

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



Πτυχιακή εργασία

ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ
ΓΑΙΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ
ΤΩΝ ΤΥΧΑΙΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

Ανδρέας Χειμωνίδης

Λεμεσός 2016

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή εργασία

ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ
ΓΑΙΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ
ΤΩΝ ΤΥΧΑΙΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

Ανδρέας Χειμωνίδης

Επιβλέπων καθηγητής
Δρ. Λύσανδρος Παντελίδης

Λεμεσός 2016

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Ανδρέας Χειμωνίδης 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Επίκουρο καθηγητή Δρ. Λύσανδρο Παντελίδη, για την άψογη συνεργασία και καθοδήγηση που μου παρείχε στην αποπεράτωση της πτυχιακής μου εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους που με τον τρόπο τους συνέβαλαν στην προσπάθεια μου να φέρω εις πέρας την πτυχιακή μου. Ειδικές ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην οικογένεια μου που πάντα βρίσκεται στο πλευρό μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα εδάφη, ακόμη και αυτά που στην κοινή πρακτική του μηχανικού θεωρούνται ομοιογενή, απέχουν περισσότερο ή λιγότερο από αυτή τη θεώρηση. Η χωρική μεταβλητότητα των εδαφών, μάλιστα είναι από τα πιο σύγχρονα και άκρως σημαντικά θέματα που απασχολούν τους γεωτεχνικούς μηχανικούς. Ωστόσο η μεταβλητότητα μπορεί να μελετηθεί αποτελεσματικά μέσω πιθανολογικών μεθόδων όπως με την Random Finite Element Method η οποία χρησιμοποιεί την ελαστοπλαστική θεωρία σε συνδυασμό με την μέθοδο των τυχαίων πεδίων.

Στις συνηθισμένες ντετερμινιστικές αναλύσεις ευστάθειας πρανών χρησιμοποιούνται συνήθως αντιπροσωπευτικές τιμές διατμητικής αντοχής εδάφους (χαρακτηριστικές τιμές ή μέσες τιμές). Στις τυπικές πιθανοκρατικές αναλύσεις η πιθανότητα αστοχίας (P_F) προκύπτει από ντετερμινιστικές αναλύσεις θεωρώντας το έδαφος χωρικά ομοιογενές. Η Μέθοδος RFEM πλεονεκτεί έναντι των παραδοσιακών τεχνικών ανάλυσης, αφού επιτρέπει να ληφθεί υπόψη η χωρική μεταβλητότητα των εδαφών μέσω του μήκους χωρικής συσχέτισης (θ) ή του κανονικοποιημένου μήκους ($\Theta = \theta/H$).

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία ερευνάται η επιρροή του μήκους χωρικής συσχέτισης (θ) των εδαφών στην πιθανότητα αστοχίας (P_F) των πρανών.

Αρχικά μελετήθηκε η ετερογένεια τεχνητού πρανού που βρίσκεται σε περιοχή κοντά στο χωριό Πεκτάκωμο της επαρχίας Λεμεσού. Εκτελέστηκε η δοκιμή DPL με δυο διαφορετικούς τρόπους για τον καθορισμό του μήκους χωρικής συσχέτισης (θ) του πρανού. Λήφθηκαν μετρήσεις της διείδυσης (mm) ανά 10 κρούσεις και μετρήσεις των κτύπων για διείδυση 10cm. Επίσης λήφθηκαν μετρήσεις ροπών με δυναμόκλειδο για να βρεθεί η αντίσταση του εδάφους σε τριβή ως ενδεικτική ένδειξη της διατμητικής αντοχής. Ακολούθως πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις με τη μέθοδο RFEM μέσω του λογισμικού Rslope2D για τον καθορισμό της πιθανότητας αστοχίας (P_F) διάφορων θεωρητικών παραδειγμάτων πρανών. Τέλος έγινε καθορισμός του εύρους της πιθανότητα αστοχίας (P_F) των αποτελεσμάτων του λογισμικού για το εύρος του κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) του πεδίου μελέτης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	xi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	xiii
1 Αβεβαιότητες στις ιδιότητες του εδάφους	1
1.1 Πηγές αβεβαιοτήτων	1
1.2 Εγγενής μεταβλητότητα.....	2
1.2.1 Χαρακτηριστικά υγρασίας και πυκνότητας.....	2
1.2.2 Χαρακτηριστικά πλαστικότητας	3
1.2.3 Χαρακτηριστικά αντοχής.....	4
1.3 Αβεβαιότητα στις μετρήσεις.....	5
2 Επιτόπου δοκιμές πενетроμέτρησης.....	7
2.1 Η Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης (SPT).....	7
2.2 Η Δοκιμή Διείσδυσης Κώνου (CPT).....	9
2.3 Dynamic Probing Test (DPL)	10
3 Πιθανολογική ανάλυση ευστάθειας πρανών.....	11
3.1 Πιθανολογική περιγραφή διατμητικής αντοχής.....	11
3.2 Προκαταρτική ντετερμινιστική μελέτη	13
3.3 Προσεγγιστική Μέθοδος Τυχαίας Μεταβλητής	14
3.4 Η Μέθοδος Random Finite Element Method (RFEM)	15
3.5 Παρατηρήσεις	19
4 Επιλύσεις με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.....	20

5 Έρευνα πεδίου.....	25
5.1 Επιλογή πεδίου.....	25
5.2 Μετρήσεις DPL (Dynamic Probing Light).....	25
5.2.1 Δοκιμή DPL.....	25
5.2.2 Αποτελέσματα μετρήσεων.....	28
6 Καθορισμός πιθανότητας αστοχίας (P_F) αποτελεσμάτων λογισμικού για κανονικοποιημένο μήκος χωρικής συσχέτισης (Θ) πεδίου.....	32
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	33
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	34
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	36

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 COV διάφορων ιδιοτήτων του εδάφους.....	2
Πίνακας 2 COV της εγγενούς μεταβλητότητας του εδάφους για την περιεκτικότητα σε υγρασία, τη μονάδα του βάρους και τη σχετική πυκνότητα	3
Πίνακας 3 COV της εγγενούς μεταβλητότητας του εδάφους για τους δείκτες πλαστικότητας 4	
Πίνακας 4 COV της εγγενούς μεταβλητότητας του εδάφους για τις παραμέτρους της αντοχής.....	5
Πίνακας 5 Περίληψη του συνόλου των σφαλμάτων των εργαστηριακών μετρήσεων κατά Phoon και Kulhawy (1999)	6
Πίνακας 6 Συντελεστής ασφαλείας για ομοιόμορφο έδαφος.....	13
Πίνακας 7 Εύρος πιθανότητας αστοχίας (P_F) για κανονικοποιημένο μήκος χωρικής συσχέτισης (Θ) πεδίου	32
Πίνακας 8 Μετρήσεις DPL - Θέση 1.....	36
Πίνακας 9 Μετρήσεις DPL - Θέση 2.....	37
Πίνακας 10 Μετρήσεις DPL - Θέση 3.....	37
Πίνακας 11 Μετρήσεις DPL - Θέση 4.....	37
Πίνακας 12 Μετρήσεις DPL - Θέση 5.....	37
Πίνακας 13 Μετρήσεις DPL - Θέση 6.....	37
Πίνακας 14 Μετρήσεις Ροπών – Θέσεις 1,2,3	37
Πίνακας 15 Μετρήσεις Ροπών – Θέσεις 4,5,6	37
Πίνακας 16 Τιμές μήκους χωρικής συσχέτισης (θ) του πεδίου	37
Πίνακας 17 Αποτελέσματα για Έδαφος CL, H=10m και Κλίση 2:1	37
Πίνακας 18 Αποτελέσματα για Έδαφος MH, H=10m και Κλίση 2:1	37
Πίνακας 19 Αποτελέσματα για Έδαφος CL, H=10m και Κλίση 1:1	37
Πίνακας 20 Αποτελέσματα για Έδαφος MH, H=10m και Κλίση 1:1	37
Πίνακας 21 Αποτελέσματα για Έδαφος CL, H=20m και Κλίση 2:1	37

Πίνακας 22 Αποτελέσματα για Έδαφος ΜΗ, H=20m και Κλίση 2:1	37
Πίνακας 23 Αποτελέσματα για Έδαφος CL, H=20m και Κλίση 1:1	37
Πίνακας 24 Αποτελέσματα για Έδαφος ΜΗ, H=20m και Κλίση 1:1	37
Πίνακας 25 Τυπικές τιμές διατμητικής αντοχής σύμφωνα με το Ενιαίο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών (USCS)	37
Πίνακας 26 Κατάταξη Εδαφών (USCS).....	37

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 Συσχετίσεις της αντίστασης διείσδυσης με τη σχετική πυκνότητα.....	8
Διάγραμμα 2 Συσχέτιση της αντίστασης διείσδυσης με τη γωνία τριβής	8
Διάγραμμα 3 Λογαριθμική κανονική κατανομή	12
Διάγραμμα 4 Γραμμική σχέση μεταξύ συντελεστή ασφαλείας F_S και διατμητικής αντοχής c	14
Διάγραμμα 5 Συσχέτιση πιθανότητας αστοχίας p_F και συντελεστή ασφαλείας F_S	14
Διάγραμμα 6 Συσχέτιση πιθανότητας αστοχίας p_F και συντελεστή διακύμανσης COV για διάφορες τιμές μ_c	15
Διάγραμμα 7 Συσχέτιση P_F και Θ βάση πεπερασμένων στοιχείων για διάφορες τιμές COV .	18
Διάγραμμα 8 Συσχέτιση P_F και COV βάση πεπερασμένων στοιχείων για διάφορες τιμές του Θ	18
Διάγραμμα 9 Σχέση Μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) με την πιθανότητα αστοχίας (P_f) για πρανές με ύψος $H=10m$ και Κλίση 2:1 των εδαφών CL και ML.....	22
Διάγραμμα 10 Σχέση Μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) με την πιθανότητα αστοχίας (P_f) για πρανές με ύψος $H=10m$ και Κλίση 1:1 των εδαφών CL και ML.....	22
Διάγραμμα 11 Σχέση Μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) με την πιθανότητα αστοχίας (P_f) για πρανές με ύψος $H=20m$ και Κλίση 2:1 των εδαφών CL και ML.....	23
Διάγραμμα 12 Σχέση Μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) με την πιθανότητα αστοχίας (P_f) για πρανές με ύψος $H=20m$ και Κλίση 1:1 των εδαφών CL και ML.....	23
Διάγραμμα 13 Διείσδυση ανά 10 κτύπους – Βάθος.....	29
Διάγραμμα 14 Ροπή ανά 10 κτύπους - Βάθος.....	29
Διάγραμμα 15 Κτύποι ανά 10cm - Βάθος.....	29
Διάγραμμα 16 Ροπή κτύπων 10cm - Βάθος.....	29
Διάγραμμα 17 Κανονική και Λογαριθμοκανονική κατανομή	30

Διάγραμμα 18 Σχέση μήκους χωρικής συσχέτισης (θ) με αριθμό κτύπων διείσδυσης.....	31
Διάγραμμα 19 Σχέση μήκους χωρικής συσχέτισης (θ) με διάστημα διείσδυσης X (cm)	31

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Δειγματολήπτης Terzaghi	7
Εικόνα 2 Ολλανδικός κώνος	9
Εικόνα 3 Παράδειγμα πρανούς	11
Εικόνα 4 Πλέγμα ανάλυσης ευστάθειας πρανών	16
Εικόνα 5 Τυπικό πλέγμα με $\Theta=0,2$	16
Εικόνα 6 Τυπικό πλέγμα με $\Theta=2,0$	16
Εικόνα 7 Πρανές με $H=10m$ και Κλίση 1:1	20
Εικόνα 8 Πρανές με $H=10m$ και Κλίση 2:1	21
Εικόνα 9 Πρανές με $H=20m$ και Κλίση 2:1	21
Εικόνα 10 Πρανές με $H=20m$ και Κλίση 1:1	21
Εικόνα 11 Περιοχή πεδίου μελέτης (Πεντάκωμο)	25
Εικόνα 12 Πρανές πεδίου μελέτης	26
Εικόνα 13 Θέσεις μετρήσεων του πρανούς μελέτης	27
Εικόνα 14 Δοκιμή DPL.....	27
Εικόνα 15 Μέτρηση ροπής με το δυναμόκλειδο	27
Εικόνα 16 Πρανές με Τύπο εδάφους CL, Ύψος $H=10m$, Κλίση 1:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=10m$	37
Εικόνα 17 Πρανές με Τύπο εδάφους CL, Ύψος $H=10m$, Κλίση 2:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=10m$	37
Εικόνα 18 Πρανές με Τύπο εδάφους CL, Ύψος $H=20m$, Κλίση 1:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=0,5m$	37
Εικόνα 19 Πρανές με Τύπο εδάφους CL, Ύψος $H=20m$, Κλίση 2:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=0,25m$	37
Εικόνα 20 Πρανές με Τύπο εδάφους MH, Ύψος $H=10m$, Κλίση 1:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=0,1m$	37

Εικόνα 21 Πρανές με Τύπο εδάφους ΜΗ, Ύψος $H=10\text{m}$, Κλίση 2:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=5\text{m}$	37
Εικόνα 22 Πρανές με Τύπο εδάφους ΜΗ, Ύψος $H=20\text{m}$, Κλίση 1:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=5\text{m}$	37
Εικόνα 23 Πρανές με Τύπο εδάφους ΜΗ, Ύψος $H=20\text{m}$, Κλίση 2:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=1\text{m}$	37

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, η παραδοσιακή ανάλυση ευστάθειας πρανών, αντικαθίσταται σταδιακά από την ανάλυση με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων. Μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικές μέθοδοι στους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται στην Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων παρέχοντας γρηγορότερες και μεγαλύτερης ακρίβειας απαντήσεις στα προβλήματα που αντιμετωπίζει ένας Γεωτεχνικός Μηχανικός. Το πρόβλημα με την αβεβαιότητα στο έδαφος είναι αρκετά σημαντικό στη Γεωτεχνική Μηχανική αφού οι ιδιότητες του δεν μπορούν να προσδιοριστούν απόλυτα λόγω της μεγάλης ετερογένειας του.

Λόγω των υψηλά οικονομικών απαιτήσεων μιας γεώτρησης δεν υπήρχαν επαρκή δείγματα για εργαστηριακές μελέτες και καθορισμό των ιδιοτήτων του εδάφους, ώστε να γινόταν ένας σωστός σχεδιασμός. Έτσι ο Μηχανικός περιοριζόταν σε πολύ λίγα στοιχεία για τη γνώση του εδάφους.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω οι Fenton και Griffiths το 1992 δημιούργησαν μια πιθανολογική μέθοδο γεωτεχνικής ανάλυσης, την Random Finite Element Method που συνδυάζει τη Μέθοδο Τυχαίων Πεδίων με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στην πιθανοκρατική ανάλυση ευστάθειας εδαφικών πρανών για τον καθορισμό της πιθανότητας αστοχίας (P_F).

Η παρούσα πτυχιακή αποτελείται από έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αβεβαιότητες στις ιδιότητες του εδάφους, στο δεύτερο οι επιτόπου δοκιμές πενетроμέτρησης, στο τρίτο η πιθανολογική ανάλυση ευστάθειας πρανών, στο τέταρτο οι επιλύσεις με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, στο πέμπτο η έρευνα πεδίου και στο έκτο ο καθορισμός της πιθανότητας αστοχίας (PF) των αποτελεσμάτων του λογισμικού για το κανονικοποιημένο μήκος χωρικής συσχέτισης (Θ) του πεδίου.

1 Αβεβαιότητες στις ιδιότητες του εδάφους

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί νέες και δημιουργικές μέθοδοι γεωτεχνικού σχεδιασμού. Ωστόσο, οι αβεβαιότητες δεν έπαψαν να υπάρχουν αφού ελάχιστοι ασχολούνται με αυτές. Για να γίνει λεπτομερή επισκόπηση της πηγής των αβεβαιοτήτων πρέπει να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων η οποία θα τις επεξεργάζεται.

1.1 Πηγές αβεβαιοτήτων

Οι αβεβαιότητες που συνδέονται με γεωτεχνικά προβλήματα σύμφωνα με τους Lacasse και Nadim (1996) μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες, τις τυχαίες (εγγενής) αβεβαιότητες και τις επιστημονικές (λόγω έλλειψης γνώσης) αβεβαιότητες. Στις τυχαίες αβεβαιότητες υπάγεται η φυσική τυχαιότητα των συστημάτων η οποία είναι συνάρτηση της χωρικής μεταβλητότητας. Στις επιστημονικές αβεβαιότητες εμπίπτουν οι αβεβαιότητες στις μετρήσεις που μπορεί να οφείλονται είτε σε ατέλειες των οργάνων που χρησιμοποιούνται είτε στην μέθοδο που επιλέγεται να ακολουθηθεί λόγω σφαλμάτων των χρηστών.

Λόγω των πιο πάνω οι ιδιότητες του εδάφους ορίζονται ως τυχαίες μεταβλητές που περιγράφονται από την μέση τιμή (μ), την τυπική απόκλιση (σ), τον συντελεστή διασποράς (COV) και μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF).

Σε πιθανολογική ανάλυση, το μοντέλο αβεβαιότητας συχνά αντιπροσωπεύεται από κανονική ή λογαριθμική κατανομή. Είναι δύσκολο να αξιολογηθεί αλλά μπορεί να συσχετιστεί με ανάλογα μοντέλα ντετερμινιστικού υπολογισμού, με γνωματεύσεις ειδικών και με αντίστοιχες μελέτες (Lacasse και Nadim, 1996).

Οι Lacasse και Nadim (1996) μετά από μελέτη της διαθέσιμης βιβλιογραφίας και εργαστηριακών αποτελεσμάτων, εισηγήθηκαν τιμές συντελεστή διασποράς καθώς και την κατανομή που ακολουθούν οι διάφορες ιδιότητες του εδάφους. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές.

Πίνακας 1 COV διάφορων ιδιοτήτων του εδάφους

Soil property	Soil type	Prob.distr. function	Mean	COV
Cone resistance	Sand Clay	LN N/LN	*	*
Undrained shear strength, s_u^{**}	Clay (triax) Clay (index s_u) Clayey silt	LN LN N	*	5 - 20% 10 - 35% 10 - 30%
Ratio s_u / σ'_{vo}	Clay	N/LN	*	5 - 15%
Plastic limit	Clay	N	0.13-0.23	3 - 20%
Liquid limit	Clay	N	0.30-0.80	3 - 20%
Submerged unit weight	All soils	N	5-11 (kN/m ³)	0 - 10%
Friction angle	Sand	N	*	2 - 5%
Void ratio, porosity, initial void ratio	All soils	N	*	7 - 30%
Overconsolidation ratio	Clay	N/LN	*	10 - 35%

N/LN Normal and lognormal distribution

* Values are site- and soil type-dependent

** Undrained shear strength is anisotropic and depends on the type of stresses imposed. The coefficient of variation for good quality tests (consolidated triaxial compression/ extension, direct simple shear, true triaxial, plane strain) is expected to be 5-20%. For extension tests, because of generally fewer data available and at times more difficult testing conditions, the coefficient of variation may be higher.

1.2 Εγγενής μεταβλητότητα

1.2.1 Χαρακτηριστικά υγρασίας και πυκνότητας

Η πυκνότητα του εδάφους είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της αντοχής του, όταν σε αυτό εδράζονται κατασκευές. Η πυκνότητα συνήθως καθορίζεται με μέτρηση του βάρους και του όγκου δειγμάτων εδάφους στο εργαστήριο.

Οι Lacasse και Nadim (1996), εισηγούνται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) του ειδικού βάρους (ή της πυκνότητας) για όλα τα είδη εδαφών να ακολουθεί κανονική κατανομή.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή διασποράς (COV) για την περιεχόμενη υγρασία (w_n), συνολικό ειδικό βάρος (γ), ειδικό ξηρό βάρος (γ_d), φαινόμενο ειδικό βάρος μερικώς κορεσμένο (γ_b), σχετική πυκνότητα (D_r), ειδική βαρύτητα (G_s) και βαθμός κορεσμού (S).

Πίνακας 2 COV της εγγενούς μεταβλητότητας του εδάφους για την περιεκτικότητα σε υγρασία, τη μονάδα του βάρους και τη σχετική πυκνότητα

Property (units)	Soil Type	No. of Data Groups	No. of Tests Per Group		Property Value		Property COV (%)		Note
			Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	
w_n (%)	Fine-grained	40	17 – 439	252	13 – 105	29	7 – 46	18	1
	Silty clay	*	*	*	*	*	20	*	3
	clay	*	*	*	*	*	13	*	
	*	18	*	*	*	*	*	17.7	4
γ (kN/m ³)	Fine-grained	6	5 – 3200	564	14 – 20	17.5	3 – 20	9	1
γ	*	*	*	*	*	*	3	*	3
γ	*	12	*	*	*	*	*	7.1	4
γ_d (kN/m ³)	Fine-grained	8	4 – 315	122	13 – 18	15.7	2 – 13	7	1
γ_b (kN/m ³)	All soils	*	*	*	5 – 11	*	0 – 10	*	2
$D_r^{(a)}$ (%)	Sand	5	*	*	30 – 70	50	11 – 36	19	1
$D_r^{(b)}$ (%)	Sand	5	*	*	30 – 70	50	49 – 74	61	
G_s	*	*	*	*	*	*	2	*	3
S	*	*	*	*	*	*	10	*	3

*Not reported.
(a) Total variability for direct method of determination.
(b) Total variability for indirect determination using SPT values.
Notes:
(1) Phoon and Kulhawy (1999).
(2) Lacasse and Nadim (1996). No comments made on whether measurement variability was included.
(3) Harr (1987). No comments made on whether measurement variability was included.
(4) Kulhawy (1992). No comments made on whether measurement variability was included.

1.2.2 Χαρακτηριστικά πλαστικότητας

Τα χαρακτηριστικά της πλαστικότητας είναι σημαντικά για την ταξινόμηση των εδαφών και τον καθορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς τους. Ο δείκτης πλαστικότητας καθορίζεται εργαστηριακά μέσω των ορίων Atterberg. Τα όρια Atterberg χαρακτηρίζονται από το όριο υδαρότητας (LL), το όριο πλαστικότητας (PL) και το όριο συρρίκνωσης (SL).

Σύμφωνα με τους Lacasse και Nadim (1996) τα όρια Atterberg ακολουθούν κανονική κατανομή.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή διασποράς (COV) για το όριο υδαρότητας (LL), το όριο πλαστικότητας (PL), τον δείκτη πλαστικότητας (PI) και τον δείκτη υδαρότητας (LI).

Πίνακας 3 COV της εγγενούς μεταβλητότητας του εδάφους για τους δείκτες πλαστικότητα

Property (%)	Soil Type	No. of Data Groups	No. of Tests Per Group		Property Value		Property COV (%)		Note
			Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	
LL	Fine-grained	38	15 – 299	129	27 – 89	51	7 – 39	18	1
	Clay	*	*	*	30 – 80	*	3 – 20	*	2
	*	28	*	*	*	*	*	11.3	4
PL	Fine-grained	23	32 – 299	201	14 – 27	22	6 – 34	16	1
	Clay	*	*	*	13 – 23	*	3 – 20	*	2
	*	27	*	*	*	*	*	11.3	4
PI	Fine-grained	33	15 – 299	120	12 – 44	25	9 – 57	29	1
LI	Clay, silt	2	32 – 118	75	*	0.094	60 – 88	74	1

* Not reported.
Notes:
(1) Phoon and Kulhawy (1999).
(2) Lacasse and Nadim (1996). No comments made on whether measurement variability was included.
(3) Harr (1987). No comments made on whether measurement variability was included.
(4) Kulhawy (1992). No comments made on whether measurement variability was included.

1.2.3 Χαρακτηριστικά αντοχής

Οι παράμετροι αντοχής του εδάφους είναι ίσως οι πιο σημαντικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην γεωτεχνική μηχανική. Οι περισσότερες μεθοδολογίες γεωτεχνικού σχεδιασμού στηρίζονται στην αντοχή των εδαφών ως πρωταρχικό και κυριότερο παράγοντα. Η αναγνώριση των αβεβαιοτήτων στις ιδιότητες της αντοχής του εδάφους είναι πολύ σημαντική καθώς μπορεί να επέλθουν αστοχίες και κατ' επέκταση σοβαρά οικονομικά προβλήματα.

Οι Lacasse και Nadim (1996) και Wolff (1996) εισηγούνται όπως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) για την γωνία τριβής (ϕ), να ακολουθεί κανονική κατανομή σε άμμους. Επίσης εισηγούνται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) για αστράγγιστη διατμητική αντοχή (s_u) για ιλυώδες εδάφη να ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή ενώ για αργιλικά εδάφη να ακολουθεί κανονική κατανομή. Οι Lacasse και Nadim (1996) προτείνουν επίσης η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) για τον λόγο αστράγγιστης διατμητικής αντοχής s_u/σ'_{v0} να ακολουθείται κανονική είτε λογαριθμοκανονική κατανομή για αργιλώδη εδάφη.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή διασποράς (COV) για την διατμητική αντοχή (s_u) και την γωνία τριβής (ϕ) για διάφορους τύπους εδαφών.

Πίνακας 4 COV της εγγενούς μεταβλητότητας του εδάφους για τις παραμέτρους της αντοχής

Property (units)	Soil Type	No. of Data Groups	No. of Tests Per Group		Property Value		Property COV (%)		Note
			Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	
$\bar{\phi}$ (°)	Sand	7	29 – 136	62	35 – 41	37.6	5 – 11	9	1
	Clay, silt	12	5 – 51	16	9 – 33	15.3	10 – 56	21	
	Clay, silt	9	*	*	17 – 41	33.3	4 – 12	9	
	*		20	*	*	*	*	*	12.6
$\tan \bar{\phi}$	Clay, silt	4	*	*	0.24 – 0.69	0.509	6 – 46	20	1
$\tan \bar{\phi}$	Clay, silt	3	*	*	*	0.615	6 – 46	23	
$\tan \bar{\phi}$	Sand	13	6 – 111	45	0.65 – 0.92	0.744	5 – 14	9	1
	*	7	*	*	*	*	*	11.3	4
$\bar{\phi}$ (°)	Sand	*	*	*	*	*	2 – 5	*	2
ϕ (°)	Gravel	*	*	*	*	*	7	*	3
	Sand	*	*	*	*	*	12	*	
$s_u^{(a)}$ (kPa)	Fine-grained	38	2 – 538	101	6 – 412	100	6 – 56	33	1
$s_u^{(b)}$ (kPa)	Clay, Silt	13	14 – 82	33	15 – 363	276	11 – 49	22	
$s_u^{(c)}$ (kPa)	Clay	10	12 – 86	47	130 – 713	405	18 – 42	32	
$s_u^{(d)}$ (kPa)	Clay	42	24 – 124	48	8 – 638	112	6 – 80	32	
		38	*	*	*	*	*	33.8	3
$s_u^{(e)}$ (kPa)	Clay	*	*	*	*	*	5 – 20	*	2
$s_u^{(f)}$ (kPa)	Clay	*	*	*	*	*	10 – 35	*	
$s_u^{(g)}$ (kPa)	Clayey silt	*	*	*	*	*	10 – 30	*	
$c^{(h)}$		*	*	*	*	*	40	*	3
s_u/σ'_{vs}	Clay	*	*	*	*	*	5 – 15	*	2

* Not reported.
(a) Unconfined compression test.
(b) Unconsolidated-undrained triaxial compression test.
(c) Consolidated isotropic undrained triaxial compression test.
(d) Laboratory test not reported.
(e) Triaxial test.
(f) Index s_u .
(g) No specification on how the parameter was defined.
Notes:
(1) Phoon and Kulhawy (1999).
(2) Lacasse and Nadim (1996). No comments made on whether measurement variability was included.
(3) Harr (1987). No comments made on whether measurement variability was included.
(4) Kulhawy (1992). No comments made on whether measurement variability was included.

1.3 Αβεβαιότητα στις μετρήσεις

Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων των ιδιοτήτων του εδάφους προκύπτουν πολλές αβεβαιότητες οι οποίες οφείλονται στα σφάλματα του εργαστηριακού εξοπλισμού και τα σφάλματα των ατόμων που διενεργούν την εργαστηριακή δοκιμή.

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή διασποράς (COV) για το συνολικό σφάλμα κατά τις μετρήσεις από εργαστηριακές δοκιμές σύμφωνα με τους Phoon και Kulhawy, 1999.

Πίνακας 5 Περίληψη του συνόλου των σφαλμάτων των εργαστηριακών μετρήσεων κατά Phoon και Kulhawy (1999)

Property (units)	Soil Type	No. of Data Groups	No. of Tests Per Group		Property Value		Property COV (%)	
			Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
$s_u^{(a)}$ (kPa)	Clay, silt	11	*	13	7 – 407	125	8 – 38	19
$s_u^{(b)}$ (kPa)	Clay, silt	2	13 – 17	15	108 – 130	119	19 – 20	20
$s_u^{(c)}$ (kPa)	Clay	15	*	*	4 – 123	29	5 – 37	13
$\bar{\phi}^{(a)}$ (°)	Clay, silt	4	9 – 13	10	2 – 27	19.1	7 – 56	24
$\bar{\phi}^{(b)}$ (°)	Clay, silt	5	9 – 13	11	24 – 40	33.3	3 – 29	13
$\bar{\phi}^{(b)}$ (°)	Sand	2	26	26	30 – 35	32.7	13 – 14	14
$\tan \bar{\phi}^{(a)}$ (°)	Clay, silt	6	*	*	*	*	2 – 22	8
$\tan \bar{\phi}^{(b)}$ (°)	Clay	2	*	*	*	*	6 – 22	14
w_n (%)	Fine-grained	3	82 – 88	85	16 – 21	18	6 – 12	8
LL, (%)	Fine-grained	26	41 – 89	64	17 – 113	36	3 – 11	7
PL, (%)	Fine-grained	26	41 – 89	62	12 – 35	21	7 – 18	10
PI, (%)	Fine-grained	10	41 – 89	61	4 – 44	23	5 – 51	24
γ_s (kN/m ²)	Fine-grained	3	82 – 88	85	16 – 17	17.0	1 – 2	1

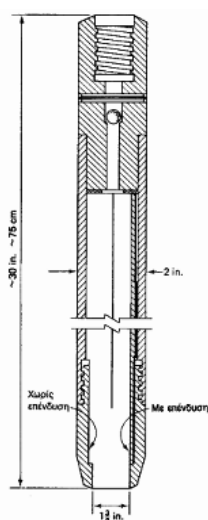
* Not reported.
(a) Triaxial compression test.
(b) Direct shear test.
(c) Laboratory vane shear test.

2 Επιτόπου δοκιμές πενετρομέτρησης

Η έρευνα του υπεδάφους συχνά συνδυάζεται και με την εκτέλεση επιτόπου δοκιμών. Οι δοκιμές αυτές πλεονεκτούν (σε σχέση με τις Εργαστηριακές), επειδή ελέγχουν τις ιδιότητες του εδάφους στη φυσική του κατάσταση, χωρίς να παρεμβληθεί η δειγματοληψία και οι λοιπές διαδικασίες που το διαταράσσουν και μεταβάλλουν τη δομή του. Επιπλέον, πολλές από τις επιτόπου δοκιμές εκτελούνται συνεχώς με το βάθος (π.χ. η δοκιμή Διείσδυσης Κώνου), οπότε λαμβάνεται μία συνεχής καταγραφή των εδαφικών χαρακτηριστικών με το βάθος. Το κύριο μειονέκτημα των επιτόπου δοκιμών είναι ότι οι εντατικές καταστάσεις που επιβάλλουν στο έδαφος είναι ανομοιογενείς και τις περισσότερες φορές άγνωστες. Έτσι, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των επιτόπου δοκιμών είναι δυσχερής και συνήθως βασίζεται σε εμπειρικές συσχετίσεις με περιορισμένο πεδίο εφαρμογής. Στα επόμενα περιγράφονται συνοπτικά μερικές από τις συνηθέστερες επιτόπου δοκιμές.

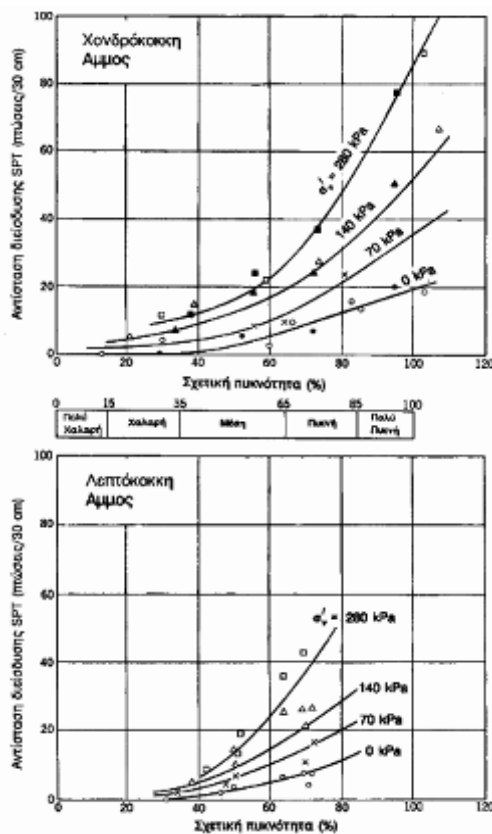
2.1 Η Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης (SPT)

Η δοκιμή αυτή είναι μία από τις περισσότερο διαδεδομένες επιτόπου δοκιμές, όχι τόσο για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της, όσο λόγω της πολυετούς εφαρμογής της και των ποικίλων (εμπειρικών) συσχετίσεων των αποτελεσμάτων της με μηχανικές ιδιότητες του εδάφους (αντοχή, γωνία τριβής, συμπιεστότητα, σχετική πυκνότητα κλπ.). Η δοκιμή βασίζεται στην προχώρηση του ειδικού διαιρετού δειγματολήπτη Terzaghi (Εικόνα 1) με πτώση βάρους 63.5kg από ύψος 76cm.

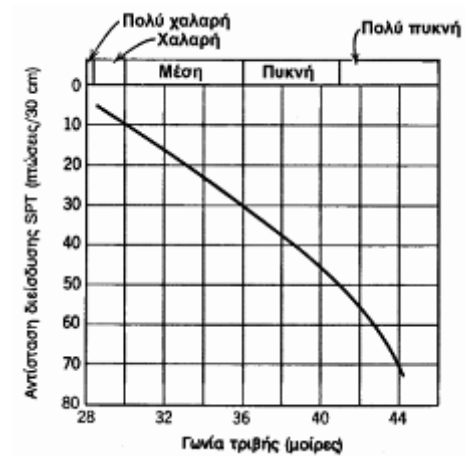


Εικόνα 1 Δειγματολήπτης Terzaghi

Κατά τη δοκιμή μετρείται ο αριθμός των πτώσεων (N =αντίσταση διείσδυσης) που απαιτείται για την προώθηση του δειγματολήπτη κατά 30 cm (μετά από μία αρχική προώθηση 15 cm, κατά την οποία δεν συνυπολογίζεται ο αριθμός πτώσεων). Μετά το τέλος της δοκιμής, από το εσωτερικό του δειγματολήπτη ανακτάται και (διαταραγμένο) εδαφικό δείγμα. Η δοκιμή SPT αναπτύχθηκε κατ' αρχήν για την εκτίμηση της σχετικής πυκνότητας των αμμωδών εδαφών, στα οποία η αδιατάρακτη δειγματοληψία είναι ιδιαίτερα δυσχερής. Σήμερα, η δοκιμή SPT χρησιμοποιείται σε όλους σχεδόν τους τύπους εδαφών κυρίως για την εκτίμηση της αντοχής τους. Μερικές από τις εμπειρικές συσχετίσεις των αποτελεσμάτων της δοκιμής SPT με μηχανικές ιδιότητες του εδάφους παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 1 και 2. Στο Διάγραμμα 1 συσχετίζει την αντίσταση διείσδυσης N με τη σχετική πυκνότητα χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων άμμων για διάφορα βάθη εκτέλεσης της δοκιμής (που εκφράζονται με την κατακόρυφη ενεργό τάση σ'_v). Στο Διάγραμμα 2 συσχετίζει την αντίσταση διείσδυσης N με τη γωνία τριβής των κοκκωδών εδαφών.



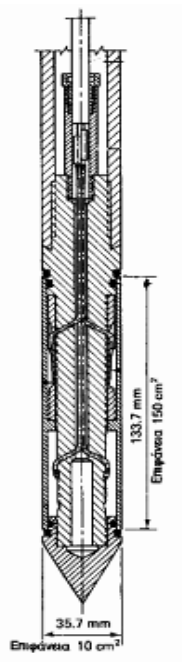
Διάγραμμα 2 Συσχετίσεις της αντίστασης διείσδυσης με τη σχετική πυκνότητα



Διάγραμμα 1 Συσχέτιση της αντίστασης διείσδυσης με τη γωνία τριβής

2.2 Η Δοκιμή Διείσδυσης Κώνου (CPT)

Η δοκιμή αυτή, που ονομάζεται και δοκιμή του Ολλανδικού Πενετρομέτρου, χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής μαλακών έως σφιγρών αργίλων και της σχετικής πυκνότητας άμμων. Η δοκιμή βασίζεται στη συνεχή προχώρηση (με ταχύτητα 1-2 m/min) ενός κώνου με αιχμή 60 μοιρών και διατομή 10cm² (Εικόνα 2).



Εικόνα 2 Ολλανδικός κώνος

Κατά τη διείσδυση του κώνου μετριέται η αντίσταση στην προχώρηση της αιχμής και η αντίσταση (πλευρική τριβή) στην προχώρηση του πλευρικού μανδύα που έχει επιφάνεια 100cm². Η δοκιμή Διείσδυσης Κώνου σήμερα εκτελείται με "ηλεκτρικούς κώνους", στους οποίους οι μετρήσεις λαμβάνονται με ηλεκτρικούς μετατροπείς και καταγράφονται αυτομάτως αναλογικά ή ψηφιακά. Επίσης, συχνά τοποθετείται στην περιοχή της αιχμής και ένα πιεζόμετρο για τη μέτρηση της πίεσης πόρων που αναπτύσσεται κατά την προώθηση του κώνου. Η δοκιμή εκτελείται χωρίς δειγματοληψία και συνεπώς η στρωματογραφία του εδάφους πρέπει να συναχθεί από τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Από τις μετρήσεις της αντοχής αιχμής (q_c), της πλευρικής τριβής (f_s) και της αναπτυσσόμενης πίεσης πόρων (u_s) σε συνδυασμό με την εμπειρία που έχει αποκτηθεί κατά την πολυετή εφαρμογή της μεθόδου

αλλά και τη βαθμονόμησή της με την εκτέλεση μερικών δοκιμών δίπλα σε δειγματοληπτικές γεωτρήσεις στην περιοχή του έργου, συνάγεται η στρωματογραφία και η συνεκτικότητα / σχετική πυκνότητα των εδαφικών σχηματισμών. Τα κύρια πλεονεκτήματα της δοκιμής είναι η ταχύτητα εκτέλεσής της και η συνεχής καταγραφή των εδαφικών χαρακτηριστικών με το βάθος, ενώ το κύριο μειονέκτημα είναι ότι δεν λαμβάνονται εδαφικά δείγματα. Η δοκιμή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εδάφη με χάλικες ή σε σκληρές αργίλους, λόγω αδυναμίας προώθησης του κώνου.

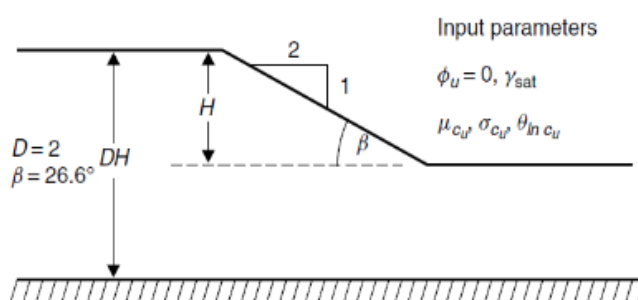
2.3 Dynamic Probing Test (DPL)

Η δοκιμή DPL είναι μια επιτόπου δοκιμή που περιλαμβάνει την οδήγηση ενός μεταλλικού κώνου μέσα στο έδαφος ακολουθώντας μια σειρά χαλύβδινων ράβδων μήκους 1m. Οι ράβδοι διεισδύουν στο έδαφος από την πτώση σφύρας βάρους 10kg που αφήνεται ελεύθερη από ύψος 760mm. Ο αριθμός των κτύπων που χρειάζονται για διείσδυση του κώνου 100mm που σύμφωνα με το πρότυπο πρέπει να κυμαίνονται από 3 έως 50, καταγράφεται μέχρι ο κώνος να φθάσει στο απαιτούμενο βάθος ή μέχρι να φθάσει σε ισχυρή ζώνη εδάφους και χρειάζεται μεγάλος αριθμός κτύπων. Η δοκιμή DPL έχει πολλές εφαρμογές, για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί σε ποια απόσταση υπάρχει αλλαγή στρώσης από μαλακά σε σκληρά εδάφη. Επίσης κατά τη δοκιμή παραλαμβάνεται ροπή για κάθε 1m διείσδυσης του κώνου με δυναμόκλειδο το οποίο μπορεί να παραλάβει ροπή από 5Nm έως 200Nm. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη δοκιμή είναι, ο τύπος και τα χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού, η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα και ο τρόπος χρησιμοποίησης του εξοπλισμού κατά την εκτέλεση της δοκιμής.

3 Πιθανολογική ανάλυση ευστάθειας πρανών

Οι πρώτες πιθανοκρατικές αναλύσεις πρανών εμφανίστηκαν στην βιβλιογραφία (Lacasse, Nadim, Griffiths, Fenton κ.α.) την δεκαετία του 1970 ενώ το ενδιαφέρον για αυτού του είδους τις αναλύσεις αυξάνεται συνεχώς.

Το υπό εξέταση πρανές παρουσιάζεται στην Εικόνα 3. Αποτελείται από αργιλικό υλικό κάτω από αστράγγιστες συνθήκες με παραμέτρους διατμητικής αντοχής $\phi_u=0$ και c_u . Με β συμβολίζεται η γωνία που σχηματίζει το πρανές με το έδαφος, με H το ύψος του πρανού και με DH το ολικό ύψος. Το κορεσμένο ειδικό βάρος του εδάφους συμβολίζεται με γ_{sat} το οποίο θεωρείται σταθερό ενώ ως τυχαία μεταβλητή θεωρείται το c_u . Η διατμητική αντοχή σε αστράγγιστες συνθήκες συμβολίζεται με c και είναι ίση με $c = c_u / (\gamma_{sat} * H)$.



Εικόνα 3 Παράδειγμα πρανού

3.1 Πιθανολογική περιγραφή διατμητικής αντοχής

Η διατμητική αντοχή (c_u) θεωρούμε ότι χαρακτηρίζεται στατιστικά από λογαριθμοκανονική κατανομή με μέση τιμή (μ_c) και τυπική απόκλιση (σ_c).

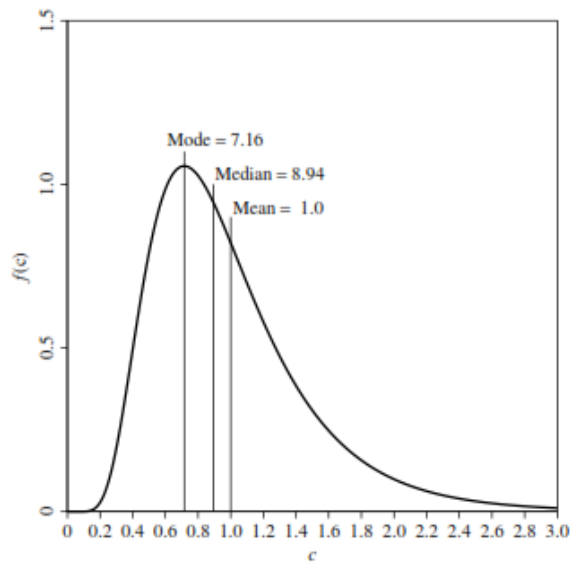
Μέση τιμή πληθυσμού μεγέθους (N) :
$$\bar{x} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N}$$

Μέση τιμή δείγματος μεγέθους (n) :
$$\mu = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

Τυπική απόκλιση πληθυσμού μεγέθους (N):
$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2$$

Τυπική απόκλιση δείγματος μεγέθους (n): $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$

Στο Διάγραμμα 3 παρουσιάζεται μια λογαριθμοκανονική κατανομή με μέση τιμή $\mu_c = 1$ και τυπική απόκλιση $\sigma_c = 0.5$.



Διάγραμμα 3 Λογαριθμική κανονική κατανομή

Η πιθανότητα η διατμητική αντοχή (c_u) να πέσει κάτω από μια δεδομένη τιμή μπορεί να υπολογισθεί από τους τυπικούς πίνακες μετά από μετασχηματισμό τους από λογαριθμοκανονική κατανομή σε κανονική κατανομή όπως φαίνεται παρακάτω:

$$P[c < a] = P[\ln c < \ln a] = P\left[Z < \frac{\ln a - \mu_{\ln c}}{\sigma_{\ln c}}\right] = \Phi\left[\frac{\ln a - \mu_{\ln c}}{\sigma_{\ln c}}\right]$$

Οι παράμετροι $\sigma_{\ln c}^2$ και $\mu_{\ln c}$ δίνονται από τους παρακάτω μετασχηματισμούς:

$$\sigma_{\ln c}^2 = \ln(1 + v_c^2)$$

$$\mu_{\ln c} = \ln(\mu_c) - \frac{1}{2}\sigma_{\ln c}^2$$

Έτσι προκύπτει ο συντελεστής διακύμανσης για c , v_c :

$$v_c = \frac{\sigma_c}{\mu_c}$$

Χρησιμοποιείται επίσης το μήκος χωρικής συσχέτισης (θ_{inc}). Το μήκος χωρικής συσχέτισης (θ_{inc}) μπορεί να εκτιμηθεί από ένα σύνολο δεδομένων διατμητικής αντοχής. Πρακτικά το θ_{inc} μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει τιμή περίπου την ίδια με αυτή του θ_c στον πραγματικό χώρο. Επίσης διαιρώντας το θ_{inc} δια το ύψος του πρανούς H , λαμβάνεται η αδιάστατη τιμή του κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ).

$$\Theta = \frac{\theta_{inc}}{H}$$

Σύμφωνα με τους Lee (1983) και Kulhawy (1991) ο συντελεστής διακύμανσης (COV) για αστράγγιστες συνθήκες διατμητικής αντοχής (c_u) κυμαίνονται από 0,1 έως 0,5.

Το κανονικοποιημένο μήκος χωρικής συσχέτισης (Θ) μπορεί να δείξει την ανομοιογένεια του εδάφους δεδομένου ότι μπορεί να χωριστεί σε οριζόντιες στρώσεις.

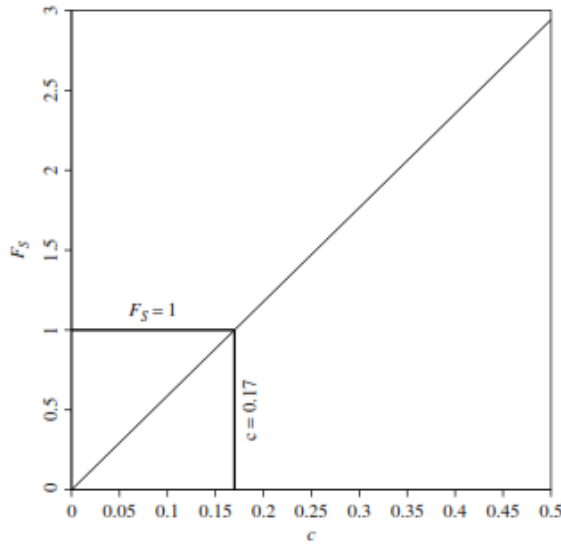
3.2 Προκαταρκτική ντετερμινιστική μελέτη

Η ντετερμινιστική ανάλυση υποθέτει ομοιόμορφες ιδιότητες εδάφους σε ολόκληρη τη μάζα του. Για το παράδειγμα της Εικόνας 3 πιο πάνω, ο συντελεστής ασφαλείας (F_s) δίνεται από τον Πίνακα 6.

Πίνακας 6 Συντελεστής ασφαλείας για ομοιόμορφο έδαφος

c	F_s
0.15	0.88
0.17	1.00
0.20	1.18
0.25	1.47
0.30	1.77

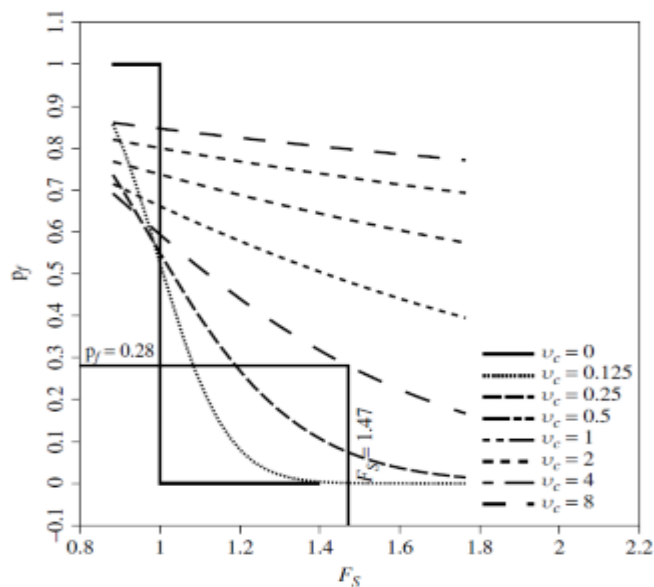
Η σχέση μεταξύ του συντελεστή ασφαλείας (F_s) και της διατμητικής αντοχής (c) είναι γραμμική, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4. Διαπιστώνεται επίσης ότι για τιμές διατμητικής αντοχής (c) μικρότερες του 0,17 ο συντελεστής ασφαλείας παίρνει τιμές μικρότερες της μονάδας πράγμα που δεν είναι επιθυμητό.



Διάγραμμα 4 Γραμμική σχέση μεταξύ συντελεστή ασφαλείας F_S και διατμητικής αντοχής c

3.3 Προσεγγιστική Μέθοδος Τυχαίας Μεταβλητής

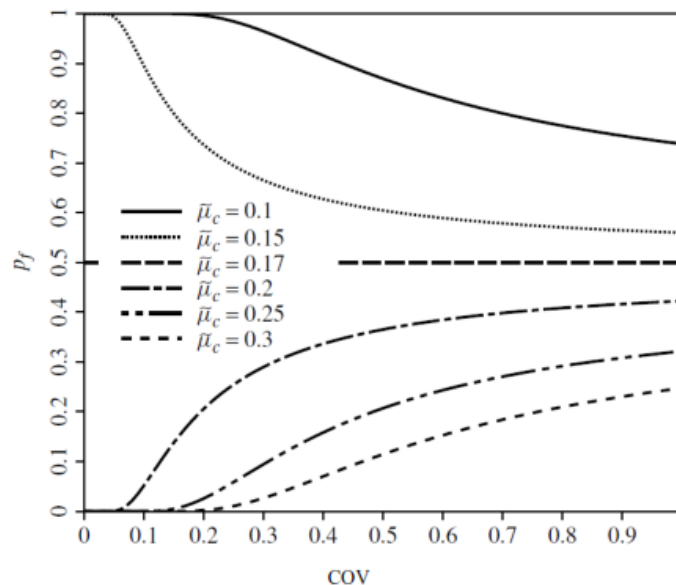
Διερευνάται η επιρροή της διατμητικής αντοχής (c), η τιμή της οποίας επιλέγεται τυχαία κάθε φορά από την λογαριθμοκανονική κατανομή. Με τις ιδιότητες του πρανές να θεωρούνται ομοιόμορφες, η διατμητική αντοχή (c) παραμένει σταθερή σε ολόκληρο το μήκος και πλάτος του. Έτσι γίνεται ανάλυση για ένα εύρος μέσων τιμών διατμητικής αντοχής (μ_c) και συντελεστών διακύμανσης (COV) δίνοντας την σχέση του συντελεστή ασφαλείας (F_S) και της πιθανότητας αστοχίας (P_F) όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.



Διάγραμμα 5 Συσχέτιση πιθανότητας αστοχίας P_F και συντελεστή ασφαλείας F_S

Βλέπουμε ότι καθώς η πιθανότητα αστοχίας (P_F) αυξάνεται ο συντελεστής ασφαλείας (F_S) μειώνεται. Για τιμές $F_S > 1$ παρατηρείται μείωση της πιθανότητας αστοχίας (P_F) καθώς και όταν ο συντελεστής διακύμανσης (COV) αυξάνεται υπάρχει και αύξηση της πιθανότητας αστοχίας (F_S). Αντίθετα για $F_S < 1$ ισχύουν τα αντίθετα.

Η μέση τιμή της διατμητικής αντοχής (μ_c) σε τέτοιου είδους αναλύσεις επηρεάζει την πιθανότητα αστοχίας (P_F) όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 6 που φαίνεται η μεταβολή της πιθανότητας αστοχίας (P_F) για διάφορες μέσες τιμές της παραμέτρου (μ_c). Για τιμές $\mu_c > 0,17$ η πιθανότητα αστοχίας (P_F) μειώνεται ενώ για τιμές $\mu_c < 0,17$ η πιθανότητα αστοχίας (P_F) αυξάνεται. Για τιμές $\mu_c = 0,17$ ο συντελεστής ασφαλείας (F_S) είναι ίσος με την μονάδα και η πιθανότητα αστοχίας (P_F) είναι 50%.

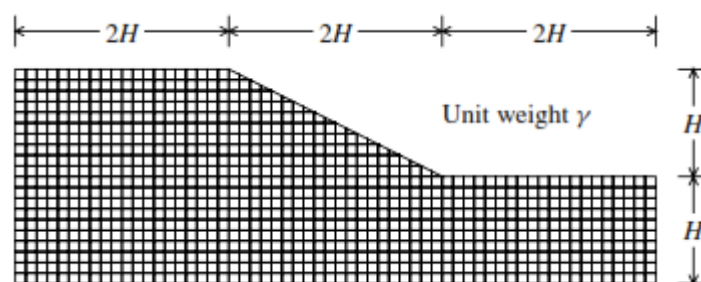


Διάγραμμα 6 Συσχέτιση πιθανότητας αστοχίας p_f και συντελεστή διακύμανσης cov για διάφορες τιμές μ_c

3.4 Η Μέθοδος Random Finite Element Method (RFEM)

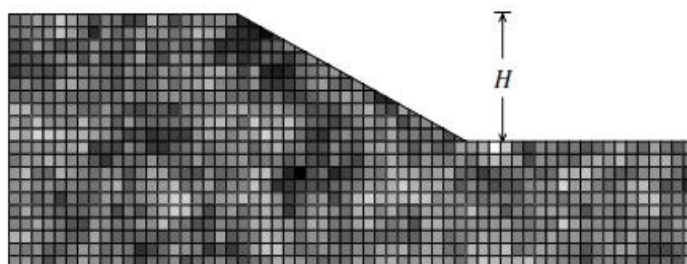
Η Random Finite Element Method (RFEM) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί την θεωρία των τυχαίων πεδίων για ελαστοπλαστική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Για την παραγωγή τυχαίων πεδίων χρησιμοποιείται η μέθοδος LAS (Logal Average Subdivision).

Η RFEM επιτρέπει σε ένα τυχαίο πεδίο που αποτελείται από μια ή περισσότερες μεταβλητές να προσαρμοστεί πάνω σε κάναβο πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι σε κάθε τυχαίο πεδίο, η τιμή που αποδίδεται στα στοιχεία του κάναβου είναι η τιμή της μεταβλητής. Στην Εικόνα 4 το πλέγμα αποτελείται από 910 πεπερασμένα στοιχεία όπου αντιστοιχούν σε 910 μεταβλητές.

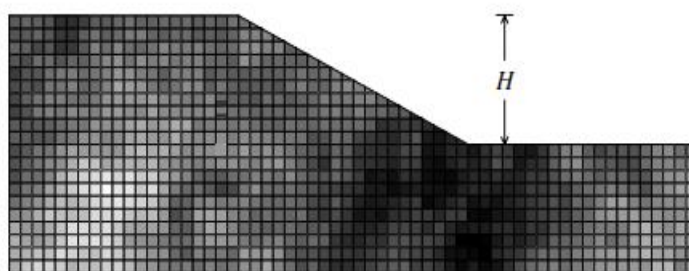


Εικόνα 4 Πλέγμα ανάλυσης ευστάθειας πρανών

Οι μεταβλητές μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους ελέγχοντας το μήκος χωρικής συσχέτισης (θ_{inc}). Στην Εικόνα 5 και 6 παρουσιάζονται τυπικά πλέγματα με διαφορετικά κανονικοποιημένα μήκη χωρικής συσχέτισης (Θ). Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται τυπικό πλέγμα με σχετικά χαμηλό κανονικοποιημένο μήκος χωρικής συσχέτισης $\Theta=0,2$ ενώ στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται τυπικό πλέγμα με σχετικά υψηλό κανονικοποιημένο μήκος χωρικής συσχέτισης $\Theta=2,0$. Οι ανοιχτόχρωμες περιοχές απεικονίζουν ασθενέστερο έδαφος ενώ οι σκουρόχρωμες περιοχές ισχυρότερο.



Εικόνα 5 Τυπικό πλέγμα με $\Theta=0,2$



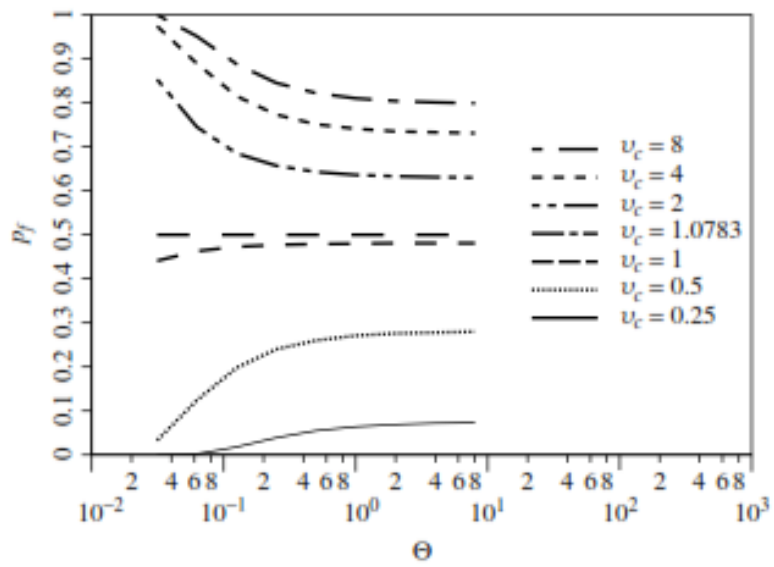
Εικόνα 6 Τυπικό πλέγμα με $\Theta=2,0$

Στην πρώτη περίπτωση το έδαφος έχει μεγάλη ετερογένεια ενώ στην δεύτερη περίπτωση το υλικό είναι χωρισμένο σε ομογενής περιοχές. Για την ανάλυση οι στατιστικές ιδιότητες παρέμειναν ίδιες ενώ αλλάζει μόνο το κανονικοποιημένο μήκος χωρικής συσχέτισης (Θ).

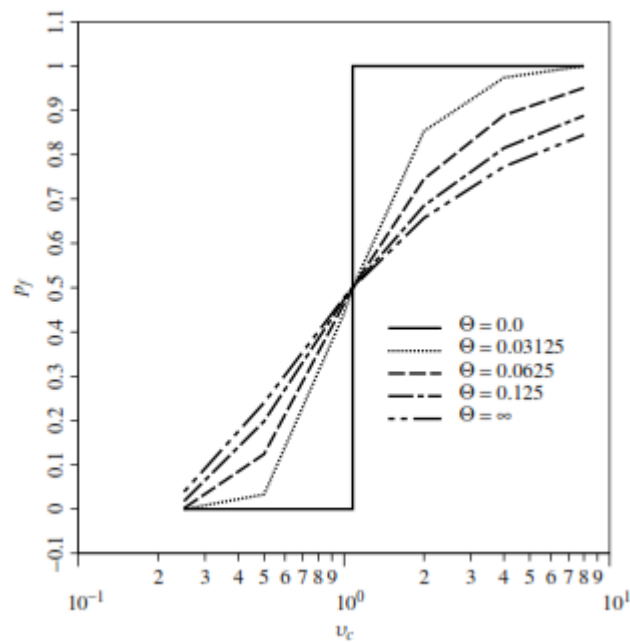
Η ανάλυση ευστάθειας πρηνών χρησιμοποιεί ελαστοπλαστική θεωρία τάσεων-παραμορφώσεων με κριτήριο αστοχίας Tresca, για αργίλους σε αστράγγιστες συνθήκες. Αν το κριτήριο Tresca παραβιαστεί τότε το πρόγραμμα τονίζει τα γειτονικά στοιχεία του κάναβου που εξακολουθούν να διατηρούν την αντοχή τους. Η πιο πάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο.

Για ένα δεδομένο σύνολο παραμέτρων διατμητικής αντοχής (μέση τιμή, τυπική απόκλιση και μήκος χωρικής συσχέτισης) που εισάγεται στο πρόγραμμα εκτελούνται προσομοιώσεις Monte Carlo. Η ανάλυση αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι τα στατιστικά στοιχεία να σταθεροποιηθούν. Κάθε μια από αυτές διαφέρει ως προς τη θέση την οποία βρίσκεται η ισχυρή και αδύναμη ζώνη. Έχει διαπιστωθεί ότι 1000 προσομοιώσεις Monte Carlo είναι αρκετές για να δώσουν αξιόπιστη εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας (P_F) σύμφωνα με τους Fenton και Griffiths.

Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε από τους Fenton και Griffiths για διάφορες τιμές κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) και δημιουργήθηκε η σχέση μεταξύ της πιθανότητας αστοχίας (P_F) και του κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ). Στο Διάγραμμα 7 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ πιθανότητας αστοχίας (P_F) και κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) για διάφορες τιμές του συντελεστή διακύμανσης (COV). Παρατηρείται ότι για πιθανότητα αστοχίας (P_F) με τιμές από 0,5 μέχρι 1 και συντελεστή διακύμανσης (COV) μεγαλύτερο του 1,0783 το κανονικοποιημένο μήκος χωρικής συσχέτισης (Θ) ακολουθεί παραβολική καμπύλη η οποία τείνει στο 0 ενώ για πιθανότητα αστοχίας (P_F) με τιμές από 0 μέχρι 0,5 και συντελεστή διακύμανσης (COV) μικρότερο του 1,0783 ακολουθεί καμπύλη υπερβολής η οποία επίσης τείνει στο 0. Από την οριζόντια γραμμή του διαγράμματος για πιθανότητα αστοχίας (P_F) 0,5 και συντελεστή διακύμανσης (COV) 1,0783 απορρέει μέση τιμή ίση με 0,17 η οποία δίνει συντελεστή ασφαλείας(P_F) στο πρηνές ίσο με 1 (Πίνακας 6).



Διάγραμμα 8 Συσχέτιση P_f και Θ βάση πεπερασμένων στοιχείων για διάφορες τιμές του COV



Διάγραμμα 7 Συσχέτιση P_f και COV βάση πεπερασμένων στοιχείων για διάφορες τιμές Θ

Στο Διάγραμμα 8 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ πιθανότητας αστοχίας (P_F) και του συντελεστή διακύμανσης (COV) για διάφορες τιμές κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ). Απεικονίζονται τα ίδια δεδομένα του Διαγράμματος 5 με τον συντελεστή διακύμανσης (COV) στον οριζόντιο άξονα και φαίνεται η πλήρης επιρροή του κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) με τιμές από 0 μέχρι ∞ αφού όλες οι καμπύλες περνούν από την κρίσιμη τιμή $v_c=1,0783$.

3.5 Παρατηρήσεις

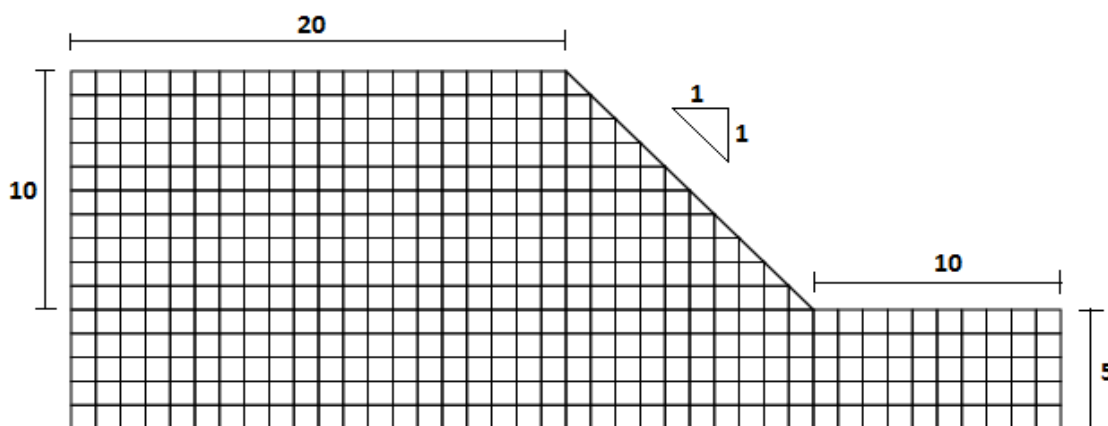
Βάση όσων προαναφέρθηκαν φαίνεται η αναγκαιότητα της χρήσης της μεθόδου RFEM, όπου με την χρήση της ελαστοπλαστικής ανάλυσης Monte Carlo λαμβάνει πλήρως υπόψη τους παράγοντες που επηρεάζουν την πιθανότητα αστοχίας (P_F), σε σύγκριση με τις απλές ντετερμινιστικές προσεγγίσεις που θεωρούν το πρηνές ως μια ενιαία τυχαία μεταβλητή. Αυτά τα αποτελέσματα είναι πιο έντονα σε σχετικά χαμηλούς συντελεστές ασφαλείας (F_S) ή όταν ο συντελεστής διακύμανσης (COV) είναι σχετικά υψηλός.

4 Επιλύσεις με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων

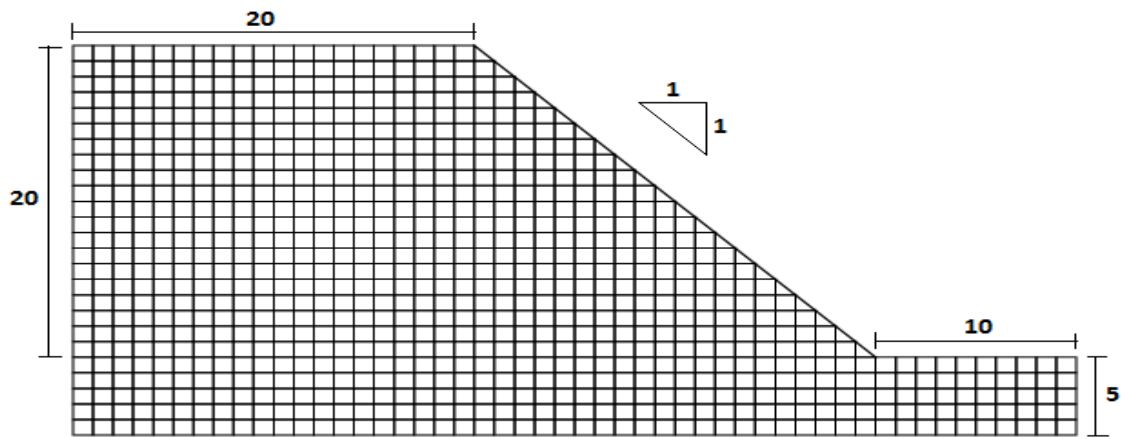
Για να προσδιορίσουμε την αβεβαιότητα στο έδαφος και τη χωρική συσχέτιση σε μια ανάλυση ευστάθειας πρανούς, οι Fenton και Griffiths (2008) χρησιμοποίησαν την Random Finite Element Method, RFEM χρησιμοποιώντας Υποδιαίρεση Τοπικού Μέσου Όρου (Local Average Subdivision, LAS). Η μέθοδος συνδυάζει ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Smith και Griffiths, 1998) και την θεωρία τυχαίων πεδίων (Fenton, 1990).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται επιλύσεις για προσδιορισμό της πιθανότητας αστοχίας (P_F) πρανών με τη χρήση του λογισμικού Rslope2D. Για κάθε μοντέλο έγιναν 1000 προσομοιώσεις.

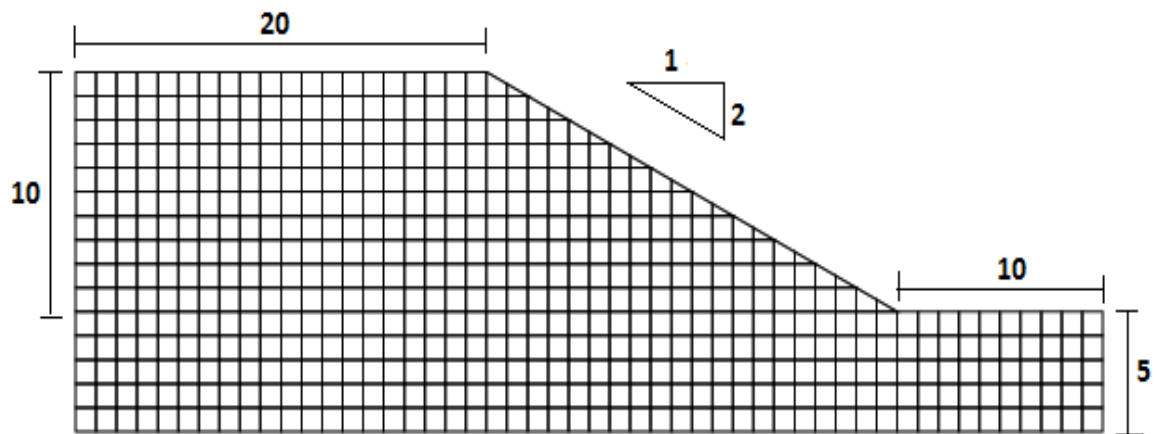
Πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις για δυο διαφορετικούς τύπους λεπτόκοκκων εδαφών, το αργιλώδες έδαφος CL και το ιλυώδες έδαφος MH για διαφορετικές κλίσεις και ύψη πρανούς που παρουσιάζονται στις Εικόνες 7, 8, 9 και 10. Έγιναν επιλύσεις για κλίσεις 1:1 και 2:1 και ύψος πρανούς $H=10\text{m}$ και $H=20\text{m}$. Το έδαφος CL χαρακτηρίζεται από $c=20\pm 10\text{kN/m}^2$, $\phi=27\pm 4^\circ$, $\gamma=20\pm 1,5\text{kN/m}^3$ και το έδαφος MH από $c=5\pm 5\text{kN/m}^2$, $\phi=24\pm 5^\circ$, $\gamma=15,5\pm 1,5\text{kN/m}^3$.



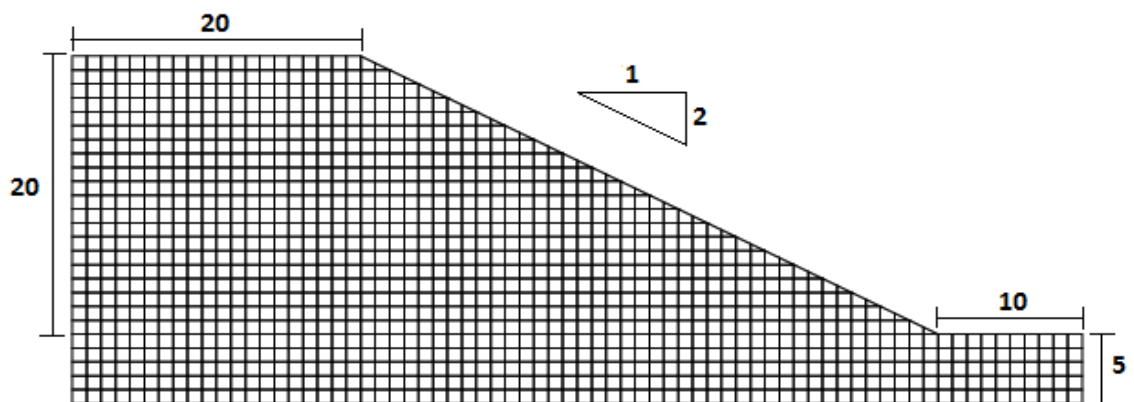
Εικόνα 7 Πρανές με $H=10\text{m}$ και Κλίση 1:1



Εικόνα 10 Πρανές με $H=10\text{m}$ και Κλίση 2:1

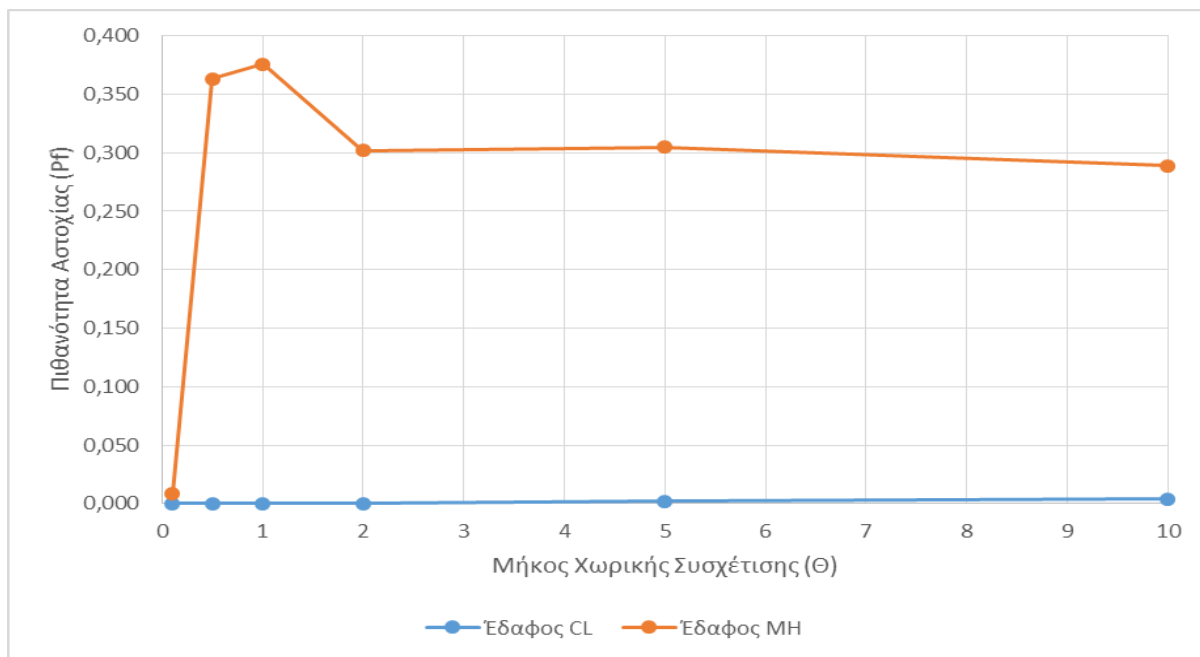


Εικόνα 9 Πρανές με $H=20\text{m}$ και Κλίση 2:1

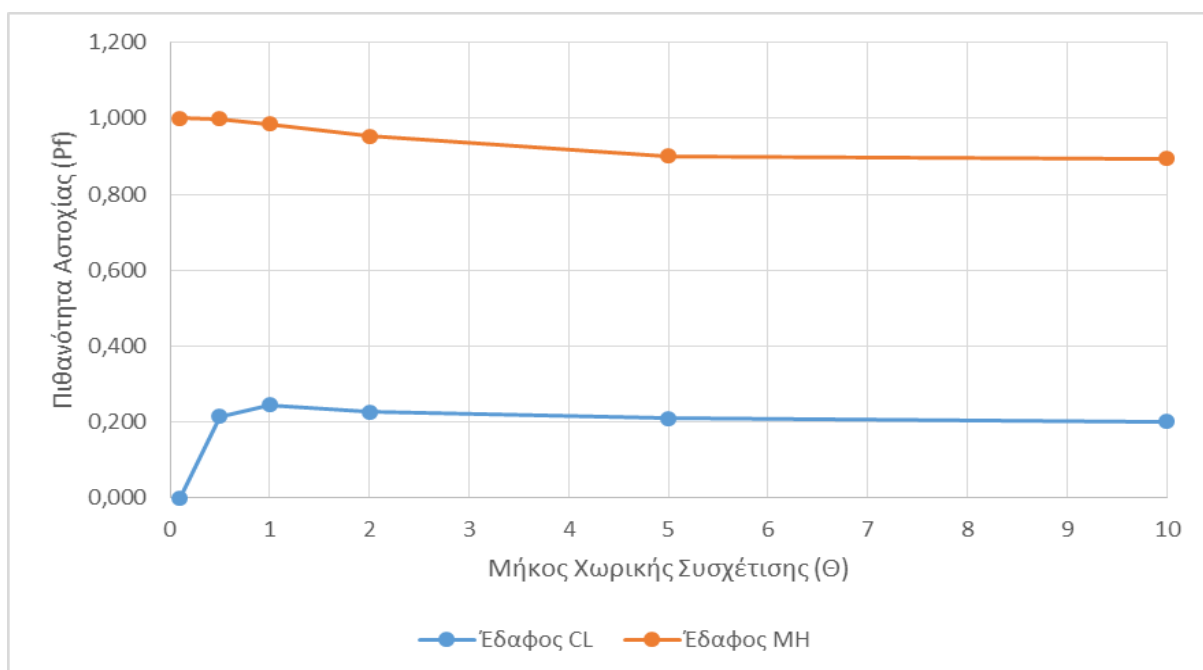


Εικόνα 8 Πρανές με $H=20\text{m}$ και Κλίση 1:1

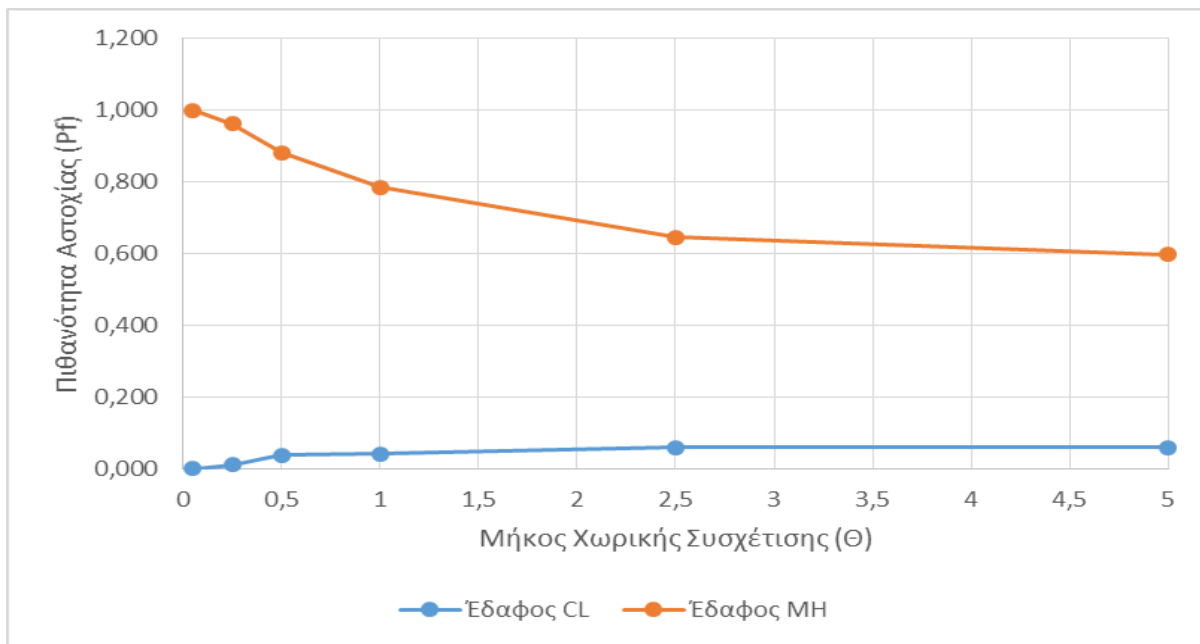
Μετά από επιλύσεις που έγιναν με τα παραπάνω δεδομένα στο λογισμικό εξάχθηκαν τα Διαγράμματα 9, 10, 11 και 12. Οι τιμές που παρουσιάζονται στα γραφήματα αναλύονται στα Παραρτήματα όπως επίσης και μερικές τυπικές επιλύσεις πρανών.



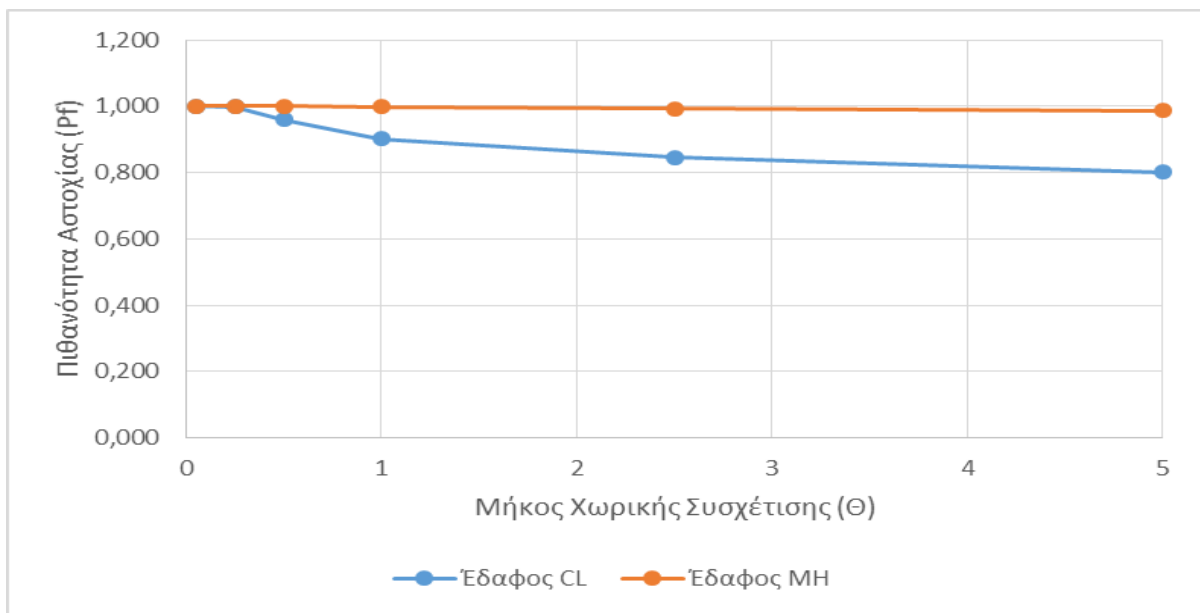
Διάγραμμα 10 Σχέση Μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) με την πιθανότητα αστοχίας (Pf) για πρανές με ύψος H=10m και Κλίση 2:1 των εδαφών CL και ML.



Διάγραμμα 9 Σχέση Μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) με την πιθανότητα αστοχίας (Pf) για πρανές με ύψος H=10m και Κλίση 1:1 των εδαφών CL και ML.



Διάγραμμα 12 Σχέση Μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) με την πιθανότητα αστοχίας (Pf) για πρανές με ύψος $H=20m$ και Κλίση 2:1 των εδαφών CL και ML.



Διάγραμμα 11 Σχέση Μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) με την πιθανότητα αστοχίας (Pf) για πρανές με ύψος $H=20m$ και Κλίση 1:1 των εδαφών CL και ML.

Στο Διάγραμμα 9 για πρανές με ύψος $H=10\text{m}$ και κλίσης 2:1 παρατηρείται για τύπο εδάφους CL ότι το κανονικοποιημένο μήκος χωρικής συσχέτισης (Θ) δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την πιθανότητα αστοχίας (Pf) αφού κυμαίνεται σε μηδενικές τιμές και για τύπο εδάφους MH παρατηρείται μια απότομη αύξηση της πιθανότητας αστοχίας (Pf) η οποία παίρνει μεγάλες τιμές και διατηρείται κατά την αύξηση του κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ).

Στο Διάγραμμα 10 για πρανές με ύψος $H=10\text{m}$ και κλίσης 1:1 παρατηρείται για τύπο εδάφους CL μια ελαφρά αύξηση της πιθανότητας αστοχίας (Pf) η οποία παίρνει μικρές τιμές και διατηρείται κατά την αύξηση του κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ). Για τύπο εδάφους MH παρατηρείται μεγάλη πιθανότητα αστοχίας (Pf) για όλες τις τιμές κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) που μελετήθηκαν.

Στο Διάγραμμα 11 για πρανές με ύψος $H=20\text{m}$ και κλίσης 2:1 παρατηρείται για τύπο εδάφους CL μικρή αύξηση της πιθανότητας αστοχίας (Pf) η οποία παίρνει αρκετά μικρές τιμές που διατηρούνται κατά την αύξηση του κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ). Για τύπο εδάφους MH παρατηρείται μεγάλη πιθανότητα αστοχίας (Pf) για μικρές τιμές κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) η οποία ελαττώνεται όσο αυτό αυξάνεται, διατηρείται όμως σε μεγάλες τιμές πιθανότητας αστοχίας (Pf).

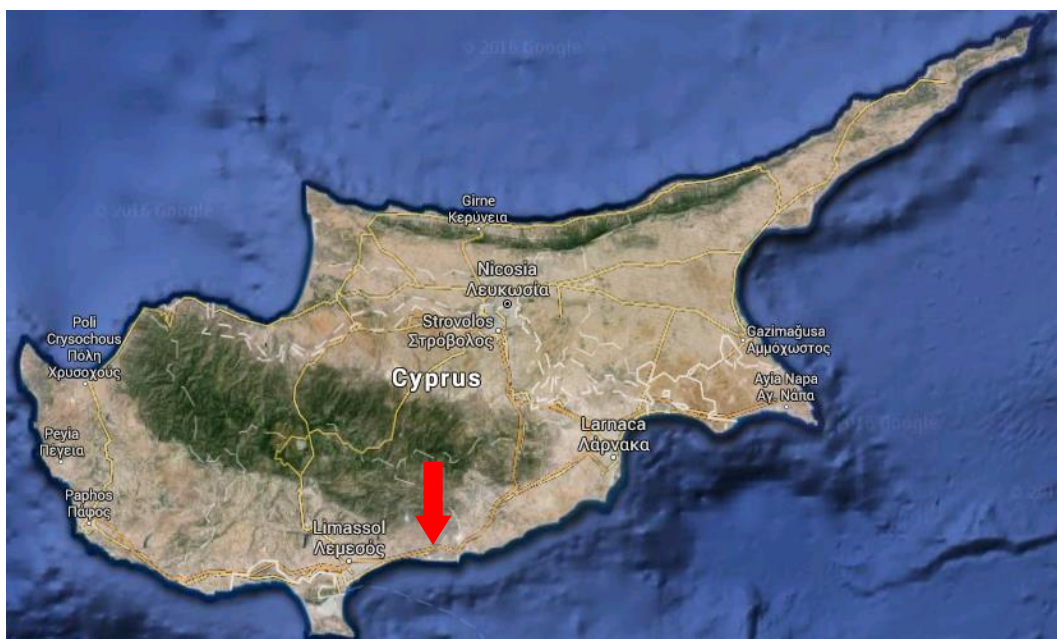
Στο Διάγραμμα 12 για πρανές με ύψος $H=20\text{m}$ και κλίσης 1:1 παρατηρείται για τύπο εδάφους CL μεγάλη πιθανότητα αστοχίας (Pf) για μικρές τιμές κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) η οποία ελαττώνεται όσο αυτό αυξάνεται, διατηρείται όμως σε μεγάλες τιμές πιθανότητας αστοχίας (Pf). Για τύπο εδάφους MH παρατηρείται μεγάλη και σταθερή πιθανότητα αστοχίας (Pf) για όλες τις τιμές κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) που μελετήθηκαν.

Ο συντελεστής ασφαλείας (FS) επηρεάζεται από τις διάφορες ιδιότητες του υλικού, την συνοχή, την γωνία εσωτερική τριβής, το μοναδιαίο βάρος κ.α.. Βλέπουμε να παραμένει σταθερός και να μην επηρεάζεται κατά τη μεταβολή του κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ). Οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής ασφαλείας (FS) για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στα Παραρτήματα.

5 Έρευνα πεδίου

5.1 Επιλογή πεδίου

Η περιοχή που επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση των δοκιμών πεδίου βρίσκεται στο χωριό Πεντάκωμο όπου απέχει 20 περίπου χιλιόμετρα, ανατολικά της πόλης της Λεμεσού (Εικόνα 11). Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη της Κύπρου η περιοχή Πεντακώμου εντάσσεται στην ιζηματογενής ακολουθία Τροόδους και αποτελείται από Συνονθύλευμα Τριαδικών – Κρητιδικών τεμαχίων κυρίως κίτρινου χαλαζιακού ψαμμίτη, γκρίζου ιλύλιθου και σερπεντινίτη, ενσωματωμένων σε μπεντονιτική άργιλο. Κατά τον υδρολογικό χάρτη της Κύπρου στην περιοχή υπάρχουν τοπικά και μικρά ασυνεχή υπόγεια ύδατα σε ιζηματογενή και πυριγενή σχηματισμούς σε σύνθεση Μαμωνίων, συμπεριλαμβανομένων σερπεντινίτη.



Εικόνα 11 Περιοχή πεδίου μελέτης (Πεντάκωμο)

5.2 Μετρήσεις DPL (Dynamic Probing Light)

5.2.1 Δοκιμή DPL

Για τον προσδιορισμό της ετερογένειας του εδάφους πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη δοκιμή DPL (Dynamic Probing Light). Το όργανο αποτελείται από ράβδους ενός μέτρου,

τυποποιημένο κώνο εμβαδού βάσης 10cm^2 και βάρος εν είδει σφύρας 10kg . Κατά την εκτέλεση της δοκιμής, αρχικά απομακρύνεται το επιφανειακό έδαφος και τοποθετείται ο κώνος ο οποίος με επαναλαμβανόμενες κρούσεις εισχωρεί στο έδαφος. Οι κρούσεις πραγματοποιούνται από σφύρα βάρους 10kg που αφήνεται από σταθερό ύψος 50cm . Η δοκιμή βάση το πρότυπο EN ISO 22476-2:2005 προβλέπει να λαμβάνονται μετρήσεις ανά 10cm διείσδυσης του κώνου και η ροπή να μετράτε ανά 1m . Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με δυο διαφορετικούς τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση καταγραφόταν η διείσδυση του κώνου στο έδαφος ανά 10 κρούσεις, ενώ στη δεύτερη καταγραφόταν ο αριθμός των κρούσεων ανά 10cm που διείσδυε ο κώνος στο έδαφος. Και στις δυο περιπτώσεις, στην πρώτη κάθε 10 κτύπους και στη δεύτερη κάθε 10cm λαμβανόταν ροπή με το δυναμόκλειδο για να βρεθεί η αντίσταση του εδάφους σε τριβή στη διεπιφάνεια μεταξύ της μεταλλικής αιχμής και του εδάφους ως ενδεικτική ένδειξη της διατμητικής αντοχής. Η αλλαγή που έγινε σε σύγκριση με την πρότυπη διαδικασία οφείλεται στο ότι θελήσαμε να μελετηθεί περαιτέρω η εδαφική ετερογένεια καθώς και το μήκος χωρικής συσχέτισης (θ). Η δοκιμή σταματούσε όταν η διείσδυση του κώνου έφτανε κάτω από 15mm και πρόδιε ισχυρό έδαφος. Τα μέρη της συσκευής DPL αφαιρούνταν με τη χρήση του εξολκέα.



Εικόνα 12 Πρανές πεδίου μελέτης



Εικόνα 15 Θέσεις μετρήσεων του πρανούς μελέτης



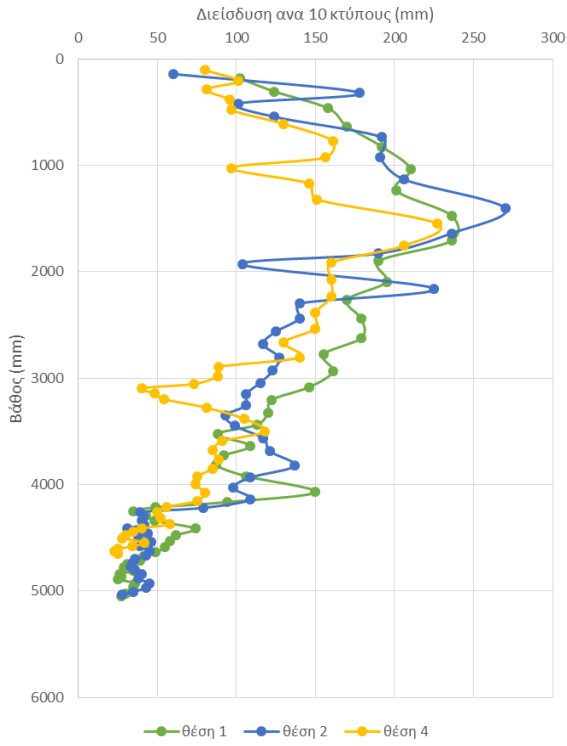
Εικόνα 14 Δοκιμή DPL



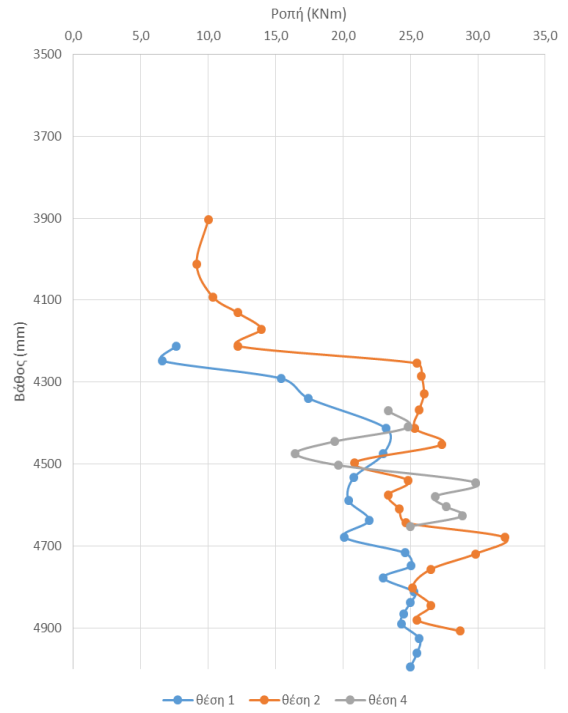
Εικόνα 13 Μέτρηση ροπής με το δυναμόκλειδο

5.2.2 Αποτελέσματα μετρήσεων

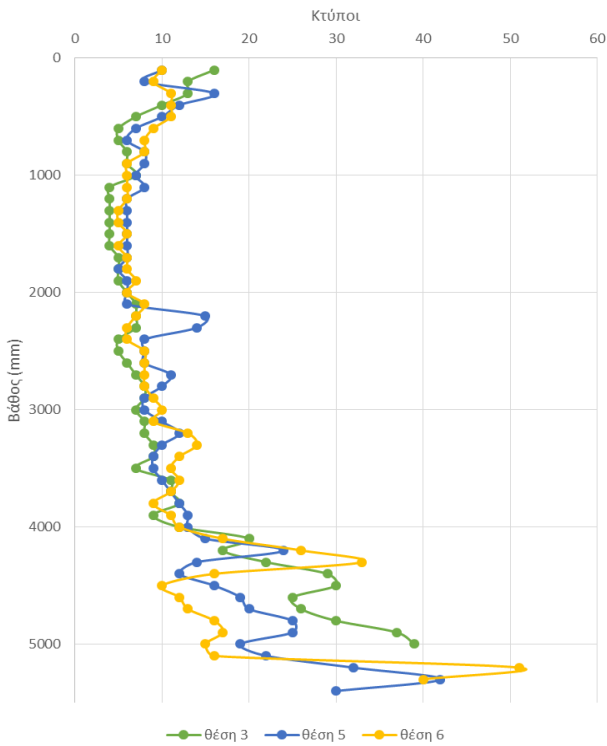
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων από την δοκιμή DPL στο πεδίο Πεντακώμου παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα. Οι τιμές για την δημιουργία των διαγραμμάτων παρουσιάζονται στα Παραρτήματα. Στο Διάγραμμα 13 παρουσιάζεται η διείσδυση του κώνου ανά 10 κτύπους σε σχέση με την συνολική διείσδυση που επιτεύχθηκε. Βλέπουμε μια ανομοιομορφία στην διείσδυση του κώνου σε διάφορα βάθη όπου αυτό προσδίδει την ετερογένεια του εδάφους. Παρατηρούμε επίσης ότι υπάρχουν περιπτώσεις που η διείσδυση γίνεται απότομη, το οποίο δηλώνει ασθενέστερο έδαφος. Στις περιπτώσεις που η διείσδυση είναι ελάχιστη ο κώνος αντιμετωπίζει ισχυρή ζώνη εδάφους. Σε μεγάλο βάθος φαίνεται ότι ο κώνος έφτασε σε ισχυρή ζώνη εδάφους και αλλαγή στρώσης αφού η διείσδυση είναι ελάχιστη σε όλες τις δοκιμές. Στο Διάγραμμα 15 παρουσιάζονται οι κτύποι ανά 10cm σε σχέση με τη συνολική διείσδυση που επιτεύχθηκε. Βλέπουμε ότι στα πρώτα μέτρα χρειάστηκαν οι ίδιοι περίπου κτύποι για την διείσδυση 10cm πράγμα που προσδίδει ομοιογενές έδαφος ενώ σε μεγάλο βάθος αντιμετωπίσαμε ισχυρό έδαφος αφού χρειάστηκαν σαφώς περισσότεροι κτύποι ανά 10cm για να διεισδύσει ο κώνος. Στο Διάγραμμα 14 παρουσιάζεται η ροπή ανά 10 κτύπους σε σχέση με τη συνολική διείσδυση και στο Διάγραμμα 16 παρουσιάζεται η ροπή των κτύπων ανά 10cm σε σχέση με τη συνολική διείσδυση. Παρατηρείται ότι η αντίσταση του εδάφους σε τριβή στη διεπιφάνεια μεταξύ της μεταλλικής αιχμής και του εδάφους αυξάνεται όσο αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης διαπιστώνοντας έτσι την ετερογένεια του εδάφους.



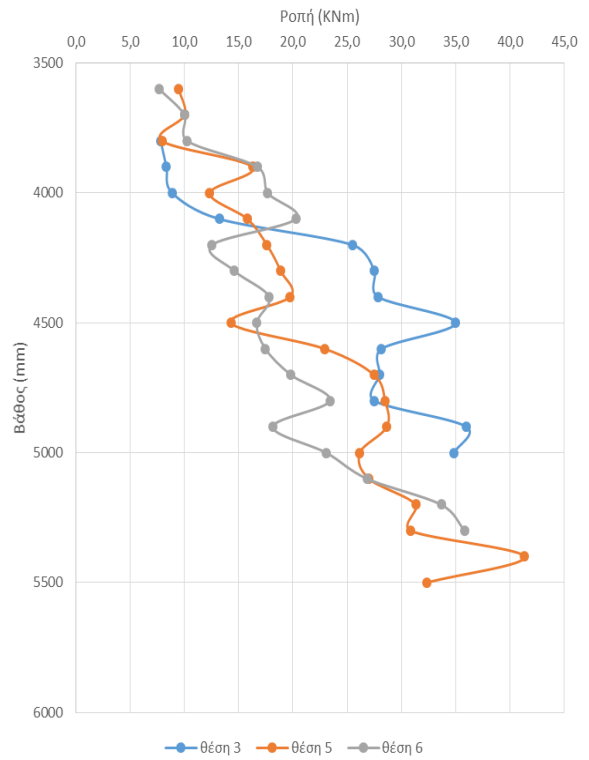
Διάγραμμα 16 Διείδουση ανά 10 κτύπους – Βάθος



Διάγραμμα 15 Ροπή ανά 10 κτύπους - Βάθος

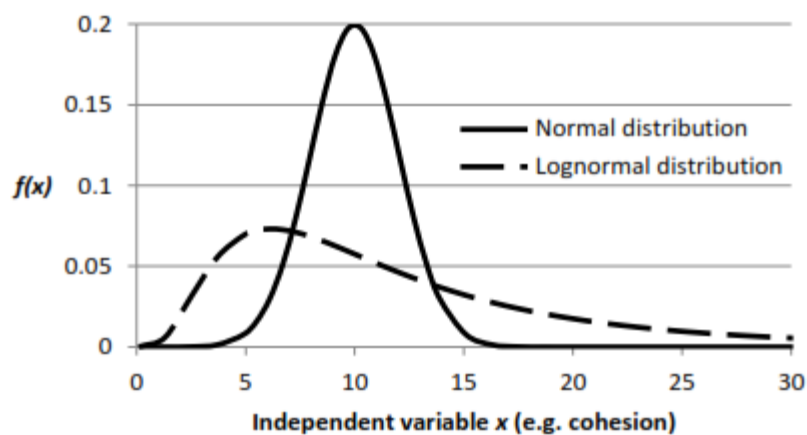


Διάγραμμα 13 Κτύποι ανά 10cm - Βάθος



Διάγραμμα 14 Ροπή κτύπων 10cm - Βάθος

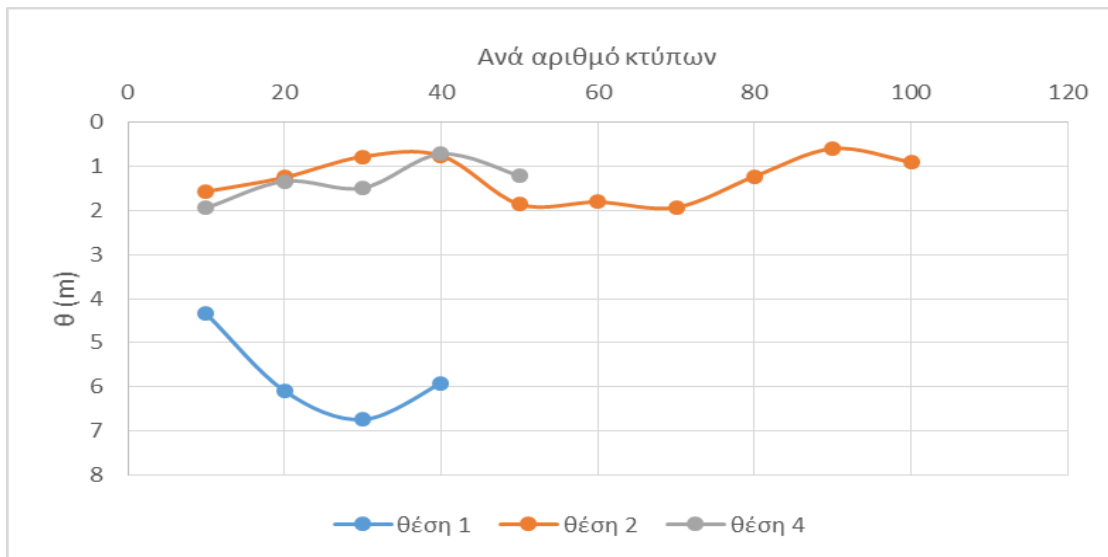
Στα παραπάνω Διαγράμματα 13 και 15 έγινε επεξεργασία που φαίνεται στα Παραρτήματα και εξάχθηκαν τα Διαγράμματα 18 και 19 που παρουσιάζουν τη σχέση του μήκους χωρικής συσχέτισης (θ) ανά τον αριθμό των κτύπων διείσδυσης και ανά το διάστημα διείσδυσης X αντίστοιχα. Το διάστημα διείσδυσης X αποτελείται από ομαδοποιημένες τιμές του βάρους διείσδυσης (cm). Επισημαίνεται ότι οι μετρήσεις στις θέσεις 2, 3 και 4 λήφθηκαν σε περίοδο που το έδαφος ήταν ξηρό ενώ στη θέση 1 εντελώς ξηρό αφού η μέτρηση πάρθηκε κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Οι μετρήσεις στις θέσεις 5 και 6 λήφθηκαν σε υγρό έδαφος μετά και κατά την περίοδο βροχόπτωσης. Στις θέσεις 2, 3 και 4 φαίνεται να ακολουθείται η καμπύλη λογαριθμοκανονικής κατανομής όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω Διάγραμμα 17.



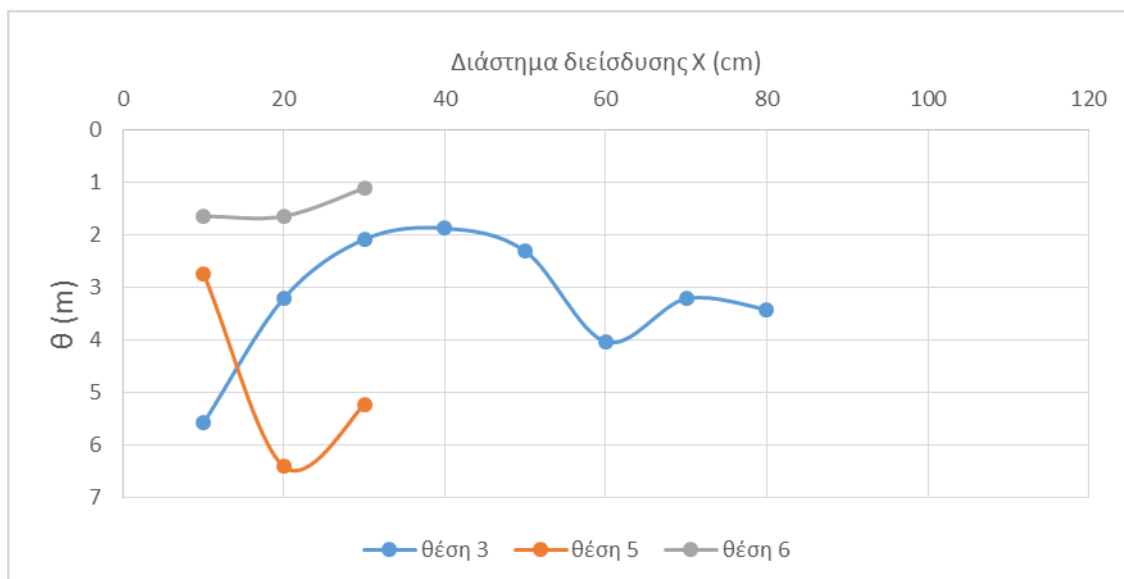
Διάγραμμα 17 Κανονική και Λογαριθμοκανονική κατανομή

Στις θέσεις 1, 5 και 6 παρατηρείται οι καμπύλες του μήκους χωρικής συσχέτισης (θ) να τείνουν σε αντίθετη κατεύθυνση από τις πρότυπες κατανομές. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη ποσότητα υγρασίας στις θέσεις 5, 6 και την μηδενική υγρασία στη θέση 1.

Εκτός από τις παρατηρήσεις στην επιρροή του μήκους χωρικής συσχέτισης (θ) λόγω της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία, διακρίνουμε και διαφορές μεταξύ του τρόπου που εκτελέστηκαν οι δοκιμές.



Διάγραμμα 19 Σχέση μήκους χωρικής συσχέτισης (θ) με αριθμό κτύπων διείσδυσης



Διάγραμμα 18 Σχέση μήκους χωρικής συσχέτισης (θ) με διάστημα διείσδυσης X (cm)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα για τις μετρήσεις του πεδίου, απορρέει ότι το μήκος χωρικής συσχέτισης (θ) κυμαίνεται από 1,57m μέχρι 5,58m. Έτσι για τα δυο ύψη πρανών που μελετήθηκαν, $H=10m$ και $H=20m$ έχουμε διάστημα κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης $\Theta=0,157$ μέχρι $\Theta=0,558$ και $\Theta=0,0785$ μέχρι $\Theta=0,279$ αντίστοιχα.

6 Καθορισμός πιθανότητας αστοχίας (P_F) αποτελεσμάτων λογισμικού για κανονικοποιημένο μήκος χωρικής συσχέτισης (Θ) πεδίου

Μετά την επεξεργασία των μετρήσεων πεδίου και των θεωρητικών δεδομένων του προγράμματος Rslope2D υπολογίστηκε το εύρος της πιθανότητας αστοχίας (P_F) του πεδίου.

Αρχικά βρέθηκε ότι το μήκος χωρικής συσχέτισης (θ) του πεδίου κυμαινόταν από 1,57m μέχρι 5,58m. Έτσι για τα δυο ύψη πρανών που μελετήθηκαν, $H=10m$ και $H=20m$ είχαμε εύρος κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης $\Theta=0,157$ έως $\Theta=0,558$ και $\Theta=0,0785$ έως $\Theta=0,279$ αντίστοιχα.

Ακολούθως τα παραπάνω διαστήματα κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) για $H=10m$ και $H=20m$ τοποθετήθηκαν στα Διαγράμματα 9, 10, 11 και 12 και βρέθηκε το εύρος της πιθανότητας αστοχίας (P_F) του πεδίου όπου παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7 Εύρος πιθανότητας αστοχίας (P_F) για κανονικοποιημένο μήκος χωρικής συσχέτισης
(Θ) πεδίου

		Εύρος Κανονικοποιημένου Μήκους Χωρικής Συσχέτισης	
		$\Theta = 0,157-0,558 (H=10m)$	$\Theta = 0,0785-0,279 (H=20m)$
Κλίση 1:1	Έδαφος CL	$P_f = 0,0306-0,2186$	$P_f = 0,9943-0,9997$
	Έδαφος MH	$P_f = 0,9974-0,9999$	$P_f = 1$
Κλίση 2:1	Έδαφος CL	$P_f = 0,0001-0,0002$	$P_f = 0,0016-0,0140$
	Έδαφος MH	$P_f = 0,0594-0,3645$	$P_f = 0,9536-0,9947$

Αν το πρανές του πεδίου μας είχε τύπο εδάφους CL και ύψος $H=10m$ θα είχε μικρή πιθανότητα αστοχίας (P_F) και για τις δύο κλίσεις, κλίση 1:1 και κλίση 2:1. Το ίδιο θα συνέβαινε και αν για κλίση 2:1 το πρανές μας είχε ύψος $H=20m$ ενώ αντίθετα για κλίση 1:1 η πιθανότητα αστοχίας (P_F) του πρανούς θα ήταν πολύ μεγάλη.

Για τύπο εδάφους MH, ύψη $H=10m$ ή $H=20m$ και κλίση 1:1 η πιθανότητα αστοχίας (P_F) του πρανούς θα ήταν πολύ μεγάλη. Για κλίση 2:1 η πιθανότητα αστοχίας (P_F) του πρανούς θα ήταν πολύ μικρή για $H=10m$ και πολύ μεγάλη για $H=20m$.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας μελέτης ήταν ο προσδιορισμός της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων τεχνητού πρανούς που βρίσκεται σε περιοχή κοντά στο χωριό Πεκτάκωμο της επαρχίας Λεμεσού. Η μεταβλητότητα του εδάφους εξαρτάται από τυχαίες και επιστημονικές αβεβαιότητες.

Εφαρμόζοντας τη δοκιμή DPL με δυο διαφορετικές μεθόδους καθορίστηκε το μήκος χωρικής συσχέτισης (θ) του πρανούς, επίσης με ειδικό δυναμόκλειδο πάρθηκαν ροπές και βρέθηκε η αντίσταση του εδάφους σε τριβή ως ενδεικτική ένδειξη της διατμητικής αντοχής. Βλέπουμε ότι όσο αυξανόταν το βάθος τόσο πιο δύσκολα διείσδυε ο κώνος, επίσης πάρθηκαν μεγαλύτερες τιμές ροπής, πράγμα που προσέδωσε ότι όσο πιο βαθιά διείσδυε ο κώνος τόσο πιο συνεκτικό και σκληρό έδαφος αντιμετώπιζε. Επισημαίνεται ότι μετρήσεις έγιναν σε ξηρό αλλά και με υγρασία έδαφος, γεγονός που επηρέασε τις μετρήσεις αρνητικά όταν έγιναν σε έδαφος κάτω από υγρές συνθήκες.

Ακολούθως πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις με τη Random Finite Element Method μέσω του λογισμικού Rslope2D και καθορίστηκε η πιθανότητα αστοχίας (P_F) τυχαίων πρανών.

Τέλος μετά από επεξεργασία των παραπάνω, εξήχθη το εύρος της πιθανότητα αστοχίας (P_F) των αποτελεσμάτων του λογισμικού για το εύρος του κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) του πεδίου μελέτης. Βλέπουμε ότι για διαφορετικά χαρακτηριστικά τυχαίων πρανών, το πραγματικό εύρος του κανονικοποιημένου μήκους χωρικής συσχέτισης (Θ) που βρέθηκε από τις μετρήσεις του πεδίου δίνει διάστημα πιθανότητας αστοχίας (P_F) που άλλοτε φτάνει σε υψηλές τιμές πιθανότητας αστοχίας (P_F) και άλλοτε σε χαμηλές.

Ο συντελεστής ασφαλείας (F_S) φαίνεται να μην επηρεάζεται κατά τη μεταβολή του μήκους χωρικής συσχέτισης (θ).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., and Boyce, G. M. (2002). "Slope stability and stabilization methods."

European Standard (2005). "Part 2: Dynamic probing" Geotechnical investigation and testing - Field testing (ISO/DIS 22476-2:2005)

European Standard (2005). "Part 3: Standard penetration test" Geotechnical investigation and testing - Field testing (ISO 22476-3:2005)

Fenton, G. A., and Griffiths, D. (2008). "Risk assessment in geotechnical engineering."

Fenton, G. A., and Griffiths, D. V. (2001). "Bearing capacity of spatially random soil: the undrained clay Prandtl problem revisited." *Geotechnique*, 51(4), 351–359.

Fenton, G. A., and Griffiths, D. V. (2002). "Probabilistic Foundation Settlement on Spatially Random Soil." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(5), 381–390.

Fenton, G. A., and Griffiths, D. V. (2003). "Bearing-capacity prediction of spatially random $c - \phi$ soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 40(1), 54–65.

Fenton, G. A., and Vanmarcke, E. H. (1990). "Simulation of random fields via local average subdivision." *J. Eng. Mech.*, 116(8), 1733–1749.

Geotechnical Journal, 36(4), 612–624.

Griffiths, D. V, and Fenton, G. A. (2000). "Bearing capacity of heterogeneous soils by finite elements."

Griffiths, D. V, and Fenton, G. A. (2007). "Probabilistic Method in Geotechnical Engineering" International Centre of Mechanical Science.

Griffiths, D. V., and Fenton, G. A. (2004). "Probabilistic Slope Stability Analysis by Finite Elements." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(May), 507–518.

Griffiths, D., and Fenton, G. A. (2007). *The Random Finite Element Method (RFEM) in Slope Stability Analysis*.

Jones, A., Kramer, S., and Arduino, P. (2002). "Estimation of Uncertainty in Geotechnical Properties for Performance-Based Earthquake Engineering." Peer Report

Kasama, K., and Whittle, A. J. (2011). "Bearing Capacity of Spatially Random Cohesive Soil Using Numerical Limit Analyses." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(11), 989–996.

Lacasse, S., and Nadim, F. (1996). "Uncertainties in characterising soil properties."

Lacasse, S., and Nadim, F. (1998). "Risk and reliability in geotechnical engineering" Norwegian Geotechnical Institute, 1172-1192

Lacasse, S., and Nadim, F. (2007). "Probabilistic geotechnical analyses for offshore facilities." *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 1(1), 21–42.

Nadim, F. (2007). Tools and strategies for dealing with uncertainty in geotechnics. 71–94.

Phoon, K., and Kulhawy, F. (1999). "Characterization of geotechnical variability." Canadian Publikasjon-Norges Geotekniske Institutt.

Smith, I. M., and Griffiths, D. V. (1998). *Programming the finite element method*, 3rd Ed., Wiley, Chichester, U.K.

Wolff, T. F. (1996). "Probabilistic slope stability in theory and practice." *Uncertainty in the geologic environment: From theory to practice*, Geotechnical Special Publication No. 58, C. D. Shackelford et al., eds., ASCE, New York, 419–433.

Άγνωστος. (2016). «Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης», Υπουργείο Γεωργίας, Αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος, Κυπριακή Δημοκρατία <<http://www.moa.gov.cy>>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Πίνακας 8 Μετρήσεις DPL - Θέση 1

Θέση 1					
Κτύποι	Καθίζηση ανα 10 κτύπους	Συνολική καθίζηση (mm)	Κτύποι	Καθίζηση ανα 10 κτύπους	Συνολική καθίζηση (mm)
10	102	181	260	150	4070
20	124	305	270	94	4164
30	158	463	280	49	4213
40	170	633	290	35	4248
50	192	825	300	43	4291
60	210	1035	310	48	4339
70	201	1236	320	74	4413
80	236	1472	330	62	4475
90	236	1708	340	58	4533
100	190	1898	350	55	4588
110	195	2093	360	49	4637
120	170	2263	370	41	4678
130	179	2442	380	39	4717
140	179	2621	390	31	4748
150	155	2776	400	29	4777
160	161	2937	410	35	4812
170	146	3083	420	26	4838
180	122	3205	430	27	4865
190	120	3325	440	25	4890
200	113	3438	450	36	4926
210	88	3526	460	35	4961
220	109	3635	470	35	4996
230	92	3727	480	30	5026
240	87	3814	490	27	5053
250	106	3920			

Πίνακας 9 Μετρήσεις DPL - Θέση 2

Θέση 2					
Κτύποι	Καθίζηση ανα 10 κτύπους	Συνολική καθίζηση (mm)	Κτύποι	Καθίζηση ανα 10 κτύπους	Συνολική καθίζηση (mm)
10	60	140	270	109	3932
20	178	318	280	98	4030
30	101	419	290	109	4139
40	124	543	300	79	4218
50	192	735	310	39	4257
60	191	926	320	41	4298
70	206	1132	330	40	4338
80	270	1402	340	42	4380
90	236	1638	350	31	4411
100	190	1828	360	44	4455
110	104	1932	370	38	4493
120	225	2157	380	46	4539
130	140	2297	390	39	4578
140	140	2437	400	45	4623
150	125	2562	410	43	4666
160	117	2679	420	36	4702
170	127	2806	430	34	4736
180	123	2929	440	33	4769
190	115	3044	450	36	4805
200	106	3150	460	40	4845
210	106	3256	470	38	4883
220	93	3349	480	45	4928
230	99	3448	490	43	4971
240	117	3565	500	35	5006
250	121	3686	510	28	5034
260	137	3823			

Πίνακας 10 Μετρήσεις DPL - Θέση 3

Θέση 3			
Κτύποι	Συνολική καθίζηση	Κτύποι	Συνολική καθίζηση
16	100	6	2600
13	200	7	2700
13	300	8	2800
10	400	8	2900
7	500	7	3000
5	600	8	3100
5	700	8	3200
6	800	9	3300
6	900	9	3400
7	1000	7	3500
4	1100	11	3600
4	1200	11	3700
4	1300	12	3800
4	1400	9	3900
4	1500	12	4000
4	1600	20	4100
5	1700	17	4200
5	1800	22	4300
5	1900	29	4400
6	2000	30	4500
7	2100	25	4600
7	2200	26	4700
7	2300	30	4800
5	2400	37	4900
5	2500	39	5000

Πίνακας 11 Μετρήσεις DPL - Θέση 4

Θέση 4					
Κτύποι	Καθίζηση ανα 10 κτύπους	Συνολική καθίζηση (mm)	Κτύποι	Καθίζηση ανα 10 κτύπους	Συνολική καθίζηση (mm)
10	80	105	260	54	3196
20	101	206	270	81	3277
30	81	287	280	105	3382
40	96	383	290	118	3500
50	97	480	300	91	3591
60	130	610	310	85	3676
70	161	771	320	89	3765
80	156	927	330	85	3850
90	97	1024	340	75	3925
100	146	1170	350	74	3999
110	151	1321	360	80	4079
120	227	1548	370	75	4154
130	206	1754	380	56	4210
140	160	1914	390	50	4260
150	160	2074	400	52	4312
160	160	2234	410	58	4370
170	150	2384	420	40	4410
180	150	2534	430	35	4445
190	130	2664	440	30	4475
200	140	2804	450	28	4503
210	89	2893	460	42	4545
220	88	2981	470	34	4579
230	73	3054	480	25	4604
240	40	3094	490	23	4627
250	48	3142	500	25	4652

Πίνακας 12 Μετρήσεις DPL - Θέση 5

Θέση 5			
Κτύποι	Συνολική καθίζηση	Κτύποι	Συνολική καθίζηση
10	100	10	2800
8	200	8	2900
16	300	8	3000
12	400	10	3100
10	500	12	3200
7	600	10	3300
6	700	9	3400
8	800	9	3500
8	900	10	3600
7	1000	11	3700
8	1100	12	3800
6	1200	13	3900
6	1300	13	4000
6	1400	15	4100
6	1500	24	4200
6	1600	14	4300
6	1700	12	4400
5	1800	16	4500
6	1900	19	4600
6	2000	20	4700
6	2100	25	4800
15	2200	25	4900
14	2300	19	5000
8	2400	22	5100
8	2500	32	5200
8	2600	42	5300
11	2700	30	5400

Πίνακας 13 Μετρήσεις DPL - Θέση 6

Θέση 6			
Κτύποι	Συνολική καθίζηση	Κτύποι	Συνολική καθίζηση
10	100	8	2800
9	200	9	2900
11	300	10	3000
11	400	9	3100
11	500	13	3200
9	600	14	3300
8	700	12	3400
8	800	11	3500
6	900	12	3600
6	1000	11	3700
6	1100	9	3800
6	1200	11	3900
5	1300	12	4000
5	1400	17	4100
6	1500	26	4200
5	1600	33	4300
6	1700	16	4400
6	1800	10	4500
7	1900	12	4600
6	2000	13	4700
8	2100	16	4800
7	2200	17	4900
6	2300	15	5000
6	2400	16	5100
8	2500	51	5200
8	2600	40	5300
8	2700		

Πίνακας 14 Μετρήσεις Ροπών – Θέσεις 1,2,3

Θέση 1		Θέση 2		Θέση 3	
Μέση Τιμή Ροπής	Συνολικό βάθος	Μέση Τιμή Ροπής	Συνολικό βάθος	Μέση Τιμή Ροπής	Συνολικό βάθος (mm)
7,6	4213	10,0	3904	7,8	3800
6,6	4248	9,1	4013	8,3	3900
15,4	4291	10,3	4092	8,9	4000
17,4	4339	12,2	4131	13,2	4100
23,2	4413	13,9	4172	25,5	4200
23,0	4475	12,2	4212	27,5	4300
20,8	4533	25,5	4254	27,8	4400
20,4	4588	25,8	4285	35,0	4500
21,9	4637	26,0	4329	28,2	4600
20,1	4678	25,7	4367	28,0	4700
24,6	4717	25,3	4413	27,5	4800
25,1	4748	27,3	4452	36,0	4900
23,0	4777	20,8	4497	34,8	5000
25,3	4812	24,8	4540		
25,0	4838	23,3	4576		
24,5	4865	24,2	4610		
24,3	4890	24,7	4643		
25,7	4926	32,0	4679		
25,5	4961	29,8	4719		
25,0	4996	26,5	4757		
24,8	5026	25,2	4802		
28,8	5053	26,5	4845		
		25,5	4880		
		28,7	4908		

Πίνακας 15 Μετρήσεις Ροπών – Θέσεις 4,5,6

Θέση 4		Θέση 5		Θέση 6	
Μέση Τιμή Ροπής	Συνολικό βάθος	Μέση Τιμή Ροπής	Συνολικό βάθος	Μέση Τιμή Ροπής	Συνολικό βάθος (mm)
23,3	4370	9,5	3600	7,7	3600
24,8	4410	10,0	3700	10,0	3700
19,4	4445	7,9	3800	10,3	3800
16,5	4475	16,3	3900	16,7	3900
19,7	4503	12,3	4000	17,7	4000
29,8	4545	15,8	4100	20,3	4100
26,8	4579	17,6	4200	12,5	4200
27,7	4604	18,9	4300	14,6	4300
28,8	4627	19,7	4400	17,8	4400
25,0	4652	14,3	4500	16,7	4500
		22,9	4600	17,5	4600
		27,5	4700	19,8	4700
		28,5	4800	23,4	4800
		28,7	4900	18,1	4900
		26,2	5000	23,1	5000
		27,0	5100	26,8	5100
		31,3	5200	33,7	5200
		30,8	5300	35,8	5300
		41,3	5400		
		32,3	5500		

Πίνακας 16 Τιμές μήκους χωρικής συσχέτισης (θ) του πεδίου

Ανά αριθμό κτύπων	Μήκος χωρικής συσχέτισης θ (m)		
	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 4
10	4,34	1,57	1,94
20	6,09	1,25	1,34
30	6,74	0,78	1,49
40	5,91	0,76	0,72
50		1,86	1,22
60		1,81	
70		1,93	
80		1,23	
90		0,6	
100		0,9	

Ανά διάστημα διείδυσης X (cm)	Μήκος χωρικής συσχέτισης θ (m)		
	Θέση 3	Θέση 5	Θέση 6
10	5,58	1,64	2,73
20	3,2	1,64	6,41
30	2,08	1,1	5,23
40	1,87		
50	2,31		
60	4,03		
70	3,21		
80	3,42		
90			
100			

Πίνακας 17 Αποτελέσματα για Έδαφος CL, H=10m και Κλίση 2:1

c (COV=0,5) (Kn/m ²)	φ (COV=0,148) (°)	γ (COV=0,075) (Kn/m ³)	θ (m)	Θ=θ/H	Πιθανότητα Αστοχίας	Συντελεστής Ασφαλείας
20±10	27±4	20±1,5	1	0,1	0,000	>1,4
20±10	27±4	20±1,5	5	0,5	0,000	>1,4
20±10	27±4	20±1,5	10	1	0,000	>1,4
20±10	27±4	20±1,5	20	2	0,000	>1,4
20±10	27±4	20±1,5	50	5	0,002	>1,4
20±10	27±4	20±1,5	100	10	0,004	>1,4

Πίνακας 18 Αποτελέσματα για Έδαφος MH, H=10m και Κλίση 2:1

c (COV=1) (Kn/m ²)	φ (COV=0,208) (°)	γ (COV=0,097) (Kn/m ³)	θ (m)	Θ=θ/H	Πιθανότητα Αστοχίας	Συντελεστής Ασφαλείας
5±5	24±5	15,5±1,5	1	0,1	0,009	1,2
5±5	24±5	15,5±1,5	5	0,5	0,363	1,2
5±5	24±5	15,5±1,5	10	1	0,376	1,2
5±5	24±5	15,5±1,5	20	2	0,302	1,2
5±5	24±5	15,5±1,5	50	5	0,305	1,2
5±5	24±5	15,5±1,5	100	10	0,289	1,2

Πίνακας 19 Αποτελέσματα για Έδαφος CL, H=10m και Κλίση 1:1

c (COV=0,5) (Kn/m ²)	φ (COV=0,148) (°)	γ (COV=0,075) (Kn/m ³)	θ (m)	Θ=θ/H	Πιθανότητα Αστοχίας	Συντελεστής Ασφαλείας
20±10	27±4	20±1,5	1	0,1	0,000	1,3
20±10	27±4	20±1,5	5	0,5	0,215	1,3
20±10	27±4	20±1,5	10	1	0,246	1,3
20±10	27±4	20±1,5	20	2	0,227	1,3
20±10	27±4	20±1,5	50	5	0,210	1,3
20±10	27±4	20±1,5	100	10	0,201	1,3

Πίνακας 20 Αποτελέσματα για Έδαφος MH, H=10m και Κλίση 1:1

c (COV=1) (Kn/m ²)	φ (COV=0,208) (°)	γ (COV=0,097) (Kn/m ³)	θ (m)	Θ=θ/H	Πιθανότητα Αστοχίας	Συντελεστής Ασφαλείας
5±5	24±5	15,5±1,5	1	0,1	1,000	1
5±5	24±5	15,5±1,5	5	0,5	0,999	1
5±5	24±5	15,5±1,5	10	1	0,985	1
5±5	24±5	15,5±1,5	20	2	0,953	1
5±5	24±5	15,5±1,5	50	5	0,901	1
5±5	24±5	15,5±1,5	100	10	0,894	1

Πίνακας 21 Αποτελέσματα για Έδαφος CL, H=20m και Κλίση 2:1

c (COV=0,5) (Kn/m ²)	φ (COV=0,148) (°)	γ (COV=0,075) (Kn/m ³)	θ (m)	Θ=θ/H	Πιθανότητα Αστοχίας	Συντελεστής Ασφαλείας
20±10	27±4	20±1,5	1	0,05	0,000	1,4
20±10	27±4	20±1,5	5	0,25	0,011	1,4
20±10	27±4	20±1,5	10	0,5	0,037	1,4
20±10	27±4	20±1,5	20	1	0,041	1,4
20±10	27±4	20±1,5	50	2,5	0,058	1,4
20±10	27±4	20±1,5	100	5	0,058	1,4

Πίνακας 22 Αποτελέσματα για Έδαφος MH, H=20m και Κλίση 2:1

c (COV=1) (Kn/m ²)	φ (COV=0,208) (°)	γ (COV=0,097) (Kn/m ³)	θ (m)	Θ=θ/H	Πιθανότητα Αστοχίας	Συντελεστής Ασφαλείας
5±5	24±5	15,5±1,5	1	0,05	1,000	1,2
5±5	24±5	15,5±1,5	5	0,25	0,963	1,2
5±5	24±5	15,5±1,5	10	0,5	0,882	1,2
5±5	24±5	15,5±1,5	20	1	0,785	1,2
5±5	24±5	15,5±1,5	50	2,5	0,645	1,2
5±5	24±5	15,5±1,5	100	5	0,598	1,2

Πίνακας 23 Αποτελέσματα για Έδαφος CL, H=20m και Κλίση 1:1

c (COV=0,5) (Kn/m ²)	φ (COV=0,148) (°)	γ (COV=0,075) (Kn/m ³)	θ (m)	Θ=θ/H	Πιθανότητα Αστοχίας	Συντελεστής Ασφαλείας
20±10	27±4	20±1,5	1	0,05	1,000	1
20±10	27±4	20±1,5	5	0,25	0,998	1
20±10	27±4	20±1,5	10	0,5	0,960	1
20±10	27±4	20±1,5	20	1	0,903	1
20±10	27±4	20±1,5	50	2,5	0,846	1
20±10	27±4	20±1,5	100	5	0,801	1

Πίνακας 24 Αποτελέσματα για Έδαφος MH, H=20m και Κλίση 1:1

c (COV=1) (Kn/m ²)	φ (COV=0,208) (°)	γ (COV=0,097) (Kn/m ³)	θ (m)	Θ=θ/H	Πιθανότητα Αστοχίας	Συντελεστής Ασφαλείας
5±5	24±5	15,5±1,5	1	0,05	1,000	1
5±5	24±5	15,5±1,5	5	0,25	1,000	1
5±5	24±5	15,5±1,5	10	0,5	1,000	1
5±5	24±5	15,5±1,5	20	1	0,999	1
5±5	24±5	15,5±1,5	50	2,5	0,992	1
5±5	24±5	15,5±1,5	100	5	0,987	1

Πίνακας 25 Τυπικές τιμές διατμητικής αντοχής σύμφωνα με το Ενιαίο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών (USCS)

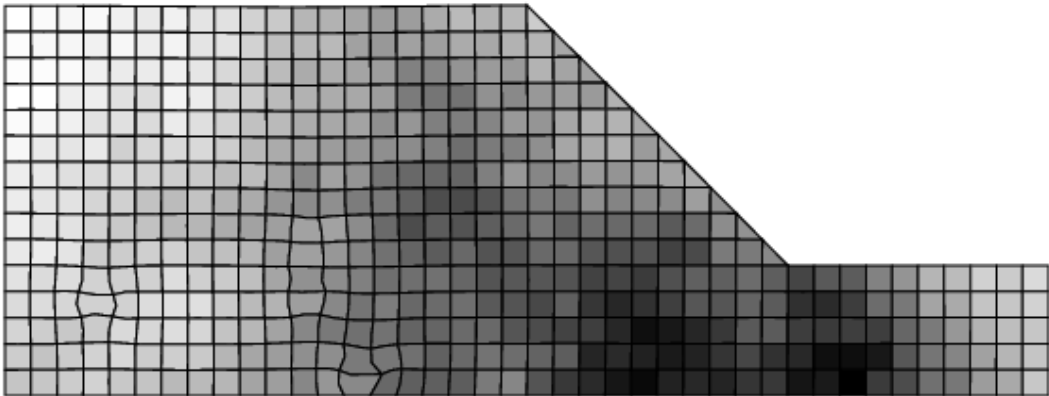
USCS	Dysli (1997)			Βαλαλάς (1985)		
	IP (%)	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)	γ (kN/m ³)
GW	0	40±5	0	40±5	0	20.0±2.5
GP	—	—	—	33±6	0	19.0±3.0
GM	2-6	36±4	-0	36±4	0	21.0±2.5
GC	7-12	34±4	-0	34±4	0	20.5±2.0
GM-ML	—	—	—	35±5	0	21.5±2.5
GM-GC	—	—	—	33±3	2±2	21.5±2.0
GC-CL	—	—	—	29±4	3±3	21.0±2.0
GC-CH	—	—	—	28±4	4±4	19.5±2.0
SW	0	40±4	0	38±5	0	19.5±2.0
SP	0	36±6	0	36±6	0	18.5±2.5
SM	2-6	34±3	-0	34±3	0	20.0±2.5
SC	6-12	32±3	-0	32±4	0	19.5±2.0
SM-ML	—	—	—	34±3	0	20.0±2.0
SM-SC	—	—	—	31±3	5±5	21.0±2.0
SC-CL	9-15	27±3	5±5	28±4	5±5	20.5±2.0
SC-CH	—	—	—	27±3	10±10	18.5±2.0
ML	2-6	33±4	-0	33±4	0	19.0±2.5
CL-ML	4-10	30±4	15±10	30±4	15±10	21.0±1.5
CL	12-18	27±4	20±10	27±4	20±10	20.0±1.5
CH	~20	20±4	20±10	—	—	—
CH	~40	15±5	25±10	22±4	25±10	17.5±1.5
CH	~60	11±4	⁽¹⁾	—	—	—
CH	>100	<8	⁽¹⁾	—	—	—
OL	—	—	—	25±4	10±5	17.0±1.5
OH	—	—	—	22±4	10±5	15.5±1.5
MH	—	—	—	24±5	5±5	15.5±1.5

⁽¹⁾ Εξαρτάται έντονα από τη φύση του αργιλικού κλάσματος.

Πίνακας 26 Κατάταξη Εδαφών (USCS)

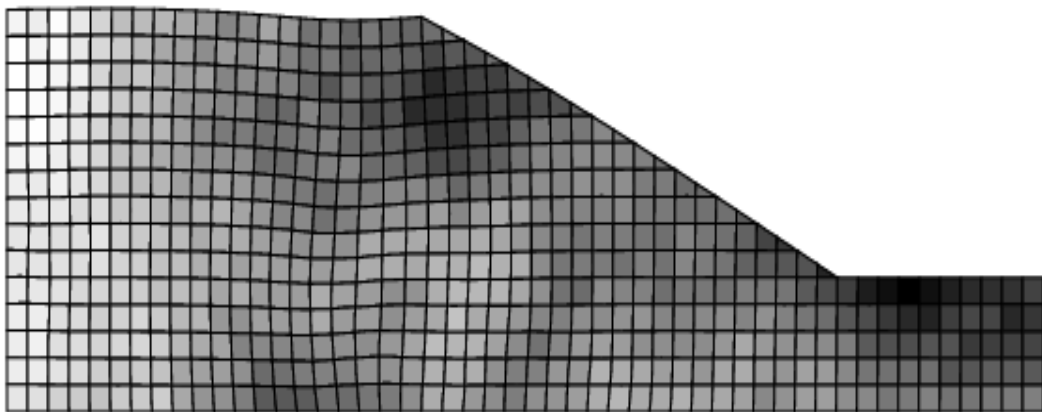
ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ		ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΑ ΕΔΑΦΗ	ΧΑΛΙΚΙΑ (λιγότερο από 50% του χονδροκόκκου διέρχεται από κόσκινο No. 4)	<i>GW</i>	Χαλίκι καλά διαβαθμισμένο με μίγμα άμμου-χαλικιού. Λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
		GP	Χαλίκι κακής διαβάθμισης με μίγμα άμμου-χαλικιού. Λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
		GM	Χαλίκια ιλυώδη, μίγμα χαλικιών, άμμου και ιλύος.
		GC	Ιλυώδης άργιλος, μίγμα χαλικιών, άμμου και αργίλου.
	ΑΜΜΟΣ (πάνω από 50% του χονδροκόκκου διέρχεται από κόσκινο No. 4)	SW	Άμμος καλά διαβαθμισμένη με χαλίκια, λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
		SP	Άμμος κακής διαβάθμισης με χαλίκια, λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
		SM	Ιλυώδης Άμμος
		SC	Αργιλώδης Άμμος
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΕΔΑΦΗ	ΙΛΥΣ ΚΑΙ ΑΡΓΙΛΟΣ Όριο υδαρότητας 50% ή μικρότερο	ML	Ανόργανη ιλύς, λεπτόκοκκη άμμος, ιλυώδης ή αργιλώδης λεπτόκοκκη άμμος.
		CL	Ανόργανη άργιλος μικρής ή μέσης πλαστιμότητας, χαλικώδης άργιλος, αμμώδης άργιλος, ιλυώδης άργιλος, ισχνή άργιλος.
		<i>OL</i>	Οργανική ιλύς και οργανική ιλυώδης άργιλος χαμηλής πλαστιμότητας.
	ΙΛΥΣ ΚΑΙ ΑΡΓΙΛΟΣ Όριο υδαρότητας μεγαλύτερο του 50%	MH	Ανόργανη ιλύς, μαρμαρυγικά ή λεπτόκοκκα αμμώδη ή ιλυώδη εδάφη, ελαστική ιλύς.
		CH	Ανόργανη άργιλος μεγάλης πλαστιμότητας, παχιά άργιλος.
		OH	Οργανική άργιλος με μέση ως μεγάλη πλαστιμότητα
ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΕΔΑΦΗ		PT	Χούμος, τύρφη και άλλα έντονα οργανικά εδάφη.

Slope didn't fail.



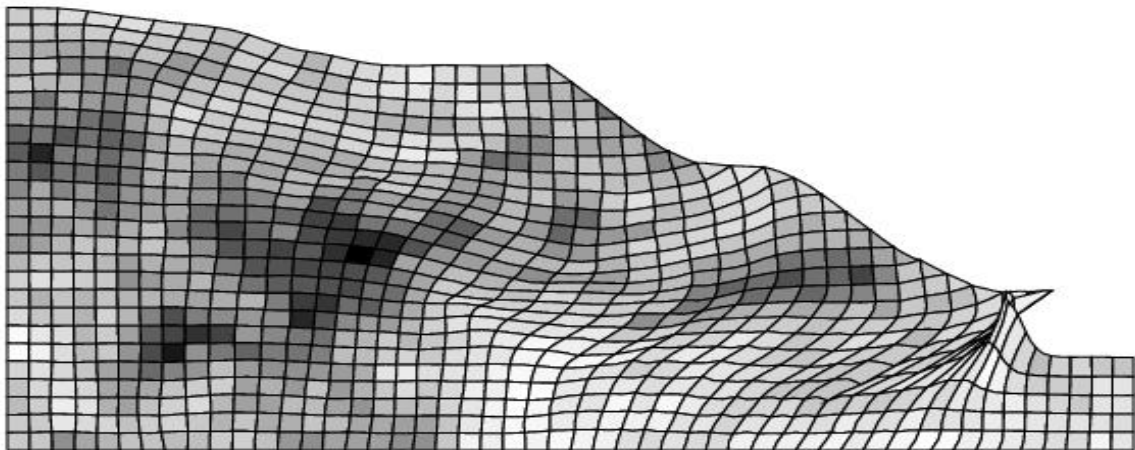
Εικόνα 17 Πρανές με Τύπο εδάφους CL, Ύψος H=10m, Κλίση 1:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=10m$

Slope didn't fail.



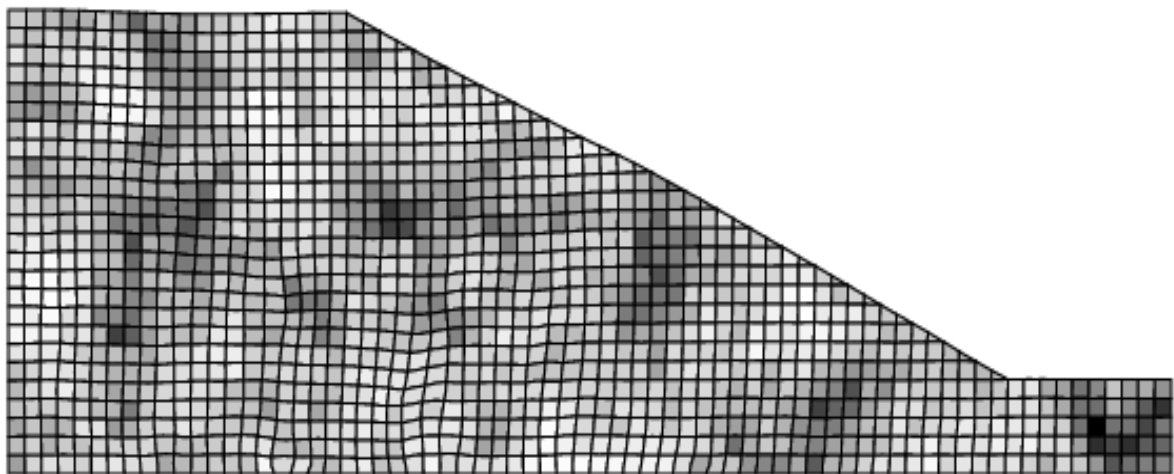
Εικόνα 16 Πρανές με Τύπο εδάφους CL, Ύψος H=10m, Κλίση 2:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=10m$

Slope failed.



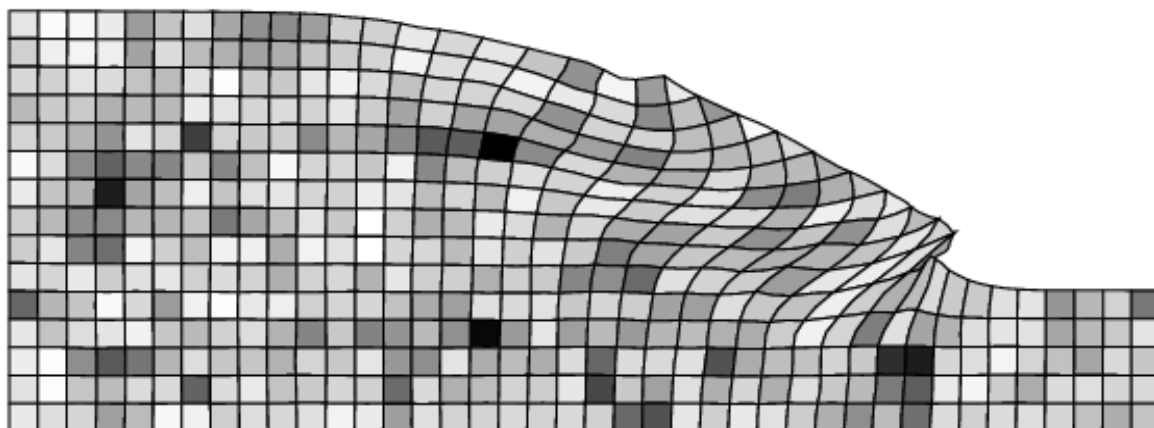
Εικόνα 19 Πρανές με Τύπο εδάφους CL, Ύψος H=20m, Κλίση 1:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=0,5m$

Slope didn't fail.



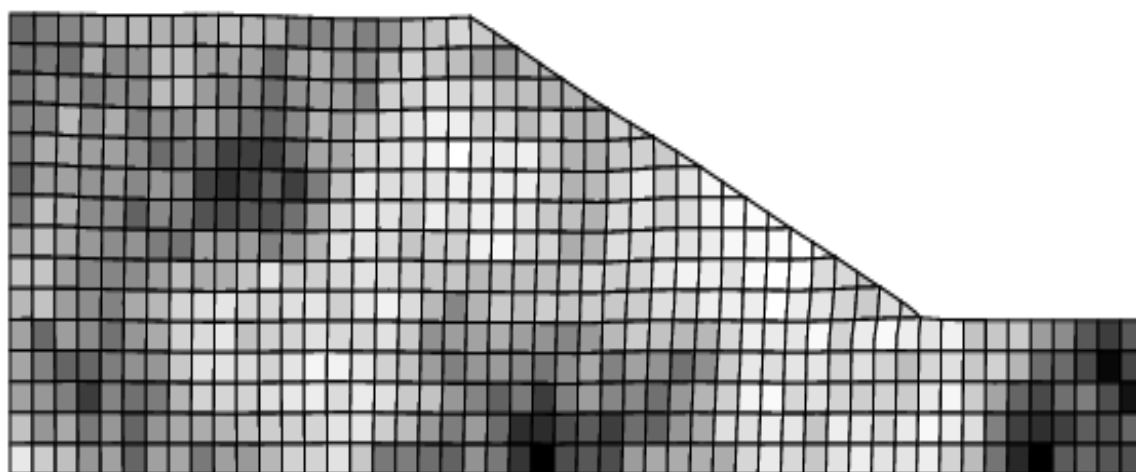
Εικόνα 18 Πρανές με Τύπο εδάφους CL, Ύψος H=20m, Κλίση 2:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=0,25m$

Slope failed.



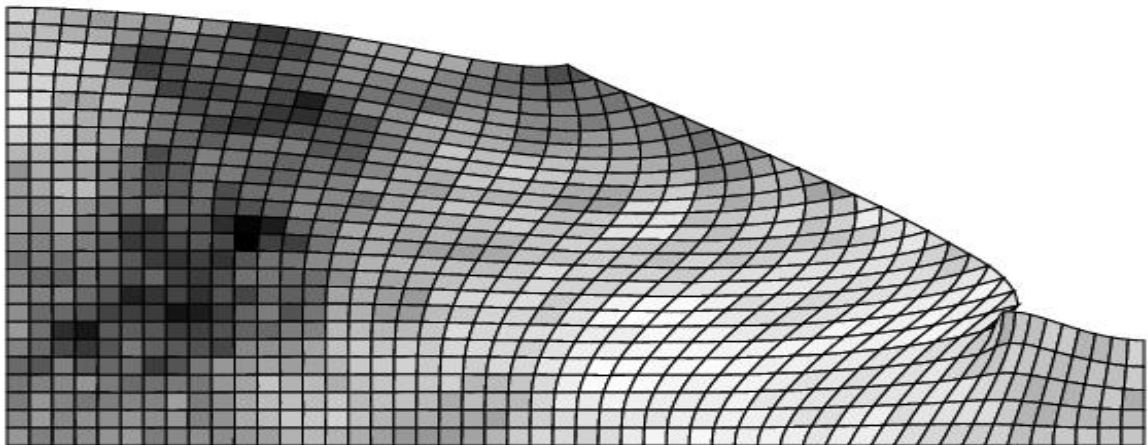
Εικόνα 20 Πρανές με Τύπο εδάφους ΜΗ, Ύψος $H=10\text{m}$, Κλίση 1:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=0,1\text{m}$

Slope didn't fail.



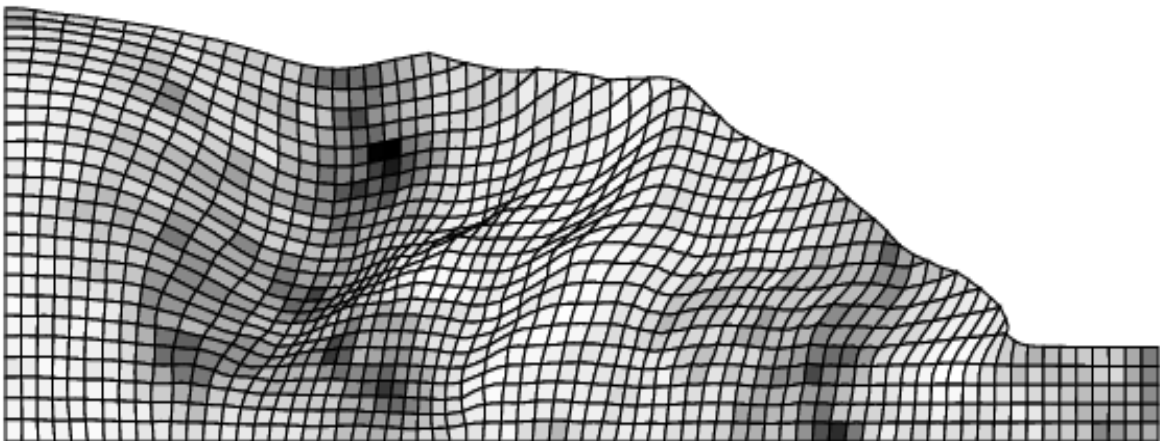
Εικόνα 21 Πρανές με Τύπο εδάφους ΜΗ, Ύψος $H=10\text{m}$, Κλίση 2:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=5\text{m}$

Slope failed.



Εικόνα 22 Πρανές με Τύπο εδάφους ΜΗ, Ύψος $H=20\text{m}$, Κλίση 1:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=5\text{m}$

Slope failed.



Εικόνα 23 Πρανές με Τύπο εδάφους ΜΗ, Ύψος $H=20\text{m}$, Κλίση 2:1 και Κανονικοποιημένο Μήκος Χωρικής Συσχέτισης $\Theta=1\text{m}$