

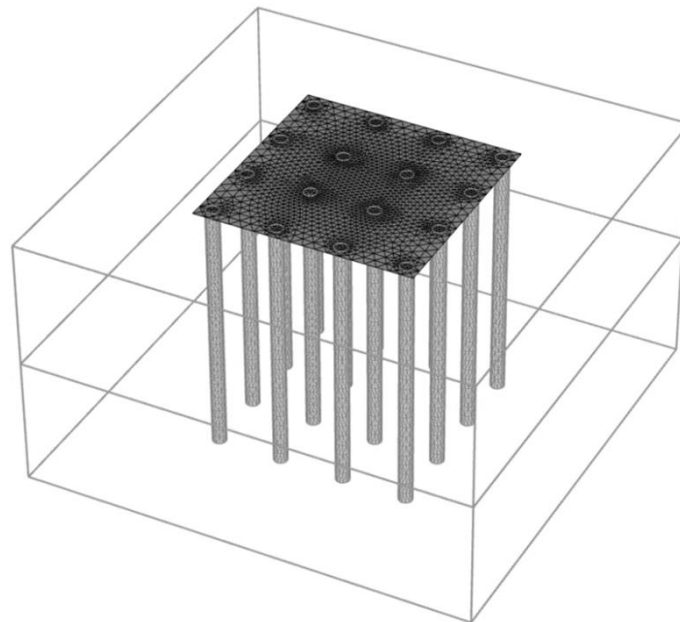
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Γεωτεχνικής



National Technical University of Athens
School of Civil Engineering
Geotechnical Department

Διπλωματική εργασία
ΓΙΑΤΡΕΛΗ ANNA-MARIA & ΛΙΤΣΑ ΜΑΡΙΑΝΝΑ
Επιβλέπων:
Αναπλ. Καθ. Ν. Γερόλυμος

***Κινηματική Αλληλεπίδραση Ομάδας Πασσάλων:
Τρισδιάστατη Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία***



***Kinematic Interaction of Pile Foundations: 3-Dimensional
Analysis with the Finite Element Method***

Diploma Thesis by
GIATRELI ANNA-MARIA & LITSA MARIANNA
Supervised by:
Ass. Prof. N. Gerolymos

Αθήνα, Μάρτιος 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στη διερεύνηση της απόκρισης ομάδων πασσάλων υπό την αποκλειστική επίδραση ανακυκλικής φόρτισης του περιβάλλοντος εδάφους. Μέσω της φόρτισης αυτής, εμφανίζεται καταπόνηση στους πασσάλους, η οποία είναι διαφορετική από εκείνη που αναπτύσσεται λόγω των φορτίων που μεταφέρονται από την ανωδομή, για αυτό και τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από αυτού του είδους τη φόρτιση ονομάζονται κινηματικά. Εκτεταμένη μελέτη έχει υπάρξει τα τελευταία χρόνια γύρω από την κινηματική επιπόνηση μονού πασσάλου, ενώ μόλις πρόσφατα επεκτάθηκε για την περίπτωση ομάδας πασσάλων, που είναι άλλωστε και η πιο συνηθισμένη στην πράξη. Οι πάσσαλοι που ανήκουν σε ομάδα υπόκεινται σε αλληλεπίδραση με το περιβάλλον έδαφος, αλλά και μεταξύ τους, καθορίζοντας έτσι την τελική απόκριση της ομάδας. Στη συγκεκριμένη εργασία επιχειρείται η διερεύνηση της επιρροής της ομάδας πασσάλων (group effect) στα αναπτυσσόμενα κινηματικά μεγέθη, μεταβάλλοντας μια σειρά από παραμέτρους, όπως το μέγεθος της ομάδας, οι αξονικές αποστάσεις των πασσάλων, η θέση του μεμονωμένου πασσάλου εντός της ομάδας και η διαφορά δυστημσίας των διαδοχικών εδαφικών στρωμάτων για την περίπτωση δίστρωτου εδαφικού σχηματισμού.

Η μελέτη των παραπάνω φαινομένων έγινε μέσω τρισδιάστατης δυναμικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία με το λογισμικό PLAXIS®. Στο πρώτο κεφάλαιο παρατίθενται οι απαραίτητες βιβλιογραφικές αναφορές, όσον αφορά τις βασικές ιδιότητες των πασσάλων ως δομικά στοιχεία, τους ορισμούς των φαινομένων που θα εξεταστούν, καθώς και την παράθεση αποτελεσμάτων δημοσιεύσεων που αργότερα θα συγκριθούν με εκείνα της παρούσης εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτεταμένη ανάλυση για τον τρόπο διεξαγωγής των αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, ενώ περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Στο τρίτο κεφάλαιο εξετάζεται η απόκριση απλής εδαφικής στήλης μοναδιαίας τομής, ώστε να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία του PLAXIS® ως προς τη βιβλιογραφία, για διάδοση διατμητικών-S και διαμήκων-P κυμάτων. Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται η κινηματική απόκριση μονού πασσάλου σε ομοιογενές και δίστρωτο έδαφος, με στρεπτή ή άστρεπτη κεφαλή, η οποία συγκρίνεται με τις εκτιμήσεις κατά Nikolaou & Gazetas (1997) και κατά Di Laora, Mandolini & Mylonakis (2012). Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται η κινηματική απόκριση ομάδας πασσάλων, για διατάξεις 2x2, 3x3 και 4x4 για αρμονική διέγερση και για μοναδιαία επιταχυνσιογραφήματα. Με αυτόν τον τρόπο επιχειρείται η διερεύνηση της επιρροής του μεγέθους της ομάδας, της διαφοράς στη δυστημσία των στρωμάτων, της θέσης και απόστασης των πασσάλων στην αναπτυσσόμενη κινηματική ροπή. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της παρούσης εργασίας, με προσθήκη προτάσεων για περαιτέρω έρευνα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	1
1.1	Εισαγωγικά στοιχεία	1
1.2	Ο σεισμός στη γεωτεχνική μηχανική	2
1.3	Πάσσαλοι: Θεωρία και Σχεδιασμός	5
1.3.1	Γενικά	5
1.3.2	Τύποι πασσάλων και κριτήρια επιλογής	5
1.3.3	Αρχές σχεδιασμού πασσάλων	7
1.4	Αδρανειακή και Κινηματική ροπή πασσάλου	8
1.5	Μέθοδοι Ανάλυσης της Κινηματικής Επιπόνησης	9
1.5.1	Μελέτη απόκρισης με πεπερασμένα στοιχεία (FEM)	9
1.5.2	Μελέτη απόκρισης με συνοριακά στοιχεία (BEM)	10
1.5.3	Μελέτη απόκρισης με ελατηριωτό προσομοίωμα Winkler (BDWF)	10
1.6	Σχέσεις για την εκτίμηση της Κινηματικής Επιπόνησης.	10
1.6.1	Αναλυτική προσέγγιση κατά Nikolaou & Gazetas (1997)	11
1.6.2	Στατική προσέγγιση κατά Sica, Mylonakis, & Simonelli (2011).....	12
1.6.3	Προσέγγιση κατά Di Laora, Mandolini, & Mylonakis, (2012)	14
1.7	Συμπεράσματα από τη μελέτη της Κινηματικής Επιπόνησης πασσάλου	15
1.8	Αλληλεπίδραση πασσάλων ομάδας	17
	ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 1	19
2	Μέθοδος Ανάλυσης με Πεπερασμένα Στοιχεία Λογισμικό PLAXIS®	31
2.1	Εισαγωγικά στοιχεία	31
2.2	Μέθοδοι Επίλυσης	31
2.2.1	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	32
2.2.2	Πεπερασμένα στοιχεία σε γεωτεχνικά προβλήματα	35
2.3	Στάδια επίλυσης Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων	36
2.3.1	Διακριτοποίηση (Διαίρεση Πεδίου).....	36
2.3.2	Συναρτήσεις Σχήματος.....	38
2.3.3	Συνοριακές συνθήκες	41
2.3.4	Αριθμητικά Ομοιώματα Συμπεριφοράς Υλικών.....	41
2.4	Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων PLAXIS©	42
2.4.1	Ιστορική αναδρομή	42

2.4.2	Βασικές εξισώσεις παραμόρφωσης	43
2.4.3	Διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων.....	44
2.4.4	Ανάλυση ευαισθησίας	45
2.5	Δυναμική ανάλυση προγράμματος PLAXIS©	46
2.5.1	Γενικές αρχές	46
2.5.2	Κρίσιμο χρονικό βήμα.....	47
2.5.3	Ορισμός ορίων	48
2.5.4	Συντελεστής απόσβεσης ξ- παράμετροι Rayleigh	48
2.5.5	Σχηματισμός καννάβου και μέγεθος στοιχείων	50
	ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2	53
3	Εδαφική Απόκριση σε Μονοδιάστατο Σεισμικό Κύμα S και P	57
3.1	Εισαγωγικά στοιχεία	57
3.2	Θεωρητικές σχέσεις εδαφικής απόκρισης	58
3.2.1	Εδαφική απόκριση ομοιογενούς σχηματισμού	58
3.2.2	Απόκριση εδαφικού σχηματισμού δύο στρώσεων	60
3.3	Ανάλυση με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS©.....	62
3.3.1	Περιγραφή της προσομοίωσης	62
3.3.2	Πορεία υπολογισμών και εξαγωγή αποτελεσμάτων	65
3.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων- Συμπεράσματα	66
	ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3	57
4	Υπολογισμός Κινηματικής Επιπόνησης Πασσάλου.....	77
4.1	Εισαγωγικά στοιχεία	77
4.2	Περιγραφή προσομοίωσης και επιλογής παραμέτρων	78
4.3	Πορεία υπολογισμών και εξαγωγή αποτελεσμάτων	80
4.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων με υπάρχουσες δημοσιεύσεις	82
4.4.1	Κατά Nikolaou & Gazetas.....	82
4.4.2	Κατά Di Laora, Mandolini & Mylonakis.....	84
	ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4	87
5	Κινηματική Επιπόνηση Ομάδας Πασσάλων.....	99
5.1	Εισαγωγικά στοιχεία	99
5.2	Ομάδα υπό απλή αρμονική διέγερση	100
5.2.1	Ομάδα πασσάλων 2x2	101

5.2.2	Ομάδα πασσάλων 3x3	102
5.2.3	Ομάδα πασσάλων 4x4	102
5.3	Ομάδα υπό πραγματική σεισμική διέγερση	103
5.4	Συμπεράσματα.....	104
5.4.1	Ομάδα πασσάλων 2x2	105
5.4.2	Ομάδα πασσάλων 3x3	106
5.4.3	Ομάδα πασσάλων 4x4	107
5.4.4	Επιταχυνσιογραφήματα	108
	ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5	111
6	Σύνοψη- Προτάσεις για Περεταίρω Διερεύνηση.....	157
	Βιβλιογραφία	157

1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο θα εστιάσουμε στα θεωρητικά στοιχεία που διέπουν το φαινόμενο της κινηματικής επιπόνησης πασσάλου, πριν προχωρήσουμε στις πρακτικές μεθόδους υπολογισμού και ανάλυσης της. Αρχικά θα γίνει αναφορά των βασικών παραμέτρων των σεισμικών κυμάτων (ταχύτητες διάδοσης, είδη κυμάτων), αφού οι τιμές τους και η μεταξύ τους αναλογία σε δίστρωτο εδαφικό σχηματισμό θα αποδειχτεί μεγάλης σημασίας σε επόμενα κεφάλαια. Στη συνέχεια καταγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των πασσάλων ως στοιχείων βαθιάς θεμελίωσης, καθώς και οι αρχές και τα βήματα σχεδιασμού τους.

Έπειτα, ορίζεται το πρόβλημα της κινηματικής ροπής, η οποία εμφανίζεται κυρίως στη διεπιφάνεια δύο εδαφικών στρώσεων, αλλά και στην κεφαλή των πασσάλων, οφειλόμενη στη διαφορά της κίνησης μεταξύ εδάφους και πασσάλου. Χαρακτηρίζεται ως κινηματική, ώστε να διαχωριστεί από την αδρανειακή ροπή που οφείλεται στην δυναμική κίνηση της ανωδομής. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται από αστοχίες πασσάλων, ενώ αργότερα ο ΕΑΚ (2000) και ο EC-8 (1996) ενέταξαν την κινηματική ροπή στους κανόνες σχεδιασμού.

Αρκετά επιστημονικά άρθρα επιχειρούν να εμβαθύνουν στο εν λόγω φαινόμενο, ενώ μέσω διάφορων τύπων αναλύσεων (ελατηριωτό προσομοίωμα τύπου Winkler, πεπερασμένα στοιχεία) καταλήγουν σε απλές κλειστές σχέσης εκτίμησης της κινηματικής ροπής. Αφού καταγραφεί η μεθοδολογία βάσει της οποίας κατασκευάστηκε η κάθε αριθμητική σχέση, δίνονται οι τελικοί τύποι των κινηματικών ροπών που προτείνονται. Ωστόσο, αναφέρονται στην εκτίμηση της ροπής μονού πασσάλου, χωρίς να λάβουν υπόψη φαινόμενα αλληλεπίδρασης στην περίπτωση ομάδας πασσάλων. Με την διαπίστωση αυτή κλείνει το παρόν κεφάλαιο, ενώ στα επόμενα κεφάλαια διερευνάται η ορθότητα και η ακρίβειά της.

1.2 Ο σεισμός στη γεωτεχνική μηχανική

Η πρόβλεψη της απόκρισης του εδάφους κατά τη διάρκεια ενός σεισμού αποτελεί σημαντικό γεωτεχνικό πρόβλημα, αφού το έδαφος όχι μόνο αλληλεπιδρά με τις διάφορες κατασκευές, αλλά ταυτόχρονα επηρεάζει και τις χωμάτινες κατασκευές και αντιστηρίξεις. Για να μελετηθεί λοιπόν η εδαφική απόκριση θα πρέπει να γνωρίζουμε και τη φύση του δυναμικού φαινομένου, καθώς από αυτήν θα εξαρτηθεί και η συμπεριφορά του εδάφους. Πρώτα από όλα συνεπώς πρέπει να οριστεί επιγραμματικά το πρόβλημα του σεισμού.

Η μετάδοση της σεισμικής ενέργειας έχει βρεθεί ότι γίνεται μέσω σεισμικών κυμάτων που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα δύο κυριότερα είδη είναι τα **διαμήκη κύματα P (Primus)** και τα **εγκάρσια κύματα S (Shear)**. Τα P-κύματα διαδίδονται πιο γρήγορα και φτάνουν πρώτα στην επιφάνεια του εδάφους, επομένως σε αυτά οφείλεται η βοή που ακούγεται κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Τα εγκάρσια κύματα S μεταδίδονται κάθετα προς τη διεύθυνση της κίνησης και μόνο σε στερεό υλικό. Οι βασικότεροι παράγοντες ενός υλικού που επηρεάζουν ποσοτικά την διάδοση των σεισμικών κυμάτων είναι οι ελαστικές σταθερές και η πυκνότητά του.

Με τη βοήθεια της κυματικής μπορούν να περιγραφούν και αριθμητικά τα προηγούμενα, ξεκινώντας από το απλό πρόβλημα της ελεύθερης διάδοσης ενός κύματος σε γραμμικώς ελαστική χορδή απείρου μήκους. Έστω μια τέτοια χορδή με εμβαδό επιφανείας A , μέτρο ελαστικότητας E , λόγο Poisson ν και πυκνότητα ρ (Εικόνα 1.1). Εάν παρεμποδιστούν οι γωνιακές παραμορφώσεις και οι στροφές τότε επιτρέπονται μόνο οι μετακινήσεις που είναι παράλληλες στη διεύθυνση της χορδής. Επομένως σε μια τομή κάποιου τμήματος της χορδής από $x = x_0$ έως $x = x_0 + dx$ θα ισχύει:

$$\left(\sigma_{x_0} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx\right) A - \sigma_{x_0} A = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

όπου u είναι η μετακίνηση στον άξονα x της χορδής. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί, έπειτα από πράξεις, στην μορφή:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.2)$$

που αποτελεί την διαφορική εξίσωση κίνησης της χορδής. Όμως γνωρίζουμε ότι $\sigma_x = M \varepsilon_x$, όπου $M = [(1 - \nu)/(1 + \nu)(1 - 2\nu)]E$ και $\varepsilon_x = \partial u / \partial x$, οπότε η (1.2) γίνεται:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{M}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1.3)$$

Όπου ο όρος $\frac{M}{\rho}$ ισούται με V_p^2 , επομένως είναι:

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (1.4)$$

Η τελευταία σχέση αποτελεί την ταχύτητα διάδοσης του μονοδιάστατου κύματος στην ιδανική χορδή απείρου μήκους και είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε πως η τιμή της δεν εξαρτάται από τη διέγερση, αλλά μόνο από τα ν , E και ρ , που αποτελούν ιδιότητες του υλικού. Ακόμη βλέπουμε πως η ταχύτητα αυξάνεται για αύξηση του μέτρου ελαστικότητας E και για μείωση της πυκνότητας ρ . Προσοχή, αυτή η ταχύτητα είναι διαφορετική από την ταχύτητα κίνησης των ανεξάρτητων σημειακών μαζών που αποτελούν τη χορδή και οι οποίες κινούνται με ταχύτητα

$$\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t} = \varepsilon_x \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\sigma_x}{M} V_p \frac{\partial t}{\partial t} = \frac{\sigma_x}{M} V_p = \frac{\sigma_x}{\rho V_p^2} V_p \Rightarrow \dot{u} = \frac{\sigma_x}{\rho V_p} \quad (1.5)$$

Έστω τώρα η ίδια χορδή στην οποία επιβάλλουμε στρεπτική ροπή T . Σε μία τομή θα έχουμε, όμοια με προηγουμένως:

$$\left(T_{x_0} + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) - T_{x_0} = \rho J dx \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (1.6)$$

Η τιμή της παραμέτρου J είναι η πολική ροπή αδράνειας της χορδής περί το κέντρο βάρους της. Δεδομένου ότι $T = G J \partial \theta / \partial x$ και απλοποιώντας την παραπάνω ώστε να γίνει της μορφής:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \rho J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (1.7)$$

θα προκύψει:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = V_s^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (1.8)$$

Παρατηρούμε ότι:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.9)$$

που αποτελεί την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος. Εδώ η ταχύτητα διάδοσης και πάλι είναι ανεξάρτητη της επιτάχυνσης. Αξίζει να τονίσουμε ότι τέτοιου είδους κύματα δεν υπάρχουν στο νερό, αφού δεν είναι δυνατό να παρουσιαστεί διάτμηση.

Όλα τα παραπάνω αφορούν την διάδοση κύματος σε γραμμικά ελαστική απειρομήκη χορδή. Μπορούν όμως να επεκταθούν και στον τρισδιάστατο χώρο, με πολύπλοκες μεν πράξεις, αλλά με την ίδια λογική βάση. Μετά από επίλυση των εξισώσεων κίνησης σε ιστροπικό και γραμμικά ελαστικό χώρο (που δεν

καταγράφονται εδώ χάριν απλότητας) θα καταλήξουμε στην τελική μορφή των ταχυτήτων διάδοσης των κυμάτων P και S.

Στα διατμητικά- S κύματα όπου πραγματοποιούνται διατμητικές παραμορφώσεις η ταχύτητα διάδοσης έχει την μορφή (1.9). Για παρεμπόδιση της στροφής και της διάτμησης, στο διαμήκες κύμα, καταλήγουμε ότι:

$$V_p = \sqrt{\frac{2G(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}} = V_s \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} \quad (1.10)$$

Υπενθυμίζεται ότι στα διαμήκη-P κύματα, οι μετακινήσεις των σημείων του μέσου στο οποίο διαδίδεται το κύμα είναι παράλληλες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Εικόνα 1.2). Από την εξίσωση (1.10) παρατηρούμε πως όσο η τιμή του λόγου Poisson ν πλησιάζει το 0,5 και το υλικό τείνει να γίνει τελείως ασυμπίεστο (κορεσμένες άργιλοι), τότε η $V_p \rightarrow \infty$. Οι ταχύτητες διάδοσης εξαρτώνται από τη δυσκαμψία του υλικού και φυσικά επηρεάζονται από τα είδη των μετακινήσεων που προκαλούνται από την κάθε μορφή κύματος. Εύκολα προκύπτει η σχέση για τις δύο ταχύτητες, από την οποία συμπεραίνουμε πως $V_p > V_s$:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (1.11)$$

Τα διατμητικά κύματα S συνήθως διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Πρόκειται για τα SH στα οποία κατά τη διάδοση του διατμητικού κύματος έχουμε μετακινήσεις των σημειακών μαζών κατά την οριζόντια διεύθυνση, και τα SV στα οποία οι αντίστοιχες μετακινήσεις είναι κατακόρυφες (Εικόνα 1.3). Μπορούμε λοιπόν να αναλύσουμε την μετακίνηση ενός διατμητικού κύματος στις συνιστώσες SH και SV.

Ωστόσο για τη μελέτη σεισμικών προβλημάτων θα ήταν εξίσου βοηθητική η γνώση της μορφής των κυμάτων που διαδίδονται στην επιφάνεια του εδάφους, όπου ενδιαφέρει η απόκριση των κατασκευών και επηρεάζει σημαντικά τον ανθρώπινο παράγοντα και το περιβάλλον. Θέτοντας λοιπόν συνοριακές συνθήκες πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους που θέλουμε να μελετήσουμε και θεωρώντας ιδεατά τη γη σαν ένα ημιάπειρο χώρο με επίπεδη επιφάνεια (αγνοούμε την καμπυλότητα της γης), μπορούμε να απαντήσουμε στο προηγούμενο ερώτημα. Πλέον δεχόμαστε πως υπάρχουν δύο είδη επιφανειακών κυμάτων, τα κύματα Rayleigh και Love.

Τα κύματα που υπάρχουν στην επιφάνεια ενός ομογενούς ελαστικού ημχώρου μελετήθηκαν αρχικά από τον Rayleigh (1885). Έχουν μικρότερη ταχύτητα διάδοσης από τα άλλα κύματα, ενώ μετακινούν το έδαφος με παρόμοιο τρόπο με εκείνο που ένα θαλάσσιο κύμα κινεί τα επιφανειακά νερά. Η βασική διαφορά στον τρόπο κίνησης είναι ότι η μετακίνηση του εδάφους κατά Rayleigh είναι ελλειψοειδής με μεγάλο άξονα τον y , ενώ στα θαλάσσια είναι ελλειψοειδής με μεγάλο άξονα τον x (Εικόνα 1.4α). Τα επιφανειακά κύματα Love μπορούν να δημιουργηθούν εάν ο

ημιχώρος καλύπτεται από υπερκείμενο έδαφος χαμηλότερης ταχύτητας διάδοσης (Love, 1927). Ένα τέτοιο κύμα θα προκαλέσει μετακινήσεις σημειακών μαζών κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης, ενώ δεν είναι παρά ένα «παγιδευμένο» στην εδαφική στρώση κύμα SH (Εικόνα 1.4β).

1.3 Πάσσαλοι: Θεωρία και Σχεδιασμός

1.3.1 Γενικά

Οι πάσσαλοι χαρακτηρίζονται ως βαθιές θεμελιώσεις, και μάλιστα είναι ο συνηθέστερος τρόπος θεμελίωσης σε μεγάλο βάθος. Έχουν τη μορφή μεμονωμένων στοιχείων κυλινδρικού σχήματος διαμέτρου d , η τιμή της οποίας κυμαίνεται σε εύρος $0,3 - 1,50 \text{ m}$, ενώ σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φθάσει τα $3,0 \text{ m}$. Το μήκος τους L μεταφέρει τα φορτία της ανωδομής σε βαθύτερο και ανεκτικότερο έδαφος, συνεπώς ο λόγος L/d πρέπει να στοχεύει στην ικανοποίηση της απαίτησης αυτής. Ωστόσο ο ρόλος των πασσάλων δεν περιορίζεται μόνο στην μεταφορά φορτίων στο έδαφος, αλλά στην ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων σε χαλαρά εδάφη, την ανάληψη οριζόντιων φορτίων, κ.λπ.

Η φέρουσα ικανότητα (Φ) ενός πασσάλου σε κατακόρυφο φορτίο είναι το άθροισμα της αντοχής της αιχμής του Q_b και της αντοχής από πλευρικές τριβές Q_s . Οι τιμές αυτές επηρεάζονται τόσο από το υλικό και τη μορφή του πασσάλου, όσο και από τον τρόπο κατασκευής και το είδος του περιβάλλοντος εδάφους. Αξίζει να σημειωθεί πως, αν και οι Q_b και Q_s θεωρούνται ανεξάρτητες μεταξύ τους κατά τους υπολογισμούς, δοκιμαστικές φορτίσεις εμπηγνυόμενων πασσάλων έχουν δείξει πως σε μη συνεκτικά εδάφη η Q_b επηρεάζεται από την ανάπτυξη της Q_s (Anagnostopoulos & Papadopoulos, 2011).

Ανάλογα με τον τρόπο μεταβίβασης των φορτίων στο έδαφος και τον τρόπο ανάπτυξης της Φ , έχουμε τον χαρακτηρισμό των πασσάλων ως αιχμής, τριβής, ή αιχμής- τριβής (Εικόνα 1.5α,β). Για την εξάντληση της διαθέσιμης αντοχής ωστόσο, απαιτείται μια κατακόρυφη μετακίνηση, η οποία στους πασσάλους είναι $5 - 10\%$ του d για αντοχή αιχμής και $0,5\%$ ή $0,5 - 2 \text{ cm}$ για πλήρη ανάπτυξη αντοχής λόγω πλευρικών τριβών. Επομένως το πρόβλημα της αντοχής του πασσάλου έγκειται στον τρόπο ανάπτυξης της αντοχής αιχμής και στην αλληλεπίδραση του με το περιβάλλον έδαφος.

1.3.2 Τύποι πασσάλων και κριτήρια επιλογής

Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, μπορούμε να διαχωρίσουμε τις κατηγορίες πασσάλων σε «δί' εκτοπίσεως» και «άνευ εκτοπίσεως». Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι προκατασκευασμένοι, εμπηγνυόμενοι και επί τόπου εγχυόμενοι, ενώ

οι πάσσαλοι δι' εκσκαφής είναι επίσης επιτόπου εγχυόμενοι, αλλά με αφαίρεση του εδαφικού υλικού άνευ εκτοπίσεως.

Οι **προκατασκευασμένοι πάσσαλοι** ενδείκνυνται τόσο για περιπτώσεις που το υπερκείμενο χαλαρό έδαφος είναι μεγάλου πάχους, όσο και για θαλάσσιες κατασκευές, αφού η κατασκευή τους δεν επηρεάζεται από τα υπόγεια ύδατα (Εικόνα 1.6). Το υλικό τους συνήθως είναι ξύλο, μέταλλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα (απλός ή προεντεταμένος οπλισμός). Υπάρχει η χρήσιμη δυνατότητα εκ των προτέρων ελέγχου της ποιότητάς τους (προ της έμπηξης), ενώ μέσω της επιμήκυνσης (split- piles), μπορούν να επιτευχθούν ακόμη μεγαλύτερα βάθη έμπηξης. Πολύ σημαντική είναι και η ικανότητα τοποθέτησής τους σε προκαθορισμένη διάταξη, γεγονός που διευκολύνει τόσο την κατασκευαστική διαδικασία, όσο και τους χρονικούς περιορισμούς ενός έργου. Τέλος, σε περίπτωση ανύψωσης κάποιου πασσάλου λόγω έμπηξης ενός κοντινού του, τότε μπορεί να επανεμπηχθεί. Ωστόσο, οι εναλλαγές στις διαστάσεις των προκατασκευασμένων πασσάλων είναι πολύ περιορισμένες (πχ μεταβολές μήκους), ενώ ο τρόπος μεταφοράς και η διαδικασία έμπηξης επηρεάζει και τον οπλισμό τους, σε περίπτωση που είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα. Επιπλέον, η διαδικασία έμπηξης διαταράσσει τόσο το έδαφος, όσο και τους ίδιους τους πασσάλους, ενώ ο θόρυβος, οι δονήσεις και η δημιουργία εδαφικών μετακινήσεων προκαλούν δυσκολίες.

Από την άλλη μεριά, οι **επί τόπου εγχυόμενοι (δι' εκτοπίσεως) πάσσαλοι** είναι κυρίως οπλισμένου σκυροδέματος, αλλά ο οπλισμός τους δεν εξαρτάται από τη διαδικασία έμπηξης. Υπάρχει ευελιξία στην επιλογή του μήκους τους, ενώ και αυτοί μπορούν να εμπηχθούν σε προκαθορισμένο βάθος ή διάταξη. Ακόμη, σε περιβάλλον υπόγειων υδάτων μπορούν να κατασκευαστούν με «κλειστό» σωλήνα, ενώ τυχόν θόρυβοι ή δονήσεις είναι δυνατόν να μειωθούν με έμπηξη «κατά τη βάση» του πασσάλου. Και σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει το μειονέκτημα της διατάραξης του εδάφους, η οποία προκαλεί ανύψωση τόσο της παρακείμενης εδαφικής επιφάνειας, όσο και των γειτονικών πασσάλων. Αυτά με τη σειρά τους μπορεί να επηρεάσουν και γειτονικές κατασκευές, επομένως χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την κατασκευή τους. Εξίσου σημαντική είναι η λήψη ειδικών μέτρων εάν υπάρχει αρτεσιανή ροή, και η εξασφάλιση της «ακεραιότητας» των πασσάλων.

Οι επί τόπου **εγχυόμενοι πάσσαλοι δι' εκσκαφής**, κατασκευάζονται με πολύ μικρότερη επίδραση στις υπάρχουσες κατασκευές, αφού δεν προκαλούν ανύψωση του περιβάλλοντος εδάφους και δεν προκαλούν τόσο θόρυβο ή δονήσεις (Εικόνα 1.7). Υπάρχει χαρακτηριστική ευελιξία διαστάσεων, ενώ κατά την εκσκαφή υπάρχει δυνατότητα συνεχούς εικόνας του εκσκαπόμενου εδάφους. Ωστόσο η διάτρηση του εδάφους δύναται να προκαλέσει χαλάρωση των μη συνεκτικών εδαφών και αποδιοργάνωση των ημιβράχων. Ειδικά κατά την κατασκευή κάτω από το νερό υπάρχουν δυσκολίες τόσο κατά τη σκυροδέτηση, όσο και για την επίτευξη της

απαιτούμενης ποιότητας σκυροδέματος. Σε μαλακά εδάφη είναι πιθανή η δημιουργία «λαιμού» και ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην αποφυγή εισροών νερού στο σωλήνα, που μπορεί να επηρεάσουν είτε το σκυρόδεμα, είτε το έδαφος στην αιχμή του πασσάλου.

Η επιλογή του καταλληλότερου τύπου πασσάλου αρχικά καθορίζεται από τη θέση του έργου, και έπειτα από τον τύπο των βασικών φορτίσεων που θα παραλάβει από την ανωδομή. Έπειτα λαμβάνονται υπόψη οι εδαφικές συνθήκες της περιοχής, καθώς και η ύπαρξη ύδατος, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις πρέπει να ληφθούν επιπλέον μέτρα έναντι ειδικών επί τόπου συνθηκών, όπως είναι η ύπαρξη αλάτων ή οξειδίων και οι αυξομειώσεις της στάθμης των υδάτων. Πολύ σημαντική παράμετρο επιλογής αποτελεί και η κοστολόγηση παράλληλα με την βέλτιστη απόδοση του έργου, στοιχεία αλληλένδετα και με τη ζητούμενη διάρκεια ζωής του.

1.3.3 Αρχές σχεδιασμού πασσάλων

Ο βασικός στόχος της αρτίως σχεδιασμένης θεμελίωσης με πασσάλους, και των έργων γενικότερα, είναι η λειτουργικότητα και η ασφάλεια. Με τη λήψη των κατάλληλων μέτρων και την εφαρμογή συντελεστών ασφαλείας, υπολογίζονται οι απαιτούμενες διαστάσεις. Τα ενδεχόμενα που θα πρέπει να εξετάζονται κατά το σχεδιασμό θεμελιώσεων με πασσάλους είναι (Anagnostopoulos & Papadopoulos, 2011):

- Απώλεια ολικής ευστάθειας (π.χ. σε φυσικά ή τεχνητά πρηνή)
- Διατμητική αστοχία του εδάφους, λόγω εξάντλησης της ΦΙ του συστήματος εδάφους- πασσάλου σε θλιπτικό φορτίο
- Εφελκυστική αστοχία συστήματος εδάφους- πασσάλου (χαμηλά κατακόρυφα φορτία με δυσανάλογα υψηλές καμπτικές ροπές)
- Διατμητική αστοχία εδάφους λόγω υψηλών οριζόντιων φορτίων
- Αστοχία πασσάλου λόγω θλίψης, εφελκυσμού, διάτμησης, κάμψης ή λυγισμού
- Συνδυασμένη- ταυτόχρονη αστοχία εδάφους και πασσάλου
- Ανάπτυξη υπερβολικών καθιζήσεων (πάσσαλοι τριβής)
- Ανύψωση του εδάφους (π.χ. διογκούμενα εδάφη)
- Δημιουργία υπερβολικών πλευρικών μετατοπίσεων (π.χ. ύπαρξη μεγάλων οριζόντιων φορτίων σε πασσάλους διερχόμενους από μαλακή άργιλο)
- Ύπαρξη υπερβολικών δονήσεων/ ταλαντώσεων

Οι παραπάνω υπολογιστικοί έλεγχοι ορίζονται από τον Ευρωκώδικα EC-7 (Γεωτεχνικός Σχεδιασμός), ενώ εντάσσονται τόσο στους ελέγχους έναντι οριακών καταστάσεων αστοχίας, όσο και στους ελέγχους έναντι οριακών καταστάσεων λειτουργικότητας.

Κατά το σχεδιασμό μιας θεμελίωσης με πασσάλους, πρώτος στόχος είναι η επιλογή του κατάλληλου τύπου πασσάλου με βάση τις απαιτήσεις του έργου, ενώ

προεκτιμάται και η διάμετρος d . Στη συνέχεια, ανάλογα με τις εκάστοτε γεωτεχνικές συνθήκες, επιλέγεται το κατάλληλο βάθος έμπηξης ή μήκος L , για να υπολογιστεί έπειτα η φέρουσα ικανότητα του μεμονωμένου πασσάλου σε κατακόρυφο και οριζόντιο φορτίο. Αφού εφαρμοστούν οι κατάλληλοι συντελεστές ασφαλείας, υπολογίζονται τα επιτρεπόμενα φορτία του πασσάλου ή η αντοχή σχεδιασμού και μετά τον υπολογισμό των φορτίων από την ανωδομή, επιλέγεται η διάταξη των πασσάλων ή η πασσαλοεσχάρα. Βάσει των μεγεθών σχεδιασμού, στη συνέχεια, υπολογίζονται οι καθιζήσεις και οι πλευρικές μετατοπίσεις στην κεφαλή του μεμονωμένου πασσάλου. Σε επίπεδο πασσαλομάδας, γίνεται εκτίμηση τόσο του συνολικού επιτρεπόμενου φορτίου στην κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση, όσο και των καθιζήσεων λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων. Αφού γίνει επανεπίλυση του συστήματος της οριστικοποιημένης πασσαλομάδας και ελεγχθούν οι πάσσαλοι ως προς τους οπλισμούς και τη στατικότητα, η μελέτη σχεδιασμού έναντι συνήθων φορτίσεων έχει ολοκληρωθεί (Anagnostopoulos & Papadopoulos, 2011).

Ως ασυνήθεις φορτίσεις, αντιθέτως, χαρακτηρίζονται εκείνες που προέρχονται από εξωτερικές μετακινήσεις εδάφους, από κυκλικές ή επαναλαμβανόμενες φορτίσεις, καθώς και από δυναμικές φορτίσεις. Ως προς το τελευταίο είδος, ο EC -8 αναφέρει πως οι πάσσαλοι θα πρέπει να σχεδιάζονται έναντι των ακόλουθων δύο φορτίσεων:

- Αδρανειακές δυνάμεις από την ανωδομή
- Κινηματική καταπόνηση λόγω παραμόρφωσης του εδάφους κατά τη διέλευση σεισμικών κυμάτων

Η απόκριση των μεμονωμένων πασσάλων και των πασσαλομάδων λόγω κινηματικής καταπόνησης μελετώνται εκτενέστερα στη συνέχεια.

1.4 Αδρανειακή και Κινηματική ροπή πασσάλου

Καθώς τα σεισμικά κύματα διαπερνούν ένα έδαφος παρατηρείται διαφορά στην κίνηση εδάφους και πασσάλου. Αυτή η διαφορά μπορεί να οφείλεται στην διαφορά των δυσκαμψιών μεταξύ εδάφους και πασσάλου, στην στρωματογραφία του εδάφους, στη συχνότητα της διέγερσης, καθώς και στους κινηματικούς περιορισμούς της κεφαλής και της βάσης του πασσάλου (Sica, Mylonakis, & Simonelli, 2011). Έτσι, αναπτύσσονται καμπτικές ροπές στον πάσσαλο, ακόμα και όταν δεν υπάρχει ανωδομή. Οι ροπές που αναπτύσσονται με τον παραπάνω τρόπο αναφέρονται ως κινηματικές για να διαχωριστούν από τις αδρανειακές, οι οποίες μεταβιβάζονται στον πάσσαλο κατά την ταλάντωση της ανωδομής (Gerolymos & Gazetas, 2008) .

Η ύπαρξη της κινηματικής ροπής αποδεικνύεται από αστοχίες πασσάλων που έχουν παρατηρηθεί έπειτα από σεισμό (Εικόνα 1.8) και ήταν σε βάθος τέτοιο που ήταν αδύνατο να οφείλονται σε μεταφορά έντασης από την ανωδομή. Ακολούθησαν τόσο επιτόπου μετρήσεις, όσο και αναλυτικοί υπολογισμοί που αποδείκνυαν την σύνδεση του συγκεκριμένου μηχανισμού αστοχίας με την ύπαρξη της διαχωριστικής διεπιφάνειας εδαφών με μεγάλη διαφορά στη δυστημψία και την αντοχή (Mizuno, 1987; R. Dorby, 1983; Tazoh T., 1987). Έπειτα από αυτές τις παρατηρήσεις, οι αντισεισμικοί κανονισμοί (ΕΑΚ 2000, EC8 1996) αναγνώρισαν την κινηματική φόρτιση και την ενέταξαν στους κανόνες σχεδιασμού. Συγκεκριμένα ανέφεραν πως θα πρέπει να εξασφαλίζεται η μη εμφάνιση πλαστικής άρθρωσης λόγω κινηματικής επιπόνησης, ιδιαίτερα στις διεπιφάνειες των εδαφικών στρώσεων.

Η κινηματική επιπόνηση ωστόσο δεν λαμβάνει χώρα μόνο στη διαχωριστική επιφάνεια των εδαφικών στρώσεων, αλλά και στο σημείο σύνδεσης του πασσάλου με τον κεφαλόδεσμο (Gerolymos & Gazetas, 2008). Πιο συγκεκριμένα, στο σημείο αυτό αναπτύσσονται τόσο ροπές αδρανειακές από την ταλάντωση της ανωδομής, όσο και κινηματικές από την αλληλεπίδραση πασσάλου και εδάφους. Οι μεν αδρανειακές ροπές λαμβάνουν και τη μέγιστη τιμή τους στο σημείο αυτό, ενώ οι κινηματικές μπορεί να είναι μεγαλύτερες στη σύνδεση του πασσάλου με τον κεφαλόδεσμο, απ' ότι οι αντίστοιχες που αναπτύσσονται στο διαχωρισμό δύο εδαφικών στρώσεων, όπως θα παρουσιαστεί και παρακάτω.

1.5 Μέθοδοι Ανάλυσης της Κινηματικής Επιπόνησης

Η απόκριση πασσάλου σε διάδοση κατακόρυφων $-S$ κυμάτων σε πολύστρωτο έδαφος αναλύεται στη βιβλιογραφία είτε με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (Blaney, Kausel, & Roesset, 1976), είτε με μεθόδους συνοριακών στοιχείων (Mamoon & Banerjee, 1990), ή με τη βοήθεια ελατηριωτού προσομοιώματος Winkler (Sica, Mylonakis, & Simonelli, 2011; Nikolaou & Gazetas, 1997).

1.5.1 Μελέτη απόκρισης με πεπερασμένα στοιχεία (FEM)

Το έδαφος γύρω από τον πάσσαλο αναπαράγεται με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων, ενώ τα όρια του προσομοιώματος έχουν το ρόλο του ελεύθερου πεδίου, με τη χρήση κατάλληλων συνοριακών συνθηκών και πινάκων. Το εδαφικό προφίλ μπορεί να αλλάζει με το βάθος, αλλά όχι με το μήκος ή το πλάτος, αφού γίνεται η υπόθεση σταθερού ελεύθερου πεδίου. Αφού υπολογιστεί η δυσκαμψία του περιβάλλοντος εδάφους, καθώς και οι δυνάμεις που ασκούνται στον πάσσαλο, μπορεί να βρεθεί η απόκρισή του. Στην ίδια βασική αρχή υπακούουν και τα προγράμματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία όπως είναι η πλατφόρμα ABAQUS, ο κώδικας ANSYS, ή το πρόγραμμα PLAXIS.

1.5.2 Μελέτη απόκρισης με συνοριακά στοιχεία (BEM)

Μέσω της μεθόδου αυτής, οι πάσσαλοι αναπαρίστανται ως συμπιεστά στοιχεία κολώνας, ενώ το έδαφος ως ιξωδο-ελαστικός ημιχώρος με υστερητική απόσβεση. Υπολογίζονται οι καθαυτές λύσεις των διαφορικών εξισώσεων των πασσάλων υπό αρμονική σεισμική διέγερση, ενώ για την αλληλεπίδραση πασσάλου- εδάφους, χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες στη μεταξύ τους διεπιφάνεια (ισορροπία δυνάμεων, κοινή μετακίνηση). Σημειώνεται πως το έδαφος θεωρείται συνεχής και ελαστικός τρισδιάστατος ημιχώρος, ενώ οι λύσεις των εξισώσεων των κυμάτων βρίσκονται μέσω απλής ολοκλήρωσης των αντίστοιχων διαφορικών εξισώσεων υπό όρους επιτάχυνσης. Εν τέλει, τα κυριότερα χαρακτηριστικά της απόκρισης μελετώνται μέσω αδιάστατων διαγραμμάτων (Mamoon & Banerjee, 1990).

1.5.3 Μελέτη απόκρισης με ελατηριωτό προσομοίωμα Winkler (BDWF)

Η αλληλεπίδραση πασσάλου και εδάφους προσομοιάζεται από σύστημα συνεχών ελατηρίων και απορροφητήρων, ενώ οι παράμετροι τους, $k = k(\omega)$ και $c = c(\omega)$ αντίστοιχα, είναι συνάρτηση της συχνότητας διέγερσης (Εικόνα 1.9). Η τιμή τους εκτιμάται έπειτα από βαθμονόμηση με βάση αποτελέσματα FEM και BEM αναλύσεων (βλ. 1.5.1 και 1.5.2), ενώ σχετίζονται τόσο με τη δυσστημσία του εδάφους, όσο και με την απόσβεση λόγω ακτινοβολίας κατά τη διάδοση των κυμάτων μακριά από τον πάσσαλο. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την κινηματική αλληλεπίδραση πασσάλου και εδάφους είναι της μορφής:

$$\frac{\partial^2 U_{ff}}{\partial z^2} + \left(\frac{\omega}{V_s}\right)^2 U_{ff} = 0 \quad (1.12)$$

$$E_p I_p \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} - \rho_p A_p \omega^2 u + (k_x + i\omega c_x)(u - U_{ff}) = 0 \quad (1.13)$$

1.6 Σχέσεις για την εκτίμηση της Κινηματικής Επιπόνησης.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές σχέσεις για την εύκολη προσεγγιστική εκτίμηση της μέγιστης κινηματικής ροπής που αναπτύσσεται στον πάσσαλο στην περιοχή της διεπιφάνειας μεταξύ δύο εδαφικών στρώσεων. Άλλες βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα και αριθμητικές αναλύσεις (ημιεμπειρικές), ενώ άλλες δημιουργούνται από τον εμπλουτισμό και την προσπάθεια βελτίωσης των ήδη υπάρχοντων εκφράσεων που περιγράφουν το παραπάνω φαινόμενο (ημιαναλυτικές). Ωστόσο προτείνεται πάντα η χρήση των εκφράσεων αυτών να γίνεται σε προβλήματα παρόμοιας γεωμετρίας και τιμών των υλικών, καθώς μικρές αλλαγές στις μεταξύ τους αναλογίες έχει βρεθεί πως μπορεί να δώσουν διαφορετικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες από τις εν λόγω σχέσεις.

1.6.1 Αναλυτική προσέγγιση κατά Nikolaou & Gazetas (1997)

Μια πρώτη κλειστή έκφραση που προτείνεται από (Nikolaou & Gazetas, 1997) βασίζεται στην πρόχειρη εκτίμηση της διατμητικής τάσης τ_{inter} που θα αναπτυχθεί στη διεπιφάνεια των δύο εδαφικών στρώσεων, συναρτήσει της επιτάχυνσης που πραγματοποιείται στην επιφάνεια του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο a_{sur} . Έτσι προκύπτει ότι:

$$\tau_{inter} \approx a_{sur} \rho_1 H_1 \quad (1.14)$$

Η κινηματική ροπή στη διεπιφάνεια προτείνεται ως:

$$M_{max} = 0.042 \tau_{inter} d^3 \left(\frac{L}{d}\right)^{0.3} \left(\frac{E_p}{E_{s1}}\right)^{0.65} \left(\frac{V_{s1}}{V_{s2}}\right)^{-0.5} \quad (1.15)$$

Οι ίδιοι πρότειναν μία δεύτερη έκφραση της μέγιστης κινηματικής ροπής στη διεπιφάνεια, η οποία βασίζεται στην μέγιστη παραμόρφωση που αναπτύσσεται σε οριζόντια τομή του πασσάλου διαμέτρου d λόγω ροπής:

$$\varepsilon_M = \frac{M}{E_p I_p} \frac{d}{2} = \frac{M}{I_p \left(\frac{\pi d^4}{64}\right)} \frac{d}{2} \cong \frac{10M}{E_p d^3} \quad (1.16)$$

Επομένως η ροπή που προκύπτει γράφεται:

$$M_{max} = \frac{2,7}{10^7} E_p d^3 \left(\frac{a_r}{g}\right) \left(\frac{L}{d}\right)^{1.3} \left(\frac{E_p}{E_{s1}}\right)^{0.7} \left(\frac{V_{s1}}{V_{s2}}\right)^{-0.3} \left(\frac{H_1}{L}\right)^{-1.25} \quad (1.17)$$

Οι συγκεκριμένες εκφράσεις έχουν αρκετό ενδιαφέρον τόσο λόγω παλαιότητας, όσο και ως προς την ευκολία χρήσης τους. Βασίστηκαν σε BDWF αναλύσεις, ενώ αφορούν αποκλειστικά την συμπεριφορά μονού πασσάλου σε δίστρωτο σχηματισμό. Το ελατηριωτό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και η εδαφική τομή που μελετώνται, φαίνονται στις Εικόνες 1.10 και 1.11. Αξίζει να σημειωθεί ακόμη πως οι σχέσεις αυτές αφορούν σταθερές επιταχύνσεις, ενώ παρατηρήθηκε πως η απόκριση σε επιταχυνσιογραφήματα (πραγματικά ή ιδεατά) ήταν η ίδια, αλλά σε μικρότερη κλίμακα.

Στην Εικόνα 1.12 φαίνεται ένα παράδειγμα της προηγούμενης παρατήρησης, όπου χρησιμοποιήθηκαν οκτώ πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα και ένα ακόμη ιδεατό ($a_{max} = 1 \text{ m/s}^2$) σε πάσσαλο διαμέτρου $d = 1.3 \text{ m}$, άστρεπτης κεφαλής και μήκους $L = 15.5 \text{ m}$, ο οποίος διαπερνά στρώμα αργίλου πάχους $H_1 = 9.5 \text{ m}$ και καταλήγει σε βάθος 6 m εντός δεύτερου στρώματος πυκνής άμμου. Αξιοποιώντας τα δεδομένα, οι Nikolaou & Gazetas επιχείρησαν να δώσουν μια σχέση μεταξύ των μέγιστων ροπών στα πεδία ορισμού του χρόνου και των συχνοτήτων, που είναι της μορφής:

$$\max M(t) = \eta \max M(\omega) \quad (1.18)$$

Στην παραπάνω σχέση η $M(t)$ αποτελεί την τιμή της ροπής που προκύπτει μέσω επιταχυνσιογραφήματος, ενώ τη $M(\omega)$ είναι η τιμή της ροπής που προκύπτει από απόκριση σε σταθερή επιτάχυνση, κυρίως στη συχνότητα συντονισμού του εδαφικού μοντέλου. Επομένως αυτός ο συντελεστής απομείωσης της ροπής «συχνοτήτων σε χρόνο» λαμβάνει τιμές από 0,15 έως 0,50, ανάλογα με:

- Τη διάρκεια του επιταχυνσιογραφήματος, σε επίπεδο κύκλων φόρτισης (N_{cycles})
- Την σχέση των συχνοτήτων μεταξύ του επιταχυνσιογραφήματος και της συνάρτησης μεταφοράς της ροπής του πασσάλου. Απλούστερα αυτή η σχέση εκφράζεται μέσω του λόγου T_p/T_s (επικρατούσα περίοδος σεισμού/ περίοδος συντονισμού του εδάφους)
- Το λόγο $maxM(T)/M(T)$, που έχει άμεση σχέση με την ενεργή απόσβεση του συστήματος πασσάλου και εδάφους

Συγκεντρωτικά λοιπόν, ισχύει η αναλογία:

$$\eta = \eta(N_{cycles}, \frac{T_p}{T_s}, \xi_{eff}) \quad (1.19)$$

Η καταμέτρηση των ποσοτήτων N_{cycles} και T_p γίνεται με την εισαγωγή σχετικών σεισμικών δεδομένων, όπως τα επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των κινηματικών ροπών που φαίνονται στον Πίνακα 1. Στην Εικόνα 1.13 βλέπουμε το προτεινόμενο διάγραμμα για την απομείωση της μέγιστης ροπής λόγω μεταφοράς από το πεδίο των συχνοτήτων στο πεδίο του χρόνου. Ο συντελεστής απομείωσης η σχεδιάζεται συναρτήσει του αριθμού των κύκλων N_{cycles} , ενώ θεωρείται απόσβεση $\xi_{eff} = 10\%$.

Ωστόσο παρατηρώντας το διάγραμμα βλέπει κανείς πως αυξανόμενων των αριθμών των κύκλων και όσο η περίοδος της φόρτισης πλησιάζει την ιδιοπερίοδο του εδάφους, έχουμε αύξηση του συντελεστή η . Φαίνεται πως η αποκλειστική αύξηση των αριθμών των κύκλων, μακριά από το συντονισμό, δεν επιφέρει ουσιαστική αλλαγή στον απομειωτικό συντελεστή (Nikolaou & Gazetas, 1997). Για το λόγο αυτό, κατά τον σχεδιασμό του διαγράμματος, λήφθηκε υπόψη το φαινόμενο αυτό και αξιοποιήθηκαν σεισμικά δεδομένα τόσο κοντά στο συντονισμό, όσο και εκτός συντονισμού (σημ. Συντονισμός θεωρείται όταν η ιδιοπερίοδος του εδάφους είναι εντός του εύρους των κυρίαρχων περιόδων της φόρτισης).

1.6.2 Στατική προσέγγιση κατά Sica, Mylonakis, & Simonelli (2011)

Ακόμη μια σχέση για την εκτίμηση της κινηματικής ροπής στη διεπιφάνεια δύο εδαφικών στρώσεων αναπτύχθηκε από Mylonakis (2001) σε σεισμική φόρτιση χαμηλής συχνότητας ($\omega \rightarrow 0$). Η κινηματική ροπή λαμβάνει υπόψη μια παράμετρο «μεταδοτικότητας παραμορφώσεων» της μορφής ε_p/γ_1 , το λόγο δηλαδή της

μέγιστης παραμόρφωσης του πασσάλου διά τη διατμητική παραμόρφωση της διεπιφάνειας του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο. Η αναλυτική λύση είναι:

$$\left(\frac{\varepsilon_p}{\gamma_1}\right)_{\omega=0} = \frac{1}{2c^4} (c^2 - c + 1) \left(\frac{h_1}{d}\right)^{-1} \left\{ \left[3 \left(\frac{k_1}{E_p}\right)^{1/4} \left(\frac{h_1}{d}\right) - 1 \right] c(c-1) - 1 \right\} \quad (1.20)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ισχύει $c = (G_2/G_1)^{1/4}$ για τη διαφορά των μέτρων δυσκαμψίας στις δύο εδαφικές στρώσεις, (h_1/d) είναι ο λόγος έμπηξης του πασσάλου, και k_1 η παράμετρος του προσομοιώματος Winkler της άνω στρώσης. Επομένως, η κινηματική ροπή λαμβάνει τη μορφή:

$$M(t)_{max} = \frac{2E_p I}{d} \left(\frac{\varepsilon_p}{\gamma_1}\right)_{\omega=0} (\gamma_1)_{\omega=0} \Phi_1 \quad (1.21)$$

$$\Phi_1 = \frac{M(t)_{max}}{M_{static}} \quad (1.22)$$

Η τιμή Φ_1 λειτουργεί ως συντελεστής ενίσχυσης ή εξασθένησης ώστε να «μετατρέψει» τη ροπή που υπολογίστηκε με στατικές συνθήκες σε ροπή στο πεδίο ορισμού του χρόνου. Στην Εικόνα 1.14 μπορούμε να δούμε τις κινηματικές ροπές που δημιουργούνται στην διεπιφάνεια δύο εδαφικών στρώσεων συναρτήσει των συχνοτήτων της εκάστοτε διέγερσης, η οποία ακολουθεί τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 1.2. Παρατηρεί κανείς πως στο μεγαλύτερο μέρος του διαγράμματος της προηγούμενης εικόνας οι κινηματικές ροπές συναρτήσει των συχνοτήτων είναι μικρότερες από τη (στατική) ροπή M_{static} που δημιουργείται για μηδενική συχνότητα.

Ο λόγος που παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο είναι οι μεγάλες κυρίαρχες συχνότητες των επιταχυνσιογραφημάτων που επιβλήθηκαν (4 – 8 Hz-Πίνακας 1.3) συγκριτικά με την ιδιοπερίοδο του εδάφους που μελετήθηκε ($f_1 = 1,6$ Hz). Στην Εικόνα 1.15, που αποτελεί μια πιο κοντινή μορφή της Εικόνας 1.14 αντιλαμβανόμαστε καλύτερα την φύση της παραμέτρου Φ_1 . Μάλιστα φαίνεται και ο συντελεστής η που αναλύθηκε προηγουμένως, όπως είχε προταθεί από Nikolaou & Gazetas (1997), που είναι της μορφής:

$$\eta = \frac{M(t)_{max}}{M_{resonance}} \quad (1.23)$$

Έπειτα από ανάλυση με γραμμική παλινδρόμηση για τις παραμέτρους η και Φ_1 , στην Εικόνα 1.16 φαίνονται τόσο οι μέσες τιμές που προκύπτουν, όσο και τα άνω και κάτω όρια. Τα όρια προέκυψαν με προσθαφαίρεση της τυπικής απόκλισης σ αντίστοιχα στον μέσο όρο των δειγμάτων. Δεχόμενοι την μέση τιμή που προέκυψε, καταλήγουμε στις σχέσεις (Sica, Mylonakis, & Simonelli, 2011):

$$\eta = 0,68 \left(\frac{f_{input}}{f_1}\right)^{-1.5} \quad (1.24)$$

$$\Phi_1 = 1,94 \left(\frac{f_{input}}{f_1} \right)^{-1.3} \quad (1.25)$$

όπου ισχύουν για μακρύ πάσσαλο και λόγο συχνοτήτων $f_{input}/f_1 > 1,5$. Όταν $f_{input}/f_1 \approx 1$, τότε τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, ενώ γενικά σε συνθήκες μακριά από το συντονισμό, όπου λόγος f_{input}/f_1 έχει αυξητική τάση, οι τιμές των η και Φ_1 τείνουν να μειωθούν. Σημειώνεται πως στο εύρος συχνοτήτων πολύ κοντά στο συντονισμό, η απόκριση εξαρτάται από τον αριθμό των κύκλων (Νικολαου, Mylonakis, Gazetas, & Tazoh, 2001), και οι παραπάνω εξισώσεις αδυνατούν να συμπεριλάβουν το φαινόμενο αυτό. Έτσι, στην Εικόνα 1.16 οι τιμές $0,5 < f_{input}/f_1 < 1,5$ οριοθετούνται από διακεκομμένες γραμμές.

Τέλος, για την στατική διατμητική παραμόρφωση της διεπιφάνειας $(\gamma_1)_{\omega=0}$ στην εξίσωση (1.21), ισχύει:

$$(\gamma_1)_{\omega=0} = \frac{\alpha h_1}{V^2 s_1} \quad (1.26)$$

όπου $\alpha = \alpha_r = \alpha_s$ μία ομοιόμορφη και ψευδοστατική επιτάχυνση που επιβάλλεται στο έδαφος. Ο λόγος αυτός είναι απλός στη χρήση, αφού δεν απαιτεί επιπλέον αναλύσεις ελεύθερου πεδίου. Ωστόσο σημειώνεται ότι η Φ_1 είναι ευαίσθητη σε αλλαγές του λόγου της εξίσωσης (1.26), οι οποίες πολλές φορές δεν είναι εκ των προτέρων γνωστές.

1.6.3 Προσέγγιση κατά Di Laora, Mandolini, & Mylonakis, (2012)

Στην προσέγγιση αυτή, η κινηματική ροπή είναι της μορφής:

$$M(t)_{max} = \frac{2E_p l}{d} \left(\frac{\varepsilon_p}{\gamma_1} \right)_{st} (\gamma_1)_{dyn} \Phi_2 \quad (1.27)$$

όπου η διατμητική παραμόρφωση υπό συνθήκες μηδενικής συχνότητας $(\gamma_1)_{\omega=0}$ της προηγούμενης έκφρασης (1.26) έχει αντικατασταθεί από την αντίστοιχη δυναμική της μορφή $(\gamma_1)_{dyn}$. Η τιμή $(\varepsilon_p/\gamma_1)_{st}$ μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\varepsilon_p = \chi \gamma_1 \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h_1}{d} \right)^{-1} + \left(\frac{E_p}{E_1} \right)^{-0.25} (c - 1)^{0.5} \right] \quad (1.28)$$

Η παραπάνω εξίσωση των (Di Laora, Mandolini, & Mylonakis, 2012) επιχειρεί να συμπεριλάβει το πρόσημο της κινηματικής ροπής στη διεπιφάνεια και να «διευρύνει» το πεδίο εφαρμογής της σχέσης. Η σχέση (1.27) βασίστηκε σε πολυάριθμες αναλύσεις (FE μέσω ANSYS), χρησιμοποιώντας έξι μοναδιαία επιταχυνσιογραφήματα και πολλές εναλλαγές παραμέτρων, που δεν αναλύονται χάριν απλότητας. Ο μειωτικός συντελεστής $\chi = 0,93$ πλησιάζει τη μονάδα και βρέθηκε μέσω του διαγράμματος της Εικόνας 1.17, ωστόσο δεν είναι τεράστιας πρακτικής σημασίας.

Αφότου τα αποτελέσματα αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης, βρέθηκε ότι η Φ_2 λαμβάνει τις τιμές 1 – 1,5. Στην Εικόνα 1.18 μπορούμε να παρατηρήσουμε πως η Φ_2 έχει αδύναμη σχετικά εξάρτηση από τη συχνότητα. Ωστόσο η εξάρτηση αυτή έχει συμπεριληφθεί μέσω της $(\gamma_1)_{dyn}$, η οποία υπολογίζεται μέσω δυναμικής ανάλυσης στο ελεύθερο πεδίο απουσία πασσάλων. Σε γενικές γραμμές, η τιμή της Φ_2 που προτείνεται είναι 1,25 και εύκολα μπορεί κανείς να εκτιμήσει την κινηματική ροπή στη διεπιφάνεια από την εξίσωση (1.27).

1.7 Συμπεράσματα από τη μελέτη της Κινηματικής Επιπόνησης πασσάλου

Εκτός από τις βασικές προαναφερθείσες σχέσεις στις οποίες και θα βασιστεί η ανάλυση της συγκεκριμένης εργασίας και ορισμένα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτές και παρουσιάστηκαν προηγουμένως, αξίζει να αναφερθούμε σε μερικά ακόμη συμπεράσματα που έχουν προκύψει από δημοσιεύσεις και επιχειρούν να καλύψουν ορισμένα κενά στη γνώση μας για το φαινόμενο.

Σύμφωνα με (Nikolaou & Gazetas, 1997) η κινηματική ροπή πασσάλου εξαρτάται από:

- Τις **συνοριακές συνθήκες στην κορυφή** του πασσάλου
- Την **εγγύτητα της συχνότητας διέγερσης στην θεμελιώδη (πρώτη) ιδιοσυχνότητα** του εδαφικού σχηματισμού. Σύμφωνα μάλιστα με τους (Sica, Mylonakis, & Simonelli, 2011) υπάρχει μία τιμή-κατώφλι του λόγου f_1/f_{input} που καθορίζει την σημασία -ή μη- του κινηματικού φαινομένου. Οι τελευταίοι επίσης απέδειξαν στη σχετική δημοσίευση ότι ο συντελεστής εδαφικής απόσβεσης επηρεάζει το μέγεθος της κινηματικής ροπής, με πιο έντονη την επιρροή των μικρών αποσβέσεων, μικρότερων από 10%.
- Το **σχετικό βάθος H_1/la** , όπου H_1 το βάθος του υπερκείμενου στρώματος και la το ενεργό μήκος του πασσάλου που οριοθετεί εύκαμπτους και δύσκαμπτους πασσάλους και για το οποίο προτείνεται η σχέση $la = x d (E_p/E_{s1})^{0,25}$, $x \approx 1,75$
- Τη **διαφορά της δυσκαμψίας μεταξύ των δύο διαδοχικών στρωμάτων** που τέμνει ο πάσσαλος. Η διαφορά αυτή εκφράζεται μέσω του λόγου ταχυτήτων διάδοσης διατμητικών -S κυμάτων, V_{s1}/V_{s2} . Όπως αποδείχτηκε και στην δημοσίευση των (Sica, Mylonakis, & Simonelli, 2011) η κινηματική ροπή στη διεπιφάνεια αυξάνεται με την μείωση του λόγου V_{s1}/V_{s2} από 1/2 σε 1/4.

- Τη **δυσκαμψία του πασσάλου σε σχέση με το έδαφος**, δηλαδή όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος E_p/E_{s1} , τόσο μεγαλύτερη είναι η αναπτυσσόμενη κινηματική ροπή.

Επίσης οι (Nikolaou & Gazetas, 1997) αναφέρουν ότι οι κινηματικές ροπές στη διεπιφάνεια για πάσσαλο ελευθέρως στρεπτής και άστρεπτης κεφαλής είναι σχεδόν όμοιες εκτός από την περίπτωση «κοντού» και δύσκαμπτου (rigid) πασσάλου, δηλαδή όταν $H_1 < la$. Όταν συμβαίνει αυτό σε πάσσαλο άστρεπτης κεφαλής η κινηματική ροπή είναι μεγαλύτερη στην κεφαλή από τη ροπή στη διεπιφάνεια. Τέλος αναφέρουν ότι οι συναρτήσεις μεταφοράς της κινηματικής ροπής εμφανίζουν απότομη πτώση όσο απομακρυνόμαστε από το συντονισμό. Συγκεκριμένα απέδειξαν ότι ο λόγος $M_{resonance}/M_{static}$ ακολουθεί το συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης της επιτάχυνσης στο ελεύθερο πεδίο.

Δύο ακόμα δημοσιεύσεις συμβάλλουν στην επέκταση των γνώσεων μας σχετικά με το φαινόμενο της κινηματικής αλληλεπίδρασης. Η πρώτη των Gerolymos & Gazetas (2008) προχωρά στην περιγραφή σχέσεων για την τέμνουσα στη διεπιφάνεια και την κινηματική ροπή στην κεφαλή. Η τελευταία μπορεί να αποδειχθεί κρισιμότερη για το σχεδιασμό δεδομένου ότι στη θέση της σύνδεσης με τον κεφαλόδεσμο η ροπή εξ' ανωδομής είναι μέγιστη και σε αυτήν προστίθεται και η κινηματική ροπή, πόσο μάλλον στις περιπτώσεις που η κινηματική ροπή στη σύνδεση με τον κεφαλόδεσμο είναι μεγαλύτερη από αυτή στη διεπιφάνεια (όταν αυτή εμφανίζεται σε μικρό βάθος). Η δε τέμνουσα καθορίζει το ποσοστό εγκάρσιας όπλισης και η δυνατότητα ακριβούς υπολογισμού της πρόσθετης τέμνουσας δύναμης λόγω κινηματικών φαινομένων είναι πολύ σημαντική. Στην εν λόγω δημοσίευση γίνεται αναφορά και στην περίπτωση εδαφικού προφίλ «ανεστραμμένης» δυστημσίας, κατά την οποία η κινηματική επιπόνηση είναι πιο έντονη. Η δεύτερη των Di Laora, Mandolini, & Mylonakis, ανάμεσα σε άλλα, συνδέει το μέγεθος της κινηματικής ροπής με τη διάμετρο του πασσάλου και μάλιστα αναπτύσσει σχέσεις που οριοθετούν το εύρος των επιτρεπτών διαμέτρων των πασσάλων.

Ένα πολύ σημαντικό κοινό χαρακτηριστικό των προαναφερθέντων συμπερασμάτων είναι πως αναφέρονται σε μονό πάσσαλο, ενώ δεν περιλαμβάνουν οδηγίες για τη χρήση των αναλυτικών σχέσεων ή όχι σε μια πασσαλομάδα. Καθώς σε μεγάλο αριθμό έργων χρησιμοποιούνται ομάδες πασσάλων, θα ήταν χρήσιμο να μπορεί να εκτιμηθεί η κινηματική επιπόνηση των πασσάλων που ανήκουν σε ομάδα. Κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικά δύσκολο, καθώς η δυναμική απόκριση ομάδων πασσάλων εντός εδάφους δυο στρώσεων έχει πολύπλοκο μηχανισμό, ενώ εξαρτάται και από τη «φυσική» του εκάστοτε προβλήματος, που με τη σειρά της εξαρτάται από τη γεωμετρία και τις παραμέτρους των υλικών. Στα επόμενα κεφάλαια επιχειρείται η εμβάθυνση στα παραπάνω φαινόμενα, μέσω τρισδιάστατων αναλύσεων για διάφορες περιπτώσεις εδαφών και μεγεθών πασσαλο-ομάδων.

1.8 Αλληλεπίδραση πασσάλων ομάδας

Στις περισσότερες περιπτώσεις βαθιών θεμελιώσεων γίνεται χρήση περισσότερων του ενός πασσάλου, δηλαδή μιας ομάδας πασσάλων. Η δράση της ομάδας αυτής, πολλές φορές εκτός από τη μετάδοση των φορτίων σε βαθύτερα στρώματα συντελεί και στη βελτίωση του περιβάλλοντος του πασσάλου εδάφους. Όπως, όμως έχει παρατηρηθεί στην πράξη, η συμβολή ενός πασσάλου στη φέρουσα ικανότητα της ομάδας, η αποδοτικότητα δηλαδή, επηρεάζεται από την ύπαρξη των γειτονικών πασσάλων, με αποτέλεσμα το οριακό εδαφικό φορτίο της ομάδας να μην αντιστοιχεί στο άθροισμα των οριακών φορτίων των μεμονωμένων πασσάλων. Δηλαδή $P_{gu} \neq n \Sigma P_u$, όπου n ο αριθμός των πασσάλων στην ομάδα. Η επιρροή αυτή συνίσταται στη μείωση του οριακού φορτίου εδάφους του μεμονωμένου πασσάλου μέσα στην ομάδα, με συνέπεια να μην θεωρείται πάντα ως βέλτιστη λύση μία ομάδα με μεγάλο αριθμό πασσάλων.

Έτσι με τον όρο «αποδοτικότητα» που χρησιμοποιείται συχνά στην περίπτωση ομάδας πασσάλων, ορίζεται ο λόγος του μέσου οριακού φορτίου ανά πάσσαλο στην ομάδα κατά την «θραύση» της ομάδας, προς το οριακό φορτίο εδάφους ενός αντίστοιχου μονού πασσάλου. Επίσης και η καθίζηση μιας ομάδας πασσάλων διαφέρει σημαντικά από την καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου, υπό φορτίο ίσο προς το μέσο φορτίο επί των πασσάλων της ομάδας. Ανάλογες παρατηρήσεις ισχύουν και για την περίπτωση αναλήψεως οριζοντίων φορτίων.

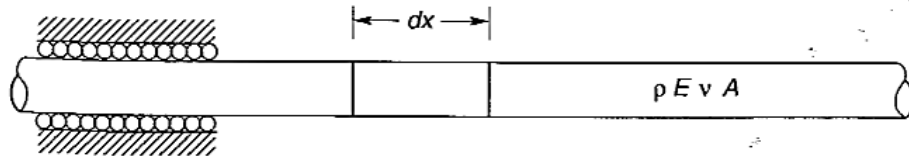
Για το σωστό σχεδιασμό μιας ομάδας πασσάλων, είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός αλληλεπιδράσεως τόσο των πασσάλων μεταξύ τους, όσο και της ομάδας με το περιβάλλον έδαφος. Όσον αφορά τον πρώτο έχει διερευνηθεί κυρίως με πειραματικές διατάξεις σε ομοιώματα πασσάλων μικρών διαστάσεων. Αντίστοιχα στοιχεία από πραγματικές διατάξεις πασσάλων είναι περιορισμένα, λόγω της μεγάλης κλίμακας και του κόστους τέτοιων ερευνών. Γενικά ο σχεδιασμός μιας ομάδας πασσάλων θα πρέπει να περιλαμβάνει τους εξής ελέγχους:

- Κατανομής του συνολικού φορτίου της ομάδας στους πασσάλους για τον προσδιορισμό του πιο επιβαρυσμένου πασσάλου
- Της φέρουσας ικανότητας του εδάφους στην περιοχή επιρροής της ομάδας
- Της καθιζήσεως της ομάδας

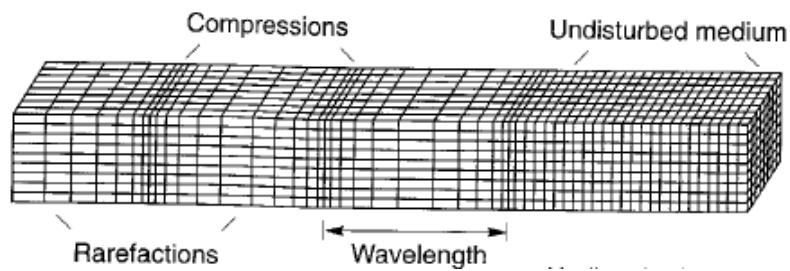
Η συμπεριφορά μιας ομάδας πασσάλων επηρεάζεται σημαντικά μεταξύ άλλων από το είδος και την ποιότητα του περιβάλλοντος εδάφους, από τον τρόπο κατασκευής των πασσάλων και από τον τρόπο σύνδεσης των κεφαλών τους μεταξύ τους (Anagnostopoulos & Papadopoulos, 2011). Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι να επιβεβαιώσει την ύπαρξη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης ομάδας πασσάλων

στην περίπτωση κινηματικής επιπόνησης τους και να διερευνήσει την επίδραση της αξονικής απόστασης των πασσάλων, του τρόπου σύνδεσης των κεφαλών τους, του πλήθους τους και της θέσης τους στο φαινόμενο αυτό.

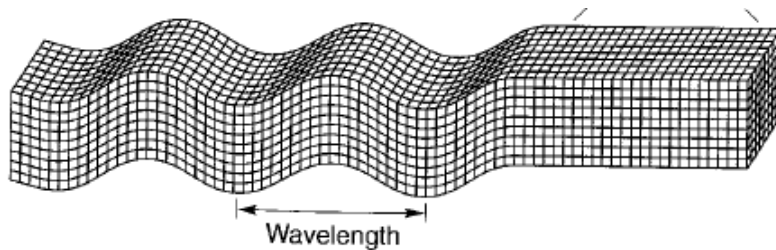
ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 1



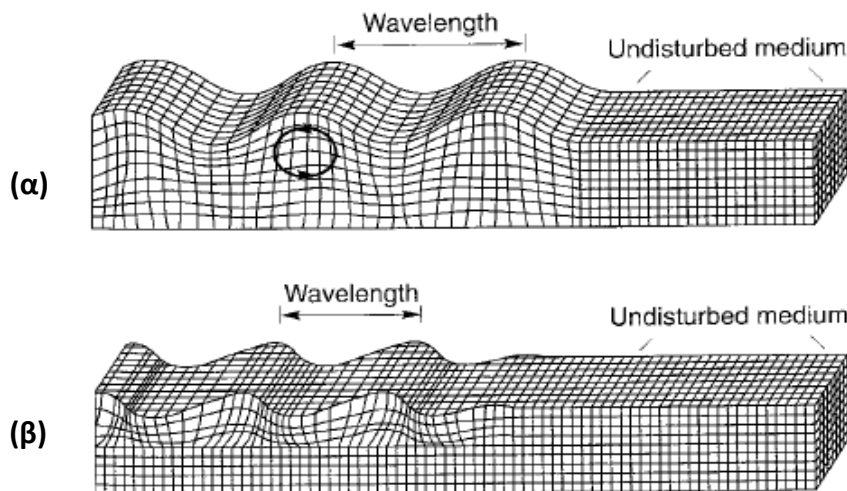
Εικόνα 1.1: Γραμμικώς ελαστική χορδή απείρου μήκους για παραγωγή εξίσωσης μονοδιάστατου κύματος. Η δέσμευση έναντι ακτινικής καταπόνησης παρουσιάζεται μέσω των κυλίσεων (Kramer, 1996)



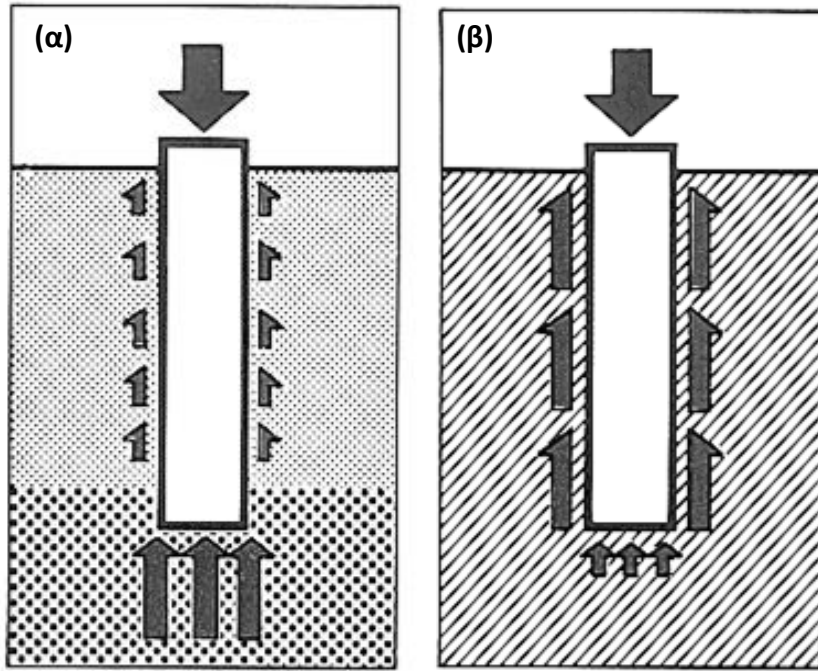
Εικόνα 1.2: Παραμόρφωση του εδάφους λόγω διάδοσης διαμήκους κύματος P (Kramer, 1996)



Εικόνα 1.3: Παραμόρφωση του εδάφους λόγω διάδοσης επιφανειακού κύματος SV (Kramer, 1996)



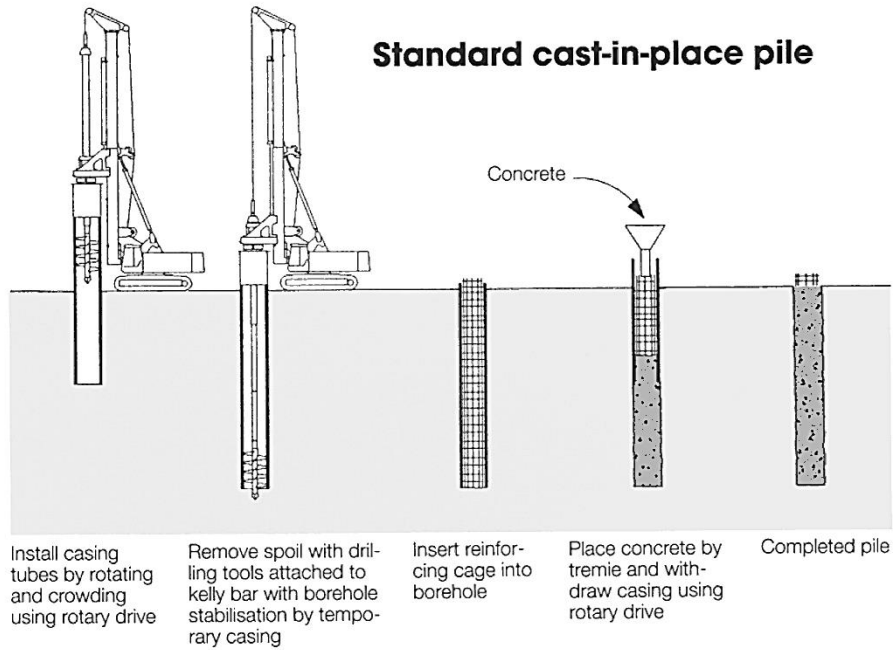
Εικόνα 1.4: Παραμορφώσεις που δημιουργούνται από (α) επιφανειακά κύματα Rayleigh και (β) επιφανειακά κύματα Love (Kramer, 1996)



Εικόνα 1.5: Οριακό φορτίο πασσάλου κατά τη διατμητική αστοχία για (α) πάσσαλο αιχμής και (β) πάσσαλο τριβής



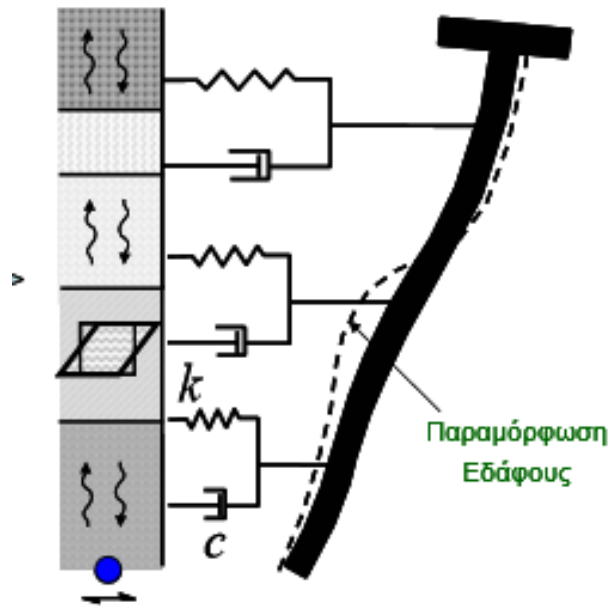
Εικόνα 1.6: Εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι (μικρής εκτοπίσεως- ανοικτοί σωλήνες)



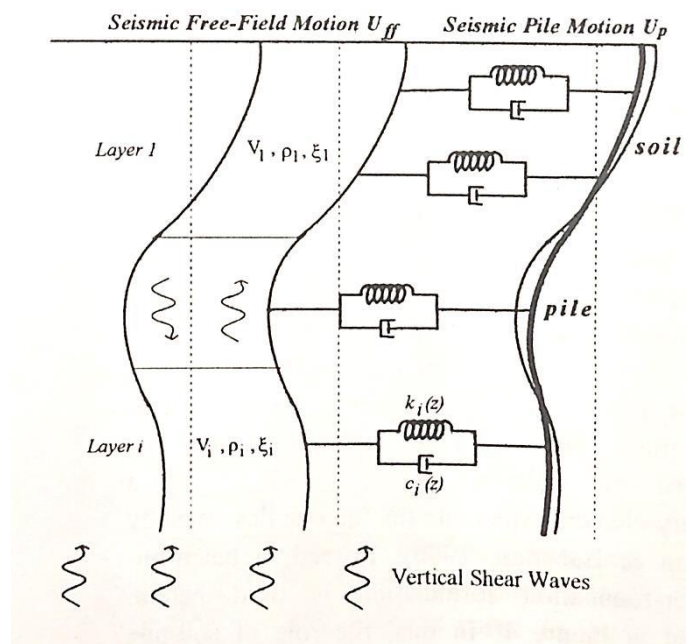
Εικόνα 1.7: Κατασκευή συνήθων έγχυτων πασσάλων με σκυροδέτηση μετά την τοποθέτηση του οπλισμού και ταυτόχρονη ανάσχυση της σωλήνωσης



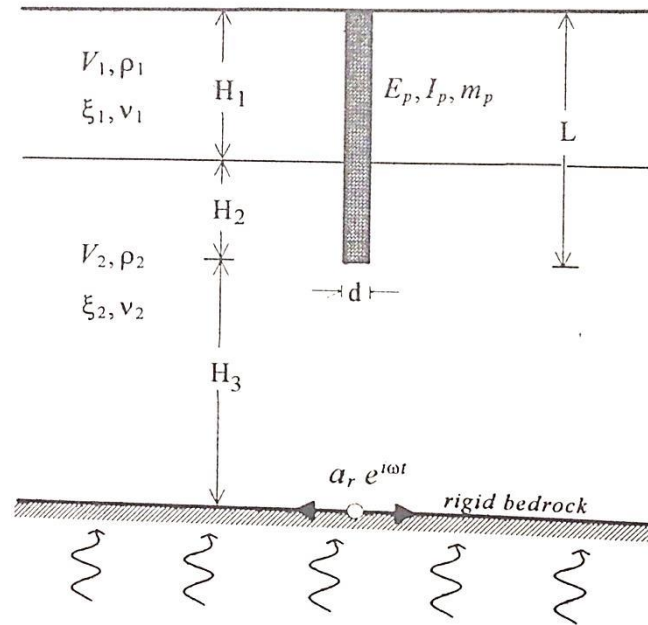
Εικόνα 1.8: Αστοχία πασσάλων ($L = 10 \text{ m}$, $d = 0.3 \text{ m}$) σε κινηματική επιπόνηση στον σεισμό της Niigata (1964)



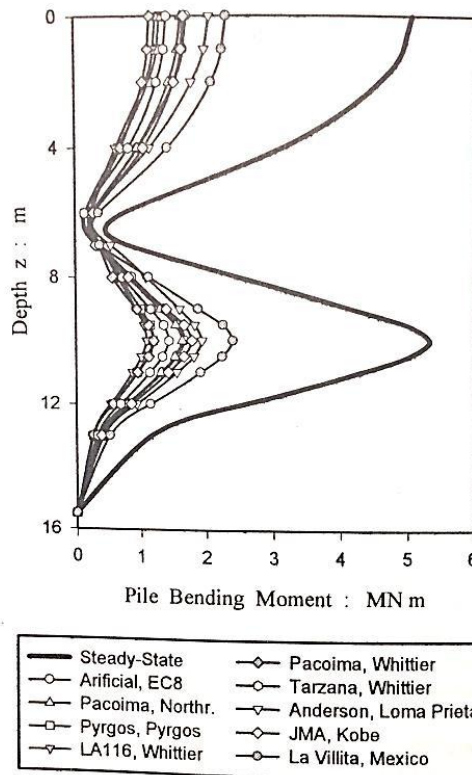
Εικόνα 1.9: Το ελατηριωτό προσομοίωμα τύπου Winkler (BDWF) (Gerolymos & Gazetas, 2002)



Εικόνα 1.10: Το ελατηριωτό προσομοίωμα τύπου Winkler (BDWF) που χρησιμοποιήθηκε (Nikolaou & Gazetas, 1997)



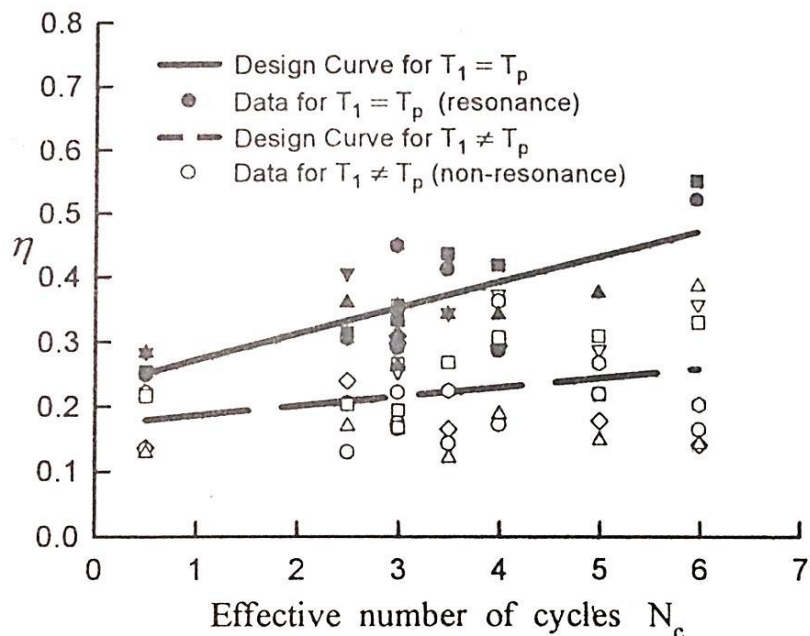
Εικόνα 1.11: Η εδαφική τομή που μελετήθηκε (Nikolaou & Gazetas, 1997)



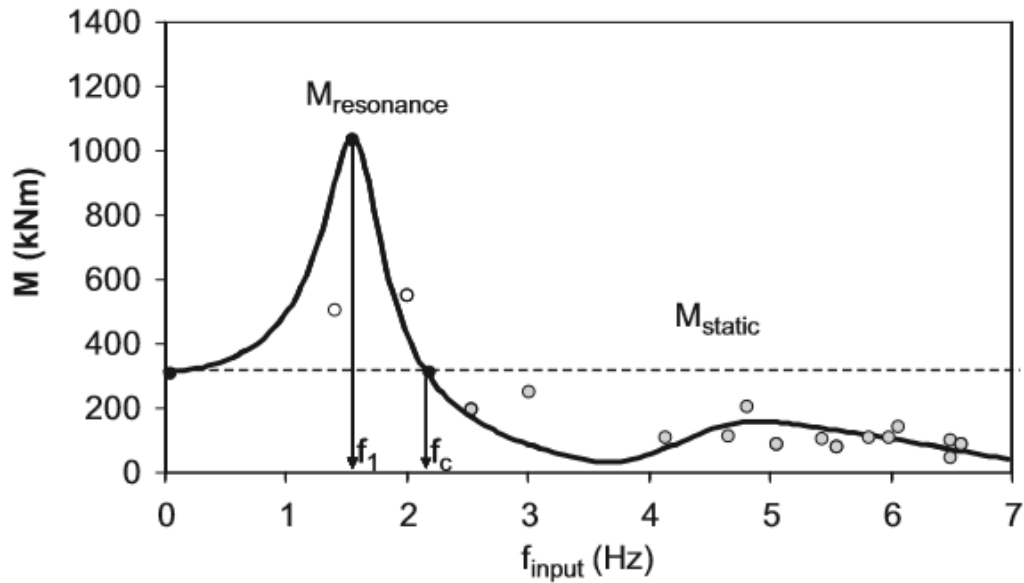
Εικόνα 1.12: Κατανομή με το βάθος των μέγιστων ροπών με σεισμό σταθερής επιτάχυνσης και της περιβάλλουσας των ροπών με σεισμό επιταχυνσιογραφημάτων μοναδιαίας μέγιστης επιτάχυνσης (του Πίνακα 1). $E_p=25$ GPa, $d=1.3$ m, $L=15.5$ m, $\rho=2,5$ Mg/m³. Συντονισμός δίστρωτου σχηματισμού για $T=0,52$ sec, $H_{tot}=30$ m, $V_{s1}=80$ m/sec, $H_1=9.5$, $V_{s2}=330$ m/sec, $H_2=6$ m, $H_3=14.5$ m (Nikolaou & Gazetas, 1997).

Earthquake	Record	PGA (g)	N_c	T_p (sec)
Artificial	AASHTO S1 soil	0.12	>10	0.1-0.5
Northridge 1994	Pacoima downstr.	0.42	2.5	0.15-0.5
Pyrgos 1993	Pyrgos trans.	0.45	0.5	0.12-0.45
Whittier 1987	LA 116 Ch. 1	0.38	6	0.1-0.25
	Pacoima Ch. 1	0.15	3.5	0.1-0.3
	Tarzana Ch. 3	0.40	5	0.3-0.4
Loma Prieta 1989	Anderson downstr.	0.24	4	0.15-0.3
Kobe 1995	Kobe JMA	0.82	3	0.3-0.9
Mexico 1985	La Villita 0°	0.12	3	0.5-0.6

Πίνακας 1.1.1: Οι εδαφικές καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις με επιταχυνσιογραφήματα, όπου N_c - ενεργός αριθμός κύκλων της καταγραφής, T_p -εύρος κυρίαρχων περιόδων της καταγραφής, PGA- η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (Nikolaou & Gazetas, 1997).



Εικόνα 1.13: Προτεινόμενο διάγραμμα για την απομείωση της μέγιστης ροπής από το πεδίο συχνοτήτων στο πεδίο του χρόνου, συναρτήσει του αριθμού των κύκλων N_c και των συνθηκών συντονισμού (Nikolaou & Gazetas, 1997).



Εικόνα 1.14: Κινηματικές ροπές στην διεπιφάνεια δύο εδαφικών στρώσεων συναρτήσει των συχνοτήτων της διέγερσης του Πίνακα 1.2

Scheme	h_1 (m)	h_2 (m)	V_{s1} (m/s)	V_{s2}/V_{s1}	ID parameter case	$V_{s, 30}$ (m/s)	Soil type (EC8)	E_p/E_{s1}	D	f_1 (Hz)	f_1/f_p range	
S1	15	15	50	2	S1-1	66	D	1880	—	0.7	0.03–0.42	
				3	S1-2	75	D			0.8	0.03–0.49	
				4	S1-3	80	D			0.8	0.03–0.50	
			100	2	S1-4	133	D	470	—	1.3	0.05–0.86	
				3	S1-5	150	D			1.5	0.06–0.99	
				4	S1-6	160	D			1.6	0.06–1.03	
			150	2	S1-7	200	C	209	—	2.0	0.08–1.28	
				2.7	S1-8	218	C			2.2	0.09–1.42	
				4	S1-9	240	C			2.4	0.10–1.54	
S2	15	30	100	2	S2-10	133	D	470	—	1.1	0.04–0.67	
				3	S2-11	150	D			1.3	0.05–0.86	
				4	S2-12	160	D			1.5	0.06–0.97	
			150	2	S2-13	200	C	209	2%	1.6	0.06–1.00	
				2.7	S2-14	218	C			10%	1.9	0.08–1.22
				4	S2-15	240	C			20%	2.3	0.09–1.47
S3	15	6	100	2	S3-16	160	D	470	—	1.5	0.06–0.99	
				3	S3-17	169	D			1.6	0.07–1.05	
				4	S3-18	174	D			1.7	0.07–1.08	
			150	2	S3-19	235	C	209	—	2.3	0.09–1.47	
				2.7	S3-20	245	C			2.4	0.10–1.53	
				4	S3-21	255	C			2.5	0.10–1.58	
S4	5	25	100	2	S4-22	171	D	—	—	1.6	0.06–1.03	
				3	S4-23	225	C			2.5	0.10–1.57	
				4	S4-24	267	C			3.2	0.13–2.05	
S5	10	20	100	2	S5-25	150	D	470	—	1.6	0.06–1.02	
				3	S5-26	180	C/D			2.0	0.08–1.28	
				4	S5-27	200	C			2.3	0.09–1.45	
S6	19	11	100	2	S6-28	122	D	—	—	1.2	0.05–0.74	
				3	S6-29	132	D			1.3	0.05–0.80	
				4	S6-30	138	D			1.3	0.05–0.84	

Πίνακας 1.2: Οι παράμετροι του προβλήματος που μελετήθηκε (Sica, Mylonakis, & Simonelli, 2011) για $V_1/V_2=0.4$, $L/d=33$, $V_{rock}=1000$ m/s.

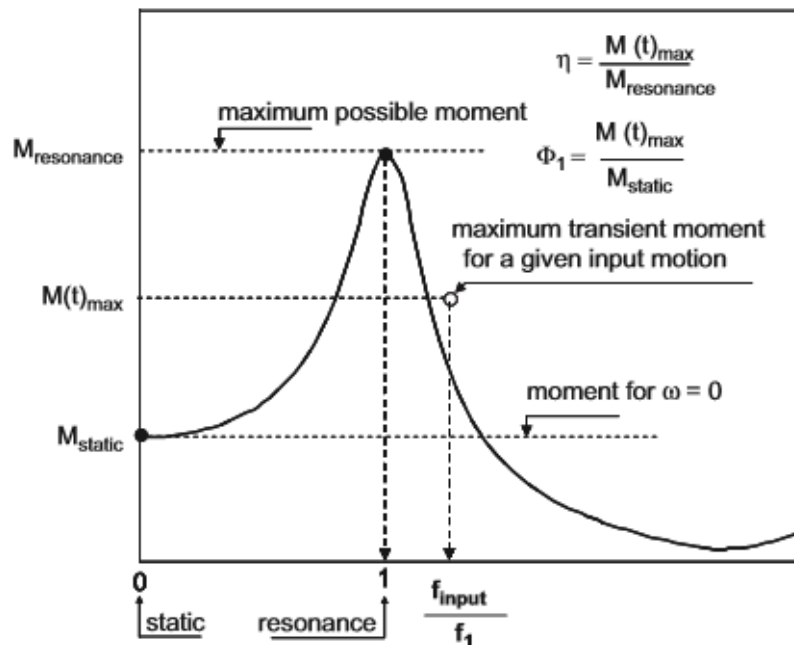
#	Record label	Station name	Earthquake	Date (d/m/yr)	Magnitude (M_w)	Epicentral distance (km)	PGA (g)	f_p (Hz) ^b	f_m (Hz) ^c	Soil type
1	A-TMZ270	Tolmezzo-Diga Ambiesta	Friuli	06/05/76	6.5	23	0.32	1.6	2.0	A
2	A-TMZ000	Tolmezzo-Diga Ambiesta	Friuli	06/05/76	6.5	23	0.36	3.8	2.5	A
3	A-STU270	Sturno	Campano Lucano	23/11/80	6.9	32	0.32	5.0	1.2	A
4	A-STU000	Sturno	Campano Lucano	23/11/80	6.9	32	0.23	2.6	1.5	A
5	A-AAL018	Assisi-Stallone	Umbria Marche	26/09/97	6	21	0.19	3.1	3.0	A
6	E-NCB090	Nocera Umbra-Biscontini	Umbria Marche ^a	06/10/97	5.5	10	0.38	8.3	5.8	A
7	E-NCB000	Nocera Umbra-Biscontini	Umbria Marche ^a	06/10/97	5.5	10	0.26	7.1	6.1	A
8	R-NCB090	Nocera Umbra-Biscontini	Umbria Marche ^a	03/04/98	5.1	11	0.31	5.6	5.6	A
9	J-BCT000	Borgo-Cerreto Torre	Umbria Marche ^a	14/10/97	5.6	12	0.34	10.0	6.0	A
10	J-BCT090	Borgo-Cerreto Torre	Umbria Marche ^a	14/10/97	5.6	12	0.33	6.3	4.8	A
11	E-AAL108	Assisi-Stallone	Umbria Marche ^a	06/10/97	5.5	20	0.19	4.5	4.1	A
12	B-BCT000	Borgo-Cerreto Torre	Umbria Marche	26/09/97	5.7	23	0.18	12.5	6.5	A
13	B-BCT090	Borgo-Cerreto Torre	Umbria Marche	26/09/97	5.7	23	0.19	8.3	5.1	A
14	TRT000	Tarcento	Friuli ^a	11/09/76	5.3	8	0.21	10.0	4.7	A
15	C-NCB000	Nocera Umbra-Biscontini	Umbria Marche ^a	03/10/97	5.3	8	0.19	25.0	7.8	A
16	C-NCB090	Nocera Umbra-Biscontini	Umbria Marche ^a	03/10/97	5.3	8	0.27	8.3	6.5	A
17	R-NC2090	Nocera Umbra 2	Umbria Marche ^a	03/04/98	5.1	10	0.31	5.6	5.4	A
18	R-NC2000	Nocera Umbra 2	Umbria Marche ^a	03/04/98	5.1	10	0.38	6.3	6.6	A

^a Aftershock.

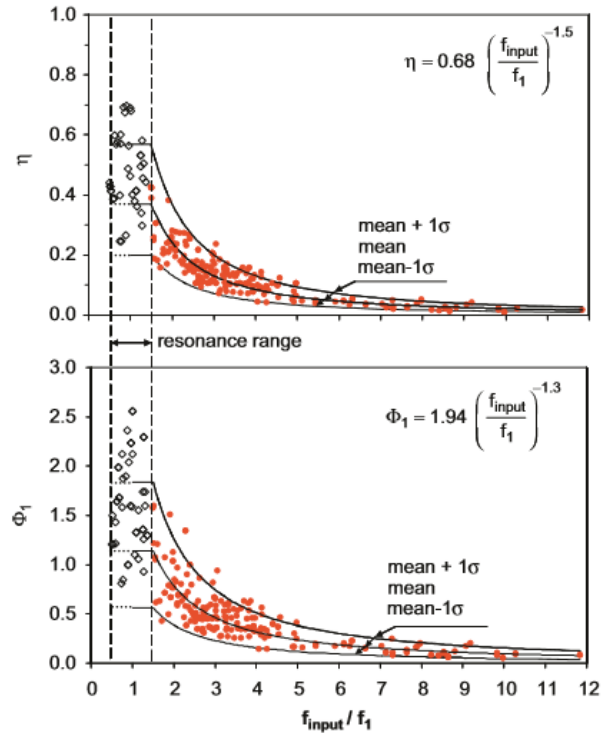
^b Predominant frequency from response spectra.

^c Average frequency according to Rathje et al. [54].

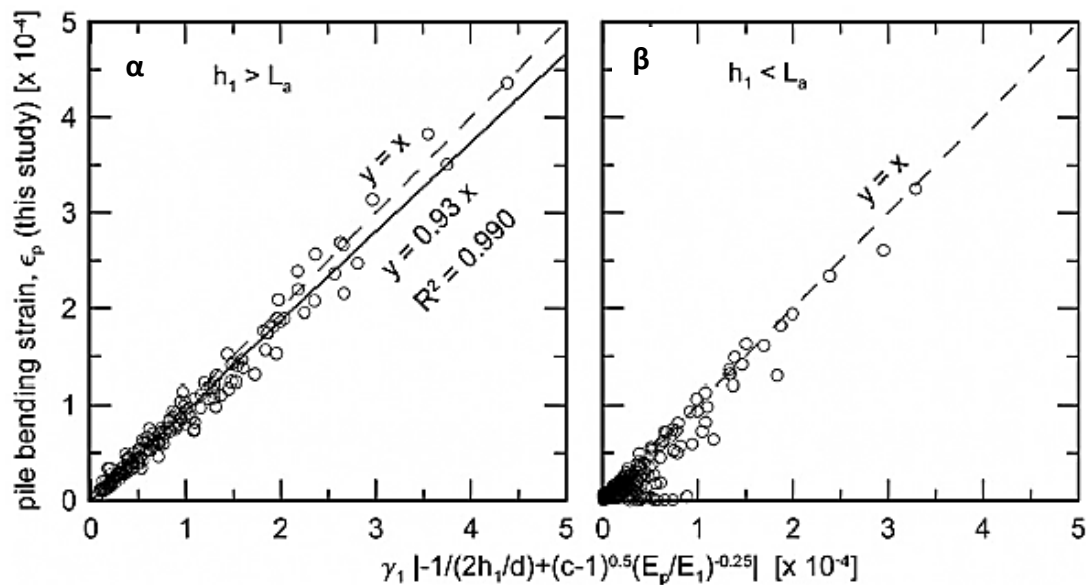
Πίνακας 1.3: Επιταχυνσιογραφήματα που εισήχθησαν στις αναλύσεις (Sica, Mylonakis, & Simonelli, 2011), με αναγωγή σε PGA=0.35 g.\



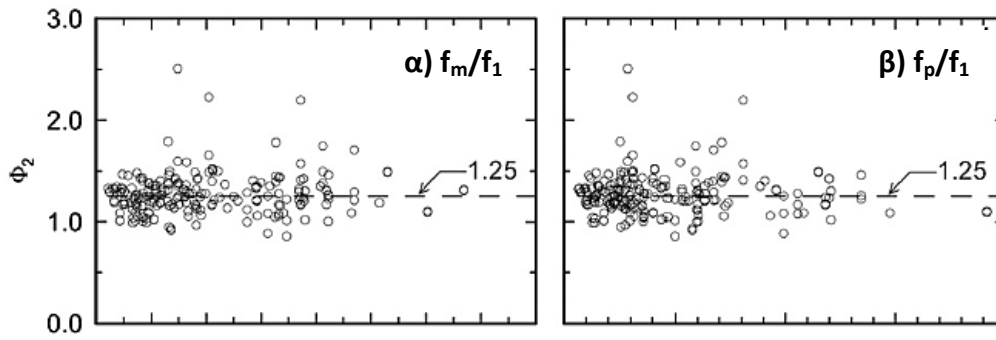
Εικόνα 1.15: Ορισμός συντελεστών απόκρισης η και Φ_1 , για ορισμένο σύστημα εδάφους- πασσάλου



Εικόνα 1.16: Συντελεστές η και Φ_1 συναρτήσει του λόγου συχνοτήτων για διαφορετικούς συνδυασμούς εδάφους-πασάλου και διαφορετικά επιταχυνσιογραφήματα (μόνο περιπτώσεις μακρών πασσάλων) (Sica, Mylonakis, & Simonelli, 2011)



Εικόνα 1.17: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία και της σχέσης (1.28) για α-μεγάλο και β-μικρό βάθος διεπιφάνειας (επιταχυνσιογραφήματα ανηγμένα σε PGA=1 m/s) (Di Laora, Mandolini, & Mylonakis, 2012)



Εικόνα 1.18: Δυναμικοί συντελεστές Φ_2 , συναρτήσει των αδιάστατων συχνοτήτων α) f_m/f_1 και β) f_p/f_1 (Di Laora, Mandolini, & Mylonakis, 2012) για αναλύσεις με μεγάλο βάθος διεπιφάνειας

2 Μέθοδος Ανάλυσης με Πεπερασμένα Στοιχεία Λογισμικό PLAXIS®

2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Στην κατηγορία των μεθόδων επίλυσης προβλημάτων εδαφομηχανικής περιλαμβάνονται μέθοδοι οι οποίες προσπαθούν να ικανοποιήσουν όλες τις θεωρητικές απαιτήσεις, κάνοντας χρήση ρεαλιστικών προσομοιωμάτων συμπεριφοράς εδαφών και οριακών συνθηκών, όσο πιο κοντά στις συνθήκες πεδίου. Εξ' αιτίας της πολυπλοκότητας και της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους, οι μέθοδοι αυτές είναι αριθμητικές από τη φύση τους. Προσεγγίσεις βασισμένες στα πεπερασμένα στοιχεία είναι αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο στη γεωτεχνική μηχανική. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιληπτική περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας του PLAXIS®, του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις της παρούσης εργασίας. Επιχειρείται η αποσαφήνιση ορισμένων τεχνικών και επιστημονικών όρων καθοριστικών τόσο για την ορθή χρήση του λογισμικού, όσο και για την ρεαλιστική προσομοίωση του συγκεκριμένου προβλήματος.

2.2 Μέθοδοι Επίλυσης

Ως βασικό αντικείμενο της Εδαφομηχανικής μπορεί να ορισθεί η μελέτη της αντοχής και των παραμορφώσεων ενός ιδεατού απλοποιημένου υλικού το οποίο παριστάνει το πραγματικό έδαφος με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, κάτω από συνθήκες φόρτισης και συνθήκες στα όρια που ορίζονται από το είδος και τα δεδομένα του κάθε προβλήματος (Βαλαλάς, 1981).

Οι μέθοδοι για την επίλυση των προβλημάτων χωρίζονται στις εξής τρεις ομάδες (Βαλαλάς, 1981):

- Τις αναλυτικές μεθόδους
- Τις αριθμητικές μεθόδους
- Τις εμπειρικές μεθόδους

Οι εμπειρικές μέθοδοι βασίζονται στην παρατήρηση και στη συστηματική μελέτη μεγάλου κατά τεκμήριο αριθμού περιπτώσεων που οδηγούν συχνά με τη βοήθεια

της στατιστικής στην εκτίμηση κάποιας εμπειρικής σχέσεως. Υπάρχουν πολλές ολοκληρωμένες εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού, όπως π.χ. υπολογισμού θεμελιώσεων ή υπολογισμού ωθήσεων. Πολλοί σημαντικοί επιστήμονες υποστηρίζουν ότι οι εμπειρικές μέθοδοι δίνουν ικανοποιητικές απαντήσεις σε πολλά προβλήματα, παρ' όλη την απλότητα και την ευκολία εφαρμογής τους. Όμως πρέπει να προστεθεί ότι για την εφαρμογή τέτοιων σχέσεων και μεθόδων πρέπει να αποδεικνύεται ότι η περίπτωση που μελετάται είναι αντίστοιχη με εκείνες στις οποίες βασίστηκαν οι εμπειρικές σχέσεις (Βαλαλάς, 1981).

Για τις δύο πρώτες μεθόδους μπορούμε να πούμε ότι η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθούν είναι παρόμοια και διαιρείται σε δύο κύρια τμήματα. Στο πρώτο τμήμα γίνεται προσπάθεια για κατανόηση και ανάλυση του φυσικού προβλήματος και στη συνέχεια δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου που παριστάνει κατά το δυνατό καλύτερα το φυσικό πρόβλημα. Το δεύτερο τμήμα αποτελείται από την επίλυση του μαθηματικού προβλήματος που έχει συνήθως τη μορφή μιας ή περισσότερων διαφορικών εξισώσεων ως προς ορισμένες ανεξάρτητες μεταβλητές που συνήθως είναι μια ή περισσότερες από τις διαστάσεις X, Y, Z ή ο χρόνος t .

Η διαφορά των αναλυτικών από τις αριθμητικές μεθόδους βρίσκεται στη λύση του μαθηματικού μέρους, καθώς στις πρώτες χρησιμοποιείται αναλυτική μεθοδολογία, ενώ στις δεύτερες εφαρμόζεται κάποια αριθμητική τεχνική. Οι αναλυτικές λύσεις που έχουν βρεθεί μέχρι σήμερα είναι μόνο για περιορισμένο αριθμό διαφορικών εξισώσεων στις οποίες πρέπει απαραίτητα να καταλήγει το φυσικό πρόβλημα για να υπάρχει αναλυτική λύση.

2.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία μέθοδος της αριθμητικής ανάλυσης, η οποία αποτελεί φυσική προσέγγιση του προβλήματος με τη διαμέριση του φυσικού χώρου σε επιμέρους διακριτά πεπερασμένα στοιχεία, στα οποία ορίζονται οι εξισώσεις που έχουν ακριβή λύση (Εικόνα 2.1).

Γενικά η προσεγγιστική αυτή μέθοδος, που βασίζεται στα ενεργειακά θεωρήματα, προσφέρει μεγάλες δυνατότητες και δίνει λύσεις σε σημεία που οι υπόλοιπες μέθοδοι αδυνατούν. Βασικό χαρακτηριστικό της προσεγγιστικής μεθόδου είναι η ανάγκη προσδιορισμού ενός συμβιβαστού πεδίου (για παράδειγμα των μετατοπίσεων) μέσω συναρτήσεων που ορίζονται σε όλο το υλικό και ικανοποιούν κάποιες συνθήκες στα σύνορα. Έτσι, το αρχικό πρόβλημα προσδιορισμού του πεδίου των μετατοπίσεων σε κάθε σημείο του υλικού (άπειροι βαθμοί ελευθερίας κίνησης) μετασχηματίζεται στο πρόβλημα προσδιορισμού πεπερασμένου αριθμού άγνωστων συντελεστών. Προκύπτει λοιπόν μία προσεγγιστική λύση στο αρχικό πρόβλημα.

Όταν το σύνορο του υλικού είναι απλό, η κατασκευή των συναρτήσεων που ικανοποιούν τις συνθήκες στα σύνορα είναι σχετικά απλή υπόθεση. Όταν όμως το σύνορο γίνει πολύπλοκο, η ικανοποίηση των οριακών συνθηκών γίνεται σχεδόν αδύνατη. Η δυσκολία αυτή ξεπερνιέται επίσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή το υλικό χωρίζεται σε ένα πλήθος περιοχών που καλούνται στοιχεία. Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται μέσω των στοιχείων αυτών είναι απλές και συνήθως πολυωνυμικής μορφής.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

- Κατασκευή της γεωμετρίας

Κατασκευή γεωμετρίας στο περιβάλλον ενός λογισμικού και στη συνέχεια εισαγωγή της στο λογισμικό των πεπερασμένων στοιχείων. Σε προγράμματα επίλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων με πεπερασμένα στοιχεία, όπως το PLAXIS© στο ίδιο λογισμικό γίνεται η κατασκευή της γεωμετρίας και στη συνέχεια η επίλυση.

- Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων και διακριτοποίηση της γεωμετρίας

Το είδος του πεπερασμένου στοιχείου καθορίζεται από τις ανάγκες της ανάλυσης που έχει επιλεγεί και θα αναλυθεί παρακάτω. Σημαντικό βήμα είναι επίσης ο ορισμός του προβλήματος προς επίλυση, για παράδειγμα αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει σε αυτό το στάδιο να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Τέλος ακολουθεί η διακριτοποίηση της γεωμετρίας της κατασκευής.

- Ορισμός φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών και επιβολή των συνοριακών συνθηκών

Οι ιδιότητες που απαιτούνται να οριστούν σε κάθε περίπτωση είναι διαφορετικές και εξαρτώνται από την φύση της ανάλυσης. Οι πιο συχνές ιδιότητες είναι το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson. Επίσης και στην περίπτωση των συνοριακών συνθηκών υπάρχει εξάρτηση τόσο από την φύση της ανάλυσης όσο και από τα χαρακτηριστικά των πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία καθορίζουν τους βαθμούς ελευθερίας.

- Επιλογή του τρόπου επίλυσης και επίλυση

Ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος καθορίζεται και η επιλογή του τρόπου επίλυσης. Όσο αναφορά στην επίλυση είναι δυνατή η χρήση μίας γρήγορης επίλυσης ή ορισμένες επαναληπτικές επιλύσεις, οι οποίες δίνουν και ακριβέστερα αποτελέσματα.

- Ανάγνωση αποτελεσμάτων και γραφική παρουσίαση τους
Υπάρχουν πολλοί τρόποι να δει κανείς τα αποτελέσματα της επίλυσης. Για παράδειγμα μπορεί να επιλεγθεί παρουσίαση των αποτελεσμάτων γραφικά δηλαδή σε διαγράμματα αλλά και σε πίνακες. Επιπλέον μπορούν να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα στους κόμβους ή στα πεπερασμένα στοιχεία. Εξειδικευμένα προγράμματα, όπως το PLAXIS© παρέχουν πολύ μεγάλο εύρος δυνατοτήτων και επιλογών παρουσίασης αποτελεσμάτων.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Επιπλέον αυτή η μέθοδος αποτελεί φυσική προσέγγιση του προβλήματος με την διαμέριση του φυσικού χώρου σε επιμέρους διακριτά πεπερασμένα στοιχεία, στα οποία ορίζονται οι εξισώσεις που έχουν ακριβή λύση.

Επειδή τα προβλήματα της μηχανικής των παραμορφώσιμων σωμάτων (όπως και όλα τα φυσικά προβλήματα του συνεχούς μέσου) περιγράφονται με διαφορικές εξισώσεις με μερικές παραγώγους, μπορούμε να τα επιλύσουμε με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Οι διαφορικές εξισώσεις για τα προβλήματα της μηχανικής των παραμορφώσιμων σωμάτων προκύπτουν από διάφορες άλλες εξισώσεις όπως οι σχέσεις μετατοπίσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων, οι εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων καθώς και από τις εξισώσεις ισορροπίας στο χώρο. Όπως κάθε πρόβλημα που εκφράζεται με διαφορικές εξισώσεις έτσι και εδώ υπάρχουν και συνοριακές συνθήκες, όπως φυσικές συνοριακές συνθήκες (φορτίσεις κλπ) και βασικές συνοριακές συνθήκες ή συνθήκες Dirichlet και Neumann (δεσμεύσεις, στηρίξεις κλπ).

Η ανάπτυξη της μεθόδου και η χρήση της για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων του μηχανικού συμβαδίζει με την τεχνολογία των Η/Υ. Κι αυτό γιατί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καταλήγουμε σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που το πλήθος τους ταυτίζεται με το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος και το οποίο μπορεί να επιλυθεί μόνο με τη βοήθεια του Η/Υ. Η εξέλιξη των Η/Υ με τις ολοένα και μεγαλύτερες δυνατότητες διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων αλλά και με την αύξηση της ταχύτητας εκτελέσεως των αριθμητικών πράξεων σε συνδυασμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, κατέστησε εφικτή την επίλυση σύνθετων προβλημάτων του μηχανικού, τα οποία θεωρούνταν απροσπέλαστα πριν μερικά χρόνια. Ενώ παλαιότερα τα προβλήματα λύνονταν στις δύο διαστάσεις κάνοντας απλοποιητικές παραδοχές, τώρα μπορούμε να επιλύσουμε κατευθείαν τα προβλήματα όπως είναι στη φύση (σε τρεις διαστάσεις).

Ακόμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πιο πολύπλοκες σχέσεις συμπεριφοράς για την περιγραφή των υλικών, ενώ αρχικά η μέθοδος επίλυε προβλήματα θεωρώντας τη συμπεριφορά των υλικών γραμμική και ελαστική, τώρα μπορούν να ληφθούν

υπόψη πιο πολύπλοκες καταστάσεις όπως η πλαστικότητα. Όλα αυτά είναι δυνατόν να εφαρμοστούν επειδή έχουμε πια την απαραίτητη υπολογιστική ισχύ και παρόλο που η γνώση για να επιλυθούν αυτά τα προβλήματα υπήρχε και παλαιότερα, δεν ήταν δυνατή η εφαρμογή της.

Η διαδικασία διατύπωσης των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων βάσει της αρχής των δυνατών έργων είναι όμοια με τη μέθοδο άμεσης δυσκαμψίας για κατασκευές από γραμμικά μέλη. Η μέθοδος άμεσης δυσκαμψίας για γραμμικά μέλη, όπως ράβδους και δοκούς, μπορεί ουσιαστικά να θεωρηθεί σαν μία ειδική περίπτωση των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων όπου είναι γνωστή η ακριβής μορφή παραμόρφωσης του μέλους και μπορεί να σχηματιστεί το ακριβές μητρώο δυσκαμψίας του κάθε μέλους, κάνοντας συχνά κάποιες απλοποιητικές παραδοχές.

Τα εντατικά μεγέθη ενός μονοδιάστατου ραβδωτού στοιχείου μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των μετακινήσεων των κόμβων του. Σε αυτές τις περιπτώσεις γενικά πρέπει να γίνουν κάποιες παραδοχές για τις μεταβολές των μετακινήσεων μέσα στο κάθε στοιχείο για να μπορέσει να σχηματιστεί το αντίστοιχο προσεγγιστικό μητρώο δυσκαμψίας του μέλους βάσει της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Όμως κάτι τέτοιο είναι αδύνατο για επιφανειακά και τρισδιάστατα στοιχεία αφού δεν υπάρχουν οι σχετικές λύσεις των αντίστοιχων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Στις περιπτώσεις επιφανειακών και χωρικών στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων με τις οποίες ένα συνεχές μέσο διαχωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία. Θεωρώντας συγκεκριμένη μεταβολή των μετακινήσεων για όλες τις διευθύνσεις σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο επιτρέπεται η επίλυση του προβλήματος βάσει ενός συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων αντί μερικών διαφορικών εξισώσεων.

2.2.2 Πεπερασμένα στοιχεία σε γεωτεχνικά προβλήματα

Η χρήση των πεπερασμένων στοιχείων για γεωτεχνικές εφαρμογές ξεκίνησε το 1966, όταν ο Clough και ο Woodward (1966) τη χρησιμοποίησαν για να καθορίσουν τάσεις και μετατοπίσεις σε αναχώματα, και οι Reyes και Deer (1966) περιέγραψαν την εφαρμογή της στην ανάλυση υπογείων εκσκαφών σε βράχους. Μάλιστα ο όρος F.E.M. (Finite Element Method) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Clough το 1960 στην μελέτη της εντατικής κατάστασης που το ανέλυσε σε λίγα σχετικά τριγωνικά στοιχεία (Εικόνα 2.2). Η F.E.M αρχικά χρησιμοποιήθηκε για υλικά μέσα που είναι γραμμικά ελαστικά. Μια σημαντική επέκταση της μεθόδου ιδιαίτερη για την εδαφομηχανική ήταν η εφαρμογή της μεθόδου σε μη γραμμικά υλικά, όπως είναι το έδαφος.

Πολλές ερευνητικές εργασίες και πρακτικές εφαρμογές έλαβαν χώρα στα σαράντα χρόνια που μεσολάβησαν. Σήμερα έχουμε στη διάθεση μας εξειδικευμένα

λογισμικά, όπως το PLAXIS®, που επιλύουν αμιγώς γεωτεχνικά προβλήματα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η ικανότητα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων να αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τις συνθήκες του πεδίου, βασικά στηρίζεται στην ικανότητα του δομικού μοντέλου να αναπαριστά τη συμπεριφορά του πραγματικού εδάφους και στην ορθότητα των επιβαλλόμενων συνοριακών συνθηκών.

Αναλύοντας το σύστημα στα στοιχεία του, η συμπεριφορά του καθενός ξεχωριστά είναι πιο εύκολα κατανοητή και στη συνέχεια η δυνατότητα σύνθεσης και θεώρησης ολόκληρου του συστήματος επιτρέπει την μελέτη της γενικής συμπεριφοράς (Βαλαλάς, 1981). Ο χρήστης θα πρέπει μόνο να καθορίσει την κατάλληλη γεωμετρία, τη διαδικασία κατασκευής, τις εδαφικές παραμέτρους και τις συνοριακές συνθήκες. Κατασκευαστικά στοιχεία ενδέχεται να χρειαστεί να ενεργοποιηθούν και να απενεργοποιηθούν κατά τη διάρκεια της αριθμητικής προσομοίωσης, ώστε να περιγραφούν οι συνθήκες πεδίου. Μπορεί να θεωρηθούν κατασκευές αντιστήριξης αποτελούμενες από πολλούς τοίχους αποτελούμενους από κατασκευαστικά στοιχεία και λόγω της εδαφικής μάζας που προσομοιώνεται στην ανάλυση, η σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ κεκλιμένων διαδοκίδων ή αγκυριών και του εδάφους μπορεί να ληφθούν υπ' όψιν. Η επίδραση του χρόνου στην ανάπτυξη της κατανομής των πιέσεων του νερού, επίσης μπορεί να προσομοιωθεί με το να συμπεριληφθεί συνδυασμένη σύζευξη.

Κανένας υποτιθέμενος μηχανισμός αστοχίας ή μέθοδος συμπεριφοράς του προβλήματος δεν απαιτείται, καθώς αυτό προκύπτει από το είδος της ανάλυσης. Η ανάλυση επιτρέπει την πρόβλεψη της πλήρους ιστορίας του προβλήματος των ορίων των τιμών και μια απλή ανάλυση μπορεί να παρέχει πληροφορίες για όλες τις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Δυνητικά η μέθοδος μπορεί να λύσει πλήρως τρισδιάστατα προβλήματα και να μην εξαρτάται καθόλου από τους περιορισμούς που ισχύουν για τις άλλες μεθόδους.

2.3 Στάδια επίλυσης Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

2.3.1 Διακριτοποίηση (Διαίρεση Πεδίου)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ) γίνεται κατανοητή με το εξής παράδειγμα. Έστω ένα σώμα τον οποίου ζητείται να βρεθεί η κατανομή μιας άγνωστης μεταβλητής, όπως είναι η μετατόπιση, τότε, το σώμα θα πρέπει να διαιρεθεί σε σύνολο μικρότερων γεωμετρικών μορφών, δηλαδή σε στοιχεία (elements). Τα στοιχεία αυτά είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία, τους κόμβους (nodes). Αυτή η διαδικασία της διαίρεσης του μέσου σε

μικρότερα στοιχεία ή τμήματα ονομάζεται διακριτοποίηση (Αγιουτάντης, 2002) και είναι ένα από τα πιο απαραίτητα στοιχεία για την εφαρμογή της Μ.Π.Σ.

Η διαίρεση του μέσου σε στοιχεία (elements) γίνεται με τη βοήθεια ιδεατών γραμμών ή επιφανειών. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με ευθύγραμμο ή καμπύλο τμήματα. Οι κορυφές των στοιχείων ορίζουν τους, κόμβους (nodes) του πλέγματος ή καννάβου διακριτοποίησης του προβλήματος (grid ή mesh). Σε κάθε κόμβο ουσιαστικά αντιστοιχούνται τα φυσικά μεγέθη που περιγράφουν το αίτιο και το αποτέλεσμα.

Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα μονοδιάστατα ή γραμμικά, τα τριγωνικά και ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά (quadrilateral) σε δύο διαστάσεις και τα πυραμιδοειδή και πρισματικά (τρισδιάστατα). Οι πιο απλές μορφές στοιχείων είναι αυτές στις οποίες ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου είναι ίσος με τον αριθμό των πλευρών, όπως για παράδειγμα τριγωνικά και τρικομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και τετρακομβικά (επίπεδα) στοιχεία, πυραμιδοειδή και τετρακομβικά (στερεά) στοιχεία, κλπ. Υπάρχουν, όμως, και περιπτώσεις, όπου υπάρχουν παραπάνω κόμβοι που περιγράφουν ένα στοιχείο, όπως τριγωνικά και εξακομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και οκτακομβικά (επίπεδα) στοιχεία, κλπ (Αγιουτάντης, 2002),

Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας ενός στοιχείου (degrees of freedom) είναι το σύνολο των αγνώστων μεταβλητών που αντιστοιχούνται σε κάθε στοιχείο. Επίσης, τα στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πώς συνδέεται η συμπεριφορά και κατ' επέκταση οι ιδιότητες τους με τα μεγέθη που αντιστοιχούνται στους κόμβους τους. Έτσι, ένα γραμμικό στοιχείο, το οποίο ουσιαστικά παριστάνει μία ράβδο με τις κατάλληλες ιδιότητες (με ή χωρίς μάζα) ανάλογα με το εξεταζόμενο πρόβλημα, μπορεί να έχει δύο ή περισσότερους κόμβους και 1, 2, 3 ή και περισσότερους βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο ανάλογα με τη διάσταση του προβλήματος.

Τα επίπεδα στοιχεία μπορεί να παριστάνουν επιφάνειες σε δι- ή τρισδιάστατα προβλήματα. Στις συνήθεις περιπτώσεις των προβλημάτων μηχανικής, κάθε κόμβος έχει δύο ή τρεις βαθμούς ελευθερίας που αντιστοιχούν στις συνιστώσες του διανύσματος μετατόπισης του κόμβου. Εάν οι κόμβοι μεταφέρουν ροπές, τότε οι βαθμοί ελευθερίας ανά κόμβο μπορεί να αυξηθούν κατά έναν στις δύο διαστάσεις και κατά τρεις στις τρεις διαστάσεις. Στις γεωτεχνικές εφαρμογές, είναι συνήθης η χρήση τριγωνικών ή τετραπλευρικών (επίπεδων) στοιχείων, τα οποία απεικονίζουν τμήματα υλικού, των οποίων η τρίτη διάσταση είναι μοναδιαία (στις περιπτώσεις όπου είναι δυνατή μία τέτοια απλοποιητική παραδοχή) (Αγιουτάντης, 2002).

Για την επιτυχή προσομοίωση της συμπεριφοράς κάποιου σώματος με τη Μ.Π.Σ σημαντική είναι η κατάλληλη διαίρεση του σώματος (πεδίου) σε επιμέρους

τμήματα (στοιχεία). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την επιλογή των ακολούθων παραμέτρων (Αγιουτάντης, 2002):

- Της γεωμετρίας του στοιχείου
- Του αριθμού κόμβων του στοιχείου και κατ' επέκταση των βαθμών ελευθερίας κάθε στοιχείου
- Των συναρτήσεων σχήματος κάθε στοιχείου
- Της πυκνότητας του καννάβου

Συνήθης πρακτική για την επιλογή των διαστάσεων και της μορφής των στοιχείων είναι η χρησιμοποίηση μικρότερων στοιχείων εκεί που αναμένονται μεγάλες μεταβολές των υπολογιζόμενων μεταβλητών. Για παράδειγμα, όταν έχουμε ανάλυση δύο διαστάσεων συνηθέστερα είναι τα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία με τρεις και τέσσερις κόμβους αντίστοιχα. Είναι δυνατόν, ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος, να αυξηθούν οι βαθμοί ελευθερίας ενός στοιχείου με την προσθήκη περισσότερων κόμβων, όπως είναι η χρήση τετραπλευρικού στοιχείου με οκτώ κόμβους.

Η διαίρεση του πεδίου γίνεται έτσι ώστε το μέγεθος των στοιχείων να είναι μικρό σε εκείνα τα σημεία όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς, ή εκεί που αναμένεται έντονη μεταβολή του ζητούμενου μεγέθους, ενώ το μέγεθος των στοιχείων είναι μεγαλύτερο στις υπόλοιπες περιοχές του πεδίου.

Ο αριθμός και το είδος των στοιχείων που επιλέγονται για να περιγράψουν το σώμα καθορίζουν την επίδραση της ζητούμενης άγνωστης μεταβλητής σε κάθε στοιχείο και η επίδραση αυτή γίνεται με κάποιο προκαθορισμένο τρόπο. Η κατανομή της άγνωστης μεταβλητής στη μάζα του σώματος προσεγγίζεται ικανοποιητικά αν αυτό έχει διακριτοποιηθεί σωστά (Καλογήρου, 2003).

Η επιλογή των συναρτήσεων που εκφράζουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών (π.χ. μετατοπίσεων) σε κάθε στοιχείο συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους, συνδέεται άμεσα με την επιθυμητή ακρίβεια στους υπολογισμούς, αλλά και με τον χρόνο επίλυσης του προβλήματος. Οι συναρτήσεις αυτές ονομάζονται συναρτήσεις σχήματος (Αγιουτάντης, 2002) και θα αναλυθούν παρακάτω.

2.3.2 Συναρτήσεις Σχήματος

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων λειτουργεί θεωρώντας μια γνωστή κατανομή διαμέσου κάθε στοιχείου για τις άγνωστες μεταβλητές. Οι εξισώσεις που ορίζουν την προσεγγιστική κατανομή των μεταβλητών ονομάζονται συναρτήσεις σχήματος και μπορούν να διατυπωθούν με οποιαδήποτε μαθηματική μορφή. Στην πράξη όμως χρησιμοποιείται η πολυωνυμική, η οποία είναι αρκετά δημοφιλής λόγω της ευκολίας του μαθηματικού χειρισμού της. Η μορφή αυτή είναι ιδιαίτερα απλή

ως προς την παραγωγή και την ολοκλήρωση, ενώ η ακρίβεια της ανάλυσης μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση του βαθμού των πολυωνυμικών συναρτήσεων.

Είναι φανερό ότι όσο υψηλότερου βαθμού είναι τα πολυώνυμα τόσο πιο κοντά στην πραγματική λύση βρίσκεται η ανάλυση. Όμως με την αύξηση του βαθμού του πολυωνύμου αυξάνει και ο αριθμός των υπολογισμών που πρέπει να πραγματοποιηθούν για να επιλυθεί το πρόβλημα. Χαρακτηριστικά μπορεί να αναφερθεί ότι η ανάλυση στοιχείου που περιγράφεται με δευτέρου βαθμού πολυώνυμο απαιτεί τριπλάσιο υπολογιστικό χρόνο από ότι ένα γραμμικά ορισμένο στοιχείο. Για τον λόγο αυτό πολλές φορές προτιμάται η χρήση πυκνότερου πλέγματος στοιχείων χαμηλότερου βαθμού, από ότι αραιότερο πλέγμα στοιχείων μεγαλύτερου βαθμού (Fagan, 1992).

Στη γενική περίπτωση, η μετατόπιση σε κάθε σημείο ενός στοιχείου εκφράζεται ως συνάρτηση των γενικευμένων συντεταγμένων (δηλαδή συντεταγμένων των κόμβων και τιμών στους κόμβους). Για ένα στοιχείο με δυο κόμβους η μετατόπιση εκφράζεται ως εξής:

$$u = a_1 + a_2 y \quad (2.1)$$

όπου τα a_1 και a_2 περιέχουν τις μετατοπίσεις, καθώς και τις συντεταγμένες των κόμβων 1,2. Αν στην παραπάνω σχέση αντικατασταθούν τα διανύσματα u και με τις επιμέρους συνιστώσες προκύπτει:

$$u_1 = a_1 + a_1 y_1 \quad (2.2)$$

$$u_2 = a_1 + a_2 y_2 \quad (2.3)$$

Τελικά προκύπτει:

$$\{q\} = [A]\{a\} \quad (2.4)$$

όπου $\{q\}$ είναι το διάνυσμα των αγνώστων μετατοπίσεων, $[A]$ είναι ο πίνακας με τις συντεταγμένες του στοιχείου και $\{a\}$ οι άγνωστοι συντελεστές. Επιλύοντας προκύπτει:

$$u = \sum u_i N_i \quad (2.5)$$

Όσον αφορά τα δισδιάστατα στοιχεία οι ενέργειες που έχουν γίνει για την σύνδεση αιτίου-αποτελέσματος συνοψίζονται παρακάτω, ενώ για τρισδιάστατα στοιχεία οι ενέργειες είναι παρόμοιες. Η μετατόπιση σε κάθε σημείο ενός στοιχείου εκφράζεται ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους $\{u_i\}$ από τη σχέση:

$$u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4 \quad (2.6)$$

Οι καταστατικές εξισώσεις συμπεριφοράς που παρίστανται από σχέσεις του σχήματος:

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}) \quad (2.7)$$

το οποίο μπορεί να γραφεί υπό μορφή πινάκων ως εξής:

$$\{\sigma\} = [E] \{\varepsilon\} \quad (2.8)$$

όπου ο πίνακας $[E]$ παριστάνει ένα γενικευμένο μητρώο των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού. Η δυναμική ενέργεια κάθε στοιχείου προκύπτει σαν άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας, καθώς και του έργου των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν στο στοιχείο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Δυναμική Ενέργεια} = \text{Εσωτερική Ενέργεια} - \text{Έργο Δυνάμεων}$$

Οι εξωτερικές δυνάμεις ανήκουν σε τρεις κατηγορίες:

- Δυνάμεις πεδίου (π.χ. βαρυτικές)
- Τάσεις (π.χ. υδροστατική)
- Σημειακές δυνάμεις

Η σχέση η οποία συνδέει τη δύναμη $\{F\}$ που δέχεται κάθε κόμβος και την μετατόπιση $\{q\}$ που υφίσταται, δηλαδή το αίτιο και το αποτέλεσμα είναι:

$$\{F\} = [K] \{Q\} \quad (2.9)$$

Η διάσταση του διανύσματος $\{F\}$ για κάθε στοιχείο εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων του στοιχείου και από τον βαθμό ελευθερίας του κάθε κόμβου. Για διδιάστατα τετράπλευρα στοιχεία προκύπτει ότι υπάρχουν συνολικά οκτώ βαθμοί ελευθερίας. Η φυσική σημασία του μητρώου $[K]$ γίνεται κατανοητή θεωρώντας τους συντελεστές του μητρώου, K_{ij} ως ισοδύναμες σταθερές ιδεατών ελατηρίων τα οποία συνδέουν τους κόμβους (βαθμούς ελευθερίας) του στοιχείου μεταξύ τους. (Αγιουτάντης, 2002).

Όπως είναι φανερό, η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης ως προς το διάνυσμα των μετατοπίσεων θα δώσει τις τιμές των άγνωστων μεταβλητών. Όμως για να γίνει αυτό θα πρέπει να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο σώμα και στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί η αναστροφή του μητρώου ακαμψίας, που είναι όμως μια δύσκολη διαδικασία, λόγω του ότι απαιτείται μεγάλος αριθμός εξισώσεων για να περιγραφεί ο μεγάλος αριθμός κόμβων. Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη δημιουργία ειδικών μαθηματικών μεθόδων έχει γίνει εφικτή η επίλυση αυτών των εξισώσεων σε ικανοποιητικά χρονικά όρια.

Με την επίλυση της εξίσωσης και της εύρεση των άγνωστων μετατοπίσεων για κάθε κόμβο γίνεται εύκολος ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και των τάσεων στα στοιχεία και τελικά γίνεται ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και των τάσεων σε όλο το σώμα (Καλογήρου, 2003).

2.3.3 Συνοριακές συνθήκες

Μετά τη δημιουργία και την συσχέτιση των καταστατικών εξισώσεων των στοιχείων, για να σχηματιστεί το σύστημα των εξισώσεων του μοντέλου και για να περιγραφεί πλήρως το πρόβλημα πρέπει να γίνει η ενσωμάτωση και των συνοριακών συνθηκών που εφαρμόζονται στο σώμα. Η ενσωμάτωση των συνοριακών συνθηκών είναι απαραίτητη, γιατί το σύστημα των εξισώσεων δεν είναι δυνατό να λυθεί, αφού το μητρώο ακαμψίας δεν μπορεί να αντιστραφεί. Η αδυναμία αναστροφής του μητρώου ακαμψίας σημαίνει την ανεξέλεγκτη κίνηση με τη μορφή άκαμπτου σώματος και για αυτό το λόγο πρέπει να εφαρμοστούν περιοριστικές δυνάμεις, όπως είναι οι συνοριακές συνθήκες, για να μπορέσουν να κρατήσουν το μοντέλο σε ισορροπία (Καλογήρου, 2003)

2.3.4 Αριθμητικά Ομοιώματα Συμπεριφοράς Υλικών

Η επιλογή του κατάλληλου αριθμητικού ομοιώματος συμπεριφοράς του υλικού, καθώς και η επιλογή των τιμών των σταθερών αυτού, συνιστά έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχημένη προσομοίωση της συμπεριφοράς φυσικών υλικών.

Η απλούστερη συμπεριφορά ως προς την προσομοίωση είναι η γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Ωστόσο η τελευταία δεν θεωρείται η πλέον κατάλληλη για την περιγραφή της συμπεριφοράς πετρωμάτων και εδαφικών υλικών σε μια, ή περισσότερες διαστάσεις. Το υλικό θεωρείται ότι παραμορφώνεται γραμμικά και ισότροπα, όπως δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Αγιουτάντης, 2002) :

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right] \quad (2.10)$$

όπου:

σ_{ij} : ο τανυστής των τάσεων που υποδεικνύει την εντατική κατάσταση στο σώμα [MPa],

E : το μέτρο ελαστικότητας του υλικού [MPa]

ν : ο λόγος Poisson του υλικού

ε_{ij} : ο τανυστής των παραμορφώσεων

δ_{ij} : ο μοναδιαίος τανυστής (δέλτα του Kronecker)

Για την περίπτωση της παραμόρφωσης σε μια διάσταση, είναι $\sigma = \varepsilon E$ όπου:

σ : η τάση που επιβάλλεται στο υλικό [MPa]

ε : η ανηγμένη παραμόρφωση που αυτό επιδέχεται

Επιπλέον αυτών, μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν άλλες καταστατικές σχέσεις συμπεριφοράς, όπως μη ισοτροπικής (ορθοτροπικής ή ανισοτροπικής) ελαστικής συμπεριφοράς, καθώς και μη ελαστικής συμπεριφοράς. Επίσης, καθώς η διαίρεση του πεδίου δημιουργεί συνεχή αλλά διακριτά τμήματα του σώματος, είναι δυνατόν να οριστούν διαφορετικές σχέσεις συμπεριφοράς υλικού σε διάφορα σημεία του σώματος (Αγιουτάντης, 2002).

2.4 Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων PLAXIS©

2.4.1 Ιστορική αναδρομή

Το πρόγραμμα PLAXIS© εμφανίστηκε το 1987 στο πολυτεχνείο του Delft ως πρωτοβουλία του ολλανδικού τμήματος δημόσιων έργων και διαχείρισης υδάτων. Ο αρχικός στόχος ήταν να αναπτυχθεί μία εύχρηστη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση των αναχωμάτων των ποταμών, στα χαλαρά εδάφη των πεδιάδων της Ολλανδίας. Στα επόμενα χρόνια, το PLAXIS© επεκτάθηκε για να καλύψει τους περισσότερους τομείς της γεωτεχνικής μηχανικής. Λόγω των συνεχώς αυξανόμενων δραστηριοτήτων, το 1993 δημιουργήθηκε μια νέα επιχείρηση με το όνομα B.V. PLAXIS©. Το 1998 κυκλοφόρησε η πρώτη έκδοση PLAXIS© για τα windows. Επιπλέον αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα υπολογισμού για τρισδιάστατους υπολογισμούς.

Μετά από αρκετά χρόνια ανάπτυξης του προγράμματος PLAXIS©, το 2001 κυκλοφόρησε το τρισδιάστατο πρόγραμμα σπράγγων. Οι κύριοι στόχοι του PLAXIS© ήταν να παρέχει ένα εργαλείο για την πρακτική ανάλυση των εδαφών και να χρησιμοποιείται από τους γεωτεχνικούς μηχανικούς. Συχνά οι μηχανικοί θεωρούν τους υπολογισμούς των πεπερασμένων στοιχείων δύσχρηστους και χρονοβόρους. Η ομάδα έρευνας και ανάπτυξης του PLAXIS© αντιμετώπισε αυτό το θέμα σχεδιάζοντας μια καλύτερη και θεωρητικά εύχρηστη υπολογιστική διαδικασία, η οποία είναι προσαρμοσμένη σε ένα λογικό και εύχρηστο περιβάλλον. Έτσι, πολλοί γεωτεχνικοί μηχανικοί παγκοσμίως έχουν υιοθετήσει το προϊόν και το χρησιμοποιούν για προβλήματα εφαρμοσμένης μηχανικής. Το PLAXIS© είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για γεωτεχνικές εφαρμογές, στις οποίες τα εδαφικά ομοιώματα που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα προσπαθούν να αναπαραστήσουν την πραγματική συμπεριφορά του εδάφους.

Επίσης, η προσομοίωση των γεωτεχνικών προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, περιλαμβάνει μερικά αναπόφευκτα αριθμητικά

σφάλματα. Σχετικά με το αν η πραγματικότητα προσεγγίζεται με ακρίβεια, εξαρτάται ιδιαίτερα από την πείρα του χρήστη, αναφορικά με τη διαμόρφωση του προβλήματος, την κατανόηση των εδαφικών προσομοιωμάτων και των περιορισμών τους, την επιλογή των παραμέτρων, και τη δυνατότητα να κριθεί η αξιοπιστία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

Για κάθε νέο πρόβλημα που αναλύεται είναι σημαντικό να δημιουργηθεί ένα πρότυπο γεωμετρίας, το οποίο σχεδιάζεται σε δισδιάστατο χώρο και αντιπροσωπεύει ένα πραγματικό τρισδιάστατο πρόβλημα. Το πρότυπο αυτό αποτελείται από τις γραμμές, τα σημεία και τις συστάδες. Επιπλέον πρέπει να περιλαμβάνει ένα αντιπροσωπευτικό τμήμα του υπεδάφους στα ευδιάκριτα εδαφολογικά στρώματα, τα δομικά αντικείμενα, τα στάδια κατασκευής και τη παραλαβή των φορτίων. Το πρότυπο πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε τα όρια να μην επηρεάζουν τα αποτελέσματα του προβλήματος που μελετάται.

2.4.2 Βασικές εξισώσεις παραμόρφωσης

Η ενότητα αυτή και όσες ακολουθούν μέχρι το τέλος του κεφαλαίου περιγράφουν μερικές βασικές αρχές λειτουργίας του εν λόγω λογισμικού, όπως περιγράφονται στο εγχειρίδιο του προγράμματος PLAXIS®. Παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις στατικής παραμόρφωσης ενός εδαφικού σώματος/στοιχείου σύμφωνα με τις αρχές της μηχανικής συνεχούς μέσου. Τίθεται ο περιορισμός οι παραμορφώσεις να είναι μικρές. Αυτό επιτρέπει ο ορισμός να γίνει σε σχέση με την αρχική απαραμόρφωτη γεωμετρία. Το συνεχές μοντέλο διακριτοποιείται σύμφωνα με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Η στατική ισορροπία ενός συνεχούς μέσου μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση :

$$L^T \sigma + b = 0 \quad (2.11)$$

Αυτή η εξίσωση συνδέει τις μερικές παραγώγους των έξι συνιστωσών της τάσης, όπως περιγράφονται στο διάνυσμα σ , με τις τρεις συνιστώσες της δύναμης που αναπτύσσεται στο σώμα και περιέχονται στο διάνυσμα b . Ο πίνακας L^T ισούται με:

$$L^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Εκτός από την εξίσωση ισορροπίας, ορίζεται επίσης η κινηματική σχέση ως εξής :

$$\varepsilon = L u \quad (2.13)$$

Αυτή η εξίσωση εκφράζει τις έξι συνιστώσες της ανηγμένης παραμόρφωσης όπως περιέχονται στο διάνυσμα ε , ως τις μερικές παραγώγους των τριών συνιστωσών της

μετακίνησης, όπως εμφανίζονται στο διάνυσμα u , χρησιμοποιώντας τον προηγουμένως ορισμένο πίνακα L . Η σχέση μεταξύ της εξίσωσης ισορροπίας και της κινηματικής εξίσωσης ορίζεται από την εκάστοτε καταστατική σχέση (δηλαδή σχέση μεταξύ λόγων τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων) αντιπροσωπευτική της συμπεριφοράς του υλικού. Η γενική καταστατική σχέση είναι η εξής :

$$\sigma = M \varepsilon \quad (2.14)$$

Ο συνδυασμός των παραπάνω τριών εξισώσεων θα μπορούσε να οδηγήσει σε δεύτερης τάξης μερικώς διαφορίσιμη εξίσωση των μετατοπίσεων u .

Ωστόσο αντί ενός άμεσου συνδυασμού των σχέσεων, η εξίσωση ισορροπίας μετασχηματίζεται σε μια «δευτερεύουσα» μορφή (weak form) σύμφωνα με την αρχή της μεταβλητής του Γαλέρκιν (Galerkin's variation principle) :

$$\int \delta u^T (L^T \sigma + b) dV = 0 \quad (2.15)$$

Σύμφωνα με την (2.15) το δu αντιπροσωπεύει μία κινηματικά αποδεκτή μεταβολή των μετακινήσεων. Στη συνέχεια εφαρμόζουμε το θεώρημα Green για μερική παραγωγή στο πρώτο μέρος της εξίσωσης, που οδηγεί στη σχέση :

$$\int (\delta \varepsilon^T \sigma dV) = \int (\delta u^T b dV) + \int (\delta u^T t dS) \quad (2.16)$$

Εδώ εμφανίζεται το διάνυσμα συνοριακών συνθηκών t , με το οποίο εισάγονται οι αντιδράσεις του ορίου. Η εξέλιξη της εντατικής κατάστασης (σ) μπορεί να θεωρηθεί μια «προσθετική» διαδικασία (incremental process) με:

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta \sigma \quad (2.17)$$

$$\Delta \sigma = \int \dot{\sigma} dt \quad (2.18)$$

2.4.3 Διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων

Σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ένα συνεχές μέσο διαιρείται σε ένα πλήθος στοιχείων (όγκου). Κάθε στοιχείο αποτελείται από έναν αριθμό κόμβων. Κάθε κόμβος έχει έναν αριθμό βαθμών ελευθερίας που αντιστοιχούν στις διακεκριμένες τιμές των αγνώστων μεταβλητών του προβλήματος συνοριακών τιμών προς επίλυση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση της θεωρίας παραμορφώσεων οι βαθμοί ελευθερίας αντιστοιχούν στις συνιστώσες της μετακίνησης. Για κάθε στοιχείο, το πεδίο των μετατοπίσεων αποκτάται από τις διακεκριμένες τιμές στους κόμβους του διανύσματος v , χρησιμοποιώντας συναρτήσεις παρεμβολής που περιέχονται στον πίνακα N , που συχνά καλούνται συναρτήσεις μορφής :

$$u = N v \quad (2.19)$$

Αντικατάσταση της ανωτέρω σχέσης στην κινηματική εξίσωση μας δίνει :

$$\varepsilon = L N v = B v \quad (2.20)$$

Σε αυτή τη σχέση το B είναι το μητρώο παρεμβολής των ανηγμένων παραμορφώσεων, το οποίο περιέχει τις μερικές παραγώγους των συναρτήσεων παρεμβολής. Η παρακάτω εξίσωση είναι η παραγόμενη συνθήκη ισορροπίας σε διακριτοποιημένη μορφή:

$$\int B^T \Delta \sigma dV = \int N^T b^i dV + \int N^T t^i dS - \int B^T \sigma^{i-1} dV \quad (2.21)$$

Ο πρώτος και ο δεύτερος όρος από δεξιά της εξίσωσης αντιπροσωπεύουν το τρέχον εξωτερικό διάνυσμα της δύναμης και ο τελευταίος όρος το διάνυσμα της εσωτερικής αντίδρασης του προηγούμενου βήματος. Η διαφορά της εξωτερικής δύναμης και της εσωτερικής αντίστασης πρέπει να εξισορροπείται από την αύξηση της τάσης κατά $\Delta \sigma$.

Η σχέση μεταξύ των πρόσθετων τάσεων και των πρόσθετων ανηγμένων παραμορφώσεων είναι συνήθως μη-γραμμική. Ως αποτέλεσμα οι πρόσθετες ανηγμένες παραμορφώσεις δεν μπορούν γενικώς να υπολογιστούν απευθείας και απαιτούνται καθολικές επαναληπτικές διαδικασίες για να ικανοποιηθεί η συνθήκη ισορροπίας για όλα τα σημεία του υλικού.

2.4.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Μία μέθοδος ποσοτικοποίησης της ευαισθησίας είναι μέσω του συντελεστή ευαισθησίας (sensitivity ratio) η_{SR} . Ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του εξαγόμενου μεγέθους προς την μεταβολή του εισαγόμενου μεγέθους εκφρασμένος σε ποσοστό. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ευαισθησίας, η εισαγόμενη μεταβλητή μεταβάλλεται ανεξάρτητα σε όλο το εύρος και χρειάζεται $2N + 1$ υπολογισμούς, με το N να ορίζει τον αριθμό των εξεταζόμενων παραμέτρων που μεταβάλλονται.

Προσθετικά στο συντελεστή ευαισθησίας μία άλλη μέθοδος πιο ακριβής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση σημαντικών πηγών αβεβαιότητας. Είναι ο βαθμός ευαισθησίας, η_{SS} , ο οποίος ορίζεται από το συντελεστή ευαισθησίας η_{SR} :

$$\eta_{SR} = \frac{\left[\frac{f(x_{L,R}) - f(x)}{f(x)} \right] 100\%}{\left[\frac{x_{L,R} - x}{x} \right] 100\%} \quad (2.22)$$

σταθμισμένο από το κανονικοποιημένο μέγεθος της διασποράς της εισαγόμενης μεταβλητής:

$$\eta_{SS} = \eta_{SR} \frac{\max x_R - \min x_R}{x} \quad (2.23)$$

Με αυτή τη μέθοδο η αναλογία των μεταβολών υπολογίζεται ανεξάρτητα από τις μονάδες μέτρησης της εισαγόμενης μεταβλητής. Στο τέλος του κεφαλαίου

παρουσιάζονται συνοπτικά τα βήματα της υπολογιστικής διαδικασίας που ακολουθεί το PLAXIS© (Εικόνα 2.3).

2.5 Δυναμική ανάλυση προγράμματος PLAXIS©

2.5.1 Γενικές αρχές

Η βασική εξίσωση για την χρονοεξαρτώμενη κίνηση ενός όγκου κάτω από την επίδραση ενός (δυναμικού) φορτίου είναι η εξής :

$$F = Ma + Cu + Kx \quad (2.24)$$

Εδώ το M είναι το μητρώο μάζας, u το διάνυσμα της μετατόπισης, C το μητρώο της απόσβεσης, K το μητρώο δυσκαμψίας και F το διάνυσμα του φορτίου. Τα μεγέθη της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης μεταβάλλονται με το χρόνο. Οι δύο τελευταίοι όροι της εξίσωσης ($Kx = F$) αντιστοιχούν στη στατική παραμόρφωση. Στο μητρώο μάζας M , περιλαμβάνεται η μάζα των υλικών (έδαφος, νερό, κατασκευές). Στο PLAXIS© το μητρώο μάζας εισάγεται ως διαγώνιο μητρώο.

Το μητρώο C αντιπροσωπεύει την απόσβεση του υλικού. Στην πραγματικότητα η απόσβεση επιτυγχάνεται λόγω τριβής και μη αναστρέψιμων παραμορφώσεων (λόγω ιξώδους ή πλαστικότητας) . Όσο περισσότερο ιξώδες ή πλαστικό είναι το υλικό, τόσο περισσότερη ενέργεια κραδασμού μπορεί να απορροφηθεί. Αν υποθέσουμε ελαστική συμπεριφορά, η απόσβεση μπορεί επίσης να οριστεί από το μητρώο C . Για τον υπολογισμό του απαιτούνται κάποιοι επιπλέον παράμετροι που είναι δύσκολο να προσδιορισθούν με δοκιμές. Σε σχηματισμούς πεπερασμένων στοιχείων το C ορίζεται ως συνάρτηση των μητρώων μάζας και δυσκαμψίας (Rayleigh damping) ως εξής :

$$C = a_R M + b_R K \quad (2.25)$$

Έτσι ο προσδιορισμός του μητρώου απόσβεσης περιορίζεται στον προσδιορισμό των συντελεστών Rayleigh a_R και b_R . Εδώ εάν η συμμετοχή της μάζας κυριαρχεί, αποσβένονται περισσότερο οι δονήσεις χαμηλής συχνότητας, ενώ όταν κυριαρχεί η επιρροή της δυσκαμψίας περισσότερες υψίσυχνες δονήσεις αποσβύνονται. Εξ' ορισμού στο PLAXIS© $a_R = 0$ και $b_R = 0$, εκτός εάν ορισθεί διαφορετικά.

Για την αριθμητική εφαρμογή της δυναμικής ανάλυσης, η χρονική ολοκλήρωση (time integration) αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη σταθερότητα και την ακρίβεια της υπολογιστικής διαδικασίας. Για το ολοκλήρωμα του χρόνου, η μέθοδος ολοκλήρωσης Newmark είναι η πιο συνηθισμένη. Η αναλυτική περιγραφή της μεθόδου και η πλήρης παράθεση των σχέσεων που χρησιμοποιούνται παραλείπεται

καθώς ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσης εργασίας. Συνοπτικά αναφέρεται ότι στη μέθοδο αυτή το χρονικό βήμα Δt πρέπει να οριστεί, όπως επίσης και δύο μεταβλητές α και β που καθορίζουν την ακρίβεια της αριθμητικής ολοκλήρωσης και οι οποίες δεν πρέπει να συγχέονται με τις ομώνυμες μεταβλητές της απόσβεσης Rayleigh. Υοθετείται από το PLAXIS© οι τιμές $\alpha = 0,25$ και $\beta = 0,50$, ωστόσο και άλλοι συνδυασμοί είναι δυνατοί. Οι τιμές αυτές εξασφαλίζουν πρώτον σύγκλιση σε κάθε περίπτωση ανεξάρτητα από το επιλεγμένο χρονικό βήμα και δεύτερον μηδενική αριθμητική απόσβεση, προσθετική στην απόσβεση Rayleigh δηλαδή.

Συνδυάζοντας τη σχέση που προκύπτει από την αριθμητική ολοκλήρωση του χρόνου με τη σχέση για την ταχύτητα, τη μετακίνηση και την επιτάχυνση στο τέλος του χρονικού βήματος προκύπτει η σχέση :

$$(c_0 M + c_1 C + K) \Delta u = F_{ext}^{t+\Delta t} + M (c_2 \dot{u}^t + c_3 \ddot{u}^t) + C (c_4 \dot{u}^t + c_5 \ddot{u}^t) - F_{int}^t \quad (2.26)$$

Σε αυτή τη μορφή το σύστημα εξισώσεων της δυναμικής ανάλυσης ταυτίζεται με αυτό της στατικής ανάλυσης. Η διαφορά είναι ότι το μητρώο δυσκαμψίας περιέχει επιπλέον όρους για τη μάζα και την απόσβεση και ότι ο όρος του δεξιού χεριού περιέχει επιπλέον παράγοντες που καθορίζουν την ταχύτητα και την επιτάχυνση στην αρχή του χρονικού βήματος (χρόνος Δt).

2.5.2 Κρίσιμο χρονικό βήμα

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα της ακολουθούμενης μεθόδου (implicit integration), το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς. Εάν είναι πολύ μεγάλο, η λύση θα παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις και η τελική απόκριση δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Το κρίσιμο χρονικό βήμα εξαρτάται από την μέγιστη συχνότητα της διέγερσης και το μέγεθος του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά προσδιορίζεται το $\Delta t_{critical}$ για ένα πεπερασμένο στοιχείο συναρτήσει της μεγαλύτερης διάστασης του στοιχείου, του εμβαδού του, του μέσου μήκους του, του είδους του, της ταχύτητας του διατμητικού κύματος και του λόγου του Poisson. Σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ως χρονικό βήμα Δt ορίζεται το μικρότερο $\Delta t_{critical}$, όπως υπολογίζεται για όλα τα στοιχεία. Ο ορισμός αυτού του χρονικού βήματος γίνεται για να εξασφαλίσει ότι το κύμα σε ένα χρονικό βήμα δεν διανύει απόσταση μεγαλύτερη από τη μικρότερη διάσταση ενός πεπερασμένου στοιχείου.

Μόλις το χρονικό βήμα οριστεί, σύμφωνα με το χρόνο του εισαγόμενου παλμού, τον αριθμό των υποβημάτων και την εξίσωση που αναφέρθηκε παραπάνω για το κρίσιμο χρονικό βήμα, μπορούν να προσδιοριστούν και οι σταθερές ολοκλήρωσης της μεθόδου Newmark που χρησιμοποιεί το PLAXIS© για να λύσει τη δυναμική εξίσωση ισορροπίας του συστήματος. Οι σταθερές αυτές ($ca_0, ca_1, ca_2, ca_3, ca_4, ca_5, ca_6, ca_7$) όλες συναρτήσει του χρονικού βήματος Δt είναι απαραίτητες για τον αριθμητικό προσδιορισμό του ενεργού ή ψευδοστατικού μητρώου δυσκαμψίας και

άρα τον υπολογισμό των μετακινήσεων, ταχυτήτων, επιταχύνσεων στο τέλος κάθε χρονικού βήματος.

2.5.3 Ορισμός ορίων

Στην περίπτωση στατικής ανάλυσης, εκ των προτέρων προσδιορισμένα όρια μετακινήσεων εισάγονται στα γεωμετρικά όρια του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Τα όρια αυτά μπορούν να είναι εντελώς ελεύθερα ή δεσμευμένα κατά μία ή δύο διευθύνσεις. Ειδικά τα κατακόρυφα όρια ενός καννάβου είναι συχνά τεχνητά ορισμένα από το χρήστη, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζεται η παραμορφωσιακή συμπεριφορά της προσομοιούμενης κατασκευής από αυτά. Με άλλα λόγια τα όρια βρίσκονται «πολύ μακριά». Για υπολογισμούς δυναμικών προβλημάτων τα όρια πρέπει εξ' αρχής να βρίσκονται πολύ μακρύτερα συγκριτικά με τα στατικά προβλήματα, γιατί, αλλιώς, τα κύματα των τάσεων μπορεί να υποστούν ανάκλαση, οδηγώντας έτσι σε αλλοιώσεις των αποτελεσμάτων. Ωστόσο τοποθετώντας τα όρια πολύ μακριά απαιτούνται πολλά επιπλέον στοιχεία και άρα πολύ παραπάνω δέσμευση μνήμης και υπολογιστικός χρόνος.

Για να αντιμετωπιστούν οι αντανακλάσεις στο όριο, ειδικές συνθήκες πρέπει να επιλεγθούν στα όρια. Ενδεικτικά αναφέρονται τα «σιωπηλά ιξώδη όρια» («silent-viscous boundaries»). Μερικές μέθοδοι για να δημιουργηθούν αυτά τα όρια είναι :

- Χρήση μισού πεπερασμένου στοιχείου (στοιχείο ορίου)
- Προσαρμογή των εδαφικών ιδιοτήτων των στοιχείων στα σύνορα (μειωμένη δυσκαμψία, υψηλό ιξώδες)
- Χρήση ιξωδών ορίων (αποσβεστήρες)

Οι προαναφερθείσες μέθοδοι έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η επιλογή της εκάστοτε μεθόδου εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στα ιξώδη όρια (viscous boundaries), ένας «αποσβεστήρας» (damper) εφαρμόζεται αντί για δεσμεύσεις σε συγκεκριμένες διευθύνσεις. Ο αποσβεστήρας διασφαλίζει ότι μία αύξηση των τάσεων στο όριο απορροφάται και δεν ανακλάται. Το όριο τότε αρχίζει να κινείται.

2.5.4 Συντελεστής απόσβεσης ξ- παράμετροι Rayleigh

Η απόσβεση των υλικών στις δυναμικές αναλύσεις οφείλεται στην ιξώδη συμπεριφορά των υλικών, στην τριβή και στην ανάπτυξη μη αναστρέψιμων παραμορφώσεων. Όλα τα μη ελαστικά μοντέλα του PLAXIS© 3D αναπτύσσουν μη αναστρέψιμες παραμορφώσεις και κατά συνέπεια απόσβεση. Ωστόσο αυτή η απόσβεση δεν επαρκεί για να αναπαραστήσει την αληθινή συμπεριφορά του εδάφους. Για παράδειγμα πολλά εδαφικά μοντέλα ακολουθούν τελείως γραμμική συμπεριφορά κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση, γεγονός που σύμφωνα με τα παραπάνω οδηγεί σε μηδενική απόσβεση. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι το Soft Soil Creep που ακολουθεί ιξώδη συμπεριφορά και σε μια δυναμική ανάλυση εμφανίζει

υστερητική απόσβεση, εμφανίζει όμως μηδαμινή παραμένουσα παραμόρφωση στην αποφόρτιση και επαναφόρτιση. Ακόμη και για μοντέλα που περιγράφουν την υστερητική συμπεριφορά κατά την φόρτιση-επαναφόρτιση, όπως το Hardening Soil Small, το υλικό δεν εμφανίζει απόσβεση. Σύμφωνα με το Hardening Soil Small model η απόσβεση εξαρτάται από τον αριθμό των κύκλων φόρτισης, για πολύ μικρές δονήσεις, κατά τις οποίες το έδαφος έχει σχεδόν ελαστική συμπεριφορά. Επομένως μια πρόσθετη απόσβεση εισαγόμενη από το χρήστη πρέπει να οριστεί για να εξασφαλιστεί καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς των εδαφών. Ο ορισμός αυτής της απόσβεσης γίνεται μέσω της απόσβεσης Rayleigh.

Πρόκειται για μια αριθμητική παράμετρο η οποία αποτελείται από τη σύνθεση ενός μητρώου απόσβεσης από ένα ποσοστό του μητρώου μάζας (M) και ένα ποσοστό του μητρώου δυσκαμψίας (K). Όπως έχει παρουσιαστεί και παραπάνω:

$$C = a_R M + b_R K \quad (2.27)$$

όπου a_R συντελεστής συμμετοχής μάζας, b_R συντελεστής συμμετοχής δυσκαμψίας.

Παρ' όλη τη σημαντική έρευνα στο πεδίο αυτό, λίγη πρόοδος έχει επιτευχθεί στην ανάπτυξη μιάς κοινώς αποδεκτής διαδικασίας για την ταυτοποίηση των παραμέτρων της απόσβεσης. Ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος όρος της μηχανικής για την απόσβεση είναι ο λόγος απόσβεσης ξ . Η τιμή $\xi = 1$, κρίσιμη απόσβεση, ορίζει το μέγεθος της απόσβεσης που απαιτείται για έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή που αφήνεται να ταλαντωθεί με κάποια αρχική παραμόρφωση ώστε να επιστρέψει στην αρχική του θέση χωρίς να ταλαντωθεί καθόλου.

Μεταξύ των συντελεστών Rayleigh και της απόσβεσης ξ μπορεί να οριστεί η ακόλουθη σχέση συναρτήσσει και της γωνιακής συχνότητας :

$$a_R + b_R \omega^2 = 2\omega\xi \quad (2.28)$$

Επιλύοντας αυτή τη σχέση ως προς την συχνότητα $f = 2\pi/\omega$, προκύπτει μια παραβολική σχέση, επομένως χρειάζονται δύο τιμές της συχνότητας για την μοναδική τιμή της απόσβεσης ώστε να οριστεί πλήρως η καμπύλη απόσβεσης για όλο το φάσμα συχνοτήτων. Αυτή τη διαδικασία ακολουθεί και το PLAXIS© για τον ορισμό της απόσβεσης και των συντελεστών Rayleigh, επομένως η επιλογή των τιμών της συχνότητας είναι αρκετά σημαντική. Μεταξύ των δύο αυτών τιμών της συχνότητας, η απόσβεση παίρνει τιμές μικρότερες από την ορισμένη απόσβεση, ενώ εκτός των τιμών αυτών μεγαλύτερη. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι από τη βιβλιογραφία προτείνεται η πρώτη συχνότητα να έχει την τιμή της ιδιοσυχνότητας του εδάφους και η δεύτερη να έχει τιμή κοντά στο λόγο της δεσπόζουσας συχνότητας της διέγερσης προς την ιδιοσυχνότητα του εδάφους.

2.5.5 Σχηματισμός καννάβου και μέγεθος στοιχείων

Η υπολογιστική διαδικασία του PLAXIS© χωρίζεται σε υπολογιστικές φάσεις, σε αντιστοιχία με τις κατασκευαστικές φάσεις ενός έργου, όπως π.χ. η περίοδος στερεοποίησης και η ενεργοποίηση ενός φορτίου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Κάθε υπολογιστική φάση γενικά διαιρείται σε έναν αριθμό βημάτων. Αυτό είναι απαραίτητο επειδή η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους απαιτεί το φορτίο να εφαρμόζεται σε μικρές δόσεις (βήματα φορτίου-load steps). Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αρκετό να προσδιορίζεται η κατάσταση που πρέπει να επιτευχθεί στο τέλος μιας υπολογιστικής φάσης. Αυτομάτως το PLAXIS© φροντίζει για την υποδιαίρεση στα κατάλληλα βήματα φορτίου.

Όταν η γεωμετρία του προβλήματος έχει πλήρως καθοριστεί, πρέπει να διαιρεθεί σε πεπερασμένα στοιχεία για να προχωρήσουμε στον υπολογισμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η σύνθεση πεπερασμένων στοιχείων ονομάζεται κάνναβος. Ο κάνναβος πρέπει να είναι επαρκώς πυκνός για ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα. Από την άλλη, πολύ πυκνοί κάνναβοι πρέπει να αποφεύγονται γιατί αυτό οδηγεί σε μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους. Ο σχηματισμός του καννάβου που γίνεται αυτόματα στο PLAXIS© λαμβάνει υπόψη την στρωματογραφία του εδάφους, όπως επίσης τα αντικείμενα, τα φορτία και τις συνοριακές συνθήκες.

Το βασικό εδαφικό στοιχείο στον τρισδιάστατο κάνναβο πεπερασμένων στοιχείων είναι το τετράεδρο στοιχείο των 10 κόμβων. Διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται για διαφορετικά δομικά στοιχεία, όπως π.χ. για τη δοκό το γραμμικό πεπερασμένο στοιχείο τριών κόμβων. Για τον σχηματισμό του καννάβου απαιτείται μια καθολική παράμετρος διακριτοποίησης, που αντιπροσωπεύει το χαρακτηριστικό μέγεθος του στοιχείου, I_e . Στο PLAXIS© αυτή η παράμετρος υπολογίζεται από τις μεγαλύτερες και μικρότερες γεωμετρικές διαστάσεις του προβλήματος (x_{min} , x_{max} , y_{min} , y_{max} , z_{min} , z_{max}) και από τη διασπορά των στοιχείων που έχει επιλεγεί, που από προεπιλογή στο PLAXIS© ορίζεται medium. Το χαρακτηριστικό μέγεθος του στοιχείου (target element size) ή μέσο μέγεθος στοιχείου (Average element size) υπολογίζεται από τη σχέση :

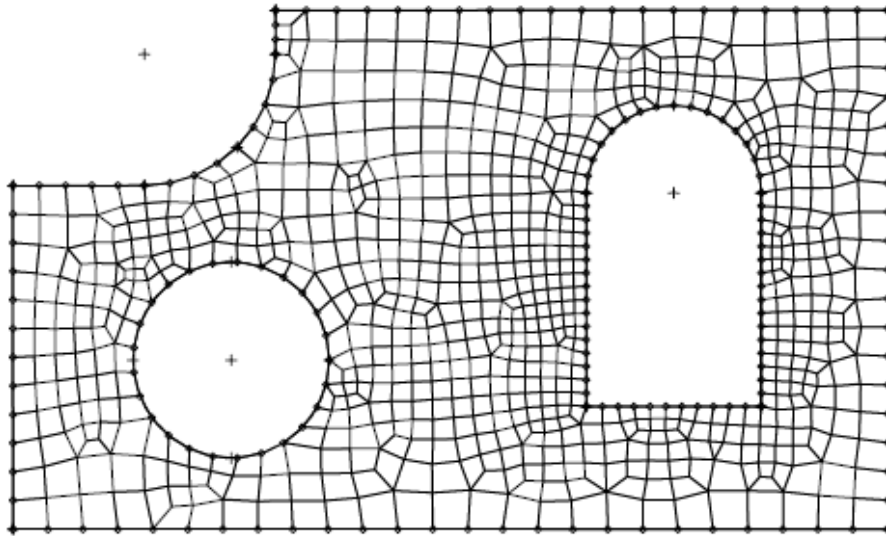
$$I_e = \left(\frac{r_e}{20}\right) [(x_{min} - x_{max})^2 + (y_{min} - y_{max})^2 + (z_{min} - z_{max})^2]^{0.5} \quad (2.29)$$

Η σχέση αυτή βασίζεται στην παράμετρο r_e , τον παράγοντα σχετικού μεγέθους στοιχείου (Relative element size factor), ο οποίος παίρνει τιμές ανάλογα με την πυκνότητα-διασπορά του καννάβου ως εξής :

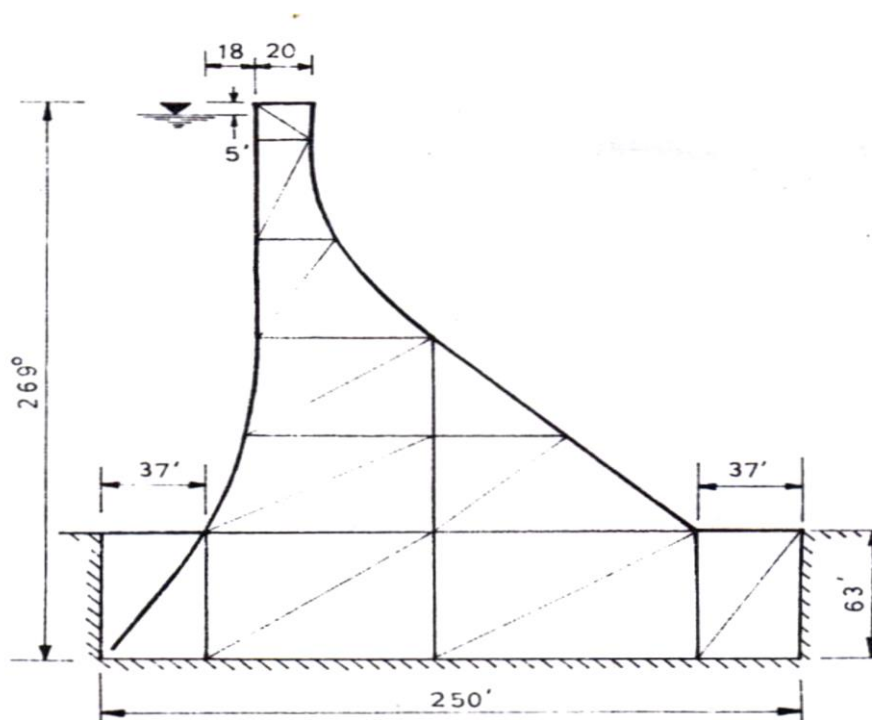
- Very coarse : $r_e = 2$
- Coarse : $r_e = 1.5$
- Medium : $r_e = 1$
- Fine $r_e = 0.7$
- Very fine : $r_e = 0.5$

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι το PLAXIS© αυτόματα προχωράει σε πύκνωση στα σημεία ανομοιογένειας ή διακοπής/παρεμβολής στη γεωμετρία, καθώς επίσης δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη για αναβαθμισμένη πύκνωση μέσω της επιλογής «enhanced refinement».

ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2



Εικόνα 2.1: Διακριτοποίηση μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Katsikadelis, 2012)



Εικόνα 2.2 Ανάλυση φράγματος σε τριγωνικά στοιχεία

Read input data	
Form stiffness matrix	$\underline{K} = \int \underline{B}^T \underline{D}^e \underline{B} dV$
New step	$i \rightarrow i + 1$
Form new load vector	$\underline{f}_{ex}^i = \underline{f}_{ex}^{i-1} + \Delta \underline{f}_{ex}$
Form reaction vector	$\underline{f}_{in} = \int \underline{B}^T \underline{\sigma}_c^{i-1} dV$
Calculate unbalance	$\Delta \underline{f} = \underline{f}_{ex}^i - \underline{f}_{in}$
Reset displacement increment	$\Delta \underline{v} = 0$
New iteration	$j \rightarrow j + 1$
Solve displacements	$\delta \underline{v} = \underline{K}^{-1} \Delta \underline{f}$
Update displacement increments	$\Delta \underline{v}^j = \Delta \underline{v}^{j-1} + \delta \underline{v}$
Calculate strain increments	$\Delta \underline{\varepsilon} = \underline{B} \Delta \underline{v}^j; \delta \underline{\varepsilon} = \underline{B} \delta \underline{v}$
Calculate stresses: Elastic	$\underline{\sigma}^{tr} = \underline{\sigma}_c^{i-1} + \underline{D}^e \Delta \underline{\varepsilon}$
Equilibrium	$\underline{\sigma}^{eq} = \underline{\sigma}_c^{ij-1} + \underline{D}^e \delta \underline{\varepsilon}$
Constitutive	$\underline{\sigma}_c^{ij} = \underline{\sigma}^{tr} - \frac{\langle \underline{f}(\underline{\sigma}^{tr}) \rangle}{d} \underline{D}^e \frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{\sigma}}$
Form reaction vector	$\underline{f}_{in} = \int \underline{B}^T \underline{\sigma}_c^{ij} dV$
Calculate unbalance	$\Delta \underline{f} = \underline{f}_{ex}^i - \underline{f}_{in}$
Calculate error	$e = \frac{ \Delta \underline{f} }{ \underline{f}_{ex}^i }$
Accuracy check	if $e > e_{tolerated} \rightarrow$ new iteration
Update displacements	$\underline{v}^j = \underline{v}^{j-1} + \Delta \underline{v}$
Write output data (results)	
If not finished \rightarrow new step	
Finish	

Εικόνα 2.3 Υπολογιστική διαδικασία PLAXIS© (tutorial)

3 Εδαφική Απόκριση σε Μονοδιάστατο Σεισμικό Κύμα S και P

3.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Το παρόν κεφάλαιο στοχεύει στην αναπαραγωγή των βιβλιογραφικών σχέσεων για την εδαφική ενίσχυση μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS® (3D AE). Με αυτό τον τρόπο θα συγκριθεί η μορφή και η τιμή των συντελεστών εδαφικής ενίσχυσης που βρέθηκαν μέσω πεπερασμένων στοιχείων με εκείνες των θεωρητικών σχέσεων. Σκοπός των παραπάνω είναι η πληροφόρηση για την ορθότητα της προσομοίωσης της εδαφικής ενίσχυσης και του σεισμού, κατ' επέκταση, από το πρόγραμμα PLAXIS®, να διακριθούν τυχόν παρεκκλίσεις και να εξηγηθεί η τυχόν ύπαρξή τους.

Αρχικά βρέθηκαν οι βιβλιογραφικές σχέσεις των δυναμικών συντελεστών ενίσχυσης για διατμητικά-S και διαμήκη-P κύματα, τόσο για ομοιογενές, όσο και για δίστρωτο έδαφος. Οι γενικοί τύποι των σχέσεων καταγράφηκαν και στη συνέχεια έγινε αντικατάσταση των κατάλληλων εδαφικών παραμέτρων του προβλήματος, ώστε να σχηματιστούν οι γραφικές παραστάσεις των συντελεστών, συναρτήσει της συχνότητας της διέγερσης f . Στα ίδια διαγράμματα θα προστεθούν αργότερα τα αποτελέσματα των αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία.

Έπειτα, αφού δημιουργηθεί το γραμμικώς ελαστικό μοντέλο εδαφικής στήλης, διαστάσεων $1 \times 1 \times 20 \text{ m}$ και εισαχθούν οι κατάλληλες παράμετροι του εδάφους, θα γίνουν δυναμικές αναλύσεις τόσο σε διατμητικά- S, όσο και σε διαμήκη- P σεισμικά κύματα για μοναδιαία επιτάχυνση. Οι συγκεκριμένες αναλύσεις γίνονται για ομοιογενές και δίστρωτο εδαφικό σχηματισμό, με κατάλληλη απόσβεση ξ . Οι αναλύσεις γίνονται για ενδεικτικές τιμές των συχνοτήτων διέγερσης (περίπου κάθε $0,5 \text{ Hz}$), με την απαραίτητη πύκνωση σε κρίσιμες περιοχές όπως είναι οι συντονισμοί, όπου οι καμπύλες είναι πιο απότομες. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 134 αναλύσεις.

3.2 Θεωρητικές σχέσεις εδαφικής απόκρισης

3.2.1 Εδαφική απόκριση ομοιογενούς σχηματισμού

Θεωρούμε επιφανειακό στρώμα εδάφους το οποίο είναι ιστροπικό και γραμμικά ελαστικό, το οποίο καλύπτει στρώμα βράχου (Εικόνα 3.1). Έστω αρμονική κίνηση «δεξιά-αριστερά» του βράχου που προκαλεί **κατακόρυφη διάδοση διατμητικών- S** κυμάτων στο εδαφικό στρώμα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η οριζόντια μετακίνηση των σημειακών μαζών είναι:

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t - kz)} + Be^{i(\omega t + kz)} \quad (3.1)$$

Υπενθυμίζεται ότι A, B είναι τα πλάτη των κυμάτων με κατεύθυνση προς τα πάνω και προς τα κάτω αντίστοιχα, ω είναι η κυκλική συχνότητα κίνησης του βράχου, όπου k ο αριθμός κύματος. Οι συνοριακές συνθήκες στην επιφάνεια επιβάλλουν:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=0} = 0 \Rightarrow \tau(0, t) = G \gamma(0, t) = G \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

Αντικαθιστώντας την (3.1) στη (3.2) και για $A = B$, που είναι η μοναδική λύση προκύπτει:

$$u(z, t) = 2A \frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2} e^{i\omega t} = u_0 \cos kz e^{i\omega t} \quad (3.3)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την εξίσωση κίνησης στάσιμου κύματος, που δημιουργείται από τα ανακλώμενα και διερχόμενα κύματα εντός του εδαφικού στρώματος. Μέσω της παραπάνω εξίσωσης ορίζεται μια συνάρτηση που περιγράφει τη σχέση κίνησης μεταξύ οποιωνδήποτε δύο σημείων μέσα στην εδαφική στρώση. Διαλέγοντας το σημείο της επιφάνειας $z = 0$ και το σημείο τομής βράχου- εδάφους $z = H$ έχουμε:

$$\frac{u_{max}(z=0)}{u_{max}(z=H)} = A = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{V_s}\right)} \quad (3.4)$$

Από την τελευταία σχέση βλέπει κανείς πως η μετατόπιση στην επιφάνεια είναι τουλάχιστον όσο μεγάλη είναι και η μετατόπιση σε βάθος H , αφού ο παρονομαστής δεν μπορεί να έχει μεγαλύτερο μέτρο από 1. Η απόλυτη τιμή της παραπάνω σχέσης αποτελεί το λόγο του πλάτους μετατόπισης στην επιφάνεια με το πλάτος μετατόπισης στην τομή των δύο στρωμάτων. Παρατηρείται πως όσο ο λόγος $(\omega H/V_s)$ πλησιάζει το $\pi/2 + n\pi$, τόσο το A πλησιάζει το άπειρο και επομένως έχουμε άπειρη εδαφική ενίσχυση ή συντονισμό (Εικόνα 3.2). Φαίνεται εδώ η μεγάλη σημασία των όρων ω, H και V_s , ακόμη και στην απλή αυτή περίπτωση.

Στην περίπτωση που έχουμε απόσβεση τιμής ξ και ληφθούν υπόψη απώλειες ενέργειας, είναι εφικτό στους προηγούμενους τύπους να αντικατασταθούν οι ταχύτητες με τις αντίστοιχες μιγαδικές τους τιμές. Επομένως θα έχουμε:

$$V_s^* = V_s \sqrt{1 + 2i\xi} \quad (3.5)$$

$$k^* = \frac{\omega}{V_s^*} \quad (3.6)$$

$$A = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{V_s^*}\right)} \quad (3.7)$$

Αν αποτυπωθεί η απόλυτη τιμή της παραπάνω σχέσης σε διάγραμμα συναρτήσεως της συχνότητας (Εικόνα 3.3), φαίνεται πως τα τοπικά μέγιστα που δημιουργούνται αυτή τη φορά είναι εντονότερα κατά τις συχνότητες που συναντώνται συνήθως στη φύση, ενώ σε μεγαλύτερες συχνότητες δεν παρατηρούνται έντονα μέγιστα, ούτε εξάρτηση από το λόγο απόσβεσης. Η πρώτη συχνότητα συντονισμού είναι κατά προσέγγιση (Gazetas G. , 2007):

$$f_1^* \cong \frac{V_s}{4H} \frac{1}{1+\xi^2} \quad (3.8)$$

ενώ η χαρακτηριστική περίοδος του πρώτου συντονισμού με τη μεγαλύτερη ενίσχυση είναι:

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega_0^*} = \frac{4H}{V_s^*} \quad (3.9)$$

Για την εύρεση της εδαφικής ενίσχυσης λόγω **διαμήκων- P μονοδιάστατων κυμάτων**, θεωρούμε την εδαφική στήλη ύψους H της Εικόνας 3.4, όπου επιβάλλεται αρμονική διέγερση $P_0 e^{i\omega t}$. Στην μόνιμη κατάσταση (δημιουργία στάσιμων κυμάτων εντός της στήλης), η λύση της κυματικής εξίσωσης θα έχει τη μορφή:

$$u(x, t) = (B^+ e^{-ikx} + B^- e^{+ikx}) e^{i\omega t} \quad (3.10)$$

όπου $k = \omega/V_p$ ο αριθμός κύματος. Επιβάλλοντας τις συνοριακές συνθήκες στην επιφάνεια του εδάφους, καθώς και στη διεπιφάνεια εδάφους και βράχου, προκύπτει ότι:

$$x = 0 : P_0 e^{i\omega t} = -\rho V_p^2 A \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (3.11)$$

$$x = H : u(x, t) = 0 \quad (3.12)$$

όπου A το εμβαδό της διατομής της εδαφικής στήλης και ρ η πυκνότητα του εδάφους. Από τις παραπάνω σχέσεις υπολογίζονται τα πλάτη B^+ και B^- και προκύπτει τελικώς:

$$u(x, t) = -i \frac{P_0}{\rho V_p A \omega} \frac{e^{ik(H-x)} - e^{-ik(H-x)}}{e^{ikH} + e^{-ikH}} e^{i\omega t} \quad (3.13)$$

Στην παραπάνω, για $x = 0$, έχουμε:

$$D = \frac{P_0 H}{A M} \frac{\tan\left(\frac{\omega H}{V_p}\right)}{\frac{\omega H}{V_p}} e^{i\omega t} \quad (3.14)$$

όπου $M = \rho V_p^2$ και, θέτοντας $u_{stat} = P_0 H / A M$, προκύπτει:

$$D = \frac{u(0)}{u_{stat}} = \frac{\tan\left(\frac{\omega H}{V_p}\right)}{\frac{\omega H}{V_p}} e^{i\omega t} \quad (3.15)$$

Ομοίως με πριν, για απόσβεση ξ και απώλειες ενέργειας, η ταχύτητα διάδοσης έχει τη μορφή:

$$V_p^* = V_p \sqrt{1 + 2i\xi} \quad (3.16)$$

Η απόλυτη τιμή της σχέσης (3.15) φαίνεται στην Εικόνα 3.5, που αποτελεί το διάγραμμα του δυναμικού συντελεστή ενίσχυσης για μηδενική απόσβεση. Λαμβάνοντας υπόψη την απόσβεση, καταλήγουμε στη σχέση:

$$|D| = \left| \frac{\tan\left(\frac{\omega H}{V_p \sqrt{1 + 2i\xi}}\right)}{\frac{\omega H}{V_p \sqrt{1 + 2i\xi}}} \right| \quad (3.17)$$

3.2.2 Απόκριση εδαφικού σχηματισμού δύο στρώσεων

Έστω μια εδαφική στήλη μοναδιαίας τομής ($\alpha = 1$), που αποτελείται από δύο εδαφικές στρώσεις πάχους H_1 και H_2 , αντίστοιχα, με ιδιότητες $\rho_{1,2}$, $V_{s1,2}$, $\xi_{1,2}$. Για **διατμητικό- S κύμα** που διαδίδεται από υποκείμενο ελαστικό βράχο, ισχύει:

$$u_1(x, t) = A e^{i(\omega t + k_1 x)} + B e^{i(\omega t - k_1 x)} \quad (3.18)$$

$$u_2(x, t) = C e^{i(\omega t + k_2 x)} + D e^{i(\omega t - k_2 x)} \quad (3.19)$$

Όπου $k_{1,2} = \omega / V_{s1,2}^*$, και $V_{s1,2}^* = V_{s1,2} \sqrt{1 + 2i\xi_{1,2}}$. Στην επιφάνεια του εδάφους οι τάσεις είναι μηδενικές, στην διεπιφάνεια των δύο υλικών υπάρχει η απαίτηση ίσων τάσεων και μετακινήσεων, ενώ στην βάση της στήλης έχουμε μηδενική μετακίνηση ως προς το βραχώδες υπόβαθρο. Εφαρμόζοντας τις συνοριακές συνθήκες και με τη χρήση των εξισώσεων διάδοσης, μπορεί να βρεθεί ο δυναμικός συντελεστής ενίσχυσης δίστρωτου εδάφους. Εδώ, χάριν απλότητας, καταγράφεται η τελική μορφή του συντελεστή, που είναι:

$$A_2 = \frac{1}{IR \sin\left(\frac{\omega H_2}{V_{S2}\sqrt{1+2i\xi_1}}\right) \sin\left(\frac{\omega H_1}{V_{S1}\sqrt{1+2i\xi_1}}\right) - \cos\left(\frac{\omega H_2}{V_{S2}\sqrt{1+2i\xi_2}}\right) \cos\left(\frac{\omega H_1}{V_{S1}\sqrt{1+2i\xi_2}}\right)} \quad (3.20)$$

$$IR = \frac{\rho_1 V_{S1} \sqrt{1+2i\xi_1}}{\rho_2 V_{S2} \sqrt{1+2i\xi_2}} \quad (3.21)$$

Ο συντελεστής ενίσχυσης εδάφους δύο στρώσεων για διάδοση **διαμήκων- Ρ κυμάτων**, δεν βρέθηκε στη βιβλιογραφία, επομένως έγινε η κατάλληλη μαθηματική αναπαραγωγή του μέσω του μαθηματικού πακέτου Mathcad. Αρχικά έγινε η επίλυση των σχέσεων «με το χέρι» και στη συνέχεια οι σχέσεις μεταφέρθηκαν στο μαθηματικό πρόγραμμα ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή των παραμέτρων του εδάφους και η δημιουργία διαγραμμάτων. Η ύπαρξη του μιγαδικού μέρους καθιστά απαραίτητη τη χρήση των μαθηματικών πακέτων, λόγω της πολυπλοκότητας των πράξεων.

Αρχικά ορίζεται η εδαφική στήλη της Εικόνας 3.6, με τη μόνη διαφορά πως στην επιφάνεια του εδάφους ασκείται δυναμικό φορτίο που μεταβάλλεται με το χρόνο ($P_0 e^{i\omega t}$). Οι συνοριακές συνθήκες είναι ίδιες με προηγουμένως, και οι σχέσεις τελικώς είναι της μορφής:

$$D_2 = \frac{u(0)}{u_{stat}} = \frac{(A+B)}{u_{stat}} e^{i\omega t} \quad (3.22)$$

όπου είναι:

$$A = \frac{\delta\beta(1-\gamma)}{1+\gamma+\delta(1-\gamma)} \quad (3.23)$$

$$\delta = e^{2iH_1 k_1} \quad (3.24), \quad \beta = \frac{P_0}{i \rho_1 V_{p1}^2 k_1} \quad (3.25), \quad \gamma = \left(\frac{1-e^{2iH_2 k_2}}{1+e^{2iH_2 k_2}} \right) \frac{\rho_1 V_{p1}^2 k_1}{\rho_2 V_{p2}^2 k_2} \quad (3.26)$$

$$B = A - \beta \quad (3.27)$$

$$u_{stat} = \frac{P_0}{\alpha} \frac{D_{S1} H_2 + D_{S2} H_1}{D_{S1} D_{S2}} \quad (3.28)$$

όπου $D_s = V_p^2 \rho$, το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης της στρώσης. Οι γραφικές παραστάσεις των συντελεστών εδαφικής ενίσχυσης του δίστρωτου εδάφους για διάδοση διατμητικού και διαμήκους κύματος βρίσκονται στη συνέχεια του κεφαλαίου, όπου συγκρίνονται με τους αντίστοιχους συντελεστές που βρέθηκαν μέσω αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία.

3.3 Ανάλυση με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS©

3.3.1 Περιγραφή της προσομοίωσης

Πρώτο βήμα για την αριθμητική ανάλυση του φαινομένου της εδαφικής ενίσχυσης λωρίδας εδάφους στο λογισμικό PLAXIS© αποτελεί η κατασκευή της γεωμετρίας και η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων. Κατασκευάστηκαν τέσσερα διαφορετικά μοντέλα, δύο για ομοιογενή εδαφικό σχηματισμό, για διάδοση διατμητικού-S κύματος και για διάδοση διαμήκους-P κύματος και δύο για εδαφικό σχηματισμό δύο στρώσεων, για τα δύο είδη κυμάτων. Η στήλη είναι τετραγωνικής επιφάνειας διαστάσεων 1×1 και εκτείνεται σε βάθος 20 μέτρων από την επιφάνεια. Επίσης για όλα τα εδαφικά υλικά ορίστηκε γραμμική ελαστική συμπεριφορά (linear elastic) και ξηρές συνθήκες με πλήρη απουσία νερού (επιλογή «Dry» στο water conditions).

Για την πρώτη περίπτωση, **ομοιογενούς εδαφικής στήλης και διάδοση S-κύματος** (Εικόνα 3.6(α)) εισήχθησαν οι εξής παράμετροι:

Πυκνότητα εδαφικού υλικού : $\rho = 2 \text{ kg/m}^3$

Συντελεστής Poisson : $\nu = 0,3$

Συντελεστής απόσβεσης : $\xi = 5 \%$

Ταχύτητα διάδοσης S κύματος : $V_s = 150 \text{ m/s}$

Με αντικατάσταση των παραπάνω στις κατάλληλες σχέσεις, αυτόματα υπολογίζονται το μέτρο διάτμησης $G = 45000 \text{ KPa}$ από τη σχέση $G = V_{s2}\rho$ και το μέτρο ελαστικότητας $E = 117000 \text{ KPa}$ από τη σχέση $E = 2G(\nu + 1)$. Επίσης εύκολα μπορεί να υπολογιστεί η ιδιοπερίοδος της εδαφικής στήλης από τη σχέση $T_s = 4H/V_s = 0,53 \text{ s}$, όπως και η ιδιοσυχνότητα $f = 1,875 \text{ Hz}$.

Στην περίπτωση διάδοσης διατμητικού- S κύματος δημιουργείται μια επιφάνεια στη βάση της στήλης, στα -20 μέτρα στην οποία θα εφαρμοστεί η σεισμική διέγερση ως ορισμένη παραμόρφωση μέσω της επιλογής του PLAXIS© «create surface prescribed displacement». Η επιφάνεια αυτή αποτελεί την προσομοίωση της υποκείμενης βραχώδης επιφάνειας που θα υπήρχε σε πραγματικές συνθήκες. Ορίζεται μοναδιαία μετακίνηση μόνο στη διεύθυνση $x'x$ η οποία πολλαπλασιάζεται με τον δυναμικό συντελεστή (dynamic multiplier) που έχει τη μορφή επιτάχυνσης που μεταβάλλεται αρμονικά με το χρόνο. Το πλάτος της ταλάντωσης είναι κάθε φορά μοναδιαίο και η συχνότητα της διέγερσης μεταξύ 0,5 και 14,9 Hz με βήμα 0,5 Hz περίπου. Συνολικά έγιναν 43 αναλύσεις. Σημειώνεται ότι σε κάποια σημεία, κυρίως στις μικρές συχνότητες και κοντά στις δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες χρειάστηκε να γίνει πύκνωση και έτσι μειώθηκε τοπικά το βήμα των συχνοτήτων.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν δύο κατακόρυφες πλευρικές επιφάνειες στη στήλη κατά μήκος του άξονα $x'x$ ώστε να οριστούν διεπιφάνειες (interfaces) σε αυτές προς το εσωτερικό του μοντέλου και να εξασφαλιστεί ότι το πρόγραμμα θα θεωρεί ότι η εδαφική στήλη μπορεί να αποχωρίζεται από τα τοιχώματα και να υποχωρεί προς το εσωτερικό.

Χρειάζεται επίσης να οριστεί για το εδαφικό υλικό απόσβεση $\xi = 5\%$ για τη συγκεκριμένη συχνότητα διέγερσης, η οποία κυμαίνεται από 0,5 έως 14,9 Hz. Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο αυτό γίνεται μέσω των συντελεστών Rayleigh. Για να οριστούν οι συντελεστές αυτοί, χρειάζεται να δοθούν δύο τιμές συχνοτήτων με την ίδια τιμή της απόσβεσης (την επιθυμητή) για να αποτυπωθεί το παραβολικό διάγραμμα $f - \xi$. Όμως εντός αυτών των συχνοτήτων η απόσβεση είναι μικρότερη της επιθυμητής και εκτός αυξάνει με εκθετικό τρόπο. Για να εκμηδενίσουμε το εύρος των συχνοτήτων στο οποίο η απόσβεση είναι μικρότερη από 5% ορίζονται οι δύο αυτές συχνότητες με διαφορά $\pm 0,01$ από την επιθυμητή συχνότητα (Εικόνα 3.9). Πρακτικά, έχοντας μονοχρωματική διέγερση (αρμονική μιας συχνότητας) οι τιμές της απόσβεσης, εκτός από τη συγκεκριμένη συχνότητα της διέγερσης δεν επηρεάζουν το πρόβλημα, επομένως εξασφαλίζεται ότι το ολικό ελάχιστο του διαγράμματος αντιστοιχεί στο ζεύγος $(f, \xi) = (\text{συχνότητα διέγερσης}, 5\%)$. Ξεχωριστή ανάλυση έγινε για την περίπτωση όπου η συχνότητα διέγερσης ισούται με την ιδιοσυχνότητα του εδάφους.

Η πυκνότητα του καννάβου που επιλέχθηκε ήταν η μεσαία (medium) αρχικά, ωστόσο βρέθηκε ότι ο πιο αδρός κάνναβος (coarse) δίνει αποτελέσματα πιο κοντά στη θεωρία, οπότε και υιοθετήθηκε η ανάλυση με coarse meshing (Εικόνα 3.7). Όλα τα στοιχεία του μοντέλου ενεργοποιήθηκαν σε μία φάση, έτσι συνολικά είχαμε δύο φάσεις κατασκευής μαζί με την αρχική (Initial conditions). Ακόμη στις συνθήκες μοντέλου (model conditions) επιλέχθηκε μόνο για τα όρια στη δυναμική ανάλυση (dynamics), το «ελεύθερο πεδίο» (free field) στη διεύθυνση x και «κενό» (none) στις διευθύνσεις y, z . Αυτή η επιλογή ορίζει την κίνηση των ορίων της στήλης κατά την δυναμική φόρτιση. Έχει να κάνει με τη θεώρηση ή μη από το PLAXIS© απορροφητήρων μεταξύ των τοιχωμάτων και μια ιδεατής κατασκευής «μακριά και έξω» από το μοντέλο.

Για τον υπολογισμό της εδαφικής ενίσχυσης τα αποτελέσματα πρέπει να εξάγονται με βάση την απόκριση της σταθερής κατάστασης και όχι τη μέγιστη επιτάχυνση των πρώτων κύκλων φόρτισης. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας επαρκή χρόνο ανάλυσης για την ολοκλήρωση τουλάχιστον 15 κύκλων ταλάντωσης, ο οποίος εξαρτάται από την εκάστοτε συχνότητα διέγερσης. Το χρονικό βήμα είναι 0,01, ενώ το σημείο που επιλέγεται για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων είναι στη μέση της επιφάνειας της στήλης. Το μέγεθος που θα καταγραφεί είναι η οριζόντια συνιστώσα της επιτάχυνσης, a_x (Εικόνα 3.10).

Για την δεύτερη περίπτωση, **ομοιογενούς εδάφους και διάδοση P-κύματος** (Εικόνα 3.6(γ)), οι παράμετροι του εδάφους παραμένουν ίδιες με την πρώτη περίπτωση, με ταχύτητα διάδοσης $V_p = 280 \text{ m/s}$, όπως προκύπτει από τη σχέση $V_p = V_s \sqrt{2(v-1)/(1-2v)}$ για $V_s = 150 \text{ m/s}$. Αυτό που αλλάζει είναι το είδος της διέγερσης που σε αυτή την περίπτωση γίνεται με την εισαγωγή κατακόρυφης τάσης, σ_z στην επιφάνεια της στήλης (surface load) με τιμή -100 kPa , η οποία πολλαπλασιάζεται με το δυναμικό συντελεστή (load multiplier) μοναδιαίου μεγέθους. Σε αυτή την περίπτωση επομένως δεν χρειάζεται ο ορισμός επιφάνειας στη βάση της στήλης ούτε διεπιφανειών κατά x . Το εύρος των συχνοτήτων της συγκεκριμένης υποπερίπτωσης είναι και πάλι μεταξύ $0,5 \text{ Hz}$ και $14,9 \text{ Hz}$, με τις αναλύσεις να ανέρχονται στις 23, έπειτα από τις απαραίτητες τοπικές πυκνώσεις.

Ωστόσο χρειάζεται να οριστούν οι παραμορφώσεις των ορίων (deformations) στο model conditions ως «ελεύθερες» (free), εκτός από τη βάση της στήλης, z_{min} , που πρέπει να θεωρηθεί πακτωμένη (fully fixed). Τέλος σε αυτή την περίπτωση καταγράφεται η κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης, a_z , στο μέσον της επιφάνειας της στήλης (Εικόνα 3.11).

Για την τρίτη περίπτωση, **δίστρωτου εδαφικού σχηματισμού και διάδοση S-κύματος** (Εικόνα 3.6(β)), ο εδαφικός σχηματισμός αποτελείται πλέον από ένα στρώμα πάχους 6 μέτρων μέχρι βάθος -6 m και από ένα δεύτερο στρώμα πάχους 14 μέτρων που εκτείνεται από -6 m έως -20 m . Οι ιδιότητες των εδαφικών υλικών που εισήχθησαν είναι οι εξής :

	<u>Στρώμα 1</u>	<u>Στρώμα 2</u>
Πυκνότητα εδαφικού υλικού :	$\rho_1 = 1,7 \text{ kg/m}^3$	$\rho_2 = 2 \text{ kg/m}^3$
Συντελεστής Poisson :	$\nu_1 = 0,3$	$\nu_2 = 0,3$
Συντελεστής απόσβεσης :	$\xi_1 = 2 \%$	$\xi_2 = 5 \%$
Ταχύτητα διάδοσης S-κύματος :	$V_{s1} = 100 \text{ m/s}$	$V_{s2} = 250 \text{ m/s}$

Υπολογίζονται τα μέτρα διάτμησης $G_1 = 17000 \text{ kPa}$ και $G_2 = 125000 \text{ kPa}$ και τα μέτρα ελαστικότητας $E_1 = 44200 \text{ kPa}$ και $E_2 = 325000 \text{ kPa}$. Σημειώνεται ότι η ιδιοπερίοδος της εδαφικής λωρίδας δύο στρωμάτων δεν μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά, αλλά θα προκύψει από την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε για την 1^η περίπτωση εξασφαλίζεται ότι η απόσβεση για το κάθε υλικό έχει ελάχιστη τιμή την επιθυμητή (2 % και 5 % για το υπερκείμενο και το υποκείμενο στρώμα αντίστοιχα, Εικόνες 3.8 και 3.9) για συχνότητα ίση με τη συχνότητα διέγερσης. Για την περίπτωση αυτή πραγματοποιήθηκαν 46 αναλύσεις, ενώ κατα τα άλλα ισχύει ό,τι αναφέρθηκε στην 1^η περίπτωση και δεν επαναλαμβάνεται χάριν απλότητας.

Για την τέταρτη περίπτωση, **δίστρωτου εδαφικού σχηματισμού και διάδοση-P κύματος** (Εικόνα 3.6(δ)) ισχύει ό,τι αναφέρθηκε στην 2^η περίπτωση, έχοντας τώρα δύο εδαφικές στρώσεις (βλ. Περίπτωση 3^η), με ταχύτητες $V_{p1} = 187 \text{ m/s}$ και $V_{p2} = 467 \text{ m/s}$ αντίστοιχα, όπως υπολογίζονται για $V_{s1} = 100 \text{ m/s}$ και $V_{s2} = 250 \text{ m/s}$. Στη συνέχεια, με τον ίδιο τρόπο των προηγούμενων περιπτώσεων, ρυθμίζεται η κατάλληλη απόσβεση και γίνονται οι 22 ζητούμενες αναλύσεις. Και σε αυτή την υποπερίπτωση έγινε τοπική πύκνωση αναλύσεων κοντά στις περιοχές συντονισμού.

3.3.2 Πορεία υπολογισμών και εξαγωγή αποτελεσμάτων

Με βάση όσα αναφέρθηκαν παραπάνω πραγματοποιούνται οι αναλύσεις. Λόγω της μικρής γεωμετρίας της προσομοίωσης, ο κάρναβος αποτελούταν από λίγα στοιχεία και έτσι οι αναλύσεις διεξάγονταν σε σύντομο χρόνο.

Παρακολουθείται η μεταβολή της επιτάχυνσης στην επιφάνεια συναρτήσει του χρόνου δυναμικής ανάλυσης για κάθε συχνότητα διέγερσης. Για την κάθε ανάλυση κατασκευάζεται το διάγραμμα της ζητούμενης επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης. Στην περίπτωση διαμηκούς-S κύματος ενδιαφέρει η συνιστώσα κατά x , ενώ στην περίπτωση διαμήκους-P κύματος η συνιστώσα κατά z (Εικόνες 3.10 και 3.11). Η διαφορά αυτή οφείλεται στη διαφορετική διεύθυνση της διέγερσης (διάδοσης) του κάθε είδους κύματος. Για το σταθερό πλέον πλάτος της επιτάχυνσης στο τέλος του 15ου κύκλου, βρίσκεται η μέγιστη τιμή της αντίστοιχης συνιστώσας, για κάθε ανάλυση. Το μέγεθος αυτό, διαιρούμενο με την τιμή της εισαγόμενης επιτάχυνσης της διέγερσης, δίνουν το συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης. Στην περίπτωση αυτή επιλέχθηκε μοναδιαίο μέγεθος διέγερσης και έτσι οι τιμές των συνιστωσών της επιτάχυνσης που εξάγονται από την ανάλυση θα δώσουν το ζητούμενο συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης.

Σκοπός των συγκεκριμένων αναλύσεων είναι να προκύψουν τα διαγράμματα του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης για τις διαφορετικές συχνότητες διέγερσης για τις τέσσερις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω (ομοιογενές και δίστρωτο έδαφος για S και P κύμα). Έτσι μπορεί κανείς να πληροφορηθεί για την αριθμητική ευστάθεια των υπολογισμών μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS©, συγκριτικά με τις σχέσεις της βιβλιογραφίας. Μέσω αυτής της επαλήθευσης γίνεται επιτρεπτή η χρήση του προγράμματος για πιο πολύπλοκες αναλύσεις, παραμένοντας ωστόσο στους ίδιους κανόνες ως προς τη συμπεριφορά των υλικών. Με βάση όλα τα παραπάνω συγκεντρώνονται όλες οι ζητούμενες τιμές και κατασκευάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα. Στη συνέχεια, γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και θα καταγραφούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων- Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα δημιουργήθηκαν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των Εικόνων 3.12 και 3.13. Αρχικά παρατηρείται πως οι μέγιστοι συντελεστές εδαφικής ενίσχυσης έχουν τιμές για την περίπτωση διατμητικού-S κύματος $A = 12,65$ για ομοιογενές έδαφος και $A_2 = 23,26$ για εδαφικό σχηματισμό δύο στρώσεων για συχνότητες διέγερσης $f_{input} = 1,875 Hz$ και $2,85 Hz$ αντίστοιχα. Η συχνότητα $f = 2,85 Hz$ είναι επομένως η συχνότητα συντονισμού του δίστρωτου εδαφικού σχηματισμού, δηλαδή αποτελεί την πρώτη ιδιοσυχνότητά του. Η κατανομή είναι περιοδική με εκθετικά μειούμενο πλάτος, όπως αναμένεται από τη θεωρία. Η δεύτερη μέγιστη τιμή είναι $A'' = 4,02$ για $f_{input} = 5,5 Hz$ και $A''_2 = 10,62$ για $f_{input} = 5,75 Hz$, η οποία αποτελεί και τη δεύτερη ιδιοσυχνότητα του εδαφικού σχηματισμού δύο στρώσεων.

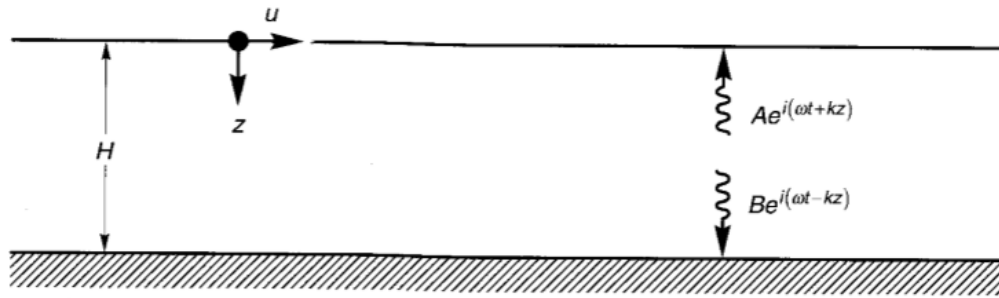
Φαίνεται να υπάρχει ταύτιση σε μεγάλο βαθμό της θεωρίας και της ανάλυσης τόσο στη μορφή, όσο και στις τιμές. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μια μικρή μετατόπιση προς τα αριστερά της τάξης των $0,5 Hz$ των τοπικών μεγίστων των αναλύσεων σε σχέση με την αναμενόμενη από τη θεωρία καμπύλη. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στο δίστρωτο σχηματισμό και για μεγάλες συχνότητες διέγερσης ($>8 Hz$). Ακόμη, οι τιμές των μεγίστων ταυτίζονται με εξαίρεση τον πρώτο συντονισμό για το δίστρωτο έδαφος όπου έχουμε απόκλιση 40% ($A_{\beta\beta\lambda} = 16,68$ και $A_{PLAXIS} = 23,26$). Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην τοπική αδυναμία της αριθμητικής ολοκλήρωσης Newmann, λόγω των τιμών των συντελεστών α και β , την οποία εξ'ορισμού εφαρμόζει το PLAXIS©.

Για την περίπτωση διαμήκους-P κύματος οι μέγιστες τιμές εδαφικής ενίσχυσης είναι $D = 7,8$ για $f_{input} = 3,56 Hz$ και $D_2 = 9,23$ για $f_{input} = 5,2 Hz$, ενώ έπειτα από αυτές τις τιμές παρατηρείται σημαντική και απότομη μείωση της εδαφικής ενίσχυσης. Τα δεύτερα μέγιστα έχουν τιμές $D'' = 0,9$ για $f_{input} = 10,06 Hz$ και $D''_2 = 2,13$ για $f_{input} = 10,4 Hz$. Η κατανομή είναι επίσης περιοδική με εκθετικά μειούμενο πλάτος πολύ κοντά σε αυτό που προβλέπεται από τη θεωρία. Αξίζει να αναφερθεί πως η τετμημένη των τοπικών μεγίστων μειώνεται έως και $0,5 Hz$ στις ανώτερες ιδιομορφές. Επιπλέον, η εδαφική ενίσχυση στον πρώτο συντονισμό της ανάλυσης διαφέρει κατά 25% από την θεωρητική τιμή ($D_{\beta\beta\lambda} = 12,64$ και $D_{PLAXIS} = 9,41$).

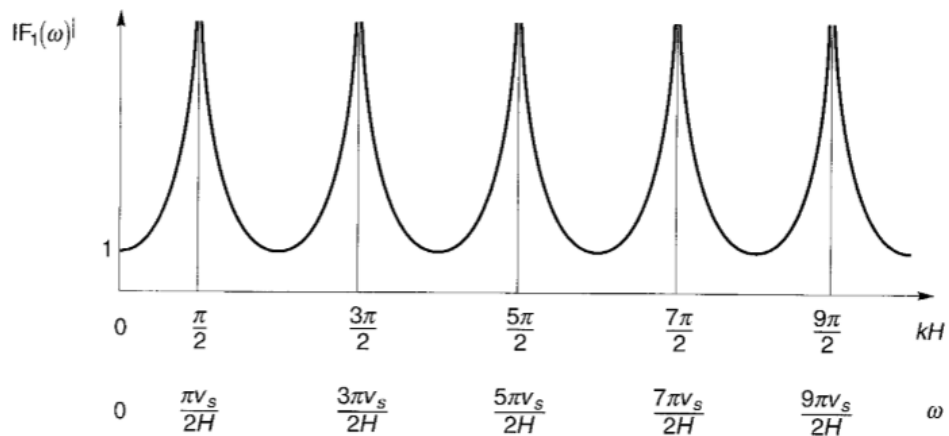
Εν τέλει, για την περίπτωση P-κύματος η μέγιστη ενίσχυση υποεκτιμάται, ενώ στην περίπτωση S-κύματος υπερεκτιμάται σε σχέση με τη θεωρία. Επιπλέον, στην περίπτωση P-κύματος η απομείωση της εδαφικής ενίσχυσης είναι αρκετά εντονότερη και πρακτικά δεν υφίσταται μετά τον πρώτο συντονισμό. Επομένως, πλην ελαχίστων δικαιολογημένων εξαιρέσεων, φαίνεται πως το λογισμικό PLAXIS©

αναλύει ορθά το φαινόμενο της εδαφικής ενίσχυσης και έτσι δίνεται η δυνατότητα επέκτασης της χρήσης του σε πιο πολύπλοκα δυναμικά προβλήματα.

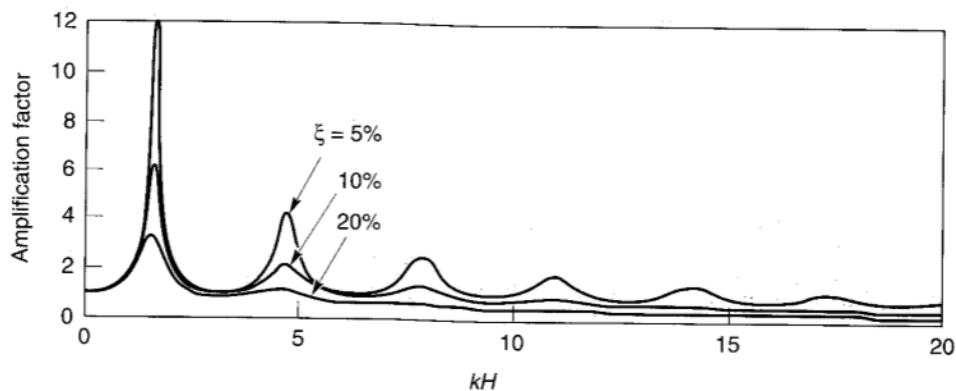
ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3



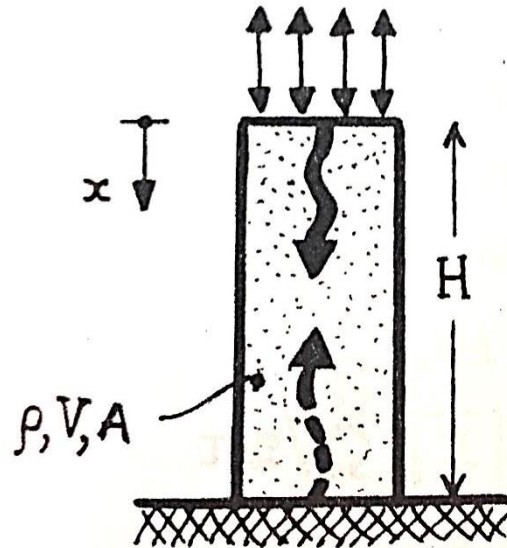
Εικόνα 3.1: Γραμμικώς ελαστικό έδαφος πάχους H , στην επιφάνεια άκαμπτου βράχου (Kramer, 1996)



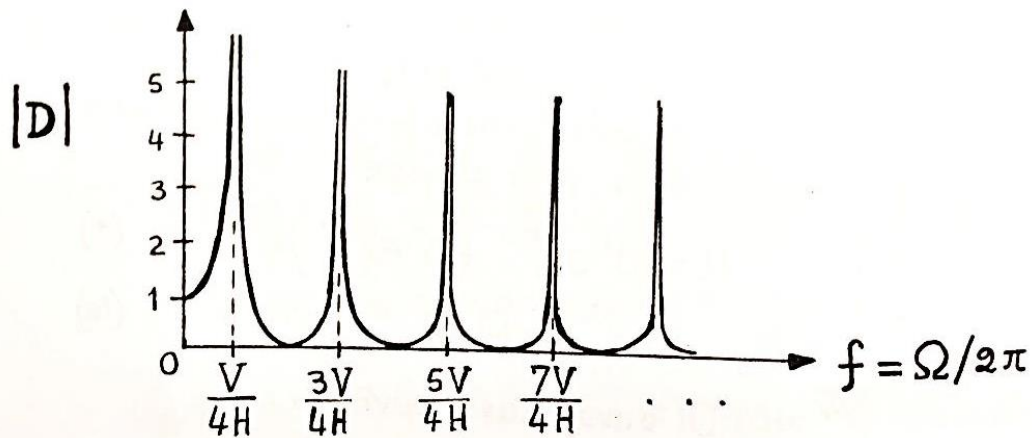
Εικόνα 3.2: Επιρροή της συχνότητας στην απόκριση γραμμικώς ελαστικού εδάφους με μηδενική απόσβεση (Kramer, 1996)



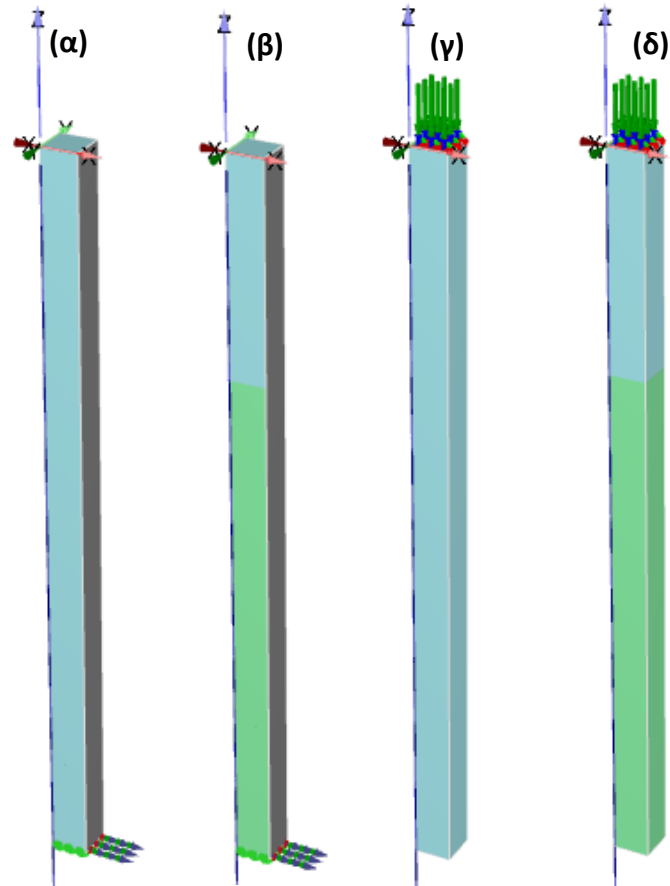
Εικόνα 3.3: Επιρροή της συχνότητας στην απόκριση γραμμικώς ελαστικού εδάφους απόσβεσης ξ (Kramer, 1996)



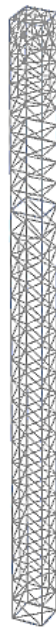
Εικόνα 3.4: Διάδοση διαμήκους κύματος σε εδαφική στήλη ομοιόμορφου γραμμικώς ελαστικού εδάφους επί συμπαγούς βράχου, για αρμονική διέγερση $P_0 e^{i\omega t}$ (Gazetas G. , 2007)



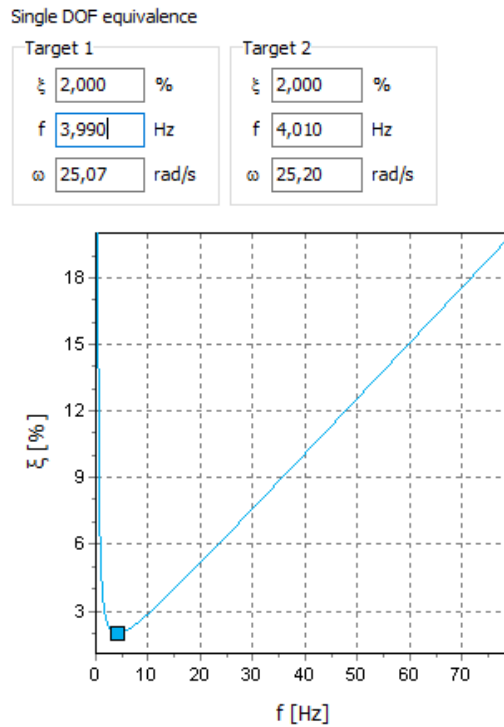
Εικόνα 3.5: Επιρροή της συχνότητας στην απόκριση γραμμικώς ελαστικού εδάφους για διάδοση διαμήκους μονοδιάστατου κύματος (Gazetas G. , 2007)



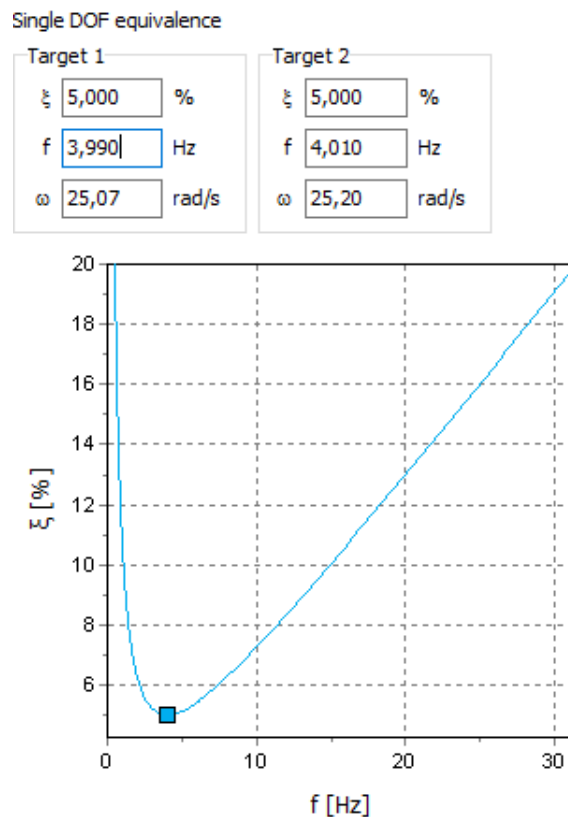
Εικόνα 3.6: Αναπαράσταση των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις (α)ομοιογενές και (β)δίστρωτο για S-κύμα, (γ)ομοιογενές και (δ)δίστρωτο για P-κύμα (PLAXIS© 3D AE)



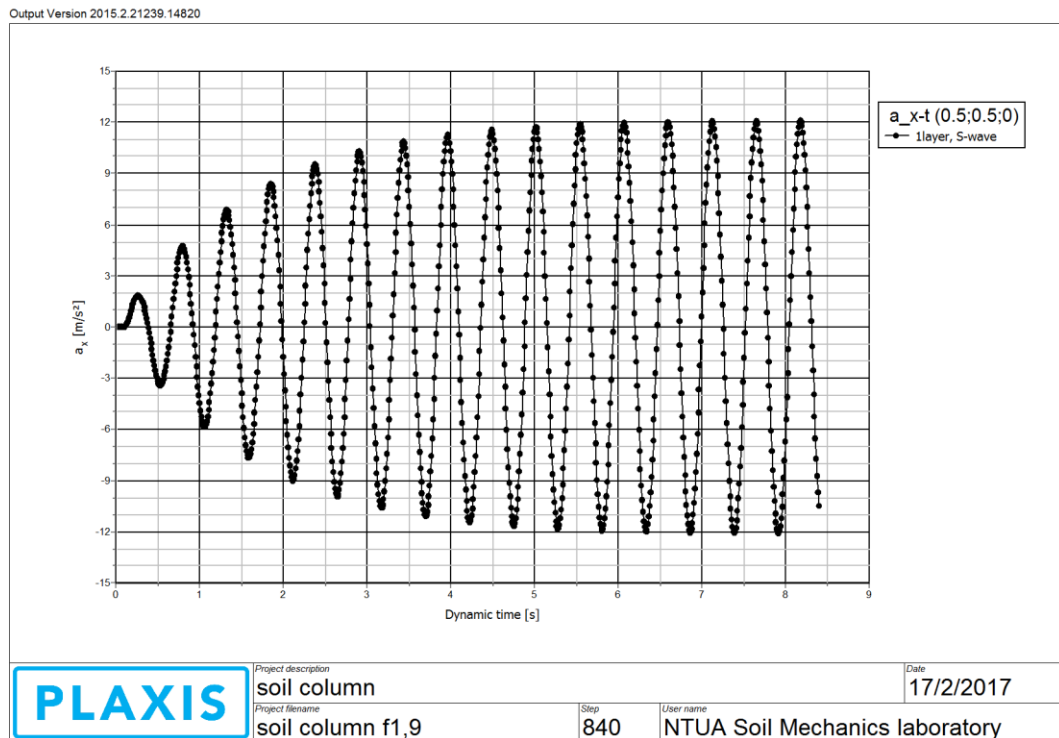
Εικόνα 3.7: Αναπαράσταση του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις, $N_{\text{στοιχείων}}=760$, $M_{\text{στοιχείου}}=0,16$ m (PLAXIS© 3D AE)



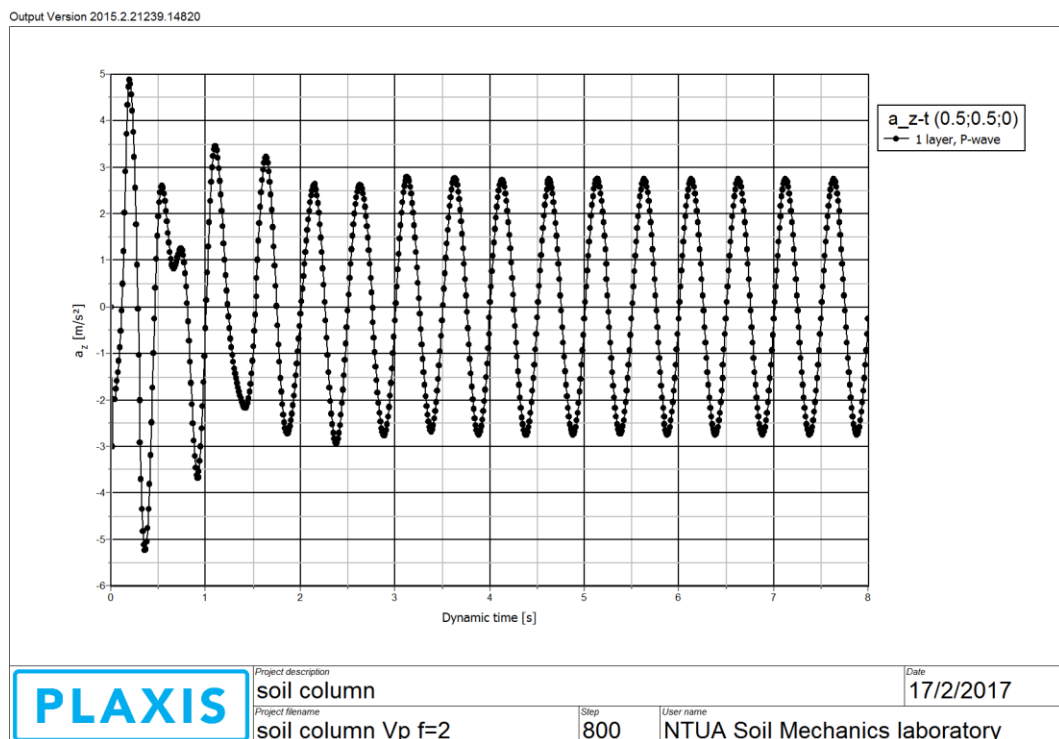
Εικόνα 3.8: Καμπύλη Rayleigh damping για $\xi=2$ % για ενδεικτική τιμή συχνότητας στα 4 Hz. Πρακτικά για κάθε συχνότητα διέγερσης επαναρυθμιζόταν η απόσβεση, ώστε να αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη συχνότητα (PLAXIS© 3D AE)



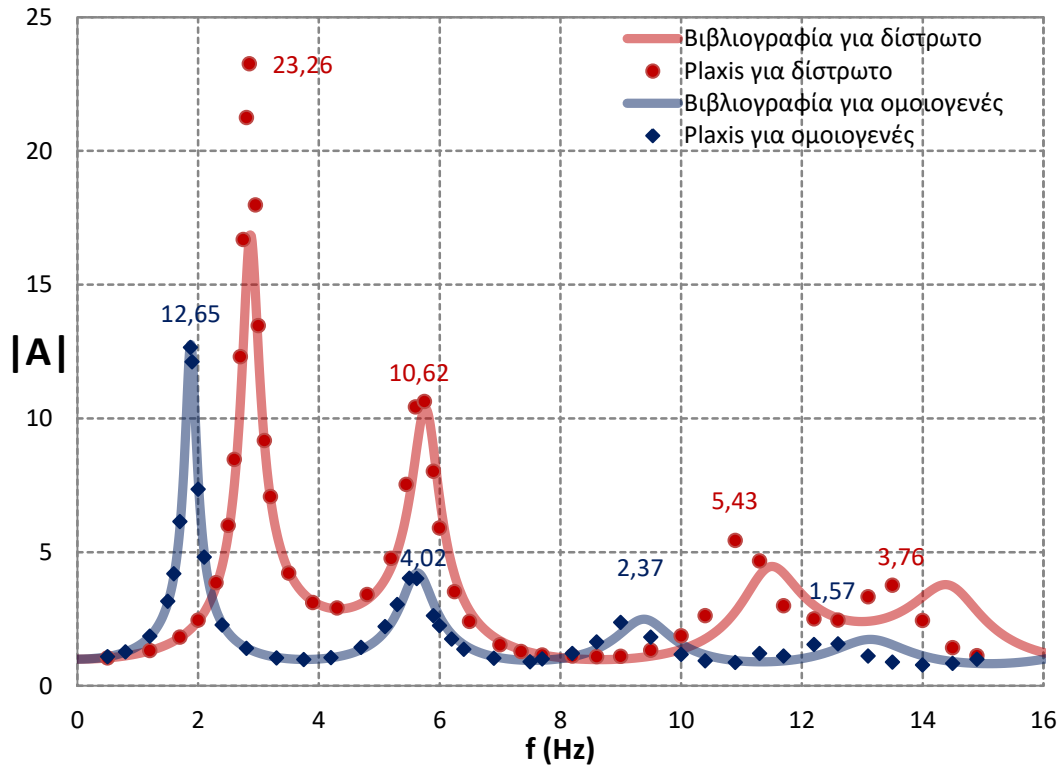
Εικόνα 3.9: Καμπύλη Rayleigh damping για $\xi=5$ % για ενδεικτική τιμή συχνότητας στα 4 Hz (PLAXIS© 3D AE)



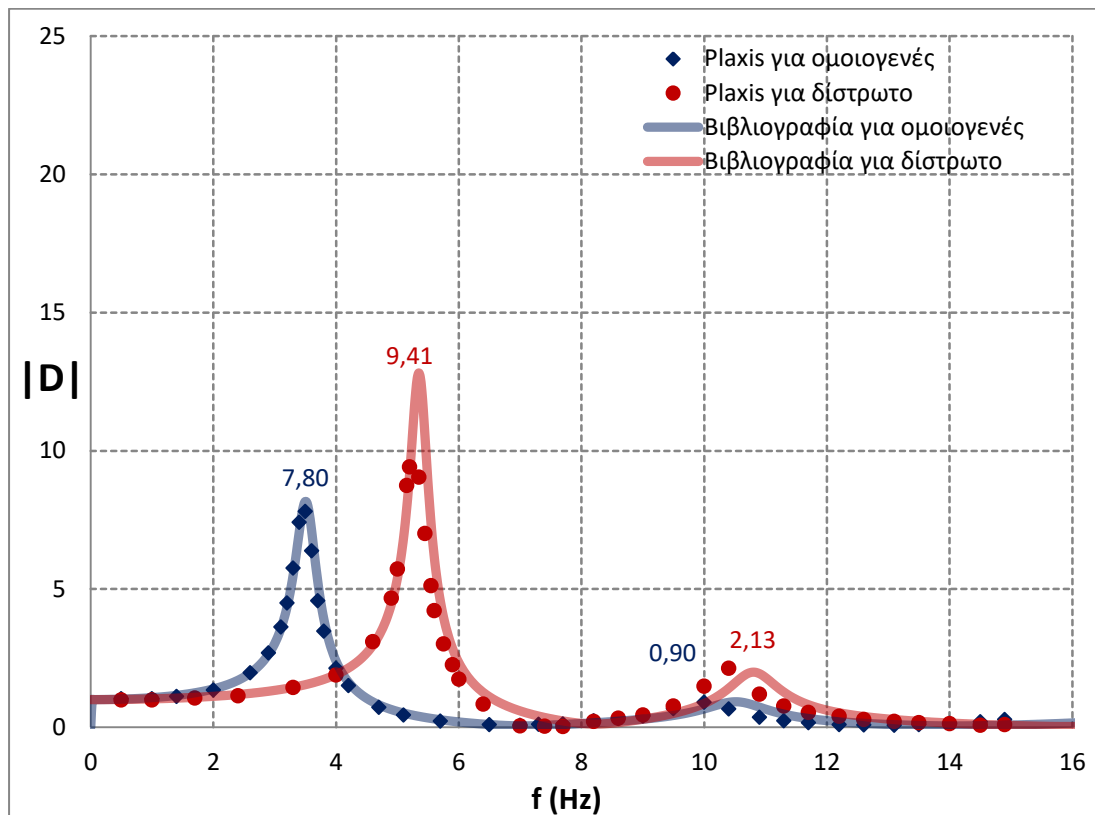
Εικόνα 3.10: Ενδεικτικό διάγραμμα επιτάχυνσης κατά x στην επιφάνεια της εδαφικής στήλης συναρτήσει του χρόνου του δυναμικού φαινομένου (PLAXIS® 3D AE)



Εικόνα 3.11: Ενδεικτικό διάγραμμα επιτάχυνσης κατά z στην επιφάνεια της εδαφικής στήλης συναρτήσει του χρόνου του δυναμικού φαινομένου (PLAXIS® 3D AE)



Εικόνα 3.12: Συγκεντρωτικό διάγραμμα εδαφικής ενίσχυσης για απόκριση σε S-κύμα, με βάση τη βιβλιογραφία και τα αποτελέσματα των αναλύσεων



Εικόνα 3.13: Συγκεντρωτικό διάγραμμα εδαφικής ενίσχυσης για απόκριση σε P-κύμα, με βάση τη βιβλιογραφία και τα αποτελέσματα των αναλύσεων

4 Υπολογισμός Κινηματικής Επιπόνησης Πασσάλου

4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Στο κεφάλαιο αυτό συγκρίνεται η απόκριση μεμονωμένου πασσάλου υπό την επίδραση αρμονικής ημιτονοειδούς διέγερσης στη βάση του μοντέλου (προσομοίωση διατμητικού-S κύματος), όπως προκύπτει από την ανάλυση στο πρόγραμμα PLAXIS©, με σχέσεις της βιβλιογραφίας για την κινηματική επιπόνηση πασσάλου. Οι εν λόγω σχέσεις της βιβλιογραφίας εξήχθησαν σύμφωνα με αποτελέσματα BDWF και FEM αναλύσεων, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 1 (1.6.1). Ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να διερευνηθούν οι ομοιότητες και διαφορές που προκύπτουν μεταξύ των μεθόδων (BDWF-FEM-PLAXIS 3D©), για την περίπτωση ύπαρξης μονού πασσάλου στο ελεύθερο πεδίο. Ακόμη, η κινηματική επιπόνηση του μεμονωμένου πασσάλου θα συγκριθεί σε επόμενο κεφάλαιο με εκείνη που αναπτύσσεται σε ομάδα πασσάλων.

Αρχικά θα γίνει η περιγραφή των σταδίων της προσομοίωσης για την κάθε υποπερίπτωση, όπου θα καταγραφούν όλες οι παράμετροι που εισήχθησαν. Στη συνέχεια θα καταγραφεί ο τρόπος επεξεργασίας των αποτελεσμάτων, ώστε να παρουσιαστούν συγκεντρωτικά σε κατάλληλα διαγράμματα. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, τα προς σύγκριση διαγράμματα των Νικολαου & Gazetas (1997) παρουσιάζουν την ανηγμένη παραμόρφωση πασσάλου, ϵ_M για πάσσαλο ελευθέρως στρεπτής και άστρεπτης κεφαλής, συναρτήσεως του ανηγμένου βάθους z/d . Εξετάζονται δε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις λόγω ταχυτήτων (V_{s1}/V_{s2}) μεταξύ υπερκείμενης και υποκείμενης στρώσης, επομένως θα εξεταστεί και η επιρροή της μεταβολής του λόγου αυτού στην κινηματική ροπή που αναπτύσσεται στον πάσσαλο. Τα διαγράμματα που προκύπτουν μέσω PLAXIS© κατασκευάζονται με όμοιο τρόπο με εκείνα των Νικολαου & Gazetas, ενώ με σημεία παρουσιάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις, σύμφωνα με τις απλές εκφράσεις που πρότειναν οι ίδιοι (1.6.1). Σημειώνεται επίσης ότι οι συγκεκριμένες σχέσεις της βιβλιογραφίας επιλέχθησαν για σύγκριση με κριτήριο την παλαιότητα και αναγνωρισιμότητά τους.

4.2 Περιγραφή προσομοίωσης και επιλογής παραμέτρων

Αρχικά γίνεται επιλογή των ιδιοτήτων των υλικών του εδάφους και του πασσάλου με κριτήριο την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ταύτιση με τις παραμέτρους της δημοσίευσης των Νικολαου & Gazetas (1997). Προσδιορίζεται η ιδιοσυχνότητα του δίστρωτου εδαφικού σχηματισμού για κάθε τιμή του λόγου V_{s1}/V_{s2} , εφόσον επιδιώκεται η μελέτη του φαινόμενο σε κατάσταση συντονισμού και έτσι η συχνότητα της διέγερσης πρέπει να ισούται με την ιδιοσυχνότητα του εδαφικού σχηματισμού. Στη συνέχεια εξετάζεται η επιρροή της εγγύτητας των συνόρων του μοντέλου και της πυκνότητας του καννάβου για την επιλογή των διαστάσεων του μοντέλου και το είδος του καννάβου (coarse-medium ή fine).

Από την εν λόγω δημοσίευση λαμβάνονται τα κατάλληλα δεδομένα που θα εισαχθούν στις αναλύσεις, αφού όλες οι παράμετροι εδάφους και υλικών πρέπει να ταυτίζονται, ώστε να μην επηρεαστούν τα αποτελέσματα. Έτσι, προκύπτει:

$$\text{Λόγος πυκνοτήτων εδαφικών στρωμάτων:} \quad \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{3}{4}$$

$$\text{Πλάτος επιτάχυνσης διέγερσης:} \quad a_{base} = 1 \frac{m}{s^2}$$

$$\text{Συντελεστής απόσβεσης (για όλα τα υλικά):} \quad \xi = 5 \%$$

$$\text{Λόγοι διατμητικών ταχυτήτων:} \quad \frac{V_{s1}}{V_{s2}} = \frac{1}{10}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1$$

$$\text{Μέτρο ελαστικότητας πασσάλου:} \quad E_p = 25 \text{ GPa}$$

$$\text{Λόγος μέτρων ελαστικότητας πασσάλου} \\ \text{και υπερκείμενου εδαφικού στρώματος:} \quad \frac{E_p}{E_1} = 5000$$

Από τα παραπάνω προκύπτει πως το μέτρο ελαστικότητας του υπερκείμενου-1^{ου} στρώματος ισούται με $E = 5000 \text{ KPa}$. Επίσης, έγιναν οι εξής παραδοχές για τον πάσσαλο και το υπερκείμενο στρώμα :

$$\text{Διάμετρος πασσάλου:} \quad d = 1 \text{ m}$$

$$\text{Μήκος πασσάλου:} \quad L = 20 \text{ m}$$

$$\text{Ειδικό βάρος πασσάλου:} \quad \gamma = 25 \frac{kN}{m^3}$$

$$\text{Λόγος Poisson εδαφικών υλικών:} \quad \nu = 0,3$$

$$\text{Ειδικό βάρος υπερκείμενου εδαφικού στρώματος:} \quad \gamma = 15 \frac{kN}{m^3}$$

Έτσι προκύπτουν στη συνέχεια το μέτρο διάτμησης του 1^{ου} στρώματος, που ισούται με $G = 1923 \text{ kPa}$ και η ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων $V_s = 35,8 \text{ m/s}$ (από τις σχέσεις της θεωρίας $G = E/2(v + 1)$ και $V_s = \sqrt{G/\rho}$).

Για το 2^ο στρώμα με δεδομένα τους λόγους ταχυτήτων διάδοσης διατμητικών κυμάτων και πυκνοτήτων των δύο στρωμάτων προκύπτουν οι εξής ιδιότητες:

Λόγος ταχυτήτων, $\frac{V_{s1}}{V_{s2}}$:	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$
Μέτρο ελαστικότητας, E :	666653 kPa	106631 kPa	26658 kPa
Λόγος Poisson ν :	0,3	0,3	0,3
Μέτρο διάτμησης, G :	256328 kPa	41012 kPa	10253 kPa
Ειδικό βάρος, γ :	$20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	$20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	$20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Σημαντικό στάδιο της ανάλυσης αποτελεί η εύρεση της ιδιοσυχνότητας του εδαφικού σχηματισμού για κάθε μία από τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις και για την περίπτωση ομογενούς εδάφους. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Mathcad και οι σχέσεις που περιγράφηκαν στο 3^ο κεφάλαιο (3.7, 3.20) για την εδαφική ενίσχυση στην περίπτωση δίστρωτου εδαφικού σχηματισμού και διάδοσης διατμητικού-S κύματος. Από τα διαγράμματα εδαφικής ενίσχυσης-συχνότητας ($A - f$) που εξάγονται (Εικόνα 4.1), βρίσκεται, μέσω της λειτουργίας trace του Mathcad, σε ποια συχνότητα αντιστοιχεί η πρώτη (και μεγαλύτερη) ενίσχυση, το ολικό μέγιστο δηλαδή της καμπύλης. Αυτή είναι η πρώτη ιδιοτιμή του εδαφικού σχηματισμού η οποία κάθε φορά θα εισάγεται ως συχνότητα διέγερσης για να επιτευχθεί η προσομοίωση του φαινομένου του συντονισμού. Συγκεντρωτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας στον Πίνακα 4.1.

Η τιμή της απόσβεσης ($\xi = 5 \%$ για όλα τα υλικά) εισάγεται στο PLAXIS© με τον τρόπο που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 (Υποκεφάλαιο 3.3.1) για τιμές $f_s + 0,01$ και $f_s - 0,01$. Η διαφορά σε σχέση με το προηγούμενο κεφάλαιο είναι πως αυτή τη φορά εισάγεται η ίδια τιμή απόσβεσης και στις δύο εδαφικές στρώσεις. Η συμπεριφορά όλων των υλικών ορίζεται και πάλι ως «γραμμικώς ελαστική» (linear elastic).

Επόμενο βήμα στη διαδικασία επιλογής παραμέτρων αποτελεί ο ορισμός της απόστασης των ορίων και η πυκνότητα του καννάβου. Για να εξεταστεί η επιρροή αυτών των παραγόντων στα αποτελέσματα κατασκευάστηκαν δύο εναλλακτικές πιθανές γεωμετρίες, μία διαστάσεων 20x20 και μία 40x40 για δίστρωτο έδαφος με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2} = 1/10$. Τα δύο αυτά μοντέλα διακριτοποιήθηκαν και με τις τρεις επιλογές πυκνότητας καννάβου που παρέχει το PLAXIS©, αδρό (coarse), μεσαίο (medium) και πυκνό (fine). Το μέγεθος που ελέγχεται είναι η κατά x

συνιστώσα της επιτάχυνσης στο μέσο της επιφάνειας. Με αναφορά το μοντέλο 40x40 και τον πιο πυκνό κάνναβο (fine) εξετάζεται η απόκλιση που εμφανίζουν τα υπόλοιπα ως προς αυτό θεωρώντας αποδεκτή απόκλιση το πολύ 10%. Παρατηρήθηκε ότι η απόκλιση κυμαίνεται αρκετά κάτω από 10% ακόμη και για το μοντέλο 20*20 με αδρό (coarse) κάνναβο (Πίνακας 4.2). Έτσι επιλέχθηκαν αυτές οι ρυθμίσεις για την προσομοίωση του μεμονωμένου πασσάλου. Επομένως προτιμήθηκε πυκνότητα καννάβου αραιή (με αυτόματη πύκνωση στα κατάλληλα σημεία) και αποστάσεις συνόρων από το κέντρο του πασσάλου 20 μέτρα.

Η παραπάνω διαδικασία είναι απαραίτητη γιατί είναι επιθυμητή η απλοποίηση και η επιτάχυνση της υπολογιστική διαδικασίας, χωρίς να επηρεαστεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αξίζει να αναφερθεί πως η free-field ανάλυση, απουσία πασσάλου, διαρκεί μόλις 10 λεπτά για τον αραιό κάνναβο, μισή ώρα για τον μεσαίο και 2 ώρες για τον πυκνό. Η χρονική διαφορά στις αναλύσεις με χρήση μεσαίου και αραιού καννάβου μπορεί να είναι μικρή, ωστόσο σε επόμενο κεφάλαιο (παρουσία πασσαλομάδας) η διαφορά μεγαλώνει σημαντικά και η απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων παραμένει μικρή ώστε να επιτρέπεται η χρήση αραιού καννάβου.

4.3 Πορεία υπολογισμών και εξαγωγή αποτελεσμάτων

Αφού έχει οριστεί πλήρως η γεωμετρία και οι ιδιότητες των υλικών του μοντέλου, γίνεται εισαγωγή της κυματοειδούς διέγερσης. Δημιουργείται, επομένως, μία επιφάνεια στη βάση του 2^{ου} στρώματος στην οποία ορίζεται μοναδιαία «καθορισμένη παραμόρφωση» (prescribed displacement) και η οποία πολλαπλασιάζεται με το δυναμικό συντελεστή επιτάχυνσης, μοναδιαίου πλάτους και συχνότητας f_s που αντιστοιχεί στο λόγο V_{s1}/V_{s2} . Επειδή πρόκειται για διατμητικό-S κύμα δημιουργήθηκαν επίσης παράπλευρες επιφάνειες στις οποίες ορίζονται διεπιφάνειες προς τα μέσα για να δοθεί η δυνατότητα αποκόλλησης του εδάφους από τα τοιχώματα (Εικόνα 4.2).

Επόμενο βήμα είναι να τοποθετηθεί πλάκα στην κεφαλή του πασσάλου (Εικόνα 4.3). Η ύπαρξη της πλάκας προσδίδει στον πάσσαλο δυσκαμψία (μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας) αλλά δεν φέρει φορτίο λόγω ίδιου βάρους (πολύ μικρό ειδικό βάρος). Διακρίνεται από τα εξής χαρακτηριστικά:

Πάχος πλάκας: $d = 10 \text{ m}$

Ειδικό βάρος: $\gamma = 0,01 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Λόγος Poisson: $\nu = 0,2$

Μέτρο ελαστικότητας: $E = 30 \text{ GPa}$

Το μέγεθος που ενδιαφέρει είναι η κατανομή των ροπών συναρτήσει του βάθους του πασσάλου, για την περίπτωση του συντονισμού. Αυτή η αντιμετώπιση δεν θα πρέπει να συγχέεται με την περίπτωση που παρακολουθείται η περιβάλλουσα των μεγίστων τιμών του κάθε σημείου, αφού στο παρόν κεφάλαιο επιβάλλεται αρμονική ταλάντωση αποκλειστικά για την περίπτωση συντονισμού. Επομένως, για να γίνει παρακολούθηση της χρονιοιστορίας των ροπών σε όλο το μήκος του πασσάλου εισάγεται στο εσωτερικό του ένα γραμμικό στοιχείο δοκού-beam element, το οποίο παρουσιάζει ανάλογη συμπεριφορά με αυτή του πασσάλου. Με αυτόν τον τρόπο, καταγράφεται η απόκρισή του με συνεχή τρόπο (αντί για διακεκριμένα σημεία κατά βάθος), όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Το στοιχείο αυτό, που πρακτικά λειτουργεί ως κλισιόμετρο, έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

$$\text{Μέτρο ελαστικότητας: } E_{beam} = \frac{E_{pile}}{1000} = 25 \text{ MPa}$$

$$\text{Εμβαδόν: } A_{beam} = A_{pile} = \pi d^2 = 3,142 \text{ m}^2$$

$$\text{Ροπή αδραειάς: } I = \frac{\pi d^4}{64} = 0,049 \text{ m}^4$$

$$\text{Ειδικό βάρος: } \gamma = 1 \frac{kN}{m^3}$$

Η ροπή του «ψευδοπασσάλου» που εξάγεται κατά βάθος για κάθε αποθηκευμένο χρονικό βήμα πολλαπλασιάζεται επί 1000, όση είναι η αναλογία των μέτρων ελαστικότητας πασσάλου-δοκού.

Τελευταίο βήμα είναι ο ορισμός των συνοριακών συνθηκών. Για τις παραμορφώσεις- deformations και τη δυναμική ανάλυση-dynamics, έχουμε για κάθε συντεταγμένη x, y, z την κατάλληλη συνθήκη, που φαίνεται στον Πίνακα 4.3. Οι επιλογές αυτές σημαίνουν ότι κατά τη διεύθυνση x ο σχηματισμός εδάφους-πασσάλου είναι ελεύθερος να κινηθεί, όπως επίσης και στην επιφάνεια κατά την κατακόρυφη έννοια (z_{max}), επιτρέπεται δηλαδή η καθίζηση σε μικρά βάθη. Ο άξονας y δεν μπορεί να παραμορφωθεί καθώς και η αιχμή του πασσάλου (z_{min}) διότι θεωρείται ότι εδράζεται σε βράχο. Ακόμη η επιλογή «free field» σημαίνει ότι το κύμα δεν αποσβένεται, δεν απορροφάται ούτε ανακλάται στα σύνορα.

Τέλος, ο χρόνος της δυναμικής ανάλυσης ανέρχεται σε 10 τουλάχιστον κύκλους φόρτισης, ώστε να γίνει προσέγγιση της απόκρισης σταθερού πλάτους ($t_{dyn} = 10 T_s$). Το χρονικό βήμα ορίζεται για 0,01 sec, που αντιστοιχεί σε μέγιστο αριθμό βημάτων $max\ steps = 1000 t_{dyn}$, ενώ, για να αποθηκεύονται τα αποτελέσματα ανα δευτερόλεπτο, ο αριθμός των αποθηκευμένων βημάτων ισούται με τον χρόνο δυναμικής ανάλυσης, $max\ steps\ saved = t_{dyn}$ (Εικόνα 4.4).

Συνολικά διεξάγονται οχτώ αναλύσεις. Για κάθε εδαφικό προφίλ και συχνότητα f_s μία ανάλυση με θεώρηση πασσάλου ελευθέρως στρεπτής κεφαλής- free head και μία για πάσσαλο άστρεπτης κεφαλής- fixed head. Η δεύτερη περίπτωση διαφέρει

από την πρώτη μόνο στο ότι εισάγεται μία «ορισμένη παραμόρφωση-prescribed displacement» κατά z στην επιφανειακή πλάκα του πασσάλου. Δίνοντας μηδενική τιμή στην παραμόρφωση αυτή, εξασφαλίζεται ακινησία στην κεφαλή του πασσάλου.

4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με υπάρχουσες δημοσιεύσεις

4.4.1 Κατά Nikolaou & Gazetas

Τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν παρουσιάζουν την μέγιστη παραμόρφωση που αναπτύσσεται σε οριζόντια τομή του πασσάλου, συναρτήσει του ανηγμένου βάθους z/d , έτσι ώστε να είναι εύκολη η σύγκριση με εκείνα των Nikolaou & Gazetas. Η παραμόρφωση αυτή υπολογίζεται μέσω της σχέσης (1.16) που καταγράφεται παρακάτω. Επιπλέον παρατίθενται με σημεία οι τιμές που εκτιμήθηκαν μέσω των σχέσεων που πρότειναν οι Nikolaou & Gazetas οι οποίες περιγράφηκαν αναλυτικά στο 1^ο Κεφάλαιο (1.6.1) και έχουν τη μορφή:

$$M_{max} = 0.042\tau_{inter}d^3 \left(\frac{L}{d}\right)^{0.3} \left(\frac{E_p}{E_{s1}}\right)^{0.65} \left(\frac{V_{s1}}{V_{s2}}\right)^{-0.5} \quad (\text{Eqn2-1.15})$$

$$\tau_{inter} \approx a_{sur}\rho_1H_1 \quad (1.14)$$

$$M_{max} = \frac{2,7}{10^7}E_p d^3 \left(\frac{a_r}{g}\right) \left(\frac{L}{d}\right)^{1.3} \left(\frac{E_p}{E_{s1}}\right)^{0.7} \left(\frac{V_{s1}}{V_{s2}}\right)^{-0.3} \left(\frac{H_1}{L}\right)^{-1.25} \quad (\text{Eqn4-1.17})$$

Η τιμή των a_{sur} , για κάθε λόγο ταχυτήτων υπολογίστηκε μέσω free field αναλύσεων (απουσία πασσάλου) και φαίνεται στην Εικόνα (4.5). Οι τιμές της ροπής που εκτιμώνται με χρήση των παραπάνω σχέσεων, μετατρέπονται σε παραμόρφωσεις μέσω της σχέσης που ακολουθεί, ώστε να συγκριθούν με τα αντίστοιχα διαγράμματα:

$$\varepsilon_M = \frac{M}{E_p I_p} \frac{d}{2} \quad (1.16)$$

Αρχικά παρατηρήθηκε καλή συσχέτιση μεταξύ των διαγραμμάτων όπως φαίνεται και από τις Εικόνες (4.6-4.13). Πιο συγκεκριμένα, βλέπει κανείς πως οι καμπύλες είναι της ίδιας μορφής και τα μέγιστα παρουσιάζονται στις αναμενόμενες περιοχές. Ωστόσο κατά περιπτώσεις βρέθηκαν τόσο μεγάλες αποκλίσεις, όσο και συγκλίσεις των δύο μεθόδων, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Τα σημεία που υπολογίστηκαν από τις προτεινόμενες σχέσεις επίσης μπορούμε να πούμε πως παρέχουν μια αποδεκτή πρώτη, συντηρητική εκτίμηση της κινηματικής επιπόνησης. Στην συνέχεια θα γίνει σύγκριση των τιμών των δύο προσεγγίσεων τόσο στη διεπιφάνεια των δύο στρώσεων, όσο και στην κεφαλή των πασσάλων, με τις συγκρινόμενες τιμές να καταγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.4. Έπειτα θα συγκριθούν οι εκτιμώμενες

μέγιστες παραμορφώσεις στη διεπιφάνεια από τις σχέσεις των Νικολαου & Gazetas, που παρατίθενται στον Πίνακα 4.5.

Στην περίπτωση του **ομοιογενούς εδάφους**, $V_{s1}/V_{s2} = 1$ (Εικόνες 4.6 και 4.7), η μέγιστη παραμόρφωση που αναπτύσσεται μέσω PLAXIS© σε βάθος 10 m έχει απόκλιση 28% από τις τιμές κατά Νικολαου & Gazetas, για τον πάσσαλο ελευθέρως στρεπτής κεφαλής. Στον πάσσαλο με άστρεπτη κεφαλή, η καμπύλη που προέκυψε μέσω PLAXIS© σχεδόν ταυτίζεται με των Νικολαου & Gazetas για βάθος 10 εως 20 m, ενώ ανεβαίνοντας στην επιφάνεια αποκλίνει αρκετά, παρουσιάζοντας τη μέγιστη τιμή στα -0,30 m (88% απόκλιση). Η απότομη αυτή αύξηση μπορεί να οφείλεται σε διαφορά στα σύνορα μεταξύ των δύο μεθόδων, με αφορμή την εμφάνιση της στην επιφάνεια του εδάφους, καθώς και στην επιλογή των παραμέτρων Winkler, η οποία βασίστηκε σε FEM και BEM αναλύσεις που ήταν διαθέσιμες εκείνη την εποχή (1997).

Στην περίπτωση δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων διάδοσης $V_{s1}/V_{s2} = 1/2$, οι μέγιστες τιμές στη διεπιφάνεια για την περίπτωση μη-στρεπτού και ελευθέρως στρεπτού πασσάλου έχουν απόκλιση 28,8% και 38,7% αντίστοιχα, μεταξύ των δύο μεθόδων (Εικόνες 4.8 και 4.9). Αξίζει να αναφερθεί πως οι μέγιστες αυτές τιμές κατά Νικολαου & Gazetas βρέθηκαν σε ανηγμένο βάθος $z/d \approx 11$, δηλαδή λίγο χαμηλότερα από τη διεπιφάνεια των δύο εδαφών. Η μέγιστη παραμόρφωση στην κεφαλή του μη-στρεπτού πασσάλου στην ανάλυση με PLAXIS© προκύπτει και πάλι σε βάθος ίσο με -0,3 m και η απόκλιση στις τιμές των δύο μεθόδων είναι 18,1%.

Στην περίπτωση δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων διάδοσης $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$, οι μέγιστες τιμές στη διεπιφάνεια κατά Νικολαου & Gazetas επίσης εμφανίστηκαν σε $z/d \approx 11$. Η απόκλιση μεταξύ των δύο μεθόδων στην περιοχή της διεπιφάνειας είναι 14,1% για τον πάσσαλο ελευθέρως στρεπτής κεφαλής και 17,6% για τον πάσσαλο άστρεπτης κεφαλής (Εικόνες 4.10 και 4.11). Το μέγιστο στην επιφάνεια για την 2^η περίπτωση στην ανάλυση με PLAXIS© προκύπτει, όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, σε βάθος -0,3 m και η απόκλιση στις τιμές των δύο μεθόδων βρέθηκε ίση με 17,5%.

Τέλος, στην περίπτωση δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων διάδοσης $V_{s1}/V_{s2} = 1/10$, οι μέγιστες τιμές κατά Νικολαου & Gazetas αυτή τη φορά εμφανίστηκαν ακριβώς στη διεπιφάνεια, δηλαδή σε ανηγμένο βάθος $z/d = 10$ (Εικόνες 4.12 και 4.13). Η απόκλιση μεταξύ των δύο μεθόδων στην περιοχή της διεπιφάνειας εμφάνισε μεγάλη αύξηση, αφού βρέθηκε ίση με 48% για τον πάσσαλο ελευθέρως στρεπτής κεφαλής και 41,8% για τον πάσσαλο άστρεπτης κεφαλής. Η μέγιστη παραμόρφωση στην κεφαλή του μη-στρεπτού πασσάλου που υπολογίστηκε μέσω PLAXIS© προκύπτει και πάλι σε βάθος -0,3 m και η απόκλιση στις τιμές των δύο μεθόδων είναι 39,7%. Αξίζει να αναφερθεί ότι αυτή είναι η μόνη περίπτωση

στην οποία η μέγιστη τιμή της διεπιφάνειας ξεπερνά εκείνη της κεφαλής (για την περίπτωση άστρεπτης κεφαλής).

Παρατηρούμε ότι γενικά οι σχέσεις που προτείνουν οι Νικολαου & Gazetas δίνουν πιο συντηρητικά αποτελέσματα σε σχέση με τις αναλύσεις του PLAXIS®, εκτός από την περίπτωση δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων διάδοσης $V_{s1}/V_{s2} = 1/10$. Όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα (Εικόνα 4.11), η εξίσωση Eqn4-1.17 υποεκτιμά αρκετά την μέγιστη παραμόρφωση της διεπιφάνειας, αλλά η εξίσωση Eqn2-1.15 έδωσε μια πολύ καλή εκτίμηση, όντας και πάλι πιο συντηρητική. Η απόκλιση των αποτελεσμάτων μέσω PLAXIS® και των εκτιμήσεων μέσω των απλών εξισώσεων καταγράφεται στην Εικόνα 4.14.

Πιο συγκεκριμένα, η Eqn2 εμφανίζει μέγιστη απόκλιση 27,9% ($V_{s1}/V_{s2} = 1/2$, free head), η οποία σταδιακά μειώνεται όσο αυξάνεται ο λόγος των ταχυτήτων V_{s1}/V_{s2} , όπου και φθάνει μέχρι το 2,3%. Συνεπώς μπορούμε να πούμε πως η συγκεκριμένη εξίσωση έχει μεγαλύτερη ακρίβεια σε ακραίες τιμές του λόγου ταχυτήτων διάδοσης του διατμητικού κύματος. Η Eqn4, από την άλλη πλευρά, εμφανίζει την μεγαλύτερη απόκλιση ίση με 38,2% ($V_{s1}/V_{s2} = 1/10$, fixed head) υποεκτιμώντας την μέγιστη παραμόρφωση, ενώ η μεγαλύτερη ακρίβεια που επιτεύχθηκε είναι ίση με 5,07% ($V_{s1}/V_{s2} = 1/4$, free head). Φαίνεται πως για τις συγκεκριμένες παραμέτρους οι εξισώσεις δίνουν πολύ καλή ακρίβεια για λόγους ταχυτήτων γύρω από την τιμή $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$, με την Eqn2 να παρέχει ένα άνω όριο και την Eqn4 το κάτω όριο.

Λαμβάνοντας υπόψη όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, όπως ήταν αναμενόμενο, εμφανίστηκαν μικρές διαφορές μεταξύ των αναλύσεων BDWF και των τρισδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Οι τρισδιάστατες αναλύσεις δίνουν γενικότερα μεγαλύτερες τιμές από τις αντίστοιχες με θεώρηση ελατηριωτού εδάφους, ενώ οι μεταξύ τους αποκλίσεις μεγιστοποιούνται στις ακραίες περιπτώσεις ομοιογενούς εδάφους και δίστρωτου με λόγο ταχυτήτων διάδοσης διατμητικού κύματος $V_{s1}/V_{s2} = 1/10$. Ακόμη, σε όλες τις περιπτώσεις τρισδιάστατων αναλύσεων εμφανίζεται η μέγιστη παραμόρφωση του δεσμευμένου πασσάλου σε βάθος -0,30 m (δημιουργία «γωνίας» στα διαγράμματα), κάτι που δεν παρατηρείται στα διαγράμματα των Νικολαου & Gazetas.

4.4.2 Κατά Di Laora, Mandolini & Mylonakis

Η δεύτερη σχέση με την οποία θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων, η οποία αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 1.6.3 και είναι της μορφής:

$$M(t)_{max} = \frac{2E_p I}{d} \left(\frac{\varepsilon_p}{\gamma_1} \right)_{st} (\gamma_1)_{dyn} \Phi_2 \quad (\text{Eqn5-1.27})$$

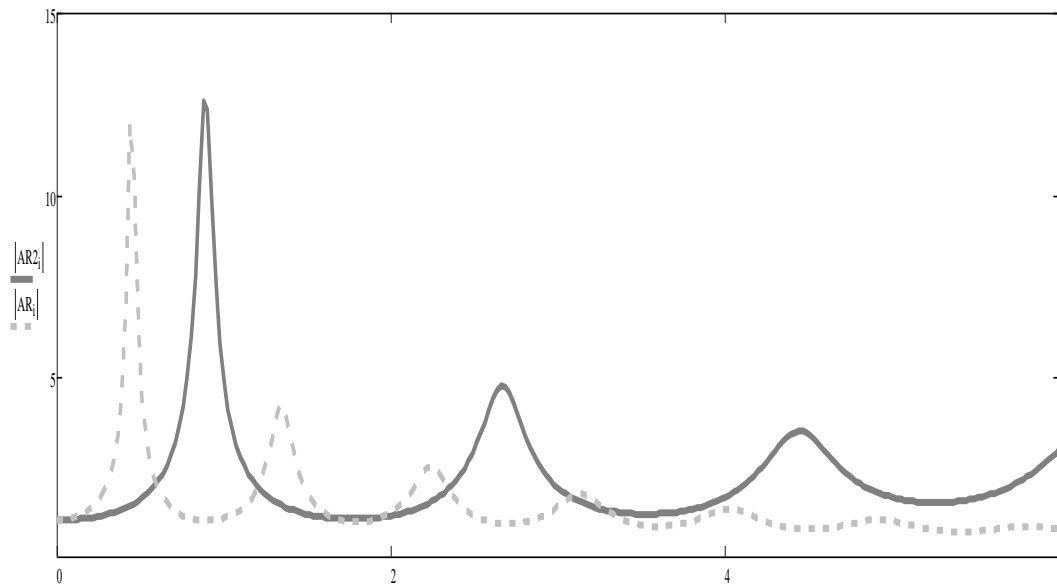
$$\varepsilon_p = \chi \gamma_1 \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h_1}{d} \right)^{-1} + \left(\frac{E_p}{E_1} \right)^{-0.25} (c - 1)^{0.5} \right] \quad (1.28)$$

Για την εύρεση του συντελεστή $(\gamma_1)_{dyn}$ πραγματοποιήθηκαν «free field» αναλύσεις για λόγους ταχυτήτων άνω και κάτω στρώσης $V_{s1}/V_{s2} = 1/2, 1/4, 1/10$, τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 4.6. Υπενθυμίζεται πως η τιμή της Φ_2 λαμβάνεται ίση με 1,25, ενώ οι υπόλοιπες τιμές που υπολογίσθηκαν φαίνονται στον ίδιο πίνακα. Οι συγκρινόμενες τιμές, όπως υπολογίσθηκαν μέσω του PLAXIS©, φαίνονται στον Πίνακα 4.7 και αφορούν αποκλειστικά την παραμόρφωση του πασσάλου λόγω κινηματικής ροπής στη διεπιφάνεια δύο εδαφικών στρώσεων. Τέλος, κατασκευάστηκαν ξεχωριστά διαγράμματα για κάθε λόγο ταχυτήτων, τα οποία παρουσιάζουν σημειακά τις μέγιστες τιμές που υπολογίσθηκαν και την εκτιμώμενη κατά Di Laora, Mandolini & Mylonakis (Εικόνα 4.15 α,β,γ).

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα αυτά, για την περίπτωση $V_{s1}/V_{s2} = 1/2$, η εκτίμηση, που ισούται με $\epsilon_M (10^4) = 6,94$, έχει μεγάλη απόκλιση καθώς οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων δίνουν $\epsilon_M (10^4) = 21,51$ και $22,02$ για πάσσαλο ελευθέρως στρεπτής και άστρεπτης κεφαλής αντίστοιχα. Προχωρώντας στην περίπτωση $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$, φαίνεται πως η εκτίμηση είναι πολύ καλή, αν και υποεκτιμά την παραμόρφωση ($\epsilon_M (10^4) = 34,4$) που υπολογίσθηκε στις αναλύσεις ($\epsilon_M (10^4) = 35,17$ για free head και $37,05$ για fixed head). Τέλος, η εκτίμηση που υπερεκτιμά την παραμόρφωση σε σχέση με τις αναλύσεις, φάνηκε να είναι για την περίπτωση $V_{s1}/V_{s2} = 1/10$, μιας και υπολογίσθηκε $\epsilon_M (10^4) = 63,29$, όταν οι αναλύσεις δίνουν $\epsilon_M (10^4) = 57,05$ για free head και $61,05$ για fixed head. Οι δύο τελευταίες περιπτώσεις, επομένως, είναι αρκετά κοντά ως προς την τιμή της κινηματικής παραμόρφωσης στη διεπιφάνεια, ενώ μικρότερο σφάλμα (7,70%) βρέθηκε για την περίπτωση $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, φαίνεται η σχέση Eqn2 των Νικολάου & Gazetas να είναι πιο κοντά στα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκριτικά με την Eqn4 και την Eqn5. Η σχέση αυτή απαιτεί τη διεξαγωγή free field αναλύσεων για την εκτίμηση της τάσης στη διεπιφάνεια των στρώσεων, ωστόσο κάτι τέτοιο δεν θεωρείται χρονοβόρο. Ακόμη, παρατηρήθηκε μέγιστη απόκλιση στις εκτιμώμενες τιμές και στις υπολογισθείσες μέσω των αναλύσεων και για τις τρεις σχέσεις, για την περίπτωση $V_{s1}/V_{s2} = 1/2$. Φάνηκε πως οι τρεις σχέσεις υποεκτιμούν αρκετά την αναμενόμενη τιμή, επομένως χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση η εφαρμογή τους για το συγκεκριμένο λόγο ταχυτήτων.

ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4



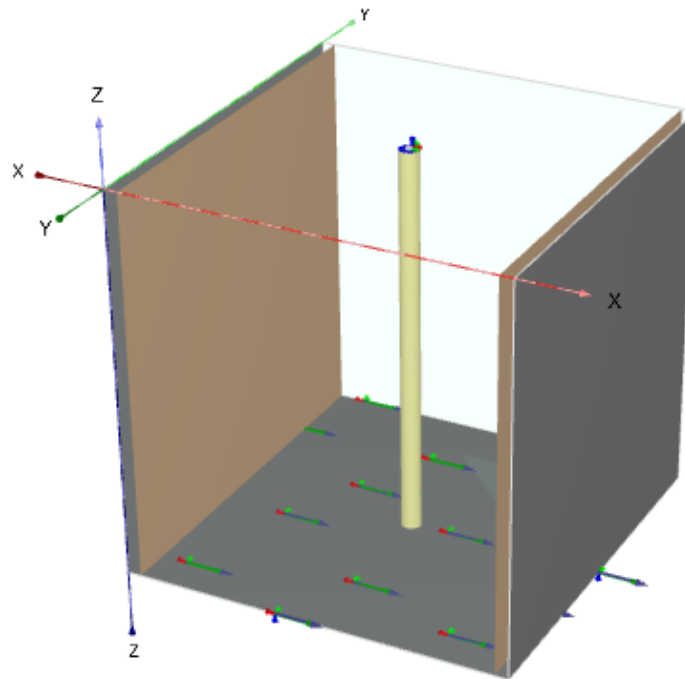
Εικόνα 4.1: Τυπικό διάγραμμα εδαφικής ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας που σχεδιάστηκε μέσω Mathcad, ενδεικτικά για την περίπτωση ομοιογενούς εδάφους και για $V_1/V_2=1/10$

$\frac{V_{s1}}{V_{s2}}$	f_s
1	0,439
1/2	0,732
1/4	0,854
1/10	0,879

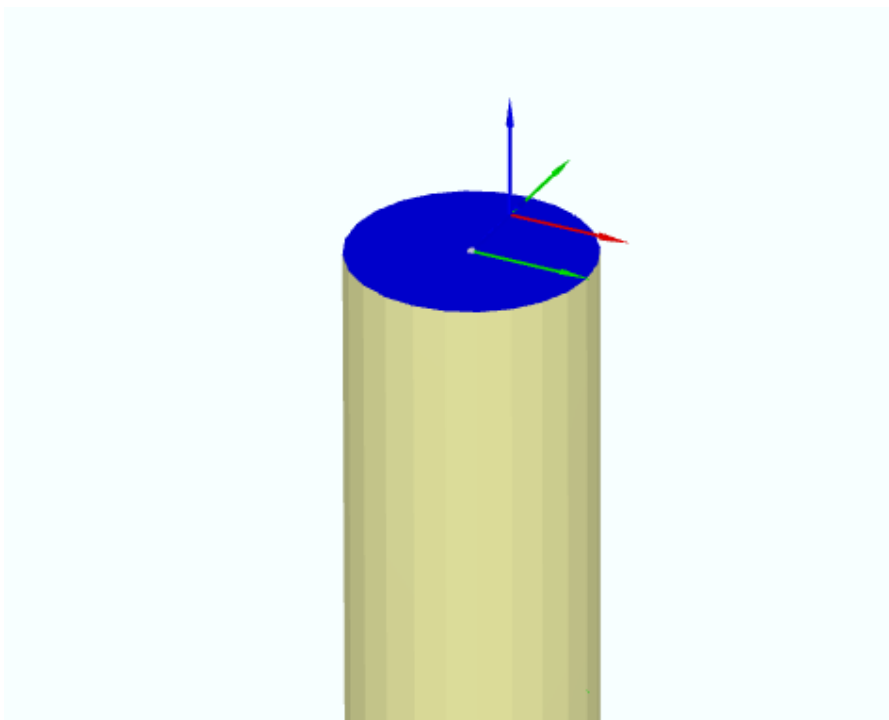
Πίνακας 4.1: Ιδιοσυχνότητες των περιπτώσεων εδάφους που αναλύθηκαν, όπως υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος Mathcad

Κάνναβος	a_x (m/s)	Απόκλιση από fine 40x40	
20x20 m	Fine	12,289	2,82%
	Medium	12,358	3,40%
	Coarse	12,437	4,06%
40x40 m	Fine	11,952	0%
	Medium	11,856	-0,80%
	Coarse	11,924	-0,23%

Πίνακας 4.2: Διαδικασία επιλογής μεγέθους και πυκνότητας καννάβου και μοντέλου (αποδεκτή η λύση coarse 20x20 m με απόκλιση 4,06%)



Εικόνα 4.2: Η γεωμετρία της προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις, απουσία εδάφους ώστε να διακρίνεται η επιφάνεια επιβαλλόμενης διέγερσης (κάτω) και οι διεπιφάνειες των συνόρων (δεξιά και αριστερά)



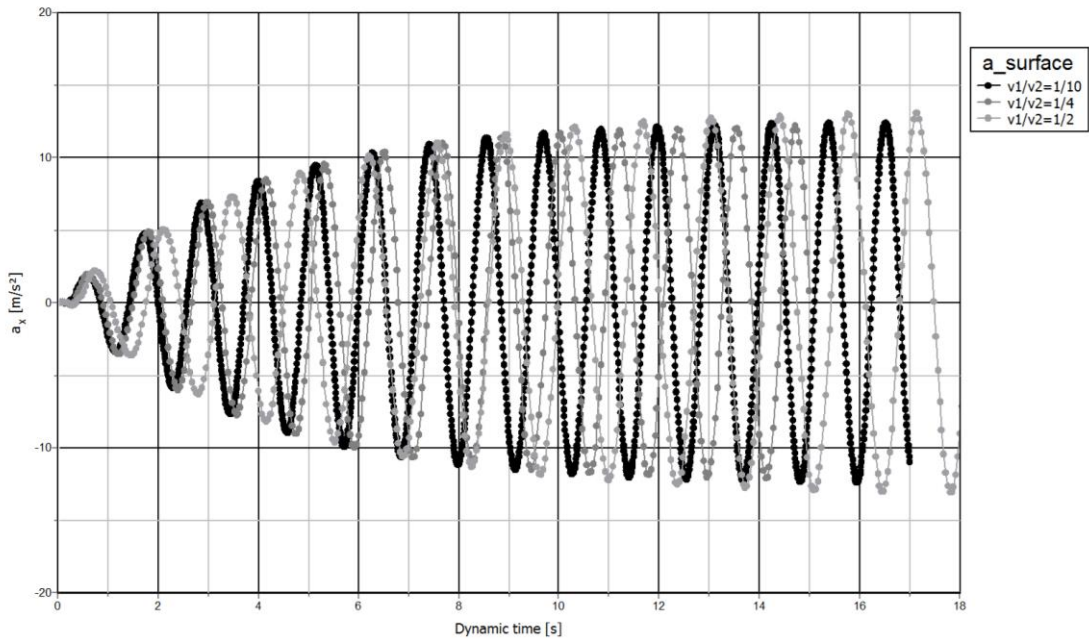
Εικόνα 4.3: Τοποθέτηση κατάλληλης πλάκας στην κεφαλή του πασσάλου, για αποφυγή των φαινομένων Βερνούλι στις αναλύσεις

Coordinate	Deformations	Dynamics
X_{min}	free	free field
X_{max}	free	free field
Y_{min}	normally fixed	none
Y_{max}	normally fixed	none
Z_{min}	normally fixed	none
Z_{max}	free	none

Πίνακας 4.3: Οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στις αναλύσεις, τόσο για τις μετακινήσεις, όσο και για τις δυναμικές συνθήκες

Dynamic time interval		23,00 s
First step		3
Last step		3402
Deformation control parameters		
Ignore undr. behaviour	<input type="checkbox"/>	
Reset displacements to	<input checked="" type="checkbox"/>	
Reset small strain	<input checked="" type="checkbox"/>	
Reset state variables	<input type="checkbox"/>	
Ignore suction	<input checked="" type="checkbox"/>	
Cavitation cut-off	<input type="checkbox"/>	
Cavitation stress		100,0 kN/m ²
Numerical control parameters		
Solver type	Picos (multicore iterative)	▼
Max cores to use		256
Max number of steps s		23
Use default iter param	<input type="checkbox"/>	
Max steps		2300
Time step determination	Manual	▼
Number of sub steps		1

Εικόνα 4.4: Ρυθμίσεις χρόνου δυναμικής ανάλυσης, βημάτων που αποθηκεύονται ώστε να εξαχθούν τα αποτελέσματα και συνολικός αριθμός βημάτων της ανάλυσης (ενδεικτική περίπτωση ομοιογενούς εδάφους)



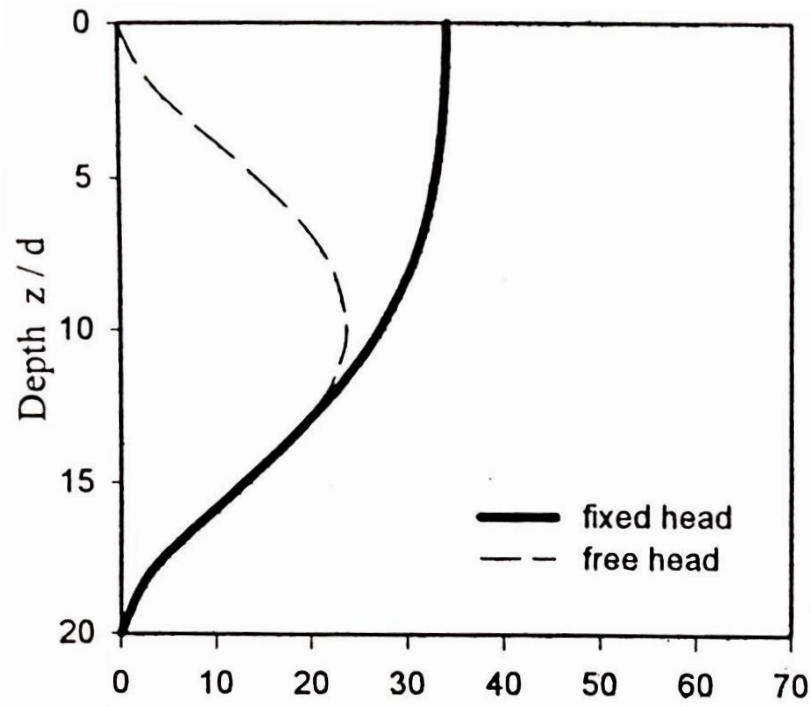
Εικόνα 4.5: Διάγραμμα των αναλύσεων ελευθέρου πεδίου που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση της μέγιστης επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους, προς εκτίμηση της τάσης στη διεπιφάνεια από τη σχέση των Νικολαου & Gazetas

$\varepsilon_M(10^4)$	V_{s1}/V_{s2}	1/10	1/4	1/2	1
$\varepsilon_{inter,free}$	PLAXIS	57	35,2	21,5	-
	PAPER	38,5	41	15,5	-
$\varepsilon_{inter,fixed}$	PLAXIS	61	37,1	21,9	-
	PAPER	43	45	17	-
ε_{head}	PLAXIS	47,5	39,6	43,7	66,4
	PAPER	34	48	37	34

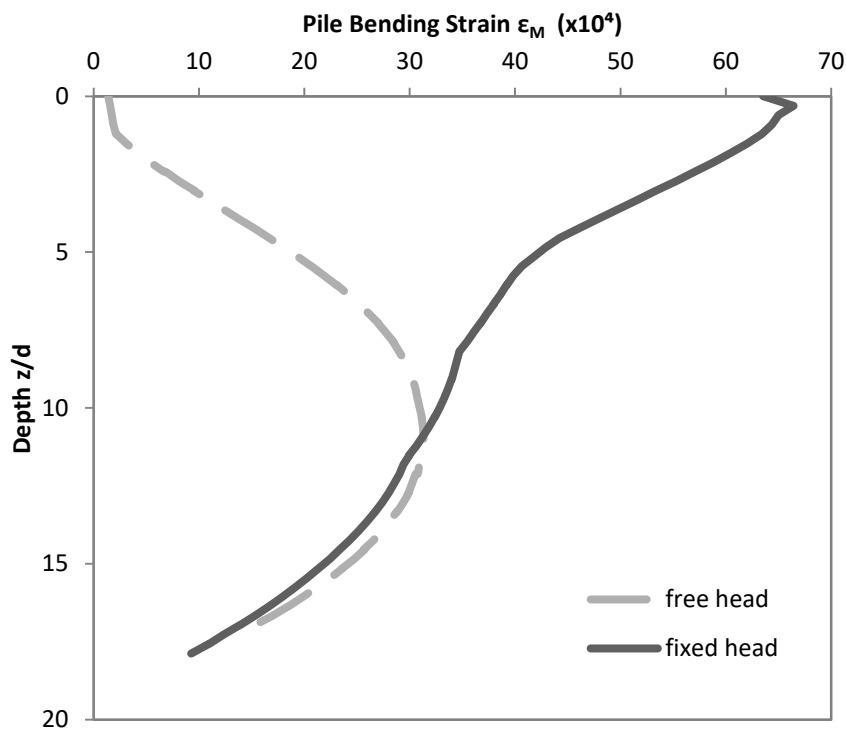
Πίνακας 4.4: Συνοπτική παρουσίαση μέγιστων παραμορφώσεων που προέκυψαν μέσω ανάλυσης μεμονωμένου πασσάλου

$\varepsilon_M(10^4)$	V_{s1}/V_{s2}	1/10	1/4	1/2
Eqn2		62,62	38,95	29,84
Eqn4		44,10	33,50	27,21

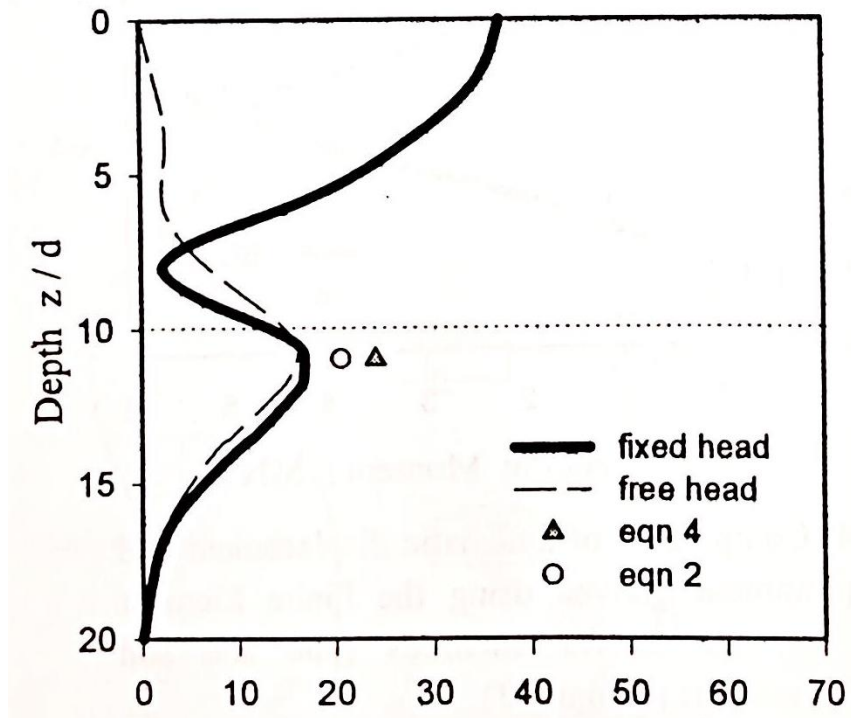
Πίνακας 4.5: Συνοπτική παρουσίαση των μέγιστων παραμορφώσεων στη διεπιφάνεια, που εκτιμήθηκαν μέσω των προτεινόμενων σχέσεων των Νικολαου & Gazetas



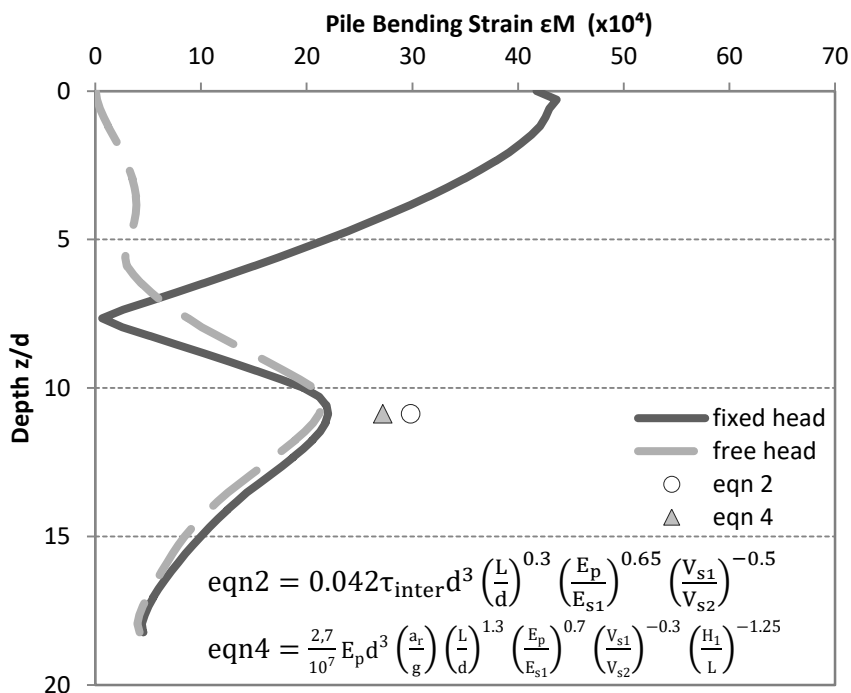
Εικόνα 4.6: Μέγιστη παραμόρφωση συναρτήσει του ανηγμένου βάθους για ελευθέρως στρεπτή και άστρεπτη κεφαλή μονού πασσάλου σε ομοιογενές έδαφος (Νικολαου & Gazetas, 1997)



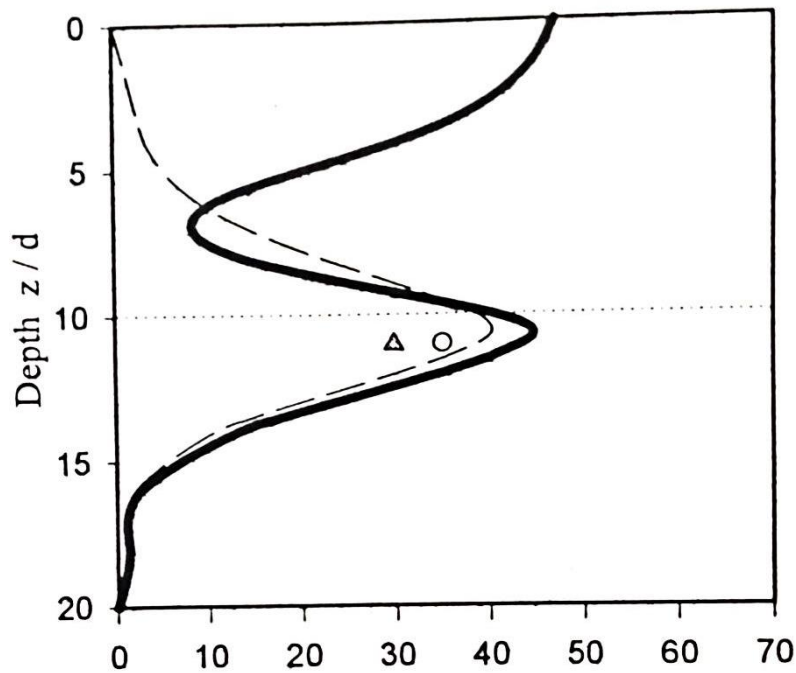
Εικόνα 4.7: Αναπαραγωγή του παραπάνω διαγράμματος μέσω τρισδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία (ομοιογενές έδαφος)



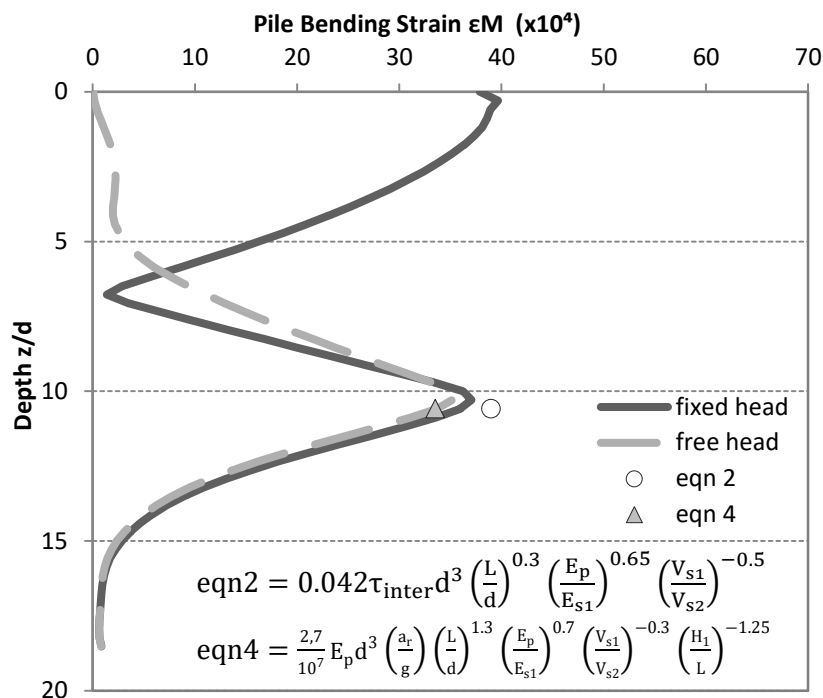
Εικόνα 4.8: Μέγιστη παραμόρφωση συναρτήσει του ανηγμένου βάθους για ελευθέρως στρεπτή και άστρεπτη κεφαλή μονού πασσάλου σε δίστρωτο έδαφος με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/2$ (Nikolaou & Gazetas, 1997)



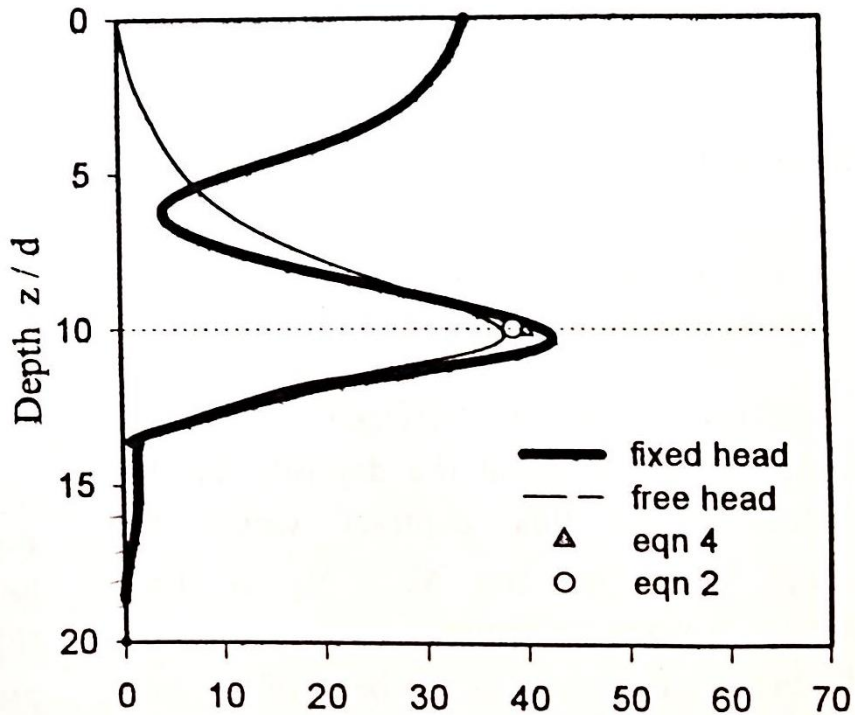
Εικόνα 4.9: Αναπαραγωγή του παραπάνω διαγράμματος μέσω τρισδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία (δίστρωτο έδαφος με $V_{s1}/V_{s2}=1/2$)



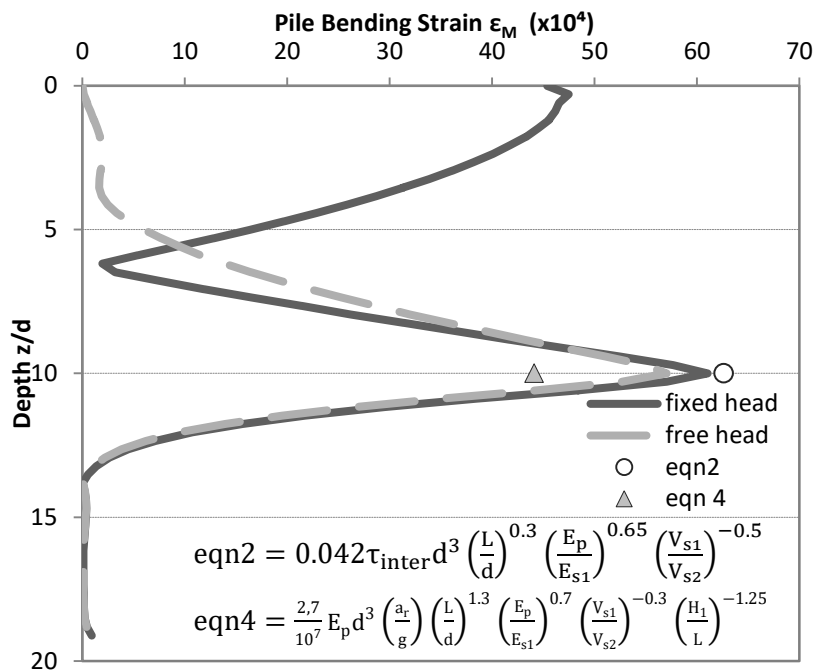
Εικόνα 4.10: Μέγιστη παραμόρφωση συναρτήσει του ανηγμένου βάθους για ελευθέρως στρεπτή και πακτωμένη κεφαλή μονού πασσάλου σε δίστρωτο έδαφος με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ (Nikolaou & Gazetas, 1997)



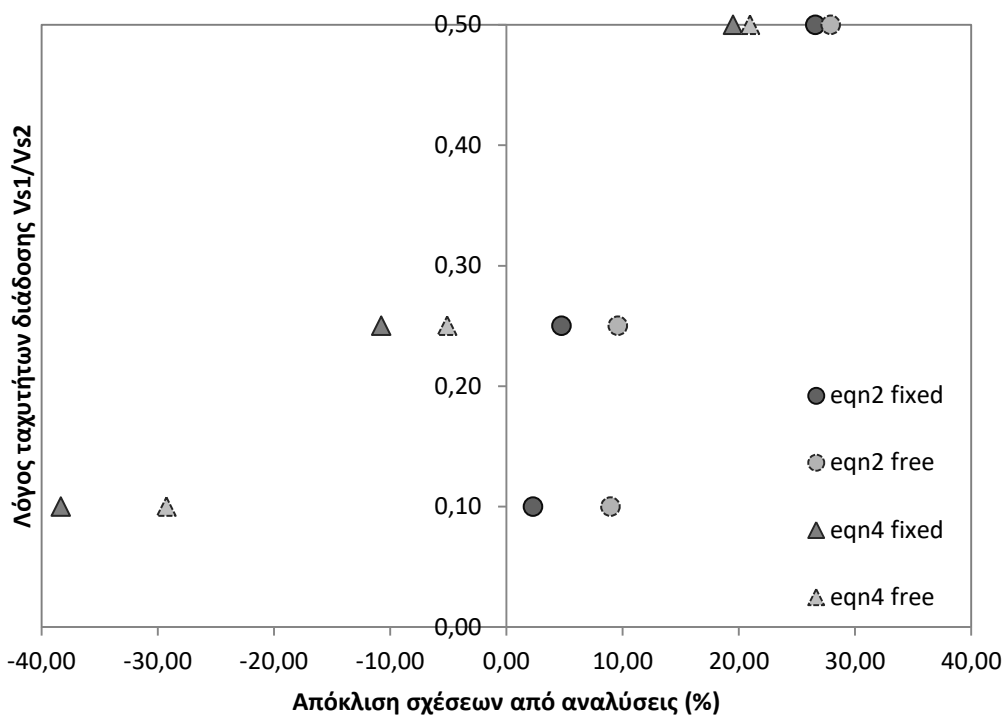
Εικόνα 4.11: Αναπαραγωγή του παραπάνω διαγράμματος μέσω τρισδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία (δίστρωτο έδαφος με $V_{s1}/V_{s2}=1/4$)



Εικόνα 4.12: Μέγιστη παραμόρφωση συναρτήσει του ανηγμένου βάθους για ελευθέρως στρεπτή και άστρεπτη κεφαλή μονού πασσάλου σε δίστρωτο έδαφος με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$ (Nikolaou & Gazetas, 1997)



Εικόνα 4.13 : Αναπαραγωγή του παραπάνω διαγράμματος μέσω τρισδιάστατων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία (δίστρωτο έδαφος με $V_{s1}/V_{s2}=1/10$)



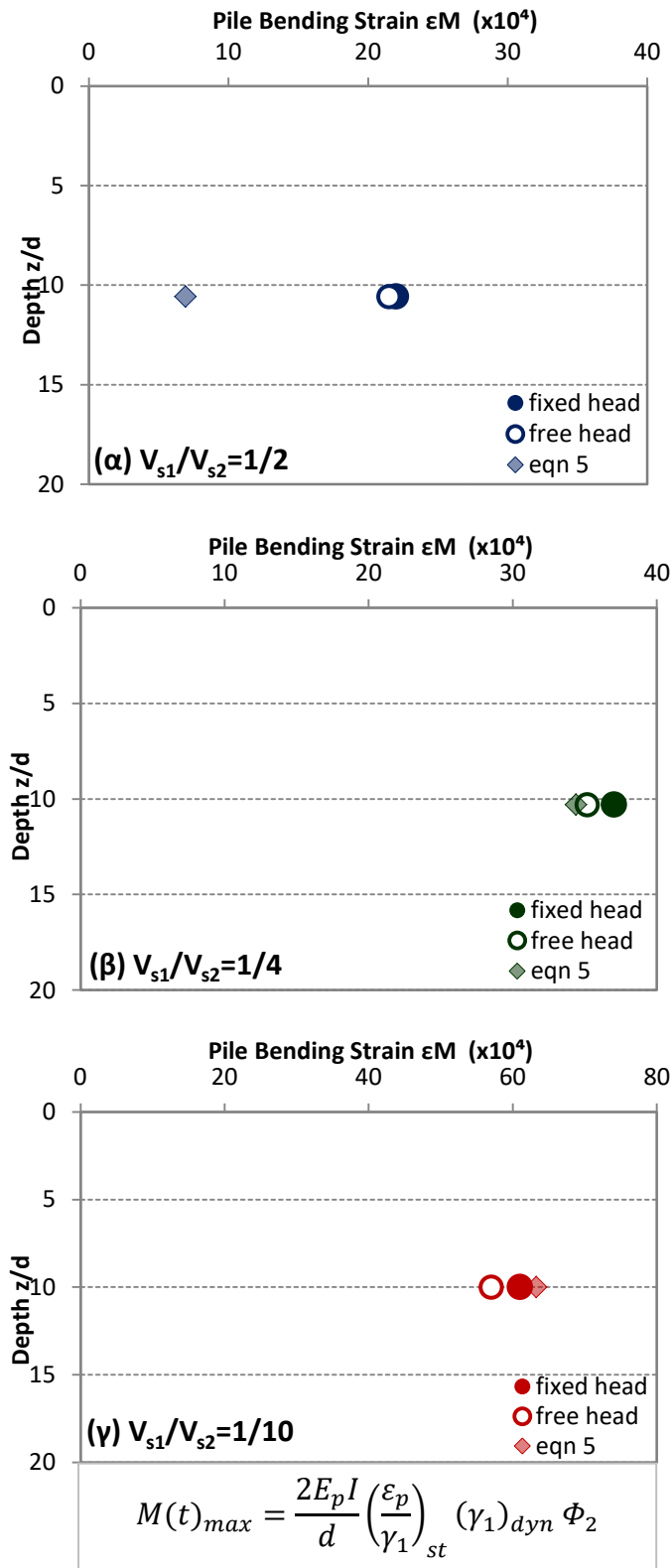
Εικόνα 4.14: Διάγραμμα των ποσοστών απόκλισης των σχέσεων Νικολαου & Gazeta, από τα αποτελέσματα των αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία

V_{s1}/V_{s2}	$C=(G2/G1)^{0,25}$	γ_{dyn}	ϵ_p/γ_1	M_{max} (KNm)	$\epsilon_m \cdot 10^4$
1/2	1.52	0,021	0,0264	1700,33	6,94
1/4	2.15	0,048	0,0573	8428,33	34,40
1/10	3.40	0,051	0,0993	15505,79	63,29

Πίνακας 4.6: Εκτίμηση της κινηματικής ροπής βάσει Di Laora, Mandolini & Mylonakis

V_{s1}/V_{s2}	$\epsilon_m \cdot 10^4$ (free head)	$\epsilon_m \cdot 10^4$ (fixed head)	Μαχ απόκλιση από εκτίμηση
1/2	21,51	22,02	217,29%
1/4	35,17	37,05	7,70%
1/10	57,05	61,05	9,85%

Πίνακας 4.7: Κινηματική ροπή που αναπτύχθηκε στην διεπιφάνεια μεταξύ των εδαφικών στρώσεων, όπως υπολογίστηκε κατά τις αναλύσεις μονού πασσάλου



Εικόνα 4.15(α,β,γ): Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, με την εκτίμηση κατά Di Laora, Mandolini & Mylonakis

5 Κινηματική Επιπόνηση Ομάδας Πασσάλων

5.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η απόκριση πασσάλου που ανήκει σε ομάδα πασσάλων υπό την επίδραση μοναδιαίας αρμονικής διέγερσης ορισμένης συχνότητας, αποκλειστικά, χωρίς επιπλέον φορτίσεις. Σκοπός είναι να μελετηθεί η επονομαζόμενη κινηματική επιπόνηση των πασσάλων, η καταπόνησή τους, δηλαδή, λόγω της εδαφικής σεισμικής κίνησης. Επιδιώκεται η σύγκριση με την απόκριση του μονού πασσάλου για να εξεταστεί το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων που ανήκουν σε ομάδα. Η αλληλεπίδραση αυτή λαμβάνει χώρα, όπως θα παρατηρηθεί στην συνέχεια, τόσο μεταξύ πασσάλου-εδάφους, όσο και μεταξύ πασσάλου με πάσσαλο.

Θα μελετηθεί η επίδραση στην κινηματική ροπή και ανηγμένη παραμόρφωση της θέσης του πασσάλου, του μεγέθους της ομάδας, των αποστάσεων μεταξύ τους και των βαθμών ελευθερίας στην κεφαλή των πασσάλων (ελευθέρως στρεπτή, μη-στρεπτή και με κεφαλόδεσμο) καθώς και την επίδραση του λόγου διάδοσης διατμητικών-S κυμάτων των δύο εδαφικών στρωμάτων V_{s1}/V_{s2} . Έτσι εξετάζεται η «ευαισθησία» της κάθε παραμέτρου στην αναμενόμενη απόκριση των πασσάλων.

Αφού ληφθούν οι κατάλληλες παράμετροι, θα σχεδιαστούν οι προσομοιώσεις, για τις διάφορες πιθανές διαστάσεις που εξετάζονται. Οι τρισδιάστατες αναλύσεις γίνονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό πρόγραμμα PLAXIS©. Αρχικά θα εξετασθεί η απόκριση σε αρμονική διέγερση, ενώ έπειτα επιχειρείται η μελέτη του φαινομένου της κινηματικής επιπόνησης ομάδας στην περίπτωση ρεαλιστικής διέγερσης με την εισαγωγή επιταχυνσιογραφημάτων πραγματικών σεισμικών γεγονότων. Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και σχολιάζονται προς το τέλος του κεφαλαίου.

5.2 Ομάδα υπό απλή αρμονική διέγερση

Οι ομάδες που κατασκευάστηκαν έχουν τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

- Τέσσερις (4) πάσσαλοι σε διάταξη κάτοψης **2x2** με αξονική απόσταση δύο διαμέτρων, **2d = 2 m**
- Τέσσερις (4) πάσσαλοι σε διάταξη κάτοψης **2x2** με αξονική απόσταση πέντε διαμέτρων, **5d = 5 m**
- Εννέα (9) πάσσαλοι σε διάταξη κάτοψης **3x3** με αξονική απόσταση δύο διαμέτρων, **2d = 2 m**
- Εννέα (9) πάσσαλοι σε διάταξη κάτοψης **3x3** με αξονική απόσταση πέντε διαμέτρων, **5d = 5 m**
- Δεκαέξι (16) πάσσαλοι σε διάταξη κάτοψης **4x4** με αξονική απόσταση δύο διαμέτρων, **2d = 2 m**
- Δεκαέξι (16) πάσσαλοι σε διάταξη κάτοψης **4x4** με αξονική απόσταση πέντε διαμέτρων, **5d = 5 m**.

Όλες οι παραπάνω διατάξεις εξετάζονται για τρεις περιπτώσεις κινηματικής συμπεριφοράς κεφαλής, άστρεπτης, ελευθέρως στρεπτής και μια ενδιάμεση και πιο ρεαλιστική κατάσταση κεφαλών ενωμένων μεταξύ τους με κεφαλόδεσμο. Επίσης οι τέσσερις πρώτες περιπτώσεις εξετάζονται για τέσσερις διαφορετικούς λόγους ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2} = 1, 1/2, 1/4, 1/10$ και για απλή ημιτονοειδή μοναδιαίου πλάτους διέγερση συχνότητας ίσης με την ιδιοσυχνότητα του εδαφικού σχηματισμού, η οποία εξαρτάται από το λόγο V_{s1}/V_{s2} . Οι ομάδες 4x4 εξετάζονται για λόγους $V_{s1}/V_{s2} = 1/4, 1/10$, επομένως προκύπτουν συνολικά **60 αναλύσεις**.

Σε όλες τις περιπτώσεις οι αποστάσεις των ορίων ορίζονται στα 10 μέτρα από τον ακριανό πάσσαλο και οι ιδιότητες των εδαφικών και δομικών υλικών (στρώσεις εδάφους, πάσσαλοι, επιφανειακή πλάκα, στοιχείο δοκού-«ψευδοπάσσαλος»), καθώς και η διαδικασία και πορεία υπολογισμού είναι ίδιες με την περίπτωση του μονού πασσάλου και παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3. Το είδος του καννάβου διαφέρει κάθε φορά ανάλογα με τη διάταξη. Στην συγκεκριμένη ενότητα, όπου εξετάζεται η απόκριση ομάδας πασσάλων οι υπολογιστικές απαιτήσεις αυξάνονται σημαντικά, το ίδιο και ο χρόνος της ανάλυσης και η επιβάρυνση των υπολογιστικών συσκευών, επομένως επιλέγεται πιο αδρός κάνναβος με μικρότερο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων προς υπολογισμό. Αυτό είναι επιτρεπτό εφόσον από την αρχική ποσοτικοποίηση της επίδρασης της πυκνότητας του καννάβου στα αποτελέσματα των αναλύσεων βρέθηκε ανεκτή απόκλιση κάτω από 10% μεταξύ της πιο πυκνής και πιο αραιής διακριτοποίησης. Πιο συγκεκριμένα η διακριτοποίηση κυμαίνεται μεταξύ των επιλογών «coarse» και «very coarse» με ή χωρίς αυτόματη βέλτιστη πύκνωση.

5.2.1 Ομάδα πασσάλων 2x2

Για τις δύο πρώτες περιπτώσεις ομάδας 2x2 ο πάσσαλος που επιλέγεται για παρακολούθηση και σύγκριση της απόκρισής του με αυτή του μονού πασσάλου είναι ο γωνιακός εξωτερικός (Εικόνα 5.1, 5.2) Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή του στοιχείου δοκού (beam element) που αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια και έχει τη λειτουργία κλισιόμετρου. Πραγματοποιούνται τρισδιάστατες αναλύσεις για αποστάσεις πασσάλων $5d$ και $2d$, για τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις λόγων ταχυτήτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αξίζει να σημειωθεί πως οι συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων επιλέχθηκαν ως άνω και κάτω όριο, καθώς αποτελούν ακραίες τιμές που στην πράξη δεν συνηθίζεται να επιλέγονται.

Για την ακριβή προσομοίωση της σύνδεσης των πασσάλων με κεφαλόδεσμο δημιουργούμε μια τετραγωνική πλάκα με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πάχος πλάκας: $d = 2 \text{ m}$

Μέτρο ελαστικότητας: $E = 30 \text{ GPa}$

Ειδικό βάρος: $\gamma = 0,01 \text{ kN/m}^3$

Δεν επιθυμείται η μεταφορά φορτίων από την πλάκα στην ομάδα, για αυτό επιλέγεται μηδενικό ειδικό βάρος. Έτσι αυξάνεται η δυσκαμψία στην κεφαλή των πασσάλων, επιτυγχάνοντας συνθήκες σύνδεσης μεταξύ των κεφαλών των πασσάλων και λειτουργώντας πρακτικά ως κεφαλόδεσμος.

Οι πλευρές της πλάκας εκτείνονται 1 μέτρο εκτός από το κέντρο του ακριανού πασσάλου δηλαδή έχει διαστάσεις ανάλογα με τη γεωμετρία της ομάδας:

$$2 * 1 + (n - 1) * x * d \quad (5.1)$$

Όπου x η απόσταση πασσάλων συναρτήσει της διαμέτρου ($d = 1 \text{ m}$) και n το πλήθος πασσάλων ομάδας ανά πλευρά ($n = 2$). Έτσι, προκύπτει για $x = 2$ και για $x = 5$ πλάκα διαστάσεων $4x4 \text{ m}$ και $7x7 \text{ m}$ αντίστοιχα.

Οι ιδιότητες των εδαφικών στρωμάτων και των λοιπών δομικών στοιχείων παραμένουν ίδιες όπως στις προηγούμενες ενότητες και δεν επαναλαμβάνονται, ομοίως και η πορεία υπολογισμού. Η πυκνότητα του καννάβου ορίστηκε αραιή (coarse) με αυτόματη βέλτιστη πύκνωση. Ενδεικτικά το πλήθος των στοιχείων που προέκυψαν με αυτή τη διακριτοποίηση ήταν της τάξης των 50000. Τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της κινηματικής ανηγμένης παραμόρφωσης, ϵ_m , καθ' ύψος του πασσάλου όπως προέκυψαν από την ανάλυση με το λογισμικό PLAXIS© για κάθε συχνότητα διέγερσης και λόγο V_{s1}/V_{s2} , για κάθε συνθήκη δέσμευσης της κεφαλής και για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις απόστασης μεταξύ των πασσάλων παρατίθενται στο τέλος του κεφαλαίου.

5.2.2 Ομάδα πασσάλων 3x3

Στην περίπτωση ομάδας διαστάσεων κάτοψης 3x3 καταγράφουμε την απόκριση (Εικόνα 5.3, 5.4):

- Του εξωτερικού γωνιακού πασσάλου (θέση 1.1)
- Του εξωτερικού μεσαίου πασσάλου (θέση 1.2)
- Του εσωτερικού μεσαίου πασσάλου στο κέντρο της ομάδας (θέση 2.2)

Αυτό γίνεται με την εισαγωγή στο κέντρο και καθ' ύψος των πασσάλων του «ψευδοπασσάλου», του στοιχείου δοκού που λειτουργεί ως κλισιόμετρο κατά τα γνωστά. Εξετάζονται οι περιπτώσεις των τεσσάρων λόγων ταχυτήτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, για κεφαλή πασσάλου ελευθέρως στρεπτή, καθόλου στρεπτή και με πλάκα κεφαλόδεσμου. Για τις ιδιότητες της πλάκας του κεφαλόδεσμου ισχύει ότι και για την ομάδα πλήθους 2x2 και οι διαστάσεις της προκύπτουν επίσης με τον ίδιο τρόπο, οπότε και διαμορφώνεται πλάκα διαστάσεων κάτοψης $6x6\text{ m}$ και $12x12\text{ m}$ για αξονική απόσταση μεταξύ των πασσάλων $2d = 2\text{ m}$ και $5d = 5\text{ m}$ αντίστοιχα.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η πολυπλοκότητα του μοντέλου αύξησε κατά πολύ τις υπολογιστικές απαιτήσεις, επομένως για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της περιορισμένης ισχύος των υπολογιστών, τέθηκε χρονικό βήμα 0,04. Το συγκεκριμένο χρονικό βήμα ήταν το βέλτιστο δυνατό για την επίτευξη αποδεκτών αναλύσεων αριθμητικά και χρονικά. Επίσης ο κάνναβος τέθηκε πιο αραιός, σε ορισμένες περιπτώσεις, σε σύγκριση με την περίπτωση της ομάδας 2x2. Παρόλα αυτά το πλήθος των στοιχείων άγγιξε τα 150000, αφού στην περιοχή κατά μήκος και γύρω από τους πασσάλους πραγματοποιείται ,απαιτούμενη από την τοπική γεωμετρία, πύκνωση των πεπερασμένων στοιχείων.

Αφού γίνουν οι απαιτούμενες αναλύσεις, οι τιμές των ροπών κατά μήκος των «ψευδοπασσάλων» μεταφέρονται σε υπολογιστικό φύλλο. Από την απόλυτη τιμή της μέγιστης ροπής που εμφανίζεται συναρτήσει του βάθους προκύπτει η κινηματική παραμόρφωση και απεικονίζεται σε κατάλληλο διάγραμμα. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται οι τιμές της ανηγμένης κινηματικής παραμόρφωσης των πασσάλων της ομάδας για όλες τις περιπτώσεις παραμέτρων που αναφέρθηκαν, μόνο που εισάγεται μία επιπλέον παράμετρος προς μελέτη της επίδρασης της στο φαινόμενο της κινηματικής επιπόνησης πασσάλων ομάδας κι αυτή είναι η θέση του πασσάλου σε σχέση με την ομάδα (θέση 1.1, 1.2 και 2.2 – Εικόνα 5.2). Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις εν λόγω αναλύσεις θα καταγραφούν σε επόμενο υποκεφάλαιο.

5.2.3 Ομάδα πασσάλων 4x4

Έχοντας κάνει τις αναλύσεις για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις μεγέθους της ομάδας (2x2 και 3x3) είναι εμφανής μία τάση στη μεταβολή των μεγεθών της

απόκρισης των πασσάλων των ομάδων με την αύξηση του μεγέθους της. Εδώ μελετάται εάν μία ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του μεγέθους της ομάδας θα έχει μεγαλύτερη επίδραση στα εξεταζόμενα μεγέθη (ϵ_M , M_{max}). Δεν είναι απίθανο από ένα σημείο και μετά το πλήθος των πασσάλων της ομάδας να μην επηρεάζει την απόκριση, πρακτικά δηλαδή να σταματά να εντείνεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης. Για το λόγο αυτό διεξάγουμε ενδεικτικές αναλύσεις για ομάδα διαστάσεων 4x4 (Εικόνα 5.5) μεταβάλλοντας τις παραμέτρους:

Αξονική απόσταση:

$$2d = 2 \text{ m και } 5d = 5 \text{ m}$$

Συνοριακές συνθήκες κεφαλής:

Ελευθέρως Στρεπτή, Άστρεπτη, Με Κεφαλόδεσμο

Λόγος ταχυτήτων εδαφικών στρωμάτων:

$$V_{s1}/V_{s2} = 1/4, 1/10$$

Η απόκριση που καταγράφεται μέσω «ψευδοπασσάλων –beams» γίνεται για τις θέσεις (Εικόνα 5.6):

- Του εξωτερικού γωνιακού πασσάλου (θέση 1.1)
- Του εσωτερικού πασσάλου (θέση 2.2)

Όλες οι ιδιότητες των υλικών επιλέγονται κατά τα γνωστά, ενώ η πλάκα του κεφαλόδεσμου έχει διαστάσεις 8x8 m και 17x17 m για αξονική απόσταση μεταξύ των πασσάλων $2d = 2 \text{ m}$ και $5d = 5 \text{ m}$ αντίστοιχα. Λόγω του μεγέθους της συγκεκριμένης πασσαλομάδας, τα μοντέλα που προέκυψαν ήταν αρκετά πολύπλοκα. Για το λόγο αυτό οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με χρονικό βήμα ίσο με 0,04, με χρήση αδρών καννάβων (very coarse) με αυτόματη βέλτιστη πύκνωση, όπως και στην περίπτωση 3x3.

Η επεξεργασία και απεικόνιση των αποτελεσμάτων γίνεται με όμοιο τρόπο με προηγουμένως (2x2, 3x3), προς διευκόλυνση της σύγκρισης μεταξύ τους. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ενώ οι τιμές συγκρίνονται και με τις προηγούμενες περιπτώσεις πασσαλομάδας, ώστε να λάβουμε μια συγκεντρωτική εικόνα των φαινομένων που εξετάζονται.

5.3 Ομάδα υπό πραγματική σεισμική διέγερση

Όλες οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν μέχρι αυτό το σημείο αφορούσαν αρμονικό σεισμό μοναδιαίας επιτάχυνσης, για 10 κύκλους διέγερσης. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται αναλύσεις με τη χρήση χρονοϊστοριών από πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα, ανηγμένα σε μοναδιαία επιτάχυνση. Οι προσομοιώσεις έγιναν για μονό πάσσαλο και για ομάδες πασσάλων 3x3 με αποστάσεις μεταξύ τους

ίσες με $5d$. Επιπλέον επιλέχθηκε λόγος ταχυτήτων υπερκείμενης και υποκείμενης στρώσης ίσος με $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$. Η τιμή αυτή προτιμήθηκε έναντι της $V_{s1}/V_{s2} = 1/10$, μιας και αποτελεί μία πιο ρεαλιστική εκδοχή. Ακόμη εξετάστηκε τόσο η περίπτωση προσθήκης κεφαλόδεσμου στην ομάδα, όσο και εκείνη άστρεπτης κεφαλής των πασσάλων. Εξαιρείται η περίπτωση κεφαλόδεσμου στον μονό πάσσαλο, η οποία αναλύεται για ελεύθερη κεφαλή. Κατά τα άλλα οι ιδιότητες των υλικών και της γεωμετρίας παρέμειναν ίδιες, όπως περιγράφονται στην παράγραφο 5.2.2.

Τα επιταχυνσιογράφηματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι του σεισμού της Καλαμάτας (1986) και της Λευκάδας (2003), που φαίνονται στην Εικόνα 5.7. Φαίνεται πως το πρώτο επιταχυνσιογράφημα έχει λιγότερους κύκλους και μεγαλύτερες περιόδους από το δεύτερο. Σημειώνεται πως και οι δύο χρονοϊστορίες αναλύθηκαν με χρονικό βήμα ίσο με $0,01$ sec, ενώ ρυθμίστηκε απόσβεση $\xi = 5\%$ για την συχνότητα συντονισμού του συγκεκριμένου εδάφους, που είναι $f_s = 0.854$.

Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε η μέγιστη κινηματική ροπή που αναπτύχθηκε στους πασσάλους, ενώ στη συνέχεια μετατράπηκε σε ανηγμένη μορφή, διαιρώντας την μέγιστη ροπή του πασσάλου ομάδας με τη μέγιστη ροπή του μονού πασσάλου $M_{max,group}/M_{max,single}$. Συγκεκριμένα για την περίπτωση του κεφαλόδεσμου, η ροπή της ομάδας διαιρέθηκε με εκείνη του μονού με άστρεπτη κεφαλή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και σχολιάζονται συγκεντρωτικά στη συνέχεια.

5.4 Συμπεράσματα

Η αλληλεπίδραση των πασσάλων ομάδας αναμένεται γενικά να εντείνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος της ομάδας, όσο μικραίνουν οι αξονικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων και όσο πιο κεντρικά βρίσκεται ο πάσσαλος εντός της ομάδας, όσο δηλαδή μεγαλώνει ο αριθμός των πασσάλων που τον περιβάλλουν. Η ένταση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης συνεπάγεται μεγαλύτερη απόκλιση των καταγεγραμμένων μεγεθών της απόκρισης του πασσάλου που ανήκει στην ομάδα σε σχέση με τον μονό πάσσαλο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επομένως αναμένεται μείωση της καταγεγραμμένης κινηματικής ροπής και ανηγμένης παραμόρφωσης καθ' ύψος του πασσάλου. Στην ενότητα αυτή αναλύονται τα αποτελέσματα από την τρισδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία μέσω PLAXIS© για να εξαχθούν συμπεράσματα για την επιρροή της αλληλεπίδρασης στο κινηματικό φαινόμενο και τη σχέση της με τις παραμέτρους που μεταβάλλονται και αναφέρθηκαν παραπάνω.

5.4.1 Ομάδα πασσάλων 2x2

Για την ομάδα της συγκεκριμένης διάταξης τα αποτελέσματα δεν αποκλίνουν από την αναμενόμενη κατανομή. Συγκεκριμένα παρατηρείται μείωση της ανηγμένης παραμόρφωσης με την μείωση της απόστασης των πασσάλων από $5d$ σε $2d$. Στη συνέχεια αναλύονται λεπτομερέστερα οι παρατηρήσεις ανά περίπτωση.

Πρώτον, στην ακραία περίπτωση εδαφικού σχηματισμού με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2} = 1/10$, η απόσταση μεταξύ των πασσάλων φαίνεται να μην παίζει κανένα ρόλο πλέον για τις περιπτώσεις στρεπτής και άστρεπτης κεφαλής. Ωστόσο, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης διατηρείται και μάλιστα εμφανίζεται πιο έντονο, αφού η απόκριση εμφανίζει τη μεγαλύτερη μείωση σε σχέση με το μονό πάσσαλο από ότι για τις άλλες περιπτώσεις λόγων V_{s1}/V_{s2} (Εικόνες 5.11 α, β). Το ίδιο δεν ισχύει ωστόσο για την περίπτωση κεφαλόδεσμου, όπου η διαφορά των μέγιστων παραμορφώσεων στη διεπιφάνεια και την κεφαλή για αποστάσεις πασσάλων $2d$ και $5d$ είναι εμφανής (Εικόνα 5.11 γ).

Δεύτερον, στην περίπτωση εδαφικού σχηματισμού με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$, η αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων της ομάδας φαίνεται να έχει αναιρεθεί για αξονική απόσταση πασσάλων $5d$ με κεφαλόδεσμο (Εικόνα 5.10γ). Μάλιστα, η τιμή στην κεφαλή του πασσάλου ξεπερνά ελάχιστα αυτή της κεφαλής του μονού. Κατά τα άλλα παρατηρείται η αναμενόμενη συμπεριφορά, μεγαλύτερης παραμόρφωσης στις ομάδες απομακρυσμένης διάταξης $5d$, ενώ οι συνθήκες κεφαλόδεσμου δίνουν τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις σε σχέση με τις συνθήκες free και fixed head.

Γενικά στις δύο προηγούμενες κατηγορίες, η παραμόρφωση στην διεπιφάνεια αυξάνεται με την αύξηση της διαφοράς δυσμησίας των διαδοχικών στρωμάτων, δηλαδή όσο μικραίνει ο λόγος V_{s1}/V_{s2} . Το ίδιο δεν συμβαίνει στην κεφαλή του πασσάλου, αφού εμφανίζονται αντίστροφα αποτελέσματα στην επιφάνεια. Κάτι τέτοιο μπορεί να δικαιολογηθεί από την μεγαλύτερη (αρνητική) κινηματική ροπή της διεπιφάνειας για $V_{s1}/V_{s2} = 1/10$, η οποία ουσιαστικά φαίνεται να «ανακουφίζει» τις αντίθετου προσήμου ροπές των κεφαλών. (Εικόνα 5.12) Μεγαλύτερες τιμές στην κεφαλή εμφανίζονται για την μεγαλύτερη αξονική απόσταση, $5d$, αποτέλεσμα αναμενόμενο από τη θεωρία της αλληλεπίδρασης.

Ενδεικτικά στην περίπτωση, με κεφαλόδεσμο, όπως και στην περίπτωση μη στρεπτού πασσάλου, η μεγαλύτερη ανηγμένη παραμόρφωση στην κεφαλή παρατηρείται για λόγο $V_{s1}/V_{s2} = 1/2$ (Εικόνες 5.9 β,γ), κάτι που δεν φαίνεται παράδοξο σύμφωνα με την παραπάνω εξήγηση, αφού ταυτόχρονα παρατηρείται η μικρότερη παραμόρφωση στη διεπιφάνεια για την συγκεκριμένη περίπτωση. Επομένως το φαινόμενο της κινηματικής επιπόνησης λειτουργεί αντίστροφα στις κεφαλές των πασσάλων και στην περιοχή της διεπιφάνειας, καθώς αυξάνεται η

διαφορά των ταχυτήτων των δύο στρωμάτων, για τις τιμές υλικών και παραμέτρων του συγκεκριμένου προβλήματος.

Ακόμη, γίνεται εμφανές ότι όσο μικραίνει η διαφορά δυσμησίας των στρωμάτων, η τιμή της απόκρισης στην κεφαλή τείνει να ξεπεράσει την τιμή στη διεπιφάνεια τόσο για την περίπτωση άστρεπτης κεφαλής, όσο και για την περίπτωση κεφαλόδεσμου. Σαν οριακή τιμή μπορεί να οριστεί ο λόγος $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$ (Εικόνες 5.9- 5.11).

Τέλος, στην περίπτωση **ομοιογενούς εδάφους** (Εικόνες 5.8 α,β,γ), πέρα από τη γενικά αναμενόμενη συμπεριφορά, παρατηρείται ότι η σύνδεση των κεφαλών με πλάκα-κεφαλόδεσμο πλησιάζει τις συνθήκες ελεύθερης κεφαλής. Ακόμα στην περίπτωση άστρεπτης κεφαλής η αξονική απόσταση μεταξύ των πασσάλων πρακτικά δεν επηρεάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ τους, αφού πρακτικά φαίνεται να έχουν την ίδια τιμή παραμόρφωσης καθ' όλο το βάθος τους.

5.4.2 Ομάδα πασσάλων 3x3

Για την ομάδα αυτού του μεγέθους η αλληλεπίδραση των πασσάλων είναι εμφανής και όπως αναμένεται γίνεται εντονότερη όσο μικραίνουν οι αξονικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων και όσο πιο κεντρικά βρίσκεται ο εξεταζόμενος κάθε φορά πάσσαλος και . Τα σημεία που αξίζει να επισημανθούν είναι τα εξής:

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης δεν διαφέρει μεταξύ του κεντρικού (θέση 2.2) και εξωτερικού (θέση 1.2) πασσάλου (Εικόνες 5.17- 5.20). Η διαφορά εντοπίζεται για τον εξωτερικό γωνιακό (θέση 1.1) πάσσαλο. Μάλιστα στην περίπτωση του ομοιογενούς εδάφους οι πάσσαλοι και στις τρεις θέσεις με απόσταση μεταξύ τους $2d$ συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα (Εικόνες 5.13 α,β,γ). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αξονική απόσταση $2d$ αποτελεί οριακή περίπτωση πέρα από την οποία η πασσαλο-ομάδα μπορεί να μελετηθεί ως ενιαία πλάκα θεμελίωσης διαστάσεως ορθογωνίου περιγεγραμμένου των πασσάλων.

Για λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2} = 1/2$ (Εικόνες 5.14 α,β,γ) και για συνθήκη άστρεπτης κεφαλής παρατηρείται όπως και στην περίπτωση της μικρότερης ομάδας 2x2 ότι η απόκριση στην κεφαλή των πασσάλων ξεπερνάει την αντίστοιχη στη διεπιφάνεια ανεξάρτητα θέσης και αξονικής απόστασης πασσάλου και έτσι καθίσταται κρίσιμη για το σχεδιασμό η θέση αυτή. Επίσης αξίζει να τονισθεί ότι η απόκριση του εξωτερικού γωνιακού πασσάλου ταυτίζεται με εκείνη του μονού πασσάλου, επομένως η αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων πρακτικά δεν υφίσταται για τη θέση αυτή και τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του εδάφους.

Τέλος στην περίπτωση $V_{s1}/V_{s2} = 1/10$ (Εικόνες 5.16 α,β,γ), το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων οξύνεται και οι τιμές της ανηγμένης παραμόρφωσης εμφανίζουν μεγάλη μείωση σε σχέση με τον μονό πάσσαλο. Μάλιστα με την αύξηση του μεγέθους της ομάδας, από ομάδα 2x2 σε ομάδα 3x3 η

μείωση γίνεται εντονότερη και ενώ αναμένεται για εδαφικό σχηματισμό με τόσο μεγάλη διαφορά δυστημσίας των διαδοχικών του στρωμάτων η απόκριση στην διεπιφάνεια να είναι μεγαλύτερη από ότι για μικρότερες διαφορές, στην συγκεκριμένη περίπτωση το μέγεθος της παραμόρφωσης στη διεπιφάνεια είναι πολύ κοντά με εκείνο για λόγο $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$ (Εικόνες 5.16- 5.17 α,β,γ). Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης επομένως επιδρά καθοριστικά και τείνει να αναιρέσει μία χαρακτηριστική ιδιότητα του κινηματικού φαινομένου, για τη συγκεκριμένη περίπτωση.

5.4.3 Ομάδα πασσάλων 4x4

Στην περίπτωση του ακόμη πυκνότερου καννάβου, φαίνεται πως τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης γίνονται εντονότερα. Η αλληλεπίδραση ωστόσο, όπως θα δούμε, μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα τόσο ενίσχυσης, όσο και απομείωσης της αναμενόμενης απόκρισης. Πιο συγκεκριμένα για την ομάδα πασσάλων 4x4 με $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$ (Εικόνες 5.21 α,β,γ), παρατηρείται ενίσχυση της αναπτυσσόμενης κινηματικής ροπής, με τον ακριανό πάσσαλο της ομάδας να έχει πρακτικά ίδια ή μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης με εκείνη του μονού πασσάλου. Σε συνθήκες ελευθέρως στρεπτής κεφαλής, ακόμη και ο ακριανός πάσσαλος της διάταξης με αποστάσεις $2d$ μεταξύ των πασσάλων έχει αγγίξει την τιμή της παραμόρφωσης του μονού πασσάλου. Οι εσωτερικοί πάσσαλοι (θέση 2.2) παραμένουν σε όλες τις περιπτώσεις με μικρότερη παραμόρφωση από τον αντίστοιχο ακριανό, κάτι που είναι αναμενόμενο από τη θεωρία. Ακόμη ένα χαρακτηριστικό, το οποίο εμφανίζεται πιο οξυμένο σε σχέση με τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις ομάδων 2x2 και 3x3, είναι πως η παραμόρφωση της διεπιφάνειας είναι πλέον μικρότερη από εκείνη στην κεφαλή (εκτός από την περίπτωση free head), ενώ σε μικρότερες ομάδες η απόκριση στις δύο θέσεις ήταν σχεδόν ίση.

Στην περίπτωση $V_{s1}/V_{s2} = 1/10$ (Εικόνες 5.22 α,β,γ), δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο της αύξησης της παραμόρφωσης ώστε να γίνει μεγαλύτερη από εκείνη του μονού πασσάλου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Ακόμη, για όλες τις περιπτώσεις (fixed, free, pile cap), παρατηρήθηκε επιβεβαίωση της θεωρίας, αφού οι πάσσαλοι με αποστάσεις $5d$ μεταξύ τους ανέπτυξαν μεγαλύτερη παραμόρφωση από εκείνους με $2d$ αντίστοιχα. Ωστόσο φαίνεται να υπάρχουν κάποιες διαφορές σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση λόγω ταχυτήτων που εξετάστηκε. Πιο συγκεκριμένα, ενώ είναι εντονότερο το φαινόμενο ανάπτυξης της κινηματικής ροπής στη διεπιφάνεια, η παραμόρφωση φαίνεται να είναι μικρότερη ή ίση σε τιμή, από εκείνη που αναπτύχθηκε για $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$. Κάτι τέτοιο είδαμε ότι συμβαίνει και πάλι σε προηγούμενες διατάξεις, ωστόσο αξίζει να αναφερθεί και εδώ.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί η διαφορετική κατανομή της ανηγμένης παραμόρφωσης που εμφανίζουν οι εξωτερικοί με τους εσωτερικούς πασσάλους με την ύπαρξη κεφαλόδεσμου σε όλες τις περιπτώσεις αποστάσεων και λόγων ταχυτήτων.

Συγκεκριμένα στους εξωτερικούς πασσάλους παρουσιάζεται η εικόνα «λαιμού» με την τιμή της παραμόρφωσης να συνεχίζει να αυξάνεται με το βάθος και να εμφανίζει τοπικό μέγιστο σε βάθος 1-2 μέτρα από την επιφάνεια. Αυτό δεν συμβαίνει στους εσωτερικούς πασσάλους όπου εμφανίζουν μέγιστο ακριβώς στην επιφάνεια του εδάφους (Εικόνες 5.21 γ και 5.22 γ).

Στις Εικόνες 5.23-5.28 παρατίθενται οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις συναρτήσει του μήκους των πασσάλων για λόγους ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$ και $1/10$, αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων $2d$ και για θέση ακριανή (1.1) και εσωτερική (2.2). Τα αντίστοιχα διαγράμματα για απόσταση $5d$ ακολουθούν αντίστοιχη κατανομή και η αντίστοιχη πληροφορία για τις μέγιστες ανηγμένες ροπές μπορεί να αντληθεί συγκεντρωτικά στις Εικόνες 5.29- 5.31.

5.4.4 Επιταχυνσιογραφήματα

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις που σχετίζονται με τα επιταχυνσιογραφήματα, φαίνονται στις Εικόνες 5.35 και 5.36 για περίπτωση άστρεπτης κεφαλής των πασσάλων και εκείνη της προσθήκης κεφαλόδεσμου αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν καταγράφηκαν αναλυτικά στον Πίνακα 5.4. Σε γενικές γραμμές φαίνεται πως το έδαφος που μελετήθηκε δεν βρέθηκε σε συνθήκες συντονισμού με κάποιο από τα επιταχυνσιογραφήματα, για αυτό το λόγο και φαίνεται η μεγάλη διαφορά των παραμορφώσεων ανάμεσα στην απόκριση αρμονικής και πραγματικής διέγερσης (Εικόνα 5.37).

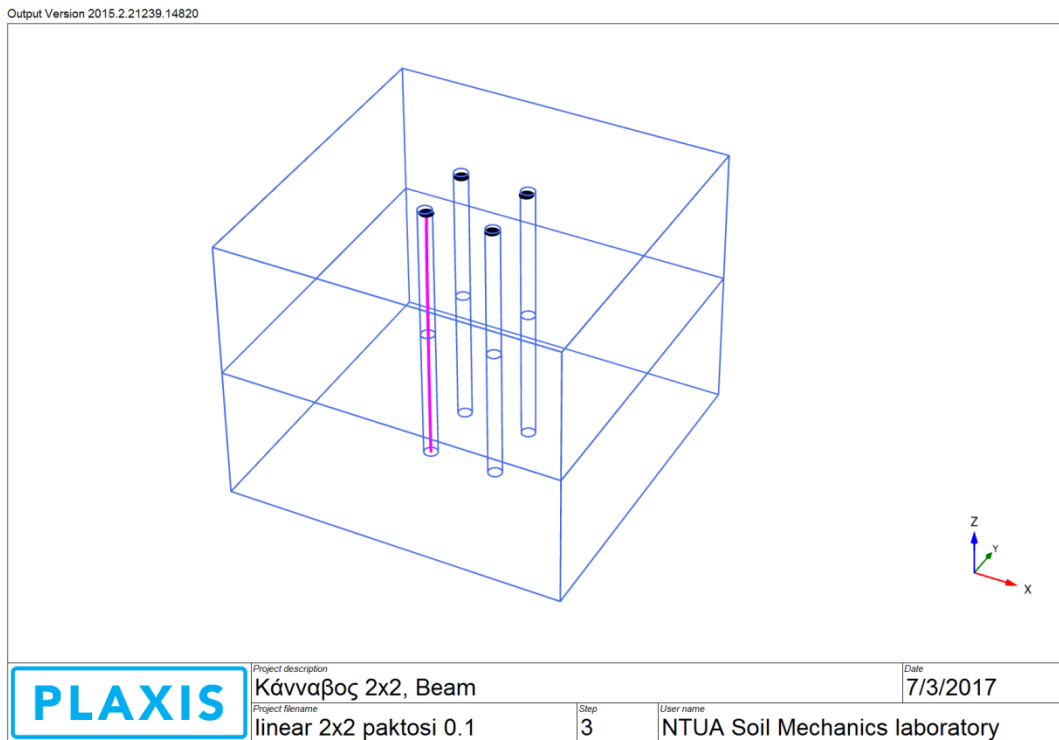
Για την πρώτη περίπτωση, όπου η κατακόρυφη μετακίνηση κάθε πασσάλου είναι δεσμευμένη (fixed head) εξετάζεται η ανηγμένη ροπή της ομάδας προς την ροπή του μονού πασσάλου, για τρεις διαφορετικές θέσεις του πασσάλου (1.1, 1.2, 2.2) σε διάταξη 3×3 , τόσο για την κεφαλή όσο και τη διεπιφάνεια. Διαπιστώνεται πως για την κεφαλή και τη διεπιφάνεια του πασσάλου η απόκριση είναι η αναμενόμενη για τον σεισμό της Λευκάδας (2003) (Εικόνα 5.7 και 5.35). Πράγματι ο ακριανός πάσσαλος της ομάδας πλησιάζει την απόκριση του μονού πασσάλου, ενώ προχωρώντας εσωτερικά η απόκριση μειώνεται. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει με την απόκριση στον σεισμό της Καλαμάτας (1986) (Εικόνα 5.6), αφού φαίνεται πως ο πάσσαλος της θέσης 1.2 (Εικόνα 5.35) έχει ξεπεράσει κατά το διπλάσιο την ροπή του μονού πασσάλου στην κεφαλή και τη διεπιφάνεια. Οι υπόλοιποι πάσσαλοι, ωστόσο (1.1, 2.2) έχουν την αναμενόμενη συμπεριφορά χωρίς να επηρεαστούν από τον πάσσαλο αυτό. Κάτι τέτοιο μπορεί να εξηγηθεί από το φαινόμενο της αλλαγής του προσήμου της ροπής, αφού ο πάσσαλος που παρουσίασε τη μεγαλύτερη απόκριση (θέση 1.2) παρατηρήθηκε πως είχε θετική ροπή στη διεπιφάνεια και αρνητική στην κορυφή, ενώ ο ακριανός πάσσαλος είχε θετική ροπή στην κορυφή και αρνητική στην διεπιφάνεια. Τέλος, ο εσωτερικός πάσσαλος (θέση 2.2) φαίνεται να είναι σε ένα «μεταβατικό» στάδιο θετικής ροπής στη διεπιφάνεια και αρνητικής στην κορυφή, αναπτύσσοντας μικρότερες ροπές. Αξίζει να αναφερθεί πως για κάθε

ξεχωριστή θέση του πασσάλου λαμβάνεται η μέγιστη τιμή της ροπής που παρουσίασε, χωρίς αυτό να σημαίνει πως όλες οι μέγιστες τιμές των πασσάλων συμβαίνουν ταυτόχρονα. Συνεπώς η παρουσίαση μεγάλων τιμών ροπών σπάνια συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλους τους πασσάλους της ομάδας, όπως είδαμε στην περίπτωση αυτή.

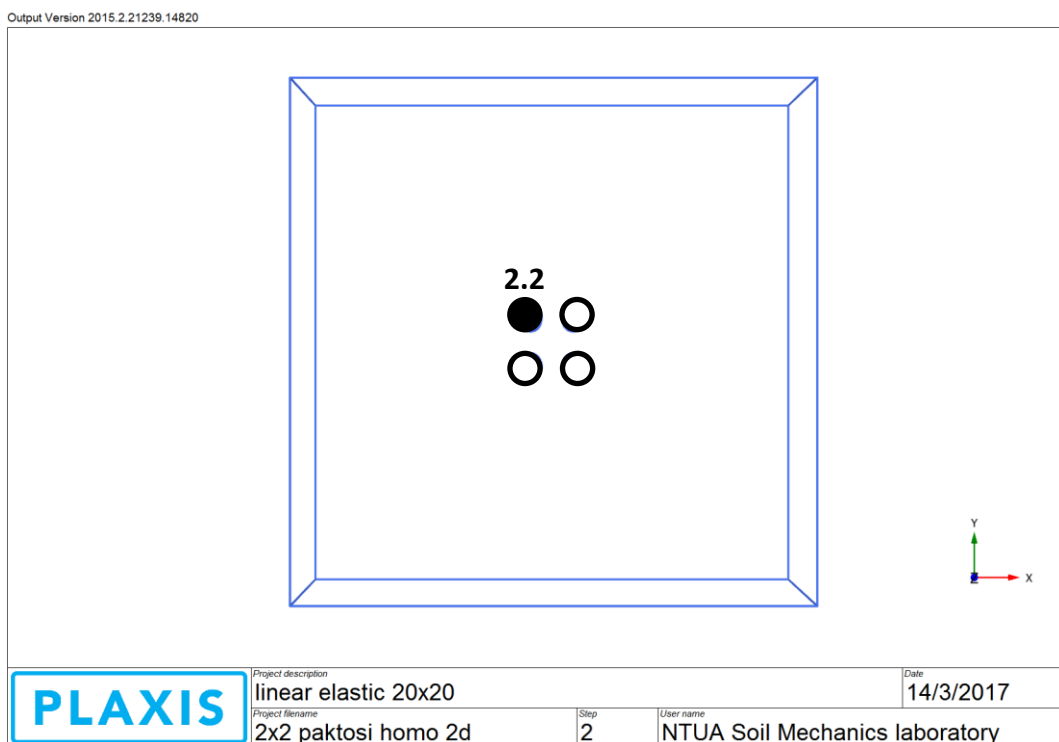
Για την περίπτωση της ίδιας ομάδας, αλλά με προσθήκη κεφαλόδεσμου, έχει αρκετό ενδιαφέρον η συμπεριφορά και στα δύο επιταχυνσιογραφήματα που μελετήθηκαν. Αρχικά βλέπουμε πως για το σεισμό της Καλαμάτας (1986), οι πάσσαλοι της ομάδας δεν παρουσίασαν κάποια ακραία συμπεριφορά όπως την προηγούμενη που περιγράφηκε. Ωστόσο παρατηρείται πως το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ροπής των ακριανών πασσάλων σε σημείο που ξεπερνά εκείνη που αναπτύχθηκε στον αντίστοιχο μονό, με αποτέλεσμα την «ανακούφιση» του εσωτερικού πασσάλου. Η συγκεκριμένη παρατήρηση αφορά την κεφαλή των πασσάλων, με το φαινόμενο να εντείνεται ακόμα περισσότερο στην περιοχή της διεπιφάνειας της άνω και κάτω εδαφικής στρώσης (Εικόνα 5.36). Ωστόσο για την περίπτωση του σεισμού της Λευκάδας (2003) για ομάδα με κεφαλόδεσμο παρουσιάστηκαν ακραίες συμπεριφορές για κάθε διαφορετική θέση των πασσάλων. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται εκτόξευση της ανηγμένης ροπής του ακριανού πασσάλου έως και σε λόγο 2,80, ενώ προχωρώντας προς τον εσωτερικό πάσσαλο ο λόγος αυτός φθάνει την τιμή 0,60 (Εικόνα 5.36), στην περιοχή της διεπιφάνειας.

Όπως ήταν αναμενόμενο, λοιπόν, η απόκριση αλλάζει ανάλογα με κάθε επιταχυνσιογράφημα, ενώ η συμπεριφορά των πασσάλων δεν παρουσιάζει πάντα την προβλεπόμενη απόκριση. Κάθε πάσσαλος αλληλεπιδρά τόσο με το περιβάλλον έδαφος, όσο και με καθέναν από τους υπόλοιπους πασσάλους της ομάδας, ενώ δεν αποκλείεται ο εγκλωβισμός στάσιμων κυμάτων (επιφανειακών ή μη) μεταξύ των πασσάλων. Ακόμη, φάνηκε πως δεν παρουσιάζονται οι μέγιστες ροπές σε όλους τους πασσάλους ταυτόχρονα, ούτε έχουν το ίδιο πρόσημο σε όλους τους πασσάλους, γεγονός που επιβεβαιώνει το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους.

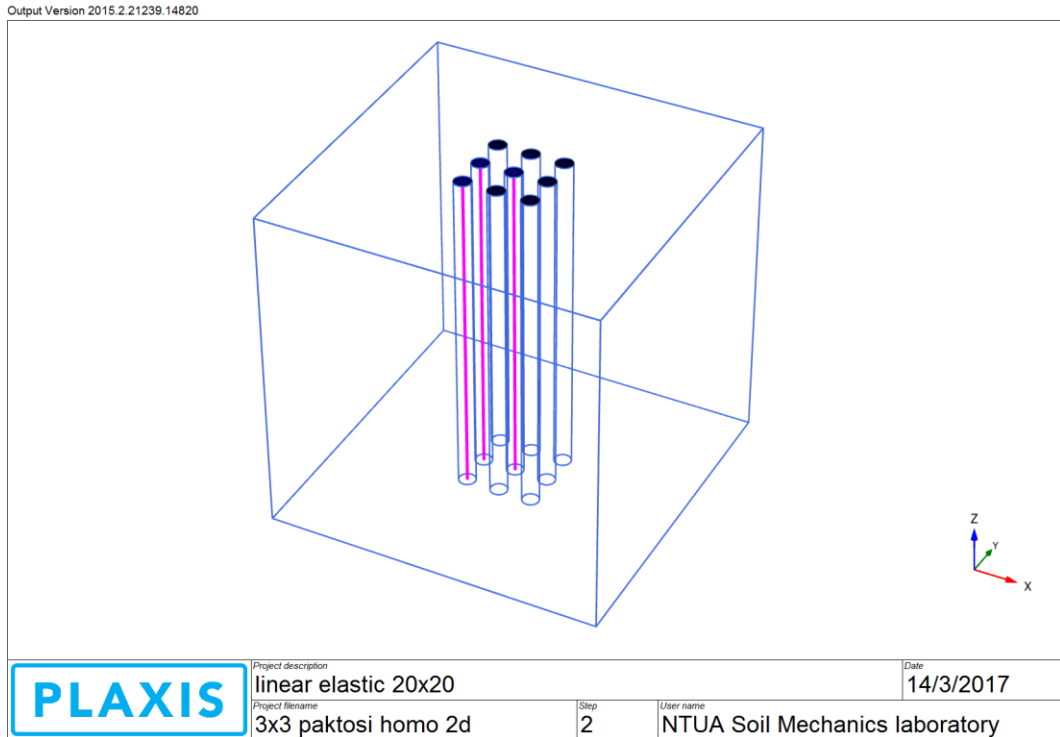
ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5



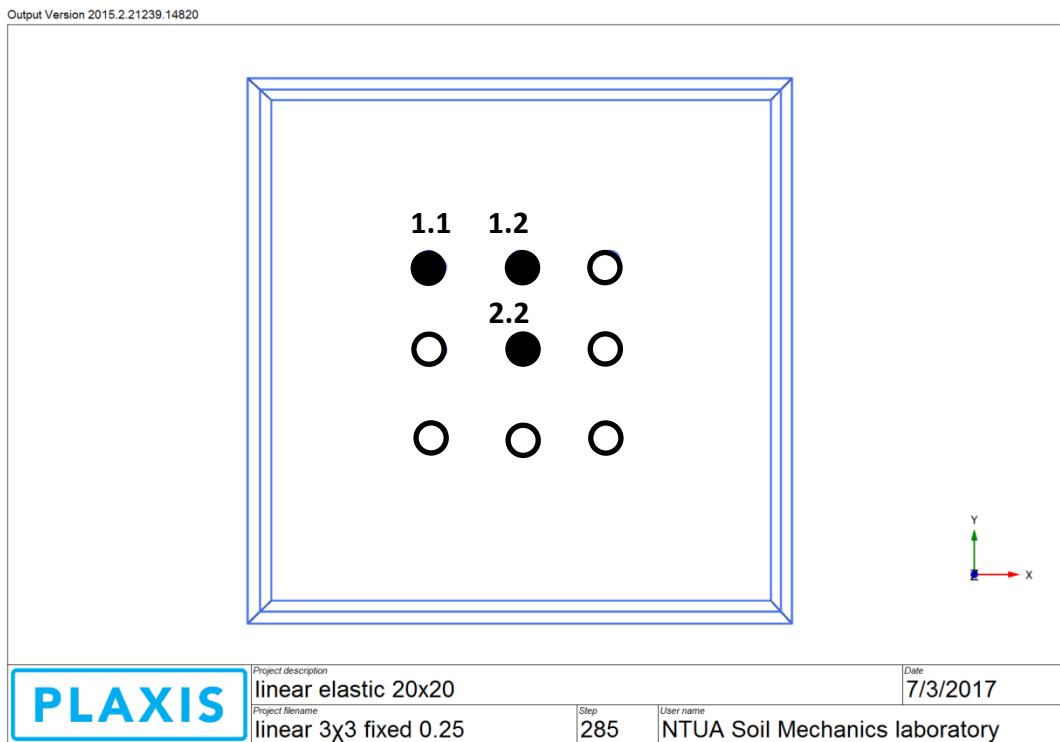
Εικόνα 5.1: Γεωμετρία του μοντέλου των τεσσάρων πασσάλων όπου φαίνεται ο πάσσαλος που επιλέχθηκε για την καταγραφή της κινηματικής ροπής, ενδεικτικά για την περίπτωση απόστασης 5d μεταξύ των πασσάλων



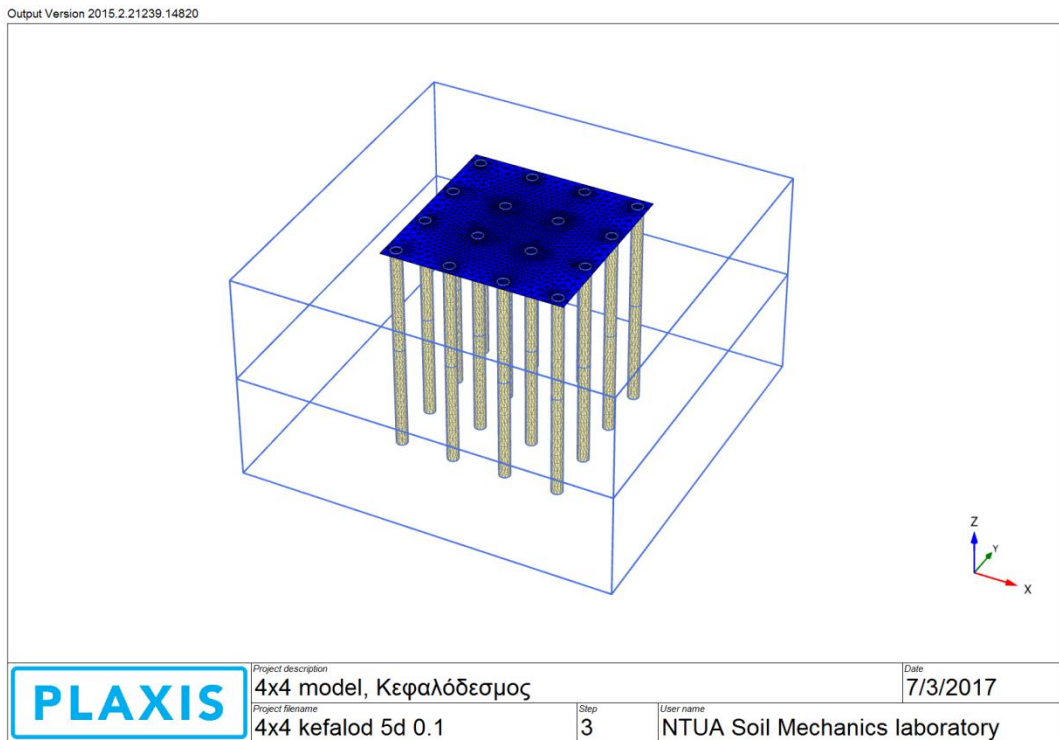
Εικόνα 5.2: Κάτοψη του μοντέλου των τεσσάρων πασσάλων με καταγραφή της κωδικής ονομασίας του κάθε πασσάλου, ενδεικτικά για απόσταση 2d μεταξύ τους



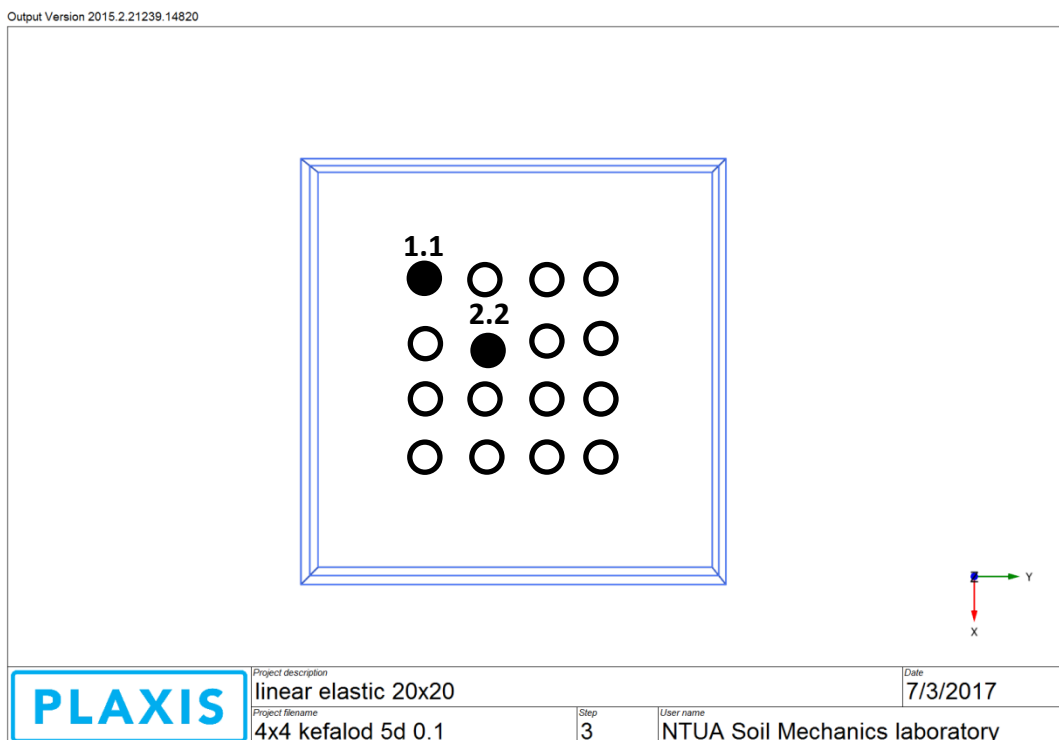
Εικόνα 5.3: Γεωμετρία του μοντέλου των εννέα πασσάλων όπου φαίνονται οι πάσσαλοι που επιλέχθηκαν για την καταγραφή της κινηματικής ροπής, ενδεικτικά για την περίπτωση απόστασης 2d μεταξύ των πασσάλων



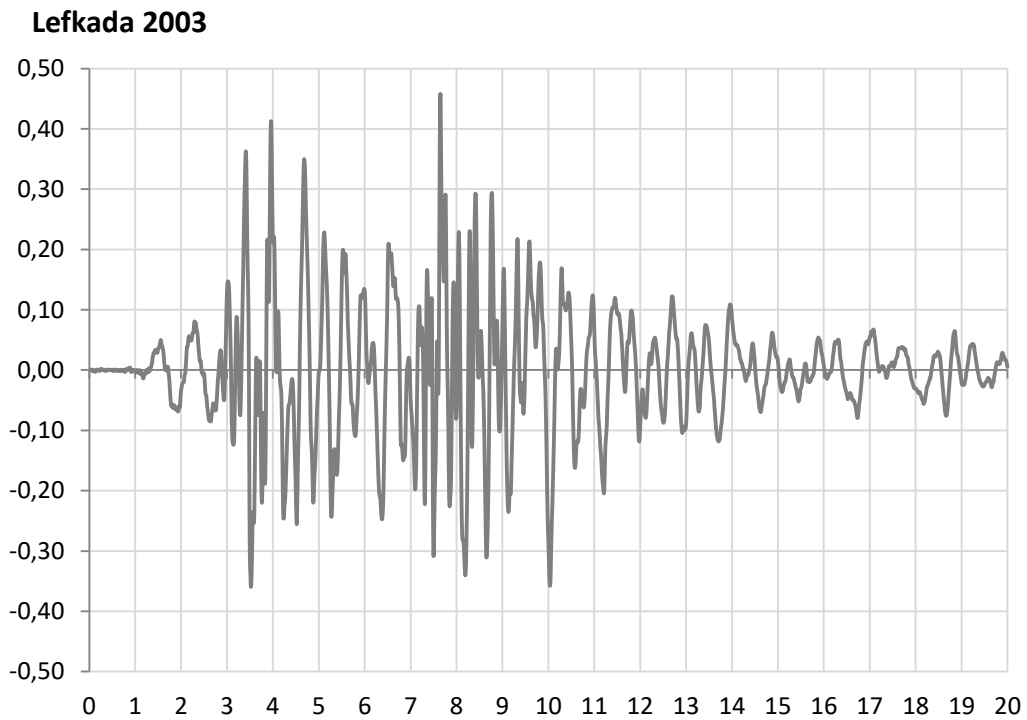
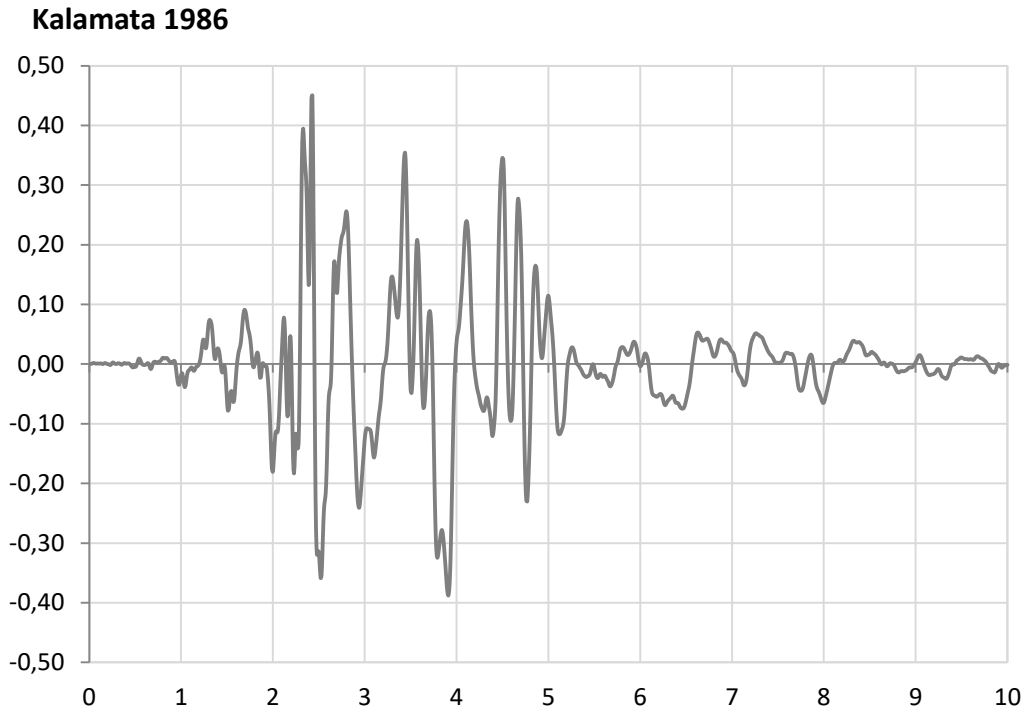
Εικόνα 5.4: Κάτοψη του μοντέλου των εννέα πασσάλων με καταγραφή της κωδικής ονομασίας του κάθε πασσάλου, ενδεικτικά για απόσταση 5d μεταξύ τους



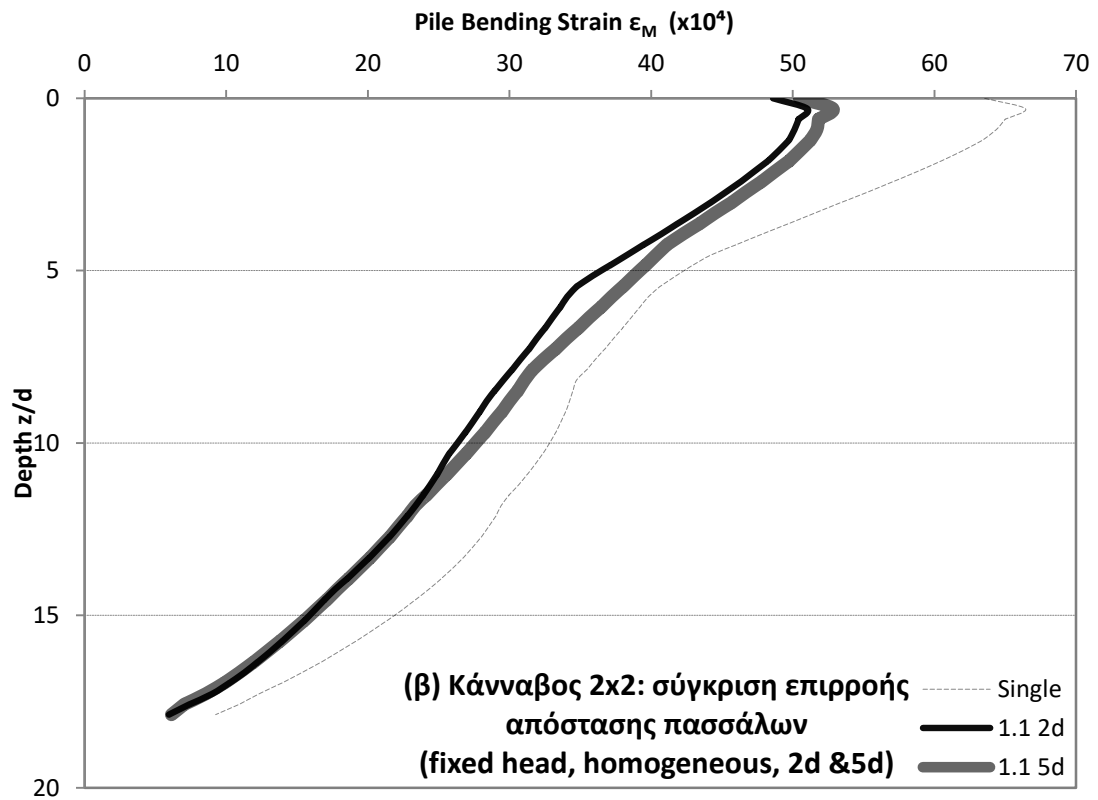
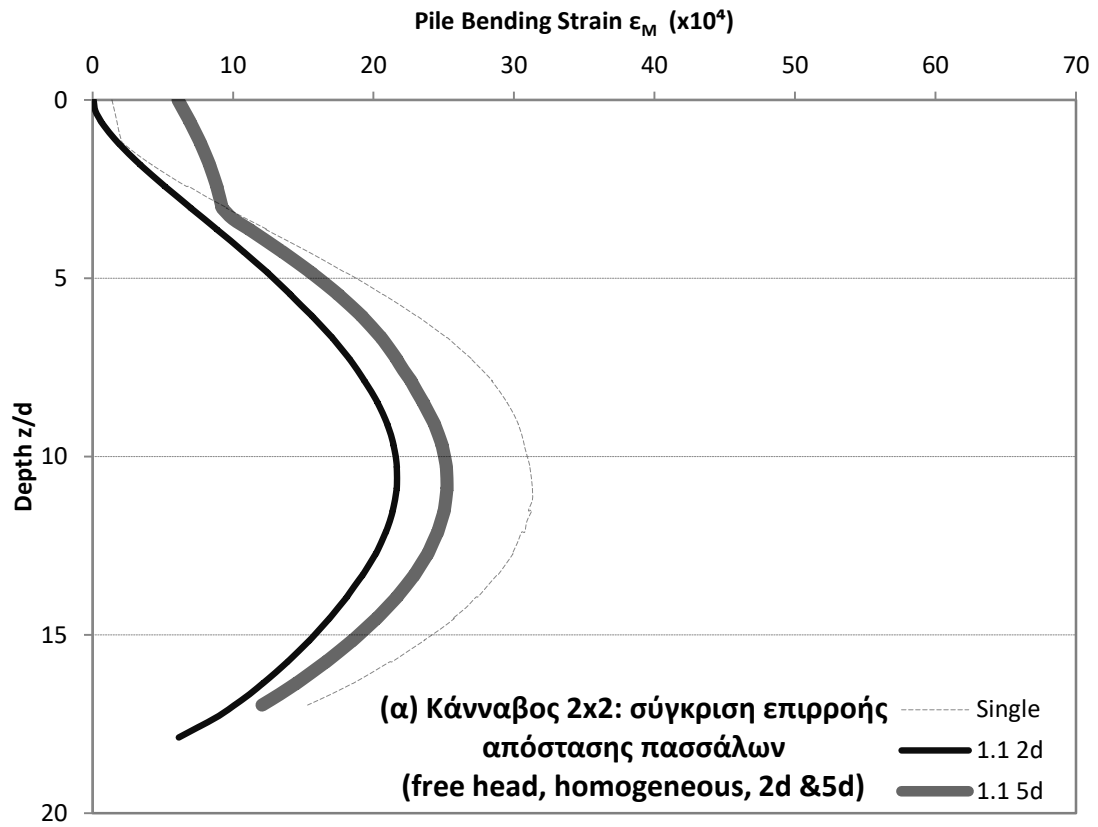
Εικόνα 5.5: Γεωμετρία του μοντέλου των δεκαέξι πασσάλων, ενδεικτικά για την περίπτωση απόστασης 5d μεταξύ τους και την προσθήκη κεφαλόδεσμου

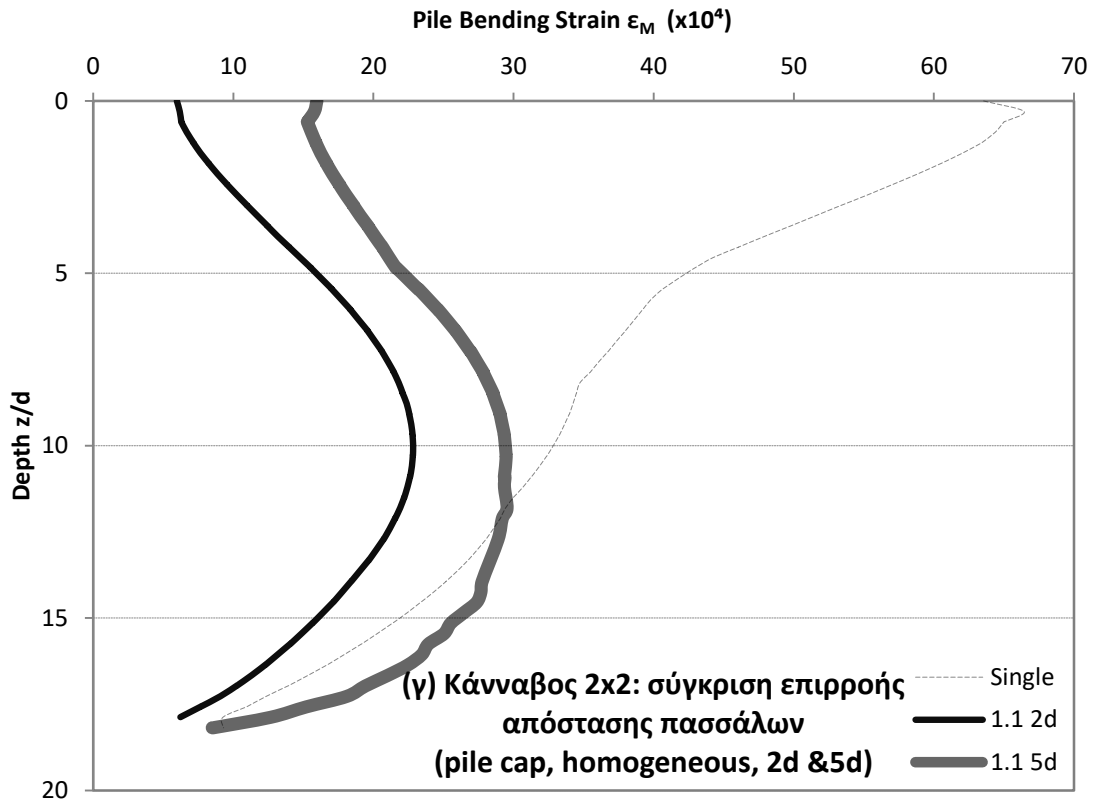


Εικόνα 5.6: Κάτοψη του μοντέλου των εννέα πασσάλων με καταγραφή της κωδικής ονομασίας του κάθε πασσάλου, ενδεικτικά για απόσταση 5d μεταξύ τους

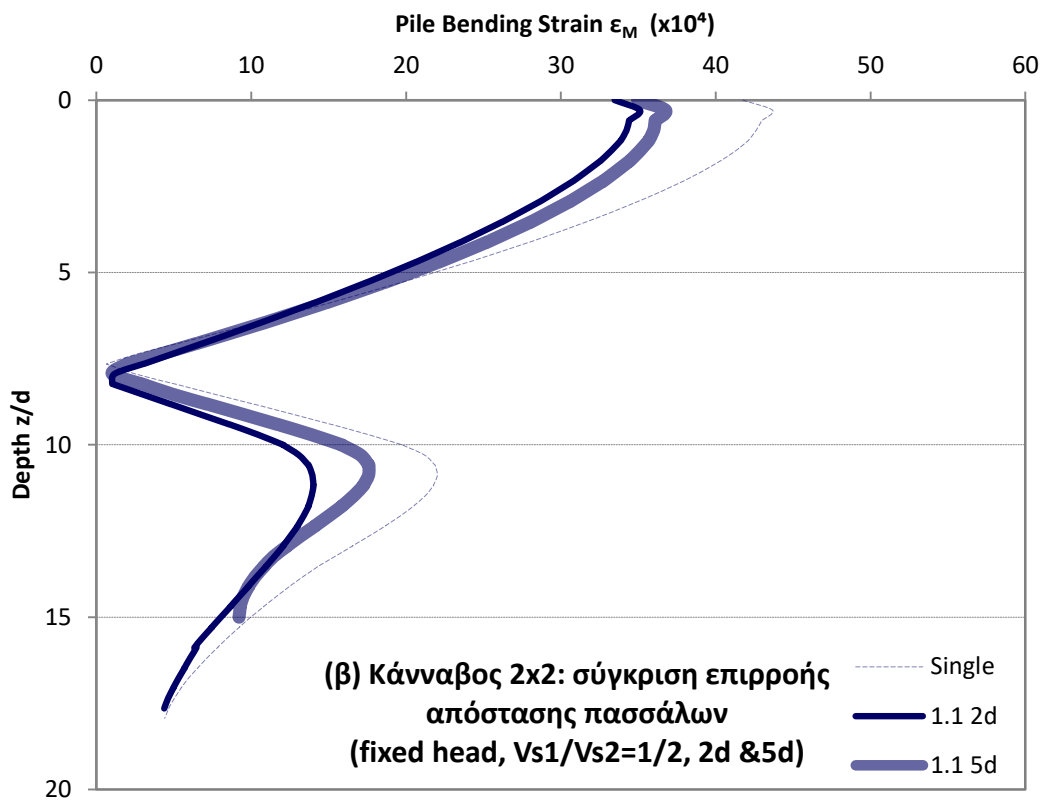
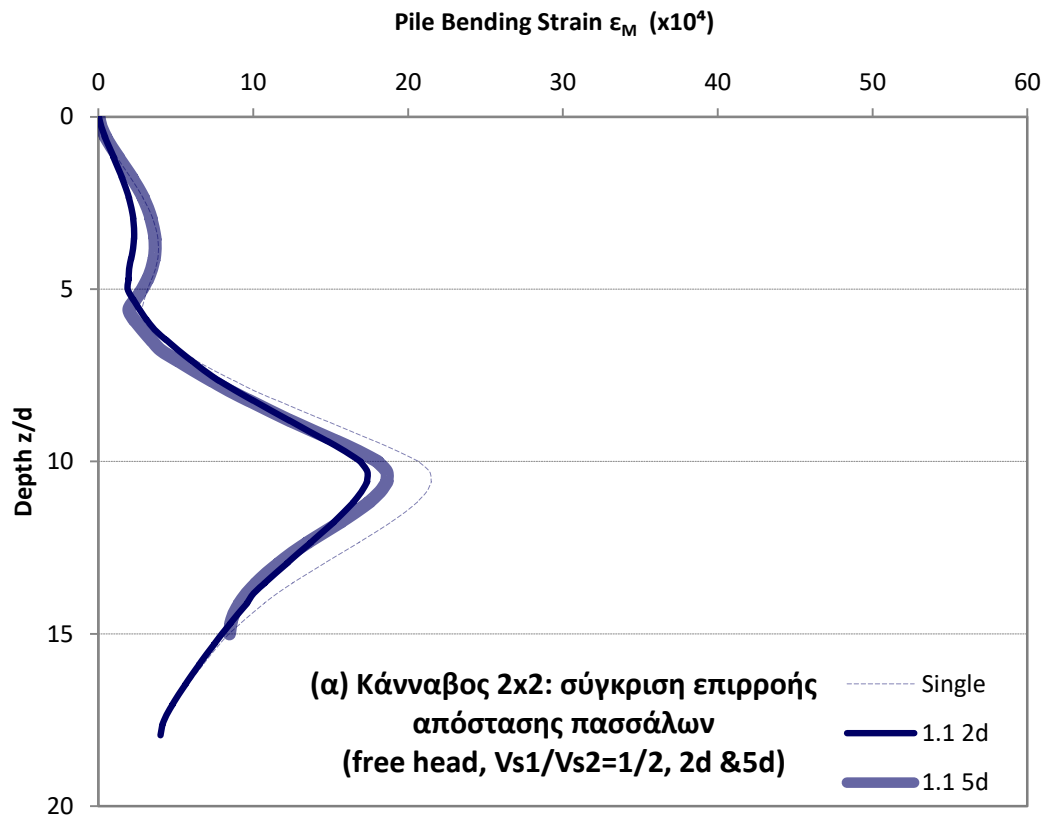


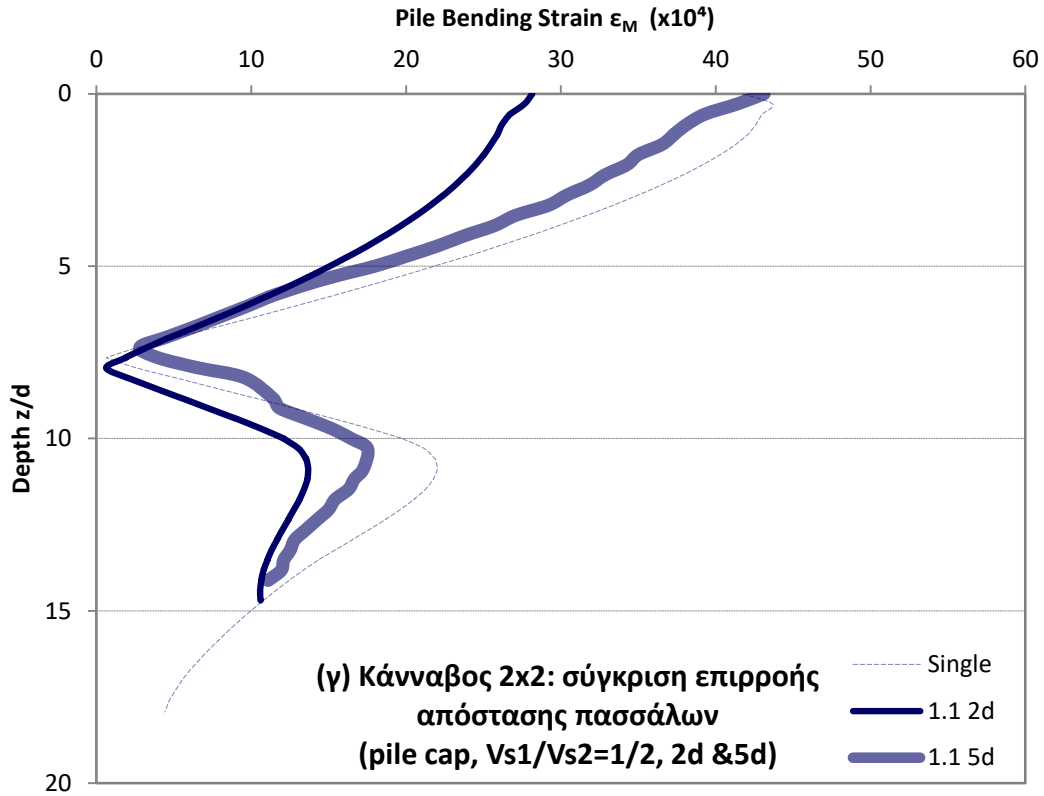
Εικόνα 5.7: Επιταχυνσιογραφήματα που εισήχθησαν στο τελευταίο στάδιο των αναλύσεων



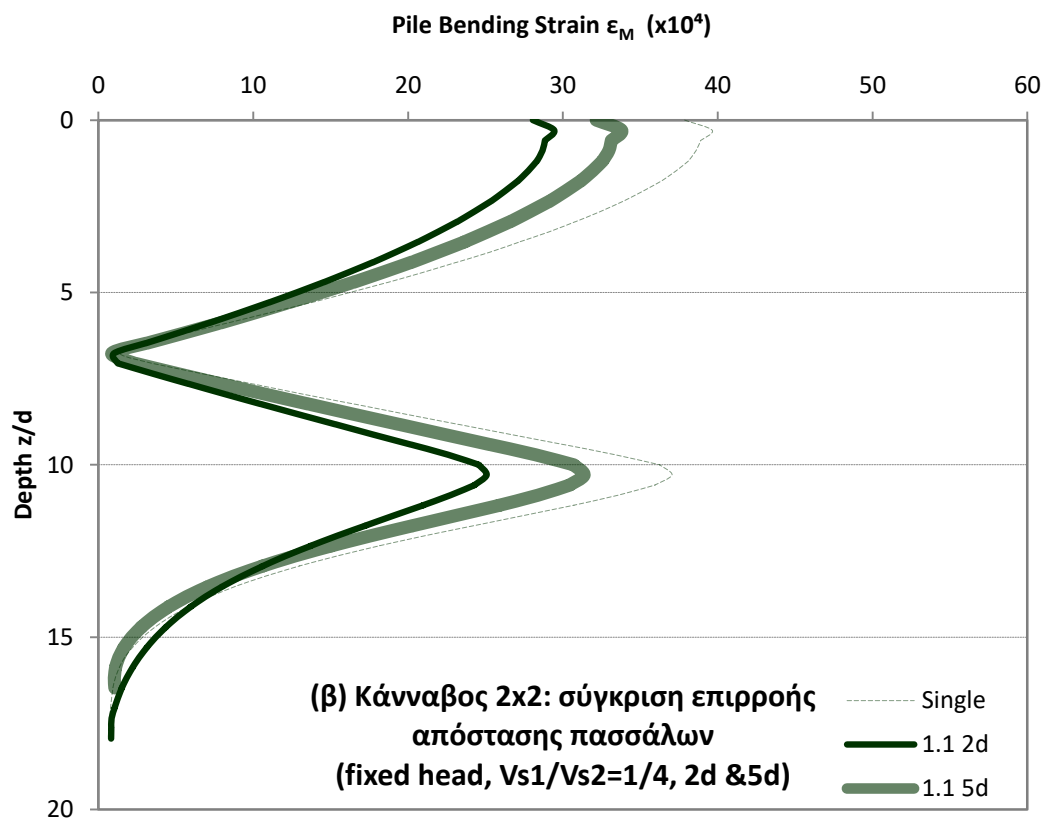
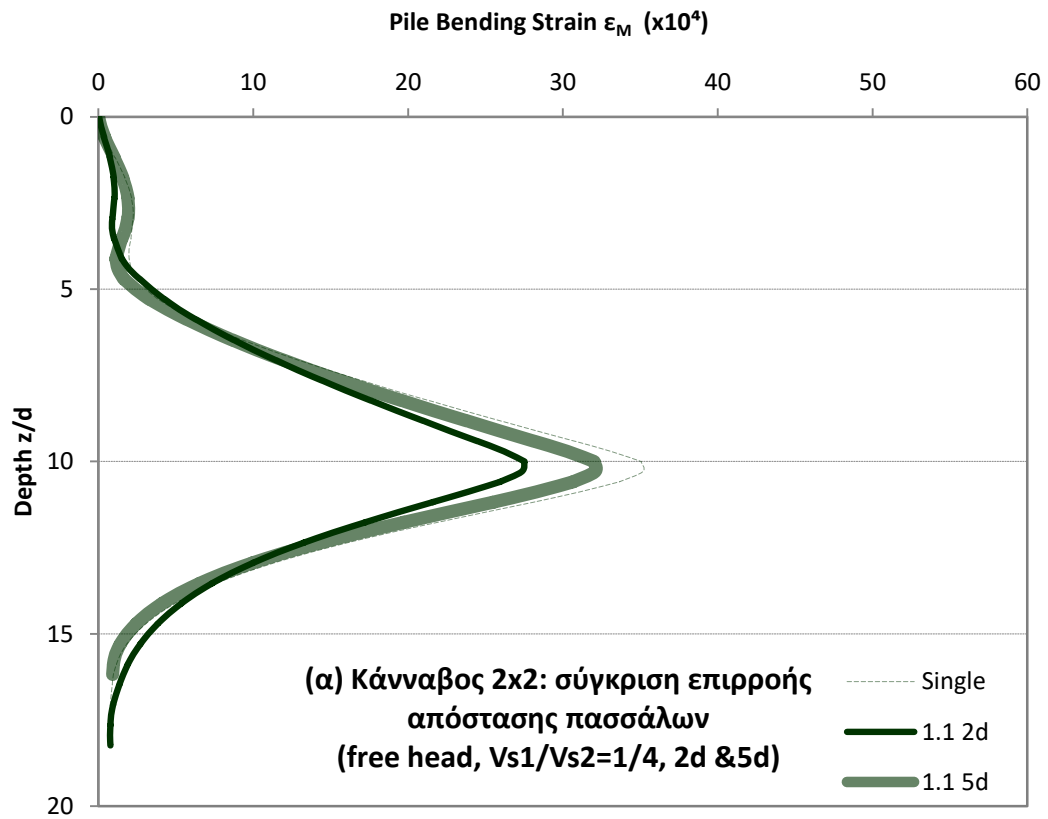


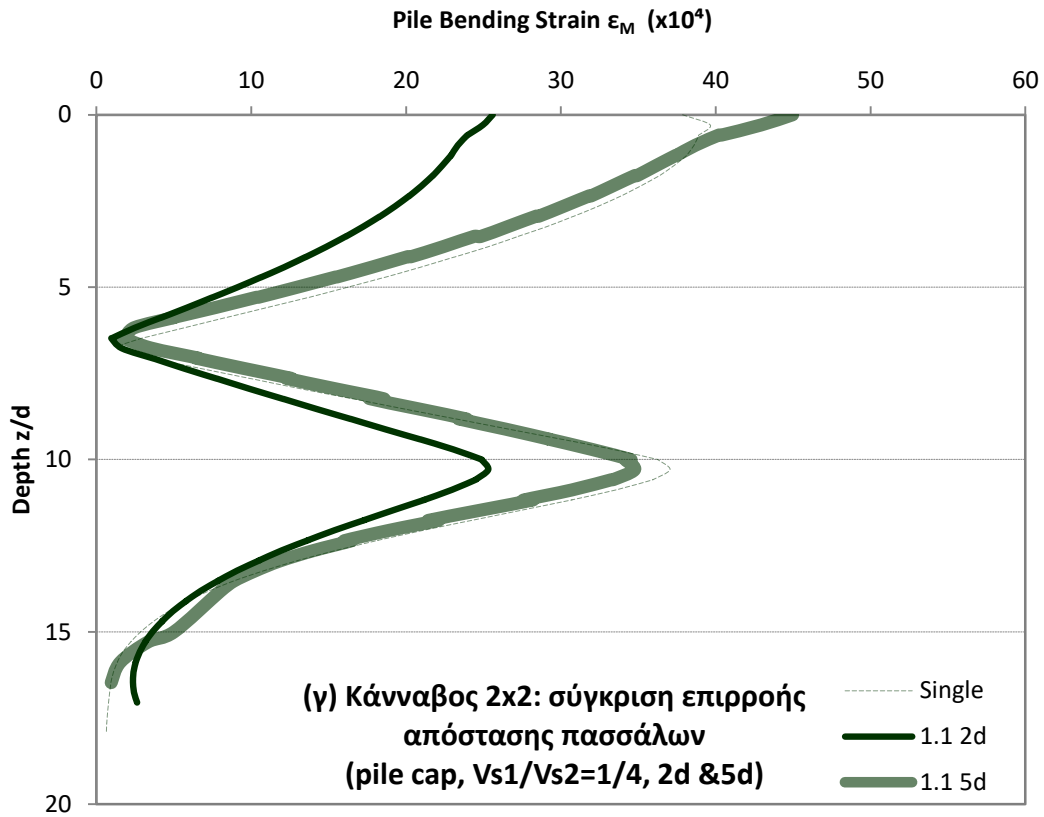
Εικόνες 5.8 (α,β,γ): Αποτελέσματα προσομοίωσης ομοιογενούς εδάφους για διάταξη ομάδας 2x2 για σύγκριση επιρροής της απόστασης των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για (α)ελευθέρως στρεπτή κεφαλή, (β) άστρεπτη κεφαλή και (γ) προσθήκη κεφαλόδεσμου



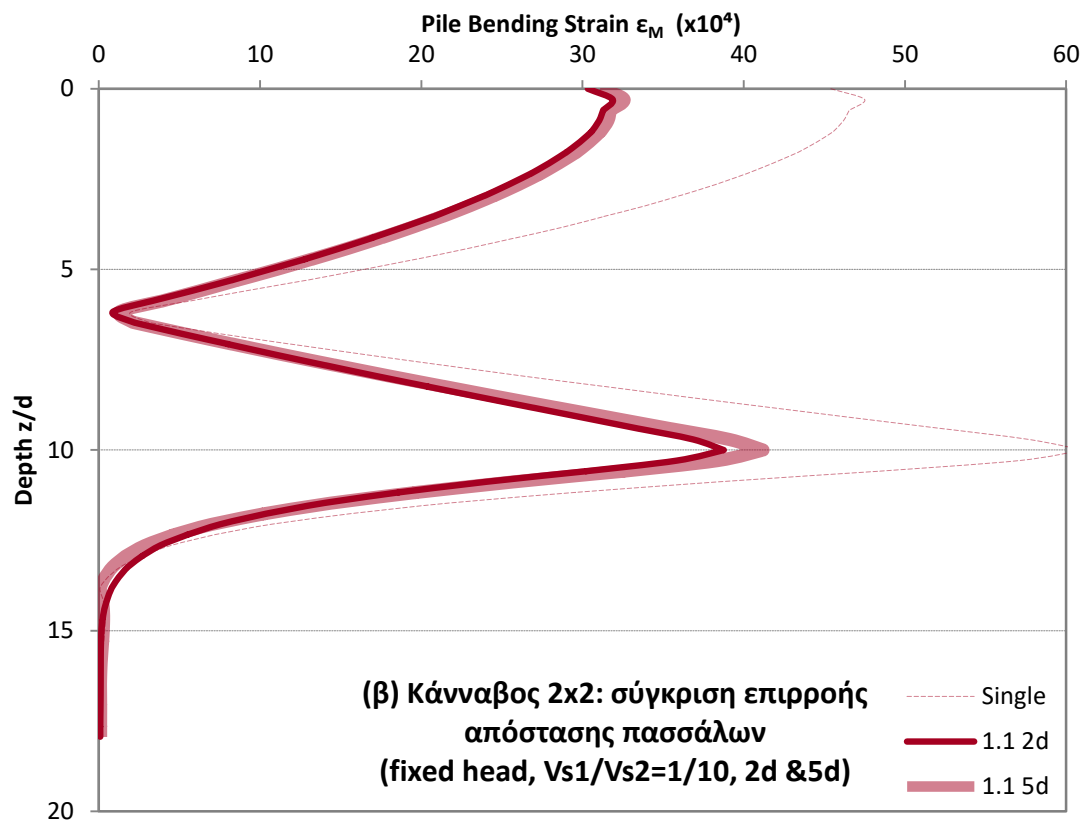
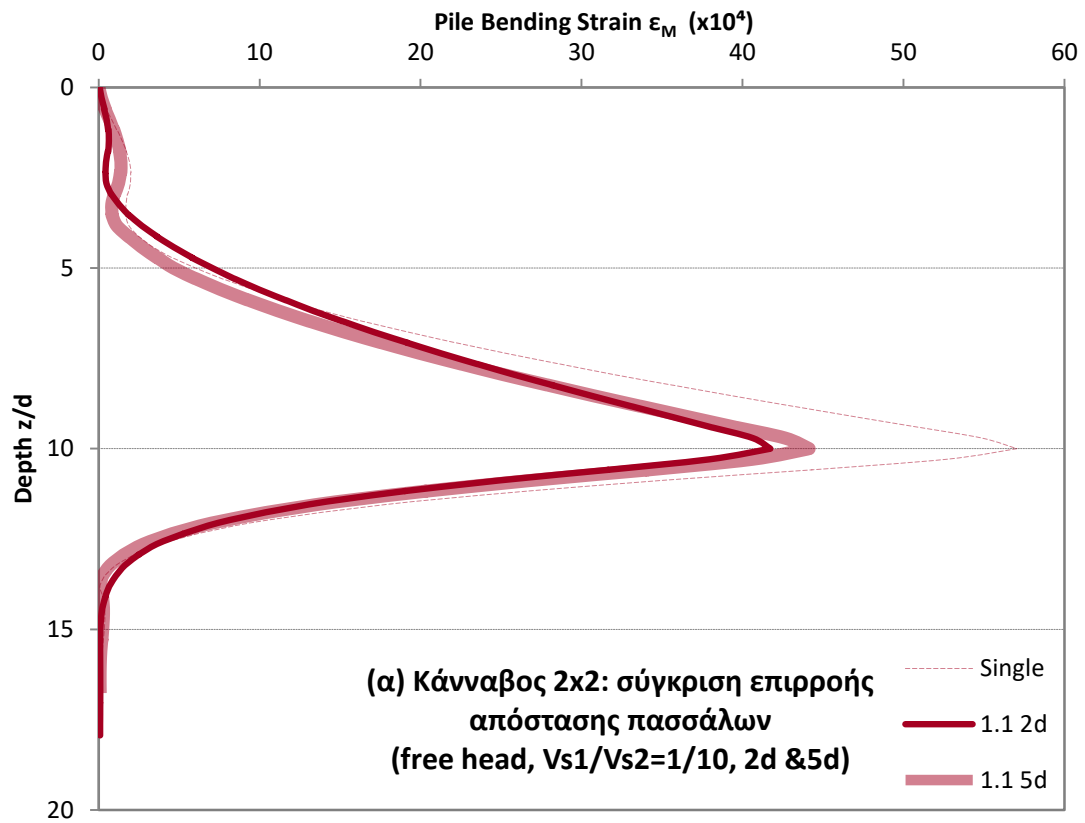


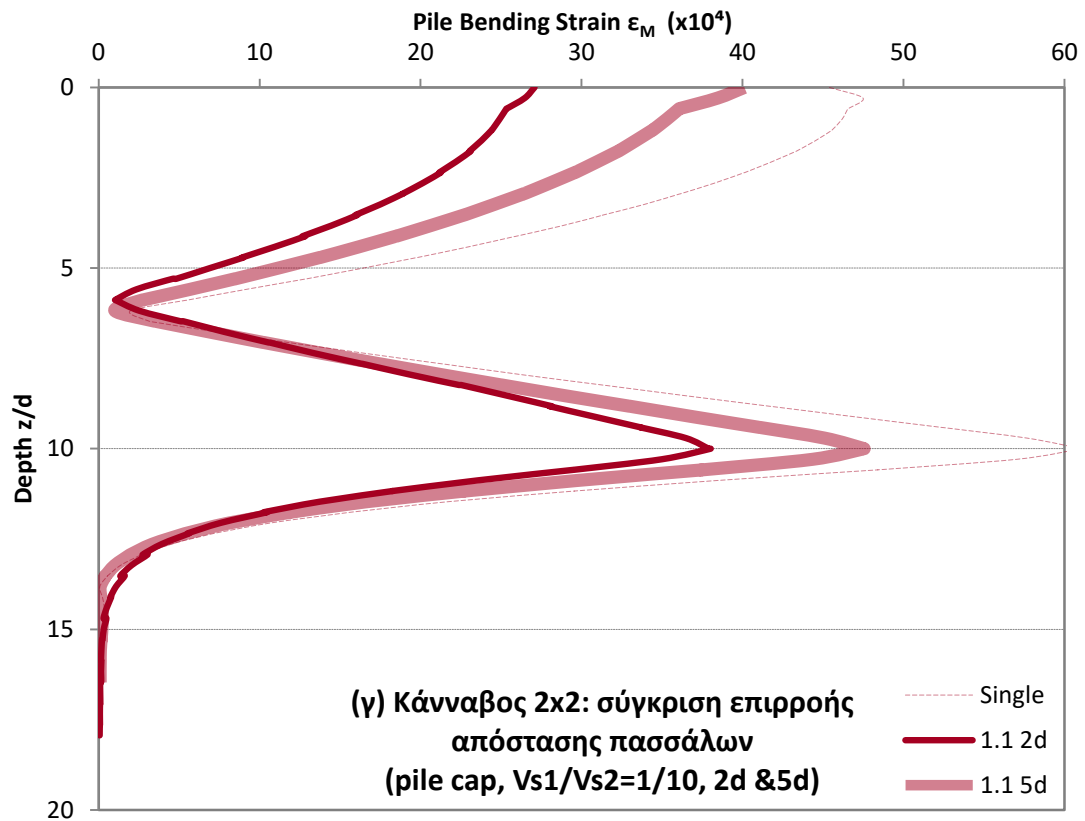
Εικόνες 5.9 (α,β,γ): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/2$ και διάταξη ομάδας 2x2 για σύγκριση επιρροής της απόστασης των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για (α)ελευθέως στρεπτή κεφαλή, (β) άστρεπτη κεφαλή και (γ) προσθήκη κεφαλόδεσμου



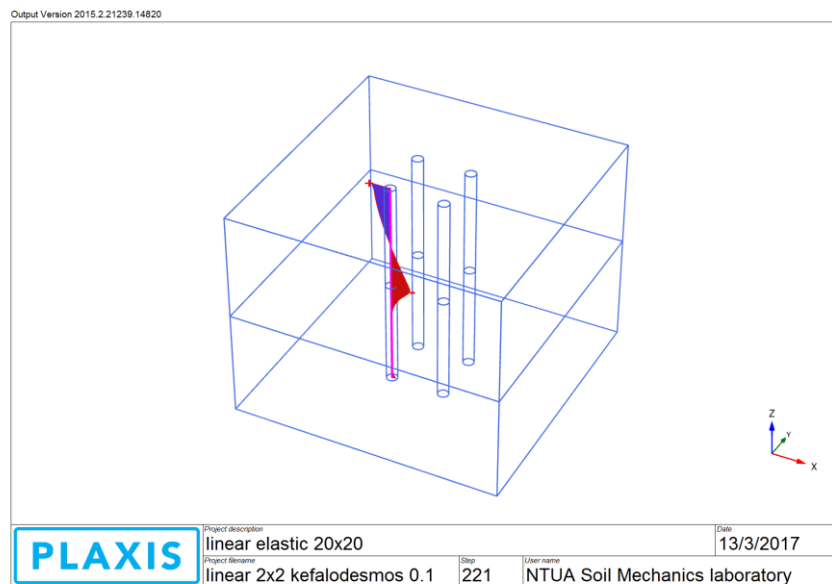


Εικόνες 5.10 (α,β,γ): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ και διάταξη ομάδας 2x2 για σύγκριση επιρροής της απόστασης των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για (α)ελευθέως στρεπτή κεφαλή, (β) άστρεπτη κεφαλή και (γ) προσθήκη κεφαλόδεσμου

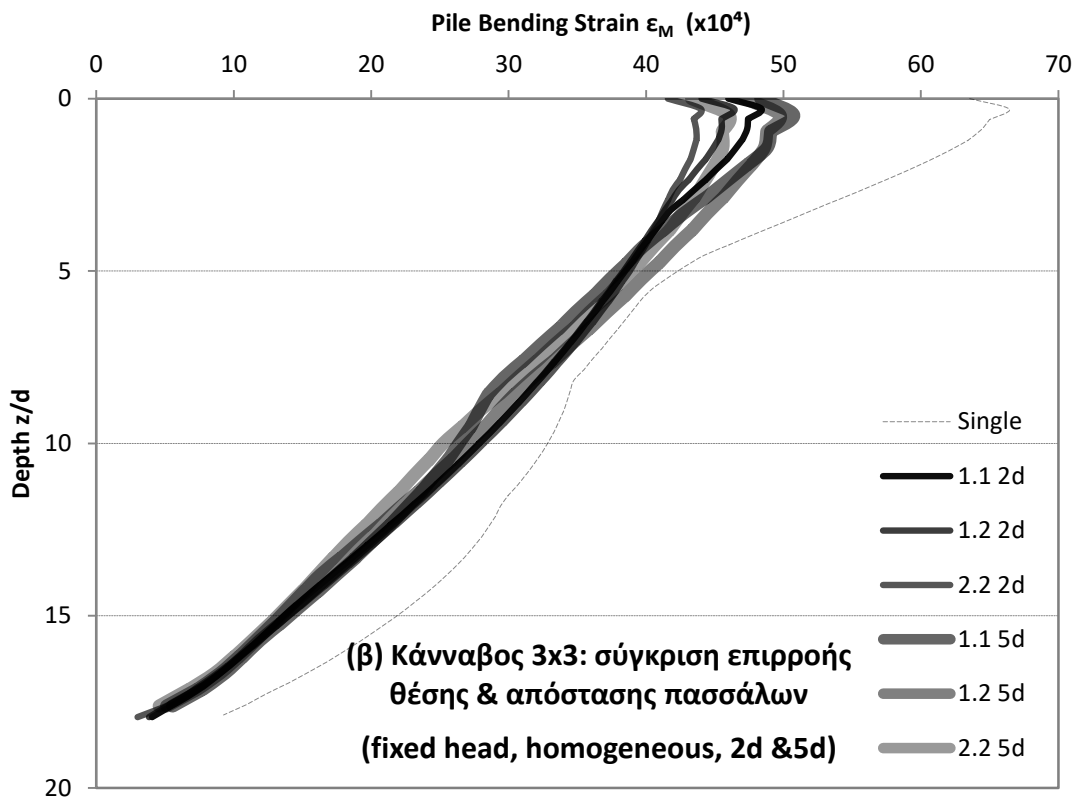
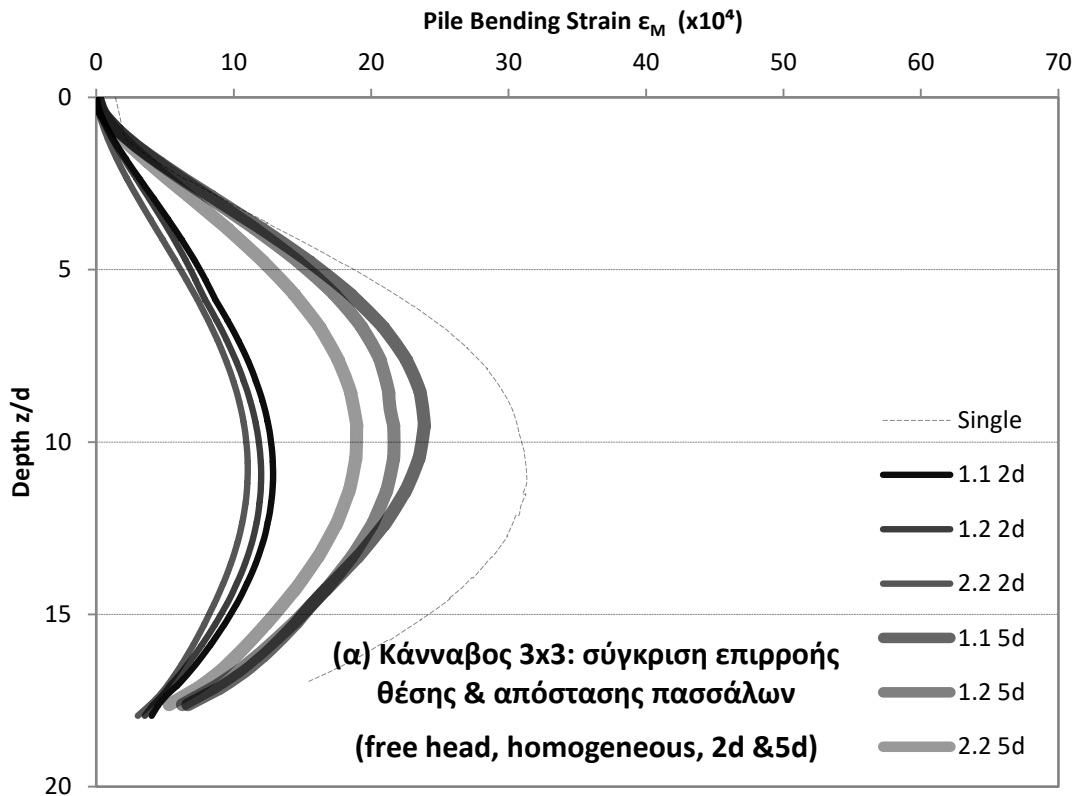


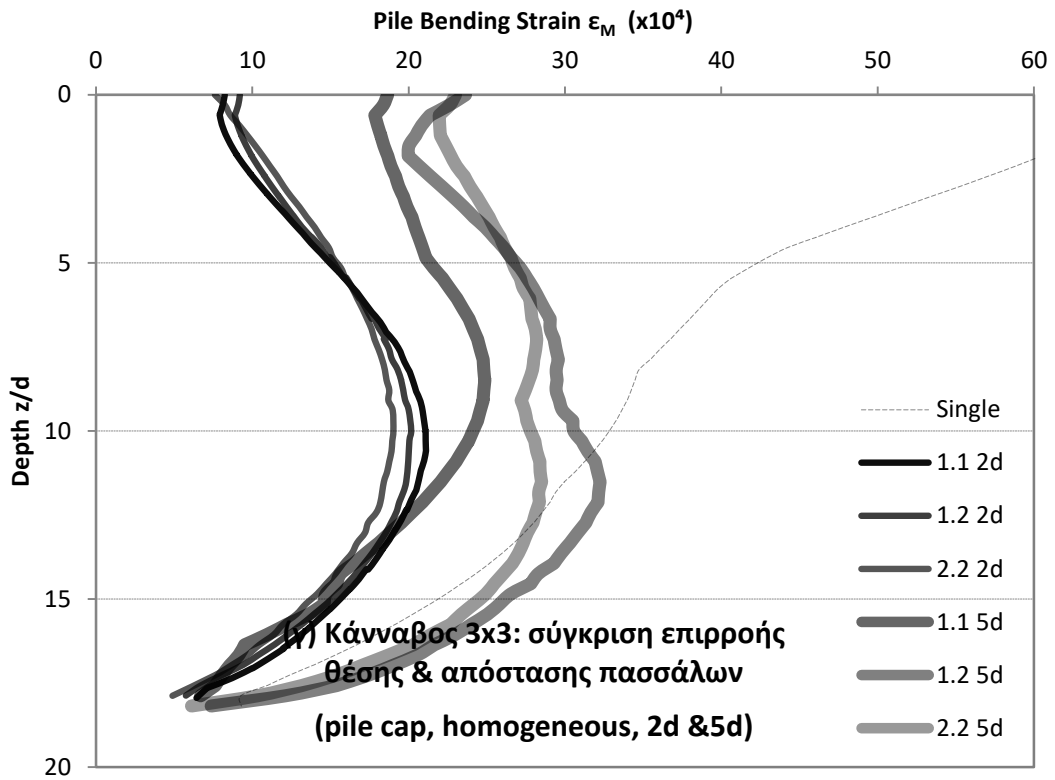


Εικόνες 5.11 (α,β,γ): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$ και διάταξη ομάδας 2x2 για σύγκριση επιρροής της απόστασης των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για (α)ελευθέως στρεπτή κεφαλή, (β) άστρεπτη κεφαλή και (γ) προσθήκη κεφαλόδεσμου

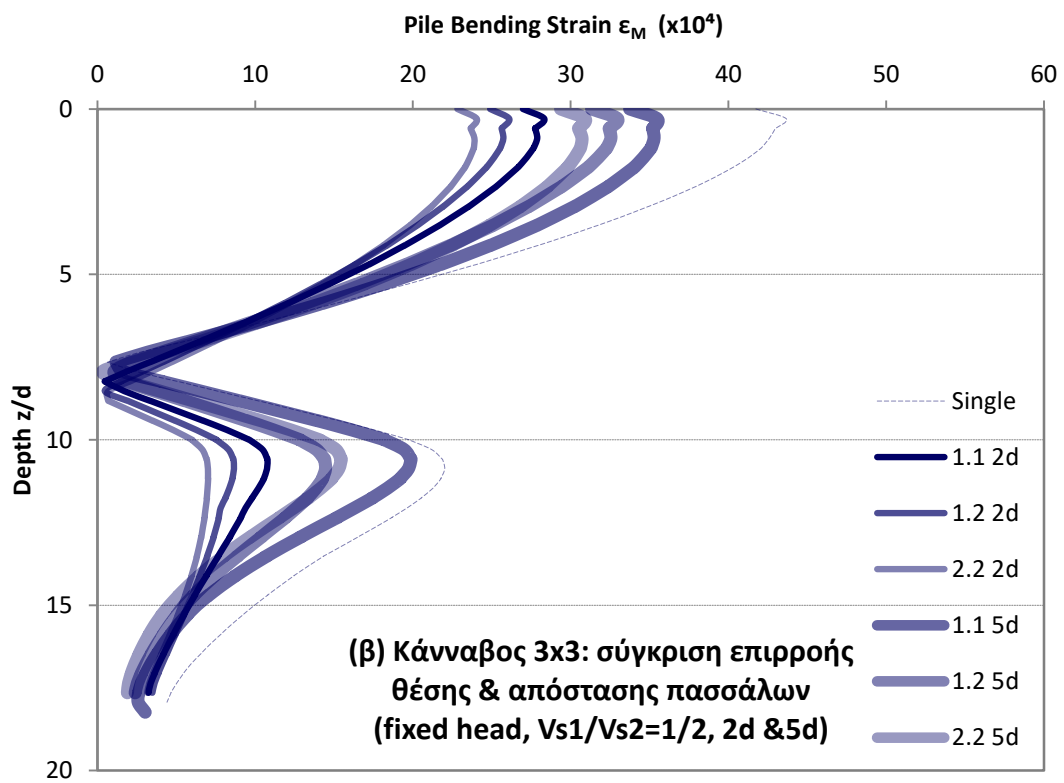
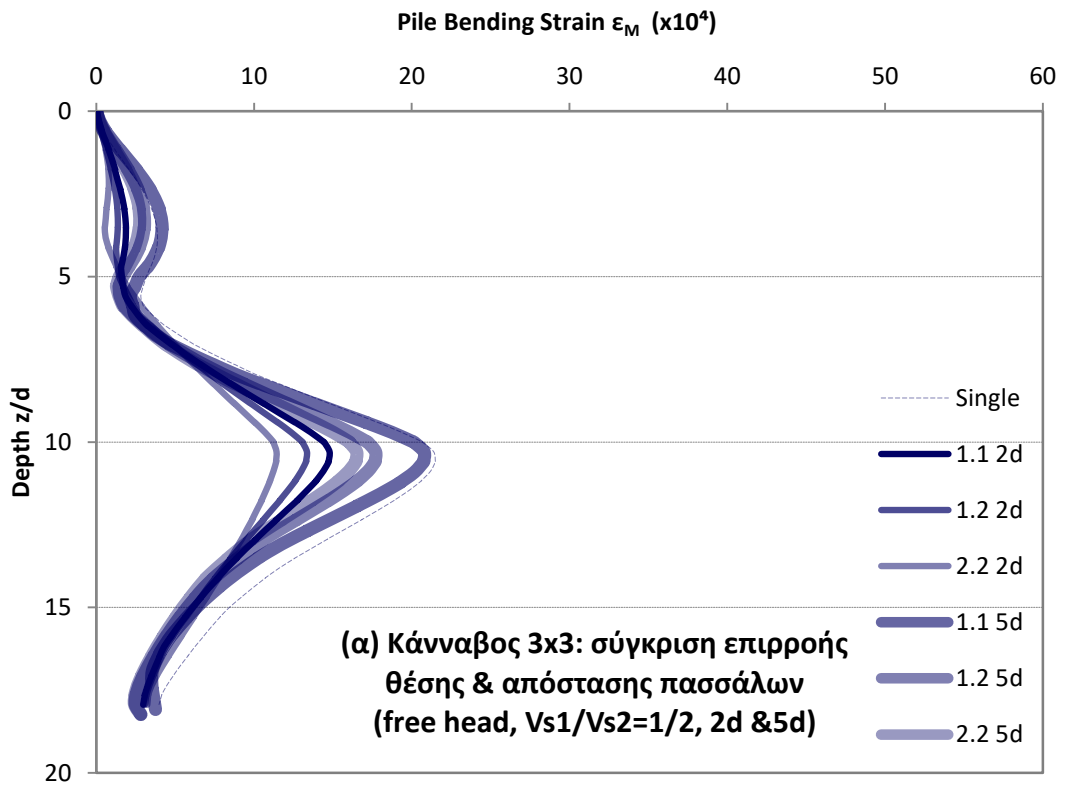


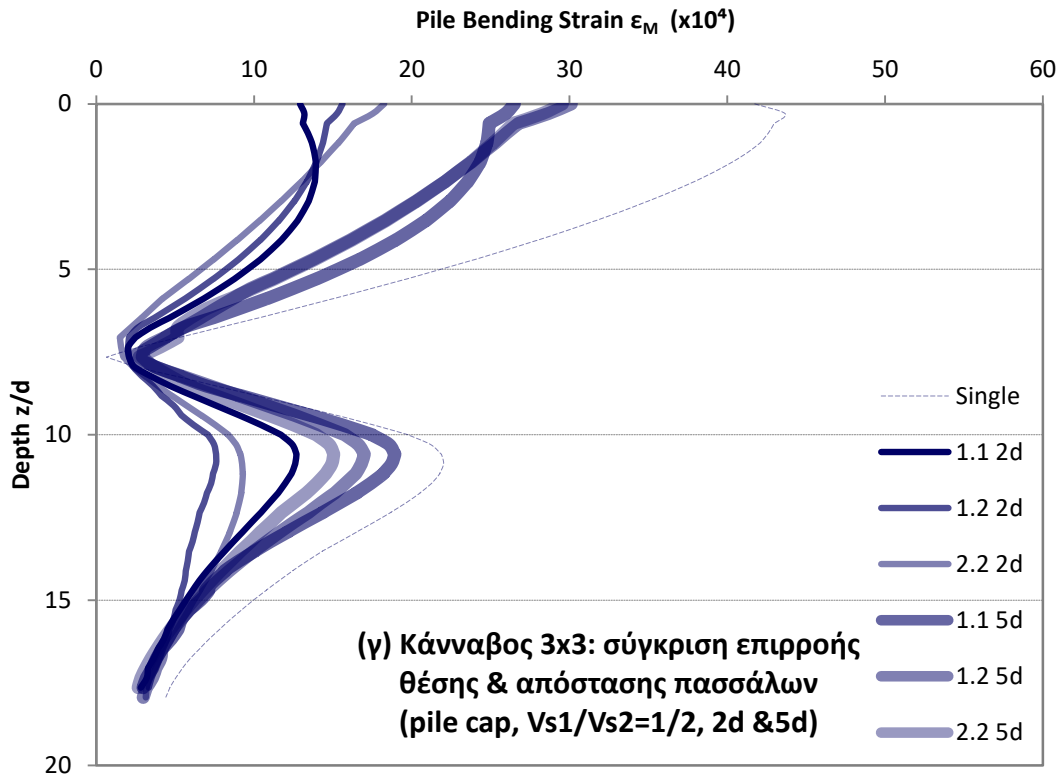
Εικόνα 5.12: Αναπτυσσόμενη ροπή στον πάσσαλο, για λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$



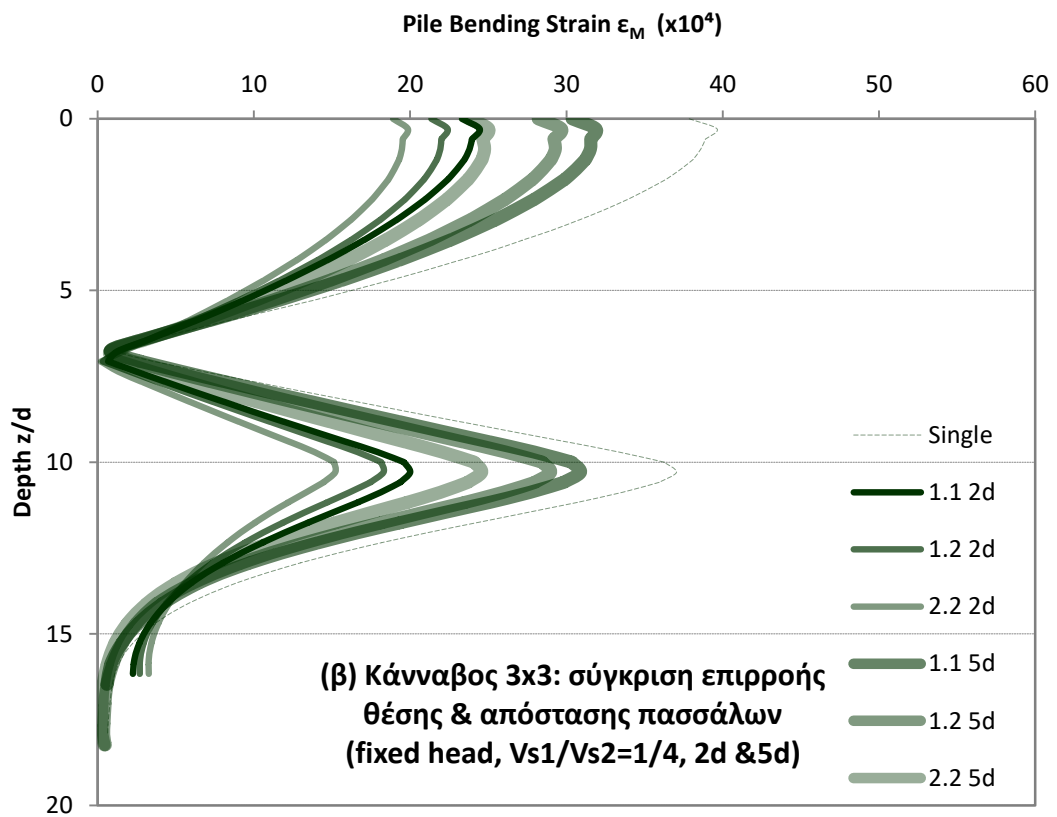
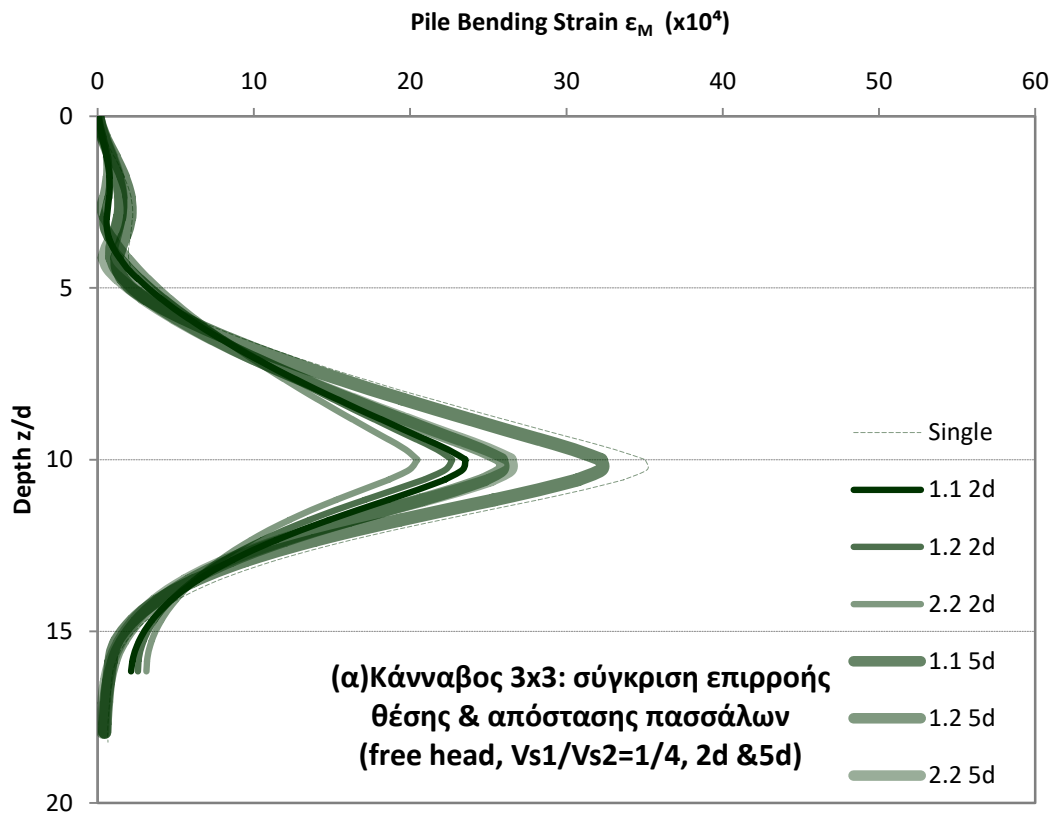


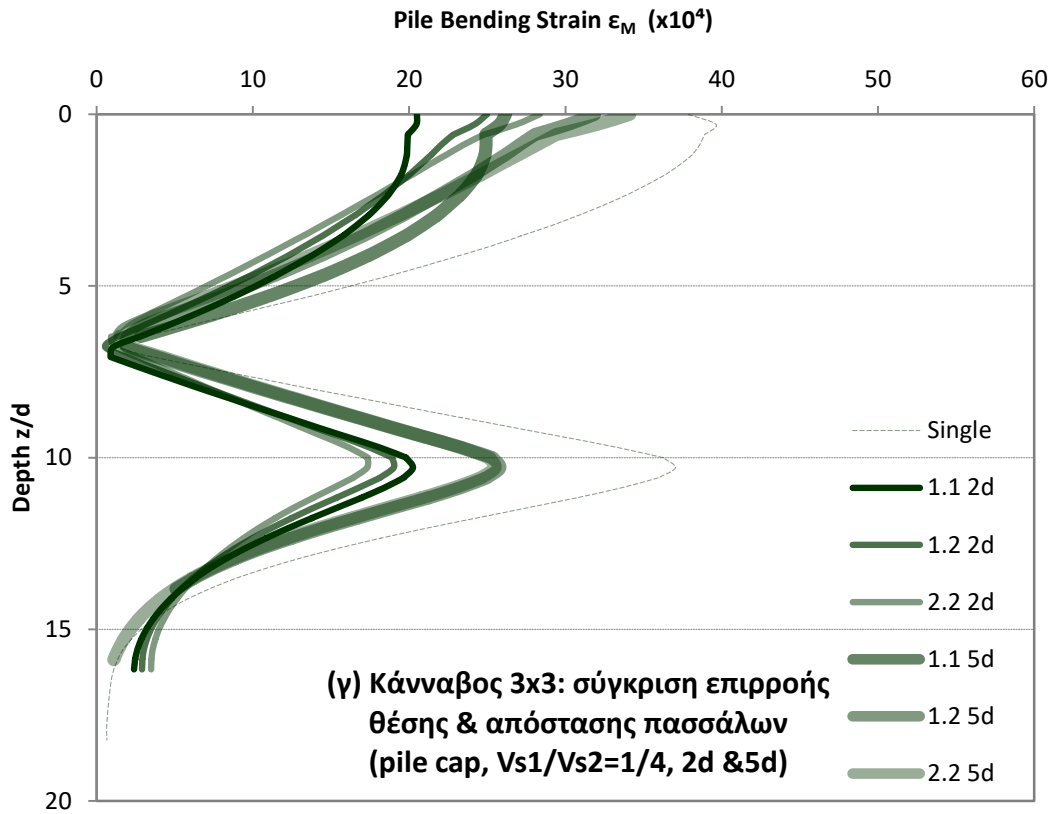
Εικόνες 5.13 (α,β,γ): Αποτελέσματα προσομοίωσης ομοιογενούς εδάφους και διάταξη ομάδας 3x3 για σύγκριση επιρροής της απόστασης των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για (α)ελευθέως στρεπτή κεφαλή, (β) άστρεπτη κεφαλή και (γ) προσθήκη κεφαλόδεσμου



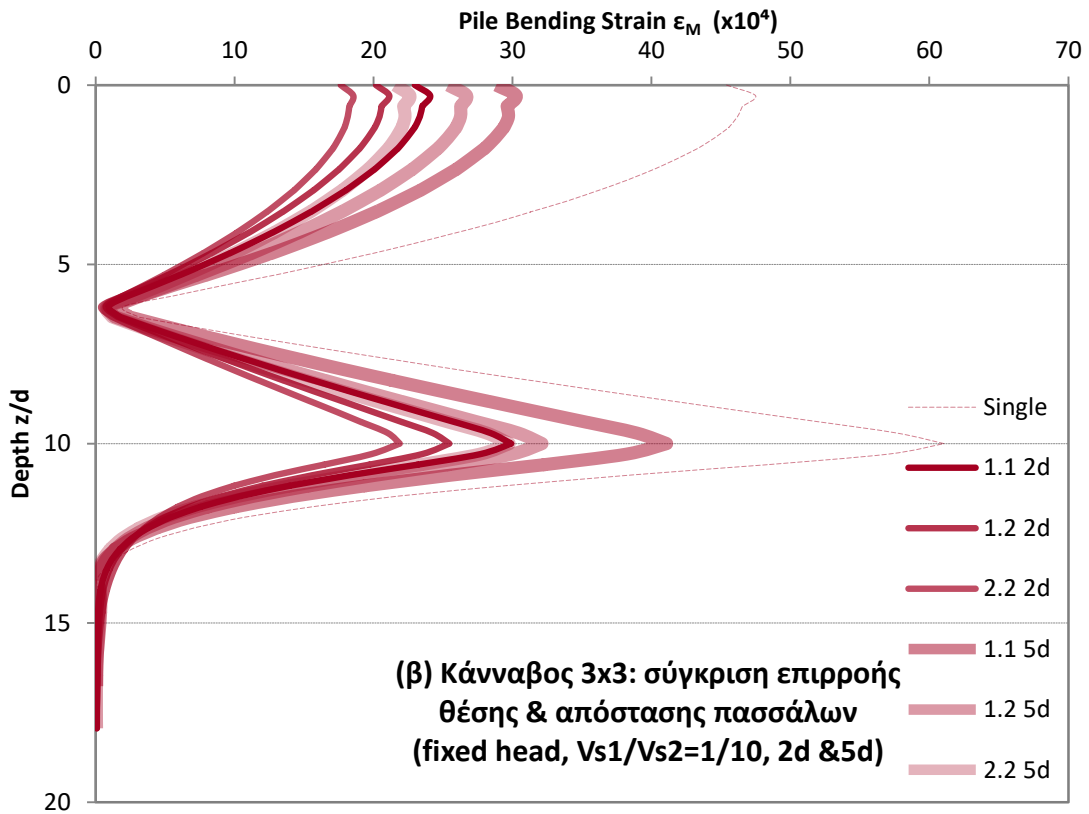
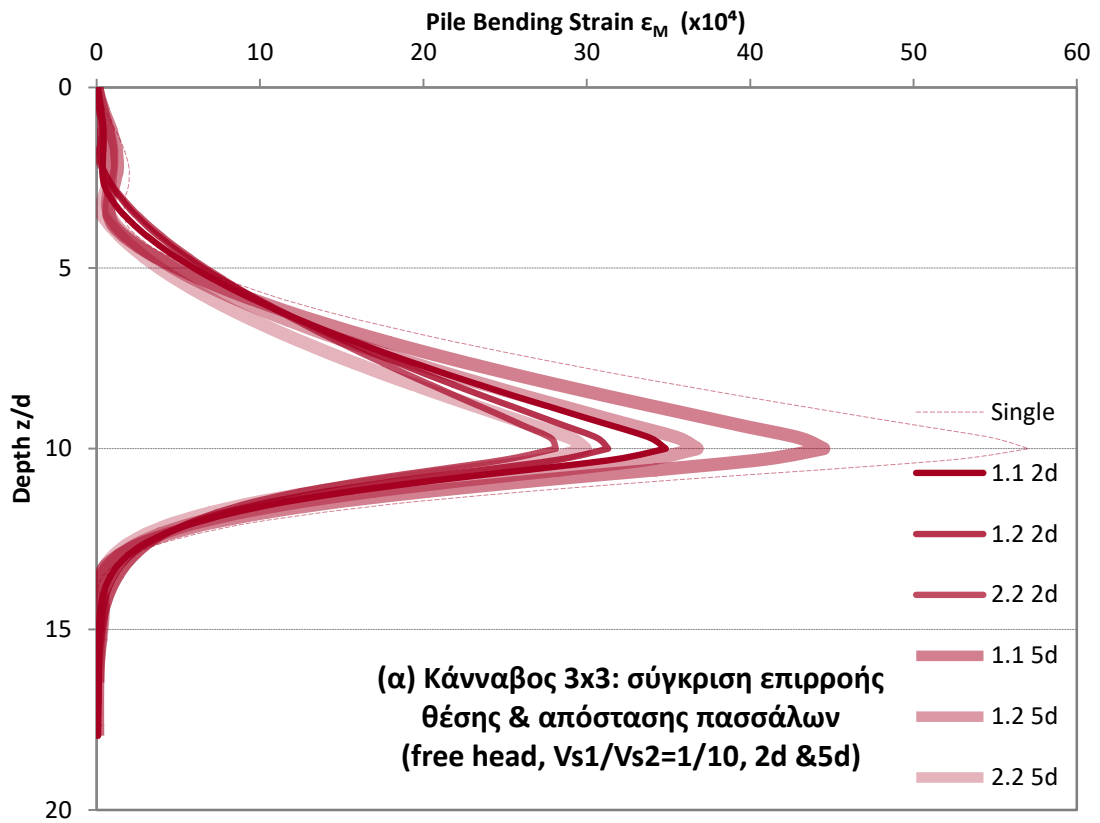


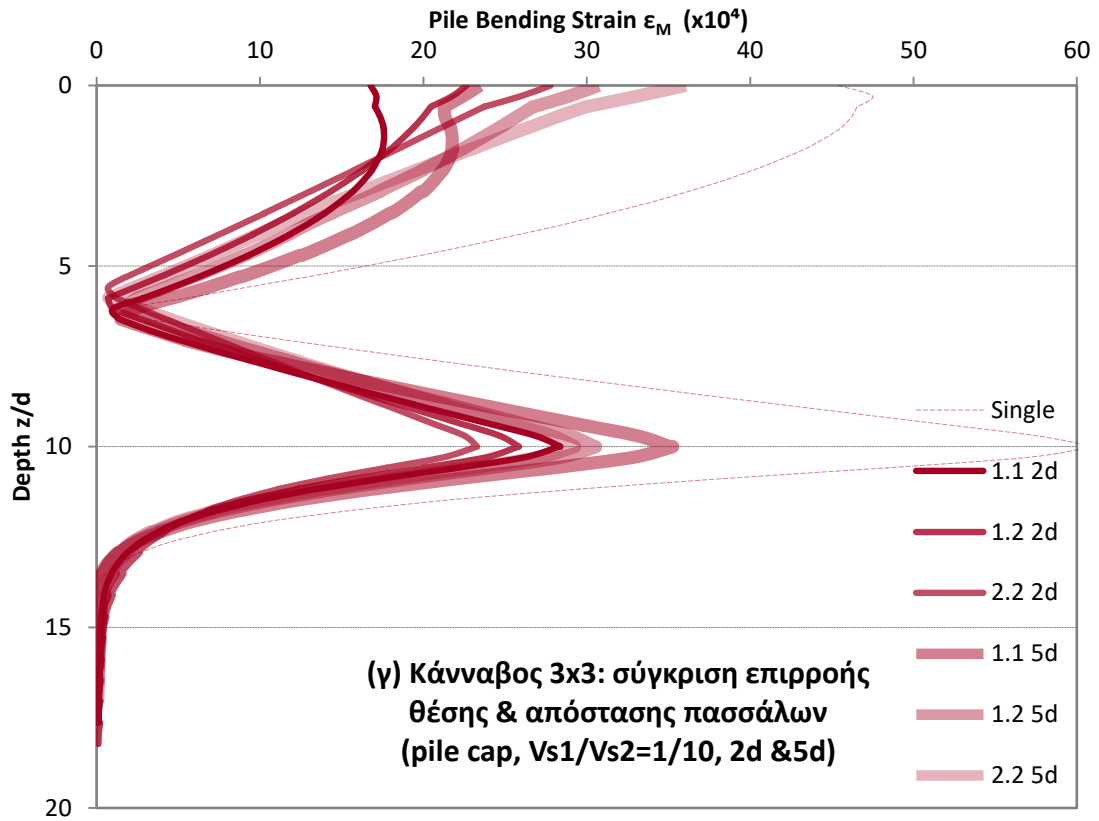
Εικόνες 5.14 (α,β,γ): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/2$ και διάταξη ομάδας 3x3 για σύγκριση επιρροής της απόστασης των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για (α)ελευθέρως στρεπτή κεφαλή, (β) άστρεπτη κεφαλή και (γ) προσθήκη κεφαλόδεσμου



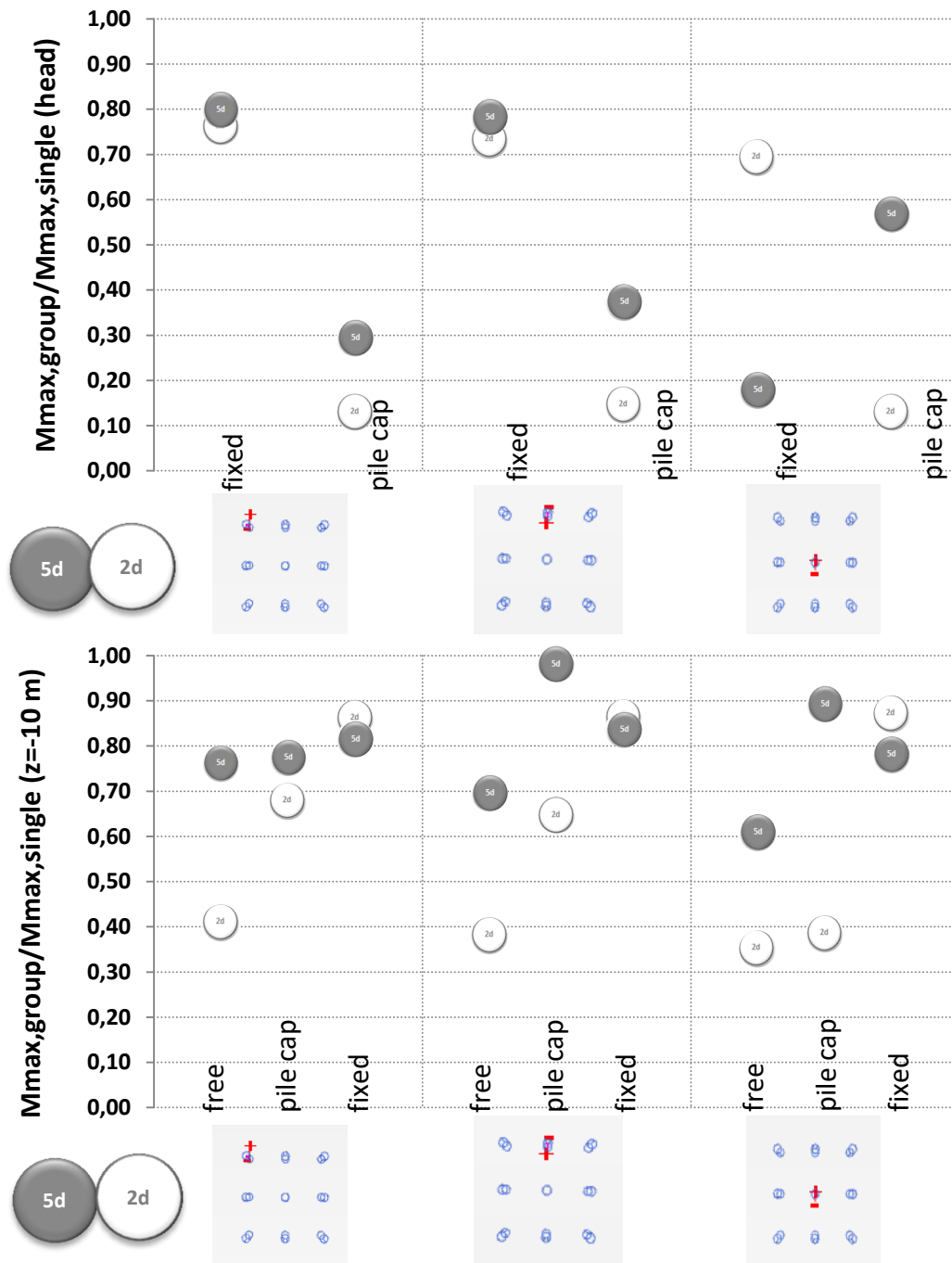


Εικόνες 5.15 (α,β,γ): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ και διάταξη ομάδας 3x3 για σύγκριση επιρροής της απόστασης των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για (α)ελευθέρως στρεπτή κεφαλή, (β) άστρεπτη κεφαλή και (γ) προσθήκη κεφαλόδεσμου

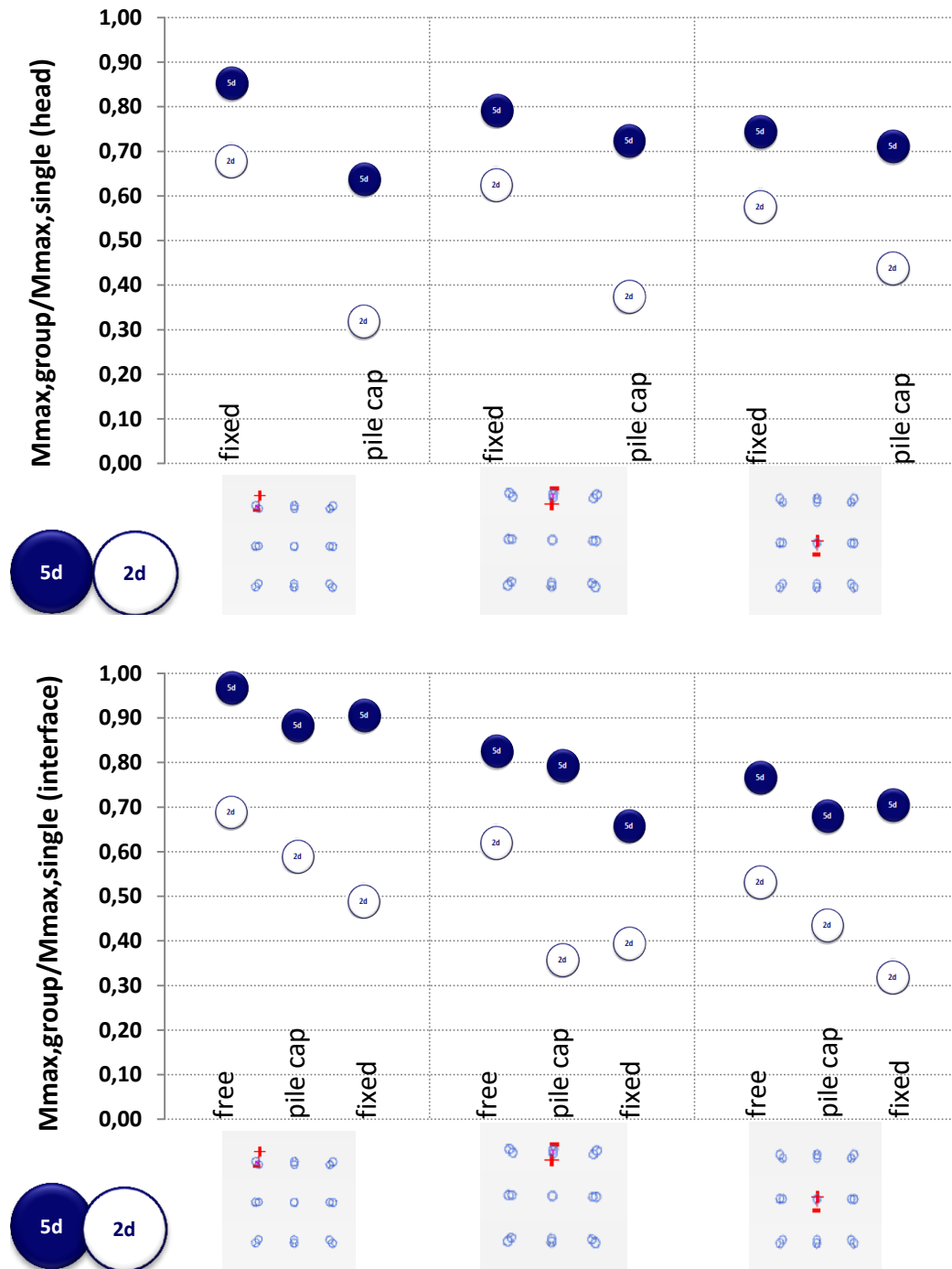




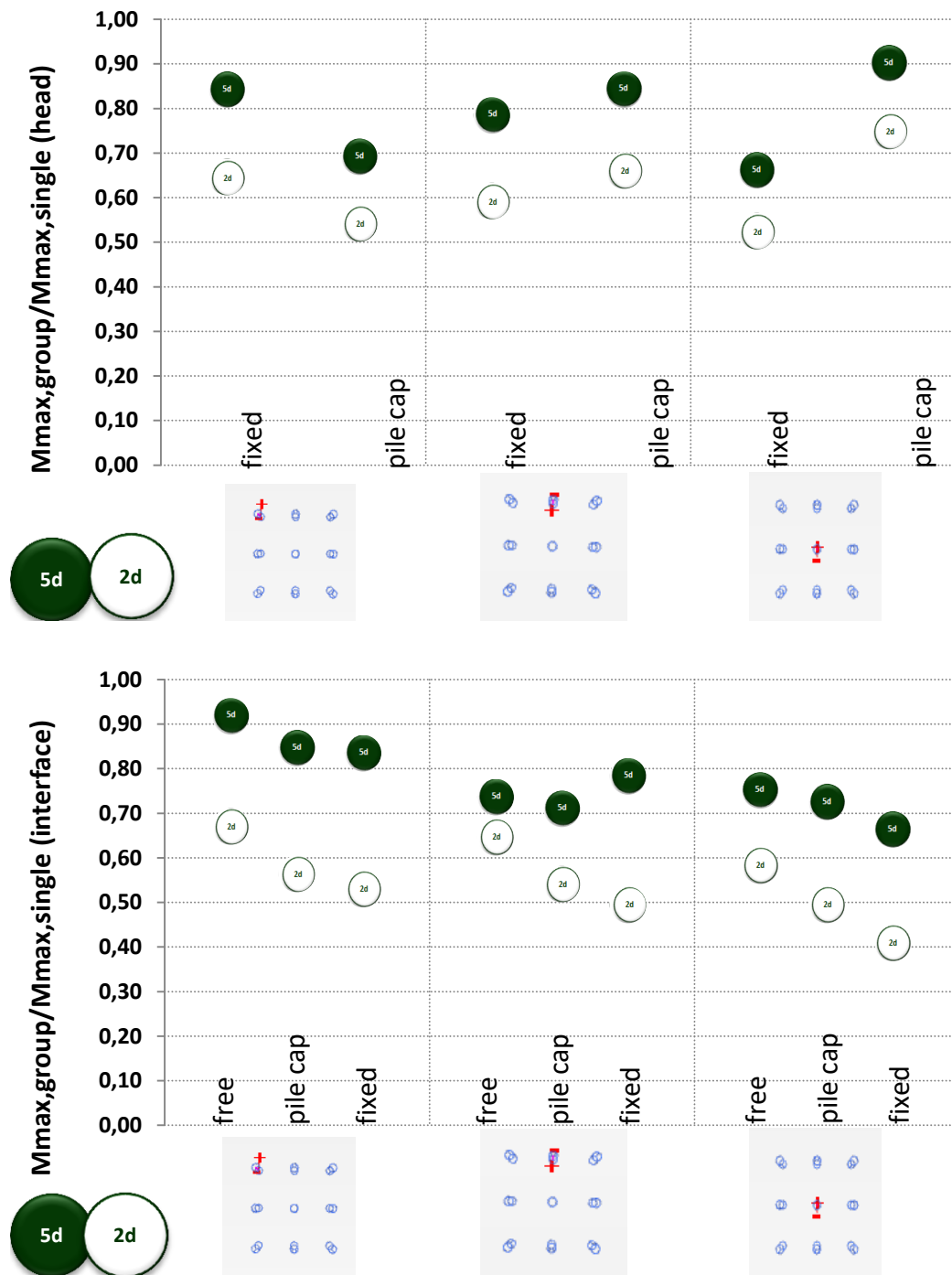
Εικόνες 5.16 (α,β,γ): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$ και διάταξη ομάδας 3x3 για σύγκριση επιρροής της απόστασης των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για (α)ελευθέως στρεπτή κεφαλή, (β) άστρεπτη κεφαλή και (γ) προσθήκη κεφαλόδεσμου



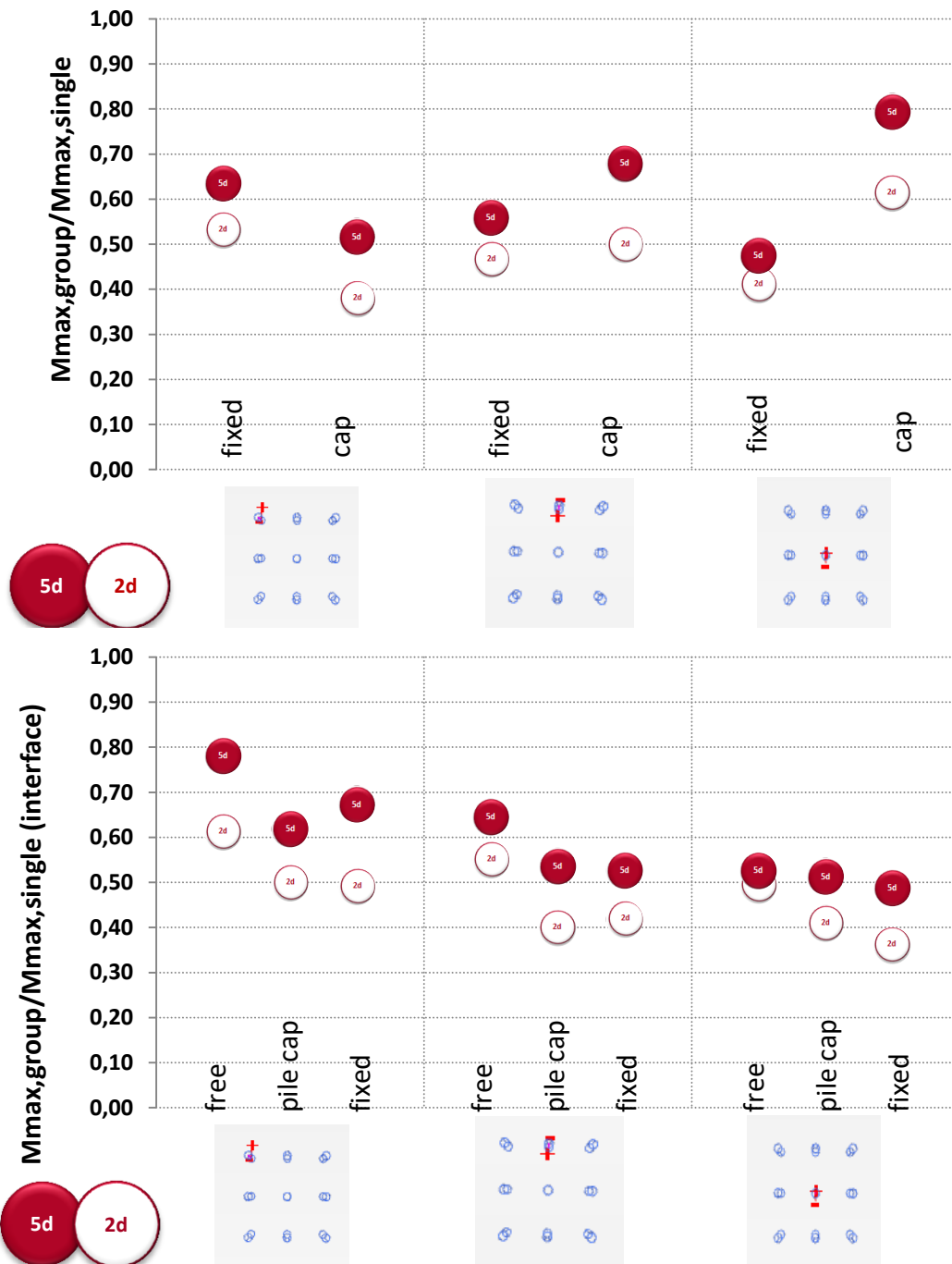
Εικόνα 5.17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ομοιογενούς εδάφους και διάταξης ομάδας 3x3 με κανονικοποιημένη ροπή ως προς εκείνη του μονού πασσάλου, για όλες τις θέσεις του πασσάλου που μελετήθηκαν (1.1, 1.2, 2.2) και για κεφαλή πασσάλου ελευθέρως στρεπτή, με κεφαλόδεσμο και άστρεπτη.



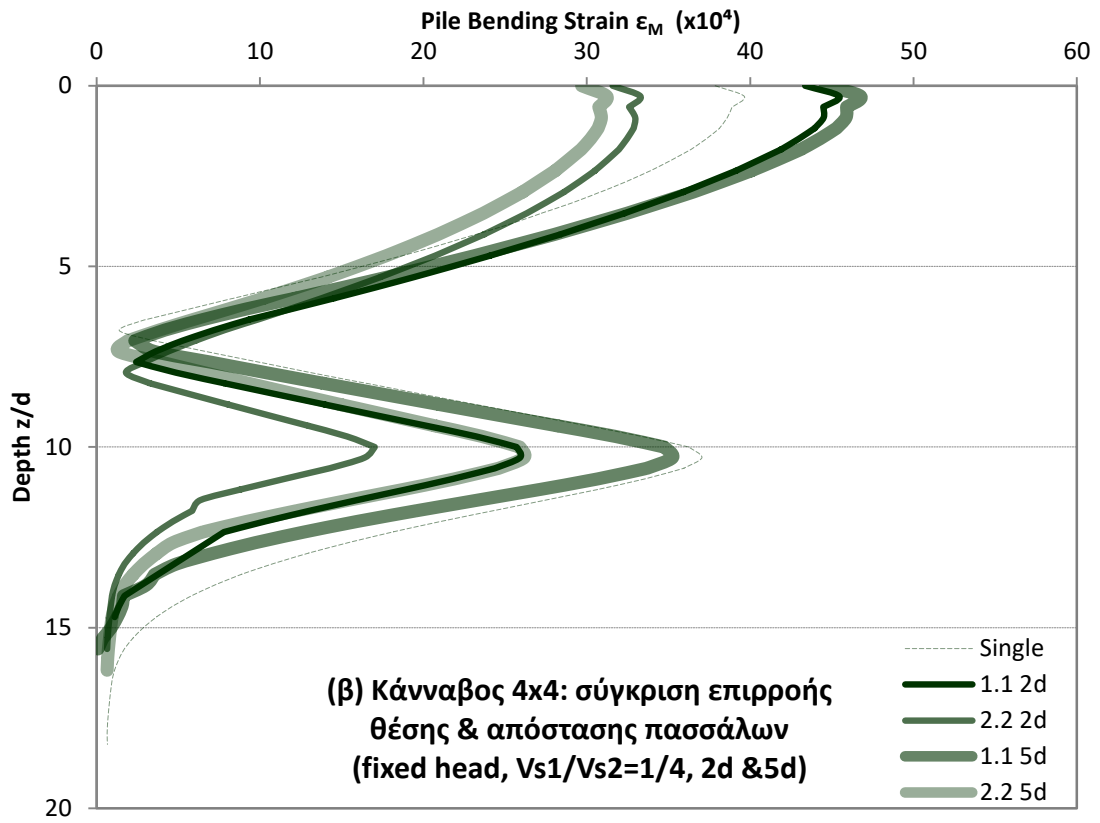
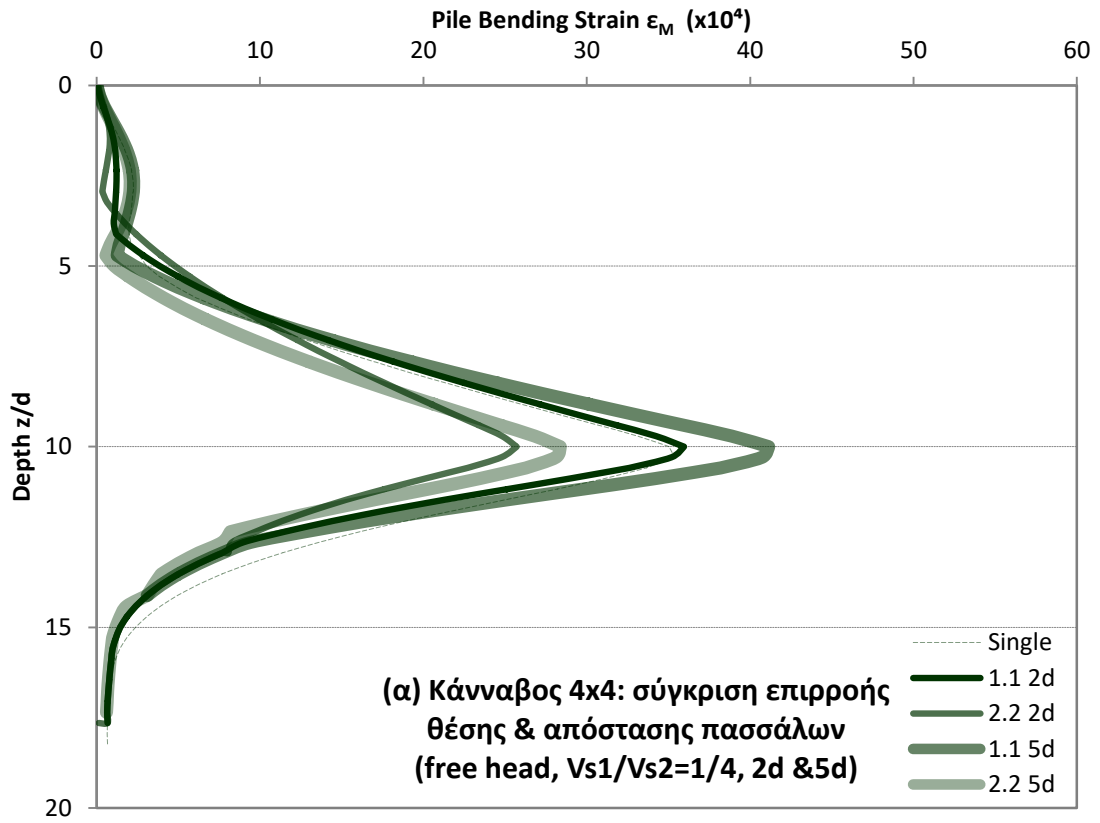
Εικόνα 5.18: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/2$ και διάταξης ομάδας 3×3 με κανονικοποιημένη ροπή ως προς εκείνη του μονού πασσάλου, για όλες τις θέσεις του πασσάλου που μελετήθηκαν (1.1, 1.2, 2.2) και για κεφαλή πασσάλου ελευθέρως στρεπτή, με κεφαλόδεσμο και άστρεπτη.

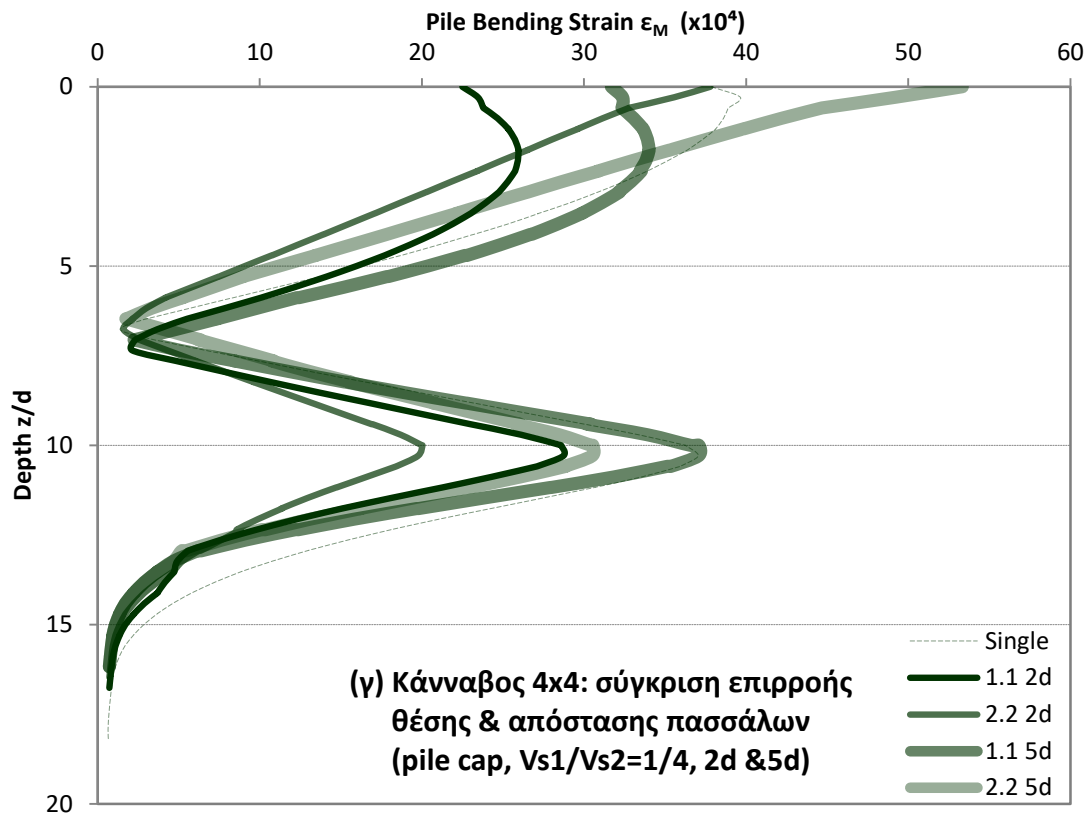


Εικόνα 5.19: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ και διάταξης ομάδας 3×3 με κανονικοποιημένη ροπή ως προς εκείνη του μονού πασσάλου, για όλες τις θέσεις του πασσάλου που μελετήθηκαν (1.1, 1.2, 2.2) και για κεφαλή πασσάλου ελευθέρως στρεπτή, με κεφαλόδεσμο και άστρεπτη.

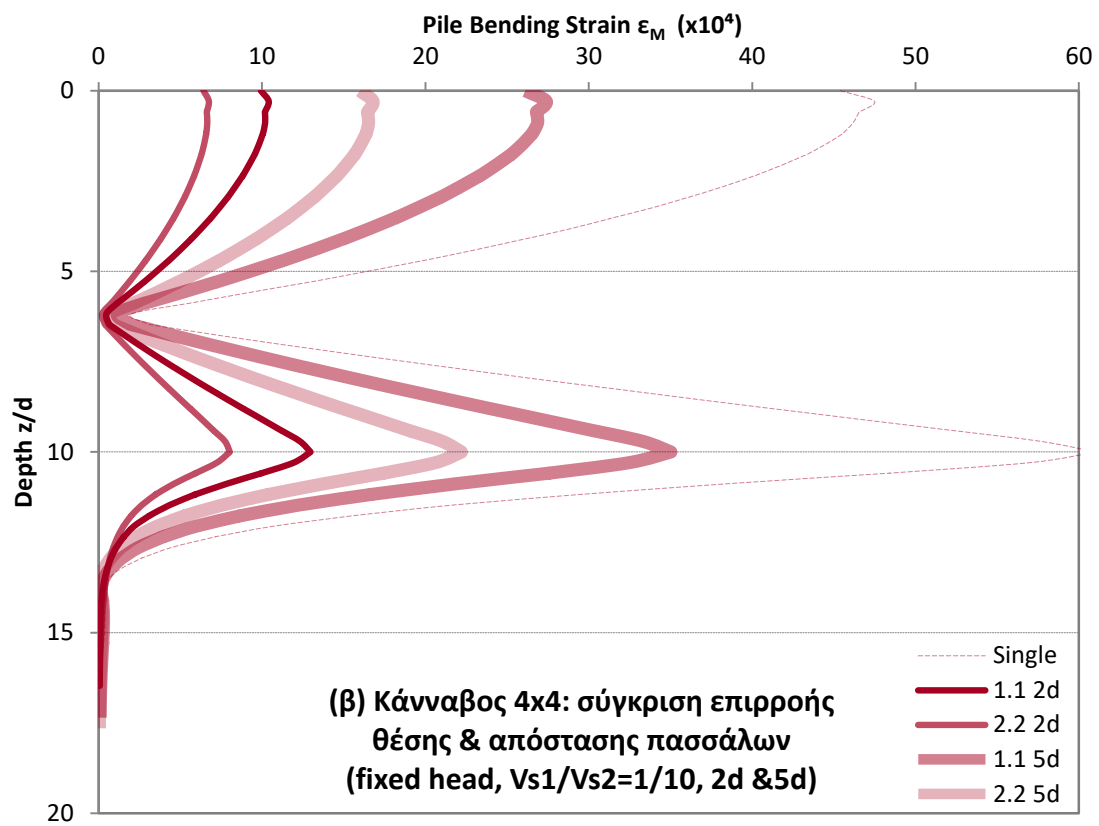
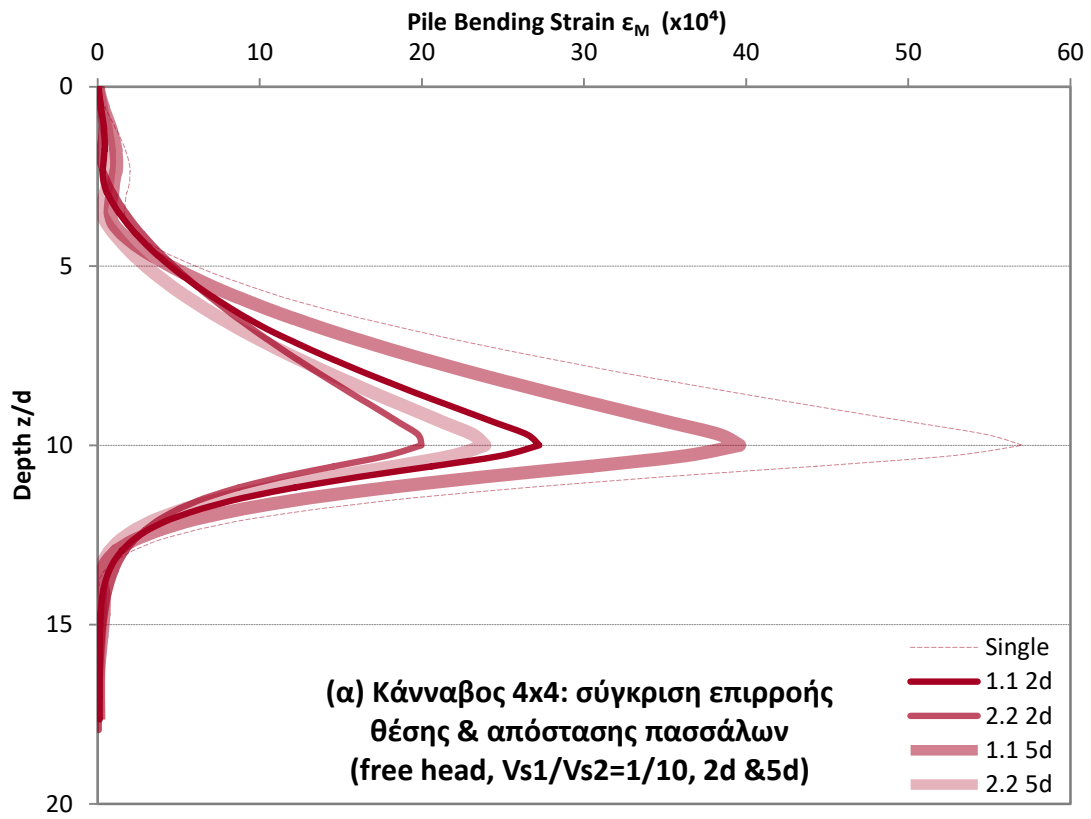


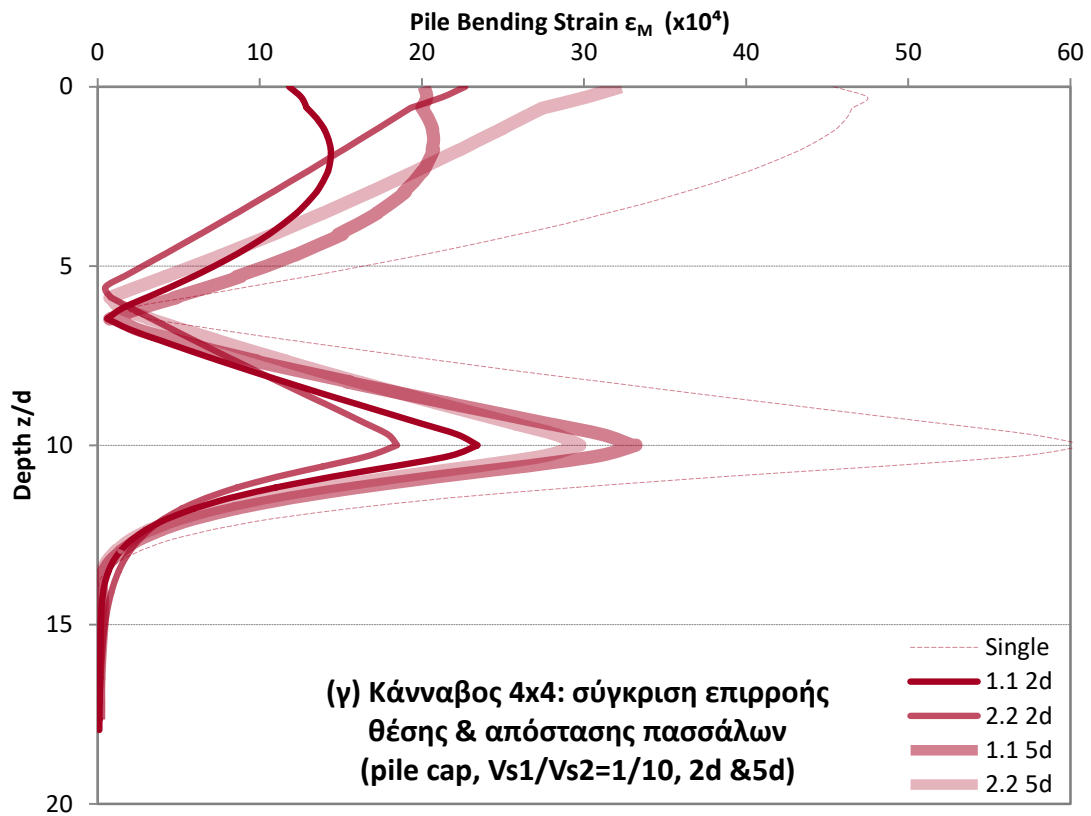
Εικόνα 5.20: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$ και διάταξης ομάδας 3×3 με κανονικοποιημένη ροπή ως προς εκείνη του μονού πασσάλου, για όλες τις θέσεις του πασσάλου που μελετήθηκαν (1.1, 1.2, 2.2) και για κεφαλή πασσάλου ελευθέρως στρεπτή, με κεφαλόδεσμο και άστρεπτη.



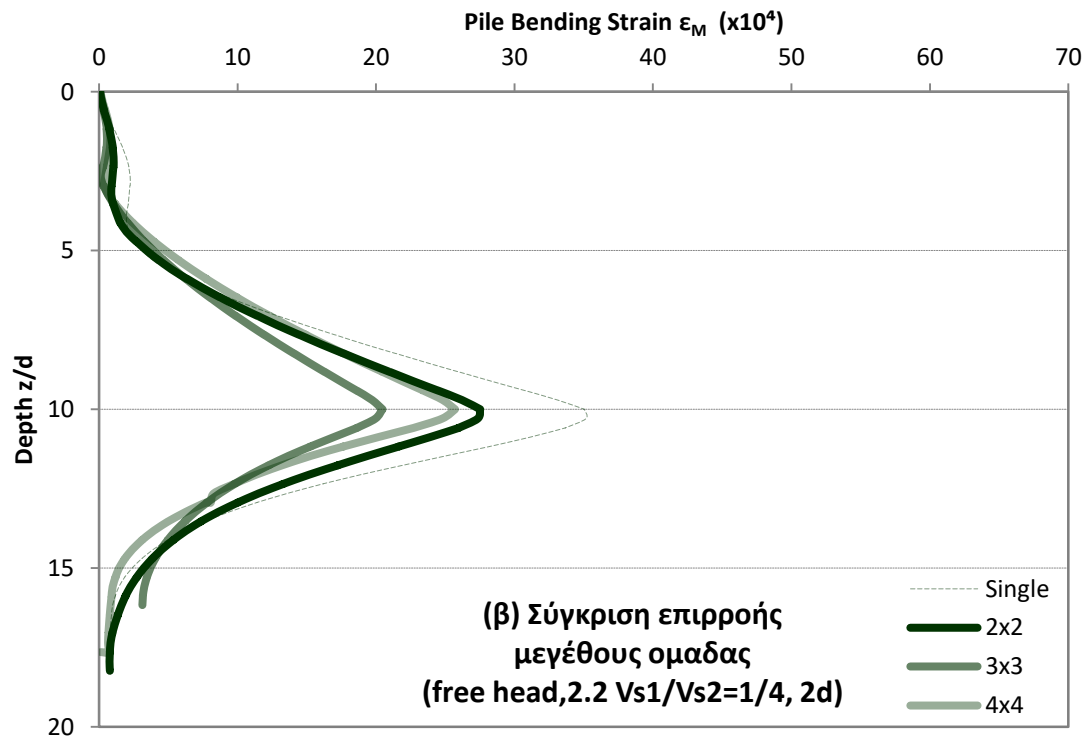
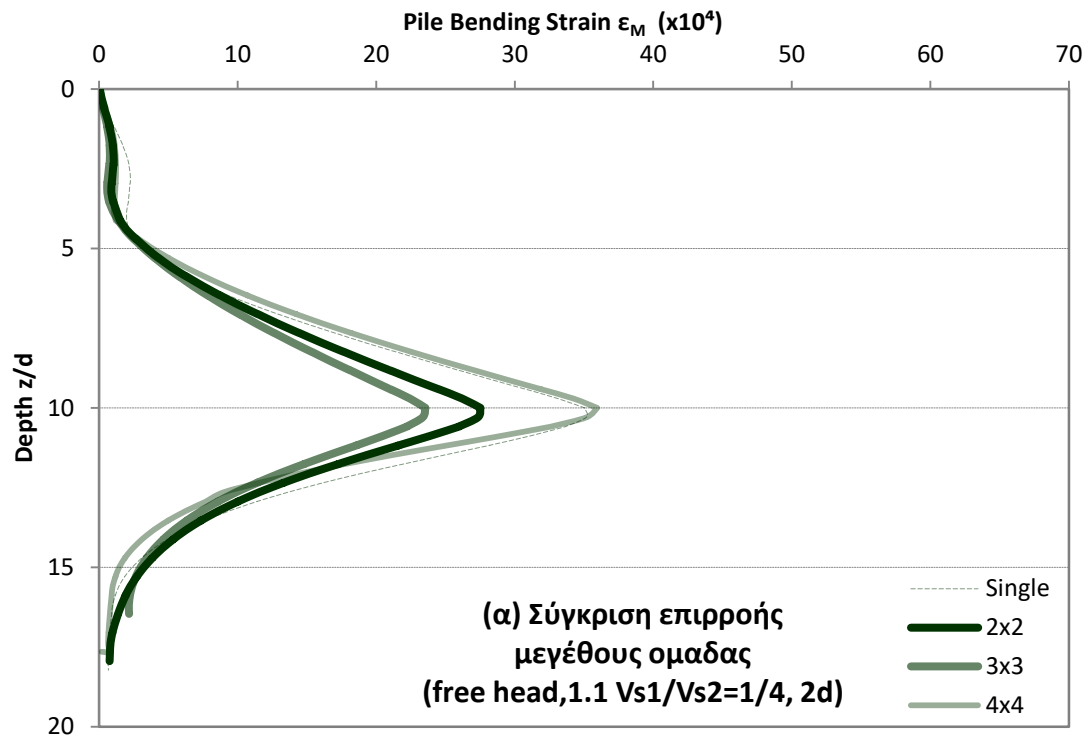


Εικόνες 5.21 (α,β,γ): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ και διάταξη ομάδας 4x4 για σύγκριση επιρροής της απόστασης των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για (α)ελευθέρως στρεπτή κεφαλή, (β) άστρεπτη κεφαλή και (γ) προσθήκη κεφαλόδεσμου

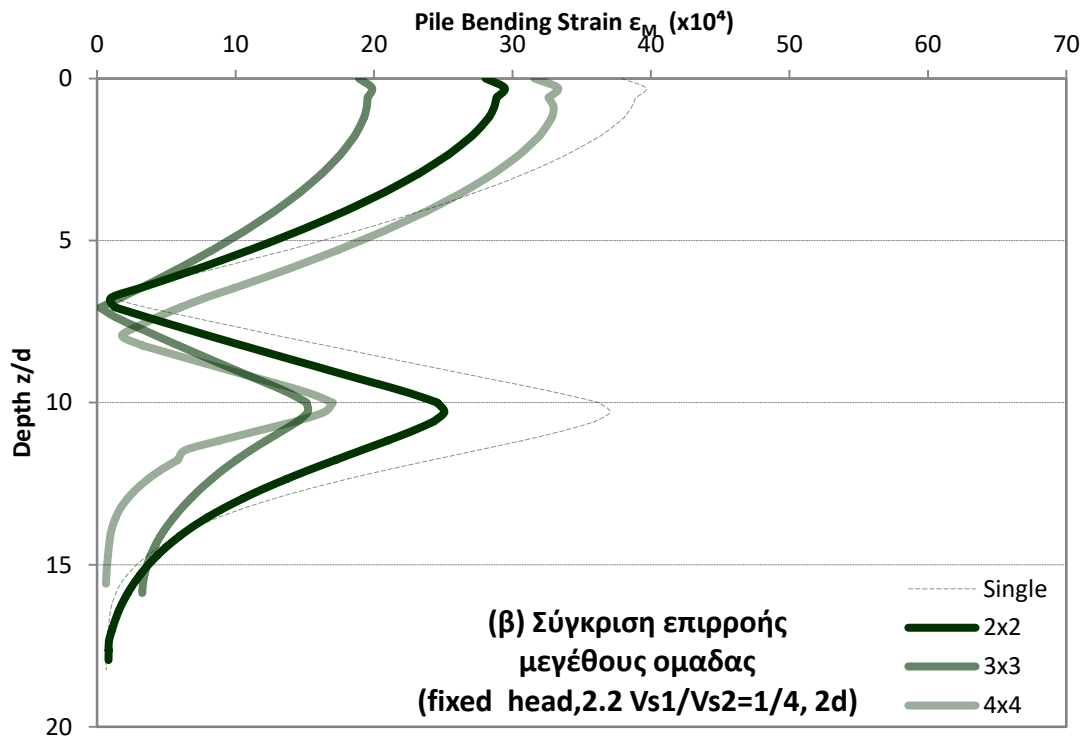
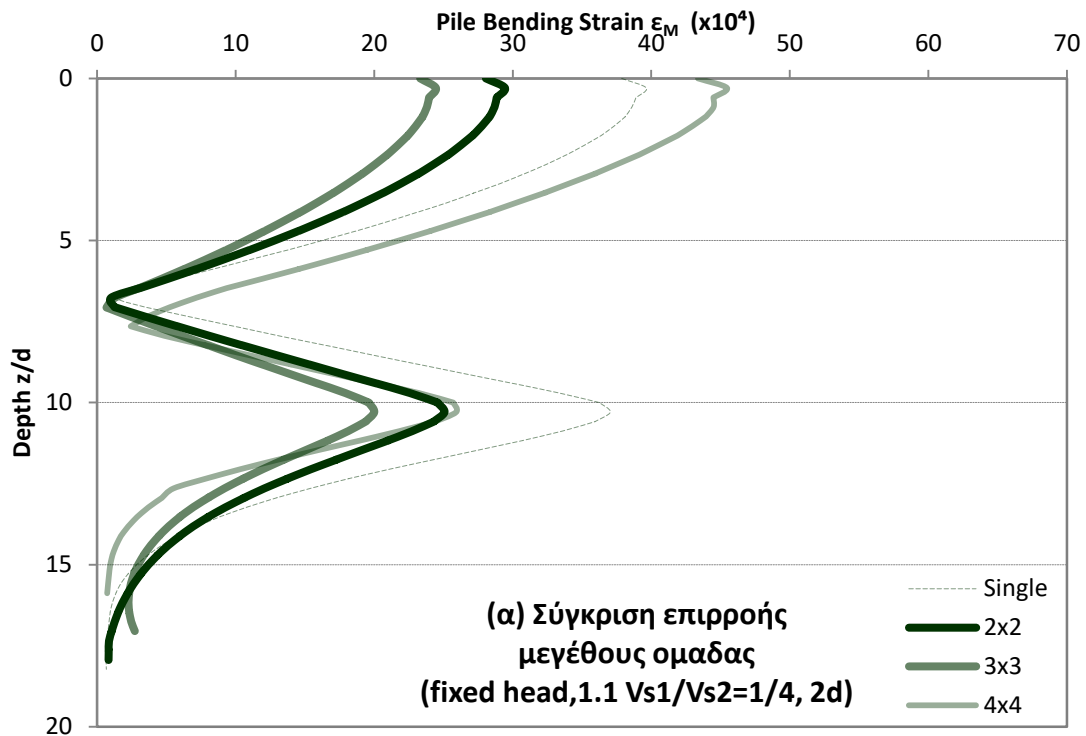




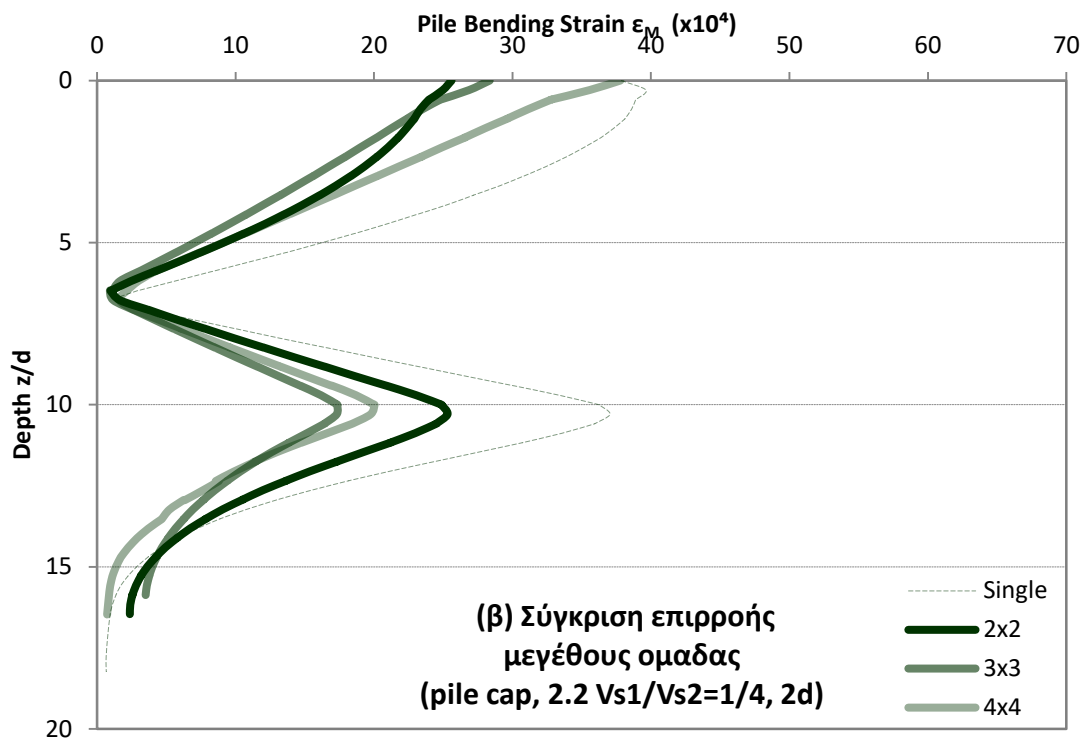
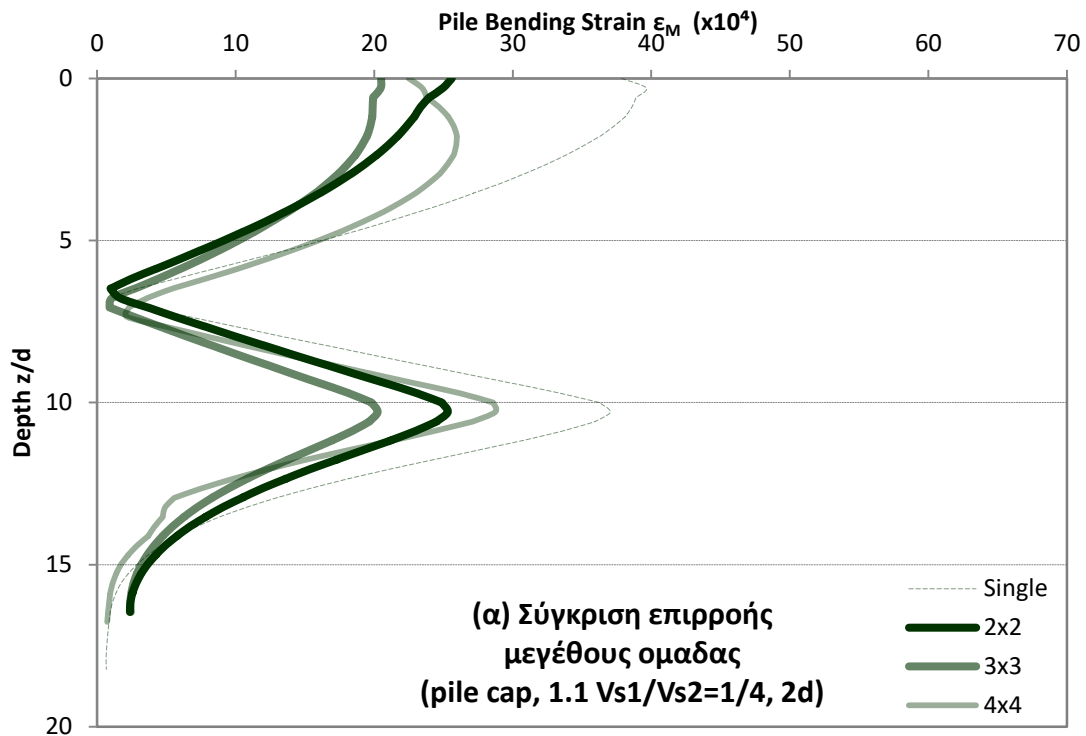
Εικόνες 5.22 (α,β,γ): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$ και διάταξη ομάδας 4x4 για σύγκριση επιρροής της απόστασης των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για (α)ελευθέρως στρεπτή κεφαλή, (β) άστρεπτη κεφαλή και (γ) προσθήκη κεφαλόδεσμου



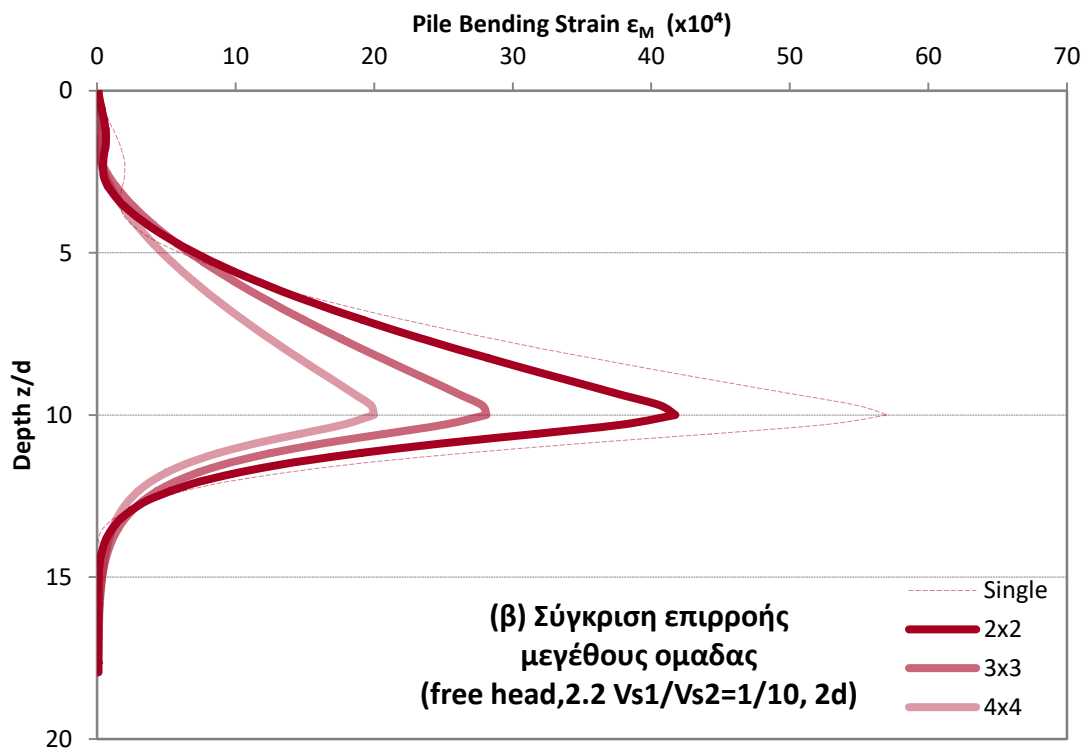
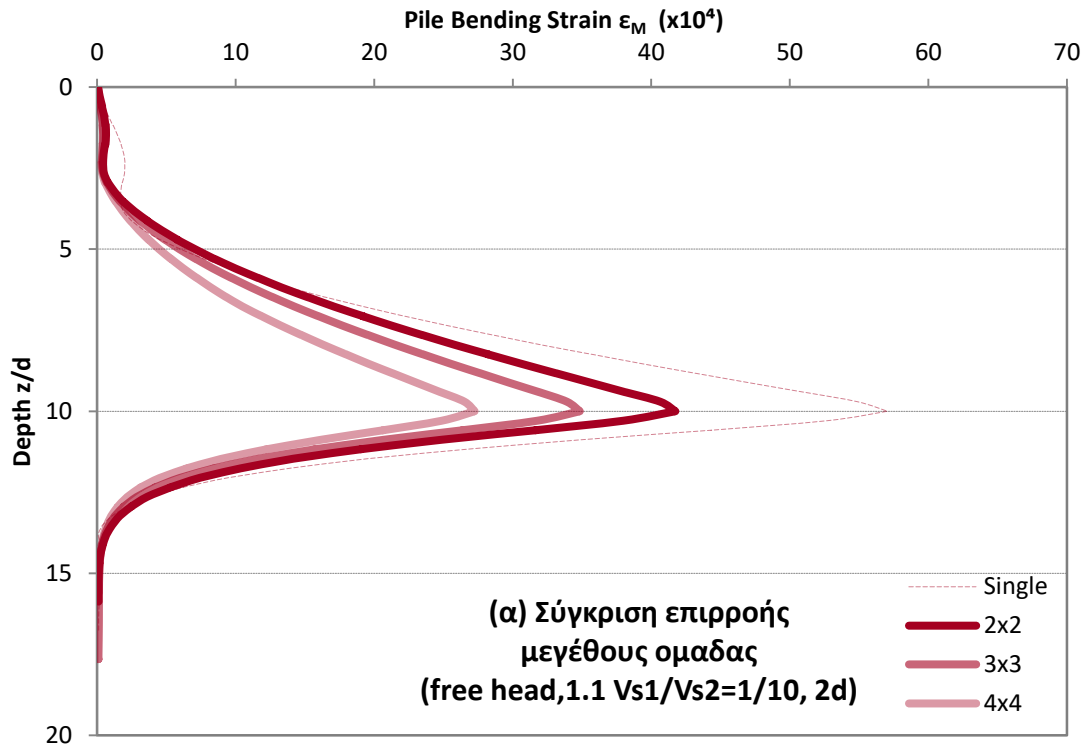
Εικόνες 5.23 (α,β): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ και διάταξη ομάδας 2x2, 3x3, 4x4 για σύγκριση επιρροής της πυκνότητας του καννάβου των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για ελευθέρως στρεπτή κεφαλή και θέση (α) ακριανή και (β) εσωτερική



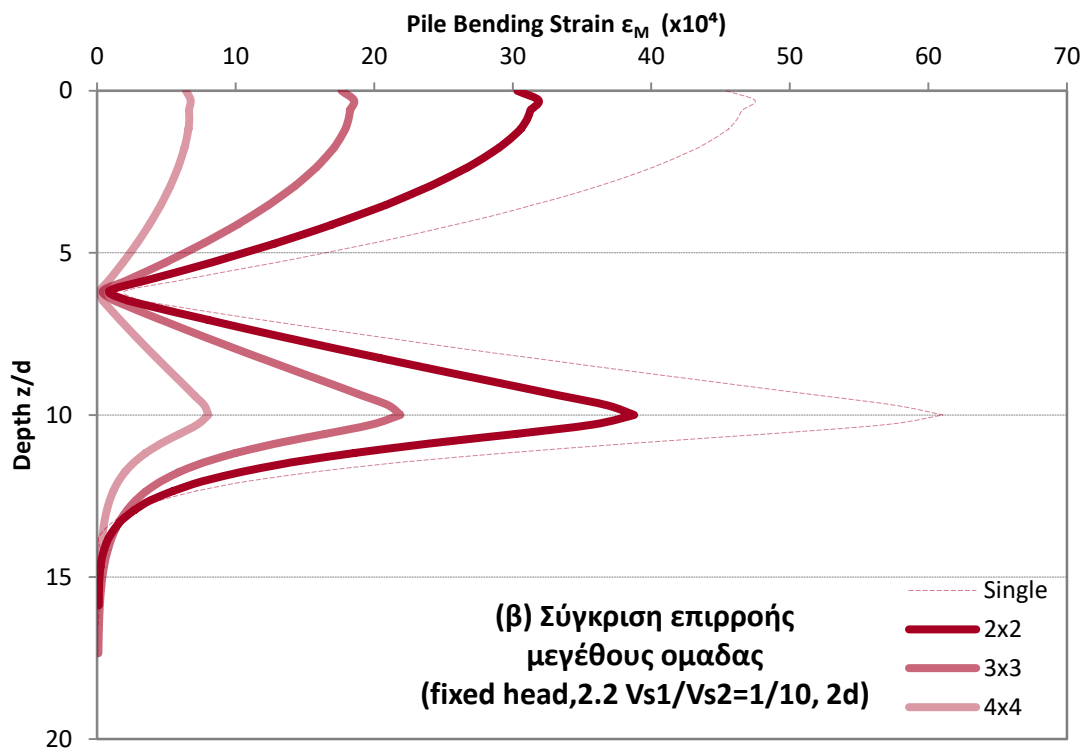
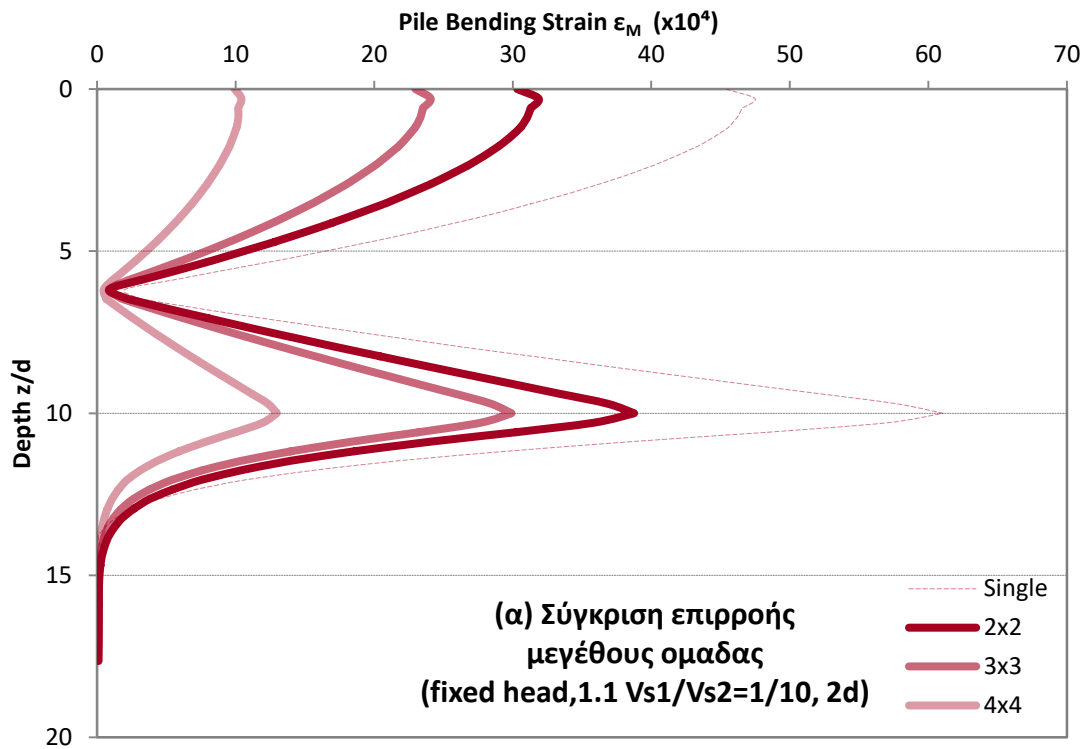
Εικόνες 5.24 (α,β): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ και διάταξη ομάδας 2x2, 3x3, 4x4 για σύγκριση επιρροής της πυκνότητας του καννάβου των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για άστρεπτη κεφαλή και θέση (α) ακριανή και (β) εσωτερική



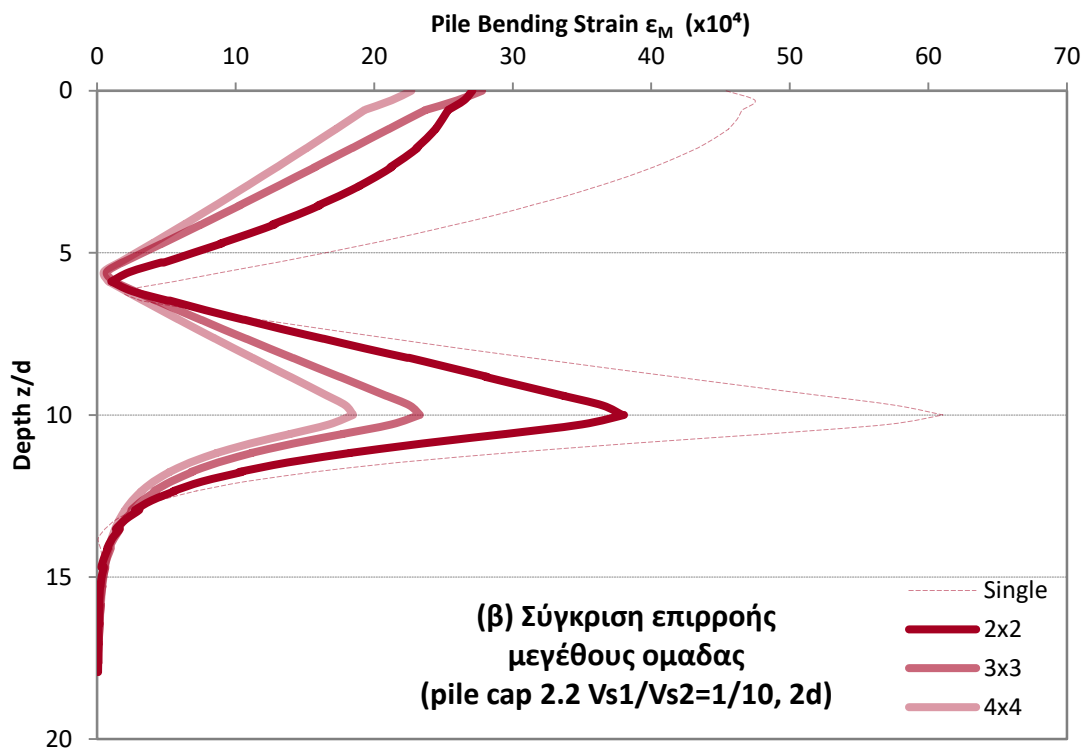
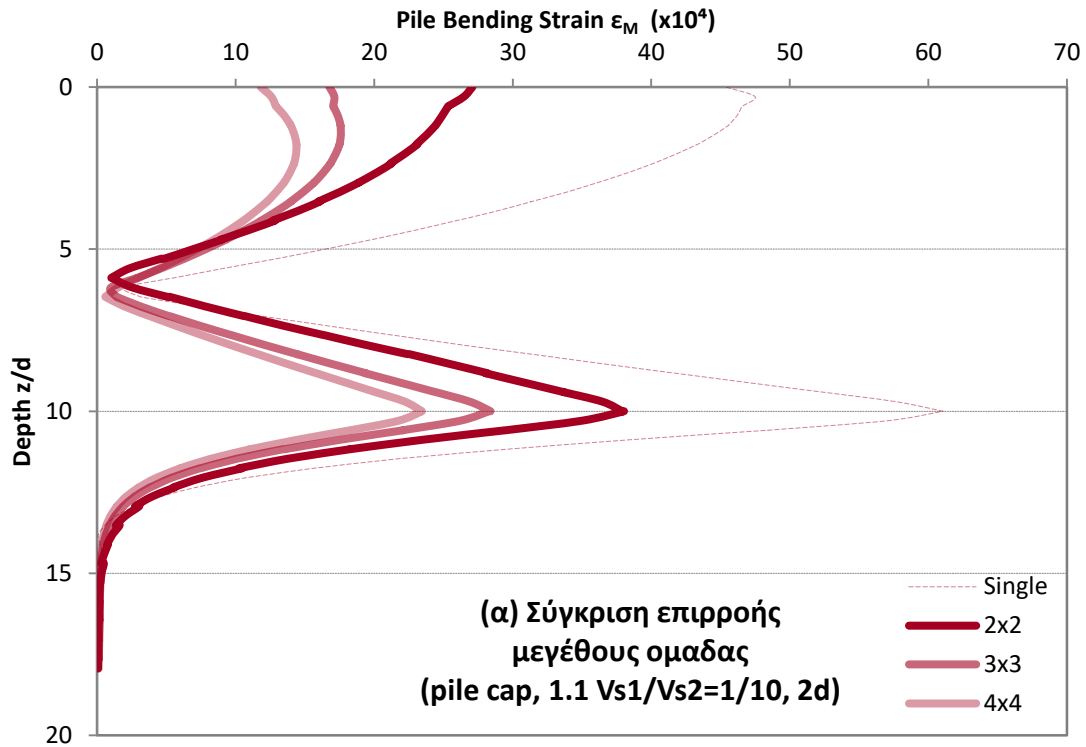
Εικόνες 5.25 (α,β): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ και διάταξη ομάδας 2x2, 3x3, 4x4 για σύγκριση επιρροής της πυκνότητας του καννάβου των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για προσθήκη κεφαλόδεσμου και θέση (α) ακριανή και (β) εσωτερική



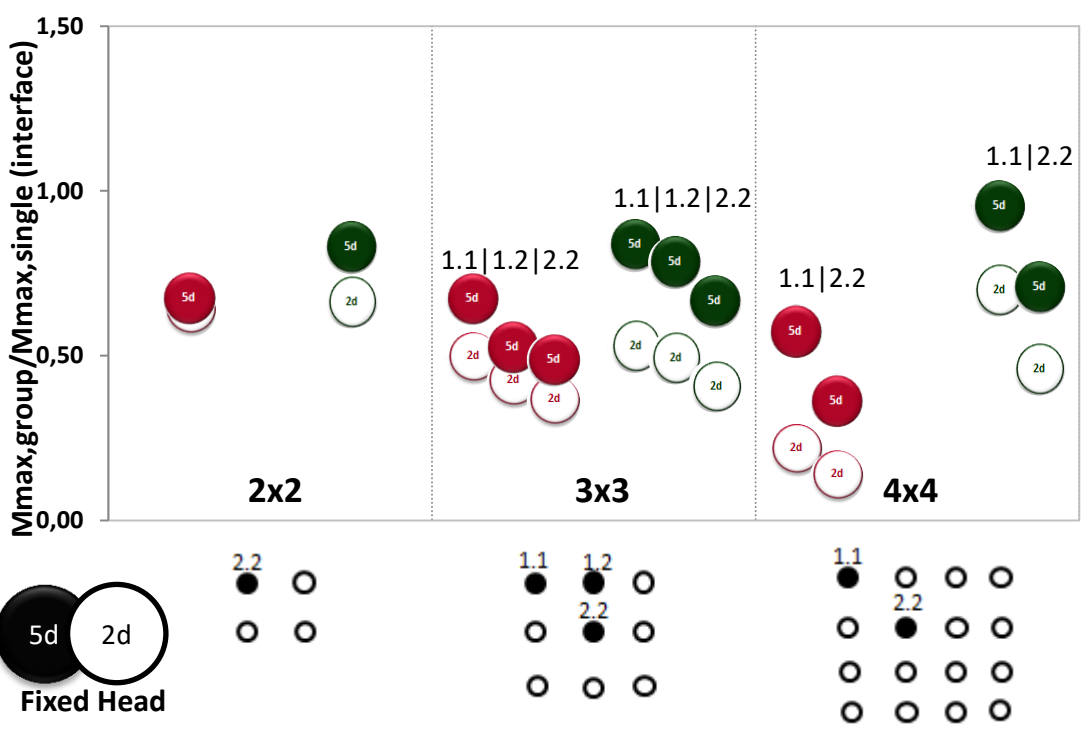
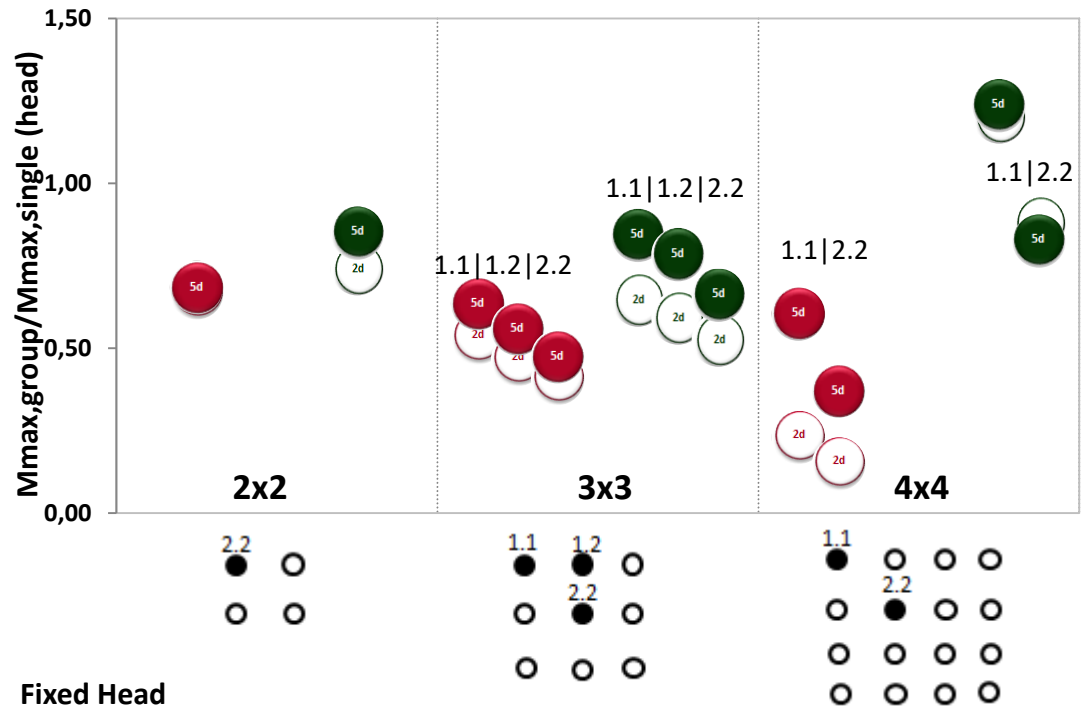
Εικόνες 5.26 (α,β): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$ και διάταξη ομάδας 2x2, 3x3, 4x4 για σύγκριση επιρροής της πυκνότητας του καννάβου των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για ελευθέρως στρεπτή κεφαλή και θέση (α) ακριανή και (β) εσωτερική



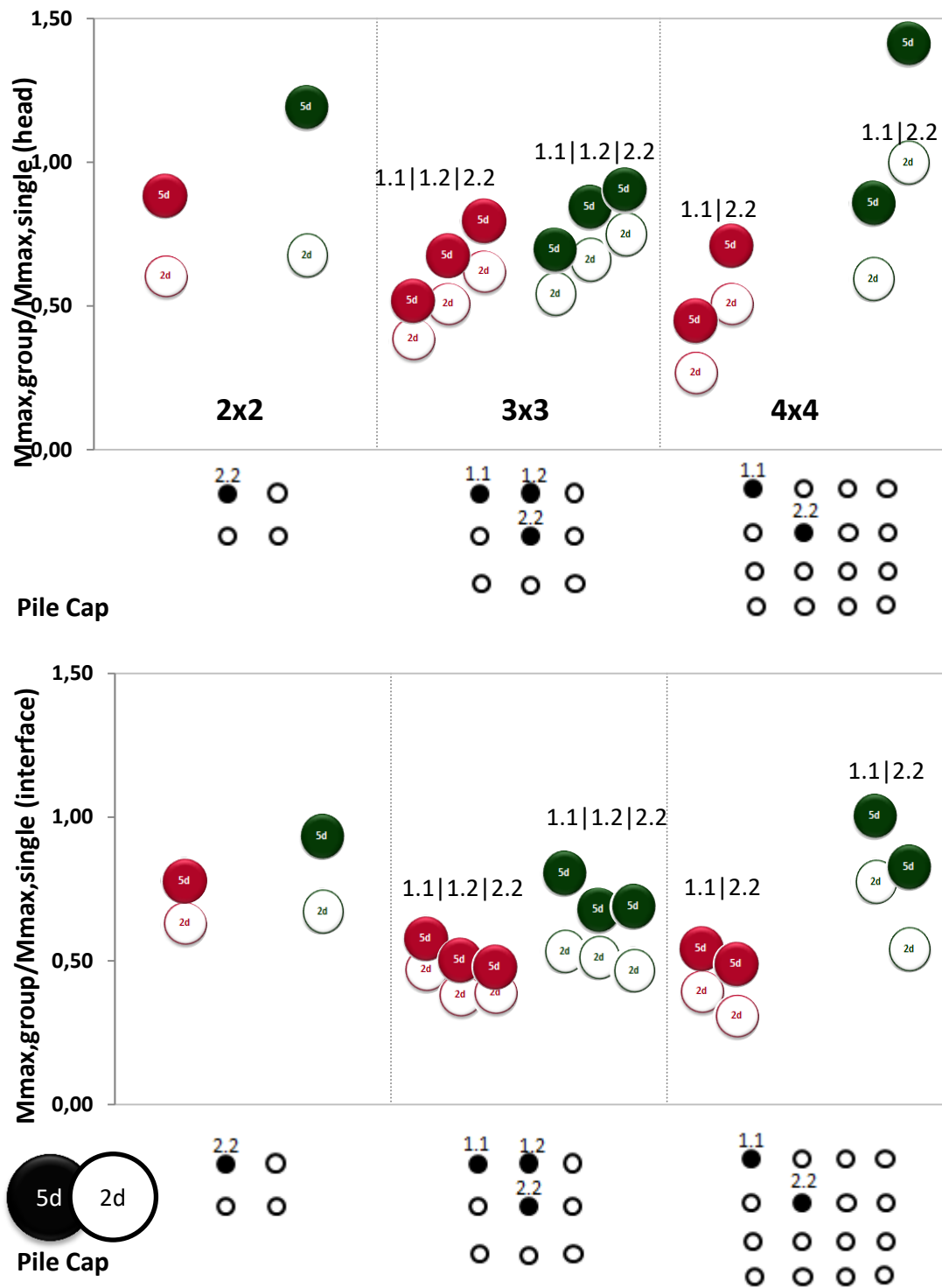
Εικόνες 5.27 (α,β): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$ και διάταξη ομάδας 2x2, 3x3, 4x4 για σύγκριση επιρροής της πυκνότητας του καννάβου των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για άστρεπτη κεφαλή και θέση (α) ακριανή και (β) εσωτερική



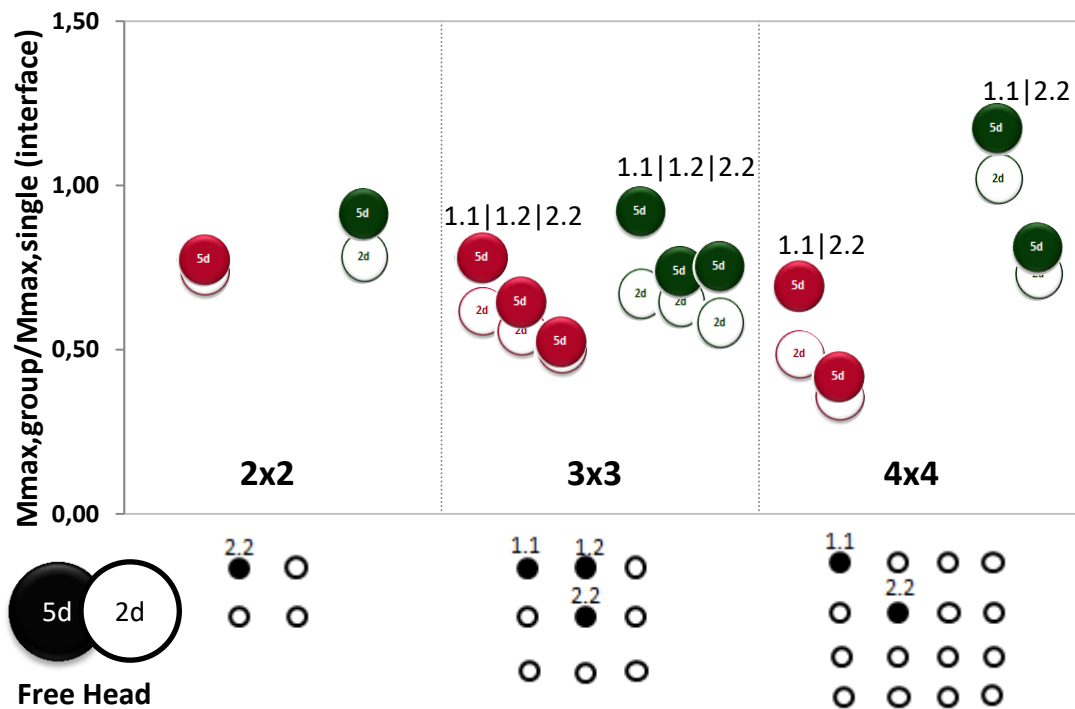
Εικόνες 5.28 (α,β): Αποτελέσματα προσομοίωσης εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$ και διάταξη ομάδας 2x2, 3x3, 4x4 για σύγκριση επιρροής της πυκνότητας του καννάβου των πασσάλων ως προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση λόγω κινηματικής ροπής, για προσθήκη κεφαλόδεσμου και θέση (α) ακριανή και (β) εσωτερική



Εικόνα 5.29: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$ και $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ διάταξης ομάδας 2x2, 3x3, 4x4 με κανονικοποιημένη ροπή ως προς εκείνη του μονού πασσάλου, για όλες τις θέσεις του πασσάλου που μελετήθηκαν και για κεφαλή πασσάλου άστρεπτη, για την κεφαλή και την διεπιφάνεια και για αποστάσεις 5d και 2d



Εικόνα 5.30: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων $Vs1/Vs2=1/10$ και $Vs1/Vs2=1/4$ διάταξης ομάδας 2x2, 3x3, 4x4 με κανονικοποιημένη ροπή ως προς εκείνη του μονού πασσάλου, για όλες τις θέσεις του πασσάλου που μελετήθηκαν για κεφαλόδεσμο, για την ροπή στην κεφαλή και την διεπιφάνεια και για αποστάσεις 5d και 2d



Εικόνα 5.31: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$ και $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ διάταξης ομάδας 2x2, 3x3, 4x4 με κανονικοποιημένη ροπή ως προς εκείνη του μονού πασσάλου, για όλες τις θέσεις του πασσάλου που μελετήθηκαν για κεφαλόδεσμο, για την ροπή στην κεφαλή και την διεπιφάνεια και για αποστάσεις 5d και 2d

M_{group}/M_{single}	(Interface)						Head			
	2.2 free		2.2 fixed		2.2 pile cap		2.2 fixed		2.2 pile cap	
v_{s1}/v_{s2}	2d	5d	2d	5d	2d	5d	2d	5d	2d	5d
0,1	0,73	0,77	0,63	0,67	0,62	0,78	0,67	0,68	0,60	0,88
0,25	0,78	0,91	0,66	0,83	0,67	0,93	0,74	0,85	0,68	1,19
0,5	0,79	0,84	0,55	0,72	0,55	0,80	0,80	0,84	0,67	1,03
1	0,70	0,81	0,80	0,83	0,70	0,91	0,76	0,79	0,09	0,25

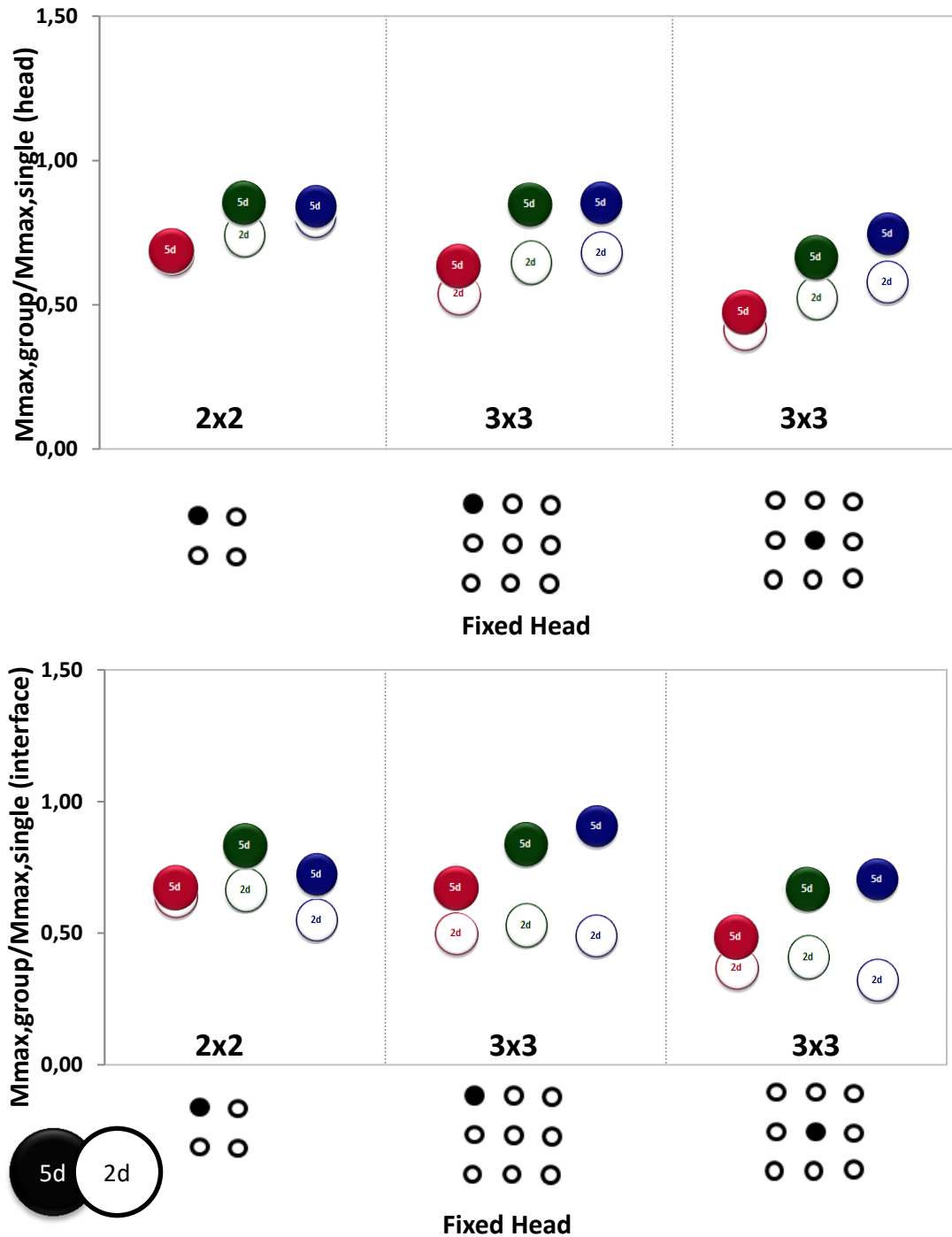
Πίνακας 5.1: Λόγος μέγιστης ροπής ομάδας και μέγιστης ροπής μονού πασσάλου σε κάναβο 2x2

M_{group}/M_{single}	(Interface)						Head			
3x3	1.1 free		1.1 fixed		1.1 pile cap		1.1 fixed		1.1 pile cap	
vs1/vs2	2d	5d	2d	5d	2d	5d	2d	5d	2d	5d
0,1	0,61	0,78	0,49	0,67	0,47	0,58	0,53	0,63	0,38	0,52
0,25	0,67	0,92	0,53	0,83	0,53	0,80	0,65	0,84	0,54	0,69
0,5	0,69	0,97	0,49	0,90	0,58	0,86	0,68	0,85	0,32	0,63
1	0,41	0,76	0,86	0,82	0,65	0,74	0,76	0,80	0,13	0,29
M_{group}/M_{single}	(Interface)						Head			
3x3	1.2 free		1.2 fixed		1.2 pile cap		1.2 fixed		1.2 pile cap	
vs1/vs2	2d	5d	2d	5d	2d	5d	2d	5d	2d	5d
0,1	0,55	0,64	0,42	0,53	0,37	0,50	0,47	0,56	0,50	0,68
0,25	0,65	0,74	0,49	0,78	0,51	0,67	0,59	0,78	0,66	0,84
0,5	0,62	0,82	0,39	0,66	0,35	0,77	0,63	0,79	0,37	0,72
1	0,38	0,70	0,86	0,84	0,62	0,94	0,73	0,78	0,14	0,37
M_{group}/M_{single}	(Interface)						Head			
3x3	2.2 free		2.2 fixed		2.2 pile cap		2.2 fixed		2.2 pile cap	
vs1/vs2	2d	5d	2d	5d	2d	5d	2d	5d	2d	5d
0,1	0,49	0,52	0,36	0,49	0,38	0,48	0,41	0,47	0,61	0,79
0,25	0,58	0,75	0,41	0,66	0,47	0,69	0,52	0,66	0,75	0,90
0,5	0,53	0,77	0,32	0,70	0,42	0,66	0,58	0,74	0,44	0,71
1	0,35	0,61	0,87	0,78	0,37	0,86	0,69	0,18	0,13	0,57

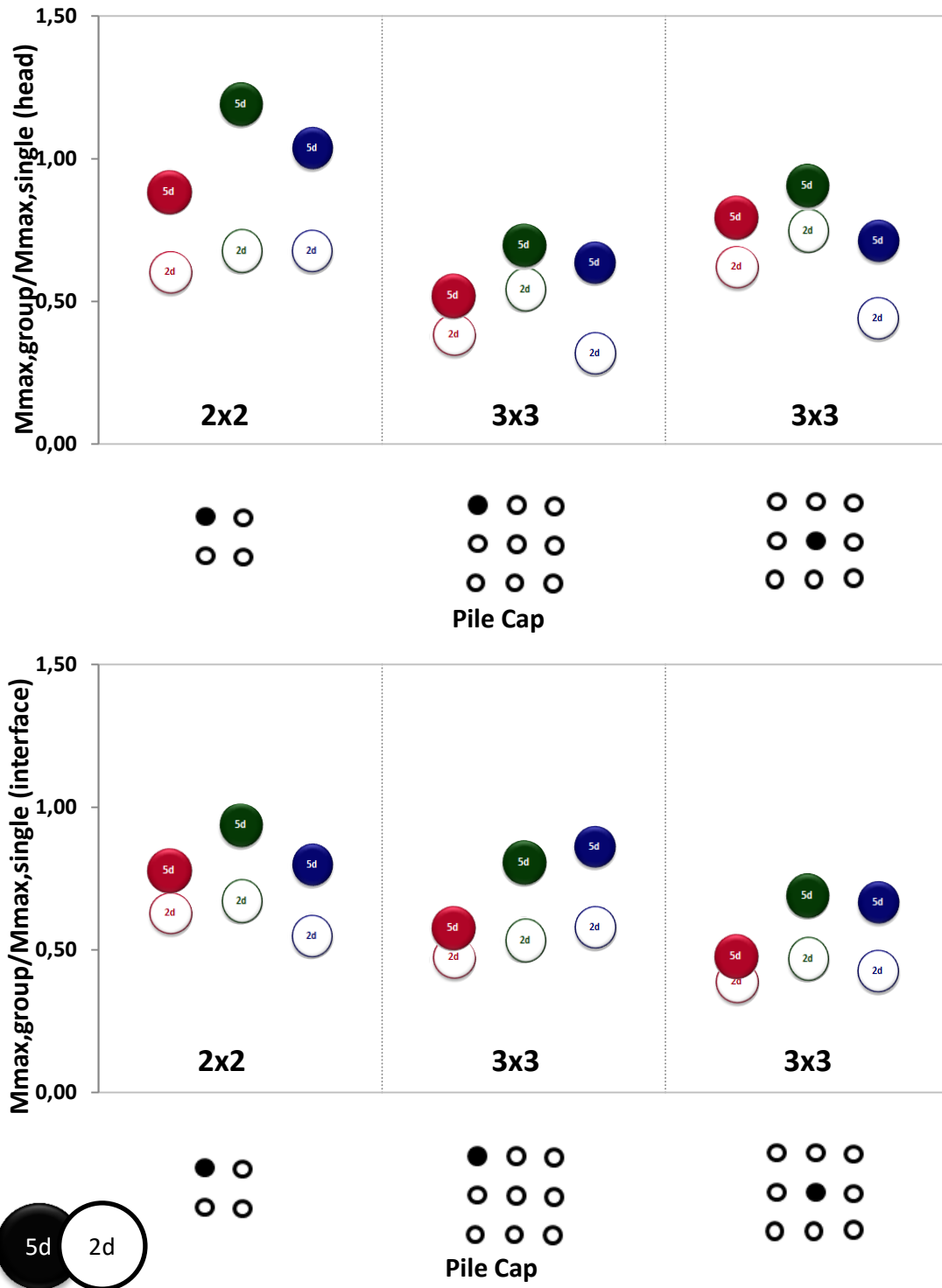
Πίνακας 5.2: Λόγος μέγιστης ροπής ομάδας και μέγιστης ροπής μονού πασσάλου σε κάναβο 3x3

M_{group}/M_{single}	(Interface)						Head			
4x4	1.1 free		1.1 fixed		1.1 pile cap		1.1 fixed		1.1 pile cap	
vs1/vs2	2d	5d	2d	5d	2d	5d	2d	5d	2d	5d
0,1	0,48	0,69	0,21	0,57	0,38	0,54	0,23	0,60	0,26	0,45
0,25	1,02	1,17	0,70	0,95	0,78	1,00	1,20	1,24	0,59	0,86
M_{group}/M_{single}	(Interface)						Head			
4x4	1.2 free		1.2 fixed		1.2 pile cap		1.2 fixed		1.2 pile cap	
vs1/vs2	2d	5d	2d	5d	2d	5d	2d	5d	2d	5d
0,1	0,35	0,42	0,13	0,36	0,30	0,49	0,15	0,37	0,50	0,71
0,25	0,73	0,81	0,46	0,71	0,54	0,82	0,88	0,82	1,00	1,41

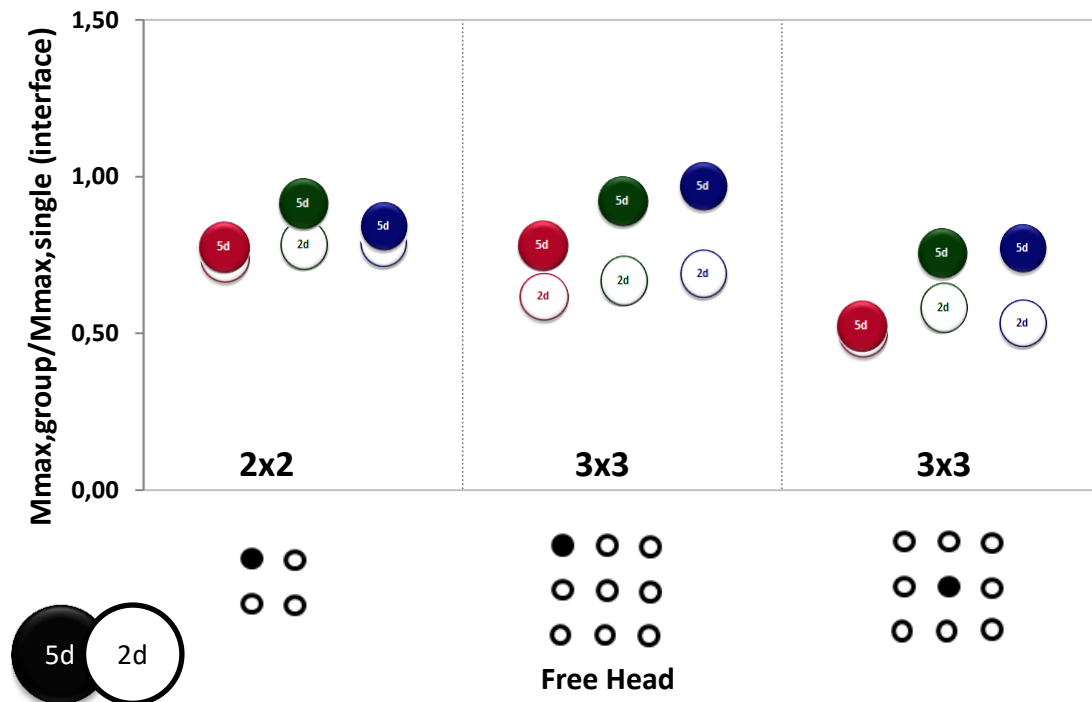
Πίνακας 5.3: Λόγος μέγιστης ροπής ομάδας και μέγιστης ροπής μονού πασσάλου σε κάναβο 4x4



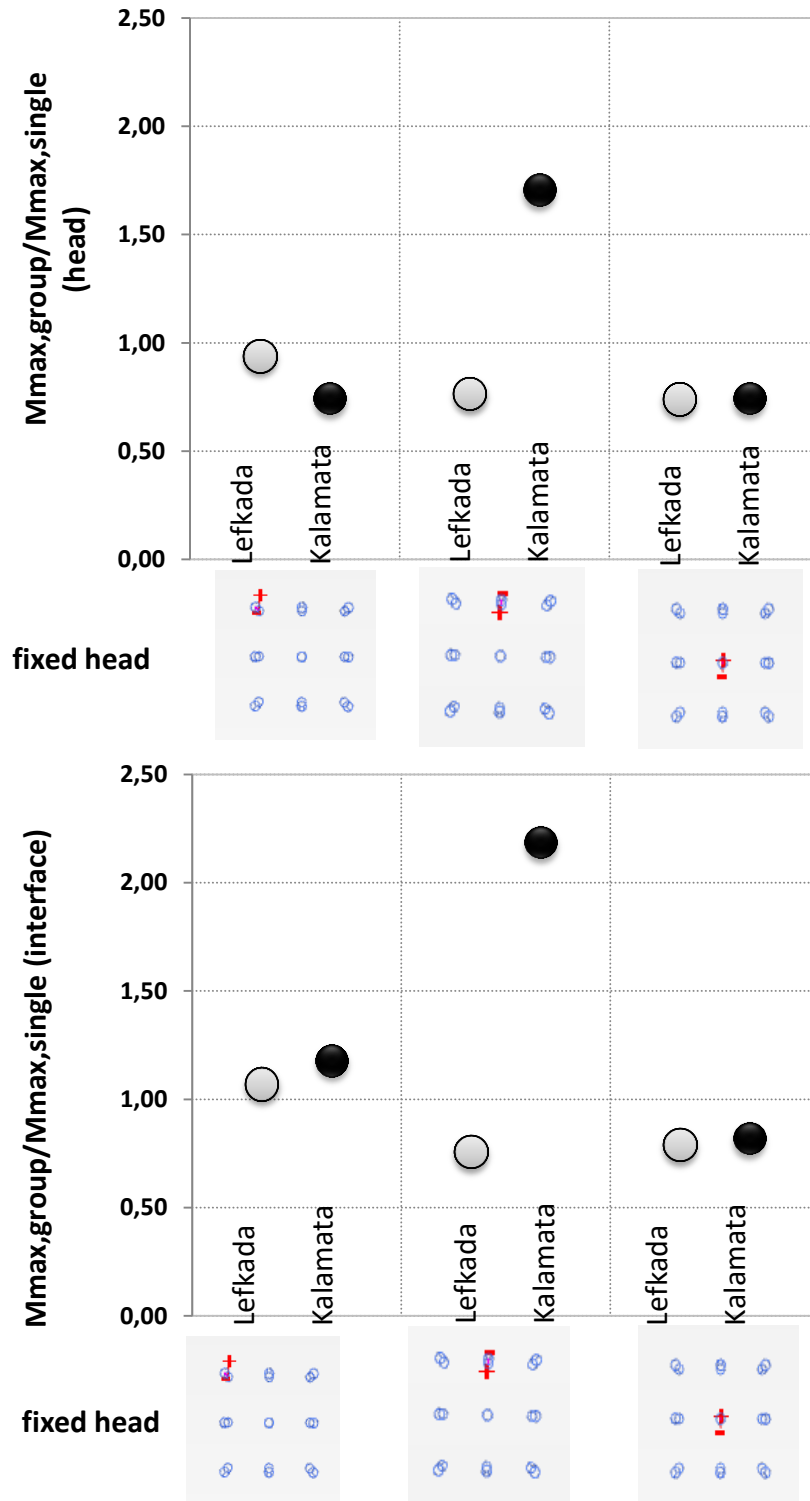
Εικόνα 5.32 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$, $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ και $V_{s1}/V_{s2}=1/5$ διάταξης ομάδας 2x2 και 3x3 για εξωτερικό ακριανό και κεντρικό πάσσαλο με κανονικοποιημένη ροπή ως προς εκείνη του μονού πασσάλου, για την ροπή στην κεφαλή και την διεπιφάνεια και για αποστάσεις 5d και 2d για την περίπτωση άστρεπτης κεφαλής.



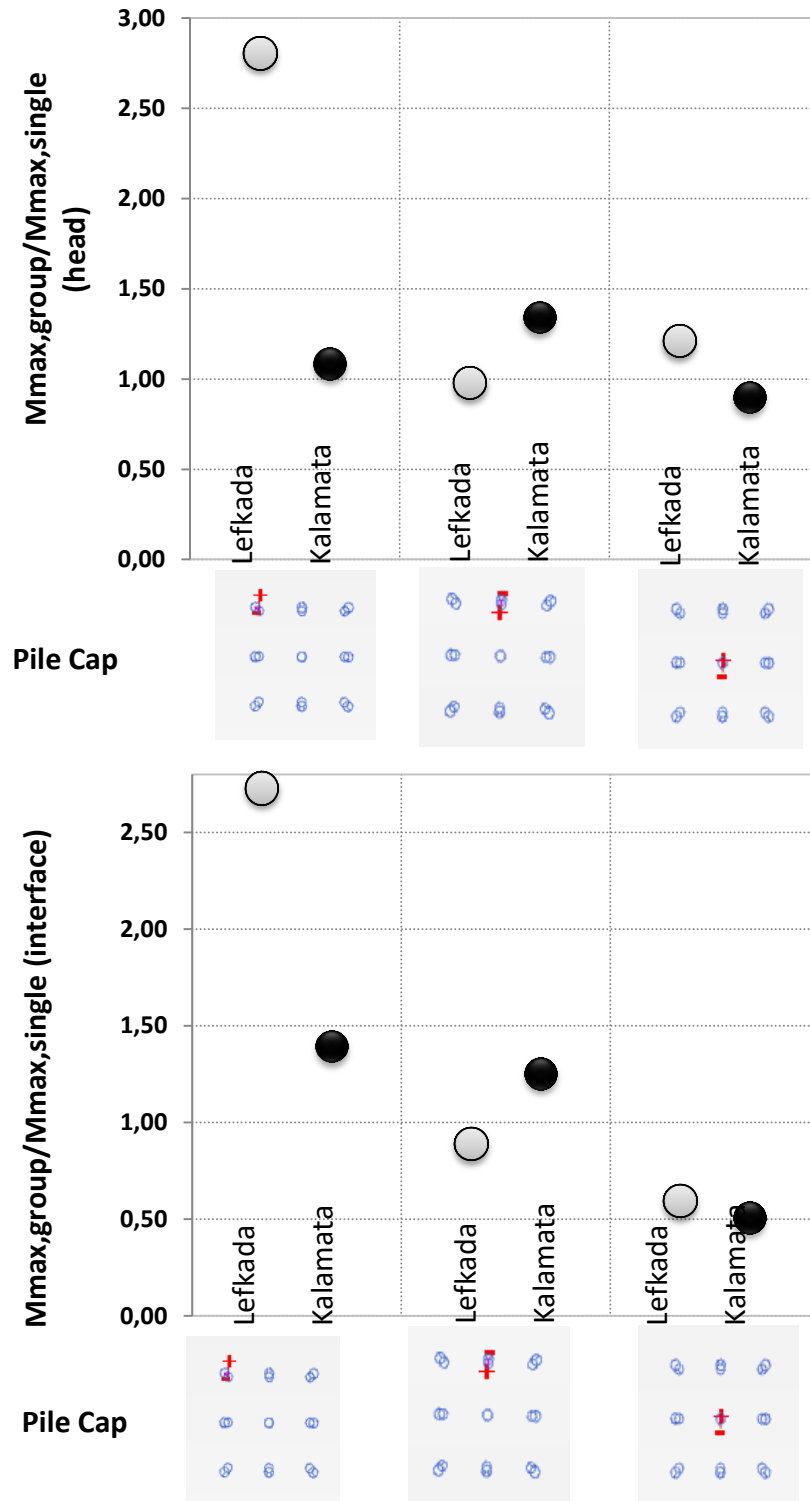
Εικόνα 5.33 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$, $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ και $V_{s1}/V_{s2}=1/5$ διάταξης ομάδας 2x2 και 3x3 για εξωτερικό ακριανό και κεντρικό πάσσαλο με κανονικοποιημένη ροπή ως προς εκείνη του μονού πασσάλου, για την ροπή στην κεφαλή και την διεπιφάνεια και για αποστάσεις 5d και 2d για την περίπτωση κεφαλόδεσμου.



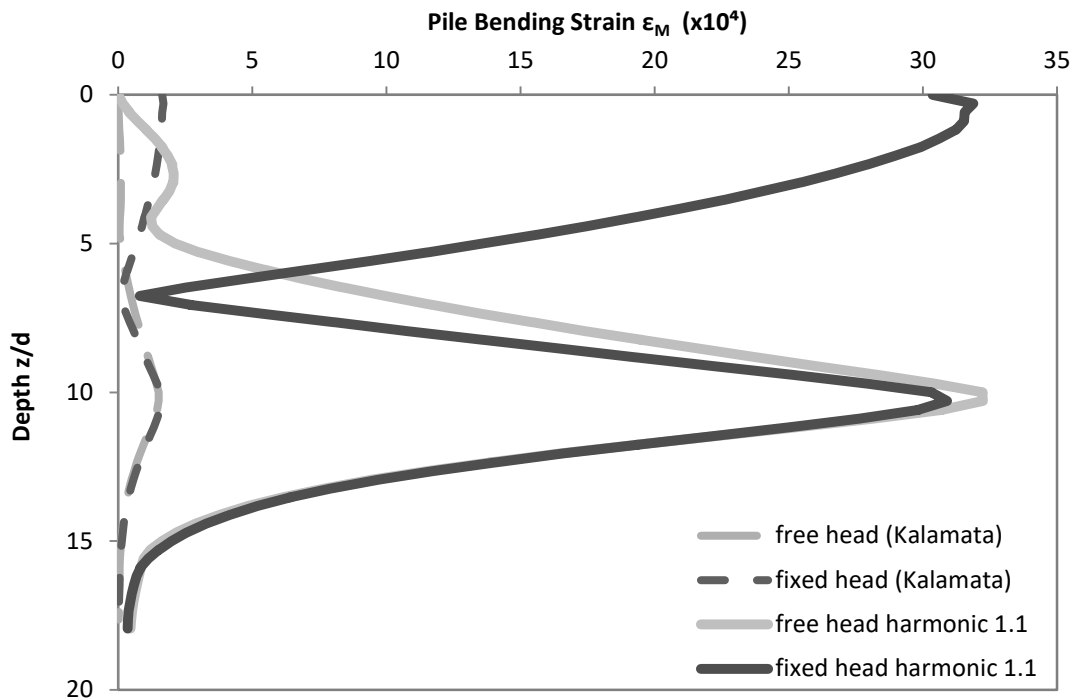
Εικόνα 5.34 Συγκεντρικά αποτελέσματα δίστρωτου εδάφους με λόγο ταχυτήτων $V_{s1}/V_{s2}=1/10$, $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ και $V_{s1}/V_{s2}=1/5$ διάταξης ομάδας 2×2 και 3×3 για εξωτερικό ακριανό και κεντρικό πάσσαλο με κανονικοποιημένη ροπή ως προς εκείνη του μονού πασσάλου, για την ροπή στην διεπιφάνεια και για αποστάσεις $5d$ και $2d$ για την περίπτωση στρεπτής κεφαλής.



Εικόνα 5.35: Αποτελέσματα αναλύσεων για πραγματικό σεισμό, για ομάδα πασσάλων 3x3, αποστάσεις μεταξύ τους ίσες με 5d και λόγο ταχυτήτων δίστρωτου εδάφους $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ (άστρεπτη κεφαλή). Η ροπή είναι κανονικοποιημένη ως προς την αντίστοιχη του μονού πασσάλου, τόσο για την κεφαλή, όσο και για τη διεπιφάνεια



Εικόνα 5.36: Αποτελέσματα αναλύσεων για πραγματικό σεισμό, για ομάδα πασσάλων 3x3, αποστάσεις μεταξύ τους ίσες με 5d και λόγο ταχυτήτων δίστρωτου εδάφους $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ (κεφαλόδεσμος). Η ροπή είναι κανονικοποιημένη ως προς την αντίστοιχη του μονού πασσάλου, τόσο για την κεφαλή, όσο και για τη διεπιφάνεια



Εικόνα 5.37: Παραμόρφωση που αναπτύσσεται σε μονούς πασσάλους λόγω σεισμού σε σύγκριση με την παραμόρφωση του ακριανού πασσάλου ομάδας 3x3 στο συντονισμό, για την περίπτωση δίστρωτου εδάφους με $V_{s1}/V_{s2}=1/4$.

3x3	1.1 fixed	1.1 pile cap	1.1 fixed	1.1 pile cap
M_{group}/M_{single}	<u>Lefkada 2003</u>		<u>Kalamata 1986</u>	
head	0,94	2,81	0,74	1,09
Interface	1,07	2,73	1,18	1,39

3x3	1.2 fixed	1.2 pile cap	1.2 fixed	1.2 pile cap
M_{group}/M_{single}	<u>Lefkada 2003</u>		<u>Kalamata 1986</u>	
head	0,77	0,98	1,71	1,34
Interface	0,76	0,89	2,19	1,25

3x3	2.2 fixed	2.2 pile cap	2.2 fixed	2.2 pile cap
M_{group}/M_{single}	<u>Lefkada 2003</u>		<u>Kalamata 1986</u>	
head	0,74	1,21	0,75	0,90
Interface	0,79	0,59	0,82	0,51

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα αναλύσεων για πραγματικό σεισμό, για ομάδα πασσάλων 3x3, αποστάσεις μεταξύ τους ίσες με 5d και λόγο ταχυτήτων δίστρωτου εδάφους $V_{s1}/V_{s2}=1/4$ (κεφαλόδεσμος). Η ροπή είναι κανονικοποιημένη ως προς την αντίστοιχη του μονού πασσάλου, τόσο για την κεφαλή, όσο και για τη διεπιφάνεια

6 Σύνοψη- Προτάσεις για Περεταίρω Διερεύνηση

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, εξάγονται κάποια συμπεράσματα σχετικά με τα φαινόμενα που εξετάστηκαν. Ωστόσο η πολυπλοκότητα των φαινομένων αυτών και το περιορισμένο εύρος μελέτης της παρούσης εργασίας, καθιστούν αναγκαία την περεταίρω διερεύνηση. Επομένως, στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται η συνοπτική καταγραφή των συμπερασμάτων, καθώς και οι προτάσεις για μελλοντική εμβάθυνση.

Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 3 αποδείχθηκε πως το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS© παρέχει τη δυνατότητα ορθής προσομοίωσης της απόκρισης εδαφικής στήλης σε διάδοση μονοδιάστατου κύματος S και P. Αυτό έγινε μέσω της πολύ καλής προσέγγισης των διαγραμμάτων εδαφικής ενίσχυσης των αναλύσεων με εκείνα της βιβλιογραφίας.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται εμβάθυνση στην απόκριση μονού πασσάλου υπό αρμονική διέγερση για διαφορετικές περιπτώσεις διαφοράς δυσστησίας των διαδοχικών εδαφικών στρωμάτων. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που διεξήχθησαν μέσω PLAXIS© συγκρίθηκαν με εκείνα των Nikolaou & Gazetas (BDWF) και των Di Laora, Mandolini & Mylonakis (FEM). Παρατηρήθηκε ταύτιση στη μορφή των διαγραμμάτων ανηγμένης παραμόρφωσης καθ' ύψος του πασσάλου των δύο μεθόδων (FEM-PLAXIS© & BDWF). Οι τιμές και των τριών προτεινόμενων σχέσεων παρουσίασαν αποδεκτή απόκλιση για λόγο $V_{s1}/V_{s2} = 1/10$ και $1/4$, με την Eqn2 να είναι πιο κοντά στις αναλύσεις μέσω PLAXIS©. Αντίθετα με τη μείωση της διαφοράς της δυσστησίας σε λόγο $V_{s1}/V_{s2} = 1/2$, η απόκλιση αυξήθηκε αρκετά, επομένως προτείνεται η αποφυγή της χρήσης των σχέσεων για το συγκεκριμένο εδαφικό προφίλ. Τέλος, παρατηρήθηκε η αναμενόμενη συμπεριφορά του μονού πασσάλου, με ανάπτυξη μεγαλύτερης κινηματικής ροπής στη διεπιφάνεια όσο αυξάνεται η δυσκαμψία της υποκείμενης στρώσης του δίστρωτου εδάφους.

Όσον αφορά το Κεφάλαιο 5, τα συμπεράσματα διαχωρίζονται σε κατηγορίες, απομονώνοντας κάθε φορά διαφορετική παράμετρο για την εξέταση της επίδρασης που αυτή έχει στην κινηματική ροπή που αναπτύσσεται σε μία ομάδα πασσάλων. Έτσι, προκύπτει:

- Σύγκριση ως προς την αύξηση της δυσκαμψίας της υποκείμενης εδαφικής στρώσης: Παρατηρήθηκε πως η αύξηση αυτή εντείνει το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης για μείωση του λόγου ταχυτήτων από $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$ σε $1/10$. Ωστόσο αυτός ο κανόνας δεν μπορεί να εφαρμοσθεί για μείωση του λόγου από

$V_{s1}/V_{s2} = 1/2$ σε $1/4$, πιθανώς λόγω δευτερευόντων παραγόντων που είναι αρκετά περίπλοκο να εκτιμηθούν, όπως είναι η ανάκλαση κυμάτων μεταξύ των πασσάλων.

- Σύγκριση ως προς τη θέση του πασσάλου (3x3 4x4): Παρατηρήθηκε η αναμενόμενη από τη θεωρία σταδιακή μείωση της ροπής όσο πιο εσωτερικά στην ομάδα βρίσκεται ο πάσσαλος. Αξίζει να αναφερθεί πως η αλλαγή της θέσης επιδρά εντονότερα στον πυκνότερο κάρναβο και για την μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των πασσάλων. Στην διεπιφάνεια δεν εμφανίστηκε κάποια ακραία περίπτωση υπέρβασης του κανόνα αυτού, ενώ στην κεφαλή το φαινόμενο αντιστρέφεται. Αυτό οφείλεται στην μορφή της απόκρισης των εξωτερικών πασσάλων, οι οποίοι εμφανίζουν τοπικό μέγιστο αρκετά κάτω από την επιφάνεια, σε αντίθεση με τους εσωτερικούς πασσάλους, των οποίων η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους και ξεπερνά εκείνη των ακριανών. Ωστόσο οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων των εξωτερικών και εσωτερικών πασσάλων δεν συμβαίνουν απαραίτητα την ίδια χρονική στιγμή, επομένως δεν μπορεί να αιτιολογηθεί με σιγουριά η αλληλεπίδραση πασσάλου με πάσσαλο ως υπεύθυνη για το φαινόμενο αυτό.
- Σύγκριση ως προς αξονική απόσταση: Σε όλα τα διαγράμματα παρατηρήθηκε πως για αποστάσεις $5d$ μεταξύ των πασσάλων η απόκριση ξεπερνά την αντίστοιχη των πασσάλων που απέχουν $2d$. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, αφού όσο απομακρύνονται οι πάσσαλοι της ομάδας τόσο μειώνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ τους και τείνουν να συμπεριφερθούν σαν ανεξάρτητοι. Αξίζει να αναφερθεί πως για την περίπτωση $V_{s1}/V_{s2} = 1/10$ παρατηρήθηκε αύξηση της διαφοράς στην παραμόρφωση των περιπτώσεων $5d$ και $2d$ με ταυτόχρονη πύκνωση του κάρναβου από 3x3 σε 4x4.
- Σύγκριση ως προς μέγεθος ομάδας: Σε γενικές γραμμές φαίνεται πως όσο αυξάνεται το μέγεθος της ομάδας, τόσο μειώνεται η παραμόρφωση του πασσάλου συγκριτικά με εκείνη του μονού. Το συγκεκριμένο φαινόμενο παρατηρείται εντονότερα στην περίπτωση απόστασης $2d$ μεταξύ των πασσάλων. Παρ'όλα αυτά στην περίπτωση $V_{s1}/V_{s2} = 1/4$ κάτι τέτοιο δεν ισχύει για την ομάδα 4x4, αφού η τιμή της απόκρισης των πασσάλων της ομάδας εξισώνεται ή ξεπερνά την αντίστοιχη του μονού πασσάλου.
- Σύγκριση ως προς την απόκριση σε επιταχυνσιογράφημα: Όπως ήταν αναμενόμενο, η απόκριση ήταν της ίδιας μορφής ως προς την παραμόρφωση συναρτήσει του βάθους, αλλά σε πολύ μικρότερη κλίμακα. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός πως όλες οι προηγούμενες αρμονικές διεγέρσεις είχαν συχνότητα ίση με τη συχνότητα του συντονισμού του εδάφους. Αξίζει να αναφερθεί πως και στα δύο επιταχυνσιογραφήματα παρουσιάστηκε το φαινόμενο κάποιος ακριανός πάσσαλος να παρουσιάζει έως και 2,8 φορές αύξηση της ροπής σε σχέση με το μονό. Η συγκεκριμένη παρατήρηση αφορά τον πάσσαλο 1.2 για το επιταχυνσιογράφημα της Καλαμάτας (1986) και για

άστρεπτη κεφαλή, και τον πάσσαλο 1.1 για το επιταχυνσιογράφημα της Λευκάδας (2003) για κεφαλόδεσμο. Ταυτόχρονα, σε όλες τις περιπτώσεις, οι εσωτερικοί πάσσαλοι ανέπτυξαν μικρότερη ροπή σε σχέση με τον αντίστοιχο μονό. Η συγκεκριμένη παρατήρηση αφορά τον πάσσαλο 1.2 για το επιταχυνσιογράφημα της Καλαμάτας (1986) και για άστρεπτη κεφαλή, και τον πάσσαλο 1.1 για το επιταχυνσιογράφημα της Λευκάδας (2003) για κεφαλόδεσμο.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν, φαίνεται πως υπάρχουν παράγοντες που έχουν ως αποτέλεσμα την διαφοροποίηση κάποιων αναπτυσσόμενων αποκρίσεων από τις αναμενόμενες. Ενδιαφέρον θα είχε η διερεύνηση και κατηγοριοποίηση των παραγόντων αυτών με προσπάθεια ανάλυσης και καταγραφής των πολύπλοκων φαινομένων από τα οποία εξαρτώνται. Επιπλέον, η μελέτη της απόκρισης ομάδας πασσάλων θα μπορούσε να επεκταθεί και σε διατάξεις μεγαλύτερου πλήθους, όσο είναι υπολογιστικά εφικτό και χρηστικό. Ακόμη, κάποιες παράμετροι η επίδραση των οποίων δεν εξετάσθηκε εδώ είναι το βάθος της διεπιφάνειας των δύο στρώσεων, η αλλαγή των διαστάσεων των πασσάλων (μήκος, διάμετρος) και η αλλαγή του λόγου των μέτρων ελαστικότητας πασσάλου και περιβάλλοντος εδάφους. Υπενθυμίζεται πως οι αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία που διεξήχθησαν για τη συγκεκριμένη εργασία αφορούν ελαστική συμπεριφορά στοιχείων και υλικών, επομένως ενδιαφέρον θα είχε η αντίστοιχη μελέτη με μη γραμμική συμπεριφορά. Τέλος, η απόκριση των πασσάλων ομάδας μπορεί να συγκριθεί με εκτιμήσεις πρόσφατων δημοσιεύσεων, όπως εκείνη των Dezi & Roulos (2016), οι οποία προτείνει απλοποιημένη σχέση για την εκτίμηση της κινηματικής ροπής λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση των πασσάλων ομάδας (βλ. Βιβλιογραφική αναφορά).

Βιβλιογραφία

- Anagnostopoulos, G., & Papadopoulos, P. (2011). *Επιφανειακές Θεμελιώσεις και Θεμελιώσεις με Πασσάλους*.
- Blaney, Kausel, & Roesset. (1976). Dynamic Stiffness of Piles.
- Dezi, F., & Poulos, H. (2016, August). Kinematic Bending Moments in Square Pile Groups. *International Journal of Geomechanics*.
- Di Laora, R., Mandolini, A., & Mylonakis, G. (2012). Insight on kinematic bending of flexible piles in layered soil. *Elsevier*.
- Di Laora, R., Mandolini, A., & Mylonakis, G. (2013, March). Pile-head kinematic bending in layered soil. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42, 319-337.
- Drosos, V., Gerolymos, N., & Gazetas, G. (2012). Constitutive model for soil amplification of ground shaking: Parameter calibration, comparisons, validation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 42.
- Gazetas, G. (1984, April). Seismic response of end-bearing piles. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Gazetas, G. (2007). *Εδαφοδυναμική*.
- Gerolymos, N., & Gazetas, G. (2008). Κινηματική Επιπόνηση Πασσάλου: Η Μέθοδος των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, Neural Network Analysis of Pile–Soil Kinematic Interaction.
- Katsikadelis, J. (2012). *BOUNDARY ELEMENTS. Theory and Applications*.
- Kramer. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*.
- Maiorano, R., De Sanctis, L., Aversa, S., & Mandolini, A. (2009). A kinematic response analysis of piled foundations under seismic excitation. *Canadian Geotechnical*.
- Mamoon, S., & Banerjee, P. (1990). Response of Piles and Pile Groups to Traveling SH-waves.
- Mizuno, H. (1987). Pile damage during earthquakes in Japan (1923- 1983).
- Mylonakis, G. (2001, August). Simplified Model for Seismic Pile Bending at Soil-Layer Interfaces. *Soils And Foundations*, 41(4), 47-58.

- Nikolaou, A., & Gazetas, G. (1997). Seismic design procedure for kinematically stressed piles.
- Nikolaou, S., Mylonakis, G., Gazetas, G., & Tazoh, T. (2001). Kinematic pile bending during earthquakes: analysis and field measurements. *Geotechnique*.
- PLAXIS TUTORIAL Scientific Manual.
- R. Dorby, M. J. (1983). Seismic Responce of End- Bearing Piles.
- Sica, S., Mylonakis, G., & Simonelli, A. L. (2011). Transient kinematic pile bending in two layer soil.
- Tazoh T., K. S. (1987). Seismic Observations and Analysis of Grouped Piles.
- Αγιουτάντης, Ζ. (2002). *Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων*. Αθήνα: Ίων.
- Αλεξούλη- Λειβαδίτη, Α. (2008). *Γενική γεωλογία: Στοιχεία Δυναμικής και Τεκτονικής Γεωλογίας*.
- Βαλαλάς, Δ. (1981). *Εδαφομηχανική*. Θεσσαλονίκη: Αφοι Κυριακίδη.
- Καλογήρου, Ε. (2003). *Παραμετρική Ανάλυση Ευστάθειας Εδαφικών Πρανών με τη Μεθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων*. Χανιά: Μεταπτυχιακή εργασία.
- Mylonakis, G. (2001). Simplified model for seismic pile bending at soil layer interfaces.