

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



Πτυχιακή εργασία

Επίδρασης της θέσης και του αριθμού δειγματοληψίας εδάφους
στον υπολογισμό των ωθήσεων εδαφών:

Μια μελέτη που βασίζεται στη θεωρία των τυχαίων πεδίων και
των πεπερασμένων στοιχείων

Νάταλη Καλλή

Σύμβουλος καθηγητής
Δρ. Λύσανδρος Παντελίδης

Λεμεσός 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής και επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Παντελίδη Λύσανδρο, τόσο για τη βοήθεια του στην επιλογή του θέματος όσο και για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Χωρίς την πολύτιμη και απρόσκοπτη στήριξη του η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στους γονείς μου καθώς και στους φίλους μου Στέλιο Γεωργίου και Μελίνα Θεοδώρου για την υπομονή, την ανεκτίμητη βοήθεια και τη στήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από την Καλλή Νάταλη, φοιτήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου στον τομέα της Γεωτεχνικής Μηχανικής, στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος Σπουδών της Σχολής για την επιτυχή ολοκλήρωση του κύκλου σπουδών.

Η εργασία αυτή πραγματεύεται την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων για εξεύρεση ακριβέστερων λύσεων σε κρίσιμα ερωτήματα της Γεωτεχνικής Μηχανικής. Πιο συγκεκριμένα έγινε μελέτη της επίδρασης της θέσης και του αριθμού δειγματοληψίας εδάφους στον υπολογισμό των ωθήσεων εδαφών και η εκτίμηση του κινδύνου αστοχίας τοίχου αντιστήριξης με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού δημιουργώντας τυχαία πεδία και χρησιμοποιώντας την πιθανολογική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Αρχικά έγιναν διάφορα σενάρια και πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με σκοπό τον καθορισμό των κρίσιμων θέσεων δειγματοληψίας και στη συνέχεια έγινε εκτενέστερη μελέτη στα συγκεκριμένα σημεία. Έπειτα, εξάχθηκαν ορισμένα ίσως χρήσιμα συμπεράσματα, εφόσον λάβουμε υπόψιν μας ότι η διεθνής βιβλιογραφία -συμπεριλαμβανομένων και των διαφόρων κωδικών σχεδιασμού σε όλο τον κόσμο- δεν είναι σε θέση να δώσει συγκεκριμένες προτάσεις όσον αφορά τη δειγματοληψία εδάφους για το σχεδιασμό γεωτεχνικών έργων αντιστήριξης.

ABSTRACT

The thesis presented in this paper is prepared by Kalli Natalie, student at the School of Civil Engineering and Geomatics of the Cyprus University of Technology, in the domain of Geotechnical Engineering. Preparing a thesis is part of the undergraduate curriculum of the School for the successful completion of the course.

This work involved extensive numerical modelling on various soil sampling scenarios with an advanced finite element tool incorporating the theory of random field. More accurately, this paper it was to study the impact of location and soil sampling volume, within the calculations of soil movement and to estimate the risk probability failure of retaining walls.

Initially, various scenarios and simulations were made and executed to determine the critical sampling points. After that was determined, a more accurate and extensive research was done on those specific points. This is a totally innovative work, where simulating soil as random field, allowed us to extract some extremely useful outcomes for practitioners regarding the optimum location and number of soil samples in designing earth retaining structures. It is worth mentioning that the international literature, including the various design codes worldwide, is not in the position to give suggestions for soil sampling.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
ABSTRACT	v
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	viii
1. Εισαγωγή.....	1
2. Δειγματοληψία – Έρευνα Πεδίου (Βάσει EC7).....	2
2.1 Δειγματοληπτικές γεωτρήσεις.....	2
2.2 Επιτόπου δοκιμές	3
3. Πλευρικές Ωθήσεις Γαιών.....	7
3.1 Θεωρία Coulomb	8
3.2 Θεωρία Rankine.....	10
4. Πιθανοκρατικές Μέθοδοι Ευστάθειας Τοίχων Αντιστήριξης.....	13
4.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων.....	14
4.2 Μέθοδος Τυχαίων Πεπερασμένων Στοιχείων.....	15
4.2.1 Μέθοδος Monte Carlo.....	16
4.2.2 Υποδιαίρεση Τοπικού Μέσου.....	16
5. Μεταβλητότητα του εδάφους.....	18
5.1 Κλασικά Στατιστικά Χαρακτηριστικά Εδαφικών Ιδιοτήτων.....	18
6. Λογισμικό - Βασικές Παραδοχές - Στοιχεία Ανάλυσης.....	23
6.1 Αξιοπιστία Σχεδιασμού Ενεργητικών Ωθήσεων	24

6.1.1	Πιθανότητα Αστοχίας.....	25
6.1.2	Συντελεστής Ασφαλείας.....	25
6.2	Μήκος χωρικής συσχέτισης.....	26
6.3	Λογισμικό reearth2D – Input Data.....	27
6.4	Επιλογή σεναρίων – Προβληματισμοί.....	32
7.	Αποτελέσματα Ανάλυσης – Γραφήματα.....	41
8.	Συμπεράσματα.....	48
9.	Βιβλιογραφία.....	49
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α’.....		51

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1.1: Δυνάμεις σε ένα τοίχο.....	8
Σχήμα 3.1.2.α: Εδαφική σφήνα για ενεργητικές ωθήσεις	9
Σχήμα 3.1.2.β: Εδαφική σφήνα για παθητικές ωθήσεις	9
Σχήμα 3.2.1: Κύκλοι Mohr -Ενεργητική και παθητική ώθηση γαιών.....	11
Σχήμα 4.1: Διακριτοποίηση σώματος	13
Σχήμα 4.2.2: Αναδρομική διαδικασία για δημιουργία τυχαίων τοπικών μέσων.....	17
Σχήμα 6.2: μορφή εδάφους με διαφορετικό μήκος χωρικής συσχέτισης	26

1. Εισαγωγή

Οι κατασκευαστικές απαιτήσεις των σύγχρονων έργων υποδομής καθιστούν απαραίτητη την εύρεση νέων μεθοδολογιών που να ανταποκρίνονται σε αυτές συνδυάζοντας ασφάλεια, ταχύτητα και οικονομία. Μεταξύ άλλων οι κατασκευές εδαφικής αντιστήριξης είναι ανάμεσα στις κλασικότερες εφαρμογές της επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού οι οποίες αντιμετωπίζουν πλήθος δυσεπίλυτων προβλημάτων. Κρίσιμο σημείο αποτελεί η κατανόηση των μηχανισμών αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής που θα καθορίσουν τη συμπεριφορά του έργου. Η διερεύνηση του υπεδάφους που συνήθως έχει πολύπλοκη σύνθεση και καθιστά απρόβλεπτη τη τεχνική του συμπεριφορά, κρίνεται απολύτως αναγκαία για τον ορθολογιστικό και οικονομικά άρτιο σχεδιασμό ενός έργου. Ο επιστημονικός κόσμος αποζητά κατασκευαστικές λύσεις και μεθόδους σχεδιασμού που επιτρέπουν το σχεδιασμό με μικρότερα περιθώρια αβεβαιότητας και οδηγούν στην ασφαλέστερη και οικονομικότερη λύση.

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της θέσης και του αριθμού δειγματοληψίας εδάφους στον υπολογισμό των ωθήσεων εδαφών καθώς και η εκτίμηση του κινδύνου αστοχίας τοίχου αντιστήριξης.

Όλες οι επιλύσεις έγιναν με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) και τη χρήση του γεωτεχνικού λογισμικού REARTH2D, ενός δισδιάστατου προγράμματος επίλυσης που υπολογίζει στατιστικά στοιχεία της αντίδρασης κάποιας εδαφικής μάζας σε ένα τοίχο αντιστήριξης, όπου το έδαφος έχει χωρικά τυχαίες ιδιότητες. Η εδαφική μάζα συγκρατείται από τοίχο αντιστήριξης στο αριστερό πρόσωπο, ο οποίος είτε δέχεται παθητικές ωθήσεις και έτσι μετακινείται προς το έδαφος, είτε ενεργητικές και απομακρύνεται από αυτό. Τα στατιστικά στοιχεία της προκύπτουσας συνολικής αντίδρασης του εδάφους υπολογίζονται με προσομοιώσεις Monte Carlo.

2. Δειγματοληψία – Έρευνα Πεδίου (Βάσει EC7)

Τα εδαφικά υλικά συνήθως χαρακτηρίζονται από έντονη ανομοιογένεια από θέση σε θέση. Η ποικιλομορφία αυτή μπορεί να υπάρχει τόσο σε υλικά διαφορετικού τύπου όσο και μεταξύ υλικών ίδιου τύπου (χαλαρό και πυκνό έδαφος). Επειδή είναι πρακτικά αδύνατο να μελετηθεί κάθε σημείο της περιοχής που πρόκειται να εκτελεσθεί το έργο, πρέπει να διερευνηθεί η μηχανική συμπεριφορά των εδαφών με τη λήψη εδαφικών δειγμάτων από τη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος. Ο αριθμός δειγμάτων καθώς και ο τύπος της γεωτεχνικής δειγματοληψίας εξαρτάται από το είδος του εδάφους, τον τύπο και τη σημασία του έργου και από τον διαθέσιμο τεχνικό εξοπλισμό.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 7 ως στόχοι της γεωτεχνικής έρευνας καλούνται ο καθορισμός των συνθηκών του εδάφους, βράχου και υπόγειου νερού, ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων του εδάφους και βράχου και η διερεύνηση του αριθμού των σημείων έρευνας έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ακριβής γνώση της πολυπλοκότητας και της μεταβλητότητας του εδάφους στη θέση ενδιαφέροντος.

Σημειώνεται ότι στους Ευρωκώδικες όπως και σε άλλους κώδικες από χώρες σε όλο τον πλανήτη, δεν υπάρχουν ενδεικτικές προτάσεις για τον αριθμό και τη τοποθεσία της λήψης των εδαφικών δειγμάτων. Αυτό είναι και το αντικείμενο της παρούσας μελέτης, η πρόταση δηλαδή των βέλτιστων σημείων για έρευνα.

Πιο κάτω γίνεται σύντομη αναφορά στους τύπους γεωτεχνικών δειγματοληψιών που προτείνονται από τον EC7.

2.1 Δειγματοληπτικές γεωτρήσεις

Γίνονται για βάθη μεγαλύτερα των 4-5 μέτρων με τη διείδυση ενός μεταλλικού στελέχους. Η διαδικασία γίνεται είτε με κρούση είτε με περιστροφή του μηχανήματος στο έδαφος και εξάγεται το δείγμα σε μορφή κυλινδρικής στήλης. Η μέθοδος αυτή δίδει τη δυνατότητα εισχώρησης σε μεγάλα βάθη με τη χρήση διαδοχικών σωληνώσεων. Ως μειονέκτημα αυτής της

μεθόδου καλείται η μείωση των εδαφικών δειγμάτων αφού υπάρχει μείωση της διαμέτρου των δειγματικών στελεχών (διαδοχικών σωληνώσεων). Κατά την εισχώρηση του γεωτρήπανου μπορούν να εκτελεσθούν επιτόπου δοκιμές (SPT, FVT, PMT κ.α.) σε τακτά χρονικά διαστήματα για τη διερεύνηση του εδάφους στη φυσική του κατάσταση.

2.2 Επιτόπου δοκιμές

Ως επιτόπου δοκιμές χαρακτηρίζονται οι δοκιμές που πραγματοποιούνται σε δείγματα που βρίσκονται στο φυσικό τους περιβάλλον με απώτερο σκοπό τα δείγματα να έχουν υποστεί την ελάχιστη δυνατή διαταραχή. Ανάλογα με τον τρόπο επιβολής των φορτίων διακρίνονται σε δοκιμές φόρτισης και δοκιμές διείσδυσης. Με την επιτόπια έρευνα επιτυγχάνεται μείωση του αριθμού των απαιτούμενων ερευνητικών γεωτρήσεων, αύξηση της ταχύτητας παροχής πληροφοριών, μείωση του κόστους της έρευνας, μείωση της διαταραχής του δείγματος και αποφυγή της διαταραχής του επιτόπιου πεδίου τάσεων.

2.2.1 *CPT, CPTU (Cone penetration and piezocone penetration tests) - Δοκιμές διείσδυσης κώνου*

Με τη δοκιμή αυτή γίνεται εφικτός ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας και του είδους του εδάφους. Απώτερος σκοπός της δοκιμής είναι ο επιτόπου προσδιορισμός της αντίστασης που αναπτύσσεται σε ένα τυποποιημένο κώνο και σε ένα κυλινδρικό μέλος τριβής που ωθούνται στο έδαφος με υδραυλικά μέσα, καθώς επίσης και ο προσδιορισμός της μεταβολής των πιέσεων του νερού των πόρων. Κύρια πλεονεκτήματα της δοκιμής αυτής είναι η ταχύτητα εκτέλεσής της και η συνεχής καταγραφή των εδαφικών χαρακτηριστικών με το βάθος.

Σημείωση: Η διαφορά μεταξύ των δοκιμών CPT και CPTU είναι ότι η δεύτερη περιλαμβάνει επιπλέον όργανο που μετρά την πίεση του νερού των πόρων κατά τη διάρκεια της διείσδυσης στο επίπεδο της βάσης του κώνου.

2.2.2 *PMT (Pressuremeter tests) - Δοκιμές πρεσσιόμετρου*

Ο σκοπός της δοκιμής του πρεσσιομέτρου είναι η μέτρηση της επί τόπου παραμόρφωσης του εδάφους ή ακόμα και του μαλακού βράχου από τη διαστολή κυλινδρικής ελαστικής μεμβράνης υπό πίεση. Καταγράφονται σχέσεις τάσης - παραμόρφωσης με παραδοχή επίπεδης έντασης και προσδιορίζεται η οριακή αντοχή του εδάφους (Αναγνωστόπουλος, 2006). Με τη δοκιμή πρεσσιομέτρησης εξασφαλίζονται σημαντικές πληροφορίες για το μέτρο ελαστικότητας, τη φέρουσα ικανότητα και την παραμορφωσιμότητα των σχηματισμών. Έμμεσα μπορούν να υπολογισθούν στοιχεία και για τις διατμητικές αντοχές των υλικών που εξετάζονται.

Κατά τη δοκιμή, μέσω γεώτρησης εισάγεται μέσα στο έδαφος βολίδα (probe) που αποτελείται από κυλινδρική ελαστική μεμβράνη, στην οποία διοχετεύεται υγρό μέσω αγωγών έτσι ώστε να μετρηθεί η διαστολή της κυλινδρικής μεμβράνης και να καταγραφούν οι μετρήσεις της πίεσης και της διαστολής.

Υπάρχουν τέσσερις τύποι πρεσσιομέτρου, που διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τρόπο εισαγωγής της βολίδας στο έδαφος:

- Πρεσσιόμετρο σε προϋπάρχουσα γεώτρηση - Pre-bored pressuremeter (PBP)
- Πρεσσιόμετρο Ménard - Ménard pressuremeter (MPM)
- Διατρητικό Πρεσσιόμετρο - Self-boring pressuremeter (SBP)
- Πρεσσιόμετρο πλήρους μετατόπισης - Full displacement pressuremeter (FDP)

2.2.3 *SPT (Standard Penetration Test) - Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης*

Η δοκιμή SPT είναι μία από τις περισσότερο διαδεδομένες επιτόπου δοκιμές λόγω της πολύχρονης εφαρμογής της καθώς και της συσχέτισης των αποτελεσμάτων της με ποικίλες εμπειρικές τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους όπως προτάθηκαν στο παρελθόν από διάφορους ερευνητές, όπως οι Terzaghi & Peck (1967), Sowers (1979), Hara et al. (1974), De Mello (1971), Stroud (1974). Χρησιμοποιείται σε όλους σχεδόν τους τύπους εδαφών κυρίως για την εκτίμηση της αντοχής τους, για την ποιοτική ένδειξη των επιτόπου ιδιοτήτων τους και για τον άμεσο προσδιορισμό της σχετικής πυκνότητας και της αντίστασης των σχηματισμών

στη διείσδυση. Επίσης χρησιμοποιείται για τον έμμεσο προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και συμπιεστότητας με τη χρήση εμπειρικών συσχετίσεων, για τον καθορισμό της επιτρεπόμενης φέρουσας ικανότητας και για τον υπολογισμό των καθιζήσεων των κατασκευών.

2.2.4 **DP** (*Dynamic probing tests*) – Δυναμική δοκιμή

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντίστασης των εδαφών και μαλακών βράχων στη δυναμική διείσδυση ενός κώνου. Ένα σφυρί μιας δεδομένης μάζας αφήνεται από συγκεκριμένο ύψος και οδηγεί τον κώνο στο έδαφος. Η αντίσταση διείσδυσης ορίζεται ως ο αριθμός των χτυπημάτων που απαιτούνται για την εισχώρηση του κώνου σε συγκεκριμένο βάθος μέσα στο έδαφος. Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της αντοχής και της παραμόρφωσης του εδάφους καθώς και για μέτρο σύγκρισης με τις άλλες επιτόπιες δοκιμές.

2.2.5 **WST** (*Weight sounding test*) - Δοκιμή πτώσης βάρους

Η συσκευή της δοκιμής πτώσης βάρους αποτελείται από ένα πενετρόμετρο σφηνοειδούς μορφής, βαρίδια και μια περιστρεφόμενη συσκευή. Χρησιμοποιείται για την καταγραφή της στρωματογραφίας του εδάφους καθώς και για την εκτίμηση της πυκνότητας των μη συνεκτικών εδαφών και της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής των συνεκτικών εδαφών. Με τη χρήση των βαριδίων το σφηνοειδές πενετρόμετρο μπήγεται στο έδαφος και μετρούνται οι στροφές που κάνει σε συγκεκριμένο βάθος.

2.2.6 **FVT** (*Field vane test*) - Επιτόπου δοκιμή πτερυγίου

Η δοκιμή αυτή αναπτύχθηκε στις Σκανδιναβικές χώρες για τη μέτρηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής των μαλακών αργίλων. Κατά τη δοκιμή, που εκτελείται σε συνδυασμό με δειγματοληπτική γεώτρηση, εισάγεται στο έδαφος κάτω από τον πυθμένα της γεώτρησης ένα σύστημα δύο κατακόρυφων μεταλλικών πλακών (πτερύγιο) σε σχήμα σταυρού. Κατά την

περιστροφή του συστήματος μετριέται η απαιτούμενη ροπή στρέψης σαν συνάρτηση της γωνίας στροφής καθώς και η μέγιστη ροπή στρέψης, που συσχετίζεται με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους. Τα αποτελέσματα της δοκιμής έχουν εφαρμοσθεί με επιτυχία στην ανάλυση της ευστάθειας επιχωμάτων και εδαφικών πρανών.

2.2.7 **FDT** (*Flat dilatometer test*) - Δοκιμή επίπεδου ντιλατομέτρου

Η δοκιμή επινοήθηκε από τον Marchetti το 1975 για σκοπούς παρακολούθησης των πλευρικών ωθήσεων εδάφους σε πασσαλότοιχους. Η δοκιμή εφαρμόζεται σε αργιλικά, ιλυώδη και αμμώδη υλικά για την εμπειρική εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων όπως το μέτρο ελαστικότητας, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή, η στραγγιζόμενη διατμητική αντοχή αμμωδών εδαφών, το φαινόμενο ειδικό βάρος, ο δείκτης υπερστερεοποίησης κ.α.

2.2.8 **PLT** (*Plate loading test*) - Δοκιμή φόρτισης πλάκας

Η δοκιμή φόρτισης πλάκας χρησιμοποιείται για τον άμεσο προσδιορισμό των καθιζήσεων ή και της φέρουσας ικανότητας των εδαφικών σχηματισμών, αλλά και των μαλακών βραχωδών σχηματισμών, σε αρκετές περιπτώσεις και με πολλές παραλλαγές, ειδικότερα εκεί όπου δεν είναι εύκολη η δειγματοληψία.

3. Πλευρικές Ωθήσεις Γαιών

Σύμφωνα με τον ορισμό που έδωσαν οι Dunn et al., 1980, και Budhu, 1999, ωθήσεις γαιών ονομάζονται οι πλευρικές πιέσεις που ασκεί το έδαφος λόγω του βάρους του και τυχόν επιφόρτισης, στην επιφάνεια ενός τεχνικού έργου.

Η ενεργητική ώθηση (p_a) είναι η ελάχιστη τιμή πλευρικής ώθησης και αντιστοιχεί σε συνθήκες θραύσης του εδάφους, όταν η αντοχή του ενεργοποιείται στο σύνολο της για την πλευρική συγκράτηση του. Η παθητική ώθηση (p_p) είναι η μέγιστη τιμή πλευρικής ώθησης και αντιστοιχεί επίσης σε συνθήκες θραύσης, όταν η αντοχή του ενεργοποιείται στο σύνολο της για την πλευρική αντίσταση του. Η ενεργητική ώθηση δηλαδή, χαρακτηρίζει τη πλευρική διόγκωση του εδάφους, ενώ η παθητική ώθηση την πλευρική συμπίεση του εδάφους. (Παντελίδης Λύσανδρος 2013)

Το μέγεθος της ώθησης γαιών εξαρτάται από την δυνατότητα του στοιχείου που δέχεται την ώθηση, να μετακινηθεί πλευρικά είτε μακριά διογκώνοντας το έδαφος, είτε προς αυτό συμπιέζοντας το. Στην περίπτωση που το δομικό στοιχείο δεν μετακινείται, η αναπτυσσόμενη ώθηση γαιών ονομάζεται 'ουδέτερη' ή 'ώθηση σε ηρεμία'.

Οι πλευρικές ωθήσεις του εδάφους επί των έργων αντιστήριξης εκφράζονται συνήθως με την έννοια του συντελεστή ωθήσεων K , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της οριζόντιας τάσης σ_h , προς την αντίστοιχη κατακόρυφη σ_v .

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}, \text{ όπου } \sigma_v = \gamma * z$$

Οι συντελεστές, για τα τρία είδη ωθήσεων γαιών, συμβολίζονται ως ακολούθως:

- K_a : Συντελεστής ενεργών ωθήσεων
- K_p : Συντελεστής παθητικών ωθήσεων
- K_0 : Συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία

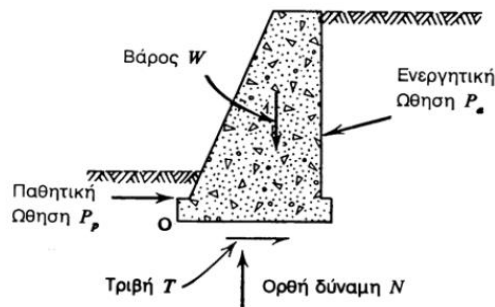
3.1 Θεωρία Coulomb (1776)

Κατά τη θεωρία Coulomb εξετάζεται η μάζα του εδάφους κατά τη στιγμή της θραύσης βασισμένη στις εξής παραδοχές:

- Η κατασκευή αντιστήριξης μπορεί να μετακινηθεί
- Η επιφάνεια ολισθήσεως του εδάφους είναι επίπεδη
- Η επιφάνεια του τοίχου είναι επίπεδη
- Η εδαφική μάζα είναι ημι-άπειρη, ομογενής, ξηρή και χωρίς συνοχή.
- Οι δυνάμεις τριβής είναι κατανομημένες ομοιόμορφα σ' όλη την επίπεδη επιφάνεια ολισθήσεως καθώς και στην επιφάνεια του τοίχου

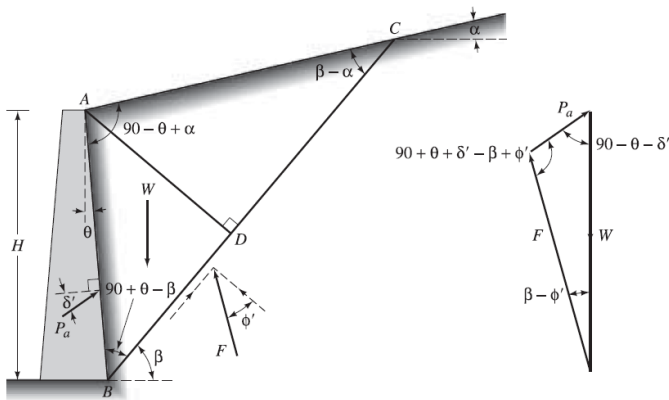
Οι δυνάμεις που ενεργούν στο εδαφικό πρίσμα που εξετάζεται είναι:

- Το βάρος του πρίσματος (W)
- Η επιφόρτιση (Q)
- Η δύναμη συνοχής (C)
- Η συνισταμένη (F) της ορθής δύναμης (N) και της δύναμης τριβής (T) που ασκούνται στο επίπεδο ολίσθησης
- Η πιθανή ενεργητική (P_a) ή παθητική (P_p) ώθηση

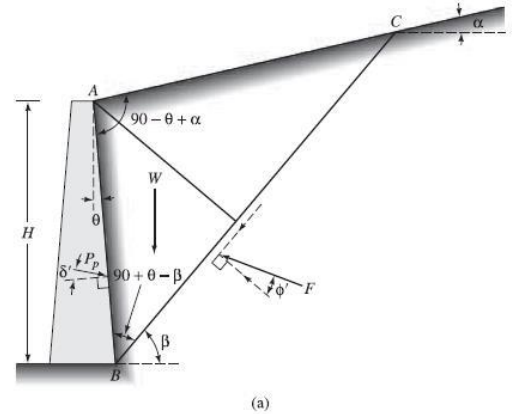


Σχήμα 3.1.1: Δυνάμεις σε ένα τοίχο

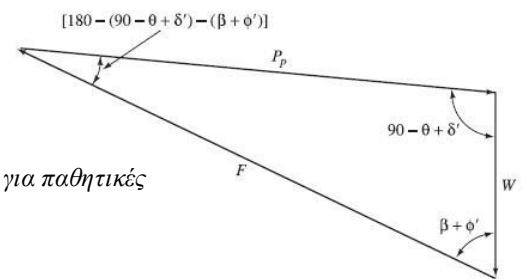
Όλες οι δυνάμεις είναι γνωστές κατά μέγεθος και διεύθυνση εκτός από τις F και P , που είναι γνωστές μόνο κατά διεύθυνση. Το μέγεθος της F εξαρτάται από τη γωνία τριβής ϕ που σχηματίζει με την κάθετο στο επίπεδο ολίσθησης, ενώ η P εξαρτάται από τη γωνία δ που σχηματίζει με την κάθετο στην επιφάνεια του τοίχου.



Σχήμα 3.1.2.α: Εδαφική σφήνα για ενεργητικές ωθήσεις (σχήμα πάνω)



(a)



Σχήμα 3.1.2.β: Εδαφική σφήνα για παθητικές ωθήσεις(σχήμα δεξιά)

(b)

Για μη συνεκτικά εδάφη ($c=0$), οι οριακές ωθήσεις υπολογίζονται με τη σχέση:

$$P_i = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cdot k_i$$

Όπου:

$$i = \begin{cases} a & \text{για ενεργητική ώθηση} \\ p & \text{για παθητική ώθηση} \end{cases}$$

H = το κατακόρυφο ύψος του τοίχου

και k_i = ο συντελεστής ώθησης

Ο συντελεστής ώθησης k_i ορίζεται ως:

$$k_a = \frac{\cos^2(\varphi' - \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\delta' + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta' + \varphi') \sin(\varphi' - \alpha)}{\cos(\delta' + \theta) \cos(\theta - \alpha)}} \right]^2}$$

$$k_p = \frac{\cos^2(\varphi' + \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\delta' - \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi' - \delta') \sin(\varphi' + \alpha)}{\cos(\delta' - \theta) \cos(\alpha - \theta)}} \right]^2}$$

Αν $\alpha=0^\circ$, $\theta=0^\circ$ και $\delta'=0^\circ$ τότε:

$$k_a = \frac{1 - \sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'} = \tan^2\left(45 - \frac{\varphi'}{2}\right) \text{ για ενεργητική ώθηση}$$

$$k_p = \frac{1 + \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'} = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi'}{2}\right) \text{ για παθητική ώθηση}$$

3.2 Θεωρία Rankine (1857)

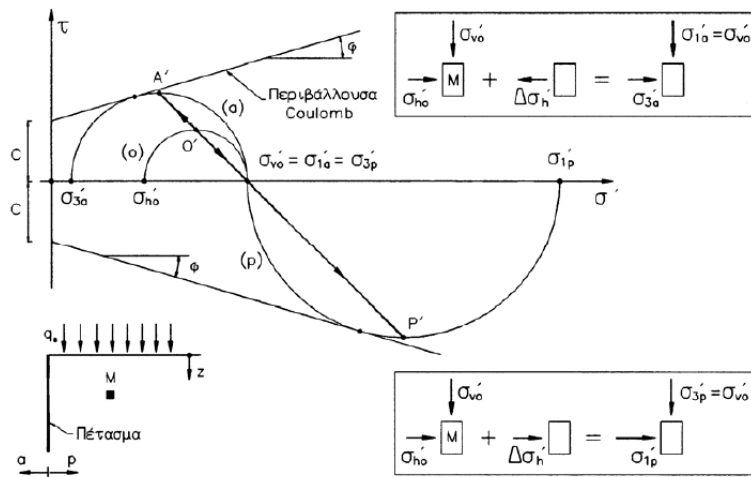
Κατά τη θεωρία Rankine εξετάζονται οι συνθήκες εντάσεως και παραμορφώσεως του εδάφους, σε κατάσταση πλαστικής ισορροπίας βασισμένη στις εξής παραδοχές:

- Η εδαφική μάζα είναι ομογενής, ξηρή και ημι-άπειρη
- Η επιφάνεια του εδάφους είναι επίπεδη
- Η αρχική εντατική κατάσταση είναι γεωστατική και ομοιόμορφη
- Η επιφάνεια του τοίχου είναι κατακόρυφο και λείο
- Ο τοίχος μπορεί να μετακινηθεί αρκετά με οποιαδήποτε φορά, ούτως ώστε να αναπτυχθούν οι οριακές τιμές ωθήσεως

Το σφάλμα που προκύπτει στον υπολογισμό τόσο των ενεργητικών όσο και των παθητικών ωθήσεων είναι προς την πλευρά της ασφάλειας λόγω των παραδοχών της θεωρίας ότι η

επιφάνεια του τοίχου είναι λεία, δηλαδή αγνοείται η τριβή και ότι το έδαφος είναι ξηρό, δηλαδή δεν υπάρχει συνοχή.

Ο Rankine εξέτασε ένα μικρό σε διαστάσεις εδαφικό στοιχείο που φτάνει σε οριακή ενεργητική ή παθητική κατάσταση, χρησιμοποιώντας τους κύκλους Mohr όπως φαίνεται πιο κάτω.



Σχήμα 3.2.1: Κύκλοι Mohr -Ενεργητική και παθητική ώθηση γαιών

Ο συντελεστής ενεργητικής ώθησης Rankine:

$$\sigma'_{\alpha} = \sigma'_{\sigma} k_{\alpha} - 2c\sqrt{k_{\alpha}}$$

όπου,

$$k_{\alpha} = \tan^2\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right)$$

Ο συντελεστής παθητικής ώθησης Rankine:

$$\sigma'_{\rho} = \sigma'_{\sigma} k_{\rho} + 2c\sqrt{k_{\rho}}$$

όπου,

$$k_p = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

Αν η επίχωση είναι από κοκκώδες υλικό με γωνία τριβής φ' υπό στραγγισμένες συνθήκες και $c'=0$, τότε:

Για την ενεργητική ώθηση:

$$\sigma'_\alpha = \gamma z k_\alpha$$

όπου,

$$k_\alpha = \cos a \frac{\cos a - \sqrt{\cos^2 a - \cos^2 \varphi'}}{\cos a + \sqrt{\cos^2 a - \cos^2 \varphi'}}$$

Και για την παθητική ώθηση:

$$\sigma'_p = \gamma z k_p$$

όπου,

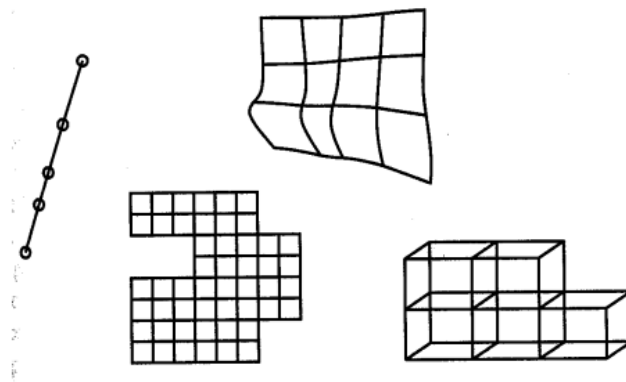
$$k_p = \cos a \frac{\cos a + \sqrt{\cos^2 a - \cos^2 \varphi'}}{\cos a - \sqrt{\cos^2 a - \cos^2 \varphi'}}$$

4. Πιθανοκρατικές Μέθοδοι Ευστάθειας Τοίχων Αντιστήριξης

4.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) - Finite Element Method (FEM)

Τα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται εκτενώς στη γεωτεχνική μηχανική αφού μπορούν να προσομοιώσουν τις συνθήκες πεδίου ικανοποιώντας σχεδόν όλες τις θεωρητικές απαιτήσεις για τις οριακές συνθήκες καθώς και την πιθανή συμπεριφορά του εδάφους. Προσεγγίσεις βασισμένες στα πεπερασμένα στοιχεία, λόγω της αριθμητικής φύσης τους, μπορούν να περιγράψουν με περισσότερη ακρίβεια την πολυπλοκότητα και την μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους.

Προβλήματα που αφορούν περίπλοκες ιδιότητες, γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες μπορούν να επιλυθούν με αριθμητικές μεθόδους και τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων λόγω της δυνατότητας τους να διακριτοποιούν το χώρο. Διακριτοποίηση ονομάζεται η διαδικασία διαμερισμού ενός σώματος σε μικρότερα στοιχεία. Αυτό σημαίνει ότι ο χώρος θεωρείται ως ένα σώμα που αποτελείται από πλήθος μικρότερων γεωμετρικών στοιχείων (elements) με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες το καθένα. Οι υποχώροι αυτοί, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω των κοινών τους σημείων – κόμβων (nodes).



Σχήμα 4.1: Διακριτοποίηση σώματος (Αγιουτάντης, 2002)

Η διαδικασία ανάλυσης με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τρία στάδια:

- i. Αρχικά γίνεται η προεπεξεργασία με την εισαγωγή των παραμέτρων ανάλυσης από τον χρήστη στο λογισμικό πρόγραμμα. Εδώ γίνεται η διακριτοποίηση του χώρου, η επιλογή του μεγέθους των στοιχείων, η εισαγωγή των εξισώσεων που χαρακτηρίζουν τους κόμβους, των χαρακτηριστικών του εδάφους και των συνοριακών συνθηκών.
- ii. Μετά από τη διαδικασία της διακριτοποίησης, σχηματίζεται ένα σύστημα εξισώσεων από τον υπολογισμό των εξισώσεων ισορροπίας του κάθε στοιχείου, βασισμένο στην μέθοδο των μετατοπίσεων. Αυτό συνεπάγεται την περιγραφή της συμπεριφοράς όλων των στοιχείων και επομένως ολόκληρου του σώματος. Οι επίλυσεις εκτελούνται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του λογισμικού. Αφού πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των μητρώων και η επίλυση των εξισώσεων, εξάγονται οι άγνωστες μεταβλητές των κόμβων.
- iii. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο γίνεται η περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων, συνήθως με την δημιουργία πινάκων και διαγραμμάτων που θα βοηθήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων.

4.2 Μέθοδος Τυχαίων Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΤΠΣ) - Random Finite Element Method (RFEM)

Είναι ευρέως γνωστό ότι τα εδάφη είναι σχεδόν αδύνατο να χαρακτηριστούν ως απόλυτα ομογενή και ομοιόμορφα και αυτό οφείλεται στην πολύχρονη και περίπλοκη διαδικασία εναπόθεσης των υλικών μέσα στο χρόνο. Ακόμη και οι ιδιότητες των εδαφών που τείνουμε να ονομάζουμε ως 'ομογενή', ποικίλουν από σημείο σε σημείο (Vanmarcke 1977a). Αυτή η ποικιλομορφία των ιδιοτήτων του εδάφους στο χώρο είναι γνωστή ως χωρική μεταβλητότητα (spatial variability).

Για να ξεπεραστούν οι περιορισμένες δυνατότητες των κλασικών μεθόδων υπολογισμού των ωθήσεων σε θέματα χωρικής μεταβλητότητας των ιδιοτήτων του εδάφους, οι Fenton και Griffiths πρότειναν μια προσέγγιση εν ονόματι της μεθόδου τυχαίων πεπερασμένων στοιχείων, η οποία ενσωματώνει ένα τυχαίως μεταβλητό εδαφικό προφίλ στην μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος προτάθηκε το 1992 από τους Drs. G.A. Fenton και D.V. Griffiths και χρησιμοποιήθηκε για να τη διερεύνηση της τυχαίας συμπεριφοράς των εδαφών στο πλαίσιο διαφόρων κλασικών γεωτεχνικών προβλημάτων. Η Μέθοδος Τυχαίων Πεπερασμένων Στοιχείων συνδυάζει μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo και την Υποδιαίρεση Τοπικού Μέσου (Local Average Subdivision, LAS) ώστε να μας δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στην μελέτη αυτή το αντικείμενο έρευνας είναι η επιρροή του αριθμού και των σημείων δειγματοληψίας στην πρόβλεψη της πιθανότητας αστοχίας σε ένα ανομοιογενές έδαφος.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί σημειακές και χωρικές στατιστικές παραμέτρους όπως μέση τιμή, τυπική απόκλιση, συντελεστής διακύμανσης κλπ. για να αναλύσει τις ιδιότητες του εδάφους μέσω των τυαίων μεταβλητών.

Σύμφωνα με τον Gordon A. Fenton (Basics of Simulation and RFEM in Stochastic Analysis and Inverse Modelling), η Μέθοδος Τυχαίων Πεπερασμένων Στοιχείων (RFEM) προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των κλασσικών μεθόδων καθώς επίσης και έναντι των συμβατικών εργαλείων πιθανολογικής ανάλυσης:

- Οι πιθανολογικές μέθοδοι ακολουθούν ένα πιο ορθολογικό τρόπο προσέγγισης των γεωτεχνικών προβλημάτων μέσω την έννοιας της πιθανότητας αστοχίας της κατασκευής, έναντι των κλασσικών μεθόδων που αναφέρονται μόνο στο συντελεστή ασφαλείας.
- Η μέθοδος RFEM αναζητά τον κρίσιμο μηχανισμό αστοχίας, χωρίς να χρειάζεται να παρθεί από εμάς απόφαση για την υποθετική επιφάνεια θραύσης, εκ των προτέρων.
- Η μέθοδος χρησιμοποιεί το μήκος χωρικής συσχέτισης για να περιγράψει την μεταβλητότητα του εδάφους και έπειτα γίνεται η ανάλυση βασισμένη στο 'χειρότερο' σενάριο χωρικής συσχέτισης ούτως ώστε να εκτιμηθεί η μέγιστη τιμή πιθανότητας αστοχίας.

4.2.1 Μέθοδος Monte Carlo, MC

Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια αριθμητική μέθοδος για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων μέσω προσομείωσης τυχαίων αριθμών. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της μεθόδου MC είναι:

- Χαρακτηρίζεται από απλή δομή του υπολογιστικού αλγόριθμου. Το πρόγραμμα πρέπει να διεκπεραιώσει μια τυχαία δοκιμή, η οποία θα επαναληφθεί N φορές, με κάθε δοκιμή ανεξάρτητη από τις προηγούμενες. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα των δοκιμών παίρνονται κατά μέσο όρο.
- Ως συνέχεια του παραπάνω, η μέθοδος μπορεί να είναι εξαιρετικά αργή, αφού για τη μείωση του σφάλματος απαιτείται επανάληψη των δοκιμών πολλές φορές. Για να μειωθεί το σφάλμα κατά ένα παράγοντα (κατά ένα δεκαδικό ψηφίο) απαιτείται αύξηση του N κατά 100.
- Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για πολυδιάστατα προβλήματα αφού η ακρίβεια της εξαρτάται μόνο από την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

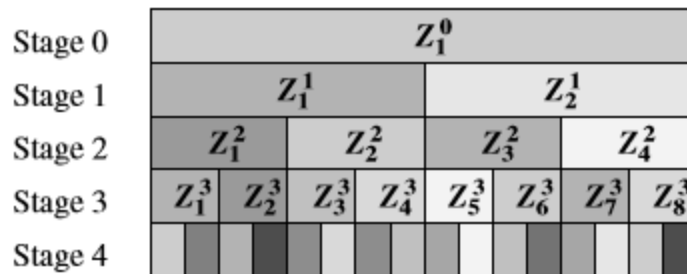
Ο κύριος τρόπος για επιτάχυνση των υπολογισμών Monte Carlo είναι η μείωση της διασποράς (Variance Reduction). Η Μείωση της Διασποράς της Monte Carlo μπορεί να επιτευχθεί είτε χρησιμοποιώντας (ψευδο-) τυχαίες (pseudorandom) ακολουθίες αριθμών, είτε με μετατροπή των ακολουθιών από (ψευδο-) τυχαίους αριθμούς σε quasi-τυχαίους αριθμούς (quasi-random).

4.2.2 Υποδιαίρεση Τοπικού Μέσου (ΥΤΠ) - Local Average Subdivision (LAS)

Η μέθοδος αναπτύχθηκε και επεξηγήθηκε λεπτομερώς από τους Fenton και Vanmarcke (1990). Η μέθοδος παράγει συσχετισμένους τοπικούς μέσους των εδαφικών ιδιοτήτων, βασισμένη σε μια συνάρτηση τυπικής κανονικής κατανομής και μια συνάρτηση χωρικής συχέτισης. Προέκυψε από την ανάγκη για σωστή εκτίμηση των μετρήσεων σε γεωτεχνικά ζητήματα, αφού στην πραγματικότητα τις περισσότερες φορές οι τιμές αυτές είναι τοπικοί μέσοι των εν λόγω ιδιοτήτων του εδάφους.

Συνοπτικά, η μέθοδος LAS μιας διάστασης (1-D), ακολουθεί μια απαγωγική αναδρομική διαδικασία υποδιαίρεσεων (top-down recursive process). Στο στάδιο 0, δημιουργείται ένας

καθολικός μέσος όρο για να ξεκινήσει η διαδικασία. Στο στάδιο 1, ο τομέας υποδιαιρείται σε δύο περιφέρειες των οποίων ο τοπικός μέσος πρέπει να πλησιάζει τον μέσο όρο του μητρικού κελιού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται υποδιαιρώντας κάθε φορά το κάθε μητρικό κελί σε δυο περιοχές διατηρώντας τους μέσους όρους πλησίον της μητρικής τιμής.



Σχήμα 4.2.2: Αναδρομική διαδικασία για δημιουργία τυχαίων τοπικών μέσων

(Gordon A. Fenton, D. V. Griffiths, Risk Assessment in Geotechnical Engineering, ch.6, p. 224)

Οι κανονικά κατανομημένες τιμές στα δυο καινούργια κελιά, δημιουργούνται έτσι ώστε να ικανοποιούν τα ακόλουθα κριτήρια:

- Είναι ορθά συσχετισμένα μεταξύ τους
- Έχουν ορθή διακύμανση σύμφωνα με την θεωρία τοπικών μέσων
- Ο μέσος τους ισούτε με αυτόν του μητρικού κελιού, και
- Είναι ορθά συσχετισμένα με άλλα παραγόμενα κελιά

Σε προσομοίωση 2 διαστάσεων (2-D) ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τη μόνη διαφορά ότι το κάθε μητρικό κελί υποδιαιρείται σε τέσσερις ίσες περιοχές.

5. Μεταβλητότητα του εδάφους

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, τα εδάφη δεν μπορούν να χαρακτηριστούν πλήρως ομογενή και αυτό οφείλεται στην εναπόθεση ποικίλων εδαφών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες, κατά την πάροδο του χρόνου. Ο Vanmarcke 1977 χαρακτήρισε την *μεταβλητότητα του εδάφους (inherent soil variability)* ως μια από τις 3 κύριες αιτίες αβεβαιότητας για το χαρακτηρισμό των εδαφικών ιδιοτήτων. Οι άλλες 2 είναι η *στατιστική αβεβαιότητα (statistical uncertainty)* λόγω των περιορισμένων εδαφικών δειγμάτων ή σφάλματος στις μετρήσεις λόγω αδυναμίας των μηχανημάτων και η *αβεβαιότητα του μοντέλου μετασχηματισμού (transformation model uncertainty)* που προέρχεται από την μετατροπή εργαστηριακών ή επιτόπιων μετρήσεων, σε ιδιότητες σχεδιασμού μέσω εμπειρικών ή άλλων μεθόδων συσχέτισης.

Ακολούθως θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών – ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν για να ποσοτικοποιηθεί η εδαφική αβεβαιότητα.

5.1 Κλασικά Στατιστικά Χαρακτηριστικά Εδαφικών Ιδιοτήτων - Μέτρα Κεντρικής Τάσης, Μεταβλητότητας και Συσχέτισης

Η μεταβλητότητα ή αβεβαιότητα των ιδιοτήτων του εδάφους μπορεί να ποσοτικοποιηθεί αν θεωρήσουμε ότι οι εδαφικές ιδιότητες είναι τυχαίες μεταβλητές στο χώρο. Αντί μιας ντετερμινιστικής τιμής, οι εδαφικές ιδιότητες παίρνουν ένα εύρος τιμών που ορίζεται από την *συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function)*.

Μια τυχαία μεταβλητή δύναται να περιγραφεί πλήρως, εάν έχει καθοριστεί η κατανομή της πιθανότητας της. Λόγω της περιπλοκότητας της φύσης, δεν είμαστε σε θέση να περιγράψουμε την ακριβή κατανομή οποιουδήποτε φυσικού φαινομένου, και ιδιαίτερα στην περίπτωση μας όπου το έδαφος παρουσιάζει σημαντική ετερογένεια. Γι' αυτό το λόγο για να περιγράψουμε μια τυχαία μεταβλητή χρησιμοποιούμε λιγότερο πλήρεις, αλλά περισσότερο κατανοητές παραμέτρους. Τα πιο σημαντικά από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η κεντρική τάση και η διακύμανση ή διασπορά. Ακόμη και αν η πλήρης κατανομή των πιθανοτήτων είναι γνωστή, τα πιο πάνω χαρακτηριστικά εξακολουθούν να είναι χρήσιμα αφού μεταφέρουν πληροφορίες

σχετικά με τις ιδιότητες των τυχαίων μεταβλητών που είναι καθοριστικής σημασίας σε πρακτικές εφαρμογές.

Τα πιο συνήθη μέτρα κεντρικής τάσης και μεταβλητότητα είναι ο μέσος (εκφράζεται με τη μέση τιμή) και η διακύμανση (εκφράζεται με την τυπική απόκλιση) αντίστοιχα. Στη μηχανική, η μεταβλητότητα μιας τυχαίας ποσότητας εκφράζεται συνήθως μέσω του αδιάστατου συντελεστή διακύμανσης, γνωστός ως coefficient of variation (COV) που ορίζεται με το λόγο της τυπικής απόκλισης ως προς την μέση τιμή.

5.1.1 Μέση Τιμή - Mean

Η μέση τιμή είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό μιας τυχαίας μεταβλητής, διότι περιγράφει την κεντρική τάση της. Μαθηματικά ορίζεται ως ακολούθως:

Έστω X , είναι μια τυχαία μεταβλητή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f(x)$.

Η μέση ή αναμενόμενη τιμή του X , που συμβολίζεται ως μ_x , ορίζεται ως:

$$E[X] = \mu_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

εαν η X είναι συνεχής

$$E[X] = \mu_x = \frac{1}{n} \sum x_i$$

εαν η X είναι διακριτή, όπου n ο αριθμός των σημείων.

5.1.2 Διακύμανση (Τυπική Απόκλιση) – Variance (Standard Deviation)

Διακύμανση είναι το χαρακτηριστικό που δηλώνει πόσο συγκεντρωμένες γύρω από τη μέση τιμή είναι οι τιμές της τυχαίας μεταβλητής. Μαθηματικά ορίζεται ως ακολούθως:

Έστω X , είναι μια τυχαία μεταβλητή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f_x(x)$ και μέση τιμή μ_x .

Η διακύμανση, ορίζεται ως:

$$\text{Var}[X] = \sigma_X^2 = E[(X - \mu_X)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_X)^2 f(x) dx$$

$$\text{Var}[X] = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \mu_X)^2$$

για συνεχείς και διακεκριμένες τιμές αντίστοιχα.

Η διακύμανση, σ^2 , έχει μονάδες X^2 . Για αυτό το λόγο τείνουμε να χρησιμοποιούμε την τυπική απόκλιση, σ , που ορίζεται ως η θετική τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης και έχει μονάδες X .

$$\sigma_X = \sqrt{\text{Var}[X]}$$

5.1.3 Συντελεστής Μεταβλητότητας - Coefficient of Variation

Ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι ένα μέτρο σχετικής μεταβλητότητας και εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό και όχι μέσω των μονάδων των δεδομένων στα οποία αναφέρεται.

Χρησιμοποιείται για σύγκριση συνόλων δεδομένων που έχουν μετρηθεί με τις ίδιες μονάδες αλλά διαφέρουν σε τέτοιο βαθμό ώστε μια άμεση σύγκριση των αντίστοιχων τυπικών αποκλίσεων να μην είναι χρήσιμη. Συμβολίζεται ως COV και ορίζεται μαθηματικά με το λόγο της τυπικής απόκλισης ως προς την μέση τιμή.

$$\text{COV} = \frac{\sigma_X}{\mu_X}$$

5.1.4 Συσχέτιση δυο Τυχαίων Μεταβλητών – Correlation of two Random Variables

Ένα ζεύγος τυχαίων μεταβλητών (π.χ. X , Y) θεωρούνται συσχετισμένες εάν η μία εξαρτάτε από την άλλη. Η συσχέτιση τους υπολογίζεται μη την συνδιακύμανση τους (covariance), $\text{Cov}[X, Y]$.

$$\text{Cov}[X, Y] = E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]$$

$$\text{Cov}[X, Y] = \frac{1}{n} \sum (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$$

για συνεχείς και διακριτές συναρτήσεις αντίστοιχα.

Ο συντελεστής συσχέτισης, ρ_{xy} , λαμβάνεται αν κανονικοποιήσουμε την συνδιακύμανση ως προς την τυπική απόκλιση των μεταβλητών X και Y, όπως ορίζεται πιο κάτω:

$$\rho_{xy} = \frac{\text{Cov}[X, Y]}{\sigma_x \sigma_y}$$

Ο συντελεστής συσχέτισης, ρ_{xy} , οροθετείται από τις τιμές -1 και +1. Αν $\rho_{xy} = \pm 1$ τότε υπάρχει απόλυτη συσχέτιση μεταξύ των δυο μεταβλητών. Αν $\rho_{xy} = 0$ τότε οι δύο τιμές είναι γραμμικά ανεξάρτητες.

5.1.5 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (ΣΠΠ) - Probability Density Function (PDF)

Η Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας ορίζει την κατανομή μιας τυχαίας μεταβλητής. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες ΣΠΠ για γεωτεχνικές εφαρμογές είναι η Κανονική Κατανομή και η Λογαριθμοκανονική Κατανομή. Πολλοί ερευνητές συμπέραναν ότι λογαριθμοκανονική υπερέχει της κανονικής σε θέματα χαρακτηρισμού των ιδιοτήτων ενός τυχαίου εδάφους. Μερικοί από αυτούς είναι Hoeksema and Kitaniadis 1985, Sudicky 1986, Fenton 1999, Cherubini 2000, Brejda 2000 κ.α.

5.1.5.1 Λογαριθμοκανονική κατανομή - Lognormal Distribution

Οι ιδιότητες των υλικών και των φορτίων στη μηχανική γενικά παίρνουν θετικές τιμές. Για τη μοντελοποίηση των ιδιοτήτων αυτών, δεν συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η κανονική κατανομή αφού έχει το μειονέκτημα ότι επιτρέπει αρνητικές τιμές και κατά συνέπεια θα είναι αναληθής. Στη θέση αυτής χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός λογαριθμικής και κανονικής κατανομής ούτως ώστε να αποφευχθούν οι αρνητικές τιμές. Η λογαριθμο-κανονική κατανομή (lognormal distribution) προκύπτει με την εφαρμογή ενός απλού αλλά μη γραμμικού μετασχηματισμού στην κανονική κατανομή. Πιο συγκεκριμένα, έστω G πλήθος κανονικά κατανομημένων μεταβλητών με εύρος τιμών $-\infty < g < +\infty$, τότε $X = \exp\{G\}$ θα έχει εύρος $0 < x < \infty$. Έτσι η προκύπτουσα τυχαία μεταβλητή, X, ακολουθεί λογαριθμο-κανονική κατανομή (σημειώνεται ότι ο φυσικός λογάριθμος της ακολουθεί κανονική κατανομή).

Η τυχαία μεταβλητή X ακολουθεί λογαριθμο-κανονική κατανομή αν $\ln(X)$ ακολουθεί κανονική κατανομή. Αν αυτό επαληθεύεται, τότε η X έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_{\ln x}\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right\} \quad 0 \leq x < \infty$$

Οι δυο παράμετροι αυτής της κατανομής είναι η μέση τιμή και η διακύμανση της κανονικά κατανεμημένης τυχαίας μεταβλητής, $\ln(X)$.

$$\begin{aligned}\mu_{\ln x} &= E[\ln X] \\ \sigma_{\ln x}^2 &= \text{Var}[\ln X]\end{aligned}$$

6. Λογισμικό - Βασικές Παραδοχές - Στοιχεία Ανάλυσης

Η χρήση αριθμητικών μεθόδων για το σχεδιασμό έργων αντιστήριξης αυξάνεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια έναντι των κλασικών μεθόδων ανάλυσης, λόγω της δυνατότητας που παρέχουν οι πρώτες για εφαρμογή σύνθετων εδαφικών μοντέλων καθώς και για προσομοίωση κάθε επιμέρους σταδίου της κατασκευής. Παρόλα αυτά, όμως, απαιτείται ορθολογιστική χρήση των αριθμητικών μεθόδων καθώς προϋποθέτουν βιβλιογραφική ανασκόπηση και μελέτη τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Η επιλογή των παραμέτρων για το έкаστο πρόβλημα πρέπει να είναι τέτοια ούτως ώστε να μην επηρεάζονται τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πιο πάνω, στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η επιρροή της επιλογής της θέσεως και του αριθμού εδαφικών δειγμάτων στη συμπεριφορά τοίχου αντιστήριξης, με απώτερο σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τον αξιόπιστο σχεδιασμό τυπικών διατάξεων αντιστηρίξεων σε ένα άγνωστο εδαφικό περιβάλλον.

Η παραμετρική μελέτη, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων REARTH2D μέσω του λογισμικού RFEM (Software Version 1.1.2) (διαθέσιμο στο <http://www.engmath.dal.ca/rfem>)

Πιο κάτω παρουσιάζονται ορισμένες από τις βασικές παραδοχές - στοιχεία της μελέτης:

- Για το σύνολο των αποτελεσμάτων εκτελέστηκαν διδιάστατες αναλύσεις σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.
- Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των εδαφικών στοιχείων εκτελείται ελαστοπλαστική ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.
- Στην ανάλυση οι κόμβοι που αντιπροσωπεύουν το άκαμπτο τοίχο αντιστήριξης μεταφράζονται σε οριζόντια θέση εντός του πλέγματος, για παθητικές ώθησεις P_p , και εκτός για ενεργητικές P_a . Ακολουθούν πολλαπλές προσομοιώσεις με τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo. Κάθε προσομοίωση περιλαμβάνει ένα τυχαίο πεδίο με την ίδια

μέση τιμή, τυπική απόκλιση και μήκος χωρικής συσχέτισης. Η χωρική κατανομή των ιδιοτήτων της κάθε μιας προσομοίωσης ποικίλλει, με αποτέλεσμα να έχουμε πληθώρα διαφορετικών τιμών για τις ενεργούσες ωθήσεις.

- Η εδαφική μάζα διακριτοποιείται σε 32 οκτακομβικά τετραγωνικά στοιχεία στην οριζόντια κατεύθυνση και κατά 32 οκτακομβικά τετραγωνικά στοιχεία την κάθετη κατεύθυνση. Ο τοίχος αντιστήριξης έχει βάθος H ενώ κάθε στοιχείο έχει πλάτος ίσο με $H/16$, δημιουργώντας ένα κάρναβο $2H$ σε πλάτος κατά $2H$ σε βάθος.
- Ο τοίχος είναι άκαμπος και λείος.

6.1 Αξιοπιστία Σχεδιασμού Ενεργητικών Ωθήσεων - Active Earth Pressure Design Reliability

Η διαδικασία σχεδιασμού ενός τοίχου αντιστήριξης περιλαμβάνει δύο στάδια:

1. την εκτίμηση των σχετικών ιδιοτήτων του εδάφους και
2. την πρόβλεψη του πλευρικού φορτίου

Η αξιοπιστία του σχεδιασμού εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών πλευρικών φορτίων. Παραβλέποντας την μεταβλητότητα από πλευρά αντίστασης R του τοίχου και με την παραδοχή ότι η σχεδιαζόμενη τιμή αντίστασης του τοίχου ικανοποιεί την εξής σχέση: $R = F_s P_a$

όπου F_s , ο συντελεστής ασφαλείας και P_a , η προβλεπόμενη τιμή φορτίου,

ο τοίχος αντιστήριξης δεν θα αστοχήσει αν η πραγματική τιμή φορτίου P_t είναι μικρότερη από $F_s * P_a$.

Η πραγματική τιμή πλευρικού φορτίου οπωσδήποτε θα διαφέρει από την προβλεπόμενη λόγω σφαλμάτων της εκτίμησης των ιδιοτήτων του εδάφους και λόγω της χωρικής μεταβλητότητας τους σε ένα πραγματικό έδαφος που δεν υπολογίζεται από τις κλασσικές μεθόδους. Η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος ορίζεται ως η πιθανότητα ότι η πραγματική τιμή πλευρικού φορτίου P_t υπερβαίνει την τιμή αντίσταση του τοίχου R .

$$p_f = P[P_t > R] = P[P_t > F_s P_a]$$

6.1.1 Πιθανότητα Αστοχίας - Probability of failure P_f

Πιο πάνω περιγράφηκε ο θεωρητικός ορισμός της πιθανότητας αστοχίας. Η εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo θα διαμορφωθεί ως ακολούθως:

Η πραγματική τιμή του φορτίου P_t θα υποτεθεί κατά προσέγγιση από το φορτίο που θα υπολογισθεί στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για κάθε προσομοίωση. Με αυτό το τρόπο αναμένεται να παραχθεί μια ρεαλιστική εκτίμηση του πραγματικού ενεργού φορτίου για δεδομένες ιδιότητες του εδάφους.

Έτσι η πιθανότητα αστοχίας, P_f , εκτιμάται διαιρώντας τον αριθμό των επαναλήψεων που ο τοίχος αστόχησε, n_f , με τον αριθμό των συνολικών επαναλήψεων που καθορίστηκε αρχικά, n_{sim} .

$$P_f = n_f / n_{sim}$$

6.1.2 Συντελεστής Ασφαλείας - Factor of Safety (F_s)

Ο κλασικός συντελεστής ασφαλείας F_s αποτελεί μέτρο της σταθερότητας και της ασφάλειας έναντι στην αστοχία του τοίχου αντιστήριξης. Ορίζεται ως ο λόγος της μέσης διατμητικής αντοχής που απαιτείται για την ευστάθεια του τοίχου ως προς τη μέση διατμητική τάση του εδάφους κατά μήκος μίας πιθανής επιφάνειας αστοχίας. Εάν ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος της μονάδας, συνεπάγεται αστοχία του εδάφους λόγω ολίσθησης ενός τμήματος του στην επιφάνεια αστοχίας εξαιτίας της μη ικανοποίησης της οριακής ισορροπίας. Επομένως αποδεκτοί είναι μόνο συντελεστές ασφαλείας μεγαλύτερη της μονάδας. Όσο αυξάνεται ο συντελεστής τόσο αυξάνεται και η ευστάθεια και συνεπώς το κόστος κατασκευής.

6.2 Μήκος χωρικής συσχέτισης - Spatial correlation length θ (cp.14 p.404)

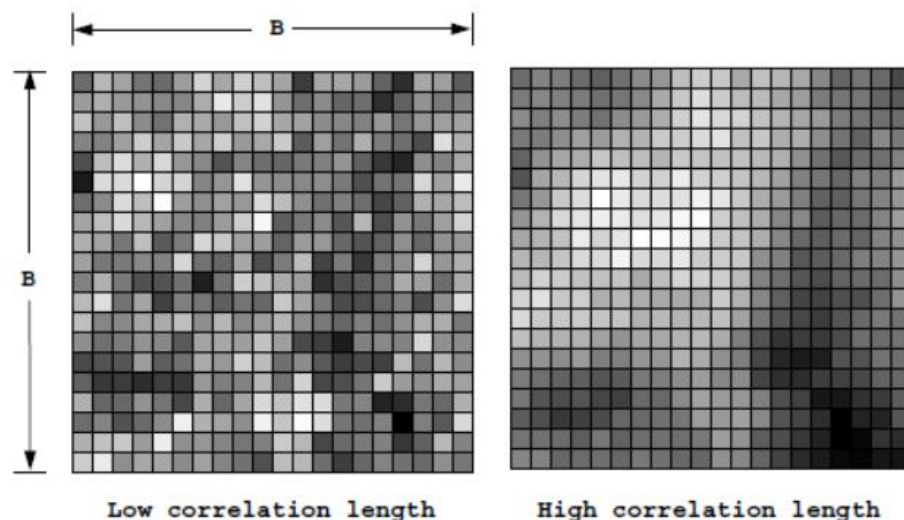
Το μήκος χωρικής συσχέτισης θ αποτελεί ένα μέτρο της μεταβλητότητας των σημείων του εδάφους. Μια αδιάστατη μορφή του μπορεί να επιτευχθεί διαιρώντας με το ύψος του τοίχου H .

$$\Theta = \theta / H$$

Όταν ο λόγος θ / H είναι μικρός, τότε τα σημεία του τυχαίου πεδίου εμφανίζονται ως πιο ανεξάρτητα. Αντίθετα, όταν ο λόγος θ / H είναι μεγάλος, τότε τα σημεία του τυχαίου πεδίου εμφανίζονται να έχουν πιο ισχυρή σχέση μεταξύ τους, με μικρότερη μεταβλητότητα σε κάθε προσομοίωση.

Γενικότερα, για μεγαλύτερα μήκη χωρικής συσχέτισης, αναμένεται μικρότερος αριθμός αστοχιών καθώς οι τιμές των ιδιοτήτων της εδαφικής μάζας θα είναι αντιπροσωπευτικές έστω και αν ληφθεί δείγμα από ένα μόνο σημείο του εδάφους. Για ενδιάμεσα μήκη χωρικής συσχέτισης, ωστόσο, οι ιδιότητες του εδάφους δύναται να διαφέρουν αρκετά από θέση σε θέση. Έτσι αναμένεται μεγαλύτερος αριθμός αποτυχιών.

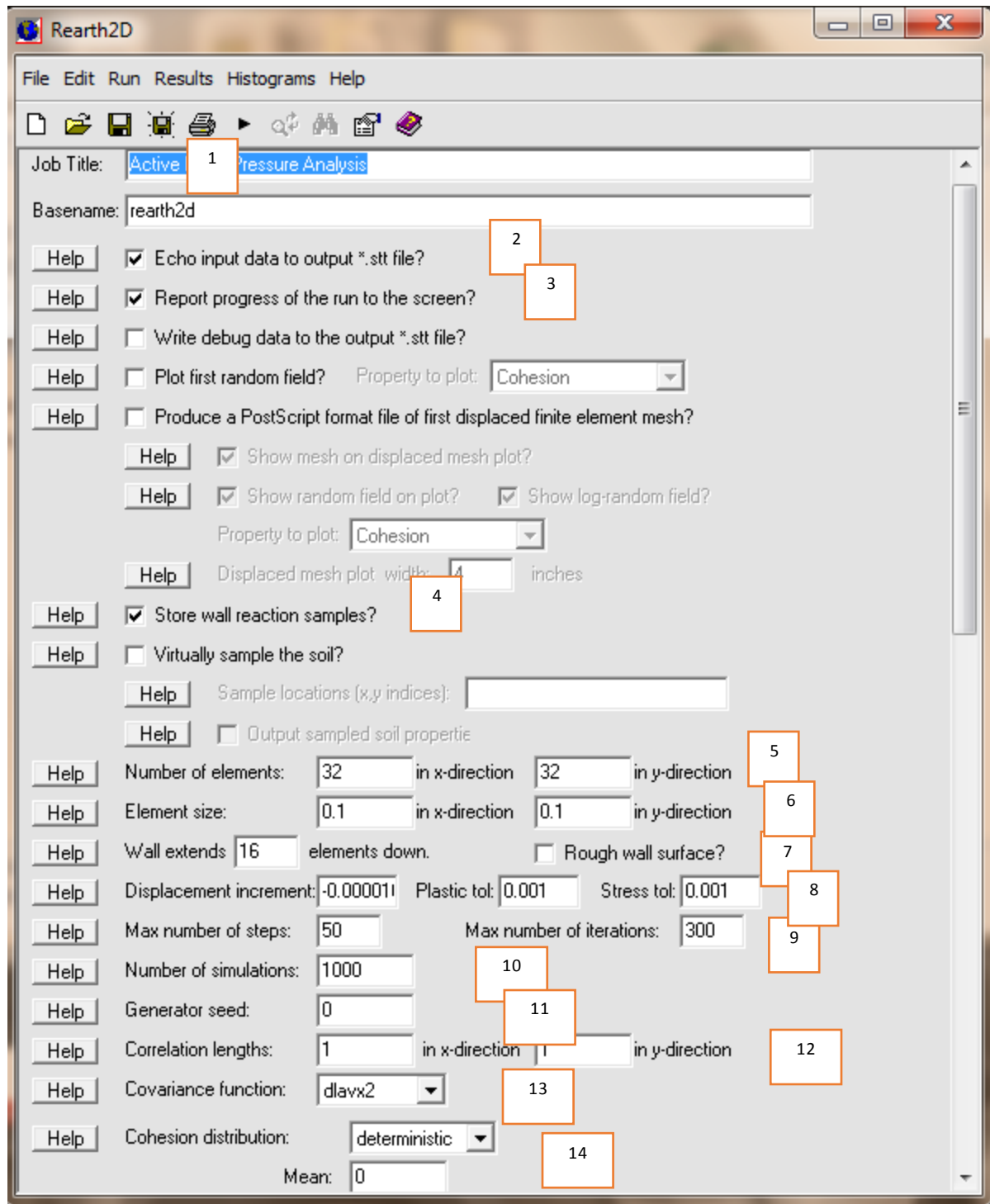
Με βάση τα πιο πάνω, μέγιστη τιμή πιθανότητας αστοχίας της κατασκευής αναμένεται να εμφανιστεί σε ενδιάμεσα μήκη χωρικής συσχέτισης.



Σχήμα 6.2: μορφή εδάφους με διαφορετικό μήκος χωρικής συσχέτισης

(D. Griffiths, G. Fenton, D. Tveten, Probabilistic Geotechnical Analysis: How difficult does it need to be?)

6.3 Λογισμικό Rearth2D – Input Data



Rearth2D

File Edit Run Results Histograms Help

Friction angle distribution: lognormal
 Selected distribution governs: phi tan(phi) 15
 Mean: 0.57735 Standard deviation: 0.173205

Dilation angle distribution: deterministic
 Mean: 0

Elastic modulus distribution: deterministic 16
 Mean: 100000

Poisson's ratio distribution: deterministic 17
 Mean: 0.3

Unit weight distribution: lognormal
 Mean: 20 Standard deviation: 6 18

Pressure coeff distribution: f(phi)
 Intercept a: 1 Slope b: -1 19
 f(phi): phi

Soil property correlation matrix elements:

	Cohesion	Friction	Dilation	Elastic Mod	Poisson's	Unit Weight	k0
Cohesion	1	0	0	0	0	0	0
Friction		1	0	0	0	0	0
Dilation			1	0	0	0	0
Elastic Mod				1	0	0	0
Poisson's ratio					1	0	0
Unit Weight						1	0

Active Earth Pressure Analysis

1

Echo input data to stats file (t/f)? t

2

Report progress to standard output (t/f)? t

3

Dump debug data to *.stt file (t/f)? t

Display a random field to *.fld (t/f)? t 1 phi

Plot displaced FE mesh to *.dis (t/f)? t 1

Output soil force samples? t

Number of elements in X and Y directions 32 32

5

Element size in X and Y directions 0.25 0.25

6

Wall depth in elements [rough?] 16 f

7

Displacement increment, plastic tol, stress tol. -5.5e-05 0.001 0.001

8

Max displacement steps, max iterations 50 300

9

Cohesion mean, SD, dist 0 0 deterministic

14

Friction angle mean, SD, dist 0.57735 0.11547 tlognormal

15

Dilation angle mean, SD, dist 0 0 deterministic

Elastic modulus mean, SD, dist 100000 0 deterministic

16

Poisson's ratio mean, SD, dist 0.3 0 deterministic

17

Unit weight mean, SD, dist 20 4 lognormal

18

Pressure coeff mean/SD, dist, a, b, f(phi) . . . 0 0 f(phi) 1 -1 sin

19

Number of realizations 1000

10

Generator seed (0 for random seed) 0

11

Scale of fluctuation in X [and Y] directions . . 4 4

12

Name of covariance function dlavx2

13

Material Property Correlation Matrix Data

=====
Property 1 Property 2 Correlation

Show element boundaries t

Show random field as background [log?] [prop?]. t t phi

Width of displaced mesh output plot in inches . 4

Number of soil property samples to take 1

20

Locations of samples: (x,y) index pairs 1 12

Output sampled soil properties to *.sam? t

Στα screenshots πιο πάνω παρουσιάζατε η βάση εισαγωγής δεδομένων στο λογισμικό. Πιο κάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις ονομασίες των διάφορων ιδιοτήτων καθώς και μια μικρή περιγραφή, όπως εμφανίζεται στο manual του λογισμικού από τους δημιουργούς του Gordon A. Fenton και D. Vaughan Griffiths. Αυτά που εμφανίζεται με **bold** γράμματα, είναι οι τιμές / ιδιότητες με τις οποίες εκτελέστηκαν οι προσωμοιώσεις για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

No	Name	Description
1	Job title	the job title is a character string which is simply echoed to various output files
2	Echo input data to output *.stt file?	the `echo input data' flag, when set to true , results in the input data being echoed to the output *.stt file
3	Report progress to standard output?	the `report progress' flag, when set to true , reports which realization is being currently processed to standard output
4	Output wall reaction samples?	the `output wall reaction samples' flag, when set to true , results in the output of a sequence of (nsim) wall reactions (in the form of maximum total reactions) realizations to output file *.cap.
5	Number of elements in X and Y directions	on this line the number of elements in the x (horizontal) and y (vertical) directions are input. All elements are assumed to have the same size and aspect ratio. Chosen No. of elements (X) 32, No. of elements (Y) 32
6	Element size	on this line the element size, in the x (horizontal) and y (vertical) directions are input. The `sizes' are the physical dimensions of the elements, in units consistent with, amongst other, the scale of fluctuation. Chosen element size in x and y directions 0.25m
7	No. of elements wall extends down LHS [rough?]	on this line one integer and, optionally, one logical value are provided. These are defined as i) the integer gives the number of elements that the wall extends over down the left face of the soil mass counting from the top left corner. Chosen 16 elements for wall depth, smooth ii) the logical value is true if the wall is considered to be `rough'. This give a no-slip interface. If the logical value is false, the wall is considered to be `smooth' so that it slips against the soil. The default is a rough interface.
8	Displacement inc, plastic tol, bearing tol	on this line, three real values are defined; i) `presc' is the horizontal displacement increment. The wall reaction analysis involves a displacement controlled loading, and displacement is incremented in maxst (see next) displacement steps each of size equal to presc. Positive values of presc results in displacement into the soil mass (passive loading). This parameter must be provided. ii) `tolp' is the convergence tolerance in the plasticity algorithm. When the nodal displacements from one iteration to the next have a relative change (max-norm) of less than tolp the iterations are halted. Default is 0.001. iii) `tolb' is the convergence tolerance on the computed wall reaction. When the stress state from one iteration to the next has a relative change (max-norm) of less than tolp the displacement steps are discontinued. Default is the value of `tolp'
9	Max displacement steps, max iterations	on this line, two integers are defined; i) `maxst' is the ceiling on the number of displacement increments

		allowed to be carried out. Default is 50. ii) 'maxit' is the ceiling on the number of iterations allowed for each displacement increment. This is to prevent a runaway analysis. Default is 300
10	No. of simulations	this is the number of realizations to perform. As the number of realizations increases, the 'accuracy' of estimated output statistics also increases. To accurately estimate the probability of some very unlikely outcomes of interest, a very large number of realizations may be required. Chosen number of realizations 1000
11	Generator seed	this is a non-negative integer generator seed. If this number is 0, then a generator seed is produced internally using either the process PID or the clock. Otherwise, the pseudo-random number generator is initialized with the provided whole number. The default is 0.
12	Correlation lengths (Scale of fluctuation)	here the x- and y-direction scales of fluctuation are input. The 'scale of fluctuation' is, loosely speaking, the distance within which the material properties are significantly correlated $\Theta=(0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50)$ and cov=0.2 (unit weight)
13	Covariance function	on this line the name of the variance/covariance function corresponding to the random field is input. 'dlavx2' - 2-D exponentially decaying (Markov) model requires X- and Y-direction scales of fluctuation
14	Cohesion distribution, mean, standard deviation	this line contains the soil cohesion mean, standard deviation, distribution type 0 0 deterministic
15	Friction angle distribution, mean, standard deviation	this line contains the soil friction angle mean, standard deviation and distribution type 0.57735 0.11547 tlognormal
16	Elastic modulus distribution, mean	this line contains the soil elastic modulus mean, standard deviation, and distribution type. 100000 0 deterministic
17	Poisson's ratio distribution, mean	this line contains the soil Poisson ratio mean, standard deviation, and distribution type. 0.3 0 deterministic
18	Unit weight distribution, mean, standard dev.	this line contains the soil unit weight mean, standard deviation, and distribution type. cov=(0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5) lognormal and $\Theta=1$
19	Pressure coeff distribution	this line contains the soil pressure coefficient mean, standard deviation, and distribution type 0 0 f(phi) 1 -1 sin
20	Locations of samples: (x,y) index pairs	this line contains the sample locations, specified as (x,y) indices into the random field arrays. Elements are counted down and then to the right. One (x,y) index pair is to be provided for each virtual sample. Scenarios A-Z

All rights reserved to Authors:

Gordon A. Fenton, DalHousie University, 2001

D. Vaughan Griffiths, Colorado School of Mines, 2001

Σημείωση:

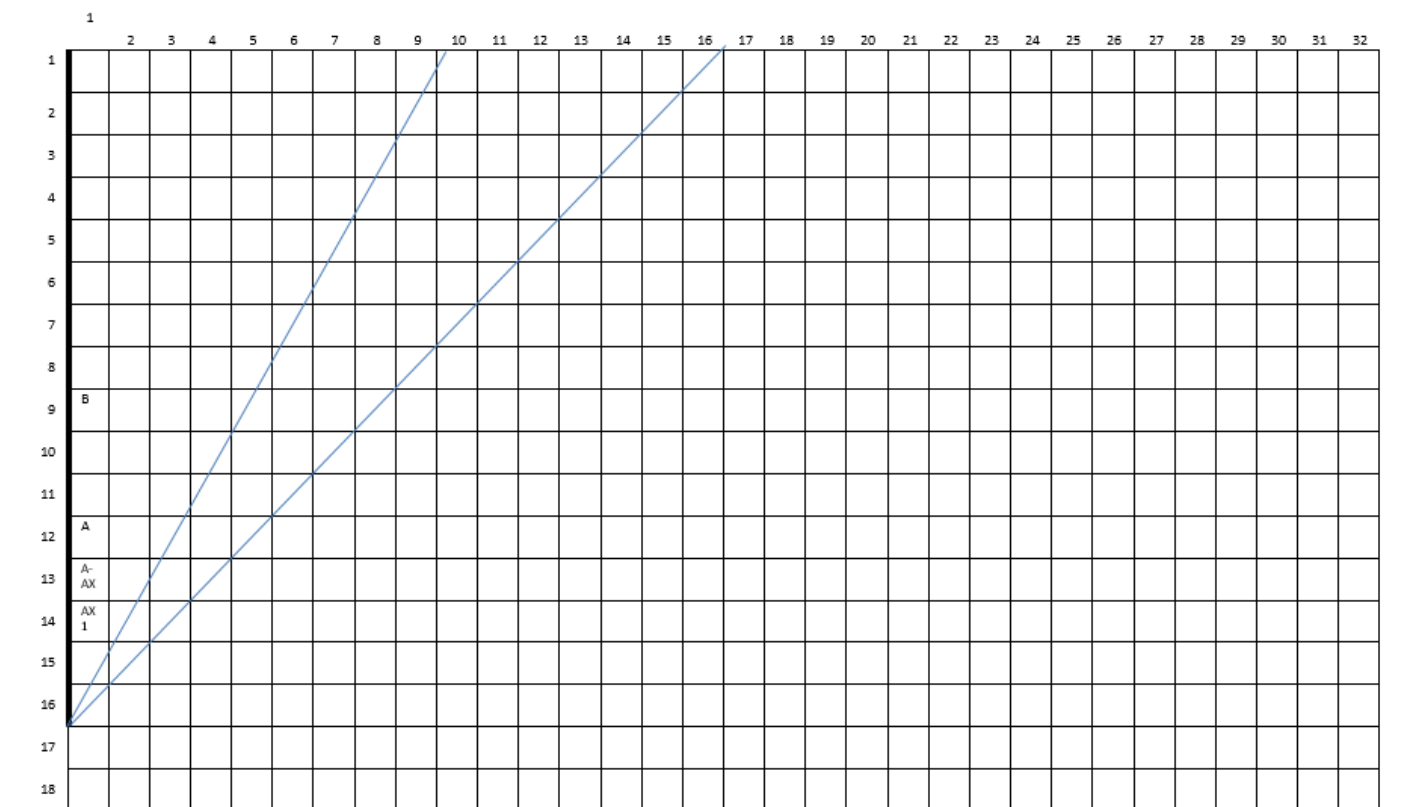
-dlavx2 Covariance Function

Σκοπός: επιστρέφει την συνδιακύμανση μεταξύ 2 σημείων, σε 2-D Μαρκοβιανό τυχαίο πεδίο

6.4 Επιλογή σεναρίων - Προβληματισμοί

Δημιουργήθηκαν συνολικά 28 σεσάρια, μέσω διαφόρων προβληματισμών, ούτως ώστε να μελετηθούν όσο το δυνατόν περισσότερα αποτελέσματα για την καλύτερη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Προσπαθήσαμε να καλύψουμε σημεία από όλη την έκταση του κάναβου σε x και y διευθύνσεις, εντός και πέραν την εφελκυστικής ρωγμής αστοχίας.

Σενάρια A, A-AX, AX1, B

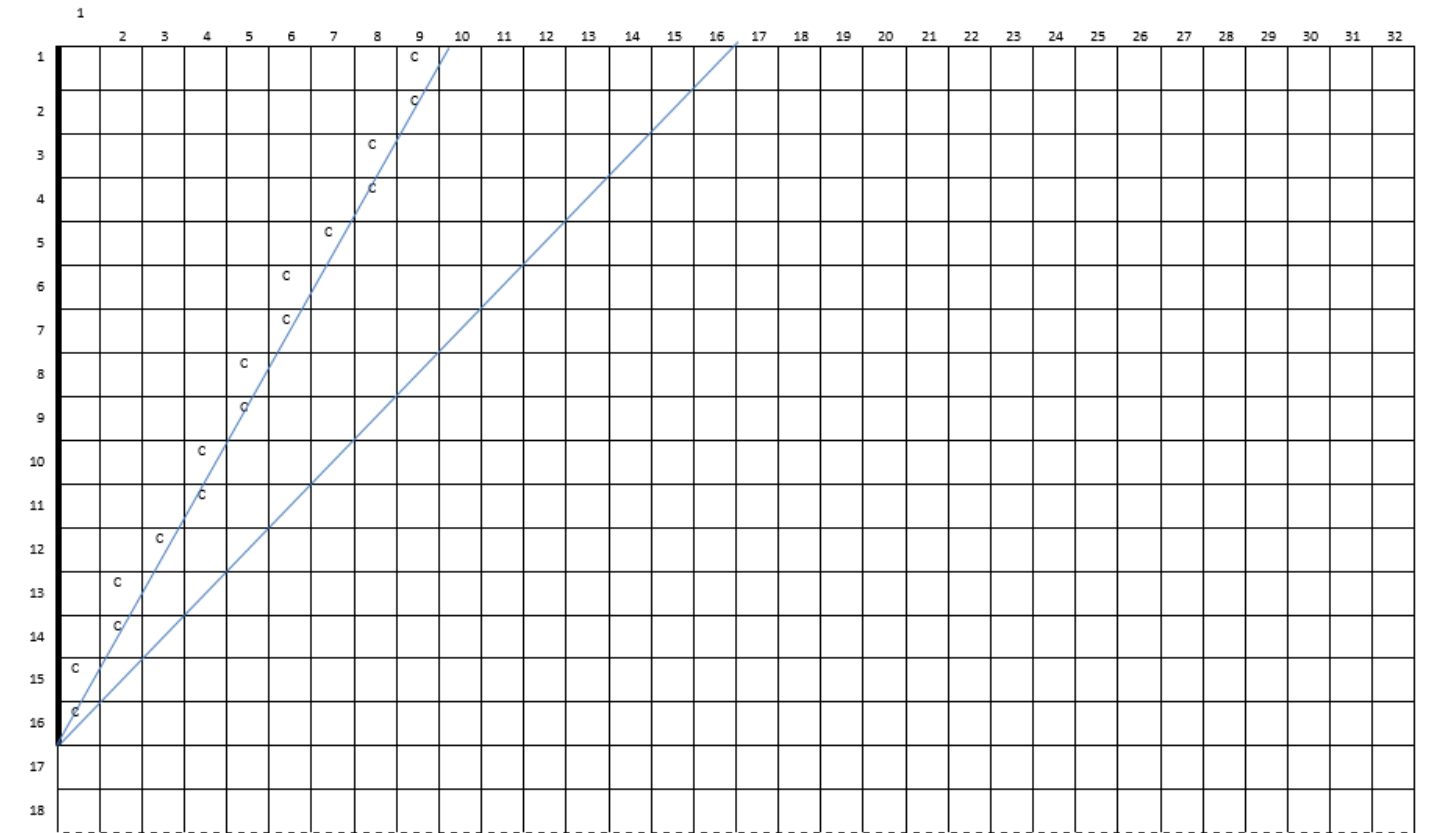


Στα σεσάρια B, A, A-AX και AX1 επιλέξαμε να πάρουμε δείγμα από ένα μόνο σημείο του εδάφους που βρίσκεται σε επαφή με τον τοίχο αντιστήριξης σε ύψος 2.25, 3.00, 3.25 και 3.50 μέτρα αντίστοιχα.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα σεσάρια αυτά είναι άμεσα συγκρίσιμα μεταξύ τους, αφού η δειγματοληψία έγινε από ένα σημείο με ίδια οριζόντια απόσταση αλλά διαφορετική κατακόρυφη.

Προβληματισμός: Επιλέγηκαν να εξεταστούν τα σημεία στο μέσο του τοίχου καθώς και στην περιοχή γύρω από το $1/3$ του ύψους του τριγώνου της τριγωνικής κατανομής των τάσεων. Κατά πόσο οι κλασσικές μέθοδοι ανάλυσης αστοχίας τοίχων αντιστήριξης συμβαδίζουν με τα αποτελέσματα μιας πιθανοκρατικής ανάλυσης ενός τυχαίου πεδίου;

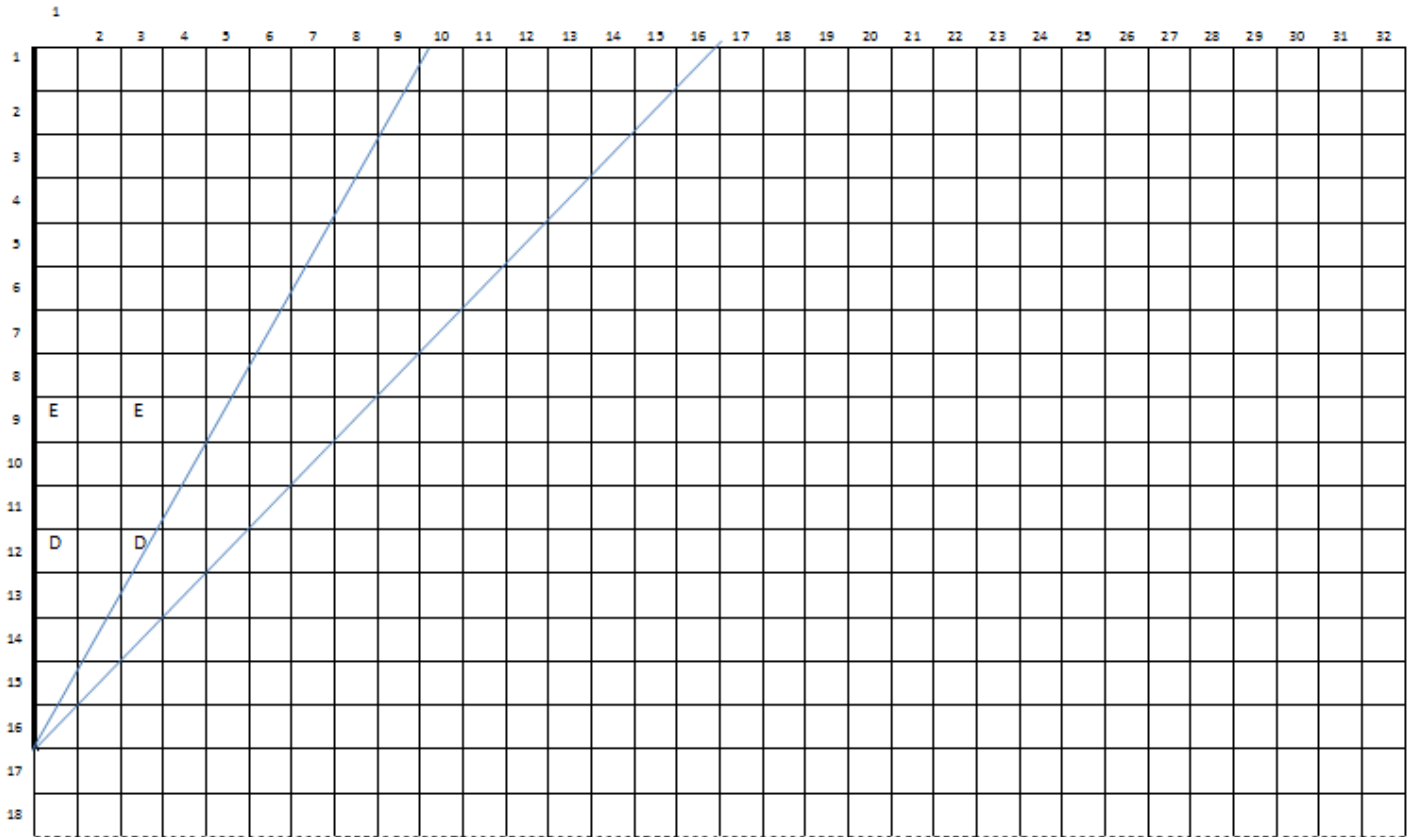
Σενάριο C



Το σενάριο C περιλαμβάνει όλα εκείνα τα σημεία που βρίσκονται εντός της επιφάνεια αστοχίας, πάνω στην πιθανή ρωγή αστοχίας.

Προβληματισμός: Η δειγματοληψία σε όλο το μήκος μιας πιθανής ρωγμής αστοχίας μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα;

Σενάρια D, E



Στην περίπτωση αυτή επιλέχθηκαν δύο σημεία για το κάθε σενάριο, εντός της επιφάνειας αστοχίας σε βάθος 2.25 και 3 μέτρα με απόσταση 0.25 μέτρου μεταξύ των δυο σημείων.

Προβληματισμός: Τα σενάρια E και D είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα A και B. Πόση απόκλιση θα υπάρξει στα αποτελέσματα για δύο σημεία σε σύγκριση με ένα σημείο (σενάρια A, B);

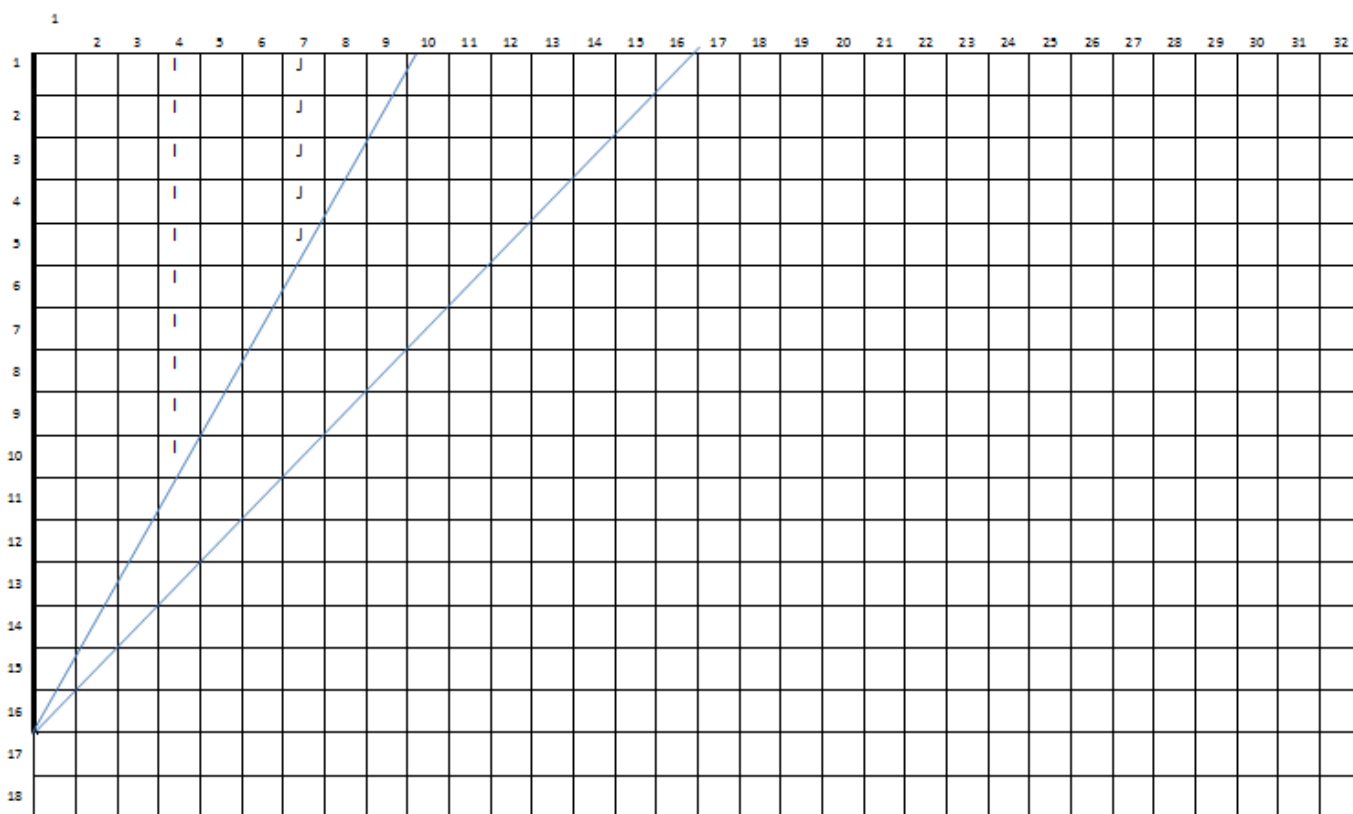
Σενάρια F, G, H

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32					
1	F		G			H																														
2	F		G			H																														
3	F		G			H																														
4	F		G			H																														
5	F		G			H																														
6	F		G			H																														
7	F		G			H																														
8	F		G			H																														
9	F		G			H																														
10	F		G			H																														
11	F		G			H																														
12	F		G			H																														
13	F		G			H																														
14	F		G			H																														
15	F		G			H																														
16	F		G			H																														
17																																				
18																																				

Στα σενάρια F, G, H εξετάστηκε εδαφικό δείγμα σε ολόκληρο το ύψος του τεσσάρων μέτρων τοίχου αντιστήριξης με απόσταση 0.50 μέτρου μεταξύ των γεωτρήσεων.

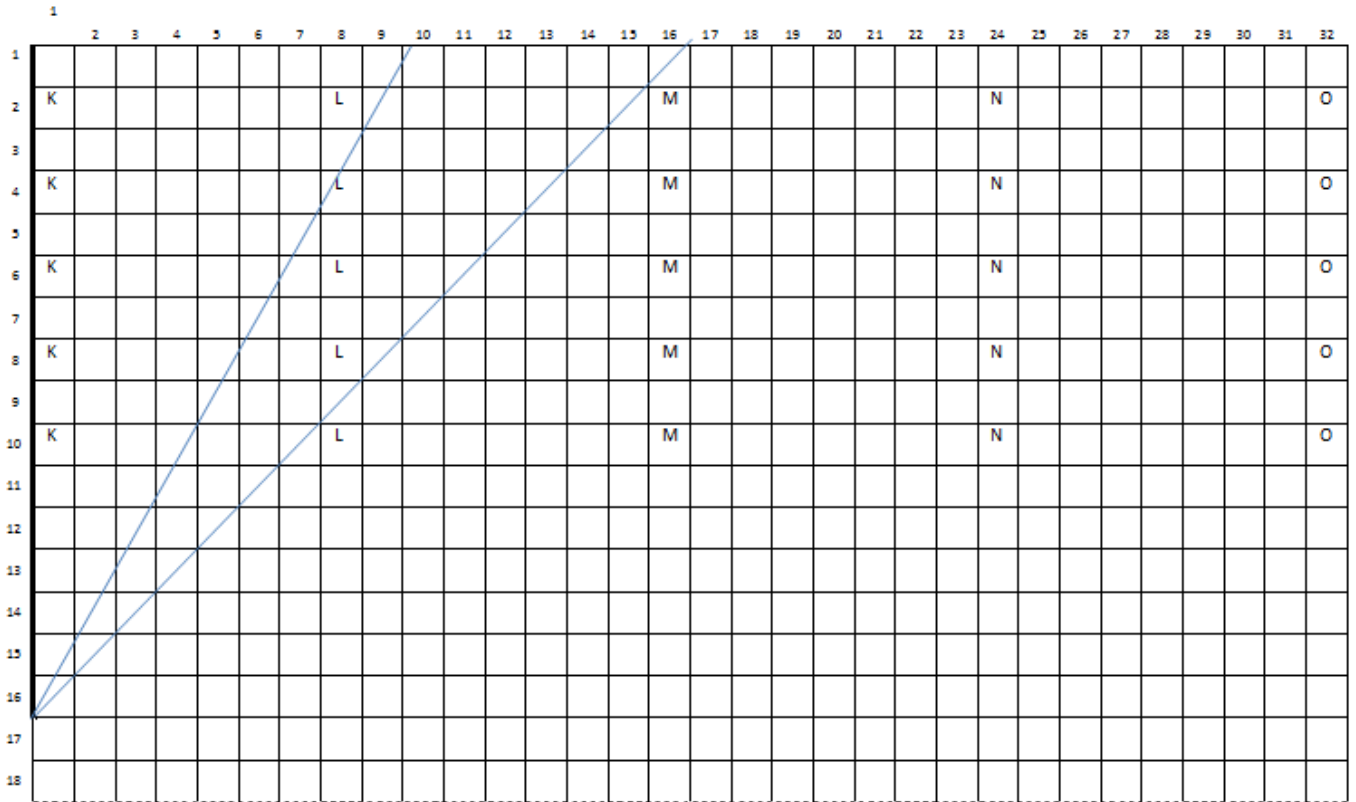
Προβληματισμός: Κατά πόσο θα αλλάζουν οι τιμές για τα σενάρια που ξεφεύγουν από την επιφάνεια αστοχίας σε σχέση με εκείνο εντός της;

Σενάρια I, J



Στα σενάρια I, J εξετάστηκαν δείγματα εντός της επιφάνειας αστοχίας μέχρι την εφελκυστική ρωγή σε απόσταση 1.00 και 1.75 μέτρα από τον τοίχο αντίστοιχα.

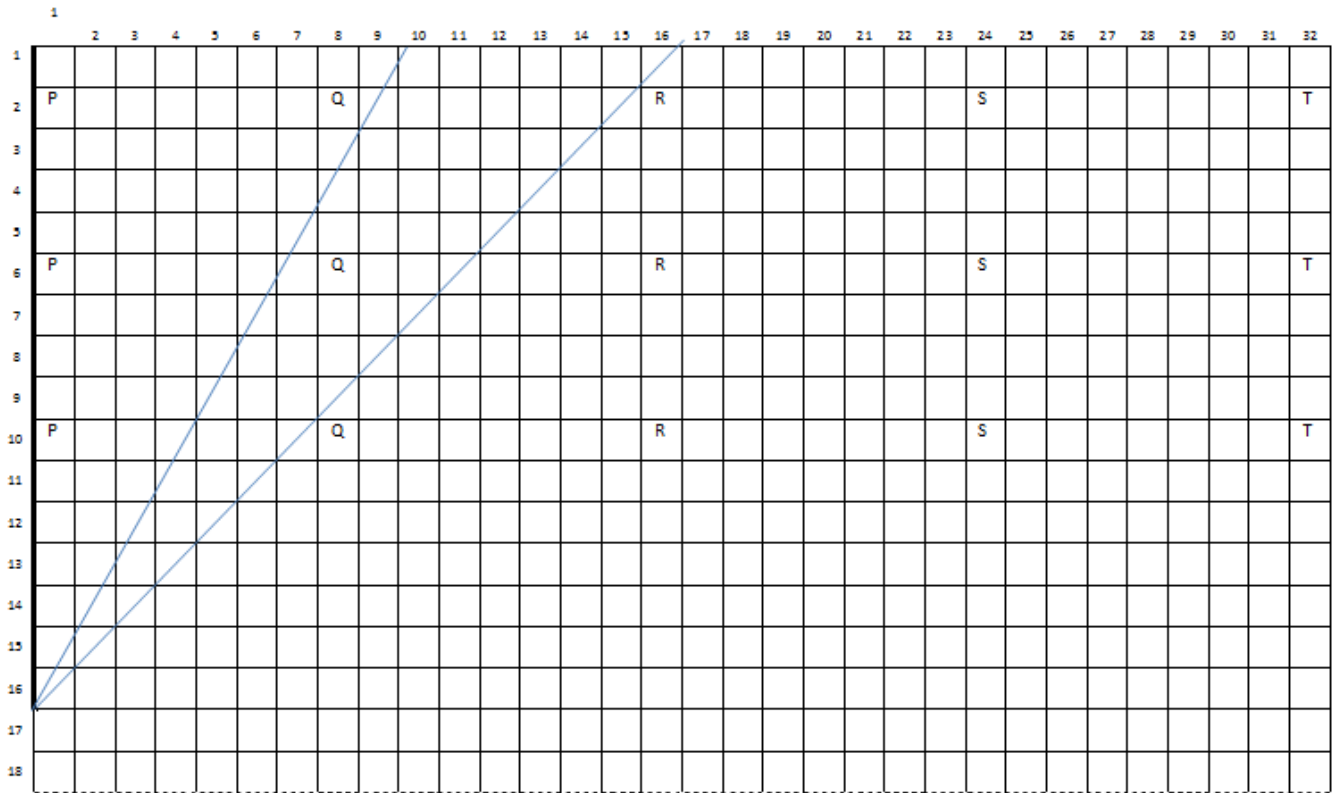
Σενάρια K, L, M, N, O



Στα σενάρια K, L, M, N, O αφού αφαιρέθηκε το επιφανειακό έδαφος, λήφθηκαν πέντε δείγματα σε βάθη 0.50, 1.00, 1.50, 2.00 και 2.50 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους με το πρώτο σενάριο να είναι σε επαφή με τον τοίχο ενώ τα υπόλοιπα να ισαπέχουν απόσταση 1.50 μέτρων.

Προβληματισμός: Μήπως επειδή είναι τυχαίο πεδίο, δεν θα υπάρξει μεγάλη απόκλιση στις τιμές μεταξύ των σεναρίων πλησίον του τοίχου αντιστήριξη και αυτών που βρίσκονται πολύ μακριά;

Σενάρια P, Q, R, S, T

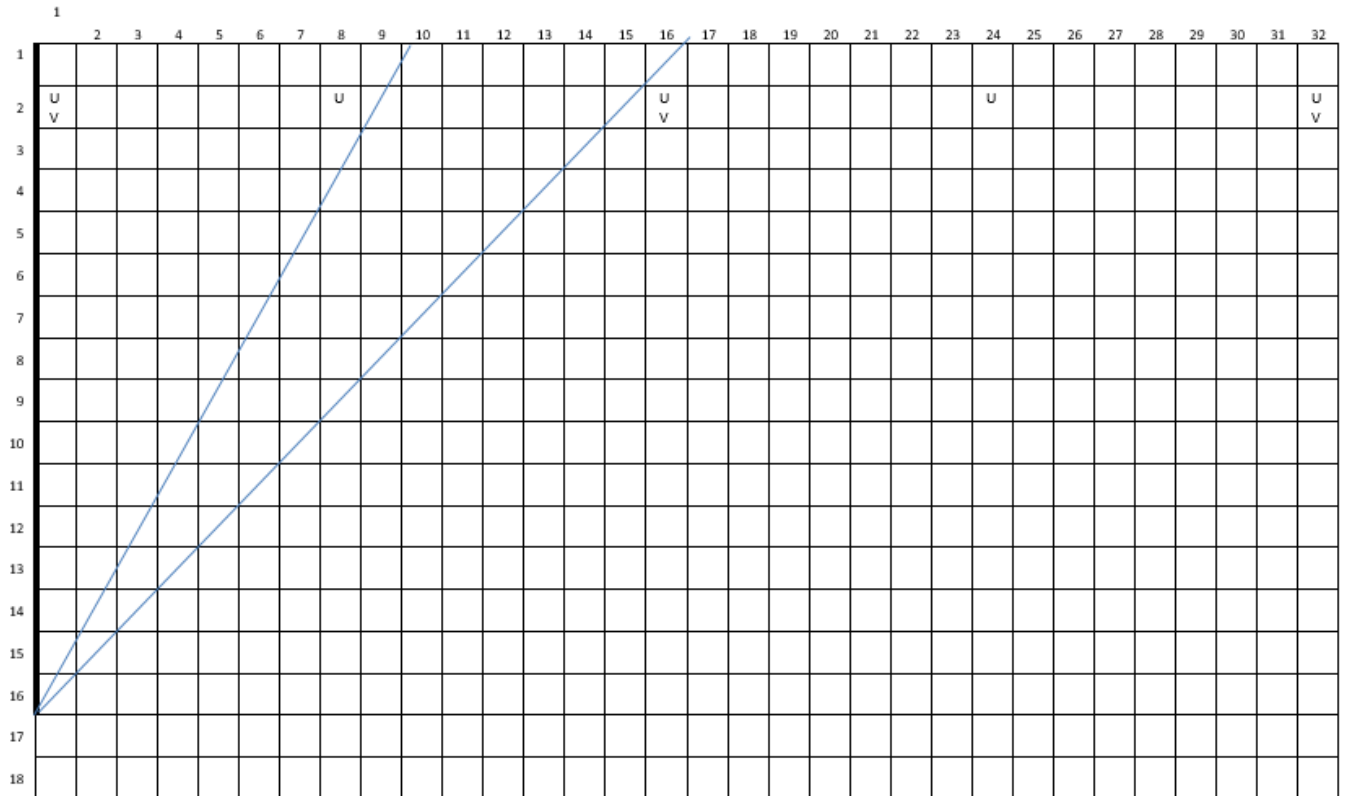


Τα σενάρια P, Q, R, S, T είναι παρόμοια με τα K, L, M, N, O, με τη μόνη διαφορά ότι αντί πέντε δείγματα τώρα έχουμε τρία σε βάθη 0.50, 1.50 και 2.50 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους.

Προβληματισμός: Κατά πόσο θα επηρεαστούν οι τιμές για λιγότερα δείγματα;

Ποια είναι εκείνη η απόσταση από τον τοίχο αντιστήριξης όπου το εδαφικό δείγμα είναι άχρηστο;

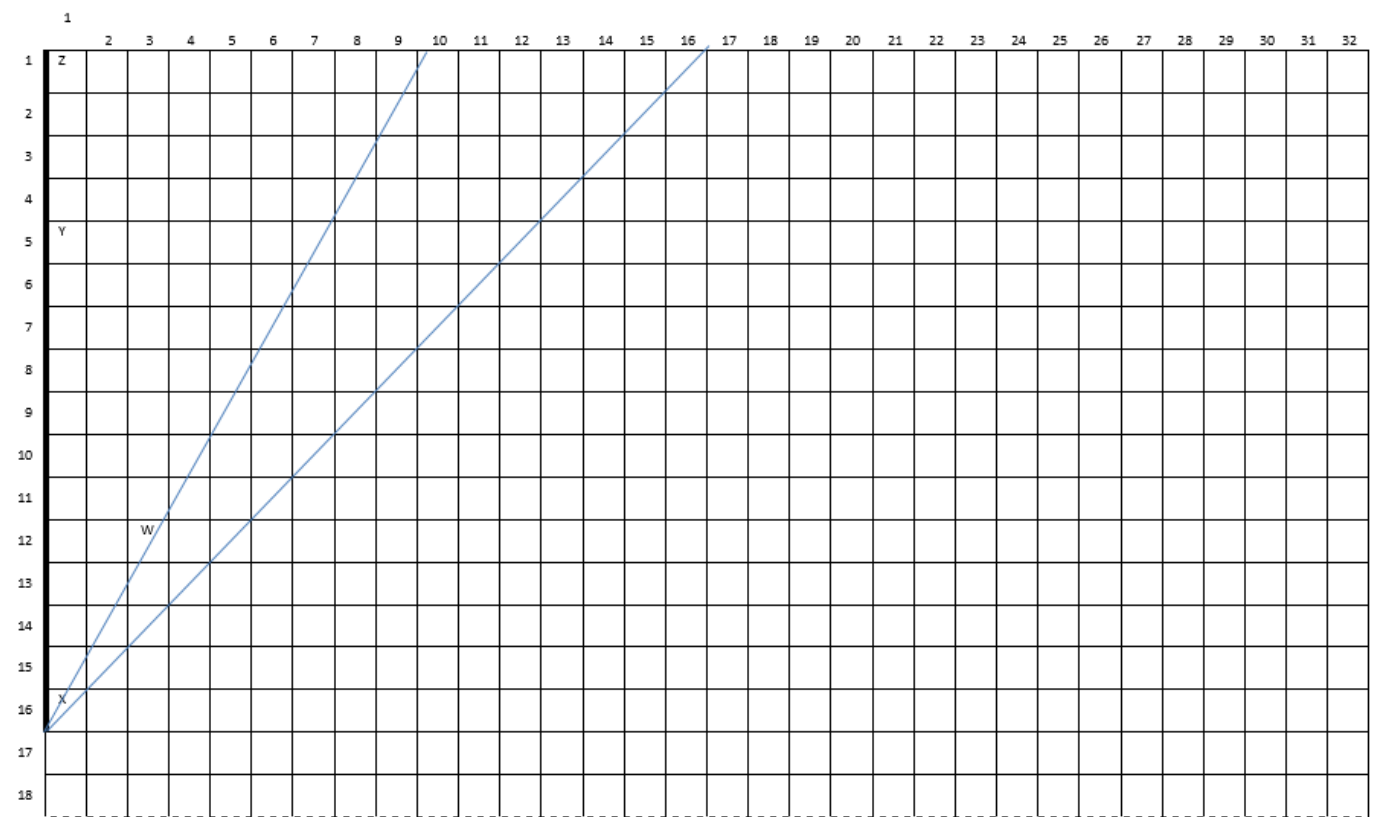
Σενάρια U, V



Τα σενάρια U, V λήφθηκαν σε βάθος 0.50 μέτρων από το επιφανειακό έδαφος, με το πρώτο σημείο να είναι σε επαφή με τον τοίχο ενώ τα υπόλοιπα να ισαπέχουν απόσταση 1.50 και 3.00 μέτρων αντίστοιχα.

Προβληματισμός: Μπορούν τόσο επιφανειακές δοκιμές να εξαγάγουν ορθά αποτελέσματα για τη συμπεριφορά ενός τυχαίου πεδίου;

Σενάρια W, X, Y, Z



Το σενάριο W βρίσκεται σε απόσταση ενός μέτρου από τον τοίχο αντιστήριξης ενώ τα σενάρια X, Y, Z εφάπτονται αυτού.

7. Αποτελέσματα Ανάλυσης – Γραφήματα

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και για τα 28 σενάρια με τις τιμές για τις πιθανότητες αστοχίας λόγω ολίσθησης και λόγω περιστροφής του τοίχου.

Σενάρια με τη μεγαλύτερη τιμή πιθανότητας αστοχίας

Τα σενάρια Α (1 12) και Α-ΑΧ (1 13) έδωσαν τις μεγαλύτερες και αντιπροσωπευτικότερες τιμές. Παράγωγο συμπέρασμα είναι ότι πρέπει να λαμβάνονται δείγματα στο κρίσιμο βάθος των 2/3 του τοίχου από σημεία που βρίσκονται σε επαφή με αυτόν.

Σύγκριση σεναρίων F-G-H

Στα σενάρια αυτά λήφθηκαν εδαφικά δείγματα κατά μήκος του τοίχου αντιστήριξης, από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το μέγιστο βάθος του τοίχου. Οι τιμές των σεναρίων είναι παρόμοιες, με την μεγαλύτερη τιμή πιθανότητας αστοχίας να προέρχεται από το σενάριο Η.

Σύγκριση σεναρίων I-J

Οι τιμές των σεναρίων αυτών είναι σχετικά μικρές. Εκτιμάται ότι αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα σενάρια λαμβάνουν εδαφικά δείγματα εντός της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας αλλά όχι πέραν από την ρωγμή θράυσης.

Σύγκριση σεναρίων K-L-M-N-O

Οι τιμές των σεναρίων αυτών είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, με τη μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας να δίνεται από το σενάριο L (8 2, 8 4, 8 6, 8 8, 8 10) όπου τα εδαφικά δείγματα λαμβάνονται κατά κύριο λόγο στην περιοχή της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας.

Σύγκριση σεναρίων P-Q-R-S-T

Ισχύει το ίδιο όπως στα σενάρια K-L-M-N-O με την μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας να δίνεται από το σενάριο Q (8 2, 8 6, 8 10).

Σύγκριση σεναρίων K-L-M-N-O και P-Q-R-S-T

Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνονται 5 εδαφικά δείγματα για κάθε σενάριο με μια γεώτρηση από διαφορετικά βάθη, ενώ στην δεύτερη λαμβάνονται 3 εδαφικά δείγματα. Παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους.

Σύγκριση σεναρίων U-V

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει σχεδόν καμία διαφορά στις τιμές της πιθανότητας αστοχίας μεταξύ των δυο σεναρίων U (1 2, 8 2, 16 2, 24 2, 32 2) και V (1 2, 16 2, 32 2) για 5 και 3 εδαφικά δείγματα αντίστοιχα. Οι τιμές είναι σχεδόν ταυτόσημες, άρα με λιγότερα εδαφικά δείγματα μπορούμε να πάρουμε ισάξια αποτελέσματα αν και συμπερασματικά καταλήγουμε ότι τόσο επιφανειακές λήψεις εδαφικών δειγμάτων δεν δίνουν τις κρισιμότερες τιμές.

Σύγκριση σεναρίων A-D-W

Στο σενάριο A και W λήφθηκε ένα δείγμα από τα σημεία (1 12) και (3 12) αντίστοιχα, ενώ στο σενάριο D (1 12, 3 12) λήφθηκαν 2 δείγματα ένας συνδυασμός των δυο προηγούμενων σεναρίων. Τη μεγαλύτερη τιμή πιθανότητας αστοχίας έδωσε το σενάριο A, ακολούθως το σενάριο D και την μικρότερη τιμή έδωσε το σενάριο W. Από εδώ συμπεραίνουμε ότι το πιο κρίσιμο σημείο που οποσδήποτε πρέπει να ληφθεί δείγμα είναι σε βάθος 2/3 του τοίχου και σε επαφή με αυτόν.

Σύγκριση σεναρίων A3-A5

Λήφθηκαν 3 και 5 εδαφικά δείγματα αντίστοιχα στο κρίσιμο βάθος των 2/3 του τοίχου. Η πιθανότητα αστοχίας που εξάγεται από το σενάριο A5 (1 12, 8 12, 16 12, 24 12, 32 12) είναι μεγαλύτερη από αυτήν του σεναρίου A3 (16 12, 24 12, 32 12). Αυτό δείχνει ξεκάθαρα ότι όσο απομακρυνόμαστε από τον τοίχο αντιστήριξης, η πιθανότητα αστοχίας μειώνεται. Άρα συμπερασματικά, σε μια απόσταση πέραν των τεσσάρων μέτρων από τον τοίχο, τα εδαφικά δείγματα είναι άχρηστα. Αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των σεναρίων A5 και A, παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μείωση της πιθανότητας αστοχίας στο πρώτο λόγω του μεγαλύτερου αριθμού εδαφικών δειγμάτων συμπεριλαμβανομένων και αυτών μακριά από τον τοίχο αντιστήριξης.

Σενάριο C

Το σενάριο C που λαμβάνει χώρα κατά μήκος της κρίσιμης επιφάνεια αστοχίας, αν και δίνει μια αρκετά μεγάλη τιμή πιθανότητας αστοχίας, ωστόσο δεν είναι η μεγαλύτερη.

Σύγκριση σεναρίων D-E

Και στα δυο σενάρια λήφθηκαν 2 εδαφικά δείγματα (1 12, 3 12) και (1 9, 3 9) αντίστοιχα. Η πιθανότητα αστοχίας σε βάθος $2/3$ του τοίχου είναι αρκετά μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτήν στο μέσο του τοίχου.

Σενάρια Z και Y

Τα δείγματα αυτών των σεναρίων λήφθηκαν σε επαφή με το τοίχο, με το πρώτο να λαμβάνεται εντελώς ζπιφανειακά από το σημείο (1 1) και το δεύτερο από το σημείο (1 5). Οι τιμές των εξαγόμενων πιθανότητων αστοχίας είναι μικρές και συνεπώς μη αντιπροσωπευτικές.

Σενάριο X

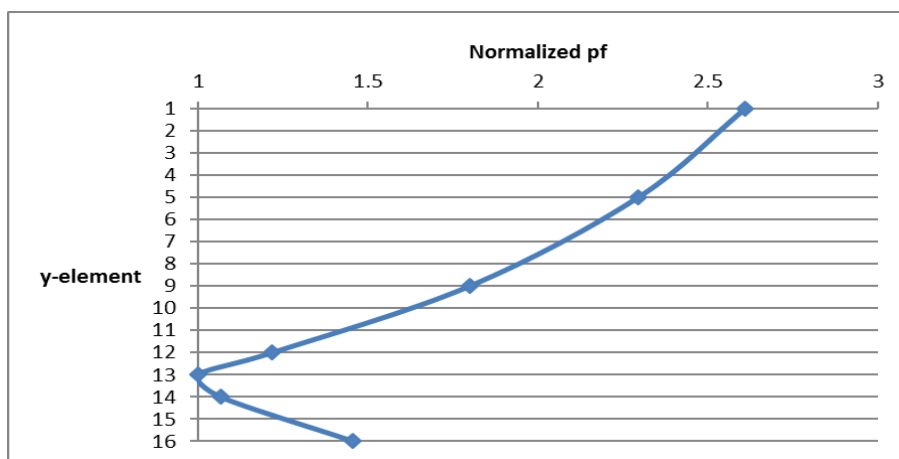
Το δείγμα λήφθηκε από το βαθύτερο σημείο του τοίχου και σε επαφή με αυτόν (1 16). Το σενάριο αυτό δίνει μια αρκετά μεγάλη πιθανότητα αστοχίας, αλλά όχι τη μεγαλύτερη.

Κανονικοποίηση πιθανότητας αστοχίας για τα σενάρια που είναι σε επαφή με το τοίχο

Από τα πιο πάνω συμπεραίνουμε ότι η πιο κρίσιμη περιοχή για να ληφθεί εδαφικό δείγμα είναι η περιοχή κοντά στον τοίχο και σε βάθος γύρω στα 2/3 του βάθους του τοίχου. Στο διάγραμμα πιο κάτω φαίνεται η κανονικοποιημένη πιθανότητα αστοχίας για τα σενάρια Z, Y, B, A, A-AX, AX και X ξεκινώντας από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι και τα 4 μέτρα βάθος του τοίχου.

Οι τιμές που συγκρίνονται είναι για $\text{cov}=0.2$, $\Theta=0.5$ και $F_s=1.5$.

γ - elemen t	pf	Scenari o	Normalized pf
1	0.274	Z	2.609524
5	0.241	Y	2.295238
9	0.189	B	1.8
12	0.128	A	1.219048
13	0.105	A-AX	1
14	0.112	AX	1.066667
16	0.153	X	1.457143

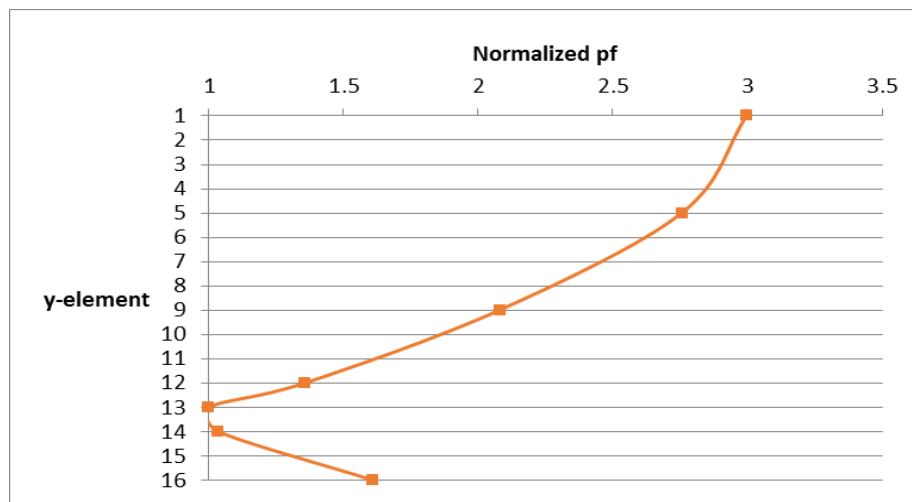


Από το διάγραμμα πιο πάνω βλέπουμε τις μειωμένες πιθανότητες αστοχίας λόγω του συντελεστή ασφαλείας $F_s=1.5$. Την μικρότερη πιθανότητα δίνει το σενάριο A-AX (1 13), μετά ακολουθεί το AX (1 14) και έπειτα το σενάριο A (1 12). Όσο ανεβαίνουμε προς τα πάνω, παρατηρούμε μεγάλη αύξηση της πιθανότητας αστοχίας.

Για να γίνει περαιτέρω έλεγχος και να διασταυρωθούν τα αποτελέσματα έγιναν κι άλλες προσωμοιώσεις στα σημεία εκείνα, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται πιο κάτω.

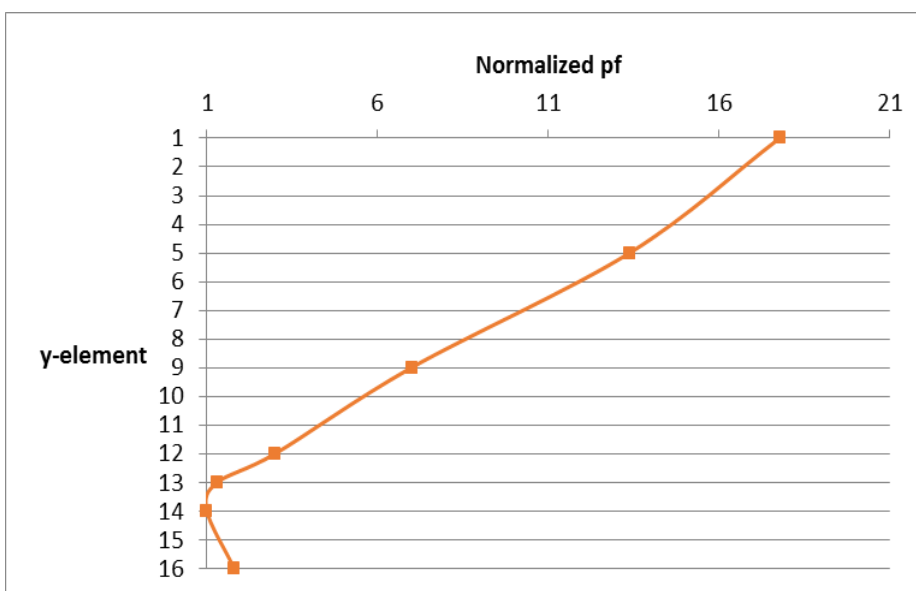
cov=0.2, $\Theta=0.5$ και $F_s=1.5$

γ - element	pf	Scenario	Normalized pf
1	0.261	Z	3
5	0.24	Y	2.758621
9	0.181	B	2.08046
12	0.118	A	1.356322
13	0.087	A-AX	1
14	0.09	AX	1.034483
16	0.14	X	1.609195



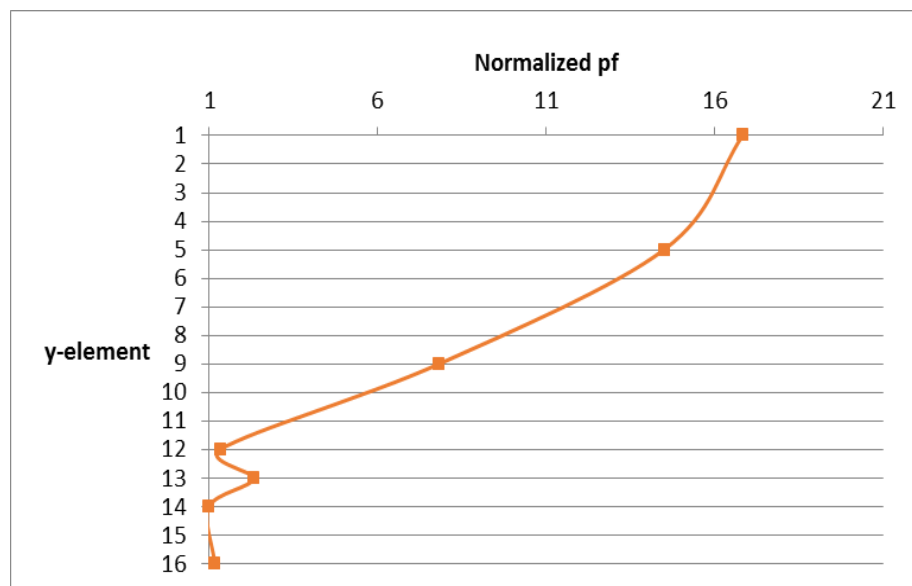
cov=0.2, $\Theta=5$ και $F_s=1.5$

y-element	pf	Scenario	Normalized pf
1	0.178	Z	17.8
5	0.134	Y	13.4
9	0.07	B	7
12	0.03	A	3
13	0.013	A-AX	1.3
14	0.01	AX	1
16	0.018	X	1.8



cov=0.2, $\Theta=10$ και $F_s=1.5$

y-element	pf	Scenario	Normalized pf
1	0.101	Z	16.83333
5	0.087	Y	14.5
9	0.047	B	7.833333
12	0.008	A	1.333333
13	0.014	A-AX	2.333333
14	0.006	AX	1
16	0.007	X	1.166667



Παρατηρούμε ότι σε όλες τις αναλύσεις, η κρίσιμη περιοχή είναι στα ίδια σημεία A, A-AX και AX.

8. Συμπεράσματα

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της θέσης και του αριθμού δειγματοληψίας εδάφους στον υπολογισμό των ωθήσεων εδαφών καθώς και η εκτίμηση του κινδύνου αστοχίας τοίχου αντιστήριξης.

Συνοπτικά συμπεραίνουμε ότι ο μεγάλος αριθμός δειγμάτων σεν σημαίνει απαραίτητα καλύτερη ανάλυση των ιδιοτήτων του εδάφους. Αντίθετα φάνηκε ότι ακόμη και ένα μόνο δείγμα μπορεί να δώσει αντιπροσωπευτικές τιμές για την πιθανότητα αστοχίας του τοίχου. Η κρισιμότερη περιοχή κρίνεται αυτή που βρίσκεται σε επαφή με τον τοίχο και πιο συγκεκριμένα τα σημεία (1 12), (1 13) και (1 14).

Θα ήταν ενδιαφέρον να γίνει περαιτέρω έρευνα μελετώντας εδάφη με μεγάλη και μικρή συνοχή καθώς και με διαφορετικές γωνίες τριβής ϕ .

Εργαζόμενη σε ένα περιβάλλον εντελώς πιθανολογικό, αντιλήφθηκα τις τεράστιες δυνατότητες αυτού του εργαλίου. Η μέθοδος τυχαίων πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα πολύ σημαντικό εφεύρεμα και θα πρέπει να χρησιμοποιείται μεν περισσότερο αλλά με ορθολογισμό δε, αφού πρώτα γίνει σωστή επιλογή των παραμέτρων για τις προσωμοιώσεις.

9. Βιβλιογραφία

1. Caltrans. (2004). *Bridge Design Specifications Section 5 - Retaining Walls*.
2. Chok, Y. H. (2008). “Modelling the Effects of Soil Variability and Vegetation on the Stability of Natural Slopes.” (October), 249.
3. En, C. Y. S., and Ac, I. C. (2004). “Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules.”
4. En, C. Y. S. (2009). “Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing.” 2007.
5. En, C. Y. S. (2006). “Geotechnical investigation and testing — Sampling methods and groundwater measurements.”
6. Fenton, G. A., and Griffiths, D. V. (n.d.). “Simulation” *Risk Assessment in Geotechnical Engineering*, 203–238.
7. Fenton, G. A., and Griffiths, D. V. (2004). “Earth Pressure.” *Risk Assessment in Geotechnical Engineering*, 401–413.
8. Fenton, G. a. (n.d.). “Basics of Simulation and RFEM in.” 61–112.
9. Fenton, G., and Griffiths, D. V. (2007). “Random Field Generation and the Local Average Subdivision Method.” *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*, 491, 201–223.
10. Fenton, G. A., and Griffiths, D. V. (n.d.). “Reliability-Based Design.” 239–262.
11. Fenton, G. A., Griffiths, D. V. (n.d.). “rearth2D Software.”
<<http://courses.engmath.dal.ca/rfem/>>.
12. Griffiths, D. V, Fenton, G. A., and Ziemann, H. R. (2008). “Reliability of passive earth pressure.” *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2(2), 113–121.
13. Griffiths, D. V., Fenton, G. A., and Tveten, D. E. (2005). “Probabilistic passive earth pressure analysis by the Random Finite Element Method.” 235.
14. Griffiths, D. V., and Fenton, G. a. (n.d.). “Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering.”

15. Roads, N. D. of. (2012). *Geotechnical Policies and Procedures*.
16. Subramaniam, P. (2011). “Reliability Based Analysis of Slope , Foundation and Retaining Wall Using Finite Element Method.” (June), 77.
17. Williams, M. B., Griffiths, D. V., and Fenton, G. a. (2005). “Reliability of traditional retaining wall design.” *Géotechnique*, 55(1), 55–62.
18. Καββαδάς, Μ. (n.d.). “Ειδικά Θέματα Εδαφομηχανικής.” *Κεφάλαιο 12*, 13–20.
19. Κλουκινάς, Π. (2012). “No Title No Title.” *Συμβολή στη Στατική και Δυναμική Ανάλυση Τοίχων Αντιστήριξης Μέσω Θεωρητικών και Πειραματικών Μεθόδων*, Πολυτεχνική Σχολή Πάτρας.
20. Μηλιτσοπούλου, Μ., Σαββίδη, Ε. (n.d.). “Μελέτη Στοιχείων Αντιστήριξης με Χρήση Αναλυτικών και Αριθμητικών Προσομοιομάτων.” ΤΕΙ Πειραιά.
21. Πλαστήρα, Β. (2010). “Σημειώσεις Εδαφομηχανικής.” ΤΕΙ Πειραιά. Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄

Στο Παράρτημα Α βρίσκονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τα 28 σενάρια. Για κάθε ένα υπάρχουν πίνακες και διαγράμματα για τις πιθανότητες αστοχίας λόγω ολίσθησης και περιστροφής. Στα διαγράμματα απεικονίζονται οι μειωμένες με τον συντελεστή ασφαλείας, πιθανότητες αστοχίας, που λαμβάνει τιμές $F_s = (1.5, 2, 2.5, 3)$.