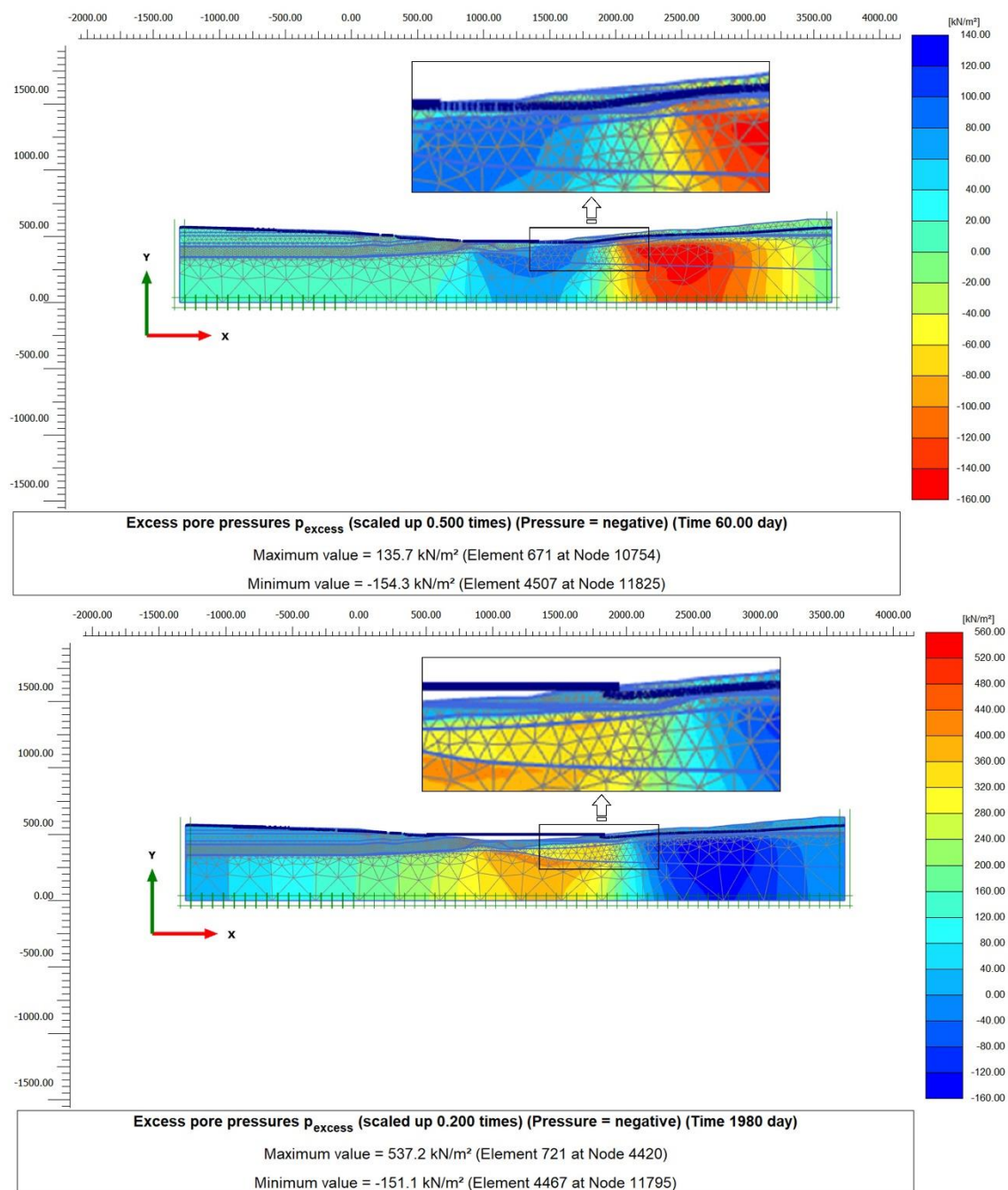
Φάσεις επίλυσης	Στάθμη λίμνης (m)
Αύξηση της στάθμης (1 ^η φάση)	154.62 (31 Δεκεμβρίου 2008)
Αύξηση της στάθμης (2 ^η φάση)	164.00 (31 Φεβρουαρίου 2009)
Αύξηση της στάθμης (3 ^η φάση)	173.19 (Ιούνιος 2009)
Αύξηση της στάθμης (4 ^η φάση)	179.68 (31 Δεκεμβρίου 2009)
Αύξηση της στάθμης (5 ^η φάση)	186.24 (30 Ιουνίου 2010)
Αύξηση της στάθμης (6 ^η φάση)	190.75 (Δεκέμβριος 2010)
Αύξηση της στάθμης (7 ^η φάση)	194.72 (Ιούνιος 2011)
Αύξηση της στάθμης (8 ^η φάση)	196.96 (Δεκέμβριος 2011)
Αύξηση της στάθμης (9 ^η φάση)	198.03 (Ιούνιος 2012)
Αύξηση της στάθμης (10 ^η φάση)	199.14 (Σεπτέμβριος 2014)

Οι κύριες μεταβολές που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης αφορούσαν:

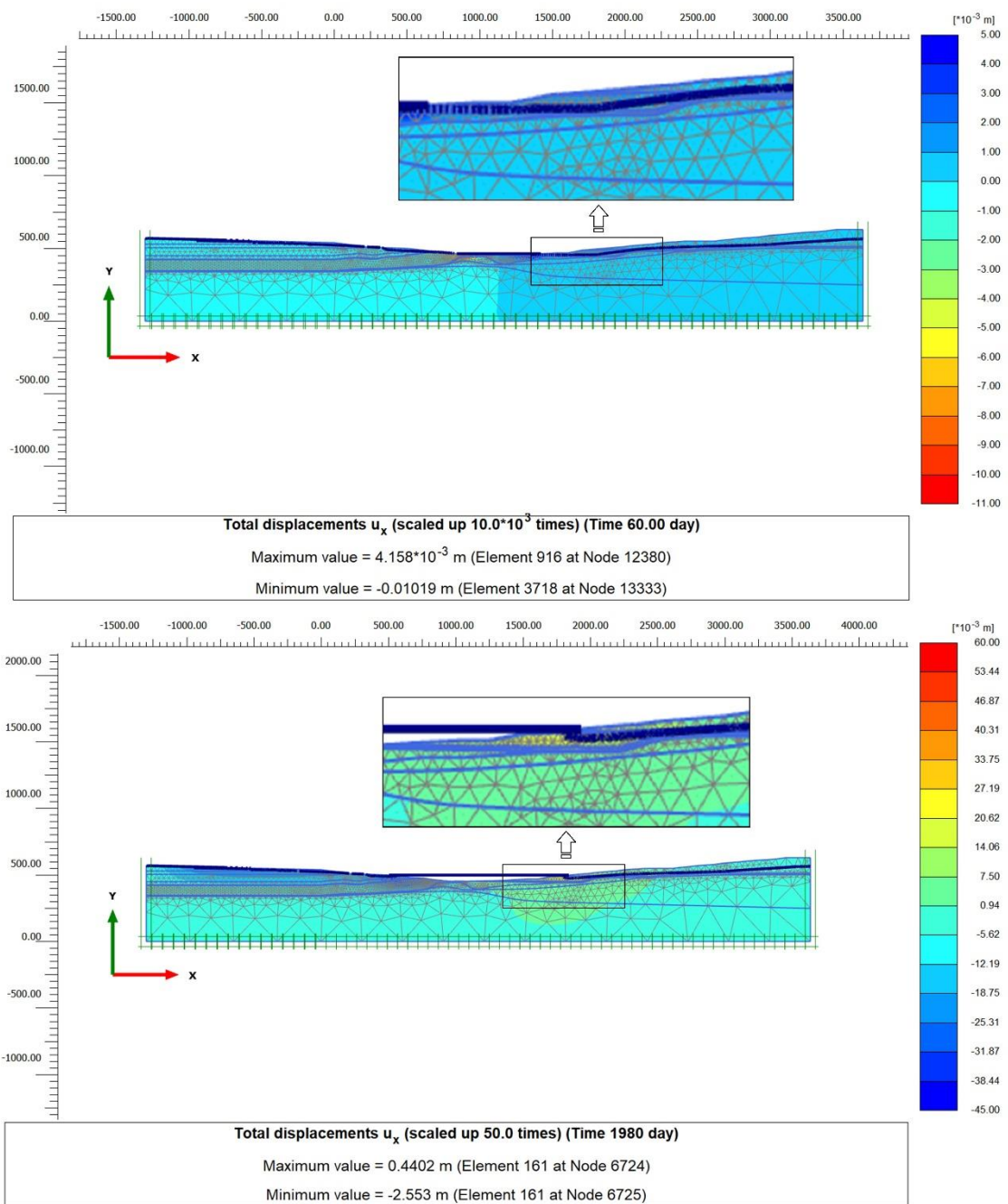
α) την υπερβολική πίεση P_{excess} (βλέπε Σχήμα 5.5), και

β) τις παραμορφώσεις σε κάθε στάδιο πλήρωσης της λίμνης με νερό (Σχήμα 5.6).

Οι μεταβολές αυτές κυρίως εμφανίζονται κοντά στα πρανή της λίμνης που επηρεάζεται από την πλήρωση του νερού.



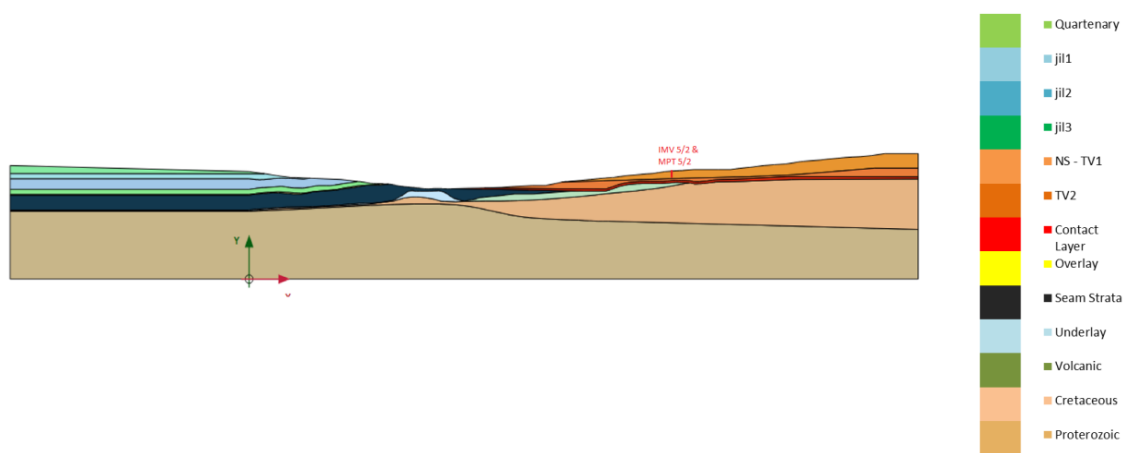
Σχήμα 5.5: Μεταβολή των υπερπιέσεων πόρων P_{excess} πριν και μετά την πλήρωση της λίμνης με νερό.



Σχήμα 5.6: Μεταβολή των οριζόντιων μετακινήσεων u_x πριν και μετά την πλήρωση της λίμνης με νερό.

5.5. Αξιολόγηση επιτόπου μετρήσεων και σύγκριση με την προβλεπόμενη συμπεριφορά της προσομοίωσης κατά την πλήρωση

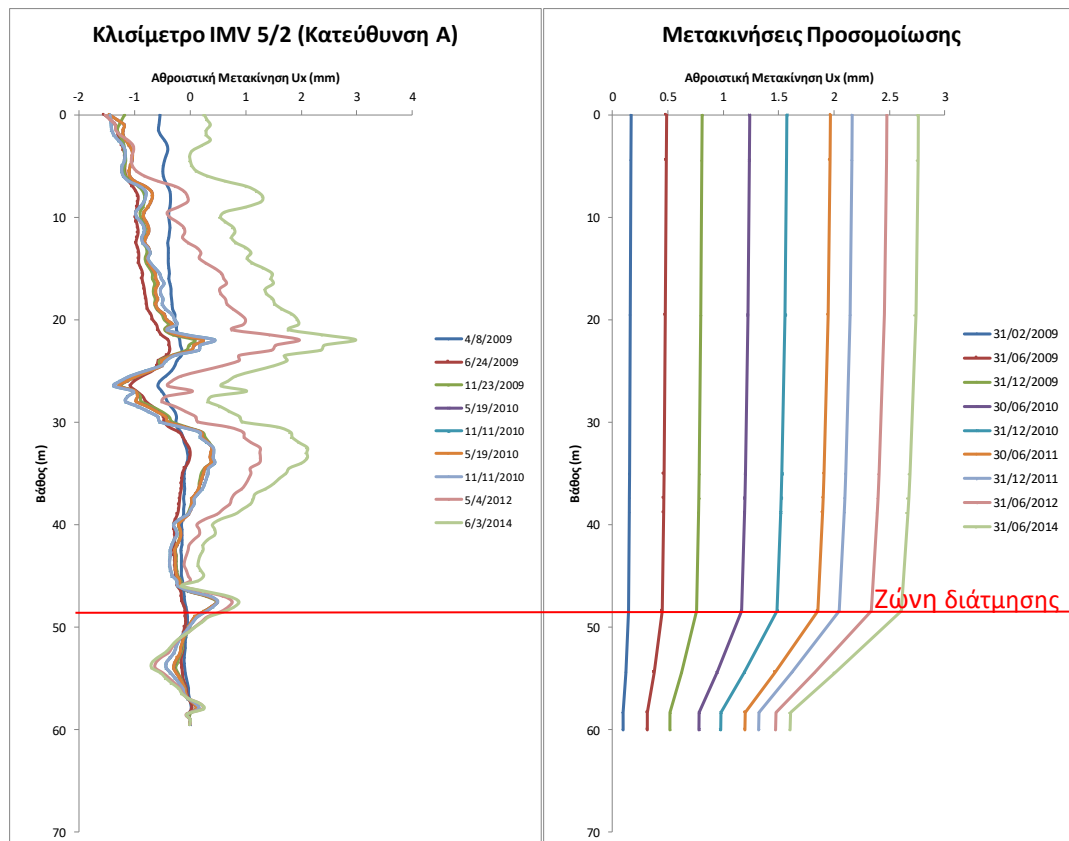
Στην περιοχή της λίμνης Most είναι εγκατεστημένα 14 κλισιμέτρα για τον έλεγχο της κινητικότητας των πρανών της απόθεσης Strimice. Από τα κλισιμέτρα αυτά ένα αναφέρεται στην τομή που εξετάζεται (IMV 5/2) (βλέπε Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7: Απεικόνιση της θέσης του πιεζομέτρου MPT 5/2 και του κλισιμέτρου IMV 5/2 στην τομή που μελετάται στην λίμνη Most.

Το κλισιμέτρο IMV 5/2 έχει προσανατολισμό κατεύθυνσης A 290° και ταυτίζεται με την κατεύθυνση της τομής που μελετάται. Από την επεξεργασία των μετρήσεων του κλισιμέτρου προκύπτει μία σχετική μετακίνηση σε βάθος 48 m από την επιφάνεια του εδάφους και μια μέγιστη μετακίνηση 2.9 mm σε βάθος 22 m (Σχήμα 5.8).

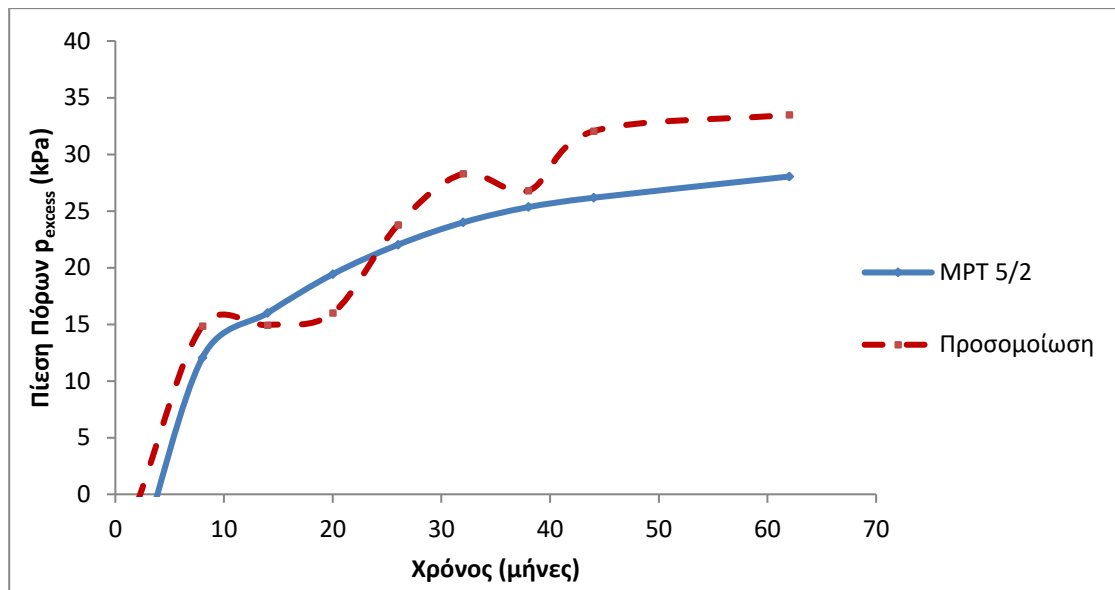
Το μοντέλο προσομοίωσης δίνει μια σχετική μετακίνηση σε βάθος 49 m, με μια μέγιστη μετακίνηση 2.7 mm (βλέπε Σχήμα 5.8). Η επιφάνεια διάτμησης αυτή εντοπίζεται στα όρια (διεπιφάνεια) μεταξύ της τεχνικογεωλογικής ενότητας TV2 και του Contact Layer. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνονται από τις μετρήσεις του κλισιμέτρου IMV 5/2.



Σχήμα 5.8: Απεικόνιση οριζόντιων μετακινήσεων U_x που προκύπτουν από το κλισίμετρο IMV 5/2 και την προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά την πίεση των πόρων συγκρίνονται με τις μετρήσεις της πίεσης των πόρων του πιεζομέτρου MPT 5/2, η θέση του οποίου βρίσκεται κοντά στην τομή που μελετάται (Σχήμα 1.6). Το πιεζόμετρο αυτό μετρά την πίεση σε βάθος 20 μέτρα από την επιφάνεια σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9, η πίεση που μετρά το πιεζόμετρο προσεγγίζει την αθροιστική P_{excess} (υπερπίεση) της προσομοίωσης που προκύπτει με την αύξηση της στάθμης. Η απόκλιση πιθανόν να οφείλεται στην έλλειψη χρονικά ταυτόχρονων μετρήσεων αύξησης της στάθμης και μέτρησης της πίεσης.



Σχήμα 5.9: Απεικόνιση της μεταβολής της πίεσης του νερού των πόρων από το πιεζόμετρο MPT 5/2 και την προσομοίωση.

Από τα παραπάνω προκύπτει μια καλή ταύτιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις παρατηρήσεις πεδίου. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι αξιόπιστες για τη σωστή πρόγνωση της κινητικής συμπεριφοράς των πρανών της λίμνης.

5.6. Επιλύσεις

Οι υπολογιστικές φάσεις προσομοιώνουν τα σενάρια που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3. Μετά από κάθε σενάριο εκτιμήθηκε ο συντελεστή ασφάλειας ΣM_{sf} (Πίνακας 5.3).

Αρχικά έγινε εκτίμηση του αρχικού πεδίου τάσεων και υπολογίστηκαν οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από το ίδιο το βάρος των σχηματισμών. Ακολούθησε μηδενισμός των παραμορφώσεων που είχαν προκύψει σ' αυτό το στάδιο και εκτιμήθηκε ο συντελεστής ασφάλειας.

Ακολούθησε η επίλυση των παρακάτω σεναρίων:

Πίνακας 5.3: Φάσεις υπολογισμού για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της λίμνης Most.

α/α	Φάσεις υπολογισμού για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της λίμνης Most
1	Εκτίμηση του αρχικού πεδίου τάσεων και μηδενισμός των παραμορφώσεων
	Εκτίμηση του συντελεστή ευστάθειας
2	Διακύμανση της στάθμης ± 60 cm με διαφορετικούς ρυθμούς και αριθμό διακυμάνσεων
3	Εκτίμηση του συντελεστή ευστάθειας
4	Πτώση της στάθμης κατά 10 m με διαφορετικούς ρυθμούς (υψόμετρο από +199 m στα 189 m)
5	Εκτίμηση του συντελεστή ευστάθειας
6	Πτώση της στάθμης κατά 5 m με διαφορετικούς ρυθμούς (υψόμετρο από +199 m στα 194 m)
7	Εκτίμηση του συντελεστή ευστάθειας (σε κάθε διαφορετικό ρυθμό πτώσης)
8	Αύξηση της στάθμης κατά 5 m με διαφορετικούς ρυθμούς (υψόμετρο από +199 m στα 204 m)
9	Εκτίμηση του συντελεστή ευστάθειας (σε κάθε διαφορετικό ρυθμό πτώσης)
10	Αύξηση της στάθμης κατά 10 m με διαφορετικούς ρυθμούς (υψόμετρο από +199 m στα 209 m)
11	Εκτίμηση του συντελεστή ευστάθειας (σε κάθε διαφορετικό ρυθμό αύξησης)
12	Πτώση της στάθμης κατά 30 m (ρυθμός πτώσης 2.55 m/h) (υψόμετρο από +199 m στα 169 m – οριακή κατάσταση)
13	Εκτίμηση του συντελεστή ευστάθειας (σε κάθε διαφορετικό ρυθμό αύξησης)

- Διακύμανση της στάθμης ± 60 cm με διαφορετικούς ρυθμούς διακύμανσης και αριθμό διακυμάνσεων.
- Πτώση της στάθμης κατά 10 m με διαφορετικούς ρυθμούς πτώσης (μεταβολή στάθμης από +199 m στα 189 m).
- Πτώση της στάθμης κατά 5 m με διαφορετικούς ρυθμούς πτώσης (μεταβολή στάθμης από +199 m στα +194 m).
- Αύξηση της στάθμης κατά 5 m με διαφορετικούς ρυθμούς αύξησης (μεταβολή στάθμης από +199 m στα +204 m).
- Αύξηση της στάθμης κατά 10 m με διαφορετικούς ρυθμούς αύξησης (μεταβολή στάθμης από +199 m στα +209 m).

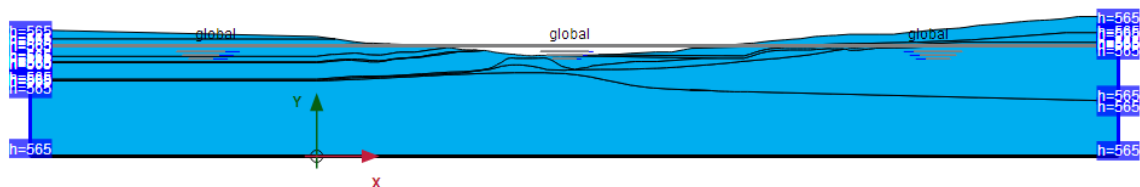
- Πτώση της στάθμης κατά 30 m με ρυθμό πτώσης 0.85 m/h (μεταβολή στάθμης από +199 m στα 169 m). Το σενάριο αυτό αποτελεί και την οριακή κατάσταση κατά την οποία η ανάντη παρειά της απόθεσης Strimice αποτελεί την πιο επισφαλή ζώνη.

5.7. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

5.7.1. Υφιστάμενη κατάσταση της λίμνης Most (στάθμη +199 m)

Ο αρχικός συντελεστής ασφάλειας των πρανών της λίμνης Most με δεδομένες τις ιδιότητες εδάφους ελέγχεται από τη γεωμετρία του, τη στάθμη των υπόγειων υδάτων και τη μύζηση στην ακόρεστη ζώνη που ορίζεται ως συνάρτηση της χαρακτηριστικής καμπύλη του εδάφους (SWCC).

Οι υφιστάμενες υδραυλικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή προκύπτουν από την εφαρμογή υδραυλικού φορτίου +565 μέτρα στα πλευρικά όρια του μοντέλου και την αρχική στάθμη της λίμνης στα +199 m (Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10: Απεικόνιση των αρχικών συνθηκών του μοντέλου στην υφιστάμενη κατάσταση της λίμνης Most (στάθμη +199 m).

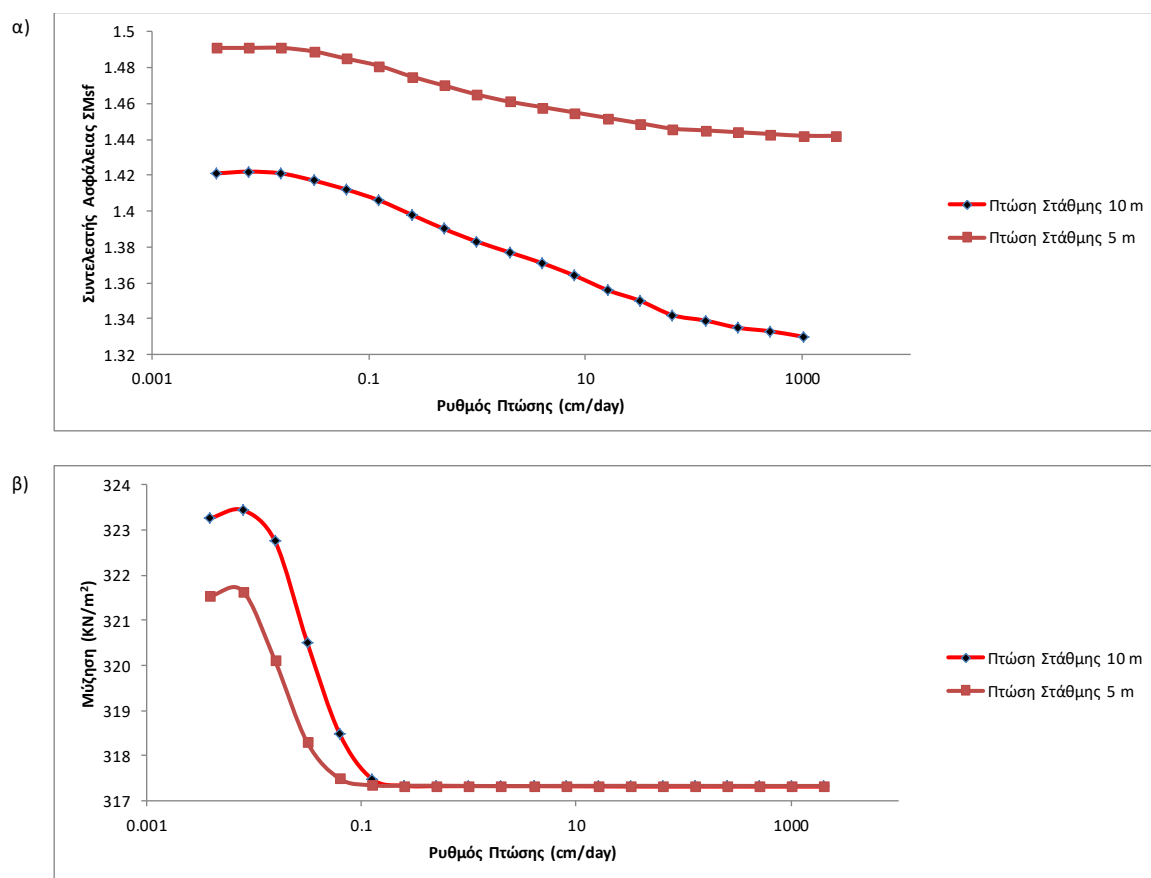
Ο αρχικός συντελεστής ασφάλειας που προσδιορίστηκε είναι 1.57 που υποδηλώνει ευστάθεια των πρανών.

5.7.2. Ταπείνωση της στάθμης κατά 5 και 10 m

Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της συμπεριφοράς των πρανών με τη πτώση της στάθμης της λίμνης κατά 10 και 5 m με διαφορετικούς ρυθμούς πτώσης (από το

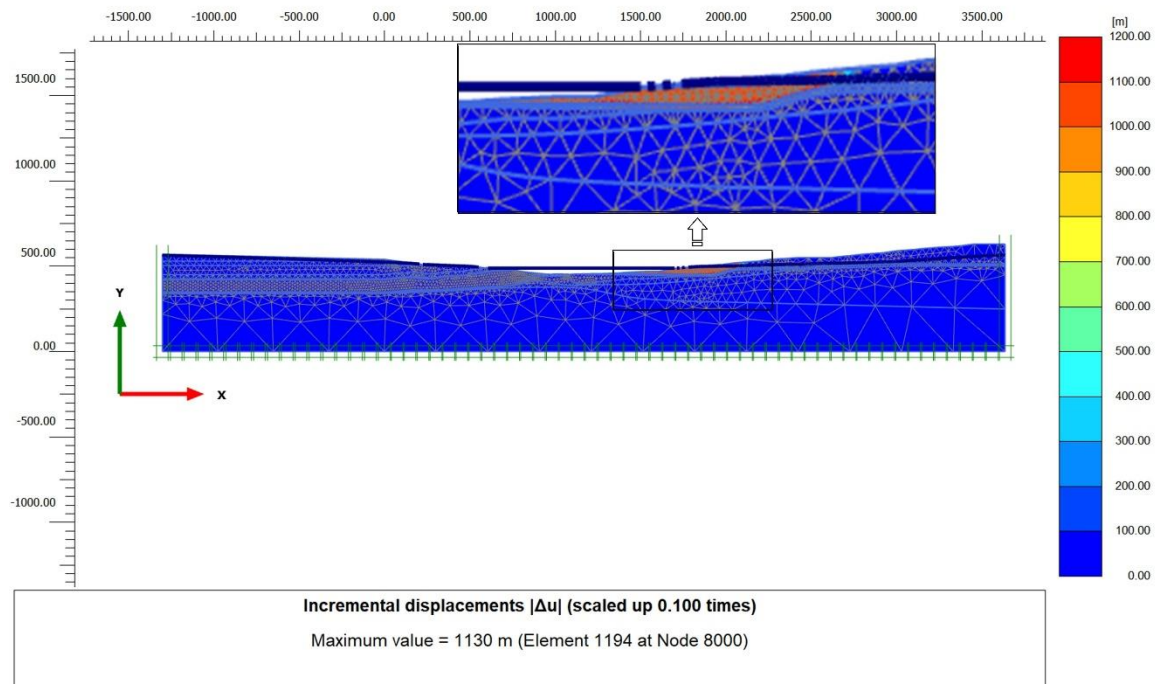
απόλυτο υψόμετρο +199 m στα +189 m και +194 αντίστοιχα) θεωρώντας ανοικτά πλευρικά όρια (δηλαδή ότι υπάρχει εισροή νερού από τα όρια του μοντέλου προς στο πρανές).

Ο μικρότερος συντελεστής ασφάλειας ($\Sigma Msf = 1.33$) προέκυψε σε μια πτώση στάθμης 10 m και ένα ρυθμό 0.85 m/h (2040 cm/day), με την πιο επισφαλή ζώνη να εντοπίζεται στην απόθεση Strimice (Σχήματα 5.11, 5.12 και 5.13).

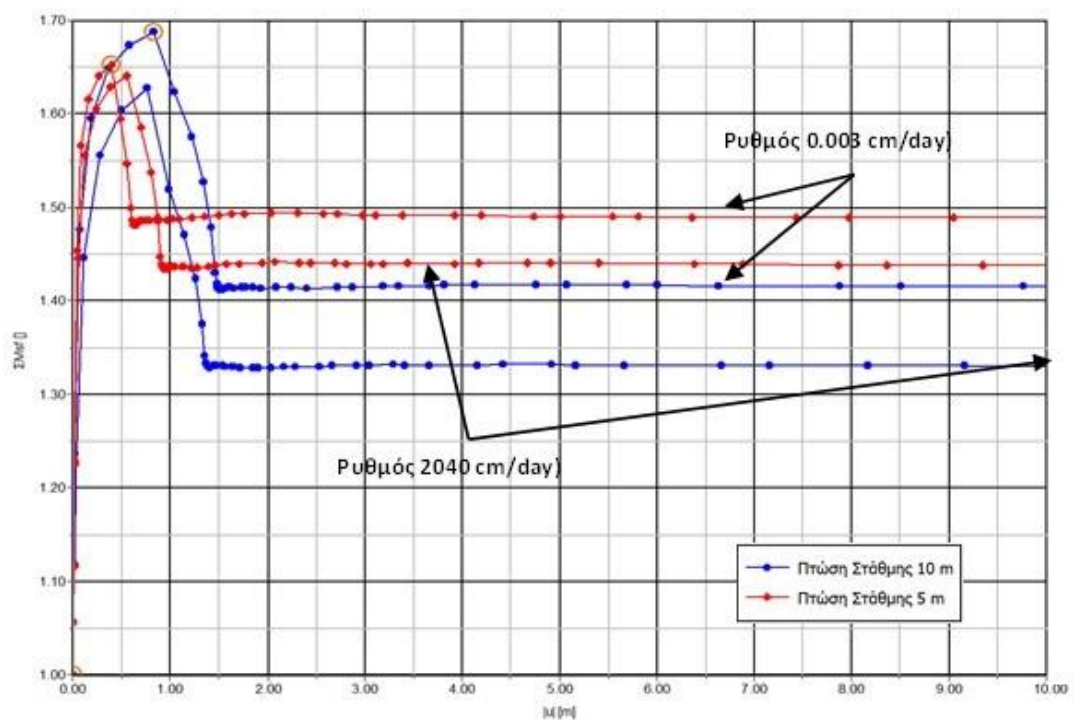


Σχήμα 5.11: Συσχέτιση του ρυθμού πτώσης με τον συντελεστή ασφάλειας και την μύζηση. α) Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με την αύξηση του ρυθμού πτώσης της στάθμης της λίμνης, β) Μεταβολή της μύζησης με την αύξηση του ρυθμού πτώσης της στάθμης της λίμνης.

Γενικά, με την πτώση της στάθμης παρουσιάζεται μείωση του συντελεστή ασφάλειας με την αύξηση του ρυθμού πτώσης. Η μέγιστη μείωση εμφανίζεται όταν ο ρυθμός πτώσης είναι πολύ μεγαλύτερος από την περατότητα του σχηματισμού που επηρεάζεται (TV2) (δηλαδή, 0.1788 cm/day).



Σχήμα 5.12: Απεικόνιση των αυξητικών παραμορφώσεων στην φάση υπολογισμού της ευστάθειας της λίμνης Most (επισφαλής ζώνη αστοχίας).



Σχήμα 5.13: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας συναρτήσει των συνολικών μετακινήσεων U σε κόμβο κοντά στο πρανές.

Γενικά, η μείωση του συντελεστή ασφάλειας κατά την πτώση της στάθμης επηρεάζεται από την μέση – χαμηλή διαπερατότητα των σχηματισμών της λίμνης. Αυτό οφείλεται στις υπερπιέσεις του νερού των πόρων p_{excess} , οι οποίες αυξάνονται αφού δεν προλαβαίνουν να εκτονωθούν (Σχήμα 5.14).

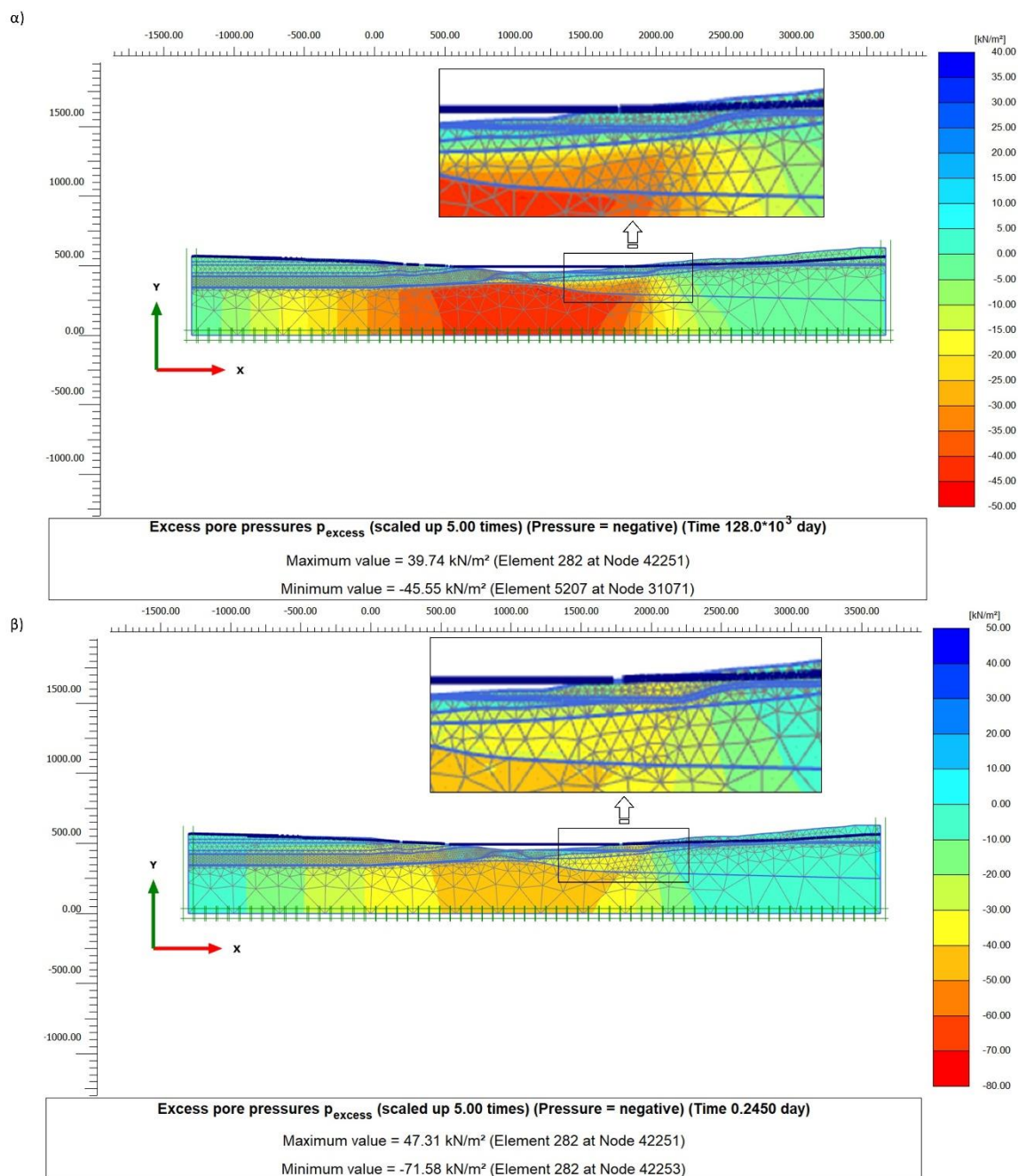
Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διατμητικής αντοχής των εδαφικών υλικών. Η μείωση της αντοχής σε συνδυασμό με τη πτώση της στάθμης (απώλεια στήριξης του πρανούς από το νερό της λίμνης) οδηγεί στην πτώση του συντελεστή ασφάλειας (Paronuzzi et al., 2013).

Η μείωση του συντελεστή ασφάλειας με την πτώση της στάθμης ερμηνεύεται από το διάγραμμα της μύζησης, το οποίο υποδεικνύει ότι σε μικρούς ρυθμούς (πολύ μικρότερους από την περατότητα των σχηματισμών που επηρεάζονται) η μύζηση του πρανούς είναι υψηλή, διατηρώντας υψηλό τον συντελεστή ασφάλειας (βλέπε Σχήμα 5.11 β).

Στην συνέχεια, καθώς ο ρυθμός πτώσης αυξάνεται και πλησιάζει την περατότητα των σχηματισμών, η μύζηση μειώνεται γεγονός που οδηγεί στην μείωση του συντελεστή ασφάλειας δεδομένου ότι η έκταση της ακόρεστης ζώνης είναι αρκετά μικρότερη (Jin-Zhu et al., 2020).

Όταν ρυθμός πτώσης πλησιάζει την περατότητα του σχηματισμού TV2 (0.178 cm/day), η μύζηση παραμένει σταθερή (η ακόρεστη ζώνη δεν μεταβάλλεται καθώς τα υλικά που είναι μέσης - χαμηλής περατότητας δεν προλαβαίνουν να στραγγίσουν).

Επομένως, η μείωση του συντελεστή ασφάλειας για ρυθμούς πτώσης πολύ μεγαλύτερους από την περατότητα των σχηματισμών οφείλεται κυρίως στην απώλεια στήριξης του πρανούς από το νερό της λίμνης και στις υπερπιέσεις του νερού των πόρων.

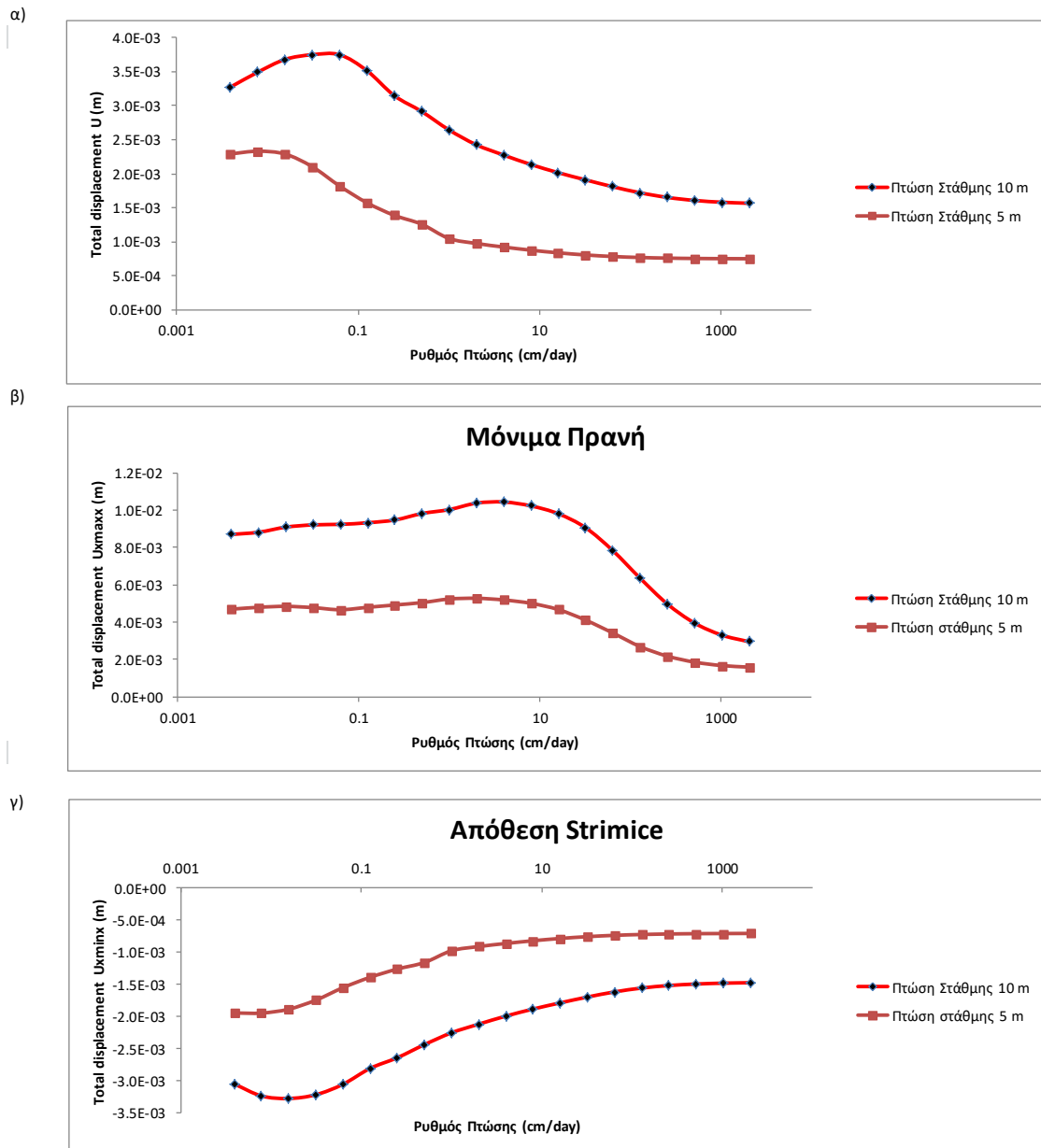


Σχήμα 5.14: Απεικόνιση των υπερβολικών πιέσεων πόρων p_{excess} σε πτώση στάθμης 5 m.

α) υπερπιέσεις πόρων σε ρυθμό πτώσης 0.003 cm/day, β) υπερπιέσεις πόρων σε ρυθμό πτώσης 2040 cm/day.

Συμπερασματικά, ρυθμοί πτώσης που προσεγγίζουν ή υπερβαίνουν την περατότητα των σχηματισμών, οδηγούν στη μείωση του συντελεστή ασφάλειας. Αυτό οφείλεται κυρίως στην απώλεια στήριξης του πρανούς από το νερό της λίμνης, την μύζηση (εύρος της ακόρεστης ζώνης) και τις υπερπιέσεις πόρων.

Επιπλέον, με την αύξηση του ρυθμού πτώσης παρατηρείται μείωση των συνολικών μετατοπίσεων U των πρανών, λαμβάνοντας μια σταθερή τιμή σε υψηλούς ρυθμούς πτώσης της στάθμης (Σχήμα 5.15).



Σχήμα 5.15: Απεικόνιση των μετακινήσεων συναρτήσει του ρυθμού πτώσης της στάθμης της λίμνης στην θέση του κλισιμέτρου IMV 5/2. α) Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων της απόθεσης Strimice σε σχέση με τον ρυθμό πτώσης, β) Μεταβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων στα μόνιμα πρανή σε σχέση με τον ρυθμό πτώσης (η θετική τιμή σημαίνει κίνηση προς την λίμνη), γ) Μεταβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων στην απόθεση Strimice σε σχέση με τον ρυθμό πτώσης (η αρνητική τιμή σημαίνει κίνηση προς την λίμνη).

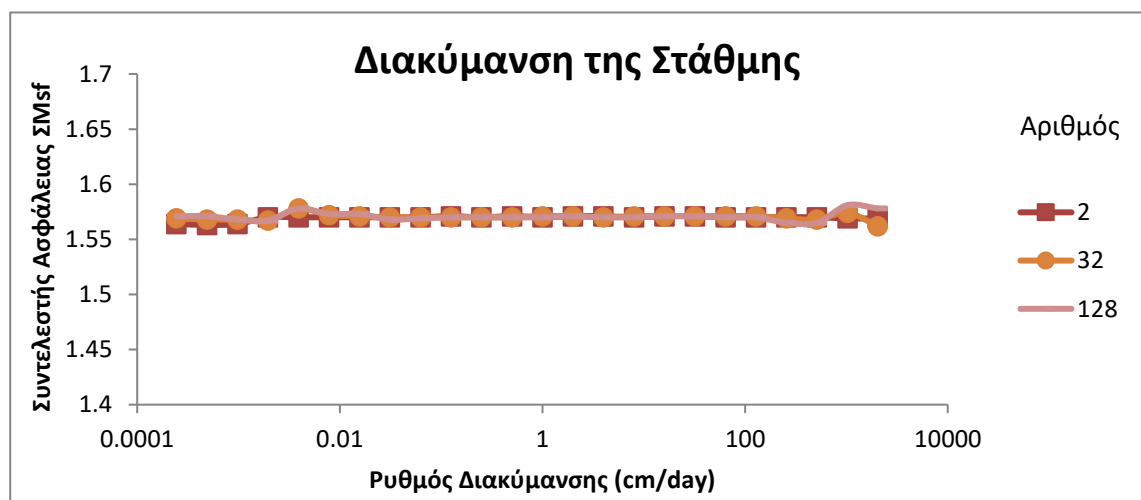
Οι συνολικές μετατοπίσεις που παρουσιάζονται στις περιοχές των μόνιμων πρανών και της απόθεσης Strimice κατά την μεταβολή των υπόγειου νερού οφείλονται στην στερεοποίηση των εδαφικών υλικών. Οι οριζόντιες μετατοπίσεις μειώνονται με την αύξηση του ρυθμού πτώσης της στάθμης της λίμνης.

Η κατεύθυνση των διανυσμάτων των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x είναι προς την μεριά της λίμνης. Οι μετακινήσεις αυτές μπορεί να οδηγήσουν στην αποσταθεροποίηση των πρανών της λίμνης δικαιολογώντας την μείωση του συντελεστή ασφάλειας (βλέπε Σχήμα 5.15).

5.7.3. Διακύμανση της στάθμης ± 60 cm

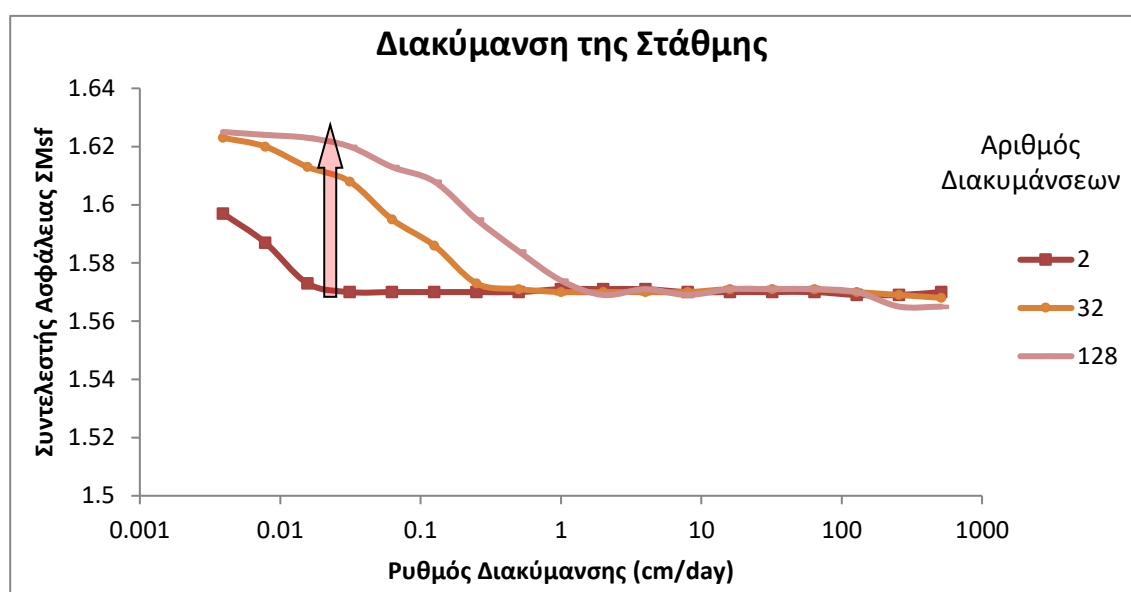
Η διακύμανση της στάθμης αποτελεί ένα σενάριο το οποίο προσομοιώνει μια πραγματική κατάσταση που επικρατεί στην λίμνη. Η διακύμανση της στάθμης ± 60 cm προσομοιώθηκε με διαφορετικούς ρυθμούς διακύμανσης και αριθμό διακυμάνσεων.

Οι οριακές συνθήκες θεωρούνται κλειστές (δηλαδή, δεν υπάρχει συνεχής εισροή νερού από τα όρια του μοντέλου προς στο πρανές). Με ανοικτές τις οριακές συνθήκες δεν υπάρχει μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας, παραμένοντας σταθερός στο 1.57. (Σχήμα 5.16).



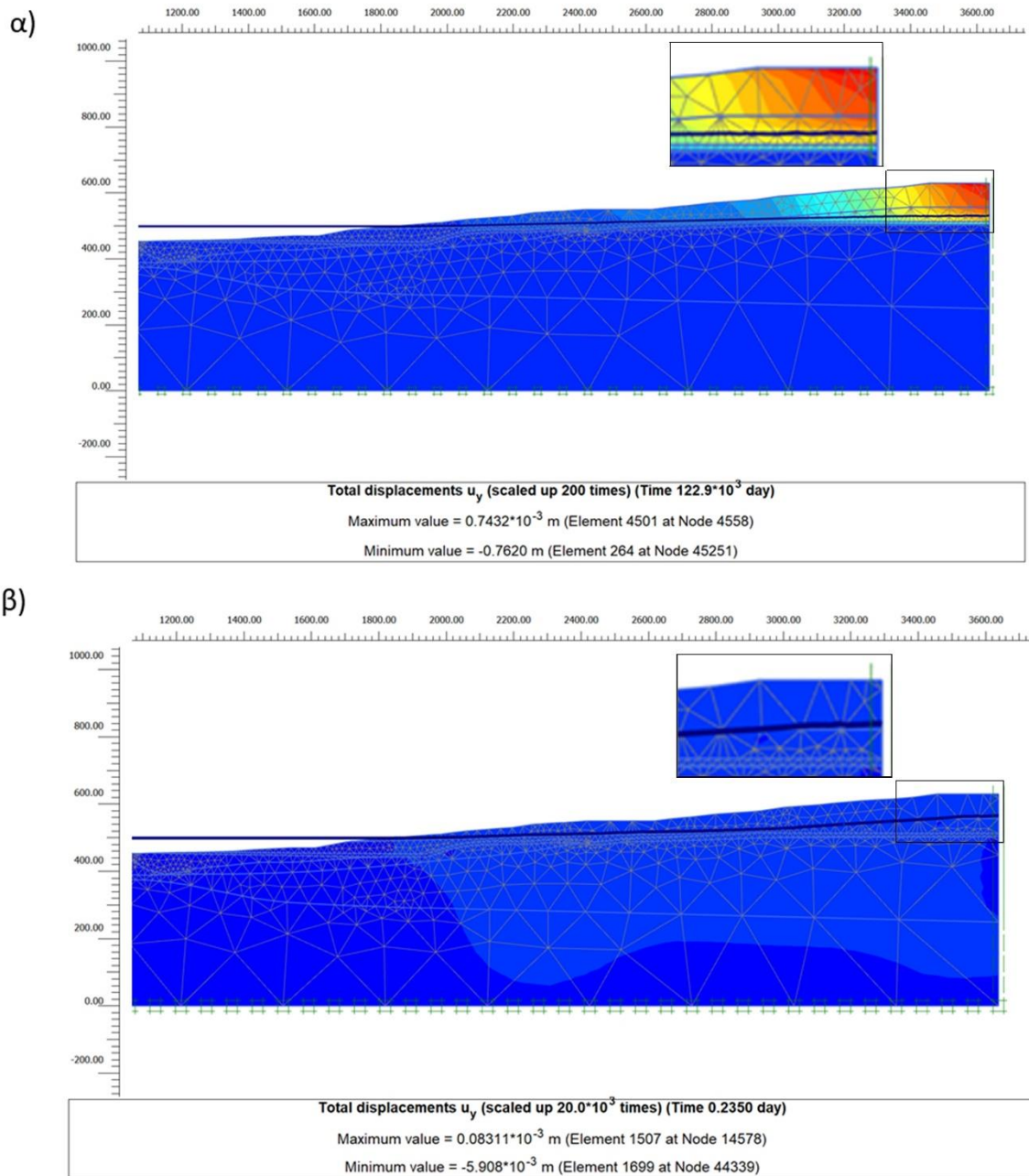
Σχήμα 5.16: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με την διακύμανση της στάθμης ± 60 cm με διαφορετικούς ρυθμούς και συγκεκριμένο αριθμό διακυμάνσεων (2, 32 και 128) (ανοικτές οριακές συνθήκες).

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με κλειστά πλευρικά όρια προκύπτει ότι με την διακύμανση της στάθμης ± 60 cm με διαφορετικούς ρυθμούς (από 0.03 έως 2040 cm/day) και αριθμό διακυμάνσεων (2, 32 και 128) ο συντελεστής ασφάλειας μειώνεται καθώς ο ρυθμός διακύμανσης πλησιάζει την περατότητα του σχηματισμού NS - TV1 (11.66 cm/day) (Σχήμα 5.17). Στην συνέχεια, ο συντελεστής ασφάλειας παραμένει σταθερός για ρυθμούς μεγαλύτερους από την περατότητα του σχηματισμού.



Σχήμα 5.17: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με την διακύμανση της στάθμης ± 60 cm με διαφορετικούς ρυθμούς και συγκεκριμένο αριθμό διακυμάνσεων (2, 32 και 128) (Κλειστές Οριακές συνθήκες).

Όταν ο ρυθμός διακύμανσης της στάθμης είναι μικρότερος από την περατότητα του σχηματισμού που επηρεάζεται (11.66 cm/day), ο συντελεστής ασφάλειας αυξάνει με την αύξηση του αριθμού διακυμάνσεων. Σε αντίθεση, με ρυθμό διακύμανσης μεγαλύτερο από την περατότητα του σχηματισμού ο συντελεστής ασφάλειας παραμένει σταθερός με την αύξηση του αριθμού διακυμάνσεων (βλέπε Σχήμα 5.17). Αυτό οφείλεται στην στερεοποίηση του εδαφικού υλικού της απόθεσης Srimice και φαίνεται από τις κατακόρυφες μετακινήσεις u_y οι οποίες αυξάνονται όταν ο ρυθμός διακύμανσης είναι πολύ μικρός (Σχήμα 5.18).



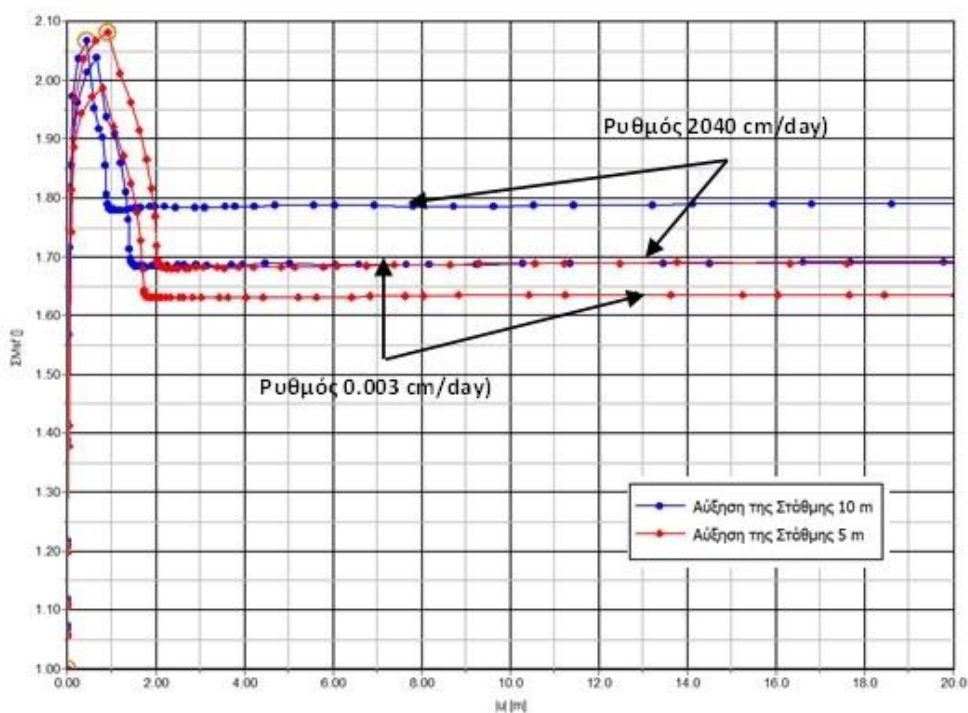
Σχήμα 5.18: Απεικόνιση κατακόρυφων μετακινήσεων u_y με την διακύμανση της στάθμης ± 60 cm. α) κατακόρυφες μετακινήσεις u_y σε ρυθμό πτώσης 0.003 cm/day, β) κατακόρυφες μετακινήσεις u_y σε ρυθμό πτώσης 2040 cm/day.

5.7.4. Ανύψωση της στάθμης κατά 5 και 10 m

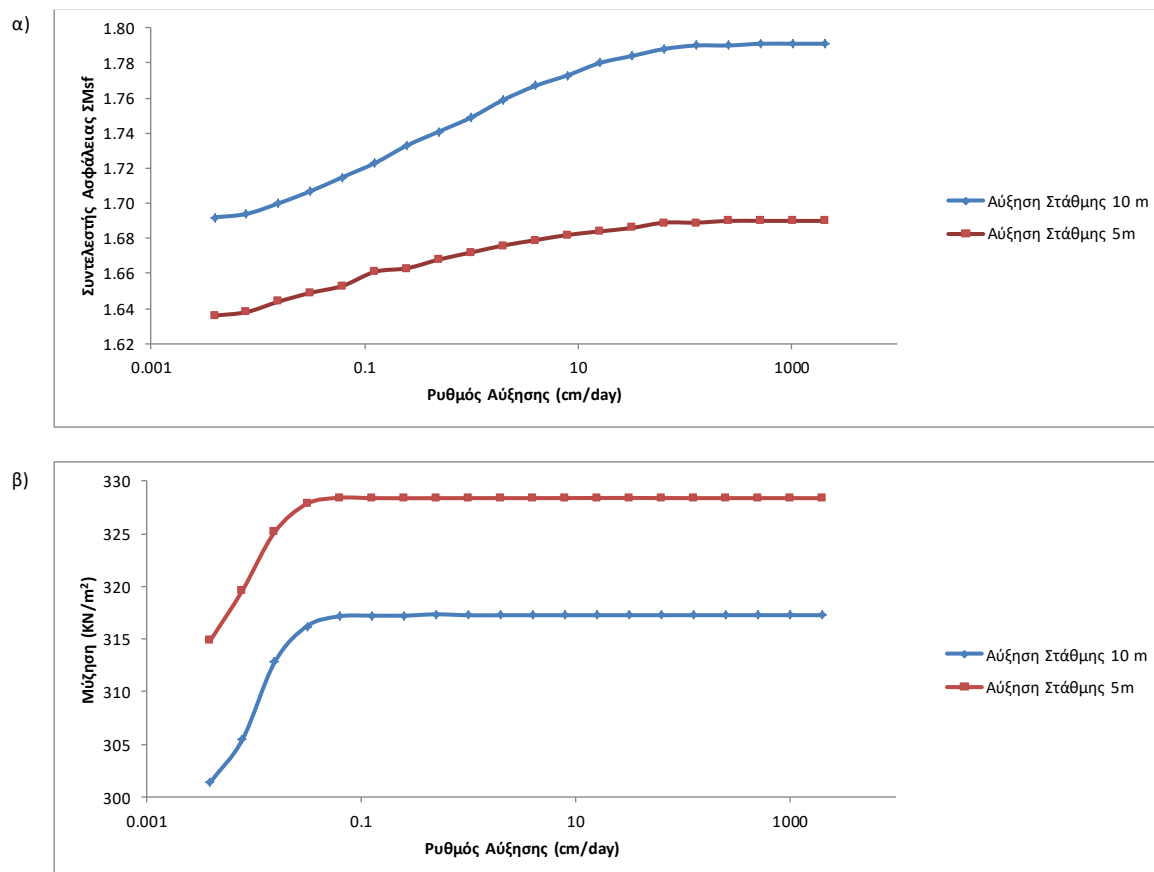
Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της αύξησης της στάθμης της λίμνης κατά 5 m και 10 m με διαφορετικούς ρυθμούς (από 0.03 cm/day έως 2048 cm/day) από το απόλυτο υψόμετρο +199 m μέχρι +204 και +209 m, αντίστοιχα.

Γενικά με την αύξηση της στάθμης του νερού υπάρχει εισροή νερού προς το πρανές με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ενεργές τάσεις και κατ' επέκταση η διατμητική αντοχή του πρανούς (Shaojun et al, 2018). Αυτό όμως εξαρτάται από την περατότητα των εδαφικών υλικών που σχηματίζουν την λίμνη. Η λίμνη Most αποτελείται χαμηλής έως μέσης περατότητας εδαφικούς σχηματισμούς με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μεγάλη εισροή νερού προς το πρανές.

Το Σχήμα 5.19 και 5.20 δείχνει την αύξηση του συντελεστή ασφάλειας με την αύξηση του ρυθμού αύξησης της στάθμης. Η μέγιστη τιμή του συντελεστή ασφάλειας παρουσιάζεται όταν ο ρυθμός αύξησης της στάθμης υπερβεί την περατότητα των σχηματισμών που επηρεάζονται (TV2) από την μεταβολή της στάθμης (0.1788 cm/day).



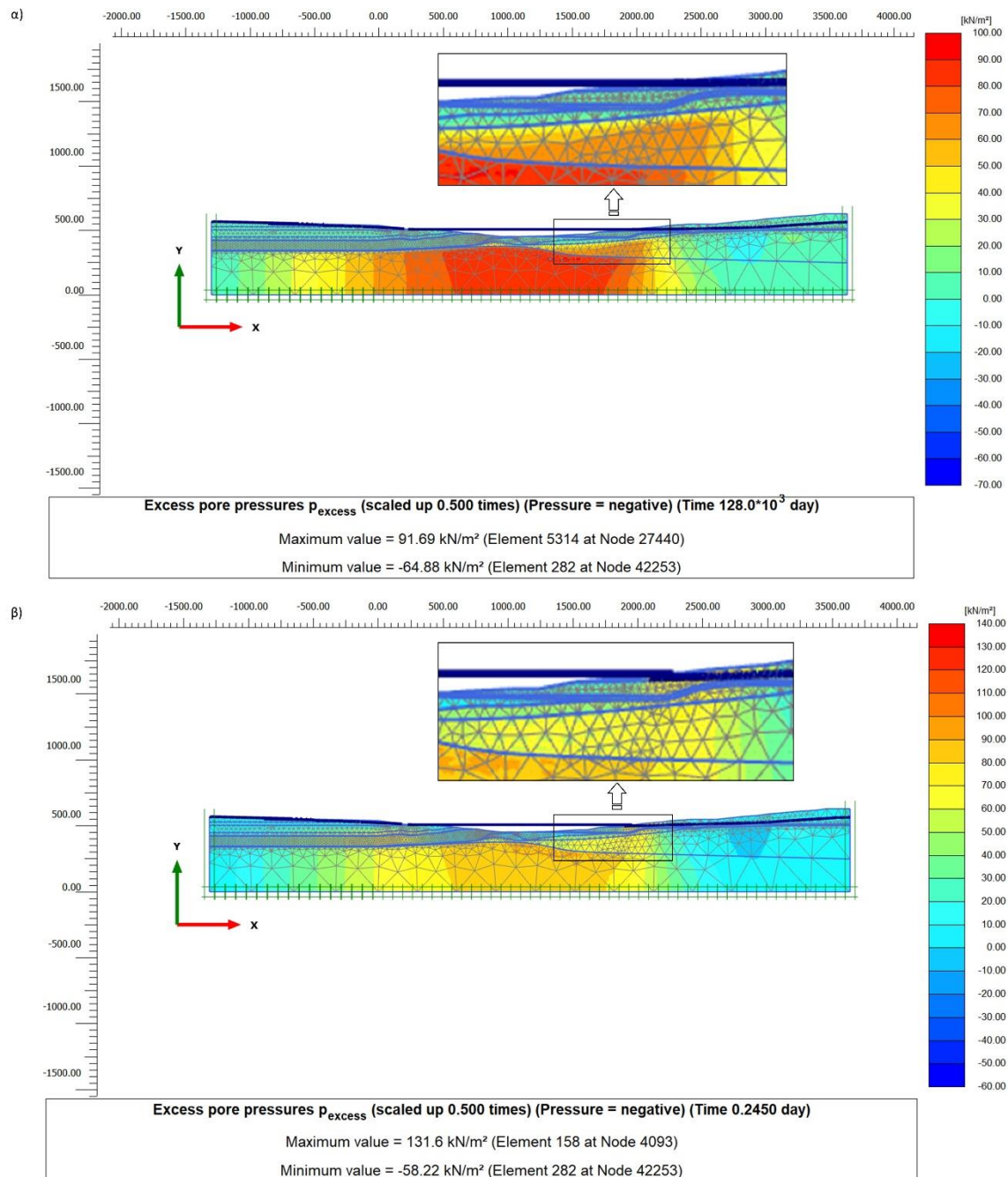
Σχήμα 5.19: Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας συναρτήσει των συνολικών μετακινήσεων U σε κόμβο κοντά στο πρανές.



Σχήμα 5.20: Συσχέτιση του ρυθμού αύξησης της στάθμης της λίμνης με τον συντελεστή ασφάλειας και την μύζηση. α) Μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας με την αύξηση του ρυθμού, β) Μεταβολή της μύζησης με την αύξηση του ρυθμού.

Όταν ο ρυθμός αυτός γίνει πολύ μεγάλος, ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς δεν αλλάζει. Αυτό οφείλεται στην χαμηλή – μέση περατότητα των σχηματισμών της λίμνης.

Όταν ο ρυθμός αύξησης της στάθμης είναι μικρότερος από την περατότητα του σχηματισμού (0.1788 cm/day), οι υπερπιέσεις του νερού των πόρων είναι μικρότερες σε σχέση με ένα γρήγορο ρυθμό αύξησης, καθώς η διαδικασία εισροής του νερού στο πρανές για την εξισορρόπηση της στάθμης της λίμνης με τα υπόγεια ύδατα απαιτεί πολύ λιγότερο χρόνο (Σχήμα 5.21).



Σχήμα 5.21: Απεικόνιση των υπερπίεσεων πόρων p_{excess} . α) υπερπίεσεις πόρων σε ρυθμό αύξησης 0.003 cm/day, β) υπερπίεσεις πόρων σε ρυθμό αύξησης 2040 cm/day.

Επομένως, η δύναμη διήθησης και το φορτίο του νερού που προκύπτει από την αύξηση του νερού της λίμνης κυριαρχεί σε σχέση με τη επίδραση της πίεσης του νερού των πόρων που επιδρά αρνητικά στην διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών (Paronuzzi et al., 2013).

Το διάγραμμα της μύζησης δείχνει ότι η μύζηση του πρανούς αυξάνεται για ρυθμούς αύξησης μικρότερους από την περατότητα των σχηματισμών που επηρεάζονται (βλέπε Σχήμα 5.20 β). Στην συνέχεια, καθώς ο ρυθμός αύξησης πλησιάζει την περατότητα των σχηματισμών, η μύζηση παραμένει σταθερή (δεν επηρεάζεται από την μεταβολή της στάθμης).

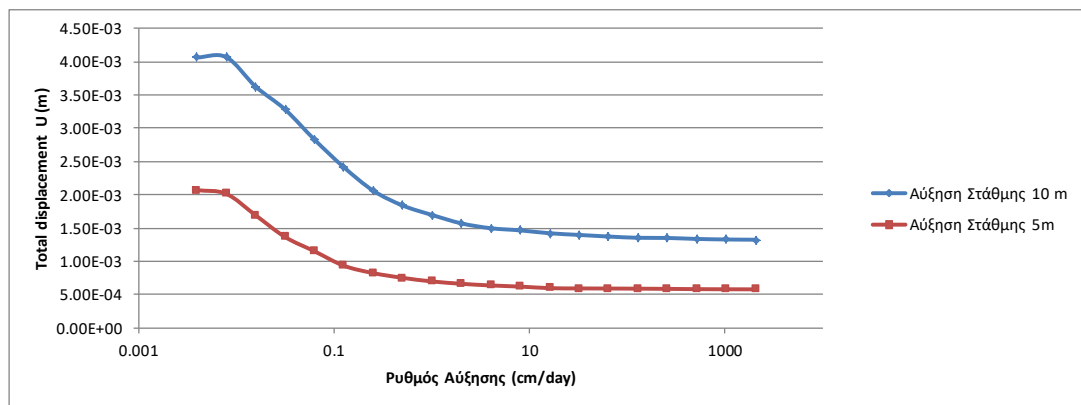
Αυτό αποδίδεται στην γεωμετρία του πρανούς και την χαμηλή - μέση περατότητα των σχηματισμών της λίμνης. Επομένως, η αύξηση του συντελεστή ασφάλειας επηρεάζεται από την μύζηση σε ρυθμούς μικρότερους από την περατότητα των σχηματισμών που επηρεάζονται.

Επιπλέον με την αύξηση του ρυθμού αύξησης της στάθμης παρατηρείται μείωση των συνολικών μετατοπίσεων (U) λαμβάνοντας μια σταθερή τιμή σε υψηλούς ρυθμούς αύξησης. Οι συνολικές μετατοπίσεις εμφανίζονται στις περιοχές των μόνιμων πρανών και της απόθεσης Strimice και οφείλονται στην διόγκωση των εδαφικών υλικών κατά την αύξηση των υπόγειων υδάτων (Σχήμα 5.22).

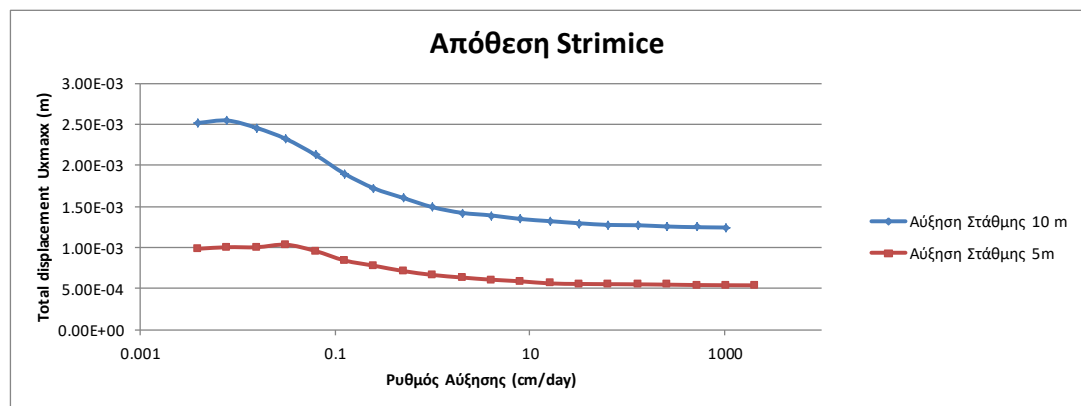
Οι οριζόντιες μετατοπίσεις μειώνονται με την αύξηση του ρυθμού αύξησης της στάθμης της λίμνης και του υπόγειου νερού. Η κατεύθυνση των διανυσμάτων των οριζόντιων μετατοπίσεων U_x είναι προς τα πρηνή της λίμνης.

Αυτό συμβάλει θετικά στην ευστάθεια των πρανών κατά την ανάλυση μεταβαλλόμενης ροής. Αυτό πιθανόν να μην συμβαίνει σε μια ανάλυση σταθερής κατάστασης ροής καθώς η πίεση του νερού των πόρων αυξάνει στο έδαφος.

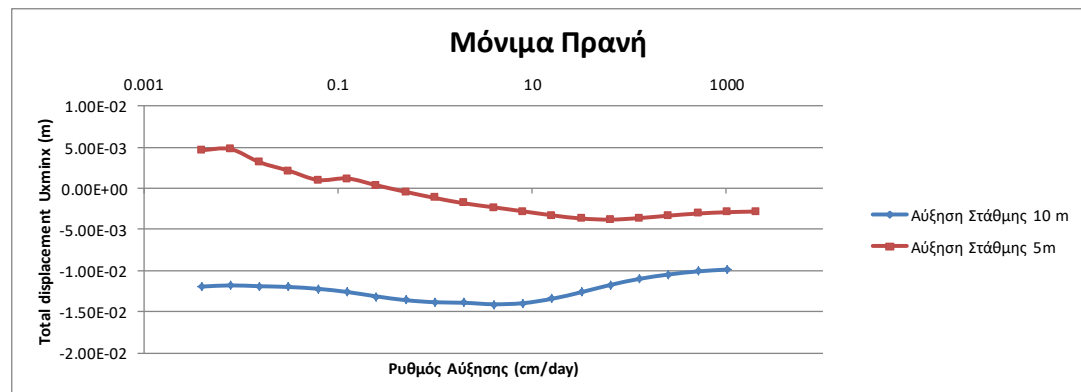
α)



β)



γ)

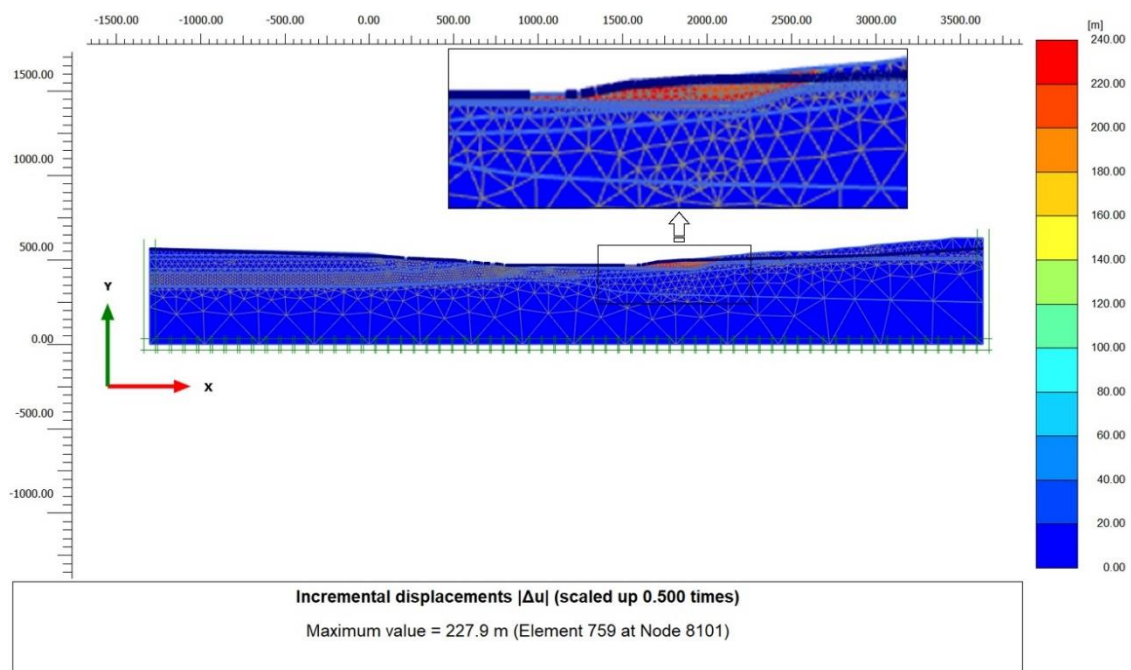


Σχήμα 5.22: Μετακινήσεις συναρτήσει του ρυθμού αύξησης της στάθμης της λίμνης στην θέση του κλισιμέτρου IMV 5/2. α) Μεταβολή των συνολικών μετατοπίσεων της απόθεσης Strimice σε σχέση με τον ρυθμό αύξησης, β) Μεταβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων στην απόθεση Strimice σε σχέση με τον ρυθμό αύξησης (η θετική τιμή σημαίνει κίνηση προς τα πρανή), γ) Μεταβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων στα μόνιμα πρανή σε σχέση με τον ρυθμό αύξησης (η αρνητική τιμή σημαίνει κίνηση προς τα πρανή).

5.7.5. Ταπείνωση της στάθμης κατά 30 m

Πραγματοποιήθηκε ταπείνωση της στάθμης 30 m με διαφορετικούς ρυθμούς με σκοπό τον προσδιορισμό της οριακής κατάστασης (το μέγεθος της οριακής πτώσης στάθμης και του οριακού ρυθμού πτώσης) στην οποία αστοχούν τα πρανή της λίμνης.

Από την προσομοίωση προέκυψε ότι το μέγεθος της οριακής πτώσης στάθμης είναι 30 μέτρα με ένα ρυθμό πτώσης 2.56 m/h. Η πιο επισφαλής ζώνη (κόκκινη περιοχή στην απόθεση) φαίνεται στο Σχήμα 5.23 δίνοντας ένα συντελεστή ασφάλειας $\Sigma M_{sf} = 1.09$.



Σχήμα 5.23: Απεικόνιση των αυξητικών παραμορφώσεων στην φάση ευστάθειας (οριακή κατάσταση αστοχίας).

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή μελέτης με σκοπό την διερεύνηση των γεωτεχνικών παραμέτρων, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Ο βαθμός κορεσμού και οι τάσεις που επιβάλλονται στο δοκίμιο όταν πραγματοποιούνται δοκιμές Bender elements επηρεάζουν τις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων και συνεπώς το μέτρο ελαστικότητας (E), το μέτρο διάτμησης (G) και τον λόγο Poisson.
- Από την σύγκριση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την τριαξονική δοκιμή και την δοκιμή Bender Elements με τις επί τόπου δοκιμές πιεζοκώνου CPTU, προκύπτει ότι οι δοκιμές CPTU μας δίνουν μια πολύ καλή εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων.

Από την προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Plaxis V16 για την ανάλυση της κινητικής συμπεριφοράς των πρανών της λίμνης Most, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Τα πρανά της λίμνης είναι σταθερά στο υφιστάμενο επίπεδο πλήρωσης της λίμνης (στάθμη πλήρωσης +199 m). Ο συντελεστής ασφάλειας εκτιμάται ίσος με 1.57.
- Καθοριστικό ρόλο στην ευστάθεια των πρανών της λίμνης διαδραματίζει τόσο η περατότητα των σχηματισμών της λίμνης όσο και ο ρυθμός μεταβολής της στάθμης. Η παρουσία χαμηλής – μέσης περατότητας σχηματισμών οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή ασφάλειας με την ανύψωση της στάθμης του νερού της λίμνης και μείωση του συντελεστή ασφάλειας με την πτώση της στάθμης. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο σε πολύ υψηλούς ρυθμούς μεταβολής της στάθμης.
- Όταν ο ρυθμός διακύμανσης της στάθμης είναι μικρότερος από την περατότητα του εδαφικού σχηματισμού, ο συντελεστής ασφάλειας αυξάνει και τείνει να σταθεροποιηθεί όταν ο ρυθμός διακύμανσης είναι μεγαλύτερος από την περατότητα του σχηματισμού.

- Κατά την διερεύνηση της συμπεριφοράς με την αύξηση του ρυθμού ταπείνωσης της στάθμης παρατηρείται μείωση του συντελεστή ασφάλειας. Αντίστοιχα με την ανύψωση του παρατηρείται αύξηση του συντελεστή ασφάλειας.
- Σε ρυθμούς μεταβολής της στάθμης μεγαλύτερους από την περατότητα του σχηματισμού δεν πραγματοποιείται σημαντική κινητικότητα στο πρανές και οι οριζόντιες μετατοπίσεις μειώνονται όταν ο ρυθμός (πτώσης ή αύξησης) είναι μεγαλύτερος από την περατότητα του σχηματισμού.
- Σε ρυθμούς μεταβολής της στάθμης μεγαλύτερους από την περατότητα του σχηματισμού που επηρεάζεται ή μύζηση παραμένει σταθερή. Αυτό έχει θετική επίδραση στην ευστάθεια των πρανών κατά την αύξηση της στάθμης της λίμνης και αρνητική επίδραση κατά την πτώση της στάθμης της λίμνης σε πολύ υψηλούς ρυθμούς.
- Κατά την πτώση και την αύξηση της στάθμης του νερού της λίμνης, η μεταβολή του συντελεστή ασφάλειας οφείλεται κυρίως στην στήριξη του πρανούς από το νερό της λίμνης, την υπερβολική πίεση του νερού των πόρων και την μύζηση (εύρος της ακόρεστης ζώνης).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Λαζαρόπουλος, Α.Κ. (2013). Προσδιορισμός του μέτρου διάτμησης εδαφικών σχηματισμών με χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

Στειακάκης, Ε. (2003). Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους. Έρευνα γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου. Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

Συλλινγάκης, Γ., Στειακάκης, Ε., Γαλετάκης, Μ. και Βαβαδάκης, Δ. (2022). Κατείσδυση και ροή σε μη κορεσμένα εδάφη. 12ο Διεθνές Υδρογεωλογικό Συνέδριο, Λευκωσία, Κύπρος, pp 403 – 406.

Διεθνής Βιβλιογραφία

Ameratunga, J., Sivakugan, N. and Das, B.M. (2016). Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering. Springer, New York. DOI: 10.1007/978-81-322-2629-1.

Biot, M.A. (1941). General theory of three dimensional consolidation. Journal of Applied Physics, 12, 155-164.

Bishop, A.W. & Blight, A.K.G. (1963). Some aspects of effective stress in saturated and partially saturated soils. Géotechnique, 13: 177-197.

Fredlund, M.D. (2016). Numerical Modeling of Unsaturated Soils Problems, Soils and Rocks, São Paulo, 39(1): 97-109

Galavi, V. (2010). Groundwater flow, fully coupled flow deformation and undrained analyses in PLAXIS 2D and 3D. Internal Report. Plaxis BV.

- GDS Instruments Ltd (2013). GDS BES Hardware and Software Manual - The GDS Bender Element System Handbook.
- Jefferies, M.G. and Davies, M.P. (1993). Use of CPTU to estimate equivalent SPT N60. *Geotech Test J ASTM* 16(4): 458-468.
- Johanson, J.M. and Edeskar, T. (2014). Effects of External Water-Level Fluctuations on Slope Stability, *EJGE*, Vol.19, 2437-2457.
- Josifoski, J. and Lenart, S. (2016). Some experience in numerical modelling of unsaturated slope instabilities. 3rd European Conference on Unsaturated Soils, Paris, France, pp 1-6. DOI: 10.1051/ 08005 .
- Jovicic, V., Coop, M.R. and Simic, M. (1996). Objective criteria for determining G_{max} from bender element tests. *Geotechnique*, 46(2): 357-62.
- Karg, C. (2005). Advanced cyclic triaxial and bender element test equipment. *Innovatie Forum Geotechniek*, KHBO – Department of Industrial Sciences, Antwerp, Belgium.
- Knappett, J. and Craig, R. F. (2019). *Craig's soil mechanics*. CRC Press; 9th edition London. / CPTprofiler_CSM9 – a spreadsheet tool for identifying soil types and layering from CPTU data using the I_c method.
- Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W. (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design. Report EL- 6800 submitted to Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 306 p.
- Lee, J.S. and Santamarina, J.C. (2005). Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131(9): 1063-70.
- Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M. (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic & Professional / Chapman-Hall Publishers, London, 312 p.
- Lopez -Acosta, N.P., Fuente de la H.A. and Auvinet G. (2013). Safety of a protection levee under rapid drawdown conditions. Coupled analysis of transient seepage and

- stability. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France, pp 3305 – 3308
- Mayne, P.W. (2007). Cone penetration testing State-of-Practice, NCHRP Synthesis. Transportation Research Board Report Project 20-05, 118 p.
- Mayne, P.W. and Rix, J.G. (1993). Gmax-qc relationships for clays. Geotech Test J ASTM 16(1): 54-60.
- Mayne, P.W. and Rix, G.J. (1995). Correlations between shear wave velocity and cone tip resistance in natural clays. Soils Found 35(2): 107-110.
- Mayne, P.W., Peuchen, J. and Bouwmeester, D. (2010). Soil unit weight estimation from CPTS. In: Proceedings 2nd international symposium on cone penetration testing CPT '10, vol 2, Huntington Beach, California, 169-176.
- Mayne, P.W. (2014). Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests. In: Robertson PK, Cabal KI (eds) Proceedings 3rd international symposium on cone penetrometer testing, CPT'14, Las Vegas, 47-73.
- PLAXIS, "PLAXIS 2D 2020," PLAXIS Material Manual CONNECT Edition V20 (2020). [Online]. Available: <https://communities.bentley.com/products/GeotechnicalAnalysis/w/plaxis-soilvision-wiki/50826/manuals-archive-plaxis>.
- PLAXIS, "PLAXIS 2D 2020," PLAXIS Reference Manual CONNECT Edition V20 (2020). [Online]. Available: <https://communities.bentley.com/products/GeotechnicalAnalysis/w/plaxis-soilvision-wiki/50826/manuals-archive-plaxis>.
- Pichler, P.P. and Schweiger, H.F. (2016). Numerical analysis of the stability of inhomogeneous slopes considering partially saturated conditions. 3rd European Conference on Unsaturated Soils, Paris, France, pp 1-6. DOI: 10.1051/e-2016-E3S Web of Conferences e3sconf/20160915010.
- Pichler, P.P. and Schweiger, H.F. (2020). Numerical analysis of the stability of inhomogeneous slopes considering partially saturated conditions. 3rd European

Conference on Unsaturated Soils, Paris, France, pp 1-6. DOI: 10.1051/e- 2016 E3S Web of Conferences e3sconf/20160915010.

RAFF (2022). Risk Assessment of Final Pits During Flooding. Research project co-financed by the Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under the Grant Agreement No-847299-RAFF. Deliverable 1.1.1 (Analysis of archival data and previous design reservoirs). Authors: Burda, J., Zizka, L., Svoboda, P., Bajcar, A., Piróg, K., Rogosz, B., Resak, M., Dębicka, K., Firlit, G., Szczepiński, J., Maliszewski, M., Bukowski, P., Bukowska, M., Niedbalska, K., Augustyniak, I., Kura, K., Wadas, M., Gawryś, J., Lazar, M., Predoiu, I., Faur, F. and Apostu, I.

Robertson, P.K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Can Geotech J* 27 (1): 151-158.

Robertson, P.K. (2009). Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. *Can Geotech J* 46: 1337-1355.

Robertson, P.K. and Cabal, K.L. (2010). Estimating soil unit weight from CPT. In: 2nd international symposium on cone penetration testing, CPT'10, Huntington Beach, California.

Robertson, P.K. and Cabal, K.L. (2010). Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering. 4th ed. Gregg Drilling & Testing, Inc., Signal Hill, California.

Robertson, P.K. and Cabal, K.L. (2014). Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering. 6th ed. Gregg Drilling & Testing, Inc., Signal Hill, California.

Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D. and Greig, J. (1986) Use of Piezometer Cone Data. Proceedings of American Society of Civil Engineers, ASCE, In-Situ 86 Specialty Conference, Blacksburg, 23-25 June 1986, 1263-1280.

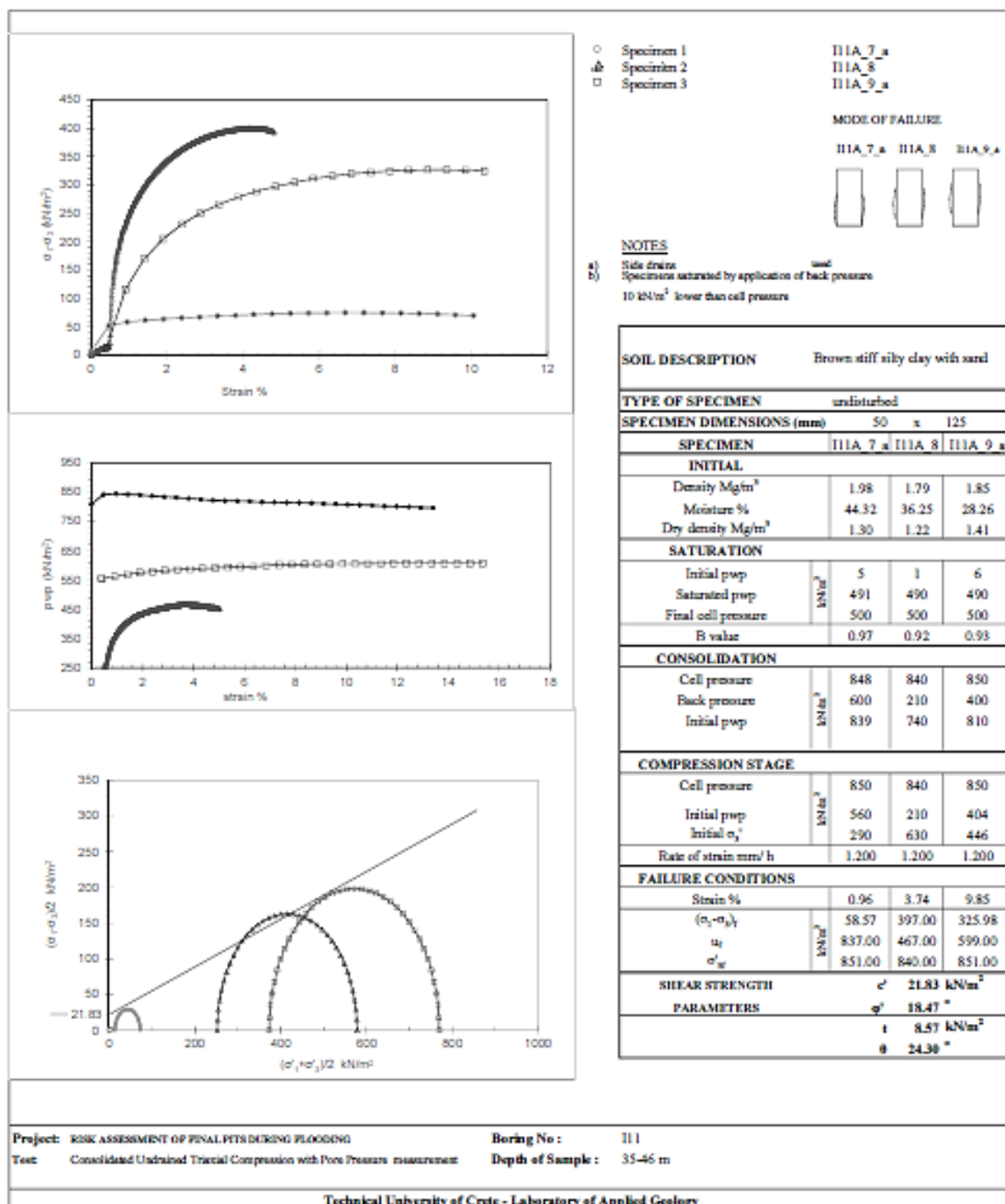
Schnaid, F. (2009). In situ testing in geomechanics. Taylor and Francis, London, 329 p.

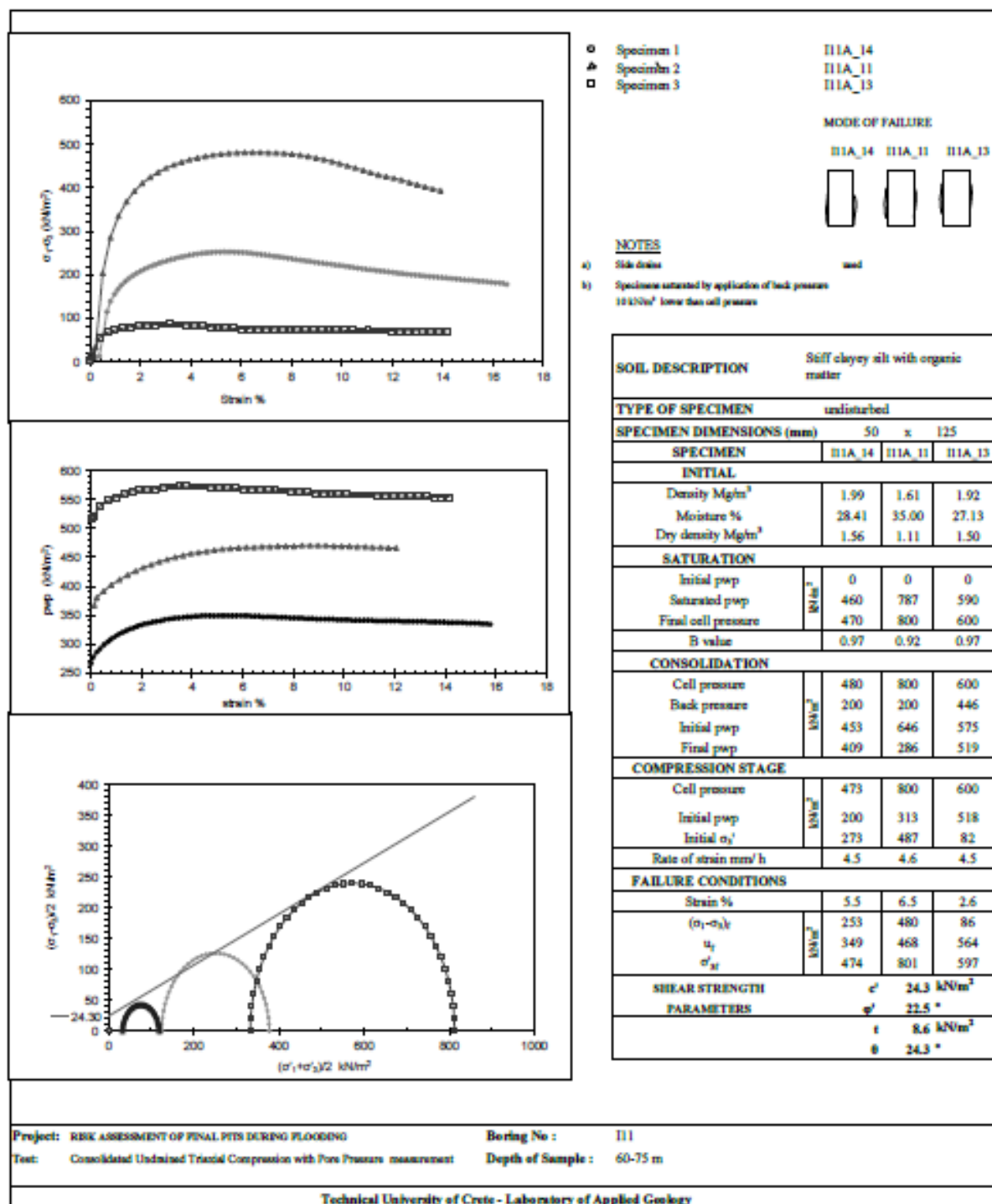
Sheng, D., Sloan, S.W., Gens, A., and Smith, D.W. (2003). Finite element formulation and algorithms for unsaturated soils. Part II: Verification and application. *Int. J. for Numerical and Analytical Meth. in Geomech.*, 27: 767-790.

- Song, E.X. (1990). Elasto-plastic consolidation under steady state and cyclic loads. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- Spiegel, M. (1978). Ανάλυση Fourier. McGraw-Hill, New York. Μετάφραση: Σ. Περσίδης, ΕΣΠΙ Εκδοτική, Αθήνα.
- Steiakakis, E., Lazaropoulos, A., Vafidis, A., Agioutantis, Z. and Kritikakis, G. (2017). Determination of shear wave velocities in sediment deposits, International journal of geotechnical engineering. <https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1374494>.
- Steiakakis, E., Syllignakis, G., Galetakis, M. and Vavadakis, D. (2021). Water level variation and Slope stability analysis in pit lake. 3rd European Regional Conference of IAEG, Athens, Greece, vol 1.
- Teh, C.I. and Houlsby, G.T. (1991). An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay. Geotechnique, Vol. 41, No. 1, 17-34.
- Viggiani, G. and Atkinson, J.H. (1995). Interpretation of bender element tests. Geotechnique, 45(1): 149-54.
- Xia, M. (2014). Relationship between landslide stability and reservoir water level variation. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Springer, 1-9. DOI: 10.1007/s10064-014-0654-0.
- Yamashita, S., Fujiwara, T., Kawaguchi, T., Mikami, T., Nakata, Y. and Shibuya, S., (2003). International Parallel Test on the Measurement of Gmax Using Bender Elements. Organized by TC-29 Japanese Domestic Committee for TC-29.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ


Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών





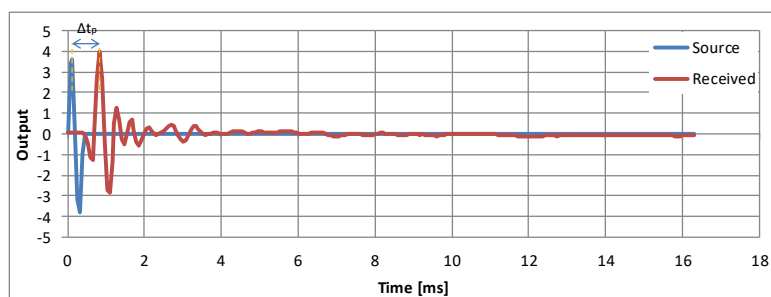
Αποτελέσματα δοκιμών Bender Elements

Δείγμα I11A-7, βάθος 35,0 – 35,4 m, μέτρηση στην φυσική του υγρασία.

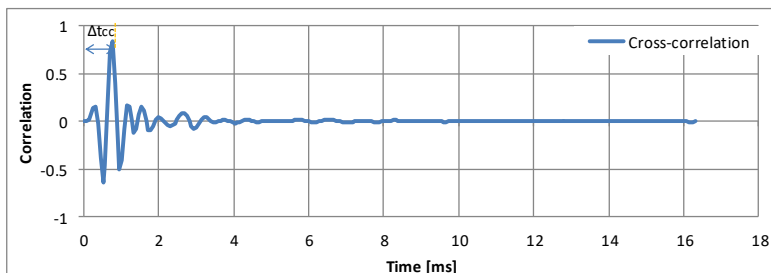
	Technical University of Crete		
	Mineral Resources Engineering Department		
	Laboratory of Applied Geology		
	73100 Chania, Crete, GREECE		
BENDER ELEMENTS TEST			

Project:	RISK ASSESSMENT OF FINAL PITS DURING FLOODING		
Sample No :	I11A-7	Description of soil :	Dark brown silty clay soil
Boring No :	I11A	Date of testing :	05-12-20
Depth of Sample :	35.0-35.4	Tested by :	Syllignakis G
Remarks :	Test at initial moisture content		

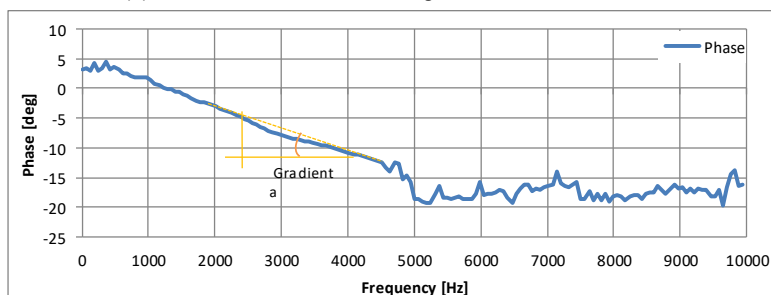
Method	Wave travel time		Shear wave velocity V_s (m/s)	Compression al wave velocity V_p (m/s)	Poisson's ratio ν	Modulus of elasticity E (MPa)	Shear modulus G_{max} (MPa)
	Notation	Estimates (ms)					
First arrival	Δt_s	0.700	173	617	0.458	173	60
Peak to peak	Δt_p	0.731	165		0.461	159	55
Cross - correlation	Δt_{cc}	0.746	162		0.463	153	52
Frequency domain	Δt_{cs}	0.718	168		0.460	165	56



(a) Travel time identification using First arrival and Peak to peak methods




(b) Wave travel time estimation using the cross - correlation method

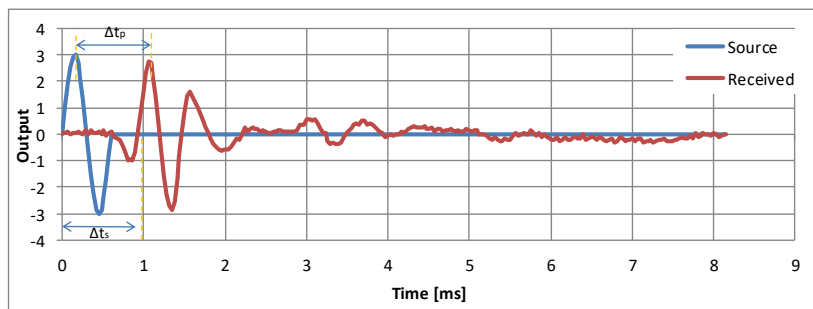


(c) Travel time estimation using frequency domain analysis

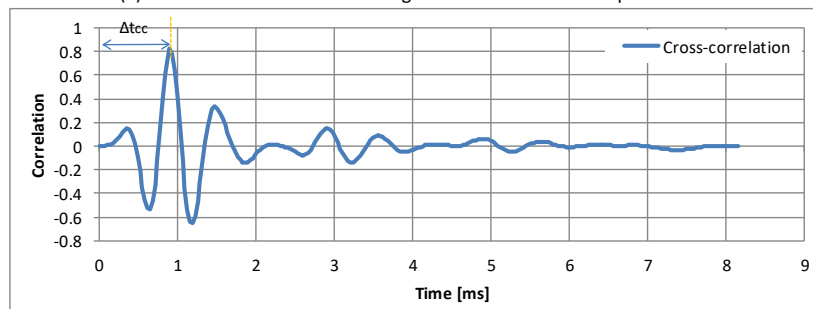
Δείγμα I11A-7, βάθος 35,0 – 35,4 m, μέτρηση μετά τον κορεσμό και την επιβολή των τάσεων πεδίου.

	Technical University of Crete		
	Mineral Resources Engineering Department		
	Laboratory of Applied Geology		
	73100 Chania, Crete, GREECE		
BENDER ELEMENTS TEST			
Project:	RISK ASSESSMENT OF FINAL PITS DURING FLOODING		
Sample No :	I11A-7	Description of soil :	Dark brown silty clay soil
Boring No :	I11A	Date of testing :	22-12-20
Depth of Sample :	35,0-35,4	Tested by :	Syllignakis G
Remarks :	Test after saturation and consolidation		

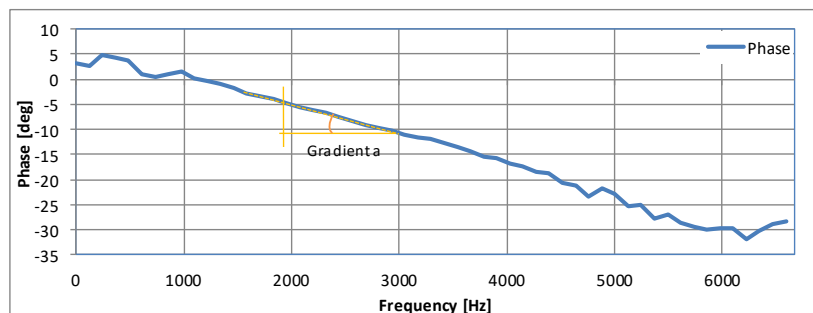
Method	Wave travel time		Shear wave velocity V_s (m/s)	Compressional wave velocity V_p (m/s)	Poisson's ratio ν	Modulus of elasticity E (MPa)	Shear modulus G_{max} (MPa)
	Notation	Estimates (ms)					
First arrival	Δt_s	0.927	131	1547	0.496	92	31
Peak to peak	Δt_p	0.918	132		0.496	94	31
Cross - correlation	Δt_{cc}	0.899	135		0.496	98	33
Frequency domain	Δt_{cs}	0.927	131		0.496	92	31



(a) Travel time identification using First arrival and Peak to peak methods

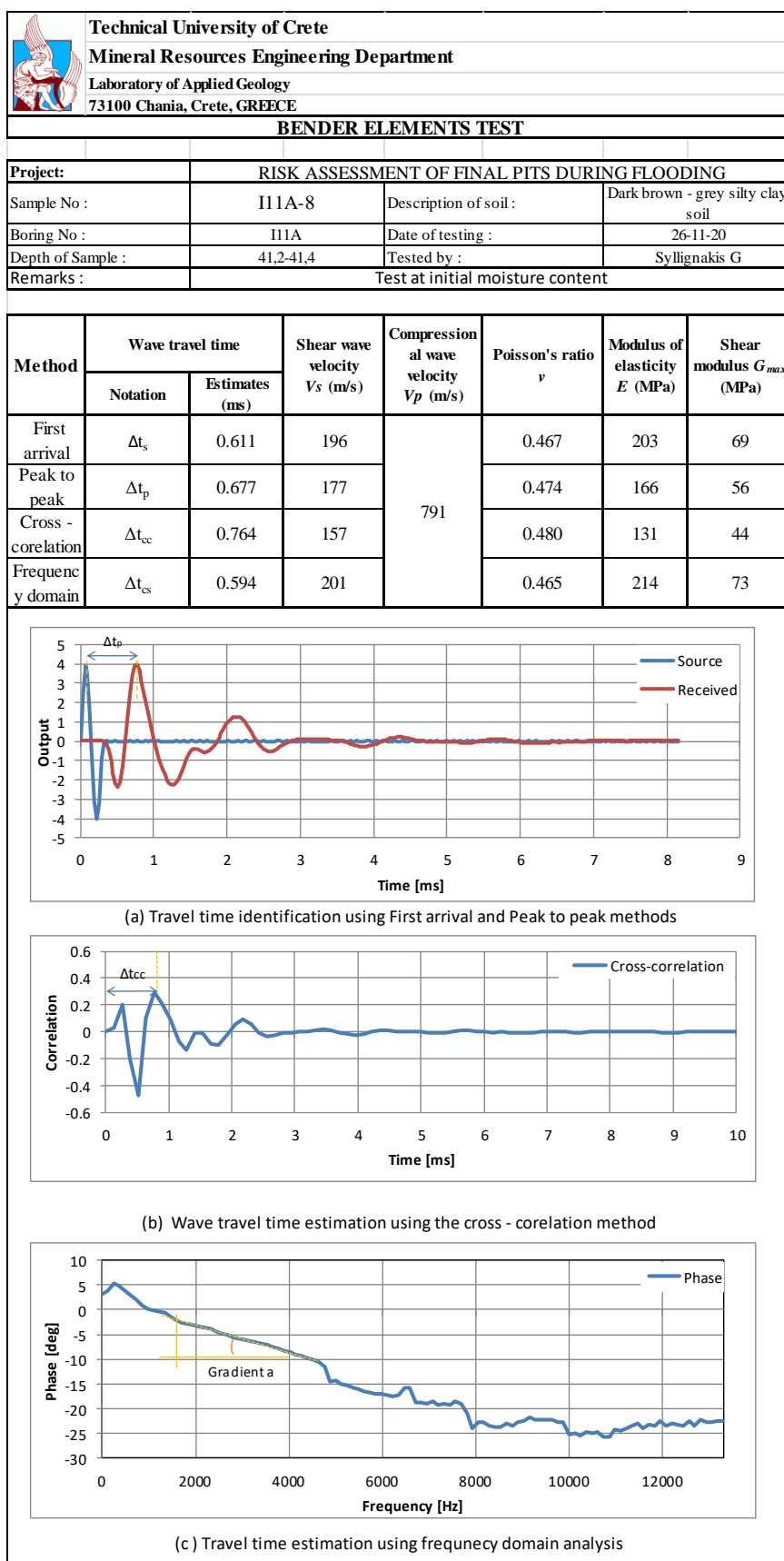


(b) Wave travel time estimation using the cross - correlation method

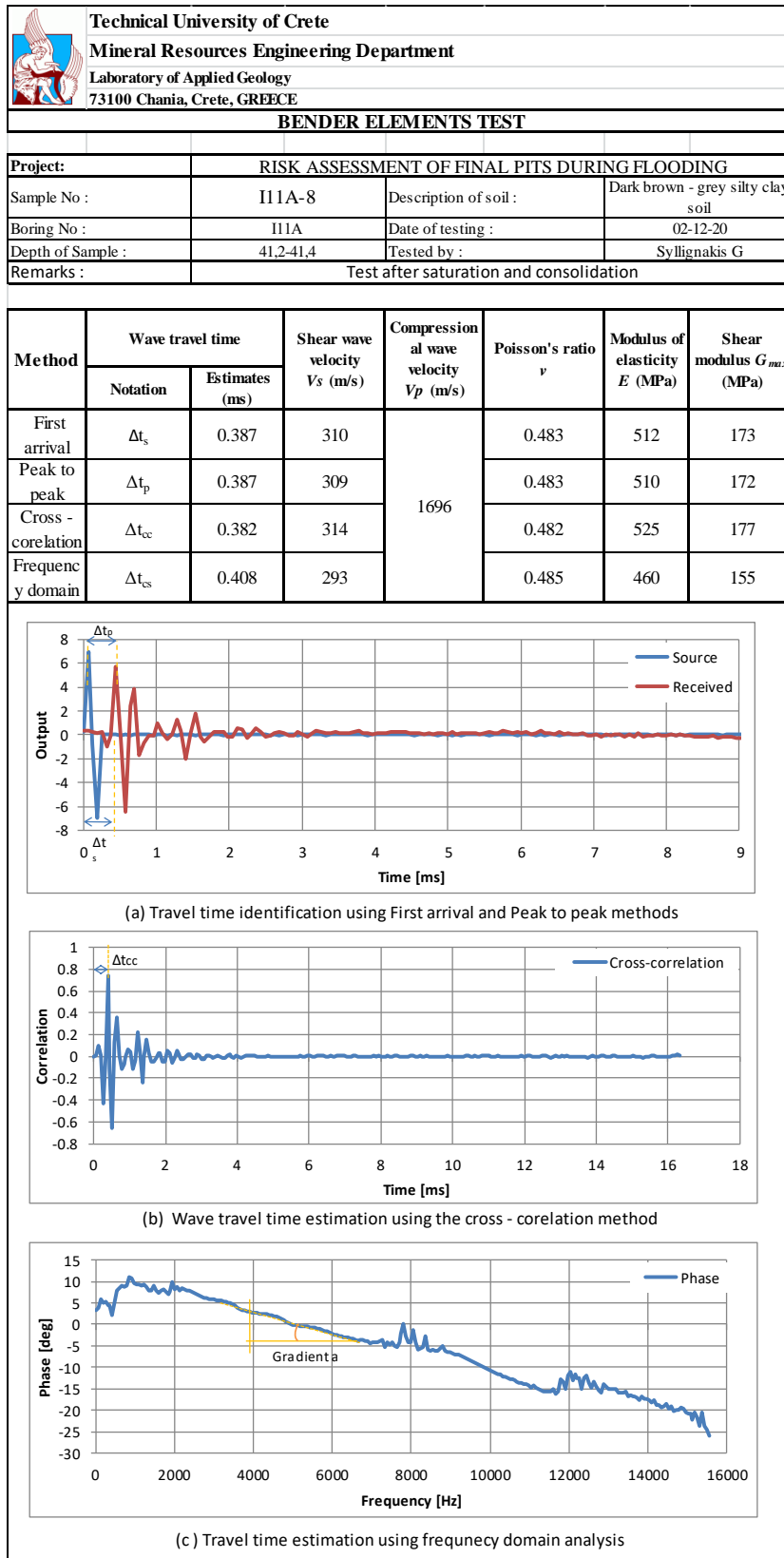


(c) Travel time estimation using frequency domain analysis

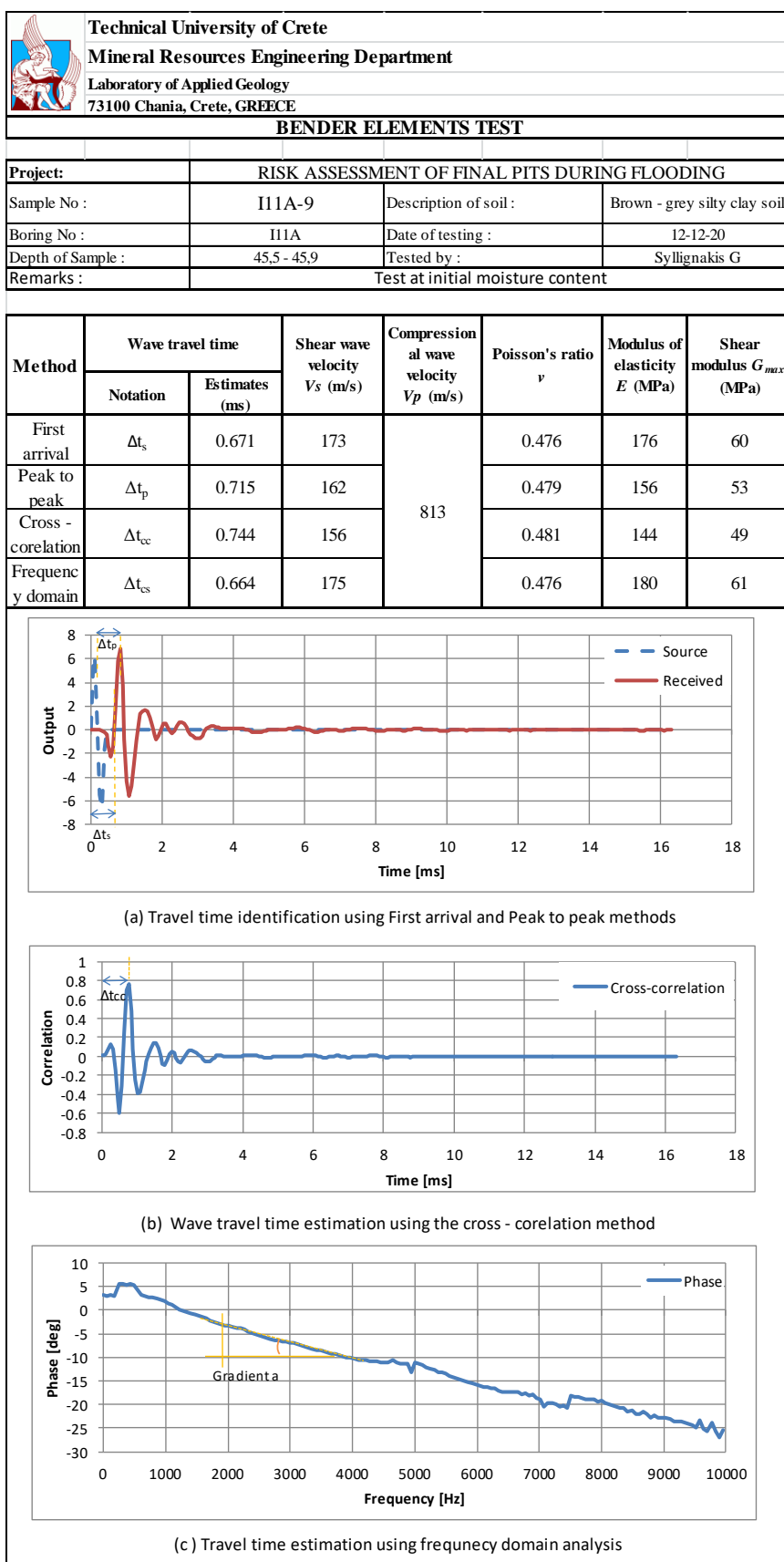
Δείγμα I11A-8, βάθος 41,2 – 41,4 m, μέτρηση στην φυσική του υγρασία.



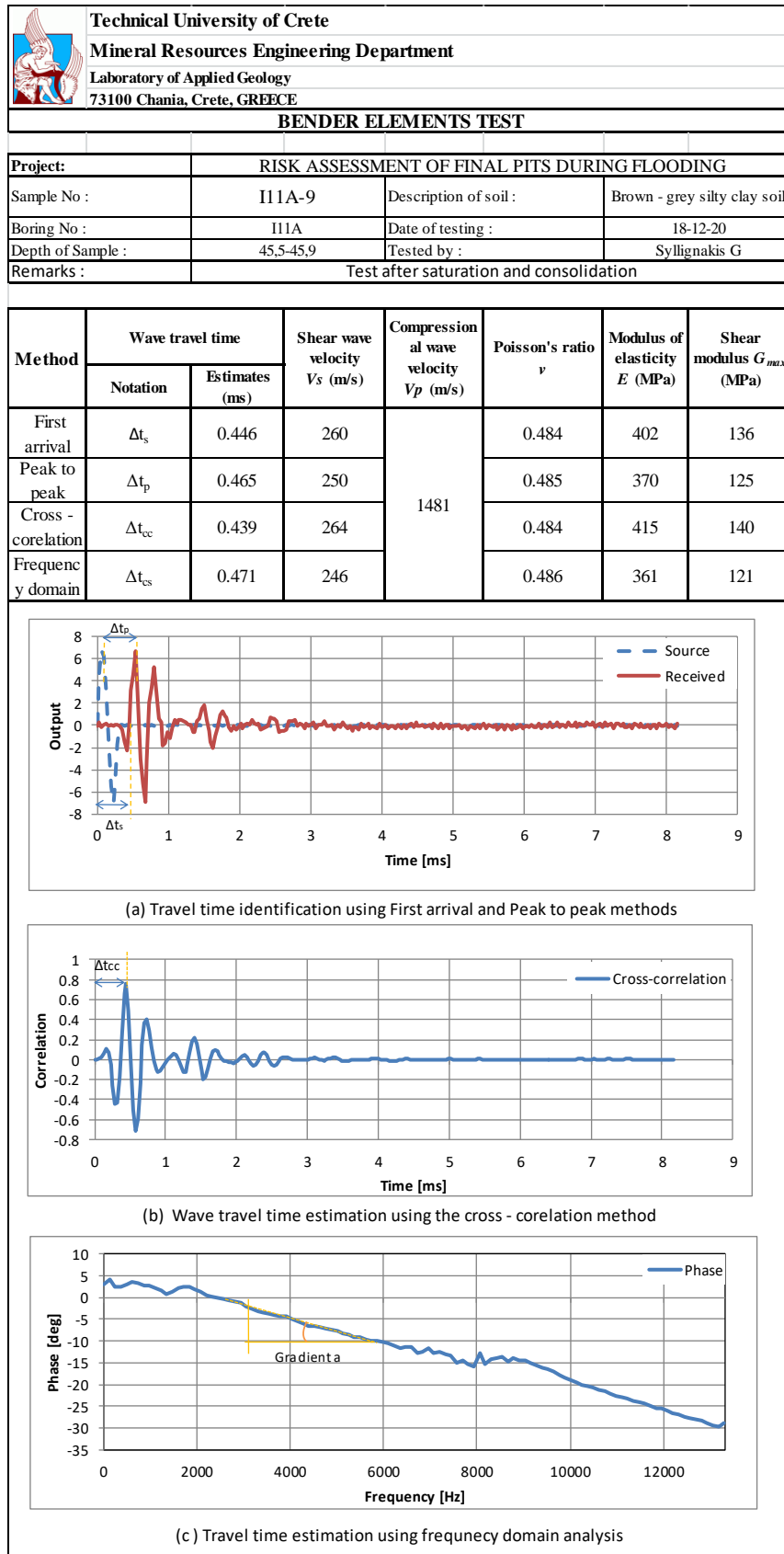
Δείγμα I11A-8, βάθος 41,2 – 41,4 m, μέτρηση μετά τον κορεσμό και την επιβολή των τάσεων πεδίου.




Δείγμα I11A-9, βάθος 45,5 – 45,9 m, μέτρηση στην φυσική του υγρασία.



Δείγμα I11A-9, βάθος 45,5 – 45,9 m, μέτρηση μετά τον κορεσμό και την επιβολή των τάσεων πεδίου.

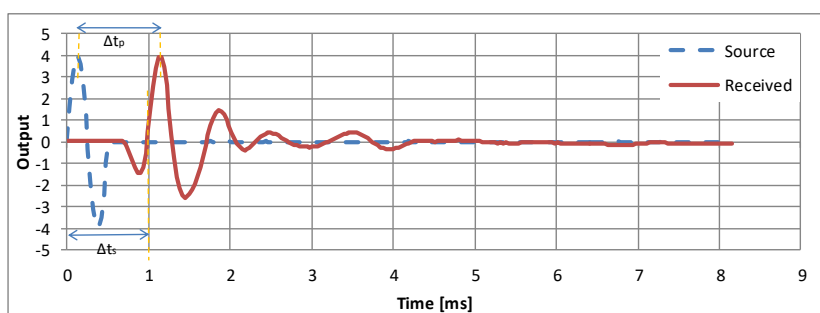


Δείγμα I11A-10, βάθος 51,6 – 52 m, μέτρηση στην φυσική του υγρασία.

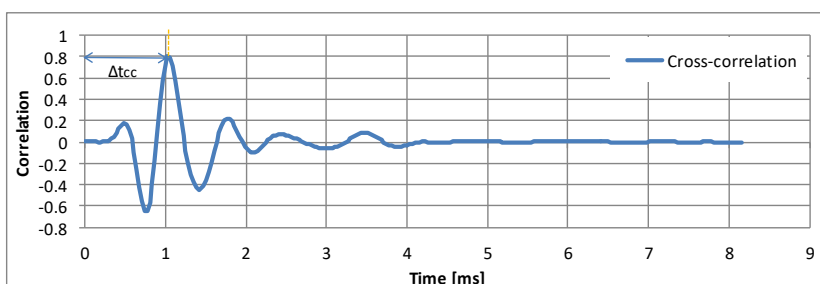
	Technical University of Crete		
	Mineral Resources Engineering Department		
	Laboratory of Applied Geology		
	73100 Chania, Crete, GREECE		
BENDER ELEMENTS TEST			

Project:	RISK ASSESSMENT OF FINAL PITS DURING FLOODING		
Sample No :	I11A-10	Description of soil :	Brown silty clay soil
Boring No :	I11A	Date of testing :	28-01-21
Depth of Sample :	51,6 - 52,0	Tested by :	Syllignakis G
Remarks :	Test at initial moisture content		

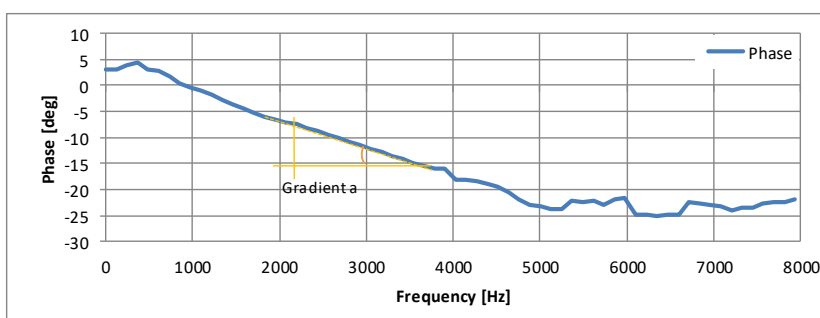
Method	Wave travel time		Shear wave velocity V_s (m/s)	Compression al wave velocity V_p (m/s)	Poisson's ratio ν	Modulus of elasticity E (MPa)	Shear modulus G_{DLX} (MPa)
	Notation	Estimates (ms)					
First arrival	Δt_s	0.979	122	337	0.425	80	28
Peak to peak	Δt_p	1.013	118		0.431	75	26
Cross - correlation	Δt_{cc}	1.035	115		0.434	72	25
Frequenc y domain	Δt_{cs}	0.997	119		0.428	77	27



(a) Travel time identification using First arrival and Peak to peak methods




(b) Wave travel time estimation using the cross - correlation method



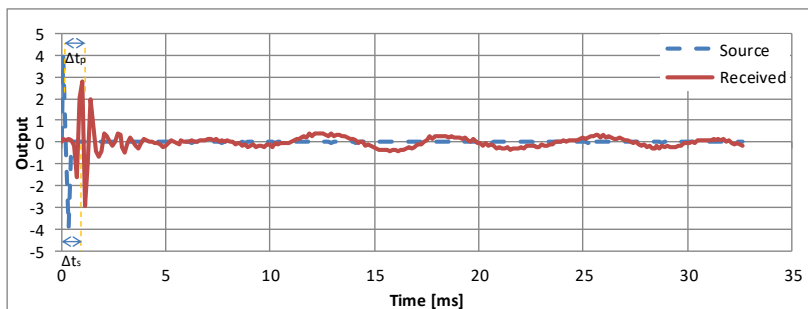
(c) Travel time estimation using frequency domain analysis

Δείγμα I11A-10, βάθος 51,6 – 52,0 m, μέτρηση μετά τον κορεσμό και την επιβολή των τάσεων πεδίου.

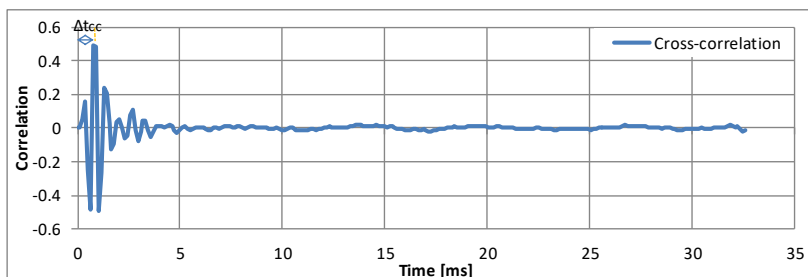
	Technical University of Crete		
	Mineral Resources Engineering Department		
	Laboratory of Applied Geology		
	73100 Chania, Crete, GREECE		
BENDER ELEMENTS TEST			

Project:	RISK ASSESSMENT OF FINAL PITS DURING FLOODING		
Sample No :	I11A-10	Description of soil :	Brown silty clay soil
Boring No :	I11A	Date of testing :	03-02-21
Depth of Sample :	51,6 - 52,0	Tested by :	Syllignakis G
Remarks :	Test after saturation and consolidation		

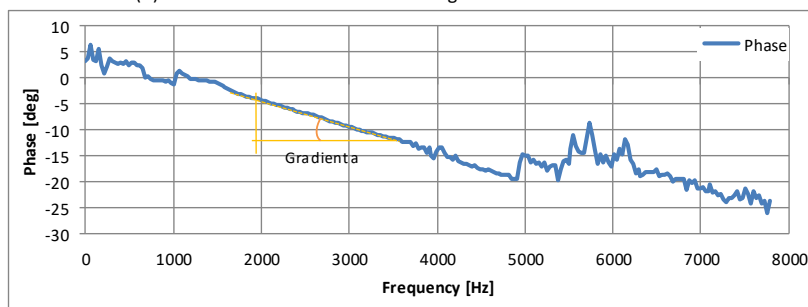
Method	Wave travel time		Shear wave velocity V_s (m/s)	Compressional wave velocity V_p (m/s)	Poisson's ratio ν	Modulus of elasticity E (MPa)	Shear modulus G_{max} (MPa)
	Notation	Estimates (ms)					
First arrival	Δt_s	0.850	140	1428	0.495	112	37
Peak to peak	Δt_p	0.849	140		0.495	112	37
Cross - correlation	Δt_{cc}	0.831	143		0.495	117	39
Frequency domain	Δt_{cs}	0.845	141		0.495	113	38



(a) Travel time identification using First arrival and Peak to peak methods




(b) Wave travel time estimation using the cross - correlation method



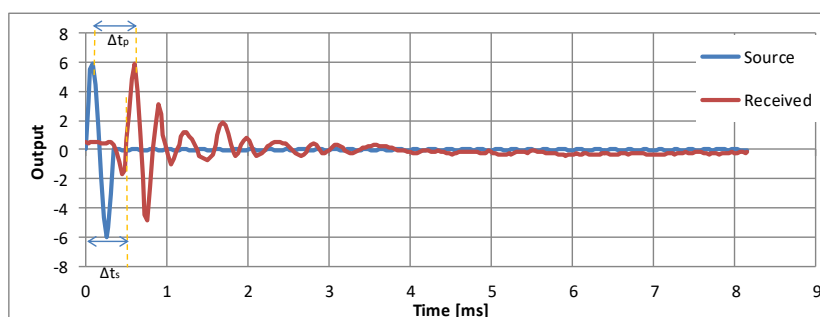
(c) Travel time estimation using frequency domain analysis

Δείγμα I11A-11, βάθος 56,6 – 56,9 m, μέτρηση στην φυσική του υγρασία.

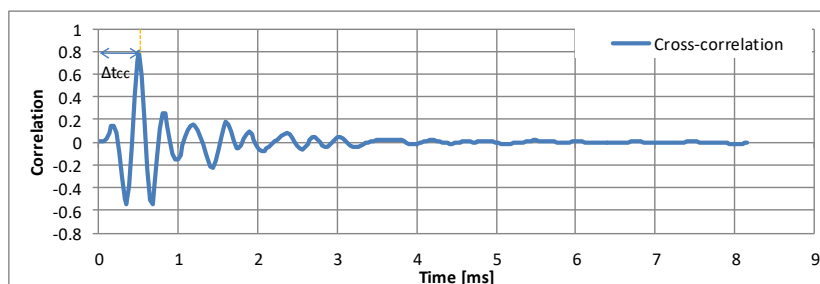
	Technical University of Crete		
	Mineral Resources Engineering Department		
	Laboratory of Applied Geology		
	73100 Chania, Crete, GREECE		
BENDER ELEMENTS TEST			

Project:	RISK ASSESSMENT OF FINAL PITS DURING FLOODING		
Sample No :	I11A-11	Description of soil :	Black silty clay soil
Boring No :	I11A	Date of testing :	27-02-21
Depth of Sample :	56.6 - 56.9	Tested by :	Syllignakis G
Remarks :	Test at initial moisture content		

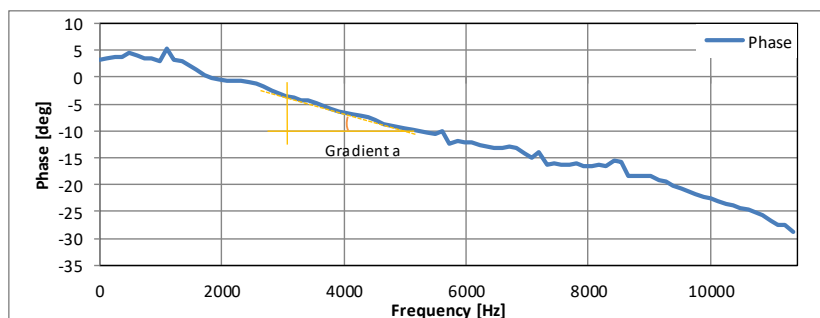
Method	Wave travel time		Shear wave velocity V_s (m/s)	Compression al wave velocity V_p (m/s)	Poisson's ratio ν	Modulus of elasticity E (MPa)	Shear modulus G_{max} (MPa)
	Notation	Estimates (ms)					
First arrival	Δt_s	0.666	180	610	0.452	151	52
Peak to peak	Δt_p	0.696	173		0.456	139	48
Cross - correlation	Δt_{cc}	0.709	169		0.458	134	46
Frequenc y domain	Δt_{cs}	0.659	182		0.451	154	53



(a) Travel time identification using First arrival and Peak to peak methods




(b) Wave travel time estimation using the cross - correlation method

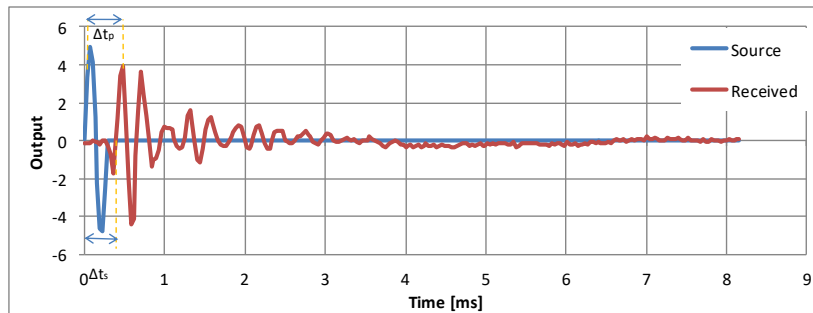


(c) Travel time estimation using frequency domain analysis

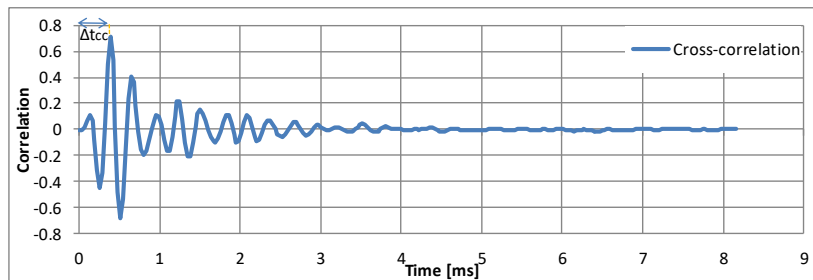
Δείγμα I11A-11, βάθος 56,6 – 56,9 m, μέτρηση μετά τον κορεσμό και την επιβολή των τάσεων πεδίου.

 Technical University of Crete Mineral Resources Engineering Department Laboratory of Applied Geology 73100 Chania, Crete, GREECE			
BENDER ELEMENTS TEST			
Project:		RISK ASSESSMENT OF FINAL PITS DURING FLOODING	
Sample No :	I11A-11	Description of soil :	Black silty clay soil
Boring No :	I11A	Date of testing :	04-03-21
Depth of Sample :	56.6 - 56.9	Tested by :	Syllignakis G
Remarks :	Test after saturation and consolidation		

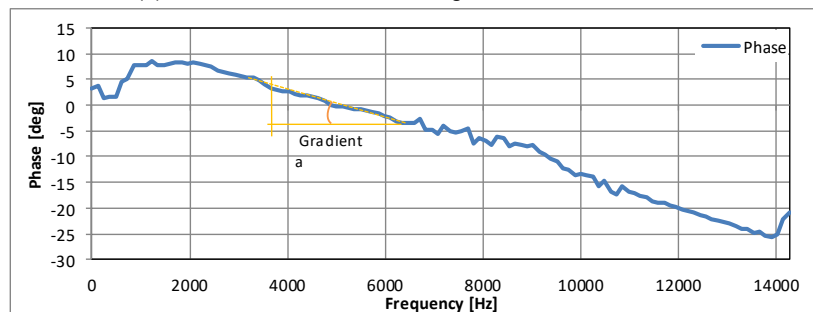
Method	Wave travel time		Shear wave velocity V_s (m/s)	Compressional wave velocity V_p (m/s)	Poisson's ratio ν	Modulus of elasticity E (MPa)	Shear modulus G_{max} (MPa)
	Notation	Estimates (ms)					
First arrival	Δt_s	0.392	306	1663	0.482	446	150
Peak to peak	Δt_p	0.397	303		0.483	435	147
Cross - correlation	Δt_{cc}	0.384	313		0.482	464	157
Frequency domain	Δt_{cs}	0.405	296		0.484	417	141



(a) Travel time identification using First arrival and Peak to peak methods




(b) Wave travel time estimation using the cross - correlation method



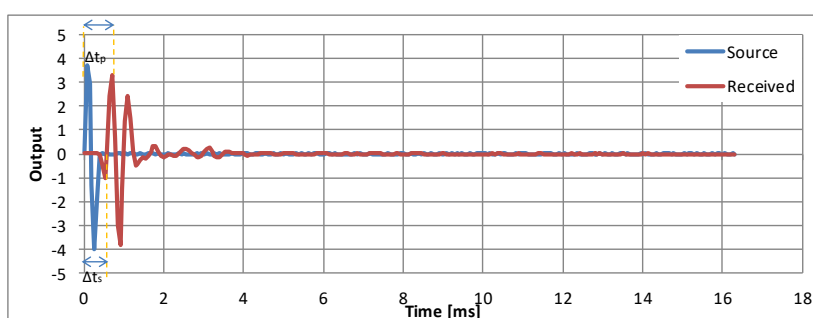
(c) Travel time estimation using frequency domain analysis

Δείγμα I11A-12, βάθος 61,7 – 62 m, μέτρηση στην φυσική του υγρασία.

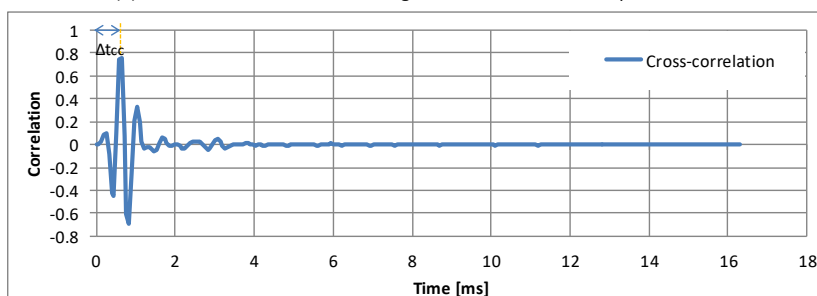
	Technical University of Crete		
	Mineral Resources Engineering Department		
	Laboratory of Applied Geology		
	73100 Chania, Crete, GREECE		
BENDER ELEMENTS TEST			

Project:	RISK ASSESSMENT OF FINAL PITS DURING FLOODING		
Sample No :	I11A-12	Description of soil :	Black silty clay soil
Boring No :	I11A	Date of testing :	18-03-21
Depth of Sample :	61.7 - 62	Tested by :	Syllignakis G
Remarks :	Test at initial moisture content		

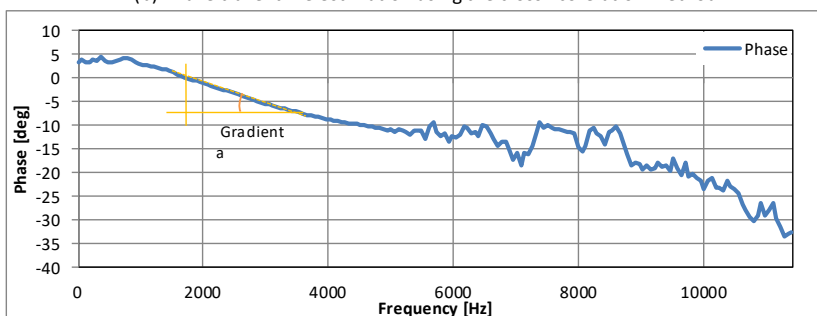
Method	Wave travel time		Shear wave velocity V_s (m/s)	Compression al wave velocity V_p (m/s)	Poisson's ratio ν	Modulus of elasticity E (MPa)	Shear modulus G_{max} (MPa)
	Notation	Estimates (ms)					
First arrival	Δt_s	0.578	210	499	0.392	209	75
Peak to peak	Δt_p	0.604	201		0.403	193	69
Cross - correlation	Δt_{cc}	0.609	199		0.405	190	68
Frequency domain	Δt_{cs}	0.600	202		0.402	195	70



(a) Travel time identification using First arrival and Peak to peak methods




(b) Wave travel time estimation using the cross - correlation method



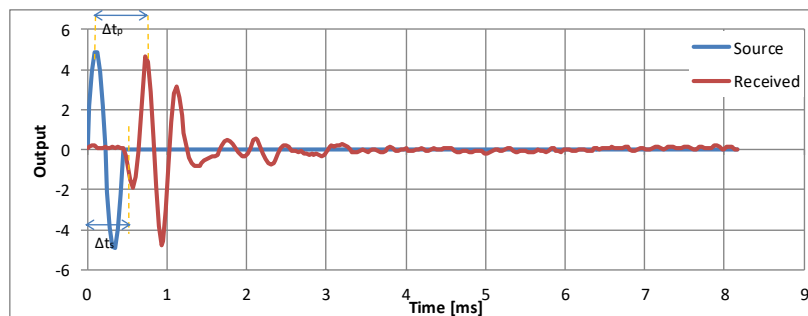
(c) Travel time estimation using frequency domain analysis

Δείγμα I11A-12, βάθος 61,7 – 62 m, μέτρηση μετά τον κορεσμό και την επιβολή των τάσεων πεδίου.

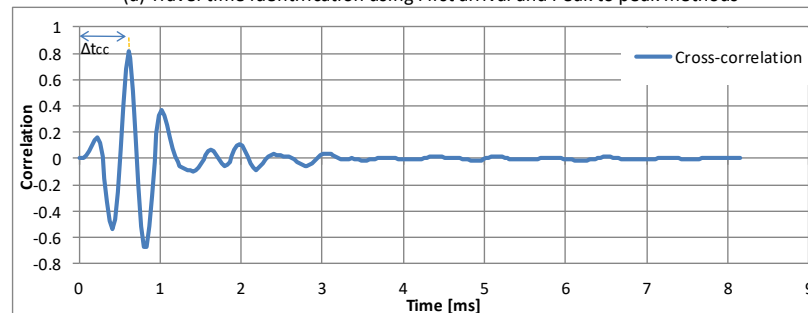
	Technical University of Crete		
	Mineral Resources Engineering Department		
	Laboratory of Applied Geology		
	73100 Chania, Crete, GREECE		
BENDER ELEMENTS TEST			

Project:	RISK ASSESSMENT OF FINAL PITS DURING FLOODING		
Sample No :	I11A-12	Description of soil :	Black silty clay soil
Boring No :	I11A	Date of testing :	26-03-21
Depth of Sample :	61.7 - 62	Tested by :	Syllignakis G
Remarks :	Test after saturation and consolidation		

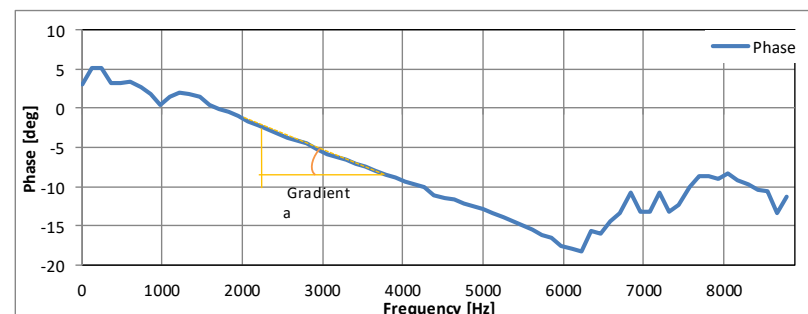
Method	Wave travel time		Shear wave velocity V_s (m/s)	Compressional wave velocity V_p (m/s)	Poisson's ratio ν	Modulus of elasticity E (MPa)	Shear modulus G_{max} (MPa)
	Notation	Estimates (ms)					
First arrival	Δt_s	0.641	189	1491	0.492	182	61
Peak to peak	Δt_p	0.631	192		0.492	188	63
Cross - correlation	Δt_{cc}	0.614	198		0.491	198	66
Frequency domain	Δt_{cs}	0.643	189		0.492	181	61



(a) Travel time identification using First arrival and Peak to peak methods




(b) Wave travel time estimation using the cross - correlation method

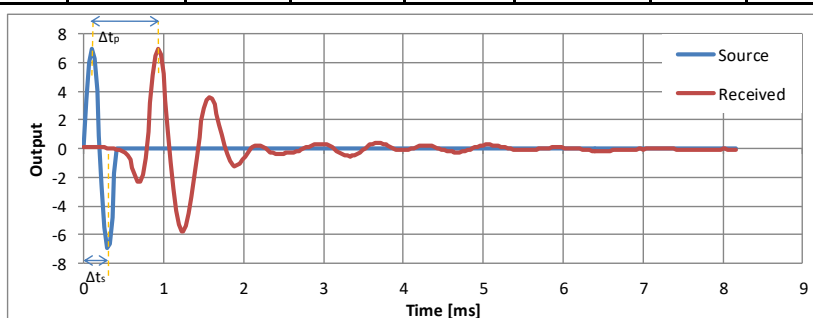


(c) Travel time estimation using frequency domain analysis

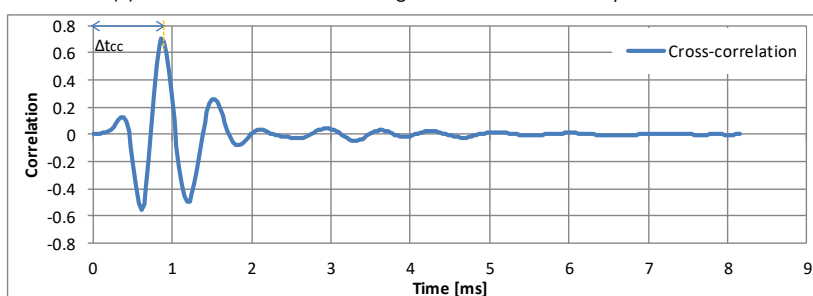
Δείγμα I11A-13, βάθος 66,5 – 65,8 m, μέτρηση στην φυσική του υγρασία.

	Technical University of Crete			
	Mineral Resources Engineering Department			
	Laboratory of Applied Geology			
	73100 Chania, Crete, GREECE			
BENDER ELEMENTS TEST				
Project:	RISK ASSESSMENT OF FINAL PITS DURING FLOODING			
Sample No :	I11A-13	Description of soil :	Black-Brown silty clay soil	
Boring No :	I11A	Date of testing :	21-05-21	
Depth of Sample :	65.5 - 65.8	Tested by :	Syllignakis G	
Remarks :	Test at initial moisture content			

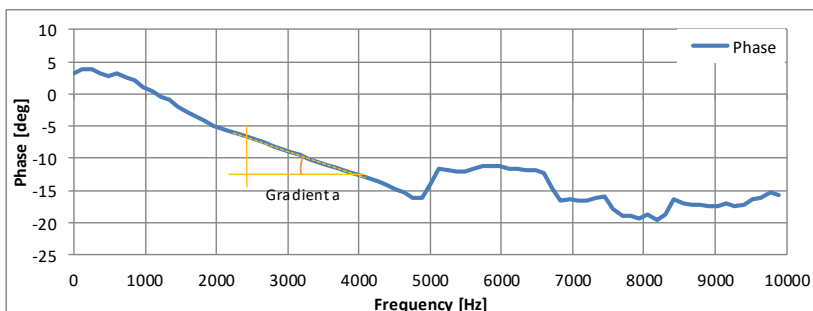
Method	Wave travel time		Shear wave velocity V_s (m/s)	Compression al wave velocity V_p (m/s)	Poisson's ratio ν	Modulus of elasticity E (MPa)	Shear modulus G_{max} (MPa)
	Notation	Estimates (ms)					
First arrival	Δt_s	0.781	154	487	0.444	131	45
Peak to peak	Δt_p	0.830	145		0.451	116	40
Cross - correlation	Δt_{cc}	0.869	139		0.456	106	36
Frequency domain	Δt_{cs}	0.659	183		0.418	180	63



(a) Travel time identification using First arrival and Peak to peak methods




(b) Wave travel time estimation using the cross - correlation method

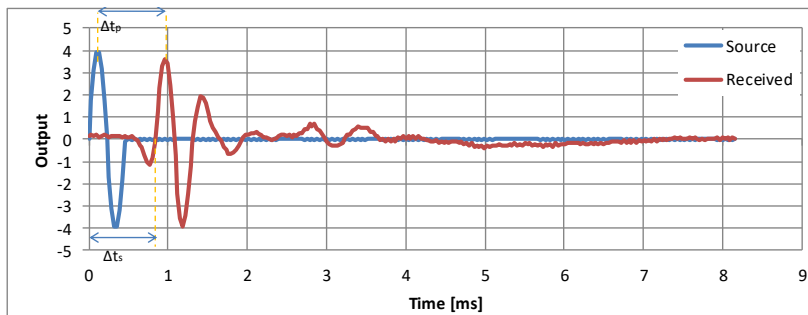


(c) Travel time estimation using frequency domain analysis

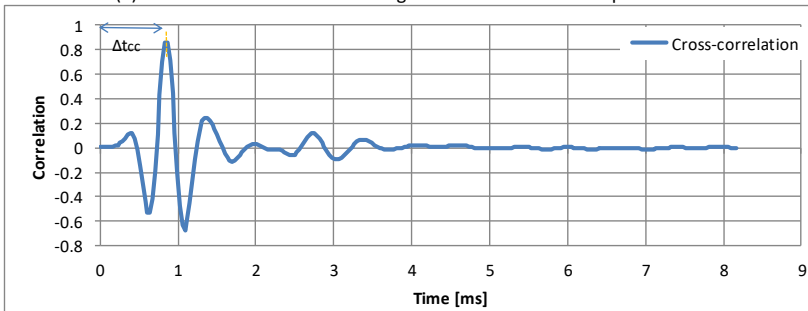
Δείγμα I11A-13, βάθος 66,5 – 65,8 m, μέτρηση μετά τον κορεσμό και την επιβολή των τάσεων πεδίου.

	Technical University of Crete				
	Mineral Resources Engineering Department				
	Laboratory of Applied Geology				
	73100 Chania, Crete, GREECE				
BENDER ELEMENTS TEST					
Project:	RISK ASSESSMENT OF FINAL PITS DURING FLOODING				
Sample No :	I11A-13	Description of soil :		Black-Brown silty clay soil	
Boring No :	I11A	Date of testing :		26-05-21	
Depth of Sample :	65.5 - 65.8	Tested by :		Syllignakis G	
Remarks :	Test after saturation and consolidation				

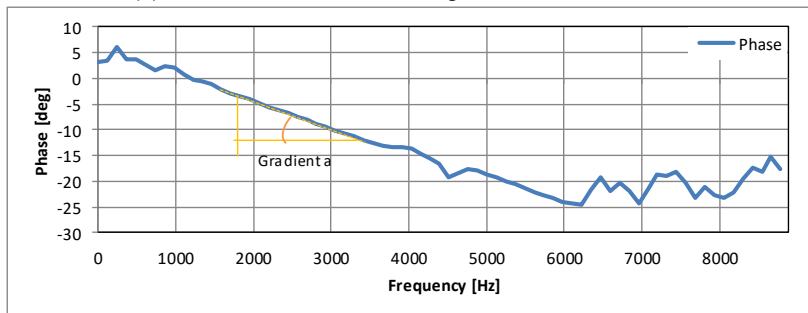
Method	Wave travel time		Shear wave velocity V_s (m/s)	Compressional wave velocity V_p (m/s)	Poisson's ratio ν	Modulus of elasticity E (MPa)	Shear modulus G_{max} (MPa)
	Notation	Estimates (ms)					
First arrival	Δt_s	0.833	145	1467	0.495	119	40
Peak to peak	Δt_p	0.850	142		0.495	114	38
Cross - correlation	Δt_{cc}	0.848	142		0.495	115	38
Frequency domain	Δt_{cs}	0.844	143		0.495	116	39



(a) Travel time identification using First arrival and Peak to peak methods




(b) Wave travel time estimation using the cross - correlation method



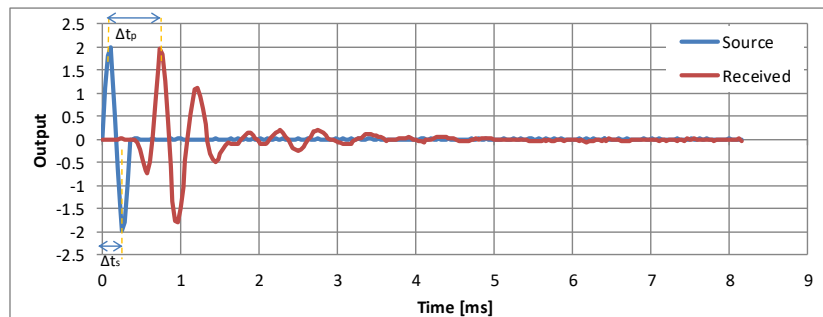
(c) Travel time estimation using frequency domain analysis

Δείγμα I11A-14, βάθος 71,7 – 72 m, μέτρηση στην φυσική του υγρασία.

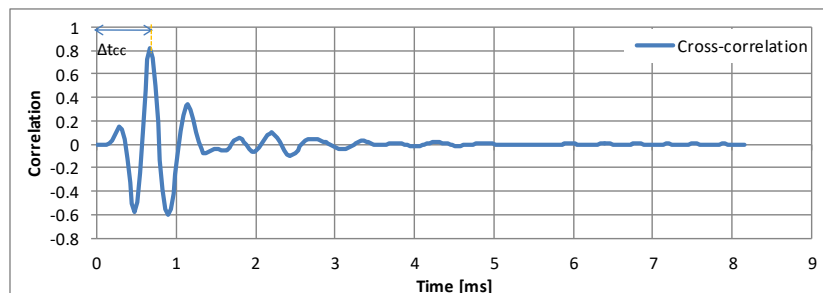
	Technical University of Crete		
	Mineral Resources Engineering Department		
	Laboratory of Applied Geology		
	73100 Chania, Crete, GREECE		
BENDER ELEMENTS TEST			

Project:	RISK ASSESSMENT OF FINAL PITS DURING FLOODING		
Sample No :	I11A-14	Description of soil :	Brown - Grey silty clay
Boring No :	I11A	Date of testing :	21-05-21
Depth of Sample :	71.7 - 72	Tested by :	Syllignakis G
Remarks :	Test at initial moisture content		

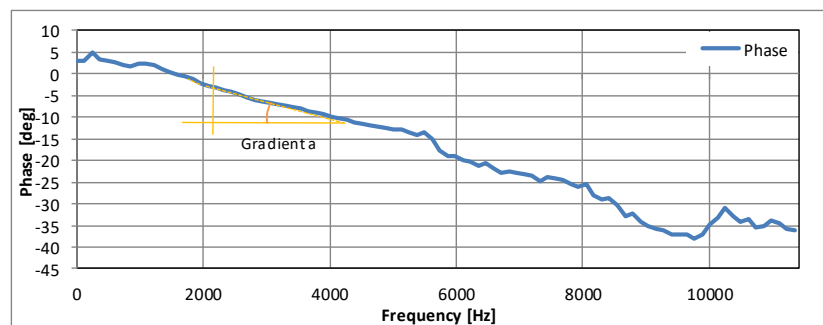
Method	Wave travel time		Shear wave velocity V_s (m/s)	Compression al wave velocity V_p (m/s)	Poisson's ratio ν	Modulus of elasticity E (MPa)	Shear modulus G_{max} (MPa)
	Notation	Estimates (ms)					
First arrival	Δt_s	0.638	188	523	0.426	202	71
Peak to peak	Δt_p	0.660	182		0.431	189	66
Cross - correlation	Δt_{cc}	0.672	179		0.434	183	64
Frequency domain	Δt_{cs}	0.618	194		0.420	214	76



(a) Travel time identification using First arrival and Peak to peak methods




(b) Wave travel time estimation using the cross - correlation method



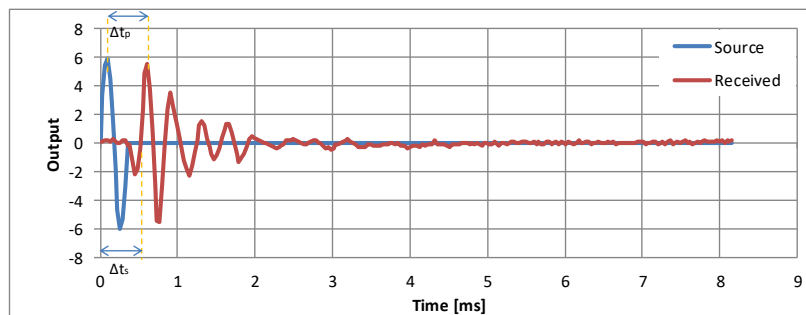
(c) Travel time estimation using frequency domain analysis

Δείγμα I11A-14, βάθος 71,7 – 72 m, μέτρηση μετά τον κορεσμό και την επιβολή των τάσεων πεδίου.

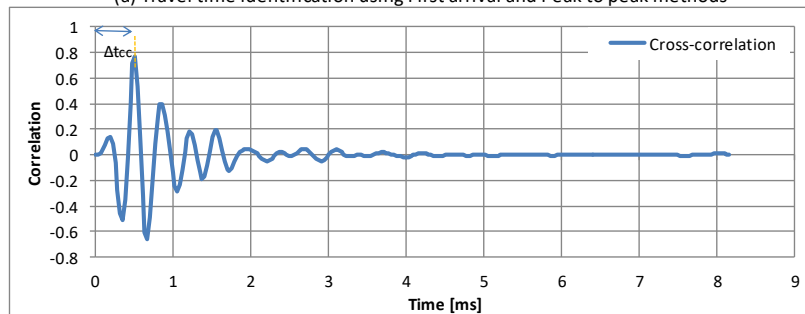
	Technical University of Crete
	Mineral Resources Engineering Department
	Laboratory of Applied Geology
	73100 Chania, Crete, GREECE
BENDER ELEMENTS TEST	

Project:	RISK ASSESSMENT OF FINAL PITS DURING FLOODING		
Sample No :	I11A-14	Description of soil :	Brown - Grey silty clay
Boring No :	I11A	Date of testing :	08-06-21
Depth of Sample :	71.7 - 72	Tested by :	Syllignakis G
Remarks :	Test after saturation and consolidation		

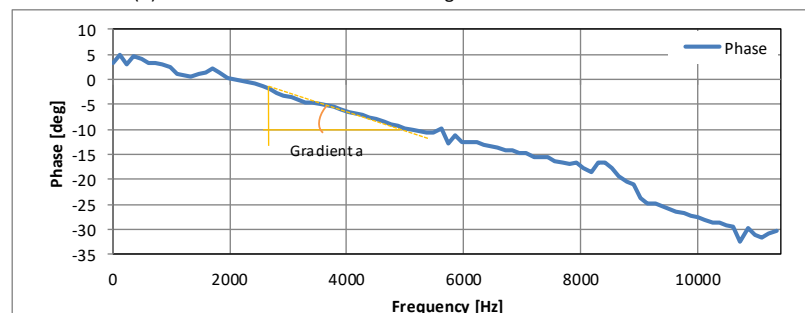
Method	Wave travel time		Shear wave velocity V_s (m/s)	Compressional wave velocity V_p (m/s)	Poisson's ratio ν	Modulus of elasticity E (MPa)	Shear modulus G_{max} (MPa)
	Notation	Estimates (ms)					
First arrival	Δt_s	0.519	231	1480	0.487	319	107
Peak to peak	Δt_p	0.516	233		0.487	322	108
Cross - correlation	Δt_{cc}	0.501	239		0.487	341	115
Frequency domain	Δt_{cs}	0.507	237		0.487	333	112



(a) Travel time identification using First arrival and Peak to peak methods



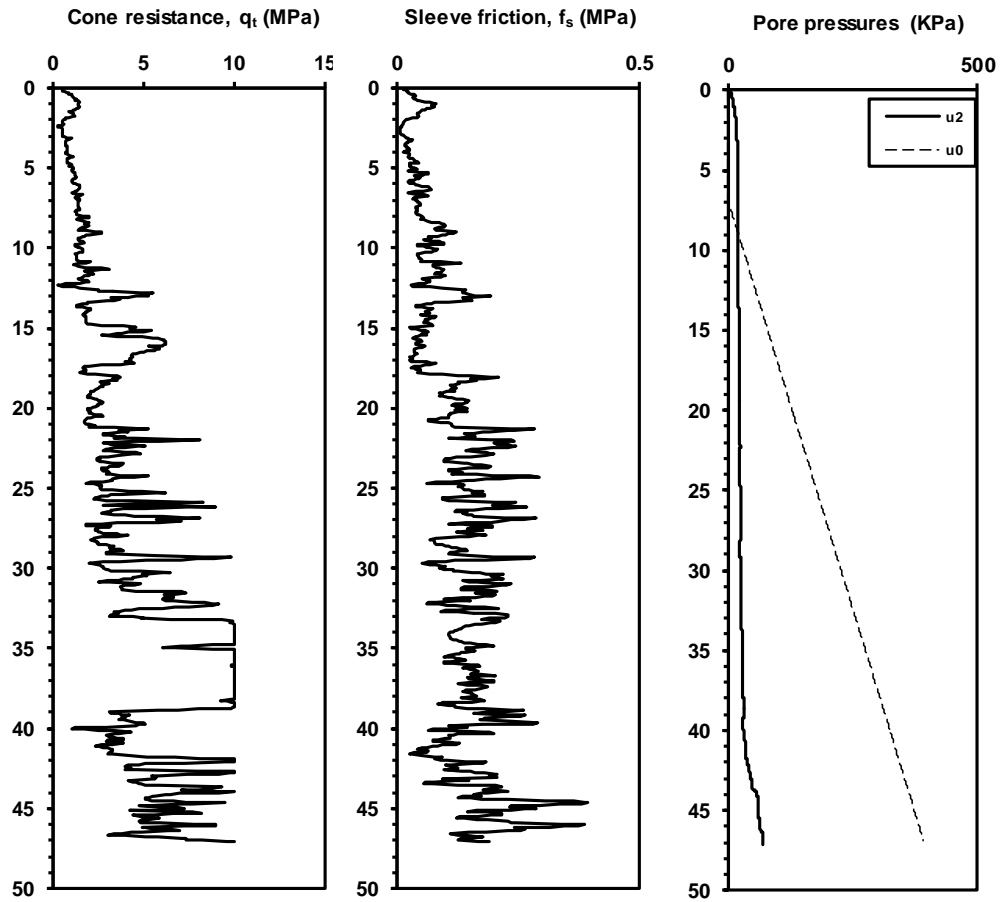
(b) Wave travel time estimation using the cross - correlation method



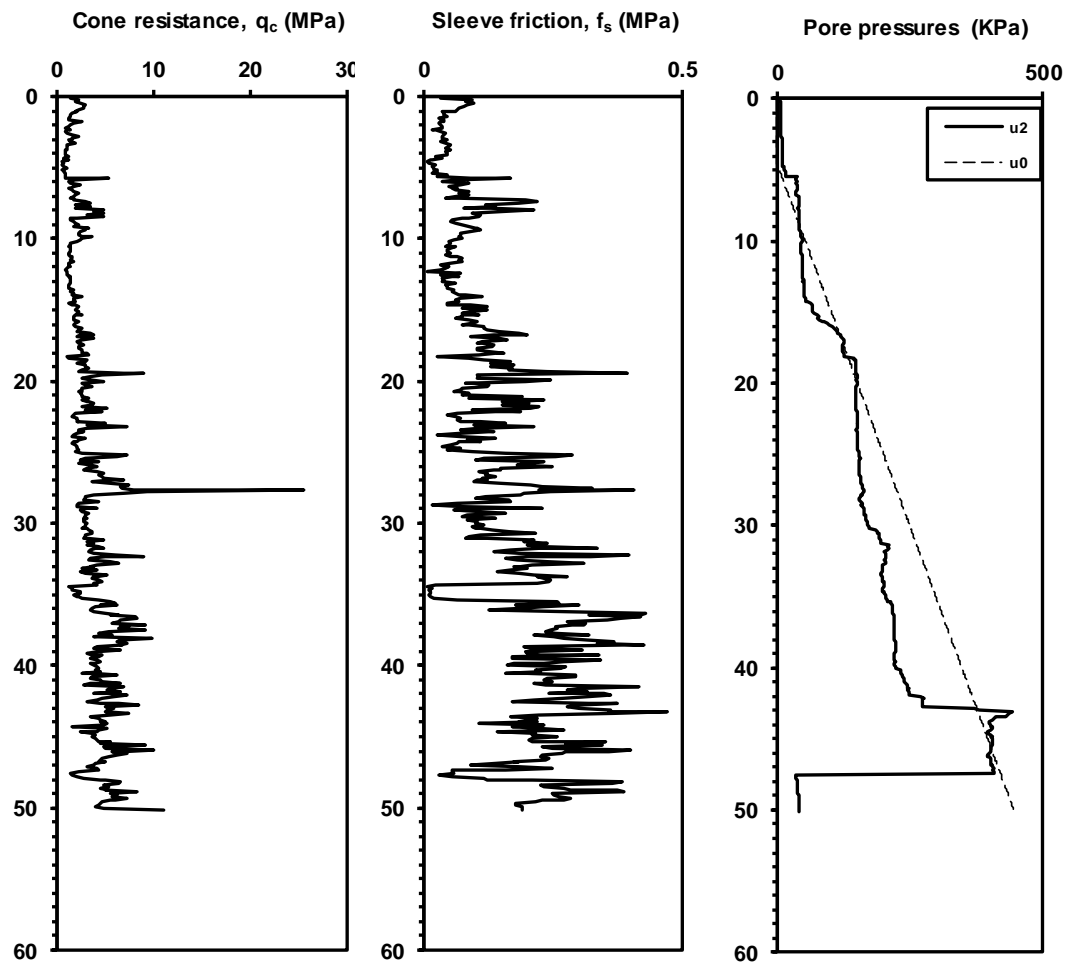
(c) Travel time estimation using frequency domain analysis

Αποτελέσματα δοκιμής στατικής πενετρομέτρησης (CPT)

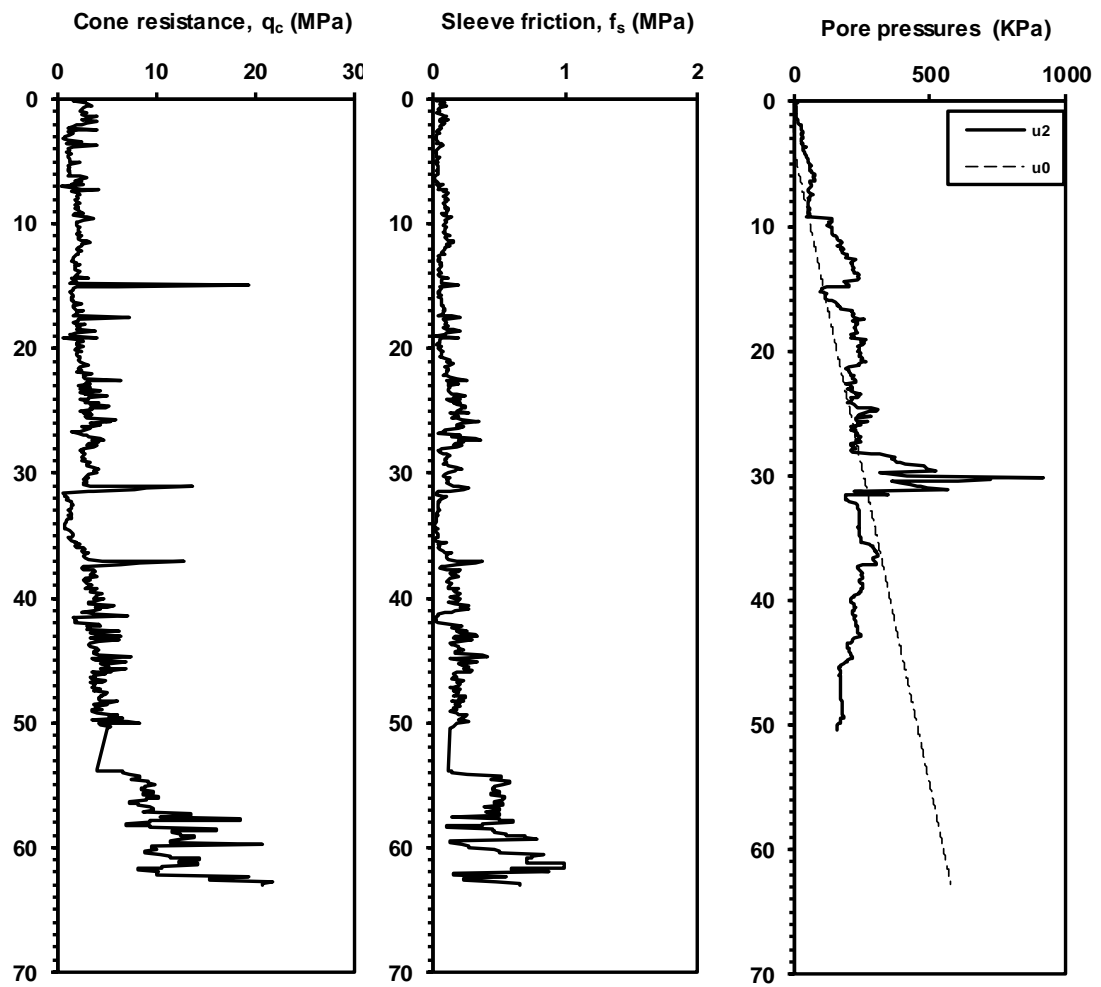
Μεταβολή της αντίστασης του κώνου q_t , της πλευρική τιμή f_s και της πίεσης πόρων u_2 συναρτήσει του βάθους στη θέση P4/14.



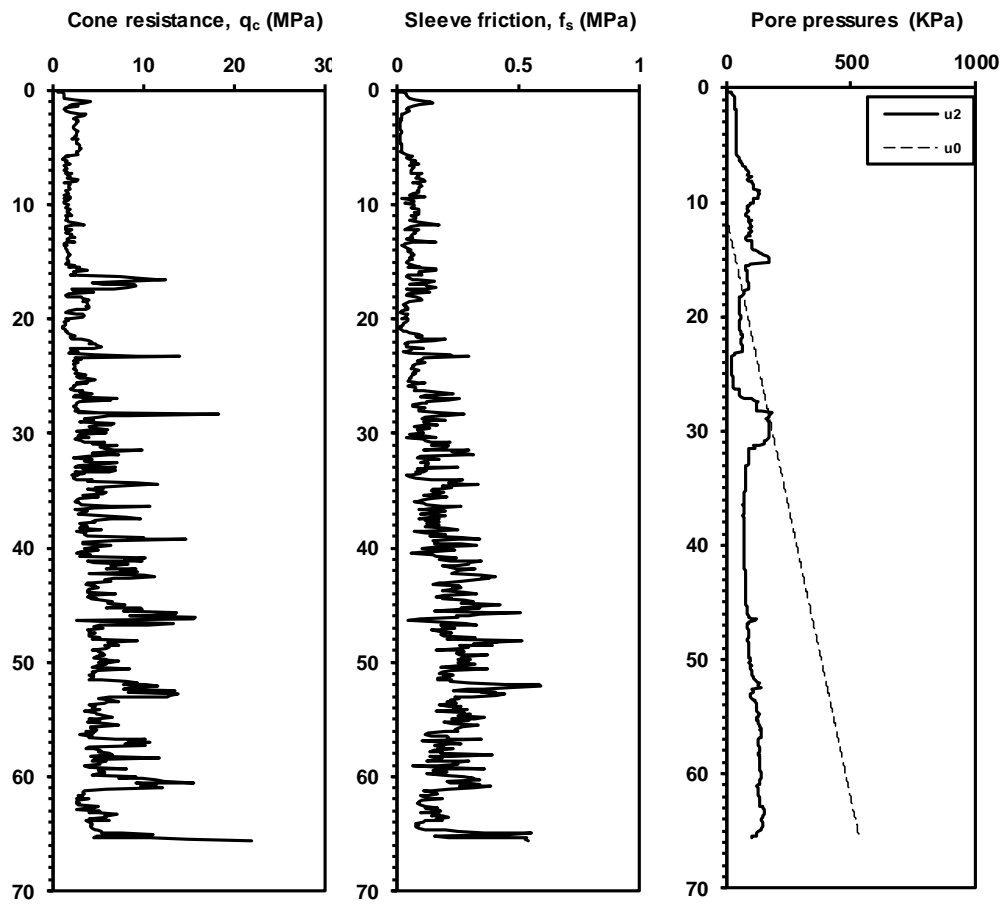
Μεταβολή της αντίστασης του κώνου q_c , της πλευρική τιμή f_s και της πίεσης πόρων u_2 συναρτήσει του βάθους στη θέση P4/15.



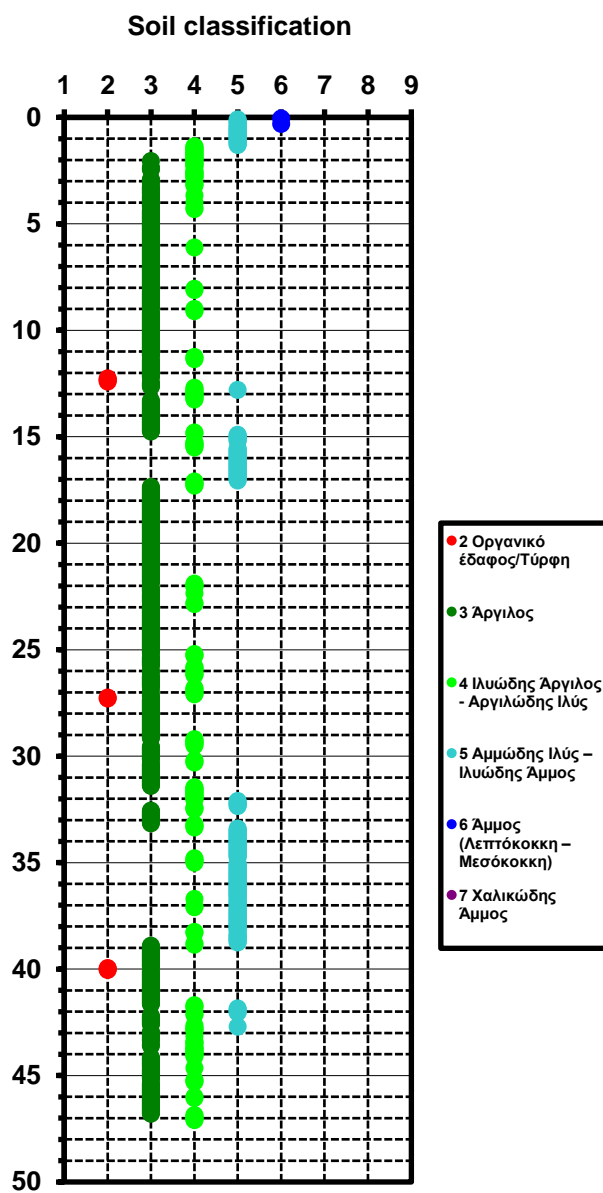
Μεταβολή της αντίστασης του κώνου q_c , της πλευρική τιμή f_s και της πίεσης πόρων u_2 συναρτήσει του βάθους στη θέση P4/16.



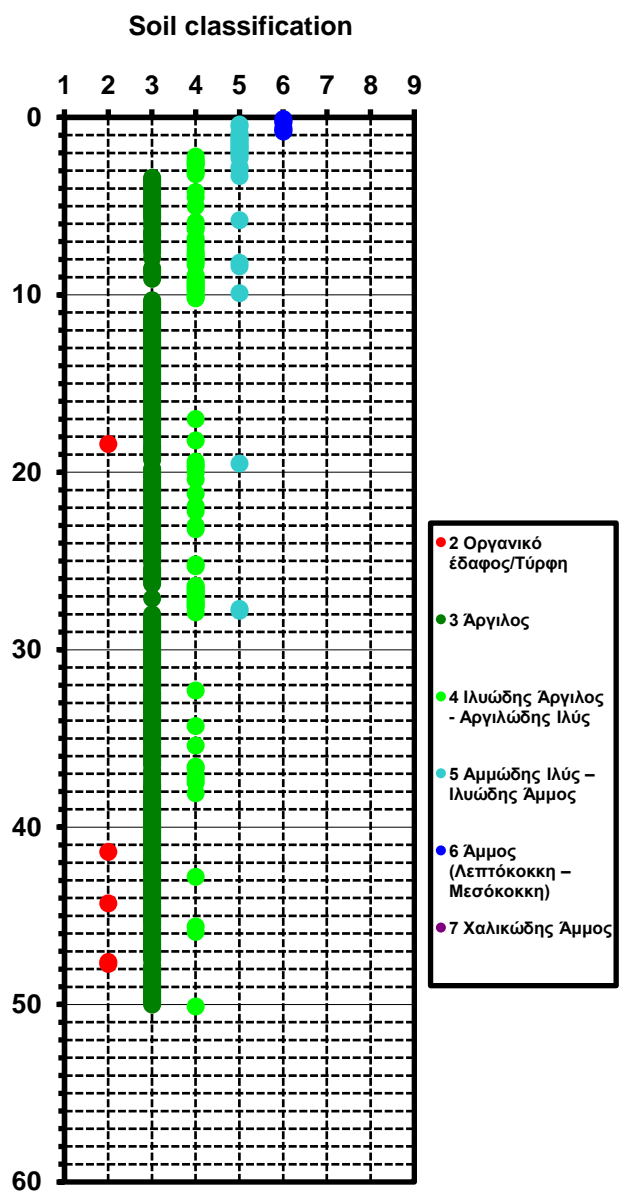
Μεταβολή της αντίστασης του κώνου q_c , της πλευρική τιμή f_s και της πίεσης πόρων u_2 συναρτήσει του βάθους στη θέση P4/17.



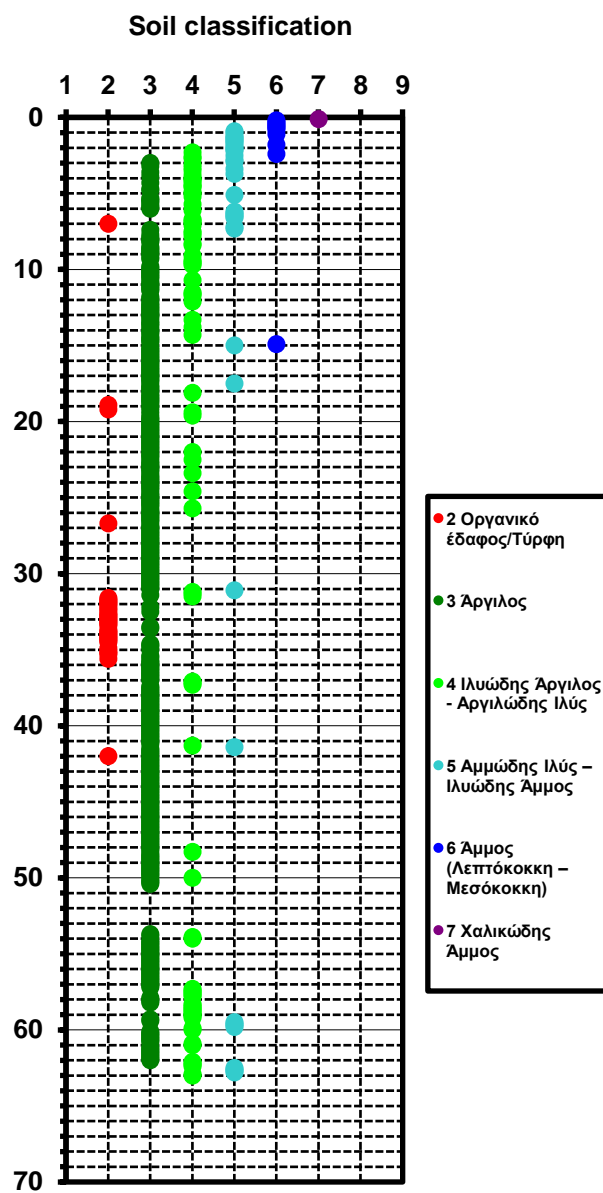
Ταξινόμηση εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος στην θέση ρ4/14 (σύμφωνα με τη μέθοδο Jefferies και Davies, 1993).



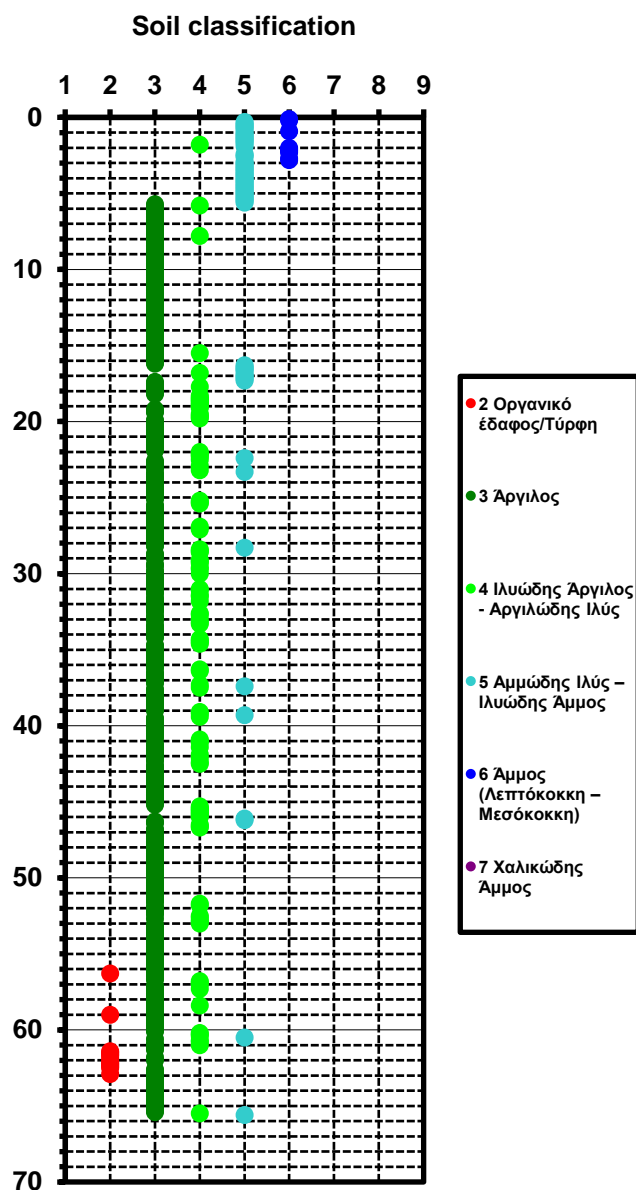
Ταξινόμηση εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος στην θέση ρ4/15 (σύμφωνα με τη μέθοδο Jefferies και Davies, 1993).



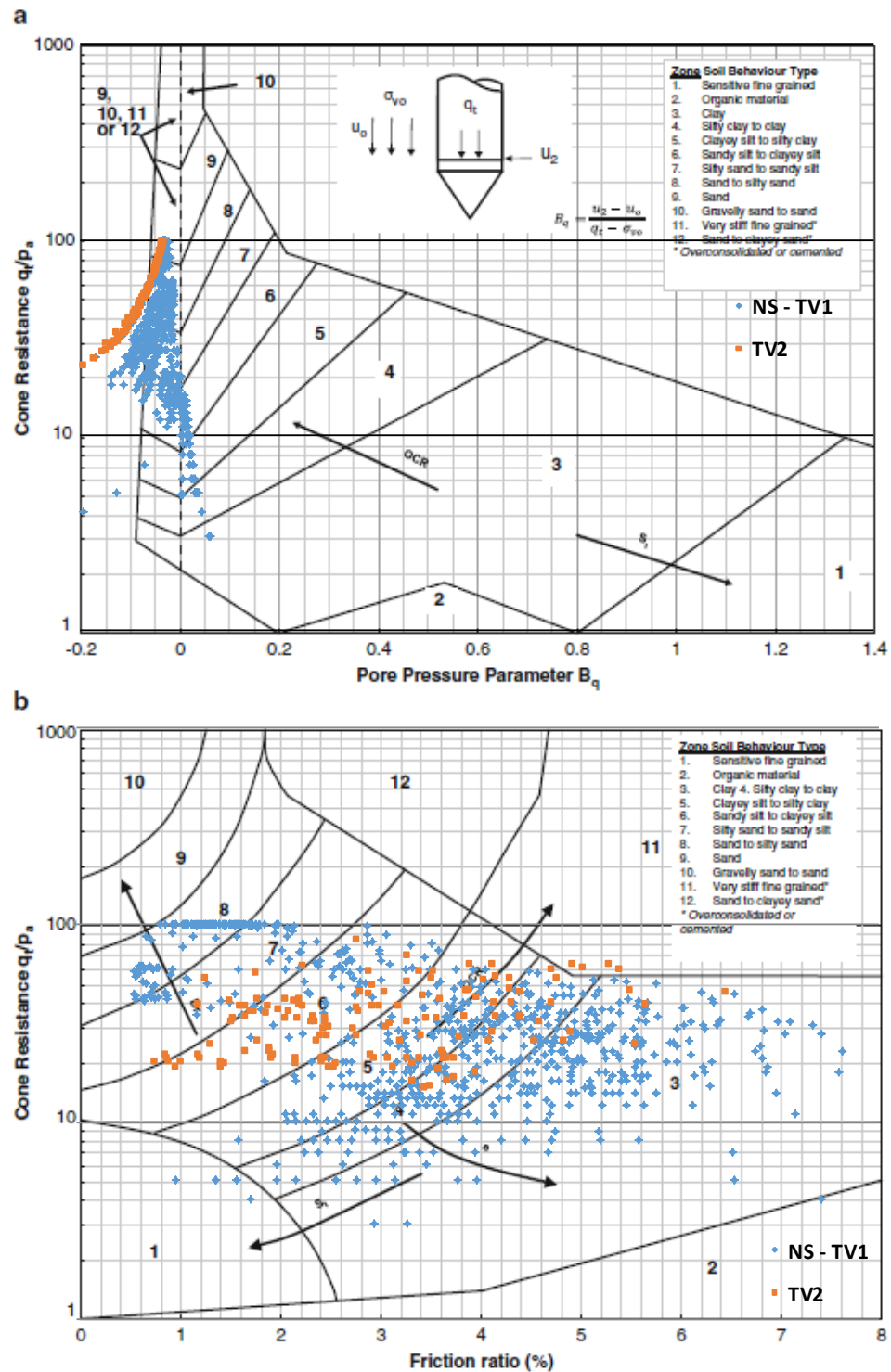
Ταξινόμηση εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος στην θέση ρ4/16 (σύμφωνα με τη μέθοδο Jefferies και Davies, 1993).



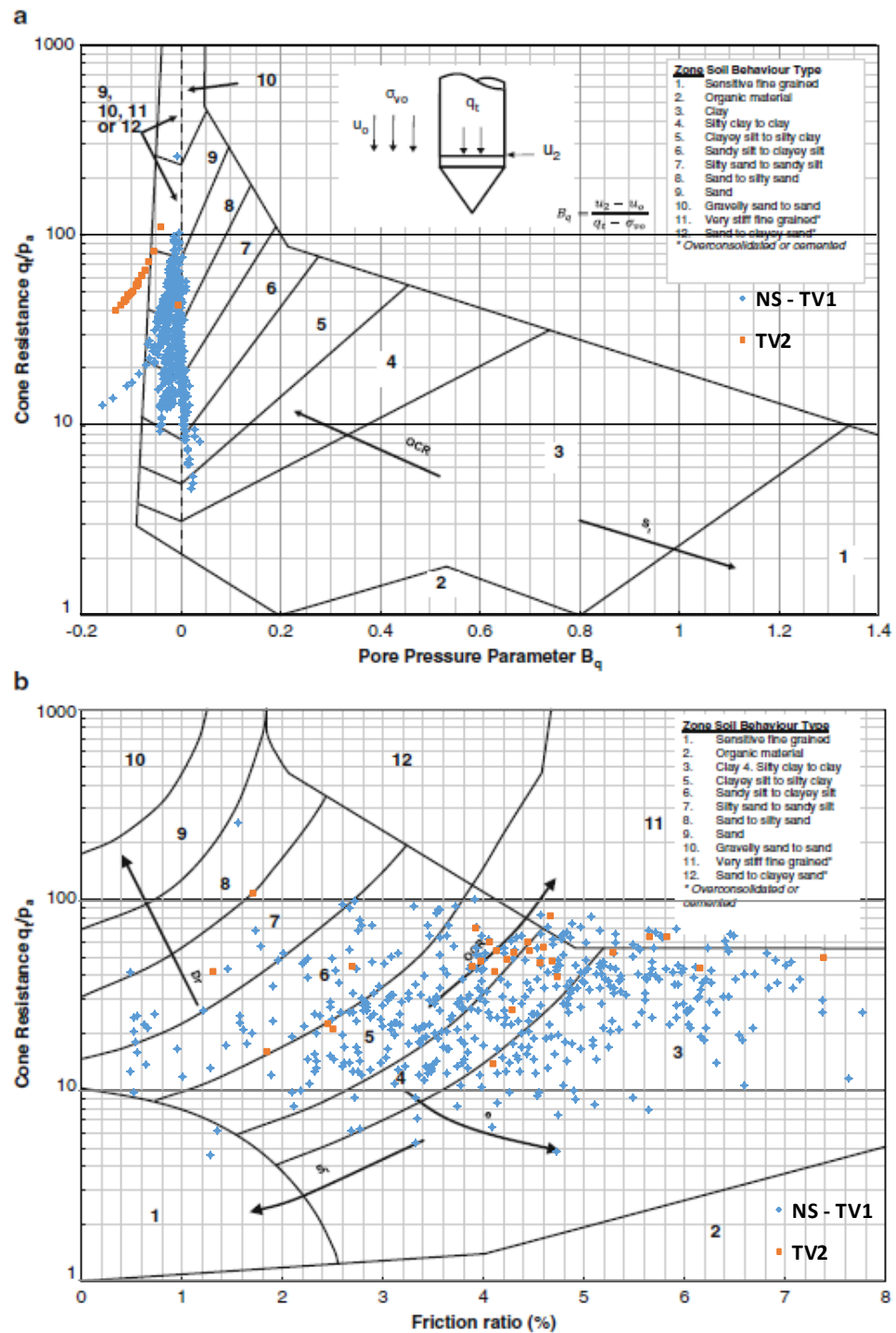
Ταξινόμηση εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος στην θέση ρ4/17 (σύμφωνα με τη μέθοδο Jefferies και Davies, 1993).



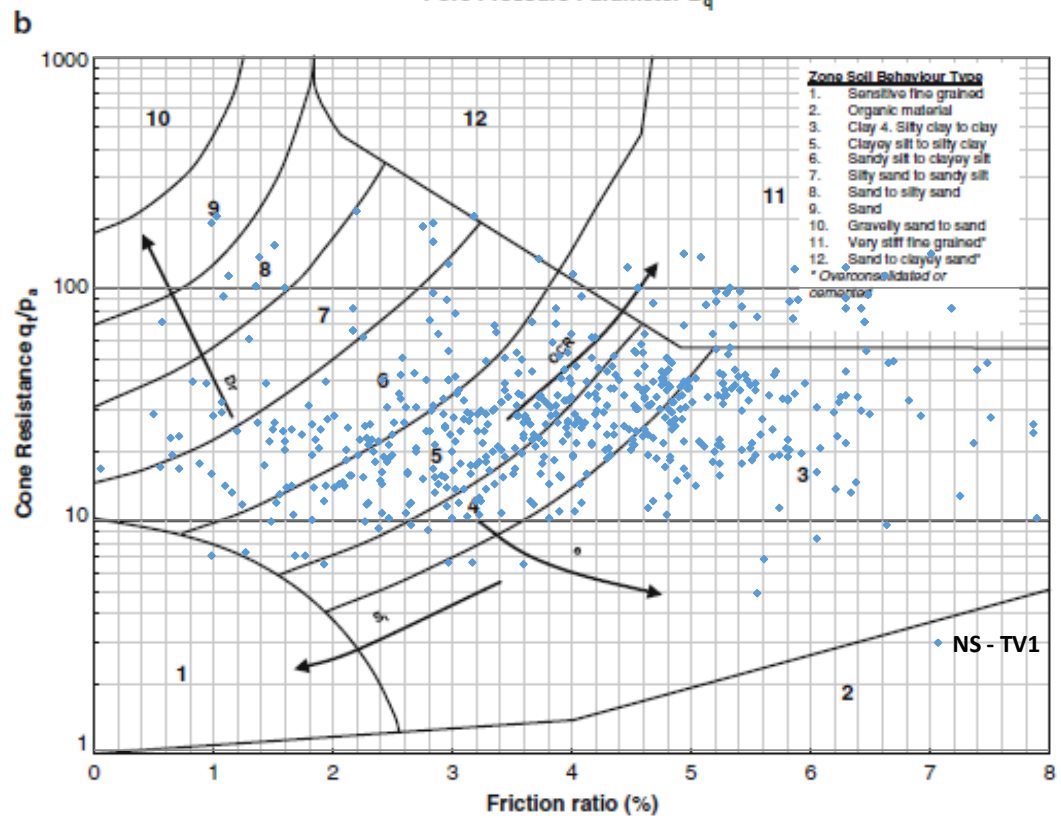
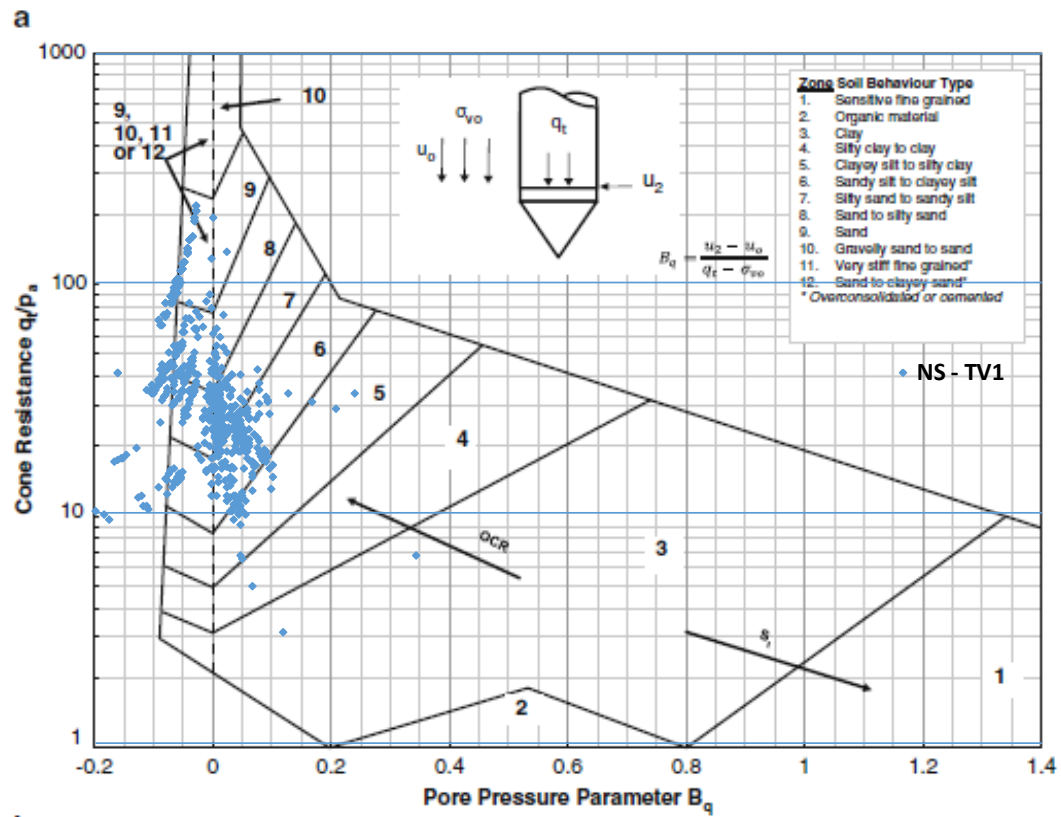
Ταξινόμηση εδάφους χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από CPT/CPTU δοκιμές στη θέση Ρ4/14
(μέθοδος Robertson, 1986).



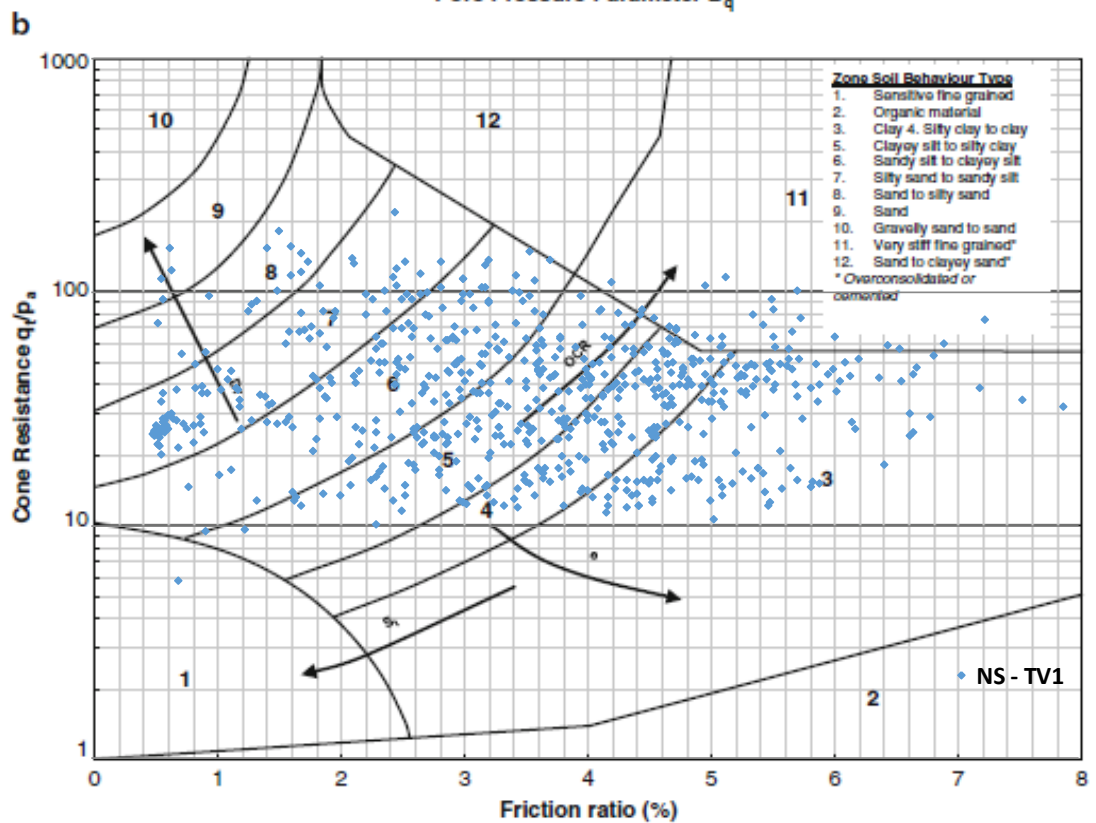
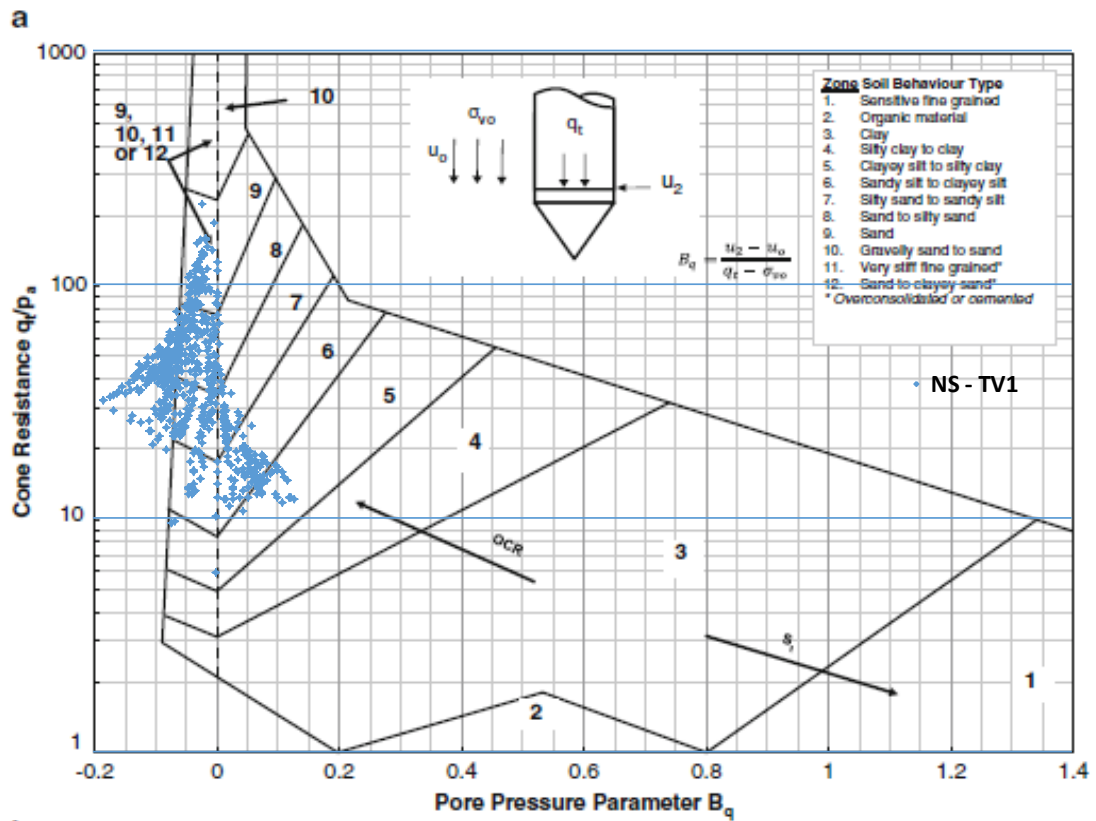
Ταξινόμηση εδάφους χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από CPT/CPTU δοκιμές στη θέση P4/15
(μέθοδος Robertson, 1986).



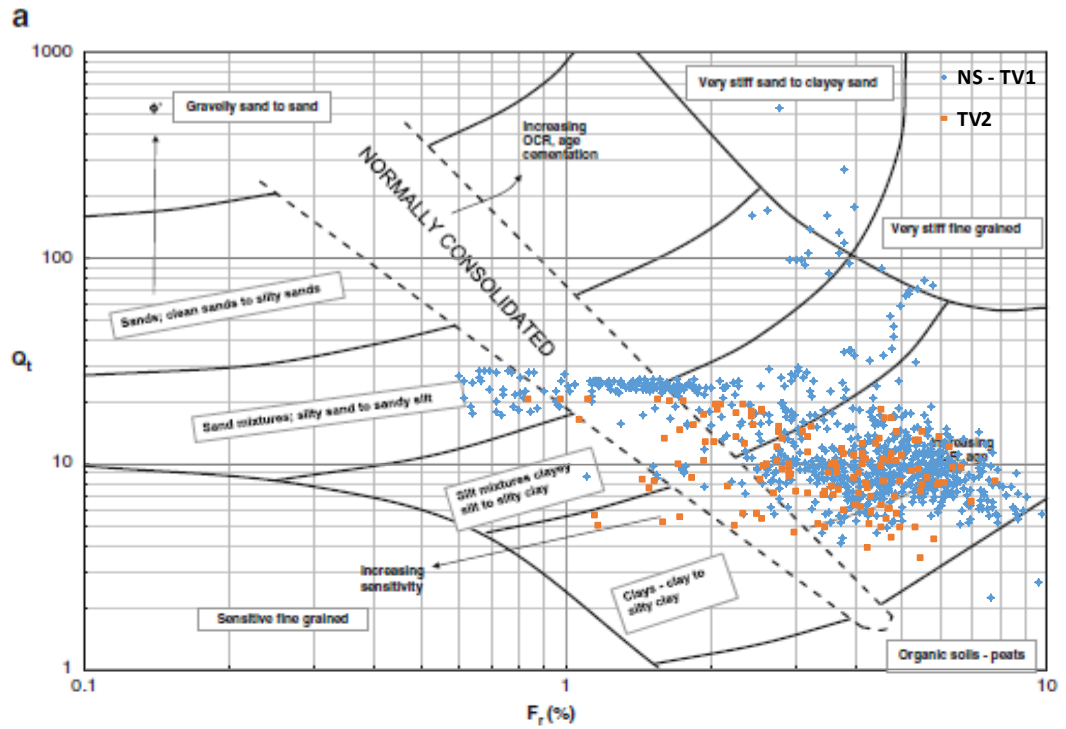
Ταξινόμηση εδάφους χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από CPT/CPTU δοκιμές στη θέση P4/16
(μέθοδος Robertson, 1986).



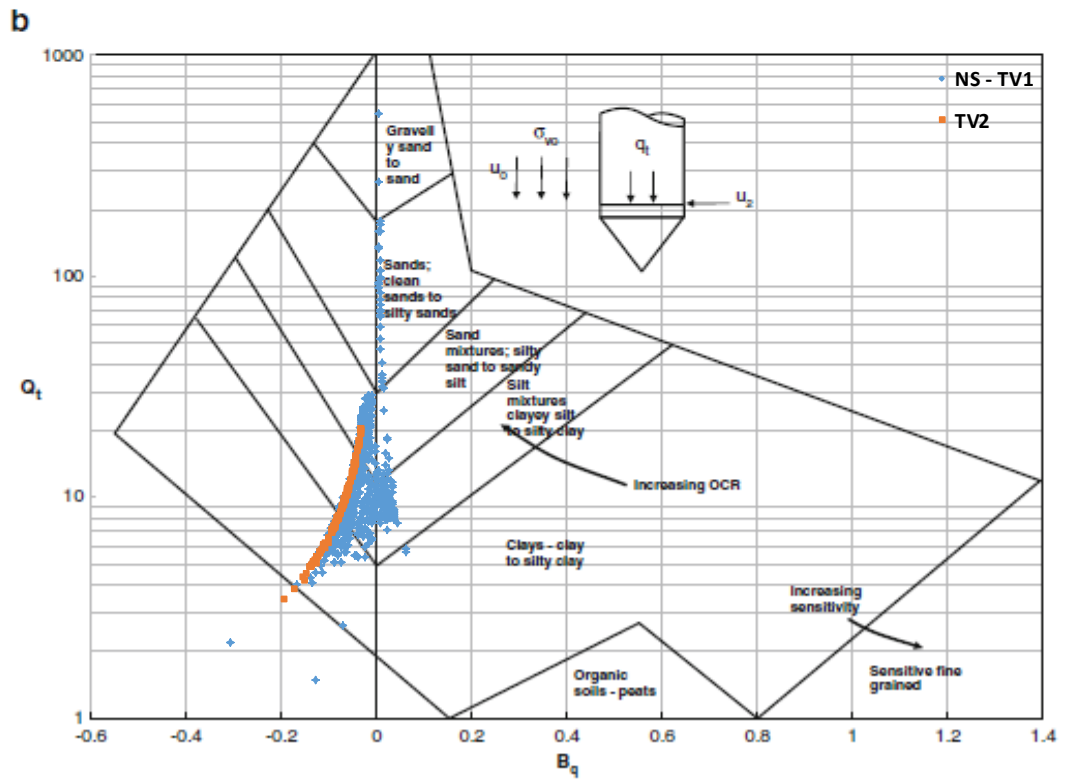
Ταξινόμηση εδάφους χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από CPT/CPTU δοκιμές στη θέση P4/17 (μέθοδος Robertson, 1986).



Ταξινόμηση εδάφους χρησιμοποιώντας τα κανονικοποιημένα δεδομένα από CPT/CPTU δοκιμές στη θέση P4/14 (μέθοδος Robertson, 1990).

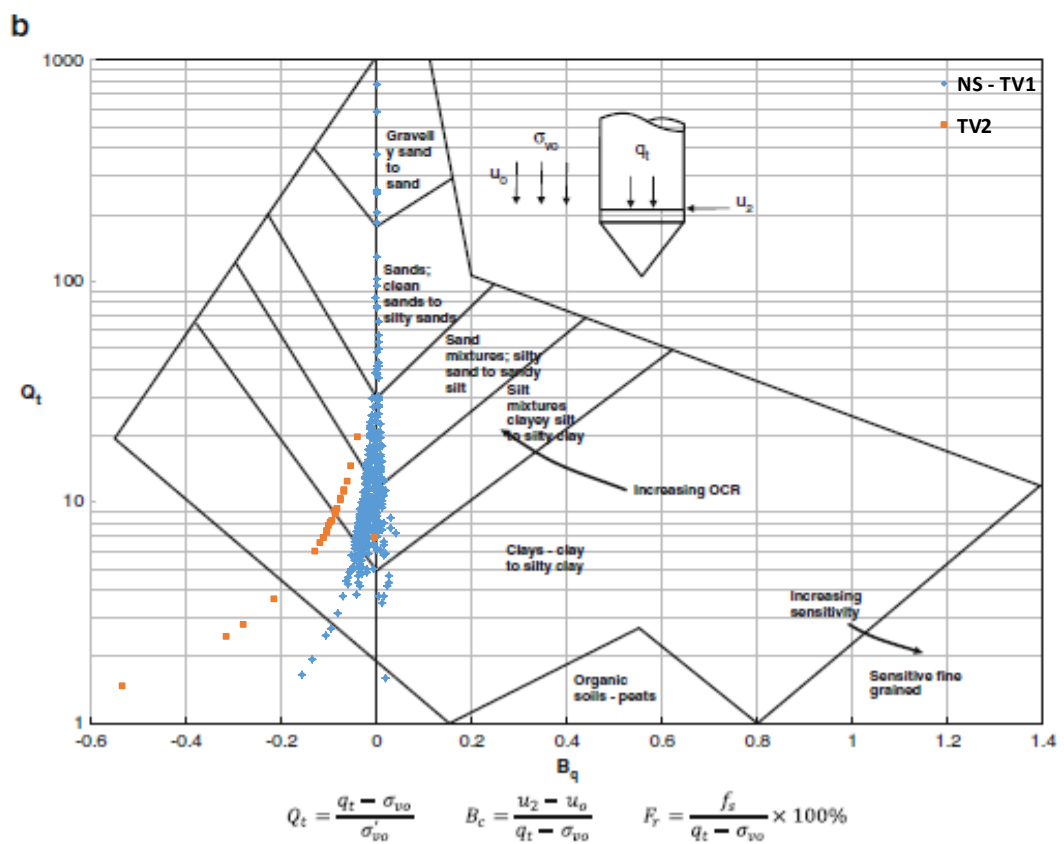
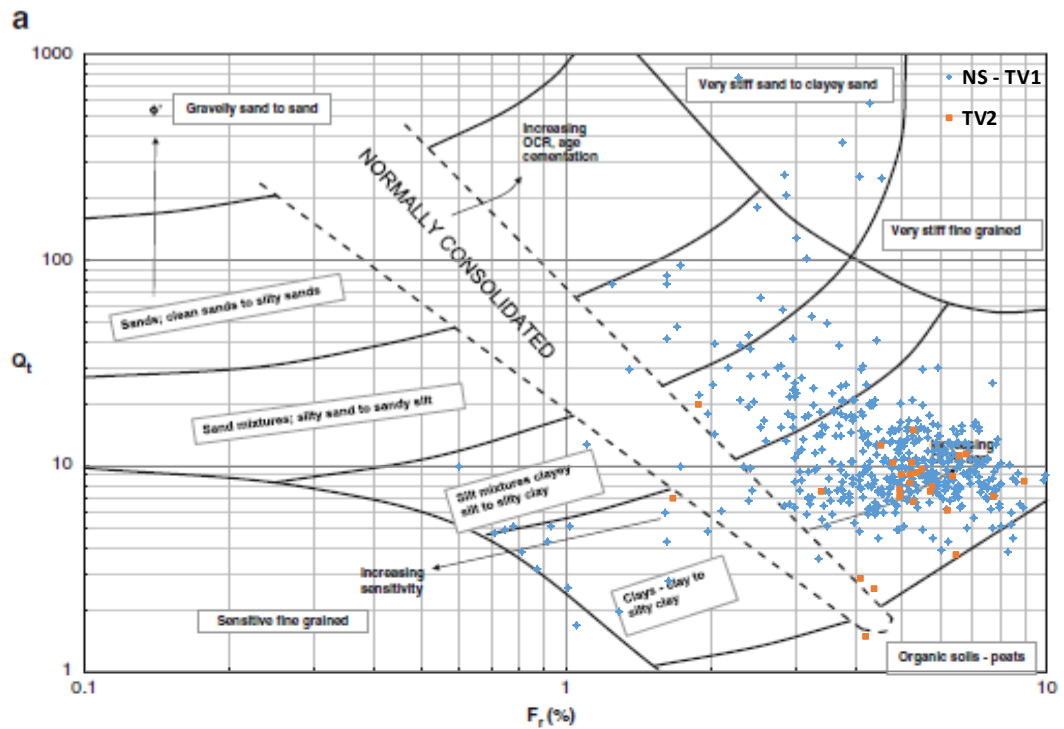


$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \quad B_c = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{vo}} \quad F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \times 100\%$$

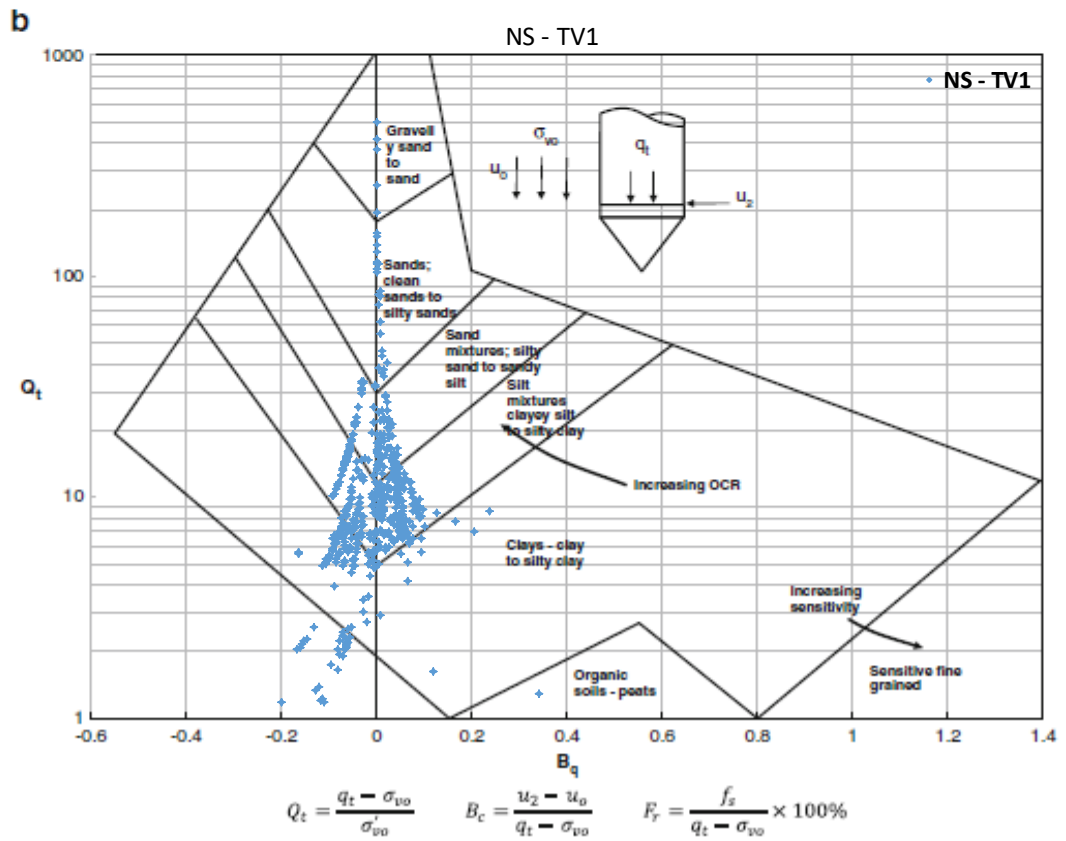
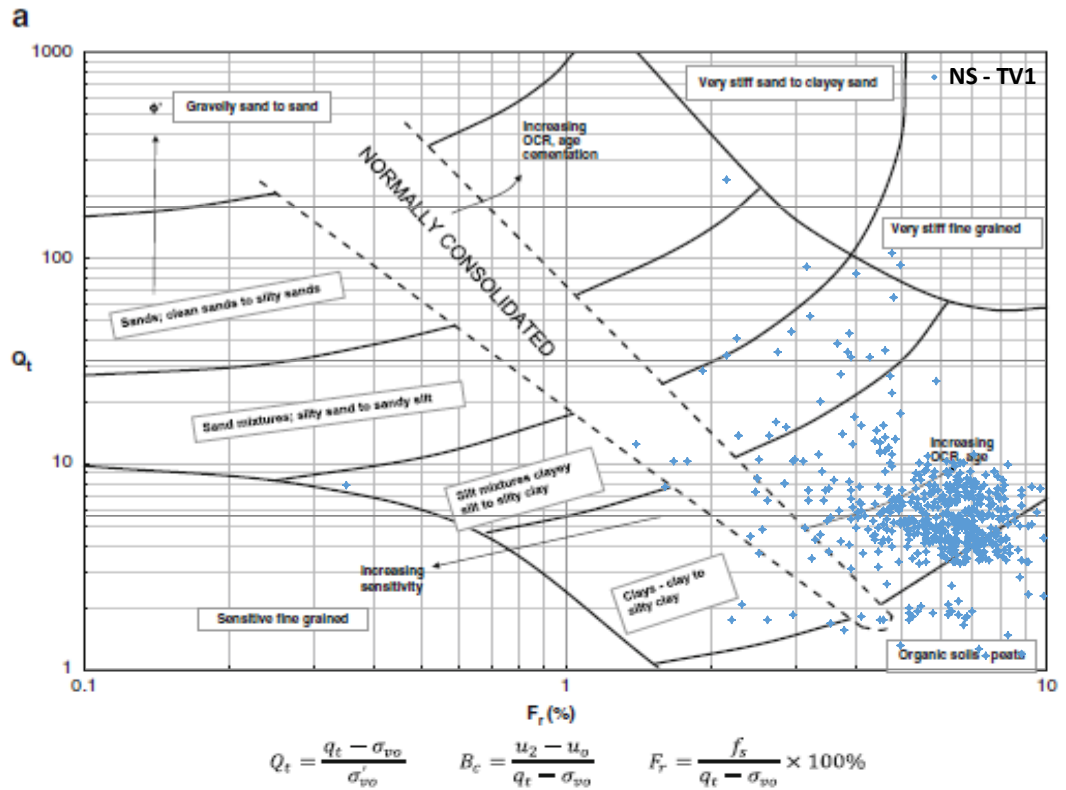


$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \quad B_c = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{vo}} \quad F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \times 100\%$$

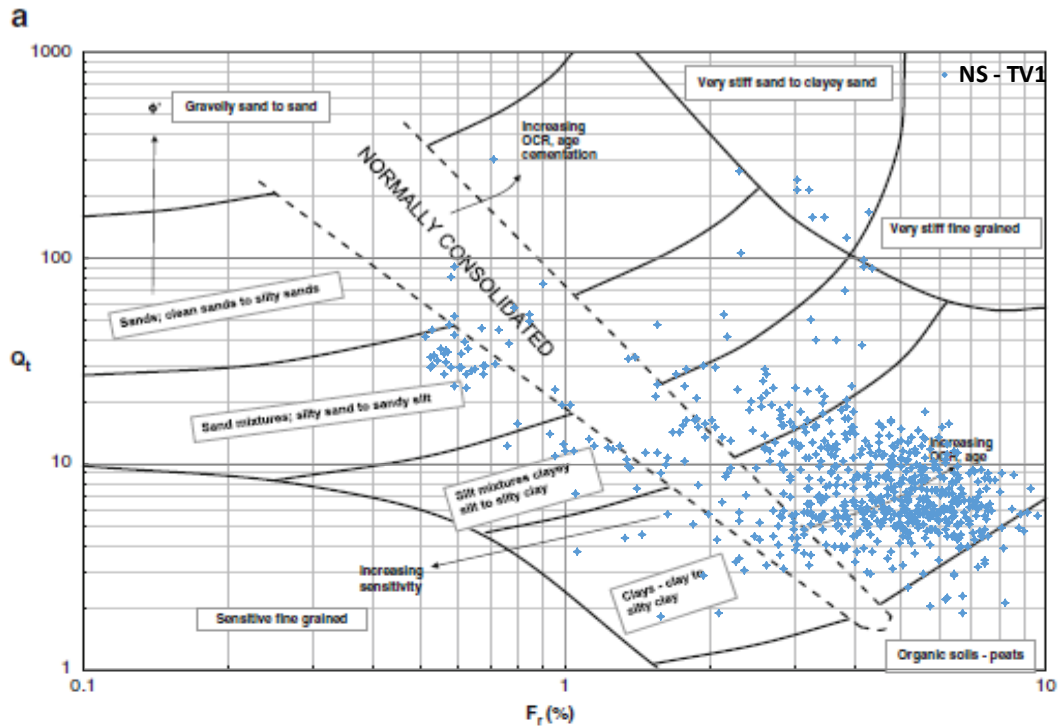
Ταξινόμηση εδάφους χρησιμοποιώντας τα κανονικοποιημένα δεδομένα από CPT/CPTU δοκιμές στη θέση P4/15 (μέθοδος Robertson, 1990).



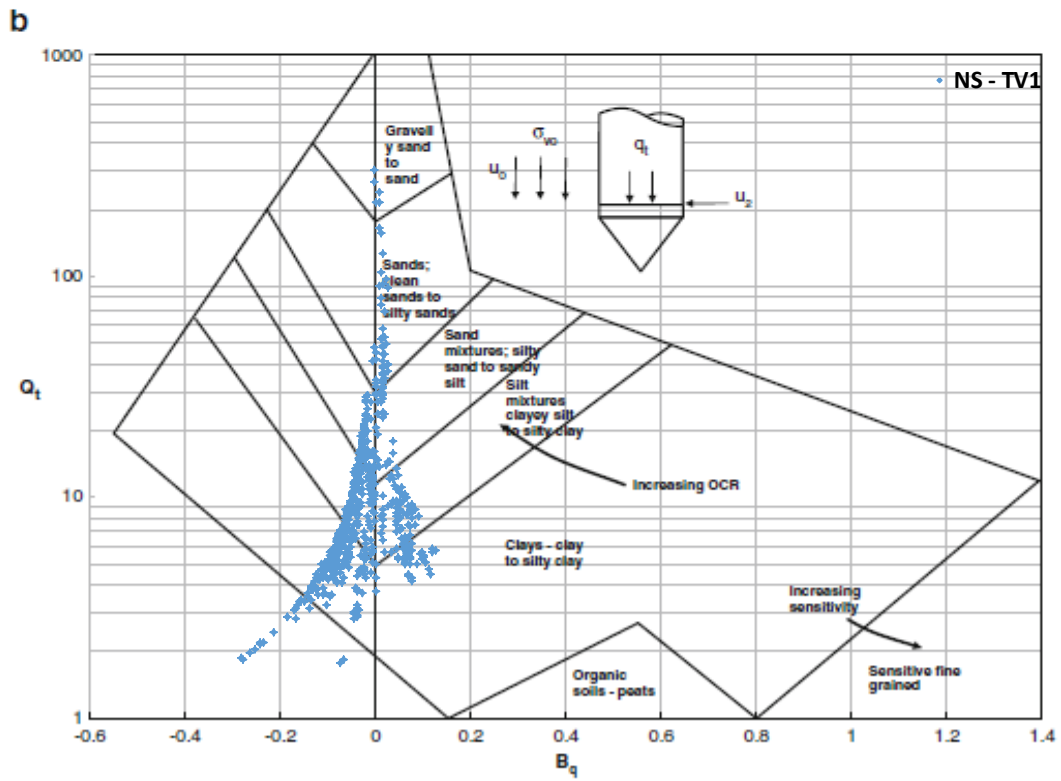
Ταξινόμηση εδάφους χρησιμοποιώντας τα κανονικοποιημένα δεδομένα από CPT/CPTU δοκιμές στη θέση P4/16 (μέθοδος Robertson, 1990).



Ταξινόμηση εδάφους χρησιμοποιώντας τα κανονικοποιημένα δεδομένα από CPT/CPTU δοκιμές στη θέση P4/17 (μέθοδος Robertson, 1990).



$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \quad B_c = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{vo}} \quad F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \times 100\%$$



$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \quad B_c = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{vo}} \quad F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \times 100\%$$

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων στη θέση P4/13.

Γεωτεχνικές Παράμετροι		NS - TV1	TV2
Μοναδιαίο βάρος εδάφους γ	[kN/m ³]	17.1	20.1
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u	[kN/m ²]	79.9	340.8
Αύξηση Συνοχής με το βάθος c'_{inc}	[kPa /m]	5.86	8.57
Friction angle ϕ' (fractile 5%)	[°]	26.1	28.1
Γωνία Τριβής ϕ'	[°]	31.8	31.1
Μέτρο Παραμόρφωσης E'	MPa	107.2	603.6
Συντελεστής Συμπίεσης M	MPa	14.5	67.8
Λόγος Προστερεοποίησης OCR	-	6.4	5.3
Συντελεστής Πλευρικής Ώθησης K_o (CPT)	-	1.9	1.7
Συντελεστής Πλευρικής Ώθησης K_o (Jaky)	-	0.5	0.5
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_s	(m/sec)	136	310.3
Μέτρο διάτμησης G_{max}	MPa	37.0	208.1
Περατότητα k	[m/sec]	2.89E-06	3.87E-08

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων στη θέση P4/14.

Γεωτεχνικές Παράμετροι		NS - TV1	TV2
Μοναδιαίο βάρος εδάφους γ	[kN/m ³]	18.7	19.7
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u	[kN/m ²]	145.6	309.5
Αύξηση Συνοχής με το βάθος c'_{inc}	[kPa /m]	3.9	15.3
Friction angle ϕ' (fractile 5%)	[°]	25	26
Γωνία Τριβής ϕ'	[°]	29.9	29
Μέτρο Παραμόρφωσης E'	MPa	318.5	597.4
Συντελεστής Συμπίεσης M	MPa	35.4	53.3
Λόγος Προστερεοποίησης OCR	-	3.3	3.3
Συντελεστής Πλευρικής Ώθησης K_o (CPT)	-	1.3	1.0
Συντελεστής Πλευρικής Ώθησης K_o (Jaky)	-	0.5	0.5
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_s	(m/sec)	225.4	316.2
Μέτρο διάτμησης G_{max}	MPa	109.8	206.0
Περατότητα k	[m/sec]	1.37E-07	1.89E-08

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων στη θέση P4/15.

Γεωτεχνικές Παράμετροι		NS - TV1	TV2
Μοναδιαίο βάρος εδάφους γ	[kN/m ³]	18.9	19.9
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u	[kN/m ²]	170.1	255.7
Αύξηση Συνοχής με το βάθος c'_{inc}	[kPa /m]	4.6	59.8
Friction angle ϕ' (fractile 5%)	[°]	24	24
Γωνία Τριβής ϕ'	[°]	29.4	28
Μέτρο Παραμόρφωσης E'	MPa	350.6	638.8
Συντελεστής Συμπίεσης M	MPa	27.0	34.9
Λόγος Προστερεοποίησης OCR	-	3.3	2.6
Συντελεστής Πλευρικής Ώθησης K_o (CPT)	-	1.1	0.8
Συντελεστής Πλευρικής Ώθησης K_o (Jaky)	-	0.5	0.5
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_s	(m/sec)	235.3	323.4
Μέτρο διάτμησης G_{max}	MPa	120.9	220.3
Περατότητα k	[m/sec]	2.89E-07	4.49E-09

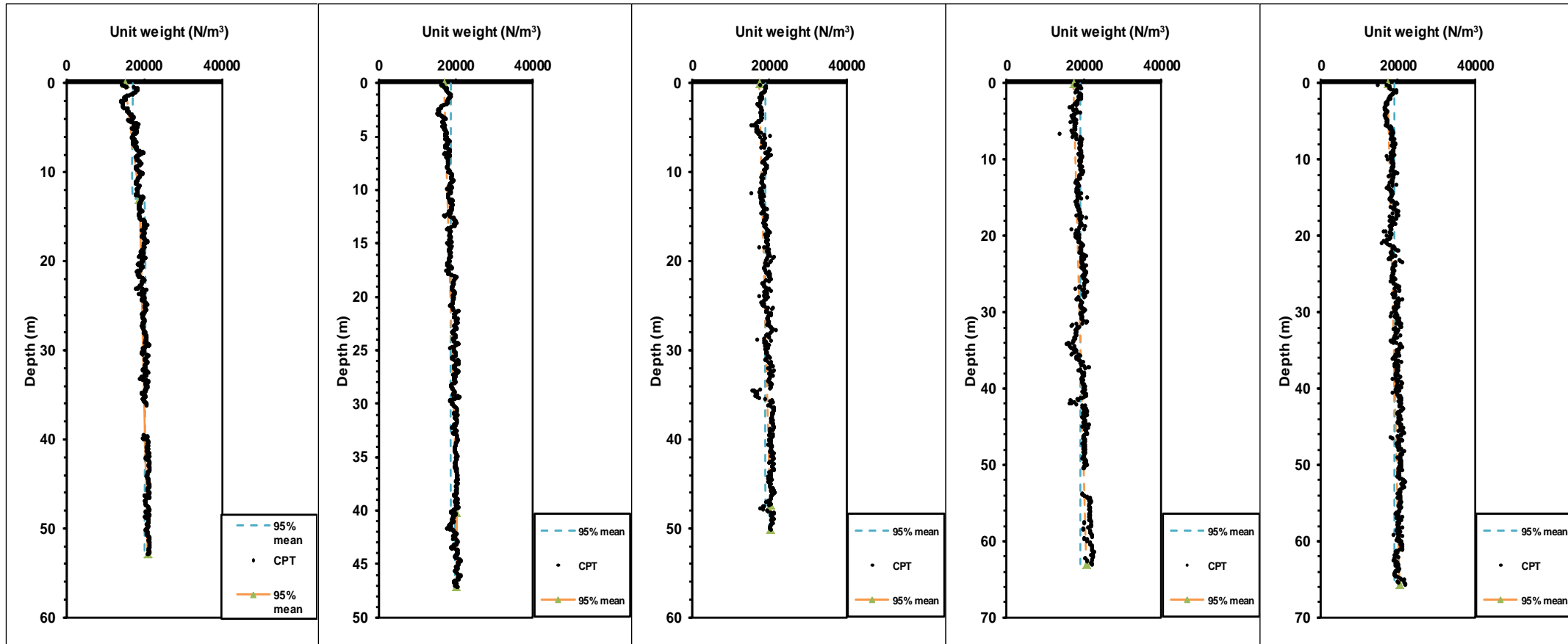
Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων στη θέση P4/16.

Γεωτεχνικές Παράμετροι		NS - TV1
Μοναδιαίο βάρος εδάφους γ	[kN/m ³]	19.0
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u	[kN/m ²]	192.5
Αύξηση Συνοχής με το βάθος c'_{inc}	[kPa /m]	6.7
Friction angle ϕ' (fractile 5%)	[°]	22
Γωνία Τριβής ϕ'	[°]	29
Μέτρο Παραμόρφωσης E'	MPa	412.8
Συντελεστής Συμπίεσης M	MPa	32.8
Λόγος Προστερεοποίησης OCR	-	3
Συντελεστής Πλευρικής Ώθησης K_o (CPT)	-	0.8
Συντελεστής Πλευρικής Ώθησης K_o (Jaky)	-	0.5
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_s	(m/sec)	249.9
Μέτρο διάτμησης G_{max}	MPa	142.3
Περατότητα k	[m/sec]	2.63E-06

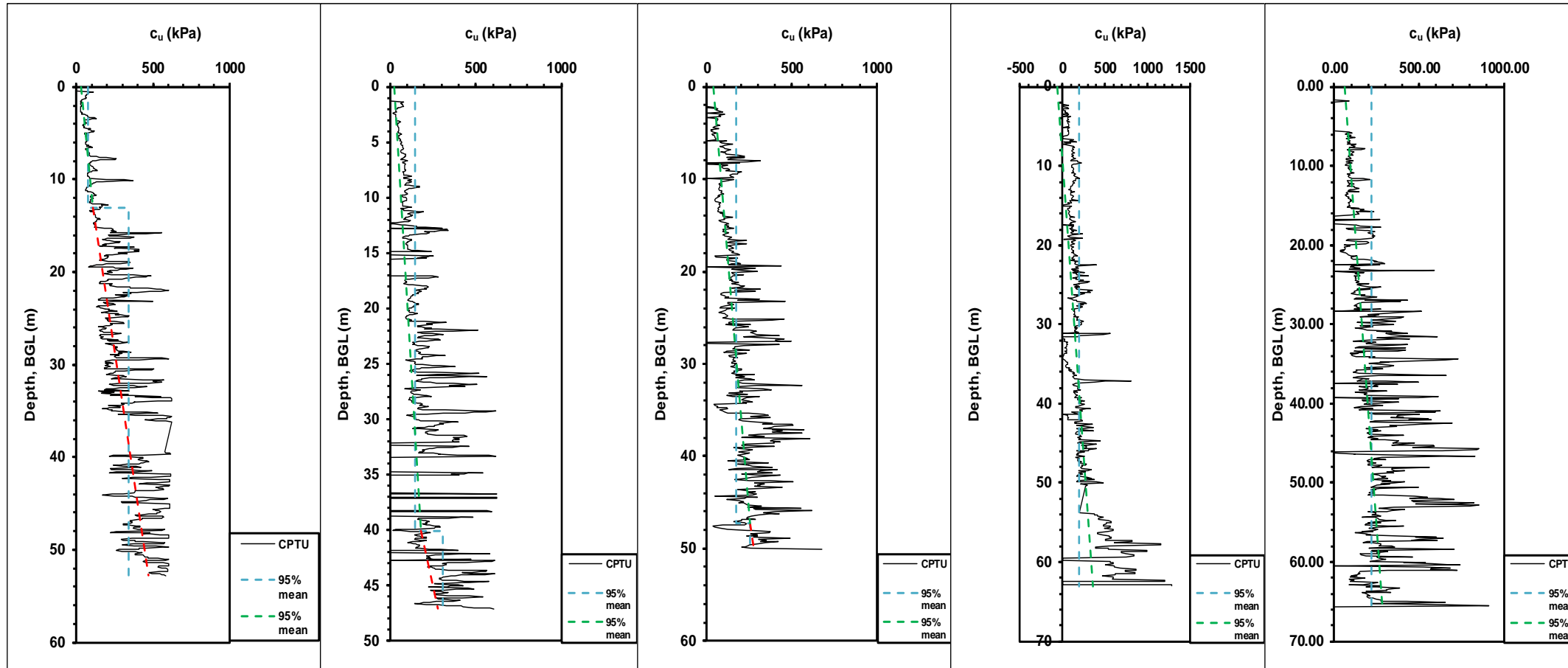
Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων στη θέση P4/17.

Γεωτεχνικές Παράμετροι		NS - TV1
Μοναδιαίο βάρος εδάφους γ	[kN/m ³]	19.1
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u	[kN/m ²]	218.5
Αύξηση Συνοχής με το βάθος c'_{inc}	[kPa /m]	3.4
Friction angle ϕ' (fractile 5%)	[°]	22
Γωνία Τριβής ϕ'	[°]	28.5
Μέτρο Παραμόρφωσης E'	MPa	447.4
Συντελεστής Συμπίεσης M	MPa	31.6
Λόγος Προστερεοποίησης OCR	-	2.6
Συντελεστής Πλευρικής Ώθησης K_o (CPT)	-	1.2
Συντελεστής Πλευρικής Ώθησης K_o (Jaky)	-	0.5
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_s	(m/sec)	269.6
Μέτρο διάτμησης G_{max}	MPa	159.8
Περατότητα k	[m/sec]	8.14E-07

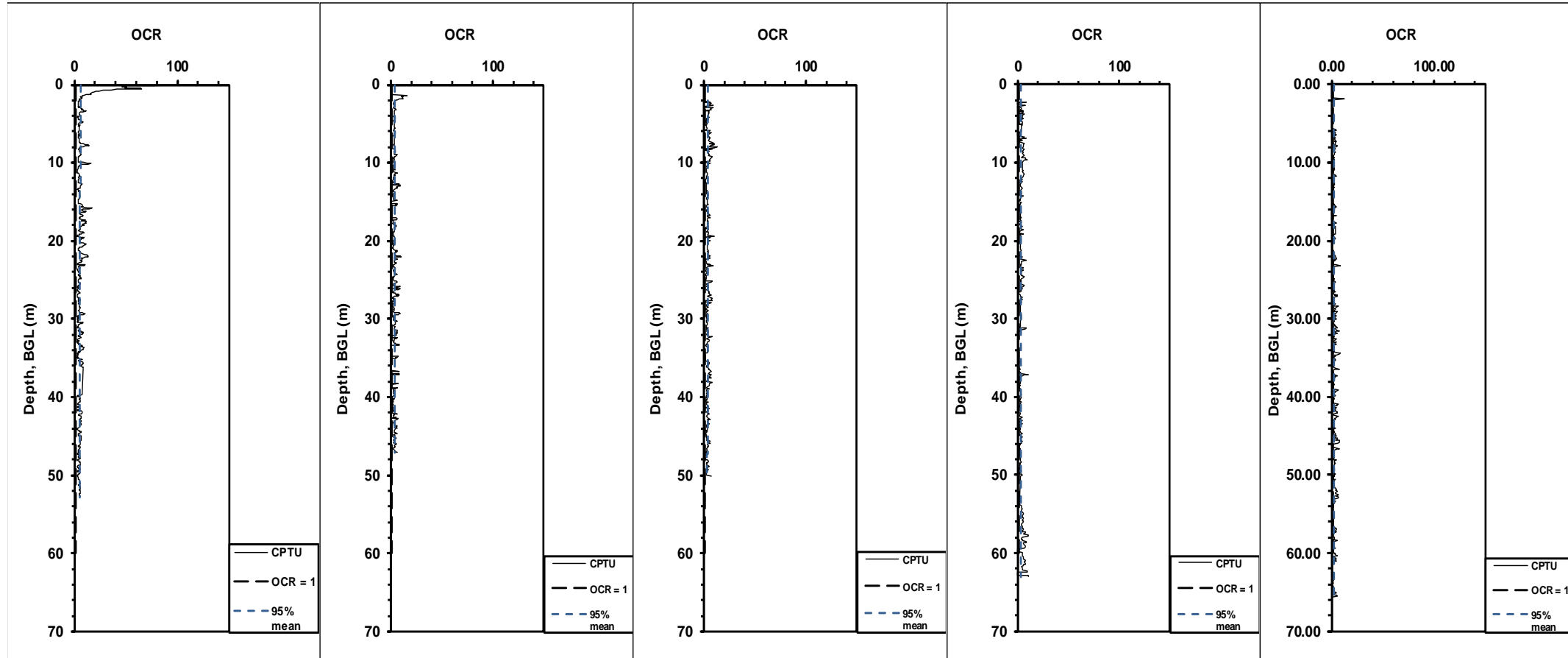
Μεταβολή του μοναδιαίου βάρους με το βάθος στις θέσεις P4/13, P4/14, P4/15, P4/16 και P4/17, αντίστοιχα.



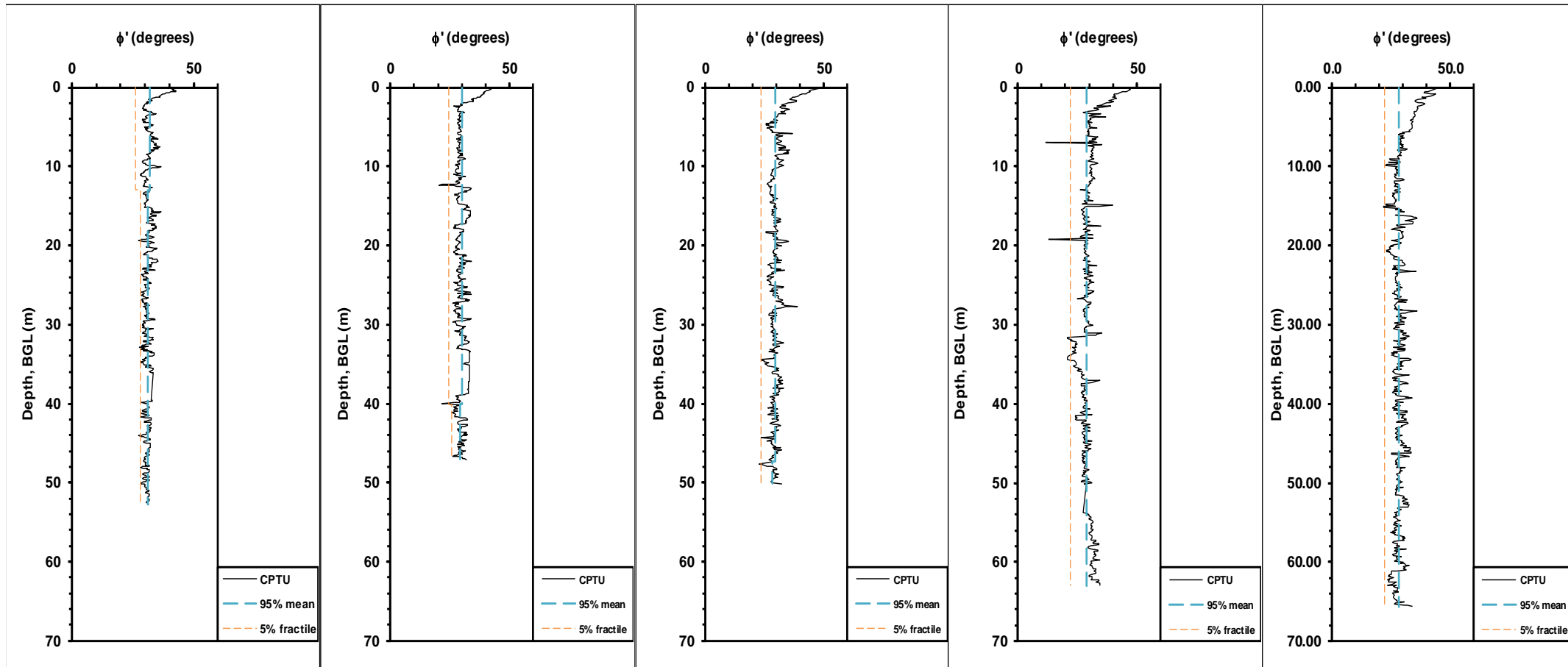
Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u με το βάθος στις θέσεις P4/13, P4/14, P4/15, P4/16 και P4/17, αντίστοιχα.



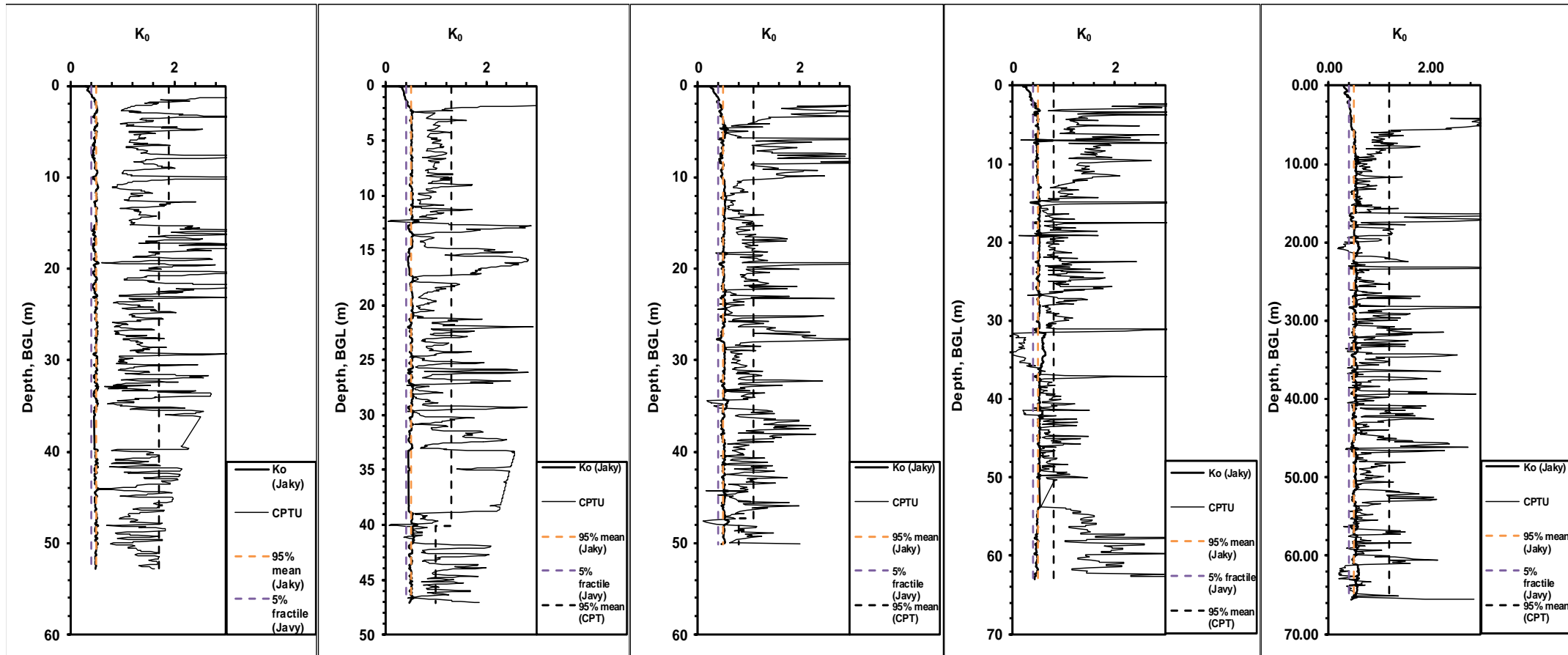
Μεταβολή του λόγου προστερεοποίησης OCR με το βάθος στις θέσεις P4/13, P4/14, P4/15, P4/16 και P4/17, αντίστοιχα.



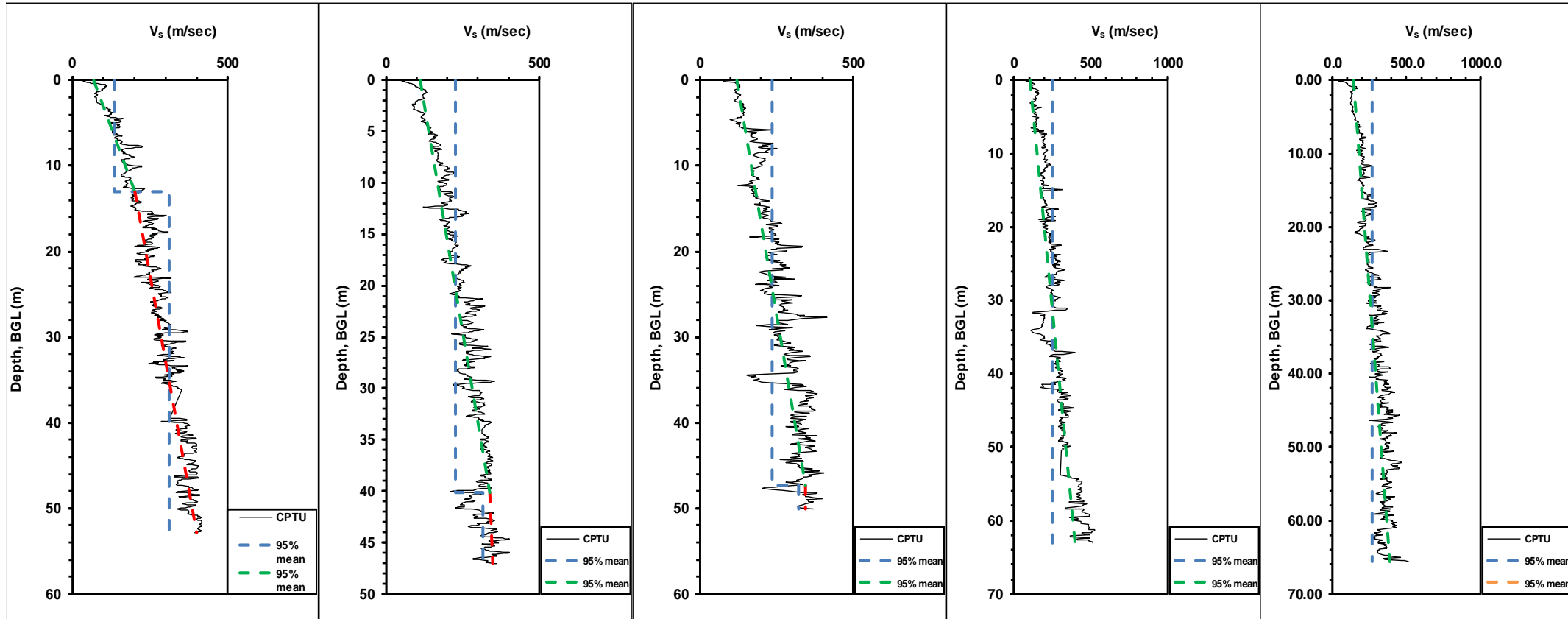
Μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ' με το βάθος στις θέσεις P4/13, P4/14, P4/15, P4/16 και P4/17, αντίστοιχα.



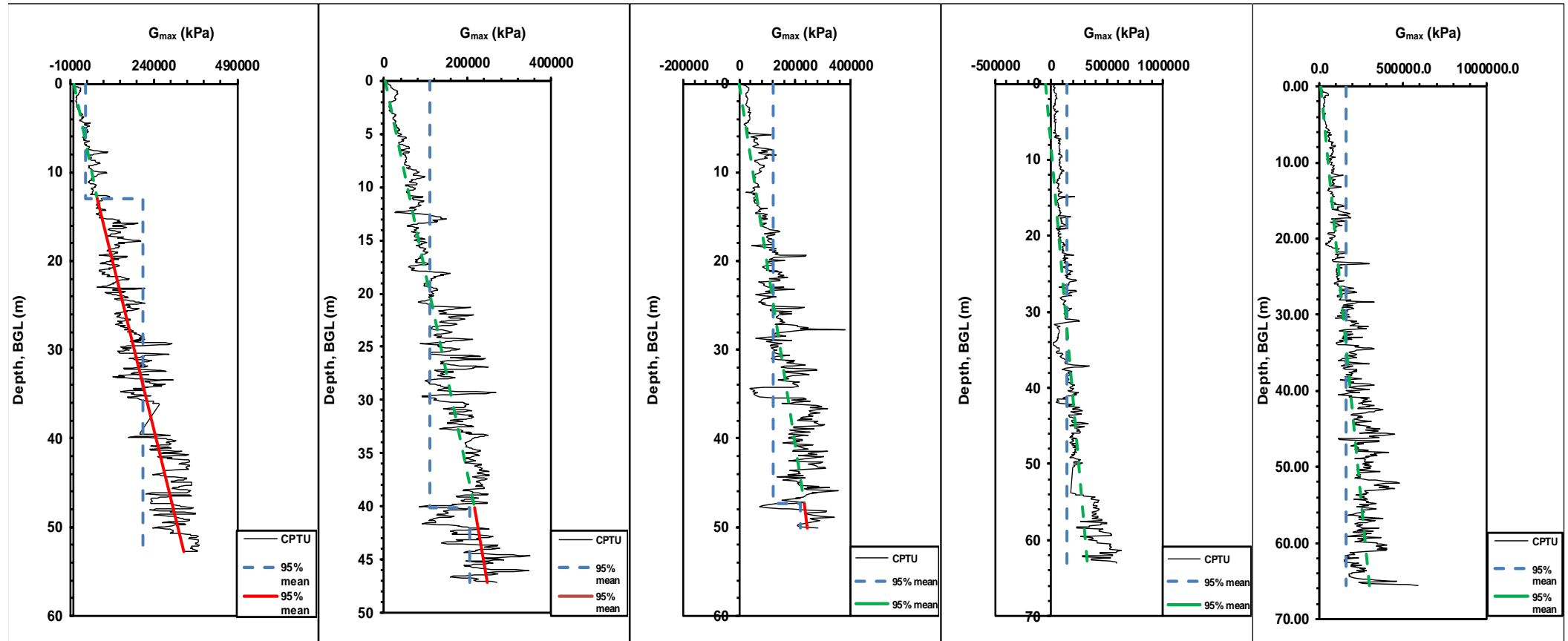
Μεταβολή του συντελεστή πλευρικής ώθησης K_0 με το βάθος στις θέσεις P4/13, P4/14, P4/15, P4/16 και P4/17, αντίστοιχα.



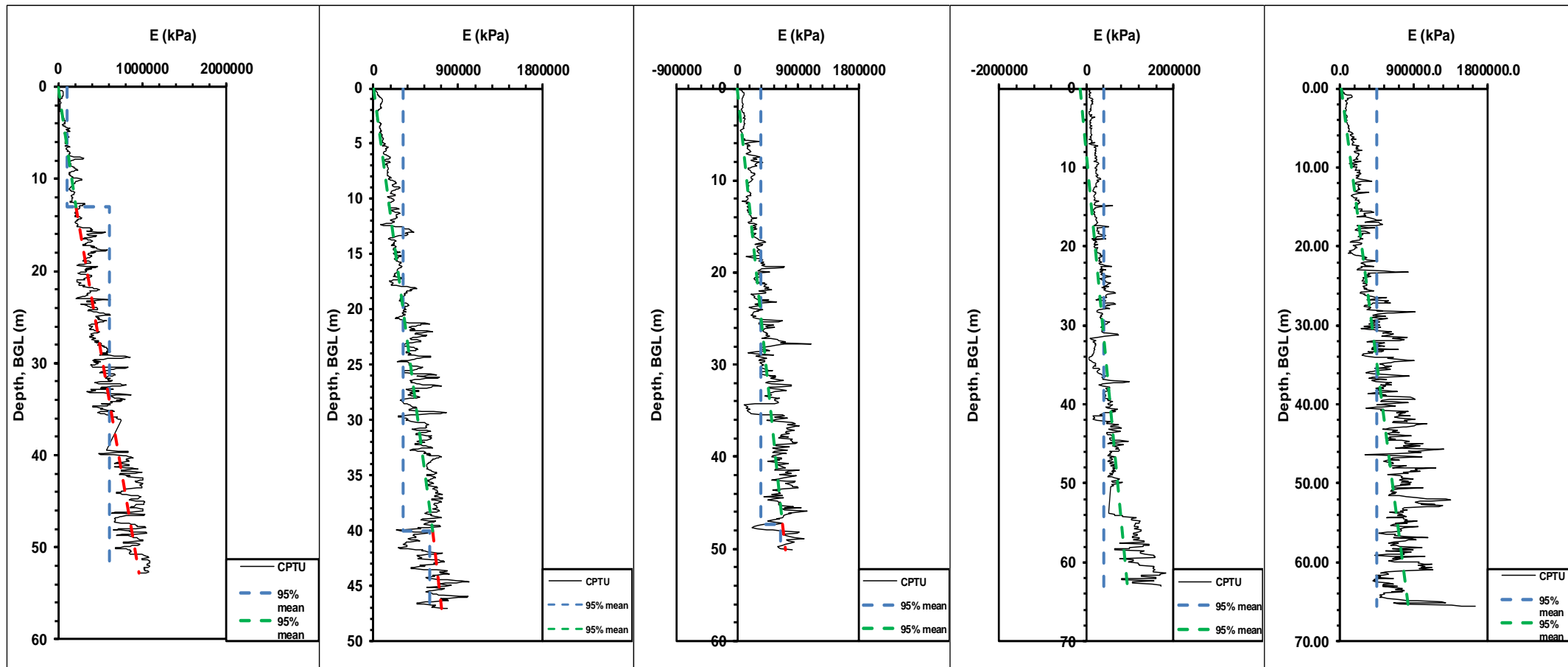
Μεταβολή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων V_s με το βάθος στις θέσεις P4/13, P4/14, P4/15, P4/16 και P4/17, αντίστοιχα.



Μεταβολή του μέτρου διάτμησης G_{max} με το βάθος στις θέσεις P4/13, P4/14, P4/15, P4/16 και P4/17, αντίστοιχα.



Μεταβολή του μέτρου παραμόρφωσης E με το βάθος στις θέσεις P4/13, P4/14, P4/15, P4/16 και P4/17, αντίστοιχα.



Μεταβολή του μέτρου συμπίεσης M με το βάθος στις θέσεις P4/13, P4/14, P4/15, P4/16 και P4/17, αντίστοιχα.

