

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



## Πτυχιακή εργασία

ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ  
ΤΟΙΧΩΝ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ  
ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ  
ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ  
ΤΥΧΑΙΑ ΠΕΔΙΑ

Κυριάκος Μολυβάς

Λεμεσός 2016



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

## **Πτυχιακή εργασία**

ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ  
ΤΟΙΧΩΝ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ  
ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ  
ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ  
ΤΥΧΑΙΑ ΠΕΔΙΑ

Κυριάκος Μολυβάς

Σύμβουλος καθηγητής  
Δρ. Λύσανδρος Παντελίδης

Λεμεσός 2016

**Πνευματικά δικαιώματα**

Copyright © Κυριάκος Μολυβάς, 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 επιβλέποντα της διατριβής μου, Επίκουρο Καθηγητή Λύσανδρο Παντελίδη για την συνεχή καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας, καθώς και για τις γνώσεις και την εμπειρία που μου πρόσφερε. Θερμές ευχαριστίες και στον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Χριστοδούλου για την πολύτιμη του βοήθεια. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην αποπεράτωση της παρούσας πτυχιακής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμερόληπτη στήριξή τους.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη και η γνώση σχετικά με την μεταβλητότητα του εδάφους είναι πολύ σημαντική στον τομέα της Γεωτεχνικής Μηχανικής. Η κακή εκτίμηση της μεταβλητότητας του υπεδάφους μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένους υπολογισμούς των χαρακτηριστικών του, που με τη σειρά τους να αποφέρουν αστοχίες σε διάφορα γεωτεχνικά έργα.

Στην παρούσα πτυχιακή μελετήθηκε το μήκος χωρικής συσχέτισης ( $\theta$ ) μέσα από έρευνα που εκτελέστηκε στο πεδίο. Το πεδίο μελέτης βρισκόταν πλησίον του χωριού Πεντάκωμο στη Λεμεσό.

Μέσα από τις μετρήσεις που διεξήχθησαν με τη χρήση DPL (Dynamic Light Penetrometer) υπολογίστηκε το μήκος χωρικής συσχέτισης. Μέσω της δοκιμής DPL δείχθηκε η έντονη ετερογένεια που παρουσιάζει το έδαφος τόσο κατά την οριζόντια, όσο και κατά την κατακόρυφη έννοια.

Έπειτα, πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις με θεωρητικά αλλά και με πραγματικά δεδομένα στο λογισμικό πρόγραμμα reearth2d. Το λογισμικό χρησιμοποιεί την μέθοδο τυχαίων πεδίων με πεπερασμένα στοιχεία (Random Finite Element Method – RFEM) για τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας του εδάφους. Κύριος σκοπός των επιλύσεων ήταν να μελετηθούν οι παράγοντες οι οποίοι αυξάνουν την πιθανότητα αστοχίας του εδάφους όσον αφορά τους τοίχους αντιστήριξης. Μέσα από τα αποτελέσματα διαφαίνεται ότι η πιθανότητα αστοχίας επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από συντελεστή διασποράς (COV) της γωνίας τριβής ( $\varphi$ ), το μήκος χωρικής συσχέτισης ( $\theta$ ), την γεωμετρία του τοίχου αντιστήριξης και την γεωμετρία του πρανές.



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	xi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	xii
1 Αβεβαιότητα στις ιδιότητες του εδάφους .....	1
1.1 Η φυσική μεταβλητότητα του εδάφους.....	2
1.1.1 Χαρακτηριστικά πυκνότητας-υγρασίας .....	2
1.1.2 Χαρακτηριστικά πλαστικότητας .....	3
1.1.3 Χαρακτηριστικά αντοχής .....	4
1.1.4 Χαρακτηριστικά στερεοποίησης και διαπερατότητας εδάφους.....	5
1.2 Αβεβαιότητα στη γνώση.....	6
1.2.1 Αβεβαιότητα χαρακτηρισμού του πεδίου.....	6
1.2.2 Σφάλματα μετρήσεων.....	6
1.2.3 Ανομοιογένεια των εδαφών.....	6
1.2.4 Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης - Standard Penetration Test (SPT).....	6
1.2.5 Δοκιμή Διείσδυσης Κώνου - Cone Penetration Test (CPT).....	7
1.2.6 DPL (dynamic light penetrometer).....	8
1.3 Αβεβαιότητα επιλογής μοντέλου.....	11
2 Πιθανολογική ανάλυση τοίχου αντιστήριξης.....	11
2.1.1 Μέση τιμή ( $\mu$ ).....	11
2.1.2 Διακύμανση ( $\sigma^2$ ) .....	12
2.1.3 Τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ) .....	12



2.1.4	Συντελεστής Διακύμανσης - Coefficient of Variation (COV) .....	12
2.2	Κατανομές .....	13
2.2.1	Κανονική κατανομή (normal distribution) .....	13
2.2.2	Λογαριθμοκανονική κατανομή (lognormal distribution) .....	14
2.3	Τυχαία πεδία .....	14
2.4	Μέθοδοι Προσομοίωσης .....	16
2.5	Μέθοδος Random Finite-Element Method (RFEM) .....	17
3	Έρευνα πεδίου .....	20
3.1	Επιλογή πεδίου .....	20
3.1.1	Γενικά χαρακτηριστικά πεδίου .....	20
3.1.2	Μετρήσεις dpl-πεδίο Πεντακώμου .....	21
3.1.3	Ερμηνεία αποτελεσμάτων dpl .....	24
4	Επιλύσεις με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (rearth2D) .....	29
4.1	Παραμετρική ανάλυση ως προς τον συντελεστή διασποράς COV .....	29
4.2	Παραμετρική ανάλυση ως προς το μήκος χωρικής συσχέτισης –correlation length ( $\theta$ )	32
4.3	Παραμετρική ανάλυση ως προς το ύψος του τοίχου .....	34
4.4	Παραμετρική ανάλυση ως προς το πλάτος του επιχώματος .....	37
4.5	Παραμετρική ανάλυση με πραγματικά δεδομένα πεδίου .....	39
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	41
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	43
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ .....	45
	Μετρήσεις DPL .....	45

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Τιμές COV για χαρακτηριστικά πυκνότητας - υγρασίας.....	2
Πίνακας 2: Τιμές COV για χαρακτηριστικά πλαστικότητας.....	3
Πίνακας 3: Τιμές COV για χαρακτηριστικά αντοχής εδάφους.....	4
Πίνακας 4: Τιμές COV για χαρακτηριστικά στερεοποίησης και διαπερατότητας.....	5
Πίνακας 5: Τιμές COV ανάλογα με την αντίσταση N .....	7
Πίνακας 6: Τιμές COV για δοκιμή CPT.....	7
Πίνακας 8: Συμπιεστότητα σε σχέση με αριθμό κτύπων .....	10
Πίνακας 7: Πυκνότητα σε σχέση με αριθμό κτύπων.....	10
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά πεδίου Πεντακόμου .....	39
Πίνακας A 1: Μετρήσεις DPL – Θέση 1 .....	45
Πίνακας A 2: Μετρήσεις DPL – Θέση 2.....	46
Πίνακας A 3: Μετρήσεις DPL – Θέση 3.....	47
Πίνακας A 4: Μετρήσεις DPL – Θέση 4.....	48
Πίνακας A 5: Μετρήσεις DPL – Θέση 5.....	49
Πίνακας A 6: Μετρήσεις DPL – Θέση 6.....	50
Πίνακας A 7: Μετρήσεις DPL – Θέση 7.....	51
Πίνακας A 8: Μετρήσεις DPL – Θέση 8.....	52

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Πηγές εδαφικής αβεβαιότητας.....	1
Εικόνα 2: Όρια Atterberg .....	3
Εικόνα 3: DPL.....	8
Εικόνα 4: Μέτρηση ροπής με το δυναμόκλειδο. Αντίσταση σε διάτμηση στη διεπιφάνεια πρότυπου κώνου DPL - εδάφους.....	9
Εικόνα 5: Κανονική κατανομή – normal distribution .....	13
Εικόνα 6: Λογαριθμονανονική κατανομή - lognormal distribution.....	14
Εικόνα 7: Σχέση βάθους με αντίσταση στην άκρη του κώνου .....	15
Εικόνα 8: Πεδία με διαφορετικό μήκος χωρικής συσχέτισης .....	16
Εικόνα 9: Σχέση αριθμού επαναλήψεων με το σφάλμα.....	17
Εικόνα 10: Τυπική αστοχία παθητικής ώθησης .....	18
Εικόνα 11: Κάναβος.....	19
Εικόνα 12: Χαμηλό μήκος συσχετισμού.....	19
Εικόνα 13: Ψηλό μήκος συσχετισμού.....	19
Εικόνα 14: Θέση πεδίου .....	20
Εικόνα 15: Πεδίο Πεντακόμου .....	21
Εικόνα 16: Σημεία μέτρησης DPL .....	22
Εικόνα 17: Βάθος μετρήσεων.....	23
Εικόνα 18: Κάναβος για την ανάλυση φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων-RFEM.....	30
Εικόνα 19: Παραμορφωμένος κάναβος πεπερασμένων στοιχείων και διάγραμμα μετατόπισης .....	30
Εικόνα 20: Παραμορφωμένος κάναβος πεπερασμένων στοιχείων.....	33
Εικόνα 21: Παραμορφωμένος κάναβος πεπερασμένων στοιχείων και διάγραμμα μετατόπισης .....	35

Εικόνα 22: Παραμορφωμένος κλίμακος πεπερασμένων στοιχείων και διάγραμμα μετατόπισης .....	37
Εικόνα Α 1: Γεωλογικός χάρτης Κύπρου.....	53
Εικόνα Α 2: Υδρογεωλογικός χάρτης Κύπρου .....	53

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Προφίλ υπεδάφους .....	23
Διάγραμμα 2: Σχέση διείσδυσης με συνολικό αριθμό κτύπων .....	25
Διάγραμμα 3: Κτύποι – Συνολικό βάθος καθίζησης Θέση 1 .....	26
Διάγραμμα 4: Κτύποι – Συνολικό βάθος καθίζησης Θέση 2 .....	26
Διάγραμμα 5: Διείσδυση ανά 10 κτύπους – Συνολικό βάθος .....	27
Διάγραμμα 6: Κτύποι – Συνολικό βάθος καθίζησης .....	27
Διάγραμμα 7: Ροπή – Συνολικό βάθος.....	28
Διάγραμμα 8: Ροπή – Συνολικό βάθος.....	28
Διάγραμμα 9: Σχέση COV με πιθανότητα αστοχίας σε ολίσθηση.....	31
Διάγραμμα 10: Σχέση COV με πιθανότητα αστοχίας σε ανατροπή .....	31
Διάγραμμα 11: Σχέση $\theta/H$ με πιθανότητα αστοχίας σε ολίσθηση .....	33
Διάγραμμα 12: Σχέση $\theta/H$ με πιθανότητα αστοχίας σε ανατροπή .....	34
Διάγραμμα 13: Σχέση ύψους τοίχου με πιθανότητα αστοχίας σε ολίσθηση.....	36
Διάγραμμα 14: Σχέση ύψους τοίχου με πιθανότητα αστοχίας σε ανατροπή .....	36
Διάγραμμα 15: Σχέση πλάτους του επιχώματος με πιθανότητα αστοχίας σε ολίσθηση.....	38
Διάγραμμα 16: Σχέση πλάτους επιχώματος με πιθανότητα αστοχίας σε ανατροπή .....	38
Διάγραμμα 17: Σχέση $\theta$ με πιθανότητα αστοχίας σε ολίσθηση .....	40
Διάγραμμα 18: Σχέση $\theta$ με πιθανότητα αστοχίας σε ανατροπή .....	40

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Γενικά στην κατασκευαστική μηχανική, τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται είναι επί το πλείστον ανθρώπινο δημιούργημα, κάνοντας έτσι τη χρήση τους όπως και την ανάλυση τους σχετικά εύκολη, ακόμη και για περίπλοκα υλικά όπως ο χάλυβας και το σκυρόδεμα. Εν αντιθέσει, η γεωτεχνική μηχανική έχει να ασχοληθεί κυρίως με υλικά και ιδιότητες όπως ακριβώς παρέχονται από τη φύση, κάνοντας την εκτίμηση της συμπεριφοράς τους πολύ πιο δύσκολη. Σαν υλικό, το έδαφος χαρακτηρίζεται από υψηλή ετερογένεια τόσο στην κάθετη, όσο και στην οριζόντια κατεύθυνση, κυρίως λόγω του τρόπου γένεσής του.

Προσεγγιστικές μέθοδοι ανάλυσης όπως η ανάλυση φέρουσας ικανότητας, καθιζήσεων και τοίχων αντιστήριξης, υστερούν στο γεγονός ότι δεν λαμβάνουν υπόψη αυτή την ανομοιογένεια του εδάφους. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι μέθοδοί αυτοί προκαθορίζουν τη γραμμική αστοχία, η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων αυξάνεται σε βαθμό να τις καταστά αναξιόπιστες.

Η μέθοδος Random Finite Element Method (RFEM) είναι μια πιθανολογική προσέγγιση βασισμένη στη θεωρία τυχαίων πεδίων. Η μέθοδος αναπτύχθηκε από τους Griffiths και Fenton το 1992. Το γεγονός ότι η μέθοδος RFEM λαμβάνει υπόψη τη χωρική μεταβλητότητα του εδάφους την καθιστά ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για τη διερεύνηση του υπεδάφους.

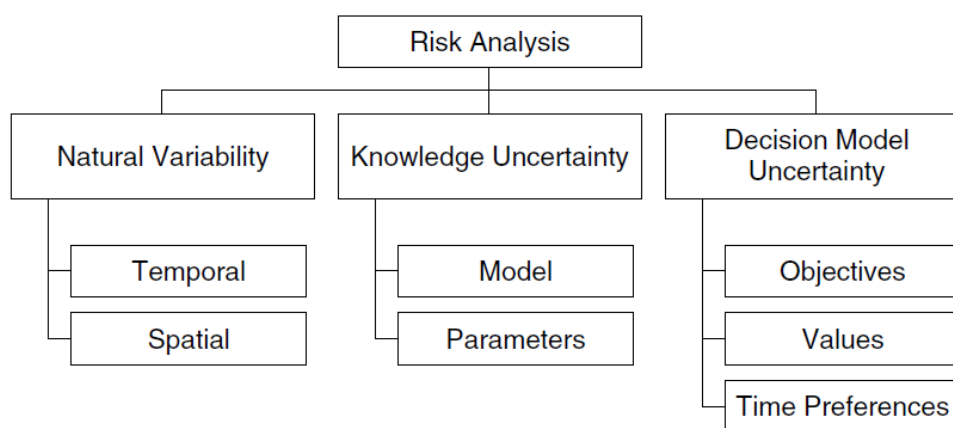
Η παρούσα πτυχιακή αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται οι παράγοντες που συμβάλλουν στην αβεβαιότητα του εδάφους. Το δεύτερο κεφάλαιο ασχολείται με την πιθανολογική ανάλυση τοίχου αντιστήριξης. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο πεδίο έρευνας και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν μέσω της δοκιμής DPL. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επιλύσεις που έγιναν για θεωρητικά δεδομένα μέσω του λογισμικού τυχαίων πεπερασμένων στοιχείων (Mrearth2d). Τέλος, στο κεφάλαιο πέντε γίνεται μια περίληψη με τα σημαντικά συμπεράσματα της έρευνας.

# 1 Αβεβαιότητα στις ιδιότητες του εδάφους

Η αξιολόγηση των ιδιοτήτων του εδάφους είναι μια από τις βασικές πτυχές που διακρίνουν τη Γεωτεχνική από τη Κατασκευαστική Μηχανική. Η μεταβλητότητα στις ιδιότητες του εδάφους συμβάλλει σημαντικά στην εδαφική αβεβαιότητα.

Σύμφωνα με τους Gregory B. Baecher και John T. Christian (2003), οι τρεις κύριες πηγές εδαφικής αβεβαιότητας είναι:

- Η φυσική μεταβλητότητα του εδάφους
- Οι αβεβαιότητες στη γνώση
- Αβεβαιότητα επιλογής μοντέλου



Εικόνα 1: Πηγές εδαφικής αβεβαιότητας

Πηγή: Gregory B. Baecher και John T. Christian (2003)

Η φυσική μεταβλητότητα συνδέεται με την εγγενής μεταβλητότητα του εδάφους και προκύπτει κυρίως λόγω των φυσικών γεωλογικών διαδικασιών που συμβαίνουν με τη πάροδο του χρόνου, όπως η σύνθεση, η απόθεση και άλλες χημικές διεργασίες, οι οποίες τροποποιούν συνεχώς τη μάζα του εδάφους. Η φυσική μεταβλητότητα μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας μαθηματικές απλοποιήσεις και μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων.

Η αβεβαιότητα στη γνώση οφείλεται στην έλλειψη πληροφοριών και δεδομένων, αλλά και στην περιορισμένη ικανότητα μοντελοποίησης του φυσικού κόσμου. Η αβεβαιότητα στη γνώση μπορεί να χωριστεί σε 3 κατηγορίες, αβεβαιότητα χαρακτηρισμού του πεδίου,

αβεβαιότητα μοντελοποίησης και αβεβαιότητα των παραμέτρων. Η αβεβαιότητα τόσο στη μοντελοποίηση, όσο και στις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων, εξαρτώνται από το πόσο καλά αντιπροσωπεύουν τη πραγματική φυσική συμπεριφορά.

## 1.1 Η φυσική μεταβλητότητα του εδάφους

### 1.1.1 Χαρακτηριστικά πυκνότητας-υγρασίας

Η πυκνότητα ενός εδάφους είναι σημαντική στον υπολογισμό των τάσεων που αναπτύσσονται κάτω και δίπλα από μια κατασκευή. Η πυκνότητα υπολογίζεται εργαστηριακά λαμβάνοντας υπόψη τον όγκο και το βάρος του εδάφους. Σύμφωνα με τους Lacasse και Nadim (1996) η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) του ειδικού βάρους (ή της πυκνότητας) για όλα τα είδη εδαφών να ακολουθεί κανονική κατανομή. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές COV (συντελεστής διασποράς) για τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: περιεχόμενη υγρασία ( $w$ ), συνολικό ειδικό βάρος ( $\gamma$ ), ειδικό ξηρό βάρος ( $\gamma_d$ ), φαινόμενο ειδικό βάρος (μερικώς κορεσμένο)  $\gamma_b$ , σχετική πυκνότητα ( $D_r$ ), ειδική βαρύτητα ( $G_s$ ) και βαθμός κορεσμού ( $S$ ).

Πίνακας 1: Τιμές COV για χαρακτηριστικά πυκνότητας - υγρασίας

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
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Fine-grained	6	5 – 3200	564	14 – 20	17.5	3 – 20	9	1
$\gamma$	*	*	*	*	*	*	3	*	3
$\gamma$	*	12	*	*	*	*	*	7.1	4
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Fine-grained	8	4 – 315	122	13 – 18	15.7	2 – 13	7	1
$\gamma_b$ (kN/m <sup>3</sup> )	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

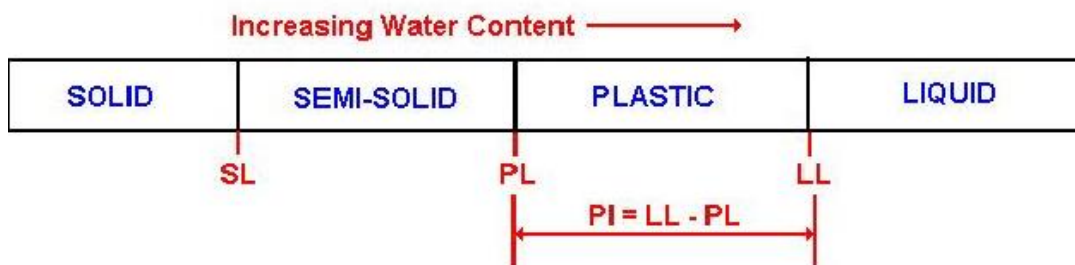
\*Not reported.  
(a) Total variability for direct method of determination.  
(b) Total variability for indirect determination using SPT values.  
Notes:  
(1) Phoon and Kulhawy (1999).  
(2) Lacasse and Nadim (1996). No comments made on whether measurement variability was included.  
(3) Harr (1987).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

Πηγή: Jones et al., 2002



### 1.1.2 Χαρακτηριστικά πλαστικότητας

Τα χαρακτηριστικά πλαστικότητας είναι σημαντικά για την κατάταξη των εδαφών και για την μηχανική τους συμπεριφορά. Οι δείκτες πλαστικότητας μετρούνται εργαστηριακά με τα όρια Atterberg.



Εικόνα 2: Όρια Atterberg

Σύμφωνα με τους Lacasse και Nadim (1996) και Lumb (1966), τα όρια αυτά ακολουθούν κανονική κατανομή. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τιμές COV για τα όρια υδαρότητας (LL), όριο πλαστικότητας (PL), δείκτη πλαστικότητας (PI) και δείκτη υδαρότητας (LI).

Πίνακας 2: Τιμές COV για χαρακτηριστικά πλαστικότητας

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.

Πηγή: Jones et al., 2002

### 1.1.3 Χαρακτηριστικά αντοχής

Η γνώση των αβεβαιοτήτων της αντοχής του εδάφους είναι πολύ σημαντική στην εδαφομηχανική, αφού η λανθασμένη εκτίμηση της αντοχής μπορεί να επιφέρει είτε δομικές αστοχίες σε περιπτώσεις υπερεκτίμησής της, είτε αύξηση του κόστους σε περιπτώσεις υποεκτίμησής της.

Σύμφωνα με τους Lacasse και Nadim (1996), η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) για την γωνία τριβής ( $\phi$ ), ακολουθεί κανονική κατανομή σε αμμώδη εδάφη. Για την αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u$ , για ιλυώδες εδάφη, εισηγούνται η PDF να ακολουθεί μια λογαριθμοκανονική κατανομή ενώ για αργιλικά εδάφη να ακολουθείτε κανονική κατανομή. Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι τιμές COV για την διατμητική αντοχή και τη γωνία τριβής για διάφορους τύπους εδαφών.

**Πίνακας 3: Τιμές COV για χαρακτηριστικά αντοχής εδάφους**

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	4
$\tan \bar{\phi}$	Clay, silt	4	*	*	0.24 – 0.69	0.509	6 – 46	20	1
$\tan \bar{\phi}$	Clay, silt	3	*	*	*	0.615	6 – 46	23	
$\tan \phi$	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
$\phi$ (°)	Gravel	*	*	*	*	*	7	*	3
	Sand	*	*	*	*	*	12	*	
$\varepsilon_u^{(a)}$ (kPa)	Fine-grained	38	2 – 538	101	6 – 412	100	6 – 56	33	1
$\varepsilon_u^{(b)}$ (kPa)	Clay, Silt	13	14 – 82	33	15 – 363	276	11 – 49	22	
$\varepsilon_u^{(c)}$ (kPa)	Clay	10	12 – 86	47	130 – 713	405	18 – 42	32	
$\varepsilon_u^{(d)}$ (kPa)	Clay	42	24 – 124	48	8 – 638	112	6 – 80	32	
	*	38	*	*	*	*	*	33.8	
$\varepsilon_u^{(e)}$ (kPa)	Clay	*	*	*	*	*	5 – 20	*	2
$\varepsilon_u^{(f)}$ (kPa)	Clay	*	*	*	*	*	10 – 35	*	
$\varepsilon_u^{(g)}$ (kPa)	Clayey silt	*	*	*	*	*	10 – 30	*	
$c^{(g)}$	*	*	*	*	*	*	40	*	
$\varepsilon_u/\sigma'_{v0}$	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  $\varepsilon_u$ .  
(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.

Πηγή: Jones et al., 2002

### 1.1.4 Χαρακτηριστικά στερεοποίησης και διαπερατότητας εδάφους

Τα χαρακτηριστικά στερεοποίησης και διαπερατότητας του εδάφους είναι σημαντικά στον καθορισμό της σχέσης μεταξύ θλίψης/εφελκυσμού και χαρακτηριστικών του εδάφους εξαρτημένων του χρόνου.

Σύμφωνα με τους Lacasse και Nadim (1996), η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) για τον συντελεστή στερεοποίησης ακολουθεί είτε λογαριθμοκανονική, είτε κανονική κατανομή. Ο δείκτης πόρων ( $e$ ) το πορώδες ( $n$ ) και ο αρχικός δείκτης πόρων ( $e_0$ ) για όλα τα εδάφη να ακολουθούν κανονική κατανομή. Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται οι τιμές COV για τις παρακάτω εργαστηριακές παραμέτρους: Δείκτης συμπίεσης ( $C_c$ ), τάση προ-στερεοποίησης ( $p_c'$ ), δείκτης πόρων ( $e$ ), αρχικός δείκτης πόρων ( $e_0$ ), λόγος υπερστερεοποίησης (OCR), συντελεστής διαπερατότητας ( $k$ ), συντελεστής στερεοποίησης ( $c_v$ ) και πορώδες ( $n$ ).

**Πίνακας 4: Τιμές COV για χαρακτηριστικά στερεοποίησης και διαπερατότητας**

Property (units)	Soil Type	No. of Data Groups	No. of Tests Per Group		Property Value		Property COV (%)		Note
			Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	
$C_c$	Sandy clay	*	*	*	*	*	26	*	1
	Clay	*	*	*	*	*	30	*	
	*	*	*	*	*	*	37	*	
$p_c'$	*	*	*	*	*	*	19	*	1
OCR	*	*	*	*	*	*	10 – 35	*	3
$k$	*	*	*	*	*	*	240		1
	*	*	*	*	*	*	90	*	
$c_v$	*	*	*	*	*	*	33 – 68	*	4
$e, n, e_0$	All soil types	*	*	*	*	*	7 – 30	*	5
$n$	*	*	*	*	*	*	10	*	1

\* Not reported.  
(a) 80% saturation.  
(b) 100% saturation.  
Notes:  
(1) Harr (1987).  
(2) Kulhawy (1992). No comments made on whether measurement variability was included.  
(3) Lacasse and Nadim (1996). No comments made on whether measurement variability was included.  
(4) Duncan (2000).

Πηγή: Jones et al., 2002

## **1.2 Αβεβαιότητα στη γνώση**

### **1.2.1 Αβεβαιότητα χαρακτηρισμού του πεδίου**

Η αβεβαιότητα χαρακτηρισμού του πεδίου προκύπτει από την αβεβαιότητα των δεδομένων και της διερεύνησης του πεδίου, η οποία περιλαμβάνει σφάλματα μετρήσεων, ανομοιογένεια των εδαφών, λάθη στους μετασχηματισμούς δεδομένων και ανεπαρκής ποσότητα δεδομένων.

### **1.2.2 Σφάλματα μετρήσεων**

Τα σφάλματα στις μετρήσεις προκύπτουν κυρίως από τα μηχανήματα τα οποία χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις, από τον χειριστή των μηχανημάτων και από τυχαίες επιδράσεις χαρακτηριστικών τα οποία δεν μπορούν να μετρηθούν ξεχωριστά.

### **1.2.3 Ανομοιογένεια των εδαφών**

Μέσα από τις μετρήσεις που γίνονται στο πεδίο μπορούν να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά των εδαφών, όπως επίσης και η μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών που έχουν. Πιο κάτω θα παρουσιαστεί η εγγενής μεταβλητότητα ανάλογα με τις 2 πιο διαδεδομένες δοκιμές που γίνονται για τον χαρακτηρισμό των εδαφών.

### **1.2.4 Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης - Standard Penetration Test (SPT)**

Η Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης είναι η πιο διαδεδομένη επιτόπου δοκιμή που χρησιμοποιείται στην γεωτεχνική. Με την δοκιμή αυτή υπολογίζονται χαρακτηριστικά του εδάφους όπως η γωνία τριβής ( $\phi$ ), η φέρουσα ικανότητα ( $q$ ), η διατμητική αντοχή ( $S$ ) κα.

Ο πίνακας 5 παρουσιάζει τιμές COV για την εγγενή μεταβλητότητα ανάλογα με την αντίσταση N.

**Πίνακας 5: Τιμές COV ανάλογα με την αντίσταση N**

Property	Soil Type	No. of Data Groups	No. of Tests Per Group		Property Value		Property COV (%)		Note
			Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	
N	Clay & Sand	*	*	*	10 – 70	*	25 – 50	*	1
N	Sand	22	2 – 300	123	7 – 74	35	19 – 62	54	2
N	Clay Loam	2	2 – 61	32	7 – 63	32	37 – 57	44	
N	*	*	*	*	*	*	26	*	3

Notes:  
 (1) Phoon and Kulhawy (1996).  
 (2) Phoon and Kulhawy (1999).  
 (3) Harr (1987). No comment made on whether measurement variability was included.

Πηγή: Jones et al., 2002

### 1.2.5 Δοκιμή Διείσδυσης Κώνου - Cone Penetration Test (CPT)

Η Δοκιμή Διείσδυσης Κώνου είναι ίσως η πιο διαδεδομένη δοκιμή μετά από την Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης. Με την δοκιμή μετρείται η δύναμη της αντίστασης στην άκρια του κώνου αλλά και η τριβή που προκαλείται στα τοιχώματά του.

Σύμφωνα με τους Lacasse και Nadim (1996), σε αμμώδη εδάφη χρησιμοποιείται λογαριθμοκανονική κατανομή, ενώ σε αργιλώδη εδάφη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κανονική η κατανομή. Ο πίνακας 6 παρουσιάζει τιμές COV για την εγγενή μεταβλητότητα για την αντίσταση στην αιχμή του κώνου ( $q_t$ ) και την αιχμή του κώνου έπειτα από τη δοκιμή διείσδυσης.

**Πίνακας 6: Τιμές COV για δοκιμή CPT**

Property (units)	Soil Type	No. of Data Groups	No. of Tests Per Group		Property Value		Property COV (%)		Note
			Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	
$q_T$ (MPa)	Clay	*	*	*	0.5 – 2.5	*	< 20	*	1
	Clay	9	*	*	0.4 – 2.6	1.32	2 – 17	8	2
$q_c$ (MPa)	Clay	*	*	*	0.5 – 2.0	*	20 – 40	*	1
	Sand	*	*	*	0.5 – 30.0	*	20 – 60	*	1
	Sand	57	10 – 2039	115	0.4 – 29.2	4.10	10 – 81	38	2
	Silty Clay	12	30 – 53	43	0.5 – 2.1	1.59	5 – 40	27	2
*	*	*	*	*	*	37	*	3	

\* Not reported

Notes:

(1) Phoon and Kulhawy (1996).

(2) Phoon and Kulhawy (1999).

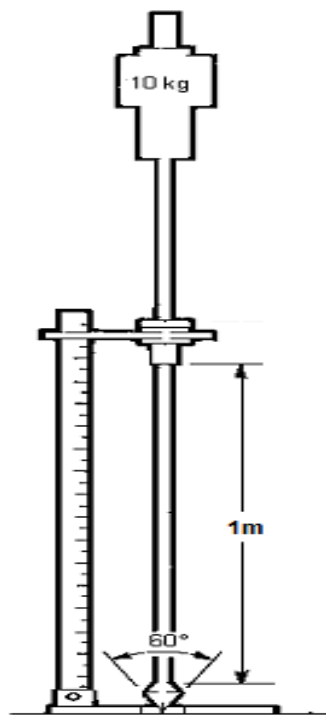
(3) Harr (1987). No comment made on whether measurement variability was included.

Πηγή: Jones et al., 2002

### 1.2.6 DPL (dynamic light penetrometer)

Το DPL (εικόνα 3) είναι το πιο ελαφρύ και συνάμα το πιο οικονομικό όργανο προσέγγισης της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Η δοκιμή DPL αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

- Ράβδοι 1m εκάστη
- Κώνος εμβαδού 10cm<sup>2</sup>
- Βαρίδι πρόσκρουσης 10kg
- Εξολκέας
- Δυναμόμετρο
- Μετροταινία



Εικόνα 3: DPL

Η διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής με βάση το πρότυπο EN ISO 22476-2:2005 είναι η ακόλουθη: αρχικά απομακρύνεται μια στρώση επιφανειακού εδάφους και έπειτα τοποθετείται

ο κώνος στο έδαφος. Ο κώνος εισχωρεί σταδιακά στο έδαφος κατά τη διάρκεια των κρούσεων από τη σφύρα 10kg. Για σκοπούς μελέτης της ετερογένειας οι μετρήσεις καταγράφονται με δύο τρόπους. Είτε καταγράφεται η διείσδυση σε ακρίβεια χιλιοστού ανά 10 χτύπους, είτε καταγράφεται ο αριθμός των χτύπων που χρειάστηκε για διείσδυση 10cm. Στην κάθε περίπτωση, με το πέρας της κάθε επανάληψης, μετριέται το μέγεθος της ροπής του κώνου με τη χρήση δυναμόμετρου (εικόνα 4) με βάση το πρότυπο EN ISO 22476-2:2005. Το πρότυπο προβλέπει οι μετρήσεις ροπής να γίνονται κάθε 1 μέτρο διείσδυσης. Για σκοπούς μελέτης της ετερογένειας οι μετρήσεις ροπής γίνονται κάθε 10 εκατοστά. Με την μέτρηση της ροπής προσδιορίζεται η πλευρική τριβή του κώνου. Η ροπή που λαμβάνεται υπόψη είναι ο μέσος όρος 3 ροπών που λαμβάνονται σε κάθε βάθος.



**Εικόνα 4: Μέτρηση ροπής με το δυναμόκλειδο. Αντίσταση σε διάτμηση στη διεπιφάνεια πρότυπου κώνου DPL - εδάφους**

Ανάλογα με τον αριθμό των κτύπων που χρειάζονται για την πρόσχωση 10cm του κώνου, μπορεί να εξαχθεί ένα πρώτο συμπέρασμα σχετικά με τη συμπιεστότητα και την πυκνότητα

του εδάφους. Οι πίνακες 7 και 8 δείχνουν την κατηγορία που εμπίπτει το έδαφος σε συμπιεστότητα και πυκνότητα, ανάλογα με το πλήθος των κτύπων για διείδυση 10cm.

**Πίνακας 7: Συμπιεστότητα σε σχέση με αριθμό κτύπων**

Blows $N_{10}$	Compacity
< 1	Very loose
< 7	Loose
7 - 83	Medium
> 83	Dense

Πηγή: Nilson T, 2008

**Πίνακας 8: Πυκνότητα σε σχέση με αριθμό κτύπων**

Blows $N_{10}$	Consistence
< 3	Very soft
3 - 6	Soft
6 - 12	Medium
13 - 22	Stiff
23 - 45	Very stiff
> 45	Hard

Πηγή: Nilson T, 2008

Εν κατακλείδι, η μέθοδος DPL επιτρέπει στον μελετητή να εξάγει γρήγορα συμπεράσματα σχετικά με μερικά χαρακτηριστικά του εδάφους όπως η αντοχή, η πυκνότητα και η συμπιεστότητα. Με τη χρήση της ροπής μπορούν να υπολογιστούν παράμετροι όπως η γωνία τριβής ( $\phi$ ) και η συνοχή (C).



### 1.3 Αβεβαιότητα επιλογής μοντέλου

Κατά την μοντελοποίηση δημιουργούνται αβεβαιότητες αναλόγως του βαθμού της ακρίβειας με τον οποίο το επιλεγμένο μαθηματικό μοντέλο αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα. Η αβεβαιότητα στην μοντελοποίηση προκύπτει επίσης και από την αδυναμία του ερευνητή να προσδιορίσει το κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο στην ανάλογη περίπτωση.

## 2 Πιθανολογική ανάλυση τοίχου αντιστήριξης

Μια τυχαία μεταβλητή μπορεί να περιγραφεί, όσο το δυνατό καλύτερα, αν καθοριστεί η πιθανολογική της κατανομή. Ποτέ όμως δεν μπορεί η μεταβλητή αυτή να αντικατοπτρίζει με απόλυτη ακρίβεια τα πραγματικά δεδομένα αφού η φυσική συμπεριφορά είναι πολύ πιο περίπλοκη από αυτή που μπορεί να περιγραφεί. Οι ιδιότητες του εδάφους μπορούν να εκφραστούν σαν τυχαίες μεταβλητές.

Για να περιγράψουμε μια τυχαία μεταβλητή πρέπει να καθοριστούν η μέση τιμή ( $\mu$ ) και η τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ). Στην στατιστική η απόκλιση συνηθίζεται να εκφράζεται σαν ο λόγος της απόκλισης ως προς τη μέση τιμή ( $\sigma/\mu$ ) και ονομάζεται συντελεστής διακύμανσης (Coefficient of Variation – COV).

### 2.1.1 Μέση τιμή ( $\mu$ )

Η μέση τιμή είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό μιας τυχαίας μεταβλητής. Η μέση τιμή δείχνει που συγκεντρώνεται η πιθανολογική κατανομή. Μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Όπου  $\mu$ =μέση τιμή,  $n$ =μέγεθος του δείγματος και  $X_i$ =διακριτές τιμές

### 2.1.2 Διακύμανση ( $\sigma^2$ )

Η διακύμανση ορίζεται ως ο μέσος αριθμητικός των τετραγώνων των διαφορών των τιμών μιας μεταβλητής από το μέσο αριθμητικό της. Συμβολίζεται με  $\sigma^2$  όταν αναφερόμαστε σε πληθυσμό και με  $s^2$  για δείγμα. Η διακύμανση υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2$$

Όπου  $\sigma^2$ =διακύμανση,  $\mu$ =μέση τιμή,  $n$ =μέγεθος του δείγματος και  $X_i$ =διακριτές τιμές.

### 2.1.3 Τυπική απόκλιση ( $\sigma$ )

Η τυπική απόκλιση καθορίζει το πόσο απέχει η κάθε μέτρηση από τη μέση τιμή των μετρήσεων, κατά μέσο όρο. Δείχνει δηλαδή ποια είναι η μέση απόσταση που απέχει ο κάθε αριθμός από το μέσο όρο του αριθμητικού συνόλου που ανήκει. Η τυπική απόκλιση ορίζεται σαν η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης.

### 2.1.4 Συντελεστής Διακύμανσης - Coefficient of Variation (COV)

Ο συντελεστής διακύμανσης μετρά την μεταβλητότητα μιας σειράς τιμών, ανεξαρτήτως της μονάδας μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συγκριθούν κατανομές με διαφορετικές μονάδες μέτρησης. Ο συντελεστής διακύμανσης υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$COV = \frac{\sigma}{\mu}$$

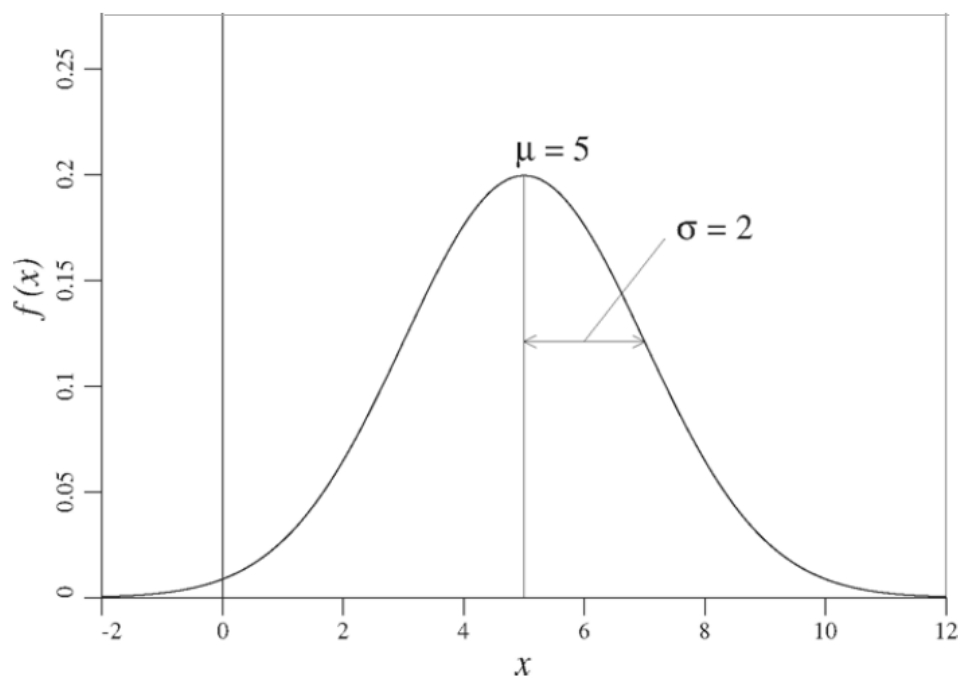
Όπου  $\sigma$ =τυπική απόκλιση και  $\mu$ =μέση τιμή.

## 2.2 Κατανομές

Οι κύριοι τύποι κατανομών που χρησιμοποιούνται σήμερα στις εφαρμογές είναι η κανονική κατανομή (normal distribution) και η λογαριθμοκανονική κατανομή (lognormal distribution).

### 2.2.1 Κανονική κατανομή (normal distribution)

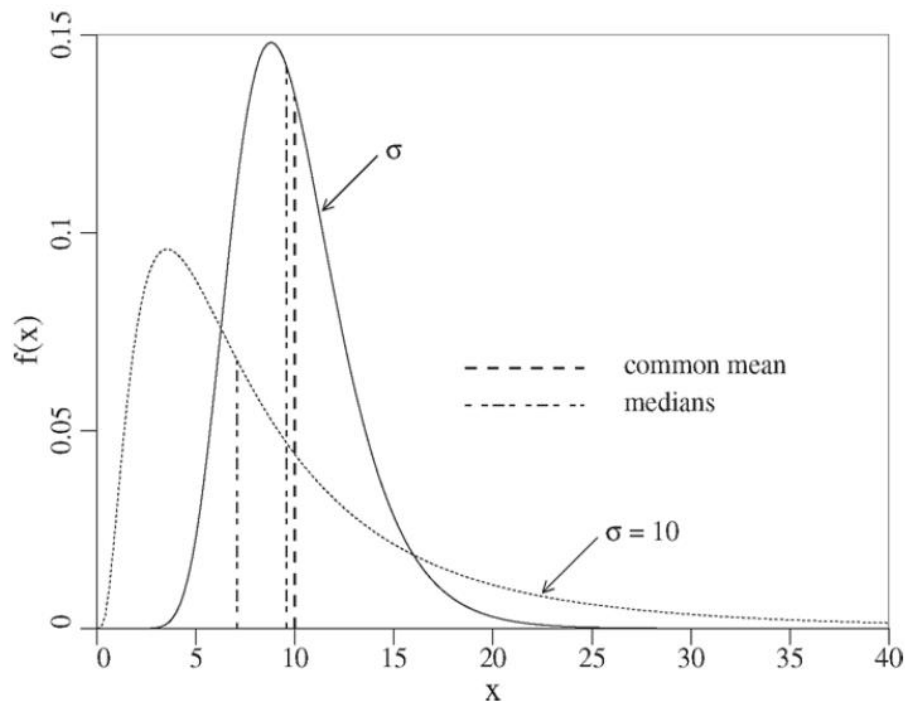
Η κανονική κατανομή (εικόνα 3) είναι ίσως η πιο σημαντική διαδεδομένη κατανομή. Αυτό είναι κυρίως επειδή το σύνολο των τυχαίων μεταβλητών τείνουν σε μια κανονική κατανομή. Πολλά φυσικά φαινόμενα τείνουν σε κανονική κατανομή όπως για παράδειγμα η συνοχή του εδάφους. Η κανονική κατανομή είναι συμμετρική δεξιά και αριστερά της μέσης τιμής ( $\mu$ ), με την μεταβλητή να μπορεί να πάρει τιμές από πλην άπειρο μέχρι άπειρο ( $-\infty < P < \infty$ ). Από πλευράς μοντελοποίησης, η κανονική κατανομή έχει ένα μεγάλο μειονέκτημα. Αυτό είναι ότι εισάγει αρνητικές τιμές. Εάν για παράδειγμα μοντελοποιήσουμε το ειδικό βάρος ( $\gamma$ ) του εδάφους χρησιμοποιώντας κανονική κατανομή, υπάρχει μια μη μηδενική πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί αρνητικό ειδικό βάρος, πράγμα που δεν μπορεί να συμβεί, οπότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κανονική κατανομή.



Εικόνα 5: Κανονική κατανομή – normal distribution

### 2.2.2 Λογαριθμοκανονική κατανομή (lognormal distribution)

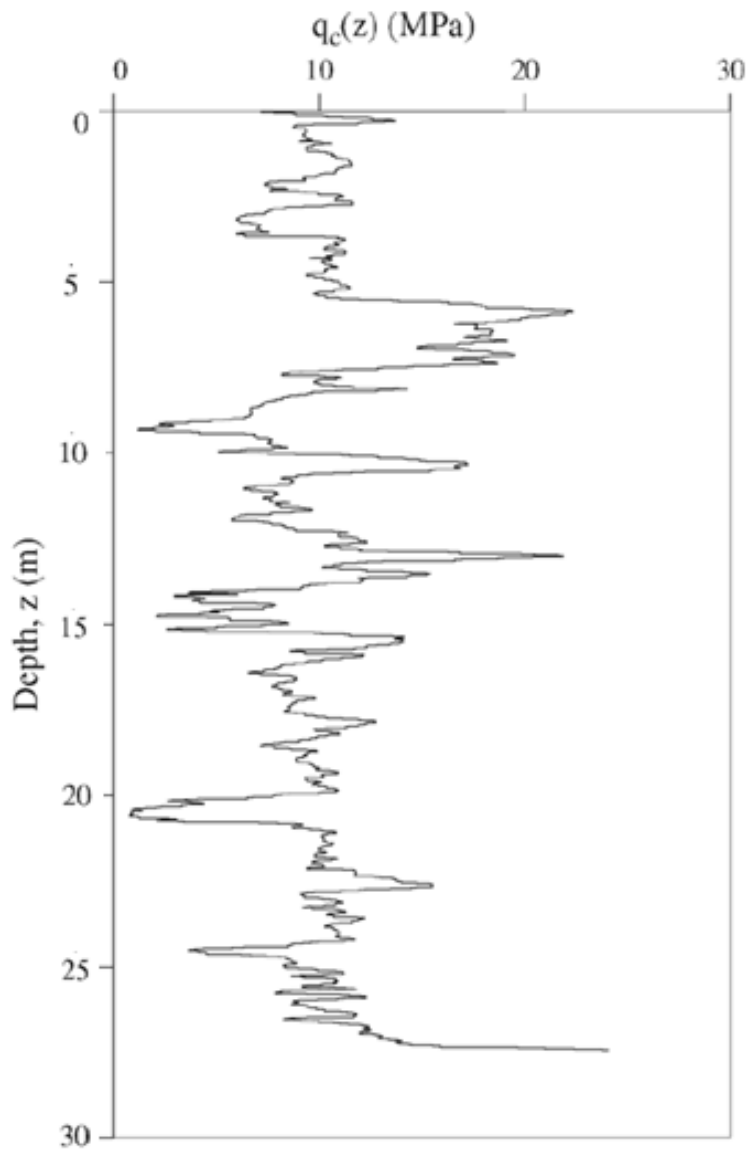
Για να αποφευχθεί το μειονέκτημα της κανονικής κατανομής να εισάγει αρνητικές μεταβλητές, χρησιμοποιείται η λογαριθμοκανονική κατανομή. Η λογαριθμοκανονική κατανομή (εικόνα 4) προκύπτει μέσω ενός μη γραμμικού μετασχηματισμού ο οποίος αλλάζει τα όρια της μεταβλητής για να παίρνει μόνο θετικές τιμές ( $0 < P < \infty$ ).



Εικόνα 6: Λογαριθμοκανονική κατανομή - lognormal distribution

### 2.3 Τυχαία πεδία

Τα τυχαία πεδία αποτελούνται από μια ακολουθία συνεχών τυχαίων μεταβλητών σε κάθε σημείο  $t$ . Η εικόνα 5 παρουσιάζει την αντίσταση στην άκρη του κώνου κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής διείδυσης κώνου (CPT) σε ένα σημείο  $t$ .

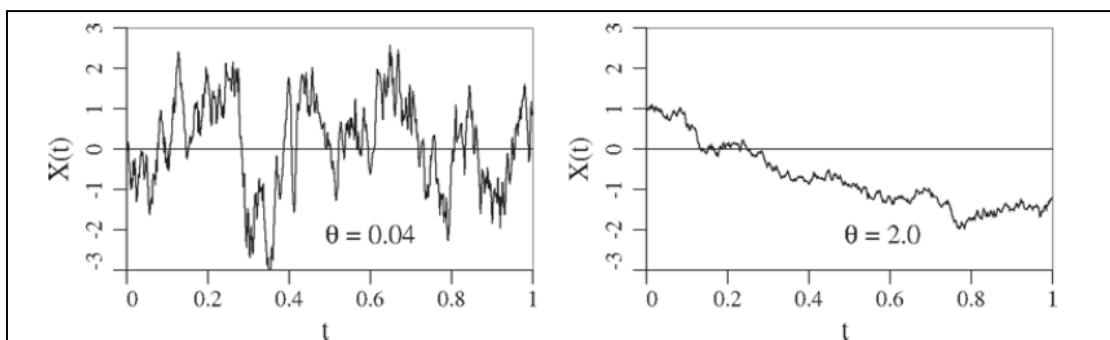


Εικόνα 7: Σχέση βάθους με αντίσταση στην άκρη του κώνου

Η εικόνα 7 δίνει μια καλή εικόνα του τι συμβαίνει στο σημείο  $t$  αλλά θα πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει και άλλα σημεία τα οποία βρίσκονται σε κάποια απόσταση. Ένας σημαντικός παράγοντας που εμπλέκεται στο χαρακτηρισμό τυχαίων πεδίων είναι η μεταβλητότητα σε ένα σημείο και η χωρική μεταβλητότητα. Η χωρική μεταβλητότητα (spatial variability) μετριέται μέσω της τιμής που έχει το μήκος χωρικής συσχέτισης (correlation length), το οποίο περιγράφει την απόσταση στην οποία οι τυχαίες μεταβλητές

τείνουν να συσχετίζονται. Για παράδειγμα, εάν το μήκος χωρικής συσχέτισης είναι 5m, τότε οι ιδιότητες του εδάφους δυο σημείων που απέχουν 10m θα είναι λίγο ή πολύ στατιστικά ανεξάρτητες. Εάν τα σημεία απέχουν 1m, τότε θα υπάρχει υψηλή συσχέτιση των χαρακτηριστικών τους. Έχει παρατηρηθεί ότι ανάλογα με το γεωλογικό ιστορικό και την σύνθεση του εδάφους, το μήκος χωρικής συσχέτισης μπορεί να πάρει τιμές από 10-40m στην οριζόντια κατεύθυνση και 0,5-3m στην κάθετη κατεύθυνση. Σε περιπτώσεις όπου το μήκος συσχετισμού προσεγγίζει το άπειρο, το έδαφος θεωρείται ως ομοιογενές ενώ για μικρά  $\theta$  τότε το έδαφος θεωρείται περισσότερο ετερογενές. Τα διάφορα εδάφη μπορούν να είναι είτε ισοτροπικά, να έχουν δηλαδή το ίδιο μήκος χωρικής συσχέτισης και στους δύο άξονες, είτε ανισοτροπικά, όπου το μήκος χωρικής συσχέτισης να διαφέρει στους δύο άξονες.

Η εικόνα 8 παρουσιάζει δυο πεδία με διαφορετικό μήκος συσχετισμού. Στα δεξιά παρουσιάζεται το πεδίο με το μεγαλύτερο μήκος συσχετισμού και φαίνεται καθαρά η υψηλή διαφοροποίηση σε σχέση με το πεδίο με μικρότερο μήκος συσχετισμού.

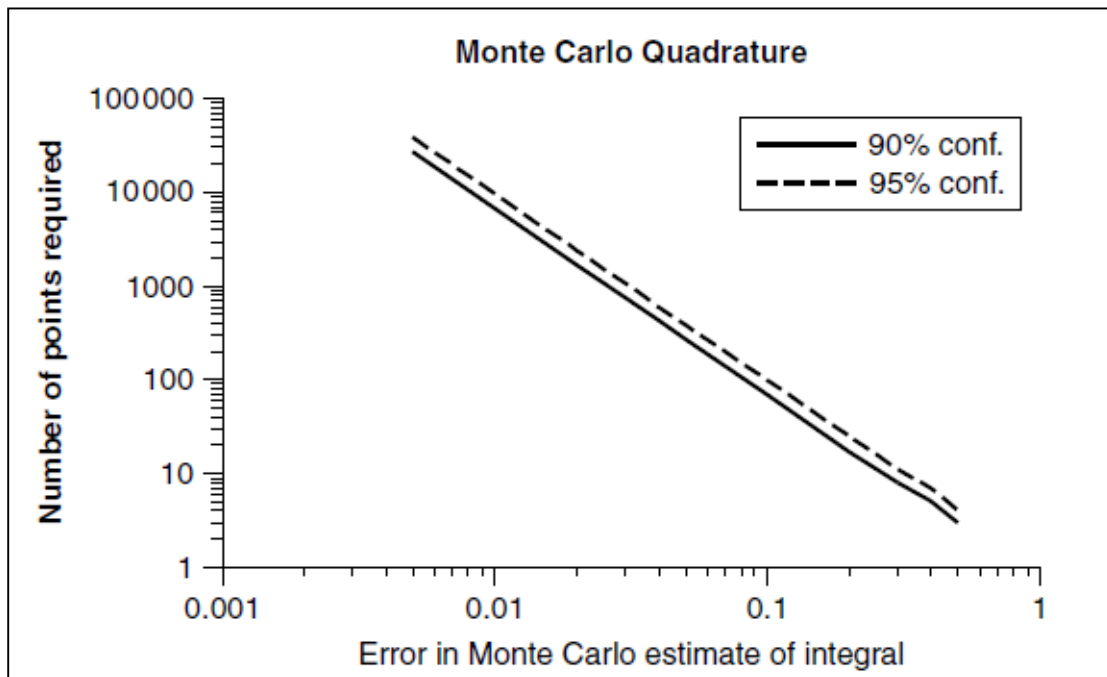


Εικόνα 8: Πεδία με διαφορετικό μήκος χωρικής συσχέτισης

## 2.4 Μέθοδοι Προσομοίωσης

Είναι πολύ σημαντικό στη Μηχανική να προσδιοριστούν εκ των προτέρων οι αβεβαιότητες μιας κατασκευής. Για τον υπολογισμό και την εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Μερικές από αυτές είναι η Monte Carlo simulation, Second Order Reliability Methods (FORM – SORM), First Order Second Moment ( FOSM) και Tree Analysis. Στην παρούσα διατριβή γίνεται αναφορά μόνο στη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo.

Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια μέθοδος προσομοίωσης η οποία χρησιμοποιεί επαναλαμβανόμενα τυχαία δείγματα και στατιστική ανάλυση για τον υπολογισμό αποτελεσμάτων. Αφού εφαρμοστούν οι επιθυμητές επαναλήψεις, οι οποίες θα δώσουν αξιόπιστο αποτέλεσμα, η μέθοδος εξάγει τα αποτελέσματα των πιθανοτήτων. Η μέθοδος Monte Carlo μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε γραμμικά, όσο και σε μη γραμμικά προβλήματα, καθώς και για στοχαστικά και ντετερμινιστικά συστήματα. Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται η σχέση του αριθμού των επαναλήψεων με το σφάλμα της μεθόδου.

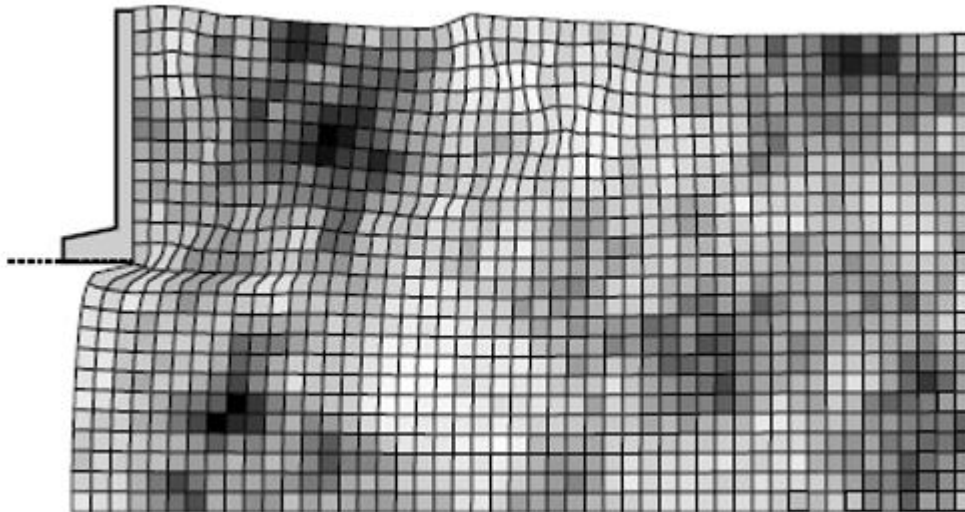


Εικόνα 9: Σχέση αριθμού επαναλήψεων με το σφάλμα

## 2.5 Μέθοδος Random Finite-Element Method (RFEM)

Το σημείο εκκίνησης για την λειτουργία προγραμμάτων προσομοίωσης είναι η πιθανολογική προσέγγιση, βασισμένη στη θεωρία τυχαίων πεδίων, όπως αναπτύχθηκε από τους Griffiths και Fenton το 1992. Η προσέγγιση αυτή ονομάζεται Random Finite Element Method (RFEM), η οποία συνδυάζει ελαστοπλαστική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με τη θεωρία των τυχαίων πεδίων.

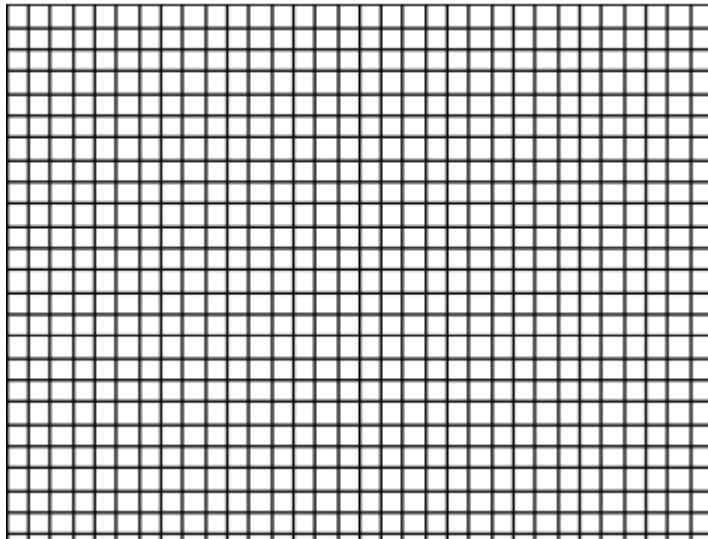
Η μέθοδος RFEM δημιουργεί και καθορίζει ένα τυχαίο πεδίο με ιδιότητες  $c'$  και  $\phi'$ , σε ένα καθορισμένο κάναβο, λαμβάνοντας υπόψη την χωρική μεταβλητότητα. Στην ανάλυση, η παθητική αντίδραση του τοίχου  $P_p$  φτάνει στο όριο της και η ανάλυση επαναλαμβάνεται χρησιμοποιώντας προσομοίωση Monte Carlo. Κάθε προσομοίωση έχει την ίδια μέση τιμή, τυπική απόκλιση και χωρική μεταβλητότητα, αλλάζει μόνο η χωρική κατανομή των ιδιοτήτων ούτως ώστε να οδηγεί σε διαφορετική τιμή αντίδρασης  $P_p$ . Με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος υπολογίστηκε η πιθανότητα αστοχίας, η οποία στην παρούσα πτυχιακή εργασία ορίζεται ως ο αριθμός των επαναλήψεων που αστόχησαν προς το συνολικό αριθμό των επαναλήψεων αναλόγως για κάθε συντελεστή ασφαλείας (FS).



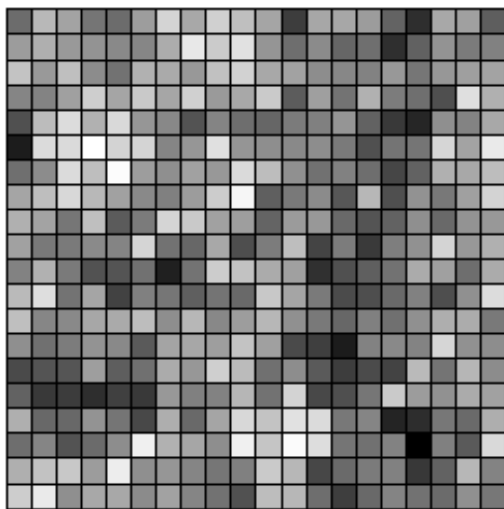
**Εικόνα 10: Τυπική αστοχία παθητικής ώθησης**



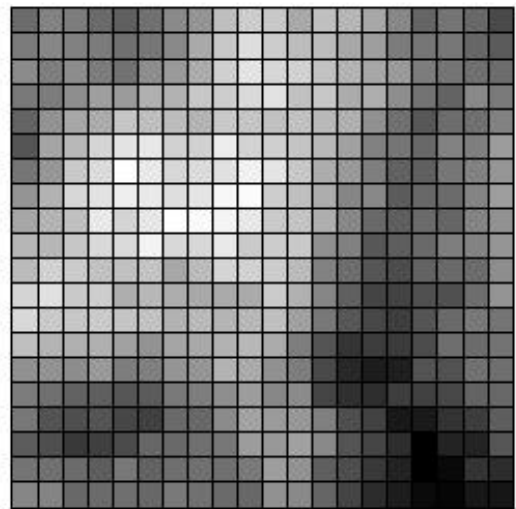
Στην εικόνα 10 παρουσιάζεται ο κάρναβος ο οποίος αποτελείται από 1024 (32x32) πεπερασμένα στοιχεία. Για κάθε μεταβαλλόμενη ιδιότητα του εδάφους το πλέγμα θα αποτελείται από 1024 μεταβλητές. Οι μεταβλητές αυτές συσχετίζονται μεταξύ τους μέσω του μήκους χωρικής συσχέτισης ( $\theta$ ). Στις εικόνες 12 και 13 φαίνονται δύο εδάφη με διαφορετικό  $\theta$ . Οι πιο σκούρες περιοχές αντιπροσωπεύουν ισχυρότερο έδαφος ενώ πιο ανοιχτόχρωμες αντιπροσωπεύουν ασθενέστερο έδαφος.



**Εικόνα 11: Κάρναβος**



**Εικόνα 13: Χαμηλό μήκος συσχετισμού**

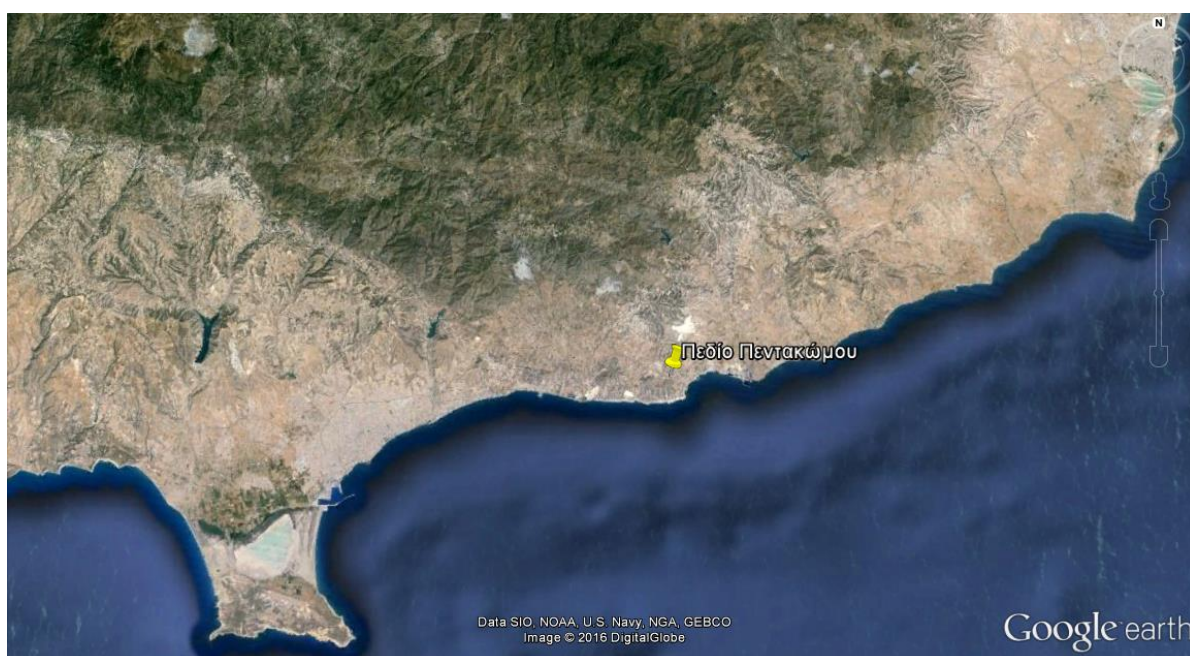


**Εικόνα 12: Ψηλό μήκος συσχετισμού**

### 3 Έρευνα πεδίου

#### 3.1 Επιλογή πεδίου

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένα πεδίο που βρισκόταν πλησίον του χωριού Πεντάκωμο, ανατολικά της Λεμεσού (εικόνα 14).



Εικόνα 14: Θέση πεδίου

##### 3.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά πεδίου

Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη (εικόνα A1-Παράρτημα), η περιοχή του Πεντακώμου χαρακτηρίζεται από χαλαζιακό ψαμμίτη ενσωματωμένων σε μετεονιτική άργιλο. Ο υδρογεωλογικός χάρτης (Εικόνα A2-Παράρτημα) αναφέρει ότι υπάρχουν τοπικά και μικρά ασυνεχή υπόγεια ύδατα σε ιζηματογενής και πυριγενής σχηματισμούς

Το έδαφος το οποίο εξετάστηκε αφορούσε ένα αργιλώδες επίχωμα το πρηνές του οποίου έχει συνολικό ύψος 9m και γωνία κλίσης  $\beta = 57^\circ$  (εικόνα 15).



**Εικόνα 15: Πεδίο Πεντακόμου**

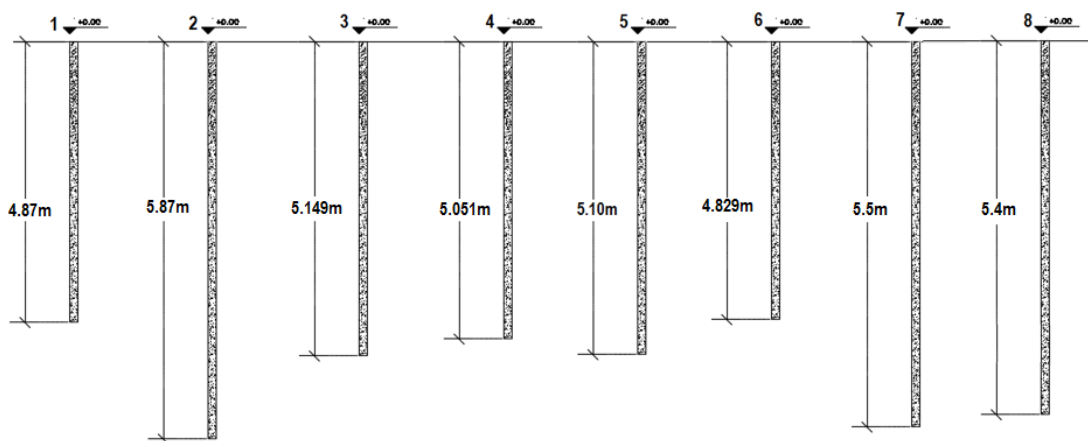
### **3.1.2 Μετρήσεις dpl-πεδίο Πεντακόμου**

Οι μετρήσεις στο πεδίο Πεντακόμου έγιναν σε 8 σημεία κατά μήκος του πρανές, τα οποία απείχαν 1,2m μεταξύ τους (εικόνα 16). Για την έρευνα του πεδίου χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή DPL (Dynamic Probing Light). Οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 22476-2:2005. Για τις θέσεις 1, 2, 5, 7, 8 έγιναν μετρήσεις για διείσδυση 10cm, ενώ για τις θέσεις 3, 4, 6 οι μετρήσεις έγιναν για διείσδυση 10 κτύπων. Σκοπός των δύο διαφορετικών τρόπων μέτρησης είναι να μελετηθεί το μήκος χωρικής συσχέτισης ( $\theta$ ) ως προς τον τρόπο μελέτης. Με το πέρας της κάθε επανάληψης, μετρήθηκε το μέγεθος της ροπής του κώνου με τη χρήση δυναμόμετρου με βάση το πρότυπο EN ISO 22476-2:2005. Οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στους πίνακες Πίνακας Α1 έως Πίνακας Α8 (Παράρτημα Α).

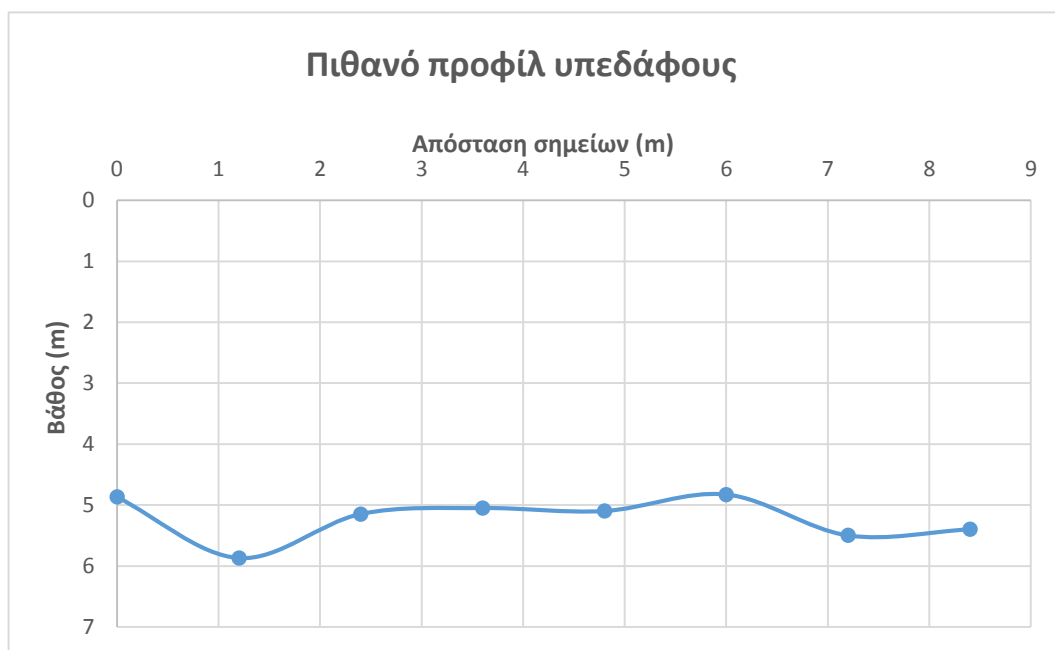


**Εικόνα 16: Σημεία μέτρησης DPL**

Στην εικόνα 17 απεικονίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των οποίων λήφθηκαν οι μετρήσεις, καθώς και το βάθος το οποίο έφθασε η κάθε μέτρηση. Στο διάγραμμα 1 φαίνεται το πιθανό προφίλ του εδάφους σύμφωνα με το βάθος των μετρήσεων. Όπως μπορεί να φανεί, είναι πιθανή η παρουσία μιας ισχυρής στρώσης εδάφους ή βράχου κάτω από τη γραμμή που σχηματίστηκε.



Εικόνα 17: Βάθος μετρήσεων



Διάγραμμα 1: Προφίλ υπεδάφους

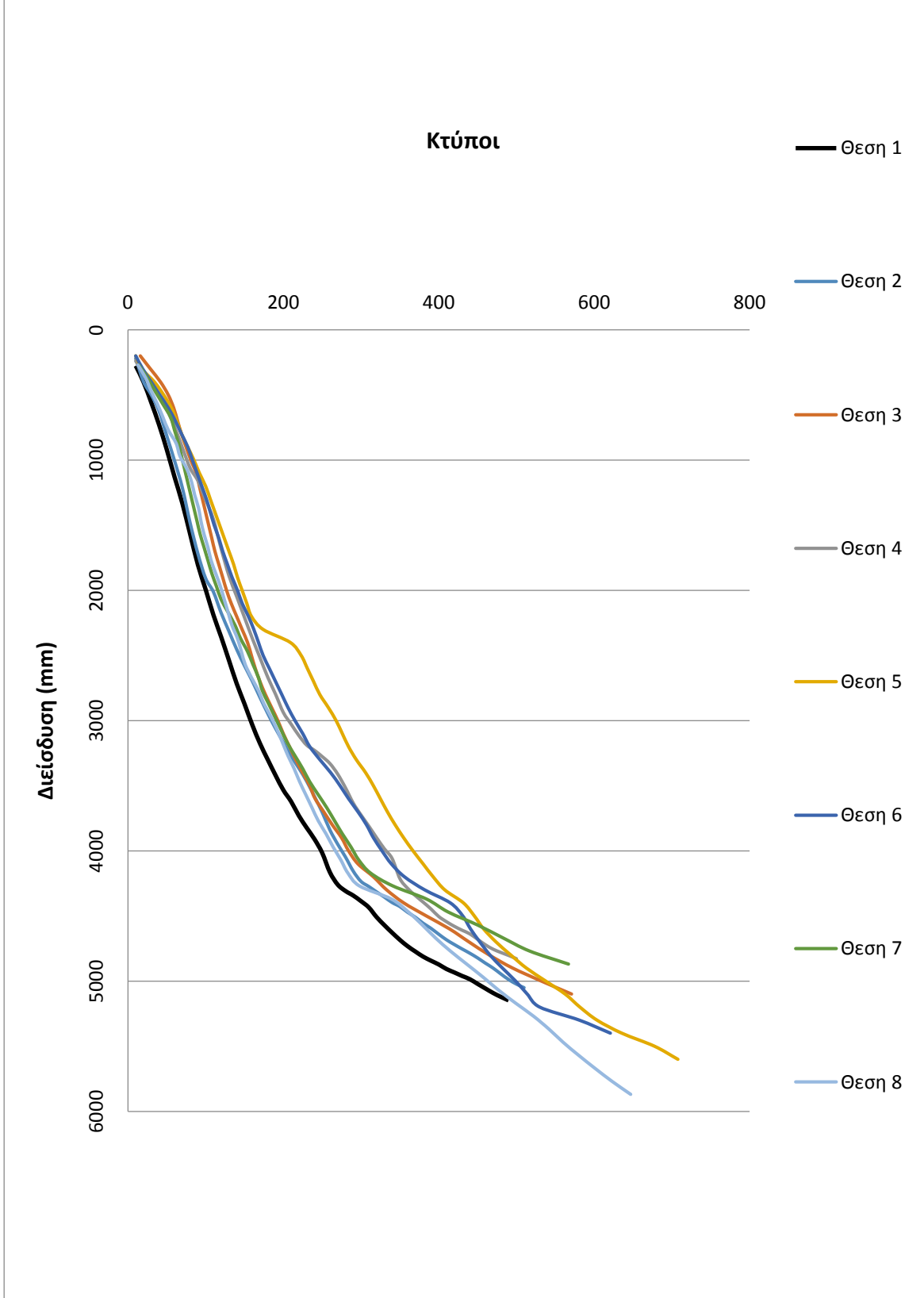
### 3.1.3 Ερμηνεία αποτελεσμάτων dpl

Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν μέσω του DPL παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων στα διαγράμματα 3-8. Στο διάγραμμα 5 παρουσιάζεται η διείσδυση του κώνου ανά 10 κρούσεις. Παρατηρείται η έντονη ανομοιογένεια του εδάφους. Αυτό εξάγεται από το γεγονός ότι για τον ίδιο αριθμό κτύπων έχουμε διαφορετική διείσδυση. Ο αριθμός των κτύπων δηλώνει και χαρακτηριστικά του εδάφους όπως επεξηγήθηκε προηγουμένως. Η μέτρηση σταματά όταν για μεγάλο αριθμό κτύπων η διείσδυση είναι πολύ μικρή. Αυτό δηλώνει την πιθανή ύπαρξη μιας ισχυρής στρώσης εδάφους ή βράχου. Από τα διαγράμματα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το έδαφος είναι αρκετά ετερογενές τόσο κατά πλάτος του πρηνές αφού η διείσδυση για κάθε σετ κτύπων διέφερε για το ίδιο βάθος σε κάθε σημείο, όσο και κατά βάθος του πρηνές, όπου για κάθε κτύπο υπήρχε διαφορετική καθίζηση.

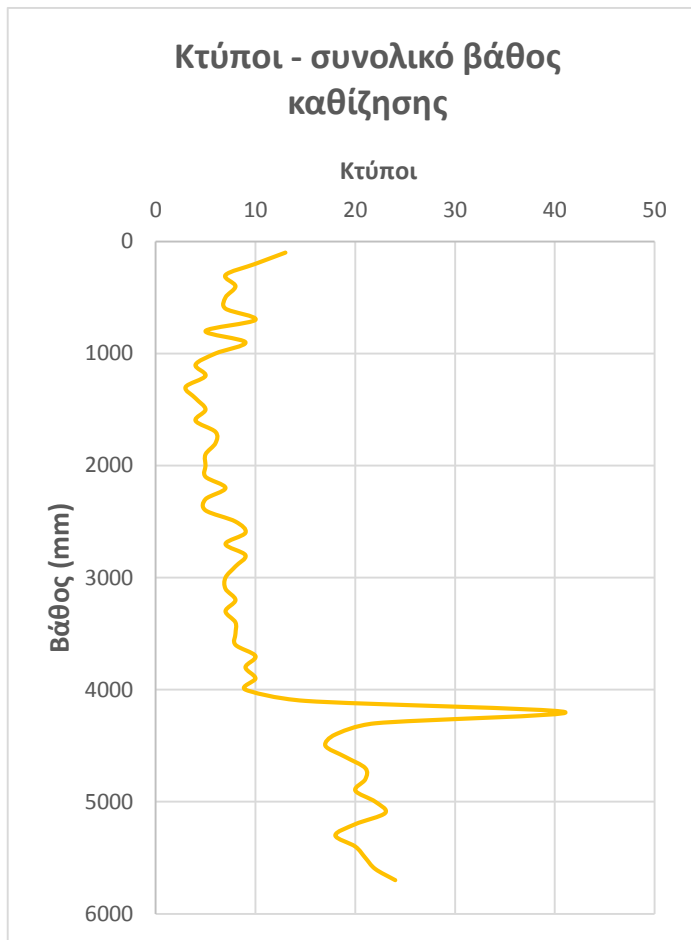
Στα διαγράμματα 3, 4 και 6 παρουσιάζεται ο αριθμός των κτύπων που χρειάζονται για διείσδυση 10cm. Όπως και στην περίπτωση για διείσδυση ανά 10 κρούσεις, παρατηρείται ξανά η έντονη ανομοιογένεια του εδάφους, αφού για σταθερή διείσδυση απαιτείται διαφορετικός αριθμός κτύπων για κάθε φορά. Στο διάγραμμα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συνολικού βάθους διείσδυσης σε σχέση με τους χτύπους που χρειάζονται για την διείσδυση αυτή. Παρατηρείται ότι χρειάζεται διαφορετικός αριθμός κτύπων για την ίδια διείσδυση σε κάθε σημείο. Στα διαγράμματα 7 και 8 παρουσιάζεται το μέγεθος της ροπής στο αντίστοιχο βάθος, η οποία λήφθηκε με τη χρήση δυναμόμετρου. Μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι υπάρχει γραμμική αύξηση της ροπής σε σχέση με το βάθος. Η ροπή είναι ενδεικτική της αντοχής του εδάφους, οπότεν μεγάλο μέγεθος ροπής αντιστοιχεί σε πιο ισχυρό έδαφος.

Μέσα από τις μετρήσεις που έγιναν στο πεδίο υπολογίστηκε το μέγεθος του μήκους χωρικής συσχέτισης ( $\theta$ ). Ενδεικτικά, το  $\theta$  υπολογίστηκε 4,34m για τη θέση 1, 1,57m για τη θέση 2, 5,58m για τη θέση 3, 1,94m για τη θέση 4, 1,64m για τη θέση 5 και 2,73m για τη θέση 6. Υπενθυμίζεται ότι για τις θέσεις 1, 2 και 4, η δοκιμή DPL έγινε για σετ 10 κτύπων, ενώ για τις θέσεις 3, 5 και 6, η δοκιμή έγινε για διείσδυση 10cm. Από το γεγονός ότι για 6 σημεία που απέχουν μόλις 1,2m μεταξύ τους έχουμε 6 διαφορετικές τιμές μήκους χωρικής συσχέτισης ενισχύεται το γεγονός ότι το έδαφος χαρακτηρίζεται από πολύ ψηλή ετερογένεια.

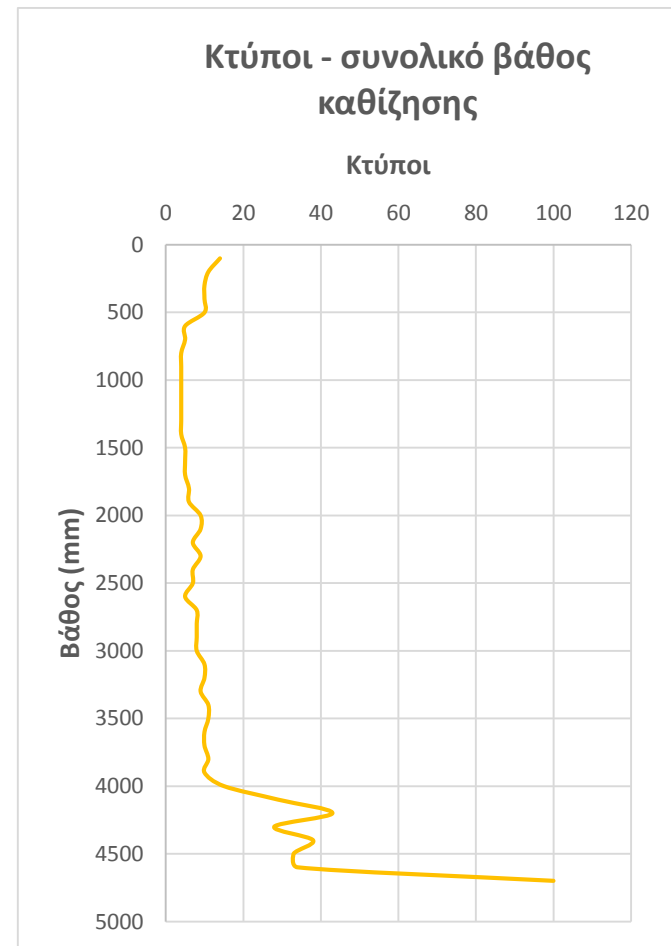
## Κτύποι - Διείσδυση



Διάγραμμα 2: Σχέση διείσδυσης με συνολικό αριθμό κτύπων

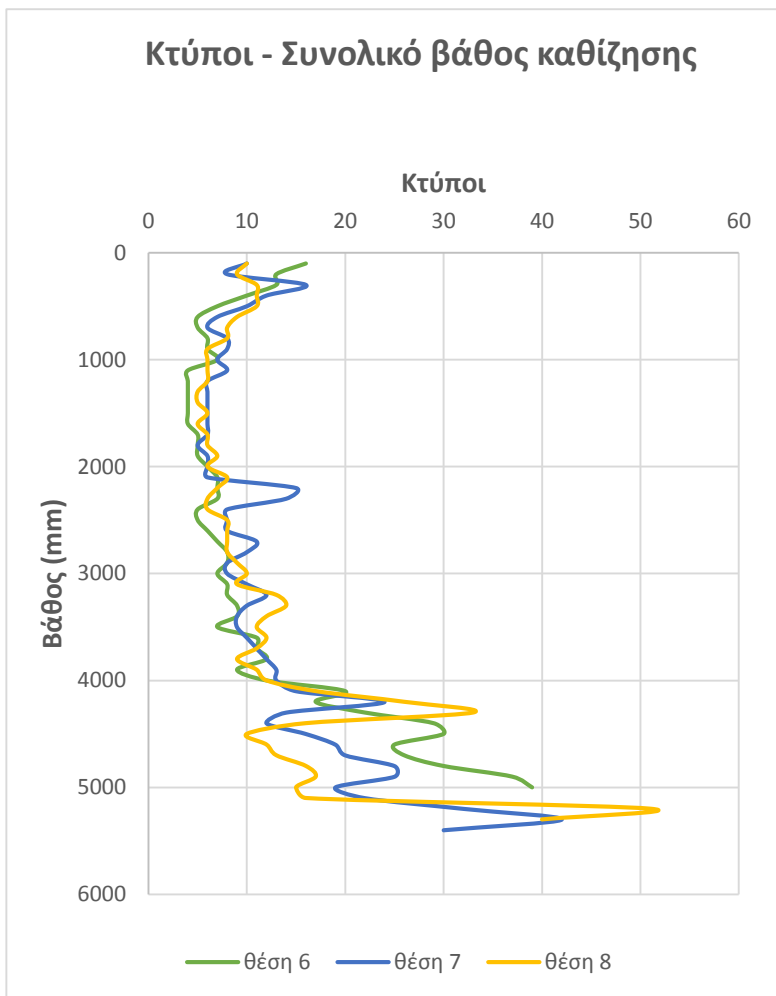


Διάγραμμα 4: Κτύποι – Συνολικό βάθος καθίζησης Θέση 2

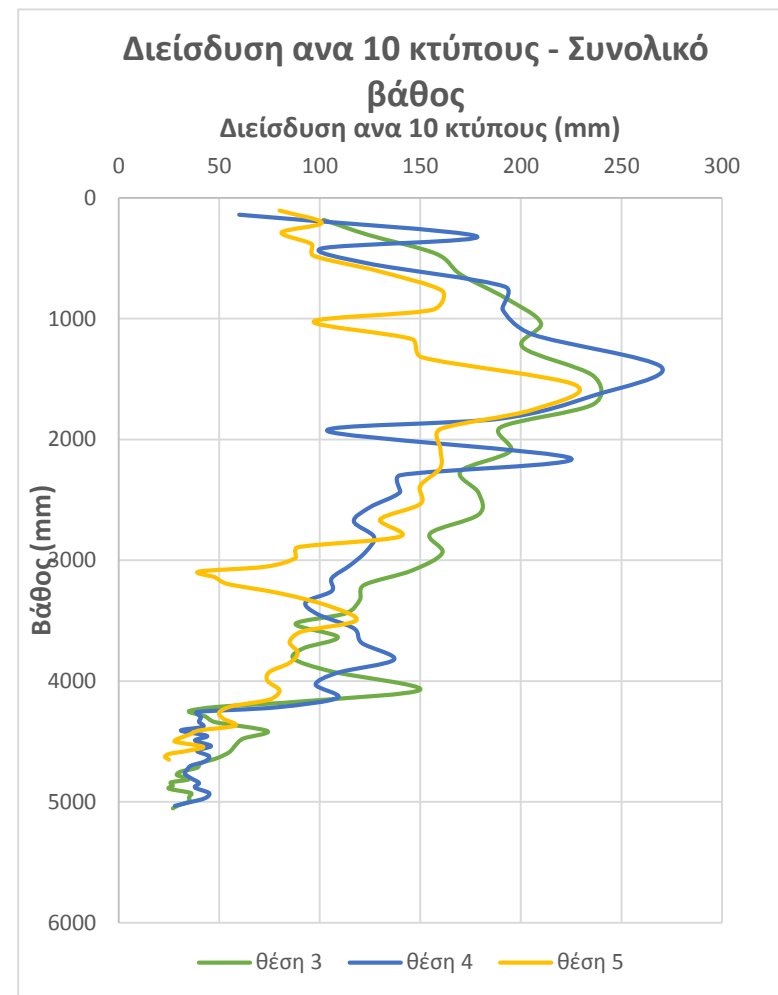


Διάγραμμα 3: Κτύποι – Συνολικό βάθος καθίζησης Θέση 1

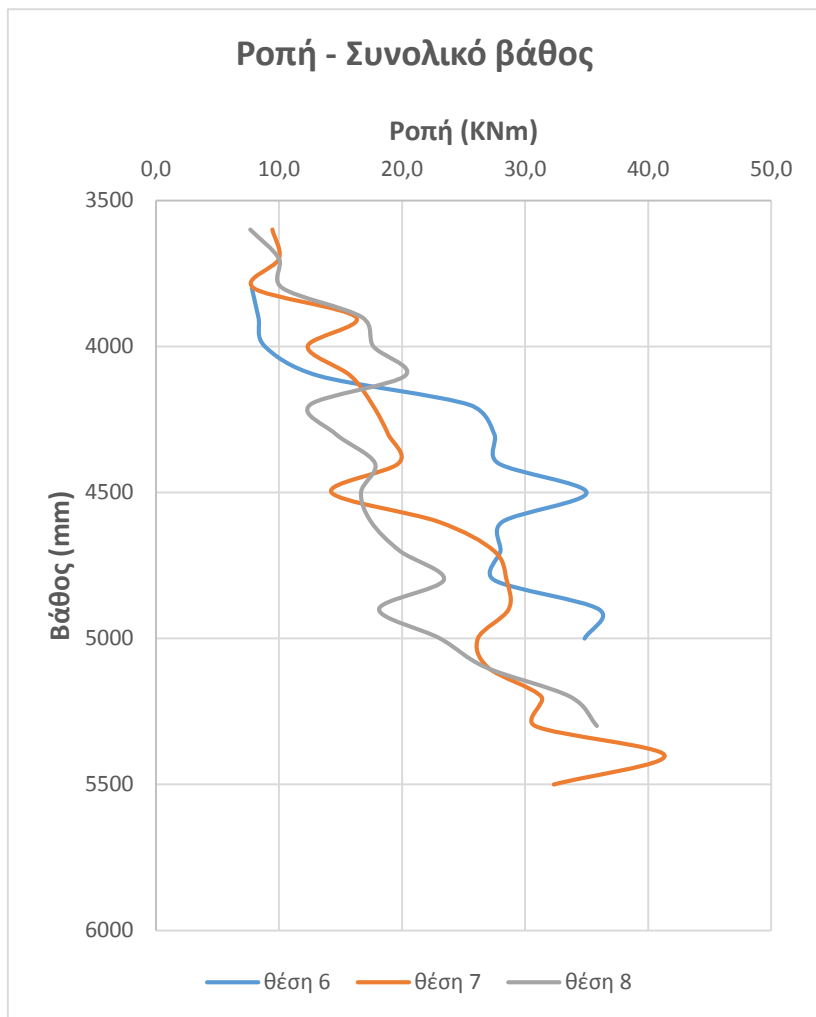




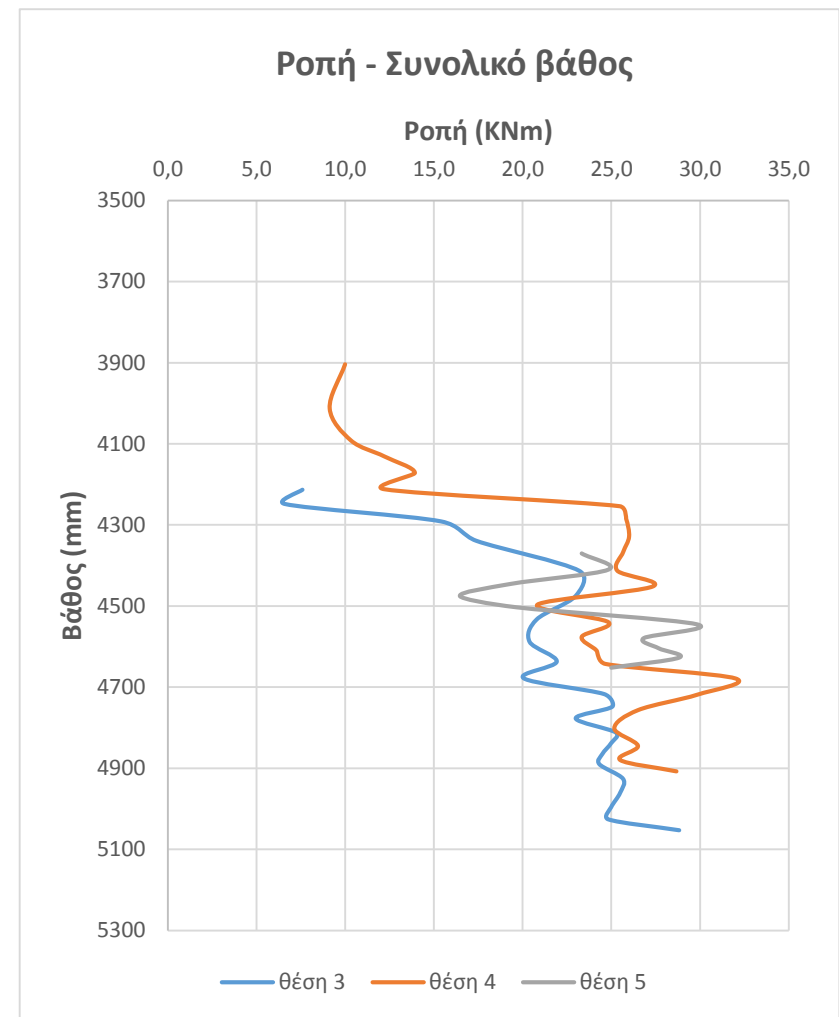
Διάγραμμα 6: Κτύποι – Συνολικό βάθος καθίζησης



Διάγραμμα 5: Διείσδυση ανά 10 κτύπους – Συνολικό βάθος



Διάγραμμα 7: Ροπή – Συνολικό βάθος



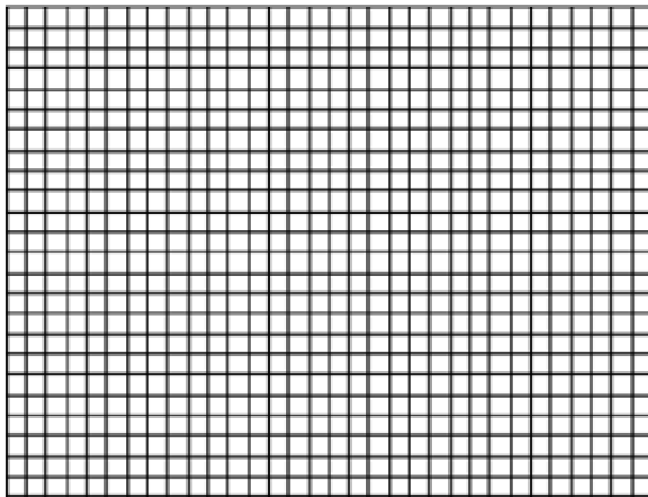
Διάγραμμα 8: Ροπή – Συνολικό βάθος

## 4 Επιλύσεις με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (rearth2D)

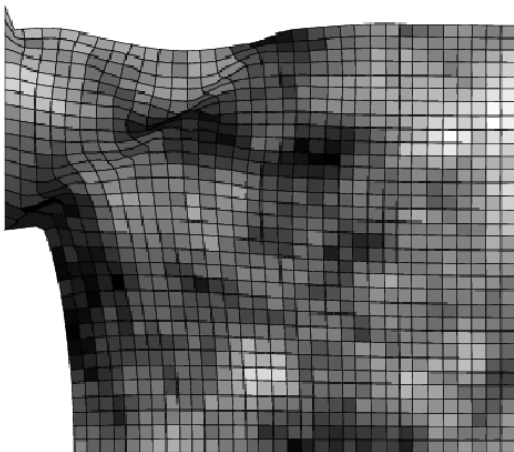
Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται επιλύσεις για τον προσδιορισμό της πιθανότητας αστοχίας (pf) του εδάφους με τη χρήση του λογισμικού rearth2D. Η πιθανότητα αστοχίας ορίζεται ως η πιθανότητα η πραγματική πλευρική ώθηση  $P_t$  να είναι πιο μεγάλη από την υπολογισμένη πλευρική ώθηση πολλαπλασιασμένη επί ένα συντελεστή ασφαλείας  $F$  ( $P_t < F \cdot P_a$ ). Οι επιλύσεις διαφόρων σεναρίων έγιναν με τη χρήση θεωρητικών δεδομένων, καθώς και με τη χρήση πραγματικών δεδομένων όπως υπολογίστηκαν για το συγκεκριμένο πεδίο. Για κάθε σενάριο έγιναν 1000 προσομοιώσεις, αριθμός που κρίθηκε ικανοποιητικός ως προς το σφάλμα που θα είχαν τα αποτελέσματα. Σε όλα τα σενάρια χρησιμοποιήθηκε λογαριθμοκανονική κατανομή τόσο για τη γωνία τριβής ( $\phi$ ), όσο και για το ειδικό βάρος του εδάφους ( $\gamma$ ) για τους λόγους που εξηγήθηκαν στο κεφάλαιο 2.

### 4.1 Παραμετρική ανάλυση ως προς τον συντελεστή διασποράς COV

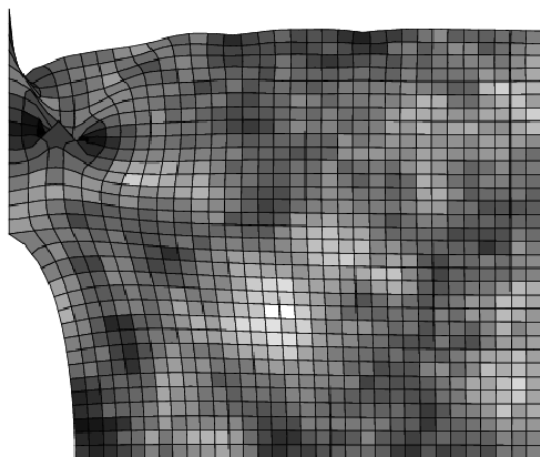
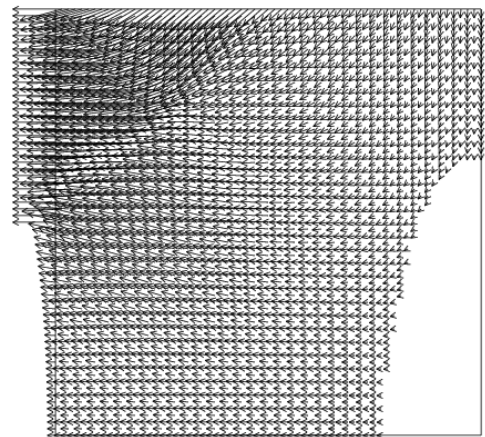
Στην πρώτη περίπτωση πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ως προς το COV της γωνίας τριβής ( $\phi$ ) σε 4 διαφορετικά σημεία δειγματοληψίας για τις τιμές  $COV=0.18, 0.24, 0.3, 0.36, 0.48$ . Το μέγεθος του κανάβου των πεπερασμένων στοιχείων ορίστηκε σε  $32 \times 32$  στοιχεία (elements) όπως φαίνεται στην εικόνα. Το κάθε στοιχείο είναι τετραγωνικό με πλευρά  $0,1m$ . Ο τοίχος αντιστήριξης βρίσκεται στην πάνω αριστερή γωνία και προεκτείνεται 16 elements ( $1,6m$ ) προς τα κάτω. Η επιφάνεια του τοίχου ορίστηκε τραχιά (rough) ούτως ώστε να μην επιτρέπει στο έδαφος να ολισθήσει κατά μήκος της επιφάνειάς του. Σκοπός της ανάλυσης είναι να διερευνηθεί η σχέση του COV της γωνίας τριβής με την πιθανότητα αστοχίας. Στην εικόνα 19 παρουσιάζονται δύο ενδεικτικά realizations από τις επίλυσης για  $COV=0,18$  και  $COV=0,48$ .



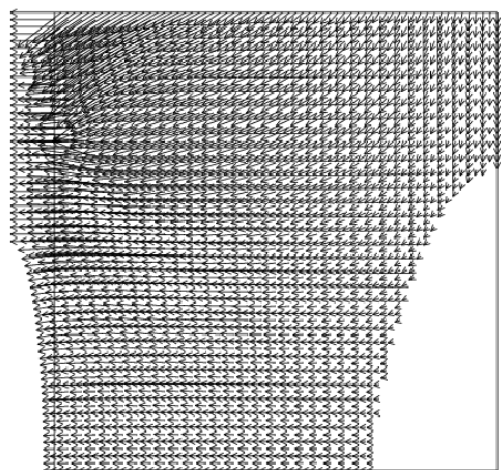
**Εικόνα 1819:** Κάναβος για την ανάλυση φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων- RFEM



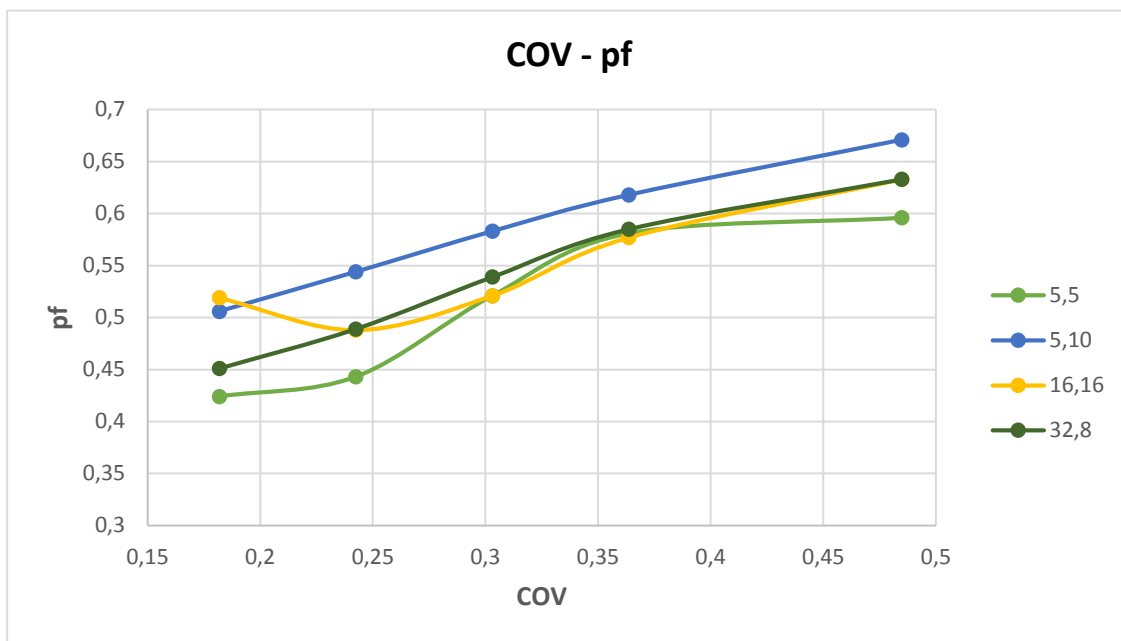
**COV=0.18**



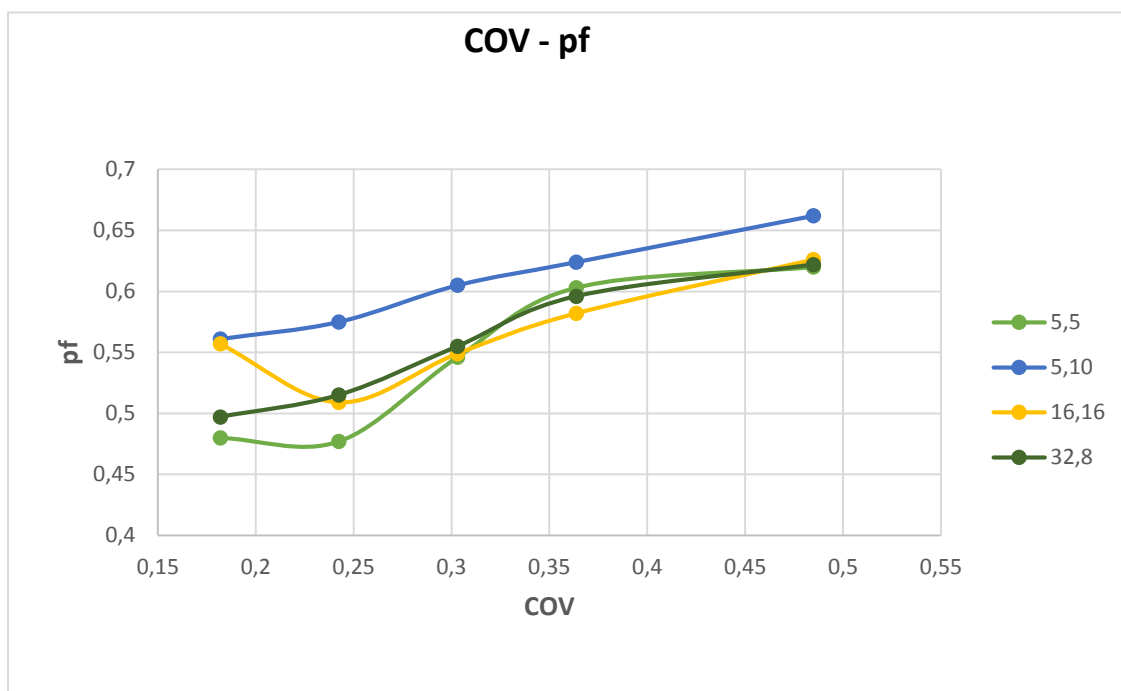
**COV=0.48**



**Εικόνα 189:** Παραμορφωμένος κάναβος πεπερασμένων στοιχείων και διάγραμμα μετατόπισης



Διάγραμμα 9: Σχέση COV με πιθανότητα αστοχίας σε ολίσθηση



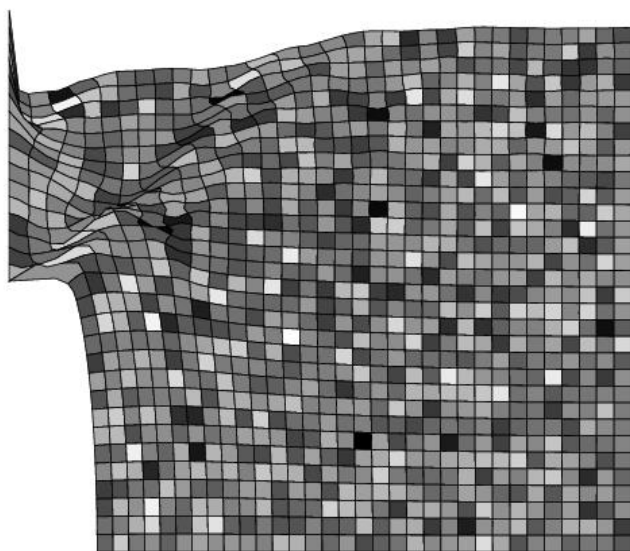
Διάγραμμα 10: Σχέση COV με πιθανότητα αστοχίας σε ανατροπή

Στα διαγράμματα 9 και 10 παρουσιάζεται η σχέση του συντελεστή διασποράς COV με την πιθανότητα αστοχίας  $p_f$  για ολίσθηση και ανατροπή του τοίχου αντιστήριξης. Κάθε καμπύλη αντικατοπτρίζει τη σχέση του συντελεστή διασποράς COV με τη πιθανότητα αστοχίας η οποία εξάχθηκε από διαφορετικό σημείο δειγματοληψίας. Η πρώτη βασική παρατήρηση που φαίνεται καθαρά στις γραφικές είναι ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής διασποράς COV, αυξάνεται και η πιθανότητα αστοχίας τόσο σε ολίσθηση, όσο και σε ανατροπή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο αυξάνεται το COV, αυξάνεται δηλαδή η τυπική απόκλιση με τη μέση τιμή να παραμένει σταθερή, τόσες πιο πολλές μικρές τιμές της γωνίας τριβής ( $\varphi$ ) μοιράζονται στα στοιχεία του κανάβου. Αυτό έχει ως επακόλουθο η γραμμή αστοχίας να βρει ασθενέστερη ζώνη για να διέλθει, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα αστοχίας.

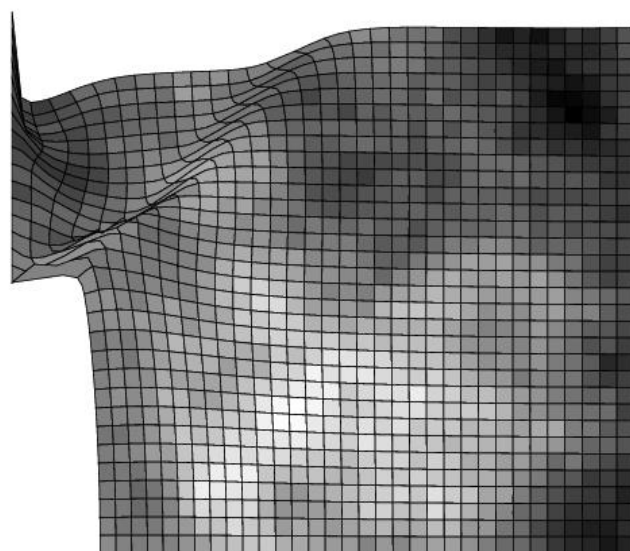
Το δεύτερο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί έχει σχέση με το σημείο το οποίο λήφθηκε δειγματοληψία. Παρατηρείται ότι η πιθανότητα αστοχίας της καμπύλης της οποίας το σημείο που λήφθηκε υπόψη είναι σε βάθος  $2H/3$  (5,10) του τοίχου ακολουθεί γραμμική αύξηση σε σχέση με το συντελεστή διασποράς COV. Στις υπόλοιπες 3 καμπύλες υπάρχει επίσης αύξηση η οποία όμως δεν είναι γραμμική. Επίσης, η καμπύλη στο σημείο  $2H/3$  δίνει πιο μεγάλη πιθανότητα αστοχίας.

## **4.2 Παραμετρική ανάλυση ως προς το μήκος χωρικής συσχέτισης – correlation length ( $\theta$ )**

Σε αυτή τη περίπτωση πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ως προς το λόγο του μήκους χωρικής συσχέτισης ως προς το ύψος ( $H$ ) του τοίχου για τιμές  $\theta = 0, 1.6, 3.2, 4.8, 6.4, 8m$ . Το μέγεθος του κανάβου παραμένει το ίδιο όπως και στην προηγούμενη περίπτωση (32x32), όπως επίσης και οι επαναλήψεις (realizations – προσομοιώσεις=1000). Το ύψος ( $H$ ) του τοίχου παραμένει σταθερό (1,6m). Σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι να διερευνηθεί η σχέση του μήκους συσχετισμού ( $\theta$ ) με την πιθανότητα αστοχίας και η επιρροή του συντελεστή ασφαλείας στην πιθανότητα αστοχίας. Στην εικόνα 20 παρουσιάζονται 2 διαγράμματα μετατόπισης για διαφορετικό μήκος συσχετισμού  $\theta=0m$ ,  $\theta=8m$ . Το σκούρο χρώμα αντιστοιχεί σε ισχυρό έδαφος, ενώ το ανοιχτό σε ασθενές.

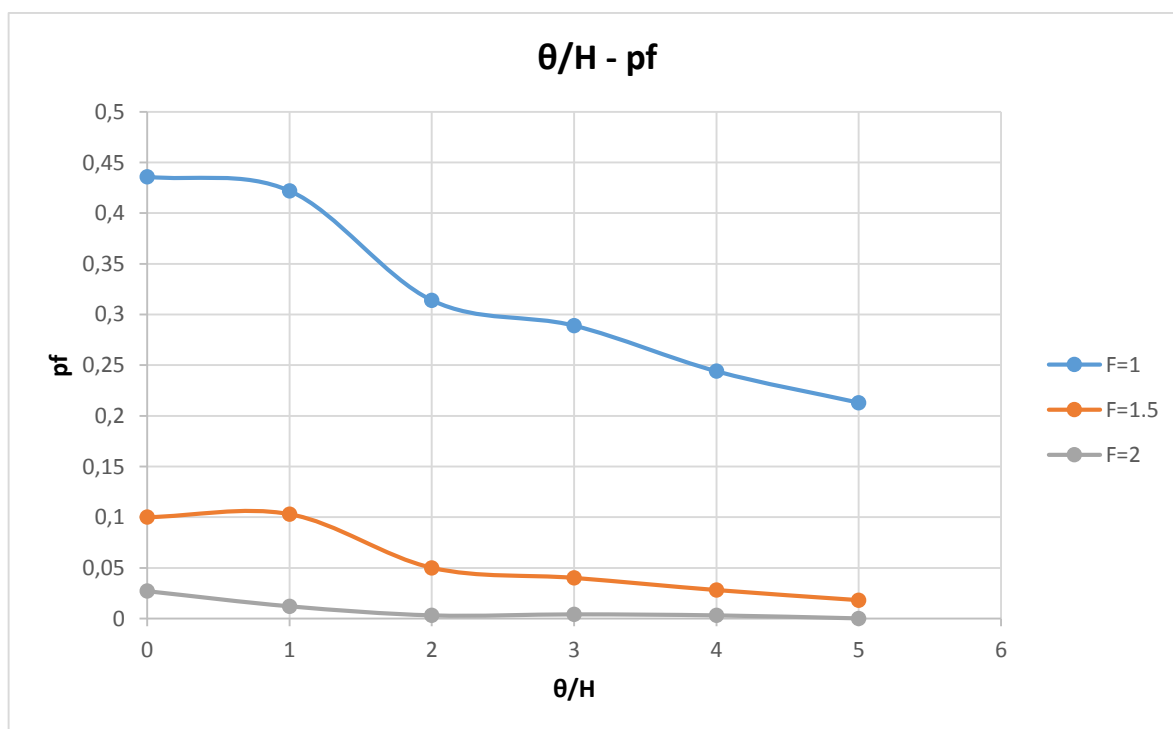


$\theta=0m$

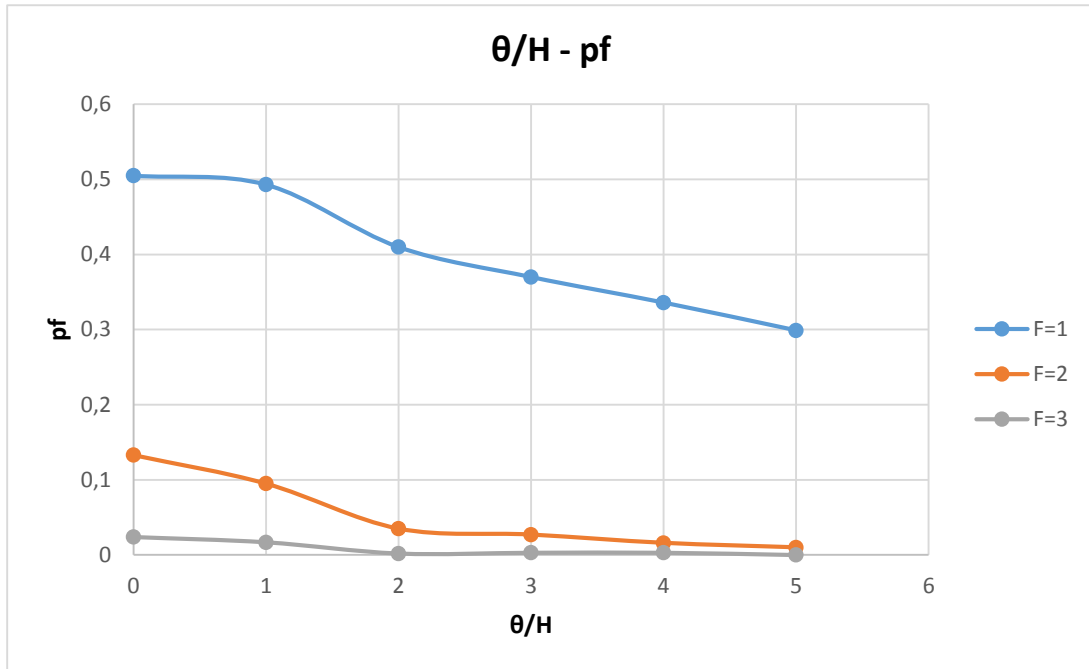


$\theta=8m$

Εικόνα 20: Παραμορφωμένος κানাβος πεπερασμένων στοιχείων.



Διάγραμμα 11: Σχέση  $\theta/H$  με πιθανότητα αστοχίας σε ολίσθηση



**Διάγραμμα 12: Σχέση  $\theta/H$  με πιθανότητα αστοχίας σε ανατροπή**

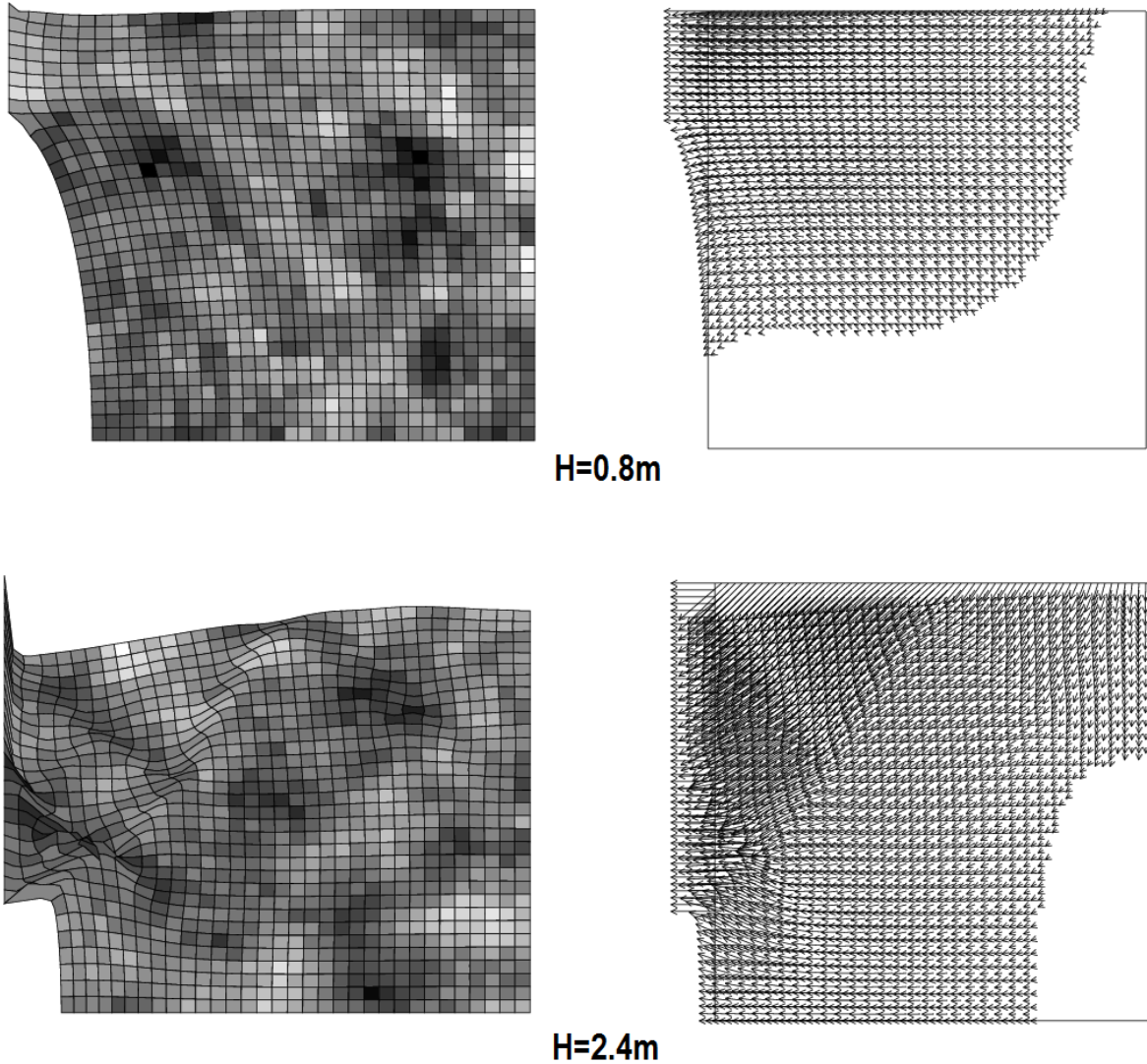
Στα διαγράμματα 11 και 12 παρουσιάζεται η πιθανότητα αστοχίας  $pf$  για ολίσθηση και ανατροπή του τοίχου αντιστήριξης για διαφορετικά  $\theta/H$ . Η κάθε καμπύλη αντιπροσωπεύει διαφορετικό συντελεστή ασφαλείας. Παρατηρείται η μείωση της πιθανότητας αστοχίας  $pf$  όσο μεγαλώνει ο λόγος  $\theta/H$ , όσο μεγαλώνει δηλαδή το μήκος χωρικής συσχέτισης ( $\theta$ ). Επίσης, παρατηρείται η έντονη μείωση της πιθανότητας αστοχίας με την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας  $F$ . Αυτό γίνεται επειδή ο συντελεστής ασφαλείας πολλαπλασιάζεται με την υπολογισμένη πλευρική ώθηση  $P_a$ . Με αυτόν τον τρόπο οι τιμές της πραγματικής πλευρικής ώθησης  $P_t$  που υπερβαίνουν την υπολογισμένη πλευρική ώθηση πολλαπλασιασμένη με τον εκάστοτε συντελεστή ασφαλείας μειώνονται, μειώνοντας έτσι και την πιθανότητα αστοχίας.

### 4.3 Παραμετρική ανάλυση ως προς το ύψος του τοίχου

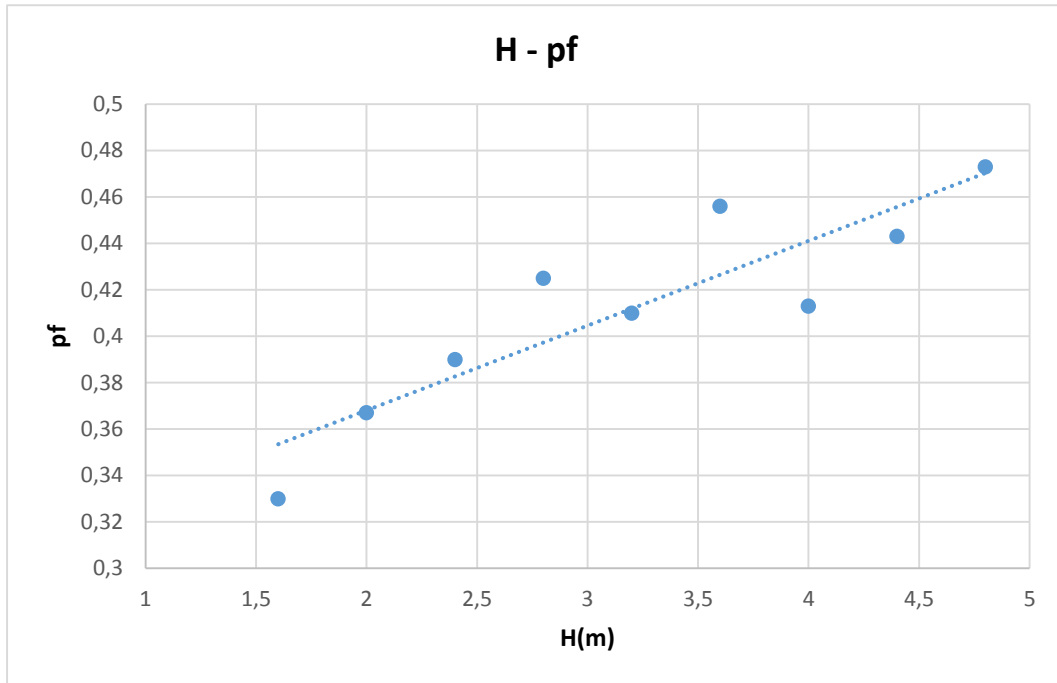
Στην τρίτη περίπτωση πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ως προς το ύψος ( $H$ ) του τοίχου για τιμές  $H= 1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4.0, 4.4, 4.8m$ . Σκοπός της παρούσας ανάλυσης



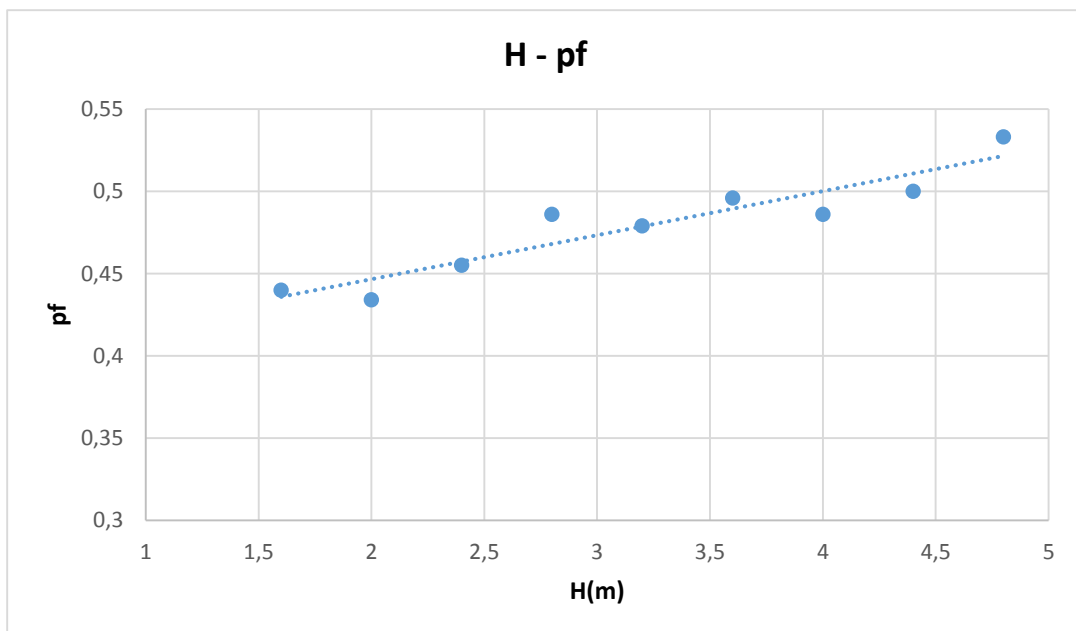
είναι να διερευνηθεί η σχέση του ύψους του τοίχου με την πιθανότητα αστοχίας ρf. Στην εικόνα 21 παρουσιάζονται 2 διαγράμματα μετατόπισης για διαφορετικό ύψος τοίχου  $H=0.8m$ ,  $H=2.4m$ .



**Εικόνα 21: Παραμορφωμένος κάναβος πεπερασμένων στοιχείων και διάγραμμα μετατόπισης**



**Διάγραμμα 13:** Σχέση ύψους τοίχου με πιθανότητα αστοχίας σε ολίσθηση

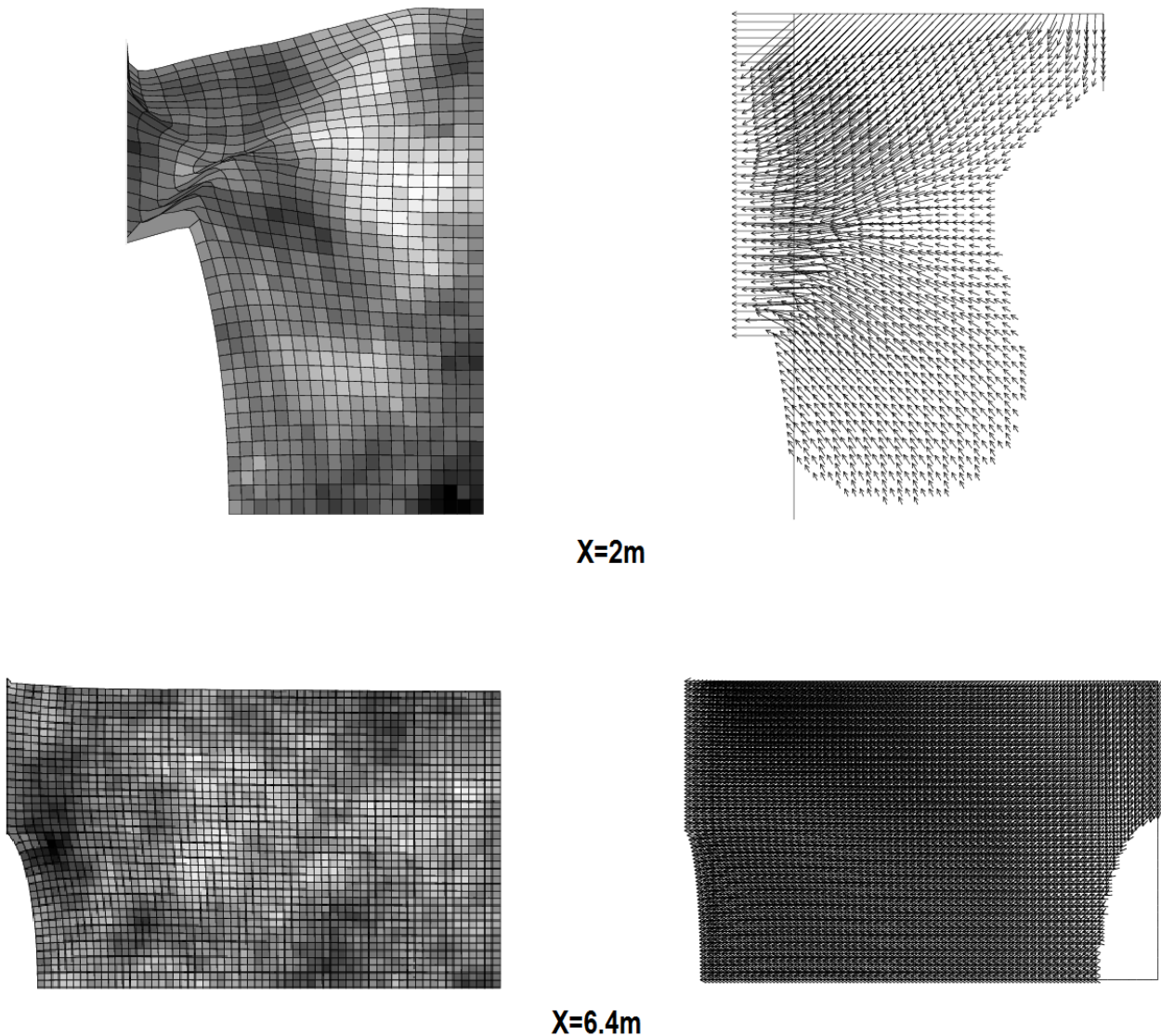


**Διάγραμμα 14:** Σχέση ύψους τοίχου με πιθανότητα αστοχίας σε ανατροπή

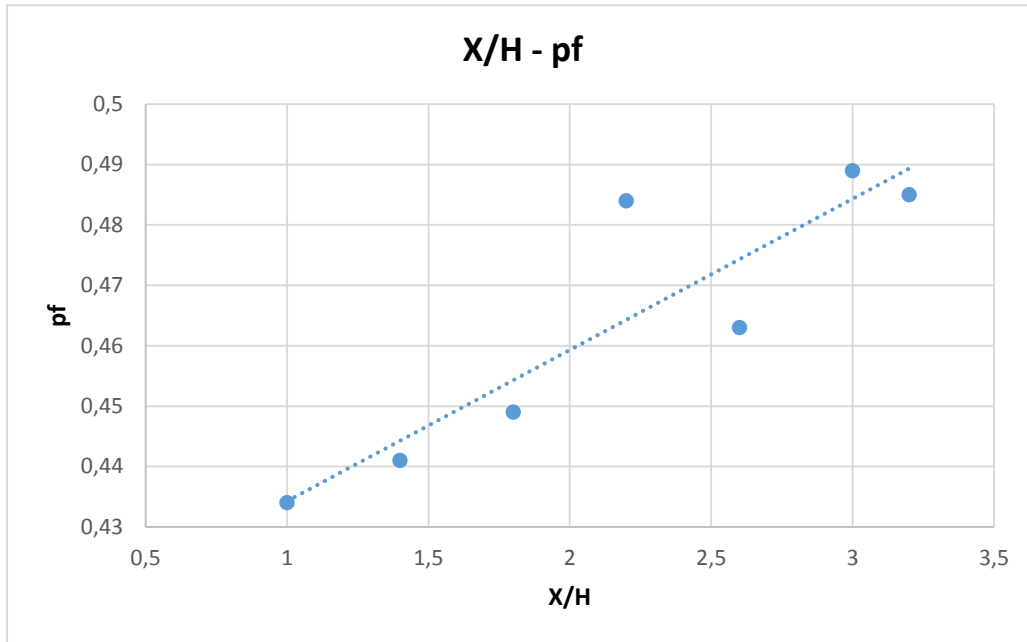
Στα διαγράμματα 13 και 14 παρουσιάζεται η πιθανότητα αστοχίας  $pf$  για ολίσθηση και ανατροπή του τοίχου αντιστήριξης για διαφορετικό ύψος του τοίχου. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ύψος του τοίχου αυξάνεται και η πιθανότητα αστοχίας.

#### 4.4 Παραμετρική ανάλυση ως προς το πλάτος του επιχώματος

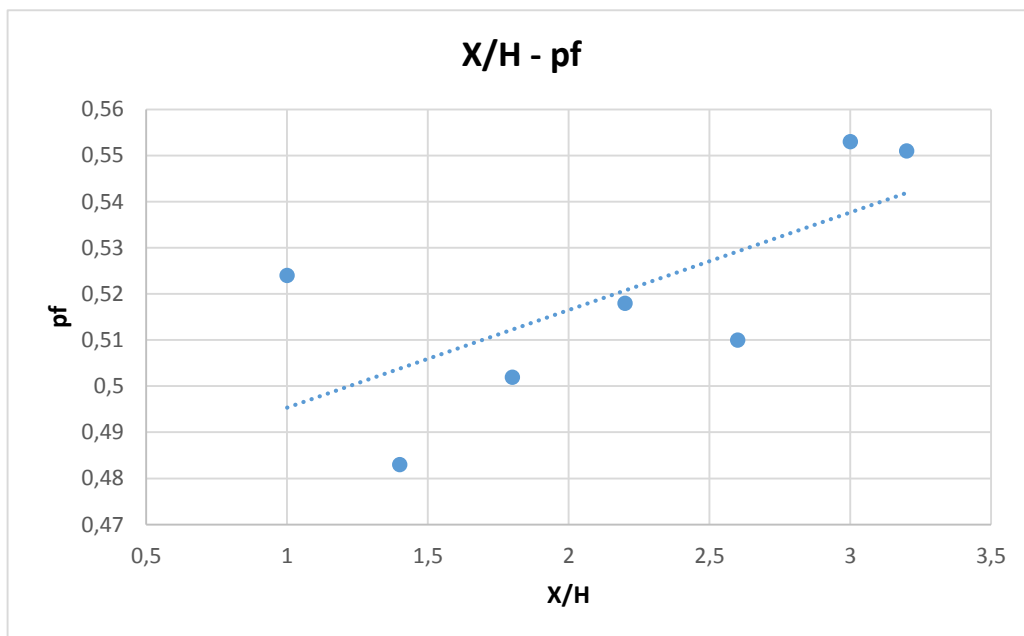
Σε αυτή τη περίπτωση πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ως προς το πλάτος του επιχώματος το οποίο αντιστηρίζεται από τον τοίχο αντιστήριξης, για τιμές  $X= 2.0, 2.8, 3.6, 4.4, 5.2, 6.0, 6.4\text{m}$ . Το ύψος του τοίχου ήταν σταθερό  $H= 2\text{m}$ . Σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι να διερευνηθεί η σχέση του πλάτους του πρανές με την πιθανότητα αστοχίας  $\rho_f$ . Στην εικόνα 22 παρουσιάζονται 2 διαγράμματα μετατόπισης για διαφορετικό πλάτος πρανές  $X=2.0\text{m}$ ,  $X=6.4\text{m}$ .



Εικόνα 22: Παραμορφωμένος κάναβος πεπερασμένων στοιχείων και διάγραμμα μετατόπισης



**Διάγραμμα 15:** Σχέση πλάτους του επιχώματος με πιθανότητα αστοχίας σε ολίσθηση



**Διάγραμμα 16:** Σχέση πλάτους επιχώματος με πιθανότητα αστοχίας σε ανατροπή

Στα διαγράμματα 15 και 16 παρουσιάζεται η πιθανότητα αστοχίας  $p_f$  για ολίσθηση και ανατροπή του τοίχου αντιστήριξης για διαφορετικά  $X/H$  (πλάτος πρανές/ύψος τοίχου). Παρατηρείται η αύξηση της πιθανότητας αστοχίας σε ολίσθηση και ανατροπή με την αύξηση του πλάτους του πρανές.

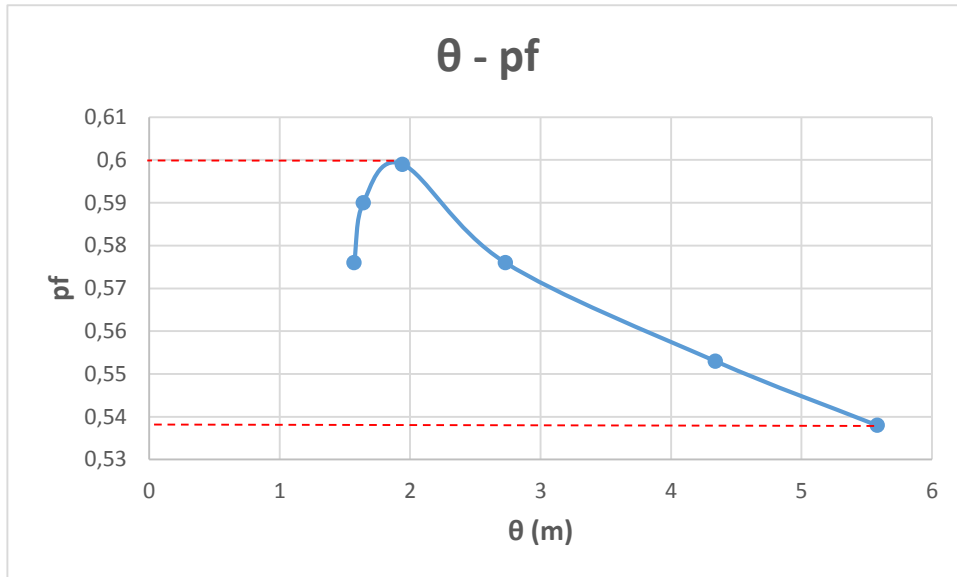
#### 4.5 Παραμετρική ανάλυση με πραγματικά δεδομένα πεδίου

Έπειτα από τον υπολογισμό του μήκους χωρικής συσχέτισης ( $\theta$ ) μέσω των δοκιμών που έγιναν στο πεδίο με τη χρήση του DPL, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ως προς τα πραγματικά μήκη χωρικής συσχέτισης του πεδίου. Συγκεκριμένα, τα  $\theta$  που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα εξής:  $\theta_3=1.57\text{m}$ ,  $\theta_4=1.64\text{m}$ ,  $\theta_5=1.94\text{m}$ ,  $\theta_6=2.73\text{m}$ ,  $\theta_7=4.34\text{m}$  και  $\theta_8=5.58\text{m}$ , τα οποία αντιστοιχούν στις θέσεις 3-8. Με βάση προηγούμενη μελέτη του Παναγιώτη Χριστοδούλου που πραγματοποιήθηκε στο ίδιο πεδίο στα πλαίσια μεταπτυχιακής διατριβής, τα χαρακτηριστικά του εδάφους υπολογίστηκαν όπως φαίνονται στο πίνακα 9. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετρική ανάλυση. Το ύψος του πρανές ορίστηκε στα 9m και το πλάτος του στα 4,2m. Το ύψος του τοίχου ορίστηκε στα 4,5m.

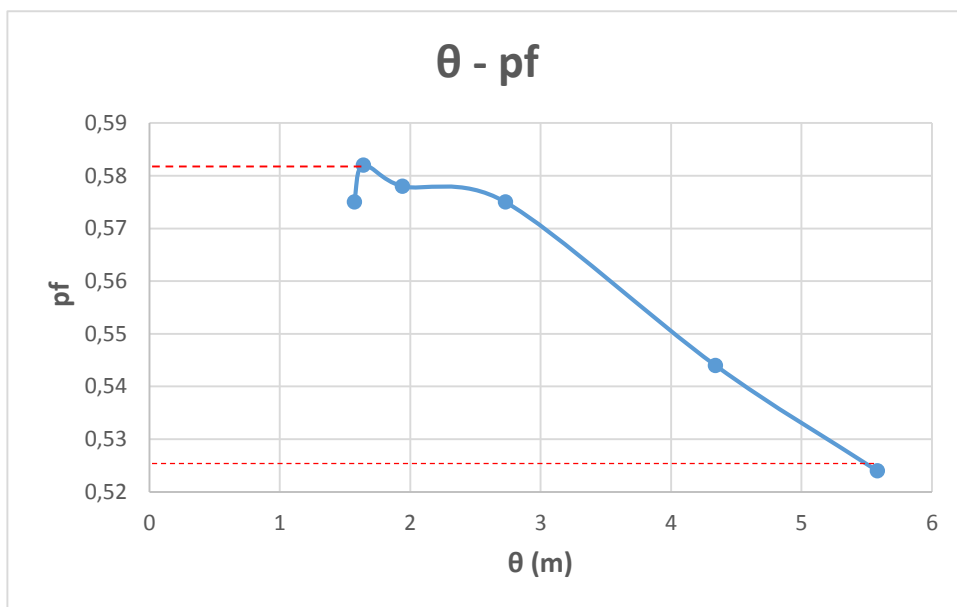
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά πεδίου Πεντακώμου

Δοκίμιο	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	w%	Δείκτης			
			πόρων e	Cu	E <sub>Young</sub>	E <sub>Def</sub> (80%)
1	14.2245	30.96	0.580	84.5	17984.89	4813.78
2	16.5789	18.47	0.320	131.4	25171.91	12516.20
4	-	29.94	0.557	79.7	11029.7	5694.03
5	-	30.14	0.562	84.62	14275.45	4380.59
6	-	33.26	0.633	30.28	10102.34	2138.57
7	-	32.92	0.625	63.4	11493.38	4262.52
8	15.7941	35.55	0.687	27.4	7783.95	2226.32
9	-	31.41	0.590	61.82	11029.7	4156.48
Mean	15.5325	30.33	0.569	70.39	13608.91	5023.56
STDV	1.198802	5.140212	0.109731	33.35895	5571.646	3262.896
COV	0.07718	0.169469	0.192714	0.473916	0.409412	0.649519

Πηγή: Παναγιώτης Χριστοδούλου, 2014



**Διάγραμμα 17: Σχέση  $\theta$  με πιθανότητα αστοχίας σε ολίσθηση**



**Διάγραμμα 18: Σχέση  $\theta$  με πιθανότητα αστοχίας σε ανατροπή**

Στα διαγράμματα 17 και 18 παρουσιάζεται η πιθανότητα αστοχίας  $pf$  για ολίσθηση και ανατροπή του τοίχου αντιστήριξης για τα διαφορετικά  $\theta$  του πεδίου. Η πραγματική πιθανότητα αστοχίας του πεδίου κυμαίνεται από 0,538 μέχρι 0,590 για ανατροπή και από 0,524 μέχρι 0,582 για ολίσθηση. Παρατηρείται ότι με την αύξηση του μήκους χωρικής συσχέτισης ( $\theta$ ) η πιθανότητα αστοχίας μειώνεται τόσο σε ανατροπή, όσο και σε ολίσθηση. Είναι αξιοσημείωτο ότι για το ίδιο έδαφος, στην ίδια περιοχή, έχουμε διαφορετική πιθανότητα αστοχίας.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μεταβλητότητα στις ιδιότητες του εδάφους συμβάλλει σημαντικά στην εδαφική αβεβαιότητα. Οι τρεις κύριες πηγές εδαφικής αβεβαιότητας είναι η φυσική μεταβλητότητα, οι αβεβαιότητες στη γνώση και η αβεβαιότητα επιλογής μοντέλου.

Στην παρούσα πτυχιακή μελετήθηκε, μέσω μετρήσεων που έγιναν στο πεδίο, η μεταβλητότητα στις ιδιότητες του εδάφους. Το πεδίο μελέτης βρισκόταν πλησίον του χωριού Πεντάκωμο, ανατολικά της Λεμεσού. Το έδαφος το οποίο εξετάστηκε αφορούσε ένα αργιλώδες επίχωμα, το πρανές του οποίου έχει συνολικό ύψος 9m και γωνία κλίσης  $\beta = 57^\circ$ .

Μέσα από τις μετρήσεις που έγιναν με τη χρήση της δοκιμής DPL (Dynamic Probing Light) παρατηρήθηκε η έντονη ετερογένεια του εδάφους τόσο κατά βάθος, όσο και κατά πλάτος του πρανές. Αυτό διαφαίνεται τόσο από τη σχέση του αριθμού των κτύπων με τη διείσδυση του κώνου, όσο και από το διαφορετικό μέγεθος της ροπής σε κάθε βάθος.

Μέσα από τις μετρήσεις του DPL υπολογίστηκε και το μήκος χωρικής συσχέτισης ( $\theta$ ). Ενδεικτικά, το μήκος χωρικής συσχέτισης του πρανές υπολογίστηκε σε 1.57m, 1.94m και 4.34m για τις 3 μετρήσεις που έγιναν ανά 10 κτύπους και σε 1.64m, 2.73 και 5.58m για τις 3 μετρήσεις που έγιναν για διείσδυση 10cm. Από το εύρος των τιμών του μήκους χωρικής συσχέτισης συμπεραίνεται ότι το έδαφος χαρακτηρίζεται από ψηλή ετερογένεια.

Πέραν από τις μετρήσεις στο πεδίο, πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις για θεωρητικά και πραγματικά δεδομένα με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων που συνδυάζουν τυχαία πεδία (RFEM) μέσω του λογισμικού reearth2D. Σκοπός των επιλύσεων ήταν να μελετηθούν μερικοί παράγοντες οι οποίοι πιθανών να επηρεάζουν την πιθανότητα αστοχίας του εδάφους.

Για τις επιλύσεις πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για τις ακόλουθες παραμέτρους: τον συντελεστή διασποράς COV της γωνίας τριβής ( $\phi$ ), το μήκος συσχετισμού – correlation length ( $\theta$ ), το ύψος του τοίχου, το πλάτος του πρανές και αναλύσεις με τα πραγματικά χαρακτηριστικά του πεδίου. Βάση των επιλύσεων με τα πραγματικά χαρακτηριστικά, υπολογίστηκε ότι η πιθανότητα αστοχίας του πεδίου κυμαίνεται από 0,538 μέχρι 0,590 για ανατροπή και από 0,524 μέχρι 0,582 για ολίσθηση.

Από τις επιλύσεις προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όσο αυξάνεται ο συντελεστής διασποράς COV της γωνίας τριβής ( $\theta$ ), αυξάνεται και η πιθανότητα αστοχίας (pf), τόσο σε ανατροπή, όσο και σε ολίσθηση.
- Το σημείο το οποίο γίνεται η δειγματοληψία επηρεάζει την πιθανότητα αστοχίας (pf).
- Δειγματοληψία σε βάθος  $2H/3$  του τοίχου δίνει γραμμική αύξηση της πιθανότητας αστοχίας (pf) σε σχέση με την αύξηση του COV της γωνίας τριβής ( $\theta$ ).
- Η αύξηση του μήκους χωρικής συσχέτισης ( $\theta$ ) επιφέρει μείωση της πιθανότητας αστοχίας (pf).
- Με την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας (F) η πιθανότητα αστοχίας (pf) μειώνεται έντονα.
- Όσο αυξάνεται το ύψος του τοίχου αντιστήριξης, αυξάνεται και η πιθανότητα αστοχίας (pf).
- Η πιθανότητα αστοχίας (pf) αυξάνεται με την αύξηση του πλάτους του πρανές.
- Υπάρχει διαφορετική πιθανότητα αστοχίας σε διάφορα σημεία του ιδίου πεδίου.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Abdi, H. (2010). "Coefficient of variation." *Encyclopedia of Research Design*, 1–5.
- Safety, D., and Development, T. (2009). *Probabilistic Slope Stability Analysis Using the Random Finite Element Method ( RFEM )*.
- Xiao, Z., Huang, J., Wang, Y., and Xu, C. (2014). "Random Reliability Analysis of Gravity Retaining Wall Structural System." (*Icmce*), 199–204.
- Phoon, K. K., and Ching J. (2015). "*Risk and reliability in geotechnical engineering*".
- Fenton, G. A., Griffiths, D. V, and Williams, M. B. (2005). "Reliability of Traditional Retaining Wall Design." 55(1), 55–62.
- Sik, B., Min, K., and Ki, D. (n.d.). "A Study on Reliability Analysis for Reinforced Earth Retaining Walls." 248–254.
- Griffiths, D. V, Fenton, G. A., and Ziemann, H. R. (2008). "Reliability of passive earth pressure." 2(2).
- Mandali, A. K., Sujith, M. S., Rao, B. N., and Maganti, J. (2011). "Reliability Analysis of Counterfort Retaining Walls." 11(1).
- Baecher, G. B., and Christian, J. T. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*.
- Kulhawy, F. H., and Phoon, K. K. (2002). "Observations on geotechnical reliability-based design development in North America." 31–48.
- Fallis, A. . (2013). "Strength, S., and Friction, I.", 248–257.
- Alam, J., Hossain, M. S., and Azad, A. K. (2013). "Development of correlation between dynamic cone resistance and relative density of sand." 41(2), 81–86.
- "Light Dynamic Penetrometer ( DPL ) Manual According To NF ISO 22476-2 Standard." (n.d.). 33(0), 78114.
- Mason, S. J., Hill, R. R., Mönch, L., Rose, O., Jefferson, T., and Fowler, J. W. (2008).

“Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference S. J. Mason, R. R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson, J. W. Fowler eds.” 91–100.

Nilsson, T. U. (2013). “Shear resistance by the DPL Nilsson test.” 1249–1257.

Nilsson, T. (2008). “Parameter approach from DPL test.” 1–4.

Duarte, I. M. R., and Ladeira, F. L. (n.d.). “Penetrometer testing in residual soils from granitic rocks in the South of Portugal.”

Suchomel, R., and Mašín, D. (2009). “Computers and Geotechnics Comparison of different probabilistic methods for predicting stability of a slope in spatially variable  $c - u$  soil.” 1–9.

Griffiths, D. V. (2005). “Probabilistic passive earth pressure analysis by the Random Finite Element Method.” 1–16.

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

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

## Μετρήσεις DPL

Πίνακας Α 1: Μετρήσεις DPL – Θέση 1

ΘΕΣΗ 1								
A/A	Κτύποι	Καθίζηση (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)		A/A	Κτύποι	Καθίζηση (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)
Αρχικό βάθος: 170mm								
1	14	100	100		30	8	100	3000
2	11	100	200		31	10	100	3100
3	10	100	300		32	10	100	3200
4	10	100	400		33	9	100	3300
5	10	100	500		34	11	100	3400
6	5	100	600		35	11	100	3500
7	5	100	700		36	10	100	3600
8	4	100	800		37	10	100	3700
9	4	100	900		38	11	100	3800
13	4	100	1000		39	10	100	3900
11	4	100	1100		40	15	100	4000
12	4	100	1200		41	29	100	4100
13	4	100	1300		42	43	100	4200
14	4	100	1400		43	28	100	4300
15	5	100	1500		44	38	100	4400
16	5	100	1600		45	33	100	4500
17	5	100	1700		46	34	100	4600
18	6	100	1800		47	100	100	4700
19	6	100	1900					
20	9	100	2000					
21	9	100	2100					
22	7	100	2200					
23	9	100	2300					
24	7	100	2400					
25	7	100	2500					
26	5	100	2600					
27	8	100	2700					
28	8	100	2800					
29	8	100	2900					

**Πίνακας Α 2: Μετρήσεις DPL – Θέση 2**

ΘΕΣΗ 2								
A/A	Κτύποι	Καθίζηση (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)		A/A	Κτύποι	Καθίζηση (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)
Αρχικό βάθος:170mm								
1	13	100	100		30	7	100	3000
2	10	100	200		31	7	100	3100
3	7	100	300		32	8	100	3200
4	8	100	400		33	7	100	3300
5	7	100	500		34	8	100	3400
6	7	100	600		35	8	100	3500
7	10	100	700		36	8	100	3600
8	5	100	800		37	10	100	3700
9	9	100	900		38	9	100	3800
13	6	100	1000		39	10	100	3900
11	4	100	1100		40	9	100	4000
12	5	100	1200		41	15	100	4100
13	3	100	1300		42	41	100	4200
14	4	100	1400		43	22	100	4300
15	5	100	1500		44	18	100	4400
16	4	100	1600		45	17	100	4500
17	6	100	1700		46	19	100	4600
18	6	100	1800		47	21	100	4700
19	5	100	1900		48	21	100	4800
20	5	100	2000		49	20	100	4900
21	5	100	2100		50	22	100	5000
22	7	100	2200		51	23	100	5100
23	5	100	2300		52	20	100	5200
24	5	100	2400		53	18	100	5300
25	8	100	2500		54	20	100	5400
26	9	100	2600		55	21	100	5500
27	7	100	2700		56	22	100	5600
28	9	100	2800		57	24	100	5700
29	8	100	2900					

Πίνακας Α 3: Μετρήσεις DPL – Θέση 3

ΘΕΣΗ 3											
A/A	Κτύποι	Καθίζηση ανά 10 κτύπους (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)	A/A	Κτύποι	Καθίζηση ανά 10 κτύπους (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)	Ροπή (Nm)			
Αρχικό βάθος: 175mm								1	2	3	M.O
1	10	102	277	28	280	49	4309	7,6			7,6
2	20	124	401	29	290	35	4344	6,6			6,6
3	30	158	559	30	300	43	4387	15,4			15,4
4	40	170	729	31	310	48	4435	17,4			17,4
5	50	192	921	32	320	74	4509	23,2			23,2
6	60	210	1131	33	330	62	4571	23			23,0
7	70	201	1332	34	340	58	4629	20,8			20,8
8	80	236	1568	35	350	55	4684	20,4			20,4
9	90	236	1804	36	360	49	4733	20,4	25,4	20	21,9
13	100	190	1994	37	370	41	4774	20,2	19,2	20,8	20,1
11	110	195	2189	38	380	39	4813	24,4	24,2	25,2	24,6
12	1120	170	2359	39	390	31	4844	24,8	24,8	25,6	25,1
13	130	179	2538	40	400	29	4873	22,5	23	23,5	23,0
14	140	179	2717	41	410	35	4908	25,2	25,4	25,2	25,3
15	150	155	2872	42	420	26	4934	27,5	24	23,5	25,0
16	160	161	3033	43	430	27	4961	23,5	25	25	24,5
17	170	144	3177	44	440	25	4986	24,5	24	24,5	24,3
18	180	124	3301	45	450	36	5022	29	24,5	23,5	25,7
19	190	120	3421	46	460	35	5057	25,5	25,5	25,5	25,5
20	200	113	3534	47	470	35	5092	24,5	25,5	25	25,0
21	210	88	3622	48	480	30	5122	24	25	25,5	24,8
22	220	109	3731	49	490	27	5149	29,5	29,5	27,5	28,8
23	230	92	3823								
24	240	87	3910								
25	250	106	4016								
26	260	150	4166								
27	270	94	4260								

Πίνακας Α 4: Μετρήσεις DPL – Θέση 4

ΘΕΣΗ 4											
A/A	Κτύποι	Καθίζηση (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)	A/A	Κτύποι	Καθίζηση (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)	Ροπή (Nm)			
Αρχικό βάθος: 160mm								1	2	3	M.O
1	10	60	220	27	270	109	3949	10,8	9,4	9,8	10,0
2	20	178	398	28	280	98	4047	13,6	7,2	6,6	9,1
3	30	101	499	29	290	109	4156	8,6	9,8	12,6	10,3
4	40	124	623	30	300	79	4235	14	11,4	11,2	12,2
5	50	192	815	31	310	39	4274	18,6	12	11,2	13,9
6	60	191	1006	32	320	41	4315	12,8	11,6	12,2	12,2
7	70	206	1212	33	330	40	4355	29	24	23,4	25,5
8	80	270	1482	34	340	42	4397	30	23	24,5	25,8
9	90	236	1718	35	350	31	4428	31,5	23,5	23	26,0
13	100	190	1908	36	360	44	4472	27	25,5	24,5	25,7
11	110	104	2012	37	370	38	4510	24	26	26	25,3
12	1120	162	2174	38	380	46	4556	30	26	26	27,3
13	130	140	2314	39	390	39	4595	21	21,5	20	20,8
14	140	140	2454	40	400	45	4640	26	25	23,5	24,8
15	150	125	2579	41	410	43	4863	25,5	22	22,5	23,3
16	160	117	2696	42	420	36	4719	26	23	23,5	24,2
17	170	127	2823	43	430	34	4753	26	23,5	24,5	24,7
18	180	123	2946	44	440	33	4786	35	30	31	32,0
19	190	115	3061	45	450	36	4822	35	27,5	27	29,8
20	200	106	3167	46	460	40	4862	27	26,5	26	26,5
21	210	106	3273	47	470	38	4900	24	24,5	27	25,2
22	220	93	3366	48	480	45	4945	27	26	26,5	26,5
23	230	99	3465	49	490	43	4988	26	24,5	26	25,5
24	240	117	3582	50	500	35	5023	29	29	28	28,7
25	250	121	3703	51	510	28	5051				
26	260	137	3840								

Πίνακας Α 5: Μετρήσεις DPL – Θέση 5

ΘΕΣΗ 5											
A/A	Κτύποι	Καθίζηση (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)	A/A	Κτύποι	Καθίζηση (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)	Ροπή (Nm)			
Αρχικό βάθος: 100mm								1	2	3	M.O
1	16	100	100	30	7	100	3000				
2	13	100	200	31	8	100	3100				
3	13	100	300	32	8	100	3200				
4	10	100	400	33	9	100	3300				
5	7	100	500	34	9	100	3400				
6	5	100	600	35	7	100	3500				
7	5	100	700	36	11	100	3600				
8	6	100	800	37	11	100	3700				
9	6	100	900	38	12	100	3800	7,6	7,8	8	7,8
13	7	100	1000	39	9	100	3900	8,2	8,4	8,4	8,3
11	4	100	1100	40	12	100	4000	8,8	9	8,8	8,9
12	4	100	1200	41	20	100	4100	13,2	13	13,4	13,2
13	4	100	1300	42	17	100	4200	30,5	23	23	25,5
14	4	100	1400	43	22	100	4300	30	26	26,5	27,5
15	4	100	1500	44	29	100	4400	30,5	25	28	27,8
16	4	100	1600	45	30	100	4500	40	33	32	35,0
17	5	100	1700	46	25	100	4600	29	27,5	28	28,2
18	5	100	1800	47	26	100	4700	27,5	28	28,5	28,0
19	5	100	1900	48	30	100	4800	29	25	28,5	27,5
20	6	100	2000	49	37	100	4900	33	37	38	36,0
21	7	100	2100	50	39	100	5000	35	33	36,5	34,8
22	7	100	2200								
23	7	100	2300								
24	5	100	2400								
25	5	100	2500								
26	6	100	2600								
27	7	100	2700								
28	8	100	2800								
29	8	100	2900								

Πίνακας Α 6: Μετρήσεις DPL – Θέση 6

ΘΕΣΗ 6											
A/A	Κτύποι	Καθίζηση ανά 10 κτύπους (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)	A/A	Κτύποι	Καθίζηση ανά 10 κτύπους (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)	Ροπή (Nm)			
Αρχικό βάθος: 160mm								1	2	3	M.O
1	10	80	240	27	270	81	3412				
2	20	101	341	28	280	105	3517				
3	30	81	422	29	290	118	3635				
4	40	96	518	30	300	91	3726				
5	50	97	615	31	310	85	3811				
6	60	130	745	32	320	89	3900				
7	70	161	906	33	330	85	3985				
8	80	156	1062	34	340	75	4060				
9	90	97	1159	35	350	74	4214				
13	100	146	1305	36	360	80	4289				
11	110	151	1456	37	370	75	4345				
12	1120	227	1683	38	380	56	4395				
13	130	206	1889	39	390	50	4447				
14	140	160	2049	40	400	52	4505				
15	150	160	2209	41	410	58	4545	24,4	22	23,6	23,33
16	160	160	2369	42	420	40	4580	29	23	22,5	24,83
17	170	150	2519	43	430	35	4610	19,5	19	19,6	19,37
18	180	150	2669	44	440	30	4638	16,4	17,4	15,6	16,47
19	190	130	2799	45	450	28	4680	20	19,5	19,5	19,67
20	200	140	2939	46	460	42	4722	32,5	29	28	29,83
21	210	89	3028	47	470	34	4756	28,5	26	26	26,83
22	220	88	3116	48	480	25	4781	29	26	28	27,67
23	230	73	3189	49	490	23	4804	32,5	27	27	28,83
24	240	40	3229	50	500	25	4829	26	24	25	25
25	250	48	3277								
26	260	54	3331								

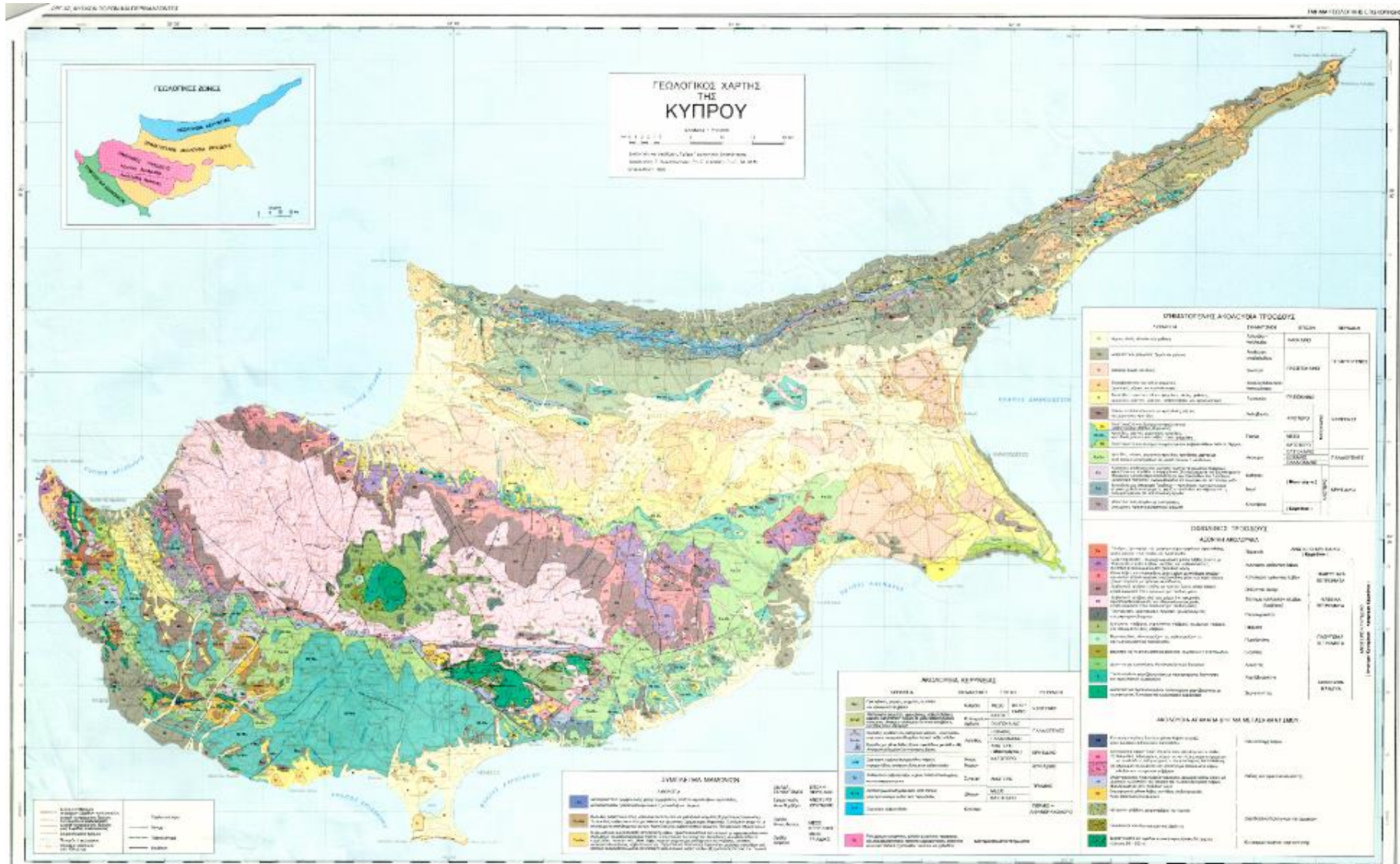


Πίνακας Α 7: Μετρήσεις DPL – Θέση 7

ΘΕΣΗ 7											
A/A	Κτύποι	Καθίζηση (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)	A/A	Κτύποι	Καθίζηση (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)	Ροπή (Nm)			
Αρχικό βάθος: 100mm								1	2	3	M.O
1	10	100	100	30	8	100	3000				
2	8	100	200	31	8	100	3100				
3	16	100	300	32	10	100	3200				
4	12	100	400	33	12	100	3300				
5	10	100	500	34	10	100	3400				
6	7	100	600	35	9	100	3500				
7	6	100	700	36	9	100	3600	10	9	9,4	9,5
8	8	100	800	37	10	100	3700	11	9,2	9,8	10,0
9	8	100	900	38	11	100	3800	8,4	7,6	7,8	7,9
13	7	100	1000	39	12	100	3900	16,2	16	16,6	16,3
11	8	100	1100	40	13	100	4000	19,8	8	9,2	12,3
12	6	100	1200	41	13	100	4100	16,8	15	15,6	15,8
13	6	100	1300	42	15	100	4200	19,6	16,8	16,4	17,6
14	6	100	1400	43	24	100	4300	19,8	18,2	18,6	18,9
15	6	100	1500	44	14	100	4400	21,6	19,6	18	19,7
16	6	100	1600	45	12	100	4500	18,4	11,8	12,6	14,3
17	6	100	1700	46	16	100	4600	23,4	22,4	23	22,9
18	5	100	1800	47	19	100	4700	28	27,2	27,2	27,5
19	6	100	1900	48	20	100	4800	29,5	28	28	28,5
20	6	100	2000	49	25	100	4900	31	27	28	28,7
21	6	100	2100	50	25	100	5000	28	26	24,5	26,2
22	15	100	2200	51	19	100	5100	29	25	27	27,0
23	35	100	2300	52	22	100	5200	30	31	33	31,3
24	14	100	2400	53	32	100	5300	31,5	31	30	30,8
25	8	100	2500	54	42	100	5400	45	40	39	41,3
26	8	100	2600	55	30	100	5500	31	34	32	32,3
27	8	100	2700								
28	11	100	2800								
29	10	100	2900								

Πίνακας Α 8: Μετρήσεις DPL – Θέση 8

ΘΕΣΗ 8											
A/A	Κτύποι	Καθίζηση (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)	A/A	Κτύποι	Καθίζηση (mm)	Συνολική καθίζηση (mm)	Ροπή (Nm)			
Αρχικό βάθος: 100mm								1	2	3	M.O
1	10	100	100	30	10	100	3000				
2	9	100	200	31	9	100	3100				
3	11	100	300	32	13	100	3200				
4	11	100	400	33	14	100	3300				
5	11	100	500	34	12	100	3400				
6	9	100	600	35	11	100	3500				
7	8	100	700	36	12	100	3600	7,6	7,6	7,8	7,7
8	8	100	800	37	11	100	3700	10,4	9,4	10,2	10,0
9	6	100	900	38	9	100	3800	9,4	10	11,4	10,3
13	6	100	1000	39	11	100	3900	16	17,2	17	16,7
11	6	100	1100	40	12	100	4000	19	18	16	17,7
12	6	100	1200	41	17	100	4100	23	19	18,8	20,3
13	5	100	1300	42	26	100	4200	13,2	12,8	11,6	12,5
14	5	100	1400	43	33	100	4300	15	14,6	14,2	14,6
15	6	100	1500	44	16	100	4400	19,2	16,4	17,8	17,8
16	5	100	1600	45	10	100	4500	16	16,6	17,4	16,7
17	6	100	1700	46	12	100	4600	17,6	17	17,8	17,5
18	6	100	1800	47	13	100	4700	20	19,6	19,8	19,8
19	7	100	1900	48	16	100	4800	24,4	22,8	23	23,4
20	6	100	2000	49	17	100	4900	18,2	17,6	18,6	18,1
21	8	100	2100	50	15	100	5000	18,2	27	24	23,1
22	7	100	2200	51	16	100	5100	27	27	26,5	26,8
23	6	100	2300	52	51	100	5200	33	34	34	33,7
24	6	100	2400	53	40	100	5300	37	34,5	36	35,8
25	8	100	2500								
26	8	100	2600								
27	8	100	2700								
28	8	100	2800								
29	9	100	2900								



Εικόνα Α 1: Γεωλογικός χάρτης Κύπρου

