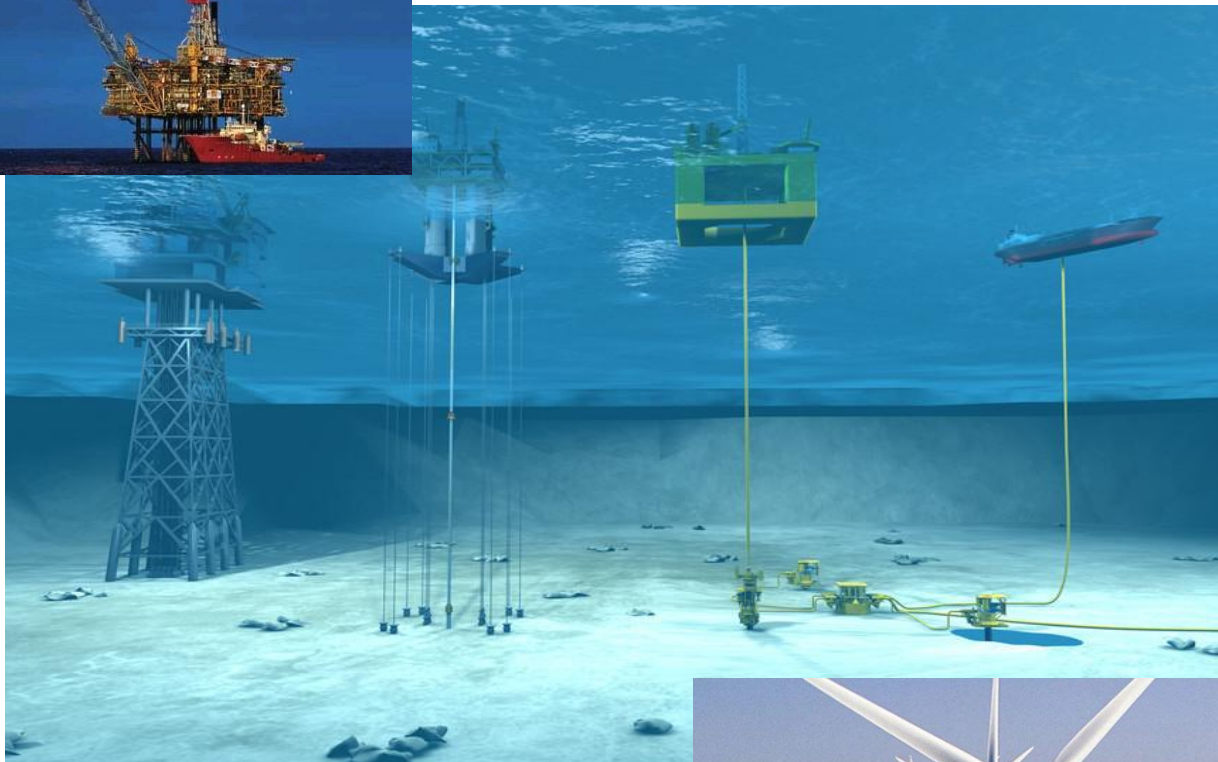




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

**Ανάλυση Απόκρισης Μεμονωμένων Πασσάλων σε
Οριζόντια Φόρτιση**
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Γ. Τσαπέκης



Επιβλέπων: Μιχαήλ Καββαδάς
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος, 2017

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής είναι η μελέτη, σύγκριση και ανάλυση διαφόρων μη-γραμμικών καμπυλών φορτίου–μετατόπισης, p - y , οι οποίες περιγράφουν την απόκριση του πασσάλου όταν αυτός καταπονείται από εγκάρσια φόρτιση. Οι καμπύλες αυτές είναι διαφορετικές ανάλογα το είδος του εδάφους (αργιλικό ή αμμώδες) και των διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών (αστράγγιστη διατμητική αντοχή, γωνία τριβής, χτύποι SPT, αντίσταση αιχμής της δοκιμής CPT). Θα σχολιαστεί η κάθε καμπύλη ξεχωριστά, θα συγκριθούν μεταξύ τους, θα συγκριθούν οι μετατοπίσεις και τα εντατικά μεγέθη του πασσάλου που προκύπτουν με τη χρήση της εκάστοτε καμπύλης και επίσης θα εξετασθεί η επίδραση που έχει το κεκλιμένο έδαφος στις καμπύλες p - y μέσω κατάλληλης απομείωσής τους.

Δημιουργήθηκε αυτόνομο εκτελέσιμο πρόγραμμα, γραμμένο στην προγραμματιστική γλώσσα MATLAB, το οποίο, αντλώντας δεδομένα από υπολογιστικό φύλλο Excel για τη στρωματογραφία του εδάφους, αναπαράγει διάφορες καμπύλες p - y σε οποιοδήποτε βάθος. Το πρόγραμμα μπορεί να παραστήσει γραφικά τις καμπύλες αυτές αλλά και να τις εξάγει για μετέπειτα χρήση. Ακόμα, έχει τη δυνατότητα να τις απομειώνει κατάλληλα, ανάλογα την κλίση του εδάφους και της επιλεγμένης μεθοδολογίας απομείωσης. Κατόπιν, μέσω του προγράμματος LATPILE, το οποίο επιλύει τον πάσσαλο ως δοκό επί μη-γραμμικού ελατηριωτού εδάφους, οι καμπύλες p - y από το πρόγραμμα της MATLAB χρησιμοποιήθηκαν για να γίνουν διάφορες αναλύσεις στον πάσσαλο, όπως: Ανάπτυξη και σύγκριση καμπύλης οριζοντίου φορτίου – μετακίνησης, Σύγκριση υπό σταθερό οριζόντιο φορτίο της διαφορετικής απόκρισης του πασσάλου ανάλογα τη μέθοδο p - y , Ανάπτυξη και σύγκριση διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης οριζοντίου φορτίου–καμπτικής ροπής, Μελέτη μεθοδολογιών απομείωσης καμπυλών p - y λόγω κεκλιμένου εδάφους.

Η εργασία αυτή μπορεί να αποτελέσει μια συνοπτική και συγκεντρωτική βιβλιοθήκη μεθοδολογιών p - y και να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω εργασία πάνω στην εγκάρσια φόρτιση μεμονωμένων πασσάλων, για ανάπτυξη ακριβέστερων καμπυλών p - y και για την κατάλληλη αντιμετώπιση της επιρροής που έχει η ύπαρξη πρσανούς. Το αυτόνομο, εκτελέσιμο πρόγραμμα έχει σκοπό να είναι όσο το δυνατόν πιο αυτόματο και εύχρηστο γίνεται, επιτρέποντας στον χρήστη να το χρησιμοποιεί παρέχοντας λίγα δεδομένα και να έχει μεγάλη ποικιλία επιλογής μεθόδων p - y .

Λέξεις Κλειδιά: μεμονωμένος πάσσαλος, οριζόντια φόρτιση, καμπύλη p - y , υπεράκτιες κατασκευές, άμμος, άργιλος, κεκλιμένο έδαφος, πρανές, ανάλυση pushover, MATLAB, LATPILE, διάγραμμα αλληλεπίδρασης.

Abstract

The purpose of this thesis is the study, comparison and analysis of various non-linear load-deflection curves, p-y, which describe the pile's response under lateral loading. Those curves differ from each other based on the soil's type (clayey or sandy) and the soil's mechanical properties (undrained shear strength, friction angle, number of SPT blows, CPT test value). Each p-y curve is going to be commented and compared to each other, the deflection and the internal forces of the pile that are resulted from each p-y curve are going to be compared and, finally, the effect that sloping ground has upon p-y curves is going to be analyzed and examined through proper reduction of the p-y curves' values.

A standalone executable application was created, based on a MATLAB code, which takes input about soil stratigraphy from an Excel file and products various p-y curves in any depth. The application can plot the curves and also export them for further use. It is also capable of properly reducing the p-y curves' values, based on the ground's slope angle and the chosen reduction method. Then, through the LATPILE program, which solves the pile as a beam upon non-linear string-type soil, the p-y curves derived from the MATLAB application, were used for the conduction of various kind of pile analyses like: Creation and comparison of horizontal load-deflection curves or pushover analysis; Comparison of pile's deflection or internal forces due to constant horizontal load, based on the different p-y curves; Creation and comparison of horizontal load-bending moment interaction diagrams; Study of various p-y curves' value reduction methods, due to sloping ground.

This study can be a brief and thorough library of p-y curves' methods and stand as the base for further study upon the pile's response to lateral loading, for the creation of more precise p-y curves and for the proper approach of sloping ground effect. The standalone executable application must be as much automatic and user-friendly as possible, allowing the user to provide the least possible data and have a big variety of p-y methods to choose from.

Key words: pile, lateral loading, p-y curve, offshore structures, sand, clay, sloping ground, slope, pushover analysis, MATLAB, LATPILE, interaction diagrams.

Ευχαριστίες

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Μιχάλη Καββαδά για την αδιάκοπη συνεργασία που είχαμε. Το μάθημα των Θεμελιώσεων, το οποίο δίδασκε, στάθηκε η αφορμή τόσο για να επιλέξω τον Τομέα Γεωτεχνικής, όσο και για την επιλογή του θέματος της εργασίας αυτής. Η άμεση επικοινωνία που είχαμε, μαζί με τις συνεχείς και στοχευμένες συμβουλές, οδηγίες και διευκρινήσεις που μου έδινε, ήταν πολύτιμες για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας.

Ακόμα, θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Τζιβάκο, ο οποίος μόλις πριν λίγες μέρες παρουσίασε τη διδακτορική του διατριβή. Καθόλη τη διάρκεια της εργασίας μου, και ενώ ήταν απασχολημένος με το διδακτορικό του, πάντα έβρισκε χρόνο για να απαντά στις απορίες μου και να προτείνει λύσεις σε όποιο πρόβλημα παρουσιαζόταν, καθώς επίσης με βοήθησε πολύ στην τελική διαμόρφωση του τεύχους και της παρουσίασης. Τον ευχαριστώ πολύ για την υπομονή του και τη διάθεσή του να με βοηθήσει όποτε τον χρειάστηκα.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω και να αφιερώσω αυτήν την εργασία στους γονείς μου. Στους δικούς τους συνεχείς και επίπονους κόπους οφείλω όσα έχω καταφέρει και συνεχώς θα προσπαθώ να φαίνομαι αντάξιός τους. Θέλω να ευχαριστήσω τα αδέρφια μου, Ορέστη και Όλγα, για τη στήριξη και την παρέα τους. Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ οφείλω στους φίλους μου και κυρίως στη Δέσποινα Καραγιαννάκη και στον Γιώργο Παπαβασιλείου, αλλά και στον Γιάννη Πανταζή, Σπύρο Χανδρινό, Αλέξανδρο Χαραλαμπίδη και Γιώργο Σακκά. Μαζί τους πέρασα πέντε υπέροχα χρόνια γεμάτα χαρές και έντονες εμπειρίες, οι οποίες ανυπομονώ να συνεχίσουν και εκτός σχολής.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iii
Abstract.....	v
Ευχαριστίες.....	vii
Περιεχόμενα Εικόνων.....	xi
Περιεχόμενα Πινάκων.....	xiv
Σύμβολα.....	xvi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : Εισαγωγή.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : Βαθειές θεμελιώσεις υπεράκτιων κατασκευών.....	5
2.1 Εδάφη θεμελιώσεως.....	5
2.2 Επικίνδυνα φαινόμενα (Geohazards).....	7
2.3 Είδη πλατφορμών.....	8
2.4 Ανάλυση οριζόντιας φόρτισης και φορτία σχεδιασμού.....	10
2.5 Ομάδες πασσάλων.....	11
2.6 Πάσσαλοι υποπίεσης.....	11
2.7 Αιολικά πάρκα.....	13
2.8 Διαδικασία εμπήξεως πασσάλου.....	14
2.10 Βελτίωση Εδάφους Θεμελιώσεως.....	16
2.11 Εκτιμήσεις γεωτεχνικών παραμέτρων.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : Βιβλιογραφική ανασκόπηση καμπυλών p-y.....	19
3.1 Καμπύλες p-y για αργιλικά εδάφη.....	19
3.1.1 Matlock (1970) – Μαλακή άργιλος.....	19
3.1.2 Jeanjean (2009) – Μαλακή άργιλος.....	21
3.1.3 Lehane (2014) – Μαλακή άργιλος.....	23
3.1.4 NGI-11 (2014) – Μαλακή άργιλος.....	25
3.1.5 Sullivan (1980) – Άργιλος.....	26
3.1.6 O’Neill & Gazizoglu (1984) – Άργιλος.....	27
3.1.7 Broms & Choa (1998) – Άργιλος.....	28
3.1.8 Jeong (2004) - Άργιλος.....	31
3.1.9 Γεωργιάδης (2010) – Άργιλος.....	32
3.1.10 Gill (1970) – Στιφρή άργιλος.....	33
3.1.11 Welch & Reese (1972) – Στιφρή άργιλος.....	33
3.1.12 Reese (1975) – Στιφρή άργιλος.....	34
3.1.13 Dunnivant & O’Neill (1989) – Στιφρή άργιλος.....	36
3.1.14 Dewaikar (2009) – Στιφρή άργιλος.....	37

3.2 Καμπύλες p-y για αμμώδη εδάφη	38
3.2.1 Gill (1970) – Άμμος	38
3.2.2 Reese (1974) – Άμμος	38
3.2.3 Murchison & O’Neill (1984) – Άμμος	41
3.2.4 Γεωργιάδης (1992) – Άμμος	42
3.2.5 Novello (1999) – Άμμος	43
3.2.6 API (2007) – Άμμος	44
3.2.7 Suryasentan & Lehane (2014) – Άμμος	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : Προγραμματισμός καμπυλών p-y στον κώδικα MATLAB	50
4.1 Περιγραφή προγράμματος ανεπτυγμένου στον κώδικα MATLAB	50
4.2 Μειονεκτήματα και περιθώρια βελτίωσης προγράμματος	58
4.3 Χαρακτηριστικά πασσάλου	58
4.4 Στρωματογραφία	59
4.5 Εκτίμηση οριακού αξονικού φορτίου μεμονωμένων πασσάλων	61
4.5.1 Εκτίμηση οριακού αξονικού φορτίου πασσάλου στη μαλακή άργιλο	61
4.5.2 Εκτίμηση οριακού αξονικού φορτίου πασσάλου στη στιφρή άργιλο	61
4.5.3 Εκτίμηση οριακού αξονικού φορτίου πασσάλου στην άμμο	61
4.6 Σύγκριση καμπυλών p-y	62
4.6.1 Σύγκριση καμπυλών p-y σε μαλακή άργιλο	62
4.6.2 Σύγκριση καμπυλών p-y σε στιφρή άργιλο	64
4.6.3 Σύγκριση καμπυλών p-y σε άμμο	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο : Αναλύσεις μεμονωμένου πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση με το πρόγραμμα LATPILE	67
5.1 Περιγραφή προγράμματος LATPILE	67
5.2 Καμπύλες οριζόντιου φορτίου-μετακίνησης κορυφής πασσάλου	68
5.3 Διαφορές στην απόκριση του πασσάλου βάσει των διαφορετικών καμπυλών p-y ...	72
5.4 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης καμπτικής ροπής-οριζοντίου φορτίου	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο : Επιρροή κεκλιμένου εδάφους στην οριζόντια απόκριση του πασσάλου .	87
6.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μεθοδολογιών απομείωσης καμπυλών p-y	87
6.1.1 Γεωργιάδης (2010) - Άργιλος	88
6.1.2 Nimityongskul (2010) - Άργιλος	89
6.1.3 Reese (1975) - Άργιλος	90
6.1.4 Barker (2012) - Άμμος	90
6.1.5 Muthukkumaran (2007) - Άμμος	90
6.1.6 Reese (1974) – Άμμος	90
6.1.7 Mezazigh & Levacher (1997) - Άμμος	91
6.1.8 Gabr & Borden (1988) - Άμμος	91

6.2 Σύνοψη συντελεστών r βάσει των ανωτέρω μεθοδολογιών.....	92
6.3 Σύγκριση μεθοδολογιών απομείωσης καμπυλών p - y	94
6.4 Εναλλακτική προσέγγιση μελέτης της απόκρισης του πασσάλου σε κεκλιμένο έδαφος	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	104
7.1 Συμπεράσματα.....	104
7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	106
7.2.1 Βελτίωση προγράμματος MATLAB.....	106
7.2.2 Εφαρμογή αναλύσεων σε συνθήκες υπεράκτιας φόρτισης.....	106
7.2.3 Εφαρμογή αναλύσεων σε υπαρκτή στρωματογραφία.....	107
7.2.4 Εξέταση επιρροής απόστασης πασσάλου από πρανές.....	107
Βιβλιογραφία.....	108
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Κώδικας προγράμματος MATLAB.....	111
Περιεχόμενα.....	111
1) Ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος	111
2) Εισαγωγή δεδομένων	117
3) Μηνύματα σφάλματος	117
4) Διαχείριση δεδομένων	118
5) Υπολογισμός μειωτικών συντελεστών r , λόγω κεκλιμένου εδάφους.....	120
6) Υπολογισμός καμπυλών p - y	124
7) Προετοιμασία διαγραμμάτων p - y	138
8) Σχεδίαση διαγραμμάτων p - y	142
9) Εκκαθάριση διαγραμμάτων p - y	142
10) Εκκαθάριση δεδομένων	143
11) Μορφοποίηση οριζοντίου άξονα διαγραμμάτων p - y	143
12) Εξαγωγή καμπυλών p - y σε αρχεία txt	143
13) Μορφοποίηση δρομέα διαγραμμάτων p - y	145
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Αποτελέσματα Slide	146

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. 1: Τυπική μορφή μη γραμμικής καμπύλης p - y	2
Εικόνα 1. 2: Σχηματική απεικόνιση της ενσωμάτωσης των καμπυλών p - y στο προσομοίωμα δοκού επί μη γραμμικού ελατηριωτού εδάφους που επιλύει το LATPILE ...	2
Εικόνα 2. 1: Είδη διαφορετικών θεμελιώσεων συναρτήσει του βάθους.....	8
Εικόνα 2. 2: Γεωμετρική διάταξη πασσάλου υποπίεσης και διάγραμμα αλληλεπίδρασης V - H	13
Εικόνα 2. 3: Τυπικό παράδειγμα αύξησης χτύπων σφύρας κατά τη συναρμογή νέων τμημάτων πασσάλου.....	15

Εικόνα 2. 4 Μείωση των χτύπων σφύρας λόγω αφαίρεσης του υλικού στο εσωτερικό του πασσάλου.....	15
Εικόνα 2. 5: Οδηγία API που συσχετίζει την εξωτερική διάμετρο του πασσάλου και την ενέργεια της σφύρας με το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος πασσάλου.....	16
Εικόνα 2. 6: Τιμή δυσκαμψίας K , συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας της άμμου.....	18
Εικόνα 3. 1: Σκαρίφημα καμπύλης p - y για μαλακή άργιλο, Matlock (1970)	21
Εικόνα 3. 2: Σύνοψη ιδιοτήτων του καολινίτη που χρησιμοποίησε ο Jeanjean στα πειράματά του (2009).....	22
Εικόνα 3. 3: Πείραμα Jeanjean (2009): Όψη της γεώτρησης, (αριστερά) και πειραματική διάταξη φυγοκεντρητή (δεξιά).....	22
Εικόνα 3. 4 Σκαρίφημα καμπύλης p - y για μαλακή άργιλο, Jeanjean (2009).....	23
Εικόνα 3. 5: Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης φυγοκεντρητή, Lehane (2014). Μονάδες: mm.....	24
Εικόνα 3. 6: Όψη διάταξης φόρτισης κεφαλής πασσάλου, Lehane (2014).....	24
Εικόνα 3. 7: Αντίσταση αιχμής q_c της δοκιμής CPT, για OCR=1 και OCR=2, συναρτήσει του βάθους για το πείραμα του Lehane (2014).....	25
Εικόνα 3. 8: Τοποθεσία περιοχής πειράματος, Broms & Choa (1998).....	29
Εικόνα 3. 9: Χαρακτηριστικά μεμονωμένων πασσάλων και φόρτισης στα πειράματα που διενήργησαν οι Broms & Choa (1998).....	29
Εικόνα 3. 10: Στρωματογραφία περιοχής πειραμάτων, Broms & Choa (1998).....	30
Εικόνα 3. 11: Στρωματογραφία περιοχής πειραμάτων και γεωμετρικά χαρακτηριστικά πασσάλων, Jeong (2004).....	31
Εικόνα 3. 12: Πίνακας με μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους που έγιναν τα πειράματα και με μηχανικά-γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πασσάλων που χρησιμοποιήθηκαν, Jeong (2004).....	31
Εικόνα 3. 13: Σκαρίφημα καμπύλης p - y για στιφρή άργιλο, Welch & Reese (1972).....	34
Εικόνα 3. 14: Τιμές σταθεράς A συναρτήσει του βάθους, για στιφρή άργιλο κατά Reese (1975).....	35
Εικόνα 3. 15: Σκαρίφημα καμπύλης p - y για στιφρή άργιλο, Reese (1975).....	35
Εικόνα 3. 16: Τιμές σταθεράς A συναρτήσει του βάθους για άμμο κατά Reese (1974)....	39
Εικόνα 3. 17: Τιμές σταθεράς B συναρτήσει του βάθους για άμμο κατά Reese (1974).....	39
Εικόνα 3. 18: Σκαρίφημα καμπύλης p - y για άμμο, Reese (1974).....	40
Εικόνα 3. 19: Τιμή δυσκαμψίας K , συναρτήσει της γωνίας τριβής ή της σχετικής πυκνότητας της άμμου, Murchison & O'Neill (1984).....	41
Εικόνα 3. 20: Πειραματική διάταξη φυγοκεντρητή, Γεωργιάδης (1992).....	43
Εικόνα 3. 21: Τιμές των σταθερών c_1 , c_2 , c_3 συναρτήσει της γωνίας τριβής, API (2007)..	44
Εικόνα 3. 22: Πείραμα Pando (2006): Στρωματογραφία γεώτρησης προεντεταμένου πασσάλου από σκυρόδεμα (αριστερά) και προφίλ μεγέθους q_c στην αντίστοιχη γεώτρηση (δεξιά).....	46
Εικόνα 3. 23: Πείραμα Pando (2006): Στρωματογραφία γεώτρησης πλαστικού πασσάλου (αριστερά) και προφίλ μεγέθους q_c στην αντίστοιχη γεώτρηση (δεξιά).....	46
Εικόνα 3. 24: Πείραμα Pando (2006): Στρωματογραφία γεώτρησης ινοπλισμένου πασσάλου (αριστερά) και προφίλ μεγέθους q_c στην αντίστοιχη γεώτρηση (δεξιά).....	47

Εικόνα 3. 25: Πείραμα Luff (2007): Στρωματογραφία γεώτρησης πασσάλου (αριστερά) και προφίλ μεγέθους q_c στην αντίστοιχη γεώτρηση (δεξιά)	47
Εικόνα 3. 26: Πείραμα Ramadan (2013): Στρωματογραφία γεώτρησης πασσάλου (αριστερά) και προφίλ μεγέθους q_c στην αντίστοιχη γεώτρηση (δεξιά)	48
Εικόνα 3. 27: Πείραμα Venville (2004): Στρωματογραφία γεώτρησης πασσάλου (αριστερά) και προφίλ μεγέθους q_c στην αντίστοιχη γεώτρηση (δεξιά)	49
Εικόνα 4. 1: Δίκτυο ροής της πορείας επίλυσης της οριζόντιας απόκρισης του πασσάλου	52
Εικόνα 4. 2: Παράδειγμα ανάπτυξης καμπύλης p-y στο πρόγραμμα της MATLAB	56
Εικόνα 4. 3: Παράδειγμα ανάπτυξης καμπύλων p-y στο πρόγραμμα της MATLAB.....	57
Εικόνα 4. 4: Στρωματογραφία μαλακής αργίλου	59
Εικόνα 4. 5: Στρωματογραφία σφιγρής αργίλου	60
Εικόνα 4. 6: Στρωματογραφία άμμου	60
Εικόνα 4. 7: Καμπύλες p-y σε μαλακή άργιλο, σε βάθος ίσο με 2 διαμέτρους	62
Εικόνα 4. 8: Καμπύλες p-y σε μαλακή άργιλο, σε βάθος ίσο με 8 διαμέτρους	63
Εικόνα 4. 9: Καμπύλες p-y σε σφιγρή άργιλο, σε βάθος ίσο με 2 διαμέτρους	64
Εικόνα 4. 10: Καμπύλες p-y σε σφιγρή άργιλο, σε βάθος ίσο με 8 διαμέτρους	64
Εικόνα 4. 11: Καμπύλες p-y σε άμμο, σε βάθος ίσο με 2 διαμέτρους	65
Εικόνα 4. 12: Καμπύλες p-y σε άμμο, σε βάθος ίσο με 8 διαμέτρους	65
Εικόνα 5. 1: Διάγραμμα pushover στη μαλακή άργιλο	69
Εικόνα 5. 2: Διάγραμμα pushover στη σφιγρή άργιλο	70
Εικόνα 5. 3: Διάγραμμα pushover στην άμμο	70
Εικόνα 5. 4: Διάγραμμα μετατόπισης κατά βάθος, μαλακή άργιλος, $H=50$ kN, $N=250$ kN ($N/N_u=9.5\%$).....	73
Εικόνα 5. 5: Διάγραμμα καμπτικής ροπής κατά βάθος, μαλακή άργιλος, $H=50$ kN, $N=250$ kN ($N/N_u=9.5\%$).....	73
Εικόνα 5. 6: Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης κατά βάθος, μαλακή άργιλος, $H=50$ kN, $N=250$ kN ($N/N_u=9.5\%$).....	74
Εικόνα 5. 7: Διάγραμμα μετατόπισης κατά βάθος, σφιγρή άργιλος, $H=85$ kN, $N=425$ kN ($N/N_u=7.3\%$).....	74
Εικόνα 5. 8: Διάγραμμα καμπτικής ροπής κατά βάθος, σφιγρή άργιλος, $H=85$ kN, $N=425$ kN ($N/N_u=7.3\%$).....	75
Εικόνα 5. 9: Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης κατά βάθος, σφιγρή άργιλος, $H=85$ kN, $N=425$ kN ($N/N_u=7.3\%$).....	75
Εικόνα 5. 10: Διάγραμμα μετατόπισης κατά βάθος, άμμος, $H=50$ kN, $N=250$ kN ($N/N_u=2.9\%$).....	76
Εικόνα 5. 11: Διάγραμμα καμπτικής ροπής κατά βάθος, άμμος, $H=50$ kN, $N=250$ kN ($N/N_u=2.9\%$).....	76
Εικόνα 5. 12: Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης κατά βάθος, άμμος, $H=50$ kN, $N=250$ kN ($N/N_u=2.9\%$).....	77
Εικόνα 5. 13: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για μαλακή άργιλο για διάφορες καμπύλες p-y, αξονικό φορτίο $N=250$ kN ($N/N_u=9.5\%$)	80
Εικόνα 5. 14: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για σφιγρή άργιλο για διάφορες καμπύλες p-y, αξονικό φορτίο $N=425$ kN ($N/N_u=7.3\%$)	81

Εικόνα 5. 15: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για άμμο για διάφορες καμπύλες p-y, αξονικό φορτίο $N=250\text{kN}$ ($N/N_u=2.9\%$).....	82
Εικόνα 5. 16: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για όλα τα εδάφη, με βάση τις μέσες καμπύλες p-y, για αξονική δύναμη $N=250\text{ kN}$	84
Εικόνα 5. 17: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για όλα τα εδάφη, με βάση τις μέσες καμπύλες p-y, για αξονική δύναμη $N=425\text{ kN}$	84
Εικόνα 5. 18: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για μαλακή άργιλο με βάση τη μέση καμπύλη p-y.....	85
Εικόνα 5. 19: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για στιφρή άργιλο με βάση τη μέση καμπύλη p-y.....	86
Εικόνα 5. 20: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για άμμο με βάση τη μέση καμπύλη p-y	86
Εικόνα 6. 1: Σκαρίφημα πασσάλου διαμέτρου b, σε πρηνές κλίσης θ μοιρών	87
Εικόνα 6. 2: Μειωτικοί συντελεστές, r , συναρτήσεϊ του βάθους για αργιλικά εδάφη και διάφορες κλίσεις.....	93
Εικόνα 6. 3: Μειωτικοί συντελεστές, r , συναρτήσεϊ του βάθους για αμμώδη εδάφη και διάφορες κλίσεις.....	93
Εικόνα 6. 4: Καμπύλες p-y για μαλακή άργιλο σε οριζόντιο έδαφος και σε έδαφος με κλίση 10° , (Αριστερά: Βάθος ίσο με 2 διαμέτρους, Δεξιά: Βάθος ίσο με 8 διαμέτρους, όπου διάμετρος $b=1\text{m}$)	95
Εικόνα 6. 5: Καμπύλες p-y για στιφρή άργιλο σε οριζόντιο έδαφος και σε έδαφος με κλίση 15° , (Αριστερά: Βάθος ίσο με 2 διαμέτρους, Δεξιά: Βάθος ίσο με 8 διαμέτρους, όπου διάμετρος $b=1\text{m}$)	96
Εικόνα 6. 6: Καμπύλες p-y για άμμο σε οριζόντιο έδαφος και σε έδαφος με κλίση 28° , (Αριστερά: Βάθος ίσο με 2 διαμέτρους, Δεξιά: Βάθος ίσο με 8 διαμέτρους, όπου διάμετρος $b=1\text{m}$)	96
Εικόνα 6. 7: Σχηματική απεικόνιση εναλλακτικής προσέγγισης επίλυσης προβλήματος κεκλιμένου εδάφους	98
Εικόνα 6. 8: Μαλακή άργιλος: Απόκλιση αποτελεσμάτων εναλλακτικής μεθόδου με τα αποτελέσματα των απομειωμένων καμπυλών p-y για διάφορα z_m	99
Εικόνα 6. 9: Στιφρή άργιλος: Απόκλιση αποτελεσμάτων εναλλακτικής μεθόδου με τα αποτελέσματα των απομειωμένων καμπυλών p-y για διάφορα z_m	99
Εικόνα 6. 10: Άμμος: Απόκλιση αποτελεσμάτων εναλλακτικής μεθόδου με τα αποτελέσματα των απομειωμένων καμπυλών p-y για διάφορα z_m	100
Εικόνα 6. 11: Βάθος αφαίρεσης επιφανειακού εδάφους συναρτήσεϊ του είδους του εδάφους και της κλίσεϊ	100
Εικόνα Π.Β. 1: Αποτέλεσμα ανάλυσεϊ Slide, για πρηνές από μαλακή άργιλο	147
Εικόνα Π.Β. 2: Αποτέλεσμα ανάλυσεϊ Slide, για πρηνές από στιφρή άργιλο.....	148
Εικόνα Π.Β. 3: Αποτέλεσμα ανάλυσεϊ Slide, για πρηνές από άμμο	149

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 2. 1: Κατάταξη εδάφους βάσει των μηχανικών του χαρακτηριστικών.....	17
Πίνακας 2. 2: Μέτρο Ελαστικότητας και λόγος Poisson, συναρτήσεϊ του είδους του εδάφους.....	18

Πίνακας 2. 3: Δυσκαμψία αργίλου συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής...	18
Πίνακας 3. 1: Μεθοδολογίες υπολογισμού απόκρισης πασσάλου υπό εγκάρσια φόρτιση	19
Πίνακας 3. 2: Περιγραφή μεθοδολογιών p-y που θα αναλυθούν.....	20
Πίνακας 3. 3: Αστράγγιστη διατμητική αντοχή συναρτήσει του βάθους, Λίμνη Austin....	20
Πίνακας 3. 4: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Matlock (1970) για μαλακή άργιλο	21
Πίνακας 3. 5: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Jeanjean (2007) για μαλακή άργιλο	23
Πίνακας 3. 6: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Lehane (2014) για μαλακή άργιλο	25
Πίνακας 3. 7: Περιπτώσεις πασσάλων υπό οριζόντια φόρτιση από τη βιβλιογραφία	26
Πίνακας 3. 8: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά NGI-11 (2014) για μαλακή άργιλο	26
Πίνακας 3. 9: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Sullivan (1980) για άργιλο.....	27
Πίνακας 3. 10: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά O'Neill & Gazioğlu (1984) για άργιλο	28
Πίνακας 3. 11: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Broms & Choa (1998) για άργιλο.....	30
Πίνακας 3. 12: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Jeong (2004) για άργιλο.....	32
Πίνακας 3. 13: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Γεωργιάδη (2010) για άργιλο.....	33
Πίνακας 3. 14: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Gill (1970) για στιφρή άργιλο.....	33
Πίνακας 3. 15: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Welch & Reese (1972) για στιφρή άργιλο	34
Πίνακας 3. 16: Μηχανικά χαρακτηριστικά της αργίλου στο Manor, Texas, συναρτήσει του βάθους.....	35
Πίνακας 3. 17: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Reese (1975) για στιφρή άργιλο	36
Πίνακας 3. 18: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Dunnavant & O'Neill (1989) για στιφρή άργιλο	37
Πίνακας 3. 19: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Dewaikar (2009) για στιφρή άργιλο	38
Πίνακας 3. 20: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Gill (1970) για άμμο	38
Πίνακας 3. 21: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Reese (1974) για άμμο	40
Πίνακας 3. 22: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Murchison & O'Neill (1984) για άμμο	42
Πίνακας 3. 23: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά πασσάλων τους οποίους προσομοίωσε ο Γεωργιάδης (1992) μέσω φυγοκεντρική	42
Πίνακας 3. 24: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Γεωργιάδη (1992) για άμμο	43
Πίνακας 3. 25: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Novello (1999) για άμμο.....	44
Πίνακας 3. 26: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά API (2007) για άμμο	45
Πίνακας 3. 27: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Suryasentan & Lehane (2014) για άμμο ..	49
Πίνακας 4. 1: Μεθοδολογίες p-y που χρησιμοποιήθηκαν	50
Πίνακας 4. 2: Μεθοδολογίες απομείωσης καμπυλών p-y που χρησιμοποιήθηκαν.....	51
Πίνακας 4. 3: Κατάταξη εδάφους βάσει των μηχανικών του χαρακτηριστικών.....	51
Πίνακας 4. 4: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά πασσάλου που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.....	59
Πίνακας 5. 1: Λόγος αξονικού φορτίου προς μεγίστου οριακού φορτίου, N/Nu	72
Πίνακας 5. 2: Κατηγοριοποίηση μεθόδων p-y από την τολμηρότερη στην πιο συντηρητική, ως προς τον υπολογισμό μετακίνησης, καμπτικής ροπής και τέμνουσας δύναμης	78
Πίνακας 6. 1: Μεθοδολογίες απομείωσης καμπυλών p-y ανά είδος εδάφους: οι προτεινόμενοι μειωτικοί συντελεστές r και το βάθος επιρροής της κλίσης	88

Πίνακας 6. 2: Συνδυασμοί παραμέτρων που χρησιμοποίησε ο Γεωργιάδης στις προσομοιώσεις του	88
Πίνακας 6. 3: Σύγκριση μεθόδων απομείωσης με τη μέση καμπύλη p-y για οριζόντιο έδαφος με αφαιρεμένη τη ρηχή εδαφική στρώση, σε όρους μετακίνησης κεφαλής. Μαλακή άργιλος.....	100
Πίνακας 6. 4: Σύγκριση μεθόδων απομείωσης με την μέση καμπύλη p-y για οριζόντιο έδαφος με αφαιρεμένη τη ρηχή εδαφική στρώση, σε όρους καμπτικής ροπής. Μαλακή άργιλος.....	101
Πίνακας 6. 5: Σύγκριση μεθόδων απομείωσης με την μέση καμπύλη p-y για οριζόντιο έδαφος με αφαιρεμένη τη ρηχή εδαφική στρώση, σε όρους μετακίνησης κεφαλής. Στιφρή άργιλος.....	101
Πίνακας 6. 6: Σύγκριση μεθόδων απομείωσης με την μέση καμπύλη p-y για οριζόντιο έδαφος με αφαιρεμένη τη ρηχή εδαφική στρώση, σε όρους καμπτικής ροπής. Στιφρή άργιλος.....	101
Πίνακας 6. 7: Σύγκριση μεθόδων απομείωσης με την μέση καμπύλη p-y για οριζόντιο έδαφος με αφαιρεμένη τη ρηχή εδαφική στρώση, σε όρους μετακίνησης κεφαλής. Άμμος	102
Πίνακας 6. 8: Σύγκριση μεθόδων απομείωσης με την μέση καμπύλη p-y για οριζόντιο έδαφος με αφαιρεμένη τη ρηχή εδαφική στρώση, σε όρους καμπτικής ροπής. Άμμος....	102

Σύμβολα

α : δείκτης τραχύτητας πασσάλου (0 έως 1 για λεία ή τραχειά διεπιφάνεια αντίστοιχα)

γ, γ' : ολικό και ενεργό ειδικό βάρος εδάφους αντίστοιχα

δ : μετατόπιση κεφαλής πασσάλου

Δp : διαφορά πίεσης κατά την τοποθέτηση πασσάλου υποπίεσης

e_{50} : παραμόρφωση εδάφους στην οποία αντιστοιχεί το 50% της μέγιστης αντίστασης

θ : κλίση εδάφους θεμελίωσης

ν : λόγος Poisson

φ : γωνία τριβής εδάφους

ψ : συντελεστής απομείωσης μέγιστης αντίδρασης εδάφους p_u

b : διάμετρος πασσάλου

c_u : αστράγγιστη διατμητική αντοχή

D_s : σχετική πυκνότητα άμμου

E : μέτρο ελαστικότητας εδάφους

E_p : μέτρο ελαστικότητας πασσάλου

F : δύναμη έμπηξης πασσάλου

G : μέτρο διάτμησης εδάφους

G_s : ειδική βαρύτητα κόκκων

h : ύψος κύματος

H, V : οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα δύναμης που δρα στον πάσσαλο υποπίεσης

H, N, M : δρώσα εγκάρσια δύναμη, αξονική θλιπτική δύναμη και καμπτική ροπή

H_u, N_u, M_u : μέγιστη εγκάρσια δύναμη, αξονική θλιπτική δύναμη και καμπτική ροπή

I_p : ροπή αδρανείας πασσάλου

K: δυσκαμψία εδάφους
K_o, K_a, K_p: συντελεστές ουδέτερων, ενεργών και παθητικών εδαφικών ωθήσεων
L: μήκος πασσάλου
L_{critical}: μήκος πασσάλου που επηρεάζεται από την εγκάρσια φόρτιση
N: αριθμός χτύπων κατά την πρότυπη δοκιμή διείσδυσης SPT
p: αντίσταση εδάφους
p_u: μέγιστη αντίσταση εδάφους
p_{u,slope}: μέγιστη αντίσταση εδάφους όταν ο πάσσαλος είναι θεμελιωμένος σε πρανές
q_c: αντίσταση αιχμής κατά τη δοκιμή διείσδυσης κώνου CPT
Q, Q_{side}, Q_{tip}: συνολική αντίσταση, αντιστάση τριβής και αιχμής πασσάλου αντίστοιχα
r: συντελεστής απομείωσης καμπυλών p-y
y: μετακίνηση πασσάλου
y₅₀: μετακίνηση πασσάλου στην οποία αντιστοιχεί το 50% της μέγιστης αντίστασης
z: βάθος
z_{critical}: βάθος μέχρι το οποίο επηρεάζεται ο πάσσαλος από την εγκάρσια φόρτιση
z_m: ανηγμένο βάθος της στρώσης προς αφαίρεση ως προς τη διάμετρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Εισαγωγή

Όλο και περισσότερες κατασκευές τα τελευταία χρόνια κατασκευάζονται υπεράκτια. Τέτοιες είναι συνήθως πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου και φυσικού αερίου, αλλά και ανεμογεννήτριες.

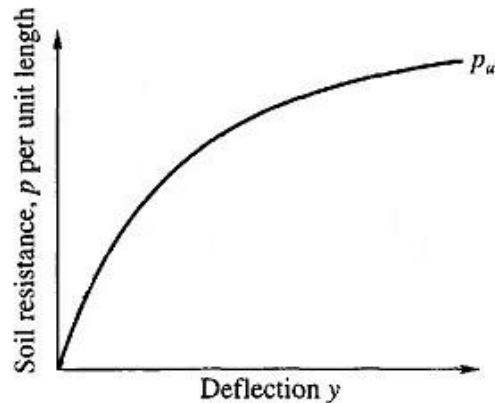
Ο τρόπος θεμελίωσης τέτοιων κατασκευών ποικίλει ανάλογα το βάθος της θάλασσας και το έδαφος θεμελίωσης. Θεμέλια μπορούν να αποτελούν κατασκευές βαρύτητας στα μικρά βάθη, ενώ στις πιο βαθιές θάλασσες και λίμνες χρησιμοποιούνται πάσσαλοι. Οι πάσσαλοι, ανάλογα πάλι το βάθος, ενδέχεται να λειτουργούν υπό θλίψη και κάμψη ή από εφελκυσμό στα μεγαλύτερα βάθη.

Σε τόσο σημαντικές και δύσκολες κατασκευές, πρέπει να γίνονται εκτεταμένες δοκιμές του εδάφους θεμελίωσης ώστε να προσδιορίζονται, με όσο γίνεται λιγότερη αβεβαιότητα, οι μηχανικές του ιδιότητες. Επίσης πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι όποιες καταστάσεις και κίνδυνοι που επικρατούν σε μεγάλα βάθη και μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία, ενώ ειδική μέριμνα και μελέτη πρέπει να γίνει για τη διαδικασία έμπηξης των πασσάλων.

Ακόμη, η θεμελίωση πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να έχει καλή απόκριση σε οριζόντια φόρτιση, μιας και στα υπεράκτια έργα επικρατούν οριζόντιες φορτίσεις όπως τα φορτία ανέμου, κυμάτων και ρευμάτων. Στην παρούσα εργασία θα αναλυθεί η απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου στην οριζόντια φόρτιση, με τη χρήση καμπυλών $p-y$. Οι καμπύλες $p-y$ δείχνουν τη σχέση οριζοντίου φορτίου ανά μέτρο με την οριζόντια μετακίνηση του πασσάλου, σε κάθε βάθος. Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα καμπυλών $p-y$, όπου η κάθε μία ταιριάζει καλύτερα σε συγκεκριμένα είδη εδάφους ή προκύπτουν βάσει συγκεκριμένων εδαφικών ιδιοτήτων, ενώ μορφώθηκαν είτε βάσει πειραμάτων πραγματικής κλίμακας, είτε βάσει πειραμάτων σε φυγοκεντρική, είτε με αριθμητικές μεθόδους. Έτσι, υπάρχουν καμπύλες που σχετίζονται με αμμώδη ή αργιλικά εδάφη, που απαιτούν τη γνώση της γωνίας τριβής ή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ή των αριθμών χτύπων N της δοκιμής SPT, ή την αντίσταση αιχμής q_c της δοκιμής CPT, που παρήχθησαν από κάποιο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ή από καλιμπράρισμα αποτελεσμάτων πειραμάτων. Μια γενική μορφή μιας καμπύλης $p-y$ φαίνεται στην Εικόνα 1.1.

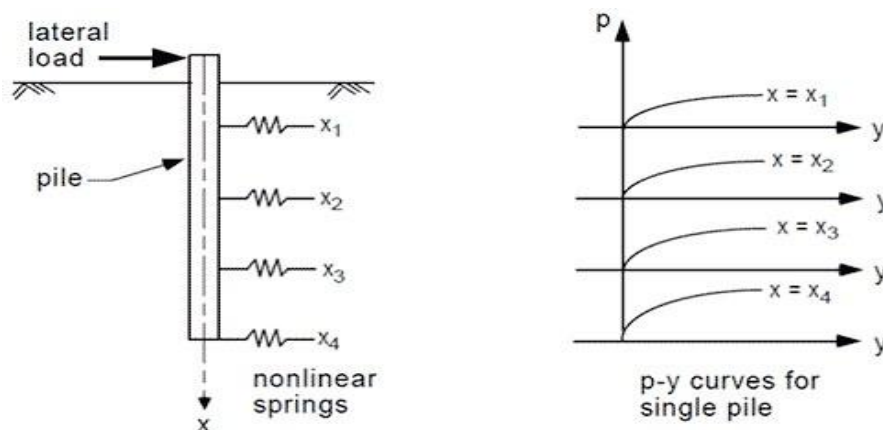
Σε αυτήν την εργασία, συντάχθηκε ένα πρόγραμμα στη γλώσσα MATLAB, το οποίο έχοντας τη στρωματογραφία του εδάφους, αναπαράγει καμπύλες $p-y$ σε οποιοδήποτε βάθος, μέσα από μια μεγάλη ποικιλία μεθοδολογιών για κάθε τύπο εδάφους. Κατόπιν, οι καμπύλες $p-y$, τις οποίες εξάγει η MATLAB, χρησιμοποιούνται ως δεδομένο εισόδου στο πρόγραμμα LATPILE. Αυτό το πρόγραμμα, επιλύει τον πάσσαλο ως δοκό επί μη γραμμικού ελατηριωτού εδάφους, όπου τα μη γραμμικά ελατήρια είναι οι καμπύλες $p-y$. Οι καμπύλες $p-y$ εισάγονται αρκετά πυκνά ώστε να υπάρχει ικανοποιητική ακρίβεια. Ο λόγος για τον οποίον πρέπει να είναι πυκνά τα ελατήρια, είναι ότι μεταξύ τους είναι ανεξάρτητα. Κατόπιν, στο LATPILE εισάγονται οι συνθήκες φόρτισης και ως αποτέλεσμα προκύπτει η μετακινησιακή και εντατική απόκριση του πασσάλου. Στην Εικόνα 1.2

φαίνεται πώς ενσωματώνονται οι διάφορες καμπύλες p-y στο προσομοίωμα που επιλύει το LATPILE.



Εικόνα 1. 1: Τυπική μορφή μη γραμμικής καμπύλης p-y

Χρησιμοποιώντας την κάθε καμπύλη p-y, εξήχθησε το μέγιστο οριζόντιο φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο πάσσαλος. Ακόμα, οι καμπύλες p-y συγκρίθηκαν μεταξύ τους ως προς τη μέγιστη μετακίνηση και καμπτική ροπή που υπόκειται ο πάσσαλος για τις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Επιπλέον, για κάθε καμπύλη p-y, υπολογίστηκε μια περιβάλλουσα αστοχίας όταν η φόρτιση αποτελείται από οριζόντιο φορτίο και καμπτική ροπή.



Εικόνα 1. 2: Σχηματική απεικόνιση της ενσωμάτωσης των καμπυλών p-y στο προσομοίωμα δοκού επί μη γραμμικού ελατηριωτού εδάφους που επιλύει το LATPILE

Τέλος, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ύπαρξη κεκλιμένου εδάφους και πώς αυτό επηρεάζει την απόκριση του πάσσалу σε οριζόντια φόρτιση. Σε πρώτη φάση εξετάστηκε πώς επηρεάζονται οι καμπύλες p-y και μελετήθηκαν διάφορες μεθοδολογίες απομείωσης τους, οι οποίες μπορούν και να εφαρμοστούν μέσα στο πρόγραμμα της MATLAB. Στη συνέχεια, σε δεύτερη φάση, εξετάστηκε πόσο η κλίση του πρανούς επηρεάζει τη μετακινησιακή απόκριση του πάσσалу. Τέλος, προτάθηκε ένας τρόπος ώστε να λαμβάνεται έμμεσα υπόψη η κλίση, δίχως να χρησιμοποιούνται οι μεθοδολογίες απομείωσης, αλλά οι κανονικές καμπύλες p-y, στο οριζόντιο έδαφος, αλλά στο οποίο θα έχει αφαιρεθεί μια επιφανειακή στρώση εδάφους, κατάλληλου πάχους ώστε η απόκλιση των δύο τρόπων να είναι αμελητέα.

Η εργασία έχει τρεις κύριους στόχους:

- Να συγκεντρώσει πληθώρα μεθοδολογιών p - y , οι οποίες θα αποτελούν μια βιβλιοθήκη για μετέπειτα μελέτη πάνω σε αυτές και για περαιτέρω σύγκριση, ανάλυση και βελτιστοποίησή τους.
- Να αναπτυχθεί λογισμικό το οποίο θα παράγει καμπύλες p - y , μέσα από ένα μεγάλο εύρος επιλογών. Το λογισμικό θα είναι φιλικό προς το χρήστη και εύχρηστο, απαιτώντας από τον χρήστη τα λιγότερα δυνατά δεδομένα και προσφέροντας τις καμπύλες p - y σε οποιοδήποτε βάθος, τόσο σε μορφή διαγράμματος, όσο και σε μορφή .txt για μετέπειτα χρήση και αξιοποίησή τους.
- Να μελετήσει την επίδραση που έχει το κεκλιμένο έδαφος στην απόκριση του πασσάλου σε οριζοντια φόρτιση και να συγκρίνει εναλλακτικούς τρόπους αντιμετώπισης του φαινομένου, όπως χρήση μεθοδολογιών απομείωσης καμπυλών p - y ή αφαίρεση επιφανειακού παχους εδάφους θεμελίωσης.

Κατόπιν, περιγράφεται συνοπτικά το περιεχόμενο των κεφαλαίων της διπλωματικής εργασίας:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Περιγραφή βαθιών θεμελιώσεων υπεράκτιων κατασκευών. Καταγραφή πολλών διαφορετικών πραγμάτων που απαρτίζουν το σύνολο της μελέτης θεμελίωσης αλλά και ειδικών περιπτώσεων που συχνά συναντούνται σε υπεράκτιες κατασκευές, όπως: είδη εδαφών που εντοπίζονται συνήθως σε μεγάλα βάθη και ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει έκαστο, κίνδυνοι που αντιμετωπίζουν οι θεμελιώσεις σε μεγάλα βάθη, τρόποι θεμελίωσης, φορτία σχεδιασμού, ομάδες πασσάλων, πάσσαλοι υποπίεσης, αιολικά πάρκα, διαδικασία εμπήξεως πασσάλων και εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Βιβλιογραφική ανασκόπηση καμπυλών p - y . Οι καμπύλες p - y αντιστοιχούν σε μαλακές ή στιφρές αργίλους, σε αργίλους γενικά και σε άμμους. Κάποιες καμπύλες έχουν προκύψει από επί τόπου πειράματα πραγματικής κλίμακας, άλλες από πειράματα σε φυγοκεντρική ενώ άλλες από αναλύσεις με αριθμητικές μεθόδους, όπως πεπερασμένα στοιχεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιγραφή του προγράμματος που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον της MATLAB, τόσο της πορείας επίλυσης όσο και των δυνατοτήτων που έχει. Επισήμανση διαφόρων χαρακτηριστικών του τα οποία μπορούν να βελτιωθούν και προτάσεις για μετέπειτα διορθώσεις ή βελτιστοποιήσεις. Περιγραφή γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του κοινού πασσάλου που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις αναλύσεις καθώς και της στρωματογραφίας των τριών διαφορετικών εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν, μαλακής αργίλου, στιφρής αργίλου και άμμου. Σύγκριση διαφορετικών καμπυλών p - y για κάθε είδος εδάφους σε βάθος δύο (2) και οκτώ (8) διαμέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Περιγραφή του προγράμματος LATPILE που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, έχοντας ως δεδομένα τις καμπύλες p - y που εξήχθησαν από το πρόγραμμα της MATLAB. Εξαγωγή καμπύλης οριζοντίου φορτίου-μετατόπισης βάσει των διαφορετικών καμπυλών p - y . Σύγκριση της απόκρισης του

πασσάλου σε επίπεδο μετακίνησης, καμπτικής ροπής και τέμνουσας δύναμης, για όλες τις διαφορετικές καμπύλες $p-y$ σε συνθήκες κοινής οριζόντιας φόρτισης. Κατασκευή διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης δρώσας καμπτικής ροπής και οριζόντιας φόρτισης, βάσει κάθε καμπύλης $p-y$ και σύγκριση των διαφορετικών περιβαλλουσών αστοχίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Επίδραση του κεκλιμένου εδάφους στην απόκριση του πασσάλου. Βιβλιογραφική ανασκόπηση μεθοδολογιών οι οποίες απομειώνουν τις καμπύλες $p-y$ συναρτήσει της κλίσης του πρανούς θεμελίωσης. Εφαρμογή των μεθοδολογιών απομείωσης στις καμπύλες $p-y$ μέσω του προγράμματος της MATLAB και εξαγωγή της απόκρισης των πασσάλων σε συνθήκες οριζόντιας φόρτισης και κεκλιμένου εδάφους. Σύγκριση των αποτελεσμάτων με εναλλακτική προσέγγιση επίλυσης, στην οποία δε χρησιμοποιούνται οι απομειωμένες καμπύλες $p-y$ αλλά οι αρχικές, αλλά έχει αφαιρεθεί ένα επιφανειακό στρώμα εδάφους, το πάχος του οποίου προσδιορίζεται έτσι ώστε το σφάλμα των δύο προσεγγίσεων να είναι αμελητέο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα και προτάσεις για περισσότερη έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Βαθείες θεμελιώσεις υπεράκτιων κατασκευών

2.1 Εδάφη θεμελίωσης

Πολύ σημαντικός είναι ο προσδιορισμός του εδάφους θεμελίωσης και των μηχανικών του ιδιοτήτων. Πρέπει να τονιστεί ότι συνήθως οποιοδήποτε δείγμα εδάφους θα δώσει υποτιμημένες αντοχές στο εργαστήριο λόγω διατάραξής του (κυρίως όταν πρόκειται για αμμώδες έδαφος). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ψύξη του εδάφους (freezing) κατά τη διαδικασία δειγματοληψίας για αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου.

Παρακάτω περιγράφονται κάποια συνήθη είδη εδαφών που εντοπίζονται στα βάθη θαλασσών:

Πυκνοί άμμοι: Λόγω των ρευμάτων και των κυματισμών, η υπερπίεση πόρων αυξομειώνεται συνεχώς, προφορτίζοντας/στερεοποιώντας την άμμο. Ως αποτέλεσμα η άμμος μπορεί να αναπτύξει πολύ μεγάλη γωνία τριβής ($\phi \sim 40^\circ$) αλλά και πολύ μεγάλο δείκτη στερεοποίησης, OCR, τόσο μεγάλο που δύσκολα επιτυγχάνεται σε εργαστηριακό περιβάλλον. Όταν λαμβάνεται δείγμα για δοκιμή, τότε, λόγω διατάραξής του, ενδέχεται να υποτιμηθούν οι μηχανικές του ιδιότητες στο εργαστήριο και ίσως απαιτείται ψύξη του δείγματος. Τέτοιες άμμοι βρίσκονται κυρίως στη Βόρεια Θάλασσα και στις ανατολικές ακτές του Καναδά.

Ασβεστώδης άμμος (calcareous sand): Τέτοιες άμμοι επικρατούν σε θερμότερα κλίματα όπως η Ανατολική Μεσόγειος ή οι ακτές της Βραζιλίας. Έχουν γενικά μεγάλη γωνία τριβής και ικανοποιητική αντοχή αιχμής (αν και για την ενεργοποίησή της απαιτείται μεγάλη βύθιση) αλλά σχεδόν μηδενική πλευρική αντίσταση, κάτι που να μεν διευκολύνει πολύ τη διαδικασία έμπηξης, αλλά μειώνει δραματικά την αξονική αντοχή του πασσάλου. Σε αντίθεση με τις περισσότερες άμμους έχουν πολύ μικρή διαπερατότητα, κάτι που δυσχερύνει τη διαδικασία τσιμεντενέσεως. Γενικά αποτελούν από τα πιο δύσκολα εδάφη για θεμελίωση με πασσάλους. Η οριζόντια φόρτιση πασσάλου μπορεί να προκαλέσει χαλάρωση του εδάφους στην περιφέρειά του στις ανώτερες, πιο ρηχές στρώσεις, κάτι που οδηγεί σε ακόμα μεγαλύτερες παραμορφώσεις–μετατοπίσεις. Εάν τοπικά και ρηχά, το έδαφος αντικατασταθεί με γαρμπίλι, τότε αυτές οι παραμορφώσεις μειώνονται. Επίσης, σε αυτό το έδαφος, οι έγχυτοι πάσσαλοι μπορεί να αναπτύξουν μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα από τους εμπυγνόμενους καθώς το ένεμα σκυροδέματος διεισδύει στο πορώδες αυξάνοντας αρκετά τη μικρή πλευρική τριβή, ωστόσο εάν το έδαφος είναι πάρα πολύ αδιαπέρατο (Βορειοδυτική Αυστραλία) το ένεμα δε θα καταφέρει να διεισδύσει ικανοποιητικά. Άλλος τρόπος βελτίωσης του εδάφους αυτού, είναι η στερεοποίησή του είτε μέσω δόνησης είτε μέσω επίχωσης-προφόρτισης με χαλίκι. Βελτίωση του εδάφους γίνεται και μέσω της ψύξης του, ωστόσο εκεί πρόβλημα αποτελεί η ενέργεια που θα απαιτείται για να διατηρηθεί το έδαφος μόνιμα σε αυτήν την κατάσταση.

ΐλύς: Ομοίως με τις άμμους, ιλυώδες έδαφος μπορεί να βρεθεί υπερστερεοποιημένο απλά και μόνο λόγω της επανακυκλιζόμενης φόρτισης των κυμάτων και ρευμάτων. Η υπερστερεοποίηση δυσκολεύει την έμπηξη των πασσάλων, ωστόσο αυξάνει τη φέρουσα ικανότητα.

Αέριο μεθανίου: Συνήθως βρίσκεται σε προσχωματικά ιζήματα σε δέλτα ποταμών και στα ρηγά βάθη κοντά στον Βόρειο Πόλο. Είναι πολύ πιθανό κατά τη διαδικασία έμπηξης ή γεωτρήσεων, να απελευθερωθεί το αέριο και να προκληθεί έκρηξη λόγω μεγάλης διαφοράς πίεσης. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι το αέριο μεθάνιο μπορεί να βρίσκεται εγκλωβισμένο στον πυθμένα σε πολύ μεγάλη πίεση. Πρέπει να δοθεί μεγάλη σημασία στην αποτόνωση αυτής της πίεσης (πχ με γεωτρήσεις πολύ μικρής διαμέτρου), καθώς απρόβλεπτες εκρήξεις, πέρα από τυχόν τραυματισμούς, μπορεί να οδηγήσουν σε δημιουργία φυσαλλίδων κάτω από την εξέδρα με αποτέλεσμα τη μείωση της άνωσης. Εάν η εξέδρα βασίζεται στην ανωστική δύναμη ώστε να εφελκύει τους πασσάλους στη θεμελίωση, οι οποίοι αντιστέκονται με την πλευρική τους τριβή, τότε η μείωσή της οδηγεί σε ενδεχόμενη χαλάρωση των εφελκόμενων τενόντων και βύθιση της κατασκευής.

Άργιλοι: Υλικό σχεδόν αδιαπέρατο, με μεγάλη συνοχή και ανισότροπο (συνήθως μεγαλύτερη οριζόντια παρά κάθετη διαπερατότητα). Η έμπηξη δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία, μιας και η βραχυπρόθεσμη συνοχή-πλευρική τριβή είναι αρκετά μικρή. Ωστόσο, τυχόν καθυστέρηση ή χρονοτριβή στη διαδικασία έμπηξης οδηγεί σε αύξηση της πλευρικής τριβής λόγω αποτόνωσης της υπερπίεσης πόρων, επομένως απαιτείται πιο ενεργοβόρος ρυθμός έμπηξης. Μάλιστα, εάν η διαδικασία χρονοτριβίσει αρκετά, υπάρχει περίπτωση η κατάσταση να είναι μη αναστρέψιμη και να μην μπορεί να συνεχιστεί η έμπηξη. Η στράγγιση (συνήθως με στραγγιστικές γεωτρήσεις) ωφελεί όλες τις ιδιότητες της αργίλου καθώς οδηγεί σε ταχύτερη στερεοποίηση.

Χάλικες: Βρίσκονται κυρίως κοντά στις αρκτικές περιοχές. Έχει ενδιαφέρον να επισημανθεί ότι παρότι ως υλικό έχει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, στο σύνολό της η εδαφική μάζα έχει πάρα πολύ χαμηλή πλευρική αντοχή λόγω του κυκλικού σχήματος των χαλίκων και των μεγάλων κενών (εξού και δεν μπορούν να σταθούν σε κλίσεις μεγαλύτερες των 20°). Επομένως, ένας πάσσαλος θα αναπτύξει ελάχιστη πλευρική αντοχή, αλλά και η αντίσταση αιχμής θα είναι αρκετά μικρή λόγω των μεγάλων κενών. Διευρυμένες αιχμές πασσάλου ή μεγαλύτερα μήκη θα απαιτηθούν για να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι ένα τέτοιο έδαφος είναι από τα χειρότερα για θεμελίωση με πασσάλους.

Λάσπη (seafloor ooze): Βρίσκεται στο βυθό πολύ βαθιών θαλασσών και αποτελείται κυρίως από οργανικές ύλες. Έχει σχεδόν μηδενική αντοχή και η συμπεριφορά του τείνει περισσότερο σε αυτή ενός παχύρρευστου υγρού παρά σε εδάφους. Ανιχνεύεται δύσκολα ακόμα και από ακουστικές μεθόδους, όπως υπέρηχοι και ραντάρ, και συνήθως δεν εντοπίζεται παρά κατά τη διαδικασία της έμπηξης. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί μια περίπτωση σε ένα φιόρντ της Νορβηγίας, όπου μια στρώση λάσπης ίση με 25 m, εντοπίστηκε με δειγματοληπτικό κουβά.

Υποφορτισμένα εδάφη: Υπάρχουν μέρη στον πλανήτη όπως ο Κόλπος της Γουινέας ή, κυρίως, τα ποτάμια, όπου ο ρυθμός προσχώσεως από φερτά υλικά είναι γρηγορότερος από το ρυθμό που αποτονώνεται η πίεση των πόρων, επομένως τα εδάφη αυτά είναι υποφορτισμένα (underconsolidated), γεγονός που οδηγεί σε πολύ μικρή αύξηση αντοχής σε σχέση με το βάθος.

Απλουστευτικό συμπέρασμα: Τα αμμώδη εδάφη έχουν καλή αντοχή αιχμής, επομένως συμπεριφέρονται καλά στα αξονικά φορτία, αλλά είναι δύσκολη η έμπηξή τους καθώς επίσης δεν έχουν καλή συμπεριφορά στα οριζόντια φορτία. Τα αργιλικά εδάφη δεν έχουν σημαντική αντοχή αιχμής, αλλά έχουν καλύτερη πλευρική τριβή, η διαδικασία έμπηξης πραγματοποιείται πιο εύκολα και αποκρίνονται πιο ικανοποιητικά στην εγκάρσια φόρτιση.

2.2 Επικίνδυνα φαινόμενα (Geohazards)

Ένας από τους πιο συνήθεις κινδύνους που παρουσιάζεται κατά την έμπηξη είναι η ρευστοποίηση. Η έμπηξη πασσάλου, λόγω του δυναμικού κρουστικού φορτίου της σφύρας, προκαλεί απότομη αύξηση υπερπίεσης πόρων τοπικά. Αυτή η αύξηση οδηγεί σε ρευστοποίηση, δηλαδή η άμμος λειτουργεί σαν παχύρευστο υγρό. Εάν η ρευστοποίηση πραγματοποιηθεί υπό έλεγχο μπορεί να δράσει θετικά για την έμπηξη μιας και μηδενίζεται η αντοχή του εδάφους επομένως απαιτείται μικρότερη ενέργεια και χρόνος για να περατωθεί η έμπηξη. Ωστόσο έντονη, ανεξέλεγκτη ρευστοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε βύθιση του πασσάλου πάρα πολύ βαθιά κάτω από τον πυθμένα. Πρέπει να δοθεί επίσης προσοχή στο εξής γεγονός: τα επανακυκλιζόμενα φορτία στην ανωδομή (κυρίως άνεμος και κύματα) μεταφέρονται στους πασσάλους και έτσι μπορεί επίσης να αναπτυχθεί απότομα η υπερπίεση πόρων και να οδηγηθούμε σε τοπική ρευστοποίηση και χάσιμο υλικού κυρίως κάτω από την επιφάνεια έδρασης (το πρόβλημα αυτό είναι πιο σημαντικό στους κρηπιδότειχους, caissons κτλ όπου η επιφάνεια έδρασης είναι μεγάλη, παρά στους πασσάλους).

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί και στους πιθανούς κινδύνους που οφείλονται στην τοπογραφία του βυθού, όπως κατολισθήσεις, αστοχίες πρανών, προσχώσεις από φερτά υλικά λόγω μεγάλων κλίσεων κ.α.. Υπάρχει περίπτωση η θεμελίωση να ενεργοποιήσει μια κατολίσθηση ενός κοντινού πρανούς, ή οι προσχώσεις που οφείλονται στην κλίση του εδάφους, στην πάροδο του χρόνου να επηρεάσουν τα φορτία στην κεφαλή των πασσάλων. Επομένως, κοντά σε μία χαράδρα ή μια απότομη πλαγιά πρέπει να γίνει έλεγχος ευστάθειας του πρανούς έτσι ώστε η θεμελίωση να μην ενεργοποιήσει κάποια κατολίσθηση ή να μη θαφτεί στην πάροδο του χρόνου από υλικά που ολισθαίνουν σιγά σιγά από τα ανάντη λόγω κλίσης.

Ακόμα, κίνδυνος έγκειται στα υγρά που εισχωρούνται με πίεση στις γεωτρήσεις. Ο σκοπός τους είναι να προκαλέσουν ρωγμές στο στρώμα πετρελαίου για να αντληθεί πιο εύκολα (hydraulic fracture or fracking). Αυτό μπορεί να συμβεί ωστόσο και σε πιο ψηλά στρώματα, πολύ πιο κοντά στη θεμελίωση διαλύοντας τη συνοχή του εδαφικού ιστού.

Επίσης επικίνδυνη είναι η ύπαρξη φυσικού αερίου κοντά στον πυθμένα της θάλασσας. Εάν αυτό το αέριο υπερθερμανθεί, τότε θα διασταλεί ο όγκος του και οι φυσαλίδες θα προσπαθήσουν να ταξιδέψουν προς τα πιο ψηλά στρώματα και ταυτόχρονα να ενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας μεγάλα κενά αέρος που εάν βρεθούν κοντά στους πασσάλους τότε μειώνουν δραματικά τη φέρουσα ικανότητά τους.

Άλλον έναν κίνδυνο αποτελεί η υδραυλική υποσκαφή (scour). Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι δύσκολο να προβλεφθεί και επηρεάζει σημαντικά, τόσο την αξονική όσο και την εγκάρσια δυσκαμψία του πασσάλου. Για αυτό συνήθως προβλέπεται προστασία στη ρηχή περιοχή, όπου συνδέονται οι πάσσαλοι με την ανωδομή (επίχωση ή βάση σκυροδέματος).

2.3 Είδη πλατφορμών

Ανάλογα το βάθος του πυθμένα, αλλάζει και ο τρόπος θεμελίωσης. Ο ιδανικός τρόπος προκύπτει ως ένας συνδυασμός του πόσο οικονομικός είναι αλλά και πόσο εφικτός είναι. Παρακάτω, στην Εικόνα 2.1 φαίνονται οι διάφοροι τρόποι θεμελίωσης για όλο και μεγαλύτερα βάθη πυθμένα ενώ κατόπιν επεξηγούνται ένας προς ένας.



Εικόνα 2. 1: Είδη διαφορετικών θεμελιώσεων συναρτήσει του βάθους

Σταθερή πλατφόρμα (Fixed Platform): Σε ρηχά νερά γίνεται να ενωθεί η πλατφόρμα με τους πάσσαλους θεμελίωσης μέσω χαλύβδινων ή σκυροδεματινών στοιχείων. Το βάρος όλης αυτής της ανωδομής είναι τόσο μεγάλο που η ανάγκη πασσάλων παύει να υπάρχει και η όλη κατασκευή απλά ακουμπά στον πυθμένα ισορροπώντας χάρη στο βάρος της. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι η σταθερότητα και οι μικρές μετατοπίσεις. Ωστόσο, αυτό το είδος πλατφορμών είναι οικονομικά μη εφαρμόσιμο σε μεγάλα βάθη. Έως το 2005, η βαθύτερη πλατφόρμα που θεμελιώθηκε κατ' αυτόν τον τρόπο, είναι η Bullwinkle στον Κόλπο του Μεξικό, σε βάθος 412 μέτρων.

Εύκαμπτος Πύργος (Compliant Tower): Και πάλι η πλατφόρμα συνδέεται με τη θεμελίωση αλλά αυτήν τη φορά όχι μέσω ακάμπτων μελών. Η κατασκευή είναι εύκαμπτη επιτρέποντας την απορρόφηση μεγαλύτερου οριζόντιου φορτίου, μέσω της μεγάλης

ανοχής που έχει στις οριζόντιες μετακινήσεις, κάνοντας αυτόν τον τρόπο πιο οικονομικό σε λίγο μεγαλύτερα βάθη. Έως και σήμερα, η βαθύτερη εξέδρα πετρελαίου που θεμελιώθηκε έτσι είναι η Petronius, στον Κόλπο του Μεξικό, σε βάθος 534 μέτρων.

Επιπλέοντα συστήματα (Floating production systems): Η πλατφόρμα είναι απλά αγκυρωμένη στον πυθμένα και είναι ελεύθερη να επιπλέει. Η διαδικασία παραγωγής γίνεται στον πυθμένα της θάλασσας, και το πετρέλαιο/φυσικό αέριο που αντλείται, ανεβαίνει στην πλατφόρμα μέσω αντλιών. (Δεν παρουσιάζει τίποτα ενδιαφέρον από άποψη θεμελιώσεως, αναφέρεται για λόγους πληρότητας.)

TLP (Tension Leg Platform): η εξέδρα ενώνεται με τους πασσάλους μέσω καλωδίων υπό εφελκυσμό, μιας και η εξέδρα έχει τοποθετηθεί σε βάθος μεγαλύτερο από αυτό που θα ισορροπούσε μόνη της, επομένως επικρατεί η άνωση υπέρ των φορτίων βαρύτητας. Επομένως οι πάσσαλοι είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν σε εφελκυσμό, τον οποίο αναλαμβάνουν μέσω της πλευρικής τριβής. Ωστόσο, τα οριζόντια φορτία λόγω του αέρα ή των κυμάτων και ρευμάτων προκαλούν οριζόντιες μετακινήσεις, και μάλιστα ίσως επανακυκλιζόμενες, στα καλώδια, άρα και στους πασσάλους, οδηγώντας σε μετακινήσεις κοντά στην κεφαλή τους. Αυτές οι μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες σε μια περιοχή ίση περίπου με 3 φορές τη διάμετρο του πασσάλου. Εάν αυτή η επανακυκλιζόμενη μετακίνηση είναι μεγάλη και οδηγήσει σε χαλάρωση του υλικού τότε μπορεί να χαθεί η επαφή εδάφους με το τοίχωμα του πασσάλου και να μειωθεί η πλευρική τριβή. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος να εξασφαλιστεί η σταθερότητα σε μια πλατφόρμα TLP (Tension Leg Platform) είναι μέσω αγκυρώσεων περιμετρικά της εξέδρας, με πασσάλους κανονικούς ή υποπίεσης (suction piles) που συνδέονται μέσω καλωδίων με την εξέδρα. Τα καλώδια αυτά δεν είναι απαραίτητα δεμένα στην κορυφή του πασσάλου, αντιθέτως μπορεί να είναι δεμένα ίσως και κάτω από το μέσο του μήκους του πασσάλου. Εάν είναι θαμμένα και τα καλώδια κάτω από το έδαφος, τότε συνεισφέρει και η πλευρική τριβή στην επιφάνεια των καλωδίων στην ανάληψη των οριζοντίων φορτίων. Μάλιστα, η μετακίνηση που θα προκαλέσουν τα καλώδια στον πάσσαλο θα ενεργοποιήσει παθητικές και ενεργητικές ωθήσεις πάνω σε αυτόν καθώς και έντονες ροπές κάμψεως. Επομένως είναι προτιμητέο να επιλεγεί η θέση τοποθέτησης του καλωδίου με τέτοιο τρόπο ώστε να αναπτυχθούν τέτοιες ωθήσεις γαιών που θα συνεισφέρουν όσο πιο πολύ γίνεται στην ανάληψη του εξωτερικά επιβαλλόμενου φορτίου. Με βάση το τελευταίο κριτήριο, η βέλτιστη θέση είναι μια συνάρτηση και της αντοχής του εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος. Η βαθύτερη εξέδρα πετρελαίου TLP αυτήν τη στιγμή, είναι η εξέδρα Magnolia στον Κόλπο του Μεξικό, θεμελιωμένη σε βάθος 1432 μέτρων.

Πλατφόρμα SPAR: Κάτω από την πλατφόρμα υπάρχει ένας τεράστιος κούλος κύλινδρος ο οποίος δε φτάνει έως τον πυθμένα, αλλά έως ένα βάθος περί των 100 μέτρων και εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Ο πρώτος είναι να ρυθμίζει το βάθος και το βάρος της εξέδρας, άρα και την άνωσή της, όπως γίνεται και στα TLP, καθώς η πλατφόρμα και πάλι στηρίζεται σε εφελκυσόμενα καλώδια. Ο δεύτερος λόγος είναι το σώμα του κυλίνδρου να απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας ενός πιθανού τυφώνα αλλά και των απλών κυματισμών, μειώνοντας έτσι το οριζόντιο φορτίο που έχει να παραλάβει η θεμελίωση. Πρόσφατα, η κατασκευή γίνεται πολυγωνική αντί για κυκλική, για μείωση του κόστους. Η

πλατφόρμα Perdido στον Κόλπο του Μεξικό, θεμελιωμένη σε βάθος 2450 μέτρων, είναι η βαθύτερη κατασκευή θεμελιωμένη με αυτό το σύστημα αυτήν τη στιγμή.

2.4 Ανάλυση οριζόντιας φόρτισης και φορτία σχεδιασμού

Οι οριζόντιες φορτίσεις επηρεάζουν κυρίως τις ανώτερες στρώσεις θεμελίωσης, όπου οι παραμορφώσεις είναι αρκετά πιο έντονες, καθώς βαθύτερα οι τάσεις απομειώνονται. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα επιφανειακά μέτρα εδάφους, αποτελούνται από πιο ασθενές υλικό. Από την άλλη, η οριζόντια φόρτιση επηρεάζει κυρίως αυτά τα επιφανειακά στρώματα. Επομένως, κατά τον σχεδιασμό έναντι οριζοντίων φορτίων πρέπει να λαμβάνονται αρκετά μεγάλοι συντελεστές ασφαλείας. Για να βελτιωθεί η παθητική αντίσταση ίσως απαιτείται βελτίωση-ενίσχυση του εδάφους όπως τσιμεντένεση (κάτι που ενισχύει και την πλευρική τριβή) ή ενίσχυση με γαρμπίλι.

Η απόκριση εξαρτάται και από τη δυσκαμψία του πασσάλου αλλά και από την παθητική αντίσταση του εδάφους. Η δυσκαμψία του πασσάλου εξαρτάται άμεσα από το πάχος των τοιχωμάτων (εάν ο πάσσαλος είναι κοίλος μεταλλικός), από τη διάμετρο και από την κατηγορία σκυροδέματος (εάν ο πάσσαλος είναι από σκυρόδεμα).

Συχνά χρησιμοποιούνται, πέρα από τους κύριους κατακόρυφους πασσάλους, και πάσσαλοι υπό κλίση, στην ευρύτερη περίμετρο της πλατφόρμας, οι οποίοι θα ενεργοποιηθούν με τα οριζόντια φορτία (ή καλύτερα θα ενεργοποιηθούν με την οριζόντια μετακίνηση της πλατφόρμας λόγω της εγκάρσιας φόρτισης) και η οριζόντια συνιστώσα της αντίδρασής τους θα μειώσει τη συνολική οριζόντια δύναμη που θα φτάσει στην κεφαλή των κυρίων πασσάλων στον πυθμένα, μειώνοντας την οριζόντια μετατόπιση. Οι κεκλιμένοι πάσσαλοι που έχουν στόχο την ανάληψη οριζοντίων φορτίων, πρέπει να έχουν αρκετά ήπια κλίση. Αυτή συστήνεται να μην ξεπερνά την κλίση 1:5 (O:K) για εμπηγνυόμενους πασσάλους και την κλίση 1:8 (O:K) για έγχυτους πασσάλους.

Τα φορτία σχεδιασμού μιας θαλάσσιας εξέδρας είναι τα εξής:

- Πρόσκωση πλοίου: η κινητική ενέργεια του πλοίου μεταφέρεται στην εξέδρα και από εκεί μοιράζεται στους πασσάλους. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί σε συγκεντρωμένο οριζόντιο φορτίο στο άνω άκρο του πασσάλου.
- Κυματισμοί: υπολογίζεται η δύναμη ανά μονάδα μήκους του κύματος συναρτήσει του υψομέτρου από τον πυθμένα της θάλασσας και της οριζόντιας απόστασης από την κορυφή του κύματος. Κατ'αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια κατανομή πίεσης σε υψόμετρο $\pm h/2$ από τη στάθμη ηρεμίας, όπου h είναι το ύψος κύματος.
- Ρεύματα: πρώτα κατασκευάζεται από δεδομένα που αφορούν την εκάστοτε περιοχή, η καμπύλη βάθους-ταχύτητας ρευμάτων. Κατόπιν εξάγεται η δύναμη ανά μονάδα μήκους, η οποία προκύπτει ως ανάλογη του τετραγώνου αυτής της ταχύτητας, επομένως προκύπτει και η κατανομή της δύναμης επί των πασσάλων.
- Άνεμος: ομοίως με την περίπτωση των ρευμάτων, μόνο που η κατανομή αντί να εκτείνεται από τη στάθμη ηρεμίας έως τον πυθμένα, εκτείνεται από τη στάθμη ηρεμίας έως την εξέδρα.

- Πάγος: υπολογίζεται έως συγκεντρωμένη οριζόντια δύναμη, ανάλογη της επιφάνειας πρόσπτωσης.
- Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην κεφαλή του πασσάλου λόγω του κρουστικού φορτίου της σφύρας, καθώς και στο μέρος της ανωδομής που είναι στο υψόμετρο όπου γίνεται ο παφλασμός των κυμάτων, το οποίο πρέπει να προστατευτεί έναντι διαβρώσεως.

2.5 Ομάδες πασσάλων

Συνήθως απαιτούνται πολλοί πάσσαλοι για να παραλάβουν τα ασκούμενα φορτία. Σε αυτήν την περίπτωση, επειδή το έδαφος ανάμεσα στους πασσάλους επηρεάζεται από την παρουσία των γειτονικών πασσάλων, η συνολική φέρουσα ικανότητα της ομάδας δεν ισούται με το άθροισμα της αντοχής κάθε πασσάλου. Στα αμμώδη εδάφη μπορεί να είναι μεγαλύτερη αλλά στις αργίλους είναι μικρότερη από αυτό. Σε κάθε περίπτωση εδάφους πάντως, η οριζόντια ή η κατακόρυφη μετατόπιση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του μεμονωμένου πασσάλου. Αυτή η αλληλεπίδραση πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν εάν ο λόγος της απόστασης των πασσάλων προς τη διάμετρό τους είναι μικρότερος του 8 σύμφωνα με το API. Η έμπηξη ενός πασσάλου θα μεταβάλει τις ιδιότητες του εδάφους λόγω του κρουστικού φορτίου της σφύρας, επομένως οι συνθήκες έμπηξης για τον επόμενο πάσσαλο θα αλλάζουν κάθε φορά. Επίσης, επειδή ο κάθε πάσσαλος μπορεί να έχει μια μικρή απόκλιση κατά την έμπηξη ως προς τον κατακόρυφο άξονα της σφύρας, πρέπει να δοθεί προσοχή όταν οι αποστάσεις τους είναι μικρές ώστε να μην υπάρξει πρόσκρουση.

Η εμπειρία από παλαιότερες υπεράκτιες κατασκευές και μελέτες θεμελιώσεων, έχει οδηγήσει σε αρκετούς πρακτικούς κανόνες, όπως αυτοί που αναφέρονται παρακάτω:

- Σε μια ομάδα πασσάλων, η απόσταση μεταξύ των πασσάλων πρέπει να είναι μεγαλύτερη των τριών διαμέτρων. Εάν οι πάσσαλοι είναι τοποθετημένοι πιο πυκνά, τότε η ομάδα (ειδικά εάν είναι μεγάλη) μπορεί να θεωρηθεί και να επιλυθεί ως ένας μεγάλος μεμονωμένος πάσσαλος.
- Σε μια ομάδα πασσάλων, η γεωμετρία και οι μηχανικές ιδιότητες των πασσάλων προτείνεται να είναι ίδιες. Εάν δεν είναι, τότε οι αναλυτικές λύσεις και το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο αυτές στηρίζονται, δεν μπορούν να υποστηρίξουν την πολυπλοκότητα της θεμελίωσης, άρα απαιτείται επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

2.6 Πάσσαλοι υποπίεσης

Αυτοί είναι κοίλοι κυλινδρικοί πάσσαλοι με πολύ μικρό λόγο μήκους προς διάμετρο. Αφού οδηγηθούν μέσω του βάρους τους στη θέση θεμελιώσεως, τότε με τη βοήθεια αντλίας, αντλείται το νερό στο εσωτερικό του πασσάλου, δημιουργώντας έτσι μια υποπίεση η οποία βοηθάει τον πάσσαλο να εισχωρήσει στο επιθυμητό βάθος. Πρέπει να δοθεί προσοχή στη δύναμη που θα προκληθεί από αυτήν την υποπίεση. Αυτή θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να ξεπεράσει την αντίσταση του εδάφους αλλά όχι τόσο μεγάλη ώστε να οδηγήσει είτε σε θραύση του εδάφους κάτω από τον πάσσαλο είτε σε ρευστοποίηση του εδάφους που είναι εγκλωβισμένο μέσα στον πάσσαλο. Η ρευστοποίηση

θα οδηγήσει σε μείωση της παραμένουσας αντοχής, κάτι που είναι ανεπιθύμητο γιατί μειώνει τη φέρουσα ικανότητα του θεμελίου.

Δύναμη έμπηξης (driving force) F:

$$F = \gamma' * \pi * \frac{b^2}{4} * \Delta p$$

Όπου γ' είναι το ενεργό ειδικό βάρος του συστήματος κύλινδρος-εσωτερικό έδαφος, b η διάμετρος του κυλίνδρου και Δp η διαφορά στην πίεση που προκαλεί το σύστημα άντλησης.

Αντίσταση εδάφους:

$$Q = Q_{side} + Q_{tip}$$

Όπου Q_{side} είναι η αντίσταση πλευρικής τριβής, τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό των τοιχωμάτων, και Q_{tip} η αντίσταση αιχμής.

Ενισχυτικοί δακτύλιοι (Ring stiffeners): Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τρόποι ώστε να γίνει πιο εύκολη η εισχώρηση του πασσάλου. Ένας από αυτούς είναι να δημιουργηθούν κάθετες στα τοιχώματα προεξοχές στο εσωτερικό του κυλίνδρου (ring stiffeners). Αυτές ναι μεν συναντούν αντίσταση αιχμής από κάτω τους, παρασύρουν δε το έδαφος από το τοίχωμα από πάνω τους μειώνοντας έτσι αρκετά την πλευρική τριβή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η εισχώρηση ενός τέτοιου πασσάλου οδηγεί σε υπερπίεση πόρων ακριβώς κάτω από τον πάσσαλο. Ως αποτέλεσμα, με την πάροδο του χρόνου το έδαφος θα στερεοποιηθεί, έστω σε μικρό βαθμό, και θα κερδίσει σε αντοχή.

Εάν θεωρήσουμε V, H, την αξονική και την οριζόντια συντιστώσα της δύναμης που εφαρμόζεται στη θέση όπου ο πάσσαλος είναι δεμένος με το καλώδιο, και ο δείκτης max συμβολίζει την τιμή που απαιτείται για οποιοδήποτε από αυτά τα δύο φορτία να οδηγήσει τον πάσσαλο σε αστοχία σε περίπτωση που δε δρα μόνο του, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξής σχέση ως έλεγχος ευστάθειας:

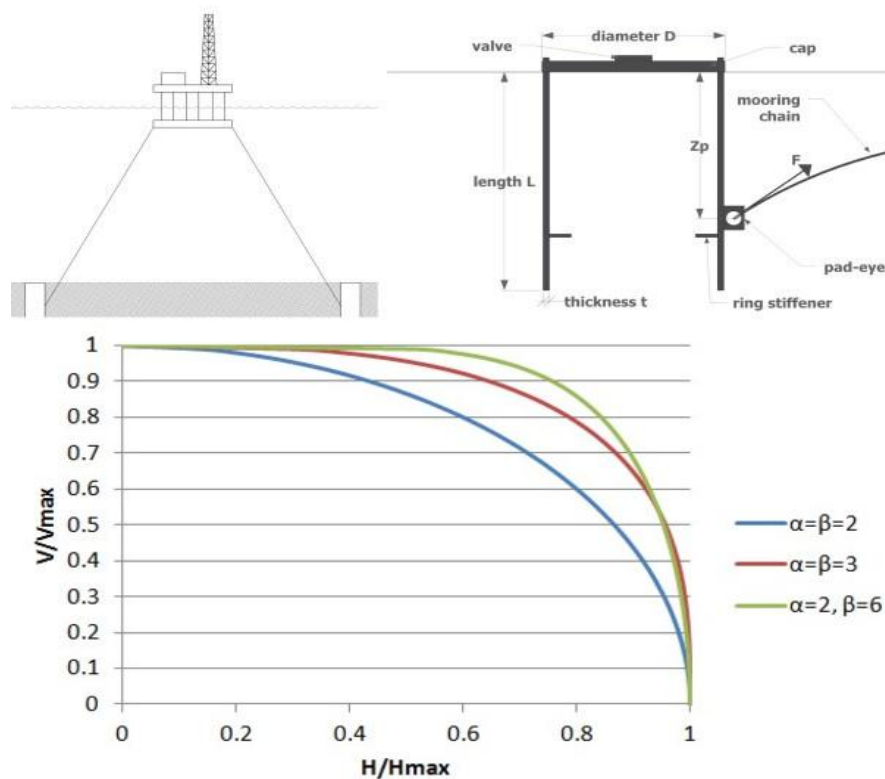
$$\left(\frac{V}{V_{max}}\right)^a + \left(\frac{H}{H_{max}}\right)^b = 1$$

Το διάγραμμα αλληλεπίδρασης που προκύπτει από την παραπάνω σχέση, καθώς και η διάταξη ενός suction pile φαίνεται στην Εικόνα 2.2.

Οι τιμές των παραμέτρων a & b μπορούν να πάρουν πολλές τιμές, ίσως για καλύτερη προσέγγιση να πρέπει να προσαρμόζονται στην εκάστοτε περίπτωση, ωστόσο πειράματα έχουν δείξει πως οι τιμές 2 ή 3 καλύπτουν ικανοποιητικά τις περισσότερες περιπτώσεις, καθώς και ότι συνήθως $H_{max} \sim V_{max} * 0.235$.

2.7 Αιολικά πάρκα

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα θαλάσσια αιολικά πάρκα. Συνήθως αυτά δεν είναι τοποθετημένα σε τόσο βαθιές θάλασσες όπως οι εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου, επομένως σπάνια χρησιμοποιείται η μέθοδος με καλώδια υπό εφέλκυσμό (TLPs). Χρησιμοποιούνται εμπηγνύομενοι πάσσαλοι, ή άλλες θεμελιώσεις, επιφανειακές ή βαρύτητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτήν τη στιγμή στην Ευρώπη είναι τοποθετημένη στη θάλασσα συνολική ισχύς 1474 MW ενώ σκοπεύεται μέχρι το 2020 η συνολική ισχύς από αιολικά πάρκα στη θάλασσα να φτάσει τα 37444 MW, ισχύς που αντιστοιχεί σε ενέργεια κατά τι μεγαλύτερη από αυτή που χρειάζεται η Ελλάδα ετησίως, και που είναι σε θέση να αντισταθμίσει εκπομπές διοξειδίου άνθρακα από θερμοηλεκτρικά εργοστάσια ίσες με 100 εκατομμύρια τόνους.



Εικόνα 2. 2: Γεωμετρική διάταξη πασσάλου υποπίεσης και διάγραμμα αλληλεπίδρασης V-H

Στην περίπτωση θεμελίωσης με πάσσαλο, το έδαφος θα πρέπει να υποστεί μια δέουσα προετοιμασία αρχικά. Θα πρέπει να εξομαλυνθεί και ίσως να διαστρωθεί με χάλικες ώστε να προστετευθεί έναντι υποσκαφής ο πάσσαλος αλλά και να μειωθούν οι οριζόντιες μετατοπίσεις.

Μία ανεμογεννήτρια ισχύος 3.5 MW, μπορεί να μεταφέρει στη θεμελίωση φορτίο ανωδομής ίσο με 6 MN ή μεγαλύτερο. Τα συνηθισμένα φορτία ανέμου για μια ανεμογεννήτρια ύψους 80 μέτρων μπορεί να είναι ίσα με 1–2 MN ενώ τα φορτία λόγω κυμάτων και ρευμάτων είναι περίπου ίσα με 3 MN σε απόσταση περίπου 20 μέτρων πάνω από τον πυθμένα. Επομένως μπορεί να υπερिσχύουν τα οριζόντια φορτία, άρα να απαιτείται ειδική μέριμνα όπως ενίσχυση της ανώτερης εδαφικής στρώσης με χάλικες ή

σκυρόδεμα ή περιμετρική αγκύρωση της ανεμογεννήτριας με καλώδια. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι πρέπει να δοθεί μεγάλη σημασία στη μορφολογία του πυθμένα, ακόμα και μια μικρή κλίση ίση με 1° μπορεί να οδηγήσει σε υψομετρική διαφορά 17 μέτρων σε ένα πάρκο έκτασης ενός χιλιομέτρου, έχοντας ως αποτέλεσμα μεγάλη διαφορά στις συνθήκες θεμελίωσης.

Συνήθως το κόστος ενός οποιουδήποτε υπεράκτιου έργου, είτε αυτό είναι πλατφόρμα πετρελαίου είτε αιολικό πάρκο, επηρεάζεται πολύ από το γεωτεχνικό σκέλος κατασκευής, καθώς αυτό ισούται περίπου με το 30% του ολικού κόστους, ενώ το κόστος θεμελιώσεως και μόνο, συνήθως ισούται με το 20% του ολικού κόστους.

2.8 Διαδικασία έμπηξης πασσάλου

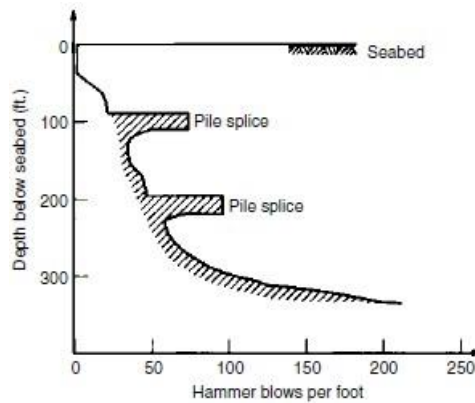
Καθώς η σφύρα χτυπά την κεφαλή του πασσάλου, η προσδιδόμενη ενέργεια οδεύει προς το υπόλοιπο μήκος του πασσάλου με τη μορφή κύματος. Το κύμα ταξιδεύει με την ταχύτητα του ήχου στον χάλυβα, δηλαδή με ταχύτητα 343 m/s. Καθώς η ενέργεια κατεβαίνει, ταυτόχρονα ένα μέρος της περνάει στον εδαφικό ιστό όπου διαχέεται με διατμητικά κύματα, επομένως η ενέργεια που μένει στον πάσσαλο όλο και μειώνεται. Μικρή ανάκλαση της ενέργειας υπάρχει και όταν το κύμα φτάσει στο τέλος του πασσάλου αλλά και από τον εδαφικό ιστό. Η χρήση κατάλληλων μετρητών ανά συγκεκριμένες αποστάσεις, επιτρέπει την εξαγωγή σημαντικών αποτελεσμάτων για τη φύση του εδάφους (αλλαγές στις στρώσεις κλπ) που μπορούν να αποτελέσουν οδηγό για στιγμιαίες αποφάσεις. Η επίλυση της διαδικασίας της έμπηξης ωστόσο δε γίνεται μέσω της εξίσωσης του κύματος αλλά με αριθμητικές μεθόδους, επιμερίζοντας τον πάσσαλο σε πολύ μικρά τμήματα με την αντίστοιχη στιβαρότητα, βάρος και κατακόρυφη αντίδραση εδάφους. Ακόμη, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η εκκεντρότητα του κέντρου βάρους της σφύρας με τον άξονα του πασσάλου. Όσο μικρότερη η εκκεντρότητα, τόσο μεγαλύτερη η απόδοση της διαδικασίας.

Εύκολη έμπηξη αντιστοιχεί σε 30 χτύπους ανά μέτρο περίπου, δύσκολη έμπηξη σε 150 χτύπους ανά μέτρο, ενώ άρνηση στην έμπηξη το έδαφος παρουσιάζει για 900 χτύπους ανά μέτρο. Άρνηση στην έμπηξη ενδέχεται να σημαίνει αποτυχία της θεμελίωσης ή ανάγκη διαφορετικού τρόπου θεμελίωσης, όπως γεώτρηση ή χρήση μεγαλύτερης σφύρας. Η έμπηξη πρέπει να γίνεται όσο πιο γρήγορα και αδιάκοπτα γίνεται. Σε περίπτωση διακοπής για συναρμογή νέου τμήματος πασσάλου (pile splice), αναγκαστικά οι χτύποι που απαιτούνται ανά τρέχον μέτρο αυξάνονται (Εικόνα 2.3). Ο κώδικας API ορίζει ως άρνηση περαιτέρω έμπηξης (pile driving refusal) τις παρακάτω περιπτώσεις:

- υπέρβαση 1000 χτύπων ανά μέτρο για 1.5 συνεχόμενο μέτρο ή
- υπέρβαση 800 χτύπων ανά 0.3 μέτρα.

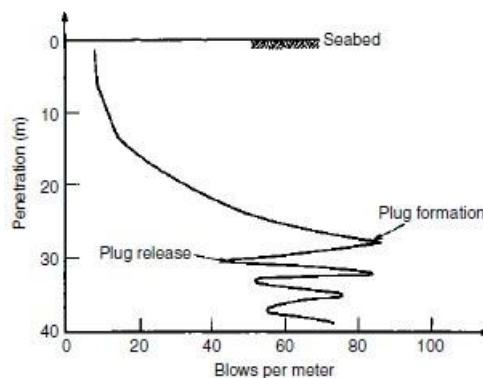
Αυτά τα όρια ισχύουν εάν το βάρος του πασσάλου είναι το πολύ 4 φορές μεγαλύτερο από αυτό της σφύρας. Διαφορετικά, τα όρια αυξάνονται ανάλογα δίχως να ξεπεράσουν το όριο των 800 χτύπων ανά 0.15 μέτρα. Όσον αφορά στο πάχος του πασσάλου (εάν αυτός είναι κοίλος μεταλλικός), τότε αυτό πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλο έτσι ώστε να μην υπάρξει

κίνδυνος τοπικού λυγισμού κατά τη διαδικασία έμπηξης. Υπάρχουν αρκετές οδηγίες σύμφωνα με το ελάχιστο πάχος. Σύμφωνα με τον Ben C. Gerwick, ο λόγος της διαμέτρου προς το πάχος πρέπει να είναι μικρότερος του 60, ώστε να αποφευχθεί ο τοπικός λυγισμός, αλλιώς χρειάζεται ειδική μελέτη. Επίσης αναφέρει, ότι εάν οι χτύποι της σφύρας ξεπερνούν τους 800 ανά μέτρο, τότε το ελάχιστο πάχος σε χιλιοστά ισούται με $(6.25+b_{(mm)})/1000$. Στην Εικόνα 2.5 φαίνεται η οδηγία του API, σύμφωνα με την οποία, αναλόγως την εξωτερική διάμετρο του πασσάλου σε mm και την ενέργεια της σφύρας σε KJ, προκύπτει το ελάχιστο πάχος τοιχώματος του πασσάλου, για κοίλους μεταλλικούς πασσάλους.



Εικόνα 2. 3: Τυπικό παράδειγμα αύξησης χτύπων σφύρας κατά τη συναρμογή νέων τμημάτων πασσάλου

Γεώτρηση και απομάκρυνση του εδαφικού υλικού που είναι στο εσωτερικό του πασσάλου επιταχύνει τη διαδικασία έμπηξης (soil plug release), όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4. Μάλιστα, αφού η διαδικασία τελειώσει, το κενό μπορεί να συμπληρωθεί με σκυρόδεμα ώστε να αυξηθεί το βάρος του πασσάλου, το οποίο βοηθάει όταν αυτός λειτουργεί υπό εφελκυσμό. Ωστόσο καλό είναι αυτό το σκυρόδεμα να έχει χαμηλό ποσοστό τσιμέντου έναντι σκύρων, ώστε να δημιουργηθούν όσο γίνεται μικρότερες θερμοκρασιακές μεταβολές κατά την πήξη του, οι οποίες θα δημιουργήσουν ρωγμές. Η γέμιση με σκυρόδεμα επίσης αυξάνει τη δυσκαμψία του πασσάλου, πέρα από τη φέρουσα ικανότητα του, βελτιώνοντας τη συμπεριφορά του στην εγκάρσια φόρτιση ή στον λυγισμό λόγω αξονικού θλιπτικού φορτίου (εάν υπόκειται και σε θλίψη).



Εικόνα 2. 4 Μείωση των χτύπων σφύρας λόγω αφαίρεσης του υλικού στο εσωτερικό του πασσάλου

Pile Outside Diameter mm	Guideline Wall Thickness, mm					
	Hammer Size, KJ					
	36	60	120	180	300	500
610	13	13	22	—	—	—
762	14	14	18	—	—	—
914	16	16	16	22	—	—
1067	18	18	18	19	32	—
1219	19	19	19	19	29	44
1524	22	22	22	22	22	35
1829	—	—	25	25	25	29
2134	—	—	—	29	29	29
2438	—	—	—	32	32	32
2743	—	—	—	—	35	35
3048	—	—	—	—	38	38

Εικόνα 2. 5: Οδηγία API που συσχετίζει την εξωτερική διάμετρο του πασσάλου και την ενέργεια της σφύρας με το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος πασσάλου

Γεώτρηση στο μέτωπο εμπήξεως ομοίως επιταχύνει τη διαδικασία. Η διάμετρος αυτής της γεώτρησης πρέπει να είναι μικρότερη από αυτήν του πασσάλου (περίπου το 50%-75%) ώστε να διατηρηθεί κατά το δυνατόν αδιατάρακτη η πλευρική τριβή και η συνοχή του εδάφους.

Αποδείχθηκε ότι εάν εφαρμοστεί συνεχόμενη πίεση κατά τη διαδικασία έμπηξης αντί για χτύπους σφύρας (continuous driving) η συνολική εδαφική αντίσταση μειώνεται δραματικά. Αυτό συμβαίνει επειδή το έδαφος χάνει προσωρινά τη συνοχή του γύρω από το σώμα του πασσάλου.

Επίσης αποδείχθηκε ότι όσος περισσότερος χρόνος περάσει από τη στιγμή που εμπήχτηκε έως τη στιγμή που θα φορτιστεί, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της μέγιστης αντοχής του θα αποκτήσει. Επιπλέον, όσο μικρότερος σε διάμετρο ο πάσσαλος, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος αυτός, σύμφωνα με τον Vesic (1977).

2.10 Βελτίωση Εδάφους Θεμελιώσεως

- Εισπίεση ενέματος (Grouting): το υλικό ενέματος πρέπει να αυξάνει την αντοχή του εδάφους και να μειώνει το πορώδες του. Πρέπει να είναι σε υγρή μορφή για άφθονη διοχέτευσή του στον εδαφικό ιστό και με μικρό ιξώδες ώστε να αντλείται εύκολα και να διοχετεύεται εύκολα μέσω του πορώδους του εδάφους. Χρησιμοποιείται κυρίως σκυρόδεμα ή άσφαλτος για εδάφη με μεγαλύτερο πορώδες.
- Δόνηση εδάφους με έμπηξη πασσάλων ή με πασσάλους που με τη βοήθεια μηχανολογικού εξοπλισμού δονούνται αφού εμπηχτούν. Η δόνηση έχει εφαρμογή στα μη συνεκτικά εδάφη.
- Ηλεκτροσόμωση: εάν διοχετευτεί ηλεκτρικό ρεύμα μέσω δύο ηλεκτροδίων στο έδαφος, τότε το νερό θα μετακινηθεί από το θετικό (άνωδος) στο αρνητικό ηλεκτρόδιο

(κάθοδος). Εάν η κάθοδος τοποθετηθεί σε μικρή γεώτρηση, τότε το νερό μπορεί να αντληθεί. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορεί να μειωθεί αρκετά η υγρασία του εδάφους αυξάνοντας έτσι την αντοχή του και επιταχύνοντας το φαινόμενο της στερεοποίησης. Η λύση είναι προσωρινή, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επίσπευση καθίζησης (πχ σε επίχωμα που προηγείται έργου οδοποιίας), για εκσκαφή σηράγγων ή πρανών κ.α.. Μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι η έμπηξη πασσάλων. Εάν η κάθοδος τοποθετηθεί κοντά στον πάσσαλο, τότε το νερό που θα σωρεύεται σε αυτήν την περιοχή θα δρα ως «λιπαντικό» για τον πάσσαλο, βοηθώντας τον να καθιζάνει πολύ πιο εύκολα με κάθε χτύπο της σφύρας.

2.11 Εκτιμήσεις γεωτεχνικών παραμέτρων

Στην παρούσα εργασία, θα πραγματοποιηθούν αναλύσεις σε τριών ειδών εδάφη, μαλακή άργιλο, στιφρή άργιλο και άμμο. Για τις περισσότερες μεθοδολογίες καμπυλών p-y, είναι απαραίτητες κάποιες γεωτεχνικές παράμετροι, όπως το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους, E, ή η παραμόρφωση στην οποία αντιστοιχεί το 50% της οριακής αντίστασης, ε_{50} . Αυτές οι παράμετροι αλλάζουν ανάλογα το είδος εδάφους, επομένως στον Πίνακα 2.1 φαίνεται πώς κατηγοριοποιούνται τα αργιλικά εδάφη συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, και πώς οι άμμοι, συναρτήσει της γωνίας τριβής τους, ενώ γίνεται αντιστοίχιση των E και ε_{50} σε κάθε είδος εδάφους.

Πίνακας 2. 1: Κατάταξη εδάφους βάσει των μηχανικών του χαρακτηριστικών			
Κριτήριο	Είδος εδάφους	μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	Παραμόρφωση ε_{50}
$0 < c_u \text{ (kPa)} < 50$	Μαλακή Άργιλος	5	2%
$50 < c_u \text{ (kPa)} < 100$	Μέτρια Άργιλος	20	1%
$100 < c_u \text{ (kPa)} < 200$	Στιφρή Άργιλος	40	0.5%
$200 < c_u \text{ (kPa)}$	Πολύ Στιφρή Άργιλος	75	0.2%
$0 < \varphi(^{\circ}) < 30$	Χαλαρή Άμμος	5	2%
$30 < \varphi(^{\circ}) < 36$	Μέτρια Άμμος	20	1%
$36 < \varphi(^{\circ})$	Πυκνή Άμμος	40	0.5%

Το μέτρο ελαστικότητας, μπορεί να εκτιμηθεί συντηρητικά από τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε κορεσμένα δοκίμια. Ωστόσο, λόγω φαινομένων κλίμακας, ενδέχεται να υπάρχει μεγάλη διαφορά στο μέτρο ελαστικότητας που εξήχθησε από τις εργαστηριακές δοκιμές συγκριτικά με το πραγματικό. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται χρήση κατάλληλων διορθωτικών συντελεστών, οι οποίοι ανάγουν το πειραματικό μέτρο ελαστικότητας στο πραγματικό, συναρτήσει της γεωμετρικής κλίμακας του πειράματος. Ακόμα, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι η έμπηξη σε χαλαρές άμμους μπορεί να αυξήσει το μέτρο ελαστικότητας, ενώ η έμπηξη σε πυκνές άμμους να το μειώσει. Άλλοι τρόποι να εκτιμηθεί το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους, είναι ως συνάρτηση της αστράγγιστης διατμητικής του αντοχής c_u , των χτύπων N της δοκιμής SPT, ή της αντίστασης αιχμής q_c της δοκιμής CPT, ως εξής:

- $E = 100 \sim 400 * c_u$
- $E(\text{kPa}) = 600 \sim 5000 * N \text{ (SPT)}$
- $E = 2 * q_c \text{ (CPT)}$

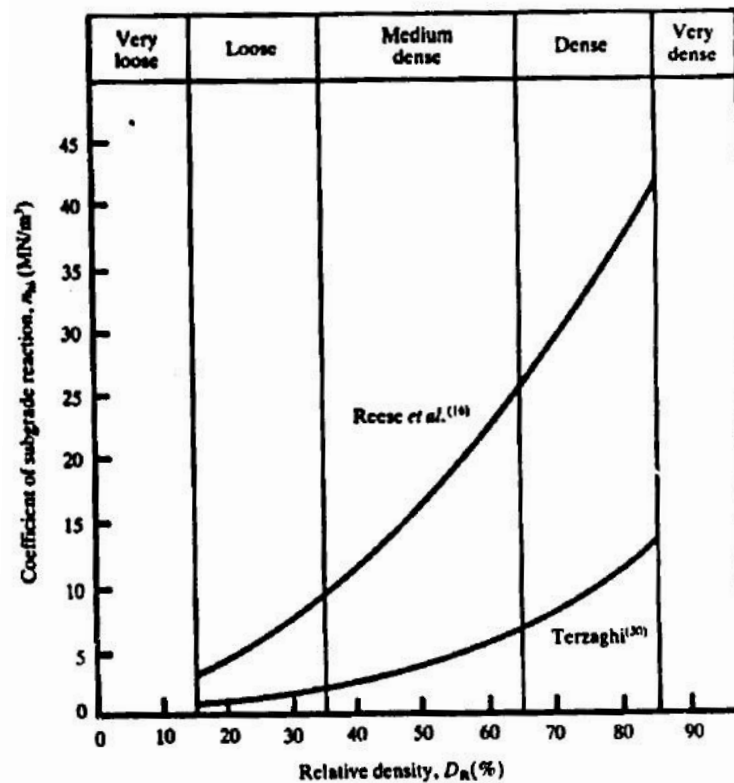
Όσον αφορά στη δυσκαμψία της αργίλου, ο Terzaghi έχει προτείνει ότι:

- $K = 67 * c_u$

Με βάση την παραπάνω εμπειρική σχέση που συνδέει το μέτρο ελαστικότητας και την αστράγγιστη διατμητική αντοχή, προκύπτουν τα εύρη στα οποία κυμαίνεται το μέτρο ελαστικότητας ανάλογα την κατηγορία του εδάφους, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.2. Ακόμα, στον Πίνακα 2.3 αναγράφονται οι τιμές για τη δυσκαμψία του εδάφους K (kN/m^2) για αργίλους, συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, ομοίως όπως πηγάζουν από την παραπάνω σχέση. Τέλος, στην Εικόνα 2.6 φαίνεται, σε μορφή διαγράμματος, η δυσκαμψία K (kN/m^3) συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας της άμμου.

Πίνακας 2. 2: Μέτρο Ελαστικότητας και λόγος Poisson, συναρτήσει του είδους του εδάφους				
είδος εδάφους	μέτρο ελαστικότητας E (kPa)		λόγος Poisson ν	
χαλαρή άμμος	E=5000~20000		$\nu=0.3\sim0.4$	
μέτριας πυκνότητας άμμος	E=16000~20000		$\nu=0.2\sim0.35$	
πυκνή άμμος	E=30000~100000		$\nu=0.15\sim0.3$	
μαλακή άργιλος	E=2000~6000	E=1000~4000	$\nu=0.5$ για αστράγγιστες συνθήκες (αριστερά)	$\nu=0.1\sim0.3$ για στραγγισμένες συνθήκες (δεξιά)
μέτρια άργιλος	E=5000~12000	E=3000~8000		
στιφρή άργιλος	E=10000~20000	E=5000~15000		

Πίνακας 2. 3: Δυσκαμψία αργίλου συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής	
αστράγγιστη διατμητική αντοχή, c_u (kPa)	Δυσκαμψία K (kN/m^2)
50-100	K=3000~6000
100-200	K=6000~12000
>200	K>12000



Εικόνα 2. 6: Τιμή δυσκαμψίας K , συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας της άμμου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Βιβλιογραφική ανασκόπηση καμπυλών

p-y

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για να υπολογιστεί η απόκριση πασσάλων σε οριζόντια φόρτιση. Η κάθε μέθοδος έχει το δικό της πεδίο εφαρμογής, τις δικές της παραδοχές και σφάλματα. Πριν την ανάπτυξη των πεπερασμένων στοιχείων, το σύστημα πασσάλου και εδάφους λυνόταν με απλές μεθόδους όπως του πλαισίου, του ελαστικού μέσου ή με χρήση καμπυλών p-y. Οι πρώτες δύο μέθοδοι στηρίζονται στη γραμμικότητα του εδάφους, μάλιστα η μέθοδος του πλαισίου δεν είναι αποτελεσματική για παραδείγματα οριζόντιας φόρτισης. Η χρήση μη γραμμικών καμπυλών p-y ήταν η πρώτη μέθοδος που έλαβε υπ' όψιν της τη μη-γραμμικότητα του εδάφους και προσέγγισε ρεαλιστικά και αποτελεσματικά την απόκριση του πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση. Οι ιδιαιτερότητες και οι λεπτομέρειες αυτών των μεθόδων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1:

Πίνακας 3. 1: Μεθοδολογίες υπολογισμού απόκρισης πασσάλου υπό εγκάρσια φόρτιση			
Μέθοδος	Περιορισμοί	Εφαρμογή	Αποτελέσματα
Πλαίσιο	Μη ρεαλιστικό μοντέλο, δε λαμβάνει υπ' όψιν το έδαφος	Σε πασσάλους αιχμής με μικρό οριζόντιο φορτίο (<10% του κατακορύφου φορτίου)	Αξονική δύναμη πασσάλου
Καμπύλες p-y	Ιδανική μέθοδος για πασσάλους, αλλά όχι για ομάδες πασσάλων με $s/b < 8$ γιατί δε λογαριάζει την αλληλεπίδραση των πασσάλων	Σε οριζόντια φόρτιση πασσάλων ή αραιής ομάδας πασσάλων. Κατάλληλο για στατική και για επανακυκλιζόμενη φόρτιση	Παραμόρφωση, κλίση, ροπή και τέμνουσα δύναμη του πασσάλου σε οποιαδήποτε στάθμη
Ελαστικό συνεχές μέσο	Κατάλληλο για την ελαστική περιοχή (δεν πλαστικοποιείται ο πάσσαλος) καθώς επίσης και για μέτρο ελαστικότητας εδάφους γραμμικά αυξανόμενο ή σταθερό μόνο	Σε πασσάλους που σχεδιάζονται ελαστικά, χωρίς να φτάσουν στη διαρροή τους	Παραμόρφωση, κλίση, ροπή, διατμητική και αξονική δύναμη του πασσάλου σε οποιαδήποτε στάθμη, καθώς και μητρώο στιβαρότητας, ευκαμψίας του πασσάλου

Από αυτές τις μεθόδους, στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθούν μόνο οι καμπύλες p-y. Παρακάτω, στον Πίνακα 3.2, κατηγοριοποιούνται όλες οι μεθοδολογίες p-y που χρησιμοποιήθηκαν, αναλόγως το είδος εδάφους.

3.1 Καμπύλες p-y για αργιλικά εδάφη

3.1.1 Matlock (1970) – Μαλακή άργιλος

Ο Matlock έκανε πειράματα στις λίμνες Austin και Sabine, στο Texas, όπου το έδαφος ήταν κυρίως ιλύς και άργιλος χαμηλής αντοχής.

Πίνακας 3. 2: Περιγραφή μεθοδολογιών p-y που θα αναλυθούν		
A/A	καμπύλη p-y	είδος εδάφους
1	Matlock (1970)	μαλακή άργιλος
2	Jeanjean (2009)	μαλακή άργιλος
3	Lehane (2014)	μαλακή άργιλος
4	NGI-11 (2014)	μαλακή άργιλος
5	Sullivan (1980)	άργιλος
6	O'Neill & Gazioglu (1984)	άργιλος
7	Broms & Choa (1998)	άργιλος
8	Jeong (2009)	άργιλος
9	Γεωργιάδης (2010)	άργιλος
10	Gill (1970)	στιφρή άργιλος
11	Welch & Reese (1972)	στιφρή άργιλος
12	Reese (1975)	στιφρή άργιλος
13	Dunnivant & O'Neill (1989)	στιφρή άργιλος
14	Dewaiakar (2009)	στιφρή άργιλος
15	Gill (1970)	άμμος
16	Reese (1974)	άμμος
17	Murchison & O'Neill (1984)	άμμος
18	Γεωργιάδης (1992)	άμμος
19	Novello (1999)	άμμος
20	API (2007)	άμμος
21	Sryasantana & Lehane (2014)	άμμος

Στη λίμνη Austin χρησιμοποίησε κοίλους μεταλλικούς πασσάλους, μήκους 12.8 m, διαμέτρου 319 mm, πάχους τοιχωμάτων ίσο με 12.7 mm και δυσκαμψίας $E_p I_p = 31280 \text{ kNm}^2$. Η άργιλος της περιοχής είναι ελαφρώς υπερστερεοποιημένη, με σχεδόν σταθερή αστράγγιστη διατμητική αντοχή κατά βάθος, ίση με $c_u = 38.3 \text{ kPa}$. Η παραμόρφωση όπου η αντίσταση είναι το 50% της μέγιστης αντοχής εκτιμήθηκε ίση με $\varepsilon_{50} = 0.012$ ενώ το ενεργό ειδικό βάρος είναι ίσο με $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$. Στον Πίνακα 3.3 φαίνεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή κατά βάθος.

Πίνακας 3. 3: Αστράγγιστη διατμητική αντοχή συναρτήσει του βάθους, Λίμνη Austin	
βάθος (m)	c_u (kPa)
0	30.2
1.14	32.2
1.14	42.3
3.39	17.5
3.70	30.1
4.30	23.4
5.69	51.8
7.25	29.8
9.47	32.6
15.0	32.6

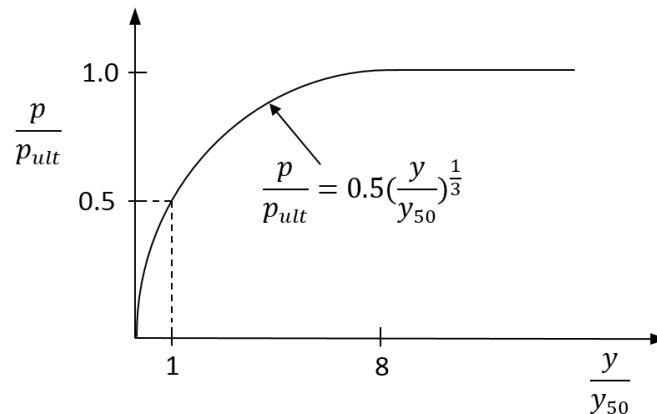
Στη λίμνη Sabine, το έδαφος ήταν και πάλι ελαφρώς υπερστερεοποιημένη άργιλος, με αστράγγιστη διατμητική αντοχή περίπου ίση με $c_u = 14.4 \text{ kN/m}^2$, δείκτη παραμόρφωσης $\varepsilon_{50} = 0.02$ και ενεργό ειδικό βάρος ίσο με $\gamma' = 5.5 \text{ kN/m}^3$, ενώ χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος πάσσαλος.

Η μέγιστη αντοχή της καμπύλης p-y, εξαρτάται άμεσα από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή, τη διάμετρο, το ενεργό ειδικό βάρος και το βάθος. Επίσης, η μέθοδος περιέχει και

έναν συντελεστή J, ο οποίος παίρνει τιμές από 0.2 έως 0.5 από μια σφιχρή έως μια μαλακή άργιλο αντίστοιχα. Στην παρούσα εργασία και επειδή η συγκεκριμένη μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί μόνο για μαλακές αργίλους, υιοθετείται τιμή για το J ίση με 0,5. Από εκεί και πέρα, η μορφή της καμπύλης (σημείο διαρροής) εξαρτάται από την παραμόρφωση ϵ_{50} του εδάφους.

Η καμπύλη του Matlock θεωρείται γενικά ότι υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια την επίδραση της διαμέτρου στην καμπύλη p-y ωστόσο, υποεκτιμά την μέγιστη αντίσταση p_u .

Η μορφή της καμπύλης φαίνεται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3. 1: Σκαρίφημα καμπύλης p-y για μαλακή άργιλο, Matlock (1970)

Πίνακας 3. 4: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Matlock (1970) για μαλακή άργιλο		
1 ^ο	$p_u = \min[p_1, p_2]$ $p_1 = 9 * c_u * b$ $p_2 = c_u * b * (3 + \gamma' * z/c_u + J * z/b)$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
2 ^ο	$y_{50} = 2.5 * \epsilon_{50} * b$	Εύρεση μετακίνησης, στην οποία αντιστοιχεί το 50% της παραμόρφωσης αστοχίας
3 ^ο	$p = p_u * 0.5 * (y/y_{50})^{1/3} \quad \text{για } y \leq 8 * y_{50}$ $p = p_u \quad \text{για } y \geq 8 * y_{50}$	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.1.2 Jeanjean (2009) – Μαλακή άργιλος

Ο Jeanjean, θεωρώντας πως η μέθοδος του Matlock υποεκτιμά την αντοχή του πασσάλου σε εγκάρσια φόρτιση, μόρφωσε νέα καμπύλη p-y. Αυτή εξήχθησε μέσω πειραμάτων σε φυγοκεντρική και αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία (ABAQUS). Το είδος εδάφους που χρησιμοποιήθηκε ήταν καολινίτης, το οποίο είναι κοντά στην άργιλο του Κόλπου του Μεξικό. Οι ιδιότητες του καολινίτη παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.2.

Property	Value
Material	Alwhite (Speswhite) kaolin
G _s (specific gravity)	2.64
λ (virgin slope in v-ln p space)	0.25
κ (reload slope in v- ln p' space)	0.05
v (on λ-line @ p' = 1 kPa)	3.58
K _o (normally consolidated)	0.64
c _v (overconsolidated kaolin)	~1 mm ² /sec
Strength ratio, c _u /σ _v ' = α (OCR) ^β	α=0.19, β=0.67
Liquid limit (LL)	58%
Plastic limit (PL)	32%
Plasticity index (PI)	26
M (critical state friction parameter)	0.8

Εικόνα 3. 2: Σύνοψη ιδιοτήτων του καολινίτη που χρησιμοποίησε ο Jeanjean στα πειράματά του (2009)

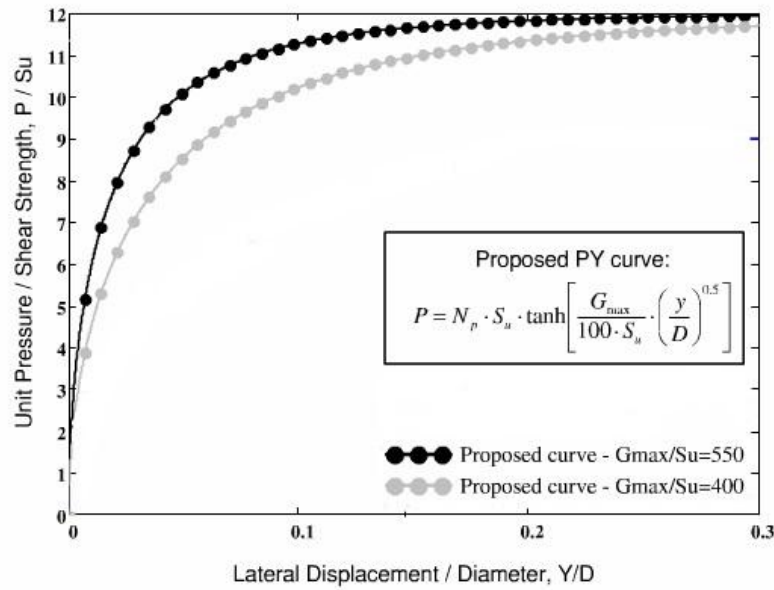
Στον φυγοκεντρητή χρησιμοποιήθηκε πάσσαλος μήκους 421 χιλιοστών, διαμέτρου 19.05 χιλιοστών και πάχους τοιχώματος ίσο με 1.22 χιλιοστά. Η επιτάχυνση του φυγοκεντρητή ήταν ίση με 48 g προσομοιάζοντας πάσσαλου διαμέτρου 0.91 m και πάχους τοιχώματος ίσο με 50.8 χιλιοστά. Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται η πειραματική διάταξη του φυγοκεντρητή.



Εικόνα 3. 3: Πείραμα Jeanjean (2009): Όψη της γεώτρησης, (αριστερά) και πειραματική διάταξη φυγοκεντρητή (δεξιά)

Η καμπύλη p-y που προέκυψε, έχει υπερβολική μορφή, σε αντίθεση με αυτήν του Matlock, και είναι εξαρτώμενη από το μέτρο διατμήσεως G. Το τελικό αποτέλεσμα, είναι μια καμπύλη με πιο απότομη αρχική κλίση (λιγότερο πλαστική συμπεριφορά απόκρισης) και αρκετά μεγαλύτερη μέγιστη αντίσταση p_u (p_u>9*c_u όπως είχε προτείνει ο Matlock).

Η μορφή της καμπύλης φαίνεται στην Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3. 4 Σκαρίφημα καμπύλης p-y για μαλακή άργιλο, Jeanjean (2009)

Πίνακας 3. 5: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Jeanjean (2007) για μαλακή άργιλο

1 ^ο	$G_s = E_s / (2 * (1 + \nu))$	Εύρεση μέτρου διατμήσεως (συναρτήσει μέτρου ελαστικότητας και λόγου Poisson)
2 ^ο	$\lambda = c_{u,z=0} / (D_{c_u} * b)$	Εξαγωγή συντελεστή λ (ο συντελεστής βρίσκεται σε κάθε βάθος, και D_{c_u} είναι ο ρυθμός αύξησης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στο βάθος αυτό)
3 ^ο	$\varepsilon = \min [0.55, 0.25 + 0.05 * \lambda]$	Εξαγωγή συντελεστή ε
4 ^ο	$N_p = b * (12 - 4 * e^{-z * \varepsilon / b})$ $p_u = c_u * N_p$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
5 ^ο	$p = p_u * \tanh \left(\frac{G_s}{100 * c_u} * \left(\frac{y}{b} \right)^{0.5} \right)$	Μόρφωση καμπύλης p-y

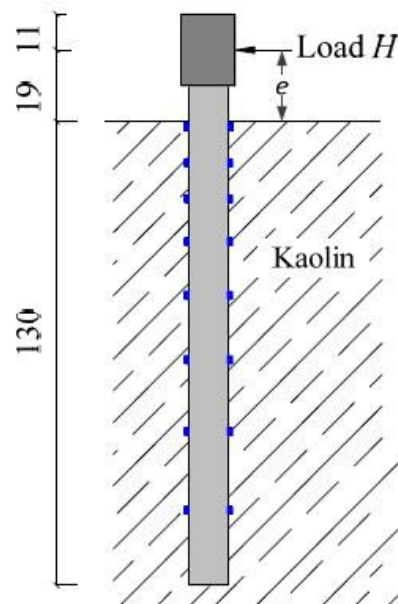
3.1.3 Lehane (2014) – Μαλακή άργιλος

Ο Lehane έκανε πειράματα σε φυγοκεντρική στο πανεπιστήμιο της Δυτικής Αυστραλίας (U.W.A.). Μέσω αυτών κατάφερε να εξάγει μια καμπύλη p-y η οποία περιγράφει τη συμπεριφορά μαλακής αργίλου μέσω της αντίστασης αιχμής της δοκιμής CPT (q_c). Η μέθοδος έχει εφαρμογή για κανονικά στερεοποιημένη και ελαφρώς στερεοποιημένη μαλακή άργιλο.

Τα πειράματα έγιναν σε καολινίτη, σε επιταχύνσεις 80g και 40g, οι οποίες σε πραγματική κλίμακα αντιστοιχούν σε πάσσαλο διαμέτρου 0.88 m και 0.44 m αντίστοιχα. Ο πάσσαλος που χρησιμοποιήθηκε είχε λόγο μήκους προς διάμετρο ίση με 11.8, διάμετρο ίση με 10

χιλιοστά και πάχος τοιχώματος ίσο με 1 χιλιοστό. Σκαρίφημα της στρωματογραφίας και η πειραματική διάταξη, φαίνονται στις Εικόνες 3.5 και 3.6 αντίστοιχα. Το προφίλ της αντίστασης αιχμής q_c , της δοκιμής CPT, για τη στρωματογραφία καολινίτη που χρησιμοποιήθηκε, φαίνεται στην Εικόνα 3.7.

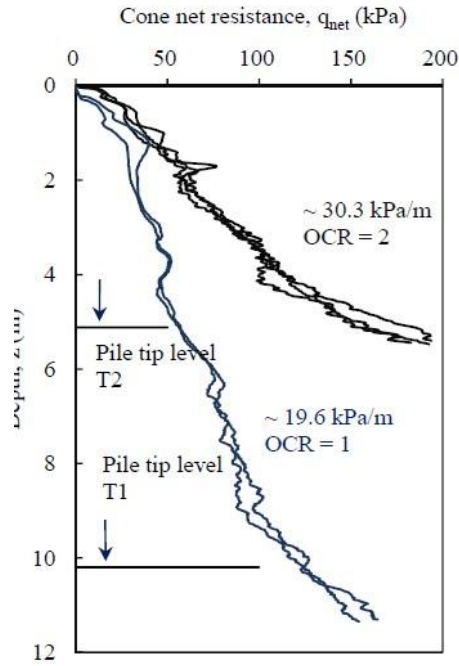
Τα πειράματα έδειξαν ότι η πλήρης εδαφική αντίσταση ενεργοποιείται για μια μετατόπιση ίση περίπου με το μισό της διαμέτρου. Ακόμα, η μέγιστη καμπτική ροπή εντοπίζεται σε ένα βάθος περίπου 6 διαμέτρων. Αυτό το βάθος είναι τυπικό για μαλακή άργιλο, ενώ λίγο μεγαλύτερο από το αντίστοιχο για στιφρή αργιλο ή άμμο.



Εικόνα 3. 5: Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης φυγοκεντρική, Lehane (2014). Μονάδες: mm



Εικόνα 3. 6: Όψη διάταξης φόρτισης κεφαλής πασσάλου, Lehane (2014)



Εικόνα 3. 7: Αντίσταση αιχμής q_c της δοκιμής CPT, για OCR=1 και OCR=2, συναρτήσει του βάθους για το πείραμα του Lehane (2014)

Πίνακας 3. 6: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Lehane (2014) για μαλακή άργιλο		
1 ^ο	$p_u = q_c * (0.2 + \tanh(0.3 * z/b))$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
2 ^ο	$p = p_u * \tanh(8.8 * (\frac{z}{b})^{-0.3} * (\frac{y}{b})^{0.68})$	για $z < 3*b$
	$p = p_u * \tanh(6.34 * (\frac{y}{b})^{0.68})$	για $z > 3*b$
		Μόρφωση καμπύλης p-y

3.1.4 NGI-11 (2014) – Μαλακή άργιλος

Το Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI), σε συνεργασία με την κινέζικη εταιρεία εξόρυξης πετρελαίου PCSB, συγκέντρωσε αρκετά αποτελέσματα από πειράματα οριζόντιας φόρτισης σε πασσάλους από διάφορες τοποθεσίες (Κόλπος του Μεξικό κτλ) με μαλακή άργιλο, προσπαθώντας να παράξει μια καμπύλη p-y που να περιγράφει καλύτερα την εγκάρσια απόκριση ενός πασσάλου, καθώς, όπως προαναφέρθηκε, υπάρχει η αίσθηση ότι ο Matlock και οι παρόμοιες μεθοδολογίες υποεκτιμούν τη μέγιστη αντίσταση του πασσάλου.

Για να μορφωθεί η καμπύλη, χρησιμοποιήθηκαν: πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (PLAXIS) και προγράμματα ανάλυσης pushover (SPLICE και USFOS), των οποίων τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις αποκρίσεις πασσάλων θεμελίωσης εξεδρών πετρελαίου ανά τον κόσμο. Συγκεκριμένα, συγκρίθηκαν με τις επόμενες περιπτώσεις, όπως αυτές περιγράφονται στον Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3. 7: Περιπτώσεις πασσάλων υπό οριζόντια φόρτιση από τη βιβλιογραφία		
Περιοχή	Διάμετρος (m)	Αιχμή πασσάλου
Ποταμός Sabine, Texas, USA	0.324	Ανοιχτή
Harvey, Luisiana, USA	0.168	Ανοιχτή
Chalmette, Luisiana, USA	0.887-0.557	Ανοιχτή
Γέφυρα Incheon, Νότια Κορέα	1.016	Ανοιχτή
Κόλπος του Μεξικό, Louisiana, USA	0.610	Κλειστή
Haga, Νορβηγία	0.153	Κλειστή

Η καμπύλη που προέκυψε είναι υπερβολικής μορφής, εξαρτώμενη από το μέτρο διατμήσεως, αρκετά παρόμοια με αυτήν του Jeanjean.

Πίνακας 3. 8: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά NGI-11 (2014) για μαλακή άργιλο		
1 ^ο	$G = E / (2 * (1 + \nu))$	Εύρεση μέτρου διατμήσεως (συναρτήσει μέτρου ελαστικότητας και λόγου Poisson)
2 ^ο	$p_u = \min [p_1, p_2]$ $p_1 = 11.9 * c_u * b$ $p_2 = c_u * b * (4 + 2 * (z/b)^{0.6})$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
3 ^ο	$p = p_u * \tanh \left(\frac{G}{100 * c_u} * \left(\frac{y}{b} \right)^{0.5} \right)$	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.1.5 Sullivan (1980) – Άργιλος

Η μέθοδος που πρότεινε ο Sullivan έχει εφαρμογή σε κάθε είδος αργίλου και είναι βασισμένη πάνω στις καμπύλες των Matlock (για μαλακή άργιλο) και Reese (για στιφρή άργιλο). Συγκεκριμένα χρησιμοποίησε τα αποτελέσματα από τα πειράματα του Matlock στη μαλακή άργιλο της λίμνης Sabine, και του Reese στη στιφρή άργιλο του Manor, Texas.

Η μορφή της καμπύλης μοιάζει αρχικά με αυτήν του Matlock, ωστόσο, στη μετακίνηση που η αντίσταση του εδάφους γίνεται ίση με την μέγιστη, τότε αυτή μειώνεται έως ότου σταθεροποιηθεί σε μια παραμένουσα αντοχή. Η τελική μορφή καθορίζεται από τις εμπειρικές παραμέτρους A, F, οι οποίες επηρεάζουν αντίστοιχα τη μετακίνηση διαρροής και την τελική παραμένουσα αντίσταση. Η παράμετρος A παίρνει τιμές από 2.5 έως 0.35 ενώ η παράμετρος F, 1 έως 0.5 για μαλακή έως πολύ στιφρή άργιλο αντίστοιχα.

Στην παρούσα εργασία, για τη μαλακή άργιλο χρησιμοποιήθηκαν A=2.5 και F=1 ενώ για τη στιφρή άργιλο: A=0.35 και F=0.5.

Πίνακας 3. 9: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Sullivan (1980) για άργιλο		
1 ^ο	$A=2.5\sim 0.35$ (από μαλακή έως πολύ σφιγρή άργιλο)	Επιλογή δείκτη A
2 ^ο	$F=1\sim 0.5$ (από μαλακή έως πολύ σφιγρή άργιλο)	Επιλογή δείκτη F
3 ^ο	$p_u = \min [p_1, p_2, p_3]$ $p_1 = 9 * c_u * b$ $p_2 = c_u * b * (3 + 0.5 * z/b)$ $p_3 = c_u * b * (2 + \gamma' * z/c_u + 0.833 * z/b)$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
4 ^ο	$y_{50} = A * \varepsilon_{50} * b$	Εύρεση μετακίνησης, στην οποία αντιστοιχεί το 50% της παραμόρφωσης αστοχίας
5 ^ο	$p = p_u * 0.5 * (y/y_{50})^{\frac{1}{3}} \quad \text{για } y < 8 * y_{50}$ $p = \min [p_u, p_u * (F + (1 - F) * \frac{z}{12*b})] \quad \text{για } y > 30 * y_{50}$ <p>Για τιμές μετακίνησης από $8 * y_{50}$ έως $30 * y_{50}$, η καμπύλη ενώνεται γραμμικά</p>	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.1.6 O'Neill & Gazdoglu (1984) – Άργιλος

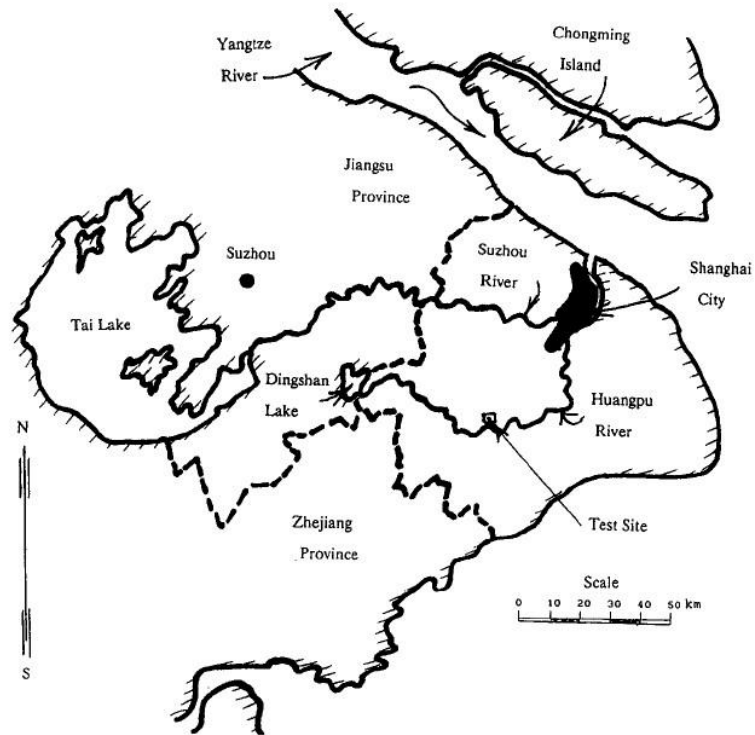
Ομοίως οι O'Neill & Gazdoglu, θέλησαν, μέσω αρκετών πειραμάτων σε πολλά είδη αργίλου, να εξάγουν μια μέθοδο που να έχει εφαρμογή τόσο σε μαλακές όσο και σε σφιγρές αργίλους.

Η καμπύλη τους μοιάζει αρκετά με του Matlock, ωστόσο υπεισέρχεται η έννοια του κρίσιμου βάθους, ήτοι η μέγιστη αντίσταση p_u περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό στα ρηγά στρώματα (κάτι που συμβαίνει γενικότερα, απλώς εδώ το βάθος αυτό συνδέεται όχι μόνο με τη διάμετρο του πασσάλου, αλλά και με το κρίσιμο μήκος του και, έμμεσα, με τα μέτρα ελαστικότητας πασσάλου-εδάφους). Επίσης, εισάγεται μια παράμετρος F (με τιμές 1 έως 0.5 για μαλακή έως πολύ σφιγρή άργιλο), της οποίας είναι ανάλογη η μέγιστη αντίσταση p_u . Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι ακραίες τιμές της παραμέτρου F για κάθε είδος εδάφους, δηλαδή 1 για μαλακή άργιλο και 0.5 για σφιγρή άργιλο.

Πίνακας 3. 10: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά O'Neill & Gazizoglu (1984) για άργιλο		
1 ^ο	F=1~0.5 (από μαλακή έως πολύ στιφρή άργιλο)	Επιλογή δείκτη F
2 ^ο	$L_{critical} = 3 * ((E_p * I_p)/(E_s * \sqrt{b}))^{0.286}$	Εξαγωγή κρίσιμου μήκους συναρτήσει μέτρων ελαστικότητας (πασσάλου-εδάφους), διαμέτρου και ροπής αδρανείας πασσάλου
3 ^ο	$z_{critical} = L_{critical}/4$	Εύρεση κρίσιμου βάθους
2 ^ο	$p_u = \min [p_1, p_2]$ $p_1 = F * 9 * c_u * b$ $p_2 = F * c_u * b * (3 + 6 * z/z_{critical})$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
3 ^ο	$y_c = 0.8 * \varepsilon_{50} * \sqrt{b} * \left(\frac{E_p * I_p}{E_s}\right)^{0.125}$	Εύρεση κρίσιμης μετακίνησης, συναρτήσει μέτρων ελαστικότητας (πασσάλου-εδάφους), διαμέτρου και ροπής αδρανείας πασσάλου
5 ^ο	$p = p_u * 0,5 * (y/y_c)^{0.387} \quad \text{για } y < 6 * y_c$ $p = \min [p_u, p_u * (F + (1 - F) * \frac{z}{z_{critical}})] \quad \text{για } y > 20 * y_c$ Για τιμές μετακίνησης από 6 * y _c έως 20 * y _c , η καμπύλη ενώνεται γραμμικά	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.1.7 Broms & Choa (1998) – Άργιλος

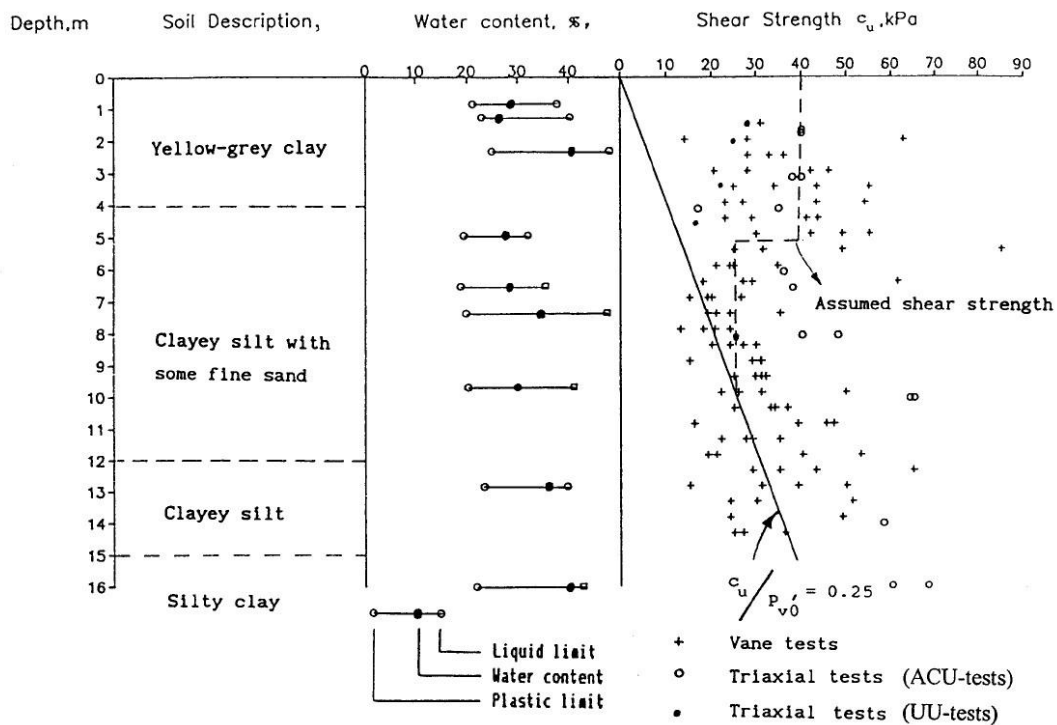
Μετά από πειράματα στον ποταμό Huangpu, στη Shanghai (Εικόνα 3.8), όπου η στρωματογραφία περιείχε από μαλακή έως στιφρή άργιλο, οι Broms & Choa πρότειναν μια καμπύλη παραβολικής μορφής που εφαρμόζεται σε κάθε είδος αργίλου. Χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικοί πάσσαλοι με διάμετρο από 0.09 m έως 0.6 m. Τα χαρακτηριστικά των πασσάλων και της φόρτισης, σε κάθε ένα από τα 21 διαφορετικά πειράματα, φαίνονται στην Εικόνα 3.9. Η στρωματογραφία της περιοχής όπου διενεργήθησαν τα πειράματα, παρουσιάζεται στο σκαρίφημα της Εικόνας 3.10.



Εικόνα 3. 8: Τοποθεσία περιοχής πειράματος, Broms & Choa (1998)

Test	Pile diameter (m)	Pile length (m)	Pile stiffness (MNm ²)	Distance from the loading point to the ground surface (m)	Type of loading
1	0.16	4.6	1.830	1.17	static
2	0.09	3.0	0.187	0.30	cyclic
3	0.09	3.0	0.195	0.28	static
4	0.09	3.0	0.182	0.28	static
5	0.09	3.0	0.196	0.28	static
6	0.09	3.0	0.216	0.29	cyclic
10	0.16	4.4	1.860	0.53	cyclic
12	0.16	4.2	1.860	0.53	static
13	0.20	6.0	5.62	0.29	static
14	0.30	12.5	27.9	0.37	cyclic
15	0.60	14.0	153.3	0.37	static
16	0.60	14.0	153.3	0.40	static
17	0.50	14.0	97.9	0.72	static
18	0.20	12.0	5.61	0.38	static
19	0.60	14.0	153.3	1.88	cyclic
20	0.60	14.0	153.3	1.93	cyclic
21	0.50	14.0	97.9	1.82	cyclic

Εικόνα 3. 9: Χαρακτηριστικά μεμονωμένων πασσάλων και φόρτισης στα πειράματα που διενήργησαν οι Broms & Choa (1998)



Εικόνα 3. 10: Στρωματογραφία περιοχής πειραμάτων, Broms & Choa (1998)

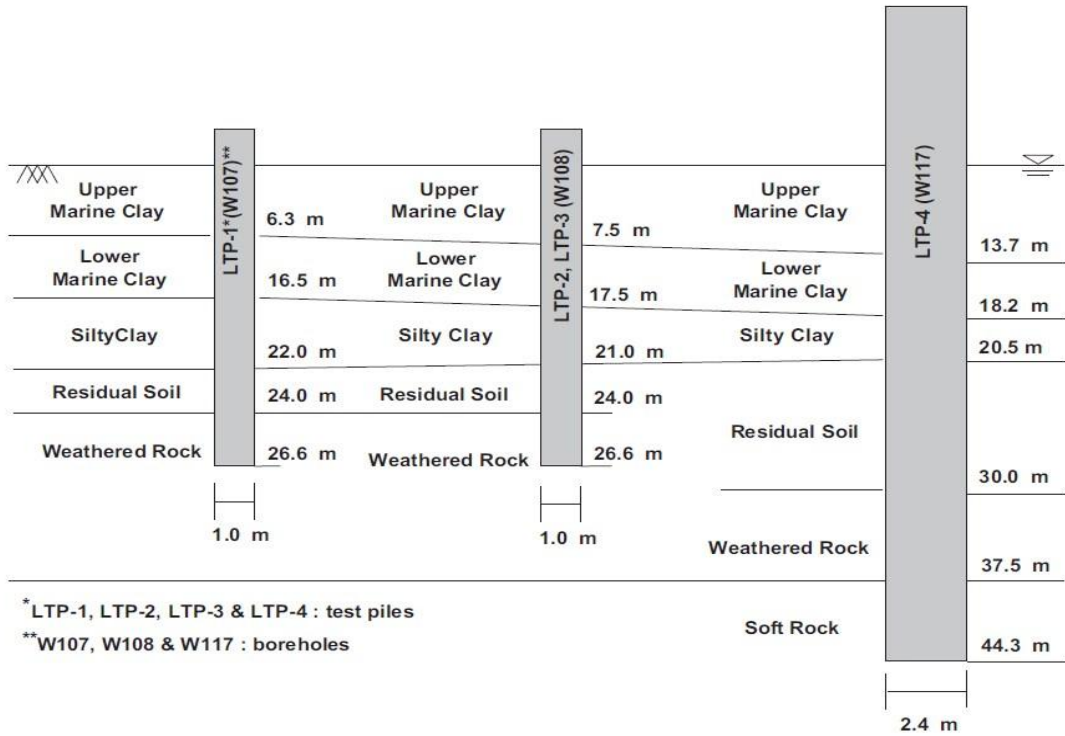
Όπως οι περισσότερες μέθοδοι, έτσι και αυτή σχετίζεται άμεσα με την αστράγγιστη διατμητική συνοχή, τη διάμετρο και το βάθος, ενώ υπεισέρχονται δύο παράμετροι για να διαφοροποιήσουν τη μέγιστη αντίσταση και την μετακίνηση στην οποία εμφανίζεται το 50% της αντοχής του εδάφους, οι οποίοι σχετίζονται με τη σφιφρότητα της αργίλου. Η παράμετρος β, παίρνει τιμές από 8 έως 12 ευθέως ανάλογα της σφιφρότητας, ενώ η παράμετρος Α αυξάνει (με διαφορετική αρχική τιμή, κλίση και τελική τιμή ανάλογα τη σφιφρότητα) γραμμικά με το βάθος έως ένα μέγιστο βάθος ίσο με 5 διαμέτρους. Στην παρούσα εργασία, για μαλακή άργιλο υιοθετήθηκε τιμή για το β ίση με 8, ενώ για σφιφρή άργιλο, ίση με 12.

Πίνακας 3. 11: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Broms & Choa (1998) για άργιλο

1 ^ο	$\beta=8-12$ (από μαλακή έως πολύ σφιφρή άργιλο)	Επιλογή δείκτη β
2 ^ο	$A = \min [10, 2.5 + 1.5 * z/b]$	Εξαγωγή δείκτη Α για μαλακή άργιλο
3 ^ο	$A = \min [7.5, 2 + 1.1 * z/b]$	Εξαγωγή δείκτη Α για σφιφρή άργιλο
4 ^ο	$p_u = A * b * c_u$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
5 ^ο	$y_{50} = A * \varepsilon_{50} * b$	Εύρεση μετακίνησης, στην οποία αντιστοιχεί το 50% της παραμόρφωσης αστοχίας
6 ^ο	$p = p_u * \frac{y/(A*y_{50})}{\frac{\beta}{\beta-1} + \frac{\beta-2}{\beta-1} * \frac{y}{A*y_{50}}}$	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.1.8 Jeong (2004) - Άργιλος

Ο Jeong, διενήργησε πειράματα στη γέφυρα Incheon, δίπλα στην Κίτρινη Θάλασσα. Έκανε δοκιμές οριζόντιας φόρτισης σε 3 διαφορετικές γεωτρήσεις, (1 και 2.4 μέτρων). Η στρωματογραφία της περιοχής και η γεωμετρία των πασσάλων, απεικονίζονται στο σκαρίφημα της Εικόνας 3.11. Ακόμη, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, και τα γεωμετρικά/μηχανικά χαρακτηριστικά των πασσάλων, φαίνονται στην Εικόνα 3.12.



Εικόνα 3. 11: Στρωματογραφία περιοχής πειραμάτων και γεωμετρικά χαρακτηριστικά πασσάλων, Jeong (2004)

Soil	Upper clay	Lower clay	Silt	Residual soil	Weathered rock	Soft rock
Total unit weight, γ_t (kN/m ³)	17.5	17.5	17.8	17.8	20.2	20.5
N value	1-3	4-7	12-19	44	50/15~	100
Average undrained strength c_u (kPa)	18	42	-	-	-	-
ϕ (deg.)	-	-	24	34	32	33
Plasticity index, PI (%)	25-30	30-35	35-40	-	-	-
Poisson's ratio μ_s	0.3	0.3	0.3	0.3	0.25	0.25
OCR	0-2	1-2	< 2	-	-	-
e_{50}	0.02	0.01	-	-	-	-
Pile	Steel pile		Drilled shaft			
Diameter (m)	1.02		2.4			
Thickness (m)	0.016		-			
Pile depth (m)	26.6		44.3			
γ_t (kN/m ³)	72		25			
E_p (kNm ²)	2.0×10^8		2.6×10^7			
I_p (m ⁴)	0.0063		1.629			
β/L	3.97		3.74			
Pile no.	LTP-1, LTP-2, LTP-3		LTP-4			

Εικόνα 3. 12: Πίνακας με μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους που έγιναν τα πειράματα και με μηχανικά-γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πασσάλων που χρησιμοποιήθηκαν, Jeong (2004)

Μέσω αυτών των πειραμάτων, ο Jeong παρουσίασε μια καμπύλη p-y παραβολικής μορφής που λαμβάνει υπ' όψιν της τη σχετική δυσκαμψία πασσάλου-εδάφους. Κατέληξε ότι η εδαφική αντίσταση σχετίζεται περισσότερο με τη ρίζα της διαμέτρου, παρά με τη

διάμετρο. Επομένως, οι υπόλοιπες καμπύλες (όπως αυτή του Matlock) που σχετίζουν την εδαφική αντίδραση άμεσα με τη διάμετρο, υποεκτιμούν σημαντικά την αρχική κλίση της καμπύλης p-y.

Πίνακας 3. 12: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Jeong (2004) για άργιλο		
1 ^ο	$K_i = i * \frac{E_s}{1-\nu^2} * b^{0.5} * \left(\frac{E_s * b^4}{E_p * I_p} \right)^j$	Εύρεση αρχικής κλίσης καμπύλης (συναρτήσει μέτρου ελαστικότητας εδάφους και πασσάλου, διαμέτρου, ροπής αδρανεαίας πασσάλου και λόγου Poisson εδάφους)
2 ^ο	$p_u = \kappa * c_u * b * z^\lambda$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
3 ^ο	$i = 17.4$ $j = 0.66$ $\kappa = 3.25$ $\lambda = 0.59$	Αδιάστατοι παράγοντες που προέκυψαν από στατιστική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων
4 ^ο	$p = y / \left(\frac{1}{K_i} + \frac{y}{p_u} \right)$	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.1.9 Γεωργιάδης (2010) – Άργιλος

Ο Γεωργιάδης χρησιμοποιεί παραβολική εξίσωση για να περιγράψει τη σχέση φορτίου–μετατόπισης. Η σχέση του έχει εφαρμογή σε κάθε είδος αργίλου και επηρεάζεται από τη μέγιστη αντίσταση p_u και μια αρχική κλίση K_i .

Η μέγιστη αντίσταση, πέρα από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή, τη διάμετρο και το βάθος, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τραχύτητα του πασσάλου, μέσω ενός δείκτη α , ο οποίος παίρνει τιμή, 0 για λείο πάσσαλο, έως 1, για πολύ τραχύ πάσσαλο (ο δείκτης αυτός ορίζεται ως ο λόγος της τριβής της διεπιφάνειας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή). Ο τρόπος έμπηξης (έγχυτος ή εμπηγνύομενος) ή το υλικό (πάσσαλος από σκυρόδεμα ή μεταλλικός) μπορούν να καθορίσουν αν ο πάσσαλος είναι ή όχι λείος. Όσο μικρότερη η τιμή του α , δηλαδή όσο πιο λείος ο πάσσαλος, τόσο μικρότερη είναι η μέγιστη εδαφική αντίδραση. Αυτό συμβαίνει διότι σε έναν λείο πάσσαλο, χάνεται η συνεισφορά της τριβής στα τοιχώματά του, όταν αυτός τείνει να μετακινηθεί.

Η αρχική κλίση K_i προκύπτει συναρτήσει της διαφοράς στα μέτρα ελαστικότητας του πασσάλου και του εδάφους.

Πίνακας 3. 13: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Γεωργιάδη (2010) για άργιλο		
1 ^ο	$\alpha=0\sim 1$ (από λείο έως τραχύ πάσσαλο)	Επιλογή δείκτη τραχύτητας α
3 ^ο	$\lambda = 0.55 - 0.15 * \alpha$ $\Delta = \arcsin(\alpha)$ $Np_u = \pi + 2 * \Delta(\text{rad}) + 2 * \cos(\Delta) + 4 * (\cos(\Delta/2) + \sin(\Delta/2))$ $Np_o = 2 + 1.5 * \alpha$ $Np = Np_u - (Np_u - Np_o) * e^{-\lambda*(z/b)}$	Εξαγωγή διαφορών δεικτών της μεθόδου
4 ^ο	$p_u = Np * c_u * b$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
5 ^ο	$K_i = 3 * E_s * \sqrt{\left(\frac{E_s * b^4}{E_p * I_p}\right)}$	Εύρεση αρχικής κλίσης καμπύλης, συναρτήσει μέτρων ελαστικότητας (πασσάλου-εδάφους), διαμέτρου και ροπής αδρανείας πασσάλου
6 ^ο	$p = y / \left(\frac{1}{K_i} + \frac{y}{p_u}\right)$	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.1.10 Gill (1970) – Στιφρή άργιλος

Ο Gill κάνοντας πειράματα σε στιφρή άργιλο, κατάφερε να παράξει μια καμπύλη p-y που εξαρτάται από τον αριθμό των χτύπων SPT (N). Παρόλα αυτά, τα πειράματά του έδειξαν ότι ενώ η μετατοπισιακή απόκριση του πασσάλου προσεγγίζεται ικανοποιητικά από την καμπύλη p-y, τα εντατικά μεγέθη (καμπτική ροπή και τέμνουσα δύναμη) υποεκτιμούνται ελαφρώς.

Πίνακας 3. 14: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Gill (1970) για στιφρή άργιλο		
1 ^ο	$K = 100 * N * 6.894$	Εξαγωγή κλίσης αρχικού ευθύγραμμου τμήματος καμπύλης
2 ^ο	$P_o = 0.25 * N * \frac{z}{b^{0.5}} * 6.894$	Εξαγωγή μέγιστης αντίστασης
3 ^ο	$p = \frac{y}{\frac{1}{K} + \frac{1}{P_o} * \frac{y}{b}}$	Μόρφωση καμπύλης p-y

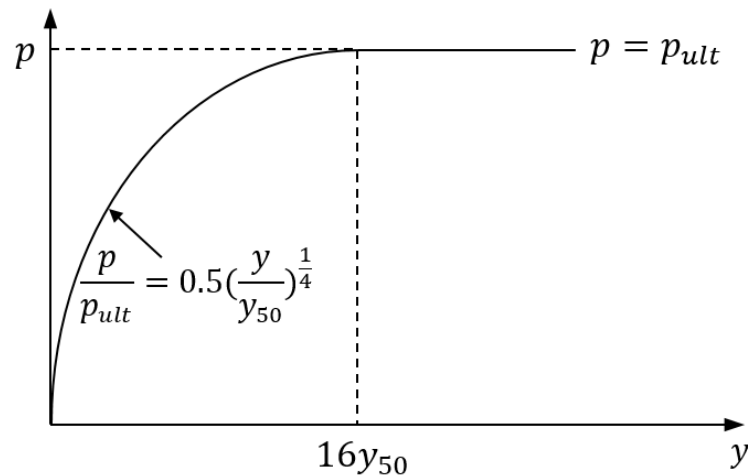
3.1.11 Welch & Reese (1972) – Στιφρή άργιλος

Οι Welch & Reese ύστερα από πειράματα σε στιφρή μη-κορεσμένη άργιλο, κατέληξαν σε μια καμπύλη p-y ίδιας μορφής και μαθηματικής με αυτήν του Matlock για μαλακές αργίλους. Στα πειράματά τους χρησιμοποιήθηκαν πάσσαλοι διαμέτρου 0.76 m, ενώ οι δοκιμές έγιναν στο Houston, Texas.

Προκύπτει ότι και για κορεσμένο έδαφος (χρήση ενεργού ειδικού βάρους) τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου δεν αποκλίνουν πολύ από άλλες μεθόδους, γι' αυτό και χρησιμοποιείται και παρουσιάζεται σε αυτήν την εργασία.

Η καμπύλη αυτή, ενώ μοιάζει πολύ με του Matlock, έχει ελαφρώς πιο απότομη κλίση λόγω του διαφορετικού εκθέτη.

Η μορφή της καμπύλης φαίνεται στην Εικόνα 3.13.



Εικόνα 3. 13: Σκαρίφημα καμπύλης p-y για στιφρή άργιλο, Welch & Reese (1972)

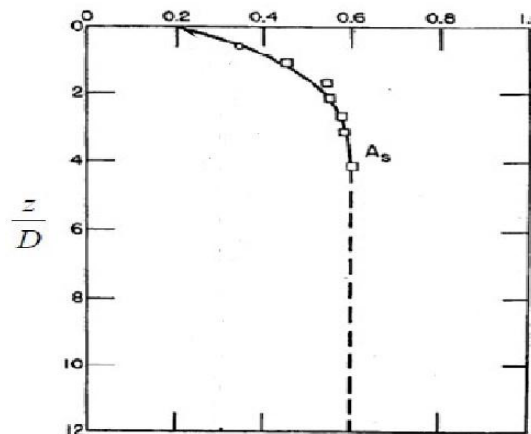
Πίνακας 3. 15: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Welch & Reese (1972) για στιφρή άργιλο		
1°	$p_u = \min[p_1, p_2]$ $p_1 = 9 * c_u * b$ $p_2 = c_u * b * (3 + \gamma' * z/c_u + 0.5 * z/b)$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
2°	$y_{50} = 2.5 * \epsilon_{50} * b$	Εύρεση μετακίνησης, στην οποία αντιστοιχεί το 50% της παραμόρφωσης αστοχίας
3°	$p = p_u * 0.5 * (y/y_{50})^{0.25} \quad \text{για } y \leq 16 * y_{50}$ $p = p_u \quad \text{για } y \geq 16 * y_{50}$	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.1.12 Reese (1975) – Στιφρή άργιλος

Ο Reese έκανε πειράματα σε στιφρή άργιλο, στο Manor του Texas. Πειραματίστηκε σε πασσάλους με διάμετρο 152 χιλιοστά και 641 χιλιοστά και μήκος 15.2 m. Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u σε kPa, ο δείκτης παραμόρφωσης ϵ_{50} και το ενεργό ειδικό βάρος γ' σε kN/m^3 παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.16.

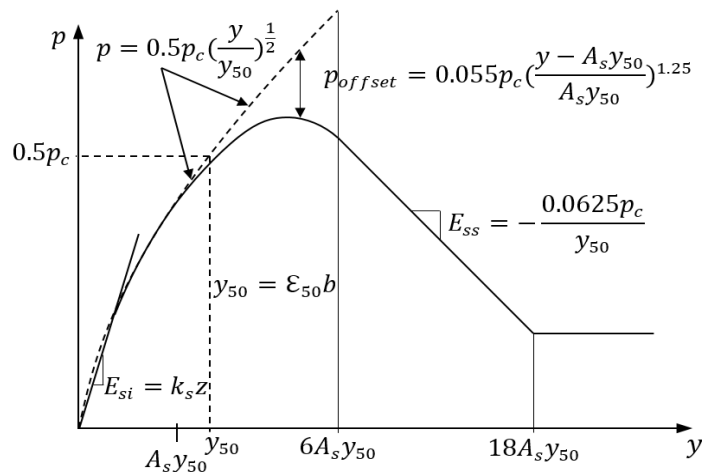
Πίνακας 3. 16: Μηχανικά χαρακτηριστικά της άργιλου στο Manor, Texas, συναρτήσει του βάθους			
βάθος (m)	c_u (kPa)	ϵ_{50}	γ' (kN/m ³)
0	25	0.007	-
0.9	70	0.007	8.1
1.52	163	0.005	9.4
4.11	333	0.004	10.3
6.55	333	0.004	10.3
9.14	1100	0.004	10.8
20.00	1100	0.004	-

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων, πρότεινε μια καμπύλη p-y η οποία παρουσιάζει μια μέγιστη αντίσταση και κατόπιν φθίνει, έως ότου φτάσει σε μια παραμένουσα αντίσταση, αρκετά μικρότερη της μέγιστης, η οποία υποεκτιμά σημαντικά την πραγματική αντίσταση του πασσάλου στις μεγάλες μετατοπίσεις. Σημαντικές παράμετροι της μεθόδου είναι η διάμετρος, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή, το ενεργό ειδικό βάρος του εδάφους και η παραμόρφωση στην οποία επιτυγχάνεται το 50% της μέγιστης αντίστασης. Επίσης, η παραμόρφωση στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη αντίσταση εξαρτάται από έναν συντελεστή A_s ο οποίος λαμβάνει υπ' όψιν την επιρροή του βάθους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.14.



Εικόνα 3. 14: Τιμές σταθεράς A συναρτήσει του βάθους, για σφιγρή άργιλο κατά Reese (1975)

Η μορφή της καμπύλης φαίνεται στην Εικόνα 3.15.



Εικόνα 3. 15: Σκαρίφημα καμπύλης p-y για σφιγρή άργιλο, Reese (1975)

Πίνακας 3. 17: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Reese (1975) για στιφρή άργιλο					
1°	c_u (kPa):	50-100	100-200	300-400	Επιλογή αρχικής κλίσης καμπύλης (στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε γραμμική παρεμβολή για ενδιάμεσες τιμές c_u)
	K_i (kN/m ³):	135000	270000	540000	
2°	$p_u = \min [p_1, p_2]$ $p_1 = 11 * c_u * b$ $p_2 = c_u * b * (2 + \gamma' * z/c_u + 2.83 * z/b)$				Εύρεση μέγιστης αντίστασης
3°	$y_{50} = \varepsilon_{50} * b$				Εύρεση μετακίνησης, στην οποία αντιστοιχεί το 50% της παραμόρφωσης αστοχίας
4°	$y_c = 0.25 * p_u^2 / (\gamma_{50} * K_i^2 * z^2)$				Εύρεση μετακίνησης, στην οποία τελειώνει το αρχικό ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης και ξεκινά το παραβολικό
5°	$A_s = \min (0.65, 0.098 * \log \left(\frac{z}{b} \right) + 0.4457)$				Εύρεση παραμέτρου A_s
6°	$p = K_i * z * y \quad \text{για } 0 < y < y_c$				Μόρφωση καμπύλης p-y
	$p = 0.5 * p_u * (y/y_{50})^{0.5} \quad \text{για } y_c < y < A_s * y_{50}$				
	$p = 0.5 * p_u * (y/y_{50})^{0.5} - 0.055 * p_u * \left(\frac{y - A_s * y_{50}}{A_s * y_{50}} \right)^{1.25}$ για $A_s * y_{50} < y < 6 * A_s * y_{50}$				
	$p = 0.5 * p_u * \sqrt{6 * A_s} - 0.411 * p_u - \frac{0.0625}{y_{50}} * p_u * (y - 6 * A_s * y_{50})$ για $6 * A_s * y_{50} < y < 18 * A_s * y_{50}$				
$p = p_u * (1.225 * \sqrt{A_s} - 0.75 * A_s - 0.411)$ για $y > 18 * A_s * y_{50}$					

3.1.13 Dunnivant & O'Neill (1989) – Στιφρή άργιλος

Μετά από μια σειρά πειραμάτων πραγματικής κλίμακας σε στιφρή, υπερστερεοποιημένη άργιλο, οι Dunnivant & O'Neill πρότειναν μια καμπύλη p-y που έχει τη μορφή υπερβολικής εφαπτομένης. Πειραματίστηκαν σε πασσάλους που είχαν διάμετρο 273, 1220 και 1830 χιλιοστά. Η καμπύλης τους λαμβάνει υπ' όψιν τη σχετική δυσκαμψία πασσάλου-εδάφους πέρα από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούν οι Reese, Matlock κτλ.

Πίνακας 3. 18: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Dunnavant & O'Neill (1989) για στιφρή άργιλο		
1 ^ο	$p_u = \min[p_1, p_2]$ $p_1 = 9 * c_u * b$ $p_2 = c_u * b * (3 + \gamma' * z/c_u + J * z/b)$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
2 ^ο	$K = \left(\frac{E_p * I_p}{E_s * L^4} \right)$	Εύρεση παραμέτρου K (συναρτήσε μετρου ελαστικότητας εδάφους και πασσάλου, μήκους και ροπής αδρανείας πασσάλου)
3 ^ο	$y_{50} = 0.0063 * \varepsilon_{50} * b * K^{-0.875}$	Εύρεση μετακίνησης, στην οποία αντιστοιχεί το 50% της παραμόρφωσης αστοχίας
4 ^ο	$p = p_u * 1.02 * \tanh \left(0.537 * \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{0.7} \right)$	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.1.14 Dewaikar (2009) – Στιφρή άργιλος

Ο Dewaikar συγκέντρωσε κάποια από τα χαρακτηριστικά των καμπυλών p-y που έχουν προτείνει οι Reese και Broms & Choa και προσπάθησε να παράξει μια νέα καμπύλη p-y. Κατόπιν, έλεγξε την παραχθείσα καμπύλη με αποτελέσματα πειραμάτων μεγάλης κλίμακας, των Reese (1975), Gabr (1994) και Ismael & Klym (1977). Ο Reese διενήργησε πειράματα στη στιφρή άργιλο του Manor, Texas, σε πασσάλους διαμέτρου 152 και 641 χιλιοστών. Ο Gabr πειραματίστηκε στο Canons Park, στην Αγγλία, το έδαφος ήταν στιφρή άργιλος Λονδίνου, με μια αστράγγιστη διατμητική αντοχή στην επιφάνεια του εδάφους ίση με 45 kPa και με ρυθμό αύξησης 10 kPa/m, ενώ ο πάσσαλος είχε μήκος 4.5 m, διάμετρο 0.17 m και δυσκαμψία $E_p I_p = 1500 \text{ kNm}^2$. Οι Ismael & Klym, έκαναν πειράματα στο Ontario του Καναδά, σε μια υπερστερεοποιημένη άργιλο με $c_u = 96 \text{ kPa}$, χρησιμοποιώντας πασσάλους από σκυρόδεμα, μήκους 12 m, διαμέτρου 1.52 m και δυσκαμψίας $E_p I_p = 2.675 * 10^6 \text{ kNm}^2$. Η καμπύλη του Dewaikar εμφάνιζε αμελητέες αποκλίσεις με τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω πειραμάτων.

Αυτή η καμπύλη μοιάζει αρκετά στη μορφή της με του Reese ωστόσο η εξίσωσή της είναι σχεδόν ίδια με των Broms & Choa, εκτός από ένα δείκτη D που συνδέει τη μετακίνηση του πασσάλου με τη μετακίνηση που αντιστοιχεί στο 50% της μέγιστης αντίστασης.

Προκύπτει ότι η μέθοδος του Dewaikar εμφανίζει μεγαλύτερη μέγιστη αντίσταση από αυτήν του Reese (περίπου ίδια με αυτήν που προτείνου οι Broms & Choa), αλλά μικρότερη παραμένουσα αντίσταση.

Πίνακας 3. 19: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Dewaikar (2009) για στιφρή άργιλο		
1 ^ο	$\beta=8-12$ (από μαλακή έως πολύ στιφρή άργιλο)	Επιλογή δείκτη β
2 ^ο	$y_{50} = \varepsilon_{50} * b$	Εύρεση μετακίνησης, στην οποία αντιστοιχεί το 50% της παραμόρφωσης αστοχίας
3 ^ο	$p_u = 1.298 * (0.9 + 1.1727 * z/b) * b * c_u$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
2 ^ο	$\alpha = 0.004 * \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^2 - 0.157 * \left(\frac{y}{y_{50}}\right) + 0.087$ $D = 10^\alpha$	Εύρεση δείκτη D
3 ^ο	$\alpha_1 = 1.71 * D$ $\alpha_1 = 2$	Εξαγωγή διαφόρων δεικτών της μεθόδου
4 ^ο	$p = p_u * \frac{\alpha_1 * D * \frac{y}{y_{50}}}{\frac{\beta - 1.6}{\beta + \alpha_2} + \frac{\beta - 1}{\beta} * \frac{y}{y_{50}}}$	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.2 Καμπύλες p-y για αμμώδη εδάφη

3.2.1 Gill (1970) – Άμμος

Ο Gill έκανε πειράματα σε άμμο και κατάφερε να παράξει μια καμπύλη p-y που εξαρτάται από τον αριθμό των χτύπων SPT (N). Στην καμπύλη χρησιμοποιείται η γωνία τριβής του εδάφους αλλά όχι η τιμή που έχει μετρηθεί, μα μια τιμή που προσδιορίζεται από την ενεργή κατακόρυφη τάση και τους χτύπους N της δοκιμής SPT.

Πίνακας 3. 20: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Gill (1970) για άμμο		
1 ^ο	$K(\text{kPa}) = 2000 * 6.894$	Εξαγωγή κλίσης αρχικού ευθύγραμμου τμήματος καμπύλης
2 ^ο	$\varphi = \left(25.4 - \frac{\gamma' * z * 0.145}{2.94 + 0.1225 * \gamma' * z * 0.145}\right) * N^{0.16}$	Εκτίμηση γωνίας τριβής με βάση τον αριθμό των χτύπων N
3 ^ο	$P_f(\text{kPa}) = (0.664 * 10^{0.038*\varphi} + 0.049 * 10^{0.034*\varphi} * \frac{z}{b}) * 6.894$	Εξαγωγή μέγιστης αντίστασης
4 ^ο	$p = y / \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{P_f} * \frac{y}{b}\right)$	Μόρφωση καμπύλης p-y

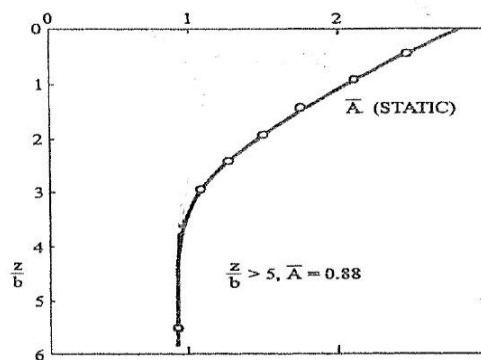
3.2.2 Reese (1974) – Άμμος

Ο Reese έκανε πειράματα στο νησί Mustang, στο Texas. Χρησιμοποίησε δύο ολοίδιους πασσάλους διαμέτρου 0.610 m, πάχους τοιχώματος 9.5 mm, μήκους 21 m και δυσκαμψίας

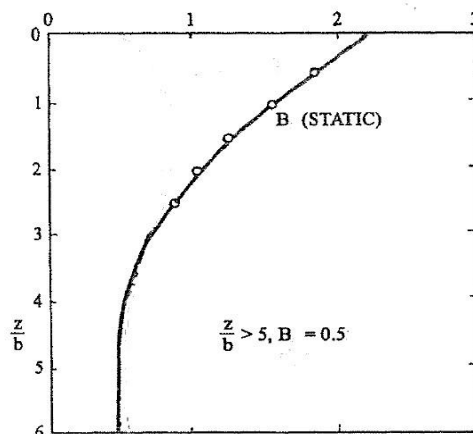
$E_p I_p = 163000 \text{ kNm}^2$. Η άμμος είχε γωνία τριβής 39 μοίρες και ενεργό ειδικό βάρος ίσο με 10.4 kN/m^3 .

Η καμπύλη μορφώθηκε με το σκεπτικό ότι κυριαρχούν δύο διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας: η τρισδιάστατη αστοχία σφήνας στα ρηχά στρώματα και η επίπεδη παραμόρφωση στα βαθύτερα. Έγινε η παραδοχή ότι στο πίσω μέρος του πασσάλου ασκούνται οι ενεργητικές ωθήσεις γαιών κατά Rankine, ενώ αυτό ισχύει μόνο εάν ο πάσσαλος είναι απόλυτα λείος. Επίσης, κατά τον υπολογισμό τους, οι οριζόντιες τάσεις δε συσχετίστηκαν ούτε με τη γωνία τριβής, ούτε με τον τρόπο θεμελίωσης του πασσάλου. Επειδή αυτές οι παραδοχές οδήγησαν σε αποκλίσεις από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν δύο διορθωτικοί, εμπειρικοί συντελεστές A, B, (διαφορετικοί για στατική ή επανακυκλιζόμενη φόρτιση, εδώ θα εξεταστεί μόνο η στατική φόρτιση) οι οποίοι μεταβάλλονται με το βάθος.

Η καμπύλη που πρότεινε έχει αρχικά ένα ευθύγραμμο τμήμα, ενώ κατόπιν έχει παραβολική μορφή. Η κλίση του αρχικού τμήματος εξαρτάται αποκλειστικά από τη γωνία τριβής, ενώ η μέγιστη αντίδραση εξαρτάται, πέρα από τη διάμετρο, από την κατακόρυφη ενεργό τάση, τη γωνία τριβής και το βάθος. Το βάθος, πέρα από την κατακόρυφη ενεργό τάση, υπεισέρχεται στημόρφωση της καμπύλης μέσω των σταθερών A, B, οι οποίες υπολογίζονται είτε μέσω των διαγραμμάτων στις Εικόνες 3.16 και 3.17, είτε μέσω των αναλυτικών σχέσεων στον Πίνακα 3.21.

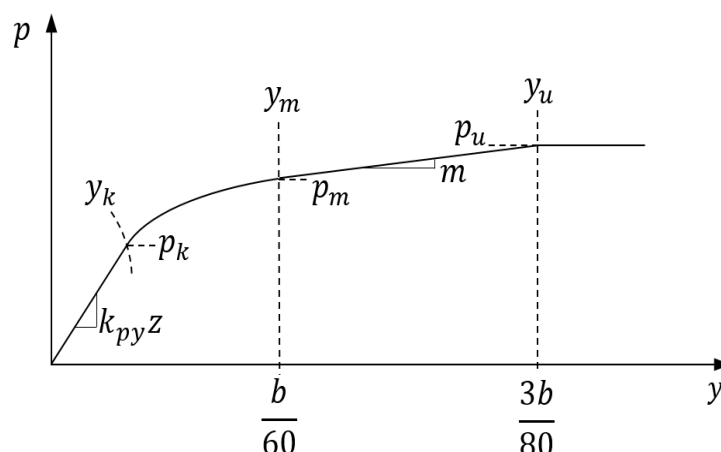


Εικόνα 3. 16: Τιμές σταθεράς A συναρτήσει του βάθους για άμμο κατά Reese (1974)



Εικόνα 3. 17: Τιμές σταθεράς B συναρτήσει του βάθους για άμμο κατά Reese (1974)

Η μορφή της καμπύλης φαίνεται στην Εικόνα 3.18.



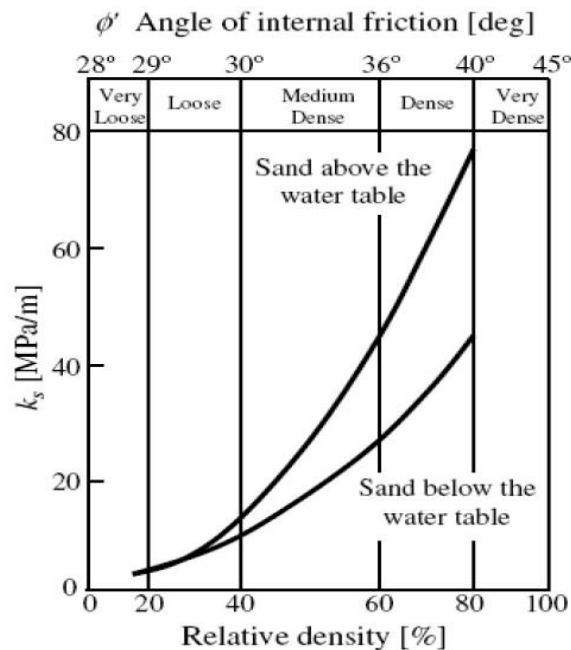
Εικόνα 3. 18: Σκαρίφημα καμπύλης p-y για άμμο, Reese (1974)

Πίνακας 3. 21: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Reese (1974) για άμμο					
1°	$\varphi(^{\circ})$:	<30	30-36	>36	Επιλογή αρχικής κλίσης καμπύλης
	K (kN/m ³):	5400	16300	34000	
2°	$A = 0.1123 * \left(\frac{z}{b}\right)^2 - 0.973 * \left(\frac{z}{b}\right) + 2.9473$ για $(z/b) < 5$ $A = 0.88$ για $(z/b) > 5$				Εξαγωγή δείκτη A
3°	$B = 0.0819 * \left(\frac{z}{b}\right)^2 - 0.7726 * \left(\frac{z}{b}\right) + 2.3093$ για $(z/b) < 5$ $B = 0.5$ για $(z/b) > 5$				Εξαγωγή δείκτη B
4°	$\alpha = \varphi/2$ $\beta = 45 + \varphi/2$ $K_o = 0.4$ $K_a = \tan(45 - \varphi/2)^2$				Εξαγωγή διαφόρων δεικτών της μεθόδου συναρτήσει της γωνίας τριβής, φ , σε μοίρες (°)
5°	$p_s = \min [p_1, p_2]$ $p_1 = \gamma' * z * \left(\frac{K_o * z * \tan(\varphi) * \sin(\beta)}{\tan(\beta - \varphi) * \cos(\alpha)} + \frac{\tan(\beta)}{\tan(\beta - \varphi)} * (b + z * \tan(\beta) * \tan(\alpha)) + K_o * z * \tan(\beta) * (\tan(\varphi) * \sin(\beta) - \tan(\alpha)) - K_a * b \right)$ $p_2 = \gamma' * z * (K_a * b * \gamma' * z * \tan^8(\beta - 1) + K_o * b * \gamma' * z * \tan(\varphi) * \tan(\beta)^4)$ $p_u = A * p_s$ $p_m = B * p_s$				Εύρεση μέγιστης και αντίστασης και άλλων τιμών αντίστασης σε χαρακτηριστικά σημεία της καμπύλης
6°	$y_u = 3 * b/80$ $y_m = b/60$				Εύρεση διαφόρων μετατοπίσεων σε χαρακτηριστικά σημεία της καμπύλης

7 ^ο	$m = \frac{p_u - p_m}{y_u - y_m}$ $n = \frac{p_m}{m * y_m}$ $C = p_m / y_m^{\frac{1}{n}}$	Εξαγωγή διαφόρων δεικτών της μεθόδου
8 ^ο	$y_k = \left(\frac{C}{K * z} \right)^{\frac{1}{1-n}}$	Εύρεση μετατόπισης στο τέλος του αρχικού ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης
9 ^ο	$p = K * z * y \quad \text{για } y < y_k$ $p = C * y^{\frac{1}{n}} \quad \text{για } y_k < y < y_m$ $p = p_m + m * (y - y_m) \quad \text{για } y_m < y < y_u$ $p = p_u \quad \text{για } y > y_u$	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.2.3 Murchison & O'Neill (1984) – Άμμος

Οι Murchison & O'Neill παρήγαγαν μια καμπύλη p-y για κορεσμένη άμμο, ελαφρώς τροποποιημένη από αυτήν του Reese (1974). Διαφέρει ελαφρώς στους διορθωτικούς συντελεστές A, B που χρησιμοποίησε ο Reese, ενώ επίσης, υπολογίζει διαφορετικά την κλίση του αρχικού ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης p-y, την οποία συσχετίζει και με τη σχετική πυκνότητα της άμμου πέρα από τη γωνία τριβής της. Ο υπολογισμός της δυσκαμψίας γίνεται είτε μέσω του διαγράμματος της Εικόνας 3.19 είτε μέσω του Πίνακα 3.23.



Εικόνα 3. 19: Τιμή δυσκαμψίας K , συναρτήσει της γωνίας τριβής ή της σχετικής πυκνότητας της άμμου, Murchison & O'Neill (1984)

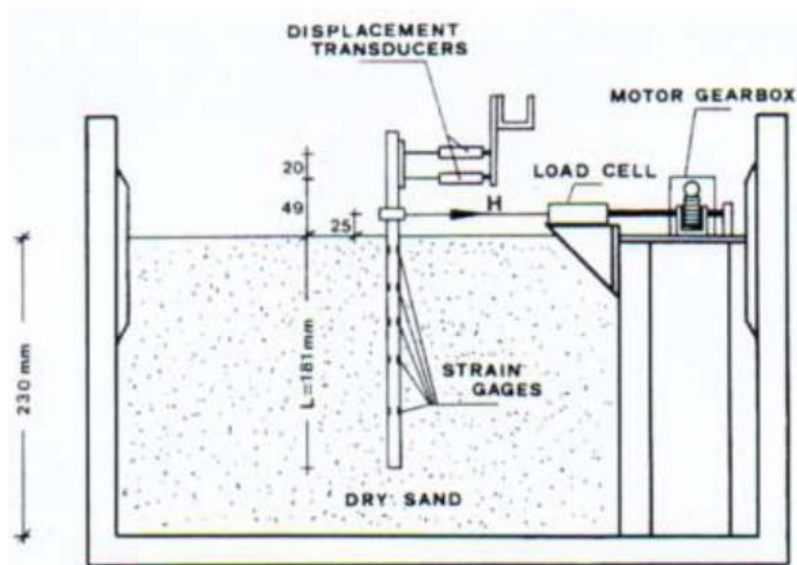
Πίνακας 3. 22: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Murchison & O'Neill (1984) για άμμο		
1 ^ο	$\beta = 45 + \varphi/2$ $K_o = 0.5$ $K_p = \tan(45 + \varphi/2)^2$ $K_a = \tan(45 - \varphi/2)^2$ $c_3 = 0.6464 * 10^{0.0555*\varphi}$ $K = 105.52 * \varphi^2 - 4321.6 * \varphi + 46079$ $A = \min [0.9, 3 - 0.8 * z/b]$	Εξαγωγή διαφόρων δεικτών της μεθόδου συναρτήσεως της γωνίας τριβής, ϕ , σε μοίρες ($^{\circ}$)
2 ^ο	$p_u = \min[p_1, p_2]$ $p_1 = \gamma' * z * (b * (K_p - K_a) + z * K_p * \tan(\varphi) * \tan(\beta))$ $p_2 = \gamma' * z * \beta * (K_p^3 + 2 * K_o * K_p^2 * \tan(\varphi) + \tan(\varphi) - K_o)$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
3 ^ο	$p = p_u * A * \tanh\left(\frac{K * z * y}{A * p_u}\right)$	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.2.4 Γεωργιάδης (1992) – Άμμος

Ο Γεωργιάδης παρήγαγε μια καμπύλη p-y για άμμο βασισμένος σε πειράματα που διενήργησε σε φυγοκεντρική. Χρησιμοποίησε άμμο σχετικής πυκνότητας $D_r=60\%$, ενεργού ειδικού βάρους $\gamma'=6.3 \text{ kN/m}^3$ και γωνία τριβής ίση με 36 μοίρες. Χρησιμοποίησε κοίλο πάσσαλο ανοιχτής αιχμής, μήκους 181 χιλιοστών. Η διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 3.20. Τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των πασσάλων που προσέγγισε σε πραγματική κλίμακα με βάση τις επιταχύνσεις του φυγοκεντρική σε κάθε πείραμα, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.23.

Ο Γεωργιάδης χρησιμοποιεί την ίδια μέγιστη αντίδραση με τον Reese (1974), αλλά χρησιμοποιεί διαφορετικό διορθωτικό συντελεστή A. Επίσης, χρησιμοποιεί αρκετά πιο ήπια αρχική κλίση από τους Reese και Murchison & O'Neill (ή API).

Πίνακας 3. 23: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά πασσάλων τους οποίους προσομοίωσε ο Γεωργιάδης (1992) μέσω φυγοκεντρική			
Χαρακτηριστικό	Πείραμα 1	Πείραμα 2	Πείραμα 3
Εξωτερική διάμετρος (m)	1.092	1.224	1.229
Πάχος τοιχώματος (mm)	44.45	17.25	15.25
Μήκος (m)	9.05	9.05	9.05
Μέτρο ελαστικότητας E_p (kPa)	$1.928*10^8$	$1.928*10^8$	$1.928*10^8$
Δυσκαμψία $E_p I_p$ (kNm ²)	3878.5	2495.0	2066.0



Εικόνα 3. 20: Πειραματική διάταξη φυγοκεντρική, Γεωργιάδης (1992)

Πίνακας 3. 24: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Γεωργιάδη (1992) για άμμο					
1 ^ο	$\varphi(^{\circ})$:	<30	30-36	>36	Επιλογή αρχικής κλίσης καμπύλης
	K (kN/m ³) :	1100-3400	3300-11000	11000-23400	
2 ^ο	$\alpha = \varphi/2$ $\beta = 45 + \varphi/2$ $K_o = 0.5$ $K_a = \tan(45 - \varphi/2)^2$ $A = \min [1, 2 - z/(3 * b)]$				Εξαγωγή διαφόρων δεικτών της μεθόδου συναρτήσει της γωνίας τριβής, φ , σε μοίρες ($^{\circ}$)
3 ^ο	$p_s = \min[p_1, p_2]$ $p_1 = K_a * b * \gamma' * z * (\tan(\beta)^8 - 1) + K_o * b * \gamma' * z * \tan(\varphi) * \tan(\beta)^4$ $p_2 = \gamma' * z * (K_o * z * \tan(\varphi) * \frac{\sin(\beta)}{\cos(\alpha) * \tan(\beta - \varphi)} + \frac{\tan(\beta)}{\tan(\beta - \varphi)} * (b + z * \tan(\beta) * \tan(\alpha)) + K_o * z * \tan(\beta) * (\tan(\varphi) * \sin(\beta) - \tan(\alpha) - K_a * b))$ $p_u = A * p_s$				
4 ^ο	$p = y / (\frac{1}{K} + \frac{y}{p_u})$				Μόρφωση καμπύλης p-y

3.2.5 Novello (1999) – Άμμος

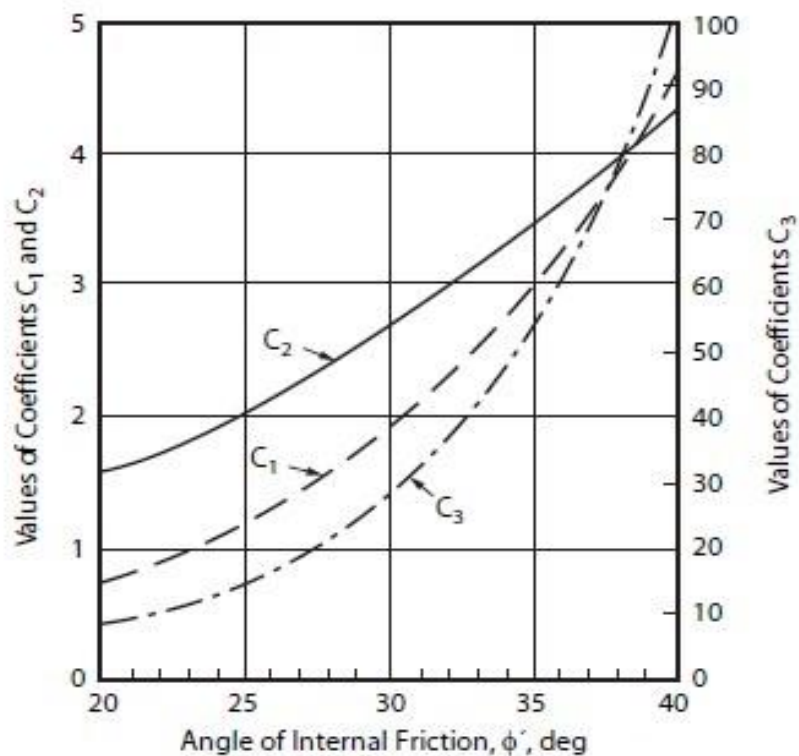
Ο Novello πραγματοποίησε μικρό αριθμό πειραμάτων, προσπαθώντας να παράξει μια καμπύλη p-y για άμμο, η οποία να εξαρτάται από την αντίσταση αιχμής της δοκιμής CPT.

Η καμπύλη δημιουργήθηκε προσπαθώντας να γίνει η καλύτερη προσαρμογή των δεδομένων στα αποτελέσματα των πειραμάτων. Ωστόσο, η μόρφωση της καμπύλης του προσεγγίζει τη συμπεριφορά του πασσάλου μόνο στις μικρές μετακινήσεις, αφού δεν έχει πλαστικό κλάδο ώστε να μεγιστοποιείται η αντίσταση σε κάποια μετατόπιση. Επομένως, αποτελεί μια μη ρεαλιστική καμπύλη, η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο στις πολύ μικρές μετατοπίσεις του πασσάλου.

Πίνακας 3. 25: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Novello (1999) για άμμο		
1°	$p = \gamma' * z * b * 4.2 * \left(\frac{q_c}{\gamma' * z}\right)^{0.68} * \left(\frac{y}{b}\right)^{0.56}$	Μόρφωση καμπύλης p-y

3.2.6 API (2007) – Άμμος

Η καμπύλη που χρησιμοποιεί το API, υιοθετεί τη μεθοδολογία του Reese, αλλά όπως και οι Murchison & O'Neill (1984) και Γεωργιάδης (1992), τροποποίησε τους διορθωτικούς συντελεστές της μέγιστης αντίδρασης, όπως αυτή προκύπτει από τους μηχανισμούς αστοχίας: τρισδιάστατη τύπου σφήνας και επίπεδης παραμόρφωσης. Αντί για τις σταθερές A,B, χρησιμοποιεί τις σταθερές c_1, c_2, c_3 , οι οποίες υπολογίζονται είτε μέσω της Εικόνας 3.21 είτε μέσω του Πίνακα 3.27. Όσον αφορά στην κλίση του αρχικού ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης, αυτή είναι ίδια με αυτήν που χρησιμοποιούν οι Murchison & O'Neill, επομένως υπολογίζεται είτε μέσω της Εικόνας 3.19 είτε μέσω του Πίνακα 3.26.



Εικόνα 3. 21: Τιμές των σταθερών c_1, c_2, c_3 συναρτήσει της γωνίας τριβής, API (2007)

Πίνακας 3. 26: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά API (2007) για άμμο		
1 ^ο	$c_1 = 0.115 * 10^{0.0405*\varphi}$ $c_2 = 0.571 * 10^{0.022*\varphi}$ $c_3 = 0.6464 * 10^{0.0555*\varphi}$ $K = 105.52 * \varphi^2 - 4321.6 * \varphi + 46079$ $A = \min [0.9, 3 - 0.8 * z/b]$	Εξαγωγή διαφόρων δεικτών της μεθόδου συναρτήσει της γωνίας τριβής, φ , σε μοίρες (°)
2 ^ο	$p_u = \min[p_1, p_2]$ $p_1 = c_3 * \gamma' * b * z$ $p_2 = \gamma' * z * (c_1 * z + c_2 * b)$	Εύρεση μέγιστης αντίστασης
3 ^ο	$p = p_u * A * \tanh\left(\frac{K * z * y}{A * p_u}\right)$	Μόρφωση καμπύλης p-y

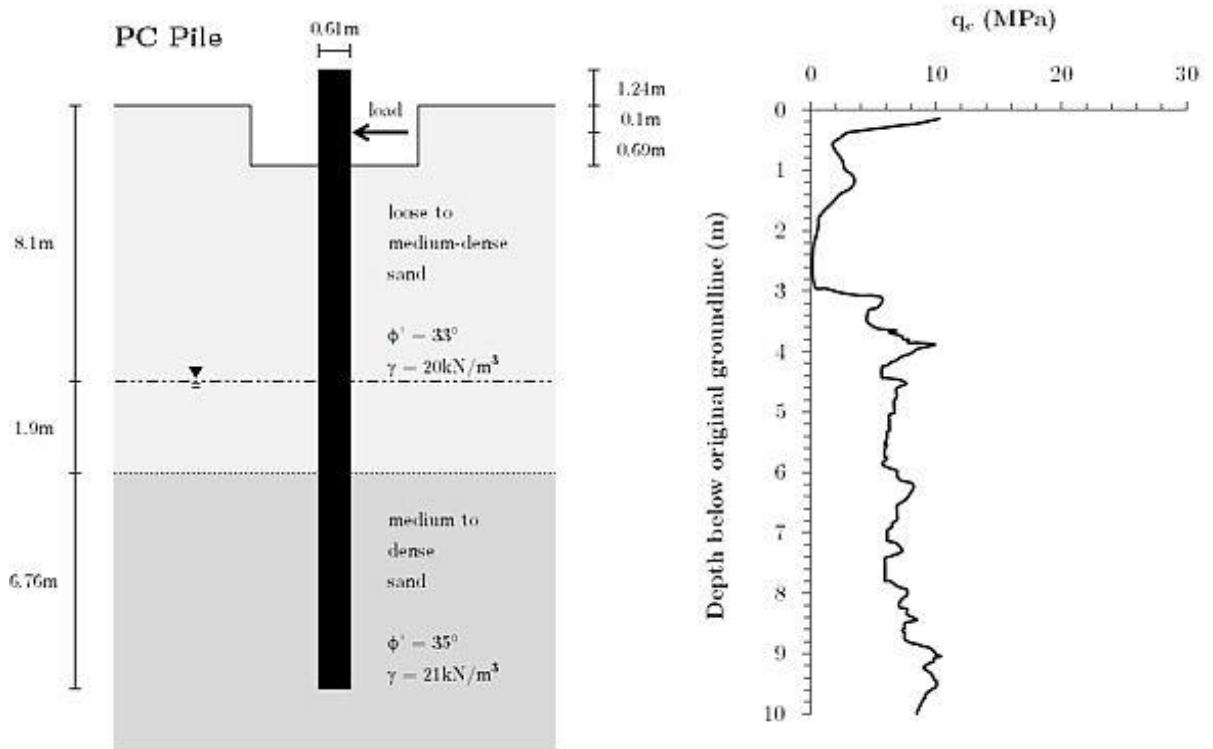
3.2.7 Suryasantan & Lehane (2014) – Άμμος

Οι Syrgasantana & Lehane έκαναν αναλύσεις σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (PLAXIS) για να παράξουν μια καμπύλη p-y που να εξαρτάται από την αντίσταση αιχμής της δοκιμής CPT, q_c . Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε πάσσαλος από σκυρόδεμα, με μέτρο ελαστικότητας $E_p=30$ GPa.

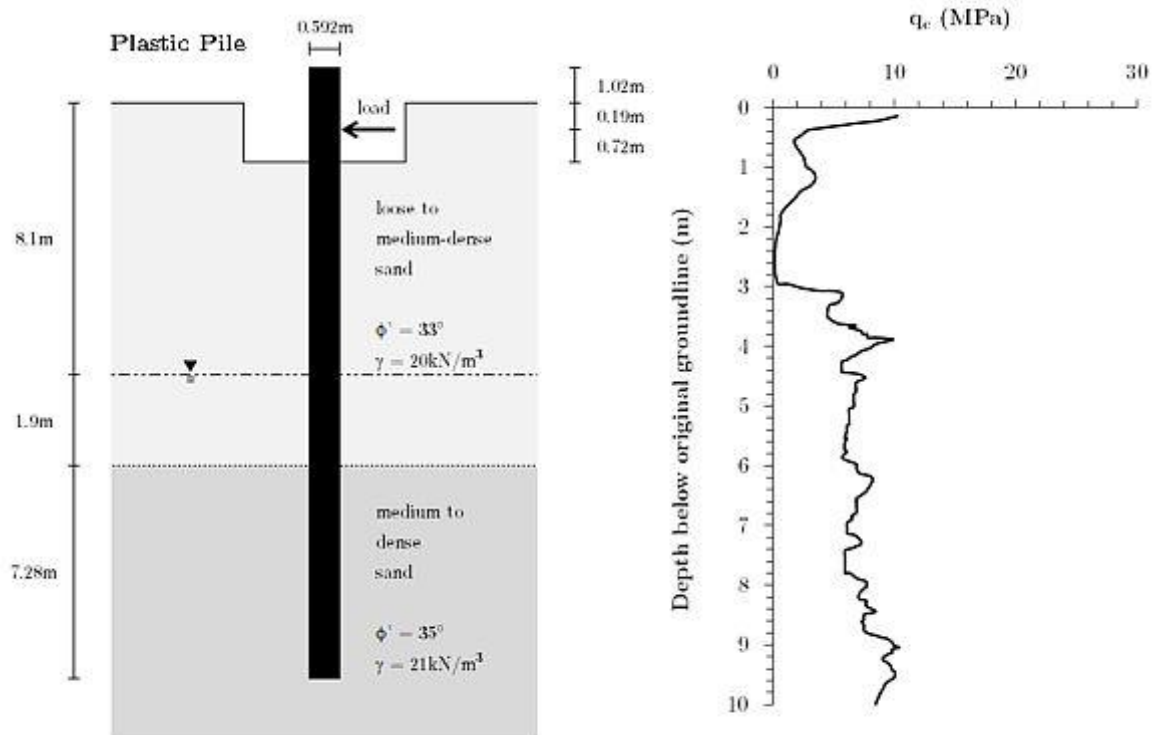
Η καμπύλη που προέκυψε έμοιαζε πολύ με αυτή του Novello (1999), ωστόσο μορφοποιήθηκε κατάλληλα ώστε να μην υπερεκτιμά την οριζόντια αντίδραση p στις μεγάλες μετατοπίσεις.

Κατόπιν, χρησιμοποίησαν τα αποτελέσματα από τέσσερα διαφορετικά πειράματα σε αμμώδη εδάφη που βρήκαν στη βιβλιογραφία για να ελέγξουν την ακρίβεια της μεθόδου τους.

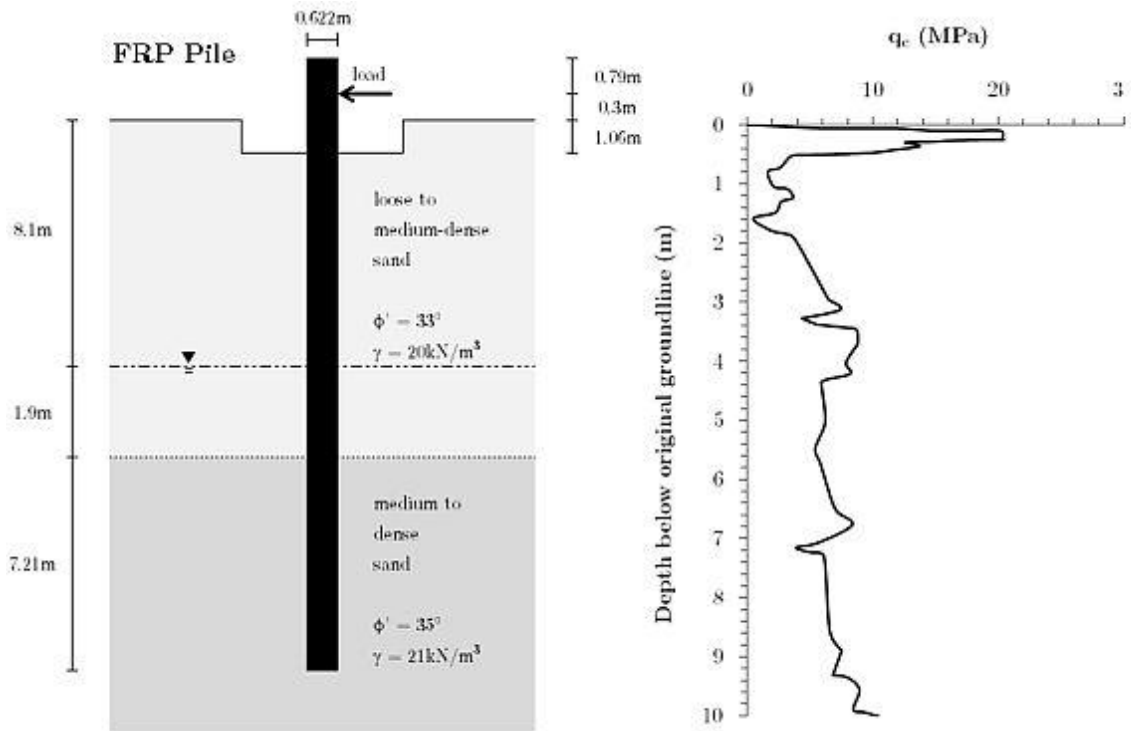
Το πρώτο πείραμα είναι αυτό που διενήργησε ο Pando (2006) στην περιοχή Hampton, σε μέτριας πυκνότητας, ιλυώδη, ακόρεστη άμμο (η μέθοδος έχει εφαρμογή σε κορεσμένη και μη άμμο, τα ακόρεστα εδάφη δεν απασχολούν την παρούσα εργασία, ωστόσο η περίπτωση παρατίθεται για λόγους πληρότητας). Χρησιμοποίησε τρεις διαφορετικούς πασσάλους, έναν από προεντεταμένο σκυρόδεμα (PC Pile), έναν πλαστικό(Plastic Pile) και έναν από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP Pile). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κάθε πασσάλου καθώς και η στρωματογραφία της κάθε γεώτρησης με το προφίλ q_c παρουσιάζονται αναλυτικά στις εικόνες 3.22 έως 3.24.



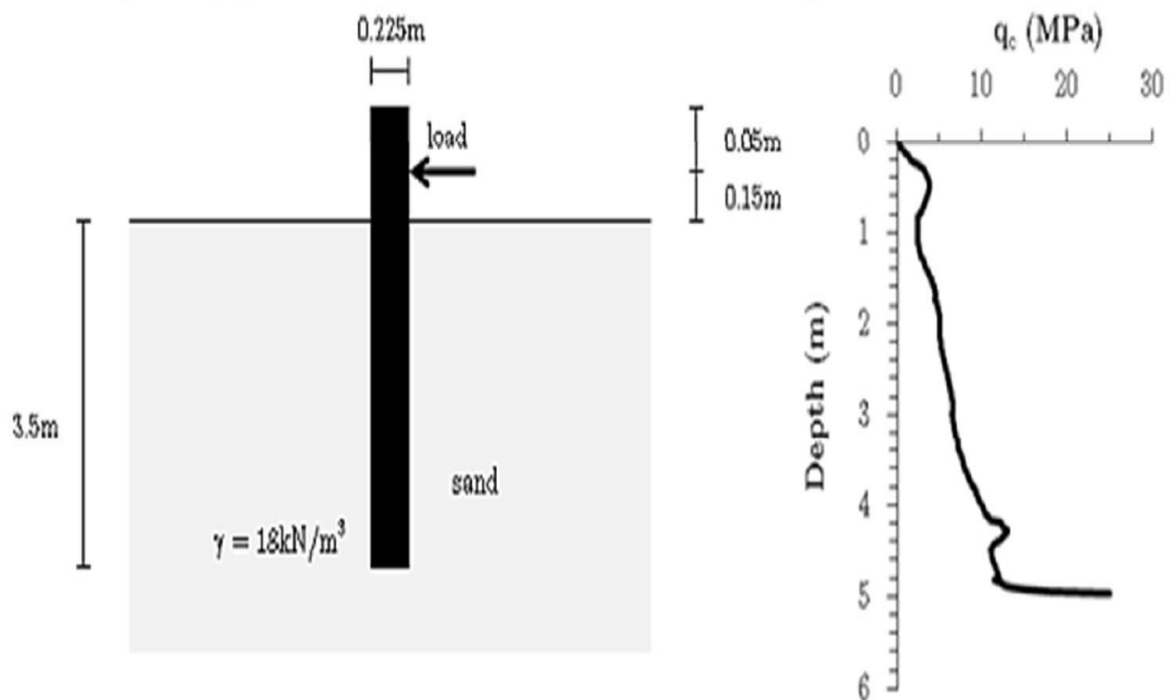
Εικόνα 3. 22: Πείραμα Pando (2006): Στρωματογραφία γεώτρησης προεντεταμένου πασσάλου από σκυρόδεμα (αριστερά) και προφίλ μεγέθους q_c στην αντίστοιχη γεώτρηση (δεξιά)



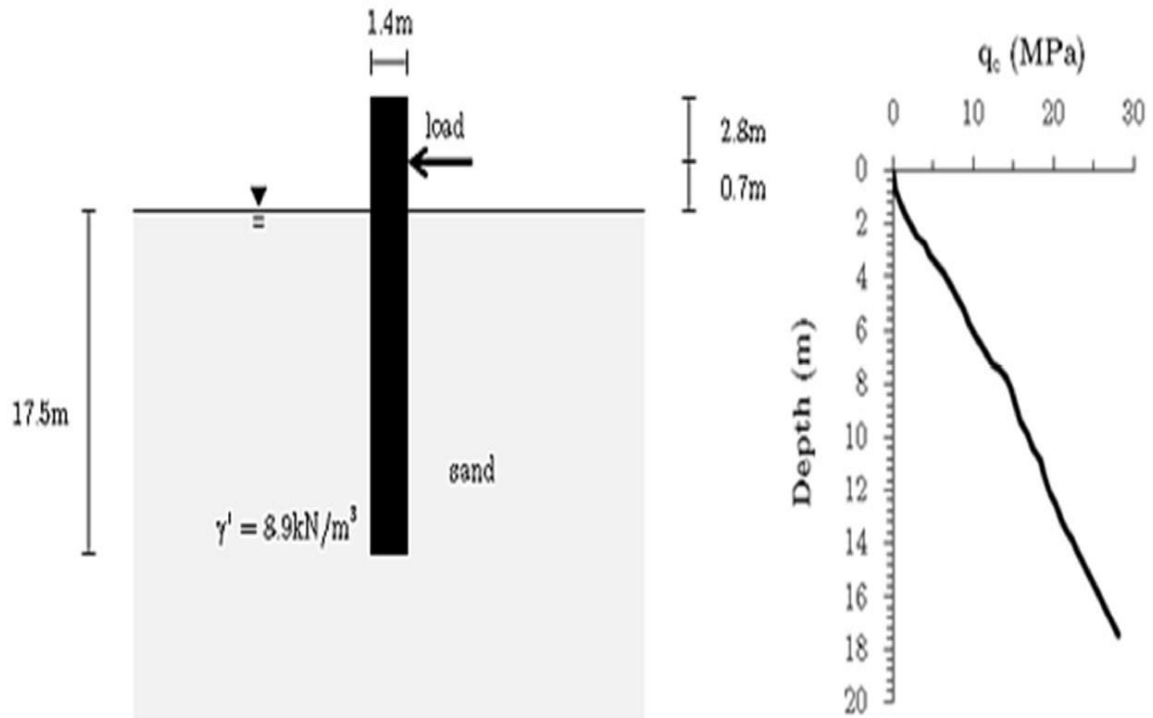
Εικόνα 3. 23: Πείραμα Pando (2006): Στρωματογραφία γεώτρησης πλαστικού πασσάλου (αριστερά) και προφίλ μεγέθους q_c στην αντίστοιχη γεώτρηση (δεξιά)



Εικόνα 3. 24: Πείραμα Pando (2006): Στρωματογραφία γεώτρησης ινοπλισμένου πασσάλου (αριστερά) και προφίλ μεγέθους q_c στην αντίστοιχη γεώτρηση (δεξιά)



Εικόνα 3. 25: Πείραμα Luff (2007): Στρωματογραφία γεώτρησης πασσάλου (αριστερά) και προφίλ μεγέθους q_c στην αντίστοιχη γεώτρηση (δεξιά)

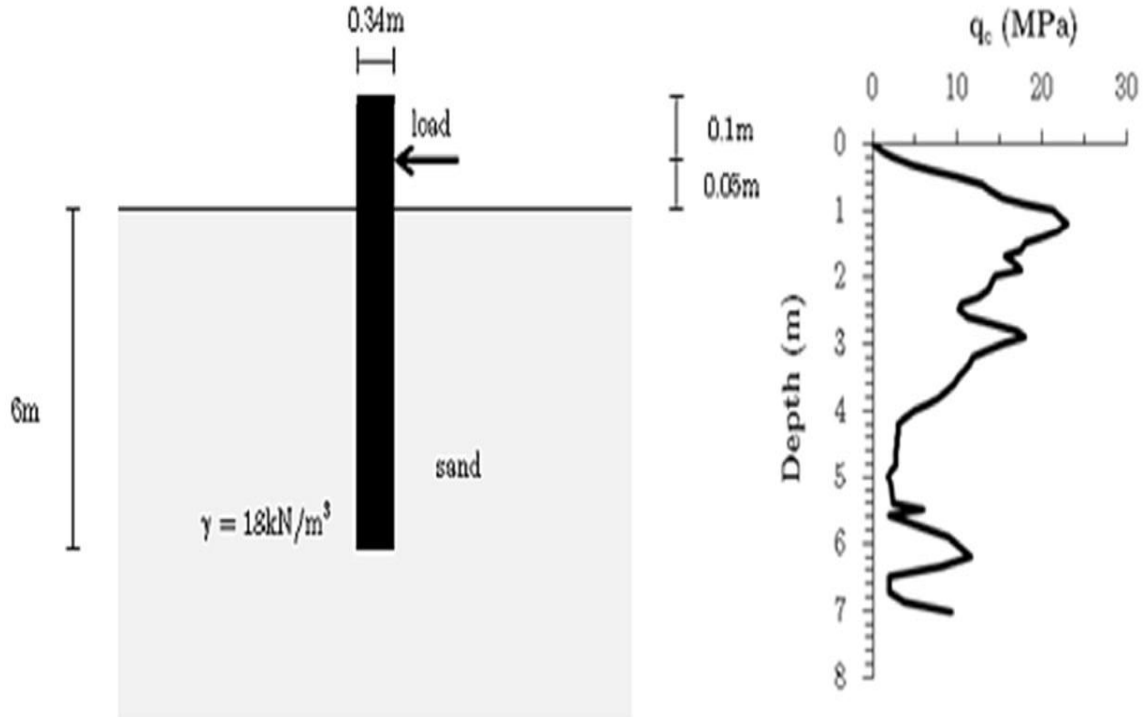


Εικόνα 3. 26: Πείραμα Ramadan (2013): Στρωματογραφία γεώτρησης πασσάλου (αριστερά) και προφίλ μεγέθους q_c στην αντίστοιχη γεώτρηση (δεξιά)

Το δεύτερο πείραμα έγινε από τον Luff (2007) στο Shenton Park, στο Πανεπιστήμιο Δυτική Αυστραλίας (U.W.A.). Χρησιμοποιήθηκαν έγχυτοι πάσσαλοι από σκυρόδεμα, διαμέτρου 225 χιλιοστών σε χαλαρή ακόρεστη άμμο. Ο πάσσαλος είχε δυσκαμψία $E_p I_p = 2420 \text{ kNm}^2$. Στην Εικόνα 3.25 φαίνεται το σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης και το προφίλ q_c .

Το τρίτο πείραμα έγινε σε φυγοκεντρική από τον Ramadan (2013), σε πυκνή, κορεσμένη άμμο, ενεργού ειδικού βάρους ίσο με 8.9 kN/m^3 . Ο πάσσαλος είχε διάμετρο 18 mm, πάχος τοιχώματος 1.5 mm και μήκος 300 mm. Επιταχυνόμενος στα 70g προσομοίαζε πάσσαλο διαμέτρου 1.4 m, μήκους 21 m και δυσκαμψίας $E_p I_p = 4484 \text{ kNm}^2$. Στην Εικόνα 3.26 φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πασσάλου πραγματικής κλίμακας και το προφίλ q_c της άμμου.

Η τελευταία περίπτωση αποτελεί πείραμα του Venville (2004), στο North Perth της Αυστραλίας, σε πυκνή ακόρεστη άμμο. Χρησιμοποιήθηκε πάσσαλος από σκυρόδεμα διαμέτρου 340 mm, μήκους 6 m και δυσκαμψίας $E_p I_{p, \text{uncracked}} = 11500 \text{ kNm}^2$ και $E_p I_{p, \text{cracked}} = 3500 \text{ kNm}^2$. Στην Εικόνα 3.27 φαίνεται το σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης και το προφίλ q_c .



Εικόνα 3. 27: Πείραμα Venville (2004): Στρωματογραφία γεώτρησης πασσάλου (αριστερά) και προφίλ μεγέθους q_c στην αντίστοιχη γεώτρηση (δεξιά)

Δεδομένου του μεγάλου εύρους γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών πασσάλων, βαθμού κορεσμού, σχετικής πυκνότητας άμμου και τιμών q_c , που απαρτίζουν τις 4 παραπάνω περιπτώσεις, η μέθοδος των Suryasentana & Lehane έδειξε ικανοποιητική συμφωνία με τα αποτελέσματα κάθε πειράματος. Τυχόντα σφάλματα οφείλονται στην αδυναμία των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων να προσομοιάσουν δυσκαμψία πασσάλου η οποία να μεταβάλλεται (στην περίπτωση ρωγμάτωσης πασσάλου από σκυρόδεμα). Ωστόσο, όλα τα σφάλματα κρίνονται αποδεκτά, και η μέθοδος ικανοποιητική, συγκρινόμενη με αυτές τις περιπτώσεις.

Πίνακας 3. 27: Περιγραφή p-y καμπύλης κατά Suryasentana & Lehane (2014) για άμμο

1 ^ο	$p = \gamma' * z * b * 2.4 * \left(\frac{q_c}{\gamma' * z} \right)^{0.67} * \left(\frac{z}{b} \right)^{0.56} * \left(1 - e^{-6.2 * \left(\frac{z}{b} \right)^{-1.2} * \left(\frac{y}{b} \right)^{0.89}} \right)$	Μόρφωση καμπύλης p-y
----------------	---	----------------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Προγραμματισμός καμπυλών p-y στον κώδικα MATLAB

4.1 Περιγραφή προγράμματος ανεπτυγμένου στον κώδικα MATLAB

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας δημιουργήθηκε κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, με σκοπό την αυτόματη αναπαραγωγή διαφόρων καμπυλών p-y. Κατόπιν, ο κώδικας αναπτύχθηκε σε αυτόνομο πρόγραμμα με, φιλική και εύχρηστη προς τον χρήστη, διεπαφή (interface), έτσι ώστε να μην απαιτείται η εγκατάσταση ή η γνώση MATLAB για τη λειτουργία του.

Σκοπός του προγράμματος είναι ο χρήστης να παρέχει ελάχιστα δεδομένα και να έχει δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε ένα μεγάλο πλήθος καμπυλών p-y αλλά και μεθοδολογιών απομείωσης για κεκλιμένο έδαφος.

Είδος εδάφους	Καμπύλες p-y
Μαλακή ή Μέτρια Αργίλος	Matlock (1970)
	Sullivan (1980)
	O'Neill & Gazioglu (1984)
	Broms & Choa (1998)
	Jeanjean (2009)
	Jeong (2009)
	Γεωργιάδης (2010)
	Lehane (2014)
NGI-11 (2014)	
Στιφρή ή Πολύ Στιφρή Αργίλος	Gill (1970)
	Welch & Reese (1972)
	Reese (1975)
	Sullivan (1980)
	O'Neill & Gazioglu (1984)
	Dunnivant & O'Neill (1989)
	Broms & Choa (1998)
	Dewaikar (2009)
Jeong (2009)	
Γεωργιάδης (2010)	
Άμμος	Gill (1970)
	Reese (1974)
	Murchison & O'Neill (1984)
	Γεωργιάδης (1992)
	Novello (1999)
	API (2007)
Syryasantana & Lehane (2014)	

Τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης είναι τα εξής: στρωματογραφία εδάφους (αστράγγιστη διατμητική αντοχή, γωνία τριβής, συνοχή, χτύποι SPT, αντίσταση αιχμής δοκιμής CPT), διάμετρος πασσάλου, μήκος πασσάλου, μέτρο ελαστικότητας υλικού πασσάλου, δείκτης τραχύτητας πασσάλου (0 για λείο έως 1 για τραχύ), ειδικό βάρος εδάφους και κλίση εδάφους. Τα δεδομένα στρωματογραφίας εισάγονται μέσω αρχείου Excel, ενώ τα

υπόλοιπα 6 δεδομένα, τα οποία είναι βαθμωτά μεγέθη, εισάγονται μέσα από το παράθυρο του προγράμματος. Ο χρήστης κατόπιν επιλέγει, με βάση το είδος εδάφους, ποια μεθοδολογία να εφαρμοστεί για χάραξη καμπύλης p-y και για απομείωσή της. Οι μεθοδολογίες p-y και απομείωσης, φαίνονται στους Πίνακες 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.

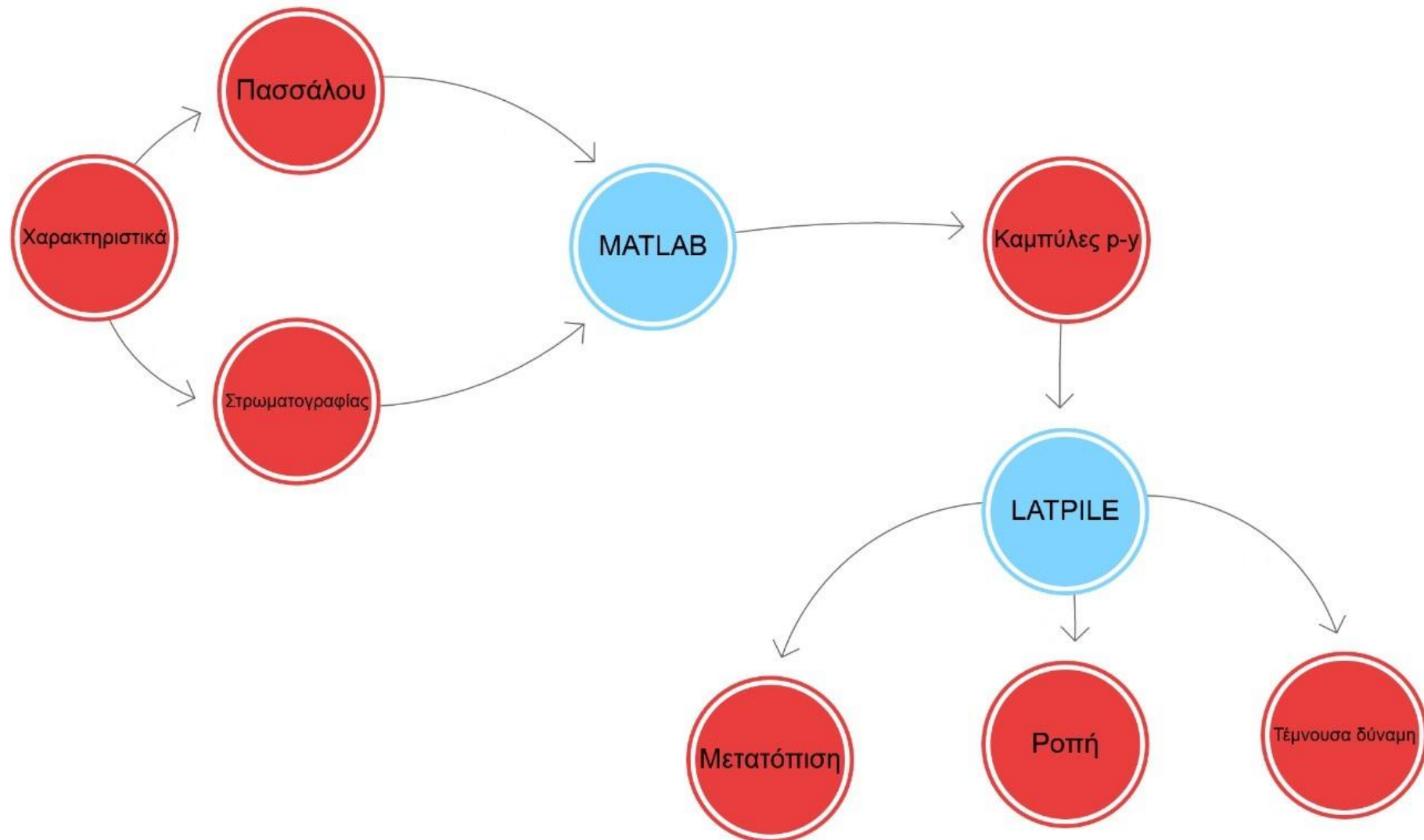
Παρατήρηση: Σε κάθε είδος εδάφους υπάρχει και μια μέση καμπύλη που θα σχολιασθεί και εξηγηθεί στη συνέχεια του Κεφαλαίου 4.1.

Είδος εδάφους	Μεθοδολογίες απομείωσης
Άργιλος	Reese
	Georgiadis
	Nimityongskul
Άμμος	Reese
	Gabr & Borden
	Mezazigh
	Barker
	Muthukkumaran

Τα είδη εδάφους που έχουν εξεταστεί στην παρούσα εργασία είναι άργιλος μαλακή έως μέτριας στιφρότητας, άργιλος στιφρή έως πολύ στιφρή και άμμος. Το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται αυτόματα σε τί κατηγορία εμπίπτει το έδαφος σε κάθε βάθος ανάλογα την τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3, και κατασκευάζει την αντίστοιχη καμπύλη p-y (την οποία μειώνει επίσης με την κατάλληλη μεθοδολογία απομείωσης).

Κριτήριο	Είδος εδάφους	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Παραμόρφωση ϵ_{50}
$0 < c_u$ (kPa) < 50	Μαλακή Άργιλος	5	2%
$50 < c_u$ (kPa) < 100	Μέτρια Άργιλος	20	1%
$100 < c_u$ (kPa) < 200	Στιφρή Άργιλος	40	0.5%
$200 < c_u$ (kPa)	Πολύ Στιφρή Άργιλος	75	0.2%
$0 < \phi(^{\circ}) < 30$	Χαλαρή Άμμος	5	2%
$30 < \phi(^{\circ}) < 36$	Μέτρια Άμμος	20	1%
$36 < \phi(^{\circ})$	Πυκνή Άμμος	40	0.5%

Το πρόγραμμα τελειώνει όταν υπολογιστούν οι, μορφοποιημένες ή μη, καμπύλες p-y για όλο το μήκος του πασσάλου, ανά τμήματα ίσα με τη διάμετρό του. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εμφανίσει τη γραφική παράσταση μιας καμπύλης p-y σε οποιοδήποτε βάθος επιλέξει (το βάθος επιλέγεται αδιαστατοποιημένο ως προς τη διάμετρο), να εμφανίσει ταυτόχρονα διαφορετικές καμπύλες, αλλά και να εξάγει τις καμπύλες σε μορφή txt. Η τελευταία επιλογή έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς έτσι, ο χρήστης μπορεί εύκολα να χρησιμοποιήσει τις καμπύλες που χρειάζεται σε άλλο πρόγραμμα. Στην παρούσα εργασία οι καμπύλες p-y που εξάγονται χρησιμοποιούνται ως δεδομένο εισόδου στο πρόγραμμα LATPILE, όπου εισάγοντας και ως δεδομένο τη φόρτιση του πασσάλου, προκύπτει η απόκρισή του σε όρους μετακίνησης (μετατόπιση και στροφή) και εντατικών μεγεθών (καμπτική ροπή και τέμνουσα δύναμη).



Εικόνα 4. 1: Δίκτυο ροής της πορείας επίλυσης της οριζόντιας απόκρισης του πασσάλου

Παρακάτω, απαριθμούνται και περιγράφονται τα βήματα με τα οποία το πρόγραμμα καταλήγει από τα δεδομένα, στις καμπύλες p-y:

1) Εισαγωγή δεδομένων

Ο χρήστης παρέχει ένα αρχείο .xls (Excel) με 5 στήλες. Η πρώτη στήλη έχει το βάθος z σε m. Η δεύτερη, την αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u σε kPa. Η τρίτη, την αντίσταση αιχμής q_c της δοκιμής CPT σε MPa (εάν δεν υπάρχει τέτοια δοκιμή τότε εισάγονται μηδενικά σε αυτήν τη στήλη). Η τέταρτη τους χτύπους N της δοκιμής SPT (εάν δεν υπάρχει τέτοια δοκιμή τότε εισάγονται μηδενικά σε αυτήν τη στήλη). Τέλος, η πέμπτη περιέχει τη γωνία τριβής ϕ σε μοίρες. Το περιεχόμενο του αρχείου θα πρέπει να είναι μόνο αυτές οι στήλες με τα νούμερα, και στη σωστή σειρά. Ακόμη, ο χρήστης εισάγει: διάμετρο b (m), μήκος L (m), μέτρο ελαστικότητας πασσάλου E_p (GPa), ειδικό βάρος εδάφους γ (kN/m^3), δείκτη τραχύτητας πασσάλου α (αδιάστατο, από 0, για λείο πάσσαλο, έως 1, για τραχύ) και κλίση εδάφους σε μοίρες.

Γίνονται οι εξής παραδοχές:

- Ο πάσσαλος έχει σταθερή διάμετρο σε όλο του το μήκος.
- Η διατομή του πασσάλου είναι συμπαγής και όχι κοίλη. Κατ'αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η ροπή αδρανείας της διατομής, I (m^4), και στη συνέχεια η δυσκαμψία του πασσάλου, $E_p I_p$ (kNm^2).
- Ως μήκος, πρέπει να εισάγεται το μήκος του πασσάλου που είναι κάτω από τη στάθμη του εδάφους.
- Το έδαφος είναι κορεσμένο, επομένως από το δεδομένο γ , θα αφαιρεθούν 10 kN/m^3 ώστε να προκύψει το ενεργό ειδικό βάρος. Εάν ο χρήστης θέλει να δουλέψει σε ακόρεστο έδαφος, τότε μπορεί να βάλει όπου ειδικό βάρος την τιμή: $\gamma+10 \text{ kN/m}^3$ ωστόσο δε συνιστάται καθώς οι περισσότερες μεθοδολογίες ισχύουν μόνο για κορεσμένα εδάφη. Εάν ο χρήστης σκοπεύει να χρησιμοποιήσει μόνο μεθοδολογίες που δεν εξαρτώνται από τον βαθμό κορεσμού του εδάφους, τότε το “κόλπο” να τεθεί ειδικό βάρος μεγαλύτερο κατά 10 kN/m^3 , θα δουλέψει ικανοποιητικά.
- Εάν το έδαφος είναι αμμώδες (είτε όλο είτε μία ή περισσότερες στρώσεις του) τότε η γωνία κλίσης θα πρέπει να είναι μικρότερη από τη γωνία τριβής, ϕ .

Αφού εισαχθούν όλα τα δεδομένα, ο χρήστης επιλέγει μία μεθοδολογία p-y για κάθε είδος εδάφους, και μία μέθοδο απομείωσης, λόγω πρανούς, για κάθε είδος εδάφους. Το σύνολο των μεθόδων φαίνεται στους Πίνακες 4.2 και 4.3.

Από εδώ και στο εξής, η κάθε διεργασία πραγματοποιείται ανά στάθμες βάθους, που η κάθε στάθμη είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της διαμέτρου. Επομένως ο πάσσαλος χωρίζεται στα βάθη $z=b$, $z=2b$... $z=n*b$, όπου αναγκαστικά $n < L/b$ και ακέραιος.

2) Είδος εδάφους

Για κάθε στάθμη z, ανάλογα τα δεδομένα καθορίζεται εάν το έδαφος είναι μαλακή άργιλος ($c_u < 100 \text{ kPa}$), στιφρή άργιλος ($c_u > 100 \text{ kPa}$) ή άμμος ($c_u = 0$).

3) Εξαγωγή δείκτη απομείωσης r

Εάν το έδαφος δεν είναι οριζόντιο αλλά έχει κλίση διάφορη των 0 μοιρών, τότε υπολογίζεται για κάθε στάθμη ο μειωτικός συντελεστής r , που προτείνει η επιλεγμένη μεθοδολογία για το έδαφος της αντίστοιχης στάθμης. Ο αριθμός r είναι ένας συντελεστής μειωτικός που πολλαπλασιάζει ολόκληρη την καμπύλη $p-y$.

Ωστόσο, πολλές μεθοδολογίες προτείνουν όχι απομείωση της καμπύλης, αλλά απομείωση της μέγιστης αντοχής p_u (συντελεστής ψ). Επειδή οι περισσότερες καμπύλες, θεωρούν την αντίδραση p για κάθε μετατόπιση y , ανάλογη της μέγιστης αντίδρασης p_u , έγινε η παραδοχή ότι $\psi=r$. Η παραδοχή αυτή δε διαφέρει από την πραγματικότητα, παρά μόνο ίσως στα αρχικά ευθύγραμμα τμήματα των καμπυλών που προτείνουν κάποιες μεθοδολογίες, των οποίων την κλίση δε συσχετίζουν με την αντίδραση p_u . Επειδή αυτές οι μεθοδολογίες είναι πολύ λίγες, θεωρήθηκε ότι γενικά ισχύει $\psi=r$ δίχως μεγάλο σφάλμα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αρκετές μεθοδολογίες απομείωσης έχουν εφαρμογή σε ένα συγκεκριμένο εύρος κλίσεων. Εάν η κλίση εδάφους δεν είναι μέσα σε αυτό το φάσμα της επιλεγμένης μεθοδολογίας, τότε δεν υπολογίζεται συντελεστής r , και εμφανίζεται αντίστοιχο μήνυμα σφάλματος.

4) Κατασκευή καμπυλών $p-y$ και μέσης καμπύλης $p-y$

Σε κάθε στάθμη, και ανάλογα τον τύπο εδάφους, παρασκευάζεται μια καμπύλη $p-y$ για κάθε μεθοδολογία που εφαρμόζεται σε αυτόν τον τύπο εδάφους. Οι καμπύλες αυτές, αποτελούνται από 3000 σημεία. Η μετακίνηση y ορίζεται έως τα 3 μέτρα (m) με βήμα 1 χιλιοστό (mm). Τα 3 μέτρα θεωρούνται επαρκής μετακίνηση για διαμέτρους πασσάλων έως και 6 μέτρα. Γενικά, μια αποδεκτή μετακίνηση περιορίζεται στο μισό της διαμέτρου, επομένως τα 3 μέτρα μετακίνησης καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα φυσιολογικών τιμών για διαμέτρους.

Κατόπιν, παρασκευάζεται η μέση καμπύλη $p-y$, ως ο μέσος όρος όλων των υπολοίπων καμπυλών. Εάν σε αυτήν τη στάθμη, λείπουν τα δεδομένα της δοκιμής SPT ή CPT ή και των δύο, τότε οι καμπύλες που προκύπτουν από τις μεθοδολογίες που βασίζονται σε αυτές τις δοκιμές, δεν παρασκευάζονται, και η μέση καμπύλη προκύπτει ως ο μέσος όρος των εναπομεινουσών καμπυλών.

5) Χάραξη καμπυλών $p-y$

Ο χρήστης εισάγει το βάθος στο οποίο επιθυμεί να αντιστοιχεί η καμπύλη $p-y$. Το βάθος αυτό εισάγεται ως πολλαπλάσιο της διαμέτρου, έτσι ώστε να μην υπερβαίνεται το συνολικό μήκος του πασσάλου. Το πρόγραμμα ανακτά την καμπύλη $p-y$ που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο βάθος και την επιλεγθείσα μεθοδολογία, αναλόγως το είδος του εδάφους εκεί, και την εμφανίζει σε διάγραμμα.

Ακόμη, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το εύρος της μετακίνησης y που φαίνεται στο διάγραμμα. Για παράδειγμα, εάν εισαχθεί διάμετρος πασσάλου ίση με 2 μέτρα, ο χρήστης μπορεί να περιορίσει τις τιμές της μετακίνησης y έως το 1 μέτρο, στο διάγραμμα.

Κατ'αυτόν τον τρόπο μπορεί να επικεντρωθεί στο πεδίο μετακινήσεων που τον αφορούν περισσότερο.

6) Εξαγωγή καμπύλων p-y

Ανά στάθμη εδάφους, η καμπύλη που προκύπτει από τη μεθοδολογία η οποία έχει επιλεγεί από τον χρήστη, υφίσταται μια τροποποίηση. Από 3000 σημεία και εύρος μετατόπισης 0 έως 3 μέτρα, τροποποιείται σε καμπύλη με 200 σημεία και εύρος μετατόπισης -3 έως 3 μέτρα. Η καμπύλη είναι τελείως συμμετρική ως προς την αρχή των αξόνων, επομένως ισχύει ότι:

$$P(y=-a)=-P(y=+a)$$

όπου α είναι θετικός αριθμός από 0 έως 3.

Η μείωση από 3000 σημεία σε 100 (100 στο διάστημα [0, 3] και άλλα 100 στο διάστημα [-3, 0]) έγινε με κατάλληλη αραίωση της αρχικής καμπύλης.

Συγκεκριμένα:

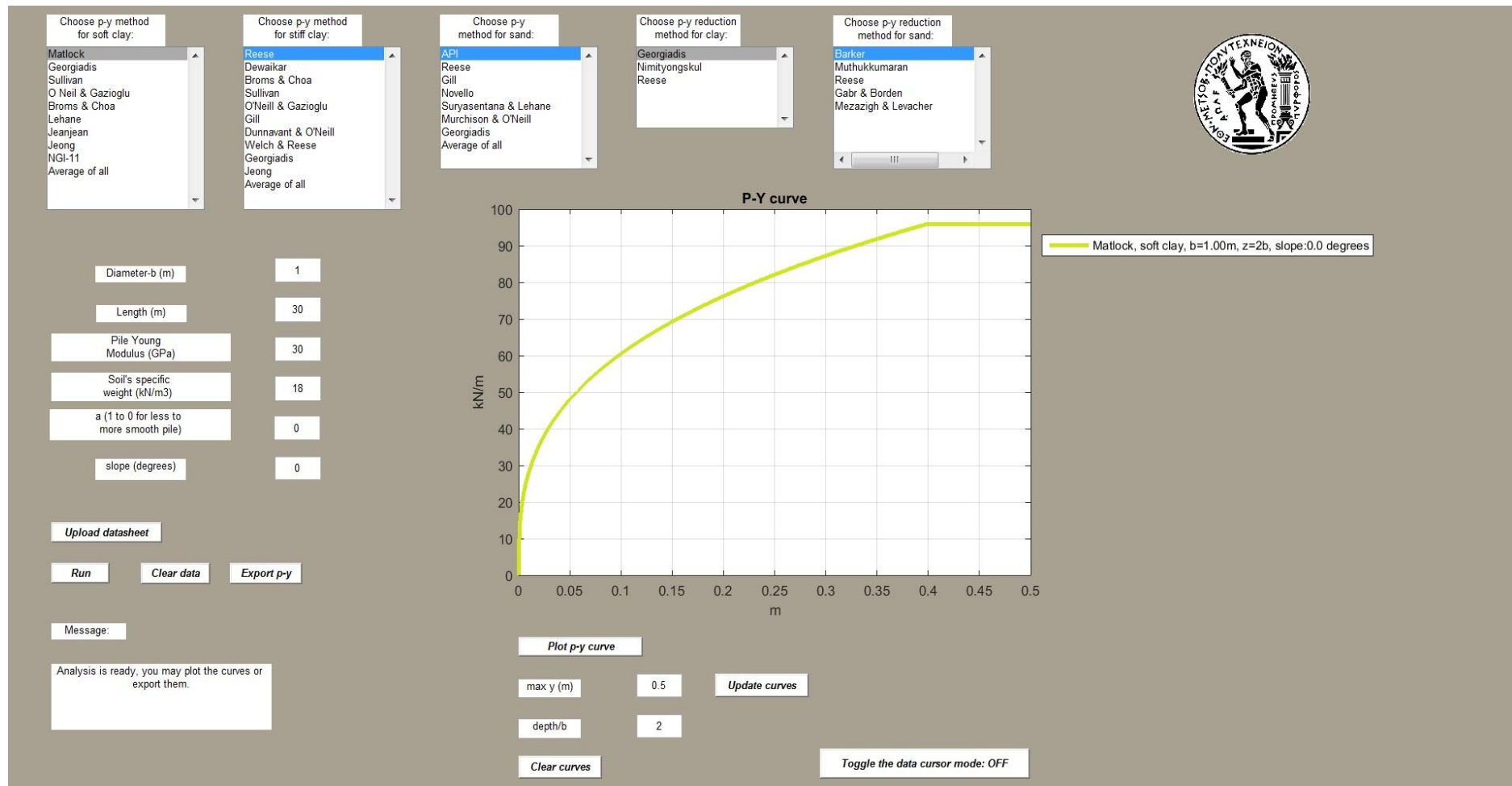
- Το 50% των 100 σημείων αντιστοιχεί σε μετατόπιση $y=0-5\% b$, με σταθερό βήμα.
- Το επόμενο 40%, αντιστοιχεί σε μετατόπιση $y=5\% b-50\% b$, με σταθερό βήμα.
- Το τελευταίο 10%, αντιστοιχεί σε μετατόπιση $y=50\% b-3m$, με σταθερό βήμα.

Γίνεται μεγαλύτερη πύκνωση στις μικρές μετατοπίσεις. Αυτό γίνεται διότι συνήθως οι αποδεκτές μετατοπίσεις περιορίζονται σε μικρά ποσοστά της διαμέτρου. Επιπλέον γίνεται, επειδή σε αυτό το διάστημα η καμπύλη p-y περνά από τον ελαστικό στον πλαστικό κλάδο, άρα υπάρχει ανάγκη ακριβείας ώστε να αποτυπωθεί με μεγάλη λεπτομέρεια η μη γραμμικότητα της καμπύλης. Ο λόγος που γίνεται αυτή η μετατροπή είναι ο εξής: Το πρόγραμμα LATPILE, στο οποίο θα χρησιμοποιηθούν αυτές οι καμπύλες p-y για να υπολογιστεί η απόκριση του πασσάλου, δέχεται καμπύλες p-y που έχουν από 4 έως 200 σημεία, και που είναι συμμετρικές ως προς την αρχή των αξόνων.

Κατ'αυτόν τον τρόπο, n+1 αρχεία .txt εμφανίζονται στον φάκελο όπου βρίσκεται το πρόγραμμα. Ο αριθμός n ισούται με το ηλίκο μήκος προς διάμετρο (στρογγυλοποιημένο στον αμέσως μικρότερο ακέραιο). Επομένως, εάν το μήκος ενός πασσάλου είναι 28 μέτρα και η διάμετρός του ίση με 0.9 μέτρα, θα είναι $28/0.9=31.111$, άρα $n=31$, άρα θα παραχθούν 32 καμπύλες, από το βάθος $z=0b$ (ή $z=0$ m) έως το βάθος $z=31b$ (ή $z=27.9$ m). Όλα τα αρχεία txt έχουν τίτλο της μορφής: "p_y curve for ratio of depth to diameter equal to n.txt".

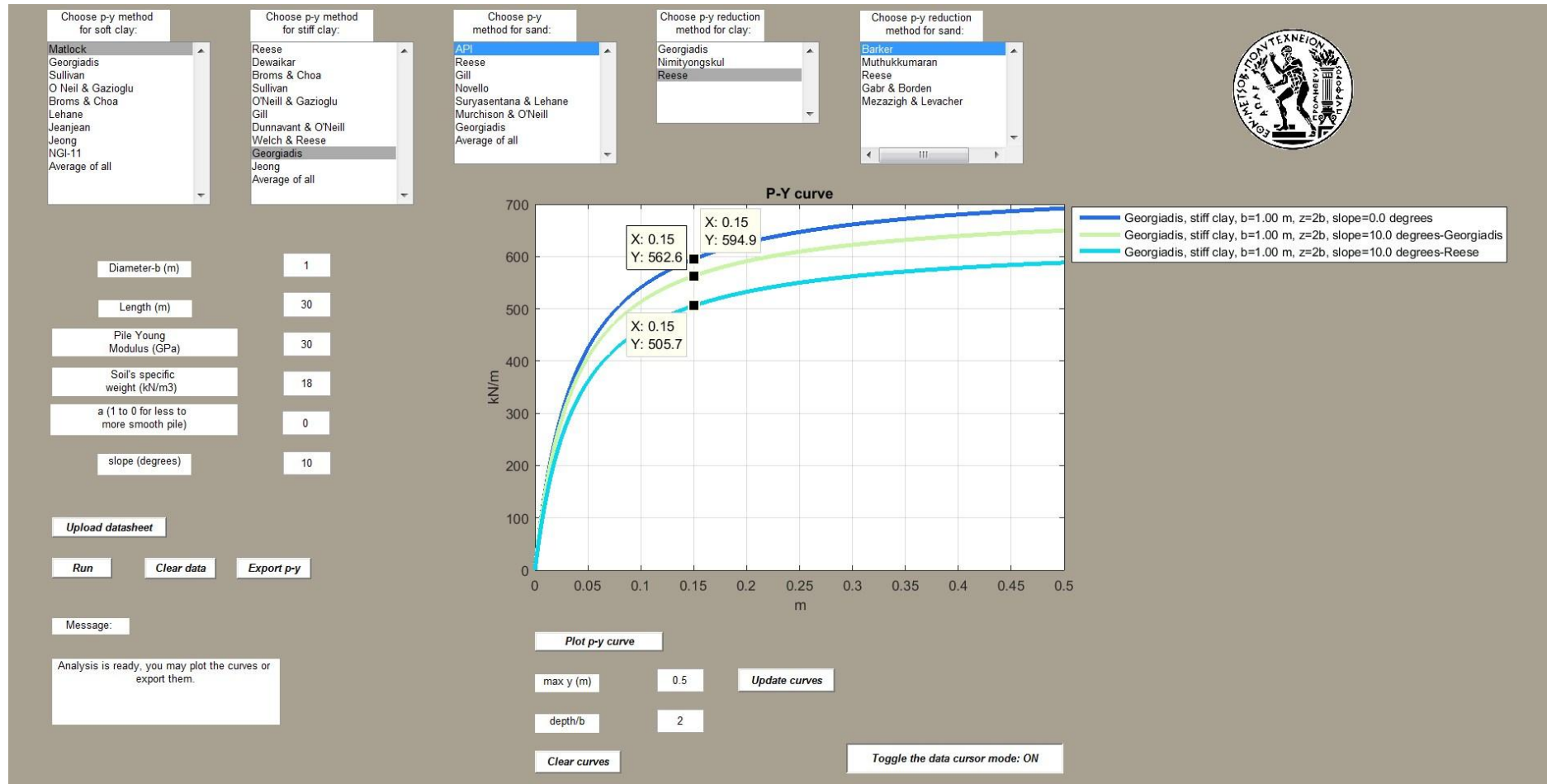
Ο κώδικας του προγράμματος παρουσιάζεται εκτενώς στο Παράρτημα Α, ενώ στις Εικόνες 4.2 και 4.3 φαίνονται κάποιες από τις δυνατότητες του προγράμματος.

Ανάλυση απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση



Εικόνα 4. 2: Παράδειγμα ανάπτυξης καμπύλης p-y στο πρόγραμμα της MATLAB

Κεφάλαιο 4^ο: Προγραμματισμός καμπύλων p-y στον κώδικα MATLAB



Εικόνα 4. 3: Παράδειγμα ανάπτυξης καμπύλων p-y στο πρόγραμμα της MATLAB

4.2 Μειονεκτήματα και περιθώρια βελτίωσης προγράμματος

Ένα από τα μειονεκτήματα του προγράμματος είναι ότι δεν μπορεί να υπολογίσει τη δυσκαμψία κοίλου πασσάλου, διότι έχει σχεδιαστεί για πλήρεις διατομές. Ένα κόλπο για να παρακαμφθεί αυτή η ατέλεια είναι να τεθεί κατάλληλα μικρότερη τιμή για το μέτρο ελαστικότητας, ώστε το γινόμενο της υπερεκτιμημένης ροπής αδρανείας I , με το υποτιμημένο μέτρο ελαστικότητας να δώσουν τη σωστή δυσκαμψία.

Ακόμα, το πρόγραμμα δεν μπορεί να εξάγει καμπύλες $p-y$ σε βάθη τα οποία δεν είναι πολλαπλάσια της διαμέτρου. Στο Κεφάλαιο 5 αποδεικνύεται ότι η απόκλιση που εμφανίζουν τα αποτελέσματα του LATPILE, εάν εισαχθούν ως δεδομένα αραιότερες ή πυκνότερες καμπύλες $p-y$, είναι αποδεκτό. Επομένως, η δυνατότητα να παράγονται καμπύλες $p-y$ και σε βάθη που είναι μη ακέραια πολλαπλάσια της διαμέτρου, για περαιτέρω πύκνωση των καμπυλών $p-y$ κατά το βάθος, κρίνεται περιττή.

Τέλος, δεν υπάρχει δυνατότητα η μέση καμπύλη να παραχθεί ως ο μέσος όρος επιλεγμένων μεθοδολογιών αντί για όλων των μεθοδολογιών. Υπάρχει περίπτωση ο χρήστης να μην εμπιστεύεται κάποιες συγκεκριμένες μεθοδολογίες, επομένως να θέλει να τις αποκλείσει από την εξαγωγή της μέσης καμπύλης. Ωστόσο, σε περίπτωση που λείπουν δεδομένα για την χάραξη κάποιων καμπυλών (έλλειψη χτύπων SPT και μετρήσεων CPT οδηγούν σε αδυναμία χάραξης των καμπυλών των Lehane, Gill, Novello και Syrgasentana & Lehane) το πρόγραμμα αυτομάτως μορφώνει τη μέση καμπύλη ως μέσο όρο όλων των υπολοίπων καμπυλών, πλην αυτών.

4.3 Χαρακτηριστικά πασσάλου

Για όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος πάσσαλος. Η διάμετρος του είναι ίση με 1 m, που είναι μια τυπική τιμή για πασσάλους. Το μήκος του τέθηκε ίσο με 30 μέτρα, χωρίς να επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, καθώς οι μετατοπίσεις και τα εντατικά μεγέθη που προκαλούν τα εγκάρσια φορτία, συνήθως περιορίζονται στις πρώτες 5-10 διαμέτρους.

Το μέτρο ελαστικότητας του πασσάλου, E , τέθηκε ίσο με 30 GPa, γεγονός που σημαίνει ότι ο πάσσαλος είναι από σκυρόδεμα. Είναι λογικό ότι καθώς ο πάσσαλος υπόκειται σε μετατοπίσεις, ρηγματώνεται και, ως αποτέλεσμα, το μέτρο ελαστικότητάς του μειώνεται. Ωστόσο επειδή καμία από τις μεθόδους δε λαμβάνει υπ' όψιν μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας, απλοποιητικά χρησιμοποιήθηκε αυτή η τιμή ως αμετάβλητη. Θα ήταν, επί του δυσμενέστερου, λογικό να τοποθετηθεί μια τιμή που να αντιστοιχεί στο ρηγματωμένο σκυρόδεμα, όμως αυτό θα επηρέαζε δυσμενώς τα αρχικά, συνήθως ευθύγραμμα, τμήματα των καμπυλών $p-y$. Ως αποτέλεσμα, για τα ίδια οριζόντια φορτία, θα προέκυπταν μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Αυτό θα ήταν πιο ασφαλές ως προσέγγιση για μεγάλα οριζόντια φορτία, όμως για φορτία που αντιστοιχούν στα ελαστικά τμήματα του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης, θα ήταν υπερβολικό, καθώς οι μετατοπίσεις σε αυτά τα τμήματα είναι τόσο μικρές, επομένως το σκυρόδεμα δε θα έχει προλάβει να ρηγματωθεί.

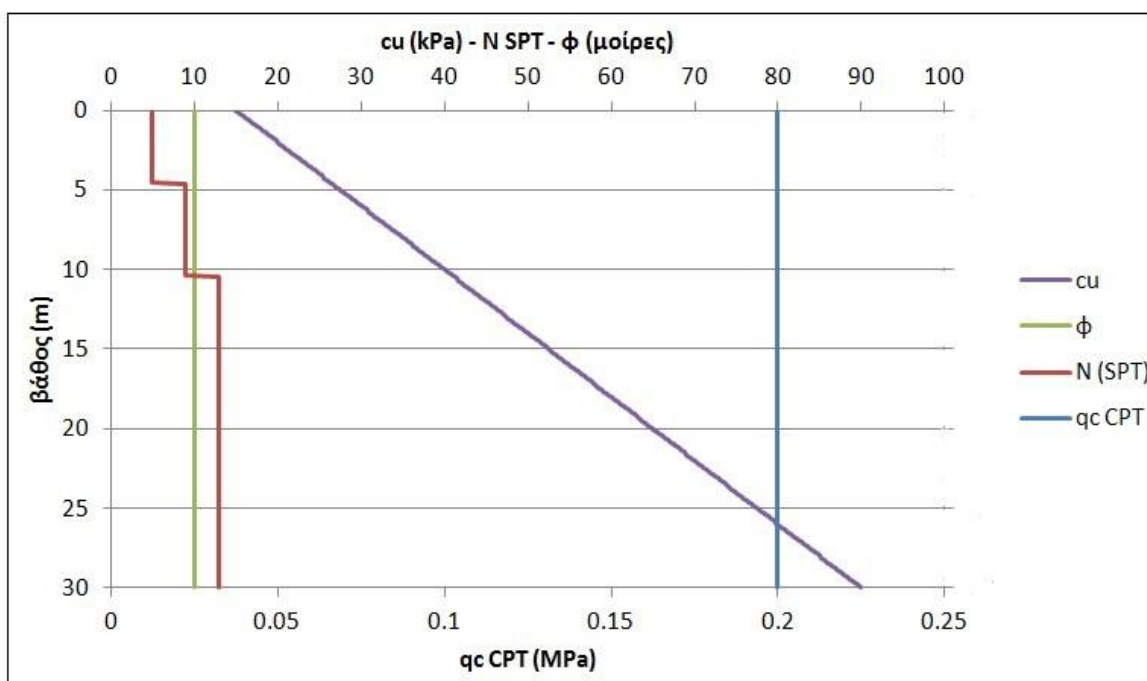
Ο δείκτης τραχύτητας, α , τέθηκε ίσος με 0, υπονοώντας λείο πάσσαλο. Λείοι πάσσαλοι συνήθως είναι οι εμπηγνύομενοι, σε αντίθεση με τους δι'εκσκαφής, που λόγω της έγχυσης του σκυροδέματος και πήξης του εντός της γεώτρησης, αποκτούν συνάφεια και τριβή με το γύρω έδαφος. Επειδή στις υπεράκτιες κατασκευές οι πάσσαλοι συνήθως εμπηγνύονται με σφύρα, κρίθηκε αποδεκτό να θεωρηθεί $\alpha=0$. Επιπλέον, αυτή η θεώρηση είναι επί του δυσμενέστερου, καθώς η ύπαρξη τριβής στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους, βελτιώνει την απόκριση του πασσάλου στην εγκάρσια φόρτιση.

Τα χαρακτηριστικά του πασσάλου παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.4.

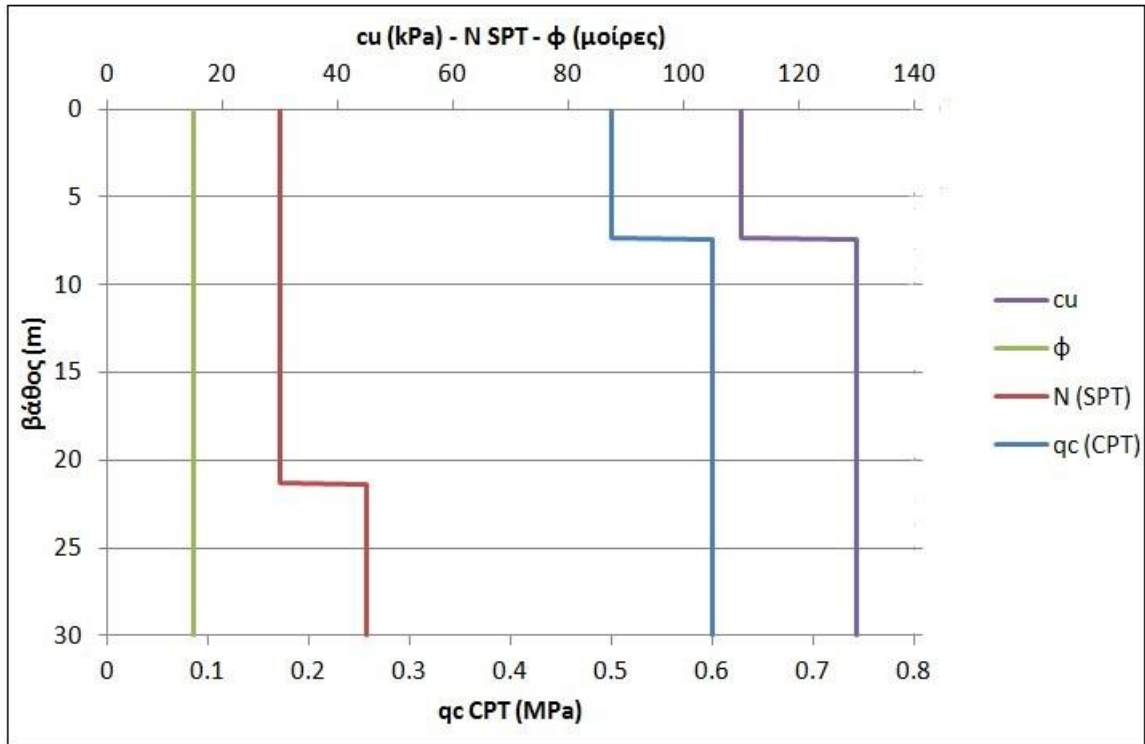
Πίνακας 4. 4: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά πασσάλου που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις	
Χαρακτηριστικό	Τιμή
Διάμετρος, b	1 m
Μήκος, L	30 m
Μέτρο Ελαστικότητας, E_p	30 GPa
Δείκτης τραχύτητας, α	0

4.4 Στρωματογραφία

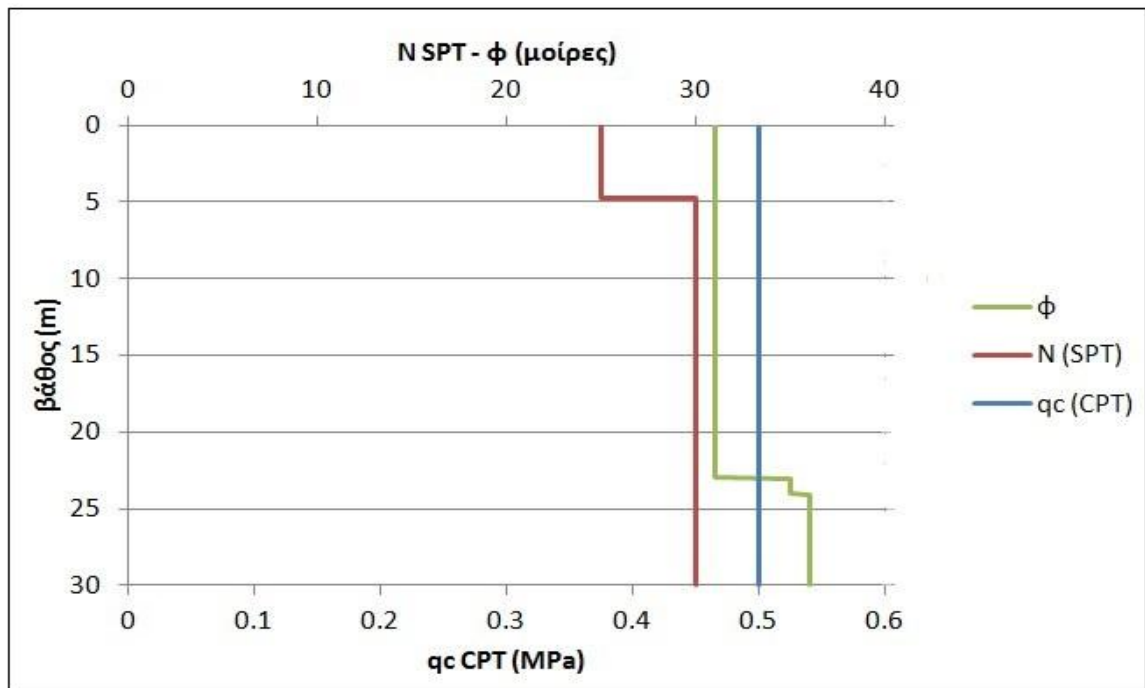
Όλα τα εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ενεργό ειδικό βάρος $\gamma'=8 \text{ kN/m}^3$. Τα υπόλοιπα μηχανικά χαρακτηριστικά των εδαφών, είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u , η γωνία τριβής ϕ , οι χτύποι N της μέτρησης SPT και η αντίσταση αιχμής q_c της δοκιμής CPT. Οι τιμές των παραπάνω φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα των Εικόνων 4.2 έως 4.4, συναρτήσει του βάθους.



Εικόνα 4. 4: Στρωματογραφία μαλακής αργίλου



Εικόνα 4. 5: Στρωματογραφία σιφικής αργίλου



Εικόνα 4. 6: Στρωματογραφία άμμου

Για τη μαλακή άργιλο, επιλέχθηκε ένα γραμμικά αυξανόμενο προφίλ αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, της μορφής $c_u = c_{u0} + \beta * z$, με αρχική τιμή στην επιφάνεια του εδάφους ίση με 15 kPa, και ρυθμό αύξησης 2.5 kPa/m, επομένως είναι: $c_u = 15 + 2.5 * z$.

Αντιθέτως, για τη στιφρή άργιλο χρησιμοποιήθηκαν τιμές, σταθερές με το βάθος, για την αστράγγιστη διατμητική αντοχή. Έτσι, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή στην άργιλο ισούται με 110 kPa στα πρώτα 7.5 m και κατόπιν αυξάνεται κατά 20 kPa.

Τέλος, για την άμμο επιλέχτηκε μια γωνία τριβής 31^ο-36^ο, δηλαδή μια άμμος μέτριας πυκνότητας προς πυκνή.

4.5 Εκτίμηση οριακού αξονικού φορτίου μεμονωμένων πασσάλων

Με βάση το μήκος και τη διάμετρο του πασσάλου και τη στρωματογραφία του εδάφους στο οποίο θεμελιώνεται ο καθένας, μπορεί να εξαχθεί το οριακό αξονικό φορτίο του καθενός, δεδομένου ότι οι πάσσαλοι είναι εμπηγνύομενοι.

4.5.1 Εκτίμηση οριακού αξονικού φορτίου πασσάλου στη μαλακή άργιλο

Η μαλακή άργιλος έχει γωνία τριβής ίση με $\phi=10^{\circ}$, που σημαίνει ότι ο λόγος κρίσιμο μήκος/διάμετρο ισούται με 3.5. Άρα το κρίσιμο μήκος ισούται με $L_{cr} = 3.5 * b = 3.5$ m. Σε αυτό το βάθος, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή ισούται με $c_u=15+2.5*3.5=23.75$ kPa. Άρα, κατά Meyerhof, η αντίσταση αιχμής του πασσάλου, η οποία εξάγεται στη στάθμη του κρίσιμου μήκους, ισούται με $q_{pu} = 9 * c_u = 9 * 23.75 = 213.75$ kPa. Επίσης, από τη στιγμή που η αστράγγιστη διατμητική αντοχή κυμαίνεται από 15 έως 90 κατά μήκος του πασσάλου, θα ληφθεί ένας μέσος συντελεστής α , κατά Tomlinson, ίσος με 0.5 Άρα, η πλευρική αντίσταση ισούται με $f_{su} = \alpha * c_u$, επομένως κυμαίνεται από 7.5 kPa έως 45 kPa. Τέλος, η αντοχή του πασσάλου ισούται με:

$$N_{u,soft\ clay} = N_f + N_p = \pi * b * L * \frac{7.5+45}{2} + \pi * \frac{b^2}{4} * 213.75 = 2472 + 168 = 2640 \text{ kN}$$

4.5.2 Εκτίμηση οριακού αξονικού φορτίου πασσάλου στη στιφρή άργιλο

Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή στην άργιλο είναι σχεδόν σταθερή, άρα δεν είναι απαραίτητο να βρεθεί το κρίσιμο μήκος. Η αντίσταση αιχμής του πασσάλου θα ισούται με $q_{pu} = 9 * c_u = 9 * 130 = 1170$ kPa. Ο συντελεστής α , κατά Tomlinson, από τη στιγμή που η αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι σταθερά πάνω από 100 kPa, λαμβάνεται ίσος με 0.4. Επομένως, η πλευρική αντίσταση ισούται με $f_{su} = \alpha * c_u = 0.4 * 130 = 52$ kPa. Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή δεν είναι σε όλο το μήκος ίση με 130 kPa, αλλά στο περισσότερο, άρα το σφάλμα θεωρείται αμελητέο. Τέλος, η αντοχή του πασσάλου ισούται με:

$$N_{u,stiff\ clay} = N_f + N_p = \pi * b * L * 52 + \pi * \frac{b^2}{4} * 1170 = 4901 + 919 = 5820 \text{ kN}$$

4.5.3 Εκτίμηση οριακού αξονικού φορτίου πασσάλου στην άμμο

Η άμμος έχει γωνία τριβής από 30^ο έως 36^ο, επομένως θεωρείται στο μεγαλύτερο μήκος του πασσάλου μια μέτριας πυκνότητας άμμος. Άρα, σύμφωνα με το API, της αντιστοιχεί ένας συντελεστής N_q , ίσος με 20. Επομένως, η αντίσταση αιχμής του πασσάλου ισούται με $q_{pu} = \sigma_v' * N_q = 8 * 30 * 20 = 4800$ kPa. Επιπλέον, όντας άμμος μέσης πυκνότητας, και

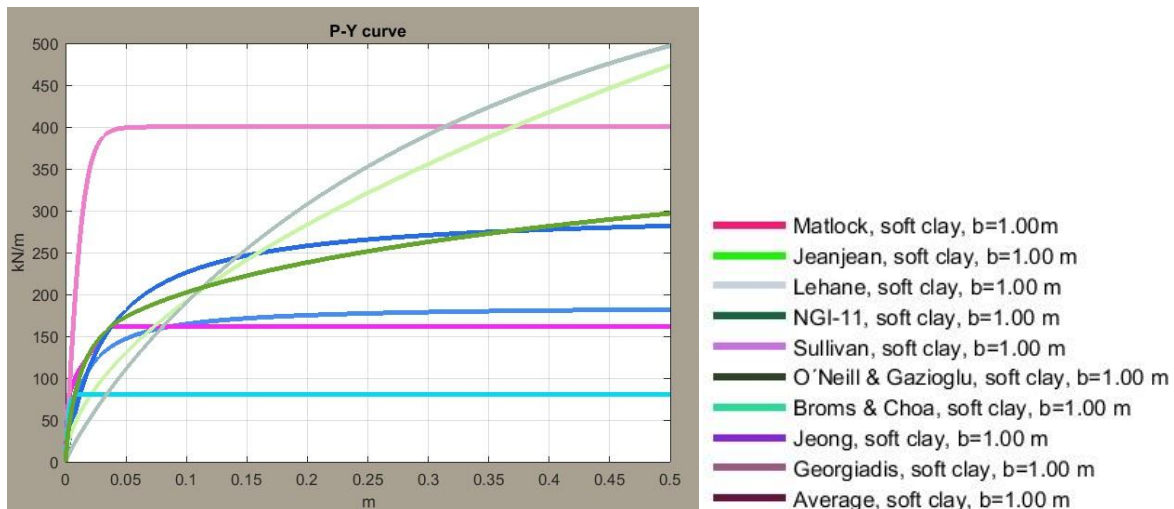
πάσσαλος πλήρης εκτόπισης (συμπαγής αφού είναι από σκυρόδεμα), σύμφωνα με το API, οι συντελεστές K , δ έχουν αντίστοιχα τιμές ίσες με 1 και 25° . Άρα, η πλευρική αντίσταση ισούται με $f_{su} = \sigma_{v'} * K * \tan(\delta) = 8 * z * 1 * 0.4663 = 3.73 * z$, ωστόσο, έχει άνω όριο τα 81.3 kPa, επομένως, η πλευρική αντίσταση ξεκινά μηδενική, και αυξάνει γραμμικά με κλίση 3.73 kPa/m έως το βάθος των 21.8 m, όπου έχει τιμή 81.3 kPa, την οποία και διατηρεί σταθερή στα υπόλοιπα 8.2 m. Τέλος, η αντοχή του πασσάλου ισούται με:

$$N_{u,sand} = N_f + N_p = \pi * b * \left(\frac{0+81.3}{2} * 21.8 + 81.3 * 8.2 \right) + \pi * \frac{b^2}{4} * 4800 = 4878 + 3770 = 8648 \text{ kN}$$

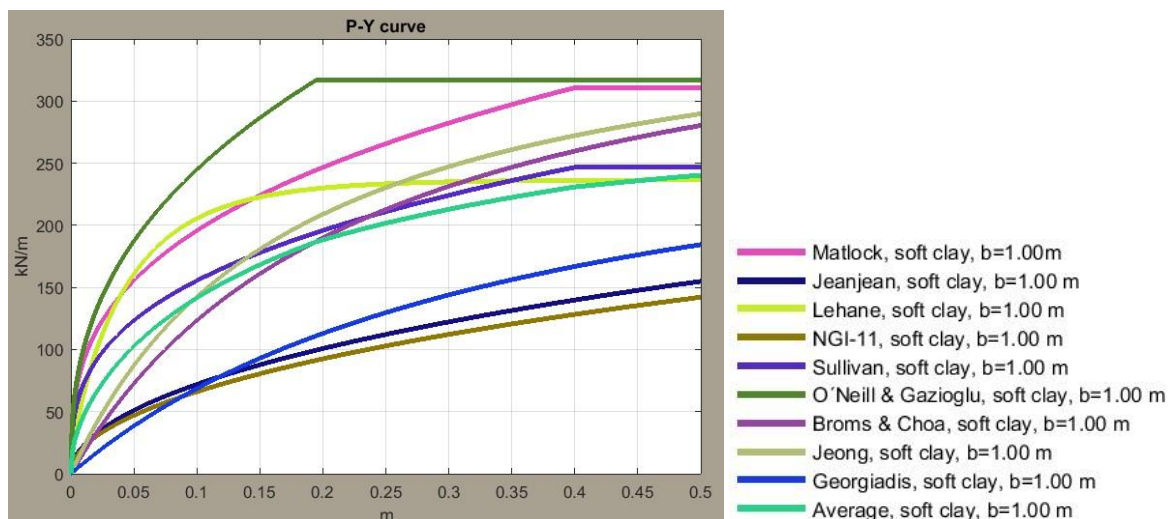
4.6 Σύγκριση καμπυλών p-y

Με βάση τα χαρακτηριστικά του πασσάλου, όπως αυτά περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4.3, και τις τρεις διαφορετικές στρωματογραφίες, που περιγράφησαν στο Κεφάλαιο 4.4, εξήχθησαν οι καμπύλες p-y για τα διαφορετικά είδη εδάφους, για κάθε μεθοδολογία που εξετάζεται. Στα διαγράμματα των Εικόνων 4.5 έως 4.10 συγκρίνονται οι διαφορετικές καμπύλες, στα βάθη των δύο (2) και των οκτώ (8) διαμέτρων. Τα βάθη επιλέχθηκαν έτσι ώστε να φανούν οι διαφορές που παρουσιάζουν οι καμπύλες μεταξύ τους, τόσο στα ρηχά όσο και στα βαθύτερα εδαφικά στρώματα.

4.6.1 Σύγκριση καμπυλών p-y σε μαλακή άργιλο



Εικόνα 4. 7: Καμπύλες p-y σε μαλακή άργιλο, σε βάθος ίσο με 2 διαμέτρους

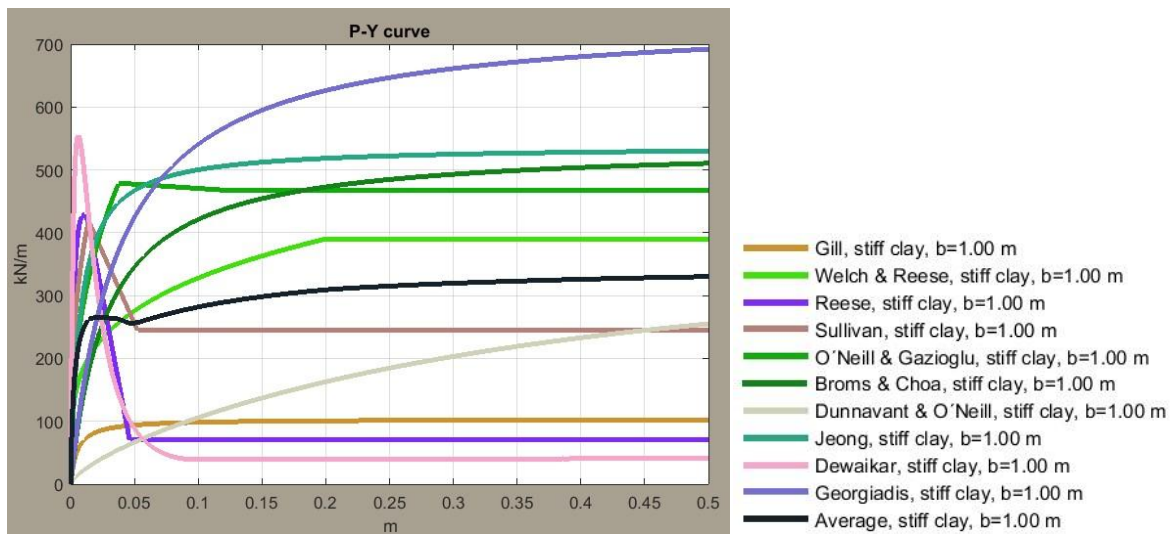


Εικόνα 4. 8: Καμπύλες p-γ σε μαλακή άργιλο, σε βάθος ίσο με 8 διαμέτρους

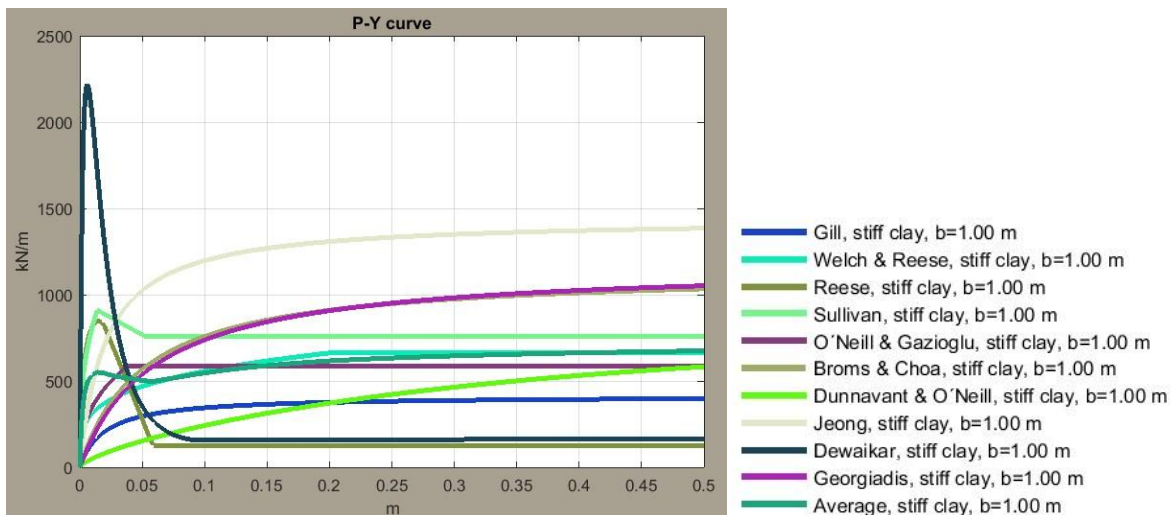
Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για τις καμπύλες p-γ στα μαλακά αργιλικά εδάφη:

- Στα ρηχά στρώματα, οι πιο τολμηρές καμπύλες είναι αυτές των Jeanjean, Lehane και O'Neill & Gazioğlu, ενώ η πιο συντηρητική αυτή του Sullivan.
- Η συμπεριφορά της καμπύλης του Lehane επηρεάζεται από τα δεδομένα της δοκιμής CPT. Επομένως το γεγονός ότι είναι από τις πιο τολμηρές καμπύλες (στα ρηχά στρώματα) ίσως υπονοεί ότι έχουν χρησιμοποιηθεί μεγάλες τιμές q_c . Ωστόσο, ως q_c έχει χρησιμοποιηθεί η τιμή 0.2 MPa, η οποία δεν κρίνεται ιδιαίτερα υψηλή.
- Στα ρηχά στρώματα η καμπύλη του Jeanjean είναι αυτή που μπαίνει πιο αργά από όλες στην πλαστική περιοχή. Αυτό συνεπάγεται ότι φτάνει σε υψηλότερη μέγιστη αντοχή και ότι επιτρέπει μεγαλύτερες μετακινήσεις έως ότου αστοχήσει.
- Στα ρηχά στρώματα, η καμπύλη βάσει της μεθολογίας NGI-11 είναι αυτή με την πιο ήπια κλίση. Επίσης, είναι η πιο συντηρητική καμπύλη μαζί με αυτή του Sullivan.
- Στα βαθύτερα στρώματα, οι πιο συντηρητικές καμπύλες είναι αυτές των Γεωργιάδη, NGI-11 και Jeanjean. Από αυτές, η πρώτη και η τρίτη, ήταν από τις πιο τολμηρές στα ρηχά βάθη. Επομένως συμπεραίνεται ότι οι μεθοδολογίες των Γεωργιάδη και Jeanjean έχουν μικρότερη ευαισθησία στο βάθος, συγκριτικά με τις υπόλοιπες.
- Στα μεγαλύτερα βάθη, οι πιο τολμηρές καμπύλες είναι αυτές των O'Neill & Gazioğlu, Matlock και Jeong.

4.6.2 Σύγκριση καμπυλών p-y σε στιφρή άργιλο



Εικόνα 4. 9: Καμπύλες p-y σε στιφρή άργιλο, σε βάθος ίσο με 2 διαμέτρους



Εικόνα 4. 10: Καμπύλες p-y σε στιφρή άργιλο, σε βάθος ίσο με 8 διαμέτρους

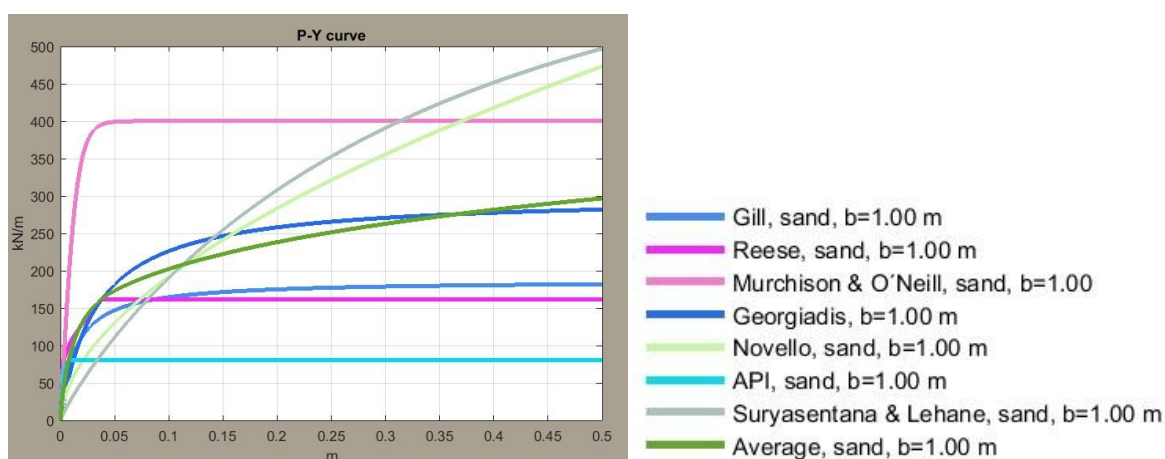
Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για τις καμπύλες p-y στα στιφρά αργιλικά εδάφη:

- Οι πιο τολμηρές καμπύλες σε οποιοδήποτε βάθος είναι αυτές των Γεωργιάδη, Broms & Choa και Jeong.
- Οι καμπύλες των Reese και Dewaikar είναι αυτές που έχουν εντόνως διαφορετική μορφή από όλες τις υπόλοιπες, καθώς φτάνουν σε μια αρκετά υψηλή μέγιστη αντίσταση με πολύ απότομη αρχική κλίση, και μετά αποκτούν μια παραμένουσα αντοχή η οποία είναι σχεδόν μηδαμινή. Αυτή η συμπεριφορά κρίνεται μη ρεαλιστική καθώς υποδηλώνει ότι στις μεγάλες μετατοπίσεις, ο πάσσαλος παρουσιάζει ελάχιστη αντίσταση, κάτι το οποίο οδηγεί πολύ εύκολα σε αστοχία ακόμα και σε μικρά φορτία. Ωστόσο, καθώς η μέγιστη αντίσταση των δύο μεθοδολογιών είναι αρκετά υψηλή, χρειάζεται πολύ μεγάλο φορτίο για να επιτευχθεί η μέγιστη αντίσταση και να επέλθει η πτώση έως την παραμένουσα τιμή της. Επομένως για φυσιολογικές τιμές οριζοντίων

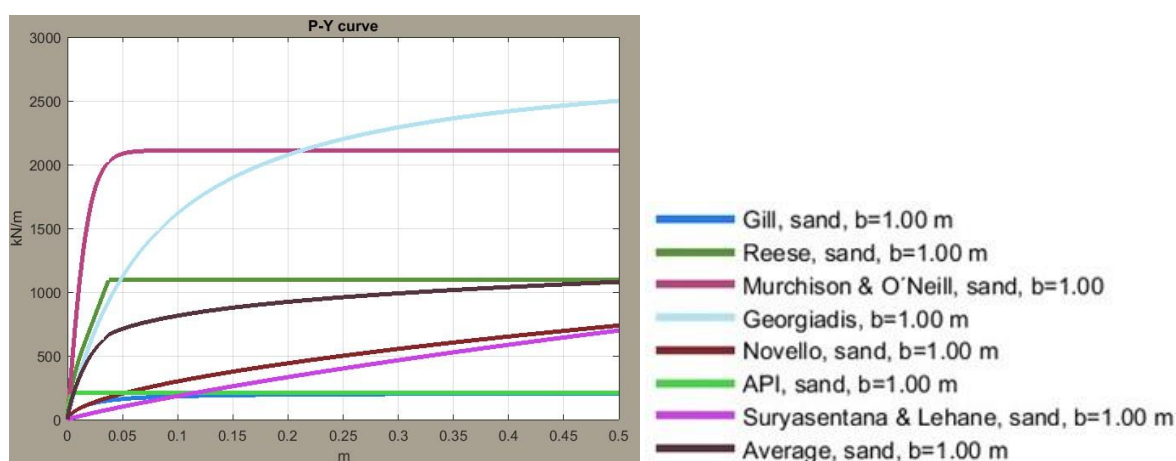
φορτίσεων, που σέβονται κάποιον συντελεστή ασφαλείας, η καμπύλη μένει στο ελαστικό της τμήμα, το οποίο έχει πολύ αποτομη κλίση, επιτρέποντας πολύ μικρές μετατοπίσεις.

- Η μέγιστη αντοχή της καμπύλης του Dewaikar, είναι πολύ ευαίσθητη στο βάθος, καθώς στα βαθύτερα στρώματα είναι πολλαπλάσια των μεγίστων αντιδράσεων που προτείνουν όλες οι υπόλοιπες μεθοδολογίες.
- Η καμπύλη του Gill είναι η πιο συντηρητική σε κάθε βάθος, συγκρίσιμη μόνο με τις παραμένουσες αντοχές των Reese και Dewaikar. Από τη στιγμή που ο Gill χρησιμοποιεί τους χτύπους της δοκιμής SPT, ίσως εισήχθησαν μικρές τιμές για τους χτύπους N, οδηγώντας σε συντηρητικά αποτελέσματα.
- Ο Sullivan ομοίως προτείνει μια μικρή απομείωση της μέγιστης αντίστασης, ωστόσο όχι τόσο έντονη όπως των Reese και Dewaikar. Είναι ενδιαφέρον να τονισθεί ότι στα βαθύτερα στρώματα, η απομείωση είναι αισθητά μικρότερη.

4.6.3 Σύγκριση καμπυλών p-y σε άμμο



Εικόνα 4. 11: Καμπύλες p-y σε άμμο, σε βάθος ίσο με 2 διαμέτρους



Εικόνα 4. 12: Καμπύλες p-y σε άμμο, σε βάθος ίσο με 8 διαμέτρους

Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: για τις καμπύλες p-y στα αμμώδη εδάφη:

- Η καμπύλη των Murchison & O'Neill είναι σε κάθε βάθος από τις πιο τολμηρές.

- Η καμπύλη του Γεωργιάδη επηρεάζεται πολύ έντονα από τη θετική συνεισφορά του βάθους. Στα ρηχά στρώματα έχει μια μέση συμπεριφορά, συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθοδολογίες, ενώ στα βαθύτερα, προτείνει τη μεγαλύτερη, με διαφορά, μέγιστη αντίσταση.
- Η καμπύλη που προτείνει το API, είναι η πιο συντηρητική σε κάθε βάθος.
- Η καμπύλη του Gill είναι από τις πιο συντηρητικές στα μεγάλα βάθη, ενώ στα ρηχά στρώματα έχει μια μέση συμπεριφορά. Επομένως έχει σχεδόν μηδαμινή ευαισθησία στη θετική συνεισφορά του βάθους, γεγονός μη ρεαλιστικό.
- Στα επιφανειακά στρώματα εδάφους, η συμπεριφορά της καμπύλης του Novello είναι υπέρμετρα τολμηρή, καθώς η καμπύλη μένει στον ελαστικό κλάδο και σε τεράστιες μετατοπίσεις. Ως αποτέλεσμα, δεν προτείνει μια μέγιστη αντίσταση, αλλά υποδηλώνει ότι ο πάσσαλος μπορεί να αναλάβει οποιοδήποτε φορτίο δίχως να αστοχήσει. Στα βαθύτερα στρώματα, η καμπύλη ναι μεν έχει την ίδια μορφή, αλλά αυτήν τη φορά, έχει πιο ήπια κλίση και φτάνει σε πολύ μικρότερες τιμές από τις υπόλοιπες μεθοδολογίες. Αυτό υποδηλώνει ότι η μέθοδος του Novello όχι μόνο δε λαμβάνει υπ' όψιν τη θετική συνεισφορά του βάθους, αλλά αντιθέτως, όσο αυξάνεται το βάθος, τόσο μικρότερος είναι ο ρυθμός αύξησης της αντοχής του πασσάλου.
- Η καμπύλη των Syrgasentana & Lehane μοιάζει αρκετά με αυτή του Novello. Ωστόσο, είναι κατάλληλα τροποποιημένη ώστε να μην αυξάνει ανεξέλεγκτα η μέγιστη αντίσταση αλλά να φτάνει σε μια μέγιστη αντοχή (έχει δηλαδή, πλαστικό τμήμα η καμπύλη). Στα ρηχά στρώματα, αυτή η τροποποίηση έχει μεγάλο αντίκτυπο, καθώς η καμπύλη των Syrgasentana & Lehane είναι ταυτόχρονα τολμηρή αλλά και ρεαλιστική. Στα μεγάλα βάθη όμως, η μετατόπιση στην οποία πλαστικοποιείται η καμπύλη αυξάνεται σημαντικά, επομένως οι δύο καμπύλες είναι σχεδόν ίδιες. Καμία από τις δύο καμπύλες δεν εκμεταλλεύεται σε μεγάλο βαθμό το όφελος του βάθους, επομένως για μεγάλες τιμές του λόγου βάθος/διάμετρος, και οι δύο καμπύλες είναι σχετικά συντηρητικές συγκριτικά με αυτές των Reese, Γεωργιάδη και Murchison & O'Neill.

Συμπερασματικά, έχει σημασία να σχολιαστεί πως τα φαινόμενα που προκαλούνται από οριζόντια φορτία, όσο μεγάλα και αν είναι αυτά, περιορίζονται σε μικρά βάθη που κυμαίνονται περί των 5 διαμέτρων. Αυτά τα φαινόμενα είναι η μετακίνηση του πασσάλου και η ανάπτυξη εντατικών μεγεθών (καμπτική ροπή και τέμνουσα δύναμη). Μάλιστα, η μετακίνηση του πασσάλου περιορίζεται ακόμα ρηχότερα από την ανάπτυξη των εντατικών μεγεθών συνήθως, όπως θα φανεί και στα αποτελέσματα των αναλύσεων του Κεφαλαίου 5.3. Επομένως, είναι ορθότερο να κρίνεται μια καμπύλη ως συντηρητική ή τολμηρή, ή ως ρεαλιστική ή μη, κυρίως από τη συμπεριφορά της στα ρηχά στρώματα, παρά στα βαθύτερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Αναλύσεις μεμονωμένου πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση με το πρόγραμμα LATPILE

5.1 Περιγραφή προγράμματος LATPILE

Σε αυτήν την εργασία, οι καμπύλες χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένο εισόδου στο πρόγραμμα LATPILE, στο οποίο το έδαφος αντιπροσωπεύεται ως ελατηριωτό μέσο, τα οποία ελατήρια είναι οι καμπύλες p-y, ώστε να εξαχθούν μετατοπίσεις και εντατικά μεγέθη για τυχούσες φορτίσεις.

Στο LATPILE ο χρήστης εισάγει ως δεδομένα το μέτρο ελαστικότητας E_p και το μέτρο διατμήσεως G_p του πασσάλου σε MPa καθώς και έναν συντελεστή σχήματος k , ο οποίος ισούται με 0.844 για κυκλικές διατομές που είναι η συνήθης περίπτωση.

Ακόμα, εισάγει τον αριθμό των πεπερασμένων τμημάτων που θα επιμεριστεί ο πάσσαλος και το μήκος (m), διάμετρο (m), εμβαδό (m^2) και ροπή αδρανείας (m^4) του πρώτου και του τελευταίου τμήματος. Τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των ενδιάμεσων τμημάτων υπολογίζονται αυτόματα από το LATPILE με γραμμική παρεμβολή.

Κατόπιν εισάγεται το πλήθος των καμπυλών p-y που θα χρησιμοποιηθεί. Μετά, εισάγεται το βάθος και το πλήθος σημείων κάθε καμπύλης και οι συντεταγμένες p-y της καμπύλης (αρχίζοντας πάντα από τη ρηχότερη προς τη βαθύτερη).

Εν συνεχεία, εισάγεται το αξονικό φορτίο, όπου, κατά τη σύμβαση προσήμανσης του LATPILE, με θετικό πρόσημο συμβολίζεται η θλίψη.

Εισάγεται ένας δείκτης ο οποίος σχετίζεται με τα δεδομένα φόρτισης. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει έναν από τους ακόλουθους συνδυασμούς φόρτισης:

- Ορισμένο εγκάρσιο συγκεντρωμένο φορτίο (H) και ροπή (M) κεφαλής του πασσάλου.
- Ορισμένο εγκάρσιο συγκεντρωμένο φορτίο (H) και μηδενική στροφή κεφαλής του πασσάλου.
- Ορισμένη ροπή (M) και μηδενική εγκάρσια μετατόπιση κεφαλής του πασσάλου.
- Ορισμένη μετατόπιση και στροφή κεφαλής του πασσάλου.

Παρατήρηση: στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά και σε κάθε ανάλυση, μόνο ο πρώτος συνδυασμός φόρτισης.

Επιπλέον, ο χρήστης εισάγει τα βήματα n, με τα οποία θα γίνει η επίλυση. Τα φορτία (αξονικά/εγκάρσια/καμπτικά/επιβεβλημένες μετακινήσεις/στροφές) διαιρούνται με το πλήθος των βημάτων n και ασκούνται αθροιστικά. Αυτό δεν έχει καμία επίπτωση στο αποτέλεσμα αλλά επηρεάζει την ερμηνεία που δίνει ο χρήστης στα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, έστω δύο χρήστες οι οποίοι θέτουν οριζόντιο φορτίο ίσο με 300 kN και μηδενική ροπή, αλλά ο ένας το σπάει σε 3 βήματα ενώ ο άλλος σε 10. Έστω ακόμα ότι η θεμελίωση αστοχεί για οριζόντιο φορτίο ίσο με 280 kN. Ο πρώτος χρήστης θα δει πως η

ανάλυση σταμάτησε να είναι επιτυχημένη στο 2^ο βήμα, ήτοι στα 200 kN, ενώ ο δεύτερος στο 9^ο βήμα, ήτοι στα 270 kN. Ο πρώτος χρήστης έχει τεράστια αβεβαιότητα ως προς το ακριβές φορτίο αστοχίας, κάτι που πιθανότατα θα τον οδηγήσει σε συντηρητικό σχεδιασμό, ενώ ο δεύτερος χρήστης, έχει περιορίσει με ικανοποιητική ακρίβεια το αντίστοιχο φορτίο. Στην παρούσα εργασία τα βήματα διέφεραν σε κάθε ανάλυση, ωστόσο ποτέ το οριζόντιο φορτίο δε διαιρούταν σε τμήματα μικρότερα των 20 kN.

Τέλος, ο χρήστης εισάγει τον αριθμό των επαναλήψεων που θα κάνει το LATPILE σε κάθε βήμα, και το αποδεκτό σφάλμα (για τη μετατόπιση και για τη στροφή) στο οποίο θα σταματήσει η επανάληψη. Όσο μικρότερα είναι τα σφάλματα και περισσότερες οι επαναλήψεις, τόσο πιο χρονοβόρος είναι η επίλυση, αλλά και ακριβής. Στις αναλύσεις που έγιναν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε σφάλμα ίσο με 10^{-5} m (για τη μετακίνηση) και 10^{-5} m⁻¹ (για τη στροφή) ενώ ο αριθμός των επαναλήψεων τέθηκε ίσος με 500.

Σε όλες τις αναλύσεις που έγιναν, το πλήθος των πεπερασμένων τμημάτων του πασσάλου τέθηκε τέτοιο έτσι ώστε κάθε τμήμα να έχει μήκος ίσο με μια διάμετρο. Ακόμα, χρησιμοποιήθηκαν 5 καμπύλες p-y. Τα βάθη στα οποία αντιστοιχούν είναι τα $z=0b$, $z=2b$, $z=8b$, $z=16b$ και $z=30b$ (για πάσσαλο ίσο με 30 μέτρα, διαμέτρου 1 μέτρο). Το LATPILE, παράγει τις ενδιάμεσες καμπύλες με γραμμική παρεμβολή, γι' αυτό και εισήχθησαν οι δύο τελευταίες, αρκετά βαθιές καμπύλες. Πρακτικά, η οριζόντια φόρτιση δεν επηρεάζει τον πάσσαλο έως το βάθος των 16 διαμέτρων, πόσω μάλλον των 30 διαμέτρων, αλλά οι καμπύλες τοποθετήθηκαν, ώστε το πρόγραμμα να παράγει και τις υπόλοιπες με γραμμική παρεμβολή. Ο λόγος που δεν εισήχθησαν όλες οι καμπύλες που εξήχθησαν από το πρόγραμμα της MATLAB, είναι για εξοικονόμηση χρόνου. Ωστόσο, έγινε μία ανάλυση για κάθε είδος εδάφους, με τη μέση καμπύλη p-y, με 5 μόνο καμπύλες και με όλες τις καμπύλες από τη MATLAB, και το σφάλμα ήταν σχεδόν μηδενικό. Επομένως η παραδοχή χρήσης 5 μόνο καμπυλών p-y, κρίθηκε αποδεκτή. Παρόλα αυτά, αυτό πιθανότατα συνέβη λόγω ομογενούς εδάφους. Εάν η στρωματογραφία ήταν πιο σύνθετη, τότε θα ήταν απαραίτητη η πύκνωση των μη γραμμικών ελατηρίων p-y ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα. Ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιήσει μια απλή ανάλυση με όλες τις καμπύλες p-y που έχει εξάγει από τη MATLAB και κατόπιν να αφαιρεί κάποιες ενδιάμεσες καμπύλες (από τις βαθύτερες έως τις ρηχότερες) μία-μία και να σταματήσει όταν το σφάλμα με την πρώτη ανάλυση γίνει οριακά αποδεκτό.

5.2 Καμπύλες οριζόντιου φορτίου-μετακίνησης κορυφής πασσάλου

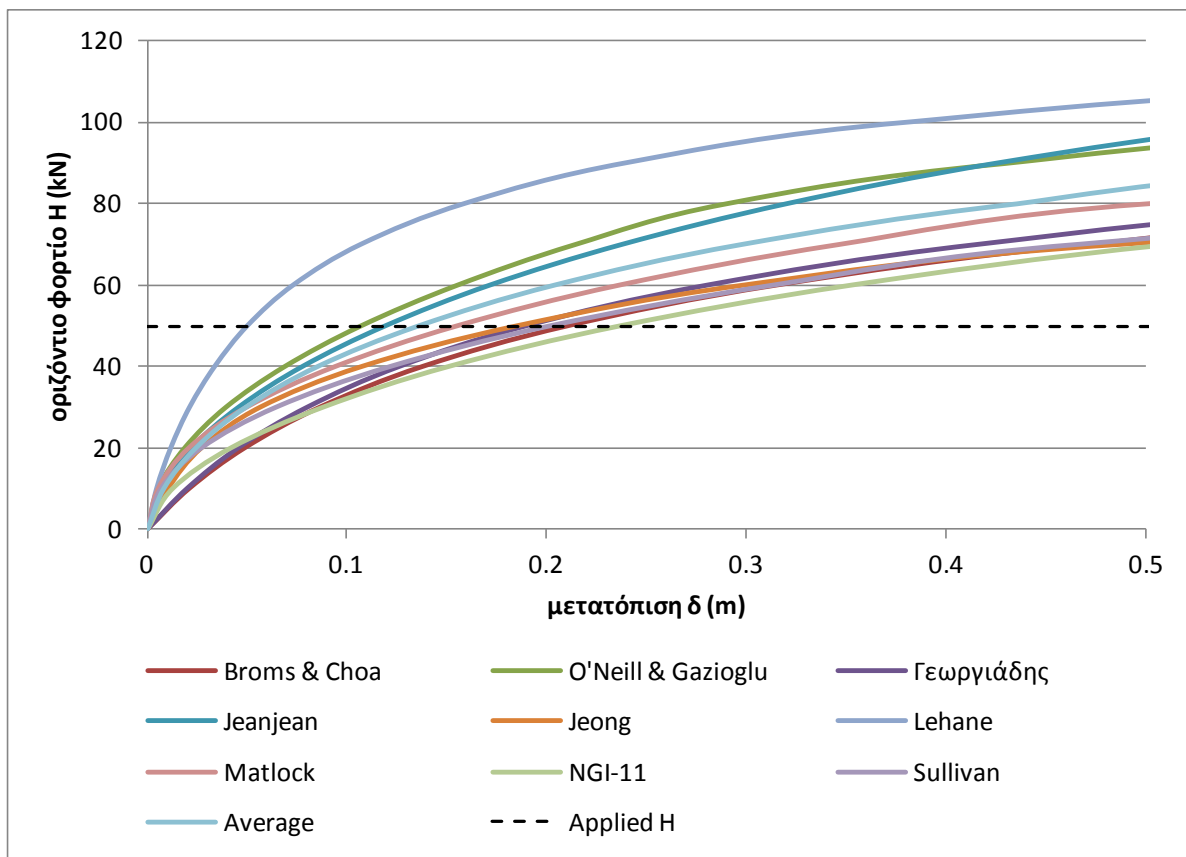
Οι καμπύλες p-y παρουσιάζουν την πίεση που δρα σε μια στάθμη του πασσάλου και την αντίστοιχη μετακίνηση στην οποία υπόκειται ο πάσσαλος σε αυτήν τη στάθμη. Ωστόσο, για να εξαχθεί κάποιο αποτέλεσμα που αφορά τη μετακινησιακή ή εντατική κατάσταση ολόκληρου του πασσάλου, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μεγάλο πλήθος καμπυλών και μάλιστα αρκετά πυκνών ώστε να υπάρχει ακρίβεια και όσο το δυνατόν μικρότερο σφάλμα στο αποτέλεσμα. Επομένως μια καμπύλη p-y σε ένα τυχαίο βάθος δεν είναι πλήρως κατατοπιστική για να γίνει αντιληπτή η απόκριση του πασσάλου. Από την άλλη, μια

καμπύλη φορτίου-μετατόπισης (H-δ) δίνει την πλήρη εικόνα μετατοπισιακής απόκρισης του πασσάλου συναρτήσει του οριζοντίου φορτίου που δρα σε αυτόν.

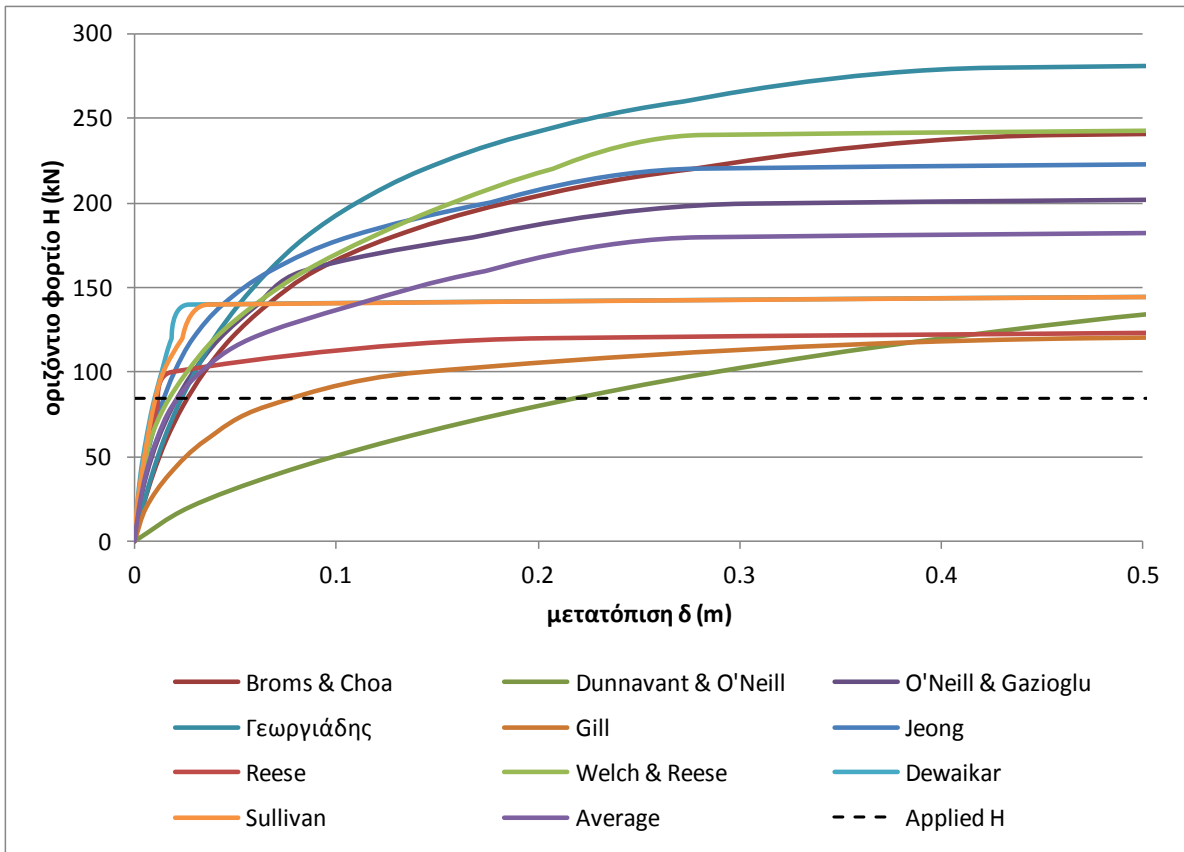
Η καμπύλη αυτή δημιουργείται ως εξής: Για κάθε τιμή οριζοντίου φορτίου H και πενταπλάσια θλιπτική αξονική δύναμη N, εξάγεται μέσω του LATPILE η μετατόπιση στην κορυφή του πασσάλου, δ. Το γεγονός ότι η αξονική δύναμη είναι κάθε φορά πέντε φορές μεγαλύτερη από την οριζόντια, δεν προκύπτει άμεσα από κάπου, αλλά αποτελεί μια λογική παραδοχή εμπνευσμένη από τις περιπτώσεις όπου η οριζόντια δύναμη προέρχεται από τον σεισμό, οπότε και αποτελεί ένα τμήμα της αξονικής δύναμης. Πιο συγκεκριμμένα, είναι σαν να ασκείται ένας σεισμός επιτάχυνσης 0.2g, οπότε και η οριζόντια δύναμη προκύπτει ίση με 0.2 φορές την κατακόρυφη.

Η διαδικασία μοιάζει με μια ανάλυση pushover, όπου καθώς αυξάνει το οριζόντιο φορτίο H, τόσο περισσότερο το έδαφος μπαίνει στο πλαστικό τμήμα των καμπυλών p-y και αυξάνει ο ρυθμός αύξησης της μετατόπισης. Ακόμη, η ταυτόχρονη αύξηση του θλιπτικού αξονικού φορτίου N, προκαλεί ανάπτυξη ροπών δευτέρας τάξεως που αυξάνουν περαιτέρω τη μετατόπιση του πασσάλου.

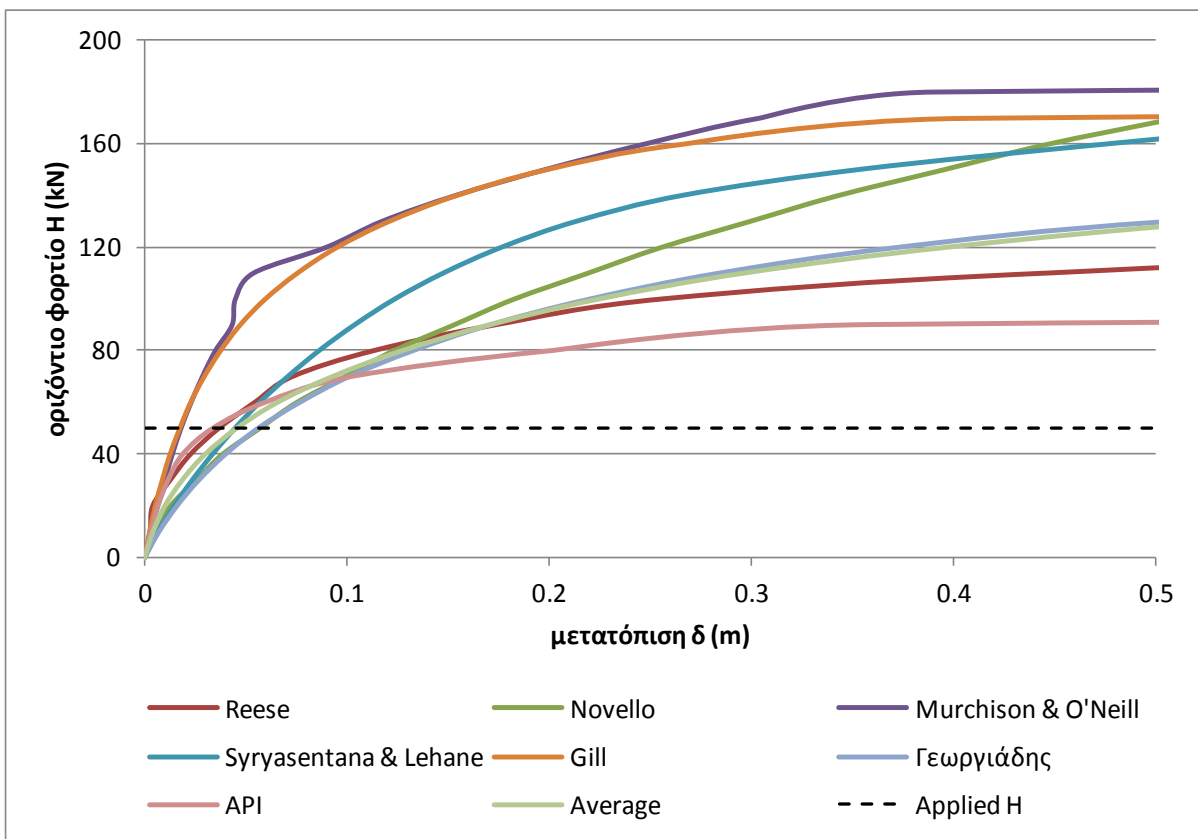
Παρακάτω, στα διαγράμματα των Εικόνων 5.1 έως 5.3 παρουσιάζονται οι καμπύλες H-δ που προέκυψαν βάσει της κάθε μεθόδου p-y για τα τρία διαφορετικά είδη εδάφους (μαλακή άργιλος, στιφρή άργιλος και άμμος).



Εικόνα 5. 1: Διάγραμμα pushover στη μαλακή άργιλο



Εικόνα 5. 2: Διάγραμμα pushover στη σιφρή άργιλο



Εικόνα 5. 3: Διάγραμμα pushover στην άμμο

Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η μορφή των καμπυλών H-δ είναι συνεχώς αύξουσα με ολοένα και μικρότερη κλίση έως ότου αποκτούν πλήρως πλαστική συμπεριφορά.
- Η αρχική κλίση των καμπυλών H-δ είναι ανάλογη της αντίστοιχης στις καμπύλες p-y. Δηλαδή τα διαγράμματα pushover που προέκυψαν από καμπύλες με πιο απότομη αρχική κλίση, έχουν ομοίως τη μεγαλύτερη αρχική κλίση συγκρινόμενα με τα υπόλοιπα.
- Η αρχική κλίση και η μετατοπισιακή συμπεριφορά στα πολύ χαμηλά φορτία, είναι σχεδόν ίδια ανεξαρτήτως της όποιας μεθοδολογίας p-y. Εξαιρέση αποτελούν λίγες περιπτώσεις, όπως οι καμπύλες του Lehane στη μαλακή άργιλο, η οποία έχει πολύ απότομη αρχική κλίση και των Gill και O'Neill & Dunnavant στη στιφρή άργιλο όπου έχουν πολύ πιο ήπια αρχική κλίση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι διαφορές εντοπίζονται εντονα στο μέγιστο φορτίο αντοχής και στην κλίση της καμπύλης αμέσως μετά το ελαστικό τμήμα (ανάμεσα δηλαδή στο φορτίο αστοχίας και στις πολύ μικρές μετατοπίσεις).
- Στις μαλακές αργίλους, η μετατόπιση μέχρι την οποία οι καμπύλες είναι στον ελαστικό κλάδο και η απόκλιση μεταξύ τους είναι αμελητέα, ισούται αδρά με το 10% της διαμέτρου. Το αντίστοιχο ποσοστό στη στιφρή άργιλο είναι 2.5% ενώ στην άμμο 5%. Επομένως, προκύπτει ότι η στιφρή άργιλος παρουσιάζει τη λιγότερο πλαστική συμπεριφορά, αποκτώντας μεγάλη αντοχή μετά από ελάχιστη μετακίνηση. Αντιθέτως, η μαλακή άργιλος είναι το πιο πλάσιμο είδος εδάφους, καθώς ο πάσσαλος υπόκειται σε μεγάλες μετατοπίσεις έως ότου να φτάσει την οριακή αντοχή του.

Παρατηρήσεις:

- Οι καμπύλες των Novello, Lehane και Gill εξαρτώνται από τις μετρήσεις χτύπων SPT ή από την αντίσταση αιχμής της δοκιμής CPT. Επομένως, το ότι αυτές οι καμπύλες ενδέχεται να διαφέρουν αρκετά από τις υπόλοιπες, ίσως οφείλεται στο ότι τα δεδομένα χτύπων SPT και αποτελέσματα CPT δε συνάδουν απόλυτα με τις υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες του εδάφους που εισήχθησαν ως δεδομένα (c_u , ϕ). Συγκεκριμένα, σε κάθε ανάλυση, οι μεθοδολογίες των Lehane και Novello μοιάζουν οι πιο τολμηρές ενώ του Gill (για στιφρή άργιλο) η πιο συντηρητική. Επομένως, με βάση αυτά τα δεδομένα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και γωνίας τριβής, ίσως οι χτύποι SPT υποεκτιμήθηκαν στη στιφρή άργιλο, ενώ η αντίσταση αιχμής της δοκιμής CPT υπερεκτιμήθηκε στη μαλακή άργιλο και στην άμμο.
- Για όλες τις άλλες αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν σταθερά οριζόντια φορτία τα οποία δεν προκαλούν εδαφική αστοχία με βάση καμία μεθοδολογία. Στη μαλακή άργιλο, χρησιμοποιήθηκε φορτίο $H=50$ kN, το οποίο κυμαίνεται στο 40%-60% των μεγίστων φορτίων που προκύπτουν βάσει των διαφόρων καμπυλών p-y. Για τη στιφρή άργιλο, επιλέχθηκε φορτίο $H=85$ kN το οποίο βρίσκεται στον ελαστικό κλάδο των περισσότερων διαγραμμάτων H-δ εκτός από των Gill και O'Neill & Dunnavant όπου τα 85 kN αποτελούν το 68% και 50% αντίστοιχα της μέγιστης αντοχής, επομένως, έχουν ένα σεβαστό περιθώριο ασφαλείας από την αστοχία. Τέλος, στην άμμο,

χρησιμοποιήθηκε φορτίο $H=50$ kN το οποίο είναι στον ελαστικό κλάδο κάθε καμπύλης.

- Επίσης, αστοχία δεν προκύπτει ούτε λόγω του αξονικού θλιπτικού φορτίου. Σύμφωνα με τα διαγράμματα των Εικόνων 5.1 έως 5.3 και τα οριακά αξονικά φορτία για τον κάθε πάσσαλο, όπως αυτά προέκυψαν στο Κεφάλαιο 4.5, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

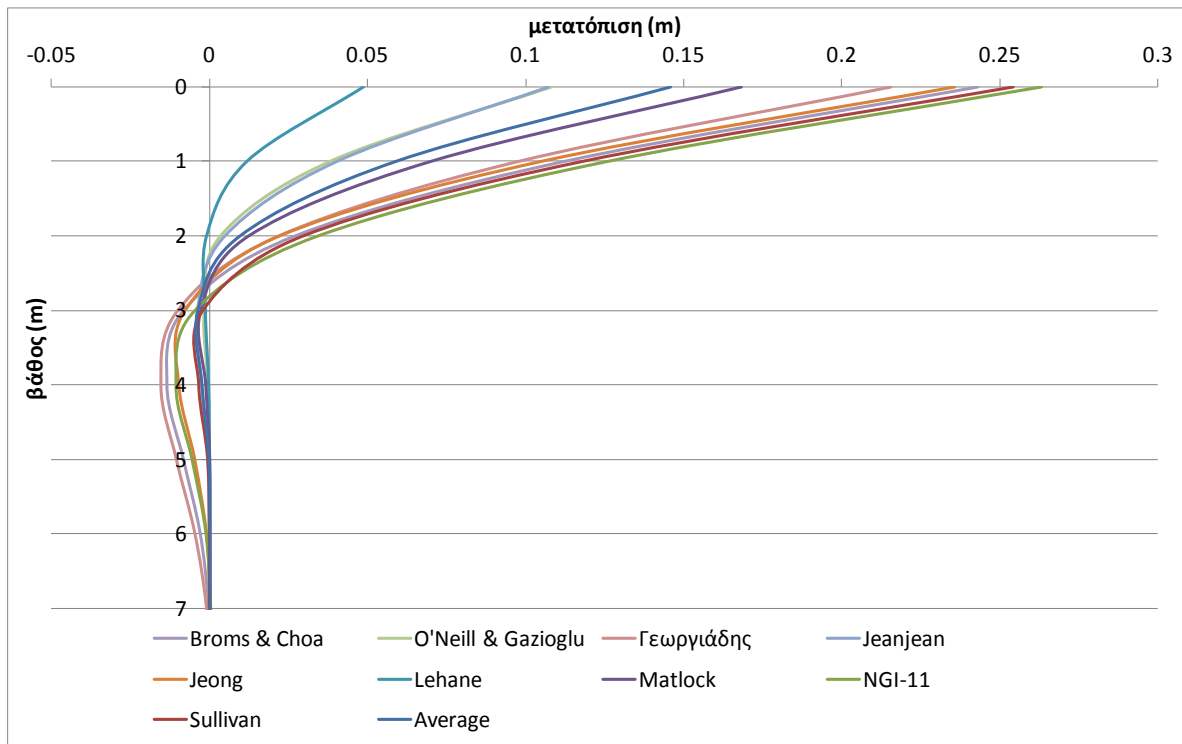
Είδος εδάφους	Μέγιστο οριζόντιο φορτίο H_u (kN)	Μέγιστη δρώσα αξονική δύναμη N (kN)	Οριακό αξονικό φορτίο N_u (kN)	Ποσοστό N/N_u (%)
μαλακή άργιλος	110	$5 * 110 = 550$	2640	20.8
στιφρή άργιλος	280	$5 * 280 = 1400$	5820	24.1
άμμος	180	$5 * 180 = 900$	8648	10.4

5.3 Διαφορές στην απόκριση του πασσάλου βάσει των διαφορετικών καμπυλών $p-y$

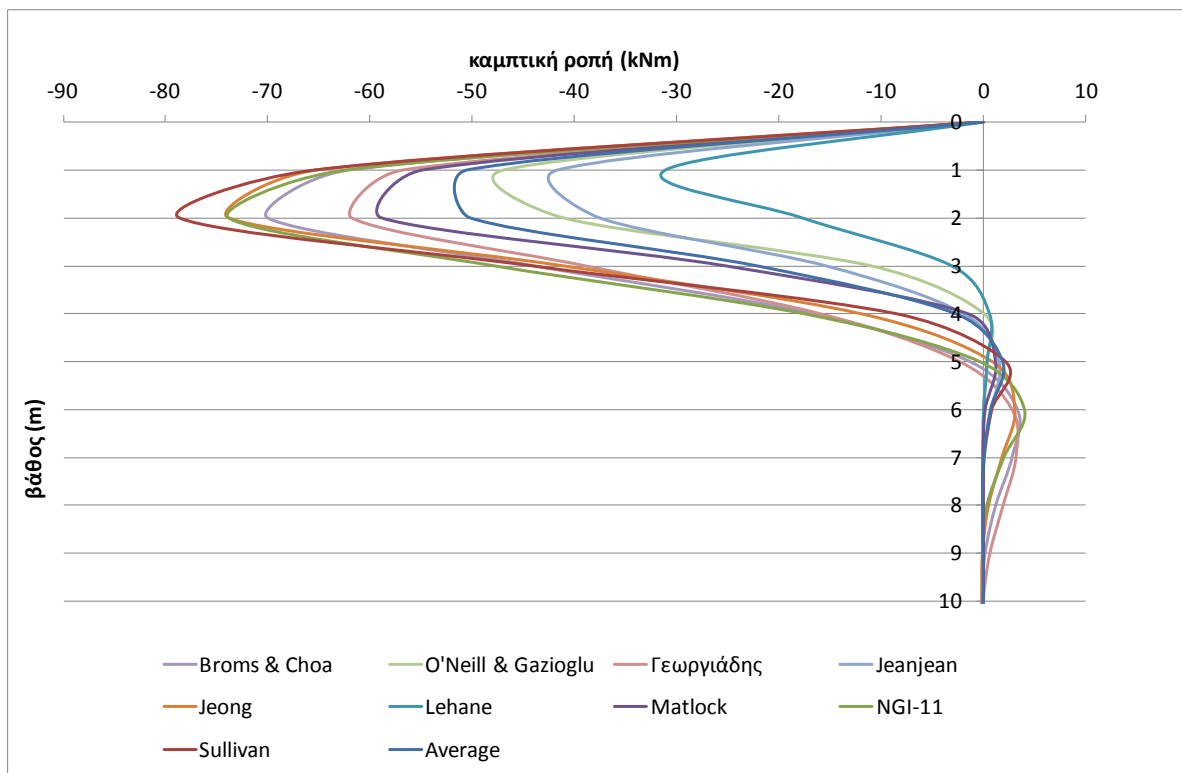
Οι καμπύλες $p-y$ που εξήχθησαν από το πρόγραμμα της MATLAB, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα LATPILE. Η σύγκριση των καμπυλών είναι αρχικά εφικτή μέσω της MATLAB, αλλά είναι σημαντικότερο να φανεί πώς οι διαφορές στις καμπύλες $p-y$ αποτυπώνονται στην απόκριση του πασσάλου, τόσο μετακινησιακά όσο και σε επίπεδο εντατικών μεγεθών.

Η φόρτιση που επιβλήθηκε στον πάσσαλο ήταν μια σταθερή οριζόντια δύναμη (διαφορετική αναλόγως το είδος εδάφους) και μία αξονική θλιπτική δύναμη, πενταπλάσια της οριζόντιας δύναμης, με τη λογική που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5.2. Επίσης, επιλέχθηκε για κάθε είδος εδάφους ένα οριζόντιο φορτίο, για το οποίο σε καμία περίπτωση να μη συμβαίνει αστοχία εδάφους. Σαφώς, αναλόγως την καμπύλη $p-y$ που χρησιμοποιείται στο LATPILE, κάποιες μεθοδολογίες τείνουν περισσότερο στην πλαστική αστοχία από κάποιες άλλες. Επίσης, το οριζόντιο φορτίο που επιλέχθηκε σε κάθε έδαφος, είναι στον ελαστικό κλάδο κάποιας καμπύλης ή στην αρχή του πλαστικού κλάδου κάποιας άλλης, σε κάθε περίπτωση πάντως επιλέχθηκε οριζόντιο φορτίο που να μην προκαλεί αστοχία εδάφους με βάση την οποιαδήποτε μεθοδολογία $p-y$. Με αυτό λοιπόν, το σκεπτικό επιλέχθηκε οριζόντιο φορτίο H , ίσο με 50 kN για τη μαλακή άργιλο και την άμμο (με αντίστοιχο θλιπτικό αξονικό φορτίο N ίσο με 250 kN) και 85 kN για τη στιφρή άργιλο (με αντίστοιχη δύναμη N ίση με 425 kN). Οι τιμές αυτών των οριζοντίων φορτίων φαίνονται, με διακεκομμένες γραμμές στις Εικόνες 5.1 έως 5.3, όπου και είναι φανερό ότι είναι αρκετά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες δυνάμεις αστοχίας. Επίσης, οι τιμές των αξονικών φορτίων είναι ομοίως αρκετά χαμηλότερες των οριακών φορτίων των αντίστοιχων πασσάλων. Συγκεκριμένα, η αξονική θλιπτική δύναμη $N=250$ kN, ισούται με το 9.5% της αντοχής του πασσάλου στη μαλακή άργιλο και με το 2.9% της αντοχής του πασσάλου στην άμμο, ενώ το φορτίο $N=425$ kN ισούται με το 7.3% της αντοχής του πασσάλου στη στιφρή άργιλο.

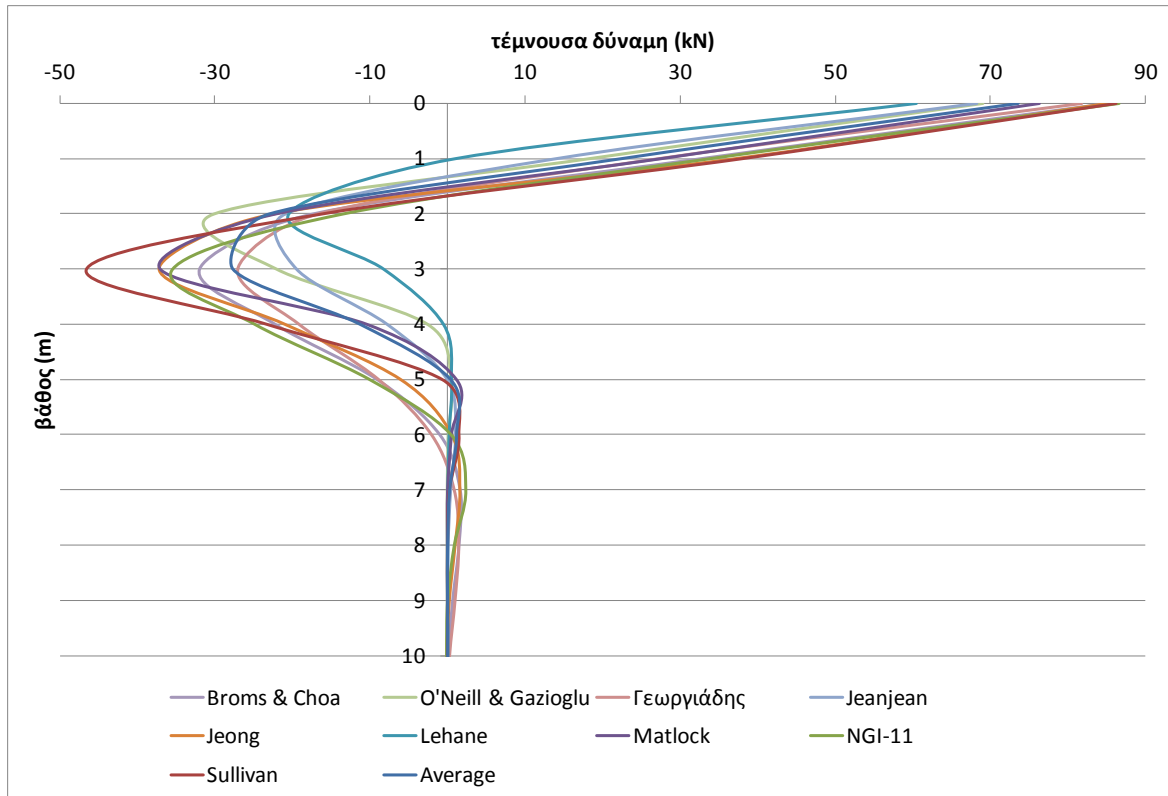
Στα διαγράμματα των Εικόνων 5.4 έως 5.12 φαίνονται τα διαγράμματα μετατόπισης, καμπτικής ροπής και τέμνουσας δύναμης κατά μήκος του πασσάλου για τα 3 διαφορετικά εδάφη:



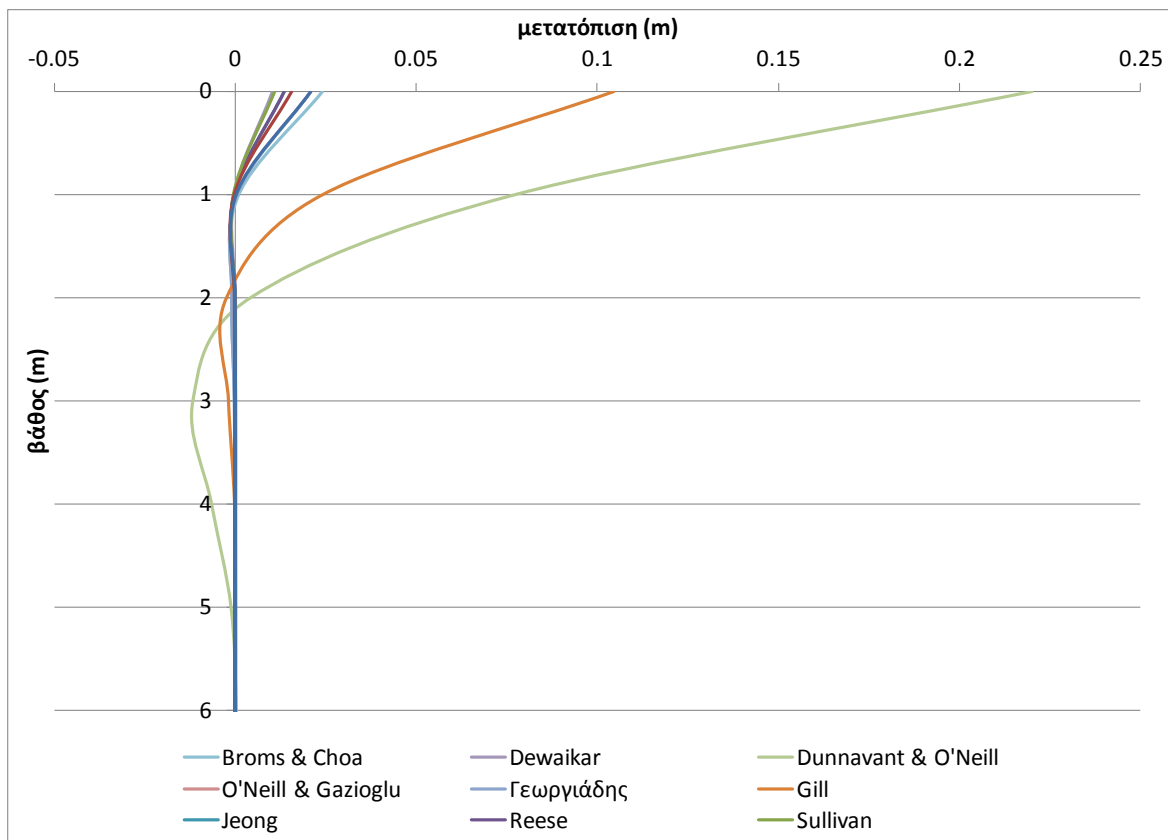
Εικόνα 5. 4: Διάγραμμα μετατόπισης κατά βάθος, μαλακή άργιλος, $H=50 \text{ kN}$, $N=250 \text{ kN}$ ($N/N_u=9.5\%$)



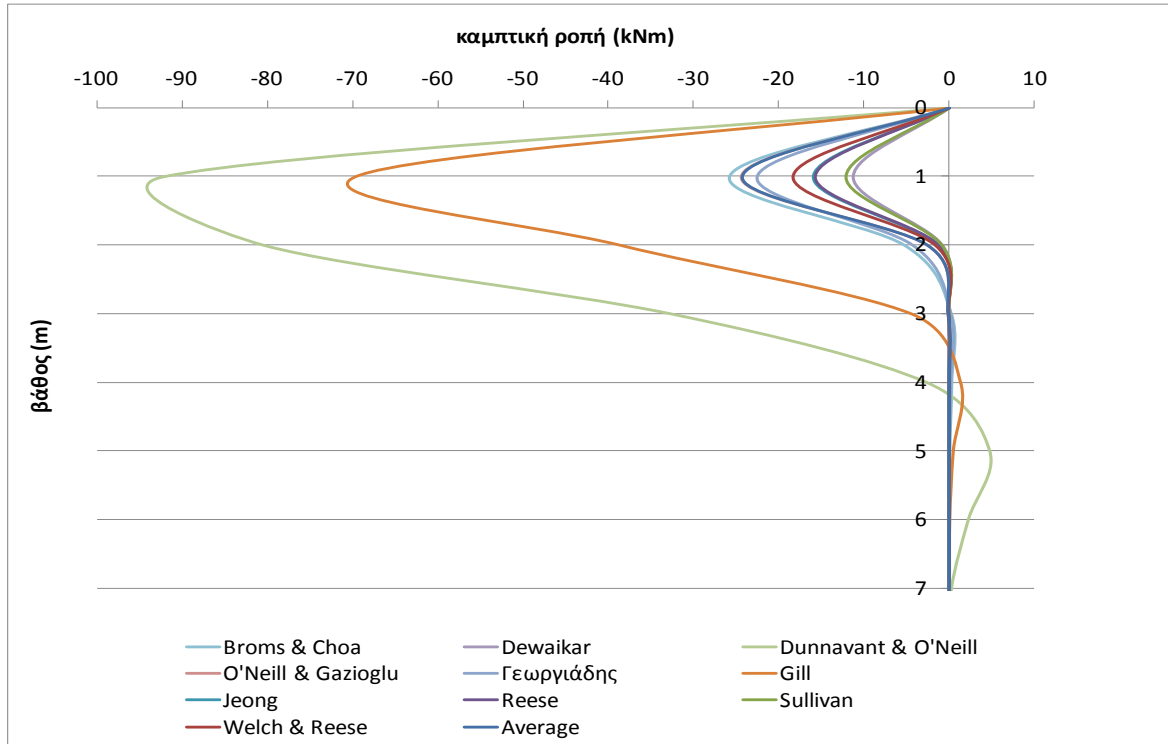
Εικόνα 5. 5: Διάγραμμα καμπτικής ροπής κατά βάθος, μαλακή άργιλος, $H=50 \text{ kN}$, $N=250 \text{ kN}$ ($N/N_u=9.5\%$)



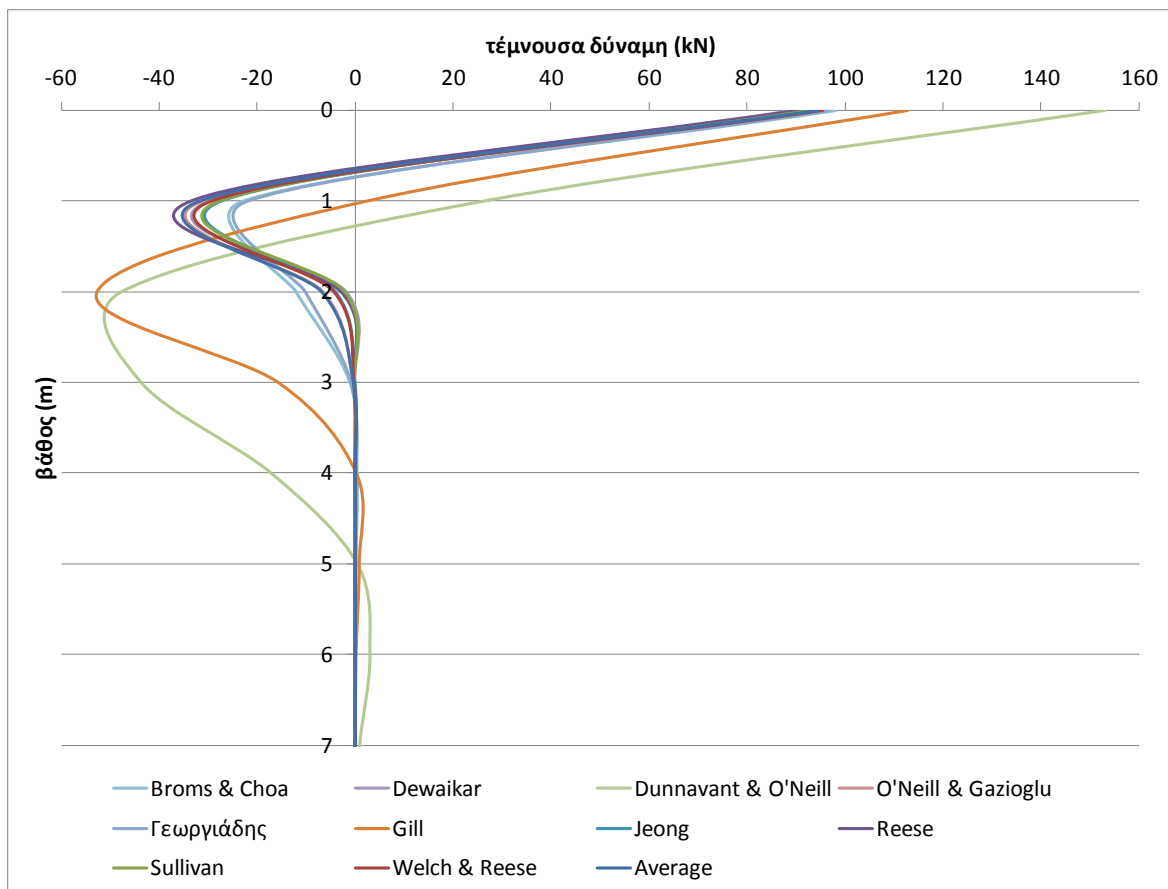
Εικόνα 5. 6: Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης κατά βάθος, μαλακή άργιλος, $H=50$ kN, $N=250$ kN ($N/N_u=9.5\%$)



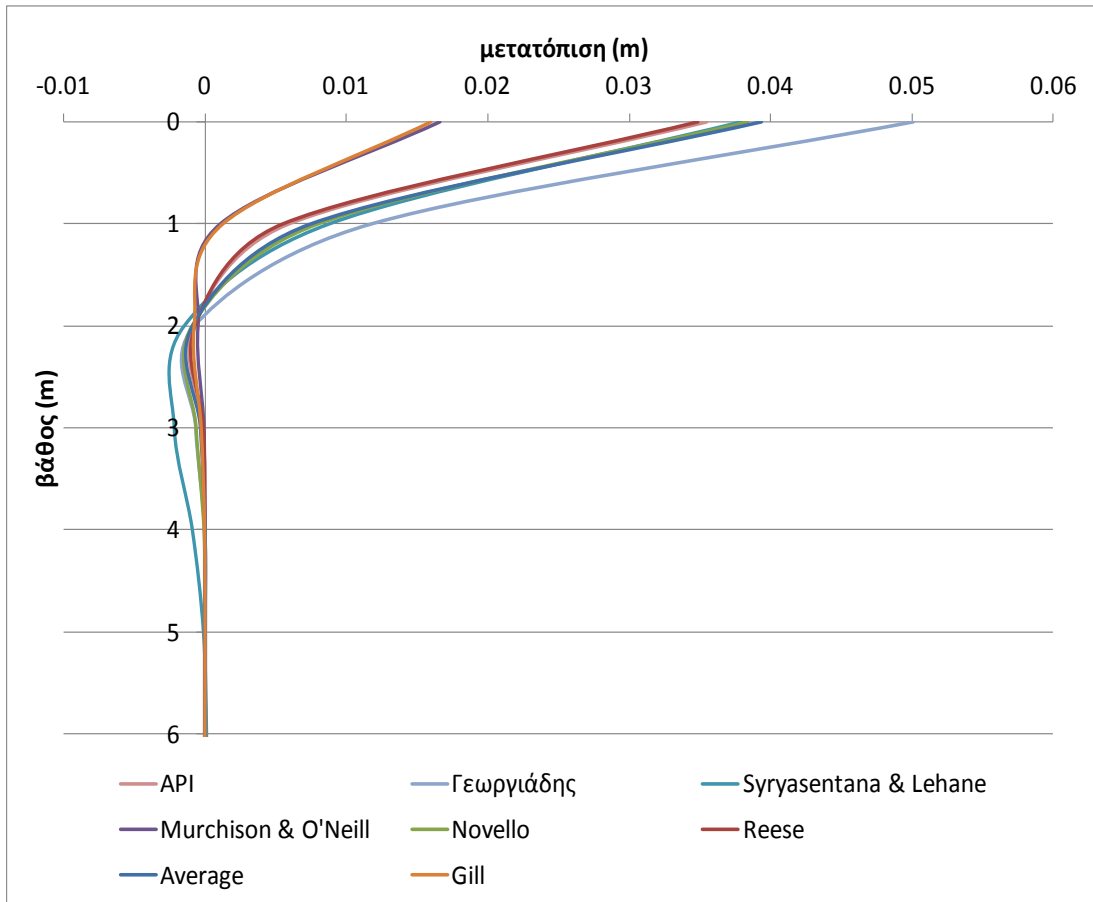
Εικόνα 5. 7: Διάγραμμα μετατόπισης κατά βάθος, σφιρρή άργιλος, $H=85$ kN, $N=425$ kN ($N/N_u=7.3\%$)



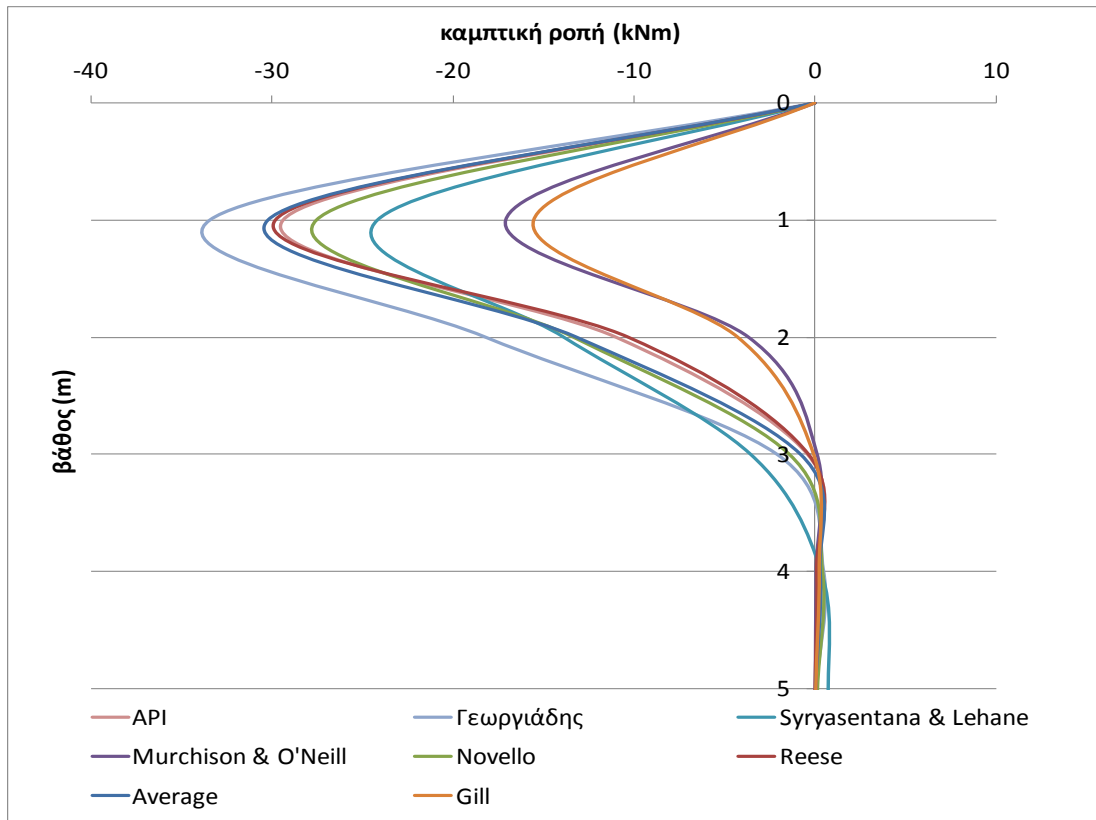
Εικόνα 5. 8: Διάγραμμα καμπτικής ροπής κατά βάθος, σιφρή άργιλος, $H=85 \text{ kN}$, $N=425 \text{ kN}$ ($N/N_u=7.3\%$)



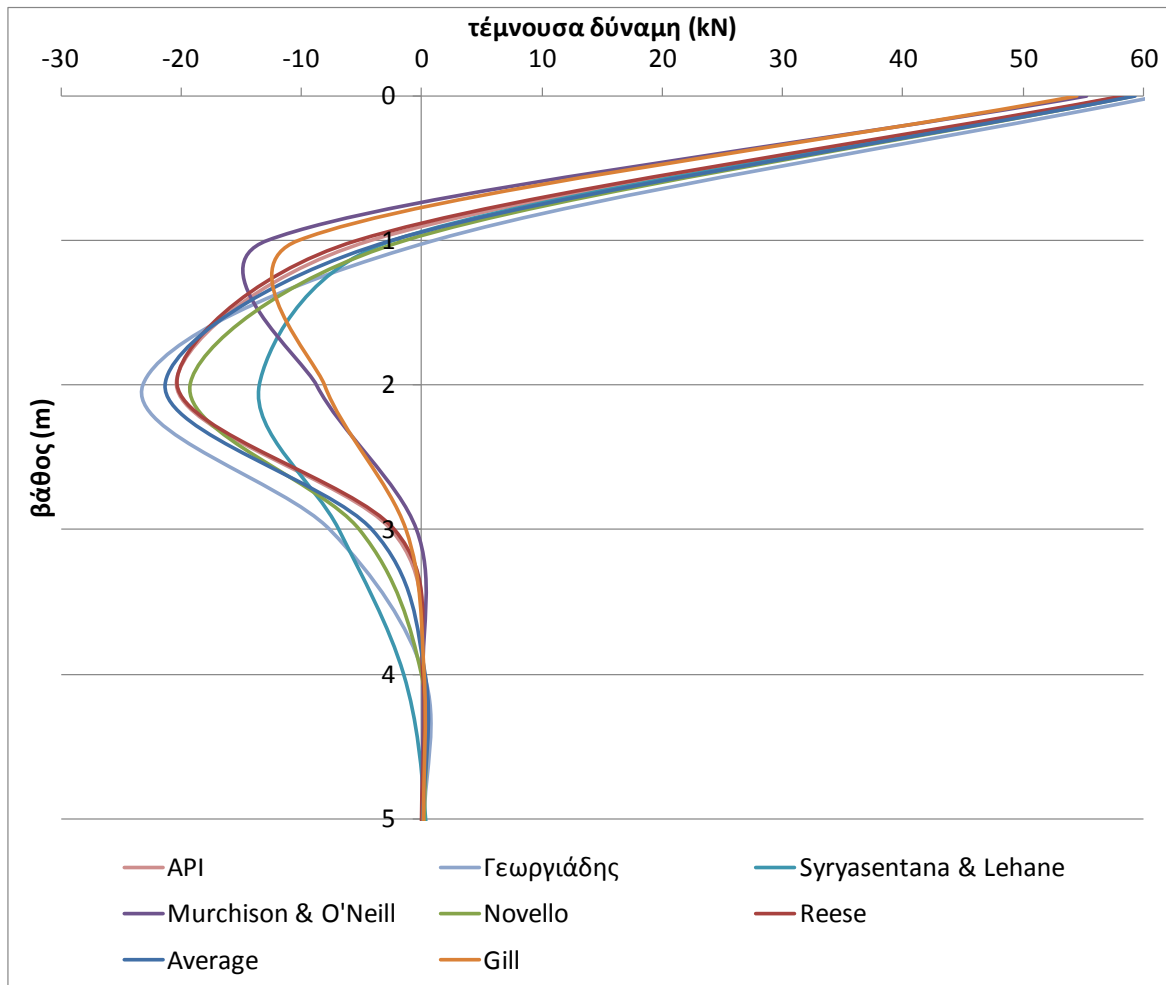
Εικόνα 5. 9: Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης κατά βάθος, σιφρή άργιλος, $H=85 \text{ kN}$, $N=425 \text{ kN}$ ($N/N_u=7.3\%$)



Εικόνα 5. 10: Διάγραμμα μετατόπισης κατά βάθος, άμμος, $H=50$ kN, $N=250$ kN ($N/N_u=2.9\%$)



Εικόνα 5. 11: Διάγραμμα καμπτικής ροπής κατά βάθος, άμμος, $H=50$ kN, $N=250$ kN ($N/N_u=2.9\%$)



Εικόνα 5. 12: Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης κατά βάθος, άμμος, $H=50$ kN, $N=250$ kN ($N/N_u=2.9\%$)

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση ανάμεσα στις διάφορες μεθοδολογίες p-y όσον αφορά στο μετακινησιακό και εντατικό προφίλ του πασσάλου που προκύπτει. Γενικά οι μεθοδολογίες οι οποίες οδηγούν σε μεγάλες μετακινήσεις στην κορυφή του πασσάλου, οδηγούν και στα μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη. Παρακάτω, στον Πίνακα 5.2 ταξινομούνται όλες οι μεθοδολογίες, ανά τύπο εδάφους, από αυτήν που δίνει τα μικρότερα έως τα μεγαλύτερα αποτελέσματα (μέγιστη μετατόπιση, μέγιστη καμπτική ροπή και μέγιστη τέμνουσα δύναμη). Προκύπτει ότι οι πιο τολμηρές καμπύλες p-y, σύμφωνα με την ανάλυση pushover του Κεφαλαίου 5.2, δεν οδηγούν απαραίτητα στο πιο ήπιο μετακινησιακό προφίλ.

Ωστόσο, σημειώνεται και πάλι, ότι οι καμπύλες των Lehane, Gill, Novello, Syrgasentana & Lehane βασίζονται στις ενδείξεις των δοκιμών SPT και CPT, επομένως στο παρόν παράδειγμα, όπου ελήφθησαν τυχαίες (αν και λογικές) τιμές N , q_c , ο αναγνώστης δε θα πρέπει να βασιστεί στην παραπάνω σύγκριση.

Πίνακας 5. 2: Κατηγοριοποίηση μεθόδων p-y από την τοιμηρότερη στην πιο συντηρητική, ως προς τον υπολογισμό μετακίνησης, καμπτικής ροπής και τέμνουσας δύναμης			
Τύπος εδάφους	Κατάταξη από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη:		
	μετακίνηση	καμπτική ροπή	τέμνουσα δύναμη
μαλακή άργιλος	Lehane	Lehane	Jeanjean
	Jeanjean	Jeanjean	Matlock
	O'Neill & Gazioglu	O'Neill & Gazioglu	O'Neill & Gazioglu
	Average	Average	Average
	Matlock	Matlock	Lehane
	Γεωργιάδης	Γεωργιάδης	Γεωργιάδης
	Jeong	Broms & Choa	Jeong
	Broms & Choa	NGI-11	Broms & Choa
	Sullivan	Jeong	Sullivan
	NGI-11	Sullivan	NGI-11
σπιρρή άργιλος	Dewaikar	Dewaikar	Reese
	Sullivan	Sullivan	Jeong
	Reese	Reese	Sullivan
	Jeong	Jeong	Average
	Welch & Reese	Welch & Reese	O'Neill & Gazioglu
	Average	Γεωργιάδης	Welch & Reese
	Γεωργιάδης	Average	Γεωργιάδης
	O'Neill & Gazioglu	O'Neill & Gazioglu	Broms & Choa
	Broms & Choa	Broms & Choa	Gill
	Gill	Gill	Dewaikar
άμμος	Dunnivant & O'Neill	Dunnivant & O'Neill	Dunnivant & O'Neill
	Gill	Gill	Gill
	Murchison & O'Neill	Murchison & O'Neill	Murchison & O'Neill
	Reese	Syryasantana & Lehane	Reese
	API	Novello	API
	Syryasantana & Lehane	API	Novello
	Novello	Reese	Average
	Average	Average	Γεωργιάδης
Γεωργιάδης	Γεωργιάδης	Syryasantana & Lehane	

5.4 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης καμπτικής ροπής-οριζοντίου φορτίου

Το βασικότερο κριτήριο διαστασολόγησης θεμελίων είναι η μετατόπιση που επιτρέπουν στα φορτία λειτουργίας της ανωδομής, δηλαδή είναι λειτουργικοί λόγοι, παρά κριτήρια αστοχίας. Συνήθως δηλαδή, τα φορτία που μεταβιβάζει η ανωδομή στα θεμέλια, στους πασσάλους εν προκειμένω, είναι αρκετά μικρά που δεν προκαλούν την αστοχία της θεμελίωσης, ή μάλλον, η θεμελίωση υπερδιαστασολογείται κατάλληλα έτσι ώστε η φόρτιση της ανωδομής να μην προκαλεί αστοχία. Αύξηση της διαμέτρου ή της δυσκαμψίας του πασσάλου (καλύτερης ποιότητας σκυρόδεμα, αύξηση πάχους τοιχώματος κοίλου πασσάλου (τουλάχιστον στα ρηγά εδαφικά στρώματα), τοποθέτηση μεταλλικών διαφραγμάτων στο εσωτερικό κοίλων πασσάλων) προκαλούν πιο δύσκαμπτο πάσσαλο, στον οποίον προκαλούνται μικρότερες μετατοπίσεις. Ωστόσο, θα είχε ενδιαφέρον να υπήρχε ένα διάγραμμα αλληλεπίδρασης ασκούμενων οριζοντίου φορτίου-καμπτικής ροπής του πασσάλου, έτσι ώστε:

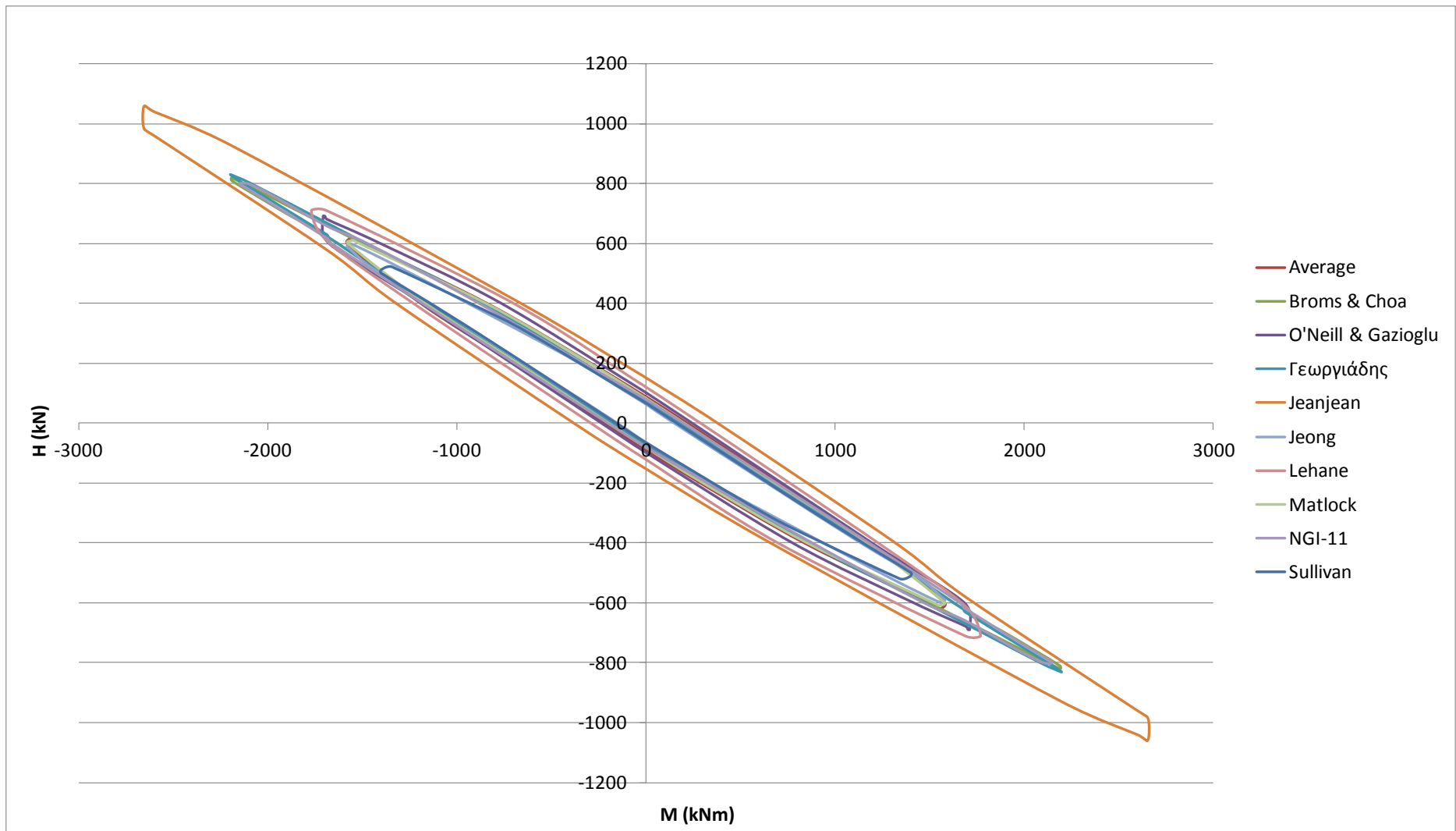
- Να σχολιαστεί η συμπεριφορά του πασσάλου όσον αφορά στα ασκούμενα φορτία.

- Να ελέγχεται ο πάσσαλος και σε φορτία αστοχίας ή σε φορτία που υπερβαίνουν τα φορτία σχεδιασμού.
- Να εξετάζεται το εύρος καμπτικής φόρτισης του πασσάλου για δεδομένο οριζόντιο φορτίο (ή ανάποδα) και κατά πόσο αυτό είναι ικανοποιητικό σε περιπτώσεις όπου η φόρτιση που θα προκληθεί θα είναι απρόβλεπτου μεγέθους, όπως σε ένα σεισμό.

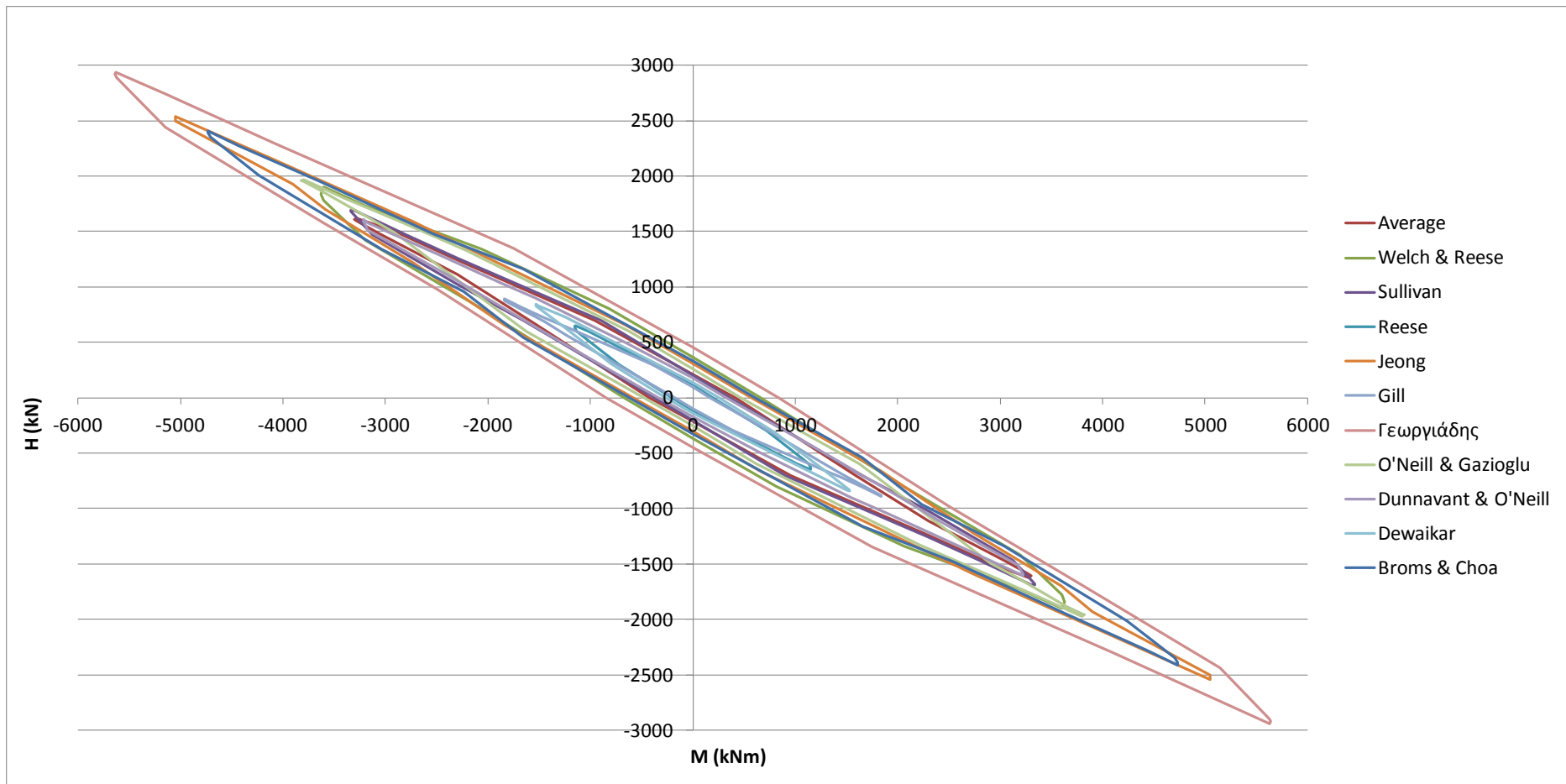
Το κριτήριο με το οποίο θα χαραχτούν τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης δεν είναι η αντοχή του πασσάλου, καθώς αυτός μπορεί να οπλιστεί κατάλληλα (εάν είναι από σκυρόδεμα) ή να αυξηθεί το πάχος του τοιχώματός του (εάν είναι κοίλος μεταλλικός) και να παραλάβει αρκετά μεγάλα φορτία πριν αστοχήσει, αλλά το έδαφος και η ύπαρξη μιας εδαφικής αστοχίας η οποία θα προκαλέσει τεράστιες μετατοπίσεις, καταστρεπτικές για την ανωδομή. Όπως είναι αναμενόμενο, εάν για μηδενική καμπτική ροπή το οριζόντιο μέγιστο φορτίο έχει μια τιμή, τότε για καμπτική ροπή ομόφορη με το οριζόντιο φορτίο, αυτή η τιμή αρχίζει να μειώνεται ώσπου να μηδενιστεί, ενώ αν η καμπτική ροπή έχει φορά αντίθετη του οριζοντίου φορτίου, τότε αυτή η τιμή αυξάνεται. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι η τιμή αυτή μπορεί να αυξηθεί πάρα πολύ, έως και 7 φορές περισσότερο από την αρχική τιμή. Το αντίστοιχο φαινόμενο συμβαίνει εάν κοιτάξουμε τη μέγιστη τιμή της καμπτικής ροπής όταν το οριζόντιο φορτίο είναι μηδενικό και όταν αρχίζει να αυξομειώνεται.

Ακόμα εξετάστηκε η επίδραση της αξονικής δύναμης, που δρα στον πάσσαλο, στο εύρος των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης. Όσο μεγαλύτερη η αξονική θλιπτική δύναμη τόσο μικρότερο εύρος έχει το διάγραμμα αλληλεπίδρασης, και το αντίθετο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θλιπτική δύναμη προκαλεί ροπές δευτέρας τάξεως, λόγω της μετατόπισης που προκαλεί (ένα φαινόμενο παρόμοιο με το λυγισμό, σε μικρότερη κλίμακα βέβαια μιας και ο πάσσαλος είναι εγκιβωτισμένος στο έδαφος). Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι η εφαρμογή διαφορετικών καμπυλών $p-y$ οδηγούν σε διαγράμματα αλληλεπίδρασης που εμφανίζουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους. Οι καμπύλες $p-y$ που έχουν μεγαλύτερη αντίδραση p για την ίδια μετατόπιση, οδηγούν σε διαγράμματα με αρκετά μεγάλο εύρος και σε υπερβολικά μεγάλες αντοχές όταν η οριζόντια φόρτιση είναι ετερόσημη της καμπτικής ροπής.

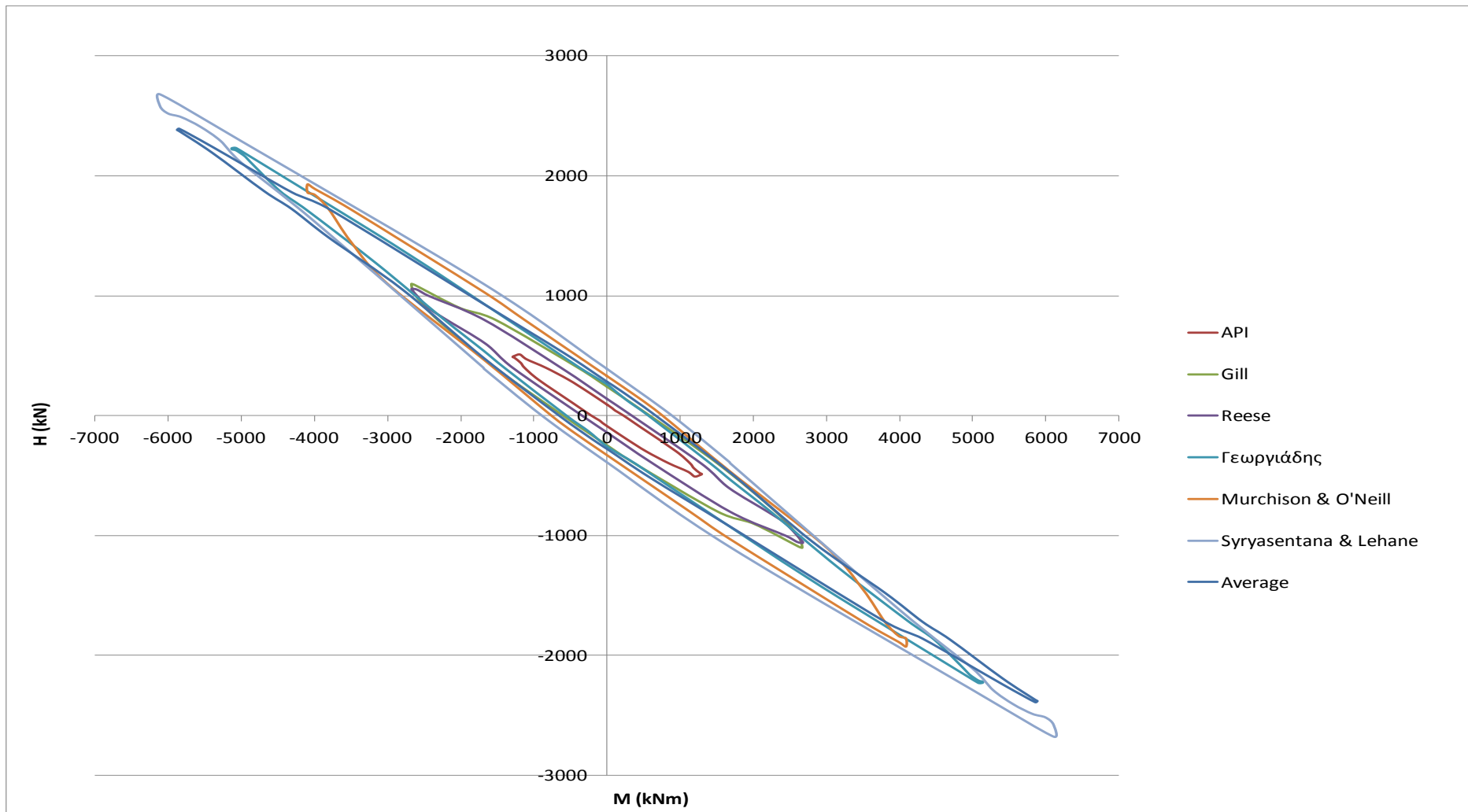
Παρακάτω, στα διαγράμματα των Εικόνων 5.13 έως 5.15 παρουσιάζονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για τα 3 διαφορετικά είδη εδάφους (μαλακή-στιφρή άργιλος και άμμος) και για όλες τις καμπύλες $p-y$. Ο πάσσαλος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ίδιος με όλες τις υπόλοιπες αναλύσεις (διάμετρος: 1 m, μήκος: 30 m, μέτρο ελαστικότητας: 30 GPa, λείος πάσσαλος με δείκτη $\alpha=0$) ενώ το έδαφος έχει και πάλι ενεργό ειδικό βάρος ίσο με 8 kN/m³. Το αξονικό φορτίο που χρησιμοποιήθηκε είναι ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις σύγκρισης μετακίνησης ανάλογα την καμπύλη $p-y$, στις αναλύσεις κεκλιμένου εδάφους με τη μέση καμπύλη και στις αναλύσεις pushover που προκύπτουν για τις διάφορες $p-y$ καμπύλες. Δηλαδή χρησιμοποιήθηκε αξονικό φορτίο ίσο με $N=250$ kN για την άμμο και τη μαλακή άργιλο, ενώ $N=425$ kN για τη στιφρή άργιλο. Όπως αποδείχθηκε και στο Κεφάλαιο 5.3, αυτά τα αξονικά φορτία απέχουν πολύ από τα οριακά φορτία των πασσάλων σε κάθε τύπο εδάφους, άρα δεν υπάρχει ανησυχία για αστοχία του πασσάλου σε θλίψη.



Εικόνα 5. 13: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για μαλακή άργιλο για διάφορες καμπύλες p-y, αξονικό φορτίο $N=250\text{kN}$ ($N/N_u=9.5\%$)



Εικόνα 5. 14: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για σφιγγή άργιλο για διάφορες καμπύλες p-y, αξονικό φορτίο $N=425\text{kN}$ ($N/N_u=7.3\%$)

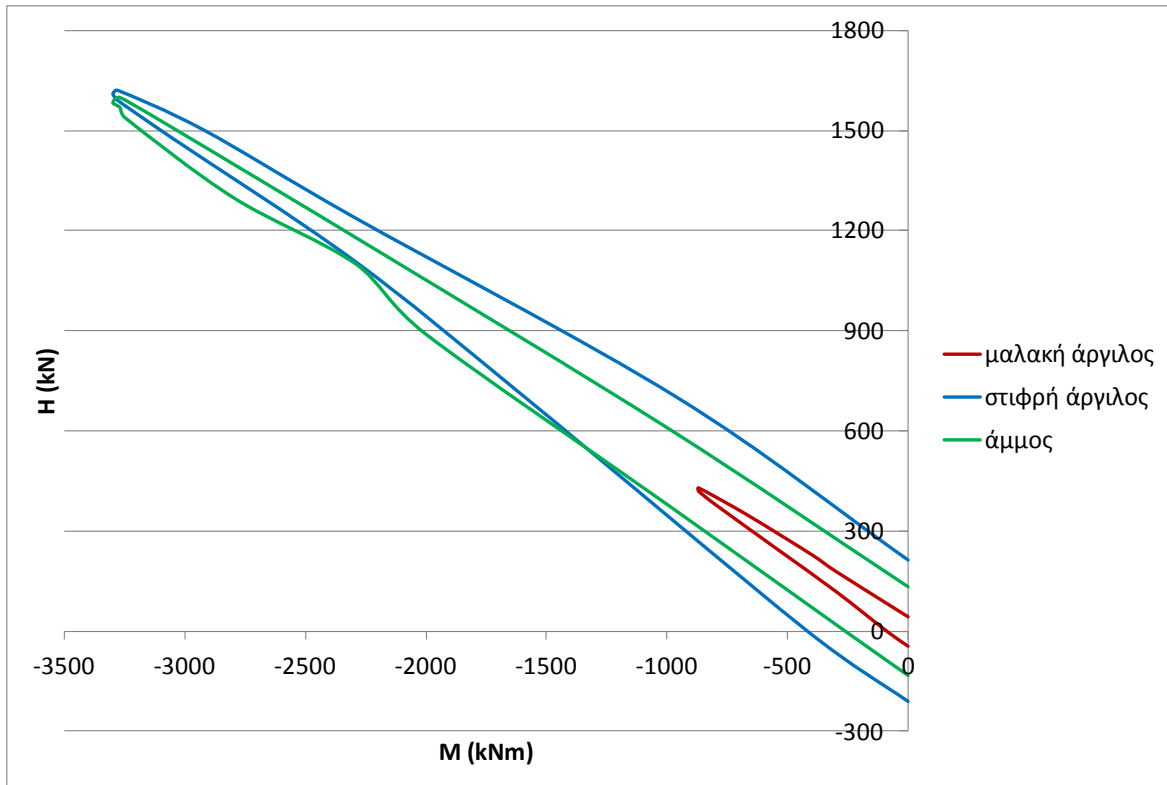


Εικόνα 5. 15: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για άμμο για διάφορες καμπύλες p-y, αξονικό φορτίο $N=250\text{kN}$ ($N/N_u=2.9\%$)

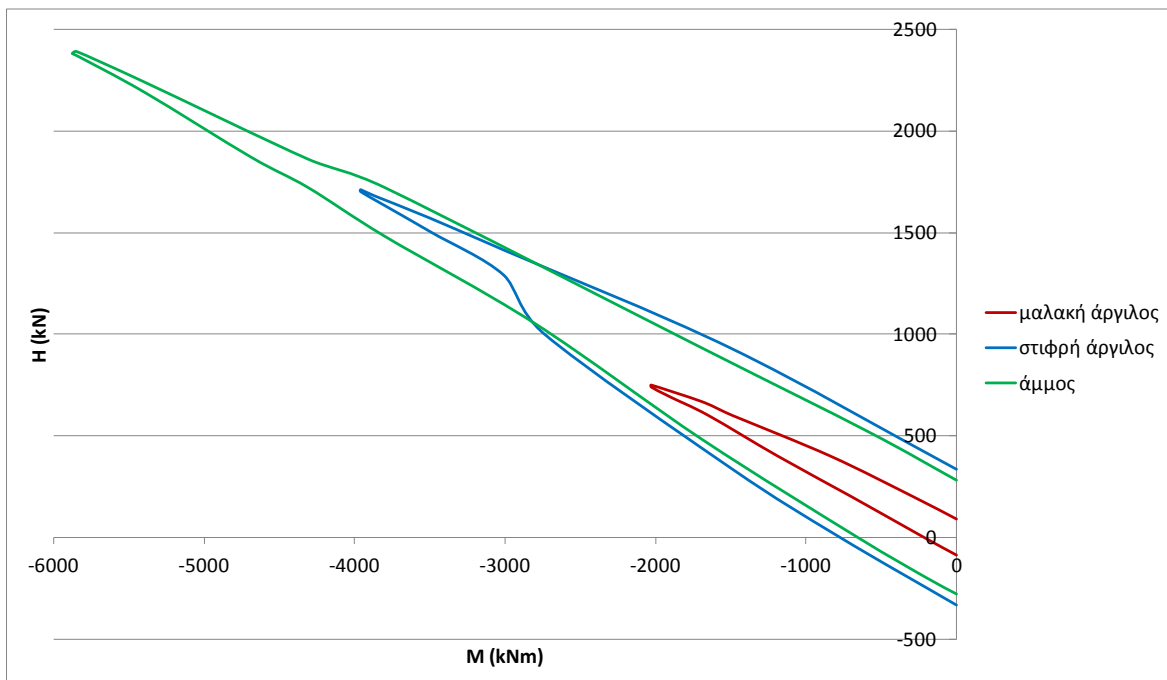
Καταρχήν τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης είναι συμμετρικά ως προς την αρχή των αξόνων. Είναι εμφανές πόσο μεγάλη απόκλιση έχουν κάποια διαγράμματα από κάποια άλλα. Ακόμα συμπεραίνεται ότι όσο μικρότερο είναι το οριζόντιο φορτίο, τόσο μεγαλύτερο το αποδεκτό εύρος της καμπτικής ασκούμενης ροπής, και το αντίθετο. Για αρκετά μεγάλα φορτία, το εύρος αυτό στενεύει τόσο πολύ που είναι πολύ εύκολο να γίνει μια μικρή υπέρβαση (προς τα πάνω ή προς τα κάτω) των φορτίων σχεδιασμού και να προκύψει συνδυασμός φόρτισης εκτός του διαγράμματος, που θα οδηγήσει σε αστοχία του εδάφους θεμελίωσης, επομένως σε καταστρεπτικές μετατοπίσεις. Επομένως, είναι προτιμητέο, να μην εξαντλούνται τα τολμηρά διαγράμματα αλληλεπίδρασης έως τις ακραίες περιβάλλουσες αλλά να χρησιμοποιούνται απομειωμένα κατά ένα ποσοστό ασφαλείας, ούτως ώστε να υπάρχει ένα περιθώριο ασφαλείας.

Επίσης παρατηρείται ότι στην άμμο, το διάγραμμα αλληλεπίδρασης που αντιστοιχεί στη μέση καμπύλη είναι αρκετά κοντά στη συμπεριφορά των διαγραμμάτων που προκύπτουν από τις πιο τολμηρές καμπύλες p-y (αντί να είναι κάπου ανάμεσα των λιγότερο και περισσότερο συντηρητικών). Αυτό ίσως δικαιολογείται καθώς η καμπύλη του Novello (η οποία είναι μη ρεαλιστικά τολμηρή σε μεγάλες μετατοπίσεις) έχει μεγάλη βαρύτητα (λόγω των πολύ μεγαλύτερων τιμών της ακόμα και από τις τολμηρές καμπύλες των Γεωργιάδη, Syrgasentana & Lehane και O'Neill) στον προσδιορισμό της μέσης καμπύλης. Μάλιστα, αυτή η συμπεριφορά της καμπύλης του Novello, κρίθηκε τόσο μη ρεαλιστική και επικίνδυνα τολμηρή, που δεν κατασκευάστηκε διάγραμμα αλληλεπίδρασης με βάση αυτήν.

Όσον αφορά στη κλίση των διαγραμμάτων, παρατηρείται ότι αυτή είναι στο μεγαλύτερο μήκος της καμπύλης σχεδόν γραμμική με αρνητική, πάντα, κλίση (δηλαδή για μεγαλύτερη θετική ροπή, η μέγιστη οριζόντια δύναμη μειώνεται και αντίστροφα). Αυτή η κλίση εάν εκφραστεί ως το πηλίκο της διαφοράς της οριζόντιας δύναμης προς τη διαφορά της οριζόντιας δύναμης ($\Delta H/\Delta M$) προκύπτει ίση με 0.4 για τη μαλακή άργιλο, 0.5 για τη στιφρή άργιλο και 0.42 για την άμμο. Ωστόσο τα διαγράμματα για τη στιφρή άργιλο προέκυψαν για διαφορετικό αξονικό φορτίο επομένως δεν είναι σωστό να συγκριθούν. Επομένως, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης και για τα 3 είδη εδάφους, με βάση τις μέσες καμπύλες p-y για 2 διαφορετικά αξονικά φορτία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα διαγράμματα των Εικόνων 5.16 και 5.17 (για οικονομία χώρου παρουσιάζεται μόνο το μισό διάγραμμα).



Εικόνα 5. 16: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για όλα τα εδάφη, με βάση τις μέσες καμπύλες p-y, για αξονική δύναμη N=250 kN



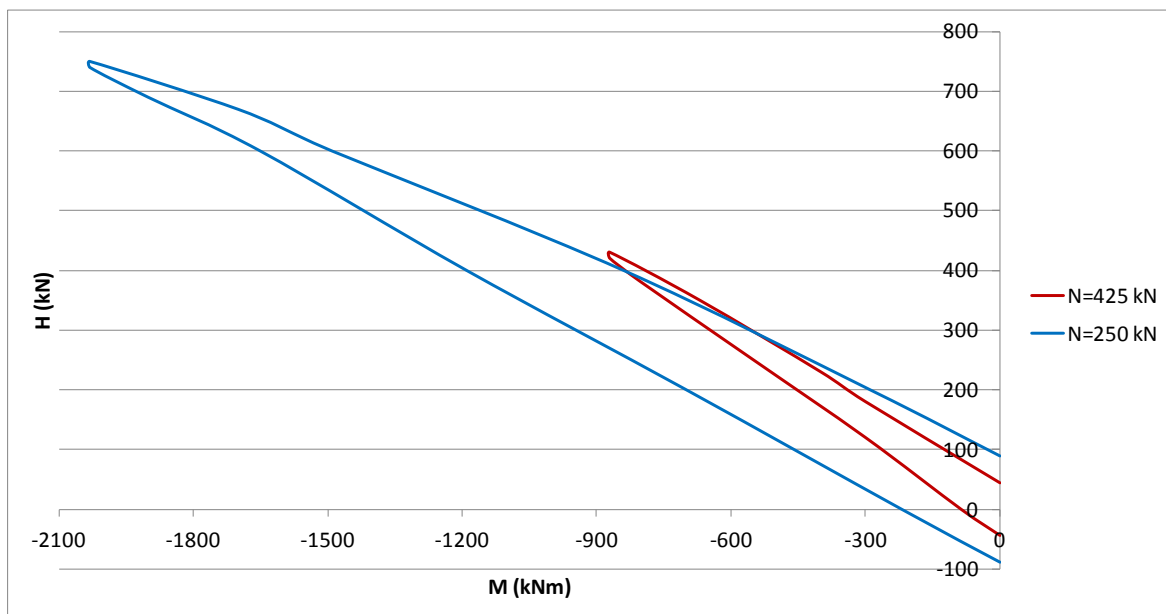
Εικόνα 5. 17: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για όλα τα εδάφη, με βάση τις μέσες καμπύλες p-y, για αξονική δύναμη N=425 kN

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα παραπάνω διαγράμματα είναι τα εξής:

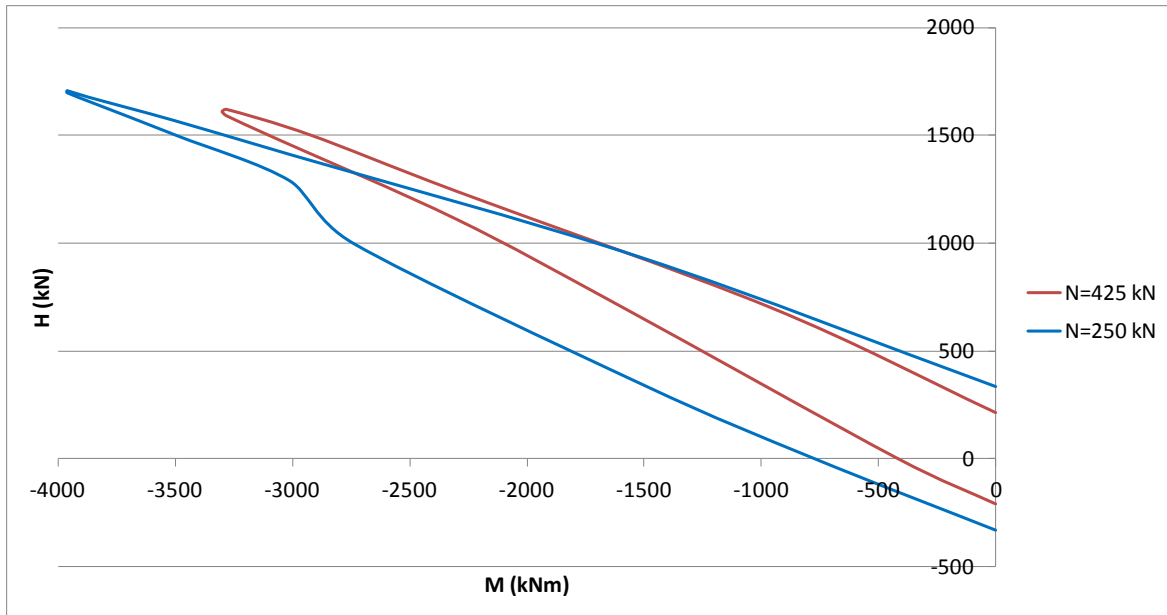
- Η κλίση των καμπυλών των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης είναι κατά κύριο λόγο σταθερή για κάθε φόρτιση ανεξάρτητα το είδος του εδάφους.

- Η αύξηση του αξονικού φορτίου είναι δυσμενής κατάσταση για το σύστημα πάσσαλος-έδαφος διότι δημιουργούνται μεγαλύτερες ροπές δευτέρας τάξεως, επομένως όσο αυξάνει το αξονικό φορτίο, τόσο μειώνεται το εύρος του κάθε διαγράμματος. Αυτός ο κανόνας έχει εφαρμογή σε κάθε διάγραμμα ανεξάρτητα από τον τύπο εδάφους.
- Η άμμος παρουσιάζει πολύ πιο καλή συμπεριφορά στα μικρά αξονικά φορτία συγκριτικά με τη στιφρή άργιλο, ωστόσο, όσο το αξονικό φορτίο αυξάνεται, φαίνεται ότι επηρεάζεται πολύ περισσότερο από τη στιφρή άργιλο, καθώς τα διαγράμματα των δύο εδαφών για $N=425$ kN είναι σχεδόν ίδια (ενώ για $N=250$ kN το διάγραμμα της άμμου ήταν πολύ πιο ευρύ από το αντίστοιχο της στιφρής αργίλου).
- Η κλίση των καμπυλών επηρεάζεται από το αξονικό φορτίο. Στα διαγράμματα υπό το μικρό αξονικό φορτίο, η κλίση είναι 0.4 περίπου (κλίση= $\Delta H/\Delta M$), αρνητική πάντα, που σημαίνει ότι για αύξηση του οριζοντίου φορτίου κατά 100%, η ροπή πρέπει να μειωθεί αλγεβρικά κατά 250%. Όταν το φορτίο γίνεται 425 kN, η κλίση αλλάζει σε 0.5 περίπου. Δηλαδή η αύξηση του οριζοντίου φορτίου κατά 100% προκαλεί αλγεβρική μείωση της καμπτικής ροπής κατά 200%.
- Η μαλακή άργιλος έχει πολύ μικρότερο εύρος συνδυασμών φορτίσεων που δεν προκαλούν αστοχία συγκριτικά με τους άλλους 2 τύπους εδαφών.

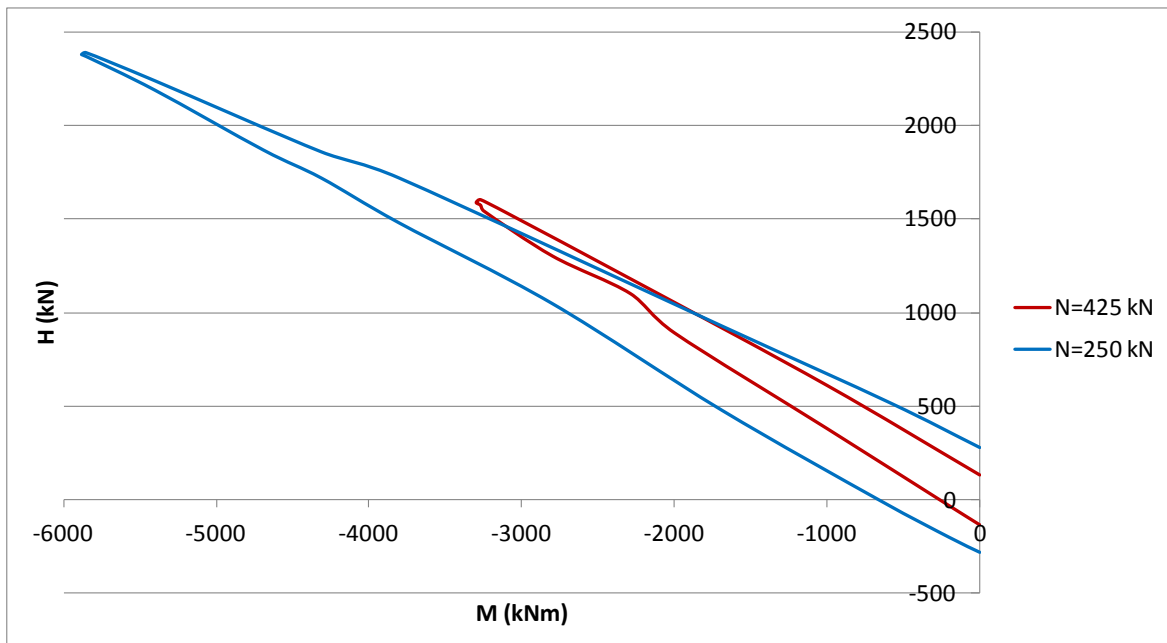
Για να φανεί καλύτερα η επίδραση του αξονικού φορτίου στο διαγράμματα αλληλεπίδρασης, στα διαγράμματα των Εικόνων 5.18 έως 5.20 παρατίθενται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης με βάση την μέση καμπύλη p-y, για αξονικό φορτίο ίσο με 250 και 425 kN, για το κάθε έδαφος.



Εικόνα 5. 18: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για μαλακή άργιλο με βάση τη μέση καμπύλη p-y



Εικόνα 5. 19: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για στιφρή άργιλο με βάση τη μέση καμπύλη p-y

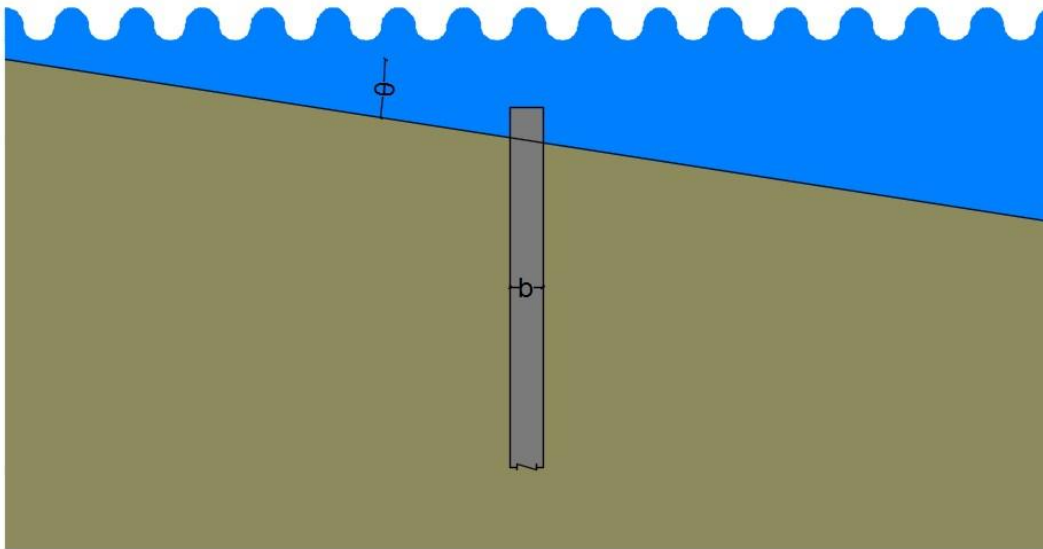


Εικόνα 5. 20: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για άμμο με βάση τη μέση καμπύλη p-y

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η μεταβολή της αξονικής δύναμης έχει μεγαλύτερη επιρροή στη μαλακή άργιλο, κατόπιν στην άμμο και τέλος, στη στιφρή άργιλο. Συγκεκριμένα, για μια μείωση της αξονικής κατά 41% (από 425 kN σε 250 kN) το μέγιστο οριζόντιο φορτίο αυξήθηκε κατά 66.6% στη μαλακή άργιλο, κατά 50% στην άμμο, ενώ μόλις κατά 6.3% στη στιφρή άργιλο (πρακτικά το μέγιστο οριζόντιο φορτίο επηρεάζεται λίγο στη στιφρή άργιλο από τις μεταβολές στην αξονική δύναμη). Όσο για τη μέγιστη καμπτική ροπή, αυτή, για την ίδια μείωση της αξονικής κατά 41%, αυξήθηκε κατά 133% στη μαλακή άργιλο, κατά 85% στην άμμο, ενώ μόλις κατά 23% στη στιφρή άργιλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Επιρροή κεκλιμένου εδάφους στην οριζόντια απόκριση του πασσάλου

Έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια ώστε να βρεθεί η επίδραση του κεκλιμένου εδάφους στην οριζόντια απόκριση του πασσάλου. Η κυριότερη παράμετρος είναι η κλίση του εδάφους (θ°) αλλά και το είδος του εδάφους. Σκαρίφημα του προβλήματος φαίνεται στην Εικόνα 6.1.



Εικόνα 6. 1: Σκαρίφημα πασσάλου διαμέτρου b , σε πρηνές κλίσης θ μοιρών

6.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μεθοδολογιών απομείωσης καμπυλών p - y

Μικρότερο ρόλο παίζουν η διάμετρος και το μήκος του πασσάλου. Λίγες είναι οι περιπτώσεις που αναπτύχθηκε αναλυτική σχέση, ενώ στη βιβλιογραφία συναντάται πληθώρα μειωτικών συντελεστών καμπυλών p - y οι οποίοι προέκυψαν από συγκεκριμένα πειράματα (συντελεστές r). Γενικά, η ύπαρξη κεκλιμένου εδάφους δεν αλλάζει τη μορφή της καμπύλης, απλά μειώνει την αντίστασή της για κάθε μετατόπιση κατά ένα ποσοστό, ενώ επίσης τα εντατικά μεγέθη στον πάσσαλο αυξάνονται (συγκεκριμένα η μέγιστη ροπή αυξάνεται και εμφανίζεται βαθύτερα όσο αυξάνει η κλίση του εδάφους). Τα περισσότερα πειράματα της βιβλιογραφίας παρουσιάζουν ως αποτέλεσμα αυτόν τον συντελεστή r , ενώ άλλα, όπως και οι περισσότερες αναλυτικές σχέσεις, δίνουν ένα μειωτικό συντελεστή για τη μέγιστη αντίσταση του πασσάλου p_u , ψ . Καθώς όμως οι περισσότερες μέθοδοι παρουσιάζουν την αντίσταση p ως ανάλογη της μέγιστης αντίστασης, θεωρήθηκε για το σκοπό της εργασίας ότι $\psi=r$ χωρίς βλάβη της γενικότητας. Επίσης, δε μελετάται η απόσταση του πασσάλου από την πλαγιά, δηλαδή γίνεται η θεώρηση ότι ο πάσσαλος θεμελιώνεται επί κεκλιμένου εδάφους. Στον συγκεντρωτικό Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι προτεινόμενες τιμές r βάσει των υφιστάμενων βιβλιογραφικών μεθοδολογιών.

Πίνακας 6. 1: Μεθοδολογίες απομείωσης καμπυλών p-y ανά είδος εδάφους: οι προτεινόμενοι μειωτικοί συντελεστές r και το βάθος επιρροής της κλίσης

Είδος Εδάφους	Μεθοδολογία	Συντελεστής απομείωσης r	Βάθος επιρροής ανηγμένο ως προς τη διάμετρο
Αργίλος c_u	Γεωργιάδης (2010)	$p_{u,slope}/p_{u,horizontal}$	-
	Nimityongskul (2010)	0.45	7
	Reese (1975)	$1/(1 + \tan(\theta))$	10
Άμμος ϕ	Barker (2012)	0.3-0.4	10
	Muthukkumaran (2008)	$r = 0.74 + 0.0378 * z/b - 0.6315 * \theta$	-
	Reese (1974)	$p_{u,slope}/p_{u,horizontal}$	10
	Mezazigh & Levacher (1998)	$1 - \tan(\theta)$	$20*\theta(\text{rad})$
	Gabr & Borden (1988)	$p_{u,slope}/p_{u,horizontal}$	-

6.1.1 Γεωργιάδης (2010) - Αργίλος

Μέσω αναλύσεων στο Plaxis 3D, ο Γεωργιάδης τροποποίησε την καμπύλη p-y που είχε αναπτύξει το 2010 για αργίλους ώστε να συμπεριλάβει την επίδραση της κλίσης του εδάφους. Η αναλυτική σχέση στην οποία κατέληξε, προέκυψε μέσω αναλύσεων σε αργίλους διαφορετικής αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, με πασσάλους διαφορετικής διαμέτρου, τραχύτητας και μήκους και σε διαφορετικές κλίσεις, ενώ τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν επιτυχώς με πειράματα της βιβλιογραφίας. Κατά συνέπεια, είναι μια μέθοδος με ευρεία εφαρμογή ως προς πολλά χαρακτηριστικά του πασσάλου ή εδαφικές ιδιότητες (οι συνδυασμοί παραμέτρων τις οποίες χρησιμοποίησε στις προσομοιώσεις του φαίνονται στον Πίνακα 5.2). Επίσης, στην προσομοίωσή του όρισε μηδενική εφελκυστική αντοχή σε μια ζώνη 10 εκατοστών γύρω από τον πάσσαλο, ώστε να λάβει υπ'όψιν του το κενό που θα δημιουργήσει η μετατόπιση λόγω οριζοντίου φορτίου στο πίσω μέρος του πασσάλου, μην επιτρέποντας να αναπτυχθούν σε αυτόν οι ενεργητικές ωθήσεις του εδάφους.

Πίνακας 6. 2: Συνδυασμοί παραμέτρων που χρησιμοποίησε ο Γεωργιάδης στις προσομοιώσεις του

μήκος L (m)	διάμετρος D (m)	κλίση πρανούς $\theta(^{\circ})$	αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u (kPa)	μέτρο ελαστικότητας E_u/c_u	ειδικό βάρος γ (kN/m ³)	δείκτης τραχύτητας α
12	1	0, 20, 30, 40	50	200	18	1
12	1	0	50	100, 200, 400	18	1
12	1	0	25, 50, 100	200	18	1
12	1	0, 30	50	200	18	0.3, 0.5, 1
12	0.5	0, 30	50	200	18	0.3, 0.5, 1
20	1	0, 20, 30, 40	50	200	18	1
20	1	0	50	100, 200, 400	18	1
20	1	0	25, 50, 100	200	18	1
20	1	0, 30	50	200	18	0.3, 0.5, 1
20	1	0, 30	50	200	16, 18, 20	1
20	0.5	0, 30	50	200	18	0.3, 0.5, 1
20	2	0, 30	50	200	18	0.3, 0.5, 1

Οι παράμετροι της καμπύλης p-y που επηρεάζονται είναι τόσο η κλίση του αρχικού ευθύγραμμου τμήματος, K_i , όσο και η μέγιστη αντίσταση p_u . Κάποια από τα συμπεράσματα της ανάλυσης του είναι ότι όσο πιο λείος ο πάσσαλος (δηλαδή όσο μειώνεται ο συντελεστής α) τόσο μεγαλύτερη η επιρροή του κεκλιμένου εδάφους, και ακόμα, το κεκλιμένο έδαφος επηρεάζει κυρίως τη μετατόπιση του πασσάλου για σταθερό φορτίο και όχι τόσο τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται σε αυτόν.

Η μέθοδος του Γεωργιάδη κρίνεται από τις πιο ακριβείς αλλά και τολμηρές στη βιβλιογραφία. Παρόλα αυτά, συστήνεται να μη χρησιμοποιείται για κλίσεις μεγαλύτερες των 40 μοιρών, καθώς δίνει υπερβολικά τολμηρά αποτελέσματα.

Όταν η μέθοδος του Γεωργιάδη πρόκειται να εφαρμοστεί στη δική του καμπύλη p-y, τότε η διαδικασία που ακολουθείται για την παραγωγή της καμπύλης είναι αυτή που περιγράφεται στον Πίνακα 3.13, με επιπρόσθετες μεταβολές στα μεγέθη K_i , p_u , οι οποίες περιγράφονται παρακάτω:

$$N_{p,slope} = N_{p,u} - (N_{p,u} - N_{p,o} * \cos(\theta)) * \exp(-\lambda * z/b/(1 + \tan(\theta)))$$

$$p_{u,slope} = N_{p,slope} * c_u * b$$

$$m = \min [\cos(\theta) + z/(6 * b) * (1 - \cos(\theta)), 1]$$

$$K_{i,slope} = 3 * E_s * \sqrt{E_s * b^4/E_p/I_p} * m$$

Εάν αυτή η μεθοδολογία απομείωσης εφαρμοστεί σε άλλη καμπύλη p-y, τότε αρκεί να εξαχθεί ο συντελεστής r , όπου $r = p_{u,slope}/p_{u,horizontal}$, όπου $p_{u,slope}$ περιγράφεται παραπάνω και $p_{u,horizontal}$ περιγράφεται στον Πίνακα 3.13.

6.1.2 Nimityongskul (2010) - Άργιλος

Ο Nimityongskul έκανε πειράματα σε κοίλο μεταλλικό πάσσαλο διαμέτρου 30 εκατοστών και μήκους 10 μέτρων, επί κεκλιμένου αργιλικού εδάφους, ενώ τα αποτελέσματά του συστήνονται προς εφαρμογή σε ένα εύρος γωνίας κλίσης 15°-35°, παρόμοιο με αυτό των πειραμάτων του (συγκεκριμένα πειραματίστηκε σε πρανές κλίσης 26.5°).

Ο Nimityongskul κατέληξε σε έναν συντελεστή r ίσο με 0.45. Παρατήρησε ότι οι καμπύλες p-y δεν επηρεάζονται από την κλίση σε ένα βάθος μεγαλύτερο των 7 διαμέτρων. Ένα ακόμα συμπέρασμα των πειραμάτων του, είναι ότι η αρχική κλίση των καμπυλών p-y ελάχιστα επηρεάζεται από την κλίση του εδάφους.

Θεωρείται αρκετά συντηρητική μέθοδος, δεδομένου ότι η άργιλος δεν επηρεάζεται τόσο πολύ από το κεκλιμένο έδαφος, και δε θα έπρεπε να αποτελεί κριτήριο σχεδιασμού, παρα μόνο ένα κάτω όριο σύγκρισης. Στην παρούσα εργασία δε θα συμπεριληφθεί σε περαιτέρω αναλύσεις, ωστόσο αποτελεί μία από τις μεθόδους που υπάρχουν στο πρόγραμμα της MATLAB.

6.1.3 Reese (1975) - Άργιλος

Ο Reese προτείνει την έμμεση απομείωση της αντίστασης εδάφους μέσω της απομείωσης της μέγιστης αντοχής p_u , διαιρώντας τη με τον όρο $(1 + \tan(\theta))$. Ο όρος αυτός προκύπτει άμεσα από τον όγκο εδάφους που «απουσιάζει» μπροστά από τον πάσσαλο λόγω του πρανούς. Η απομείωση αυτή πρέπει να γίνεται έως το βάθος των 10 διαμέτρων, καθώς παρακάτω δεν υπάρχει επιρροή της κλίσης στην αντίσταση του πασσάλου.

6.1.4 Barker (2012) - Άμμος

Ο Barker για τα πειράματά του χρησιμοποίησε κοίλους μεταλλικούς πασσάλους διαμέτρου 30 εκατοστών και μήκους 10 μέτρων, ενώ η αμμώδης πλαγιά όπου έκανε το πείραμα είχε κλίση 26.5° .

Ο Barker πρότεινε ότι η κλίση του εδάφους επηρεάζει την απόκριση του πασσάλου έως το βάθος των 10 διαμέτρων. Στις πρώτες 4 διαμέτρους, προτείνει τιμή για το r ίση με 0.3, ενώ για τις υπόλοιπες 6 διαμέτρους, προτείνει $r=0.4$. Οι τιμές αυτές θα έπρεπε να εφαρμόζονται σε περιπτώσεις όπου η κλίση είναι περίπου 15° - 35° , δηλαδή παρόμοια με αυτή στα πειράματά του.

Είναι από τις πιο συντηρητικές μεθόδους, ωστόσο, μιας και η αντίσταση της άμμου είναι ευαίσθητη στην κλίση του εδάφους (καθώς τίθενται και θέματα ευστάθειας και ανάπτυξης επιφανειών αστοχίας στο αμμώδες πρανές), συμπεριλαμβάνεται στις αναλύσεις και συγκρίνεται με τις υπόλοιπες μεθόδους.

6.1.5 Muthukkumaran (2007) - Άμμος

Η μέθοδος αυτή προέκυψε κατόπιν πειραμάτων σε φυγοκεντρική όπου χρησιμοποιήθηκε μικρής κλίμακας πάσσαλος (εξωτερική διάμετρος ίση με 25 χιλιοστά, εσωτερική διάμετρος ίση με 23 χιλιοστά, μήκος ίσο με 700 χιλιοστά). Συστήνεται για κλίσεις εδάφους από 28° - 40° όπως και αυτές στις οποίες διεξήχθησαν τα πειράματα. Ο πάσσαλος αυτός κατά τον Muthukkumaran θεωρείται το ανάλογο ενός πασσάλου 30 φορές μεγαλύτερου σε διάμετρο και μήκος, με λόγο διαμέτρου προς πάχος ίσο με 50 και με δυσκαμψία $E_p \cdot I_p = 330 \text{ MN/m}^2$.

Είναι η πιο τολμηρή και ακριβής από τις υπόλοιπες μεθόδους όσον αφορά στα αμμώδη εδάφη και η μοναδική που λαβαίνει υπ' όψιν τη θετική συνεισφορά του βάθους, την οποία ο Muthukkumaran δικαιολόγησε όπως το υπερκείμενο βάρος αυξάνει την παθητική αντίσταση του εδάφους.

6.1.6 Reese (1974) – Άμμος

Ο μειωτικός συντελεστής r προκύπτει ως το πηλίκο της μέγιστης εδαφικής αντίδρασης στο κεκλιμένο έδαφος προς τον αντίστοιχο σε οριζόντιο. Επομένως, η καμπύλη σχηματίζεται όπως περιγράφεται στον Πίνακα 3.22 και κατόπιν

πολλαπλασιάζεται με $r = r_{u,slope} / r_{u,horizontal}$, όπου $r_{u,horizontal}$ περιγράφεται στον Πίνακα 3.21 ενώ το $r_{u,slope}$ βρίσκεται ως εξής:

$$r_{u,slope} = A * \gamma' * z * \left(\frac{K_o * z * \tan(\varphi) * \sin(\beta)}{\tan(\beta - \varphi) * \cos(\alpha)} * (4 * D_1^3 - 3 * D_1^2 + 1) + \right. \\ \left. + \frac{\tan(\beta)}{\tan(\beta - \varphi)} * (b * D_2 + z * \tan(\beta) * \tan(\alpha) * D_2^2) + \right. \\ \left. + K_o * z * \tan(\beta) * (\tan(\varphi) * \sin(\beta) - \tan(\alpha)) * (4 * D_1^3 + 3 * D_1^2 + 1) - K_a * b \right)$$

όπου:

$$A = 0.1123 * \left(\frac{z}{b}\right)^2 - 0.973 * \left(\frac{z}{b}\right) + 2.9473 \quad \text{για } (z/b) < 5$$

$$A = 0.88 \quad \text{για } (z/b) > 5$$

$$D_1 = \frac{\tan(\theta) * \tan(\beta)}{\tan(\theta) * \tan(\beta) + 1}$$

$$D_2 = 1 - D_1$$

$$K_a = \cos(\theta) * \frac{\cos(\theta) - \sqrt{\cos(\theta)^2 - \cos(\varphi)^2}}{\cos(\theta) + \sqrt{\cos(\theta)^2 - \cos(\varphi)^2}}$$

6.1.7 Mezazigh & Levacher (1997) - Άμμος

Οι Mezazigh & Levacher έκαναν πειράματα σε αμμώδη κεκλιμένα εδάφη (συγκεκριμένα σε πλαγιές με κλίση 26.6° και 33.7°) σε φυγοκεντρική προσπαθώντας να εξάγουν το συντελεστή r συναρτήσει και της απόστασης από την πλαγιά (t) αλλά και της κλίσης της. Για τον σκοπό του πειράματος χρησιμοποιήθηκε μοντέλο πασσάλου σε μικρή κλίμακα, με ύψος ίσο με 350 χιλιοστά, εξωτερική διάμετρο ίση με 18 χιλιοστά και πάχος 1.5 χιλιοστού.

Θέτοντας την απόσταση t ίση με 0, προκύπτει ότι $r = 1 - \tan(\theta)$. Η σχέση εφαρμόζεται για κλίσεις μικρότερες των 40° ενώ το βάθος επιρροής είναι ίσο με $20 * \theta(\text{rad}) * b$. Πέρα από τον Muthukkumaran που λαβαίνει υπ' όψιν τη θετική συνεισφορά του βάθους άμεσα στη σχέση εξαγωγής του συντελεστή r , αυτή είναι η μόνη από τις υπόλοιπες μεθοδολογίες που, έστω και έμμεσα, εκμεταλλεύεται την ωφέλεια του βάθους, εφαρμόζοντας τον συντελεστή r έως ένα βάθος που επηρεάζεται γραμμικά από την κλίση του πρανούς.

6.1.8 Gabr & Borden (1988) - Άμμος

Η μέθοδος των Gabr & Borden μοιάζει αρκετά με του Reese, μόνο που αυτή λαβαίνει υπ' όψιν και τις ενεργητικές ωθήσεις γαιών. Η συνεισφορά των ενεργητικών ωθήσεων από το πίσω μέρος του πασσάλου οδηγεί σε συντηρητικά αποτελέσματα, μιας και, συνήθως, λόγω του οριζοντίου φορτίου και της μετακίνησης του πασσάλου, χάνεται η επαφή στο πίσω μέρος του πασσάλου, επομένως στην πραγματικότητα δε δρουν αυτές οι ωθήσεις στο σώμα του πασσάλου. Ο συντελεστής r , όπως και στην

περίπτωση του Reese, προκύπτει ως το πηλίκο $p_{u,slope}/p_{u,horizontal}$, όπου $p_{u,horizontal}$ και $p_{u,slope}$ σε βάθος z , βρίσκονται ως εξής:

$$K_p = \frac{\tan(45+\varphi/2) * (\cos(45+\varphi/2) + \sin(45+\varphi/2) * \tan(\varphi))}{(\tan(\theta) * \tan(45+\varphi/2) + 1) * (\sin(45+\varphi/2) - \cos(45+\varphi/2) * \tan(\varphi))}$$

$$K_a = \cos(\theta) * \frac{\cos(\theta) - \sqrt{\cos(\theta)^2 - \cos(\varphi)^2}}{\cos(\theta) + \sqrt{\cos(\theta)^2 - \cos(\varphi)^2}}$$

$$K_1 = \frac{\cos(45+\varphi/2) * (\tan(\theta) * \sin(45+\varphi/2) + \cos(45+\varphi/2))}{z}$$

$$K_2 = \frac{\tan(45+\varphi/2) * \sin(45+\varphi/2)}{\tan(\theta) * \tan(45+\varphi/2) + 1}$$

$$\lambda = K_1/2 * (K_2 + \frac{K_2}{\cos(45+\varphi/2)})$$

$$S_1 = \frac{\lambda * \tan(\varphi/2) * \tan(45+\varphi/2)}{(\tan(\theta) * \tan(45+\varphi/2) + 1)^2} * [(\tan(\theta) * \tan(45 + \varphi/2) + 1) * (3 + 4 * \tan(\varphi) * \tan(45+\varphi/2))]$$

$$S_2 = \frac{2 * \lambda}{\tan(\theta) * \tan(45+\varphi/2) + 1} * (1 + \tan(\varphi)^2)$$

$$S_3 = ((\tan(\varphi) - \tan(\varphi/2)) * [\tan(45 + \varphi/2) - \frac{\tan(45+\varphi/2)^4 * \tan(\theta)^3 + \tan(45+\varphi/2)^3 * \tan(\theta)^2}{(\tan(\theta) * \tan(45+\varphi/2) + 1)^3}])$$

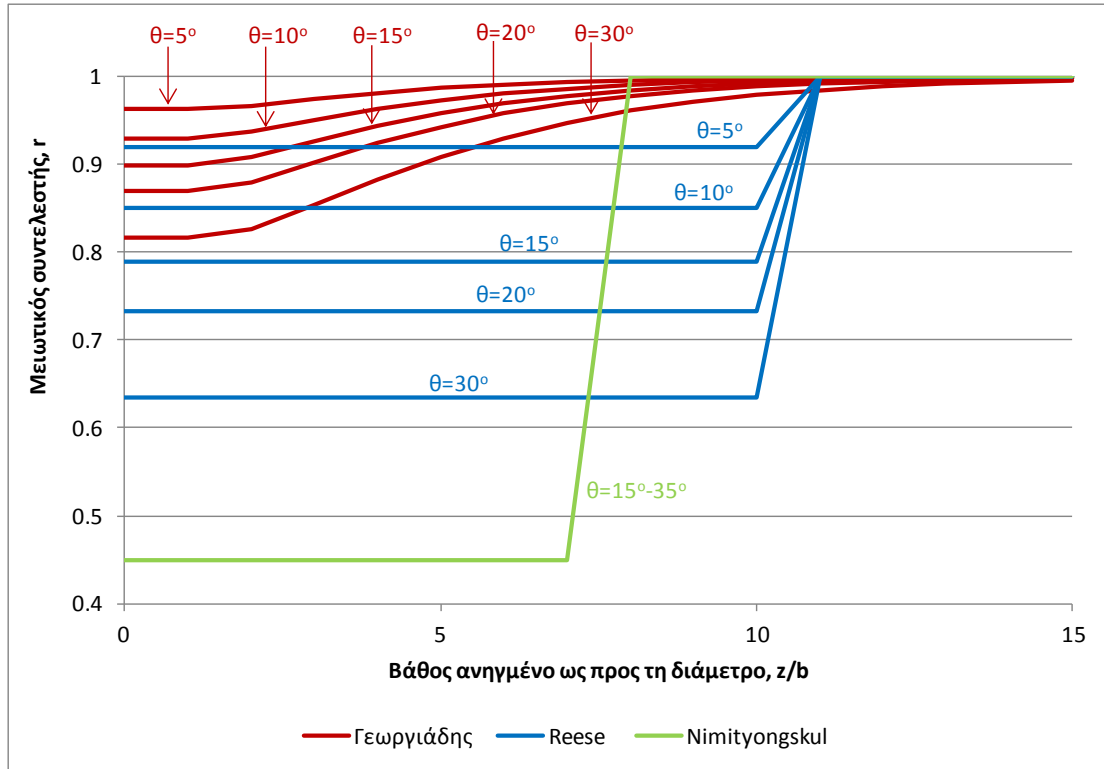
$$p_u = \gamma' * z * (z * S_1 + z * 3 * K_o * S_3 + b * S_2 - K_a * b)$$

όπου γ' το ενεργό ειδικό βάρος, b η διάμετρος, z το βάθος, φ η γωνία τριβής και $K_o=0.4$. Για να εξαχθεί το $p_{u,slope}$ μπαίνει όπου θ η κλίση του πρανούς, ενώ για να εξαχθεί το $p_{u,horizontal}$, όπου $\theta=0$.

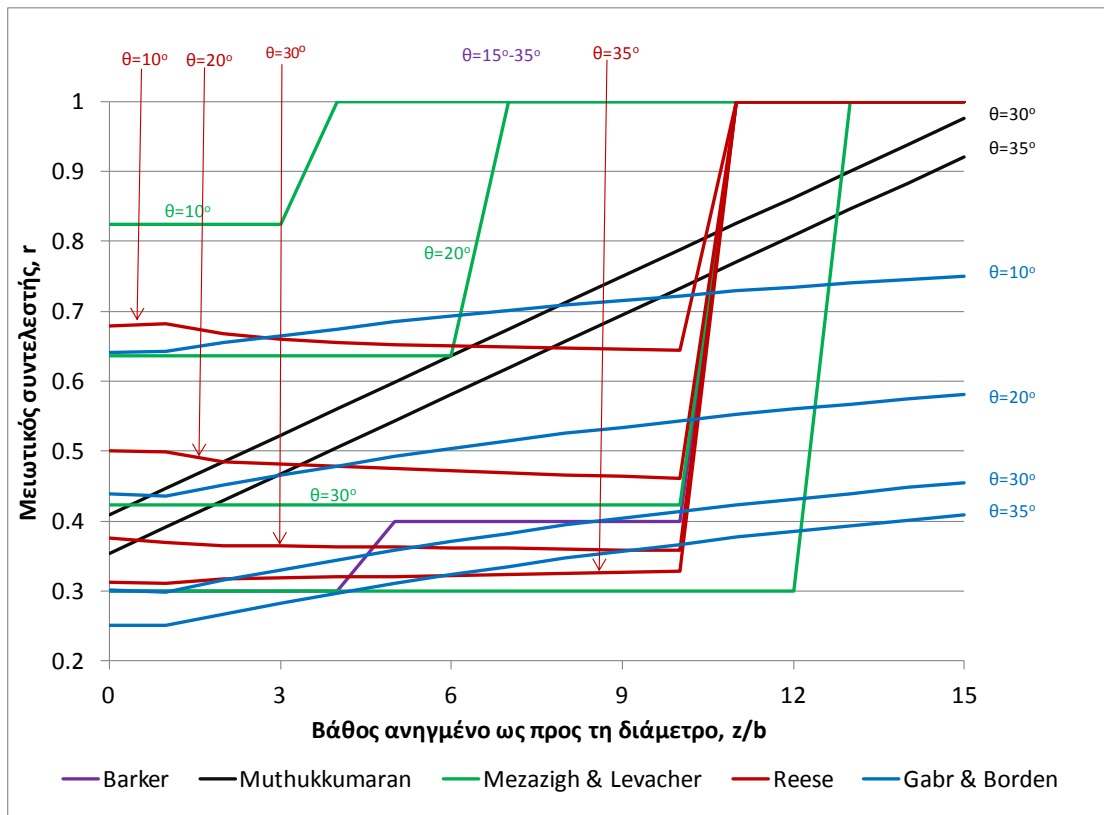
6.2 Σύνοψη συντελεστών r βάσει των ανωτέρω μεθοδολογιών

Αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία έχουν δείξει πως η επίδραση της κεκλιμμένης επιφάνειας παύει να έχει ισχύ από ένα βάθος ίσο με 4 έως 6 διαμέτρους. Επομένως αρκετές μέθοδοι είναι αρκετά συντηρητικές καθώς προτείνουν απομείωση της αρχικής καμπύλης p - y και σε αρκετά μεγαλύτερο βάθος.

Στα διαγράμματα που φαίνονται στις εικόνες 6.2 και 6.3 φαίνονται οι μειωτικοί συντελεστές r συναρτήσει του βάθους, ανηγμένου ως προς τη διάμετρο, που προτείνει η κάθε μεθοδολογία. Η ανάλυση έγινε για λείο πάσσαλο, διαμέτρου ίσης με 1 μέτρο, μήκους ίσο με 30 μέτρα και στην ανάλυση των μεθόδων για αμμώδη εδάφη, χρησιμοποιήθηκε γωνία τριβής ίση με 35 μοίρες.



Εικόνα 6. 2: Μειωτικοί συντελεστές, r , συναρτήσει του βάθους για αργιλικά εδάφη και διάφορες κλίσεις



Εικόνα 6. 3: Μειωτικοί συντελεστές, r , συναρτήσει του βάθους για αμμώδη εδάφη και διάφορες κλίσεις

Με βάση τα παραπάνω δύο διαγράμματα, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Στα αργιλικά εδάφη:

- Μόνο η μέθοδος του Γεωργιάδη λαμβάνει υπ' όψιν τη θετική συνεισφορά του βάθους προσδίδοντας συνεχή μορφή στην τιμή του r κατά βάθος, οι υπόλοιπες 2 μέθοδοι υποεκτιμούν τον συντελεστή r ακόμα και σε πολύ μεγάλα βάθη.
- Η μέθοδος του Nimityongskul έχει πολύ μεγάλη απόκλιση από τις υπόλοιπες 2 και κρίνεται υπερσυντηρητική.
- Όσο αυξάνει η κλίση, τόσο αυξάνει η απόκλιση ανάμεσα στις μεθόδους των Reese και Γεωργιάδη, καθώς η πρώτη μέθοδος φαίνεται να είναι αρκετά πιο ευαίσθητη στην κλίση.
- Είναι φανερό πως η πιο τολμηρή μέθοδος είναι αυτή του Γεωργιάδη.

Στα αμμώδη εδάφη:

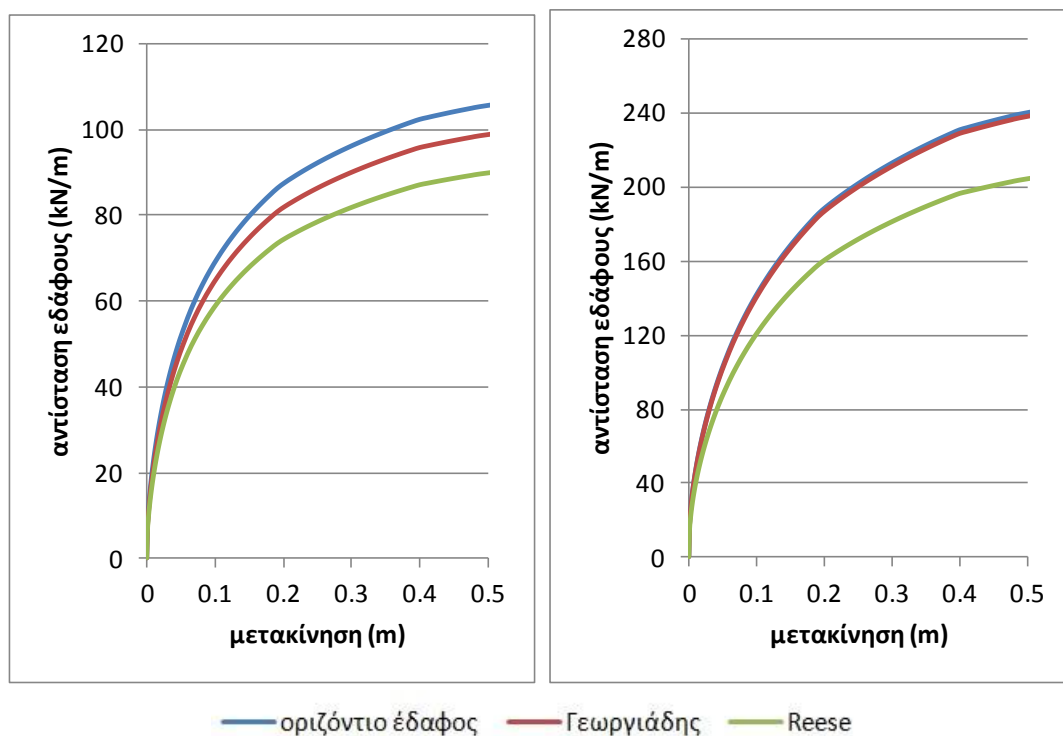
- Η μέθοδος του Muthukkumaran είναι η πιο τολμηρή στο πεδίο εφαρμογής της και είναι η μοναδική που λογαριάζει με σημαντική βαρύτητα τη θετική συνεισφορά του βάθους (αυτό είναι εμφανές από τη γραμμική αύξηση του r συναρτήσει του βάθους τη στιγμή που σε όλες τις άλλες μεθόδους το r μένει σχεδόν σταθερό έως το βάθος επιρροής).
- Στις ήπιες κλίσεις, πιο τολμηρή είναι η μέθοδος των Mezazigh & Levacher, η οποία μάλιστα μεταβάλλει σημαντικά το βάθος επιρροής συναρτήσει της κλίσης (σαφώς η συσχέτιση βάθους επιρροής-κλίσης δεν είναι τόσο άμεση όπως στην αναλυτική σχέση του Muthukkumaran, αλλά είναι πολύ πιο λογική από το σταθερό βάθος επιρροής που προτείνουν όλες οι άλλες μεθοδολογίες).
- Στη μέθοδο του Reese, μικρό ρόλο παίζει το βάθος, μιας και ο συντελεστής r παραμένει σταθερός έως τις 10 διαμέτρους, επομένως θα μπορούσε να απλοποιηθεί η μεθόδός του συσχετίζοντας μία τιμή ανά κλίση, καθώς η μεταβολή του βάθους προκαλεί μια απόκλιση της τάξης του 5% το πολύ.
- Σχεδόν όλες οι μεθοδολογίες υπερεκτιμούν το βάθος επιρροής (πέρα από το ότι δεν το συσχετίζουν άμεσα με την κλίση), υποβαθμίζοντας αρκετά την αντοχή του πασσάλου στα βαθύτερα στρώματα, όπου λογικά η απόκρισή του δεν επηρεάζεται από την κλίση του εδάφους.

6.3 Σύγκριση μεθοδολογιών απομείωσης καμπυλών p - y

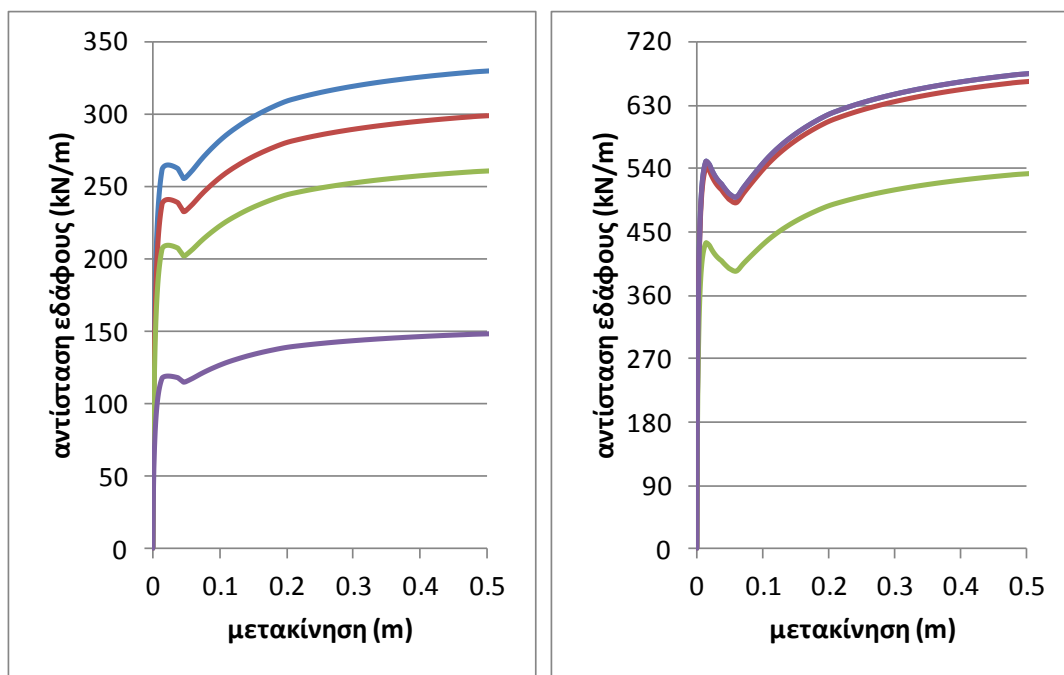
Όπως ήταν αναμενόμενο, όταν για την ίδια κλίση εφαρμόστηκαν στην ίδια περίπτωση όλες οι καμπύλες απομείωσης, κάποιες ήταν πιο τολμηρές ή πιο συντηρητικές από κάποιες άλλες. Όσον αφορά στην άργιλο, η πρόταση του Nimityongskul για απομείωση κατά 55% της αντοχής του πασσάλου, έχει τόσο μεγάλη απόκλιση από αυτές των Reese και Γεωργιάδη, που δε λήφθηκε υπ' όψιν σε περαιτέρω αναλύσεις. Άλλος ένας λόγος που αγνοήθηκε η μέθοδος είναι ότι κρίθηκε υπερβολική για αργιλικά εδάφη, καθώς αυτά δεν παρουσιάζουν σημαντική μείωση της αντοχής τους λόγω κλίσης. Στα αμμώδη εδάφη, η πρόταση του Barker είναι ομοίως αρκετά συντηρητική, καθώς και των Gabr & Borden για αρκετά μεγάλες

κλίσεις, ωστόσο αυτές οι μεθοδολογίες λήφθηκαν υπ' όψιν καθώς η άμμος είναι πολύ πιο ευαίσθητη όταν το έδαφος είναι κεκλιμένο (επειδή πλέον κινδυνεύει από ανάπτυξη επιφάνειας αστοχίας).

Στα παρακάτω διαγράμματα που παρουσιάζονται στις Εικόνες 6.4 έως 6.6, παρουσιάζονται τροποποιημένες καμπύλες p-y σε σχέση με τις αντίστοιχες αρχικές για κάθε είδος εδάφους, στα βάθη των 2 και 8 διαμέτρων, ώστε να φανούν οι διαφορές λόγω του βάθους. Χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά η μέση καμπύλη p-y για κάθε είδος εδάφους. Για τη μαλακή άργιλο επιλέχθηκε μια κλίση ίση με 10° , αρκετά μικρή ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος αστάθειας, για τη σφιχρή άργιλο ίση με 15° ομοίως, και για την άμμο μια μάλλον απότομη κλίση, ίση με 28° , έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί και η μέθοδος του Muthukkumaran, η οποία προτείνεται για κλίσεις από 28° έως 40° .

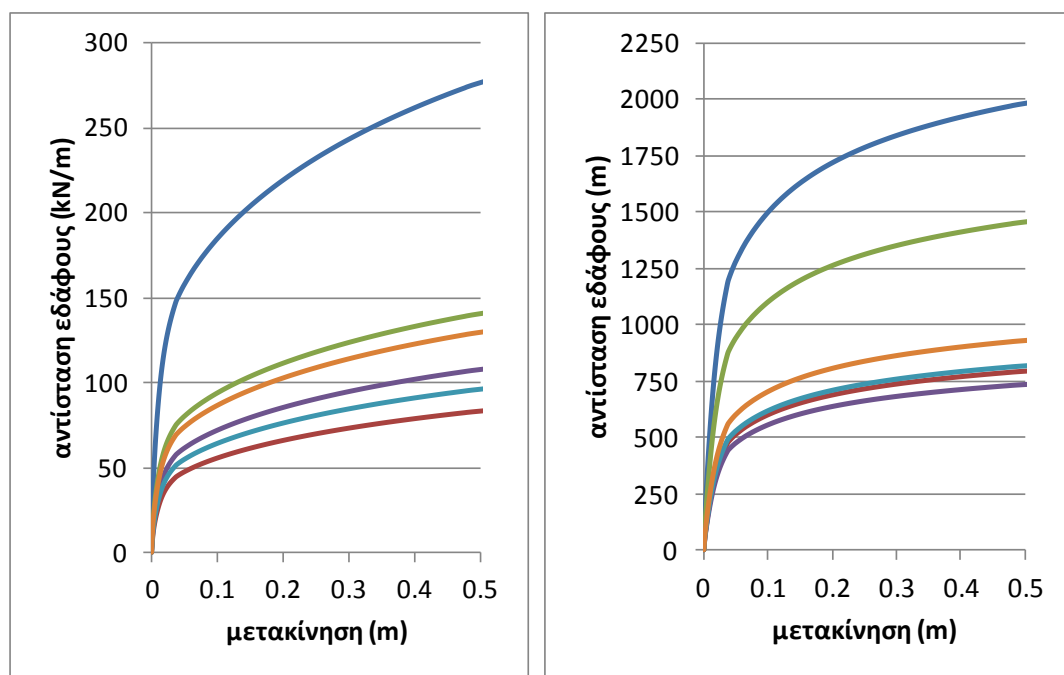


Εικόνα 6. 4: Καμπύλες p-y για μαλακή άργιλο σε οριζόντιο έδαφος και σε έδαφος με κλίση 10° , (Αριστερά: Βάθος ίσο με 2 διαμέτρους, Δεξιά: Βάθος ίσο με 8 διαμέτρους, όπου διάμετρος $b=1m$)



— οριζόντιο έδαφος — Γεωργιάδης — Reese — Nimityongskul

Εικόνα 6. 5: Καμπύλες p-y για σφιχή άργιλο σε οριζόντιο έδαφος και σε έδαφος με κλίση 15°, (Αριστερά: Βάθος ίσο με 2 διαμέτρους, Δεξιά: Βάθος ίσο με 8 διαμέτρους, όπου διάμετρος b=1m)



— οριζόντιο έδαφος — Barker — Muthukkumaran — Reese — Gabr & Borden — Mezazigh & Levacher

Εικόνα 6. 6: Καμπύλες p-y για άμμο σε οριζόντιο έδαφος και σε έδαφος με κλίση 28°, (Αριστερά: Βάθος ίσο με 2 διαμέτρους, Δεξιά: Βάθος ίσο με 8 διαμέτρους, όπου διάμετρος b=1m)

Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

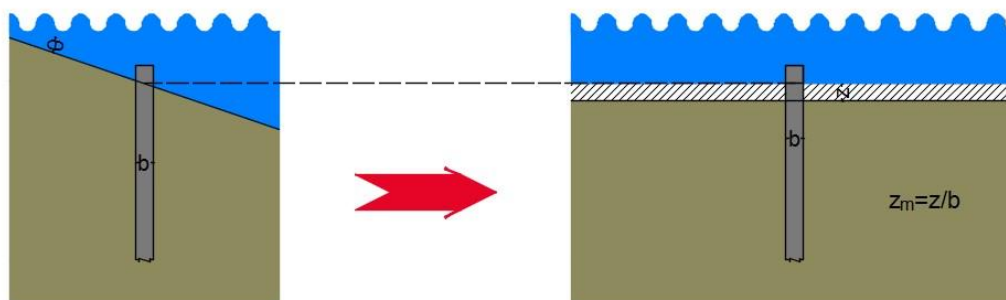
- Κάποιες από τις μεθόδους απομείωσης επηρεάζονται από το βάθος (όπως του Γεωργιάδη ή του Muthukkumaran) ενώ άλλες είναι ανεξάρτητες του βάθους, έχουν όμως περιορισμένο πεδίο εφαρμογής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι πρώτες

καμπύλες να προσδίδουν μια πιο αληθοφανή τροποποίηση, ενώ οι άλλες να είναι αρκετά συντηρητικές σε μεγάλα βάθη.

- Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, η πιο έντονη τροποποίηση παρατηρείται στα ρηγά στρώματα, λίγες είναι οι μεθοδολογίες που προτείνουν έντονη απομείωση σε βάθος 8 διαμέτρων (πόσω μάλλον και μεγαλύτερο).
- Είναι φανερό πόσο συντηρητική είναι η μέθοδος του Nimityongskul στις αργίλους.
- Σχεδόν όλες οι μεθοδολογίες που αφορούν τα αμμώδη εδάφη έχουν μικρή απόκλιση μεταξύ τους στα ρηγά (και σημαντικότερα για την οριζόντια απόκριση) στρώματα εδάφους. Στα βαθύτερα στρώματα η απόκλιση μεγαλώνει καθώς η καμπύλη του Muthukkumaran τείνει να ακολουθήσει τη μη τροποποιημένη καμπύλη, λαβαίνοντας υπ'όψιν τη θετική συνεισφορά του βάθους με συνεχή τρόπο.
- Με εξαίρεση την καμπύλη του Nimityongskul, παρατηρείται ότι οι απομειωμένες καμπύλες στην άργιλο είναι αρκετά κοντύτερα στη μη τροποποιημένη, από τις αντίστοιχες στην άμμο. Αυτό βέβαια επηρεάζεται από τη μεγαλύτερη κλίση για την οποία έχουν προκύψει οι καμπύλες στην άμμο, ωστόσο είναι ενδεικτικό του πόσο περισσότερο επηρεάζεται ένα αμμώδες έδαφος από μία κεκλιμένη επιφάνεια.

6.4 Εναλλακτική προσέγγιση μελέτης της απόκρισης του πασσάλου σε κεκλιμένο έδαφος

Επειδή η μελέτη που έχει γίνει πάνω στις καμπύλες $p-y$ σε κεκλιμένο έδαφος είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο και δεν υπάρχουν πολλές προτεινόμενες αναλυτικές σχέσεις στη βιβλιογραφία όπως αυτή των Reese, Γεωργιάδη, Muthukkumaran, Mezazigh & Levacher, κρίθηκε σκόπιμο να βρεθεί εναλλακτικός τρόπος μελέτης της επίδρασης κεκλιμένου εδάφους στην απόκριση του πασσάλου σε εγκάρσια φόρτιση. Θα ήταν δυνατό, αντί να χρησιμοποιείται μια μέθοδος απομείωσης, να αμελείται η ύπαρξη του επιφανειακού εδάφους έως ένα βάθος. Ο λόγος που το κεκλιμένο έδαφος έχει μικρότερη αντοχή είναι διότι λείπει ένας τεράστιος όγκος εδάφους στα κατάντη του πασσάλου, ο οποίος ανθίσταται στην μετακίνησή του. Επομένως, αμελώντας ένα ρηγό εδαφικό στρώμα, όπως περιγράφεται στην Εικόνα 6.7, και πάλι ο πάσσαλος μένει ανυποστήρικτος στην κεφαλή του, ενώ επίσης επωφελούμαστε από την χρήση των ήδη γνωστών καμπυλών $p-y$ για οριζόντιο έδαφος. Το ερώτημα είναι πόσο βαθύ είναι αυτό το στρώμα που πρέπει να αφαιρεθεί και εάν αυτό το βάθος εξαρτάται, και πόσο, από το είδος του εδάφους και από την κλίση της επιφάνειας.



Εικόνα 6. 7: Σχηματική απεικόνιση εναλλακτικής προσέγγισης επίλυσης προβλήματος κεκλιμένου εδάφους

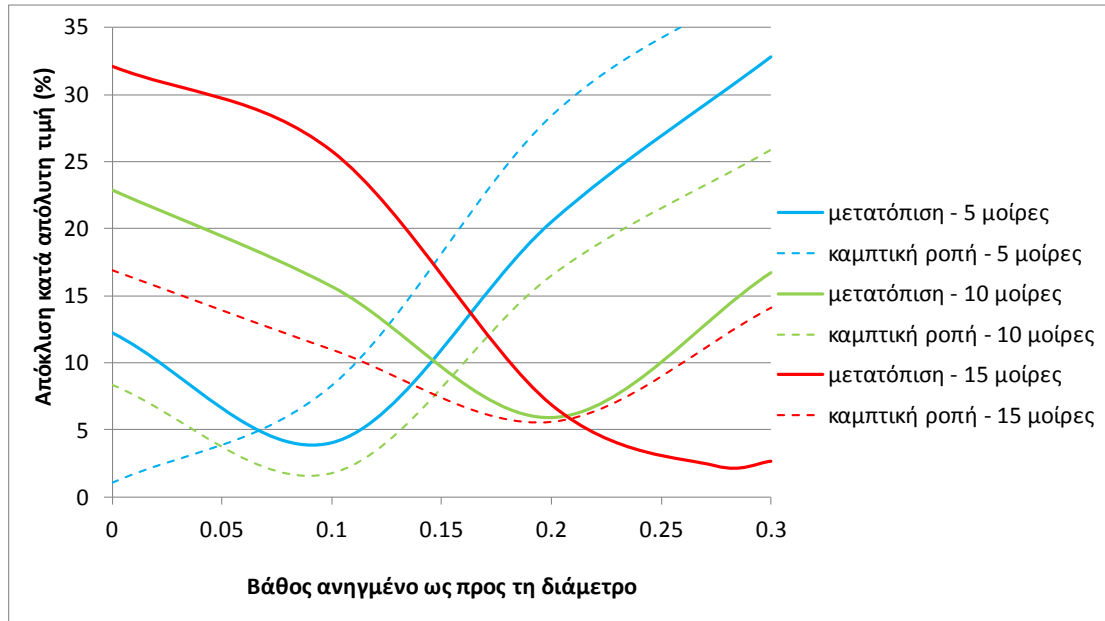
Αρχικά εξήχθησαν οι απομειωμένες καμπύλες $p-y$ για κάθε είδος εδάφους, για 3 διαφορετικές κλίσεις στο κάθε ένα (5° , 10° , 15° στη μαλακή άργιλο και 10° , 20° , 30° στη στιφρή άργιλο και άμμο) με βάση την κάθε μεθοδολογία. Μέσω του LATPILE, και για σταθερή φόρτιση για κάθε έδαφος, εξήχθησαν οι μετατοπίσεις κεφαλής του πασσάλου και η μέγιστη καμπτική ροπή και τέμνουσα δύναμη. Από αυτά τα μεγέθη προέκυψε ο μέσος όρος. Κατόπιν, χρησιμοποιήθηκε η μέση καμπύλη $p-y$ για κάθε έδαφος, για την ίδια φόρτιση, ενώ σιγά σιγά αφαιρούταν ένα τμήμα ρηχού εδάφους. Το τμήμα αυτό μεγάλωνε, έως ότου η μετατόπιση που προέκυπτε είχε μικρή απόκλιση από το μέσο όρο των μετατοπίσεων που έβγαλαν οι τροποποιημένες καμπύλες.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συνάδουν με την γενική αρχή, δηλαδή ότι η άργιλος επηρεάζεται λιγότερο από την κλίση του εδάφους, από ότι η άμμος. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για την άργιλο, αρκεί να αφαιρεθεί ένα στρώμα εδάφους ίσο περίπου με μισή διάμετρο, ενώ ταυτόχρονα έχει μικρή ευαισθησία στις αλλαγές της κλίσης. Αντιθέτως, στο αμμώδες έδαφος, το ίδιο στρώμα εδάφους κυμαίνεται από 1 έως 1.5 διάμετρο, ένα βάθος το οποίο πρώτον, αλλάζει αρκετά με την αλλαγή της κλίσης, δεύτερον είναι αρκετά μεγάλο, εάν ληφθεί υπ' όψιν ότι το βάθος επιρροής του οριζοντίου φορτίου δεν ξεπερνά τις 5 περίπου διαμέτρους.

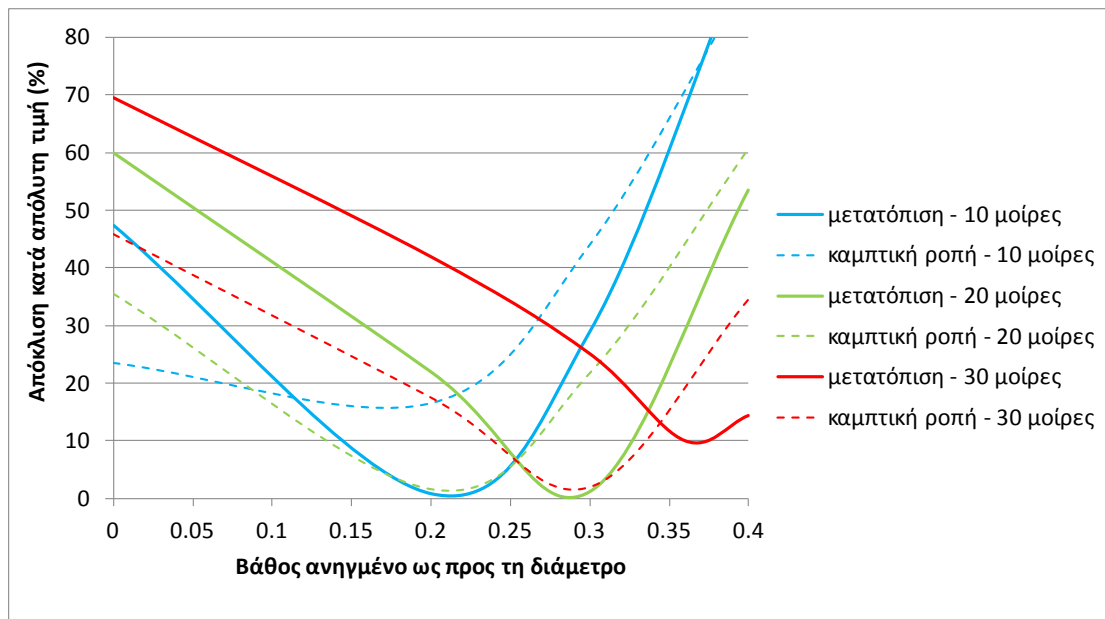
Στους Πίνακες 6.3 έως 6.8 παρουσιάζεται η μέγιστη μετακίνηση και καμπτική ροπή που προκύπτει ανάλογα τον τύπο εδάφους, την κλίση και τη μέθοδο απομείωσης $p-y$. Κατόπιν εξάγονται οι αντίστοιχοι μέσοι όροι. Τέλος, παρουσιάζονται οι τιμές για τη μέγιστη μετακίνηση και καμπτική ροπή, όπως αυτές προκύπτουν για οριζόντιο έδαφος αφού αφαιρεθεί ένα ρηχό στρώμα εδάφους πάχους z , ή ανηγμένου βάθους z_m , όπου $z_m = z/b$.

Ακόμα, στα διαγράμματα των Εικόνων 6.8 έως 6.10, φαίνεται η απόκλιση, κατ' απόλυτη τιμή, της μέγιστης μετακίνησης (και καμπτικής ροπής), που έχει η παραδοχή οριζοντίου εδάφους με αφαιρεμένο ένα στρώμα εδάφους ίσο με z_m , με το αποτέλεσμα του μέσου όρου των μεθοδολογιών απομείωσης. Τέλος, στην Εικόνα 6.11, παρουσιάζονται τα βάθη z_m στα οποία παρουσιάζεται η ελάχιστη, κατ' απόλυτη τιμή,

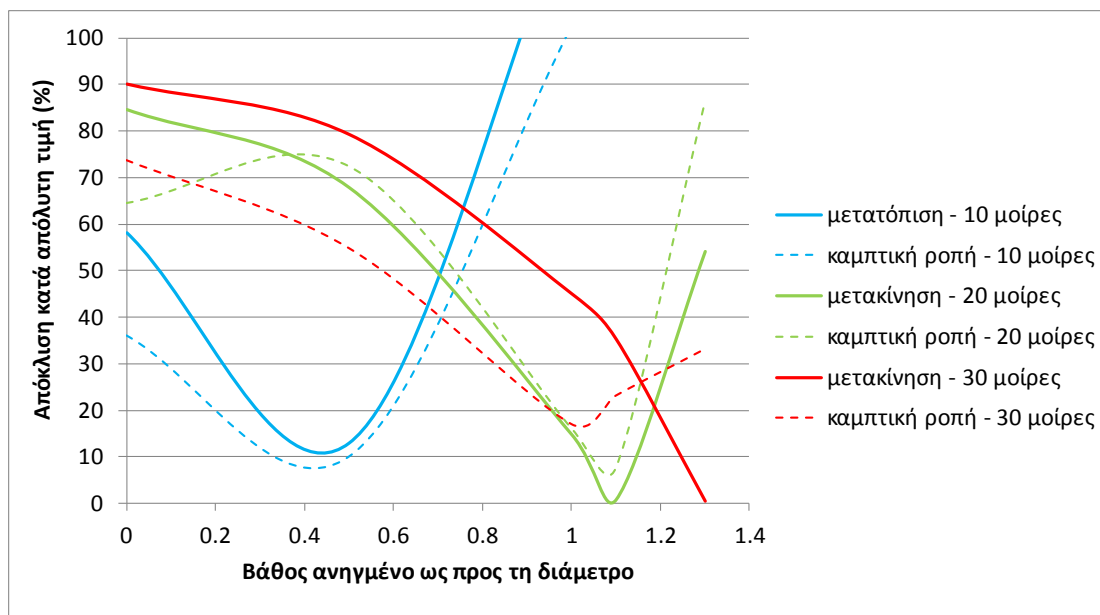
απόκλιση (ως προς τη μετατόπιση που προκύπτει από το μέσο όρο των μεθοδολογιών απομείωσης) ανά είδος εδάφους και ανά κλίση πρανούς.



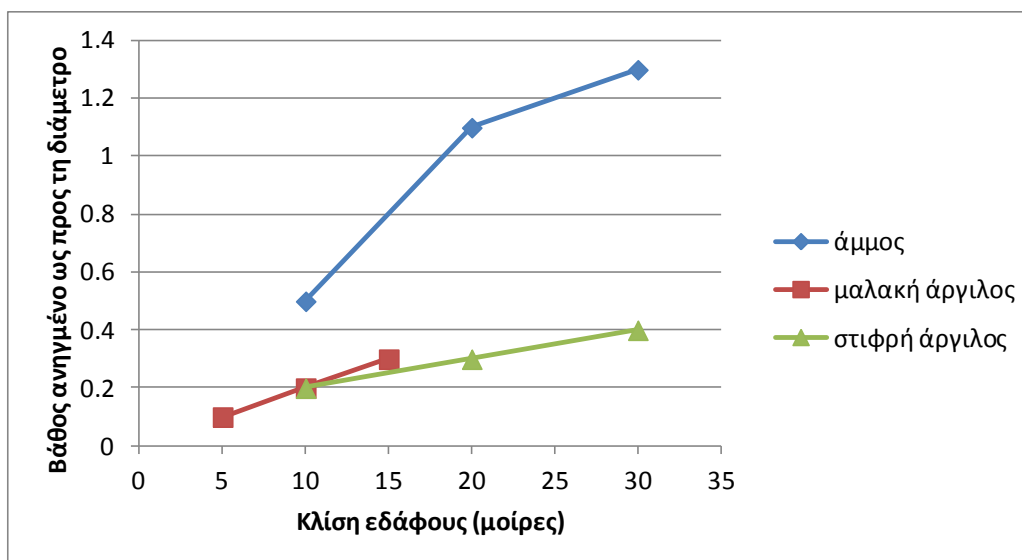
Εικόνα 6. 8: Μαλακή άργιλος: Απόκλιση αποτελεσμάτων εναλλακτικής μεθόδου με τα αποτελέσματα των απομειωμένων καμπυλών p-y για διάφορα z_m



Εικόνα 6. 9: Στιφρή άργιλος: Απόκλιση αποτελεσμάτων εναλλακτικής μεθόδου με τα αποτελέσματα των απομειωμένων καμπυλών p-y για διάφορα z_m



Εικόνα 6. 10: Άμμος: Απόκλιση αποτελεσμάτων εναλλακτικής μεθόδου με τα αποτελέσματα των απομειωμένων καμπυλών p-y για διάφορα z_m



Εικόνα 6. 11: Βάθος αφαίρεσης επιφανειακού εδάφους συναρτήσει του είδους του εδάφους και της κλίσης

Πίνακας 6. 3: Σύγκριση μεθόδων απομείωσης με τη μέση καμπύλη p-y για οριζόντιο έδαφος με αφαιρεμένη τη ρηχή εδαφική στρώση, σε όρους μετακίνησης κεφαλής. Μαλακή άργιλος			
κλίση εδάφους:	5°	10°	15°
Μέθοδος:	Μετακίνηση (cm)		
μέθοδος Γεωργιάδη	15.78	17.28	18.53
μέθοδος Reese	17.21	20.25	24.14
μέσος όρος	16.49	18.77	21.34
κλίση εδάφους:	0°		
z_m :	Μετακίνηση (cm)		
0	14.48		
0.1	15.83		
0.2	19.87		
0.3	21.90		

Πίνακας 6. 4: Σύγκριση μεθόδων απομείωσης με την μέση καμπύλη p-y για οριζόντιο έδαφος με αφαιρεμένη τη ρηχή εδαφική στρώση, σε όρους καμπτικής ροπής. Μαλακή άργιλος

κλίση εδάφους:	5°	10°	15°
Μέθοδος:	Μέγιστη Ροπή (kNm)		
μέθοδος Γεωργιάδη	53.6	57.3	61.23
μέθοδος Reese	57.4	65.11	73.86
μέσος όρος	55.5	61.21	67.55
κλίση εδάφους:	0°		
z _m :	Μέγιστη Ροπή (kNm)		
0	56.1		
0.1	60.13		
0.2	71.3		
0.3	77.09		

Πίνακας 6. 5: Σύγκριση μεθόδων απομείωσης με την μέση καμπύλη p-y για οριζόντιο έδαφος με αφαιρεμένη τη ρηχή εδαφική στρώση, σε όρους μετακίνησης κεφαλής. Στιφρή άργιλος

κλίση εδάφους:	10°	20°	30°
Μέθοδος:	Μετακίνηση (cm)		
μέθοδος Γεωργιάδη	3.82	4.50	5.56
μέθοδος Reese	4.41	6.04	8.59
μέσος όρος	4.11	5.27	7.08
κλίση εδάφους:	0°		
z _m :	Μετακίνηση (cm)		
0	2.16		
0.2	4.12		
0.3	5.30		
0.4	8.09		

Πίνακας 6. 6: Σύγκριση μεθόδων απομείωσης με την μέση καμπύλη p-y για οριζόντιο έδαφος με αφαιρεμένη τη ρηχή εδαφική στρώση, σε όρους καμπτικής ροπής. Στιφρή άργιλος

κλίση εδάφους:	5°	10°	15°
Μέθοδος:	Μέγιστη Ροπή (kNm)		
μέθοδος Γεωργιάδη	39.61	44.8	51.85
μέθοδος Reese	43.94	54.13	66.23
μέσος όρος	41.77	49.47	59.04
κλίση εδάφους:	0°		
z _m :	Μέγιστη Ροπή (kNm)		
0	31.92		
0.2	48.7		
0.3	60.2		
0.4	79.5		

Πίνακας 6. 7: Σύγκριση μεθόδων απομείωσης με την μέση καμπύλη p-y για οριζόντιο έδαφος με αφαιρεμένη τη ρηχή εδαφική στρώση, σε όρους μετακίνησης κεφαλής. Άμμος			
κλίση εδάφους:	10°	20°	30°
Μέθοδος:	Μετακίνηση (cm)		
μέθοδος Gabr & Borden	11.05	22.30	60.00
μέθοδος Reese	9.47	16.03	37.00
μέθοδος Mezazigh & Levacher	7.72	11.22	23.87
μέθοδος Barker	-	52.20	52.23
μέθοδος Muthukkumaran	-	-	23.64
μέσος όρος	9.42	25.44	39.35
κλίση εδάφους:	0°		
z _m :	Μετακίνηση (cm)		
0	3.94		
0.5	8.20		
1	21.67		
1.1	25.52		
1.3	39.2		

Πίνακας 6. 8: Σύγκριση μεθόδων απομείωσης με την μέση καμπύλη p-y για οριζόντιο έδαφος με αφαιρεμένη τη ρηχή εδαφική στρώση, σε όρους καμπτικής ροπής. Άμμος			
κλίση εδάφους:	10°	20°	30°
Μέθοδος:	Μέγιστη Ροπή (kNm)		
μέθοδος Gabr & Borden	51.44	77.86	159.50
μέθοδος Reese	47.31	58.90	112.04
μέθοδος Mezazigh & Levacher	43.20	51.26	80.76
μέθοδος Barker	-	142.2	142.20
μέθοδος Muthukkumaran	-	-	82.54
μέσος όρος	47.32	82.56	115.41
κλίση εδάφους:	0°		
z _m :	Μέγιστη Ροπή (kNm)		
μηδενική αφαίρεση	30.22		
αφαίρεση 0.5 διαμέτρων	52.10		
αφαίρεση 1 διαμέτρων	95.87		
αφαίρεση 1.1 διαμέτρου	88.80		
αφαίρεση 1.3 διαμέτρων	153.60		

Στους παραπάνω πίνακες και διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Το κριτήριο με βάση το οποίο επιλέγεται ένα βάθος ως κατάλληλο για να αφαιρεθεί και να δώσει ίδια αποτελέσματα με τις τροποποιημένες καμπύλες p-y είναι η μετακίνηση του πασσάλου, καθώς συνήθως κριτήριο για τη διαστασολόγηση των θεμελιώσεων αποτελεί η κατάσταση λειτουργικότητας και όχι αστοχίας, αφού σκοπός των θεμελιώσεων είναι να προσφέρουν ένα ασφαλές μετακινησιακό καθεστώς στην ανωδομή και όχι η προστασία αυτών καθεαυτών.

Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η απόκριση του πασσάλου σε οριζόντιο φορτίο έχει μικρή ευαισθησία στην κλίση της επιφάνειας του εδάφους στο αργιλικό έδαφος. Μια μεγάλη αύξηση στην κλίση (200% αύξηση σε μοίρες) επιφέρει μια αύξηση στο απαιτούμενο προς αφαίρεση βάθος ίση με 0.2 διαμέτρους στην άργιλο και 0.8 διαμέτρους στην

άμμο. Επίσης, το βάθος που πρέπει να αφαιρεθεί σε μια άργιλο κυμαίνεται σε ένα μικρό ποσοστό της διαμέτρου (0.2-0.3) ενώ στην άμμο φτάνει τη μία διάμετρο περίπου. Αυτό μπορεί ίσως να ερμηνευτεί μέσω της συνοχής και της καλύτερης ευστάθειας που έχει ένα αργιλικό πρανές σε σχέση με ένα αμμώδες. Επίσης, σε ένα αμμώδες έδαφος, η απουσία εδάφους στα κατάντη του πασσάλου συνεπάγεται μεγάλη απώλεια παθητικής αντίστασης η οποία αποτελεί τον κύριο μηχανισμό αντίστασης του πασσάλου στην οριζόντια φόρτιση.

- Η επιλογή μοιρών έγινε έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος ευστάθειας. Στο αμμώδες έδαφος επιλέχθηκαν κλίσεις μικρότερες από τη γωνία τριβής της άμμου, ενώ ακόμη, σε κάθε τύπο εδάφους, έγιναν αναλύσεις στο πρόγραμμα SLIDE για να ελεγχθεί η ευστάθεια του πρανούς. Εάν υπήρχε κίνδυνος ολίσθησης ή ανατροπής πρανούς τότε δε θα είχε νόημα η παραπάνω ανάλυση διότι θα προκαλούνταν μεγάλες μετατοπίσεις στο έδαφος μόνο και μόνο λόγω της μετακίνησης του πρανούς. Τα αποτελέσματα του προγράμματος που αποδεικνύουν την ευστάθεια των πρανών, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.
- Προκύπτει ότι για το βάθος αφαίρεσης εδάφους στο οποίο η μετακίνηση είναι κοντά στην αντίστοιχη των τροποποιημένων καμπύλων $p-y$, οι αντίστοιχες ροπές διαφέρουν αρκετά. Αυτό δεν είναι ανησυχητικό, από τη στιγμή που αφαιρώντας ένα τμήμα εδάφους, το οριζόντιο φορτίο στην κεφαλή του πασσάλου είναι σαν να ασκείται σε έναν πρόβολο, μήκους όσο και το τμήμα εδάφους που αφαιρέθηκε. Επομένως το στατικό σύστημα διαφοροποιείται αρκετά από την πραγματικότητα, δίνοντας μια αρκετά μεγαλύτερη μέγιστη ροπή. Για αυτό το λόγο δεν αποτελεί η ροπή το κριτήριο για την εύρεση του κατάλληλου βάθους, αλλά επίσης συμπεραίνεται ότι η μέθοδος αυτή δεν ενδείκνυται για τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών του πασσάλου.

Εν κατακλείδι, με την παραδοχή ότι τα εντατικά μεγέθη δεν αποτελούν τα πρωτεύοντα κριτήρια για τη διαστασολόγηση του πασσάλου, σε αντίθεση με τη μετακίνησή του (λειτουργικοί λόγοι), η μέθοδος απομείωσης είναι αρκετά εύστοχη και εύχρηστη. Μια αφαίρεση επιφανειακού εδάφους ίση με το 20%-50% της διαμέτρου σε αργιλικό έδαφος ή 100%-150% σε αμμώδες έδαφος, ανάλογα πόσο απότομη είναι η κλίση, θα οδηγήσει σε συμπεράσματα σχετικά με τη μετακίνηση του πασσάλου αρκετά ρεαλιστικά, αποφεύγοντας τη χρήση ημιεμπειρικών και όχι τόσο ανεπτυγμένων ή γνωστών μεθόδων απομείωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν αρκετές διαφορετικές καμπύλες p - y και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα που έχει η χρήση κάθε μίας στην απόκριση του πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση.

Αρχικά, επιτεύχθηκε ο στόχος ανάπτυξης προγράμματος, το οποίο δύναται να υπολογίζει και να εξάγει καμπύλες p - y , βασισμένο σε μια βιβλιοθήκη αρκετών μεθοδολογιών που βρίσκονται στη βιβλιογραφία. Αυτό το πρόγραμμα μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για επαγγελματικούς λόγους, δίχως ο χρήστης να κατέχει σε βάθος το θεωρητικό υπόβαθρο πίσω από τη μόρφωση των καμπυλών p - y . Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαλέξει από ένα μεγάλο πλήθος μεθοδολογιών και να εξάγει τις επιθυμητές καμπύλες p - y προς χρήση, εισάγοντας τα λιγότερα δυνατά δεδομένα.

Από την ανάλυση των καμπυλών p - y , προέκυψε ότι ακόμα και οι καμπύλες που αφορούν το ίδιο είδος εδάφους, παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές και αποκλίσεις. Αυτές οι διαφορές αφορούν κυρίως τη μέγιστη αντίδραση του πασσάλου, p_u , και όχι τόσο πολύ την κλίση του αρχικού ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης. Οι αποκλίσεις αυτές ίσως οφείλονται στο διαφορετικό πλήθος πειραμάτων στα οποία βασίστηκε ο κάθε ερευνητής, στις διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες του εδάφους που χρησιμοποίησε (λίγο ή πολύ μαλακή άργιλος για παράδειγμα), στα διαφορετικά χαρακτηριστικά του πασσάλου (εμπηγνυόμενος ή έγχυτος, κοίλος ή όχι, μεταλλικός ή από σκυρόδεμα, διαφορετικής διαμέτρου κτλ) και στις διαφορετικές μεθόδους, όπως πείραμα με πραγματική κλίμακα, πείραμα σε φυγοκεντρική ή αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία.

Η παραπάνω διαφορά, πέρα από τις καμπύλες p - y , αποτυπώνεται και στις καμπύλες φορτίου-μετακίνησης που προέκυψαν από τις αναλύσεις pushover. Αρχικά, υπάρχει μια γραμμική σχέση οριζόντιου φορτίου-μετακίνησης. Αυτή η γραμμικότητα παύει να ισχύει σε ένα σημείο και η καμπύλη εισέρχεται σε έναν μη-γραμμικό κλάδο έως ότου αστοχήσει. Αυτό το σημείο αντιστοιχεί σε μετατόπιση ίση με το 10%, 2.5% και 5% σε μαλακή άργιλο, στιφρή άργιλο και άμμο αντίστοιχα. Το αρχικό γραμμικό τμήμα των καμπυλών οριζόντιου φορτίου-μετακίνησης διαφέρει ελάχιστα απο μεθοδολογία σε μεθοδολογία, ενώ στο μη-γραμμικό τμήμα παρατηρούνται και πάλι τεράστιες αποκλίσεις. Είναι επιλογή του μελετητή να επιλέξει με ποια μεθοδολογία θα σχεδιάσει τον πάσσαλο, έχοντας κατά νου το εξής σκεπτικό: Πρώτον, ότι το οριζόντιο φορτίο σχεδιασμού θα πρέπει να ανήκει στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης (ή ακόμα καλύτερα όλων των διαθέσιμων καμπυλών) και ότι η καταλληλότερη καμπύλη είναι αυτή η οποία προέκυψε από πειράματα/αναλύσεις σε έδαφος παρόμοιο

με αυτό που απασχολεί τον μελετητή ή/και από πάσσαλο παρομοίων χαρακτηριστικών.

Ένα ακόμα συμπέρασμα που προκύπτει, είναι ότι οι μεθοδολογίες βάσει των οποίων προκύπτουν οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις κεφαλής του πασσάλου, οδηγούν και στα μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη. Βέβαια, η κατάλληλη όπλιση του πασσάλου (εάν αυτός είναι από σκυρόδεμα) ή η επιλογή κατάλληλου πάχους (εάν αυτός είναι κοίλος μεταλλικός) συνήθως αρκεί για να παραληφθούν τα εντατικά μεγέθη με σχετική ευκολία. Για αυτόν τον λόγο, το πρωτεύον κριτήριο διαστασολόγησης ενός πασσάλου που υπόκειται σε οριζόντια φόρτιση, είναι οι μετατοπίσεις που του προκαλούνται, έτσι ώστε να μην προκύψουν λειτουργικά προβλήματα στην ανωδομή.

Όσον αφορά στα διαγράμματα αλληλεπίδρασης οριζοντίου φορτίου-μετακίνησης, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η αντοχή του πασσάλου σε οριζόντιο φορτίο μπορεί να αυξηθεί δραματικά εάν σε αυτόν ασκείται μια αντίφορη ροπή (και ομοίως να μειωθεί έως ότου μηδενιστεί για ταυτόχρονη άσκηση ομόφορης ροπής). Οι κλίσεις των περιβαλουσσών είναι σχεδόν ίδιες ανεξαρτήτως της μεθοδολογίας $p-y$, ωστόσο το εύρος αλλάζει εντόνως ανάλογα πόσο τολμηρή ή συντηρητική είναι η κάθε μεθοδολογία, με τις πιο τολμηρές να οδηγούν στις περιβάλλουσες με το μεγαλύτερο εύρος και αντίθετα.

Τέλος, εξετάστηκε το φαινόμενο του κεκλιμένου εδάφους, και τί επίδραση αυτό έχει στην απόκριση του πασσάλου σε εγκάρσια φόρτιση. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με κατάλληλη απομείωση των καμπυλών $p-y$. Προέκυψε ότι η άμμος είναι αρκετά πιο ευαίσθητη στην κλίση του εδάφους θεμελίωσης, καθώς η απομείωση που γίνεται στις καμπύλες $p-y$ για άμμους είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στις καμπύλες για αργιλικά εδάφη. Επιπλέον, μελετήθηκε διαφορετική προσέγγιση ανάλυσης απόκρισης πασσάλου θεμελιωμένου σε πρανές. Προτάθηκε λοιπόν, αντί για απομείωση των καμπυλών $p-y$, να γίνεται χρήση των κανονικών καμπυλών αλλά να αφαιρείται μια στρώση εδάφους. Ο λόγος που μελετήθηκε μια τέτοια προσέγγιση είναι ότι οι μεθοδολογίες απομείωσης καμπυλών $p-y$ είναι αρκετά περιορισμένες στη βιβλιογραφία και έχουν μικρό πεδίο εφαρμογής καθώς έχουν προκύψει από πειράματα σε πολύ συγκεκριμένες συνθήκες. Προέκυψε ότι το βάθος που πρέπει να αφαιρεθεί στις αργίλους κυμαίνεται σε 0.1 έως 0.4 φορές τη διάμετρο για ένα μεγάλο εύρος κλίσεων (5° έως 30°) ενώ το αντίστοιχο βάθος στις άμμους, στο ίδιο εύρος κλίσεων, κυμαίνεται από 0.4 έως 1.3 φορές τη διάμετρο. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνει το συμπέρασμα ότι η άμμος είναι πολύ πιο ευαίσθητη στην ύπαρξη κλίσης, και μάλιστα ότι εξαρτάται πιο έντονα από τις αλλαγές στην κλίση (αντιθέτως, η συμπεριφορά της αργίλου είναι σχετικά σταθερή ανεξάρτητα των αλλαγών στην κλίση του πρανούς).

7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

7.2.1 Βελτίωση προγράμματος MATLAB

Το πρόγραμμα της MATLAB, αν και έχει πολλές δυνατότητες, έχει ακόμη πολλά περιθώρια βελτίωσης. Θα μπορούσε να τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε:

- Να δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να εξάγει τις καμπύλες p-y σε όποιο βάθος θέλει, δίχως αυτό να είναι συσχετισμένο με τη διάμετρο.
- Να μπορεί να εξάγει τα δεδομένα και σε πρόγραμμα Excel πέρα από αρχεία της μορφής .txt, έτσι ώστε ο χρήστης να τα χειριστεί με όποιον τρόπο θέλει. Βέβαια, τα δεδομένα από ένα αρχείο .txt μεταφέρονται εύκολα στο Excel, ωστόσο η επιτυχία του προγράμματος έγκειται στην, κατά το δυνατόν ευρύτερη, αυτοματοποίηση των διεργασιών. Ο λόγος που στην παρούσα εργασία, η μεταφορά των δεδομένων έγινε σε αρχεία .txt, είναι διότι τέτοια απαιτεί ως δεδομένα εισόδου το πρόγραμμα LATPILE, όπου πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις.
- Να δύναται ο χρήστης να επιλέξει από ποιες μεθοδολογίες θα προκύψει η μέση καμπύλη.
- Να εισαχθούν και άλλα δεδομένα που περιγράφουν καλύτερα τη γεωμετρία και τα μηχανικά/αδρανειακά χαρακτηριστικά του πασσάλου, όπως η ροπή αδρανείας ή μεταβλητή διάμετρος.
- Να εισαχθούν και άλλες μεθοδολογίες καμπυλών p-y ή απομείωσης καμπυλών p-y, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία και δυνατότητα επιλογής για τον χρήστη.

Στόχος του προγράμματος είναι πρωτίστως να είναι όσο το δυνατόν πιο εύχρηστο και αυτοματοποιημένο για τον χρήστη. Επίσης, να είναι εποπτικό, παρέχοντας τη δυνατότητα να συγκριθούν οι διαφορετικές καμπύλες p-y, αλλά και η επιρροή διαφόρων παραμέτρων (βάθος, διάμετρος κ.α.) στην κάθε μία. Τέλος, να έχει την, κατά το δυνατόν, μεγαλύτερη ποικιλία μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται.

7.2.2 Εφαρμογή αναλύσεων σε συνθήκες υπεράκτιας φόρτισης

Σε όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τυχαίες φορτίσεις στην κεφαλή του πασσάλου. Τα εγκάρσια φορτία θεωρήθηκαν απλουστευτικά ως σεισμικές φορτίσεις, επομένως συσχετίστηκαν κατάλληλα με τα αξονικά φορτία, ως ποσοστά αυτών (της τάξης του 20%, θεωρώντας μια επιτάχυνση $a=0.2g$).

Μιας και η θεμελίωση με πασσάλους χρησιμοποιείται κατά κόρον στις υπεράκτιες κατασκευές, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το υπόβαθρο αυτής της εργασίας ως προς τις καμπύλες p-y, αλλά να εφαρμοστούν δυνάμεις που προκύπτουν από τις φορτίσεις που δέχεται μια θαλάσσια εξέδρα. Συνήθως, αυτές οι εξέδρες συνδέονται με τη θεμελίωση μέσω δικτυωμάτων ή καλωδίων, επομένως, δεν είναι εξ'αρχής αντιληπτό πώς ακριβώς καταλήγουν τα φορτία που δρουν στην εξέδρα, στις κεφαλές των πασσάλων. Ακόμη, πολλές από τις φορτίσεις σε μια θαλάσσια εξέδρα δεν είναι

στατικές, αλλά βασίζονται σε κυματοειδείς συναρτήσεις (όπως οι δυνάμεις από κύματα και ρεύματα) ή σε φάσματα (δυνάμεις από άνεμο). Επομένως, ένας συνδυασμός δομοστατικής ανάλυσης στην ανωδομή (εξέδρα και συνδετική κατασκευή εξέδρας-πασσάλων) και των αναλύσεων που παρουσιάζονται σε αυτήν την εργασία, θα αποτελούσε μια ολοκληρωμένη μελέτη μιας υπεράκτιας κατασκευής, και πλήρη διαστασολόγηση της θεμελίωσής της. Ακόμη, θα έδινε μια πολύ πιο στοχευμένη εικόνα της μετακινησιακής και εντατικής κατάστασης στην οποία βρίσκονται οι θεμελιώσεις τέτοιων κατασκευών.

7.2.3 Εφαρμογή αναλύσεων σε υπαρκτή στρωματογραφία

Στην παρούσα εργασία συγκρίνονται μεθοδολογίες καμπυλών p-y, όπου η κάθε μία χρησιμοποιεί διαφορετικά δεδομένα. Για παράδειγμα, ενώ οι περισσότερες μεθοδολογίες για άργιλο ή για άμμο χρησιμοποιούν την αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u ή τη γωνία τριβής ϕ αντίστοιχα, ως δεδομένα εισόδου, κάποιες άλλες χρησιμοποιούν τους χτύπους N από τη δοκιμή SPT (Gill) ή την αντίσταση αιχμής q_c της δοκιμής CPT (Lehane, Novello, Syrgasentana & Lehane). Οι στρωματογραφίες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις, επιλέχθηκαν βάσει συνήθων τιμών για κάθε ένα από τα παραπάνω μεγέθη c_u , ϕ , N, q_c . Ωστόσο, θα ήταν πιο ρεαλιστικό να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από μια υπαρκτή στρωματογραφία, για την οποία θα είναι γνωστά και τα τρία δεδομένα (c_u , N, q_c για άργιλο, ϕ , N, q_c για άμμο). Κατ'αυτόν τον τρόπο, όλες οι μεθοδολογίες θα συγκρίνονται επί ίσοις όροις.

7.2.4 Εξέταση επιρροής απόστασης πασσάλου από πρανές

Στο Κεφάλαιο 6 εξετάστηκε πώς επηρεάζεται η απόκριση του πασσάλου από την κλίση του πρανούς, όταν αυτός είναι θεμελιωμένος σε κεκλιμένο έδαφος. Αυτή η επιρροή υπάρχει διότι λόγω της κλίσης, “απουσιάζει” ένα τμήμα εδάφους από τα κατάντη του πασσάλου, το οποίο διαφορετικά θα προσέφερε στην αντίσταση του πασσάλου. Ωστόσο, ακόμα και αν ο πάσσαλος είναι θεμελιωμένος όχι πάνω σε πρανές, αλλά δίπλα σε πρανές, ενδέχεται να επηρεαστεί αρνητικά. Σαφώς η επιρροή, όσο αυτή η απόσταση μεγαλώνει, είναι ολοένα και μικρότερη, και πάντα μικρότερη από αυτήν που αναλύθηκε παραπάνω. Ωστόσο υπάρχει, επομένως, μιας και η θεμελίωση με πασσάλους κοντά σε πρανή είναι μια συχνή εικόνα στα γεωτεχνικά έργα, θα μπορούσε να αναλυθεί. Η εξέταση και η ανάλυση του προβλήματος και του μεγέθους της επιρροής της απόστασης από το πρανές (πέρα ή μαζί με την κλίση του πρανούς) θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτίωση των υπαρχόντων μεθόδων απομείωσης καμπυλών p-y λόγω κεκλιμένου εδάφους, σε ανάπτυξη καινούργιων μεθόδων, ή σε ανάπτυξη άλλων εμπειρικών λύσεων, όπως αυτή που προτάθηκε στο Κεφάλαιο 6.4.

Βιβλιογραφία

- 1) Καββαδάς Μιχάλης, “Στοιχεία Εδαφομηχανικής”, Εκδόσεις Συμείων, Ιούνιος 2009.
- 2) Γεωργιάδης Κωνσταντίνος & Μιχάλης, “Στοιχεία Εδαφομηχανικής”, Εκδόσεις Ζήτη, Απρίλιος 2013.
- 3) Καββαδάς Μιχάλης, “Θεμελιώσεις Τεχνικών Έργων”, 4η Έκδοση Ε.Μ.Πολυτεχνείου, Σεπτέμβριος 2008.
- 4) Ben C. Gerwick, “Construction of Marine and Offshore Structures”, CRC Press, 3rd Edition.
- 5) AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, “Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design”, 2007.
- 6) Det Norske Veritas, “Design of Offshore Wind Turbine Structures”, 2014.
- 7) Lymon C. Reese & William F. Van Impe, “Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading”, University of Texas, Austin, USA, 2001.
- 8) Barry J. Meyer & Lymon C. Reese, “Analysis of Single Piles Under Lateral Loading”, Texas State Department of Highways and Public Transportation, 1979.
- 9) W. K. Elson, “Design of Laterally Loaded Piles”, CIRIA Report, 1984.
- 10) Yannis Chaloulos, “Numerical Investigation of Pile Response Under Liquefaction and Ground Lateral Spreading”, National Technical University of Athens, 2012.
- 11) Ermioni Manouseli, “Analysis of Lateral Loading of Piles in Cohesive Soils using Numerical Methods”, National Technical University of Athens, 2012.
- 12) P. Y. Lee & L. W. Gilbert, “Behavior of Laterally Loaded Pile in Very Soft Clay”, 11th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 1979.
- 13) Dhruva Lal Pradhan, “Development of P-Y Curves for Monopiles in Clay using Finite Element Model Plaxis 3D Foundation”, Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- 14) Junhwan Lee, “Estimation of Lateral Displacements for Offshore Monopiles in Clays Based on CPT Results”, University of Yonsei, Seoul, South Korea, 2016.
- 15) Sangseom Jeong, “Influence on Lateral Rigidity of Offshore Piles Using Proposed P-Y Curves”, University of Yonsei, Seoul, Korea, 2009.
- 16) P. Jeanjean & BP America Inc., “Re-Assessment of P-Y Curves for Soft Clays from Centrifuge Testing and Finite Element Modelong”, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2009.
- 17) Robert B. Gilbert, Shin-Tower Wang, Asitha Senanayake & Erica Rendon, “Design of Wind Turbine Monopiles for Lateral Loads”, The University of Texas at Austin, 2015.
- 18) PETRONAS, Norwegian Geotechnical Institute, “Effect of Lateral Soil Strength and Stiffness on Jacket Foundation Integrity and Design for South China Sea Sites”, Offshore Technology Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014.

- 19) Dongoing Wu, Bengt B. Broms & Victor Choa, “Design of Laterally Loaded Piles in Cohesive Soils Using P-Y Curves”, Japanese Geotechnical Society, 1998.
- 20) Barry Michael Lehane, “Experimentally Derived CPT-Based P-Y Curves for Soft Clay”, University of Western Australia, 2014.
- 21) Dinesh Mohan & S. P. Shrivastava, “Nonlinear Behavior of Single Vertical Pile Under Lateral Loads”, 3rd Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1971.
- 22) Dewaikar, Salimath & Sawant, “A Modified P-Y Curve for the Analysis of a Laterally Loaded Pile in Stiff Clay”, Indian Institute of Technology Bombay, 2009.
- 23) S. Syryasantana & B. M. Lehane, “Verification of Numerically Derived CPT Based P-Y Curves for Piles in Sand”, University of Western Australia, 2014.
- 24) Martijn van Wijngaarden, “Concept Design of Steel Bottom Founded Support Structures for Offshore Wind Turbines”, Delft University of Technology, 2013.
- 25) Carlos Garces Garcia, “Design and Calculus of the Foundation Structure of an Offshore Monopile Wind Turbine”, Barcelona University of Technology, 2012.
- 26) Joey Velarde, “Design of Monopile Foundations to Support the DTU 10 MW Offshore Wind Turbine”, Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- 27) L. F. Albert, R. D. Holtz & E. Magris, “Superpile System: A Feasible Alternate Foundation for Tension Leg Platforms in Deep Water”, Marine Geotechnology, 1989.
- 28) Binay Pathak, “Analysis of Static Lateral Load Test of Battered Pile Group at I-10 Twin Span Bridge”, Louisiana State University, 2011.
- 29) Hudson Matlock, “Field Tests of the Lateral Load Behavior of Pile Groups in Soft Clay”, 12th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1980.
- 30) Kabir Sadeghi, “An Overview of Design, Analysis, Construction and Installation of Offshore Petroleum Platforms Suitable for Cyprus Oil/Gas Fields”, Girne American University, Mersin, Turkey, 2007.
- 31) Cihan Taylan Akdadm “Behavior of Closely Spaced Double-Pile-Supported Jacket Foundations for Offshore Wind Energy Converters”, Torbah Vocational School of Higher Education, Izmir, Turkey, 2015.
- 32) Peng Li, “Analysis and Design of Offshore Jacket Wind Turbine”, Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- 33) H. G. Poulos, “Behaviour of Laterally Loaded Piles near a Cut or Slope”, University of Sydney, Sydney, Australia, Australian Geomechanics Journal, 1976.
- 34) Konstantinos Georgiadis, “Undrained Lateral Pile Response in Slopping Ground”, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010.
- 35) Mohammed A. Gabr & Roy H. Borden, “Lateral Analysis of Piers Constructed on Slopes”, American Society of Civil Engineers, 2013.
- 36) R. M. Verhoef, “Laterally Loaded Piles in Slopping Ground”, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 2015.

- 37) K. Muthukkumaran, R. Sundaravadivelu & S. R. Gandhi, “Effect of Slope on P-Y Curves Due to Surcharge Load”, Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, 2008.
- 38) S. Mezazigh & D. Levacher, “Laterally Loaded Piles in Sand: Slope Effect on P-Y Reaction Curves”, Canadian Geotechnical Journal, 1998.
- 39) Artak Davit Mirzoyan, “Lateral Resistance of Piles at the Crest of Slopes in Sand”, Brigham Young University, 2007.
- 40) Paul D. Barker, “Effects of Soil Slope on the Lateral Capacity of Piles in Cohesionless Soils”, Oregon State University, USA, 2012.
- 41) Nontapat Nimityongskul, “of Soil Slope on Lateral Capacity of Piles in Cohesive Soils”, Oregon State University, USA, 2010

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Κώδικας προγράμματος MATLAB

Περιεχόμενα

- 1) Ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος
- 2) Εισαγωγή δεδομένων
- 3) Μηνύματα σφάλματος
- 4) Διαχείριση δεδομένων
- 5) Υπολογισμός μειωτικών συντελεστών r , λόγω κεκλιμένου εδάφους
- 6) Υπολογισμός καμπυλών p - y
- 7) Προετοιμασία διαγραμμάτων p - y
- 8) Σχεδίαση διαγραμμάτων p - y
- 9) Εκκαθάριση διαγραμμάτων p - y
- 10) Εκκαθάριση δεδομένων
- 11) Μορφοποίηση οριζοντίου άξονα διαγραμμάτων p - y
- 12) Εξαγωγή καμπυλών p - y σε αρχεία txt
- 13) Μορφοποίηση δρομέα διαγραμμάτων p - y

1) Ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος

```
function varargout = p_y_model(varargin)
% P_Y_MODEL MATLAB code for p_y_model.fig
%   P_Y_MODEL, by itself, creates a new P_Y_MODEL or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = P_Y_MODEL returns the handle to a new P_Y_MODEL or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   P_Y_MODEL('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in P_Y_MODEL.M with the given input arguments.
%
%   P_Y_MODEL('Property','Value',...) creates a new P_Y_MODEL or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before p_y_model_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to p_y_model_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help p_y_model
% Last Modified by GUIDE v2.5 06-May-2017 17:13:17
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
```

```

        'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
        'gui_OpeningFcn', @p_y_model_OpeningFcn, ...
        'gui_OutputFcn', @p_y_model_OutputFcn, ...
        'gui_LayoutFcn', [] , ...
        'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before p_y_model is made visible.
function p_y_model_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to p_y_model (see VARARGIN)
% Choose default command line output for p_y_model
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes p_y_model wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = p_y_model_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
function b_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to b (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of b as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of b as a double
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function b_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to b (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function L_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to L (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of L as text

```

```

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of L as a double
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function L_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to L (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function Ep_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Ep (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Ep as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Ep as a double
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Ep_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Ep (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function g_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to g (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of g as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of g as a double
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function g_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to g (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function a_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to a (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of a as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of a as a double
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are

```

```

provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function a_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to a (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function theta_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to theta (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of theta as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of theta as a
double
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function theta_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to theta (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function max_y_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to max_y (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of max_y as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of max_y as a
double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function max_y_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to max_y (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function depth_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to depth (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of depth as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of depth as a
double
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function depth_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to depth (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on selection change in method1.
function method1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to method1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns method1 contents as
cell array
%           contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from method1
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function method1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to method1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: listbox controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on selection change in method2.
function method2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to method2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns method2 contents as
cell array
%           contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from method2
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function method2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to method2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: listbox controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on selection change in method3.
function method3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to method3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns method3 contents as

```

```

cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from method3
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function method3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to method3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: listbox controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on selection change in method4.
function method4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to method4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns method4 contents as
cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from method4
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function method4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to method4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: listbox controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on selection change in method5.
function method5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to method5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns method5 contents as
cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from method5
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function method5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to method5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: listbox controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ntua_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to ntua (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: place code in OpeningFcn to populate ntua
hold on axes(handles.ntua);
axes(hObject);
imshow('ntua.jpg')
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function p_y_curve_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to p_y_curve (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: place code in OpeningFcn to populate p_y_curve
% --- Executes on button press in Upload.
function Upload_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Upload (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
filename1=uigetfile('*.xlsx');
data=xlsread(filename1);
handles.data=data;
guidata(hObject, handles);
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
% --- Executes on button press in Run.
function Run_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to Run (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

2) Εισαγωγή δεδομένων

```

%data retrieval from gui and excel file

depth=str2double(get(handles.depth,'String'));
theta=str2double(get(handles.theta,'String'));
limit=str2double(get(handles.max_y,'String'));
b=str2double(get(handles.b,'String'));
L=str2double(get(handles.L,'String'));
Ep=str2double(get(handles.Ep,'String'));
g=str2double(get(handles.g,'String'));
a=str2double(get(handles.a,'String'));
data=handles.data;

```

3) Μηνύματα σφάλματος

```

% error messages

error=0;
if a<0 || a>1
    error=1;

```

```

    set(handles.instruction,'String','Variable "a" must be between 0 and 1.
    Provide a correct value and Run the analysis.');
```

```

elseif b<=0 || Ep<=0 || depth<=0 || L<=0 || limit<=0
    error=1;
    set(handles.instruction,'String','Values of diameter, length, Young
    Modulus, depth and maximum displacement, must all be positive numbers.');
```

```

elseif g<=10
    error=1;
    set(handles.instruction,'String','Specific weight must be greater than 10.
    Provide correct values and Run the analysis.');
```

```

elseif b>L
    error=1;
    set(handles.instruction,'String','Diameter must be smaller than the
    length. Provide correct values and Run the analysis.');
```

```

elseif depth*b>L
    error=1;
    set(handles.instruction,'String','Depth must be smaller than the length.
    Provide correct values and Run the analysis.');
```

```

elseif size(data,1)<L
    error=1;
    set(handles.instruction,'String','Spreadsheet data are not enough for the
    provided length. Provide a correct spreadshit or length value and Run the
    analysis.');
```

```

elseif theta>89 || theta<0
    error=1;
    set(handles.instruction,'String','Slope must be between 0 and 89 degrees.
    Provide a correct value and Run the analysis.');
```

```

elseif isa(depth,'integer')==0
    set(handles.instruction,'String','Depth to diameter factor must be an
    integer');
```

```

end
```

4) Διαχείριση δεδομένων

```

%change of units

g_eff=g-10;
Ep=Ep*1000000;
Ip=pi*b^4/64;
theta=theta*pi/180;
segments=floor(L/b);
soil_info=zeros(segments,6);

%choice of p-y method to display

method1=get(handles.method1,'Value');
method2=get(handles.method2,'Value');
method3=get(handles.method3,'Value');
method4=get(handles.method4,'Value');
method5=get(handles.method5,'Value');

%identification of soil type according to the depth

for i=1:segments
```



```

z=i*b;
temp=1;
j=1;
while temp==1
    if data(j,1)>=z
        cu=data(j,2);
        qc=data(j,3);
        N=data(j,4);
        phi=data(j,5);
        if cu>1
            if cu<=50
                id=1;
                e50=0.02;
                Es=5000;
            elseif 50<cu && cu<=100
                id=2;
                e50=0.01;
                Es=20000;
            elseif 100<cu && cu<=200
                id=3;
                e50=0.005;
                Es=40000;
            else
                id=4;
                e50=0.002;
                Es=75000;
            end
        else
            id=5;
            if phi<30
                e50=0.02;
                Es=5000;
            elseif phi>=30 && phi<36
                e50=0.01;
                Es=20000;
            else
                e50=0.005;
                Es=40000;
            end
        end
        Lcritical=3*(Ep*Ip/Es/b^0.5)^0.286;
        zcritical=Lcritical/4;
        temp=2;
        soil_info(i,1:9)=[z,cu,id,e50,Es,zcritical,qc,N,phi];
    end
    j=j+1;
end
end
p_y_overall=zeros(6000,segments+1);
for j=3001:6000
    p_y_overall(j,1)=0.001*j-3.001;
end
for j=1:3000
    k=6001-j;
    p_y_overall(j,1)=-p_y_overall(k,1);
end
clear j;

```

```
%creation of empty matrices that will be filled by p-y data

%soft clay
p_y_matlock{1,segments}=[];
p_y_georgiadis_soft{1,segments}=[];
p_y_sullivan_soft{1,segments}=[];
p_y_oneill_and_gazioglu_soft{1,segments}=[];
p_y_broms_and_choa_soft{1,segments}=[];
p_y_lehane{1,segments}=[];
p_y_jeanjean{1,segments}=[];
p_y_jeong_soft{1,segments}=[];
p_y_ngi_11{1,segments}=[];
p_y_average_soft{1,segments}=[];

%stiff clay
p_y_reese_stiff{1,segments}=[];
p_y_dewaikar{1,segments}=[];
p_y_broms_and_choa_stiff{1,segments}=[];
p_y_sullivan_stiff{1,segments}=[];
p_y_oneill_and_gazioglu_stiff{1,segments}=[];
p_y_gill_stiff{1,segments}=[];
p_y_dunnavant_and_oneill{1,segments}=[];
p_y_welch_and_reese{1,segments}=[];
p_y_georgiadis_stiff{1,segments}=[];
p_y_jeong_stiff{1,segments}=[];
p_y_average_stiff{1,segments}=[];

%sand
p_y_API{1,segments}=[];
p_y_reese_sand{1,segments}=[];
p_y_gill_sand{1,segments}=[];
p_y_novello{1,segments}=[];
p_y_suryasentana_and_lehane{1,segments}=[];
p_y_oneill{1,segments}=[];
p_y_georgiadis_sand{1,segments}=[];
p_y_average_sand{1,segments}=[];
```

5) Υπολογισμός μειωτικών συντελεστών r , λόγω κεκλιμένου εδάφους

```
%r calculation

for i=1:segments

    z=soil_info(i,1);
    cu=soil_info(i,2);
    id=soil_info(i,3);
    e50=soil_info(i,4);
    Es=soil_info(i,5);
    zcritical=soil_info(i,6);
    qc=soil_info(i,7)*1000;
    N=soil_info(i,8);
    phi=soil_info(i,9);

    if id==1 || id==2 || id==3 || id==4
```

```

if method4==1      %Georgiadis
    if theta>0.698
        error=1;
        set(handles.instruction,'String','Georgiadis method is
        reccomendend for a slope angle smaller than 40 degrees');
    end
    pu=zeros(2,1);
    for j=1:2
        if j==1
            theta_temp=0;
        else
            theta_temp=theta;
        end
        Delta=asin(a);
        Npo=2+1.5*a;
        Npu=pi+2*Delta+2*cos(Delta)+4*cos(Delta/2)+4*sin(Delta/2);
        lamtha=0.55-0.15*a;
        Np=Npu-(Npu-Npo*cos(theta_temp))*exp(-
        lamtha*z/b/(1+tan(theta_temp)));
        pu(j,1)=Np*cu*b;
    end
    r=min(pu(2,1)/pu(1,1),1);
elseif method4==2      %Nimityingskul
    if theta>0.62 || theta<0.26
        if theta==0
            r=1;
        else
            error=1;
            set(handles.instruction,'String','Nimityongskul method
            applies for a slope between 15 and 35 degrees. No
            reduction factor will be calculated');
            r=1;
        end
    else
        error=2;
        set(handles.instruction,'String','Nimityongskul method is very
        conservative');
        if z<7*b
            r=0.45;
        else
            r=1;
        end
    end
end
elseif method4==3      %Reese-clay
    if theta==0 || z>10*b
        r=1;
    else
        r=1/(1+tan(theta));
    end
end
elseif id==5
    if method5==1      %Barker
        if theta>0.62 || theta<0.26
            if theta==0
                r=1;
            else
                error=1;
                set(handles.instruction,'String','Barker method applies

```



```

pu_0=g_eff*z*(Ko*z*tan(phirad)*sin(beta)/(tan(beta-
phirad)*cos(alpha))+tan(beta)*(b+z*tan(beta)*
tan(alpha))/tan(beta-phirad)+Ko*z*tan(beta)*
(tan(phirad)*sin(beta)-tan(alpha))-Ka_0*b);
pu_s=g_eff*z*(Ko*z*tan(phirad)*sin(beta)/(tan(beta-
phirad)*cos(alpha))*(4*D1^3-
3*D1^2+1)+tan(beta)*(b*D2+z*tan(beta)*tan(alpha)*D2^2)
/tan(beta-phirad)+Ko*z*tan(beta)*(tan(phirad)*sin(beta)-
tan(alpha))*(4*D1^3-3*D1^2+1)-Ka_s*b);
r=min(pu_s/pu_0,1);
end
if theta>=phi*pi/180
r=1;
error=1;
set(handles.instruction,'String','In a sandy soil, the slope
angle cannot be bigger than the friction angle');
end
elseif method5==4 %Gabr & Borden
if theta>=phi*pi/180
r=1;
error=1;
set(handles.instruction,'String','In a sandy soil, the slope
angle cannot be bigger than the friction angle');
else
pu=zeros(2,1);
for j=1:2
if j==1
theta_temp=0;
else
theta_temp=theta;
end
phirad=phi*pi/180;
alpha=phirad/2;
beta=45*pi/180+phirad/2;
Ko=0.4;
Ka=cos(theta_temp)*(cos(theta_temp)-
sqrt((cos(theta_temp))^2-
(cos(phirad))^2))/(cos(theta_temp)+
sqrt((cos(theta_temp))^2-(cos(phirad))^2));
K1=(cos(beta)*(tan(beta)*sin(beta)+cos(beta)))/z;
K2=(tan(beta)*sin(beta))/(tan(theta_temp)*tan(beta)+1);
Kpf=(tan(beta)*(cos(beta)+
sin(beta)*tan(phirad)))/((tan(theta_temp)*tan(beta)+1)*
(sin(beta)*cos(beta)*tan(phirad)));
lamtha2=K1/2*(Kpf+K2/cos(beta));
S1f=lamtha2*tan(alpha)*tan(beta)/
(tan(theta_temp)*tan(beta)+1)^2*((tan(theta_temp)*
tan(beta)+1)*(3+4*tan(phirad)*tan(beta))-
2*tan(phirad)*tan(beta));
S2f=2*tan(alpha)*tan(beta)/(tan(theta_temp)*tan(beta)+1)*
(1+(tan(phirad))^2);
S3f=(tan(phirad)-tan(alpha))*(tan(beta)-
tan(beta)^4*tan(theta_temp)^3+tan(beta)^
3*tan(theta_temp)^2)/(tan(theta_temp)*tan(beta)+1)^3);
pu(j,1)=g_eff*z*(z*(S1f+3*Ko*S3f)+b*S2f-Ka*b);
end
r=pu(2,1)/pu(1,1);
end

```

```

elseif method5==5      %Mezazigh & Levacher
    if theta>0.70
        error=1;
        set(handles.instruction,'String','Mezazigh & Levacher method
        applies for a slope between 0 and 40 degrees. No reduction
        factor will be calculated');
        r=1;
    else
        if z<20*theta*b
            r=1-tan(theta);
        else
            r=1;
        end
    end
    if theta>=phi*pi/180
        r=1;
        error=1;
        set(handles.instruction,'String','In a sandy soil, the slope
        angle cannot be bigger than the friction angle');
    end
end
clear j;

```

6) Υπολογισμός καμπυλών p-y

```

%p-y formation

if id==1 || id==2
    %Matlock
    y50=2.5*e50*b;
    pu=min(9*cu*b,cu*b*(3+g_eff*z/cu+0.5*z/b));
    p_y=zeros(3000,2);
    for j=1:3000
        p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
        if p_y(j,1)<=8*y50
            p_y(j,2)=r*pu*0.5*(p_y(j,1)/y50)^(1/3);
        else
            p_y(j,2)=r*pu;
        end
    end
    p_y_matlock{1,i}=p_y;
    clear j; clear pu; clear p_y; clear y50;
    if method1==1
        p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_matlock{1,i}(1:3000,2);
        for j=1:3000
            k=3001-j;
            p_y_overall(j,i+1)=-p_y_matlock{1,i}(k,2);
        end
    end

    %Georgiadis
    if method4~=1
        theta_temp=0;
        r_temp=r;
    end
end

```

```

else
    theta_temp=theta;
    r_temp=1;
end
Delta=asin(a);
Npo=2+1.5*a;
Npu=pi+2*Delta+2*cos(Delta)+4*cos(Delta/2)+4*sin(Delta/2);
m=min(cos(theta_temp)+z/(6*b)*(1-cos(theta_temp)),1);
Ki=3*Es*sqrt(Es*b^4/Ep/Ip)*m;
lamtha=0.55-0.15*a;
Np=Npu-(Npu-Npo*cos(theta_temp))*exp(-lamtha*z/b/(1+tan(theta_temp)));
pu=Np*cu*b;
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    p_y(j,2)=r_temp*p_y(j,1)/(1/Ki+p_y(j,1)/pu);
end
p_y_georgiadis_soft{1,i}=p_y;
clear j; clear pu; clear p_y;
clear Delta;clear Npo;clear Npu;clear Ki;clear m; clear lamtha;clear
Np;
if method1==2
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_georgiadis_soft{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_georgiadis_soft{1,i}(k,2);
    end
end

%Sullivan
A=2.5;
y50=A*e50*b;
pu=min([9*cu*b;cu*b*(3+0.5*z/b);cu*b*(2+g_eff*z/cu+0.833*z/b)]);
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    if p_y(j,1)<=8*y50
        p_y(j,2)=r*pu*0.5*(p_y(j,1)/y50)^(1/3);
    else
        p_y(j,2)=r*pu;
    end
end
p_y_sullivan_soft{1,i}=p_y;
clear j; clear A; clear y50; clear pu; clear p_y;
if method1==3
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_sullivan_soft{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_sullivan_soft{1,i}(k,2);
    end
end

%O'NeilL & Gazioglu
F=1;
Np=min(3+6*z/zcritical,9);
y50=0.8*e50*b^0.5*(Ep*Ip/Es)^0.125;
pu=F*Np*cu*b;

```

```

p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    if p_y(j,1)<=6*y50
        p_y(j,2)=r*pu*0.5*(p_y(j,1)/y50)^(0.387);
    else
        p_y(j,2)=r*pu;
    end
end
p_y_oneill_and_gazioglu_soft{1,i}=p_y;
clear j;
clear Np; clear y50; clear pu; clear p_y; clear F;
if method1==4
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=
    p_y_oneill_and_gazioglu_soft{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_oneill_and_gazioglu_soft{1,i}(k,2);
    end
end

%Broms & Choa for soft
A=min(10,2.5+1.5*z/b);
beta=min((cu/200)*4+8,8);
y50=A*e50*b;
pu=A*cu*b;
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    p_y(j,2)=r*pu*(p_y(j,1)/y50)/(beta/(beta-a)+(beta-2)/(beta-1)*(p_y(j,1)/y50));
end
p_y_broms_and_choa_soft{1,i}=p_y;
clear j; clear y50; clear pu; clear p_y; clear beta; clear A;
if method1==5
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_broms_and_choa_soft{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_broms_and_choa_soft{1,i}(k,2);
    end
end

%Lehane
pu=qc*(0.2+tanh(0.3*z/b));
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    if z<=3*b
        p_y(j,2)=r*pu*tanh(8.8*(z/b)^(-0.3)*(p_y(j,1)/b)^0.68);
    else
        p_y(j,2)=r*pu*tanh(6.34*(p_y(j,1)/b)^0.68);
    end
end
p_y_lehane{1,i}=p_y;
clear j; clear pu; clear p_y;
if method1==6
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_lehane{1,i}(1:3000,2);
end

```



```

        for j=1:3000
            k=3001-j;
            p_y_overall(j,i+1)=-p_y_lehane{1,i}(k,2);
        end
    end

    %Jeanjean
    n=0.3;
    G=Es/2/(1+n);
    if i==1
        slope=(soil_info(i+1,2)-soil_info(i,2))/(soil_info(i+1,1)-
            soil_info(i,1));
    else
        slope=(soil_info(i,2)-soil_info(i-1,2))/(soil_info(i,1)-
            soil_info(i-1,1));
    end
    lamtha=data(1,2)/slope/b;
    epsilon=min(0.25+0.05*lamtha,0.55);
    Np=12-4*exp(-epsilon*z/b);
    pu=cu*Np*b;
    p_y=zeros(3000,2);
    for j=1:3000
        p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
        p_y(j,2)=r*pu*tanh(G*(p_y(j,1)/b)^(0.5)/100/cu);
    end
    p_y_jeanjean{1,i}=p_y;
    clear j; clear pu; clear p_y; clear n; clear G; clear slope; clear
    lamtha ; clear epsilon; clear Np;
    if method1==7
        p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_jeanjean{1,i}(1:3000,2);
        for j=1:3000
            k=3001-j;
            p_y_overall(j,i+1)=-p_y_jeanjean{1,i}(k,2);
        end
    end

    %Jeong
    n=0.3;
    K=17.4*Es/(1-n^2)*b^0.5*(Es*b^4/Ep/Ip)^0.66;
    pu=3.25*cu*b*z^0.59;
    p_y=zeros(3000,2);
    for j=1:3000
        p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
        p_y(j,2)=r*p_y(j,1)/(1/K+p_y(j,1)/pu);
    end
    p_y_jeong_soft{1,i}=p_y;
    clear j; clear pu; clear p_y; clear n; clear K;
    if method1==8
        p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_jeong_soft{1,i}(1:3000,2);
        for j=1:3000
            k=3001-j;
            p_y_overall(j,i+1)=-p_y_jeong_soft{1,i}(k,2);
        end
    end

    %NGI-11
    n=0.3;

```

```

G=Es/2/(1+n);
Np=min(4+2*(z/b)^0.6,11.9);
pu=cu*Np;
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    p_y(j,2)=r*pu*tanh(G*(p_y(j,1)/b)^(0.5)/100/cu);
end
p_y_ngi_11{1,i}=p_y;
clear j; clear pu; clear p_y; clear n; clear G; clear Np;
if method1==9
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_ngi_11{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_ngi_11{1,i}(k,2);
    end
end

%average of all
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    if qc==0
        p_y(j,2)=(p_y_matlock{1,i}(j,2)+p_y_georgiadis_soft{1,i}(j,2)+
        p_y_sullivan_soft{1,i}(j,2)+
        p_y_oneill_and_gazioglu_soft{1,i}(j,2)+
        p_y_broms_and_choa_soft{1,i}(j,2)+p_y_lehane{1,i}(j,2)+
        p_y_jeong_soft{1,i}(j,2)+p_y_ngi_11{1,i}(j,2))/8;
    else
        p_y(j,2)=(p_y_matlock{1,i}(j,2)+p_y_georgiadis_soft{1,i}(j,2)+
        p_y_sullivan_soft{1,i}(j,2)+
        p_y_oneill_and_gazioglu_soft{1,i}(j,2)+
        p_y_broms_and_choa_soft{1,i}(j,2)+p_y_lehane{1,i}(j,2)+
        p_y_jeanjean{1,i}(j,2)+p_y_jeong_soft{1,i}(j,2)+
        p_y_ngi_11{1,i}(j,2))/9;
    end
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
end
p_y_average_soft{1,i}=p_y;
clear j; clear p_y;
if method1==10
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_average_soft{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_average_soft{1,i}(k,2);
    end
end
elseif id==3 || id==4

%Reese
K=min((cu-100)/100*270+270,540)*1000;
pu=min(11*cu*b,cu*b*(2+g_eff*z/cu+2.83*z/b));
y50=e50*b;
y=0.25*pu^2/(y50*K^2*z^2);
As=min(0.65,0.098*log(z/b)+0.4457);
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;

```

```

if p_y(j,1)<=y
    p_y(j,2)=r*K*z*p_y(j,1);
elseif p_y(j,1)>y && p_y(j,1)<=As*y50
    p_y(j,2)=r*0.5*pu*(p_y(j,1)/y50)^0.5;
elseif p_y(j,1)>As*y50 && p_y(j,1)<=6*As*y50
    p_y(j,2)=r*(0.5*pu*(p_y(j,1)/y50)^0.5-0.055*pu*((p_y(j,1)-
        As*y50)/(As*y50))^1.25);
elseif p_y(j,1)>6*As*y50 && p_y(j,1)<=18*As*y50
    p_y(j,2)=r*(0.5*pu*(6*As)^0.5-0.411*pu-
        0.0625/y50*pu*(p_y(j,1)-6*As*y50));
else
    p_y(j,2)=r*pu*(1.225*As^0.5-0.75*As-0.411);
end
end
p_y_reese_stiff{1,i}=p_y;
clear j, clear As, clear K, clear y1; clear pu; clear y50; clear p_y;
if method2==1
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_reese_stiff{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_reese_stiff{1,i}(k,2);
    end
end

%Dewaikar
y50=e50*b;
pu=1.298*(0.9+1.727*z/b)*b*cu;
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    factor=min(p_y(j,1)/y50,20);
    D=10^(0.004*factor^2-0.157*factor+0.087);
    p_y(j,2)=r*pu*(1.71*D*p_y(j,1)/y50)/((12-
        1.6)/(12+2)+11/12*(p_y(j,1)/y50));
end
p_y_dewaikar{1,i}=p_y;
clear D, clear j; clear pu; clear y50; clear p_y; clear factor
if method2==2
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_dewaikar{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_dewaikar{1,i}(k,2);
    end
end

%Broms & Choa for stiff
A=min(7.5,2+1.1*z/b);
beta=min((cu/200)*4+8,8);
y50=A*e50*b;
pu=A*cu*b;
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    p_y(j,2)=r*pu*(p_y(j,1)/y50)/(beta/(beta-1)+(beta-2)/(beta-
        1)*(p_y(j,1)/y50));
end
p_y_broms_and_choa_stiff{1,i}=p_y;

```

```

clear j; clear y50; clear pu; clear p_y; clear beta; clear A;
if method2==3
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=
        p_y_broms_and_choa_stiff{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_broms_and_choa_stiff{1,i}(k,2);
    end
end

%Sullivan
A=0.35;
y50=A*e50*b;
pu=min([9*cu*b;cu*b*(3+0.5*z/b);cu*b*(2+g_eff*z/cu+0.833*z/b)]);
p_y=zeros(3000,2);
p8y50=pu*0.5*8^(1/3);
p30y50=min(pu,pu*(0.5+0.5*z/(12*b)));
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    if p_y(j,1)<=8*y50
        p_y(j,2)=r*pu*0.5*(p_y(j,1)/y50)^(1/3);
    elseif p_y(j,1)>8*y50 && p_y(j,1)<=30*y50
        p_y(j,2)=r*((p_y(j,1)-8*y50)/(30*y50-8*y50))*(p30y50-p8y50)+
            p8y50);
    else
        p_y(j,2)=r*p30y50;
    end
end
p_y_sullivan_stiff{1,i}=p_y;
clear j;clear p8y50;clear p30y50; clear A, clear y50; clear pu; clear
p_y;
if method2==4
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_sullivan_stiff{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_sullivan_stiff{1,i}(k,2);
    end
end

%O'Neill & Gazioglu
F=0.5;
Np=min(3+6*z/zcritical,9);
y50=0.8*e50*b^0.5*(Ep*Ip/Es)^0.125;
pu=F*Np*cu*b;
p_y=zeros(3000,2);
p6y50=pu*0.5*6^0.387;
p20y50=min(pu,pu*(F+(1-F)*z/zcritical));
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    if p_y(j,1)<=6*y50
        p_y(j,2)=r*pu*0.5*(p_y(j,1)/y50)^(0.387);
    elseif p_y(j,1)>6*y50 && p_y(j,1)<=20*y50
        p_y(j,2)=r*((p_y(j,1)-6*y50)/(20*y50-6*y50))*(p20y50-p6y50)+
            p6y50);
    else
        p_y(j,2)=r*p20y50;
    end
end

```

```

end
p_y_oneill_and_gazioglu_stiff{1,i}=p_y;
clear j;
clear Np; clear p6y50; clear p20y50; clear y50; clear pu; clear p_y;
clear F;
if method2==5
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=
        p_y_oneill_and_gazioglu_stiff{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_oneill_and_gazioglu_stiff{1,i}(k,2);
    end
end

%Gill
Ko=100*N;
Pf=0.25*N*z/sqrt(b);
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    y=p_y(j,1)*39.37;
    P=y/(1/Ko+1/Pf*p_y(j,1)/b);
    p_y(j,2)=r*0.175*P;
end
p_y_gill_stiff{1,i}=p_y;
clear j; clear Pf; clear P; clear Ko; clear y; clear p_y;
if method2==6
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_gill_stiff{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_gill_stiff{1,i}(k,2);
    end
end

%Dunnavant & O'Neill
Nc=min(9,2+g_eff*z/cu+0.4*z/b);
pu=Nc*cu*b;
Kr=Ep*Ip/Es/(L^4);
y50=0.0063*e50*b*Kr^(-0.875);
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    if p_y(j,1)<=8*y50
        p_y(j,2)=r*pu*1.02*tanh(0.537*(p_y(j,1)/y50)^(0.7));
    else
        p_y(j,2)=r*pu;
    end
end
p_y_dunnavant_and_oneill{1,i}=p_y;
clear Nc; clear pu; clear Kr; clear y50; clear j; clear p_y;
if method2==7
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=
        p_y_dunnavant_and_oneill{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_dunnavant_and_oneill{1,i}(k,2);
    end
end

```

```

end

%Welch & Reese
y50=2.5*e50*b;
pu=min(9*cu*b,cu*b*(3+g_eff*z/cu+0.2*z/b));
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    if p_y(j,1)<=16*y50
        p_y(j,2)=r*pu*0.5*(p_y(j,1)/y50)^(0.25);
    else
        p_y(j,2)=r*pu;
    end
end
p_y_welch_and_reese{1,i}=p_y;
clear j; clear y50; clear pu; clear p_y;
if method2==8
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_welch_and_reese{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_welch_and_reese{1,i}(k,2);
    end
end

%Georgiadis
if method4~=1
    theta_temp=0;
    r_temp=r;
else
    theta_temp=theta;
    r_temp=1;
end
Delta=asin(a);
Npo=2+1.5*a;
Npu=pi+2*Delta+2*cos(Delta)+4*cos(Delta/2)+4*sin(Delta/2);
m=min(cos(theta_temp)+z/(6*b)*(1-cos(theta_temp)),1);
Ki=3*Es*sqrt(Es*b^4/Ep/Ip)*m;
lamtha=0.55-0.15*a;
Np=Npu-(Npu-Npo*cos(theta_temp))*exp(-lamtha*z/b/(1+tan(theta_temp)));
pu=Np*cu*b;
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    p_y(j,2)=r_temp*p_y(j,1)/(1/Ki+p_y(j,1)/pu);
end
p_y_georgiadis_stiff{1,i}=p_y;
clear j; clear pu; clear p_y;
clear Delta;clear Npo;clear Npu;clear Ki;clear lamtha;clear Np;
if method2==9
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_georgiadis_stiff{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_georgiadis_stiff{1,i}(k,2);
    end
end

%Jeong

```

```

n=0.3;
K=17.4*Es/(1-n^2)*b^0.5*(Es*b^4/Ep/Ip)^0.66;
pu=3.25*cu*b*z^0.59;
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    p_y(j,2)=r*p_y(j,1)/(1/K+p_y(j,1)/pu);
end
p_y_jeong_stiff{1,i}=p_y;
clear j; clear pu; clear p_y; clear n; clear K;
if method2==10
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_jeong_stiff{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_jeong_stiff{1,i}(k,2);
    end
end

%average of all
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    if N==0
        p_y(j,2)=(p_y_reese_stiff{1,i}(j,2)+
        p_y_broms_and_choa_stiff{1,i}(j,2)+
        p_y_sullivan_stiff{1,i}(j,2)+
        p_y_oneill_and_gazioglu_stiff{1,i}(j,2)+
        p_y_dewaikar{1,i}(j,2)+p_y_dunnavant_and_oneill{1,i}(j,2)+
        p_y_welch_and_reese{1,i}(j,2)+
        p_y_georgiadis_stiff{1,i}(j,2)+p_y_jeong_stiff{1,i}(j,2))/9;
    else
        p_y(j,2)=(p_y_reese_stiff{1,i}(j,2)+
        p_y_broms_and_choa_stiff{1,i}(j,2)+
        p_y_sullivan_stiff{1,i}(j,2)+
        p_y_oneill_and_gazioglu_stiff{1,i}(j,2)+
        p_y_dewaikar{1,i}(j,2)+p_y_gill_stiff{1,i}(j,2)+
        p_y_dunnavant_and_oneill{1,i}(j,2)+
        p_y_welch_and_reese{1,i}(j,2)+p_y_georgiadis_stiff{1,i}(j,2)+
        p_y_jeong_stiff{1,i}(j,2))/10;
    end
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
end
p_y_average_stiff{1,i}=p_y;
clear j; clear p_y;
if method2==11
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_average_stiff{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_average_stiff{1,i}(k,2);
    end
end
elseif id==5

%API
c1=0.115*10^(0.0405*phi);
c2=0.571*10^(0.022*phi);
c3=0.6464*exp(0.0555*phi);
k=105.52*phi^2-4321.6*phi+46079;

```

```

A=max(0.9,3-0.8*z/b);
pu=min(g_eff*z*(c1*z+c2*b),c3*b*g_eff*z);
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    p_y(j,2)=r*A*pu*tanh(k*z*p_y(j,1)/A/pu);
end
p_y_API{1,i}=p_y;
clear c1;clear c2;clear c3;clear k; clear A; clear pu; clear j; clear
p_y;
if method3==1
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_API{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_API{1,i}(k,2);
    end
end

%Reese
if phi<30
    K=5400;
elseif phi>=30 && phi<36
    K=16300;
else
    K=34000;
end
if z/b<5
    A=0.1123*(z/b)^2-0.973*(z/b)+2.9473;
    B=0.0819*(z/b)^2-0.7726*(z/b)+2.3093;
else
    A=0.88;
    B=0.5;
end
phirad=phi*pi/180;
alpha=phirad/2;
beta=45*pi/180+phirad/2;
Ko=0.4;
Ka=(tan(45*pi/180-phirad/2))^2;
ps=min(Ka*b*g_eff*z*((tan(beta))^8-1)
+Ko*b*g_eff*z*tan(phirad)*(tan(beta))^4,
g_eff*z*(Ko*z*tan(phirad)*sin(beta)/cos(alpha)/tan(beta-
phirad)+tan(beta)/tan(betaphirad)*(b+z*tan(beta)*tan(alpha))
+Ko*z*tan(beta)*(tan(phirad)*sin(beta)-tan(alpha))-Ka*b));
pu=A*ps;
pm=B*ps;
yu=3*b/80;
ym=b/60;
m=(pu-pm)/(yu-ym);
n=pm/(m*ym);
C=pm/ym^(1/n);
y=(C/(K*z))^(1/(1-1/n));
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    if p_y(j,1)<=y
        p_y(j,2)=r*K*z*p_y(j,1);
    elseif p_y(j,1)>y && p_y(j,1)<=ym
        p_y(j,2)=r*C*p_y(j,1)^(1/n);
    end
end

```



```

elseif p_y(j,1)>ym && p_y(j,1)<=yu
    p_y(j,2)=r*(pm+m*(p_y(j,1)-ym));
elseif p_y(j,1)>yu
    p_y(j,2)=r*pu;
end
end
p_y_reese_sand{1,i}=p_y;
clear phirad;clear alpha; clear beta; clear Ko; clear Ka; clear A;
clear B;
clear K; clear ps; clear pu; clear pm; clear yu; clear ym; clear m;
clear n; clear C; clear y1; clear p_y; clear j;
if method3==2
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_reese_sand{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_reese_sand{1,i}(k,2);
    end
end

%Gill
Ko=2000;
f=(25.4-(g_eff*z*0.145)/(2.94+0.1225*g_eff*z*0.145))*N^0.16;
Pf=0.664*10^(0.038*f)+0.049*10^(0.034*f)*z/b;
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    y=p_y(j,1)*39.37;
    P=y/(1/Ko+1/Pf*p_y(j,1)/b);
    p_y(j,2)=r*0.175*P;
end
p_y_gill_sand{1,i}=p_y;
clear j; clear Pf; clear P; clear Ko; clear y; clear p_y; clear f;
if method3==3
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_gill_sand{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_gill_sand{1,i}(k,2);
    end
end

%Novello
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    p_y(j,2)=
        r*4.2*qc^(0.68)*z^(0.32)*p_y(j,1)^(0.56)*g_eff^(0.32)*b^(0.44);
end
p_y_novello{1,i}=p_y;
clear j; clear p_y;
if method3==4
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_novello{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_novello{1,i}(k,2);
    end
end
end

```

```

%Suryasentana & Lehane
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    p_y(j,2)=r*g_eff*z*b*2.4*(qc/g_eff/z)^(0.67)*(z/b)^(0.75)*(1-exp(-
        6.2*(z/b)^(-1.2)*(p_y(j,1)/b)^(0.89)));
end
p_y_suryasentana_and_lehane{1,i}=p_y;
clear j; clear p_y;
if method3==5
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=
        p_y_suryasentana_and_lehane{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_suryasentana_and_lehane{1,i}(k,2);
    end
end
%Murchison & O'Neill
phirad=phi*pi/180;
beta=45*pi/180+phirad;
Ka=(tan(45*pi/180-phirad/2))^2;
Kp=(tan(45*pi/180+phirad/2))^2;
Ko=0.5;
A=max(0.9,3-0.8*z/b);
k=105.52*phi^2-4321.6*phi+46079;
pu=min(g_eff*z*(b*(Kp-Ka)+z*Kp*tan(phirad)*tan(beta)),
    g_eff*b*z*(Kp^3+2*Ko*Kp^2*tan(phirad)+tan(phirad)-Ka));
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    p_y(j,2)=r*A*pu*tanh(k*z*p_y(j,1)/A/pu);
end
p_y_oneill{1,i}=p_y;
clear j; clear p_y;
if method3==6
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_oneill{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_oneill{1,i}(k,2);
    end
end

%Georgiadis
if phi<30
    K=1100+phi/30*(3300-1100);
elseif phi>=30 && phi<36
    K=3300+(phi-30)/(36-30)*(11000-3300);
else
    K=min(11000+(phi-36)/(40-36)*(23400-11000),23400);
end
A=max(2-z/b/3,1);
phirad=phi*pi/180;
alpha=phirad/2;
beta=45*pi/180+phirad;
Ko=0.4;
Ka=(tan(45*pi/180-phirad/2))^2;
ps=min(Ka*b*g_eff*z*((tan(beta))^8-
    1)+Ko*b*g_eff*z*tan(phirad)*(tan(beta))^4,

```

```

g_eff*z*(Ko*z*tan(phirad)*sin(beta)/cos(alpha)/tan(beta-
phirad)+tan(beta)/tan(beta-
phirad)*(b+z*tan(beta)*tan(alpha))+Ko*z*tan(beta)
*(tan(phirad)*sin(beta)-tan(alpha))-Ka*b));
pu=A*ps;
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
    p_y(j,2)=r*p_y(j,1)/(1/K/z+p_y(j,1)/pu);
end
p_y_georgiadis_sand{1,i}=p_y;
clear j; clear p_y;clear K;clear A;clear phirad;clear alpha;clear
beta;clear Ko;clear Ka;clear ps; clear pu;
if method3==7
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_georgiadis_sand{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_georgiadis_sand{1,i}(k,2);
    end
end
%average of all
p_y=zeros(3000,2);
for j=1:3000
    if N==0
        p_y(j,2)=(p_y_API{1,i}(j,2)+p_y_reese_sand{1,i}(j,2)
+p_y_novello{1,i}(j,2)+p_y_suryasentana_and_lehane{1,i}(j,2)
+p_y_oneill{1,i}(j,2)+p_y_georgiadis_sand{1,i}(j,2))/6;
    elseif qc==0
        p_y(j,2)=(p_y_API{1,i}(j,2)+p_y_reese_sand{1,i}(j,2)+
p_y_gill_sand{1,i}(j,2)+p_y_oneill{1,i}(j,2)+
p_y_georgiadis_sand{1,i}(j,2))/5;
    elseif N==0 && qc==0
        p_y(j,2)=(p_y_API{1,i}(j,2)+p_y_reese_sand{1,i}(j,2)+
p_y_oneill{1,i}(j,2)+p_y_georgiadis_sand{1,i}(j,2))/4;
    else
        p_y(j,2)=(p_y_API{1,i}(j,2)+p_y_reese_sand{1,i}(j,2)+
p_y_gill_sand{1,i}(j,2)+p_y_novello{1,i}(j,2)+
p_y_suryasentana_and_lehane{1,i}(j,2)+p_y_oneill{1,i}(j,2)+
p_y_georgiadis_sand{1,i}(j,2))/7;
    end
    p_y(j,1)=0.001*j-0.001;
end
p_y_average_sand{1,i}=p_y;
clear j; clear p_y;
if method3==8
    p_y_overall(3001:6000,i+1)=p_y_average_sand{1,i}(1:3000,2);
    for j=1:3000
        k=3001-j;
        p_y_overall(j,i+1)=-p_y_average_sand{1,i}(k,2);
    end
end
end
end
end

```

7) Προετοιμασία διαγραμμάτων p-y

```
%retrieval of p-y curves

handles.segments=segments;
handles.p_y_overall=p_y_overall;
guidata(hObject,handles);

%formation of axes, legend and plot color according to p-y method and soil type

message_about_slope_in_clay='';
message_about_slope_in_sand='';
if theta~=0
    if method4==1
        message_about_slope_in_clay='-Georgiadis';
    elseif method4==2
        message_about_slope_in_clay='-Nimityongskul';
    elseif method4==3
        message_about_slope_in_clay='-Reese';
    end
    if method5==1
        message_about_slope_in_sand='-Barker';
    elseif method5==2
        message_about_slope_in_sand='-Muthukkumaran';
    elseif method5==3
        message_about_slope_in_sand='-Reese';
    elseif method5==4
        message_about_slope_in_sand='-Gabr & Borden';
    elseif method5==5
        message_about_slope_in_sand='-Mezazigh & Levacher';
    end
end
if soil_info(depth,3)==1 || soil_info(depth,3)==2
    if method1==1
        x=p_y_matlock{1,depth}(:,1);
        y=p_y_matlock{1,depth}(:,2);
        message=sprintf('Matlock, soft clay, b=%.2fm, z=%.0fb, slope=%.1f degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
        A=rand(1,3);
    elseif method1==2
        x=p_y_georgiadis_soft{1,depth}(:,1);
        y=p_y_georgiadis_soft{1,depth}(:,2);
        message=sprintf('Georgiadis, soft clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
        A=rand(1,3);
    elseif method1==3
        x=p_y_sullivan_soft{1,depth}(:,1);
        y=p_y_sullivan_soft{1,depth}(:,2);
        message=sprintf('Sullivan, soft clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
        A=rand(1,3);
    elseif method1==4
        x=p_y_oneill_and_gazioglu_soft{1,depth}(:,1);
        y=p_y_oneill_and_gazioglu_soft{1,depth}(:,2);
        message=sprintf('O'Neill & Gazioglu, soft clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
    end
end
```

```

A=rand(1,3);
elseif method1==5
x=p_y_broms_and_choa_soft{1,depth}(:,1);
y=p_y_broms_and_choa_soft{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Broms & Choa, soft clay, b=%.2f m, z=%.0fb,
slope=%.1f degrees%s',b,depth,theta*180/pi,
message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method1==6
x=p_y_lehane{1,depth}(:,1);
y=p_y_lehane{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Lehane, soft clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method1==7
x=p_y_jeanjan{1,depth}(:,1);
y=p_y_jeanjan{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Jeanjan, soft clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method1==8
x=p_y_jeong_soft{1,depth}(:,1);
y=p_y_jeong_soft{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Jeong, soft clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method1==9
x=p_y_ngi_11{1,depth}(:,1);
y=p_y_ngi_11{1,depth}(:,2);
message=sprintf('NGI-11, soft clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method1==10
x=p_y_average_soft{1,depth}(:,1);
y=p_y_average_soft{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Average, soft clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
end
elseif soil_info(depth,3)==3 || soil_info(depth,3)==4
if method2==1
x=p_y_reese_stiff{1,depth}(:,1);
y=p_y_reese_stiff{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Reese, stiff clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method2==2
x=p_y_dewaikar{1,depth}(:,1);
y=p_y_dewaikar{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Dewaikar, stiff clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method2==3
x=p_y_broms_and_choa_stiff{1,depth}(:,1);
y=p_y_broms_and_choa_stiff{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Broms & Choa, stiff clay, b=%.2f m, z=%.0fb,
slope=%.1f degrees%s',b,depth,theta*180/pi,
message_about_slope_in_clay);

```

```

A=rand(1,3);
elseif method2==4
x=p_y_sullivan_stiff{1,depth}(:,1);
y=p_y_sullivan_stiff{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Sullivan, stiff clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method2==5
x=p_y_oneill_and_gazioglu_stiff{1,depth}(:,1);
y=p_y_oneill_and_gazioglu_stiff{1,depth}(:,2);
message=sprintf('O'Neill & Gazioglu, stiff clay, b=%.2f m, z=%.0fb,
slope=%.1f degrees%s',b,depth,theta*180/pi,
message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method2==6
x=p_y_gill_stiff{1,depth}(:,1);
y=p_y_gill_stiff{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Gill, stiff clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method2==7
x=p_y_dunnavant_and_oneill{1,depth}(:,1);
y=p_y_dunnavant_and_oneill{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Dunnavant & O'Neill, stiff clay, b=%.2f m, z=%.0fb,
slope=%.1f degrees%s',b,depth,theta*180/pi,
message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method2==8
x=p_y_welch_and_reese{1,depth}(:,1);
y=p_y_welch_and_reese{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Welch & Reese, stiff clay, b=%.2f m, z=%.0fb,
slope=%.1f degrees%s',b,depth,theta*180/pi,
message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method2==9
x=p_y_georgiadis_stiff{1,depth}(:,1);
y=p_y_georgiadis_stiff{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Georgiadis, stiff clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method2==10
x=p_y_jeong_stiff{1,depth}(:,1);
y=p_y_jeong_stiff{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Jeong, stiff clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
elseif method2==11
x=p_y_average_stiff{1,depth}(:,1);
y=p_y_average_stiff{1,depth}(:,2);
message=sprintf('Average, stiff clay, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_clay);
A=rand(1,3);
end
elseif soil_info(depth,3)==5
if method3==1
x=p_y_API{1,depth}(:,1);
y=p_y_API{1,depth}(:,2);
message=sprintf('API, sand, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f

```

```

    degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_sand);
    A=rand(1,3);
elseif method3==2
    x=p_y_reese_sand{1,depth}(:,1);
    y=p_y_reese_sand{1,depth}(:,2);
    message=sprintf('Reese, sand, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
    degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_sand);
    A=rand(1,3);
elseif method3==3
    x=p_y_gill_sand{1,depth}(:,1);
    y=p_y_gill_sand{1,depth}(:,2);
    message=sprintf('Gill, sand, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
    degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_sand);
    A=rand(1,3);
elseif method3==4
    x=p_y_novello{1,depth}(:,1);
    y=p_y_novello{1,depth}(:,2);
    message=sprintf('Novello, sand, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
    degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_sand);
    A=rand(1,3);
elseif method3==5
    x=p_y_suryasentana_and_lehane{1,depth}(:,1);
    y=p_y_suryasentana_and_lehane{1,depth}(:,2);
    message=sprintf('Suryasentana & Lehane, sand, b=%.2f m, z=%.0fb,
    slope=%.1f degrees%s',b,depth,theta*180/pi,
    message_about_slope_in_sand);
    A=rand(1,3);
elseif method3==6
    x=p_y_oneill{1,depth}(:,1);
    y=p_y_oneill{1,depth}(:,2);
    message=sprintf('Murchison & O'Neill, sand, b=%.2f m, z=%.0fb,
    slope=%.1f degrees%s',b,depth,theta*180/pi,
    message_about_slope_in_sand);
    A=rand(1,3);
elseif method3==7
    x=p_y_georgiadis_sand{1,depth}(:,1);
    y=p_y_georgiadis_sand{1,depth}(:,2);
    message=sprintf('Georgiadis, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
    degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_sand);
    A=rand(1,3);
elseif method3==8
    x=p_y_average_sand{1,depth}(:,1);
    y=p_y_average_sand{1,depth}(:,2);
    message=sprintf('Average, sand, b=%.2f m, z=%.0fb, slope=%.1f
    degrees%s',b,depth,theta*180/pi,message_about_slope_in_sand);
    A=rand(1,3);
end
end

handles.message=message;
handles.x=x;
handles.y=y;
handles.A=A;
handles.id=soil_info(depth,3);
guidata(hObject,handles);

if error==0

```

```
set(handles.instruction,'String','Analysis is ready, you may plot the
    curves or export them. ');
elseif error==2
    set(handles.instruction,'String','Nimityongskul method is very
        conservative. Analysis is ready, you may plot the curves or export
        them. ')
end
```

8) Σχεδίαση διαγραμμάτων p-y

```
% --- Executes on button press in plot.

function plot_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to plot (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
depth=str2double(get(handles.depth,'String'));
x=handles.x;
y=handles.y;
limit=str2double(get(handles.max_y,'String'));
b=str2double(get(handles.b,'String'));
message=handles.message;
hold on axes(handles.p_y_curve);
axes(handles.p_y_curve);
id=handles.id;
A=handles.A;
plot(x,y,'Color', A,'DisplayName',message, 'LineWidth',3);
title(['P-Y curve']);
xlim([0 limit]);
axis 'auto y'
ylabel('kN/m');
xlabel('m');
grid on;
legend('-DynamicLegend');
```

9) Εκκαθάριση διαγραμμάτων p-y

```
% --- Executes on button press in clear.

function clear_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to clear (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
hold off axes(handles.p_y_curve);
axes(handles.p_y_curve);
x=zeros;
y=zeros;
h=plot(x,y);
delete(h);
```


10) Εκκαθάριση δεδομένων

```
% --- Executes on button press in clear_data.

function clear_data_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to clear_data (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.b,'String','');
set(handles.L,'String','');
set(handles.Ep,'String','');
set(handles.g,'String','');
set(handles.a,'String','');
set(handles.theta,'String','');
set(handles.instruction,'String','Analysis not ready, make sure all data are
provided, methods and datasheet selected, and then Run the analysis');
```

11) Μορφοποίηση οριζοντίου άξονα διαγραμμάτων p-y

```
% --- Executes on button press in update.

function update_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to update (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
limit=str2double(get(handles.max_y,'String'));
xlim([0 limit]);
axis 'auto y';
```

12) Εξαγωγή καμπυλών p-y σε αρχείο txt

```
% --- Executes on button press in export.

function export_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to export (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
p_y_overall=handles.p_y_overall;
b=str2double(get(handles.b,'String'));
step=0.001;
check1=0.05*b;
check2=0.5*b;
check3=3;
segments1=check1/step;
segments2=(check2-check1)/step;
segments3=(check3-check2)/step;
step1=floor(segments1/50);
step2=floor(segments2/40);
```

```

step3=floor(segments3/10);
segments=handles.segments;
export_table=zeros(200,2);

for i=1:segments
    for j=1:50
        counter=j*step1-step1;
        export_table(101-j,1)=p_y_overall(3000-counter,1);
        export_table(100+j,1)=p_y_overall(3001+counter,1);
        export_table(101-j,2)=p_y_overall(3000-counter,i+1);
        export_table(100+j,2)=p_y_overall(3001+counter,i+1);
    end
    for j=1:40
        counter=49*step1+j*step2;
        export_table(51-j,1)=p_y_overall(3000-counter,1);
        export_table(150+j,1)=p_y_overall(3001+counter,1);
        export_table(51-j,2)=p_y_overall(3000-counter,i+1);
        export_table(150+j,2)=p_y_overall(3001+counter,i+1);
    end
    for j=1:10
        counter=49*step1+40*step2+j*step3;
        export_table(11-j,1)=p_y_overall(3000-counter,1);
        export_table(190+j,1)=p_y_overall(3001+counter,1);
        export_table(11-j,2)=p_y_overall(3000-counter,i+1);
        export_table(190+j,2)=p_y_overall(3001+counter,i+1);
    end
    textFileName = ['p_y curve for ratio of depth to diameter equal to '
        num2str(i) '.txt'];
    dlmwrite(textFileName,export_table,'delimiter','\t','precision',5,'newline',
        'e', 'pc');
    if i==1
        export_table_1=export_table;
    elseif i==2
        export_table_2=export_table;
    end
end
export_table_0=zeros(200,2);
export_table_0(1:200,1)=export_table_1(1:200,1);
for i=1:100
    export_table_0(100+i,2)=max(export_table_1(100+i,2)-
        (export_table_2(100+i,2)-
        export_table_1(100+i,2)),0.5*export_table_1(100+i,2));
    export_table_0(101-i,2)=-export_table_0(100+i,2);
end

textFileName = ['p_y curve for ratio of depth to diameter equal to '
    num2str(0) '.txt'];
dlmwrite(textFileName,export_table_0,'delimiter','\t','precision',5,'newline',
    'pc');
set(handles.instruction,'String',['In the file where this program is located,
there are now ',num2str(segments+1),' txt files, each containing a p-y
curve']);

```

13) Μορφοποίηση δρομέα διαγραμμάτων p-y

```
% --- Executes on button press in datacursormode.

function datacursormode_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to datacursormode (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of datacursormode
index=get(hObject,'Value');
if index==1
    datacursormode on;
    set(handles.datacursormode,'String','Toggle the data cursor mode: ON')
else
    datacursormode off;
    set(handles.datacursormode,'String','Toggle the data cursor mode: OFF')
end
Published with MATLAB® R2015a
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Αποτελέσματα Slide

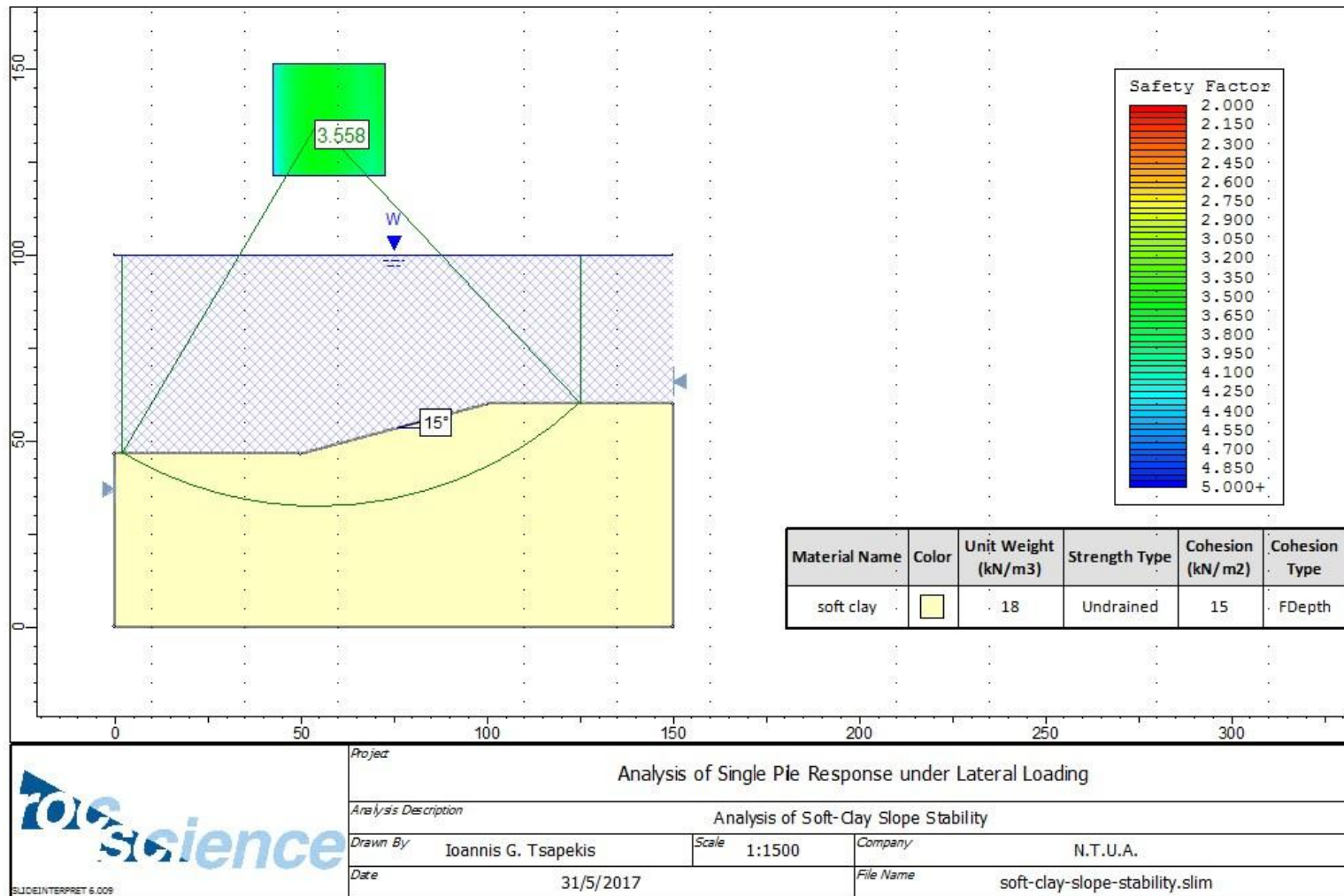
Για να εξακριβωθεί ότι οι κλίσεις πρανών που χρησιμοποιήθηκαν δεν προκαλούν αστοχία σε κανένα από τα τρία είδη εδάφους, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα της εταιρείας RocScience, Slide 6.0 και η μέθοδος επίλυσης κατά λωρίδες κατά Fellenius.

Για κάθε είδος εδάφους, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο πλάτους 150 m και πάχους 60 m ανάντη του πρανούς. Τα πρώτα και τα τελευταία 50 m του μοντέλου έχουν οριζόντιο έδαφος, ενώ τα ενδιάμεσα 50 m, έχουν κεκλιμένο έδαφος, με κλίση ίση με 30° για τη στιφρή άργιλο και την άμμο, και 15° για τη μαλακή άργιλο. Για κάθε τύπο εδάφους, χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη κλίση για την οποία έγιναν αναλύσεις με καμπύλες p-y. Από τη στιγμή που με αυτές τις μέγιστες κλίσεις, δεν υπάρχει πρόβλημα ευστάθειας, τότε προφανώς δε θα υπάρχει ούτε με τις ηπιότερες κλίσεις. Ακόμα, ορίστηκε υδροφόρος ορίζοντας λίγο πάνω από το έδαφος. Στα προβλήματα ευστάθειας, το ύψος του νερού δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα από τη στιγμή που είναι πάνω από το φρύδι του πρανούς. Επίσης, η ύπαρξη του νερού δρα θετικά στην ευστάθεια του πρανούς, καθώς το βάρος του, που ασκείται πάνω στο παρανές, αντιστέκεται στην ανατροπή άρα και στην ανάπτυξη της επιφάνειας αστοχίας.

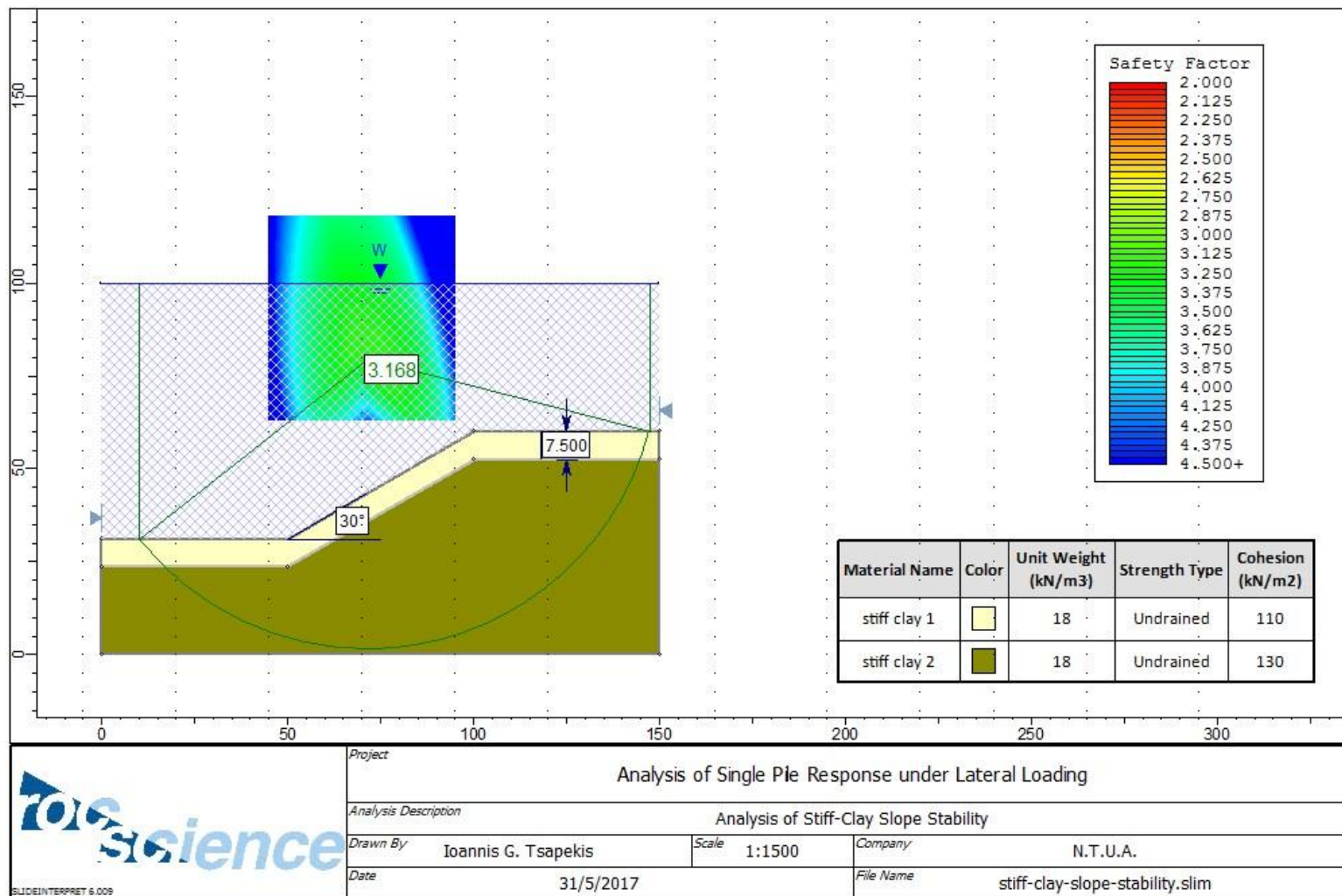
Αποδείχθηκε ότι και στα τρία είδη εδαφών, δεν υπάρχει πρόβλημα ευστάθειας. Αντιθέτως, οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας προέκυψαν όλοι πάνω από 3. Επομένως, σε καμία περίπτωση δεν τίθεται θέμα οριακής αστοχίας. Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν δίχως να κινδυνεύουν τα πρανή από διατμητική αστοχία.

Στον Πίνακα Π.Β.1 παρουσιάζονται οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας έναντι διατμητικής αστοχίας που προέκυψαν, ανά τύπο εδάφους, ενώ στις εικόνες Π.Β.1, Π.Β.2 και Π.Β.3 φαίνονται τα αποτελέσματα του προγράμματος Slide για μαλακή άργιλο, στιφρή άργιλο και άμμο αντίστοιχα.

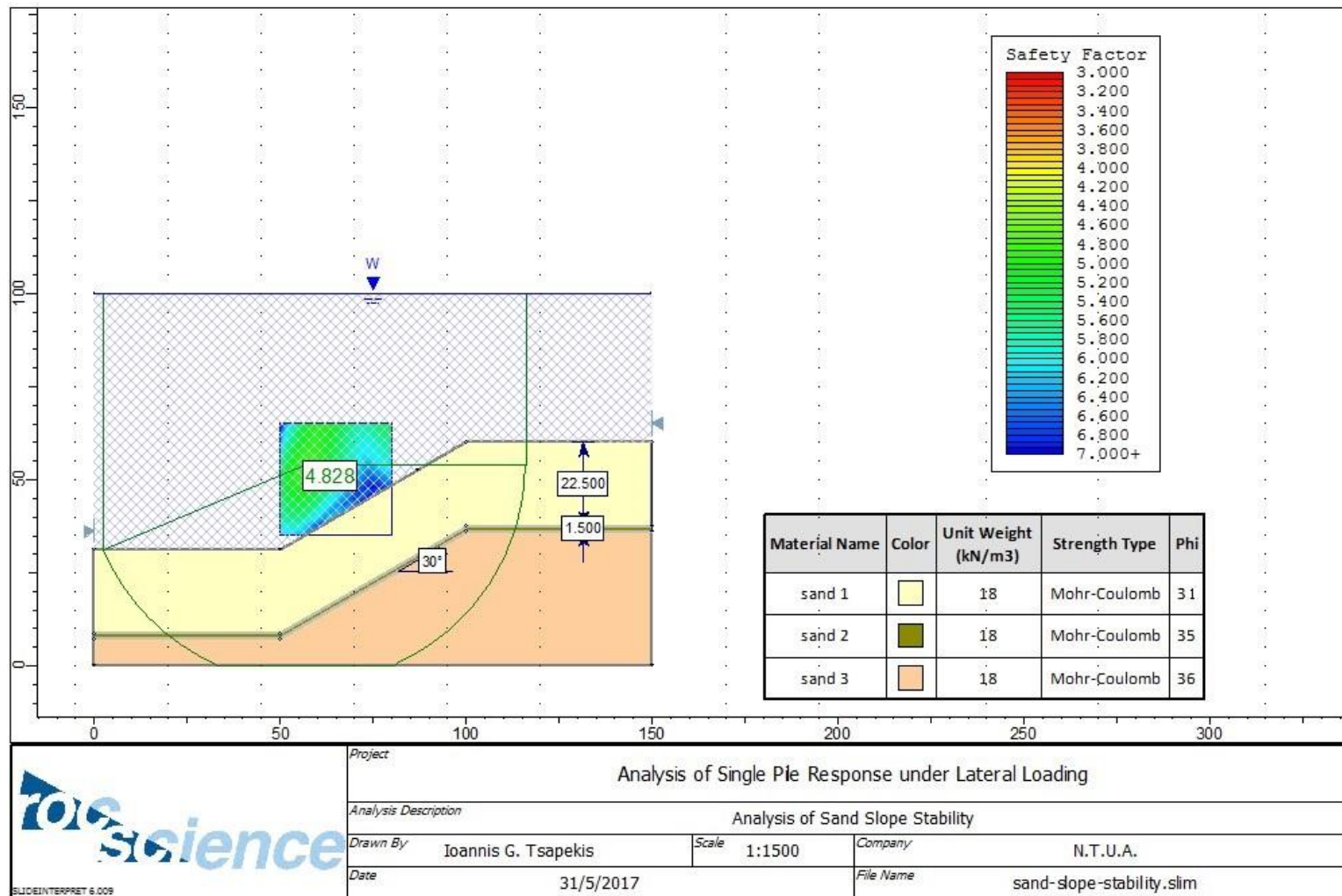
Πίνακας Π.Β.1: Ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας (F.S.min) έναντι διατμητικής αστοχίας		
Τύπος εδάφους	F.S.min	Κλίση πρανούς
Μαλακή άργιλος	3.558	15°
Στιφρή άργιλος	3.168	30°
Άμμος	4.828	30°



Εικόνα Π.Β. 1: Αποτέλεσμα ανάλυσης Slide, για πρανές από μαλακή άργιλο



Εικόνα Π.Β. 2: Αποτέλεσμα ανάλυσης Slide, για πρανές από σιφρή άργιλο



Εικόνα Π.Β. 3: Αποτέλεσμα ανάλυσης Slide, για πρανές από άμμο