



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΛΑΚΑΣ ΑΠΟ ΕΛΑΦΟΠΑΣΣΑΛΟΥΣ ΩΣ
ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΤΗ ΒΑΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ
ΜΕΓΑΛΟΥ ΒΑΘΟΥΣ: ΤΡΟΠΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ
ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ, ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΩΝ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ**

υπό

ΚΑΡΑΓΚΟΥΝΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΣ

Επιβλέπων Καθηγητής:
ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ ΑΙΜΙΛΙΟΣ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

Βόλος, 2017

© 2017 Αναστασία Καραγκούνη

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε για την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017. Πριν την παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους παράγοντες που συντέλεσαν στην εκπόνησή της, αλλά και σε όλους όσους με στήριξαν κατά τη διάρκεια πραγματοποίησής της.

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Αιμίλιο Κωμοδρόμο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου, την άμεση αποδοχή της επίβλεψής της και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κ. Εφραιμίδα και κ. Καλλιόγλου για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ευχαριστώ όλους τους φίλους μου, τόσο αυτούς που γνώρισα στη φοιτητική μου ζωή όσο και τις παιδικές μου φίλες για την ηθική υποστήριξή τους και την αγάπη τους. Χάρηκα που μου δόθηκε η ευκαιρία να ζήσω τόσο όμορφες στιγμές μαζί τους αυτά τα 5 χρόνια. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στην οικογένειά μου, για την ολόψυχη αγάπη και ακατάπαυστη υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια, σε δύσκολες και ευχάριστες στιγμές.

Καραγκούνη Αναστασία

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract	2
Κεφάλαιο 1	3
Εισαγωγή.....	3
1.1 Γενικά στοιχεία για την ενίσχυση εδαφών	3
1.2 Ιστορικά στοιχεία της μεθόδου της εδαφική ανάμειξης.....	6
Κεφάλαιο 2	8
Περιγραφή της μεθόδου ενίσχυσης (Jet Grouting).....	8
2.1 Εξοπλισμός.....	8
2.2 Διαδικασία της μεθόδου της εδαφικής ανάμειξης (Jet Grouting)	16
2.3 Συστήματα εισπίεσης - εδαφικής ανάμειξης	22
2.4 Παράμετροι της εδαφικής ανάμειξης	28
Κεφάλαιο 3	31
Εφαρμογές εισπίεσης - εδαφικής ανάμειξης (Jet Grouting).....	31
3.1 Γενικά στοιχεία.....	31
3.2 Κατασκευές με εφαρμογή της μεθόδου jet grouting	33
3.2.1 Υποστήριξη υφιστάμενων κατασκευών με ενίσχυση της θεμελίωσης.....	33
3.2.2 Έλεγχος του υπόγειου νερού του εδάφους.....	36
3.2.3 Υποστήριξη σηράγγων	44
3.2.4 Περιβαλλοντικές εφαρμογές	47
Κεφάλαιο 4	49
Χωρική Μεταβλητότητα γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών.....	49
4.1 Μεταβλητότητα της διαμέτρου	49
4.1.1 Εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης της διαμέτρου των εδαφοπασσάλων	51
4.1.2 Θεωρητικά μοντέλα πρόβλεψης της διαμέτρου των πασσάλων	56
4.1.3 Artificial Neural Networks (ANN).....	69
4.2 Προσομοιώσεις Monte Carlo	77
4.3 Μεταβλητότητα της αντοχής.....	79
4.4 Μεταβλητότητα του μέτρου παραμορφωσιμότητας.....	117
4.5 Αποτίμηση επιπτώσεων χωρικής μεταβλητότητας	120
Κεφάλαιο 5	125
Σύνοψη - Συμπεράσματα.....	125
Βιβλιογραφία.....	131

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της τεχνικής Jet Grouting (εισπίεση - εδαφική ανάμειξη) για την κατασκευή πλάκας ενισχυμένου εδάφους, σε μεγάλο βάθος εκσκαφής. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια εξειδικευμένη τεχνική με συνεχή εξέλιξη και βελτίωση, κάτι που την καθιστά βασικό εργαλείο στις εφαρμογές της Γεωτεχνικής Μηχανικής. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, αναλύονται αρχικά η διαδικασία, τα στάδια της μεθόδου, οι μορφές έγχυσης, οι οποίες κατηγοριοποιούνται βάσει του αριθμού των ρευστών που χρησιμοποιούνται, καθώς και οι τιμές των παραμέτρων της. Στη συνέχεια, περιγράφονται ενδελεχώς οι εφαρμογές της μεθόδου τόσο στην υποστήριξη κατασκευών με ενίσχυση θεμελιώσεων, όσο και στην εξασφάλιση υδατοστεγανότητας και προστασίας έναντι μόλυνσης. Η παρούσα διπλωματική εργασία, επικεντρώνεται στη χωρική μεταβλητότητα που παρατηρείται στη διάμετρο των πασσάλων, που σχηματίζονται από την εδαφική ανάμειξη, στην αντοχή τους καθώς και στο μέτρο ελαστικότητάς τους. Το φαινόμενο αυτό έγκειται στη μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του ίδιου εδάφους, καθώς αποτελεί υλικό που ποικίλλει τόσο μεταξύ διαφορετικών στρωμάτων, όσο και στο εσωτερικό ίδιου στρώματος. Αναλύονται τρόποι προσδιορισμού της τιμής της διαμέτρου των πασσάλων μέσω θεωρητικών και εμπειρικών σχέσεων, αλλά και της χρήσης των artificial neural networks (ANN). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τρόποι προσομοίωσης της μεταβλητότητας της αντοχής βάσει υπάρχουσών μελετών, με τη χρήση αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων και των προσομοιώσεων Monte Carlo. Προσδιορίζεται η διαφορά μεταξύ των εξαρτώμενων και ανεξάρτητων προσομοιώσεων, η μεταβλητότητα ως προς την αντοχή στο εσωτερικό του πασσάλου καθώς και η διαφοροποίηση που ανιχνεύεται στην προσομοίωση όταν μεταβάλλονται οι συνοριακές συνθήκες. Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με την ανάλυση τρόπων προσομοίωσης του μέτρου παραμορφωσιμότητας αλλά και των επιπτώσεων της χωρικής μεταβλητότητας στα εντατικά και κινηματικά μεγέθη.

Abstract

The aim of this diploma thesis is to analyze the technique of Jet Grouting (high pressure injection) for the construction of a reinforced soil slab at a great depth of excavation. This method is a specialized technique with constant evolution and improvement, which makes it a basic tool in the applications of Geotechnical Engineering. In this thesis, the process, process steps, injection forms, which are divided, according to the number of fluids used, and the values of its parameters, are firstly analyzed. The application of the method is described in detail both in support of constructions and reinforcement of foundations, as well as in the provision of waterproofing and protection against contamination. This diploma thesis focuses on the spatial variability observed in the diameter of the columns, which are formed by jet grouting, in strength and elastic modulus. This phenomenon lies in the variability of the characteristics and properties of the soil, as it is a material that varies both between different layers and within the same layer. Afterwards, ways to determine the diameter of piles by means of numerical and empirical formulas, but also with the use of artificial neural networks (ANN), are analyzed. Then, ways to simulate strength variability based on existing studies, using finite element analyzes and Monte Carlo simulations, are presented. The difference between the conditional and unconditional simulations, the variability in the strength of the pile inside, and the differentiation detected in the simulation when the boundary conditions change, are reported. This thesis is completed with the analysis of ways of simulating the elastic modulus and the effects of spatial variability to the response of the retaining structure.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά στοιχεία για την ενίσχυση εδαφών

Πολλές υποβαθμισμένες, από πλευράς εδαφικών χαρακτηριστικών, περιοχές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή έργων είτε λόγω έλλειψης χώρων (περιαστικές περιοχές) είτε λόγω αύξησης των απαιτήσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μεγάλων έργων υποδομής. Για τη χρησιμοποίηση αυτών των εδαφών γίνεται χρήση μεθόδων βελτίωσης και ενίσχυσης των γεωτεχνικών ιδιοτήτων τους. Σε γενικές γραμμές, η ενίσχυση εφαρμόζεται σε μαλακά - χαλαρά εδάφη όπως:

- χαλαρές άμμους, ιδιαίτερα όταν είναι κορεσμένες,
- χαλαρές και μέσης πυκνότητας κορεσμένες άμμους και αμμοχάλικα υπό σεισμική φόρτιση,
- απροφόρτιστες ή υποστερεοποιημένες αργίλους και ιλύς

Γενικά, με τον όρο βελτίωση η ενίσχυση ενός υλικού, φυσικού η θραυστού, εννοούμε την επεξεργασία του υλικού αυτού που αποβλέπει στη βελτίωση των γεωτεχνικών του ιδιοτήτων (αντοχή, διάβρωση, διαπερατότητα, συμπιεστότητα, πορώδες, φυσικά χαρακτηριστικά, μηχανικές ιδιότητες κλπ.). Ο Van Impe (1989) διαχωρίζει τις μεθόδους βελτίωσης στις παρακάτω γενικές ομάδες:

α) Προσωρινής λειτουργίας τεχνικές βελτίωσης εδάφους με περιορισμένο χρόνο εφαρμογής, κατά την περίοδο της κατασκευής (ηλεκτρική όσμωση, ψύξη εδάφους κλπ.).

β) Μόνιμης λειτουργίας τεχνικές βελτίωσης εδάφους, που εφαρμόζονται χωρίς την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων (δυναμική συμπύκνωση, μέθοδοι μαζικής δόνησης κλπ.).

γ) Μόνιμης λειτουργίας τεχνικές βελτίωσης εδάφους που εφαρμόζονται με την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων (οπλισμένο έδαφος με γεωσυνθετικά υλικά ή εφαρμογή ηλώσεων, τσιμεντενέσεις, εισπίεση ενεμάτων, εισπίεσεις μιγμάτων όπως τσιμέντο, ασβέστη, μπεντονίτη κλπ., με ταυτόχρονη ανάμειξή τους με το έδαφος).

Οι τεχνικές βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους βρίσκουν ευρύ πεδίο εφαρμογής που καλύπτει τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Θεμέλια κτιρίων για τη μείωση των καθιζήσεων, τη μείωση της διαπερατότητας ή/και την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους.
- Σε εργασίες εκσκαφής για την αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους και βελτίωση της συνθηκών αντιστήριξης (σήραγγες, βαθιές ανοικτές εκσκαφές, τάφρους)
- Σε έργα οδοποιίας, με στόχο την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους, βελτίωση των υδραυλικών χαρακτηριστικών και μείωση του λόγου κενών του εδαφικού μέσου ώστε να περιορισθούν οι καθιζήσεις.
- Σε σταθεροποίηση πρανών για τη βελτίωση των επικρατούσων συνθηκών ευστάθειας.
- Βελτίωση των υδραυλικών χαρακτηριστικών και μείωση της διαπερατότητας σε ειδικά έργα υψηλών απαιτήσεων ως προς τη στεγανότητα (φράγματα, έργα Χ.Υ.Τ.Α.).

Η βελτίωση εδάφους γίνεται μια ολοένα και συχνότερη τεχνική για την επίλυση προσωρινών και μόνιμων προβλημάτων στον τομέα ενός πολιτικού μηχανικού. Ένας τρόπος ενίσχυσης και βελτίωσης του εδάφους, με τον οποίο πραγματεύεται και η παρούσα εργασία είναι η εισπίεση ενέματος με ταυτόχρονη εδαφική ανάμειξη (jet grouting).

Η μέθοδος jet grouting περιλαμβάνει την υπό πίεση διοχέτευση ειδικών ρευστών, η πήξη των οποίων οδηγεί στην ενίσχυση των εδαφών. Η επέμβαση πραγματοποιείται με κατασκευή εδαφοπασσάλων και με ελεγχόμενη διοχέτευση ενέματος με επιβολή υψηλής πίεσης. Με ειδικό αυτοκινούμενο μηχάνημα διανοίγεται οπή, κατόπιν το στέλεχος ανασύρεται ενώ διοχετεύεται στο έδαφος το υλικό σταθεροποίησης. Οι εφαρμοζόμενες πιέσεις προσδιορίζονται ανάλογα με τη σύσταση του υλικού ώστε η θραύση και ανάμειξη του εδάφους να οδηγήσει στην επιθυμητή διάμετρο εδαφοπασσάλου. Κατά κανόνα εφαρμόζονται εισπίεσεις μεγαλύτερες των 20 MPa (200 bar ή 200 ατμόσφαιρες), ενώ συχνά επιβάλλονται και πιέσεις της τάξης των 50 MPa (η εφαρμοζόμενη πίεση μειώνεται όσο το στέλεχος εισπίεσης πλησιάζει την επιφάνεια του εδάφους ώστε να αποφευχθεί διευρυμένη αστοχία). Ανάλογα με τον τρόπο που ενεργεί το ένεμα, διακρίνονται οι εξής κατηγορίες:

- Ενεματώσεις διαποτισμού, με τις οποίες το ένεμα εισχωρεί στο έδαφος και γεμίζει εδαφικούς πόρους.
- Ενεματώσεις εκτόπισης ή συμπίκνωσης.
- Ενεματώσεις συγκόλλησης, με τις οποίες το ένεμα συγκολλά ρηγματωμένη βραχώμαζα.

- Ενεματώσεις πλήρωσης, με τις οποίες πληρούνται καρστικά έγκοιλα ή κενά προβληματικών τεχνητών επιχωματώσεων.

Οι συνήθεις τύποι ενεμάτων είναι τα αιωρήματα τσιμέντου (τσιμεντενέσεις) ή μείγματος εδάφους (π.χ. μπετονίτη, άμμου) και τσιμέντου, καθώς και χημικά διαλύματα, συνήθως πυριτικών ή πολυμερών υλικών. Σε περίπτωση που επιδιώκεται ρύθμιση των ιδιοτήτων των μειγμάτων εδάφους - τσιμέντου χρησιμοποιούνται σταθεροποιητές ή πρόσθετα, όπως επιταχυντές και επιβραδυντές. Η ενίσχυση με ενέσεις βρίσκει εφαρμογή σε όλο σχεδόν το εύρος των εδαφών (συνεκτικά και μη συνεκτικά) και σε μαλακούς βράχους, υπό τον όρο ότι ο βράχος είναι ρηγματωμένος, με τις ρωγμές του να επικοινωνούν. Αντίθετα, δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε εδάφη μικρής διαπερατότητας, όπως είναι οι αργιλικοί σχηματισμοί. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου προσμετρούνται η υψηλή ταχύτητα εφαρμογής, το σχετικά χαμηλό κόστος και η απουσία θορύβου και δονήσεων κατά την εφαρμογή. Η επιλογή των ενεμάτων εξαρτάται από το είδος του εδάφους και την κοκκομετρική του διαβάθμιση. Γενικά, η σταθεροποίηση με τσιμέντο παρουσιάζει το ευρύτερο φάσμα εφαρμογής. Στην περίπτωση διαπερατών αμμωδών εδαφών χρησιμοποιούνται αιωρήματα τσιμέντου με υψηλές τιμές του λόγου "τσιμέντο προς νερό", εφόσον επιδιώκεται υψηλή αντοχή, ενώ προτιμώνται χημικά διαλύματα ειδικών πυριτικών ή πολυμερών προϊόντων, όταν η διαπερατότητα είναι μικρότερη, όπως συμβαίνει στα αργιλικά εδάφη. Στις θεμελιώσεις η εισπίεση ενεμάτων χρησιμοποιείται για τη βελτίωση των συνθηκών έδρασης. Επίσης χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις εκσκαφών που βρίσκονται σε επαφή με υφιστάμενα κτίρια, ειδικά όταν οι εκσκαφές είναι μεγάλου βάθους και το έδαφος είναι μικρής διατμητικής αντοχής, καθώς και σε περιπτώσεις, κατά τις οποίες κρίνεται αναγκαία η βελτίωση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελίωσης (εδάφη χαμηλής αρχικής φέρουσας ικανότητας, προσθήκη ορόφων κτλ.). Η αποτελεσματικότητα της τεχνικής εξαρτάται από την ομοιομορφία της διασποράς του ενέματος κάτω από τη θεμελίωση. Σε περιπτώσεις ανομοιογένειας του εδάφους, η ομοιόμορφη διασπορά του ενέματος καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη, ενώ η διείσδυσή του σε μεγάλη έκταση ενδέχεται να καταστήσει τη μέθοδο οικονομικά ασύμφορη. Η επιλογή της σύνθεσης των ενεμάτων, κυρίως ως προς το ιξώδες, απαιτεί γνώση του επιπέδου των ρωγμών του εδάφους, εντός των οποίων θα διεισδύσει.

Ένα από τα πιο κρίσιμα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη μέθοδο αυτή, οφείλεται στη μεταβλητότητα του εδάφους. Το έδαφος χαρακτηρίζεται από μεταβλητότητα των παραμέτρων αντοχής, παραμορφωσιμότητας καθώς και των φυσικών του χαρακτηριστικών, σε αντίθεση με βιομηχανικά παρασκευαζόμενα υλικά, όπως το σκυρόδεμα και ο χάλυβας. Κάθε γεωτεχνικός μηχανικός, που καλείται να διεκπεραιώσει ένα τέτοιο έργο, πρέπει να λάβει υπόψη του την παράμετρο της χωρικής μεταβλητότητας. Είναι γεγονός, ότι οι ιδιότητες του εδάφους μεταβάλλονται ακόμη και εντός του ίδιου εδαφικού σχηματισμού ή στρώματος. Κατά συνέπεια, η σύσταση, η αντοχή, η διαπερατότητα καθώς και άλλα χαρακτηριστικά δεν εμφανίζουν ομοιομορφία, όπως συμβαίνει σε άλλα υλικά. Συνεπώς, και οι ιδιότητες

της κάθε κατασκευής που βρίσκεται στο έδαφος μεταβάλλονται αναλόγως. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία η εύρεση τρόπων προσομοίωσης της συμπεριφοράς του εδάφους, ώστε να προβλεφθούν οι ιδιότητες και οι μεταβολές τους στην προκείμενη κατασκευή, στην παρούσα εργασία της πλάκας από εδαφοπασφάλους.

1.2 Ιστορικά στοιχεία της μεθόδου της εδαφική ανάμιξης

Η ιδέα της βελτίωσης και ενίσχυσης του εδάφους, με την ανάμιξη υλικών (τσιμέντου, ασβέστου, πολυμερών υλικών κλπ.) ή την επιβολή ξένων προς το έδαφος στοιχείων (πασσάλων, διαφραγμάτων, γεωφασμάτων, ηλώσεων κλπ.) άρχισε να εφαρμόζεται από αρχαιότατων χρόνων, από την περίοδο των Αιγυπτίων, Σουμερίων, Ασσυρίων, Ελλήνων, Κινέζων, Αράβων και Ρωμαίων. Η χρήση της υδρασβέστου στη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους ήταν γνωστή στους Κινέζους, πριν 3000 έτη, για βελτίωση των δρόμων (Israel, 1982). Την ίδια χρονική περίοδο επίσης οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν ξύλο ή bamboo για την ενίσχυση του εδάφους, μεθόδους που χρησιμοποιούν ακόμη και σήμερα για την δημιουργία φραγμάτων για προστασία του περιβάλλοντος από λασποροές. Οι αρχαίοι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν ηφαιστειακή τέφρα, (ποζολάνες – ο όρος Pozzolan προέρχεται από το χωριό Pozzuoli της Ιταλίας), για διάφορες κατασκευές όπως η Απία Οδός, το Κολοσσαίο, το Πάνθεον, (Israel, 1982). Στη Μεσοποταμία οι κάτοικοι χρησιμοποιούσαν άσφαλτο αναμεμιγμένη με αμμόδες έδαφος για κατασκευές δρόμων, από το 3200 πχ., (Asphalt Institute, 1965). Η πρώτη σύγχρονη κατασκευή με ασφαλτικό υλικό επικάλυψης σημειώθηκε το 1802 στη Γαλλία. Το τσιμέντο Portland ανακαλύφθηκε το 1824 από τον Άγγλο Joseph Aspdin. Η ονομασία του συνδέθηκε με το χρώμα του που ήταν όμοιο με αυτό του ασβεστολίθου της νήσου Portland κοντά στην Αγγλία. Το 1904 στη περιοχή St Louis (USA) έγινε η πρώτη εφαρμογή σταθεροποίησης εδάφους με τσιμέντο τύπου Portland. Από το 1940 και μετά οι Γερμανοί αργότερα οι Βρετανοί και οι Αμερικανοί κατασκεύασαν τους αεροδιαδρόμους πολλών πολεμικών αεροδρομίων με την τεχνική εδάφους - τσιμέντου. Την ίδια χρονική περίοδο η τεχνική της σταθεροποίησης εδάφους με διάφορα πρόσθετα (τσιμέντο, ασβέστος, ιπτάμενη τέφρα, χημικές ενώσεις κλπ) επεκτάθηκε στην Αυστραλία, Σκανδιναβία και Ιαπωνία (Σταυριδάκης, 1997). Άλλες τεχνικές σταθεροποίησης και ενίσχυσης μαλακών και συνεκτικών εδαφών είναι η βαθιά μίξη με πρόσθετα (DSM, CDM, κλπ), για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών αυτών (Kamruzzaman et al, 2000). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε από την Ιαπωνία το 1970, Σκανδιναβία, (Σουηδία, Φιλανδία) για εφαρμογές σε κτιριακά συγκροτήματα, θεμελιώσεις γεφυρών, κατασκευές αντιστήριξης, κλπ. Η βασική στρατηγική όλων αυτών των τεχνικών είναι να βρεθεί η πιο κατάλληλη, αποτελεσματική και οικονομική μέθοδος που να βελτιώνει τις

μηχανικές ιδιότητες του εδάφους οδηγώντας κατά τον τρόπο αυτό σε ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό των γεωτεχνικών έργων και των κατασκευών που εδράζονται στο έδαφος.

Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική της εισπίεσης ενεμάτων με ταυτόχρονη ανάμειξή τους με το έδαφος, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1950 στην Αγγλία, για την κατασκευή ενός διαφραγματικού τοίχου για την παρεμπόδιση του νερού. Ωστόσο, η πραγματική πρακτική ανάπτυξη της μεθόδου πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία το 1970, μετά τη δημιουργία ενός περιστροφικού συστήματος έγχυσης (Essler και Yoshida, 2004; Morey, 1992). Αρχικά, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία διαφραγματικών τοίχων. Στα μέσα του 1970, η μέθοδος εξήχθη στην Ευρώπη και έχει γίνει πολύ διαδεδομένη παγκοσμίως.

Κεφάλαιο 2

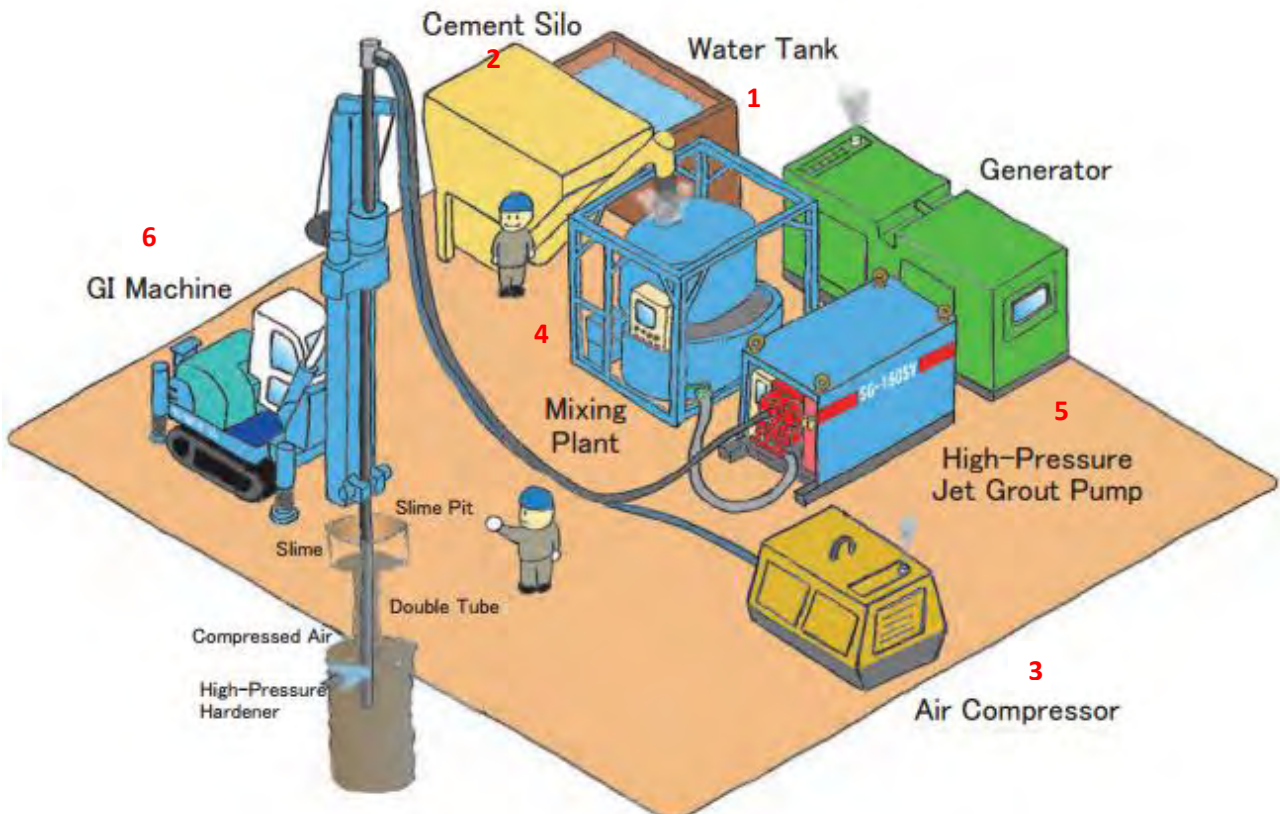
Περιγραφή της μεθόδου ενίσχυσης (Jet Grouting)

2.1 Εξοπλισμός

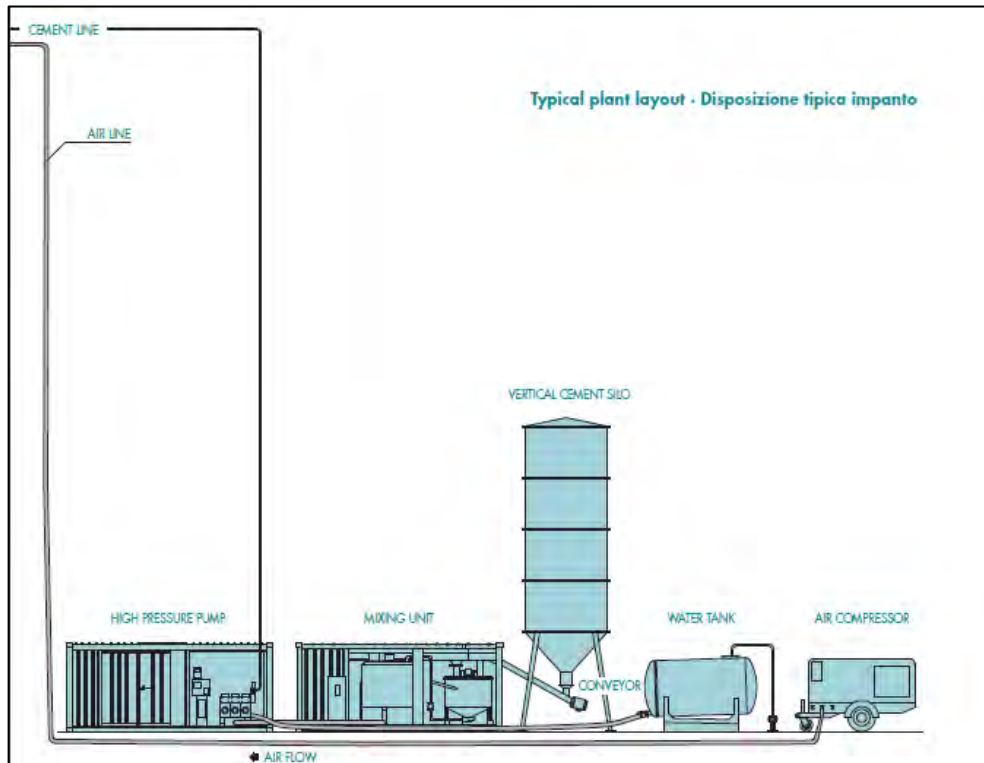
Μια γενική ιδέα της διάταξης του εξοπλισμού στο χώρο στον οποίο λαμβάνει χώρα η εδαφική ανάμειξη φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. Η βελτίωση του εδάφους με την προκείμενη μέθοδο περιλαμβάνει τις εξής διεργασίες:

- αποθήκευση των υλικών (νερό, τσιμέντο),
- ανάμειξη και άντληση,
- γεώτρηση (διάτρηση),
- μέτρηση και καταχώρηση των αποτελεσμάτων.

Οι παραπάνω διεργασίες εκτελούνται από μια σειρά συσκευών που αποτελούν τον απαραίτητο εξοπλισμό για τη διεκπεραίωση της εδαφικής ανάμειξης. Όλα τα μέλη του εξοπλισμού είναι ανεξάρτητα και μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορες θέσεις όπως η περιοχή καθορίζει. Ο εξοπλισμός μπορεί να τοποθετηθεί, μέχρι και 100 μέτρα μακριά από το εργοτάξιο.



Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση του χώρου και του εξοπλισμού της μεθόδου jet grouting



Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση των συσκευών (αντλία υψηλής πίεσης, συσκευή ανάμιξης, δεξαμενή αποθήκευσης τσιμέντου, δεξαμενή νερού, συμπιεστής αέρα)

Επιγραμματικά οι συσκευές και τα εργαλεία που απαιτούνται είναι:

- Δεξαμενή νερού (Water tank)
- Δεξαμενή αποθήκευσης τσιμέντου (Cement silo)
- Συμπιεστής αέρα (Air compressor)
- Συσκευή ανάμιξης τσιμέντου-νερού για τη σύνθεση ενέματος (Mixing plant/Mixing unit/Mixer/Agitator)
- Δεξαμενή αποθήκευσης του προϊόντος της ανάμιξης (Storage tank)
- Αντλία υψηλής πίεσης ενέματος (High pressure pump)
- Μηχάνημα μεταφοράς και σύνδεσης με το τρυπάνι γεώτρησης και έγχυσης (drill rig)
 1. Σωλήνας γεώτρησης (Drill rod)
 2. Περιστερόμενη κεφαλή στην κατάληξη του τρυπανιού (Rotary head)
 3. Κεφαλές απόπλυσης (Flushing heads)
 4. Ακροφύσια (Nozzles)
 5. Μόνιτορ έγχυσης (διαφορετικό για κάθε σύστημα βαθιάς εδαφικής ανάμιξης) (Jet monitor)
- Σύστημα παρακολούθησης της διαδικασίας και εκτύπωσης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων (Grouting recording system/Measurement system and pump control)

Πιο αναλυτικά (η αρίθμηση γίνεται βάσει του σχήματος 2.1):

1. Δεξαμενή νερού (Water tank):

Αποτελεί το χώρο αποθήκευσης του νερού, από τον οποίο θα ληφθεί το νερό για τη δημιουργία του ενέματος, που θα εγχυθεί μέσω της αντλίας, και θα συνδεθεί με το σωλήνα γεώτρησης, ο οποίος θα διατρηθεί στο εσωτερικό του εδάφους. Ο όγκος νερού που αποθηκεύει μια δεξαμενή για αυτό το σκοπό έχει όγκο περίπου 30000 L/30 m³.



Σχήμα 2.3: Δεξαμενή νερού

2. Δεξαμενή αποθήκευσης τσιμέντου (Cement silo):

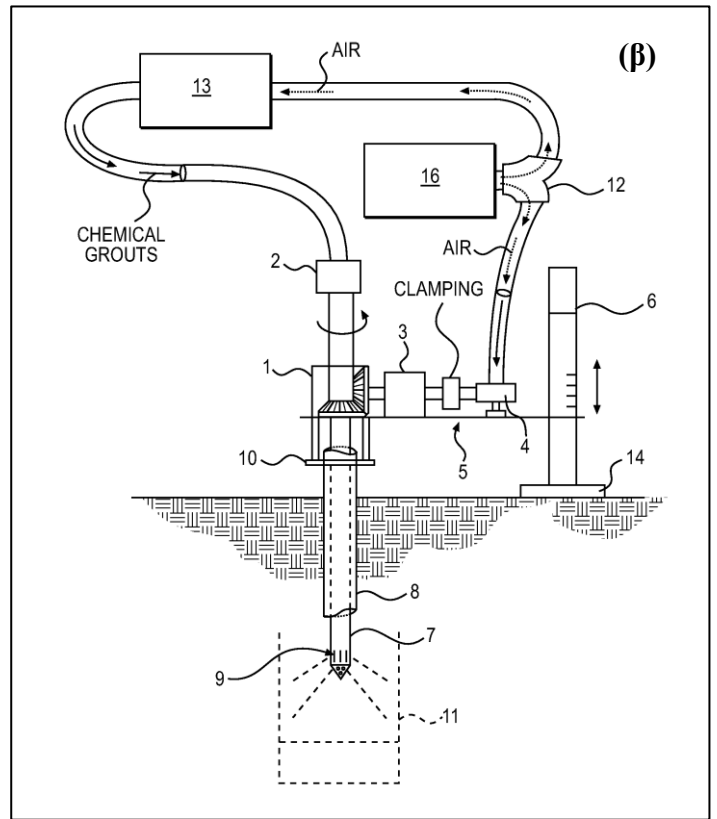
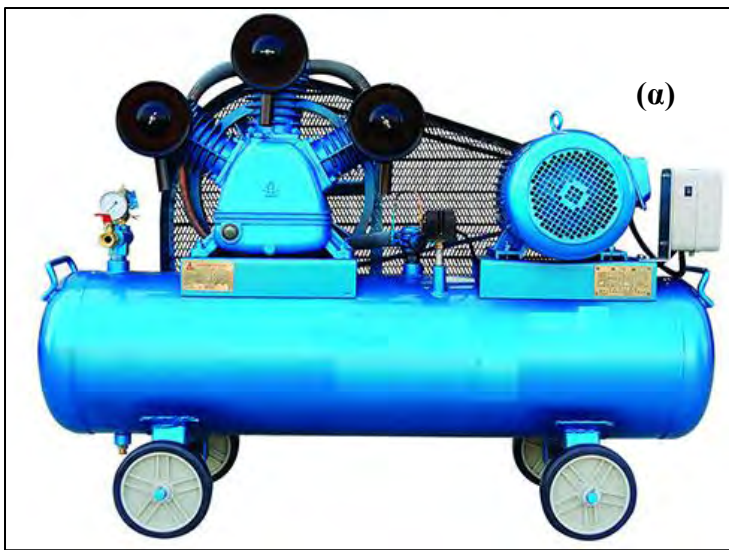
Αποτελεί το χώρο αποθήκευσης του τσιμέντου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία του ενέματος που θα εγχυθεί στο έδαφος.



Σχήμα 2.4: Χώρος αποθήκευσης τσιμέντου (σιλό)

3. Συμπιεστής αέρα (Air compressor):

Ο συμπιεστής αέρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5β, παρέχει υψηλής πίεσης αέρα (4000-6000 psi) σε μια διαχωριστική βαλβίδα σχήματος "T" (12) για τη ροή του συμπιεσμένου αέρα στον κινητήρα αέρα (4) και στην αντλία ενέματος (13). Ο αέρας υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται για την περιστροφή του κινητήρα του αέρα και επίσης για την άντληση του ρευστού από την αντλία ενέματος (13) στον περιστρεφόμενο σωλήνα (7). Όπως φαίνεται στο σχήμα, ο περιστρεφόμενος σωλήνας (7) περιλαμβάνει ακροφύσια ψεκασμού (9) που χρησιμοποιούνται για να διοχετεύουν τα σταθεροποιητικά αυτά υλικά στο χαλαρό, ασθενές υπέδαφος.



Σχήμα 2.5: α) Συμπιεστής αέρα β) Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας τους

4. Συσκευή ανάμιξης (Mixing plant):

Στη συσκευή αυτή γίνεται η σύνθεση του ενέματος αναμειγνύοντας νερό, προερχόμενο από την υπάρχουσα δεξαμενή και τσιμέντο από τη δεξαμενή αποθήκευσης τσιμέντου. Έτσι, δημιουργείται το ένεμα (grout) το οποίο μπορεί να περιέχει και μπετονίτη. Τα συστατικά του μίγματος (ένεμα) ζυγίζονται καθώς εισέρχονται στη συσκευή έτσι ώστε να επιτυγχάνονται ακριβείς αναλογίες.



Σχήμα 2.6: Συσκευή ανάμιξης

5. Αντλία υψηλής πίεσης ενέματος (High pressure pump)

Η αντλία υψηλής πίεσης ενέματος τροφοδοτεί το κινητό μηχάνημα που φέρει το σωλήνα γεώτρησης και το τρυπάνι με το ένεμα που συντέθηκε από τη συσκευή ανάμιξης με μεγάλη πίεση. Τέτοιες αντλίες παρουσιάζουν ρυθμό ροής μέχρι και 575 L/min και πίεση μέχρι και 250 bar και χρησιμοποιούνται για πολλές εφαρμογές που αφορούν την ενεμάτωση περιλαμβάνοντας και τη μεταφορά του ενέματος.

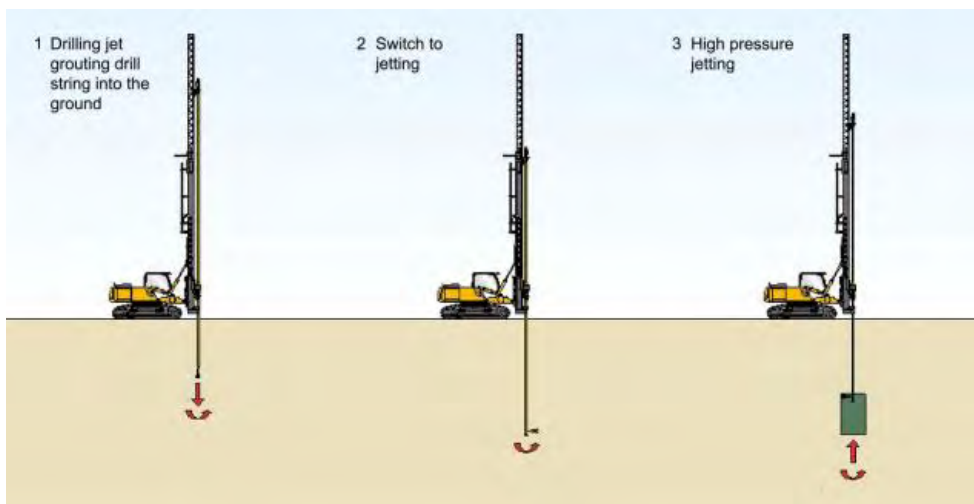


Σχήμα 2.7: Αντλία υψηλής πίεσης

6. Μηχάνημα μεταφοράς και σύνδεσης με το τρυπάνι και το σωλήνα διάτρησης (drill rig, drill rod)

Γίνεται διάτρηση με χρήση ράβδων-στελεχών μέχρι το ακροφύσιο να φτάσει στο επιθυμητό βάθος με περιστρεφόμενο γεωτρυπάνο. Στο κάτω άκρο της ράβδου βρίσκονται πλευρικά ακροφύσια από τα οποία εισπνέζεται το ένεμα (συντά χρησιμοποιούνται στελέχη με διπλά ή τριπλά ακροφύσια ώστε ταυτόχρονα με την εισπνέση ενέματος να εισπνέζεται νερό για την αποδόμηση του εδάφους ώστε να επιτευχθεί καλύτερα ανάμειξη). Ένα υγρό έγχυσης (νερού και / ή συνδετικό υλικό, το οποίο εξαρτάται από το σύστημα εδαφικής ανάμειξης που χρησιμοποιείται) εκτοξεύεται από ακροφύσια σε υψηλή πίεση (400-600 bar). Η πίεση αυτή προκαλεί υδραυλική θραύση στο έδαφος και βοηθά στην ανάμειξή του με το εισπνέζόμενο ένεμα. Ανάλογα με το σύστημα έγχυσης, το κάτω μέρος του σωλήνα γεώτρησης αλλάζει, καθώς το monitor διαθέτει ένα ακροφύσιο για την έγχυση ενέματος για το απλό σύστημα (single jetting system), ένα ακροφύσιο για την έγχυση ενέματος και αέρα για το διπλό σύστημα (double jetting system) και δύο ακροφύσια έγχυσης νερού και αέρα και ενέματος, εκ των οποίων το ακροφύσιο ενέματος βρίσκεται στο κάτω μέρος, για το τριπλό σύστημα (triple jetting system). Οι απαραίτητες παράμετροι που είναι υπεύθυνες για το κατάλληλο αποτέλεσμα είναι:

- Πίεση αντλίας 100-600 bar
- Αριθμός ακροφυσίων 1-2
- Διάμετρος ακροφυσίων 2-7 mm
- Ρυθμός εξαγωγής των στελεχών διάτρησης 1-12 min/m
- Πίεση αέρα 4-12 bar
- Ταχύτητα περιστροφής του σωλήνα γεώτρησης 2-15 rpm
- Αναλογία νερού – συνδετικού υλικού 0,5-1,5
- Ρυθμός έγχυσης 100-400 L/min

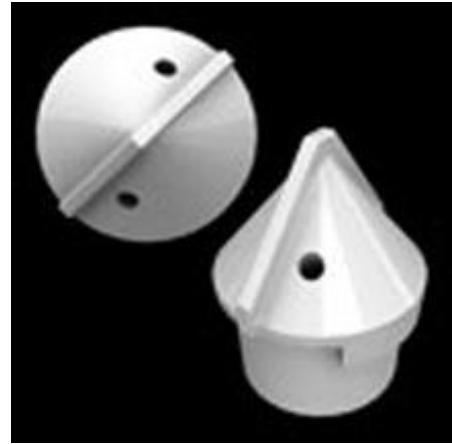


Σχήμα 2.8: Διαδικασία διάτρησης, εισαγωγής του στελέχους και έγχυσης

Περιγραφή της μεθόδου ενίσχυσης (Jet Grouting)



Σχήμα 2.9: Σωλήνες διάτρησης (Drill rods)



Σχήμα 2.10: Τρυπάνι διάτρησης (αιχμή)



Σχήμα 2.11: Στέλεχος έγχυσης μέσω ακροφυσίων

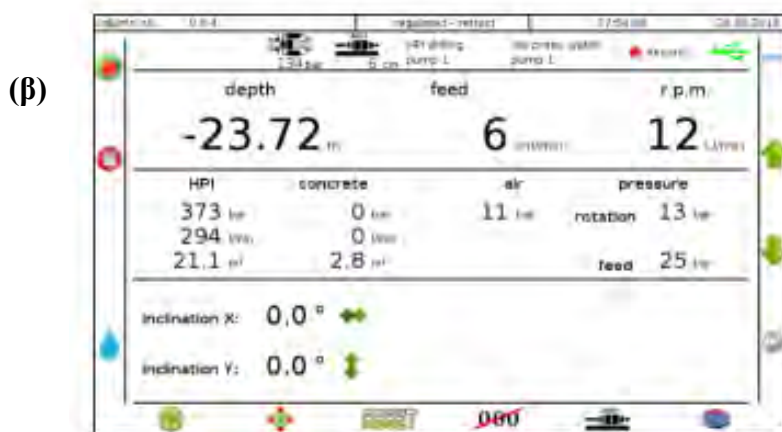
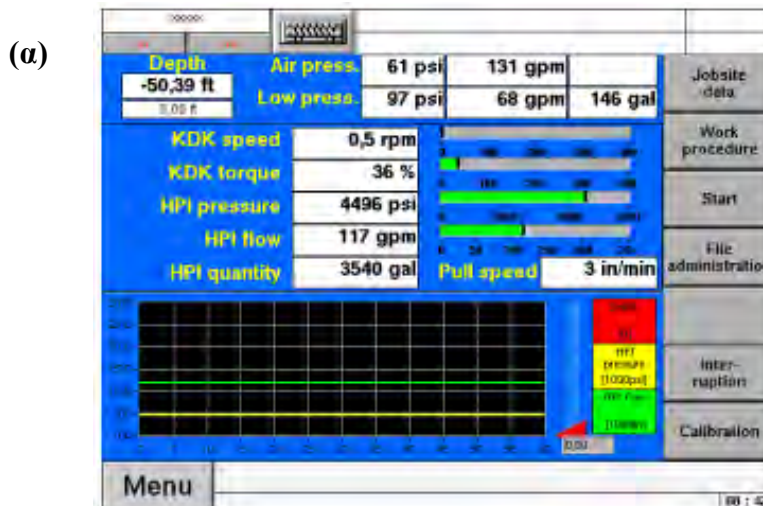


Σχήμα 2.12: Στέλεχος έγχυσης (monitor)

7. Σύστημα παρακολούθησης της διαδικασίας και εκτύπωσης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων (Grouting recording system/ Measurement system and pump control)

Το ηλεκτρονικό σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο της διάταξης του εξοπλισμού. Αυτό το σύστημα απόκτησης δεδομένων παρακολουθεί και ελέγχει τόσο τις παραμέτρους παραγωγής όσο και τις λειτουργίες γενικού εξοπλισμού. Οι ακόλουθες παράμετροι παραγωγής μπορούν να λαμβάνονται συνεχώς, να απεικονίζονται και αποθηκεύονται:

- Βάθος
- Όγκος
- Πίεση ενέματος
- Ταχύτητα περιστροφής
- Ρυθμός ροής
- Κλίση



Σχήμα 2.13 α), β): Σύστημα ηλεκτρονική επίβλεψης των μετρήσεων και παραμέτρων έγχυσης

2.2 Διαδικασία της μεθόδου της εδαφικής ανάμειξης (Jet Grouting)

Όταν τα δομικά έργα απαιτούν βελτιώσεις του εδάφους για την κατασκευή νέων δομών ή αποκατάσταση των ήδη υπάρχοντων μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος της εισπίεσης - ανάμειξης (Jet Grouting). Η βελτίωση του εδάφους συνίσταται την τροποποίηση και βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους, την αντοχή σε θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας και την παράλληλη μείωση της διαπερατότητας του φυσικού εδάφους. Η τεχνική jet grouting είναι μια σύγχρονη, γρήγορη και αποτελεσματική μέθοδος που εφαρμόζεται σε εδάφη και σε ασθενείς βράχους για τη δημιουργία βαθιών στοιχείων θεμελίωσης, με την οποία αυξάνεται η αντοχή και η δυσκαμψία του εδάφους, μειώνονται οι μετακινήσεις, ελέγχεται η υπόγεια ροή του νερού και δίνεται η δυνατότητα εποπτείας της βελτίωσης που θα επέλθει μέσω αυτής της επέμβασης. Η εδαφική ανάμειξη είναι μια διαδικασία ενίσχυσης εδάφους που χρησιμοποιεί ένα υψηλής κινητικής ενέργειας ρευστό με σκοπό τη διάσπαση και τη χαλάρωση του εδάφους και τελικά την ανάμειξή του με έναν πολτό τσιμέντου. Αυτή η τεχνική υδροδυναμικής ανάμειξης στο χώρο παράγει ένα υλικό τσιμέντου στο έδαφος, που συνήθως αναφέρεται ως "soilcrete" δηλαδή τσιμεντοποιημένο έδαφος. Με τη μέθοδο αυτή, το χώμα αναμειγνύεται επιτόπου και απευθείας με τον σταθεροποιητή (συνήθως πρόσμειξη τσιμέντου με νερό-ένεμα) το οποίο εγχέεται με πολύ υψηλή πίεση (τουλάχιστον 300 bar). Το εκτοξευόμενο ρευστό, που εξάγεται από τα ακροφύσια, καταστρέφει τη φυσική δομή του εδάφους και δημιουργεί μια ανάμειξη μεταξύ εδάφους και σταθεροποιητή. Ο αναλυτικός υπολογισμός της σύνθεσης του ενέματος δεν είναι πρακτικά δυνατός, εξαιτίας των πολύπλοκων διεργασιών της διάβρωσης, ανάμειξης, αντικατάστασης και κάλυψης των κενών αλλά και λόγω των διάφορων παραμέτρων της βαθιάς εδαφικής ανάμειξης. Η πρόβλεψη γίνεται βάσει παρατηρήσεων. Οι Croce και Flora (2000) βρήκαν ότι το ποσοστό του εδάφους που απομακρύνεται κυμαίνεται από 30% μέχρι και 60% σε δοκιμές πεδίου χρησιμοποιώντας το απλό σύστημα έγχυσης. Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατό να επεξεργαστεί ένα ευρύ φάσμα εδαφών που περιλαμβάνει χαλικώδη μέχρι και αργιλικά. Η κύρια διαφορά της εδαφικής ανάμειξης σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους έγχυσης είναι ότι με αυτή τη μέθοδο η απαραίτητη ποσότητα σταθεροποιητή μπορεί να προσδιοριστεί πριν από την έναρξη της εργασίας, οπότε το τελικό αποτέλεσμα ως προς τη δύναμη και τη διαπερατότητα και συνεπώς το κόστος μπορεί να οριστεί και να εκτιμηθεί εκ των προτέρων. Οι διάμετροι και η αντοχή του ενέματος μπορούν να σχεδιαστούν και να εγκατασταθούν με ακρίβεια τόση ώστε να παραλάβουν επαρκώς τόσο τα στατικά όσο και τα σεισμικά φορτία.

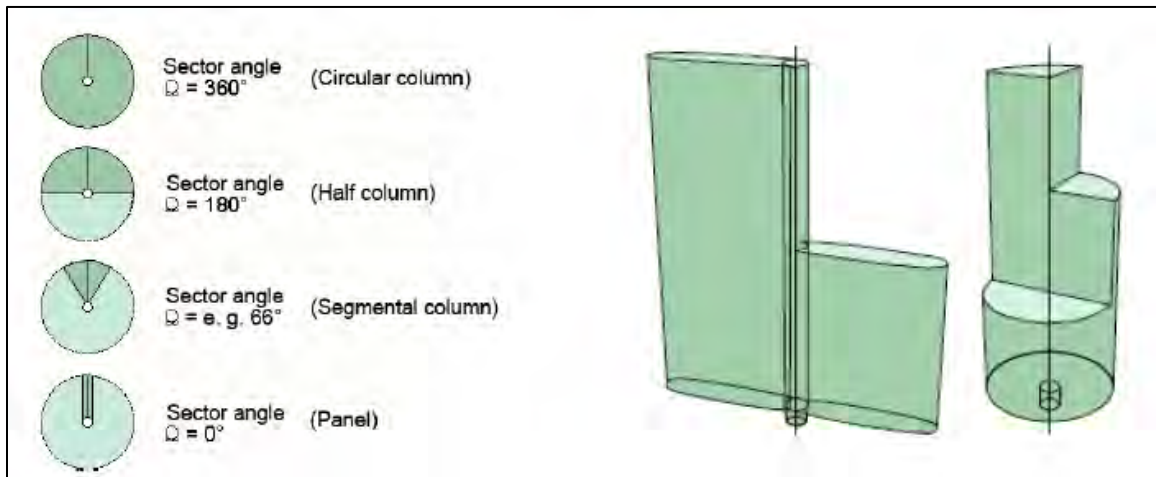
Σε γενικές γραμμές, η εδαφική ανάμειξη απαιτεί μόνο νερό και συνδετικό υλικό (γενικά με τη μορφή τσιμέντου). Η επιλογή του κατάλληλου συνδετικού παράγοντα καθορίζεται από τις ακόλουθες απαιτήσεις:

Περιγραφή της μεθόδου ενίσχυσης (Jet Grouting)

- Αντοχή
- Διαπερατότητα (όσο πιο αδιαπέρατο τόσο το καλύτερο)
- Αντοχή στη διάβρωση
- Εργασιμότητα

Ανάλογα με την περιστροφή και την κίνηση των ράβδων διάτρησης, μπορούν να δημιουργηθούν διαφορετικές γεωμετρικές μορφές στοιχείων εδαφικής ανάμειξης (Σχ. 2.14), όπως:

- Κυλινδρικοί πάσσαλοι
- 'Ήμι-πάσσαλοι'
- Τμηματικοί πάσσαλοι
- Πάνελ (Επίπεδοι πάσσαλοι, πλάκες)



Σχήμα 2.14: Γεωμετρικές μορφές των προκύπτοντων στοιχείων βαθιάς εδαφικής ανάμειξης

Πιο αναλυτικά:

Στελέχη διάτρησης, εξοπλισμένα με ακροφύσια διαμέτρου 1-10 mm, χρησιμοποιούνται για την έγχυση του ενέματος στο κατάλληλο βάθος. Οι ράβδοι μπορεί να είναι απλού, διπλού ή τριπλού συστήματος, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται και το τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα. Η γεώτρηση έχει γενικά διάμετρο 100-200 mm και σταθεροποιείται με ένεμα, το οποίο χρησιμοποιείται για την απόπλυση και έτσι σταθεροποιεί την οπή της γεώτρησης κατά τη διάρκεια της διάτρησης. Όσον αφορά τη φάση της διάτρησης χρησιμοποιούνται γενικά τρυπάνια γεώτρησης που δύνανται να φτάσουν σε βάθος μέχρι περίπου 20 m. Σε συγκεκριμένες εφαρμογές, μπορεί να ζητηθεί μεγαλύτερος εξοπλισμός με τον οποίο η διάτρηση να φτάσει μέχρι και στα 50-60 m από την επιφάνεια του εδάφους. Από τη στιγμή που η τεχνική jet grouting αποτελεί μια διαδικασία η οποία ξεκινά από τον πυθμένα της γεώτρησης και συνεχίζει προς την επιφάνεια του εδάφους, η διάσπαση του εδάφους ξεκινά από το βάθος σχεδιασμού με υψηλή ταχύτητα έγχυσης ρευστού.

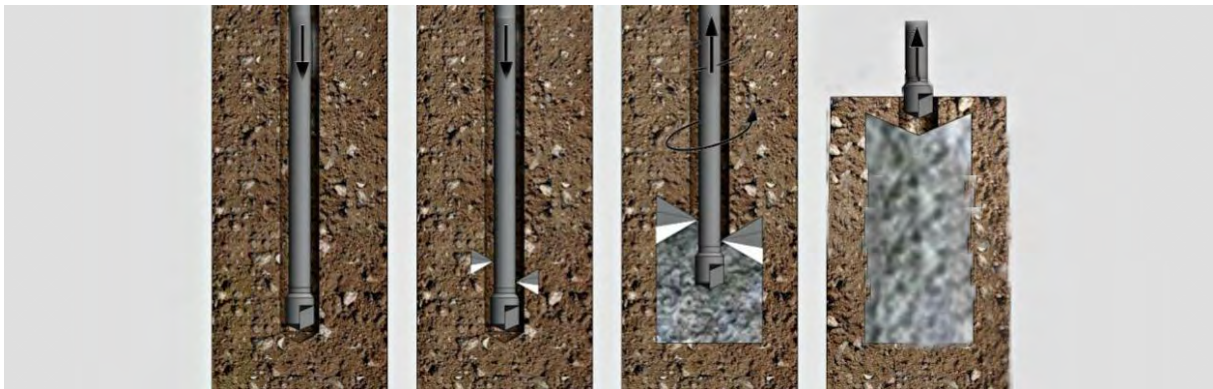
Περιγραφή της μεθόδου ενίσχυσης (Jet Grouting)

Αυτό συνεχίζει με συνεχή ομοιόμορφη περιστροφή και επαναφορά προς την επιφάνεια του εδάφους, ενώ παράλληλα απομακρύνονται διαβρωμένα υπολείμματα εδάφους προς την κορυφή της γεώτρησης.

Με τη βοήθεια των πιδάκων κοπής υψηλής πίεσης νερού ή μίγματος τσιμέντου και έχοντας ως ταχύτητα εξόδου από τα ακροφύσια ≥ 100 m / sec, τελικά το έδαφος αναμειγνύεται με αέρα, και το έδαφος γύρω από τη γεώτρηση διαβρώνεται. Το διαβρωμένο χρώμα αναδιατάσσεται και αναμειγνύεται με το μίγμα τσιμέντου.

Το τελικό αποτέλεσμα της εκτόξευσης είναι ένα 'σώμα' εδάφους κυλινδρικού σχήματος το οποίο ονομάζεται jet column, ή αλλιώς εδαφοπάσσαλος. Πιο αναλυτικά, τα τρία στάδια που συνιστούν τη διαδικασία σχηματισμού των εδαφοπασσάλων είναι τα εξής:

- Ανάμιξη νερού με τσιμέντο και άντληση ενέματος
- Μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ εδαφών και ενέματος
- Σκλήρυνση του soilcrete (σκυρόδεμα)

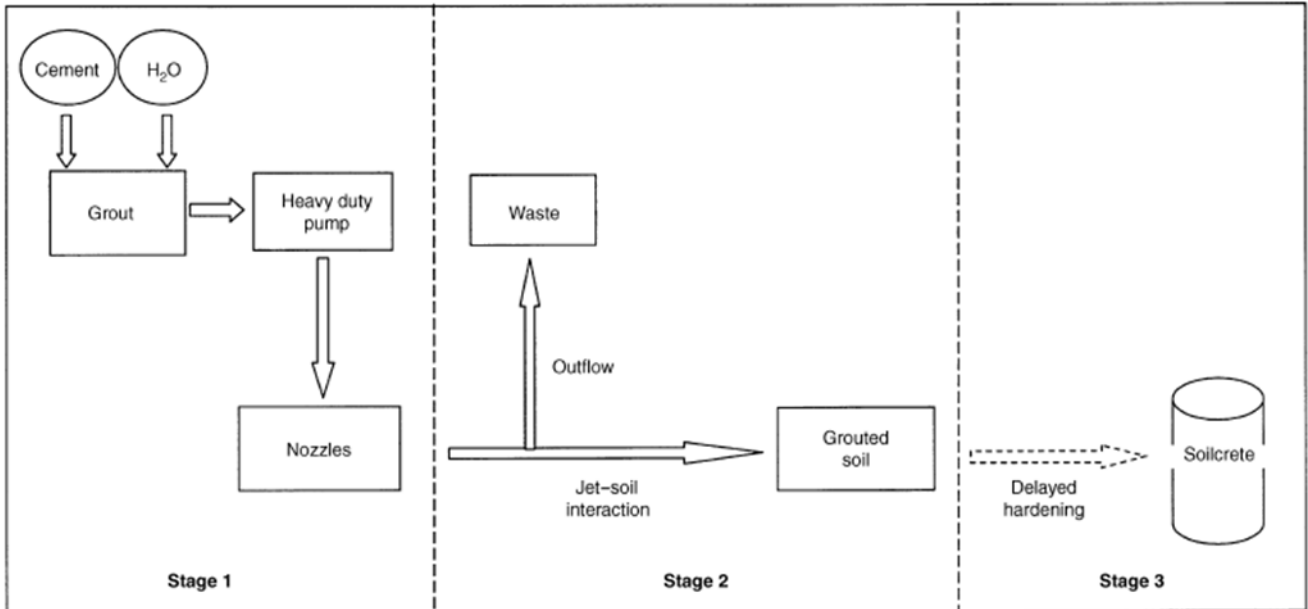


Σχήμα 2.15: Στάδια της διαδικασίας Jet Grouting

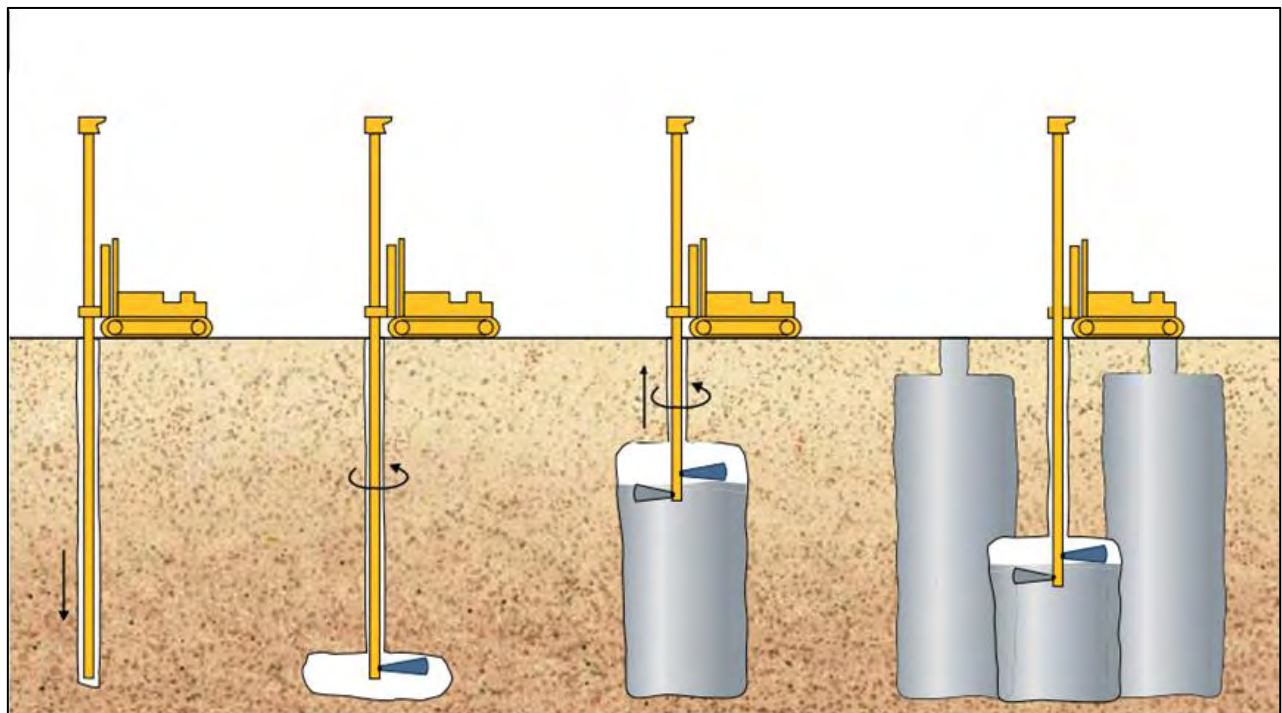
Τα υγρά εγχέονται στο έδαφος με πολύ μεγάλη ταχύτητα 200-250 m/s και πίεση συνήθως 20-40 MPa (εισπίεση) μέσω ακροφυσίων μικρής διαμέτρου, τα οποία βρίσκονται σε έναν σωλήνα, ο οποίος περιστρέφεται με σταθερό ρυθμό και κατευθύνεται αργά προς την επιφάνεια του εδάφους. Η εκτόξευση διαδίδεται ακτινικά κατά τον άξονα της 'επέμβασης' και το κονίαμα (μείγμα) στερεοποιείται υπόγεια. Το ένεμα δρα στο έδαφος σύμφωνα με τις προδιαγραφές είτε για λόγους σταθεροποίησης είτε ως μονωτική κατασκευή. Ένας συνδυασμός και των δύο ιδιοτήτων απαιτείται ολόένα και περισσότερο. Η αντοχή σε θλίψη του προκύπτοντος τσιμεντοποιημένου εδάφους κυμαίνεται από 2 έως 25 N / mm² και καθορίζεται από την περιεκτικότητα σε τσιμέντο και το υπόλοιπο τμήμα του εδάφους που έχει παραμείνει στη μάζα του νέου επεξεργασμένου εδάφους. Η μονωτική δράση του

Περιγραφή της μεθόδου ενίσχυσης (Jet Grouting)

τσιμεντοποιημένου εδάφους έναντι εισροής νερού επιτυγχάνεται επιλέγοντας κατάλληλη ποσότητα ενέματος και εάν είναι απαραίτητο και προσθήκη μπετονίτη.



Σχήμα 2.16: Σχηματική αναπαράσταση των σταδίων δημιουργίας των εδαφοπασσάλων



Σχήμα 2.17: Στάδια σύνθεσης εδαφοπασσάλων

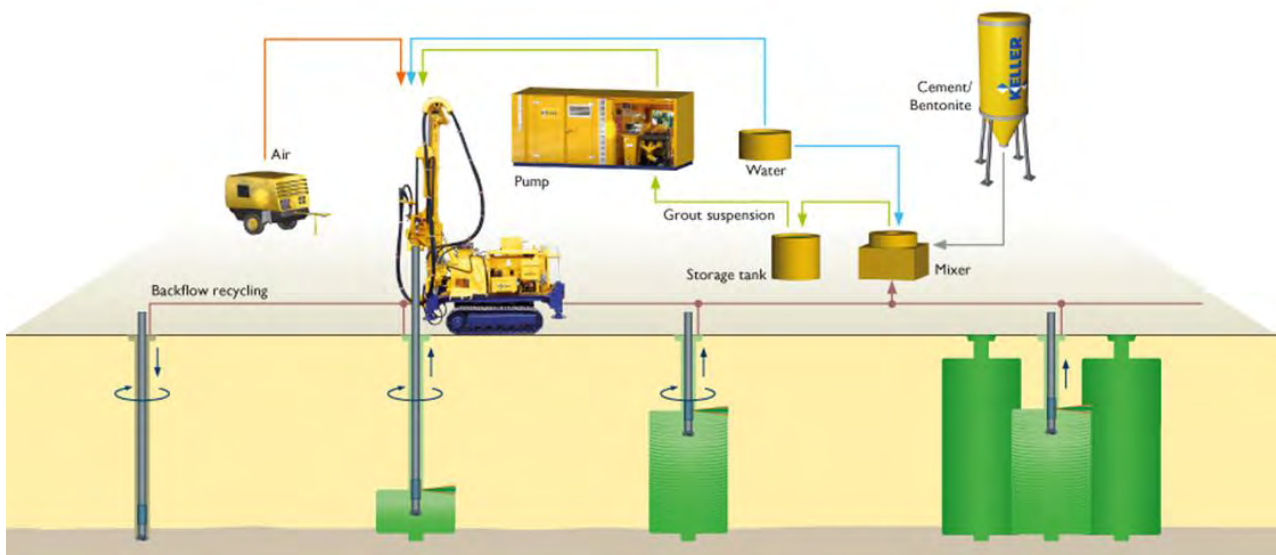
Περιγραφή της μεθόδου ενίσχυσης (Jet Grouting)

Στο σχήμα 2.16 αναπαρίσταται η διαδικασία της εδαφικής ανάμειξης με τη χρήση του απλού συστήματος έγχυσης. Παρατηρείται:

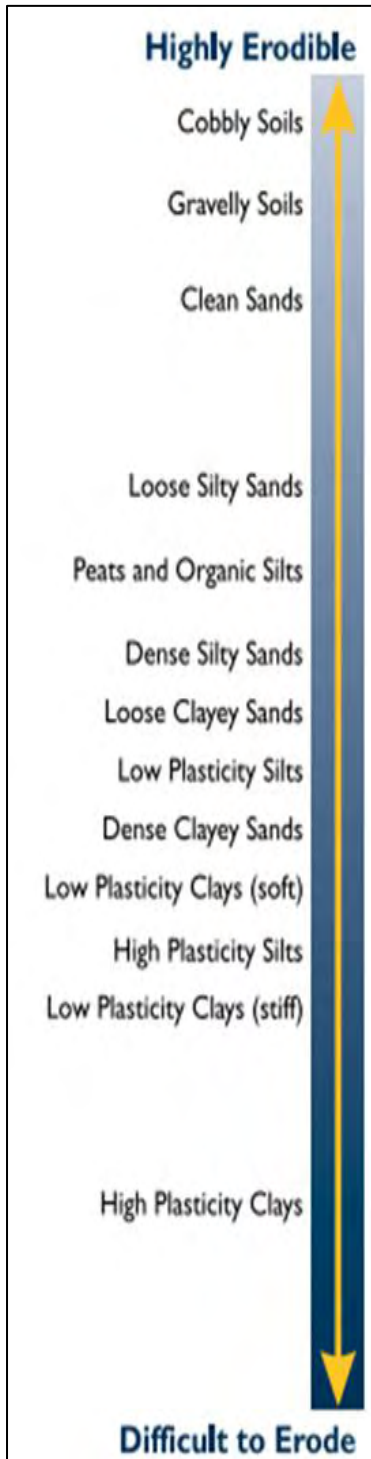
Στο πρώτο στάδιο, η σκόνη τσιμέντου και το νερό αναμειγνύονται σε διάφορες προβλεπόμενες αναλογίες για το σχηματισμό του ενέματος, το οποίο, στη συνέχεια, υπόκειται σε μεγάλη πίεση και αντλείται από αυτοκινούμενο ειδικό μηχάνημα. Το ένεμα μεταφέρεται μέσω εύκαμπτων σωλήνων και, στη συνέχεια, μέσω κοίλων μεταλλικών στελεχών έγχυσης καταλήγει τελικά στα ακροφύσια του στελέχους. Έτσι το ένεμα εκτοξεύεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα, αν και μέρος της υδραυλικής πίεσης (του πιεζομετρικού ύψους) χάνεται στην πορεία μεταξύ της αντλίας και των ακροφυσίων.

Το δεύτερο στάδιο χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι μόνο ένα τμήμα του ενέματος απορροφάται από το έδαφος, ενώ το υπόλοιπο ρέει προς την επιφάνεια του εδάφους, διερχόμενο από έναν δακτύλιο χώρο, ο οποίος οριοθετείται από την οπή διάτρησης και το στέλεχος έγχυσης. Η ελεγχόμενη εδαφική ανάμειξη πρέπει να δημιουργεί εκροές (spoil material) κατά τη διάρκεια της έγχυσης. Στη συνέχεια, μετράται το ποσοστό των εκροών (spoil) που αποτελούνται από ένεμα και διαβρωμένο έδαφος. Ο όγκος του περισσευούμενου εδάφους μπορεί να προβλεφθεί από τους όγκους ενέματος που έχουν εγχυθεί και αποτελεί περίπου το 40-60 % του όγκου του τσιμεντοποιημένου εδάφους. Οι εκροές που προκύπτουν διατηρούν μια σημαντική ποσότητα τσιμέντου του οποίου η αντοχή αυξάνεται με το χρόνο. Μετά από 12 ώρες, η αντοχή έχει γίνει τόση που οι εκροές μπορούν να μεταχειριστούν σαν στιφρή άργιλο, και χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις πλήρωσης της κατασκευής

Το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει τη διαδικασία τσιμεντοποίησης λόγω της στερεοποίησης του ενέματος που συγκρατείται από το έδαφος. Αυτό είναι ένα χρονικά εξαρτώμενο φαινόμενο το οποίο προκαλείται από την ενυδάτωση των σωματιδίων του τσιμέντου από το νερό, το οποίο με τη σειρά του περιέχεται στο ένεμα ή και στο φυσικό έδαφος. Σε αυτό το στάδιο η διαβάθμιση των κόκκων και η ορυκτολογία του εδάφους θα επηρεάσει την αντοχή του τσιμεντοποιημένου εδάφους (soilcrete).



Σχήμα 2.18: Συνολική σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Jet Grouting



Η μέθοδος jet grouting είναι αποτελεσματική σχεδόν σε κάθε είδος εδάφους, ανεξάρτητα από το σύστημα έγχυσης που χρησιμοποιείται. Εφαρμόζεται ακόμα και σε ιλυώδη εδάφη και στα περισσότερα αργιλικά. Η γεωμετρία του τσιμεντοποιημένου εδάφους, καθώς και οι φυσικές του ιδιότητες διαμορφώνονται ανάλογα το έδαφος το οποίο υπόκειται σε επεξεργασία. Η διαβρωσιμότητα του εδάφους αποτελεί βασικό παράγοντα που επηρεάζει την πρόβλεψη της διαμέτρου και την ποιότητα του προκύπτοντος εδάφους. Κατά κανόνα τα μη συνεκτικά εδάφη είναι πιο 'διαβρώσιμα' από τα μη συνεκτικά εδάφη.

Στο σχήμα 2.19 παρουσιάζονται τα είδη εδαφών και πόσο ευαίσθητα είναι στη 'διάβρωση' και επεξεργασία με τη μέθοδο της βαθιάς εδαφικής ανάμιξης.

Ο έλεγχος και η διασφάλιση της ποιότητας είναι κρίσιμα συστατικά ενός πετυχημένου προγράμματος jet grouting, δεδομένου ότι τα υπόγεια εδάφη συμφωνούν με τις υποθέσεις που έχουν γίνει σχετικά με τις σχεδιαστικές παραμέτρους. Η διασφάλιση της ποιότητας ξεκινά με έλεγχο της γεωμετρίας του τσιμεντοποιημένου εδάφους και της αντοχής του. Λαμβάνονται δείγματα από τον πυρήνα του επεξεργασμένου εδάφους, τα οποία υποβάλλονται σε εργαστηριακές δοκιμές, ώστε να επιβεβαιωθεί αν έχει επιτευχθεί η θλιπτική αντοχή που απαιτείται. Η διασφάλιση της ποιότητας πριν τη σύνθεση του νέου εδάφους αποτελεί βάση για τον έλεγχο της ποιότητας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της έγχυσης. Γίνεται ηλεκτρονική συλλογή των δεδομένων σχετικά με τις παραμέτρους του jet grouting, τα οποία είναι μονίμως διαθέσιμα και ενημερώνονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Πέραν της εποπτείας της ποιότητας της κατασκευής, είναι πιθανό να χρειαστούν έλεγχοι διαπερατότητας.

Σχήμα 2.19: Είδη εδαφών με σειρά διαβρωσιμότητας

2.3 Συστήματα εισπίεσης - εδαφικής ανάμειξης

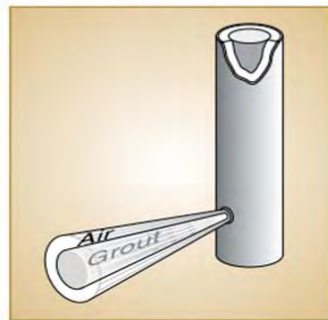
Υπάρχουν 3 συστήματα εισπίεσης - εδαφικής ανάμειξης (jet grouting systems). Η επιλογή του καταλληλότερου συστήματος εξαρτάται από το έδαφος που πρόκειται να επεξεργαστεί, από το είδος της εφαρμογής, και τα φυσικά χαρακτηριστικά του τσιμεντοποιημένου εδάφους που απαιτούνται στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Ωστόσο, κάθε σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σχεδόν κάθε εφαρμογή με την προϋπόθεση ότι υπάρχει ο σωστός σχεδιασμός και χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες διαδικασίες εφαρμογής. Οι τεχνικές της εδαφικής ανάμειξης (jet grouting) μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τον αριθμό των ρευστών που εγχέονται στο υπέδαφος:

Principal jet systems

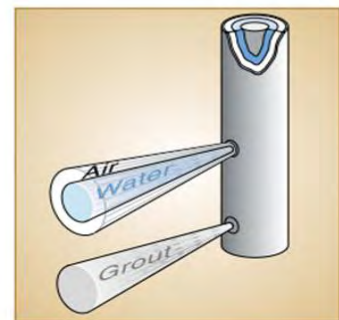
(α)



SINGLE JET
Soil loosening and grout injection are performed by a jet of high pressure grout from nozzles at the bottom end of a drill rod.

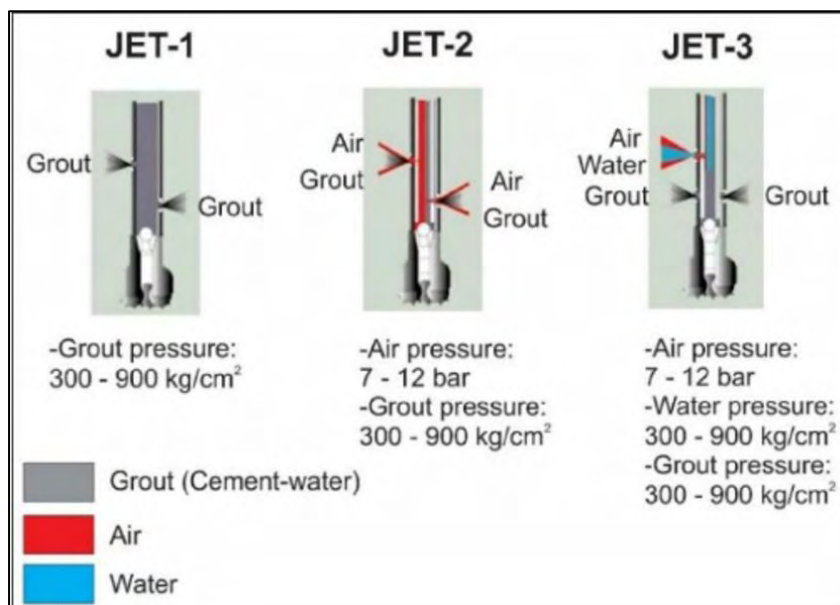


TWIN JET
Soil loosening and grout injection are performed by a high pressure jet of grout shrouded by a concentric jet of air which increases the radius of action.



TRIPLE JET
Soil loosening is performed by a jet of water shrouded by concentric jet of air. Grout injection is performed by a separate jet of grout.

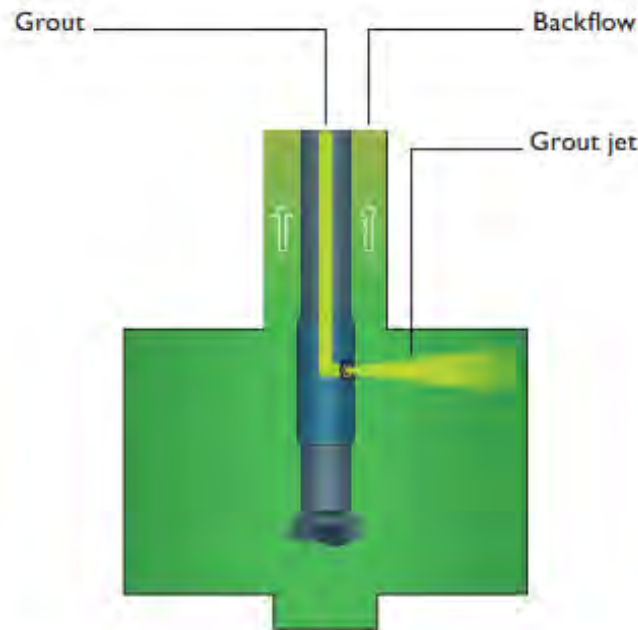
(β)



Σχήμα 2.20 α), β): Συστήματα Jet Grouting (απλό, διπλό, τριπλό)

- Ένεμα (single fluid system)

Στο απλό σύστημα εδαφικής ανάμειξης, το υγρό εκτόξευσης από το ακροφύσιο (ταχύτητα εκτόξευσης μέχρι 650 ft/sec-200 m/s) είναι ένεμα που εκτελεί τις τρεις λειτουργίες: χαλάρωση του εδάφους, απομάκρυνση του περίσσιου ενέματος και παροχή συνδετικού υλικού. Αυτή η ενέργεια προκαλεί τη διάσπαση του εδάφους και κατ' επέκταση την αντικατάσταση και την ανάμειξη του τσιμεντοπολτού (ένεμα) με το έδαφος. Ένα σημαντικό ποσοστό της κινητικής ενέργειας του πίδακα χάνεται μέσω τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του ενέματος και του εδάφους και το περισσευούμενο υλικό μπορεί να γίνει πολύ παχύρρευστο για να ανέβει ελεύθερα προς την οπή. Μολονότι με το σύστημα αυτό σχηματίζονται πάσσαλοι μικρότερης διαμέτρου σε σχέση με τα άλλα δύο συστήματα, είναι πιο απλό, πιο ευέλικτο και προφανώς οικονομικότερο συγκριτικά με το διπλό και τριπλό σύστημα. Χρησιμοποιείται για το σχηματισμό μικρής ως μεσαίας διαμέτρου πασσάλων. Στα χαλικώδη εδάφη ο πάσσαλος τσιμεντοποιημένου εδάφους μπορεί να αποκτήσει διάμετρο από 0,5 m μέχρι και 1,2 m (γενικά μικρότερες από 1 m). Στα χαλαρά, ιλυώδη και αμμώδη εδάφη επιτυγχάνονται μικρότερες διαμέτροι. Το απλό σύστημα εδαφικής ανάμειξης είναι αρκετά αποτελεσματικό σε χονδρόκοκκα εδάφη και γενικά λιγότερο αποτελεσματικό σε συνεκτικά εδάφη. Ωστόσο, λόγω της δημιουργίας μικρής διαμέτρου πασσάλων, μερικές φορές προκαλείται ανύψωση εδάφους. Εφαρμογές του απλού συστήματος πραγματοποιούνται σε περιπτώσεις όπως διαφραγματικοί τοίχοι (cut-off walls) σε πορώδη εδάφη, σε σταθεροποίηση εδάφους για την κατασκευή της οροφής σήραγγας, προσωρινή υποστήριξη σήραγγας, υποστήριξη στον πυθμένα της εκσκαφής λόγω υπάρχοντων βαθιών ασυνεχειών (τάφρων) σε μαλακά εδάφη, σε αγκυρώσεις και τέλος σε έργα στεγανοποίησης.



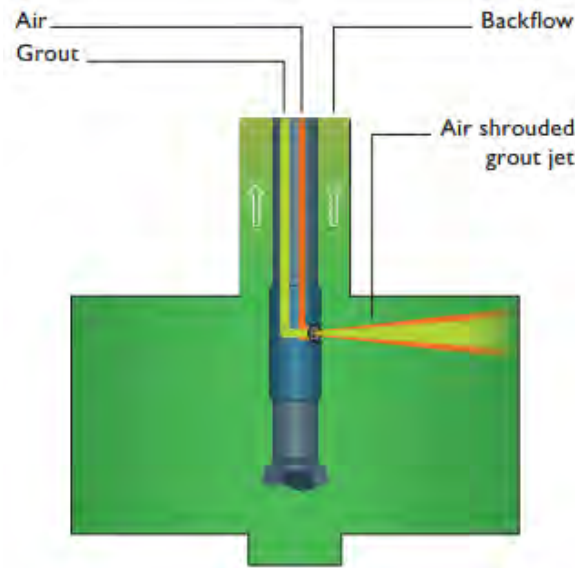
Σχήμα 2.21: Απλό σύστημα έγχυσης, με τη χρήση ενέματος (νερό, τσιμέντο)

- **Αέρας ή Νερό + Ένεμα (double fluid system)**

Η χαλάρωση του εδάφους και η έγχυση γίνονται με μια υψηλής πίεσης εκτόξευση (ταχύτητα εξόδου >100 m/s) ενέματος, μαζί με μια διαφορετική αλλά ομόκεντρη εκτόξευση αέρα, και έτσι η ακτίνα δράσης του πίδακα στο ίδιο έδαφος αυξάνεται σημαντικά. Στο διπλό αυτό σύστημα (Σχ. 2.22), το ένεμα χρησιμοποιείται για τη διάσπαση του εδάφους και τελικά την ανάμειξή του με αυτό. Η προσθήκη του αέρα βελτιώνει την αποτελεσματικότητα δραματικά προκαλώντας αύξηση κατά 30% της διαμέτρου της στήλης τσιμεντοποιημένου εδάφους χρησιμοποιώντας την ίδια ενέργεια. Ο αέρας περικλείει το ένεμα και βελτιώνει την απόδοση κατά την απομάκρυνση του επιτόπου εδάφους και την ικανότητα 'διάβρωσης', καθώς μειώνει τις απώλειες λόγω τριβής επιτρέποντας έτσι το ένεμα να 'εξαπλωθεί' σε μεγάλη απόσταση από το σημείο της έγχυσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό πασσάλων με μεγαλύτερη διάμετρο και η απόσταση κοπής αυξάνεται σημαντικά λόγω του αέρα που ενισχύει τη δράση του ενέματος. Η διάμετρος πασσάλων τσιμεντοποιημένου εδάφους, που σχηματίζονται με τη χρήση αυτού του συστήματος, ξεπερνά το 1 m για μέτρια ως πυκνά εδάφη, ενώ ξεπερνά τα 1,8 m σε χαλαρά εδάφη και μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 3 m. Καταληκτικά, το διπλό σύστημα οδηγεί σε μερική αντικατάσταση του επιτόπου εδάφους με τον τσιμεντοποιημένο πάσσαλο, αυξάνοντας την αντοχή και μειώνοντας τη διαπερατότητα. Ωστόσο, η παρουσία φυσαλίδων αέρα σημαίνει ότι οι πάσσαλοι δεν έχουν τόσο μεγάλη αντοχή όσο αυτοί που δημιουργούνται με το προηγούμενο σύστημα, και παράγονται μεγαλύτερες ποσότητες περισσευούμενου εδάφους (spoil), που επιστρέφουν στην επιφάνεια του εδάφους. Χρησιμοποιείται κυρίως για σταθεροποίηση του εδάφους, για ενίσχυση θεμελίωσης, για επίπεδους διαφραγματικούς τοίχους (cut-off walls), για υποστήριξη και στεγανοποίηση πλακών.

Σημειώνεται ότι, όσον αφορά το διπλό σύστημα εδαφικής ανάμειξης (double fluid system), η χρήση αέρα χαμηλής πίεσης (2-10 bars, ανάλογα με το είδος του εδάφους) εφαρμόζεται κυρίως σε αμμώδη και χαλικώδη εδάφη, όπου ο αέρας δημιουργεί μεγαλύτερες διαμέτρους σε σχέση με το απλό σύστημα jet grouting.

Είναι δυνατή και η χρήση νερού αντί για αέρα, και το σύστημα αυτό εφαρμόζεται κυρίως σε αργιλικά και ιλυώδη εδάφη. Γι' αυτό, αντί για αέρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί νερό (10-30 L/min) ώστε να αποφευχθεί πιθανό 'μπλοκάρισμα' των ακροφυσίων. Όταν εφαρμόζεται αυτό το σύστημα, πρέπει να ελέγχεται η αντοχή του επεξεργασμένου εδάφους, για την περίπτωση που το επιπρόσθετο νερό έχει επηρεάσει το τελικό επιθυμητό προκύπτον έδαφος.

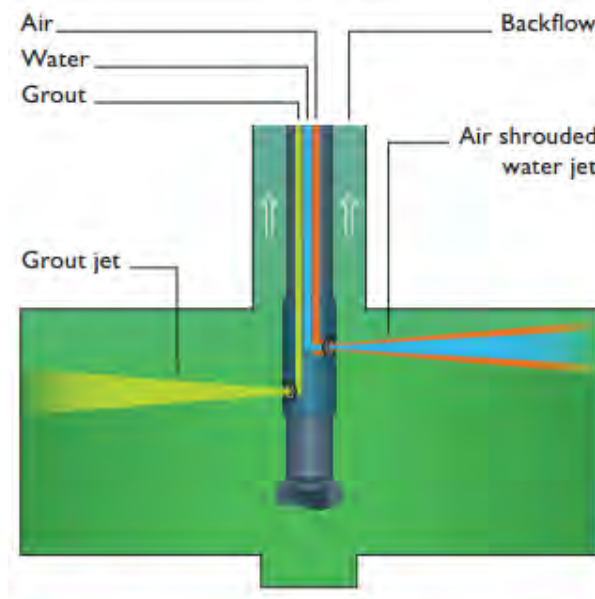


Σχήμα 2.22: Διπλό σύστημα έγχυσης με τη χρήση ενέματος και αέρα

- **Νερό + Αέρας + Ένεμα (triple fluid system)**

Σε αυτό το σύστημα (Σχ. 2.23), η χαλάρωση και η απομάκρυνση του εδάφους πραγματοποιούνται από πίδακες νερού και αέρα, ανεξάρτητα από την ενσωμάτωση του συνδετικού υλικού, το οποίο παρέχεται με ταυτόχρονη εκτόξευση χαμηλής πίεσης και ταχύτητας (σε μερικά MPa, περίπου 15 bar) από ένα άλλο ανεξάρτητο ακροφύσιο που βρίσκεται πιο χαμηλά (ταχύτητα εξόδου ≥ 100 m/s). Στο τριπλό σύστημα ο κοπτήρας χρησιμοποιεί νερό αντί για ένεμα, μαζί με πεπιεσμένο αέρα ενώ το ένεμα ψεκάζεται ξεχωριστά μέσω ενός ακροφυσίου που βρίσκεται σε χαμηλότερο σημείο και σε πολύ μικρότερη πίεση για να αναμειχθεί με το διαβρωμένο χώμα. Αυτό ουσιαστικά διαχωρίζει τη διαδικασία διάβρωσης από τη διαδικασία ενεμάτωσης και επιτυγχάνει καλύτερης ποιότητας τσιμεντοποιημένο έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση, η απόσταση κοπής ενισχύεται περαιτέρω λόγω του χαμηλότερου ιξώδους του νερού σε σύγκριση με εκείνο του ενέματος. Οι διάμετροι των τσιμεντοποιημένων πασσάλων κυμαίνονται από 0,9 m μέχρι και πάνω από 1,5 m. Αποτελεί το πιο αποτελεσματικό σύστημα για τα συνεκτικά εδάφη. Μία παραλλαγή του συνηθισμένου συστήματος τριπλού ρευστού, που ονομάζεται ενισχυμένο τριπλό σύστημα, προτάθηκε από τον Tsujita (1996). Στο ενισχυμένο σύστημα, τόσο το νερό όσο και το ένεμα εκτοξεύονται ταυτόχρονα υπό υψηλές πιέσεις (Shen κ.α 2009b), έτσι ώστε το έδαφος να υποβληθεί σε δύο στάδια διάβρωσης, αρχικά λόγω του πίδακα ύδατος, ακολουθούμενος από δευτερογενή διάβρωση λόγω του πίδακα ενέματος. Η έκθεση του εδάφους διπλά στη διαβρωτική δράση των ρευστών επιτρέπει τη δημιουργία ενός μεγαλύτερης διαμέτρου πασσάλου. Το τριπλό σύστημα χρησιμοποιείται κυρίως σε έργα ενίσχυσης και υποστήριξης εκσκαφών, σε εφαρμογές στεγανοποίησης, για έλεγχο του νερού του εδάφους, σε διαφραγματικούς τοίχους και στην ενίσχυση συνεκτικών εδαφών.

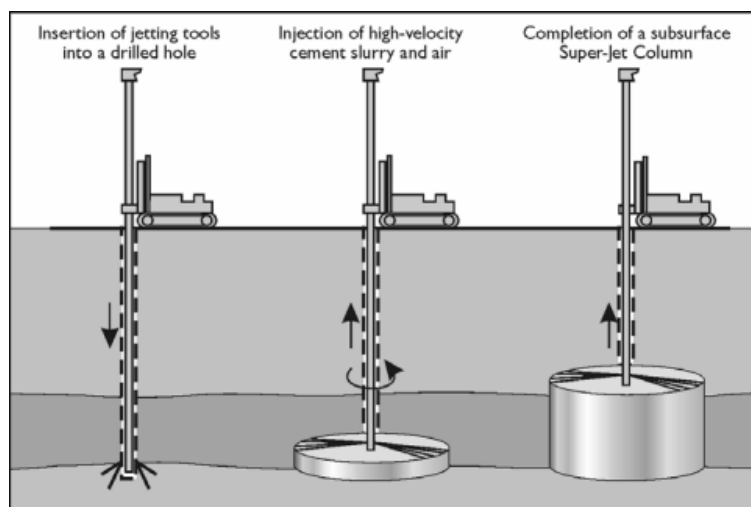
Περιγραφή της μεθόδου ενίσχυσης (Jet Grouting)



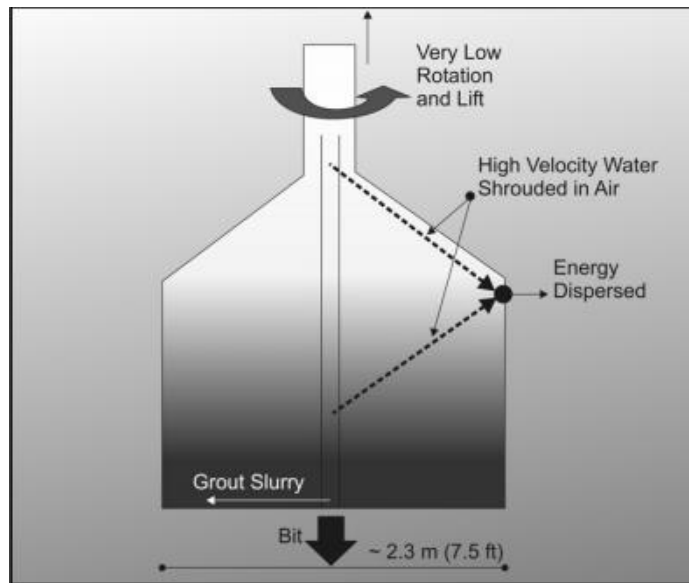
Σχήμα 2.23: Τριπλό σύστημα έγχυσης με τη χρήση ενέματος και νερού με αέρα

Οι απαιτήσεις στο χώρο της τεχνικής jet grouting εξελίσσονται συνεχώς, έτσι και στην αγορά, όπου τα συστήματα εδαφικής ανάμειξης βελτιώνονται συνεχώς. Τέτοιες καινοτομίες είναι:

- ✓ Η χρήση του λεγόμενου ‘Super Jet Grouting’, όπου το μόνιτορ έχει τροποποιηθεί και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας του εκτοξευόμενου ενέματος που διαβρώνει το έδαφος. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν πάσσαλοι με μεγαλύτερη διάμετρο.
- ✓ Η χρήση του ‘Crossjet Grouting’ το οποίο δημιουργεί πασσάλους με καλά προσδιορισμένη γεωμετρία.



Σχήμα 2.24: Σύστημα Super Jet Grouting για τη δημιουργία πασσάλων μεγαλύτερης διαμέτρου (Burke, 2004)



Σχήμα 2.25: Σύστημα Crossjet Grouting (Burke, 2004)

Τέλος, σημειώνεται ότι αντί για ένεμα, που χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις, μπορεί εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί μπετονίτης, στην περίπτωση που κύριο στόχο της ενεμάτωσης αποτελεί η μείωση της διαπερατότητας και η μείωση των υπογείων ροών.

2.4 Παράμετροι της εδαφικής ανάμειξης

Ο προσδιορισμός της ποιότητας της μεθόδου jet grouting βασίζεται κυρίως στην εμπειρία, η οποία συνδέει κάποιες βασικές παραμέτρους με τα ποικίλα είδη εδαφών. Όταν λαμβάνονται αυτές οι παράμετροι, συνδέονται με κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων οι τιμές λαμβάνονται κυρίως ηλεκτρονικά. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι:

- Η πίεση του ενέματος και ο ρυθμός ροής
- Η πίεση του νερού και ο ρυθμός ροής (εφόσον χρειάζεται)
- Η πίεση του αέρα και ο ρυθμός ροής (εφόσον χρειάζεται)
- Η ταχύτητα απόσυρσης των σωλήνων διάτρησης κατά τη διάρκεια της έγχυσης
- Ο τύπος του μόνιτορ και ο αριθμός των ακροφυσίων
- Η περιστροφή του σωλήνα γεώτρησης

Οι προαναφερθείσες παράμετροι ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται και τις ειδικές απαιτήσεις κάθε έργου. Οι τιμές που προτείνει ο κανονισμός EN 12716 (2001) είναι ενδεικτικές και παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Page 28
EN 12716:2001

Annex B
(informative)

Ranges of jet grouting parameters

The jet grouting parameters usually adopted for the different systems fall within the following ranges :

Jet grouting parameters	Single fluid	Double fluid (air)	Double fluid (water)	Triple fluid
Grout pressure (MPa)	30 to 50	30 to 50	> 2	> 2
Grout flow rate (l/min)	50 to 450	50 to 450	50 to 200	50 to 200
Water pressure (MPa)	N/A	N/A	30 to 60	30 to 60
Water flow rate (l/min)	N/A	N/A	50 to 150	50 to 150
Air pressure (MPa)	N/A	0,2 to 1,7	N/A	0,2 to 1,7
Air flow rate (m ³ /min)	N/A	3 to 12	N/A	3 to 12
N/A Not applicable.				

The disaggregating effect is obtained by the high velocity of the jet, mainly dependent on the pressure of the fluid used for the disaggregation : grout in single and double (air) fluid systems, water in double (water) and triple fluid systems.

For single and double (air) fluid systems, grout pressure usually ranges between 30 MPa and 50 MPa, as defined in the table above. Lower limits down to 10 MPa have also been adopted in particular cases, such as small diameter jet grouted columns in very loose soils.

NOTE The most recent developments in pumping equipment enable the pressure of the disaggregating fluid to reach up to 70 MPa or flow rates up to 650 l/min.

Σχήμα 2.26: Παράμετροι Jet Grouting σύμφωνα με τον κανονισμό EN 12716 (2001)

Περιγραφή της μεθόδου ενίσχυσης (Jet Grouting)

Είναι γεγονός ότι στο περιβάλλον της γεωτεχνικής μηχανικής αλλά και στην παγκόσμια αγορά, οι απαιτήσεις και τα προβλήματα πληθαίνουν και μεταβάλλονται συνεχώς, και αυτό αποτελεί πρόκληση για κάθε μηχανικό ο οποίος καλείται να προσαρμόζεται στις αλλαγές και να επιλέγει κάθε φορά τις κατάλληλες παραμέτρους για κάθε έργο που αντιμετωπίζει.

Ο Burke (2004) πρότεινε τιμές για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, που βρίσκονται στον επόμενο πίνακα:

		Single Fluid	Double Fluid	Triple Fluid
Water	Pressure (bar)	na	na	300 – 400
	Volume (l/min)	na	na	80 – 200
	No. Nozzles	na	na	1 – 2
	Nozzle Sizes (mm)	na	Na	1.5 – 3.0
Air	Pressure (bar)	na	7 – 15	7 – 15
	Volume (m ³ /min)	na	8 – 30	4 – 15
Grout Slurry	Pressure (bar)	400 – 700	300 – 700	7 – 100
	Volume (l/min)	100 – 300	100 – 600	120 – 200
	Density (S.G)	1.25 – 1.6	1.25 – 1.8	1.5 – 2.0
	No. Nozzles	1 – 6	1 – 2	1 – 3
	Nozzle Sizes (mm)	1.0 – 4	2 – 7	5 – 10
Lift	Step Height (cm)	0.5 – 60	2.5 – 40	2 – 5
	Step Time (sec)	4 – 30	4 – 30	4 – 20
Rotation	Speed (rpm)	7 – 20	2 – 20	7 – 15

Πίνακας 2.1: Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων έγχυσης για κάθε σύστημα (Burke, 2004)

Άλλες ενδεικτικές τιμές που προτείνονται σε βιβλιογραφία και σε εταιρείες που αναλαμβάνουν τέτοιου είδους έργα παρατίθενται στη συνέχεια:

Συγκριτικός πίνακας		SINGLE FLUID SYSTEM	DOUBLE FLUID SYSTEM
Μέγεθος ακροφυσίων (Nozzle sizes)			
Νερό (Water, Pre-Washing)	mm	(1,8-2,4)	(1,8-2,4)
Ένεμα (grout)	mm	2-4,5	2-8,0
Αριθμός ακροφυσίων (Nozzle numbers)			
Νερό (Water, Pre-Washing)	-	1	1
Ένεμα (grout)	-	1-8,0	1-8,0
Ταχύτητα περιστροφής του σωλήνα γεώτρησης (Rods rotation speed)			
	rpm	5,0-30	5,0-30
Διάμετρος στηλών (Column diameter)			
Χαλικώδη/Αμμώδη εδάφη	m	0,6-1	1,2-3
Αργιλώδη εδάφη	m	0,5-1	1,2-2
Λόγος νερού προς τσιμέντου (Water-Cement ratio)			
		1,2-0,5	1,2-0,5
Κατανάλωση τσιμέντου (Cement consumption)			
Ανά μονάδα όγκου επεξεργασμένου εδάφους (Per volume of treated soil)	kg/m ³	400-800	400-800
Αντοχή τσιμεντοποιημένου εδάφους (Soilcrete strength)			
Χαλικώδη/Αμμώδη εδάφη	kg/cm ²	40-300	55-250
Αργιλώδη εδάφη	kg/cm ²	15-70	15-60

Πίνακας 2.2: Τιμές παραμέτρων έγχυσης (Casagrande, Jet Grouting Equipment)

Typical parameters used during jet-grouting operations		
Parameter	Range	Typical
Borehole diameter (mm)	76–115	
Number of jets	2–4	
Nozzle diameter (mm)	1.5–3	2
Grout pump pressure (MPa)	30–60	40
Grout mix (water:cement)	0.8–2.0:1	1:1
Drilling rod rotation rate (RPM)	10–20	15
Withdrawal rate (m/min)	0.25–0.5	0.4
Grout injection rate (m ³ /h)	5–8	

Πίνακας 2.3: Τιμές παραμέτρων της διαδικασίας βαθιάς εδαφικής ανάμιξης (Burke, 2004)

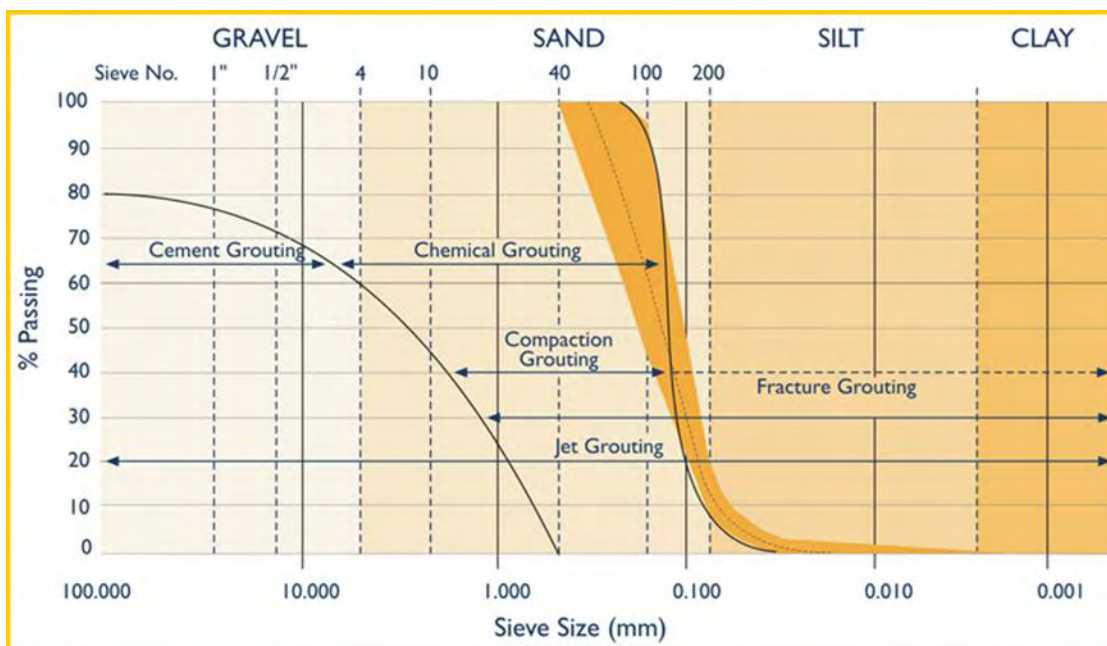
Κεφάλαιο 3

Εφαρμογές εισπίεσης - εδαφικής ανάμειξης (Jet Grouting)

3.1 Γενικά στοιχεία

Αν και αναφέρθηκαν πολλές από τις εφαρμογές της μεθόδου jet grouting, θα παρατεθούν πιο αναλυτικά τα κύρια έργα στα οποία γίνεται χρήση της τεχνικής αυτής, καθώς και κίνδυνοι που αποτρέπονται.

Με τη χρήση της μεθόδου jet grouting είναι δυνατή η βελτίωση πολλών ειδών εδαφών από χαλικώδη μέχρι και αργιλικά, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Η κύρια διαφορά της μεθόδου από τις υπόλοιπες κλασικές μεθόδους έγχυσης, έγκειται στο γεγονός ότι η κατάλληλη ποσότητα του σταθεροποιητή (ένεμα κατά κύριο λόγο) μπορεί να εισαχθεί πριν ξεκινήσει η διεργασία. Ως εκ τούτου, τα τελικά αποτελέσματα, όσον αφορά την αντοχή και τη διαπερατότητα καθώς και το οικονομικό κόστος, μπορούν να εκτιμηθούν κατά μεγάλο ποσοστό εκ των προτέρων. Ο τρόπος αυτός βελτίωσης παράγει ένα επεξεργασμένο έδαφος το οποίο ελέγχεται πιο εύκολα από την αρχική δομή του εδάφους. Μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και σε μη ομογενή εδάφη και σχηματισμούς καθώς και σε εδάφη με εναλλασσόμενα εδαφικά στρώματα με περιεκτικότητα σε οργανικά στοιχεία. Μαλακοί σχηματισμοί βράχου μπορούν να επεξεργαστούν, αλλά και εδάφη με μέγεθος κόκκων μέχρι και 300 mm μπορούν να βελτιωθούν (Racansky, 2008).



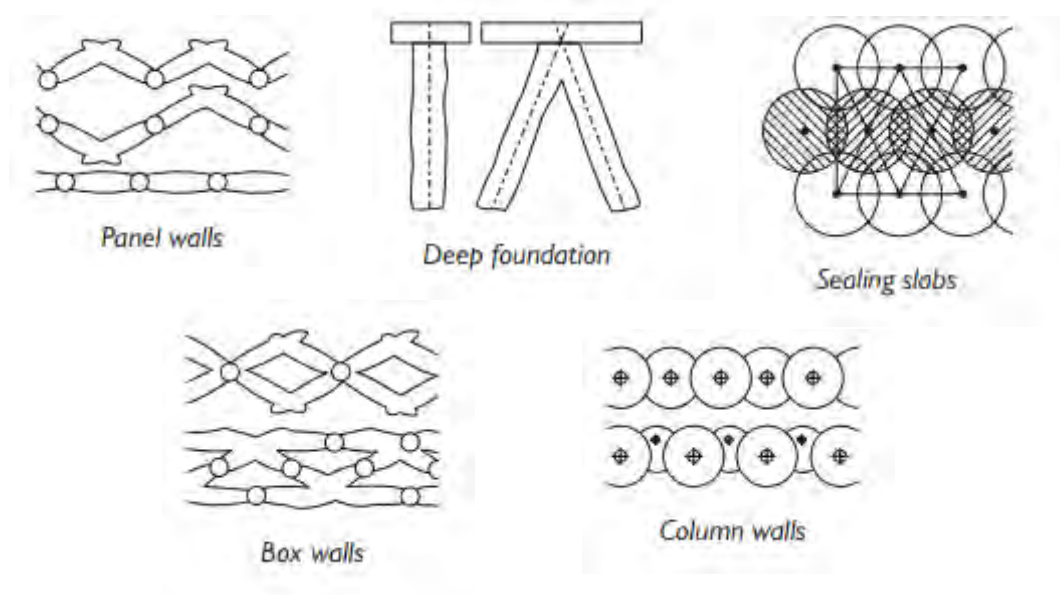
Σχήμα 3.1: Εύρος εφαρμογής των μεθόδων ενίσχυσης εδάφους σε κοκκομετρικές καμπύλες εδαφών

Με τη μέθοδο αυτή, δίνεται η δυνατότητα σχηματισμού τσιμεντοποιημένου εδάφους ακόμα και σε περιορισμένο χώρο με την ύπαρξη υπόγειων εμποδίων, κάτι που την κάνει ευέλικτη και εφαρμόσιμη σε μεγάλο εύρος κατασκευών. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους σταθεροποίησης και βελτίωσης εδάφους, η τεχνική jet grouting μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη στεγανοποίηση όλων των ειδών του εδάφους που κυμαίνονται από χαλαρά ιζήματα μέχρι και αργιλικά εδάφη.

Η πιθανότητα υπερπίεσης εδαφικών ζωνών και ανύψωσης του εδάφους είναι πρακτικά περιορισμένη καθώς το μίγμα αέρα-νερό-ένεμα είναι μικρότερης πυκνότητας και μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα προς την επιφάνεια του εδάφους (spoil).

Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα διάτρησης θεωρητικά σε μεγάλο βάθος, διάταξης και κατανομής των σχηματιζόμενων στηλών τσιμεντοποιημένου εδάφους με πολλούς τρόπους, προσαρμοσμένους στην εκάστοτε κατασκευή ανάλογα με τις διαστάσεις και το σχήμα της. Δεν προκαλεί θορύβους, δονήσεις ή χρήση βαρέων οχημάτων σε συνεχή κίνηση όπως άλλες μέθοδοι (δυναμική συμπίκνωση, προφόρτιση). Αποτελεί μια γρήγορη, ασφαλή, αποτελεσματική και σχετικά μικρού κόστους μέθοδο ενίσχυσης εδάφους

Η διάταξη των πασσάλων τσιμεντοποιημένου εδάφους για κάθε εφαρμογή (επίπεδοι διαφραγματικοί τοίχοι, ενίσχυση βαθιών θεμελιώσεων, υδατοστεγανές πλάκες, τοίχοι από πασσάλους) φαίνεται παρακάτω (Σχ. 3.2):



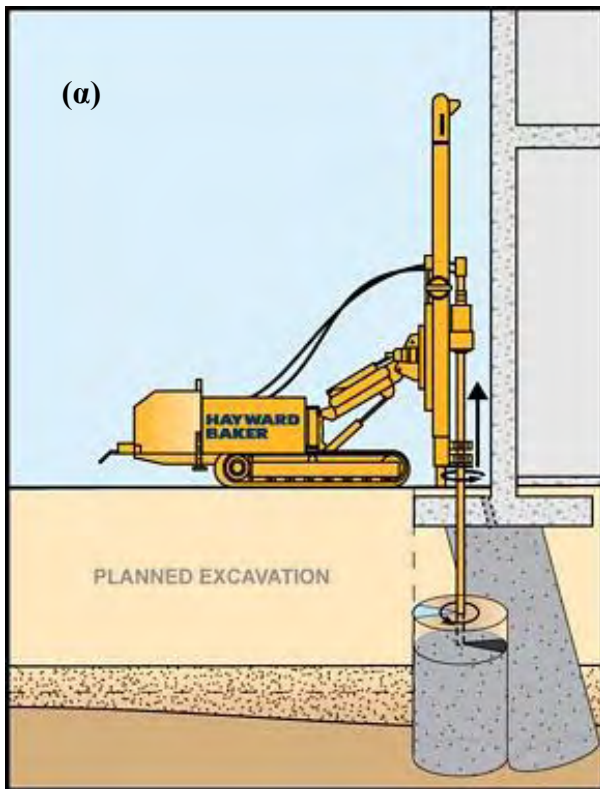
Σχήμα 3.2: Διατάξεις πασσάλων ανάλογα την εφαρμογή της μεθόδου Jet Grouting

3.2 Κατασκευές με εφαρμογή της μεθόδου jet grouting

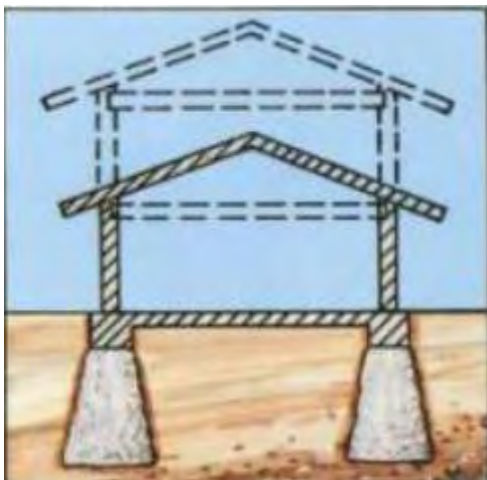
3.2.1 Υποστήριξη υφιστάμενων κατασκευών με ενίσχυση της θεμελίωσης

Η υποστήριξη αυτή έχει ως σκοπό να σταματήσει ή να αναστείλει τις μετακινήσεις των κατασκευών, οι οποίες ενδεχομένως μπορεί να τις καταστήσουν ακατάλληλες. Οι μη αποδεκτές μετακινήσεις προκύπτουν λόγω ασθενών εδαφών, στερεοποίησης ή συμπίεσης του εδάφους κάτω από τη θεμελίωση. Η υποστήριξη αυτή με τη χρήση της εδαφικής ανάμειξης περιλαμβάνει την κατασκευή μιας δομής από βελτιωμένο έδαφος κάτω από την κατασκευή, έτσι ώστε τα φορτία της κατασκευής να μεταφέρονται σε βάθος. Το ένεμα εισάγεται ως ρευστό και στερεοποιείται στη συνέχεια και έτσι βελτιώνεται η δυσκαμψία, η αντοχή καθώς και η αντίσταση στη διάβρωση. Η ενεμάτωση μπορεί να γίνεται συνεχώς και επαναλαμβανόμενα, κάτι που καθιστά τη διαδικασία ευπροσάρμοστη στη θέση της επέμβασης και στο μέγεθος του τμήματος εδάφους που θα υποστεί επεξεργασία. Η κατεύθυνση της ροής της έγχυσης στα φυσικά εδάφη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των εδαφών. Οι διαδικασίες έγχυσης, ωστόσο, έχουν εξελιχθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μην εξαρτώνται καταλυτικά από μικρές ιδιαιτερότητες των εδαφών κάτι που βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της υποστήριξης με τη μέθοδο jet grouting. Καθώς οι ιδιότητες του επεξεργασμένου εδάφους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ομοιομορφία της κατανομής του ενέματος, η επίτευξη μιας ομοιόμορφα κατανεμημένης έγχυσης είναι πολύ σημαντική. Τα πέδιλα θεμελίωσης που πρέπει να υποστηριχτούν απαιτούν τοπικές επεμβάσεις στις περιοχές που παρουσιάζουν υψηλές τάσεις και φορτία (Σχ. 3.3α). Αυτό γίνεται με την έγχυση ενέματος και δημιουργία πασσάλων τσιμεντοποιημένου εδάφους με τη βοήθεια αγκυρίων (Σχ. 3.5), όπως φαίνεται και στο σχήμα. Όταν η υποστήριξη πραγματοποιείται δίπλα σε μια εκσκαφή, το νέο τσιμεντοποιημένο έδαφος που δημιουργείται πρέπει να σχεδιάζεται ανάλογα και να ελέγχεται ως προς τα νέα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμορφωσιμότητας. Υπάρχει και οικονομική σχέση ανάμεσα στη δημιουργία ενός στηρίγματος βαρύτητας (gravity underpin), το οποίο είναι αυτουποστηριζόμενο και σταθερό, και σε ένα υποστηριζόμενο σώμα όπου η ανατροπή και η ολίσθηση περιορίζονται με αγκύρια.

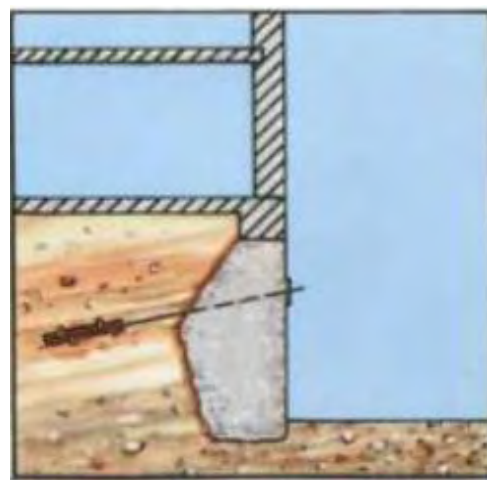
Η μέθοδος jet grouting επιλέγεται ως εναλλακτική μέθοδος υποστήριξης, καθώς το κόστος εφαρμογής είναι παραπλήσιο με άλλες μεθόδους, ενώ η εφαρμογή της δεν είναι χρονοβόρα. Επιπρόσθετα, παρέχει πέραν της μόνιμης υποστήριξης της κατασκευής, υποστήριξη και κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, ελαχιστοποιώντας τις καθιζήσεις των γειτονικών κατασκευών. Δημιουργούνται τοίχοι από πασσάλους τσιμεντοποιημένου εδάφους, οι οποίοι χρησιμεύουν και ως εμπόδια σε περιπτώσεις υπόγειας διαρροής, ενώ παράλληλα μπορούν να κατασκευαστούν σε περιορισμένους χώρους εργασίας. Αυτό σημειώνεται, καθώς η οπή της γεώτρησης είναι μόλις μερικών εκατοστών, ενώ η διάμετρος των πασσάλων που επιτυγχάνεται είναι της τάξης ή και αισθητά μεγαλύτερη του ενός μέτρου.



Σχήμα 3.3: α) Ενίσχυση πεδίου θεμελίωσης β) Ενίσχυση υπάρχουσας κατασκευής



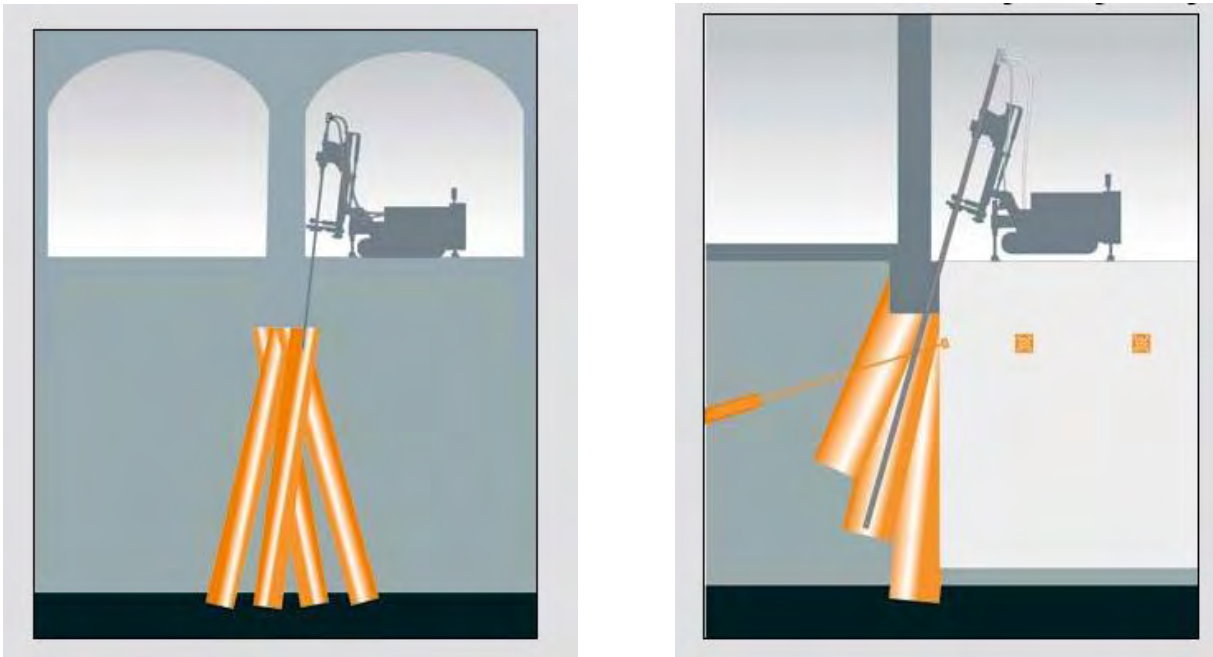
Σχήμα 3.4: Σχηματική ενίσχυση θεμελίωσης



Σχήμα 3.5: Σχηματική ενίσχυση θεμελίωσης με τη χρήση αγκυρίων

Στην περίπτωση ιστορικών κτιρίων, που υπάρχει μεγάλη πιθανότητα καθιζήσεων, χρησιμοποιείται η εδαφική ανάμειξη για ενίσχυση της ήδη υπάρχουσας θεμελίωσης, η οποία παρέχει μεγάλη κατασκευαστική προστασία.

Το κύριο στοιχείο της ενίσχυσης της θεμελίωσης με jet grouting αποτελεί η μεταφορά των φορτίων σε βαθύτερες εδαφικές στρώσεις με καλύτερα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας. Έτσι, προκύπτουν δύο διαφορετικοί τύποι ενίσχυσης εδάφους. Στην πρώτη περίπτωση οι πάσσαλοι επικαλύπτονται ή βρίσκονται πολύ κοντά ο ένας στον άλλο και σχηματίζουν μια δομή (jet grouted block) που είναι κατασκευασμένη από το νέο υλικό τσιμεντοποιημένου εδάφους (Croce κα, 1990). Στη δεύτερη περίπτωση, δημιουργείται διάταξη από απομονωμένους πασσάλους και σχηματίζουν ένα σύστημα δομικών στηριγμάτων παρόμοια με τη θεμελίωση από πασσάλους (Modoni και Bzowka, 2012). Και στις δυο περιπτώσεις οι πάσσαλοι μπορούν να ενισχυθούν με χαλύβδινα πλαίσια για την αύξηση της αντίστασης σε αξονικά φορτία και καμπτικές ροπές.



Σχήμα 3.6: α) Υποστήριξη υφιστάμενης κατασκευής με τη δημιουργία εδαφοπασσάλων β) Ενίσχυση της θεμελίωσης με τη δημιουργία τοίχου από ακυρωμένους εδαφοπασσάλους και ταυτόχρονη ασφάλιση της γειτονικής κατασκευής

3.2.2 Έλεγχος του υπόγειου νερού του εδάφους

3.2.2.1 Αλληλοτεμνόμενοι πάσσαλοι

Εφαρμογές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της εδαφικής ανάμειξης είναι και αυτές που αφορούν τον έλεγχο του νερού στο έδαφος. Τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν την παρεμπόδιση της ροής του νερού είτε μέσω των πλευρών είτε στη βάση της εκσκαφής, τον έλεγχο του υπόγειου νερού κατά την κατασκευή σηράγγων, την παρεμπόδιση ή τη μείωση της διαρροής του νερού μέσω κατασκευών συγκράτησης νερού, όπως το φράγμα, και τέλος την αποτροπή ή τη μείωση της ρύπανσης στο έδαφος.

Τις δυο τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται ένας αυξανόμενος αριθμός εκσκαφών που γίνονται σε εδάφη με παρουσία νερού. Η χρήση συμβατικών τεχνικών μείωσης του νερού του εδάφους περιορίστηκε ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης σημασίας του οικονομικού ελέγχου του νερού, του περιβάλλοντος, του υδροφόρου ορίζοντα και της προστασίας των υπάρχοντων κτιρίων. Τα συμβατικά χημικά συστήματα έγχυσης έχουν αντικατασταθεί πλήρως από τις τεχνικές εδαφικής ανάμειξης, όπου η χρήση ενέματος από τσιμέντο μειώνει την αλκαλικότητα.

Κατασκευάζονται οριζόντιοι και κάθετοι τοίχοι για την επίτευξη στεγανότητας (Σχ. 3.7α, 3.7β). Η διαπερατότητα των πασσάλων είναι 10^{-9} – 10^{-10} , ενώ η διαπερατότητα του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 10^{-7} – 10^{-8} . Η εκσκαφή δεν μπορεί να ξεκινήσει μέχρι να επιτευχθεί ο επιτρεπτός ρυθμός ροής. Η ενδεχόμενη διαρροή είναι αποτέλεσμα ελαττώματος στον τοίχο ή στην πλάκα ή στις συνδέσεις μεταξύ των τοίχων και του κάτω μέρους (bottom seal).

Η ανίχνευση και η τοποθεσία των διαρροών είναι πολύ δύσκολη και ορισμένες φορές αδύνατη. Οι απαραίτητες διεργασίες για την αντιμετώπιση των διαρροών είναι συνήθως χρονοβόρες και πολύ ακριβές, γι' αυτό και ο πρωταρχικός σχεδιασμός και η κατασκευή στοιχείων στεγανότητας με τη χρήση jet grouting είναι πολύ σημαντικά για την επιτυχία του έργου. Ο σχεδιασμός απαιτεί τον προσδιορισμό της επαρκούς αντοχής, ελάχιστης διαπερατότητας, ομοιογένειας και ακρίβειας στη διαστασιολόγηση. Τα σφάλματα που μπορούν να γίνουν, συμβαίνουν ως αποτέλεσμα:

- Της ανεπαρκούς επικάλυψης των εδαφοπασσάλων
- Της ανομοιογένειας του εδάφους
- Της αστάθειας και της επακόλουθης κατάρρευσης των τσιμεντοποιημένων πασσάλων πριν εγκατασταθούν
- Των ελλείψεων, των σφαλμάτων και των διακοπών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας

Σημειώνεται ότι η ολοκληρωμένη δομή του νέου τσιμεντοποιημένου εδάφους δεν είναι ομοιογενής και γι' αυτό δεν παρουσιάζει μια σταθερή αντοχή ή συγκεκριμένα

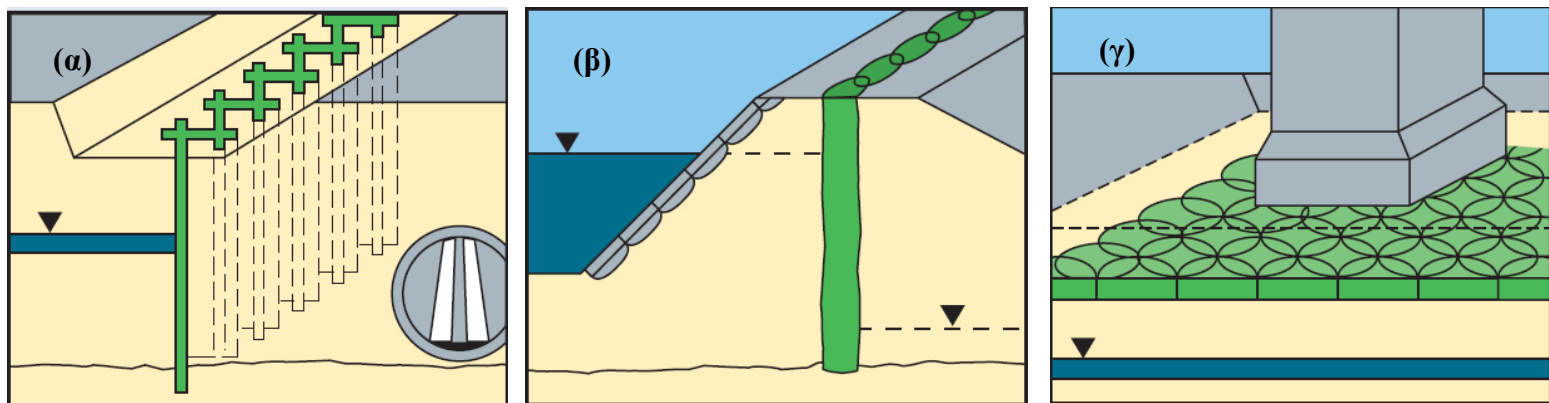
υδραυλικά χαρακτηριστικά. Ο σχεδιασμός και ο έλεγχος ποιότητας πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την κατανομή της αντοχής και της διαπερατότητας, εξαιτίας της μεταβλητότητας του εδάφους που έγκειται σε επεξεργασία.

Οι οριζόντιοι τοίχοι κατασκευασμένοι από το τσιμεντένεμα στις βαθιές εκσκαφές πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται λαμβάνοντας υπ' όψιν τα εξής:

- Το ελάχιστο πάχος της πλάκας να μην είναι μικρότερο από 1m και να αυξάνεται κατά 0,1m για κάθε μέτρο που ξεπερνά τα 10m βάθος.
- Οι μεγάλες περιοχές των πλακών να χωρίζονται σε τμήματα των 2000 m².
- Αύξηση του πάχους της πλάκας στα σημεία που γειτνιάζει με κάθετους τοίχους.
- Αποφυγή διαφορετικών ανυψώσεων της πλάκας σε ένα τμήμα.
- Αποφυγή τοποθέτησης πλάκας σε ακατάλληλες συνθήκες εδάφους.
- Αποφυγή πλακών με αγκύρια.

Όσον αφορά τους κάθετους τοίχους συνιστώνται παρόμοια μέτρα:

- Εφαρμογές με πίεση νερού που ξεπερνούν τα 5m απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή (προσεκτικός σχεδιασμός, κατάλληλες διαδικασίες ελέγχου, σχέδιο άμεσης ανάγκης).
- Η αναγνώριση εδαφών που ενδεχομένως διαβρωθούν μετά από διαρροή.
- Ιδιαίτερη προσοχή όταν απαιτούνται αγκύρια.



Σχήμα 3.7: α) Επίπεδος τοίχος για την παρεμπόδιση του υπόγειου νερού (κάτω από δρόμους και κτίρια) β) Διαφραγματικός τοίχος χαμηλής διαπερατότητας γ) Πλάκα προστασίας από υπόγεια διαρροή κάτω από κατασκευή

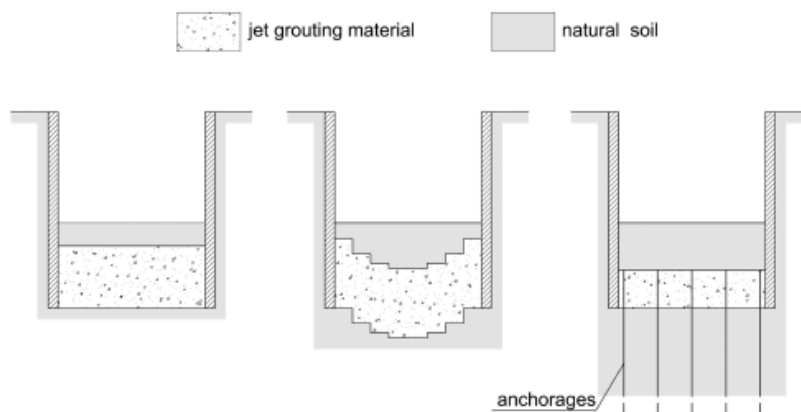
3.2.2.2 Στεγανοποίηση πυθμένα

Στην περίπτωση των διαπερατών και μη τσιμεντοποιημένων εδαφών, οι υπόγειες εκσκαφές μπορούν να γίνουν στεγανοποιώντας τον πυθμένα με μερικώς επικαλυπτόμενους τσιμεντοποιημένους εδαφοπασσάλους. Αυτοί οι πάσσαλοι εξασφαλίζουν προσωρινή στεγανότητα κατά την εκσκαφή και επαρκή αντίσταση στα φορτία του νερού. Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνολογίας της μεθόδου jet grouting, για αυτή την εφαρμογή, είναι η δυνατότητα απόκτησης μεταβλητών παχών ή σχημάτων σε τέτοιες κατασκευές προσαρμόζοντας τη γεωμετρία των πασσάλων με σκοπό την αντίσταση στην ανύψωση που μπορεί να προκληθεί. Ο σχεδιασμός αυτών των κατασκευών που ονομάζονται bottom plugs πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη:

- 1) την ισορροπία της ανύψωσης της πλάκας στεγανοποίησης ή ολόκληρης της κατασκευής
- 2) την κατασκευαστική συμπεριφορά της πλάκας στεγανοποίησης
- 3) την εισροή νερού μέσω πιθανών ασυνεχειών της τσιμεντοποιημένης μάζας

Το αποτέλεσμα από τους παραπάνω ελέγχους είναι το κατάλληλο πάχος της πλάκας και η κατάλληλη διάταξη των πασσάλων σε απόσταση μεταξύ των αξόνων τους (s) μικρότερη από τη διάμετρό τους (D). Στην ιδανική περίπτωση τέλειων κυλινδρικών και κάθετων πασσάλων, αυτές οι ποσότητες μπορούν εύκολα να βρεθούν προσδιορίζοντας το μήκος τους με απλές εξισώσεις ισορροπίας.

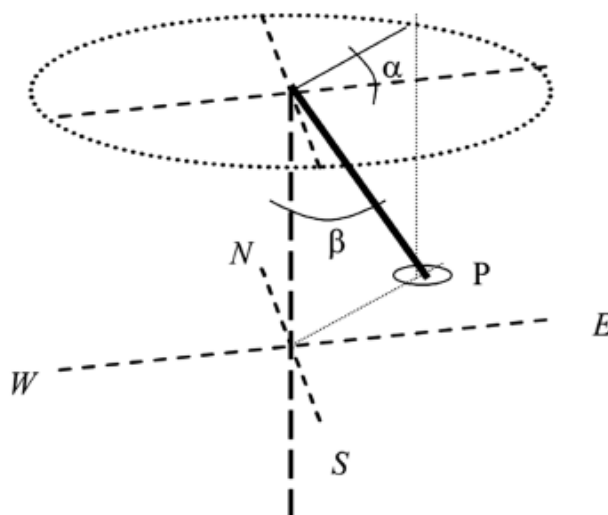
Ωστόσο, τα γεωμετρικά σφάλματα δεν κάνουν τους πασσάλους ομογενή κυλινδρικά σώματα και οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων των τσιμεντοποιημένων πασσάλων εδάφους κάνουν την επιλογή του λόγου s/D όχι τόσο εύκολη. Η κατάσταση γίνεται πιο κρίσιμη, καθώς οι πάσσαλοι πρέπει να δημιουργηθούν με έγχυση από την επιφάνεια του εδάφους πριν την εκσκαφή και εξαιτίας της όχι τόσο ακριβούς τοποθέτησης στο επίπεδο του εδάφους ή των αποκλίσεων από την καθετότητα της γεώτρησης, η πραγματική θέση μπορεί να διαφέρει από την ιδανική από το πάνω μέρος της πλάκας.



Σχήμα 3.8: Παραδείγματα bottom plugs με jet grouting: **α)** ενιαία τσιμεντοποιημένη μάζα **β)** σε μορφή ανεστραμμένου τόξου **γ)** με τη βοήθεια αγκυριών, (Design of excavation bottom plugs, Modoni, Flora, Lirer, Ochmanski, Croce)

Ανεξάρτητα από το γεγονός ότι η μέθοδος jet grouting χρησιμοποιείται ευρέως, υπάρχει ακόμα αβεβαιότητα σε σχεδιαστικό επίπεδο εξαιτίας της έλλειψης αξιόπιστων μεθόδων πρόβλεψης της διαμέτρου και της θέσης των σχηματιζόμενων πασσάλων εδάφους, κάτι που θα αναλυθεί παρακάτω ενδελεχώς. Η διάμετρος D των τσιμεντοποιημένων πασσάλων εδάφους σπάνια είναι σταθερή, λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ της διαβρωτικής δράσης του ενέματος και της αντίστασης του φυσικού εδάφους. Εκτός από την περίπτωση του στρωματοποιημένου υπεδάφους, μεταβαλλόμενες διαμέτροι παρατηρούνται γενικά και σε σχετικά ομοιογενή στρώματα. Μαζί με τη μείωση της διαμέτρου με το βάθος, που προκαλείται από την αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους, οι διαμέτροι μπορούν να ποικίλουν σημαντικά εξαιτίας των τοπικών αλλαγών στη σύνθεση του υπεδάφους. Οι μεταβολές εξαρτώνται από τον τύπο εδάφους και μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές συνέπειες στη συμπεριφορά της κατασκευής και δεν μπορούν να παραβλεφθούν.

Ο δεύτερος σημαντικός παράγοντας για την εξασφάλιση της συνέχειας της πλάκας είναι η θέση των σχηματιζόμενων πασσάλων τσιμεντοποιημένου εδάφους. Ακόμα και αν οι πάσσαλοι κατασκευάζονται με τη μέγιστη ακρίβεια, ο άξονας τους αποκλίνει και μερικές φορές σημαντικά από την προκαθορισμένη κατεύθυνση. Για τους κάθετους πασσάλους, η απόκλιση μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από δυο γωνίες. Η μια είναι το αζιμούθιο α από 0° - 180° και η άλλη είναι η κλίση β από -90° ως 90° . Το α ακολουθεί γενικά ομοιόμορφη κατανομή. Όσον αφορά το β , μια γκαουσιανή καμπύλη μπορεί να μοντελοποιήσει τη μεταβολή της γωνίας (Flora κα 2007).



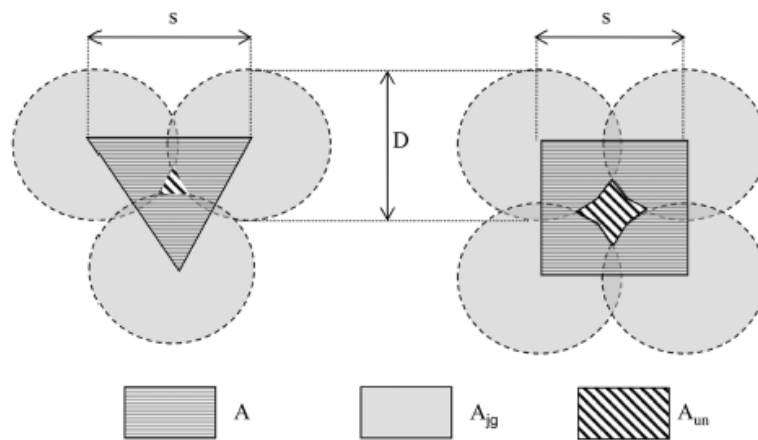
Σχήμα 3.9: Απόκλιση των πασσάλων από την προκαθορισμένη θέση: Γωνία κλίσης β , αζιμούθιο α

Οι μεγαλύτερες τιμές της γωνίας β παρατηρούνται σε εξαιρετικά μη επιθυμητές συνθήκες, όπως χαμηλής ποιότητας εξοπλισμό, όταν δεν έχει μετρηθεί η κλίση της γεώτρησης ή όταν υπάρχει μεγάλη ετερογένεια στο έδαφος.

Για ένα δοθέν πλάνο στοίχισης των τσιμεντοποιημένων πασσάλων εδάφους, είναι χρήσιμο να προσδιοριστεί ένας λόγος επιφάνειας Ω για να υπολογίζει την πιθανή ύπαρξη μη επεξεργασμένων περιοχών του νέου εδάφους (Σχέση (1)).

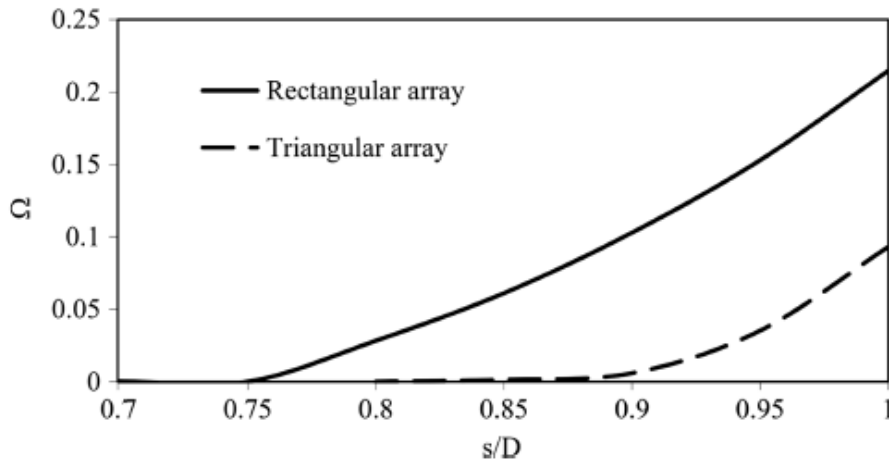
$$\Omega = \frac{A_{un}}{A} \quad (1)$$

Όπου A είναι η περιοχή που περιλαμβάνεται από τις ευθείες που ενώνουν τα κέντρα των στηλών του νέου εδάφους όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.10) και A_{un} είναι η περιοχή που δεν έχει επεξεργαστεί.



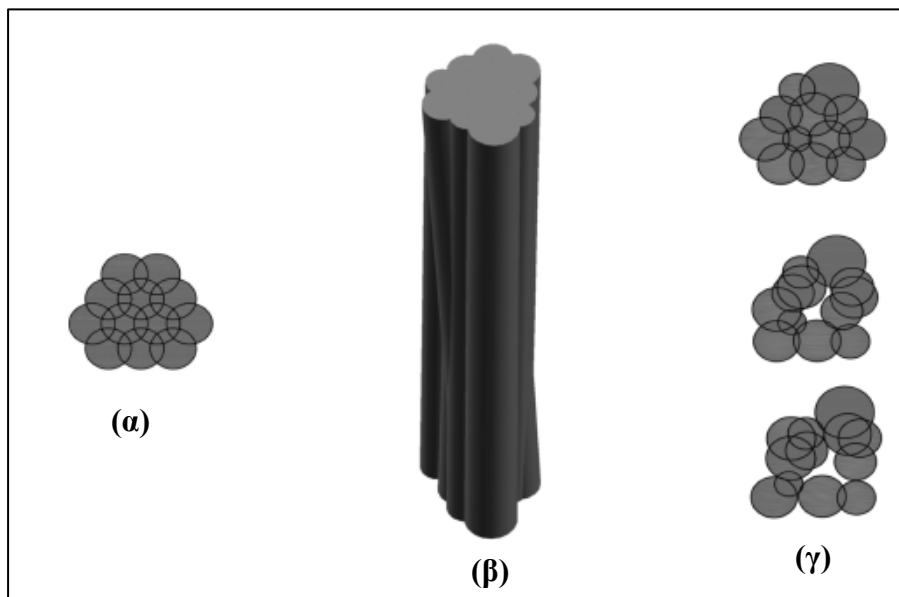
Σχήμα 3.10: Ισόπλευρες τριγωνικές και τετραγωνικές διατάξεις πασσάλων (χωρίς γεωμετρικά σφάλματα), (Design of excavation bottom plugs, Modoni, Flora, Lirer, Ochmanski, Croce)

Η ισόπλευρη τριγωνική διάταξη είναι πιο βολική από την τετραγωνική καθώς διατηρείται η συνέχεια σε μεγαλύτερο μέρος ($s/D=0,87$). Από οικονομική άποψη, η τριγωνική διάταξη είναι πιο συμφέρουσα, καθώς χρησιμοποιείται λιγότερο υλικό. Στην περίπτωση των ιδανικών σχηματιζόμενων πασσάλων εδάφους (μη διαπερατοί, κυλινδρικοί, κάθετοι), θα πρέπει να δίνουν λόγο s_0/D ώστε $\Omega=0$ (όπου s_0 είναι η απόσταση στο επίπεδο του εδάφους), ώστε να αποκτηθεί στεγανότητα κατά μήκος της πλάκας. Ωστόσο, εξαιτίας των σφαλμάτων το Ω μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 0 για μικρή απόσταση ($s_0/D < 0,87$ για την τριγωνική διάταξη), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.11).



Σχήμα 3.11: Λόγος Ω της μη επεξεργασμένης περιοχής των πλακών (Design of excavation bottom plugs, Modoni, Flora, Lirer, Ochmanski, Croce)

Το ποσοστό των πλακών που εμφανίζουν ασυνέχειες ($\Omega > 0$) αυξάνεται με το s_0/D , αλλά υπάρχει πιθανότητα να προκύψουν μερικώς επεξεργασμένες πλάκες με $\Omega > 0$ ακόμα και αν οι τιμές της απόστασης s_0/d είναι μικρότερες από το θεωρητικό όριο $s_0/D = 0,87$. Παρακάτω παρουσιάζεται η αναπαράσταση τμήματος της πλάκας, στο σχήμα α είναι η ιδανική διατομή και διάταξη των πασσάλων, στα σχήματα β και γ παρουσιάζονται η τρισδιάστατη μορφή πασσάλων με λανθασμένη διάταξη και η διατομή της διάταξης αυτής σε διάφορα βάθη αντίστοιχα (Σχ. 3.12).

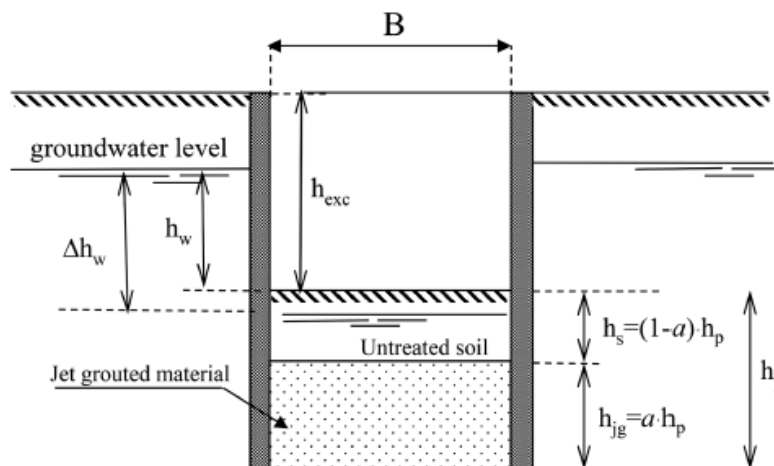


Σχήμα 3.12: Αναπαράσταση τμήματος της πλάκας στεγανοποίησης από την ανάλυση: α) Κάτοψη πασσάλων στην ιδανική περίπτωση β) Τρισδιάστατη αναπαράσταση πασσάλων μιας πλάκας με γεωμετρικά σφάλματα γ) Κατόψεις πασσάλων σε διαφορετικά βάθη (Design of excavation bottom plugs, Modoni, Flora, Lirer, Ochmanski, Croce)



Σχήμα 3.13: Σχεδιασμός του εκτιμώμενου εύρους και διάστασης των πασσάλων από την επιφάνεια της εκσκαφής

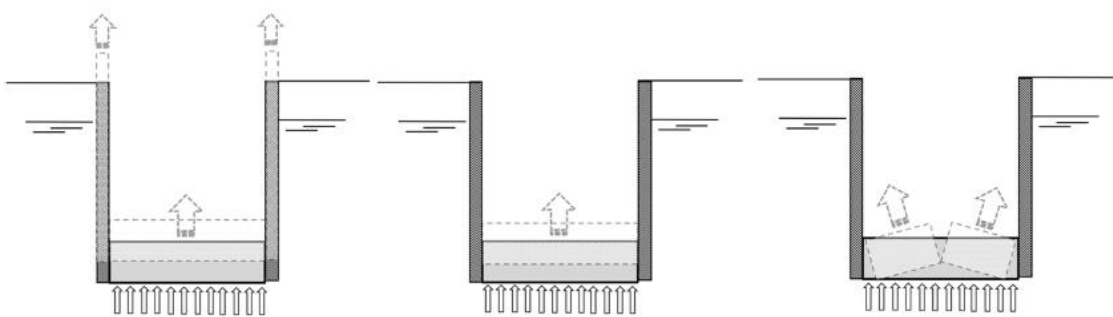
Λαμβάνοντας υπόψη την κύρια λειτουργία της πλάκας, η οποία αποτρέπει την εισροή νερού στον πυθμένα της εκσκαφής, οι στόχοι σχεδιασμού πρέπει να είναι σύμφωνα με τις οριακές καταστάσεις Ultimate Limit State (ULS) και Serviceability Limit State (SLS). Στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.14) φαίνεται η διατομή μιας εκσκαφής (h_{exc}) που στον πυθμένα της βρίσκεται η πλάκα, το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα (h_w). Η πλάκα στον πυθμένα πρέπει να έχει ένα πάχος h_p ώστε να παρέχει ένα περιθώριο ασφάλειας για την ισορροπία από ανύψωση. Το τιμεντοποιημένο τμήμα της πλάκας (h_{jg}), για το οποίο το κόστος πρέπει να παραμένει όσο γίνεται μικρότερο, πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να διατηρούνται οι εσωτερικές τάσεις χωρίς όμως να επέλθει θραύση. Η απόσταση μεταξύ των πασσάλων του νέου εδάφους πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να μειώνεται η εισροή του νερού στο μέγιστο δυνατό επίπεδο (και αν είναι αναγκαίο ακόμα και στο 0, αν και μια τέτοια κατάσταση θα απαιτούσε μη οικονομικές και μη συντηρητικές λύσεις).



Σχήμα 3.14: Σχηματική αναπαράσταση διατομής μιας ιδανικής πλάκας στεγανοποίησης

Οι 3 μηχανισμοί αστοχίας, που φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.15), είναι οι εξής:

- 1) Ολική αστοχία από ανύψωση. Η ανυψωτική δράση του νερού δεν αντισταθμίζεται από το άθροισμα του ιδίου βάρους όλης της κατασκευής (πλάκα και παραμένονσα κατασκευή) και τη διατμητική αντοχή στη διεπιφάνεια της κατασκευής με το έδαφος.
- 2) Αστοχία από ανύψωση της πλάκας. Η αστοχία συνιστά την κάθετη μετακίνηση της πλάκας εξαιτίας του ανεπαρκούς ιδίου βάρους και της διατμητικής αντοχής στη διεπιφάνεια με την κατασκευή.
- 3) Η κατασκευαστική αστοχία της πλάκας. Αυτό συμβαίνει όταν έχει μικρό πάχος και έτσι η αστοχία επέρχεται λόγω καμπτικού μηχανισμού καθώς είναι ακατάλληλο για το νέο προκύπτον υλικό, και έχει μηδενική εφελκυστική αντοχή.



Σχήμα 3.15: Πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας της πλάκας στεγανοποίησης: **α)** Ολική αστοχία από ανύψωση του εδάφους **β)** Ανύψωση της πλάκας **γ)** Κατασκευαστική αστοχία της πλάκας

Ο προσδιορισμός μιας τιμής για το ρυθμό ροής του νερού δεν είναι απλός, καθώς εξαρτάται από τα συστήματα στεγανοποίησης που είναι διαθέσιμα. Ωστόσο, ένα όριο 1-2 L/s στα 1000m² δίνεται σε πολλούς κώδικες. Η διαρροή υποτίθεται ότι συμβαίνει μόνο μέσω των μη επεξεργασμένων περιοχών της πλάκας, που χαρακτηρίζονται από τυπικούς υψηλούς συντελεστές διαπερατότητας των μη συνεκτικών εδαφών, και όχι μέσω του μη διαπερατού τσιμεντοποιημένου υλικού. Μακροπρόθεσμα, το νερό θα ρέει μέσω του τσιμεντοποιημένου εδάφους αλλά η στεγανότητα θα εξασφαλίζεται από άλλες μηχανισμούς (permeable linings).

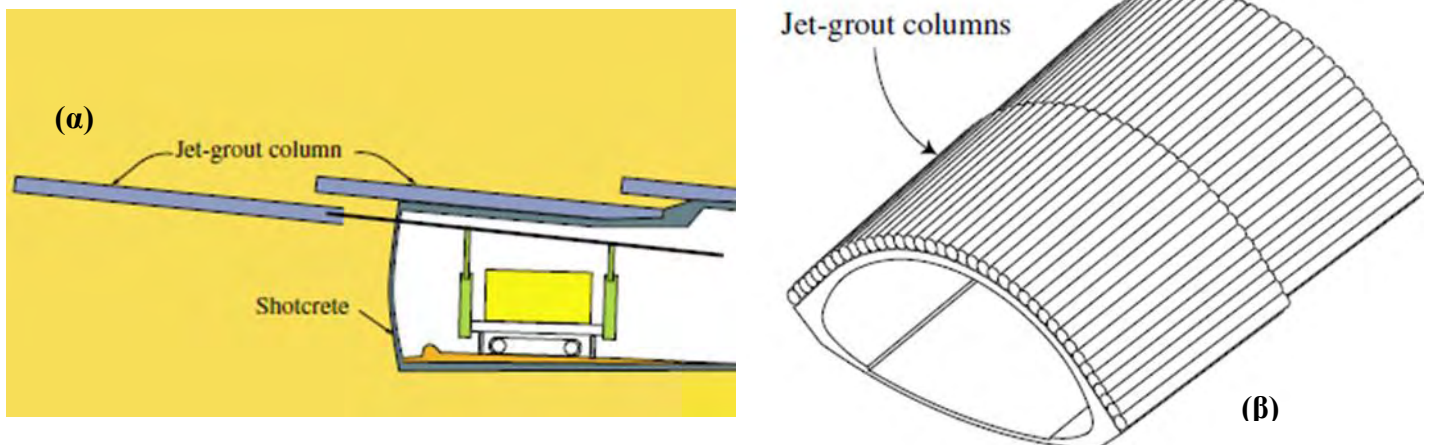
Το ύψος του τσιμεντοποιημένου τμήματος μαζί με την απόσταση και τη διάμετρο των πασσάλων, επηρεάζει την εισροή του νερού στην περιοχή της εκσκαφής. Όλες οι γεωμετρικές ιδιότητες της πλάκας (μήκος, διάμετρος και η απόσταση μεταξύ πασσάλων) συνδυάζονται, μαζί με τα σφάλματα, για τον υπολογισμό της πιθανής διαρροής ώστε να δοθούν οι τελικές πληροφορίες για το σχεδιασμό της. Καταρχάς, η πλήρης στεγανότητα της περιοχής της εκσκαφής απαιτεί η πλάκα να είναι συνεχής ($\Omega=0$) τουλάχιστον σε μια περιοχή του τσιμεντοποιημένου τμήματος. Ωστόσο, κυρίως για βαθιές εκσκαφές, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερσυντηρητικό

σχεδιασμό και πρέπει να ερευνηθεί η πιθανότητα να επιτραπεί η εισροή του νερού. Πράγματι, η διαρροή δε συνεπάγεται απαραίτητα δραματικές επιπτώσεις, αλλά εξαρτάται από τον όγκο και την ταχύτητα του ρέοντος νερού στην περιοχή εκσκαφής. Γι' αυτό, πρέπει να ποσοτικοποιηθεί ο ρυθμός ροής του νερού Q που περνά μέσω της ελαττωματικής πλάκας.

3.2.3 Υποστήριξη σηράγγων

Η χρήση της μεθόδου jet grouting στην κατασκευή σηράγγων γίνεται ολοένα και πιο συχνή, ιδιαίτερα για μεγάλες σήραγγες που δεν έχουν κυκλική διατομή. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί οριζόντιους πασσάλους για τη δημιουργία ενός 'τόξου' από τσιμεντοποιημένο έδαφος πάνω από το μέτωπο της σήραγγας και παρέχει υποστήριξη κατά την εκσκαφή (Pelizza και Peila, 1993) (Σχ. 3.16).

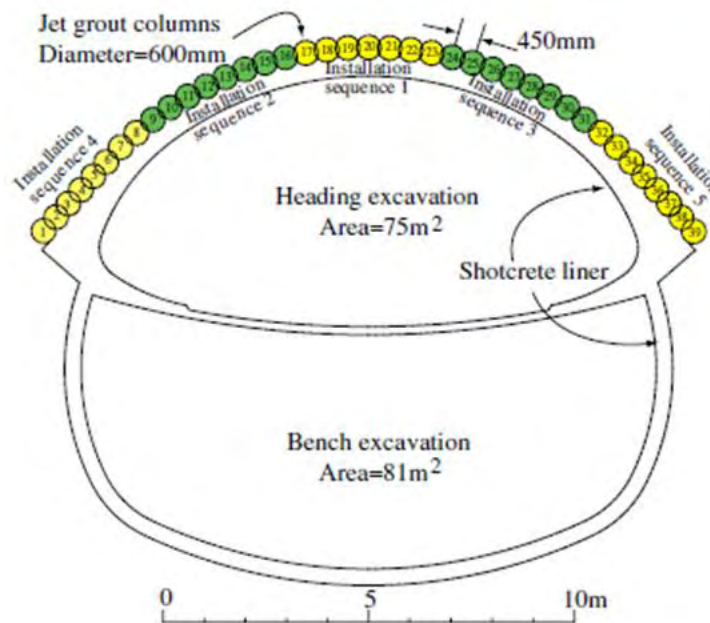
Στην περίπτωση της ενίσχυσης σηράγγων, ένα τμήμα τσιμεντοποιημένου υλικού σχηματίζεται γύρω από την περίμετρο της σήραγγας, πριν από την εκσκαφή, προκειμένου η απόκριση του υλικού που περιβάλλει τη σήραγγα να γίνει πιο άκαμπτη και να μειωθούν οι τάσεις και η ακτινική σύγκλιση της εσωτερικής επιφάνειας. Συνήθως, οι πάσσαλοι τσιμεντοποιημένου εδάφους εγκαθίστανται σε γκρουπ 4 ή περισσότερων (Σχ. 3.18). Η μέθοδος αυτή μπορεί να μειώσει τις μετακινήσεις της επιφάνειας. Σε ένα υπόγειο περιβάλλον, μια από τις σχεδιαστικές απαιτήσεις για επιφανειακές σήραγγες είναι ότι η μέθοδος κατασκευής πρέπει να ελέγχει τις μετακινήσεις της επιφάνειας με κάποια προσδιορισμένη 'ανοχή'. Το πλήρως στερεοποιημένο ένεμα συμπεριφέρεται αρκετά σαν σκυρόδεμα Portland, το οποίο γενικά παρουσιάζει μη γραμμική ελαστική συμπεριφορά, η οποία ακολουθείται από ψαθυρή αστοχία. Η αντοχή του έχει συνιστώσες και συνοχής και γωνίας τριβής. Ο Fang (1994) προσδιόρισε μέσω τριαξονικών δοκιμών ότι η συνοχή και η γωνία τριβής σε ιλυώδεις άμμους είναι 4,2 MPa και 35° αντίστοιχα. Η αντοχή του Portland εξαρτάται από το χρόνο και τη θερμοκρασία. Η αντοχή και η δυσκαμψία του εδάφους αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.16: Τυπική μορφή 'ομπρέλας' από εδαφοπασσάλους για τη χρήση μεγάλων επιφανειακών σηράγγων **α)** Τυπική διαμήκης τομή της τοποθέτησης πασσάλων για τη δημιουργία της προστατευτικής 'ομπρέλας' **β)** Τρισδιάστατη μορφή της 'ομπρέλας' από εδαφοπασσάλους



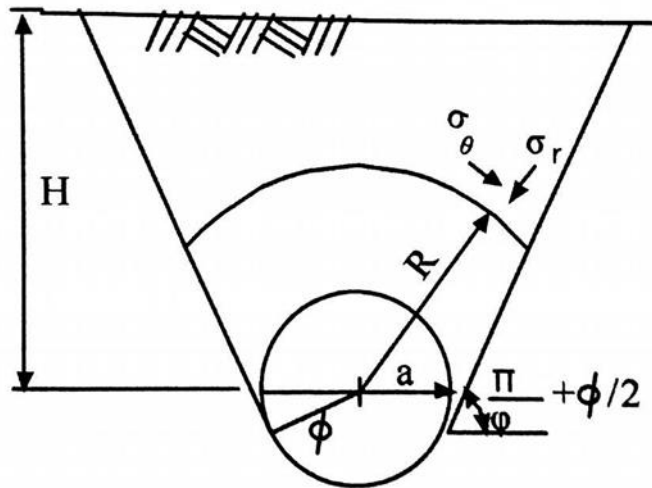
Σχήμα 3.17: Ενίσχυση των εσωτερικών τοιχωμάτων της σήραγγας



Σχήμα 3.18: Τυπική σειρά τοποθέτησης πασσάλων για τη δημιουργία 'ομπρέλας' εδαφοπασσάλων

Κατά την εκκίνηση του μετροπόντικα (Tunnel Boring Machine, TBM), σε εδαφικό μέσο συνιστάμενο από αλλουβιακές αποθέσεις, στο έδαφος που περιβάλλει το TBM μπορεί να επέλθει διατμητική θραύση. Αυτό μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση ή μετακίνηση εξαιτίας της επέκτασης της χαλάρωσης προς την επιφάνεια του εδάφους, ειδικά στην περίπτωση της κατασκευής επιφανειακών σηράγγων. Δεδομένου αυτών των δυσκολιών, η μέθοδος jet grouting προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στο

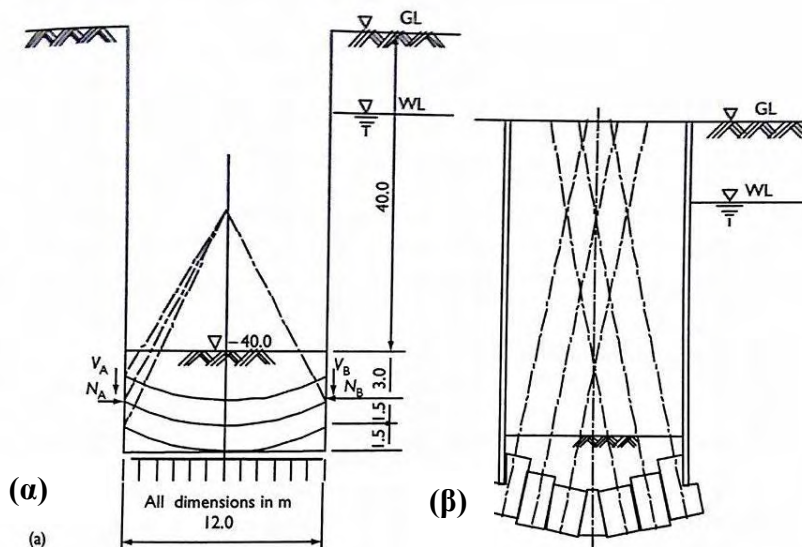
σχεδιασμό της υποστήριξης της οροφής. Η γεωμετρία του σχεδιασμού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.19), το οποίο αναπαριστά πως μπορεί να ενισχυθεί η ζώνη (R-a) με τη μέθοδο jet grouting. Ένας πετυχημένος σχεδιασμός ακολουθεί μια ευθεία διατμητική αντοχής, η οποία ξεπερνά την περιβάλλουσα σε έναν κύκλο του Mohr. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται ότι οι ακτινικές και εφαπτόμενες τάσεις εξισορροπούνται στην οριακή γραμμή της ελαστικής περιοχής από την πλαστική.



Σχήμα 3.19: Ενίσχυση οροφής σήραγγας (Ground Improvement, M.P. Moseley, K. Kirsch, 2004)

Ωστόσο, με τη μέθοδο αυτή υπάρχει μια καθυστέρηση μεταξύ της εγκατάστασης του τσιμεντενέματος και της σταθεροποίησης της μίξης αυτής. Αν η σκλήρυνση καθυστερήσει σε μεγάλο βαθμό τότε ο πάσσαλος τσιμεντοποιημένου εδάφους που θα δημιουργηθεί μπορεί να μην έχει επαρκή διατμητική αντοχή για να αντισταθεί σε μεγάλα φορτία, με αποτέλεσμα να παρουσιαστούν μετακινήσεις πάνω από τη σήραγγα και κατ' επέκταση παραμορφώσεις του μετώπου.

Όπως προαναφέρθηκε, έτσι και στις σήραγγες μπορεί να στεγανοποιηθεί και να μονωθεί η βάση για την αποτροπή της ανύψωσης ή της διαρροής σε μη συνεκτικά, κορεσμένα εδάφη με υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα (Σχ. 3.20α). Συνιστάται διεθνώς ότι το πάχος της πλάκας πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μισό της απόστασης των τοίχων της εκσκαφής. Ωστόσο, μπορούν να δημιουργηθούν λεπτότερες πλάκες με τοξωτές δοκούς, στις οποίες ενεργεί μόνο η θλιπτική τάση (Σχ. 3.20β).

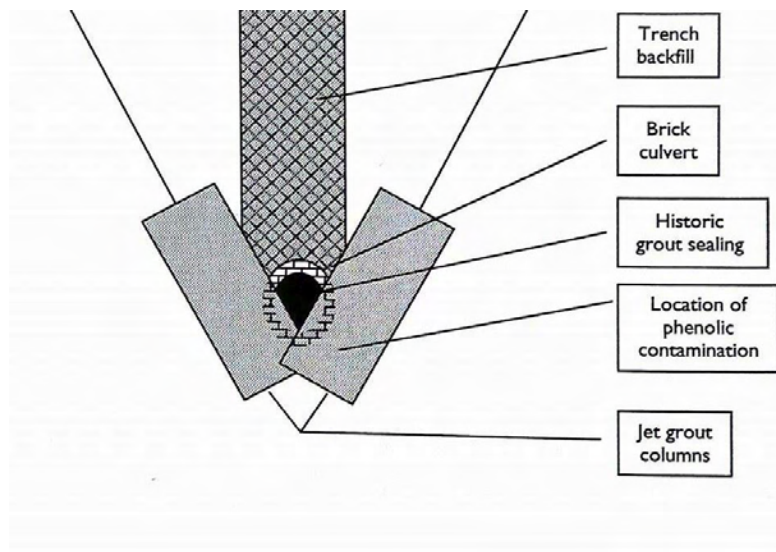


Σχήμα 3.20: Στεγάνωση της βάσης σήραγγας: **α**) Σχετική διατομή **β**) Διάταξη τόξου από τσιμεντοποιημένους εδαφοπασσάλους, (Ground Improvement, M.P. Moseley, K. Kirsch, 2004)

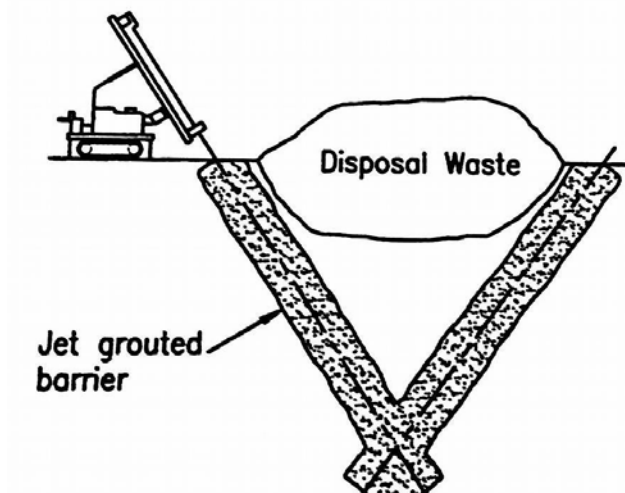
3.2.4 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες χρήσεις της εδαφικής ανάμειξης είναι στον περιβαλλοντικό τομέα. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές που βασίζονται στην ικανότητα της μεθόδου jet grouting να σχηματίζει δομές σε σημαντικά εδάφη, ενώ απαιτείται μικρής διαμέτρου γεώτρηση. Μια από τις κύριες χρήσεις είναι ο εγκλωβισμός των ρυπαντών σε βάθη, όπου η εκσκαφή δύσκολα επιτυγχάνεται, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.21). Ακόμα, η δημιουργούμενη τσιμεντοποιημένη δομή είναι συνήθως λιγότερο διαπερατή από το συμβατικό τσιμεντοποιημένο έδαφος, κάτι που οδηγεί σε μεγαλύτερη ασφάλεια στον έλεγχο της ρύπανσης.

Για τον ίδιο σκοπό μπορούν να δημιουργηθούν φράγματα (lateral barriers). Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να γίνει επιλογή για το που θα γίνει η φραγή, και είναι πολύ σημαντικό για εφαρμογές σε μεγάλα βάθη. Το ένεμα ή το νερό που χρησιμοποιείται (ανάλογα με το σύστημα έγχυσης που χρησιμοποιείται) απομακρύνει τα αδύναμα και χαλαρά υλικά, διεισδύοντας σε ρωγμές, αντικαθιστώντας το διαπερατό υλικό με σχετικά αδιαπέρατο ένεμα. Η αποτελεσματική απόσταση διείσδυσης εξαρτάται από το σύστημα έγχυσης, τον τύπο του βράχου, αλλά έχει συναχθεί το συμπέρασμα ότι μπορεί να είναι αποτελεσματικό μέχρι και 1m από τη θέση της οπής. Πρόσφατα η εδαφική ανάμειξη έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή διαπερατών φραγμάτων (active barriers). Τέτοια εμπόδια περιλαμβάνουν υλικά τα οποία αντιδρούν με συγκεκριμένους ρυπαντές και τους καθιστούν λιγότερο επικίνδυνους.



Σχήμα 3.21: Εγκλωβισμός αποτροπή εισόδου ρυπαντών σε βάθος, (Ground Improvement, M.P. Moseley, K. Kirsch, 2004)



Σχήμα 3.22: Δημιουργία φράγματος παρεμπόδισης ρυπαντών

Κεφάλαιο 4

Χωρική Μεταβλητότητα γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών

Το έδαφος χαρακτηρίζεται από μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών αντοχής και παραμορφωσιμότητας. Σε αντίθεση με τα άλλα ποιοτικώς ελεγχόμενα υλικά, όπως το ξύλο, το σκυρόδεμα ή ο χάλυβας, των οποίων οι ιδιαιτερότητες είναι γνωστές και σταθερές, οι γεωτεχνικοί μηχανικοί καλούνται να αντιμετωπίσουν αβεβαιότητες τόσο από περιοχή σε περιοχή όσο και στο εσωτερικό της ίδιας περιοχής. Έτσι, έχει δημιουργηθεί η ανάγκη για κατανόηση του πεδίου, ώστε οι σχεδιασμοί να είναι αξιόπιστοι και οικονομικοί. Στο στάδιο σχεδιασμού υπάρχει αβεβαιότητα που προκύπτει από την έλλειψη αξιόπιστων μεθόδων πρόβλεψης της διαμέτρου των τσιμεντοποιημένων εδαφοπασσάλων και κατ' επέκταση της γεωμετρίας τους αλλά και των μηχανικών ιδιοτήτων του τσιμεντοποιημένου εδάφους. Όσον αφορά την αποτίμηση της συμπεριφοράς πλάκας ενισχυμένου εδάφους για την ανάληψη φορτίων αντιστήριξης βαθιάς εκσκαφής, η μεταβλητότητα της επιτυγχανόμενης διαμέτρου, η μεταβλητότητα της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας ανάλογα με τη σύσταση του εδάφους και το ποσοστό τσιμέντου που τελικά διαχέεται σε κάποια θέση, καθιστά το θέμα της χωρικής μεταβλητότητας των παραμέτρων καθοριστικό για την αποτίμηση της απόκρισης της πλάκας ενισχυμένου εδάφους και των επιπτώσεων που αυτή επιφέρει στο έργο αντιστήριξης.

4.1 Μεταβλητότητα της διαμέτρου

Η εκτίμηση της διαμέτρου ενός κατασκευασμένου τσιμεντοποιημένου στοιχείου δεν είναι εύκολη και απλή υπόθεση, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις πιθανές μεταβολές ακόμα και σε ένα ομοιογενές εδαφικό στρώμα. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της προκύπτουσας τελικής διαμέτρου. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες είναι:

- ✓ Η διαβρωσιμότητα του εδάφους
- ✓ Ο τύπος του εδάφους και η αντοχή του
- ✓ Οι λειτουργικές παράμετροι κατά τη διαδικασία της εδαφικής ανάμιξης (όπως η ταχύτητα ανύψωσης και περιστροφής, η πίεση του νερού και του ενέματος)
- ✓ Ο διαθέσιμος εξοπλισμός που απαιτείται για τη διεργασία (αντλίες υψηλής πίεσης, διαθέσιμα monitors, τρυπάνια κλπ)
- ✓ Οι διάφορες τεχνικές και συστήματα έγχυσης

Τα υπάρχοντα μοντέλα για την πρόβλεψη της διαμέτρου των πασσάλων, που δημιουργούνται μέσω της εδαφικής ανάμειξης και λαμβάνουν υπόψη τα φυσικά φαινόμενα κατά την έγχυση, μπορούν να ομαδοποιηθούν σε εμπειρικά (Covil & Skinner, 1994; Shibazaki, 2003; Tornaghi, 1993; Tornaghi & Pettinaroli, 2004), σε σχετικά (Arson & Juge, 2012; Croce & Flora, 2000; Mosiici, 1994), σε θεωρητικά (Carletto, 2009; Ho, 2005, 2009; Modoni et al., 2006; Shen, Wang, Yang, & Ho, 2013; Wang κ.α., 2012) και ημιθεωρητικά μοντέλα (Flora, Modoni, Lirer, & Croce, 2013). Οι υπάρχουσες μέθοδοι για την εκτίμηση της διαμέτρου ενός τσιμεντοποιημένου εδαφοπασσάλου βασίζονται είτε σε εμπειρικές είτε σε θεωρητικές προσεγγίσεις. Οι εμπειρικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν βάσει παρατηρήσεων από δοκιμές πεδίου και προσπαθούν να συσχετίσουν τη διάμετρο με διάφορες παραμέτρους με τη χρήση διάφορων μαθηματικών νόμων. Αυτές οι σχέσεις δεν έχουν ξεκάθαρα φυσική σημασία (Croce & Flora, 2000). Στις εμπειρικές μεθόδους, μόνο παράμετροι όπως η πίεση έγχυσης, ο ρυθμός ροής, η ταχύτητα απόσυρσης των ακροφυσίων λαμβάνονται υπ' όψιν, ενώ άλλες σημαντικές παράμετροι, όπως η διάμετρος των ακροφυσίων, η επίδραση του αέρα στο διπλό και τριπλό σύστημα έγχυσης, η ταχύτητα περιστροφής και οι ιδιότητες του εδάφους αγνοούνται. Οι εμπειρικοί συντελεστές προέκυψαν από συγκεκριμένες συνθήκες εδάφους, και είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε άλλες περιπτώσεις, όπου οι συνθήκες του εδάφους είναι διαφορετικές. Τα εμπειρικά και τα σχετικά μοντέλα δεν μπορούν να περιγράψουν φαινόμενα με καθαρή θεωρητική σημασία, ενώ τα θεωρητικά και τα ημιθεωρητικά μοντέλα αναπτύχθηκαν σύμφωνα με θεωρίες που μπορούν να περιγράψουν τη διάβρωση του εδάφους κατά τη διεργασία της έγχυσης. Οι κύριες θεωρητικές μέθοδοι βασίζονται σε θεωρίες της τυρβώδους ροής και της διάβρωσης του εδάφους (Modoni κ.α. 2006; Ho 2007). Με αυτές τις μεθόδους, η φυσική διαδικασία της εδαφικής ανάμειξης, δηλαδή η αλληλεπίδραση μεταξύ του εγγεόμενου ρευστού και των εδαφών, μπορεί να περιγραφεί επιτυχώς. Κάποιες πρόσφατες μελέτες (όπως του Modoni, 2006 και των Wang, Shen & Yang, 2012) θεώρησαν την υδροδυναμική δράση της έγχυσης ότι εξαρτάται και από την πίεση και την ορμή, και επομένως και από την ταχύτητα ανύψωσης του τρυπανιού. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να υπολογίσουν τη διάμετρο των τσιμεντοποιημένων εδαφοπασσάλων.

Type	Model	Mechanical system for which it was developed
Empirical	Covil and Skinner (1994)	Single and double fluid
Conceptual	Mosiici (1994)	—
	Croce and Flora (2000)	Single fluid
	Arson and Juge (2012)	Single fluid
Theoretical	Modoni, Croce, and Mongiovi (2006)	Single fluid
	Wang, Shen, and Yang (2012)	Single fluid (extended to double and triple fluid by Shen, Wang, Yang et al., 2013)
Semi-Theoretical	Flora, Modoni, Lirer, and Croce (2013)	Single, double and triple fluid

Πίνακας 4.1: Μοντέλα πρόβλεψης της διαμέτρου των πασσάλων

4.1.1 Εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης της διαμέτρου των εδαφοπασσάλων

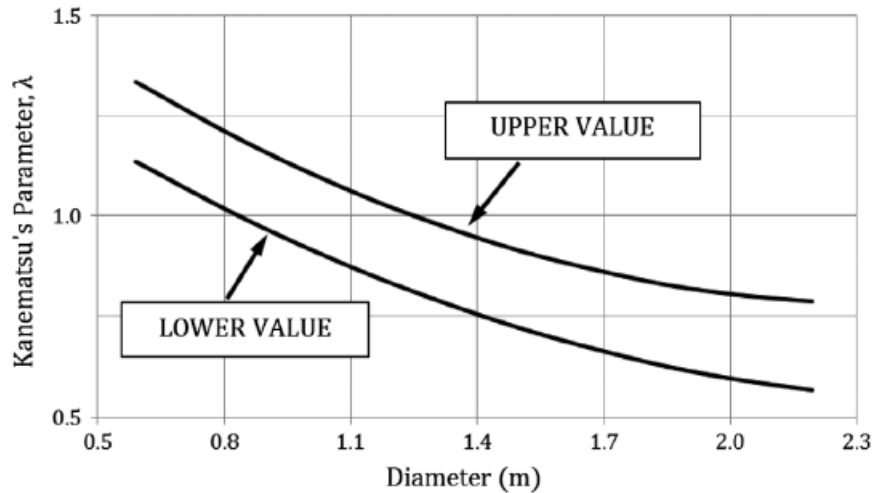
Τα εμπειρικά και σχετικά μοντέλα χρησιμοποιούνται κυρίως για να γίνουν γεωμετρικές προβλέψεις κατά τον προσχεδιασμό των τσιμεντοποιημένων εδαφοπασσάλων. Τα σχετικά μοντέλα χρησιμοποιούνται συνήθως για τον έλεγχο της ποιότητας και της γεωμετρίας. Οι εμπειρικοί τύποι αποτελούν έναν έμμεσο τρόπο πρόβλεψης της γεωμετρίας. Αντί να γίνεται υπολογισμός της διαμέτρου ως συνάρτηση των παραμέτρων έγχυσης, οι παράμετροι έγχυσης εκτιμώνται για μια συγκεκριμένη επιθυμητή διάμετρο. Οι εμπειρικοί κανόνες προκύπτουν συνήθως από δεδομένα τσιμεντοποιημένων εδαφοπασσάλων κάτω από διαφορετικές συνθήκες (διαφορετικό είδος εδάφους, διαδικασίες ή εξοπλισμός). Τέτοιες αναλύσεις είναι των Tornaghi (1993) και των Tornaghi και Pettinaroli (2004). Ένα σχετικό μοντέλο προσδιορίζεται βάσει ενός φυσικού μοντέλου, ωστόσο δεν μπορεί να περιγράψει το φαινόμενο με καθαρά θεωρητική σημασία. Το κύριο στοιχείο αυτών των μοντέλων είναι η διατήρηση της μάζας (Carnevale, Belloni, & Grassi, 2012 και Mosiici, 1994), η διατήρηση του όγκου (Croce & Flora, 2000), όπου η ποσοτικοποίηση των αλλαγών του όγκου των κενών αποτελεί πρόβλημα, αλλά και η ισορροπία ενέργειας (Arson & Juge, 2012). Όπως φαίνεται στη συνέχεια, τα σχετικά μοντέλα μπορούν να προσαρμοστούν συναρτήσει κάποιων ιδιοτήτων που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της έγχυσης (ποσότητα ενέματος και/ ή πυκνότητα του spoil).

Εμπειρικό μοντέλο για τον όγκο του εκτοξευόμενου ρευστού :

Οι Covil και Skinner (1994) πρότειναν ένα εμπειρικό μοντέλο που προβλέπει την ποσότητα του όγκου ενέματος που πρέπει να εγχυθεί για τη σύνθεση ενός τσιμεντοποιημένου εδαφοπασσάλου. Ο εκτιμώμενος όγκος θα είναι μια αρχική τιμή, η οποία όμως θα προσαρμοστεί επιτόπου κατά την έγχυση. Αυτό το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για απλό και διπλό σύστημα έγχυσης, και δίνεται από τον παρακάτω τύπο (Σχέση (2)):

$$Q_i = 0.25 \cdot \pi \cdot D^2 \lambda \cdot (1 + \beta) \quad (2)$$

όπου Q_i είναι ο όγκος του ενέματος που θα εγχυθεί σε m^3 ανά m μήκους, D είναι η διάμετρος του πασσάλου και β είναι ένας συντελεστής απωλειών, ο οποίος πρέπει να είναι <1 . Ο συντελεστής λ που ονομάζεται παράμετρος Kanematsu και εκτιμάται χρησιμοποιώντας το παρακάτω διάγραμμα (Covil & Skinner, 1994). Ο συντελεστής αυτός έχει άνω και κάτω όριο και παρέχει τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές που αναμένονται ως συνάρτηση της διαμέτρου που θα προκύψει (μέχρι 2,20 m).



Σχήμα 4.1: Πειραματική παράμετρος Kanematsu (Covil & Skinner, 1994)

Εμπειρικό μοντέλο βασισμένο στη διατήρηση της μάζας:

Το σχετικό μοντέλο που πρότεινε ο Mosiici (1994) είναι ένα σχετικό μοντέλο, το οποίο βασίζεται στη διατήρηση της μάζας:

$$W_{grout} + W_{soil} = W_{column} + W_{spoil} \quad (3)$$

όπου W_{grout} , W_{soil} , W_{column} , W_{spoil} , είναι αντίστοιχα τα βάρη του ενέματος που εγχέεται, του φυσικού εδάφους, του πασσάλου και του spoil στον όγκο που πρόκειται να επεξεργαστεί. Η σύνθεση του περισσευόμενου εδάφους (spoil), που είναι μια ανάμειξη ενέματος και εδάφους, θεωρείται ότι είναι ίδια με αυτή των πασσάλων. Ακόμα ο όγκος V_i (ανά μονάδα μήκους του πασσάλου) θεωρείται ίσος με τον όγκο των αποβαλλόμενων spoil. Έτσι, η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$(\gamma_{sp} - \gamma_{soil}) \cdot \frac{\pi \cdot D_{eq}^2}{4} = (\gamma_g - \gamma_{sp}) \cdot V_i \quad (4)$$

όπου γ_{sp} , γ_g και γ_{soil} , είναι αντίστοιχα το ειδικό βάρος του spoil, του ενέματος και του φυσικού εδάφους, και D_{eq} είναι η διάμετρος του ισοδύναμου πασσάλου, ο οποίος θεωρείται τέλεια κυλινδρικός κατά μήκος του. Τελικά, από τη σχέση (4) προκύπτει η (5):

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4 \gamma_g - \gamma_{sp}}{\pi \gamma_{sp} - \gamma_{soil}} V_i} \quad (5)$$

Δεν είναι εύκολος ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους του περισσευόμενου εδάφους πριν τη διεργασία και τη δημιουργία του πασσάλου και αυτό καθιστά τη μέθοδο περιορισμένη για τον προσχεδιασμό των πασσάλων.

Εμπειρικό μοντέλο βασισμένο στην ισορροπία των όγκων

Οι Croce και Flora (2000) πρότειναν ένα μοντέλο βασισμένο στη συνθήκη της συνέχειας που εφαρμόζεται στους όγκους που συμμετέχουν στη διαδικασία της κατασκευής των πασσάλων. Η λογική είναι παρόμοια με το μοντέλο που εισήχθη από το Mosiici (1994), αλλά λαμβάνει υπόψη τον αέρα στους πόρους του εδάφους, καθώς ο όγκος τους δεν μπορεί να παραλειφθεί. Αμέσως μετά την έγχυση, ο όγκος του πασσάλου (Σχέση (6)) ανά μονάδα μήκους μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει του ποσοστού του ενέματος α που παραμένει στον πάσσαλο (Σχέση (7)), των κενών που καλύπτονται από το ένεμα δ (Σχέση (8)), του αρχικού πορώδους του εδάφους n_s , και του ποσοστού των διαβρωμένων κόκκων εδάφους β (Σχέση (9)) και τέλος του ποσοστού του τελικού όγκου ενέματος που εγχέεται ανά μονάδα μήκους του όγκου του πασσάλου V_i .

$$V = \frac{\alpha}{\delta(n_s + \beta - n_s\beta)} V_i \quad (6) \quad \text{όπου:}$$

$$\alpha = \frac{V_g}{V_i} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{V_g}{V_{v,2}} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{V_{s,1} - V_{s,2}}{V_{s,1}} \quad (9)$$

Σε αυτές τις εξισώσεις, V_g και $V_{s,2}$ είναι αντίστοιχα ο όγκος του ενέματος και ο όγκος των τμημάτων εδάφους μετά την έγχυση. Αυτοί οι όγκοι μπορούν έμμεσα να υπολογιστούν από τους όγκους του ενέματος και των τμημάτων εδάφους στον όγκο του περισευόμενου εδάφους διά τον όγκο του ενέματος που εγχέεται V_i , και τον όγκο των τμημάτων εδάφους πριν την έγχυση $V_{s,1}$. Ο όγκος των κενών μετά την έγχυση $V_{v,2}$ γενικά δεν εκτιμάται. Αντίθετα, εκτός από τις εγχύσεις που γίνονται σε καθαρά χονδρόκοκκα εδάφη, οι Croce και Flora (2000) πρότειναν την υπόθεση μιας τιμής για το δ , η οποία να δηλώνει ότι όλα τα κενά έχουν καλυφθεί από ένεμα.

Έπειτα προτάθηκε η σχέση (10), όπου n_{sc} είναι το πορώδες του τσιμεντοποιημένου εδαφοπασσάλου και k είναι ο ογκομετρικός λόγος του τσιμέντου (χωρίς νερό) προς τον όγκο του ενέματος στον πάσσαλο μετά την έγχυση (Σχέση (11)).

$$V = \frac{k\alpha}{n_s + \beta - n_s\beta - n_{sc}} V_i \quad (10)$$

$$k = \frac{(1 + r_s) \gamma_g}{(1 + w/c) \gamma_{hc}} \quad (11)$$

όπου r_s είναι ο λόγος νερό προς τσιμέντο (περίπου 0,3), w/c είναι ο λόγος νερό προς τσιμέντο σε όρους μάζας, γ_{hc} και γ_g είναι αντίστοιχα είναι τα ογκομετρικά βάρη του τσιμέντου (χωρίς νερό) και του ενέματος.

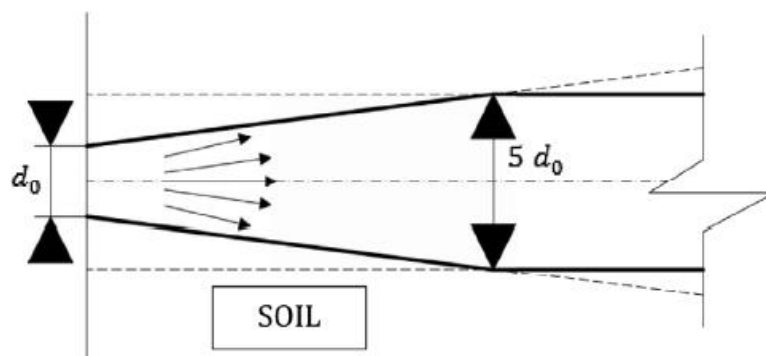
Ο όγκος του πασσάλου ανά μονάδα μήκους V μπορεί εύκολα να σχετιστεί με τη γεωμετρία του, υπολογίζοντάς τον απλά ως συνάρτηση της ισοδύναμης διαμέτρου D_{eq} . Πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο αυτό έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως προς τον έλεγχο της ποιότητας παρά ως προς την πρόβλεψη της διαμέτρου.

Εμπειρικό μοντέλο βασισμένο στην ισορροπία της ενέργειας

Οι Arson και Juge (2012) πρότειναν ένα μοντέλο βασισμένο στην ισορροπία της ενέργειας. Γι' αυτό το μοντέλο, η κινητική ενέργεια της εκτόξευσης είναι ίση με το άθροισμα της διάβρωσης που προκαλείται από την τριβή, όταν επιτυγχάνεται η μέγιστη ακτίνα του πασσάλου, και του κρίσιμου έργου της δύναμης για το οποίο δεν είναι δυνατή η περαιτέρω διάβρωση. Αυτή η ισορροπία εκφράζεται από την παρακάτω σχέση, όπου K είναι η κινητική ενέργεια του ενέματος που εγχέεται, W είναι το έργο της δύναμης που απαιτείται για την απομάκρυνση των κόκκων του εδάφους και του νερού από τον όγκο που επεξεργάζεται, S είναι το έργο της δύναμης που συσχετίζεται με το ιζώδες του ενέματος, και N είναι ο συντελεστής που εισάγεται για τον έλεγχο της επιρροής των διαβρωτικών παραγόντων και σχετίζεται με το ιζώδες.

$$K = W + N \cdot S \quad (12)$$

Παρακάτω δίνεται η σχηματική αναπαράσταση του πάχους του στρώματος του ενέματος που εκτοξεύεται από τα ακροφύσια, όπου d_0 είναι η διάμετρος του ακροφυσίου.



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση του στρώματος εκτοξευόμενου ενέματος (Arson & Juge, 2012)

Η κινητική ενέργεια του ενέματος στο ακροφύσιο υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο (Σχέση (13)), στον οποίο U_0 είναι η ταχύτητα του ενέματος στο ακροφύσιο, $V_{g,rev}$ είναι ο όγκος του ενέματος που εγχέεται και ρ_g είναι η πυκνότητα του ενέματος.

$$K = \frac{1}{2} V_{g,rev} \rho_g U_0^2 \quad (13)$$

Το έργο της δύναμης W μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση (14), όπου υποτέθηκε ότι το ένεμα ακολουθεί μια σφαιρική σπειροειδή πορεία, με την ακτίνα να μεταβάλλεται συνέχεια από 0 μέχρι την τιμή R , μέχρι να ολοκληρωθεί μια περιστροφή.

$$W = \frac{5\pi}{6} 5d_0 \cdot (p_0 - p) \cdot R^2 \quad (14)$$

όπου $5d_0$ είναι το πάχος του στρώματος ενέματος που εκτοξεύεται, p_0 είναι η πίεση της έγχυσης στο ακροφύσιο, ενώ p είναι η πίεση στο μέσο του στρώματος και R είναι η ακτίνα που προκύπτει από την έγχυση.

Οι Arson και Juge υπέθεσαν μια ενιαία κατανομή της ταχύτητας μέσα στο πάχος του στρώματος. Αυτό δεν είναι ρεαλιστικό για μια τυρβώδη ροή, ωστόσο απλοποιεί ένα πολύ σύνθετο πρόβλημα. Έτσι, προτάθηκε η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της F που είναι η μέση διατμητική δύναμη εξαιτίας του ιξώδους του ενέματος.

$$F = \pi \cdot R^2 \cdot \mu \frac{U_{grout}}{5d_0} \quad (15)$$

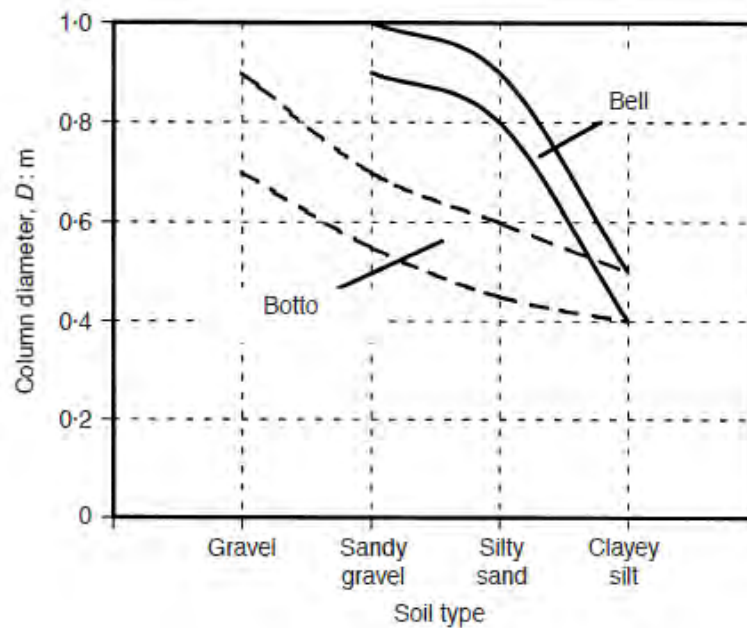
όπου μ είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού και U_{grout} αντιστοιχεί στην ταχύτητα του ενέματος. Ο λόγος $U_{grout}/5d_0$ αναπαριστά το ρυθμό της διατμητικής παραμόρφωσης του ρευστού. Έτσι, προέκυψε ο παρακάτω τύπος που μπορεί να υπολογίσει την ακτίνας ενός τσιμεντοποιημένου εδαφοπασσάλου.

$$R = \sqrt{\frac{K}{\frac{5\pi}{6} t \cdot (p_0 - p) + N \left(\frac{1}{10^{-6}} \pi \cdot R^2 \cdot c \frac{U_{grout}}{t} \right)}} \quad (16)$$

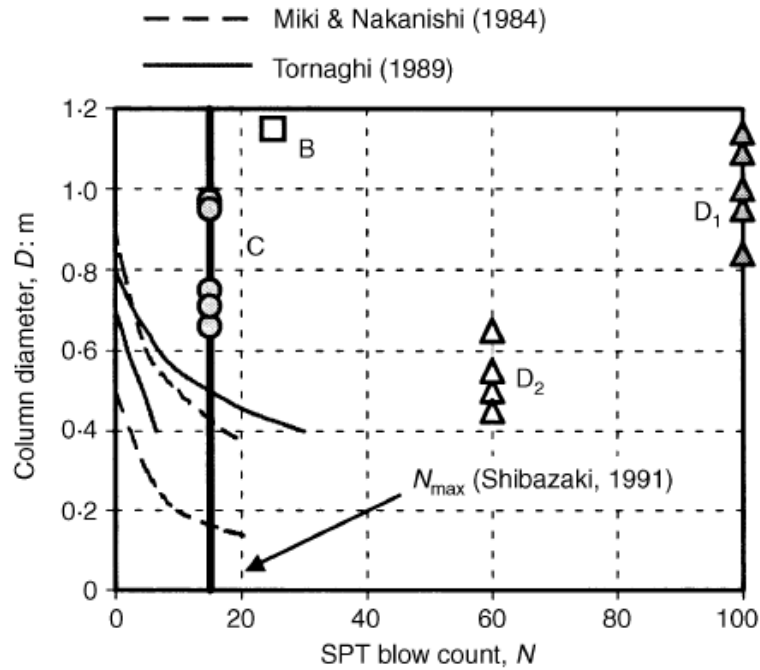
Αυτό το μοντέλο είναι συντηρητικό, καθώς τα αποτελέσματα που εξήχθησαν ήταν πάντα μικρότερα από τα πραγματικά μετά από μέτρηση της διαμέτρου των πασσάλων. Το μέγιστο σφάλμα που παρατηρήθηκε ήταν μικρότερο από 0,10m.

4.1.2 Θεωρητικά μοντέλα πρόβλεψης της διαμέτρου των πασσάλων

Η επιρροή των ιδιοτήτων του εδάφους στη διάμετρο των τσιμεντοποιημένων εδαφοπασσάλων εξαρτάται από τρεις μεταβλητές: διαβάθμιση, σχετική πυκνότητα και αστράγγιστη διατμητική αντοχή S_u . Η σχετική πυκνότητα έχει εκτιμηθεί με τον SPT (Standard Penetration Test) αριθμό χτύπων N . Κάποιες δημοσιευμένες σχέσεις (Botto 1985, Bell 1993) προτείνουν ότι η D μειώνεται με τη μείωση του μεγέθους των κόκκων, όπως φαίνεται στο πρώτο διάγραμμα (Σχ. 4.2). Άλλες σχέσεις (Miki & Nakanishi 1984, Tornaghi 1989) δείχνουν ότι η D μειώνεται με την αύξηση του N και του S_u . Ωστόσο φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα (Σχ. 4.3) ότι η διάμετρος για χονδρόκοκκα εδάφη δεν μπορεί απλά να συσχετιστεί με τον αριθμό χτύπων SPT , καθώς μεγάλες διαμέτροι μπορούν να προκύψουν και από πυκνά υλικά. Αυτό αντιτίθεται στις προτάσεις των Miki, Nakanishi, Shibazaki και Tornaghi.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα της διαμέτρου πασσάλου με το είδος του εδάφους (Botto, 1985 και Bell, 1993)



Σχήμα 4.3: Σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων πεδίου και προτεινόμενων διαμέτρων πασσάλου που κυμαίνονται βάσει του αριθμού των χτύπων SPT

Ο Tornaghi (1989) πρότεινε τη συσχέτιση της διαμέτρου του εδαφοπασσάλου με την ενέργεια κατά την ενίσχυση του εδάφους, ανά μονάδα μήκους του πασσάλου. Αυτή η ενέργεια υπολογίζεται στην αντλία (E_p) (Σχέση (17)):

$$E_p = \frac{pQ}{v} \quad (17)$$

Όπου p αποτελεί την πίεση του ενέματος, Q είναι ο ρυθμός της ροής του ενέματος και v ο ρυθμός ανύψωσης του monitor.

Μια άλλη προσέγγιση για τη βελτίωση των σχεδιαστικών μεθόδων που περιλαμβάνει τη συσχέτιση της διαμέτρου με την ενέργεια και άλλες παραμέτρους όπως το μέγεθος των κόκκων, το αριθμό κτύπων και την αστράγγιστη διατμητική αντοχή S_u , διαφοροποιείται από την προαναφερθείσα, στο γεγονός ότι η ενέργεια υπολογίζεται στα ακροφύσια και όχι στην αντλία. Έτσι συνυπολογίζονται οι απώλειες γύρω από την περίμετρο και διαμέσου των ακροφυσίων:

$$E_n = \frac{mv_n^2}{2L} \quad (18)$$

Όπου L το μήκος του πασσάλου, m η μάζα του ενέματος που διέρχεται σε χρόνο Δt και αντιστοιχεί σε μήκος L , u_n η ταχύτητα του ενέματος στα ακροφύσια. Η μάζα m προκύπτει από τη σχέση:
$$m = \rho_g Q \Delta t \quad (19)$$

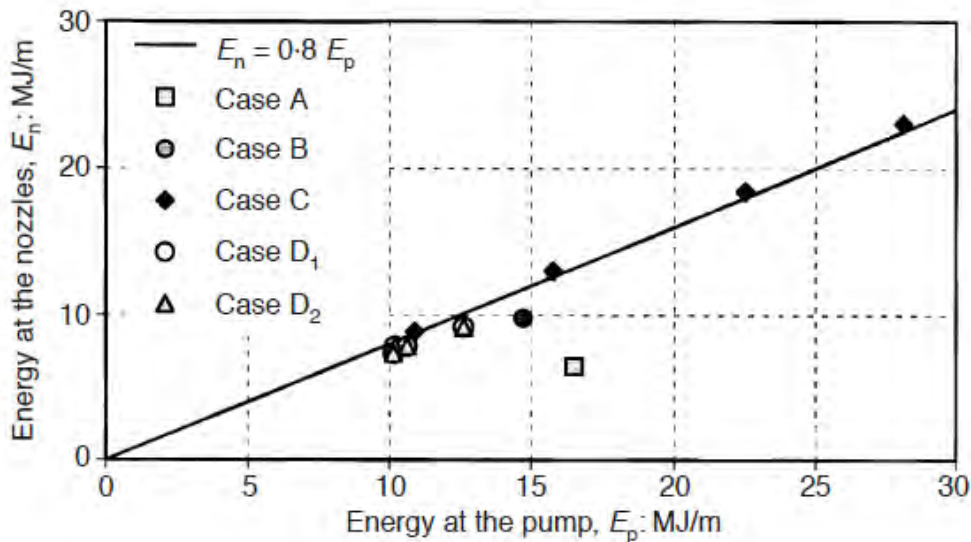
Όπου ρ_g είναι η πυκνότητα του ενέματος και Q ο ρυθμός ροής του ενέματος.

Τελικά προκύπτει η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της ενέργειας στα ακροφύσια:

$$E_n = \frac{8\rho_g Q^3}{\pi^2 M^2 d^4 v} \quad (20)$$

Όπου M είναι ο αριθμός των ακροφυσίων, d η διάμετρος των ακροφυσίων και v ο ρυθμός ανύψωσης του monitor.

Σε σχέση με την προηγούμενη εξίσωση, η εξίσωση της ενέργειας στα ακροφύσια παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι λαμβάνει υπ' όψιν την πυκνότητα του ενέματος, η οποία μπορεί να αλλάζει από περίπτωση σε περίπτωση σε σχέση με την πίεση του ενέματος που είναι σχετικά σταθερή (45 MPa). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα στο οποίο γίνεται σύγκριση μεταξύ της ενέργειας στην αντλία E_p και της ενέργειας στα ακροφύσια E_n . Οι τιμές του διαγράμματος δείχνουν ότι περίπου το 20% της ενέργειας χάνεται στις περισσότερες περιπτώσεις, πριν το ένεμα φτάσει στο έδαφος ($E_n = 0,8E_p$).



Σχήμα 4.4: Σύγκριση μεταξύ της ενέργειας στην αντλία E_p με την ενέργεια στα ακροφύσια, (Analysis of single-Fluid jet grouting, Croce P. and Flora A., 2000)

Γενικά, έχει παρατηρηθεί βελτίωση στην αποτελεσματικότητα της εδαφικής ανάμειξης, που οφείλεται στη μείωση των απωλειών ενέργειας κατά την έγχυση τόσο

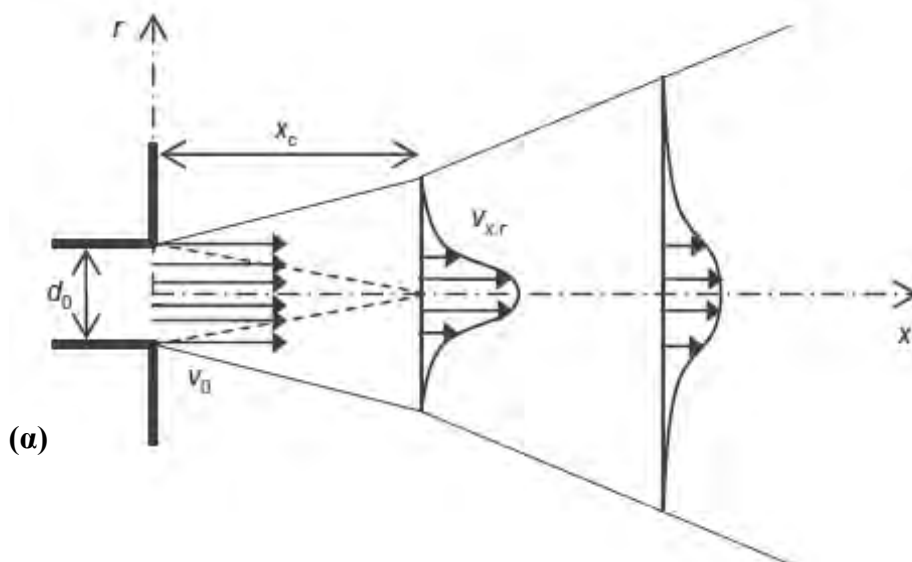
στην περίμετρο όσο και στα ακροφύσια καθώς και στην αύξηση των δυνατοτήτων των αντλιών.

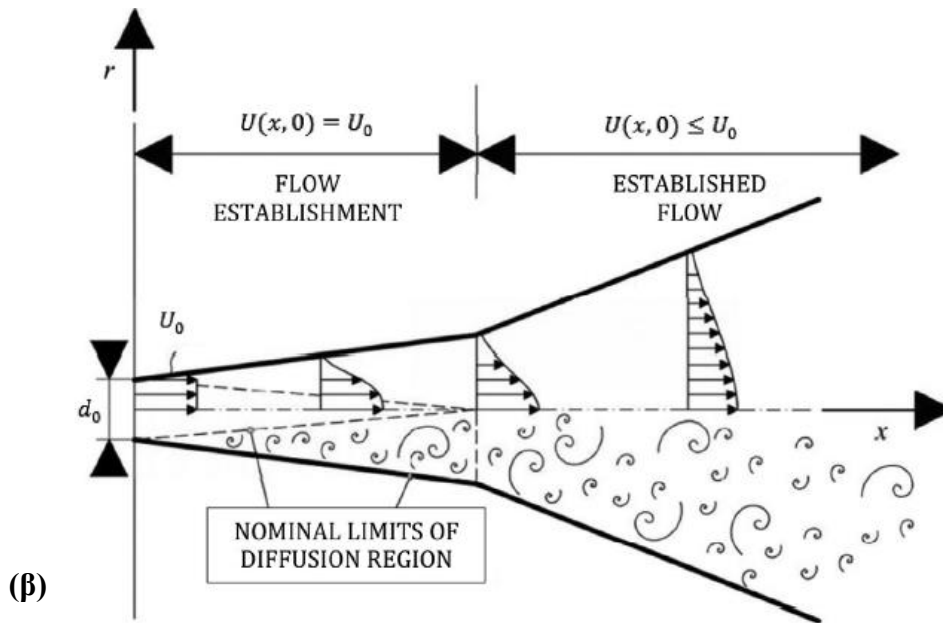
Οι απευθείας παρατηρήσεις (Croce & Flora 2000; Croce κ.α., 2001) έχουν δείξει ότι οι προκύπτοντες εδαφοπάσσαλοι δεν είναι τέλεια κυλινδρικοί και οι άξονες μπορεί να παρεκκλίνουν από την προκαθορισμένη θέση σχεδιασμού. Η σύνθεση των εδαφοπασσάλων μπορεί να μην είναι ομοιογενής, αλλά και να υπάρχουν περιοχές τους που να μην έχουν επεξεργαστεί, ειδικά στην περίπτωση των λεπτόκοκκων εδαφών (Stark κ.α., 2009). Πιθανές λύσεις για τη μείωση της μεταβλητότητας της διαμέτρου και της σύνθεσης των πασσάλων μπορούν να ληφθούν κατά το στάδιο της εκτέλεσης, όπως με αριθμό κύκλων ανάμιξης κατά την απόσυρση του τρυπανιού (Topolnicki, 2004). Ωστόσο, ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση, κάποια μεταβλητότητα στις διαστάσεις και ιδιότητες των πασσάλων θα συνεχίσει να υφίσταται. Σε κάθε περίπτωση, η παρέκκλιση των αξόνων θα γίνει αντιληπτή, εφόσον αποσυρθεί το τρυπάνι γεώτρησης και όχι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, επομένως δεν μπορεί να διορθωθεί. Αυτά τα σφάλματα μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά όλων των τσιμεντοποιημένων κατασκευών. Έτσι, έχουν προταθεί σχεδιαστικές προσεγγίσεις βασισμένες σε πιθανοτικές, ημιπιθανοτικές αναλύσεις για έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών (Croce & Moldoni 2005; Lignola κ.α. 200). Σε τέτοια παραδείγματα, η μεταβλητότητα των ιδιοτήτων των πασσάλων υποτίθεται ότι είναι τυχαία δράση και μοντελοποιείται από πιθανοτικούς νόμους κατανομής βασισμένους σε στατιστικά αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων, κάτι που θα αναλυθεί στη συνέχεια. Ο Croce κ.α. (2001) παρατήρησαν ότι η μεταβλητότητα της διαμέτρου των εδαφοπασσάλων μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά από μια συνάρτηση κανονικής κατανομής, της οποίας η διασπορά εξαρτάται από τη διαβάθμιση του εδάφους.

Μια αποτελεσματική διαδικασία σχεδιασμού πρέπει να περιλαμβάνει τα δύο ακόλουθα βήματα: α) προσδιορισμός της μέσης τιμής της διαμέτρου του εδαφοπασσάλου β) πρόβλεψη της παρέκκλισης από τη μέση τιμή. Όσον αφορά τον προσδιορισμό της μέσης τιμής για τη διάμετρο του εδαφοπασσάλου, έχουν προταθεί πολλές εμπειρικές σχέσεις με πιο κατανοητές αυτές των Tornaghi & Pettinaroli (2004) και Flora & Lier (2011) που αναφέρθηκαν παραπάνω, στις οποίες ο ρόλος των διαφορετικών παραμέτρων έγχυσης λαμβάνεται υπόψη. Ωστόσο, η επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους σ' αυτές τις σχέσεις δεν ορίζεται. Σαν εναλλακτική των εμπειρικών, έχουν αναπτυχθεί θεωρητικά μοντέλα για το απλό σύστημα έγχυσης (single jet grouting system) (Modoni κ.α. 2006, 2008; Wang κ.α. 2012). Τα μοντέλα είναι πολυσύνθετα και λαμβάνουν υπ' όψιν το ρόλο των παραμέτρων έγχυσης και της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Ο Modoni και άλλοι (2006) παρουσίασαν τρία μοντέλα για την περιγραφή της φυσικής διεργασίας jet grouting σε διαφορετικά εδάφη, ένα μοντέλο για διαρροή για χονδρόκοκκα εδάφη και ένα μοντέλο για διάβρωση για αμμώδη και ιλυώδη εδάφη. Για τα παραπάνω εδάφη (χονδρόκοκκα, αμμώδη), παρουσίασαν ένα μοντέλο που προσομοιώνει το φαινόμενο της πλήρωσης των πόρων του εδάφους με το ρευστό που εγχέεται. Στα μοντέλα διάβρωσης για τα

αμμώδη και αργιλικά εδάφη, ο ρυθμός διείσδυσης του ρευστού στο έδαφος και η διάρκεια της δράσης της έγχυσης θεωρήθηκαν πολύ σημαντικοί παράγοντες που ελέγχουν την προκύπτουσα διάμετρο του πασσάλου. Κατά τη διεργασία, μεταβλητές όπως οι ιδιότητες του ρευστού, ο ρυθμός ροής, η διάμετρος των ακροφυσίων, όπως και η αντίσταση του εδάφους ελήφθησαν υπ' όψιν, ωστόσο η επίδραση του συμπιεσμένου αέρα και η ταχύτητα περιστροφής αγνοήθηκαν.

Το μοντέλο που θα αναλυθεί στη συνέχεια, είναι θεωρητικό και βασίζεται στην ελεύθερη τυρβώδη ροή του ρευστού και εισήχθη από τον Wang (2012). Αυτή η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη στα περισσότερα είδη εδαφών. Η φυσική του φαινομένου της μεταβλητότητας της διαμέτρου και οι διαθέσιμες πειραματικές πληροφορίες δείχνουν ότι η έκταση της διάβρωσης που προκαλείται από την έγχυση, που αποτελεί ουσιαστικά τη διάμετρο του τσιμεντοποιημένου εδαφοπασσάλου, προκύπτει από την ισορροπία μεταξύ της ενέργειας που απαιτείται για την επεξεργασία και της αντίστασης του εδάφους σε αυτή την επέμβαση. Η διαβρωτική ικανότητα του ρευστού εκτιμάται χρησιμοποιώντας μια εμπειρική σχέση, σύμφωνα με αποτελέσματα πειραματικών ερευνών. Θεωρήθηκε ότι κατά τη διάρκεια της έγχυσης, όπου το νερό ή το ένεμα διαβρώνει το έδαφος, υπάρχει μια απόσταση 'διείσδυσης' x_p μέσω της οποίας είναι δυνατή η εύρεση της διαμέτρου. Σύμφωνα με τον Wang (2012) υπάρχουν δύο θεωρίες που συνδέονται για να προκύψει η παραπάνω απόσταση: η θεωρία της τυρβώδους κινηματικής ροής και η θεωρία της διάβρωσης του εδάφους. Η εξέλιξη των υδροδυναμικών ιδιοτήτων μέσα στο ρευστό μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με ένα διαμήκες ή εγκάρσιο προφίλ ταχύτητας. Κατά την έξοδο από τα ακροφύσια οι γραμμές ροής είναι παράλληλες και έχουν μια σταθερή ταχύτητα v_0 . Η ταχύτητα, ωστόσο, μειώνεται εξαιτίας της τυρβώδους αλληλεπίδρασης μεταξύ του jet και του περιβάλλοντος ρευστού, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Σε απόσταση λίγων διαμέτρων από το ακροφύσιο x_c , η διάχυση είναι πλήρως αναπτυγμένη και η μεταβολή - μείωση της ταχύτητας δημιουργεί ένα προφίλ το οποίο 'πλαταίνει' όσο απομακρύνεται από το ακροφύσιο. Έτσι, η περιοχή της ροής χωρίζεται σε δύο ζώνες την αρχική όπου το ρευστό έχει ταχύτητα v_0 και η κύρια ζώνη κατά την οποία $v < v_0$.





Σχήμα 4.5: α),β): Σχηματική αναπαράσταση της ροής του ρευστού κατά την εκτόξευσή του από τα ακροφύσια (Hinze, 1948, Albertson et al, 1950)

Ο Modoni κ.α. (2006) χρησιμοποίησαν τη θεωρία του Hinze (1948) για να εκφράσουν την πτώση της ταχύτητας κατά την έγχυση, στη ζώνη διάχυσης ($x > x_c$). Προέκυψαν οι σχέσεις (21) και (22):

$$\frac{v_{x,r=0}}{v_0} = \Lambda \frac{d_0}{x} \quad (21)$$

$$\frac{v_{x,r}}{v_{x,r=0}} = \frac{1}{[1 + 1.33 \Lambda^2 (r/x)^2]^2} \quad (22)$$

Στις παραπάνω σχέσεις r είναι η απόσταση από τον άξονα της εκτόξευσης, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (Σχ. 4.5α). Συνδυάζοντας τις δύο αυτές εξισώσεις, η ταχύτητα σε κάθε σημείο με συντεταγμένες (x, r) μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση της ταχύτητας v_0 , της διαμέτρου του ακροφυσίου d_0 , και της αδιάστατης παραμέτρου Λ , η οποία ποσοτικοποιεί την αλληλεπίδραση μεταξύ του jet και του περιβάλλοντος ρευστού. Από φυσική άποψη το Λ αναπαριστά την ποσοστιαία μείωση της ταχύτητας $v_{x,r=0}$ σε απόσταση $100d_0$ από το ακροφύσιο. Ο συντελεστής Λ λαμβάνει υπ' όψιν την επιρροή του σχήματος του ακροφυσίου και το ιξώδες και μπορεί να εκφραστεί από τον παρακάτω τύπο, όπου N είναι ο λόγος ανάμεσα στο τυρβώδες ιξώδες του ρευστού και του νερού και Λ_w είναι ο συντελεστής στην περίπτωση έγχυσης νερού.

$$\Lambda = \frac{\Lambda_w}{\sqrt{N}} \quad (23)$$

Η διαφορετικά λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι οι λόγοι του κινηματικού ιξώδους και του laminar ιξώδους δεν είναι ίσοι προκύπτει:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\mu_w \rho_f}{\mu_f \rho_w}} \Lambda_w \quad (24)$$

Όπου μ_w και μ_f είναι τα laminar ιξώδη του νερού και του ρευστού αντίστοιχα, και ρ_f και ρ_w οι πυκνότητες του ρευστού και του νερού αντίστοιχα.

Η ροή φτάνει σε ένα όριο ταχύτητας (κρίσιμη ταχύτητα v_L), όπου η διάβρωση σταματά και η μέγιστη απόσταση διείσδυσης θα είναι ίση με τη μέγιστη ακτίνα του πασσάλου. Η μέγιστη απόσταση διείσδυσης x_p και η μέγιστη ακτίνα του πασσάλου δίνονται αντίστοιχα από τους παρακάτω τύπους:

$$x_p = \Lambda \frac{U_0 d_0}{v_L} \quad (25) \quad R_{\max} = R_i + \Lambda \frac{U_0 d_0}{v_L} \quad (26)$$

Όπου R_i είναι η διάμετρος του σωλήνα έγχυσης και είναι περίπου 0,09-0,1m.

Αντί να ληφθεί η μέγιστη τιμή της μέσης ταχύτητας, ο Modoni (2006) έλαβε μια ισοδύναμη μέση ταχύτητα για την κρίσιμη περιοχή και προσδιόρισε τη μέγιστη ακτίνα του πασσάλου με την παρακάτω σχέση, όπου ξ είναι ο λόγος της μέσης ταχύτητας του εκτοξευόμενου ρευστού προς τη ταχύτητα στον άξονα για $r=0$, U_c .

$$R_{\max} = R_i + \Lambda \sqrt{\xi} \frac{U_0 d_0}{v_L} \quad (27)$$

Παρακάτω δίνεται η σχέση της κινητικής ενέργειας στα ακροφύσια ανά μονάδα μήκους εδαφοπασσάλου (Croce & Flora, 2000) (Σχέση (28)):

$$E'_n = \frac{\pi M \rho d_0^2 v_0^3}{8 v_s} \quad (28)$$

Όπου M είναι ο αριθμός των ακροφυσίων, ρ είναι η πυκνότητα του εκτοξευόμενου ρευστού, Δt ($\Delta t=L/ v_s$) ο χρόνος που απαιτείται για να δημιουργηθεί ένας πάσσαλος μήκους L και v_s είναι η ταχύτητα ανύψωσης του monitor.

Η ενέργεια ανά μονάδα μήκους πασσάλου σε απόσταση x από το ακροφύσιο δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$E'(x) = 0.6 \Lambda \frac{d_0}{x} E'_n \quad (29)$$

Όπου αυτή η σχέση ισχύει όταν: $E'(x) \leq E'_n$ για $x \geq 0.6 \Lambda d_0$

Η σχέση (29) προτιμάται έναντι της (28), καθώς εκφράζει την εξέλιξη της διαθέσιμης ενέργειας σε οποιαδήποτε απόσταση x από το ακροφύσιο και λαμβάνει υπ' όψιν την αλληλεπίδραση μεταξύ του στελέχους και του ρευστού χρησιμοποιώντας την αδιάστατη παράμετρο Λ . Τέλος, χρησιμοποιείται για κάθε σύστημα εδαφικής ανάμειξης.

Ένα κύριο πρόβλημα που δημιουργείται κατά τη χρήση της σχέσης του E'_n είναι ότι όλοι οι όροι που δίνουν τη συγκεκριμένη ενέργεια στα ακροφύσια πρέπει να είναι γνωστοί. Ωστόσο, συνήθως η μόνη γνωστή παράμετρος είναι η ενέργεια στην αντλία E'_p (Tornaghi 1989), η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$E'_p = \frac{pQ}{v_s} \quad (30)$$

Όπου u_s είναι η μέση ταχύτητα ανύψωσης, p είναι η πίεση της έγχυσης στην αντλία και Q ο ρυθμός ροής του ρευστού. Οι σχέσεις που εκφράζουν τις E'_p και E'_n διαφέρουν εξαιτίας των συγκεντρωμένων και κατανεμημένων απωλειών ενέργειας στην περίμετρο της έγχυσης. Οι Croce και Flora (2000) σημείωσαν ότι η διαφορά μεταξύ των διαφορετικών αυτών ενεργειών έγκειται στην απόσταση μεταξύ της αντλίας και των ακροφυσίων. Συμβατικά, οι απώλειες ενέργειας είναι περίπου το 10% του E'_p (Flora & Lier, 2011; AGI 2012). Όταν μόνο η τιμή του E'_p είναι γνωστή τότε μπορεί να εφαρμοστεί η παρακάτω σχέση:

$$E'_n = 0.9E'_p \quad (31)$$

Καθώς ελήφθην υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ του εκτοξευόμενου και του περιβάλλοντος ρευστού, είναι βολική η έκφραση της σύνθεσης του διαβρωτικού ρευστού (νερό ή ένεμα) με μια παράμετρο Λ^* , και την ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης του Jet με το περιβάλλον ρευστό (grout spoil ή αέρας) μέσω μιας δεύτερης παραμέτρου α . Όσον αφορά την παράμετρο α , $\alpha=1$ όταν έχουμε απλό σύστημα έγχυσης, ενώ $\alpha>1$ για διπλό και τριπλό σύστημα έγχυσης. Ισχύει ότι:

$$\Lambda = \alpha\Lambda^* \quad (32)$$

Με αυτόν τον τρόπο δε γίνεται προσπάθεια για να συνοπολογιστεί και η ενέργεια του air jet όπως στην περίπτωση των Tornaghi και Pettiranoli (2004). Με την παραπάνω σχέση, η επίδραση του air jet λαμβάνεται υπ' όψιν με την παρατηρούμενη αύξηση της υδροδυναμικής αποτελεσματικότητας του ενέματος ή του νερού. Από πειραματικά δεδομένα ο Modoni βρήκε ότι $\Lambda^*=16$ για ένα jet νερού. Για Λ^* ενεμάτων διαφορετικής σύνθεσης, χρησιμοποιώντας τη θεωρία του Hinze προτάθηκε η παρακάτω σχέση:

$$\Lambda^* = \Lambda_w^* \sqrt{\frac{\mu_w \rho_g}{\mu_g \rho_w}} \quad (33)$$

Όπου μ είναι ο δυναμικός συντελεστής ιξώδους και οι δείκτες w και g δηλώνουν νερό και ένεμα αντίστοιχα.

Ισχύει: $\mu_w = 0,001 \text{ N s/m}^2$ και $\rho_w = 9,81 \text{ Kn/m}$

Τελικά λαμβάνοντας υπ' όψιν τις παραπάνω σχέσεις που προτάθηκαν από του Modoni, Croce και Flora, προέκυψε η παρακάτω σχέση (Ribeiro, 2014), όπου $n=Mo$ αριθμός των ακροφυσίων και ρ_f η πυκνότητα του ρευστού.

$$R_{\max} = R_i + \sqrt{\xi} \frac{\Lambda}{v_L} \left[\frac{7.2 \cdot v_s \cdot d_0 \cdot E_p}{n \cdot \pi \cdot \rho_f} \right]^{1/3} \quad (34)$$

Όσον αφορά την αντίσταση του εδάφους στη διάβρωση, πειραματικά δεδομένα έχουν δείξει ότι οι μηχανισμοί διάβρωσης είναι διαφορετικοί για λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα εδάφη. Για τα λεπτόκοκκα εδάφη, η διάβρωση περιλαμβάνει κυρίως την κοπή των μεγαλύτερων τμημάτων. Ένας απλός τρόπος για να ποσοτικοποιηθεί η αντίσταση του εδάφους στη διάβρωση είναι η συσχέτιση με τη διατμητική αντοχή του εδάφους, όπως έγινε από τους Dabbagh κα (2002), Modoni κα (2006), Wang κα (2012). Σ' αυτή την εργασία προτάθηκε η αναπαράσταση της διατμητικής αντοχή του εδάφους με τα αποτελέσματα των Standard Penetration Tests (SPTs) (N_{SPT}) (ASTM D1586, ASTM 2011a) για χονδρόκοκκα εδάφη και Cone Penetration Tests (CPTs) (q_u) για λεπτόκοκκα εδάφη. Αυτή η επιλογή έγινε γιατί τα SPTs και τα CPTs είναι γνωστά σε επιτόπου δοκιμές. Ακόμα, τα N_{SPT} και q_c λαμβάνουν υπ' όψιν την επίδραση των ιδιοτήτων του εδάφους (είτε η ενεργή γωνία τριβής φ' ή η αστράγγιστη διατμητική αντοχή s_u). Η μέση τιμή της διαμέτρου του τσιμεντοποιημένου εδαφοπασσάλου D_a μπορεί να εκφραστεί ως:

$$D_a = D_{\text{ref}} J^\beta S^\delta \quad (35)$$

Όπου D_{ref} είναι η διάμετρος αναφοράς, είναι ουσιαστικά αυτή που αποκτάται μετά την έγχυση και εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους, J είναι η ικανότητα διάβρωσης και S είναι η αντίσταση στη διάβρωση. Η διάμετρος D_{ref} εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους και μαζί με τους εκθέτες β και δ ποσοτικοποιούνται βάσει δεδομένων. Η διάμετρος D_{ref} δίνεται από τον παρακάτω λόγο:

$$J = \frac{E'(x)}{E'_{\text{ref}}(x)} = \frac{\alpha \Lambda^* E'_n}{\alpha_{\text{ref}} \Lambda_{\text{ref}}^* E'_{n,\text{ref}}} \quad (36)$$

Όπου E'_n είναι η κινητική ενέργεια στα ακροφύσια.

Η αντίσταση του εδάφους θα εκφραστεί από τις παρακάτω σχέσεις:

$$S = \frac{N_{SPT}}{N_{SPT \text{ ref}}} = \frac{N_{SPT}}{10} \quad \text{Για χονδρόκοκκα εδάφη} \quad (37)$$

$$S = \frac{q_c}{q_{c \text{ ref}}} = \frac{q_c}{1.5} \quad (q_c \text{ in MPa}) \quad \text{Για λεπτόκοκκα εδάφη} \quad (38)$$

Τελικά, η μέση διάμετρος ενός τσιμεντοποιημένου εδαφοπασσάλου μπορεί να υπολογιστεί από τους παρακάτω τύπους:

$$D_a = D_{\text{ref}} \left(\frac{\alpha \Lambda^* E'_n}{7.5 \times 10} \right)^\beta \left(\frac{q_c}{1.5} \right)^\delta \quad \text{Για λεπτόκοκκα εδάφη} \quad (39)$$

$$D_a = D_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \Lambda^* \cdot E'_n}{7.5 \cdot 10} \right)^\beta \cdot \left(\frac{N_{SPT}}{10} \right)^\delta \quad \text{Για χονδρόκοκκα εδάφη} \quad (40)$$



Σχήμα 4.6: Επιτόπου δοκιμές εδαφοπασσάλων

Θεωρητικό μοντέλο βασισμένο στις ισοδύναμες τάσεις

Ο μηχανισμός διάβρωσης που προκαλείται από τη δράση της εκτόξευσης στο έδαφος θεωρήθηκε από το Modoni (2006) πρόβλημα ισορροπίας των τάσεων. Ορίστηκε μια ισοδύναμη διαβρωτική δύναμη ψ_A , η οποία ποσοτικοποιεί τη δράση της έγχυσης στο έδαφος, και μια ισοδύναμη δύναμη αντίστασης ψ_R η οποία λαμβάνει υπ' όψιν την αντίσταση του εδάφους στη διάβρωση, και είναι διαφορετική για άμμους και αργίλους, όπως φαίνεται από τις αντίστοιχες σχέσεις.

$$\psi_A = \Omega_A \frac{\gamma_f}{g} U_f^2 \quad (41)$$

$$\psi_{R, sands} = \Omega_{R, sands} [c' + \sigma' \tan(\phi')] \quad (42) \quad \psi_{R, clays} = \Omega_{R, clays} s_u \quad (43)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις Ω_A και Ω_R είναι αδιάστατες σταθερές οι οποίες αφορούν αντίστοιχα τη διάχυση της ενέργειας και τη σχέση μεταξύ της αντοχής του εδάφους και της αντίστασης του στη διάβρωση, U_f και γ_f είναι η ισοδύναμη μέση ταχύτητα και το ειδικό βάρος του ρευστού που εγχέεται (ένεμα), c' , ϕ' και s_u είναι οι ιδιότητες αντοχής του εδάφους (συνοχή, γωνία τριβής και αστράγγιστη διατμητική αντοχή) και σ' είναι ενεργή ορθή τάση. Σημειώνεται ότι σ' αυτό το μοντέλο η πίεση πόρων θεωρείται αποτέλεσμα της υδροδυναμικής δράσης της εκτόξευσης και αντιστοιχεί στο δεύτερο όρο της παρακάτω εξίσωσης. όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, γ_f είναι το βάρος του ρευστού που εγχέεται και U_f είναι η μέση ταχύτητα του ρευστού.

$$\sigma' = \sigma_z - \frac{\gamma}{2g} U_f^2 \quad (44)$$

Η έγχυση διαβρώνει το έδαφος όσο η πίεση της διάβρωσης ψ_A είναι μεγαλύτερη από την πίεση της αντίστασης στη διάβρωση ψ_R . Η μέγιστη απόσταση διείσδυσης επιτυγχάνεται όταν η πίεση της διάβρωσης γίνει ίση με την πίεση αντίστασης του εδάφους. Έτσι, η κρίσιμη ταχύτητα μπορεί να εκφραστεί από τις παρακάτω σχέσεις για αμμώδη και αργιλικά εδάφη αντίστοιχα, όπου Ω_s και Ω_c αντιστοιχούν στο λόγο των Ω_R και Ω_A για άμμους και αργίλους αντίστοιχα.

$$v_{L, sands} = \sqrt{\Omega_s \frac{g}{\gamma_f} \frac{c' + \sigma \cdot \tan(\phi')}{1 + \Omega_s \cdot 0.5 \cdot \tan(\phi')}} \quad (45)$$

$$v_{L, clays} = \sqrt{\Omega_c \frac{g}{\gamma_f} s_u} \quad (46)$$

Με αυτό το μοντέλο προέκυψαν διάμετροι σχετικά μικρές (μέγιστη μέση διάμετρος 1,11m) και το μέγιστο σφάλμα ήταν μικρότερο από 15%.

Μια νέα προσέγγιση που αναπτύχθηκε πρόσφατα σύμφωνα με τον Carnevale (2011), στα πλαίσια της οποίας σχεδιάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο, βασισμένο σε παρατηρήσεις πεδίου, και δίνεται η δυνατότητα εκτίμησης της διαμέτρου του πασσάλου. Τα βασικά στοιχεία αυτού του προγράμματος, προήλθαν από το συνδυασμό της Εδαφομηχανικής με τη κατανομή της πίεσης του ρευστού, Η διάμετρος ενός πασσάλου είναι συνάρτηση της διαθέσιμης ενέργειας και της αντίστασης του εδάφους. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του εδάφους, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που απαιτείται για τη σύνθεση ενός πασσάλου (Carnevale 2011). Η έγχυση ενέματος με υψηλή πίεση διαβρώνει το έδαφος και το προκύπτον αποτέλεσμα είναι ένα μίγμα νερού εδάφους και ενέματος. Σύμφωνα με τον Carnevale, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους, το παραπάνω μίγμα μπορεί να ακολουθήσει τρεις διαδρομές: α) παραμένει στα επίπεδα του monitor και σχηματίζεται ο πάσσαλος β) διαχέεται στο περιβάλλον έδαφος με τη βοήθεια της διαπερατότητας γ) φτάνει στην επιφάνεια μέσω του σωλήνα γεώτρησης με τα υπολείμματα εδάφους (spoil). Σύμφωνα, λοιπόν, με τα παραπάνω ο Carnevale συμπέρανε ότι η πίεση του ενέματος στο ακροφύσιο P_n μειώνεται με την αύξηση της οριζόντιας απόστασης x από το ακροφύσιο. Η διάβρωση του εδάφους θα συνεχίσει μέχρι η τιμή της πίεσης να είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση του εδάφους q_u . Η απόσταση x είναι η ακτίνα διάβρωσης R_e , όταν η πίεση της έγχυσης είναι ίση με την αντίσταση q_u . Το έδαφος στα όρια της R_e έχει αστοχήσει, έτσι η πλαστική ζώνη γύρω από την ακτίνα αυτή θα συμβάλλει στην αύξηση της οριζόντιας μετακίνησης δ . Η διάμετρος του πασσάλου μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

Το μοντέλο περιλαμβάνει και μια εξίσωση ισορροπίας βαρών η οποία πρέπει να ισχύει, ώστε το μοντέλο να είναι ακριβές, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 4.7):

$$D_c = 2 * (R_e + \delta) \quad (47)$$

$$P_m + P_t - P_p = P_c + P_r + P_d \quad (48)$$

Όπου P_m είναι το βάρος του ενέματος που εγχέεται, P_t το βάρος του επεξεργασμένου εδάφους, P_p το βάρος του εδάφους που απομακρύνεται κατά τη διάτρηση, P_c το βάρος του πασσάλου, P_r το βάρος των υπολειμμάτων εδάφους που απομακρύνονται προς την επιφάνεια (spoil) και P_d το βάρος του 'διασκορπισμένου' μίγματος.

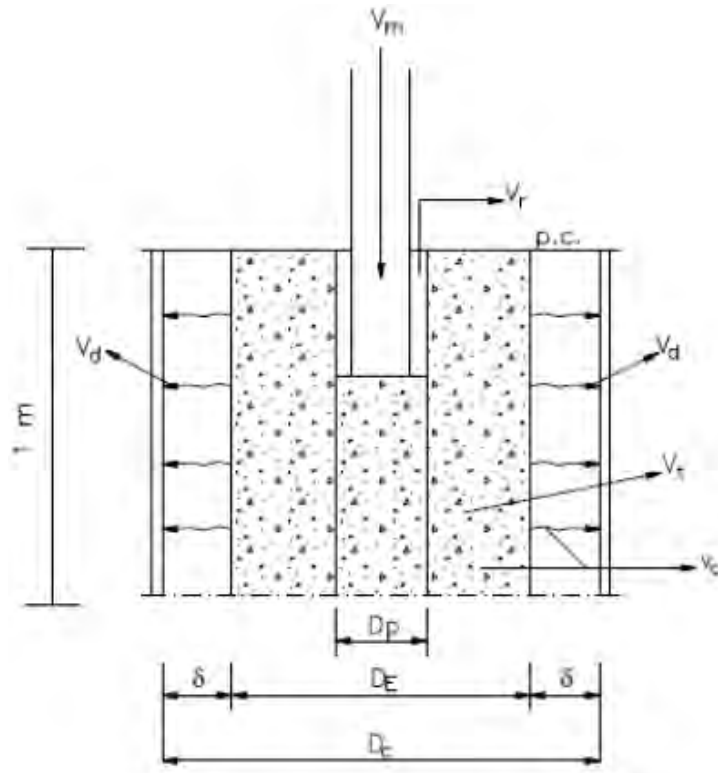
Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να εκφραστεί και με όρους όγκων, όπου ο όρος P_p παραλείπεται (Carnevale, 2011). Επομένως, προκύπτει:

$$\gamma_m \cdot V_m (1 - \alpha - \beta) = \gamma_c \cdot \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} - \gamma \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [(D_c - 2 \cdot \delta)^2 - D_p^2] \quad (49)$$

Όπου :

$$\alpha = \frac{\gamma_r \cdot V_r}{\gamma_m \cdot V_m}, \beta = \frac{\gamma_d \cdot V_d}{\gamma_m \cdot V_m} \quad (50) \quad V_d = \pi \cdot k \cdot \frac{q_u}{\gamma_d} \cdot \Delta t \quad (51)$$

Όπου γ_d είναι το ειδικό βάρος του διασκορπισμένου ρευστού, το οποίο είναι περίπου ίσο με το γ_m , k είναι η διαπερατότητα του εδάφους και Δt είναι το χρονικό βήμα.



Σχήμα 4.7: Όγκοι που συμμετέχουν στο μοντέλο (Carnevale, 2011)



Σχήμα 4.8: Επιτόπου παρατηρήσεις της διαμέτρου των πασσάλων στο πεδίο

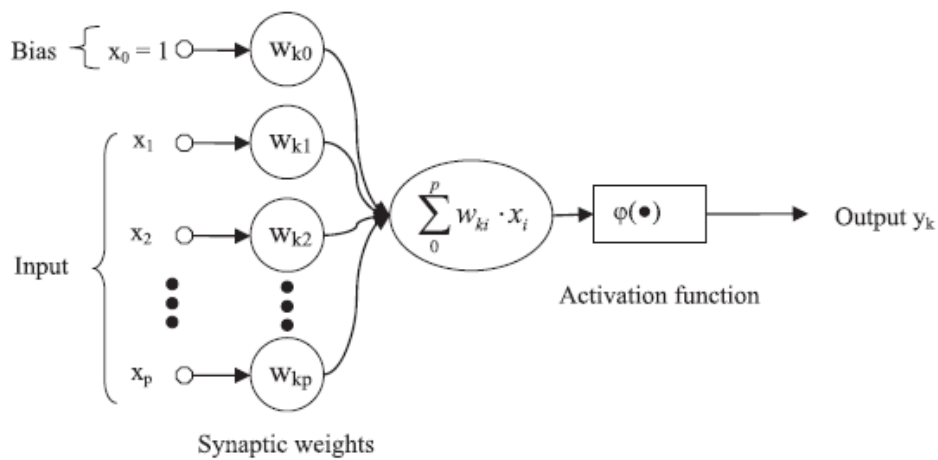
4.1.3 Artificial Neural Networks (ANN)

Η πρόβλεψη της διαμέτρου, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί βασικό βήμα για το σχεδιασμό τέτοιου είδους κατασκευών, καθώς μπορεί να προκύψουν αρνητικά αποτελέσματα από μια ακατάλληλη επιλογή κατά τη διεργασία. Έχουν προταθεί πολλές εμπειρικές και θεωρητικές σχέσεις, κάποιες από τις οποίες αναλύθηκαν παραπάνω, που υπολογίζουν τη μέση διάμετρο των πασσάλων. Ωστόσο, η αβεβαιότητα όσον αφορά αυτές τις σχέσεις είναι μεγάλη, καθώς γίνονται πολλές αυθαίρετες υποθέσεις για τη σύνθεσή τους. Με σκοπό τη μείωση αυτών των αυθαίρετων επιλογών, προτάθηκε μια μέθοδος που βασίζεται στα artificial neural networks (ANN). Τέτοιου είδους δίκτυα συνιστούν τη δημιουργία ενός ηλεκτρονικού κώδικα που περιλαμβάνει πειραματικές παρατηρήσεις και τη χρήση σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου για τον υπολογισμό άλλων μεγεθών. Οι μέθοδοι που προτάθηκαν στην προηγούμενη ενότητα μέσω των θεωρητικών μοντέλων αποτελούν τα πιο ενημερωμένα και ολοκληρωμένα εργαλεία για την πρόβλεψη της διαμέτρου. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές δεν είναι τόσο πρακτικές και άμεσες, καθώς η εφαρμογή τους απαιτεί τη γνώση όλων των παραμέτρων έγχυσης, κάτι που δεν είναι σύνηθες και μπορούν να εφαρμοστούν σε περιορισμένες περιπτώσεις.

Η μέθοδος των ANN αποτελεί μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση, η οποία βασίζεται στη συγκέντρωση δεδομένων, ώστε η πρόβλεψη να γίνει πιο ακριβής και να περιοριστούν οι αυθαίρετες υποθέσεις. Οι τεχνικές συγκέντρωσης δεδομένων είναι ευρέως διαδεδομένες σε διάφορους τομείς, χάριν στην ικανότητα τους να λύνουν πολυδιάστατα και σύνθετα προβλήματα, στα οποία οι συμβατικές προσεγγίσεις έχουν αποτύχει (Hui, 2011). Όσον αφορά τη βαθιά εδαφική ανάμιξη, η τεχνική Support Vector Machine (SVM) χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς (Tinoco κα, 2011) για την πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του τσιμεντοποιημένου υλικού. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει μοντέλα με αλγόριθμους οι οποίοι αναλύουν δεδομένα για ταξινόμηση και παλινδρόμηση. Η μέθοδος των ANN προτιμάται λόγω της μεγαλύτερης απλότητας συγκριτικά με τα SVM. Το βασικό στοιχείο των ANN είναι η δημιουργία σχέσεων μεταξύ των αιτιών και των αποτελεσμάτων, όπως λειτουργεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος, στηριζόμενα σε προηγούμενες παρατηρήσεις και στην υιοθέτηση αυτών των σχέσεων για μελλοντικές προβλέψεις. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε πολλά γεωτεχνικά προβλήματα. Χάριν στην ικανότητα αυτής της μεθόδου να περιλαμβάνει πολλαπλές μεταβλητές, με άγνωστη μεταξύ τους σχέση, και να παραβλέπει τα άγνωστα δεδομένα, καθίσταται ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα καθώς εντοπίζει τις σχέσεις αίτιο - αποτέλεσμα σε σύνθετους μηχανισμούς, όπως αυτός της εδαφικής ανάμιξης (jet grouting). Αναγνωρίστηκε ένα εύρος από μεταβλητές για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων της τεχνικής jet grouting σε απλή και ολοκληρωμένη μορφή. Ένας μεγάλος αριθμός από πειραματικές παρατηρήσεις, περιλαμβάνοντας εφαρμογές του απλού, διπλού και τριπλού συστήματος έγχυσης σε διαφορετικά είδη εδάφους, συγκεντρώθηκε από τη βιβλιογραφία για την τροχοδρόμηση του δικτύου αυτού. Δοκιμάστηκαν διαφορετικές πιθανές δομές του δικτύου, ώστε να βρεθεί η πιο

αποτελεσματική που θα χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά των εναλλακτικών μεθόδων.

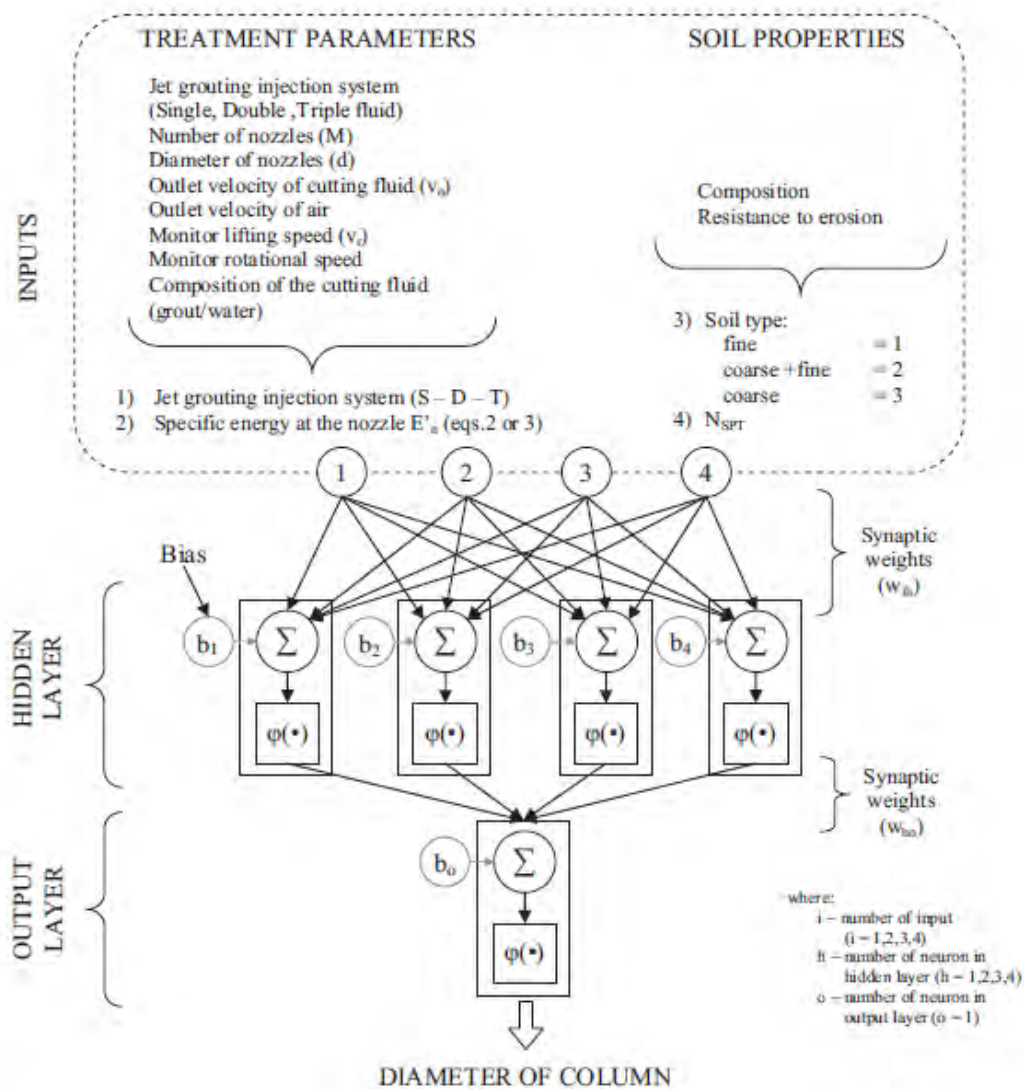
Ο βασικός στόχος των ANN είναι η γνώση της συμπεριφοράς ενός συστήματος, ξεκινώντας απευθείας από την παρατήρηση χωρίς αυθαίρετες υποθέσεις και τη σύνδεση των μεταβλητών εισόδου και εξόδου για την πρόβλεψη μελλοντικών αντίστοιχων φαινομένων. Ο στόχος επιτυγχάνεται, σχηματοποιώντας το πρόβλημα που μελετάται με έναν αριθμός μεταβλητών εισόδου και εξόδου, επιλέγοντας τον πιο κατάλληλο υπολογιστικό αλγόριθμο, δοκιμάζοντας πολλές περιπτώσεις για τις οποίες η απόκριση του συστήματος είναι γνωστή.



Σχήμα 4.9: Βασική δομή ANN

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η βασική δομή ενός ANN (Σχ. 4.9), όπου ένα γενικό σήμα εισόδου x_i πολλαπλασιάζεται με ένα συγκεκριμένο συναπτικό βάρος (δηλώνει το εύρος της σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων) w_{ki} και στη συνέχεια προστίθεται ένα σφάλμα w_{k0} όπου αυτό είναι απαραίτητο. Όλα τα παραπάνω προστίθενται και επεξεργάζονται με μια προκαθορισμένη συνάρτηση, η οποία προσδιορίζει τη συμπεριφορά του κόμβου.

Για την επιτυχή εφαρμογή ενός ANN, είναι πολύ σημαντικό η πολυπλοκότητα του προβλήματος, που εξαρτάται από τον αριθμό των μεταβλητών εισόδου και εξόδου και τις συναρτησιακές σχέσεις να υποστηρίζεται επαρκώς από δείγμα πολλών παρατηρήσεων (Haykin, 1999).



Σχήμα 4.10: Δομή του ANN για τον υπολογισμό της διαμέτρου του πάσσαλου

Σύμφωνα με τη μελέτη που έγινε από τους M. Ochmański, G. Modoni, J. Bzówka για την πρόβλεψη της διαμέτρου με τη χρήση των ANN ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Η διάμετρος ενός πασσάλου εξαρτάται από τις παραμέτρους έγχυσης και τις ιδιότητες του φυσικού εδάφους. Για την απλοποίηση της λογικής δομής του δικτύου επιλέχθηκαν λιγότερες μεταβλητές εισόδου όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Αγνοήθηκε η ταχύτητα περιστροφής του τρυπανιού, καθώς παρόλο που επηρεάζει την ομοιογένεια του εδάφους, δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διάσταση των πασσάλων. Οι άλλες μεταβλητές που αφορούν το ρευστό (ένεμα τσιμέντου για απλό ή διπλό σύστημα έγχυσης και νερό για το τριπλό σύστημα), που είναι η ταχύτητα έγχυσης v_0 , η πυκνότητα ρ , ο αριθμός M και η διάμετρος των ακροφυσίων d και η ταχύτητα ανύψωσης v_l ομαδοποιήθηκαν στην προσδιορισμένη ενέργεια στα

ακροφύσια E'_n η οποία δίνεται απο τις παρακάτω εξισώσεις των Croce και Flora που παρατέθηκαν και στην προηγούμενη ενότητα (Σχέσεις (28), (31)).

$$E'_n = \frac{1}{2} \frac{m \cdot v_0^2}{L} = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{M \cdot \rho \cdot d^2 \cdot v_o^3}{v_r} \quad \text{και} \quad E'_n = 0.9E'_p$$

Ο ρόλος του φυσικού εδάφους ελήφθη υπ' όψιν με το διαχωρισμό ανάμεσα στα λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα υλικά, υποδιαιρώντας τα τελευταία σε δύο κατηγορίες (χονδροκοκκα με λεπτόκοκκα και χωρίς λεπτόκοκκα) ανάλογα με την πιθανή παρουσία του λεπτόκοκκου κλάσματος στον πίνακα των χονδρόκοκκων, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Η ταξινόμηση των εδαφών έγινε με τον κανονισμό ASTM DD2487 (2011), όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Soil type		ASTM D2487 classification
Coarse grained	Without fine	Gravels and sands with less than 5% fines GW-GP-SW-SP
	With fine	Gravels and sands with more than 5% fines GM-GC-SM-SC
Fine grained		Silts, clay and organic soils CL-ML-OL-CH-MH-OH-Pt

Πίνακας 4.2: Χαρακτηρισμός των τύπων εδαφών από τον κανονισμό ASTM D2487, για την εισαγωγή τους στο δίκτυο

Ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποιες από τις παρατηρήσεις που ελήφθησαν για τη δημιουργία του δικτύου για κάθε σύστημα έγχυσης:

Reference	Case study	Soil properties			USCS	N_{SPT} [-]	Specific energy at nozzle, E'_n (MJ/m)	Diameter, D_a (m)	
		Soil type							
1	Bianco and Santoro (1995)	Rio Matzeu, Italy	Coarse grained	Without fine	Sandy gravel	GW or GP	10	8.2	0.97
2-3	Croce et al. (1994)	Polcevera, Italy			Dense sandy gravel		20	13.2-14.6	1.10-1.20
4-8	Croce et al. (2011)	Barcelona, Spain			Gravelly sand	SW or SP	23-34	15.4-29.4	0.76-1.08
9	Flora et al. (2013)	Caivano, Italy			Pyroclastic silt and gravelly sand	SM	14	16.9	1.11
10		Trento, Italy			Gravelly sand and gravelly silt	SM or SP or SW	28	15.2	1
11-16	Croce and Flora (1998)	Vesuvio, Italy		With fine	Dense silty and gravelly sand	SW-SM or SP-SM	15	9-23.5	0.66-0.97
17	Tornaghi and Pettinaroli (2004)	S. Benedetto, Italy			Medium loose silty sand	SM or GC-GM	8	7.2	0.69
18		Varallo P. (A), Italy			Gravel in silty sand matrix		18	7.4	0.6
19		Mazzè, Italy					18	14.4	0.7
20		Casalmaiocco, Italy			Silty sand		10	21.6	0.78
21	Flora et al. (2013)	Castellamare, Italy			Pyroclastic silty sand		13	11.5	0.83
22	Tornaghi and Pettinaroli (2004)	Arezzo, Italy	Fine grained		Medium stiff clayey sand silt	CL-ML or ML	3	14.4	0.63

Πίνακας 4.3: Λίστα παρατηρήσεων απλού συστήματος έγχυσης που χρησιμοποιήθηκαν στο δίκτυο

Χωρική Μεταβλητότητα γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών

List of observation adopted for training the neural network (double fluid system).

Reference	Case study	Soil properties					Specific energy at nozzle, E_n (MJ/m)	Diameter, D_a (m)	
		Soil type		USCS	N_{SPT} [-]				
51	Modoni and Bzówka (2012)	Bojszowy Nowe, Poland	Coarse grained	Without fine	Sand	SW or SP	25	4.5	0.80
51-54	Flora et al. (2013)	Biandrate, Italy			Gravelly sand and sandy gravel	SW or SP or GW or GP or SM	50	17.2–21.5	1.00
55-56		Caivano, Italy			Pyroclastic silty and gravelly sand		14	16.1–21.2	1.50–1.70
57	Mauro and Santillan (2005)	Kansas, USA			Medium to gravelly sand	SW or SP	24	155	2.30
58-60	Tomaghi and Pettinaroli (2004)	Casalmaicco, Italy		With fine	Medium loose silty sand	SM	8	18–31	1.40–1.50
61-74					Silty sand		10	13.5–73.8	1.19–2.17
75-83	Flora et al. (2013)	Castellamare, Italy			Pyroclastic silty sand		13	9.1–49.8	0.90–1.80
84-87	Durgunoglu et al. (2003)	Izmir, Turkey			Silty sand		3	7.20–8.80	0.95–1.1
88	Tomaghi and Pettinaroli (2004)	Venezia, Italy	Fine grained		Soft clayey silt	CL or CL-ML or CH or MH	5	18	0.85
89-92	Flora et al. (2013)	Bologna, Italy			Soft silty clay		9	22.2–29.8	0.61–1.02
93		Sarno, Italy			Soft clay		7	31.6	0.80

Πίνακας 4.4: Λίστα παρατηρήσεων διπλού συστήματος έγχυσης που χρησιμοποιήθηκαν στο δίκτυο

List of observation adopted for training the neural network (triple fluid system).

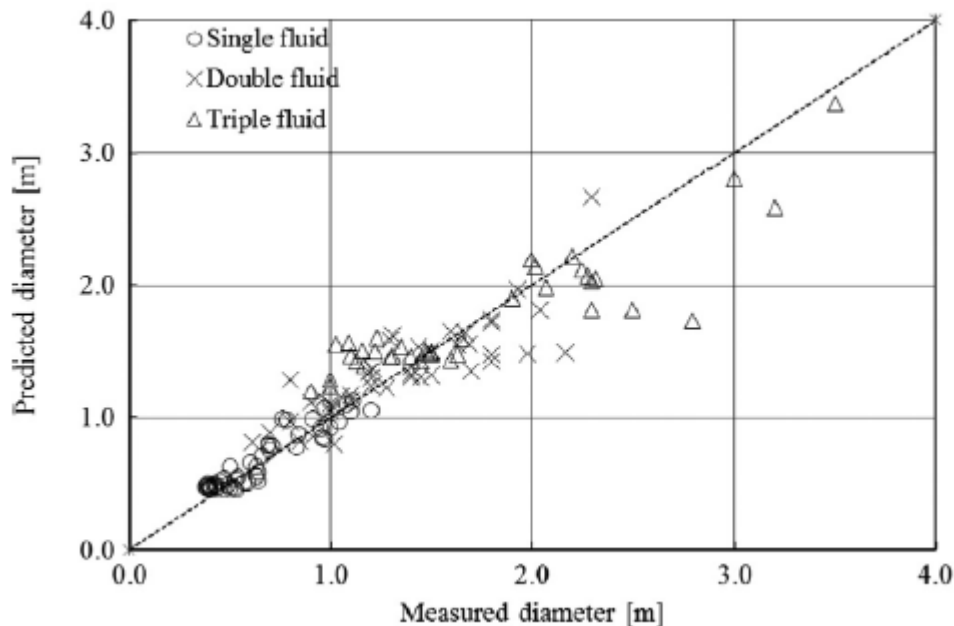
Reference	Case study	Soil properties					Specific energy at nozzle, E_n (MJ/m)	Diameter, D_a (m)	
		Soil type		USCS	N_{SPT} [-]				
94-95	Mauro and Santillan (2005)	Kansas, USA	Coarse grained	Without fine	Medium to gravelly sand	GW or GP or SW or SP	24	150–270	3.20–3.50
96-98	Nikbakhtan and Osanloo (2009)	Shahriar Dam, Iran			Sand and gravel		2	33.5–66.8	1.13–1.31
88-110	Tomaghi and Pettinaroli (2004)	S. Benedetto, Italy		With fine	Medium loose silty sand	SM or SW-SM or SP-SM	8	12–85	1.10–1.90
111	Stark et al. (2009)	Manhattan, Kansas, USA			From silty sand to medium sand		12	220	3.00
112-114	Tomaghi and Pettinaroli (2004)	Casalmaicco, Italy			Silty sand		10	97	2.32
115								97	2.28
116								98	2.25
117-119	Shen et al. (2012)	Shanghai, China			Sandy silt and silty sand		33	54.7–63	2.00–2.30
120-125	Nikbakhtan and Osanloo (2009)	Shahriar Dam, Iran	Fine grained		Lean clay or plastic silt	CL or ML	5	33.5–94.9	1.03–1.47
126-128	Shen et al. (2012)	Shanghai, China			Clayey silt and soft clay	CL or CL-ML or CH	3	54.2–63	2.30–2.80
129-131					Stiff silty clay		15	54.2–63	0.90–1.00

Πίνακας 4.5: Λίστα παρατηρήσεων τριπλού συστήματος έγχυσης που χρησιμοποιήθηκαν στο δίκτυο

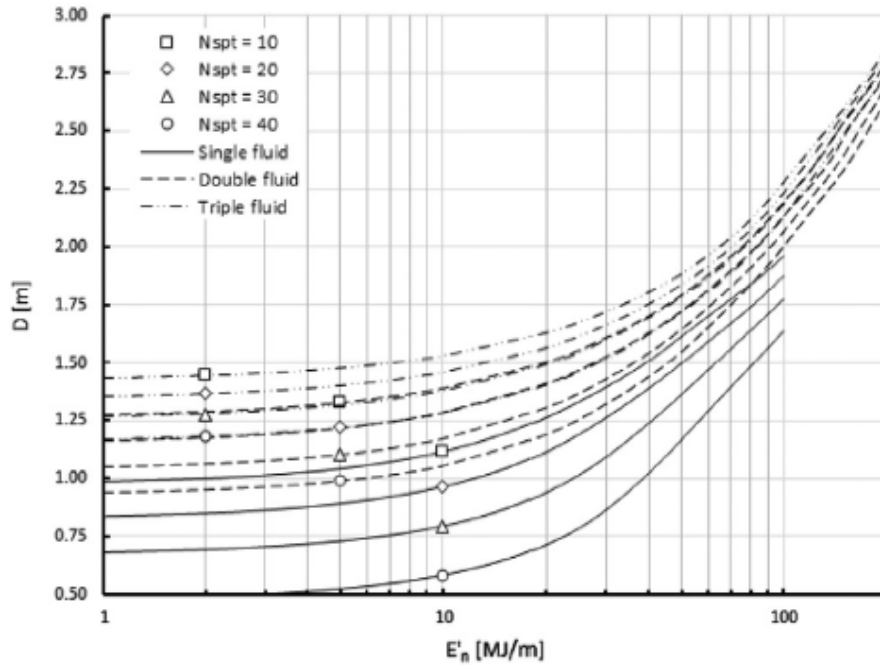
Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρήσεων, η αντίσταση του εδάφους στη δράση της έγχυσης ποσοτικοποιήθηκε με βάση τον αριθμό των χτύπων των Standard Penetration Tests (N_{SPT}). Μολονότι αυτή η ποσότητα δεν αποτελεί την καλύτερη επιλογή για τα συνεκτικά υλικά, η επιλογή μιας ενιαίας τιμής για όλα τα υλικά έγινε για λόγους απλοποίησης της δομής του δικτύου.

Έτσι τα δεδομένα εισόδου χαρακτηρίζονται από τέσσερις μεταβλητές, οι δύο από τις οποίες που είναι το σύστημα έγχυσης και η ενέργεια E'_n που χαρακτηρίζουν τις παραμέτρους της επεξεργασίας, και οι άλλες δύο που είναι το είδος εδάφους και ο αριθμός N_{SPT} που ποσοτικοποιούν το ρόλο του εδάφους, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Το δίκτυο αυτό δοκιμάστηκε σε συνολικό αριθμό 131 παρατηρήσεων οι οποίες φαίνονται στους παραπάνω πίνακες. Κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις αναφέρεται σε δοκιμές πεδίου, όπου οι ιδιότητες (σύνθεση και διατμητική αντοχή) του φυσικού εδάφους, οι παράμετροι έγχυσης (στο ακροφύσιο και στην αντλία) καθώς και οι διάμετροι που προέκυψαν είναι γνωστές. Τα δεδομένα χωρίστηκαν σε τρεις κύριες κατηγορίες ανάλογα με το σύστημα έγχυσης. Για κάθε έναν από τους παραπάνω πίνακες έγιναν δοκιμές για λεπτόκοκκα, χονδρόκοκκα με λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα υλικά, δίνοντας για κάθε περίπτωση την ενέργεια στο ακροφύσιο, την υπολογισμένη διάμετρο και τον αριθμό των χτύπων SPT.

Έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από το ANN (predicted), με τις πραγματικές υπολογισμένες τιμές (measured), όπως φαίνεται σχηματικά από τα παρακάτω διαγράμματα (Σχ. 4.11):



Σχήμα 4.11: Σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το ANN (Prediction of the diameter of jet grouting columns with artificial neural networks, M. Ochmańska, G. Modonib, J. Bzówkac)



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα διαμέτρου (ANN) με την ενέργεια στα ακροφύσια και τον αριθμό Nspt, (Prediction of the diameter of jet grouting columns with artificial neural networks, M. Ochmańska, G. Modonib, J. Bzówkac)

Για κάθε δοκιμή, εκτιμήθηκε το επίπεδο συσχέτισης μεταξύ της μέτρησης και της πρόβλεψης που προσδιορίστηκαν συγκρίνοντας τις n μετρημένες διαμέτρους από τους παραπάνω πίνακες με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες που προέκυψαν από το δίκτυο. Τελικά, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Mean Squared Error MSE) υπολογίστηκε από τον παρακάτω τύπο και παρέχει έναν δείκτη που περιγράφει την ποιότητα της πρόβλεψης.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_{i_predicted} - D_{i_measured})^2 \quad (m^2) \quad (52)$$

όπου $D_{i_measured}$ είναι η υπολογισμένη τιμή της διαμέτρου των διαθέσιμων δειγμάτων πειραματικών παρατηρήσεων, $D_{i_predicted}$ είναι η τιμή που υπολογίστηκε για τα αντίστοιχα δεδομένα εισόδου από το δίκτυο. Καθώς τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν τυχαία από τον ηλεκτρονικό κώδικα, η $D_{i_predicted}$ εκτιμήθηκε ως η μέση τιμή είκοσι επαναληπτικών δοκιμών.

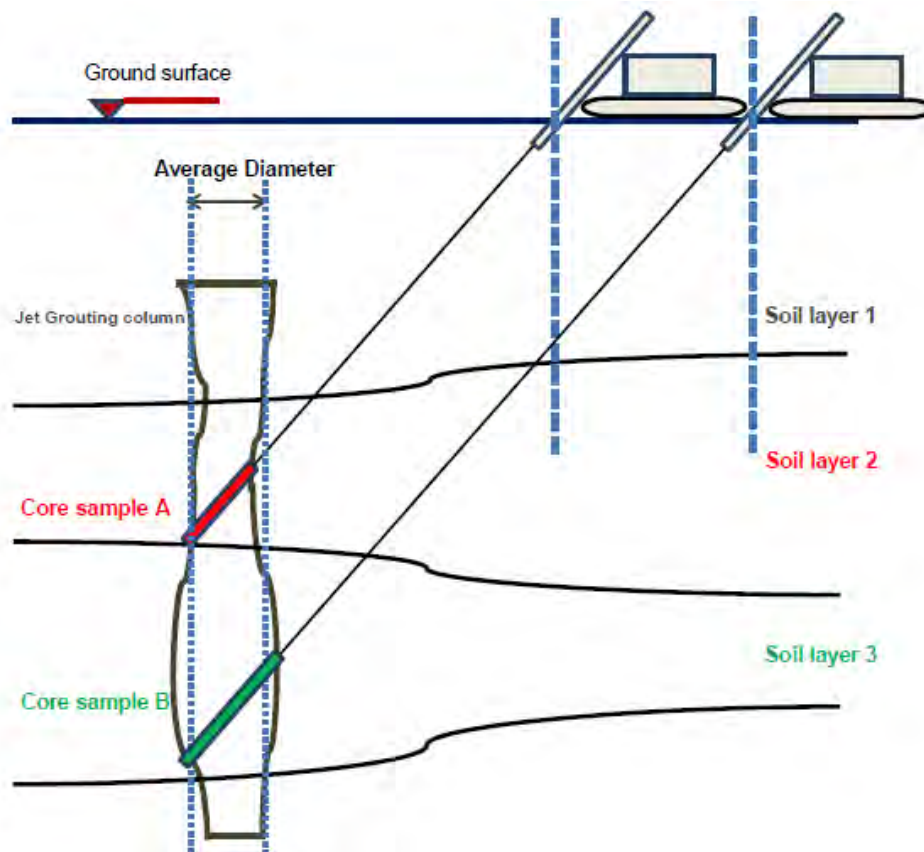
Η αξιοπιστία της πρόβλεψης μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από τον παρακάτω τύπο:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_n \left| \frac{D_{i_predicted} - D_{i_measured}}{D_{i_measured}} \right| \quad (\%) \quad (53)$$

Συγκριτικά με το σφάλμα MSE, το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα MAPE δίνει μια εκτίμηση του μέσου ποσοστιαίου σφάλματος της πρόβλεψης.

Τελικά, τα μέσα ποσοστιαία σφάλματα που προέκυψαν ήταν $\pm 12\%$, $\pm 13\%$, $\pm 15\%$ αντίστοιχα για το απλό, διπλό και τριπλό σύστημα έγχυσης. Η σύγκριση με άλλες δημοσιευμένες μεθόδους όπως αυτές των Croce και Shen, έδειξε ότι υπάρχει μια βελτίωση στην ακρίβεια της πρόβλεψης, ειδικά για το διπλό και τριπλό σύστημα έγχυσης, για υψηλές ενέργειες. Αυτό το αποτέλεσμα σχετίζεται με εφαρμογές όπου δημιουργούνται πάσσαλοι μεγαλύτερης διαμέτρου. Τα ANN, αποδείχτηκε, ότι είναι πιο εύελικτα συγκριτικά με τις σχέσεις που έχουν καθορισμένη δομή.

Μολονότι οι σχέσεις αυτές μπορούν να μεταβληθούν προσαρμόζοντας καινούρια δεδομένα, τα ANN έχουν την ικανότητα να προσαρμόζουν τη δομή τους, σύμφωνα με νέες πληροφορίες. Οι περισσότερες δοκιμές πεδίου και μετρήσεις θα μειώσουν τις υποθέσεις προσδιορίζοντας έτσι το ρόλο κάθε μεταβλητής. Για παράδειγμα, μια πιο σαφής ποσοτικοποίηση του ρόλου της έγχυσης αέρα θα βελτιώσει την πρόβλεψη όσον αφορά το διπλό και τριπλό σύστημα.



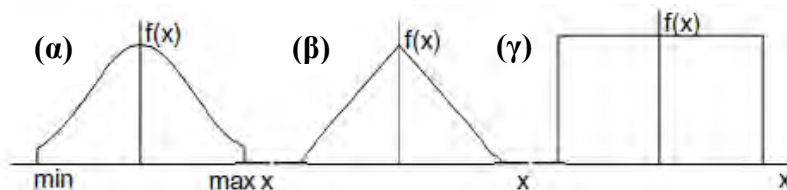
Σχήμα 4.13: Διαφοροποίηση διαμέτρου κατά μήκος του ίδιου πασσάλου

4.2 Προσομοιώσεις Monte Carlo

Οι μέθοδοι Monte Carlo είναι υπολογιστικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι βασίζονται στην επαναλαμβανόμενη τυχαία δειγματοληψία για την απόκτηση αριθμητικών αποτελεσμάτων. Οι μέθοδοι αυτές είναι χρήσιμες για την προομοίωση συστημάτων με πολλούς βαθμούς ελευθερίας, όπως τα ρευστά. Η Monte Carlo προσομοίωση είναι μια αριθμητική διαδικασία επαναλαμβανόμενου υπολογισμού μιας εμπειρικής ή μαθηματικής σχέσης, στην οποία οι μεταβλητές είναι τυχαίες ή περιέχουν αβεβαιότητα, με καθορισμένες κατανομές πιθανοτήτων. Το αριθμητικό αποτέλεσμα από κάθε επανάληψη αυτής της διαδικασίας θεωρείται δείγμα της πραγματικής λύσης της σχέσης, ανάλογη με ένα δείγμα που λαμβάνεται από ένα φυσικό πείραμα. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo αποτελούν μέθοδο ανάλυσης της αξιοπιστίας για την εκτίμηση πιθανότητας αστοχίας διάφορων συντελεστών.

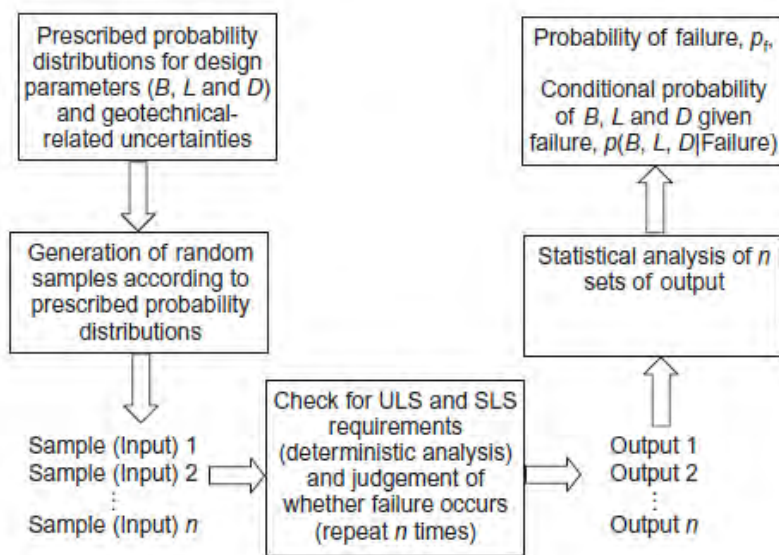
Ο σχεδιασμός είναι μια διαδικασία προσδιορισμού παραμέτρων που περιγράφουν μια γεωκατασκευή και ικανοποιεί μια σειρά από απαιτήσεις, περιλαμβάνοντας την πιθανότητα αστοχίας. Μια κατασκευή πρέπει να σχεδιάζεται και να πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε κατά τη διάρκεια της ζωής του με οικονομικό τρόπο και αξιοπιστία να ανταπεξέρχεται σε κάθε επιρροή κατά τη διάρκεια της πραγματοποίησης και χρήσης της, καθώς και να παραμένει λειτουργική για κάθε χρήση που απαιτείται. Αυτές οι απαιτήσεις εκφράζονται μέσω των οριακών καταστάσεων Ultimate Limit State (ULS) και Serviceability Limit State (SLS).

Χρησιμοποιείται ευρέως σε γεωτεχνικά προβλήματα, καθώς είναι χρήσιμη για τη μοντελοποίηση φαινομένων με σημαντική αβεβαιότητα στα δεδομένα εισόδου (input data). Εξαρτάται από την επαναλαμβανόμενη τυχαία δειγματοληψία για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων. Το αποτέλεσμα από την προσομοίωση αυτή είναι μια κατανομή πιθανότητας για όλες τις παραμέτρους. Κάθε πιθανοτική παράμετρος εισόδου μπορεί να περιγραφεί από μια κατανομή Gauss, Simpson ή μια άλλη ενιαία κατανομή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι παράμετροι εισόδου είναι μέσες, μέγιστες, ελάχιστες τιμές, που εξαρτώνται από την καμπύλη κατανομής.



Σχήμα 4.14: α) Κανονική κατανομή Gauss β) Τριγωνική Κατανομή Simpson γ) Τετραγωνική (ενιαία) κατανομή

Η προσομοίωση Monte Carlo είναι η βάση για το συγκεκριμένο σχεδιασμό για την εκτίμηση διάφορων μεταβλητών. Για παράδειγμα, παρακάτω φαίνεται σχηματικά ένα παράδειγμα εφαρμογής της προσομοίωσης Monte Carlo για περίπτωση θεμελίωσης. Η προσομοίωση ξεκινά με το χαρακτηρισμό των σχεδιαστικών παραμέτρων, όπως στην προκειμένη περίπτωση η διάμετρος καθώς και των γεωτεχνικά σχετιζόμενων αβεβαιοτήτων που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό (RBD Reliability Based Design). Επιπρόσθετα, εκτός από τις κατανομές που αφορούν τη διάμετρο, χρησιμοποιούνται κατανομές πιθανότητας για τη μοντελοποίηση των αβεβαιοτήτων που προκύπτουν στα φορτία, στις γεωτεχνικές ιδιότητες, στην κατανόηση του πεδίου και στα υπολογιστικά μοντέλα από τις εκτιμήσεις των ULS και SLS. Για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται συχνά κανονικές ή λογαριθμοκανονικές κατανομές για τη μοντελοποίηση των φορτίων και των ιδιοτήτων του εδάφους. Στη συνέχεια, προκύπτουν επαναλαμβανόμενα τυχαία δείγματα των άγνωστων μεταβλητών από τις αντίστοιχες κατανομές πιθανοτήτων τους, μετά από συνεχείς ελέγχους των οριακών καταστάσεων SLS και ULS. Έπειτα, γίνεται στατιστική ανάλυση των δεδομένων που εξάγονται για την εκτίμηση της άγνωστης μεταβλητής (διάμετρος). Η ακρίβεια των προσομοιώσεων Monte Carlo βελτιώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των δειγμάτων που εισάγονται.



Σχήμα 4.15: Παράδειγμα διαδικασίας προσομοιώσεων Monte Carlo για το σχεδιασμό θεμελιώσεων

4.3 Μεταβλητότητα της αντοχής

Η αντοχή ενός τσιμεντοποιημένου στοιχείου ελέγχεται γενικά μέσω δοκιμών μονοαξονικής θλίψης. Σύμφωνα με τους Nikbakhtan & Ahangri (2010), οι πάσσαλοι που δημιουργούνται με τη μέθοδο της εδαφικής ανάμιξης, εξαρτώνται, όσον αφορά την αντοχή τους, από την πίεση του ενέματος, την ταχύτητα ανύψωσης, την ταχύτητα περιστροφής, τον αριθμό και τη διάμετρο των ακροφυσίων, το λόγο τσιμέντο/νερό, τις ιδιαιτερότητες του εδάφους, το μέγεθος των κόκκων και το ρυθμό ροής του ενέματος.

Η μέση τιμή της αντοχής είναι η μέση τιμή της βάσης δεδομένων. Η χαρακτηριστική τιμή $f_{m,k}$ προσδιορίζεται σύμφωνα με το νέο κανονισμό DIN 4093 (2012) ‘Design of ground improvement- Jet grouting, deep mixing or grouting’ ως η ελάχιστη τιμή των ακόλουθων κριτηρίων:

- ✓ $f_{m,k} \leq f_{m,min}$, όπου $f_{m,min}$ είναι η ελάχιστη τιμή της βάσης δεδομένων
- ✓ $f_{m,k} \leq \alpha f_{mean}$, όπου α είναι συντελεστής:
 - $\alpha=0,6$, όταν $f_{m,k} \leq 4 \text{ N/mm}^2$
 - $\alpha=0,75$, όταν $f_{m,k} \geq 12 \text{ N/mm}^2$
- ✓ $f_{m,k} \leq 4 \text{ N/mm}^2$

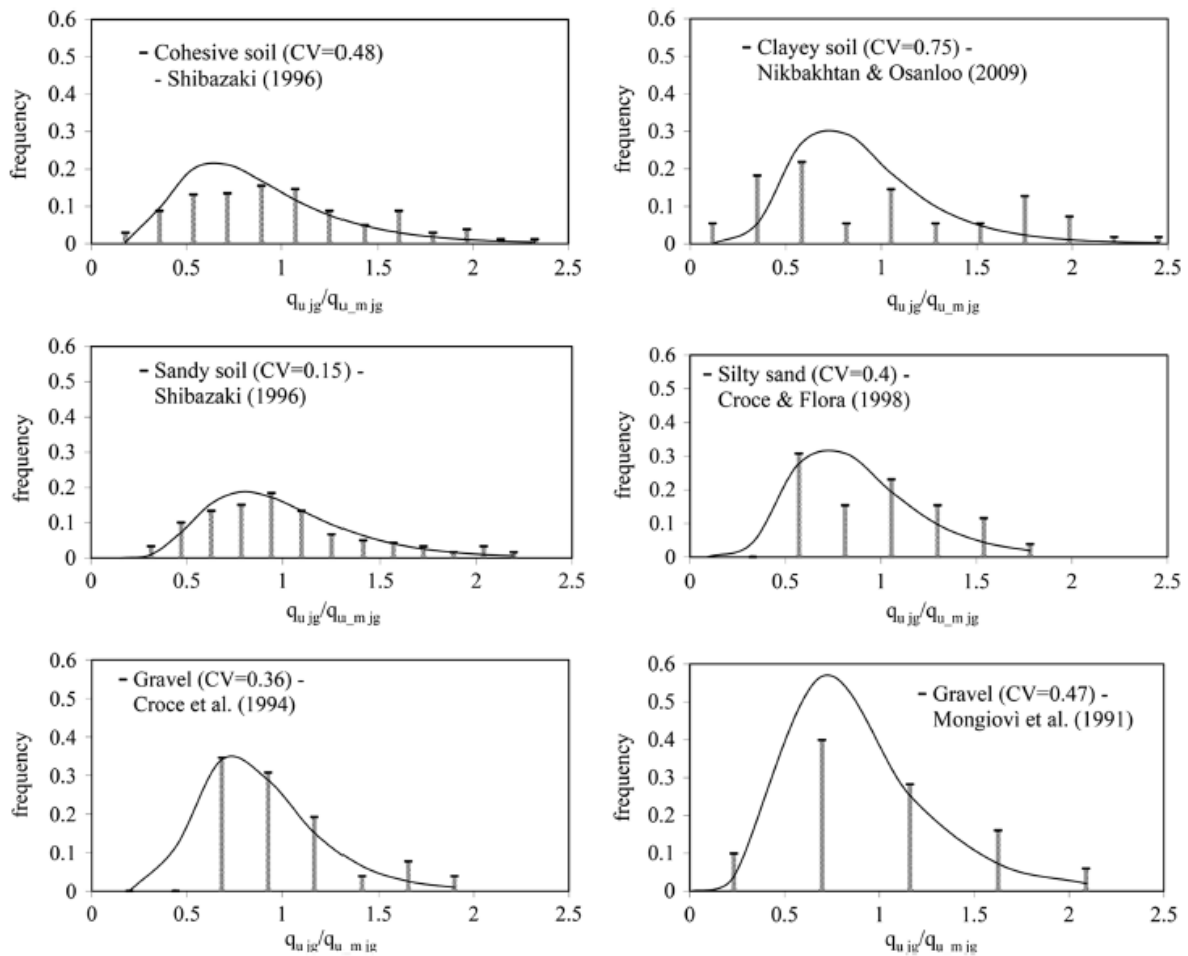
Γενικά, η διατμητική αντοχή του τσιμεντοποιημένου υλικού υπολογίζεται μέσω του κριτηρίου αστοχίας Tresca, αγνοώντας την επίδραση της μέσης τάσης, και ο εργαστηριακός πειραματικός χαρακτηρισμός γίνεται μετρώντας την ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή $q_{u,jg}$ σε όλα τα δείγματα. Οι αναλύσεις γίνονται σε συνθήκες ολικών τάσεων, χωρίς να λαμβάνεται υπ’ όψιν η επιρροή της πίεσης πόρων. Η μόνη παράμετρος του κριτηρίου Tresca είναι η συνοχή c_{jg} , η οποία μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της $q_{u,jg}$ (Σχέση (54)).

$$c_{jg} = \delta \cdot q_{u,jg} \quad (54)$$

όπου το δ κυμαίνεται ανάμεσα σε 0,2 και 0,3 (Croce, 2014).

Η εφελκυστική αντοχή του τσιμεντοποιημένου υλικού που παρατηρείται πειραματικά είναι της τάξης του 1/10 του $q_{u,jg}$, (Croce, 2014), και συνήθως αγνοείται, λαμβάνοντας υπ’ όψιν την απότομη πτώση των εφελκυστικών τάσεων κατά τη φθορά του υλικού. Από τη στιγμή που οι πειραματικές τιμές του $q_{u,jg}$ δείχνουν μια σχετική διασπορά, γίνεται μια τυπική προσέγγιση για να λάβει υπ’ όψιν αυτή τη μεταβλητότητα στον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής τιμής του c_{jg} (ή $q_{u,jg}$), η οποία βρίσκει την πιθανοτική κατανομή των πειραματικών αποτελεσμάτων υπολογίζοντας την τιμή που αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό (π.χ. 5%).

Το σχήμα 4.16 παρουσιάζει τα στατιστικά αποτελέσματα του $q_{u,jg}$ που προέκυψαν από δείγματα έξι διαφορετικών μελετών σε τυπική λογαριθμοκανονική κατανομή (Croce, 2014). Λαμβάνοντας υπόψη τους πολύ μεγάλους συντελεστές μεταβλητότητας $CV(q_{u,jg})$ όπως φαίνεται από τα δεδομένα, το ποσοστό 5% οδηγεί σε πολύ μικρές και συντηρητικές τιμές των χαρακτηριστικών τιμών $q_{u,jg,k}$. Ωστόσο, θεωρίες (Vanmarcke 1983) υποστηρίζουν ότι ο συντελεστής μεταβλητότητας της αντίστασης σε μεγάλους όγκους μπορεί να είναι πολύ μικρότερος (συνήθως απο 1/10 με 1/5) συγκριτικά με μικρούς όγκους, ανάλογα με τη χωρική αυτοσυσχέτιση των ιδιοτήτων του υλικού. Υποθέτοντας συντηρητικά ότι ο λόγος των συντελεστών μεταβλητότητας προς την κλίμακα του δείγματος είναι 1/5, τα αποτελέσματα στο παρακάτω σχήμα (που είναι τυπικά για τα τσιμεντοποιημένα εδάφη) δείχνουν ότι ο συντελεστής μεταβλητότητας που κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 0,03 και 0,15 μπορεί να αναπαραστήσει τη συμπεριφορά ενός τσιμεντοποιημένου στοιχείου. Εφόσον η μέση τιμή της αντοχής είναι ανεξάρτητη της κλίμακας (Croce, 2014), μια αξιόπιστη χαρακτηριστική αντοχή $q_{u,jg,k}$ της τσιμεντοποιημένης κατασκευής, υπολογισμένη με 5% ανοχή της λογαριθμοκανονικής κατανομής έχοντας τους παραπάνω δοθέντες συντελεστές μεταβλητότητας, κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 0,77 και 0,95 της μέσης αντοχής.



Σχήμα 4.16: Κατανομές πιθανότητας της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής από διαφορετικές δοκιμές πεδίου, με συντελεστές μεταβλητότητας CV, που αφορούν τα εργαστηριακά αποτελέσματα (Croce et. al 2014)

Η ποιότητα των τσιμεντοποιημένων εδαφοπασσάλων εκτιμάται εξετάζοντας την αντοχή των δειγμάτων που λαμβάνονται από τον πυρήνα των δειγμάτων. Έγινε μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για την εκτίμηση της αντοχής τσιμεντοποιημένου εδάφους (Conditional Probabilistic Analysis of Cement-Treated Soil Column Strength, Tsutomu Namikawa, 2015).

Εξαιτίας της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων του εδάφους, της αποτελεσματικότητας της ανάμειξης και άλλων παραγόντων, η αντοχή των δημιουργούμενων εδαφοπασσάλων ποικίλλει σημαντικά. Έτσι, για το σχεδιασμό των πασσάλων, είναι απαραίτητη η κατάλληλη εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός τσιμεντοποιημένου εδάφους, στο οποίο παρατηρείται μεγάλη μεταβλητότητα της αντοχής. Σε πρακτικές σχεδιαστικές διαδικασίες, χρησιμοποιούνται η μέση και τυπική απόκλιση της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής q_u των τσιμεντοποιημένων εδαφών για τον προσδιορισμό της αντοχής σχεδιασμού F_c και την εκτίμηση της ποιότητας των εδαφικών βελτιώσεων. Σε ορισμένους σχεδιασμούς (CDIT 2002; Futaki and Tamura 2002), η F_c σχετίζεται με τη μέση μ_{qu} και την τυπική απόκλιση σ_{qu} της αντοχής q_u με την παρακάτω σχέση:

$$F_c = \mu_{qu} - K\sigma_{qu} = (1 - KV_{qu})\mu_{qu} \quad (55)$$

όπου K είναι μειωτικός συντελεστής και V_{qu} είναι συντελεστής μεταβλητότητας.

Ο μειωτικός συντελεστής K προσδιορίζει το επίπεδο εμπιστοσύνης για $q_u > F_c$. Σε μια διαδικασία σχεδιασμού υποθέτοντας μια κανονική κατανομή του q_u , με $K=1,3$ για ένα επίπεδο εμπιστοσύνης 90%, το οποίο αντιστοιχεί σε 10% σφάλματα, η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι έχει ληφθεί υπόψη η μεταβλητότητα της αντοχής κατά το σχεδιασμό των πασσάλων. Ωστόσο, η τυπική απόκλιση δεν είναι αποτελεσματική για τον προσδιορισμό της μεταβλητότητας της αντοχής, καθώς οι χωρικές μεταβολές της αντοχής σχετίζονται μεταξύ τους (Honjo 1982; Navin και Filz 2005; Namikawa και Koseki 2013).

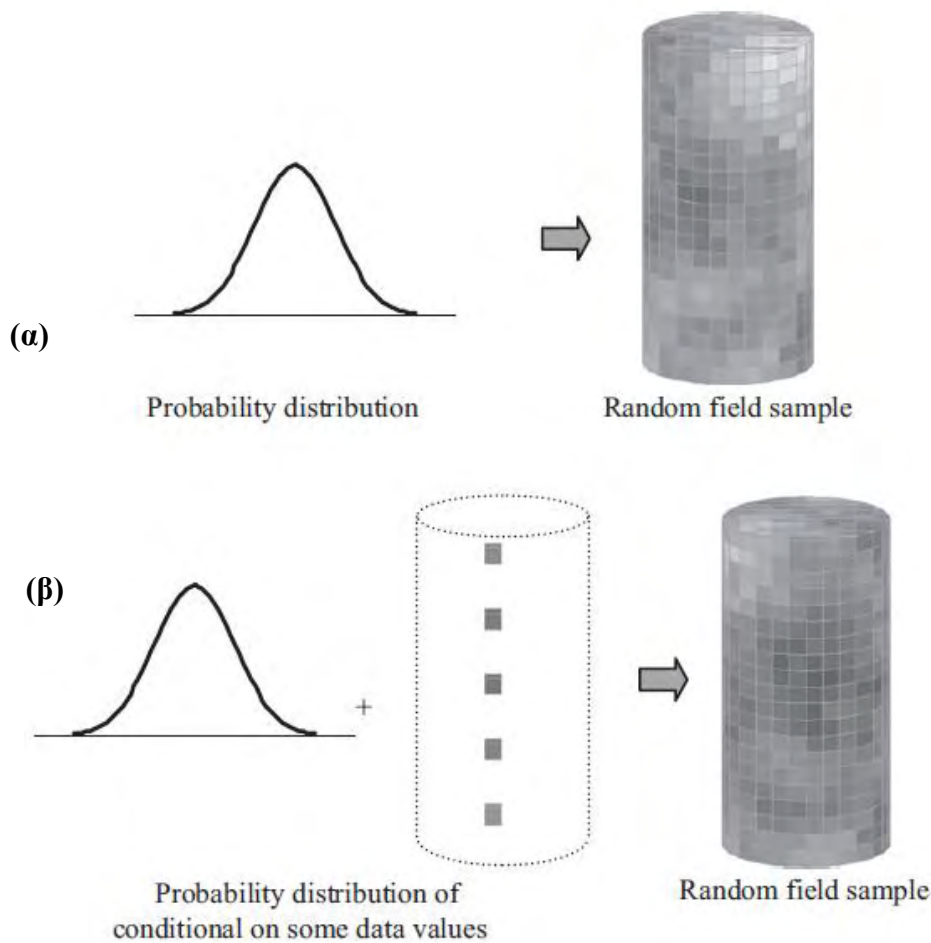
Με τον όρο χωρική συσχέτιση (ή χωρική αυτοσυσχέτιση) εννοείται ότι κάθε μεταβλητή σχετίζεται με τον εαυτό της. Η πιο απλή ερμηνεία της αυτοσυσχέτισης δίνεται αν υποθεθούν δύο στοιχεία τα οποία βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ του, είναι πολύ πιθανό οι τιμές τους να συμπίπτουν, συγκριτικά με άλλα στοιχεία που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση, και επομένως εμφανίζουν λιγότερες ομοιότητες.

Γι' αυτό απαιτείται μια μέθοδος που να εκτιμά καλύτερα την επίδραση της χωρικής μεταβλητότητας στη συμπεριφορά του πασσάλου. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo, στις οποίες δημιουργούνται τυχαία πεδία, μπορούν να ποσοτικοποιήσουν τη συμπεριφορά των χωρικά μεταβλητών εδαφών. Λύσεις σε προβλήματα συνοριακών τιμών μπορούν να δοθούν μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για τον προσδιορισμό της επιρροής της ετερογένειας του

εδάφους στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους, συγχωνεύοντας τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και τις προσομοιώσεις Monte Carlo (π.χ. Pospecu 2005, Griffiths 2009). Σε αυτή τη μεθοδολογία, τα δείγματα που πιθανώς έχουν τις ιδιότητες πάνω στον τομέα ανάλυσης, δημιουργούνται πρώτα με μια κατανομή πιθανότητας. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε αυτά τα δείγματα. Αποτελέσματα τέτοιων μελετών έχουν δείξει ότι η χωρική συσχέτιση των ιδιοτήτων του εδάφους επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους με χωρικά μεταβλητές ιδιότητες. Οι Namikawa και Koseki (2013) εκτέλεσαν μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων καθώς και προσομοιώσεις Monte Carlo για να εκτιμήσουν τη θλιπτική συμπεριφορά ενός πασσάλου που παρουσιάζει χωρική μεταβλητότητα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χωρική αυτοσυσχέτιση της αντοχής επηρέασε σημαντικά την ολική θλιπτική αντοχή του πασσάλου.

Όταν λαμβάνονται δείγματα από τον πυρήνα του τσιμεντοποιημένου εδάφους, οι περιοχές και η αντοχή αυτών των δειγμάτων λαμβάνονται ως δεδομένα. Τέτοιες μετρήσεις θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη άλλων αντοχών σε άγνωστες περιοχές τυχαίων πεδίων. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo με μια εξαρτώμενη κατανομή (conditional distribution) μπορούν να δημιουργήσουν τυχαία στοιχεία - δεδομένα, περιλαμβάνοντας γνωστές τιμές δεδομένων. Προτάθηκε από τον Tsutomu Namikawa η πραγματοποίηση μιας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, στην οποία δημιουργούνται νέα δεδομένα στοιχεία βάσει γνωστών δεδομένων.

Αυτή η μελέτη παρουσιάζει μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με μια προσέγγιση εξαρτώμενης προσομοίωσης για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός τσιμεντοποιημένου εδαφοπασσάλου, όπου οι τιμές της αντοχής του είναι γνωστές σε κάποιες περιοχές. Τα γνωστά δεδομένα αντιπροσωπεύουν την αντοχή των δειγμάτων τα οποία προέρχονται από τον πυρήνα του πασσάλου. Στην εξαρτώμενη προσομοίωση, τα τυχαία δείγματα με γνωστές τιμές αντοχής σε ορισμένες περιοχές, δημιουργήθηκαν από εξαρτώμενες κατανομές με τη χρήση των προσομοιώσεων Monte Carlo. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για αυτά τα δείγματα, ώστε να προσομοιωθεί η ανεμπόδιστη θλιπτική συμπεριφορά του πασσάλου που παρουσιάζει χωρικά μεταβλητές ιδιότητες. Πραγματοποιήθηκε και μια μη εξαρτώμενη προσομοίωση, κατά την οποία δεν ενσωματώνονται δεδομένα, και χρησιμοποιήθηκε ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο για τα τσιμεντοποιημένα εδάφη (Namikawa και Mihira 2007). Η εξαρτώμενη προσομοίωση υπερτερεί της μη εξαρτώμενης στην εκτίμηση της ολικής αντοχής του τσιμεντοποιημένου πασσάλου με γνωστά δεδομένα. Στην ανεξάρτητη προσομοίωση, τα τυχαία δείγματα δημιουργούνται μόνο από την πιθανότητα κατανομής που υποτίθεται για τα δεδομένα. Αντίθετα, για την εξαρτώμενη προσομοίωση, γνωστά δεδομένα σε συγκεκριμένες περιοχές, χρησιμοποιούνται και αυτά στη δημιουργία τυχαίων δειγμάτων. Τα γνωστά δεδομένα είναι ουσιαστικά οι μετρήσεις, όπως η αντοχή ενός δείγματος από τον πυρήνα του πασσάλου. Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η δημιουργία τυχαίων δειγμάτων στην ανεξάρτητη και εξαρτώμενη προσομοίωση.



Σχήμα 4.17: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας δημιουργίας τυχαίου δειγματος πεδίου α) με ανεξάρτητη προσομοίωση β) με εξαρτώμενη προσομοίωση (Namikawa, 2015)

Για τη δημιουργία τυχαίων δειγμάτων απαιτείται ένα είδος κατανομής πιθανότητας. Πολλές μελέτες έχουν γίνει για τον προσδιορισμό της κατανομής πιθανότητας που θα προσομοιώνει καλύτερα την αντοχή του πασσάλου (Honjo 1982; Navin και Filz 2005; Namikawa και Koseki 2013) και συνήγαν τον συμπέρασμα ότι μια κανονική (γκαουσιανή) ή μια λογαριθμοκανονική κατανομή μπορεί να περιγράψει την ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή q_u των τσιμεντοποιημένων εδαφών.

Γενικά, προτείνεται η ευρύτερη μελέτη για να ερευνηθεί η επιρροή της κατανομής του q_u στην ολική συμπεριφορά της βελτίωσης του εδάφους. Στην παρακάτω μελέτη (Namikawa, 2015), για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής ενός τσιμεντοποιημένου πασσάλου χρησιμοποιήθηκε κανονική ή λογαριθμοκανονική κατανομή. Για τη δημιουργία τυχαίων πεδίων αντοχής, απαιτούνται χαρακτηριστικά χωρικής συσχέτισης του q_u . Γίνεται η υπόθεση ενός σταθερού τυχαίου πεδίου με μια εκθετική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης για τη χωρική μεταβλητότητα του q_u σε έναν τσιμεντοποιημένο πάσσαλο. Η εκθετική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης περιγράφει τα

χαρακτηριστικά συσχέτισης ενός τέτοιου πασσάλου σε ικανοποιητικό βαθμό (Honjo 1982). Αυτή η εκθετική συνάρτηση είναι:

$$\rho(d) = \exp\left(-\frac{d}{\theta_{qu}}\right) \quad (56)$$

όπου $\rho(d)$ είναι ο συντελεστής συσχέτισης, d η απόσταση μεταξύ δύο σημείων που λαμβάνονται και θ_{qu} η απόσταση αυτοσυσχέτισης της αντοχής.

Η αντοχή $q_u(\mathbf{r}_i)$ ακολουθεί μια κατανομή πολλών μεταβλητών όπως φαίνεται παρακάτω:

$$f(\mathbf{q}_u) = (2\pi)^{-n/2} |\Sigma_{qu}|^{-1/2} \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{q}_u - \boldsymbol{\mu}_{qu})^T \Sigma_{qu}^{-1} (\mathbf{q}_u - \boldsymbol{\mu}_{qu})\right] \quad (57)$$

$$\mathbf{q}_u = \begin{bmatrix} q_u(\mathbf{r}_1) \\ \vdots \\ q_u(\mathbf{r}_n) \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\mu}_{qu} = \begin{bmatrix} \mu_{qu} \\ \vdots \\ \mu_{qu} \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$\Sigma_{qu} = \sigma_{qu}^2 \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}{\theta_{qu}}\right) \quad (59)$$

Όπου n είναι ο αριθμός των $q_u(\mathbf{r}_i)$, μ_{qu} είναι ο μέσος όρος των q_u , σ_{qu} είναι η τυπική απόκλιση των q_u , \mathbf{r}_i είναι το χωρικό διάνυσμα στο σημείο i και Σ_{qu} είναι η συνάρτηση μεταβλητής του q_u . Η παραπάνω σχέση εκφράζει το τυχαίο πεδίο στην ανεξάρτητη προσομοίωση, όπου δεν ενσωματώνονται τα γνωστά δεδομένα. Για την εξαρτώμενη προσομοίωση, στην οποία οι τιμές των δεδομένων είναι γνωστές σε κάποιες περιοχές, χρησιμοποιείται μια εξαρτώμενη κανονική κατανομή πολλών μεταβλητών για να εκφραστεί το τυχαίο πεδίο ενσωματώνοντας τις γνωστές τιμές των δεδομένων. Η εξαρτώμενη κανονική κατανομή του \mathbf{q}_{u2} χρησιμοποιώντας τη γνωστή τιμή του \mathbf{q}_{u1} ορίζεται ως εξής (Anderson 2003):

$$f(\mathbf{q}_{u2} | \mathbf{q}_{u1}) = (2\pi)^{-n_2/2} |\Sigma_{qu22 \cdot 1}|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{q}_{u2} - \boldsymbol{\mu}_{qu2 \cdot 1})^T \Sigma_{qu22 \cdot 1}^{-1} (\mathbf{q}_{u2} - \boldsymbol{\mu}_{qu2 \cdot 1})\right\} \quad (60)$$

$$\mathbf{q}_{u1} = \begin{bmatrix} q_{u1}(\mathbf{r}_1) \\ \vdots \\ q_{u1}(\mathbf{r}_{n1}) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q}_{u2} = \begin{bmatrix} q_{u2}(\mathbf{r}_{n1+1}) \\ \vdots \\ q_{u2}(\mathbf{r}_n) \end{bmatrix} \quad (61)$$

όπου $q_{u1}(r_i)$ είναι η γνωστή αντοχή, $q_{u2}(r_i)$ είναι η προκύπτουσα τιμή της αντοχής, n_1 και n_2 είναι οι αριθμοί των $q_{u1}(r_i)$ και $q_{u2}(r_i)$ αντίστοιχα. Στην παραπάνω εξίσωση οι τιμές των $\mu_{qu2 \cdot 1}$ και $\Sigma_{qu22 \cdot 1}$ προσδιορίζονται από τις εξής σχέσεις (62), (63):

$$\Sigma_{qu22 \cdot 1} = \Sigma_{qu22} - \Sigma_{qu21} \Sigma_{qu11}^{-1} \Sigma_{qu12} \quad (62)$$

$$\mu_{qu2 \cdot 1} = \mu_{qu2} + \Sigma_{qu21} \Sigma_{qu11}^{-1} (\mu_{qu1} - \mu_{qu1}) \quad (63)$$

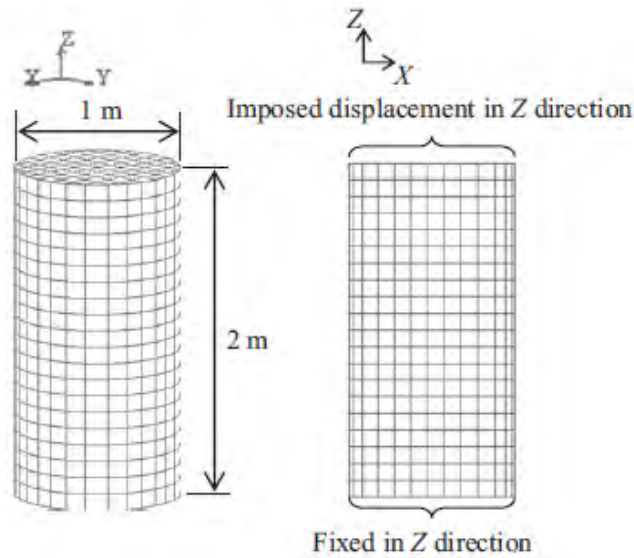
όπου μ_{qu1} είναι η μέση τιμή των δεδομένων τιμών, μ_{qu2} η μέση τιμή των προσομοιωμένων δεδομένων χρησιμοποιώντας την εξαρτωμένη κατανομή και Σ_{qu11} , Σ_{qu12} , Σ_{qu21} , Σ_{qu22} οι χωρισμένες συναρτήσεις μεταβλητών. Οι συναρτήσεις αυτές λαμβάνονται από τα παρακάτω μητρώα:

$$\mu_{qu} = \begin{bmatrix} \mu_{qu1} \\ \mu_{qu2} \end{bmatrix}, \quad \Sigma_{qu} = \begin{bmatrix} \Sigma_{qu11} & \Sigma_{qu12} \\ \Sigma_{qu21} & \Sigma_{qu22} \end{bmatrix} \quad (64), (65)$$

Οι τυχαίες μεταβλητές που προκύπτουν εκχωρούνται στα στοιχεία των δειγμάτων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Γενικά, κατά τη διαδικασία αυτή απαιτείται τοπική μέση υποδιαίρεση (Fenton και Vanmarcke 1990) για τη διακριτοποίηση του τυχαίου πεδίου. Σε αυτή τη μελέτη, επειδή το μέγεθος των στοιχείων αντιστοιχεί περίπου στο μέγεθος των δειγμάτων του πυρήνα δεν εκτελέστηκε τοπική μέση υποδιαίρεση, δηλαδή η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η απόσταση αυτοσυσχέτισης υποτίθεται λαμβάνονται απευθείας για τα στοιχεία. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι το τυπικό μέγεθος των δειγμάτων του πυρήνα είναι διαμέτρου 70-90mm, επιλέγεται στοιχείο μεγέθους 100mm. Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε από το Shiomi κ.α. (1993), χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της ανεμπόδιστης θλιπτικής συμπεριφοράς του τσιμεντοποιημένου εδαφοπασσάλου.

Στην παρούσα μελέτη, θα χρησιμοποιηθεί μια τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μοντελοποιήθηκε ένα κυλινδρικό δείγμα διαμέτρου 1m ύψους 2m.

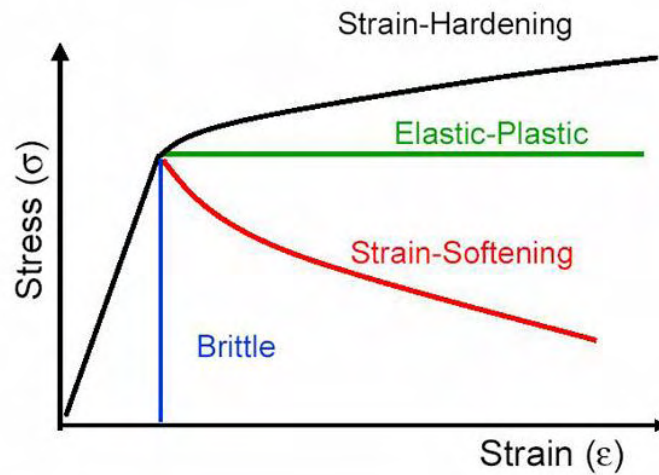
Φαίνεται στο παρακάτω σχήμα η διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων που αποτελείται από ισοπαραμετρικά στοιχεία οχτώ κόμβων.



Σχήμα 4.18: Διακριτοποίηση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Namikawa, 2015)

Η πλειοψηφία των στοιχείων είναι κυβικά με μήκος 100mm και ο αριθμός των στοιχείων N_e είναι 1760. Η διαδικασία της επιβολής φορτίων περιλαμβάνει την εφαρμογή ενιαίας κάθετης μετακίνησης στην άνω επιφάνεια του δείγματος. Η τιμή του ενδιάμεσου βήματος είναι 1×10^{-2} mm/βήμα. Η μεταβαλλόμενη ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή κάθε στοιχείου q_{ui} υπολογίζεται από τυχαίες μεταβλητές που καταχωρούνται σε κάθε στοιχείο του δείγματος, και οι τιμές q_{ui} ταξινομούνται σε διακριτές τάξεις με διάστημα $0,1\sigma_{qu}$. Η ταξινομημένη q_{ui} κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $-3,1\sigma_{qu}$ και $3,1\sigma_{qu}$, και η τιμή που ξεπερνά τα ανώτερα ή τα χαμηλότερα όρια ταξινομείται σε υψηλότερες ή χαμηλότερες τάξεις, αντίστοιχα.

Ένας τσιμεντοποιημένος εδαφοπάσσαλος που παρουσιάζει χωρική μεταβλητότητα, μπορεί να αστοχήσει κατά τη διάρκεια της προφόρτισης (Namikawa και Koseki 2013). Γι' αυτό απαιτείται ένα μοντέλο, που μπορεί να εκφράσει περίπου τη συμπεριφορά του τσιμεντοποιημένου εδάφους πριν τη φόρτιση. Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε το ελαστοπλαστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για τσιμεντοποιημένα εδάφη (Namikawa και Mihira 2007). Αυτό το μοντέλο μπορεί να περιγράψει τη συμπεριφορά του πασσάλου μετά την επιβολή μέγιστης τάσης (strain softening). Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, λόγω της διόγκωσης του εδάφους, μόλις ξεπεραστεί η τιμή της μέγιστης αντοχής μέσω της συνεχούς διάτμησης, η αντίσταση του εδάφους θα αρχίσει να μειώνεται. Αυτή η συμπεριφορά περιγράφηκε με το παρακάτω μοντέλο. Το μοντέλο επαληθεύτηκε με πολλές προσομοιώσεις σε διάφορες εργαστηριακές δοκιμές των τσιμεντοποιημένων εδαφών (Namikawa και Mihira 2007; Namikawa και Koseki 2007) και σε επιτόπου δοκιμή φόρτισης ενός τσιμεντοποιημένου εδαφοπάσσάλου.



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, όπου η κόκκινη καμπύλη δηλώνει τη μείωση της αντοχής μετά την μέγιστη τιμή τάσης

Έγιναν παραμετρικές μελέτες για τον προσδιορισμό της επίδρασης της ενσωμάτωσης των γνωστών δεδομένων στα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης. Στις παραμετρικές μελέτες, η μέση τιμή μ_{q_i} και ο συντελεστής μεταβλητότητας V_c της q_{ii} διατηρήθηκαν σταθερά 1,7 MPa και 0,3 αντίστοιχα. Και οι τιμές της απόστασης αυτοσυσχέτισης θ_{q_i} του q_{ii} επιλέχθηκαν 0,2, 0,5, 1,0 και 2 m (Honjo 1982; Namikawa και Koseki 2013). Οι παραμετρικές τιμές του ελαστοπλαστικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική ανάλυση παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.6).

Parameter	Stochastic or deterministic	Value
E (MPa)	Stoch.	3,000
ν	Deter.	0.167
ϕ (degrees)	Deter.	30
c (kPa)	Stoch.	490
T_f (kPa)	Stoch.	380
α	Deter.	1.05
e_y	Deter.	0.0002
G_f (N/m)	Stoch.	9
e_r	Deter.	0.40
D_c	Deter.	-0.4
t_{s0} (mm)	Deter.	0.6
l_c (mm)	Deter.	100

Note: Deter. = deterministic parameter; Stoch. = stochastic parameter.

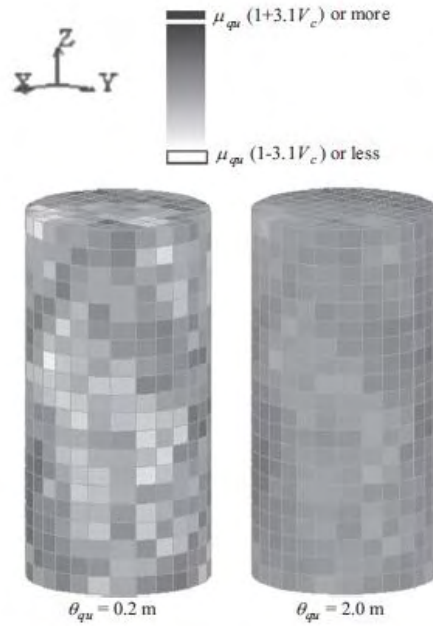
Πίνακας 4.6 : Παράμετροι του τσιμεντοποιημένου υλικού (Namikawa, 2015)

Όπως φαίνεται στον πίνακα, το μέτρο ελαστικότητας E , η συνοχή c , η εφελκυστική αντοχή T_f , και η ενέργεια θραύσης G_f θεωρούνται στοχαστικές παράμετροι. Τα

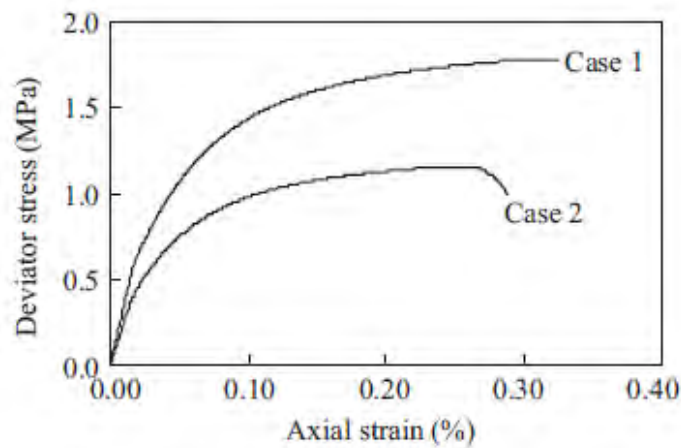
πειραματικά αποτελέσματα (Tatsuoka 1997) δείχνουν ότι ο λόγος του αρχικού μέτρου ελαστικότητας προς τη θλιπτική αντοχή είναι σταθερός για έναν δοθέντα τύπο εδάφους, υπό παρόμοιες συνθήκες. Γι' αυτό, το μέτρο ελαστικότητας E θεωρείται αναλογικό της τιμής του q_{ui} . Η ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή των τσιμεντοποιημένων εδαφών εξαρτάται κυρίως από τη συνοχή. Με σταθερή τη γωνία τριβής, η τιμή της συνοχής c προσδιορίστηκε από την τιμή q_{ui} . Η εφελκυστική αντοχή T_f θεωρείται ανάλογη της τιμής της q_{ui} , βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμών (Koseki 2005). Η ενέργεια θραύσης G_f ορίζεται ως η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την εφελκυστική αστοχία και θεωρείται ανάλογη της τιμής του q_{ui} . Άλλες παράμετροι, όπως ο συντελεστής Poisson, οι συντελεστές σκλήρυνσης α και e_y , η παράμετρος e_r , ο συντελεστής διόγκωσης D_c , το μέγεθος t_{s0} και το χαρακτηριστικό μήκος l_c , υποτέθηκε ότι μεταβάλλονται με το q_{ui} . Επειδή λείπουν αξιόπιστα πειραματικά δεδομένα, για απλοποίηση, το ν θεωρείται ανεξάρτητο της αντοχής. Οι παράμετροι α και e_y της υπερβολικής συνάρτησης, για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς, θεωρούνται ανεξάρτητες της αντοχής καθώς η παραμόρφωση δεν μεταβάλλεται με την αντοχή. Η παράμετρος e_r , η οποία ελέγχει τη μείωση της καμπύλης όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα (Σχ. 4.19), θεωρείται σταθερή. Η ενέργεια διατμητικής αστοχίας θεωρείται ανάλογη της αντοχής. Ο συντελεστής διόγκωσης D_c αναπαριστά το λόγο της πλαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης προς την πλαστική διατμητική παραμόρφωση, και ο συντελεστής t_{s0} αφορά το πάχος της διατμητικής ζώνης. Η εξάρτηση των D_c και t_{s0} από την αντοχή είναι άγνωστη, λόγω της έλλειψης πειραματικών δεδομένων και διατηρούνται σταθερά στην παρούσα μελέτη. Το χαρακτηριστικό μήκος l_c σχετίζεται με το μέγεθος της διακριτοποίησης, το οποίο δε μεταβάλλεται με τη δύναμη.

Η εξαρτώμενη προσομοίωση απαιτεί δείγματα, τα οποία να παρέχουν γνωστά δεδομένα για κάποιες περιοχές. Σε αυτή τη μελέτη, τα δείγματα προέκυψαν με την κανονική κατανομή πολλών μεταβλητών της εξίσωσης που παρατέθηκε νωρίτερα. Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές Case 1 και Case 2. Σε κάθε περίπτωση, τα δείγματα είχαν αποστάσεις αυτοσυσχέτισης θ_{qu} ίσες με 0,2, 0,5, 1,0 και 2,0 m και έτσι δημιουργήθηκαν 8 δείγματα για τις εξαρτώμενες προσομοιώσεις. Τα δείγματα με $\theta_{qu}=0,2$ και 2,0 m στην περίπτωση 1 φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Οι σκοτεινές και φωτεινές περιοχές απεικονίζουν τα ισχυρά και αδύναμα στοιχεία αντίστοιχα.

Οι συνολικές σχέσεις τάσης - παραμόρφωσης των δειγμάτων για θ_{qu} για τις περιπτώσεις 1 και 2 φαίνονται στα επόμενα σχήματα (Σχ. 4.20, 4.21). Στη σχέση τάσεων - παραμορφώσεων, η τάση υπολογίζεται από το συνολικό κάθετο φορτίο που ασκείται στην άνω επιφάνεια και η παραμόρφωση υπολογίζεται από την κάθετη μετακίνηση της άνω επιφάνειας.



Σχήμα 4.20: Δείγματα με απόσταση συσχέτισης $\theta_{qu}=0,2$ και $2.0m$ για την περίπτωση 1 (Namikawa, 2015)



Σχήμα 4.21: Συνολική σχέση τάσης-παραμόρφωσης των δειγμάτων για $\theta_{qu}=2.0m$ (Namikawa, 2015)

Οι συνολικές τιμές της αντοχής Q_u συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

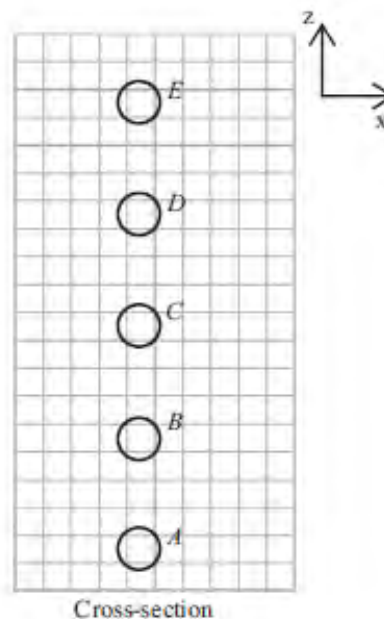
Case	θ_{qu} (m)	Q_u (MPa)	m_{qu} (MPa)
Case 1	0.2	1.50	1.72
	0.5	1.56	1.84
	1.0	1.72	1.94
	2.0	1.78	1.96
Case 2	0.2	1.44	1.66
	0.5	1.24	1.58
	1.0	1.16	1.50
	2.0	1.16	1.42

Πίνακας 4.7: Συνολική αντοχή Q_u και οι μέσες τιμές αντοχής των στοιχείων m_{qu}

Η παράμετρος Q_u ορίζεται ως η μέγιστη τάση στις υπολογισμένες σχέσεις τάσης - παραμόρφωσης. Τα δείγματα παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους όσον αφορά την τιμή της Q_u , ακόμα και για την ίδια περίπτωση, εξαιτίας των διαφορών στα θ_{qu} . Οι μέσες τιμές m_{qu} της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής των στοιχείων που συγκροτούν το δείγμα φαίνονται επίσης στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 4.7) και η μέση τιμή m_{qu} ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$m_{qu} = \frac{\sum_{i=1}^{N_e} v_i q_{ui}}{\sum_{i=1}^{N_e} v_i} \quad (66)$$

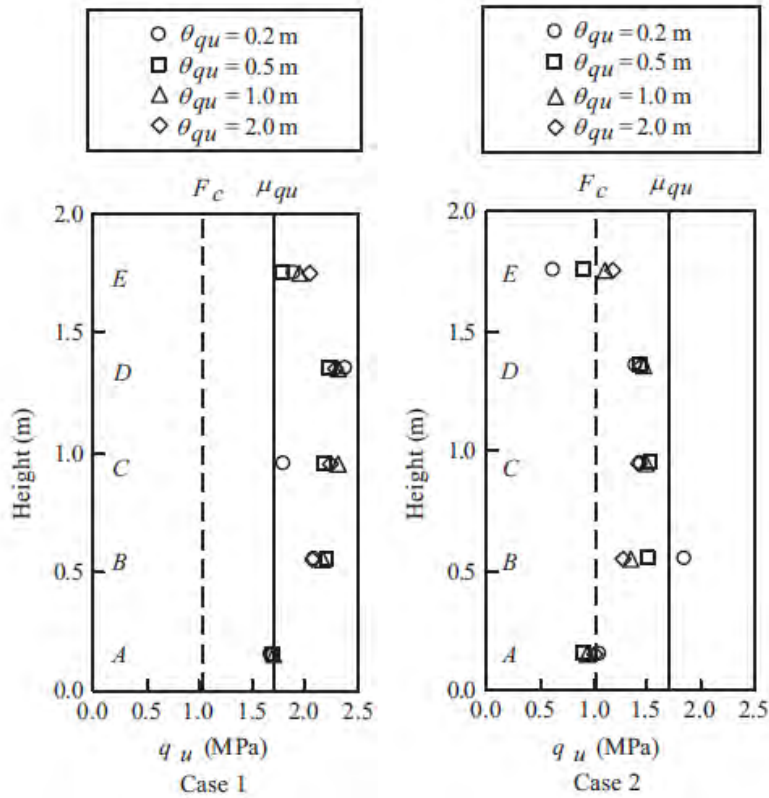
Όπου v_i είναι ο όγκος του στοιχείου. Οι τιμές m_{qu} των δειγμάτων στην περίπτωση 1 είναι μεγαλύτερες από την τιμή μ_{qu} ($=1,7$ MPa) και οι τιμές m_{qu} στην περίπτωση 2 είναι μικρότερες από το μ_{qu} . Επιλέχθηκαν δείγματα με διαφορετικές αντοχές για να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα της εξαρτώμενης προσομοίωσης στην εκτίμηση των συνολικών αντοχών του τσιμεντοποιημένου εδαφοπασσάλου. Σε μια εξαρτώμενη προσομοίωση, τα ενσωματωμένα δεδομένα αναπαριστούν τις αντοχές των δειγμάτων που προέρχονται από τον πυρήνα του πασσάλου και θεωρούνται δεδομένες (fixed) τιμές. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η θέση των στοιχείων στα οποία οι τιμές αντοχής έχουν ενσωματωθεί στην προσομοίωση.



Σχήμα 4.22: Περιοχές των στοιχείων με γνωστές δεδομένες τιμές (Namikawa, 2015)

Σε πραγματικά έργα, λαμβάνονται λίγα δείγματα ανά μέτρο από τον πυρήνα ενός τσιμεντοποιημένου εδαφοπασσάλου. Σε αυτή τη μελέτη, επιλέχθηκαν πέντε περιοχές από ένα δείγμα ύψους 2m. Ακόμα, ο αριθμός των περιοχών, με γνωστές δεδομένες τιμές, επιλέχθηκε να είναι 2, 3 και 5, για να διερευνηθεί η επίδραση στο Q_u . Οι τιμές

της αντοχής στα στοιχεία A και E καθορίζονται όταν $N_d=2$, εκείνες στα στοιχεία A,C και E όταν $N_d=3$, ενώ οι τιμές των αντοχών στα στοιχεία A, B, C, D, E όταν $N_d=5$. Οι καθορισμένες τιμές των αντοχών σε κάθε περίπτωση (Case 1, Case 2) παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 4.23).

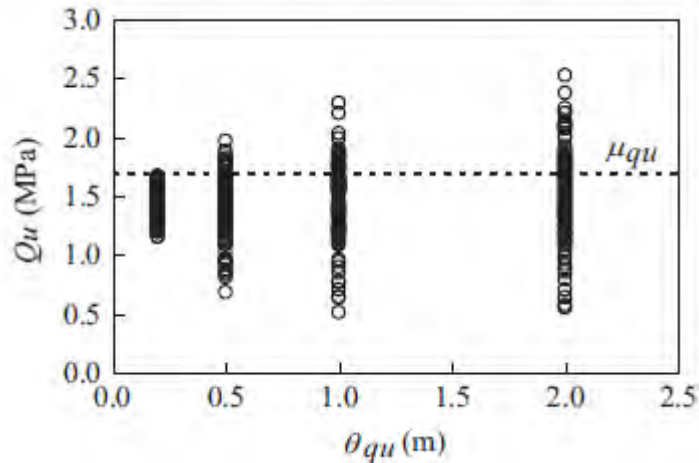


Σχήμα 4.23: Ανεμπόδιστες θλιπτικές αντοχές q_u των στοιχείων με δεδομένες τιμές (Namikawa, 2015)

Στο ίδιο σχήμα (Σχ. 4.23) φαίνονται και η μέση τιμή αντοχής μ_{qu} και η αντοχή σχεδιασμού F_c , που υπολογίστηκαν από τη σχέση (55). Οι γνωστές τιμές αντοχής είναι μεγαλύτερες από τη μ_{qu} για την περίπτωση 1. Στην περίπτωση 2, οι γνωστές τιμές των αντοχών στα A και E είναι μικρότερες από την F_c , δείχνοντας ότι η περίπτωση 2 αναπαριστά τη δυσμενέστερη κατάσταση, στην οποία ανιχνεύονται σφάλματα στον τιμεντοποιημένο εδαφοπάσσαλο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας του ελέγχου ποιότητας. Έγιναν 100 δοκιμές της διαδικασίας Monte Carlo, για όλες τις περιπτώσεις. Ο εκτιμώμενος δειγματικός μέσος όρος που προέκυψε από τις προσομοιώσεις Monte Carlo έχει ένα σφάλμα ανάλογο του $1/\sqrt{N}$, όπου N είναι ο αριθμός των δοκιμών.

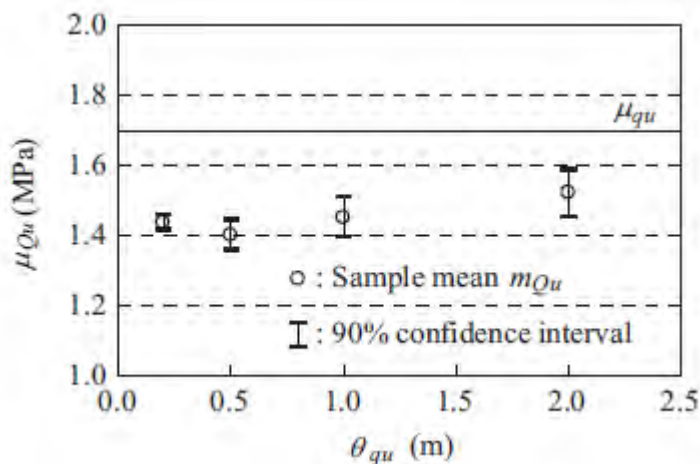
Το παρακάτω σχήμα (Σχ. 4.24) δείχνει 100 τιμές της Q_u που υπολογίστηκαν με ανεξάρτητη προσομοίωση, στην οποία δεν έγινε εισαγωγή γνωστών δεδομένων τιμών. Η μεταβλητότητα της Q_u εξαρτάται από την απόσταση συσχέτισης θ_{qu} . Δηλαδή, η αντοχή Q_u παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβλητότητα για υψηλότερες τιμές θ_{qu} συγκριτικά με χαμηλότερες τιμές θ_{qu} , δείχνοντας ότι το θ_{qu} επηρεάζει σημαντικά

την Q_u ενός πασσάλου που παρουσιάζει χωρική μεταβλητότητα. Επιπλέον, οι περισσότερες τιμές της Q_u είναι μικρότερες από τη μ_{qu} , ανεξάρτητα από την απόσταση θ_{qu} . Το έδαφος που έχει επεξεργαστεί κατ' αυτόν τον τρόπο αποτελεί ψαθυρό υλικό, συνεπώς η ολική αντοχή του πασσάλου, στον οποίο υπάρχουν ασθενή στοιχεία, είναι μικρότερη από τη μέση τιμή της αντοχής του στοιχείου.



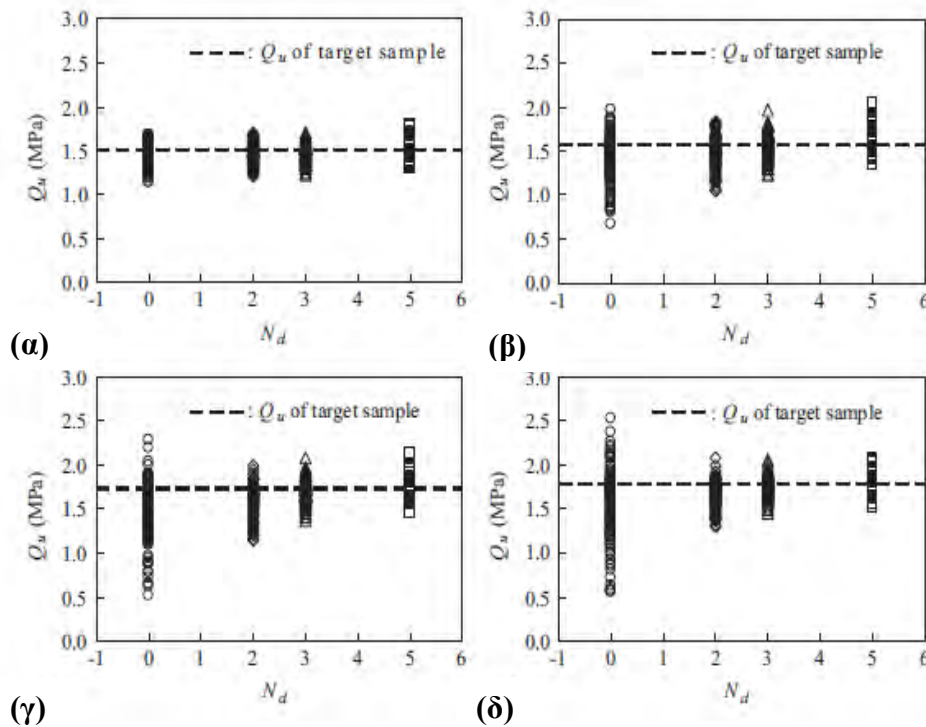
Σχήμα 4.24: Συνολική αντοχή Q_u , ως συνάρτηση της απόστασης συσχέτισης θ_{qu} , που προέκυψε από τα αποτελέσματα της ανεξάρτητης προσομοίωσης (Namikawa, 2015)

Ο δειγματικός μέσος όρος των 100 συνολικών αντοχών m_{Qu} φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 4.25). Παρατηρείται ότι η m_{Qu} μεταβάλλεται με τη θ_{qu} . Η ελάχιστη τιμή m_{Qu} προκύπτει για $\theta_{qu}=0,5$ m, συμπεραίνοντας ότι μια συγκεκριμένη θ_{qu} , η οποία εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος μπορεί να παρέχει την ελάχιστη τιμή m_{Qu} . Μια πιο ουσιώδης διαδικασία για την εκτίμηση των παραμέτρων των τυχαίων μεταβλητών περιλαμβάνει την εκτίμηση ενός διαστήματος που θα περιλαμβάνει την εκτιμώμενη παράμετρο με ένα βαθμό αβεβαιότητας. Το διάστημα εμπιστοσύνης για τη μέση τιμή υπολογίζεται για να παρέχει μια συγκεκριμένη αβεβαιότητα ότι η μέση τιμή αντοχής μ_{Qu} κυμαίνεται μέσα σε αυτό το διάστημα. Τα διαστήματα εμπιστοσύνης 90% παρατίθενται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 4.25).



Σχήμα 4.25: Μέσες τιμές της συνολικής αντοχής μ_{qu} , ως συνάρτηση της απόστασης αυτοσυσχέτισης θ_{qu} , που προκύπτει από τα αποτελέσματα της ανεξάρτητης προσομοίωσης (Namikawa, 2015)

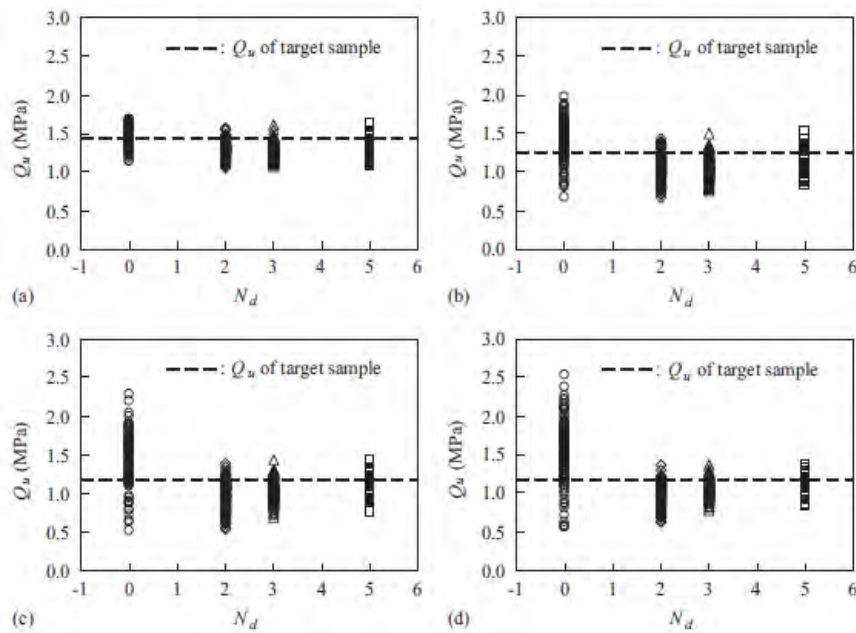
Το παρακάτω σχήμα δείχνει τις 100 τιμές της Q_u σαν συνάρτηση του αριθμού των περιοχών με γνωστές δεδομένες τιμές N_d στην εξαρτώμενη προσομοίωση για την περίπτωση 1 (Σχ. 4.26). Σχεδιάζονται στο ίδιο διάγραμμα και τα αριθμητικά αποτελέσματα από την ανεξάρτητη προσομοίωση ($N_d=0$). Παρατηρείται ότι οι υπολογισμένες τιμές της Q_u στην εξαρτώμενη προσομοίωση συγκεντρώνονται κοντά στα δείγματα. Παρατηρήθηκε ότι η εξαρτώμενη προσομοίωση με τιμές αντοχής σταθερές σε κάποια στοιχεία είναι αποτελεσματική για την εκτίμηση της ολικής αντοχής ενός πασσάλου που αποτελείται από 1760 στοιχεία. Η αποτελεσματικότητα της εξαρτώμενης προσομοίωσης εξαρτάται από τη θ_{qu} . Για $\theta_{qu}=0,2m$ υπάρχει μικρή διαφορά στη μεταβλητότητα της Q_u ανάμεσα στα δύο είδη των προσομοιώσεων. Επειδή η συσχέτιση στην αντοχή των γειτονικών στοιχείων είναι μικρή για μικρή θ_{qu} , η επιρροή των δεδομένων τιμών αντοχής των στοιχείων είναι επίσης μικρή. Η ανεξάρτητη προσομοίωση είναι αποτελεσματική για την εκτίμηση της Q_u για χαμηλές τιμές της θ_{qu} . Αντίθετα, για υψηλότερες τιμές της θ_{qu} , επειδή οι δεδομένες τιμές επηρεάζουν την αντοχή των στοιχείων που είναι γειτονικά σε αυτά, η μεταβλητότητα του Q_u που υπολογίζεται με εξαρτώμενη προσομοίωση είναι μικρότερη συγκριτικά με την ανεξάρτητη. Αυτό δείχνει ότι η εξαρτώμενη προσομοίωση υπερέχει της ανεξάρτητης για υψηλές τιμές θ_{qu} .



Σχήμα 4.26: Συνολική αντοχή Q_u ως συνάρτηση του αριθμού των δεδομένων τιμών N_d , που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της εξαρτώμενης προσομοίωσης για την περίπτωση 1 α) $\theta_{qu}=0,2m$ β) $\theta_{qu}=0,5m$ γ) $\theta_{qu}=1,0m$ δ) $\theta_{qu}=2,0m$ (Namikawa, 2015)

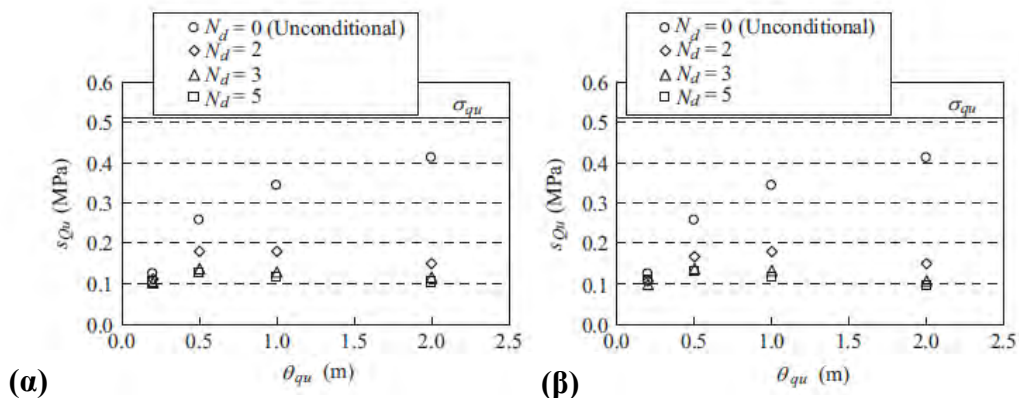
Στο σχήμα 4.27 παρατίθενται οι 100 τιμές της Q_u ως συνάρτηση του N_d στην εξαρτώμενη προσομοίωση, για την περίπτωση 2. Η γενική τάση της αντοχής Q_u είναι ίδια με αυτή στην περίπτωση 1. Τα αποτελέσματα στις περιπτώσεις 1 και 2 δείχνουν

ότι η εξαρτώμενη προσομοίωση υπερέχει της ανεξάρτητης για υψηλές τιμές θ_{qu} ανεξάρτητα από την ολική αντοχή των δειγμάτων.



Σχήμα 4.27: Συνολική αντοχή Q_u , ως συνάρτηση του αριθμού των δεδομένων τιμών N_d προέκυψαν από τα αποτελέσματα της ανεξάρτητης προσομοίωσης για την περίπτωση 2 α) $\theta_{qu}=0,2m$ β) $\theta_{qu}=0,5m$ γ) $\theta_{qu}=1.0m$ δ) $\theta_{qu}=2.0m$ (Namikawa, 2015)

Το σχήμα 4.28 δείχνει την τυπική απόκλιση s_{Q_u} των 100 τιμών Q_u . Στην ανεξάρτητη προσομοίωση, με την αύξηση της θ_{qu} , η διαφορά στις μέσες τιμές m_{qu} μεταξύ των δειγμάτων αυξάνεται. Δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές, όπως φαίνεται στο σχήμα, στις περιπτώσεις 1 και 2. Στα αποτελέσματα της ανεξάρτητης προσομοίωσης, η τυπική απόκλιση s_{Q_u} αυξάνεται με τη θ_{qu} , ενώ στην εξαρτώμενη προσομοίωση η απόσταση θ_{qu} δεν επηρεάζει σημαντικά την τυπική απόκλιση. Για μεγαλύτερες τιμές θ_{qu} , η τιμή s_{qu} στην εξαρτώμενη προσομοίωση είναι πολύ μικρότερη από αυτή στην ανεξάρτητη προσομοίωση. Όσο αυξάνεται η θ_{qu} , οι αντοχές των στοιχείων, που είναι γειτονικά με τα στοιχεία με γνώστες τιμές, αποκτούν τιμές παρόμοιες με τις δεδομένες τιμές αντοχής.

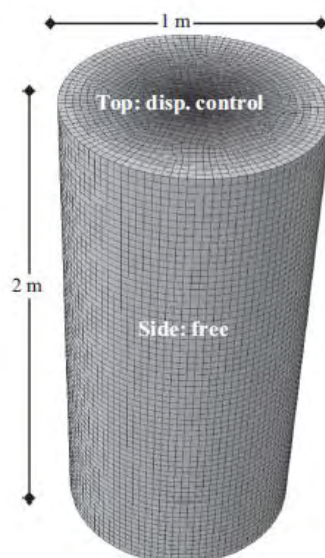


Σχήμα 4.28: Σύγκριση της τυπικής απόκλισης της ολικής αντοχής s_{Q_u} , που προέκυψε από την ανεξάρτητη και την εξαρτώμενη προσομοίωση για τις περιπτώσεις **α)** 1 και **β)** 2

Στην προηγούμενη μελέτη των Namikawa και Koseki, που αναλύθηκε, το τσιμεντοποιημένο έδαφος θεωρήθηκε στατιστικά ομοιογενές, κάτι που σημαίνει ότι η μέση τιμή, η διακύμανση η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής παραμένουν σταθερές σε όλη την έκταση του πασσάλου. Ωστόσο, για παράδειγμα, βάσει δοκιμών σε πασσάλους, ο Sakai κ.α. παρατήρησαν μια τάση προς την ακτινική κατεύθυνση. Δηλαδή, παρατηρήθηκε ότι η θλιπτική αντοχή ήταν μεγαλύτερη στο κέντρο του πασσάλου και μειωνόταν προς την άκρη του. Επιπρόσθετα, η χωρική συσχέτιση της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής μπορεί να διαφέρει κατά μήκος της ακτινικής κατεύθυνσης, κάτι που υποδηλώνει την πιθανή ύπαρξη της ανισοτροπίας της ετερογένειας στην αντοχή.

Η παρακάτω μελέτη που θα αναλυθεί αποτελεί διεύρυνση εκείνης που συντάχθηκε από τους Namikawa και Koseki, και πραγματοποιήθηκε από τους Yong Liu , Jun Hu, Yu-Ping Li , Li-Hua Li. Εξετάζεται η δομή της αντοχής σε έναν τσιμεντοποιημένο εδαφοπάσσαλο. Για να ληφθεί υπ' όψιν η ετερογένεια, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές κλίμακες διακύμανσης (SOFs). Έγινε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με την χρήση του λογισμικού ABAQUS/Standard Version 6.13 για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση. Ο στόχος της μελέτης αυτής είναι η εκτίμηση της επίδρασης της δομής του πασσάλου στη συνολική συμπεριφορά του πασσάλου, ο οποίος υπόκειται σε διάφορες πηγές ετερογένειας της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ο πάσσαλος έχει διάμετρο 1 m και ύψος 2 m, και υπόκειται σε αξονική θλίψη . Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από 81673 στοιχεία με 259692 βαθμούς ελευθερίας, Προσομοιώθηκε με θεώρηση τέλει ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς και κριτήριο αστοχίας τύπου Mohr-Coulomb, υπό αστράγγιστες συνθήκες (μετάπτωση σε Tresca).



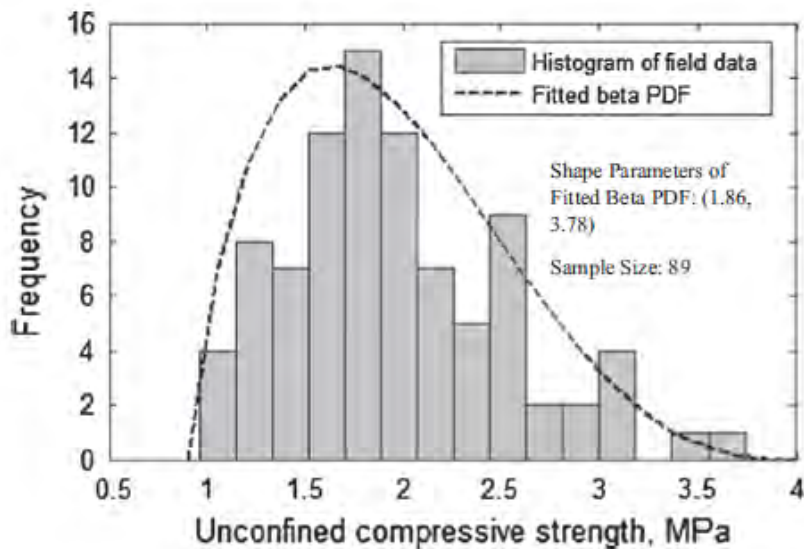
Σχήμα 4.29: Γεωμετρία, πλέγμα διακριτοποίησης και συνοριακές συνθήκες της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής (το πιο σκοτεινό χρώμα δηλώνει υψηλές τιμές αντοχής) (Yong Liu, Jun Hub, Yu-Ping Li, Li-Hua Li, 2016)

Το μοντέλο χρησιμοποιεί πέντε παραμέτρους, που παρατίθενται στον πίνακα 4.8, του οποίου η ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή θεωρήθηκε η τυχαία μεταβλητή και η ετερογένειά της θεωρήθηκε ότι αποτελείται από δύο συνιστώσες την ακτινική μέση συνάρτηση αντοχής και μια στοχαστική διακύμανση. Το μέτρο του Young θεωρήθηκε 140 φορές την ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή (Lee). Η κατανομή πιθανότητας της αντοχής θεωρήθηκε κατανομή βήτα, αφού πρώτα δημιουργήθηκε ένα τυχαίο πεδίο με την κατανομή Gauss και χρησιμοποιήθηκε μια εκθετική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης.

Undrained soil material properties.

Symbol	Definition	Description	Value
φ_u	Friction angle	Constant	0 degree
q_u	Unconfined compressive strength	Spatially varying	Mean trend + random field
ψ	Dilation angle	Constant	0 degree
E_u	Young's modulus	Spatially varying	Fixed ratio: $E_u/q_u = 140$
ν_u	Poisson's ratio	Constant	0.49

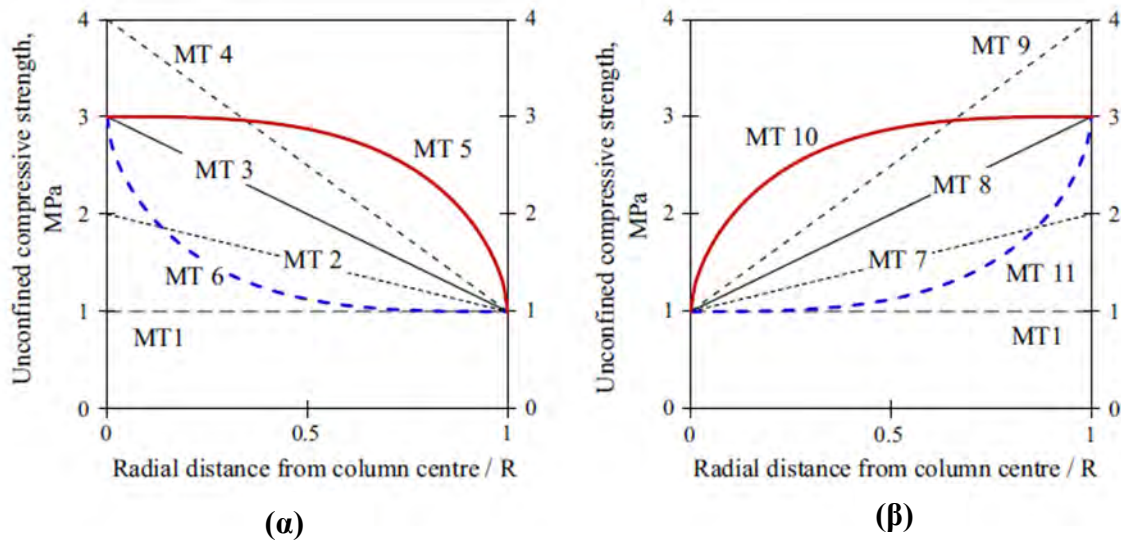
Πίνακας 4.8: Ιδιότητες εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες



Σχήμα 4.30: Παράμετροι κατανομής βήτα

Η ολική συμπεριφορά ενός πασσάλου, που φορτίζεται αξονικά, μπορεί να εξεταστεί μέσω μιας καμπύλης φορτίων-μετακίνησης από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η καμπύλη δείχνει τη δύναμη αντίστασης στο άνω μέτωπο έναντι της μετατόπισης, από την οποία μπορεί να προκύψει και καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων. Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι συνοριακές συνθήκες και η

γεωμετρία που προτάθηκαν από του Namikawa και Koseki. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η μέση ακτινική τάση είναι γενικά μια συνάρτηση της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει της ακτινικής απόστασης από το κέντρο του πασσάλου προς την άκρη του (MT). Διαμέσου ενός πασσάλου, το εσωτερικό τμήμα μπορεί να είναι ισχυρότερο ή ασθενέστερο από το εξωτερικό τμήμα. Και τα δύο σενάρια έχουν παρατηρηθεί βάσει αποτελεσμάτων πεδίου. Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν 11 τέτοιες συναρτήσεις απόστασης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.31: Αναπαράσταση των 11 συναρτήσεων MT (ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή με την ακτινική απόσταση από το κέντρο του πάσσαλου/R) α) Το εσωτερικό τμήμα πιο άκαμπτο β) Το εξωτερικό τμήμα πιο άκαμπτο (Yong Liu, Jun Hub, Yu-Ping Li, Li-Hua Li, 2016)

Οι MT (mean trends) 1-6 αναπαριστούν τις περιπτώσεις που το εσωτερικό τμήμα του πασσάλου είναι πιο δύσκαμπτο, ενώ οι υπόλοιπες όταν το εξωτερικό τμήμα είναι πιο δύσκαμπτο. Σε όλες τις περιπτώσεις, η ελάχιστη τιμή της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής θεωρήθηκε 1 MPa για λόγους απλούστευσης. Για έναν τσιμεντοποιημένο εδαφοπάσσαλο η μέση αντοχή μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

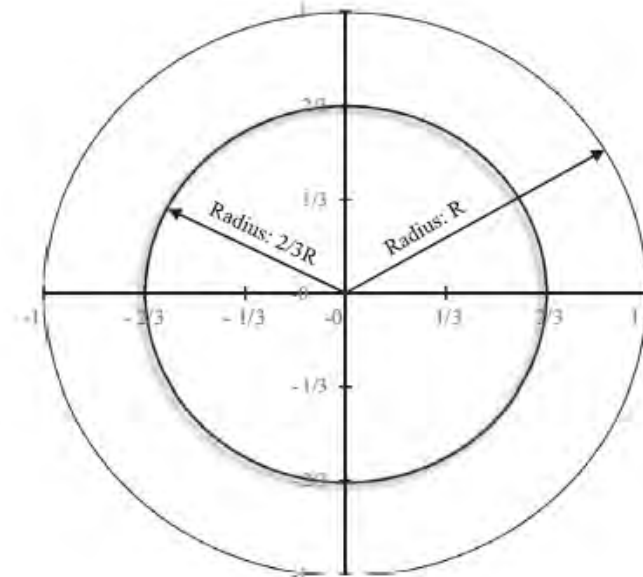
$$q_{u_ave} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R q_u(r) d(\pi r^2) \quad (67)$$

όπου r είναι η ακτινική απόσταση και $q_u(r)$ είναι η τιμή της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής σε μια αξονική απόσταση r .

Αν η q_u είναι γραμμική συνάρτηση της ακτινικής απόστασης r , η παραπάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

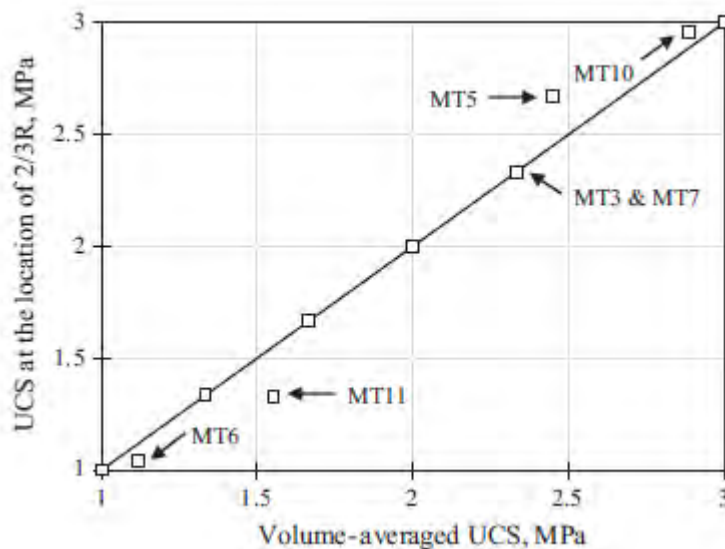
$$q_{u_ave} = q_u \left(\frac{2R}{3} \right) \quad (68)$$

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 4.32), η εξίσωση δείχνει ότι η μέση αντοχή ισούται με την τιμή της αντοχής σε απόσταση $2/3$ της ακτίνας από το κέντρο του πασσάλου, εφόσον η q_u είναι γραμμική συνάρτηση.



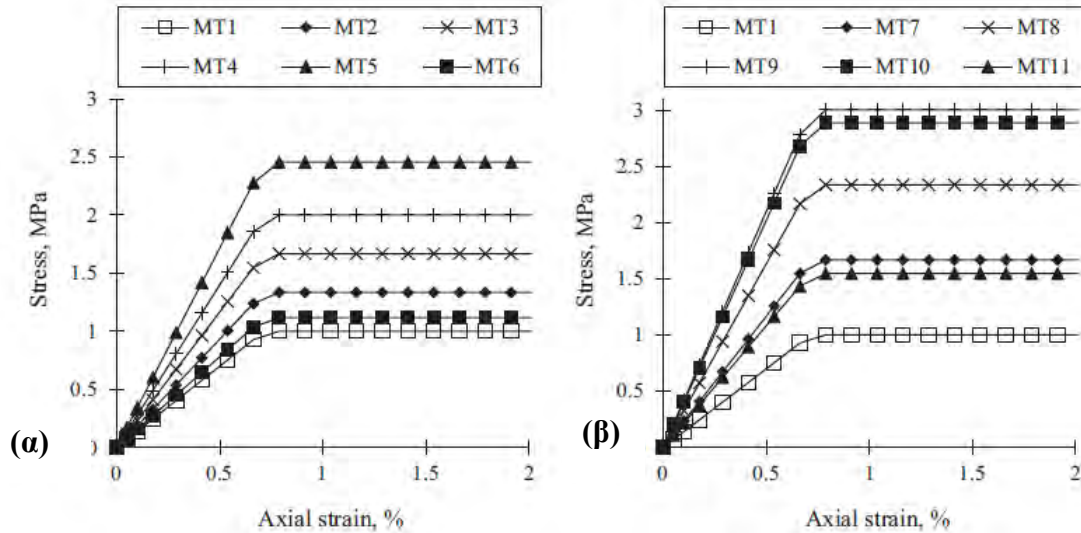
Σχήμα 4.32: Προτεινόμενη θέση σε απόσταση $2/3R$ για δείγματα από τον πυρήνα (Yong Liu, Jun Hub, Yu-Ping Li, Li-Hua Li, 2016)

Η απλούστευση αυτή παρουσιάζει σχετικό σφάλμα, συγκριτικά με τη χρήση μη γραμμικής συνάρτησης, μικρότερο από 15%, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα (Σχ. 4.33). Το επίπεδο αυτό του σφάλματος είναι αποδεκτό στην πράξη, καθώς σε πραγματικά έργα με περιορισμένα δείγματα, είναι δύσκολη η εκτίμηση της μορφής της συνάρτησης της αντοχής καθώς και η εύρεση των μέσων αντοχών.



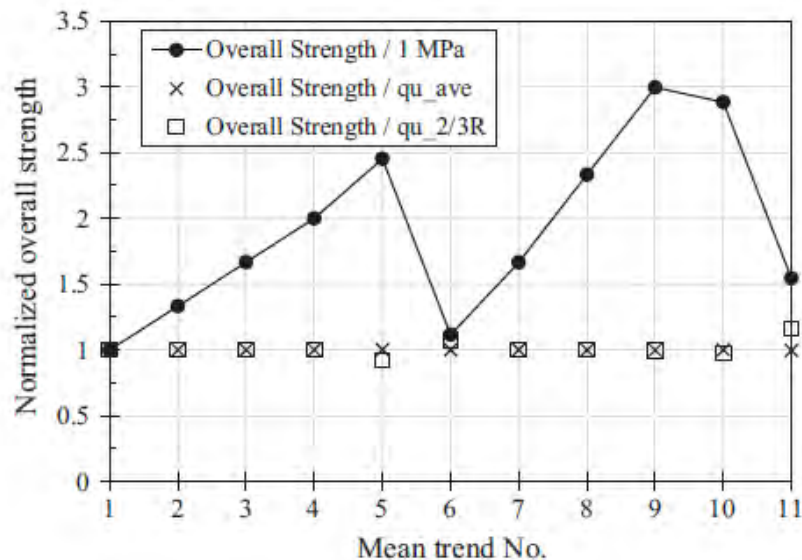
Σχήμα 4.33: Σύγκριση μεταξύ της μέσης θλιπτικής αντοχής (UCS) και της τιμής UCS στη θέση των $2/3$ της ακτίνας (Yong Liu, Jun Hub, Yu-Ping Li, Li-Hua Li, 2016)

Οι αντίστοιχες καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης των πασσάλων με τις 11 αυτές συναρτήσεις φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Σε αυτές τις αναλύσεις, ελήφθη υπ' όψιν μόνο η συνάρτηση της αντοχής και όχι η διακύμανση (συντελεστής διακύμανσης COV=1).



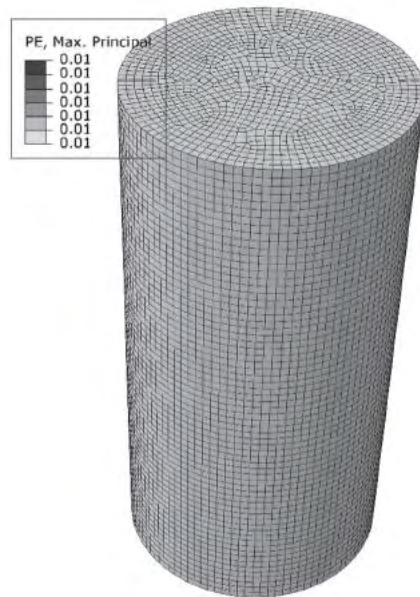
Σχήμα 4.34: Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης με τις διάφορες συναρτήσεις MT **α)** Το εσωτερικό τμήμα πιο άκαμπτο **β)** Το εξωτερικό τμήμα πιο άκαμπτο (Yong Liu, Jun Hub, Yu-Ping Li, Li-Hua Li, 2016)

Μπορούν να παρατηρηθούν σημαντικές διακυμάνσεις στην ολική αντοχή, οι τιμές της οποίας συνοψίζονται στα σχήματα 4.34α, 4.34β. Γενικά, οι περιπτώσεις στις οποίες το εξωτερικό τμήμα είναι πιο δύσκαμπτο παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή συγκριτικά με τις περιπτώσεις που το εσωτερικό τμήμα είναι ισχυρότερο. Όταν όμως οι τιμές των αντοχών κανονικοποιήθηκαν ως προς τη μέση αντοχή, οι κανονικοποιημένες αντοχές έτειναν να έχουν μια ομοιομορφία, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.35. Αυτό συμβαίνει, καθώς ο λόγος του μέτρου του Young προς την αντοχή είναι σταθερός. Ο σταθερός αυτός λόγος δηλώνει ότι όλα τα στοιχεία αστοχούν στο ίδιο επίπεδο παραμόρφωσης.



Σχήμα 4.35: Διάγραμμα αντοχών αστοχίας με διαφορετική κανονικοποίηση με τις συναρτήσεις MT (Yong Liu, Jun Hub, Yu-Ping Li, Li-Hua Li, 2016)

Ακόμα, έγινε έλεγχος των μετακινήσεων και εφαρμόστηκαν ενιαίες παραμορφώσεις σε όλα τα στοιχεία. Αυτό μπορεί ακόμα να δικαιολογηθεί, από την ενιαία τιμή της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, όπου η αξονική παραμόρφωση 2,5% ασκήθηκε στην άνω επιφάνεια.



Σχήμα 4.36: Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση για την περίπτωση 3 (Yong Liu, Jun Hub, Yu-Ping Li, Li-Hua Li, 2016)

Όταν τα αποτελέσματα όμως κανονικοποιήθηκαν ως προς την αντοχή σε απόσταση $2/3$ της ακτίνας, οι κανονικοποιημένες αντοχές επίσης παρουσιάζουν ομοιομορφία, αν και με κάποιες αποκλίσεις σε κάποια σημεία (Σχ. 4.35). Αυτό δείχνει, ότι η ολική αντοχή μπορεί να προβλεφθεί επιτυχώς με την αντοχή υπολογισμένη σε απόσταση $2/3$ της ακτίνας.

Για την προσομοίωση της στοχαστικής διακύμανσης της αντοχής θεωρήθηκε το παρακάτω τυχαίο πεδίο (με μηδενική MT), που μπορεί να ελεγχθεί από δύο παραμέτρους: COV και SOF, από τις οποίες η πρώτη προσδιορίζεται ως η τυπική απόκλιση της αντίστοιχης τιμής της MT. Για έναν πραγματικό πάσσαλο, η τυπική απόκλιση είναι ανάλογη της MT. Έτσι, στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε μια σταθερή τιμή COV για όλο τον πάσσαλο. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί COV και SOF για την εξέταση της επίδρασης της διακύμανσης στην ολική συμπεριφορά (Πίνακας 4.8).

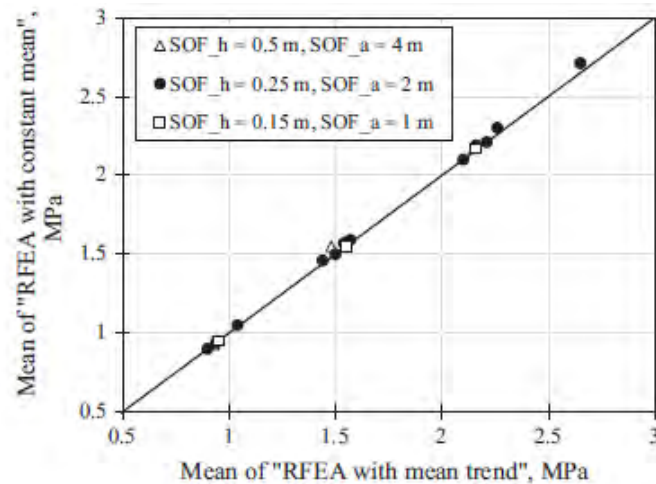
Το εύρος των τιμών που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα. Για κάθε περίπτωση, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων υπολογίστηκε 600 φορές για την εκτίμηση των στατιστικών χαρακτηριστικών της ολικής αντοχής (600 προσομοιώσεις Monte Carlo). Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων αναφέρεται ως RFEA (Random Finite Element Analysis).

Range of coefficient of variation (COV) and scale of fluctuation (SOF).

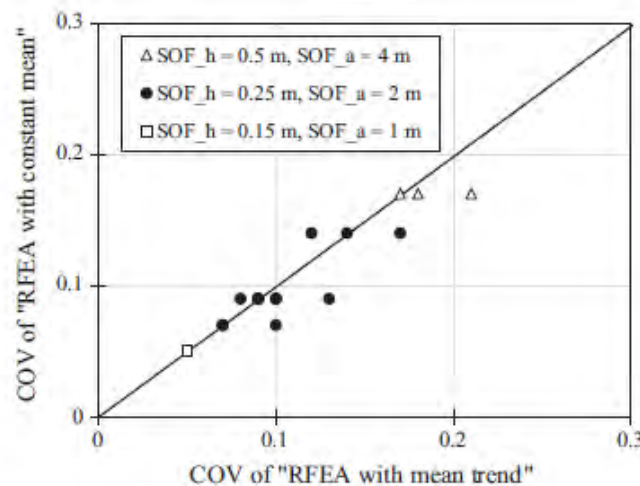
COV	SOF (m)	
	Vertical	Cross-section plane
0.21–0.36	0.8–8.0	–
0.2–0.35	–	–
<0.6	–	Radial: <0.13 Orthogonal: <0.32
0.29–0.46	–	–

Πίνακας 4.8: Εύρος τιμών του συντελεστή μεταβλητότητας (COV) και της κλίμακας διακύμανσης (SOF)

Η ανάλυση RFEA πραγματοποιήθηκε και σε έναν πάσσαλο με σταθερή μέση αντοχή, αντί για MT. Αυτό έγινε βάσει της εξίσωσης (68). Για την εκτίμηση αυτής της διαφοράς, το παρακάτω σχήμα περιλαμβάνει τα διαγράμματα της συνάρτησης και του συντελεστή COV της ολικής αντοχής, που αποκτώνται σε κάθε περίπτωση με την ύπαρξη σταθερής συνάρτησης ή όχι.



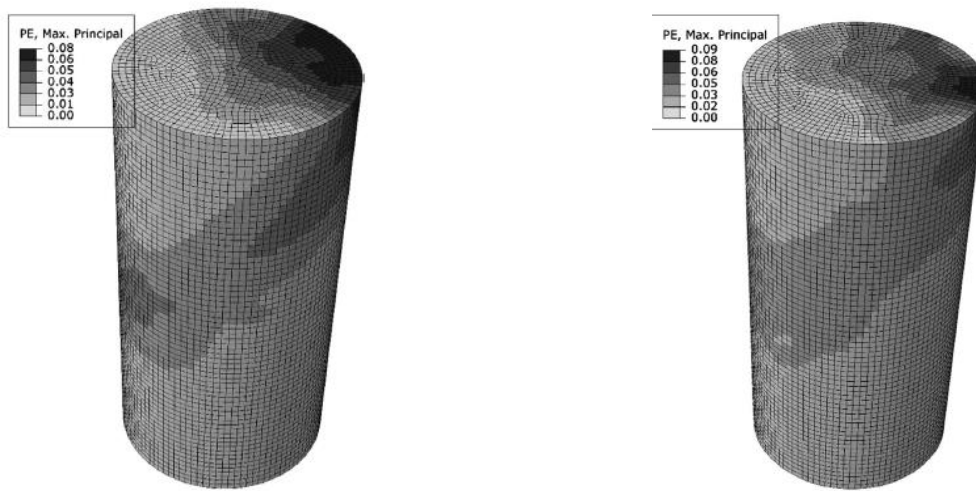
(α)



(β)

Σχήμα 4.37: Συγκρίσεις **α)** των μέσων τιμών **β)** και των COV ανάμεσα στα αποτελέσματα της τυχαίας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (RFEA) με MT και με μια σταθερή μέση τιμή (ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή σε απόσταση $2/3R$) (h είναι η κλίμακα διακύμανσης στο επίπεδο διατομής, ενώ a κατά μήκος της αξονικής διεύθυνσης) (Yong Liu, Jun Hub, Yu-Ping Li, Li-Hua Li, 2016),

Από τα προκύπτοντα αποτελέσματα, μπορεί να διαπιστωθεί ότι και στην περίπτωση των αντοχών και των COV και για τις δύο αναλύσεις, παρουσιάζεται μια ομοιομορφία, εκτός από κάποια σημεία που παρουσιάζεται μια διασπορά στην περίπτωση των COV. Όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα, οι αστοχίες των μοντέλων και στις δύο περιπτώσεις μοιάζουν μεταξύ τους (εκ των οποίων στην μία περίπτωση υπάρχει MT, ενώ στην άλλη όχι). Αυτό δείχνει ότι δε χρειάζεται μεγάλη προσπάθεια για την εκτίμηση συγκεκριμένης μορφής της συνάρτησης της αντοχής (MT) σε έναν πάσσαλο,



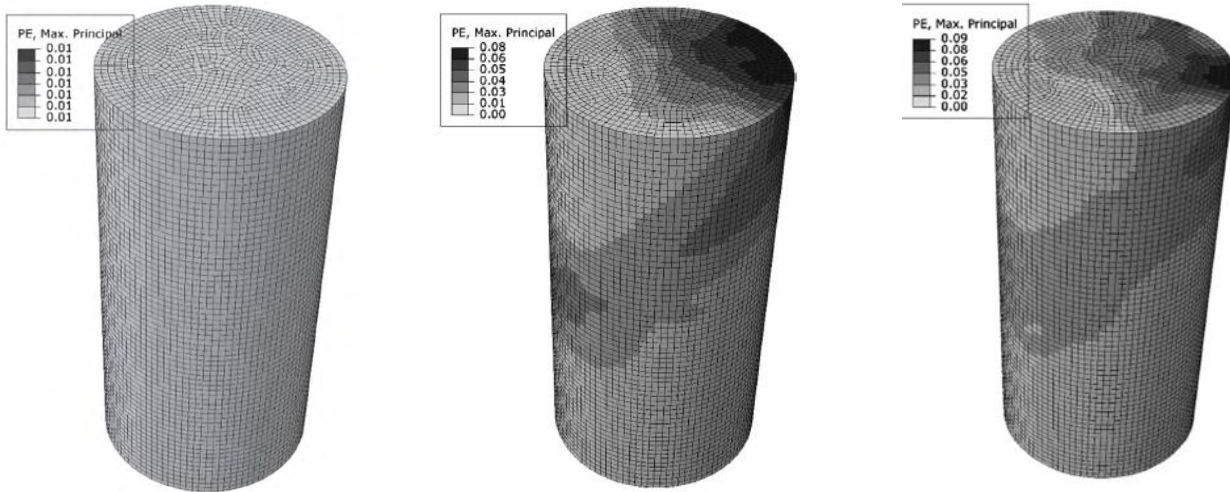
Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να δείξει και το μηχανισμό αστοχίας των πασσάλων με χωρικά μεταβλητές ιδιότητες. Για παράδειγμα, τα παρακάτω σχήματα αναπαριστούν τη μέγιστη παραμόρφωση για τις περιπτώσεις όπου υπάρχει συνάρτηση της αντοχής MT, όταν υπάρχει τυχαίο πεδίο και στην περίπτωση που έχουμε έναν συνδυασμό των παραπάνω (Case 3, 13, 18).

Summary of random finite-element analysis results.

Case No.	COV in UCS	SOF (m)		Mean trend (MT) No. (see Fig. 5)	Volume-averaged UCS, $q_{u,ave}$ (MPa)	RFEA with mean trend			RFEA with constant mean (UCS at 2/3R)		
		Cross-section plane SOF	Axial SOF			Mean (MPa)	COV in responses	KS test statistic D_0	Mean (MPa)	COV in responses	KS test statistics D_0
3	0	-	-	3	1.67	1.67	0	-	1.67	0	-
13	0.4	0.25	2.0	1	1.00	0.94	0.09	0.023	0.94	0.09	0.023
18	0.4	0.25	2.0	3	1.67	1.54	0.10	0.026	1.57	0.09	0.023

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για τις περιπτώσεις 3, 13, 18 (Yong Liu, Jun Hub, Yu-Ping Li, Li-Hua Li, 2016)

Στην πρώτη περίπτωση, εμφανίζεται αστοχία σε κάθε σημείο, κάτι το οποίο δεν είναι ρεαλιστικό. Αντίθετα, το διαγώνιο επίπεδο αστοχίας που παρατηρείται στις άλλες δύο περιπτώσεις, είναι πιο εφικτό, σύμφωνα με την πραγματική αστοχία που συμβαίνει σε πραγματικές δοκιμές.



Σχήμα 4.39: Μέγιστη πλαστική παραμόρφωση για τις περιπτώσεις 3, 13 και 18 αντίστοιχα (Statistical evaluation of the overall strength of a soil-cement column under axial compression, Yong Liu, Jun Hub, Yu-Ping Li, Li-Hua Li, 2016)

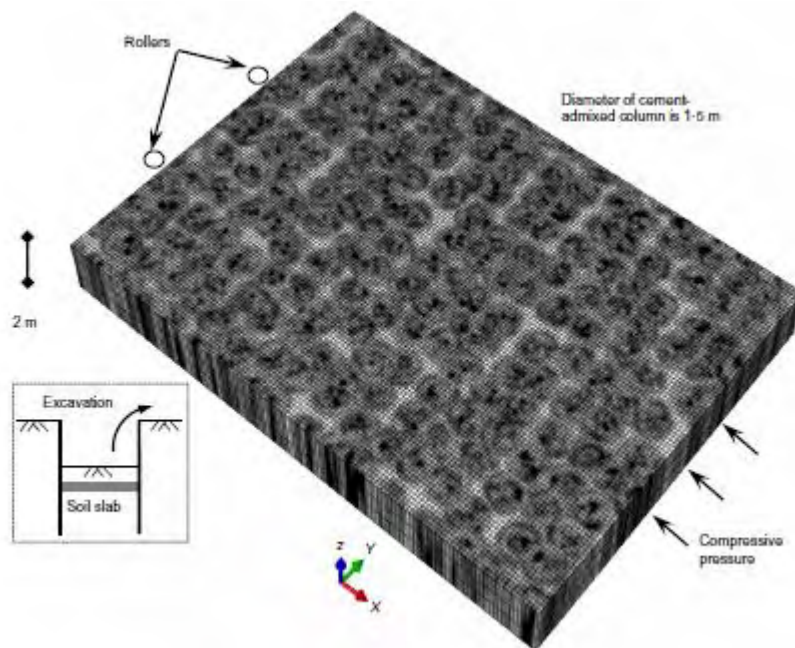
Τα τσιμεντοποιημένα εδάφη, συχνά θεωρούνται ιστροπικά και ομοιογενή κατά το σχεδιασμό (π.χ. Terashi, 2005; O' Rourke & McGinn, 2006). Στην πραγματικότητα, το έδαφος που βελτιώνεται με τη μέθοδο της εδαφικής ανάμειξης έχει πασσαλοειδή δομή (Nakagawa κα, 1996), και διαθέτει σημαντική, τυχαία χωρική μεταβλητότητα με συντελεστή μεταβλητότητας (COV) περίπου 0,4 (π.χ. Larsson κα 2005; Chen κ.α., 2011). Συνεπώς, η αντοχή του τσιμεντοποιημένου εδάφους που προκύπτει είναι συχνά αρκετές φορές μικρότερη από την εργαστηριακά υπολογισμένη αντοχή της ίδιας σύστασης δοκιμίου (π.χ. Chew κα, 2004).

Στην παρακάτω μελέτη, θα εξεταστούν η στοχαστική και ντετερμινιστική ετερογένεια στην αστράγγιστη συμπεριφορά ενός τσιμεντοποιημένου στρώματος αργίλου, χρησιμοποιώντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Griffiths & Fenton, 2009). Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή και το μέτρο του Young του εδάφους είναι οι τυχαίες παράμετροι στη μελέτη αυτή, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της τσιμεντοποιημένης αργίλου. Τα underlying τυχαία γκαουσιανά πεδία δημιουργούνται χρησιμοποιώντας τη γραμμική μέθοδο εκτίμησης που προτάθηκε από τον Liu (2014), η οποία παρέχει έναν αποτελεσματικό τρόπο δημιουργίας ενός τρισδιάστατου τυχαίου πεδίου με εκθετική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης. Το μη γκαουσιανό τυχαίο πεδίο, που προκύπτει ως συνάρτηση των συντεταγμένων των σημείων, σε ένα μοντέλο

πεπερασμένων στοιχείων, προσομοιώθηκε από το underlying γκαουσιανό πεδίο προσαρμόζοντας την κλίμακας διακύμανσης (SOF). Η επαλήθευση έγινε με σύγκριση των αποτελεσμάτων για κατακόρυφη φόρτιση, με εκείνα των Namikawa και Koseki (2013). Στη συνέχεια, έγινε τυχαία ανάλυση για τη τσιμεντοποιημένη πλάκα, που αποτελείται από 160 πασσάλους και υπόκειται σε θλιπτική πλευρική φόρτιση μιας κατεύθυνσης.

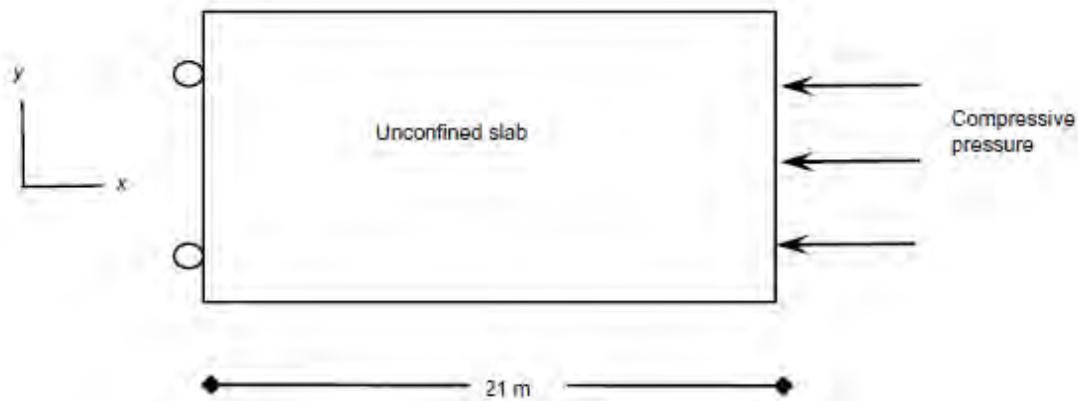
Το πρόβλημα που αναλύθηκε από τους Namikawa και Koseki, αναλύθηκε εκ νέου από τους Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi. Η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας (στατιστική κατανομή) είναι ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν από τους Namikawa και Koseki (2013). Η μείωση της αντοχής (strain softening) μοντελοποιείται με τη μείωση της ενεργούς συνοχής ως συνάρτηση της παραμόρφωσης.

Όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα (Σχ. 4.40, 4.41, 4.42), το πρόβλημα περιλαμβάνει μια πλάκα εδάφους που αποτελείται από 160 εδαφοπασσάλους που υπόκεινται σε μονοδιάστατη θλίψη. Οι μη επεξεργασμένες περιοχές αναπαρίστανται με λευκό χρώμα και θεωρούνται φυσικό έδαφος με τις ιδιότητες που αναφέρονται στον πίνακα 4.10.



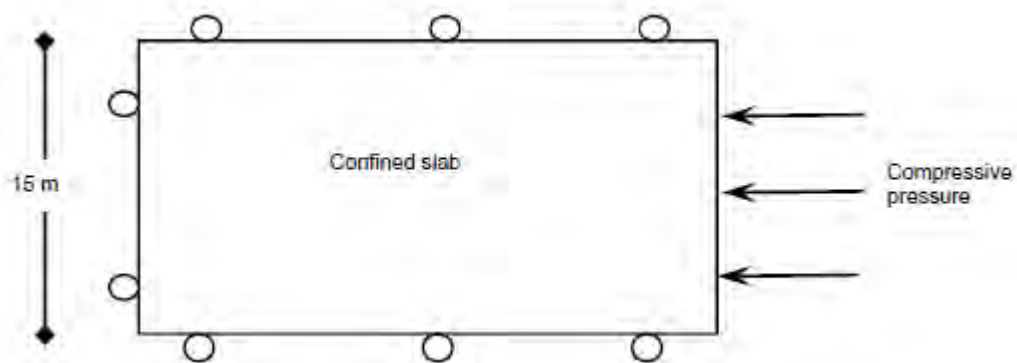
Σχήμα 4.40: Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες της πλάκας, ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή σε τρισδιάστατη μορφή, όπου οι πιο σκοτεινές ζώνες δείχνουν μεγαλύτερες ανεμπόδιστες θλιπτικές αντοχές. (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)

Η πλάκα πάχους 2 m είναι τυπική των πλακών ενισχυμένου εδάφους για βαθιές εκσκαφές. Χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη συνοριακών συνθηκών για τις αφόρτιστες πλευρές. Η πρώτη υποθέτει ότι η αφόρτιστη πλευρά είναι ελεύθερη, κάτι που δηλώνει ότι στις ελεύθερες πλευρές υπάρχει μαλακό έδαφος (Σχ. 4.41).



Σχήμα 4.41: Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες της πλάκας (Unconfined case), (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)

Στη δεύτερη περίπτωση η αφόρτιστη πλευρά είναι πλήρως 'πακτωμένη', και αυτό δείχνει μια κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης κατά την οποία η πλάκα θεωρείται απείρου μήκους στην κατεύθυνση y (Σχ. 4.42).



Σχήμα 4.42: Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες της πλάκας (Confined case), (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)

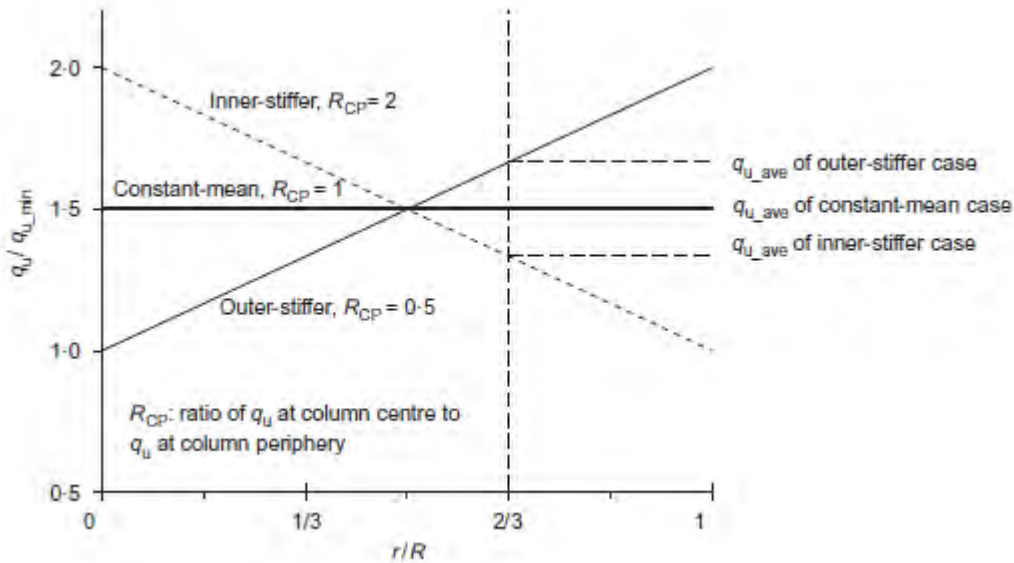
Το πάνω και το κάτω μέτωπο, θεωρήθηκε ότι είναι ελεύθερα καθώς τα υποκείμενα και τα υπερκείμενα εδάφη είναι συνήθως μαλακά και δεν παρέχουν ουσιαστικά σημαντικό κάθετο καταναγκασμό.

Parameter	Value or choice for reference case
<i>(a) Deterministic parameters</i>	
Size (length × width × depth)	21 m × 15 m × 2 m
Radius of column, R	0.75 m
Layout of columns	Rectangular arrangement
Centre to centre distance	1.7 R
E/c_u (improved soils)	280 on average
E/c_u (natural soils)	200
c_u (natural soils)	73 kPa*
Poisson ratio (all soils), ν	0.49
Density (all soils)	1700 kg/m ³
Friction angle (all soils)	0°
Dilation angle (all soils)	0°
Element type (all soils)	Eight-noded brick with reduced integration
<i>(b) Statistical parameter: unconfined compressive strength of cement-admixed soils</i>	
Mean value	2.15 MPa
Resultant coefficient of variation	0.47
Cross-correlation between E and c_u (improved soils)	0.85
Scale of fluctuation	
Circumferential direction	$\pi/4$
Radial direction	$R/3$
Depth direction	$5R$
Strength ratio, R_{cp}	2 (inner-stiffer)
Amount of positioning error	$D/4$ (drilling depth ~25 m)
Correlation lengths of positioning error	Transverse to pressure: $3R$ Longitudinal to pressure: $1R$

Πίνακας 4.10: Τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi, 2015)

Ελήφθησαν υπόψη τρία είδη μεταβλητότητας. Η πρώτη είναι η μεταβολή της αντοχής με την ακτινική απόσταση από το κέντρο. Ο Kawasaki κ.α. (1984) παρατήρησε μείωση της αντοχής με την ακτινική απόσταση. Ωστόσο, το πεδίο τιμών του Larsson (2001) δείχνει ότι η αντοχή μπορεί είτε να μειώνεται είτε να αυξάνεται είτε να παραμένει σταθερή με την ακτινική απόσταση. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.43, και οι τρεις αυτές περιπτώσεις αναλύονται και οι λόγοι της ακτινικής αντοχής λαμβάνονται από τις δεδομένες τιμές του Larsson (2001). Η μέση ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή $q_{u,ave}$ ενός πασσάλου μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση (67), Όπου R είναι η ακτίνα του πασσάλου και $q_u(r)$ είναι η τιμή της αντοχής σε ακτίνα r :

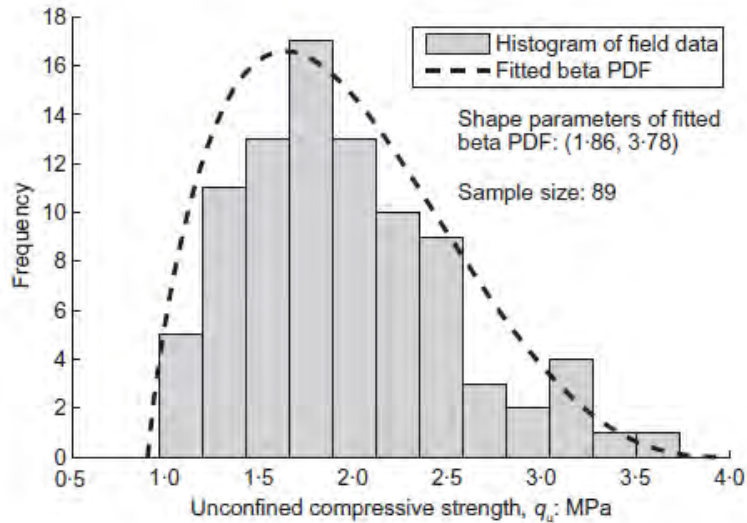
$$q_{u,ave} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R q_u(r) d(\pi r^2)$$



Σχήμα 4.43: Τρεις περιπτώσεις ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής q_u ($q_{u,min}$ είναι ελάχιστη θλιπτική αντοχή, $q_{u,ave}$ είναι η μέση ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή, r η ακτινική απόσταση και R η ακτίνα του πασσάλου), (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi, 2015)

Η αυτοσυσχέτιση της αντοχής παρουσιάζει διαφορές κατά την ακτινική κατεύθυνση, στην περιφέρεια, και κατά την κατεύθυνση του βάθους (Larsson et al, 2005). Για να ληφθεί υπόψη αυτή η διαφοροποίηση, χρησιμοποιήθηκε σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων και ορίστηκαν διαφορετικές παράμετροι για κάθε κατεύθυνση. Αυτό διαφέρει από την ανάλυση των Namikawa και Koseki (2013) οι οποίοι υπέθεσαν ότι ο πάσσαλος είναι στατιστικά ομοιογενής. Η κατανομή πιθανότητας που χρησιμοποιήθηκε για την ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή είναι η κατανομή βήτα, η οποία μοντελοποιεί ικανοποιητικά τη διακύμανση που παρατηρείται στο πεδίο τιμών. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν προσαρμόστηκαν, χρησιμοποιώντας το πεδίο τιμών από τη φάση 4 του Marina Bay Financial Centre (MBFC), πρότζεκτ στη Σιγκαπούρη (Chen κ.α., 2011) (Σχ. 4.44). Μπορεί να προκύψουν σφάλματα στην τοποθέτηση των πασσάλων, τα οποία μπορεί να είναι αποτέλεσμα της εκκεντρότητας του εξοπλισμού ανάμιξης ή της μη καθετότητας. Ακόμα, τέτοια σφάλματα εντείνουν την ετερογένεια. Ορίστηκε ένα ενιαίο τυχαίο σφάλμα στις κεντρικές περιοχές του πασσάλου, που υπόκειται σε μια μέγιστη απόκλιση. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα μοντέλο Mohr-Coulomb με μηδενική γωνία τριβής, και συνεπώς η αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι το μισό της τιμής της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής και θεωρείται τυχαία μεταβλητή. Έγινε παράλληλος υπολογισμός χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Abaqus/Explicit (version 6.11). Το μέγεθος των στοιχείων κατά τις κατευθύνσεις x , y και z ήταν 0.15 m, 0.15 m και 0.67 m, αντίστοιχα. Ο συντελεστής μεταβλητότητας (COV) που χρησιμοποιήθηκε για τη στοχαστική διακύμανση είναι 0,4. Όσον αφορά τη διακύμανση SOF, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την ακτινική κατεύθυνση και την περιφέρεια είναι παρόμοιες

με αυτές του Larsson (2005). Κατά την κατεύθυνση του βάθους, η τιμή που χρησιμοποιήθηκε βρίσκεται στο μέσο του εύρους του Honjo (1982) (Πίνακας 4.11).

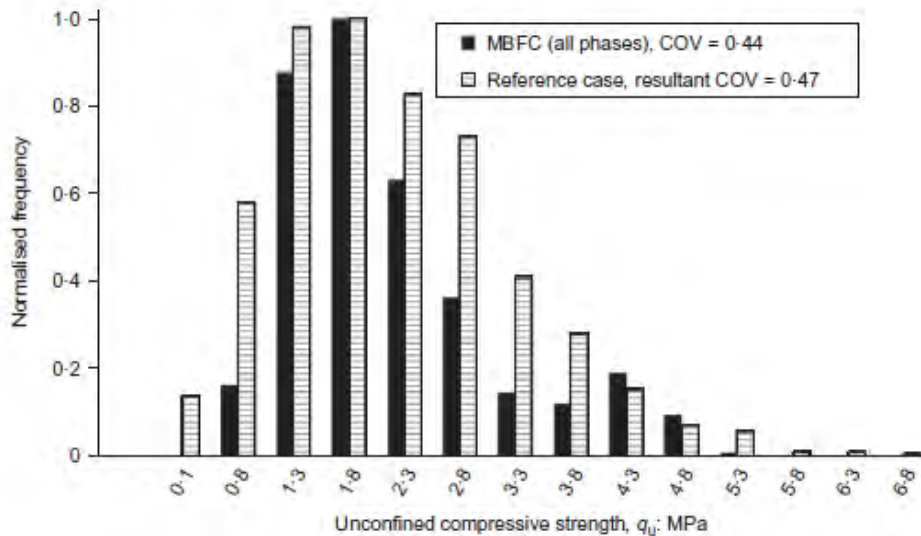


Σχήμα 4.44: Παράμετροι της κατανομής βήτα μετά από προσαρμογή του πεδίου τιμών (PDF-συνάρτηση πιθανότητας) (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)

References	Mixing method	Test	COV	Scale of fluctuation*: m	
				Vertical	Horizontal
Honjo (1982)	Wet method	Unconfined compressive test	0.21-0.36 (clay) 0.32-0.40 (sandy soils)	0.8-8.0	—
Navin (2005)	Wet method	Unconfined compressive test	0.34-0.74†	—	Approximate 24.0
Larsson <i>et al.</i> (2005)	Dry method	Hand-operated penetrometer test	< 0.60	—	Radial: <0.13 Orthogonal: <0.32
Larsson & Nilsson (2009)	Dry method	Cone penetration test	0.20-0.60	—	1.8-3.6
Chen <i>et al.</i> (2011)‡	Wet method	Unconfined compressive test	0.43 (Phase 2) 0.46 (Phase 3A) 0.41 (Phase 3B) 0.41 (Phase 3C) 0.29 (Phase 4)	—	—
Chen <i>et al.</i> (2011)	Combination of wet method and jet grouting	Unconfined compressive test	0.23	—	—
Al-Naqshabandy <i>et al.</i> (2012)	Dry method	Cone penetration test	0.22-0.67	0.2-0.7	2.0-3.0

Πίνακας 4.11: Στατιστικά χαρακτηριστικά τσιμεντοποιημένων εδαφών (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)

Το σχήμα 4.45 δείχνει ένα ιστόγραμμα της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής από 1000 τιμές που επιλέχθηκαν τυχαία από την ανάλυση της πλάκας χρησιμοποιώντας τις παρακάτω παραμέτρους (Πίνακας 4.12). Οι τιμές των δειγμάτων παρουσίασαν μεγαλύτερο COV ίσο με 0,47 (resultant COV) συγκριτικά με τον ορισμένο ίσο με 0,4. Η διαφορά αυτή οφείλεται στα σφάλματα τοποθέτησης του πασσάλου. Η πυκνότητα των εδαφών θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 1700 kg/m^3 , ώστε το πρόβλημα να απλουστευθεί. Αυτό δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, καθώς η κύρια φόρτιση δεν είναι κατά την κάθετη κατεύθυνση αλλά κατά την πλευρική.



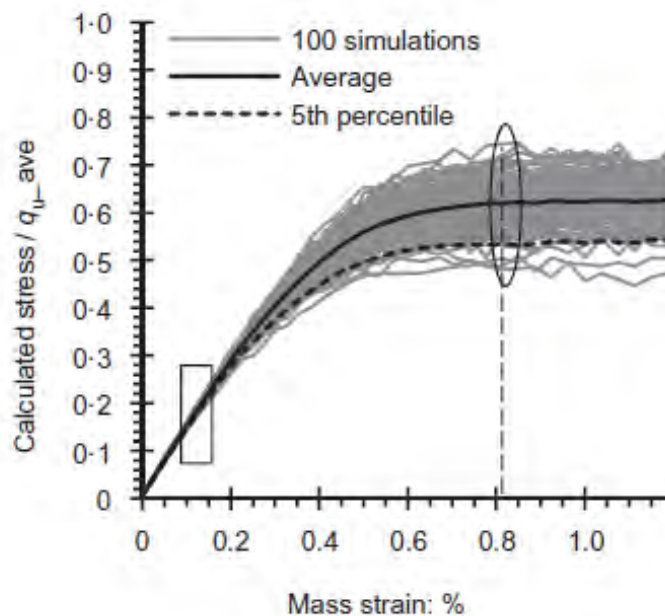
Σχήμα 4.45: Σύγκριση ιστογραμμάτων μεταξύ των δειγμάτων από την προσομοιωμένη αργλική πλάκα και του MBFC πρότζεκτ. (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)

Parameter	Value or choice for reference case	References
<i>(a) Deterministic parameters</i>		
Size (length \times width \times depth)	21 m \times 15 m \times 2 m	
Radius of column, R	0.75 m	Porbaha <i>et al.</i> (2001)
Layout of columns	Rectangular arrangement	Porbaha <i>et al.</i> (2001)
Centre to centre distance	1.7 R	Porbaha <i>et al.</i> (2001)
E/c_u (improved soils)	280 on average	Lee <i>et al.</i> (2005)
E/c_u (natural soils)	200	Dames & Moore (1983)
c_u (natural soils)	73 kPa*	—
Poisson ratio (all soils), ν	0.49	—
Density (all soils)	1700 kg/m ³	—
Friction angle (all soils)	0°	—
Dilation angle (all soils)	0°	—
Element type (all soils)	Eight-noded brick with reduced integration	—
<i>(b) Statistical parameter: unconfined compressive strength of cement-admixed soils</i>		
Mean value	2.15 MPa	Chen <i>et al.</i> (2011)
Resultant coefficient of variation	0.47	Chen <i>et al.</i> (2011)
Cross-correlation between E and c_u (improved soils)	0.85	Liu <i>et al.</i> (2014)
Scale of fluctuation		
Circumferential direction	$\pi/4$	Larsson <i>et al.</i> (2005)
Radial direction	$R/3$	Larsson <i>et al.</i> (2005)
Depth direction	5 R	Honjo (1982)
Strength ratio, R_{cp}	2 (inner-stiffer)	Larsson (2001)
Amount of positioning error	$D/4$ (drilling depth ~ 25 m)	—
Correlation lengths of positioning error		
Transverse to pressure:	3 R	—
Longitudinal to pressure:	1 R	—

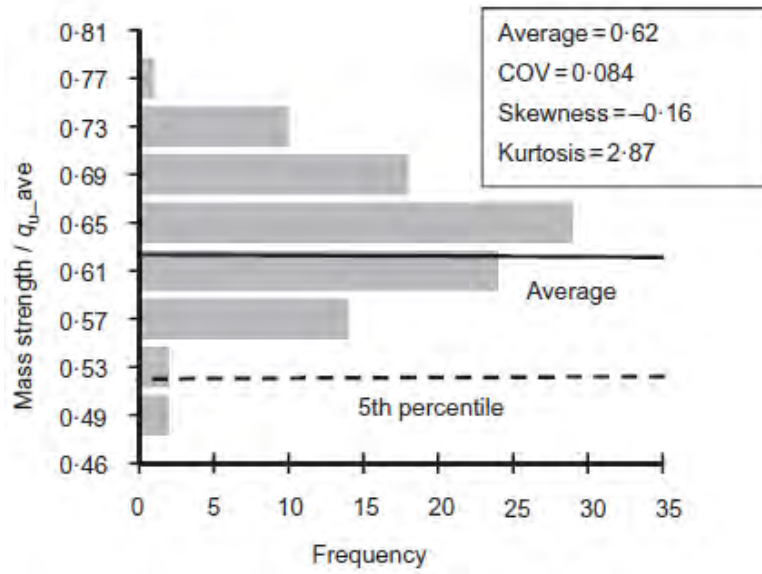
Πίνακας 4.12: Στατιστικές και ντετερμινιστικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)

Το σχήμα 4.46 αναπαριστά την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για 100 τυχαίες προσομοιώσεις του προβλήματος. Η συνολική παραμόρφωση (mass strain) είναι η παραμόρφωση της πλάκας λόγω θλίψης. Για την ελεύθερη πλάκα, το μέτρο ελαστικότητας (μέτρο του Young) μπορεί να προκύψει από το γραμμικό τμήμα της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης. Για την confined πλάκα το μέτρο ελαστικότητας προέκυψε από τον πολλαπλασιασμό της κλίσης με το $(1-\nu^2)$.

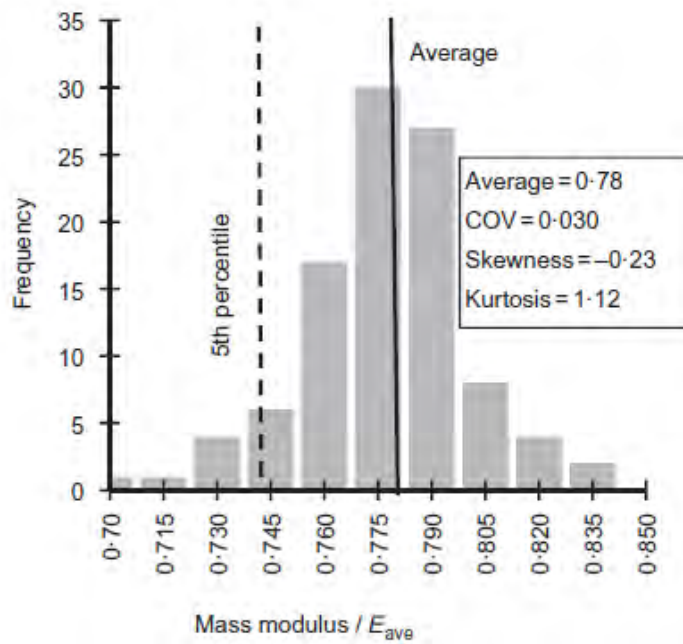
Στα σχήματα 4.47 και 4.48, φαίνεται ότι ο COV της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας είναι σημαντικά μικρότερος από τις αντίστοιχες τιμές των τυχαίων πεδίων (Πίνακας 4.12). Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι διαστάσεις της πλάκας στο επίπεδο x-y είναι πολύ μεγαλύτερες από τις SOFs (Vanmarcke, 1983) των ιδιοτήτων των υλικών και των σφαλμάτων τοποθέτησης. Έτσι και η μεταβλητότητα στην απόκριση θα είναι μικρότερη. Επιπλέον, μολονότι η κατανομή της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής (UCS) είναι θετικά καμπύλη, η συνολική αντοχή και το μέτρο παραμορφωσιμότητας αναπαρίστανται αρκετά καλά από την κανονική κατανομή (Σχ. 4.49). Σημειώνεται ότι στο διάγραμμα 4.49 ο οριζόντιος άξονας περιλαμβάνει τις τιμές της κανονικοποιημένης αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας.



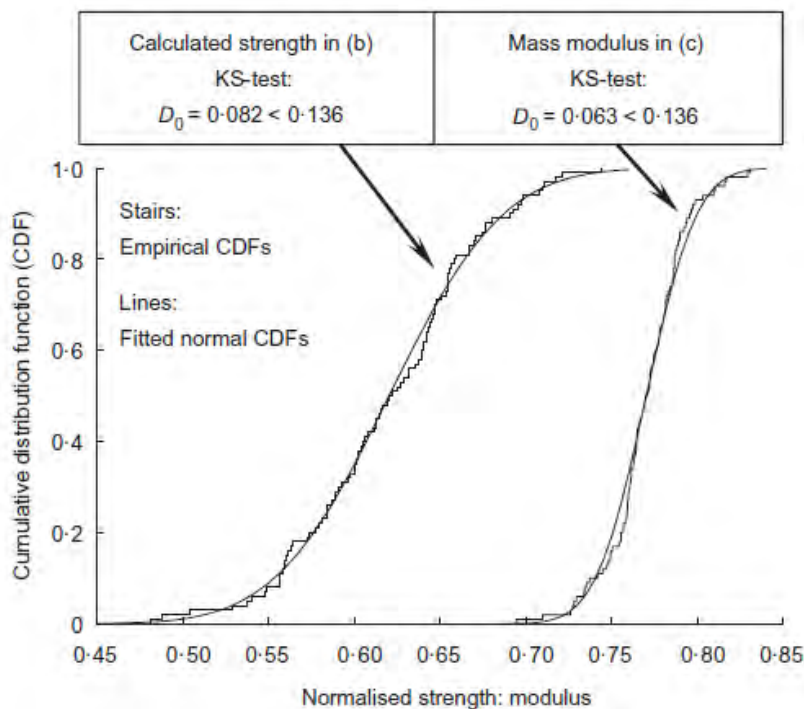
Σχήμα 4.46: Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)



Σχήμα 4.47: Ιστόγραμμα των τάσεων αστοχίας (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)



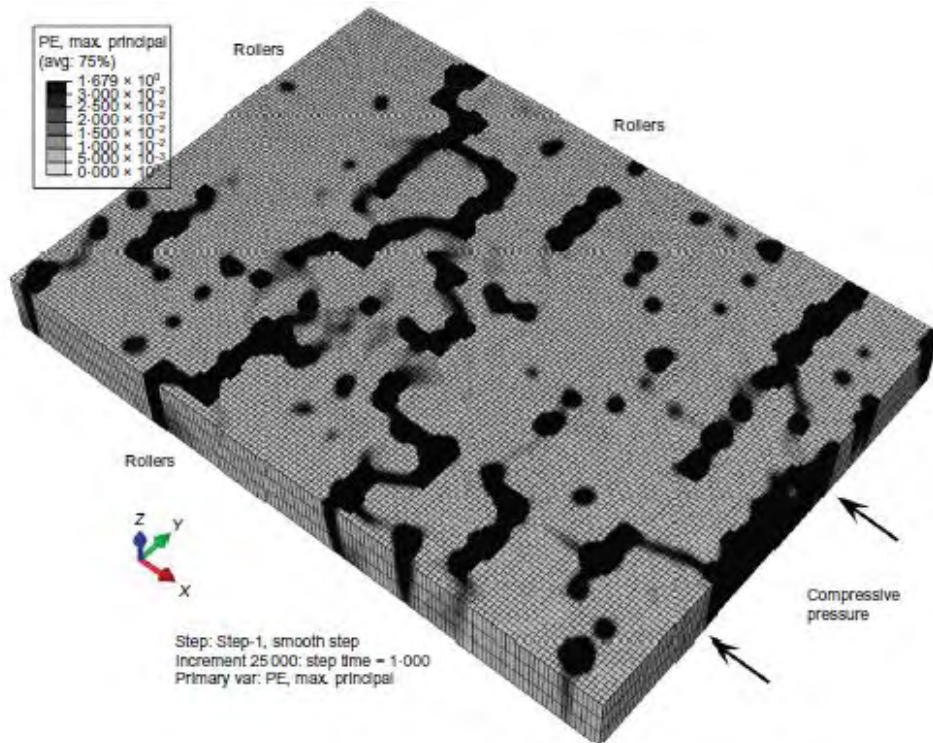
Σχήμα 4.48: Ιστόγραμμα του συνολικού μέτρου παραμόρφωσης (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)



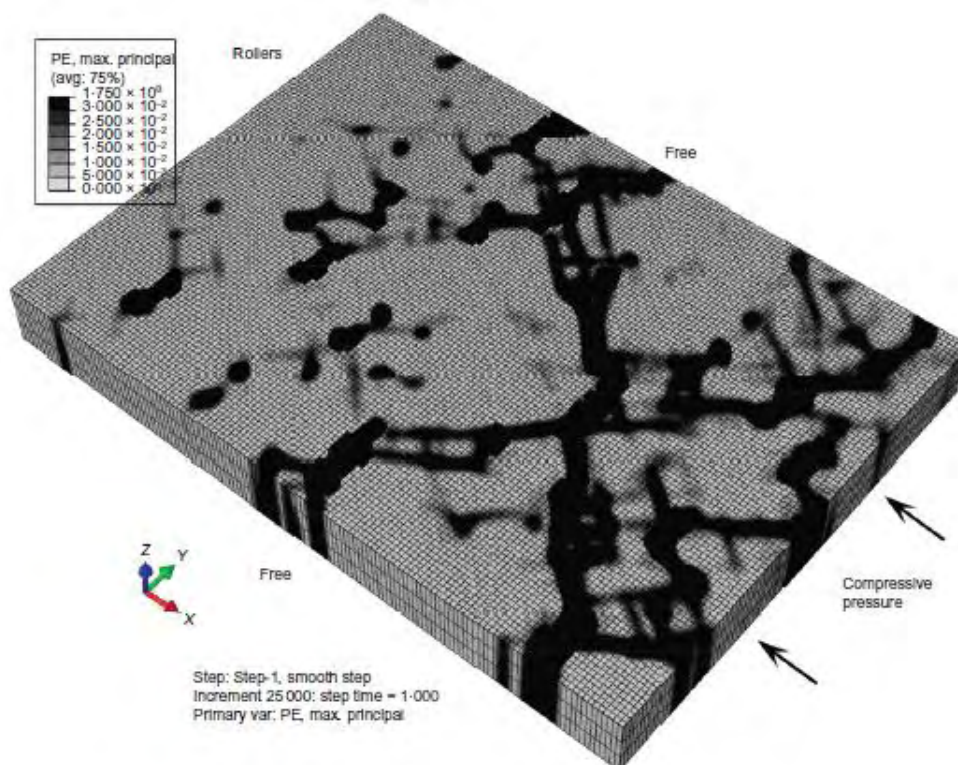
Σχήμα 4.49: Καταλληλότητα των KS τεστ (KS= Kolmogorov-Smirnov, D_0 = μέγιστη κάθετη απόσταση μεταξύ των εμπειρικών και των προσαρμοσμένων συναρτήσεων κατανομής CDFs. Η τιμή 0,136 είναι η κρίσιμη τιμή ενός KS τεστ για ένα δείγμα με μέγεθος 100 σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05) (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)

Τα σχήματα 4.50 και 4.51 απεικονίζουν τη διαφορετική μορφή της αστοχίας της πλάκας. Στην confined πλάκα, οι ζώνες με μεγάλες παραμορφώσεις είναι προς την κατεύθυνση της φόρτισης. Στην ελεύθερη πλάκα, οι ζώνες συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν ευθεία περίπου 45° προς την κατεύθυνση της φόρτισης. Σημειώνεται ότι το μοντέλο Mohr-Coulomb με μηδενική γωνία τριβής δεν μπορεί να λάβει υπ' όψιν την εφελκυστική αστοχία.

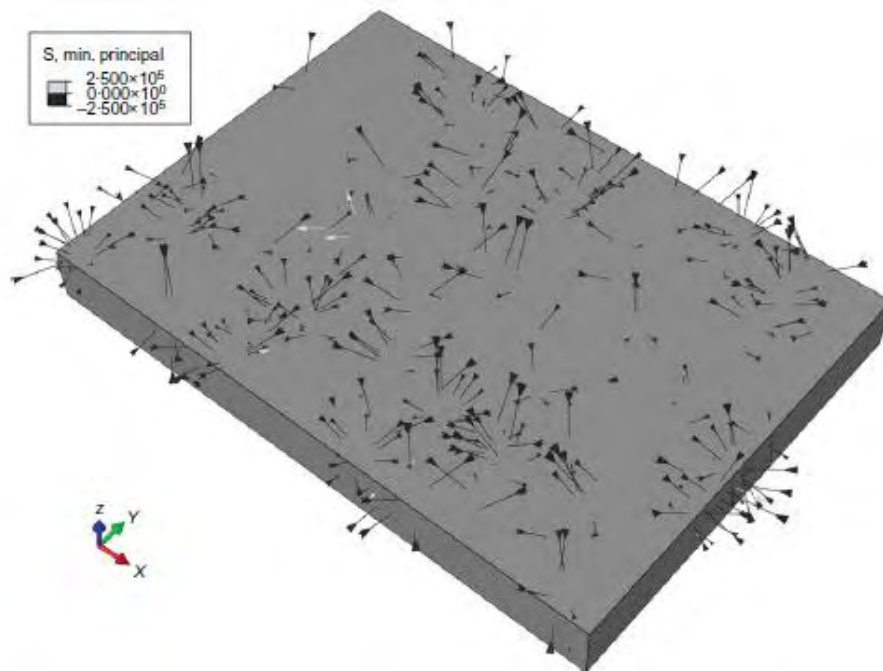
Το σχήμα 4.52 παρουσιάζει την κατανομή των ελάχιστων κύριων τάσεων που εμφανίζεται στην πλάκα στην περίπτωση της 'πακτωμένης πλάκας' (confined case), όπου τα άσπρα βέλη αναπαριστούν τα σημεία με εφελκυστική τάση. Παρατηρείται ότι η εφελκυστική τάση εμφανίζεται μόνο σε λίγες απομονωμένες περιοχές και το μέγεθός της είναι λιγότερο από το 20% της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στο ίδιο σημείο. Αυτή η παρατήρηση είναι λογική καθώς η κύρια τάση που ασκείται είναι θλιπτική. Ο Xiao (2009) ανέφερε ότι η εφελκυστική αντοχή των τσιμεντοποιημένων εδαφών είναι περίπου 0,26cu. Έτσι, η εφελκυστική τάση δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.50: Αναπαράσταση της μέγιστης κύριας παραμόρφωσης στην περίπτωση της πακτωμένης πλάκας (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)



Σχήμα 4.51: Αναπαράσταση της μέγιστης κύριας παραμόρφωσης στην περίπτωση της unconfined πλάκας (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)



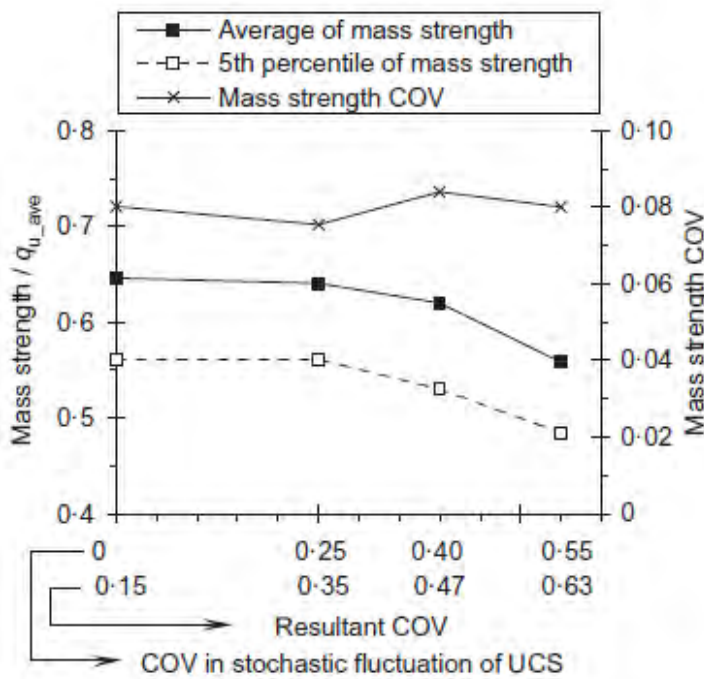
Σχήμα 4.52: Κατανομή ελάχιστων κυρίων τάσεων της πλάκας κατά την αστοχία για την περίπτωση της πακτωμένης πλάκας (θεωρήθηκε συμβατικά θετική φορά του εφελκυσμού) (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίδραση της ακτινικής συνάρτησης (3 διαφορετικές τιμές του λόγου αντοχής) στο μέτρο ελαστικότητας είναι ασήμαντη, όταν αυτό κανονικοποιείται με τη μέση τιμή του (Πίνακας 4.13). Η κλίμακα διακύμανσης SOF δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, κάτι που διαφέρει από την ανάλυση των Namikawa και Koseki, οι οποίοι παρατήρησαν ότι η μέση τιμή της συνολικής θλίψης φτάνει την ελάχιστη τιμή της όταν η κλίμακα διακύμανσης ισούνται με τη διάμετρο του πασσάλου. Αυτή η διαφορά μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι στην ανάλυση των Namikawa και Koseki, η κλίμακα SOF λαμβάνεται περίπου ίση με το μέγεθος της διαμέτρου του πασσάλου και έτσι μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη συνολική αντοχή του πασσάλου. Στην παρούσα μελέτη, η SOF είναι αρκετά μικρότερη σχετικά με τις διαστάσεις της πλάκας. Έτσι, η επιρροή της είναι σημαντική μόνο όταν είναι αρκετά μεγάλη συγκριτικά με το μέγεθος του προβλήματος.

Αντίθετα, ο συντελεστής μεταβλητότητας COV φαίνεται ότι έχει μεγαλύτερη επιρροή στις συνολικές ιδιότητες όπως φαίνεται στον πίνακα 4.13 και στο σχήμα 4.53, καθώς και η συνολική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας μειώνονται με την αύξηση του συντελεστή. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι μια αύξηση στον COV μειώνει την αντοχή των ασθενών ζωνών και αυξάνει το συνολικό όγκο τους.

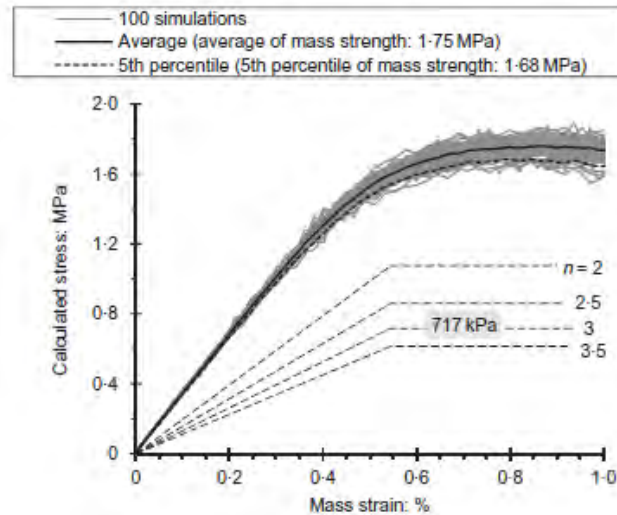
Factors/Parameters	Illustrations	Values (choices for reference case are shown in bold font)	Mass modulus E'		Mass strength, Q	
			Average E'/E_{ave}	COV	Average $Q/q_{u,ave}$	COV
Strength ratio (R_{CP})	Σχήμα 4.43	2 (inner-stiffer)	0.78	0.06	0.62	0.08
		1 (constant-mean)	0.75	0.06	0.60	0.09
		0.5 (outer-stiffer)	0.74	0.05	0.57	0.08
Scale of fluctuation	Σχήμα 4.40	$\theta_c = \pi/3, \theta_x = R/2, \theta_z = 7R$	0.78	0.06	0.60	0.08
		$\theta_c = \pi/4, \theta_x = R/3, \theta_z = 5R$	0.78	0.06	0.62	0.08
		$\theta_c = \pi/5, \theta_x = R/4, \theta_z = 3R$	0.78	0.06	0.60	0.08
Coefficient of variation in stochastic fluctuation		0.00 (resultant COV: 0.15)	0.81	0.05	0.65	0.08
	Σχήμα 4.44,	0.25 (resultant COV: 0.35)	0.80	0.05	0.64	0.08
	Σχήμα 4.45	0.40 (resultant COV: 0.47)	0.78	0.06	0.62	0.08
		0.55 (resultant COV: 0.63)	0.74	0.06	0.56	0.08

Πίνακας 4.13: Ισοδύναμες συνολικές ιδιότητες υπολογισμένες από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)

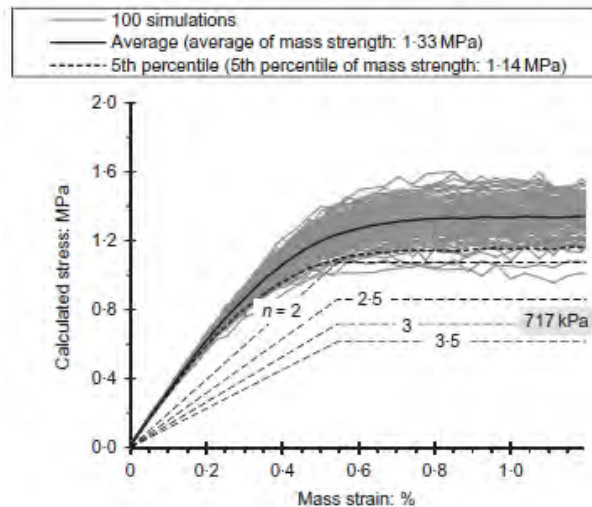


Σχήμα 4.53: Επίδραση του συντελεστή COV στην ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)

Κατά το σχεδιασμό, οι πλάκες ενισχυμένου εδάφους θεωρούνται ενιαία μέσα. Στην παρούσα περίπτωση, δεν υπάρχει κάποια ικανοποιητική μέθοδος για τον προσδιορισμό μιας αντιπροσωπευτικής τιμής σχεδιασμού της αντοχής. Μια κοινή μέθοδος που εφαρμόζεται είναι η χρήση μια συντηρητικής τιμής αντοχής, η οποία θα υπερβαίνεται από τις περισσότερες, αν όχι όλες, τιμές των δειγμάτων (του πυρήνα) που ελέγχονται. Τα παρακάτω σχήματα (Σχ. 4.54α, 4.54β) δείχνουν ότι ακόμα και αν χρησιμοποιείται ένας συντελεστής αντοχής (περίπου 2-5 φορές), τα αποτελέσματα από την ισοδύναμη πλάκα μειώνονται κάτω από το εύρος των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης των αναλύσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι συνολικές ιδιότητες (Σχ. 4.47, 4.48, 4.49) παρουσιάζουν μια σχετικά κανονική κατανομή με σχετικά χαμηλούς COVs. Αυτό δείχνει ότι η συνολική συμπεριφορά τείνει προς τη μέση συμπεριφορά. Η χρήση του συντελεστή αντοχής, χωρίς το συνυπολογισμό της κατανομής δεν μπορεί να λάβει υπ' όψιν τις στατιστικές ιδιότητες της συνολικής συμπεριφοράς.



(α)



(β)

Σχήμα 4.54: Σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων από το 'ενιαίο μέσο' ($Q=q_{u,ave}/n$) και των τυχαίων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. (d = η μέγιστη τιμή του σφάλματος θέσης, R =ακτίνα πασσάλου, $q_{u,ave}$ = 2-15MPa, Το μέτρο ελαστικότητας ισούται με 140 φορές τη θλιπτική αντοχή για το ενιαίο μέσο). **α)** $d/R=0,3$, το βάθος γεώτρησης είναι περίπου 13 m **β)** $d/R=0,5$, το βάθος γεώτρησης είναι περίπου 24 m (Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen and J.-T. Yi , 2015)

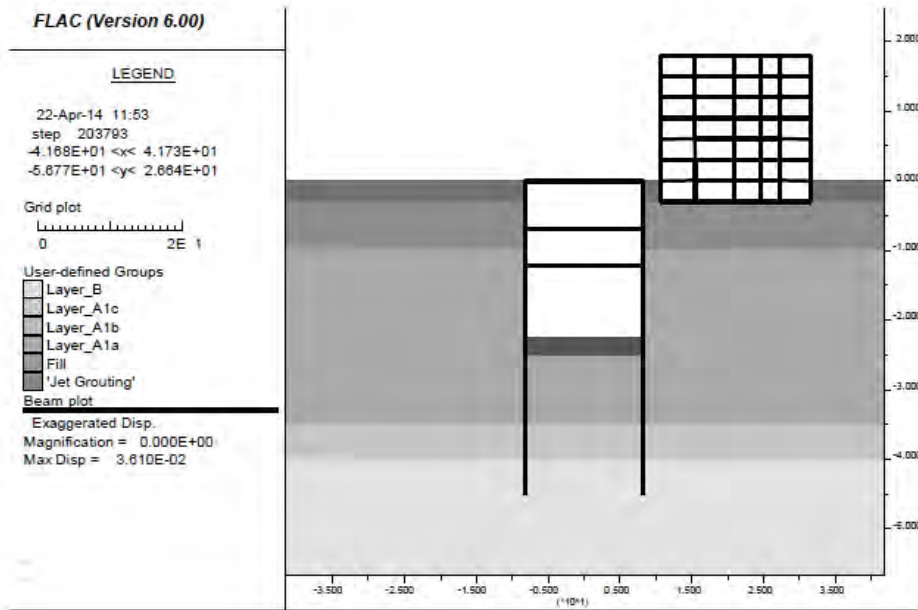
Συμπερασματικά, η προσέγγιση που περιλαμβάνει τη χρήση μικρότερης τιμής αντοχής κατά το σχεδιασμό της εκσκαφής, συχνά οδηγεί σε πολύ υψηλούς μειωτικούς συντελεστές αντοχής. Έτσι, προτάθηκε μια εναλλακτική προσέγγιση, λαμβάνοντας υπ' όψιν την επίδραση της τυχαίας διακύμανσης στη συνολική απόκριση, με τη χρήση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Συνυπολογίζει την επίδραση της μεταβλητότητας και της χωρικής αυτοσυσχέτισης καθώς και το σφάλμα θέσης στη συνολική αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής, είναι ότι λαμβάνονται υπ' όψιν στην ανάλυση η πασσαλοειδής δομή του επεξεργασμένου εδάφους, οι πηγές της χωρικής διακύμανσης, η φόρτιση, οι συνοριακές συνθήκες καθώς και η κλίμακα διακύμανσης (SOF). Όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν τη συμπεριφορά του επεξεργασμένου εδάφους. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο όταν το έδαφος υπόκειται σε θλίψη.

4.4 Μεταβλητότητα του μέτρου παραμορφωσιμότητας

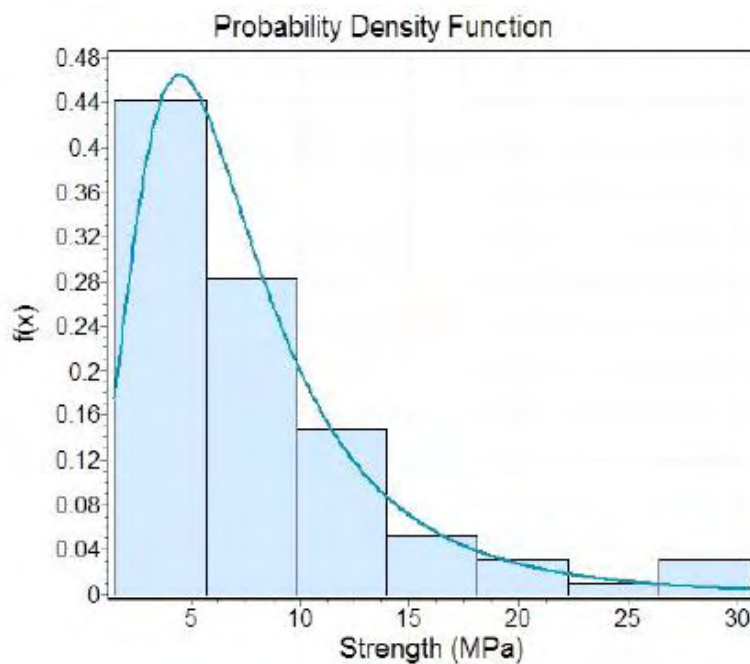
Όσον αφορά τη μεταβλητότητα του μέτρου παραμορφωσιμότητας, θα παρατεθεί ανάλυση που πραγματοποιήθηκε από τον Κωμοδρόμος κ.α. (2014a), στα πλαίσια του έργου του σταθμού Ανάληψης στο μετρό Θεσσαλονίκης. Στο συγκεκριμένο έργο, πραγματοποιήθηκε εκσκαφή βάθους 22,82 m και κατασκευάστηκε πλάκα θεμελίωσης πάχους 2 m (Σχ. 4.55). Από δοκιμές σε ανεμπόδιση θλίψη που πραγματοποιήθηκαν, προέκυψε ότι υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις τιμές των αντοχών, για τις οποίες προσδιορίστηκε, στη συνέχεια, η βέλτιστη κατανομή. Στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 4.56), γίνεται η ομαδοποίηση των τιμών με κατανομή τύπου GEV, για $\kappa=0,06$, $\sigma=2,2$ και $\mu=4,1$. Ως φυσικό επακόλουθο, το μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζει και αυτό μεγάλη μεταβλητότητα, η οποία σχετίζεται με τη διακύμανση της αντοχής. Η εξίσωση που αντιστοιχεί στην καμπύλη διακύμανσης των τιμών του μέτρου ελαστικότητας είναι:

$$E = \sigma (200 - \sigma^{1.4}) \quad (69)$$

Όπου σ είναι η τιμή σε ανεμπόδιση θλίψη.

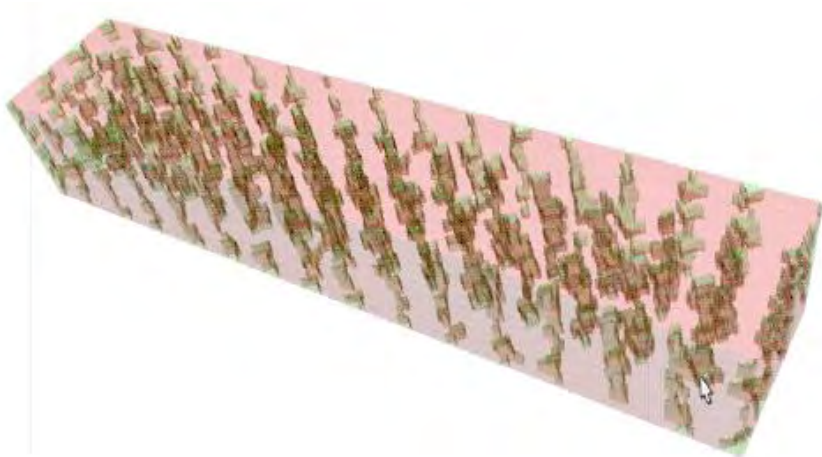


Σχήμα 4.55: Πλέγμα προσομοίωσης σταθμού Ανάλιψης κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής (Αποτίμηση επιπτώσεων χωρικής μεταβλητότητας παραμέτρων ενισχυμένης ζώνης εδάφους στην απόκριση έργου αντιστήριξης, Κωμοδρόμος, Παπαϊκονόμου, Παπαδοπούλου, Κωνσταντινίδης, 2013)



Σχήμα 4.56: Ταξινόμηση αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών αντοχής δοκιμών εδαφοπασσάλων και προσέγγιση με κατανομή τύπου GEV. (Αποτίμηση επιπτώσεων χωρικής μεταβλητότητας παραμέτρων ενισχυμένης ζώνης εδάφους στην απόκριση έργου αντιστήριξης, Κωμοδρόμος, Παπαϊκονόμου, Παπαδοπούλου, Κωνσταντινίδης, 2013)

Ωστόσο, η σχέση (69) αφορά το μέτρο παραμορφωσιμότητας σε δοκίμια εδαφοπασσάλων και όχι σε αυτό της πλάκας ενισχυμένου εδάφους. Για το λόγο αυτό, απαιτήθηκε ένας μειωτικός συντελεστής λόγω της ύπαρξης εδαφικών ζωνών που συνεχίζουν να υφίστανται και μετά την εισπίεση ενέματος. Για την εύρεση του μειωτικού συντελεστή έγιναν τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με πλέγμα διαστάσεων 15.0 x 5.0 x 2.5 (μήκος, πλάτος, πάχος πλάκας) συνιστάμενο από 300000 ή 1200000 (Κωμοδρόμος, 2014a). Μορφώθηκαν οι πάσσαλοι με τετραγωνική διάταξη 1.0 x 1.0 m και με μέγιστη απόκλιση 5 cm προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, για την οποία χρησιμοποιήθηκε ομοιόμορφη κατανομή.



Σχήμα 4.57: Απεικόνιση εδαφικών ζωνών με τυχατική κατανομή στην πλάκα ενισχυμένου εδάφους. (Αποτίμηση επιπτώσεων χωρικής μεταβλητότητας παραμέτρων ενισχυμένης ζώνης εδάφους στην απόκριση έργου αντιστήριξης, Κωμοδρόμος, Παπαοικονόμου, Παπαδοπούλου, Κωνσταντινίδης, 2013)

Η διάμετρος των εδαφοπασσάλων μεταβάλλεται από θέση σε θέση και με το βάθος. Σύμφωνα με τις καταγραφές, η διάμετρος μεταβάλλεται εντός των τιμών 0,80 m και 1,20 m. Για την τυχατική μεταβολή, χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την περίπτωση ομοιόμορφη κατανομή. Το μέτρο ελαστικότητας των εδαφοπασσάλων, θεωρήθηκε σύμφωνα με τα εργαστηριακά αποτελέσματα, ότι κυμαίνεται στο εύρος 1.0 ± 0.4 GPa. Στο παραπάνω σχήμα (Σχ. 4.57), δίνεται το πλέγμα ανάλυσης στο οποίο οι σκιαγραμμισμένες περιοχές αντιστοιχούν στις απομένουσες εδαφικές ζώνες. Επιβλήθηκε κατά μήκος συμπίεση μέχρι να επέλθει βράχυνση 4 cm και στη συνέχεια με διαίρεση της μέσης τάσης με τη μέση παραμόρφωση προσδιορίστηκε το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της πλάκας. Έτσι προέκυψε ο μειωτικός συντελεστής ίσος με 0,55, που ουσιαστικά είναι ο λόγος της μέσης τιμής E εργαστηριακών αποτελεσμάτων προς το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της πλάκας. Ο όγκος των εδαφικών ζωνών για την ανωτέρω θεώρηση είναι ίσος με το 20.7% του συνολικού όγκου. Συνεπώς, η εξίσωση (69) με την εισαγωγή του μειωτικού συντελεστή γίνεται:

$$E = 0.55 \sigma (200 - \sigma^{1.4}) \quad (70)$$

4.5 Αποτίμηση επιπτώσεων χωρικής μεταβλητότητας

Η επιλογή αντιπροσωπευτικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας κατά την επίλυση προβλημάτων στη γεωτεχνική μηχανική καθορίζει, ανάλογα με την διακύμανση των τιμών, τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Σε σχετικά απλές περιπτώσεις προβλημάτων, όπου η μεταβλητότητα περιορίζεται σε μία και μόνο παράμετρο και η διερεύνηση αποσκοπεί στην εκτίμηση εκδήλωσης αστοχίας, η αβεβαιότητα από την χωρική μεταβολή αντιμετωπίζεται με την επιλογή συντηρητικών τιμών. Η χρήση ενιαίας τιμής μπορεί να λύσει τα προβλήματα προσομοίωσης στην περίπτωση διασποράς αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών που προκύπτουν από τη διαδικασία δειγματοληψίας και εκτέλεσης, παραμένει εντούτοις αμφίβολη η χρήση της στην περίπτωση χωρικής μεταβλητότητας (Κωμοδρόμος, 2013).

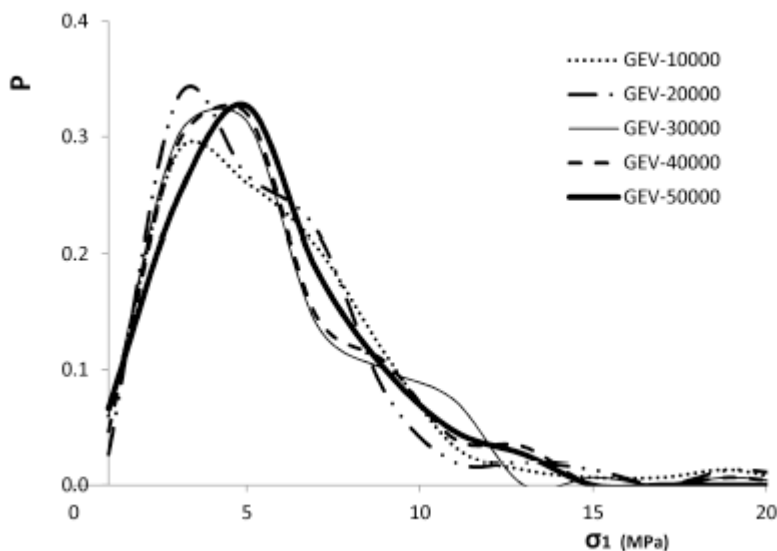
Για την αντιμετώπιση προβλημάτων με χωρική μεταβλητότητα παραμέτρων προτείνεται διεθνώς η χρήση στατιστικών μεθοδολογιών σε συνδυασμό με αριθμητικές μεθόδους, συνδυασμός που οδήγησε στην μέθοδο RFEM (Random Finite Element Method, Griffiths and Fenton, 2004, Huang et al., 2013), όπως προαναφέρθηκε. Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς πλάκας ενισχυμένου εδάφους για την ανάληψη φορτίων αντιστήριξης βαθιάς εκσκαφής χρησιμοποιήθηκε η παραπάνω μέθοδος. Για την εκτίμηση των επιπτώσεων πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη ανάλυση προσομοίωσης της πλάκας υπό αξονική φόρτιση, κατά την οποία ελήφθη υπ' όψιν η διακύμανση στη διάμετρο των πασσάλων, στη θέση και στο μέτρο ελαστικότητάς τους. Ακολούθησαν αριθμητικές αναλύσεις σε καθεστώς επίπεδης παραμόρφωσης, και χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας που προσομοιώνονται με την κατανομή GEV. Χρησιμοποιήθηκαν 5 διαφορετικές κατανομές και προέκυψαν τα διαγράμματα ροπών, οι μετακινήσεις καθώς και οι αξονικές δυνάμεις που λαμβάνονται από την πλάκα.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος FLAC. Χρησιμοποιήθηκε καταστατικός νόμος που ορίζει δύο επιφάνειες διαρροής (double yield). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.14), παρατίθενται οι παράμετροι προσομοίωσης της πλάκας για τις πέντε επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν. Η αντοχή σε σύνθλιψη κάθε στοιχείου προσδιορίστηκε από την κατανομή GEV με γεννιότερες 10000, 20000, 30000, 40000 και 50000 (Σχ. 4.58). Η γωνία τριβής της πλάκας πριν επέλθει η θραύση θεωρήθηκε 5 και η συνοχή προκύπτει από το κριτήριο Mohr-Coulomb για τη συγκεκριμένη γωνία τριβής και σ_1 ίση με την αντοχή θλίψης. Μετά τη θραύση η γωνία τριβής αυξάνεται στις 30, ενώ η συνοχή μειώνεται στα 100 kPa. Επιλέχθηκε κατηγορία σκυροδέματος C30/37, επομένων ο λόγος Poisson $\nu_c=0,20$ και μέτρο παραμορφωσιμότητας $E_c=32000$ MPa. Σημειώνεται ότι λόγω ρηγμάτωσης, που οφείλεται στη δράση των φορτίων που δέχονται τα διαφραγματικά στοιχεία, η

δυσκαμψία μειώθηκε κατά 50% (Gaba et al. 2003, Κωμοδρόμος και Παπαδοπούλου, 2014).

Επίλυση	Παράμετροι Παραμορφωσιμότητας		Παράμετροι διατμητικής αντοχής	
	E (GPa)	ν	c (kPa)	ϕ°
Mohr-Coulomb, MC-SV-1, c=100 kPa	var /seed no 10000	0.2	var/100	5/30
Mohr-Coulomb, MC-SV-2, c=100 kPa	var /seed no 20000	0.2	var/100	5/30
Mohr-Coulomb, MC-SV-3, c=100 kPa	var /seed no 30000	0.2	var/100	5/30
Mohr-Coulomb, MC-SV-4, c=100 kPa	var /seed no 40000	0.2	var/100	5/30
Mohr-Coulomb, MC-SV-5, c=100 kPa	var /seed no 50000	0.2	var/100	5/30

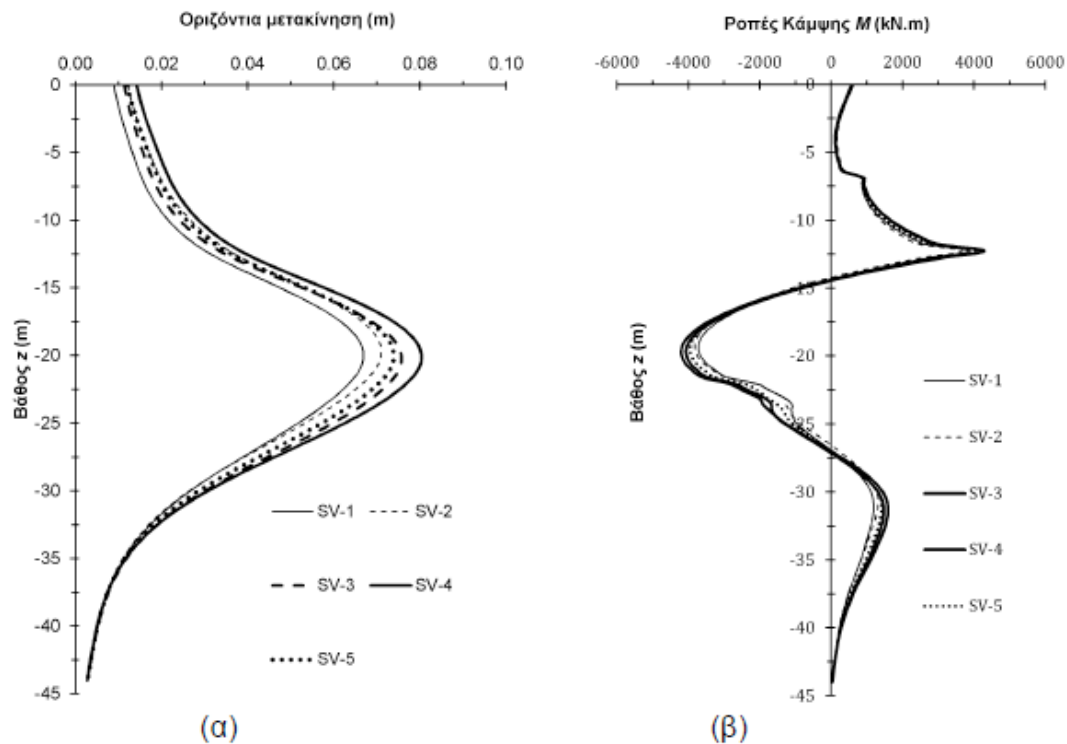
Πίνακας 4.14: Τιμές παραμέτρων πλάκας με θεώρηση χωρικής μεταβλητότητας και μείωσης αντοχής μετά τη θραύση (Αποτίμηση επιπτώσεων χωρικής μεταβλητότητας παραμέτρων ενισχυμένης ζώνης εδάφους στην απόκριση έργου αντιστήριξης, Κωμοδρόμος, Παπαϊκονόμου, Παπαδοπούλου, Κωνσταντινίδης, 2013)



Σχήμα 4.58: Κατανομή της αντοχής των στοιχείων της πλάκας, για τις πέντε κατανομές (Αποτίμηση επιπτώσεων χωρικής μεταβλητότητας παραμέτρων ενισχυμένης ζώνης εδάφους στην απόκριση έργου αντιστήριξης, Κωμοδρόμος, Παπαϊκονόμου, Παπαδοπούλου, Κωνσταντινίδης, 2013)

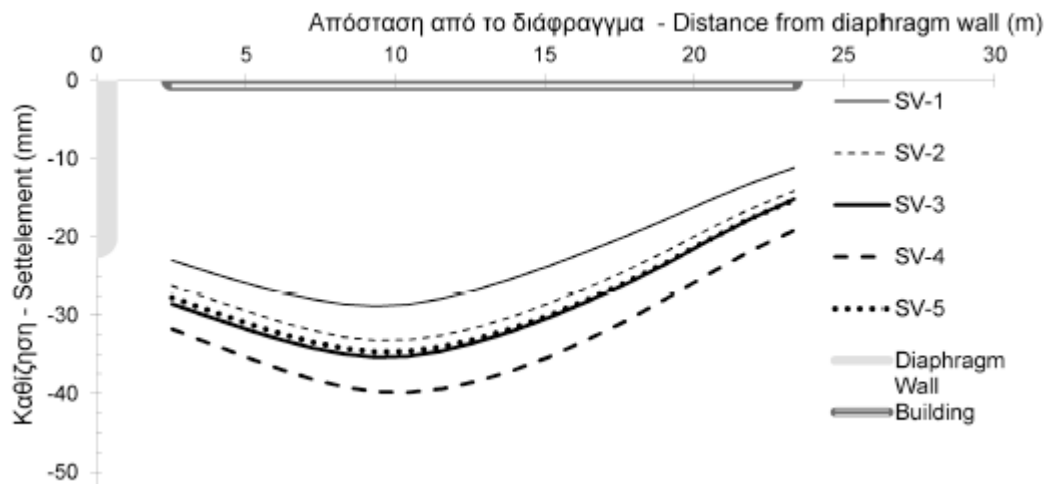
Στα σχήματα 4.59α και 4.59β δίνονται τα διαγράμματα των οριζόντιων μετακινήσεων και των καμπτικών ροπών του διαφράγματος προς την πλευρά του κτιρίου κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής. Παρατηρείται ότι οι επιπτώσεις της χωρικής

μεταβλητότητας στις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας είναι διαφορετικές, καθώς η μέγιστη μετακίνηση δίνεται από την ανάλυση SV-4, ενώ η μεγαλύτερη καμπτική ροπή από την ανάλυση SV-3. Συμπεραίνεται ότι η επίπτωση της μεταβλητότητας είναι μεγαλύτερη στις μετακινήσεις (σχεδόν διπλάσια) συγκριτικά με αυτή στα εντατικά μεγέθη. Η διαπίστωση αυτή ενισχύει την προσέγγιση εφαρμογής της μεθοδολογίας χωρικής μεταβλητότητας στην περίπτωση έργων, όπου η λειτουργικότητα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στο σχεδιασμό μιας κατασκευής.

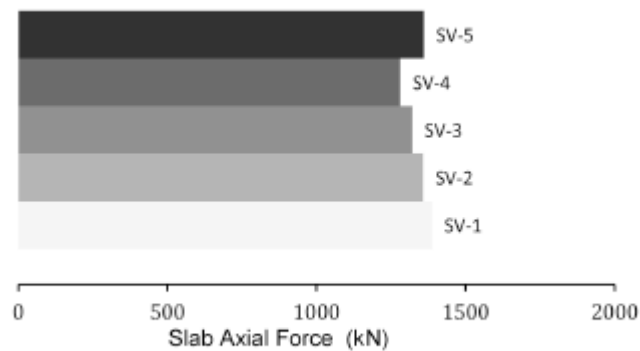


Σχήμα 4.59: α) Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης β) Διάγραμμα καμπτικών ροπών, κατά μήκος του διαφράγματος προς την πλευρά του κτιρίου (Αποτίμηση επιπτώσεων χωρικής μεταβλητότητας παραμέτρων ενισχυμένης ζώνης εδάφους στην απόκριση έργου αντιστήριξης, Κωμοδρόμος, Παπαϊκονόμου, Παπαδοπούλου, Κωνσταντινίδης, 2013)

Στο σχήμα 4.60 δίνεται το διάγραμμα καθιζήσεων κάτω από το κτίριο κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής. Όσον αφορά τις καθιζήσεις, η μέγιστη καθίζηση προκύπτει από την ανάλυση SV-4 (39,8 mm), ενώ η μικρότερη από την ανάλυση SV-1 (28,8 mm). Η διαφορά τους είναι της τάξης του 38,2%. Αντίστοιχα, από το σχήμα 4.61, προκύπτει ότι η μέγιστη αξονική δύναμη που παραλαμβάνεται παρατηρείται στην ανάλυση SV-1 (1387 kN), ενώ η μικρότερη στην επίλυση SV-4 (1281 kN). Η διαφορά τους είναι της τάξης του 8,2%. Συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι επιπτώσεις της χωρικής μεταβλητότητας της αντοχής και του μέτρου παραμορφωσιμότητας είναι διαφορετικές. Η επίπτωση στις καθιζήσεις είναι πολύ μεγαλύτερη (περίπου 40%), συγκριτικά με αυτή στα εντατικά μεγέθη (8,2%).



Σχήμα 4.60: Διάγραμμα καθιζήσεων κάτω από το κτίριο (Αποτίμηση επιπτώσεων χωρικής μεταβλητότητας παραμέτρων ενισχυμένης ζώνης εδάφους στην απόκριση έργου αντιστήριξης, Κωμοδρόμος, Παπαοικονόμου, Παπαδοπούλου, Κωνσταντινίδης, 2013)



Σχήμα 4.61: Διάγραμμα αναλαμβανόμενης αξονικής δύναμης από την εδαφόπλακα (Αποτίμηση επιπτώσεων χωρικής μεταβλητότητας παραμέτρων ενισχυμένης ζώνης εδάφους στην απόκριση έργου αντιστήριξης, Κωμοδρόμος, Παπαοικονόμου, Παπαδοπούλου, Κωνσταντινίδης, 2013)

Από την επεξεργασία των επιλύσεων προσδιορίστηκε η διαφοροποίηση εντατικών και κινηματικών μεγεθών και έγιναν αντίστοιχες συγκρίσεις. Προέκυψε ότι οι επιπτώσεις στις μετακινήσεις είναι σημαντικότερες από αυτές των εντατικών μεγεθών. Ειδικότερα δε οι επιπτώσεις στις καθιζήσεις είναι ακόμη μεγαλύτερες. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι δυσμενέστερες επιπτώσεις προέρχονται από διαφορετική περίπτωση μεταβλητότητας για τα εντατικά και τα κινηματικά μεγέθη.

Αντίθετα, στην περίπτωση έργων με ειδικά κριτήρια ως προς την λειτουργικότητα και τα όρια μετακινήσεων καταδεικνύεται η αναγκαιότητα και αποτελεσματικότητα της

μεθόδου για τον προσδιορισμό του αναμενόμενου εύρους. Οι σχετικές προβλέψεις μετακινήσεων μπορούν να χρησιμοποιούνται και να συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μετρήσεις κατά τη φάση κατασκευής στα εν λόγω έργα, όπου η ενοργάνωση και παρακολούθηση αποτελεί μέρος του σχεδιασμού τους.

Κεφάλαιο 5

Σύνοψη - Συμπεράσματα

Καταληκτικά, με την παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται η μέθοδος jet grouting για την κατασκευή πλάκας ενισχυμένου εδάφους σε μεγάλο βάθος εκσκαφής. Όταν τα δομικά έργα απαιτούν βελτιώσεις του εδάφους για την κατασκευή νέων δομών ή αποκατάσταση των ήδη υπάρχοντων, μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος της εισπίεσης - εδαφικής ανάμειξης. Με την ενίσχυση αυτή, τροποποιούνται και βελτιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η αντοχή σε θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας και επιτυγχάνεται μείωση της διαπερατότητας του φυσικού εδάφους. Η εδαφική ανάμειξη είναι μια σύγχρονη, γρήγορη και αποτελεσματική μέθοδος που εφαρμόζεται σε σχεδόν όλους τους τύπους εδαφών και μπορεί να εκτελεστεί σε περιορισμένο χώρο εργασίας.

Χρησιμοποιείται ένα υψηλής κινητικής ενέργειας ρευστό με σκοπό τη διάσπαση και τη χαλάρωση του εδάφους και τελικά την ανάμειξή του με ένα πολύ τσιμέντου. Αυτή η τεχνική υδροδυναμικής ανάμειξης στο χώρο παράγει ένα υλικό τσιμέντου στο έδαφος. Πρακτικά αυτό γίνεται με τον εξής τρόπο: Το εκτοξευόμενο ρευστό, που εξάγεται από τα ακροφύσια με ταχύτητα εξόδου ≥ 100 m/sec, καταστρέφει τη φυσική δομή του εδάφους και δημιουργεί μια ανάμειξη μεταξύ εδάφους και σταθεροποιητή. Ουσιαστικά, το έδαφος αναμειγνύεται με αέρα, και το έδαφος γύρω από τη γεώτρηση διαβρώνεται. Το διαβρωμένο χώμα αναδιατάσσεται και αναμειγνύεται με το μίγμα τσιμέντου. Το τελικό αποτέλεσμα της εκτόξευσης είναι ένα 'σώμα' εδάφους κυλινδρικού σχήματος, ο εδαφοπάσσαλος.

Υπάρχουν 3 βασικά συστήματα έγχυσης, τα οποία εφαρμόζονται γενικά σε όλες τις κατηγορίες εδαφών. Κατηγοριοποιούνται βάσει του αριθμού των ρευστών που χρησιμοποιούνται. Στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν τα τρία αυτά συστήματα, τα οποία είναι το απλό, διπλό και τριπλό σύστημα. Στο απλό σύστημα (single fluid system) χρησιμοποιείται μόνο ένεμα ή νερό και εφαρμόζεται για το σχηματισμό μικρής ως μεσαίας διαμέτρου πασσάλων, συνήθως μικρότερης από 1 m. Όσον αφορά το διπλό σύστημα έγχυσης, πραγματοποιείται με μια υψηλής πίεσης εκτόξευση ενέματος, μαζί με μια διαφορετική αλλά ομόκεντρη εκτόξευση αέρα, με αποτέλεσμα η ακτίνα δράσης του να αυξάνεται σημαντικά. Η διάμετρος του σχηματιζόμενου πασσάλου αυξάνεται κατά 30% συγκριτικά με το απλό σύστημα, χρησιμοποιώντας την ίδια ενέργεια. Στο τριπλό σύστημα έγχυσης, η χαλάρωση και η απομάκρυνση του εδάφους πραγματοποιείται από πίδακες νερού και αέρα, ανεξάρτητα από την ενσωμάτωση του συνδετικού υλικού (ένεμα), το οποίο παρέχεται με ταυτόχρονη εκτόξευση χαμηλής πίεσης και ταχύτητας από ένα άλλο ανεξάρτητο ακροφύσιο που βρίσκεται πιο χαμηλά. Η διαφορά των παραπάνω συστημάτων έγκειται στα ρευστά

που χρησιμοποιούνται, στο οικονομικό κόστος (το τριπλό σύστημα έγχυσης είναι πιο οικονομικά ασύμφορο) και στη διάμετρο πασσάλου που επιτυγχάνεται.

Στη συνέχεια αναλύθηκαν οι παράμετροι της μεθόδου που επηρεάζουν την ποιότητα και απόδοσή της και παρατέθηκαν ενδεικτικές τιμές που έχουν προταθεί από τους κανονισμούς και τη βιβλιογραφία. Τέτοιες παράμετροι είναι: η πίεση του ενέματος και ο ρυθμός ροής, η πίεση του νερού και ο ρυθμός ροής, η πίεση του αέρα και ο ρυθμός ροής, η ταχύτητα απόσυρσης των στελεχών διάτρησης κατά τη διάρκεια της έγχυσης, ο τύπος του μόνιτορ, ο αριθμός των ακροφυσίων και η περιστροφή του σωλήνα γεώτρησης.

Η μέθοδος jet grouting βρίσκει εφαρμογή τόσο στην υποστήριξη υφιστάμενων κατασκευών με ενίσχυση της θεμελίωσής τους, όσο και στον έλεγχο της υπόγειας ροής νερού για την εξασφάλιση υδατοστεγανότητας και την προστασία του εδάφους από ενδεχόμενη μόλυνση. Με την υποστήριξη που παρέχεται είτε με το σχηματισμό μεμονωμένων εδαφοπασσάλων (πιθανή τοποθέτηση αγκυρίων) είτε με το σχηματισμό μιας ενιαίας δομής από πασσάλους, ελαχιστοποιούνται οι καθιζήσεις της κατασκευής, μεταφέρονται τα φορτία στα βαθύτερα και πιο επαρκή σε αντοχή στρώματα εδάφους και εξασφαλίζεται αντοχή και σταθεροποίηση τόσο της ίδιας της κατασκευής όσο και των γειτονικών. Όσον αφορά τον έλεγχο της υπόγειας ροής νερού, η μέθοδος χρησιμοποιείται στην κατασκευή διαφραγματικών τοίχων από αλληλοτεμνόμενους πασσάλους αλλά και πλακών στεγανοποίησης, οι οποίοι παρεμποδίζουν την εισροή του νερού και εξασφαλίζουν υδατοστεγανότητα και αντίσταση στα φορτία του νερού. Για την αποφυγή της αστοχίας των πλακών στεγανοποίησης προτιμάται η τριγωνική διάταξη των πασσάλων καθώς προκύπτει μικρότερο εμβαδό μη επεξεργασμένου εδάφους και εξασφαλίζεται συνέχεια στο μεγαλύτερο τμήμα της πλάκας ($\Omega=0$). Ακόμα, για την πρόληψη ενδεχόμενης αστοχίας προτείνεται ο κατάλληλος σχεδιασμός της κατασκευής για την αποτροπή απόκλισης του πασσάλου από τον άξονα του. Η τεχνική jet grouting μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή σηράγγων που δε διαθέτουν κυκλικό προφίλ. Σχηματίζεται το νέο αυτό υλικό περιμετρικά της σήραγγας (σε μορφή ομπρέλας) και κατ' αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι τάσεις, η ακτινική σύγκλιση της επιφάνειας και οι μετακινήσεις της, και ως εκ τούτου εξασφαλίζεται υποστήριξη της οροφής. Μια ακόμα ενδιαφέρουσα εφαρμογή της εισπίεσης – εδαφικής ανάμειξης αφορά την προστασία του εδάφους από ρυπαντές. Αξιοποιείται η αδιαπέρατη σύνθεση του τσιμεντοποιημένου υλικού, και δημιουργούνται φράγματα που είτε αποτρέπουν την είσοδο των ρυπαντών είτε περιλαμβάνουν υλικά, τα οποία αντιδρούν με αυτούς, και τους καθιστούν λιγότερο επίφοβους για την ασφάλεια του εδάφους.

Το κύριο θέμα που αναλύεται στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη χωρική μεταβλητότητα που ανιχνεύεται στα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του νέου σχηματιζόμενου υλικού, που οφείλεται στη φύση του υλικού του εδάφους. Το έδαφος δεν είναι ποιοτικά ελεγχόμενο και παρουσιάζει μεταβλητότητα στις ιδιότητές του, τόσο σε διαφορετικά στρώματα όσο και στο

εσωτερικό του ίδιου στρώματος. Αρχικά, παρατέθηκαν εμπειρικά και θεωρητικά μοντέλα πρόβλεψης της διαμέτρου των εδαφοπασσάλων των οποίων η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στα θεωρητικά μοντέλα λαμβάνεται υπόψη ο ρόλος των διαφορετικών παραμέτρων έγχυσης και της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Για την αποφυγή και τον περιορισμό της αβεβαιότητας που προκύπτει από τη χρήση των εμπειρικών και θεωρητικών σχέσεων, προτάθηκε η εφαρμογή των artificial neural networks (ANN). Με τη χρήση τέτοιων δικτύων υπολογίζεται η διάμετρος των εδαφοπασσάλων συγκεντρώνοντας πειραματικά δεδομένα και εισάγοντας σε αυτά τις εξής παραμέτρους: σύστημα έγχυσης, ενέργεια στα ακροφύσια E'_n , το είδος εδάφους και ο αριθμός των χτύπων N_{SPT} . Συνήχθη το συμπέρασμα από σύγκριση των μεθόδων υπολογισμού της διαμέτρου, ότι η χρήση των ANN προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της τιμής της διαμέτρου, καθώς διαθέτουν την ικανότητα προσρμογής νέων πληροφοριών.

Για την προσομοίωση της μεταβλητότητας μιας παραμέτρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι προσομοιώσεις Monte Carlo, οι οποίες αποτελούν αλγόριθμους που βασίζονται στην τυχαία δειγματοληψία. Μέσω αυτών προκύπτει η κατανομή πιθανότητας κάθε παραμέτρου, δημιουργούνται τυχαία δείγματα των άγνωστών μεταβλητών, γίνεται στατιστική ανάλυση των δεδομένων που εξάγονται και τελικά εκτιμάται η άγνωστη μεταβλητή.

Όσον αφορά την προσομοίωση της μεταβλητότητας της αντοχής, προέκυψε μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων των Namikawa και Koseki, ότι η εξαρτώμενη προσομοίωση υπερτερεί έναντι της ανεξάρτητης. Με την εξαρτώμενη προσομοίωση, δημιουργούνται τυχαία δείγματα τα οποία διαθέτουν περιοχές στις οποίες οι τιμές της αντοχής είναι γνωστές, ενώ στην ανεξάρτητη προσομοίωση δεν ενσωματώνονται στην πιθανοτική κατανομή δεδομένες τιμές για τη δημιουργία τυχαίων δειγμάτων. Η μεταβλητότητα της αντοχής κατά την ανεξάρτητη προσομοίωση εξαρτάται από την απόσταση αυτοσυσχέτισης, καθώς η αντοχή παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβλητότητα για μεγαλύτερες τιμές της απόστασης. Προέκυψε ότι για μικρές τιμές της απόστασης αυτοσυσχέτισης θ_{qu} οι διαφορές των δύο προσομοιώσεων στη συνολική αντοχή Q_u δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, επομένως η ανεξάρτητη προσομοίωση για μικρές τιμές είναι αποτελεσματική. Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές της θ_{qu} , καθώς οι δεδομένες τιμές που εισάγονται στην εξαρτώμενη προσομοίωση επηρεάζουν τα στοιχεία που είναι γειτονικά στις γνωστές περιοχές, η εξαρτώμενη προσομοίωση είναι αποτελεσματικότερη συγκριτικά με την ανεξάρτητη.

Ως διεύρυνση της προαναφερθείσας μελέτης των Namikawa και Koseki, πραγματοποιήθηκε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων από τους Yong Liu, Jun Hu, Yu-Ping Li, Li-Hua Li, η οποία εξέτασε την επίδραση της δομής του πασσάλου στη συνολική θλιπτική αντοχή του, όταν υπόκειται σε αξονική θλίψη. Χρησιμοποιήθηκαν 11 συναρτήσεις της αντοχής του πασσάλου με την ακτινική απόσταση από το κέντρο του πασσάλου (Mean Trends MT), εκ των οποίων οι 1-6 αναπαρίσταναν τις περιπτώσεις που το εσωτερικό τμήμα του πασσάλου παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή

και οι 7-11 όταν το εξωτερικό τμήμα του πασσάλου είναι πιο δύσκαμπτο. Παρατηρήθηκε ότι η εφαρμογή της απλουστευμένης συνάρτησης σε απόσταση $2/3R$ από το κέντρο του πασσάλου μπορεί να προβλέψει την αντοχή επιτυχώς, χωρίς μεγάλο σφάλμα. Για τις περιπτώσεις που ελήφθη υπόψη και η διακύμανση εκτός της συνάρτησης MT, χρησιμοποιήθηκαν δύο παράμετροι: ο συντελεστής μεταβλητότητας COV και η διακύμανση SOF. Έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των τιμών των μέσων αντοχών και των συντελεστών COV από τις αναλύσεις RFEA όταν λαμβάνεται σταθερή τιμή της αντοχής ($2/3R$) και όταν λαμβάνεται η συνάρτηση αντοχής MT. Γενικά, παρατηρήθηκε ομοιομορφία, κάτι που δηλώνει ότι δεν απαιτείται η εκτίμηση της μορφής της συνάρτησης αντοχής MT. Τελικά συγκρίθηκαν οι τρόποι αστοχίας των δειγμάτων σε τρεις περιπτώσεις, εκ των οποίων στην πρώτη λαμβάνεται συνάρτηση αντοχής MT, χωρίς διακύμανση, στη δεύτερη περίπτωση δημιουργείται τυχαίο πεδίο με συντελεστή μεταβλητότητας και η τρίτη περίπτωση αποτελεί το συνδυασμό των δύο παραπάνω. Στην πρώτη περίπτωση, εμφανίστηκε αστοχία σε κάθε σημείο, κάτι το οποίο δεν είναι ρεαλιστικό, ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκε διαγώνιο επίπεδο αστοχίας, κάτι που είναι πιο εφικτό, σύμφωνα με την πραγματική αστοχία που συμβαίνει σε πραγματικές δοκιμές.

Στη συνέχεια, παρατέθηκε μελέτη που αφορούσε τη στοχαστική και ντετερμινιστική ετερογένεια στην αστράγγιστη συμπεριφορά ενός τσιμεντοποιημένου στρώματος αργίλου, χρησιμοποιώντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Έγινε τυχαία ανάλυση για τσιμεντοποιημένη πλάκα αργίλου, που αποτελείται από 160 πασσάλους και υπόκειται σε θλιπτική πλευρική φόρτιση μιας κατεύθυνσης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη συνοριακών συνθηκών για τις αφόρτιστες πλευρές. Η πρώτη υποθέτει ότι η αφόρτιστη πλευρά είναι ελεύθερη, κάτι που δηλώνει ότι στις ελεύθερες πλευρές υπάρχει μαλακό έδαφος. Στη δεύτερη περίπτωση η αφόρτιστη πλευρά είναι πλήρως 'πακτωμένη', και αυτό δείχνει μια κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης κατά την οποία η πλάκα θεωρείται απείρου μήκους στην κατεύθυνση y . Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίδραση της ακτινικής συνάρτησης (3 διαφορετικές τιμές του λόγου αντοχής) στο μέτρο ελαστικότητας είναι ασήμαντη. Η κλίμακα διακύμανσης SOF δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, κάτι που διαφέρει από την ανάλυση των Namikawa και Koseki, οι οποίοι παρατήρησαν ότι η μέση τιμή της συνολικής θλίψης φτάνει την ελάχιστη τιμή της όταν η κλίμακα διακύμανσης ισούται με τη διάμετρο του πασσάλου. Αυτή η διαφορά μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι στην ανάλυση των Namikawa και Koseki, η κλίμακα SOF λαμβάνεται περίπου ίση με το μέγεθος της διαμέτρου του πασσάλου και έτσι μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη συνολική αντοχή του πασσάλου. Στην παρούσα μελέτη, η SOF είναι αρκετά μικρότερη σχετικά με τις διαστάσεις της πλάκας. Έτσι, η επιρροή της είναι σημαντική μόνο όταν είναι αρκετά μεγάλη συγκριτικά με το μέγεθος του προβλήματος. Αντίθετα, ο συντελεστής μεταβλητότητας COV είχε μεγαλύτερη επιρροή στις συνολικές ιδιότητες, καθώς και η συνολική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας μειώνονται με την αύξηση του συντελεστή. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι μια αύξηση στον COV μειώνει την αντοχή των ασθενών ζωνών και αυξάνει το συνολικό όγκο τους.

Όσον αφορά τη μεταβλητότητα του μέτρου παραμορφωσιμότητας, παρατέθηκε ανάλυση που πραγματοποιήθηκε από τον Κωμοδρόμος κ.α. (2014a), στα πλαίσια του έργου του σταθμού Ανάληψης στο μετρό Θεσσαλονίκης. Από δοκιμές σε ανεμπόδιστη θλίψη που πραγματοποιήθηκαν, προέκυψε ότι υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις τιμές των αντοχών. Ως φυσικό επακόλουθο, το μέτρο ελαστικότητας παρουσίασε και αυτό μεγάλη μεταβλητότητα, η οποία σχετίζεται με τη διακύμανση της αντοχής. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας προέκυψε από την εξίσωση που αντιστοιχεί στην καμπύλη διακύμανσης των τιμών του μέτρου ελαστικότητας. Ωστόσο, η σχέση που προέκυψε αφορούσε το μέτρο παραμορφωσιμότητας σε δοκίμια εδαφοπασσάλων και όχι σε αυτό της πλάκας ενισχυμένου εδάφους. Για το λόγο αυτό, απαιτήθηκε ένας μειωτικός συντελεστής λόγω της ύπαρξης εδαφικών ζωνών που συνεχίζουν να υφίστανται και μετά την εισπίεση ενέματος. Για την εύρεση του μειωτικού συντελεστή έγιναν τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Το μέτρο ελαστικότητας των εδαφοπασσάλων, θεωρήθηκε σύμφωνα με τα εργαστηριακά αποτελέσματα, ότι κυμαίνεται στο εύρος 1.0 ± 0.4 GPa. Επιβλήθηκε κατά μήκος συμπίεση μέχρι να επέλθει βράχυνση 4 cm και στη συνέχεια με διαίρεση της μέσης τάσης με τη μέση παραμόρφωση προσδιορίστηκε το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της πλάκας. Έτσι προέκυψε ο μειωτικός συντελεστής ίσος με 0,55, που ουσιαστικά είναι ο λόγος της μέσης τιμής E εργαστηριακών αποτελεσμάτων προς το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της πλάκας.

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη ανάλυση προσομοίωσης της πλάκας υπό αξονική φόρτιση, κατά την οποία ελήφθη υπ' όψιν η διακύμανση στη διάμετρο των πασσάλων, στη θέση και στο μέτρο ελαστικότητάς τους. Ακολούθησαν αριθμητικές αναλύσεις σε καθεστώς επίπεδης παραμόρφωσης, και χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας που προσομοιώνονται με την κατανομή GEV. Χρησιμοποιήθηκαν 5 διαφορετικές κατανομές και προέκυψαν τα διαγράμματα ροπών, οι μετακινήσεις καθώς και οι αξονικές δυνάμεις που λαμβάνονται από την πλάκα.. Προέκυψε ότι οι επιπτώσεις στις μετακινήσεις είναι σημαντικότερες από αυτές των εντατικών μεγεθών. Ειδικότερα δε οι επιπτώσεις στις καθιζήσεις είναι ακόμη μεγαλύτερες. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι δυσμενέστερες επιπτώσεις προέρχονται από διαφορετική περίπτωση μεταβλητότητας για τα εντατικά και τα κινηματικά μεγέθη. Αντίθετα, στην περίπτωση έργων με ειδικά κριτήρια ως προς την λειτουργικότητα και τα όρια μετακινήσεων καταδεικνύεται η αναγκαιότητα και αποτελεσματικότητα της μεθόδου για τον προσδιορισμό του αναμενόμενου εύρους. Οι σχετικές προβλέψεις μετακινήσεων μπορούν να χρησιμοποιούνται και να συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μετρήσεις κατά τη φάση κατασκευής στα εν λόγω έργα, όπου η ενοργάνωση και παρακολούθηση αποτελεί μέρος του σχεδιασμού τους. Από την επεξεργασία των επιλύσεων προσδιορίστηκε η διαφοροποίηση εντατικών και κινηματικών μεγεθών και έγιναν αντίστοιχες συγκρίσεις..

Η μέθοδος jet grouting αποτελεί μια αξιόπιστη και διαχρονική τεχνική ενίσχυσης εδάφους. Λόγω της εύκολης εφαρμογής της, τόσο λόγω του περιορισμένου χώρου

εργασίας, όσο και της γρήγορης διεκπεραίωσή της, καθίσταται μια από τις ευρέως διαδεδομένες τεχνικές ενίσχυσης και χρησιμοποιείται σε πολλά είδη κατασκευών.

Συμπερασματικά, η προσεκτική και ενδεδειγμένη μελέτη του εδάφους, το οποίο θα ενισχυθεί με τη μέθοδο της εισπίεσης – εδαφικής ανάμειξης, είναι απαραίτητη, πριν την εκκίνηση της επεξεργασίας. Αποτελεί αναπόδραστη ανάγκη, ώστε να γίνει αναγνώριση των πιθανών ιδιαιτεροτήτων και μεταβλητών χαρακτηριστικών που δύνανται να επηρεάσουν την επικείμενη κατασκευή. Η συγκέντρωση περισσότερων πληροφοριών και δεδομένων από διάφορα έργα, θα συνεισέφερε στη διόρθωση ή βελτίωση των σχέσεων υπολογισμού της διαμέτρου, για την εξαγωγή ακριβέστερων και πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η γνώση περισσότερων στοιχείων για τις ιδιότητες των εδαφών, καθιστά την προσομοίωση της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων του νέου υλικού, ευκολότερη. Τέλος, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη νέων αξιόπιστων τρόπων προσδιορισμού της διαμέτρου, ώστε να προληφθούν ενδεχόμενα προβλήματα ή κατασκευαστικές αστοχίες.

Βιβλιογραφία

- [1] A. Flora, G. Modoni, S. Lirer, P. Croce, 2013, The diameter of single, double and triple fluid jet grouting columns: prediction method and field trial results, *Geotechnique* 63, No. 11, 934–945
- [2] C. G. Rawlings, E.E. Hellowell, W. M. Kilkenny, *Grouting for ground engineering*, CIRIA, 2000, pp 117-130
- [3] Daniel Ribeiro & Rafaela Cardoso, 2016, A review on models for the prediction of the diameter of jet grouting columns, Taylor & Francis, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, ISSN: 1964-8189
- [4] D. T. Bergado, J. C. Chai, M. C. Alfaro, A. S. Balasubramaniam, 1994, *Improvement Techniques of oft Ground in Subsiding and Lowland Environment*, A.A. BALKEMA/ ROTTERDAM/ BROOKFIELD, pp 103-111
- [5] E. Saurer, Th. Marcher, M. Lesnik, 2011, Grid space optimization of jet grouting columns, *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, IOS Press
- [6] Giulia Viggiani, 2012, *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, CRC Press, pp 615-620
- [7] Giuseppe Modoni, Alessandro Flora, Stefania Lirer, Maciej Ochmański, Paolo Croce, 2016, Design of Jet Grouted Excavation Bottom Plugs, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, ISSN 1090-0241
- [8] Gordon A. Fenton, Farzaneh Naghibi, D.V. Griffiths, 2016, *On a unified theory for reliability-based geotechnical design*, Elsevier Ltd
- [9] J. Morey, D.W. Campo, 1999, Quality control of jet grouting on the Cairo metro, (GI 065), *Ground Improvement*
- [10] João Nuno Duarte Correia, *Reinforcement of building foundations*
- [11] M. Ochmańska, G. Modoni, J. Bzówka, 2015 Prediction of the diameter of jet grouting columns with artificial neural networks, *The Japanese Geotechnical Society*, Elsevier B.V., *Soils and Foundations* 2015;55(2):425–436
- [12] M. P. Moseley, K. K. Irsch, 2004, *Ground Improvement*, Second Edition, Taylor & Francis, pp 160-195
- [13] Paolo Croce, Alessandro Flora, Giuseppe Modoni, *Jet Grouting: Technology, Design and Control*, CRC Press, 2014
- [14] P. Croce, A. Flora, 2000, Analysis of single-Fluid jet grouting, *Geotechnique* 50, No. 6, 739-748
- [15] S. Coulter, C.D. Martin, 2006, Single fluid jet-grout strength and deformation properties, *Tunnelling and Underground Space Technology* 21 (2006) 690–695, Elsevier Ltd
- [16] Shui-Long Shen, Zhi-Feng Wang, Jun Yang, M.ASCE, Chu-Eu Ho, M.ASCE, 2013, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE

- [17] Tsutomu Namikawa, 2015, Conditional Probabilistic Analysis of Cement-Treated Soil Column Strength, ASCE, ISSN 1532-3641/04015021(10), American Society of Civil Engineers
- [18] Y. Liu, F.-H. Lee, S.-T. Quek, E. J. Chen, J.-T. Yi, 2005, Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab, Géotechnique 65, No. 10, 851–865
- [19] Yong Liu, Jun Hu, Yu-Ping Li, Li-Hua Li, 2016, Statistical evaluation of the overall strength of a soil-cement column under axial compression, Elsevier Ltd
- [20] Ευάγγελος Ι. Σταυριδάκης, Μέθοδοι βελτίωσης και ενίσχυσης εδαφών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- [21] Κωμοδρόμος Α.Μ., Παπαικονόμου Α.Ν., Παπαδοπούλου, Μ.Κ., Κωνσταντινίδης Γ.Κ., 2013, Effects from soil reinforced zone spatial variation to the response of a retaining structure

Διαδικτυακοί τόποι:

- [22] The Constructor Civil Engineering Home:
<https://theconstructor.org/geotechnical/jet-grouting-procedure-advantages/14470/>
- [23] Tunnel Business Magazine:
<http://tunnelingonline.com/ground-improvement-groundwater-control/>
- [24] Keller International Geotechnical Contactors:
<http://www.kellerholding.com/soilcrete-jet-grouting.html>
- [25] Hayward Baker, A Keller Company
<http://www.haywardbaker.com/solutions/techniques/jet-grouting>
- [26] Soletanche Bachy:
[http://www.bachy-soletanche.com/SBF/referencesb.nsf/\(LTechnicsEN\)/Jet%20grouting%20\(Jet%20grouting\)](http://www.bachy-soletanche.com/SBF/referencesb.nsf/(LTechnicsEN)/Jet%20grouting%20(Jet%20grouting))
- [27] Mainmark:
<https://www.mainmark.com/products/jet-grouting/>
- [28] Helical Geotechnical Design/Build
<https://www.helicaldrilling.com/expertise/underpinning/>