





## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη μελέτη της εγκάρσιας φόρτισης μεμονωμένου πασσάλου ελεύθερα στρεπτής κεφαλής από οπλισμένο σκυρόδεμα σε μαλακή, κορεσμένη άργιλο υπό αστράγγιστες συνθήκες. Υιοθετείται γραμμική κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της άργιλου με το βάθος. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μελετάται με χρήση αριθμητικών, αναλυτικών και ημι-εμπειρικών μεθόδων για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλου.

Αρχικά, παρουσιάζονται μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος εγκάρσιας φόρτισης πασσάλου με χρήση απλοποιητικών παραδοχών όπως η θεώρηση ιδεώδους εδάφους Winkler. Επιπλέον, εισάγεται και ερμηνεύεται η μέθοδος προσομοίωσης του εδάφους με χρήση μη-γραμμικών καμπύλων p-y εδαφικής αντίδρασης - οριζόντιας μετατόπισης. Αναλύεται η διαδικασία χάραξης μη-γραμμικών καμπύλων p-y σύμφωνα με τις εξής μεθοδολογίες: Matlock (1970), Νορβηγικοί Κανονισμοί (DnV 1977) και Γεωργιάδη (2010). Για την εκάστοτε μεθοδολογία διερευνάται παραμετρικά η επιρροή επιλεγμένων συντελεστών στη μορφή των καμπύλων p-y.

Οι μη-γραμμικές καμπύλες p-y των ανωτέρω μεθοδολογιών εισάγονται σε κατάλληλο λογισμικό με σκοπό την πρόβλεψη καμπύλων εγκάρσιου φορτίου - οριζόντιας μετατόπισης κεφαλής και κατανομών οριζόντιων μετατοπίσεων και καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου. Τα παραπάνω διαγράμματα χρησιμοποιούνται σε μία προσπάθεια σύγκρισης των υφιστάμενων μεθοδολογιών χάραξης καμπύλων p-y. Οι έντονες διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των αποτελεσμάτων υπαγορεύουν τη διερεύνηση της οριακής εδαφικής αντίδρασης κατά μήκος του πασσάλου ( $p_{ult}$ ).

Στην πορεία της εργασίας χρησιμοποιείται ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10 για τη μόρφωση τριδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος πασσάλου-εδάφους. Εξετάζεται η επιρροή του αστράγγιστου μέτρου ελαστικότητας ( $E_u$ ), του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ( $k_o$ ) και του συντελεστή διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους ( $\alpha$ ) σε ενδεικτικά αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων. Ειδικότερα, συγκρίνονται διαγραμματικά καμπύλες p-y, καμπύλες εγκάρσιου φορτίου-οριζόντιας μετατόπισης κεφαλής και κατανομές οριζόντιων μετατοπίσεων και καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου. Η συμπεριφορά του εδάφους καθορίζεται από συγκεκριμένο ελαστικό-απολύτως πλαστικό καταστατικό προσομοίωμα.

Στο τελικό μέρος της εργασίας επιχειρείται ο προσδιορισμός της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) από τα αποτελέσματα αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Η συγκεκριμένη προσπάθεια στοχεύει στην εκτίμηση εύρους τιμών του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $N_p$ ) και τη χάραξη συγκεντρωτικών διαγραμμάτων κατανομής του εν λόγω συντελεστή με το βάθος. Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών κατά μήκος του πασσάλου, όπως υπολογίζονται από τις προαναφερθείσες μεθοδολογίες χάραξης καμπύλων p-y, με τα αντίστοιχα των αριθμητικών αναλύσεων.

**Λέξεις-κλειδιά:** πάσσαλος, εγκάρσια φόρτιση, μαλακή άργιλος, μη-γραμμικές καμπύλες p-y, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.



## Abstract

The purpose of the present diploma thesis is the study of the undrained lateral response of a single, free-head, reinforced concrete pile in soft saturated clays. A linear distribution of the undrained shear strength with depth is being adopted. The specific problem is analyzed using numerical, analytical and semi-empirical methods for the simulation of the pile-soil interaction.

At the beginning, analytical methods are presented for solving the problem of the laterally loaded pile based on simplifying assumptions, such as the approach of the ideal Winkler soil. In addition, soil simulation using non-linear p-y curves (soil resistance - horizontal displacement) is thoroughly presented. The procedure for computation of p-y curves according to the following methodologies is demonstrated: Matlock (1970), Norwegian Regulations (DnV 1977) and Georgiadis (2010). A parametric study of specific factors dominating the form of p-y curves is carried out for each of these methodologies.

The non-linear p-y curves of the above methodologies are imported into a suitable software in order to predict diagrams of the lateral load versus horizontal displacement of the pile head and curves demonstrating the distribution of the horizontal displacement and bending moment along the pile. A comparison of existing methodologies for the development of p-y curves is attempted through the aforementioned graphs. The striking differences observed, impose the investigation of the ultimate soil resistance along the pile ( $p_{ult}$ ).

Subsequently, the computer finite element code Abaqus 6.10 is used for the three-dimensional numerical simulation of the pile-soil interaction. The influence of the undrained modulus of elasticity ( $E_u$ ), coefficient of subgrade reaction ( $k_o$ ) and adhesion factor ( $\alpha$ ) on the results of parametric analyses is studied. Specifically, p-y curves, diagrams of the lateral load versus horizontal displacement of the pile head and curves demonstrating the distribution of the horizontal displacement and bending moment along the pile are compared. The behavior of the soil is controlled by a specific elastic-perfectly plastic constitutive model.

In the final part of the thesis, the determination of the ultimate soil resistance ( $p_{ult}$ ) is attempted based on the results of the finite element analyses. The specific procedure aims at the estimation of a range of values for the ultimate soil resistance coefficient ( $N_p$ ) and the derivation of summarized diagrams depicting the distribution of the above coefficient with depth. Finally, the results of structural variables along the pile calculated through the aforementioned methodologies for the computation of p-y curves are compared to the numerical analyses results.

**Keywords:** pile, lateral loading, soft clay, finite element analysis, non-linear p-y curves, finite element method.



## *Ευχαριστίες*

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ.Μιγάλη Καββαδά για την καθοδήγησή και τη βοήθειά του σε κάθε στάδιο δημιουργίας της. Επίσης, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα κ.Κωνσταντίνο Τζιβάκο, η συνεισφορά του οποίου ήταν ιδιαίτερα σημαντική για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Τέλος, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για τη διαρκή υποστήριξή της, που επέτρεψε την επιτυχή διεκπεραίωση των σπουδών μου.

Μανουσέλη Ερμιόνη  
Αθήνα 2012





## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Περιεχόμενα .....	vii
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> : Ακριβείς μέθοδοι ανάλυσης.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Προσομοίωση του εδάφους με βάση τη θεώρηση ιδεώδους εδάφους Winkler .....	1
1.2.1 Δείκτης εδάφους.....	1
1.2.2 Κρίσιμο μήκος.....	2
1.2.3 Μέθοδος Matlock και Reese (1956, 1960).....	4
1.2.4 Μέθοδος Davisson και Gill (1963).....	5
1.2.5 Διαφορική εξίσωση για τη μόρφωση καμπύλων p-y .....	6
1.3 Προσομοίωση του εδάφους ως ελαστικού ισότροπου ημιχώρου.....	18
1.4 Εξιδανίκευση προβόλου .....	22
1.5 Μέθοδος Broms.....	23
1.5.1 Κοντός ελεύθερα στρεπτής κεφαλής πάσσαλος.....	24
1.5.2 Κοντός δεσμευμένης κεφαλής πάσσαλος.....	25
1.5.3 Μακρύς ελεύθερα στρεπτής κεφαλής πάσσαλος .....	26
1.5.4 Μακρύς δεσμευμένης κεφαλής πάσσαλος .....	26
1.5.5 Μετατόπιση πασσάλων .....	26
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> : Μέθοδοι χάραξης μη-γραμμικών καμπύλων p-y .....	29
2.1 Ιστορικό.....	29
2.2 Χαρακτηριστικά καμπύλων p-y .....	29
2.3 Επιρροή της διαμέτρου.....	30
2.4 Προτάσεις για τον προσδιορισμό καμπύλων p-y σε συνεκτικά εδάφη .....	30
2.5 Επιλογή της δυσκαμψίας της αργίλου .....	32
2.6 Χάραξη καμπύλων p-y για μαλακές, κορεσμένες αργίλους.....	33
2.6.1 Χάραξη καμπύλων p-y κατά Matlock(1970) .....	33
2.6.2 Χάραξη καμπύλων p-y κατά τους Νορβηγικούς κανονισμούς (1977).....	40
2.6.3 Καμπύλες p-y κατά Γεωργιάδη (2010) .....	44
2.6.4 Συμπεριφορά της αργίλου κατά API (American Petroleum Institute). .....	48
2.7 Χάραξη καμπύλων p-y για στιφρή, κορεσμένη άργιλο κατά τους Reese et al. (1975).....	49
2.8 Χάραξη καμπύλων p-y σε στιφρή, μη-κορεσμένη άργιλο κατά Welch & Reese (1972).....	55
2.9 Προτάσεις για τη χάραξη καμπυλών p-y σε έδαφος με συνοχή και γωνία τριβής.....	57
2.10 Παρατηρήσεις επί των καμπύλων p-y για μαλακές κορεσμένες αργίλους .....	59
2.11 Συγκεντρωτική καταγραφή μεθοδολογιών υπολογισμού του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης $N_p$ .....	60
2.11.1 Μεθοδολογία κατά Hansen (1961).....	60

2.11.2	Μεθοδολογία κατά Broms (1964).....	61
2.11.3	Μεθοδολογία κατά Matlock (1970) .....	61
2.11.4	Μεθοδολογία κατά τους Νορβηγικούς κανονισμούς DnV (1977).....	61
2.11.5	Μεθοδολογία κατά Sullivan (1979) .....	61
2.11.6	Μεθοδολογία κατά Stevens & Audibert (1979).....	62
2.11.7	Μεθοδολογία κατά Randolph-Houlsby (1984) .....	62
2.11.8	Μεθοδολογία κατά Murf-Hamilton (1993) .....	63
2.11.9	Μεθοδολογία κατά API 2000 (RP 2A-WSD) .....	64
2.11.10	Μεθοδολογία κατά Zhang-Ahmari (2009).....	64
2.11.11	Μεθοδολογία κατά Γεωργιάδη (2010) .....	64
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> : Εντατικά μεγέθη με χρήση μη-γραμμικών καμπύλων p-y.....	67
3.1	Παραδείγματα χάραξης μη γραμμικών καμπύλων p-y σε μαλακή, κορεσμένη άργιλο .....	67
3.1.1	Χάραξη καμπύλων p-y για μαλακή κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο κατά Matlock (1970).....	67
3.1.2	Χάραξη καμπύλων p-y για μαλακή κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σύμφωνα με τους Νορβηγικούς Κανονισμούς (1977) .....	69
3.1.3	Χάραξη καμπύλων p-y για μαλακή κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σύμφωνα με τη μέθοδο του Γεωργιάδη (2010).....	71
3.2	Συγκριτικά διαγράμματα καμπύλων p-y .....	72
3.2.1	Συγκριτικά διαγράμματα καμπύλων p-y για A=0.15 .....	73
3.2.2	Συγκριτικά διαγράμματα καμπύλων p-y για A=0.25 .....	74
3.2.3	Συγκριτικά διαγράμματα καμπύλων p-y για A=0.35 .....	75
3.2.4	Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα .....	75
3.3	Χρήση του κώδικα Latpile .....	76
3.3.1	Εισαγωγή.....	76
3.3.2	Μεθοδολογία του κώδικα Latpile.....	76
3.4	Εντατικά μεγέθη αναλύσεων με χρήση του κώδικα Latpile .....	78
3.4.1	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για A=0.15.....	79
3.4.2	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για A=0.25.....	82
3.4.3	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για A=0.35.....	84
3.4.4	Παρατηρήσεις και συμπεράσματα .....	87
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> : Παραμετρική διερεύνηση της εγκάρσιας φόρτισης πασσάλου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων .....	89
4.1	Εισαγωγή.....	89
4.2	Σχεδίαση προσομοιώματος πασσάλου-εδάφους .....	89
4.2.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά .....	89
4.2.2	Διακριτοποίηση προσομοιωμάτων πασσάλου-εδάφους.....	90
4.2.3	Συνοριακές συνθήκες .....	92

4.3	Ιδιότητες προσομοιώματος εδάφους-πασσάλου.....	92
4.3.1	Ιδιότητες εδάφους.....	92
4.3.2	Ιδιότητες πασσάλου.....	97
4.4	Βήματα παραμετρικών αναλύσεων.....	97
4.5	Διερεύνηση της προσομοίωσης του συστήματος πασσάλου-εδάφους.....	98
4.5.1	Διερεύνηση της προσομοίωσης του πασσάλου.....	98
4.5.2	Διερεύνηση διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους.....	102
4.5.3	Διερεύνηση προσομοίωσης του εδάφους.....	106
4.5.4	Διερεύνηση των συνόρων του προσομοιώματος.....	108
4.6	Αποτελέσματα παραμετρικής διερεύνησης για τα εντατικά μεγέθη του πασσάλου.....	111
4.6.1	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.15$ .....	112
4.6.2	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.25$ .....	117
4.6.3	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.35$ .....	121
4.6.4	Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα διαγραμμάτων $H-y_o$ , $y-z$ , $M-z$ .....	126
4.7	Παραμετρική διερεύνηση υπολογισμού της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ).....	126
4.7.1	Προσδιορισμός της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ).....	126
4.7.2	Επαλήθευση διαδικασίας προσδιορισμού της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ )....	128
4.7.3	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.15$ .....	129
4.7.4	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.25$ .....	134
4.7.5	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.35$ .....	139
4.7.6	Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα μη-γραμμικών καμπύλων $p-y$ .....	144
4.7.7	Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ).....	145
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> : Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων χάραξης μη-γραμμικών καμπύλων $p-y$ και μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.....	147
5.1	Χαρακτηριστικά αριθμητικών μεθόδων.....	147
5.1.1	Χαρακτηριστικά θεωρητικών μεθόδων χάραξης καμπύλων $p-y$ .....	147
5.1.2	Χαρακτηριστικά αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία.....	148
5.2	Συγκριτικά διαγράμματα κατανομής του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης $N_p$ ... 149	149
5.2.1	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.15$ .....	149
5.2.2	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.25$ .....	151
5.2.3	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.35$ .....	153
5.2.4	Συμπεράσματα συγκριτικών διαγραμμάτων $N_p-z/D$ .....	154
5.3	Συγκριτικά διαγράμματα $H-y_o$ , $y-z$ , $M-z$ .....	155
5.3.1	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.15$ .....	155
5.3.2	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.25$ .....	158
5.3.3	Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.35$ .....	160
5.3.4	Παρατηρήσεις συγκριτικών διαγραμμάτων $H-y_o$ , $y-z$ και $M-z$ .....	163

6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 <sup>ο</sup> : Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις-Προτάσεις .....	165
6.1	Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις .....	165
6.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	167
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	169
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	205

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Ακριβείς μέθοδοι ανάλυσης

## 1.1 Εισαγωγή

Οι οριζόντιες φορτίσεις που επιβάλλονται στις θεμελιώσεις με πασσάλους μπορεί να προέρχονται είτε από οριζόντιες δυνάμεις στην κεφαλή του πασσάλου, για παράδειγμα λόγω ανεμοπιέσεων και σεισμικών δυνάμεων, είτε από φορτίσεις κατά μήκος της παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου, όπως στην περίπτωση πασσαλοτοίχων και πασσάλων θεμελίωσης βάθρων γέφυρας. Η φόρτιση μπορεί να χαρακτηριστεί είτε στατική (βραχυχρόνια) είτε δυναμική, η οποία πιθανόν να οφείλεται σε πρόσκρουση πλοίου ή επαναλαμβανόμενη φόρτιση λόγω σεισμού ή καταιγίδας. Για συγκεκριμένους πασσάλους, όπως είναι οι πάσσαλοι που χρησιμοποιούνται για την πρόσδεση των πλοίων, οι δυνάμεις πρόσκρουσης συχνά θεωρούνται στατικές φορτίσεις κατά το σχεδιασμό. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η περίπτωση στατικής φόρτισης στην κεφαλή του πασσάλου, η οποία θεωρείται ότι συμπίπτει με το επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους.

Κατά το σχεδιασμό μεμονωμένων πασσάλων υποβαλλόμενων σε οριζόντια φορτία, κυριότερο κριτήριο στις περισσότερες περιπτώσεις δεν αποτελεί το οριακό φορτίο, αλλά η μέγιστη επιτρεπόμενη μετακίνηση του πασσάλου. Συνεπώς, καθίσταται απαραίτητη για το σχεδιασμό η χρήση μεθόδων ανάλυσης της συνολικής λειτουργίας του συστήματος πασσάλου-εδάφους. Ανάλογα με την παραδοχή συγκεκριμένου εδαφικού προσομοιώματος, αναφορικά με τις παραμορφώσεις, οι μέθοδοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Πρώτη κατηγορία αποτελεί η προσομοίωση του εδάφους ως μονοπαραμετρικού ελατηριωτού μέσου κατά τη θεωρία του δείκτη εδάφους Winkler και η δεύτερη αντιστοιχεί στην προσομοίωση του εδάφους ως ελαστικού, ισότροπου ημιχώρου, όπου εφαρμόζεται η θεωρία της ελαστικότητας. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση μεθόδων ανάλυσης από τη βιβλιογραφία.

## 1.2 Προσομοίωση του εδάφους με βάση τη θεώρηση ιδεώδους εδάφους Winkler

### 1.2.1 Δείκτης εδάφους

Η τιμή του δείκτη εδάφους επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα πολλών από τις μεθόδους υπολογισμού πασσάλων υπό εγκάρσια φόρτιση. Επομένως, απαραίτητος καθίσταται ο προσδιορισμός του δείκτη εδάφους ( $k$ ) ανάλογα με τον εκάστοτε τύπο εδάφους. Θεωρώντας ότι το έδαφος αποτελείται από γραμμικά ελατήρια και ότι ο δείκτης εδάφους αντιστοιχεί στην ακαμψία των ελατηρίων, γίνεται η παραδοχή ότι η πλευρική πίεση επί του πασσάλου συνδέεται με την αντίστοιχη πλευρική μετατόπισή του μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$k_h = p / y \quad (1.1)$$

Η παραδοχή αυτή βασίζεται σε δοκιμαστικές φορτίσεις, στις οποίες έχει παρατηρηθεί ότι η επιβολή σχετικά μικρών οριζόντιων φορτίων προκαλεί πλευρική μετατόπιση, η οποία αυξάνει σχεδόν αναλογικά με την αύξηση του φορτίου. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι ο δείκτης εδάφους δεν αποτελεί ιδιότητα του εδαφικού υλικού, καθώς εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως είναι: το μέγεθος της εφαρμοζόμενης πίεσης, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας επί της οποίας εφαρμόζεται η πίεση αυτή και το βάθος εφαρμογής της.

Ο δείκτης εδάφους  $k_h$  είναι ανάλογος του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα του εδάφους καθώς και την ενεργό τάση εξ υπερκείμενων γαιών. Συνεπώς, ο δείκτης εδάφους  $k_h$  θα αυξάνεται με το βάθος σύμφωνα με τη σχέση:

$$k_h = n_h \left( \frac{z}{B} \right)^n \quad (1.2)$$

Όπου  $z$  το βάθος,  $B$  η διάμετρος του πασσάλου και  $n_h$  σταθερά η οποία εκφράζει την ταχύτητα αύξησης του  $k_h$  με το βάθος σε μονάδες δύναμη/μήκος<sup>3</sup>.

Ο δείκτης εδάφους μεταβάλλεται γραμμικά στην περίπτωση κανονικά φορτισμένων αργίλων ( $n=1$ ) και εκθετικά για μη συνεκτικά εδάφη ( $n = 0,5 - 1$ ). Η χρήση του εκθετικού νόμου μεταβολής του δείκτη  $k_h$  αποτελεί προσπάθεια ορισμένων ερευνητών να προσεγγίσουν τη μη γραμμικότητα των σχέσεων φορτίου-μετατόπισης στα πραγματικά εδάφη. Η σταθερά  $n_h$  για τα συνεκτικά εδάφη εξαρτάται από την ταχύτητα αύξησης της διατμητικής αντοχής με το βάθος και παίρνει τιμές 1-2 tons/ft<sup>3</sup> (350-700kN/m<sup>3</sup>) για μαλακές, κανονικά στερεοποιημένες αργίλους. Στην περίπτωση κανονικά στερεοποιημένης αργίλου, όπου η διατμητική αντοχή και ακολούθως το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με το βάθος, αντίστοιχη αναμένεται να είναι και η αύξηση του δείκτη εδάφους. Αντιθέτως, κατά τη μελέτη υπερστερεοποιημένης αργίλου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο δείκτης παραμένει σταθερός σε όλο το βάθος, καθώς σταθερή θεωρείται και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή.

Αναφέρουμε ότι συγκεκριμένοι ερευνητές χρησιμοποιούν στις αναλύσεις τους στη θέση του δείκτη εδάφους  $k_h$ , το μέτρο του δείκτη εδάφους  $K$  για το οποίο ισχύει η εξής σχέση:

$$K = k_h B \quad (1.3)$$

όπου  $B$  είναι η διάμετρος ή το πλάτος του πασσάλου. Το μέτρο αυτό εκφράζεται σε μονάδες πίεσης και αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στο μέτρο ελαστικότητας  $E$  (kN/m<sup>2</sup>).

Ο υπολογισμός του δείκτη εδάφους γίνεται, εκτός από δοκιμαστικές φορτίσεις πασσάλων και με δοκιμαστικές φορτίσεις πλακών και χρήση κατάλληλων εμπειρικών συσχετίσεων ανάλογα με τον τύπο του εδάφους καθώς και με εμπειρικούς συσχετισμούς αποτελεσμάτων εργαστηριακών ή επί τόπου δοκιμών. Τέλος, σημειώνεται ότι απαιτείται γραμμική συσχέτιση μεταξύ τάσεων-μετακινήσεων για την εφαρμογή μεθόδων ανάλυσεως που θεωρούν το έδαφος ως ελαστικό μέσον. Για το λόγο αυτό, ο Terzaghi δέχεται ότι οι σχέσεις που προτείνει για την εκτίμηση του δείκτη εδάφους  $k_h$  ισχύουν μόνο στην περίπτωση που οι επιβαλλόμενες τάσεις από τον πάσσαλο στο έδαφος δεν υπερβαίνουν το 50% της φέρουσας ικανότητας του εδάφους έναντι θραύσεως.

### 1.2.2 Κρίσιμο μήκος

Η ανάλυση της απόκρισης πασσάλων υπό εγκάρσια φόρτιση αντιμετώπισε αρχικά το έδαφος ως μια σειρά από ελατήρια κατά μήκος του πασσάλου γνωστό και ως μοντέλο Winkler, Σχήμα 1.1. Η ακαμψία του ελατηρίου  $k$ , όπως έχει ήδη αναφερθεί, ορίζεται ως μέτρο δείκτη εδάφους, εκφράζοντας το φορτίο που επιβάλλεται ανά μονάδα μήκους του πασσάλου και προκαλείται για μοναδιαία πλευρική μετατόπιση. Αν θεωρηθεί ότι ο δείκτης εδάφους  $k$  παραμένει σταθερός ανεξαρτήτως βάθους, τότε αναλυτικές λύσεις δύνανται να δώσουν την παραμορφωμένη μορφή του πασσάλου καθώς και την κατανομή τεμνουσών δυνάμεων και καμπτικών ροπών κατά μήκος του (Matlock και Reese, 1960). Για έναν πάσσαλο με δεδομένο μέτρο ελαστικότητας  $E$  και ροπή αδράνειας  $I_p$  σε έδαφος με δείκτη εδάφους  $k$  υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος πέραν του οποίου ο πάσσαλος συμπεριφέρεται σαν να ήταν απείρως μακρύς. Αυτό το κρίσιμο μήκος υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$L_c = 4 \left[ (EI)_p / k \right]^{1/4} \quad (1.4)$$

Η επίδραση του φορτίου που εφαρμόζεται στην κορυφή του πασσάλου είναι μηδενική από κάποια συγκεκριμένη τιμή του βάθους και έπειτα. Στην πραγματικότητα, η πλειοψηφία των πασσάλων που συναντώνται στην πράξη συμπεριφέρονται ως εύκαμπτοι. Για αυτούς τους πασσάλους, η οριζόντια μετατόπιση,  $u$ , και η στροφή,  $\theta$ , στην επιφάνεια του εδάφους, λόγω φορτίου,  $H$ , και καμπτικής ροπής,  $M$ , υπολογίζονται από τους τύπους:

$$u = \sqrt{2} \frac{H}{k} \left( \frac{L_c}{4} \right)^{-1} + \frac{M}{k} \left( \frac{L_c}{4} \right)^{-2} \quad (1.5)$$

$$\theta = \frac{H}{k} \left( \frac{L_c}{4} \right)^{-2} + \sqrt{2} \frac{M}{k} \left( \frac{L_c}{4} \right)^{-3} \quad (1.6)$$

Παρόμοιες εκφράσεις για το κρίσιμο μήκος και για την οριζόντια μετατόπιση μπορούν να ληφθούν για τις περιπτώσεις όπου η τιμή του συντελεστή  $k$  ποικίλλει ανάλογα με το βάθος και ιδιαίτερα όταν αυτός μεταβάλλεται αναλογικά με το βάθος (Reese και Matlock, 1956).

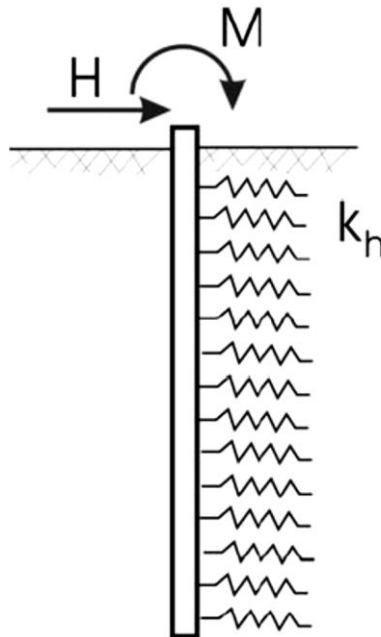
Για τις περιπτώσεις όπου ο δείκτης εδάφους μεταβάλλεται γραμμικά με το βάθος, το κρίσιμο μήκος,  $L_c$ , μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$L_c = 4 \left[ (EI)_p / k \right]^{1/5} \quad (1.7)$$

Οι αντίστοιχες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του εδάφους υπολογίζονται από τους τύπους:

$$u = 2.34 \frac{H}{n} \left( \frac{L_c}{4} \right)^{-2} + 1.62 \frac{M}{n} \left( \frac{L_c}{4} \right)^{-3} \quad (1.8)$$

$$\theta = 1.62 \frac{H}{n} \left( \frac{L_c}{4} \right)^{-3} + 1.73 \frac{M}{n} \left( \frac{L_c}{4} \right)^{-4} \quad (1.9)$$



**Σχήμα 1.1:** Προσομοίωμα του εδάφους κατά το μοντέλο Winkler

Οι σύγχρονες υπολογιστικές τεχνικές επέτρεψαν την επέκταση της παραπάνω προσέγγισης ώστε να μπορούν να συμπεριληφθούν μη-γραμμικά ελατήρια στην προσομοίωση του εδάφους. Στη θέση του συντελεστή  $k$  καθορίζεται μία πλήρης καμπύλη φορτίου-μετατόπισης ( $p$ - $y$ ). Η προσομοίωση της κάμψης του πασσάλου επέτρεψε τη δημιουργία μίας πλήρους καμπύλης (Reese, 1977). Τυπικές μορφές καμπύλων  $p$ - $y$  έχουν παρουσιαστεί για πασσάλους σε άμμο από τους Reese et al. (1974) και για πασσάλους σε άργιλο από τους Matlock (1970), Dunnivant και O'Neill (1989). Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως για το σχεδιασμό πασσάλων σε παράκτια έργα, η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης

παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και κυρίως στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Λογισμικά, όπως το LPILE (Reese και Wang, 1993) ή το PYGMY (Stewart, 1999) περιλαμβάνουν αλγόριθμους για τη χάραξη καμπύλων p-y και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μη-γραμμική ανάλυση μεμονωμένων πασσάλων. Ωστόσο, η γραμμική ανάλυση επαρκεί για τις χερσαίες εφαρμογές, ιδιαίτερα όταν οι πάσσαλοι κατασκευάζονται σε ομάδες.

### 1.2.3 Μέθοδος Matlock και Reese (1956, 1960)

Αποτελεί μία γενική μέθοδο προσδιορισμού της μετατόπισης, της στροφής, της ροπής κάμψης, της τέμνουσας δύναμης καθώς και των εδαφικών αντιδράσεων επί κατακόρυφου πασσάλου σε οριζόντιο έδαφος Winkler, ο οποίος καταπονείται από εγκάρσιο συγκεντρωμένο φορτίο (H) και ροπή (M<sub>t</sub>) στην κεφαλή του. Η μέθοδος προϋποθέτει δείκτη εδάφους k<sub>h</sub> γραμμικά μεταβαλλόμενο με το βάθος και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις κανονικά φορτισμένων αργίλων και άμμων.

#### 1.2.3.1 Πάσσαλος με ελεύθερη κεφαλή

Για την περίπτωση πασσάλου με ελεύθερη κεφαλή, τα προαναφερθέντα εντατικά μεγέθη προσδιορίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\text{Μετατόπιση:} \quad y = \frac{A_y H T^3}{E_p I_p} + \frac{B_y M_t T^3}{E_p I_p} \quad (1.10)$$

$$\text{Κλίση:} \quad S = \frac{A_s H T^3}{E_p I_p} + \frac{B_s M_t T^3}{E_p I_p} \quad (1.11)$$

$$\text{Ροπή κάμψεως:} \quad M = A_m H T + B_m M_t \quad (1.12)$$

$$\text{Διατμητική δύναμη:} \quad Q = A_v H + \frac{B_v M_t}{T} \quad (1.13)$$

$$\text{Εδαφική αντίδραση} \quad p = \frac{A_p H}{T} + \frac{B_p M_t}{T^2} \quad (1.14)$$

$$\text{Όπου } T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}} \quad (1.15)$$

Το T αντιστοιχεί στο «ελαστικό μήκος», σύμφωνα με το οποίο ορίζεται η σχετική ακαμψία του συστήματος πασσάλου-εδάφους, A<sub>y</sub>, B<sub>y</sub> συντελεστές μετατόπισης, A<sub>s</sub>, B<sub>s</sub> συντελεστές κλίσεως, A<sub>m</sub>, B<sub>m</sub> συντελεστές ροπής κάμψεως, A<sub>v</sub>, B<sub>v</sub> συντελεστές διατμητικής δύναμης και A<sub>p</sub>, B<sub>p</sub> συντελεστές εδαφικής αντίδρασης.

#### 1.2.3.2 Πάσσαλος πακτωμένης κεφαλής

Οι εξισώσεις που προσδιορίζουν την κατανομή των εντατικών μεγεθών πασσάλου-εδάφους με το βάθος για την περίπτωση πασσάλου πακτωμένης κεφαλής είναι οι εξής:

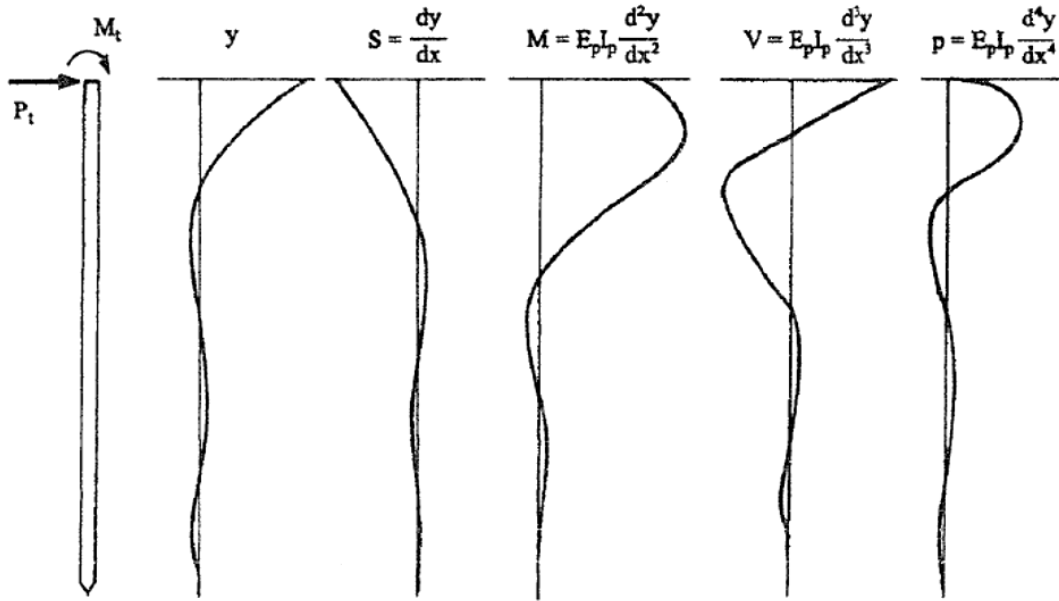
$$\text{Μετατόπιση:} \quad y_F = \frac{F_y H T^3}{E_p I_p} \quad (1.16)$$

$$\text{Ροπή κάμψεως:} \quad M_F = F_m H T \quad (1.17)$$

$$\text{Εδαφική αντίδραση} \quad p_F = F_p \frac{H}{T} \quad (1.18)$$



Όπου  $F_y$ ,  $F_m$ ,  $F_p$ , αδιάστατοι συντελεστές μετατόπισης, ροπής κάμψης και εδαφικής αντίδρασης, οι οποίοι υπολογίζονται με τη βοήθεια διαγραμμάτων κατά Matlock και Reese.



Σχήμα 1.2: Κατανομή εντατικών μεγεθών,  $y$ ,  $S$ ,  $M$ ,  $Q$ , και  $p$  με το βάθος  $z$ .

### 1.2.4 Μέθοδος Davisson και Gill (1963)

Η συγκεκριμένη μέθοδος αφορά την ανάλυση του πασσάλου ως ελαστική δοκός σε ελαστικό έδαφος, του οποίου ο δείκτης εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση  $k$  είναι σταθερός σε όλο το βάθος.

#### 1.2.4.1 Πάσσαλος με ελεύθερη κεφαλή

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των καμπτικών ροπών και των οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος πασσάλου με ελεύθερη κεφαλή γίνεται χρήση ενός συντελεστή σχετικής ακαμψίας,  $R$  καθώς και ενός αδιάστατου συντελεστή βάθους,  $I = z/R$ , όπου  $z$  το βάθος. Με τη βοήθεια των συντελεστών αυτών και αντίστοιχων διαγραμμάτων γίνεται εφικτή η εύρεση των συντελεστών μετατόπισης,  $y_m$  και καμπτικής ροπής,  $M_m$ , οι οποίοι με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις υπολογισμού της μετατόπισης,  $y$ , και της καμπτικής ροπής,  $M$ , (εξισώσεις 1.19-1.22). Τα διαγράμματα αφορούν πασσάλους ελεύθερα στρεπτής κεφαλής, οι οποίοι φέρουν στην κεφαλή τους είτε ροπή,  $M$  και μηδενικό οριζόντιο φορτίο είτε οριζόντιο φορτίο,  $H$ , και μηδενική ροπή. Οι εξισώσεις εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου είναι οι παρακάτω:

Για ροπή,  $M$  και μηδενικό οριζόντιο φορτίο:

- Μετατόπιση: 
$$y_1 = M y_m \frac{R^2}{E_p I_p} \quad (1.19)$$

- Καμπτική ροπή: 
$$M_1 = M * M_m \quad (1.20)$$

Για οριζόντιο φορτίο,  $H$  και μηδενική ροπή:

- Μετατόπιση: 
$$y_1 = H y_h \frac{R^3}{E_p I_p} \quad (1.21)$$

- Καμπτική ροπή  $M_1 = HM_h R$  (1.22)

όπου, ο συντελεστής ακαμψίας, R, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = \sqrt[4]{\frac{EpJp}{kB}} \quad (1.23)$$

B= διάμετρος πασσάλου,

k= δείκτης εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση,  $k = \frac{k_t}{1.5B}$  για αργίλους και  $k_t$  δείκτης εδάφους κατά Terzaghi, όπως προκύπτει από την κατακόρυφη φόρτιση τετραγωνικής πλάκας πλάτους 1ft,  $I_{max} = \frac{L}{R}$ , όπου L το μήκος του πασσάλου.

Στην περίπτωση πασσάλων μήκους, L, με ελεύθερη κεφαλή, τα κριτήρια ακαμψίας που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

- $L < 2R$ ,  $\rightarrow$  ο πάσσαλος θεωρείται άκαμπτος,
- $L > 3.5R \rightarrow$  ο πάσσαλος θεωρείται εύκαμπτος.

#### 1.2.4.2 Πάσσαλος πακτωμένης κεφαλής

Η περίπτωση πασσάλου πακτωμένης κεφαλής μπορεί να επιλυθεί με τον ίδιο τρόπο που επιλύθηκε η περίπτωση πασσάλου ελεύθερης κεφαλής. Αρχικά υπολογίζονται οι μετατοπίσεις, y, με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω. Στη συνέχεια, επιβάλλεται μία ιδεατή ροπή στην κεφαλή του πασσάλου, τέτοια ώστε να μηδενιστεί η στροφή. Οι μετατοπίσεις που προκαλούνται εξαιτίας αυτής της καμπτικής ροπής αφαιρούνται απ' αυτές που υπολογίστηκαν αρχικά με τη μεθοδολογία πασσάλου ελεύθερα στρεπτής κεφαλής.

### 1.2.5 Διαφορική εξίσωση για τη μόρφωση καμπύλων p-y

Μία μέθοδος ανάλυσης της εγκάρσιας φόρτισης του πασσάλου αποτελεί η προσομοίωση του εδάφους σύμφωνα με το προσομοίωμα Winkler καθώς και το συμβιβαστό των παραμορφώσεων σε όλη την παράπλευρη επιφάνεια μεταξύ πασσάλου και εδάφους. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η επίλυση, ο πάσσαλος θεωρείται ως δοκός επί ελαστικού εδάφους και αναλύεται βάσει αυτής της θεωρήσεως. Η εξίσωση δοκού πρέπει να λυθεί ώστε να διαμορφωθούν οι ζητούμενες καμπύλες εδαφικής αντίδρασης(p)-μετατόπισης(y), οι οποίες εκτιμούν το οριακό φορτίο που αντιστοιχεί στη μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση του εκάστοτε εξεταζόμενου συστήματος.

#### 1.2.5.1 Προέλευση διαφορικής εξίσωσης

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η αξονική δύναμη σε έναν πάσσαλο υπό εγκάρσια φόρτιση έχει σχετικά μικρή επίδραση στη ροπή κάμψης. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητός ο υπολογισμός του φορτίου λυγισμού του πασσάλου. Συνεπώς, το αξονικό φορτίο χρειάζεται στην εξίσωση. Στη συγκεκριμένη εργασία η επίδραση του αξονικού φορτίου θεωρείται μηδενική, επομένως δεν εξετάζεται. Για λόγους πληρότητας, οι εξισώσεις θα παρουσιαστούν στη γενική τους μορφή, δηλαδή θα συμπεριλαμβάνουν τους όρους λόγω της επίδρασης του αξονικού φορτίου. Η λύση του προβλήματος της δοκού επί ελαστικού εδάφους δόθηκε από τον Hetenyi (1946) καθώς και από άλλους ερευνητές, με τη βοήθεια της γνωστής διαφορικής εξισώσεως τετάρτης τάξεως κατά την οποία ο πάσσαλος αποτελεί μία γραμμικά ελαστική δοκό και οι ανά μονάδα μήκους εδαφικές αντιδράσεις αντιπροσωπεύονται από μία γραμμική φόρτιση q(z).

Γίνεται η υπόθεση ότι η δοκός υποβάλλεται σε οριζόντια φόρτιση και ένα ζεύγος θλιπτικών δυνάμεων,  $P_x$ , ασκείται στο κέντρο βάρους των ακραίων διατομών της δοκού. Εάν ένα απείρως μικρό, μη φορτισμένο στοιχείο, οριοθετημένο από οριζόντιες ευθείες, απόστασης dx μεταξύ τους αποκοπεί από τη δοκό (Σχήμα 1.3), η ισορροπία ροπών (αγνοώντας φαινόμενα δευτέρας τάξης) οδηγεί στην εξίσωση:

$$(M + dM) - M + P_x d_y - V_v d_x = 0 \quad (1.24)$$

ή

$$\frac{dM}{dx} + P_x \frac{dy}{yx} - V_v = 0 \quad (1.25)$$

Παραγωγίζοντας αυτή την εξίσωση ως προς x έχουμε:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} + P_x \frac{d^2 y}{yx^2} - \frac{dV_v}{dx} = 0 \quad (1.26)$$

Σημειώνονται οι παρακάτω ταυτότητες:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = E_p I_p \frac{d^4 y}{yx^4}$$

$$\frac{dV_v}{dx} = p$$

και

$$p = E_{py} y$$

Πραγματοποιώντας τις υποδεικνύμενες αντικαταστάσεις, η εξίσωση 1.26 γίνεται:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{yx^4} + P_x \frac{d^2 y}{yx^2} + E_{py} y = 0 \quad (1.27)$$

όπου

$E_p$  = το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του πασσάλου,

$I_p$  = η ροπή αδράνειας (ανάλογα με τη διεύθυνση κάμψης),

$y$  = οι πλευρικές μετατοπίσεις, κοινές στον πάσσαλο και στο έδαφος,

Η κατεύθυνση της διατμητικής δύναμης,  $V_v$ , φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Η διατμητική δύναμη σε επίπεδο κάθετο προς τη γραμμή μετατόπισης υπολογίζεται ως:

$$V_n = V_v \cos S - P_x \sin S \quad (1.28)$$

Επειδή η τιμή της στροφής,  $S$ , είναι συνήθως μικρή, ισχύει ότι  $\cos(S)=1$  και  $\sin(S)=\tan(S)=dy/dx$ .

Έτσι διαμορφώνεται η εξίσωση 1.29:

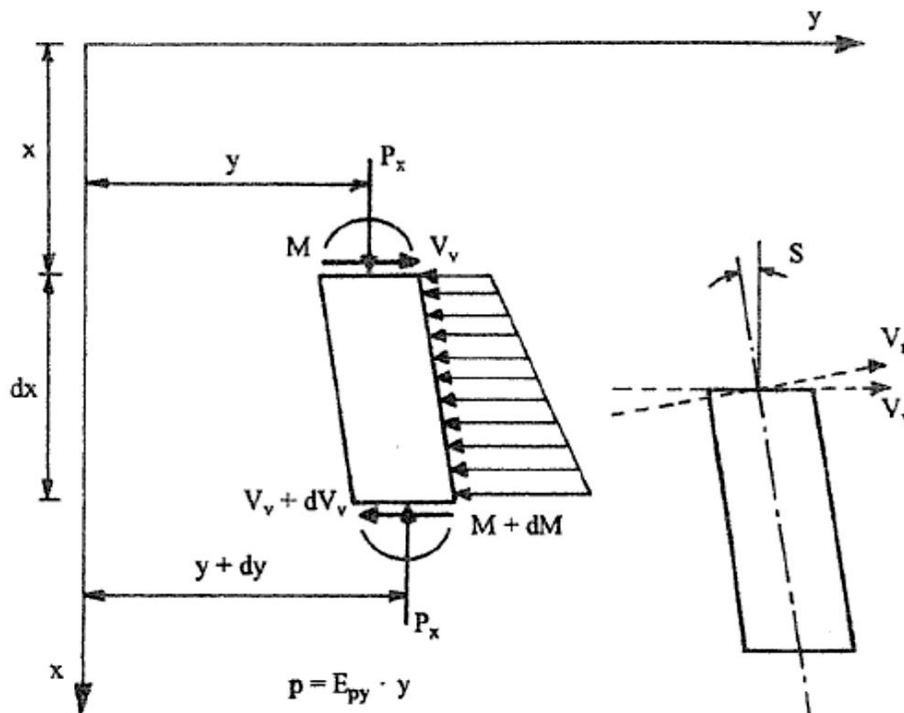
$$V_n = V_v - P_x \frac{dy}{yx} \quad (1.29)$$

Η δύναμη,  $V_n$ , θα χρησιμοποιηθεί περισσότερο στους υπολογισμούς, αλλά η δύναμη,  $V_v$ , μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 1.29 όπου  $dy/dx$  ισούται με τη στροφή  $S$ .

Η δυνατότητα να θεωρηθεί ένα κατανεμημένο φορτίο  $W$  ανά μονάδα μήκους για το πάνω τμήμα του πασσάλου βοηθάει στη λύση πολλών πρακτικών προβλημάτων. Η διαφορική εξίσωση επομένως υπολογίζεται από την εξίσωση 1.30:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{yx^4} + P_x \frac{d^2 y}{yx^2} - p + W = 0 \quad (1.30)$$

όπου  $P_x$  = αξονικό φορτίο στον πάσσαλο,  $y$ = πλευρική μετατόπιση του πασσάλου σε σημείο  $x$  κατά μήκος του πασσάλου,  $p$ = αντίδραση εδάφους ανά μονάδα μήκους,  $E_p I_p$ =ακαμψία και  $W$ =καταναμημένο φορτίο κατά μήκος του πασσάλου.



Σχήμα 1.3.: Στοιχείο δοκού (κατά Hetenyi 1946).

Άλλες εξισώσεις δοκού που χρειάζονται στην ανάλυση πασσάλων υπό εγκάρσια φόρτιση είναι:

$$E_p I_p \frac{d^3 y}{y x^3} + P_x \frac{dy}{y x} = V \quad (1.31)$$

$$E_p I_p \frac{d^2 y}{y x^2} = M \quad (1.32)$$

Και  $\frac{dy}{y x} = S \quad (1.33)$

Όπου  $V$ = τέμνουσα δύναμη στον πάσσαλο,  $M$ = ροπή κάμψης και  $S$ = κλίση του παραμορφωμένου σχήματος του πασσάλου που οριοθετείται από τον άξονά του

Εάν εξαιρέσουμε το αξονικό φορτίο,  $P_x$ , το συμβιβαστό των παραμορφώσεων είναι αντίστοιχο με αυτό των δοκών στη μηχανική, με τη διαφορά ότι ο άξονας του πασσάλου είναι στραμμένος κατά  $90^\circ$  σε σχέση με τον άξονα της δοκού σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού. Το αξονικό φορτίο συνήθως δεν εμφανίζεται στην εξίσωση δοκού. Οι θετικές συμβάσεις παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 1.4.

Οι παραδοχές της λύσης του προβλήματος είναι οι εξής:

1. Ο πάσσαλος είναι ευθύς με σταθερή διατομή,
2. Ο πάσσαλος έχει ένα διάμηκες επίπεδο συμμετρίας, πάνω στο οποίο βρίσκονται φορτία και αντιδράσεις,
3. Το υλικό του πασσάλου είναι ομοιογενές και ισότροπο,
4. Το όριο διαρροής του υλικού του πασσάλου δεν υπερβαίνεται,
5. Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του πασσάλου είναι το ίδιο σε εφελκυσμό και θλίψη,

6. Οι διατμητικές παραμορφώσεις του πασσάλου είναι μικρές,
7. Ο πάσσαλος δεν υποβάλλεται σε δυναμική φόρτιση και
8. Οι μετακινήσεις λόγω διατμητικών τάσεων είναι μικρές.

Η παραδοχή 8 ικανοποιείται με τη συμμετοχή περισσότερων όρων στη διαφορική εξίσωση, αλλά συνήθως τα σφάλματα που σχετίζονται με την παράλειψη αυτών των όρων είναι μικρά.

*Σημείωση:* όλες οι αντιδράσεις του πασσάλου και του εδάφους είναι σχεδιασμένες βάσει της σύμβασης θετικής φοράς (  $F$ =δύναμη,  $L$ =μήκος).

### 1.2.5.2 Επίλυση απλοποιημένης μορφής της διαφορικής εξίσωσης

Μία απλούστερη μορφή της διαφορικής εξίσωσης διαμορφώνεται από την εξίσωση 1.30, εάν υποθεθεί πρώτον ότι δεν ασκείται αξονικό φορτίο, δεύτερον ότι η ακαμμία  $E_p I_p$  είναι σταθερή κατά μήκος του πασσάλου και τέλος ότι η εδαφική αντίδραση  $E_{py}$  είναι σταθερή και ίση με  $\alpha$ . Οι πρώτες δύο υποθέσεις σπάνια ισχύουν στην πράξη.

Η λύση που αναφέρεται σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται για δύο σημαντικούς λόγους. Καταρχάς, οι τελικώς διαμορφωμένες εξισώσεις συμπεριλαμβάνουν παράγοντες που είναι κοινοί σε κάθε λύση και επομένως αποκαλύπτεται η φύση του προβλήματος. Επιπλέον, η κλειστή μορφή λύση επιτρέπει τον έλεγχο της ακρίβειας των αριθμητικών λύσεων.

Εάν εφαρμοστούν οι παραπάνω παραδοχές και η ταυτότητα στην εξίσωση 1.34, προκύπτει η απλοποιημένη μορφή της διαφορικής εξίσωσης (εξίσωση 1.35).

$$\beta^4 = \frac{\alpha}{4E_p I_p} \quad (1.34)$$

$$\frac{d^4 y}{y x^4} + 4\beta^4 y = 0 \quad (1.35)$$

της οποίας η λύση είναι:

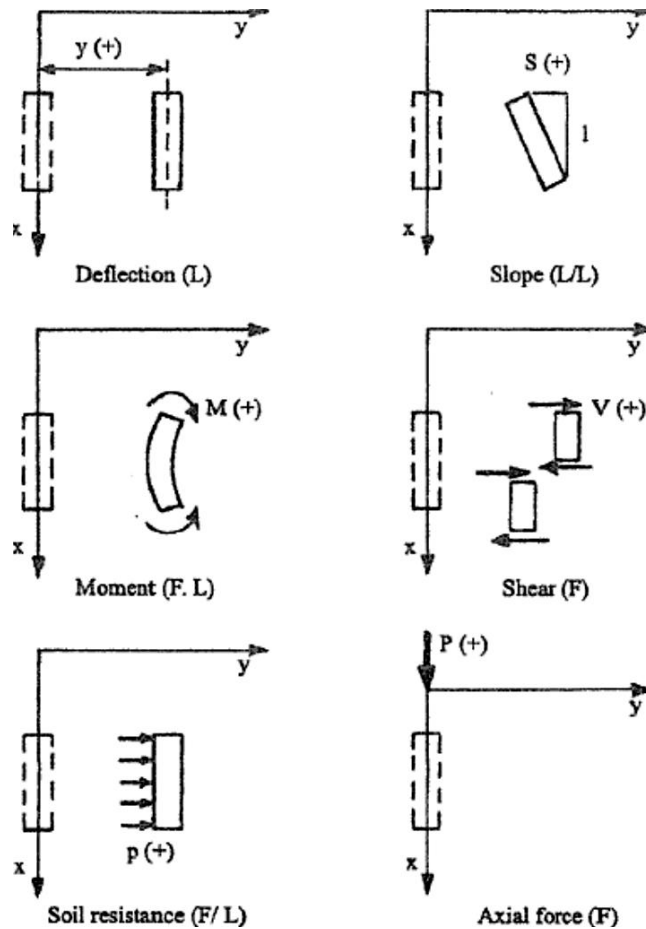
$$y = e^{\beta x} (x_1 \cos \beta x + x_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (x_3 \cos \beta x + x_4 \sin \beta x) \quad (1.36)$$

Οι συντελεστές  $\chi_1$ ,  $\chi_2$ ,  $\chi_3$  και  $\chi_4$  πρέπει να υπολογιστούν για τις διάφορες συνοριακές συνθήκες απαιτείται να προσομοιωθούν. Εάν θεωρηθεί μακρύς πάσσαλος, διαμορφώνονται απλοποιημένες εξισώσεις. Μία εφαρμογή της εξίσωσης 1.36 δείχνει ότι οι συντελεστές  $\chi_1$  και  $\chi_2$  πρέπει να είναι σχεδόν μηδενικοί για ένα μακρύ πάσσαλο, καθώς ο όρος  $e^{\beta x}$  θα είναι μεγάλος για μεγάλες τιμές του  $x$ .

Οι συνοριακές συνθήκες της κορυφής του πασσάλου που εφαρμόζονται για τη λύση της απλοποιημένης μορφής της διαφορικής εξίσωσης φαίνονται στα σχεδιαγράμματα, Σχήμα 1.5. Οι συνοριακές συνθήκες που επιλέγονται για την κορυφή ενός μακρύ πασσάλου για την πρώτη περίπτωση παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.5α και σε μορφή εξίσωσης είναι:

$$\text{Για } x = 0, \quad \frac{d^2 y}{y x^2} = \frac{M}{E_p I_p} \quad (1.37)$$

$$\text{Και} \quad \frac{d^3 y}{y x^3} = \frac{P_t}{E_p I_p} \quad (1.38)$$



**Σχήμα 1.4:** Συμβάσεις θετικής φοράς.

Μέσω της εξίσωσης 1.36 και αντικαθιστώντας από την εξίσωση 1.37 υπολογίζεται:

$$\chi_4 = \frac{-M_t}{E_p I_p \beta^2} \quad (1.39)$$

Οι αντικαταστάσεις που υποδεικνύονται από την Εξίσωση 1.38 δίνουν:

$$\chi_3 + \chi_4 = \frac{-P_t}{2E_p I_p \beta^3} \quad (1.40)$$

Οι εξισώσεις 1.39 και 1.40 χρησιμοποιούνται στη διαμόρφωση εκφράσεων που αφορούν τη μετατόπιση y, την κλίση S, τη ροπή κάμψης M, την τέμνουσα V και την εδαφική αντίδραση ρ για ένα μακρύ πάσσαλο, εξισώσεις (1.41-1.45).

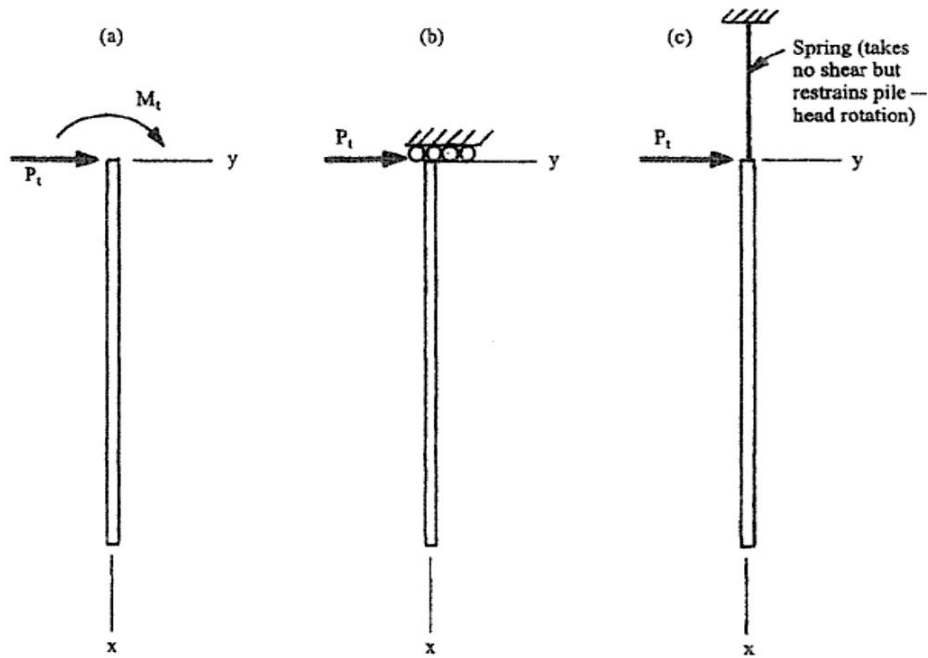
$$y = \frac{2\beta^2 e^{-\beta x}}{a} \left[ \frac{P_t}{\beta} \cos \beta x + M_t (\cos \beta x - \sin \beta x) \right] \quad (1.41)$$

$$S = e^{-\beta x} \left[ \frac{2P_t \beta^2}{a} (\sin \beta x + \cos \beta x) + \frac{M_t}{E_p I_p \beta} \cos \beta x \right] \quad (1.42)$$

$$M = e^{-\beta x} \left[ \frac{P_t}{\beta} (\sin \beta x + \cos \beta x) + M_t \cos \beta x \right] \quad (1.43)$$

$$V = e^{-\beta x} \left[ P_t (\cos \beta x - \sin \beta x) - 2M_t \beta \sin \beta x \right] \quad (1.44)$$

$$p = -2\beta^2 e^{-\beta x} \left[ \frac{P_t}{\beta} \cos \beta x + M_t (\cos \beta x - \sin \beta x) \right] \quad (1.45)$$



Σχήμα 1.5.: Συνοριακές συνθήκες στην κορυφή του πασσάλου.

Προκειμένου να απλοποιηθούν οι παραπάνω μορφές των εξισώσεων, σκόπιμος είναι ο προσδιορισμός ορισμένων συντελεστών:

$$A_1 = e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (1.46)$$

$$B_1 = e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) \quad (1.47)$$

$$C_1 = e^{-\beta x} \cos \beta x \quad (1.48)$$

$$D_1 = e^{-\beta x} \sin \beta x \quad (1.49)$$

Με βάση τους παραπάνω συντελεστές, οι εξισώσεις (1.41-1.45) μετατρέπονται στις ακόλουθες:

$$y = \frac{2P_t\beta}{\alpha} C_1 + \frac{M_t}{2E_p I_p \beta^3} B_1 \quad (1.50)$$

$$y = \frac{2P_t\beta^2}{\alpha} A_1 + \frac{M_t}{E_p I_p \beta^3} C_1 \quad (1.51)$$

$$M = \frac{P_t}{\beta} D_1 + M_t A_1 \quad (1.52)$$

$$V = P_t B_1 - 2M_t \beta D_1 \quad (1.53)$$

και

$$p = -2P_t\beta C_1 - 2M_t\beta^2 B_1 \quad (1.54)$$

Για ένα μακρύ πάσσαλο δεσμευμένης στροφής στην κεφαλή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5b, η λύση υπολογίζεται με την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών που υπολογίζονται στις εξισώσεις 1.55 και 1.56.

Για

$$x = 0, \quad \frac{dy}{dx} = 0 \quad (S=0) \quad (1.55)$$

$$\frac{d^3y}{dx^3} = \frac{P_t}{E_p I_p} \quad (1.56)$$

Χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πρώτη ομάδα συνοριακών συνθηκών, υπολογίζονται:

$$x_3 = x_4 = \frac{P_t}{3E_p I_p \beta^3} \quad (1.57)$$

Η λύση για μακρύ πάσσαλο τελικά υπολογίζεται από τις εξισώσεις :

$$y = \frac{P_t \beta}{\alpha} A_1 \quad (1.58)$$

$$S = \frac{P_t}{2E_p I_p \beta^2} D_1 \quad (1.59)$$

$$M = -\frac{P_t}{2\beta} B_1 \quad (1.60)$$

$$V = P_t C_1 \quad (1.61)$$

$$p = -P_t \beta A_1 \quad (1.62)$$

Μερικές φορές είναι σκόπιμο να έχουμε μία λύση μέσω ενός τρίτου συνόλου συνοριακών συνθηκών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5c. Αυτές οι συνθήκες δίνονται στις παρακάτω εξισώσεις:

Για

$$x = 0, \quad \frac{E_p I_p \frac{d^2y}{dx^2}}{\frac{dy}{dx}} = \frac{M_t}{S_t} \quad (1.63)$$

$$\frac{d^3y}{dx^3} = \frac{P_t}{E_p I_p} \quad (1.64)$$

Εφαρμόζοντας αυτές τις συνοριακές συνθήκες, υπολογίζονται οι συντελεστές  $\chi_3$  και  $\chi_4$  για το μακρύ πάσσαλο και παρουσιάζονται στις εξισώσεις 1.65, 1.66. Για λόγους απλοποίησης, η αντίδραση έναντι στροφής,  $M_t/L_t$ , αντικαθίσταται από το σύμβολο  $k_\theta$ .

$$x_3 = \frac{P_t(2E_p I_p + k_\theta)}{EI(a + 4\beta^3 k_\theta)} \quad (1.65)$$

$$x_4 = \frac{P_t k_\theta}{E_p I_p (a + 4\beta^3 k_\theta)} \quad (1.66)$$

Αυτές οι εκφράσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εξίσωση 1.36 και μετά από τις κατάλληλες παραγωγίσεις και αντικαταστάσεις των εξισώσεων 1.46 έως 1.49 θα ορίσουν ένα νέο σύνολο



εκφράσεων για το μακρύ πάσσαλο, όμοιες με αυτές των εξισώσεων από 1.50 έως 1.54 και από 1.58 έως 1.62.

Ο Timoshenko (1941) ισχυρίστηκε ότι η λύση του προβλήματος για ένα μακρύ πάσσαλο είναι ικανοποιητική όπου ισχύει ότι  $\beta L \geq 4$ . Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η λύση της απλοποιημένης διαφορικής εξίσωσης απαιτείται για πασσάλους οι οποίοι έχουν αδιάστατο μήκος μικρότερο από 4. Η λύση για οποιοδήποτε μήκος  $L$  του πασσάλου μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή των παρακάτω συνοριακών συνθηκών στην αιχμή του πασσάλου.

Για

$$x = L, \frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \quad (M=0 \text{ στην αιχμή του πασσάλου}) \quad (1.67)$$

Για

$$x = L, \frac{d^3 y}{dx^3} = 0 \quad (V=0 \text{ στην αιχμή του πασσάλου}) \quad (1.68)$$

Όταν οι παραπάνω συνοριακές συνθήκες, μαζί με κάποιες από αυτές της κεφαλής του πασσάλου εφαρμοστούν, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των συντελεστών  $\chi_1, \chi_2, \chi_3$  και  $\chi_4$ .

Η επιρροή του μήκους του πασσάλου στη μετατόπιση στο επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους φαίνεται στο Σχήμα 1.6. Το Σχήμα 1.6α απεικονίζει έναν πάσσαλο στον οποίο ασκείται αξονικό φορτίο, με την υπόθεση όμως ότι έχει μικρή τιμή. Το μήκος του πασσάλου θα οριστεί από το εγκάρσιο φορτίο,  $P_t$ , και τη ροπή,  $M_t$ . Πραγματοποιούνται υπολογισμοί για στατική φόρτιση και σταθερή διατομή πασσάλου, του οποίου το αρχικό μήκος τον καθιστά «μακρύ». Οι υπολογισμοί συνεχίζονται με σταδιακή μείωση της τιμής του αρχικώς ορισμένου μήκους. Η μετατόπιση στην επιφάνεια του εδάφους υπολογίζεται συναρτήσει του επιλεγμένου μήκους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6b.

Σύμφωνα με το Σχήμα 1.6b, η μετατόπιση στην επιφάνεια του εδάφους μεταβάλλεται (μειώνεται) μέχρι το μήκος του πασσάλου να φτάσει την τιμή του κρίσιμου μήκους. Σημειώνεται σημαντική αύξηση της μετατόπισης όσο το μήκος μειώνεται κάτω από το κρίσιμο. Ο μηχανικός θα επιλέξει κατά την κρίση του το μήκος εκείνο που εξασφαλίζει τον κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας ώστε η τιμή της μετατόπισης να μην ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη (αστοχία). Η ακρίβεια της λύσης θα εξαρτηθεί από το κατά πόσο οι καμπύλες αντίδρασης του εδάφους αντιπροσωπεύουν την πραγματική συμπεριφορά του εδάφους.

Η απλοποιημένη μορφή της διαφορικής εξίσωσης κανονικά δεν θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση λύσεων σχεδιασμού. Ωστόσο, μέσω αυτής καθίσταται εφικτή η ευκρινής παρουσίαση του μεγέθους επιρροής του μήκους του πασσάλου,  $L$ , της ακαμψίας του καθώς και άλλων παραμέτρων.

### 1.2.5.3 Λύση της διαφορικής εξίσωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών

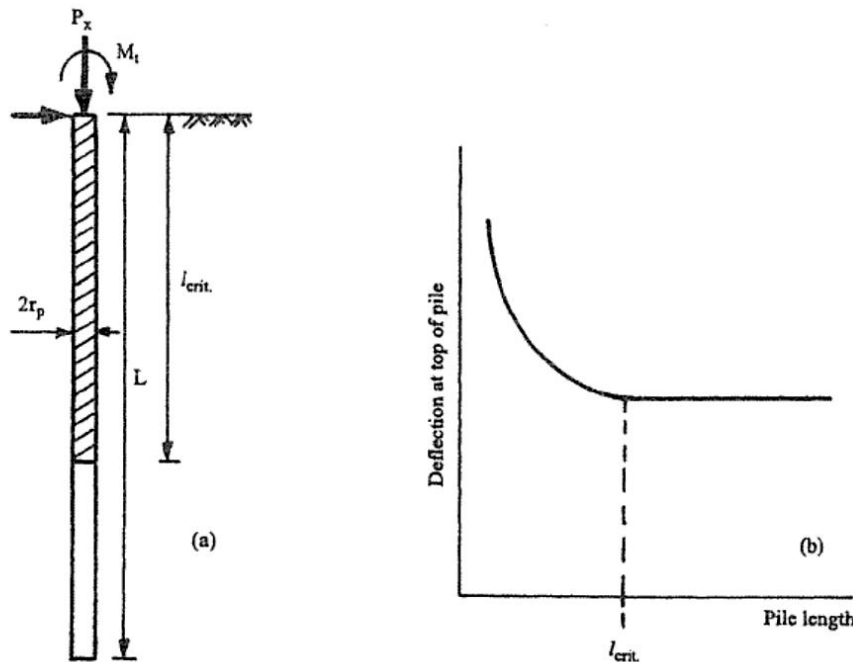
Η λύση της εξίσωσης 1.30 είναι επιθυμητή και απαραίτητη για αναλύσεις που συναντώνται στην πράξη. Η μορφοποίηση της διαφορικής εξίσωσης σε αριθμητικούς όρους και μία λύση μέσω επαναλήψεων επιτρέπουν βελτιώσεις στις λύσεις που περιγράφηκαν σε προηγούμενες παραγράφους. Οι τελικές εξισώσεις διαμορφώνουν τη βάση για ένα υπολογιστικό πρόγραμμα που είναι απαραίτητο στην πράξη.

- Η επίδραση του αξονικού φορτίου στη μετατόπιση και στη ροπή κάμψης θα ληφθεί υπόψη και τα προβλήματα λυγισμού του πασσάλου μπορούν να λυθούν.
- Η ακαμψία  $E_p I_p$  του πασσάλου μπορεί να διαφοροποιείται κατά μήκος του πασσάλου.
- Τελευταίο και κυριότερο, η εδαφική αντίδραση  $E_{py}$  μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την μετατόπιση του πασσάλου και με την απόσταση κατά μήκος του πασσάλου.

Εάν ο πάσσαλος υποδιαιρεθεί σε τμήματα ύψους  $h$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7, η εξίσωση 1.30 σε μορφή πεπερασμένων διαφορών γίνεται:

$$\begin{aligned}
 & y_{m-2}R_{m-1} + y_{m-1}(-2R_{m-1} - 2R_m + P_x h^2) \\
 & + y_m(R_{m-1} + 4R_m + R_{m+1} - 2P_x h^2 + E_{py} h^4) \\
 & + y_{m+1}(-2R_m - 2R_{m+1} + P_x h^2) \\
 & + y_{m+2}R_{m-1} + W_m h^4 = 0
 \end{aligned}
 \tag{1.69}$$

όπου  $R_m = (E_p I_p)_m$  η ακαμψία του πασσάλου στο σημείο  $m$ .



**Σχήμα 1.6:** Λύση για το κρίσιμο μήκος.

Εάν ο πάσσαλος διαιρεθεί σε  $n$  τμήματα, μπορούν να διαμορφωθούν  $n+1$  εξισώσεις όπως την εξίσωση 1.69. Θα υπάρχουν  $n+5$  άγνωστοι επειδή θα εισαχθούν δύο πλασματικά σημεία στην κεφαλή και δύο στην αιχμή του πασσάλου. Εάν εκφραστούν δύο συνοριακές συνθήκες για το πάνω και δύο για το κάτω μέρος του πασσάλου, θα υπάρξουν  $n+5$  εξισώσεις, οι οποίες θα δώσουν αποτελέσματα ταυτόχρονα για όλους τους αγνώστους.

Οι δύο συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται για το χαμηλότερο σημείο του πασσάλου βασίζονται στη ροπή και στη διάτμηση. Εφόσον η ύπαρξη ενός αξονικού φορτίου που προκαλεί ροπή στην αιχμή του πασσάλου αγνοηθεί, η ροπή σ' αυτό το σημείο είναι μηδενική. Η υπόθεση μηδενικής καμπτικής ροπής θεωρείται ότι δεν προκαλεί σφάλμα, εκτός από την περίπτωση κοντών, άκαμπτων πασσάλων που μεταφέρουν τα φορτία τους στην αιχμή. Η περίπτωση όπου υπάρχει ροπή στην αιχμή του πασσάλου είναι ασυνήθιστη και δεν αντιμετωπίζεται από τις διαδικασίες που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία. Επομένως, μία συνοριακή συνθήκη στην αιχμή του πασσάλου είναι η εξής:

$$y_{-1} - 2y_0 + y_1 = 0
 \tag{1.70}$$

Η εξίσωση αυτή εκφράζει την κατάσταση όπου ισχύει ότι  $M=0$  για  $x=L$ , που συνεπάγεται ότι  $E_p I_p (d^2 y / d^2 x) = 0$ . Η δεύτερη συνοριακή συνθήκη για τη χαμηλότερη διατομή του πασσάλου περιλαμβάνει τη διάτμηση. Γίνεται η υπόθεση ότι, λόγω διατμητικών τάσεων, μπορεί να αναπτυχθεί

εδαφική αντίδραση στην αιχμή ενός κοντού πασσάλου κατά τη μετατόπιση. Επιπλέον, υποθέτουμε ότι μπορούμε να εξάγουμε πληροφορίες που επιτρέπουν τη  $V_o$ , διάτμηση στην άκρη του πασσάλου, να γίνει γνωστή συναρτήσει της  $y_o$ . Με αυτόν τον τρόπο, η δεύτερη συνοριακή συνθήκη στην αιχμή του πασσάλου διαμορφώνεται ως:

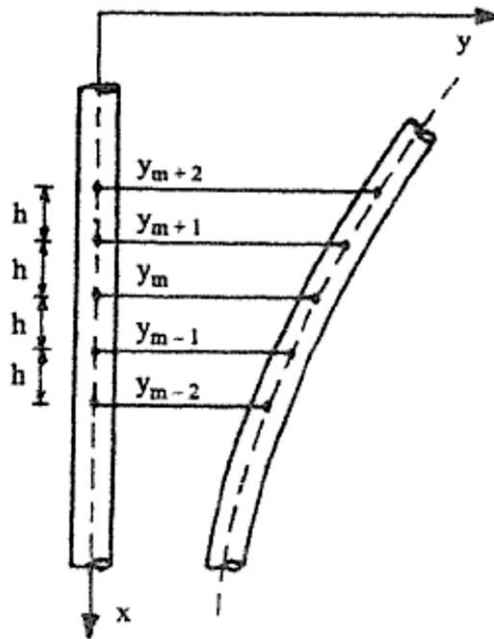
$$\frac{R_o}{2h^3}(y_{-2} - 2y_{-1} + 2y_1 - y_2) + \frac{P_x}{2h}(y_{-1} - y_1) = V_o \quad (1.71)$$

όπου  $R_o$ =η ακαμψία στην αιχμή του πασσάλου.

Η εξίσωση εκφράζει τη σχέση  $V=V_o$  που συνεπάγεται ότι για  $x=L$ :

$$E_p I_p (d^3 y / d^3 x) + P_x (d_y / d_x) = V_o . \quad (1.72)$$

Η τιμή της  $V_o$  πρέπει να εξισωθεί με το μηδέν όσο αφορά μακρύ πάσσαλο με δύο ή περισσότερα σημεία μηδενικής μετατόπισης. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, απαιτούνται δύο συνοριακές εξισώσεις στην κορυφή του πασσάλου. Εξισώσεις έχουν εκφραστεί για τέσσερις ομάδες συνοριακών συνθηκών, η κάθε μία με δύο εξισώσεις. Ο μηχανικός καλείται να επιλέξει την ομάδα που ταιριάζει περισσότερο στο εκάστοτε πρόβλημα.



Σχήμα 1.7: Πάσσαλος που έχει εκτραπεί.

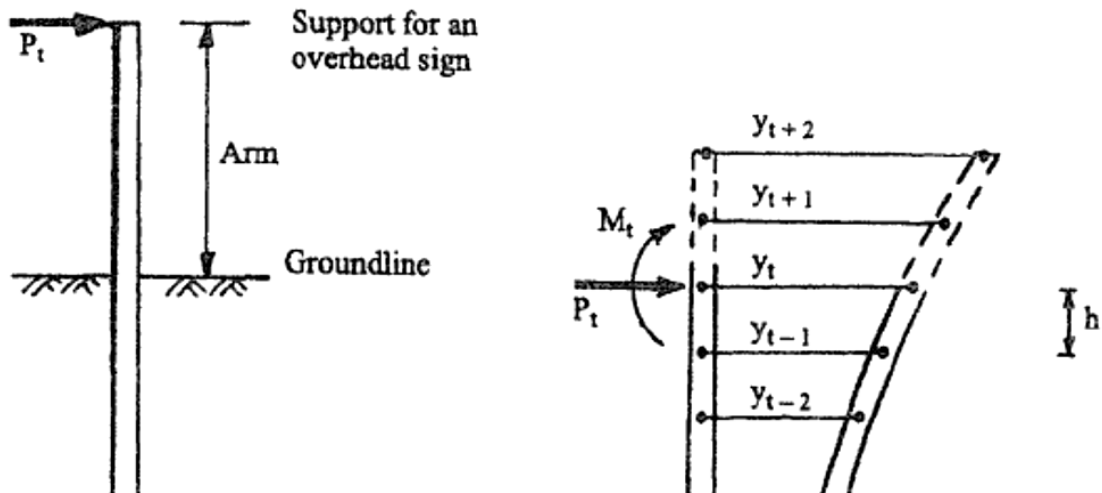
#### 1.2.5.4 Διάτμηση και ροπή στην κεφαλή του πασσάλου.

Η πρώτη περίπτωση των συνοριακών συνθηκών στην κορυφή του πασσάλου απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 1.8. Το αξονικό φορτίο  $P_x$  δεν εμφανίζεται, αλλά θεωρούμε ότι ασκείται σε κάθε περίπτωση από τις τέσσερις των συνοριακών συνθηκών στην κορυφή του πασσάλου. Για την περίπτωση όπου η διάτμηση στην κορυφή ισούται με  $P_t$  και η δυσκαμψία με  $R_t$ , διαμορφώνεται η παρακάτω εξίσωση.

$$\frac{R_t}{2h^3}(y_{t-2} - 2y_{t-1} + 2y_{t+1} - y_{t+2}) + \frac{P_x}{2h}(y_{t-1} - y_{t+1}) = P_t \quad (1.73)$$

Όταν η ροπή στην κορυφή του πασσάλου ισούται με  $M_t$ , έχουμε:

$$\frac{R_t}{h^2}(y_{t-1} - 2y_t + y_{t+1}) = M_t \quad (1.74)$$



Σχήμα 1.8: Πρώτη περίπτωση συνοριακών συνθηκών στην κορυφή του πασσάλου.

#### 1.2.5.5 Διάτμηση και στροφή στην κεφαλή του πασσάλου

Η δεύτερη περίπτωση των συνοριακών συνθηκών που εφαρμόζονται στην κορυφή του πασσάλου απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 1.9. Υποθέτουμε ότι ο πάσσαλος είναι ενσωματωμένος σε μία βάση από σκυρόδεμα της οποίας είναι γνωστή η στροφή. Σε πολλές περιπτώσεις, η στροφή θεωρείται μηδενική, τουλάχιστον για τις αρχικές λύσεις.

Η Εξίσωση 1.73 είναι η πρώτη από τις δύο εξισώσεις που απαιτούνται. Η δεύτερη απ' αυτές αναφέρεται στην κλίση  $S_t$  της κορυφής, η οποία είναι γνωστή.

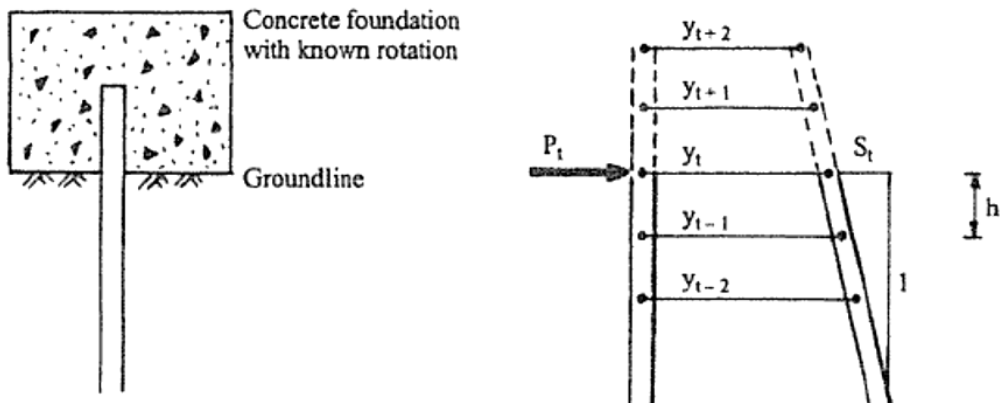
$$\frac{y_{t-1} - y_{t+1}}{2h} = S_t \quad (1.75)$$

#### 1.2.5.6 Διάτμηση και δέσμευση της στροφής στην κεφαλή του πασσάλου

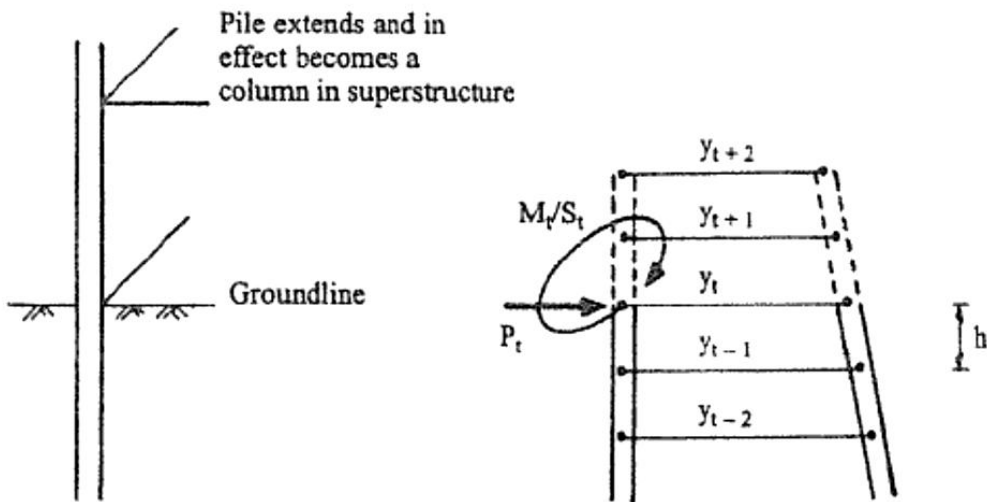
Η τρίτη περίπτωση των συνοριακών συνθηκών απεικονίζεται στο Σχήμα 1.10. Ο πάσσαλος θεωρείται ότι συνεχίζει πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, όπως μία κολώνα από σκυρόδεμα γίνεται μέλος του πλαισίου. Η λύση του προβλήματος μπορεί να βρεθεί με την αποκοπή ενός ελευθέρου σώματος στο κάτω μέρος του πλαισίου. Εφαρμόζεται ροπή στο πλαίσιο και η στροφή του πλαισίου υπολογίζεται ή εκτιμάται για την αρχική λύση. Η ροπή διαιρεμένη με την στροφή,  $M_t/S_t$ , δίνει την ακαμψία ως προς την στροφή που προέρχεται από την κολώνα και γίνεται μία από τις συνοριακές συνθήκες, η οποία έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμη στο σχεδιασμό. Πιθανόν να απαιτείται μία αρχική λύση ώστε να γίνει μία πρώτη εκτίμηση της καμπτικής ροπής στη βάση της κολώνας και μετά να επανεξεταστεί ο πάσσαλος. Στις περισσότερες περιπτώσεις μία ή δύο επαναλήψεις επαρκούν.

Η εξίσωση 1.73 είναι η πρώτη από τις δύο εξισώσεις που απαιτούνται για την τρίτη περίπτωση. Η εξίσωση 1.76 εκφράζει την περίπτωση όπου η ακαμψία,  $M_t/S_t$ , είναι γνωστή.

$$\frac{\frac{R_t}{h^2}(y_{t-1} - 2y_t + y_{t+1})}{\frac{y_{t-1} - y_{t+1}}{2h}} = \frac{M_t}{S_t} \quad (1.76)$$



Σχήμα 1.9: Δεύτερη περίπτωση συνοριακών συνθηκών στην κορυφή του πασσάλου.



Σχήμα 1.10: Τρίτη περίπτωση συνοριακών συνθηκών στην κορυφή του πασσάλου.

### 1.2.5.7 Ροπή και μετατόπιση στην κεφαλή του πασσάλου

Η τέταρτη περίπτωση συνοριακών συνθηκών απεικονίζεται στο Σχήμα 1.11. Ο πάσσαλος θεωρείται ότι είναι ενσωματωμένος σε «στήριγμα» το οποίο έχει τη δυνατότητα να κινηθεί πλευρικά κατά συγκεκριμένο βαθμό. Επομένως, η μετατόπιση  $y_t$  στην κορυφή του πασσάλου είναι γνωστή. Επίσης, γνωστή είναι και η ροπή κάμψης. Εάν μικρό κομμάτι του πασσάλου είναι ενσωματωμένο, η ροπή κάμψης συχνά θεωρείται μηδενική. Οι δύο εξισώσεις που απαιτούνται στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι εξισώσεις 1.74 και 1.77.

$$y_t = Y_t \quad (1.77)$$

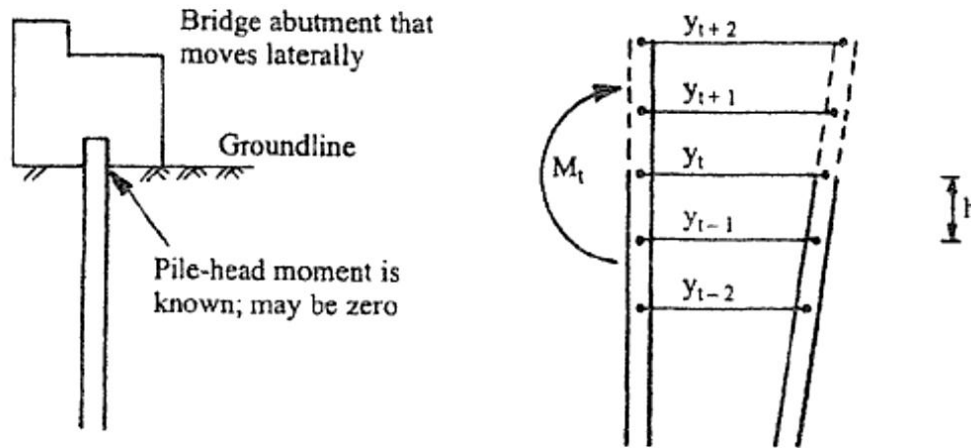
Οι τέσσερις ομάδες συνοριακών συνθηκών που εφαρμόζονται στην κορυφή του πασσάλου θα πρέπει να επαρκούν για σχεδόν οποιαδήποτε κατάσταση, αλλά μπορεί να προκύψουν ορισμένα ζητήματα. Ωστόσο, οι διαθέσιμες συνοριακές συνθήκες, με λίγη προσπάθεια, μπορούν να δώσουν τις απαιτούμενες λύσεις. Για παράδειγμα, μπορεί να υποθεθεί ότι οι τιμές των  $P_t$  και  $y_t$  είναι γνωστές στην κορυφή του πασσάλου και να αποτελέσουν τις απαιτούμενες συνοριακές συνθήκες (δεν ανήκουν σε κάποια από τις παραπάνω τέσσερις ομάδες). Οι εξισώσεις της τέταρτης ομάδας μπορούν να εφαρμοστούν με λίγες επιλεγμένες τιμές της  $M_t$ , μαζί με τη δοσμένη τιμή της  $y_t$ . Τα αποτελέσματα που δίνει ο ηλεκτρονικός υπολογιστής ορίζουν τιμές της  $P_t$ .

Η ακαμψία  $E_p I_p$  που συμβολίζεται ως  $R$  στις εξισώσεις, σωστά αντιπροσωπεύεται ως σταθερά δευτέρας τάξης της διαφορικής εξίσωσης, εξίσωση 1.32.

$$E_p I_p \frac{d^2 y}{dx^2} = M \quad (1.32)$$

Στη μορφή των πεπερασμένων διαφορών, η εξίσωση γίνεται:

$$R_m (y_{m-1} - 2y_m + y_{m+1}) = M_m \quad (1.78)$$



Σχήμα 1.11: Τέταρτη περίπτωση συνοριακών συνθηκών στην κορυφή του πασσάλου.

Σημείωση:  $P_i$ ,  $y_i$  σημειώνονται με τη θετική φορά τους.

### 1.3 Προσομοίωση του εδάφους ως ελαστικού ισότροπου ημιχώρου

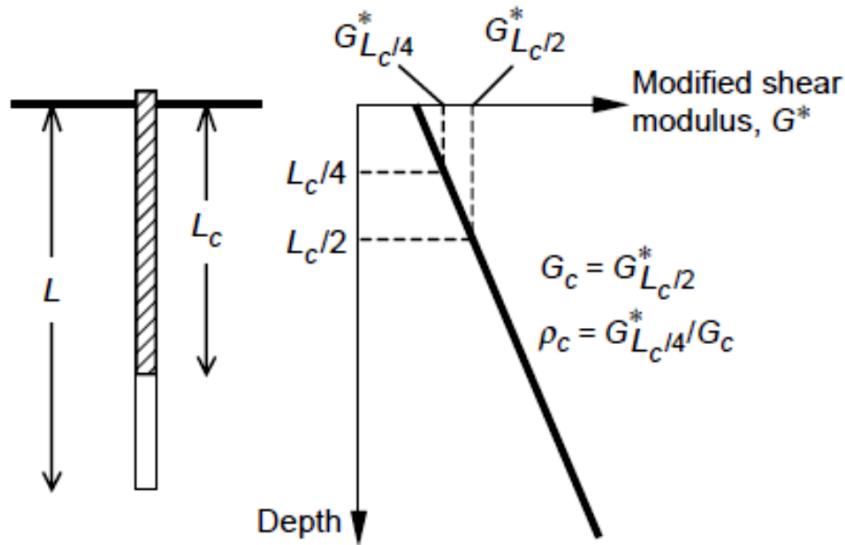
Ο κύριος περιορισμός στη χρήση της θεωρίας του δείκτη εδάφους για την ανάλυση πασσάλων υπό πλευρική φόρτιση έγκειται στην εκτίμηση κατάλληλης τιμής του συντελεστή «k» για το έδαφος. Συγκρίσεις της πρώτης προσέγγισης με την ελαστική ανάλυση έχουν δείξει ότι η σωστή επιλογή του k δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του εδάφους, αλλά και από άλλες παραμέτρους, όπως είναι η ακαμψία του πασσάλου και η μορφή της φόρτισης (δηλαδή η εκκεντρότητα της εφαρμοζόμενης εγκάρσιας φόρτισης). Επιπλέον, δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος τρόπος με τον οποίο οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μπορούν να ποσοτικοποιηθούν όταν μια ομάδα πασσάλων φορτίζεται πλευρικά.

Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, έχουν παρουσιαστεί λύσεις που βασίζονται στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία και στη μοντελοποίηση των οριακών στοιχείων πασσάλου-έδαφος (Poulos 1971, Kuhlemeyer 1979 Randolph 1981). Οι λύσεις αυτές επιτρέπουν εκφράσεις παρόμοιες σε μορφή με τις εξισώσεις 1.4, 1.5 και 1.6, οι οποίες εκφράζουν το κρίσιμο μήκος του πασσάλου και τις παραμορφώσεις στην επιφάνεια του εδάφους. Αρχικά, αναφερόμενοι σε πασσάλους των οποίων το μήκος ξεπερνά το κρίσιμο μήκος, απαραίτητη είναι, στην αρχή, η εκτίμηση της μέσης δυσκαμψίας του εδάφους στο ενεργό τμήμα του πασσάλου, δηλαδή στο τμήμα που βρίσκεται πάνω από το κρίσιμο μήκος του. Για να αποφευχθεί η χρήση διαφορετικών λύσεων για διαφορετικές τιμές του λόγου Poisson, ο Randolph (1981) εισήγαγε το μέτρο  $G^*$ , το οποίο ορίζεται ως:

$$G^* = G(1 + 3\nu/4) \quad (1.79)$$

Σύμφωνα με το Σχήμα 1.12, το χαρακτηριστικό μέτρο,  $G_c$ , ορίζεται ως η μέση τιμή του  $G^*$  στο ενεργό μήκος του πασσάλου. Επιπλέον, εισάγεται η παράμετρος  $\rho_c$ , η οποία αντικατοπτρίζει το βαθμό της ομοιογένειας στην ακαμψία του εδάφους. Η γραμμική μεταβολή του μέτρου  $G_c$  φαίνεται στο Σχήμα 1.12. Η τιμή του  $\rho_c$  μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της εξίσωσης:

$$\rho_c = \frac{G_{L_c/4}^*}{G_{L_c/2}^*} = \frac{G_{L_c/4}^*}{G_c} \quad (1.80)$$



**Σχήμα 1.12:** Ορισμός της τιμής  $\rho_c$  και  $G_c$ .

Χρήσιμο είναι να χρησιμοποιηθεί λύση σε όρους ισοδύναμου συμπαγή πασσάλου, ίδιας εγκάρσιας διατομής και ίδιας ακαμψίας με τον πραγματικό πάσσαλο. Για ένα ισοδύναμο πάσσαλο διαμέτρου  $d$ , το κατάλληλο μέτρο Young μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$E_p = \frac{(EI)_p}{\pi d^4 / 64} \quad (1.81)$$

όπου  $(EI)_p$  είναι η ακαμψία του πραγματικού πασσάλου.

Το κρίσιμο μήκος τώρα ορίζεται από την εξίσωση:

$$L_c = d(E_p / G_c)^{2/7} \quad (1.82)$$

Η μορφή αυτής της εξίσωσης είναι παρόμοια με την εξίσωση 1.4, με έναν εκθέτη  $2/7$  στη θέση του  $1/4$ . Επίσης, δεδομένου ότι το  $E_p$  χρησιμοποιείται αντί της ακαμψίας  $(EI)_p$ , για ισοδύναμο πάσσαλο, υπεισέρχεται ο όρος του κρίσιμου λόγου λυγηρότητας,  $L_c / d$ , για τον πάσσαλο που εξάγεται ευθέως από το λόγο ακαμψίας,  $E_p/G_c$ .

Σύμφωνα με το Σχήμα 1.12 προκύπτει ότι ο ορισμός του  $G_c$  απαιτεί τη γνώση του κρίσιμου μήκους,  $L_c$ , το οποίο με τη σειρά του ορίζεται σε όρους  $G_c$ . Συνεπώς, απαιτούνται επαναλήψεις εκτός από τις ακραίες περιπτώσεις ομογενούς εδάφους ( $\rho_c=1$ ) και του εδάφους όπου το  $G$  είναι ανάλογο του βάθους ( $\rho_c=0.5$  και το κρίσιμο μήκος μειώνεται σε  $L_c = d(2E_p / m^* d)^{2/9}$ , όπου  $m^*$  αποτελεί το βαθμό αύξησης του  $G$  με το βάθος). Για παράδειγμα, υποθέτουμε ότι η μεταβολή του συντελεστή διάτμησης με το βάθος,  $z$ , προσεγγίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$G = 10 + 4z \text{ MPa (z σε m)} \quad (1.83)$$

Για έναν πάσσαλο διαμέτρου  $0.6 \text{ m}$ , με ισοδύναμο συντελεστή  $E_p = 30 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ , ως πρώτη εκτίμηση για το κρίσιμο βάθος θεωρούμε τα  $6 \text{ m}$  ( $10$  φορές τη διάμετρο του πασσάλου). Ορίζουμε το λόγο Poisson,  $\nu = 0.3$  και ο χαρακτηριστικός συντελεστής,  $G_c$ , μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$G_c = (10 + 4 \cdot 6/2)(1 + 3 \cdot 0.3/4) = 27.0 \text{ MPa} \quad (1.84)$$

Υπολογίζεται, λοιπόν, μία αναθεωρημένη εκτίμηση του κρίσιμου μήκους του πασσάλου ως:

$$L_c = 0.6 * (3 * 10^4 / 27.0)^{2/7} = 4.45 \text{ m} \quad (1.85)$$

Περαιτέρω επαναλήψεις δίνουν τελικές τιμές  $L_c=4.63 \text{ m}$ , και  $G_c=23.6 \text{ MPa}$ .

Η έννοια του χαρακτηριστικού μέτρου διάτμησης,  $G_c$ , και του κρίσιμου μήκους του πασσάλου,  $L_c$ , είναι ο ορισμός εκφράσεων για τις παραμορφώσεις του πασσάλου στην επιφάνεια του εδάφους. Επομένως, οι πλευρικές μετατοπίσεις,  $u$ , και η στροφή,  $\theta$ , υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$u = \frac{(E_p / G_c)^{1/7}}{p_c G_c} \left[ 0.27 \frac{H}{L_c / 2} + 0.30 \frac{M}{(L_c / 2)^2} \right] \quad (1.86)$$

$$\theta = \frac{(E_p / G_c)^{1/7}}{p_c G_c} \left[ 0.30 \frac{H}{L_c / 2} + 0.80 \sqrt{p} \frac{M}{(L_c / 2)^3} \right] \quad (1.87)$$

Αυτές οι εκφράσεις προέρχονται από τη σύνθεση μιας σειράς αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων (Randolph, 1981). Η ομοιότητα με τις εκφράσεις που λαμβάνονται από την προσέγγιση του δείκτη εδάφους (εξισώσεις 1.5, 1.6) είναι προφανής. Γενικευμένα προφίλ της μετατόπισης καθώς και της ροπής κάμψης κατά μήκος του πασσάλου μπορούν να χαραχτούν για πασσάλους που υπόκεινται σε διατμητική φόρτιση,  $H$ , ή κάμψη,  $M$ . Παραδείγματα για αυτά τα προφίλ παρουσιάζονται στα Σχήματα, ( Σχήμα 1.13 και 1.14). Η μέγιστη ροπή ενός πασσάλου που υποβάλλεται σε πλευρική φόρτιση,  $H$ , εντοπίζεται σε βάθος μεταξύ  $L_c/4$  (για ομοιογενές έδαφος) και  $L_c/3$  (για έδαφος με ακαμψία ανάλογη με το βάθος).

Η τιμή της μέγιστης καμπτικής ροπής μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$M_{\max} = (0.1 / p_c) H L_c \quad (1.88)$$

Όσον αφορά πασσάλους που ανήκουν σε ομάδα, η κεφαλή του πασσάλου μπορεί να εμποδίσει την στροφή του (πακτωμένη κεφαλή). Η εύρεση της ροπής θραύσεως,  $M_B$ , σ' αυτές τις περιπτώσεις, πραγματοποιείται μηδενίζοντας τη στροφή ( $\theta=0$ ). Οπότε έχουμε:

$$M_{\max} = - \left[ 0.1875 / (p_c)^{1/2} \right] H L_c \quad (1.89)$$

Η τελική μετατόπιση της κεφαλής του πασσάλου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$u_f = \frac{(E_p / G_c)^{1/7}}{p_c G_c} \left( 0.27 - \frac{0.11}{\sqrt{p_c}} \right) \frac{H}{L_c / 2} \quad (1.90)$$

Η τιμή της μετατόπισης που προκύπτει από τον παραπάνω τύπο είναι περίπου ίση με το μισό της τιμής που θα προέκυπτε για έναν πάσσαλο ελεύθερα στρεπτής κεφαλής. Το Σχήμα 1.15 παρουσιάζει το γενικευμένο προφίλ μετατόπισης και τη μεταβολή της ροπής κάμψης για τη συγκεκριμένη περίπτωση.

Προκειμένου να εφαρμοστούν οι λύσεις στο σχεδιασμό, θεωρείστε την απόκριση ενός μεταλλικού πασσάλου, διαμέτρου 1.5m, πάχους 50mm, ενσωματωμένο σε μαλακή, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο με διατμητική αντοχή που αυξάνεται με ρυθμό 2,5 kPa/m. Το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον τύπο:

$$E_p = E_{steel} \left[ 1 - \left( \frac{d_i}{d} \right)^4 \right] = 50600 \text{ Mpa} \quad (1.91)$$

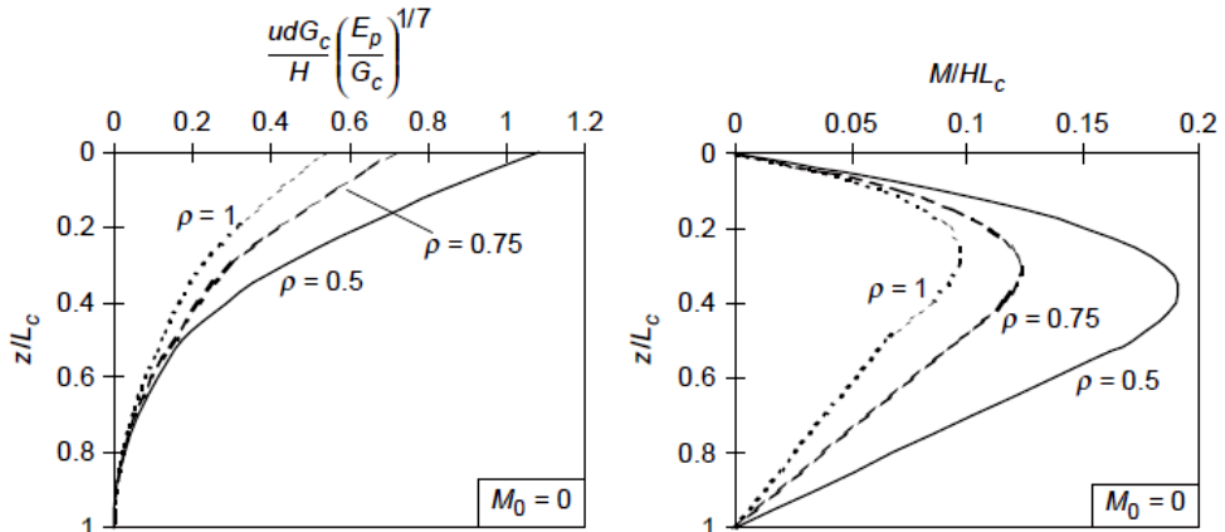


Όπου  $d_i$ , η εσωτερική διάμετρος του πασσάλου και  $E_{\text{steel}} = 210 \text{ GPa}$ . Θεωρώντας ότι το μέτρο διάτμησης του εδάφους ισούται με  $G = 100C_u = 0.25z \text{ MPa}$ , και ο λόγος Poisson,  $\nu = 0.3$ , το κρίσιμο βάθος προκύπτει:

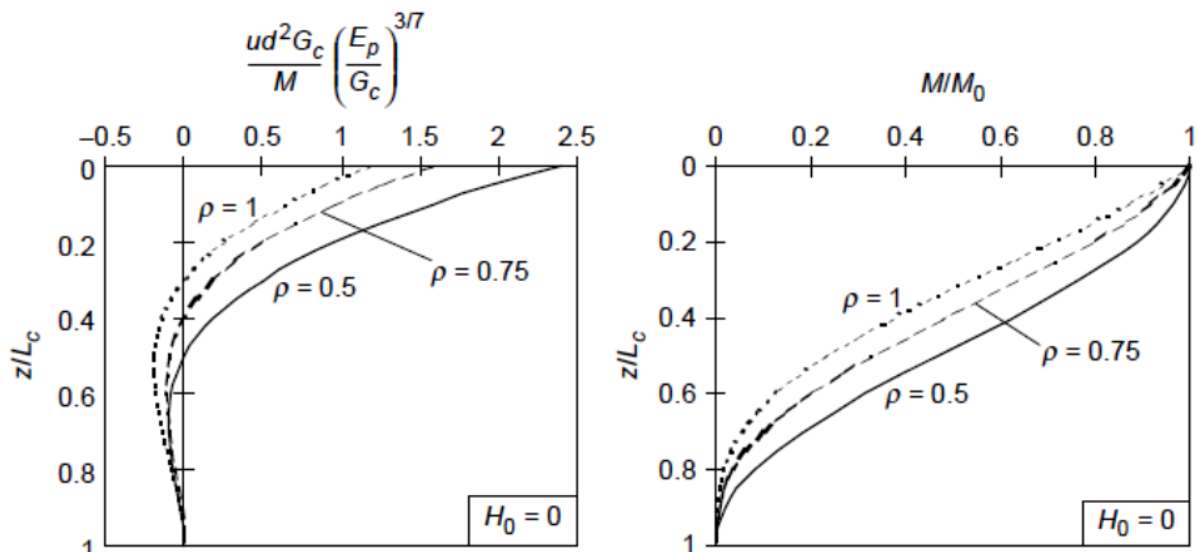
$$L_c = d(2E_p / m^* d)^{2/9} = 23.1m \quad (1.92)$$

όπου,

$$m^* = 0.25(1 + 0.7 * 0.3) = 0.306 \text{ MPa/m}. \quad (1.93)$$



**Σχήμα 1.13:** Γενικευμένες καμπύλες πλευρικής μετατόπισης και προφίλ ροπής κάμψης για εγκάρσια φόρτιση.



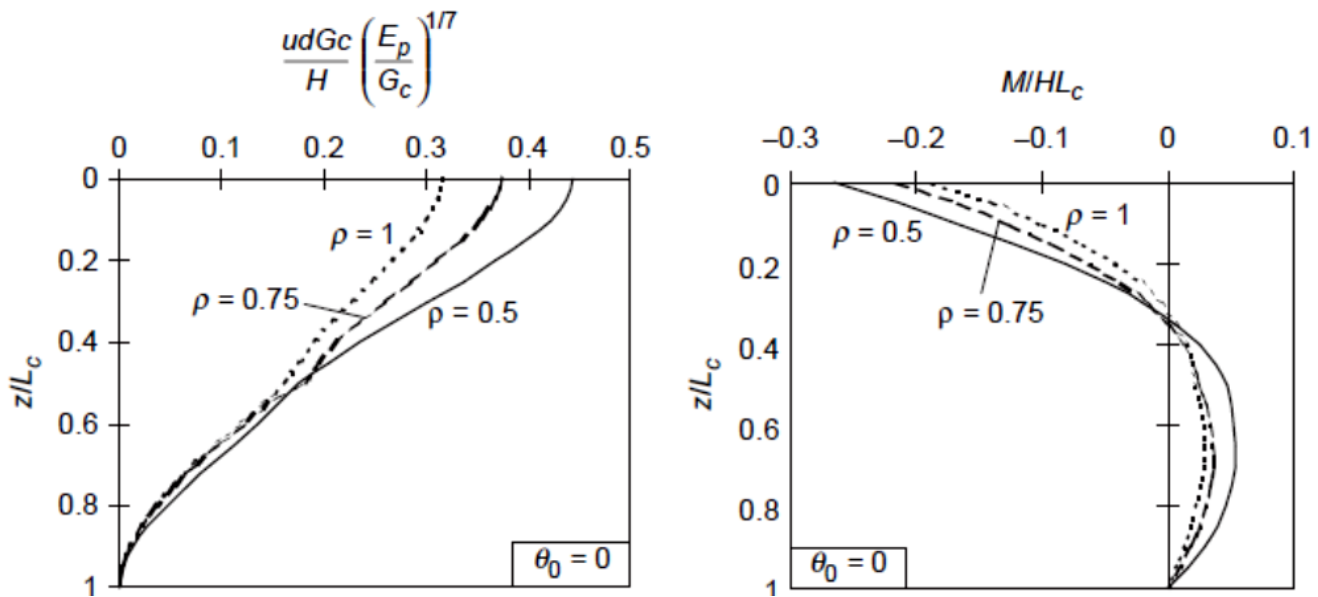
**Σχήμα 1.14:** Γενικευμένες καμπύλες πλευρικής μετατόπισης και προφίλ ροπής κάμψης για καμπτική φόρτιση.

Η τιμή του  $G_c$  επομένως προκύπτει  $0.5 * 23.1 * 0.306 = 3.53 \text{ MPa}$  και  $\rho_c = 0.5$ .

Υπό εγκάρσια φόρτιση ίση με  $1 \text{ MN}$ , χωρίς επιτρεπόμενη στροφή στην επιφάνεια του εδάφους, η μέγιστη ροπή κάμψης και η μετατόπιση στο επίπεδο της επιφάνειας υπολογίζονται από τις εξισώσεις 1.89, 1.90 αντίστοιχα, δίνοντας:

$$M_f = -6.1 \text{ MNm}$$

$$u_f = 21.3 \text{ mm}$$



**Σχήμα 1.15:** Γενικευμένες καμπύλες πλευρικής μετατόπισης και προφίλ ροπής κάμψης για εγκάρσια φόρτιση πασσάλου πακτωμένης κεφαλής.

Ορισμένες διευκρινίσεις απαιτούνται, λαμβάνοντας υπόψη την εφαρμοσιμότητα των λύσεων για την απόκριση των πασσάλων σε εγκάρσια φόρτιση, με βάση τις ελαστικές ιδιότητες του εδάφους. Σαφώς, οι μεγάλες τάσεις που εμφανίζονται τοπικά γύρω από την κεφαλή του πασσάλου θα μειώσουν αρκετά την τιμή της τέμνουσας. Η εξιδανίκευση του εδάφους ως υλικό με δυσκαμψία ανάλογη του βάθους είναι «καλύτερη» από την προσομοίωσή του ως ομοιογενές υλικού. Ωστόσο, ακόμα και με αυτή την εξιδανίκευση, η επιλογή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους θα εξαρτηθεί από το μέγεθος της μετακίνησης που αναμένεται. Δοκιμές φυγοκέντρισης σε πασσάλους ενσωματωμένους σε πυκνή άμμο, που αναφέρονται από τον Barton (1982), δείχνουν ότι η δυσκαμψία του εδάφους μειώνεται απότομα, καθώς η εκτροπή της κεφαλής του πασσάλου αυξάνεται.

#### 1.4 Εξιδανίκευση προβόλου

Η μετατόπιση ενός εγκάρσια φορτισμένου πασσάλου περιορίζεται γενικά στο πάνω μέρος του και σπάνια πέραν μήκους ίσου με περίπου 10 φορές τη διάμετρό του κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σε μια κοινή - αν και ασαφή - προσομοίωση του πασσάλου, που υποβάλλεται σε εγκάρσιο φορτίο, με ισοδύναμο πρόβολο. Ο πάσσαλος αντικαθίσταται από ένα πρόβολο, πακτωμένο σε κάποιο βάθος αγνοώντας τη στήριξη του εδάφους πάνω από αυτό.

Η κύρια έλλειψη της προσομοίωσης των εγκάρσια φορτισμένων πασσάλων ως προβόλων, πακτωμένων σε κάποιο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, είναι η έλλειψη της συμβολής του ρόλου της σχετικής δυσκαμψίας εδάφους-πασσάλου στον προσδιορισμό κατάλληλου βάθους της πάκτωσης. Οι εξισώσεις 1.86, 1.87 μπορούν να διατυπωθούν σε μορφή περισσότερο οικεία στους μηχανικούς, αντικαθιστώντας το  $G_c$  σε όρους  $E_p$  και στη συνέχεια με την αντικατάσταση του  $E_p$  με  $(EI)_p / (\pi d^4 / 64)$ . Στις περισσότερες περιπτώσεις, θα είναι κατάλληλη η λήψη του  $\rho_c$  (εξίσωση 1.80) ίση με 0.5, επιτρέποντας πολύ χαμηλή δυσκαμψία του εδάφους κοντά στην επιφάνεια, όπου αναπτύσσονται υψηλές τάσεις στο έδαφος. Για την περίπτωση αυτή, οι εξισώσεις 1.86, 1.87 μετατρέπονται ως εξής:

$$u = 0.424 \frac{H}{EI} \left( \frac{L_c}{2} \right)^3 + 0.472 \frac{M}{EI} \left( \frac{L_c}{2} \right)^2 \quad (1.94)$$

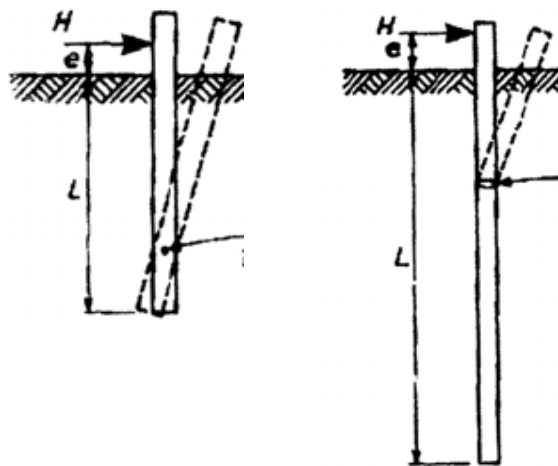
$$\theta = 0.472 \frac{H}{EI} \left( \frac{L_c}{2} \right)^2 + 0.887 \frac{M}{EI} \left( \frac{L_c}{2} \right) \quad (1.95)$$

Αυτές οι εξισώσεις είναι παρόμοιες με εκείνες που θα λαμβάνονταν από την προσομοίωση του πασσάλου ως προβόλου, με την πάκτωση να βρίσκεται σε βάθος ίσο με  $L_c/2$ . Σ' αυτή την περίπτωση, οι τρεις ανεξάρτητοι συντελεστές είναι ίσοι με 1/3, 1/2 και 1 αντίστοιχα, αντί των τιμών 0.424, 0.472 και 0.887. Με αυτόν τον τρόπο, τα λάθη που υπάρχουν στην εκτίμηση των παραμορφώσεων του πασσάλου από την εξιδανίκευσή του ως προβόλου, θα είναι μικρά, υπό την προϋπόθεση ότι έχει ληφθεί το κατάλληλο βάθος πάκτωσης ( $L_c/2$ ).

Η εξιδανίκευση προβόλου δεν είναι κατάλληλη για την εκτίμηση του προφίλ των οριζόντιων μετατοπίσεων που προκαλούνται από ροπές κάμψης. Για παράδειγμα, στην απλή περίπτωση ενός πασσάλου υποβαλλόμενου μόνο σε εγκάρσια δύναμη  $H$ , ( $M=0$ ), η εξίσωση 1.88 δίνει μέγιστη ροπή κάμψης ίση με  $0.2HL_c$  (λαμβάνοντας  $\rho_c = 0,5$ ), σε βάθος  $L_c / 3$ . Η προσέγγιση προβόλου θα δώσει μέγιστη ροπή κάμψης στη βάση του προβόλου (βάθος  $L_c / 2$ ) ίση με  $0.5HL_c$ .

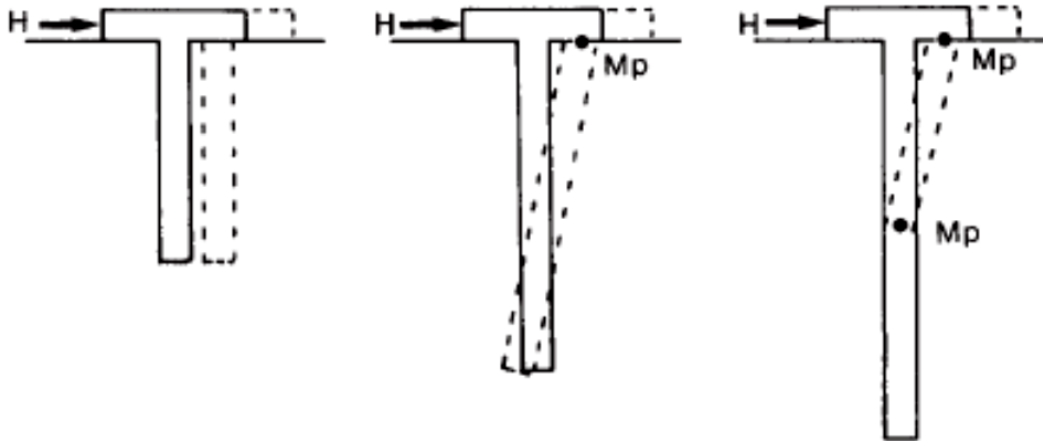
### 1.5 Μέθοδος Broms

Η προσέγγιση του οριακού οριζόντιου φορτίου βάσει της μεθόδου Broms είναι κατάλληλη για μελέτη «κοντού» και «μακρύ» πασσάλου, πακτωμένης ή ελεύθερα στρεπτής κεφαλής σε συνεκτικό ή μη συνεκτικό έδαφος, με την υπόθεση ότι ο πάσσαλος ισοδυναμεί με δοκό σε ελαστική θεμελίωση. Ένας πάσσαλος χαρακτηριζόμενος ως «κοντός» θεωρείται ότι είναι πρακτικά άκαμπτος και ότι κατά την επιβολή εγκάρσιου φορτίου θα περιστραφεί ενιαία. Το έδαφος που βρίσκεται σε επαφή με τον «κοντό» πάσσαλο υποθέτουμε ότι θα αστοχήσει σε διάτμηση (αστοχία λόγω θραύσεως του εδάφους) όταν το εγκάρσιο φορτίο φτάσει την οριακή τιμή του, Σχήμα 1.16α. Αντιθέτως, η αστοχία του συστήματος πασσάλου-εδάφους, στην περίπτωση «μακρύ» πασσάλου θα επέλθει λόγω υπερβάσεως της αντοχής του πασσάλου έναντι καμπτικών ροπών, δηλαδή θα δημιουργηθεί πλαστική άρθρωση, Σχήμα 1.16 β. Τέλος ο όρος «πάσσαλος πακτωμένης κεφαλής» υποδεικνύει ότι εμποδίζεται η στροφή του πασσάλου.



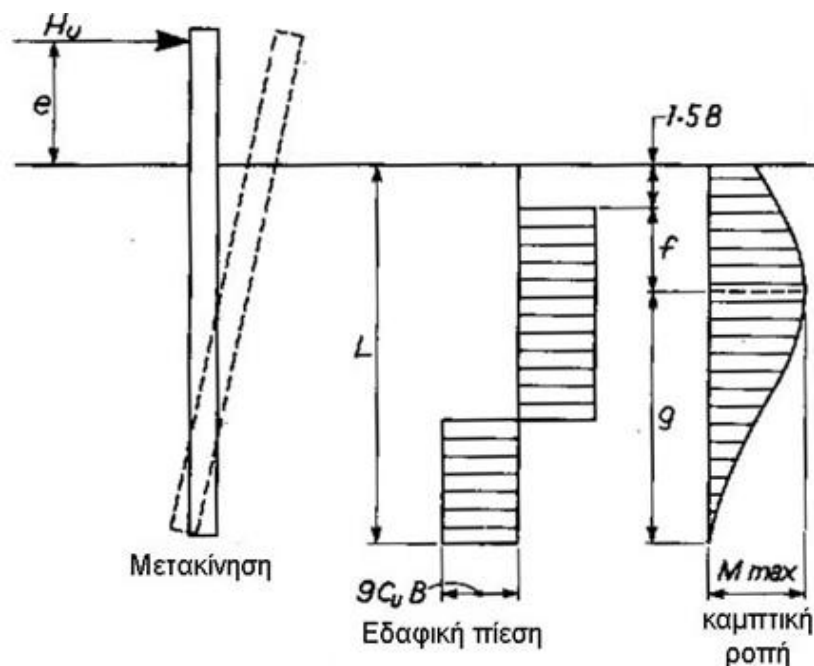
**Σχήμα 1.16:** Μοντέλα αστοχίας πασσάλου ελεύθερης κεφαλής: α) Κοντός πάσσαλος, β) Μακρύς πάσσαλο

Ο Broms θεωρεί ότι η πίεση θραύσεως του συνεκτικού εδάφους ισούται με  $9c_u$ , όπου  $c_u$  η αστράγγιστη διατμητική αντοχή, κατά μήκος του πασσάλου ξεκινώντας από βάθος ίσο με 1.5 φορές τη διάμετρό του ( $1.5 \cdot b$ ). Ο λόγος, για τον οποίο αγνοεί την εδαφική αντίδραση σε αυτό το ύψος, είναι η πιθανή αποκοπή σφήνας εδάφους κατά τη διεύθυνση άσκησης του εγκάρσιου φορτίου. Παρακάτω παρουσιάζονται εκφράσεις για την εύρεση της τιμής του οριζόντιου οριακού φορτίου και της μέγιστης ροπής κάμψης για την εκάστοτε περίπτωση πασσάλου.



**Σχήμα 1.17:** Μοντέλα αστοχίας πασσάλου δεσμευμένης κεφαλής: α) Καμία πλαστική άρθρωση, β) μία πλαστική άρθρωση, γ) δύο πλαστικές αρθρώσεις.

### 1.5.1 Κοντός ελεύθερα στρεπτής κεφαλής πάσσαλος



**Σχήμα 1.18:** Κατανομή εδαφικής πίεσης και καμπτικής ροπής κοντών πασσάλων με ελεύθερη κεφαλή σε συνεκτικό έδαφος.

Στην περίπτωση κοντού πασσάλου με ελεύθερη στροφή ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:

Θέση μέγιστης ροπής:

$$f = H_u / 9c_u B \quad (1.96)$$

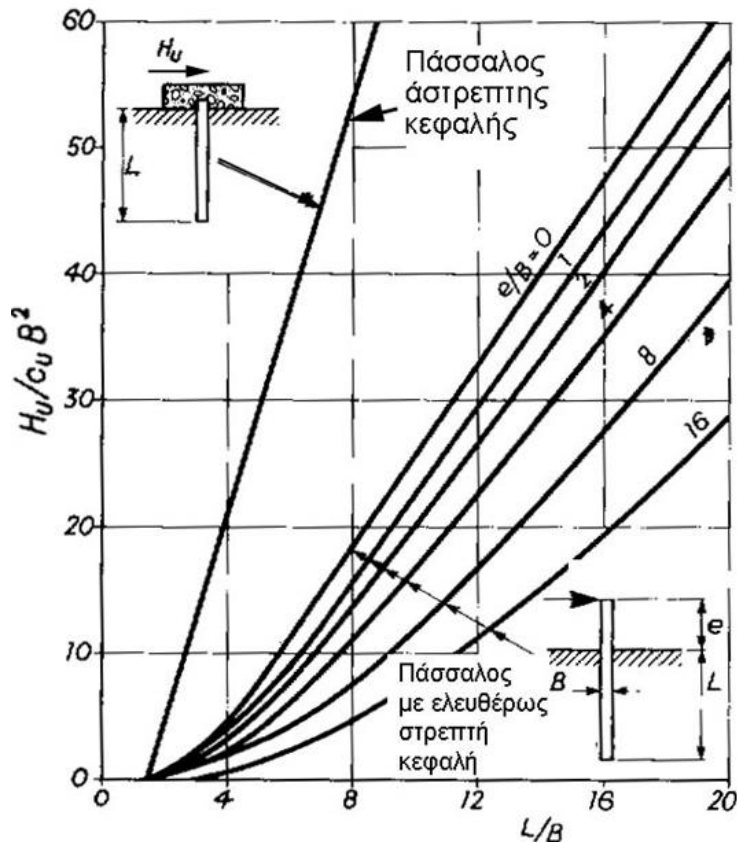
Τιμή μέγιστης ροπής πάνω από το σημείο μηδενισμού της τέμνουσας:

$$M_y = 2.25c_u Bg^2 - 9c_u Bf(1.5B + 0.5f) \quad (1.97)$$

Τιμή μέγιστης ροπής κάτω από το σημείο μηδενισμού της τέμνουσας:

$$M_{\max} = 2.25Bg^2c_u \quad (1.98)$$

Ο υπολογισμός του οριακού φορτίου επιτυγχάνεται με την επίλυση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων, υπό τη μορφή αδιαστατοποιημένων διαγραμμάτων, Σχήμα 1.19, γνωρίζοντας ότι  $L=1.5B+f+g$ . Απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρήση των διαγραμμάτων αποτελεί η ισχύς της εξίσωσης  $M_y > M_{\max}$ , όπου  $M_y$  η ροπή θραύσεως της διατομής του πάσσалу, ώστε ο πάσσαλος να θεωρείται «κοντός».



Σχήμα 1.19: Διαγράμματα υπολογισμού οριζόντιου οριακού φορτίου κοντών πασσάλων, άστρεπτης και ελευθέρως στρεπτής κεφαλής, σε συνεκτικό έδαφος.

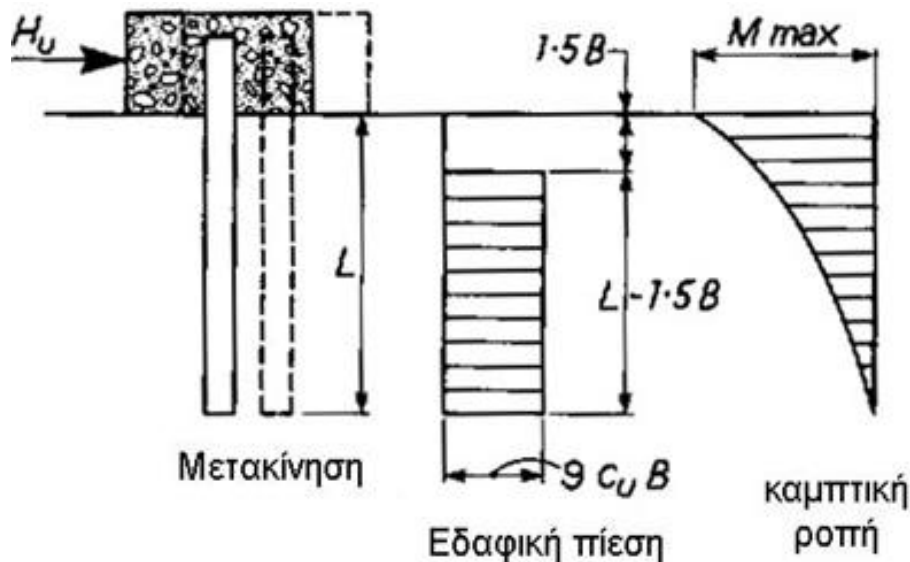
### 1.5.2 Κοντός δεσμευμένης κεφαλής πάσσαλος

Για κοντό πάσσαλο με δεσμευμένη κεφαλή, η αστοχία επέρχεται με την οριζόντια κίνηση του πασσάλου μέσα στο έδαφος και την πλήρη ανάπτυξη της εδαφικής αντίδρασης κατά μήκος του από βάθος κάτω του 1.5 φορές τη διάμετρό του. Μέσω της ισοροπίας των δυνάμεων προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$H_u = 9c_u B(L - 1.5B) \quad (1.99)$$

και

$$M_{\max} = H_u (0.5L + 0.75B) \quad (1.100)$$



**Σχήμα 1.20:** Κατανομή εδαφικής πίεσης και καμπτικής ροπής κοντών πασσάλων δεσμευμένης κεφαλής σε συνεκτικό έδαφος.

### 1.5.3 Μακρύς ελεύθερα στρεπτής κεφαλής πάσσαλος

Στην περίπτωση μακρύ πασσάλου με ελεύθερη κεφαλή, η πλαστική άρθρωση κατά την αστοχία δημιουργείται σε βάθος  $z=1.5f+b$  από την επιφάνεια του εδάφους. Οι εξισώσεις, για τη θέση και την τιμή της μέγιστης ροπής κάμψης πάνω από το σημείο μηδενισμού της τέμνουσας, που έχουν εκφραστεί για την αντίστοιχη περίπτωση κοντού πασσάλου ισχύουν και για το μακρύ πάσσαλο. Η τιμή του οριακού εγκάρσιου φορτίου υπολογίζεται με τη χρήση των διαγραμμάτων του Σχήματος 1.24, θέτοντας στην τιμή  $M_{max}$  των εξισώσεων τη γνωστή τιμή της ροπής θραύσεως του πασσάλου,  $M_y$ .

### 1.5.4 Μακρύς δεσμευμένης κεφαλής πάσσαλος

Το κριτήριο αστοχίας είναι η υπέρβαση της ροπής θραύσεως,  $M_y$ , από τη θετική ροπή ανοίγματος, οπότε το οριζόντιο οριακό φορτίο προκύπτει από την εξίσωση:  $H_u=2M_y/(1.5B+0.5f)$ . Λόγω της υπέρβασης της αντοχής του πασσάλου δημιουργούνται δύο πλαστικές αρθρώσεις. Στην περίπτωση υπέρβασης της ροπής,  $M_y$ , από την αρνητική ροπή πακτώσεως (ενδιάμεσου μήκους πασσάλου), η πλαστική άρθρωση θα δημιουργηθεί μόνο στην πάκτωση. Η αντίστοιχη σχέση της ροπής πακτώσεως έχει ως εξής:

$$M_y = 2.25c_u Bg^2 - 9c_u Bf(1.5B + 0.5f) \quad (1.101)$$

Με τη βοήθεια των εξισώσεων  $f=H_u/9c_u B$  και  $L=1.5B+f+g$  υπολογίζεται η τιμή του οριακού φορτίου,  $H_u$ . Για τη συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει να ισχύει ότι η ροπή σε βάθος  $f+1.5B$  είναι μικρότερη από τη ροπή  $M_y$ .

### 1.5.5 Μετατόπιση πασσάλων

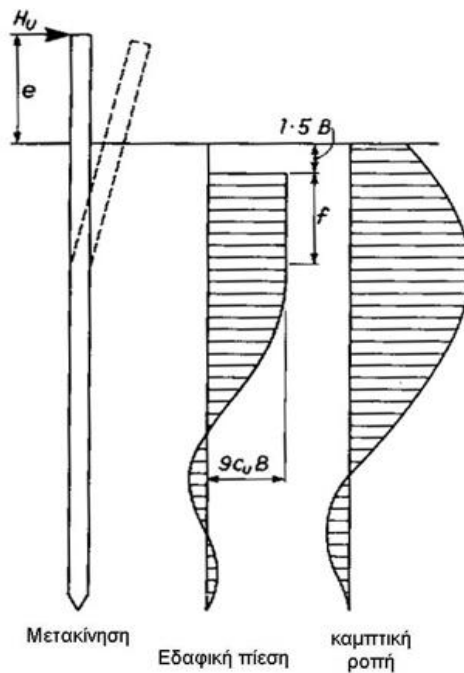
Όσο αφορά την εύρεση της μετατόπισης πασσάλων σε συνεκτικό έδαφος, ο Broms βασίζεται στη θεώρηση του εδάφους ως μονοπαραμετρικού ελαστικού μέσου, ακολουθώντας τη σχέση  $p=k_h y$ , όπου  $k_h$  ο δείκτης εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση. Για την περίπτωση μακρών πασσάλων ο δείκτης εδάφους  $k_h$  ισούται με:

$$k_h = 0.4 \frac{k}{B} \quad (1.102)$$

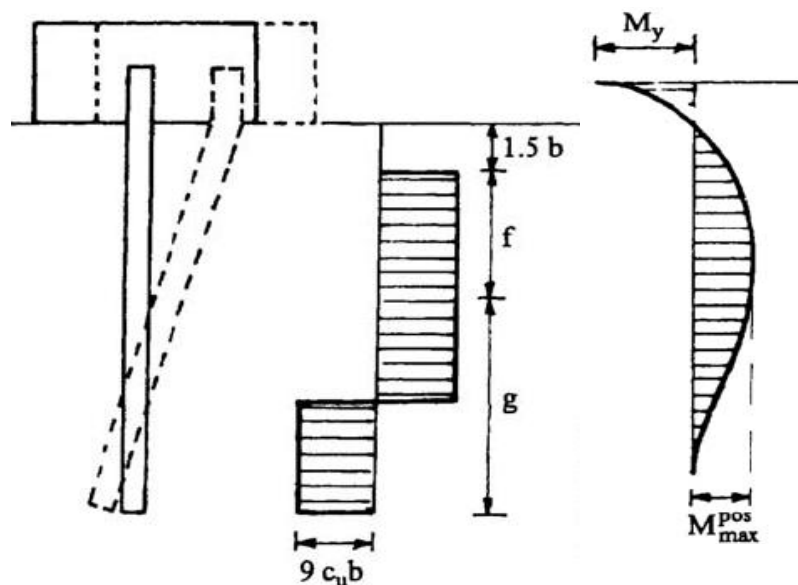
όπου  $k$  δείκτης εδάφους κατά την κατακόρυφο. Ο υπολογισμός της πλευρικής μετατόπισης επιτυγχάνεται μέσω διαγραμμάτων με τη χρήση ενός συντελεστή  $\beta$ , ο οποίος υπολογίζεται ως:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Bk_h}{EI}} \quad (1.103)$$

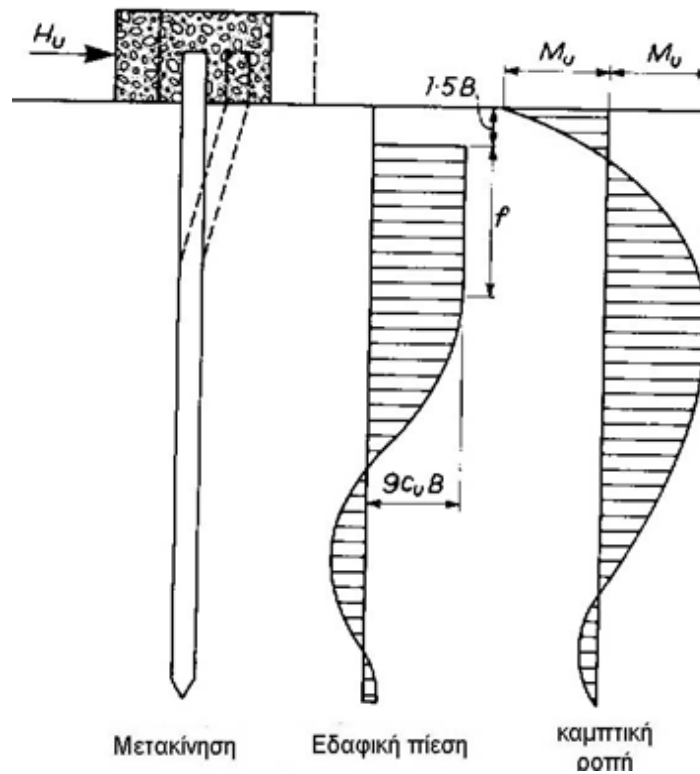
όπου  $L$  το μήκος του πασσάλου,  $B$  η διάμετρός του και  $EI$  το μέτρο ελαστικότητας και η ροπή αδράνειας του πασσάλου. Σημειώνεται ότι κριτήριο για το διαχωρισμό του πασσάλου ως κοντού ή μακρού είναι:  $\beta L < 2.25$  για κοντό πάσσαλο και  $\beta L > 2.25$  για μακρύ πάσσαλο.



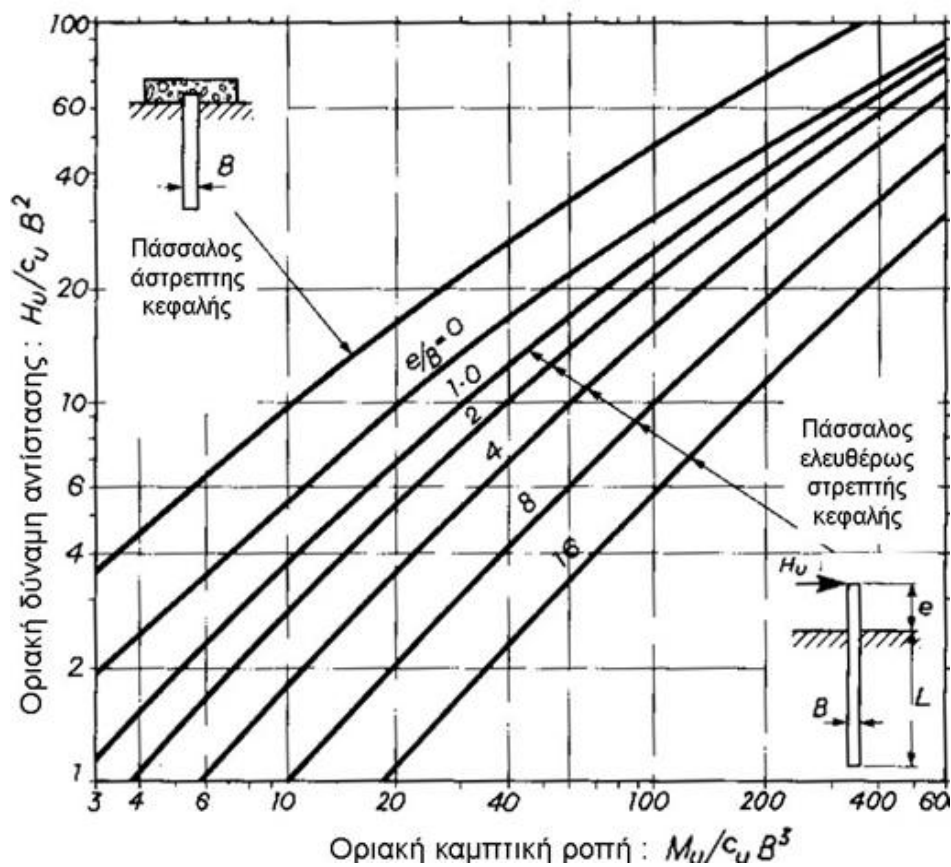
**Σχήμα 1.21:** Κατανομή εδαφικής πίεσης και καμπτικής ροπής μακρών πασσάλων ελεύθερα στρεπτής κεφαλής σε συνεκτικό έδαφος.



**Σχήμα 1.22:** Κατανομή εδαφικής πίεσης και καμπτικής ροπής ενδιάμεσου μήκους πασσάλων, δεσμευμένης κεφαλής, σε συνεκτικό έδαφος.



**Σχήμα 1.23:** Κατανομή εδαφικής πίεσης και καμπτικής ροπής μακρών πασσάλων δεσμευμένης κεφαλής σε συνεκτικό έδαφος.



**Σχήμα 1.24:** Διαγράμματα υπολογισμού οριζόντιου οριακού φορτίου μακρών πασσάλων, άστρεπτης και ελευθέρως στρεπτής κεφαλής, σε συνεκτικό έδαφος

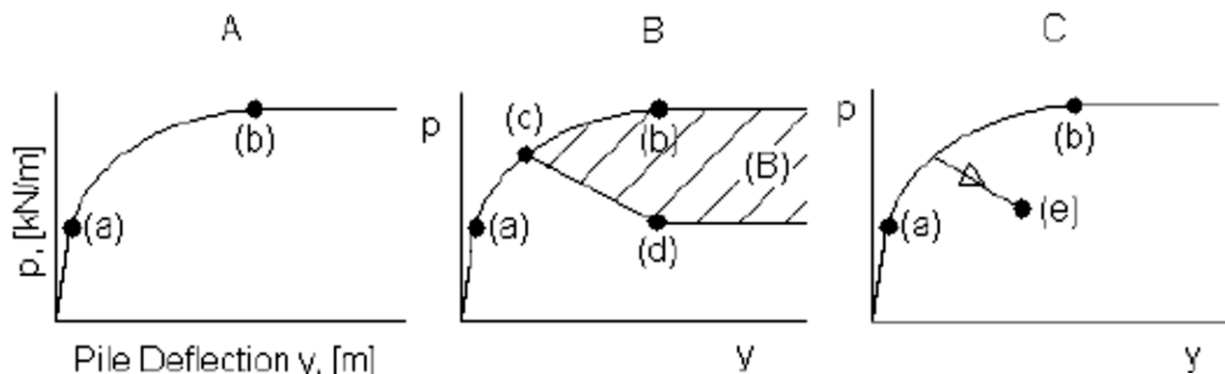


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Μέθοδοι χάραξης μη-γραμμικών καμπύλων p-y

Με το προσομοίωμα των καμπύλων p-y νοείται ένα αριθμητικό προσομοίωμα της αντίδρασης του εδάφους με προκαθορισμένα μη-γραμμικά ελατήρια. Οι μετατοπίσεις και οι καμπτικές ροπές κατά μήκος του πασσάλου υπολογίζονται μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας μέχρι το φορτίο και η αντοχή του εδάφους (ανάλογα με τη μετατόπιση του πασσάλου) να ισορροπήσουν. Ενδιαφέρον πάνω στο συγκεκριμένο προσομοίωμα αναπτύχθηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1940 και του 1950 όταν οι εταιρείες ενέργειας άρχισαν να ασχολούνται με τις παράκτιες κατασκευές, οι οποίες σχεδιάζονταν με αντίσταση σε μεγάλα οριζόντια φορτία ασκούμενα από τα κύματα. Ακριβής ημερομηνία δημοσίευσης του προσομοιώματος δεν είναι διαθέσιμη, αφού οι καμπύλες p-y, τροποποιούνται και βελτιώνονται μέχρι και σήμερα. Οι πρώτες συστάσεις για τη συμπεριφορά της αντίδρασης του εδάφους συναρτήσει της εγκάρσιας μετατόπισης του πασσάλου συναντώνται στη βιβλιογραφία του Skempton και του Terzaghi. Σκοπό του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση εκφράσεων για το σχηματισμό καμπύλων p-y, καταλλήλων για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός πασσάλου ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες φόρτισης και τις ιδιότητες του περιβάλλοντος εδάφους.

### 2.1 Ιστορικό

Υπάρχουν δύο είδη μη-γραμμικότητας στο πρόβλημα της εγκάρσιας φόρτισης πασσάλων. Η πρώτη αφορά τη μη-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους που περιβάλλει τον πάσσαλο. Για μικρές εγκάρσιες μετατοπίσεις του πασσάλου, το έδαφος αντιδρά με μεγαλύτερη δυσκαμψία σε σχέση με το έδαφος σε καθεστώς μεγαλύτερων παραμορφώσεων. Η δεύτερη μη-γραμμικότητα εντοπίζεται στη συμπεριφορά του πασσάλου. Η καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου μειώνεται με την αύξηση της καμπτικής ροπής που ασκείται στην κεφαλή του. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της αξονικής φόρτισης στη ροπή κάμψης χρησιμοποιείται μία διαφορική εξίσωση, στην οποία συμπεριλαμβάνεται η επίδραση του λογισμού. Αριθμητικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση αυτής της διαφορικής εξίσωσης.



Σχήμα 2.1: Τυπικές μορφές καμπύλων p-y A: στατική φόρτιση, B: ανακυκλιζόμενη φόρτιση, C: μακροχρόνια φόρτιση.

### 2.2 Χαρακτηριστικά καμπύλων p-y

Μία τυπική καμπύλη p-y φαίνεται στο Σχήμα 2.1A. Η καμπύλη προσομοιώνει μία βραχυχρόνια, εγκάρσια, στατική φόρτιση στον πάσσαλο. Το αρχικό τμήμα αποτελείται από μια ευθεία γραμμή μεταξύ της αρχής των αξόνων και του σημείου (a), με την υπόθεση ότι η αντίδραση του εδάφους ( $p$ ) σχετίζεται γραμμικά με τη μετατόπιση του πασσάλου ( $y$ ) για την επιβολή σχετικά μικρών οριζόντιων φορτίων. Αναλυτικές μέθοδοι έχουν καθιερωθεί για την εκτίμηση αυτής της σχέσης.

Στο δεύτερο τμήμα, από το σημείο (a) έως (b), φαίνεται ότι η αντίδραση του εδάφους αυξάνεται με φθίνοντα ρυθμό σε σχέση με τη μετατόπιση του πασσάλου. Μ' αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται η μη-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους. Το οριζόντιο τμήμα της καμπύλης ορίζει τη μέγιστη αντίδραση του εδάφους. Το έδαφος συμπεριφέρεται πλαστικά μετά το σημείο (b), καθώς η αντίδραση του εδάφους παραμένει σταθερή και ίση με τη μέγιστη παρά την αύξηση της μετατόπισης του πασσάλου. Η τιμή, λοιπόν, της μέγιστης αντίδρασης του εδάφους αντιστοιχεί στην τιμή του φορτίου μετά την άσκηση του οποίου επέρχεται η αστοχία του εδάφους που περιβάλλει το «σώμα» του πασσάλου. Το σκιασμένο εμβαδό στο Σχήμα 2.1 Β δείχνει τη φθίνουσα πορεία της τιμής της εδαφικής αντίδρασης, από το σημείο (c) μέχρι το σημείο (d). Η μείωση αυτή καταδεικνύει την επίδραση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης στην καμπύλη p-y. Τα Σχήματα Α και Β είναι πανομοιότυπα μέχρι το σημείο (c). Συνεπάγεται ότι οι μικρές ανακυκλιζόμενες φορτίσεις έχουν μικρή έως καμία επίδραση στη συμπεριφορά του εδάφους μέχρι εκείνο το σημείο.

Η πιθανή επίδραση της μακροχρόνιας φόρτισης φαίνεται στο Σχήμα 2.1C. Στην περίπτωση που η διαπερατότητα του εδάφους είναι χαμηλή, η αυξημένη πίεση πόρων του νερού θα αποτονωθεί αργά. Αυτό σημαίνει ότι αρχικά η δυσκαμψία του εδάφους είναι υψηλή, αλλά μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Η γραμμή (e) δείχνει αυτή την επίδραση του χρόνου υπό σταθερό φορτίο. Η μειωμένη τιμή της εδαφικής αντίδρασης, υποδεικνύει ότι καθώς οι μετατοπίσεις αυξάνονται, η αντίδραση μεταβιβάζεται σε άλλα στοιχεία του πασσάλου.

### 2.3 Επιρροή της διαμέτρου

Αναλυτικές εκφράσεις για τις καμπύλες p-y υποδεικνύουν ότι η διάμετρος του πασσάλου παίζει σημαντικό ρόλο στη μόρφωσή τους. Οι Reese et al. (1975) περιγράφουν δοκιμές σε πασσάλους διαμέτρου 152 mm και 641 mm στην περιοχή Manor. Οι διατυπώσεις για τις καμπύλες p-y που προέκυψαν από την ανάλυση αποτελεσμάτων για τους μεγαλύτερους πασσάλους, χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της συμπεριφοράς μικρότερων πασσάλων. Από τους υπολογισμούς της καμπυλικής ροπής διαπιστώθηκε συμφωνία αποτελεσμάτων μεταξύ ανάλυσης και πειραμάτων, κάτι που δεν συνέβη όμως και για τους υπολογισμούς της μετατόπισης στην επιφάνεια του εδάφους, αφού οι υπολογισμένες τιμές προέκυψαν σημαντικά μικρότερες από αυτές των επιτόπου μετρήσεων. Για την τελευταία διαφωνία αποτελεσμάτων δεν ήταν δυνατόν να δοθεί κάποια αιτιολόγηση.

Επιπλέον, οι O'Neill & Dunnavant (1984) και Dunnavant & O'Neill (1985) αναφέρονται σε δοκιμές με πασσάλους διαμέτρων 273 mm, 1220 mm και 1830mm υπό εγκάρσια φόρτιση που πραγματοποιήθηκαν σε περιοχή στην οποία η άργιλος ήταν υπερστερεοποιημένη. Διαπίστωσαν ότι η απόκριση του εδάφους στη συγκεκριμένη περιοχή διέπεται από μία μη-γραμμική συνάρτηση της διαμέτρου.

### 2.4 Προτάσεις για τον προσδιορισμό καμπύλων p-y σε συνεκτικά εδάφη

Προκειμένου να οριστεί το αρχικό τμήμα της καμπύλης, καθίσταται αναγκαίος ο προσδιορισμός της δυσκαμψίας,  $E_{smax}$ , για μικρές παραμορφώσεις, κάτι που δεν μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί. Μελέτες αναφέρουν τιμές της δυσκαμψίας,  $E_{smax}$ , οι οποίες ποικίλλουν από 40 μέχρι και 2840 φορές την τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Η βέλτιστη προσέγγιση της τιμής της κλίσης της καμπύλης, p-y, γίνεται μέσω πειραμάτων. Στη συνέχεια, καθορίζεται η οριακή εδαφική αντίδραση. Αναφορικά με το άνω μέρος του πασσάλου, η οριακή τιμή της εδαφικής αντίδρασης μπορεί να προσομοιωθεί με το μηχανισμό σφήνας που ωθείται προς τα πάνω (Σχήμα 2.2Α). Η αντίδραση της σφήνας διαμορφώνεται ως το άθροισμα της τριβής κατά μήκος των τριών πλευρών της σφήνας και της τριβής κατά μήκος της παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου.

Λαμβάνοντας υπόψη τις τριβές κατά μήκος των πλευρών της σφήνας και το ίδιο βάρος της προκύπτει η ακόλουθη έκφραση της  $p_{ult}$ :

$$P_{ult} = c_a b [\tan a_s + (1+k) \cot a_s] + \gamma' b H + 2c_a H (\tan a_s \sin a_s + \cos a_s) \quad (2.1)$$

όπου,

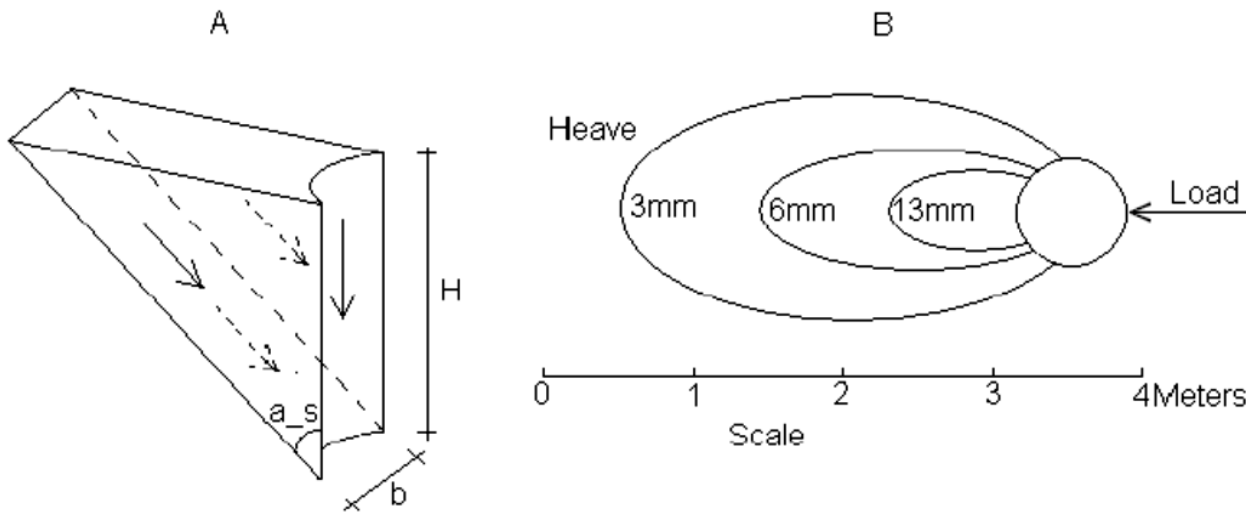
$p_{ult}$  = η οριακή εδαφική αντίδραση κοντά στην επιφάνεια του εδάφους ανά μονάδα μήκους πασσάλου (kN/m),

$c_a$  = μέση αστράγγιστη διατμητική αντοχή καθ ύψος της σφήνας (kN/m<sup>2</sup>),

$a_s$  = γωνία κεκλιμένου επιπέδου με την κατακόρυφο (μοίρες),

$\gamma'$  = ενεργό ειδικό βάρος εδάφους (kN/m<sup>3</sup>),

$k$  = μειωτικός συντελεστής της διατμητικής αντίδρασης κατά μήκος της παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου.



**Σχήμα 2.2:** A) Σφήνα εδάφους, B) Προσέγγιση αναμενόμενης ανύψωσης (J.Ruigrok)

Η εξίσωση 2.1 μπορεί να απλοποιηθεί κάνοντας την υπόθεση ότι η τιμή του  $k$  είναι η μηδενική και η τιμή του  $a_s$  ισούται με 45° :

$$p_{ul1} = 2c_a b + \gamma' b H + 2.83c_a H \quad (2.2)$$

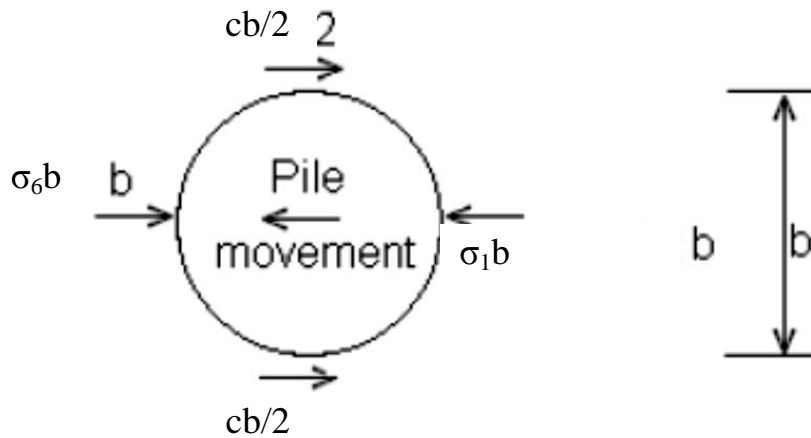
Η προσομοίωση της σφήνας ως αστοχία του εδάφους, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2, βρίσκεται υπό εξέταση. Μετρήσεις δείχνουν ότι η ανίζηση του εδάφους γύρω από έναν πάσσαλο δεν είναι ορθογώνια, αλλά έχει ένα περίπου ωοειδές σχήμα, Σχήμα 2.2 B.

Στη συνέχεια, απαιτείται ο υπολογισμός της οριακής αντίδρασης του εδάφους χαμηλότερα από το πάνω μέρος, όπου το έδαφος μετατοπίζεται μόνο οριζόντια. Η εδαφική αντίδραση διαμορφώνεται σε τέσσερα μέρη. Το πρώτο μέρος είναι η άμεση αντίδραση,  $\sigma_6 b$ , Σχήμα 2.3. Έπειτα, προσομοιώνεται η τριβή μεταξύ των πλευρών του πασσάλου και του εδάφους. Επειδή η διατομή του πασσάλου έχει κυκλικό σχήμα, η τριβή είναι ενεργή μόνο σε πλάτος ίσο με το μισό της διαμέτρου του πασσάλου. Η τριβή είναι συνάρτηση της συνοχής και ένα μέρος,  $\sigma_1 b$ , βρίσκεται πίσω από τον πάσσαλο. Το τελευταίο μέρος προκαλεί αρνητική αντίδραση, επειδή το έδαφος ωθεί τον πάσσαλο σε διεύθυνση ίδια με αυτή της κίνησής του.

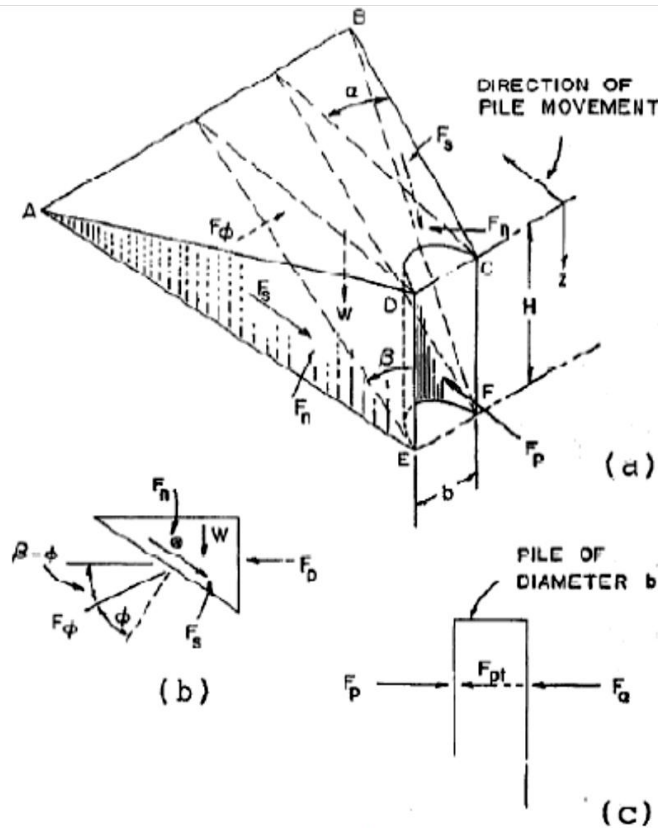
Συνεπάγεται η παρακάτω εξίσωση:

$$p_{u2} = (\sigma_6 - \sigma_1 + c) b = 11cb \quad (2.3)$$

Η παραπάνω απλοποιητική εξίσωση ίση με  $11cb$ , προκύπτει από εξίσωση ισορροπίας όλων των τάσεων γύρω από τον πάσσαλο ( Σχήμα 2.3). Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω αφορούν μία γενική κατάσταση για τα αργιλικά εδάφη. Ακολουθούν προτάσεις για τη μόρφωση καμπύλων  $p-y$  σύμφωνα με συγκεκριμένες μεθοδολογίες.



Σχήμα 2.3: Εδαφική αντίδραση σε περίπτωση οριζόντιας μετακίνησης του εδάφους ( J. Ruigrok).



Σχήμα 2.4: Μοντέλο εδαφικού τεμάχους στην επιφάνεια του εδάφους για τον υπολογισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης.

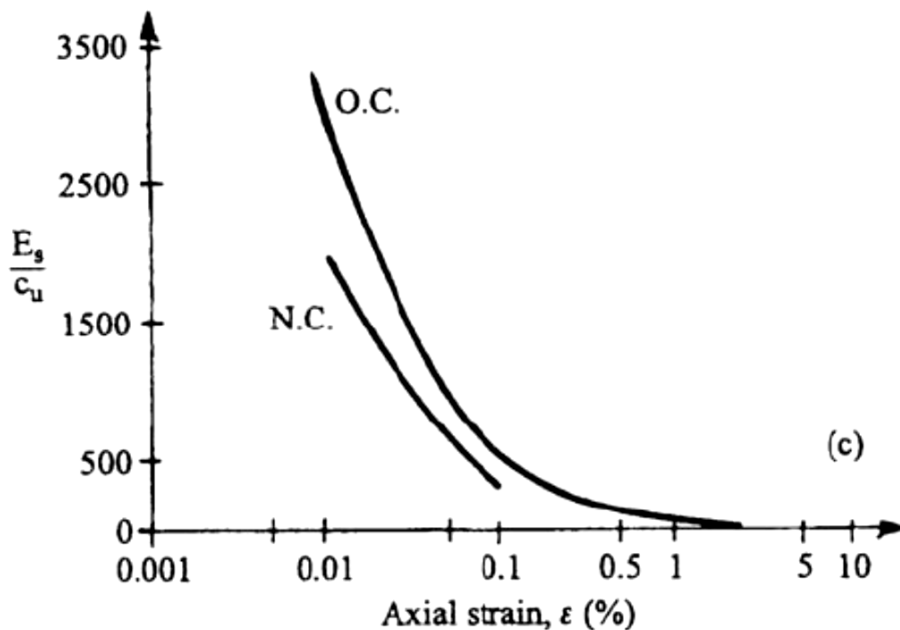
### 2.5 Επιλογή της δυσκαμψίας της αργίλου

Η δυσκαμψία των αργιλικών εδαφών εξαρτάται από την τιμή  $\epsilon_{50}$ , η οποία αντιστοιχεί στην παραμόρφωση δοκιμίου αργίλου υπό ένταση ίση με τη μισή της θλιπτικής του αντοχής. Οι τιμές της παραμόρφωσης  $\epsilon$  επί τις εκατό συναρτήσει των τιμών του μέτρου ελαστικότητας  $E_s$  διαιρεμένων με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u$  συνθέτουν καμπύλη, παράδειγμα της οποίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Η τιμή του  $c_u$  παραμένει σταθερή για συγκεκριμένες δοκιμές. Με αυτό τον τρόπο, η

μείωση του μέτρου ελαστικότητας, δηλαδή η μείωση του λόγου  $E_s/c_u$ , συνεπάγεται αύξηση της παραμόρφωσης  $\epsilon$ , όπως προκύπτει από το ίδιο Σχήμα (Σχήμα 2.5).

Αναφορικά με το ρόλο του συντελεστή  $\epsilon_{50}$  στις καμπύλες p-y, έχει διαπιστωθεί ότι για μικρές τιμές του  $\epsilon_{50}$  οι μετατοπίσεις του πασσάλου είναι μικρότερες στην περίπτωση σχετικά μικρών φορτίων. Για μεγαλύτερα φορτία η επιλογή του  $\epsilon_{50}$  επηρεάζει ελάχιστα τις υπολογισμένες τιμές της καμπτικής ροπής. Σε περίπτωση δηλαδή που ο μηχανικός ενδιαφέρεται περισσότερο για την αντοχή σε καμπτική ροπή, όπως αυτή των παράκτιων αποβάθρων, η επιλογή της τιμής  $\epsilon_{50}$  δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Αντιθέτως, αν ο μηχανικός ενδιαφέρεται για τον υπολογισμό οριζόντιων μετατοπίσεων του πασσάλου και μάλιστα υπό σχετικά μικρά εγκάρσια φορτία, οφείλει να επιλέξει με προσοχή την  $\epsilon_{50}$ .

Συνεπάγεται από τα παραπάνω ότι η ακαμψία της αργίλου είναι μία σημαντική παράμετρος και πρέπει να προσδιορίζεται προσεκτικά είτε από εργαστηριακές, είτε από επί τόπου δοκιμές. Απουσία αυτών των δεδομένων όμως, μπορούν οι τιμές της  $\epsilon_{50}$  να λαμβάνονται από αντίστοιχους πίνακες σύμφωνα με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου, όπως ο Πίνακας που παρατίθεται παρακάτω (Πίνακας 2.1). Η κατάλληλη επιλογή της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$  είναι σημαντική στον υπολογισμό της μετατόπισης υπό εγκάρσια φόρτιση, ειδικά για σχετικά μικρές τιμές του φορτίου, και λιγότερο σημαντική στον υπολογισμό της μέγιστης καμπτικής ροπής.



Σχήμα 2.5: Παράδειγμα καμπύλων του αστράγγιστου μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή συναρτήσει της παραμόρφωσης  $\epsilon$  (%).

## 2.6 Χάραξη καμπύλων p-y για μαλακές, κορεσμένες αργίλους

### 2.6.1 Χάραξη καμπύλων p-y κατά Matlock(1970)

Η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω αφορά σε βραχυχρόνια (στατική) φόρτιση, ανακυκλιζόμενη φόρτιση και μετά-ανακυκλιζόμενη φόρτιση και απεικονίζεται στα Σχήματα 2.6 και 2.7, αντίστοιχα (Matlock 1970).

**Πίνακας 2.1.** Τιμές της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$  για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους.

Συνοχή αργίλου	Μέση τιμή σε kPa*	$\epsilon_{50}$
Μαλακή	<48	0.020
Μέτρια	48-96	0.010
Στιφρή	96-192	0.005
*Peck et al. 1974		

Για τη μόρφωση καμπύλης  $p$ - $y$  σε μαλακή, κορεσμένη άργιλο υπό στατική φόρτιση ακολουθούμε τα εξής βήματα:

1. Συγκέντρωση των χαρακτηριστικών του εδάφους (ειδικό βάρος, αστράγγιστη διατμητική αντοχή, κλπ.). Υπολογισμός της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$  από τις καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων που έχουν σχεδιαστεί για το συγκεκριμένο έδαφος βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων. Αν δεν διατίθενται καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων λαμβάνονται τιμές της  $\epsilon_{50}$  σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1.

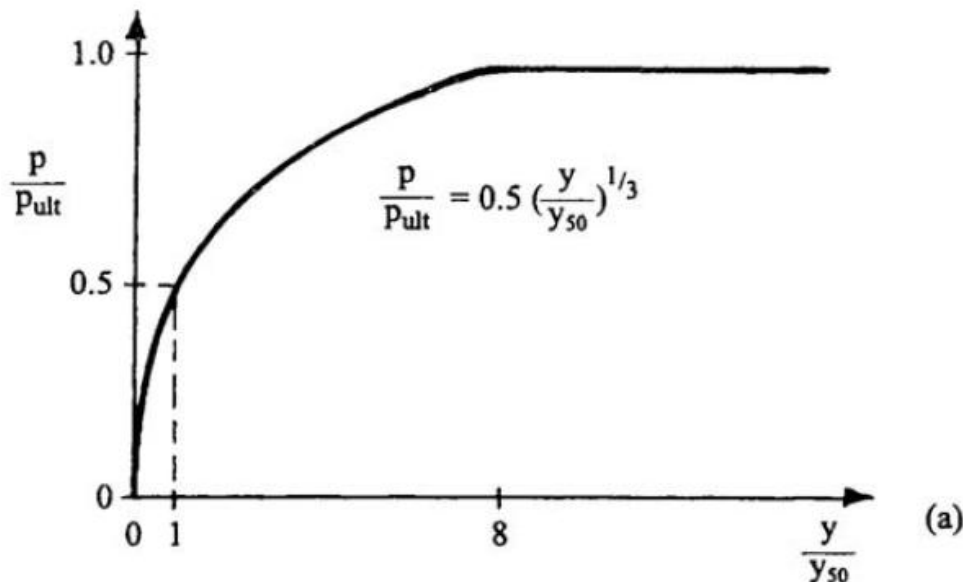
2. Υπολογισμός της οριακής αντίδρασης του εδάφους ανά μονάδα μήκους πασσάλου, χρησιμοποιώντας την ελάχιστη από τις τιμές των δύο παρακάτω εξισώσεων:

$$p_{ult} = \left[ 3 + \frac{\gamma'}{c_u} z + \frac{J}{b} z \right] c_u b \quad (2.4)$$

$$p_{ult} = 9c_u b \quad (2.5)$$

όπου  $\gamma'$  = υπό άνωση ειδικό βάρος από την επιφάνεια του εδάφους,  $z$  = βάθος για το οποίο μορφώνεται η καμπύλη  $p$ - $y$ ,  $c_u$  = αστράγγιστη διατμητική αντοχή στο βάθος  $z$ ,  $b$  = διάμετρος του πασσάλου.

Ο Matlock (1970) ανέφερε ότι η τιμή  $J$  εκτιμάται πειραματικά ίση με 0.5 για μαλακή άργιλο και 0.25 για μέτριας στιφρότητας άργιλο. Η τιμή  $p_{ult}$  υπολογίζεται στο βάθος χάραξης της καμπύλης  $p$ - $y$  βάσει της αστράγγιστης διατμητική αντοχής στο συγκεκριμένο βάθος.



**Σχήμα 2.6:** Χαρακτηριστική μορφή καμπύλης  $p$ - $y$  για πάσσαλο σε μαλακή, κορεσμένη άργιλο υπό στατική φόρτιση (Matlock 1970).

3. Υπολογισμός της μετατόπισης  $y_{50}$ , για το μισό της οριακής αντίδρασης του εδάφους, από την ακόλουθη σχέση:

$$y_{50} = 2.5\epsilon_{50}b \quad (2.6)$$

4. Η συνάρτηση των σημείων που περιγράφουν την καμπύλη p-y για πάσσαλο υπό εγκάρσια φόρτιση σε μαλακή, κορεσμένη άργιλο υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{p}{p_{ult}} = 0.5 \left( \frac{y}{y_{50}} \right)^{1/3} \quad (2.7)$$

Η τιμή του p παραμένει σταθερή για τιμές μεγαλύτερες του  $y = 8y_{50}$ .

Για τη μόρφωση της συγκεκριμένης καμπύλης p-y εισάγεται η εξίσωση του βήματος 4 σε ένα λογιστικό φύλλο Excel και για σταδιακά αυξανόμενες τιμές της μετατόπισης y – μέχρι τη μετατόπιση  $8y_{50}$  – υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές της πίεσης p.

Η παρακάτω διαδικασία αφορά σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση και φαίνεται στο Σχήμα 2.7:

1. Κατασκευή της καμπύλης p-y ομοίως με την καμπύλη για βραχυχρόνια στατική φόρτιση, για τιμές του p μικρότερες από  $0.72 p_{ult}$ .

2. Επίλυση των εξισώσεων του βήματος 2. ταυτόχρονα, για τον υπολογισμό του κρίσιμου βάθους  $z_r$ , στο οποίο αλλάζει ο κλάδος της καμπύλης. Αν το ειδικό βάρος και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους είναι σταθερά με το βάθος στην ανώτερη εδαφική ζώνη, τότε:

$$z_r = \frac{6c_u b}{(\gamma' b + Jc_u)} \quad (2.8)$$

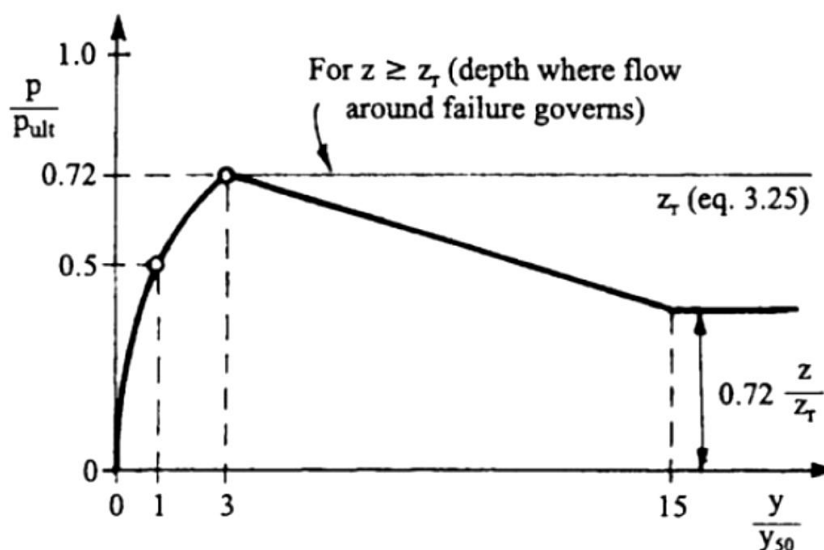
Αν το ειδικό βάρος και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους μεταβάλλονται με το βάθος, η τιμή του  $z_r$  υπολογίζεται για τις εδαφικές ιδιότητες στο βάθος που χαράσσεται η καμπύλη p-y.

3. Αν το βάθος της καμπύλης p-y είναι μεγαλύτερο ή ίσο του βάθους  $z_r$ , το p πρέπει να είναι ίσο με  $0.72 p_{ult}$  για όλες τις τιμές του y μεγαλύτερες του  $3y_{50}$ .

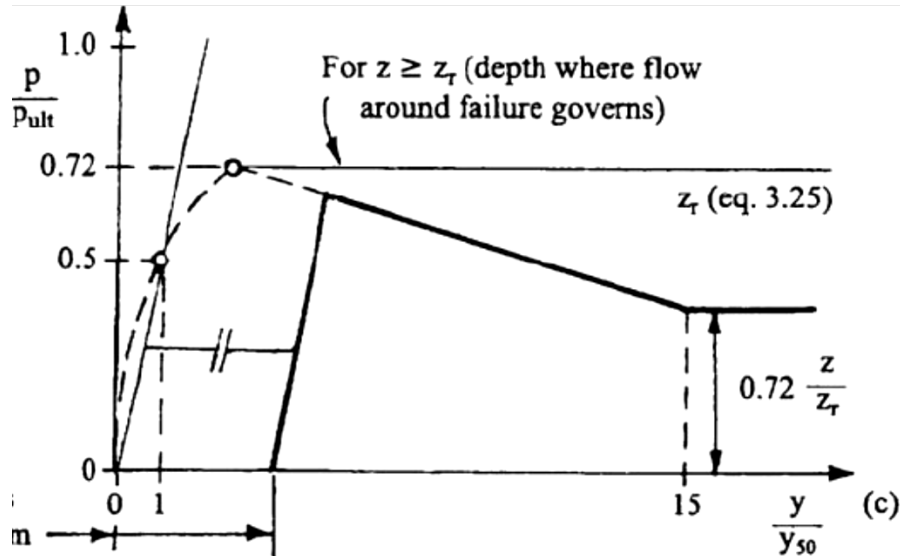
4. Αν το βάθος της καμπύλης p-y είναι μικρότερο από το βάθος  $z_r$ , το p μειώνεται από την τιμή  $0.72 p_{ult}$  για  $y = 3y_{50}$  μέχρι μία τιμή που υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση για  $y = 15y_{50}$ .

$$p = 0.72 p_{ult} \left( \frac{z}{z_r} \right) \quad (2.9)$$

Η τιμή του p παραμένει σταθερή για y ίσο με  $15y_{50}$  και άνω.



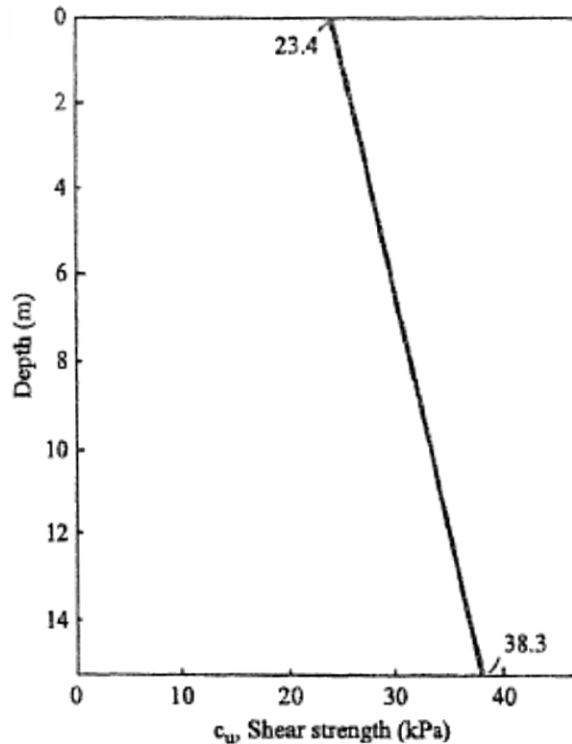
**Σχήμα 2.7:** Χαρακτηριστική μορφή καμπύλης p-y για πάσσαλο σε μαλακή, κορεσμένη άργιλο υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Matlock 1970).



**Σχήμα 2.8:** Χαρακτηριστική μορφή καμπύλης p-y για πάσσαλο σε μαλακή, κορεσμένη άργιλο υπό μετά-ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Matlock 1970).

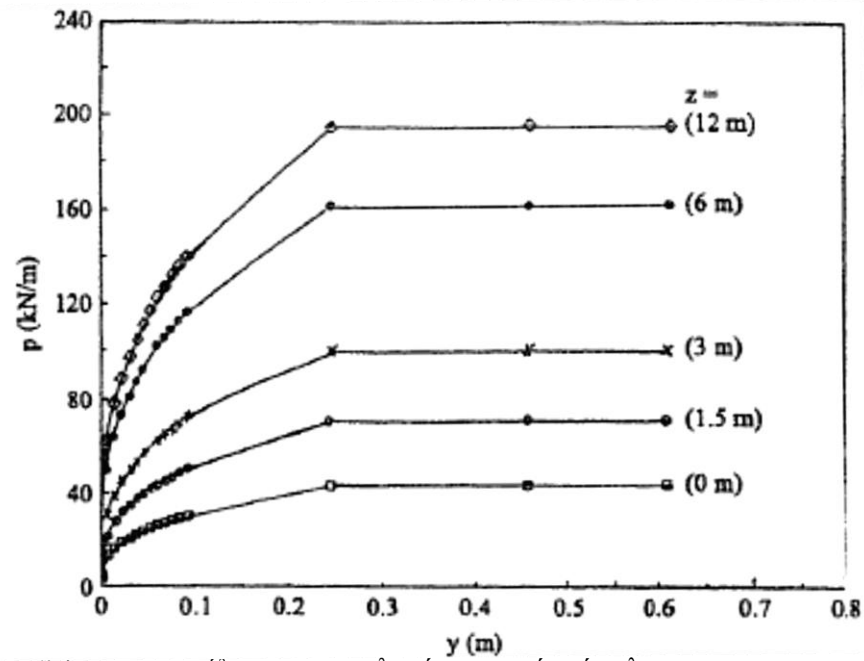
Παράδειγμα εφαρμογής σε μαλακή, κορεσμένη άργιλο

Οι παρακάτω απεικονιζόμενες καμπύλες φορτίου-μετατόπισης αφορούν πάσσαλο διαμέτρου 610 mm, ο οποίος περιβάλλεται από μαλακή, κορεσμένη άργιλο. Το εδαφικό προφίλ που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Σχήμα 2.9. Το υπό άνωση ειδικό βάρος ισούται με 6.3 kN/m<sup>3</sup>. Απουσία καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων θεωρήθηκε τιμή της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$  ίση με 0.020 καθ' ύψος του εδαφικού προφίλ (Πίνακας 2.1). Επίσης, η φόρτιση θεωρείται στατική. Τέλος, οι απεικονιζόμενες καμπύλες αντιστοιχούν στα εξής βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους: z=1.5, z=3, z=6 και z=12m (Σχήμα 2.10).



**Σχήμα 2.9:** Παράδειγμα: προφίλ αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για μαλακή, κορεσμένη άργιλο.

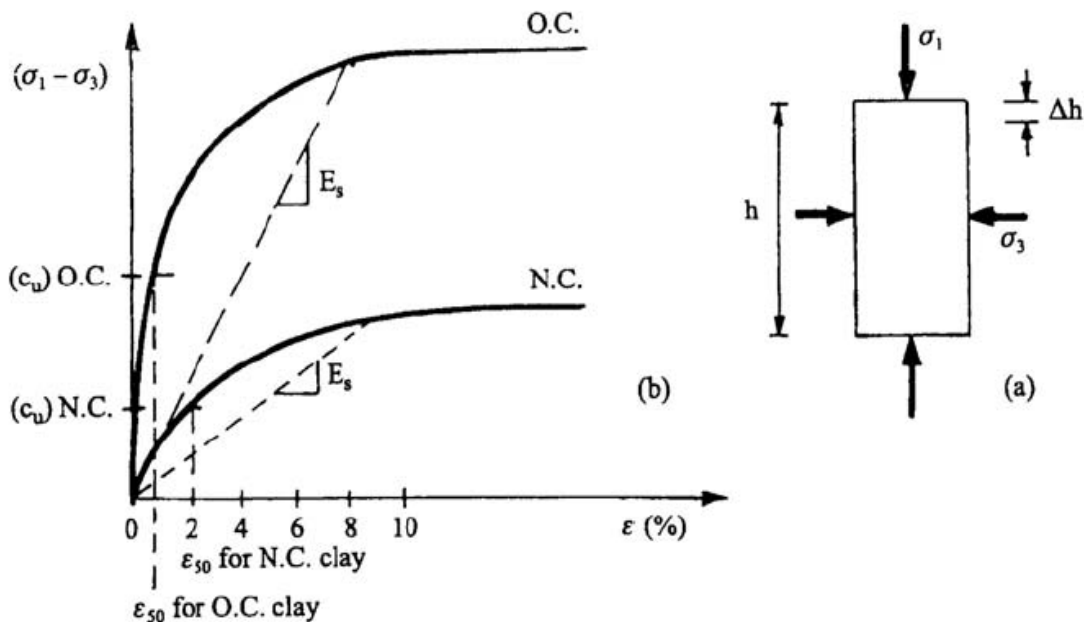




Σχήμα 2.10: Παραδείγματα καμπύλων p-y σε μαλακή, κορεσμένη άργιλο.

### 2.6.1.1 Παραμετρική διερεύνηση της παραμόρφωσης, $\epsilon_{50}$

Η δυσκαμψία των αργιλικών εδαφών εξαρτάται από την τιμή  $\epsilon_{50}$  που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση αργιλικού δοκιμίου υπό ένταση ίση με τη μισή της θλιπτικής αντοχής του. Το Σχήμα 2.11(a) απεικονίζει τη δοκιμή της αστράγγιστης θλίψης δοκιμίου κορεσμένης άργιλου όπου η παραμόρφωση  $\epsilon$  ισούται με  $\Delta h/h$ . Μερικές τυπικές καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων τόσο για υπερστερεοποιημένες (O.C.) όσο και για κανονικά στερεοποιημένες (N.C.) άργιλους φαίνονται στο Σχήμα 2.11(b).

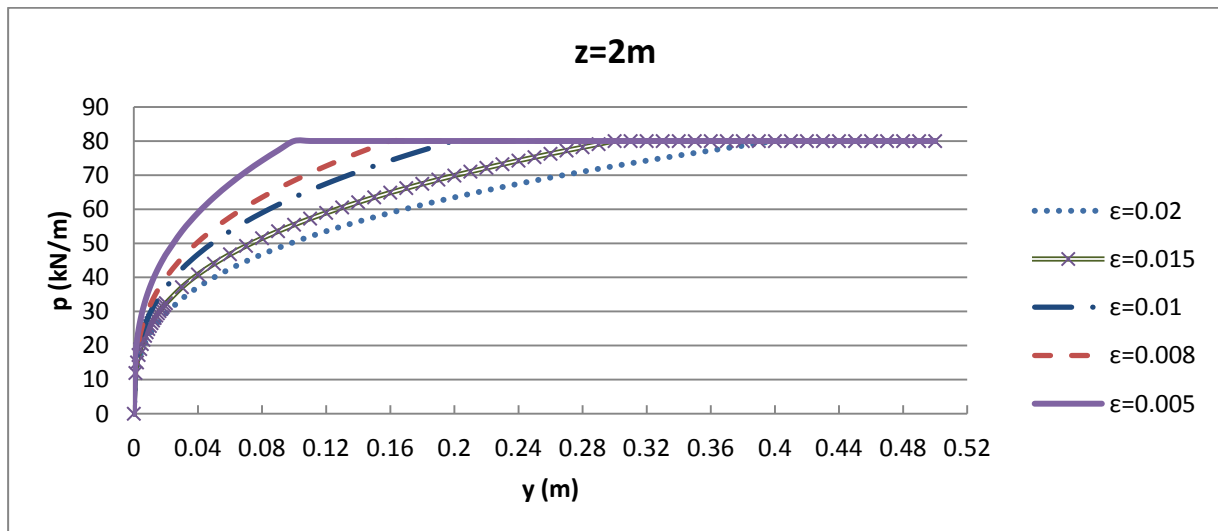


Σχήμα 2.11: α) Δοκιμή αστράγγιστης θλίψης δοκιμίου κορεσμένης άργιλου, β) τυπικές καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων κανονικά στερεοποιημένης(NC) και υπερστερεοποιημένης άργιλου(OC).

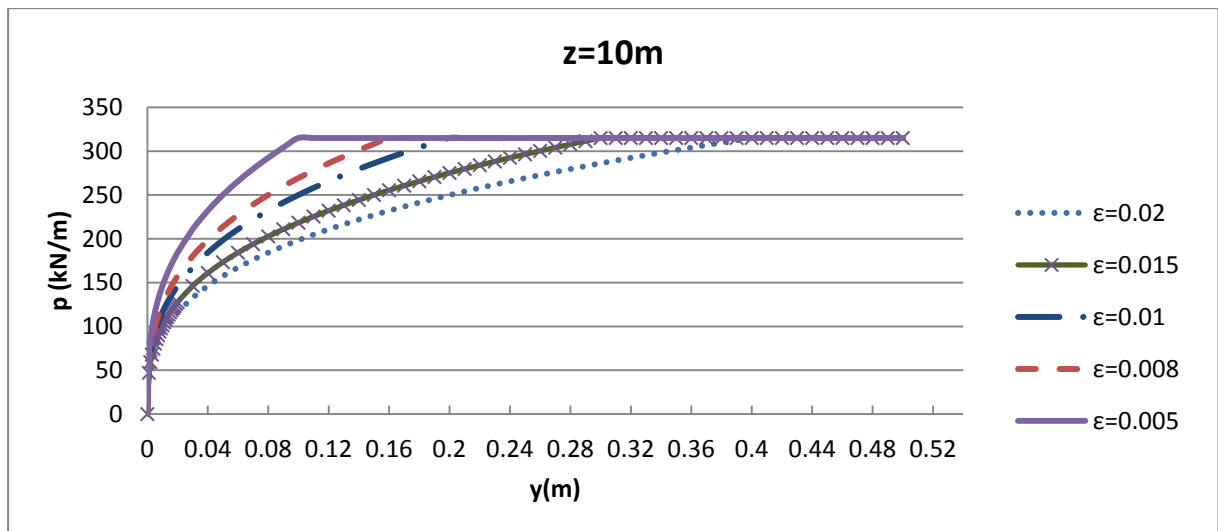
Ο Matlock (1970) πραγματοποίησε πειράματα σε μαλακές άργιλους και πρότεινε τιμές της  $\epsilon_{50}$  μεταξύ 0.005 και 0.020, με τη μικρότερη τιμή να αντιστοιχεί σε ψαθυρές άργιλους και τη μεγαλύτερη σε

αναμοχλευμένα εδάφη ή μη στερεοποιημένα ιζήματα. Μία μέση τιμή 0.01 θεωρείται μάλλον ικανοποιητική για τις περισσότερες περιπτώσεις. Προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή της τιμής  $\varepsilon_{50}$  στη μορφή των καμπύλων  $p-y$ , θεωρήθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί παραμετρική διερεύνηση για διάφορες τιμές της συγκεκριμένης παραμέτρου. Για εύρος τιμών κυμαινόμενο από  $\varepsilon_{50}=0.005$  έως και  $\varepsilon_{50}=0.02$  επιλέχθηκαν πέντε διακριτές τιμές της παραμέτρου και μορφώθηκαν οι αντίστοιχες καμπύλες για τα βάθη  $z=2\text{m}$  και  $z=10\text{m}$ , οι οποίες απεικονίζονται διαγραμματικά στα Σχήματα 2.12 και 2.13. Η τιμή του συντελεστή  $J$  διατηρήθηκε σταθερή και ίση με  $J=0.5$ . Τέλος, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή θεωρήθηκε ότι αυξάνεται γραμμικά με το βάθος ακολουθώντας την εξίσωση:  $c_u=10+0.25\gamma'z$ .

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με βάση τα διαγράμματα, παρατηρήθηκε ότι για μικρές τιμές της  $\varepsilon_{50}$  αυξάνεται η αρχική κλίση της καμπύλης  $p-y$ . Για το λόγο αυτό, οι υπολογισμένες τιμές της μετατόπισης του πασσάλου θα είναι μικρότερες για μικρές τιμές της  $\varepsilon_{50}$ , ειδικότερα στη περίπτωση σχετικά μικρών φορτίων. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η τιμή της  $\varepsilon_{50}$  δεν επηρεάζει την οριακή εδαφική αντίδραση  $p_{ult}$ , καθώς όλες οι καμπύλες οριζοντιώνονται στην ίδια τιμή  $p$ . Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από την εξίσωση εύρεσης του  $p_{ult}$  κατά Matlock (εξίσωση 2.4, 2.5), στην οποία δεν συμμετέχει ο όρος της παραμόρφωσης  $\varepsilon_{50}$ . Η διαφορά έγκειται στη μετατόπιση που αντιστοιχεί στην οριακή εδαφική αντίδραση  $p_{ult}$ , η οποία μειώνεται με τη μείωση της παραμέτρου  $\varepsilon_{50}$ .



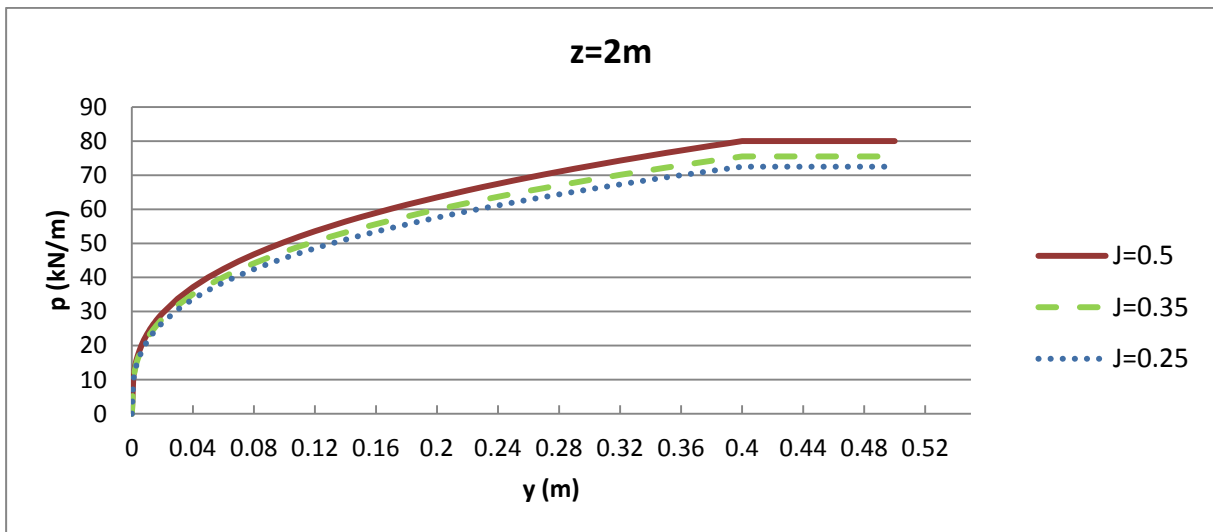
Σχήμα 2.12: Καμπύλες  $p-y$  για διάφορες τιμές της παραμόρφωσης  $\varepsilon_{50}$  σε βάθος  $z=2\text{m}$ .



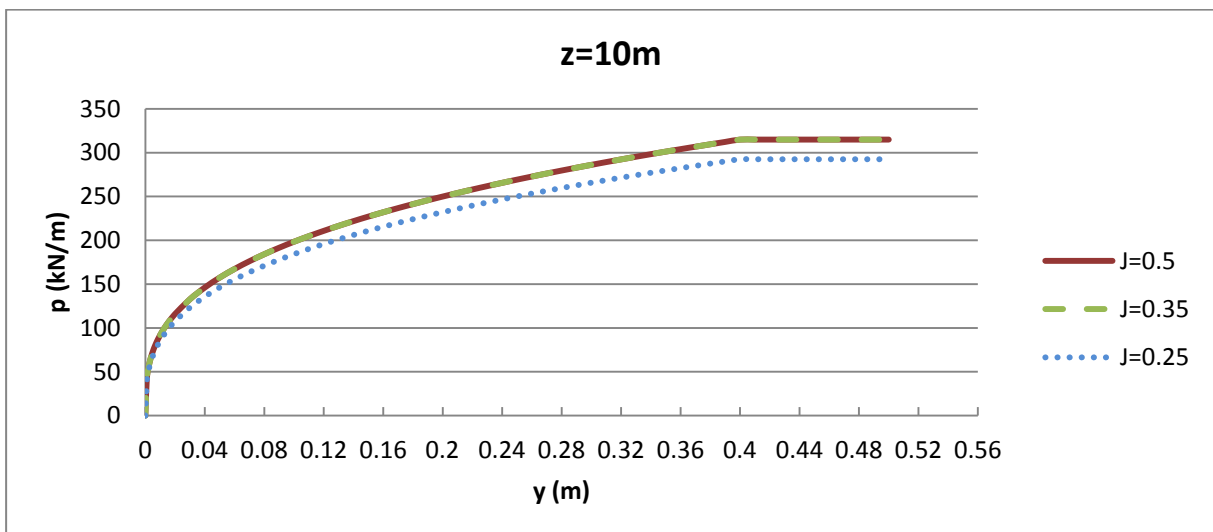
Σχήμα 2.13: Καμπύλες  $p-y$  για διάφορες τιμές της παραμόρφωσης  $\varepsilon_{50}$  σε βάθος  $z=10\text{m}$ .

### 2.6.1.2 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή J

Ο συντελεστής J, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης,  $p_{ult}$ , έχει εκτιμηθεί πειραματικά. Σύμφωνα με τον Matlock (1970) θεωρείται ίσος με 0,5 για την περίπτωση μαλακής αργίλου και ίσος με 0,25 για μέτριας στιφρότητας άργιλο. Θεωρώντας την τιμή της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$  του εδάφους σταθερή κατά μήκος του πασσάλου και ίση με  $\epsilon_{50}=0.02$ , συγκρίθηκε η μορφή των καμπύλων για  $J=0.5$ ,  $J=0.35$  και  $J=0.25$  στα βάθη  $z=2m$  και  $z=10m$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται διαγραμματικά (Σχήμα 2.14 και Σχήμα 2.15). Όπως παρατηρείται, η τιμή του συντελεστή J επηρεάζει την τιμή της εδαφικής αντίδρασης σε όλη την καμπύλη πλην του αρχικού, γραμμικού, ελαστικού τμήματός της, εμφανίζοντας διαφορές έως 10 kN/m. Τέλος, στο βάθος  $z=10m$ , δεν παρουσιάζεται καμία διαφοροποίηση της καμπύλης για τιμές  $J=0.50$  και  $J=0.35$ . Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα οφείλεται στο εδαφικό προφίλ που επιλέχθηκε για την παραμετρική διερεύνηση, καθώς σε βάθος  $z=10m$  η ελάχιστη τιμή της εδαφικής αντίδρασης ισούται με  $\min p_{ult}=315kN/m$ , κοινή για τις δύο τιμές του συντελεστή J.



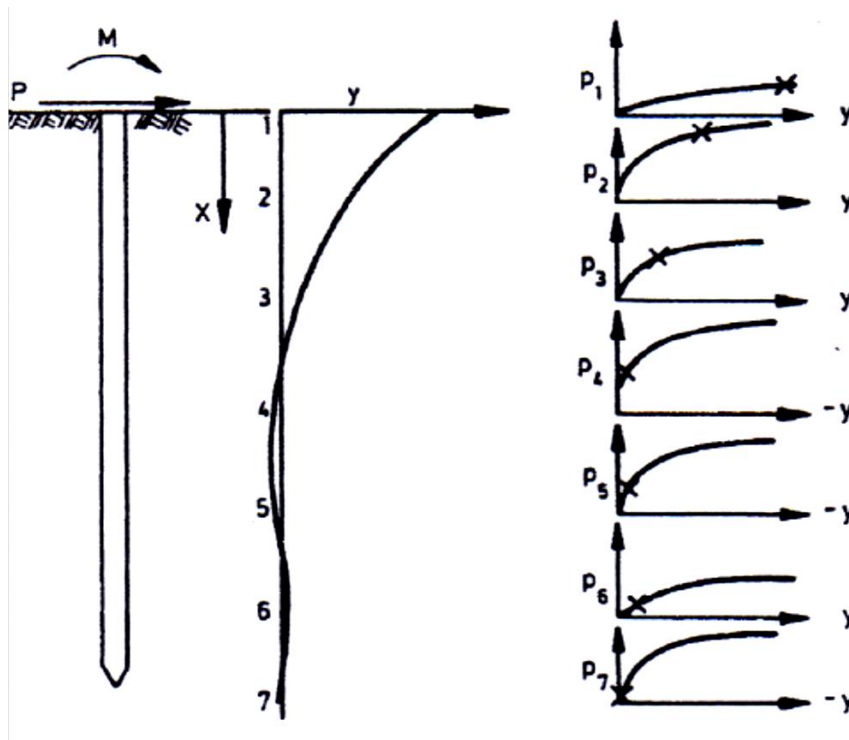
Σχήμα 2.14: Καμπύλες p-y για διάφορες τιμές του συντελεστή J σε βάθος  $z=2m$ .



Σχήμα 2.15: Καμπύλες p-y για διάφορες τιμές του συντελεστή J σε βάθος  $z=10m$ .

### 2.6.2 Χάραξη καμπύλων p-y κατά τους Νορβηγικούς κανονισμούς (1977)

Η μεθοδολογία ανάλυσης των εγκάρσια φορτισμένων πασσάλων που προτείνεται στην παρούσα παράγραφο βασίζεται, ομοίως με τη μεθοδολογία κατά Matlock, σε μία παραδοχή τροποποιημένου μοντέλου Winkler. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι σε κάθε βάθος υπάρχει μία μοναδική σχέση που συνδέει τη μετατόπιση του πασσάλου με την εδαφική αντίδραση που ασκείται κατά μήκος του. Με αυτό τον τρόπο, ο πάσσαλος διαχωρίζεται σε επί μέρους στοιχεία, το καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από μία μη-γραμμική καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, τη λεγόμενη καμπύλη p-y, (Σχήμα 2.16).



**Σχήμα 2.16:** α) Συνθήκες φόρτισης, β) Μετατοπίσεις κατά μήκος του πασσάλου, γ) Χαρακτηριστικές καμπύλες εδαφικής αντίδρασης μετατόπισης κατά μήκος του πασσάλου.

Η συνολική δύναμη,  $F$ , που ασκείται στο εκάστοτε στοιχείο πασσάλου, λόγω της εδαφικής αντίδρασης που αναπτύσσεται στο συγκεκριμένο στοιχείο, προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τη μέση τιμή της εδαφικής πίεσης με το μήκος του στοιχείου και τη διάμετρο του πασσάλου.

$$F = pb\Delta l \quad (2.10)$$

όπου,  $F$  η δύναμη πάνω στο στοιχείο,  $p$  η πίεση του εδάφους,  $b$  το πλάτος του πασσάλου και  $\Delta l$  το μήκος του στοιχείου.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του πασσάλου και τις συνοριακές συνθήκες που τον χαρακτηρίζουν, μπορούν να υπολογιστούν οι δυνάμεις και οι ροπές σε κάθε βάθος και να προκύψει μία αριθμητική λύση φορτίου-μετατόπισης.

#### 2.6.2.1 Χάραξη καμπύλης p-y

Η καμπύλη p-y αποτελείται από τρία τμήματα. Το αρχικό τμήμα αποτελείται από μία ευθεία γραμμή, η κλίση της οποίας ισούται με:

$$k_1 = \xi \frac{P_d}{b(\varepsilon_c)^{0.25}} \quad (2.11)$$

όπου

$p_d$ = εδαφική αντίδραση σχεδιασμού,  $p_{ds}$ =  $p_{ds}$  για στατική φόρτιση και  $p_d = p_{dc}$  για ανακυκλιζόμενη φόρτιση,

$\xi$ = εμπειρικός συντελεστής σύμφωνα με τον Πίνακα 2.2,

$\varepsilon_c$ = παραμόρφωση δοκιμίου αργίλου υπό δοκιμή αστράγγιστης τριαξονικής συμπίεσης που αντιστοιχεί στο μισό της θλιπτικής του αντοχής.

Στη συνέχεια, η καμπύλη χαρακτηρίζεται από ένα παραβολικό σχήμα, το οποίο φτάνει μέχρι το σημείο  $a$  που αντιστοιχεί σε μετατόπιση  $\beta b$  και σε εδαφική πίεση ίση με το φορτίο σχεδιασμού του πασσάλου. Χαρακτηριστικό σχήμα της καμπύλης p-y φαίνεται στο Σχήμα 2.16. Για τιμές της εδαφικής αντίδρασης μικρότερες της τιμής  $p_d$  ( $p \leq p_d$ ) και μετατοπίσεις μικρότερες της  $\beta b$  ( $y \leq \beta b$ ), η καμπύλη ακολουθεί την εξίσωση:

$$\frac{y}{p} = \frac{1}{k_1} + \frac{y}{\alpha p_d} \quad (2.12)$$

όπου,

$y$ = η μετατόπιση του πασσάλου,

$p$ = εγκάρσια εδαφική αντίδραση,

$p_d$ = εγκάρσια αντοχή σχεδιασμού,

$k_1$ , αρχική κλίση καμπύλης,

$\beta$ , συντελεστής εξαρτώμενος από τον τύπο του εδάφους και τις συνθήκες φόρτισης (Πίνακας 2.2),

$$a = \frac{1}{1 - \frac{P_d}{k_1 \beta b}} \quad \alpha > 1, b = \text{διάμετρος πασσάλου.}$$

Το σημείο  $a$  αντιστοιχεί στο σημείο τομής της υπερβολής και της αντοχής σχεδιασμού,  $p_d$ , (Σχήμα 2.17) με συντεταγμένες  $y = \beta b$  και  $p = p_d$ . Η παραπάνω σχέση που ορίζει το σημείο  $a$  ισχύει για τιμές της μετατόπισης  $\beta b > p_d / k_1$ , ενώ για μικρότερες τιμές η υπερβολή, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μπορεί να αντικατασταθεί από μία ευθεία γραμμή.

Ορισμένα φαινόμενα πιθανόν να προκαλέσουν μείωση της εδαφικής αντίδρασης μετά το σημείο «α». Με αυτό τον τρόπο ορίζεται το τρίτο τμήμα της καμπύλης που χαρακτηρίζεται από την παραμένουσα εγκάρσια αντίδραση  $p'_d$  βασισμένη σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών και στην κρίση του μηχανικού. Η μετατόπιση που κινητοποιεί την παραμένουσα εδαφική αντίδραση στην άργιλο αντιστοιχεί στην τιμή  $y = \beta' b$ , όπου η  $\beta' b$  δίνεται στον Πίνακα 2.2.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται κανονικά στερεοποιημένες αργίλους, των οποίων η μηχανική συμπεριφορά δεν εμφανίζει κράτυνση. Συνεπώς, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η οριακή εδαφική αντίδραση  $p_d$  σε σχέση με την  $p'_d$ . Επίσης, για λόγους σύγκρισης των καμπύλων p-y με τις αντίστοιχες άλλων μεθοδολογιών, θα θεωρηθεί ότι η τιμή της οριακής εδαφικής αντίδρασης παραμένει σταθερή για τιμές της μετατόπισης μεγαλύτερες από την τιμή  $y = \beta b$ , οπότε η χάραξη του τρίτου τμήματος θα αποτελείται από μία οριζόντια γραμμή με αφετηρία το σημείο  $a$ .

Η εγκάρσια αντίδραση σχεδιασμού ενός μεμονωμένου πασσάλου σε άργιλο μπορεί να ορισθεί ως:

$$p_d = N_p \frac{c_u}{\gamma_{mc}} \quad (2.13)$$

όπου,

$c_u$ =η αστράγγιστη διατμητική αντοχή σε συγκεκριμένο βάθος κατά μήκος του πασσάλου,

$\gamma_{mc}$ =συντελεστής ασφαλείας ίσος με τη μονάδα,

$N_p$ =ημι-εμπειρικός συντελεστής, γραμμικά αυξανόμενος με το βάθος, από  $N_p=1$  (για στατική φόρτιση) ή  $N_p=0$  (για ανακυκλιζόμενη φόρτιση) στην επιφάνεια του εδάφους μέχρι  $N_p=8$  σε βάθος ίσο με  $z=N_p b$ ,

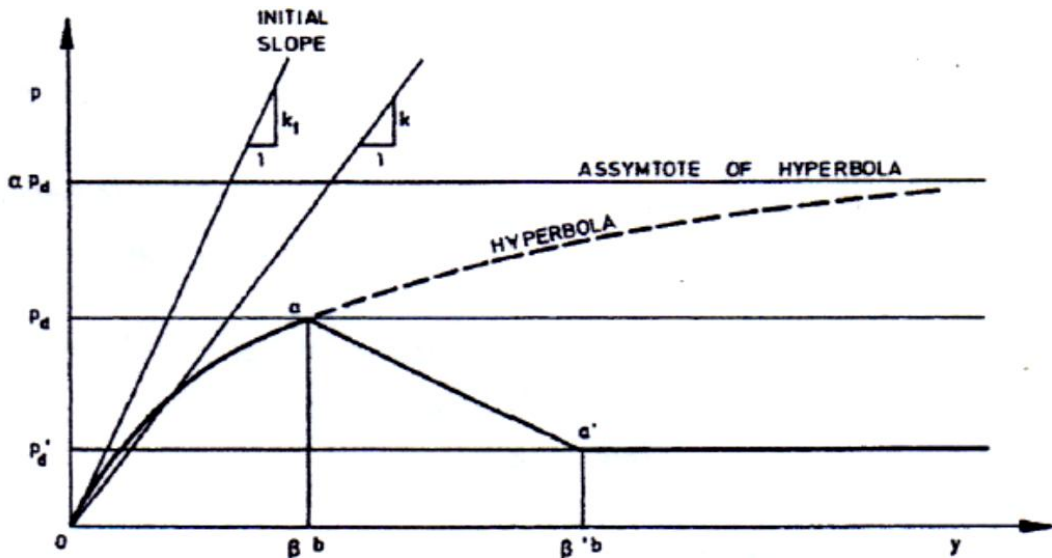
$N_f=10$  για κανονικά στερεοποιημένη άργιλο

=5 για υπερστερεοποιημένη άργιλο.

**Πίνακας 2.2:** Τιμές διαφόρων παραμέτρων ανάλογα με τον τύπο φόρτισης και τον τύπο αργίλου.

Παράμετρος	Τύπος φόρτισης	Τύπος Αργίλου	
		Κανονικά Στερεοποιημένη Αργίλος	Υπερστερεοποιημένη Αργίλος
$\xi$	Στατική φόρτιση	10	30
$\beta$	Στατική φόρτιση	$20\epsilon_c$	$5\epsilon_c$
$\beta'$	Στατική φόρτιση	$80\epsilon_c$	$8\epsilon_c$
$\xi$	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση	10	30
$\beta$	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση	$7.5\epsilon_c$	$2.5\epsilon_c$
$\beta'$	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση	$20\epsilon_c$	$5\epsilon_c$

Σημειώνεται ότι για το σωστό σχεδιασμό ενός εγκάρσια φορτισμένου πασσάλου απαιτείται πλήρης γνώση των εδαφικών ιδιοτήτων του εδάφους κυρίως μέχρι βάθος ίσο με τουλάχιστον δέκα φορές τη διάμετρό του, καθώς η αλληλεπίδραση του συστήματος πασσάλου-εδάφους σε αυτό το στρώμα είναι περισσότερο κρίσιμη. Επιπλέον, αναφέρεται ότι η καμπύλη  $p$ - $y$ , που προκύπτει από την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας, εκφράζει την εδαφική αντίδραση σε μονάδες δύναμης (kN), σε αντίθεση με τη μεθοδολογία κατά Matlock, που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο, όπου η εδαφική αντίδραση εκφράζεται σε μονάδες δύναμης ανά μήκος(kN/m).



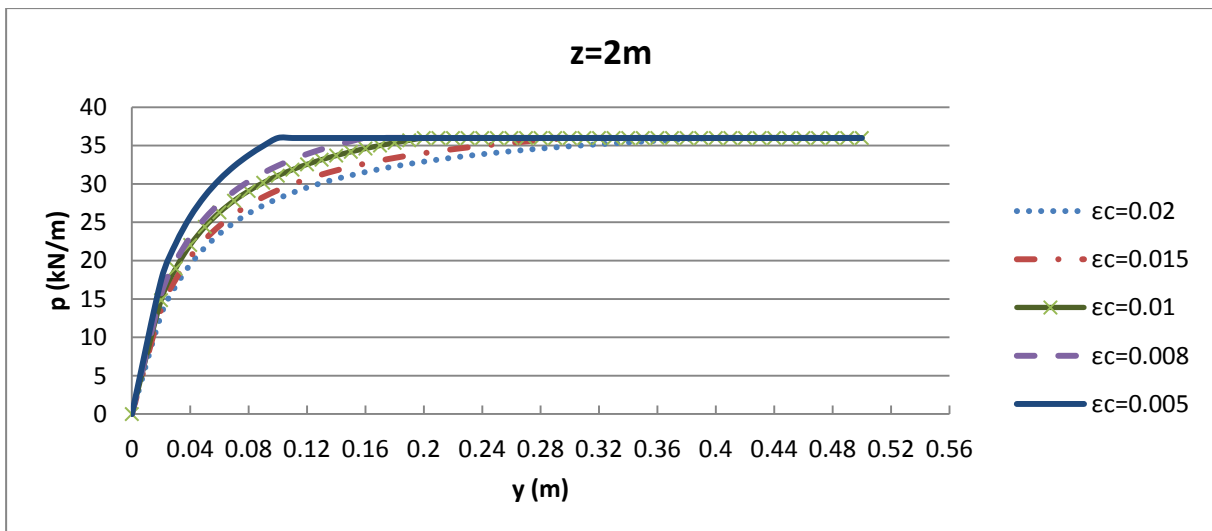
**Σχήμα 2.17:** Χαρακτηριστική μορφή καμπύλης  $p$ - $y$  σύμφωνα με τους Νορβηγικούς Κανονισμούς.

Προκειμένου να είναι ορθή η σύγκριση των μεθοδολογιών, η τιμή του οριακού φορτίου  $p_d$  (kN/m<sup>2</sup>) της μεθοδολογίας πολλαπλασιάστηκε με τη διάμετρο του πασσάλου, ώστε η εδαφική αντίδραση να προκύψει σε μονάδες δύναμης ανά μήκος (kN/m). Στη συγκεκριμένη εργασία μελετείται πάσσαλος διαμέτρου  $b=1m$ , επομένως ο πολλαπλασιασμός αυτός δεν μεταβάλλει τις τιμές της εδαφικής

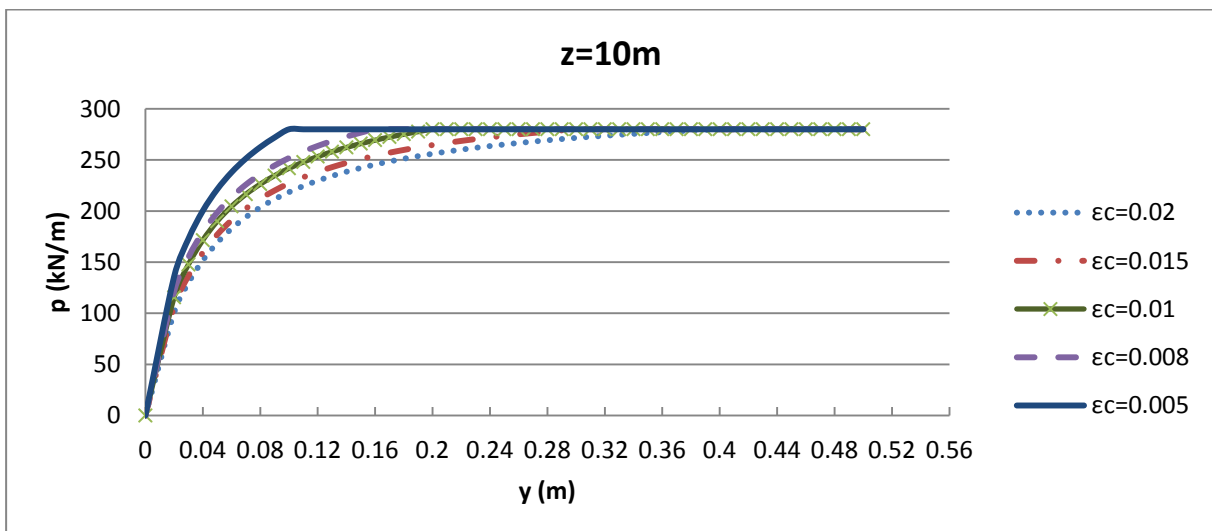
αντίδρασης. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο κανονισμός μεταβλήθηκε το 2007 και η πλέον ισχύουσα μεθοδολογία είναι ίδια με αυτή κατά Matlock(1970). Παρόλα αυτά, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η παλαιότερη μεθοδολογία των Νορβηγικών κανονισμών για λόγους σύγκρισης με την τελική της έκδοση, τα αποτελέσματα της οποίας συμπίπτουν με αυτά της πρώτης μεθοδολογίας.

### 2.6.2.2 Παραμετρική διερεύνηση της παραμόρφωσης $\epsilon_c$

Ομοίως με την προηγούμενη μέθοδο (Matlock 1970), πραγματοποιήθηκε παραμετρική διερεύνηση συγκεκριμένων συντελεστών με στόχο τη σύγκριση των προκυπτουσών καμπύλων p-y ακολουθώντας τους Νορβηγικούς κανονισμούς. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης, για διάφορες τιμές της παραμόρφωσης  $\epsilon_c$ , απεικονίζονται γραφικά στα Σχήματα 2.18 και 2.19, για βάθος  $z=2m$  και  $z=10m$  αντίστοιχα. Η μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής θεωρήθηκε γραμμική με το βάθος σύμφωνα με την εξίσωση  $c_u=10+0.25\gamma'z$ . Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα, η μείωση του  $\epsilon_c$  οδηγεί σε μετακίνηση της καμπύλης προς τα αριστερά, δηλαδή σε αύξηση της κλίσης του αρχικού και του παραβολικού τμήματος. Επομένως, η ίδια τιμή της μετατόπισης  $y$  αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη εδαφική αντίδραση όσο μειώνεται το  $\epsilon_c$ . Τέλος, η οριακή αντίδραση παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται η τιμή της μετατόπισης που την κινητοποιεί, η οποία αυξάνεται για μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου.



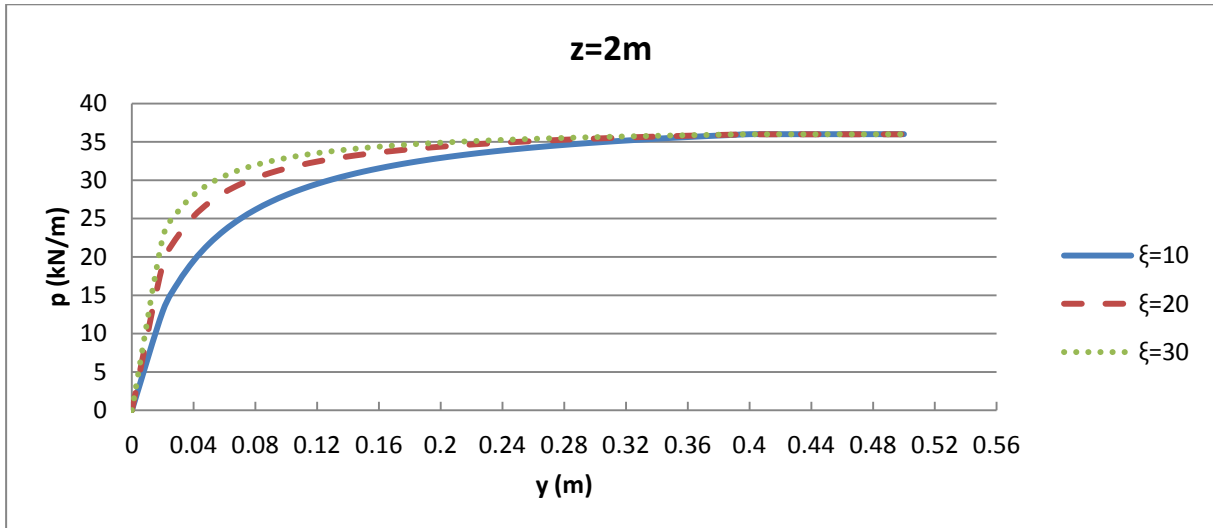
Σχήμα 2.18: Καμπύλες p-y για διάφορες τιμές της παραμόρφωσης  $\epsilon_c$  σε βάθος  $z=2m$ .



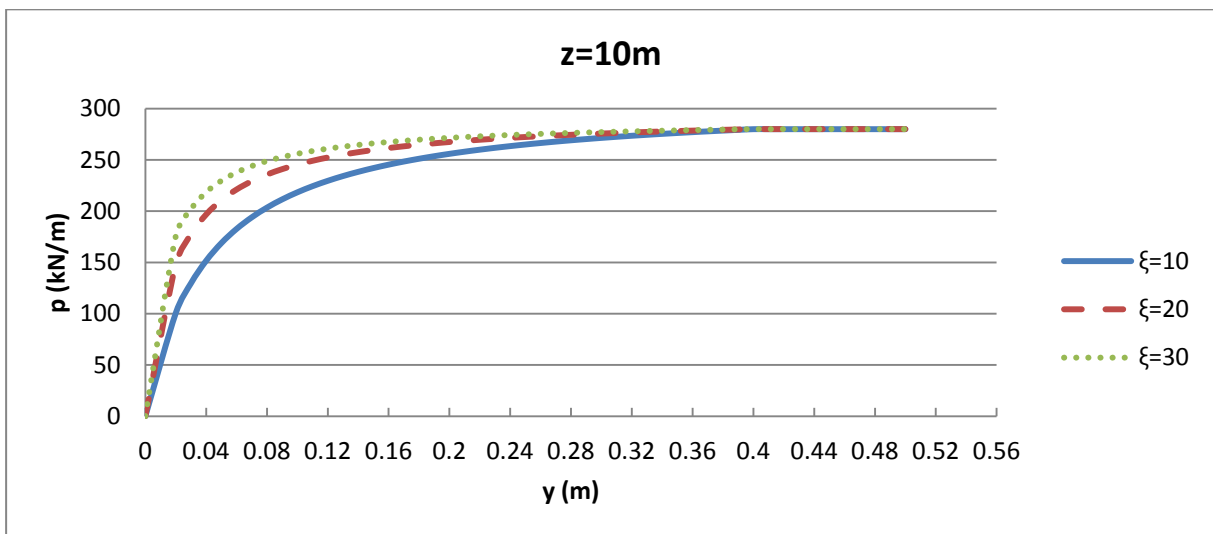
Σχήμα 2.19: Καμπύλες p-y για διάφορες τιμές της παραμόρφωσης  $\epsilon_c$  σε βάθος  $z=10m$ .

### 2.6.2.3 Παραμετρική διερεύνηση της παραμέτρου $\xi$

Επιλέγεται να πραγματοποιηθεί διερεύνηση ώστε να μελετηθεί η προκαλούμενη, λόγω της μεταβολής του συντελεστή  $\xi$ , διαφοροποίηση των καμπύλων  $p$ - $y$ . Η διαφοροποίηση φαίνεται στα παρακάτω παρατιθέμενα Σχήματα (Σχήμα 2.20 και Σχήμα 2.21). Αποδεικνύεται ότι η αύξηση της τιμής του  $\xi$  αντιστοιχεί σε άργιλο μεγαλύτερης αντοχής, καθώς για την ίδια μετατόπιση κινητοποιείται μεγαλύτερη εδαφική αντίδραση. Η παραπάνω διαπίστωση επαληθεύεται και από τον Πίνακα 2.2, καθώς η τιμή του  $\xi$  είναι μεγαλύτερη για υπερστερεοποιημένες αργίλους.



Σχήμα 2.20: Καμπύλες  $p$ - $y$  λόγω μεταβολής του συντελεστή  $\xi$  σε βάθος  $z=2m$ .



Σχήμα 2.21: Καμπύλες  $p$ - $y$  λόγω μεταβολής του συντελεστή  $\xi$  σε βάθος  $z=10m$ .

### 2.6.3 Καμπύλες $p$ - $y$ κατά Γεωργιάδη (2010)

Η συγκεκριμένη μέθοδος υιοθετεί την ακόλουθη παραβολική εξίσωση για τον προσδιορισμό των καμπύλων  $p$ - $y$  υπό αστράγγιστες συνθήκες :

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_i} + \frac{y}{p_u}} \quad (2.14)$$

όπου  $k_i$  η αρχική κλίση της καμπύλης  $p$ - $y$  και  $p_u$  η οριακή εδαφική αντίδραση, η οποία για την περίπτωση εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:



$$p_u = N_p c_u D \quad (2.15)$$

όπου  $D$  η διάμετρος του πασσάλου,  $c_u$  η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους και  $N_p$  συντελεστής εγκάρσιας φέρουσας ικανότητας.

Ο συντελεστής  $N_p$  αυξάνεται με το βάθος ξεκινώντας από μία αρχική τιμή  $N_{po}$  στην επιφάνεια του εδάφους (αντιστοιχεί σε μηχανισμό αστοχίας τύπου σφήνας) μέχρι μία μέγιστη τιμή  $N_{pu}$ . Η ανώτατη αυτή τιμή παραμένει σταθερή για το υπόλοιπο τμήμα του πασσάλου. Οι δύο παραπάνω τιμές,  $N_{po}$  και  $N_{pu}$ , εξαρτώνται από τη συνοχή της διεπιφάνειας εδάφους-πασσάλου. Όπως έχει προταθεί από τον Γεωργιάδη, αναφορικά με την οριζόντια επιφάνεια εδάφους, ο συντελεστής  $N_p$  μπορεί να προσεγγιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$N_p = N_{pu} - (N_{pu} - N_{po})e^{-\lambda(z/D)} \quad (2.16)$$

όπου  $\lambda$  αδιάστατος συντελεστής, ο οποίος μεταβάλλεται για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ , ο οποίος με τη σειρά του, ορίζεται ως ο λόγος της τριβής της διεπιφάνειας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $\alpha = \tau_f/c_u$ . Το εύρος των τιμών του  $\lambda$  κυμαίνεται από  $\lambda=0.55$  για  $\alpha=0$  (λείος πάσσαλος) μέχρι  $\lambda=0.4$  για  $\alpha=1$  (τραχύς πάσσαλος).

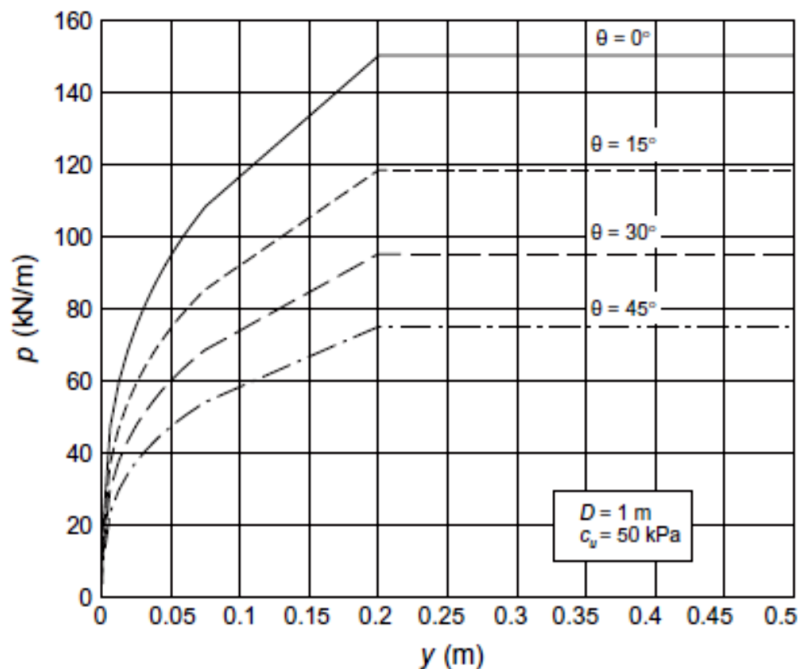
$$\lambda = 0.55 - 0.15\alpha \quad (2.17)$$

$$N_{po} = 2 + 1.5\alpha \quad (2.18)$$

$$N_{pu} = \pi + 2\Delta + 2\cos\Delta + 4\left(\cos\frac{\Delta}{2} + \sin\frac{\Delta}{2}\right) \quad (2.19)$$

όπου  $\Delta = \arcsin(\alpha)$

Για λεία διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους ( $\alpha=0$ ), η παραπάνω εξίσωση υπολογίζει  $N_{pu}=9.14$ , ενώ για τραχεία διεπιφάνεια ( $\alpha=1$ ),  $N_{pu}=11.94$ .



**Σχήμα 2.22:** Χαρακτηριστικές καμπύλες p-y στην επιφάνεια του εδάφους (Οριζόντια επιφάνεια  $\theta=0^\circ$ ).

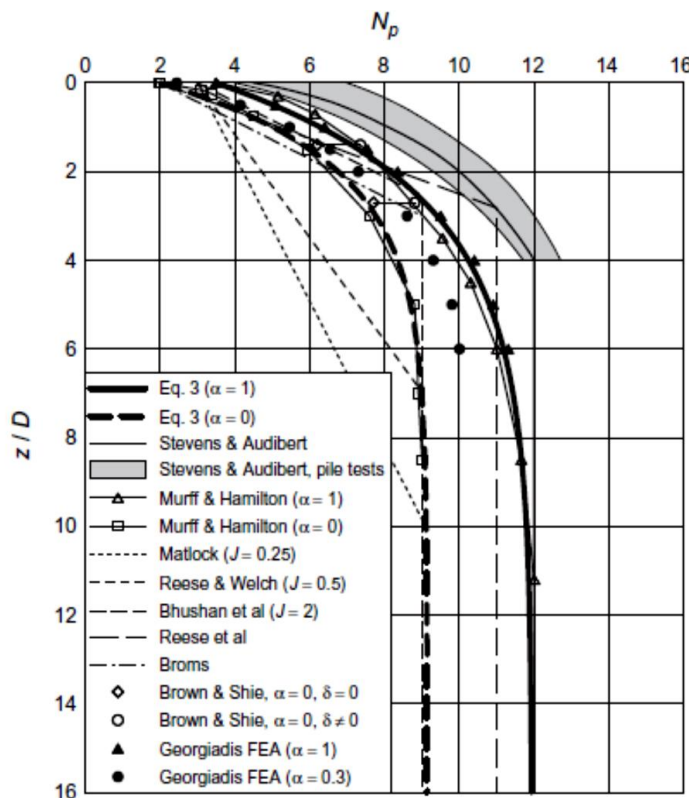
Η αρχική δυσκαμψία  $k_i$  της καμπύλης p-y εξαρτάται από τα παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά του εδάφους καθώς και από τη διάμετρο και τη δυσκαμψία του πασσάλου. Ο υπολογισμός της επιτυγχάνεται μέσω της εξίσωσης:

$$k_i = 3E_{50} \left( \frac{E_{50} D^4}{E_p I_p} \right)^{1/2} \quad (2.20)$$

όπου

$E_{50}$ : το μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί σε ένταση ίση με το μισό της θλιπτικής αντοχής δοκιμίου κανονικά στερεοποιημένης αργίλου και καθορίζεται από δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης υπό αστράγγιστες συνθήκες,

$E_p I_p$ : δυσκαμψία πασσάλου.



Σχήμα 2.23: Μεταβολή του συντελεστή  $N_p$  με το λόγο  $z/D$  για  $\alpha=0$  και  $\alpha=1$ .

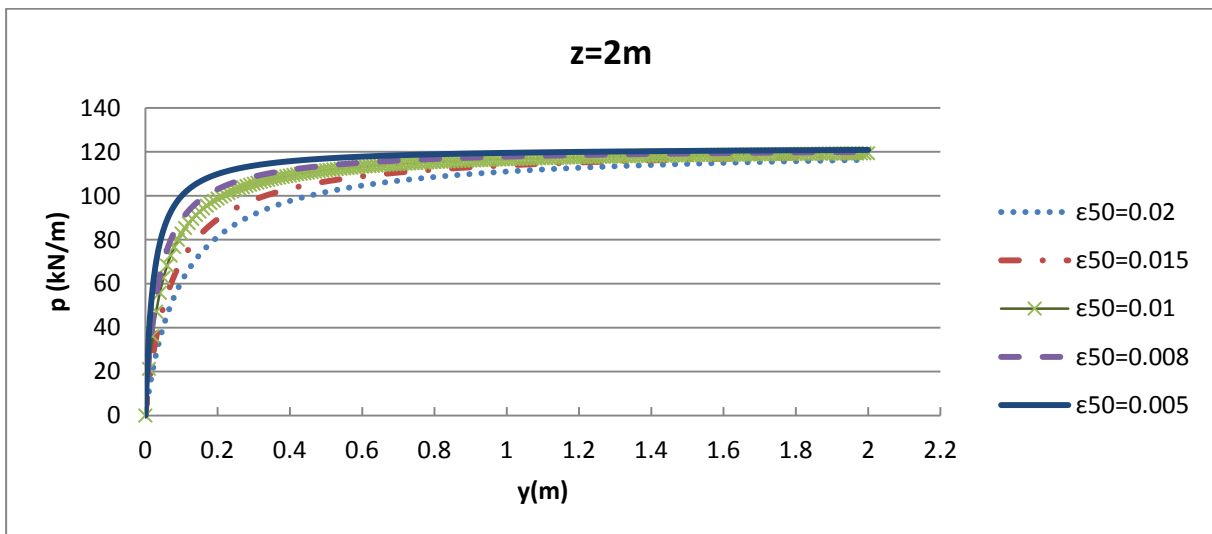
Η πλειοψηφία των αναλύσεων του Γεωργιάδη πραγματοποιήθηκαν για αστράγγιστη διατμητική αντοχή ίση με  $c_u=50\text{kPa}$ , μέτρο ελαστικότητας  $E_u=10\text{MPa}$ , λόγο Poisson  $\nu=0.49$  και ειδικό βάρος  $\gamma=18\text{kN/m}^3$ . Επίσης, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τιμές  $c_u=25\text{kPa}$ ,  $E_u=5\text{MPa}$ ,  $20\text{MPa}$  και  $\gamma=16\text{kN/m}^3$  και  $\gamma=20\text{kN/m}^3$ , προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή των  $c_u$ ,  $E_u$  και  $\gamma$  στην απόκριση του πασσάλου.

### 2.6.3.1 Παραμετρική διερεύνηση της παραμόρφωσης $\epsilon_{50}$

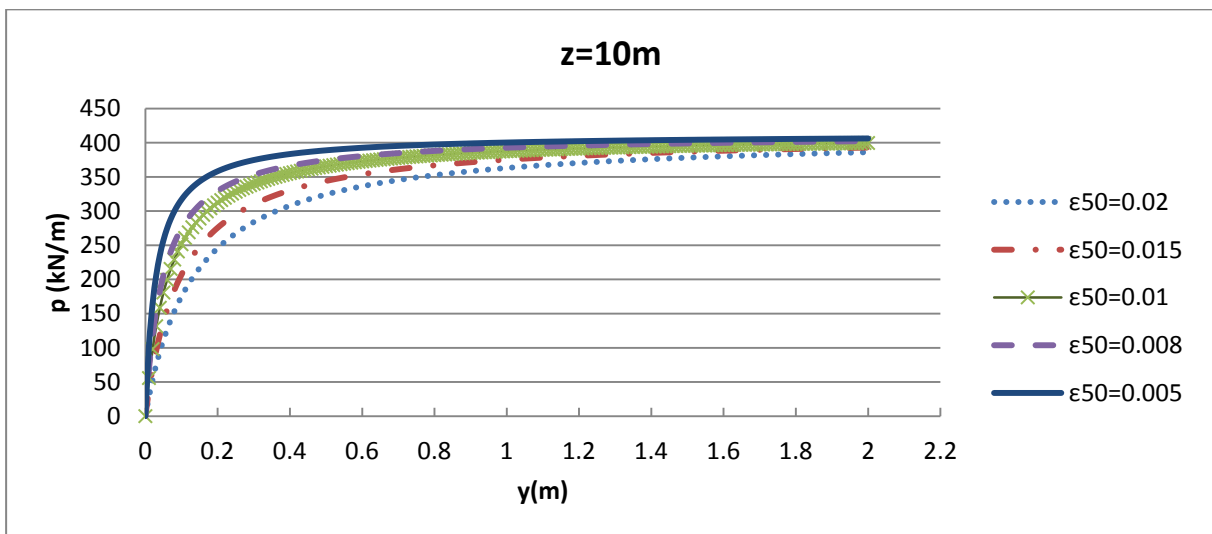
Η μέθοδος που παρουσιάστηκε στην παραπάνω παράγραφο χρησιμοποιεί την παράμετρο  $E_{50}$ , η οποία αντιστοιχεί σε τιμή του μέτρου ελαστικότητας αντιπροσωπευτική της μισής αντοχής του εδάφους σε ανεμπόδιστη θλίψη υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η τιμή αυτή ισούται με την παραμόρφωση ( $\epsilon_{50}$ ) πολλαπλασιασμένη επί την αντίστοιχη τάση  $\sigma_{50}=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ , η οποία αντιστοιχεί στην αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u$ . Κατά αντιστοιχία με τις προαναφερθείσες μεθοδολογίες μεταβάλλεται η τιμή της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$ , αλλάζοντας με αυτό τον τρόπο και το μέτρο ελαστικότητας  $E_{50}$  σύμφωνα με τη σχέση:  $E_{50}=(1/\epsilon_{50})c_u$ . Επομένως, όσο αυξάνεται η τιμή  $\epsilon_{50}$  τόσο μειώνεται η δυσκαμψία  $E_{50}$ . Επιπλέον, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή θεωρείται ότι αυξάνεται γραμμικά με το βάθος ακολουθώντας την εξίσωση  $c_u=10+0.25\gamma'z$ . Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα διαγράμματα για τις διάφορες τιμές του  $\epsilon_{50}$  επαληθεύουν τα αντίστοιχα των παραπάνω μεθοδολογιών.

### 2.6.3.2 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή $\alpha$

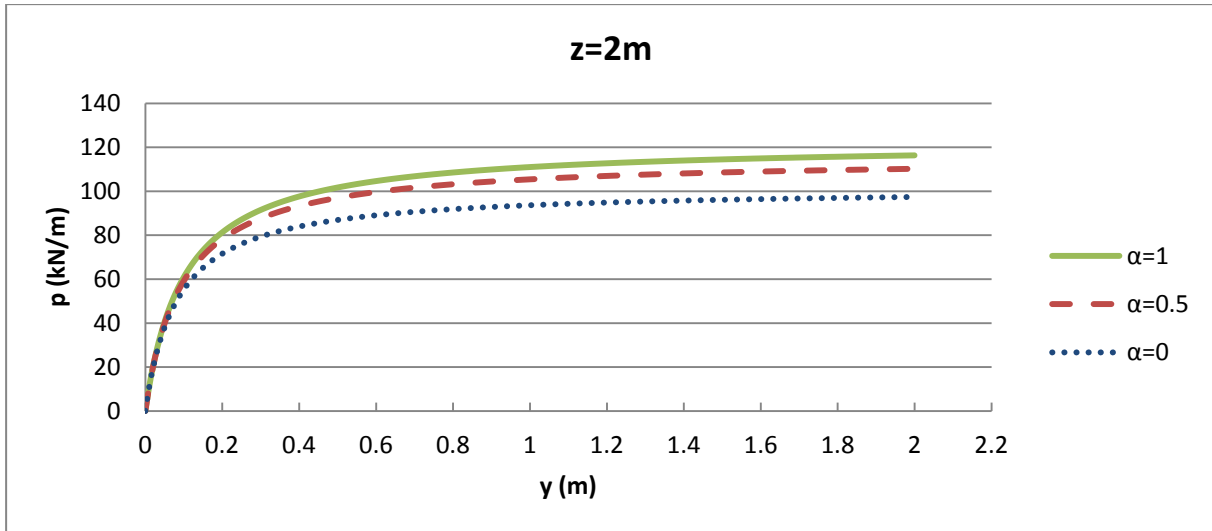
Η παράμετρος  $\alpha$ , η οποία αντιστοιχεί στο συντελεστή αντίστασης τριβής της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους επηρεάζει τα αποτελέσματα σχεδόν όλων των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για τη χάραξη των καμπύλων p-y στη συγκεκριμένη μεθοδολογία. Συνεπώς, οδηγούμαστε στη μελέτη του βαθμού επιρροής της. Από τα διαγράμματα που προκύπτουν (Σχήμα 2.26 και 2.27), συμπεραίνεται ότι όσο μειώνεται το  $\alpha$ , δηλαδή όσο πιο λεία είναι η διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους, τόσο μικρότερη είναι η προκαλούμενη εδαφική αντίδραση του ανελαστικού κλάδου και η αντίστοιχη οριακή.



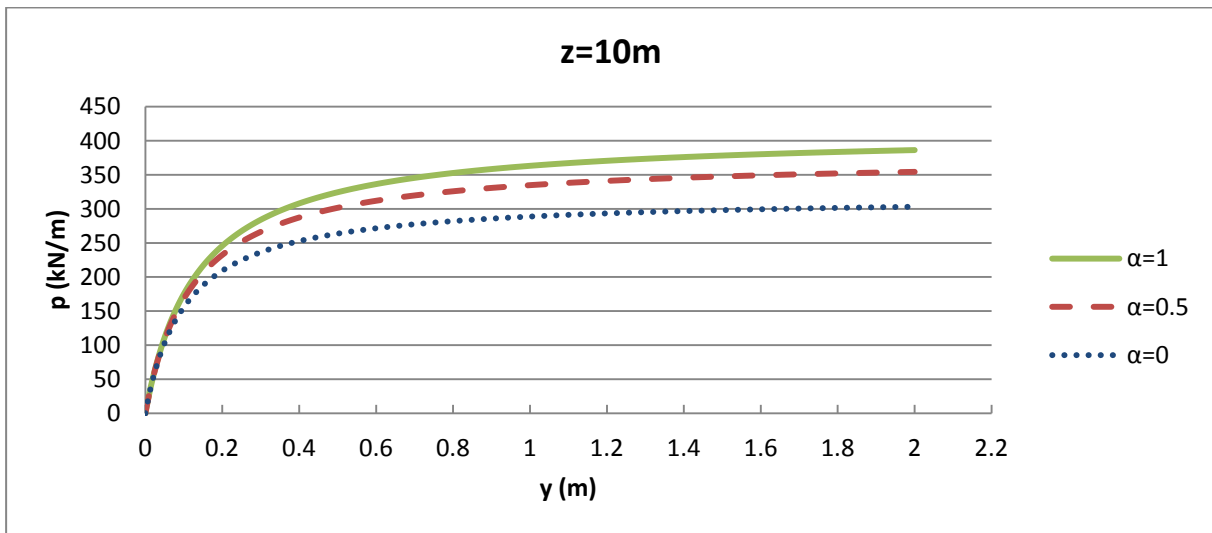
Σχήμα 2.24: Καμπύλες p-y για διάφορες τιμές της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$  σε βάθος  $z=2\text{m}$ .



Σχήμα 2.25: Καμπύλες p-y για διάφορες τιμές της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$  σε βάθος  $z=10\text{m}$ .



Σχήμα 2.26: Καμπύλες p-y για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας α σε βάθος z=2m.



Σχήμα 2.27: Καμπύλες p-y για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας α σε βάθος z=10m.

#### 2.6.4 Συμπεριφορά της αργίλου κατά API (American Petroleum Institute).

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία κατά API, η οποία βασίζεται στην αντίστοιχη κατά Matlock, η οριακή αντοχή έναντι εγκάρσιας φόρτισης εξαρτάται από το μηχανισμό αστοχίας της αργίλου, ο οποίος διαφέρει για μικρό ( $p_{us}$ ) και μεγάλο ( $p_{ud}$ ) βάθος. Ο καθορισμός της οριακής φέρουσας ικανότητας πραγματοποιείται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$p_{us} = 3c_u + \gamma' H + Jc_u \frac{H}{D} \quad (2.21)$$

$$p_{ud} = 9c_u \quad (2.22)$$

όπου,

- $p_{us}$  = οριακή εγκάρσια αντίδραση σε μικρό βάθος ( $\text{kN/m}^2$ ),
- $p_{ud}$  = οριακή εγκάρσια αντίδραση σε μεγάλο βάθος ( $\text{kN/m}^2$ ),
- $c_u$  = αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $\text{kN/m}^2$ ),
- $\gamma'$  = ενεργό ειδικό βάρος του εδάφους ( $\text{kN/m}^3$ ),
- $H$  = βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (m),

J = αδιάστατη, εμπειρική σταθερά. Προτείνεται εύρος τιμών 0.25 - 0.5,  
 D = διάμετρος πασσάλου (m).

Μέσω της επίλυσης των δύο παραπάνω εξισώσεων 2.21 και 2.22, προκύπτει η κοινή λύση της τιμής του βάθους ( $z_R$ ) κάτω από το οποίο αλλάζει η εξίσωση υπολογισμού της οριακής εδαφικής αντίδρασης (εξίσωση 2.23). Επομένως, για  $z < z_R$  εφαρμόζεται η εξίσωση 2.21, ενώ για  $z \geq z_R$  η εξίσωση 2.22.

$$z_R = \frac{6D}{\frac{\gamma D}{c_u} + J} \quad (2.23)$$

Η καμπύλη p-y αποτελείται από δύο τμήματα. Αρχικά, την καμπύλη η οποία περιγράφει τη μη-γραμμική συμπεριφορά και στη συνέχεια την ευθεία που αντιστοιχεί στην οριακή εδαφική αντίδραση.

$$p = 0.5 p_u (y / y_{50})^{(1/3)} \quad \text{για} \quad y < 8y_{50} \quad (2.24)$$

$$p = p_u \quad \text{για} \quad y \geq 8y_{50} \quad (2.25)$$

όπου,

p = εγκάρσια εδαφική αντίδραση σε βάθος H (kN/m<sup>2</sup>),

p<sub>u</sub> = οριακή εγκάρσια αντίδραση, η μικρότερη τιμή από τα p<sub>us</sub> και p<sub>ud</sub> (kN/m<sup>2</sup>),

y = πραγματική εγκάρσια μετατόπιση (m),

y<sub>50</sub> = 2.5ε<sub>50</sub>D (m),

ε<sub>50</sub> = παραμόρφωση η οποία αντιστοιχεί στο μισό της μέγιστης της θλιπτικής αντοχής αργιλικού δοκιμίου,

D = διάμετρος πασσάλου (m).

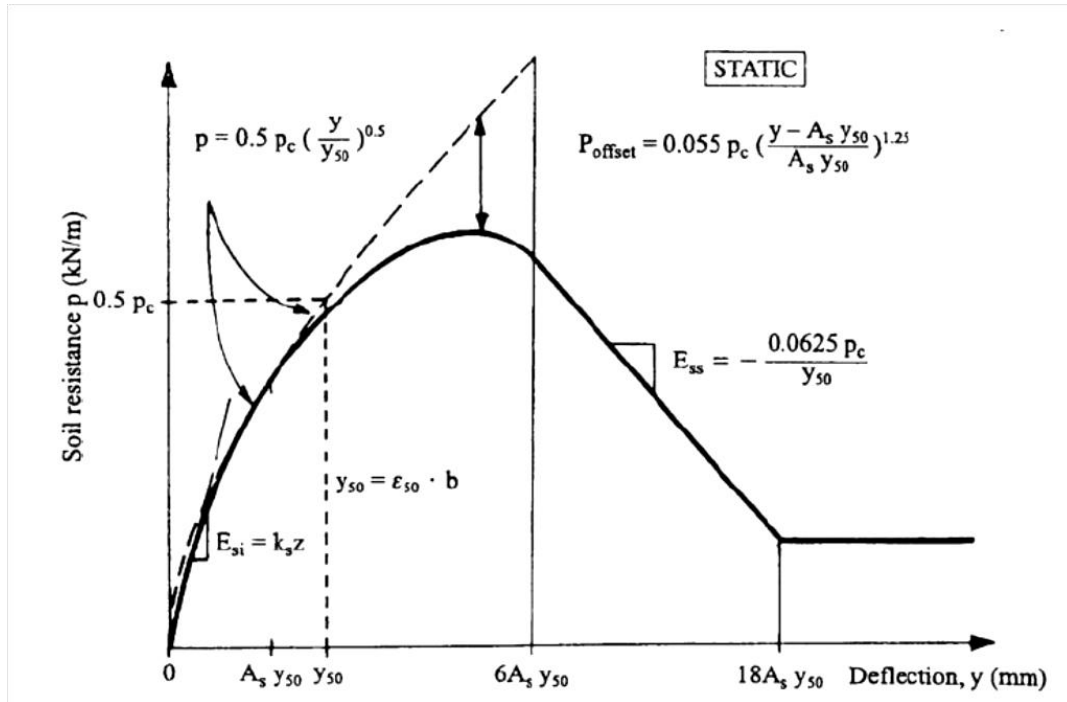
## 2.7 Χάραξη καμπύλων p-y για στιφρή, κορεσμένη άργιλο κατά τους Reese et al. (1975)

Η παρακάτω διαδικασία αφορά σε βραχυχρόνια φόρτιση (στατική) κατά τους Reese et al. (1975), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.28. Σύμφωνα με μία μελέτη σχετικά με τις καμπύλες p-y που προτείνονται για ανακυκλιζόμενη φόρτιση, τα αποτελέσματα από την περιοχή Manog εμφάνισαν πολύ μεγάλη απώλεια εδαφικής αντίδρασης. Τα δεδομένα των δοκιμών αυτών έχουν μελετηθεί προσεκτικά και οι προτεινόμενες καμπύλες p-y για ανακυκλιζόμενη φόρτιση αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά του εδάφους στη συγκεκριμένη περιοχή.

Εντούτοις, η απώλεια αντίδρασης λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης στο Manog υπήρξε πολύ εντονότερη συγκριτικά με άλλες περιοχές, πιθανότατα επειδή το έδαφος ήταν διογκούμενο και συνέχιζε να προσροφά νερό με την πάροδο των επαναλήψεων φόρτισης. Για το λόγο αυτό, η χρήση των παρατηρήσεων αυτής της ενότητας για ανακυκλιζόμενη φόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε συντηρητικά αποτελέσματα για πολλές αργίλους.

**Πίνακας 2.3:** Τιμές του k<sub>py</sub> για υπερστερεοποιημένες αργίλους.

Μέση αστράγγιστη διατμητική αντοχή (kPa)			
	50-100	100-200	300-400
k <sub>py</sub> (στατική) MN/m <sup>3</sup>	135	270	540
k <sub>py</sub> (ανακυκλιζόμενη) MN/m <sup>3</sup>	55	110	540



**Σχήμα 2.28:** Χαρακτηριστική μορφή καμπύλης  $p$ - $y$  για πάσσαλο υπό στατική φόρτιση σε στιφρή, κορεσμένη άργιλο.

**Πίνακας 2.4:** Τιμές της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$  για υπερστερεοποιημένες αργίλους.

Αστράγγιστη διατμητική αντοχή (kPa)			
$\epsilon_{50}$	50-100	100-200	300-400
	0.007	0.005	0.004

Για τη μόνωση καμπύλης  $p$ - $y$  σε στιφρή, κορεσμένη άργιλο υπό στατική φόρτιση ακολουθούμε τα εξής βήματα:

1. Λήψη δεδομένων για την αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u$ , το υπό άνωση ειδικό βάρος  $\gamma'$ , και τη διάμετρο του πασσάλου  $b$ .
2. Υπολογισμός της μέσης αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_a$  άνω του βάθους  $z$ .
3. Υπολογισμός της οριακής εδαφικής αντίδρασης ανά μονάδα μήκους του πασσάλου, χρησιμοποιώντας τη μικρότερη από τις τιμές που δίνουν οι δύο ακόλουθες σχέσεις:
 
$$p_{ct} = 2cb + \gamma'bz + 2.83c_a z \quad (2.26)$$
4. Επιλογή της τιμής του  $A_s$  (στατική φόρτιση) από το Σχήμα 2.29 για το αντίστοιχο αδιάστατο βάθος ( $z/b$ ).
5. Χάραξη του αρχικού ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης  $p$ - $y$ , χρησιμοποιώντας την κατάλληλη τιμή του  $k_s$  από τον αντίστοιχο Πίνακα (Πίνακας 2.3) .
 
$$p = (k_s z)y \quad (2.28)$$

6. Υπολογισμός της ακόλουθης μετατόπισης: λαμβάνοντας την τιμή της  $\varepsilon_{50}$  από αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών ή, απουσία πειραμάτων, από τους Πίνακες (Πίνακας 2.1, Πίνακας 2.4) ή ανάλογα με τον βαθμό στερεοποίησης της αργίλου.

$$y_{50} = \varepsilon_{50} b \quad (2.29)$$

7. Χάραξη του πρώτου παραβολικού τμήματος της καμπύλης p-y, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση και λαμβάνοντας το  $p_c$  από το βήμα 3. της διαδικασίας.

$$p = 0.5 p_c \left( \frac{y}{y_{50}} \right)^{0.5} \quad (2.30)$$

Η παραπάνω εξίσωση προσδιορίζει το τμήμα της καμπύλης p-y από το σημείο τομής της με την εξίσωση του βήματος 5. ως το σημείο στο οποίο το y είναι ίσο με  $A_s y_{50}$

8. Χάραξη του δεύτερου παραβολικού τμήματος της καμπύλης p-y,

$$p = 0.5 p_c \left( \frac{y}{y_{50}} \right) - 0.055 p_c \left( \frac{y - A_s y_{50}}{A_s y_{50}} \right)^{1.25} \quad (2.31)$$

Η παραπάνω εξίσωση προσδιορίζει το τμήμα της καμπύλης p-y από το σημείο στο οποίο το y είναι ίσο με  $A_s y_{50}$  ως το σημείο όπου το y είναι ίσο με  $6 A_s y_{50}$

9. Χάραξη του επόμενου ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης p-y,

$$p = 0.5 p_c (6 A_s)^{0.5} - 0.411 p_c - \frac{0.0625}{y_{50}} p_c (y - 6 A_s y_{50}) \quad (2.32)$$

Η παραπάνω εξίσωση προσδιορίζει το τμήμα της καμπύλης p-y από το σημείο στο οποίο το y είναι ίσο με  $6 A_s y_{50}$  ως το σημείο όπου το y είναι ίσο με  $18 A_s y_{50}$ .

10. Χάραξη του τελικού ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης p-y,

$$p = 0.5 p_c (6 A_s)^{0.5} - 0.411 p_c - 0.75 p_c A_s \quad (2.33)$$

ή

$$p = p_c (1.225 \sqrt{A_s} - 0.75 A_s - 0.411) \quad (2.34)$$

Η παραπάνω εξίσωση προσδιορίζει το τμήμα της καμπύλης p-y από το σημείο στο οποίο το y είναι ίσο με  $18 A_s y_{50}$  και άνω.

*Σημείωση:* Η διαδικασία που αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.28, προϋποθέτει ότι υπάρχει σημείο τομής μεταξύ των εξισώσεων στα βήματα 5 και 7. Πάραυτα, μπορεί να μην υπάρχει σημείο τομής της εξίσωσης του βήματος 5 με κάποια από τις εξισώσεις των βημάτων που ακολουθούν. Άρα η εξίσωση του βήματος 5 προσδιορίζει την καμπύλη p-y μέχρι αυτή να τμήσει κάποια εξίσωση ακόλουθου βήματος. Σε περίπτωση που δεν υπάρξει σημείο τομής, η εξίσωση του βήματος 5 προσδιορίζει εξ' ολοκλήρου την καμπύλη p-y.

Η ακόλουθη διαδικασία αφορά σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.30:

1. Τα βήματα 1,2,3,5, και 6 είναι όμοια με αυτά υπό στατική φόρτιση.

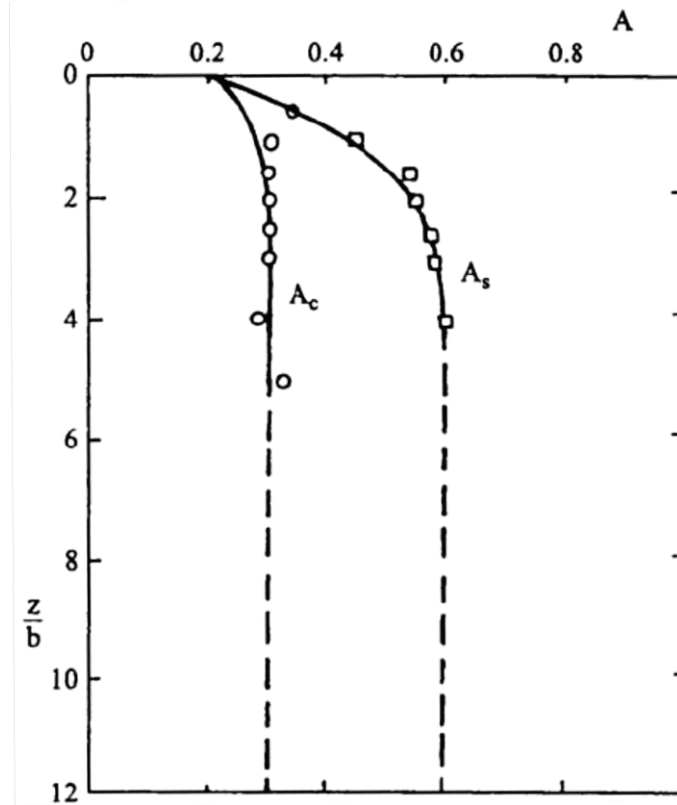
4. Επιλογή της κατάλληλης τιμής του  $A_c$  από το Σχήμα 2.29 για το αντίστοιχο αδιάστατο βάθος (z/b). Υπολογισμός της τιμής:

$$y_p = 4.1 A_c y_{50} \quad (2.35)$$

7. Χάραξη του παραβολικού τμήματος της καμπύλης p-y,

$$p = A_c p_c \left[ 1 - \left( \frac{y - 0.45 y_p}{0.45 y_p} \right)^{0.25} \right] \quad (2.36)$$

Η εξίσωση του επόμενου βήματος προσδιορίζει το τμήμα της καμπύλης p-y από το σημείο τομής με την εξίσωση του βήματος 5. ως το σημείο όπου το y είναι ίσο με  $0.6 y_p$ .



**Σχήμα 2.29:** Τιμές των σταθερών  $A_c$  (cyclic),  $A_s$  (static)

8. Χάραξη του επόμενου ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης p-y,

$$p = 0.936 A_c p_c - \frac{0.085}{y_{50}} p_c (y - 0.6 y_p) \quad (2.37)$$

Η παραπάνω εξίσωση προσδιορίζει το τμήμα της καμπύλης p-y από το σημείο στο οποίο το y είναι ίσο με  $0.6 y_p$  ως το σημείο όπου το y είναι ίσο με  $1.8 y_p$ .

9. Χάραξη του τελικού ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης p-y,

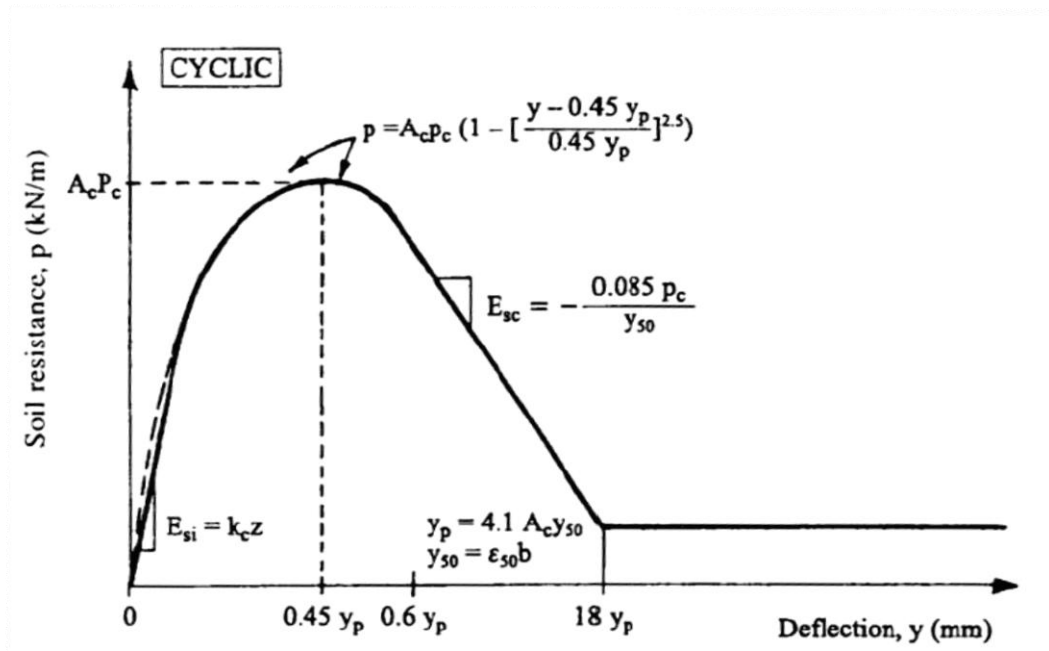
$$p = 0.936 A_c p_c - \frac{0.102}{y_{50}} p_c y_p \quad (2.38)$$

Η παραπάνω εξίσωση προσδιορίζει το τμήμα της καμπύλης p-y από το σημείο στο οποίο το y είναι ίσο με  $1.8 y_p$  και άνω.

*Σημείωση:* Η διαδικασία που αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.30, προϋποθέτει την ύπαρξη σημείου τομής μεταξύ των εξισώσεων των βημάτων 5 και 7. Υπάρχει πιθανότητα να μην υφίσταται σημείο τομής της εξίσωσης του βήματος 5 με κάποια από τις εξισώσεις των ακόλουθων



βημάτων που προσδιορίζουν την καμπύλη p-y. Σε περίπτωση που δεν υπάρξει σημείο τομής, εφαρμόζεται η εξίσωση που έχει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη τιμή του p για οποιαδήποτε τιμή του y.

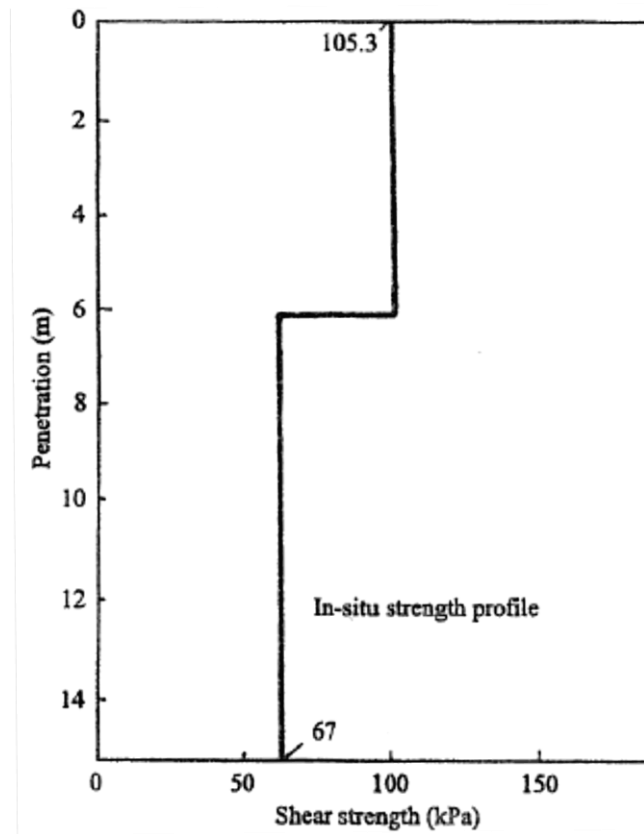


**Σχήμα 2.30:** Χαρακτηριστική μορφή καμπύλης p-y για πάσσαλο υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε στιφρή, κορεσμένη άργιλο.

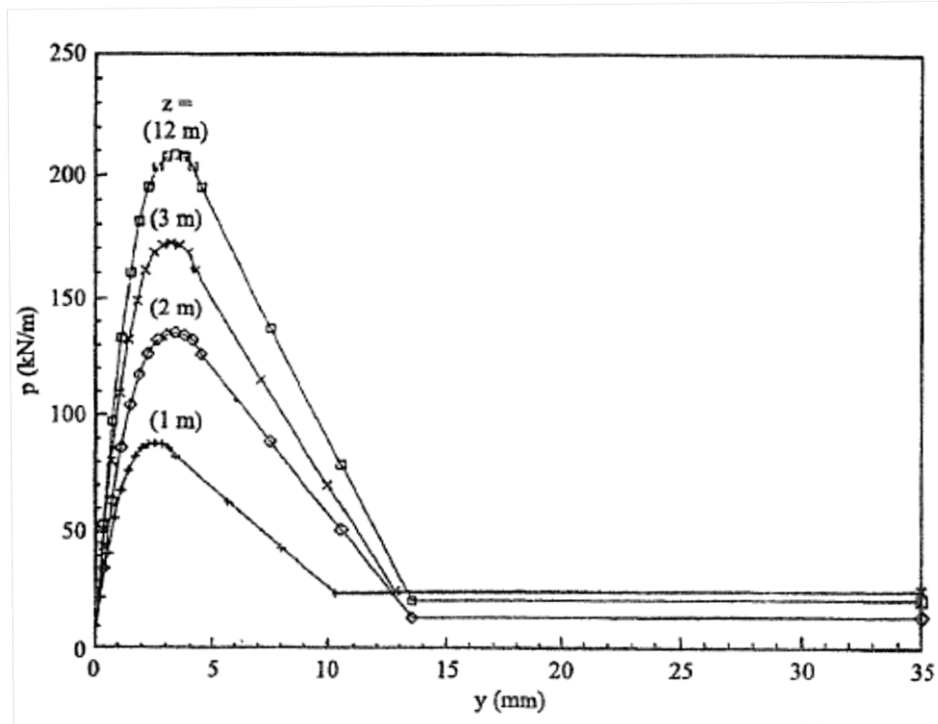
#### Παράδειγμα εφαρμογής σε στιφρή, κορεσμένη άργιλο

Προκειμένου να προσδιοριστεί η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους προτείνεται η πραγματοποίηση δοκιμών τριαξονικής συμπίεσης σε μη στερεοποιημένα δοκίμια υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η τιμή της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$  ορίζεται ως η παραμόρφωση που μετρήθηκε κατά τη δοκιμή και αντιστοιχεί στην τιμή της διατμητικής αντοχής,  $c$ , η οποία με τη σειρά της ορίζεται ίση με το ήμισυ της τιμής της θλιπτικής αντοχής του δοκιμίου. Οι τιμές που προκύπτουν από τις τριαξονικές δοκιμές πιθανόν να είναι συντηρητικές, αλλά αντιπροσωπεύουν περισσότερο ρεαλιστικά, σε σχέση με άλλες δοκιμές, την αντοχή.

Η ομάδα των καμπύλων φορτίου-μετατόπισης, που παρουσιάζονται παρακάτω ως παράδειγμα, αντιστοιχούν σε πάσσαλο διαμέτρου 610mm, περιβαλλόμενο από στιφρή, κορεσμένη άργιλο. Το εδαφικό προφίλ που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο τύπου εδάφους φαίνεται στο Σχήμα 2.31. Το ενεργό ειδικό βάρος θεωρήθηκε ότι ισούται με  $\gamma' = 7.9 \text{ kN/m}^3$  σε όλο το βάθος. Η απουσία καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων του εδάφους οδήγησε στην υπόθεση ότι η παραμόρφωση  $\epsilon_{50}$  είναι ίση με 0.005 για όλο το βάθος του εδαφικού προφίλ (Πίνακας 2.4). Επιπλέον, υποτέθηκε ότι η αρχική κλίση της καμπύλης p-y αντιστοιχεί στη τιμή  $k = 135 \text{ MN/m}^3$  και ότι η φόρτιση είναι στατική. Τέλος, αναφέρουμε ότι οι υπολογιζόμενες καμπύλες p-y αντιστοιχούν σε βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους: 1, 2, 3 και 12m (Σχήμα 2.32).



Σχήμα 2.31: Εδαφικό προφίλ που χρησιμοποιήθηκε για το παράδειγμα σιφής, κορεσμένης αργίλου.



Σχήμα 2.32: Παραδείγματα καμπύλων  $p$ - $y$  σε σιφή, κορεσμένη άργιλο.

## 2.8 Χάραξη καμπύλων p-y σε στιφρή, μη-κορεσμένη άργιλο κατά Welch & Reese (1972)

Η διαδικασία που αναπτύσσεται αφορά σε βραχυχρόνια φόρτιση (στατική), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.33 (Welch & Reese 1972):

1. Λήψη δεδομένων για την αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u$ , το ειδικό βάρος του εδάφους  $\gamma$ , και τη διάμετρο του πασσάλου  $b$ . Επίσης, λήψη της  $\varepsilon_{50}$  από καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων. Ελλείψει αυτών των καμπύλων, χρησιμοποιούνται οι τιμές 0.010 ή 0.005 όπως δίνονται από τον Πίνακα 2.1, με τη μεγαλύτερη από τις δύο τιμές να είναι πιο συντηρητική.

2. Υπολογισμός της οριακής αντίδρασης του εδάφους ανά μονάδα μήκους του πασσάλου,  $p_{ult}$ , χρησιμοποιώντας την ελάχιστη από τις δύο τιμές που υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$p_{ult} = \left[ 3 + \frac{\gamma}{c_a} z + \frac{J}{b} z \right] c_a b \quad (2.39)$$

$$p_{ult} = 9c_u b \quad (2.40)$$

όπου  $c_a$  η μέση αστράγγιστη διατμητική αντοχή της εξεταζόμενης εδαφικής ζώνης και  $J=0.5$ .

3. Υπολογισμός της μετατόπισης  $y_{50}$ , για το μισό της οριακής αντίδρασης του εδάφους, από την ακόλουθη σχέση:

$$y_{50} = 2.5\varepsilon_{50} b \quad (2.41)$$

4. Τα σημεία που περιγράφουν την καμπύλη p-y για πάσσαλο υπό εγκάρσια φόρτιση σε στιφρή, μη κορεσμένη άργιλο υπολογίζονται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{p}{p_{ult}} = 0.5 \left( \frac{y}{y_{50}} \right)^{0.25} \quad (2.42)$$

5. Έπειτα από το σημείο  $y=16y_{50}$ , το p ισούται με  $p_{ult}$  για μεγαλύτερες τιμές του y.

Η ακόλουθη διαδικασία αφορά σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση και απεικονίζεται από τυπικές καμπύλες στο Σχήμα 2.34:

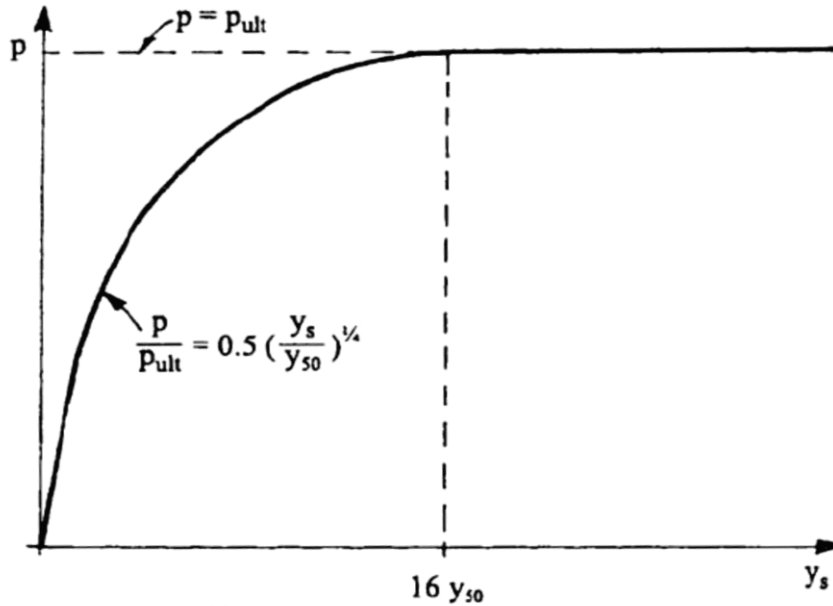
1. Προσδιορισμός της καμπύλης για στατική φόρτιση σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία.
2. Προσδιορισμός του αριθμού των επαναλήψεων εφαρμογής του εγκάρσιου φορτίου σχεδιασμού στον πάσσαλο.
3. Υπολογισμός της τιμής C για διάφορες τιμές του λόγου  $p/p_{ult}$ , όπου C η παράμετρος που περιγράφει την επιρροή της επαναλαμβανόμενης φόρτισης στη μετατόπιση, με μία σχέση που αναπτύσσεται από εργαστηριακές δοκιμές, (Welch & Reese 1972), ή απουσία της σχέσης, από την εξίσωση:

$$C = 9.6 \left( \frac{p}{p_{ult}} \right)^4 \quad (2.43)$$

4. Υπολογισμός νέων τιμών του y για ανακυκλιζόμενη φόρτιση, από τις τιμές του p που χρησιμοποιήθηκαν στον λόγο  $p/p_{ult}$  του βήματος 3, χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

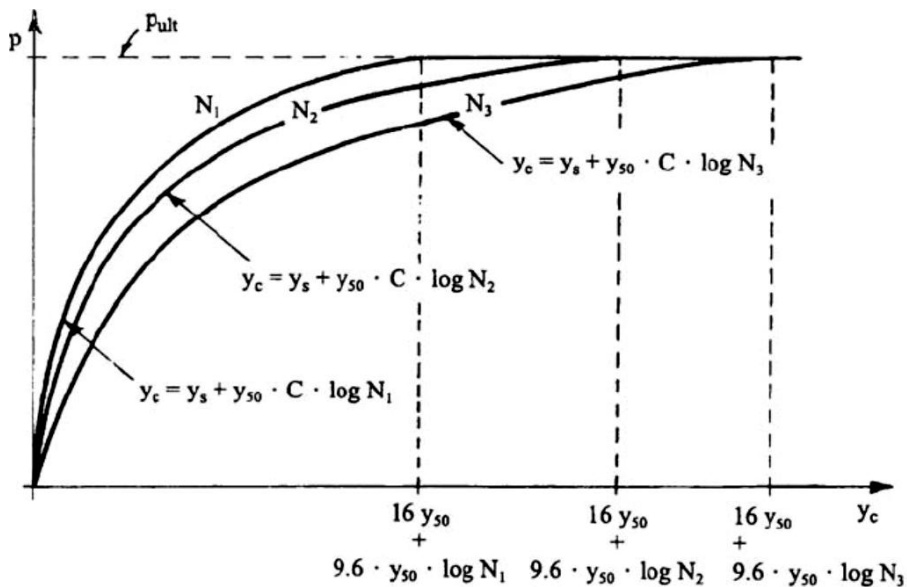
$$y_c = y_s + y_{50} C \log N \quad (2.44)$$

όπου  $y_c$  = μετατόπιση έπειτα από  $N$ -κύκλους φόρτισης,  $y_s$  = μετατόπιση υπό βραχυχρόνιο στατικό φορτίο, και  $y_{50}$  = μετατόπιση υπό βραχυχρόνιο στατικό φορτίο ίσο με τη μισή οριακή αντίδραση του εδάφους.



**Σχήμα 2.33:** Χαρακτηριστική μορφή καμπύλης  $p$ - $y$  για πάσσαλο υπό στατική φόρτιση σε στιφρή, μη κορεσμένη άργιλο.

5. Η καμπύλη  $p$ - $y$  καθορίζει την εδαφική απόκριση έπειτα από  $N$ -κύκλους φόρτισης.

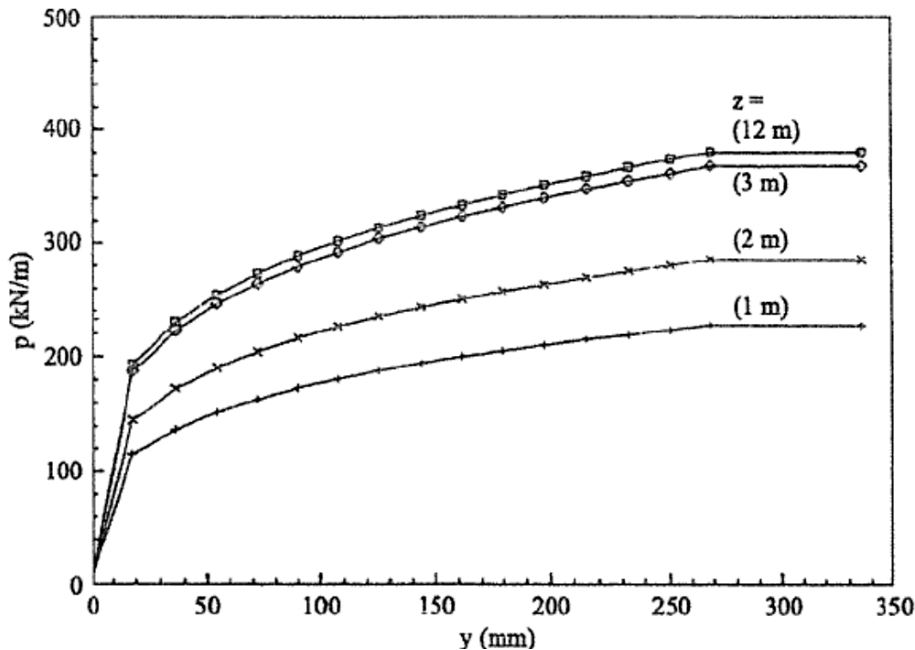


**Σχήμα 2.34:** Χαρακτηριστικές μορφές καμπύλων  $p$ - $y$  για πάσσαλο υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε στιφρή, μη κορεσμένη άργιλο.

Παράδειγμα εφαρμογής σε στιφρή, μη κορεσμένη άργιλο

Στο Σχήμα 2.35 απεικονίζονται οι καμπύλες  $p$ - $y$  όπως υπολογίστηκαν για πάσσαλο διαμέτρου  $D=305\text{mm}$ , ο οποίος είναι τοποθετημένος σε στιφρή, μη κορεσμένη άργιλο. Το εδαφικό προφίλ που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 2.31. Το ειδικό βάρος θεωρήθηκε ίσο με  $19 \text{ kN/m}^3$  σε όλο το βάθος. Επιπλέον, εξαιτίας της έλλειψης καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων, αντιπροσωπευτικής της

συμπεριφοράς του εδάφους, θεωρήθηκε τιμή της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$  ίση με 0.005. Χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση για τον υπολογισμό της τιμής της παραμέτρου C και έγινε η υπόθεση ότι θα υπάρξουν 100 κύκλοι εφαρμογής του φορτίου. Τέλος, οι καμπύλες p-y υπολογίστηκαν σε βάθη: 1, 2, 3 και 12m.



Σχήμα 2.35: Παράδειγμα καμπύλης p-y για ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε στιφρή, μη κορεσμένη άργιλο.

## 2.9 Προτάσεις για τη χάραξη καμπυλών p-y σε έδαφος με συνοχή και γωνία τριβής

Δεν υπάρχουν διαθέσιμες προτάσεις για τη διαδικασία χάραξης καμπυλών p-y σε έδαφος με συνοχή και γωνία τριβής οι οποίες να είναι γενικώς αποδεκτές. Η διαδικασία που ακολουθεί για τον προσδιορισμό των καμπύλων αφορά βραχυχρόνια, στατική φόρτιση καθώς και ανακυκλιζόμενη. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Kuwait και στο Los Angeles επέτρεψαν την ανάπτυξη των προτάσεων που ακολουθούν.

Η οριακή εδαφική αντίδραση υπολογίζεται ως ο συντελεστής παθητικής ώθησης συν την αντίδραση στις πλευρές του πασσάλου αφαιρώντας την ενεργό εδαφική τάση. Οι δύο αυτές τελευταίες τάσεις τείνουν να αλληλοαναιρούνται. Η προτεινόμενη εξίσωση για τον υπολογισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης υπολογίζεται ως:

$$p = \sigma_p D = C_p \sigma_h D \quad (2.45)$$

όπου,

$\sigma_p$  = Παθητική πίεση, η οποία περιλαμβάνει την τριδιάστατη επιρροή της σφήνας ( $\text{kN/m}^2$ ),

D = διάμετρος πασσάλου (m)

και

$$\sigma_h = \gamma z \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.46)$$

όπου,

$\sigma_h$  = η παθητική πίεση Rankine σε τείχος απείρου μήκους ( $\text{kN/m}^2$ ),

$\gamma$  = ειδικό βάρος εδάφους ( $\text{kN/m}^3$ ),

z = βάθος στο οποίο θεωρείται ότι ασκείται η παθητική αντίδραση (m),

$\phi$  = γωνία τριβής (μοίρες),

c = συνοχή ( $\text{kN/m}^2$ ),

$C_p$ , = αδιάστατος συντελεστής για τον υπολογισμό της τριδιάστατης επιρροής της σφήνας.

Ο συντελεστής  $C_p$  μπορεί να διαιρεθεί σε δύο μέρη. Στο συντελεστή  $C_{p\phi}$  για τη μετατροπή του όρου τριβής της εξίσωσης και στο συντελεστή  $C_{pc}$  για τη μετατροπή του όρου συνοχής. Με αυτό τον τρόπο η εξίσωση μετασχηματίζεται ως:

$$p_{ult} = [C_{p\phi} \gamma z \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) + C_{pc} c \tan(45 + \frac{\phi}{2})] D \quad (2.47)$$

Η οποία μπορεί επίσης να εκφραστεί ως:

$$p_{ult} = A_s p_{ult\phi} + p_{ultc} \quad (2.48)$$

όπου

$$p_{ult\phi} = \min(p_{u1}, p_{u2}) \quad (2.49)$$

$$p_{u1} = \gamma z \left[ \frac{k_o z (\tan \phi) (\sin \beta)}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (b + z (\tan \beta) (\tan \alpha)) + k_o z \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - \kappa_\alpha b \right] \quad (2.50)$$

$$p_{u2} = k_a b \gamma z \tan^8(\beta - 1) + \kappa_o b \gamma z \tan \phi \tan^4 \beta \quad (2.51)$$

όπου,

$\phi$  = γωνία τριβής [μοίρες],

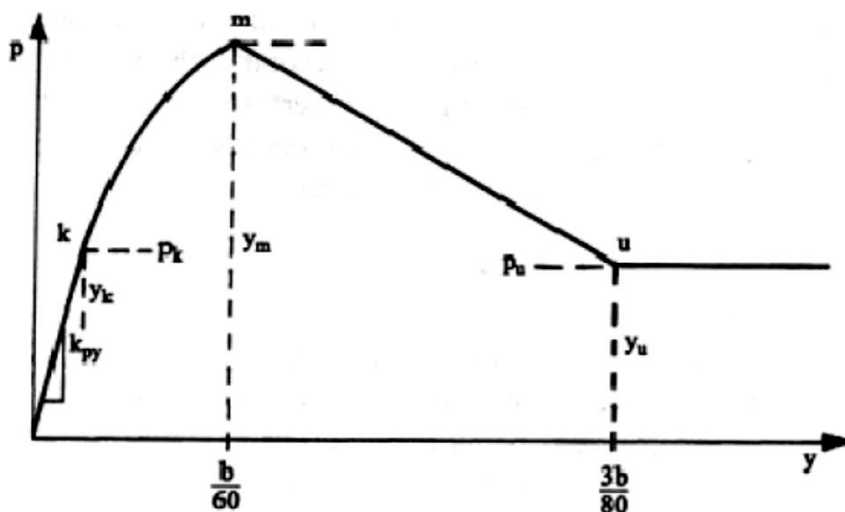
$K_o$  = συντελεστής ουδέτερης ώθησης,  $K_o = 1 - \sin \phi$ ,

$K_\alpha$  = ελάχιστος συντελεστής ενεργητικής ώθησης,  $K_\alpha = \tan^2[45 - \phi/2]$ ,

$\beta$  =  $45 + \phi/2$  [μοίρες],

$\alpha_s$  = κυμαίνεται μεταξύ  $\phi/3 - \phi/2$  [μοίρες], ( $\alpha_s = \phi/2$  χρησιμοποιείται από τον Blum)

Η τιμή του  $A_s$  προκύπτει από το Σχήμα 2.29. Το τμήμα της εξίσωσης που σχετίζεται με την τριβή,  $p_{ult\phi}$ , θα αποτελεί και τη μικρότερη τιμή των εξισώσεων,  $p_{u1}$ ,  $p_{u2}$ . Το γεγονός ότι η συμπεριφορά εδάφους με χαρακτηριστικά συνοχής και γωνίας τριβής, μοιάζει περισσότερο με τη συμπεριφορά ενός μη-συνεκτικού εδάφους, οδηγεί στη χρήση διαδικασίας που έχει αναπτυχθεί για άμμο από τους Reese et al. για τον προσδιορισμό των καμπύλων p-y. Δίνεται ένα παράδειγμα καμπύλης στο Σχήμα 2.36.



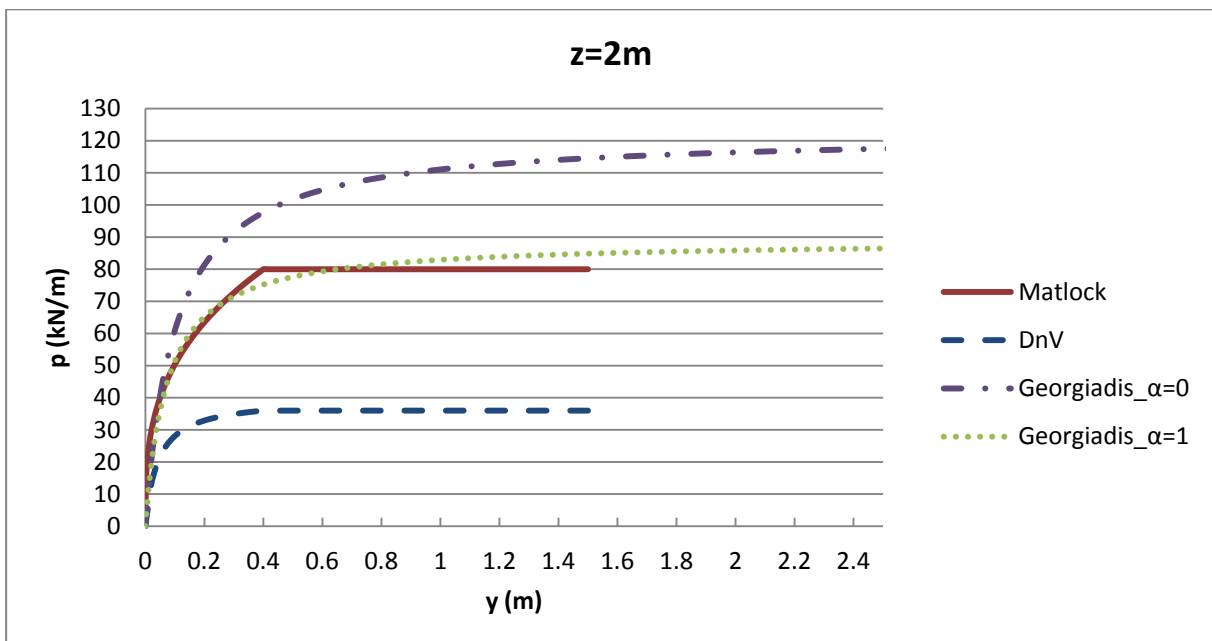
**Σχήμα 2.36:** Χαρακτηριστική καμπύλη p-y συνεκτικού εδάφους με γωνία τριβής. (Reese & Van Impe, 2001).

## 2.10 Παρατηρήσεις επί των καμπύλων p-y για μαλακές κορεσμένες αργίλους

Οι καμπύλες p-y χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό της σχέσης μεταξύ της εγκάρσιας εδαφικής αντίδρασης και της εγκάρσιας μετατόπισης του πασσάλου και σχετίζονται με την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του εδάφους, όπως αυτή έχει προκύψει από εργαστηριακές δοκιμές. Η χρήση εμπειρικών μεθοδολογιών για σχεδιαστικούς σκοπούς είναι δικαιολογημένη όταν οι συνθήκες προσεγγίζουν εκείνες στις οποίες βασίζονται οι μεθοδολογίες.

Οι μεθοδολογίες που εξετάστηκαν και διερευνήθηκαν παραμετρικά στο παρόν κεφάλαιο αναφορικά με την περίπτωση μαλακής αργίλου είναι εκείνες που έχουν προταθεί από τους: Matlock (1970), Νορβηγικούς κανονισμούς (1977) και τον Γεωργιάδη (2010). Η εκάστοτε μεθοδολογία προτείνει μία διαδικασία για τη χάραξη μη-γραμμικών καμπύλων p-y. Προκειμένου να είναι εμφανής η διαφορά των αποτελεσμάτων των τριών παραπάνω μεθοδολογιών, παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.37 και 2.38 συγκριτικά διαγράμματα καμπύλων p-y για βάθος  $z=2\text{m}$  και  $z=10\text{m}$  αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι στα διαγράμματα η ονομασία DnV αναφέρεται στην καμπύλη η οποία έχει χαραχθεί σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Νορβηγικών κανονισμών, ενώ η ονομασία Georgiadis\_α=1 και Georgiadis\_α=0 αναφέρεται στη μεθοδολογία κατά τον Γεωργιάδη για συντελεστή τριβής της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους  $\alpha=1$  και  $\alpha=0$  αντίστοιχα. Τέλος, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u$  θεωρείται ότι μεταβάλλεται γραμμικά με το βάθος σύμφωνα με την εξίσωση:  $c_u=10+0.25\gamma'z$ .

Όπως προκύπτει από τα συγκριτικά διαγράμματα, διαφορές εμφανίζονται τόσο στην κλίση της καμπύλης όσο και στην τιμή της οριακής εδαφικής αντίδρασης με τις τελευταίες να είναι εμφανέστερες σε μικρά βάθη.

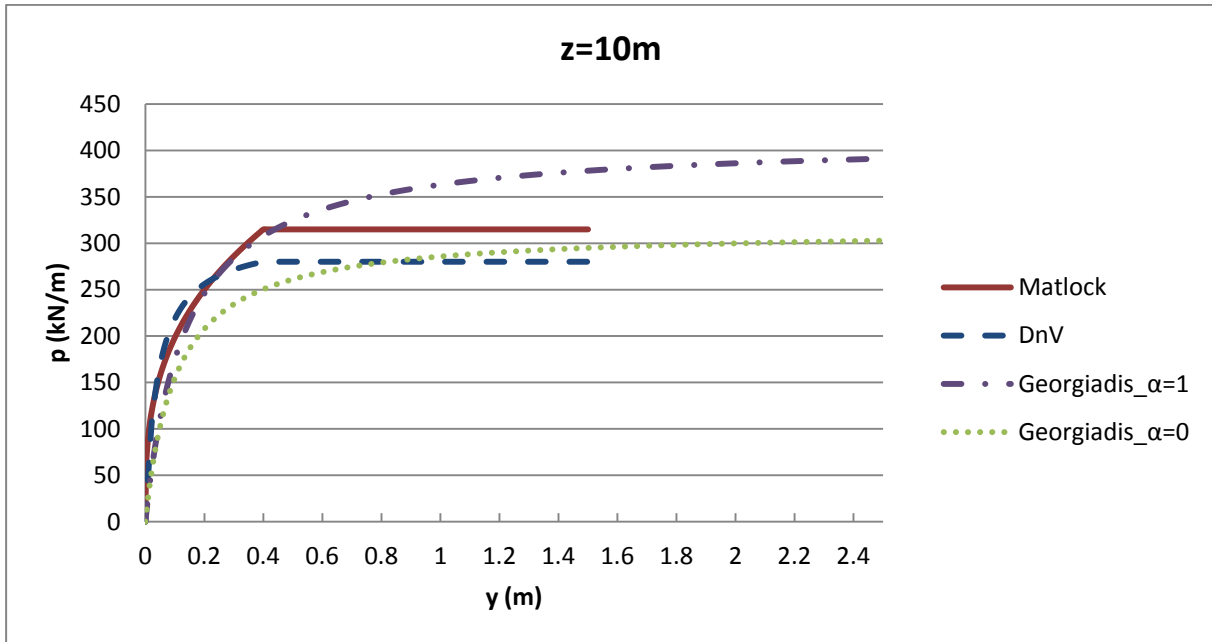


**Σχήμα 2.37:** Συγκριτικό διάγραμμα καμπύλων p-y για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε βάθος  $z=2\text{m}$  για  $A=0.25$ .

### Οριακή εγκάρσια εδαφική αντίδραση

Αναφορικά με τον υπολογισμό της τιμής της οριακής εδαφικής αντίδρασης, τμήμα της καμπύλης που συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον ενός μελετητή, σε όλες τις μεθοδολογίες υπεισέρχεται ο όρος του συντελεστή  $N_p$  και της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_u$ . Καθώς σε όλες τις μεθοδολογίες έχει χρησιμοποιηθεί κοινή μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος, σκόπιμη κρίνεται η διερεύνηση των τιμών του συντελεστή  $N_p$  που χρησιμοποιεί η κάθε

μεθοδολογία από τις προαναφερόμενες καθώς και άλλες που παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.



**Σχήμα 2.38:** Συγκριτικό διάγραμμα καμπύλων p-y για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε βάθος z=10m για A=0.25.

## 2.11 Συγκεντρωτική καταγραφή μεθοδολογιών υπολογισμού του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης $N_p$

Η παρούσα παράγραφος πραγματεύεται τις τιμές του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  που χρησιμοποιούνται από διάφορες μεθοδολογίες για την εύρεση της οριακής εδαφικής αντίδρασης. Η διερεύνηση αυτή αφορά πάσσαλο σε μαλακή κανονικά στερεοποιημένη άργιλο υπό αστράγγιστες συνθήκες υποβαλλόμενο σε εγκάρσια στατική φόρτιση. Παρακάτω παρατίθενται οι εξεταζόμενες μεθοδολογίες σε χρονολογική σειρά και συγκεντρωτικό διάγραμμα  $N_p$  συναρτήσει του λόγου z/D (Σχήμα 2.39) όπως προέκυψε από την εφαρμογή τους για μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής σύμφωνα με τη σχέση  $c_u=10+0.25\gamma'z$ .

### 2.11.1 Μεθοδολογία κατά Hansen (1961)

Η σχέση που διατυπώθηκε από τον Hansen (1961) για τον υπολογισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης στην περίπτωση εγκάρσιας φόρτισης πασσάλου προσδιορίζεται στην εξίσωση 2.52 και αφορά όλα τα εδάφη με μηδενική γωνία εσωτερικής τριβής ( $\phi=0$ ). Ο Hansen έλαβε υπόψη του την τραχύτητα της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους και πρότεινε να αγνοείται η επίδραση του ειδικού βάρους του εδάφους.

$$\frac{p_{ult}}{c_u b} = \frac{2.567 + 5.307 \frac{z}{b}}{1 + 0.652 \frac{z}{b}} \quad (2.52)$$

όπου z το εκάστοτε εξεταζόμενο βάθος.



### 2.11.2 Μεθοδολογία κατά Broms (1964)

Η μεθοδολογία που προτείνεται κατά Broms (1964) για τον υπολογισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης έχει διατυπωθεί στην παράγραφο 1.5 της παρούσας εργασίας. Ο Broms προτείνει τη χρήση της τιμής  $N_p=9$  για τον υπολογισμό της μέγιστης εδαφικής αντίδρασης  $p_{ult}$  (εξίσωση 2.53).

$$p_{ult} = 9c_u D \quad (2.53)$$

### 2.11.3 Μεθοδολογία κατά Matlock (1970)

Η τιμή του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης σύμφωνα με τη μεθοδολογία κατά Matlock (1970) για την οποία έχει γίνει λόγος στην παράγραφο 2.6.1 της παρούσας εργασίας ορίζεται από την εξής εξίσωση:

$$N_p = \min \left\{ 3 + \frac{\gamma'}{c_u} z + \frac{J}{D} z, 9 \right\} \quad (2.54)$$

όπου J συντελεστής που παίρνει τιμή  $J=0.5$  για κανονικά στερεοποιημένη άργιλο.

### 2.11.4 Μεθοδολογία κατά τους Νορβηγικούς κανονισμούς DnV (1977)

Στην παράγραφο 2.6.2 της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκε η μεθοδολογία χάραξης καμπύλων p-y σύμφωνα με τους Νορβηγικού κανονισμούς του 1977. Ο συντελεστής  $N_p$  συμμετέχει στον υπολογισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης ως εξής:

$$p_d = N_p \frac{c_u}{\gamma_{mc}} \quad (2.55)$$

όπου  $N_p$  ημι-εμπειρική σταθερά που αυξάνει γραμμικά από την τιμή  $N_p=1$  (στατική φόρτιση) στην επιφάνεια έως την τιμή  $N_p=8$  σε βάθος  $x=N_r \cdot D$  κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, με  $N_r=10$  για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους.

Η μεθοδολογία των Νορβηγικών κανονισμών (2007) είναι όμοια με την αντίστοιχη κατά Matlock (1970).

### 2.11.5 Μεθοδολογία κατά Sullivan (1979)

Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία εξετάζονται δύο τύποι αστοχίας του εδάφους. Η πρώτη αφορά τη θεώρηση αστοχίας τύπου σφήνας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και η δεύτερη τη θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης του εδάφους γύρω από τον πάσσαλο σε χαμηλότερο βάθος κατά την αστοχία.

Η οριακή εδαφική αντίδραση κατά την αστοχία τύπου σφήνας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους δίνεται από τη σχέση:

$$p_u = N_p (s_u)_{avg} b \quad (2.56)$$

όπου  $(s_u)_{avg}$  η μέση αστράγγιστη διατμητική αντοχή για το βάθος εμφάνισης αστοχίας τύπου σφήνας – συνήθως περίπου ίσο με τρεις διαμέτρους πασσάλου – και b η διάμετρος του πασσάλου.

Για τη δεύτερη θεώρηση της αστοχίας υπολογίζεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή σε συγκεκριμένο βάθος. Η οριακή εδαφική αντίδραση ισούται με:

$$p_u = N_p s_u b \quad (2.57)$$

Προτείνονται οι εξής εξισώσεις για τον υπολογισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης:

$$p_u = \left\{ 2 + \frac{\gamma}{(s_u)_{avg}} x + \frac{0.833}{b} x \right\} (s_u)_{avg} b \quad (2.58)$$

$$p_u = \left\{ 3 + \frac{0.5}{b} x \right\} (s_u) b \quad (2.59)$$

Υιοθετείται τιμή του συντελεστή  $N_p=9$  η οποία οδηγεί στην εξίσωση 2.60 για τον υπολογισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης.

$$p_u = 9c_u b \quad (2.60)$$

Προτείνεται ο ορισμός της τιμής της οριακής εδαφικής αντίδρασης ως το ελάχιστο των εξισώσεων 2.58 και 2.60.

### 2.11.6 Μεθοδολογία κατά Stevens & Audibert (1979)

Οι Stevens & Audibert πραγματοποίησαν πειράματα εγκάρσιας φόρτισης σε πασσάλους διαμέτρου μεταξύ 0.30m και 1.50m, τα αποτελέσματα των οποίων συνέκριναν με τα αντίστοιχα υφιστάμενων μεθοδολογιών χάραξης καμπύλων p-y. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψε ότι οι υπολογιζόμενες μετατοπίσεις κατά μήκος των πασσάλων ήταν μικρότερες από εκείνες που προέβλεπαν οι θεωρητικές μεθοδολογίες. Επιπλέον, συμπέραναν ότι οι μεθοδολογίες υποτιμούσαν τη μέγιστη καμπτική ροπή κατά μήκος του πασσάλου. Οι προκύπτουσες διαφορές θεωρήθηκε ότι οφείλονταν σε κυρίως σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος αφορά τη θεώρηση γραμμικής εξάρτησης των παραμορφωσιακών χαρακτηριστικών του εδάφους από τη διάμετρο του πασσάλου. Ο δεύτερος παράγοντας ήταν η διαφορά της οριακής εδαφικής αντίδρασης μεταξύ των πειραμάτων και των προτεινόμενων μεθοδολογιών για μικρά βάθη.

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης, οι Stevens & Audibert πρότειναν συγκεκριμένες μετατροπές στη διαδικασία χάραξης καμπύλων p-y κατά Matlock (1970) και κατά API RP (1978). Μία από αυτές αφορά τη σχέση του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  με το λόγο του εξεταζόμενου βάθους προς τη διάμετρο του πασσάλου ( $z/D$ ). Βέβαια, δεν πρότειναν σαφώς ορισμένη σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή  $N_p$ . Συνεπώς, ψηφιοποιήθηκε το διάγραμμα των πειραματικών τους αποτελεσμάτων για την εκτίμηση τιμών του συντελεστή  $N_p$ , ώστε να συμπεριληφθεί η συγκεκριμένη μεθοδολογία στο διάγραμμα του Σχήματος 2.39.

### 2.11.7 Μεθοδολογία κατά Randolph-Houlsby (1984)

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία βασίζεται στη θεώρηση του εδάφους ως απολύτως πλαστικού συνεκτικού υλικού, γεγονός που «υποβαθμίζει» τον υπολογισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης σε πρόβλημα επίπεδης παραμόρφωσης της θεωρίας πλαστικότητας. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα η φόρτιση υπολογίζεται σε έναν μακρύ κύλινδρο, ο οποίος κινείται εγκάρσια εντός απείρου μέσου. Εφόσον η φόρτιση αδιαστατοποιηθεί ως προς την αντοχή του εδάφους και τη διάμετρο του πασσάλου, διαπιστώνεται ότι ο συντελεστής οριακής εδαφικής αντίδρασης κυμαίνεται μεταξύ  $6+\pi$  για απόλυτα λείο πάσσαλο και  $4\sqrt{2}+2\pi$  για απόλυτα τραχύ πάσσαλο.

1. Για  $z>3D$

Επίλυση κάτω ορίου θεωρίας πλαστικότητας:

$$N_p = \frac{P}{cd} = \pi + 2\Delta + 2\cos \Delta + 4 \left[ \cos\left(\frac{\Delta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right) \right] \quad (2.61)$$

όπου  $\Delta = \arcsin(\alpha)$ ,  $\alpha$  ο συντελεστής διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους και  $d$  η διάμετρος του πασσάλου.

Επίλυση άνω ορίου θεωρίας πλαστικότητας:

$$N_p = P / cd = \pi + 2\Delta + 4 \cos \psi (\sqrt{2} + \sin \psi) \quad (2.62)$$

όπου  $\psi = \pi/4 - \Delta/2$

2. Για  $z < 3D$

Αστοχία τύπου σφήνας:

$$N_p = \frac{P}{cd} = 2 + \frac{\alpha\pi}{2} - \frac{\pi}{8} \frac{\gamma d}{c} + \frac{z}{d} \left( 2\sqrt{2} + \frac{\gamma d}{c} \right) \quad (2.63)$$

ή

$$N_p = P / cd = 2 + \sigma_{vo} / c + 1.5z / d \quad (2.64)$$

### 2.11.8 Μεθοδολογία κατά Murff-Hamilton (1993)

Η ανάλυση των Murff-Hamilton βασίζεται στο άνω όριο της θεωρίας πλαστικότητας. Ο μηχανισμός συνδυάζει μία παραμορφώσιμη κωνική εδαφική σφήνα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους με συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης σε μεγαλύτερα βάθη. Χρησιμοποιούνται τέσσερις παράμετροι βελτιστοποίησης, οι οποίες ορίζουν τη γεωμετρική έκταση και τη χωρική διακύμανση της παραμόρφωσης του εδάφους. Ο παραπάνω μηχανισμός δύναται να λάβει υπόψη πολλές περιπλοκότητες, όπως η ανομοιογένεια της εδαφικής αντοχής, η συνάφεια πασσάλου-εδάφους και η μύζηση όπισθεν του πασσάλου. Επιπλέον, οι Murff-Hamilton προσάρμοσαν την ακόλουθη εμπειρική σχέση σε αναλυτικά αποτελέσματα τυπικών εδαφικών συνθηκών με σκοπό τον προσδιορισμό μίας πιο εύχρηστης μορφής της μεθοδολογίας ανάλυσης.

Η μοναδιαία οριακή αντίσταση στον πάσσαλο εκφράζεται ως:

$$P_{\max} = N_p s_u + \gamma' z \quad (2.65)$$

Για ένα εδαφικό προφίλ με αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $s_{u0}$  στην επιφάνεια του εδάφους και με γραμμική αύξηση της αντοχής κατά  $s_{u1}$  ανά μέτρο βάθους, προκύπτει από την ανάλυση η εξής συνάρτηση του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης:

$$N_p = f \left( \frac{z}{d}, \frac{s_{u0}}{s_{u1} D} \right) \quad (2.66)$$

Για σταθερή τιμή αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ή για νόμο γραμμικά αυξανόμενης αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με μηδενική τιμή στην επιφάνεια του εδάφους ( $s_{u0}=0$ ), ο συντελεστής οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  είναι συνάρτηση μόνο του λόγου  $z/D$ .

Λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένο εύρος τιμών του συντελεστή  $N_p$  προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$N_p = N_1 - N_2 \exp \left( -\frac{\xi z}{D} \right) \quad (2.67)$$

όπου  $N_1$  ο συντελεστής οριακής εδαφικής αντίδρασης σε βάθος,  $N_2 = N_1 - N_{p0}$  (με  $N_{p0} = 2-4$  στην επιφάνεια του εδάφους) και  $\xi$  γραμμική συνάρτηση του συντελεστή  $\lambda$  ( $\lambda = s_{u0}/s_{u1} D$ ) ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \xi &= 0.25 + 0.05\lambda && \text{για } \lambda < 6 \\ \xi &= 0.55 && \text{για } \lambda \geq 6 \end{aligned}$$

### 2.11.9 Μεθοδολογία κατά API 2000 (RP 2A-WSD)

Η μεθοδολογία εύρεσης τη οριακής εδαφικής αντίδρασης κατά API είναι όμοια με την αντίστοιχη κατά Matlock (1970). Επομένως, ο συντελεστής  $N_p$  προκύπτει από την εξίσωση 2.54.

### 2.11.10 Μεθοδολογία κατά Zhang-Ahmari (2009)

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία η τιμή της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_u$ ) μεταβάλλεται μη-γραμμικά με το βάθος ακολουθώντας την εξίσωση 2.68. Ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ( $k_h$ ) θεωρείται σταθερός με το βάθος.

$$p_u = N_p c_u B \quad (2.68)$$

$$N_p = C_1 + C_2 \left( \frac{z}{B} \right)^{C_3} \quad (2.69)$$

όπου  $C_1$  και  $C_3$  σταθερές και  $C_2$  συντελεστής που εκφράζει την επιρροή της αντοχής του εδάφους στο συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$ .

$$C_1 = 2.5$$

$$C_2 = \frac{\gamma' B}{c_u} + 5.5$$

$$C_3 = 0.1$$

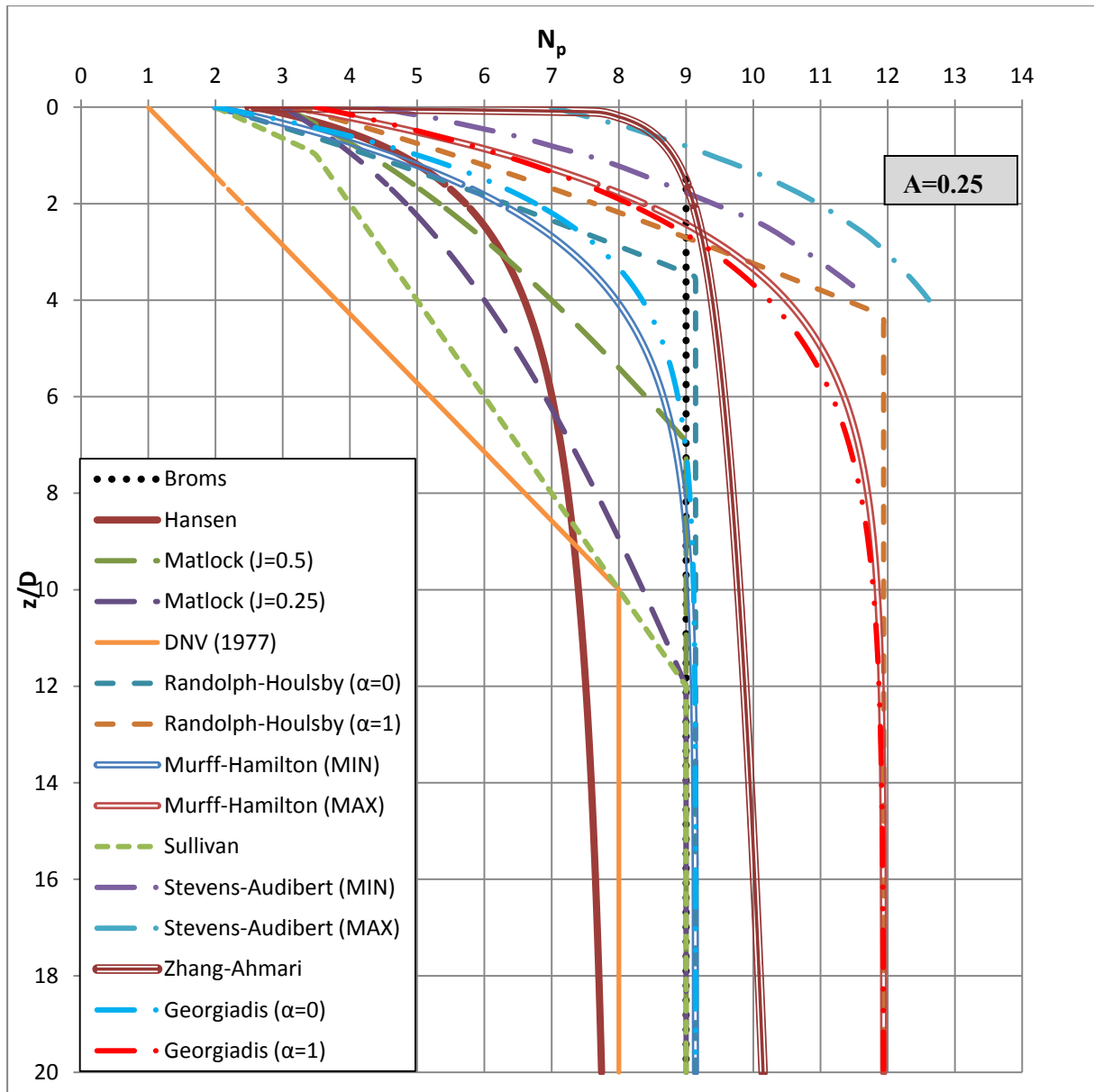
όπου  $\gamma'$  το ενεργό ειδικό βάρος του εδάφους.

Η τιμή του συντελεστή  $C_2$  βασίζεται στις εκφράσεις υπολογισμού του  $N_p$  σύμφωνα με τους Matlock, Reese et al., Randolph and Houlsby και Murff and Hamilton.

### 2.11.11 Μεθοδολογία κατά Γεωργιάδη (2010)

Η μεθοδολογία υπολογισμού της οριακής εδαφικής αντίδρασης σύμφωνα με τον Γεωργιάδη αναλύεται στην παράγραφο 2.6.3 της παρούσας εργασίας. Ο συντελεστής οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  ισούται με:

$$N_p = p_u / c_u D \quad (2.70)$$



**Σχήμα 2.39:** Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  συναρτήσει του λόγου  $z/D$  για  $A=0.25$ .



### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Εντατικά μεγέθη με χρήση μη-γραμμικών καμπύλων p-y

Η συγκεκριμένη ενότητα αποτελείται αρχικά από παραδείγματα χάραξης μη-γραμμικών καμπύλων p-y σε μαλακή άργιλο για την κάθε μία από τις τρεις μεθοδολογίες (Matlock, Νορβηγικοί κανονισμοί, Γεωργιάδης) που διερευνήθηκαν παραμετρικά στο προηγούμενο Κεφάλαιο (Κεφάλαιο 2) και στη συνέχεια από την παρουσίαση της διαδικασίας αξιοποίησης των καμπύλων, μέσω του κώδικα Latpile, ώστε να είναι εφικτός ο υπολογισμός των οριζόντιων μετατοπίσεων και των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών κατά μήκος του υπό μελέτη πασσάλου.

Τα εδάφη που μελετήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο αφορούν την περίπτωση μαλακής, κορεσμένης, κανονικά στερεοποιημένης αργίλου, με αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $c_u$ ) γραμμικά αυξανόμενη με το βάθος (z) βάσει της εξίσωσης:

$$c_u = 10 + A * \gamma' * z \quad (3.1)$$

όπου A συντελεστής αντιπροσωπευτικός της κατανομής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος.

Εξετάστηκαν τρεις τιμές του συντελεστή A, οι οποίες είναι οι εξής: A=0.15, A=0.25 και A=0.35. Όπως ορίζει η εξίσωση 3.1, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι μεγαλύτερη για το ίδιο βάθος (z) όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή A. Με αυτό τον τρόπο, η τιμή του  $c_u$  για A=0.25 σε βάθος μεγαλύτερο από  $z \geq 16\text{m}$  και για A=0.35 σε βάθος μεγαλύτερο από  $z \geq 10\text{m}$  υπερβαίνει τα 50 kPa, χαρακτηριστικό που καθιστά το αργιλικό έδαφος ως μέτριας στιφρότητας, σύμφωνα με τη θεώρηση κατά Peck et. al 1974 (Πίνακας 2.1). Συνεπώς, από τα συγκεκριμένα βάθη και κάτω, οι τιμές των συντελεστών που χρησιμοποιούνται για τη μόρφωση των καμπύλων p-y θα διαφέρουν από εκείνες που χρησιμοποιούνται σε μικρότερα βάθη. Παρακάτω παρατίθενται τρία παραδείγματα μόρφωσης της καμπύλης p-y, για συντελεστή A=0.25 και για βάθος z=2m, ένα για κάθε μεθοδολογία. Τέλος, για τους υπολογισμούς θεωρείται πάσσαλος μήκους L=20m με διάμετρο D=1m.

#### 3.1 Παραδείγματα χάραξης μη γραμμικών καμπύλων p-y σε μαλακή, κορεσμένη άργιλο

##### 3.1.1 Χάραξη καμπύλων p-y για μαλακή κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο κατά Matlock (1970)

Στην παρούσα παράγραφο η χάραξη της καμπύλης p-y πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη διαδικασία, που παρουσιάστηκε στη δεύτερη ενότητα κατά Matlock (1970). Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $c_u$ ) θεωρήθηκε ότι αυξάνεται γραμμικά με το βάθος σύμφωνα με την ακόλουθη κατανομή:

$$c_u = 10 + (0.25) * \gamma' * z \quad (3.2)$$

όπου  $\gamma'$  είναι το ενεργό ειδικό βάρος και ισούται με  $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ , και z το βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, έχει θεωρηθεί ότι στην επιφάνεια του εδάφους η αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι ίση με  $c_u = 10 \text{ kPa}$  και ότι κατά μήκος του πασσάλου για κάθε 1m αυξάνεται κατά 2.5 kPa. Οι καμπύλες p-y υπολογίστηκαν σε διάφορα βάθη. Παρακάτω παρουσιάζεται, ως παράδειγμα, η πορεία υπολογισμού της καμπύλης p-y σε βάθος z=2m. Η διαδικασία χάραξης των καμπύλων είναι ίδια για όλα τα βάθη z.

##### Καμπύλη p-y σε βάθος z=2m

Ακολουθήθηκε η διαδικασία για μαλακή, κορεσμένη άργιλο υπό βραχυχρόνια (στατική) φόρτιση με την εξής πορεία υπολογισμού της καμπύλης p-y:

1. Άργιλος με αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u=10+(0.25)*10*2=15$  kPa, ειδικό βάρος  $\gamma'=10$  kN/m<sup>3</sup> και παραμόρφωση  $\varepsilon_{50}=2\%=0,020$  από τον Πίνακα 2.1 βάσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της.

2. Οριακή αντίδραση του εδάφους ανά μέτρο μήκους του πασσάλου:

$$p_{ult1} = [3 + (\gamma * z) / c_u + (J * z) / b] c_u b = 80 \text{ kN/m} \quad (3.3)$$

$$p_{ult2} = 9c_u b = 135 \text{ kN/m} \quad (3.4)$$

όπου  $J=0,5$  για μαλακές αργίλους και  $b=D=1$  m η διάμετρος του πασσάλου. Το ειδικό βάρος ορίζεται ως το ενεργό, το οποίο ισούται με  $\gamma'=10$  kN/m<sup>3</sup>.

Επομένως,

$$p_{ult} = \min(p_{ult1}, p_{ult2}) = \min(80, 135) = 80 \text{ kN/m} \quad (3.5)$$

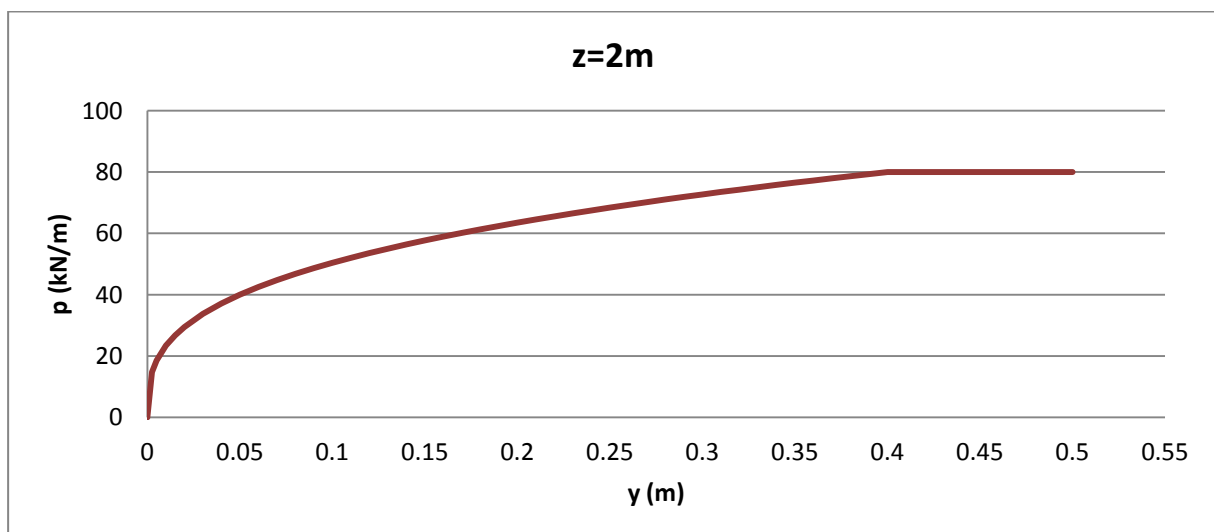
3. Μετατόπιση,

$$y_{50} = 2.5 * \varepsilon_{50} * b = 0.05 \text{ m} \quad (3.6)$$

4. Τα σημεία που περιγράφουν την καμπύλη p-y σε βάθος  $z=2$  m για πάσσαλο υπό εγκάρσια φόρτιση σε μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο με αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u=30$  kPa υπολογίζονται από την ακόλουθη εξίσωση:

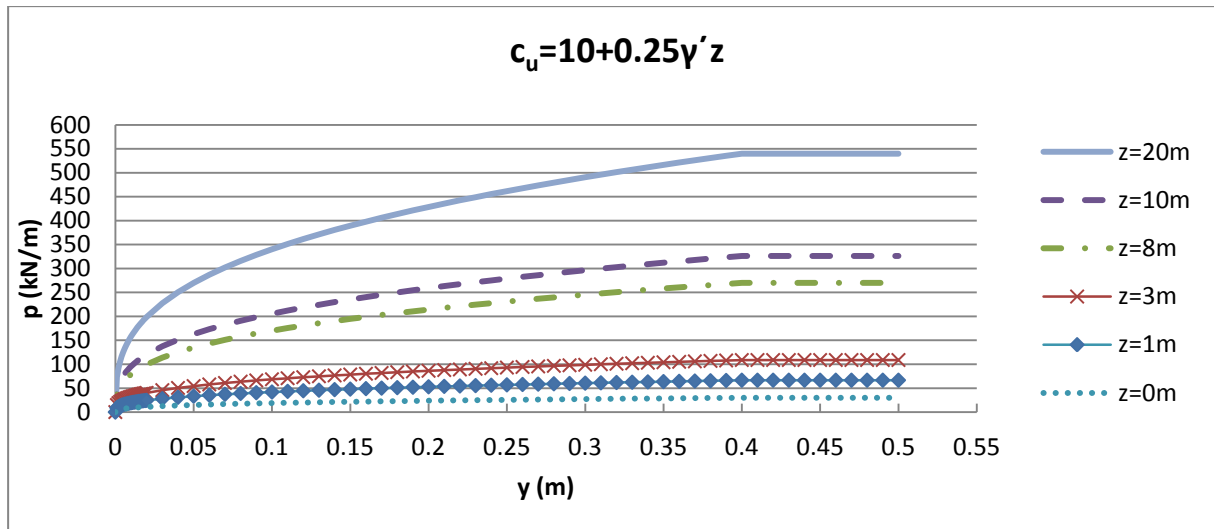
$$p = 0.5 * 80 * \left( \frac{y}{0.05} \right)^{1/3} \quad (3.7)$$

Εισάγοντας την εξίσωση του p ως προς y σε λογιστικό φύλλο του Microsoft Excel και για τιμές του y από  $y=0$  m υπολογίζουμε τις αντίστοιχες τιμές εδαφικής αντίδρασης p. Η τιμή του p παραμένει σταθερή και ίση με  $p_{ult}$  για μετατοπίσεις μεγαλύτερες του  $y=8y_{50}=0,4$  m. Για τη μόρφωση της συγκεκριμένης καμπύλης δόθηκαν τιμές του y μέχρι  $y=0.5$  m. Η καμπύλη p-y που προέκυψε από την παραπάνω αριθμητική εφαρμογή της εξίσωσης, φαίνεται στο Σχήμα 3.1 Παρατίθεται, επίσης, διάγραμμα όπου παρουσιάζεται η χάραξη των καμπύλων p-y για βάθη  $z=0$  m,  $z=1$  m,  $z=3$  m,  $z=8$  m,  $z=10$  m και  $z=20$  m, ως αντιπροσωπευτικές της συμπεριφοράς του εδάφους καθώς και Πίνακες των συντεταγμένων για τις αντίστοιχες καμπύλες (Παράρτημα Α).



**Σχήμα 3.1:** Καμπύλη p-y για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε βάθος  $z=2$  m κατά Matlock (1970).





Σχήμα 3.2: Καμπύλες p-y για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε διάφορα βάθη κατά Matlock (1970).

### 3.1.2 Χάραξη καμπύλων p-y για μαλακή κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σύμφωνα με τους Νορβηγικούς Κανονισμούς (1977)

Εφαρμόζοντας τη συνάρτηση μεταβολής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_u$ , σύμφωνα με την εξίσωση 3.2, μορφώθηκε η καμπύλη p-y ακολουθώντας τη μεθοδολογία των Νορβηγικών κανονισμών, όπως έχει παρουσιαστεί στην ενότητα 2.

Καμπύλη p-y σε βάθος  $z=2m$

$$1) \quad c_u = 10 + 0.25 * \gamma' * (2) = 15kPa \quad (3.8)$$

$$2) \quad N_r = 10,$$

Για  $z \leq 10$  ( $z \leq N_r * b$ ):

$$N_p = 1 + z * (N_{p_{max}} - N_{p_{min}}) / (N_r * b) = 1 + 2 * (7 / 10) = 2.4 \quad (3.9)$$

3) Εδαφική αντίδραση σχεδιασμού:

$$p_d = N_p \frac{c_u}{\gamma_{mc}} = 2.4 * \frac{15}{1} = 36kN / m^2 \quad (3.10)$$

$$p_d * b = 36 * 1 = 36kN / m \quad (3.11)$$

4) Αρχική κλίση:

$$k_1 = \xi \frac{p_d}{b(\epsilon_c)^{0.25}} = 10 * \frac{36}{1 * (0.02)^{0.25}} = 857.3kN / m^3 \quad (3.12)$$

όπου  $b=1m$ , η διάμετρος του πασσάλου,  $\xi=10$  εμπειρικός συντελεστής σύμφωνα με τον Πίνακα 2.2,  $\epsilon_c=0.02$  για μαλακή άργιλο,

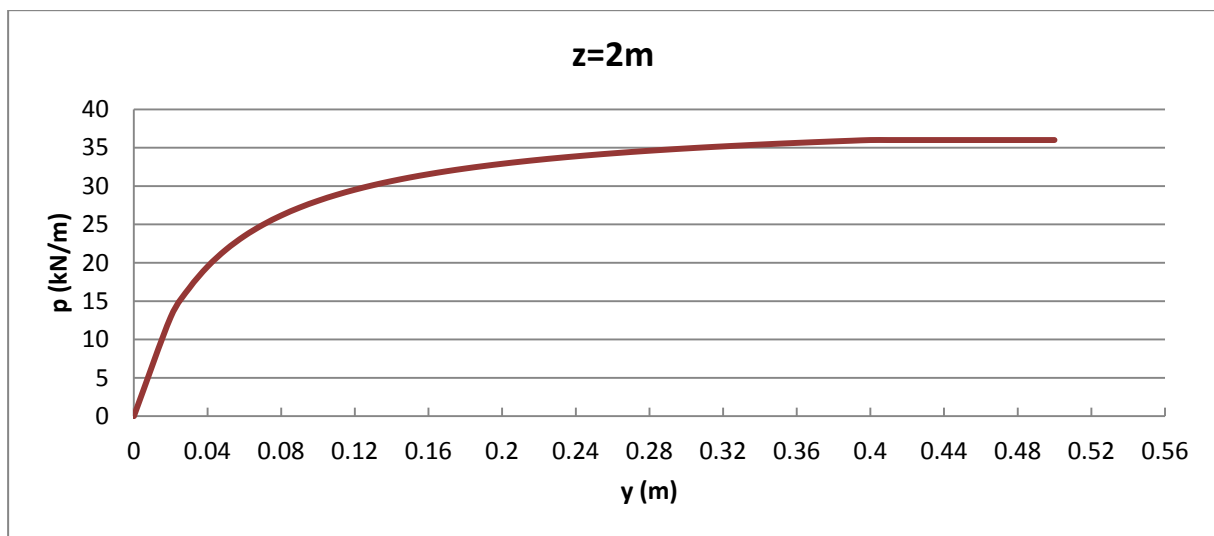
$$a = \frac{1}{1 - \frac{p_d}{k_1 b}} = \frac{1}{1 - \frac{36}{857.3 * 0.4 * 1}} = 1.1 \quad (3.13)$$

όπου  $\beta=20\varepsilon_c=20(0.02)=0.4$  σύμφωνα με τον Πίνακα 2.2.

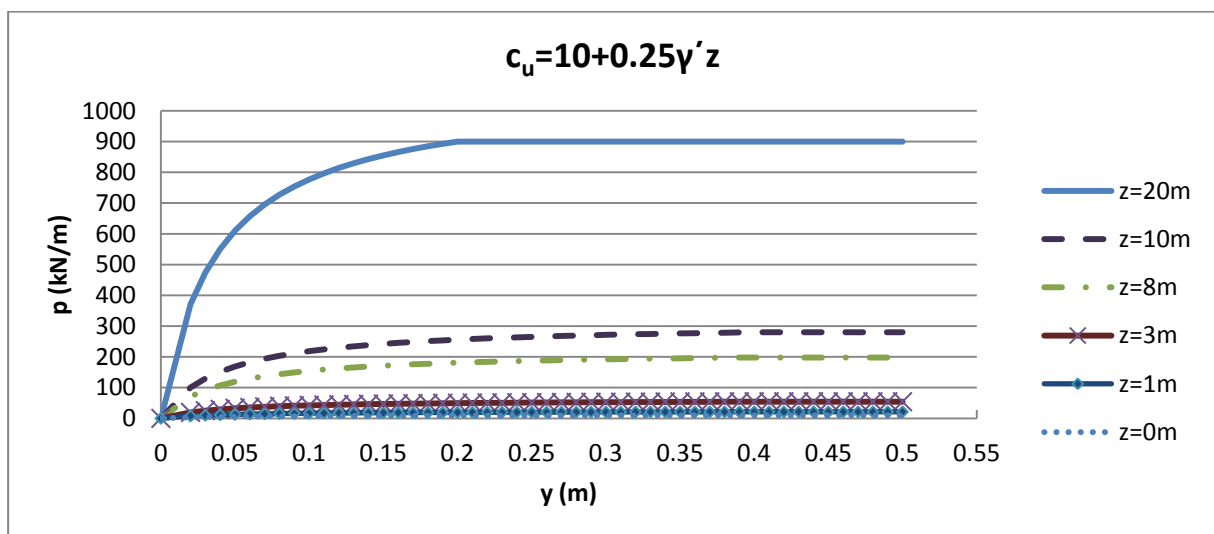
Σημειώνεται ότι οι τιμές της εδαφικής αντίδρασης κατά τους Νορβηγικούς Κανονισμούς εκφράζονται σε μονάδες  $\text{kN/m}^2$ . Προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση με τις δύο άλλες μεθοδολογίες που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, η τιμή της οριακής αντίδρασης  $p_d$  πολλαπλασιάστηκε με τη διάμετρο  $D=1\text{m}$  ώστε να εκφραστεί σε μονάδες  $\text{kN/m}$ . Με τη μετατροπή αυτή όλες οι υπολογιζόμενες τιμές  $p$  δίνονται στις ίδιες μονάδες  $\text{kN/m}$ .

Εφαρμόζοντας την εξίσωση της καμπύλης για διάφορες τιμές της μετατόπισης  $y$  προκύπτει η ζητούμενη καμπύλη  $p$ - $y$  (Σχήμα 3.3):

$$\frac{y}{p} = \frac{1}{k_1} + \frac{y}{\alpha p_d} \quad (3.14)$$



**Σχήμα 3.3:** Καμπύλη  $p$ - $y$  για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε βάθος  $z=2\text{m}$  κατά τους Νορβηγικούς κανονισμούς (1977).



**Σχήμα 3.4:** Καμπύλες  $p$ - $y$  για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε διάφορα βάθη κατά τους Νορβηγικούς κανονισμούς (1977).

### 3.1.3 Χάραξη καμπύλων p-y για μαλακή κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σύμφωνα με τη μέθοδο του Γεωργιάδη (2010)

Καμπύλη p-y σε βάθος z=2m

1) Αδιάστατος συντελεστής  $N_p$ :

$$N_p = N_{pu} - (N_{pu} - N_{po})e^{-\lambda(z/D)} \quad (3.15)$$

όπου

$D=1m$ , η διάμετρος του πασσάλου και για  $\alpha=1$  (τραχύς πάσσαλος):

$$\lambda = 0.55 - 0.15\alpha = 0.55 - 0.15 = 0.4 \quad (3.16)$$

$$N_{po} = 2 + 1.5\alpha = 2 + 1.5 = 3.5 \quad (3.17)$$

$$N_{pu} = \pi + 2\Delta + 2\cos\Delta + 4\left(\cos\frac{\Delta}{2} + \sin\frac{\Delta}{2}\right) = 11.9 \quad (3.18)$$

Άρα:

$$N_p = N_{pu} - (N_{pu} - N_{po})e^{-\lambda(z/D)} = 8.1 \quad (3.19)$$

2) Οριακή εδαφική αντίδραση:

$$p_u = N_p c_u D = 8.1 * 15 * 1 = 122kN / m \quad (3.20)$$

όπου

$$c_u = 10 + 0.25 * \gamma' * (2) = 15kPa \quad (3.21)$$

3) Η αρχική δυσκαμψία της καμπύλης p-y ισούται με:

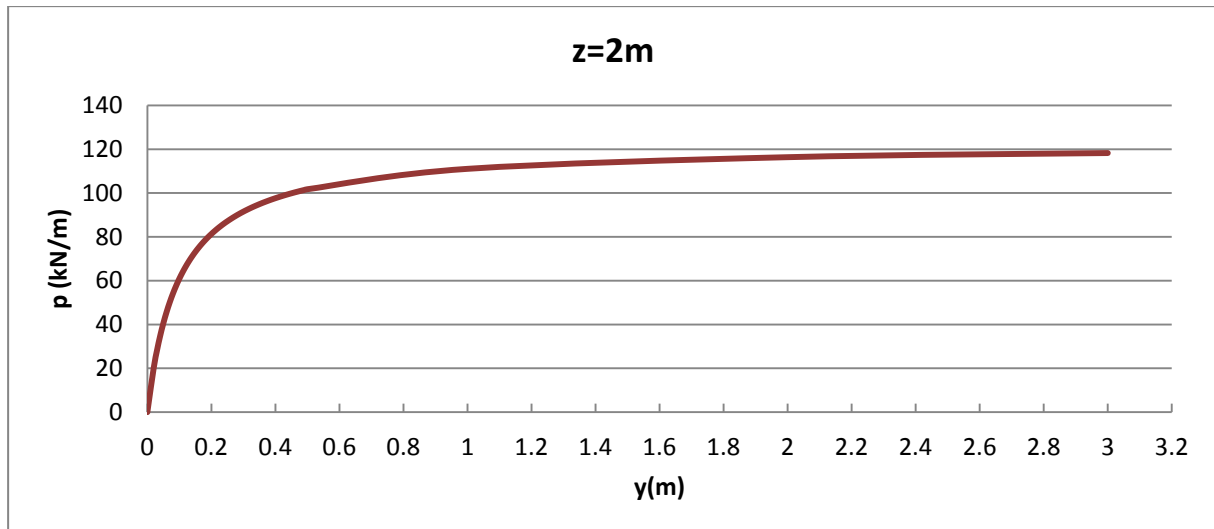
$$k_i = 3E_{50} \left( \frac{E_{50} D^4}{E_p I_p} \right)^{1/2} = 1214kN / m^2 \quad (3.22)$$

$$\text{όπου } E_{50} = \frac{c_u}{\varepsilon_{50}} = \frac{15}{0.02} = 750kPa \quad (3.23)$$

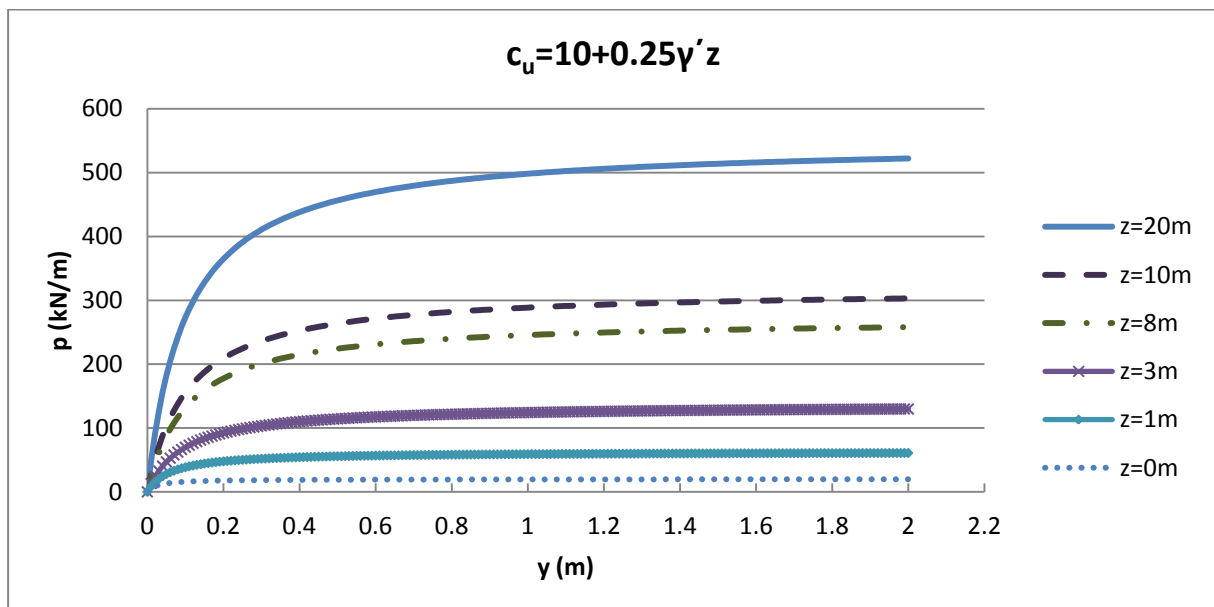
4) Η εξίσωση της καμπύλης p-y ορίζεται ως:

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_i} + \frac{y}{p_u}} \quad (3.24)$$

Εισάγοντας την παραπάνω εξίσωση στο λογιστικό φύλλο του Microsoft Excel και για διάφορες τιμές της μετατόπισης y υπολογίζεται η εκάστοτε τιμή της εδαφικής αντίδρασης. Συνεπώς, καθίσταται δυνατή η χάραξη της καμπύλης p-y για συγκεκριμένο βάθος.



Σχήμα 3.5: Καμπύλη p-y για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε βάθος z=2m σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Γεωργιάδη (2010).



Σχήμα 3.6: Καμπύλες p-y για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε διάφορα βάθη κατά Γεωργιάδη (2010).

### 3.2 Συγκριτικά διαγράμματα καμπύλων p-y

Αποσκοπώντας στη σύγκριση των αποτελεσμάτων των παραπάνω μεθοδολογιών, απαραίτητη καθίσταται η μόρφωση καμπύλων p-y σε κοινό διάγραμμα για κάθε εξεταζόμενο έδαφος, δηλαδή για κάθε μία περίπτωση μεταβολής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος:

$$c_u = 10 + 0.15 * \gamma' * z \quad (3.25)$$

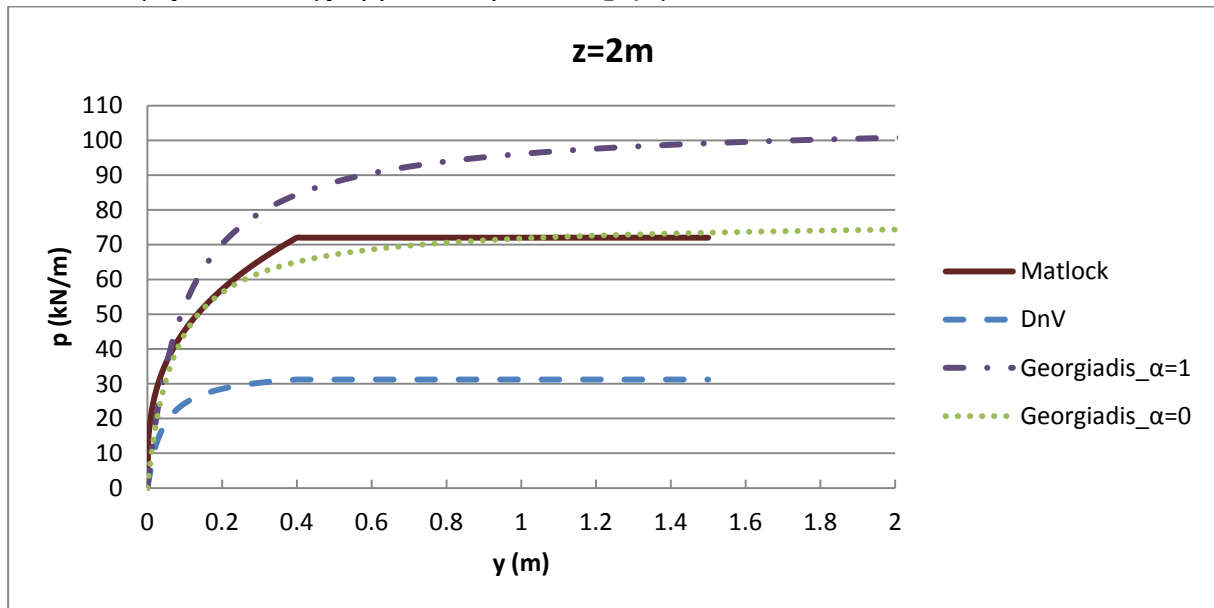
$$c_u = 10 + 0.25 * \gamma' * z \quad (3.26)$$

$$c_u = 10 + 0.35 * \gamma' * z \quad (3.27)$$

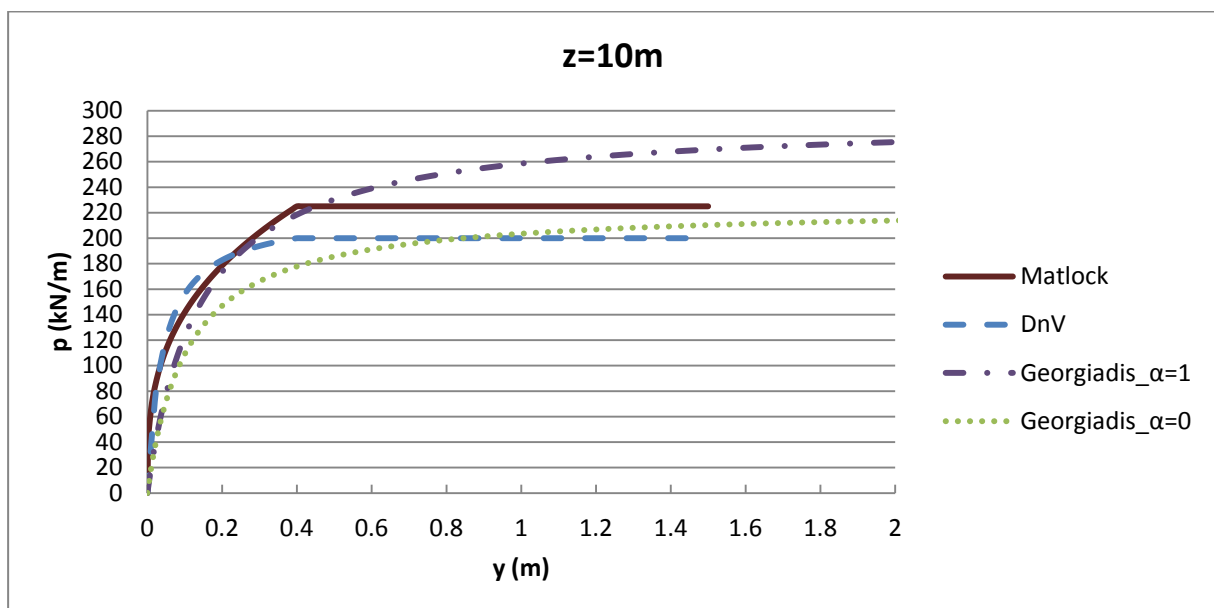
Η σύγκριση επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί σε δύο αντιπροσωπευτικά βάθη, ένα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, z=2m και ένα στο μέσον του πασσάλου, z=10m. Ακολουθούν συγκριτικά διαγράμματα για την εκάστοτε περίπτωση κατανομής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος (εξισώσεις 3.25-3.27).

Ως προς τη χάραξη καμπύλων p-y σε μαλακές κανονικά στερεοποιημένες αργίλους συγκρίθηκαν οι μεθοδολογίες κατά Matlock (1970), κατά τους Νορβηγικούς κανονισμούς(1977) και κατά τον Γεωργιάδη(2010). Αναφορικά με τη διαδικασία χάραξης καμπύλων p-y κατά Matlock(1970) ο συντελεστής J λαμβάνεται ίσος με  $J=0.5$  και η τιμή της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$  ίση με  $\epsilon_{50}=0.02$  (Πίνακας 2.1), τιμές που αντιστοιχούν στην περίπτωση μαλακής αργίλου με  $c_u < 48\text{kPa}$ . Αντίστοιχα, οι συντελεστές  $\xi$  και  $\epsilon_c$  της μεθόδου των Νορβηγικών Κανονισμών (DnV) ισούνται με  $\xi=10$  και  $\epsilon_c=0.02$ . Τέλος, για τη μεθοδολογία του Γεωργιάδη ο συντελεστής  $E_{50}$  ακολουθεί την εξίσωση 3.23 για  $\epsilon_{50}=0.02$ , ενώ εξετάζονται δύο τιμές του συντελεστή  $\alpha$ ,  $\alpha=0$  για λείο πάσσαλο και  $\alpha=1$  για τραχύ πάσσαλο. Στα παρακάτω Σχήματα φαίνεται η σύγκριση των τριών μεθοδολογιών για  $A=0.15$ ,  $A=0.25$  και  $A=0.35$  σε βάθος  $z=2\text{m}$  και  $z=10\text{m}$ .

### 3.2.1 Συγκριτικά διαγράμματα καμπύλων p-y για $A=0.15$

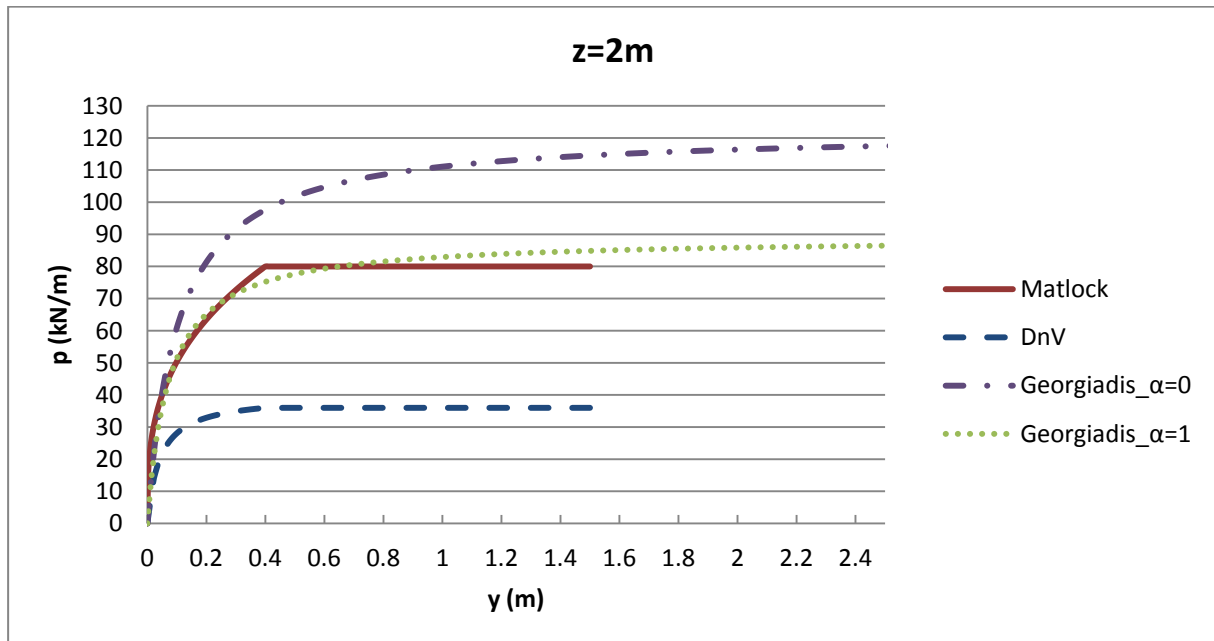


Σχήμα 3.7: Συγκριτικό διάγραμμα καμπύλων p-y για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε βάθος  $z=2\text{m}$  για  $A=0.15$ .

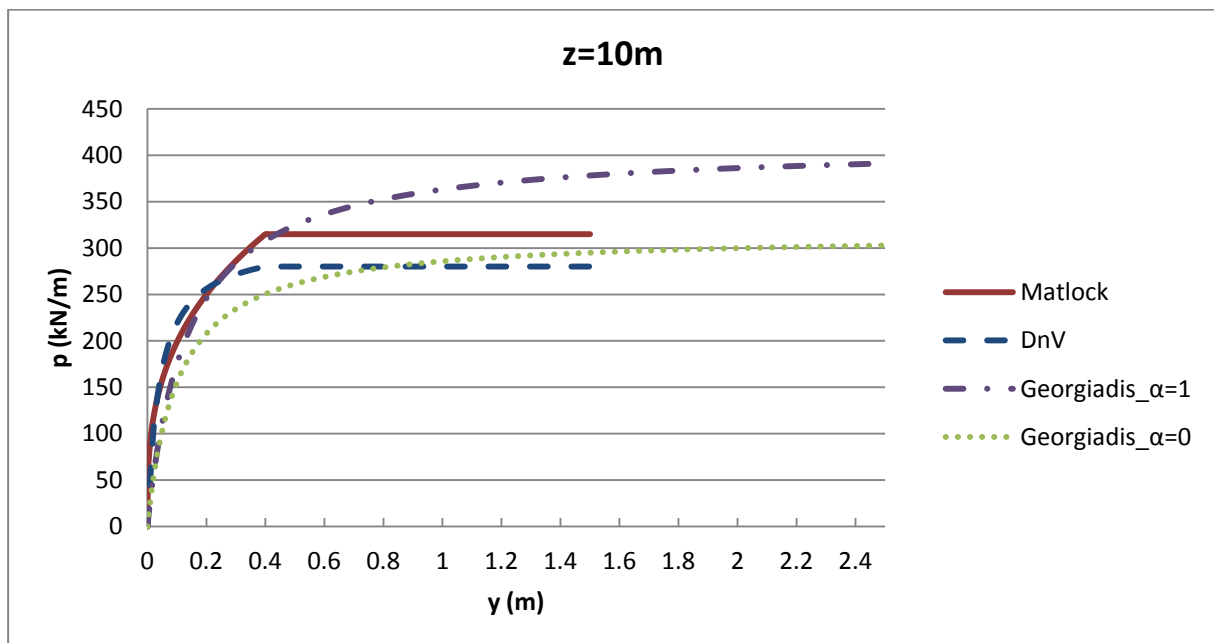


Σχήμα 3.8: Συγκριτικό διάγραμμα καμπύλων p-y για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε βάθος  $z=10\text{m}$  για  $A=0.15$ .

### 3.2.2 Συγκριτικά διαγράμματα καμπύλων p-y για A=0.25

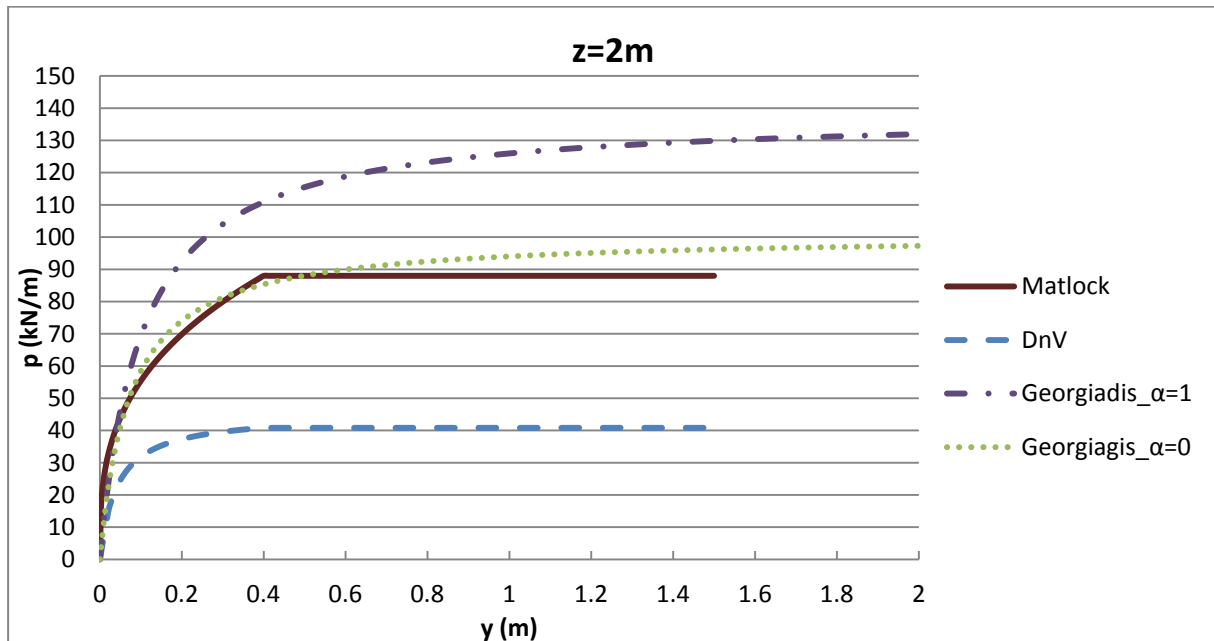


Σχήμα 3.9: Συγκριτικό διάγραμμα καμπύλων p-y για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε βάθος  $z=2$  m για  $A=0.25$ .

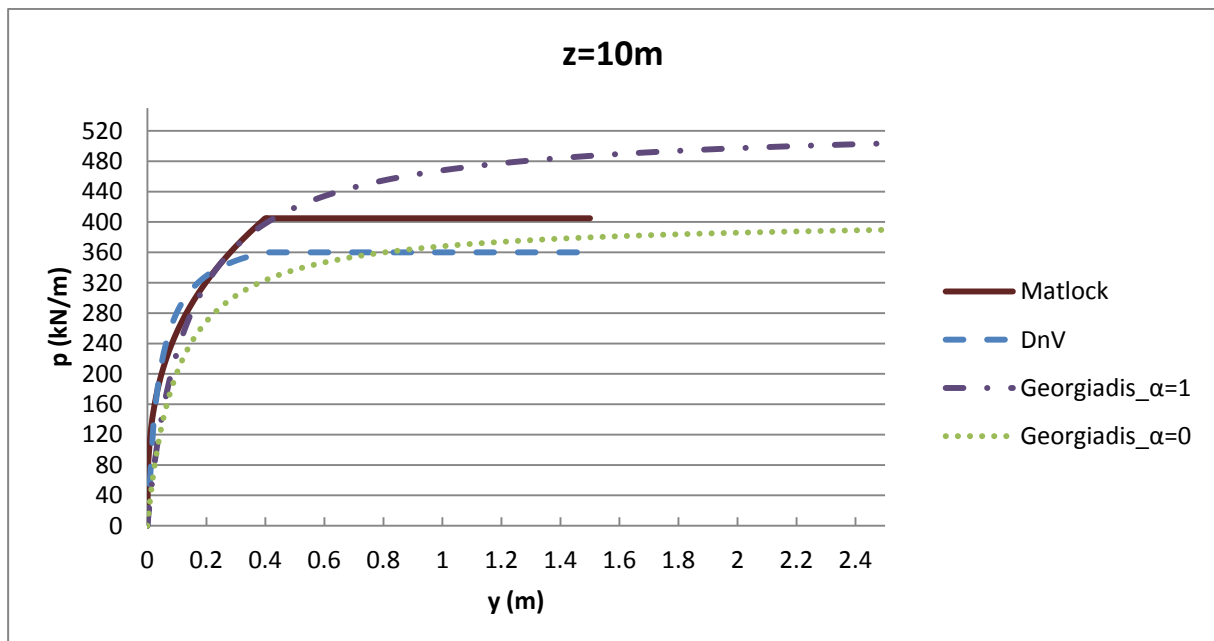


Σχήμα 3.10: Συγκριτικό διάγραμμα καμπύλων p-y για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε βάθος  $z=10$  m για  $A=0.25$ .

### 3.2.3 Συγκριτικά διαγράμματα καμπύλων p-y για A=0.35



Σχήμα 3.11: Συγκριτικό διάγραμμα καμπύλων p-y για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε βάθος z=2m για A=0.35.



Σχήμα 3.12: Συγκριτικό διάγραμμα καμπύλων p-y για μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο σε βάθος z=10m για A=0.35.

### 3.2.4 Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα

Αρχικά, αναφορικά με τη σύγκριση των καμπύλων p-y σε βάθος z=2m από την επιφάνεια του εδάφους, η μέγιστη οριακή εδαφική αντίδραση καθώς και η μεγαλύτερη κλίση του ανελαστικού κλάδου προκύπτει από τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας κατά Γεωργιάδη για συντελεστή διεπιφάνειας ίσο με τη μονάδα, ενώ οι αντίστοιχες ελάχιστες προέρχονται από τη μεθοδολογία των Νορβηγικών κανονισμών. Οι ενδιάμεσες καμπύλες, οι οποίες φαίνεται να έχουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους, αντιστοιχούν στη διαδικασία χάραξης κατά Matlock και κατά Γεωργιάδη για μηδενικό

συντελεστή διεπιφάνειας. Οι παραπάνω σχέσεις μεταξύ των καμπύλων p-y αφορούν και τις τρεις περιπτώσεις κατανομής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος ( $A=0.15$ ,  $A=0.25$  και  $A=0.35$ ).

Το γεγονός ότι οι τιμές της οριακής εδαφικής αντίδρασης προκύπτουν μεγαλύτερες σύμφωνα με τον Γεωργιάδη, σε σχέση με τις αντίστοιχες του Matlock και των Νορβηγικών κανονισμών, οφείλεται στην κατανομή του συντελεστή  $N_p$  με το βάθος που χρησιμοποιεί η κάθε μεθοδολογία. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.11, οι τιμές του συντελεστή  $N_p$  σχετίζονται άμεσα με την οριακή αντίδραση  $p_{ult}$ , η τιμή της οποίας αποτελεί όρο για τον υπολογισμό της αντίδρασης  $p$  για ορισμένη μετατόπιση  $y$ . Τέλος, ομοίως για όλες τις περιπτώσεις μεταβολής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, παρατηρείται το ίδιο μοτίβο συμπεριφοράς των καμπύλων p-y και στο βάθος  $z=10m$ . Οι αποκλίσεις, όμως, μεταξύ των τριών μεθοδολογιών στο συγκεκριμένο βάθος είναι αρκετά περιορισμένες σε σχέση με το βάθος  $z=2m$ . Οι μεγάλες διαφορές που εμφανίζονται στις καμπύλες για  $z=2m$  πιθανόν οφείλονται στην αδυναμία προσδιορισμού της οριακής εδαφικής αντίδρασης για εγκάρσια φορτιζόμενο πάσσαλο σε μικρά βάθη (Σχήμα 2.39. Διάγραμμα  $N_p-z/D$ ).

### 3.3 Χρήση του κώδικα Latpile

#### 3.3.1 Εισαγωγή

Η χρήση του κώδικα Latpile αφορά τον υπολογισμό της εντατικής κατάστασης του υπό μελέτη πασσάλου, δηλαδή των οριζόντιων μετατοπίσεων, των στροφών, των τεμνουσών και των ροπών που αναπτύσσονται λόγω της επιβολής εγκάρσιου συγκεντρωμένου φορτίου στην κεφαλή του πασσάλου. Η λειτουργία του κώδικα περιγράφεται από την εισαγωγή καμπύλων p-y για διάφορα βάθη, χαρακτηριστικά της προσομοίωσης της συμπεριφοράς του εδάφους. Οι καμπύλες εισήχθησαν με τη μορφή πολυγωνικών, οι οποίες υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφηκαν αναλυτικά παραπάνω.

#### 3.3.2 Μεθοδολογία του κώδικα Latpile

##### 3.3.2.1 Δεδομένα εισαγωγής

Το προσομοίωμα εδάφους-πασσάλου που χρησιμοποιήθηκε στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων του κώδικα Latpile έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά. Θεωρήθηκε φρεατοπάσσαλος κυκλικής διατομής διαμέτρου  $D=1m$  και μήκους  $L=20m$ , κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα, ειδικού βάρους  $\gamma=25 kN/m^3$ , με μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=25GPa$  και δείκτη Poisson που ισούται με  $\nu=0.20$ . Το περιβάλλον έδαφος ορίστηκε ως κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλος, υπό αστράγγιστες συνθήκες, με θεώρηση του ύψους της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους, το οποίο συμπίπτει με την κεφαλή του υπό μελέτη πασσάλου. Η τιμή του υπό άνωση ειδικού βάρους θεωρήθηκε ίση με  $\gamma'=10 kN/m^3$  και ο λόγος Poisson  $\nu=0.50$ .

Για την εκάστοτε μεθοδολογία δημιουργήθηκε ξεχωριστό αρχείο εισαγωγής με τη χρήση των καμπύλων p-y που αντιστοιχούν στην καθεμία. Στη συγκεκριμένη εργασία θεωρήθηκε αρχική διατμητική αντοχή ίση με  $c_u=10kPa$  και μεταβολή του  $c_u$  σύμφωνα με την εξίσωση 3.1 για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή  $A$ ,  $A=0.15$ ,  $A=0.25$  και  $A=0.35$ . Σημειώνεται ότι ορίστηκε για όλες τις μεθοδολογίες μέγιστη, σταθερή εγκάρσια φόρτιση  $H_{max}=3000 kN$  και μηδενική επιβαλλόμενη ροπή στην κεφαλή του πασσάλου.

##### 3.3.2.2 Δημιουργία αρχείου εισαγωγής

Προκειμένου να αναλυθεί με τον κώδικα δεδομένων Latpile το πρόβλημα της παρούσας εργασίας, απαραίτητος καθίσταται ο πλήρης προσδιορισμός στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων των χαρακτηριστικών του πασσάλου, του περιβάλλοντος εδάφους καθώς και των συνθηκών φόρτισης. Στο

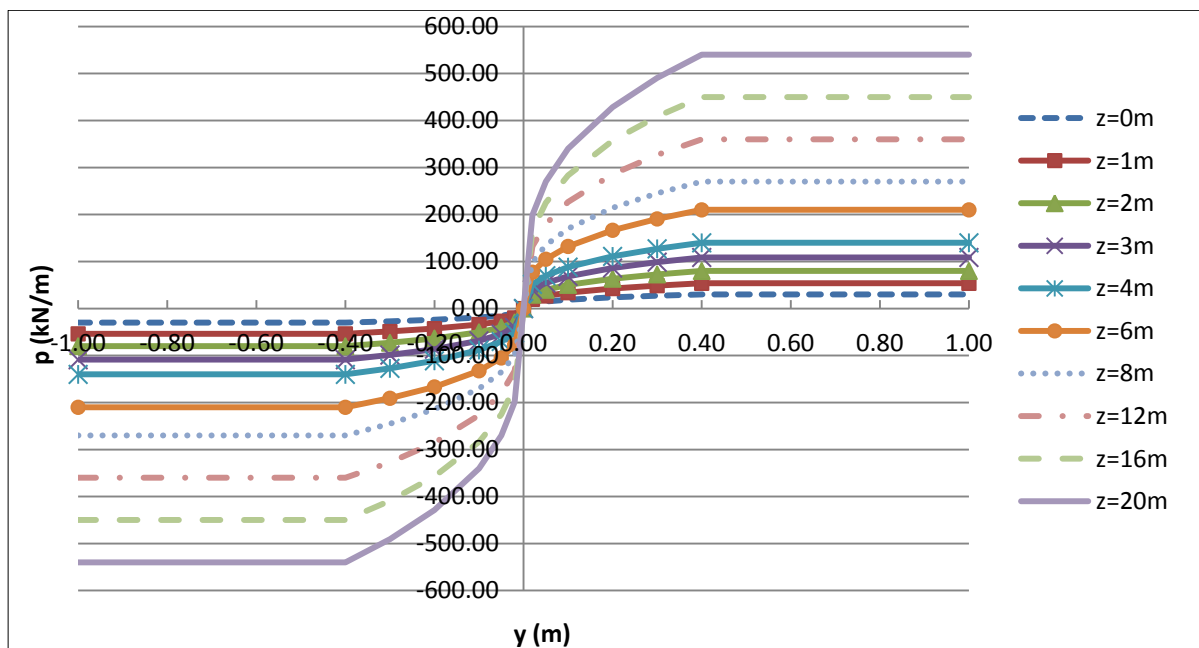


αρχείο εισαγωγής ορίζεται, επίσης, ο τρόπος επίλυσης του προβλήματος μέσω των βημάτων σύγκλισης της ανάλυσης. Η ανάλυση διακόπτεται όταν δεν ικανοποιείται η προκαθορισμένη σύγκλιση, όπως συμβαίνει στην περίπτωση που η τιμή της εγκάρσιας φόρτισης έχει φτάσει στην οριακή.

Στην αρχή της δημιουργίας του αρχείου εισαγωγής ορίζονται δεδομένα που αφορούν τον πάσσαλο και περιλαμβάνουν το μέτρο ελαστικότητας E, το μέτρο διάτμησης, G ( $G=0.417 \cdot E$ ), ορισμός σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κώδικα, και το συντελεστή σχήματος, ο οποίος για κυλινδρικό πάσσαλο ισούται με  $k=0.8439$ . Έπειτα, προσδιορίζεται ο αριθμός των γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων στα οποία έχει διακριτοποιηθεί ο πάσσαλος. Στην παρούσα εργασία ο πάσσαλος συνολικού μήκους  $L=20m$  έχει διαχωριστεί σε 40 τμήματα ύψους 0.5m έκαστο. Επομένως, αφού το μήκος του πασσάλου είναι ίσο με  $L=20m$  λαμβάνεται  $N=40$ . Στη συνέχεια, εισάγονται τα γεωμετρικά δεδομένα των επί μέρους στοιχείων του πασσάλου, μήκος, πλάτος, εμβαδόν και ροπή αδράνειας της διατομής. Για το λόγο ότι τα παραπάνω δεδομένα είναι όμοια και για τα 40 στοιχεία στα οποία έχει διαχωριστεί ο υπό μελέτη πάσσαλος, αρκεί να ορίσουμε τις ιδιότητες του πρώτου και του τελευταίου τμήματος.

Ακολούθως, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά για την προσομοίωση του εδάφους που περιβάλλει τον μεμονωμένο πάσσαλο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των πολυγωνικών καμπύλων p-y, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ο κώδικας δίνει τη δυνατότητα χρήσης μέχρι 10 πολυγωνικών καμπύλων p-y. Η εισαγωγή των καμπύλων στο αρχείο του κώδικα Latpile πραγματοποιείται με τον καθορισμό των συντεταγμένων, εδαφικής αντίδρασης p (kN/m) και μετατόπισης y (m), συγκεκριμένου αριθμού σημείων, τα οποία συνθέτουν τις καμπύλες.

Προκειμένου να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του εδάφους με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, εξαντλήθηκε το όριο, οπότε χρησιμοποιήθηκαν 10 διαγράμματα, τα οποία αντιστοιχούν σε βάθη από  $z=0m$  έως  $z=4m$  ανά 1m,  $z=6m$ ,  $z=8m$ ,  $z=12m$ ,  $z=16m$  και  $z=20m$ . Για τον ίδιο λόγο εξαντλήθηκε το όριο των σημείων από τα οποία συντίθεται η κάθε πολυγωνική καμπύλη, αποτελούμενη από 15 σημεία. Σημειώνεται ότι ο κώδικας προσομοιώνει τη συμπεριφορά του εδάφους που αντιστοιχεί στα βάθη όπου δεν έχει οριστεί καμπύλη p-y μέσω γραμμικής παρεμβολής. Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα πολυγωνικών καμπύλων όπως προέκυψε με την εφαρμογή της μεθοδολογίας κατά Matlock για  $A=0.25$ .



Σχήμα 3.13: Πολυγωνικές καμπύλες p-y με την εφαρμογή της διαδικασίας κατά Matlock για  $A=0.25$ .

Αφού έχει ολοκληρώθηκε η διαδικασία ορισμού των 15 σημείων που συνθέτουν την πολυγωνική για το εκάστοτε βάθος κατά μήκος του πασσάλου, προσδιορίστηκαν οι συνθήκες φόρτισης και οι βαθμοί ελευθερίας της κεφαλής του πασσάλου. Στην προκειμένη περίπτωση ορίζουμε στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων επιβολή εγκάρσιου συγκεντρωμένου φορτίου (H) στην κεφαλή του πασσάλου.

Ακολουθεί ο προσδιορισμός του βήματος της επιβαλλόμενης φόρτισης, δηλαδή του μεγέθους αύξησης του φορτίου μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση που έχει οριστεί στον κώδικα. Τοιουτοτρόπως, ορίζοντας στον πάσσαλο μέγιστη συγκεντρωμένη εγκάρσια φόρτιση  $H_{max}=3000$  kN και αριθμό βημάτων φόρτισης ίσο με 300, όπως ορίστηκαν στην παρούσα εργασία, η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί με την ολοκλήρωση της επιβολής τμημάτων φόρτισης τα οποία θα αυξάνουν με βήμα 10kN μέχρι να φτάσουν τη συνολική τιμή της φόρτισης. Η επιβολή της φόρτισης σε επί μέρους τμήματα αποσκοπεί στον υπολογισμό του μεγέθους του οριακού φορτίου κεφαλής στην εκάστοτε περίπτωση.

Τελευταίο βήμα, για την ολοκλήρωση του αρχείου εισαγωγής δεδομένων του κώδικα, αποτελεί ο προσδιορισμός του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων που θα εκτελεστούν σε κάθε βήμα φόρτισης. Η διακοπή της ανάλυσης λόγω αδυναμίας σύγκλισης σε κάποιο βήμα φόρτισης ερμηνεύεται ως αστοχία του εδάφους για επιβολή του μεγέθους του φορτίου που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο βήμα.

Αναφορικά με τη συσχέτιση των οριζόντιων μετατοπίσεων και των στροφών του πασσάλου με τη διαδικασία σύγκλισης της λύσης, εάν N είναι ο αριθμός των γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων προσομοίωσης του πασσάλου,  $M=(2*N+1)$  ο αριθμός κόμβων,  $w_i$  η μετατόπιση του κόμβου και  $\beta_i$  η στροφή του, τότε η σύγκλιση των επαναλήψεων επιτυγχάνεται εάν ικανοποιούνται οι παρακάτω ανισώσεις:

$$\sqrt{\left(\sum_{i=1}^M w_i^2\right)} / M \leq DTOL \quad (3.28)$$

και

$$\sqrt{\left(\sum_{i=1}^M \beta_i^2\right)} / M \leq RTOL \quad (3.29)$$

όπου DTOL, η ανοχή του διανύσματος επικόμβιων μετατοπίσεων για την οποία προτείνεται τιμή ίση με  $10^{-5}$  m και RTOL η ανοχή του διανύσματος επικόμβιων στροφών με προτεινόμενη τιμή  $10^{-5}$  rad.

Έχοντας ολοκληρώσει το αρχείο εισαγωγής του κώδικα Latpile με όλα τα απαραίτητα δεδομένα, πραγματοποιήθηκαν οι απαιτούμενες αναλύσεις. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προσδιορίστηκε η εντατική κατάσταση του συστήματος πασσάλου-εδάφους μέσω των τιμών της μετατόπισης, της στροφής, της καμπτικής ροπής και της τέμνουσας δύναμης κατά μήκος του πασσάλου. Οι τιμές των παραπάνω μεγεθών υπολογίζονται σε μονάδες αντίστοιχες με αυτές που ορίστηκαν στο αρχείο εισαγωγής του κώδικα. Επομένως, η μετατόπιση σε m, η στροφή σε rad, η ροπή σε kNm και τέλος η τέμνουσα δύναμη σε kN.

### 3.4 Εντατικά μεγέθη αναλύσεων με χρήση του κώδικα Latpile

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, από τον κώδικα Latpile υπολογίστηκαν οι τιμές των εντατικών μεγεθών (μετατόπιση, στροφή, καμπτική ροπή, τέμνουσα δύναμη) σε κάθε βήμα φόρτισης του συστήματος πασσάλου-εδάφους, δηλαδή για φόρτιση της κεφαλής του πασσάλου με σταδιακά αυξανόμενα

ποσοστά της συνολικής επιβαλλόμενης δύναμης. Το τελευταίο βήμα φόρτισης της εκάστοτε ανάλυσης εξαρτάται από την οριακή εδαφική αντίδραση. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με χρήση του κώδικα Latpile και για τις τρεις μεθοδολογίες που εξετάζονται αναλυτικά στη συγκεκριμένη εργασία, για μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος σε κάθε μία περίπτωση από τις παρακάτω:

$$c_u = 10 + 0.15 * \gamma' * z \quad (3.30)$$

$$c_u = 10 + 0.25 * \gamma' * z \quad (3.31)$$

$$c_u = 10 + 0.35 * \gamma' * z \quad (3.32)$$

Η σύγκριση των τριών μεθοδολογιών με τη χρήση των αποτελεσμάτων του κώδικα Latpile υλοποιήθηκε μέσω διαγραμμάτων. Τα συγκριτικά αυτά διαγράμματα είναι τριών ειδών και περιλαμβάνουν καμπύλες φορτίου-μετατόπισης κεφαλής ( $H-y_0$ ) και καμπύλες κατανομής της μετατόπισης και της καμπτικής ροπής με το βάθος ( $y-z$ ,  $M-z$ ). Αναφορικά με τις καμπύλες της καμπτικής ροπής, η σύγκριση πραγματοποιήθηκε σε δύο βήματα της φόρτισης, δηλαδή για κοινό εγκάρσιο συγκεντρωμένο φορτίο σε όλες τις μεθοδολογίες, ένα σχετικά μικρού μεγέθους και ένα δεύτερο, η τιμή του οποίου ορίστηκε από το ελάχιστο οριακό φορτίο των μεθοδολογιών. Ομοίως πραγματοποιήθηκε και για τις καμπύλες της μετατόπισης συναρτήσει του βάθους ( $y-z$ ). Επιπρόσθετα, μορφώθηκαν διαγράμματα της κατανομής της μετατόπισης με καμπύλες που αντιστοιχούν σε φόρτιση ίση με ποσοστά 40% και 90% του οριακού φορτίου ( $0.4P_{ult}$ ,  $0.9P_{ult}$ ) της κάθε μεθοδολογίας. Επομένως, τα συγκεκριμένα διαγράμματα απεικονίζουν μία ενδιάμεση και μία οριακή κατάσταση φόρτισης του πασσάλου όπως ορίζεται ξεχωριστά από την κάθε μεθοδολογία. Τέλος, σημειώνεται ότι οι οριζόντιες ευθείες που έχουν χαραχθεί στα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου αντιστοιχούν στις τιμές της φόρτισης στις οποίες έγινε η σύγκριση για σταθερή εγκάρσια φόρτιση στην κεφαλή του πασσάλου.

### 3.4.1 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.15$

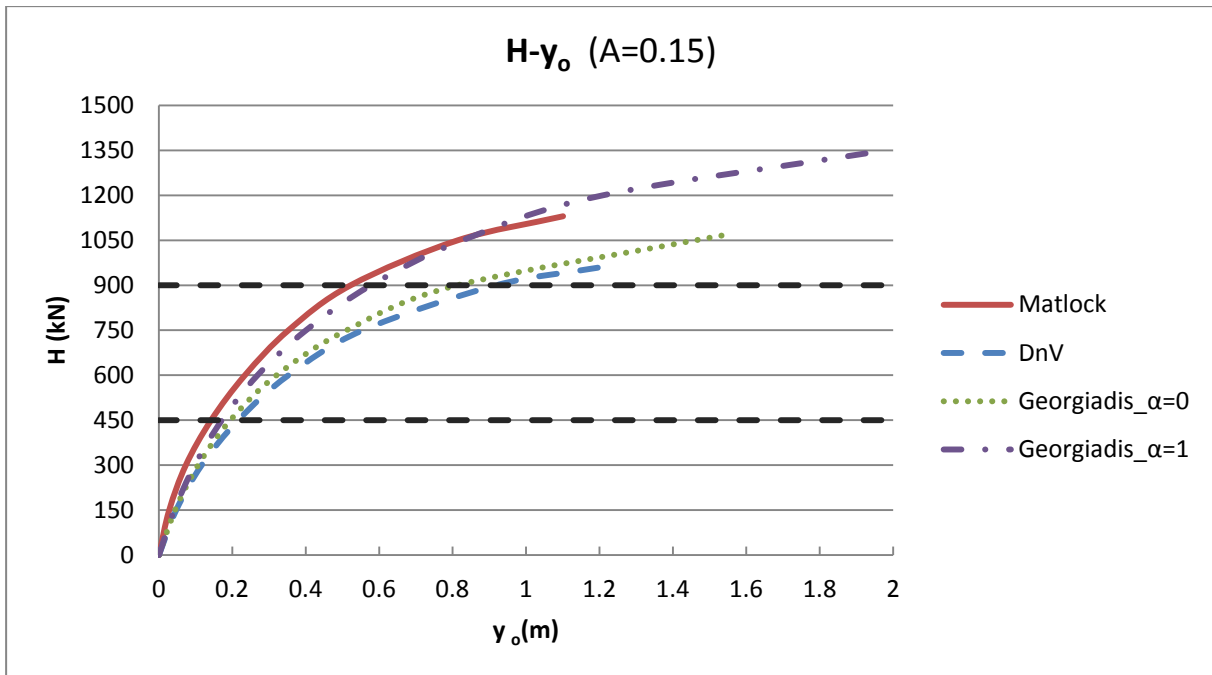
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, οι συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για την κάθε μεθοδολογία είναι οι εξής:

- $J=0.5$ ,  $\varepsilon_{50}=0.02$ , μεθοδολογία κατά Matlock,
- $\xi=10$ ,  $\varepsilon_c=0.02$ , μεθοδολογία Νορβηγικών κανονισμών(DnV),
- $E_{50}=c_u/\varepsilon_{50}$ , όπου  $\varepsilon_{50}=0.02$ ,  $\alpha=0$ (λείος πάσσαλος) και  $\alpha=1$ (τραχύς πάσσαλος), μεθοδολογία Γεωργιάδη

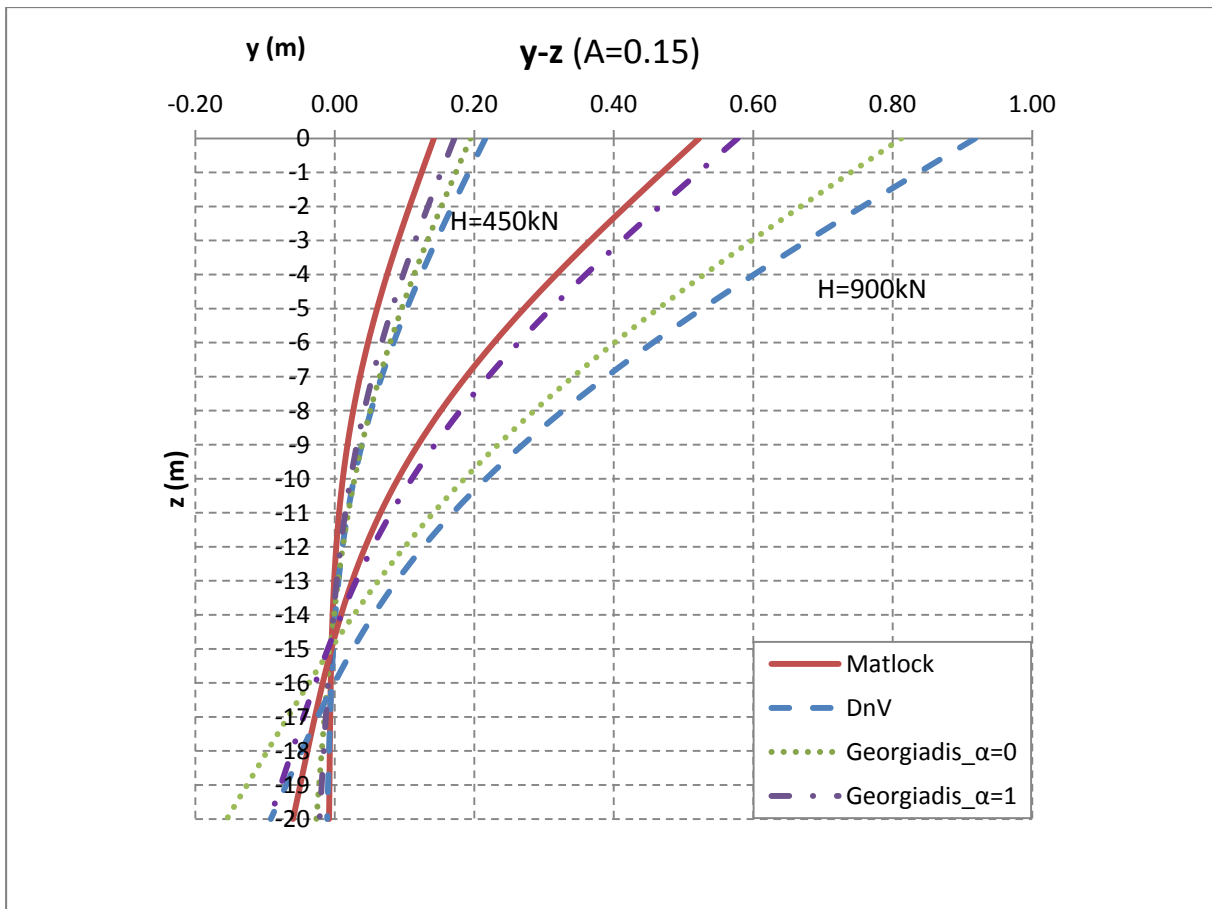
Στον Πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι τιμές της οριακής εγκάρσιας φόρτισης που αντιστοιχούν στην εκάστοτε μεθοδολογία για έδαφος με  $A=0.15$ , καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά της 40% και 90%. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν στο συγκριτικό διάγραμμα των οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου,  $y-z$ , (Σχήμα 3.17). Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα του κώδικα Latpile ορίστηκαν για βήμα 10kN, συνεπώς τα ποσοστά 40% και 90% του οριακού φορτίου στρογγυλοποιήθηκαν σε πολλαπλάσια του δέκα.

**Πίνακας 3.1:** Τιμές της οριακής εγκάρσιας φόρτισης και των ποσοστών της 40% και 90% .

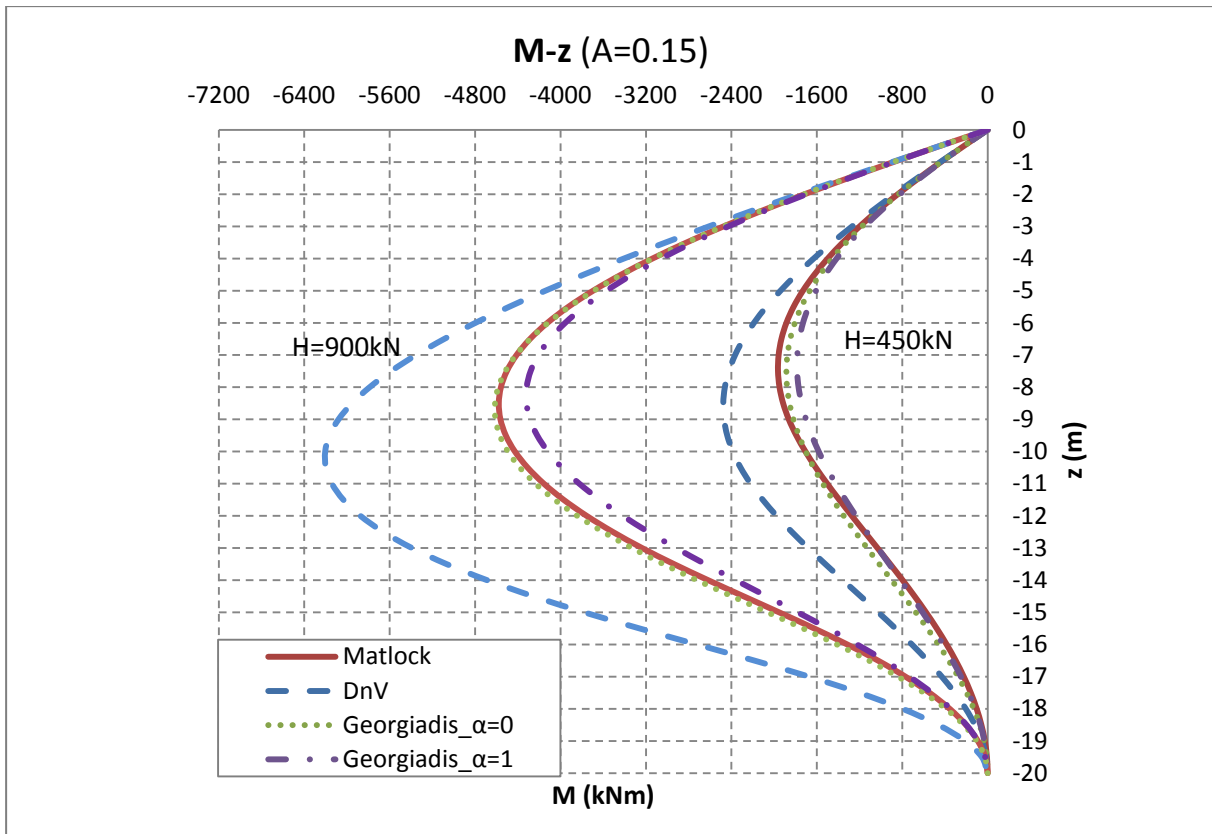
$c_u=10+0.15\sigma'_v$	$H_{ult}$ (kN)	40% $H_{ult}$ (kN)	90% $H_{ult}$ (kN)
Matlock	1130	450	1020
DnV	960	380	860
Georgiadis_α=0	1070	430	960
Georgiadis_α=1	1350	540	1210



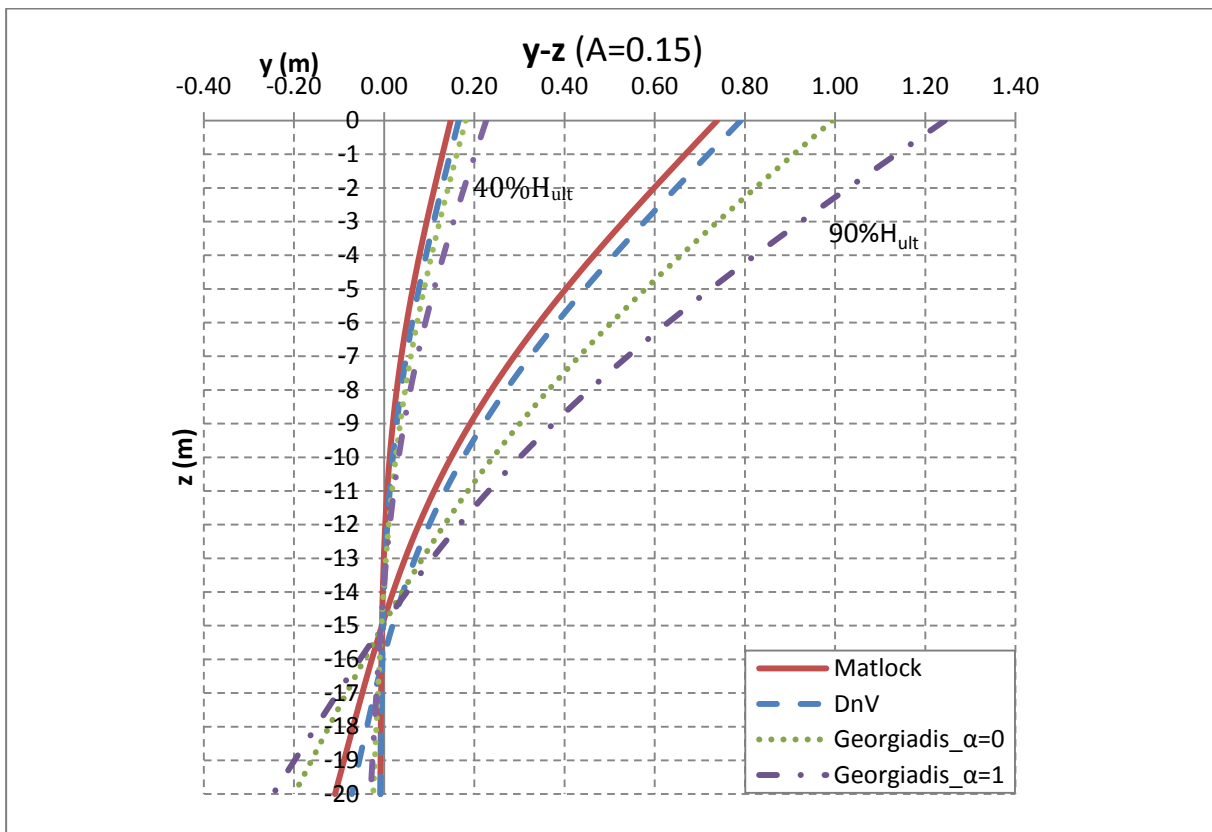
Σχήμα 3.14: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου για A=0.15.



Σχήμα 3.15: Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής των οριζόντιων μετατοπίσεων με το βάθος για A=0.15 και σταθερή εγκάρσια φόρτιση H=450kN, H=900kN.



**Σχήμα 3.16:** Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής των καμπτικών ροπών με το βάθος για  $A=0.15$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=900\text{kN}$ .



**Σχήμα 3.17:** Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής των οριζόντιων μετατοπίσεων με το βάθος για  $A=0.15$  και φορτίσεις ποσοστού 40% και 90% του οριακού φορτίου της κάθε μεθοδολογίας.

### 3.4.2 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.25$

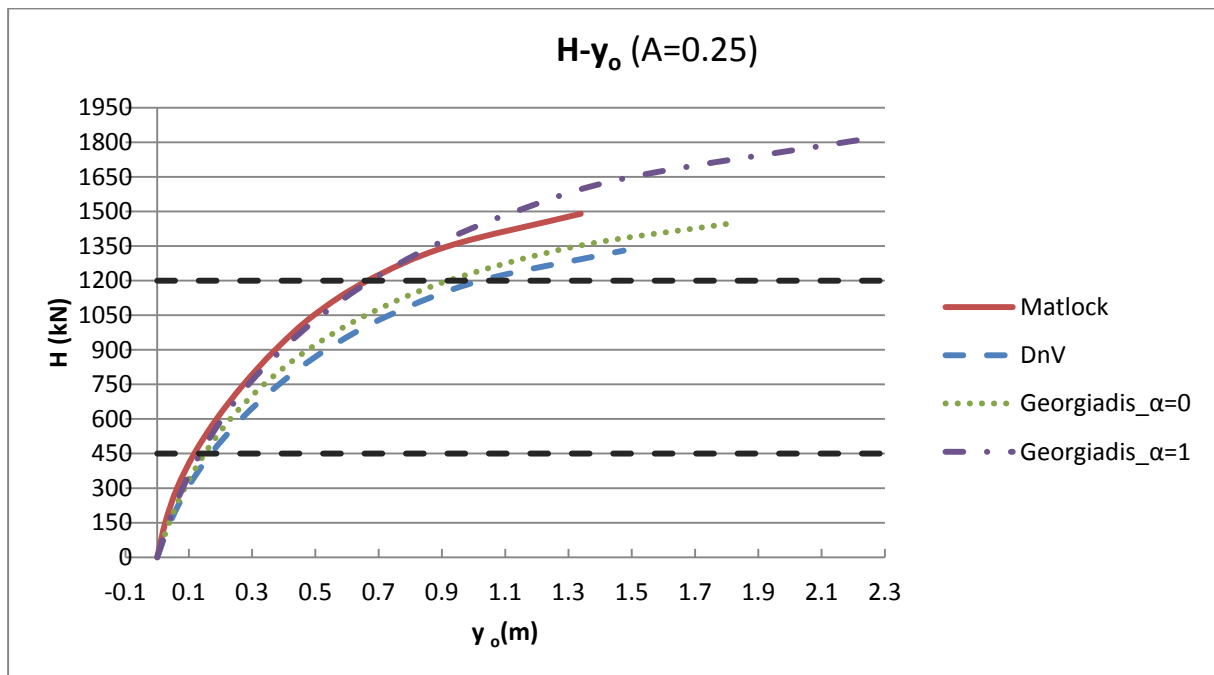
Ομοίως με την περίπτωση για  $A=0.15$  γίνεται χρήση ίδιων τιμών των συντελεστών της κάθε μεθοδολογίας. Σημειώνεται ότι για βάθος  $z \geq 16\text{m}$  η αστράγγιστη διατμητική αντοχή προκύπτει μεγαλύτερη από  $48\text{kPa}$ , οπότε για τα συγκεκριμένα βάθη η άργιλος χαρακτηρίζεται ως μέτριας σκληρότητας σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1. Οι τιμές των συντελεστών κατά τον ίδιο Πίνακα για τη συγκεκριμένη κατηγορία αργίλου λαμβάνουν διαφορετικές τιμές από τις αντίστοιχες για  $A=0.15$  και συγκεκριμένα:

- $J=0.25$ ,  $\varepsilon_{50}=0.01$ , μεθοδολογία Matlock (Παράρτημα Β),
- $\xi=10$ ,  $\varepsilon_c=0.01$ , μεθοδολογία Νορβηγικών κανονισμών(DnV),
- $E_{50}=c_u/\varepsilon_{50}$ , όπου  $\varepsilon_{50}=0.01$ ,  $\alpha=0$ (λείος πάσσαλος) και  $\alpha=1$ (τραχύς πάσσαλος), μεθοδολογία Γεωργιάδη(G).

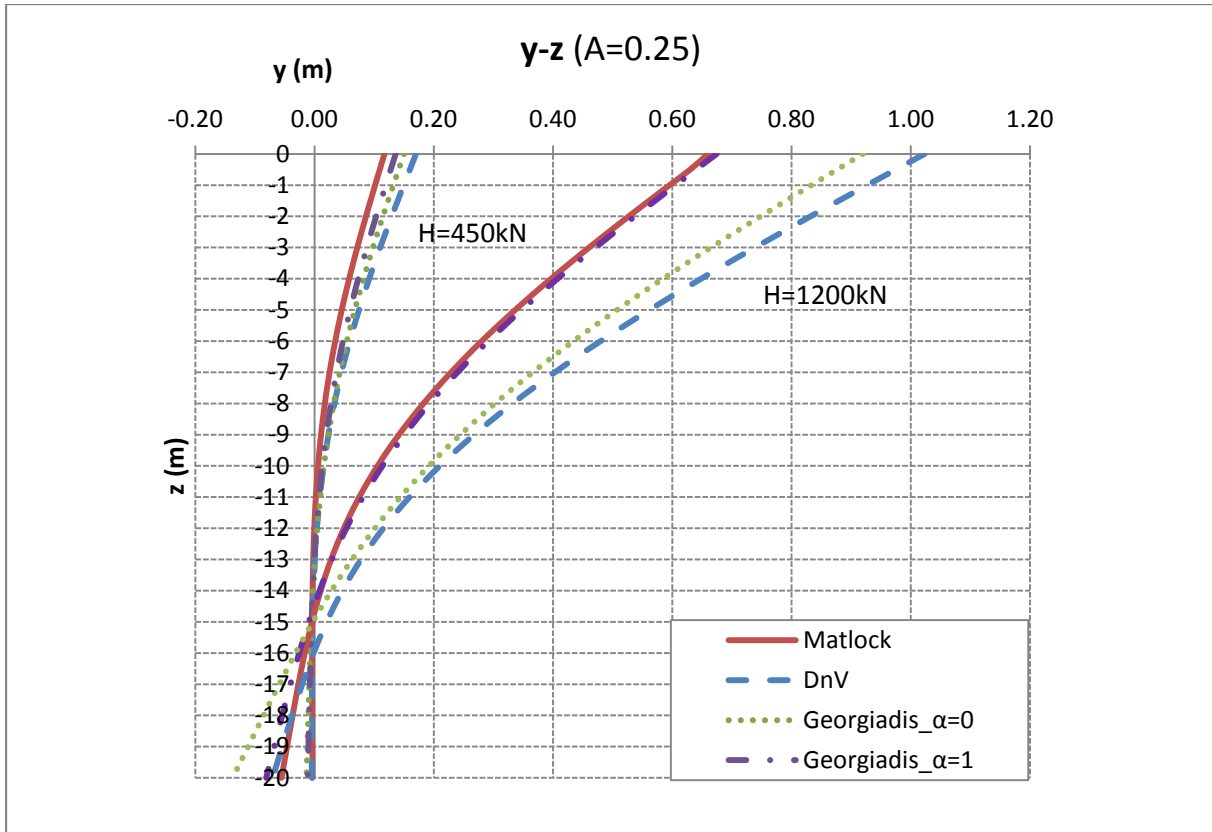
Για το λόγο ότι η μεταβολή των τιμών των συντελεστών αφορά ένα τμήμα του πασσάλου που βρίσκεται σε μεγάλο βάθος ( $z \geq 16\text{m}$ ) και επειδή σκοπό των διαγραμμάτων αποτελεί η σύγκριση των μεθοδολογιών για έδαφος με κοινά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που αντιστοιχούν σε μαλακή άργιλο για όλο το μήκος του πασσάλου. Στον Πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι τιμές της οριακής εγκάρσιας φόρτισης που αντιστοιχεί στην εκάστοτε μεθοδολογία σε έδαφος με  $A=0.25$ , καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά της 40% και 90%. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν στο συγκριτικό διάγραμμα των οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου,  $y$ - $z$ , (Σχήμα 3.21). Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα του κώδικα Latpile ορίστηκαν για βήμα  $10\text{kN}$ , συνεπώς τα ποσοστά 40% και 90% του οριακού φορτίου στρογγυλοποιήθηκαν σε πολλαπλάσια του δέκα.

**Πίνακας 3.2:** Τιμές της οριακής εγκάρσιας φόρτισης και των ποσοστών της 40% και 90% .

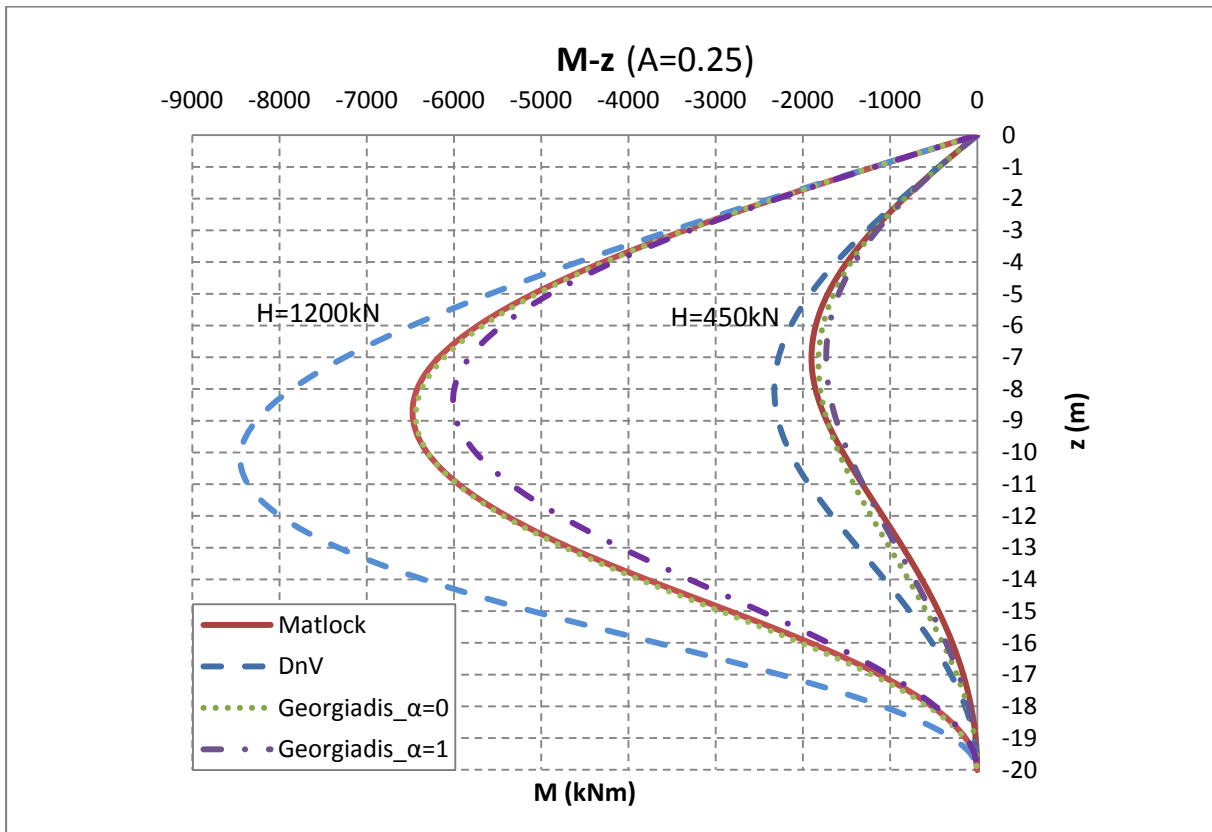
$c_u=10+0.25\sigma'_v$	$H_{ult}$ (kN)	40% $H_{ult}$ (kN)	90% $H_{ult}$ (kN)
Matlock	1490	600	1340
DnV	1330	670	1200
Georgiadis_α=0	1450	580	1300
Georgiadis_α=1	1820	730	1640



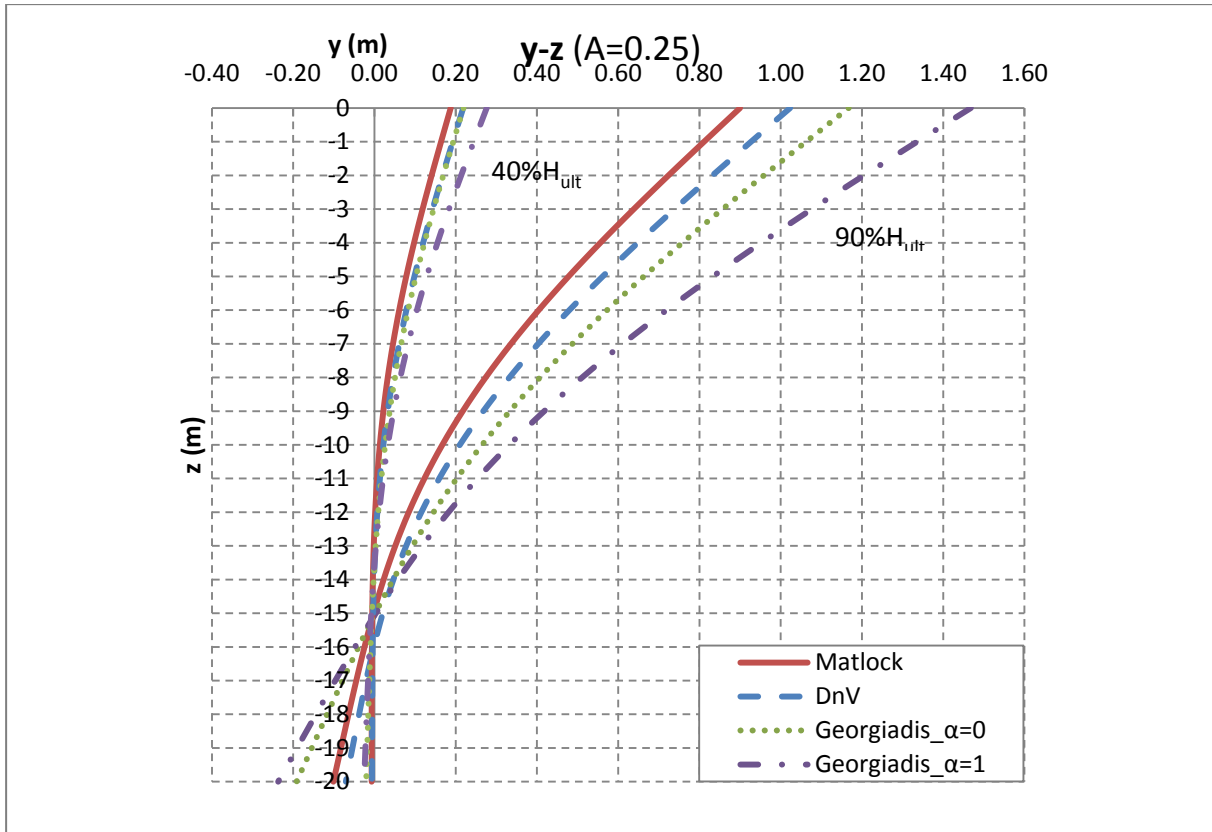
**Σχήμα 3.18:** Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου για  $A=0.25$ .



Σχήμα 3.19: Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής των οριζόντιων μετατοπίσεων με το βάθος για  $A=0.25$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1200\text{kN}$ .



Σχήμα 3.20: Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής των καμπτικών ροπών με το βάθος για  $A=0.25$  και φορτίσεις  $H=450\text{kN}$  και  $H=1200\text{kN}$ .



**Σχήμα 3.21:** Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής των οριζόντιων μετατοπίσεων με το βάθος για  $A=0.25$  και φορτίσεις ποσοστού 40% και 90% του οριακού φορτίου της κάθε μεθοδολογίας.

### 3.4.3 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.35$

Στην περίπτωση όπου το  $A=0.35$ , η αστράγγιστη διατμητική αντοχή μεταβάλλεται με πιο γρήγορους ρυθμούς σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις ( $A=0.15$  και  $A=0.25$ ), με αποτέλεσμα η άργιλος να μπορεί να χαρακτηριστεί ως άργιλος μέτριας σκληρότητας από βάθος  $z=10\text{m}$  και κάτω. Επομένως, οι συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για τη χάραξη των διαγραμμάτων της συγκεκριμένης παραγράφου είναι οι εξής:

Για βάθος  $z \leq 10\text{m}$ :

- $J=0.5$ ,  $\varepsilon_{50}=0.02$ , μεθοδολογία κατά Matlock,
- $\xi=10$ ,  $\varepsilon_c=0.02$ , μεθοδολογία Νορβηγικών κανονισμών(DnV),
- $E_{50}=c_u/\varepsilon_{50}$ , όπου  $\varepsilon_{50}=0.02$ ,  $\alpha=0$ (λείος πάσσαλος) και  $\alpha=1$ (τραχύς πάσσαλος), μεθοδολογία Γεωργιάδη

Για βάθος  $z > 10\text{m}$ :

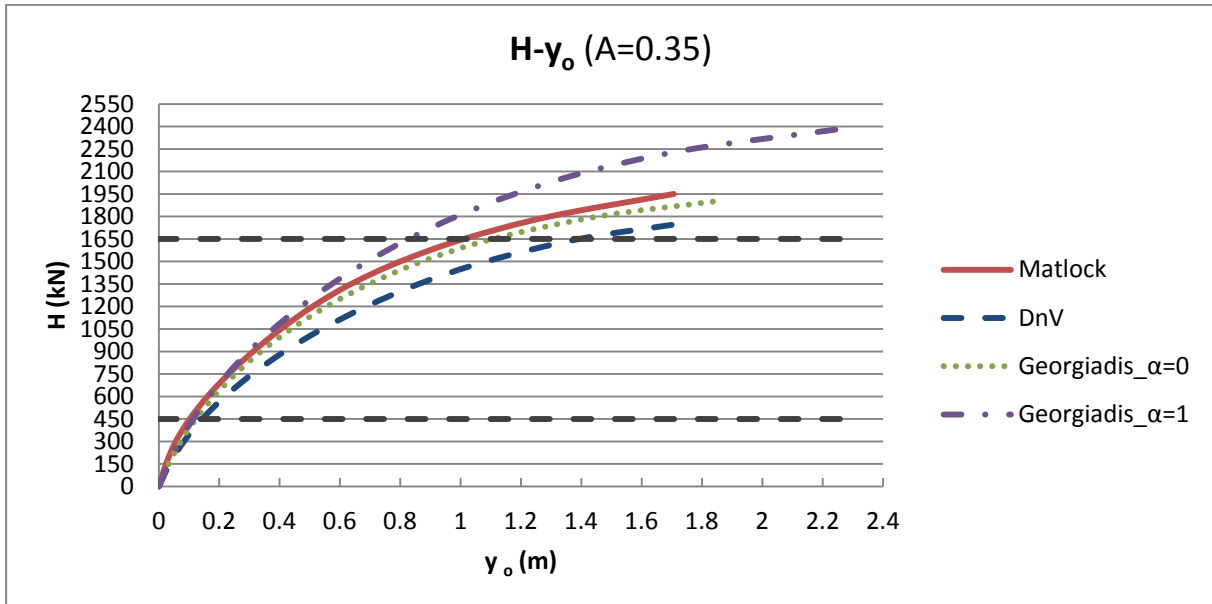
- $J=0.25$ ,  $\varepsilon_{50}=0.01$ , μεθοδολογία κατά Matlock,
- $\xi=10$ ,  $\varepsilon_c=0.01$ , μεθοδολογία Νορβηγικών κανονισμών(DnV),
- $E_{50}=c_u/\varepsilon_{50}$ , όπου  $\varepsilon_{50}=0.01$ ,  $\alpha=0$ (λείος πάσσαλος) και  $\alpha=1$ (τραχύς πάσσαλος), μεθοδολογία Γεωργιάδη.

Στον Πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι τιμές της οριακής εγκάρσιας φόρτισης που αντιστοιχεί στην εκάστοτε μεθοδολογία σε έδαφος με  $A=0.35$ , καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά της 40% και 90%. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν στο συγκριτικό διάγραμμα των οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου,  $y-z$ . Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα του κώδικα Latpile ορίστηκαν για βήμα  $10\text{kN}$ , συνεπώς τα ποσοστά 40% και 90% του οριακού φορτίου στρογγυλοποιήθηκαν σε πολλαπλάσια του δέκα.

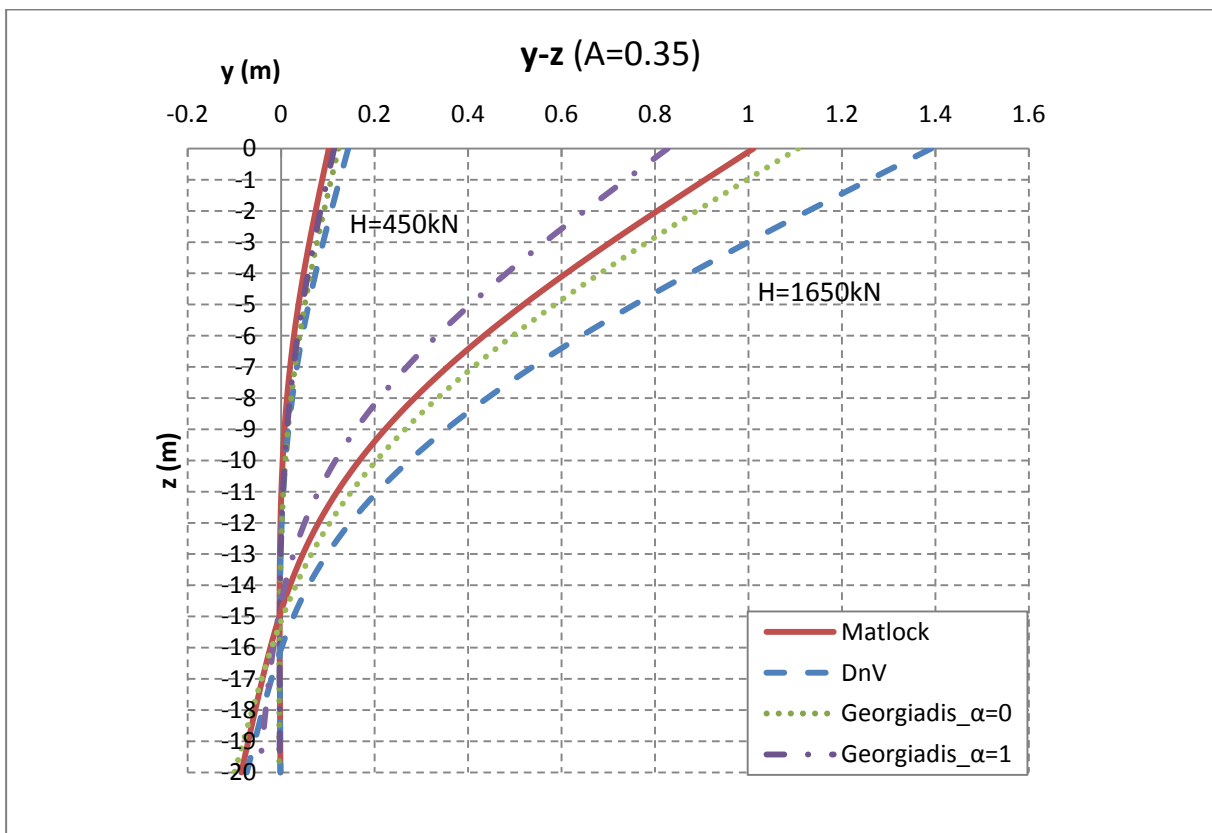


**Πίνακας 3.3:** Τιμές της οριακής εγκάρσιας φόρτισης και των ποσοστών της 40% και 90% .

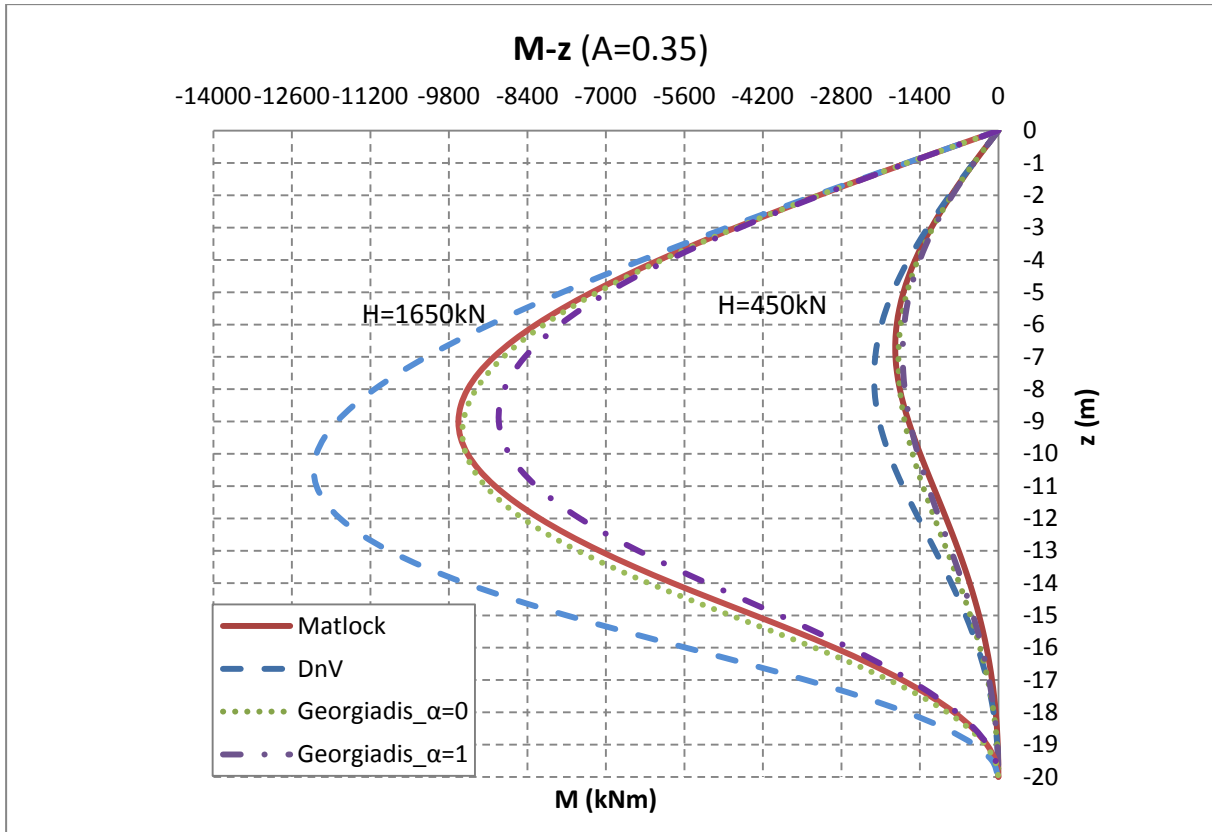
$c_{ii}=10+0.35\sigma'_v$	$H_{ult}$ (kN)	40% $H_{ult}$ (kN)	90% $H_{ult}$ (kN)
Matlock	1950	780	1750
DnV	1750	700	1570
Georgiadis_α=0	1900	760	1710
Georgiadis_α=1	2400	960	2150



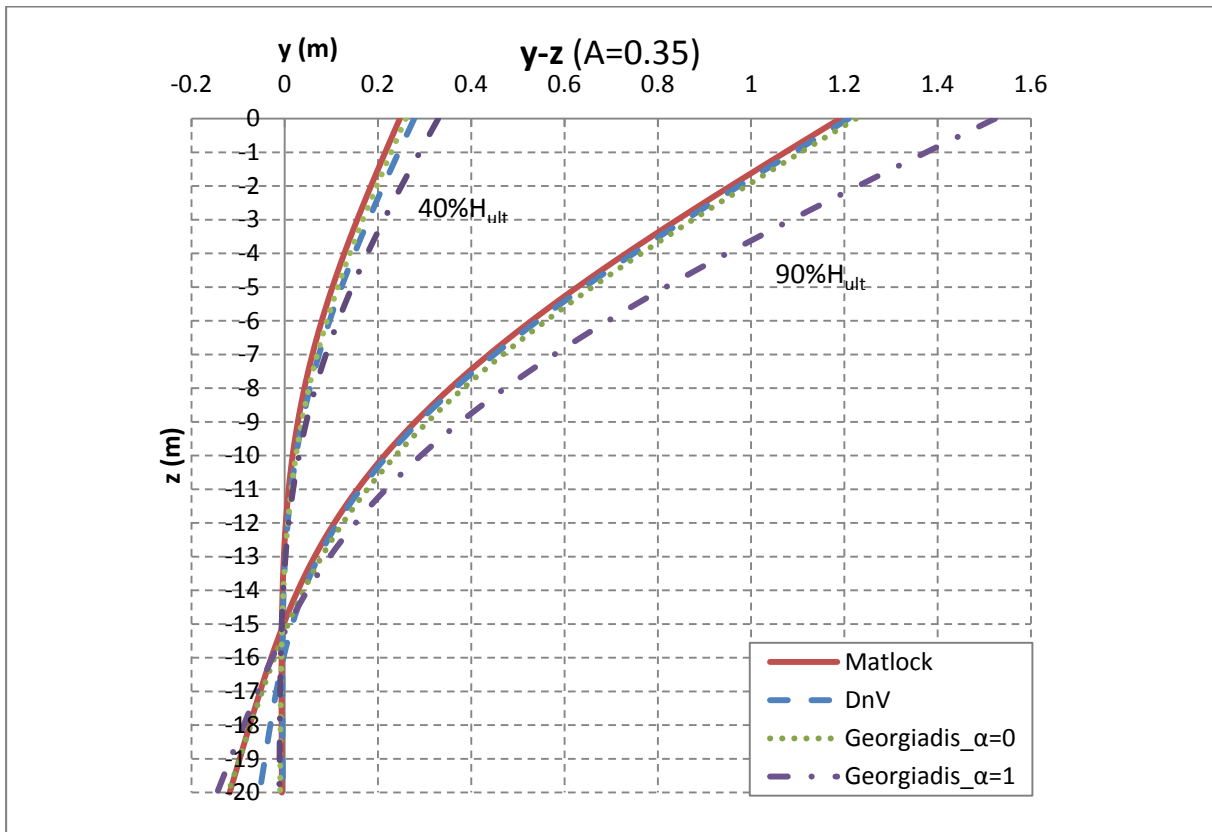
**Σχήμα 3.22:** Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου για  $A=0.35$ .



**Σχήμα 3.23:** Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής των οριζόντιων μετατοπίσεων με το βάθος για  $A=0.35$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1650\text{kN}$ .



**Σχήμα 3.24:** Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής των καμπτικών ροπών με το βάθος για  $A=0.25$  και φορτίσεις  $H=450\text{kN}$  και  $H=1650\text{kN}$ .



**Σχήμα 3.25:** Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής των οριζόντιων μετατοπίσεων με το βάθος για  $A=0.35$  και φορτίσεις ποσοστού 40% και 90% του οριακού φορτίου της κάθε μεθοδολογίας.

*Σημείωση:* Ως οριακή εγκάρσια φόρτιση, της οποίας τα ποσοστά 40% και 90% έχουν χρησιμοποιηθεί στα παραπάνω διαγράμματα, έχει θεωρηθεί για την εκάστοτε μεθοδολογία η τιμή του τελευταίου βήματος της σύγκλισης του κώδικα Latpile.

### 3.4.4 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα

#### 3.4.4.1 Καμπύλες κατανομής της μετατόπισης κατά μήκος του πασσάλου (y-z)

Η απόκλιση της οριζόντιας μετατόπισης στην κεφαλή του πασσάλου από μία μέση τιμή της για εγκάρσιο συγκεντρωμένο φορτίο ίσο με 40% του αντίστοιχου οριακού για όλες τις μεθοδολογίες κυμαίνεται μεταξύ των ποσοστών 14% και 21%. Αντιθέτως, η σύγκριση της κατανομής οριζόντιων μετατοπίσεων του πασσάλου μεταξύ όλων των μεθοδολογιών για εγκάρσια φόρτιση κοντά στην οριακή φέρουσα ικανότητα εμφανίζει πολύ μεγάλη διαφορά αποτελεσμάτων. Στους Πίνακες 3.4 και 3.5 παρατίθενται οι μέγιστες και οι ελάχιστες μετατοπίσεις κεφαλής καθώς και το ποσοστό της απόκλισής τους από μία μέση τιμή για τα δύο ποσοστά της οριακής φόρτισης. Σε γενικές γραμμές, οι όποιες διαφορές παρατηρούνται μεταξύ των κατανομών μετατόπισης κατά μήκος του πασσάλου ενδέχεται να οφείλονται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων για διαφορετικό συγκεντρωμένο εγκάρσιο φορτίο κεφαλής. Το οριακό φορτίο κεφαλής ( $H_{ult}$ ) προέκυψε διαφορετικό σύμφωνα με τη διαδικασία σύγκλισης του κώδικα Latpile.

Η μεθοδολογία κατά Matlock εκτιμά μικρότερες μετατοπίσεις είτε για κοινή φόρτιση είτε για ποσοστά 40% και 90% των οριακών εγκάρσιων φορτίων. Ωστόσο, η μεθοδολογία του Γεωργιάδη για συντελεστή διεπιφάνειας εδάφους-πασσάλου  $\alpha=1$  εκτιμά μεγαλύτερες οριζόντιες μετατοπίσεις στα συγκριτικά διαγράμματα των ποσοστών της οριακής εγκάρσιας φόρτισης, ενώ για την ίδια τιμή εγκάρσιου φορτίου κεφαλής η καμπύλη πλησιάζει αρκετά την καμπύλη κατά Matlock. Αναφορικά με τους Νορβηγικούς κανονισμούς, στην κατηγορία σύγκρισης σταθερού φορτίου παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες μετακινήσεις λόγω της μικρότερης εδαφικής αντίδρασης, όπως φαίνεται στις συγκριτικές καμπύλες p-y της ενότητας 3.2.

**Πίνακας 3.4:** Τιμές και απόκλιση μέγιστης και ελάχιστης μετατόπισης κεφαλής για  $H=(0.4)H_{ult}$

$H=40\%H_{ult}$	$y_{omin}(m)$	$y_{omax}(m)$	Απόκλιση από μέσο $y_o$ %
A=0.15	0.156	0.214	± 21%
A=0.25	0.186	0.276	± 22%
A=0.35	0.244	0.329	± 14%

**Πίνακας 3.5:** Τιμές και απόκλιση μέγιστης και ελάχιστης μετατόπισης κεφαλής για  $H=(0.9)H_{ult}$

$H=90\%H_{ult}$	$y_{omin}(m)$	$y_{omax}(m)$	Απόκλιση από μέσο $y_o$ %
A=0.15	0.739	1.244	± 25%
A=0.25	0.900	1.468	± 24%
A=0.35	1.191	1.523	± 12%

#### 3.4.4.2 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης της κεφαλής του πασσάλου (H-y<sub>o</sub>)

Αναφορικά με τις καμπύλες φορτίου-οριζόντιας μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου, εντύπωση προκαλεί η συμφωνία μέχρι ενός σημαντικού ποσοστού του οριακού φορτίου των μεθοδολογιών Matlock και Γεωργιάδη για συντελεστή τριβής διεπιφάνειας  $\alpha=1$  σε όλα τα εδάφη που εξετάστηκαν παρά το γεγονός ότι οι δύο μεθοδολογίες εκτιμούν πού διαφορετική οριακή εδαφική αντίδραση  $p_{ult}$  (ενότητα 2.11). Αντίστοιχες ομοιότητες παρατηρούνται στα διαγράμματα y-z υπό σταθερό φορτίο κεφαλής. Επίσης, όπως φαίνεται από τα συγκριτικά διαγράμματα, η μεθοδολογία του Γεωργιάδη για  $\alpha=1$  εκτιμά το μεγαλύτερο φορτίο κεφαλής, ενώ οι Νορβηγικοί κανονισμοί το αντίστοιχο μικρότερο. Στα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής καταδεικνύονται με οριζόντιες γραμμές

συγκεκριμένες τιμές εγκάρσιου φορτίου για τις οποίες συγκρίθηκαν οι κατανομές καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου για όλες τις μεθοδολογίες.

#### **3.4.4.3 Καμπύλες κατανομής της καμπτικής ροπής κατά μήκος του πασσάλου (M-z)**

Από το διάγραμμα κατανομής καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου, η μεθοδολογία των Νορβηγικών Κανονισμών (DnV) υπερεκτιμά τη μέγιστη καμπτική ροπή ακριβώς επειδή υποεκτιμά την οριακή εδαφική αντίδραση ( $p_{ult}$ ), όπως δείχνουν οι συγκριτικές καμπύλες p-y της ενότητας 3.2. Όπως προκύπτει και από το διάγραμμα εγκάρσιου φορτίου-μετατόπισης κεφαλής για κοινό εγκάρσιο φορτίο, η μεθοδολογία των Νορβηγικών Κανονισμών εμφανίζει διαρκώς τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις κεφαλής. Συνεπώς, σε μία ιδεατή περίπτωση πλήρους έλλειψης εδαφικής αντίδρασης, ο πάσσαλος θα συμπεριφερόταν ως πρόβολος πακτωμένος στην αιχμή του, όπου θα εμφάνιζε τη μέγιστη καμπτική ροπή. Αναφορικά με τις υπόλοιπες μεθοδολογίες, η κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου για όλα τα εδάφη που εξετάστηκαν είναι σχεδόν όμοια μεταξύ Matlock και Γεωργιάδη για  $\alpha=0$ . Τέλος, η μεθοδολογία του Γεωργιάδη για  $\alpha=1$  υπολογίζει τη μικρότερη μέγιστη καμπτική ροπή κατά μήκος του πασσάλου για όλα τα εδάφη και για τις συγκεκριμένες τιμές εγκάρσιων φορτίων κεφαλής που ελέγχθηκαν.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Παραμετρική διερεύνηση της εγκάρσιας φόρτισης πασσάλου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

### 4.1 Εισαγωγή

Σκοπό του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η μελέτη, μέσω της χρήσης του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10, της συμπεριφοράς του συστήματος πασσάλου-εδάφους σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο υπό αστράγγιστες συνθήκες για επιβολή εγκάρσιας φόρτισης στην κεφαλή του πασσάλου. Πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις στις οποίες τα χαρακτηριστικά του πασσάλου διατηρούνται όμοια, ενώ μεταβάλλονται οι ιδιότητες του εδάφους. Παρουσιάζεται αναλυτικά η πορεία επιλογής των ιδιοτήτων του τελικού προσομοιώματος, τα χαρακτηριστικά του πασσάλου και του εδάφους καθώς και οι διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα της μελέτης σε μορφή διαγραμμάτων που έχουν προκύψει από παραμετρικές αναλύσεις και εκφράζονται τα τελικά συμπεράσματα.

### 4.2 Σχεδίαση προσομοιώματος πασσάλου-εδάφους

Τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου σχεδιάστηκαν και διακριτοποιήθηκαν στο περιβάλλον του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 9.0. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων πασσάλου-εδάφους και ο τρόπος με τον οποίο έγινε η διακριτοποίησή τους.

#### 4.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Σχεδιάστηκαν τρία τριδιάστατα προσομοιώματα πασσάλου-εδάφους με κοινές τις διαστάσεις του πασσάλου και τις εξωτερικές διαστάσεις κατά τη διεύθυνση του άξονα  $y$  – την κάθετη στη διεύθυνση της φόρτισης- και κατά την κατακόρυφη διάσταση  $z$ . Η διαφορά τους εντοπίζεται στη διάσταση του εδαφικού όγκου που περιβάλλει τον υπό μελέτη πάσσαλο κατά τη διεύθυνση της φόρτισης (άξονας  $x$ ). Η μεταβολή μόνο της διάστασης του προσομοιώματος κατά τον άξονα  $x$  οφείλεται στο γεγονός ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η απόκριση του πασσάλου λόγω επιβαλλόμενης εγκάρσιας δύναμης στην κεφαλή του κατά το συγκεκριμένο άξονα. Συνεπώς, πιθανές διαφορές που τυχόν εμφανιστούν, μεταξύ των προσομοιωμάτων, επηρεάζονται κυρίως από τη συγκεκριμένη διάσταση. Οι διαστάσεις των προσομοιωμάτων παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.

Από γεωμετρικής απόψεως, τα σχήματα που συνέθεσαν τελικά το προσομοίωμα πασσάλου-εδάφους αποτελείται από: α) ένα οκταγωνικό πρίσμα, ακτίνας  $R=0.25\text{m}$  έως βάθος  $z=25\text{m}$ , β) τρεις κυλίνδρους έως βάθος  $z=25\text{m}$  και ακτίνας  $R= 0.5\text{m}$  (πάσσαλος),  $R= 1.5\text{m}$  και  $R= 2.5\text{m}$ , γ) δύο ορθογώνια παραλληλεπίπεδα,  $z=25\text{m}$  και διαστάσεων  $y= 10\text{m}$  και  $y=20\text{m}$  κατά τον άξονα  $y$  ( η διάσταση κατά τον άξονα  $x$  ήταν ανάλογη της εξωτερικής διάστασης  $x$  και τέλος δ) οκτώ ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, τέσσερα έως βάθος  $z=20\text{m}$  και τέσσερα μεταξύ βάθους  $z=20-25\text{m}$ . Η αλληλοεπικάλυψη των παραπάνω όγκων συνθέτει το σύνολο του κάθε προσομοιώματος.

**Πίνακας 4.1:** Εξωτερικές διαστάσεις προσομοιωμάτων εδάφους-πασσάλου.

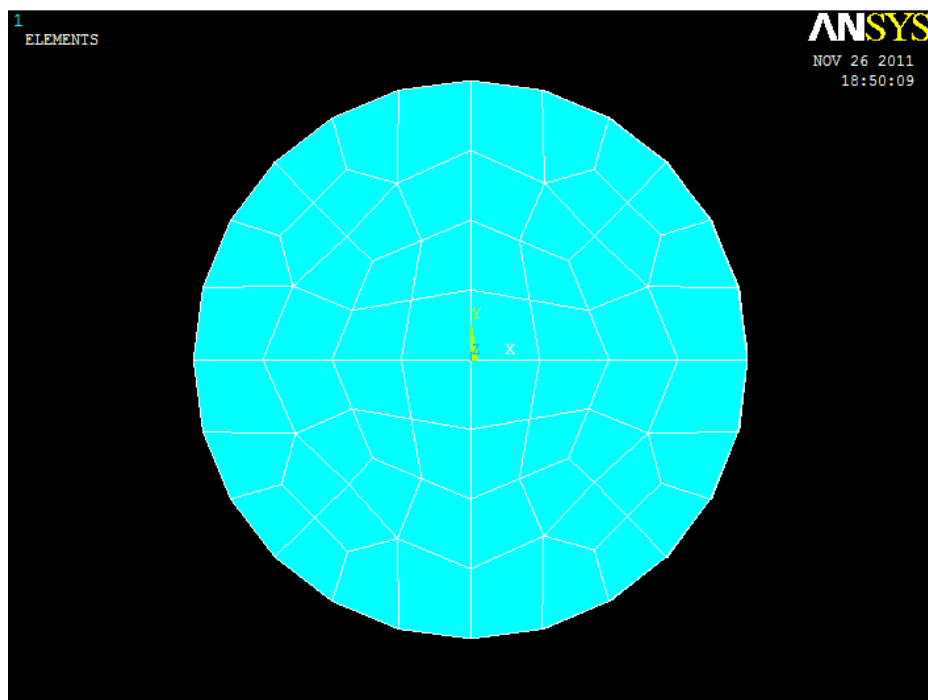
Προσομοίωμα A			Προσομοίωμα B			Προσομοίωμα C		
x(m)	y(m)	z(m)	x(m)	y(m)	z(m)	x(m)	y(m)	z(m)
40	30	-25	60	30	-25	80	30	-25

**Πίνακας 4.2:** Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά προσομοιωμάτων.

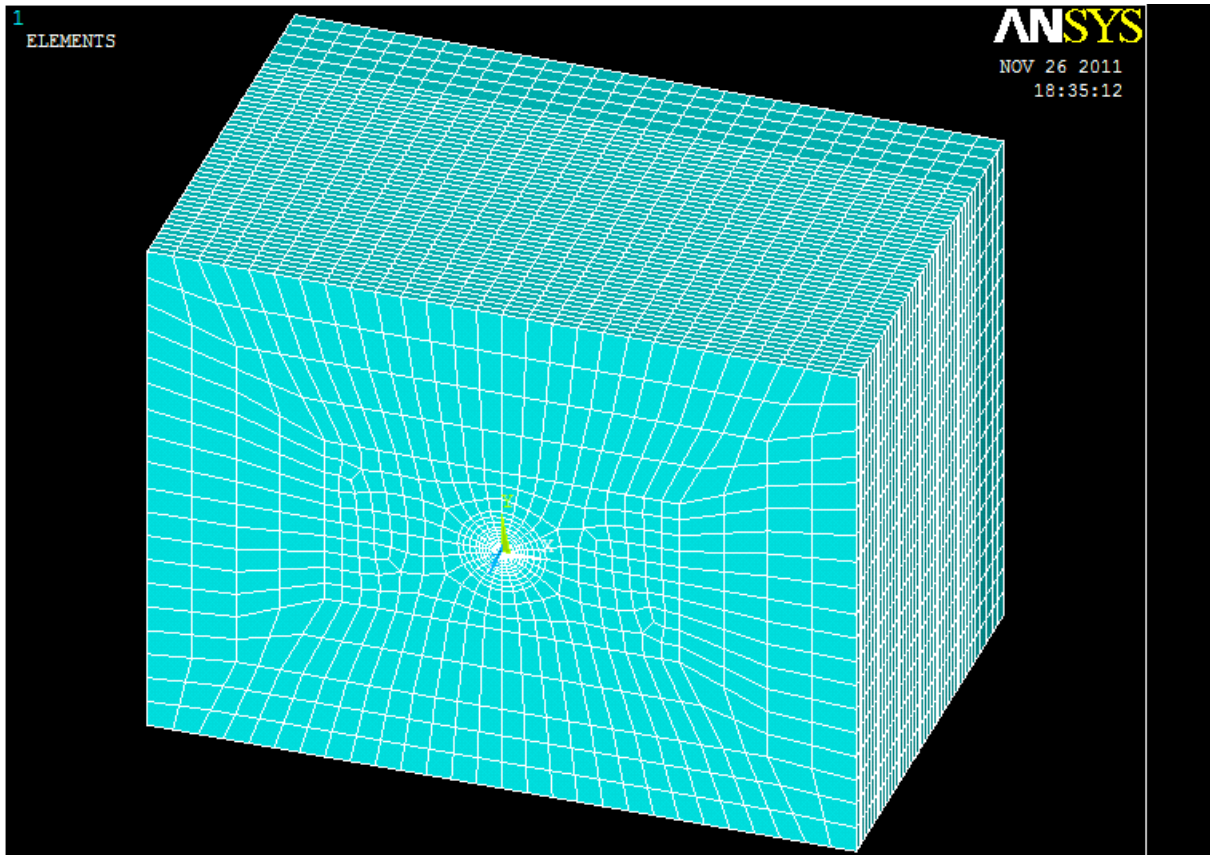
	Όγκος (m <sup>3</sup> )	Αριθμός στοιχείων
Προσομοίωμα Α (40x30x25)	30.000	34.355
Προσομοίωμα Β (60x30x25)	45.000	47.295
Προσομοίωμα C (80x30x25)	60.000	58.095

#### 4.2.2 Διακριτοποίηση προσομοιωμάτων πασσάλου-εδάφους

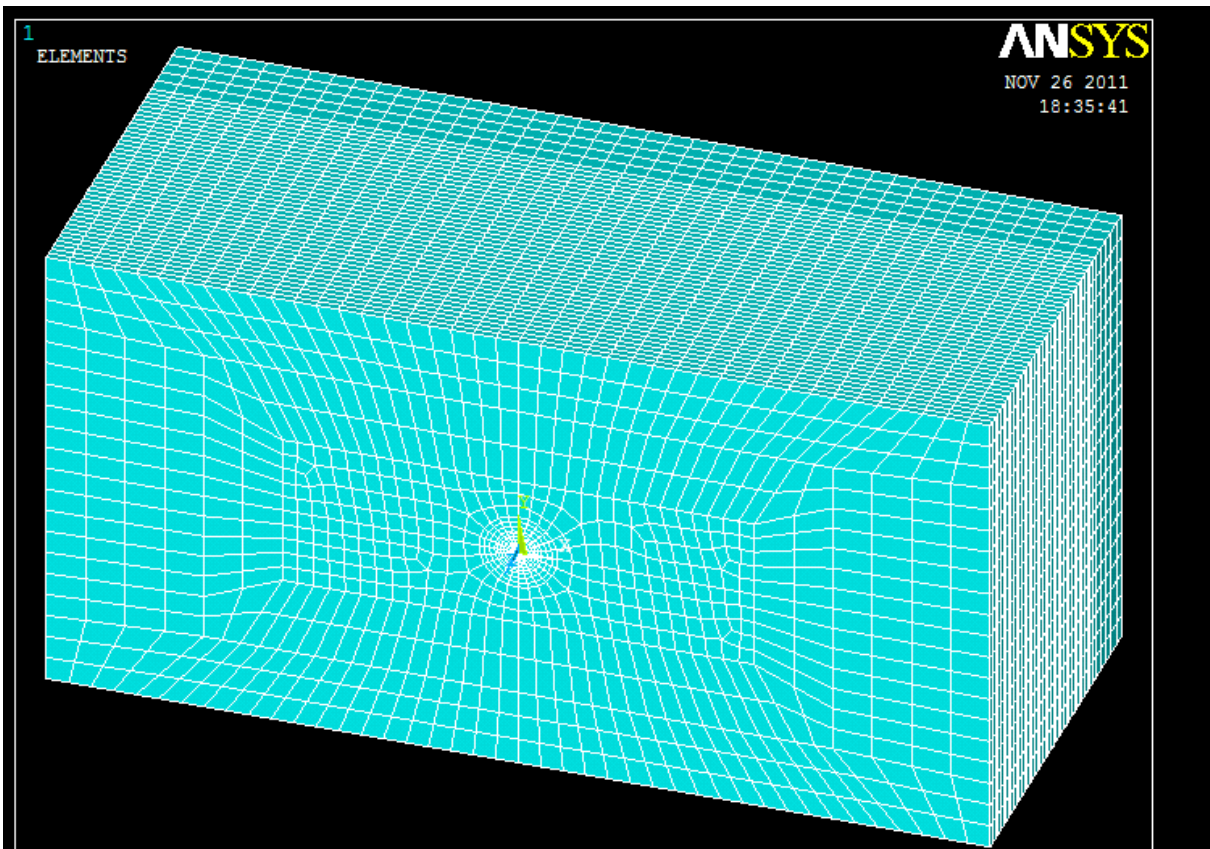
Η διακριτοποίηση των προσομοιωμάτων, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του κώδικα ANSYS 9.0, όπου και χρησιμοποιήθηκαν τριδιάστατα, οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε τα στοιχεία περιμετρικά του πασσάλου να είναι μικρά σε μέγεθος και επομένως το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων της εδαφικής στρώσης που περιβάλλει τον πάσσαλο να είναι πυκνό, ενώ όσο πιο απομακρυσμένα είναι τα στοιχεία από τον πάσσαλο τόσο αυξάνεται το μέγεθός τους και κατά συνέπεια το δίκτυο «αραιώνει». Αναφορικά με τη διακριτοποίηση καθ' ύψος του πασσάλου από  $z=0\text{m}$  έως  $z=20\text{m}$  το δίκτυο αποτελείται από στοιχεία πάχους  $b=0.5\text{m}$  ενώ για βάθη κάτω από  $z=20\text{m}$  έως και  $z=25\text{m}$  το πάχος των στοιχείων είναι  $b=1\text{m}$ . Επιπλέον, η διακριτοποίηση είναι πυκνότερη στα εσωτερικά στοιχεία του πασσάλου (οκτάγωνο) σε σχέση με τα περιβάλλοντα. Τέλος, το μήκος του κάθε κυλινδρικού όγκου χωρίστηκε σε εικοσιτέσσερα ίσα τμήματα. Παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 4.2) με τα στοιχεία των προσομοιωμάτων καθώς και εικόνες του κάθε προσομοιώματος ξεχωριστά, Σχήμα 4.2, Σχήμα 4.3 και Σχήμα 4.3.



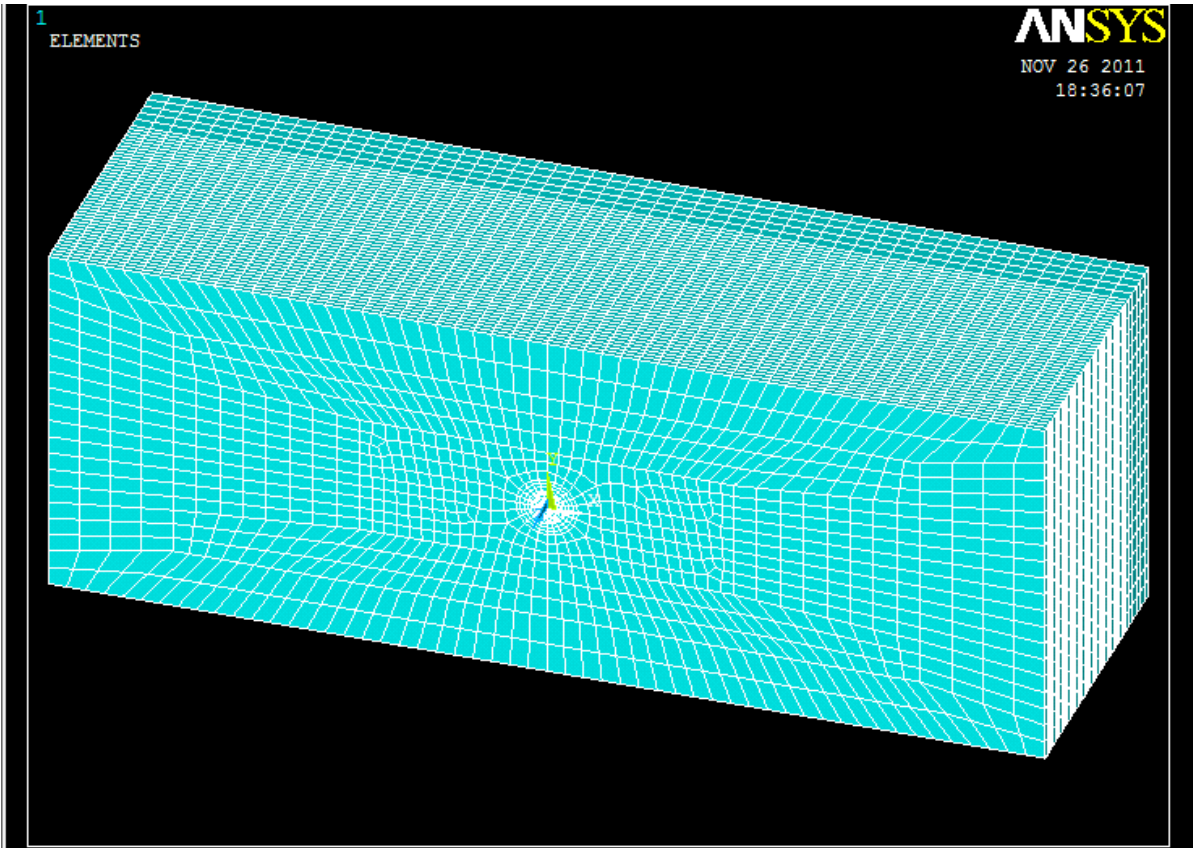
**Σχήμα 4.1:** Διακριτοποίηση διατομή του πασσάλου.



Σχήμα 4.2: Διακριτοποίηση Προσομοιώματος Α ( $x=40m$ ).



Σχήμα 4.3: Διακριτοποίηση Προσομοιώματος Β ( $x=60m$ ).



Σχήμα 4.4: Διακριτοποίηση Προσομοιώματος C (x=80m).

### 4.2.3 Συνοριακές συνθήκες

Στο αρχείο που χρησιμοποιήθηκε ως αρχείο εισαγωγής δεδομένων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus θεωρήθηκε ότι τα προσομοιώματα δεσμεύονται περιμετρικά από τις εξής συνοριακές συνθήκες: α) οι κόμβοι του επιπέδου xy για  $z=25\text{m}$  είναι πακτωμένοι, καθώς δεσμεύονται οι μετατοπίσεις τους κατά x, y και z, β) οι μετατοπίσεις των συνοριακών επιπέδων xz και yz δεσμεύονται κατά y και x (κυλίσεις), γ) οι κόμβοι της επιφάνειας του εδάφους ( $z=0\text{m}$ ) είναι ελεύθεροι να παραμορφωθούν.

## 4.3 Ιδιότητες προσομοιώματος εδάφους-πασσάλου

### 4.3.1 Ιδιότητες εδάφους

Στις παραμετρικές αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάστηκε η περίπτωση κανονικά στερεοποιημένης αργίλου με γραμμικά αυξανόμενη αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $c_u$ ) και μέτρο ελαστικότητας ( $E_u$ ) με το βάθος (z). Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή για την προσομοίωση του εδάφους με χαρακτηριστικά κανονικά στερεοποιημένης αργίλου θεωρήθηκε ίση με  $c_u=10\text{kPa}$  στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ με την αύξηση του βάθους κατά  $z=1\text{m}$ , η τιμή της θεωρήθηκε αρχικά ότι αυξάνεται κατά  $\Delta c_u=2.5\text{kPa}$  σύμφωνα με την εξίσωση:  $c_u=10+0.25\gamma'z$ , όπου  $\gamma'=10\text{ kN/m}^3$  το ενεργό ειδικό βάρος.

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για φόρτιση του εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες, θεωρώντας ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους. Συνεπώς, για το έδαφος θεωρήθηκε ολικό ειδικό βάρος  $\gamma=20\text{ kN/m}^3$  και λόγος Poisson  $\nu_u=0.499$ , αποφεύγοντας την ακριβή τιμή του λόγου  $\nu_u=0.50$  για λόγους αριθμητικής σταθερότητας στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Αναφορικά με την αρχική εντατική κατάσταση, δηλαδή την κατάσταση πριν την επιβολή



της εγκάρσιας φόρτισης, θεωρείται αρχική τάση στην επιφάνεια του εδάφους  $\sigma_v=1\text{kPa}$ , και στο κατώτατο επίπεδο  $z=25\text{m}$  γεωστατική τάση  $\sigma_v=500\text{ kPa}$  ( $\sigma_v=\gamma*z=20*25=500\text{kPa}$ ).

Τα κριτήρια αστοχίας που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους είναι τα κριτήρια αστοχίας Mohr-Coulomb και Drucker-Prager, τα οποία περιγράφονται σε επόμενες παραγράφους (4.3.1.1 και 4.3.1.2). Ακριβώς επειδή δεν εκτελέστηκαν συζευγμένες αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία που υπολογίζουν πίεση πόρων, αλλά αναλύσεις σε όρους ολικών τάσεων, προέκυψε η ανάγκη προσδιορισμού ενός ισοδύναμου συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων. Ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων που συνδέει την οριζόντια με την κατακόρυφη ολική τάση ορίστηκε αρχικά ως  $k_{ou}=k_{oxu}=k_{oyu}=0.75$  και αφορά την προσομοίωση της γεωστατικής κατάστασης. Συγκεκριμένα, η επιλογή της τιμής του ισοδύναμου συντελεστή εδάφους που χρησιμοποιείται στο αρχείο εισαγωγής των δεδομένων του κώδικα Abaqus για την περιγραφή της γεωστατικής κατάστασης, υπολογίζεται για ένα τυχαίο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους  $H$  σύμφωνα με την εξίσωση 4.1 ως:

$$k_{ou} = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \frac{\sigma'_3 + u}{\sigma'_1 + u} = \frac{\sigma'_1 k_o + u}{\sigma'_1 + u} = \frac{\gamma' H k_o + u}{\gamma' H + u} = \frac{\gamma' H k_o + H \gamma_w}{\gamma' H + H \gamma_w} = \frac{\gamma' k_o + \gamma_w}{\gamma' + \gamma_w} =$$

$$\frac{(\gamma - \gamma_w) k_o + \gamma_w}{(\gamma - \gamma_w) + \gamma_w} = \frac{\gamma k_o - \gamma_w k_o + \gamma_w}{\gamma} = k_o - \frac{\gamma_w}{\gamma} k_o + \frac{\gamma_w}{\gamma} \quad (4.1)$$

όπου  $\sigma_3$  η οριζόντια ολική τάση  $\sigma_h$ ,  $\sigma_1$  η κατακόρυφη ολική τάση  $\sigma_v$ ,  $u$  η πίεση πόρων,  $\gamma_w$  ειδικό βάρος νερού,  $\gamma_w = 10\text{ kN/m}^3$  και  $H$  το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους, το οποίο ταυτίζεται με την απόσταση από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

Για παράδειγμα, για συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_o=0.5$  συνεπάγεται ότι ο ισοδύναμος συντελεστής ολικών οριζόντιων γεωστατικών τάσεων υπό αστράγγιστες συνθήκες θα ισούται με:

$$k_{ou} = k_o - \frac{\gamma_w}{\gamma} k_o + \frac{\gamma_w}{\gamma} = 0.5 - (10/20) * 0.5 + (10/20) = 0.75 \quad (4.2)$$

Προκειμένου να εξασφαλίσουμε ότι το προσομοίωμα δεν αστοχεί στη γεωστατική κατάσταση, θα πρέπει η ακτίνα του κύκλου Mohr ολικών τάσεων να είναι μικρότερη από την εκάστοτε αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $R < c_u$ ) για κάθε βάθος. Για παράδειγμα, για μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $c_u$ ) κανονικά στερεοποιημένης αργίλου σύμφωνα με την εξίσωση  $c_u=10+0.25*10*z$  και για βάθος  $z=25\text{m}$ , προκύπτει ότι  $c_u=10+0.25*10*25=72.5\text{ kPa}$ , ( $72.5 \geq 62.5$ ). Συνεπώς, το προσομοίωμα δεν αστοχεί πριν την επιβολή οριζόντιας δύναμης στην κεφαλή του πασσάλου.

#### 4.3.1.1 Καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb

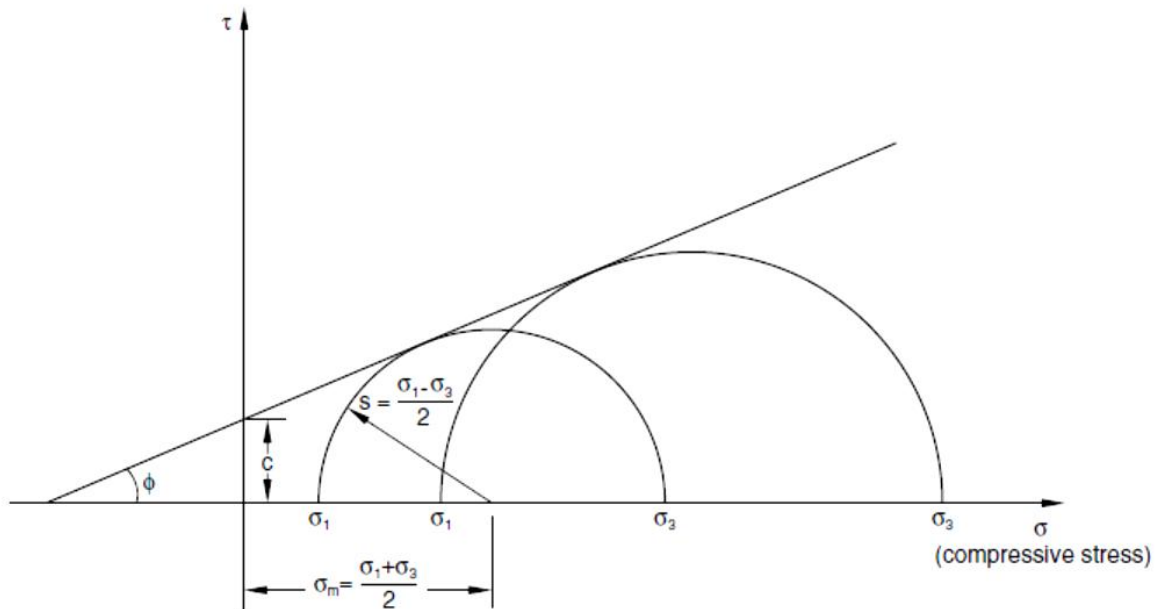
Το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb αποτελεί το πιο διαδεδομένο κριτήριο αστοχίας της γεωτεχνικής μηχανικής. Στις εξισώσεις 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται οι εκφράσεις του κριτηρίου στο επίπεδο αστοχίας. Γραφικά, στην περίπτωση επίπεδης έντασης απεικονίζεται με μία ευθεία γραμμή, ενώ στο χώρο των κυρίων τάσεων έχει σχήμα μη κανονικής εξαγωνικής πυραμίδας (Σχήματα 4.5 και 4.6).

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi \quad (4.3)$$

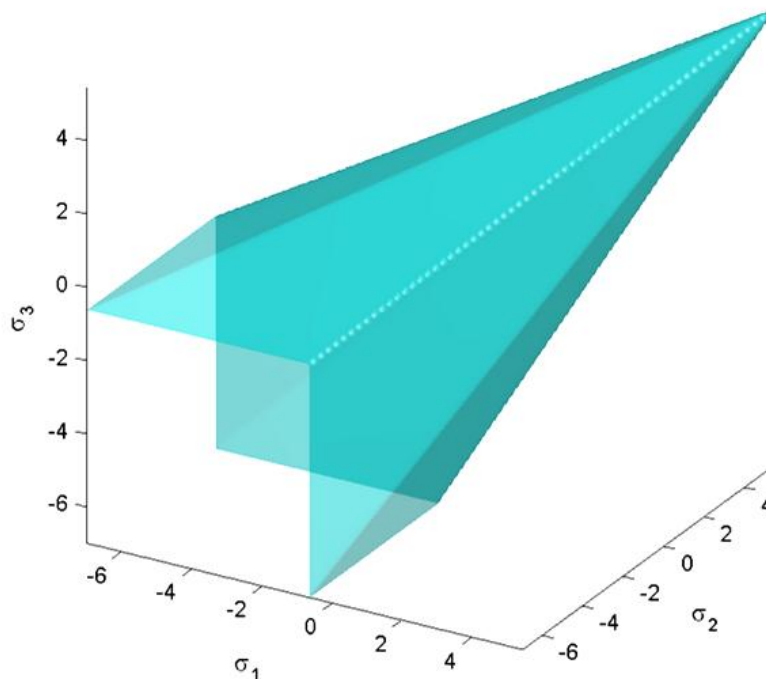
$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2(45 + \varphi / 2) + 2c \tan(45 + \varphi / 2) \quad (4.4)$$

όπου,

$\tau$ : διατμητική τάση στο επίπεδο αστοχίας  
 $\sigma$ : ορθή τάση στο επίπεδο αστοχίας  
 $\sigma'_1$ : μέγιστη κύρια ενεργός τάση  
 $\sigma'_3$ : ελάχιστη κύρια ενεργός τάση  
 $c$ : ενεργός συνοχή  
 $\phi$ : ενεργός γωνία εσωτερικής τριβής



Σχήμα 4.5: Γραφική απεικόνιση κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb για επίπεδη ένταση.



Σχήμα 4.6: Γραφική απεικόνιση κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb στο χώρο των κυρίων τάσεων.

#### 4.3.1.2 Καταστατικό προσομοίωμα Drucker-Prager

Το καταστατικό προσομοίωμα Drucker-Prager αποτελεί μία τροποποιημένη έκφραση του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb. Γραφικά, το κριτήριο είναι κωνικό στο χώρο των κυρίων τάσεων, ενώ η

τομή του στο επίπεδο της μέσης τάσης είναι κυκλική (Σχήματα 4.7 και 4.8). Το κριτήριο Drucker-Prager εκφράζεται αριθμητικά στην εξίσωση 4.5 (ABAQUS Documentation, 2009).

$$q = p \tan \beta + d \quad (4.5)$$

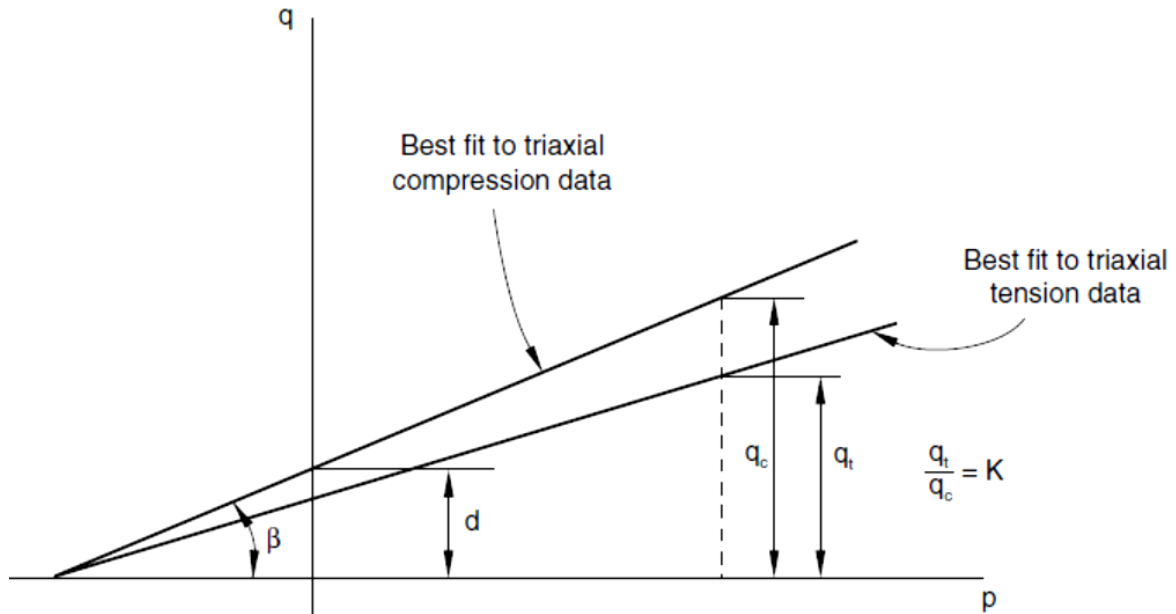
όπου,

d: παράμετρος «συνοχής»

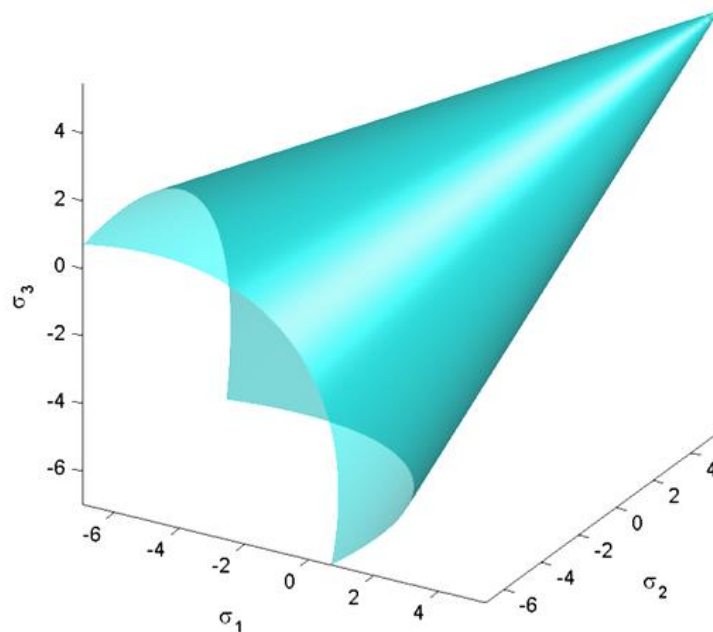
$\beta$ : παράμετρος «γωνίας τριβής»

p: μέση τάση

q: διεκτροπική τάση



Σχήμα 4.7: Γραφική απεικόνιση κριτηρίου αστοχίας Drucker-Prager για επίπεδη ένταση.



Σχήμα 4.8: Γραφική απεικόνιση κριτηρίου αστοχίας Drucker-Prager στο χώρο των κυρίων τάσεων.

#### 4.3.1.3 Σύνδεση κριτηρίων αστοχίας Mohr-Coulomb & Drucker-Prager

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα του κριτηρίου αστοχίας Drucker-Prager είναι η δυνατότητα σύνδεσής του με το κριτήριο Mohr-Coulomb. Για συνθήκες τριαξονικής φόρτισης όπου ο κύκλος του κριτηρίου Drucker-Prager είναι περιγεγραμμένος στις μεγάλες πλευρές της πυραμίδας του κριτηρίου Mohr-Coulomb, τότε οι παράμετροι των εξισώσεών τους συνδέονται από τις εξής σχέσεις:

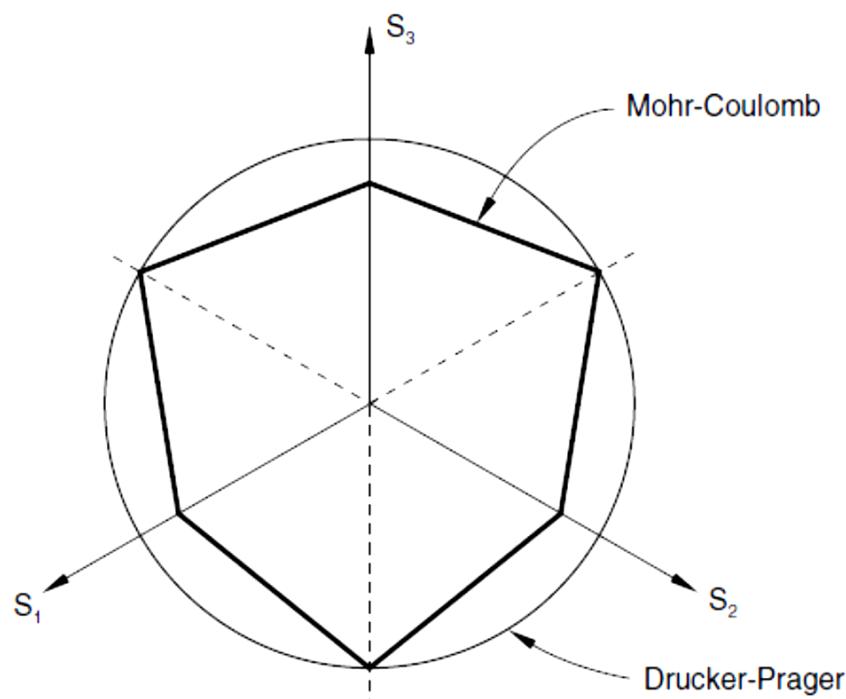
$$\tan \beta = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (4.6)$$

$$d = \frac{6c \cos \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (4.7)$$

Για παράδειγμα, σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο με μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής σύμφωνα με την εξίσωση  $c_u = 10 + 0.25\gamma'z$ , σε βάθος  $z = 2\text{m}$  ισχύει ότι  $c_u = 15\text{kPa}$  και  $\varphi = 0$ . Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, εφαρμόζοντας την εξίσωση 4.3 δίνει μέγιστη διατμητική τάση  $\tau = c_u = 15\text{kPa}$ . Η αστοχία απεικονίζεται από μία ευθεία γραμμή παράλληλη στον άξονα των ορθών τάσεων ( $\tau = \tau_{\max}$ ). Οι παράμετροι  $c_u = 15\text{kPa}$  και  $\varphi = 0$  χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις 4.6 και 4.7 για την έκφραση του κριτηρίου αστοχίας Drucker-Prager ως εξής:

$$\tan \beta = \frac{6 \sin 0}{3 - \sin 0} = 0 \quad (4.8)$$

$$d = \frac{6 * 15 \cos 0}{3 - \sin 0} = \frac{90}{3} = 30 \quad (4.9)$$



**Σχήμα 4.9:** Σύνδεση κριτηρίων αστοχίας Mohr-Coulomb & Drucker-Prager.

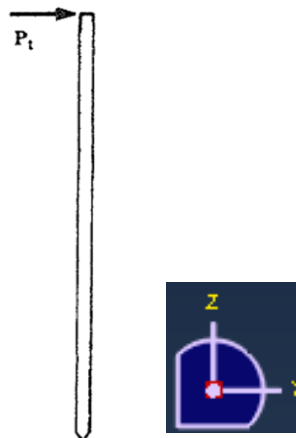
### 4.3.2 Ιδιότητες πασσάλου

Η προσομοίωση του πασσάλου πραγματοποιήθηκε με το σχεδιασμό κυλινδρικού όγκου διατομής διαμέτρου  $D=1\text{m}$  και μήκους  $L=20\text{m}$ . Η μελέτη αφορά πάσσαλο από οπλισμένο σκυρόδεμα (φρεατοπάσσαλος) με μέτρο ελαστικότητας  $E=25\text{ GPa}$ . Επίσης, το ειδικό βάρος του ισούται με  $\gamma_b=25\text{kN/m}^3$  και ο δείκτης Poisson με  $\nu=0.20$ .

### 4.4 Βήματα παραμετρικών αναλύσεων

Σε όλες τις περιπτώσεις των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν εφαρμόστηκε κοινό καθεστώς φόρτισης του πασσάλου. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε εγκάρσιο, συγκεντρωμένο φορτίο,  $H$ , κατά τη θετική φορά του άξονα 1, ο οποίος αντιστοιχεί στον άξονα  $x$  του προσομοιώματος ( Σχήμα 4.10) ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

1. Στο πρώτο βήμα μέσω του αρχείου εισαγωγής δεδομένων του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus ορίστηκε η εφαρμογή των γεωστατικών τάσεων με τιμές μεταξύ των  $\sigma_v=1\text{kPa}$  για  $z=0\text{m}$  για λόγους αριθμητικής συμβατότητας και  $\sigma_v=500\text{kPa}$  για  $z=25\text{m}$ . Τα παραπάνω ορίζονται στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων μέσω του ολικού ειδικού βάρους  $\gamma=20\text{kN/m}^3$ , το οποίο προσδιορίζει τον υπολογισμό των ολικών τάσεων του προσομοιώματος.
2. Έπειτα, στο δεύτερο βήμα, δίνεται εντολή στο αρχείο εισαγωγής ώστε να αφαιρεθούν τα πεπερασμένα στοιχεία του εδάφους που συνθέτουν το σχήμα του πασσάλου και έχουν οριστεί στη θέση του και στη συνέχεια δίνεται εντολή να προστεθούν τα αντίστοιχα πεπερασμένα που συνθέτουν τον όγκο του πασσάλου. Τα στοιχεία που σχηματίζουν τον πάσσαλο έχουν οριστεί δύο φορές στον κώδικα, μία φορά με τα χαρακτηριστικά του εδάφους και άλλη μία με τις ιδιότητες του πασσάλου. Το αρχικό προσομοίωμα αποτελείται μόνο από στοιχεία εδάφους και με την εντολή του συγκεκριμένου βήματος πραγματοποιείται αντικατάσταση κυλινδρικού τμήματος με τις ιδιότητες του πασσάλου.
3. Τέλος, στο τρίτο βήμα εφαρμόζεται η εγκάρσια φόρτιση,  $H$ , στην κεφαλή του πασσάλου, η οποία παραμένει σταθερή (στατική φόρτιση). Η επιβολή της προκαλεί πρόσθετες οριζόντιες τάσεις λόγω της εδαφικής αντίδρασης που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου, οι οποίες προστίθενται στις ήδη υπάρχουσες γεωστατικές τάσεις. Η μέγιστη εγκάρσια φόρτιση για την εκτέλεση των παραμετρικών αναλύσεων της παρούσας εργασίας θεωρήθηκε ίση με  $H=3000\text{ kN}$ . Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε αυτού του μεγέθους το επιβαλλόμενο συγκεντρωμένο φορτίο είναι η πρόθεση να οδηγηθεί το περιβάλλον έδαφος στην. Όπως αναφέρεται και παρακάτω ο κώδικας επιβάλει σταδιακά αυξανόμενο συγκεντρωμένο εγκάρσιο φορτίο στην κεφαλή του πασσάλου μέχρι την ανάπτυξη της οριακής εδαφικής αντίδρασης.



Σχήμα 4.10: Συγκεντρωμένη, εγκάρσια φόρτιση στην κεφαλή του πασσάλου κατά τον άξονα  $x$  (άξονας 1).

## 4.5 Διερεύνηση της προσομοίωσης του συστήματος πασσάλου-εδάφους

Οι διερευνήσεις του συστήματος πασσάλου-εδάφους που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκαν ώστε να αποφασιστούν τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης τα οποία θα οριστούν στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν τα στοιχεία του πασσάλου, του περιβάλλοντος εδάφους και της μεταξύ τους διεπιφάνειας. Στο τελικό τμήμα της υποενότητας ορίζονται οι εξωτερικές διαστάσεις του προσομοιώματος που χρησιμοποιείται στις παραμετρικές αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

### 4.5.1 Διερεύνηση της προσομοίωσης του πασσάλου

Πριν την επιλογή του τελικού προσομοιώματος που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση των αναλύσεων στον κώδικα Abaqus 6.10, θεωρήθηκε σκόπιμη η διερεύνηση της προσομοίωσης του πασσάλου με τον πλέον κατάλληλο τρόπο. Η διερεύνηση περιελάμβανε την πραγματοποίηση δοκιμαστικών αναλύσεων σε ένα από τα τρία προσομοιώματα (Προσομοίωμα Α) αρχικά με τη μέθοδο των στερεών στοιχείων, δηλαδή τη μοντελοποίηση του πασσάλου με τριδιάστατα στερεά στοιχεία (C3D8R), και στη συνέχεια με τριδιάστατα στοιχεία δοκού (B31). Από τη σύγκριση των δύο παραπάνω προσομοιώσεων προέκυψε το αποτέλεσμα της διερεύνησης, σύμφωνα με το οποίο επιλέχθηκε η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, με κριτήριο την ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων και την ταχύτητα της εκάστοτε ανάλυσης.

#### 4.5.1.1 Προσομοίωση του πασσάλου με τριδιάστατα στερεά στοιχεία

Το σώμα του πασσάλου διακριτοποιήθηκε σε πεπερασμένα στοιχεία μέσω της διαδικασίας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 4.2.2. Για τον υπολογισμό της εδαφικής αντίδρασης σε διάφορα βάθη μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus εξήχθησαν και αθροίστηκαν οι επικόμβιες οριζόντιες συνιστώσες των ορθών και διατμητικών δυνάμεων για την εκάστοτε διατομή του πασσάλου (24 κόμβοι). Υπολογίζοντας τη συνολική εγκάρσια εδαφική αντίδραση σε κάθε διακριτοποιημένη διατομή του πασσάλου (πάσσαλος μήκους  $L=20\text{m}$ , αποτελούμενος από 41 διατομές ανά  $0.5\text{m}$ ) επιτεύχθηκε η χάραξη της καμπύλης εδαφικής αντίδρασης  $p(\text{kN/m})$ -βάθους  $z(\text{m})$  για συγκεκριμένο βήμα της εγκάρσιας φόρτισης, δηλαδή για ποσοστό της συνολικής εγκάρσιας δύναμης στην κεφαλή του πασσάλου που έχει οριστεί στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων του κώδικα.

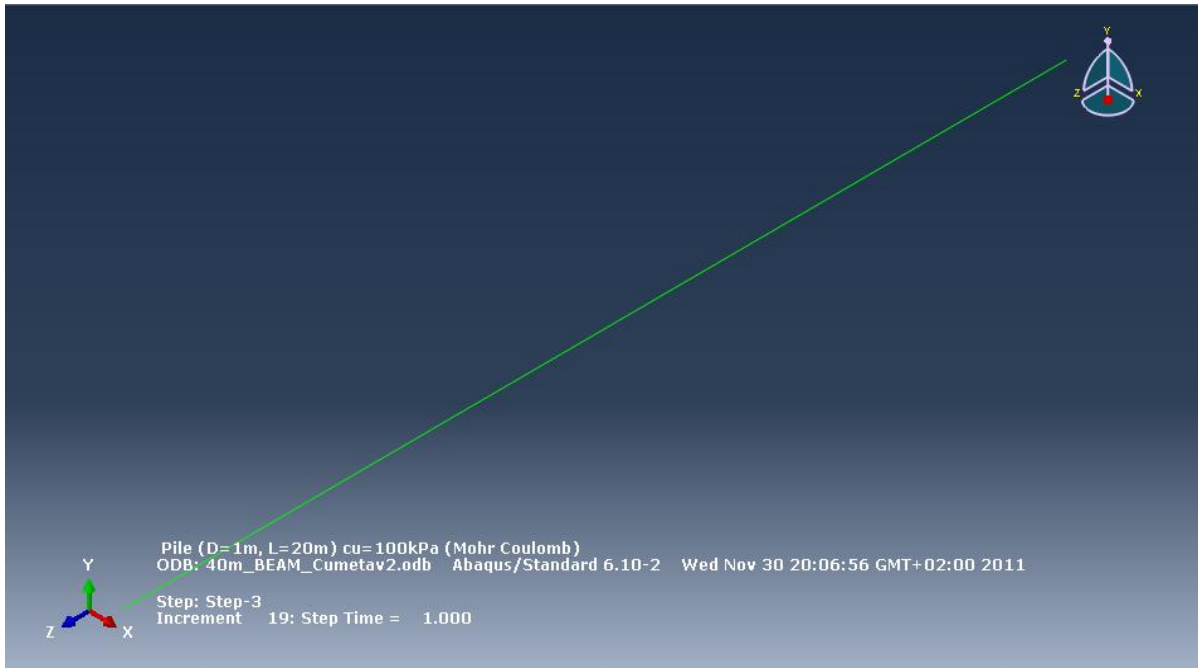
#### 4.5.1.2 Προσομοίωση του πασσάλου με στοιχεία δοκού

Η προσομοίωση με στοιχεία δοκού πραγματοποιήθηκε με τον ορισμό στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων 40 νέων στοιχείων, τύπου B31, κυλινδρικής διατομής, μήκους  $L_i=0.5\text{m}$  και ακτίνας ίσης με την ακτίνα του πασσάλου  $R=0.5\text{m}$ . Το κάθε στοιχείο οριοθετείται από δύο κεντρικούς κόμβους επί του άξονα του πασσάλου ( $x=0$ ,  $y=0$ ) και ένα σημείο ολοκλήρωσης στο μέσον του ύψους του στοιχείου. Στη συνέχεια, για κάθε διατομή του πασσάλου πραγματοποιήθηκε σύνδεση των κόμβων του κυκλικού δίσκου της διατομής με τον κεντρικό κόμβο με άκαμπτα στοιχεία δοκού. Τέλος, στα στοιχεία του πασσάλου ορίστηκαν ιδιότητες σκυροδέματος με μέτρο ελαστικότητας  $E=25\text{GPa}$ , ειδικό βάρος  $\gamma_b=25\text{kN/m}^3$  και δείκτης Poisson  $\nu=0.2$ .

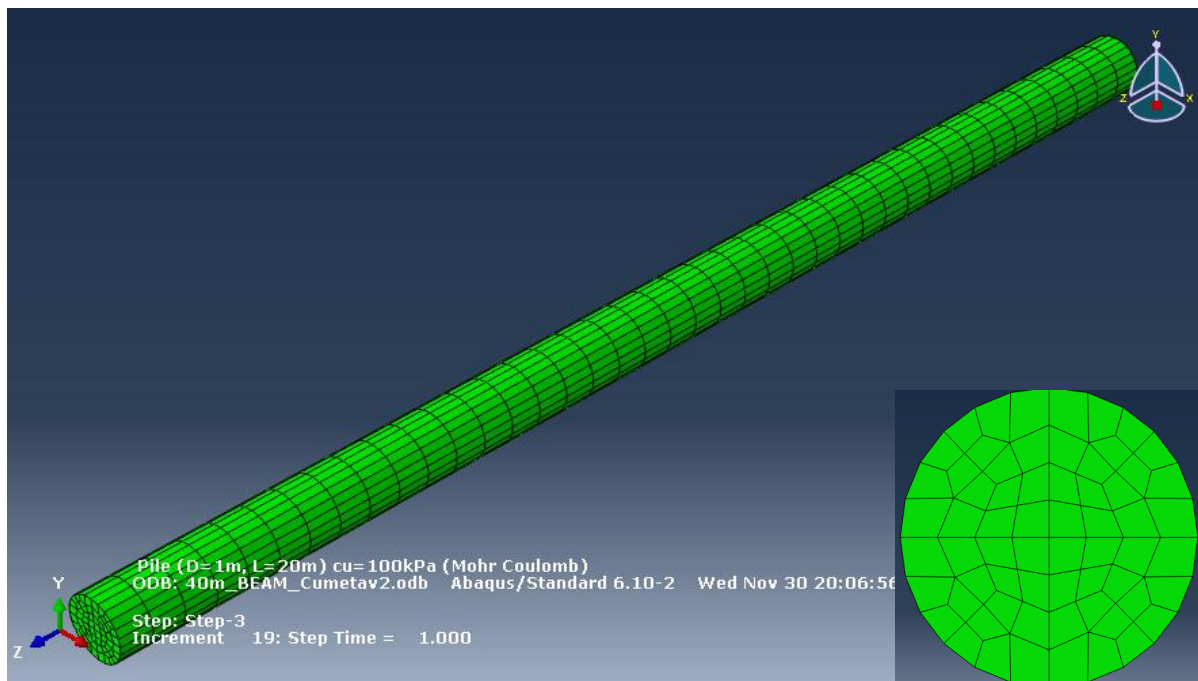
Η διαδικασία λήψης αποτελεσμάτων μέσω της συγκεκριμένης προσομοίωσης περιλαμβάνει τον υπολογισμό της τέμνουσας δύναμης που αναπτύσσεται κατά τον άξονα  $x$  σε κάθε στοιχείο δοκού του πασσάλου. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις αναλυτικές σχέσεις της θεωρίας δοκού η εδαφική αντίδραση προκύπτει από παραγωγή της συνάρτησης τέμνουσας δύναμης κατά μήκος του πασσάλου. Συνεπώς, αφού εξήχθησαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα τέμνουσών δυνάμεων μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για τα σημεία ολοκλήρωσης κάθε στοιχείου δοκού που συνθέτει τον πάσσαλο, διαιρέθηκαν με τη μεταξύ τους απόσταση – πρακτικά με το μήκος του στοιχείου ( $L_i=0.5\text{m}$ ) – ώστε να υπολογιστεί η εδαφική αντίδραση  $p(\text{kN/m})$ . Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία προέκυψε το διάγραμμα  $p(\text{kN/m})$ - $z(\text{m})$  για συγκεκριμένο ποσοστό της

Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Παραμετρική διερεύνηση της εγκάρσιας φόρτισης πασσάλου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

εγκάρσιας συγκεντρωμένης δύναμης στην κεφαλή του πασσάλου. Σημειώνεται ότι για τη χάραξη των καμπύλων  $p-y$ , η τιμή της εδαφικής αντίδρασης  $p$  (kN/m) υπολογίστηκε στα βάθη των κόμβων των στοιχείων δοκού του πασσάλου. Η συγκεκριμένη τιμή προέκυπτε από παραγωγή της τέμνουσας δύναμης κατά τη διεύθυνση του άξονα  $x$ , η οποία υπολογιζόταν στα σημεία ολοκλήρωσης εκατέρωθεν των κόμβων που προαναφέρθηκαν. Για τους ίδιους κόμβους εξήχθησαν τα αποτελέσματα οριζόντιας μετατόπισης από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.



**Σχήμα 4.11:** Προσομοίωση του πασσάλου με στοιχεία δοκού.



**Σχήμα 4.12:** Προσομοίωση του πασσάλου με τριδιάστατα εξαεδρικά οκτακομβικά στοιχεία.

#### 4.5.1.3 Σύγκριση μεθόδων προσομοίωσης του πασσάλου με στερεά στοιχεία και στοιχεία δοκού

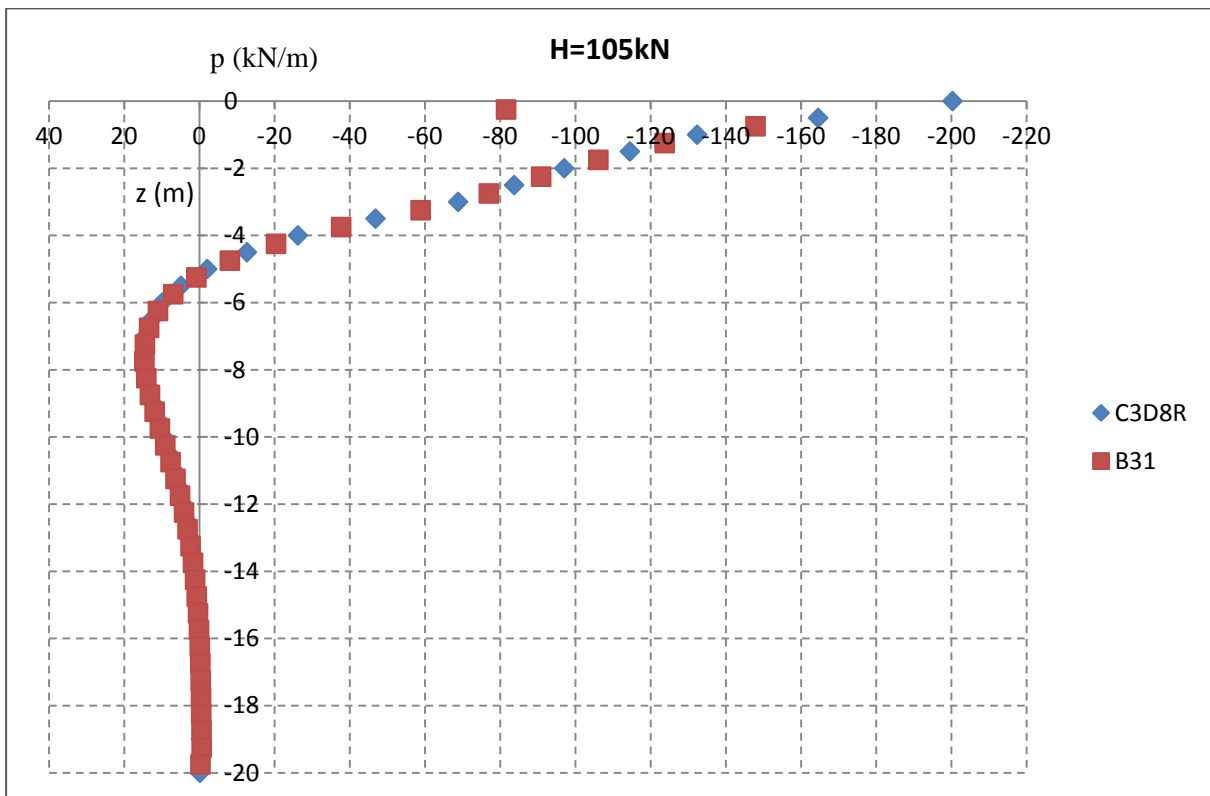
Η σύγκριση των δύο διαφορετικών προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε σε τρία διαφορετικά βήματα εγκάρσιας φόρτισης του πασσάλου της ανάλυσης για το Προσομοίωμα Α ( $x=40\text{m}$ ) μέσω διαγραμμάτων εδαφικής αντίδρασης  $p(\text{kN/m})$  καθ' ύψος του πασσάλου  $z(\text{m})$ , όπως παρατίθενται παρακάτω. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για προσομοίωση εδάφους με μεταβαλλόμενη αστράγγιστη διατμητική αντοχή κατανομής  $c_u=10+0.25\gamma'z$  και μέτρου ελαστικότητας  $E_u=300c_u$ . Επιπλέον, οι απαιτούμενες για τη σύγκριση αναλύσεις ολοκληρώθηκαν με τη χρήση του καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb.

#### 4.5.1.4 Συμπεράσματα

Από τα διαγράμματα (Σχήματα 4.13, 4.14 και 4.15) προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των αναλύσεων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για τα τρία βήματα των δύο διαφορετικών μεθοδολογιών προσομοίωσης πασσάλου συμπίπτουν σε κοινό διάγραμμα με ελάχιστες αποκλίσεις. Οι όποιες αποκλίσεις παρατηρούνται στην επιφάνεια του εδάφους ( $z=0\text{m}$ ) οφείλονται στη λήψη των δεδομένων με τέτοιο τρόπο ώστε να μην μπορεί να οριστεί επακριβώς η συμπεριφορά του πρώτου και του τελευταίου στοιχείου του προσομοιώματος του πασσάλου με την προσομοίωση στοιχείων δοκού.

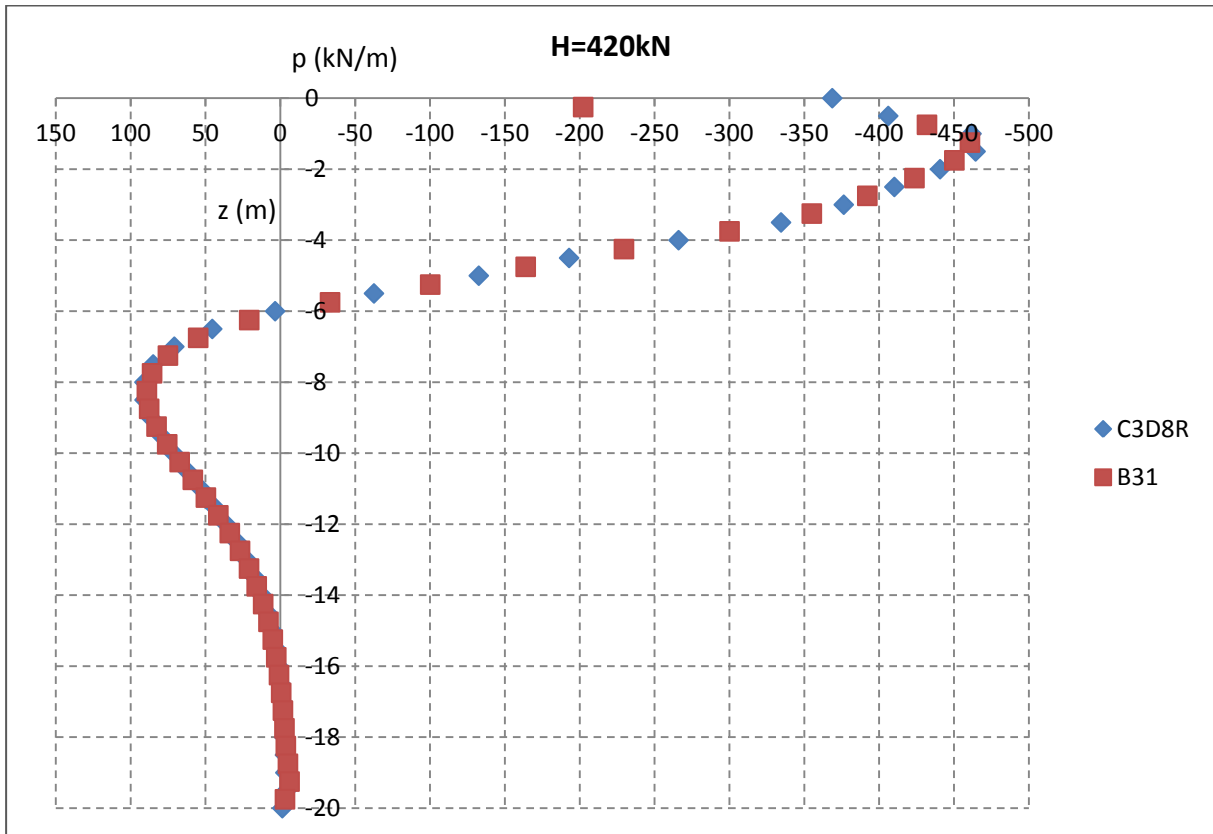
Λόγω της ομοιότητας των παραπάνω διαγραμμάτων το κριτήριο επιλογής της μεθόδου που χρησιμοποιείται στις ακόλουθες αναλύσεις αποτελεί η ταχύτητα της ανάλυσης και της δημιουργίας των αρχείων εισαγωγής δεδομένων. Συνεπώς, σύμφωνα με τα παραπάνω, εύλογη καθίσταται η προσομοίωση του πασσάλου με στοιχεία δοκού (B31) για τις αναλύσεις που πρόκειται να πραγματοποιηθούν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

*Σημείωση:* Σημειώνεται ότι η σύγκριση των δύο μεθόδων έγινε σε στάδια (βήματα) της ανάλυσης με κριτήριο τη μετατόπιση της κεφαλής του πασσάλου. Επιπλέον ελέγχθηκε ότι στα ίδια βήματα για το ίδιο ποσοστό του φορτίου, η μετατόπιση κεφαλής ήταν κοινή για τις δύο μεθόδους.

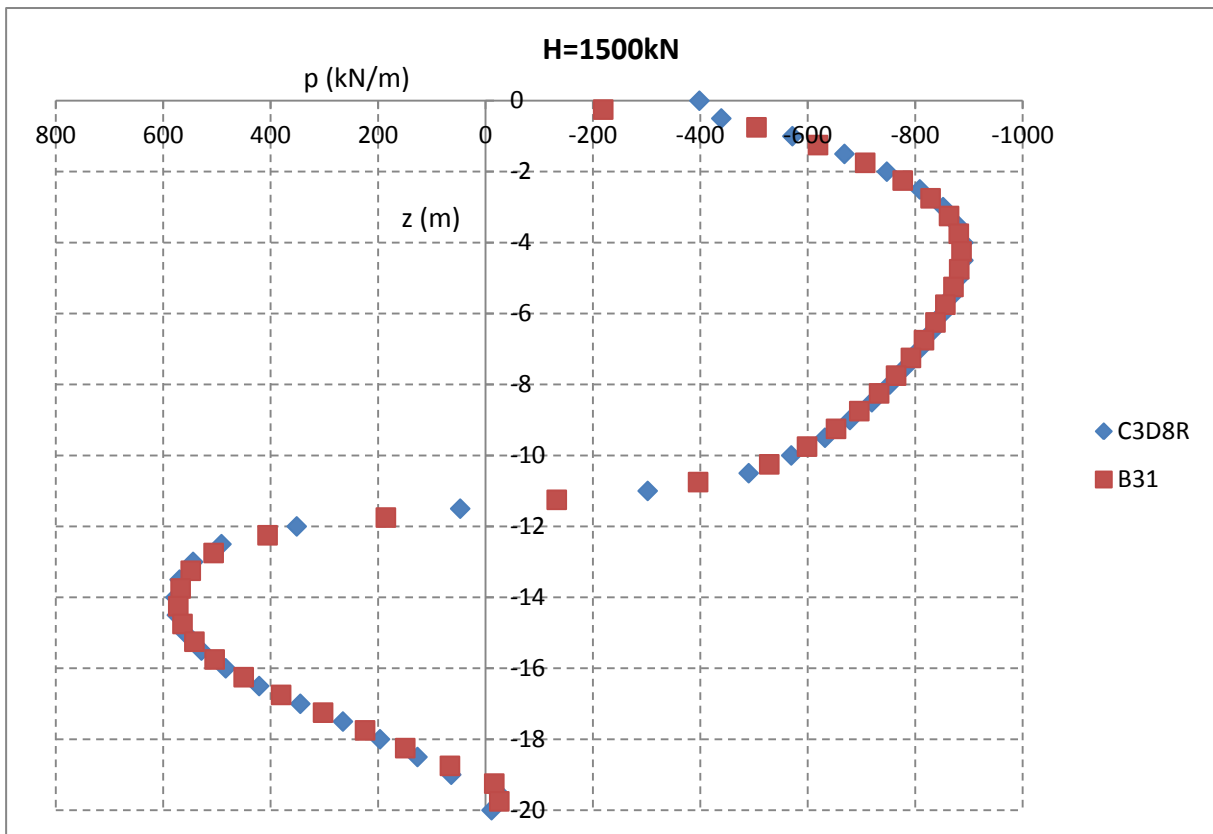


Σχήμα 4.13: Διαγράμματα  $p-z$  με τις δύο μεθόδους για εγκάρσια φόρτιση  $H=105\text{kN}$ .





Σχήμα 4.14: Διαγράμματα  $p$ - $z$  με τις δύο μεθόδους για εγκάρσια φόρτιση  $H=420\text{kN}$ .



Σχήμα 4.15: Διαγράμματα  $p$ - $z$  με τις δύο μεθόδους για εγκάρσια φόρτιση  $H=1500\text{kN}$ .

## 4.5.2 Διερεύνηση διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους

### 4.5.2.1 Γενικά

Στο τελικό προσομοίωμα ορίστηκε ο νόμος τριβής και αποκόλλησης της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους, αποσκοπώντας στον προσδιορισμό της αντίστασης πλευρικής τριβής και των συνθηκών μετάδοσης ορθών τάσεων αντίστοιχα κατά μήκος της παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου. Ακολουθεί περιγραφή της διαδικασίας για την επιλογή των κατάλληλων εξισώσεων σύμφωνα με τις οποίες υπολογίζεται η πλευρική τριβή που αναπτύσσεται στον πάσσαλο και το καθεστώς αποκόλλησης του πασσάλου από το περιβάλλον έδαφος κατά την επιβολή εγκάρσιας φόρτισης. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα δεδομένα του αρχείου εισαγωγής του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, όπως αυτά θεωρήθηκε ότι προσομοιώνουν κατάλληλα τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους.

### 4.5.2.2 Παραδοχές

Η μελέτη της συμπεριφοράς του προσομοιώματος πασσάλου-εδάφους πραγματοποιήθηκε με τη θεώρηση παραδοχών που αφορούν τη διεπιφάνεια και την παραμορφωσιμότητα της διατομής του πασσάλου. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε όμοια μετατόπιση εδάφους και πασσάλου στα σημεία επαφής τους. Επομένως, η μετατόπιση του εδάφους που βρίσκεται σε επαφή με τον πάσσαλο ισούται με εκείνη της παρειάς του πασσάλου. Η θεώρηση αυτή αφορά την πλευρά του πασσάλου που προκαλεί θλίψη του εδάφους λόγω της εγκάρσιας φόρτισης του πασσάλου και άρα ανάπτυξη εδαφικών αντιδράσεων. Στην πλευρά, βέβαια, του πασσάλου, που αποκολλάται από το έδαφος δεν εφαρμόζεται η παραπάνω παραδοχή, καθώς το έδαφος αδυνατεί να παραλάβει εφελκυσμό.

Μία ακόμα παραδοχή της εργασίας αφορά τη διατομή του πασσάλου. Θεωρήθηκε κοινή μετατόπιση για όλα τα σημεία μίας διατομής, το οποίο συνεπάγεται πρακτικά απαραμόρφωτο πάσσαλο στη διατομή του. Η βάση της παραπάνω παραδοχής έγκειται αφενός στο γεγονός ότι οι παραμορφώσεις της διατομής είναι ελάχιστες σε σχέση με τις αντίστοιχες του εδάφους και επιπλέον με αυτόν τον τρόπο δίνουμε έμφαση στη μελέτη της αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους, που αποτελεί και στόχο της παρούσας εργασίας.

### 4.5.2.3 Νόμος τριβής διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους

Ο υπολογισμός της οριακής αντίδρασης πλευρικής τριβής πραγματοποιείται με την εισαγωγή συγκεκριμένου τρόπου προσομοίωσης της τριβής στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους. Το προσομοίωμα σε άξονες ορθής-διατμητικής τάσης (p-τ) αποτελείται από δύο κλάδους όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.18. Ο αρχικός κλάδος προσδιορίζεται από την εξίσωση 4.10:

$$\tau = \mu \sigma_h \quad (4.10)$$

Ο δεύτερος κλάδος του διαγράμματος p-τ που ουσιαστικά προσδιορίζει τη μέγιστη διατμητική τάση η οποία αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους προκύπτει από τις εξισώσεις 4.9 και 4.10.

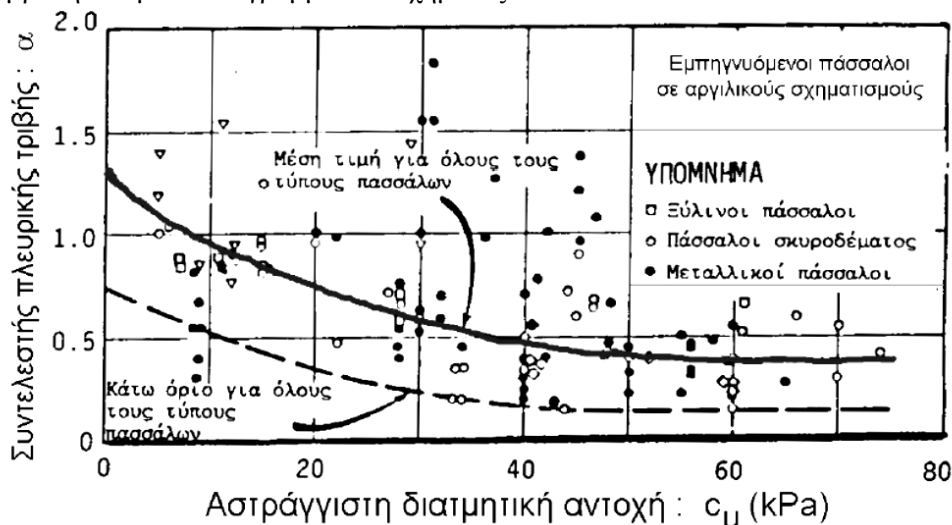
$$\tau_{\max} = a * c_u \quad (4.11)$$

όπου  $a$  συντελεστής ο οποίος μπορεί προσδιορίζεται από το διάγραμμα κατά Weltman & Healy (1978), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16, σύμφωνα με την εκάστοτε τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής,  $c_u$ .

Στην περίπτωση εδάφους με συμπεριφορά κανονικά στερεοποιημένης αργίλου, όπου η τιμή του  $c_u$  αυξάνεται με το βάθος ( $z$ ) υπό συγκεκριμένο νόμο, αντιστοιχούν τιμές του συντελεστή  $a$  από το Σχήμα 4.16 για κάθε  $c_u(z)$ . Σημειώνεται ότι οι τιμές του συντελεστή  $a$  από το συγκεκριμένο διάγραμμα αναφέρονται σε εμπηγνόμενους πασσάλους. Οι τιμές του συντελεστή για τη μελέτη έγχυτων πασσάλων είναι μειωμένες κατά 20% από τις αντίστοιχες του διαγράμματος. Επομένως, η εξίσωση γίνεται:

$$\tau_{\max} = (0.8)ac_u \quad (4.12)$$

Επίσης, προσδιορίστηκε ο νόμος ολίσθησης διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια (Slip-τ). Η τιμή της μετατόπισης, η οποία σηματοδοτεί τη μετάβαση από τον κλάδο στατικής τριβής στον κλάδο τριβής ολισθήσεως ορίζεται ως ελαστική ολίσθηση (Elastic Slip) στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων. Για τον προσδιορισμό της «ελαστικής ολίσθησης» πραγματοποιήθηκε αριθμητική διερεύνηση όπως φαίνεται στην ενότητα 4.5.2.3. Μέσω του προσδιορισμού της τιμής της οριακής αντίστασης τριβής και της παραπάνω τιμής της «ελαστικής ολίσθησης», ορίστηκε η κλίση της ελαστικής γραμμής του διαγράμματος τριβής-ολίσθησης άρα και η δυσκαμψία της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους. Ο συντελεστής τριβής,  $\mu$ , πολλαπλασιαζόμενος με την οριζόντια ολική τάση,  $\sigma_h$ , δίνει τη ζητούμενη τιμή της τριβής και είναι συνάρτηση της γωνία τριβής του εδάφους. Συγκεκριμένα,  $\mu = \tan \delta$ , όπου  $\delta = (2/3)\phi$ . Επειδή, όμως, η διερεύνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά την εγκάρσια φόρτιση πασσάλου σε συνεκτικά εδάφη υπό αστράγγιστες συνθήκες ( $\phi_u = 0$ ), θεωρήθηκε μηδενική συμβολή του  $\mu$  στο διάγραμμα του Σχήματος 4.18.



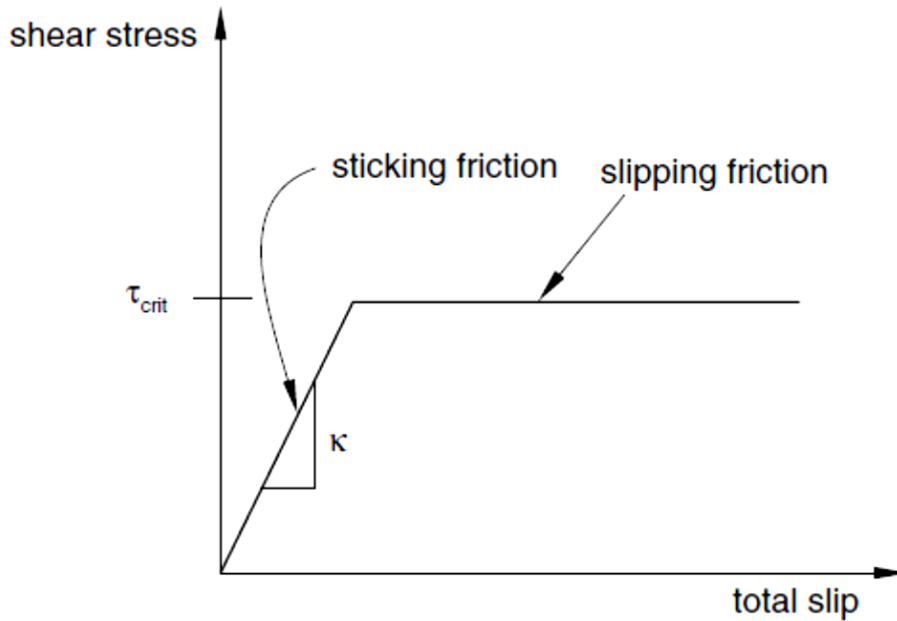
**Σχήμα 4.16:** Προσδιορισμός του συντελεστή  $\alpha$  μέσω της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $c_u$ ) κατά Weltman & Healy (1978).

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους, ως προς την πλευρική τριβή που αναπτύσσεται προκύπτει από το διάγραμμα του Σχήματος 4.18 ως το ελάχιστο των υπολογισμένων από τις εξισώσεις 4.10 και 4.12 διατμητικών τάσεων:

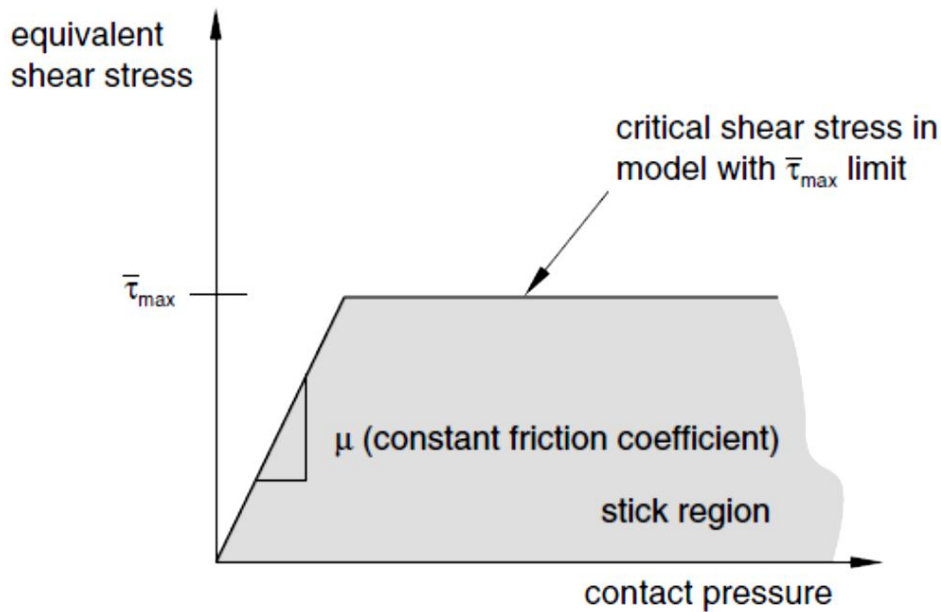
$$\tau = \min(\mu * \sigma_h, \tau_{\max}) \quad (4.13)$$

Η μελέτη της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας πασσάλου με κανονικά στερεοποιημένη άργιλο απαιτεί την εύρεση σε κάθε βάθος ξεχωριστά, όχι μόνο της τιμής της εξίσωσης  $\tau = \mu * p$ , αλλά και της τιμής της εξίσωσης  $\tau = \alpha * c_u$ , λόγω της μεταβολής με το βάθος της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Συνεπώς, για κάθε βάθος με διαφορετική αστράγγιστη διατμητική αντοχή έλεγχος του Σχήματος 4.18.

Προκειμένου να υιοθετηθεί ο νόμος τριβής  $\tau = \alpha * c_u$  σε ολόκληρη τη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους, χρησιμοποιήθηκε το ακόλουθο αριθμητικό τέχνασμα. Για να εξασφαλιστεί ότι η τιμή της παραπάνω εξίσωσης είναι η ελάχιστη, ορίστηκε στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων συντελεστής τριβής,  $\mu = 100$ . Η τιμή αυτή του συντελεστή διεπιφάνειας δημιουργεί πολλή μεγάλη κλίση του πρώτου κλάδου του διαγράμματος  $p$ - $\tau$  (Σχήμα 4.18), με αποτέλεσμα ακόμα και για πολύ μικρές τιμές ορθής πίεσης ( $p$ ) να ενεργοποιείται ο μηχανισμός τριβής  $\tau = \alpha * c_u$ . Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίστηκε ότι ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων «χρησιμοποίησε» ποσοστό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $c_u$ ) για τον προσδιορισμό της αντίστασης πλευρικής τριβής.



**Σχήμα 4.17:**Ελαστοπλαστικό διάγραμμα ολίσθησης (m)- τριβής,  $\tau$ (kPa) της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους.



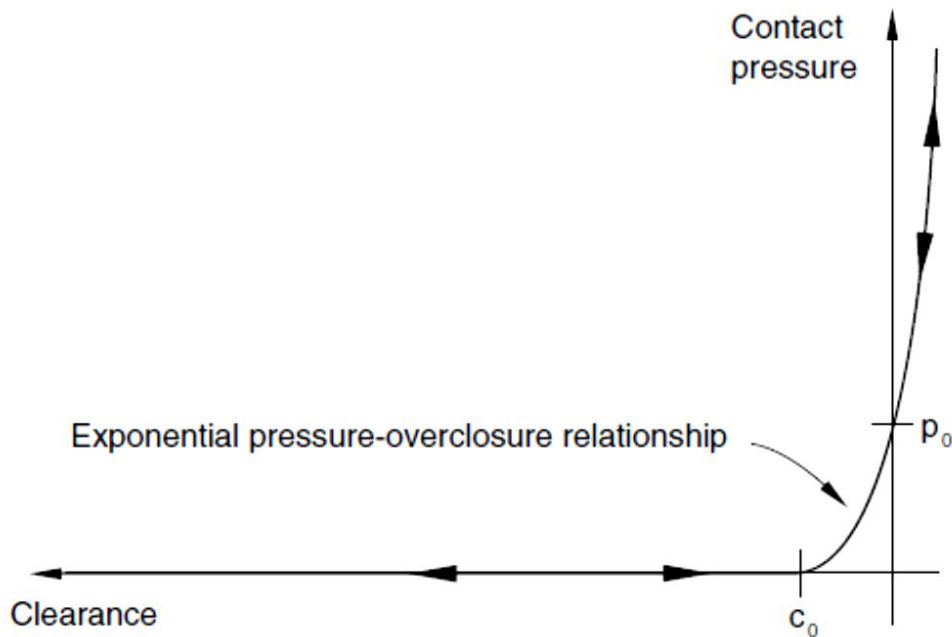
**Σχήμα 4.18:** Περιοχή των τιμών τριβής της εξίσωσης 4.10 με ανώτερο όριο την τιμή της εξίσωσης 4.12.

#### 4.5.2.4 Νόμος αποκόλλησης διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους

Στα δεδομένα του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων καθορίζεται μία αρχική απόσταση  $c_0$  στην οποία θεωρείται ότι η επιφάνεια του πασσάλου έρχεται σε επαφή με αυτή του εδάφους. Συνεπώς, η λειτουργία της διεπιφάνειας αρχίζει όταν η μεταξύ τους απόσταση φτάσει την τιμή  $h=c_0$ . Με τη περαιτέρω μείωση της τιμής αυτής αυξάνεται η τάση που μεταδίδεται μέσω της διεπιφάνειας. Η πίεση παίρνει την τιμή  $p_0$  όταν η απόσταση των δύο επιφανειών μηδενιστεί  $h=0$  (Σχήμα 4.19). Στην παρούσα διπλωματική εργασία ορίστηκε τάση  $p_0=2\text{kPa}$  και απόσταση  $c_0=10^{-6}\text{m}$ .

Στο Σχήμα 4.19 παρουσιάζεται η σχέση σύμφωνα με την οποία ο κώδικας των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζει την τάση στη διεπιφάνεια για συγκεκριμένες τιμές της απόστασης των επιφανειών πασσάλου-εδάφους. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στην τάση που αναπτύσσεται στη

διεπιφάνεια, ενώ ο οριζόντιος στην αποκόλληση για τιμές μεγαλύτερες του  $c_0$  και στην υπερκάλυψη για τιμές μικρότερες του  $c_0$ . Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη σχέση πίεσης-αποκόλλησης είναι η αποφυγή της αριθμητικής αστάθειας που προκύπτει στις αναλύσεις για νόμο πίεσης-αποκόλλησης που μηδενίζει την πίεση επαφής ακριβώς τη στιγμή της αποκόλλησης.



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα υπερκάλυψης-πίεσης της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους.

#### 4.5.2.5 Αριθμητική διερεύνηση «ελαστικής ολίσθησης»

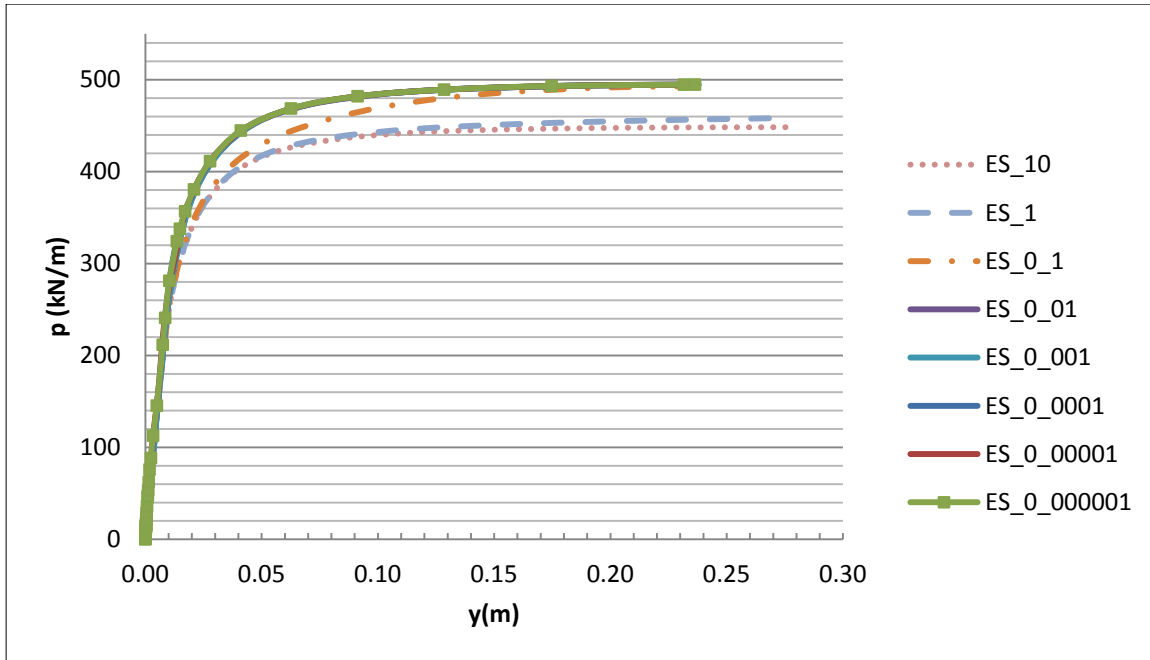
Στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων ορίστηκε τύπος διεπιφάνειας σύμφωνα με τον οποίο οι περιορισμοί της διεπιφάνειας αναφέρονται σε μία πεπερασμένη περιοχή. Επιπλέον, ορίστηκε ιδιότητα μικρής ολίσθησης (Small Sliding), ώστε να επιτρέπεται μικρή σχετική ολίσθηση και δυνατότητα στροφής μεταξύ των σωμάτων (πάσσαλος- έδαφος) που έρχονται σε επαφή.

Στη συνέχεια, η επιλογή της οριακής τιμής της «ελαστικής ολίσθησης» (Elastic Slip), προέκυψε από σύγκριση των αποτελεσμάτων αναλύσεων με τιμές διαφορετικής τάξης μεγέθους της συγκεκριμένης παραμέτρου (Σχήμα 4.20). Σημειώνεται ότι η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με χρήση του ελαστικού-απολύτως πλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb για άργιλο με σταθερή αστράγγιστη διατμητική αντοχή με το βάθος  $c_u=100\text{kPa}$ .

Οι τιμές της παραμέτρου «ελαστικής ολίσθησης» (Elastic Slip) που χρησιμοποιήθηκαν για την παραπάνω διαδικασία είναι οι εξής:

ES_10:	Elastic Slip= 10m
ES_1:	Elastic Slip= 1m
ES_0_1:	Elastic Slip= 0.1m
ES_0_01:	Elastic Slip= 0.01m
ES_0_001:	Elastic Slip= 0.001m
ES_0_0001:	Elastic Slip= 0.0001m
ES_0_00001:	Elastic Slip= 0.00001m

Η αύξηση της τιμής της «ελαστικής ολίσθησης» σημαίνει μείωση της κλίσης του διαγράμματος διατμητικής τάσης-ολίσθησης (Σχήμα 4.20), δηλαδή για την ίδια τιμή της μετατόπισης έχουμε μικρότερη τιμή της πλευρικής τριβής.



**Σχήμα 4.20:** Διαγράμματα καμπύλων p-y με χρήση διαφορετικών τιμών Elastic Slip σε βάθος z=1m.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων απεικονίζονται στο Σχήμα 4.20 με τη μορφή διαγραμμάτων εδαφικής αντίδρασης p(kN/m)-μετατόπισης y(m). Το ζητούμενο είναι να εξεταστεί η επιρροή της «ελαστικής ολίσθησης» στη μορφή των καμπύλων, πάνω στις οποίες θα πραγματοποιηθούν οι παραμετρικές αναλύσεις της συγκεκριμένης εργασίας. Εξετάζεται, συνεπώς, η επιρροή του μηχανισμού τριβής της διεπιφάνειας στο μέγεθος της εδαφικής αντίδρασης. Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των καμπύλων από τιμές της «ελαστικής ολίσθησης» κάτω από 0.01 m προκύπτουν ίδιας μορφής καμπύλες p-y. Στην παρούσα εργασία επιλέχτηκε η τιμή ES=0.001m για τις παραμετρικές αναλύσεις που έπονται.

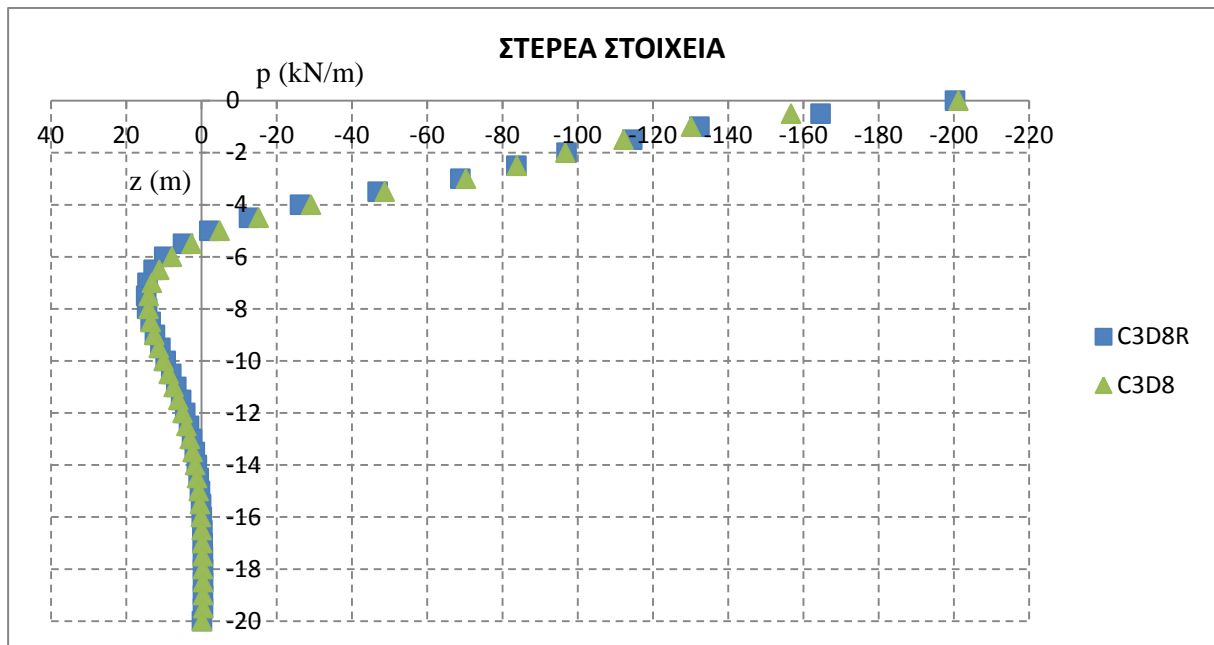
### 4.5.3 Διερεύνηση προσομοίωσης του εδάφους

#### 4.5.3.1 Επιλογή τύπου ανάλυσης

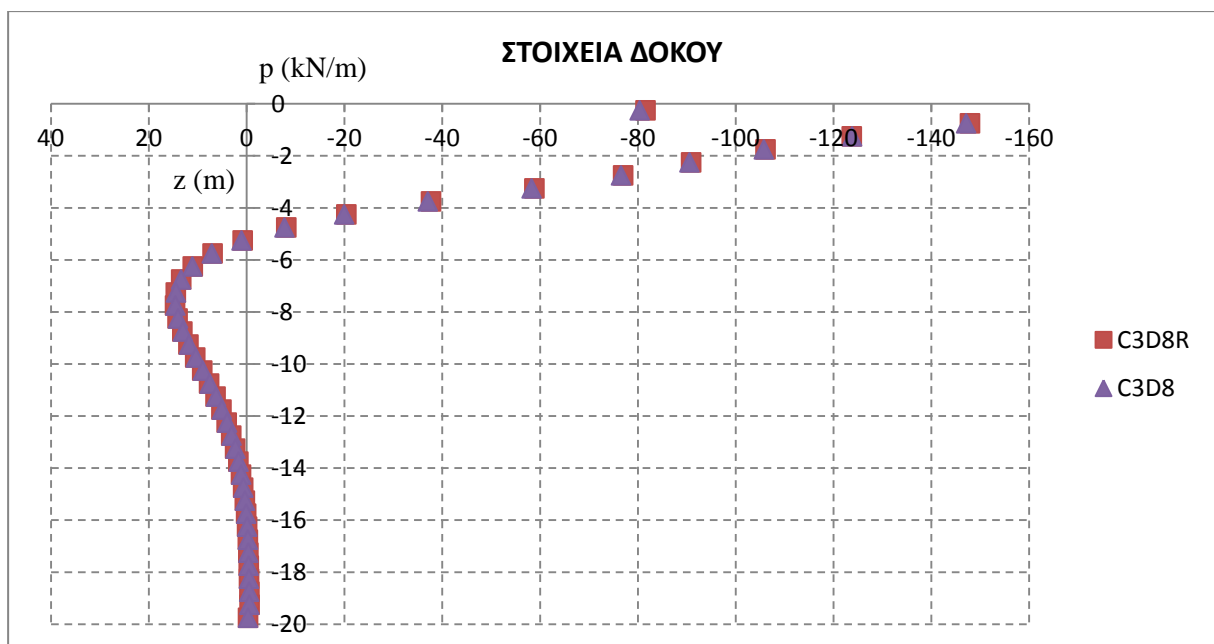
Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε μία ακόμα διερεύνηση, αναφορικά με τον τύπο στερεών, τριδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία C3D8 και C3D8R (μειωμένα σημεία ολοκλήρωσης). Η διαφορά έγκειται στη διαδικασία προσομοίωσης που εκτελεί ο κώδικας, η οποία είναι περισσότερο λεπτομερής για αναλύσεις με στοιχεία C3D8. Συνεπώς, οι αναλύσεις αυτού του τύπου διαρκούν περισσότερο σε σχέση με τις αναλύσεις στοιχείων C3D8R. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από πεπερασμένα στοιχεία με περισσότερα σημεία ολοκλήρωσης είναι πιο ακριβή, γεγονός που μας οδήγησε στην πραγματοποίηση αυτής της διερεύνησης.

Παρακάτω παρατίθενται δύο διαγράμματα μεταβολής της εγκάρσιας εδαφικής αντίδρασης p(kN/m) με το βάθος z(m), τα οποία αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο βήμα της ανάλυσης (H=105kN) όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις με χρήση του καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb. Στο Σχήμα 4.21 φαίνεται το αποτέλεσμα σύγκρισης των δύο τύπων πεπερασμένων στοιχείων για την περίπτωση ανάλυσης με την προσομοίωση του πασσάλου με στερεά στοιχεία, ενώ στο Σχήμα 4.22 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του πασσάλου με στοιχεία δοκού για τους δύο τύπους ανάλυσης.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα, τα αποτελέσματα των δύο τύπων ανάλυσης ταυτίζονται. Συνεπώς, ο τύπος τριδιάστατων στοιχείων που επιλέχτηκε για την προσομοίωση του εδάφους στις επικείμενες αναλύσεις ήταν ο τύπος C3D8R, εφόσον τα αποτελέσματα έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια και μπορούν να ληφθούν με πολύ λιγότερο υπολογιστικό κόστος.



Σχήμα 4.21: Εγκάρσια εδαφική αντίδραση επί πασσάλου προσομοιωμένου με στερεά, τριδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.



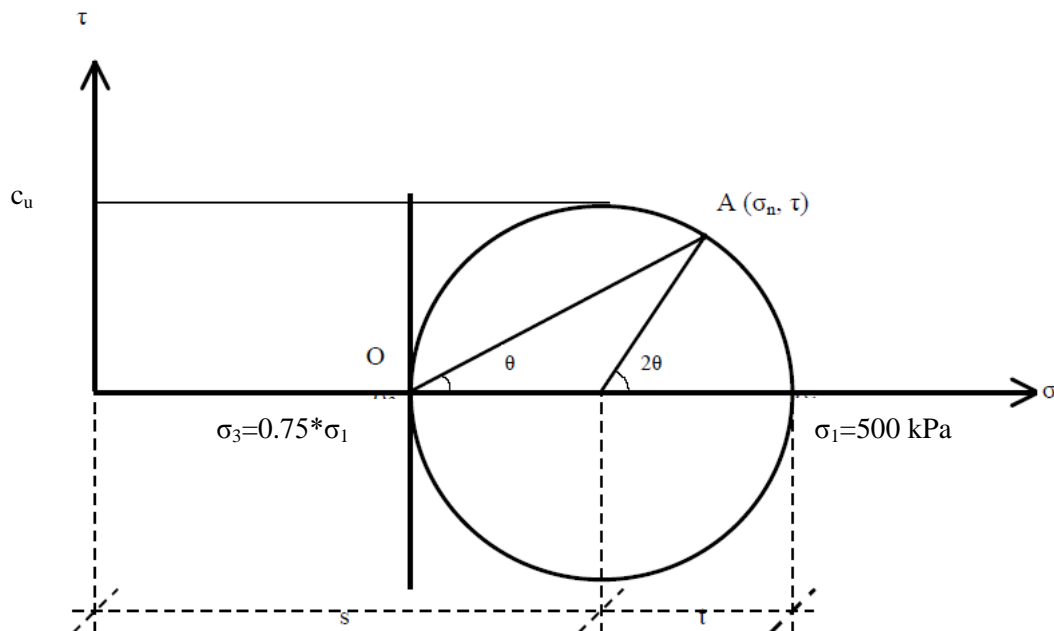
Σχήμα 4.22: Εγκάρσια εδαφική αντίδραση επί πασσάλου προσομοιωμένου με τριδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία δοκού.

#### 4.5.4 Διερεύνηση των συνόρων του προσομοιώματος

Η επιλογή του πλέον αντιπροσωπευτικού προσομοιώματος του συστήματος πασσάλου-εδάφους, ορίστηκε με αρχικό κριτήριο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων εδαφικής αντίδρασης και μετατόπισης και στη συνέχεια με κριτήριο το χρόνο ολοκλήρωσης των αριθμητικών αναλύσεων. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση του κάθε προσομοιώματος ξεχωριστά (Πίνακας 4.1), στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10, για συγκεντρωμένο εγκάρσιο φορτίο κατά τη θετική φορά του άξονα 1 ίσο με  $H= 5000 \text{ kN}$ . Η ανάλυση ολοκληρώθηκε με την επιβολή ποσοστού του παραπάνω φορτίου μέχρι την αστοχία του εδάφους. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν καμπύλες εδαφικής αντίδρασης  $p$  (kN/m)-μετατόπισης  $y$  (m) μέχρι μετατόπιση κεφαλής ίσης με περίπου 25cm ( σχεδόν 20 φορές τη διάμετρο του πασσάλου  $20D=20\text{cm}$ ). Σε αντίθεση με τις προηγούμενες διερευνήσεις έγινε χρήση του ελαστικού-απολύτως πλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Drucker-Prager, καθώς χρησιμοποιείται και στις μετέπειτα παραμετρικές αναλύσεις.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε μορφή διαγραμμάτων εδαφικής αντίδρασης,  $p(\text{kN/m})$  συναρτήσει της μετατόπισης  $y(\text{m})$  κατά τη διεύθυνση του άξονα της επιβαλλόμενης δύναμης και για ενδεικτικά βάθη  $z= 1\text{m}$ ,  $z= 2\text{m}$  και  $z= 4\text{m}$  φαίνονται παρακάτω. Οι υπόλοιπες καμπύλες κατά μήκος του πασσάλου, πέρα από τις υποφαινόμενες, μελετήθηκαν αλλά δεν παρουσιάζονται καθώς τα αποτελέσματα της σύγκρισης είναι όμοια με αυτά που προκύπτουν για τις απεικονιζόμενες καμπύλες.

Όπως παρατηρείται, οι καμπύλες  $p-y$  των τριών προσομοιωμάτων ταυτίζονται, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα σύνορα των προσομοιωμάτων δεν επηρεάζουν τις υπολογιζόμενες καμπύλες. Επομένως, επιλέχθηκε το μικρότερο προσομοίωμα (Προσομοίωμα A, με διάσταση  $x=40\text{m}$ ), λόγω της μεγαλύτερης ευχρηστίας και ταχύτητας λήψης των αποτελεσμάτων. Το προσομοίωμα A είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Για λόγους πληρότητας της εργασίας, παρατίθεται παρακάτω ένας Πίνακας (Πίνακας 4.3) με τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κεφαλής του πασσάλου, όπως αυτά προέκυψαν για επιβολή εγκάρσιας φόρτισης  $H=1000 \text{ kN}$  και στα τρία προσομοιώματα.



Σχήμα 4.23: Κύκλος Mohr-Coulomb ολικών τάσεων σε βάθος  $z=25\text{m}$ .

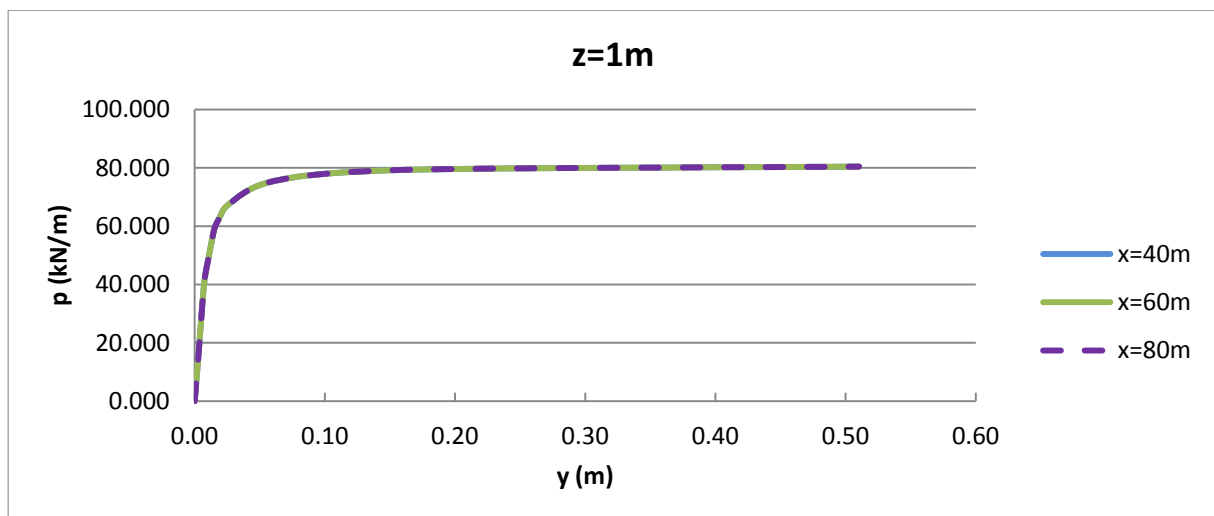


**Πίνακας 4.3:** Οριζόντια μετατόπιση κεφαλής πασσάλου Προσομοιώματων A, B,C.

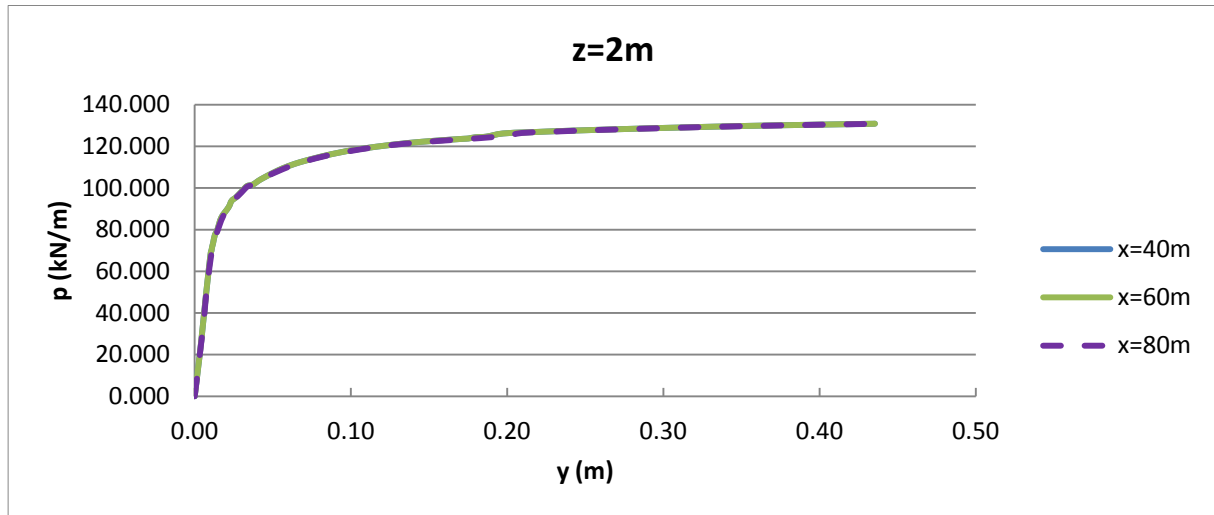
Φόρτιση H=1000kN		
Προσομοίωμα A	Προσομοίωμα B	Προσομοίωμα C
$U_1$ (m)	$U_1$ (m)	$U_1$ (m)
$2.049 \cdot 10^{-1}$	$2.050 \cdot 10^{-1}$	$2.052 \cdot 10^{-1}$

Σημειώνεται ότι έγινε θεώρηση μεταβολής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής,  $c_u$ , σύμφωνα με την εξίσωση  $c_u=10+0.25 \cdot 10 \cdot z$ , με  $c_u=10\text{kPa}$  στην επιφάνεια του εδάφους. Τέλος, ορίστηκε ως μία αρχική προσέγγιση μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας ( $E_u$ ) με το βάθος, ανάλογη της τιμής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στο εκάστοτε βάθος σύμφωνα με τη σχέση  $E_u=300c_u$ . Η προσέγγιση αυτή του μέτρου ελαστικότητας θεωρείται ικανοποιητική για υπολογισμούς παραμορφώσεων του εδάφους μακριά από την αστοχία με χρήση ελαστικού-απολύτως πλαστικού καταστατικού προσομοιώματος (για παράδειγμα στον υπολογισμό καθιζήσεων πεδύλου). Στις παραμετρικές αναλύσεις που ακολουθούν, ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή λαμβάνεται αρκετά μικρότερος ( $E_u/c_u=50-200$ ), καθώς στόχο της εργασίας αποτελεί η μελέτη της συμπεριφοράς εδάφους για εγκάρσια φόρτιση του πασσάλου μέχρι την οριακή εδαφική αντίδραση.

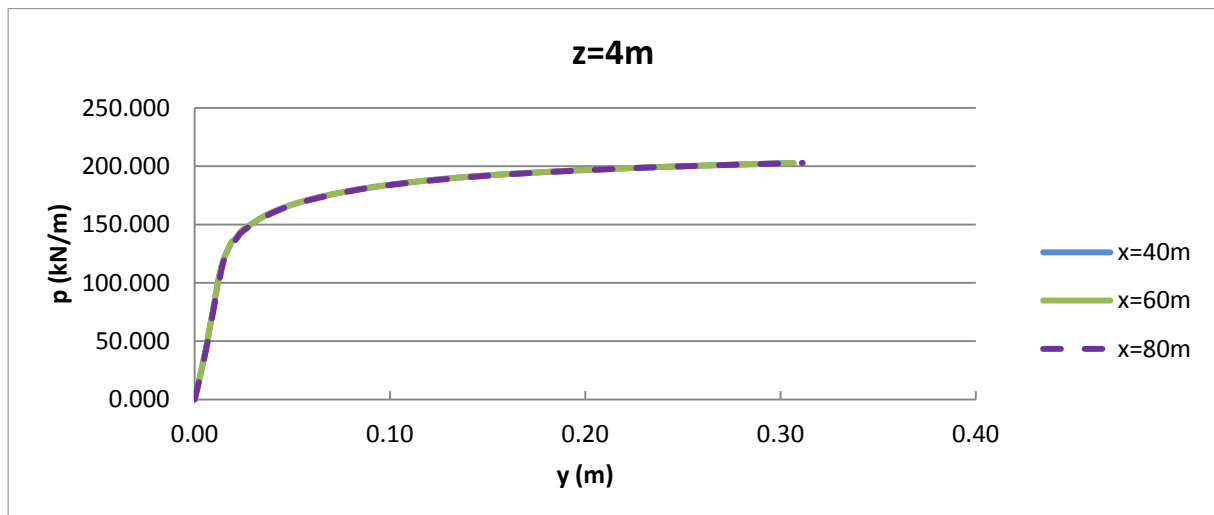
Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3, η μετατόπιση κεφαλής που προκύπτει από τα αποτελέσματα των αναλύσεων είναι παρόμοια, με μικρές αποκλίσεις, και για τα τρία προσομοιώματα. Συγκεκριμένα, το σφάλμα μεταξύ των προσομοιωμάτων A, B, C είναι της τάξης του  $10^{-4}$ . Το σφάλμα αυτό θεωρείται αμελητέο για την επιθυμητή ακρίβεια των παραμετρικών αναλύσεων. Επιβεβαιώνεται, με αυτό τον τρόπο, το παραπάνω συμπέρασμα ότι τα σύνορα των επιλεγμένων προσομοιωμάτων δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων και επομένως επιλέγεται το Προσομοίωμα A για τους υπολογισμούς της συγκεκριμένης εργασίας, καθώς είναι αυτό που με το μικρότερο δυνατό υπολογιστικό κόστος υπολογίζει με ακρίβεια τα επιθυμητά αποτελέσματα.



**Σχήμα 4.24:** Διαγράμματα εδαφικής αντίδρασης-οριζόντιας μετατόπισης Προσομοιωμάτων A, B, C σε βάθος  $z=1\text{m}$ .



**Σχήμα 4.25:** Διαγράμματα εδαφικής αντίδρασης-οριζόντιας μετατόπισης Προσομοιωμάτων A, B, C σε βάθος  $z=2m$ .

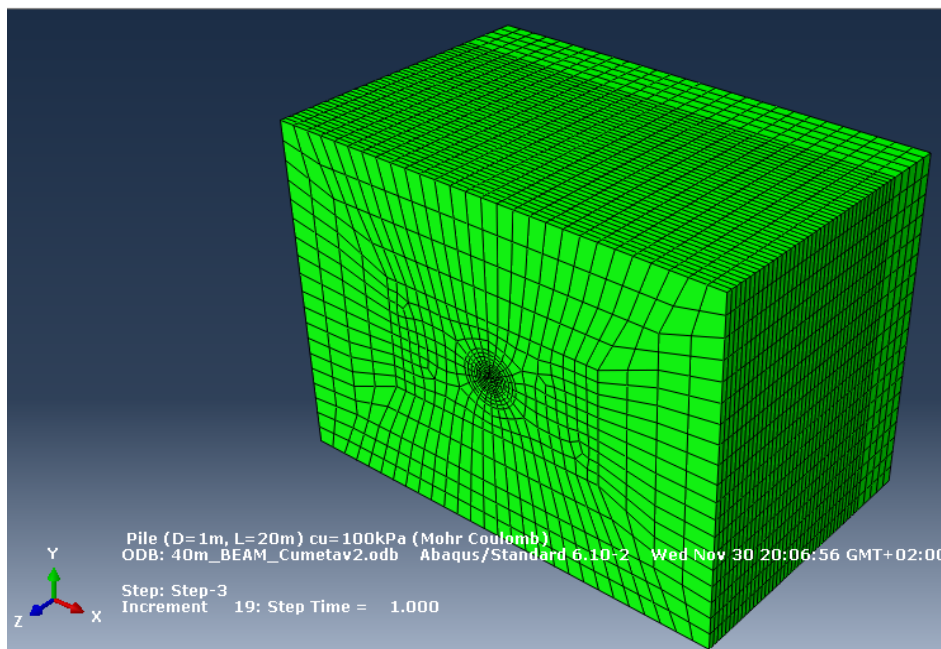


**Σχήμα 4.26:** Διαγράμματα εδαφικής αντίδρασης- οριζόντιας μετατόπισης Προσομοιωμάτων A, B, C σε βάθος  $z=4m$ .

Συνοψίζοντας, στην παρούσα υποενότητα πραγματοποιήθηκαν διερευνήσεις του προσομοιώματος πασσάλου-εδάφους, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των οποίων αποφασίστηκαν τα τελικά χαρακτηριστικά του. Συγκεκριμένα:

- το τελικό προσομοίωμα έχει εξωτερικές διαστάσεις:  $x=40m$ ,  $y=30m$  και  $z=25m$ ,
- χρησιμοποιούνται πεπερασμένα στοιχεία μειωμένων σημείων ολοκλήρωσης C3D8R,
- ο πάσσαλος προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού (B31),
- οι ιδιότητες της διεπιφάνειας ακολουθούν τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.5.2.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά ορίζονται στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων για την επίτευξη των ακόλουθων παραμετρικών αναλύσεων.



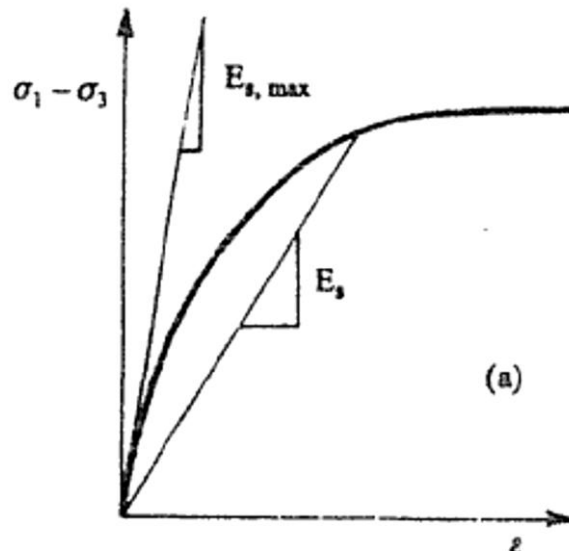
Σχήμα 4.27 :Τελικό προσομοίωμα στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10.

#### 4.6 Αποτελέσματα παραμετρικής διερεύνησης για τα εντατικά μεγέθη του πασσάλου

Στην προηγούμενη υποενότητα ολοκληρώθηκε η διαδικασία επιλογής του τελικού προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε στις παραμετρικές αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στη συνέχεια, σκόπιμη θεωρήθηκε η πραγματοποίηση παραμετρικών αναλύσεων ώστε να διαπιστωθεί ο βαθμός επιρροής των συγκεκριμένων παραμέτρων προσομοίωσης της συμπεριφοράς του εδάφους στα διαγράμματα εγκάρσιου συγκεντρωμένου φορτίου- οριζόντιας μετατόπισης κεφαλής ( $H-y_0$ ) και στα διαγράμματα οριζόντιων μετατοπίσεων ( $y-z$ ) και καμπτικών ροπών ( $M-z$ ) κατά μήκος του πασσάλου. Ανάλογη διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο για τις θεωρητικές μεθοδολογίες χάραξης μη γραμμικών καμπύλων  $p-y$ .

Εξετάζονται, ομοίως με τα προηγούμενα κεφάλαια, τρεις διαφορετικές κατανομές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής σε μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλο. Στις κατανομές αυτές θεωρείται τιμή  $c_u=10\text{kPa}$  στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ η διαφορά τους έγκειται στο βήμα μεταβολής του  $c_u$  με το βάθος  $z$ . Η τιμή του συντελεστή  $A$  στην εξίσωση  $c_u=10+A\gamma'z$  λαμβάνει τις εξής τιμές:  $A=0.15$ ,  $A=0.25$  και  $A=0.35$ .

Οι παράμετροι για τις οποίες μελετάται η συμπεριφορά του εδάφους κατά την άσκηση εγκάρσιας φόρτισης στον πάσσαλο είναι: το αστράγγιστο μέτρο ελαστικότητας  $E_u$ , ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων,  $k_0$  και ο συντελεστής τριβής της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους,  $\alpha$ . Αναφορικά με το μέτρο ελαστικότητας  $E_u$ , σημειώνεται ότι ενώ στις αρχικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε τιμή  $E_u=300c_u$ , στις παραμετρικές αναλύσεις εξετάζεται ως κατώτερο όριο η τιμή  $E_u=50c_u$  και ανώτερο όριο η τιμή  $E_u=200c_u$ . Οι μικρότερες αυτές τιμές του μέτρου ελαστικότητας αφορούν καταστάσεις φόρτισης του εδάφους που πλησιάζουν την αστοχία, ενώ μεγαλύτερες τιμές αφορούν το τμήμα της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων ( $\sigma-\epsilon$ ) πριν την επίτευξη της οριακής τάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.28. Η μέγιστη τιμή του μέτρου ελαστικότητας της προσομοίωσης εδάφους με μία συγκεκριμένη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων αντιστοιχεί στην κλίση του αρχικού ελαστικού τμήματός της ( $E_{smax}$ ).



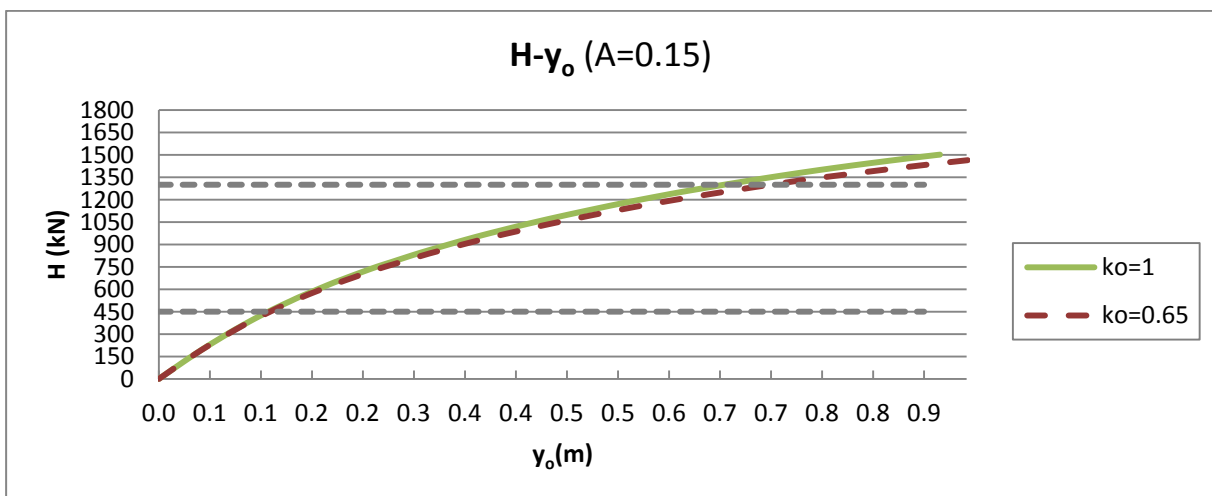
Σχήμα 4.28: Τυπική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων, σε μορφή καμπύλων H-y<sub>0</sub>, y-z και M-z ξεχωριστά για την εκάστοτε παράμετρο που εξετάζεται και για την κάθε περίπτωση εδάφους. Σημειώνεται ότι οι οριζόντιες ευθείες που έχουν χαραχθεί στα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής αντιστοιχούν στα φορτία για τα οποία πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των καμπύλων y-z και M-z και είναι όμοια σε όλα τα διαγράμματα για την ίδια περίπτωση εδάφους. Οι τιμές των φορτίων αυτών επιλέχθηκαν ώστε να εξεταστεί μία φόρτιση με σχετικά μικρό εγκάρσιο φορτίο και μία φόρτιση κοντά στην οριακή κατάσταση αστοχίας του εδάφους. Σημειώνεται ότι όλες οι παραμετρικές αναλύσεις που παρουσιάζονται παρακάτω πραγματοποιήθηκαν με χρήση του ελαστικού-απολύτως πλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Drucker-Prager. Εξασφαλίζεται η επιβολή τέτοιας εγκάρσιας φόρτισης στο έδαφος ώστε να απεικονίζεται με σαφήνεια η αστοχία του τελευταίου στη φόρτιση αυτή.

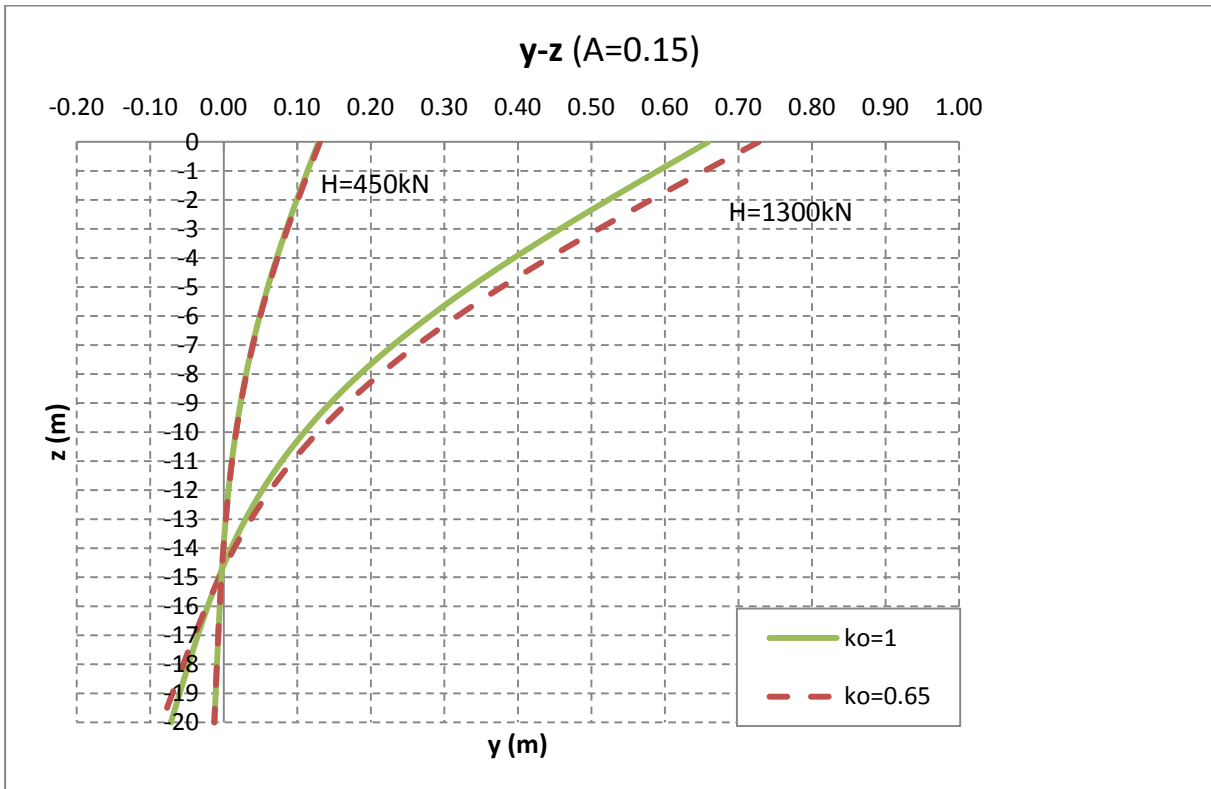
#### 4.6.1 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για A=0.15

##### 4.6.1.1 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων k<sub>0</sub>

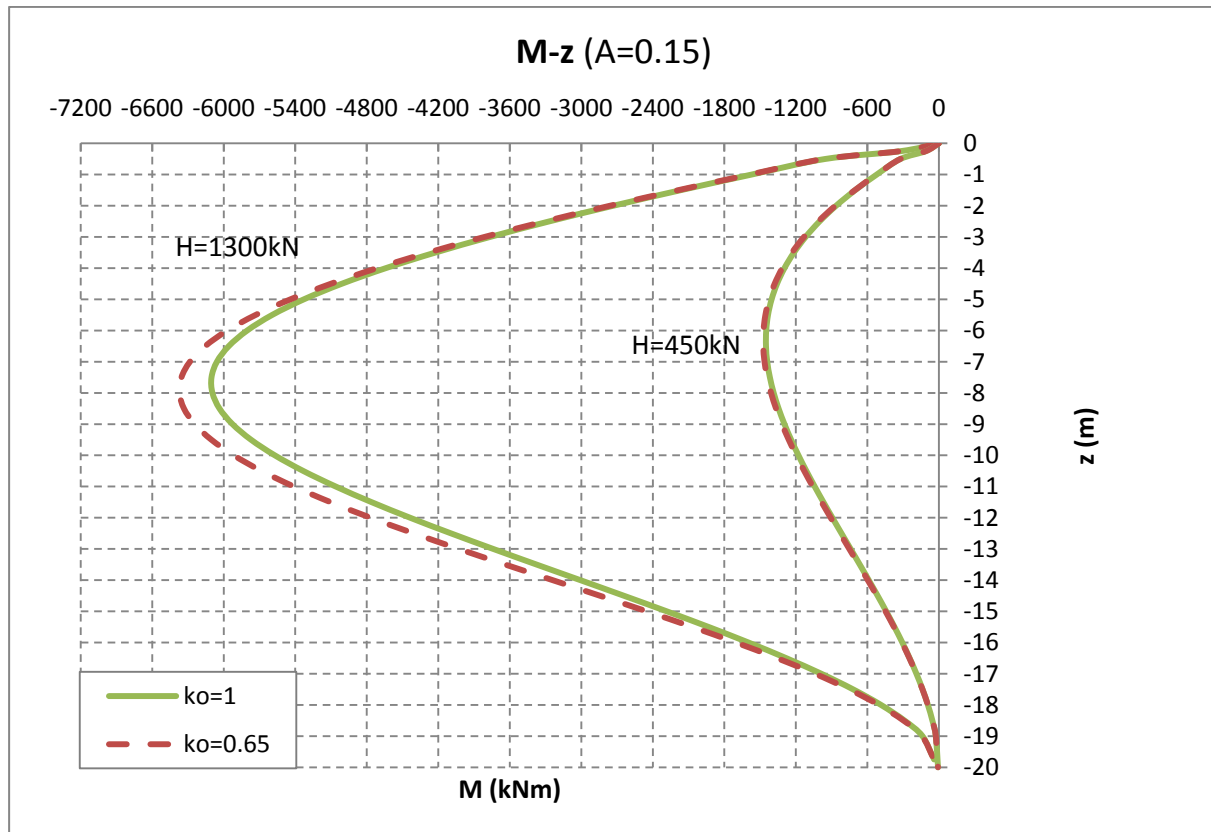
Για την παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας α και του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή, α κατά Weltman & Healy και E<sub>v</sub>/c<sub>u</sub>=50 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.29: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου για A=0.15 για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων k<sub>0</sub>.



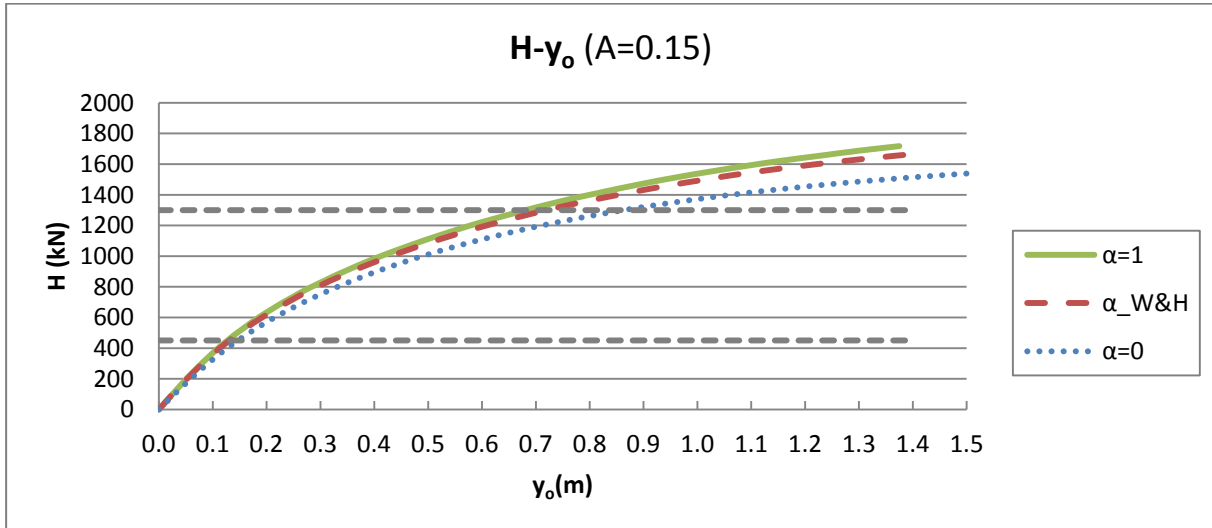
Σχήμα 4.30: Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου (y-z) για  $A=0.15$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1300\text{kN}$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_o$ .



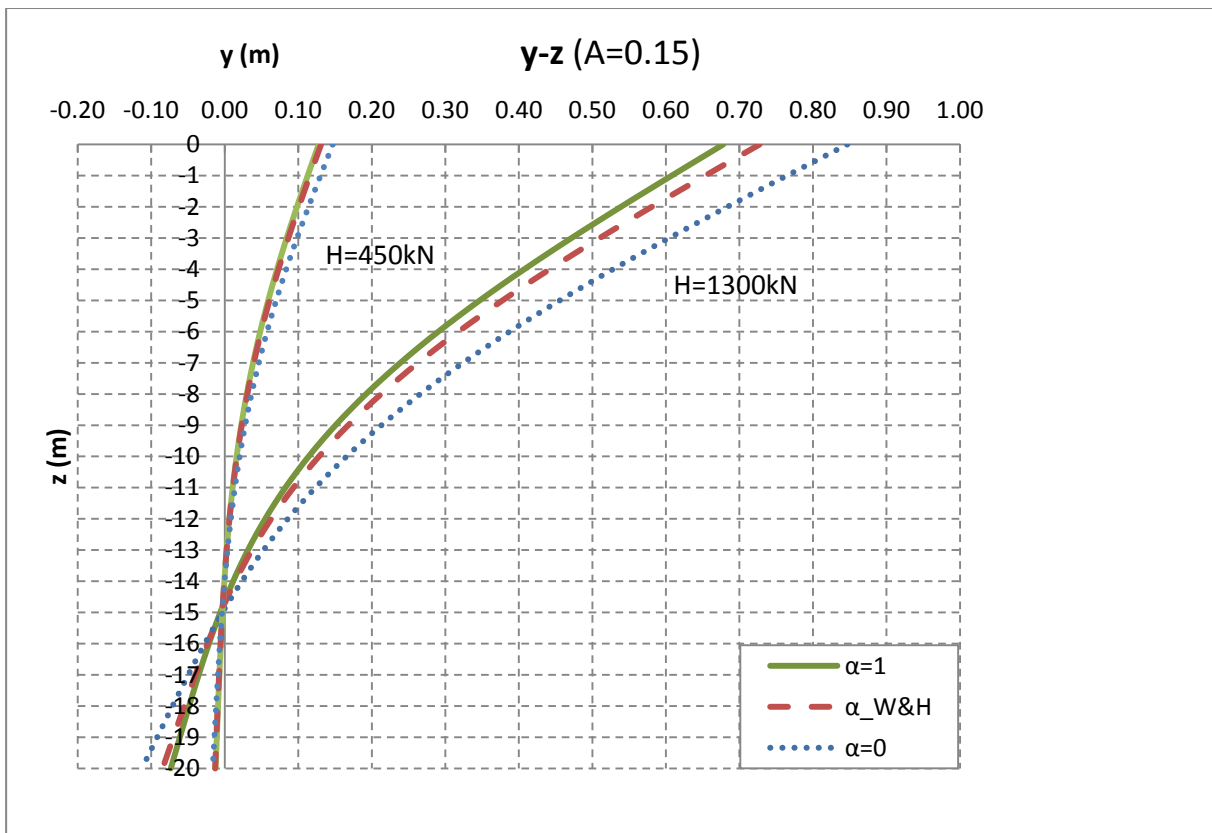
Σχήμα 4.31: Διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου (M-z) για  $A=0.15$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1300\text{kN}$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_o$ .

#### 4.6.1.2 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή διεπιφάνειας $\alpha$

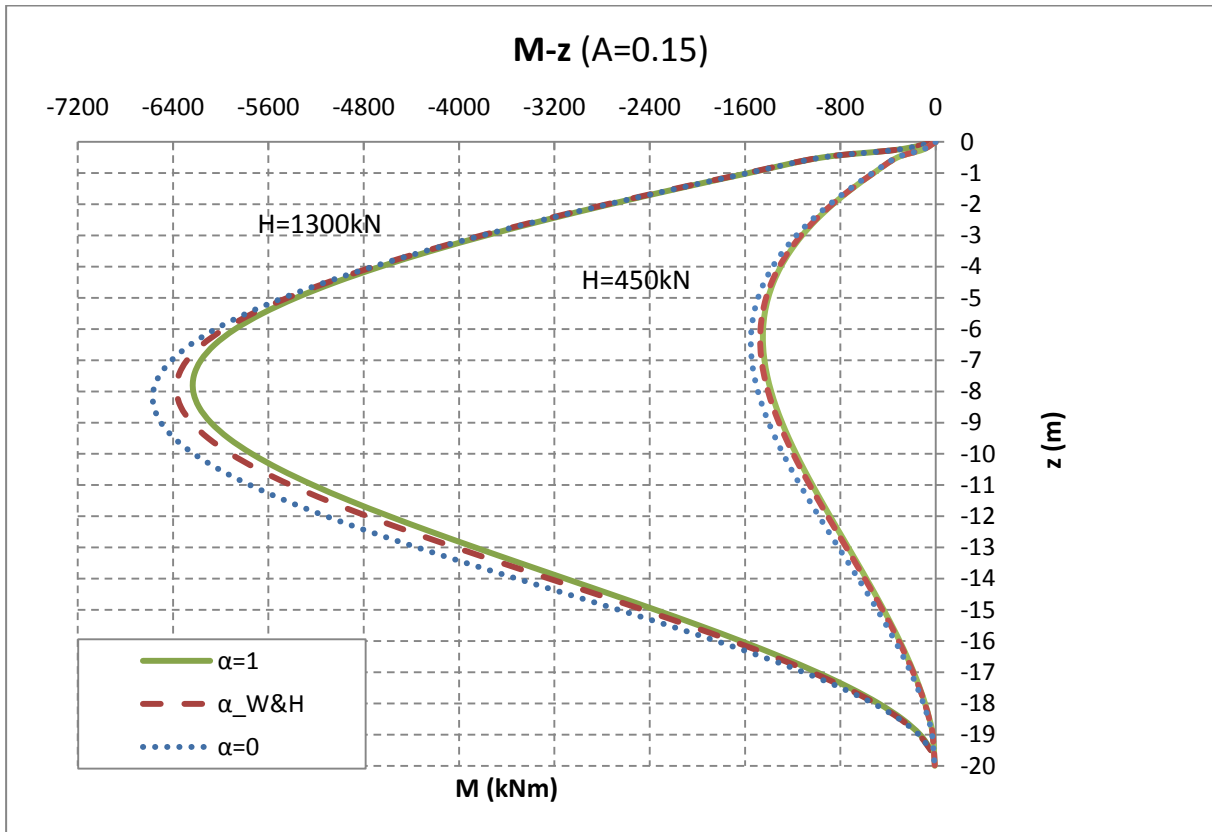
Για την παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_o$ ) και του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $k_o=0.65$  και  $E_u/c_u=50$  αντίστοιχα.



Σχήμα 4.32: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου για  $A=0.15$  για διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .



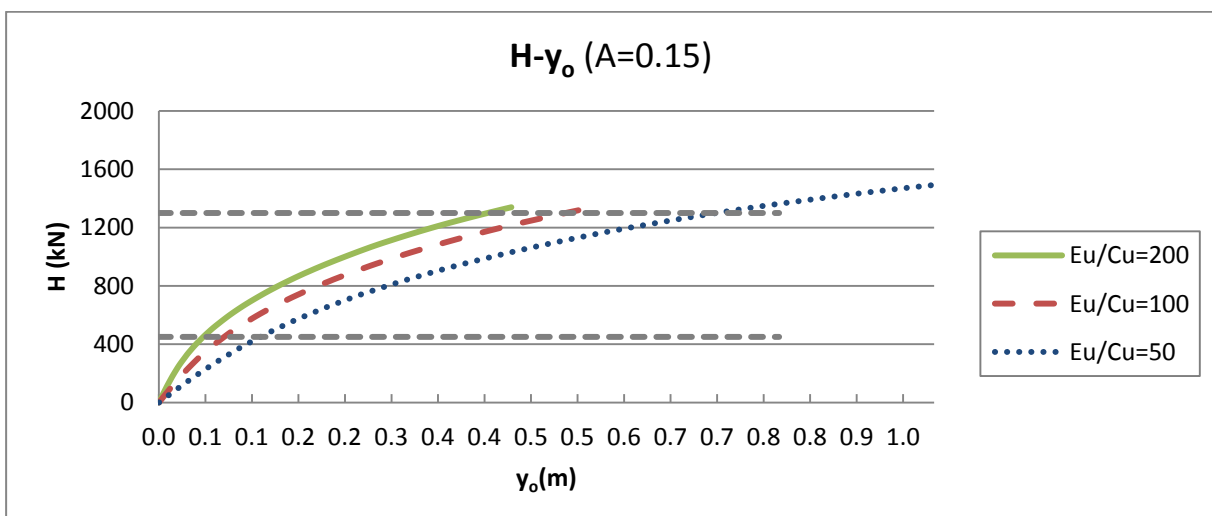
Σχήμα 4.33: Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου ( $y-z$ ) για  $A=0.15$  και φόρτιση  $H=450$  kN και  $H=1300$  kN για διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .



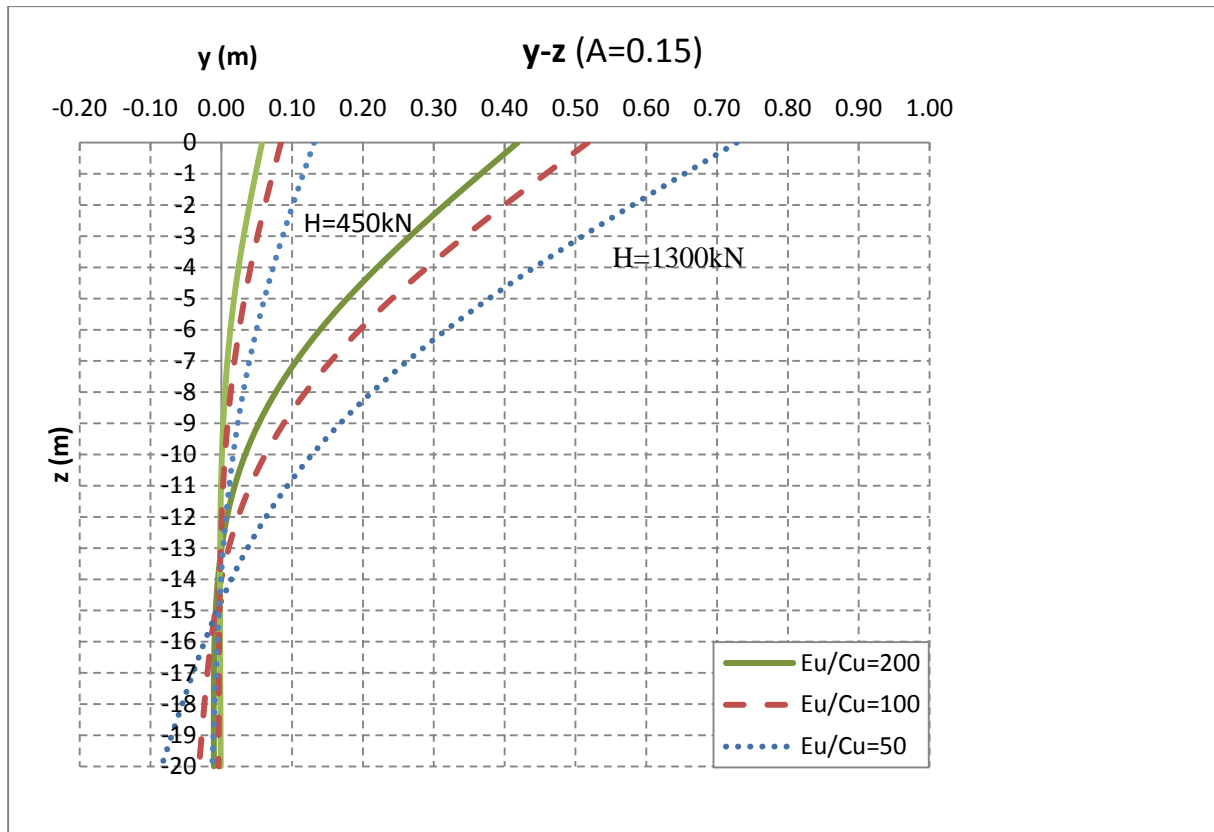
Σχήμα 4.34: Διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου (M-z) για A=0.15 και φόρτιση H=450kN και H=1300kN για διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .

#### 4.6.1.3 Παραμετρική διερεύνηση του μέτρου ελαστικότητας $E_u$

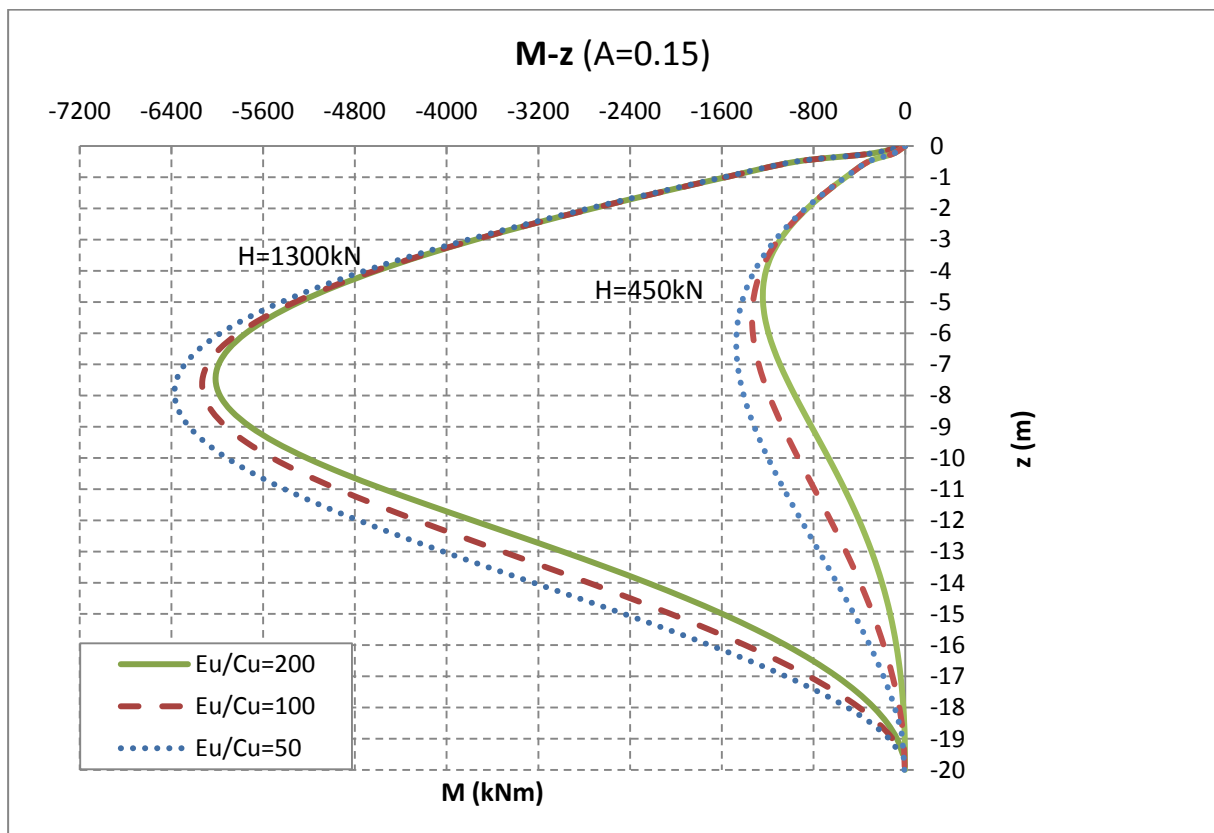
Για την παραμετρική διερεύνηση του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $E_u/c_u$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_o$ ) και του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ),  $k_o=0.65$  και  $\alpha$  κατά Weltam & Healy αντίστοιχα.



Σχήμα 4.35: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου για A=0.15 για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



**Σχήμα 4.36:** Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου ( $y-z$ ) για  $A=0.15$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1300\text{kN}$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



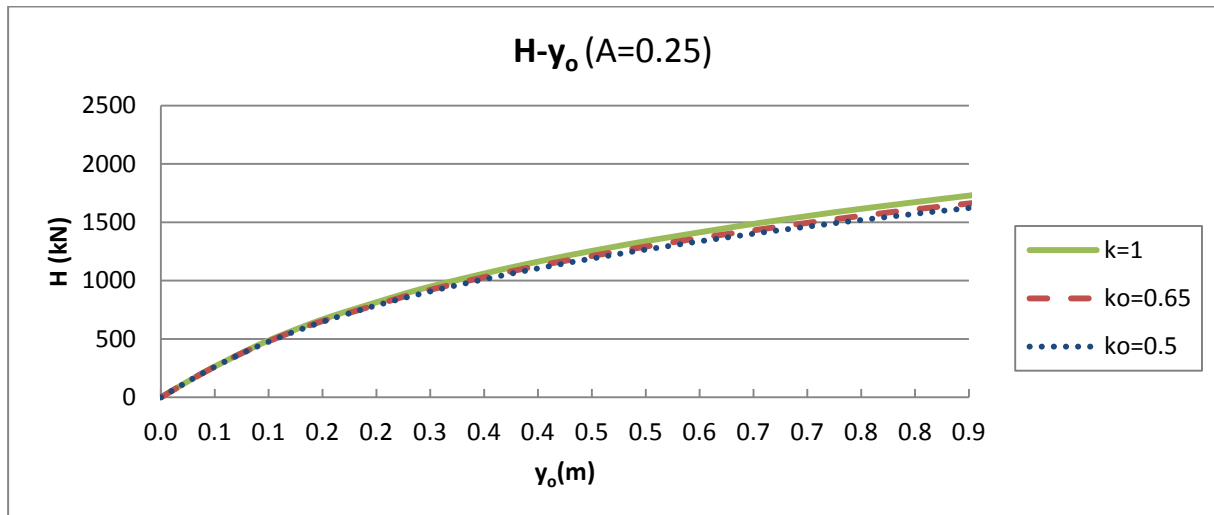
**Σχήμα 4.37:** Διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου ( $M-z$ ) για  $A=0.15$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1300\text{kN}$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



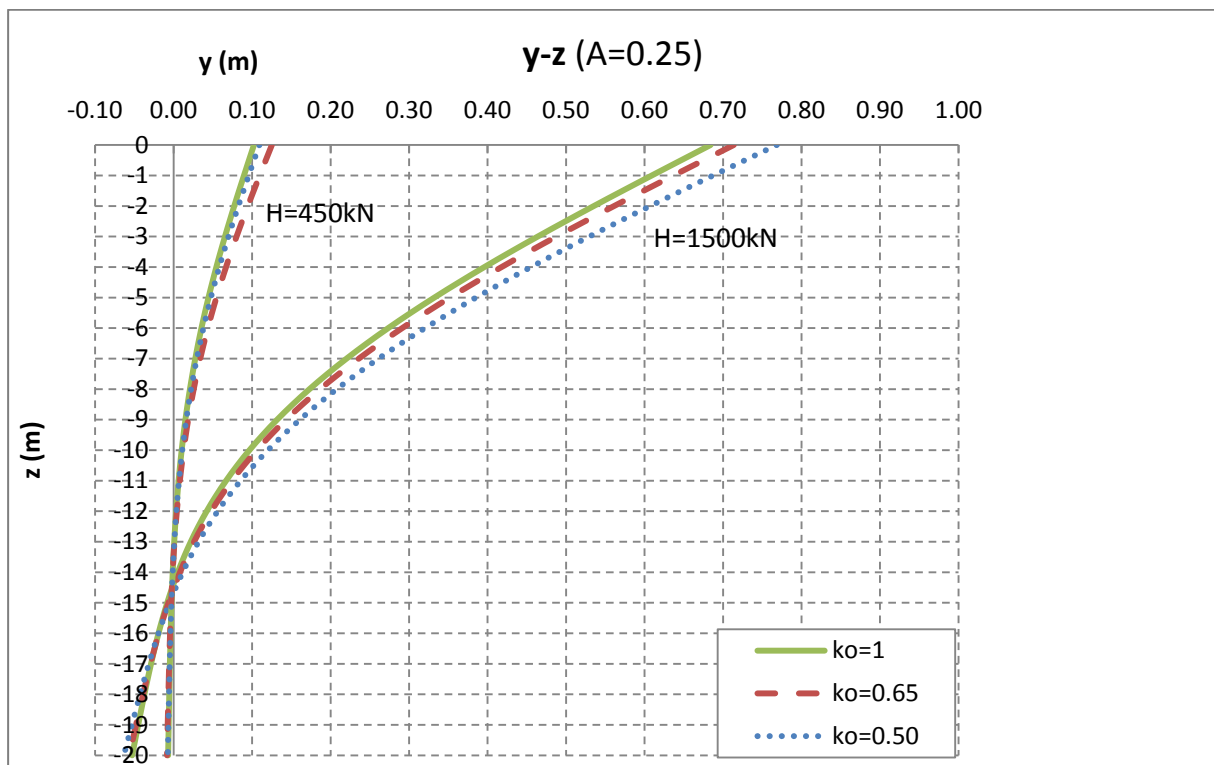
## 4.6.2 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.25$

### 4.6.2.1 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o$

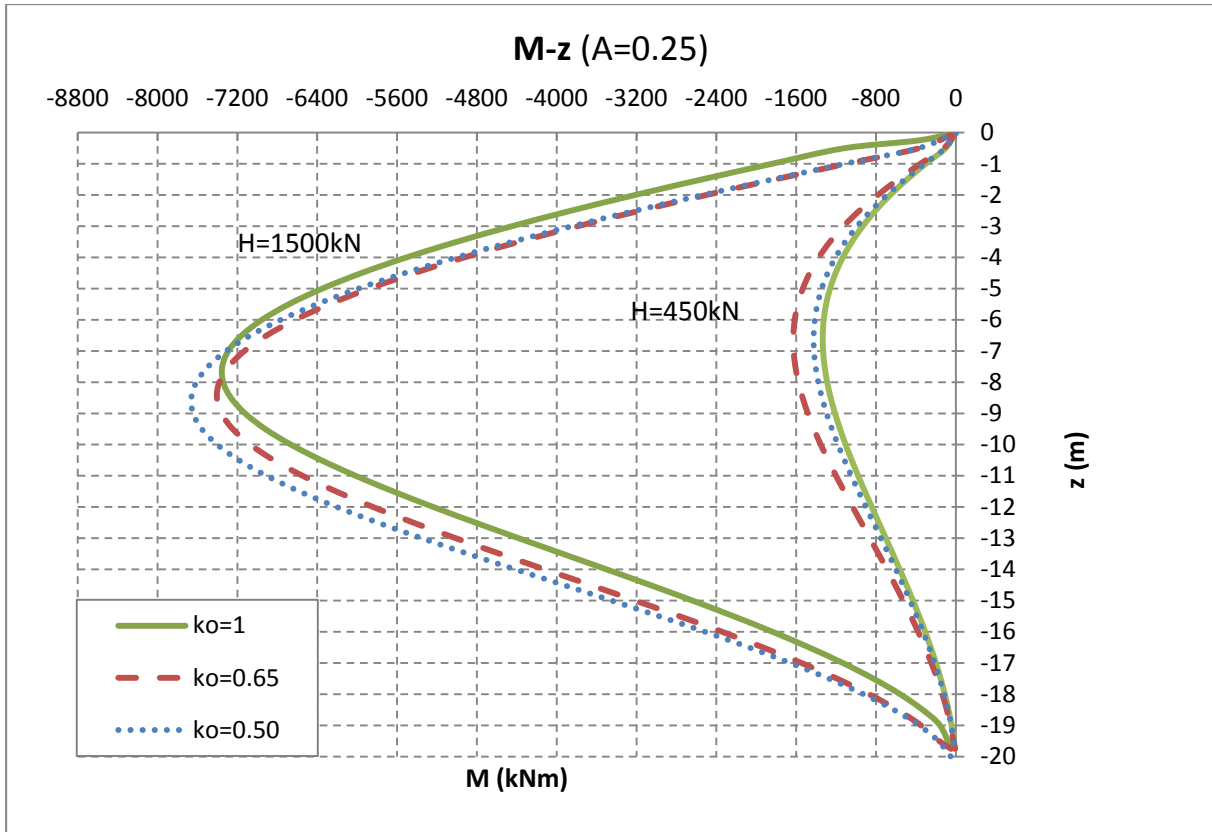
Για την παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_o$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ) και του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $\alpha$  κατά Weltman & Healy και  $E_u/c_u=50$  αντίστοιχα.



Σχήμα 4.38: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου για  $A=0.25$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_o$ .



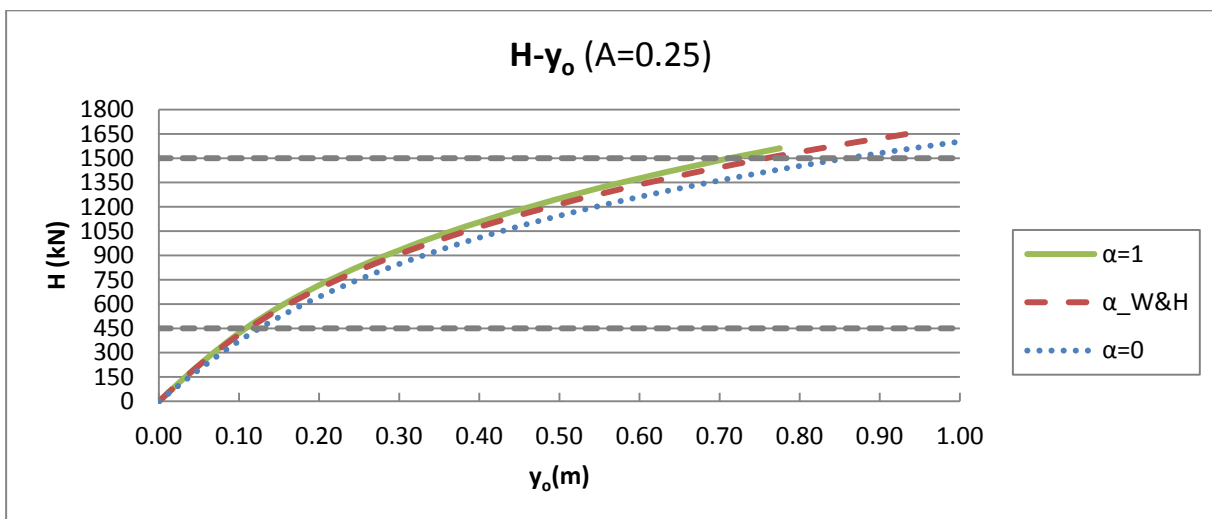
Σχήμα 4.39: Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου (y-z) για  $A=0.25$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1500\text{kN}$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_o$ .



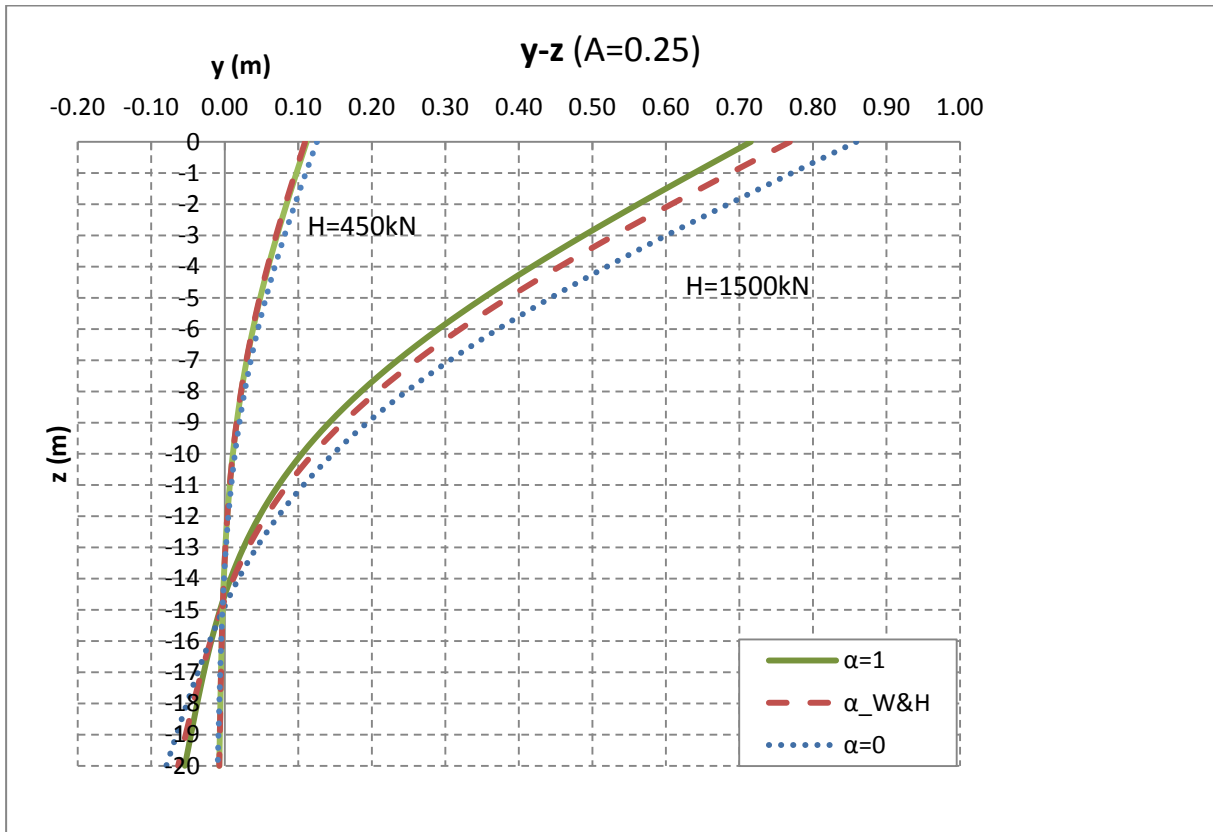
**Σχήμα 4.40:** Διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου (M-z) για A=0.25 και φόρτιση H=450kN και H=1500kN για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_o$ .

#### 4.6.2.2 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή διεπιφάνειας $\alpha$

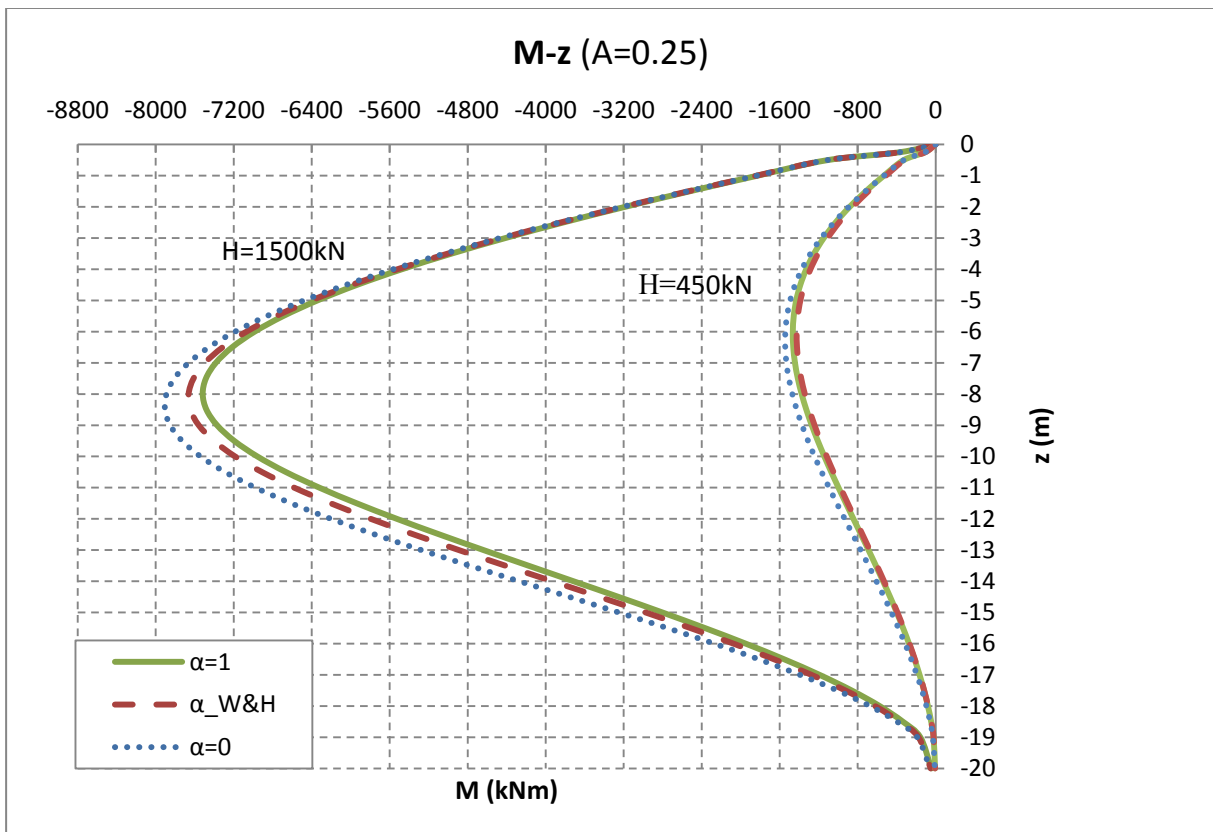
Για την παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_o$ ) και του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $k_o=0.5$  και  $E_u/c_u=50$  αντίστοιχα.



**Σχήμα 4.41:** Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου για A=0.25 για διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .



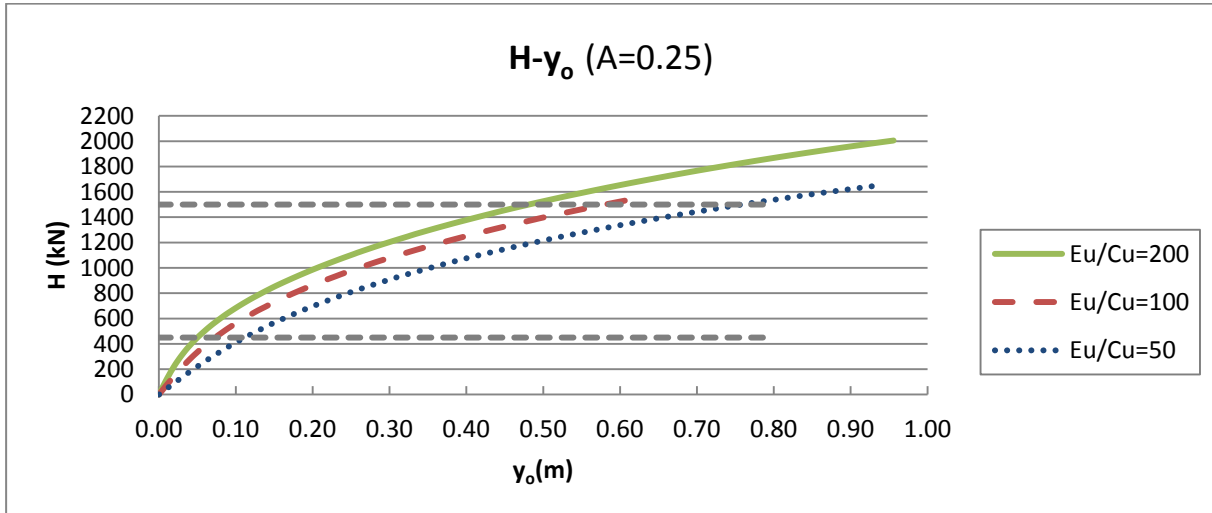
Σχήμα 4.42: Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου (y-z) για  $A=0.25$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1500\text{kN}$  για διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .



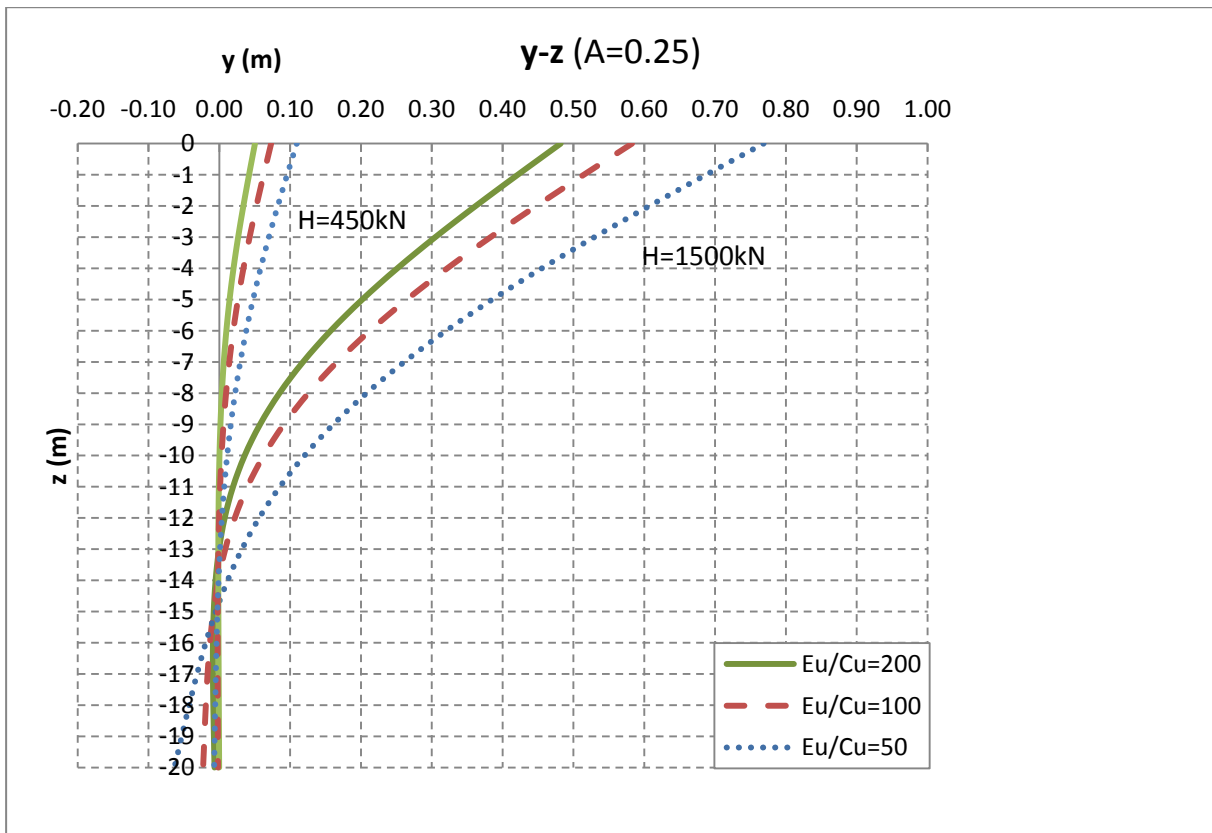
Σχήμα 4.43: Διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου (M-z) για  $A=0.25$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1500\text{kN}$  για διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .

#### 4.6.2.3 Παραμετρική διερεύνηση του μέτρου ελαστικότητας E

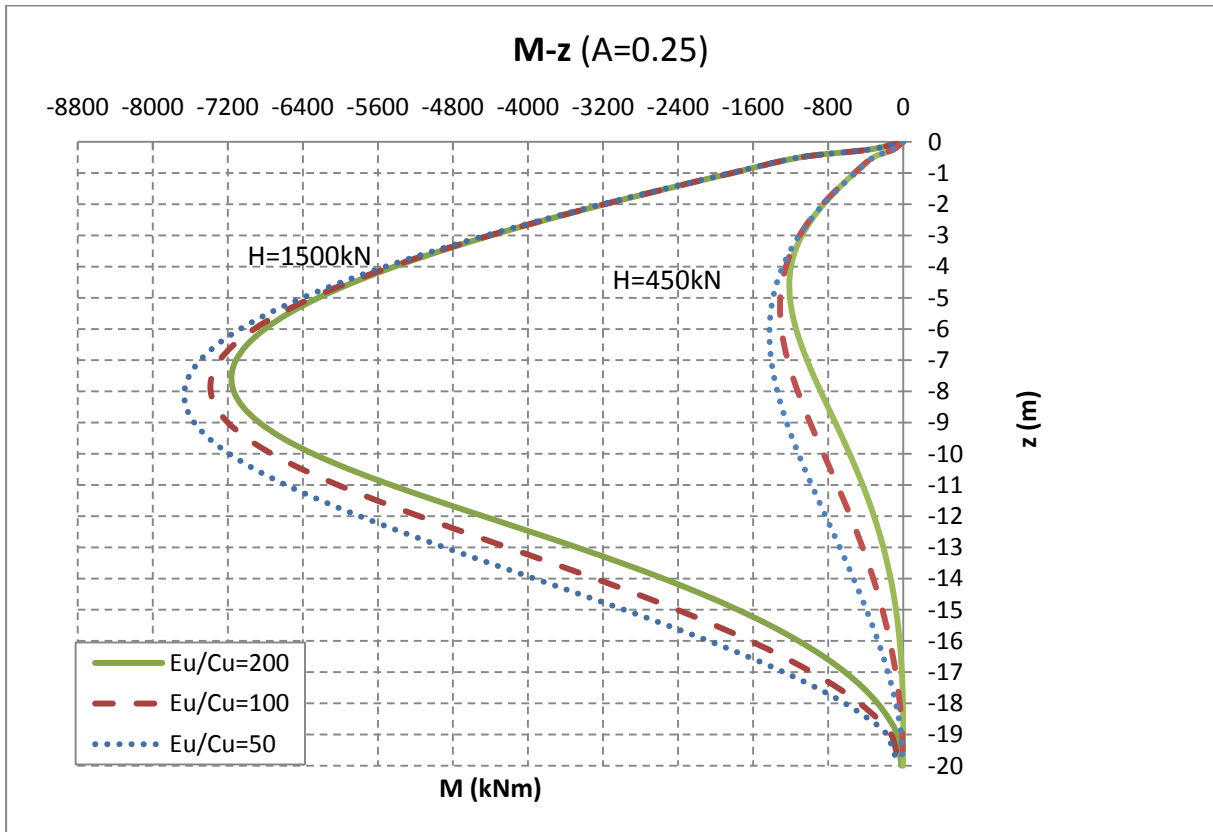
Για την παραμετρική διερεύνηση του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $E_u/c_u$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_o$ ) και του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ),  $k_o=0.65$  και  $\alpha$  κατά Weltam & Healy αντίστοιχα.



Σχήμα 4.44: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου για  $A=0.25$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



Σχήμα 4.45: Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου ( $y-z$ ) για  $A=0.25$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1500\text{kN}$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

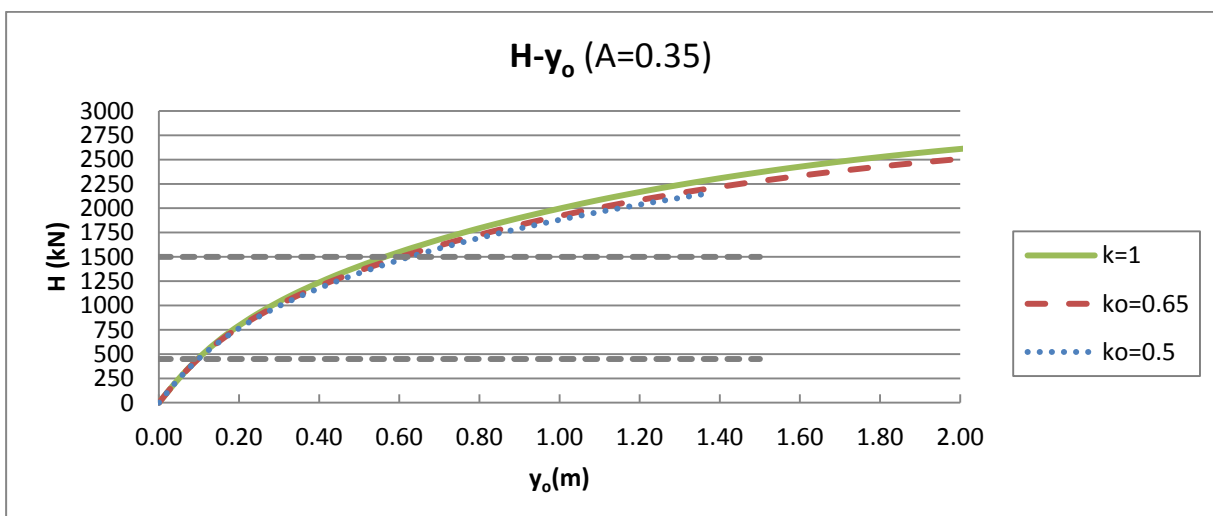


Σχήμα 4.46: Διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου (M-z) για A=0.25 και φόρτιση H=450kN και H=1500kN για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

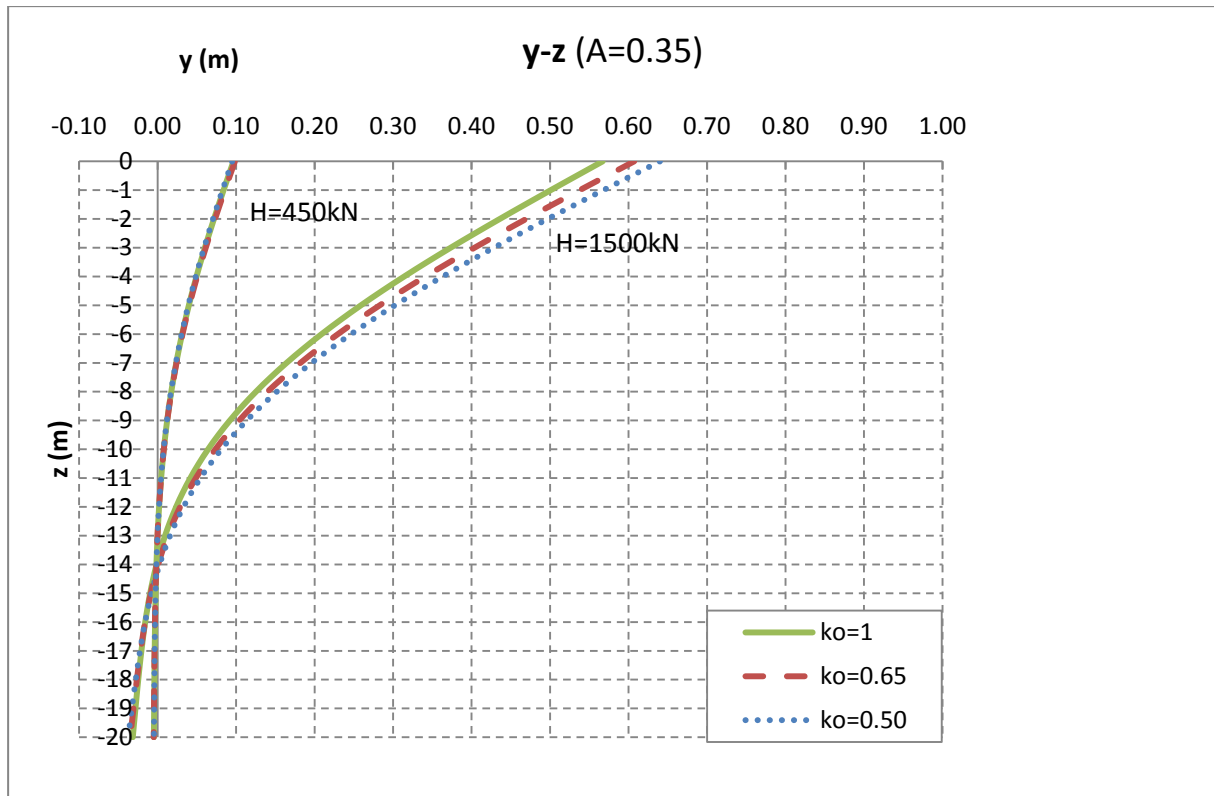
#### 4.6.3 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για A=0.35

##### 4.6.3.1 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o$

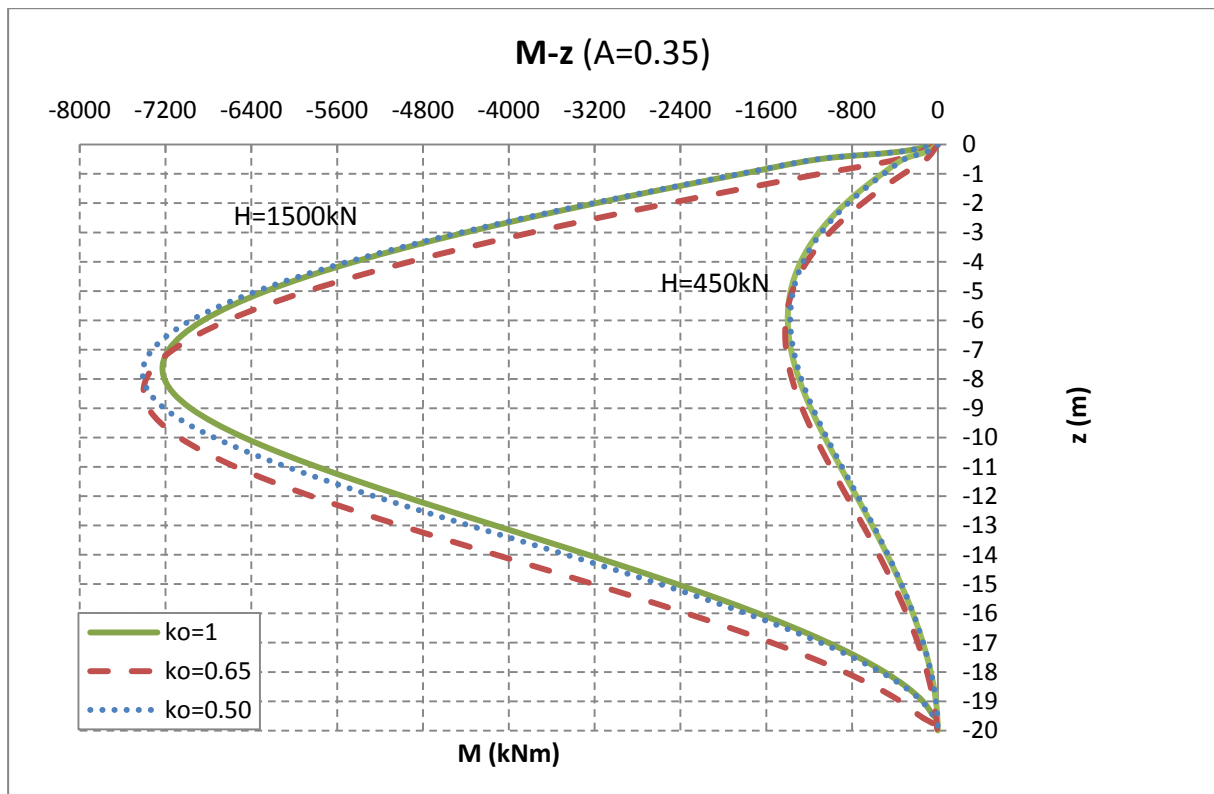
Για την παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ( $k_o$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ) και του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $\alpha$  κατά Weltman & Healy και  $E_u/c_u=50$  αντίστοιχα.



Σχήμα 4.47: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου για A=0.35 για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_o$ .



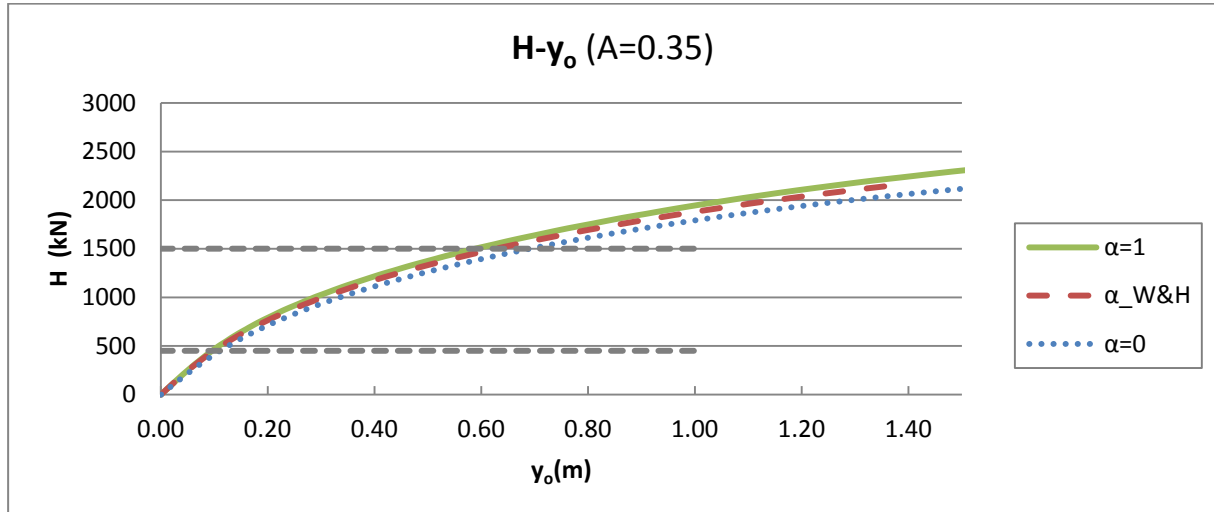
**Σχήμα 4.48:** Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου ( $y-z$ ) για  $A=0.35$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1500\text{kN}$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_0$ .



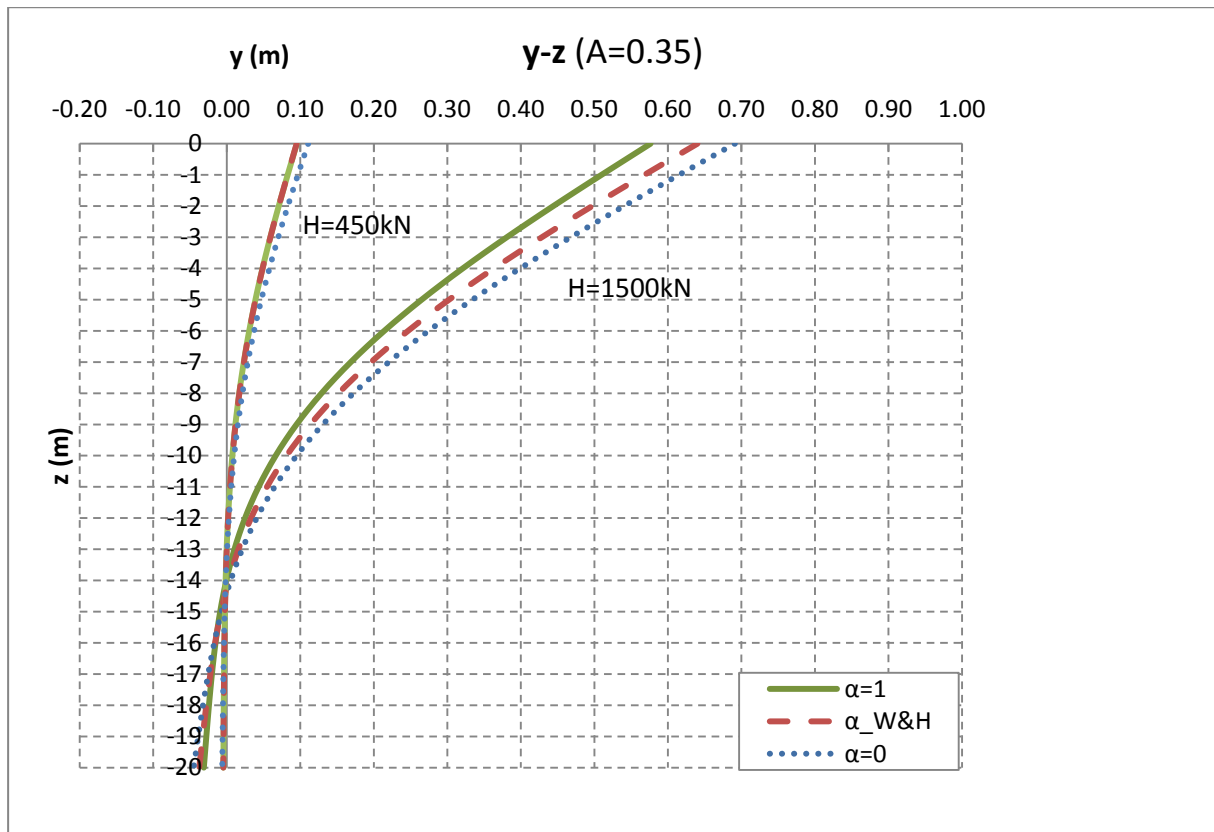
**Σχήμα 4.49:** Διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου ( $M-z$ ) για  $A=0.35$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1500\text{kN}$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_0$ .

#### 4.6.3.2 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή διεπιφάνειας $\alpha$

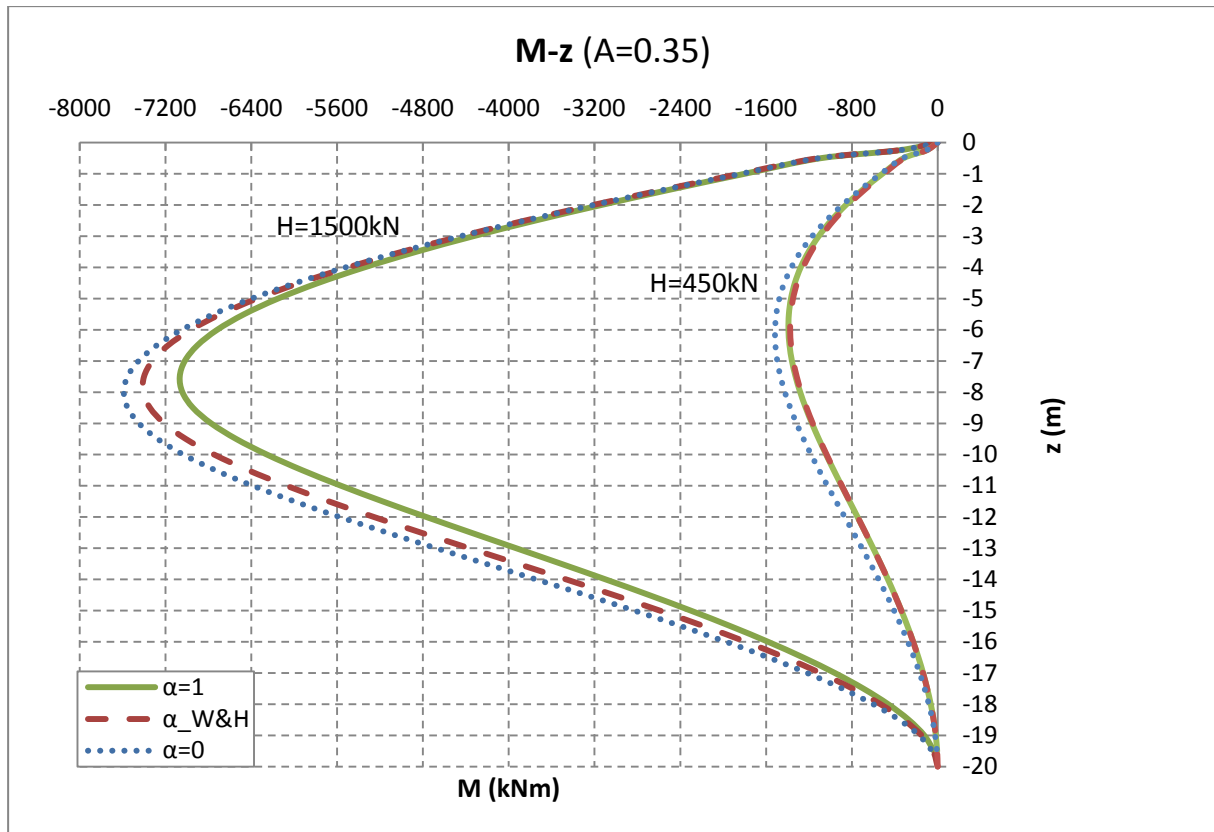
Για την παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_o$ ) και του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $k_o=0.5$  και  $E_u/c_u=50$  αντίστοιχα.



Σχήμα 4.50: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου για  $A=0.35$  για διάφορες του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .



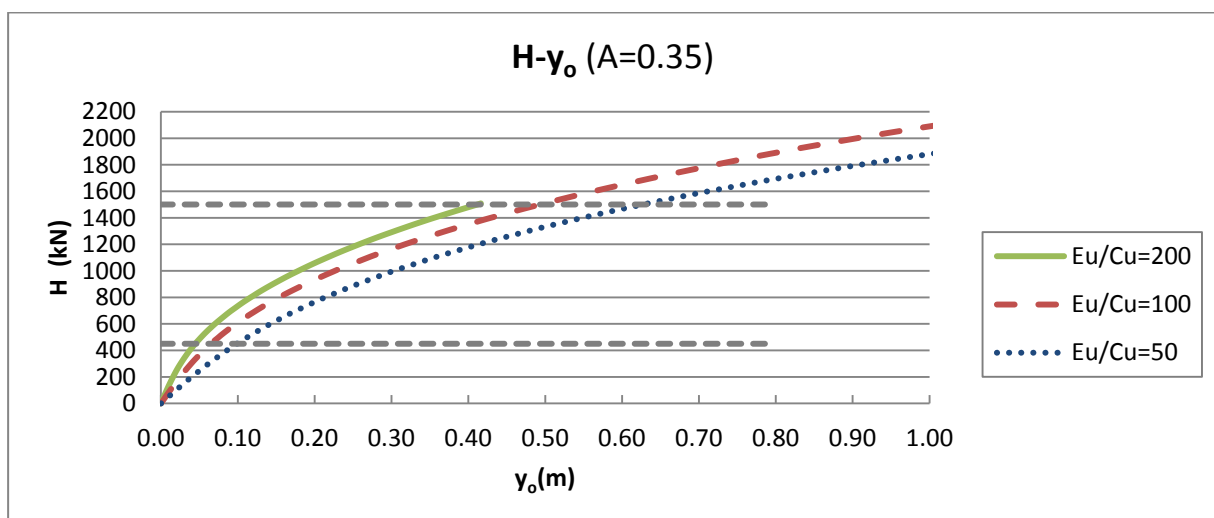
Σχήμα 4.51: Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου ( $y-z$ ) για  $A=0.35$  και φόρτιση  $H=450$  kN και  $H=1500$  kN για διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .



**Σχήμα 4.52:** Διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου (M-z) για A=0.35 και φόρτιση H=450kN και H=1500kN για διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .

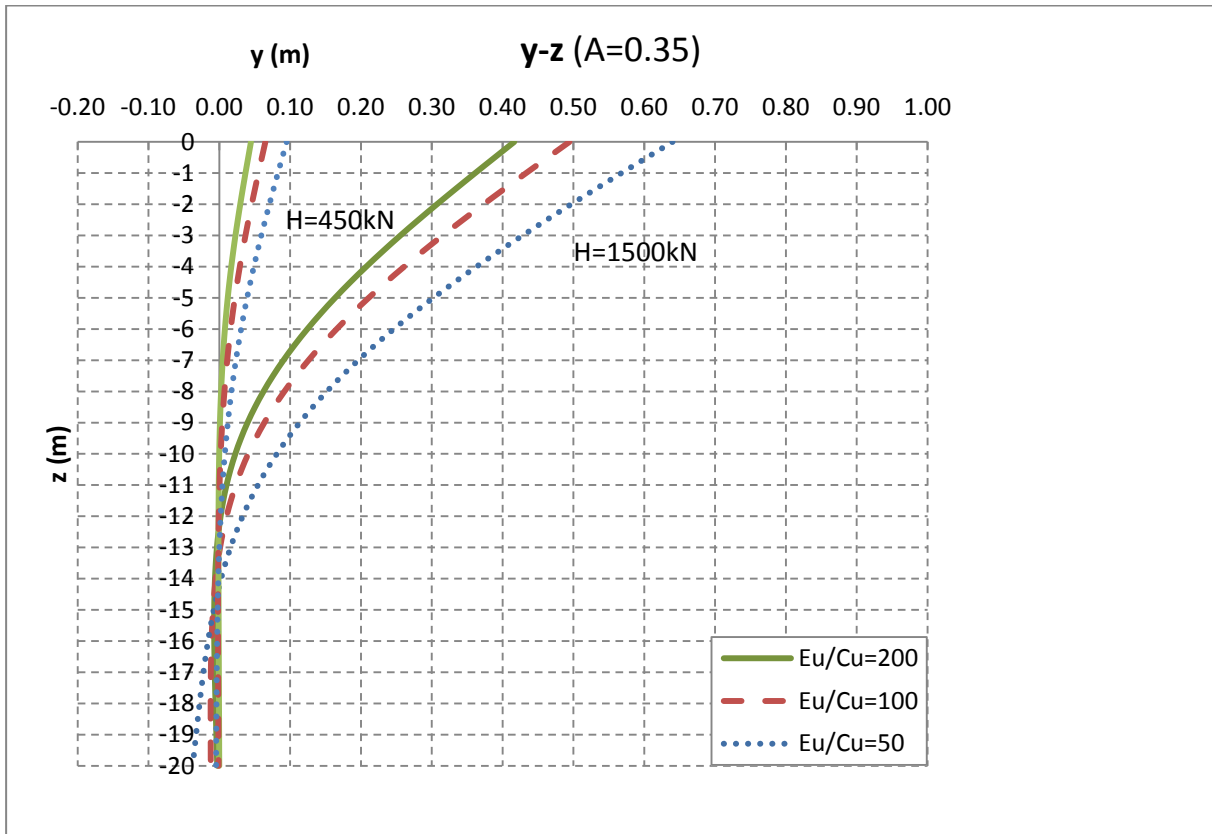
#### 4.6.3.3 Παραμετρική διερεύνηση του μέτρου ελαστικότητας E

Για την παραμετρική διερεύνηση του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $E_u/c_u$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_o$ ) και του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ),  $k_o=0.65$  και  $\alpha$  κατά Weltam & Healy αντίστοιχα.

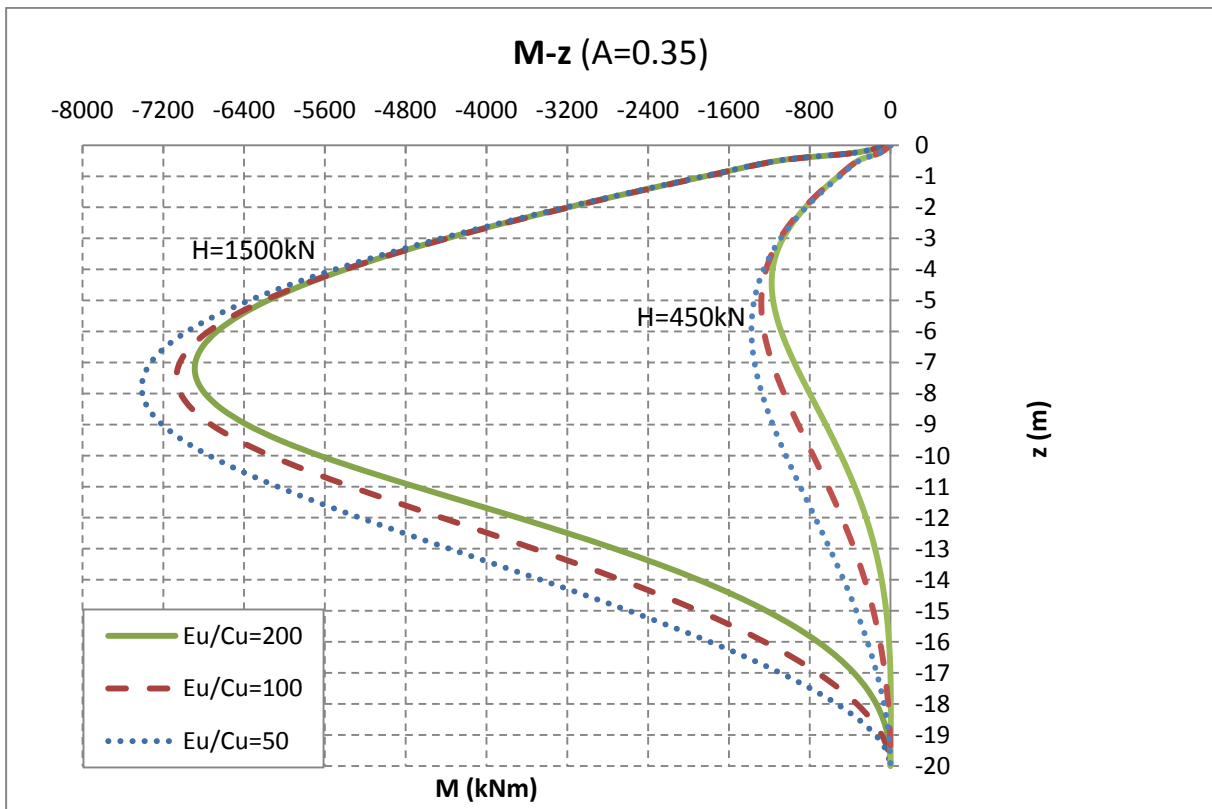


**Σχήμα 4.53:** Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής του πασσάλου για A=0.35 για διάφορες του λόγου  $E_u/c_u$ .





Σχήμα 4.54: Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου (y-z) για  $A=0.35$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1500\text{kN}$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



Σχήμα 4.55: Διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου (M-z) για  $A=0.35$  και φόρτιση  $H=450\text{kN}$  και  $H=1500\text{kN}$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

#### 4.6.4 Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα διαγραμμάτων H-y<sub>0</sub>, y-z, M-z

##### 4.6.4.1 Επίδραση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων k<sub>0</sub>

Γενικά σε όλα τα διαγράμματα και για την κάθε περίπτωση εδάφους, η επιρροή του k<sub>0</sub> είναι ελάχιστη και συγκεκριμένα η μέγιστη απόκλιση, ορίζοντας μία μέση τιμή ανάμεσα στις ακραίες τιμές κάθε διαγράμματος, είναι της τάξης του 5%. Η αύξηση του συντελεστή k<sub>0</sub> προκαλεί μία πολύ μικρή μείωση των οριζόντιων μετατοπίσεων και των καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου.

##### 4.6.4.2 Επίδραση του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους, α

Η αύξηση του συντελεστή α, δηλαδή η αύξηση της τραχύτητας της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους, οδηγεί σε μείωση των μετακινήσεων και των καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου. Οι αποκλίσεις των ακραίων τιμών ως προς μία μεταξύ τους μέση τιμή κυμαίνονται στο 2% με 4% για τα διαγράμματα M-z και στο 9% με 12% για τα αντίστοιχα y-z σε όλες τις περιπτώσεις μεταβολής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου (A=0.15, A=0.25 και A=0.35). Η τιμή του συντελεστή α=0, η οποία αντιστοιχεί σε τελείως λεία διεπιφάνεια, χρησιμοποιήθηκε στα συγκριτικά διαγράμματα παρά το γεγονός ότι δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα ώστε να επιδειχθεί ένα κατώτερο όριο.

##### 4.6.4.3 Επίδραση του λόγου E<sub>u</sub>/c<sub>u</sub>

Αρχικά, αναφορικά με τα διαγράμματα των οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου, η μεταβολή του λόγου E<sub>u</sub>/c<sub>u</sub> φαίνεται να έχει τη μεγαλύτερη επίδραση σε σχέση με τις δύο άλλες εξεταζόμενες παραμέτρους (α, k<sub>0</sub>), καθώς οι αποκλίσεις κυμαίνονται από 21% έως 26%. Η αύξηση του λόγου, η οποία σημαίνει και αύξηση της δυσκαμψίας του εδάφους προκαλεί μικρότερες μετακινήσεις του συστήματος πασσάλου-εδάφους. Επιπλέον, προκαλεί μικρότερες καμπτικές ροπές. Στα συγκεκριμένα διαγράμματα ορίζεται ένα εύρος τιμών με μέγιστες αποκλίσεις από μία μέση τιμή της τάξης του 3%. Τα παραπάνω αφορούν και τις τρεις περιπτώσεις εδάφους κανονικά στερεοποιημένης αργίλου.

#### 4.7 Παραμετρική διερεύνηση υπολογισμού της οριακής εδαφικής αντίδρασης (p<sub>ult</sub>)

##### 4.7.1 Προσδιορισμός της οριακής εδαφικής αντίδρασης (p<sub>ult</sub>)

Πραγματοποιήθηκε χάραξη μη-γραμμικών καμπύλων p-y με τη χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, για την εκάστοτε περίπτωση εδάφους (A=0.15, A=0.25 και A=0.35) καθώς και για τις διάφορες τιμές των συντελεστών k<sub>0</sub>, α και του λόγου E<sub>u</sub>/c<sub>u</sub>. Τα ενδεικτικά βάθη στα οποία έγινε η χάραξη των καμπύλων p-y είναι τα εξής: z=1m, z=2m, z=4m και z=6m. Σε μεγαλύτερα βάθη, τα αποτελέσματα των αναλύσεων δεν έδιναν καμπύλες στις οποίες να φαίνεται η σύγκλιση στην οριακή τιμή της εδαφικής αντίδρασης (p<sub>ult</sub>). Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος τόσο λιγότερο ολοκληρωμένη είναι η προκύπτουσα καμπύλη p-y, καθώς είναι μικρότερες οι προκαλούμενες μετατοπίσεις, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.56.

Η μορφή των μη-γραμμικών καμπύλων p-y που προέκυψαν από την ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων κρίθηκε ότι πλησιάζει την αντίστοιχη της διαδικασία χάραξης κατά τους Νορβηγικούς κανονισμούς και κατά τον Γεωργιάδη, για τις οποίες έγινε λόγος στις παραγράφους 2.6.2 και 2.6.3 της παρούσας εργασίας. Προκειμένου να εκτιμηθεί η τιμή της οριακής εδαφικής αντίδρασης από τις καμπύλες p-y, γίνεται χρήση εξίσωσης εδαφικής αντίδρασης-μετατόπισης παρόμοιας με αυτή που χρησιμοποιείται στη μεθοδολογία των Νορβηγικών κανονισμών και στη μεθοδολογία του Γεωργιάδη, η οποία είναι η εξής:

$$\frac{y}{p} = \frac{1}{k_1} + \frac{y}{p_{ult}} \quad (4.14)$$

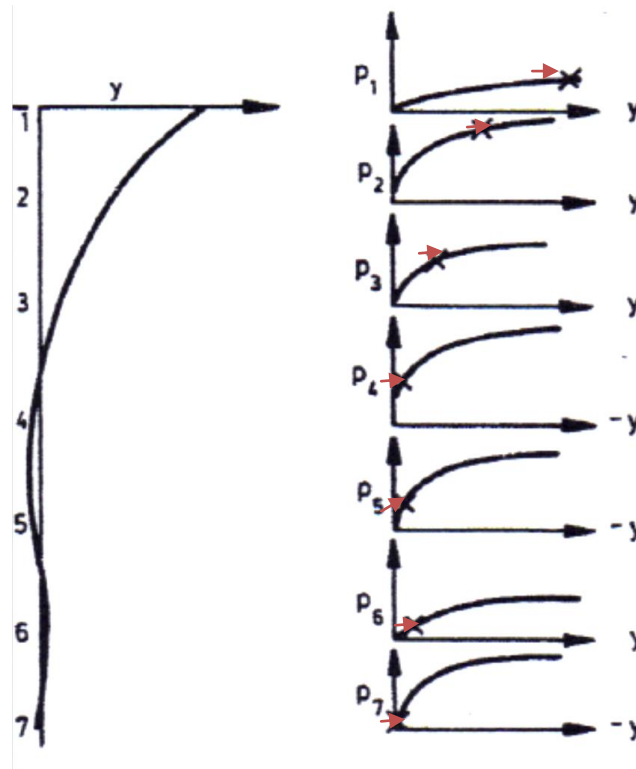
όπου,

$y$ : οριζόντια μετατόπιση (m)

$p$ : εδαφική αντίδραση (kN/m)

$p_{ult}$ : οριακή εδαφική αντίδραση (kN/m)

$k_1$ : κλίση αρχικού γραμμικού τμήματος της καμπύλης  $p$ - $y$ .



**Σχήμα 4.56:** Μη-γραμμικές καμπύλες κατά μήκος πασσάλου υπό εγκάρσια συγκεντρωμένη φόρτιση κεφαλής.

Ορίζεται για κάθε καμπύλη  $p$ - $y$  μία ευθεία γραμμή της μορφής  $y=ax+\beta$ , στην οποία το  $x$  της ευθείας αντιστοιχεί στην οριζόντια μετατόπιση  $y$ , το  $y$  της ευθείας στο λόγο της οριζόντιας μετατόπισης προς την εδαφική αντίδραση  $y/p$ , η κλίση  $a$  στο λόγο  $1/p_{ult}$  και τέλος η σταθερά  $\beta$  στην τιμή  $1/k_1$  (Σχήμα 4.57). Επομένως, γνωρίζοντας την κλίση  $a$  κάθε ευθείας είναι εφικτός ο υπολογισμός της οριακής εδαφικής αντίδρασης μέσω της εξίσωσης:

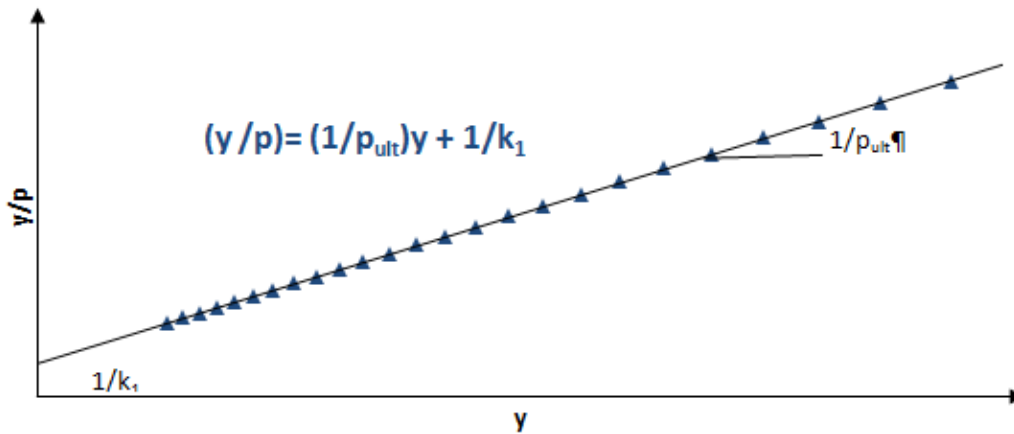
$$p_{ult} = 1 / \alpha \quad (4.15)$$

όπου,

$a$ : κλίση ευθείας  $y=ax+\beta$

$p_{ult}$ : μέγιστη εδαφική αντίδραση

Αρχικά, παρουσιάζονται τα διαγράμματα μη-γραμμικών καμπύλων  $p$ - $y$ , ενδεικτικά για βάθη  $z=1\text{m}$  και  $z=2\text{m}$ , όπως αυτά προέκυψαν από τις αναλύσεις του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $k_0$  και του λόγου  $E_u/c_u$ . Για κάθε καμπύλη  $p$ - $y$  χαράχθηκε η αντίστοιχη ευθεία υπολογισμού της μέγιστης οριακής εδαφικής αντίδρασης  $p_{ult}$ . Οι ευθείες  $(y/p)=f(y)$  παρουσιάζονται για τα βάθη  $z=1\text{m}$ ,  $z=2\text{m}$ ,  $z=4\text{m}$  και  $z=6\text{m}$ .



**Σχήμα 4.57:** Εξίσωση ευθείας για τον υπολογισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) μέσω της μη-γραμμικής καμπύλης  $p$ - $y$ .

#### 4.7.2 Επαλήθευση διαδικασίας προσδιορισμού της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ )

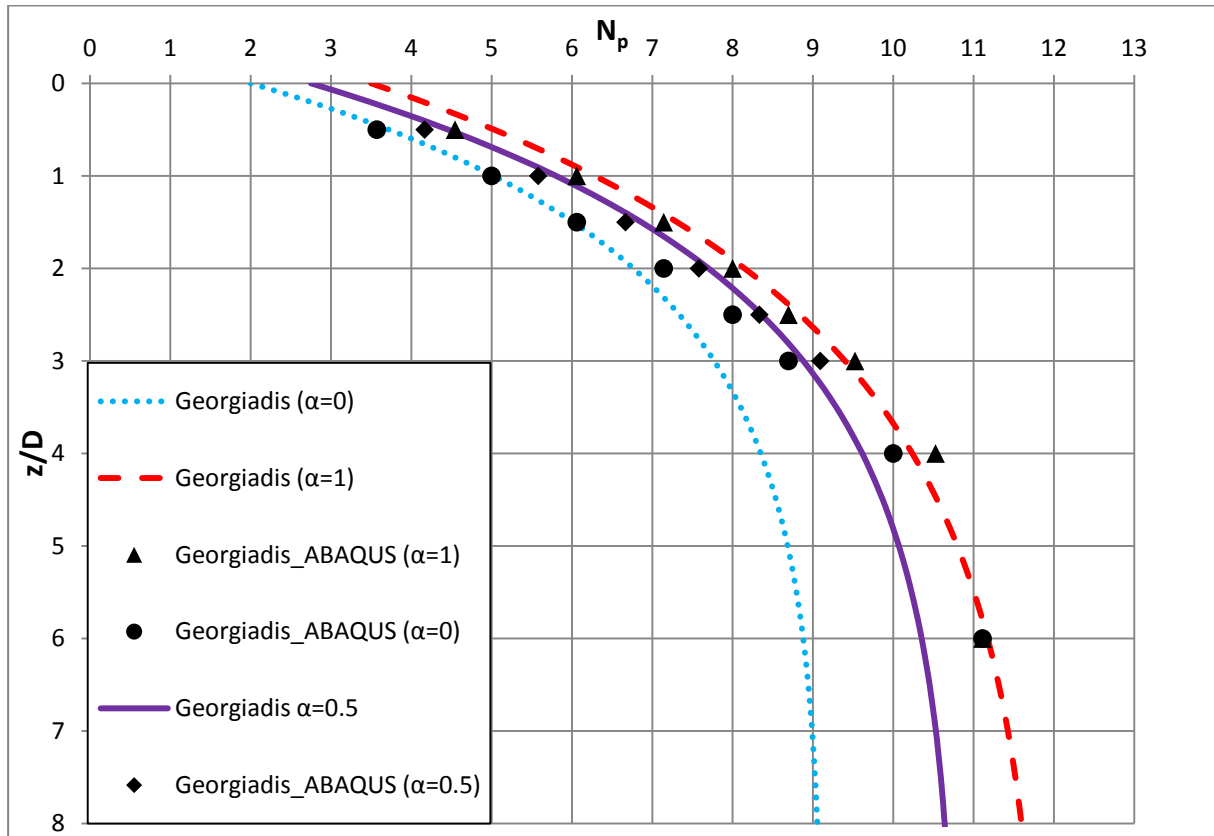
Για την επαλήθευση της διαδικασίας προσδιορισμού της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο και χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέχθηκε μεθοδολογία χάραξης καμπύλων  $p$ - $y$  σύμφωνα με τον Γεωργιάδη 2010 (Παράγραφος 2.6.3). Η μεθοδολογία κατά Γεωργιάδη εφαρμόστηκε ώστε να μορφωθούν οι προβλεπόμενες καμπύλες κατανομής του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  για συγκεκριμένα εδαφικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 4.4). Ακολούθως εκτελέστηκαν τρεις αναλύσεις του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus με τιμές παραμέτρων που εισήχθησαν στις παραπάνω αριθμητικές αναλύσεις. Μορφώθηκαν μη-γραμμικές καμπύλες  $p$ - $y$  μέχρι βάθος έξι διαμέτρων και στη συνέχεια υπολογίστηκε η τιμή της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) με βάση την προαναφερθείσα διαδικασία. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας πασσάλου εδάφους,  $\alpha=0$ ,  $\alpha=0.5$  και  $\alpha=1$  (Σχήμα 4.58).

Οι αριθμητικές αναλύσεις του Γεωργιάδη (2010) αφορούν πάσσαλο μήκους  $L=20m$  και διαμέτρου  $D=1m$  (όμοια χαρακτηριστικά με τον υπό μελέτη πάσσαλο της παρούσας εργασίας), μέτρου ελαστικότητας  $E_p=2.9 \cdot 10^7$  kPa και λόγου Poisson  $\nu=0.1$ . Η συμπεριφορά του εδάφους προσομοιώνεται με την εισαγωγή ελαστικού-απολύτως πλαστικού καταστατικού προσομοιώματος με τα εξής χαρακτηριστικά: σταθερή αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u=0.5kPa$  κατά μήκος του πασσάλου, λόγος Poisson  $\nu_u=0.49$  και ειδικό βάρος  $\gamma=18kN/m^3$ .

**Πίνακας 4.4:** Χαρακτηριστικά συγκριτικών αναλύσεων.

Αύξων αριθμός ανάλυσης	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή $c_u$	Λόγος $E_u/c_u$	Συντελεστής διεπιφάνειας $\alpha$
1	50	200	0
2	50	200	0.5
3	50	200	1

Όπως προκύπτει από τη διαγραμματική σύγκριση του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  κατά μήκος του πασσάλου (Σχήμα 4.58), τα αποτελέσματα των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων εντοπίζονται εντός του εύρους τιμών που προβλέπονται από τη μεθοδολογία του Γεωργιάδη. Οι διαφορές που παρατηρούνται για βάθη μεγαλύτερα των δύο διαμέτρων πασσάλου πιθανόν οφείλονται στη διαφορετική διαδικασία προσδιορισμού της οριακής εδαφικής αντίδρασης των δύο αριθμητικών μεθόδων.

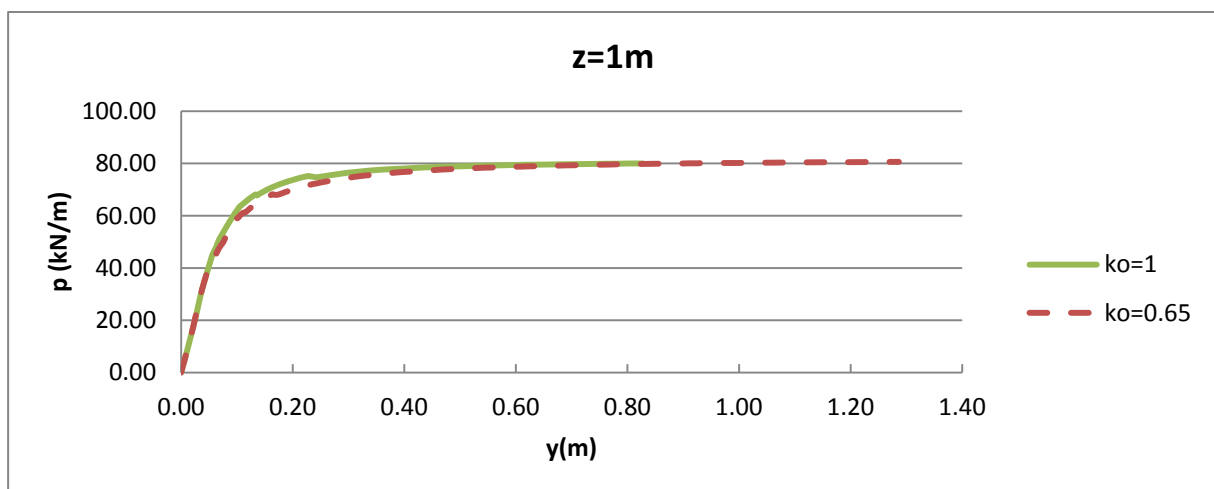


**Σχήμα 4.58:** Σύγκριση κατανομής του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  μεταξύ της μεθοδολογίας του Γεωργιάδη και των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

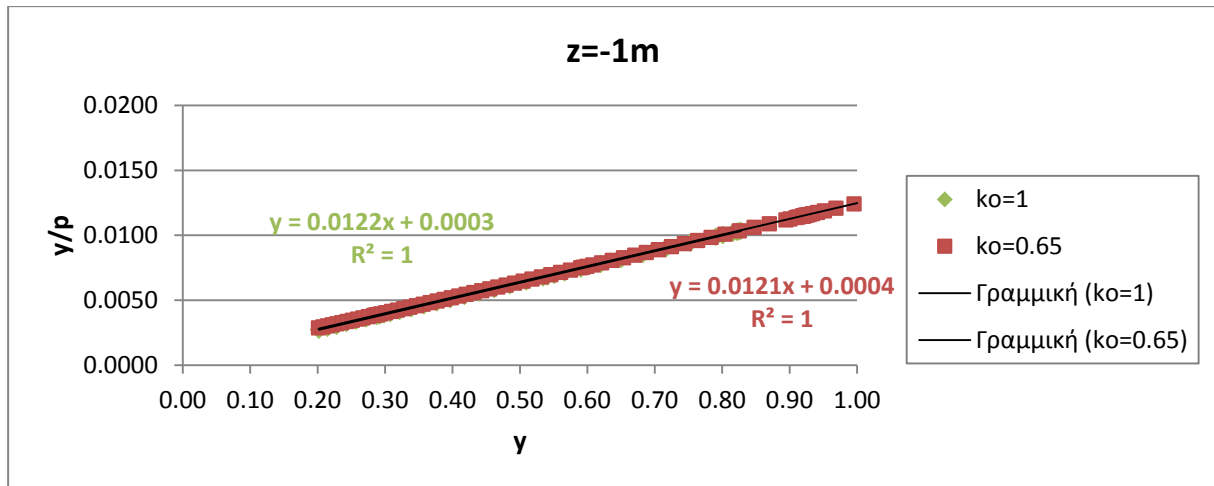
### 4.7.3 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.15$

#### 4.7.3.1 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0$

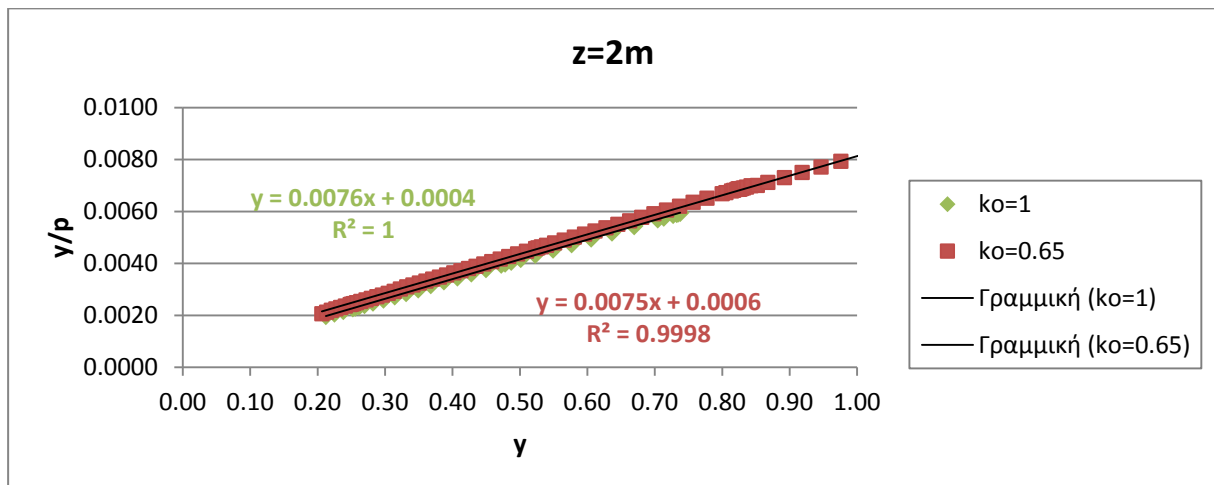
Για την παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_0$  διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας  $\alpha$  και του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $\alpha$  κατά Weltman & Healy και  $E_u/c_u=50$  αντίστοιχα.



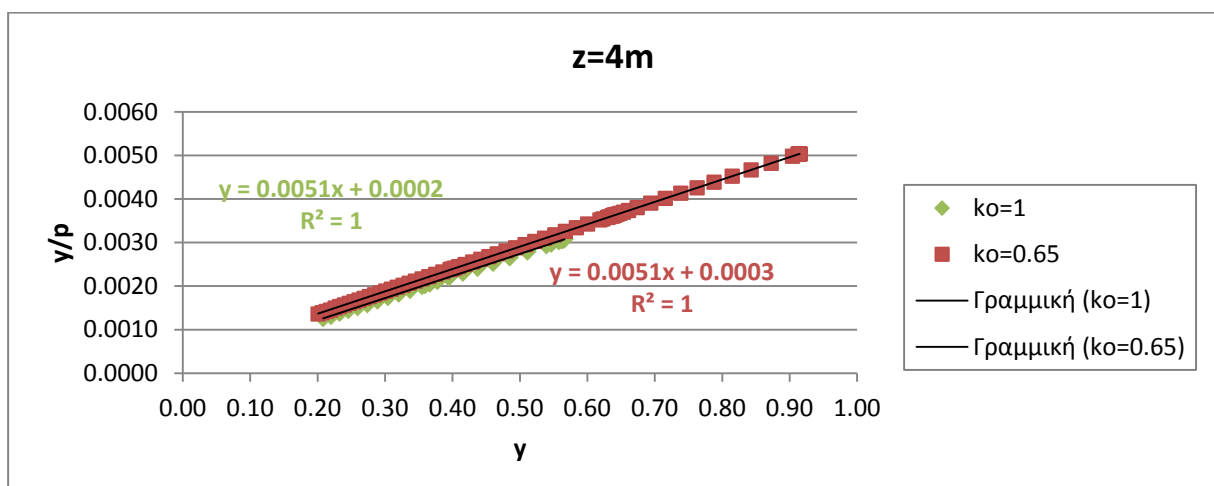
**Σχήμα 4.59:** Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $\gamma$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=1m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_0$ .



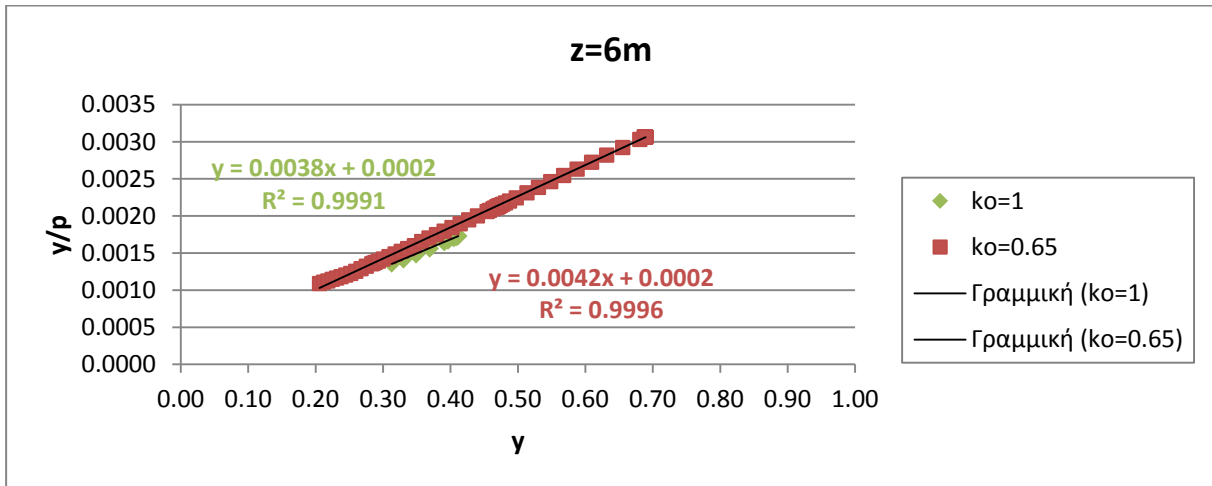
**Σχήμα 4.60:** Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=1m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_0$ .



**Σχήμα 4.61:** Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=2m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_0$ .



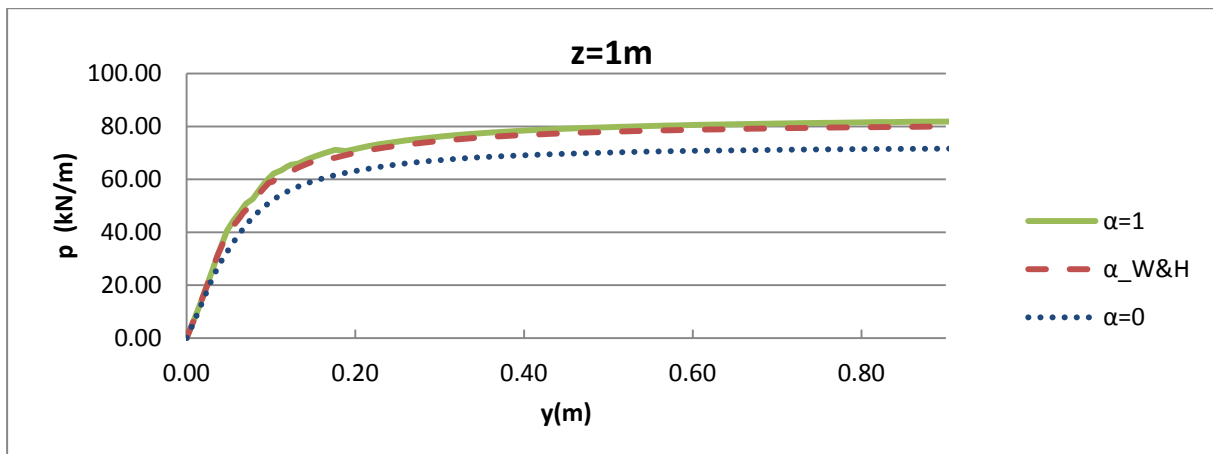
**Σχήμα 4.62:** Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=4m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_0$ .



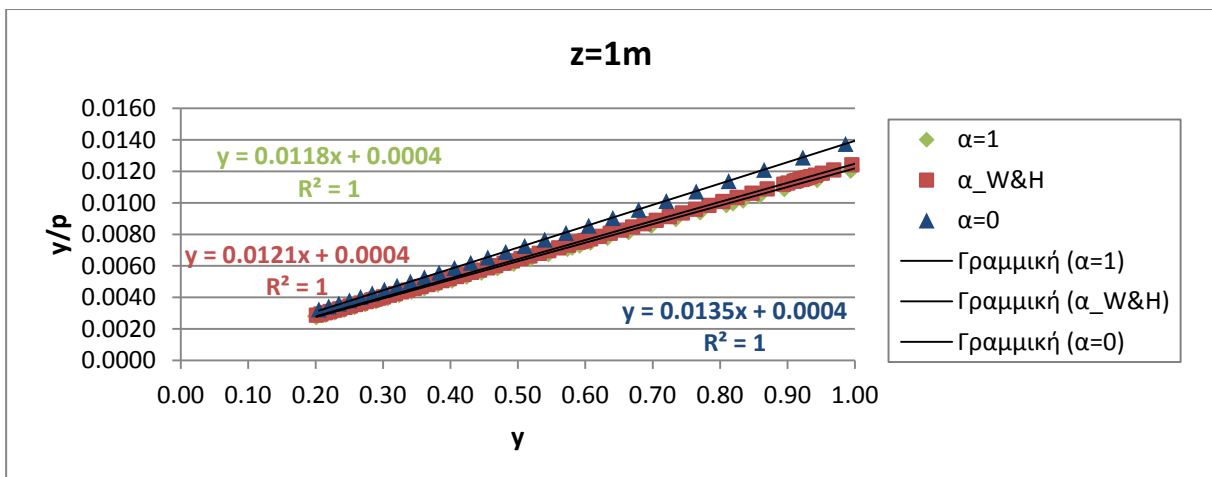
Σχήμα 4.63: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=6m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_0$ .

#### 4.7.3.2 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή διεπιφάνειας $\alpha$

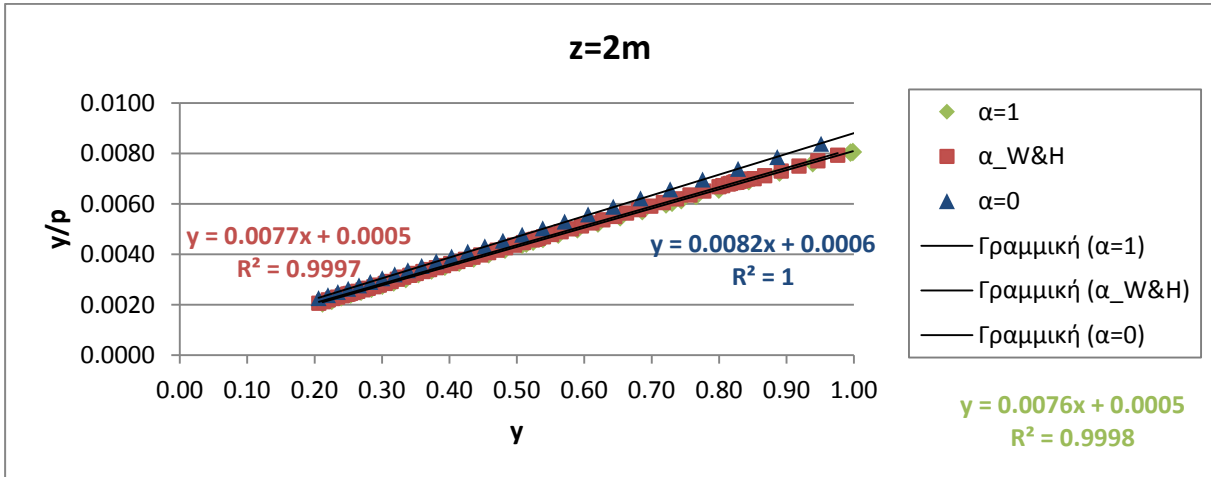
Για την παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_0$ ) και του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $k_0=0.65$  και  $E_u/c_u=50$  αντίστοιχα.



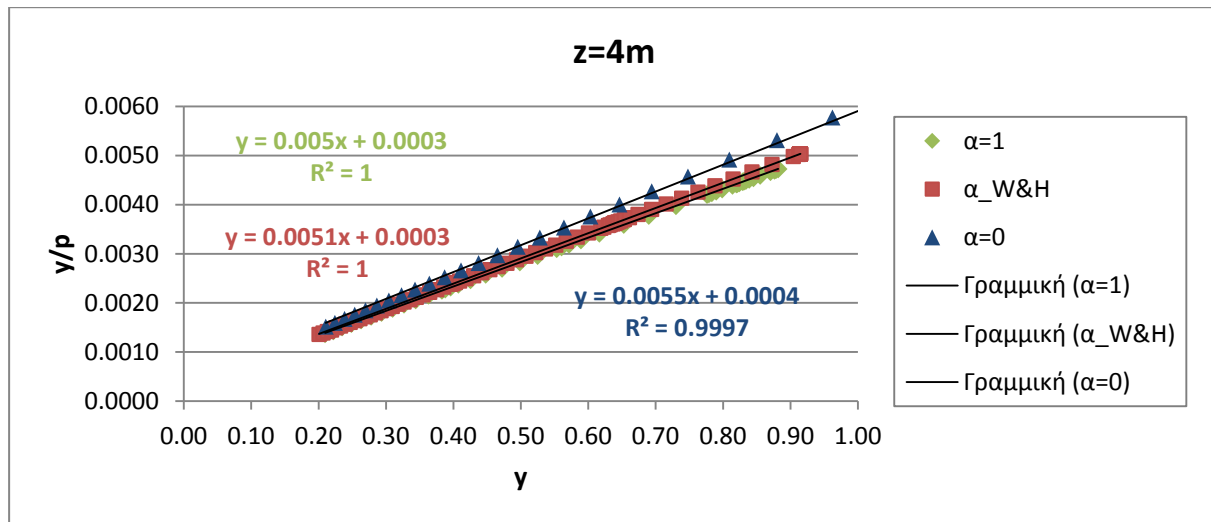
Σχήμα 4.64: Μη γραμμική καμπύλη  $p-y$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=1m$  για διάφορες τιμές του συντελεστή  $\alpha$ .



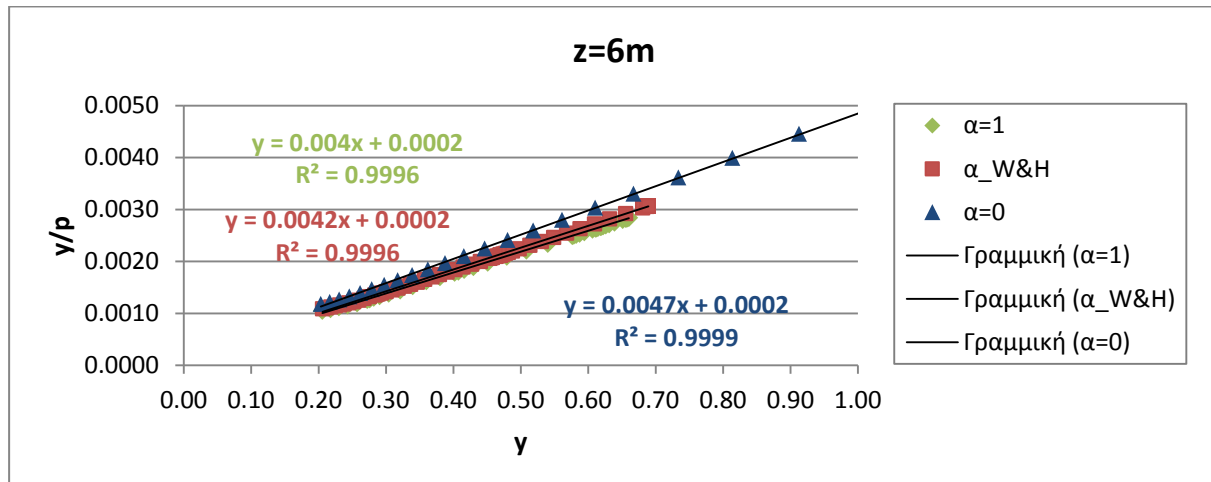
Σχήμα 4.65: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=1m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .



**Σχήμα 4.66:** Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=2m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .



**Σχήμα 4.67:** Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=4m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .

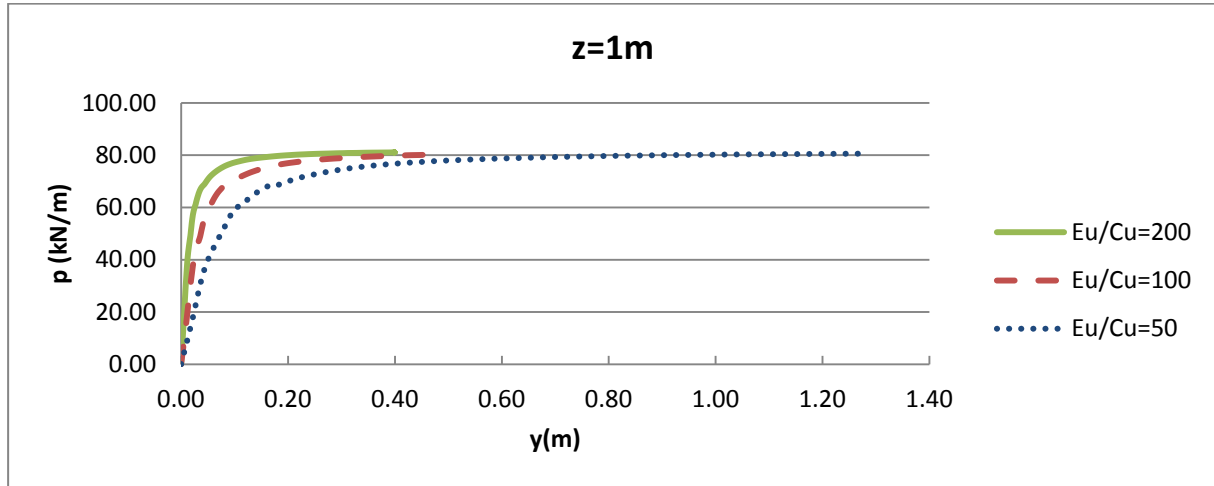


**Σχήμα 4.68:** Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=6m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .

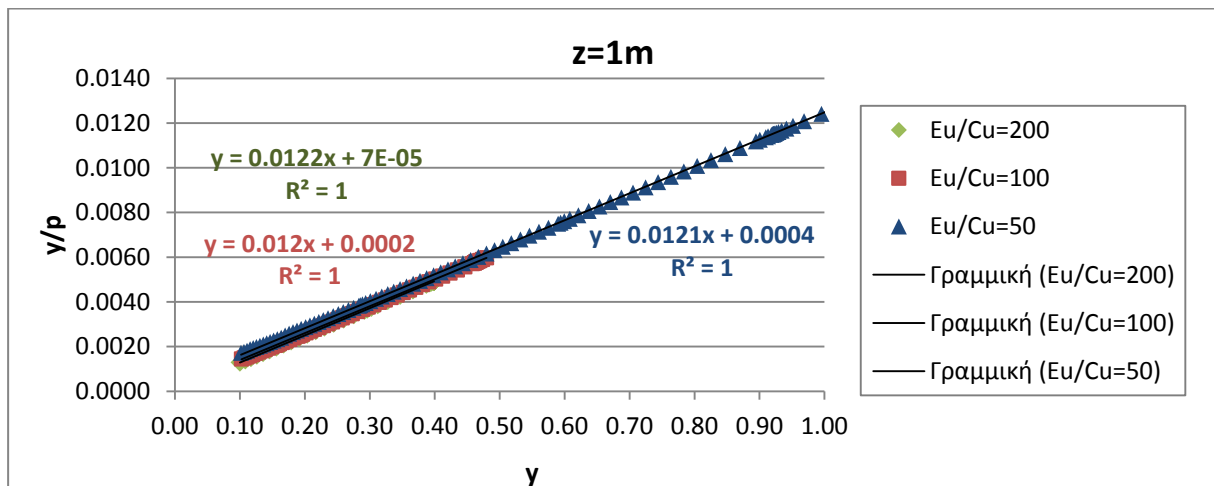


### 4.7.3.3 Παραμετρική διερεύνηση του μέτρου ελαστικότητας E

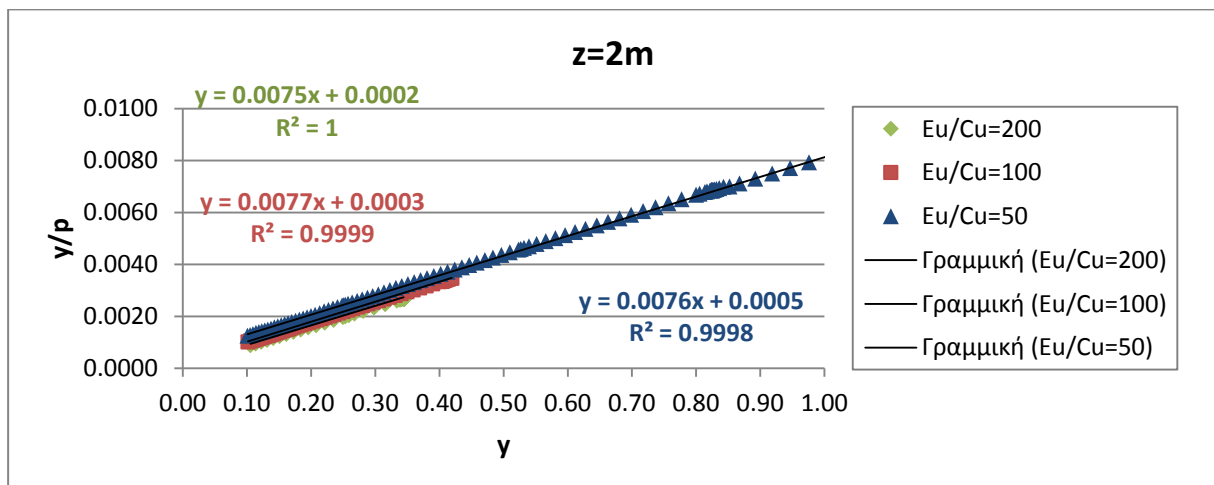
Για την παραμετρική διερεύνηση του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $E_u/c_u$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_o$ ) και του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ),  $k_o=0.65$  και  $\alpha$  κατά Weltam & Healy αντίστοιχα.



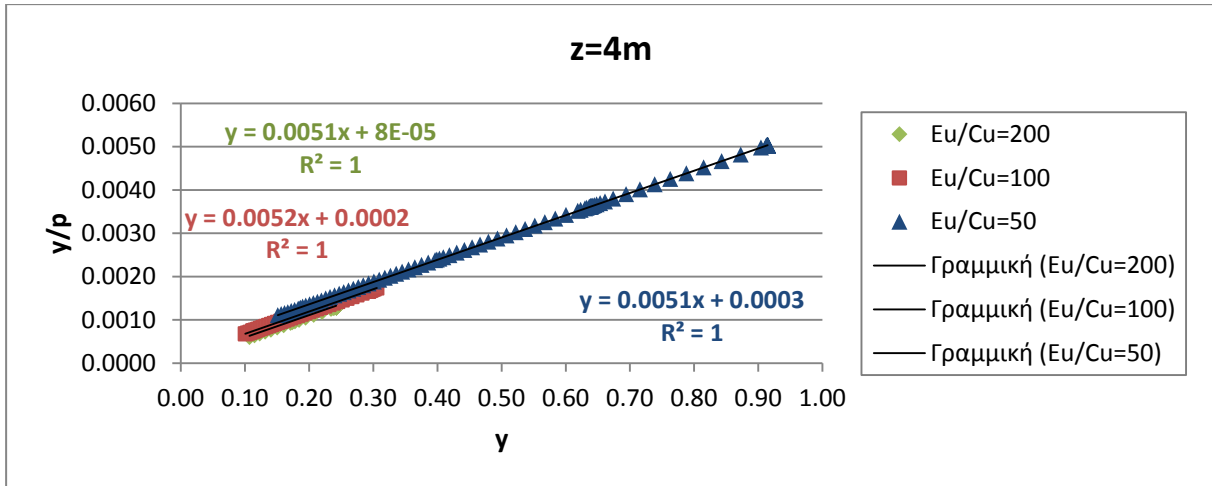
Σχήμα 4.69: Μη γραμμική καμπύλη p-y για A=0.15 σε βάθος z=1m για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



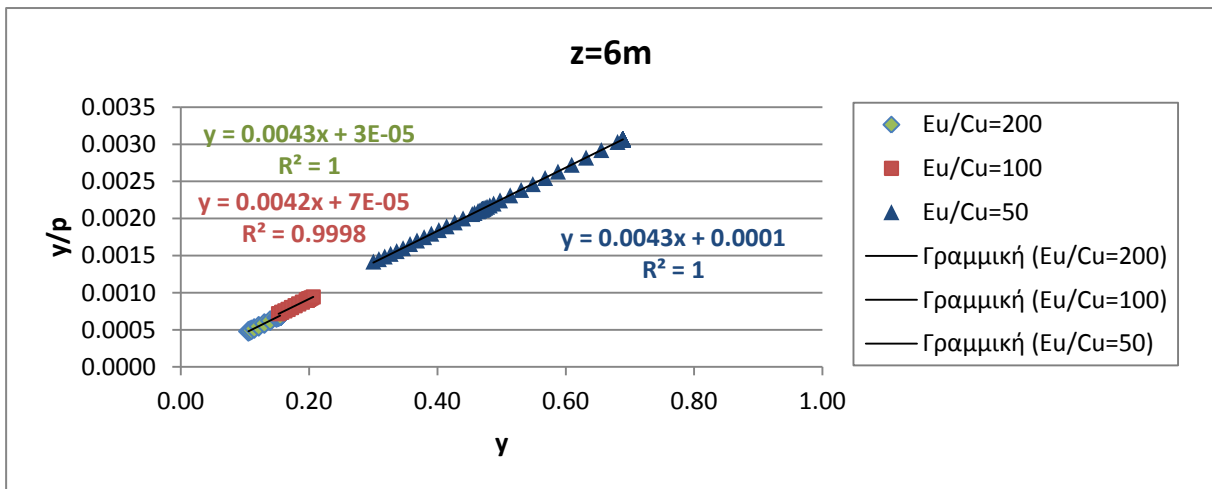
Σχήμα 4.70: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για A=0.15 σε βάθος z=1m για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



Σχήμα 4.71: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για A=0.15 σε βάθος z=2m για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



Σχήμα 4.72: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=4m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

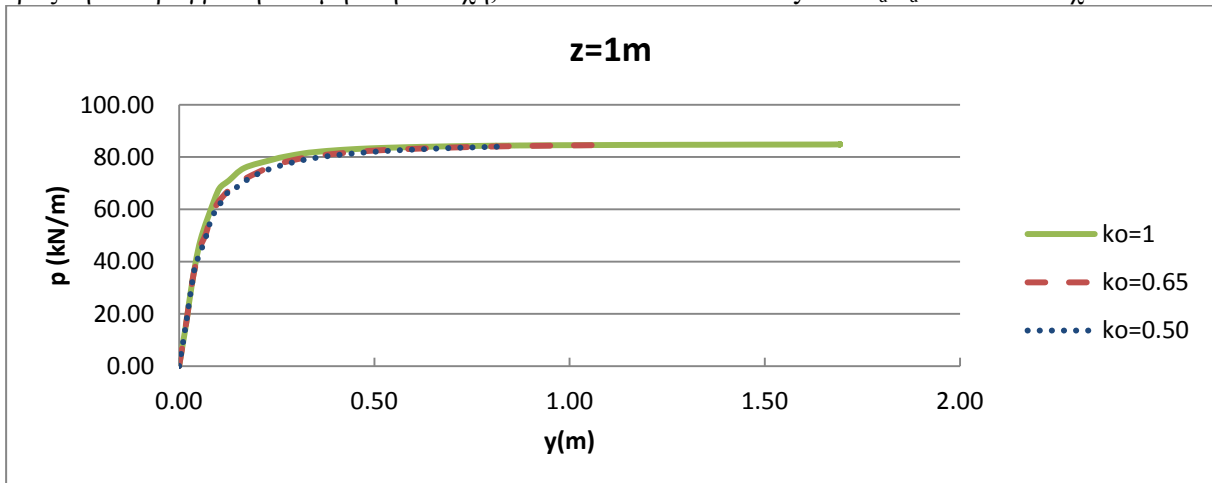


Σχήμα 4.73: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=6m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

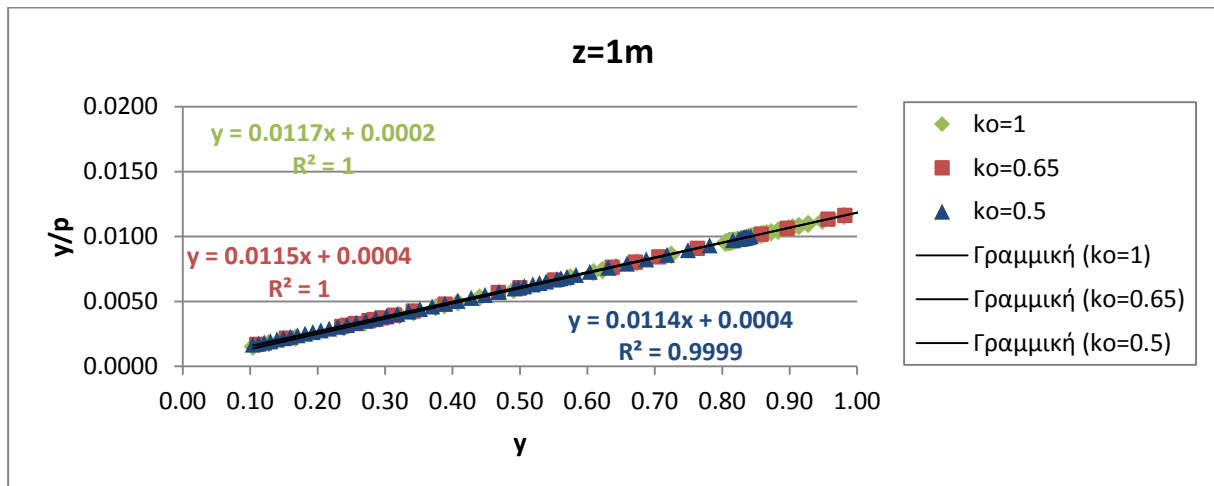
#### 4.7.4 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.25$

##### 4.7.4.1 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o$

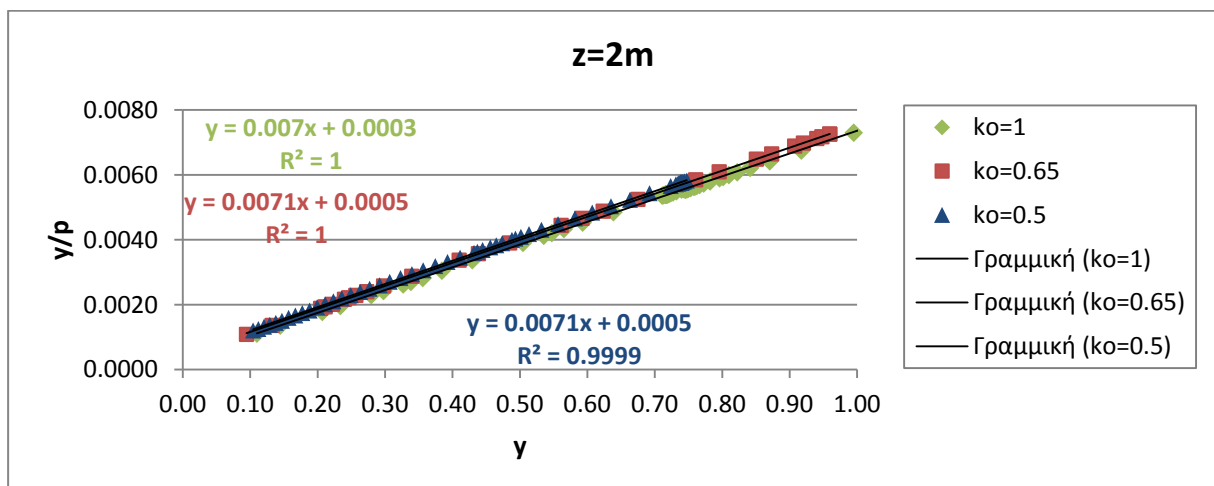
Για την παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ( $k_o$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ) και του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $\alpha$  κατά Weltman & Healy και  $E_u/c_u=50$  αντίστοιχα.



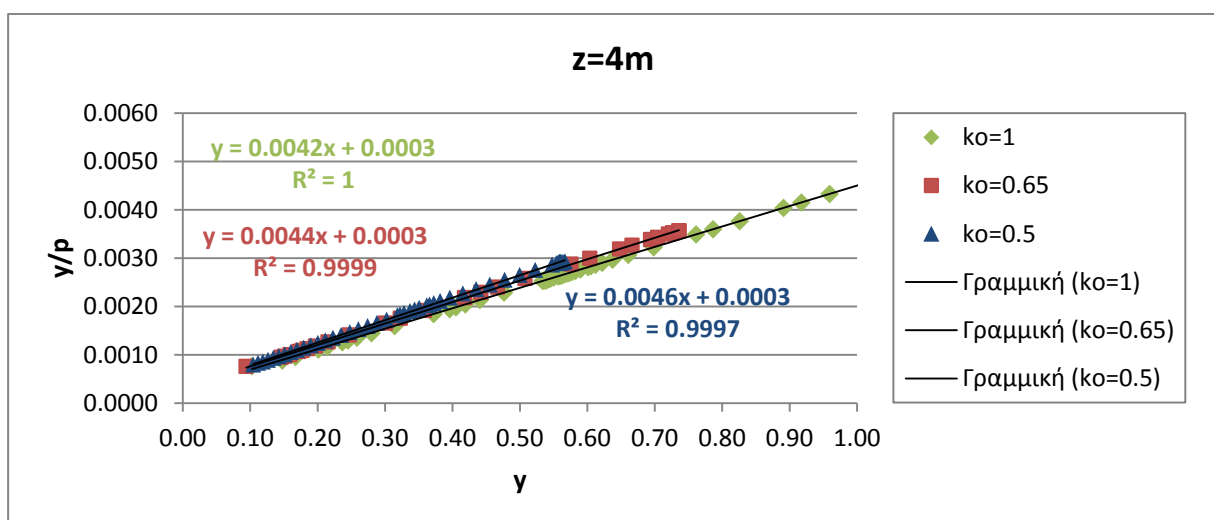
Σχήμα 4.74: Μη γραμμική καμπύλη  $p-y$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=1m$  για διαφορετικές τιμές του  $k_o$ .



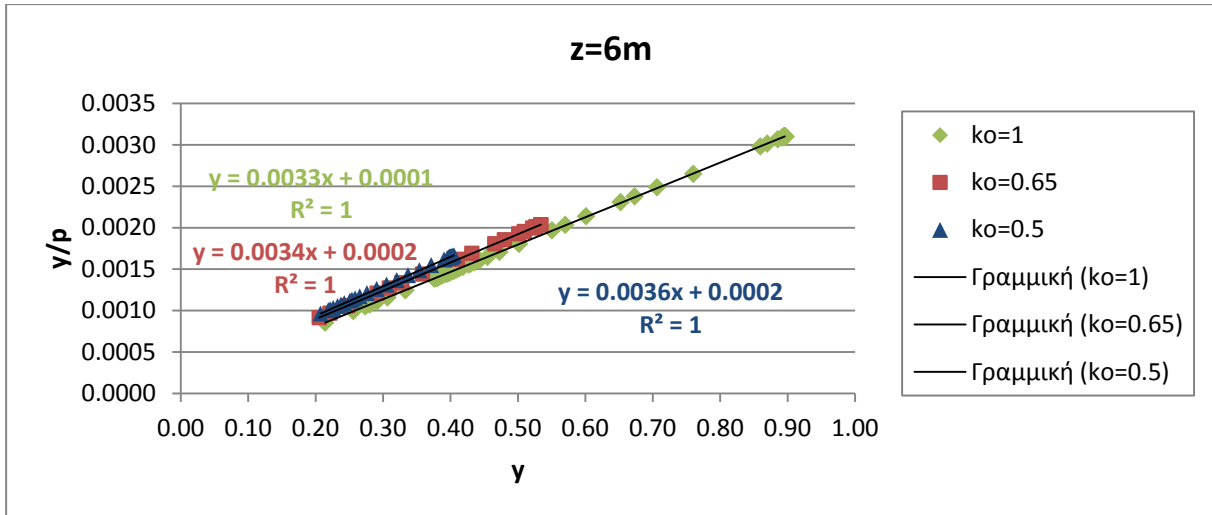
Σχήμα 4.75: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=1m$  για διαφορετικές τιμές του  $k_o$ .



Σχήμα 4.76: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=2m$  για διαφορετικές τιμές του  $k_o$ .



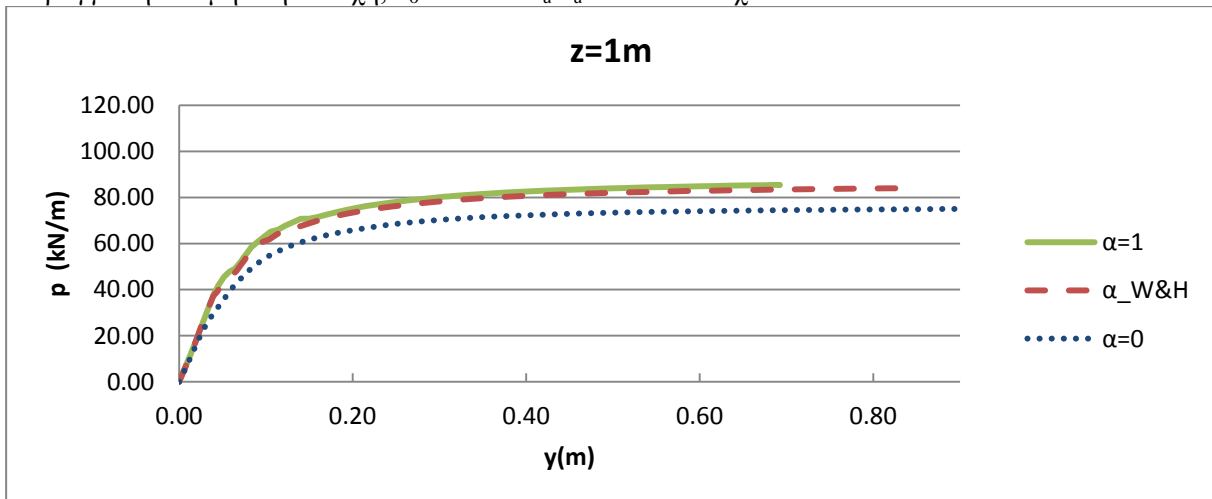
Σχήμα 4.77: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=4m$  για διαφορετικές τιμές του  $k_o$ .



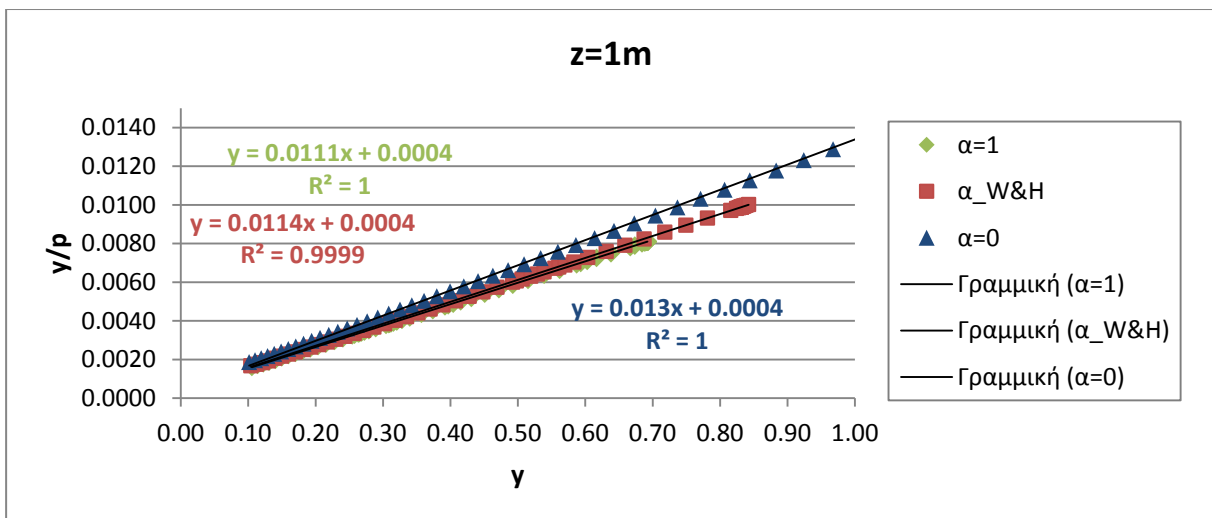
Σχήμα 4.78: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=6m$  για διαφορετικές τιμές του  $k_o$ .

#### 4.7.4.2 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή διεπιφάνειας $\alpha$

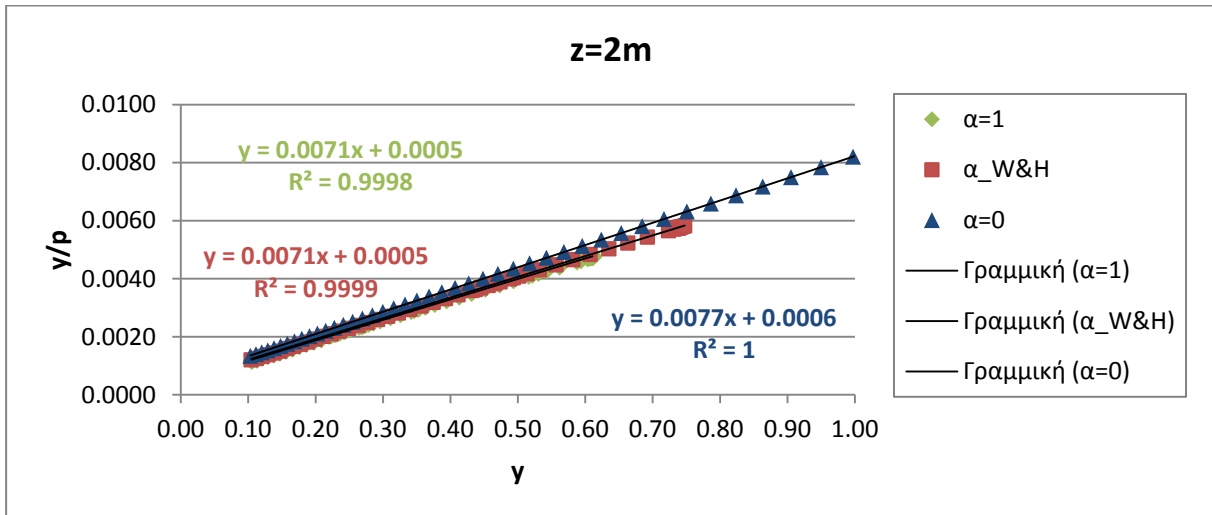
Για την παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_o$ ) και του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $k_o=0.5$  και  $E_u/c_u=50$  αντίστοιχα.



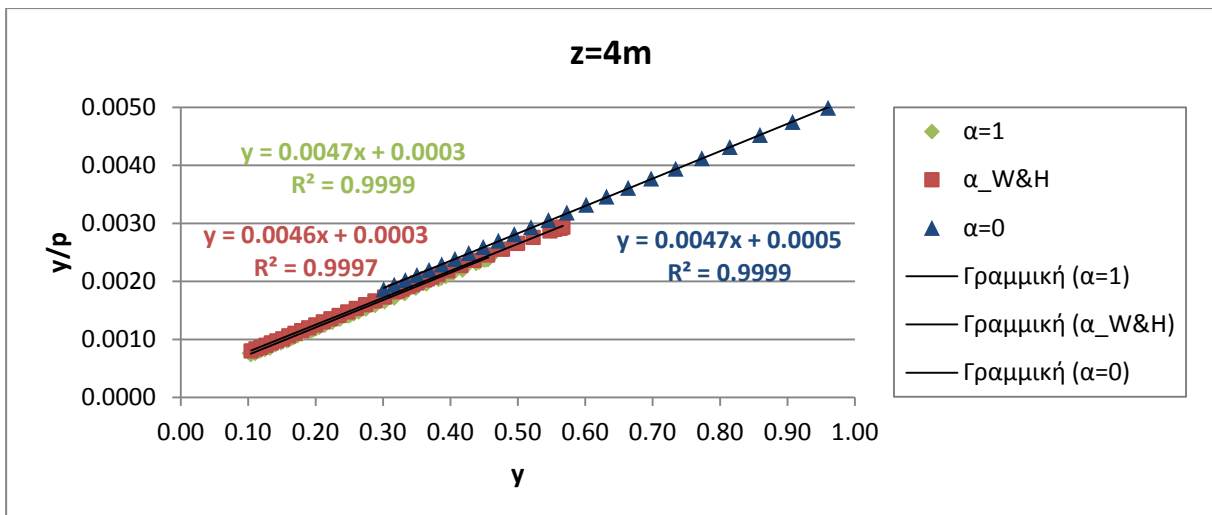
Σχήμα 4.79: Μη γραμμική καμπύλη  $p-y$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=1m$  για διάφορες τιμές του  $\alpha$ .



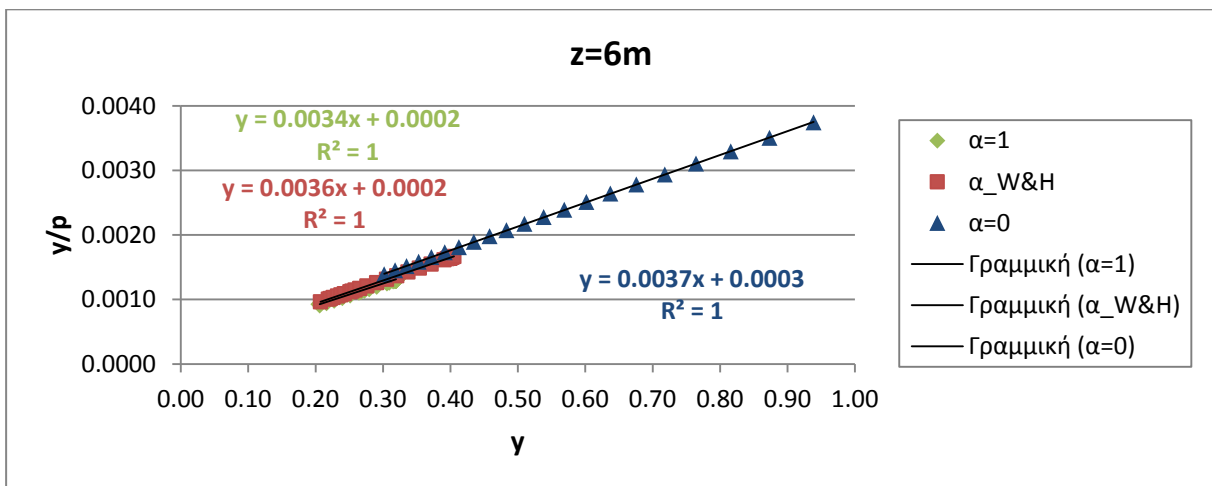
Σχήμα 4.80: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=1m$  για διαφορετικές τιμές του  $\alpha$ .



Σχήμα 4.81: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=2m$  για διαφορετικές τιμές του  $\alpha$ .



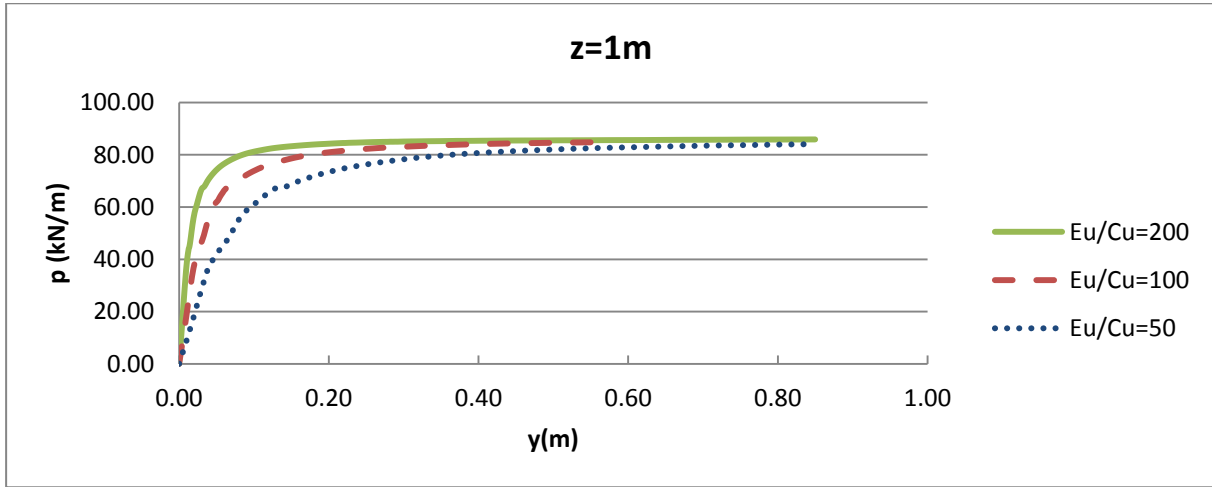
Σχήμα 4.82: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=4m$  για διαφορετικές τιμές του  $\alpha$ .



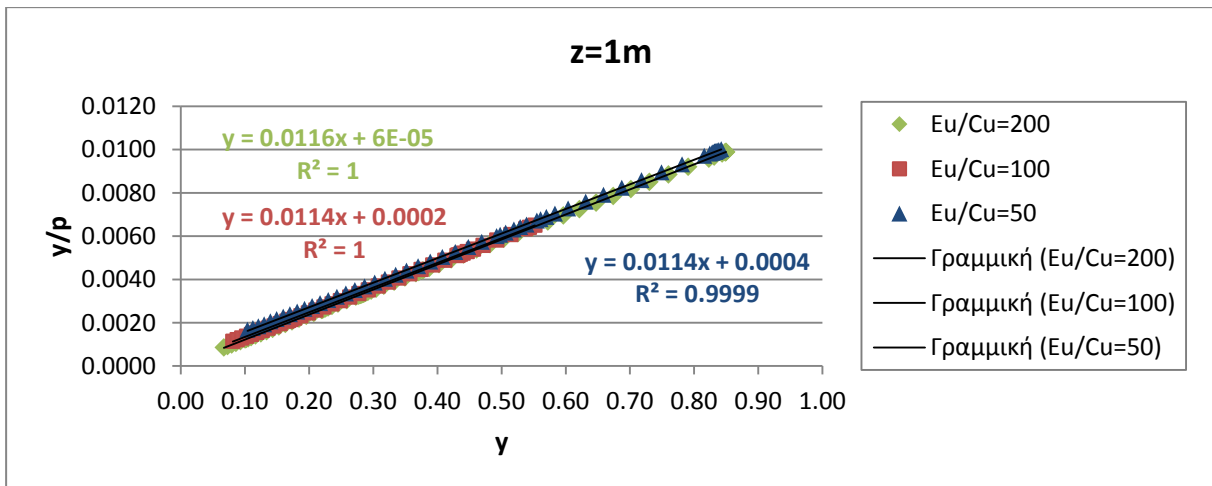
Σχήμα 4.83: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=6m$  για διαφορετικές τιμές του  $\alpha$ .

#### 4.7.4.3 Παραμετρική διερεύνηση του μέτρου ελαστικότητας E

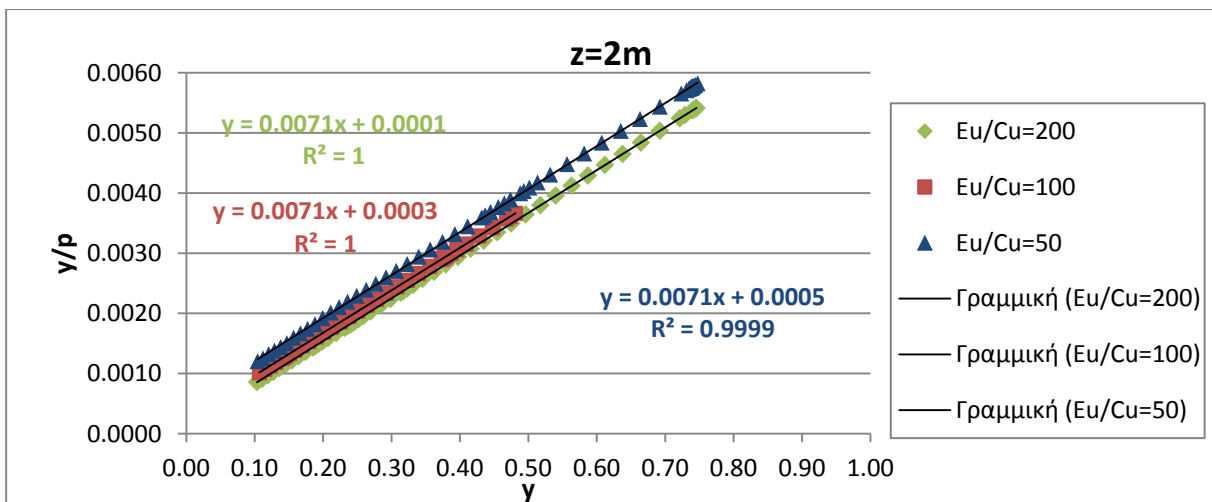
Για την παραμετρική διερεύνηση του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $E_u/c_u$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_o$ ) και του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ),  $k_o=0.65$  και  $\alpha$  κατά Weltam & Healy αντίστοιχα.



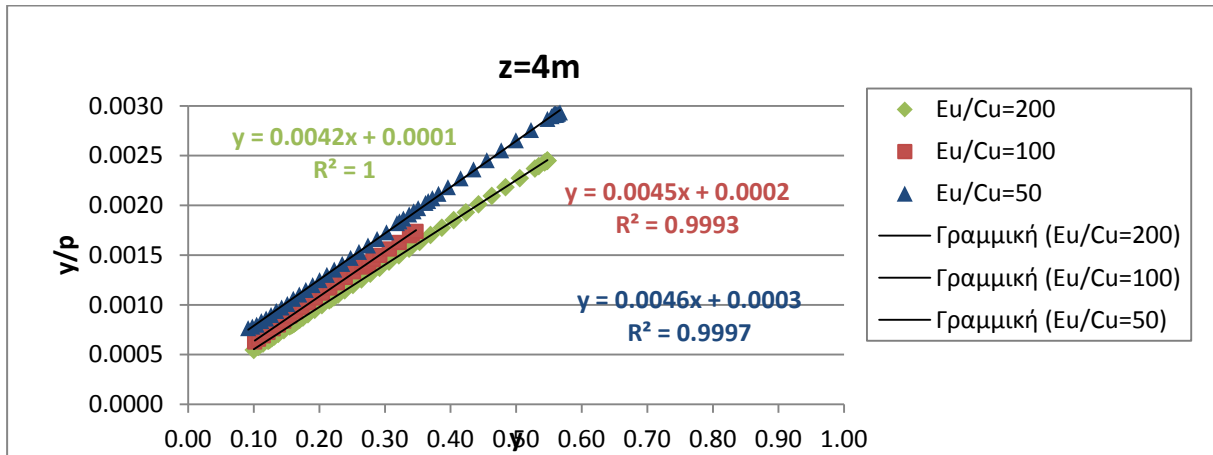
Σχήμα 4.84: Μη γραμμική καμπύλη p-y για A=0.25 σε βάθος z=1m για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



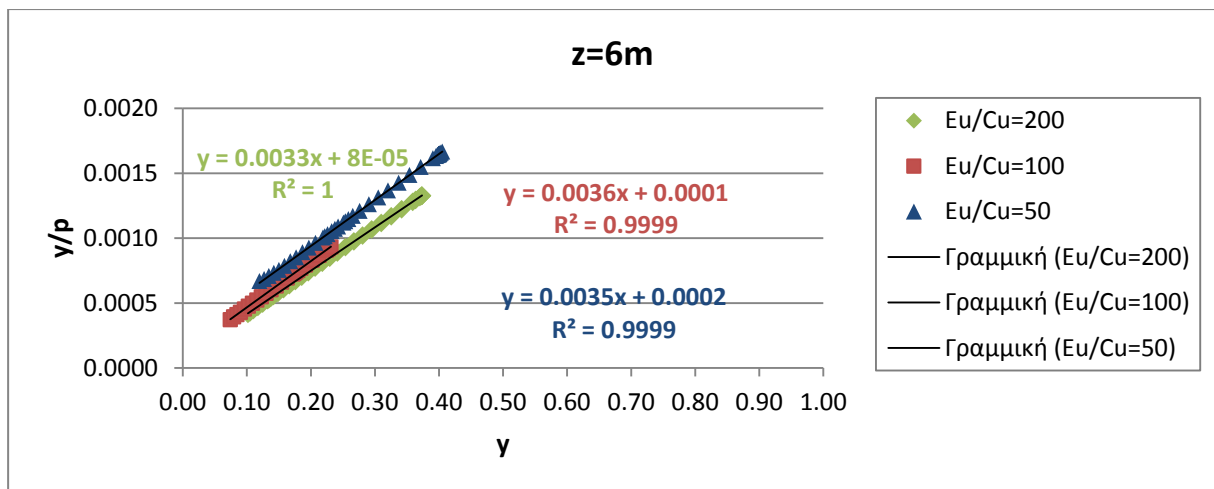
Σχήμα 4.85: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για A=0.25 σε βάθος z=1m για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



Σχήμα 4.86: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για A=0.25 σε βάθος z=2m για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



Σχήμα 4.87: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=4m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

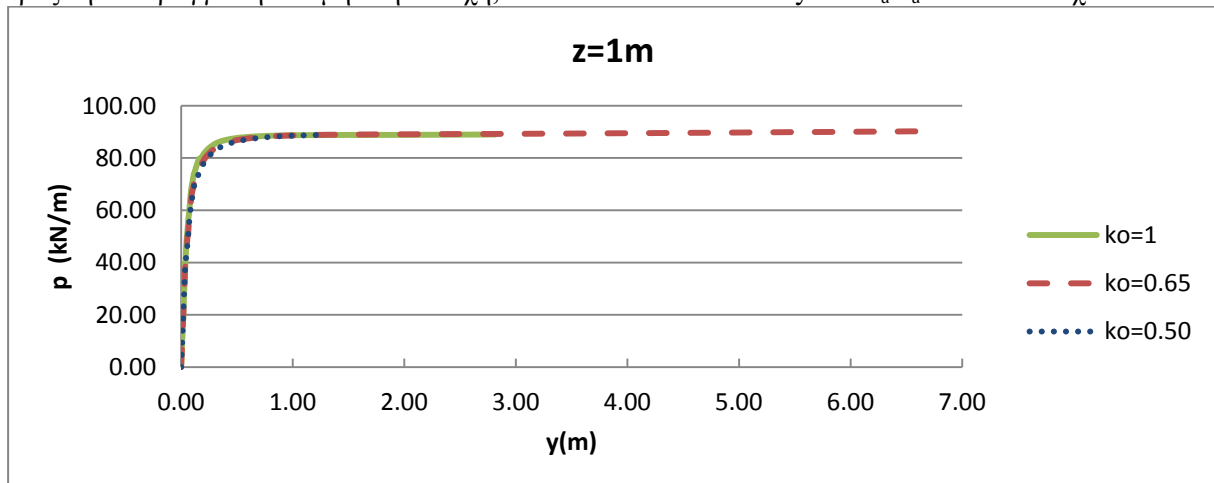


Σχήμα 4.88: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=6m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

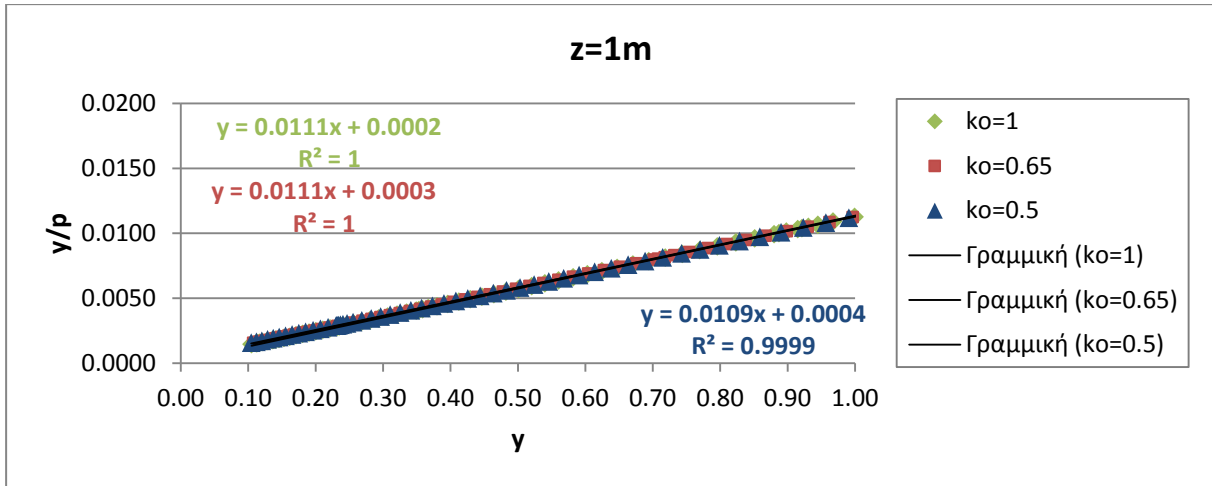
#### 4.7.5 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.35$

##### 4.7.5.1 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o$

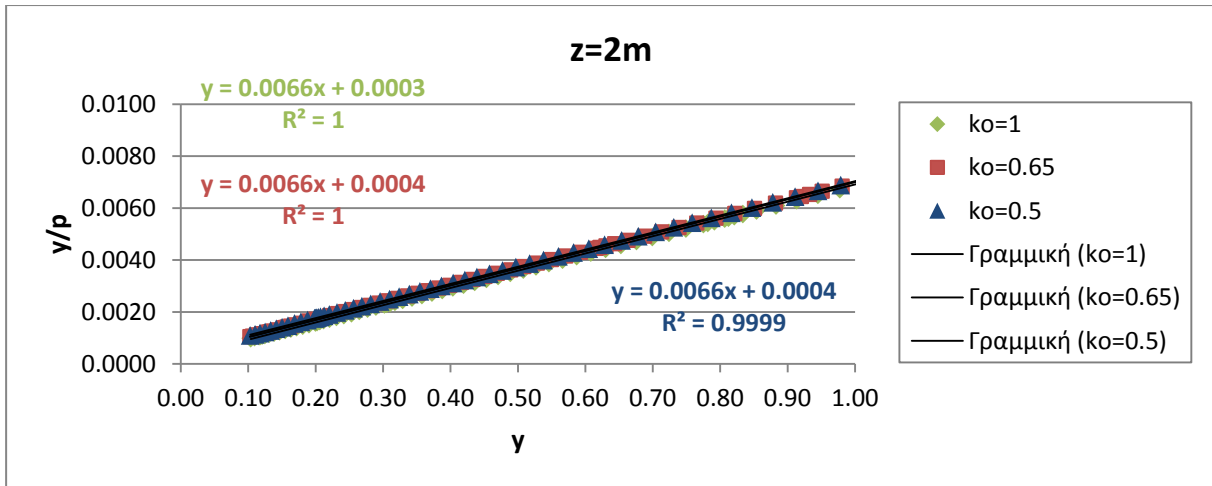
Για την παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ( $k_o$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ) και του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $\alpha$  κατά Weltman & Healy και  $E_u/c_u=50$  αντίστοιχα.



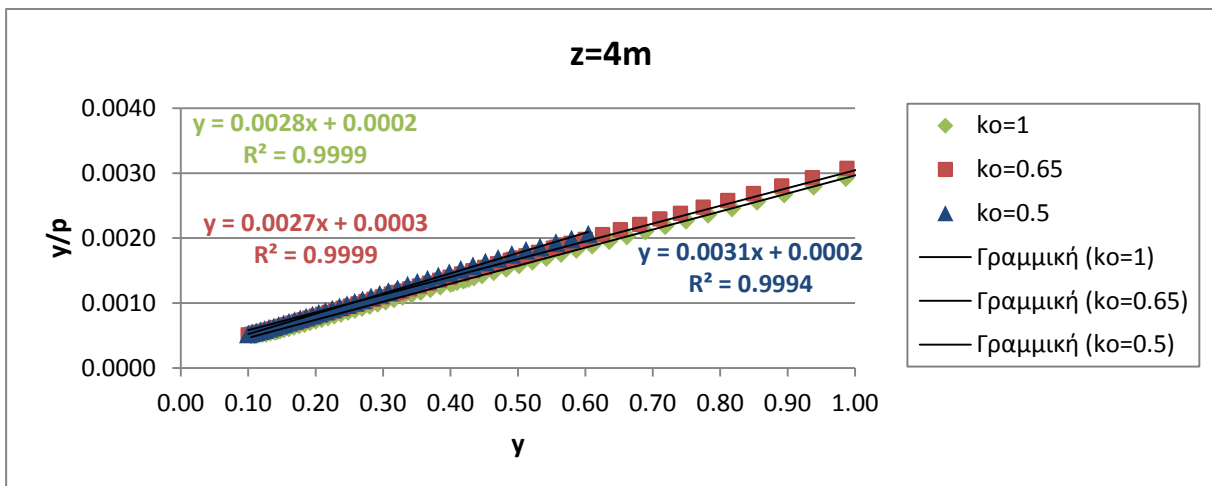
Σχήμα 4.89: Μη γραμμική καμπύλη  $p-y$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=1m$  για διαφορετικές τιμές του  $k_o$ .



Σχήμα 4.90: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=1m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή  $k_o$ .

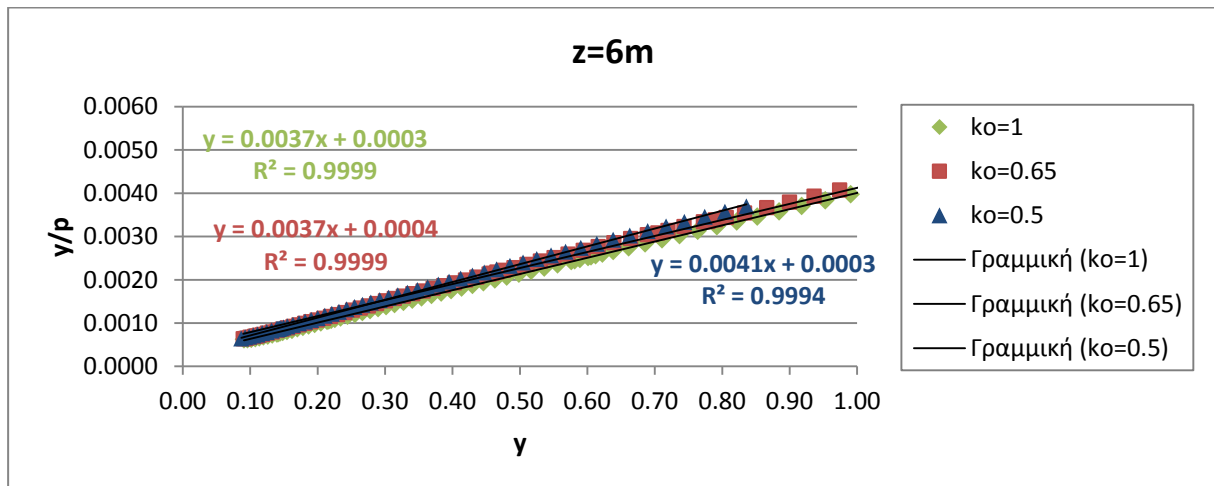


Σχήμα 4.91: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=2m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή  $k_o$ .



Σχήμα 4.92: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=4m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή  $k_o$ .

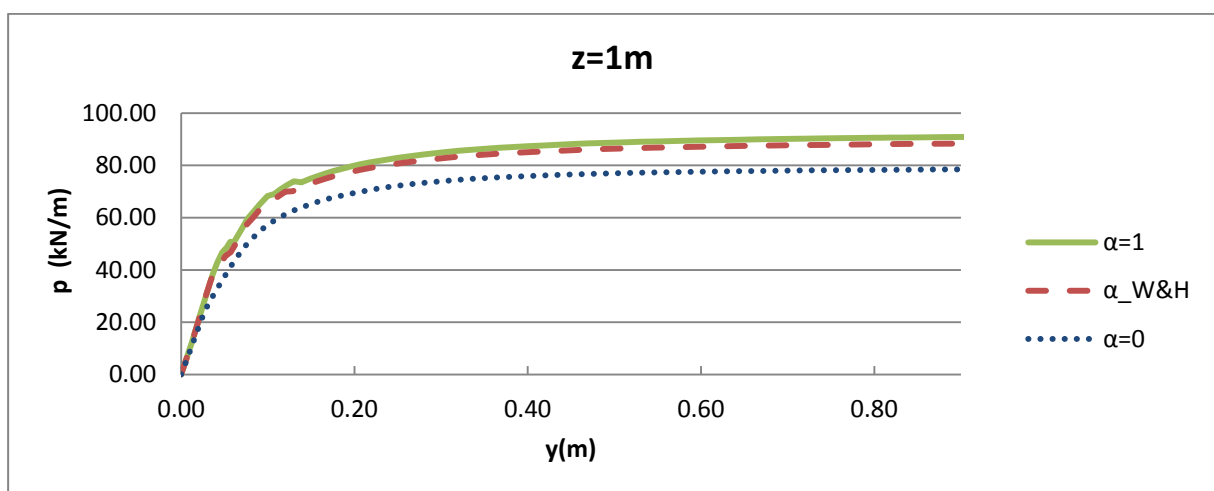




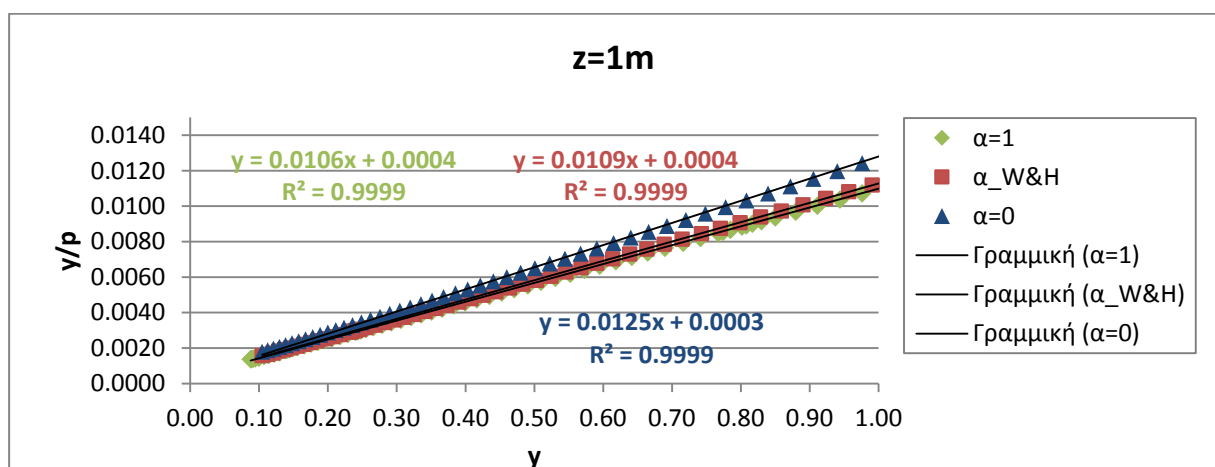
Σχήμα 4.93: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=6m$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή  $k_o$ .

#### 4.7.5.2 Παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή διεπιφάνειας $\alpha$

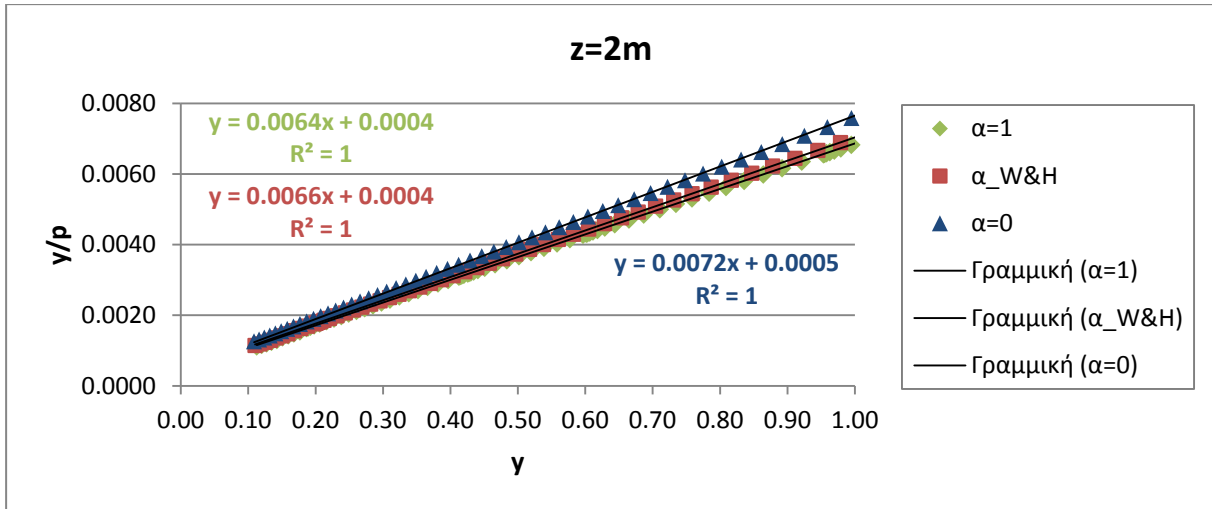
Για την παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_o$ ) και του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $k_o=0.5$  και  $E_u/c_u=50$  αντίστοιχα.



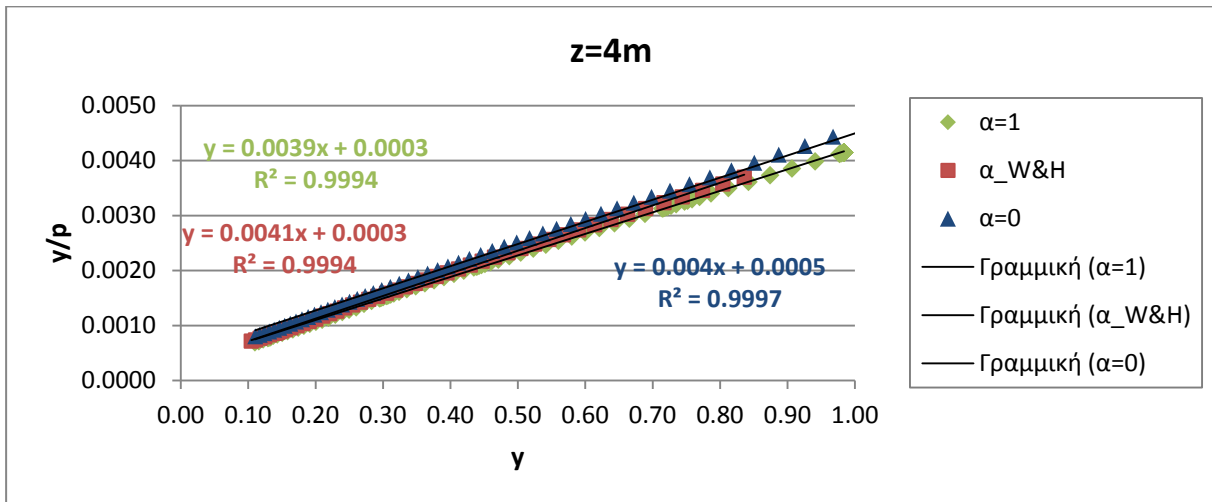
Σχήμα 4.94: Μη γραμμική καμπύλη  $p-y$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=1m$  για διάφορες τιμές του συντελεστή  $\alpha$ .



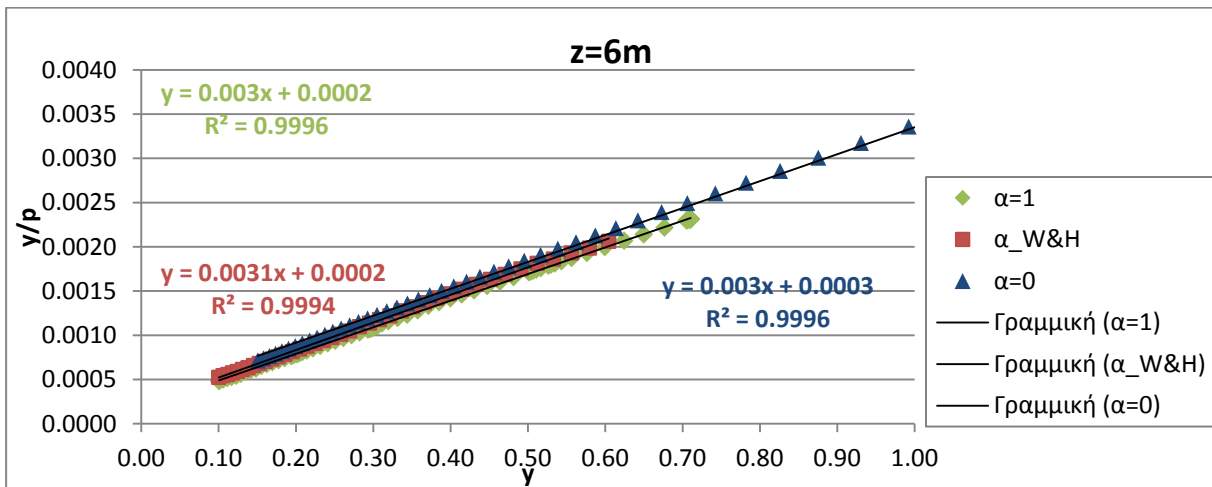
Σχήμα 4.95: Μη γραμμική καμπύλη  $p-y$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=1m$  για διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .



**Σχήμα 4.96:** Μη γραμμική καμπύλη p-y για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=2\text{m}$  για διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .



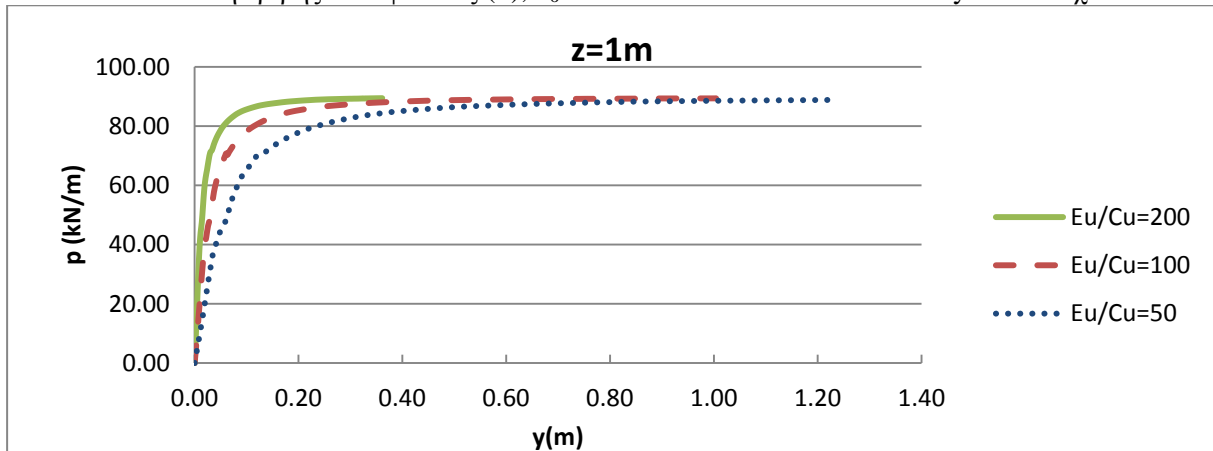
**Σχήμα 4.97:** Μη γραμμική καμπύλη p-y για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=4\text{m}$  για διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .



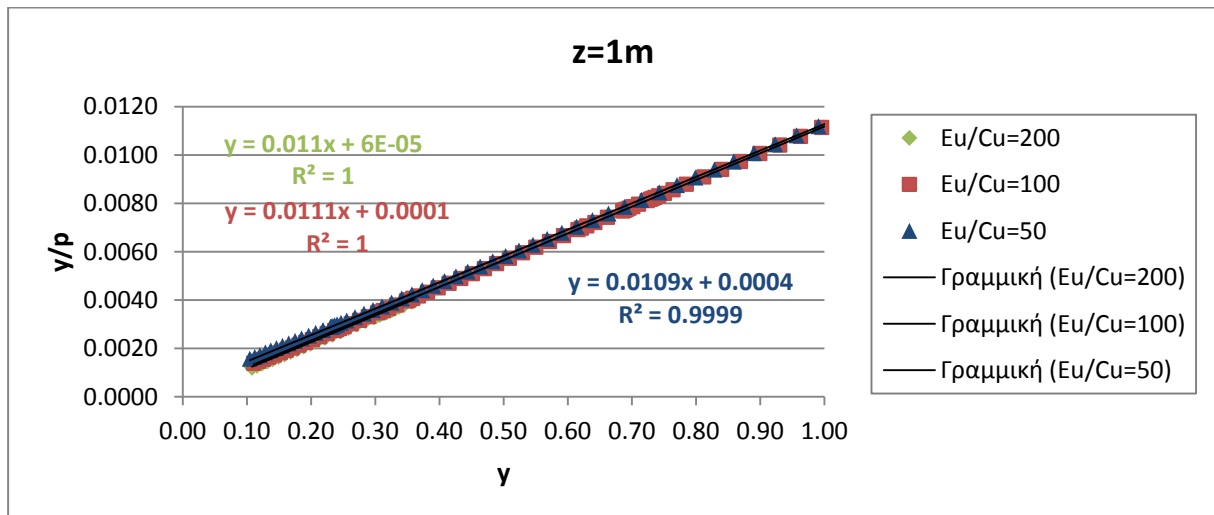
**Σχήμα 4.98:** Μη γραμμική καμπύλη p-y για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=6\text{m}$  για διάφορες τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ .

### 4.7.5.3 Παραμετρική διερεύνηση του μέτρου ελαστικότητας E

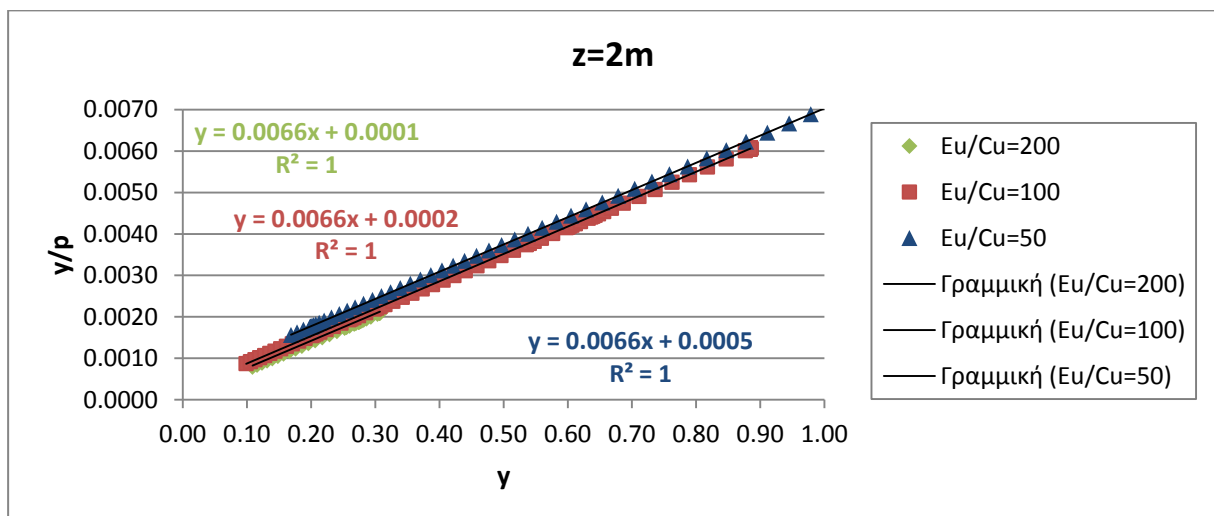
Για την παραμετρική διερεύνηση του λόγου του μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $E_u/c_u$ ) διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές του συντελεστή οριζόντιας ώθησης ( $k_o$ ) και του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας ( $\alpha$ ),  $k_o=0.65$  και  $\alpha$  κατά Weltam & Healy αντίστοιχα.



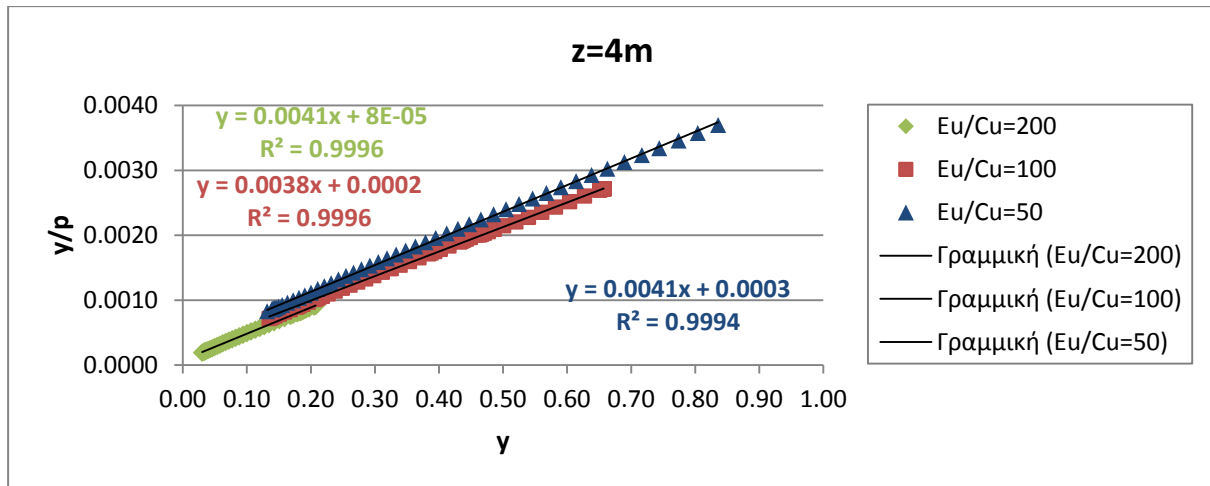
Σχήμα 4.99: Μη γραμμική καμπύλη p-y για A=0.35 σε βάθος z=1m για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



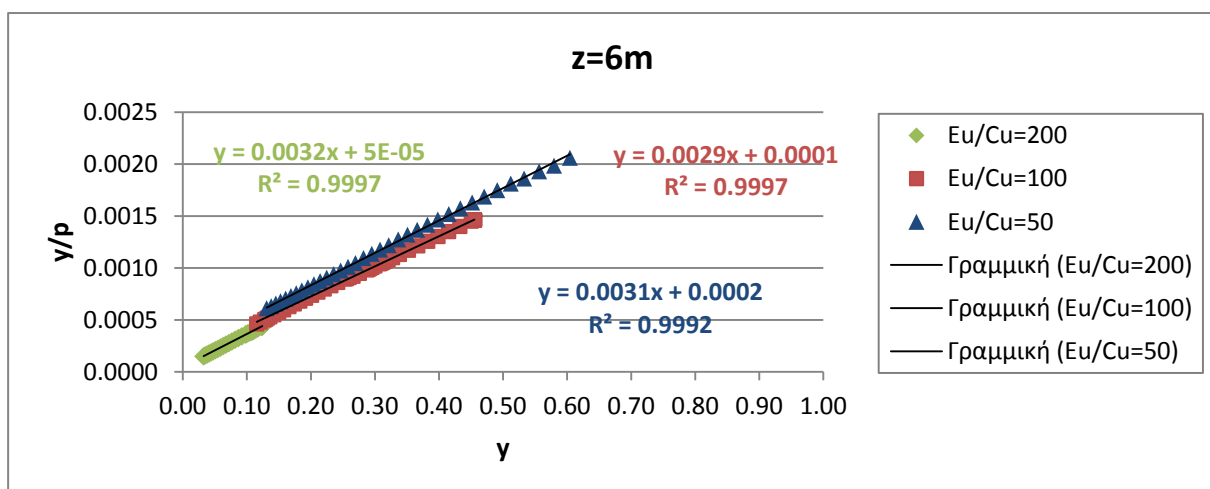
Σχήμα 4.100: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για A=0.35 σε βάθος z=1m για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



Σχήμα 4.101: Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για A=0.35 σε βάθος z=2m για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



**Σχήμα 4.102:** Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=4m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



**Σχήμα 4.103:** Ευθεία  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=6m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

#### 4.7.6 Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα μη-γραμμικών καμπύλων $p-y$

##### 4.7.6.1 Επίδραση του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_0$

Αναφορικά με το συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ( $k_0$ ), η επίδρασή του είναι πολύ μικρή και περιορίζεται στον ανελαστικό κλάδο της καμπύλης  $p-y$ . Το γεγονός ότι η μέγιστη εδαφική αντίδραση δεν ταυτίζεται ακριβώς για βάθος  $z=2m$  σε αντίθεση με τις καμπύλες για  $z=1m$  δεν σημαίνει ότι δεν είναι ίδια, καθώς το προσομοίωμα σε αυτό το βάθος δεν έχει παραλάβει τη μέγιστη δυνατή μετατόπιση. Η επέκταση της καμπύλης θα έκανε φανερή τη σύγκλιση των τιμών. Σημειώνεται ότι οι καμπύλες  $p-y$  για τα βάθη  $z=2m$ ,  $z=4m$  και  $z=6m$  παρατίθενται στο Παράρτημα Γ της παρούσας εργασίας.

##### 4.7.6.2 Επίδραση του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους, $\alpha$

Η επιρροή του συντελεστή διεπιφάνειας ( $\alpha$ ) στις καμπύλες  $p-y$  αφορά τόσο τον ανελαστικό κλάδο όσο και την οριακή εδαφική αντίδραση. Η μέγιστη εδαφική αντίδραση προκύπτει για τιμή  $\alpha=1$  (τραχύς πάσσαλος), ενώ η αντίστοιχη μικρότερη για  $\alpha=0$  (τελείως λείος πάσσαλος). Οι τιμές του συντελεστή διεπιφάνειας ( $\alpha$ ) κατά Weltman & Healy πλησιάζουν πολύ τη μονάδα. Αυτός είναι και ο λόγος που οι προκύπτουσες καμπύλες  $p-y$  για  $\alpha=1$  και  $\alpha_W$  &  $H$  έχουν παρόμοια αποτελέσματα.

##### 4.7.6.3 Επίδραση του λόγου $E_u/c_u$

Από τα αποτελέσματα των μη-γραμμικών καμπύλων  $p-y$  προκύπτει ότι η μεταβολή του λόγου  $E_u/c_u$  επηρεάζει τη μορφή των καμπύλων σε όλο το μήκος τους. Ωστόσο, οι καμπύλες φαίνεται να

συγκλίνουν στην ίδια περίπου τιμή της οριακής εδαφικής αντίδρασης για την εκάστοτε τιμή του  $A$ . Για την ίδια τιμή της οριζόντιας μετατόπισης, η μεγαλύτερη εδαφική αντίδραση αντιστοιχεί στην τιμή  $E_u/c_u=200$ , ενώ η αντίστοιχη μικρότερη στην τιμή  $E_u/c_u=50$ . Όσο μεγαλύτερη δυσκαμψία έχει το έδαφος τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίδραση που αναπτύσσει, αλλά τόσο μικρότερη είναι η τιμή της μετατόπισης που αντιστοιχεί στην οριακή εδαφική αντίδραση.

#### **4.7.7 Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ )**

##### **4.7.7.1 Διερεύνηση της οριακής εδαφικής αντίδρασης ως προς τον συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων $k_o$**

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ανωτέρω διαγραμμάτων, η μεταβολή του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων μεταξύ των τιμών  $k_o=0.5$  και  $k_o=1$  (ειδικότερα για την κανονικά στερεοποιημένη άργιλο με  $A=0.15$  εξετάστηκε ως ελάχιστη τιμή του συντελεστή η  $k_o=0.65$  εξαιτίας συγκεκριμένων δυσκολιών προσομοίωσης) δεν επηρεάζει ουσιαστικά την τιμή της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) μέχρι βάθος  $z=4m$ . Διαφορές μεγαλύτερες του 10% μεταξύ της οριακής εδαφικής αντίδρασης για διαφορετικούς συντελεστές οριζόντιων γεωστατικών τάσεων παρατηρήθηκαν σε όλα τα εδαφικά προφίλ για βάθος  $z=6m$ . Συνεπώς, θεωρείται πιθανή η επιρροή του συντελεστή  $k_o$  στην οριακή εδαφική αντίδραση ( $p_{ult}$ ) για βάθη μεγαλύτερα των έξι διαμέτρων πασσάλου (6D), την οποία δεν πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία για τους λόγους που αναπτύχθηκαν στην αρχή της ενότητας 4.7.

##### **4.7.7.2 Διερεύνηση της οριακής εδαφικής αντίδρασης ως προς τον συντελεστή τριβής της διεπιφάνειας $\alpha$**

Τα αποτελέσματα διερεύνησης της επίδρασης του συντελεστή τριβής της διεπιφάνειας  $\alpha$  στην οριακή εδαφική αντίδραση ( $p_{ult}$ ) κατέδειξαν διαφορές της τάξης του 10% για τιμές του εν λόγω συντελεστή μεταξύ  $\alpha=0$  και  $\alpha=1$  και για βάθη μέχρι  $z=4m$ . Ιδιαίτερα για την περίπτωση του συντελεστή  $\alpha$  κατά τους Weltman & Healey παρατηρήθηκαν σε όλα τα εξεταζόμενα βάθη ( $z=1-6m$ ) εξαιρετικές ομοιότητες με την περίπτωση του συντελεστή  $\alpha=1$  ακριβώς επειδή η αστράγγιστη διατμητική  $c_u$  είναι αρκετά μικρή στα βάθη αυτά ώστε από το Σχήμα 4.16 (Weltman & Healey) να προκύπτουν τιμές του συντελεστή  $\alpha$  κοντά στην τιμή  $\alpha=1$ . Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η επίδραση του συντελεστή τριβής της διεπιφάνειας  $\alpha$  γίνεται ασθενέστερη με την αύξηση της θεωρούμενης αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για το ίδιο βάθος υπολογισμού της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ). Χαρακτηριστικά, παρατηρήθηκε μείωση της απόκλισης μεταξύ των οριακών εδαφικών αντιδράσεων ( $p_{ult}$ ) που υπολογίστηκαν για τιμές του συντελεστή μεταξύ  $\alpha=0$  και  $\alpha=1$  στην άργιλο με  $A=0.35$  για  $z=6m$ , συγκριτικά με τις αντίστοιχες διαφορές στο ίδιο βάθος για  $A=0.15, 0.25$ .

##### **4.7.7.3 Διερεύνηση της οριακής εδαφικής αντίδρασης ως προς το λόγο αστράγγιστου μέτρου ελαστικότητας προς την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους $E_u/c_u$**

Τα διαγράμματα της συγκεκριμένης διερεύνησης παρουσίασαν αμελητέα επιρροή του αστράγγιστου μέτρου ελαστικότητας του εδάφους στα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για την οριακή εδαφική αντίδραση ( $p_{ult}$ ). Για τιμές του λόγου αστράγγιστου μέτρου ελαστικότητας προς αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους μεταξύ  $E_u/c_u=50$  ( $\epsilon_{50}=0.02$ ) και  $E_u/c_u=200$  ( $\epsilon_{50}=0.005$ ) παρατηρήθηκαν αποκλίσεις μικρότερες του 5% στον υπολογισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) σε όλα τα βάθη και για όλα τα εδάφη που εξετάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο. Όπως ήταν αναμενόμενο με τη χρήση ελαστικού-απολύτως πλαστικού καταστατικού νόμου για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους, το αστράγγιστο μέτρο ελαστικότητας  $E_u$  επηρεάζει αποκλειστικά και μόνο την κλίση του αρχικού, ελαστικού κλάδου των καμπύλων  $p$ - $y$  και όχι την οριακή εδαφική αντίδραση.

#### 4.7.7.4 Γενικές παρατηρήσεις

Από την παραμετρική διερεύνηση του παρόντος κεφαλαίου για τους παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) και για βάθη μέχρι  $z=6m$  παρατηρήθηκε ευαισθησία των αποτελεσμάτων ως προς τον συντελεστή τριβής της διεπιφάνειας  $\alpha$ , χωρίς βέβαια να σημειωθούν έντονες αποκλίσεις μεταξύ των τιμών  $p_{ult}$  που υπολογίστηκαν. Ο παράγοντας αυτός θα αποτελέσει και τον κύριο άξονα των παραμετρικών αναλύσεων σύγκρισης με τα αποτελέσματα των αναλυτικών μεθοδολογιών του Κεφαλαίου 2 που θα ακολουθήσουν στο Κεφάλαιο 5. Επιπλέον, παρατηρήθηκε πιθανή συμβολή του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων στην υπολογιζόμενη οριακή εδαφική αντίδραση  $p_{ult}$  για βάθη μεγαλύτερα από  $z=6m$ . Με βεβαιότητα αναφέρεται ότι για τη συγκεκριμένη καταστατική προσομοίωση του εδάφους (ελαστικό-απολύτως πλαστικό) ο λόγος αστράγγιστου μέτρου ελαστικότητας προς αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους  $E_u/c_u$  δεν επηρεάζει ουσιαστικά τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας ως προς την οριακή εδαφική αντίδραση  $p_{ult}$ .

**Πίνακας 4.5:** Τιμές της οριακής εδαφικής αντίδρασης για  $A=0.15$ .

$p_{ult}$ (kN/m) για $A=0.15$		$z/D=1$	$z/D=2$	$z/D=4$	$z/D=6$
$k_o$	$k_o=1$	82	132	196	263
	$k_o=0.65$	83	133	196	238
$\alpha$	$\alpha=1$	85	132	200	250
	$\alpha= W \ \& \ H$	83	130	196	238
	$\alpha=0$	74	122	182	213
$E_u/c_u$	$E_u/c_u=200$	82	133	196	233
	$E_u/c_u=100$	83	130	192	238
	$E_u/c_u=50$	83	132	196	233

**Πίνακας 4.6:** Τιμές της οριακής εδαφικής αντίδρασης για  $A=0.25$ .

$p_{ult}$ (kN/m) για $A=0.25$		$z/D=1$	$z/D=2$	$z/D=4$	$z/D=6$
$k_o$	$k_o=1$	85	143	238	303
	$k_o=0.65$	87	141	227	294
	$k_o=0.50$	88	141	217	278
$\alpha$	$\alpha=1$	90	141	213	294
	$\alpha= W \ \& \ H$	88	141	217	278
	$\alpha=0$	76	130	213	270
$E_u/c_u$	$E_u/c_u=200$	86	141	238	303
	$E_u/c_u=100$	88	141	222	278
	$E_u/c_u=50$	88	141	217	286

**Πίνακας 4.7:** Τιμές της οριακής εδαφικής αντίδρασης για  $A=0.35$ .

$p_{ult}$ (kN/m) για $A=0.35$		$z/D=1$	$z/D=2$	$z/D=4$	$z/D=6$
$k_o$	$k_o=1$	90	151	357	270
	$k_o=0.65$	90	151	370	270
	$k_o=0.50$	92	151	323	244
$\alpha$	$\alpha=1$	94	156	256	333
	$\alpha= W \ \& \ H$	92	152	244	323
	$\alpha=0$	80	139	250	333
$E_u/c_u$	$E_u/c_u=200$	91	152	244	313
	$E_u/c_u=100$	90	152	263	345
	$E_u/c_u=50$	92	152	244	323

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων χάραξης μη-γραμμικών καμπύλων p-y και μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

### 5.1 Χαρακτηριστικά αριθμητικών μεθόδων

Στόχο του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των θεωρητικών μεθοδολογιών χάραξης μη-γραμμικών καμπύλων p-y, που περιγράφηκαν αναλυτικά στα Κεφάλαια 2 και 3 και των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, Abaqus, όπως αναλύθηκε στο τέταρτο Κεφάλαιο. Η σύγκριση γίνεται εφικτή μέσω διαγραμμάτων που περιλαμβάνουν καμπύλες κατανομής του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  συναρτήσει του λόγου z/D, καμπύλες φορτίου-μετατόπισης κεφαλής (H-y<sub>o</sub>) και καμπύλες κατανομής οριζόντιων μετατοπίσεων και καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου (M-z, y-z). Τα παραπάνω διαγράμματα μορφώνονται για κάθε περίπτωση αργίλου με μεταβολή αστράγγιστης διατμητικής αντοχής κατά μήκος του πασσάλου σύμφωνα με την εξίσωση  $c_u=10+A\sigma'_v$ , όπου  $A=0.15$ ,  $A=0.25$  και  $A=0.35$ .

Προκειμένου να είναι ορθή η σύγκριση των προαναφερόμενων καμπύλων, απαραίτητος καθίσταται ο προσδιορισμός κοινών χαρακτηριστικών του εδάφους που περιβάλλει τον πάσσαλο για όλες τις αριθμητικές μεθοδολογίες. Συγκεκριμένα, ανάλογα με τον τύπο της αργίλου, δηλαδή για την εκάστοτε εξεταζόμενη κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, απαιτείται σε κάθε βάθος από την επιφάνεια του εδάφους να είναι όμοιες οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας E, του συντελεστή οριζόντιας ώθησης  $k_o$  και του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους α.

#### 5.1.1 Χαρακτηριστικά θεωρητικών μεθόδων χάραξης καμπύλων p-y

Αναφορικά με τις θεωρητικές μεθοδολογίες που συμμετέχουν στη σύγκριση, κατά Matlock, Νορβηγικών κανονισμών και κατά Γεωργιάδη, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.1, 5.2 και 5.3. Οι διαφορετικές τιμές των συντελεστών χρησιμοποιήθηκαν για το λόγο ότι η άργιλος με αστράγγιστη διατμητική αντοχή μικρότερη από 50kPa θεωρείται μαλακή, ενώ για την αντίθετη περίπτωση  $c_u \geq 50\text{kPa}$  θεωρείται μέτριας σκληρότητας. Συγκεκριμένα, η τιμή της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$ ,  $\epsilon_c$  ορίστηκε με βάση τη διάκριση κατά Peck et al. 1974 (Πίνακας 2.1) και η τιμή του συντελεστή J κατά Matlock.

**Πίνακας 5.1:** Τιμές συντελεστών μεθοδολογίας κατά Matlock (1970).

Matlock (1970)	$c_u=10+0.15\sigma'_v$	$c_u=10+0.25\sigma'_v$		$c_u=10+0.35\sigma'_v$	
	$0 \leq z \leq 20\text{m}$	$z < 16\text{m}$	$z \geq 16\text{m}$	$z < 11\text{m}$	$z \geq 11\text{m}$
$\epsilon_{50}$	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
J	0.5	0.5	0.25	0.5	0.25

**Πίνακας 5.2:** Τιμές συντελεστών μεθοδολογίας κατά τους Νορβηγικού Κανονισμούς (1977).

Νορβηγικοί Κανονισμοί(Dn V) 1977	$c_u=10+0.15\sigma'_v$	$c_u=10+0.25\sigma'_v$		$c_u=10+0.35\sigma'_v$	
	$0 \leq z \leq 20\text{m}$	$z < 16\text{m}$	$z \geq 16\text{m}$	$z < 11\text{m}$	$z \geq 11\text{m}$
$\epsilon_c$	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
$\xi$	10	10	10	10	10

**Πίνακας 5.3:** Τιμές συντελεστών μεθοδολογίας κατά Γεωργιάδη (2010).

Γεωργιάδης (2010) $\alpha=0, \alpha=1$	$c_u=10+0.15\sigma'_v$	$c_u=10+0.25\sigma'_v$		$c_u=10+0.35\sigma'_v$	
	$0 \leq z \leq 20\text{m}$	$z < 16\text{m}$	$z \geq 16\text{m}$	$z < 11\text{m}$	$z \geq 11\text{m}$
$\epsilon_{50}$	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
$E_{50}=(1/\epsilon_{50})c_u$	$500 \leq E_{50} \leq 2000$	$500 \leq E_{50} < 2500$	$5000 \leq E_{50} \leq 6000$	$500 \leq E_{50} < 2425$	$4850 \leq E_{50} \leq 8000$

### 5.1.2 Χαρακτηριστικά αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία

Τα αποτελέσματα των θεωρητικών μεθοδολογιών με τιμές συντελεστών όπως ορίζονται στους Πίνακες 5.1, 5.2 και 5.3, συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από αναλύσεις μέσω του κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων. Σκόπιμος θεωρήθηκε ο προσδιορισμός ενός εύρους αποτελεσμάτων μεταξύ καμπυλών. Το εύρος αυτό αφορά μία ανώτερη και μία κατώτερη τιμή τόσο του μέτρου ελαστικότητας  $E_u$  όσο και του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους  $\alpha$ . Τα χαρακτηριστικά του εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν για την εκάστοτε ανάλυση παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 5.5, 5.6 και 5.7.

#### 5.1.2.1 Παραδοχές αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία

Αρχικά, θεωρήθηκε, ομοίως με τις αναλυτικές μεθοδολογίες, κανονικά στερεοποιημένη άργιλος με μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής κατά μήκος του πασσάλου σύμφωνα με την εξίσωση  $c_u=10+A\gamma'z$ , για τιμές  $A=0.15$ ,  $A=0.25$  και  $A=0.35$ . Στη συνέχεια, για την προσομοίωση της τριβής στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους θεωρήθηκε συντελεστής διεπιφάνειας  $\alpha$ , ο οποίος έλαβε τις τιμές  $\alpha=0$  και  $\alpha=1$ . Ως μέτρο ελαστικότητας  $E_u$  ορίστηκε το αντίστοιχο τέμνον της καμπύλης φορτίου-παραμόρφωσης( $\sigma$ - $\epsilon$ ) ίσο με  $E_u=50c_u$  για βάθη με αστράγγιστη διατμητική αντοχή μικρότερη από  $c_u<50\text{kPa}$  και  $E_u=100c_u$  για βάθη με αστράγγιστη διατμητική αντοχή μεγαλύτερη από  $c_u\geq 50\text{kPa}$  και μία μέγιστη  $\eta$  οποία αντιστοιχεί στη διπλάσια της αρχικής σε όλο το μήκος του πασσάλου. Ο ορισμός του μέτρου ελαστικότητας βασίστηκε στο διαχωρισμό της τιμής της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$ , που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση αργιλικού δοκιμίου υπό ένταση ίση με τη μισή της θλιπτικής αντοχής του, κατά Peck et al (1974) ανάλογα με την ποιότητα της αργίλου και μέσω της σχέσης  $E_u=(1/\epsilon_{50})c_u$ . Τέλος, όλες οι παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση του ελαστικού-απολύτως πλαστικού καταστατικού προσομοιώματος Drucker-Prager για το περιβάλλον έδαφος.

**Πίνακας 5.4.** Τιμές της παραμόρφωσης  $\epsilon_{50}$  για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους κατά Peck et al. 1974.

Συνοχή αργίλου	Μέση τιμή σε kPa*	$\epsilon_{50}$
Μαλακή	<48	0.020
Μέτρια	48-96	0.010
Στιφρή	96-192	0.005

**Πίνακας 5.5:** Χαρακτηριστικά ανάλυσης για  $A=0.15$ .

$c_u=10+0.15\sigma'_v$	Αύξων αριθμός ανάλυσης	$\alpha$	$k_o$	$E_u$ (kPa)
	1	0	0.65	$50c_u$
	2	1	0.65	$50c_u$

**Πίνακας 5.6:** Χαρακτηριστικά ανάλυσης για  $A=0.25$ .

$c_u=10+0.25\sigma'_v$	Αύξων αριθμός ανάλυσης	$\alpha$	$k_o$	$E_u$ (kPa) $z<16\text{m}$	$E_u$ (kPa) $z\geq 16\text{m}$
	1	0	0.50	$50c_u$	$100c_u$
	2	1	0.50	$50c_u$	$100c_u$
	3	0	0.50	$100c_u$	$200c_u$
	4	1	0.50	$100c_u$	$200c_u$

**Πίνακας 5.7:** Χαρακτηριστικά ανάλυσης για  $A=0.35$ .

$c_u=10+0.35\sigma'_v$	Αύξων αριθμός ανάλυσης	$\alpha$	$k_o$	$E_u$ (kPa) $z<11\text{m}$	$E_u$ (kPa) $z\geq 11\text{m}$
	1	0	0.50	$50c_u$	$100c_u$
	2	1	0.50	$50c_u$	$100c_u$
	3	0	0.50	$100c_u$	$200c_u$
	4	1	0.50	$100c_u$	$200c_u$



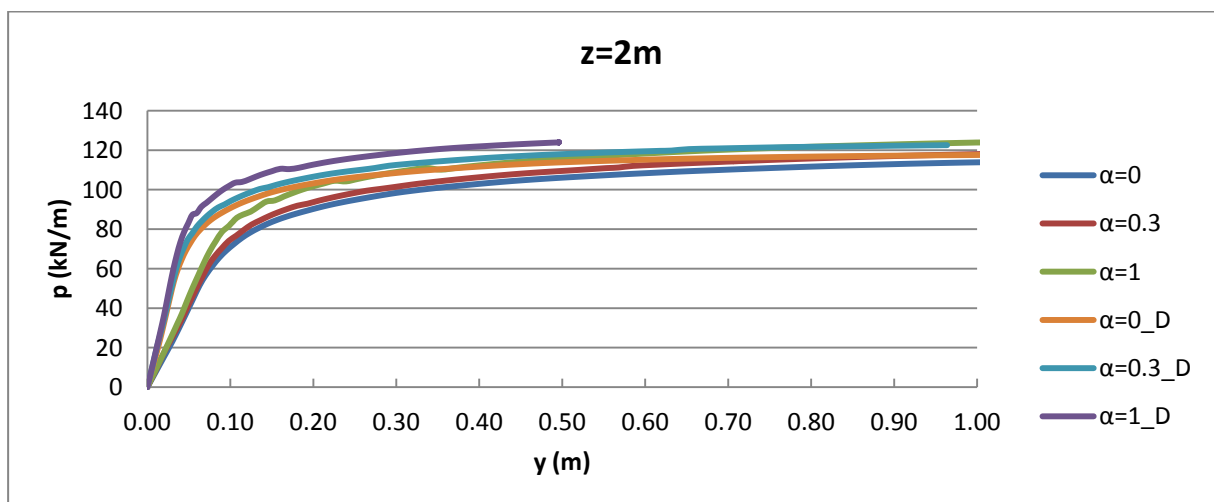
## 5.2 Συγκριτικά διαγράμματα κατανομής του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης $N_p$

Σκοπό της παρούσας παραγράφου αποτελεί η σύγκριση των τιμών του συντελεστή εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  όπως αυτός προέκυψε από τα αποτελέσματα του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus με τις αντίστοιχες τιμές διάφορων αναλυτικών μεθοδολογιών. Οι αναλυτικές μεθοδολογίες που συμμετέχουν στη σύγκριση είναι εκείνες που έχουν προταθεί κατά τους: Hansen (1961), Broms (1964), Matlock (1970), Νορβηγικοί κανονισμοί DnV(1977), Sullivan (1979), Stevens & Audibert (1979), Randolph-Houlsby (1984), Murf-Hamilton(1993), API (2000) Zhang-Ahmari (2009) και Γεωργιάδη (2010). Η διαδικασία εύρεσης του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  με βάση τις παραπάνω αναλυτικές μεθοδολογίες καθώς και συγκριτικό διάγραμμα  $N_p$ -z/D για τις μεταξύ τους τιμές έχουν παρουσιαστεί στην ενότητα 2.11. Σημειώνεται ότι για τις μεθοδολογίες που λαμβάνουν υπόψη την επιρροή του συντελεστή διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους ( $\alpha$ ) έχουν υπολογιστεί οι οριακές τιμές του συντελεστή  $N_p$  οι οποίες αντιστοιχούν σε  $\alpha=0$  για απόλυτα λείο πάσσαλο και  $\alpha=1$  σε πλήρως τραχύ πάσσαλο.

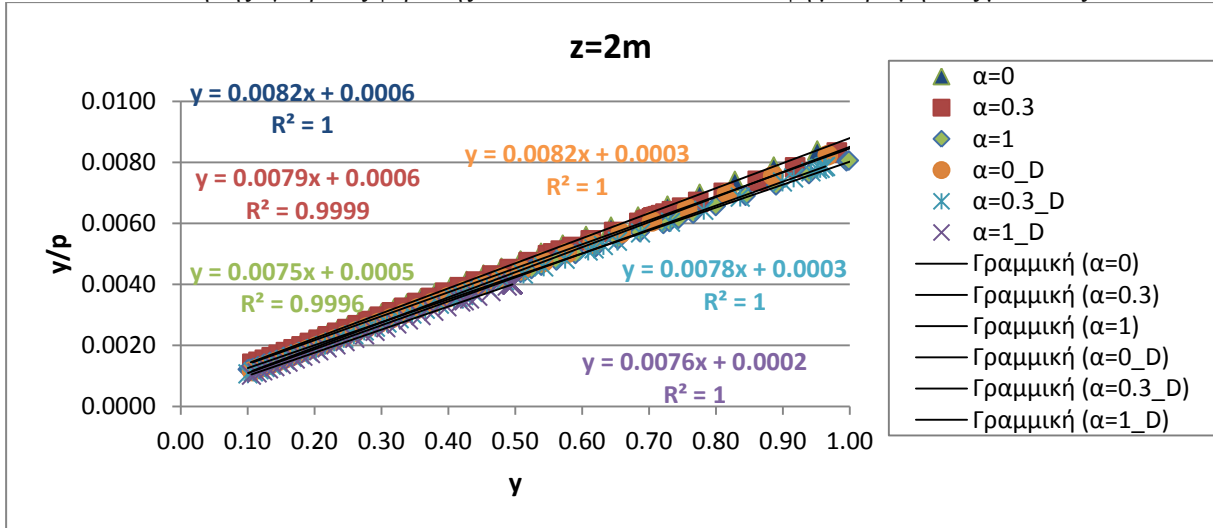
Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά των αναλύσεων, υιοθετήθηκαν οι παραδοχές της παραγράφου 5.1.2.1 και τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_u$ , του μέτρου ελαστικότητας  $E_u$ , του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_0$  και του συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ , σύμφωνα με τους Πίνακες 5.5-5.7. Μορφώθηκαν μέσω των αποτελεσμάτων του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων μη-γραμμικές καμπύλες p-y για διάφορα βάθη ώστε να γίνει μία αρχική προσέγγιση της οριακής εδαφικής αντίδρασης. Στη συνέχεια έγινε χάραξη της ευθείας  $(y/p)=f(y)$ , από την κλίση της οποίας υπολογίστηκε η τιμή της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ).

Για την εκάστοτε περίπτωση εδάφους ( $A=0.15$ ,  $A=0.25$ ,  $A=0.35$ ) παρουσιάζονται καμπύλες p-y και ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για το βάθος  $z=2m$  καθώς και συγκριτικό διάγραμμα  $N_p$ -z/D που περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των αναλύσεων του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων και τα αντίστοιχα των αναλυτικών μεθοδολογιών. Επίσης, παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας των τιμών της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) σε διάφορα βάθη. Στο Παράρτημα ΣΤ της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται διαγράμματα p-y και  $(y/p)=f(y)$  για άλλα βάθη. Σημειώνεται ότι στα υπομνήματα το γράμμα D αναφέρεται στις αναλύσεις με τη διπλάσια τιμή του λόγου  $E_u/c_u$ .

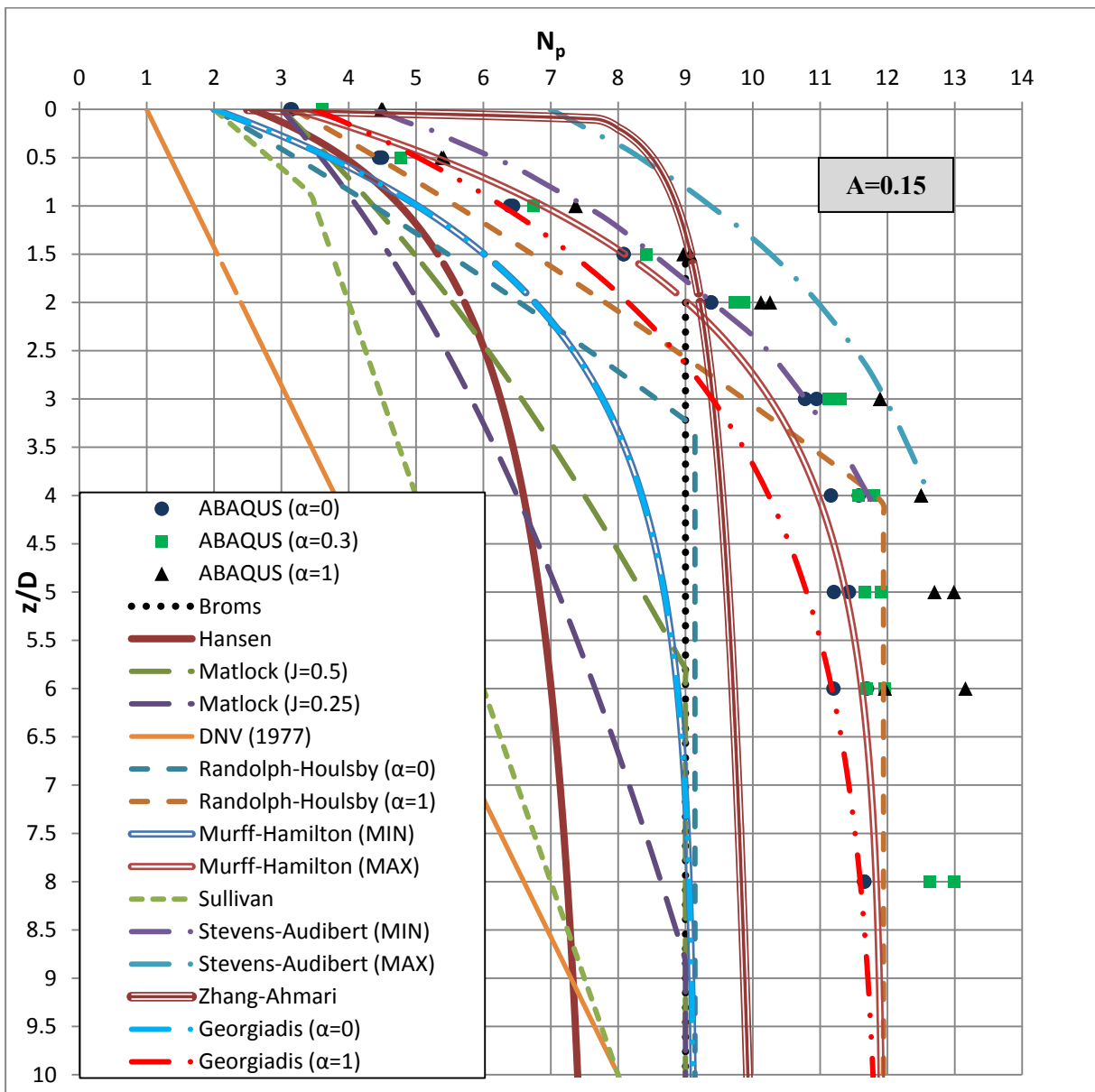
### 5.2.1 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.15$



Σχήμα 5.1: Συγκριτικό διάγραμμα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=2m$ .



Σχήμα 5.2: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=2m$ .

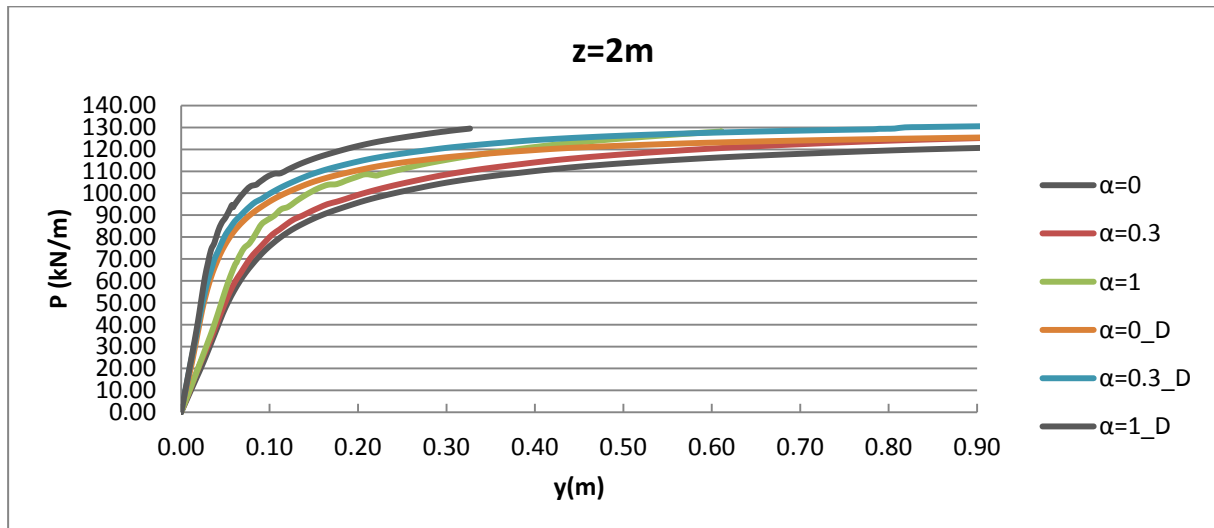


Σχήμα 5.3: Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής του συντελεστή  $N_p$  συναρτήσει του λόγου  $z/D$  για  $A=0.15$ .

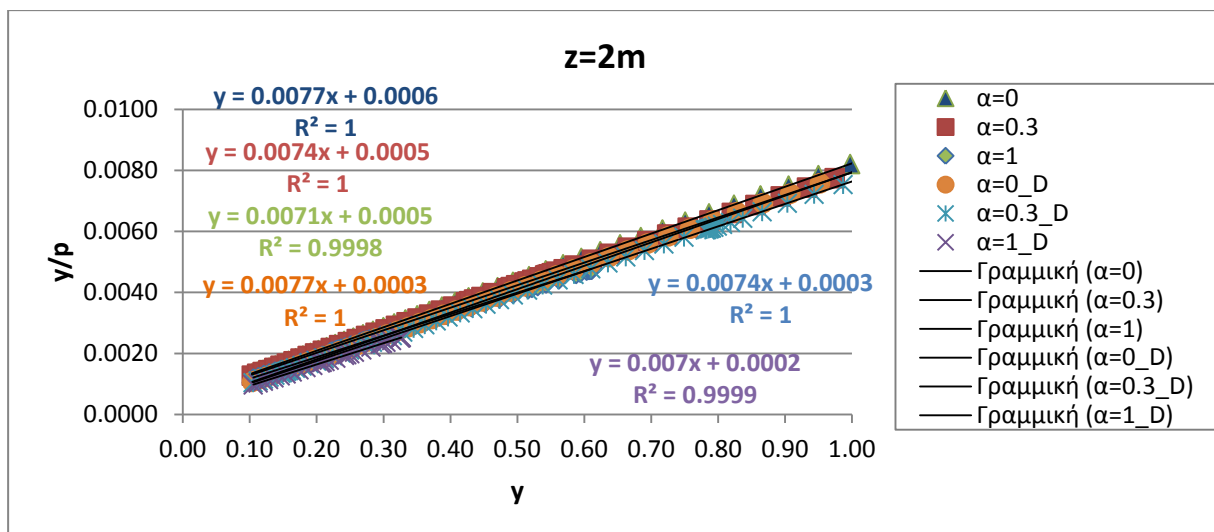
Πίνακας 5.8: Συγκεντρωτικός πίνακας οριακών τιμών εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) για  $A=0.15$ .

A=0.15						
$p_{ult}(kN/m)$	$\alpha=0$	$\alpha=0.3$	$\alpha=1$	$\alpha=0\_D$	$\alpha=0.3\_D$	$\alpha=1\_D$
$z/D=0$	31.3	36.1	44.8	31.5	36.1	45
$z/D=0.5$	47.9	51.3	58.1	48.3	51.3	57.8
$z/D=1$	74.1	77.5	84.8	73.5	77.5	84.8
$z/D=1.5$	99	103.1	111.1	99	103.1	109
$z/D=2$	122	126.6	133.3	122	128.2	131.6
$z/D=3$	156.3	161.3	172.4	158.7	163.9	172.4
$z/D=4$	178.6	188.7	200	185.2	185.2	200
$z/D=5$	196.1	208.3	227.3	200	204.1	222.2
$z/D=6$	212.8	227.3	222.2	222.2	222.2	250
$z/D=8$	256.4	285.7	384.6	256.4	277.8	434.8

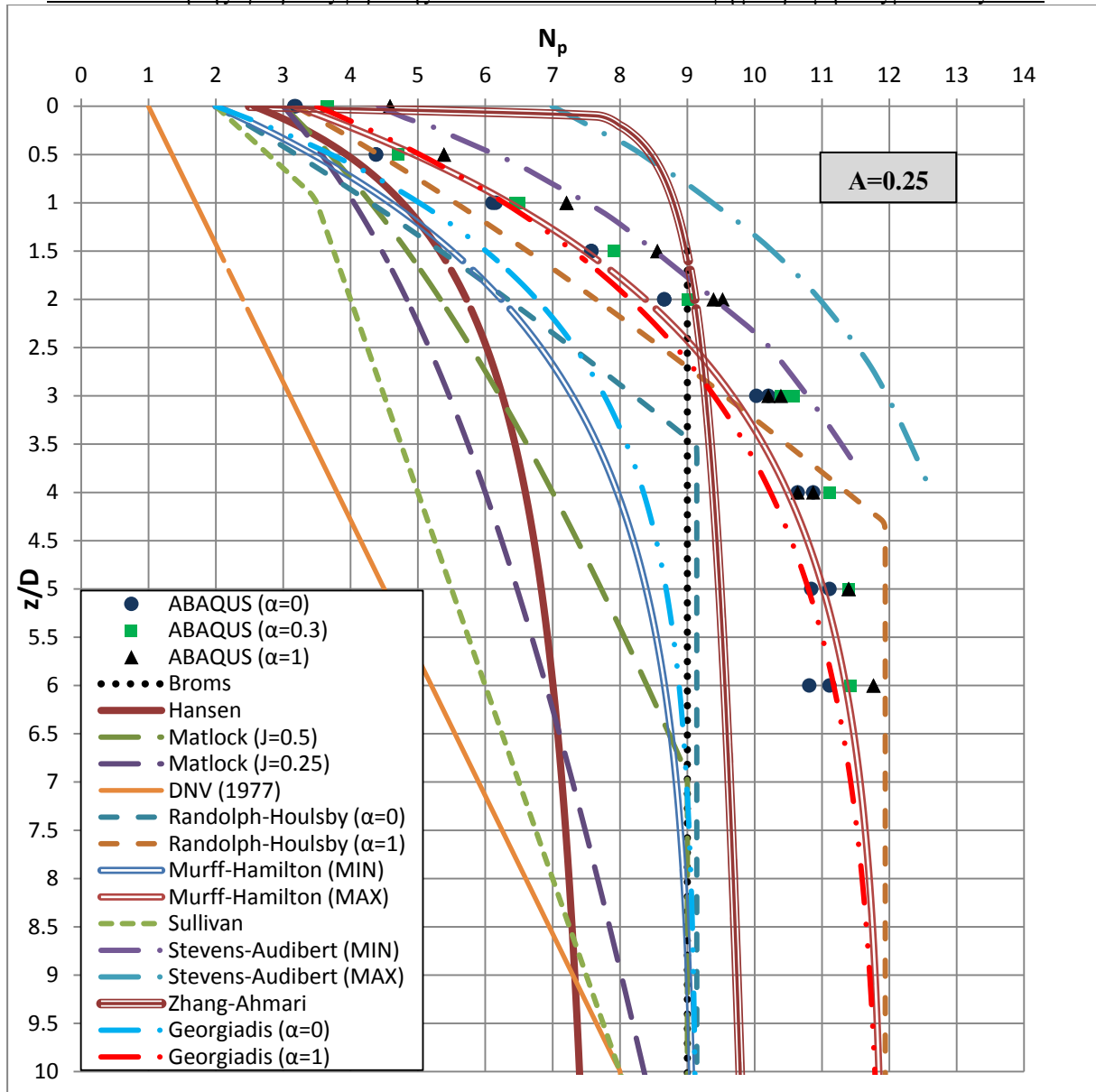
### 5.2.2 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.25$



Σχήμα 5.4: Συγκριτικό διάγραμμα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=2m$ .



Σχήμα 5.5: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=2m$ .

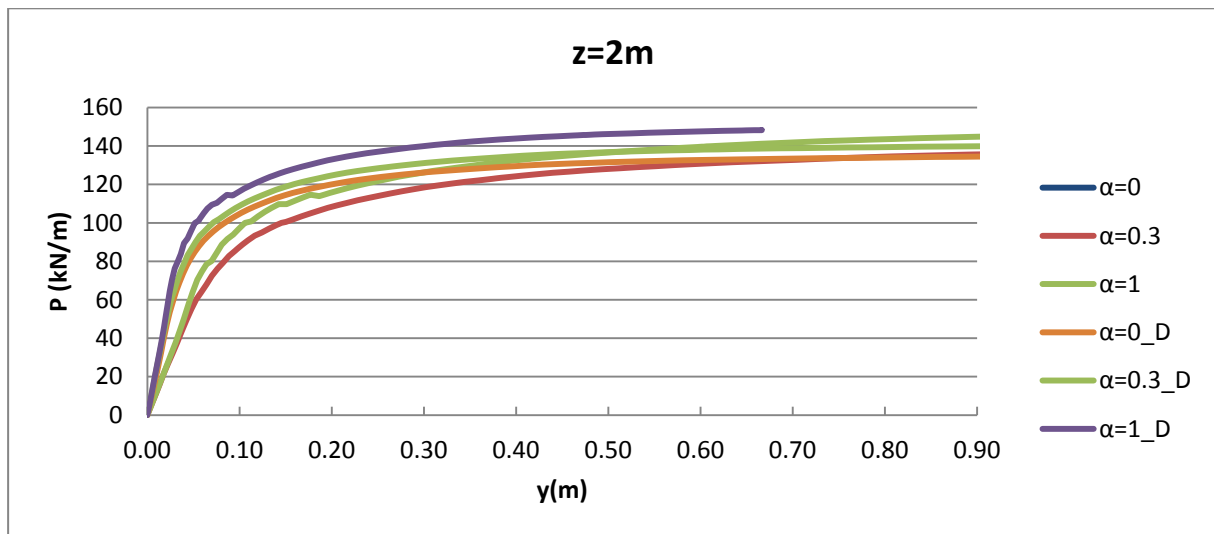


Σχήμα 5.6: Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής του συντελεστή  $N_p$  συναρτήσει του λόγου  $z/D$  για  $A=0.25$ .

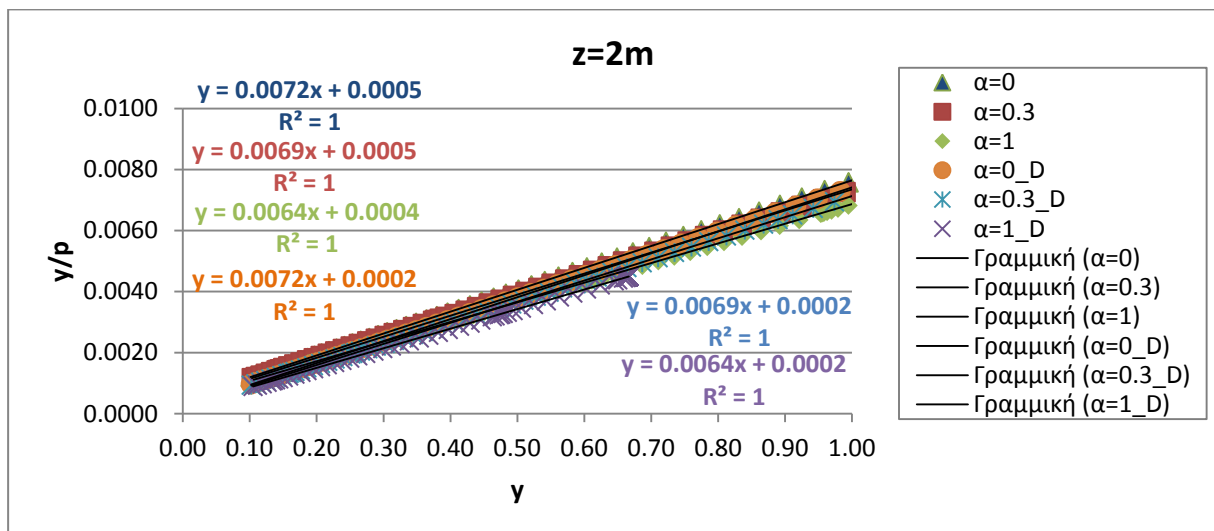
Πίνακας 5.9: Συγκεντρωτικός πίνακας οριακών τιμών εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) για  $A=0.25$ .

A=0.25						
$p_{ult}(kN/m)$	$\alpha=0$	$\alpha=0.3$	$\alpha=1$	$\alpha=0\_D$	$\alpha=0.3\_D$	$\alpha=1\_D$
$z/D=0$	31.8	36.6	45.9	31.6	36.5	45.9
$z/D=0.5$	49.3	52.9	60.6	49.3	52.9	60.6
$z/D=1$	76.9	81.3	90.1	76.3	80.7	90.1
$z/D=1.5$	104.2	108.7	117.6	104.2	108.7	117.6
$z/D=2$	129.9	135.1	140.9	129.9	135.1	142.9
$z/D=3$	175.4	181.8	178.6	178.6	185.2	181.8
$z/D=4$	212.8	222.2	212.8	217.4	222.2	217.4
$z/D=5$	243.9	256.4	156.4	250	256.4	256.4
$z/D=6$	270.3	285.7	294.1	277.8	285.7	294.1

### 5.2.3 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για A=0.35



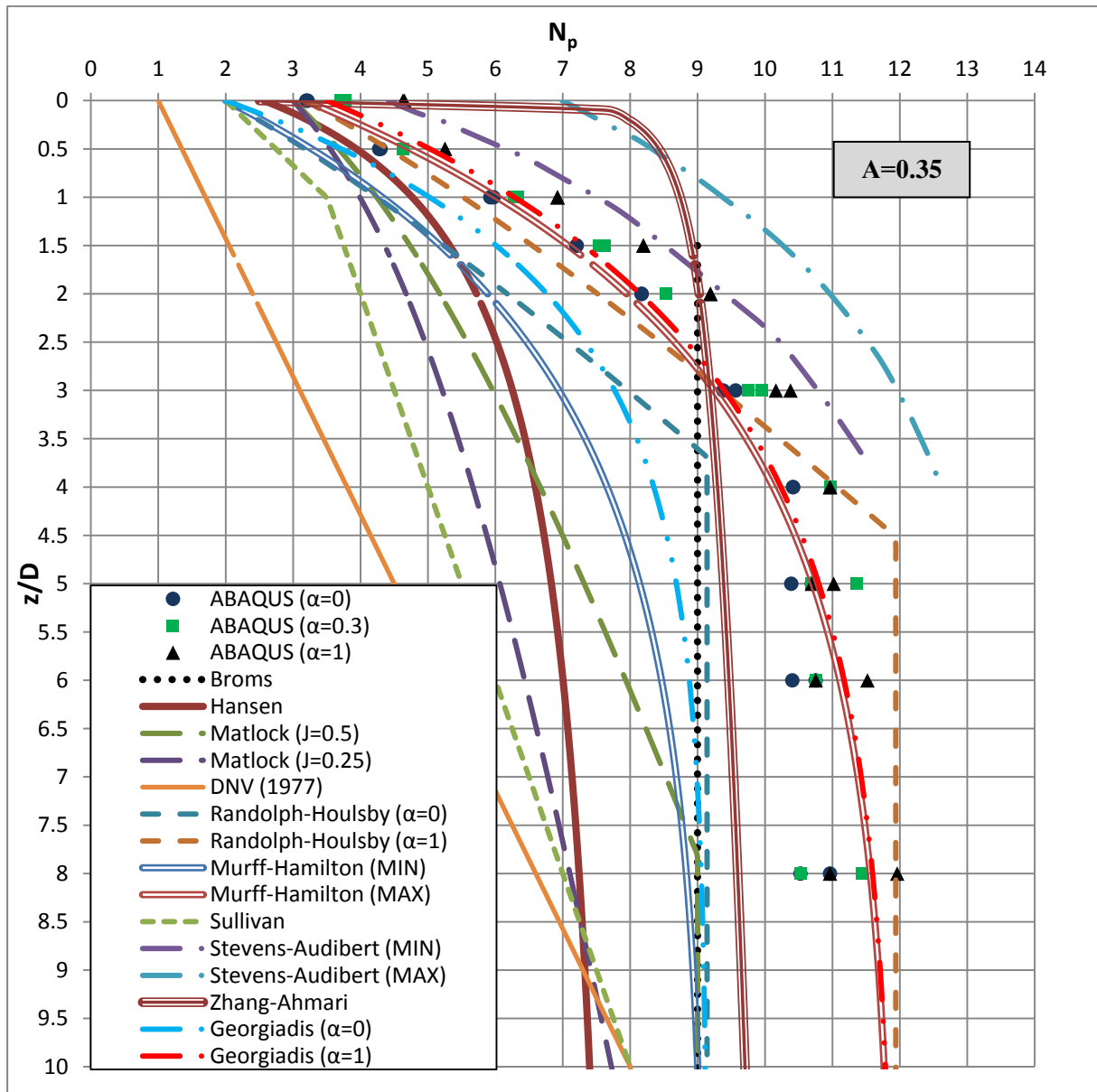
Σχήμα 5.7: Συγκριτικό διάγραμμα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για A=0.35 σε βάθος z=2m.



Σχήμα 5.8: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για A=0.35 σε βάθος z=2m.

Πίνακας 5.10: Συγκεντρωτικός πίνακας οριακών τιμών εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) για A=0.35.

A=0.35						
$p_{ult}$ (kN/m)	$\alpha=0$	$\alpha=0.3$	$\alpha=1$	$\alpha=0\_D$	$\alpha=0.3\_D$	$\alpha=1\_D$
z/D=0	32.2	37	46.3	31.9	37.7	46.5
z/D=0.5	50.3	54.4	61.7	50.5	54.4	61.7
z/D=1	80.7	85.5	93.5	80	84.8	93.5
z/D=1.5	109.9	116.3	125	109.9	114.9	125
z/D=2	138.9	145	156.3	138.9	144.9	156.3
z/D=3	192.3	200	208.3	196.1	204.1	212.8
z/D=4	250	263.2	263.2	250	263.2	263.2
z/D=5	285.7	294.1	294.1	294.1	312.5	303
z/D=6	322.6	333.3	333.3	333.3	333.3	357.1
z/D=8m	400	400	416.7	416.7	434.8	454.6



Σχήμα 5.9: Συγκριτικό διάγραμμα κατανομής του συντελεστή  $N_p$  συναρτήσει του λόγου  $z/D$  για  $A=0.35$ .

#### 5.2.4 Συμπεράσματα συγκριτικών διαγραμμάτων $N_p$ - $z/D$

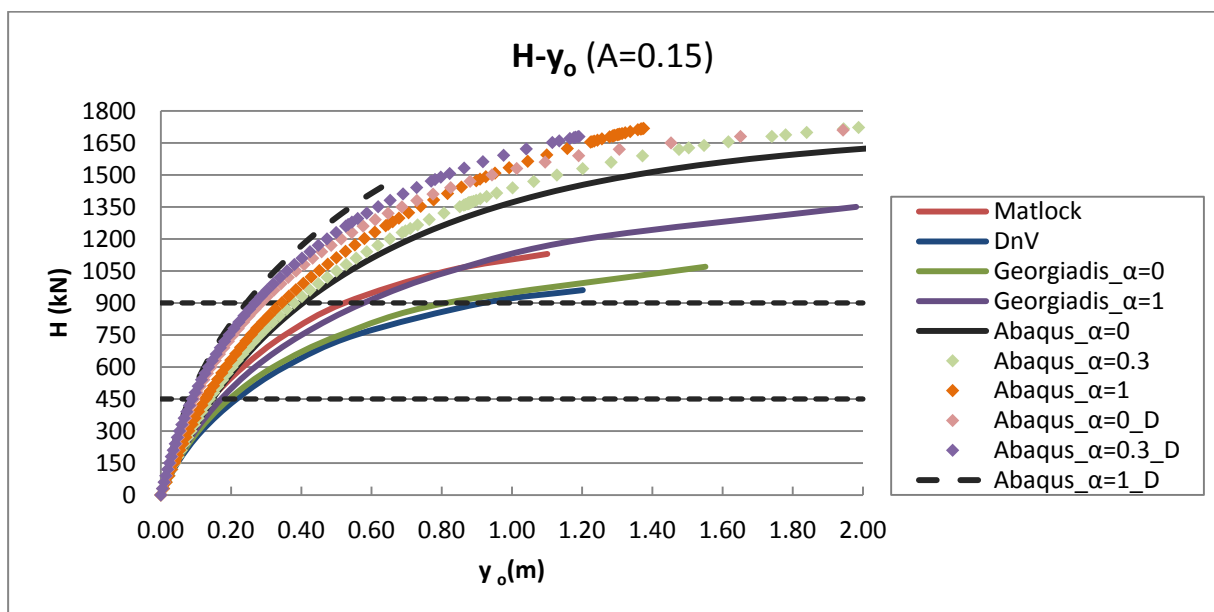
3. Για βάθος μεγαλύτερο από μία διάμετρο παρατηρείται ότι η τιμή του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  συγκλίνει περισσότερο στις σύγχρονες μεθοδολογίες, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη το συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$ . Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα για  $\alpha=1$  πλησιάζουν περισσότερο τα αντίστοιχα του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Όσο πιο χαμηλή είναι η ποιότητα της αργίλου (μικρότερο  $A$ ) παρατηρούνται πιο μεγάλες διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις αναλύσεις και τις αναλυτικές μεθοδολογίες. Αντίθετα, όσο πιο σφιχτό είναι το έδαφος (μεγαλύτερο  $A$ ) τόσο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία πλησιάζουν τα αντίστοιχα των μεθοδολογιών κατά Murff-Hamilton, Randolph-Houlsby και Γεωργιάδη για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=1$ .
4. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για την περίπτωση αργίλου με  $A=0.15$  και για βάθος  $2D < z < 4D$  (όπου  $D$  η διάμετρος του πασσάλου) βρίσκονται μέσα στο εύρος των τιμών του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  που δίνονται από τους Stevens-Audibert. Η παραπάνω διαπίστωση για  $A=0.15$  πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι η διερεύνηση των Stevens-Audibert αφορούσε μεγάλης διαμέτρου πασσάλους σε μαλακή άργιλο.

5. Για βάθος μεγαλύτερο της μία διαμέτρου ( $z > 1D$ ) τα αποτελέσματα των περισσότερων αναλυτικών μεθοδολογιών είναι συντηρητικά συγκριτικά με τα αντίστοιχα των πεπερασμένων στοιχείων. Ο συντελεστής παραμένουσας οριακής εδαφικής αντίδρασης σύμφωνα με τα αποτελέσματα του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων δεν είναι μικρότερος από 10, σε αντίθεση με το κάτω όριο των μεθοδολογιών που λαμβάνουν υπόψη το συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=0$ .

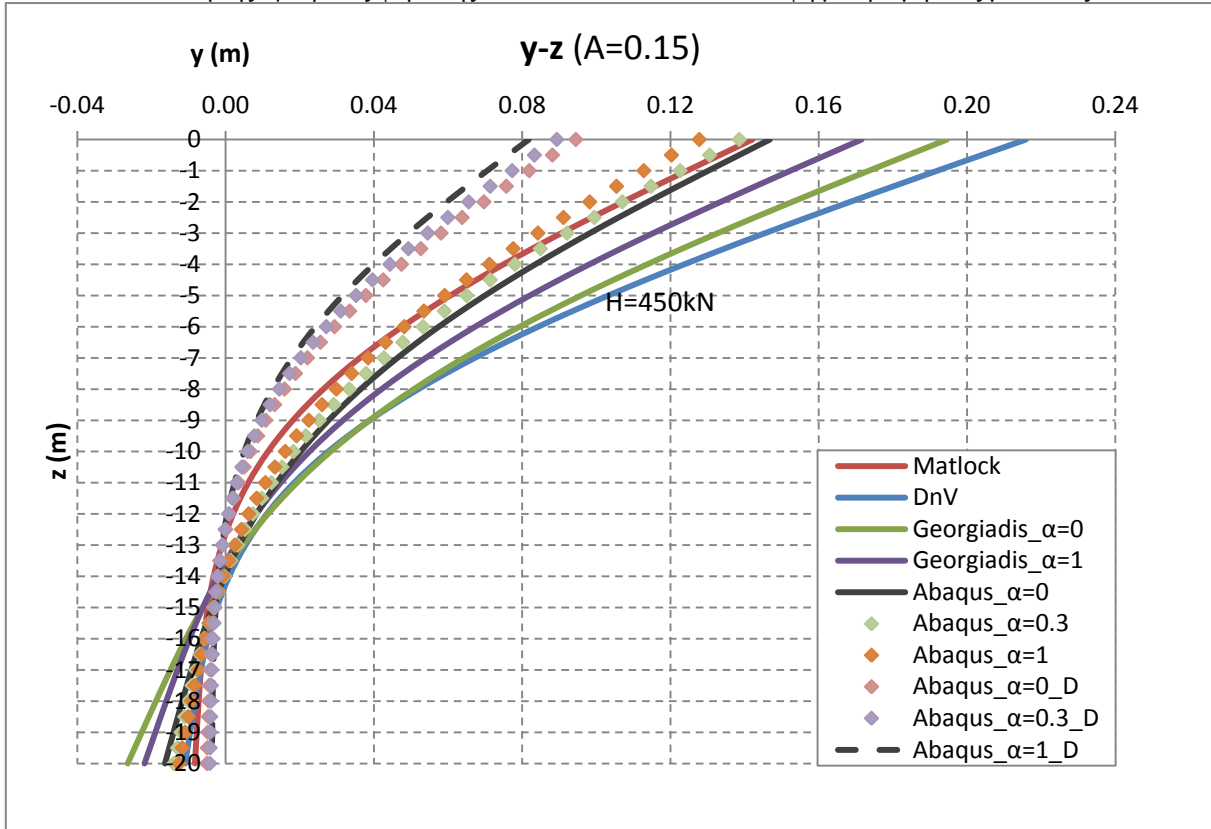
### 5.3 Συγκριτικά διαγράμματα H-y<sub>0</sub>, y-z, M-z

Στην πορεία παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα των αριθμητικών μεθοδολογιών ξεχωριστά για την κάθε εξίσωση κατανομής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος. Αρχικά, παρατίθεται το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής (H-y<sub>0</sub>) το οποίο περιλαμβάνει καμπύλες σύμφωνα με τρεις θεωρητικές μεθοδολογίες (Matlock 1970, Νορβηγικοί κανονισμοί 1977, Γεωργιάδης 2010) χάραξης καμπύλων p-y και άλλες έξι όπως προέκυψαν από τον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης, περιλαμβάνει δύο οριζόντιες ευθείες οι οποίες αντιστοιχούν στα δύο εγκάρσια φορτία κεφαλής για τα οποία πραγματοποιήθηκαν οι συγκρίσεις. Σημειώνεται ότι στα υπομνήματα των διαγραμμάτων ο όρος DOUBLE αναφέρεται στις αναλύσεις με τη διπλάσια τιμή του μέτρου ελαστικότητας κατά μήκος του πασσάλου σε σχέση με τις αντίστοιχες για την ίδια τιμή του συντελεστή τριβής διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους  $\alpha$ . Ομοίως με τα διαγράμματα H-y<sub>0</sub> και στα επακόλουθα y-z, M-z περιλαμβάνονται οι αντίστοιχες καμπύλες. Οι καμπύλες που έχουν τονιστεί με μαύρο χρώμα αντιστοιχούν στις ακραίες που έχουν προκύψει από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ οι υπόλοιπες παρουσιάζονται ως ενδιάμεσα σημεία.

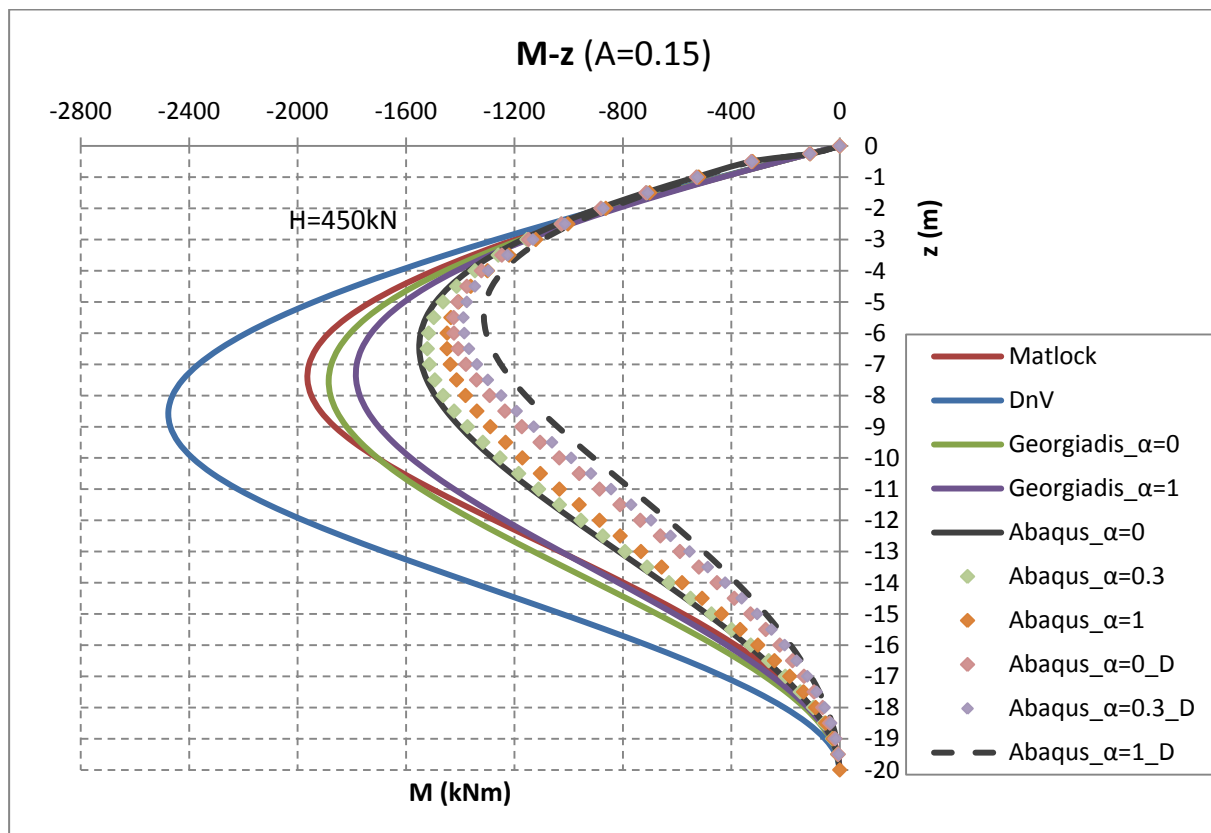
#### 5.3.1 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.15$



Σχήμα 5.10: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής για  $A=0.15$ .

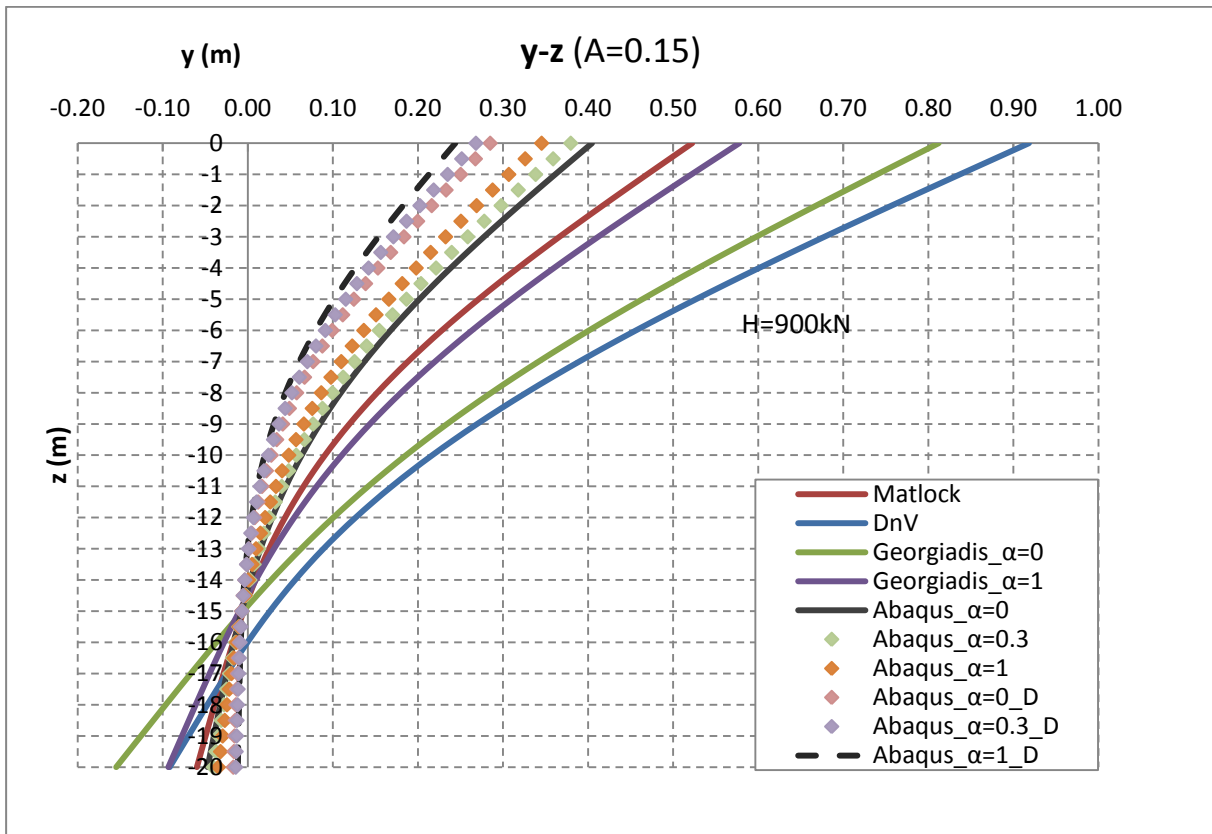


**Σχήμα 5.11:** Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου για  $A=0.15$  και για εγκάρσιο φορτίο κεφαλής  $H=450\text{kN}$ .

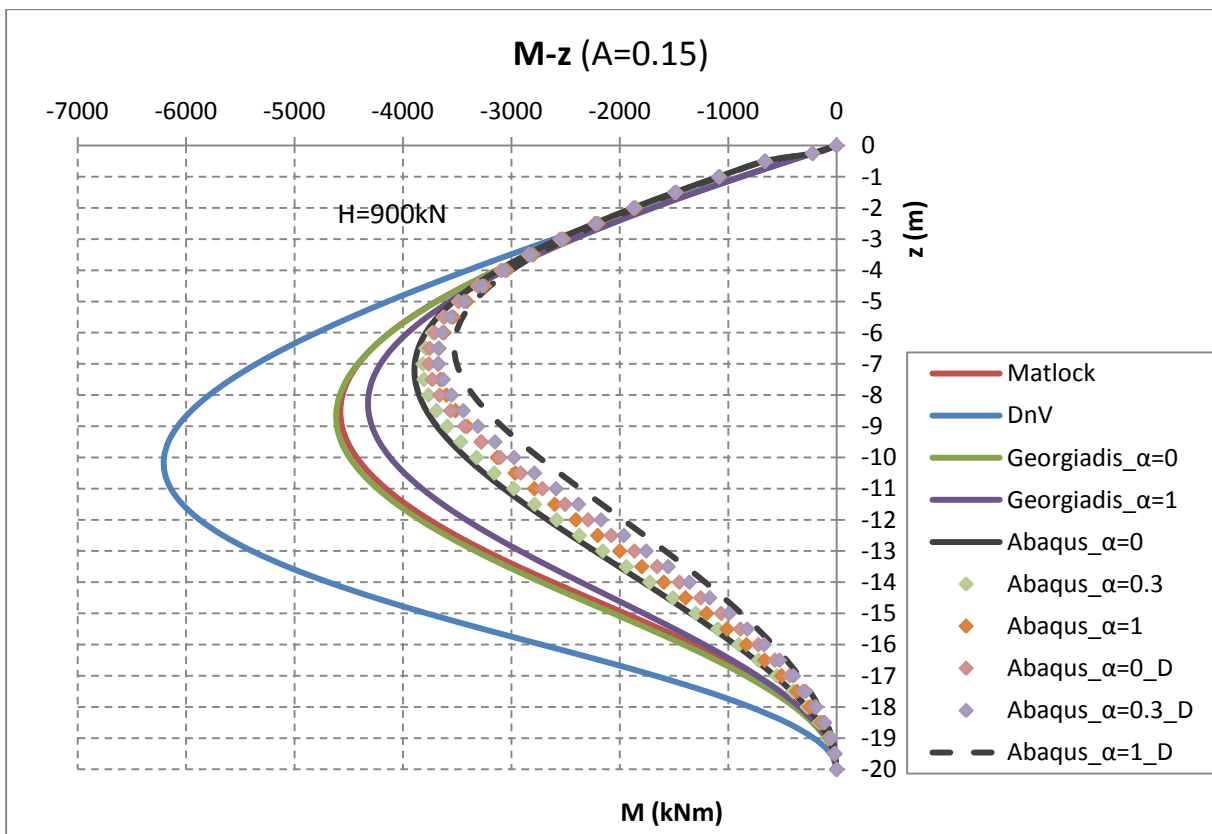


**Σχήμα 5.12:** Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου για  $A=0.15$  και για εγκάρσιο φορτίο κεφαλής  $H=450\text{kN}$ .



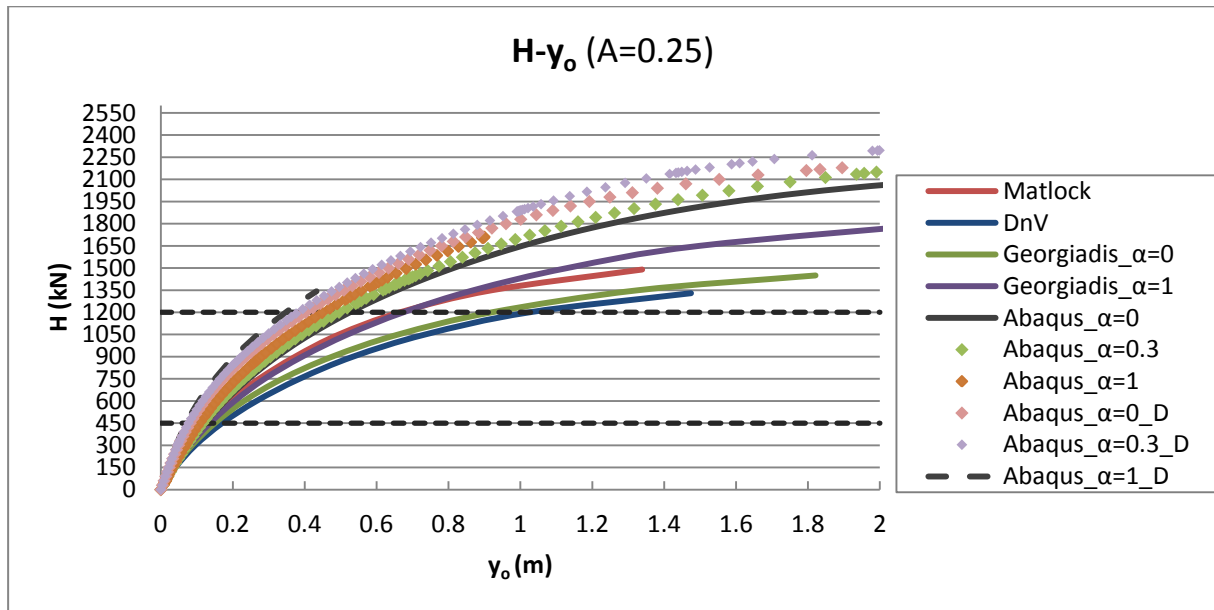


Σχήμα 5.13: Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου για  $A=0.15$  και για εγκάρσιο φορτίο κεφαλής  $H=900\text{kN}$ .

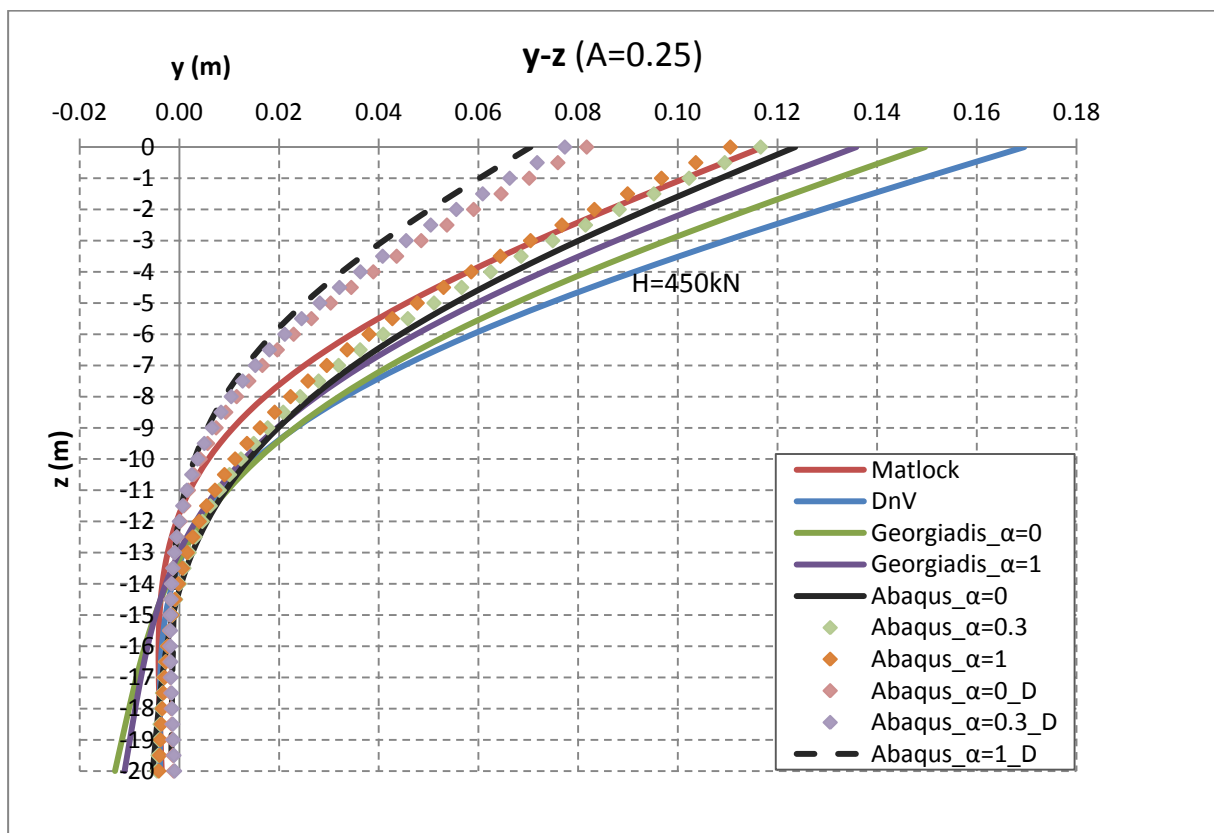


Σχήμα 5.14: Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου για  $A=0.15$  και για εγκάρσιο φορτίο κεφαλής  $H=900\text{kN}$ .

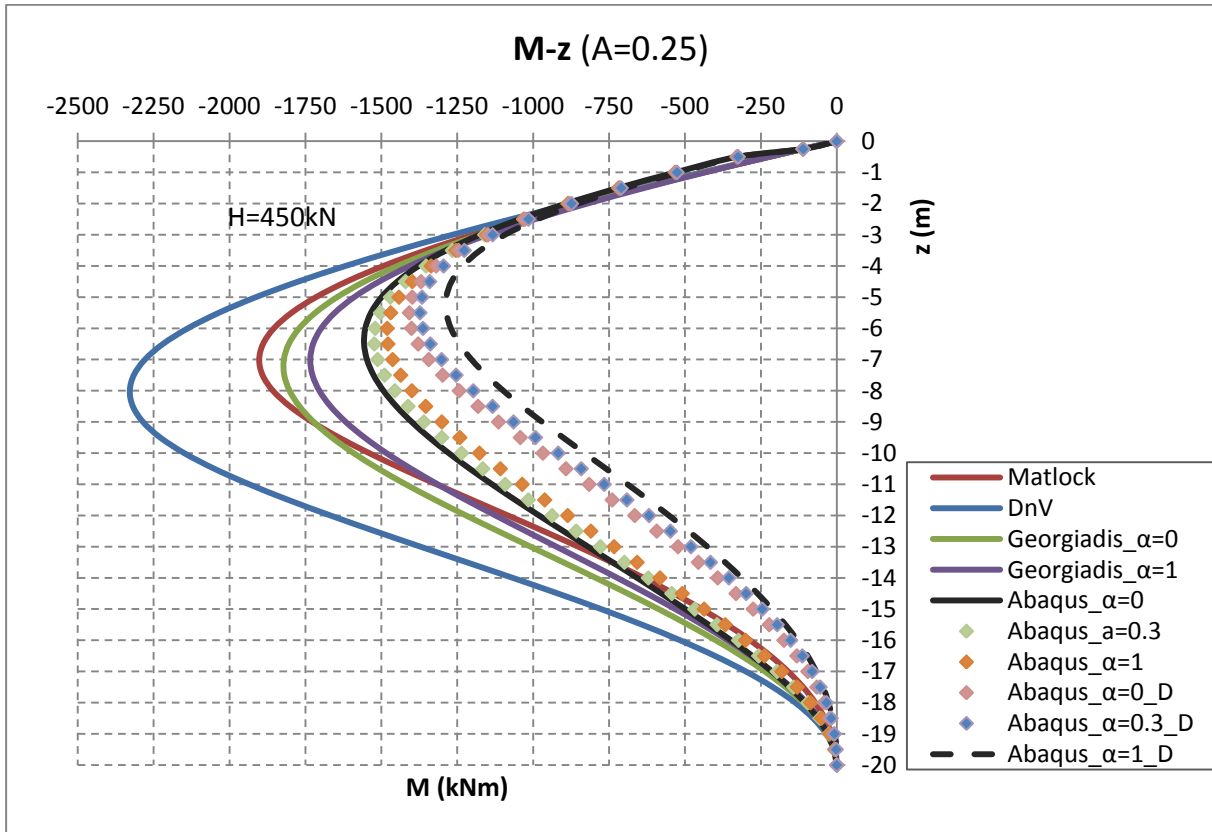
### 5.3.2 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.25$



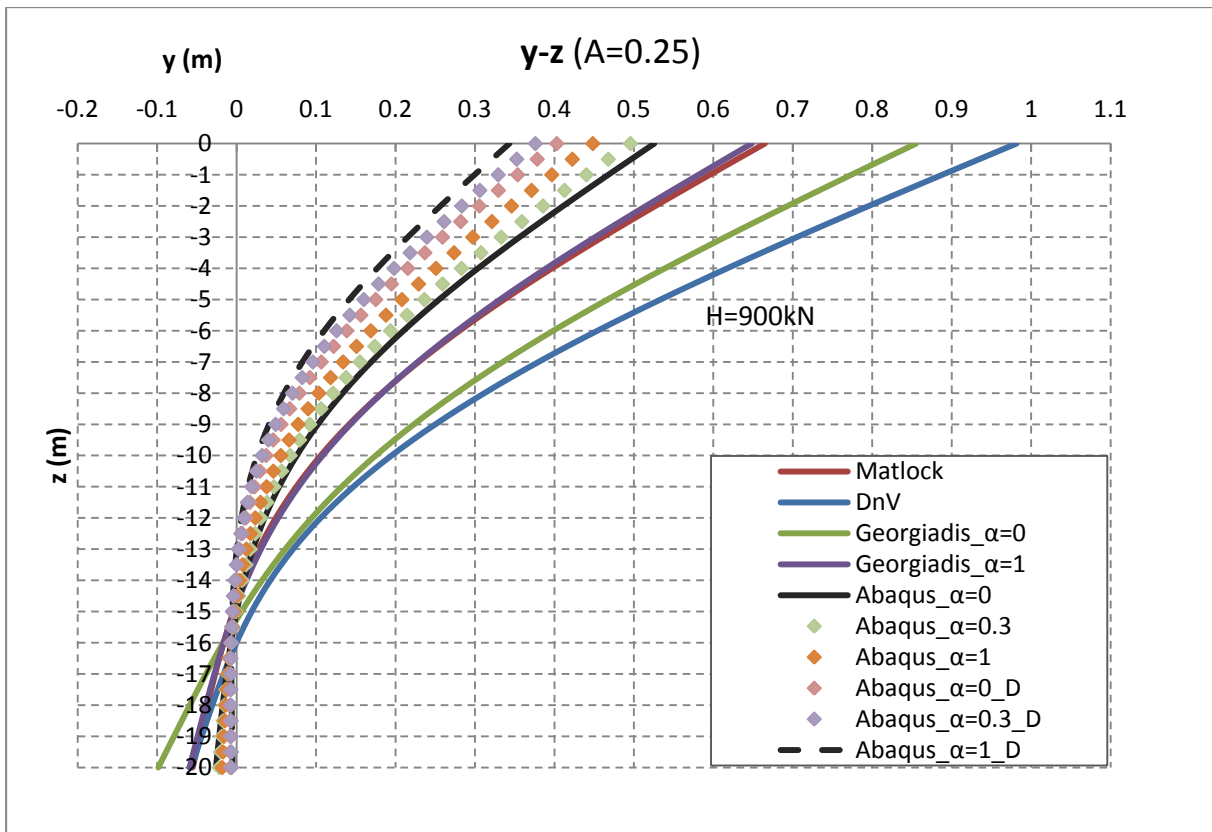
Σχήμα 5.15: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής για  $A=0.25$ .



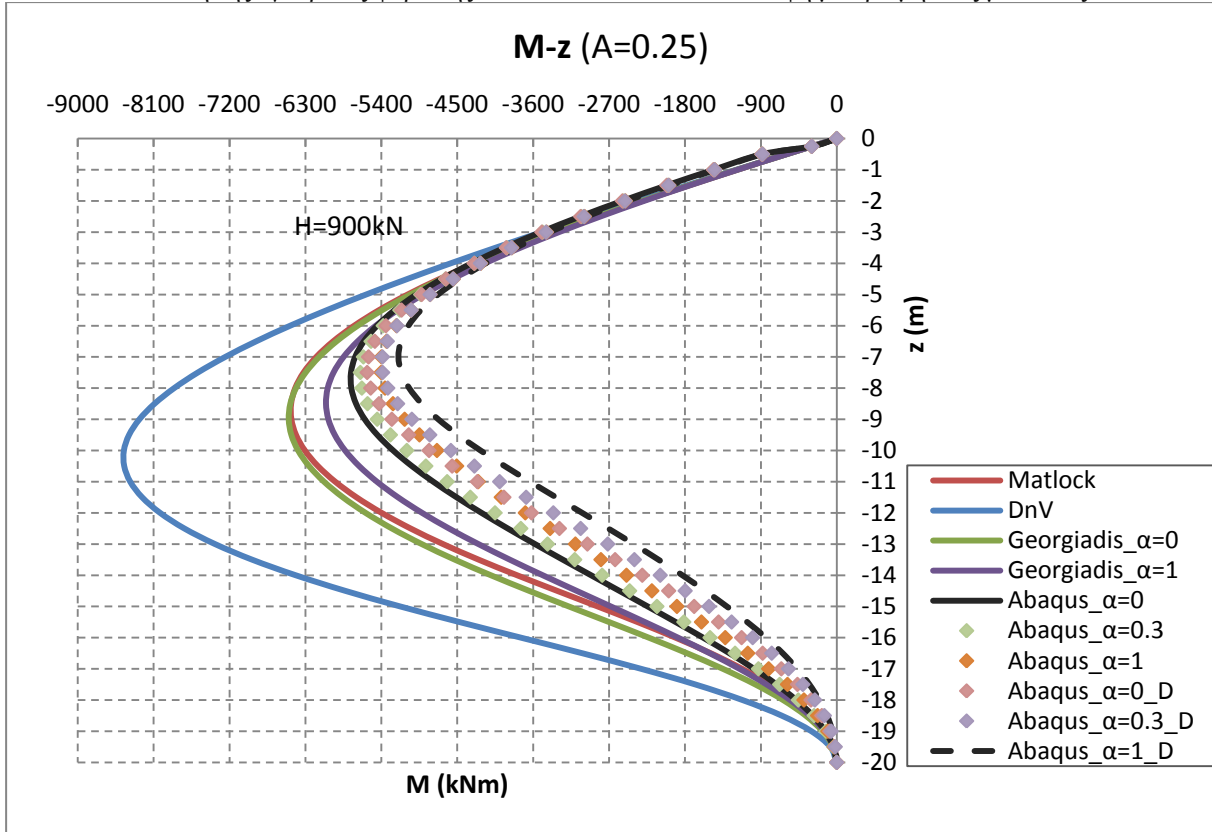
Σχήμα 5.16: Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου για  $A=0.25$  και για εγκάρσιο φορτίο κεφαλής  $H=450$  kN.



Σχήμα 5.17: Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου για  $A=0.25$  και για εγκάρσιο φορτίο κεφαλής  $H=450\text{kN}$ .

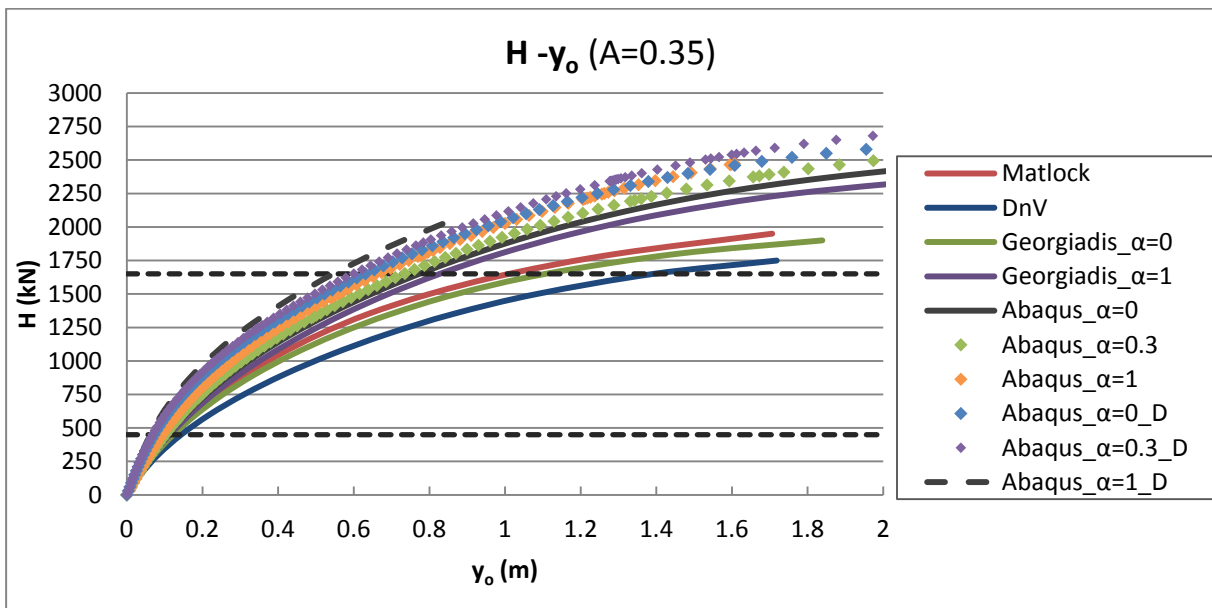


Σχήμα 5.18: Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου για  $A=0.25$  και για εγκάρσιο φορτίο κεφαλής  $H=900\text{kN}$ .

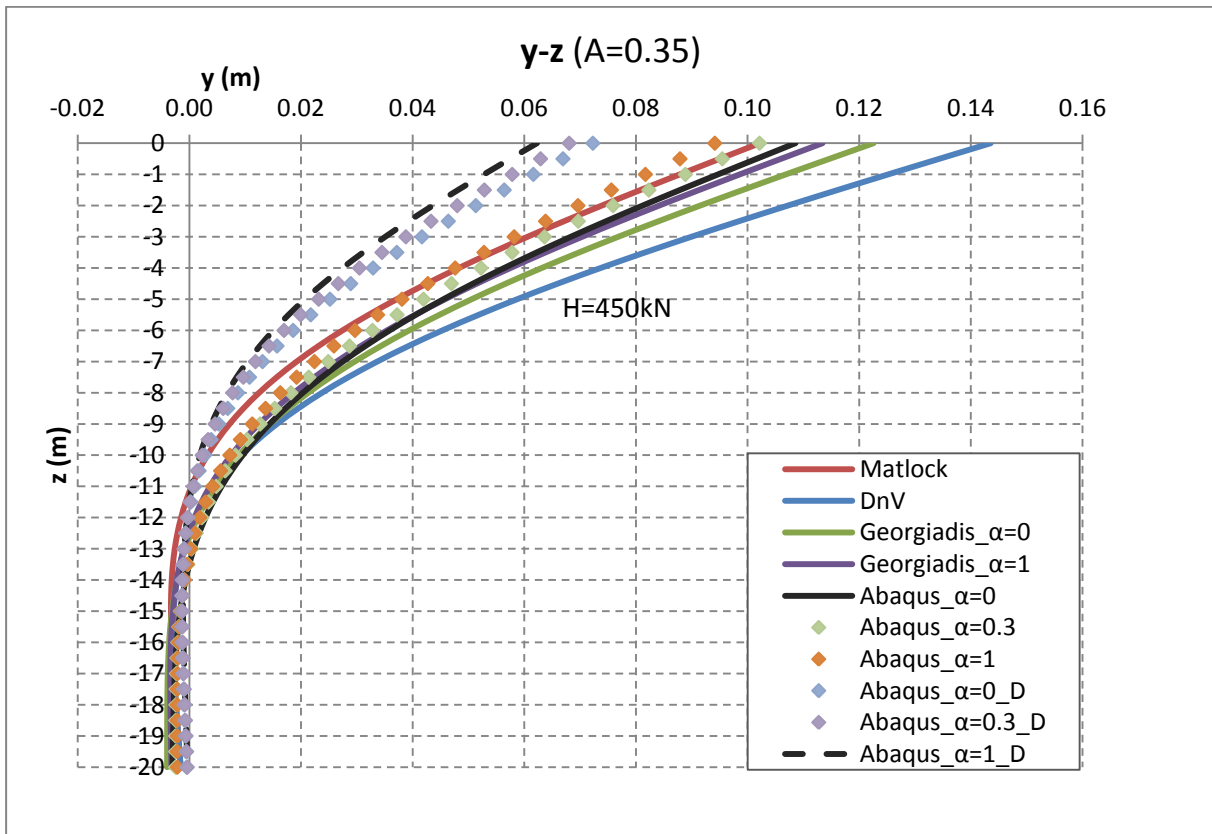


**Σχήμα 5.19:** Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου για  $A=0.25$  και για εγκάρσιο φορτίο κεφαλής  $H=900\text{kN}$ .

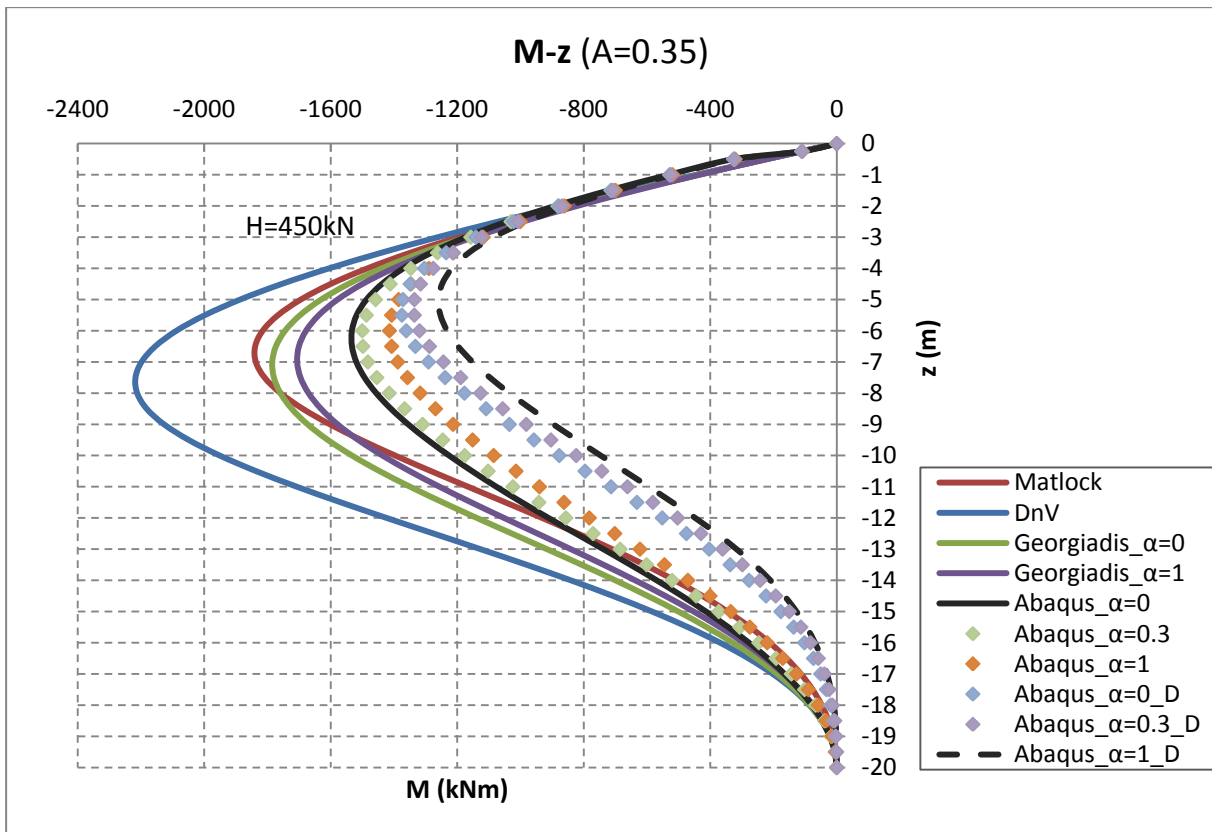
### 5.3.3 Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για $A=0.35$



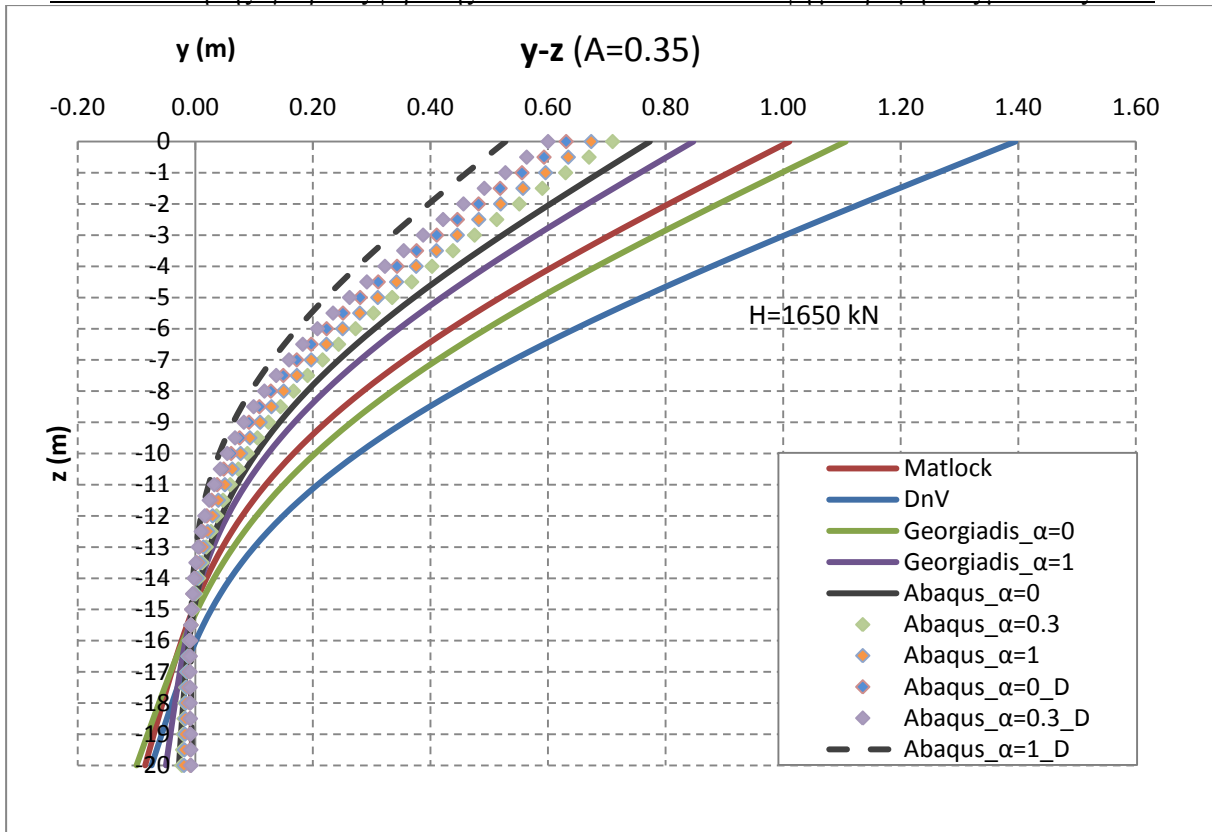
**Σχήμα 5.20:** Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κεφαλής για  $A=0.35$ .



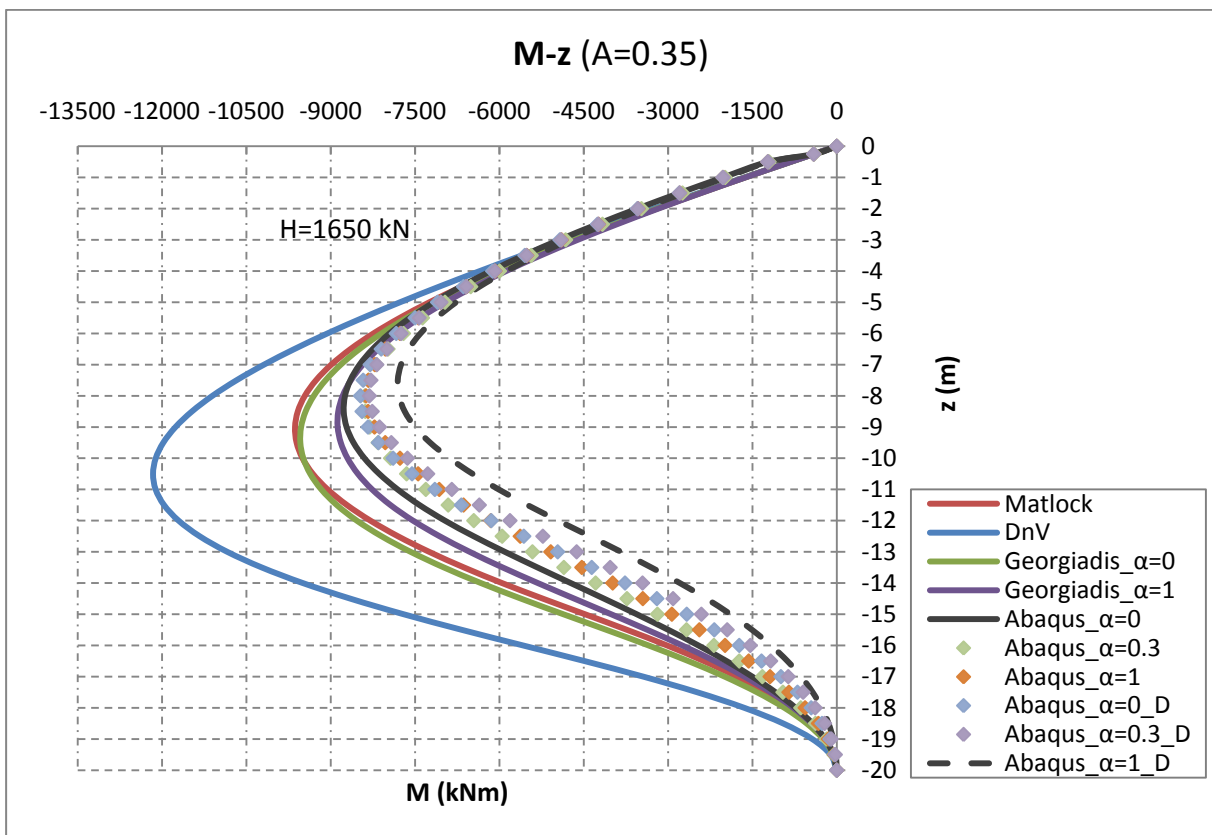
Σχήμα 5.21: Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου για  $A=0.35$  και για εγκάρσιο φορτίο κεφαλής  $H=450\text{kN}$ .



Σχήμα 5.22: Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου για  $A=0.35$  και για εγκάρσιο φορτίο κεφαλής  $H=450\text{kN}$ .



Σχήμα 5.23: Συγκριτικό διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου για  $A=0.35$  και για εγκάρσιο φορτίο κεφαλής  $H=1650\text{kN}$ .



Σχήμα 5.24: Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου για  $A=0.35$  και για εγκάρσιο φορτίο κεφαλής  $H=1650\text{kN}$ .

### **5.3.4 Παρατηρήσεις συγκριτικών διαγραμμάτων H-y, y-z και M-z**

#### **5.3.4.1 Συγκριτικά διαγράμματα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου, M-z**

Αρχικά, διαπιστώνεται ότι δεν ισχύει ο ισχυρισμός των Stevens & Audibert (1979) ότι οι εκτιμώμενες μέγιστες καμπτικές ροπές είναι αισθητά μικρότερες από αυτές που αναπτύσσονται στην πραγματικότητα κατά μήκος του πασσάλου. Αντίθετα, οι μέγιστες καμπτικές ροπές που προέκυψαν από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ήταν μικρότερες από τις αντίστοιχες υπολογισθείσες με χρήση αναλυτικών μεθοδολογιών για όλα τα εδάφη ( $A=0.15$ ,  $A=0.25$ ,  $A=0.35$ ) και για όλες τις περιπτώσεις εγκάρσιου φορτίου κεφαλής. Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό της μέγιστης καμπτικής ροπής, η μεθοδολογία του Γεωργιάδη (2010) για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=1$  καταγράφει ελάχιστη απόκλιση από τα αποτελέσματα των αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία.

#### **5.3.4.2 Συγκριτικά διαγράμματα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου, y-z**

Αρχικά, αναφέρεται ότι τα συμπεράσματα διαφοροποιούνται ανάλογα με την τιμή του συγκεντρωμένου εγκάρσιου φορτίου κεφαλής. Για εγκάρσια φόρτιση στην κεφαλή του πασσάλου μικρότερη από το 40% της οριακής, οι οριζόντιες μετατοπίσεις κατά μήκος του πασσάλου, όπως υπολογίζονται με χρήση των καμπύλων p-y κατά Matlock (API 2000, DnV 2007) εμπίπτουν στο εύρος των αντίστοιχων μετατοπίσεων που προέκυψαν από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Αντίθετα, για εγκάρσια φόρτιση μεγαλύτερη του 65% της οριακής (ως προς τις αναλυτικές μεθοδολογίες), τα αποτελέσματα των αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία καταδεικνύουν συντηρητικό υπολογισμό οριζόντιων μετατοπίσεων από όλες τις θεωρητικές μεθοδολογίες. Στη συγκεκριμένη σύγκριση επιβεβαιώνεται η διαπίστωση των Stevens & Audibert (1979) περί εκτίμησης μεγάλων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου από τις αναλυτικές μεθοδολογίες, συμπέρασμα που προφανώς αποδίδεται στην υποεκτίμηση της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ), όπως αποδείχθηκε στην παράγραφο 5.2. Τέλος, παρατηρείται ότι με την αύξηση της αντοχής του εδάφους (μεγαλύτερο  $A$ ) μειώνεται η απόκλιση της κατανομής των οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου αναφορικά με τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων και της μεθοδολογίας του Γεωργιάδη για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=1$ .

#### **5.3.4.3 Συγκριτικά διαγράμματα εγκάρσιου φορτίου-οριζόντιας μετατόπισης κεφαλής, H-y**

Παρατηρείται απόκλιση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών μεθοδολογιών από τα αντίστοιχα των αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία στα πλαίσια της σύγκρισης καμπύλων εγκάρσιου φορτίου συναρτήσει της οριζόντιας μετατόπισης στην κεφαλή του πασσάλου. Ειδικότερα για μετατοπίσεις κεφαλής μεγαλύτερες από το 20% της διαμέτρου, υπολογίζεται υψηλότερο φορτίο κεφαλής συγκριτικά με τις αναλυτικές μεθοδολογίες για κοινή μετατόπιση κεφαλής. Για μικρές οριζόντιες μετατοπίσεις στην επιφάνεια του εδάφους ( $y_0 < 20\%D$ ) οι μεθοδολογίες κατά Matlock και Γεωργιάδη για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=1$  εκτιμούν αρκετά ικανοποιητικά το οριακό εγκάρσιο φορτίο κεφαλής που ασκείται στην κεφαλή του υπό μελέτη πασσάλου. Τέλος, για  $A=0.35$  (μέτριας στιφρότητας άργιλο), η καμπύλη του Γεωργιάδη για  $\alpha=1$  πλησιάζει τις αντίστοιχες καμπύλες των αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, συμπεριφορά που παρατηρήθηκε και στα διαγράμματα κατανομής των καμπτικών ροπών και των οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου (M-z, y-z).





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις-Προτάσεις

### 6.1 Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

- Προκύπτουν μεγάλες αποκλίσεις της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) μεταξύ των αναλυτικών μεθοδολογιών κυρίως για μικρά βάθη (μικρότερα από έξι διαμέτρους πασσάλου). Οι διερευνήσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας βασίζονται πάνω σε αυτό το πρόβλημα.
- Οι συγκρίσεις των μεθοδολογιών χάραξης μη-γραμμικών καμπύλων  $p$ - $y$  κατά Matlock 1970 (API 2000, DnV 2007), κατά τους Νορβηγικούς κανονισμούς (1977) και κατά Γεωργιάδη (2010) οδηγούν στις παρακάτω παρατηρήσεις:
  - ✓ Τα διαγράμματα κατανομής οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου ( $y$ - $z$ ) παρουσιάζουν αποκλίσεις έως 25% ως προς μία ενδιάμεση τιμή μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης υπολογιζόμενης οριζόντιας μετατόπισης κεφαλής  $y_0$ . Επίσης, για κοινό εγκάρσιο φορτίο κεφαλής, παρατηρείται συμφωνία των αποτελεσμάτων των μεθοδολογιών κατά Matlock (API 2000, DnV 2007) και κατά Γεωργιάδη για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=1$ .
  - ✓ Στις καμπύλες φορτίου-οριζόντιας μετατόπισης κεφαλής ( $H$ - $y_0$ ) τα αποτελέσματα των μεθοδολογιών κατά Matlock (API 2000, DnV 2007) είναι κοντά στα αντίστοιχα κατά Γεωργιάδη για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=1$  για οριζόντιες μετατοπίσεις μικρότερες της μίας διαμέτρου σε μαλακή άργιλο και μικρότερες 1/5 της διαμέτρου σε άργιλο μεγαλύτερης σφιφρότητας.
  - ✓ Στα διαγράμματα καμπτικών ροπών κατά μήκος του πασσάλου ( $M$ - $z$ ), οι μέγιστες καμπτικές ροπές προκύπτουν από τη μεθοδολογία των Νορβηγικών κανονισμών (1977), ενώ οι αντίστοιχες ελάχιστες από τη μεθοδολογία του Γεωργιάδη για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=1$ . Όσο μεγαλύτερη είναι η εδαφική αντίδραση που κινητοποιείται τόσο μικρότερη είναι η μέγιστη αναπτυσσόμενη καμπτική ροπή. Επιπλέον, για τις μέγιστες φορτίσεις που εξετάστηκαν (μεγαλύτερες του 65% της οριακής φόρτισης όπως υπολογίστηκε από τις αναλυτικές μεθοδολογίες) παρουσιάζεται ταύτιση των αποτελεσμάτων κατά Matlock (API 2000, DnV 2007) και κατά Γεωργιάδη για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=0$ . Αντίθετα, για μικρές φορτίσεις η καμπύλη που προκύπτει σύμφωνα με τον Matlock πλησιάζει αρκετά τις καμπύλες του Γεωργιάδη για  $\alpha=0$  και  $\alpha=1$ .
- Από τις διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση τριδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων στον κώδικα Abaqus 6.10 (4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο) προκύπτουν τα εξής:
  - ✓ Η επιρροή του συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_0$  στην τιμή της οριακής εδαφικής αντίδρασης εντοπίζεται σε βάθη μεγαλύτερα από έξι διαμέτρους πασσάλου για τα εδαφικά προφίλ μαλακών, κορεσμένων, κανονικά στερεοποιημένων αργίλων που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.
  - ✓ Ο συντελεστής της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους  $\alpha$  αποτελεί μία κρίσιμη παράμετρο διερεύνησης. Η διαπίστωση αυτή οφείλεται στις αποκλίσεις του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  για τιμές της παραμέτρου συνάφειας πασσάλου-εδάφους μεταξύ  $\alpha=0$  και  $\alpha=1$ . Οι αποκλίσεις αυτές είναι της τάξης του 10% και αφορούν βάθη μικρότερα από έξι διαμέτρους πασσάλου.
  - ✓ Τιμές του λόγου αστράγγιστου μέτρου ελαστικότητας προς αστράγγιστη διατμητική αντοχή μεταξύ  $E_u/c_u=50$  και  $E_u/c_u=200$  επηρεάζουν σε ποσοστό μικρότερο του 5% την τιμή της οριακής εδαφικής αντίδρασης.

- Τα συμπεράσματα της σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ των αναλυτικών μεθοδολογιών χάραξης καμπύλων  $p$ - $y$  και των παραμετρικών αναλύσεων με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10 (5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο) είναι τα εξής:
  - ✓ Οι μεθοδολογίες κατά Murf-Hamilton, Randolph-Houlsby και Γεωργιάδη για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=1$  προβλέπουν μικρότερες τιμές του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  κατά μήκος του πασσάλου από τις αντίστοιχες των τιμών που εξήχθησαν από τις παραμετρικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για εδαφικά προφίλ μαλακής αργίλου ( $c_u < 50$ ). Αυξάνοντας το ρυθμό μεταβολής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος ( $c_u = 10 + A \gamma' z$  όπου  $A = 0.15 \rightarrow 0.35$ ) παρατηρήθηκε σύγκλιση των τιμών του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων στις αντίστοιχες προβλεπόμενες των παραπάνω αναλυτικών μεθοδολογιών για  $\alpha=1$ .
  - ✓ Η μέγιστη τιμή του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων δεν είναι μικρότερη από  $N_p=10$ . Η αντίστοιχη προβλεπόμενη τιμή των σύγχρονων αναλυτικών μεθοδολογιών για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=0$  είναι  $N_p=9.14$ .
  - ✓ Για βάρη μεταξύ μίας διαμέτρου και τεσσάρων διαμέτρων πασσάλου οι προβλεπόμενες τιμές του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης  $N_p$  είναι συντηρητικές συγκριτικά με τις αντίστοιχες υπολογισθείσες από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.
  - ✓ Συγκρίνοντας εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη κατά μήκος του πασσάλου που υπολογίστηκαν από τις αριθμητικές αναλύσεις προκύπτει ότι οι εξετασθείσες αναλυτικές μεθοδολογίες προσδιορισμού καμπύλων  $p$ - $y$  προβλέπουν συντηρητικές τιμές οριζόντιων μετατοπίσεων και αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών για μετατοπίσεις μεγαλύτερες του (1/5) της διαμέτρου.

## 6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Στην παρούσα διπλωματική εργασία η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους καθορίζεται από τα ελαστικά-απολύτως πλαστικά καταστατικά προσομοιώματα Mohr-Coulomb και Drucker-Prager. Προτείνεται χρήση μη-γραμμικού ελαστοπλαστικού καταστατικού νόμου για την ακριβέστερη προσομοίωση της εδαφικής συμπεριφοράς (π.χ. τροποποιημένο καταστατικό προσομοίωμα Cam-Clay) και διερεύνηση της επιρροής αυτού του νόμου στα αποτελέσματα.
- Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10 προέκυψαν σε όρους ολικών τάσεων, λαμβάνοντας υπόψη την αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου ( $c_u$ ). Αποσκοπώντας σε ακριβέστερη καταστατική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους, προτείνεται η χρήση πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία θα λαμβάνουν υπόψη την πίεση πόρων μέσω συζευγμένων αριθμητικών αναλύσεων.
- Η προσομοίωση του προβλήματος εγκάρσιας φόρτισης πασσάλου με την επιβολή συγκεντρωμένου φορτίου στην κεφαλή του πασσάλου δεν επέτρεψε ασφαλή προσδιορισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) για βάθη μεγαλύτερα από έξι διαμέτρους στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η επίλυση του προβλήματος με επιβολή κοινής οριζόντιας μετατόπισης καθ' όλο το μήκος του πασσάλου πιθανότατα να καταστήσει εφικτό τον υπολογισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) για βάθη μεγαλύτερα από έξι διαμέτρους, ώστε να μορφωθεί ένα πληρέστερο διάγραμμα κατανομής του συντελεστή οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $N_p$ ) με το βάθος.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:</b> Συντεταγμένες $p(kN/m)-y(m)$ (3 <sup>ο</sup> Κεφάλαιο)
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:</b> Τιμές μετατοπίσεων( $y$ )-καμπτικών ροπών ( $M$ ) (3 <sup>ο</sup> Κεφάλαιο)
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ:</b> Μη-γραμμικές καμπύλες $p-y$ (4 <sup>ο</sup> Κεφάλαιο)
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ:</b> Αρχείο εισαγωγής δεδομένων του κώδικα Abaqus(4 <sup>ο</sup> Κεφάλαιο)
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε:</b> Μη-γραμμικές καμπύλες $p-y$ (5 <sup>ο</sup> Κεφάλαιο)
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ:</b> Διαγράμματα ευθείας $(y/p)=f(y)$ (5 <sup>ο</sup> Κεφάλαιο)

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:**

Συντεταγμένες εδαφικής αντίδρασης (ρ)-οριζόντιας μετατόπισης (γ) για διάφορα βάθη σύμφωνα με τη μεθοδολογία κατά Matlock (1970) ως παράδειγμα χάραξης καμπύλων ρ-γ (Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>)

A1) Μαλακή, κορεσμένη, κανονικά στερεοποιημένη άργιλος με αστράγγιστη διατμητική αντοχή γραμμικά αυξανόμενη με το βάθος σύμφωνα με την εξίσωση  $C_u=10+0.25\gamma'z$ .

z = 0		z = -1.5		z = -2m		z = -3m	
γ(m)	ρ (kN/m)	γ(m)	ρ (kN/m)	γ(m)	ρ (kN/m)	γ(m)	ρ (kN/m)
0	0	0	0	0	0	0	0
0.02	11.05209	0.02	24.52183	0.02	29.47225	0.02	40.06384
0.03	12.65149	0.03	28.07049	0.03	33.73731	0.03	45.86165
0.04	13.92477	0.04	30.89558	0.04	37.13271	0.04	50.47728
0.05	15	0.05	33.28125	0.05	40	0.05	54.375
0.06	15.93988	0.06	35.36661	0.06	42.50634	0.06	57.78206
0.07	16.78033	0.07	37.23137	0.07	44.74756	0.07	60.82871
0.08	17.54411	0.08	38.92599	0.08	46.78428	0.08	63.59739
0.09	18.24661	0.09	40.48466	0.09	48.65762	0.09	66.14395
0.1	18.89882	0.1	41.93175	0.1	50.39684	0.1	68.50821
0.11	19.50887	0.11	43.28531	0.11	52.02366	0.11	70.71966
0.12	20.08299	0.12	44.55913	0.12	53.55464	0.12	72.80083
0.13	20.62603	0.13	45.76401	0.13	55.00275	0.13	74.76937
0.14	21.1419	0.14	46.90858	0.14	56.37839	0.14	76.63937
0.15	21.63374	0.15	47.99987	0.15	57.68998	0.15	78.42232
0.16	22.10419	0.16	49.04367	0.16	58.9445	0.16	80.12769
0.17	22.55542	0.17	50.04484	0.17	60.14778	0.17	81.76339
0.18	22.98928	0.18	51.00747	0.18	61.30475	0.18	83.33615
0.19	23.40736	0.19	51.93508	0.19	62.41963	0.19	84.85168
0.2	23.81102	0.2	52.83069	0.2	63.49604	0.2	86.31493
0.21	24.20143	0.21	53.69692	0.21	64.53715	0.21	87.73018
0.22	24.57964	0.22	54.53607	0.22	65.5457	0.22	89.10119
0.23	24.94655	0.23	55.35016	0.23	66.52414	0.23	90.43125
0.24	25.30298	0.24	56.14099	0.24	67.47461	0.24	91.7233
0.25	25.64964	0.25	56.91014	0.25	68.39904	0.25	92.97994
0.26	25.98717	0.26	57.65904	0.26	69.29913	0.26	94.2035
0.27	26.31616	0.27	58.38898	0.27	70.17643	0.27	95.39608
0.28	26.63712	0.28	59.10111	0.28	71.03232	0.28	96.55956
0.29	26.95053	0.29	59.79648	0.29	71.86807	0.29	97.69566
0.3	27.25681	0.3	60.47604	0.3	72.68482	0.3	98.80593
0.31	27.55636	0.31	61.14067	0.31	73.48362	0.31	99.8918
0.32	27.84953	0.32	61.79115	0.32	74.26542	0.32	100.9546
0.33	28.13666	0.33	62.42822	0.33	75.0311	0.33	101.9954
0.34	28.41805	0.34	63.05254	0.34	75.78146	0.34	103.0154
0.35	28.69397	0.35	63.66474	0.35	76.51725	0.35	104.0156
0.36	28.96468	0.36	64.26539	0.36	77.23915	0.36	104.997

z = 0		z = -1.5		z = -2m		z = -3m	
y(m)	p (kN/m)	y(m)	p (kN/m)	y(m)	p (kN/m)	y(m)	p (kN/m)
0.36	28.96468	0.36	64.26539	0.36	77.23915	0.36	104.997
0.37	29.23043	0.37	64.85501	0.37	77.94781	0.37	105.9603
0.38	29.49143	0.38	65.4341	0.38	78.64381	0.38	106.9064
0.39	29.74789	0.39	66.00312	0.39	79.3277	0.39	107.8361
0.4	30	0.4	66.5625	0.4	80	0.4	108.75
0.41	30	0.41	66.5625	0.41	80	0.41	108.75
0.42	30	0.42	66.5625	0.42	80	0.42	108.75
0.43	30	0.43	66.5625	0.43	80	0.43	108.75
0.44	30	0.44	66.5625	0.44	80	0.44	108.75
0.45	30	0.45	66.5625	0.45	80	0.45	108.75
0.46	30	0.46	66.5625	0.46	80	0.46	108.75
0.47	30	0.47	66.5625	0.47	80	0.47	108.75
0.48	30	0.48	66.5625	0.48	80	0.48	108.75
0.49	30	0.49	66.5625	0.49	80	0.49	108.75
0.5	30	0.5	66.5625	0.5	80	0.5	108.75

(Συνέχεια)

z = -8m		z = -10.5m		z = -20m	
y(m)	p (kN/m)	y(m)	p (kN/m)	y(m)	p (kN/m)
0	0	0	0	0	0
0.02	99.46885	0.02	120.1915	0.02	198.9377
0.03	113.8634	0.03	137.585	0.03	227.7268
0.04	125.3229	0.04	151.4318	0.04	250.6458
0.05	135	0.05	163.125	0.05	270
0.06	143.4589	0.06	173.3462	0.06	286.9178
0.07	151.023	0.07	182.4861	0.07	302.046
0.08	157.897	0.08	190.7922	0.08	315.7939
0.09	164.2195	0.09	198.4318	0.09	328.4389
0.1	170.0893	0.1	205.5246	0.1	340.1787
0.11	175.5798	0.11	212.159	0.11	351.1597
0.12	180.7469	0.12	218.4025	0.12	361.4938
0.13	185.6343	0.13	224.3081	0.13	371.2686
0.14	190.2771	0.14	229.9181	0.14	380.5541
0.15	194.7037	0.15	235.267	0.15	389.4074
0.16	198.9377	0.16	240.3831	0.16	397.8754
0.17	202.9988	0.17	245.2902	0.17	405.9975
0.18	206.9035	0.18	250.0085	0.18	413.8071
0.19	210.6663	0.19	254.5551	0.19	421.3325
0.2	214.2991	0.2	258.9448	0.2	428.5983
0.21	217.8129	0.21	263.1905	0.21	435.6257
0.22	221.2167	0.22	267.3036	0.22	442.4335
0.23	224.519	0.23	271.2938	0.23	449.0379
0.24	227.7268	0.24	275.1699	0.24	455.4536

<b>z = -8m</b>		<b>z = -10.5m</b>		<b>z = -20m</b>	
<b>γ(m)</b>	<b>ρ (kN/m)</b>	<b>γ(m)</b>	<b>ρ (kN/m)</b>	<b>γ(m)</b>	<b>ρ (kN/m)</b>
0.25	230.8468	0.25	278.9398	0.25	461.6935
0.26	233.8846	0.26	282.6105	0.26	467.7691
0.27	236.8454	0.27	286.1882	0.27	473.6909
0.28	239.7341	0.28	289.6787	0.28	479.4682
0.29	242.5547	0.29	293.087	0.29	485.1095
0.3	245.3113	0.3	296.4178	0.3	490.6226
0.31	248.0072	0.31	299.6754	0.31	496.0144
0.32	250.6458	0.32	302.8637	0.32	501.2916
0.33	253.23	0.33	305.9862	0.33	506.4599
0.34	255.7624	0.34	309.0463	0.34	511.5248
0.35	258.2457	0.35	312.0469	0.35	516.4914
0.36	260.6821	0.36	314.9909	0.36	521.3643
0.37	263.0738	0.37	317.8809	0.37	526.1477
0.38	265.4228	0.38	320.7193	0.38	530.8457
0.39	267.731	0.39	323.5083	0.39	535.462
0.4	270	0.4	326.25	0.4	540
0.41	270	0.41	326.25	0.41	540
0.42	270	0.42	326.25	0.42	540
0.43	270	0.43	326.25	0.43	540
0.44	270	0.44	326.25	0.44	540
0.45	270	0.45	326.25	0.45	540
0.46	270	0.46	326.25	0.46	540
0.47	270	0.47	326.25	0.47	540
0.48	270	0.48	326.25	0.48	540
0.49	270	0.49	326.25	0.49	540
0.5	270	0.5	326.25	0.5	540

(Συνέχεια)



**A2)** Συντεταγμένες πολυγωνικών καμπυλών  $p-y$  σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο ( $C_u=10+0.25\gamma'z$ ).

z=0 m		z= 1m		z=2m		z=3m		z=4m	
$\gamma(m)$	$p(kN/m)$	$\gamma(m)$	$p(kN/m)$	$\gamma(m)$	$p(kN/m)$	$\gamma(m)$	$p(kN/m)$	$\gamma(m)$	$p(kN/m)$
-1	-30	-1	-53.75	-1	-80	-1	-108.75	-1	-140
-0.4	-30	-0.4	-53.75	-0.4	-80	-0.4	-108.75	-0.4	-140
-0.3	-27.2568	-0.3	-48.8351	-0.3	-72.6848	-0.3	-98.8059	-0.3	-127.198
-0.2	-23.811	-0.2	-42.6614	-0.2	-63.496	-0.2	-86.3149	-0.2	-111.118
-0.1	-18.8988	-0.1	-33.8604	-0.1	-50.3968	-0.1	-68.5082	-0.1	-88.1945
-0.05	-15	-0.05	-26.875	-0.05	-40	-0.05	-54.375	-0.05	-70
-0.02	-11.0521	-0.02	-19.8017	-0.02	-29.4723	-0.02	-40.0638	-0.02	-51.5764
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.02	11.05209	0.02	19.80167	0.02	29.47225	0.02	40.06384	0.02	51.57644
0.05	15	0.05	26.875	0.05	40	0.05	54.375	0.05	70
0.1	18.89882	0.1	33.86038	0.1	50.39684	0.1	68.50821	0.1	88.19447
0.2	23.81102	0.2	42.6614	0.2	63.49604	0.2	86.31493	0.2	111.1181
0.3	27.25681	0.3	48.83512	0.3	72.68482	0.3	98.80593	0.3	127.1984
0.4	30	0.4	53.75	0.4	80	0.4	108.75	0.4	140
1	30	1	53.75	1	80	1	108.75	1	140

z=6m		z= 8m		z= 12m		z =16m		z= 20m	
$\gamma(m)$	$p(kN/m)$	$\gamma(m)$	$p(kN/m)$	$\gamma(m)$	$p(kN/m)$	$\gamma(m)$	$p(kN/m)$	$\gamma(m)$	$p(kN/m)$
-1	-210	-1	-270	-1	-360	-1	-450	-1	-540
-0.4	-210	-0.4	-270	-0.4	-360	-0.4	-450	-0.4	-540
-0.3	-190.798	-0.3	-245.311	-0.3	-327.082	-0.3	-408.852	-0.3	-490.623
-0.2	-166.677	-0.2	-214.299	-0.2	-285.732	-0.2	-357.165	-0.2	-428.598
-0.1	-132.292	-0.1	-170.089	-0.1	-226.786	-0.1	-283.482	-0.1	-340.179
-0.05	-105	-0.05	-135	-0.05	-180	-0.05	-225	-0.05	-270
-0.02	-77.3647	-0.02	-99.4689	-0.02	-132.625	-0.02	-165.781	-0.02	-198.938
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.02	77.36466	0.02	99.46885	0.02	132.6251	0.02	165.7814	0.02	198.9377
0.05	105	0.05	135	0.05	180	0.05	225	0.05	270
0.1	132.2917	0.1	170.0893	0.1	226.7858	0.1	283.4822	0.1	340.1787
0.2	166.6771	0.2	214.2991	0.2	285.7322	0.2	357.1652	0.2	428.5983
0.3	190.7977	0.3	245.3113	0.3	327.0817	0.3	408.8521	0.3	490.6226
0.4	210	0.4	270	0.4	360	0.4	450	0.4	540
1	210	1	270	1	360	1	450	1	540

Σημείωση: Ομοίως υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες εδαφικής αντίδρασης ( $p$ )-οριζόντιας μετατόπισης ( $y$ ) για τις μεθοδολογίες κατά τους Νορβηγικούς κανονισμούς DnV (1977) και κατά Γεωργιάδη (2010).

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:**

**Οριζόντια μετατόπιση και καμπτική ροπή κατά μήκος του πασσάλου σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο κατά Matlock 1970 για  $A=0.25$  ως παράδειγμα για τη χάραξη των διαγραμμάτων  $y-z$ ,  $M-z$ (Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> ).**

**B1) Φόρτιση  $H=450$  kN.**

<b>STEP 3</b>		
<b>SHEAR= 450 kN</b>		
<b>Z (m)</b>	<b>y (m)</b>	<b>MOMENT(kNm)</b>
0	0.117	0
0.5	0.109	-222
1	0.101	-438
1.5	0.094	-645
2	0.086	-841
2.5	0.079	-1026
3	0.072	-1197
3.5	0.065	-1353
4	0.058	-1493
4.5	0.052	-1614
5	0.046	-1715
5.5	0.040	-1796
6	0.035	-1854
6.5	0.030	-1890
7	0.025	-1902
7.5	0.021	-1891
8	0.017	-1857
8.5	0.014	-1801
9	0.011	-1728
9.5	0.008	-1640
10	0.006	-1540
10.5	0.004	-1432
11	0.002	-1318
11.5	0.001	-1201
12	-0.001	-1083
12.5	-0.002	-966
13	-0.002	-852
13.5	-0.003	-741
14	-0.003	-636
14.5	-0.004	-537
15	-0.004	-445
15.5	-0.004	-361
16	-0.004	-286
16.5	-0.004	-219
17	-0.004	-161
17.5	-0.004	-111

STEP 3		
SHEAR=	450	kN
Z (m)	y (m)	MOMENT(kNm)
18	-0.004	-71
18.5	-0.004	-40
19	-0.004	-18
19.5	-0.004	-4
20	-0.004	0

(Συνέχεια)

B2) Φόρτιση H=1200 kN.

STEP 8		
SHEAR=	1200	kN
Z	y (m)	MOMENT(kNm)
0	0.66	0
0.5	0.63	-596
1	0.60	-1181
1.5	0.56	-1753
2	0.53	-2308
2.5	0.49	-2843
3	0.46	-3354
3.5	0.43	-3838
4	0.40	-4292
4.5	0.37	-4710
5	0.34	-5090
5.5	0.31	-5429
6	0.28	-5723
6.5	0.25	-5972
7	0.23	-6172
7.5	0.21	-6323
8	0.18	-6422
8.5	0.16	-6470
9	0.14	-6467
9.5	0.12	-6413
10	0.11	-6308
10.5	0.09	-6153
11	0.08	-5948
11.5	0.06	-5696

STEP 8		
SHEAR=	1200	kN
Z	y (m)	MOMENT(kNm)
12	0.05	-5397
12.5	0.04	-5054
13	0.03	-4670
13.5	0.02	-4246
14	0.01	-3791
14.5	0.00	-3316
15	0.00	-2836
15.5	-0.01	-2364
16	-0.02	-1913
16.5	-0.02	-1496
17	-0.03	-1122
17.5	-0.03	-795
18	-0.04	-519
18.5	-0.04	-297
19	-0.05	-135
19.5	-0.05	-34
20	-0.06	0

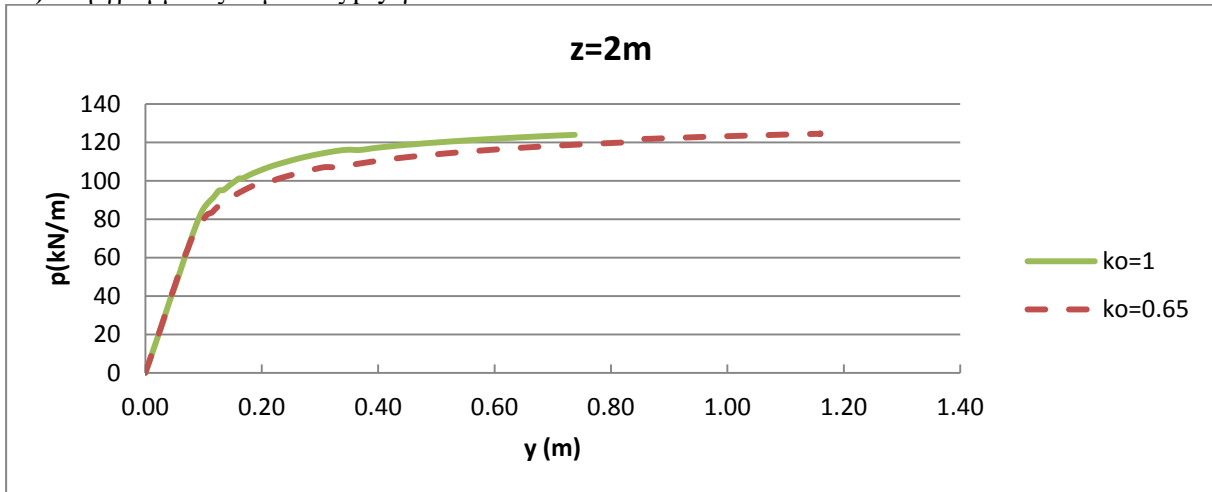
(Συνέχεια)

Σημείωση: Ομοίως υπολογίστηκαν οι οριζόντιες μετατοπίσεις και οι καμπτικές ροπές κατά μήκος του πασσάλου για τις μεθοδολογίες κατά τους Νορβηγικούς κανονισμούς DnV (1977) και κατά Γεωργιάδη (2010).

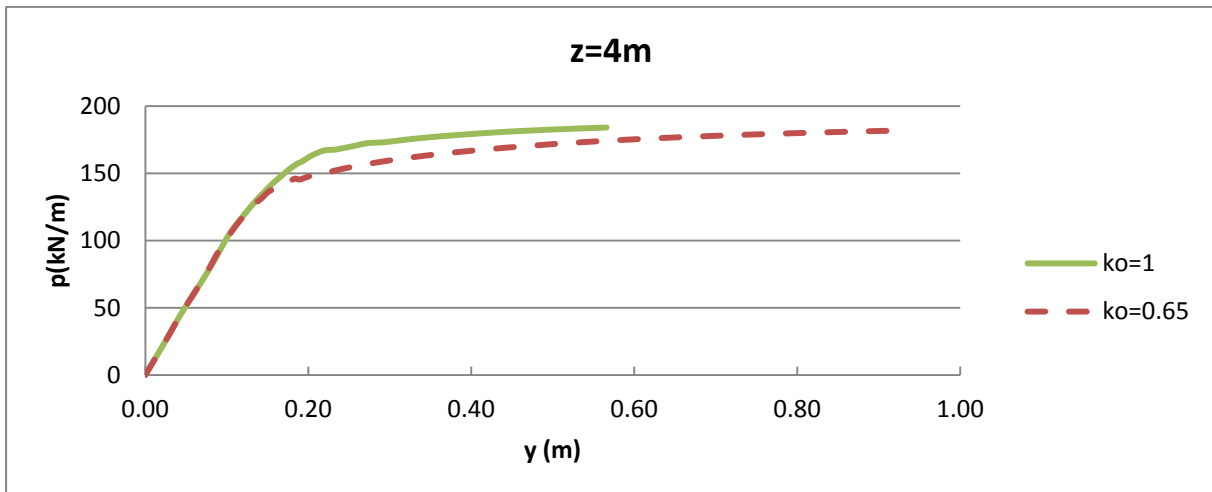
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ**

Διαγράμματα μη-γραμμικών καμπύλων  $p$ - $y$  για βάθη  $z=2m$ ,  $z=4m$  και  $z=6m$  (Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>).

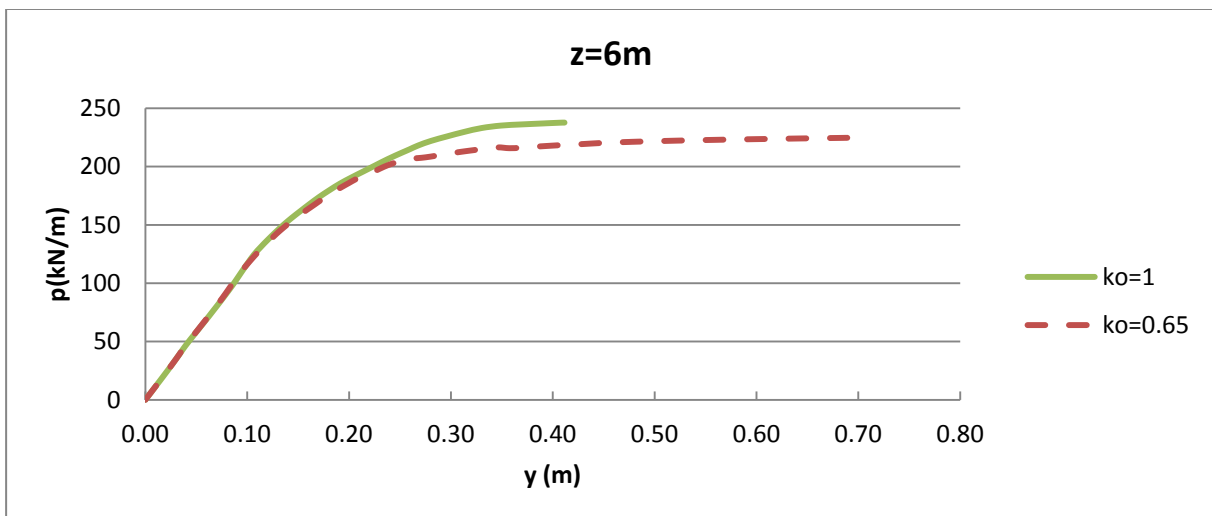
Γ1) Μη-γραμμικές καμπύλες  $p$ - $y$  για  $A=0.15$ .



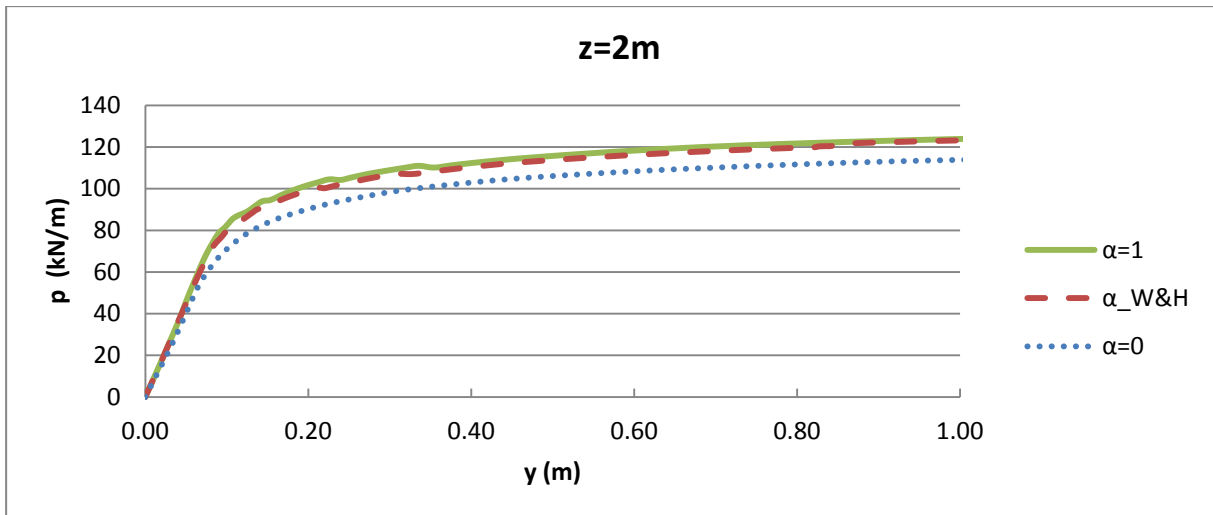
Σχήμα 0.1: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=2m$  για διαφορετικές τιμές του  $k_0$



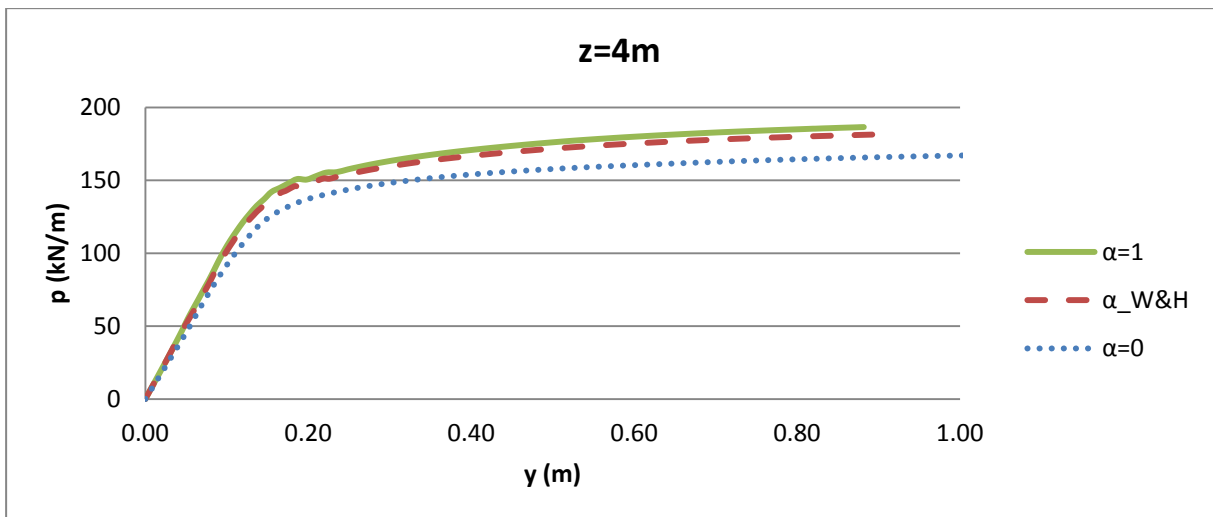
Σχήμα 0.2: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=4m$  για διαφορετικές τιμές του  $k_0$



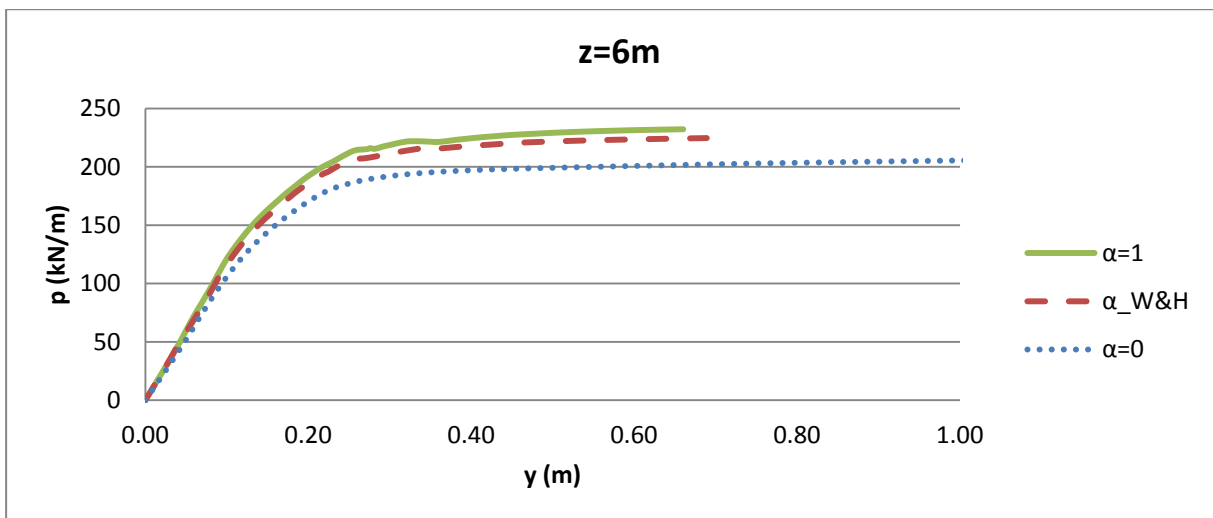
Σχήμα 0.3: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=6m$  για διαφορετικές τιμές του  $k_0$



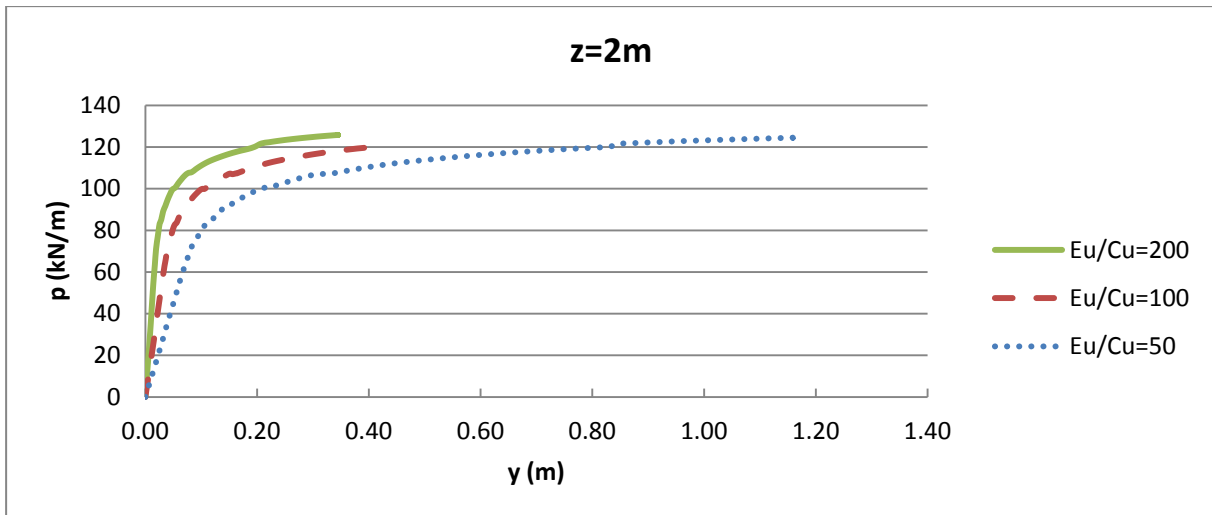
Σχήμα 0.4: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=2m$  για διάφορες τιμές του  $\alpha$ .



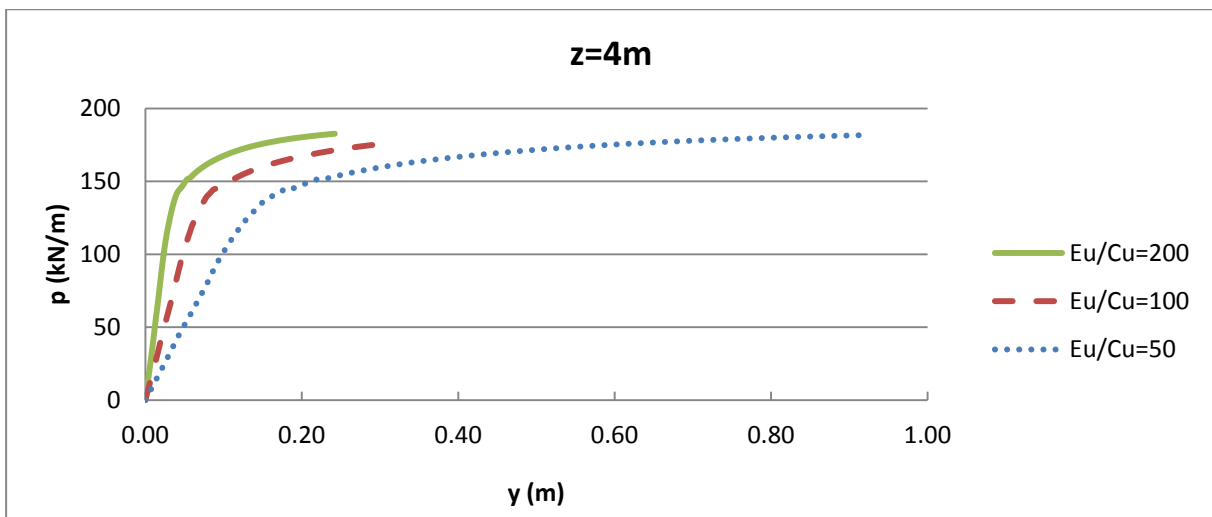
Σχήμα 0.5: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=4m$  για διάφορες τιμές του  $\alpha$ .



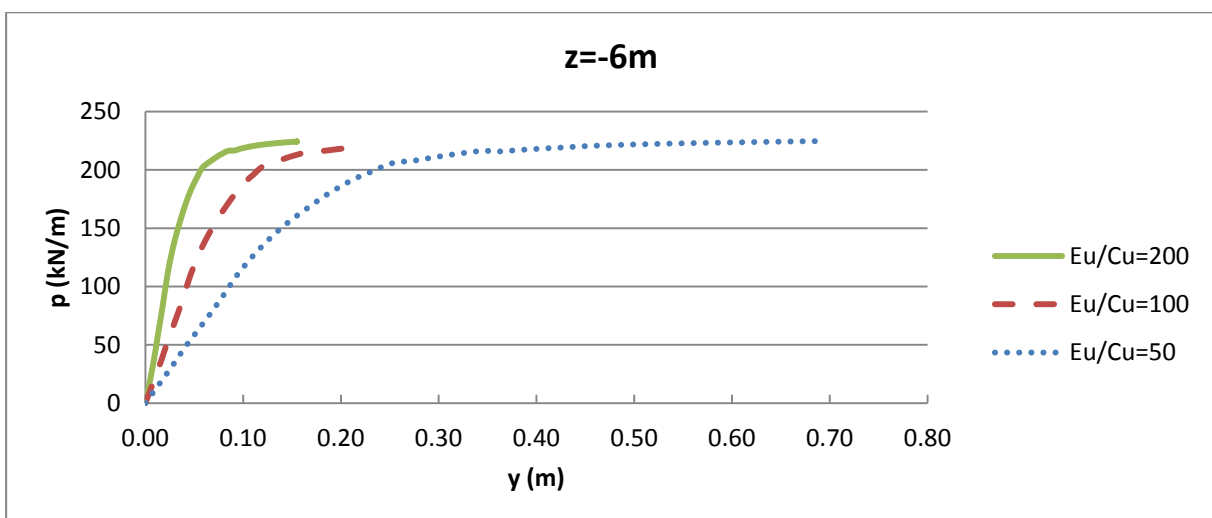
Σχήμα 0.6: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=6m$  για διάφορες τιμές του  $\alpha$ .



Σχήμα 0.7: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=2m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

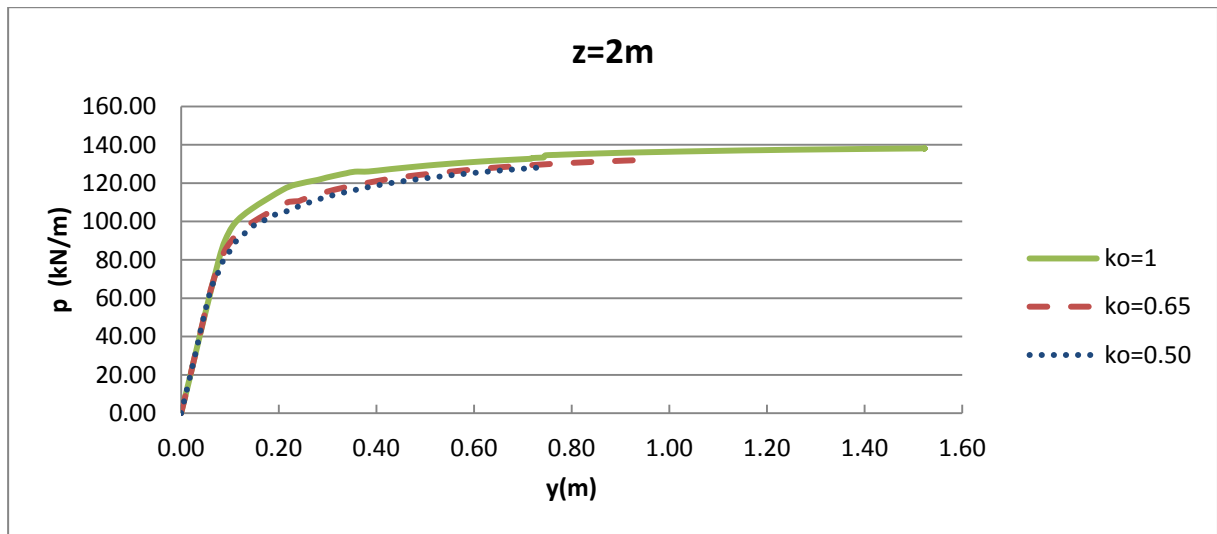


Σχήμα 0.8: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=4m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

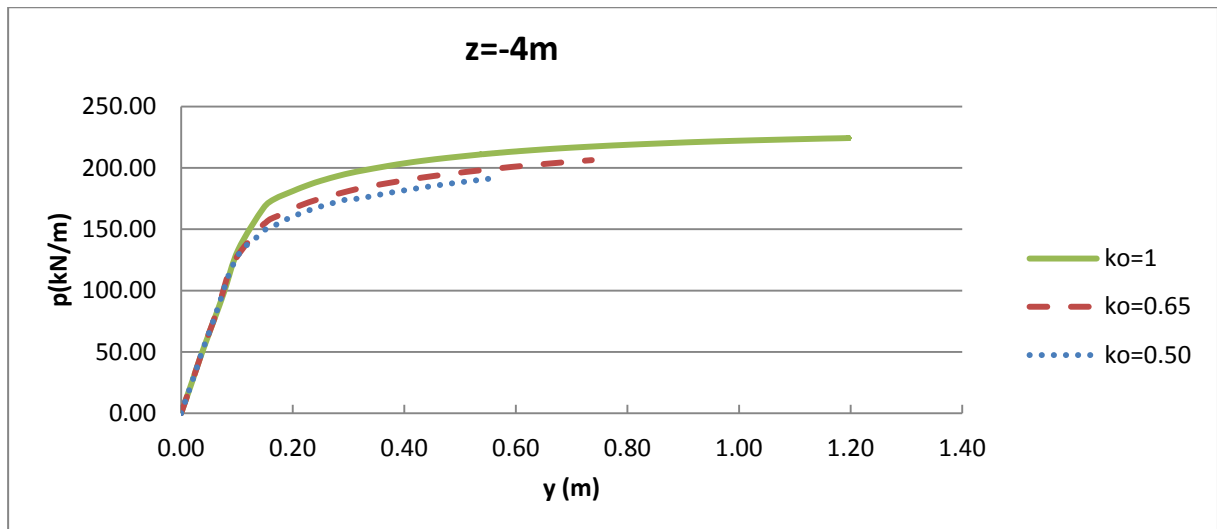


Σχήμα 0.9: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=6m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

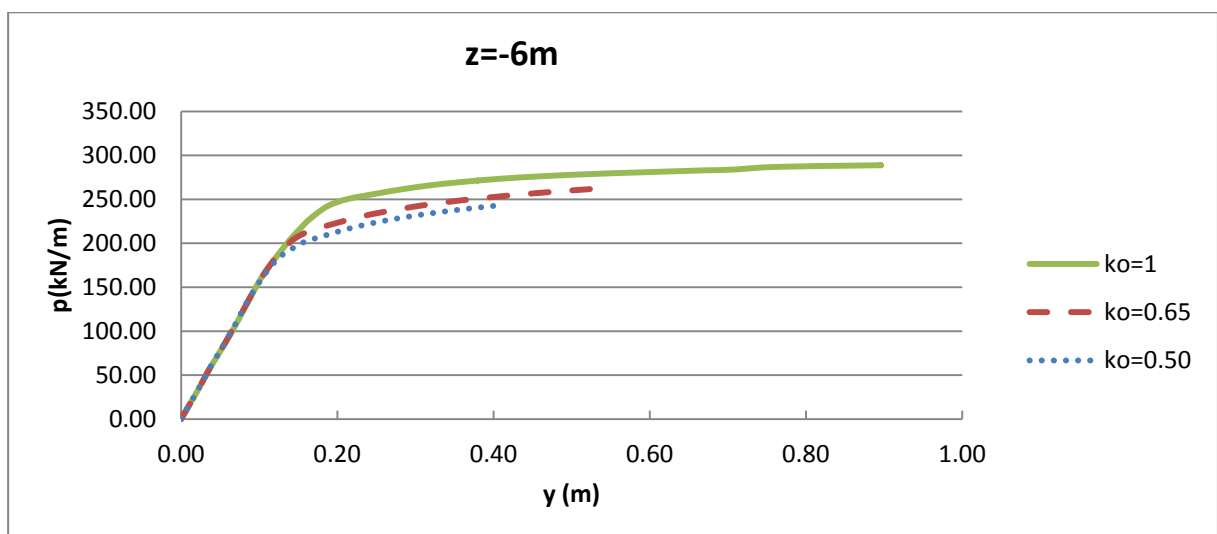
Γ2) Μη-γραμμικές καμπύλες p-y για A=0.25.



Σχήμα 0.10: Μη γραμμική καμπύλη p-y για A=0.25 σε βάθος z=2m για διαφορετικές τιμές του  $k_o$ .

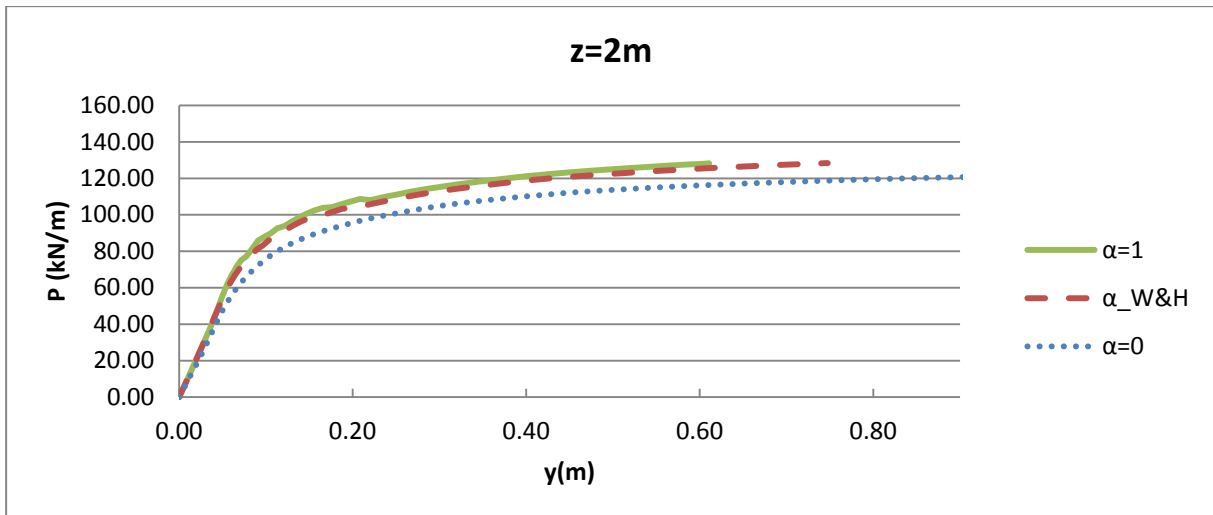


Σχήμα 0.11: Μη γραμμική καμπύλη p-y για A=0.25 σε βάθος z=4m για διαφορετικές τιμές του  $k_o$ .

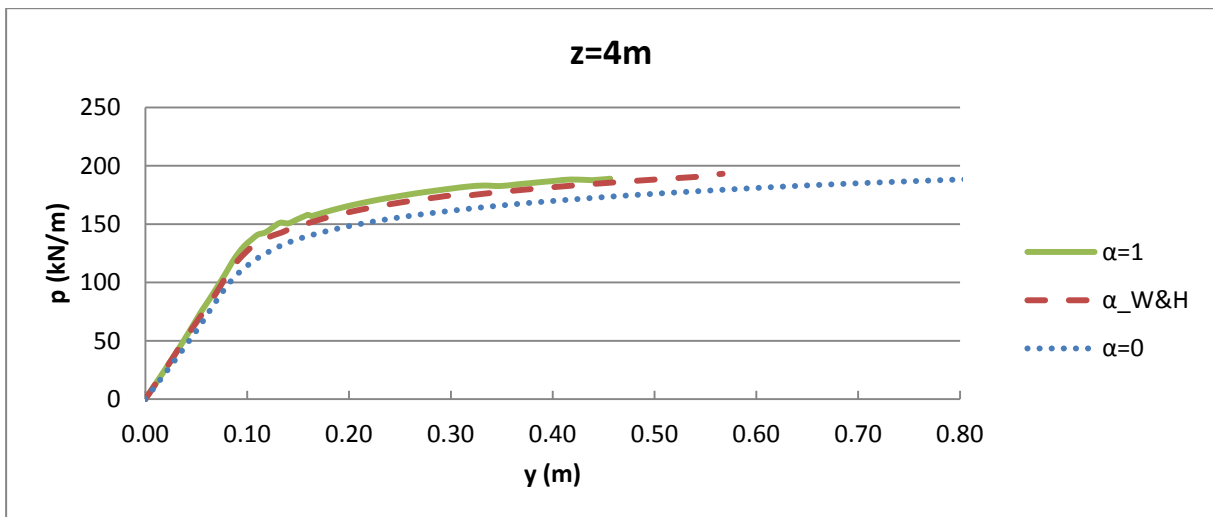


Σχήμα 0.12: Μη γραμμική καμπύλη p-y για A=0.25 σε βάθος z=6m για διαφορετικές τιμές του  $k_o$ .

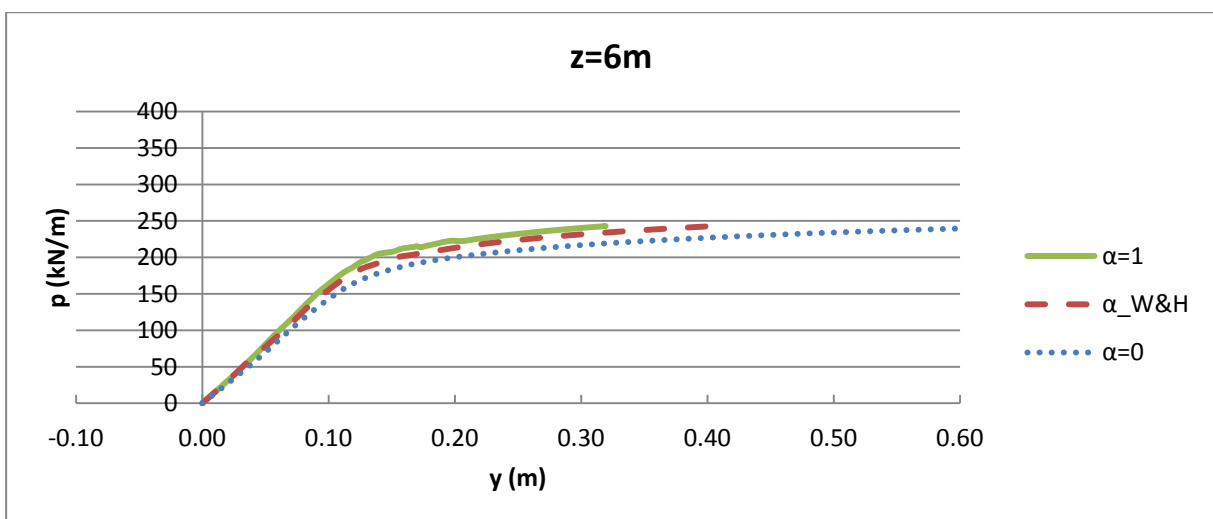




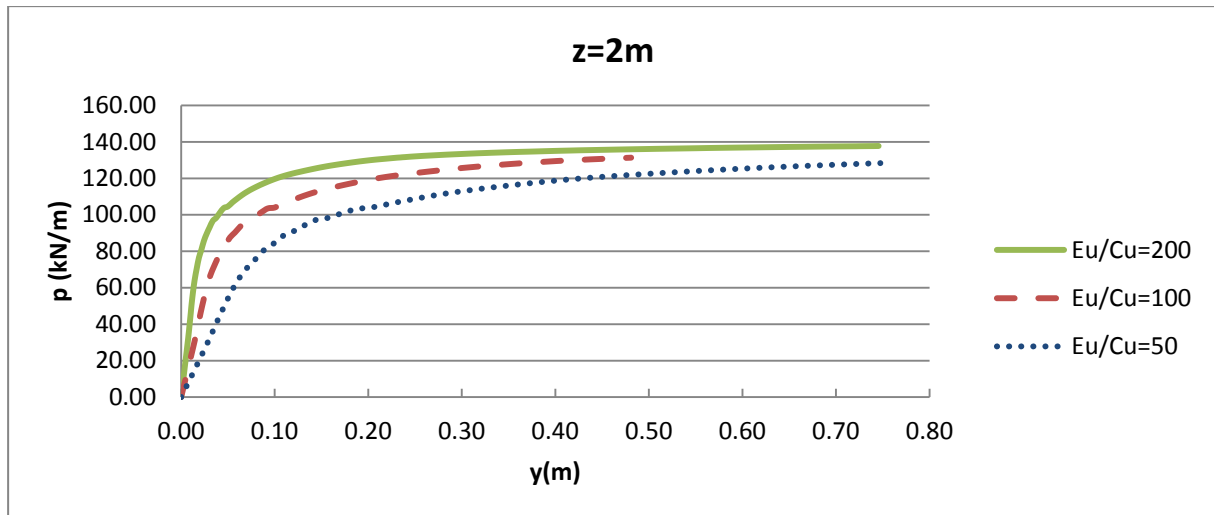
Σχήμα 0.13: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=2m$  για διάφορες τιμές του  $\alpha$ .



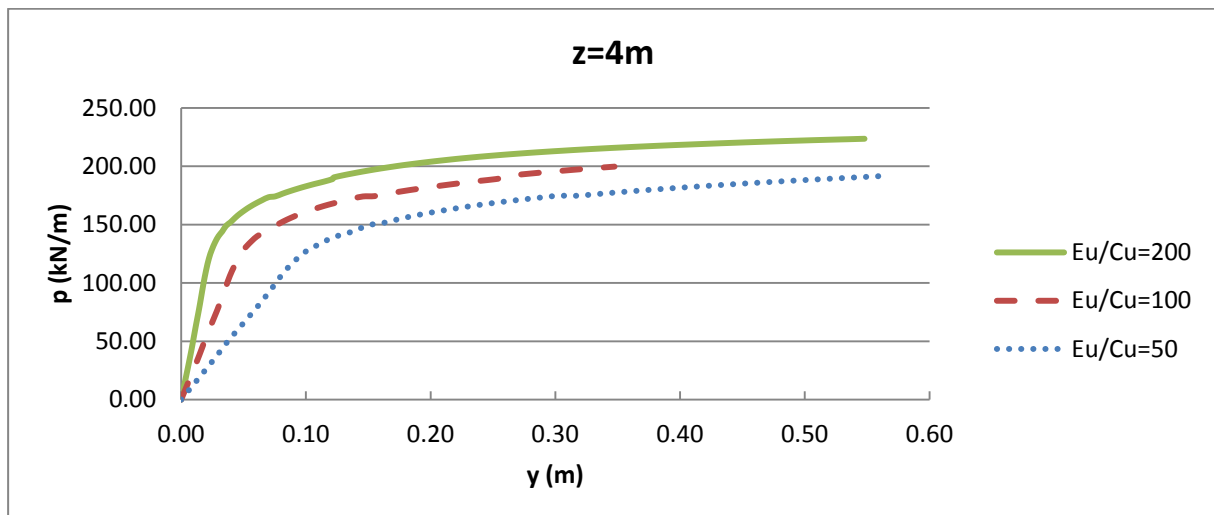
Σχήμα 0.14: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=4m$  για διάφορες τιμές του  $\alpha$ .



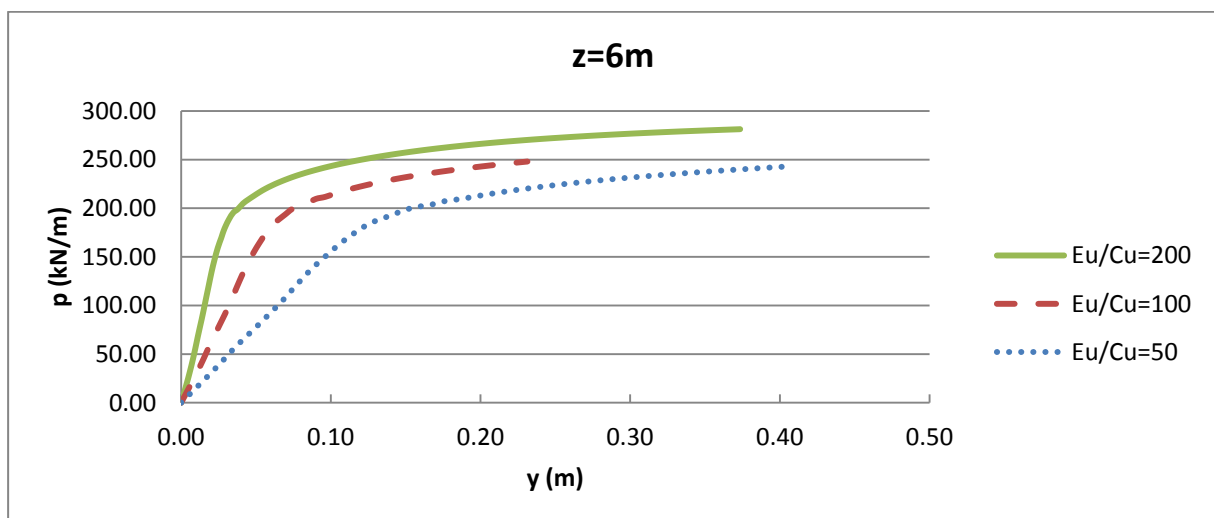
Σχήμα 0.15: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=6m$  για διάφορες τιμές του  $\alpha$ .



Σχήμα 0.16: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=2m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

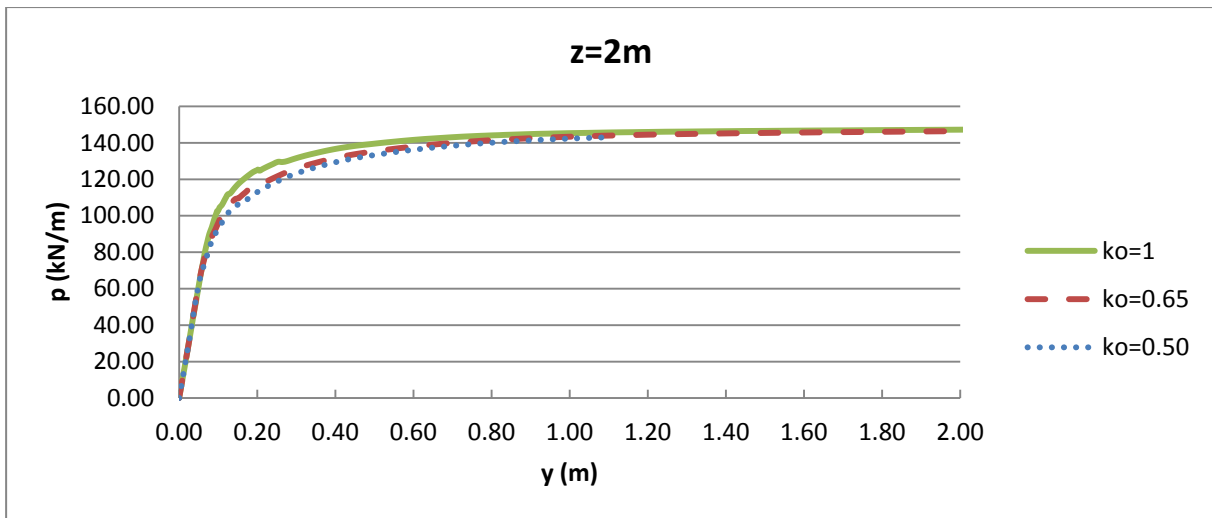


Σχήμα 0.17: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=4m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

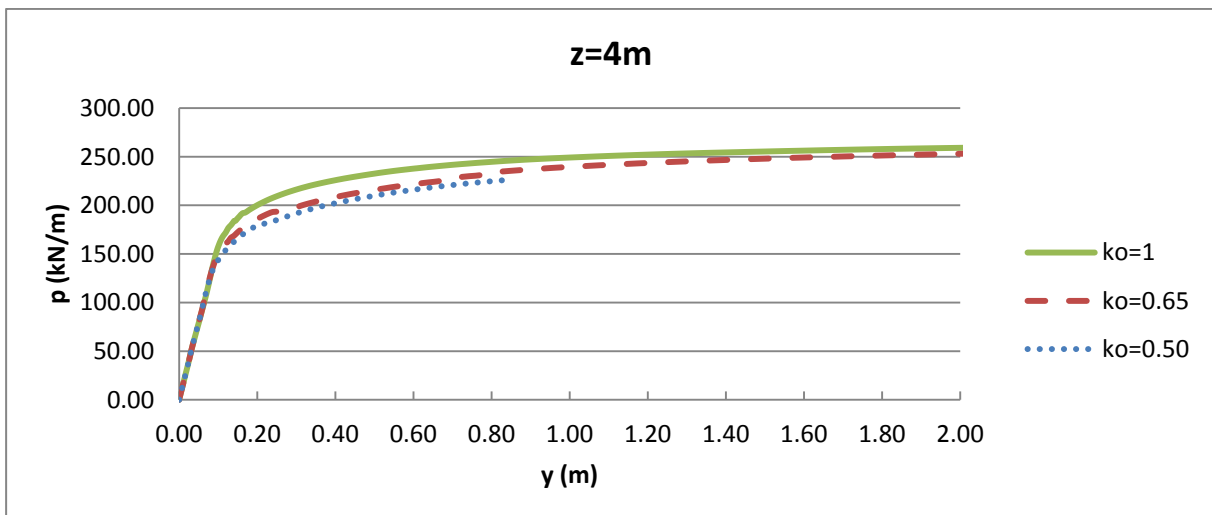


Σχήμα 0.18: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=6m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

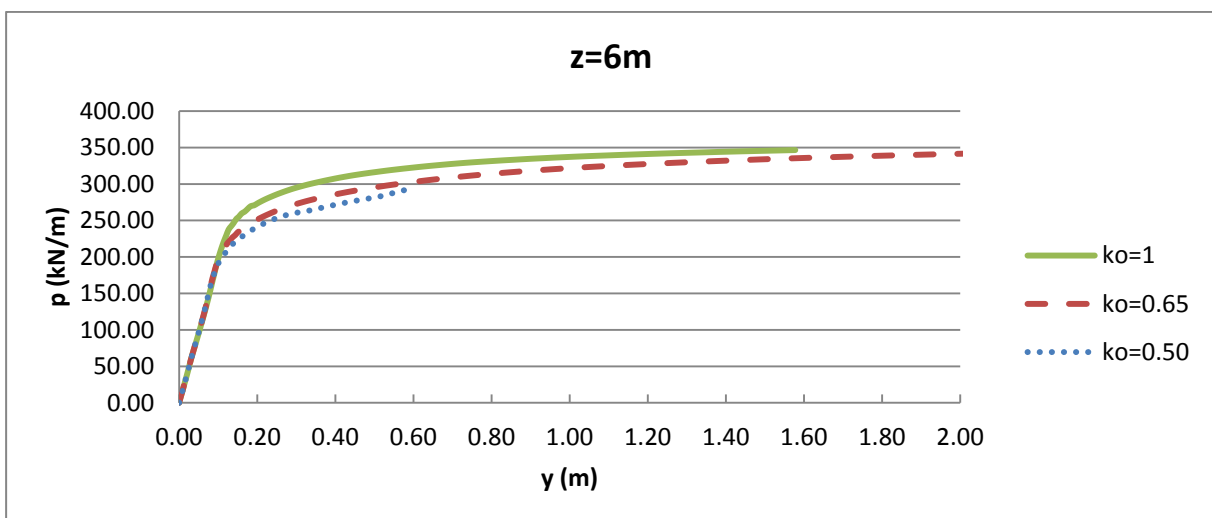
Γ3) Μη-γραμμικές καμπύλες  $p$ - $y$  για  $A=0.35$ .



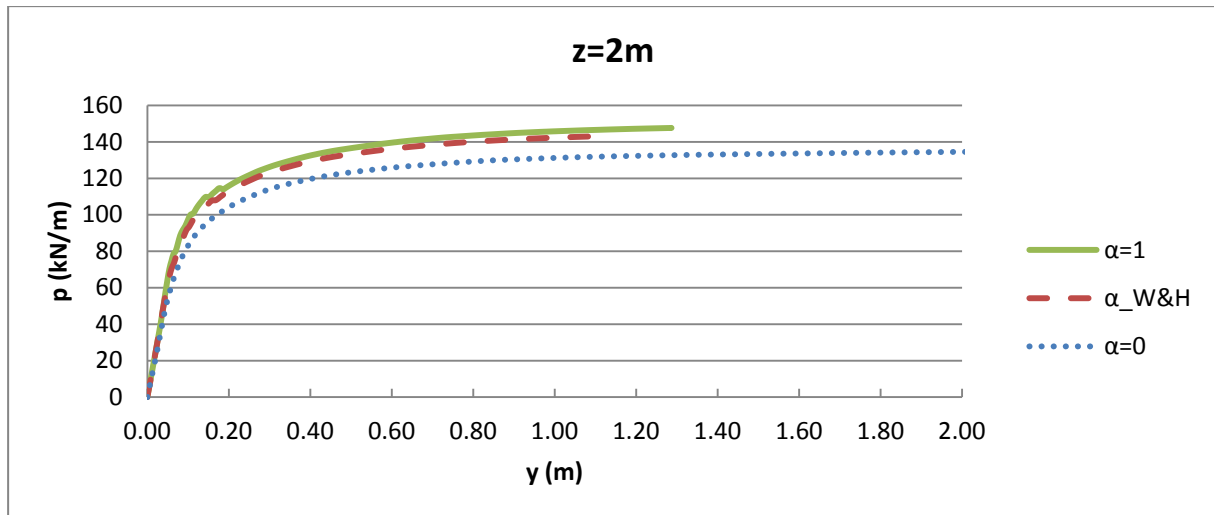
Σχήμα 0.19: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=2m$  για διαφορετικές τιμές του  $k_o$ .



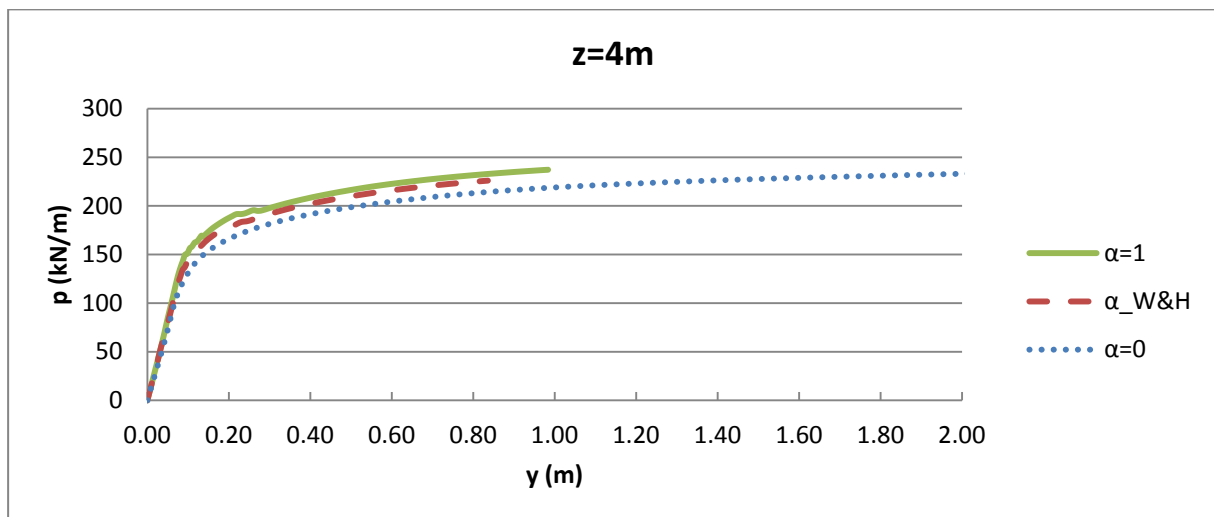
Σχήμα 0.20: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=4m$  για διαφορετικές τιμές του  $k_o$ .



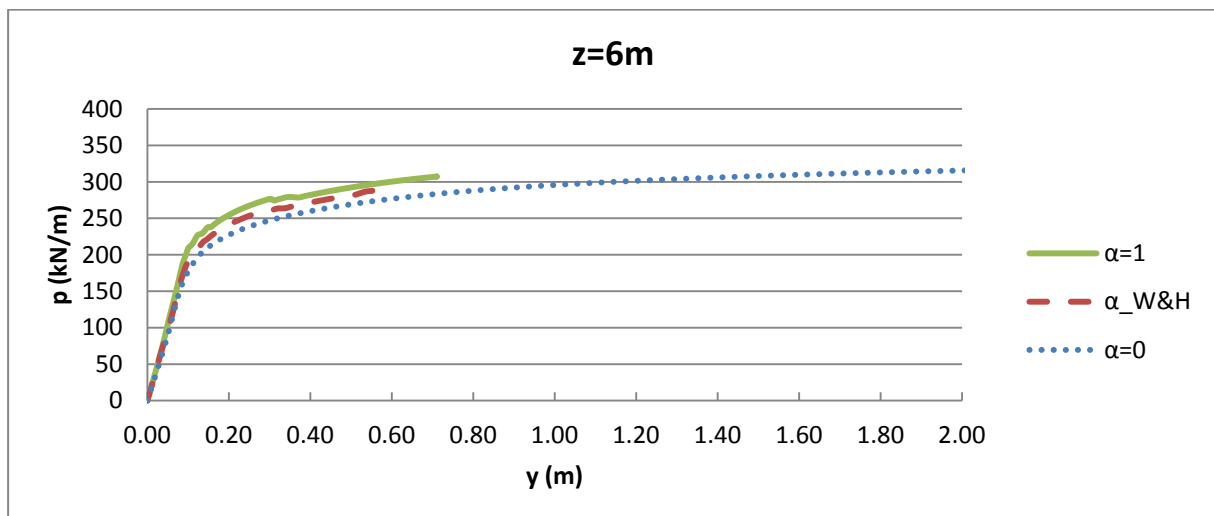
Σχήμα 0.21: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=6m$  για διαφορετικές τιμές του  $k_o$ .



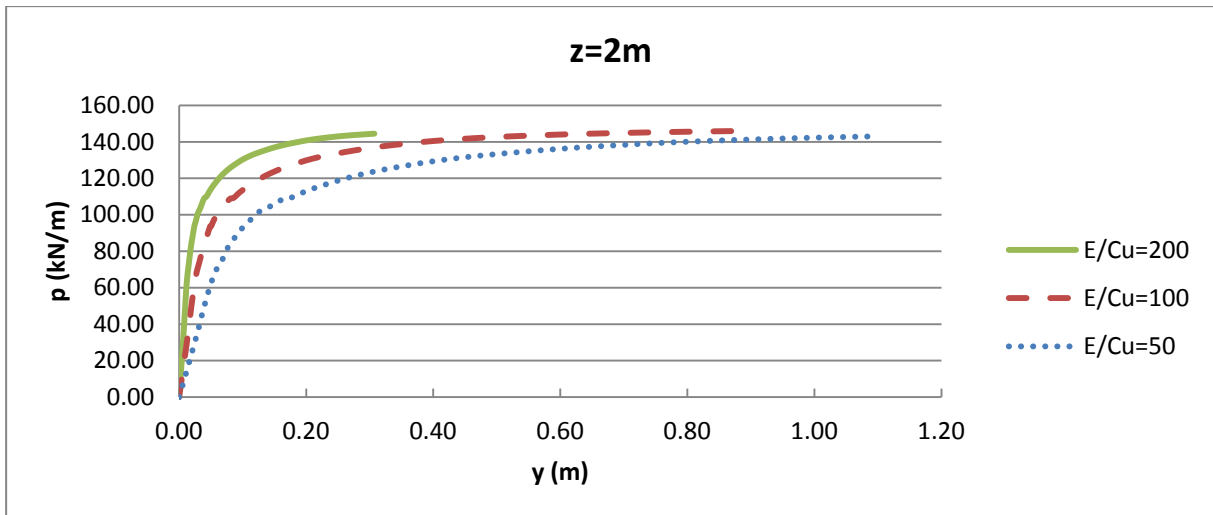
Σχήμα 0.22: Μη γραμμική καμπύλη p-y για A=0.35 σε βάθος z=2m για διάφορες τιμές του α.



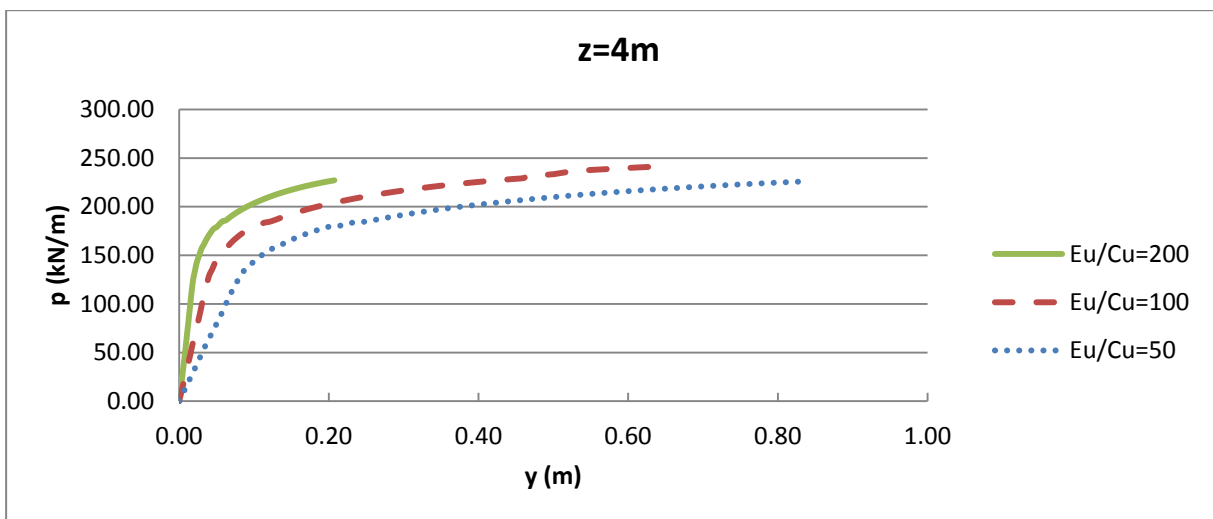
Σχήμα 0.23: Μη γραμμική καμπύλη p-y για A=0.35 σε βάθος z=4m για διάφορες τιμές του α.



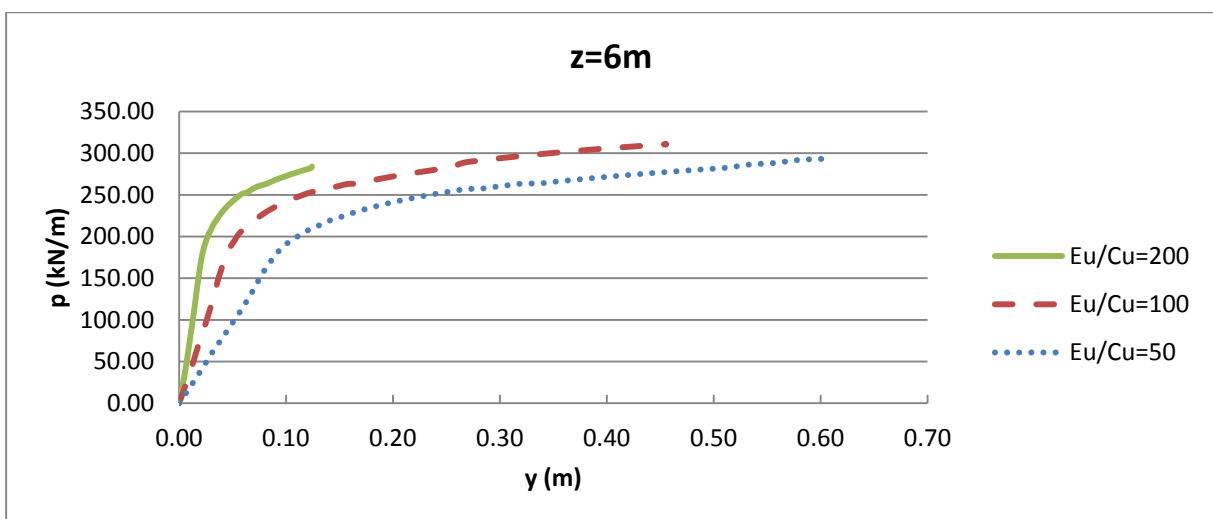
Σχήμα 0.24: Μη γραμμική καμπύλη p-y για A=0.35 σε βάθος z=6m για διάφορες τιμές του α.



Σχήμα 0.25: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=2m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



Σχήμα 0.26: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=4m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .



Σχήμα 0.27: Μη γραμμική καμπύλη  $p$ - $y$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=6m$  για διάφορες τιμές του λόγου  $E_u/c_u$ .

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Τμήματα του αρχείου εισαγωγής δεδομένων του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus (Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>) για την περίπτωση κατανομής του  $c_u$  κατά  $c_u=10+0.25\gamma'z$ , μέτρο ελαστικότητας  $E_u/c_u=50$ , συντελεστή οριζόντιων γεωστατικών τάσεων  $k_0=0.75$  και συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha$  κατά Weltman & Healy.

**Δ1)** Χαρακτηριστικά διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους για τα πρώτα και τα τελευταία 0.5m (ομοίως για τα ενδιάμεσα).

```
*CONTACT PAIR, INTERACTION=PILE_SOIL_0_05, TYPE=SURFACE TO SURFACE,
SMALL SLIDING
  PILE_0_05, SOIL_0_05
**
*SURFACE INTERACTION, NAME=PILE_SOIL_0_05
*SURFACE BEHAVIOR, PRESSURE-OVERCLOSURE=exponential
0.000001, 2.0
**
*FRICTION, TAUMAX=8.3, ELASTIC SLIP=0.001
  100
.
.
.
```

```
*CONTACT PAIR, INTERACTION=PILE_SOIL_195_20, TYPE=SURFACE TO
SURFACE, SMALL SLIDING
  PILE_195_20, SOIL_195_20
**
*SURFACE INTERACTION, NAME=PILE_SOIL_195_20
*SURFACE BEHAVIOR, PRESSURE-OVERCLOSURE=exponential
0.000001, 2.0
**
*FRICTION, TAUMAX=21.4, ELASTIC SLIP=0.001
  100
**
```

**Δ2)** Χαρακτηριστικά εδάφους για τα πρώτα και τα τελευταία 0.5m (ομοίως για τα ενδιάμεσα).

```
**
*****
**                                     **
***** MATERIALS *****
**                                     **
*****
** @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
**                               SOIL
** @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
*SOLID SECTION, ELSET=E0_05M, MATERIAL=SOIL0_05
  1.,
*Material, Name=SOIL0_05
*Density
** Mgr/m^3 **
  2.0,
*Elastic
```

```

** E (kPa),v (=-εh/εv) **
531, 0.499
*DRUCKER PRAGER, SHEAR CRITERION=LINEAR
**beta, K, psi
0, 1. , 0.
*DRUCKER PRAGER HARDENING, TYPE=SHEAR
**d
21.25,
.
.
.

*SOLID SECTION, ELSET=E24_25M, MATERIAL=SOIL24_25
1.,
*Material, Name=SOIL24_25
*Density
** Mgr/m^3 **
2.0,
*Elastic
** E (kPa),v (=-εh/εv) **
3563, 0.499
*DRUCKER PRAGER, SHEAR CRITERION=LINEAR
**beta, K, psi
0, 1. , 0.
*DRUCKER PRAGER HARDENING, TYPE=SHEAR
**d
142.5,

```

**Δ3) Χαρακτηριστικά πασσάλου (τριδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία και στοιχεία δοκού)**

```

**@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
**
** PILE SHAFT
**@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
*SOLID SECTION, ELSET=PILE_SHAFT, MATERIAL=FILL
1.,
*Material, Name=FILL
*Density
** Mgr/m^3 > DENSITY**
2.5
*ELASTIC
** E(kPa),v **
0.01, 0.2
**
**
**
**@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
**
** BEAM ELEMENTS
**@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
*BEAM SECTION, ELSET=PILEBEAM, MATERIAL=CONC, SECTION=CIRC
0.5
0,-1,0
*MATERIAL,NAME=CONC
*Density
0.001

```

\*ELASTIC  
2.5e+07, 0.2

**Δ4) Συνοριακές συνθήκες, αρχική γεωστατική κατάσταση και βήματα φόρτισης**

```
**
** @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
**                                BOUNDARY CONDITIONS
** @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
**
*BOUNDARY, OP=NEW
** NSET NAME, FIRST DIRECTION, LAST DIRECTION, DEFLECTION **
  SIDESX, 1,1,                0.
  SIDESY, 2,2,                0.
  BOTTOM, 1,1,                0.
  BOTTOM, 2,2,                0.
  BOTTOM, 3,3,                0.
**
**
** @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
**                                INITIAL CONDITIONS
** @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
**
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS, GEOSTATIC
**ELSET NAME, STRESS FOR NEXT Z, Z, STRESS FOR NEXT Z(=Z*γ, γ= 20
kN/m^3), Z, kox, koy **
** kox koy **
  SOIL,-1,0,-500,-25, 0.75, 0.75
**
**
**
** @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
**                                STEPS
** @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
**
*****
****
****STEP 1: GEOSTATIC
****
*****
*STEP
*GEOSTATIC
** DISTRIBUTED LOAD **
*DLOAD
** ELSET NAME, GRAV, ACCELERATION, X, Y, Z **
SOIL,GRAV,10.0, 0.,0.,-1.
*MODEL CHANGE, TYPE=CONTACT PAIR, REMOVE
PILE_0_05, SOIL_0_05
PILE_05_1, SOIL_05_1
PILE_1_15, SOIL_1_15
PILE_15_2, SOIL_15_2
PILE_2_25, SOIL_2_25
PILE_25_3, SOIL_25_3
PILE_3_35, SOIL_3_35
PILE_35_4, SOIL_35_4
PILE_4_45, SOIL_4_45
PILE_45_5, SOIL_45_5
```



```

PILE_5_55, SOIL_5_55
PILE_55_6, SOIL_55_6
PILE_6_65, SOIL_6_65
PILE_65_7, SOIL_65_7
PILE_7_75, SOIL_7_75
PILE_75_8, SOIL_75_8
PILE_8_85, SOIL_8_85
PILE_85_9, SOIL_85_9
PILE_9_95, SOIL_9_95
PILE_95_10, SOIL_95_10
PILE_10_105, SOIL_10_105
PILE_105_11, SOIL_105_11
PILE_11_115, SOIL_11_115
PILE_115_12, SOIL_115_12
PILE_12_125, SOIL_12_125
PILE_125_13, SOIL_125_13
PILE_13_135, SOIL_13_135
PILE_135_14, SOIL_135_14
PILE_14_145, SOIL_14_145
PILE_145_15, SOIL_145_15
PILE_15_155, SOIL_15_155
PILE_155_16, SOIL_155_16
PILE_16_165, SOIL_16_165
PILE_165_17, SOIL_165_17
PILE_17_175, SOIL_17_175
PILE_175_18, SOIL_175_18
PILE_18_185, SOIL_18_185
PILE_185_19, SOIL_185_19
PILE_19_195, SOIL_19_195
PILE_195_20, SOIL_195_20
*MODEL CHANGE, TYPE=ELEMENT, REMOVE
  PILE_SHAFT, PILEBEAM
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
**U=DEFLECTION**
  U,
*ELEMENT OUTPUT
** S=STRESS, E=STRAIN, PRESS, MISES, PE=PLASTIC STRAIN COMPONENTS,
PEMAG=PLASTIC STRAIN MAGNITUDE **
  S,E,PRESS,MISES,PE,PEMAG
*CONTACT OUTPUT
** CSTRESS= CPRESS,CSHEAR **
** CDISP= CONTACT DISPLACEMENTS **
  CSTRESS,CDISP,CFORCE
*END STEP
**
*****
**
**STEP 2: REMOVE SHAFT - ADD PILE & GRAVITY LOADS
**
*****
*STEP, UNSYMM=YES, INC=10000000000
*STATIC
**STEP,END STEP,STOP STEP,MAX STEP**
  0.05,1,0.0000000001,0.1
****

```

```
**
*DLOAD
PILE_SHAFT, GRAV, 10.0, 0., 0., -1.
**
*MODEL CHANGE, TYPE=ELEMENT, REMOVE
SOIL_SHAFT
*MODEL CHANGE, TYPE=ELEMENT, ADD
PILE_SHAFT, PILEBEAM
*MODEL CHANGE, TYPE=CONTACT PAIR, ADD
PILE_0_05, SOIL_0_05
PILE_05_1, SOIL_05_1
PILE_1_15, SOIL_1_15
PILE_15_2, SOIL_15_2
PILE_2_25, SOIL_2_25
PILE_25_3, SOIL_25_3
PILE_3_35, SOIL_3_35
PILE_35_4, SOIL_35_4
PILE_4_45, SOIL_4_45
PILE_45_5, SOIL_45_5
PILE_5_55, SOIL_5_55
PILE_55_6, SOIL_55_6
PILE_6_65, SOIL_6_65
PILE_65_7, SOIL_65_7
PILE_7_75, SOIL_7_75
PILE_75_8, SOIL_75_8
PILE_8_85, SOIL_8_85
PILE_85_9, SOIL_85_9
PILE_9_95, SOIL_9_95
PILE_95_10, SOIL_95_10
PILE_10_105, SOIL_10_105
PILE_105_11, SOIL_105_11
PILE_11_115, SOIL_11_115
PILE_115_12, SOIL_115_12
PILE_12_125, SOIL_12_125
PILE_125_13, SOIL_125_13
PILE_13_135, SOIL_13_135
PILE_135_14, SOIL_135_14
PILE_14_145, SOIL_14_145
PILE_145_15, SOIL_145_15
PILE_15_155, SOIL_15_155
PILE_155_16, SOIL_155_16
PILE_16_165, SOIL_16_165
PILE_165_17, SOIL_165_17
PILE_17_175, SOIL_17_175
PILE_175_18, SOIL_175_18
PILE_18_185, SOIL_18_185
PILE_185_19, SOIL_185_19
PILE_19_195, SOIL_19_195
PILE_195_20, SOIL_195_20
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
U,
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
```

```

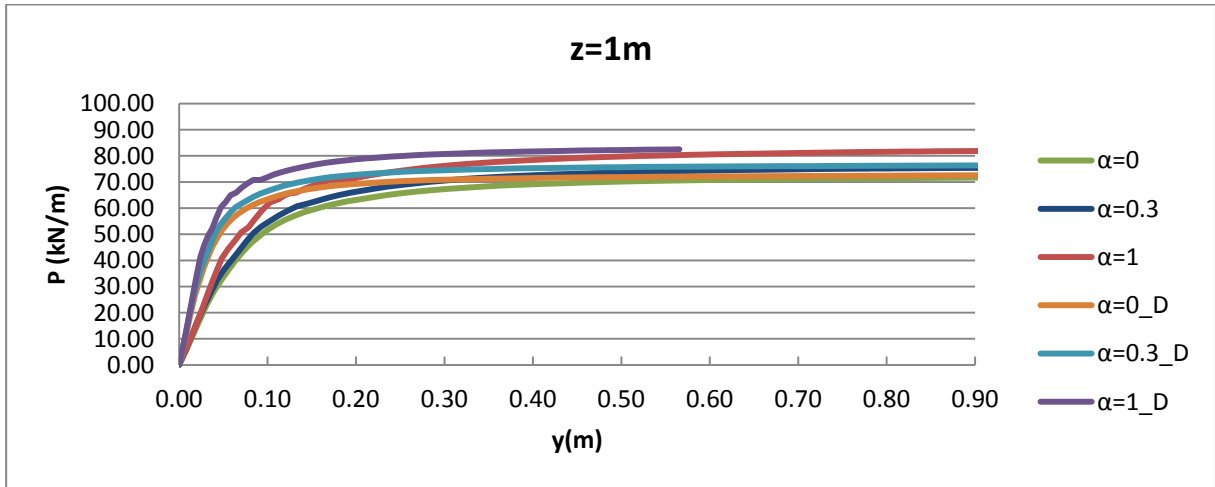
*ELEMENT OUTPUT
S, SF, E, PRESS, MISES, PE, PEMAG
**
*CONTACT OUTPUT
  CSTRESS, CDISP, CFORCE
*END STEP
**
**
*****
**
**STEP 3: LATERAL PILE LOAD
**
*****
*STEP, UNSYMM=YES, INC=10000000000
*STATIC
0.01, 1, 0.0000000001, 0.01
****
**
*NSET, NSET=HORZ, GENERATE
**NUMBER OF CENTRAL NODE, Z=0**
  317, 317, 1
**CONCENTRATED LOAD **
*CLOAD, OP=NEW
**NSET NAME, DIRECTION, MAGNITUDE OF LOAD **
HORZ, 1,          3000.
**
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
  U,
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*ELEMENT OUTPUT
  S, SF, E, PRESS, MISES, PE, PEMAG
**
*CONTACT OUTPUT
  CSTRESS, CDISP, CFORCE
*END STEP

```

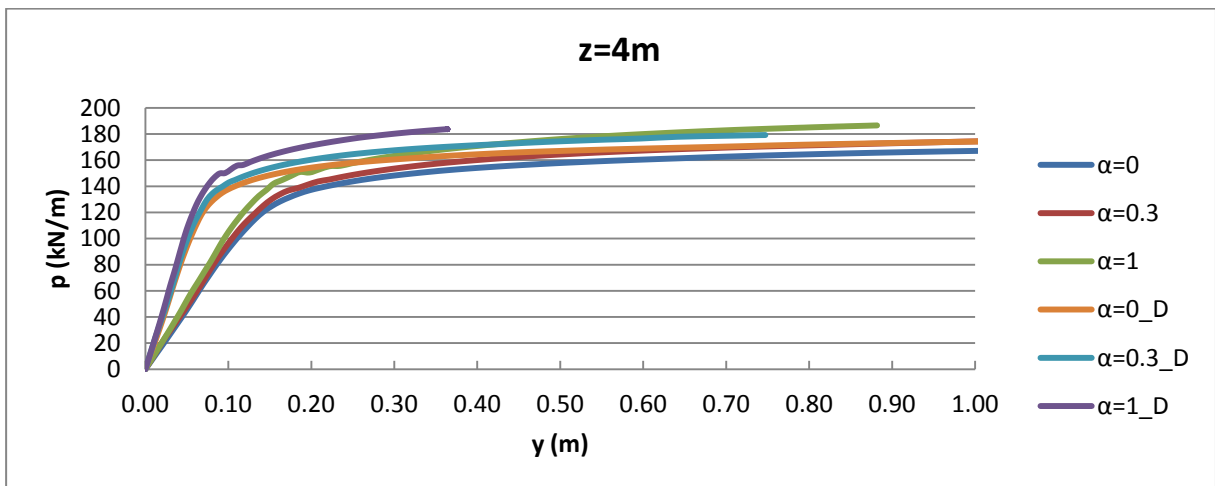
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε**

**Διαγράμματα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για βάθη z=1m, z=4m και z=6m (Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>).**

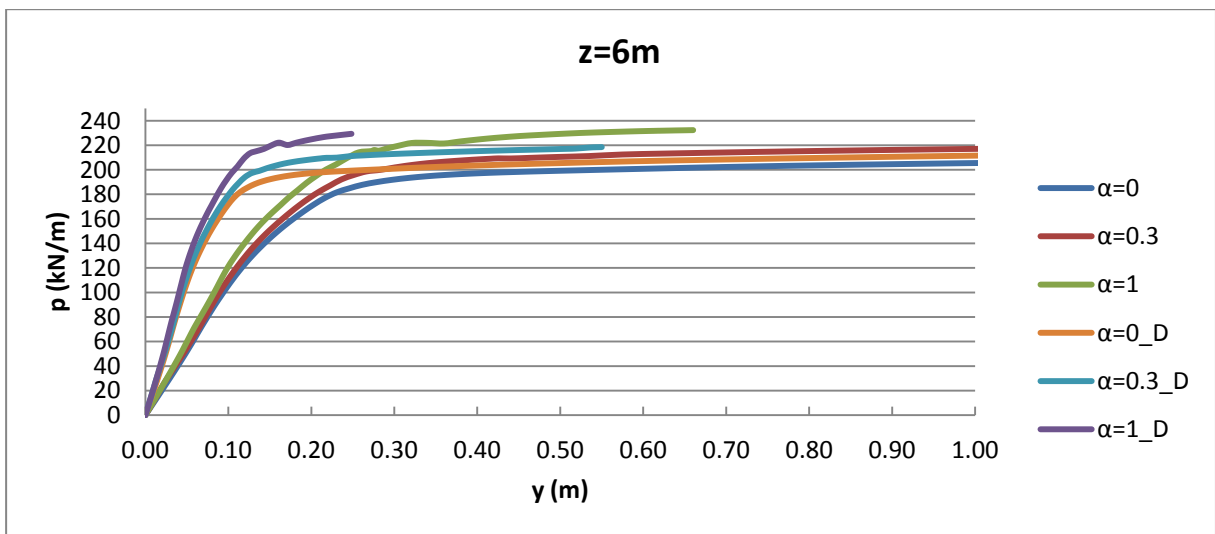
E1) Μη-γραμμικές καμπύλες p-y για A=0.15.



Σχήμα 0.28: Συγκριτικό διάγραμμα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για A=0.15 σε βάθος z=1m.

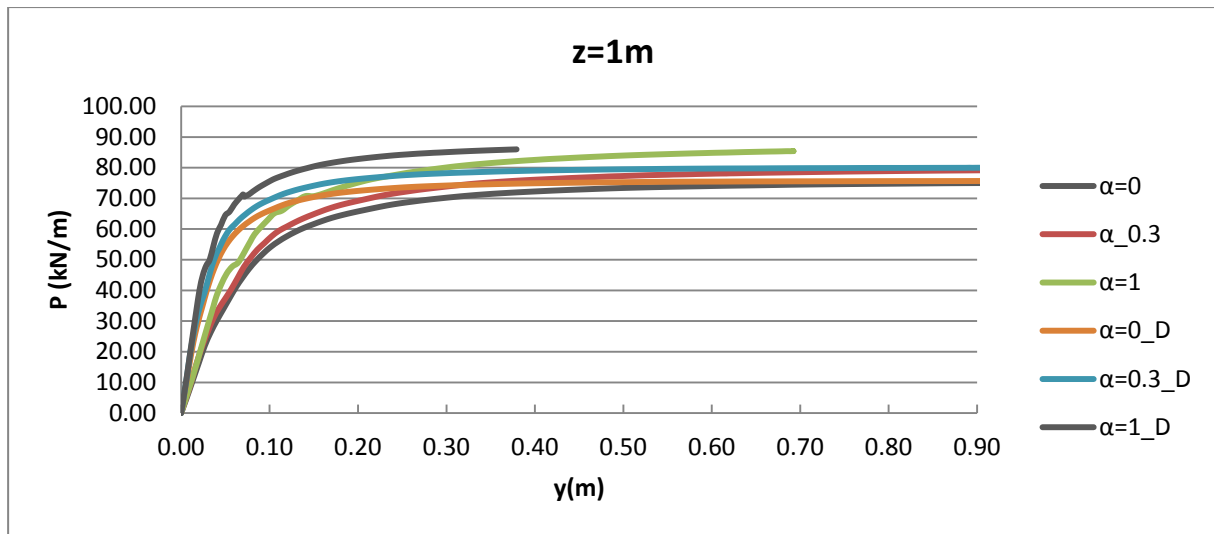


Σχήμα 0.29: Συγκριτικό διάγραμμα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για A=0.15 σε βάθος z=4m.

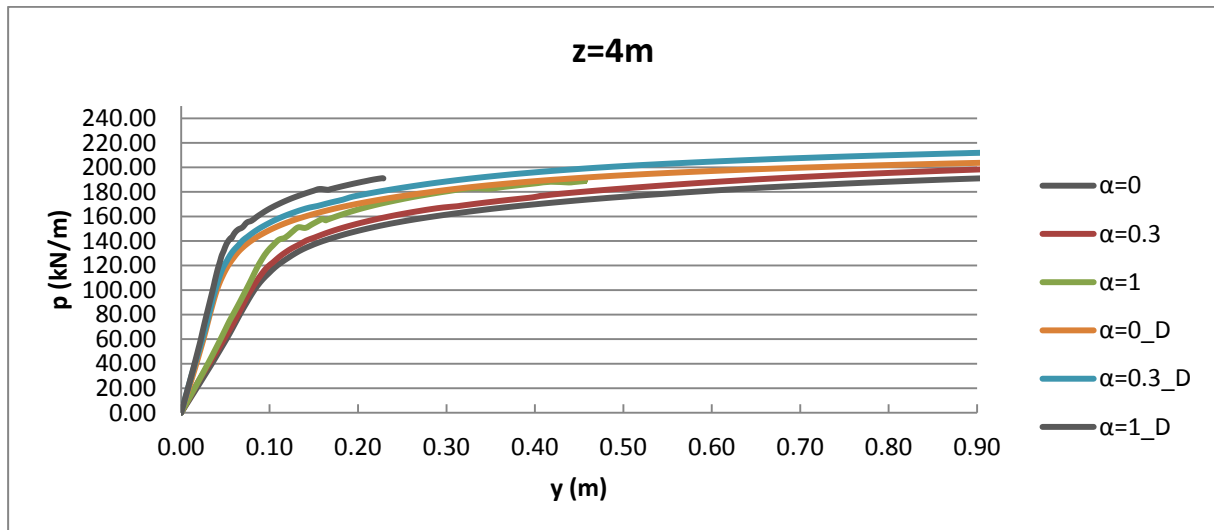


Σχήμα 0.30: Συγκριτικό διάγραμμα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για A=0.15 σε βάθος z=6m.

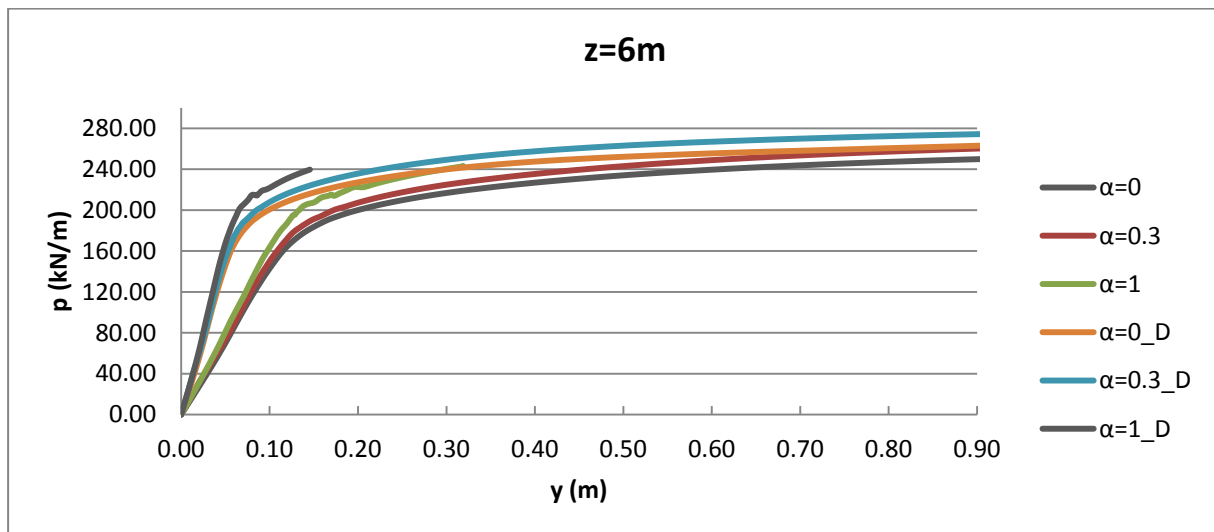
Ε2) Μη-γραμμικές καμπύλες p-y για A=0.25.



Σχήμα 0.31: Συγκριτικό διάγραμμα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για A=0.25 σε βάθος z=1m.

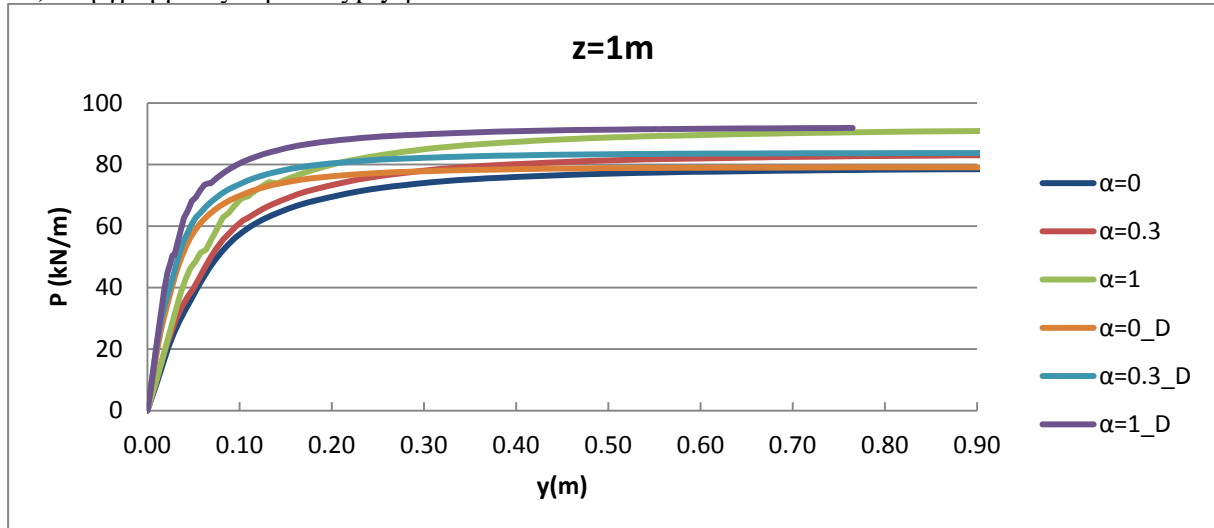


Σχήμα 0.32: Συγκριτικό διάγραμμα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για A=0.25 σε βάθος z=4m.

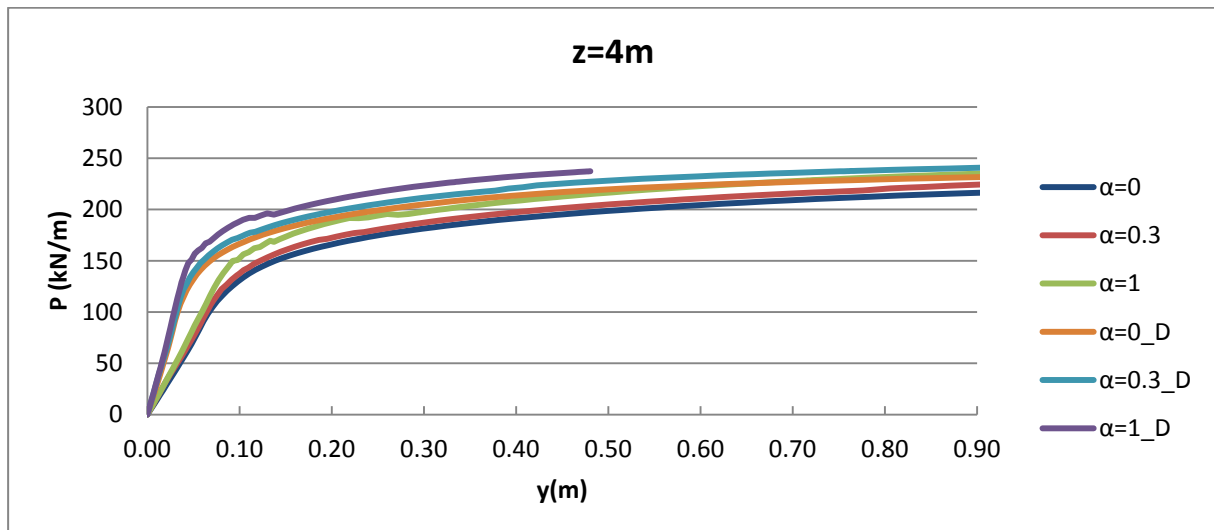


Σχήμα 0.33: Συγκριτικό διάγραμμα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για A=0.25 σε βάθος z=6m.

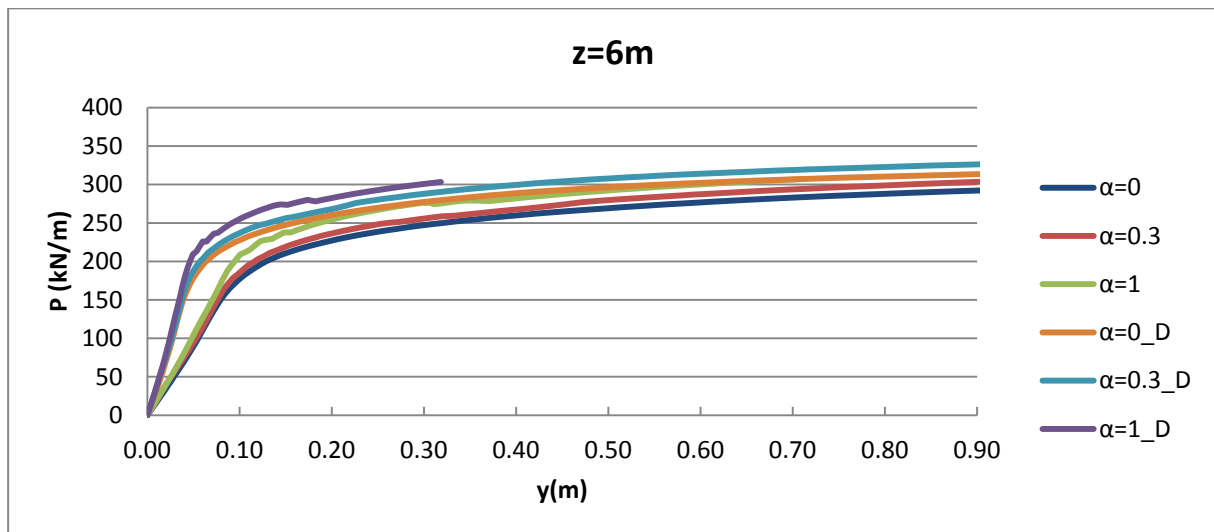
**Ε3) Μη-γραμμικές καμπύλες p-y για A=0.35.**



**Σχήμα 0.34:** Συγκριτικό διάγραμμα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για A=0.35 σε βάθος z=1m.



**Σχήμα 0.35:** Συγκριτικό διάγραμμα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για A=0.35 σε βάθος z=4m.

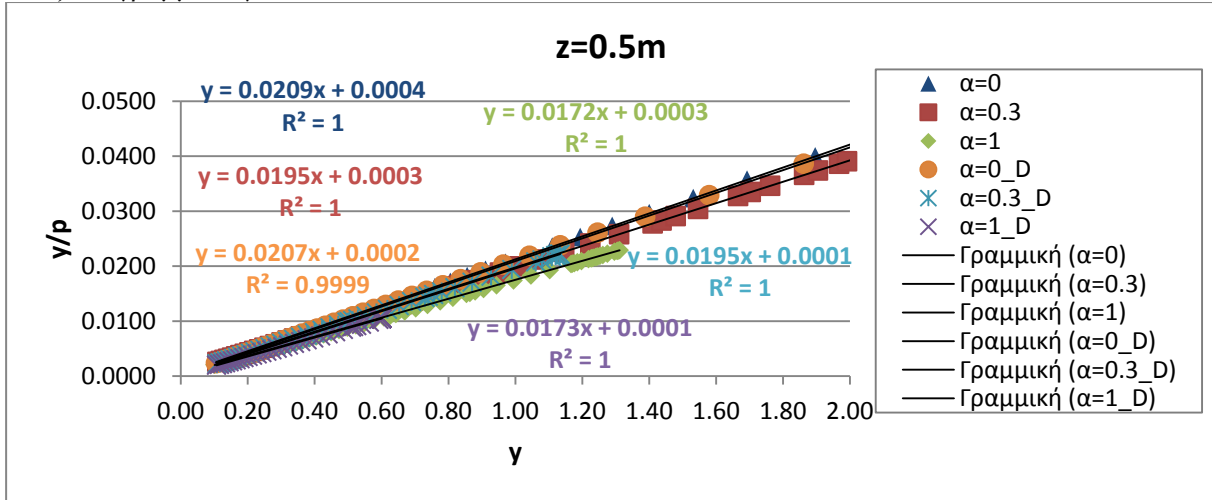


**Σχήμα 0.36:** Συγκριτικό διάγραμμα μη-γραμμικών καμπύλων p-y για A=0.35 σε βάθος z=6m.

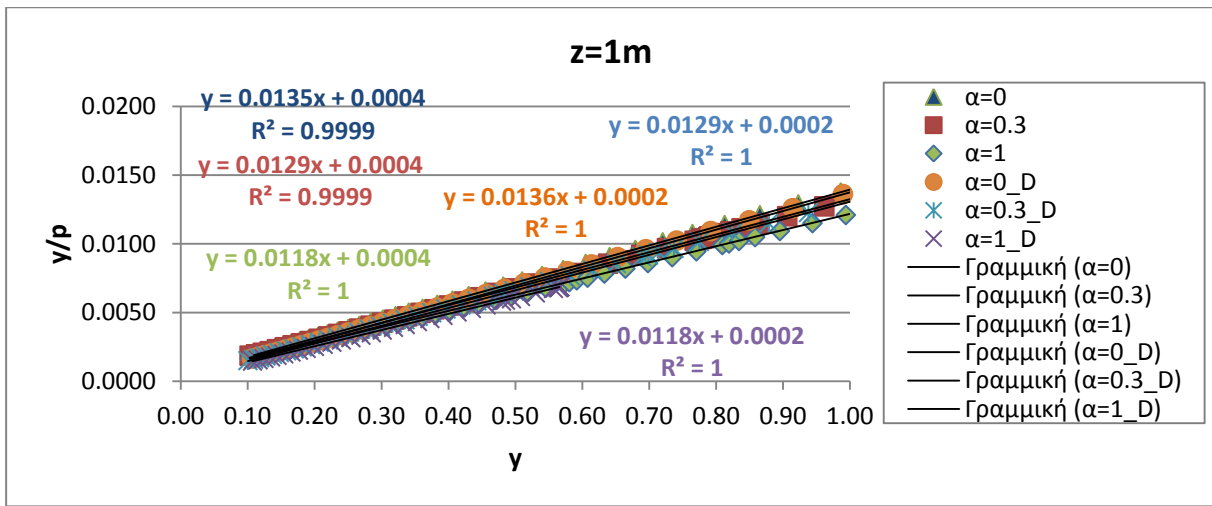
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ**

Διαγράμματα ευθείας  $(y/p)=f(y)$  για βάθη  $z=0.5m, z=1m, z=3m, z=4m, z=5m, z=6m$  και  $z=8m$  ( $z=8m$  για  $A=0.15$  και  $A=0.35$ ) (Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>).

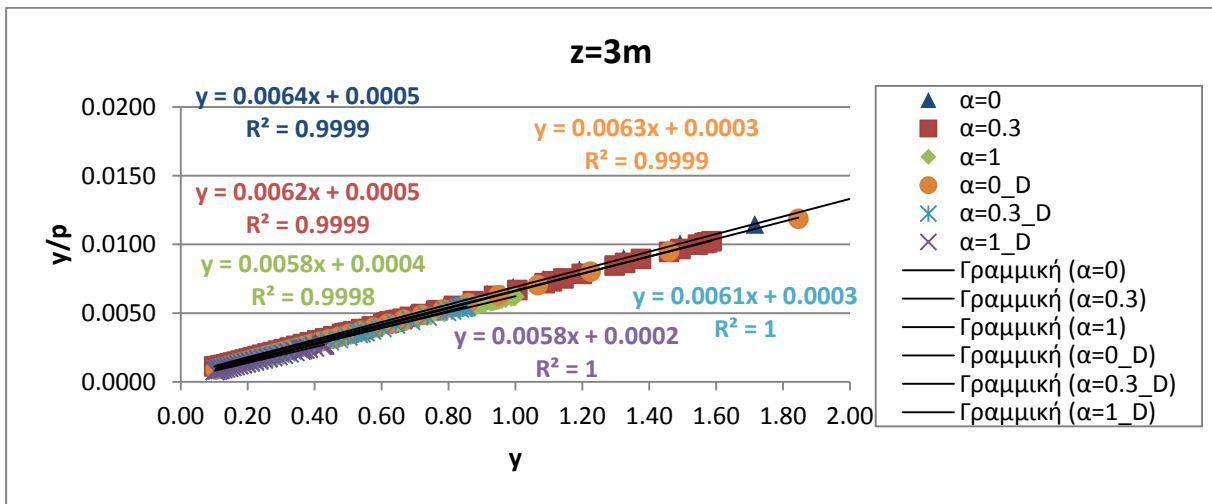
ΣΤ1) Διαγράμματα για  $A=0.15$ .



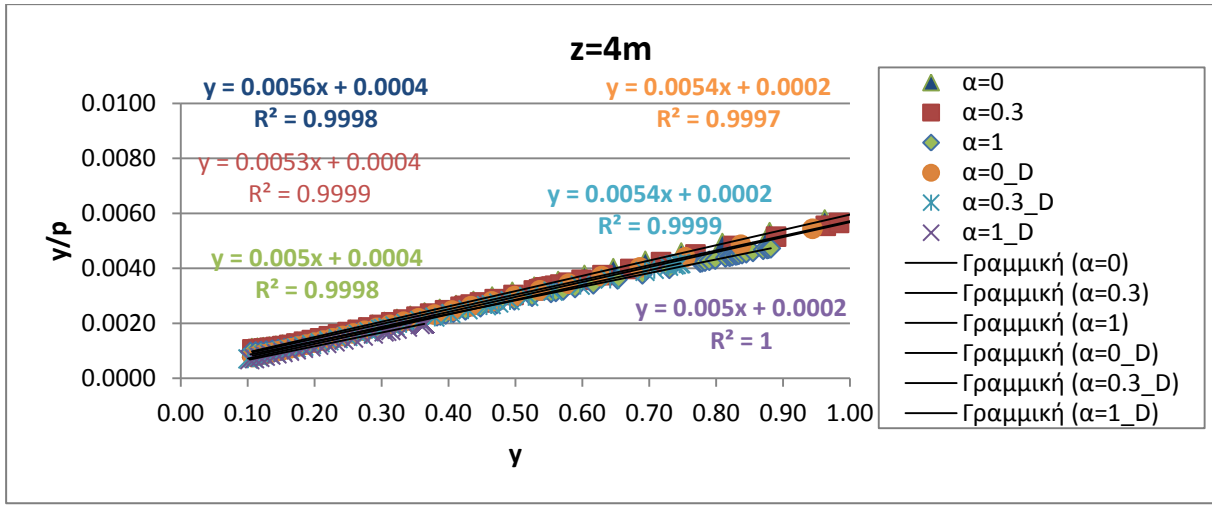
Σχήμα 0.37: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=0.5m$ .



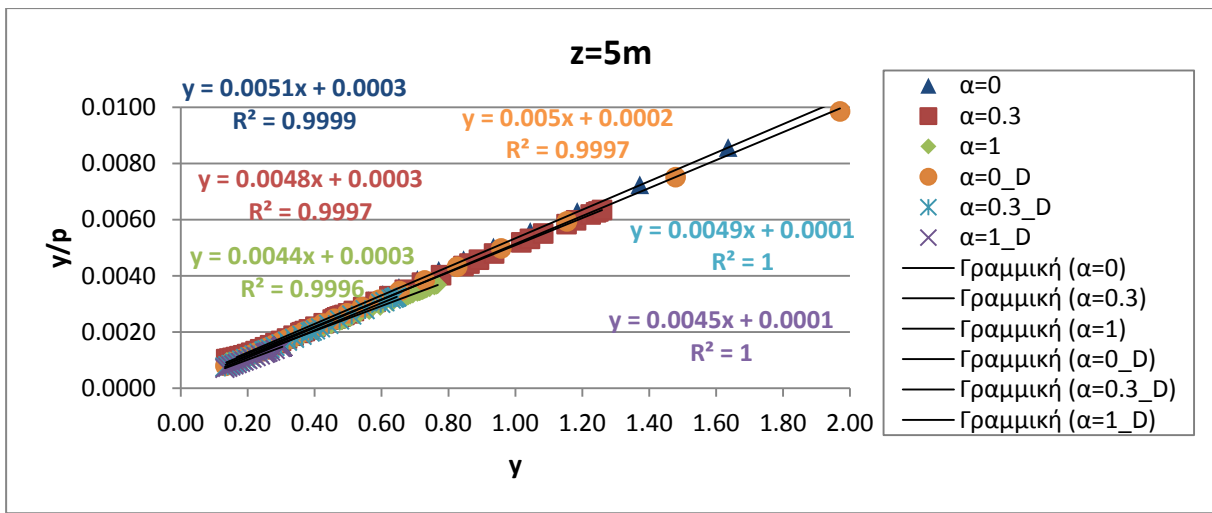
Σχήμα 0.38: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=1m$ .



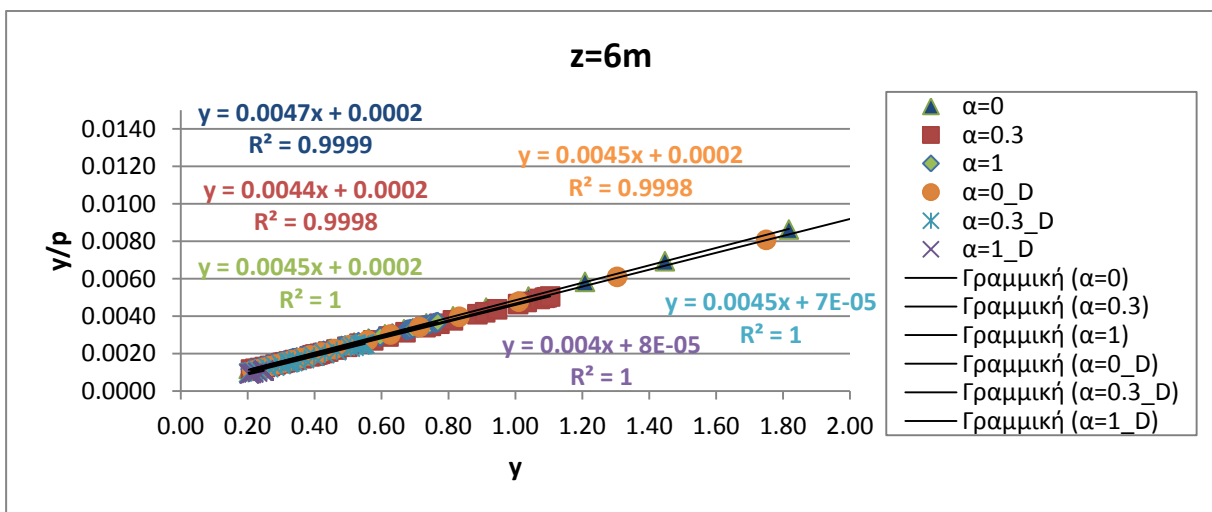
Σχήμα 0.39: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=3m$ .



Σχήμα 0.40: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=4m$ .

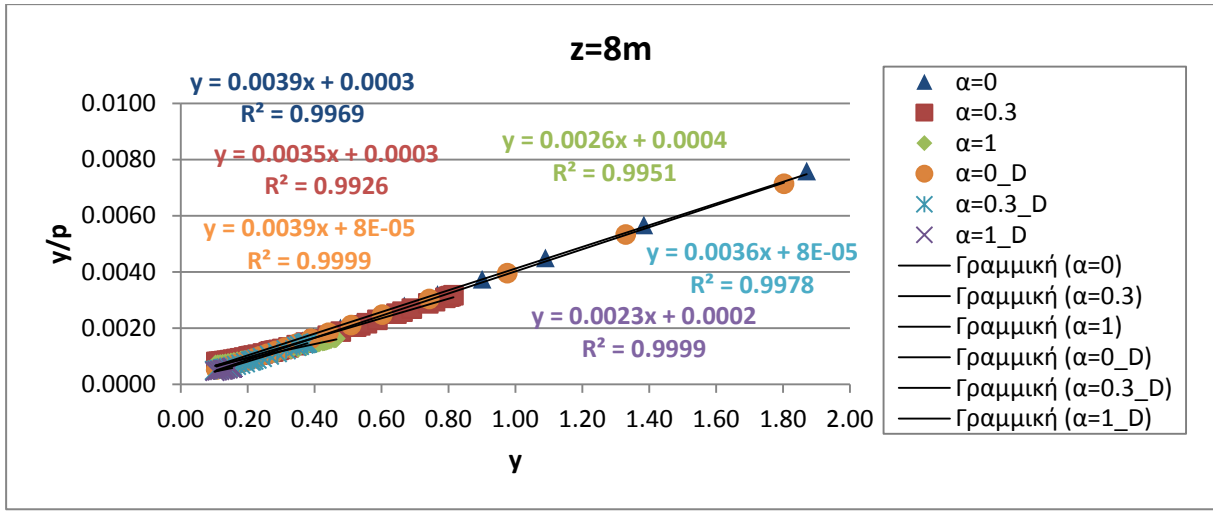


Σχήμα 0.41: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=5m$ .



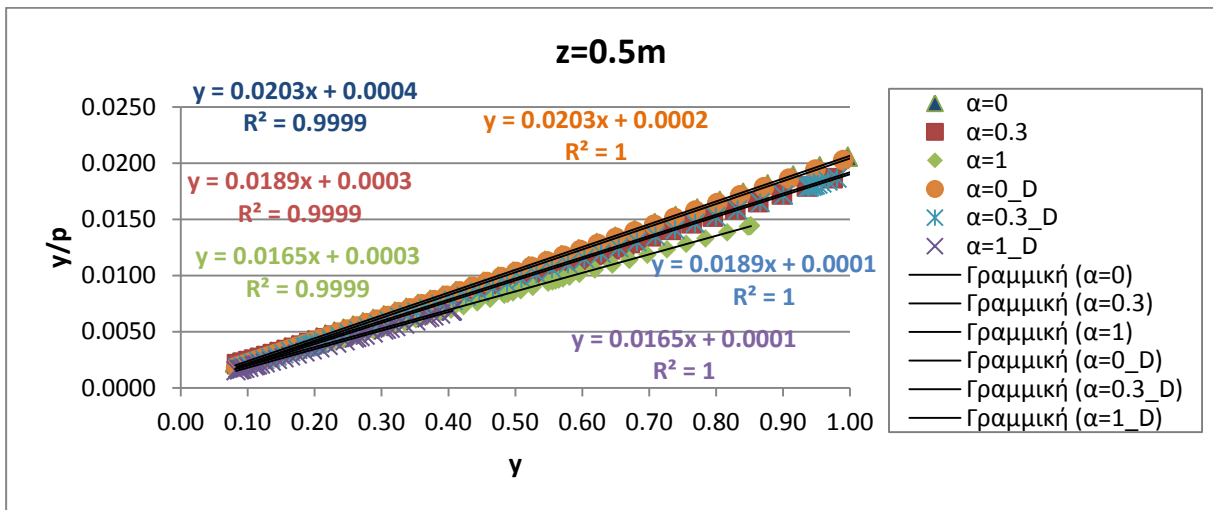
Σχήμα 0.42: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=6m$ .



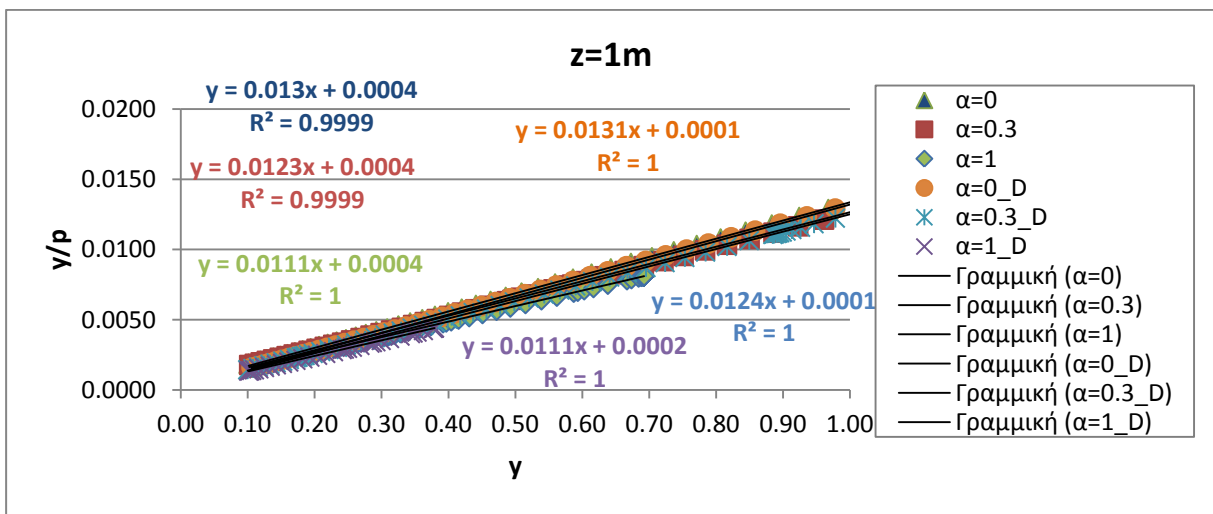


Σχήμα 0.43: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.15$  σε βάθος  $z=8m$ .

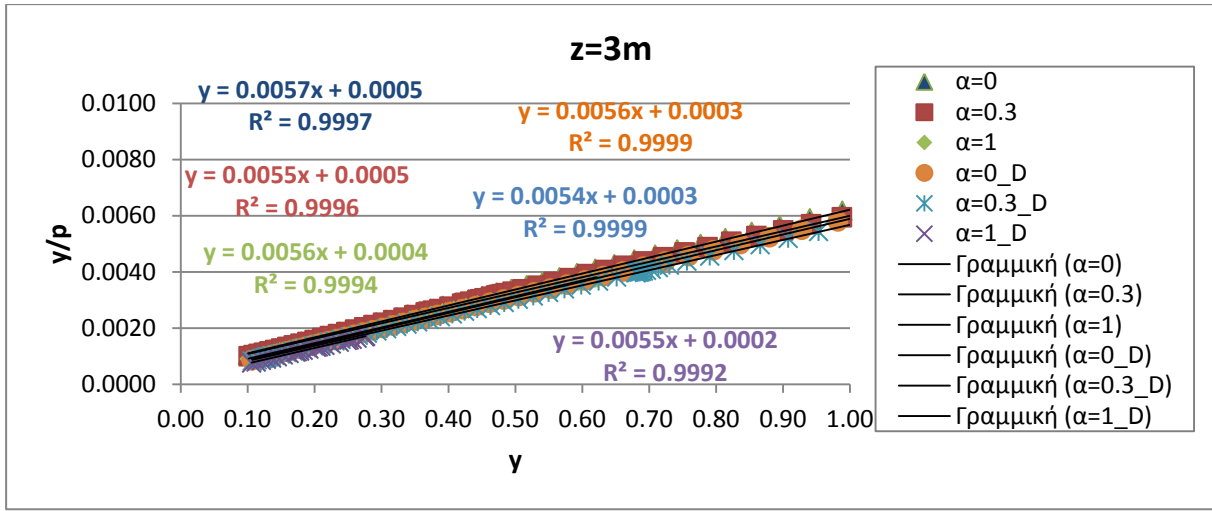
ΣΤ2) Διαγράμματα για  $A=0.25$



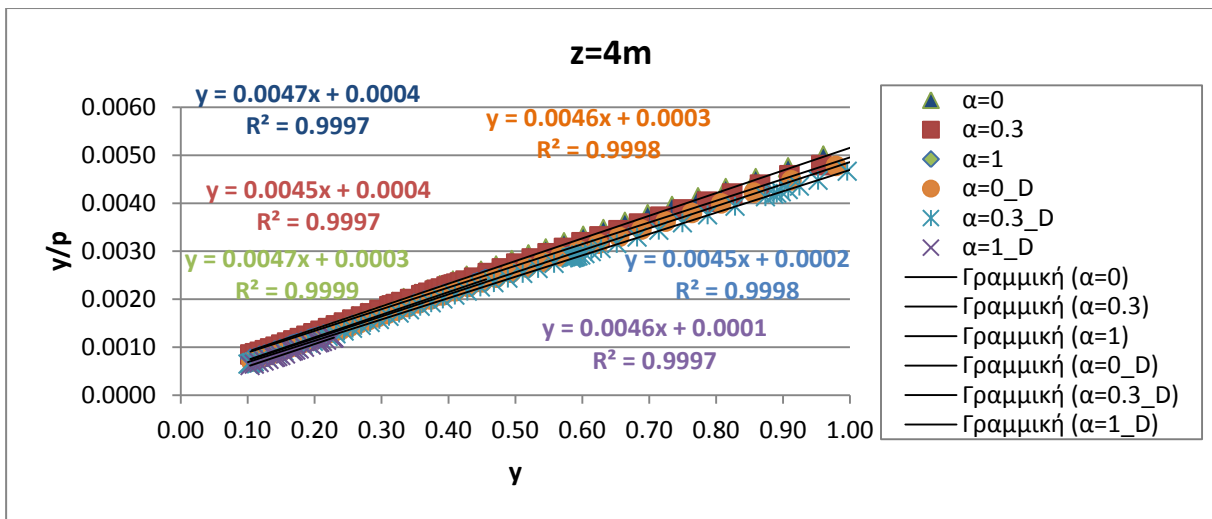
Σχήμα 0.44: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=0.5m$ .



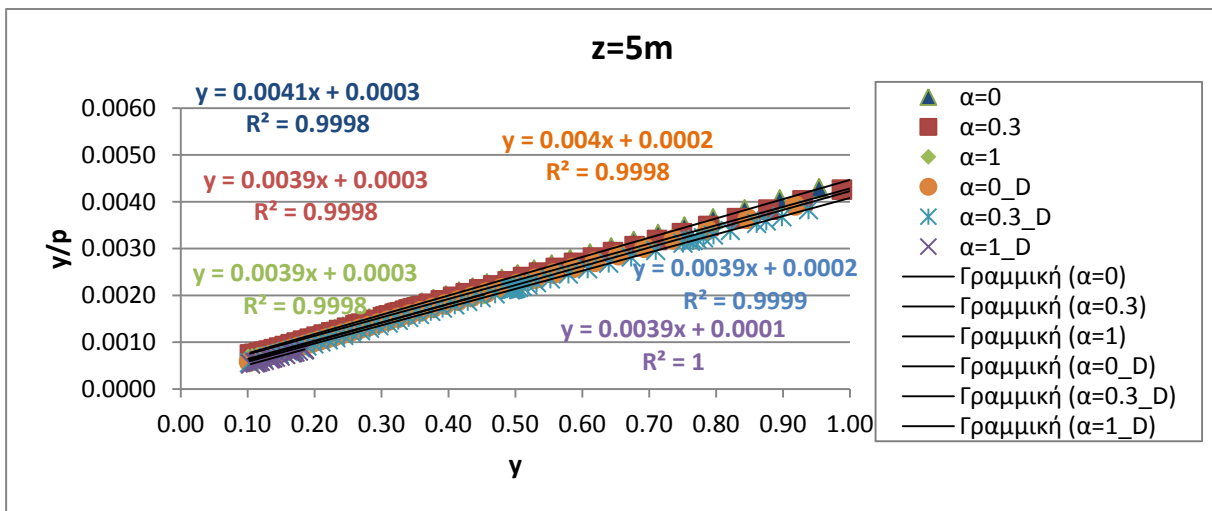
Σχήμα 0.45: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=1m$ .



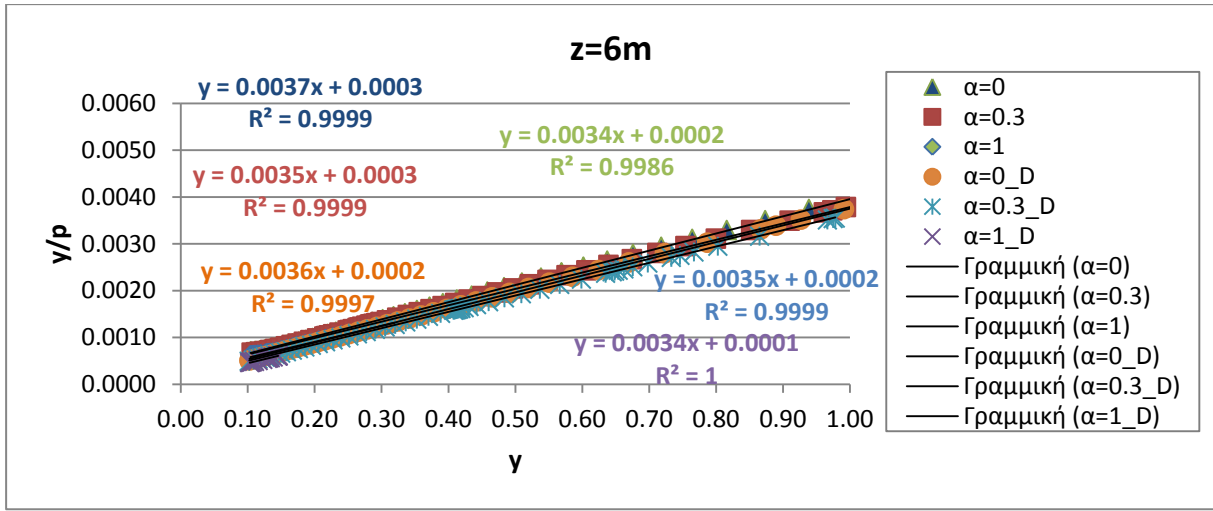
Σχήμα 0.46: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=3m$ .



Σχήμα 0.47: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=4m$ .

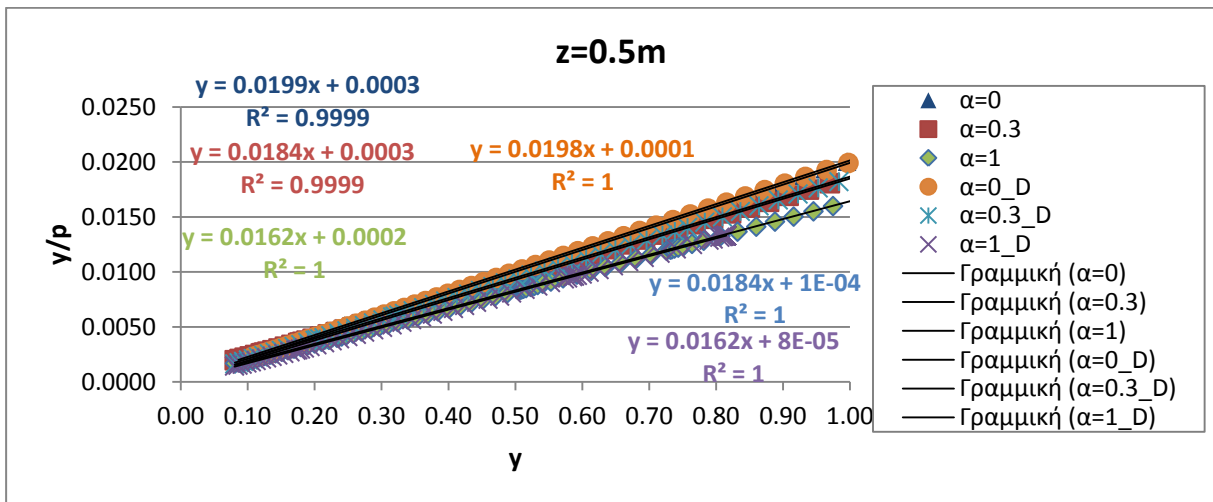


Σχήμα 0.48: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=5m$ .

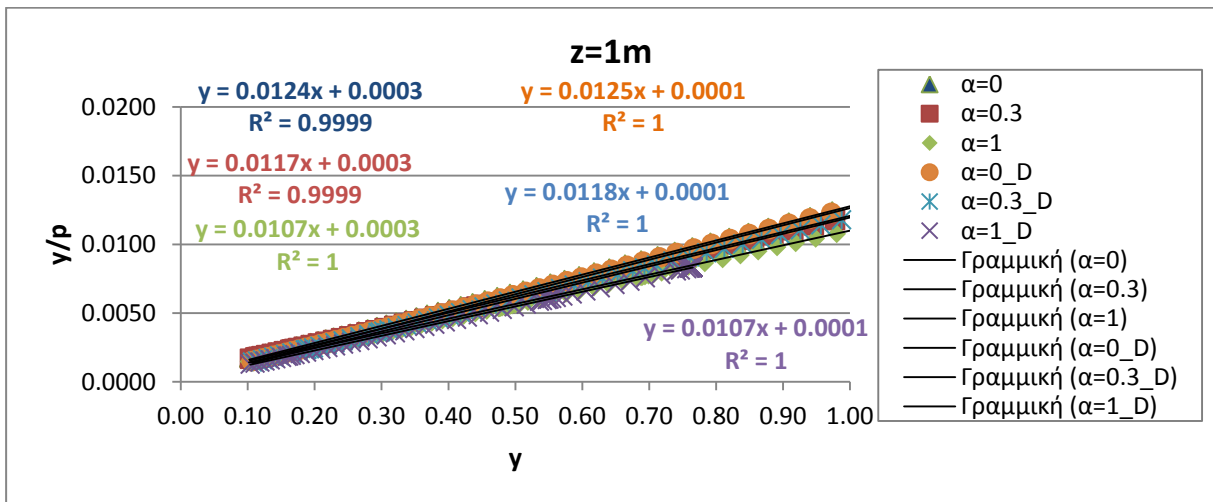


Σχήμα 0.49: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.25$  σε βάθος  $z=6m$ .

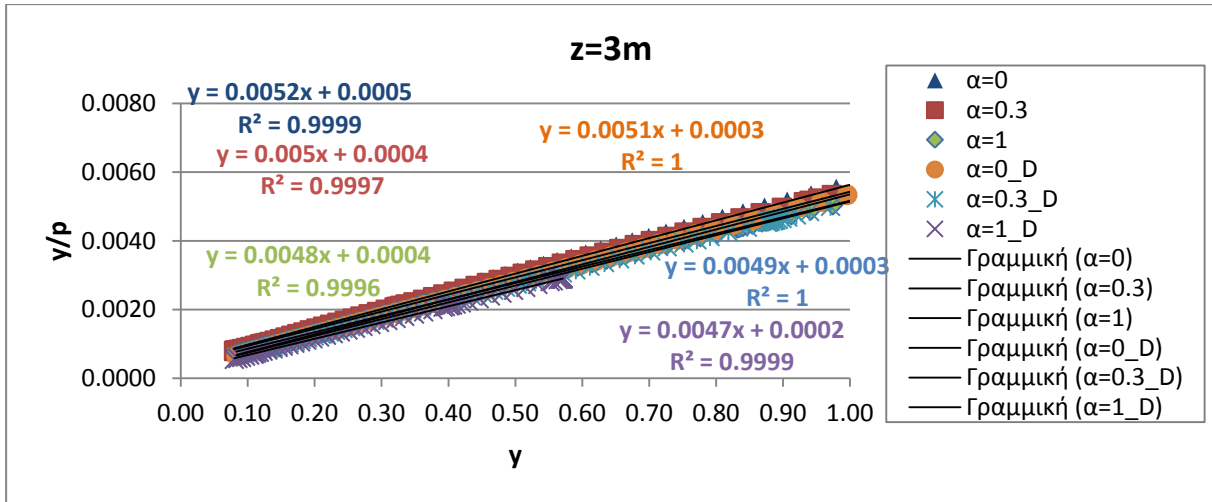
**ΣΤ3) Διαγράμματα για  $A=0.35$**



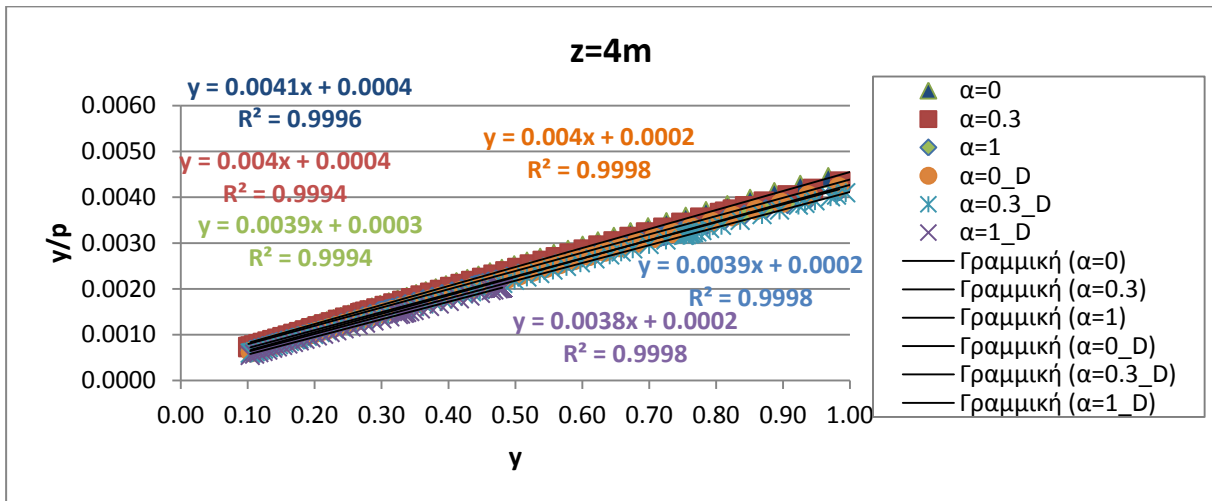
Σχήμα 0.50: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=0.5m$ .



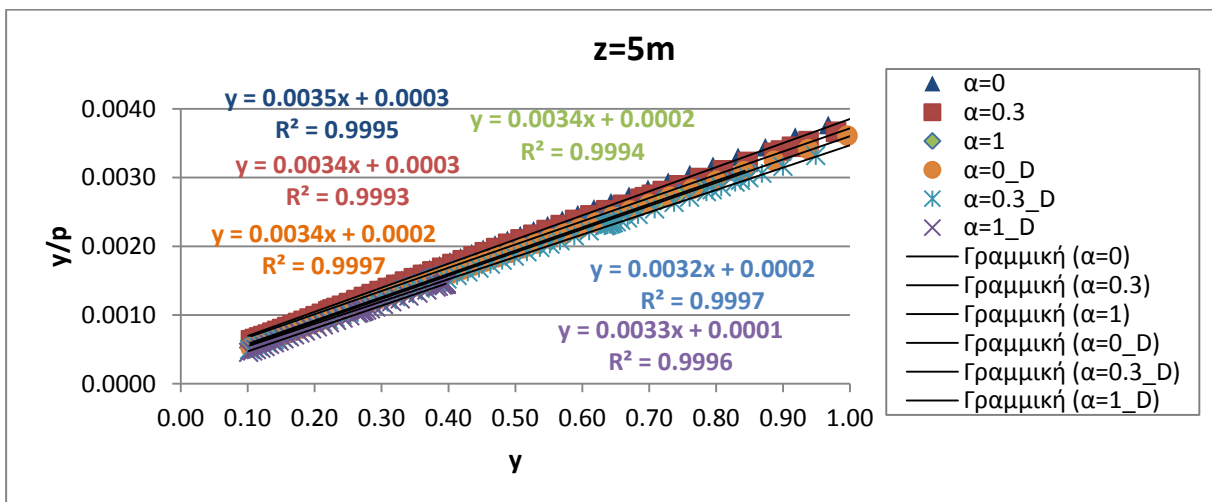
Σχήμα 0.51: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=1m$ .



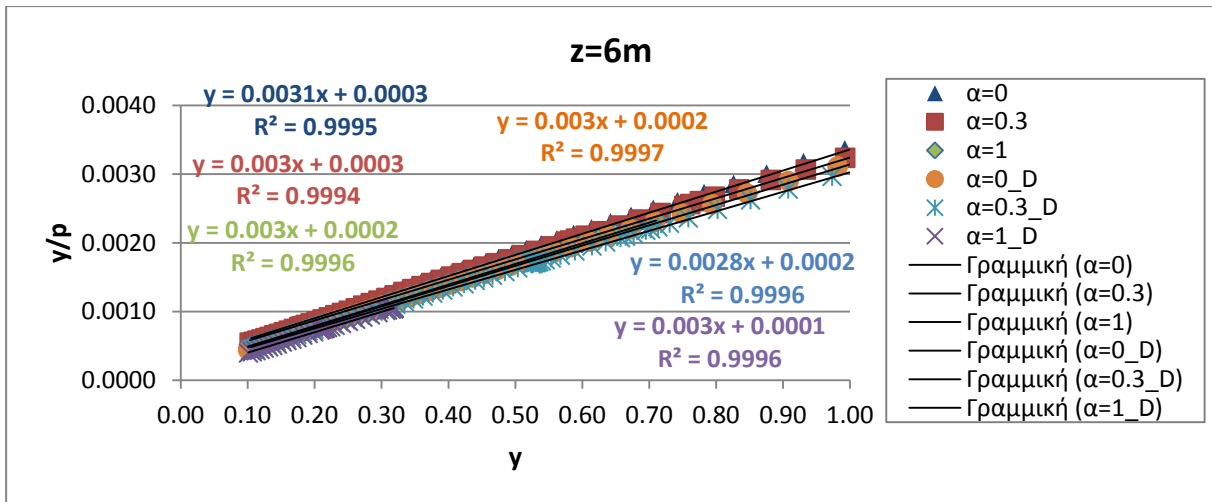
Σχήμα 0.52: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=3m$ .



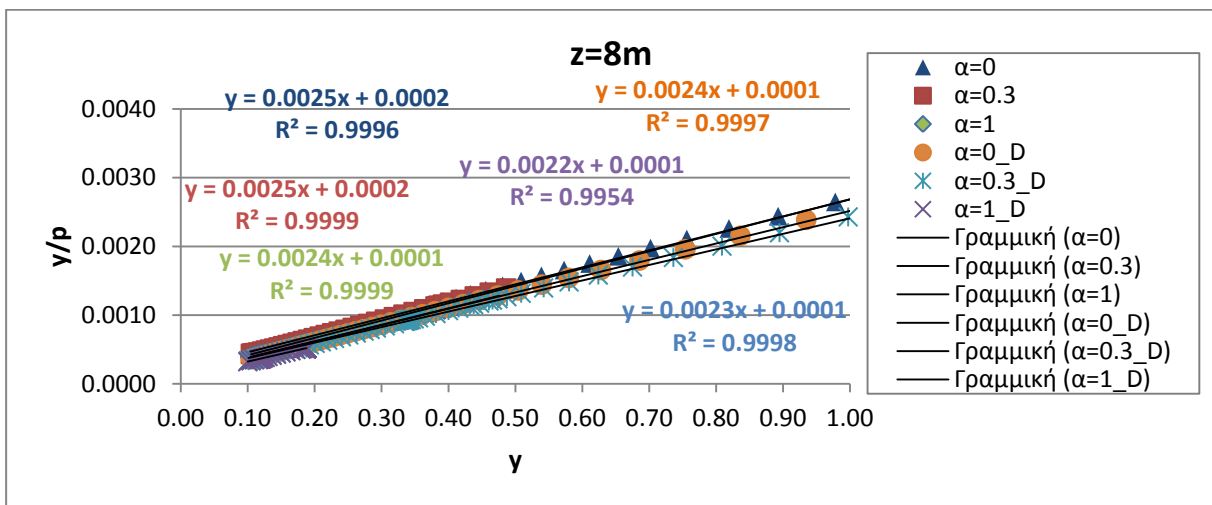
Σχήμα 0.53: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=4m$ .



Σχήμα 0.54: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=5m$ .



Σχήμα 0.55: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=6m$ .

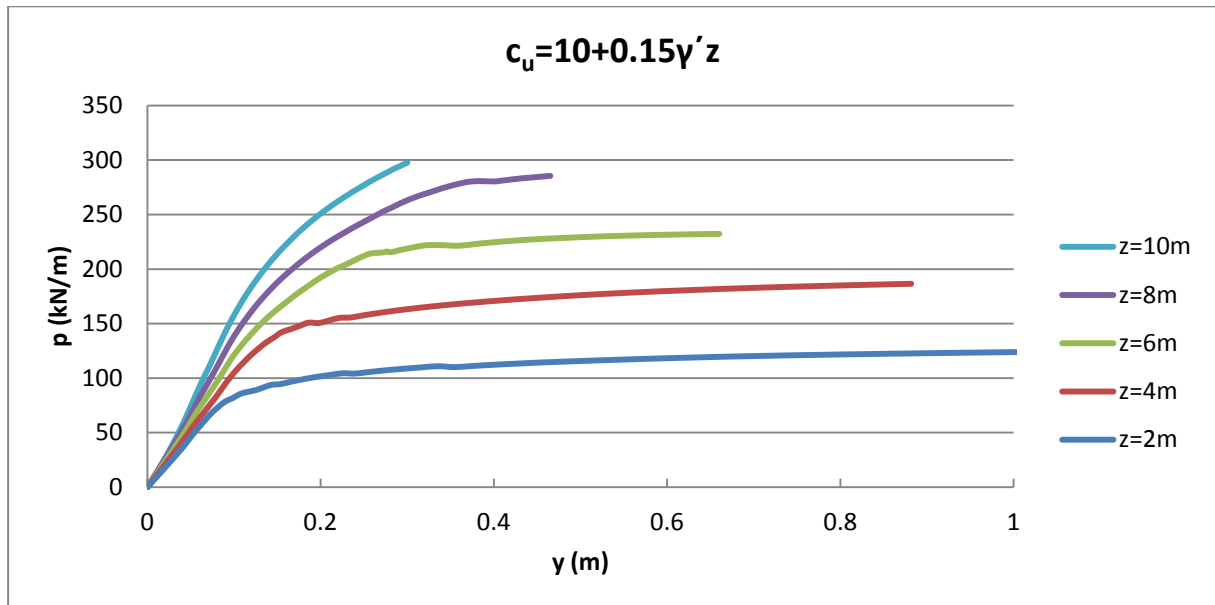


Σχήμα 0.56: Συγκριτικές ευθείες  $(y/p)=f(y)$  για  $A=0.35$  σε βάθος  $z=8m$ .

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ

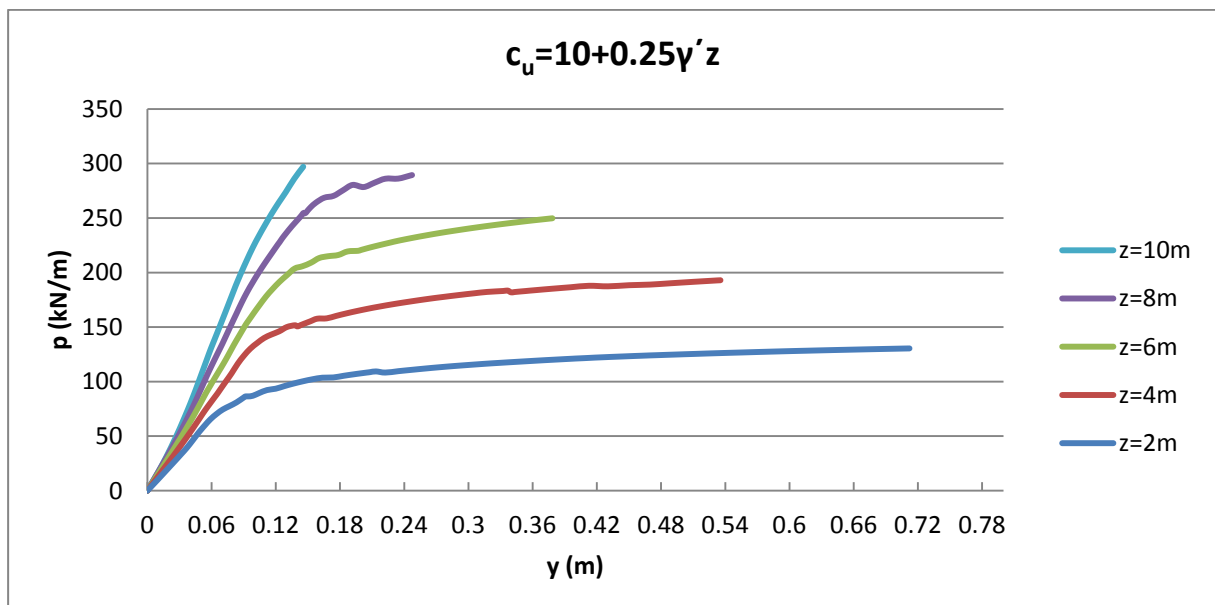
Μη-γραμμικές καμπύλες  $p$ - $y$  για τον έλεγχο βάθους υπολογισμού της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ) για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=1$  (Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>).

**Z1)** Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής κατά  $c_u=10+0.15\gamma'z$

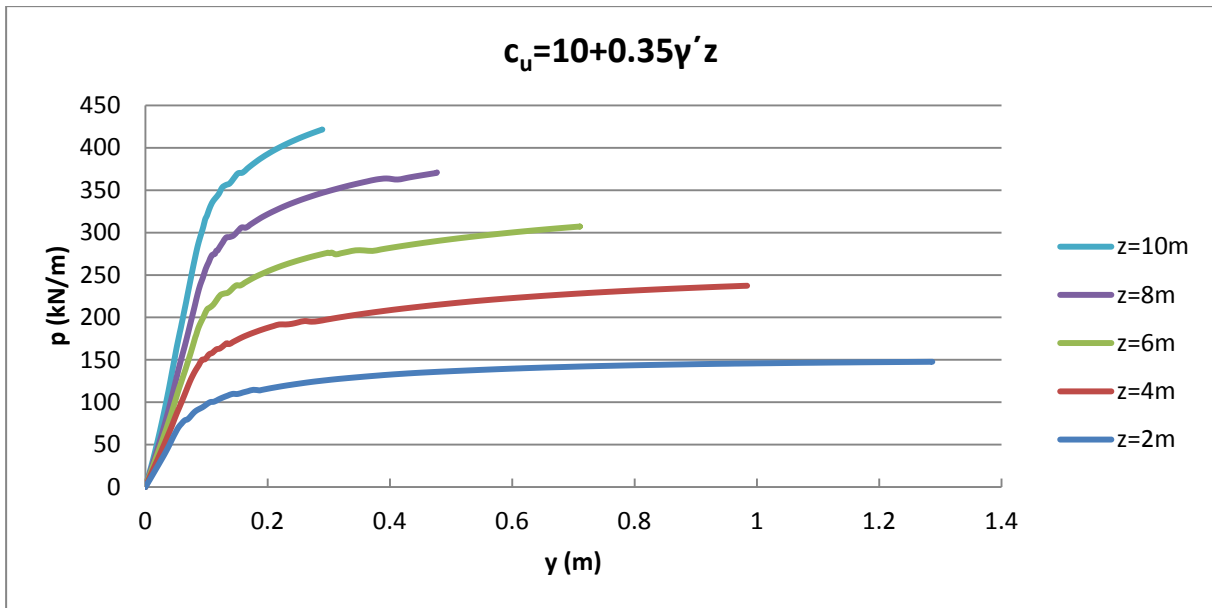


Σχήμα 0.57: Μη-γραμμικές καμπύλες  $p$ - $y$  σε διάφορα βάθη για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=1$ .

**Z2)** Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής κατά  $c_u=10+0.25\gamma'z$



Σχήμα 0.58: Μη-γραμμικές καμπύλες  $p$ - $y$  σε διάφορα βάθη για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=1$ .



Σχήμα 0.59: Μη-γραμμικές καμπύλες p-y σε διάφορα βάθη για συντελεστή διεπιφάνειας  $\alpha=1$ .





## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αναγνωστόπουλος Α., Παπαδόπουλος Β, «Θεμελιώσεις με πασσάλους», Εκδόσεις Συμείων, 2004.
2. Καββαδάς Μ., «Θεμελιώσεις Τεχνικών Έργων», Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου, 2008.
3. Καββαδάς Μ., «Στοιχεία Εδαφομηχανικής», Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου, 2007.
4. American Petroleum Institute, «Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design», 2002.
5. Broms, B.B. 1964a. «Lateral resistance of piles in cohesive soils. Journal of the Soil», Mechanics and Foundations Division, ASCE 90(SM2): 27-63.
6. Broms, B.B. 1964b. «Lateral resistance of piles in cohesionless soils. Journal of the Soil» Mechanics and Foundations Division, ASCE 90(SM3): 123-156.
7. Det Norske Veritas, «Rules for the design construction and inspection of offshore structures», Appendix F, 1977.
8. Det Norske Veritas, «Design of offshore wind turbine structures», 2007.
9. Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K., «Piling Engineering», Third Edition, 2009.
10. Georgiadis M., «Development of p-y curves for undrained response of piles near slopes», Elsevier, 2011.
11. Helwany S., «Applied Soil Mechanics with Abaqus Applications», Bicentennial publishing, 2007.
12. Matlock H. «Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay», Second Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1970.
13. Murff & Hamilton, «P-Ultimate for undrained analysis of laterally loaded piles», 1993.
14. Randolph M.F. & Houlsby G.T., «The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil», 1984.
15. Reese L.C., Van Impre W.F., «Single piles and Pile Groups under Lateral Loading», A.A. Balkema Publishers, 2001.
16. Simulia Abaqus 6.10 Documentation
17. Stevens J. & Audibert J., «Re-Examination of p-y curve formulations», 1979.
18. Sullivan et al, «Unified Method for Analysis of Laterally Loaded Piles», London 1980.
19. Zhang L. & Ahmari S., «Nonlinear analysis of laterally loaded rigid piles in cohesive soil», 2011.