

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Γεωτεχνικής



National Technical University of Athens  
School of Civil Engineering  
Geotechnical Department

Διπλωματική Εργασία

**ΙΩΑΝΝΗ ΡΑΔΙΜΑ**

Επιβλέπων Καθηγητής

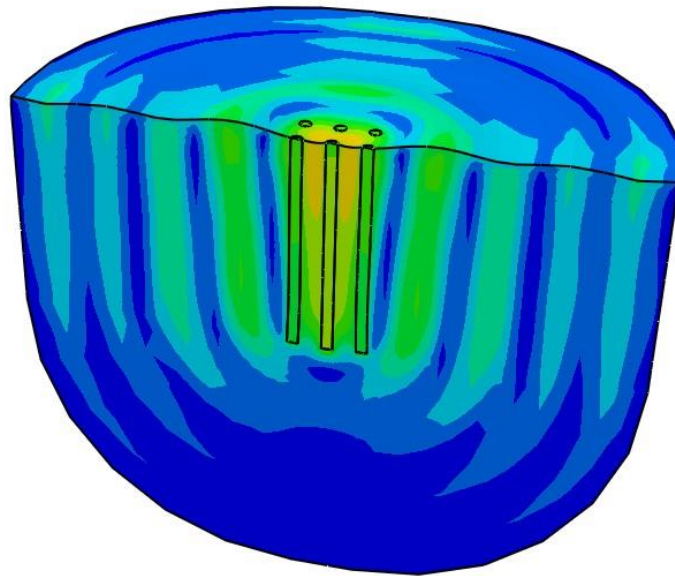
Γ. Γκαζέτας

---

**ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΣΣΑΛΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΠΑΣΣΑΛΟΥ ΚΑΙ**

**ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΟΜΑΔΑΣ ΠΑΣΣΑΛΩΝ**

---



---

**NON LINEAR PILE SOIL PILE INTERACTION AND**

**PILE GROUP DYNAMIC BEHAVIOR**

---

Diploma Thesis

**JOANI RADHIMA**

Supervised by

G. Gazetas

Αθήνα, Νοέμβριος 2018



*Στην μητέρα μου, Αλκέτα,  
την οποία ελπίζω να πάψω να  
βασανίζω στο εγγύς μέλλον*



## Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία σηματοδοτεί το τέλος ενός μεγάλου κεφαλαίου στην μέχρι τώρα ζωή μου, το κεφάλαιο των προπτυχιακών σπουδών μου στο ίδρυμα αυτό. Το κεφάλαιο αυτό ξεκίνησε με τους καλύτερους οιωνούς, συνεχίστηκε με φουρτούνες όμως τελικά ολοκληρώθηκε επιτυχώς. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω ορισμένα άτομα που έπαιξαν σπουδαίο ρόλο και βοήθησαν ιδιαίτερα στην επιτυχή κατάληξή του.

Αρχικά, τον καθηγητή μου κ. Γεώργιο Γκαζέτα, ο οποίος υπήρξε ένας από τους σημαντικούς λόγους της επιτυχούς αυτής κατάληξης. Ο ιδιαίτερος τρόπος με τον οποίο προσπαθεί να μεταδώσει την γνώση του στους φοιτητές και να δημιουργήσει κριτική σκέψη μηχανικού, το γεγονός πως δεν αρκείται στην διδασκαλία την ύλης αλλά αποζητά την πραγματική κατανόηση των φαινομένων, υπήρξαν έναυσμα για εμένα ώστε να αγαπήσω την σχολή, κάτι που δεν είχε συμβεί «με την πρώτη ματιά».

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την συνεργάτιδα του κ. Γκαζέτα, Ευαγγελία Γαρίνη, για την στήριξη που προσέφερε και την υπομονή που έδειξε, όλες τις φορές που ήθελα να μοιραστώ τους προβληματισμούς μου σχετικά με την διπλωματική εργασία. Η ύπαρξη ενός ατόμου πρόθυμου να ακούσει και να παρακολουθήσει τους προβληματισμούς μου, οδήγησε στην επίλυση πολλών εξ' αυτών και η βοήθειά της ήταν πολύτιμη. Επιπρόσθετα, σημαντική βοήθεια προσέφερε και η υπόλοιπη ερευνητική ομάδα του κ. Γκαζέτα σε θέματα που είχαν να κάνουν με την εκμάθηση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων και λοιπές τεχνικές δυσκολίες, η περάτωση της διπλωματικής χωρίς την βοήθειά τους θα ήταν αδύνατη.

Σημαντικό ρόλο στις σπουδές μου είχαν και διάφορα άτομα που γνώρισα στην σχολή, τους οποίους θεωρώ φίλους μου και στο εγγύς μέλλον θα ονομάζω και συναδέλφους. Αυτοί είναι οι Αλέξανδρος Μεντεκίδης, Φιλάρετος Φιλαρέτου, Γιώργος Τσιαλιαμάνης και Νεκτάριος Χνάρης. Η γνωριμία μου μαζί τους και οι συζητήσεις που κάναμε, με τον έναν ή με τον άλλο τρόπο με οδήγησαν στο συμπέρασμα πως από την στιγμή που βρίσκομαι σε αυτό το ίδρυμα, δεν υπάρχει όριο σε όσα θέλω να πετύχω στην ζωή μου, εκτός μόνο από την ίδια την θέλησή μου να τα πετύχω.

Δεν γίνεται φυσικά να μην αναφέρω τον στενό μου φίλο Ανδρέα Δελέγκο, με τον οποίο γνωριζόμαστε από τριών ετών. Με το πέρασμα του χρόνου η σχέση μας έχει περάσει από διάφορα στάδια, όμως έχει καταλήξει σε μια ισχυρή φιλία η οποία βασίζεται σε πραγματικό ενδιαφέρον μεταξύ φίλων, κάτι που σπανίζει.

Ξεχωριστή θέση στις ευχαριστίες έχει η κοπέλα μου, Ελένη Στάικου, η οποία έχει υπάρξει τρομερή βοήθεια για εμένα σε αυτά τα χρόνια. Έχει σταθεί δίπλα μου σε πολλές δυσκολίες, έχει βάλει το εμείς πάνω από το εγώ και το σημαντικότερο είναι πως για αυτήν αυτό δεν είναι δύσκολο.

Κλείνοντας, οι σημαντικότερες ευχαριστίες αποδίδονται στο άτομο που προσέφερε την μεγαλύτερη βοήθεια, που χάραξε την πορεία μου σε κάθε στάδιο της ζωής μου με γνώμονα το καλό μου, την μητέρα μου. Χωρίς αυτήν σίγουρα δεν θα έφτανα εδώ και η ευγνωμοσύνη που νιώθω είναι αδύνατο να αποδοθεί με λόγια.

## Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ πασσάλων υπό στατική και δυναμική φόρτιση, με μη-γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας.

Συγκεκριμένα, έγιναν αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία και εξετάστηκε το πρόβλημα υπό κατακόρυφη και οριζόντια φόρτιση πασσάλου. Εξήχθησαν αποτελέσματα με την μορφή διαγραμμάτων που παρουσιάζουν την εξέλιξη της αλληλεπίδρασης συναρτήσει της μετακίνησης του πασσάλου-πηγής, της συχνότητας διέγερσης και του επιβαλλόμενου φορτίου. Επίσης έγιναν αναλύσεις στατικής και δυναμικής διέγερσης σε μια ομάδα πασσάλων  $3 \times 3$ , ώστε να μελετηθεί η πραγματική συμπεριφορά της για μη-γραμμικές συνθήκες και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών μαζί με τους βρόγχους υστέρησης, που αποκωδικοποιούν την συμπεριφορά της θεμελίωσης σε πιο γενικό επίπεδο.

Τα αποτελέσματα της διπλωματικής αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την ποιοτική εξήγηση της συμπεριφοράς παρόμοιων συστημάτων, την επίδραση της μη-γραμμικότητας σε διάφορα είδη φόρτισης και την μελέτη φαινομένων κυματικής διάδοσης στο έδαφος.

**Λέξεις Κλειδιά:** Αλληλεπίδραση Πασσάλου-Εδάφους-Πασσάλου, Αλληλεπίδραση Εδάφους-κατασκευής, Δυναμική Διέγερση, Κυματική Διάδοση, Εδαφοδυναμική, Εδαφομηχανική, Μη-Γραμμική Συμπεριφορά Εδάφους, Μη-Γραμμική Γεωμετρία, Πεπερασμένα Στοιχεία





## Abstract

The scope of this thesis was the analysis of interaction effects on piles, under dynamic and static loading, incorporating non-linearity in material behavior and geometry.

Specifically, analyses were made using the finite element method and the problem was studied under vertical and horizontal loading. The results obtained are presented in form of diagrams, in regards to the level of the source-pile deflection, its load level and the frequency of the excitation imposed on said pile. In addition, static and dynamic analyses of a  $3 \times 3$  pile group were done, in order to study the true behavior of pile groups, incorporating material and geometry non-linearity and the results of these analyses were presented together with the F-y curves, which decode the foundation behavior on a more general level.

The results of this thesis are useful tools in the qualitative study of similar systems, the effects of non-linearity on several types of loading and the study of wave propagation phenomena in soils.

**Keywords:** Pile-Soil-Pile Interaction, Soil-Structure Interaction, Dynamic Excitation, Wave Propagation, Soil Dynamics, Soil Mechanics, Non-Linear Soil Behavior, Geometric Non-Linearity, Finite Elements



## Πίνακας περιεχομένων

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1	Θεμελιώσεις με Πασσάλους.....	1
1.2	Μη-Γραμμική Αλληλεπίδραση ΠΕΠ.....	2
1.3	Οργάνωση κειμένου .....	2
<b>2</b>	<b>Σχετική Βιβλιογραφία .....</b>	<b>4</b>
2.1	Απόκριση Πασσάλου σε Επιβολή Φορτίου .....	4
2.1.1	Καμπύλες $p$ - $y$ .....	4
2.1.2	Θεωρία Ελαστικότητας.....	5
2.1.3	Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων .....	6
2.2	Αλληλεπίδραση ΠΕΠ.....	6
2.2.1	Στατικά Φορτία.....	6
2.2.2	Δυναμικά Φορτία .....	7
2.3	ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	9
<b>3</b>	<b>Προσομοίωση και Μεθοδολογία.....</b>	<b>11</b>
3.1	Προσομοίωση μέσω Πεπερασμένων Στοιχείων .....	11
3.1.1	Προσομοίωμα Ανάλυσης Κατακόρυφων Φορτίων.....	12
3.1.2	Προσομοίωμα Ανάλυσης Οριζοντίων Φορτίων .....	12
3.1.3	Προσομοίωμα Ανάλυσης Ομάδας Πασσάλων $3 \times 3$ .....	13
3.1.4	Αξιοπιστία Προσομοιωμάτων.....	13
3.2	Καταστατικά Προσομοιώματα.....	14
3.2.1	Καταστατικό Προσομοίωμα Εδάφους .....	14
3.2.2	Καταστατικό Προσομοίωμα Πασσάλου.....	16
3.2.3	Καταστατικό Προσομοίωμα Διεπιφάνειας .....	16
3.2.4	Απόσβεση Rayleigh .....	17

3.3	Μεθοδολογία Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης ΠΕΠ.....	17
3.3.1	Μη Γραμμικός Συντελεστής Αλληλεπίδρασης.....	17
3.3.2	Στατικά Φορτία.....	18
3.3.3	Δυναμικά Φορτία .....	19
3.3.4	Ομάδα Πασσάλων .....	21
3.4	ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	23
<b>4</b>	<b>Κατακόρυφη Αλληλεπίδραση.....</b>	<b>32</b>
4.1	Στατική Αλληλεπίδραση.....	32
4.1.1	Συμπεριφορά Πασσάλου Υπό Αξονικό Φορτίο .....	32
4.1.2	Αλληλεπίδραση Πασσάλου Εδάφους.....	34
4.1.3	Επιρροή Παθητικών Πασσάλων .....	36
4.2	Δυναμική Αλληλεπίδραση .....	36
4.2.1	Συντελεστές Αλληλεπίδρασης.....	36
4.2.2	Καμπύλες F-δ.....	38
4.3	ΣΧΗΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	40
4.4	ΣΧΗΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....	51
<b>5</b>	<b>Οριζόντια Αλληλεπίδραση.....</b>	<b>58</b>
5.1	Στατική Αλληλεπίδραση.....	58
5.1.1	Συμπεριφορά Πασσάλου Υπό Οριζόντιο Φορτίο .....	58
5.1.2	Οριζόντια Αλληλεπίδραση.....	60
5.1.3	Επιρροή Παθητικών Πασσάλων .....	62
5.2	Δυναμική Αλληλεπίδραση .....	63
5.2.1	Συντελεστές Αλληλεπίδρασης.....	63
5.2.2	Καμπύλες F-δ.....	66
5.3	ΣΧΗΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	69
5.4	ΣΧΗΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....	88
<b>6</b>	<b>Στιβαρότητα Ομάδας Πασσάλων.....</b>	<b>98</b>
6.1	Κατακόρυφη Σύνθετη Στιβαρότητα .....	98

6.2	Οριζόντια Σύνθετη Στιβαρότητα .....	103
6.3	ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΣΤΙΒΑΡΟΤΗΤΑΣ.....	106
6.4	ΣΧΗΜΑΤΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΣΤΙΒΑΡΟΤΗΤΑΣ .....	124
	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>140</b>



# 1

## *Εισαγωγή*

### *1.1 Θεμελιώσεις με Πασσάλους*

Η χρήση πασσάλων για θεμελίωση υποδομών είναι μια πρακτική με μακρά ιστορία εφαρμογής. Αρχικός στόχος στην χρήση των πασσάλων ήταν η παράκαμψη πτωχών επιφανειακών εδαφικών στρώσεων και η μεταφορά των κατακόρυφων φορτίων σε υποκείμενα εδάφη με καλύτερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Με την πάροδο των ετών η εφαρμογή τους επεκτάθηκε και σε περιπτώσεις εδαφών με υψηλή αντοχή – ακόμα και βραχωδών - όπου κύριος στόχος ήταν η παραλαβή μεγάλων ροπών από υψίκορμες κατασκευές, όπως βάθρα γεφυρών και υψηλών κτηρίων. Σήμερα οι θεμελιώσεις με πασσάλους βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε έργα υποδομών και αποτελούν μια κοινή εναλλακτική στην συνήθη επιφανειακή θεμελίωση. Εκτός από την ασυνήθιστη περίπτωση της θεμελίωσης με έναν μόνο πάσσαλο, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων θεμελιώσεις τέτοιου τύπου αποτελούνται από πολλούς πασσάλους, συνδεδεμένους μονολιθικά στην κεφαλή τους με ένα σώμα σκυροδέματος ικανών διαστάσεων ώστε να χαρακτηριστεί άκαμπτο και να προσφέρει λειτουργία διαφράγματος, την κεφαλοδοκό.

Λόγω της φύσης του εδάφους ως συνεχούς μέσου, οι παραμορφώσεις και οι εντάσεις που ασκούνται σε μια του θέση μεταφέρονται και σε γειτονικές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η λειτουργία της ομάδας πασσάλων να επιδεικνύει ιδιαίτερη συμπεριφορά, αφού ο κάθε πάσσαλος αλληλοεπιδρά και επηρεάζει τους γειτονικούς του. Επομένως για τις ομάδες δεν αρκεί η μελέτη του μεμονωμένου πασσάλου και εν

συνεχία ο σχεδιασμός της θεμελίωσης αλλά απαιτείται και μελέτη των επιπρόσθετων φαινομένων αλληλεπίδρασης στο σύστημα Πασσάλου-Εδάφους-Πασσάλου (ΠΕΠ), ώστε να είναι δυνατή η επιτυχής πρόβλεψη της συμπεριφοράς της θεμελίωσης στις στατικές και δυναμικές φορτίσεις που θα κληθεί να παραλάβει.

## **1.2 Μη-Γραμμική Αλληλεπίδραση ΠΕΠ**

Στην παρούσα διπλωματική θα αναλυθεί η στατική και δυναμική αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους-πασσάλου με μη-γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας. Θα πραγματοποιηθούν στατικές και δυναμικές αναλύσεις όπου θα μελετηθεί η μετάδοση παραμορφώσεων από τον φορτιζόμενο πάσσαλο στο περιβάλλον έδαφος, η επίδραση της ύπαρξης παθητικών πασσάλων στο πεδίο των παραμορφώσεων καθώς και η επίδραση της αλληλεπίδρασης στην συμπεριφορά μιας ομάδας πασσάλων  $3 \times 3$ .

## **1.3 Οργάνωση κειμένου**

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο του παρόντος τεύχους παρουσιάζεται περιληπτικά η -σχετική με το θέμα της διπλωματικής- βιβλιογραφία και οι βασικές έννοιες που θα αναλυθούν. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν, τα καταστατικά προσομοιώματα, η βασικές μεθοδολογίες και λοιπές πληροφορίες σχετικά με την διπλωματική. Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η κατακόρυφη αλληλεπίδραση, στατική και δυναμική. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η οριζόντια αλληλεπίδραση, στατική και δυναμική. Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύεται η κατακόρυφη και οριζόντια συμπεριφορά μιας ομάδας πασσάλων  $3 \times 3$ .



# 2

## Σχετική Βιβλιογραφία

### 2.1 Απόκριση Πασσάλου σε Επιβολή Φορτίου

Η μελέτη της αλληλεπίδρασης των πασσάλων προϋποθέτει την γνώση της απόκρισης τους σε εξωτερικά φορτία. Τρεις είναι οι κύριες θεματικές περιοχές για την ανάλυση της απόκρισης αυτής

1. Ανάλυση με χρήση καμπύλων  $p-y$
2. Ανάλυση με χρήση Θεωρίας Ελαστικότητας
3. Ανάλυση με χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

#### 2.1.1 Καμπύλες $p-y$

Σύμφωνα με αυτή την θεωρία, το έδαφος μπορεί να αντικατασταθεί από μια σειρά ελατηρίων Winkler, τα οποία διέπονται από μια σχέση Δύναμης-Μετακίνησης. Ο πάσσαλος διακριτοποιείται σε μικρότερα μέρη και τέτοια ελατήρια απλώνονται κατά μήκος του πασσάλου (Εικόνα 2) και με χρήση αριθμητικών μεθόδων πεπερασμένων διαφορών είναι δυνατή η προσομοίωση της συμπεριφοράς του μεμονωμένου πασσάλου.

Αν και η μέθοδος αυτή βασίζεται σε αρκετές και σημαντικές απλουστεύσεις, όσον αφορά την συμπεριφορά του εδάφους, βρίσκει ακόμα ευρεία εφαρμογή. Βασικά πλεονεκτήματά της είναι τα παρακάτω:

1. Η χρήση της είναι αρκετά απλή και μπορεί να ενσωματωθεί με ευκολία στους εμπορικούς κώδικες ανάλυσης.

2. Η μακρά ιστορία εφαρμογής της σε τεχνικά έργα έχει ως αποτέλεσμα πληθώρα επιστημονικών εργασιών και δοκιμών πεδίου, οδηγώντας σε αξιόπιστα αποτελέσματα.
3. Μπορεί να ενσωματώσει πολύ εύκολα στις καμπύλες  $p-y$  μη-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους ή αποκόλληση στην διεπιφάνεια πασσάλου εδάφους.
4. Το χαμηλό υπολογιστικό κόστος.

Παρόλα αυτά, η βασική παραδοχή της μεθόδου, η αντικατάσταση του εδάφους από ανεξάρτητα ελατήρια Winkler οδηγεί στην αδυναμία της να προσομοιώσει σωστά την αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων. Αν και έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, βασίζονται σε εμπειρικές κυρίως μεθόδους.

#### 2.1.2 Θεωρία Ελαστικότητας

Η χρήση της θεωρίας ελαστικότητας για την ανάλυση της απόκρισης του πασσάλου βασίζεται στην εργασία του **Mindlin** (1936) και την εφαρμογή της σε ένα διακριτοποιημένο σύστημα πασσάλου-εδάφους. Η μέθοδος βασίζεται στην διακριτοποίηση του πασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους και τον συσχετισμό των δυνάμεων και των μετακινήσεων σε κάθε τμήμα, μέσω των σχέσεων του Mindlin. Στην συνέχεια, επιβάλλεται το συμβιβαστό των παραμορφώσεων και προκύπτει ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, η λύση του οποίου οδηγεί στις τιμές των δυνάμεων και των μετακινήσεων σε κάθε θέση του πασσάλου. Στην συνέχεια, μπορεί να γίνει χρήση των αποτελεσμάτων αυτών για να βρεθεί το παραμορφωσιακό πεδίο του εδάφους, με χρήση των ίδιων εξισώσεων. Σημαντική συνεισφορά στην μεθοδολογία αυτή είχαν οι επιστημονικές εργασίες των **Poulos & Davis** (1968), **Mattes & Poulos** (1969) και **Poulos & Mattes** (1969), μεταξύ αρκετών άλλων. Βασικές παραδοχές της μεθοδολογίας είναι η ελαστική συμπεριφορά πασσάλου, η θεώρηση του εδάφους ως γραμμικού ελαστικού ημιχώρου, η απουσία ολίσθησης και αποκόλλησης στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους αλλά και η απουσία έντασης στον πάσσαλο και το έδαφος ως αρχικές συνθήκες της ανάλυσης.

Με κατάλληλες τροποποιήσεις είναι δυνατό να αντιμετωπιστούν πολλές από τις δυσκολίες της μεθόδου και να ληφθούν υπόψιν φαινόμενα ολίσθησης, καθώς και πεπερασμένο εδαφικό στρώμα ή ακόμα και συμπεριφορά πασσάλου αιχμής.

### 2.1.3 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η χρήση των πεπερασμένων στοιχείων στην ανάλυση των πασσάλων έχει οδηγήσει στην μεγάλη αύξηση της γνώσης που υπάρχει για την συμπεριφορά τους υπό διάφορα είδη φόρτισης. Η ευκολία προσομοίωσης οποιασδήποτε γεωμετρίας αλλά και ενσωμάτωσης περίπλοκων φαινομένων όπως ανελαστική συμπεριφορά του εδάφους, ολίσθηση και αποκόλληση στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους, υδροστατικές πιέσεις και ανάλυση ενεργών τάσεων αλλά και δυναμικών φορτίσεων έχουν καταστήσει την μέθοδο αυτή βασικό εργαλείο στην έρευνα και την πρακτική της γεωτεχνικής. Η ανάλυση της μεθόδου ξεφεύγει αρκετά των στόχων της παρούσας διπλωματικής γι' αυτό και αμελείται.

## 2.2 Αλληλεπίδραση ΠΕΠ

Η αλληλεπίδραση μεταξύ πασσάλων μπορεί να χωριστεί σε δυο μεγάλες κατηγορίες με βάση τα δυο είδη φορτίσεων, στατικές και δυναμικές. Παρόλο που η στατική φόρτιση μπορεί να θεωρηθεί ως υποπερίπτωση της δυναμικής (για  $\omega \rightarrow 0$ ), η συμπεριφορά μεταξύ των δυο διαφέρει πολύ και είναι σκόπιμο να μελετηθούν ξεχωριστά.

### 2.2.1 Στατικά Φορτία

Βασική έννοια στην μελέτη αλληλεπίδρασης μεταξύ πασσάλων είναι ο συντελεστής αλληλεπίδρασης, έννοια που εισήχθη αρχικά από τον **Poulos** (1968) και αναλύεται σε μεγάλο βάθος από τους **Poulos & Davis** (1980) στο σχετικό βιβλίο.

Η μέθοδος βασίζεται στην προαναφερθείσα ανάλυση με χρήση της θεωρίας ελαστικότητας και ενός συστήματος δυο όμοιων πασσάλων, εκ των οποίων ο ένας θεωρείται ενεργός και ο άλλος ανενεργός. Με την επιβολή φορτίου  $F$  στον ενεργό πάσσαλο, αυτός λαμβάνει μια μετακίνηση  $d_{11}$  και δημιουργείται τριγύρω του ένα

εντατικό και παραμορφωσιακό πεδίο. Εφόσον ο ανενεργός πάσσαλος βρίσκεται εντός του πεδίου αυτού, θα υποστεί μια μετακίνηση  $d_{21}$  χωρίς να του έχει ασκηθεί φορτίο. Εάν στην συνέχεια ασκηθεί στον ανενεργό πάσσαλο το ίδιο φορτίο  $F$ , ο ίδιος θα υποστεί επιπρόσθετη μετακίνηση  $d_{22}$  και ο ενεργός πάσσαλος, ευρισκόμενος πλέον στο παραμορφωσιακό πεδίο του ανενεργού, θα υποστεί επιπλέον μετακίνηση  $d_{12}$ .

Ορίζεται λοιπόν ο συντελεστής αλληλεπίδρασης  $\alpha_{12} \equiv \frac{d_{21}}{d_{11}}$ , ο οποίος υποδηλώνει την επιπλέον μετακίνηση του πασσάλου (1) λόγω της φόρτισης του πασσάλου (2). Λόγω συμμετρίας και γραμμικής ελαστικότητας προκύπτει πως  $\alpha_{12} = \alpha_{21}$  και τελικά η συνολική μετακίνηση κάθε πασσάλου, για επιβολή κοινού φορτίου στον καθένα, θα είναι  $d_{total} = d_{11} \times (1 + \alpha_{12})$ .

Έχει αποδειχθεί πως στην πλειοψηφία των περιπτώσεων αυτή η ανάλυση δυο πασσάλων μπορεί να επεκταθεί και για ομάδες με πάνω από δυο πασσάλους, χωρίς απώλεια της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Ισχύει δηλαδή η επαλληλία των συντελεστών αλληλεπίδρασης δυο πασσάλων και σε ομάδες που μεταξύ τους παρεμβάλλονται και άλλοι πάσσαλοι. Συνεπώς αρκεί μονάχα η μελέτη της αλληλεπίδρασης δυο πασσάλων την φορά και η επαλληλία των αλληλεπιδράσεων, ώστε να μελετηθεί και να προβλεφθεί η συμπεριφορά μιας ομάδας με μεγαλύτερο αριθμό πασσάλων. Υπό στατικές φορτίσεις, οι συντελεστές αλληλεπίδρασης  $\alpha_{ij}$  είναι πάντοτε θετικοί και οδηγούν στην αύξηση των μετακινήσεων των πασσάλων και κατ' επέκταση, την μείωση της στιβαρότητας της θεμελίωσης.

### 2.2.2 Δυναμικά Φορτία

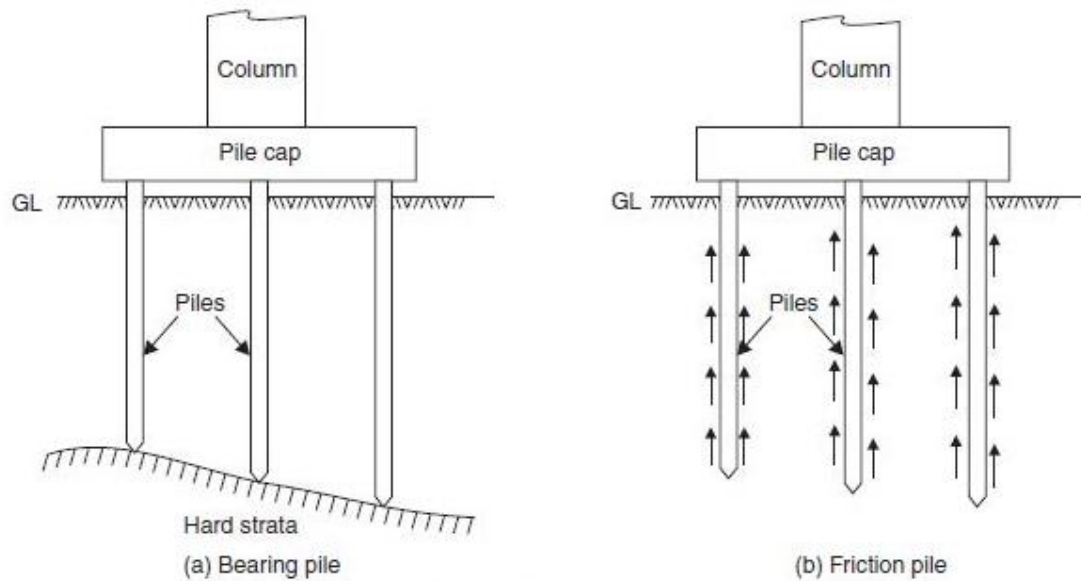
Υπό καθεστώδες δυναμικών φορτίσεων οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις στο έδαφος από την φόρτιση ενός πασσάλου παίρνουν την μορφή κυμάτων που εκπέμπονται από την περιφέρεια του πασσάλου. Καθώς λοιπόν τα σημεία της επιφάνειας του εδάφους ταλαντώνονται, ο λόγος  $\frac{d_{21}}{d_{11}}$  παύει να είναι πραγματικός θετικός αριθμός και μετατρέπεται σε μιγαδικό, αντιπροσωπεύοντας το μέτρο της αλληλεπίδρασης αλλά και την διαφορά φάσης ανάμεσα στον πάσσαλο (1) και τον πάσσαλο (2). Είναι λοιπόν

δυνατό η διαφορά φάσης να είναι τέτοια ώστε οι μετακίνηση της πηγής να είναι σε αντίθετη φάση με την μετακίνηση στην θέση του πασσάλου **(2)**, οδηγώντας σε ετερόσημες μετακινήσεις και «αρνητική» αλληλεπίδραση.

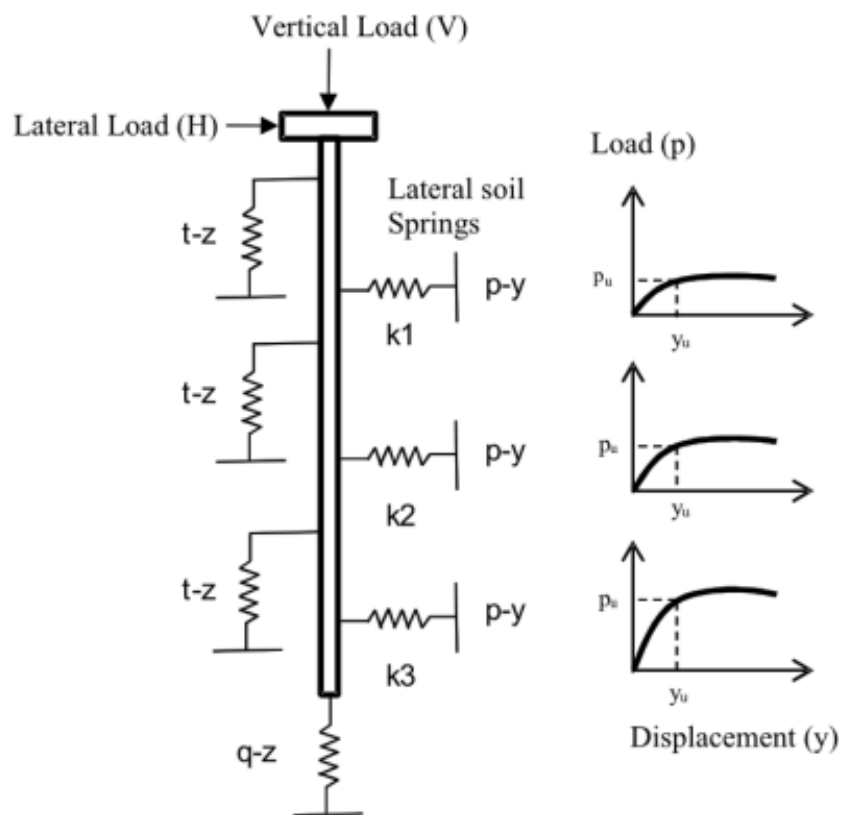
Ως αποτέλεσμα στην δυναμική φόρτιση η στιβαρότητα μιας θεμελίωσης με πασσάλους είναι συνάρτηση της διάταξης των πασσάλων και της συχνότητας της διέγερσης, μπορεί δε να λάβει τιμές αρκετά μεγαλύτερες της μονάδας λόγω των κυματικών αλληλεπιδράσεων αλλά και αδρανειακών δυνάμεων, καθώς και φαινομένων απόσβεσης ακτινοβολίας.

Εκτεταμένη έρευνα στο συγκεκριμένο τομέα έχει πραγματοποιηθεί από αρκετούς ερευνητές, ανάμεσά τους και τους **Kaynia & Kausel** (1982a και b), **Dobry & Gazetas** (1988), **Gazetas & Makris** (1991) και **Makris & Gazetas** (1992).

## 2.3 ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



Εικόνα 2.1 - Συνήθης μορφή και λειτουργία θεμελιώσεων με πασσάλους



Εικόνα 2.2- Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής μεθοδολογίας καμπύλων  $p-y$  για την ανάλυση της συμπεριφοράς ενός πασσάλου

# 3

## *Προσομοίωση και Μεθοδολογία*

Η μελέτη της μη-γραμμικής αλληλεπίδρασης ΠΕΠ πραγματοποιήθηκε μέσω αναλύσεων με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και συγκεκριμένα μέσω του εμπορικού κώδικα **ABAQUS**. Η ανάλυση έγινε στο πλαίσιο στατικών αλλά και δυναμικών φορτίσεων, όπου επιλέχθηκαν αρμονικές διεγέρσεις καθώς προσφέρουν μια εποπτεία του προβλήματος και μπορούν να συγκριθούν με ήδη υπάρχουσες, προσεγγιστικές, αναλυτικές λύσεις. Ανάλογα με την περίπτωση επιλέχθηκε η επιβολή δύναμης ή μετακίνησης ως διεγερσης ώστε να αντιμετωπιστούν διάφορες δυσκολίες. Επιλέχθηκαν να εξεταστούν πάσσαλοι διαμέτρου  $D = 1\text{ m}$  και μήκους  $L = 20\text{ m}$ , σε αποστάσεις από την πηγή  $S = 3, 5$  και  $10\text{ m}$ . Για την κατακόρυφη φόρτιση, εφόσον το πρόβλημα είναι αξονοσυμμετρικό ήταν αρκετή μόνο μια σειρά πασσάλων όμως στην περίπτωση οριζόντιων φορτίων το πρόβλημα παύει να είναι αξονοσυμμετρικό και χρειάστηκαν τρεις σειρές πασσάλων σε γωνίες  $\theta = 0, 45$  και  $90$  μοίρες σε σχέση με την διεύθυνση φόρτισης. Καθώς το πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς το επίπεδο φόρτισης, επιλέχθηκε να αναλυθεί μόνο το μισό πρόβλημα, για μείωση του υπολογιστικού κόστους.

### *3.1 Προσομοίωση μέσω Πεπερασμένων Στοιχείων*

Για την προσομοίωση του προβλήματος επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν οκτακομβικά εξαεδρικά στοιχεία **C3D8** (brick type) από την βιβλιοθήκη του **ABAQUS**. Τα στοιχεία αυτά εφαρμόστηκαν στους πασσάλους και στο έδαφος των διάφορων προσομοιωμάτων της εργασίας. Για την κατάλληλη προσομοίωση των συνόρων του προβλήματος επιλέχθηκε η χρήση ειδικών οκτακομβικών εξαεδρικών στοιχείων **CIN3D8** (infinite elements) τα οποία είναι κατάλληλα για προβλήματα που το μέσον θεωρείται απειρομήκες αλλά ενδιαφέρει μια μικρή του περιοχή. Τα στοιχεία αυτά

λειτουργούν ελαστικά ανεξαρτήτως ανάλυσης και σε μεν στατικές αναλύσεις, προσομοιώνουν τον ομοιογενή γραμμικά ελαστικό ημιχώρο προσφέροντας στιβαρότητα στο κυρίως προσομοίωμα ενώ σε δυναμικές αναλύσεις, λειτουργούν αποκλειστικά αποσβεστικά και παρέχουν μηδενική στιβαρότητα στο μοντέλο, προσομοιώνοντας επακριβώς την λειτουργία του ομοιογενούς ελαστικού ημιχώρου ως «απορροφητήρα» απόσβεσης ακτινοβολίας.

### *3.1.1 Προσομοίωμα Ανάλυσης Κατακόρυφων Φορτίων*

Το προσομοίωμα που δημιουργήθηκε για την ανάλυση κατακόρυφων φορτίων παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1**, όπου σημειώνονται και οι βασικές διαστάσεις του προσομοιώματος, καθώς και η διαμέρισή του σε κυρίως μοντέλο και απειρομήκη στοιχεία, με πράσινο και γκρι χρώμα αντίστοιχα. Με μπλε χρώμα παρουσιάζεται ο ενεργός πάσσαλος-πηγή ενώ με κόκκινο χρώμα οι παθητικοί πάσσαλοι. Είναι εμφανής η τοποθέτηση των απειρομήκων στοιχείων με τρόπο τέτοιο, ώστε τα κύματα που φτάνουν σε αυτά να είναι κάθετα στο επίπεδο των συνόρων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση των ειδικών αυτών στοιχείων όσον αφορά τον αποσβεστικό τους χαρακτήρα.

Οι πάσσαλοι έχουν διαμεριστεί με 10 στοιχεία στην διάμετρο, 16 στην ημιπερίμετρο και 30 στοιχεία καθ' ύψος. Λεπτομέρειες του κανάβου σχετικά με τους πασσάλους και το περιβάλλον έδαφός τους παρουσιάζονται στις **Εικόνες 2 και 3**. Ο συνολικός αριθμός πεπερασμένων στοιχείων ανέρχεται σε 62600.

### *3.1.2 Προσομοίωμα Ανάλυσης Οριζοντίων Φορτίων*

Το προσομοίωμα που δημιουργήθηκε για την ανάλυση οριζοντίων φορτίων παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4**, όπου σημειώνονται και οι βασικές διαστάσεις του μοντέλου, καθώς και το κυρίως τμήμα του με πράσινο χρώμα και τα απειρομήκη στοιχεία με γκρι. Σε αυτή την περίπτωση δεν έχουν χρησιμοποιηθεί απειρομήκη στοιχεία στη βάση του μοντέλου, καθώς η χρήση τους προϋποθέτει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη συμμετρία ως προς την περιοχή ενδιαφέροντος και η πολυπλοκότητα της περιοχής των πασσάλων δεν επέτρεψε τον απαιτούμενο βαθμό συμμετρίας. Επομένως στην πλευρά αυτή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν συμβατικά όρια (αρθρώσεις) χωρίς αποσβεστήρες, καθώς θεωρήθηκε πως το μέγεθος της



επιβληθείσας φορτίσεως σε συνδυασμό με την διεύθυνσή της ισοδυναμούν με ελάχιστες μετακινήσεις σε αυτό το βάθος και πως η παραδοχή μηδενικών μετακινήσεων ήταν σωστή. Επιπρόσθετα, καθώς τα φορτία και συνεπώς οι μετακινήσεις αναμένονται να έχουν κυρίαρχη διεύθυνση την οριζόντια, θεωρήθηκε πως η χρήση απειρομήκων στοιχείων μονάχα σε αυτή την διεύθυνση αρκεί για την ομαλή απόσβεση των κυμάτων, ειδικά σε συνδυασμό με την ανελαστική συμπεριφορά που αναμένεται να υπάρξει στο έδαφος.

Λεπτομέρειες σχετικά με τους πασσάλους, την διάταξη και την διαμέρισή τους εμφανίζονται στις **Εικόνες 5 και 6**. Η καθ' ύψος διαμέριση του μοντέλου οδήγησε σε 20 στοιχεία στα πάνω 10 μέτρα, όπου βρίσκεται και το ενεργό μήκος του πασσάλου, 10 στοιχεία για τα επόμενα 10 μέτρα και 4 στοιχεία για τα κατώτερα 10 μέτρα. Ο συνολικός αριθμός στοιχείων ανέρχεται σε 79275.

### 3.1.3 Προσομοίωμα Ανάλυσης Ομάδας Πασσάλων $3 \times 3$

Το προσομοίωμα που δημιουργήθηκε για την ανάλυση της συμπεριφοράς της ομάδας πασσάλων με  $S/D = 3$  υπό εξωτερικές φορτίσεις παρουσιάζεται στις **Εικόνες 7 και 8**, μαζί με τις βασικές του διαστάσεις. Το προσομοίωμα παρουσιάζει σύνορα απειρομήκων στοιχείων σε όλες τις διευθύνσεις. Η διαμέριση των πασσάλων και συνολικά του προσομοιώματος επιλέχθηκε πιο αδρή συγκριτικά με τις προηγούμενες περιπτώσεις για να αντισταθμιστεί το επιπλέον υπολογιστικό κόστος από την παρουσία έξι διεπιφανειών έναντι μιας στις προηγούμενες αναλύσεις, χωρίς όμως την απώλεια ακρίβειας στα αποτελέσματα αφού η διακριτοποίηση παραμένει αρκετά λεπτομερής συγκριτικά με παρόμοιες μελέτες στην βιβλιογραφία. Η λειτουργία κεφαλοδοκού επιτυγχάνεται μέσω σύνδεσης των κεφαλών των πασσάλων με MPC (Multi Point Constraint) λειτουργίας άκαμπτης δοκού, εξασφαλίζοντας κοινές μετατοπίσεις στις κεφαλές των πασσάλων. Ο συνολικός αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων ανέρχεται σε 56480.

### 3.1.4 Αξιοπιστία Προσομοιωμάτων

Σύμφωνα με αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν στα επιμέρους κεφάλαια, η παρούσα διπλωματική πετυχαίνει μεγάλη συμφωνία με γνωστά αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της.

## 3.2 Καταστατικά Προσομοιώματα

### 3.2.1 Καταστατικό Προσομοίωμα Εδάφους

Για την προσομοίωση των ιδιοτήτων και της αστράγγιστης συμπεριφοράς του, το έδαφος στην παρούσα εργασία ακολουθεί κριτήριο διαρροής Von Mises με μη-γραμμικό νόμο κράτυνσης και συσχετισμένο νόμο πλαστικής ροής. Αυτό το καταστατικό προσομοίωμα θεωρείται πως προσομοιώνει ικανοποιητικά την συμπεριφορά αργιλικών εδαφών υπό συνθήκες ταχείας φόρτισης (αστράγγιστες συνθήκες).

Σύμφωνα με το κριτήριο Von Mises, η εξέλιξη των τάσεων υπακούει την ακόλουθη σχέση:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_o + \boldsymbol{\alpha}$$

όπου ως  $\boldsymbol{\sigma}_o$  ορίζεται η τιμή της τάσης σε μηδενική πλαστική παραμόρφωση και  $\boldsymbol{\alpha}$  είναι η συνιστώσα της κινηματικής κράτυνσης που κατευθύνει την επιφάνεια διαρροής στον χώρο των τάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της παρακάτω συνάρτησης:

$$F = f(\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}) - \boldsymbol{\sigma}_o$$

όπου  $f(\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha})$  είναι το αντίστοιχο της τάσης Mises λαμβάνοντας υπόψιν την συνεισφορά του  $\boldsymbol{\alpha}$ .

Εφόσον η πλαστική ροή θεωρείται συσχετισμένη, για τον ρυθμό πλαστικής ροής ισχύει:

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{pl} = \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{pl} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$$

όπου ως  $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{pl}$  ορίζεται ο ισοδύναμος ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης.

Η εξέλιξη του τασικού πεδίου βασίζεται σε δυο συνιστώσες:

1. Μια συνιστώσα ισοτροπικής κράτυνσης, που περιγράφει την αλλαγή της ισοδύναμης τάσης καθορίζοντας το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής  $\boldsymbol{\sigma}_o$  συναρτήσει της πλαστικής παραμόρφωσης, μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$\boldsymbol{\sigma}_o = \boldsymbol{\sigma}_o + Q_\infty (1 - e^{-b\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{pl}})$$

όπου οι σταθερές  $Q_\infty$  και  $b$  είναι παράμετροι του προσομοιώματος που καθορίζουν την μέγιστη αλλαγή του μεγέθους της επιφάνειας διαρροής και

τον ρυθμό αλλαγής συναρτήσει της πλαστικής παραμόρφωσης  $\dot{\epsilon}^{pl}$ , αντίστοιχα. Εάν τεθεί  $Q_{\infty} = \mathbf{0}$ , τότε το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής δεν επιδέχεται αλλαγής και το μοντέλο μετατρέπεται σε ένα μη-γραμμικό μοντέλο κινηματικής κράτυνσης.

2. Μια μη-γραμμική κινηματική συνιστώσα, που περιγράφει την μεταφορά της επιφάνειας διαρροής στον χώρο των τάσεων και καθορίζεται από την επαλληλία ενός καθαρά κινηματικού όρου (γραμμικός νόμος κράτυνσης Ziegler) και ενός νόμου χαλάρωσης, ο οποίος και εισάγει την μη-γραμμικότητα. Η εξίσωση που καθορίζει την συμπεριφορά αυτή είναι:

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma - \alpha) \dot{\epsilon}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\epsilon}^{pl}$$

όπου ως  $C$  ορίζεται το αρχικό κινηματικό μέτρο κράτυνσης [ $C = E = 2G_0(1 + \nu)$ ] και ως  $\gamma$  η παράμετρος που καθορίζει τον ρυθμό μείωσης της κινηματικής κράτυνσης αυξανομένης της πλαστικής παραμόρφωσης.

Σύμφωνα λοιπόν με τον νόμο εξέλιξης της κινηματικής συνιστώσας της κράτυνσης, η τιμή της παραμέτρου  $\alpha$  πρέπει να βρίσκεται εντός κυλίνδρου με ακτίνα  $\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{C}{\gamma}$  και η θεώρηση φραγμένης επιφάνειας διαρροής συνεπάγεται πως όλες οι πιθανές τιμές έντασης πρέπει να βρίσκονται εντός κυλίνδρου ακτίνας  $\sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_y$ , όπου  $\sigma_y$  είναι η τάση διαρροής.

Για την περίπτωση της αργίλου, που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, η μέγιστη τάση διαρροής υπό αστράγγιστες συνθήκες είναι:

$$\sigma_y = \frac{c}{\gamma} + \sigma_0$$

Σύμφωνα με το κριτήριο διαρροής Von Mises, η μέγιστη τάση είναι:

$$\sigma_y = \sqrt{3} S_u$$

Συνεπώς από τις δύο τελευταίες σχέσεις, προκύπτει:

$$\gamma = \frac{c}{\sqrt{3} S_u - \sigma_0}$$

Οι παράμετροι του καταστατικού προσομοιώματος βαθμονομήθηκαν βάσει των

δημοσιευμένων καμπυλών G-γ κατά Vucetic & Dobry (1991), σύμφωνα την διαδικασία που περιγράφεται από Gerolymos & Gazetas (2005). Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικά εδαφικά προφίλ τα οποία αντιστοιχούν σε τιμές  $\frac{G}{S_u} = 300, 600$  και  $1350$ , όπου το  $S_u$  είναι σταθερό στα 50 KPa. Οι σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε προφίλ παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1** και τις **Εικόνες 9, 10 και 11**, όπου φαίνονται και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης από τον Kanelloroulos (2017).

### 3.2.2 Καταστατικό Προσομοίωμα Πασσάλου

Στην παρούσα εργασία γίνεται η θεώρηση πως ο πάσσαλος έχει ελαστική συμπεριφορά ανεξαρτήτως φορτίων και έντασης που αναπτύσσει, επομένως συμπεριφέρεται ως γραμμικά ελαστικό, ισότροπο υλικό με σταθερές E και ν, όπου ως τιμές επιλέχθηκαν οι  $E = 25 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.2$  και  $\rho = 2.5 \frac{\text{tn}}{\text{m}^3}$ .

### 3.2.3 Καταστατικό Προσομοίωμα Διεπιφάνειας

Για την επιφάνεια πασσάλου-εδάφους επιλέχθηκε η χρήση διεπιφάνειας απειροστού πάχους η οποία επιτρέπει φαινόμενα ολίσθησης και αποκόλλησης μεταξύ πασσάλου και εδάφους.

Κατά την παράλληλη διεύθυνση, η διεπιφάνεια ακολουθεί συμπεριφορά ελαστική-τέλεια πλαστική καθώς έχει χρησιμοποιηθεί άνω όριο στην αντοχή της ίσο με  $\tau_{max} = aS_u = 50 \text{ KPa}$ , έχει γίνει δηλαδή επιλογή του συντελεστή  $a = 1$ . Καθότι μια τέτοια τιμή είναι οριακά εκτός των προτεινόμενων από την βιβλιογραφία (συνετότερη επιλογή θα ήταν  $a = 0.85$ ), η χρήση διεπιφάνειας με χαμηλότερη αντοχή από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους θα οδηγούσε σε εντελώς ελαστική συμπεριφορά του υπό κατακόρυφα φορτία (Trochanis et al. 1991), δηλαδή η ζώνη πλαστικοποίησης θα ήταν, μη-ρεαλιστικά, μηδενικού πάχους. Η επιλεχθείσα διάταξη παρουσιάζει μια λεπτή ζώνη πλαστικοποιήσεων περιμετρικά της διεπιφάνειας αλλά και συγκεντρωμένες ολισθήσεις κατά μήκος αυτής, οδηγώντας σε μια πιο σωστή απεικόνιση της πραγματικής συμπεριφοράς του εδάφους.

Κατά την κάθετη στην διεπιφάνεια διεύθυνση υιοθετήθηκε νόμος επαφής εκθετικής μορφής (**Εικόνα 12**) ώστε να επιτευχθεί ευκολότερη σύγκλιση της προσομοίωσης.

### 3.2.4 Απόσβεση Rayleigh

Σε όλες τις μη-γραμμικές αναλύσεις έγινε χρήση απόσβεσης Rayleigh ίση με 2% ενώ στις ελαστικές ίση με 5%, ώστε να καταπολεμηθούν αριθμητικά προβλήματα της προσομοίωσης αλλά και μικρές ατέλειες της βαθμονόμησης του καταστατικού του εδάφους. Όπως φαίνεται και στα σχήματα των βαθμονομήσεων, σε χαμηλά επίπεδα παραμόρφωσης το καταστατικό προσομοίωμα οδηγεί σε οιονεί ελαστική λειτουργία με απουσία υστερητικής απόσβεσης, συνεπώς η προσθήκη ενός χαμηλού επιπέδου απόσβεσης εξισορροπεί την λειτουργία του εδάφους.

## 3.3 Μεθοδολογία Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης ΠΕΠ

### 3.3.1 Μη Γραμμικός Συντελεστής Αλληλεπίδρασης

Ένα βασικό μειονέκτημα της κλασικής μεθόδου των ελαστικών συντελεστών αλληλεπίδρασης είναι πως συχνά υπερεκτιμούν τις τελικές καθιζήσεις που αναπτύσσονται οι θεμελιώσεις, αποτέλεσμα της θεώρησης ελαστικού εδάφους.

Είναι γνωστό πως η φέρουσα αντοχή των πασσάλων προέρχεται κυρίως από την πλευρική αντοχή τους, η οποία και ενεργοποιείται σε πολύ μικρά επίπεδα καθιζήσεων και συνεπώς παραμορφώσεων. Εκτός περιπτώσεων όπου η θεμελίωση λειτουργεί σε επίπεδο φόρτισης πολύ χαμηλότερο της αντοχής της, δεν συμπεριφέρεται ελαστικά αλλά παρουσιάζεται πλαστικοποίηση του εδάφους περιμετρικά του πασσάλου. Είναι επίσης γνωστό πως σε περιπτώσεις πλαστικής συμπεριφοράς του εδάφους, ο βολβός των μετακινήσεων είναι αρκετά μικρότερος από την ελαστική συμπεριφορά και οι μετακινήσεις που διαδίδονται στο περιβάλλον έδαφος είναι αρκετά μικρότερες. Συνεπώς είναι αναγκαία η μελέτη των συντελεστών αλληλεπίδρασης υπό μη γραμμικές συνθήκες ώστε να κατανοηθεί περαιτέρω η μη γραμμική αλληλεπίδραση των συστημάτων πασσάλου-εδάφους-πασσάλου.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αποσαφηνιστεί η έννοια του μη γραμμικού συντελεστή αλληλεπίδρασης και η χρήση της στην παρούσα εργασία. Ενώ σε περιπτώσεις όπου κυριαρχούν ελαστικές συνθήκες μπορεί να εφαρμοστεί επαλληλία των συντελεστών αυτών και να υπολογιστούν παραμορφωσιακά και εντατικά μεγέθη, η φύση της μη γραμμικής ανάλυσης ακυρώνει από μόνη της την βασική αυτή ιδιότητα των συντελεστών.

Κατά τους **Trochanis et al** (1991), ο μη γραμμικός συντελεστής αλληλεπίδρασης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τον παραδοσιακό τρόπο. Συγκεκριμένα, έδειξαν πως υπό ένα συγκεκριμένο επίπεδο κατακόρυφης φόρτισης του ενεργού πασσάλου (1) που εξασφαλίζει μη γραμμική συμπεριφορά, αυτός και ο παθητικός πάσσαλος (2) ανέπτυξαν καθιζήσεις 1.22 cm και 0.16 cm αντίστοιχα. Ύστερα από φόρτιση του παθητικού πασσάλου με το ίδιο φορτίο οι πάσσαλοι οδηγήθηκαν σε κοινή καθίζηση ίση με 1.25 cm και όχι 1.38 cm που θα προέκυπτε αν η επαλληλία μπορούσε να εφαρμοστεί.

Τα παραπάνω είναι απολύτως λογικά, αν αναλογιστεί κανείς πως ολική διαρροή του εδάφους που περιβάλλει τον πάσσαλο συνεπάγεται μηδενική επαπτομενική στιβαρότητα του συστήματος πασσάλου εδάφους ή αλλιώς αδυναμία του ενός μέρους να επηρεάσει περεταίρω το άλλο. Σε περιπτώσεις όπου δεν έχει επιτευχθεί η ολική διαρροή του συστήματος αλλά το έδαφος έχει ξεκινήσει να παρουσιάζει μη γραμμικότητα, όπως την περίπτωση της προηγούμενης παραγράφου, η πραγματικότητα βρίσκεται κάπου ενδιάμεσα, όπου συνεχίζει να υπάρχει κάποιου είδους αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο πασσάλων, όμως είναι αισθητά μειωμένη.

### 3.3.2 Στατικά Φορτία

Για την μελέτη των στατικών συντελεστών κατακόρυφης και οριζόντιας αλληλεπίδρασης  $a_v$  και  $a_h$  ασκήθηκε στην κεφαλή τους μετακίνηση ίση με 10 και 5 cm αντίστοιχα. Στην συνέχεια υπολογίστηκαν οι συντελεστές ως μετακίνηση σημείου ενδιαφέροντος / μετακίνηση πηγής σε κάθε increment της ανάλυσης και εξήχθησαν τα αποτελέσματα.

Στο προσομοίωμα ασκήθηκε βαρυτικό πεδίο με  $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$  και μειωμένο μέτρο στους πασσάλους, ώστε να επιτευχθούν ομαλά οι γεωστατικές τάσεις. Το βαρυτικό πεδίο είναι σχεδόν υδροστατικό ( $K_o = 0.96$ ) εξαιτίας του λόγου Poisson του εδάφους που είναι  $\nu = 0.49$ . Λόγω της διαφοράς των μέτρων ελαστικότητας μεταξύ πασσάλου και εδάφους, υπάρχουν στην αρχή των αναλύσεων παραμένουσες διατμητικές τάσεις στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους (**Εικόνα 13**), οι οποίες όμως κρίνονται πολύ μικρές και δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Ειδικότερα, το ολοκλήρωμα των τάσεων αυτών κατά μήκος του πασσάλου προς την ολική του

αντοχή έδειξε πως ο πάσσαλος βρίσκεται σε ένα επίπεδο φόρτισης που δεν ξεπερνάει το 3.5% της αντοχής του.

### 3.3.3 Δυναμικά Φορτία

Υπό δυναμική εξαίτηση, ο λόγος  $\frac{\text{μετακίνηση σημείου ενδιαφέροντος}}{\text{μετακίνηση πηγής}}$  παύει να είναι πραγματικός αριθμός και μετατρέπεται σε μιγαδικό. Πιο συγκεκριμένα, για τις αρμονικές φορτίσεις που εξετάζονται στην παρούσα εργασία και υπό ελαστικές συνθήκες, εάν το φορτίο είναι της μορφής:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_o e^{i\omega t}$$

οι μετακινήσεις της πηγής θα είναι της μορφής:

$$w^{11} = w_o^{11} e^{i\omega t}$$

και του σημείου ενδιαφέροντος της μορφής:

$$w^{21} = w_o^{21} e^{i\omega t}.$$

Για τον λόγο των δύο μετακινήσεων ισχύει πως:

$$\alpha_{v,h} = \frac{w^{21}}{w^{11}} = \mathbf{Re}(\alpha_{v,h}) + \mathbf{Im}(\alpha_{v,h})i = |\alpha_{v,h}| e^{i\varphi}$$

Φυσικά από τα παραπάνω προκύπτει πως:

$$\mathbf{Re}(\alpha_{v,h}) = |\alpha_{v,h}| \cos \varphi \text{ και } \mathbf{Im}(\alpha_{v,h}) = |\alpha_{v,h}| \sin \varphi$$

Είναι φανερό πως στην περίπτωση στατικής φόρτισης, όπου δεν υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ των μετακινήσεων, το φανταστικό μέρος του παραπάνω μιγαδικού αριθμού μηδενίζεται και ο αριθμός εκφυλίζεται σε πραγματικό, κάτι που προκύπτει και λογικά αφού η στατική φόρτιση είναι υποπερίπτωση της δυναμικής για  $\omega \rightarrow 0$ .

Πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο πως τα παραπάνω ισχύουν αποκλειστικά και μόνο για ελαστική συμπεριφορά του συστήματος, όπου η στιβαρότητα και η απόσβεσή του είναι σταθερές και όχι μεταβλητές. Εφόσον στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε κυρίως η μη-γραμμική συμπεριφορά των πασσάλων, τα παραπάνω ισχύουν μόνο προσεγγιστικά αφού ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης, αλλάζουν τα μητρώα στιβαρότητας και απόσβεσης του συστήματος σε κάθε βήμα. Προκύπτει λογικά πως σε περίπτωση επιβολής αρμονικού φορτίου οι

μετακινήσεις δεν θα είναι αρμονικές (ημιτονικές) και σε περίπτωση επιβολής αρμονικής μετακίνησης τα φορτία δεν θα είναι αρμονικά.

Για την ανάλυση του συγκεκριμένου προβλήματος έγινε ανάλυση των χρονοϊστοριών επιτάχυνσης που προέκυψαν ύστερα από επιβολή αρμονικού φορτίου, μέσω χρήσης του προγράμματος **Seismosignal**. Από την φασματική ανάλυση προέκυψε πως το συχνοτικό περιεχόμενο της διέγερσης δεν μεταβάλλεται σημαντικά, η περιοδικότητα δηλαδή της διέγερσης παραμένει ίδια με αυτή του επιβαλλόμενου φορτίου και συνεπώς η προσέγγιση του προβλήματος ως αρμονικού κρίθηκε επαρκής.

Για την ανάλυση της κυματικής διάδοσης και της αλληλεπίδρασης μεμονωμένων πασσάλων έγινε χρήση επιβολής μετακίνησης  $d = 0.01 m$  στην κεφαλή του πασσάλου-πηγή, καθώς η επιβολή φορτίου καθιστούσε αδύνατη την σωστή ανάλυση του προβλήματος. Συγκεκριμένα για να αναλυθεί η δυναμική αλληλεπίδραση πέραν της αστοχίας του πασσάλου-πηγής θα έπρεπε να ασκηθεί δυναμικό φορτίο που θα οδηγούσε τον πάσσαλο αυτό στην αστοχία. Οι δυσκολίες που παρουσιάζονται – κυρίως στην κατακόρυφη φόρτιση- είναι:

1. Ένα τέτοιο φορτίο είναι δύσκολο να υπολογιστεί καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψιν και αδρανειακά φορτία που εμφανίζονται σε υψίσυχνες διεγέρσεις καθώς και φορτία ιξώδους απόσβεσης.
2. Καθώς ο πάσσαλος αναπτύσσει φορτίο λόγω του αντιδρώντος εδάφους, η άσκηση φορτίου μεγαλύτερου από την αντοχή του εδάφους συν τα όποια αδρανειακά και αποσβεστικά φορτία εμφανίζονται, οδηγεί τον πάσσαλο σε μια μετελαστική συμπεριφορά μορφής επιταχυνόμενης κίνησης, όμοια με την ελεύθερη πτώση. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε μικρές αλλαγές της τιμής του επιβαλλόμενου φορτίου και είναι πολύ εύκολο να χαθεί το φυσικό νόημα της ανάλυσης.

Ο ορισμός του συντελεστή αλληλεπίδρασης ως λόγου μετακινησιακών μεγεθών σε συνδυασμό με τις παραπάνω δυσκολίες οδήγησαν στην επιλογή επιβολής μετακίνησης αντί φορτίου. Η μετακίνηση που επιλέχθηκε ήταν  $d = 0.01 m$  – κατακόρυφη και οριζόντια- καθώς είναι μια τιμή που οδηγούσε τον πάσσαλο σε διαρροή υπό στατική φόρτιση αλλά παράλληλα δεν εισέβαλε σε παράλογο βαθμό



στην περιοχή αστοχίας, ώστε να μελετηθεί η αλληλεπίδραση υπό συνθήκες που θα υπήρχε επαρκής ολίσθηση στην διεπιφάνεια, χωρίς όμως αυτή να κυριαρχεί.

### 3.3.4 Ομάδα Πασσάλων

Σε αντιστοιχία με ότι ισχύει για την δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ πασσάλων, η στιβαρότητα μιας θεμελίωσης υπό δυναμική φόρτιση δεν είναι σταθερός, πραγματικός αριθμός αλλά αντιθέτως, είναι μιγαδικός αριθμός, συνάρτηση της συχνότητας διέγερσης. Πιο συγκεκριμένα, για τις αρμονικές φορτίσεις που εξετάζονται στην παρούσα εργασία και υπό ελαστικές συνθήκες, εάν το φορτίο είναι της μορφής:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_o e^{i\omega t}$$

οι μετακινήσεις της πηγής θα είναι της μορφής:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_o e^{i\omega t}$$

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, η **σύνθετη στιβαρότητα** της θεμελίωσης είναι:

$$\mathbf{K}^G = \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{u}} = \mathbf{k}^G + i\mathbf{a}_o \mathbf{c}^G$$

όπου ως  $\mathbf{k}^G$  ορίζεται το πραγματικό μέρος της στιβαρότητας, που αντιστοιχεί στην αντίσταση λόγω ακαμψίας του συστήματος αλλά και την αδρανειακή αντίδρασή του, ως  $\mathbf{c}^G$  ορίζεται το φανταστικό μέρος της στιβαρότητας, που αντιστοιχεί στην αντίσταση λόγω απόσβεσης, υστεριτικής και ιξώδους-ακτινοβολίας και  $\mathbf{a}_o = \omega \frac{d}{V_s}$  είναι αδιάστατη παράμετρος, με  $V_s$  την ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο έδαφος.

Για την μελέτη της ομάδας πασσάλων επιλέχθηκε η επιβολή φορτίου, σε αντίθεση με την μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ πασσάλων. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί:

1. Σε μια ομάδα πασσάλων η συμπεριφορά υπό κατακόρυφα φορτία δεν είναι όμοια με αυτή του μεμονωμένου πασσάλου όπου κυριαρχεί η πλευρική αντίσταση καθώς η βάση παίζει μεγαλύτερο ρόλο, με αποτέλεσμα να μην είναι προφανής ο ορισμός μιας μετακίνησης διαρροής.
2. Η στιβαρότητα της ομάδας ορίζεται ως λόγος εντατικών προς μετακινησιακών μεγεθών οπότε η επιλογή μεθοδολογίας πρέπει να «σέβεται» την φυσική του προβλήματος από την σκοπιά και των δυο αυτών

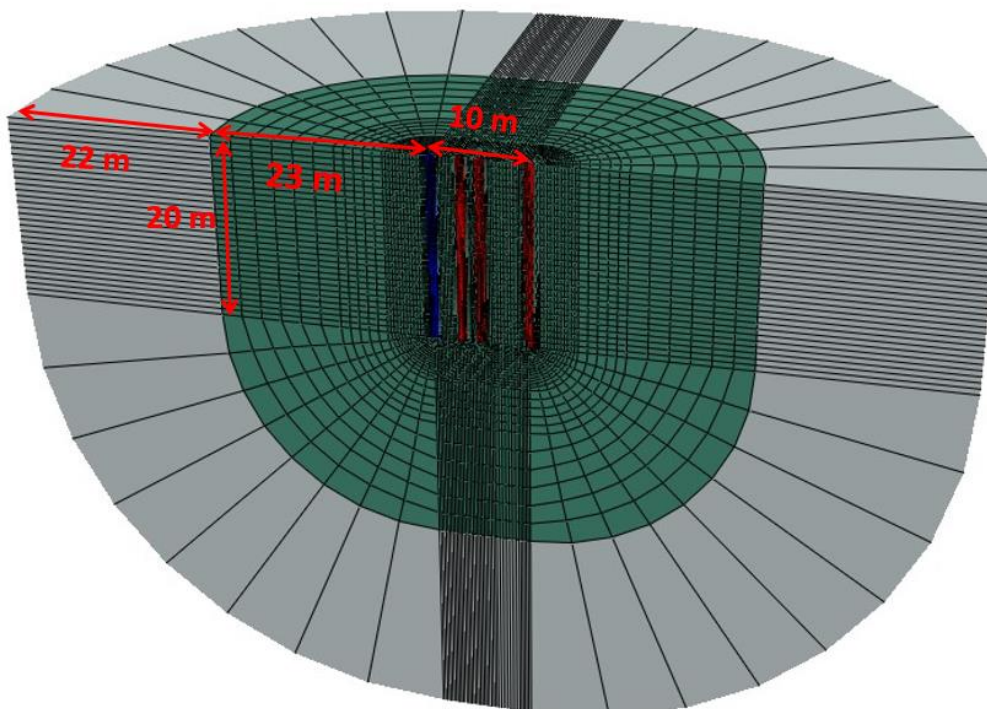
μεγεθών. Κρίθηκε επομένως σκόπιμο να ασκηθεί φορτίο που να είναι στα φυσικώς δυνατά, δηλαδή την αντίδραση του εδάφους στις μετακινήσεις του πασσάλου.

Τελικά πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με διάφορα επίπεδα φόρτισης. Συγκεκριμένα, για την μελέτη υπό κατακόρυφη φόρτιση ασκήθηκε αρχικά κατακόρυφο στατικό φορτίο που «προσομοιώνει» την υπάρχουσα κατασκευή, ίσο με  $F_{sta} = 9F_u^s/3$ , όπου  $F_u^s$  είναι το φορτίο αστοχίας του μεμονωμένου πασσάλου υπό κατακόρυφο φορτίο. Στην συνέχεια ασκήθηκε δυναμικό φορτίο μέτρου  $F_{dyn} = 9F_u^s/3$  και  $F_{dyn} = 2(9F_u^s)/3$ , ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά της θεμελίωσης σε επίπεδα φόρτισης που αντιστοιχούν σε 66% και 100% της στατικής αντοχής των εννέα πασσάλων.

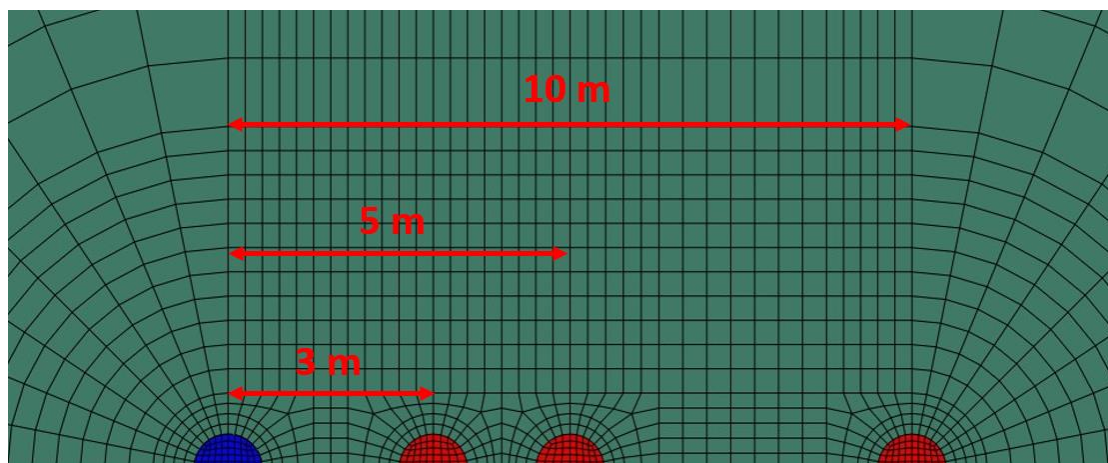
Για την μελέτη υπό οριζόντια φόρτιση ασκήθηκε αρχικά το ίδιο στατικό φορτίο που προσομοιώνει την κατασκευή και στην συνέχεια ασκήθηκε ένα επίπεδο δυναμικής οριζόντιας φόρτισης  $F_{dyn} = 2(9F_u^s)/3$ , όπου  $F_u^s$  είναι το φορτίο αστοχίας του μεμονωμένου πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση, όπως αυτό ορίζεται στην συνέχεια της διπλωματικής.

Παράλληλα έγιναν και ελαστικές αναλύσεις για να συγκριθεί η επιρροή της μη-γραμμικότητας στην δυναμική συμπεριφορά των ομάδων.

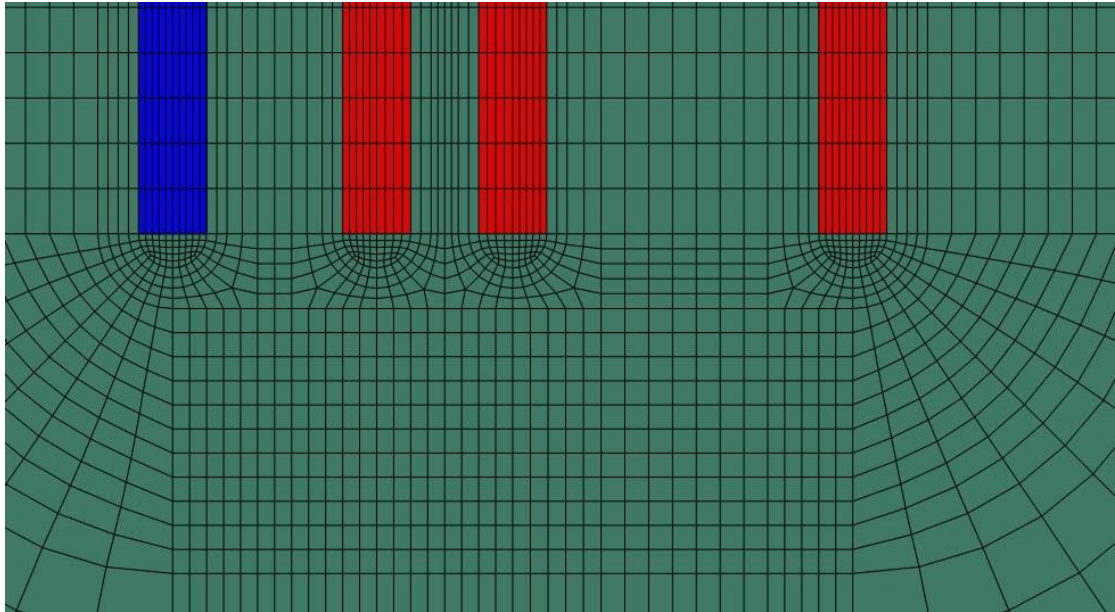
### 3.4 ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



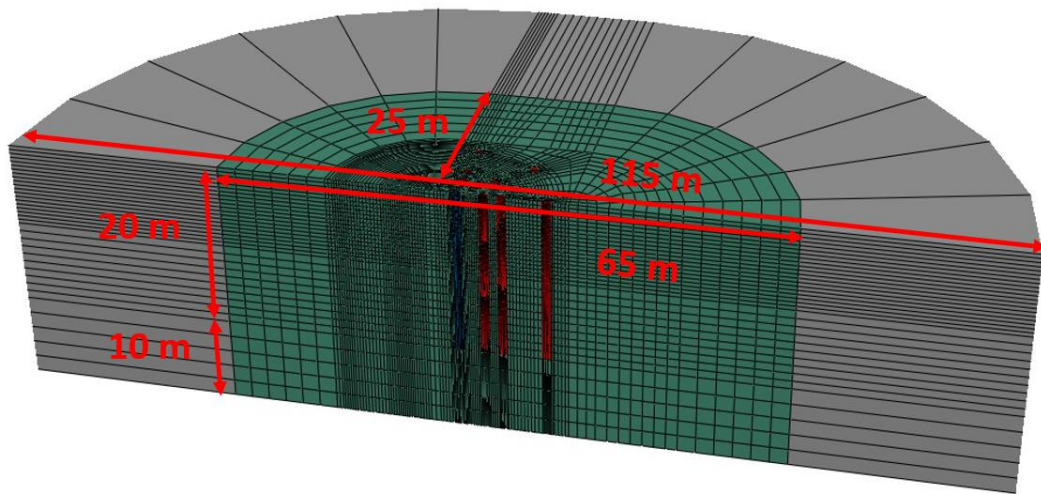
**Εικόνα 3.1-** Το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για τις κατακόρυφες φορτίσεις, με πράσινο απεικονίζεται το πραγματικό έδαφος, με γκρι τα infinite elements, με μπλε ο πάσσαλος-πηγή και με κόκκινο οι παθητικοί πάσσαλοι



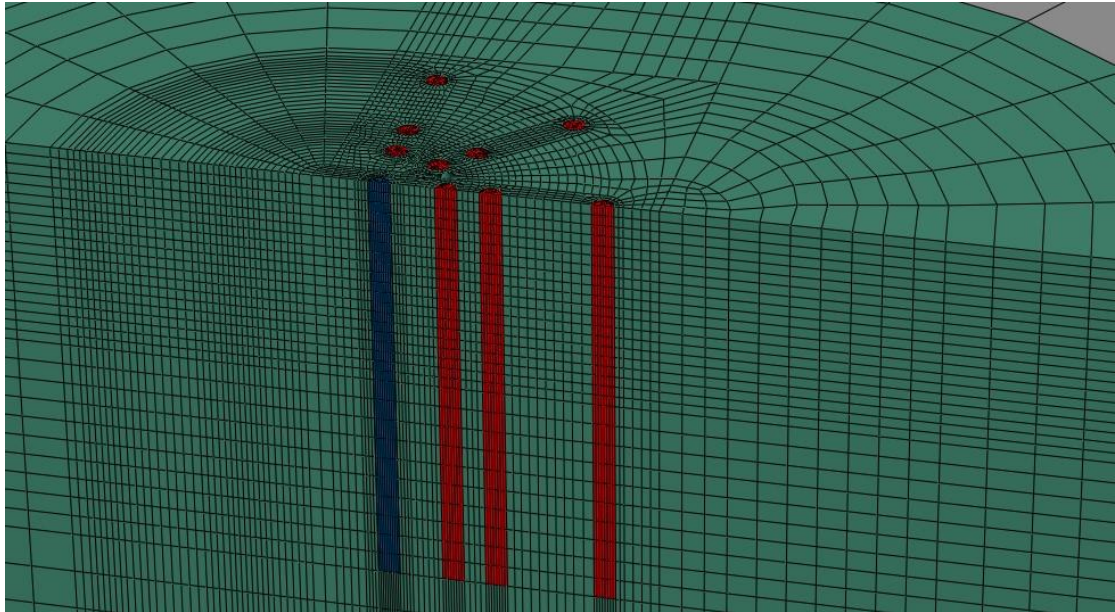
**Εικόνα 3.2-** Λεπτομέρεια της διάταξης των πασσάλων 3D, 5D και 10D



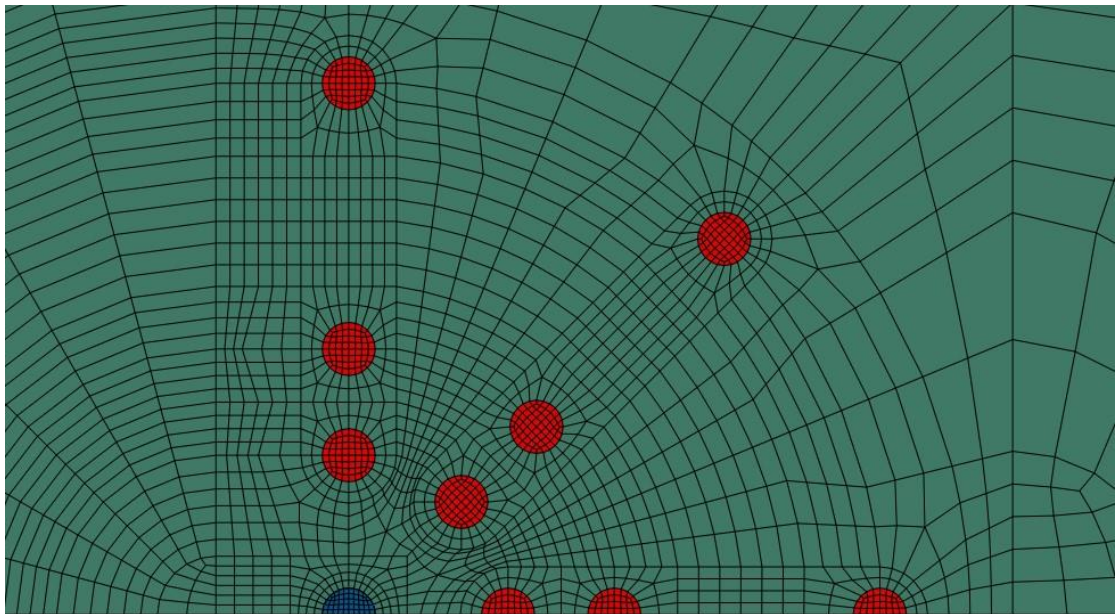
**Εικόνα 3.3-** Λεπτομέρεια της διάταξης των πασσάλων 3D, 5D και 10D



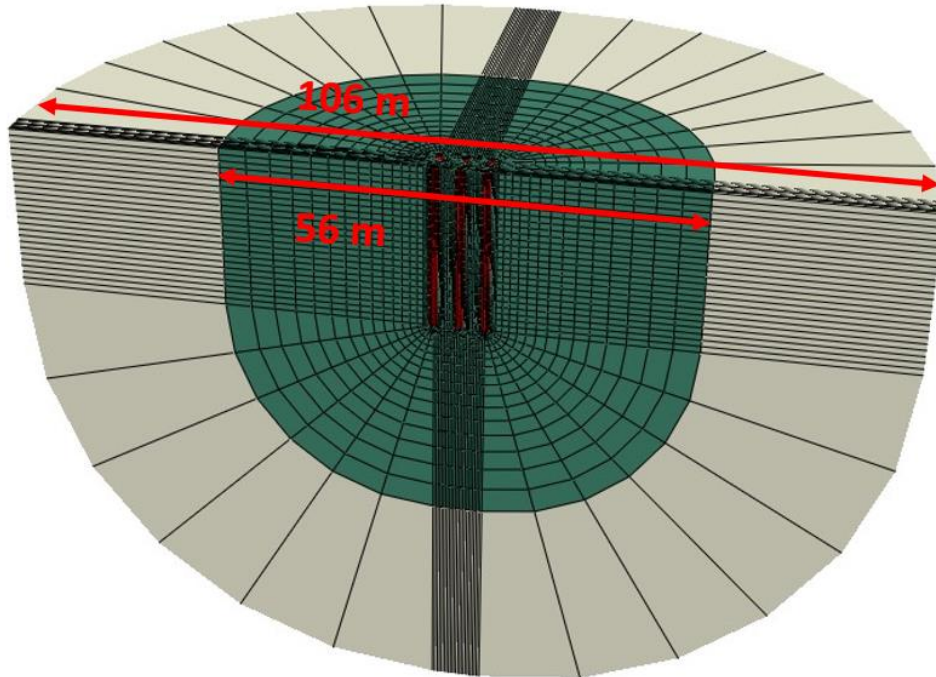
**Εικόνα 3.4-** Το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για την οριζόντια φόρτιση, με πράσινο απεικονίζεται το πραγματικό έδαφος, με γκρι τα *infinite elements*, με μπλε ο πάσσαλος-πηγή και με κόκκινο οι παθητικοί πάσσαλοι



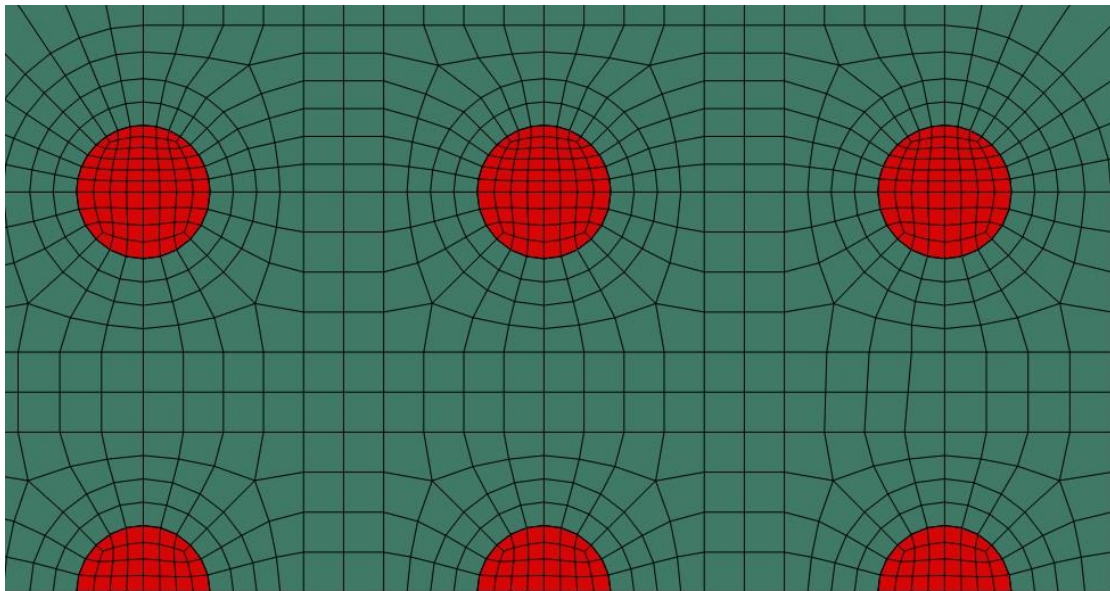
*Εικόνα 3.5- Κοντινή άποψη του προσομοιώματος*



*Εικόνα 3.6- Κάτοψη της διάταξης των πασσάλων, όπου υπάρχουν 3 σειρές πασσάλων σε γωνία  $0$ ,  $45$  και  $90$  μοίρες με την διεύθυνση φόρτισης. Ο κάθε πάσσαλος έχει μια κωδική ονομασία της μορφής “ $5D\ 45$ ”, όπου  $5D$  είναι η απόσταση από την πηγή και  $45$  είναι η γωνία του σε σχέση με την διεύθυνση φόρτισης.*



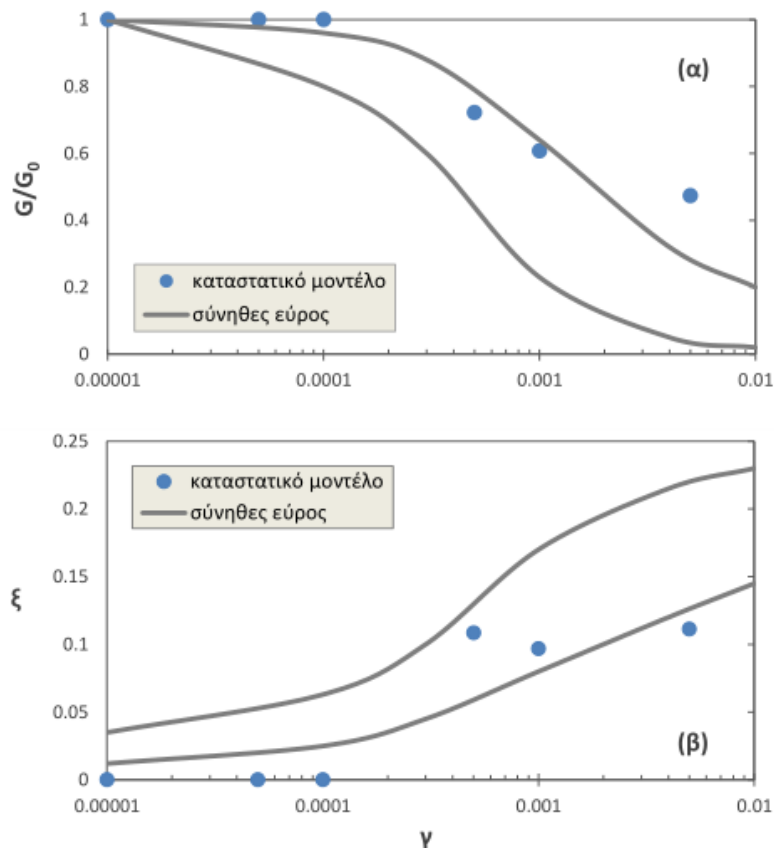
*Εικόνα 3.7- Το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της συμπεριφοράς της ομάδας πασσάλων. Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται το πραγματικό έδαφος, με γκρι τα infinite elements και με κόκκινο οι πάσσαλοι.*



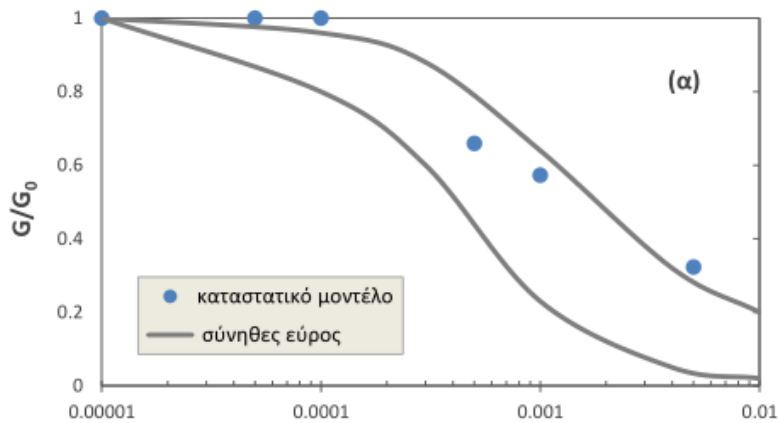
*Εικόνα 3.8- Κάτοψη της ομάδας πασσάλων 3x3 με  $S/D=3$*

<b>G/Su</b>	<b>300</b>	<b>600</b>	<b>1350</b>
<b>C [KPa]</b>	<b>44400</b>	<b>90000</b>	<b>200000</b>
<b><math>\sigma_0</math> [KPa]</b>	<b>5.77</b>	<b>8.66</b>	<b>12.37</b>
<b><math>\gamma</math> [-]</b>	<b>553</b>	<b>1154.7</b>	<b>2694.3</b>
<b>Su [KPa]</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>
<b><math>\rho</math> [tn/m<sup>3</sup>]</b>	<b>1.75</b>	<b>1.75</b>	<b>1.75</b>
<b><math>\nu</math> [-]</b>	<b>0.49</b>	<b>0.49</b>	<b>0.49</b>

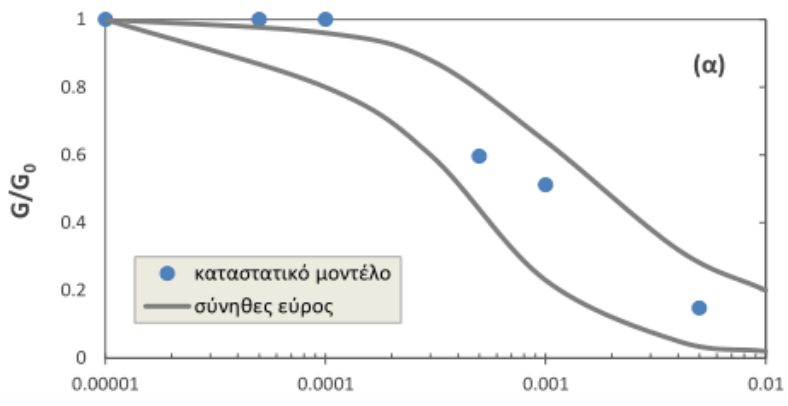
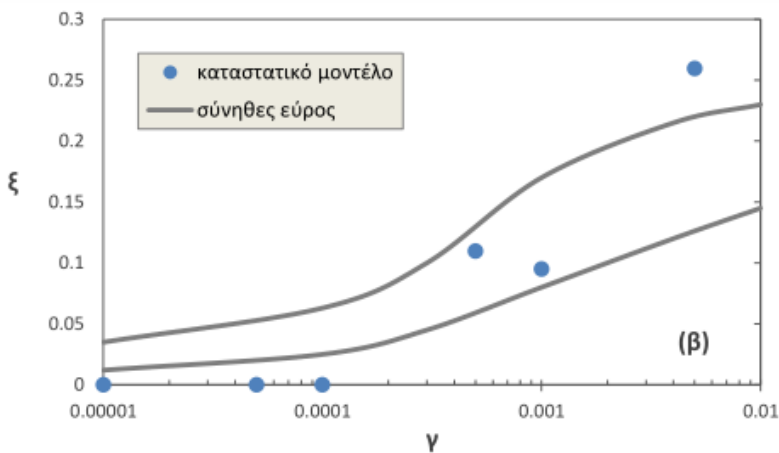
*Πίνακας 3.1- Στοιχεία καταστατικού προσομοιώματος για τα 3 προφίλ εδάφους που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική*



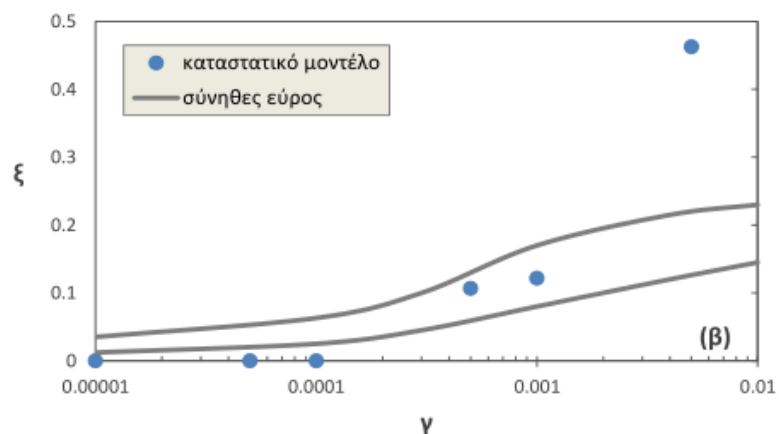
*Εικόνα 3.9 – Αποτελέσματα βαθμονόμησης του καταστατικού προσομοιώματος για  $G/Su=300$  κατά Kapelloroulos (2017)*



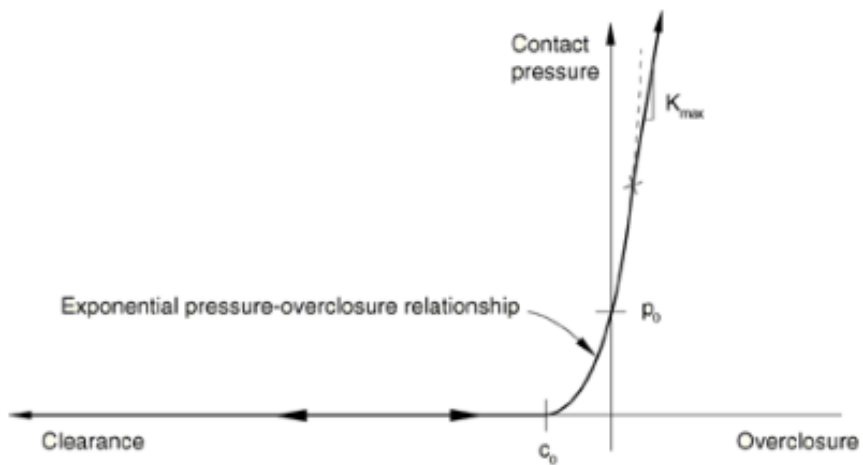
**Εικόνα 3.10** - Αποτελέσματα βαθμονόμησης του καταστατικού προσομοιώματος για  $G/Su=600$  από Kanelloroulos (2017)



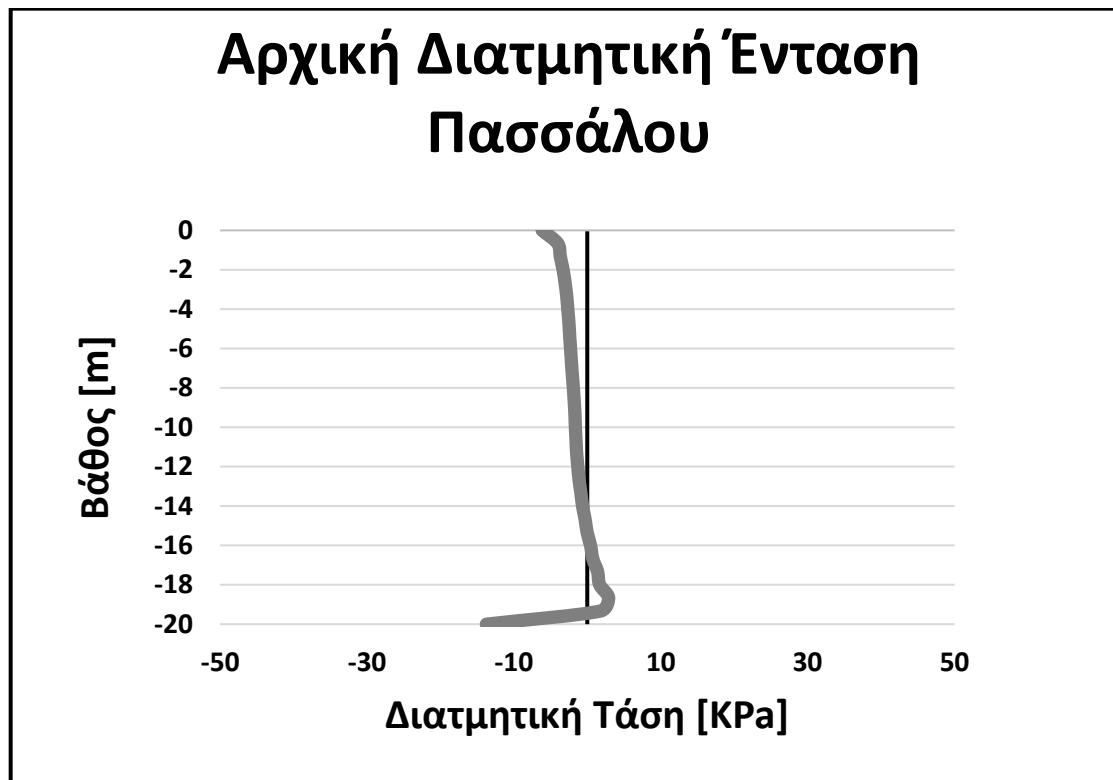
**Εικόνα 3.11** - Αποτελέσματα βαθμονόμησης του καταστατικού προσομοιώματος για  $G/Su=1350$  από Kanelloroulos (2017)







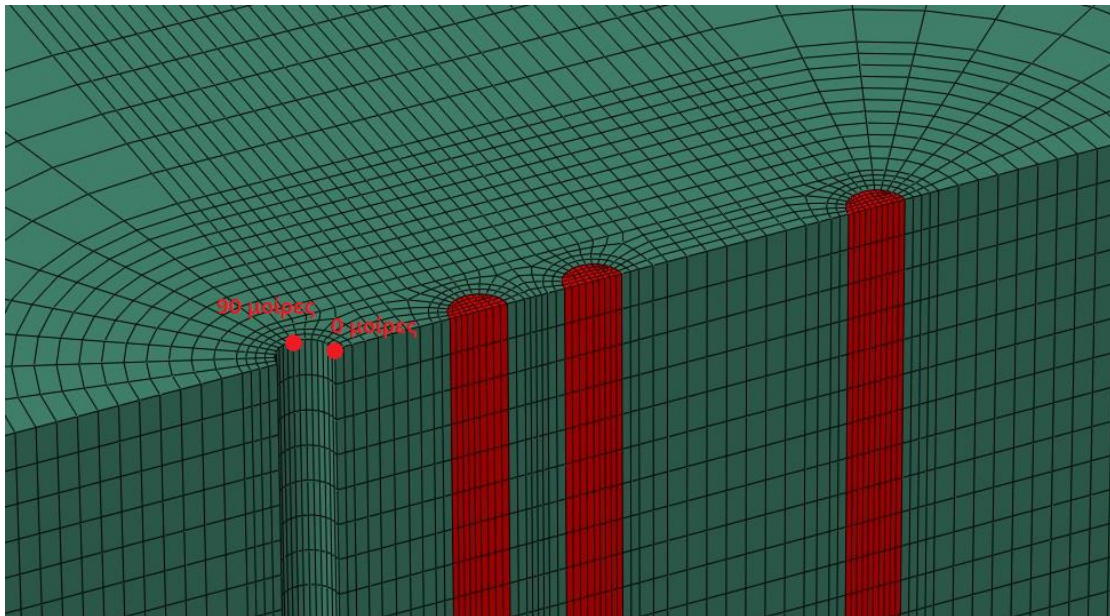
Εικόνα 3.12- Ο νόμος εκθετικής μορφής που υιοθετήθηκε για την κάθετη συμπεριφορά της διεπιφάνειας



Εικόνα 3.13- Αρχικές διατμητικές τάσεις στην διεπιφάνεια του πασσάλου κατά την αρχή της ανάλυσης. Υπενθυμίζεται πως η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους,  $S_u$ , είναι ίση με **50 KPa**, που είναι τα όρια του διαγράμματος

$\omega D/Vs$	$\omega(\text{rad/s})$	$T(\text{s})$	$f(\text{Hz})$
<b>0.1</b>	<b>13.09307</b>	<b>0.479886</b>	<b>2.083827</b>
<b>0.2</b>	<b>26.18615</b>	<b>0.239943</b>	<b>4.167655</b>
<b>0.3</b>	<b>39.27922</b>	<b>0.159962</b>	<b>6.251482</b>
<b>0.4</b>	<b>52.37229</b>	<b>0.119972</b>	<b>8.335309</b>
<b>0.5</b>	<b>65.46537</b>	<b>0.095977</b>	<b>10.41914</b>
<b>0.6</b>	<b>78.55844</b>	<b>0.079981</b>	<b>12.50296</b>
<b>0.7</b>	<b>91.65151</b>	<b>0.068555</b>	<b>14.58679</b>
<b>0.8</b>	<b>104.7446</b>	<b>0.059986</b>	<b>16.67062</b>
<b>0.9</b>	<b>117.8377</b>	<b>0.053321</b>	<b>18.75445</b>
<b>1</b>	<b>130.9307</b>	<b>0.047989</b>	<b>20.83827</b>

*Εικόνα 3.14* Στοιχεία των διεγέρσεων που ασκήθηκαν κατά τις δυναμικές αναλύσεις



*Εικόνα 3.15-* Στην παρούσα εργασία ορίζονται ως «διεπιφάνεια 0 μοίρες» και «διεπιφάνεια 90 μοίρες» τα σημεία που τονίζονται με κουκίδα στην παραπάνω εικόνα, όπου έχει αφαιρεθεί ο ενεργός πάσσαλος. Τα σημεία αυτά είναι πολύ χρήσιμα για την μελέτη της αλληλεπίδρασης, καθώς όταν αναπτυχθούν ολισθήσεις, αποκολλήσεις και πλαστικοποιήσεις στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους, η κίνηση της εδαφικής μάζας ανεξαρτητοποιείται από την κίνηση της πηγής και απαιτείται μελέτη της συμπεριφοράς των συγκεκριμένων σημείων για την ερμηνεία των διαφόρων φαινομένων

# 4

## Κατακόρυφη Αλληλεπίδραση

### 4.1 Στατική Αλληλεπίδραση

Για την μελέτη της συμπεριφοράς των πασσάλων και της στατικής αλληλεπίδρασής τους υπό κατακόρυφα στατικά φορτία, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις «**pushdown**» χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Πραγματοποιήθηκαν 2 σειρές αναλύσεων με διαφορά τις μηχανικές ιδιότητες των παθητικών πασσάλων· αρχικά δόθηκαν ιδιότητες εδάφους σε όλους τους παθητικούς πασσάλους, καθιστώντας τους ανενεργούς και στην συνέχεια έγιναν οι ίδιες αναλύσεις αλλά δίνοντάς τους ιδιότητες σκυροδέματος. Σκοπός της παραπάνω διαδικασίας ήταν ο έλεγχος της επιρροής των παθητικών πασσάλων στους συντελεστές αλληλεπίδρασης (φαινόμενα σκιάς και «φιλτραρίσματος» των μετακινήσεων).

#### 4.1.1 Συμπεριφορά Πασσάλου Υπό Αξονικό Φορτίο

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν 3 προφίλ εδάφους με  $S_u = 50 \text{ KPa}$  και λόγο  $G/S_u = 300, 600$  και  $1350$  και στους παθητικούς πασσάλους δόθηκαν μηχανικές ιδιότητες εδάφους ώστε να μην επηρεάζουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η συμπεριφορά του ενεργού πασσάλου σε κάθε περίπτωση παρουσιάζεται στις **Εικόνες 1 και 2**.

Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα **F-δ**, όπου είναι εμφανής η μετάβαση σε πιο «άκαμπτη» συμπεριφορά, όσο το έδαφος γίνεται πιο σκληρό. Συγκεκριμένα, η παραμόρφωση διαρροής του συστήματος εδάφους-πασσάλου παίρνει τιμές από  $d_y = 1.4 \text{ cm}$  στο **μαλακό** έδαφος, σε  $d_y = 0.65 \text{ cm}$  στο **ενδιάμεσο** έδαφος και  $d_y = 0.38 \text{ cm}$  στο **σκληρό** έδαφος. Από τις παραπάνω καμπύλες έχουν εξαχθεί τα διαγράμματα επαπτομενικής στιβαρότητας του πασσάλου, της πραγματικής δηλαδή

ικανότητας να παραλάβει επιπλέον φορτίο σε κάθε επίπεδο φόρτισης. Είναι εμφανής η διαφορά στην συμπεριφορά του πασσάλου σε κάθε περίπτωση, όπου στο μεν μαλακό έδαφος ο πάσσαλος συντηρεί την στιβαρότητά του για σχετικά μεγάλη καθίζηση ενώ στο στιφρό φαίνεται να αστοχεί ταχύτατα. Παρουσιάζεται λοιπόν διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα το προφίλ του εδάφους όπου στο μαλακό έδαφος ο πάσσαλος διατηρεί την αντοχή του για αρκετά μεγαλύτερη καθίζηση σε σχέση με το στιφρό. Η παραπάνω συμπεριφορά είναι απολύτως λογική αφού κρίσιμος παράγοντας στην αστοχία του εδάφους είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του που είναι κοινή στα 3 εδαφικά προφίλ. Εφόσον το μαλακότερο έδαφος αντιδρά ηπιότερα στην επιβολή μετακίνησης, απαιτεί μεγαλύτερη καθίζηση για να αναπτύξει την οριακή αντοχή του, σε αντίθεση με το στιφρό που χρειάζεται ελάχιστη καθίζηση για να έρθει σε διαρροή. Εμφανής από τα διαγράμματα αυτά είναι και η ελάχιστη καθίζηση που απαιτείται για να αρχίσουν οι ολισθήσεις στην περιφέρεια του πασσάλου, αφού φαίνεται πως οι πάσσαλοι δεν διατηρούν την ελαστική τους αξονική στιβαρότητα ούτε σε μικρά επίπεδα καθιζήσεων· αντίθετα η στιβαρότητά τους ξεκινάει μειούμενη από την αρχή ουσιαστικά της φόρτισής τους.

Όσον αφορά την οριακή αντοχή του πασσάλου, το προσομοίωμα πετυχαίνει μεγάλο βαθμό συμφωνίας με την θεωρητική σχέση

$$P_u = \pi D L S_u + \frac{\pi}{4} D^2 \gamma S_u$$

η οποία για δεδομένα του προβλήματός μας ( $D = 1 \text{ m}, L = 20 \text{ m}, S_u = 50 \text{ KPa}$ ) επιστρέφει τιμή  $P_u = 3495 \text{ KN}$ , ενώ οι αναλύσεις μας επέστρεψαν τιμές  $P_u = 3517, 3550$  και  $3584 \text{ KN}$  σε καθίζηση  $0.1D = 10 \text{ cm}$ , που είναι μια συνηθισμένη θεωρητική καθίζηση αστοχίας.

Στην **Εικόνα 3** παρουσιάζεται η σύγκριση της ελαστικής στιβαρότητας του πασσάλου όπως αυτή προκύπτει από τις αναλύσεις που έγιναν, με την μεθοδολογία που αναλύεται στο βιβλίο των **Poulos & Davies** (1980). Η σύγκριση δείχνει πως υπάρχει πολύ μικρή απόκλιση ανάμεσα στα αποτελέσματα και σε συνδυασμό με την σωστή πρόβλεψη της οριακής αντοχής αποτελούν απόδειξη πως το προσομοίωμα επιδεικνύει σωστή συμπεριφορά.

#### 4.1.2 Αλληλεπίδραση Πασσάλου Εδάφους

Από τις αναλύσεις του προηγούμενου βήματος προέκυψαν και οι χρονοϊστορίες μετακινήσεων για τα διάφορα σημεία ενδιαφέροντος στο έδαφος, ώστε να υπολογιστούν οι συντελεστές αλληλεπίδρασης. Στην **Εικόνα 4** παρουσιάζεται η σύγκριση των συντελεστών αλληλεπίδρασης για ελαστική απόκριση του εδάφους, μεταξύ των αποτελεσμάτων της ανάλυσης μέσω του Abaqus και όπως αυτοί προκύπτουν από τα διαγράμματα τωνoulos & Davis. Η σύγκριση δείχνει πάρα πολύ καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων με την θεωρία, αποτελώντας άλλη μια ένδειξη πως το προσομοίωμα προβλέπει επαρκώς την πραγματική συμπεριφορά του προβλήματος.

Στις **Εικόνες 5 και 6** παρουσιάζεται η χρονοϊστορία μετακινήσεων της κορυφής του ενεργού πασσάλου (πηγή), της διεπιφάνειας του εδάφους στο ύψος της επιφάνειας αλλά και του σημείου του εδάφους που βρίσκεται σε απόσταση 3 διαμέτρων, για έδαφος με  $G/S_u = 300$  και  $G/S_u = 1350$ . Είναι εμφανής η απότομη διακοπή της μετάδοσης μετακινήσεων μόλις διαρρεύσει το έδαφος. Από εκείνο το σημείο και έπειτα η πηγή συνεχίζει να παραλαμβάνει καθίζηση υπό –ουσιαστικά- σταθερό φορτίο, όμως η μηδενική στιβαρότητα του συστήματος πασσάλου-εδάφους καθιστά την μετάδοση τάσεων -κατά συνέπεια και παραμορφώσεων- στο περιβάλλον έδαφος αδύνατη, με αποτέλεσμα το περιβάλλον έδαφος να μην αντιλαμβάνεται την περεταίρω καθίζηση της πηγής.

Αποτέλεσμα της προηγούμενης συμπεριφοράς του συστήματος είναι οι συντελεστές μη-γραμμικής αλληλεπίδρασης που παρουσιάζονται στις **Εικόνες 11 έως 16**. Πρόκειται για συντελεστές «τέμνουσας» αλληλεπίδρασης, αφού παρουσιάζουν σε κάθε επίπεδο καθίζησης της πηγής, τον λόγο  $\alpha_v = \frac{\text{καθίζηση σημείου εδάφους}}{\text{καθίζηση πηγής}}$ , ακόμα και μετά την διαρροή του εδάφους που περιβάλλει την πηγή. Οι συντελεστές αυτοί παρουσιάζουν μια μη-γραμμική συμπεριφορά μέχρι την διαρροή του εδάφους, όπου μειώνονται σταδιακά όσο οι ολισθήσεις στην διεπιφάνεια του πασσάλου επεκτείνονται προς τα κάτω. Αφού διαρρεύσει το έδαφος η μορφή των καμπυλών είναι ανάλογη της  $y = 1/x$ , δηλαδή ο αριθμητής (η καθίζηση στο σημείο ενδιαφέροντος) παραμένει σταθερός ενώ ο παρονομαστής (καθίζηση πηγής) αυξάνεται γραμμικά. Στις **Εικόνες 17 έως 19** παρουσιάζεται η μεταβολή των

συντελεστών «τέμνουσας» αλληλεπίδρασης συναρτήσει του επιπέδου φόρτισης, όπου είναι φανερό πως δεν υπάρχει κάποια σημαντική αλλαγή υπό φορτία λειτουργίας

Στις **Εικόνες 20** έως 22 παρουσιάζεται η «εφαπτομενική» αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων. Συγκεκριμένα έχει υπολογιστεί σε κάθε βήμα της μη-γραμμικής ανάλυσης η κατακόρυφη αλληλεπίδραση ως  $\alpha_v = \frac{\text{επιπλέον καθίζηση σημείου ενδιαφέροντος}}{\text{επιπλέον καθίζηση πηγής}}$ . Με την μορφή αυτή είναι ευκολότερα κατανοητή η πραγματική συμπεριφορά του εδάφους καθώς απεικονίζεται η μηδενική επιπρόσθετη καθίζηση που αναπτύσσουν τα σημεία της επιφάνειάς του, ύστερα από την διαρροή του εδάφους περιμετρικά του ενεργού πασσάλου.

Από τα διαγράμματα που έχουν παρουσιαστεί επιβεβαιώνονται ορισμένα γνωστά συμπεράσματα:

1. Η επιρροή του εδάφους αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό των συντελεστών αλληλεπίδρασης, καθώς παρουσιάζεται μεγάλη μείωσή τους για μετάβαση από μαλακό προς σκληρό έδαφος. Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα της διαφορετικής λειτουργίας του πασσάλου μέσα στο έδαφος σε κάθε περίπτωση. Ενώ σε μαλακά εδάφη ο πάσσαλος λειτουργεί σαν στερεό σώμα, επιβάλλοντας καθ' ύψος κοινή καθίζηση, σε σκληρά εδάφη ο πάσσαλος παρουσιάζει διαφορικές καθιζήσεις καθ' ύψος, ασκώντας ασθενέστερο παραμορφωσιακό πεδίο στο περιβάλλον έδαφος. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την **Εικόνα 23**, όπου φαίνεται πως στο μαλακό έδαφος και υπό ελαστική συμπεριφορά, η καθίζηση της βάσης είναι το **78%** της καθιζήσης κορυφής, ενώ στο σκληρό έδαφος το ποσοστό πέφτει σε **45%**.
2. Η απομείωση της αλληλεπίδρασης με αύξηση της απόστασης από την πηγή, λογικό αποτέλεσμα λόγω της απομείωσης των επιβαλλόμενων τάσεων όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή.
3. Επιβεβαιώνεται η παραδοχή των Roulos & Davis πως η ολίσθηση διαδραματίζει περιορισμένο ρόλο υπό τα συνήθη φορτία λειτουργίας, αφού για τιμές του συντελεστή ασφαλείας  $FS = 2$  που είναι μια συνηθισμένη τιμή στην πράξη, η μείωση του συντελεστή αλληλεπίδρασης μεταβάλλεται από 13% έως 20%, με τις μεγάλες μειώσεις να επιτυγχάνονται σε μαλακά εδάφη.

### 4.1.3 Επιρροή Παθητικών Πασσάλων

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις όπου οι παθητικοί πάσσαλοι είχαν μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος, ώστε να μελετηθεί η επίδρασή τους στο παραμορφωσιακό πεδίο του εδάφους (φαινόμενο σκιάς) και κατά πόσο η ύπαρξη πασσάλου στο σημείο ενδιαφέροντος «φιλτράρει» τις μετακινήσεις του εδάφους. Στις **Εικόνες 24 έως 27** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών για το έδαφος με  $G/S_u = 600$ . Όπως φαίνεται στα διαγράμματα αυτά, η επίδραση των παθητικών πασσάλων είναι πολύ μικρή, γίνεται δε μικρότερη όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή. Τέλος, δεν φαίνεται να υπάρχει κάποιο φαινόμενο σκιάς, γεγονός λογικό καθώς θα ήταν πολύ δύσκολο 3 πάσσαλοι σε σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ τους να επηρεάσουν σημαντικά το παραμορφωσιακό πεδίο του εδάφους.

## 4.2 Δυναμική Αλληλεπίδραση

### 4.2.1 Συντελεστές Αλληλεπίδρασης

Για την μελέτη της κυματικής διάδοσης και της δυναμικής αλληλεπίδρασης των πασσάλων υπό κατακόρυφη δυναμική διέγερση, πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αναλύσεις όπου επιβλήθηκαν 8 κύκλοι φόρτισης με πλάτος ταλάντωσης  $d = 0.01 m$  στον πάσσαλο-πηγή, χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 και το εδαφικό προφίλ με τιμή  $G/S_u = 600$ . Στην συνέχεια και αφού το σύστημα έφτασε σε «μόνιμες συνθήκες», μετρήθηκε το πλάτος ταλάντωσης στην κεφαλή των παθητικών πασσάλων καθώς και η διαφορά φάσης που αυτοί παρουσίαζαν σχετικά με την πηγή. Οι παθητικοί πάσσαλοι είχαν αποκλειστικά ιδιότητες σκυροδέματος στις αναλύσεις, για τους εξής λόγους:

1. Την πιθανότητα δημιουργίας σημαντικών ανακλάσεων λόγω της ύπαρξης των ενδιάμεσων πασσάλων εντός του δυναμικού παραμορφωσιακού πεδίου, κάτι που θα ήταν αντίθετο στην μεθοδολογία επαλληλίας 2 πασσάλων που προτείνει ο Ρουλος.
2. Η διαφορετική μάζα των πασσάλων έναντι του εδάφους οδηγεί σε επιρροή της κίνησης, λόγω διαφορετικών αδρανειακών φορτίων που αναπτύσσονται.

Στις **Εικόνες 28 και 29** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες μετακινήσεων των 3 πασσάλων του προβλήματος, όπως αυτές εξήχθησαν από το Abaqus, για τις δυο ακραίες περιπτώσεις συχνότητας διέγερσης  $\alpha_0 = 0.1$  και  $1.0$ . Οι πάσσαλοι παρουσίασαν ημιτονοειδείς μετακινήσεις, όχι ακριβώς αρμονικές, όμως όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3 το φασματικό περιεχόμενο παραμένει κοινό με του διεγέρτη και η κίνηση διατηρεί την περιοδικότητά της. Από τα σχήματα αυτά είναι εμφανές πως δεν υπάρχει κάποιο φαινόμενο σκιάς ανάμεσα στους πασσάλους καθώς και ότι τα σύνορα του προσομοιώματος λειτουργούν ομαλά, όσον αφορά την απόσβεση των κυμάτων που φτάνουν σε αυτά. Η αρνητική κλίση που παρουσιάζουν οι καμπύλες είναι μόνιμο μοτίβο σε όλες τις συχνότητες, όταν η ανάλυση είναι μη γραμμική και αποδίδεται στις μόνιμες παραμορφώσεις του εδάφους, καθώς δεν παρουσιάζεται αντίστοιχο φαινόμενο σε ελαστικές αναλύσεις.

Στις **Εικόνες 30 και 31** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τον υπολογισμό των δυναμικών συντελεστών αλληλεπίδρασης, για πλάτος ταλάντωσης πηγής  $d = 0.01 \text{ m}$ . Είναι σημαντικό να τονιστεί πως οι συντελεστές αυτοί είναι διαφορετικοί για κάθε πλάτος ταλάντωσης και αυτό καθιστά τα αποτελέσματα αυτής της ενότητας εργαλεία ποιοτικής παρακολούθησης του φαινομένου και όχι εργαλεία σχεδιασμού. Εάν για παράδειγμα είχε επιλεγθεί πλάτος ταλάντωσης πηγής  $d = 0.10 \text{ m}$  τότε οι συντελεστές αυτοί θα έτειναν να μηδενιστούν, διότι το έδαφος δεν μπορεί να ακολουθήσει τόσο μεγάλες μετακινήσεις. Αντίστοιχα, εάν το πλάτος ταλάντωσης ήταν  $d = 0.001 \text{ m}$  οι συντελεστές θα έτειναν στις αναλυτικές τιμές που προκύπτουν από τους Dobry & Gazetas αφού το έδαφος θα συμπεριφερόταν ελαστικά. Δηλαδή, το πλάτος του διαδιδόμενου κύματος εξαρτάται άμεσα από την ικανότητα ελαστικής παραμόρφωσης του εδάφους γύρω από την πηγή και όχι από το πλάτος ταλάντωσής της ίδιας, το οποίο η εδαφική μάζα αδυνατεί να ακολουθήσει αν αυτό λάβει μεγάλες τιμές.

Στις **Εικόνες 32 έως 37** γίνεται η σύγκριση των καμπυλών που εξήχθησαν από τις αναλύσεις με τις προβλέψεις της ελαστικής θεωρίας κατά Dobry & Gazetas. Η καμπύλες ακολουθούν πιστά κατά μορφή την θεωρία ελαστικότητας και η βασική



διαφοροποίησή τους βρίσκεται στο μέτρο των συντελεστών, το οποίο και είναι σημαντικά μειωμένο.

Όσον αφορά το διάγραμμα του φανταστικού μέρους του πασσάλου **3D**, φαίνεται να υπάρχει ένα παράδοξο στην καμπύλη αφού για συχνότητα διέγερσης  $\alpha_o = 0.1$  η διαφορά φάσης μεταξύ πηγής και του πασσάλου είναι αρνητική, κάτι που θα σήμαινε ότι πρώτα γίνεται η ταλάντωση στον πάσσαλο και ύστερα στην πηγή. Επειδή αυτό δεν είναι δυνατόν να ισχύει, στην **Εικόνα 38** παρουσιάζεται η εξήγηση της παραπάνω «ύποπτης» συμπεριφοράς. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες μετακίνησης της πηγής και του κορυφαίου σημείου της διεπιφάνειας. Ενώ λοιπόν η διεπιφάνεια ακολουθεί την κίνηση της πηγής, όσον αφορά την άνοδο και την κάθοδό της, με μια μικρή καθυστέρηση (όπως φαίνεται και από τις διακεκομμένες γραμμές), η αδυναμία της να ακολουθήσει την πηγή την οδηγεί στο να φτάσει την μέγιστη μετακίνησή της πριν την πηγή. Συνεπώς, ενώ το έδαφος κινείται καθυστερημένα σε σχέση με την πηγή, επειδή ολοκληρώνει τις κινήσεις του νωρίτερα από αυτήν ο κυματισμός ταξιδεύει μέσα στο έδαφος νωρίτερα, δημιουργώντας αυτό το παράδοξο φαινόμενο. Η συμπεριφορά αυτή παρουσιάζεται μόνο στην χαμηλότερη συχνότητα διέγερσης  $\alpha_o = 0.1$ , όπως φαίνεται και στις συγκεντρωτικές καμπύλες αλλά και στην σύγκριση με την **Εικόνα 39**, που αντιστοιχεί σε  $\alpha_o = 1.0$ .

#### 4.2.2 Καμπύλες $F - \delta$

Στις **Εικόνες 40 και 41** παρουσιάζονται οι καμπύλες Δύναμης-Μετακίνησης που επέστρεψε η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία για την επιβληθείσα αρμονική μετακίνηση της πηγής, στις συχνότητες  $\alpha_o = 0.1$  και  $1.0$ .

Στην περίπτωση  $\alpha_o = 0.1$  που αντιστοιχεί σε  $T \approx 0.5$  s, τα αδρανειακά φορτία που αναπτύσσονται σύμφωνα με την θεωρία είναι:

$$F = ma = -V\rho\omega^2u$$

και για τις τιμές του προβλήματός μας :

$$L = 20 \text{ m}, \rho = 2.5 \frac{\text{tn}}{\text{m}^3}, u_{max} = 0.01 \text{ m}, \omega = 13.1 \text{ s}^{-1}$$

υπολογίζεται (αν θεωρήσουμε ότι ο πάσσαλος συμπεριφέρεται ως απαραμόρφωτο σώμα) μια μέγιστη αδρανειακή δύναμη με μέτρο **67.35 KN**, η οποία δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να παραποιήσει την μορφή του διαγράμματος. Έτσι αυτό

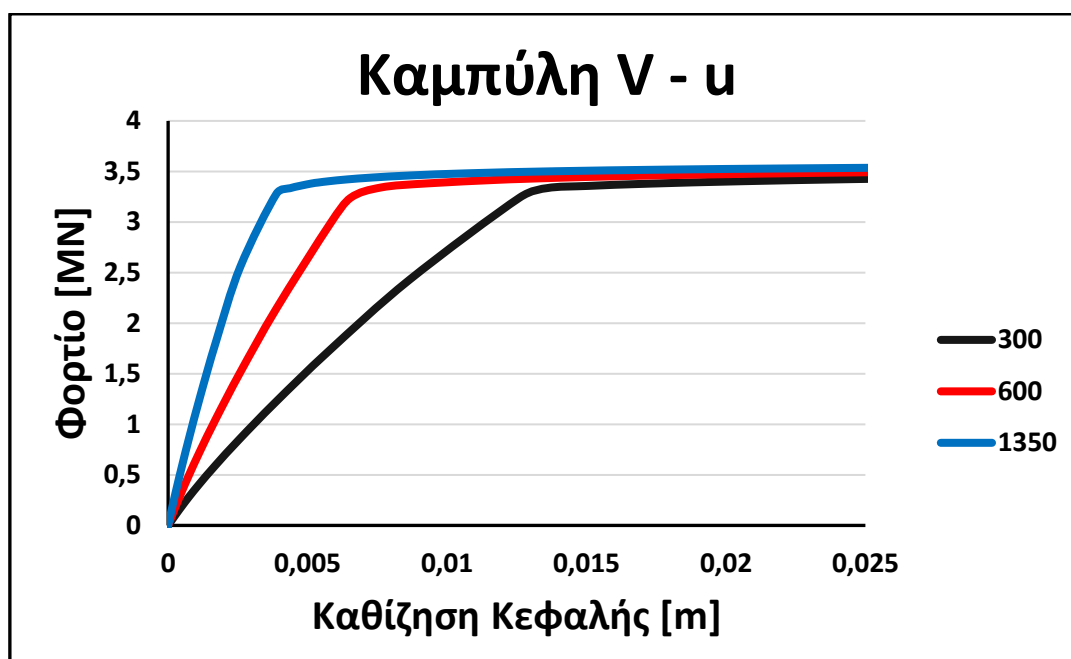
παρουσιάζει μια μορφή ψευδοστατικής φόρτισης πασσάλου, όπου η αντίδραση στην κορυφή του είναι αποτέλεσμα μονάχα της αντοχής του περιβάλλοντος εδάφους.

Αντίθετα, στην περίπτωση  $\alpha_o = 1.0$  που αντιστοιχεί σε υπό-δεκαπλάσια περίοδο, τα αδρανειακά φορτία σύμφωνα με την θεωρία επιστρέφουν μέγιστη αδρανειακή δύναμη με μέτρο  $6746 KN$ , αποτέλεσμα επιτάχυνσης μέτρου  $\alpha_{max} \approx 17 g$ . Η δύναμη αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους, με αποτέλεσμα να υπερσχύει αυτής στο διάγραμμα και η μορφή του να τείνει προς διάγραμμα  $F - \delta$  απλού αρμονικού ταλαντωτή, παρουσιάζοντας διαφορά φάσης  $180^\circ$  μεταξύ των 2 μεγεθών. Φυσικά, η ύπαρξη υστεριτικής απόσβεσης αλλά και απόσβεσης ακτινοβολίας επηρεάζει σημαντικά την μορφή της καμπύλης, δημιουργώντας ένα βρόγχο υστέρησης σημαντικού μεγέθους.

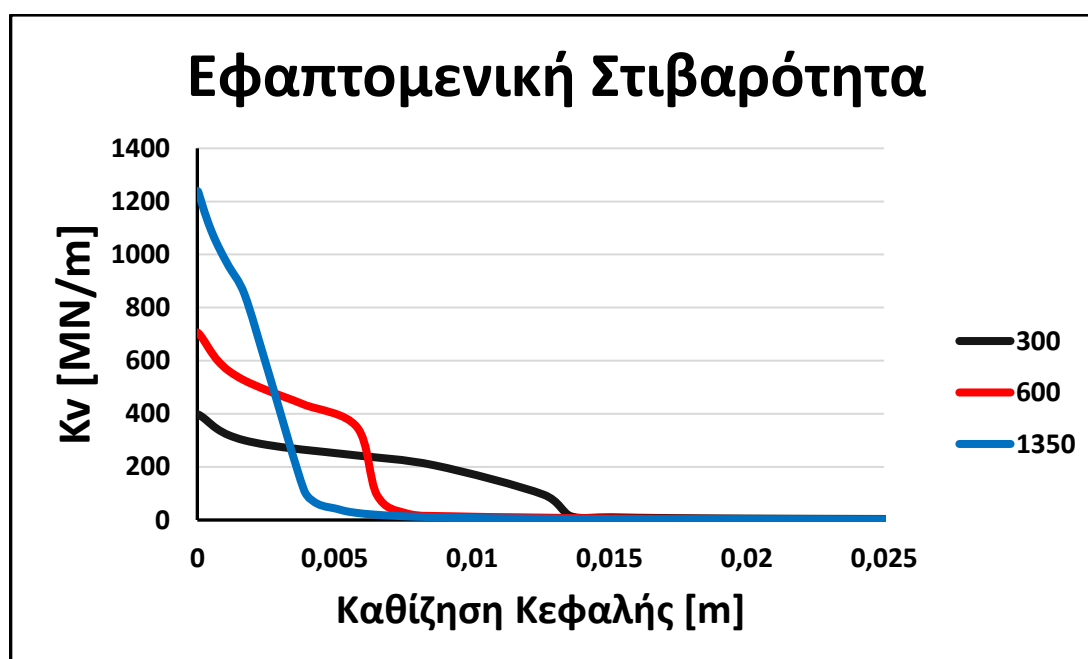
Γίνεται κατανοητό πως τέτοια φορτία είναι αδύνατο να ασκηθούν σε πάσσαλο ο οποίος αντλεί την αντοχή του από το περιβάλλον έδαφος, καθώς η διαρροή του εδάφους θα οδηγούσε σε μηδενισμό της αντίστασης του πασσάλου σε περεταίρω καθίζηση. Τέτοιες χρονοϊστορίες δύναμης προϋποθέτουν εξωτερική διέγερση του πασσάλου από έναν ταλαντωτή, κάτι που δεν εμφανίζεται στην φύση. Είναι πιθανό βέβαια ένας πάσσαλος να ακολουθήσει ταλάντωση με πλάτος ενός εκατοστού, η οποία όμως είτε δεν θα είναι αρμονική είτε η φόρτισή του πασσάλου δεν θα είναι αρμονική.

Η παρούσα ενότητα επικεντρώθηκε στην μελέτη της συμπεριφοράς του πασσάλου και της αρμονικής κυματικής διάδοσης στο έδαφος, πέρα από τα όρια της ελαστικότητας, συνεπώς ήταν αναγκαία η χρήση επιβολής μετακίνησης στην κορυφή του πασσάλου-πηγής. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να συμπεριληφθούν έμμεσα στην μελέτη του προβλήματος οι προαναφερθείσες «ιδιαιτέρως» φορτίσεις. Καθώς όμως στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους η αντοχή του εδάφους δεν είναι δυνατό να ξεπεραστεί, το έδαφος δεν «βλέπει» αυτές τις ιδιαίτερες διεγέρσεις του πασσάλου και από την στιγμή που δεν μας ενδιαφέρει η καταπόνηση του πασσάλου, το «αφύσικο» της διέγερσης δεν επηρεάζει καθόλου την μελέτη.

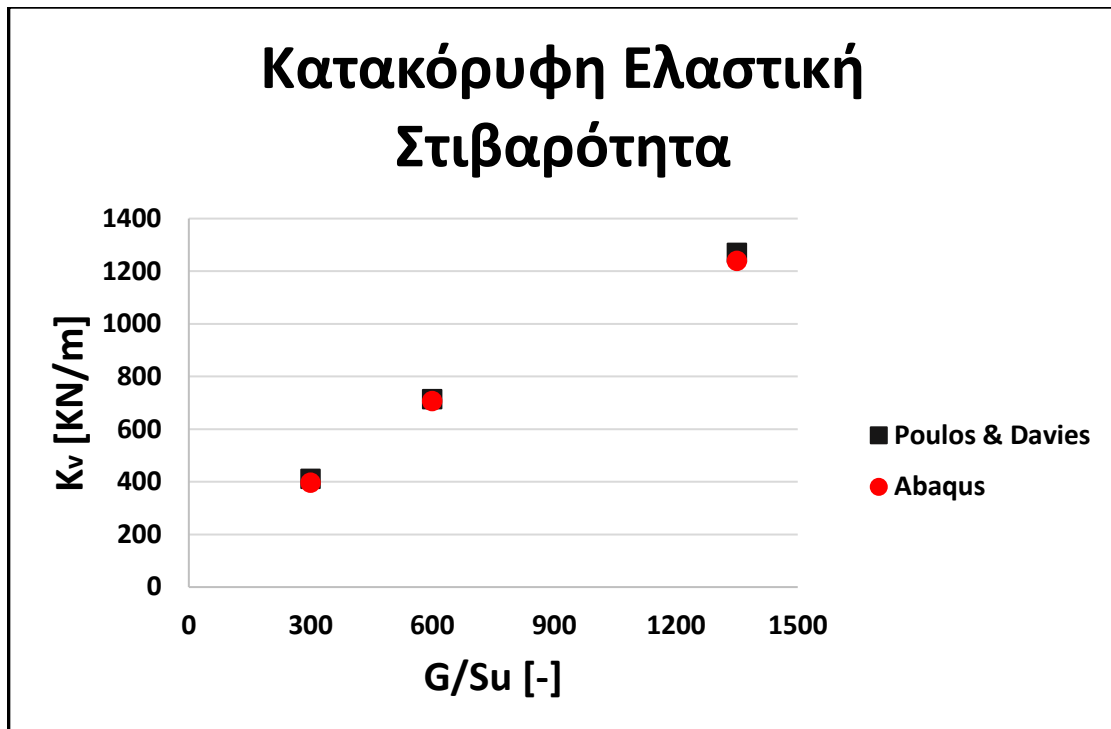
### 4.3 ΣΧΗΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



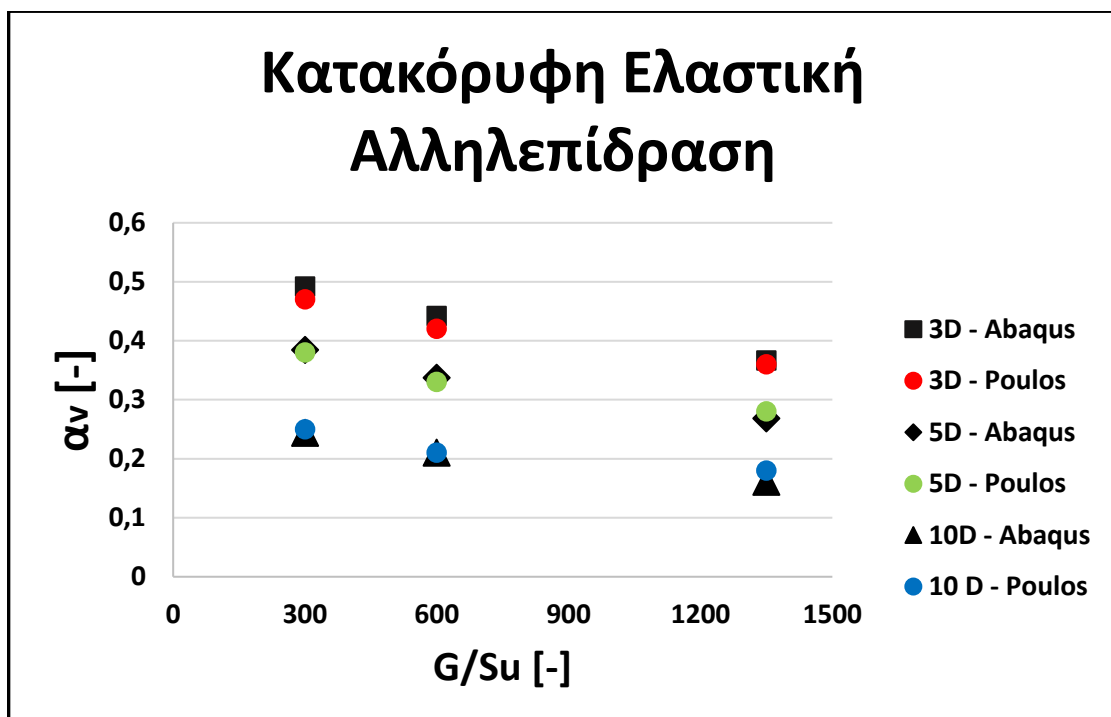
Εικόνα 4.1- Καμπύλες Φορτίου-Καθίζησης του ενεργού πασσάλου στα 3 διαφορετικά προφίλ εδάφους



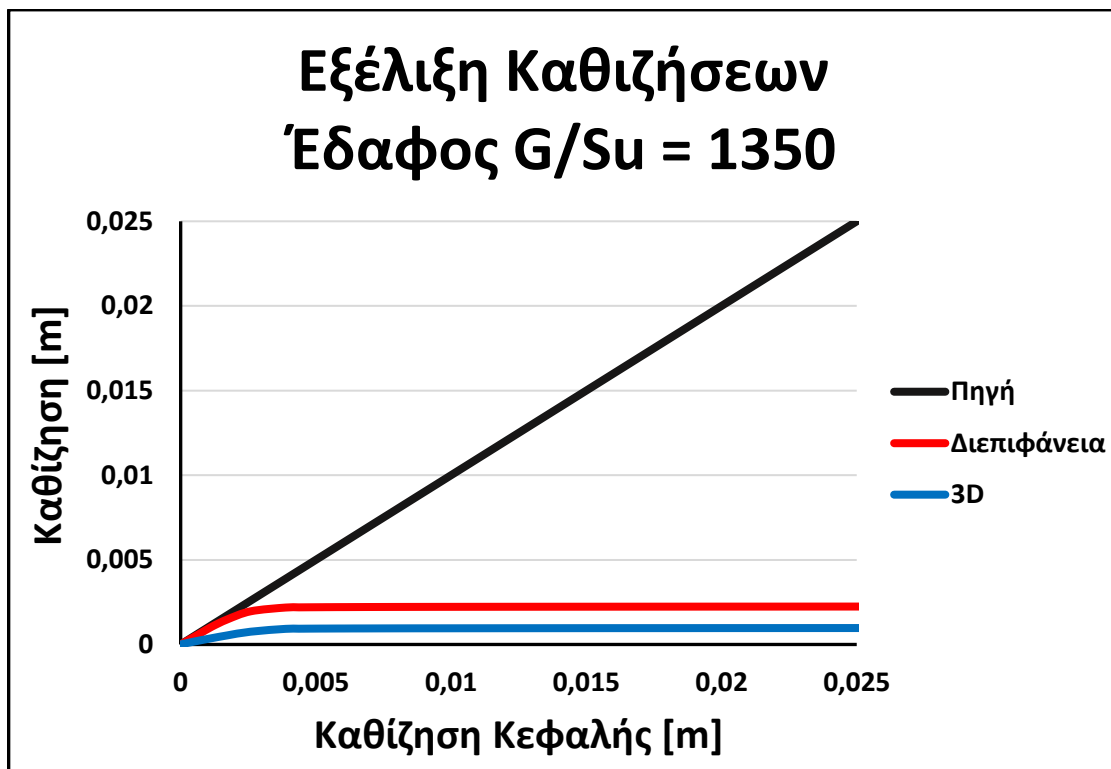
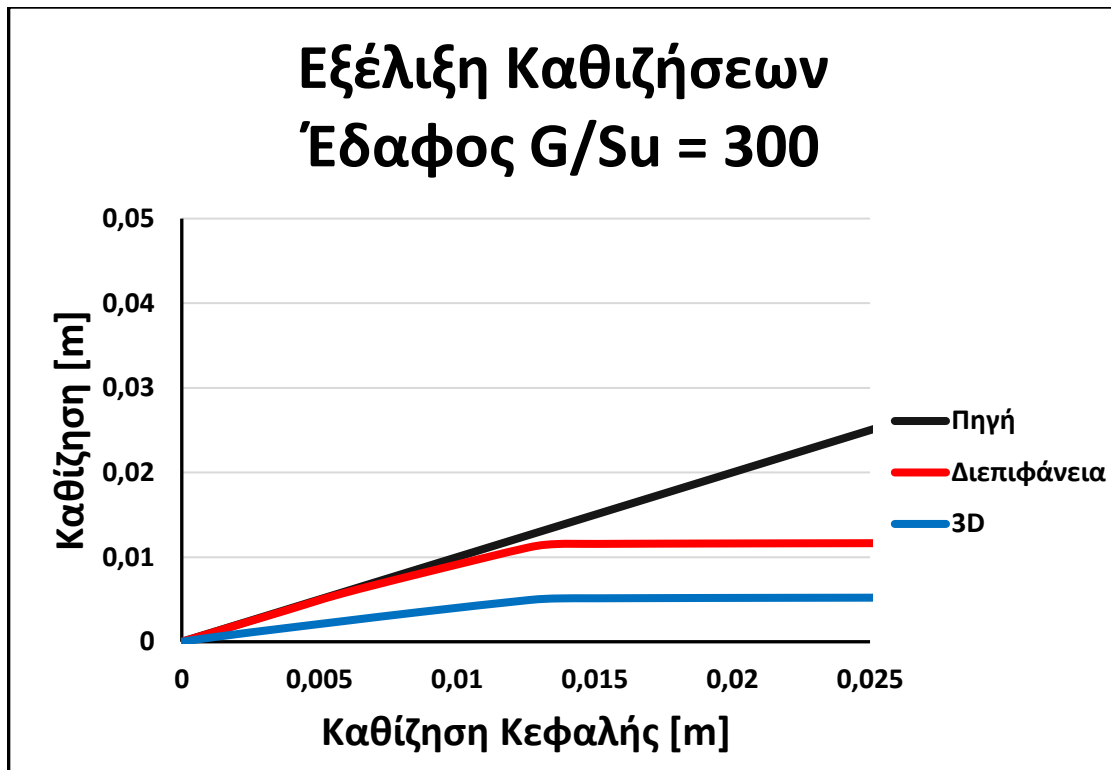
Εικόνα 4.2- Καμπύλες της εφαπτομενικής στιβαρότητας του ενεργού πασσάλου στα 3 διαφορετικά προφίλ εδάφους. Η εφαπτομενική στιβαρότητα αντιπροσωπεύει την πραγματική αντίσταση του πασσάλου σε περεταίρω καθίζηση, σε κάθε επίπεδο φόρτισης



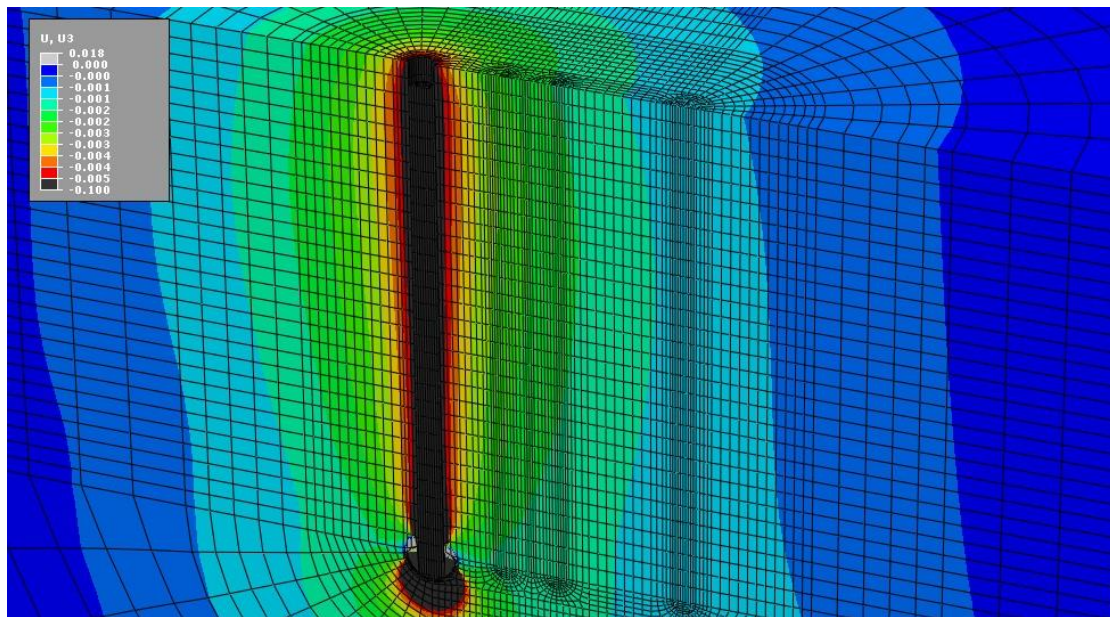
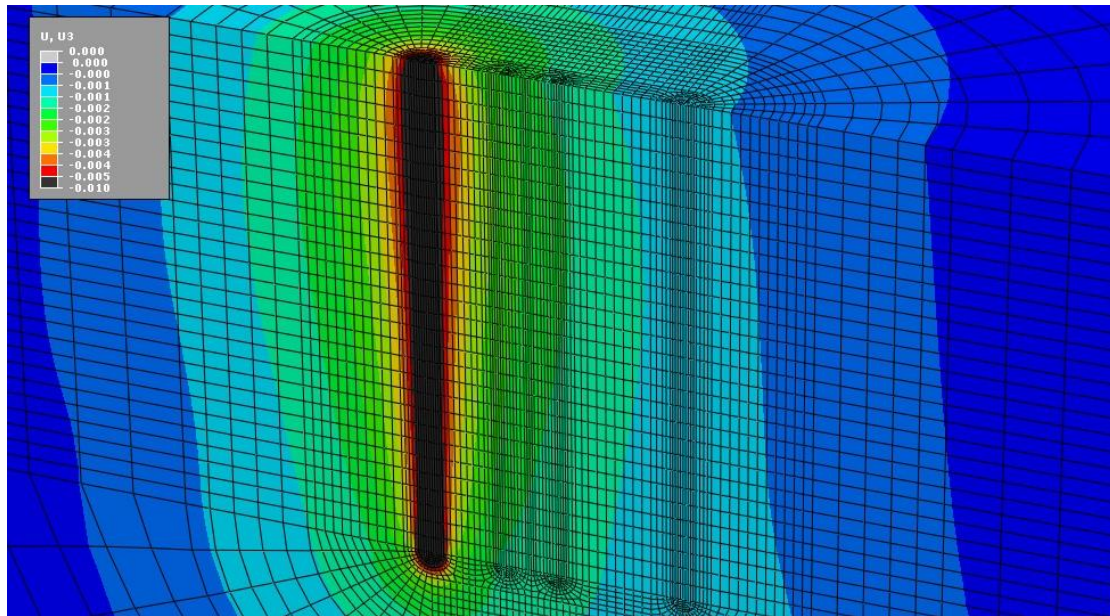
*Εικόνα 4.3- Σύγκριση της κατακόρυφης ελαστικής στιβαρότητας μεμονωμένου πασσάλου, μεταξύ των διαγραμμάτων των Poulos & Davies και των αποτελεσμάτων του Abaqus*



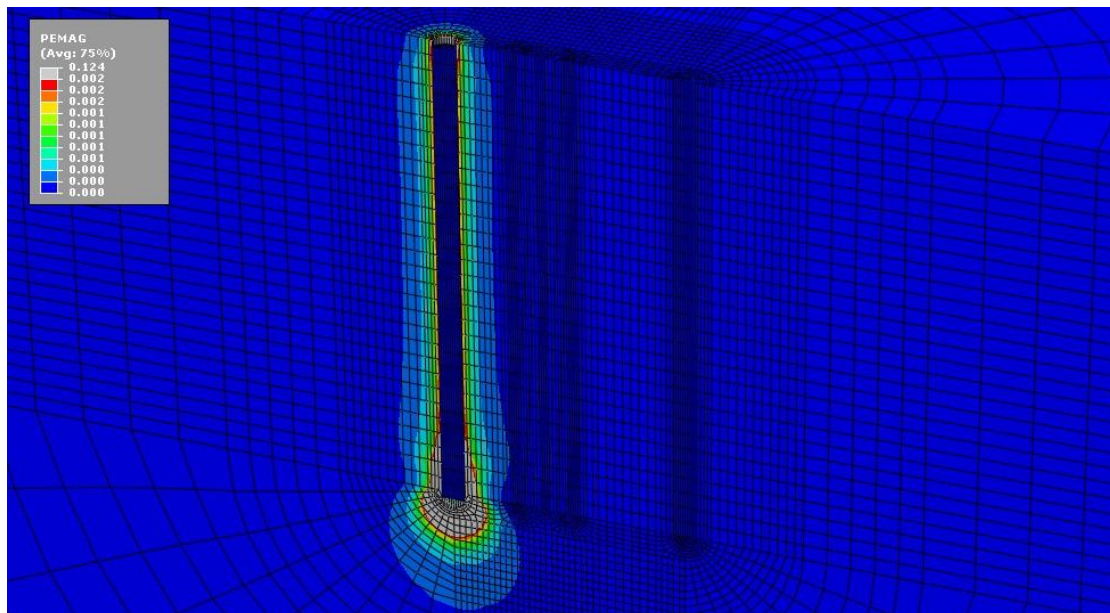
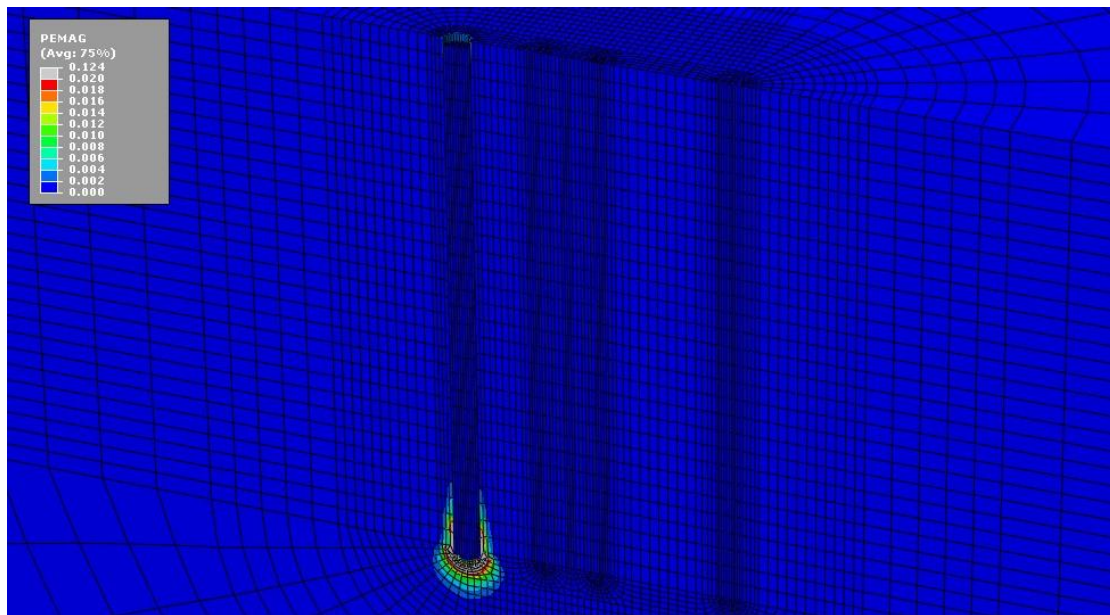
*Εικόνα 4.4- Σύγκριση της κατακόρυφης ελαστικής αλληλεπίδρασης, όπως αυτή προκύπτει για τα δεδομένα του προβλήματος από τα διαγράμματα των Poulos & Davis και από τα αποτελέσματα του Abaqus*



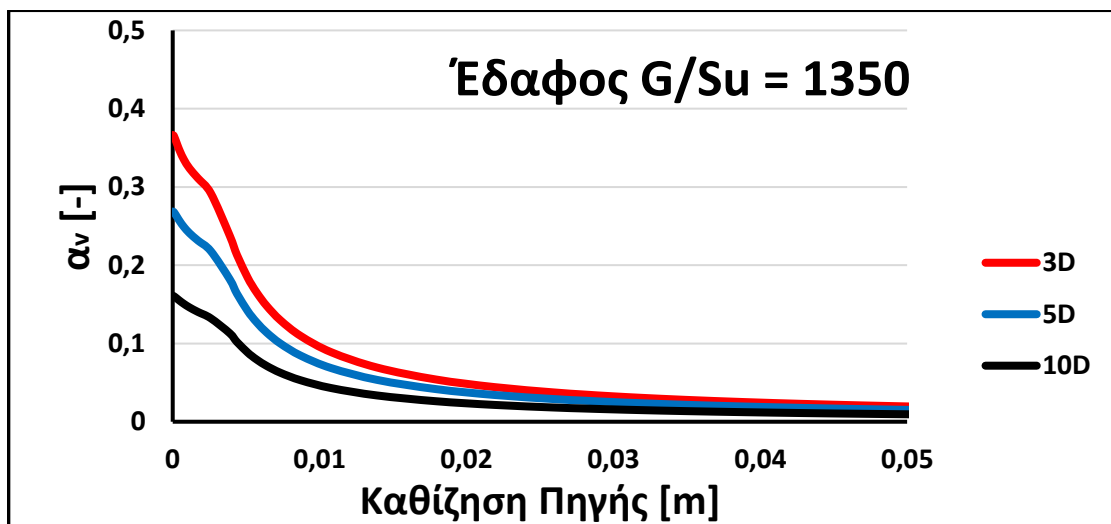
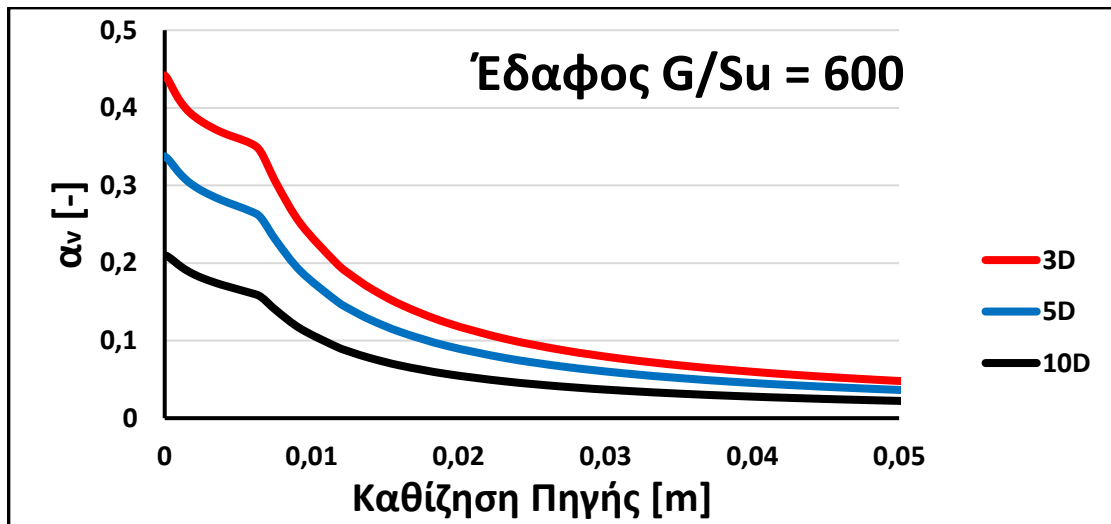
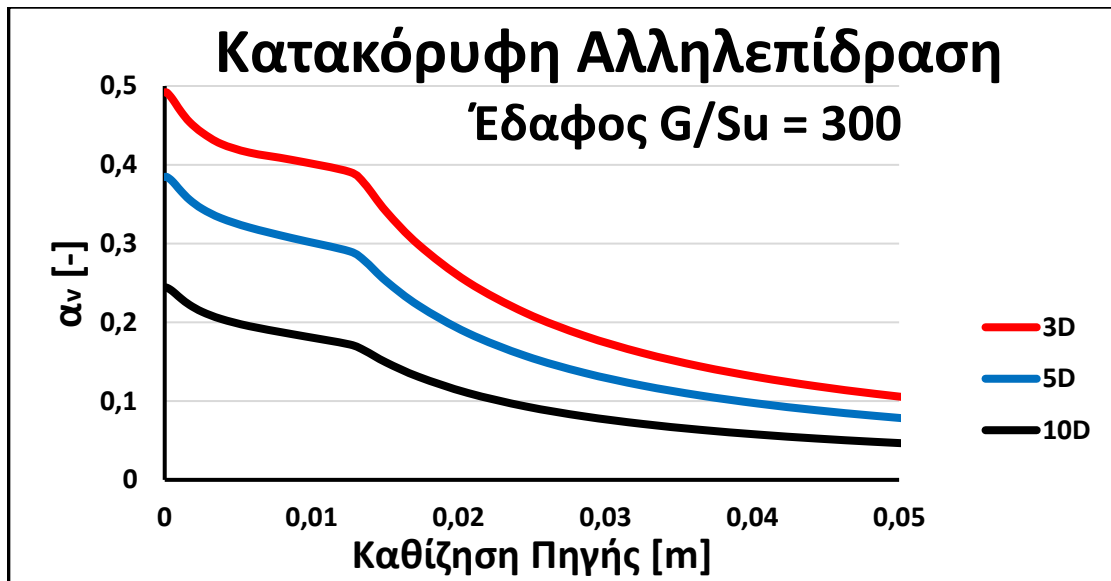
*Εικόνες 4.5-4.6 Χρονοϊστορία των μετακινήσεων του ενεργού πασσάλου-πηγή, του κορυφαίου σημείου της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους και του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση 3D από την πηγή. Είναι εμφανές το σημείο στο οποίο διακόπτεται η μετάδοση καθιζήσεων στο έδαφος.*



**Εικόνες 4.7-4.8** Ισοϋψείς κατακόρυφων μετακινήσεων του προσομοιώματος, για  $G/Su=600$  και ανενεργούς παθητικούς πασσάλους. Η πρώτη εικόνα αντιστοιχεί σε καθίζηση κεφαλής του ενεργού πασσάλου ίση με **1 cm** ενώ η δεύτερη σε καθίζηση ίση με **10 cm**. Τιμές μεγαλύτερες από **5 mm** εμφανίζονται με σκούρο γκρι. Η πανομοιότυπη μορφή των ισοϋψών μετακίνησης επιβεβαιώνει πως ύστερα από την διαρροή της διεπιφάνειας του εδάφους, σταματάει η μετάδοση καθιζήσεων στο έδαφος. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10.**

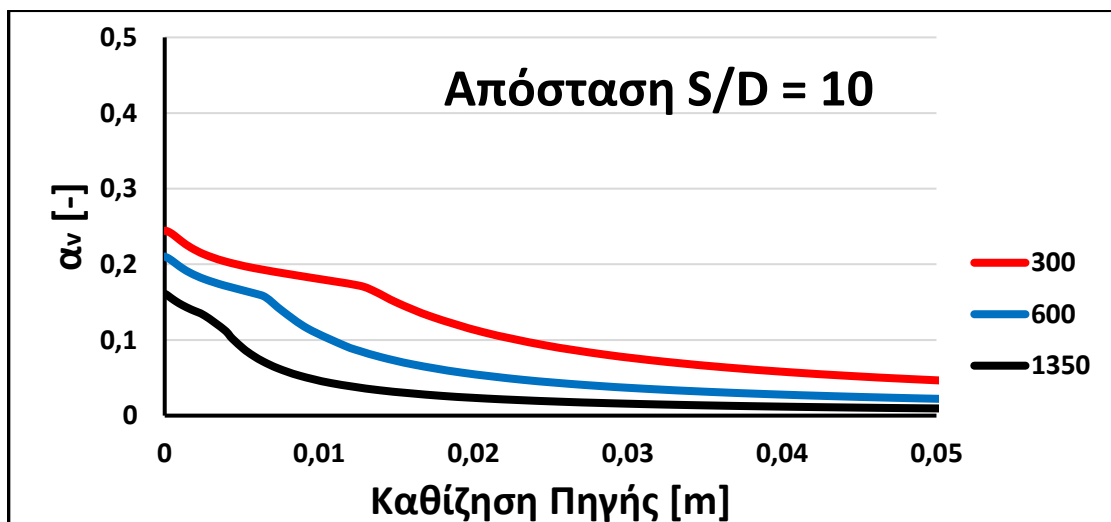
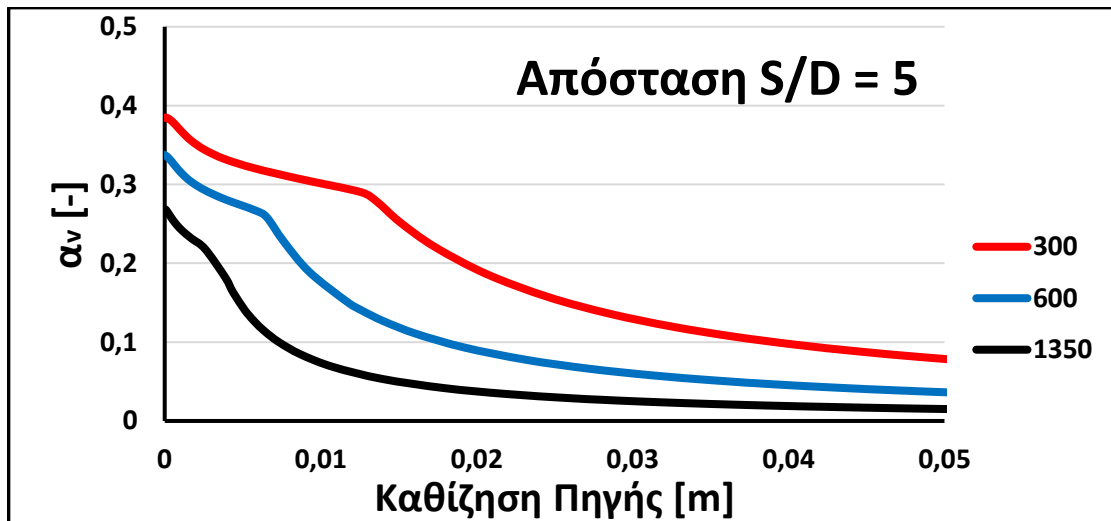
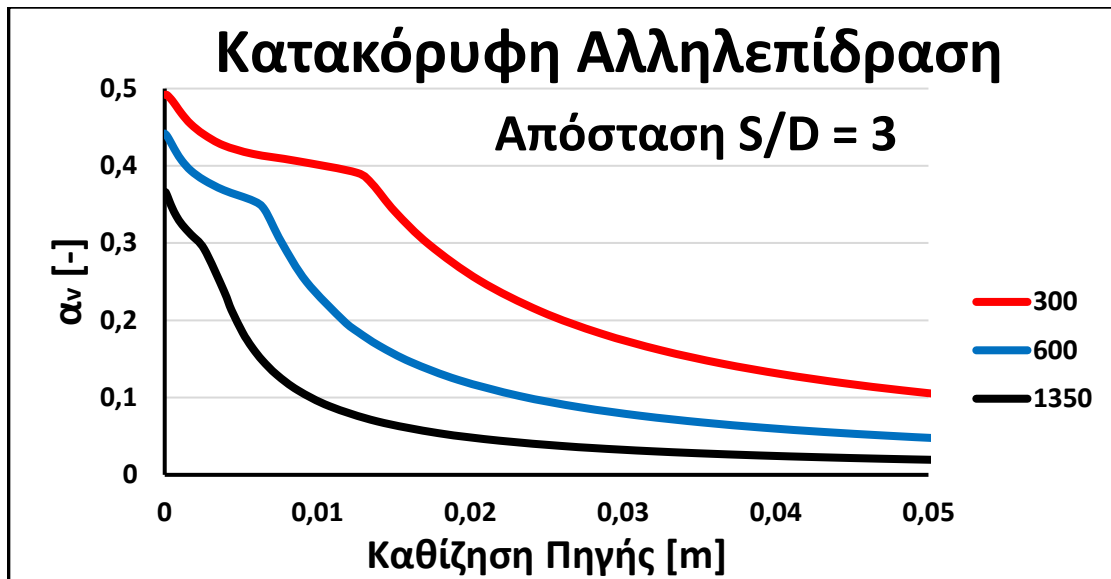


**Εικόνες 4.9-4.10** Ισοϋψείς πλαστικών παραμορφώσεων. Οι 2 εικόνες αντιστοιχούν σε κοινό επίπεδο φόρτισης και η διαφορά τους είναι η τιμή της ανώτερης ισοϋψούς: στην πάνω εικόνα είναι **PEMAG=0.02** και στην κάτω, **PEMAG=0.002**. Είναι εμφανές ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις συγκεντρώνονται σε μια περιοχή πολύ κοντά στον πάσσαλο και η υπόλοιπη εδαφική μάζα λειτουργεί ελαστικά. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10.**

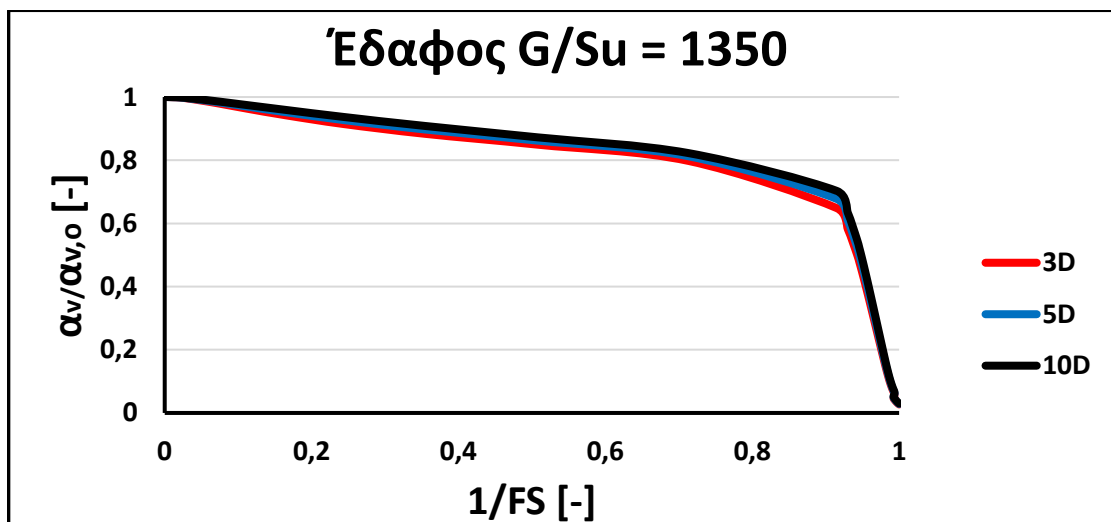
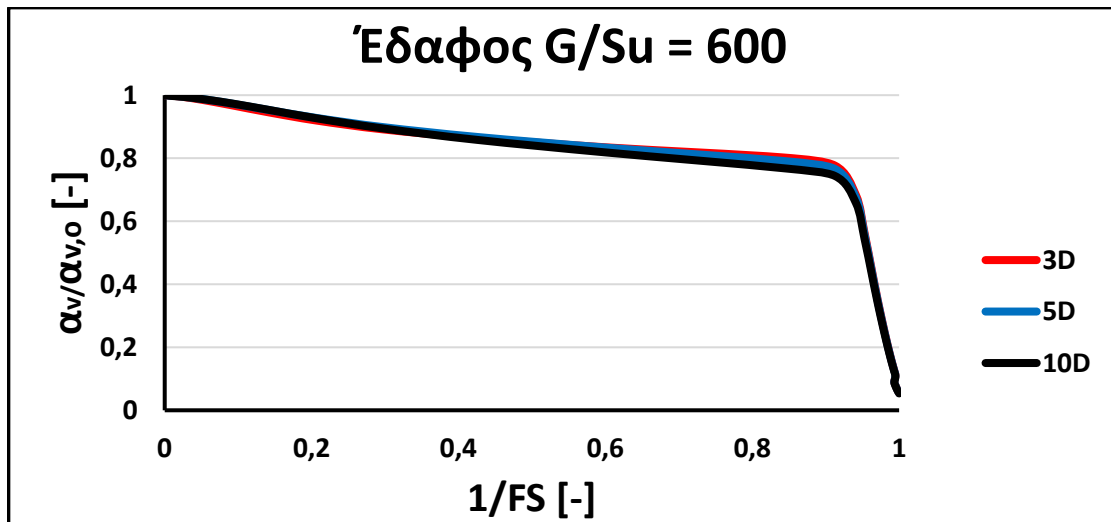
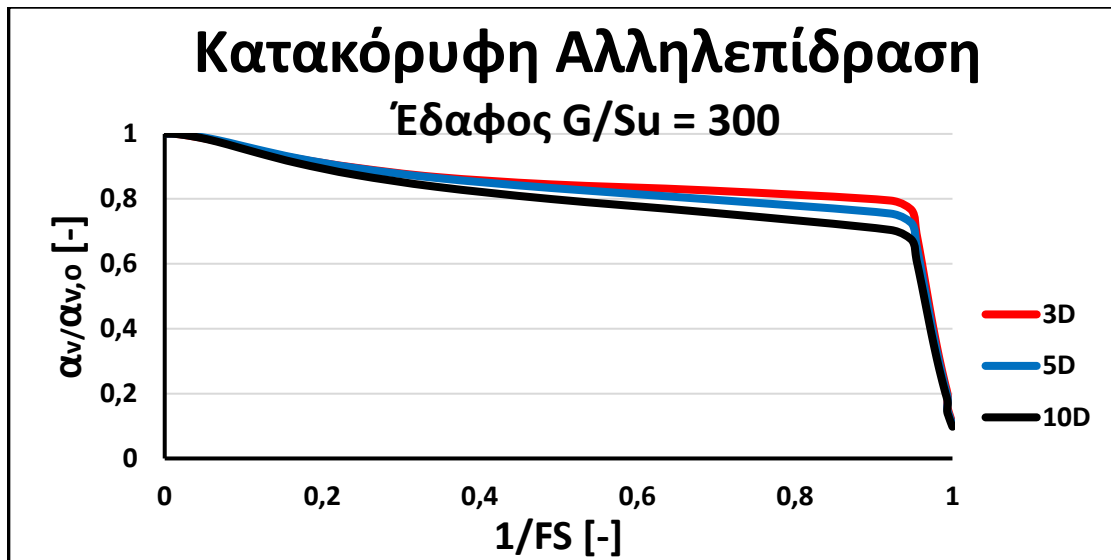


**Εικόνα 4.11-4.13** Μεταβολή της κατακόρυφης αλληλεπίδρασης για μετάβαση από ελαστική σε ανελαστική συμπεριφορά, για 3 διαφορετικά εδαφικά προφίλ. Εμφανής διαφορά ανάμεσα στις 3 περιπτώσεις με πολύ αμεσώτερη μείωση για μετάβαση προς σκληρότερα εδάφη

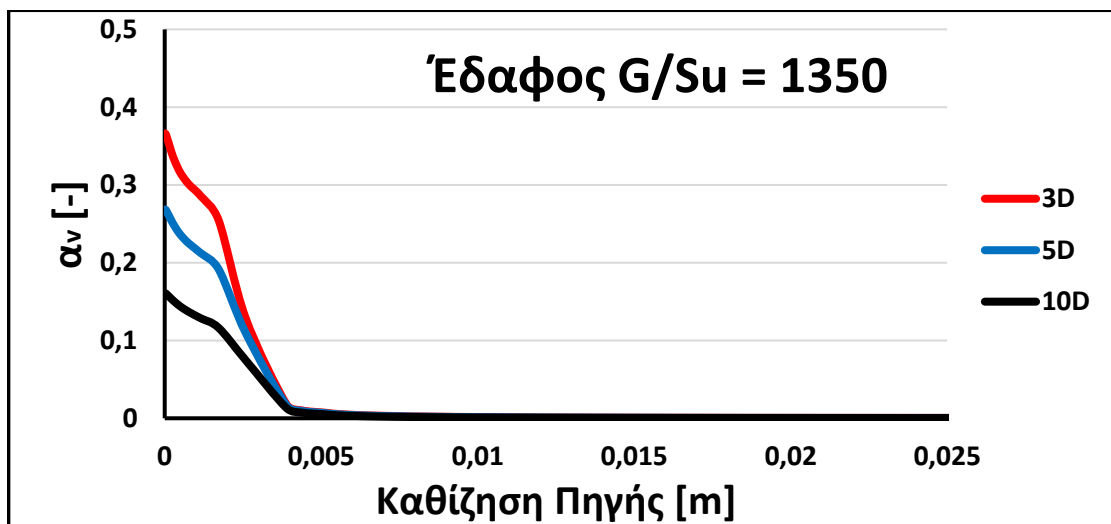
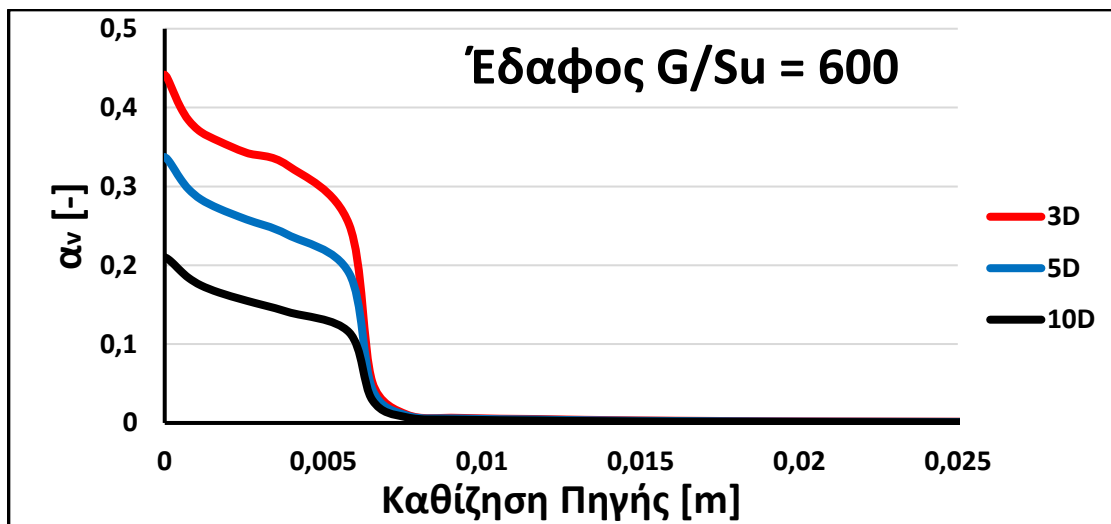
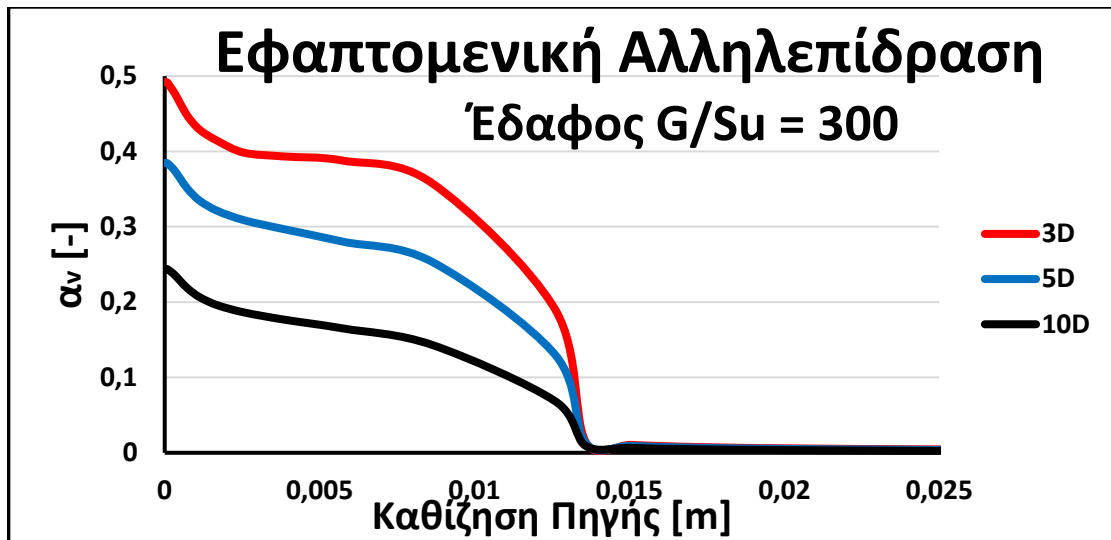




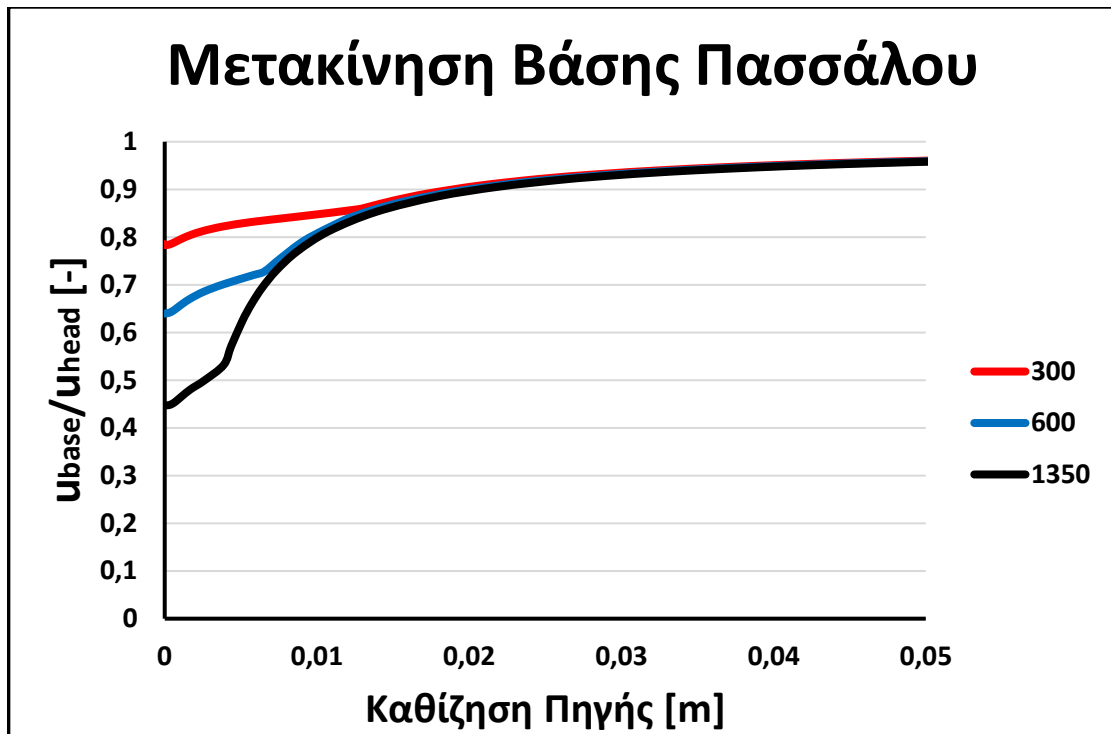
**Εικόνα 4.14-4.16** Μεταβολή της κατακόρυφης αλληλεπίδρασης για μετάβαση από ελαστική σε ανελαστική συμπεριφορά, για 3 διαφορετικά εδαφικά προφίλ. Εμφανής διαφορά ανάμεσα στις 3 περιπτώσεις με πολύ αμεσότερη μείωση για μετάβαση προς σκληρότερα εδάφη



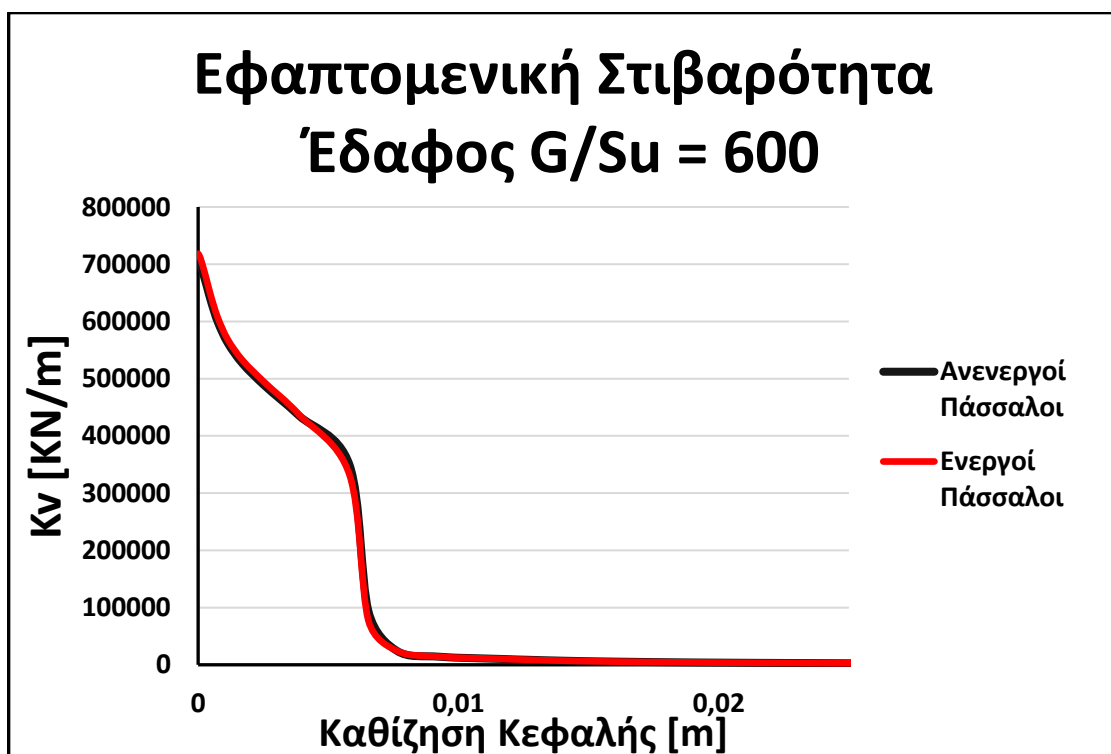
**Εικόνες 4.17-4.19** Μεταβολή της κατακόρυφης αλληλεπίδρασης συναρτήσει της απόστασης από τον ενεργό πάσσαλο, για 3 διαφορετικά εδαφικά προφίλ. Η αλληλεπίδραση δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα σε συνήθη φορτία λειτουργίας και απομειώνεται πιο απότομα στα σκληρά εδάφη, όσο πλησιάζει ο πάσσαλος στην αστοχία



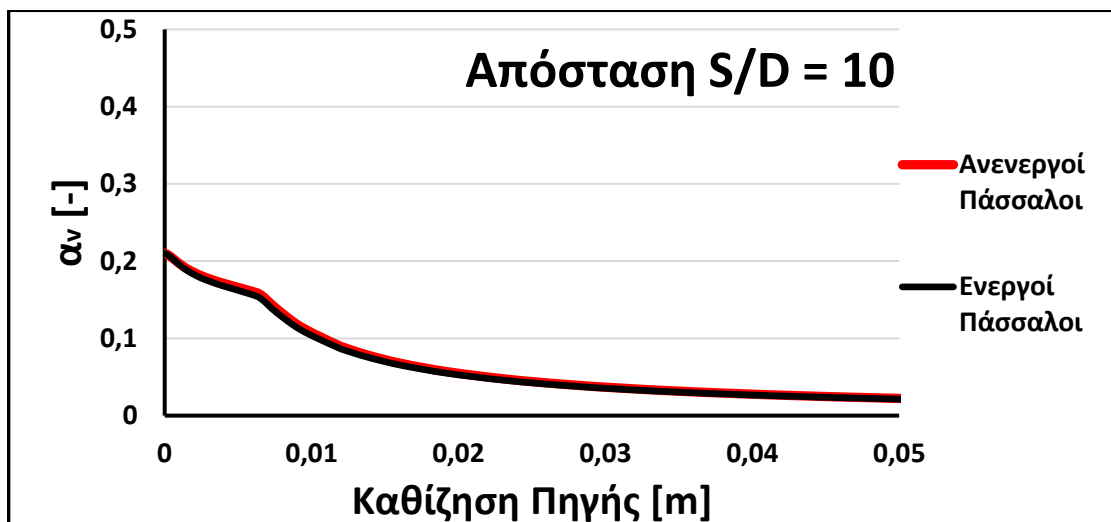
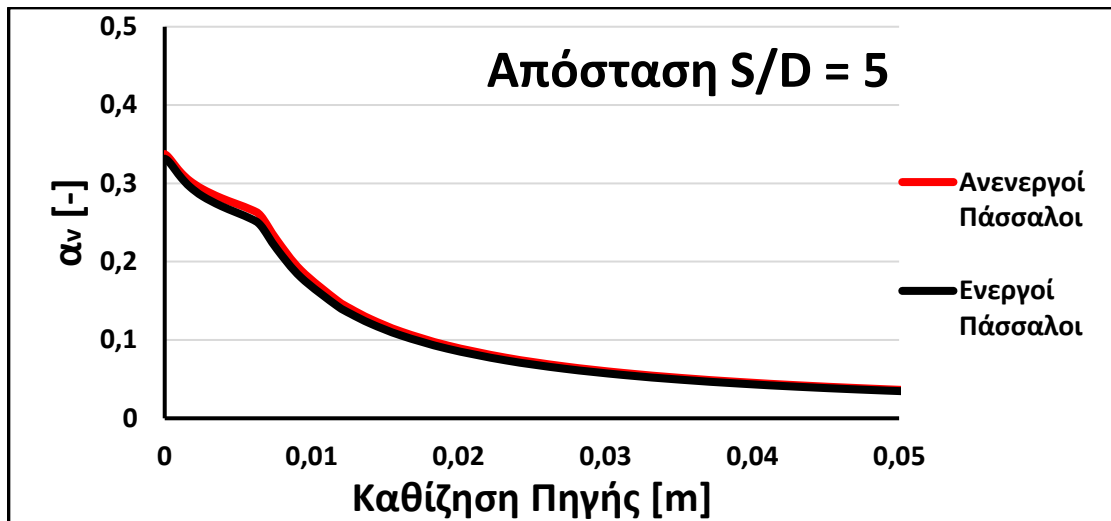
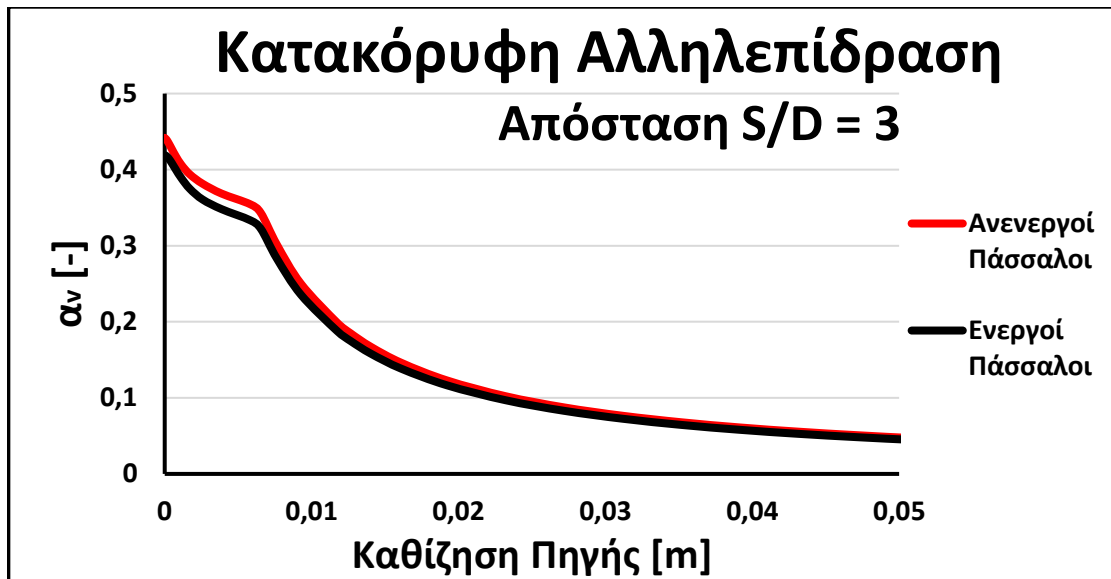
**Εικόνες 4.20-4.22** Διαγράμματα «εφαπτομενικής» αλληλεπίδρασης –έναντι τέμνουσας- που δείχνουν την πραγματική συμπεριφορά της αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους-πασσάλου σε κάθε επίπεδο καθίζησης του ενεργού πασσάλου, για 3 διαφορετικά προφίλ εδάφους. Εμφανής η μηδενική αλληλεπίδραση ύστερα από την διαρροή του πασσάλου.



**Εικόνα 4.23** - Διάγραμμα που δείχνει την εξέλιξη της μετακίνησης στην βάση του πασσάλου σχετικά με την μετακίνηση στην κορυφή του, σαν συντελεστής αλληλεπίδρασης.

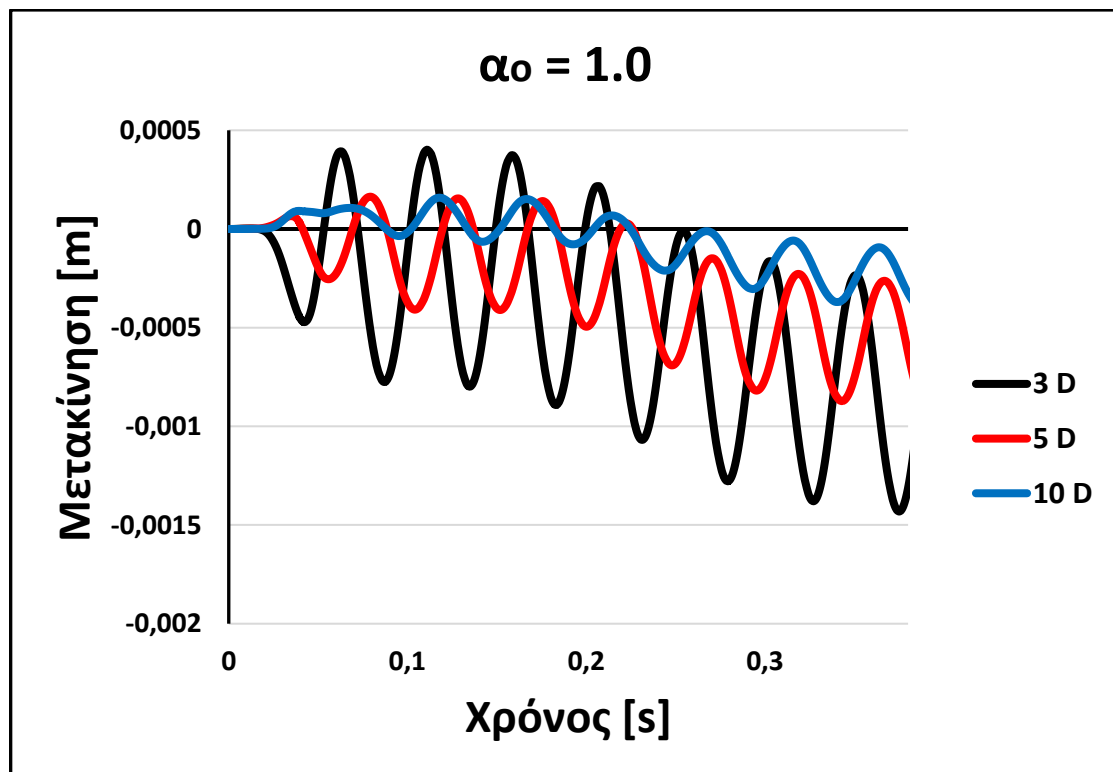
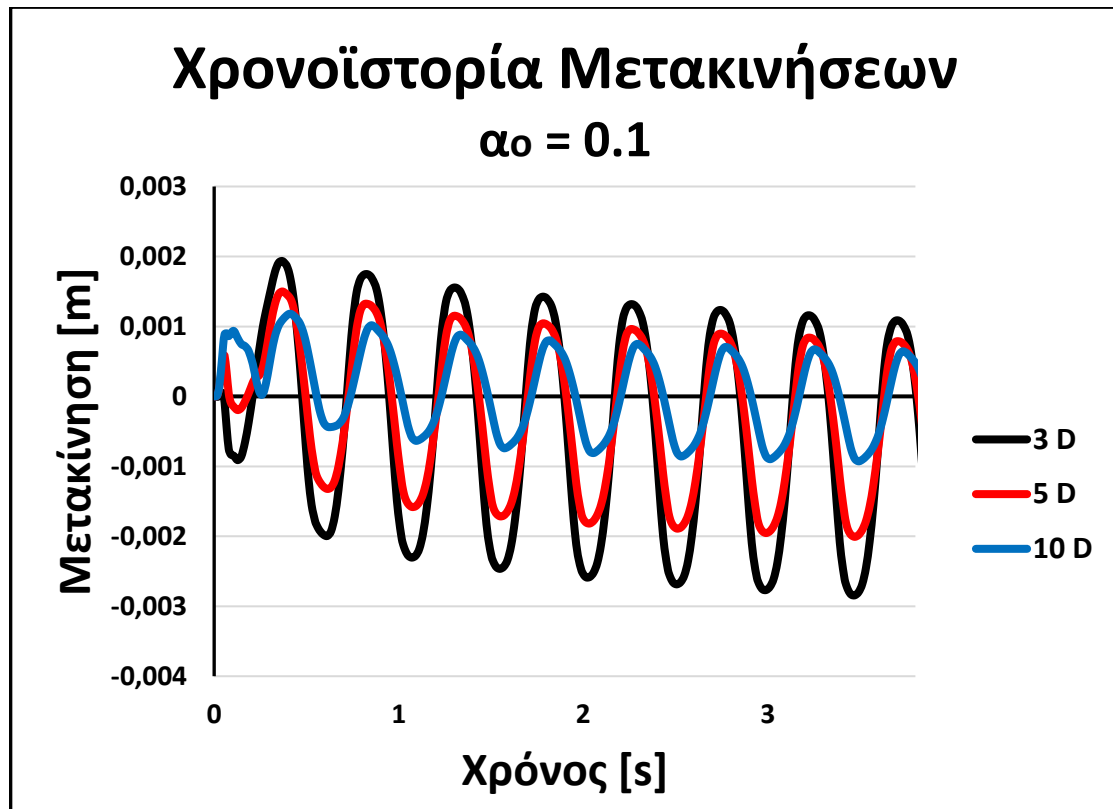


**Εικόνα 4.24** – Διάγραμμα εφαπτομενικής στιβαρότητας πασσάλου για έδαφος  $G/Su=600$ , όπου με μαύρο εμφανίζονται η ανάλυση όπου δεν υπάρχουν οι παθητικοί πάσσαλοι ενώ με κόκκινο η ανάλυση όπου αυτοί είναι ενεργοί. Δεν φαίνεται να υπάρχει καμία επιρροή των παθητικών πασσάλων στην συμπεριφορά του ενεργού.

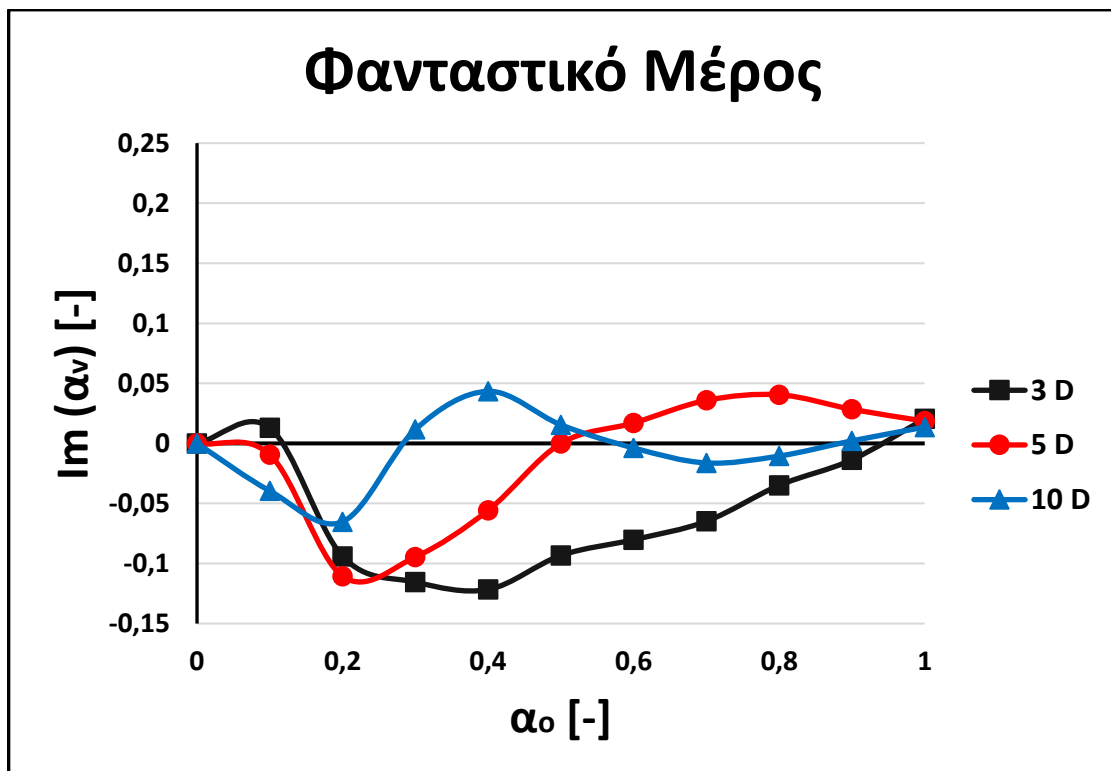
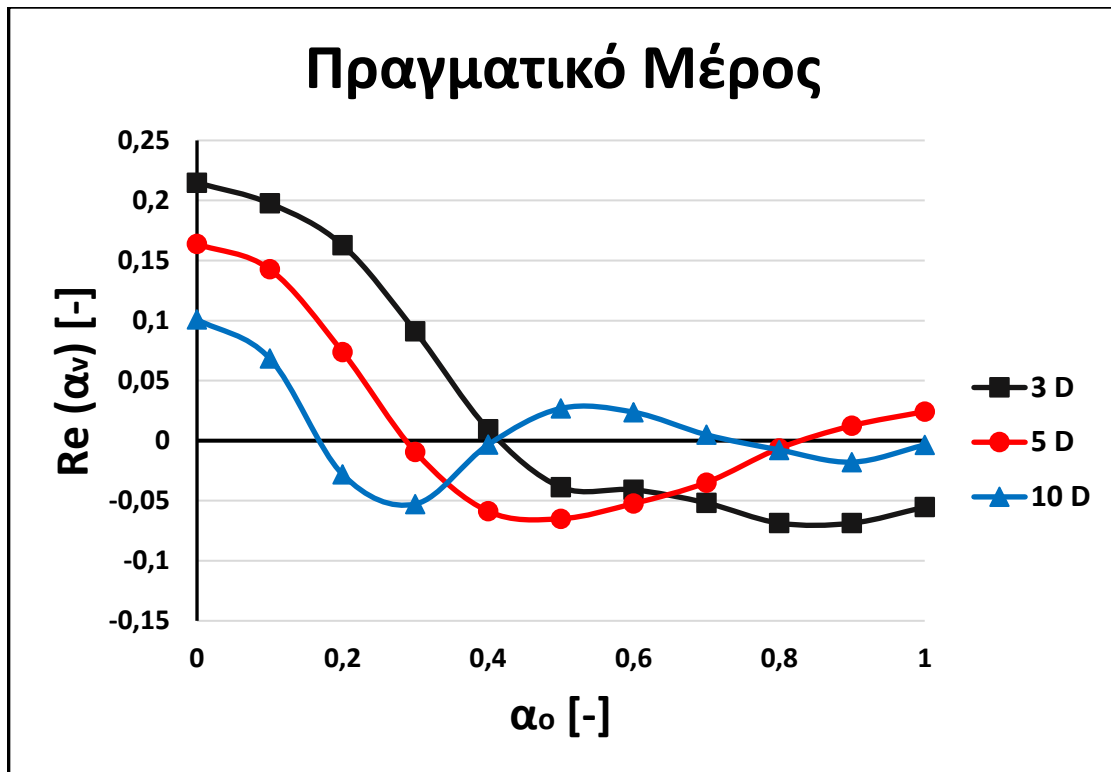


*Εικόνες 4.25-4.27 Επίδραση της ύπαρξης παθητικών πασσάλων στην αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους-πασσάλου, για έδαφος με  $G/Su=600$ . Οι παθητικοί πάσσαλοι δεν φαίνεται να επηρεάζουν την αλληλεπίδραση, ειδικά για μεγαλύτερες αποστάσεις.*

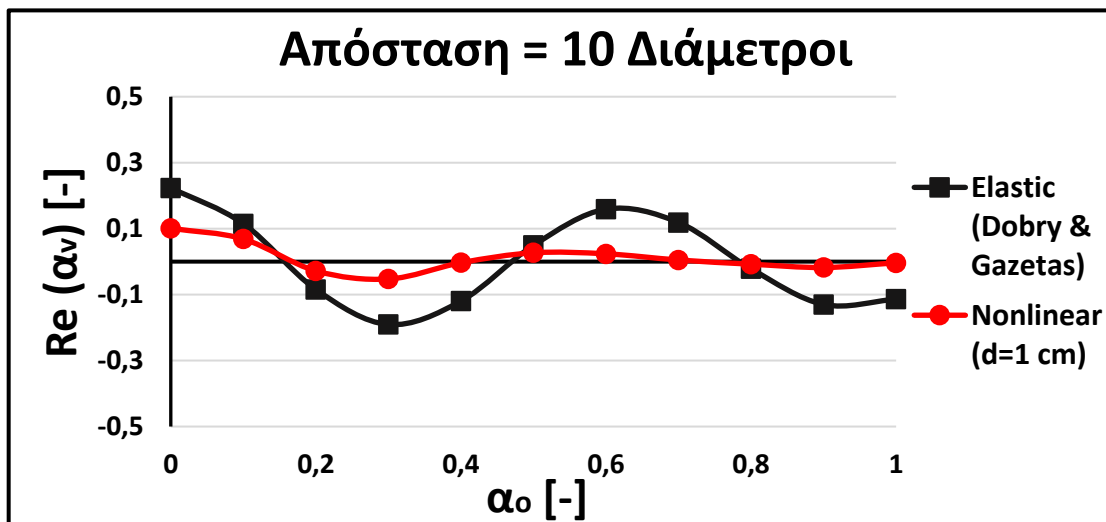
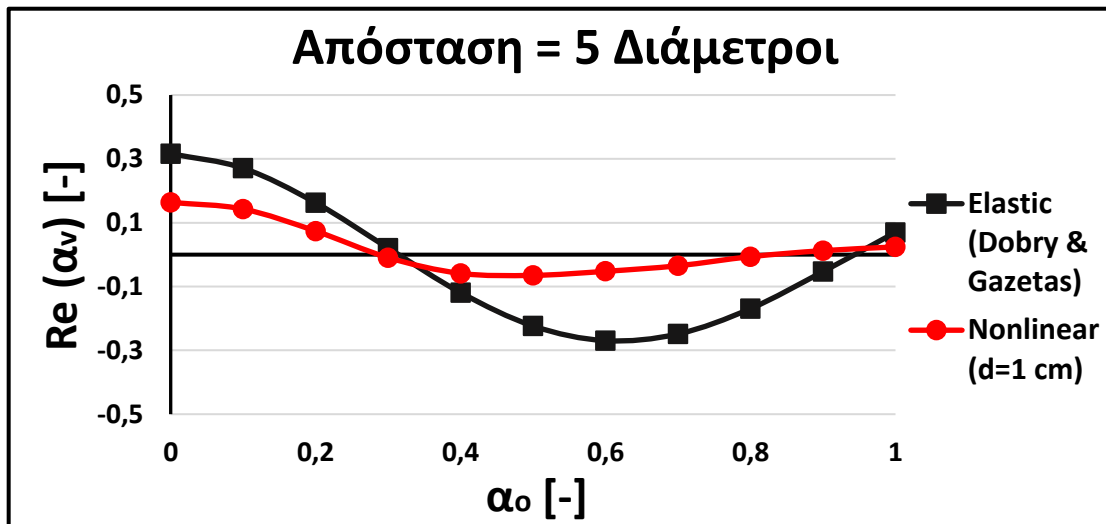
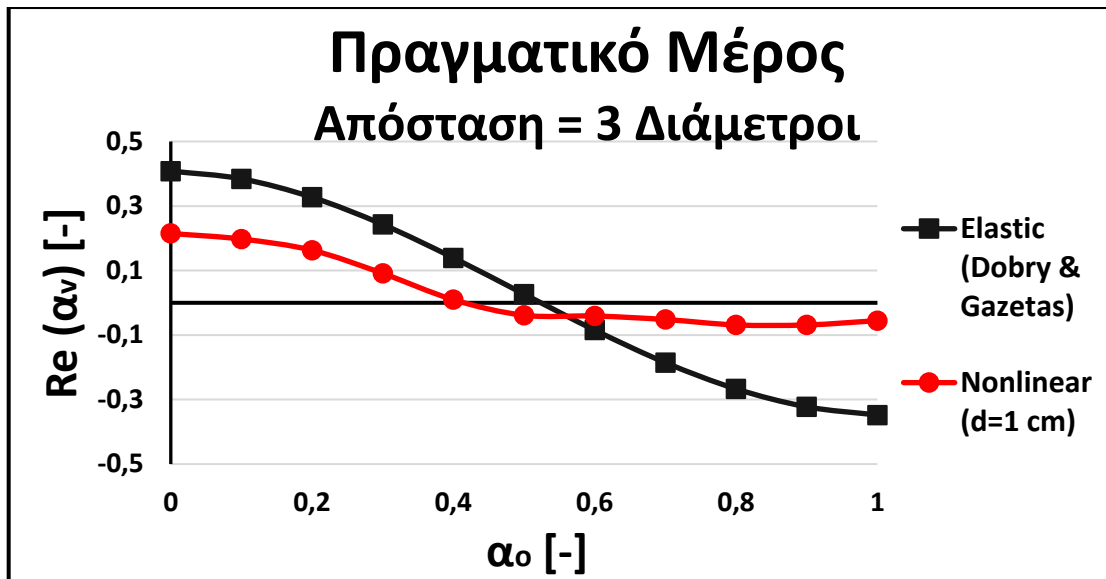
#### 4.4 ΣΧΗΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνες 4.28-4.29 Χρονοϊστορία μετακινήσεων των παθητικών πασσάλων για έδαφος  $G/Su=600$  και συχνότητα διέγερσης που αντιστοιχεί σε  $\alpha_0=0.1$  και  $1.0$ . Επιβαλλόμενο πλάτος ταλάντωσης στην πηγή ίσο με  $1\text{ cm}$ .

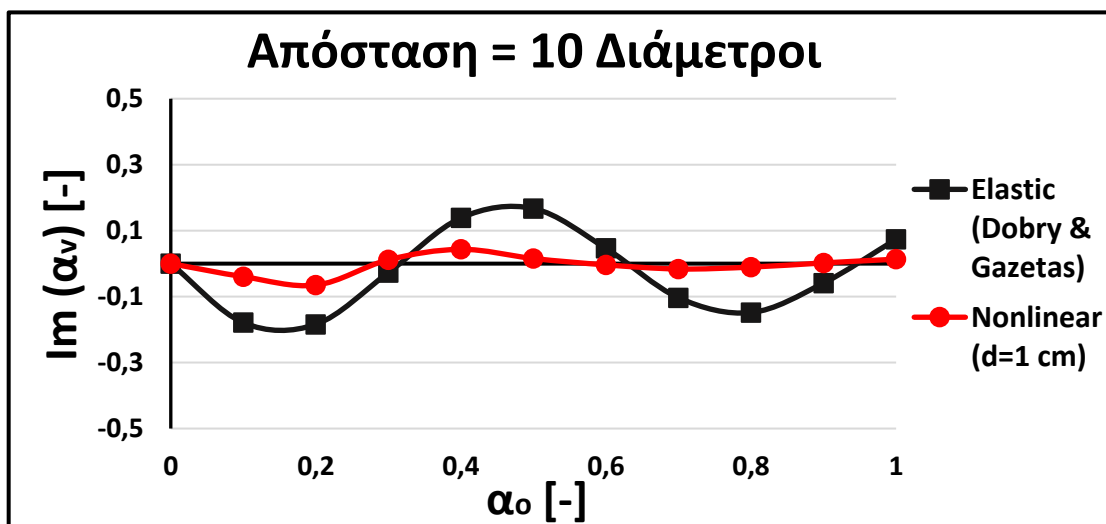
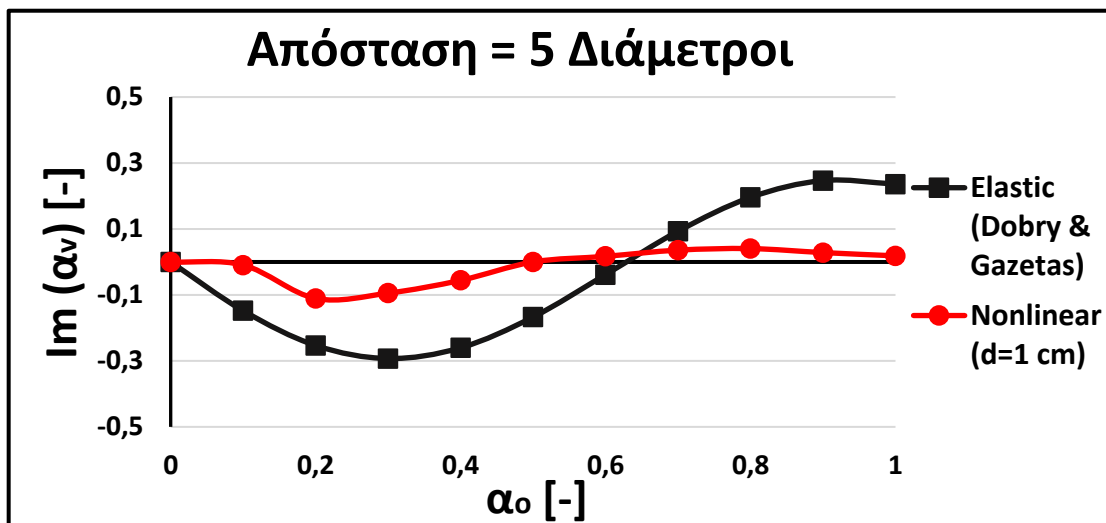
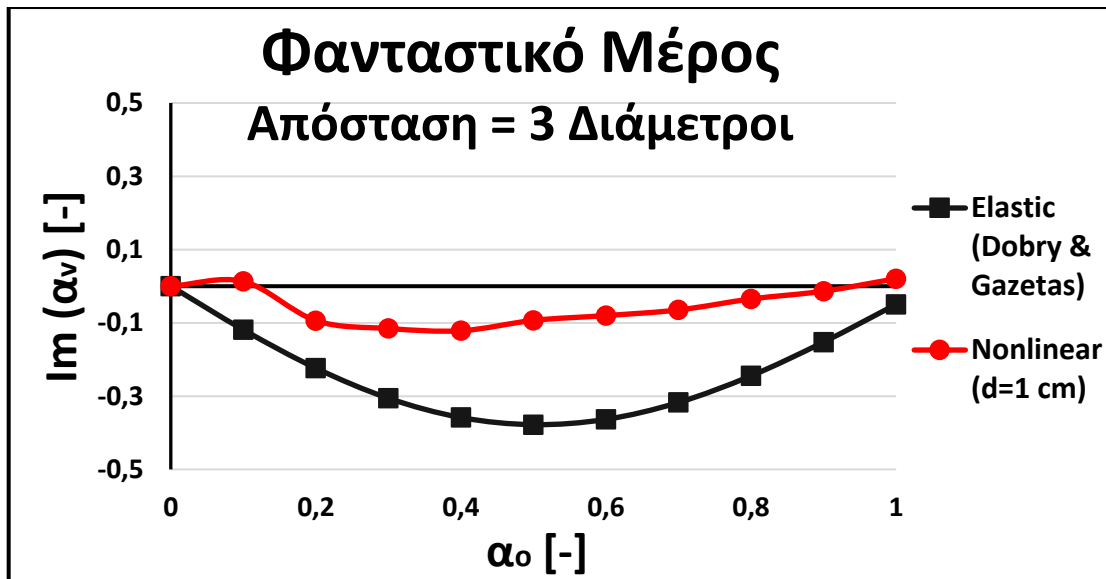


*Εικόνες 4.30-4.31 Διαγράμματα εξέλιξης του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους-πασσάλου, συναρτήσεως της συχνότητας διέγερσης, για έδαφος με  $G/Su=600$ . Συχνότητα  $\alpha_o=0$  ισοδυναμεί με στατική φόρτιση. Επιβαλλόμενο πλάτος ταλάντωσης στην πηγή ίσο με 1 cm.*

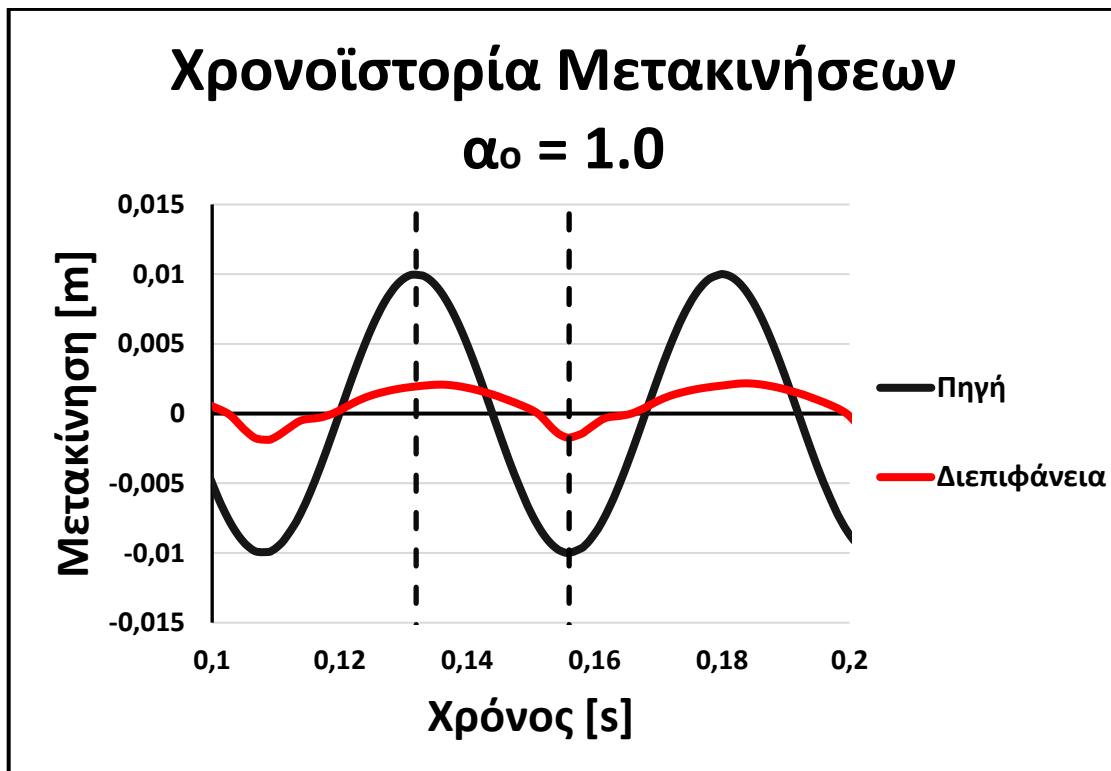
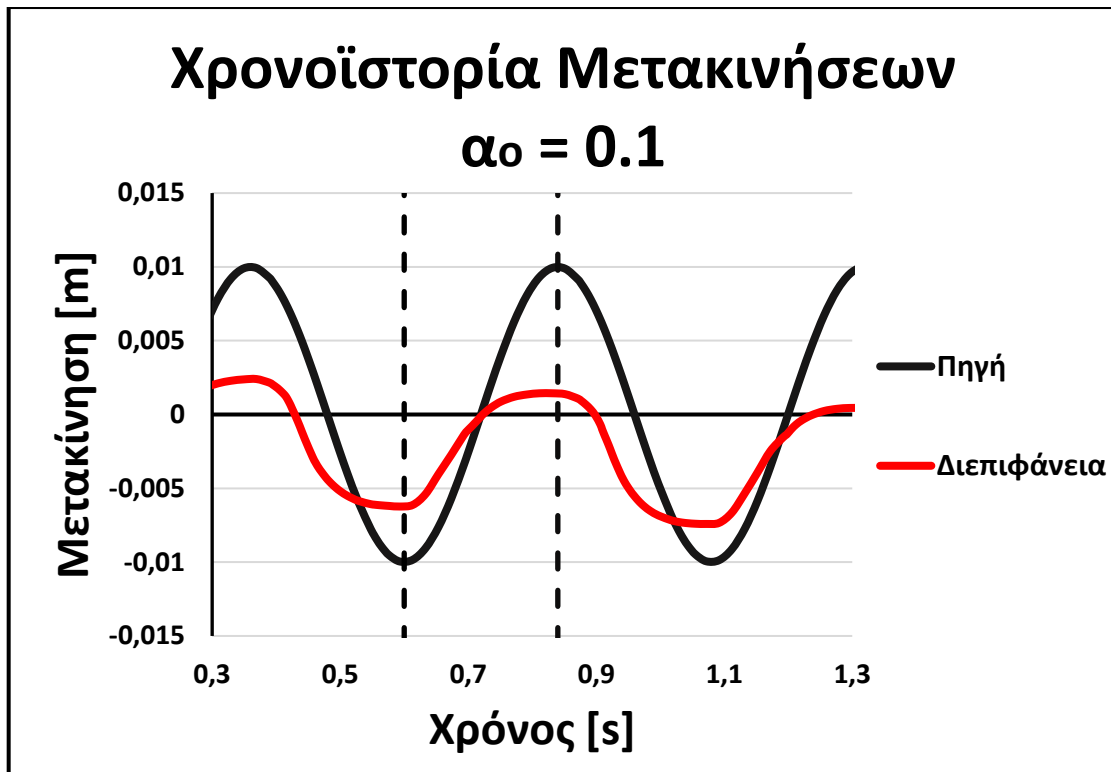


Εικόνες 4.32-4.34 Σύγκριση του πραγματικού μέρους της αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους-πασσάλου μεταξύ της ελαστικής, αναλυτικής λύσης των Dobry & Gazetas και των μη-γραμμικών αναλύσεων για επιβολή ταλάντωσης πλάτους  $d=1$  cm στην κεφαλή του πασσάλου-πηγή.

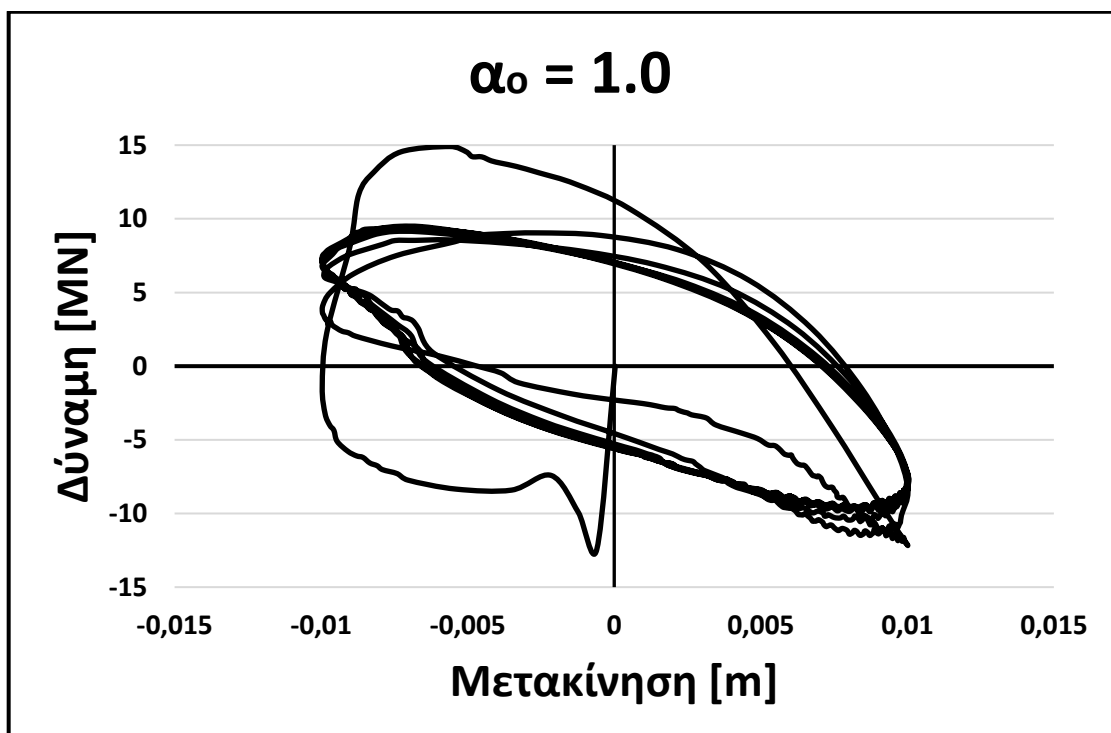
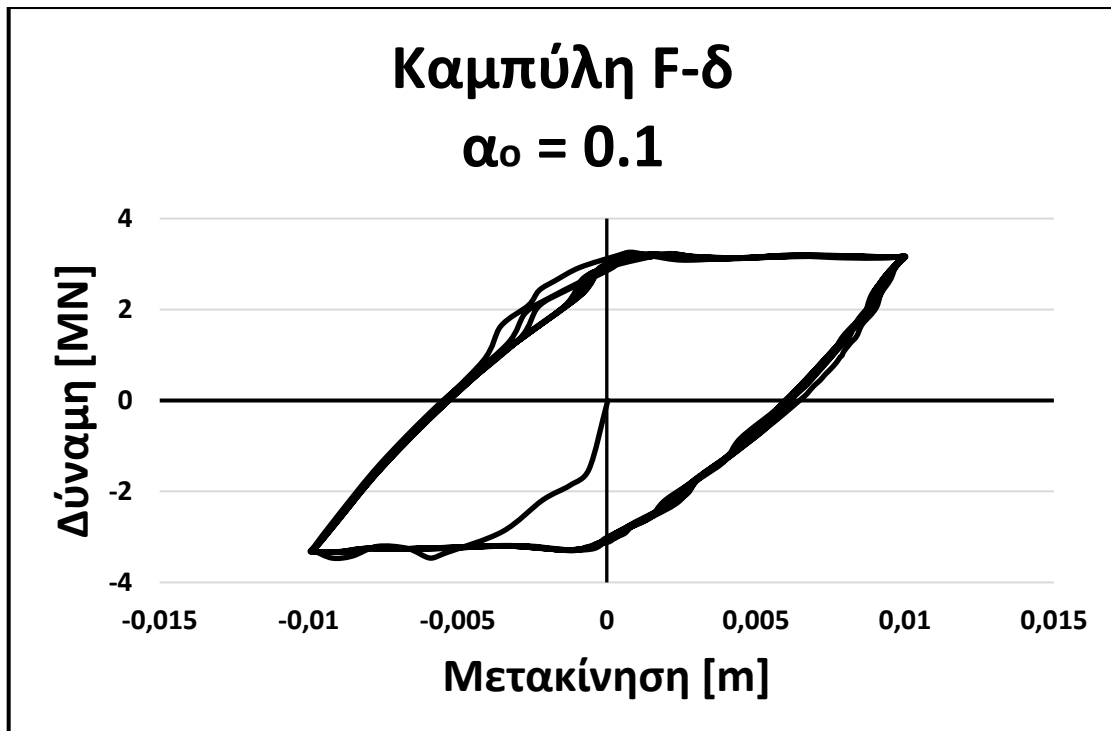




Εικόνες 4.35-4.37 Σύγκριση του φανταστικού μέρους της αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους-πασσάλου μεταξύ της ελαστικής, αναλυτικής λύσης των *Dobry & Gazetas* και των μη-γραμμικών αναλύσεων για επιβολή ταλάντωσης πλάτους  $d=1$  cm στην κεφαλή του πασσάλου-πηγή.



*Εικόνες 4.38-4.39 Χρονοϊστορία μετακινήσεων της πηγής και της διεπιφάνειας του εδάφους, για έδαφος  $G/Su=600$  και συχνότητα διέγερσης που αντιστοιχεί σε  $\alpha_0=0.1$  και  $1.0$ . Στην χαμηλή συχνότητα διέγερσης,  $\alpha_0=0.1$ , το «κέντρο βάρους» της μετακίνησης της διεπιφάνειας προηγείται της πηγής δημιουργώντας φαινομενική αρνητική διαφορά φάσης, κάτι που δεν εμφανίζεται στις υψηλότερες συχνότητες, όπως στην  $\alpha_0=1.0$ .*



**Εικόνες 4.40-4.41** Καμπύλες Δύναμης-Μετακίνησης στην κεφαλή του πασσάλου, για έδαφος με  $G/S_u=600$  και συχνότητα διέγερσης που αντιστοιχεί σε  $\alpha_0=0.1$  και  $1.0$ . Στην χαμηλή συχνότητα διέγερσης δεν αναπτύσσονται μεγάλα αδρανειακά και αποσβεστικά φορτία, οπότε η καμπύλη έχει την μορφή ψευδοστατικής φόρτισης. Αντίθετα, στην υψηλή συχνότητα τα αδρανειακά φορτία υπερισχύουν, δημιουργώντας αρνητική κλίση στην καμπύλη (διαφορά φάσης  $\sim 180^\circ$  μεταξύ δύναμης και μετακίνησης) και δίνοντάς της μορφή που παραπέμπει σε απλό αρμονικό ταλαντωτή με απόσβεση.



# 5

## Οριζόντια Αλληλεπίδραση

### 5.1 Στατική Αλληλεπίδραση

Για την μελέτη της συμπεριφοράς των πασσάλων και της στατικής αλληλεπίδρασής τους υπό οριζόντια στατικά φορτία, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις «**pushover**» χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Πραγματοποιήθηκαν 2 σειρές αναλύσεων με διαφορά τις μηχανικές ιδιότητες των παθητικών πασσάλων· αρχικά δόθηκαν ιδιότητες εδάφους σε όλους τους παθητικούς πασσάλους, καθιστώντας τους ανενεργούς και στην συνέχεια έγιναν οι ίδιες αναλύσεις αλλά δίνοντάς τους ιδιότητες σκυροδέματος. Σκοπός της παραπάνω διαδικασίας ήταν ο έλεγχος της επιρροής των παθητικών πασσάλων στους συντελεστές αλληλεπίδρασης (φαινόμενα σκιάς και «φιλτραρίσματος» των μετακινήσεων).

#### 5.1.1 Συμπεριφορά Πασσάλου Υπό Οριζόντιο Φορτίο

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν 3 προφίλ εδάφους με  $S_u = 50 \text{ KPa}$  και λόγο  $G/S_u = 300, 600$  και  $1350$  και στους παθητικούς πασσάλους δόθηκαν μηχανικές ιδιότητες εδάφους ώστε να μην επηρεάζουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η συμπεριφορά του ενεργού πασσάλου σε κάθε περίπτωση παρουσιάζεται στις **Εικόνες 1 και 2**.

Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα **F-δ**, όπου είναι εμφανής η έναρξη των πλαστικοποιήσεων ήδη από πολύ μικρά επίπεδα φόρτισης. Η αρχική κλίση της καμπύλης δεν παραμένει σταθερή, παρά μόνον για ένα πολύ μικρό τμήμα στην αρχή· αντιθέτως μειώνεται συνεχώς καθώς οι πλαστικοποιήσεις εντείνονται. Η μορφή αυτή των καμπυλών είναι απόλυτα λογική καθώς σε αντίθεση με την αξονική φόρτιση των

πασσάλων, στην οριζόντια οι μετακινήσεις είναι συγκεντρωμένες κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και μειώνονται ταχύτατα κατά βάθος. Η έννοια αυτή είναι το γνωστό «ενεργό μήκος» το οποίο υπό ελαστικές συνθήκες είναι σταθερή τιμή που μπορεί να υπολογιστεί. Σε μη-γραμμικές αναλύσεις η έννοια του ενεργού μήκους δεν ορίζεται αυστηρά : λόγω της ύπαρξης οριακής αντοχής του εδάφους μπροστά από τον πάσσαλο, αυτός αναγκάζεται να παραμορφώνεται όλο και βαθύτερα ώστε να εξισορροπήσει το επιπλέον φορτίο που του ασκείται. Παρόλα αυτά, υπό φυσιολογικά φορτία –ακόμα και «αστοχίας»- οι μετακινήσεις παραμένουν συγκεντρωμένες σε ένα βάθος έως **10D**.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα εφαπτομενικής στιβαρότητας, δηλαδή η πραγματική αντίσταση που προβάλλει ο πάσσαλος σε περεταίρω παραμόρφωση, σε κάθε επίπεδο φόρτισης. Εμφανής είναι η απώλεια στιβαρότητας από τις πολύ μικρές μετακινήσεις, συνέπεια των πλαστικοποιήσεων του εδάφους, αφού ως γνωστό η στιβαρότητα του πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση είναι κυρίως αποτέλεσμα του περιβάλλοντος εδάφους. Οι καμπύλες αυτές καταλήγουν σε κοινή τιμή, η οποία είναι η δυσκαμψία του πασσάλου ως πακτωμένης δοκού, ο οποίος όπως έχει αναφερθεί και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παραμένει ελαστικός ανεξαρτήτως φορτίου. Αυτή του η ιδιότητα κατέστησε δύσκολο τον ακριβή προσδιορισμό της οριακής αντοχής του, αφού αυτός ουσιαστικά δεν αστοχεί ποτέ. Αυθαίρετα λοιπόν στην συνέχεια της διπλωματικής θεωρήθηκε ως φορτίο αστοχίας του πασσάλου, το φορτίο του για μετακίνηση κορυφής ίση με  $\delta = 1.5 \text{ cm}$ , όπου οι καμπύλες έχουν εισέλθει στην περιοχή που παρουσιάζουν κοινή στιβαρότητα -αυτή του πασσάλου ως δοκού- και συνεπώς το έδαφος έχει αστοχήσει πλήρως.

Στην **Εικόνα 3** παρουσιάζεται η σύγκριση της ελαστικής στιβαρότητας του προσομοιώματος με γνωστές σχέσεις της βιβλιογραφίας, όπου φαίνεται πως τα αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία με τις δημοσιευμένες μελέτες ερευνητών, αν και παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση από την αντίστοιχη σύγκριση του προηγούμενου κεφαλαίου. Στην **Εικόνα 4** παρουσιάζεται η σύγκριση της συμπεριφοράς μεταξύ του μακροστοιχείου των Budhu & Davies και του προσομοιώματος της εργασίας. Η σύγκριση παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια κοντά στην ελαστική περιοχή και η απόκλιση στην συμπεριφορά των 2 καμπύλων αποδίδεται στο

ότι το μακροστοιχείο έχει δημιουργηθεί με παραδοχή ενωμένης επιφάνειας πασσάλου-εδάφους, επιτρέποντας εφελκυστικές τάσεις στην πίσω πλευρά του πασσάλου, είναι συνεπώς λογικό να είναι πιο δύσκαμπτο.

### 5.1.2 Οριζόντια Αλληλεπίδραση

Από τις αναλύσεις του προηγούμενου βήματος προέκυψαν και οι χρονοϊστορίες μετακινήσεων για τα διάφορα σημεία ενδιαφέροντος στο έδαφος, ώστε να υπολογιστούν οι συντελεστές αλληλεπίδρασης. Στις **Εικόνες 5 και 6** παρουσιάζεται η σύγκριση των συντελεστών αλληλεπίδρασης για ελαστική απόκριση του εδάφους, μεταξύ των αποτελεσμάτων της ανάλυσης μέσω του Abaqus και όπως αυτοί προκύπτουν από τα διαγράμματα των Roulos & Davis. Η σύγκριση δείχνει ικανοποιητική συμφωνία των αποτελεσμάτων με την θεωρία στο μαλακό έδαφος, με αυξανόμενες αποκλίσεις για τα σκληρότερα εδάφη. Ένας από τους λόγους της απόκλισης είναι και η αδυναμία ακριβή υπολογισμού των θεωρητικών τιμών, μιας και οι Roulos & Davis δίνουν διαγράμματα για συγκεκριμένους μόνο συνδυασμούς εδάφους-πασσάλου, με αποτέλεσμα τον προσεγγιστικό μονάχα υπολογισμό των θεωρητικών τιμών. Παρόλα αυτά η συμφωνία είναι ικανοποιητική και σε συνδυασμό με τις σωστές προβλέψεις του προσομοιώματος για την ελαστική στιβαρότητα του πασσάλου αποτελούν αποδείξεις για την σωστή συμπεριφορά του.

Στις **Εικόνες 7 και 8** παρουσιάζεται η χρονοϊστορία μετακινήσεων της κορυφής του ενεργού πασσάλου (πηγή), του σημείου που βρίσκεται σε απόσταση 3 διαμέτρων από την πηγή στην θετική διεύθυνση φόρτισης (μπροστά από την πηγή) και του αντίστοιχου σημείου στην αρνητική διεύθυνση φόρτισης (πίσω από την πηγή), για εδάφη με  $G/S_u = 300$  και  $1350$ . Είναι εμφανής η διαφορετική συμπεριφορά του συστήματος εδάφους-πασσάλου, σε σχέση με την περίπτωση αξονικής φόρτισης: εδώ το περιβάλλον έδαφος δεν σταματάει να αναπτύσσει μετακινήσεις εξαιτίας της πηγής. Η βασική διαφορά των δυο περιπτώσεων είναι η διεύθυνση φόρτισης σχετικά με την ευθεία που συνδέει τα σημεία ενδιαφέροντος με την πηγή: στην αξονική φόρτιση του πασσάλου, τα σημεία αυτά βρίσκονται κάθετα στην διεύθυνση φόρτισης με αποτέλεσμα όταν η διεπιφάνεια αστοχήσει να σταματάει αυτόματα η μετάδοση καθιζήσεων προς αυτά, μηδενίζοντας την στιβαρότητα του συστήματος: αντίθετα στην οριζόντια φόρτιση αυτά βρίσκονται στην διεύθυνση φόρτισης του πασσάλου,

συνεπώς μετά την διαρροή του περιβάλλοντος εδάφους ο πάσσαλος συνεχίζει να φορτίζει το έδαφος, οδηγώντας όλο και περισσότερο σε διαρροή αλλά παράλληλα μεταφέροντας τις μετακινήσεις παραπέρα.

Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται από τα διαγράμματα εφαπτομενικής αλληλεπίδρασης που παρουσιάζονται στις **Εικόνες 9 έως 11**. Όπως έχει αναφερθεί, τα διαγράμματα αυτά δείχνουν την πραγματική αλληλεπίδραση του συστήματος, υπολογισμένη σε κάθε βήμα της φόρτισης. Σε αντίθεση με τα αντίστοιχα του προηγούμενου κεφαλαίου, εδώ δεν υπάρχει ένα σαφές σημείο μηδενισμού της αλληλεπίδρασης αλλά η μείωση αυτή γίνεται σταδιακά. Πέραν αυτού, στις περιπτώσεις που το σημείο ενδιαφέροντος βρίσκεται μπροστά από την πηγή, δηλαδή γωνίες  $0^\circ$  και  $45^\circ$ , η αλληλεπίδραση δεν μηδενίζεται ακόμα και για μεγάλες μετακινήσεις. Αντίθετα, για τα σημεία ενδιαφέροντος που βρίσκονται σε γωνία  $90^\circ$  σχετικά με την διεύθυνση φόρτισης η αλληλεπίδραση φαίνεται πως μηδενίζεται, κατάληξη λογική αφού τα σημεία αυτά βρίσκονται κάθετα στην διεύθυνση φόρτισης, σε παρόμοια διάταξη με την κατακόρυφη αλληλεπίδραση, γι' αυτό και ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά.

Στις **Εικόνες 12 έως 38** παρουσιάζονται οι συντελεστές τέμνουσας αλληλεπίδρασης για τους διάφορους συνδυασμούς εδάφους, απόστασης και γωνίας σε σχέση με την διεύθυνση φόρτισης. Όπως φαίνεται σε αυτά, η οριζόντια αλληλεπίδραση παρουσιάζει μια αρκετά ηπιότερη συμπεριφορά σε σχέση με την κατακόρυφη και διατηρεί σχετικά υψηλές τιμές για πολύ μεγαλύτερα επίπεδα φόρτισης της πηγής, παρόλο που η μείωση είναι εντονότερη στα χαμηλά επίπεδα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:

1. Μείωση της αλληλεπίδρασης για μετάβαση από μαλακά σε σκληρά εδάφη, σε πλήρη αντιστοιχία με την κατακόρυφη φόρτιση. Η εξήγηση του φαινομένου είναι κοινή, σκληρότερα εδάφη οδηγούν τον πάσσαλο σε συμπεριφορά «εύκαμπτου» σώματος, επιβάλλοντας μετακινήσεις ταχύτερα μειούμενες με το βάθος σε σχέση με το μαλακό έδαφος.
2. Μείωση της αλληλεπίδρασης για αύξηση της γωνίας μεταξύ του επιπέδου φόρτισης και του σημείου ενδιαφέροντος. Η εξήγηση



προκύπτει διαισθητικά: είναι απολύτως φυσικό οι μετακινήσεις να είναι μεγαλύτερες στην διεύθυνση φόρτισης σε αντίθεση με την διεύθυνση κάθετα σε αυτήν, άρα το ίδιο ισχύει και για την αλληλεπίδραση.

3. Μείωση της αλληλεπίδρασης για αύξηση της απόστασης από την πηγή.

Στις **Εικόνες 39 έως 41** παρουσιάζεται η διαφορά της αλληλεπίδρασης για θετική και αρνητική διεύθυνση φόρτισης. Είναι εμφανές πως ενώ οι 2 συντελεστές ξεκινάνε από την ίδια τιμή (ελαστική συμπεριφορά συστήματος πασσάλου-εδάφους) η αλληλεπίδραση του πασσάλου που βρίσκεται πίσω από την πηγή μειώνεται αρκετά ταχύτερα, αποτέλεσμα που κρίνεται αρκετά λογικό αφού η αποκόλληση που δημιουργείται μεταξύ πασσάλου και εδάφους δεν επιτρέπει την ανάπτυξη εφελκυσμού. Στις **Εικόνες 42 έως 45** παρουσιάζεται η εξέλιξη των μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, που δείχνει την ασυμμετρία τους λόγω της διεπιφάνειας και της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους.

### *5.1.3 Επιρροή Παθητικών Πασσάλων*

Στις **Εικόνες 46 έως 48** παρουσιάζεται η επιρροή της ύπαρξης των παθητικών πασσάλων στην αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους-πασσάλου, όπου φαίνεται πως αυτοί δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα ιδιαίτερα. Σε κάποιες περιπτώσεις εμφανίζεται το «παράδοξο» η αλληλεπίδραση με ύπαρξη παθητικών πασσάλων να είναι μεγαλύτερη από την απλή αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους. Το φαινόμενο εξηγείται σχηματικά στις **Εικόνες 49 και 50**: συγκεκριμένα, καθώς η διατομή του πασσάλου είναι σχετικά απαραμόρφωτη πρέπει όλα τα σημεία της να έχουν -προσεγγιστικά- κοινή μετακίνηση: γι' αυτό τον λόγο το τμήμα της διατομής που βρίσκεται πλησιέστερα στην πηγή τείνει να «τραβήξει» το υπόλοιπο, οδηγώντας συνολικά τον πάσσαλο σε μεγαλύτερη μετακίνηση.

Η ιδιαιτερότητα αυτή μοιάζει στην βάση της με μια αντίστοιχη: πως οι πάσσαλοι πακτωμένης κεφαλής παρουσιάζουν μεγαλύτερους συντελεστές αλληλεπίδρασης από τους ελεύθερης κεφαλής. Αυτό που επηρεάζει την διαίσθηση είναι πως αναμένεται από στιβαρότερα συστήματα να αναπτύσσονται μικρότερες μετακινήσεις, κάτι το οποίο ισχύει: για ίδια δύναμη στην κορυφή, ο πάσσαλος

ελεύθερης κεφαλής θα μετατοπιστεί περισσότερο από τον πακτωμένης και είναι πιθανό οι μετακινήσεις στο σημείο ενδιαφέροντος να είναι επίσης μεγαλύτερες· όμως ο συντελεστής αλληλεπίδρασης εξετάζει την μετακίνηση του σημείου ενδιαφέροντος ως ποσοστό της μετακίνησης της πηγής, συνεπώς το φορτίο που απαιτείται για να αναπτυχθούν οι μετακινήσεις δεν ενδιαφέρει. Αντίστοιχα, παρόλο που η ύπαρξη παθητικών πασσάλων μειώνει τις μετακινήσεις για επιβολή συγκεκριμένου φορτίου, γιατί κάνει το σύστημα πιο «δύσκαμπτο», αυτό δεν επηρεάζει τους συντελεστές αλληλεπίδρασης γιατί είναι εξ' ορισμού ανεξάρτητοι του φορτίου και συναρτήσεις αποκλειστικά μετακινησιακών μεγεθών. Θα απαιτηθεί δηλαδή μεγαλύτερο φορτίο για να επιτευχθεί κοινή μετακίνηση πηγής όμως όταν επιτευχθεί, οι μετακινήσεις στα σημεία ενδιαφέροντος θα είναι μεγαλύτερες.

## 5.2 Δυναμική Αλληλεπίδραση

### 5.2.1 Συντελεστές Αλληλεπίδρασης

Για την μελέτη της κυματικής διάδοσης και της δυναμικής αλληλεπίδρασης των πασσάλων υπό οριζόντια δυναμική διέγερση, πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αναλύσεις όπου επιβλήθηκαν από **5 έως 7 κύκλοι φόρτισης** με πλάτος ταλάντωσης  $d = 0.01 \text{ m}$  στον πάσσαλο-πηγή με συχνότητες από  $\alpha_o = 0.1$  έως  $0.8$ , χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 και το εδαφικό προφίλ με τιμή  $G/S_u = 600$ . Στην συνέχεια και αφού το σύστημα έφτασε σε «μόνιμες συνθήκες», μετρήθηκε το πλάτος ταλάντωσης στην κεφαλή των παθητικών πασσάλων καθώς και η διαφορά φάσης που αυτοί παρουσίαζαν σχετικά με την πηγή. Οι παθητικοί πάσσαλοι είχαν αποκλειστικά ιδιότητες σκυροδέματος στις αναλύσεις, για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στις **Εικόνες 51 έως 54** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες μετακινήσεων των παθητικών πασσάλων του προβλήματος, όπως αυτές εξήχθησαν από το Abaqus, για τις δυο ακραίες περιπτώσεις συχνότητας διέγερσης  $\alpha_o = 0.1$  και  $0.8$ . Οι πάσσαλοι παρουσίασαν μετακινήσεις με μεγαλύτερη απόκλιση από την αρμονική συμπεριφορά της πηγής, σε σχέση με την κατακόρυφη διέγερση, όμως όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3 το φασματικό περιεχόμενο παραμένει κοινό με του

διεγέρτη και η κίνηση διατηρεί την περιοδικότητά της. Από τα σχήματα αυτά είναι εμφανές πως ενώ σε χαμηλές συχνότητες δεν παρατηρείται κάποιο φαινόμενο σκιάς ή εν γένει κάποιου είδους «περίεργη» συμπεριφορά, για τις υψηλές συχνότητες η ταλάντωση των σημείων ενδιαφέροντος γίνεται πιο άναρχη, με απότομες μεταβολές στην κλίση των καμπυλών και μεγαλύτερες μετακινήσεις στην διεύθυνση κάθετα στην φόρτιση.

Αυτή η διαφορά στην συμπεριφορά αλλά και το σχήμα των διεγέρσεων αυτών εξηγείται αν μελετηθεί αναλυτικότερα η διέγερση του εδάφους πλησιέστερα στην πηγή, το οποίο είναι και η γενέτειρα των κυματισμών μέσα στο έδαφος. Συγκεκριμένα, στις **Εικόνες 55 και 56** παρουσιάζεται η χρονοϊστορία των μετακινήσεων της πηγής, της διεπιφάνειας του εδάφους μπροστά από τον πάσσαλο και της διεπιφάνειας του εδάφους σε γωνία  $90^\circ$  σε σχέση με την διεύθυνση φόρτισης. Στην περίπτωση όπου  $\alpha_0 = 0.1$  παρατηρείται ομαλή συμπεριφορά του εδάφους:

1. Το σημείο που βρίσκεται μπροστά στην πηγή, αρχικά ακολουθεί σε μικρό βαθμό την κίνησή της καθώς αυτή μετακινείται προς την άλλη μεριά. Στο σημείο αυτό εμφανίζεται αποκόλληση στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους. Όταν η πηγή επιστρέψει με θετική φορά, αυτή και το έδαφος κινούνται μαζί μέχρι την μέγιστη μετακίνηση, με την πηγή να σπρώχνει το έδαφος. Στην συνέχεια κατά την αλλαγή φοράς της πηγής, το έδαφος παρουσιάζει μια ελαστική αποτόνωση, ακολουθεί όσο μπορεί την πηγή, όμως οι πλαστικές παραμορφώσεις που έχει υποστεί καθιστούν αδύνατη την επιστροφή του στην αρχική του θέση· αντίθετα δημιουργείται μόνιμη αποκόλληση και το έδαφος μετακινείται ελάχιστα συγκριτικά με την πηγή. Όταν τελικά η πηγή φτάσει στην άλλη πλευρά και έρθει σε επαφή με το έδαφος στην αρνητική φορά φόρτισης – το οποίο είχε αναπτύξει τις ίδιες πλαστικές παραμορφώσεις, στην αρχή της φόρτισης – η διεπιφάνεια μπροστά από την πηγή «νιώθει» το τράβηγμα του εδάφους της άλλης πλευράς, αποτέλεσμα της λειτουργίας του εδάφους ως συνεχούς μέσου. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε κύκλο φόρτισης, με τον πάσσαλο να έρχεται κάθε φορά σε επαφή με το έδαφος, στην παραμορφωμένη θέση ισορροπίας του και όχι σε αυτήν που είχε όταν ξεκίνησε η φόρτιση. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η

δημιουργία μιας «κοιλότητας» σχήματος καρδιάς γύρω από το ενεργό μήκος του πασσάλου (*Εικόνες 57 και 58*), η οποία με την σειρά της οδηγεί σε μεγάλη μείωση της αλληλεπίδρασης.

2. Το σημείο που βρίσκεται σε ορθή γωνία με την διεύθυνση φόρτισης ακολουθεί μια αρκετά πιο συμμετρική συμπεριφορά, αποτέλεσμα της επίσης συμμετρικής θέσης του ως προς την ταλάντωση. Είναι φανερό από την χρονοϊστορία της μετακίνησής του πως το μεγαλύτερο τμήμα του πλάτους της ταλάντωσής του δεν συμβαίνει όταν η πηγή εφάπτεται σε αυτό αλλά κυρίως όταν σπρώχνει τις δυο επιφάνειες εμπρός και πίσω από αυτήν· η διέγερσή του δεν είναι αποτέλεσμα επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης από την πλαϊνή πλευρά του πασσάλου-πηγή αλλά, κυρίως, αποτέλεσμα της λειτουργίας του εδάφους ως συνεχές μέσο.

Εξετάζοντας όμως την περίπτωση  $\alpha_0 = 0.8$ , η κίνηση του εδάφους δεν είναι εξίσου ομαλή:

1. Η διεπιφάνεια μπροστά από την πηγή ξεκινάει την ίδια διαδικασία, όπου ακολουθεί την πηγή μέχρι την μέγιστη μετακίνησή της (εδώ η πηγή ξεκίνησε με θετική φορά) και στην συνέχεια αδυνατεί να επιστέψει στην αρχική της θέση πλήρως και αρκείται σε μια μικρή ελαστική αποτόνωση προς εκείνη την πλευρά. Όμως, ενώ η μορφή της μετακίνησής της είναι όμοια ποιοτικά με την αντίστοιχη στην χαμηλόσυχνη διέγερση, διακόπτεται απότομα από την πηγή, η οποία έχει ξεκινήσει ήδη τον επόμενο κύκλο φόρτισης πριν ολοκληρώσει η διεπιφάνεια τον δικό της. Ως αποτέλεσμα, η καμπύλη κάνει απότομη γωνία στο σημείο αυτό, η οποία αντιπροσωπεύει την κρούση της πηγής πάνω στην εδαφική μάζα· αυτό το απότομο φαινόμενο εξηγεί το γωνιώδες προφίλ των μετακινήσεων των πασσάλων, αφού το κύμα που φτάνει σε αυτούς ως διέγερση αναπόφευκτα έχει την μορφή της διέγερσης στην γενέτειρα των κυματισμών.
2. Αντίστοιχα με την χαμηλόσυχνη διέγερση, η κίνηση της διεπιφάνειας των  $90^\circ$  φαίνεται πως είναι σε φάση με την διεπιφάνεια των  $0^\circ$ , επιβεβαιώνοντας και εδώ πως η προέλευση των κυματισμών στην διεύθυνση κάθετα στην διέγερση, δεν είναι λόγω διατμητικής παραμόρφωσης του εδάφους από την

πλαϊνή επιφάνεια της πηγής, αλλά λόγω της φύσης του εδάφους ως συνεχούς μέσου. Εφόσον λοιπόν οι κυματισμοί που διαδίδονται σε αυτήν την διεύθυνση έχουν κοινή προέλευση με την διεύθυνση των  $0^\circ$ , είναι λογικό να διατηρούν παρόμοια, «γωνιώδη» μορφή.

Στις **Εικόνες 59 έως 70** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τον υπολογισμό των δυναμικών συντελεστών αλληλεπίδρασης, για πλάτος ταλάντωσης πηγής  $d = 0.01 \text{ m}$ . Οι συντελεστές έχουν πολύ μικρές τιμές, αποτέλεσμα της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους· καθώς αυτό παραμορφώνεται πλαστικά και δεν επανέρχεται στην αρχική του θέση, δεν «βλέπει» ολόκληρη την ταλάντωση της πηγής ως διέγερση αλλά μόνο το τμήμα της που είναι ίσο με την ελαστική αποτόνωση που πραγματοποιείται κάθε φορά. Όμοια δηλαδή με την κατακόρυφη φόρτιση, όπου το πλάτος του διαδιδόμενου κύματος εξαρτώνταν από την ελαστική παραμόρφωση του εδάφους γύρω από την πηγή και όχι το πλάτος ταλάντωσής της, εδώ το πλάτος αυτό εξαρτάται από την ελαστική αποτόνωση του εδάφους και όχι από το πλάτος ταλάντωσης της πηγής.

Αξίζει να αναφερθεί πάλι πως, ακριβώς όπως ίσχυε και στην περίπτωση της κατακόρυφης διέγερσης, οι συντελεστές αυτοί είναι διαφορετικοί για κάθε πλάτος ταλάντωσης και αυτό καθιστά τα αποτελέσματα αυτής της ενότητας εργαλεία ποιοτικής παρακολούθησης του φαινομένου και όχι εργαλεία σχεδιασμού. Εάν το πλάτος ταλάντωσης ήταν  $d = 0.001 \text{ m}$  οι συντελεστές θα είχαν πολύ μεγαλύτερες τιμές, εφόσον δεν θα υπήρχαν έντονα φαινόμενα αποκόλλησης του εδάφους από την πηγή αλλά και πλαστικής παραμόρφωσής του.

### 5.2.2 Καμπύλες $F - \delta$

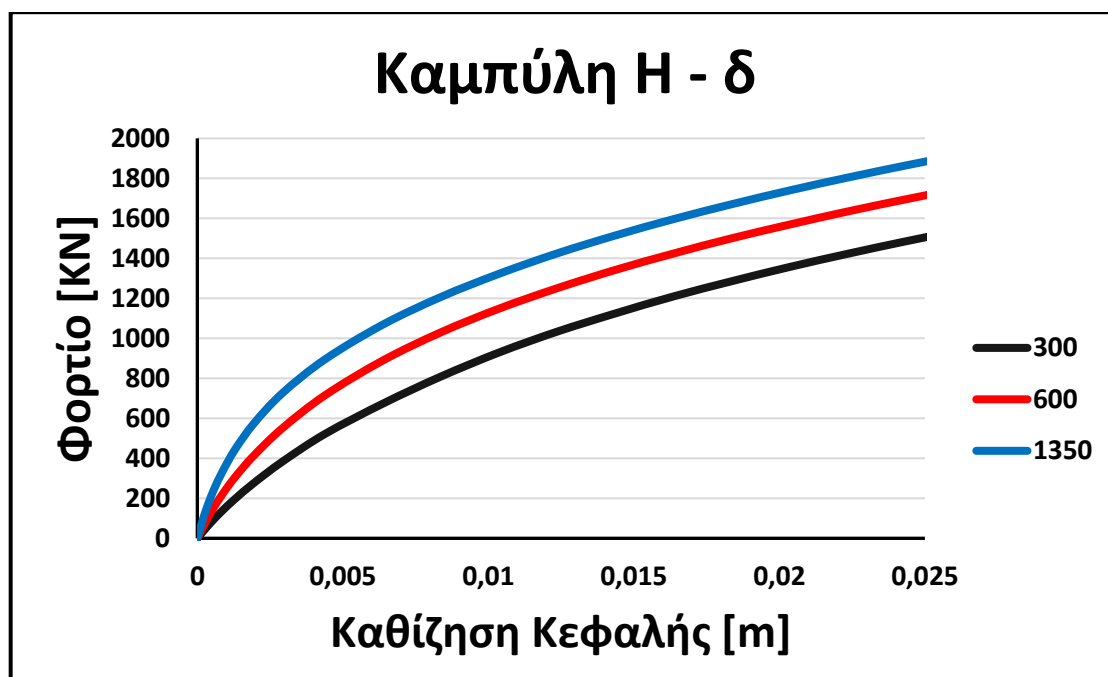
Στις **Εικόνες 71 και 72** παρουσιάζονται οι καμπύλες Δύναμης-Μετακίνησης που επέστρεψε η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία για την επιβληθείσα αρμονική μετακίνηση της πηγής, στις συχνότητες  $\alpha_o = 0.1$  και  $0.8$ .

Όπως συνέβη και στην κατακόρυφη φόρτιση, για διέγερση συχνότητας  $\alpha_o = 0.1$  δεν αναπτύσσονται αδρανειακά φορτία υψηλού μέτρου και ο παραγόμενος βρόγχος έχει την μορφή ψευδοστατικής κυκλικής φόρτισης, με βασική διαφορά ότι για μικρές μετακινήσεις ο πάσσαλος δεν αναπτύσσει μεγάλο φορτίο, εκτός από τον πρώτο κύκλο φόρτισης. Αυτό είναι αποτέλεσμα της «κοιλότητας» που σχηματίζεται γύρω

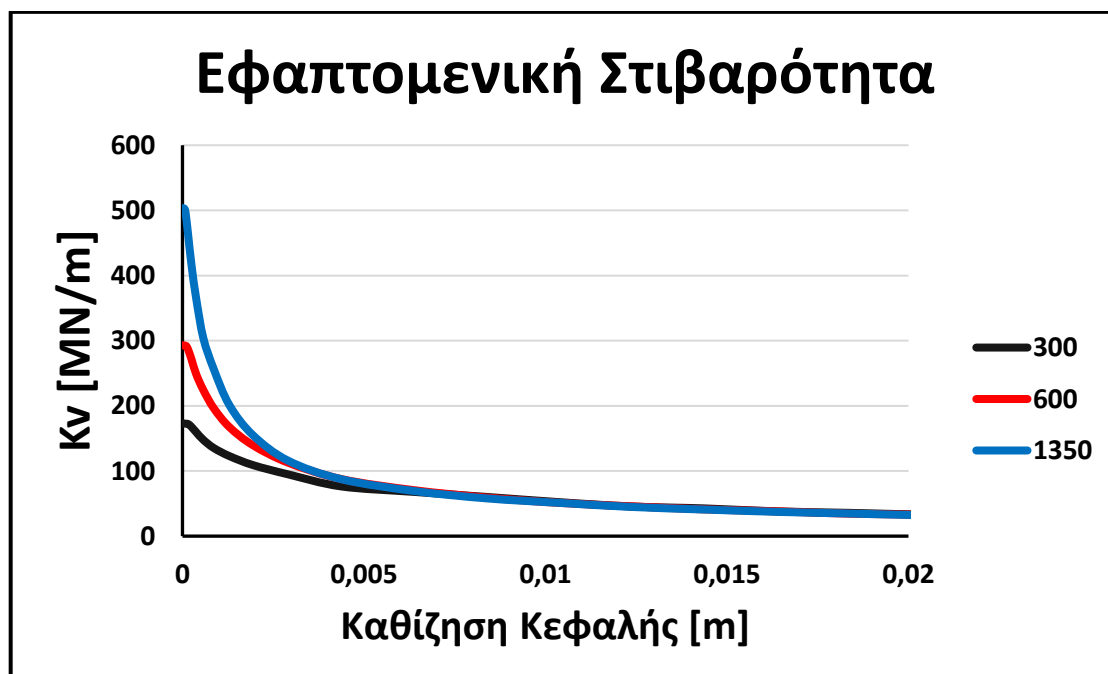
από το ενεργό μήκος του. Όταν η μετακίνηση αυξηθεί αρκετά, ώστε να έρθει ο πάσσαλος σε επαφή με το έδαφος, η κλίση της καμπύλης (που αντιπροσωπεύει την πραγματική δυσκαμψία σε εκείνο το σημείο) αυξάνεται εμφανώς, καθώς ο πάσσαλος παύει να λειτουργεί σαν πακτωμένη δοκός και πλέον λειτουργεί κανονικά σαν πάσσαλος, με ενεργή μόνο τη μπροστινή παρειά του, λόγω της αποκόλλησης στην πίσω πλευρά του. Οι γωνίες στις άκρες του βρόγχου υποδηλώνουν –και εδώ– πως δεν υπάρχει έντονη παρουσία ιξώδους απόσβεσης (όπως είναι η απόσβεση ακτινοβολίας) και πως η όποια απόσβεση είναι υστερητική. Το γεγονός όμως πως μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, η επαφή του πασσάλου με το έδαφος περιορίζεται μόνο στο εύρος της ελαστικής αποτόνωσης του εδάφους, συνεπάγεται ουσιαστικά «ελαστική» συμπεριφορά του συστήματος και γι' αυτό το εμβαδόν του βρόγχου υστέρησης είναι τόσο μικρό.

Για την υψίσουχη διέγερση με  $\alpha_0 = 0.8$ , οι τεράστιες επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στην κορυφή του πασσάλου-πηγή οδηγούν στην ανάπτυξη κάποιων αδρανειακών φορτίων, τα οποία όμως δεν είναι σε καμία περίπτωση συγκρίσιμα με αυτά της κατακόρυφης φόρτισης: ο λόγος είναι φυσικά πως στην οριζόντια φόρτιση κινείται μόνο ένα μικρό μέρος του πασσάλου, το οποίο έχει και ταχύτατα μειούμενες μετακινήσεις, οπότε η επιτάχυνση ασκείται σε πολύ μικρότερη μάζα συνολικά. Παρόλα αυτά, αδρανειακά φορτία αναπτύσσονται και έχουν ως συνέπεια την ελαφριά αρνητική κλίση που έχει ο βρόγχος, η οποία είναι παρατηρήσιμη κυρίως στην περιοχή των μικρών μετακινήσεων. Η «ταραχώδης» μορφή της καμπύλης στην περιοχή των μεγάλων μετακινήσεων είναι πιθανότατα αριθμητικό παράγωγο της κρούσης του πασσάλου με το έδαφος. Τέλος, είναι εμφανές πως ο βρόγχος είναι πιο «στρογγυλός», αποτέλεσμα της παρουσίας απόσβεσης ακτινοβολίας, η οποία όπως έχει αναφερθεί είναι ιξώδους φύσης.

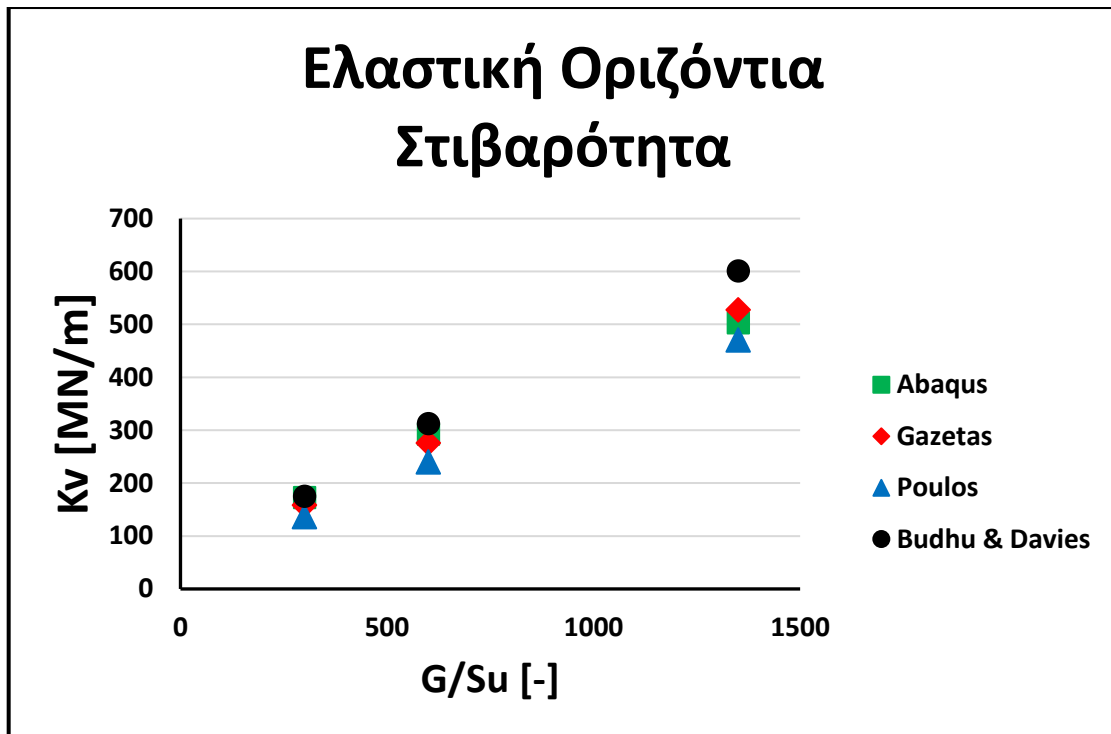
### 5.3 ΣΧΗΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



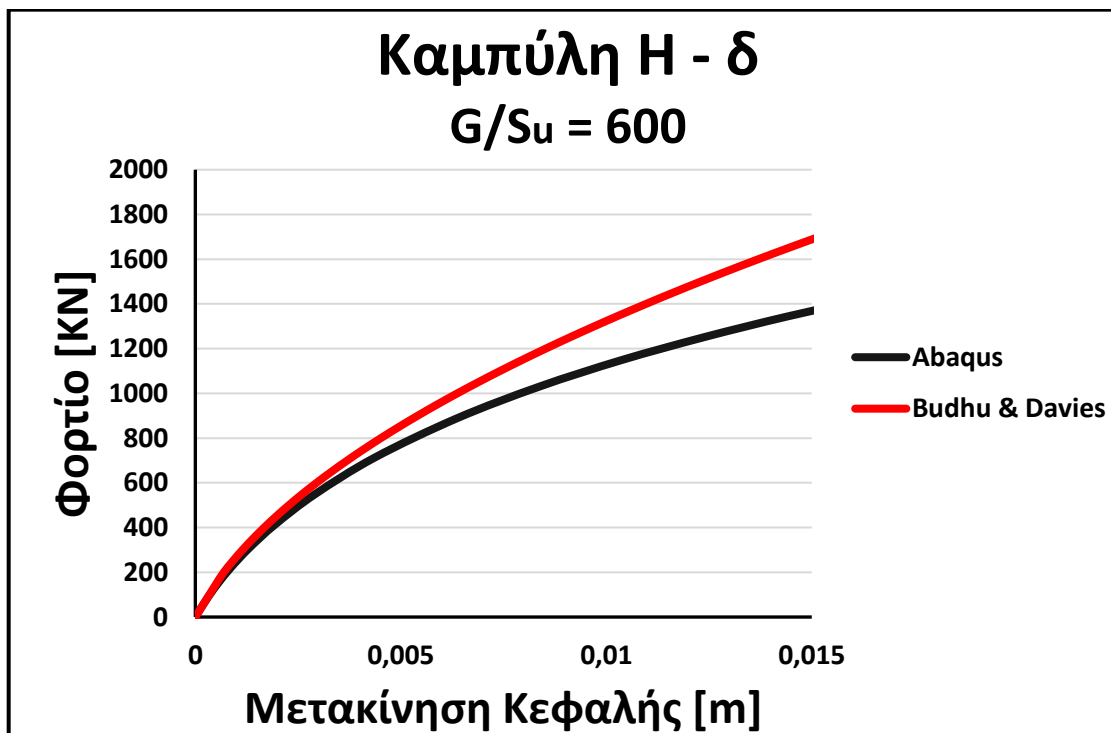
*Εικόνα 5.1* Καμπύλες οριζόντιας φόρτισης πακτωμένου στην κεφαλή πασσάλου, για 3 διαφορετικά εδάφη με  $Su=50$  kPa και  $G/Su=300, 600$  και  $1350$ . Οι καμπύλες καταλήγουν σε κοινή κλίση, η οποία είναι η δυσκαμψία του πασσάλου ως πακτωμένης δοκού.



*Εικόνα 5.2* Καμπύλες εφαπτομενικής στιβαρότητας πακτωμένου στην κεφαλή πασσάλου, για οριζόντια φόρτιση και 3 διαφορετικά προφίλ εδάφους. Οι πάσσαλοι δεν παρουσιάζουν ουσιαστικά καθόλου ελαστική συμπεριφορά, οι πλαστικοποιήσεις εμφανίζονται ήδη από πολύ μικρά φορτία.

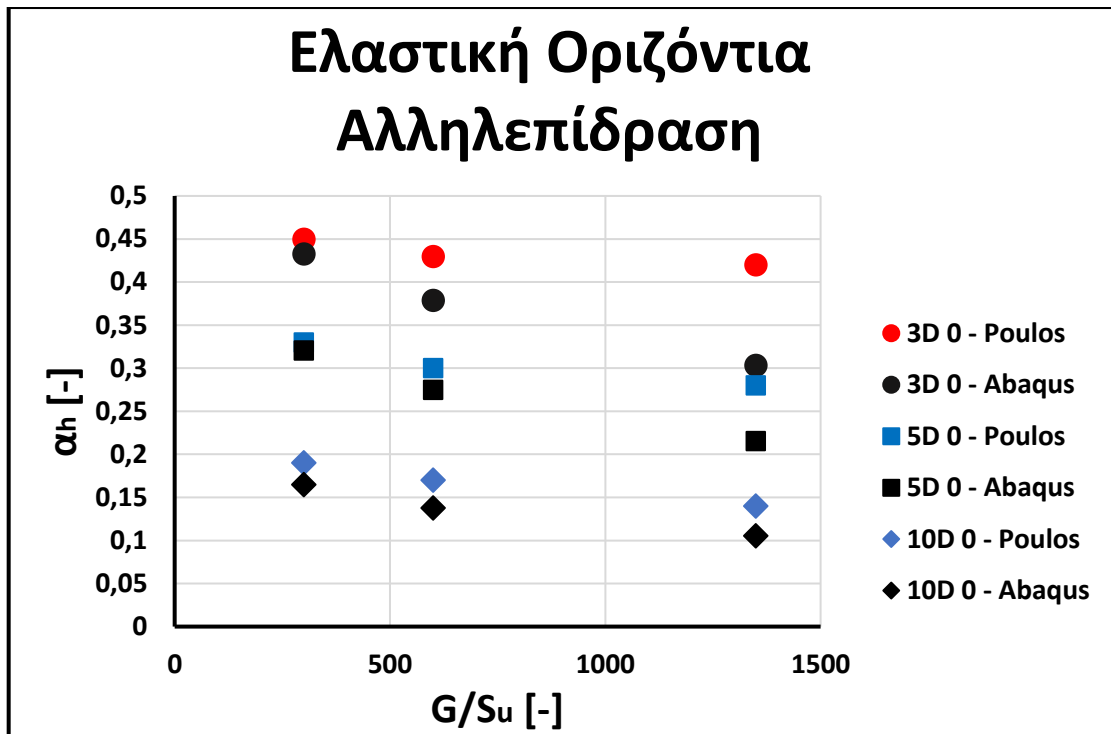


Εικόνα 5.3- Σύγκριση της ελαστικής στιβαρότητας του πασσάλου για οριζόντια φόρτιση, σε 3 διαφορετικά προφίλ εδάφους, όπως προκύπτει από το προσομοίωμα και γνωστές σχέσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας.

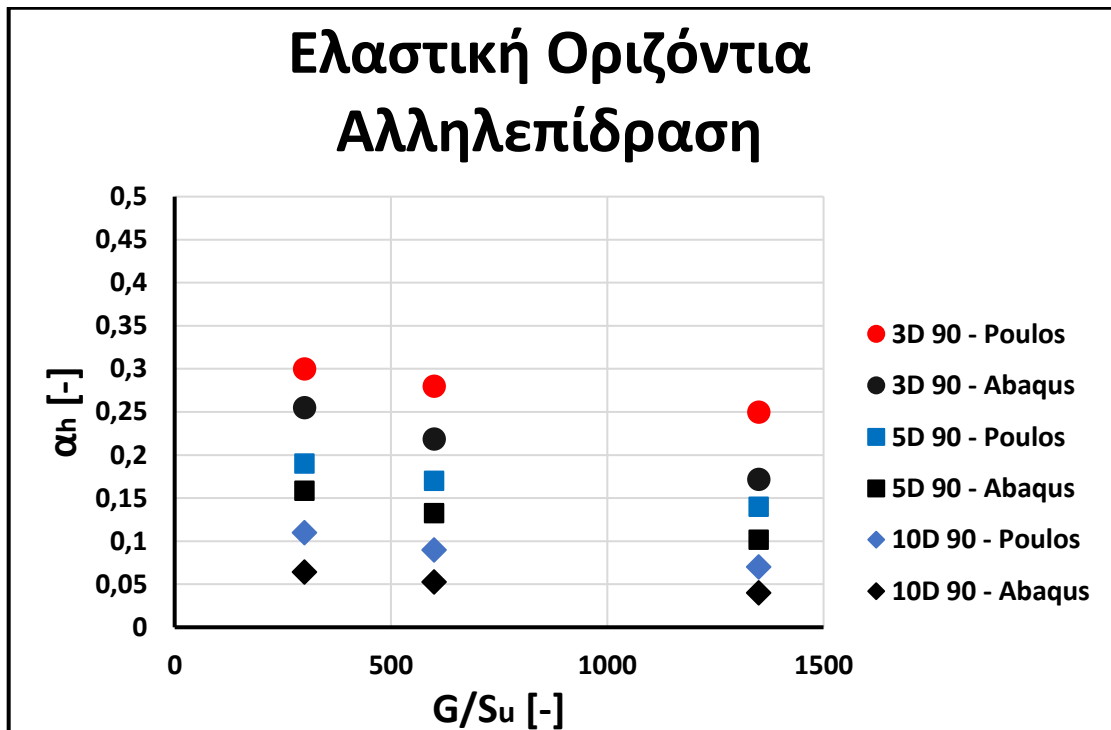


Εικόνα 5.4- Σύγκριση της συμπεριφοράς του ενεργού πασσάλου του προσομοιώματος με το μακροστοιχείο των *Budhu & Davies*. Η απόκλιση στην συμπεριφορά που παρουσιάζεται σε υψηλότερα φορτία αποδίδεται στην αποκόλληση που επιτρέπεται στο προσομοίωμα, σε αντίθεση με το μακροστοιχείο όπου η πίσω παρειά του πασσάλου επιτρέπεται να αναπτύξει εφελκυστικές τάσεις.

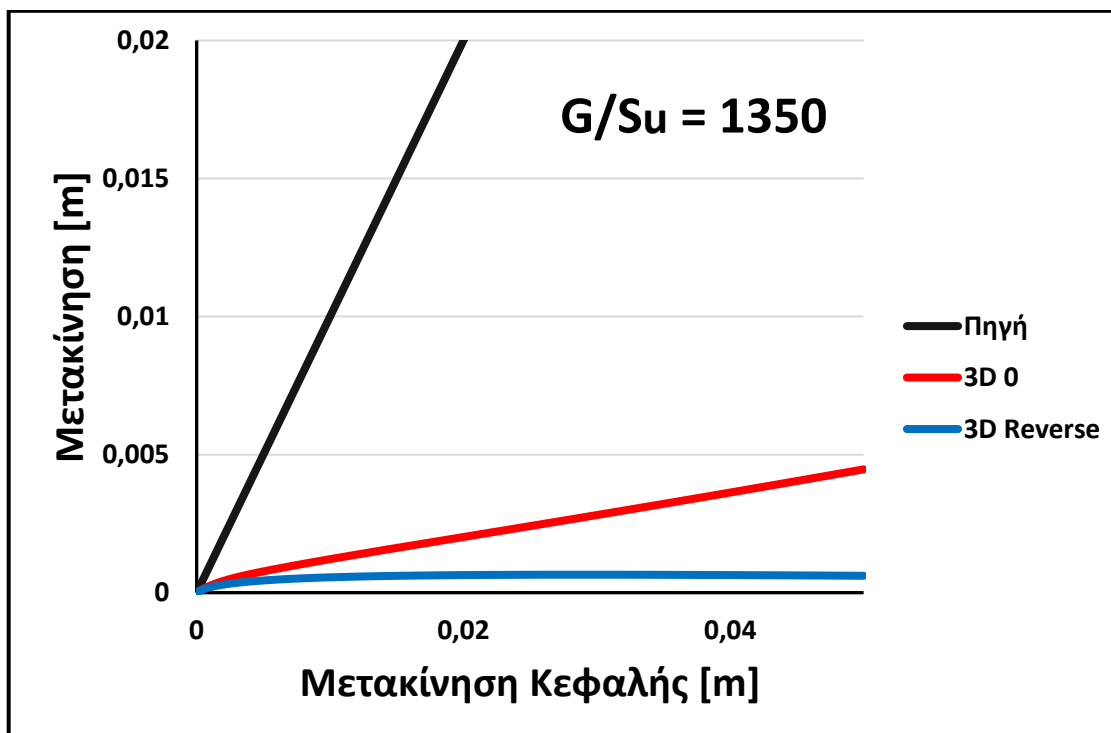
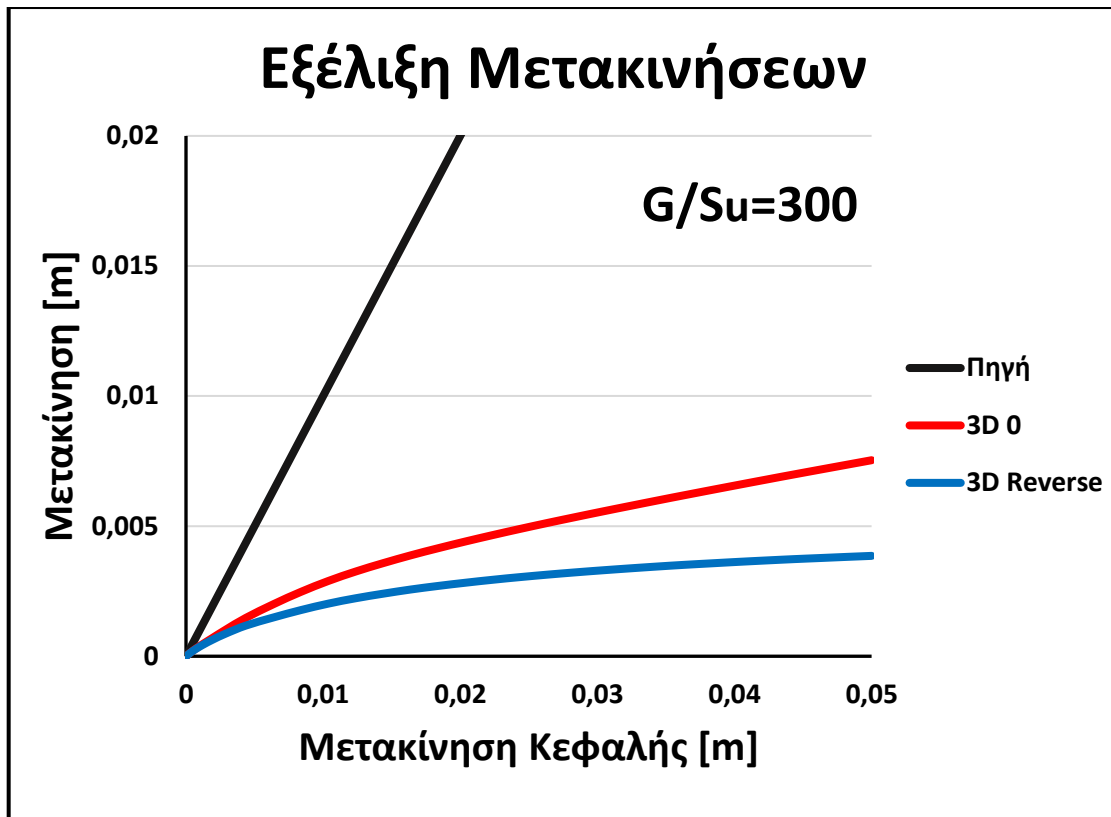




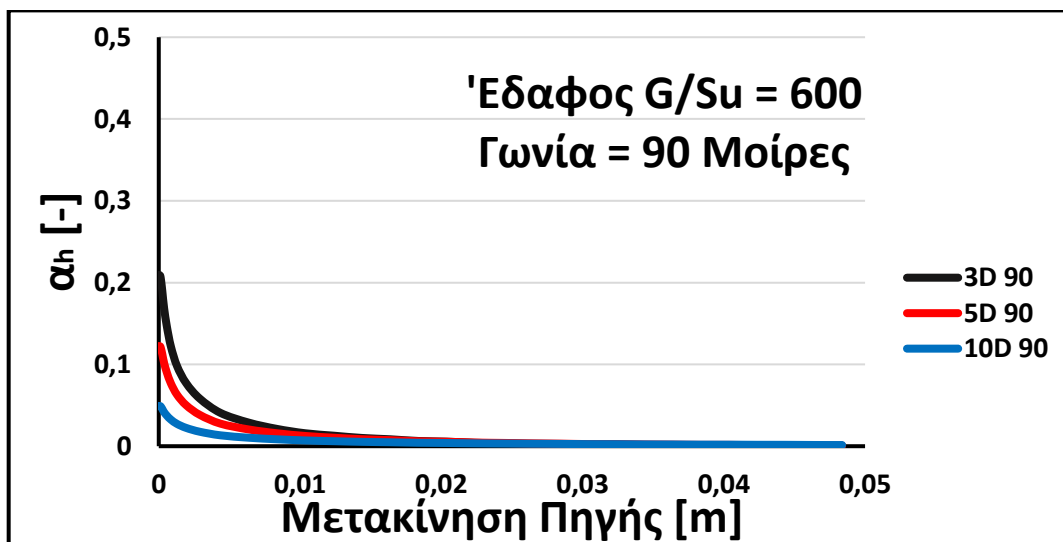
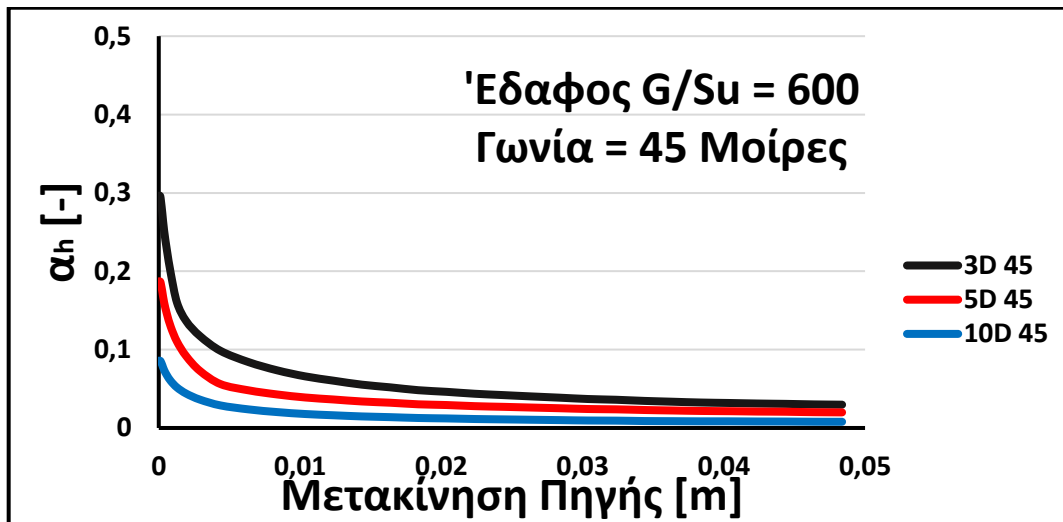
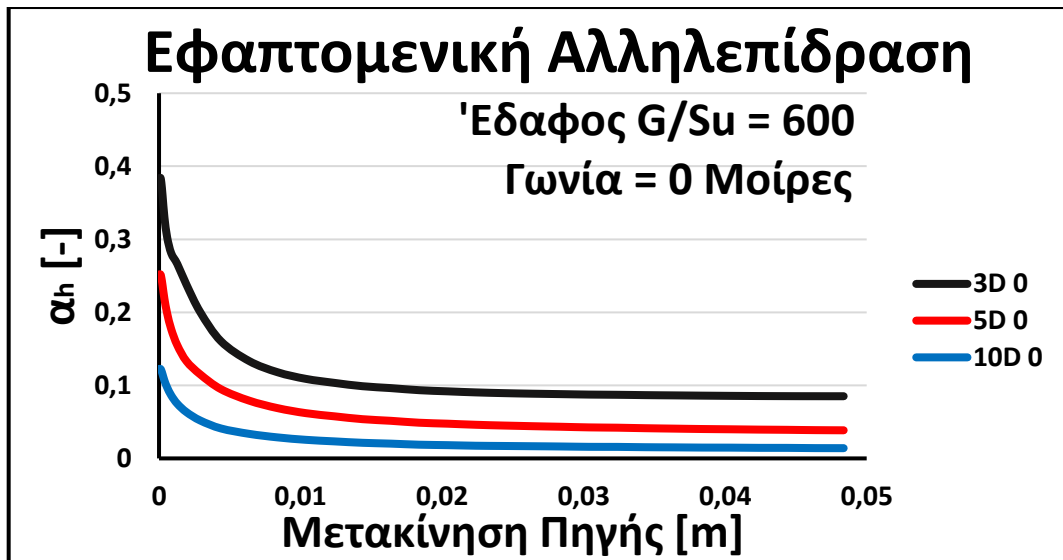
*Εικόνα 5.5- Σύγκριση των ελαστικών συντελεστών οριζόντιας αλληλεπίδρασης για σημεία ενδιαφέροντος πάνω στην διεύθυνση φόρτισης, για 3 διαφορετικά εδαφικά προφίλ, όπως προκύπτουν από το προσομοίωμα και την μεθοδολογία των Poulos & Davis*



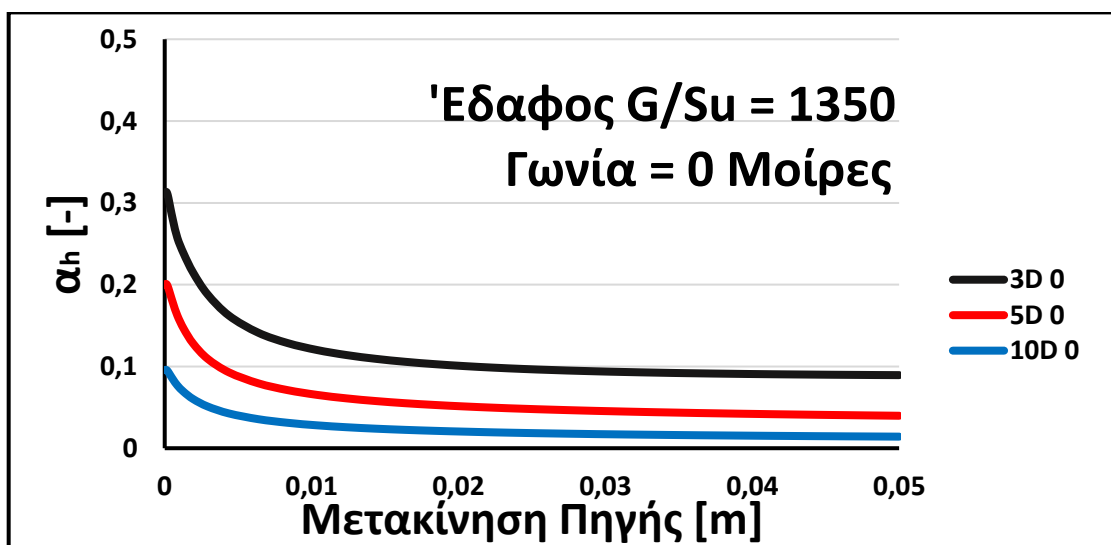
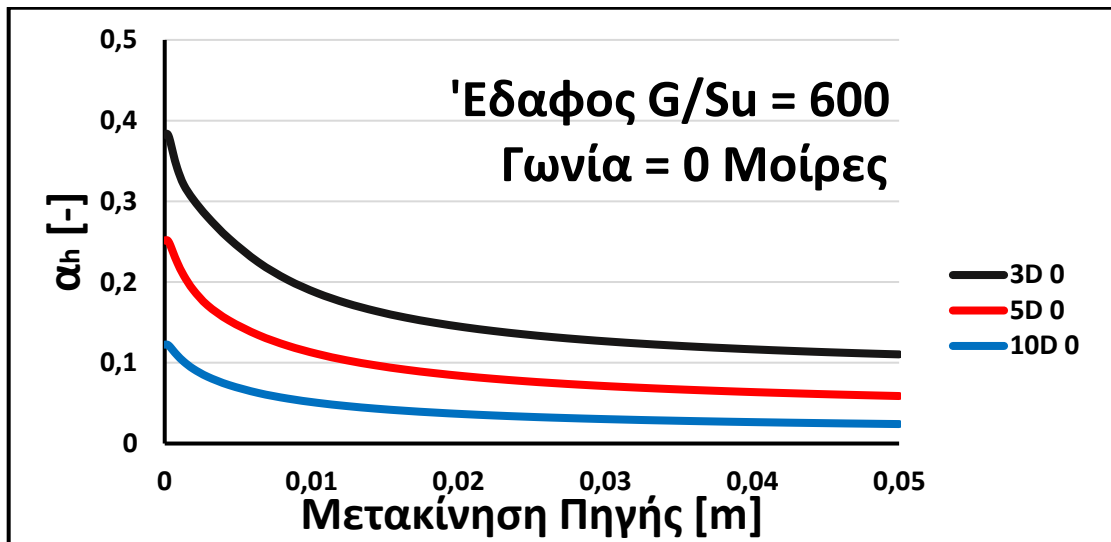
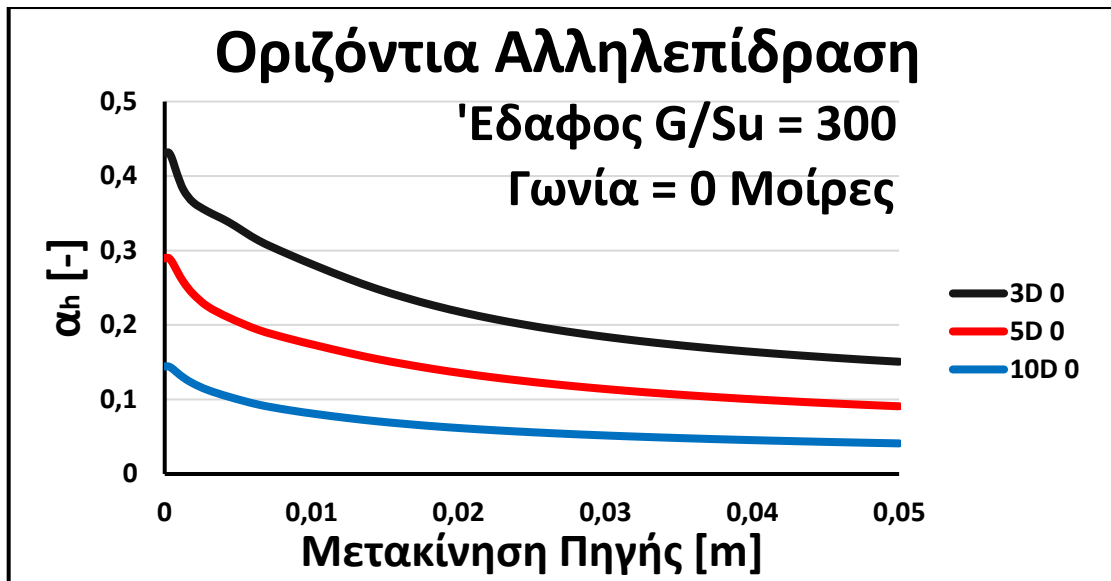
*Εικόνα 5.6- Σύγκριση των ελαστικών συντελεστών οριζόντιας αλληλεπίδρασης για σημεία ενδιαφέροντος κάθετα στην διεύθυνση φόρτισης, για 3 διαφορετικά εδαφικά προφίλ, όπως προκύπτουν από το προσομοίωμα και την μεθοδολογία των Poulos & Davis*



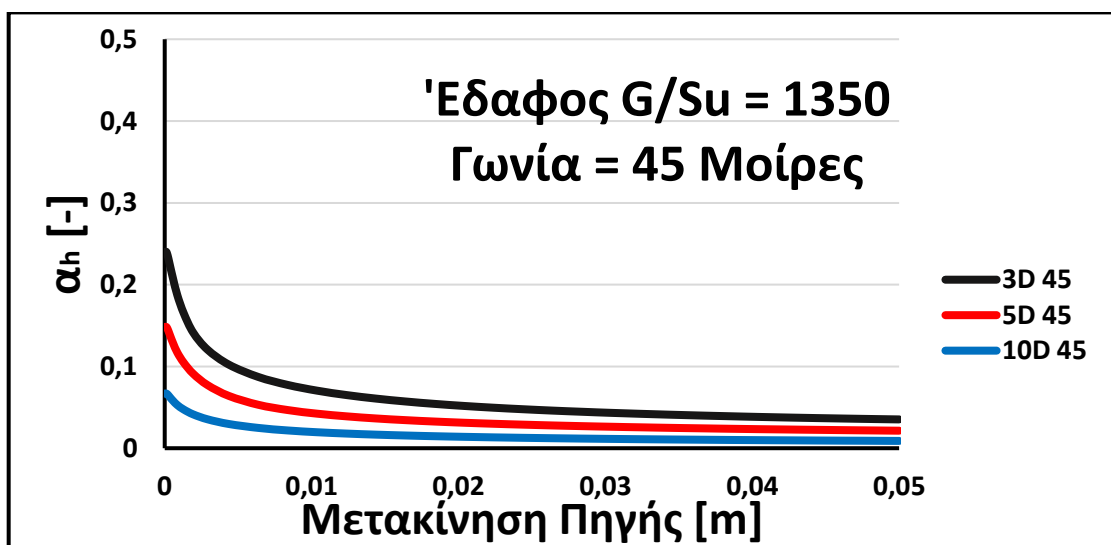
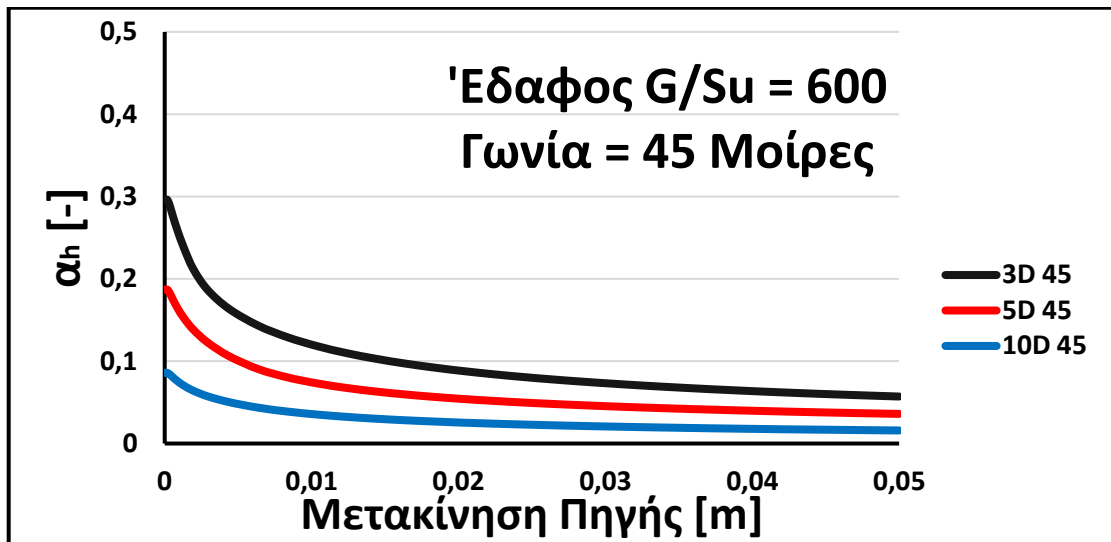
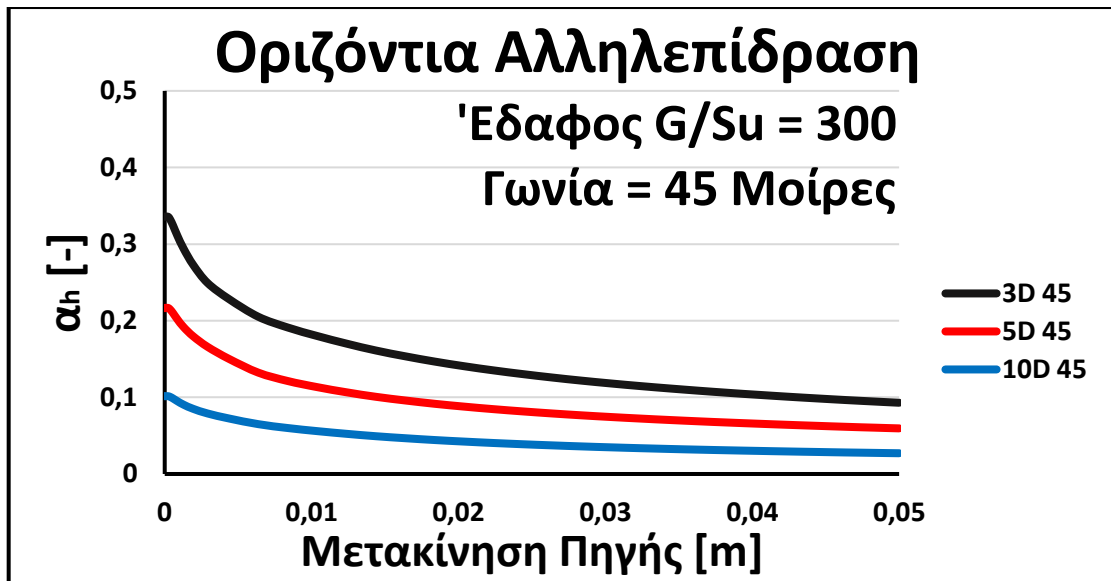
*Εικόνες 5.7-5.8 Εξέλιξη των μετακινήσεων του ενεργού πασσάλου και των σημείων που βρίσκονται σε απόσταση 3D από τον πάσσαλο, στην θετική και στην αρνητική διεύθυνση φόρτισης. Εμφανής η διαφορά με την περίπτωση της κατακόρυφης φόρτισης, όπου οι μετάδοση μετακινήσεων στο έδαφος σταματούσε απότομα: εδώ είναι πολύ πιο ήπια η απομείωση και σε μερικές περιπτώσεις, όπως το σημείο 3D 0, η μετάδοση μετακινήσεων όχι μόνο δεν μηδενίζεται αλλά αποκτά και σταθερή κλίση*



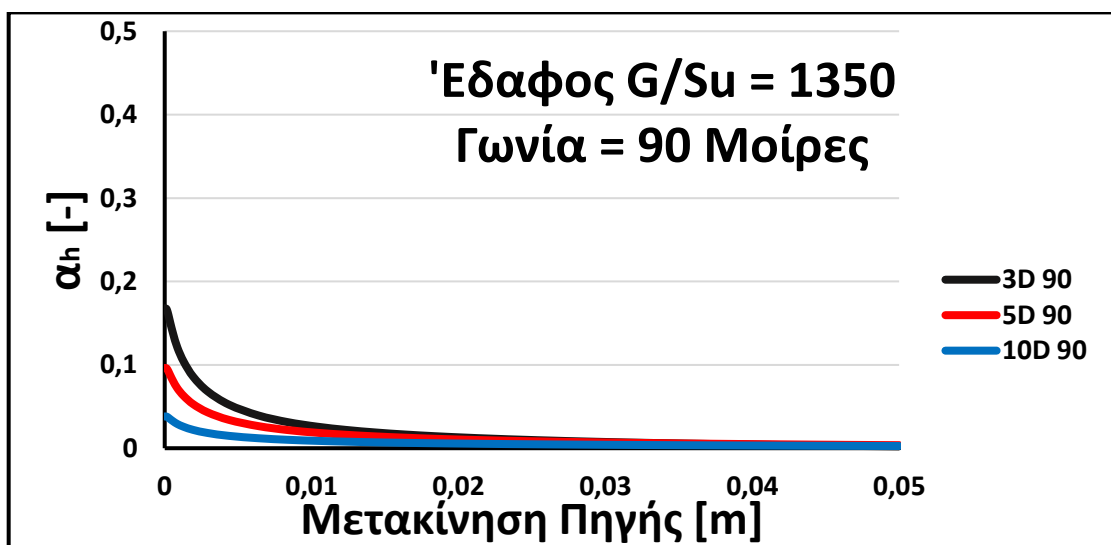
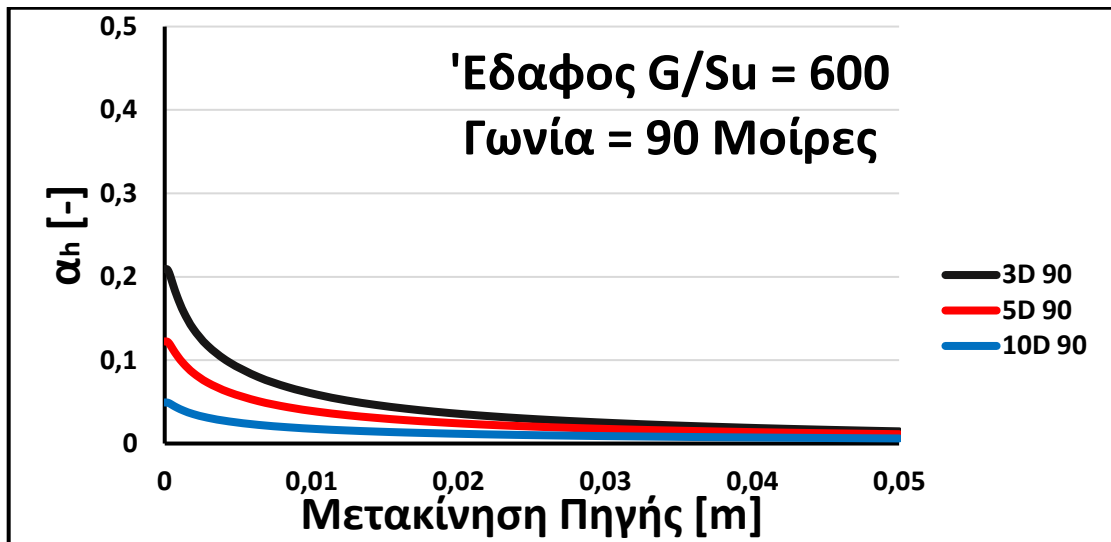
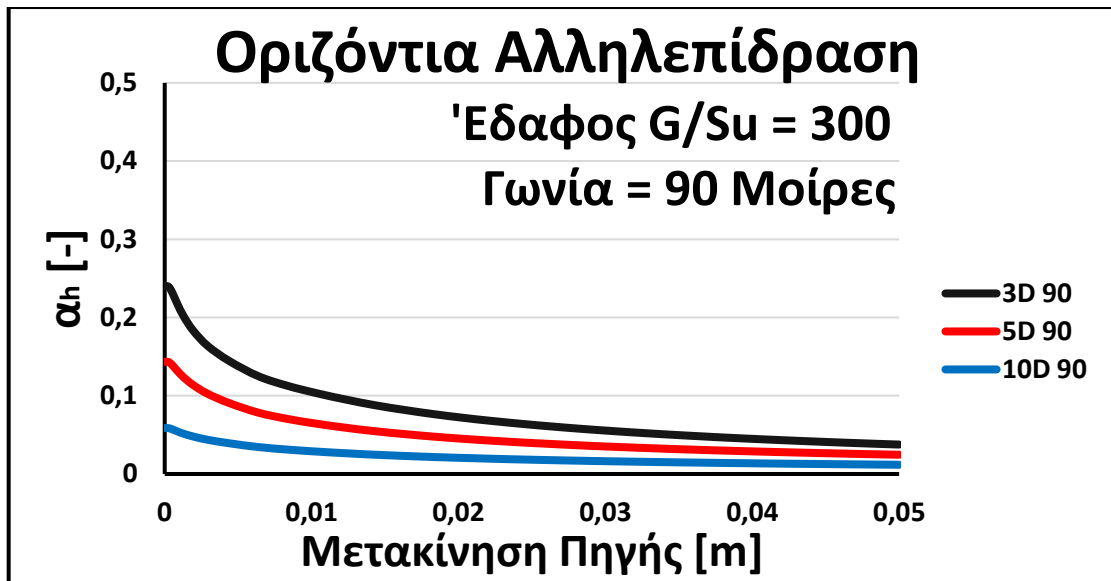
Εικόνες 5.7-5.11 Διαγράμματα εφαπτομενικής αλληλεπίδρασης, όπου έχει υπολογιστεί σε κάθε increment της ανάλυσης η αλληλεπίδραση για το επόμενο increment. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν την πραγματική συμπεριφορά της αλληλεπίδρασης, σε κάθε επίπεδο μετακίνησης της πηγής.



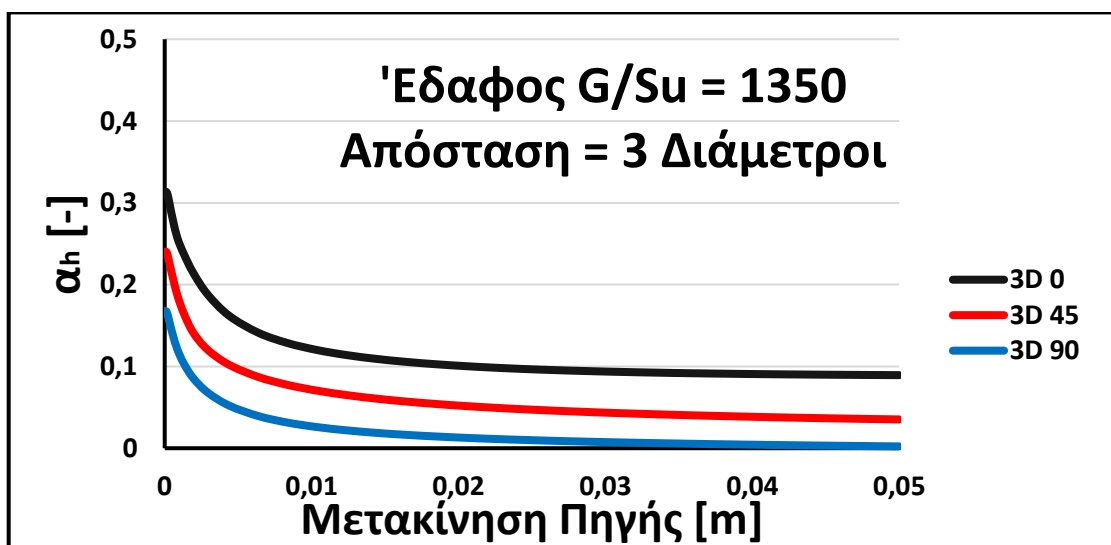
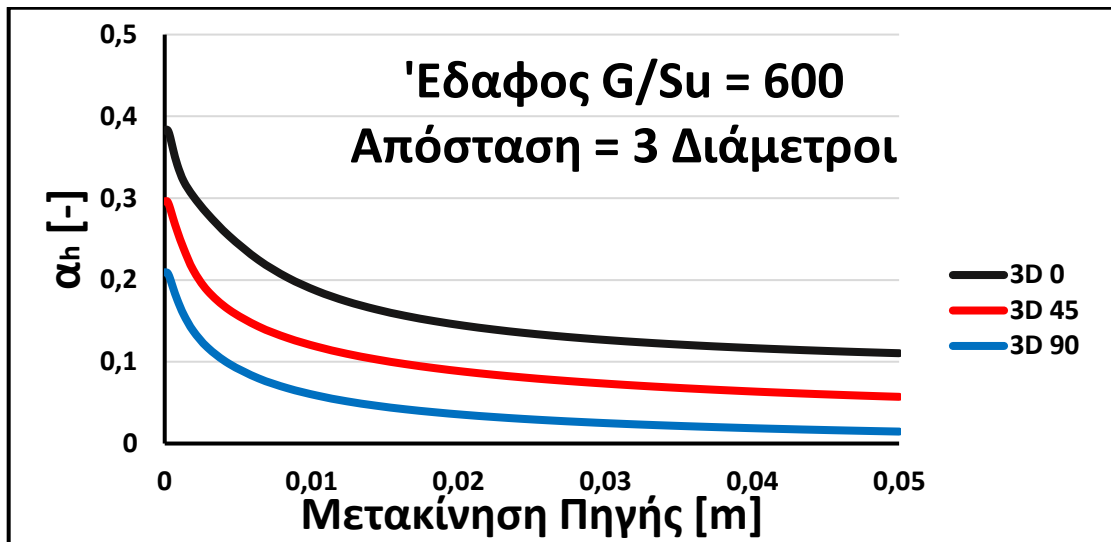
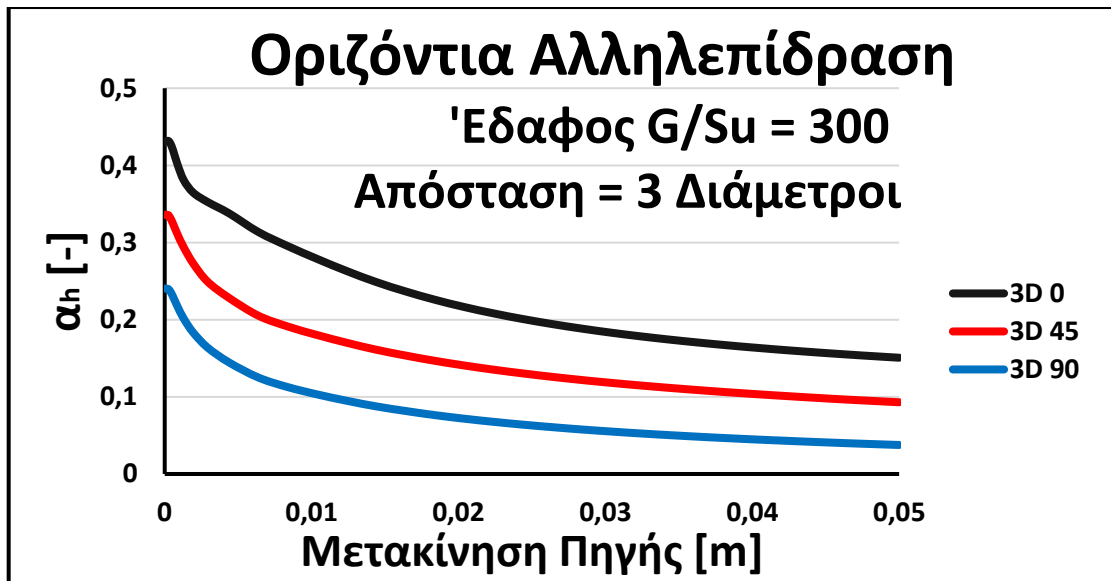
*Εικόνες 5.12-5.14 Εξέλιξη της οριζόντιας αλληλεπίδρασης για μετάβαση από ελαστική σε μη-γραμμική συμπεριφορά του ενεργού πασσάλου. Επίδραση της απόστασης από την πηγή, για κοινό προφίλ εδάφους και διεύθυνση φόρτισης*



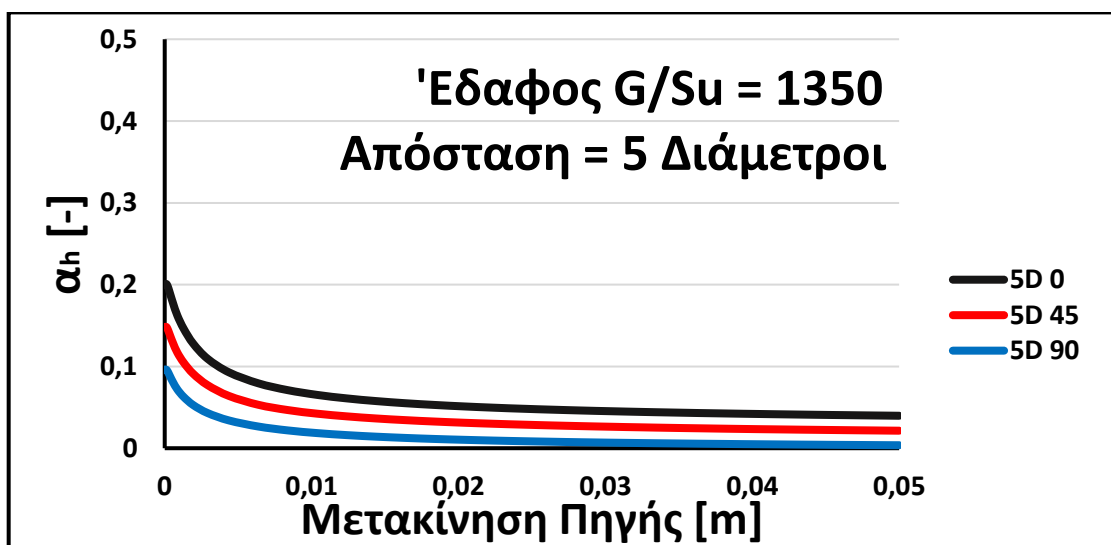
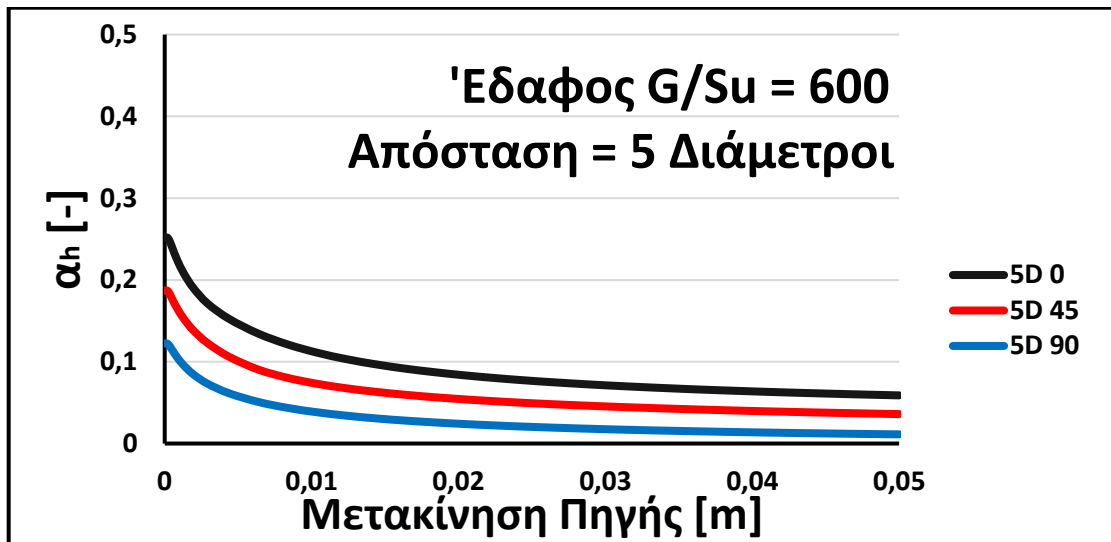
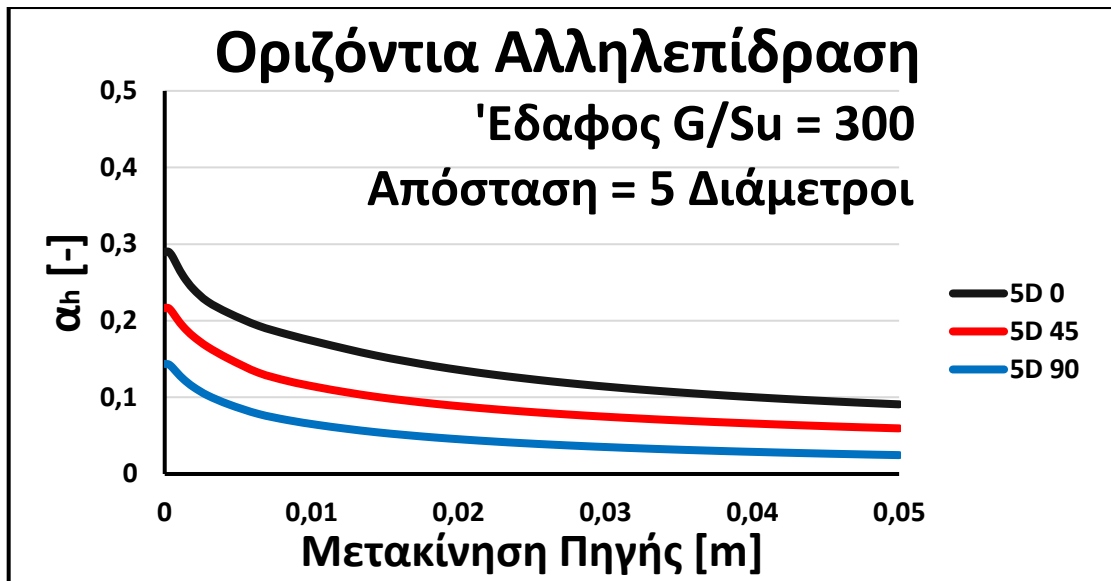
*Εικόνες 5.15-5.17 Εξέλιξη της οριζόντιας αλληλεπίδρασης για μετάβαση από ελαστική σε μη-γραμμική συμπεριφορά του ενεργού πασσάλου. Επίδραση της απόστασης από την πηγή, για κοινό προφίλ εδάφους και διεύθυνση φόρτισης*



*Εικόνες 5.18-5.20 Εξέλιξη της οριζόντιας αλληλεπίδρασης για μετάβαση από ελαστική σε μη-γραμμική συμπεριφορά του ενεργού πασσάλου. Επίδραση της απόστασης από την πηγή, για κοινό προφίλ εδάφους και διεύθυνση φόρτισης*

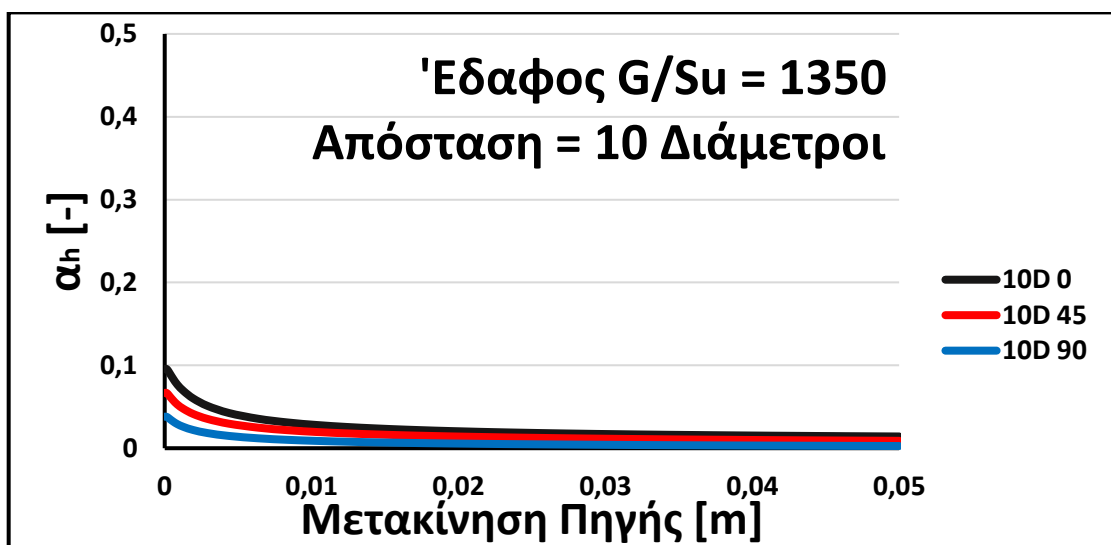
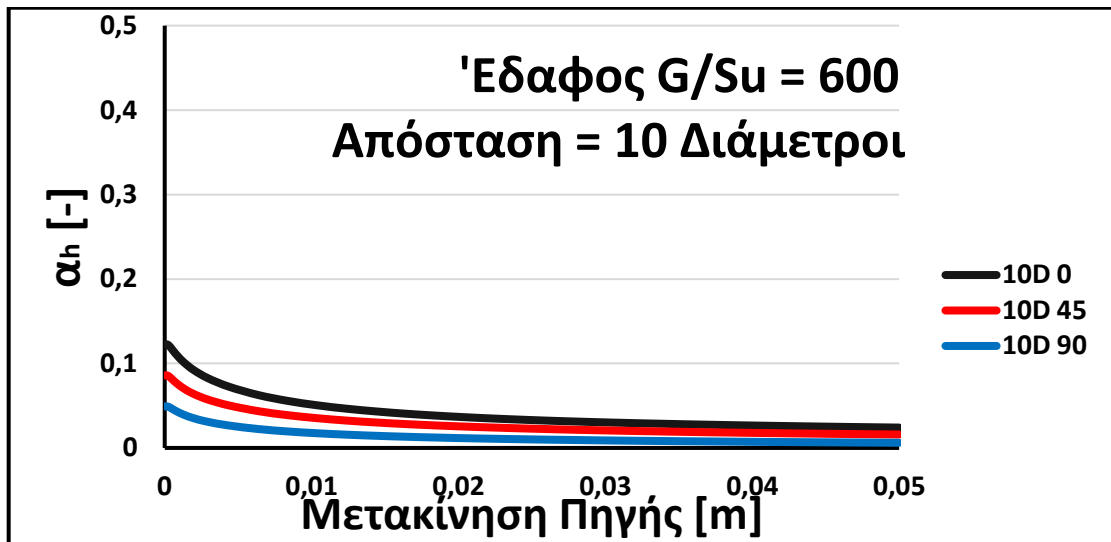
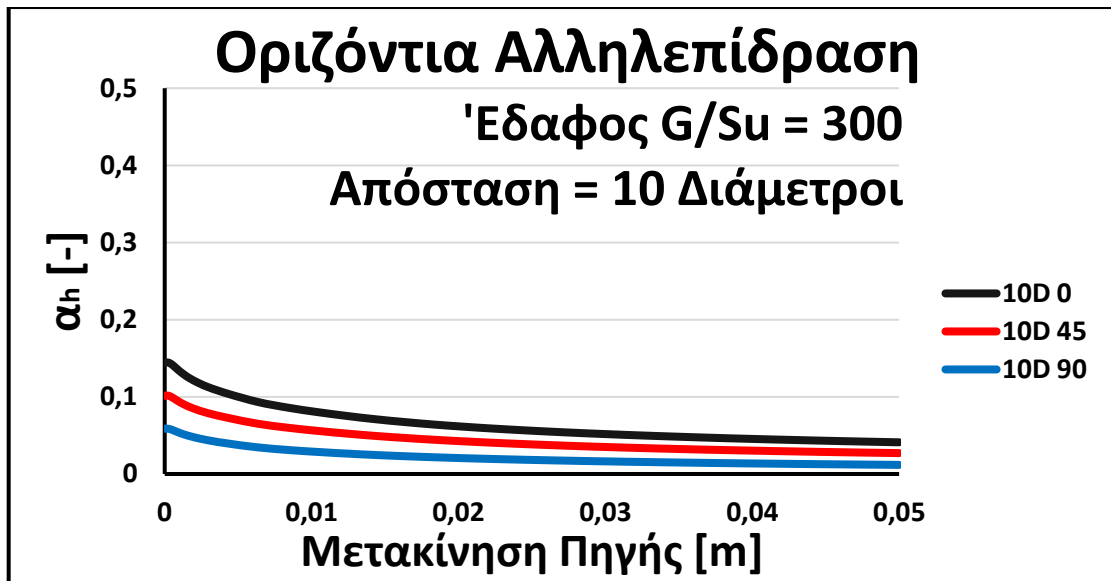


*Εικόνες 5.21-5.23 Εξέλιξη της οριζόντιας αλληλεπίδρασης για μετάβαση από ελαστική σε μη-γραμμική συμπεριφορά του ενεργού πασσάλου. Επίδραση της διεύθυνσης φόρτισης, για κοινό προφίλ εδάφους και απόσταση από την πηγή*

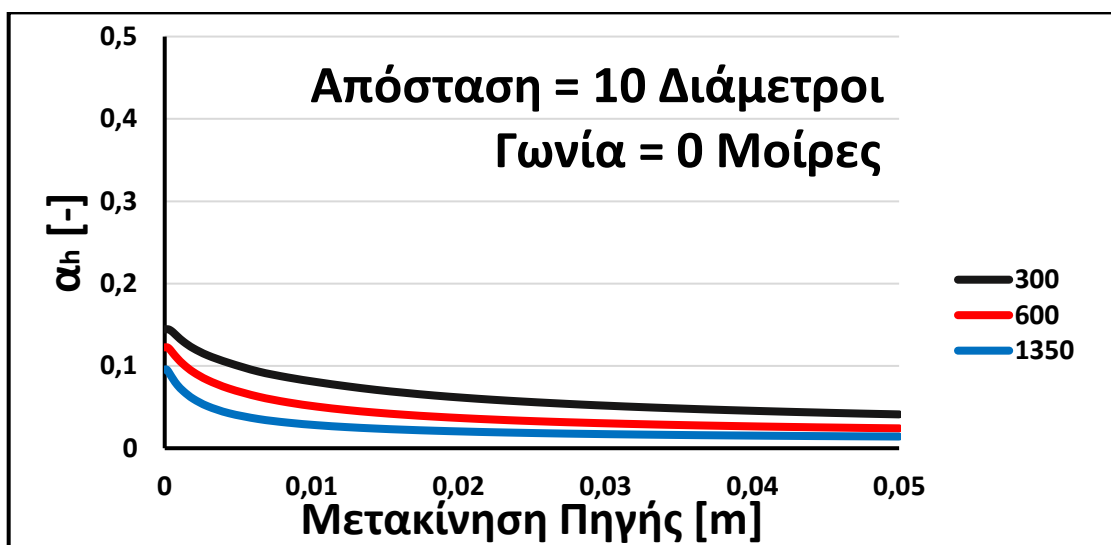
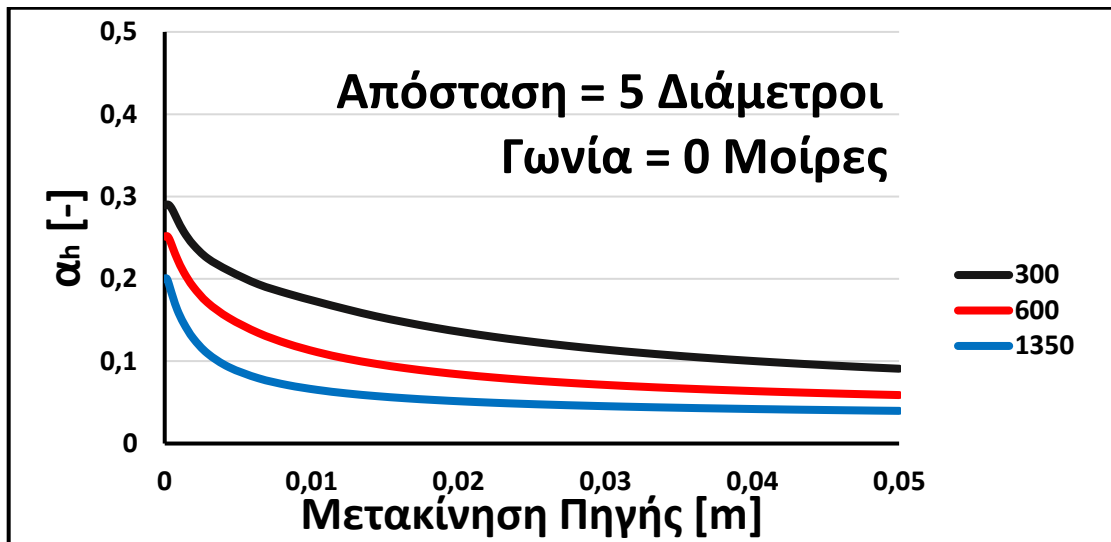
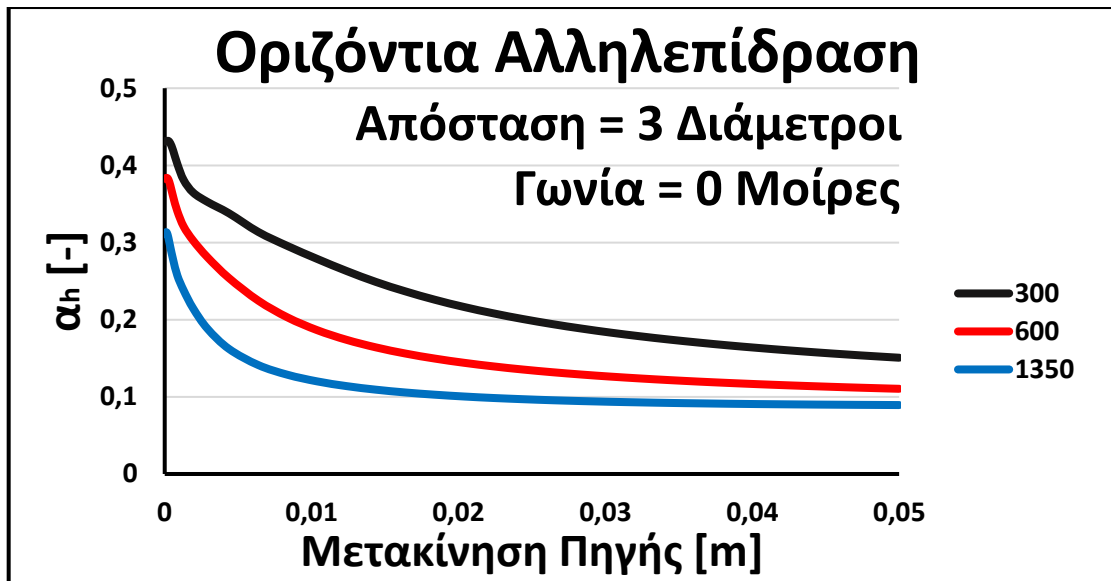


*Εικόνες 5.24-5.26 Εξέλιξη της οριζόντιας αλληλεπίδρασης για μετάβαση από ελαστική σε μη-γραμμική συμπεριφορά του ενεργού πασσάλου. Επίδραση της διεύθυνσης φόρτισης, για κοινό προφίλ εδάφους και απόσταση από την πηγή*

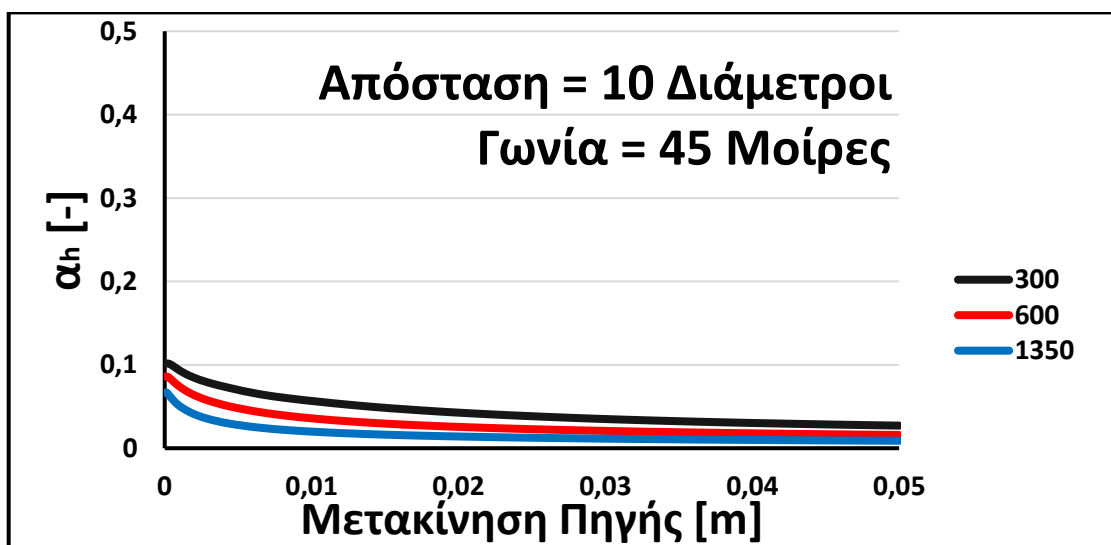
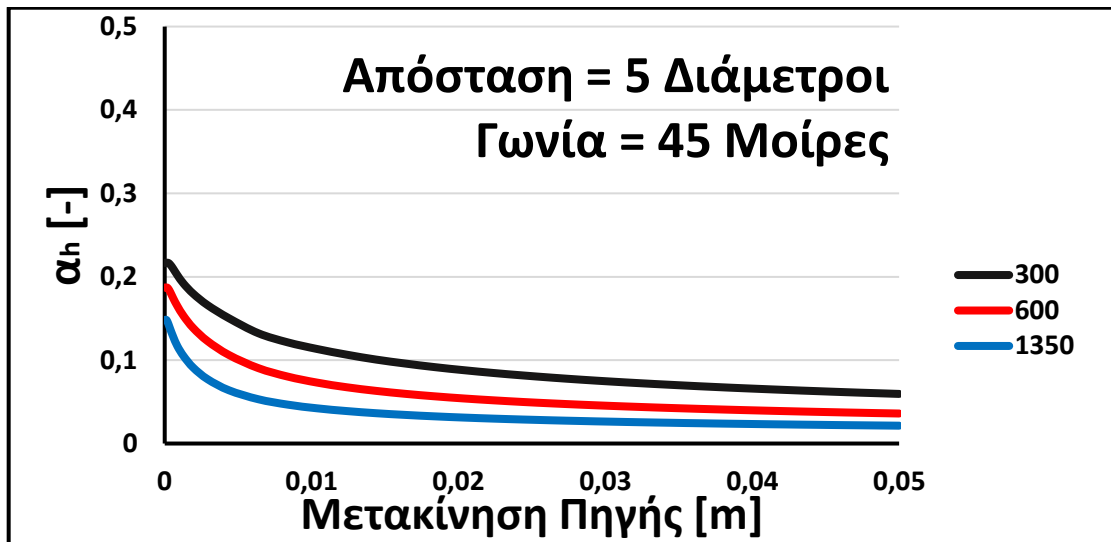
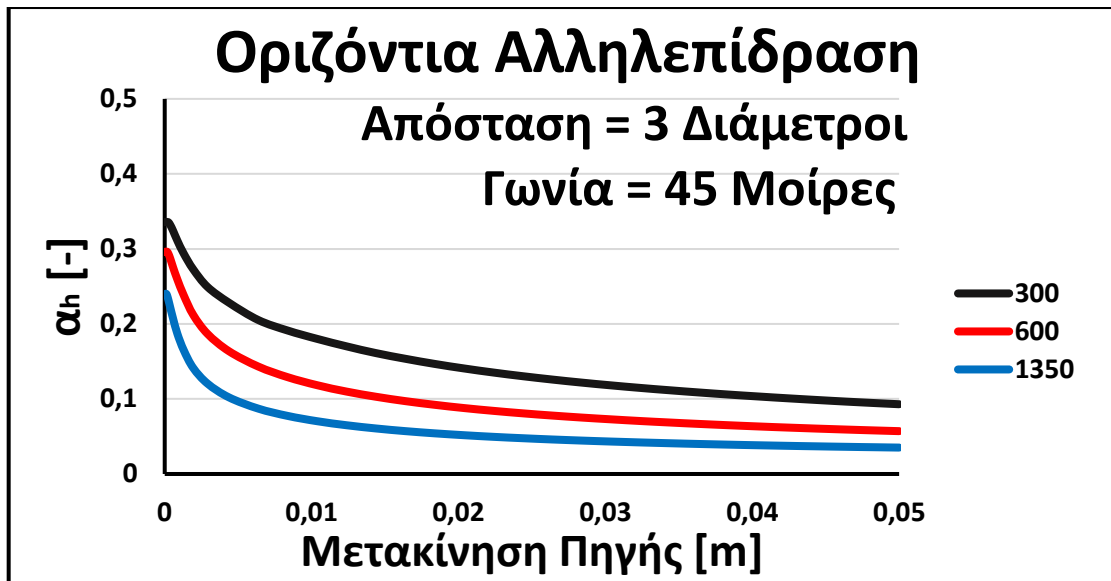




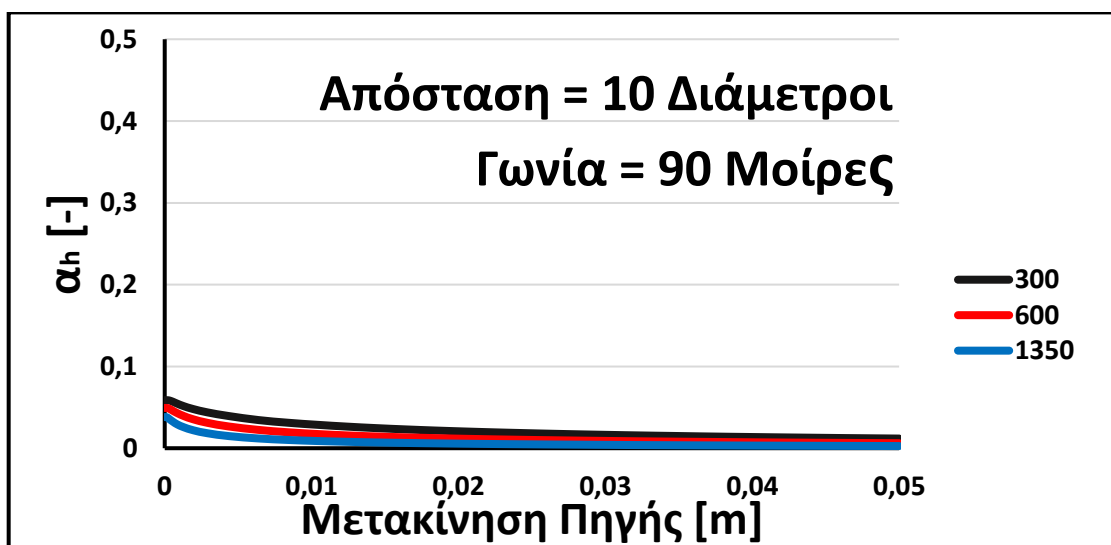
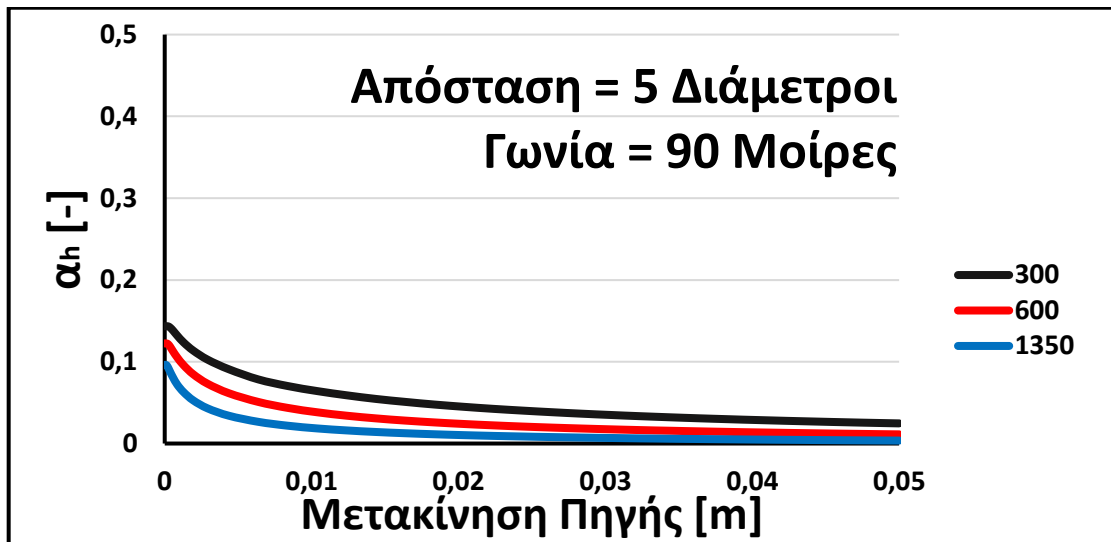
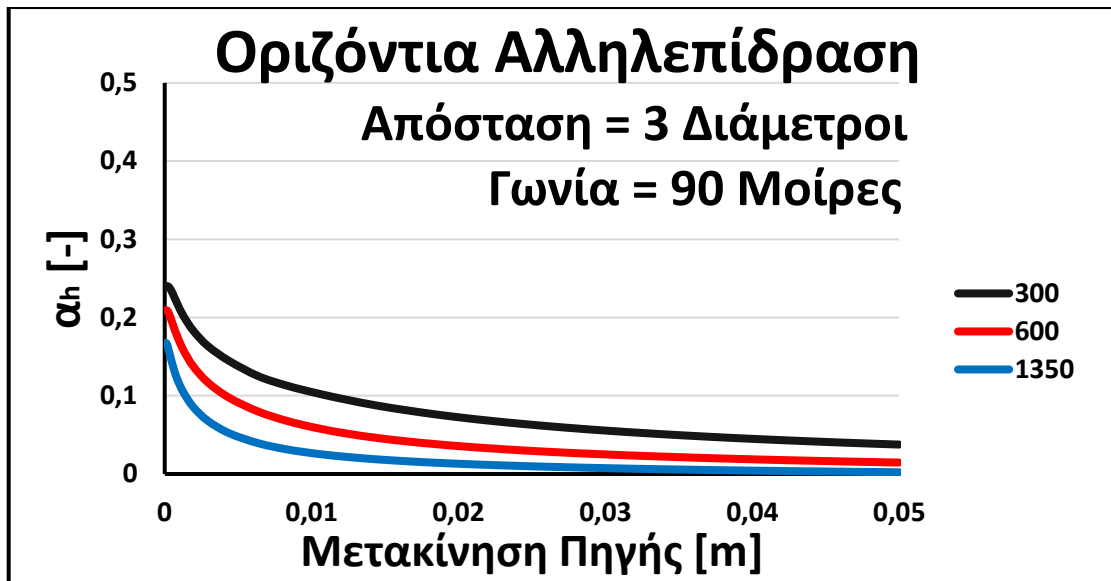
*Εικόνες 5.27-5.29 Εξέλιξη της οριζόντιας αλληλεπίδρασης για μετάβαση από ελαστική σε μη-γραμμική συμπεριφορά του ενεργού πασσάλου. Επίδραση της διεύθυνσης φόρτισης, για κοινό προφίλ εδάφους και απόσταση από την πηγή*



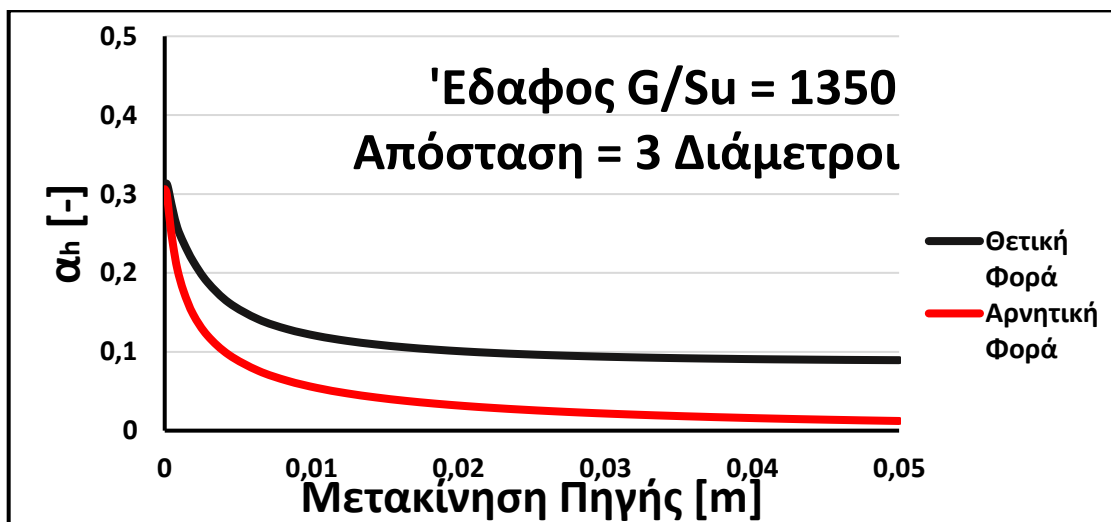
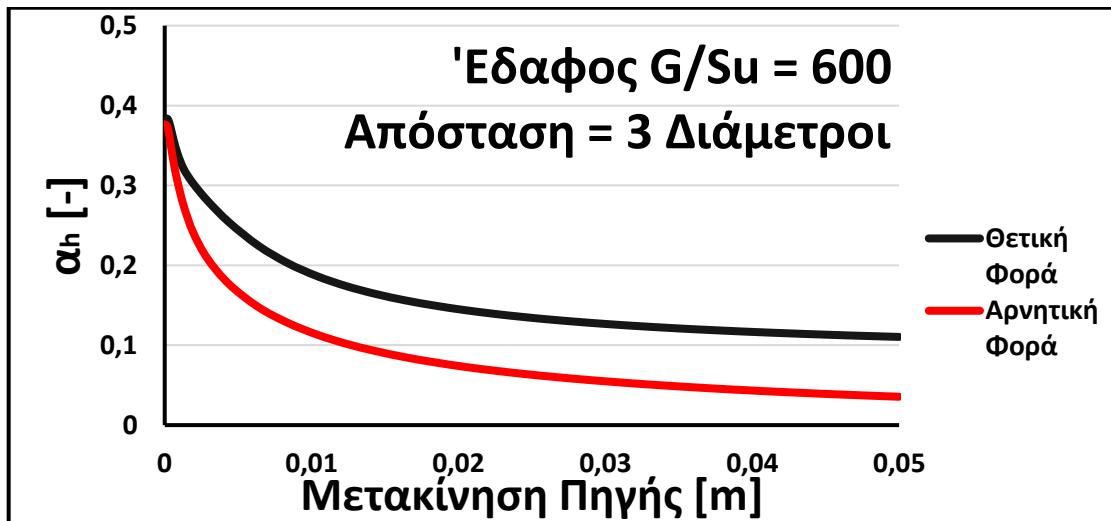
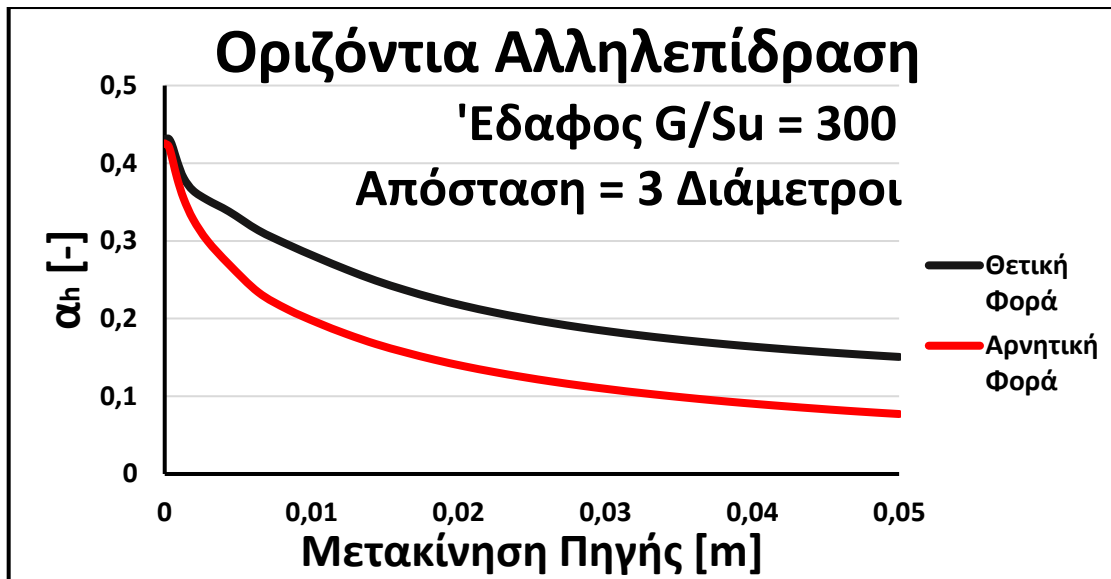
*Εικόνες 5.30-5.32 Εξέλιξη της οριζόντιας αλληλεπίδρασης για μετάβαση από ελαστική σε μη-γραμμική συμπεριφορά του ενεργού πασσάλου. Επίδραση του εδάφους, για κοινή διεύθυνση φόρτισης και απόσταση από την πηγή*



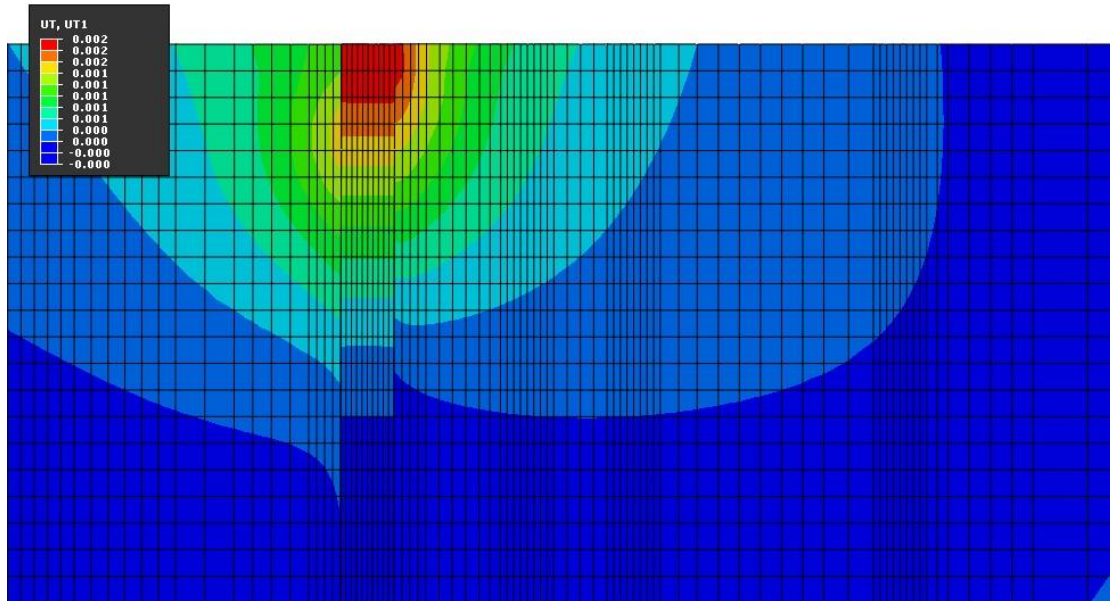
*Εικόνες 5.33-5.35 Εξέλιξη της οριζόντιας αλληλεπίδρασης για μετάβαση από ελαστική σε μη-γραμμική συμπεριφορά του ενεργού πασσάλου. Επίδραση του εδάφους, για κοινή διεύθυνση φόρτισης και απόσταση από την πηγή*



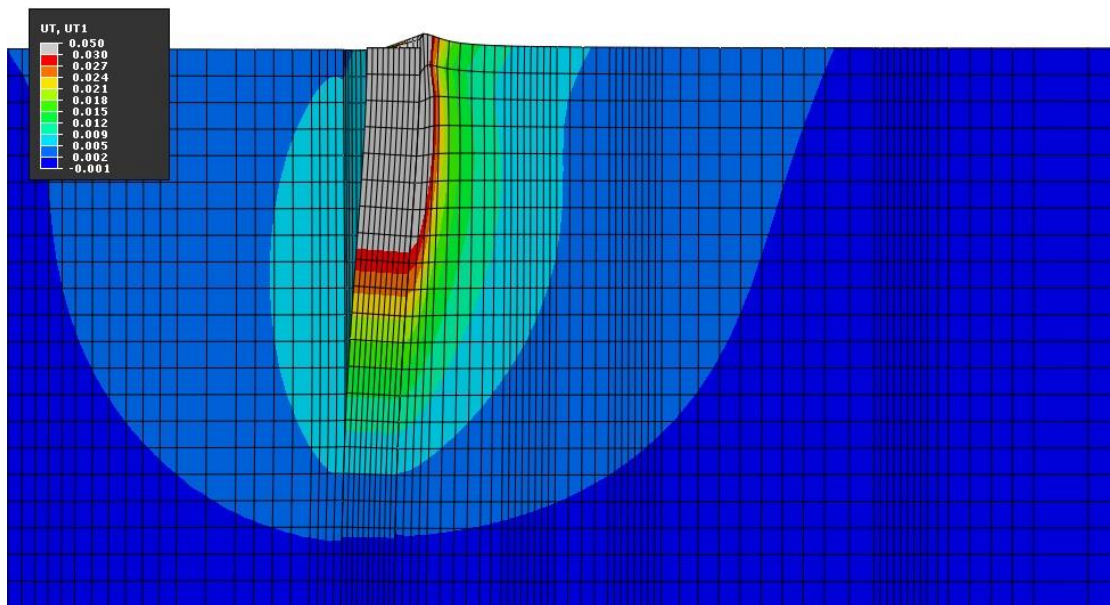
*Εικόνες 5.36-5.38 Εξέλιξη της οριζόντιας αλληλεπίδρασης για μετάβαση από ελαστική σε μη-γραμμική συμπεριφορά του ενεργού πασσάλου. Επίδραση του εδάφους, για κοινή διεύθυνση φόρτισης και απόσταση από την πηγή*



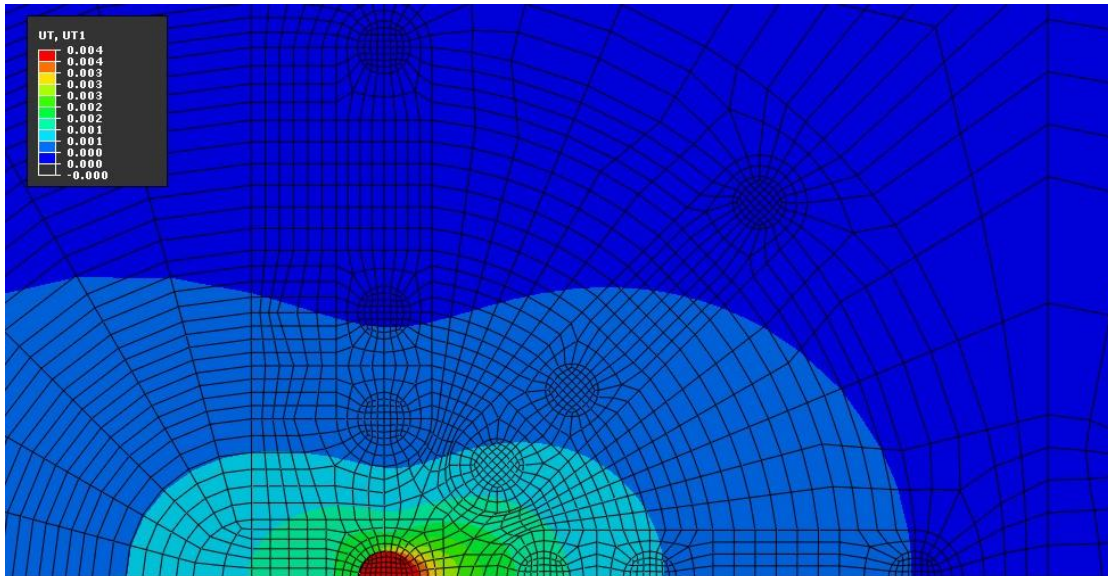
*Εικόνες 5.39-5.41 Εξέλιξη της οριζόντιας αλληλεπίδρασης για μετάβαση από ελαστική σε μη-γραμμική συμπεριφορά του ενεργού πασσάλου. Επίδραση της ασυμμετρίας που προκύπτει, λόγω διεπιφάνειας και μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους.*



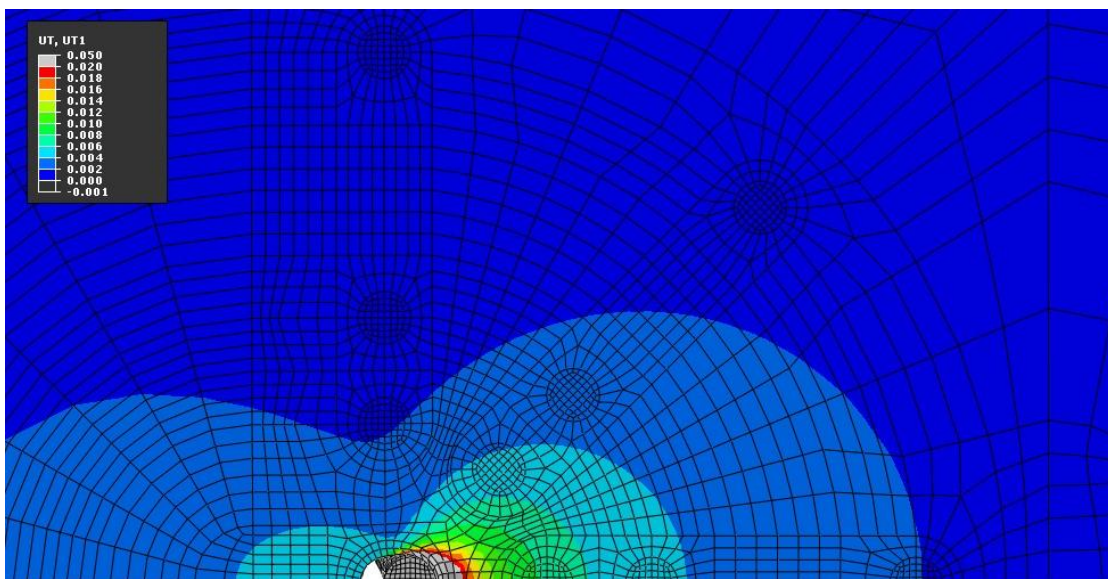
**Εικόνα 5.42-** Ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων στο έδαφος για μικρές μετακινήσεις της πηγής, δηλαδή σχεδόν ελαστική συμπεριφορά. Οι κατανομή των μετακινήσεων στο έδαφος είναι σχεδόν συμμετρική, εκτός από την περιοχή πολύ κοντά στην κεφαλή του πάσσαλου όπου η αποκόλληση έχει ήδη αναπτυχθεί, κάτι που προκύπτει από την απότομη αλλαγή του χρώματος στην πίσω παρειά της πηγής. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**



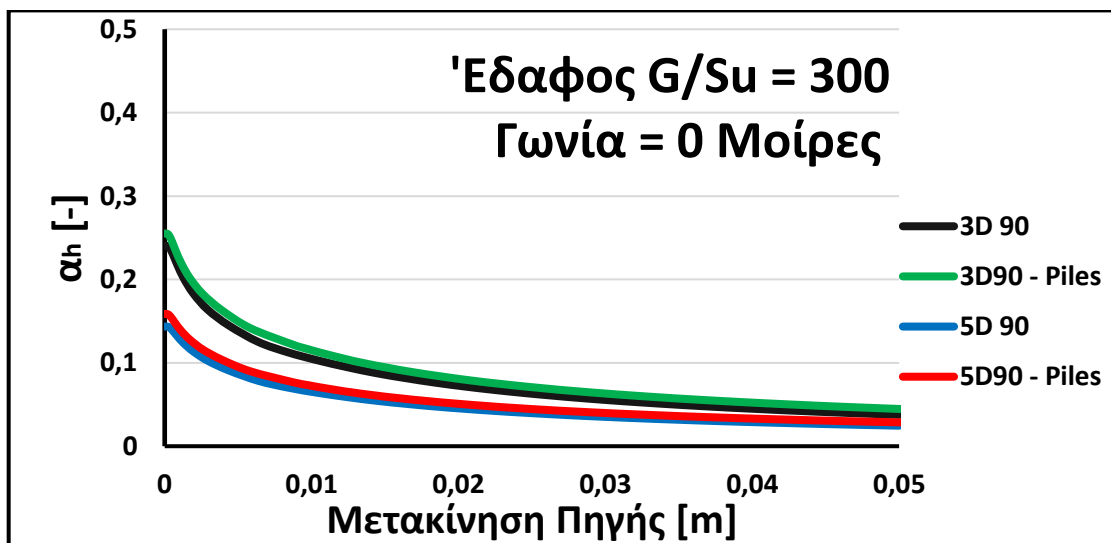
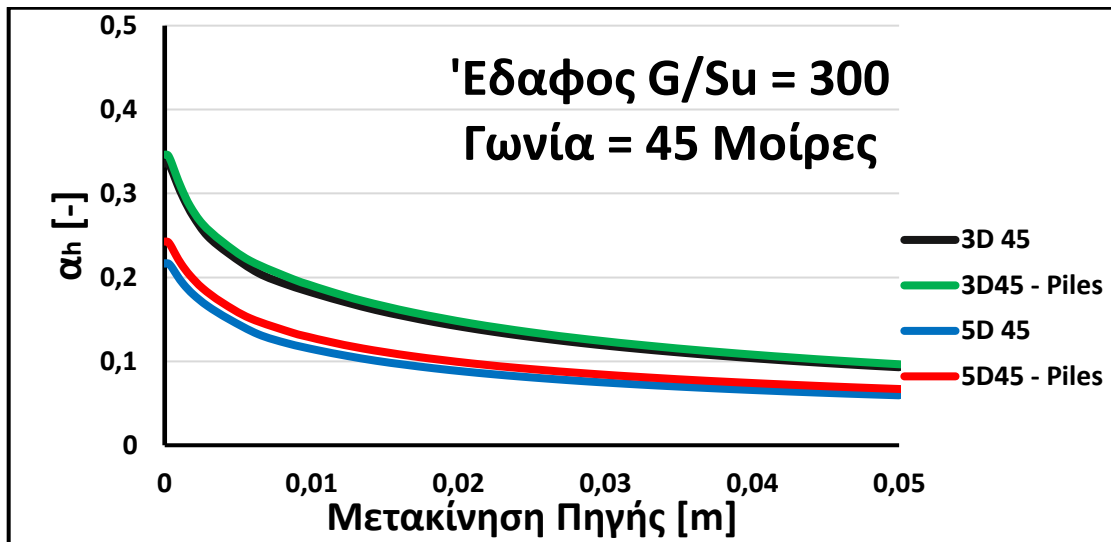
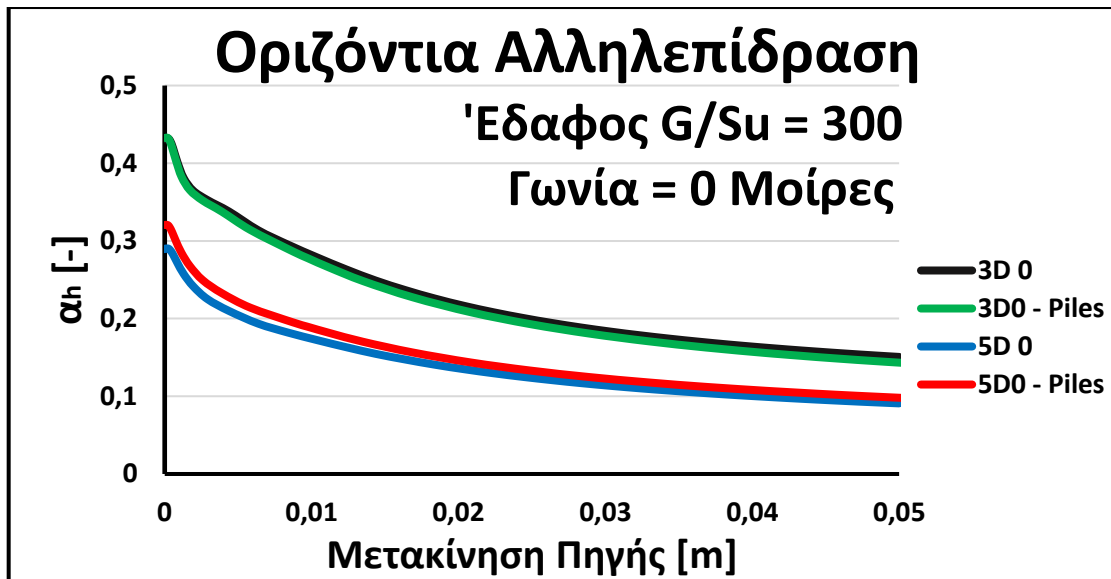
**Εικόνα 5.43-** Ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων στο έδαφος για μεγάλες μετακινήσεις της πηγής, δηλαδή μη γραμμική συμπεριφορά. Οι κατανομή των μετακινήσεων στο έδαφος δεν παρουσιάζει συμμετρία στην περιοχή κοντά στο πάσσαλο, όπου είναι εμφανής η αποκόλληση στην πίσω παρειά του και η συγκέντρωση μετακινήσεων στην μπροστά παρειά. Μακριά από τον πάσσαλο, η λειτουργία του εδάφους ως συνεχούς μέσου ομαλοποιεί τις τάσεις, άρα και τις παραμορφώσεις, οδηγώντας σε πιο συμμετρική κατανομή των μετακινήσεων στις μικρές τιμές τους. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**



**Εικόνα 5.44-** Ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων στο έδαφος για **μικρές μετακινήσεις της πηγής, δηλαδή σχεδόν ελαστική συμπεριφορά**. Οι κατανομή των μετακινήσεων στο έδαφος είναι σχεδόν συμμετρική, εκτός από την περιοχή πολύ κοντά στην κεφαλή του πάσσαλου όπου η αποκόλληση έχει ήδη αναπτυχθεί, κάτι που προκύπτει από την απότομη αλλαγή του χρώματος στην πίσω παρειά της πηγής. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**

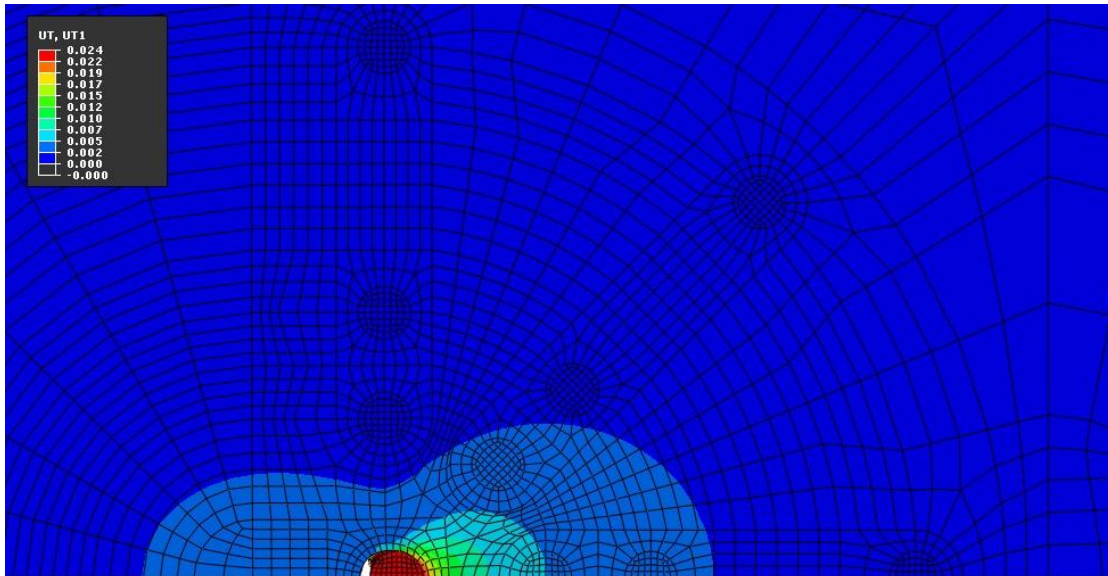


**Εικόνα 5.45-** Ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων στο έδαφος για **μεγάλες μετακινήσεις της πηγής, δηλαδή μη γραμμική συμπεριφορά**. Οι κατανομή των μετακινήσεων στο έδαφος δεν παρουσιάζει συμμετρία στην περιοχή κοντά στο πάσσαλο, όπου είναι εμφανής η αποκόλληση στην πίσω παρειά του και η συγκέντρωση μετακινήσεων στην μπροστά παρειά. Μακριά από τον πάσσαλο, η λειτουργία του εδάφους ως συνεχούς μέσου ομαλοποιεί τις τάσεις, άρα και τις παραμορφώσεις, οδηγώντας σε πιο συμμετρική κατανομή των μετακινήσεων στις μικρές τιμές τους. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**

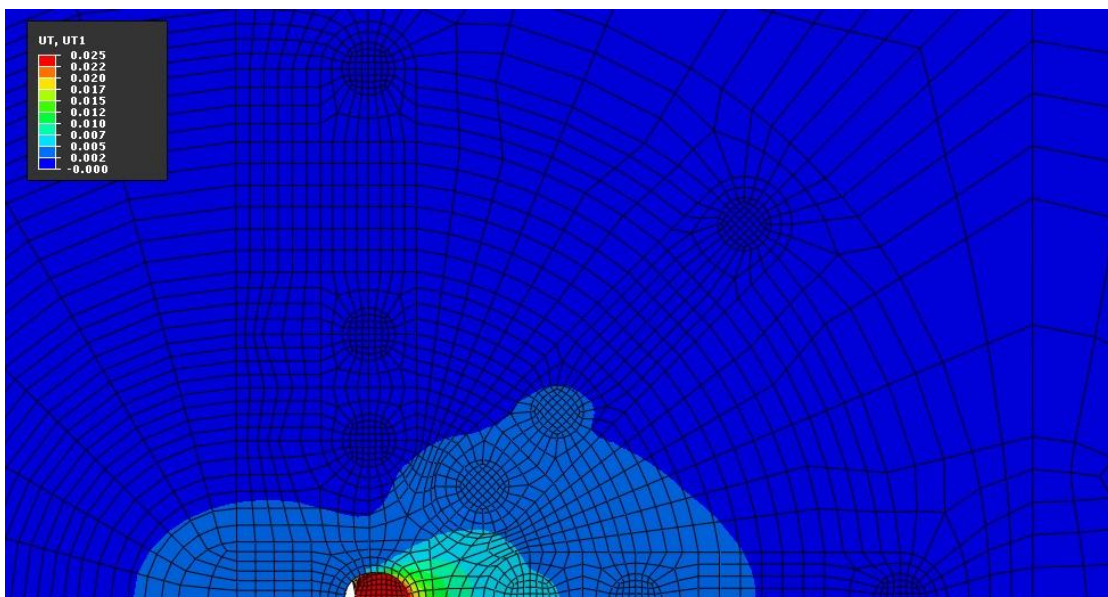


*Εικόνες 5.46-5.48 Επίδραση των παθητικών πασσάλων στην οριζόντια αλληλεπίδραση, όπου **3D 90** ονομάζεται η ανάλυση χωρίς την ύπαρξή τους και **3D 90 - Piles** με την ύπαρξή τους. Η επιρροή τους στα αποτελέσματα είναι πολύ μικρή.*



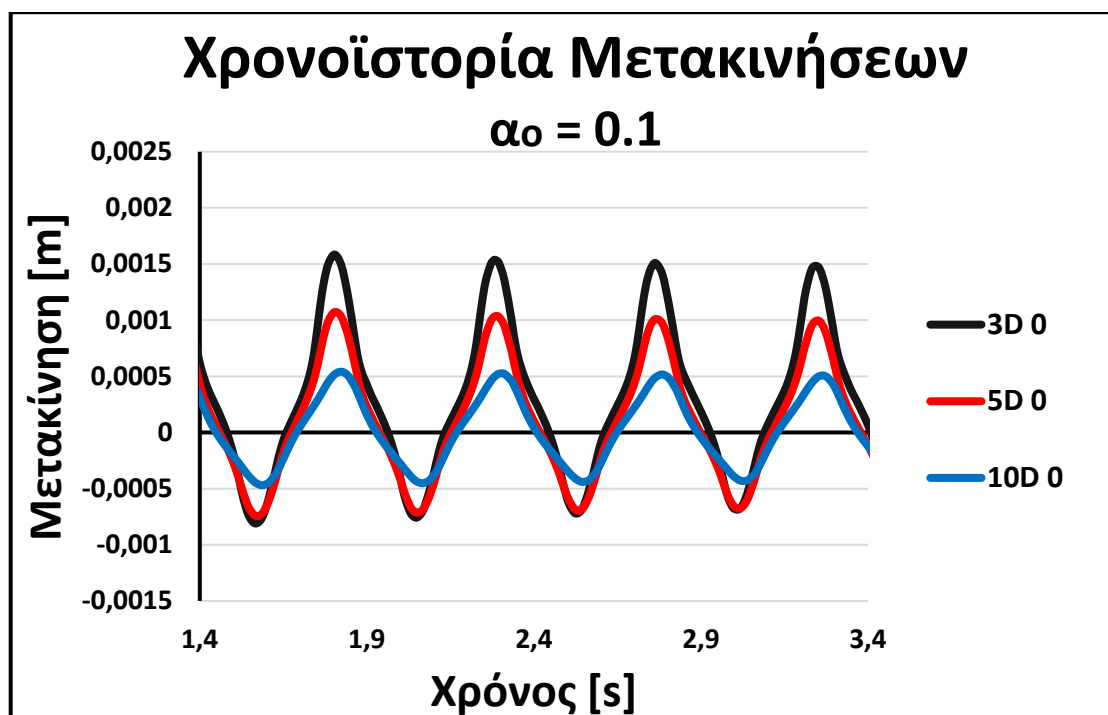


**Εικόνα 5.49-** Ισοϋψείς μετακινήσεων για **ανάλυση χωρίς παθητικούς πασσάλους**, όπου φαίνεται χαρακτηριστικά πως στην θέση 3D 0, η ισοϋψής τέμνει την περιοχή που θα υπήρχε πάσσαλος στα δυο. Εάν υπήρχε ο πάσσαλος, επειδή η διατομή του λειτουργεί προσεγγιστικά σαν στερεό σώμα, η ισοϋψής είτε θα μετακινούταν είτε προς τα μέσα, είτε προς τα έξω, μειώνοντας ή αυξάνοντας αντίστοιχα την αλληλεπίδραση στην θέση αυτή. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**

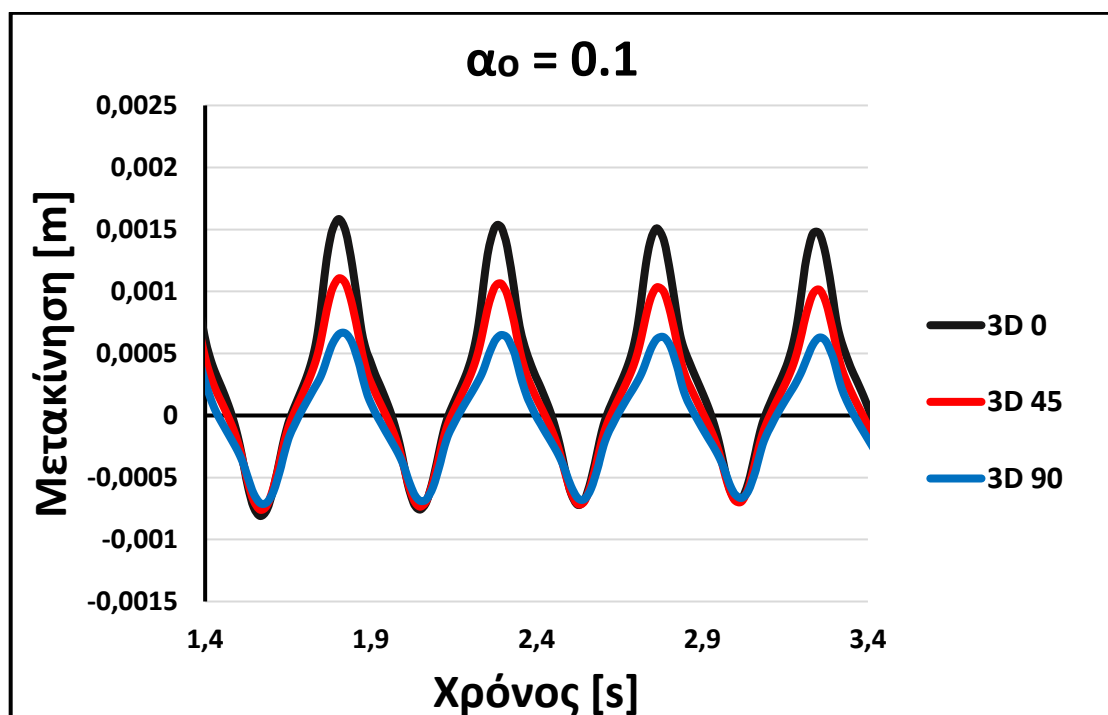


**Εικόνα 5.50-** Ισοϋψείς μετακινήσεων για **ανάλυση με παθητικούς πασσάλους**. Εμφανής η επίδρασή τους στο τοπικό μετακινησιακό πεδίο, καθώς όταν η διατομή του παθητικού πασσάλου βρεθεί εντός μιας ισοϋψούς αναπτύσσει ολόκληρη κοινή μετακίνηση. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στους πασσάλους **3D 0 και 5D 45**, όπου είναι εμφανές πως η ύπαρξή τους έχει προεκτείνει τις ισοϋψείς προς τα έξω, μεγαλώνοντας την αλληλεπίδραση, αντίθετα με ότι θα περίμενε κανείς διαισθητικά. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**

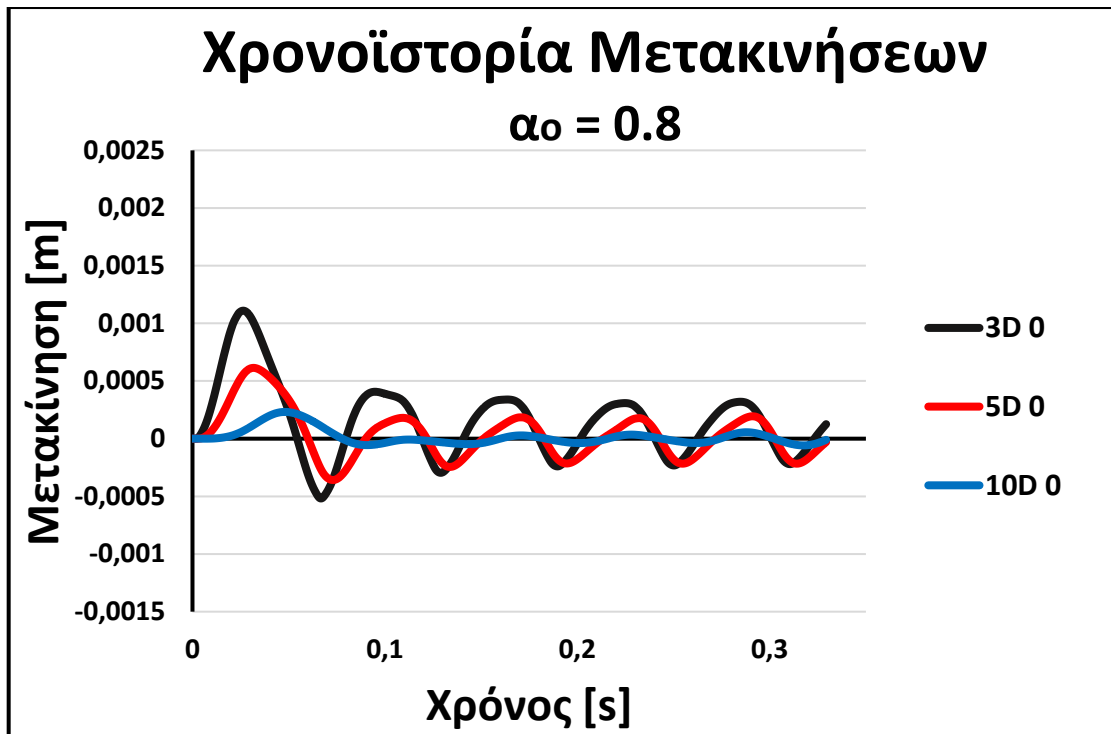
## 5.4 ΣΧΗΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



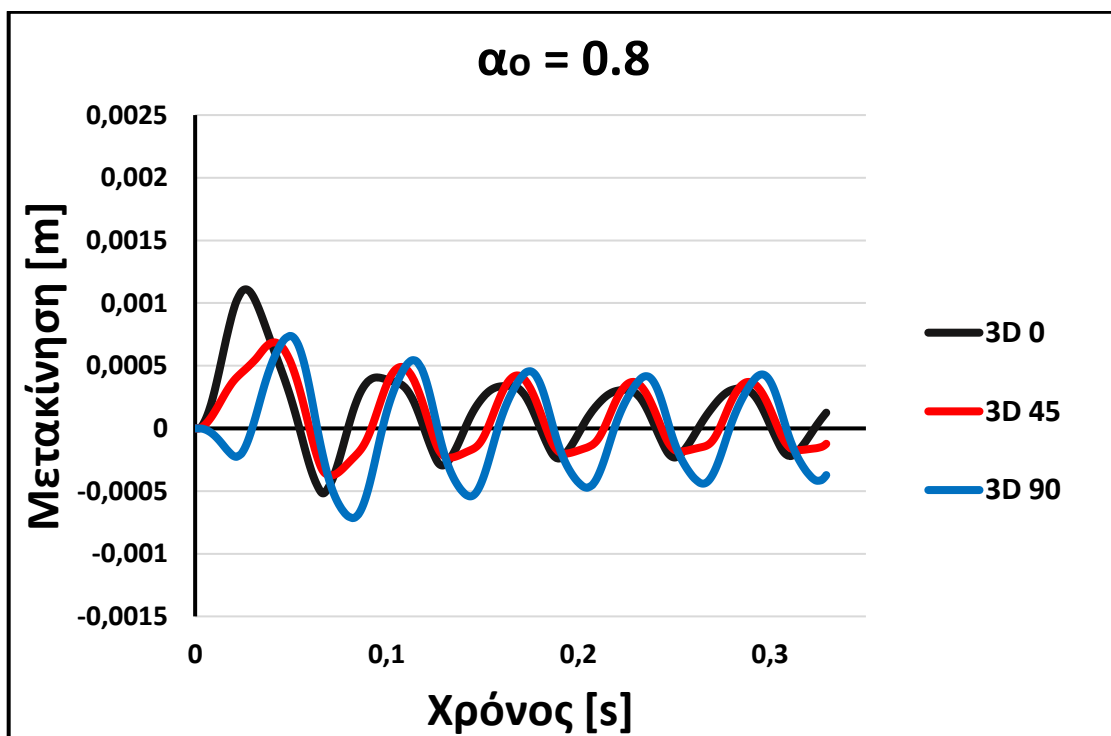
Εικόνα 5.51- Χρονοϊστορία μετακινήσεων των παθητικών πασσάλων που βρίσκονται πάνω στην διεύθυνση φόρτισης, για συχνότητα διέγερσης  $\alpha_0=0.1$  και έδαφος με  $G/Su=600$ . Επιβληθείσα μετακίνηση πηγής  $d=1\text{ cm}$ .



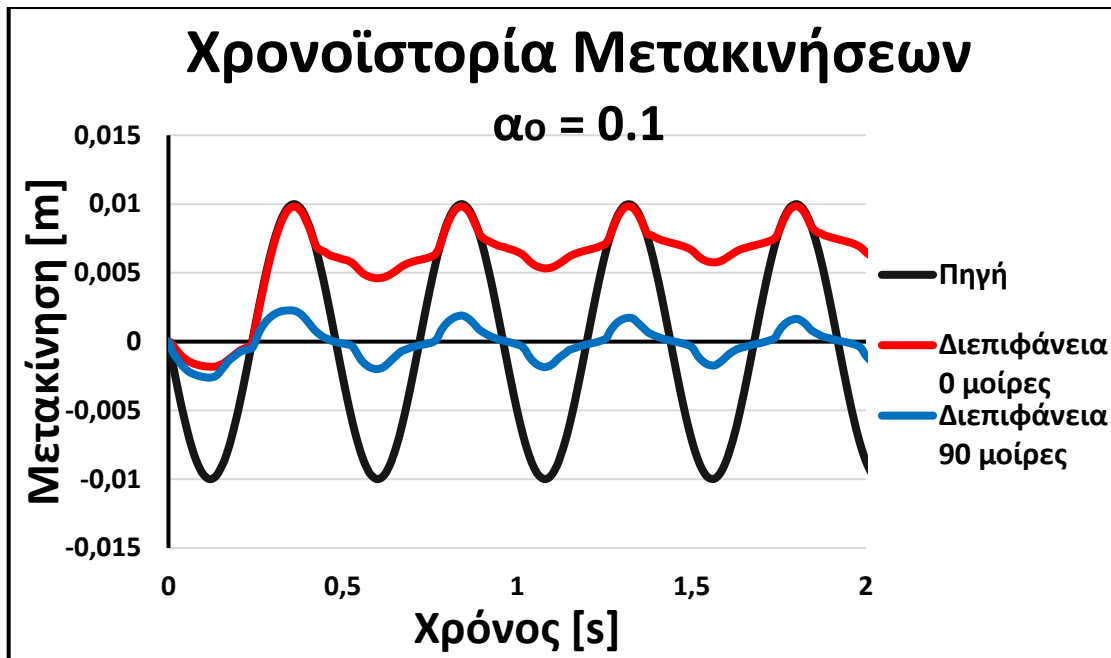
Εικόνα 5.52- Χρονοϊστορία μετακινήσεων των παθητικών πασσάλων που απέχουν 3 διαμέτρους από την πηγή, για συχνότητα διέγερσης  $\alpha_0=0.1$  και έδαφος με  $G/Su=600$ . Επιβληθείσα μετακίνηση πηγής  $d=1\text{ cm}$ .



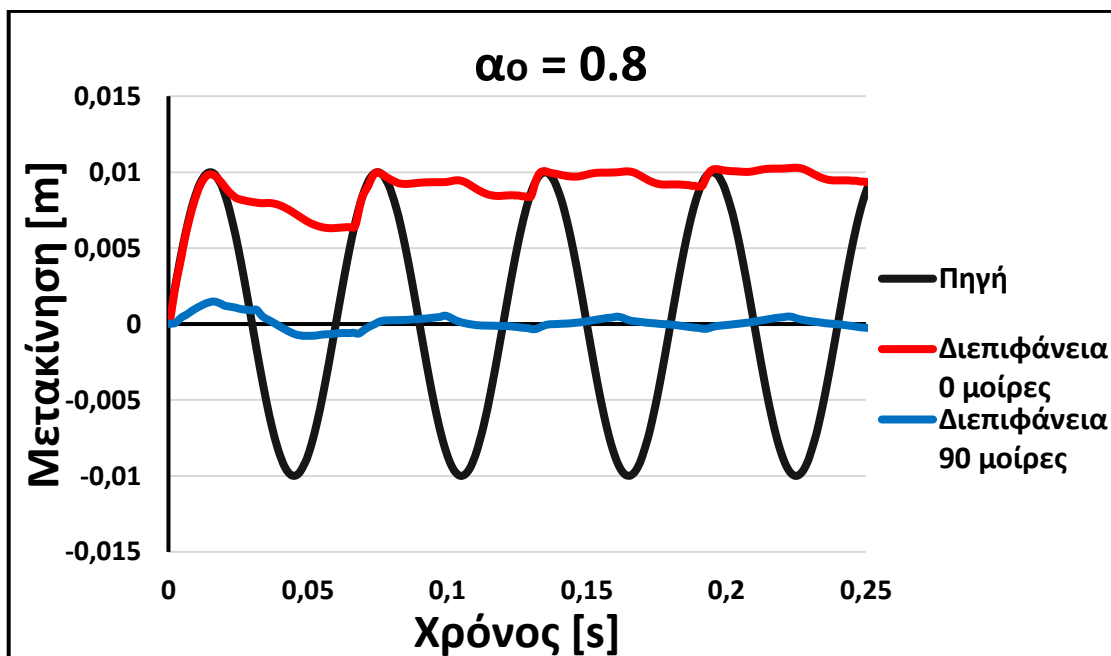
*Εικόνα 5.53- Χρονοϊστορία μετακινήσεων των παθητικών πασσάλων πάνω στην διεύθυνση φόρτισης, για συχνότητα διέγερσης  $\alpha_0=0.8$  και έδαφος με  $G/Su=600$ . Επιβληθείσα μετακίνηση πηγής  $d= 1 \text{ cm}$ .*



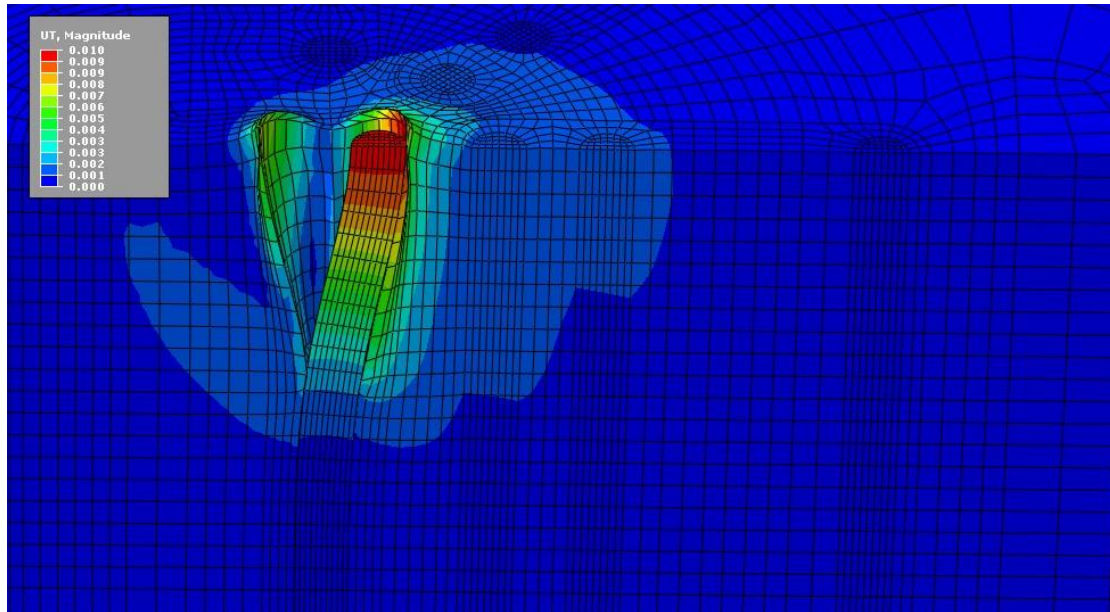
*Εικόνα 5.54- Χρονοϊστορία μετακινήσεων των παθητικών πασσάλων που απέχουν 3 διαμέτρους από την πηγή, για συχνότητα διέγερσης  $\alpha_0=0.8$  και έδαφος με  $G/Su=600$ . Επιβληθείσα μετακίνηση πηγής  $d= 1 \text{ cm}$ .*



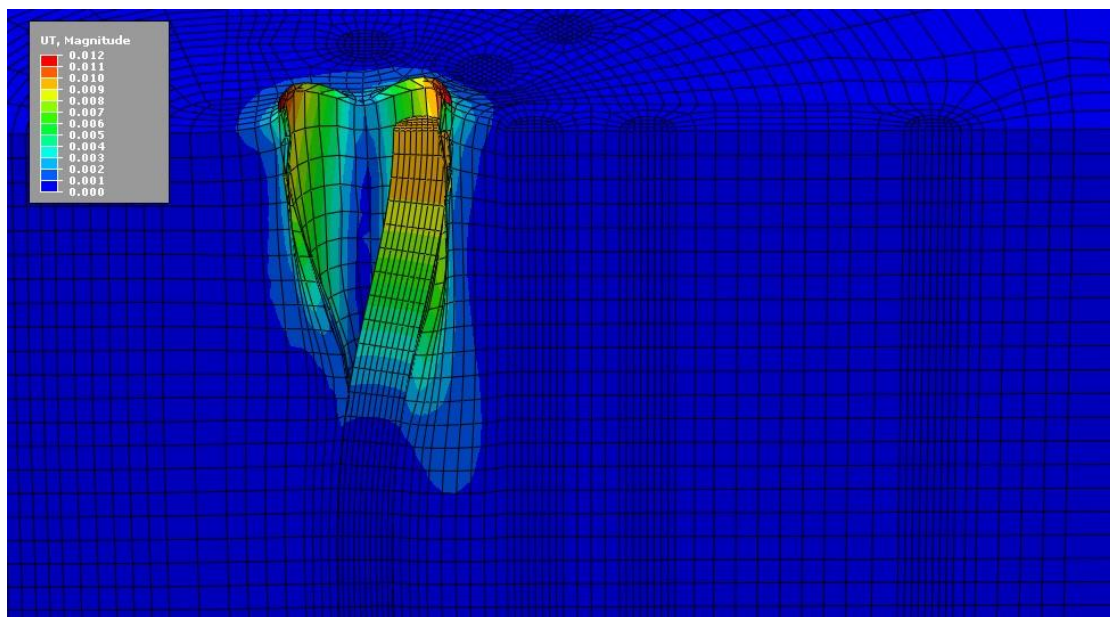
*Εικόνα 5.55-* Χρονοϊστορία των μετακινήσεων της πηγής και των 2 σημείων στην διεπιφάνεια του εδάφους, για  $\alpha_0=0.1$ . Είναι εμφανής η μόνιμη παραμόρφωση του εδάφους μπροστά από την πηγή, σε αντίθεση με το έδαφος στην πλαϊνή παρειά της πηγής που παραμένει στην αρχική του θέση ισορροπίας. Οι μετακινήσεις των 2 αυτών σημείων βρίσκονται σε φάση, γεγονός που δείχνει ότι η διεπιφάνεια 90 μοιρών κινείται λόγω της κίνησης του εδάφους μπροστά στην πηγή και όχι λόγω διατμητικών παραμορφώσεων από την πλαϊνή παρειά της πηγής.



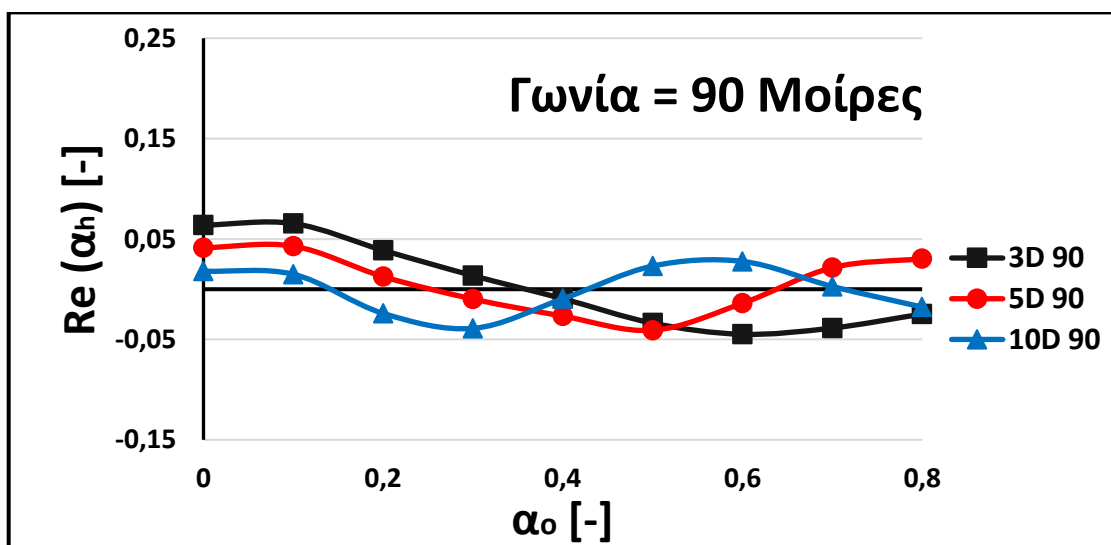
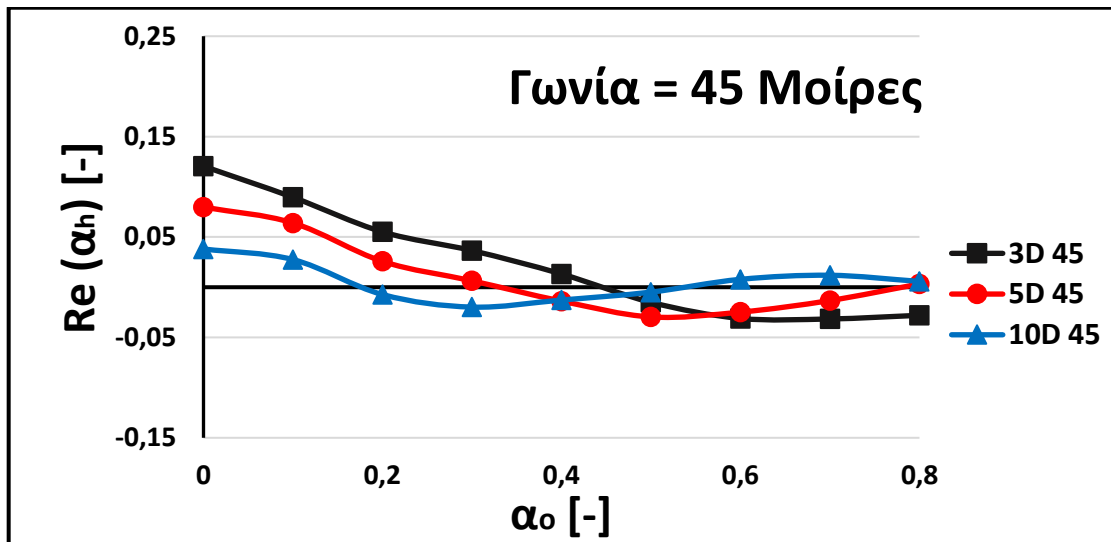
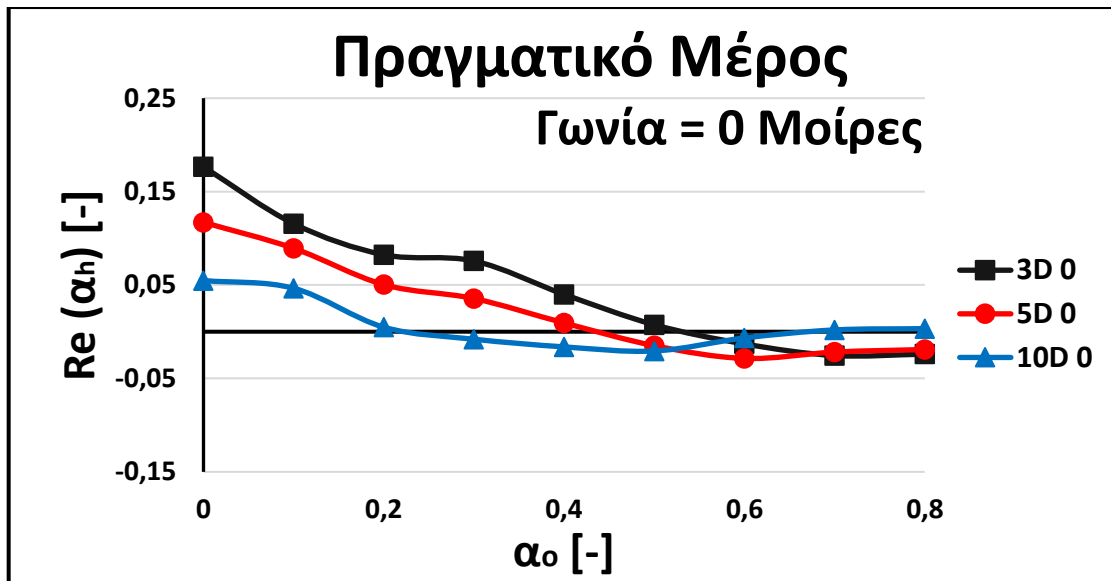
*Εικόνα 5.56-* Χρονοϊστορία των μετακινήσεων της πηγής και των 2 σημείων στην διεπιφάνεια του εδάφους, για  $\alpha_0=0.8$ . Είναι εμφανής η παρόμοια συμπεριφορά με την περίπτωση  $\alpha_0=0.1$ , με βασική διαφορά την απότομη αλλαγή κλίσης της κόκκινης καμπύλης στα σημεία που έρχεται σε επαφή με την πηγή, που υποδηλώνει κρούση της πηγής στην παρειά του εδάφους.



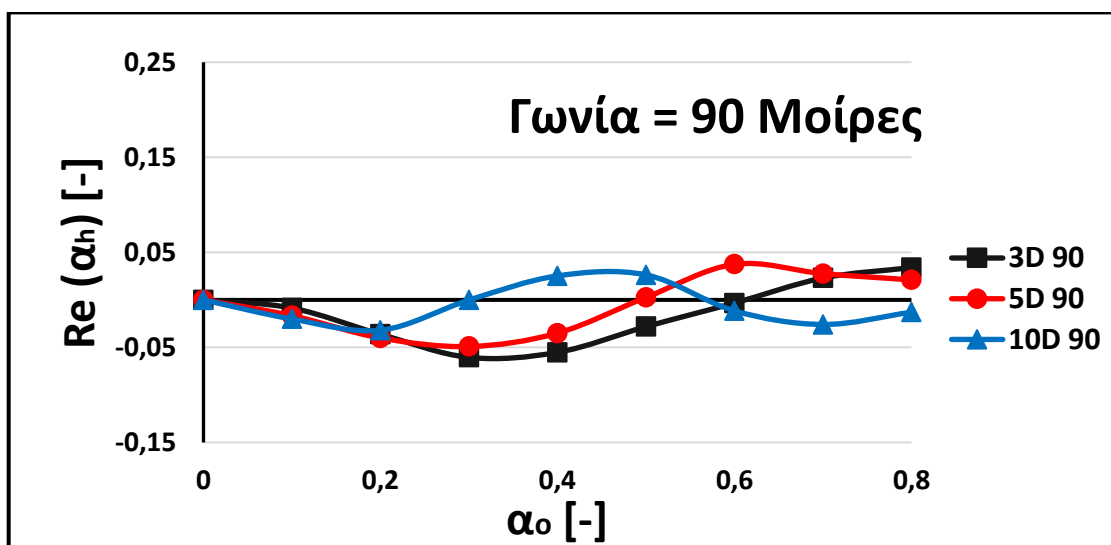
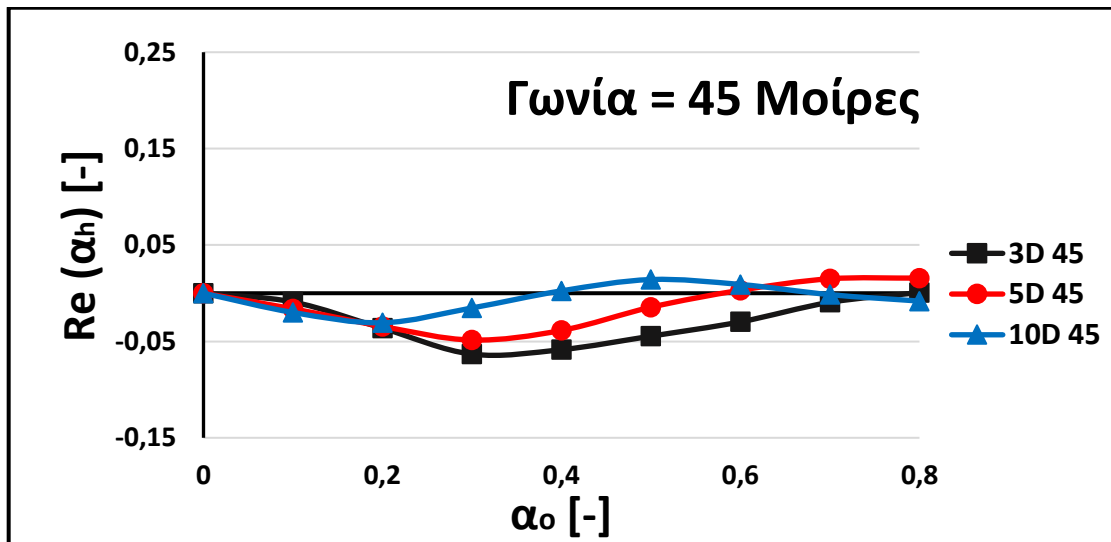
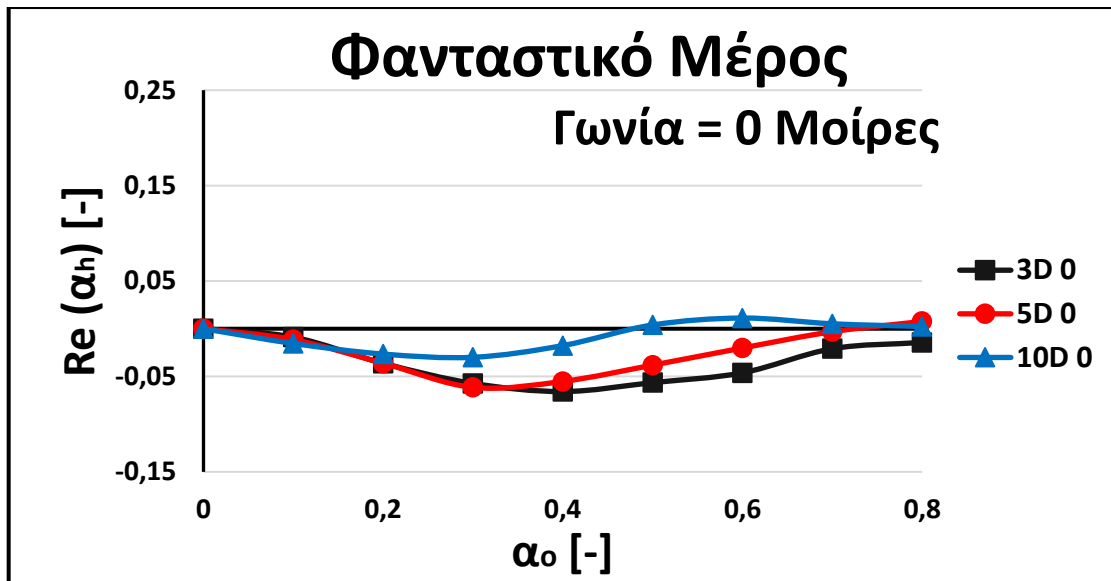
**Εικόνα 5.57-** Στιγμιότυπο από την ανάλυση οριζόντιας δυναμικής φόρτισης μεμονωμένου πασσάλου για  $\alpha_0=0.1$ , όπου είναι εμφανής η κοιλότητα σχήματος καρδιάς που σχηματίζεται λόγω μόνιμων παραμορφώσεων του εδάφους. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων=100.**



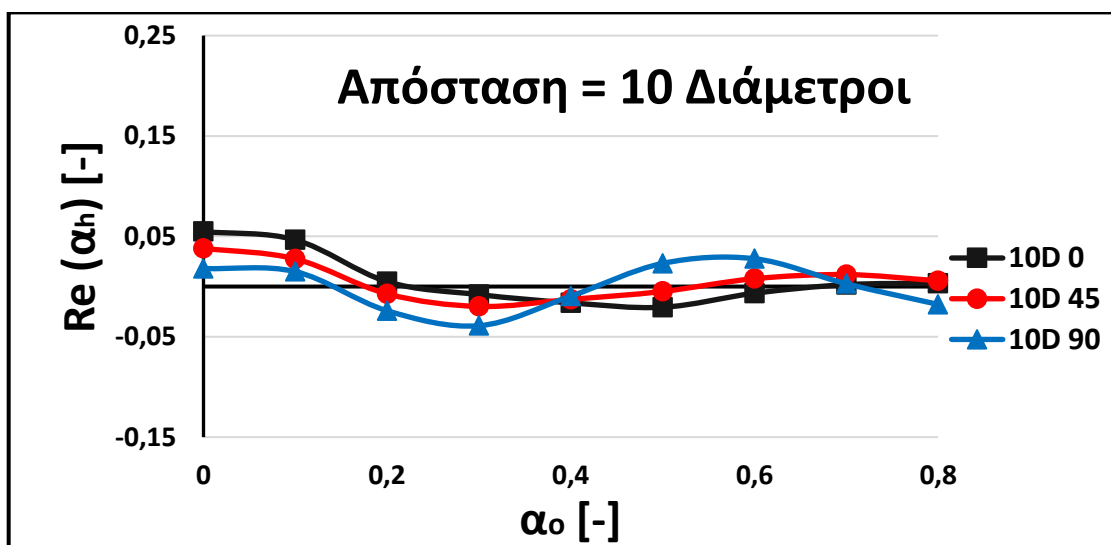
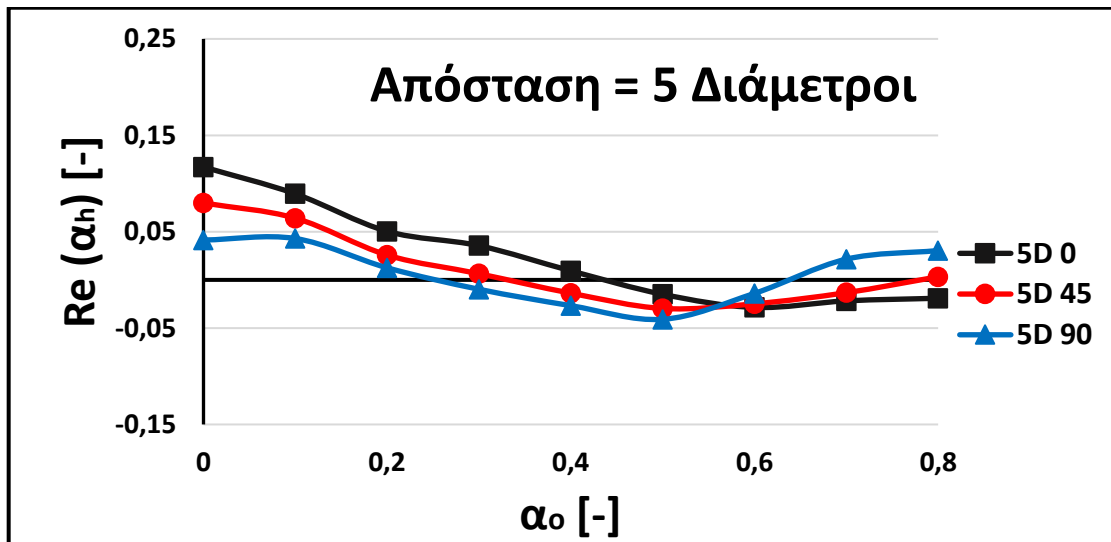
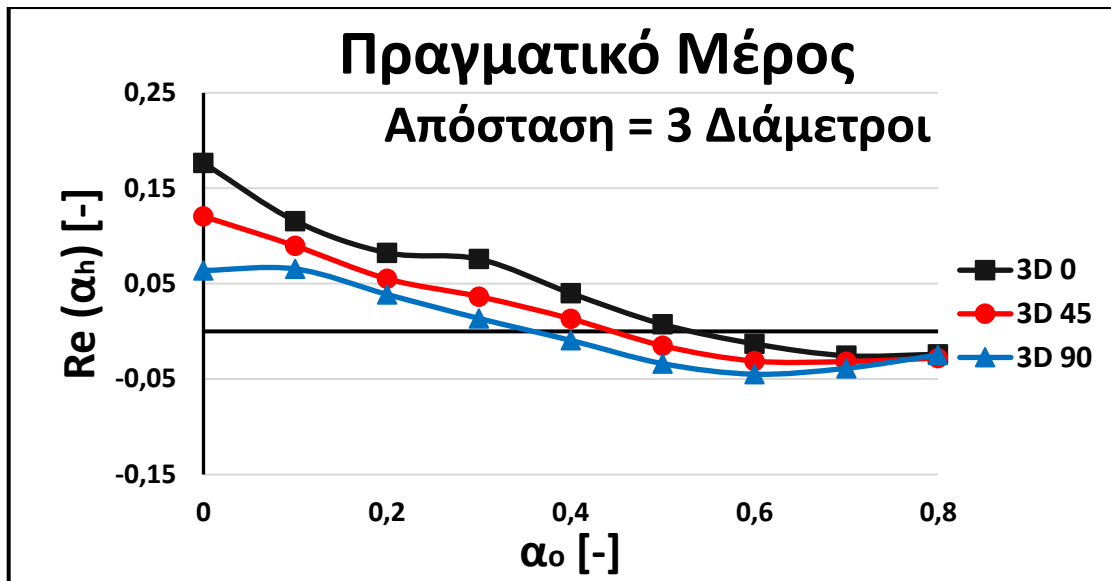
**Εικόνα 5.58-** Στιγμιότυπο από την ανάλυση οριζόντιας δυναμικής φόρτισης μεμονωμένου πασσάλου για  $\alpha_0=0.8$ , όπου είναι εμφανής η κοιλότητα σχήματος καρδιάς που σχηματίζεται λόγω μόνιμων παραμορφώσεων του εδάφους. Παρατηρούνται επίσης οι πιο εκτεταμένες πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους, έναντι της περίπτωσης  $\alpha_0=0.1$  του προηγούμενου σχήματος, όπου εδώ το έδαφος έχει αναπτύξει μετακίνηση μεγαλύτερη από το πλάτος ταλάντωσης ( $d=0.01m$ ) σε κάποια σημεία. Είναι επίσης εμφανής η μειωμένη έκταση των μετακινήσεων σε σχέση με την προηγούμενη εικόνα, αποτέλεσμα των εκτενέστερων πλαστικών παραμορφώσεων αλλά και του μικρότερου «πλάτους» του κύματος, λόγω υψηλότερης συχνότητας. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων=100.**



Εικόνες 5.59-5.61 Πραγματικό μέρος της οριζόντιας αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους-πασσάλου για  $\alpha_0=0$  έως  $0,8$ ,  $d=1\text{ cm}$  και έδαφος  $G/Su=600$ . Επίδραση της απόστασης για κοινή γωνία σχετικά με την διεύθυνση φόρτισης

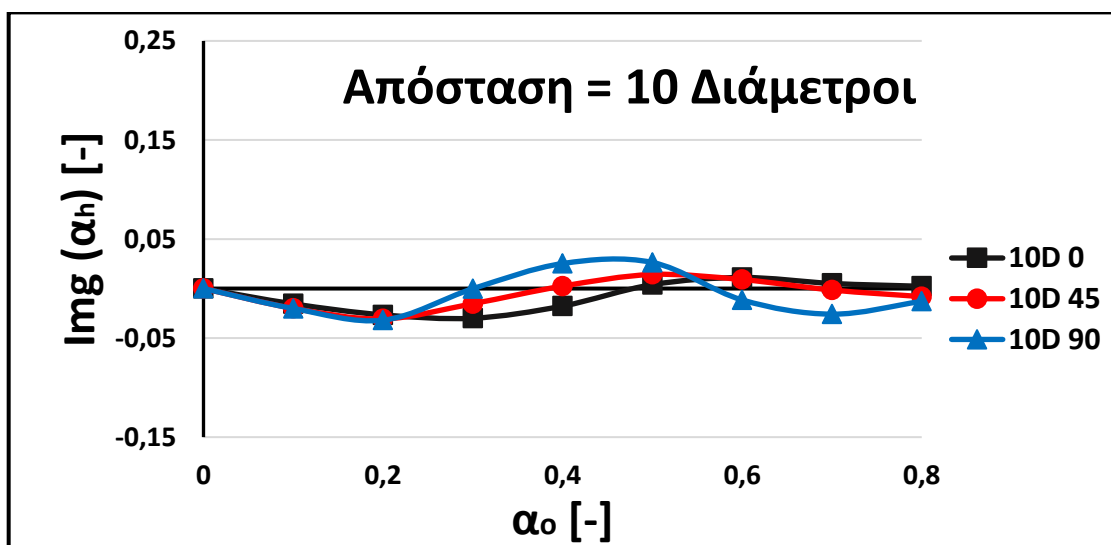
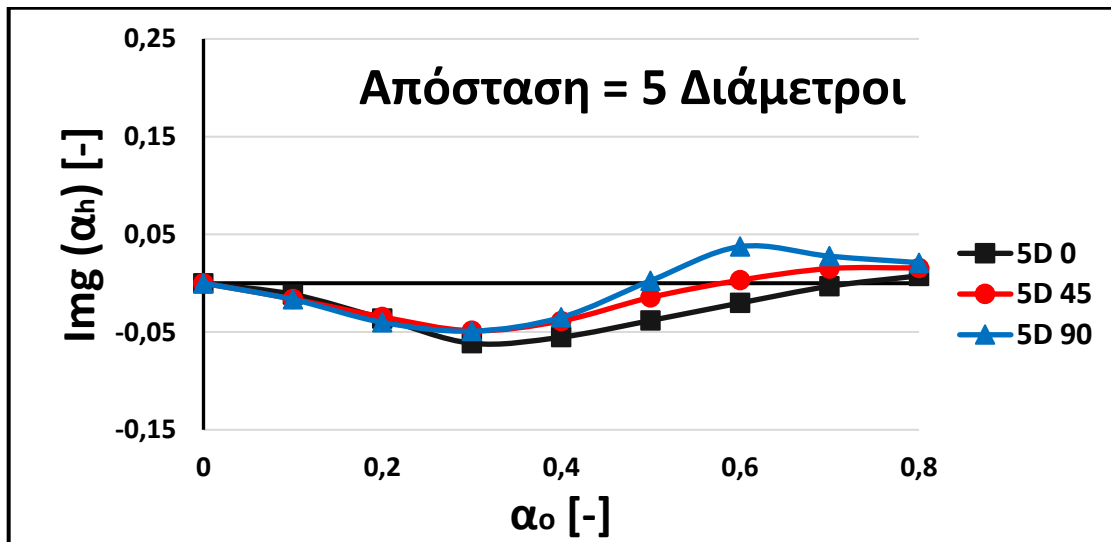
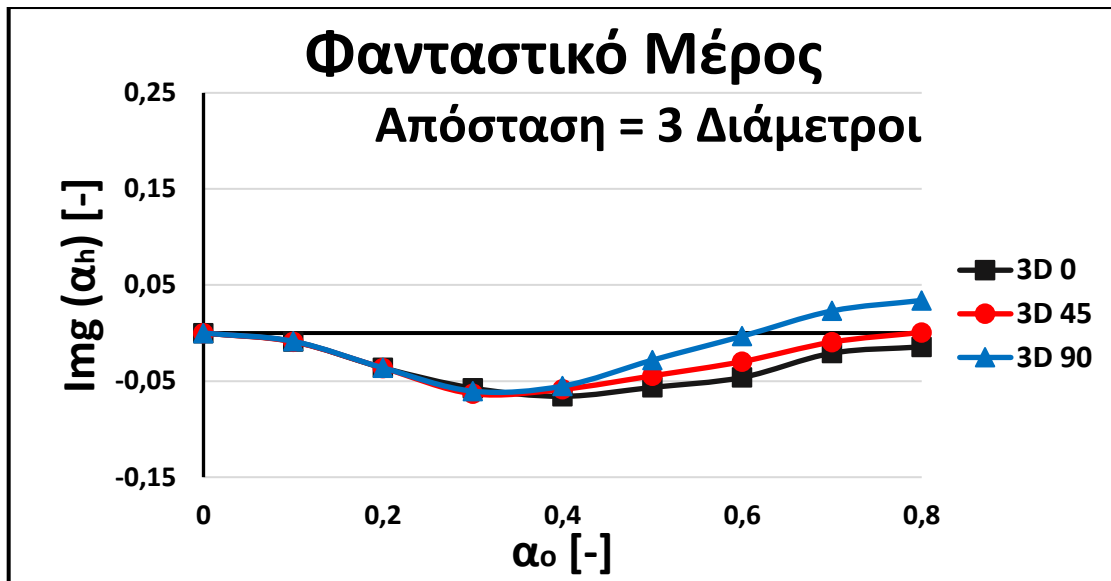


Εικόνες 5.62-5.64 Φανταστικό μέρος της οριζόντιας αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους-πασσάλου για  $\alpha_o=0$  έως  $0,8$ ,  $d=1\text{ cm}$  και έδαφος  $G/Su=600$ . Επίδραση της απόστασης για κοινή γωνία σχετικά με την διεύθυνση φόρτισης.

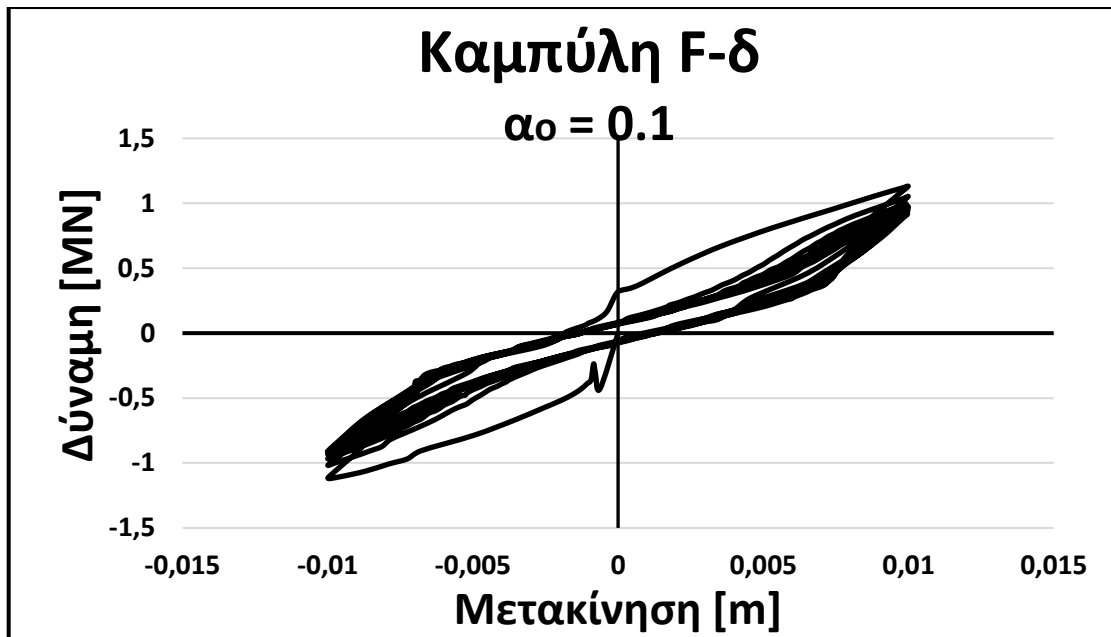


Εικόνες 5.65~5.67- Πραγματικό μέρος της οριζόντιας αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους-πασσάλου για  $\alpha_o=0$  έως  $0.8$ ,  $d=1\text{ cm}$  και έδαφος  $G/Su=600$ . Επίδραση της διεύθυνσης φόρτισης για σταθερή απόσταση παθητικού πασσάλου από την πηγή.

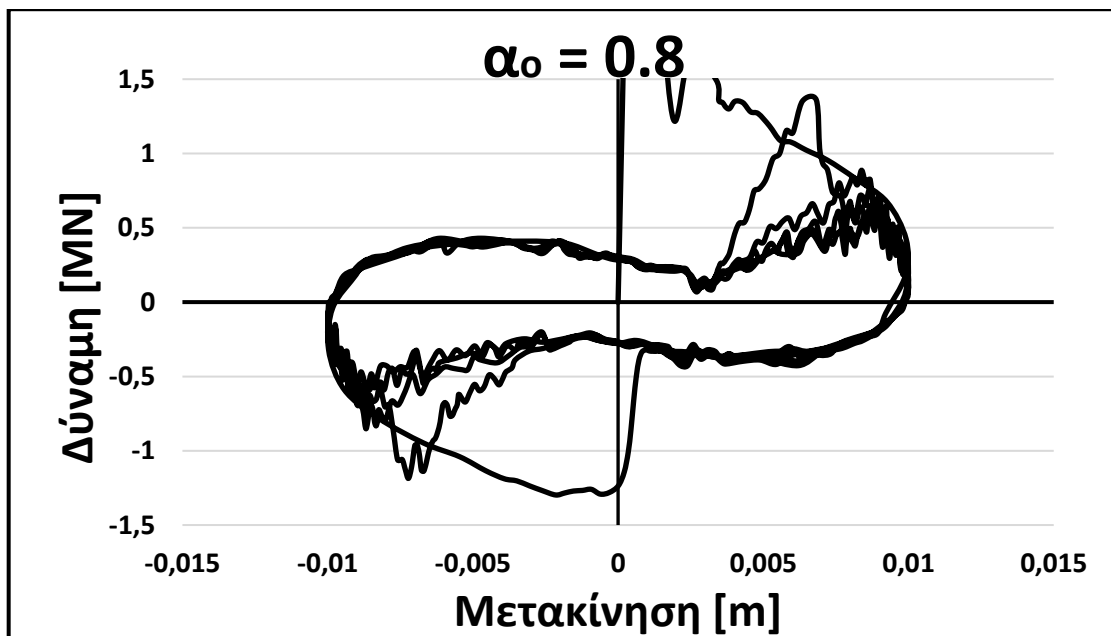




Εικόνες 5.68~5.70- Φανταστικό μέρος της οριζόντιας αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους-πασσάλου για  $\alpha_o=0$  έως  $0,8$ ,  $d=1\text{ cm}$  και έδαφος  $G/Su=600$ . Επίδραση της διεύθυνσης φόρτισης για σταθερή απόσταση παθητικού πασσάλου από την πηγή



**Εικόνα 5.71-** Καμπύλη Δύναμης-Μετακίνησης για οριζόντια δυναμική φόρτιση πακτωμένου στην κεφαλή πασσάλου, με συχνότητα διέγερσης  $\alpha_0=0.1$ . Λόγω της μόνιμης παραμόρφωσης του εδάφους, η συμπεριφορά του συστήματος τείνει προς ελαστική μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, γι' αυτό το εμβαδόν του βρόγχου υστέρησης είναι πολύ μικρό. Η χαμηλή συχνότητα φόρτισης έχει ως αποτέλεσμα μικρά επίπεδα απόσβεσης ακτινοβολίας, που οδηγούν σε γωνιώδη μορφή της καμπύλης. Εμφανής η αύξηση της στιβαρότητας του συστήματος στις περιοχές μεγάλης μετακίνησης, όπου ο πάσσαλος έρχεται σε επαφή με το παραμορφωμένο έδαφος.



**Εικόνα 5.72-** Καμπύλη Δύναμης-Μετακίνησης για οριζόντια δυναμική φόρτιση πακτωμένου στην κεφαλή πασσάλου, με συχνότητα διέγερσης  $\alpha_0=0.8$ . Η υψηλή συχνότητα φόρτισης οδηγεί σε ανάπτυξη μεγάλων αδρανειακών φορτίων, τα οποία επηρεάζουν την μορφή του βρόγχου και του δίνουν αρνητική κλίση στις περιοχές χαμηλών μετακινήσεων. Παρατηρείται και εδώ αύξηση της στιβαρότητας στις περιοχές των μεγάλων μετακινήσεων, όπου ο πάσσαλος έρχεται σε επαφή με το έδαφος.

# 6

## Στιβαρότητα Ομάδας Πασσάλων

Όπως έχει αναφερθεί ήδη στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, η **σύνθετη στιβαρότητα** μιας θεμελίωσης για δυναμικές διεγέρσεις είναι μιγαδικής μορφής:

$$\mathbf{K}^G = \frac{P}{u} = \mathbf{k}^G + i\mathbf{a}_o\mathbf{c}^G$$

όπου ως  $\mathbf{k}^G$  ορίζεται το πραγματικό μέρος της στιβαρότητας, που αντιστοιχεί στην αντίσταση λόγω ακαμψίας του συστήματος αλλά και την αδρανειακή αντίδρασή του, ως  $\mathbf{c}^G$  ορίζεται το φανταστικό μέρος της στιβαρότητας, που αντιστοιχεί στην αντίσταση λόγω απόσβεσης, υστεριτικής και ιξώδους-ακτινοβολίας και  $\mathbf{a}_o = \omega \frac{d}{V_s}$  είναι αδιάστατη παράμετρος, με  $V_s$  την ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο έδαφος. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναλύσεων που έγιναν σε μια ομάδα πασσάλων  $3 \times 3$  σε έδαφος  $G/S_u = 600$ , για να μελετηθεί η συμπεριφορά της υπό ελαστική αλλά και μη-γραμμική συμπεριφορά του συστήματος.

### 6.1 Κατακόρυφη Σύνθετη Στιβαρότητα

Για την μελέτη της κατακόρυφης **σύνθετης στιβαρότητας** της ομάδας πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις, αρχικά ελαστικές και στην συνέχεια ανελαστικές, στις οποίες επιβλήθηκε διέγερση μεταβαλλόμενης συχνότητας  $\alpha_o = 0.1$  έως  $1.0$ . Στις ανελαστικές αναλύσεις ασκήθηκε στην ομάδα ένα κατακόρυφο στατικό φορτίο, το οποίο «προσομοιώνει» χονδρικά την ύπαρξη της ανωδομής και στόχο έχει την σωστή προσομοίωση της συμπεριφοράς της ομάδας· όπως έχει αναφερθεί ήδη, κατά τους **Trochanis et al** οι μη-γραμμικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με την κλασική μέθοδο της επαλληλίας καθώς είναι ευαίσθητοι

στις αρχικές συνθήκες του συστήματος. Αυτό αποδείχθηκε και από στο κεφάλαιο 4, όπου τα διαγράμματα εφαπτομενικής αλληλεπίδρασης έδειξαν πως η αλληλεπίδραση είναι διαφορετική σε κάθε επίπεδο φόρτισης του πασσάλου και μηδενική έπειτα από την διαρροή του εδάφους γύρω από αυτόν. Συνεπώς, το ίδιο δυναμικό φορτίο σε μια θεμελίωση χωρίς αρχικό, κατακόρυφο, στατικό φορτίο θα επέστρεφε διαφορετικά αποτελέσματα από την περίπτωση που το φορτίο αυτό υπήρχε. Εφόσον δε στις πραγματικές θεμελιώσεις, το φορτίο αυτό πάντα υπάρχει, επιλέχθηκε η εφαρμογή του. Στις ελαστικές αναλύσεις, η συμπεριφορά του συστήματος παραμένει γραμμική και ένα τέτοιο φορτίο δεν είχε λόγο εφαρμογής στην θεμελίωση.

Τα φορτία που επιλέχθηκαν να ασκηθούν στην ομάδα ήταν συναρτήσεις του οριακού φορτίου αντοχής του ενός πασσάλου,  $F_u \approx 3500 \text{ KN}$ . Συγκεκριμένα, εφόσον χωρίς αλληλεπίδραση η ομάδα θα είχε οριακή αντοχή  $F'_u = 9 \times 3500 = 31500 \text{ KN}$ , ασκήθηκε στατικά φορτίο  $F_{static} = F'_u/3 = 10500 \text{ KN}$  και δυναμικά φορτία ίσα με  $F_1^{dyn} = F'_u/3$  και  $F_2^{dyn} = 2F'_u/3$ , ώστε να εντοπιστούν τυχόν διαφορές στην συμπεριφορά του συστήματος για υψηλότερα φορτία.

Από τα αποτελέσματα, μετρήθηκαν τα πλάτη των ταλαντώσεων που έκανε η ομάδα καθώς και η διαφορά φάσης μεταξύ της μετακίνησης και της δύναμης στην κεφαλή της και υπολογίστηκαν τα μεγέθη που ενδιαφέρουν, ως :

$$K^G = \frac{P}{u} = k^G + i a_o c^G = |K^G| e^{i\omega\phi}$$

$$k^G = |K^G| \cos \phi \text{ και } c^G = |K^G| \sin \phi / a_o$$

όπου  $|K^G| = |F_{dynamic}/A|$ , με  $A$  το πλάτος της ταλάντωσης,  $\phi$  την διαφορά φάσης και  $F^{dyn}$  το πλάτος ταλάντωσης του φορτίου που ασκείται στην κεφαλή της ομάδας.

Στις **Εικόνες 1 έως 8** παρουσιάζονται στιγμιότυπα από την ταλάντωση της ομάδας για τις διεγέρσεις  $\alpha_o = 0.1$  και  $1.0$ , την στιγμή που αυτή παίρνει την μέγιστη καθίζησή της κατά τον 5<sup>ο</sup> κύκλο φόρτισης. Στα στιγμιότυπα παρουσιάζονται ισοϋψείς μετακινήσεων και πλαστικών παραμορφώσεων και είναι εμφανής η σημαντικότερη επιπόνηση του εδάφους στην χαμηλόσυχνη διέγερση, καθώς επίσης και η διαφορετική συμπεριφορά του εδάφους εντός των πασσάλων στις 2 συχνότητες διέγερσης.

Στις **Εικόνες 9 και 10** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες μετακίνησης της κεφαλής της ομάδας πασσάλων και ενός σημείου του εδάφους ανάμεσα στους πασσάλους και κοντά στην επιφάνεια, για τις διεγέρσεις  $\alpha_o = 0.1$  και  $1.0$  και δυναμικό φορτίο  $F_2^{dyn} = 2F_u^G/3$ , όπου φαίνονται οι μόνιμες καθιζήσεις που συσσωρεύονται σε κάθε κύκλο φόρτισής της ομάδας. Όπως είναι εμφανές, οι καθιζήσεις αυτές μειώνονται στις υψίσυχνες διεγέρσεις, σε πλήρη αναλογία με άλλες περιπτώσεις μη-γραμμικής ολίσθησης όπου οι χαμηλόσυχνες διεγέρσεις αποδεικνύονται περισσότερο καταστροφικές. Οι χρονοϊστορίες αυτές αποτελούνται από 2 συνιστώσες, έναν καθοδικό κλάδο με ουσιαστικά σταθερή κλίση και ένα δυναμικό μέρος που εκτελεί ταλάντωση με την συχνότητα του εξωτερικού διεγέρτη και ουσιαστικά σταθερό πλάτος ταλάντωσης. Αφού αφαιρέθηκε από την συνολική χρονοϊστορία ο καθοδικός κλάδος, χρησιμοποιήθηκε το πλάτος ταλάντωσης του δυναμικού κλάδου ώστε να υπολογιστεί η σύνθετη στιβαρότητα της θεμελίωσης.

Στις εικόνες αυτές φαίνεται επίσης και ο ρόλος του εδάφους, το οποίο ενώ στην χαμηλή συχνότητα ταλαντώνεται σε φάση με την ομάδα, σε υψίσυχνες διεγέρσεις μπορεί να αποκτήσει μεγάλη διαφορά φάσης και να αυξήσει την στιβαρότητα της θεμελίωσης. Αυτή η διαφορά φάσης στην ταλάντωση μεταξύ εδάφους και ομάδας εξηγεί και την διαφορά στην σχετική καθίζηση μεταξύ εδάφους και ομάδας. Ενώ στην χαμηλόσυχνη διέγερση το έδαφος ενδιάμεσα στους πασσάλους μοιάζει «κολλημένο» στην ομάδα και αναπτύσσει κοινή καθίζηση σε κάθε κύκλο, στην υψίσυχη η διαφορά φάσης στην ταλάντωση οδηγεί σε επιπρόσθετες διατμητικές τάσεις, αντίθετες σε φορά από την φόρτιση της ομάδας, οι οποίες οδηγούν την διεπιφάνεια σε διαρροή και συνεπώς ολίσθηση, η οποία «ξεκλειδώνει» την κίνηση του εδάφους και την κάνει ανεξάρτητη από αυτή της ομάδας.

Τα παραπάνω αποδεικνύονται στις **Εικόνες 11 έως 13**, όπου παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της διατμητικής έντασης κατά μήκος του πασσάλου, για 2 σημεία σε βάθος 2 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους και συχνότητες διέγερσης  $\alpha_o = 0.1$  και  $1.0$ . Από τις εικόνες αυτές φαίνεται πως στην χαμηλόσυχνη διέγερση, λόγω αλληλεπίδρασης το έδαφος ανάμεσα στους πασσάλους δεν παραλαμβάνει ένταση όμοια με το έδαφος περιμετρικά της ομάδας και η διεπιφάνεια δεν φτάνει την οριακή αντοχή της (**50 KPa**) σε κανένα από τα 2 σημεία. Αντίθετα, στην υψίσυχη διέγερση

τα αδρανειακά φορτία του εδάφους οδηγούν σε διαρροή την διεπιφάνεια οδηγώντας σε σχετική ολίσθηση του εδάφους με τους πασσάλους.

Στις **Εικόνες 14 έως 16** παρουσιάζονται τα μεγέθη της σύνθετης στιβαρότητας της θεμελίωσης, κανονικοποιημένα ως προς το άθροισμα των κατακόρυφων, **στατικών, ελαστικών στιβαροτήτων** των μεμονωμένων πασσάλων. Η κανονικοποίηση αυτή έχει ως στόχο να παρουσιάσει την συνολική επίδραση της μη-γραμμικότητας στην συμπεριφορά της ομάδας και τις διαφορές που αυτή επιφέρει στην δυναμική συμπεριφορά της σε σχέση με την ελαστική θεώρηση. Από τα διαγράμματα αυτά φαίνεται πως η μη-γραμμικότητα δεν έχει σημαντική επιρροή στην στιβαρότητα της ομάδας στην περιοχή των μικρών συχνοτήτων παρόλο που η αλληλεπίδραση μειώνεται λόγω της μη-γραμμικότητας, καθώς μειώνεται επίσης και η στιβαρότητα των πασσάλων. Στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων όμως, οι αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται καθιστούν αδύνατο για το έδαφος να ακολουθήσει την κίνηση των πασσάλων και αναπτύσσονται σημαντικές ολισθήσεις, οδηγώντας σε μείωση του πραγματικού μέρους της στιβαρότητας,  $k^G$ . Αντίστοιχα, είναι εμφανές από το διάγραμμα του φανταστικού μέρους πως η ολίσθηση που παρουσιάζεται στις υψηλές συχνότητες μειώνει σε μεγάλο βαθμό το φανταστικό μέρος της στιβαρότητας,  $c^G$ , γεγονός που αποδίδεται στην μείωση της απόσβεσης ακτινοβολίας.

Από τα διαγράμματα όμως προκύπτει και κάτι ακόμα: φαίνεται πως η επιρροή της μη-γραμμικότητας στην συμπεριφορά της θεμελίωσης δεν περιορίζεται μόνο στο μέτρο των διάφορων μεγεθών, όπως θα ήταν αναμενόμενο, αλλά επηρεάζει και την διαφορά φάσης μεταξύ δύναμης και μετακίνησης, αλλάζοντας και ποιοτικά τα διαγράμματα· οι μη-γραμμικές καμπύλες εμφανίζουν την περιοχή ελαχιστοποίησης και μεγιστοποίησης του  $k^G$  σε χαμηλότερες συχνότητες από την ελαστική, είναι δηλαδή μετατοπισμένες προς τα αριστερά σε σχέση με την ελαστική. Τα παραπάνω αποδεικνύονται στις **Εικόνες 14α έως 16α**, όπου παρουσιάζονται τα μεγέθη της σύνθετης στιβαρότητας της θεμελίωσης, κανονικοποιημένα ως προς το άθροισμα των κατακόρυφων, **στατικών στιβαροτήτων** των μεμονωμένων πασσάλων **για επίπεδο φόρτισης ίσο με το μέτρο του δυναμικού φορτίου**. Αυτή η κανονικοποίηση έχει ως στόχο να δείξει την επίδραση της μη-γραμμικότητας στην μείωση της

αλληλεπίδρασης και την διαφορά μεταξύ στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς της θεμελίωσης, για κάθε επίπεδο φόρτισης. Συνεπώς τα διαγράμματα αυτά λειτουργούν σαν διαγράμματα «αποδοτικότητας» της θεμελίωσης συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης. Σε αυτά είναι εμφανές πως όσο αυξάνεται το επίπεδο φόρτισης της θεμελίωσης, τόσο αυξάνεται η «αποδοτικότητα» της σε σχέση με την στατική φόρτιση καθώς μειώνεται η αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους-πασσάλου. Είναι επίσης αρκετά πιο ευδιάκριτη σε σχέση με πριν η μετακίνηση των καμπυλών προς χαμηλότερες συχνότητες όταν αυξάνεται η μη-γραμμικότητα, καθώς φαίνεται ξεκάθαρα η πορεία **ελαστικότητα (χαμηλή φόρτιση) → μεσαία φόρτιση → έντονη φόρτιση** και η μετατόπιση προς τα αριστερά που αυτή επιφέρει στις καμπύλες. Επίσης φαίνεται εντονότερα η επίδραση της κυματικής αλληλεπίδρασης, η οποία είναι και αυτή που δημιουργεί την απότομη αύξηση του πραγματικού και του φανταστικού μέρους στο εύρος  $\alpha_o = 0.5 - 0.8$ .

Μια εξήγηση για την παραπάνω συμπεριφορά είναι η ακόλουθη. Είναι πιθανό, υπό ελαστικές συνθήκες η απόσταση  $S/D=3$  της ομάδας να εμποδίζει την κυματική διάδοση στο έδαφος και συνεπώς την δυναμική αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους-πασσάλου: το κύμα «βλέπει» την ομάδα σαν ενιαία κατασκευή και όχι σαν μεμονωμένους πασσάλους και συνεπώς δεν μεταδίδεται όπως σε ελεύθερο πεδίο· αντίθετα, στο έδαφος εντός της ομάδας δημιουργείται στάσιμο κύμα το οποίο το οδηγεί να ταλαντώνεται ως ενιαία μάζα. Αποτέλεσμα αυτής της παρεμπόδισης της κυματικής διάδοσης είναι η ομάδα συνολικά να παρουσιάζει λειτουργία μεμονωμένου θεμελίου. Όταν επιτρέπεται ολίσθηση, η κίνηση του εδάφους «απελευθερώνεται» σε ένα βαθμό, ενισχύοντας έτσι φαινόμενα κυματικής αλληλεπίδρασης, η οποία για το εξεταζόμενο πρόβλημα έχει τάση να αυξήσει την στιβαρότητα της θεμελίωσης σε συχνότητες  $\alpha_o = 0.6$  έως  $0.8$ , που είναι και οι συχνότητες που παρουσιάζει μέγιστο η σύνθετη στιβαρότητα στις μη-γραμμικές αναλύσεις.

Μια απλούστερη εξήγηση είναι πως η έντονη φόρτιση του εδάφους οδηγεί σε μη-γραμμικότητα, η οποία με την σειρά της μειώνει το ενεργό μέτρο διάτμησης  $G$ , μειώνοντας το μήκος κύματος και συνεπώς μετακινώντας την καμπύλη συνολικά προς τα αριστερά.

Στις **Εικόνες 17 έως 26 και 27 έως 36** παρουσιάζονται οι ελαστικές και οι μη-γραμμικές ( $F_2^{dyn} = 2F'_u/3$ ) καμπύλες **F-δ** που προέκυψαν από τις αναλύσεις. Σε αυτές φαίνεται η συμπεριφορά του συστήματος για κάθε συχνότητα διέγερσης, όπως για παράδειγμα η αρνητική κλίση του ανελαστικού συστήματος για συχνότητες  $\alpha_o = 0.2 \sim 0.5$  που στο διάγραμμα του πραγματικού μέρους εμφανίζεται ως αρνητική τιμή του  $k^G$ .

## 6.2 Οριζόντια Σύνθετη Στιβαρότητα

Για την μελέτη της **οριζόντιας σύνθετης στιβαρότητας** της ομάδας πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις, αρχικά ελαστικές και στην συνέχεια ανελαστικές, στις οποίες επιβλήθηκαν 6 κύκλοι φόρτισης υπό διέγερση μεταβαλλόμενης συχνότητας  $\alpha_o = 0.1$  έως **0.8**. Στις ανελαστικές αναλύσεις ασκήθηκε στην ομάδα το ίδιο κατακόρυφο στατικό φορτίο που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Ως φορτίο επιλέχθηκε να επιβληθεί στην κεφαλή της ομάδας οριζόντιο δυναμικό  $F^{dyn} = 9 \times 685 \text{ KN} = 6165 \text{ KN}$ , όπου **685 KN** είναι το φορτίο που αντιστοιχεί στο 50% του αυθαίρετου φορτίου αστοχίας, όπως αυτό ορίστηκε στο κεφάλαιο της οριζόντιας στατικής αλληλεπίδρασης, που για το έδαφος με  $G/s_u = 600$  αντιστοιχεί σε  $F_u \approx 1400 \text{ KN}$ . Τα μεγέθη που ενδιαφέρουν υπολογίστηκαν σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Στις **Εικόνες 37 έως 42** παρουσιάζονται στιγμιότυπα από την ταλάντωση της ομάδας υπό οριζόντιο δυναμικό φορτίο, την χρονική στιγμή που η κεφαλή της παρουσιάζει μέγιστη μετακίνηση κατά τον 5<sup>ο</sup> κύκλο φόρτισης, για διέγερση συχνότητας  $\alpha_o = 0.1$  και **0.8**. Στα στιγμιότυπα φαίνονται οι μετακινήσεις αλλά και οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους που περιβάλλει την ομάδα. Από τις κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στο έδαφος, γίνεται αντιληπτό πως η υψίσυχη φόρτιση είναι δυσμενέστερη για το έδαφος, το οποίο καταπονεί περισσότερο.

Πριν παρουσιαστούν τα διαγράμματα της σύνθετης στιβαρότητας, πρέπει να σημειωθεί πως στις υψηλές συχνότητες φόρτισης η ταλάντωση της θεμελίωσης δεν έφτασε σε «μόνιμες συνθήκες». Όπως φαίνεται στις **Εικόνες 43 και 44**, σε αντίθεση



με τις χαμηλές συχνότητες διέγερσης όπου το πλάτος ταλάντωσης παρουσίαζε μια πολύ μικρή αυξητική τάση, στην υψίσυχη διέγερση η αυξητική τάση είναι εμφανής. Ο λόγος για την συμπεριφορά αυτή είναι πως στις χαμηλές συχνότητες το έδαφος κινείται σε φάση με την ομάδα, ενώ στις υψηλές συχνότητες, λόγω διαφοράς φάσης στην μετακίνησή τους, εμφανίζονται φαινόμενα κρούσης των πασσάλων πάνω στο έδαφος, οδηγώντας σε έντονες πλαστικοποιήσεις του, οι οποίες γίνονται εντονότερες σε κάθε κύκλο φόρτισης.

Εξαιτίας των παραπάνω, για υπολογισμό των μεγεθών στιβαρότητας ορίστηκε ως πλάτος ταλάντωσης το πλάτος του τελευταίου κύκλου, συνεπώς τα αποτελέσματα είναι επηρεασμένα από την «ασυνέπεια» αυτή. Παρόλα αυτά θεωρείται πως 6 κύκλοι ανελαστικής φόρτισης είναι αρκετοί για να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την ανελαστική στιβαρότητα της θεμελίωσης, καθώς είναι από μόνοι τους μια πολύ δυσμενής φόρτιση. Στις **Εικόνες 45 έως 47** παρουσιάζονται τα υπολογισθέντα μεγέθη, κανονικοποιημένα ως προς το άθροισμα των οριζόντιων, στατικών, **ελαστικών** στιβαροτήτων των μεμονωμένων πασσάλων.

Στην περίπτωση του πραγματικού μέρους,  $k^G$ , η μη γραμμικότητα φαίνεται να επηρεάζει τις τιμές στις χαμηλές συχνότητες, όπου σε σχετικά με την ελαστική στιβαρότητα η μείωση φτάνει στο 50%, αν και οι αρχικές τιμές ήταν ήδη μικρές. Σε υψηλότερες συχνότητες, όπου δεν πρόλαβε να σταθεροποιηθεί το πλάτος ταλάντωσης, το ανελαστικό σύστημα παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές του  $k^G$ , κάτι που έχει 2 πιθανά αίτια:

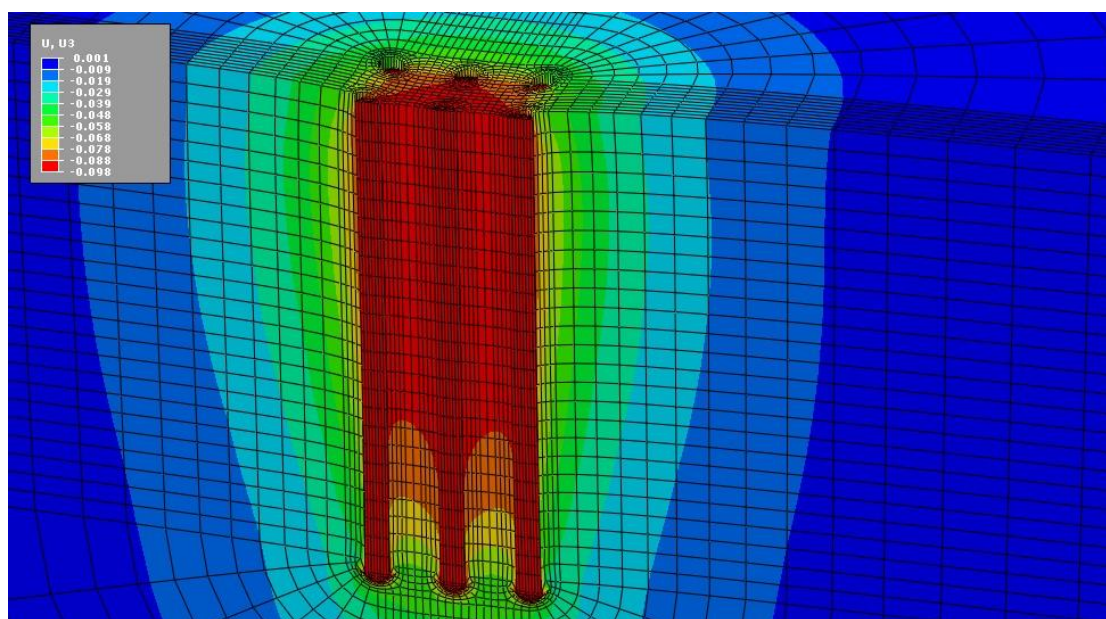
1. Την χρήση μικρότερης τιμής για το πλάτος ταλάντωσης, από αυτήν που θα εμφάνιζε το σύστημα αν προλάβαινε να φτάσει σε «μόνιμες» συνθήκες.
2. Την μειωμένη επίδραση του εδάφους ως αδρανειακό φορτίο επί των πασσάλων, καθώς όπως φαίνεται στην **Εικόνα 48**, στην ελαστική ανάλυση το έδαφος κινείται μαζί με την ομάδα, σαν ενιαίο σώμα, για  $\alpha_o = 0.8$ , ενώ στην ανελαστική με διαφορά φάσης, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης και της δημιουργίας «κοιλότητας» γύρω από τους πασσάλους.
3. Όσον αφορά το φανταστικό μέρος,  $c^G$ , η εμφανής διαφορά στις υψηλές συχνότητες αποδίδεται αποκλειστικά στην μειωμένη απόσβεση ακτινοβολίας του συστήματος, λόγω των πλαστικών παραμορφώσεων και της «κοιλότητας»

που δημιουργείται γύρω από το ενεργό μήκος των πασσάλων. Εφόσον η ομάδα «σπρώχνει» το έδαφος για ένα πολύ περιορισμένο εύρος, οι κυματισμοί που εκπέμπονται είναι πολύ μικρότεροι σε ένταση σχετικά με την ελαστική ανάλυση, που δεν υπάρχουν απώλειες.

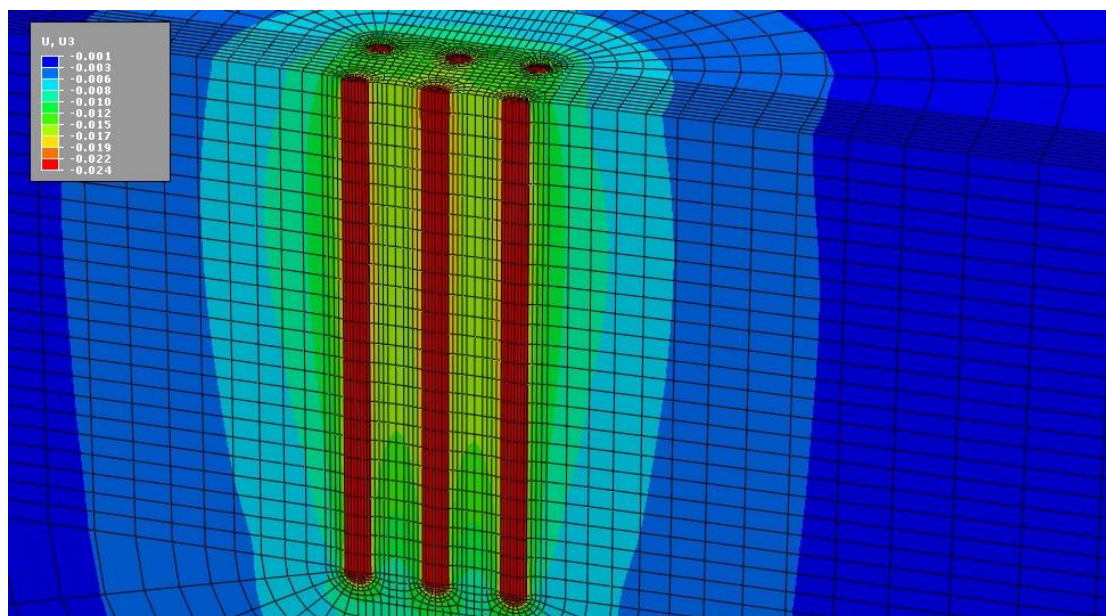
Όπως έγινε και για την κατακόρυφη φόρτιση, στις **Εικόνες 45α έως 47α** παρουσιάζονται τα μεγέθη της σύνθετης στιβαρότητας της θεμελίωσης, κανονικοποιημένα ως προς το άθροισμα των στατικών στιβαροτήτων **για επίπεδο φόρτισης ίσο με το μέτρο του δυναμικού φορτίου**. Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται πως και στην περίπτωση οριζόντιας φόρτισης, η μη-γραμμικότητα οδηγεί σε αύξηση της αποδοτικότητας της θεμελίωσης, εκτός από την περιοχή των πολύ υψηλών συχνοτήτων. Εκεί, μπορεί το πραγματικό μέρος των ανελαστικών συστημάτων να είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των ελαστικών (λόγω της κίνησης του εσωτερικού εδάφους με αντίθετη φάση) όμως η μείωση της απόσβεσης ακτινοβολίας είναι ακόμα εντονότερη, οδηγώντας σε μειωμένη αποδοτικότητα.

Στις **Εικόνες 49 έως 56** και **57 έως 64** παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ομάδας υπό την μορφή καμπυλών F-δ για ελαστικές και μη-γραμμικές αναλύσεις αντίστοιχα, όπου είναι εμφανής η διαφορά της συμπεριφοράς στις υψηλές συχνότητες: ενώ στις ελαστικές αναλύσεις το σύστημα λειτουργεί σχεδόν αποκλειστικά ως ιξώδης ταλαντωτής, η ύπαρξη θετικής κλίσης στην καμπύλη των μη-γραμμικών αναλύσεων «προδίδει» την σημαντική συνεισφορά της δυσκαμψίας του συστήματος ή αλλιώς, την ασήμαντη συνεισφορά της -ιξώδους- απόσβεσης ακτινοβολίας.

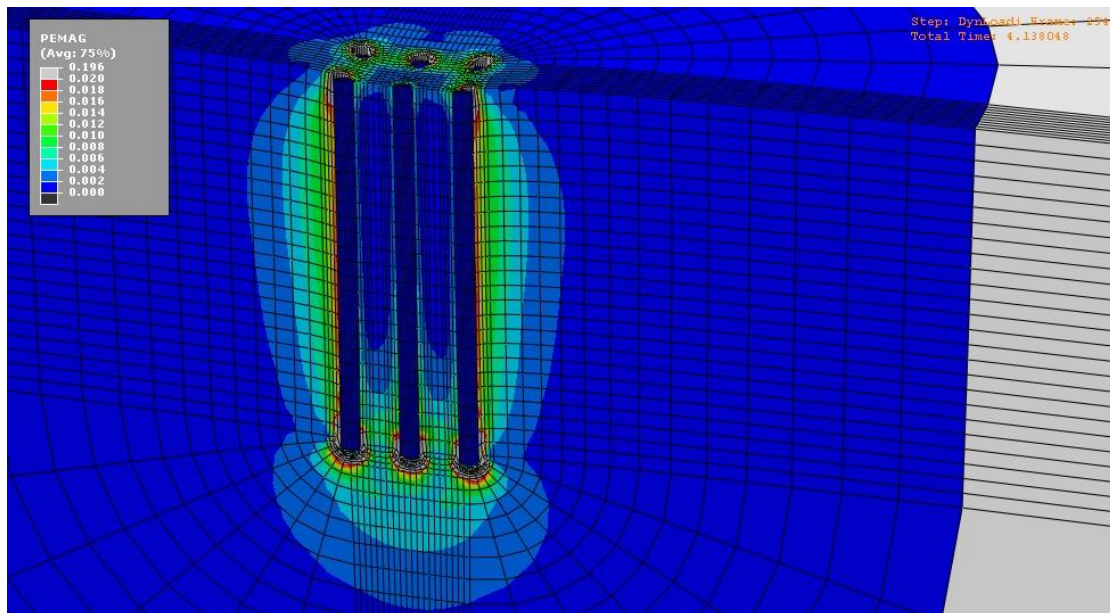
### 6.3 ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΣΤΙΒΑΡΟΤΗΤΑΣ



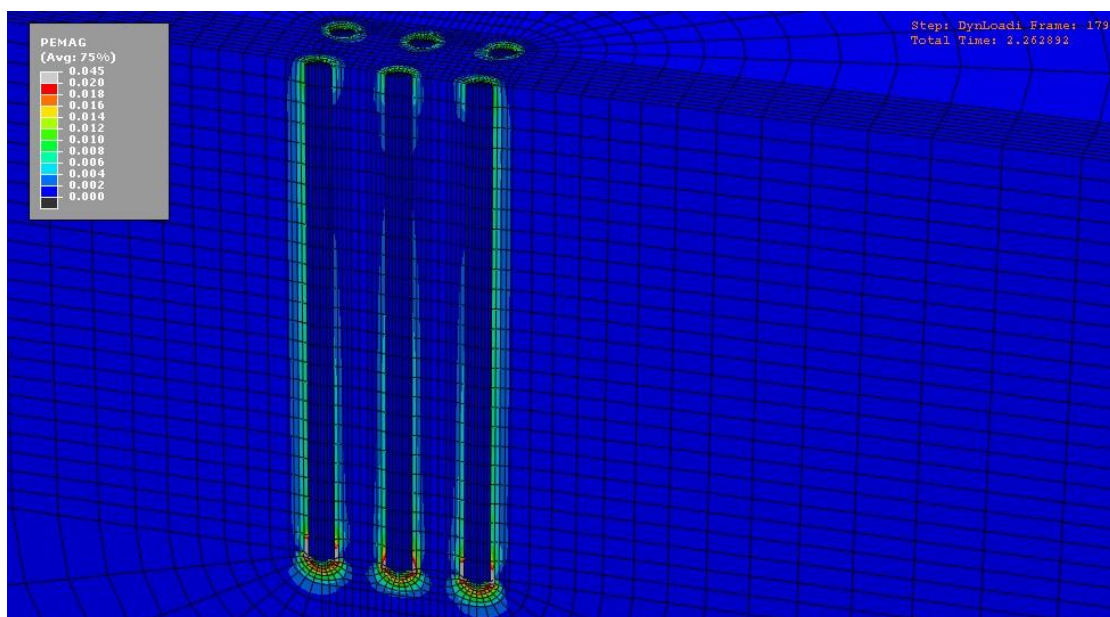
**Εικόνα 6.1** Στιγμιότυπο της ταλάντωσης της ομάδας υπό διέγερση  $\alpha\omega=0.1$  για  $t=5T+T/4$ , όπου παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις του προσομοιώματος. Στην κεφαλή των πασσάλων είναι εμφανής η ολίσθηση και το έδαφος ανάμεσα τους λειτουργεί σαν «κολλημένο», χωρίς να αναπτύσσει διαφορικές καθιζήσεις με τους πασσάλους. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**



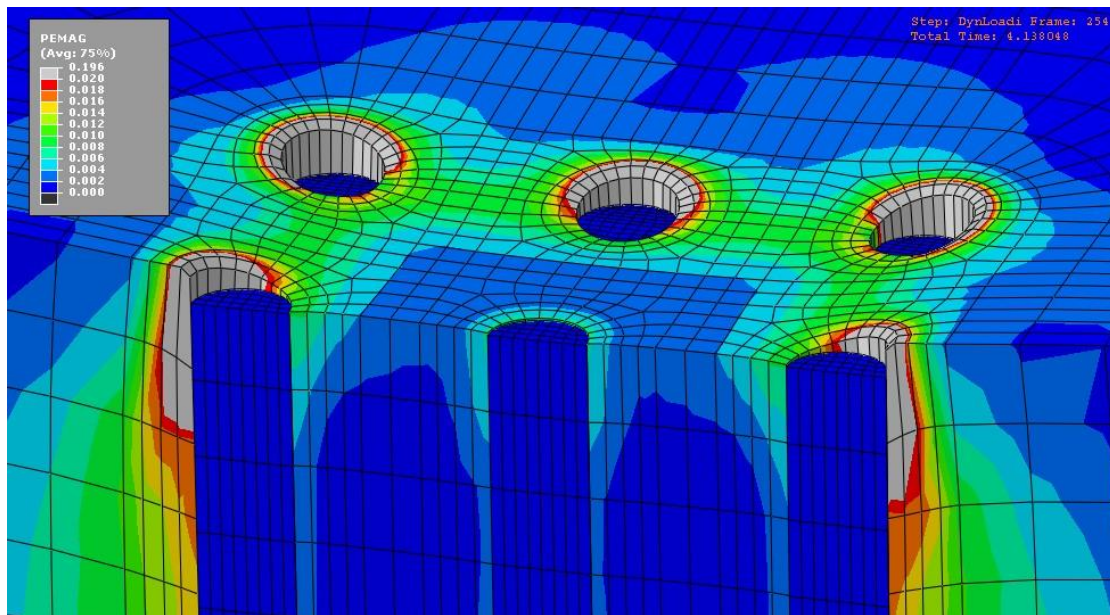
**Εικόνα 6.2** Στιγμιότυπο της ταλάντωσης της ομάδας υπό διέγερση  $\alpha\omega=1.0$  για  $t=5T+T/4$ , όπου παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις του προσομοιώματος. Το έδαφος ανάμεσα στους πασσάλους δεν λειτουργεί πλέον σαν «κολλημένο» αλλά αναπτύσσει διαφορικές καθιζήσεις, γεγονός που υποδηλώνει ολισθήσεις και συνεπώς διαρροή της διεπιφάνειας. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**



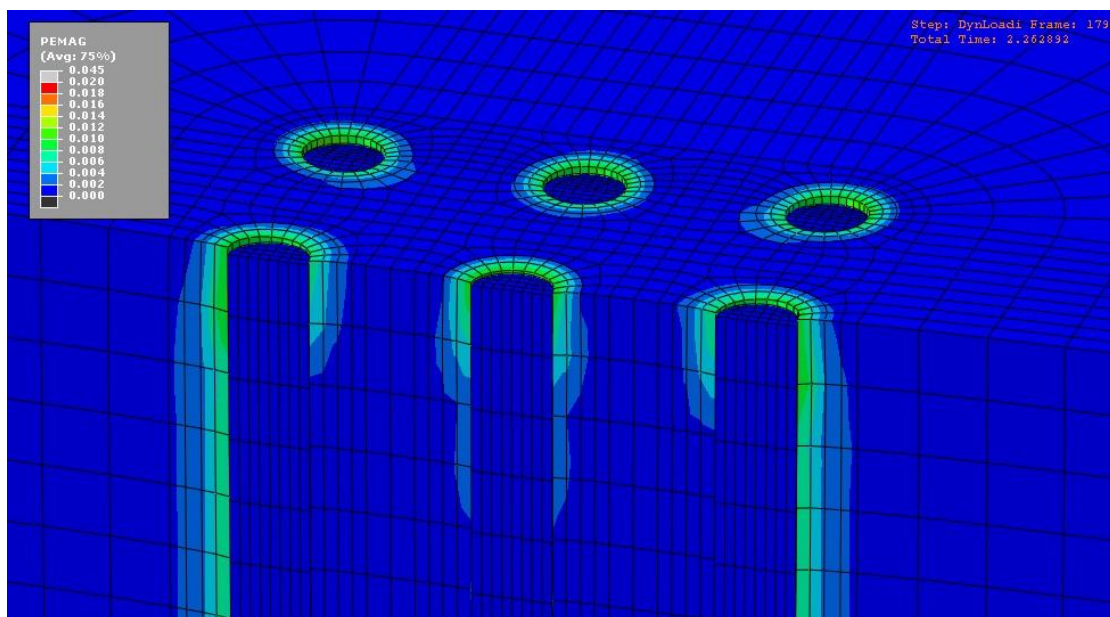
**Εικόνα 6.3** Ισοϋψείς πλαστικών παραμορφώσεων του εδάφους, υπό διέγερση  $\alpha_0=0.1$  την χρονική στιγμή  $t=5T+T/4$ . Ως άνω όριο των ισοϋψών έχει ορισθεί μέτρο πλαστικών παραμορφώσεων  $PEMAG=0.02$ , με τιμές μεγαλύτερες από αυτή να εμφανίζονται με γκρι. Πλαστικοποιήσεις του εδάφους παρουσιάζονται κυρίως στην περίμετρο της ομάδας αλλά και στην βάση των πασσάλων. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**



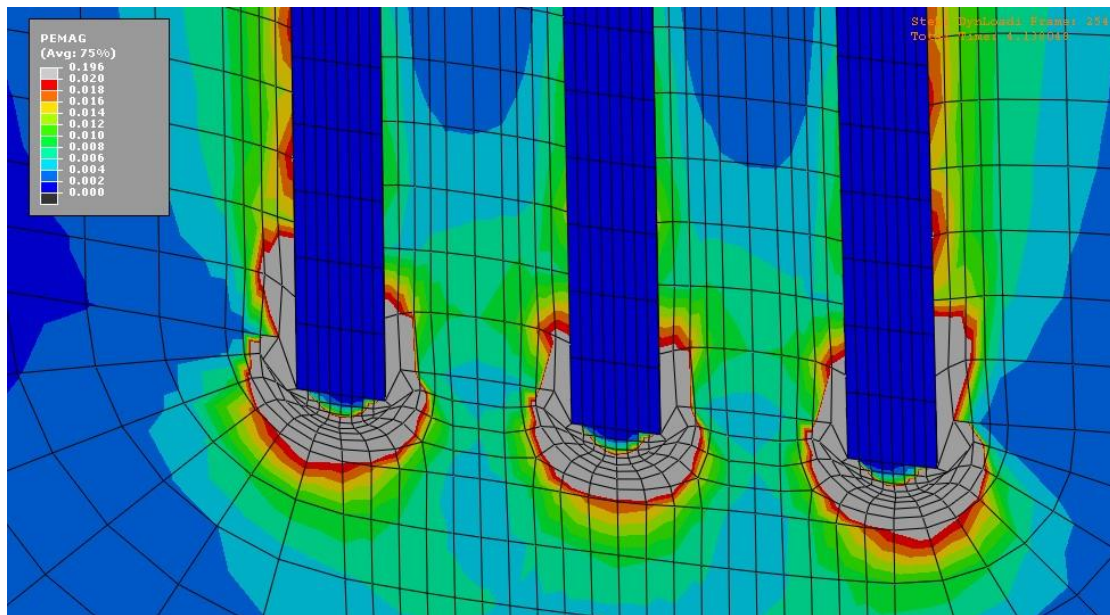
**Εικόνα 6.4** Ισοϋψείς πλαστικών παραμορφώσεων του εδάφους, υπό διέγερση  $\alpha_0=1.0$  την χρονική στιγμή  $t=5T+T/4$ . Ως άνω όριο των ισοϋψών έχει ορισθεί μέτρο πλαστικών παραμορφώσεων  $PEMAG=0.02$ , με τιμές μεγαλύτερες από αυτή να εμφανίζονται με γκρι. Πλαστικοποιήσεις του εδάφους παρουσιάζονται κυρίως στην βάση των πασσάλων και είναι φανερό πως η καταπόνηση του εδάφους είναι μικρότερη εδώ, συγκριτικά με την χαμηλόσυχη διέγερση. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**



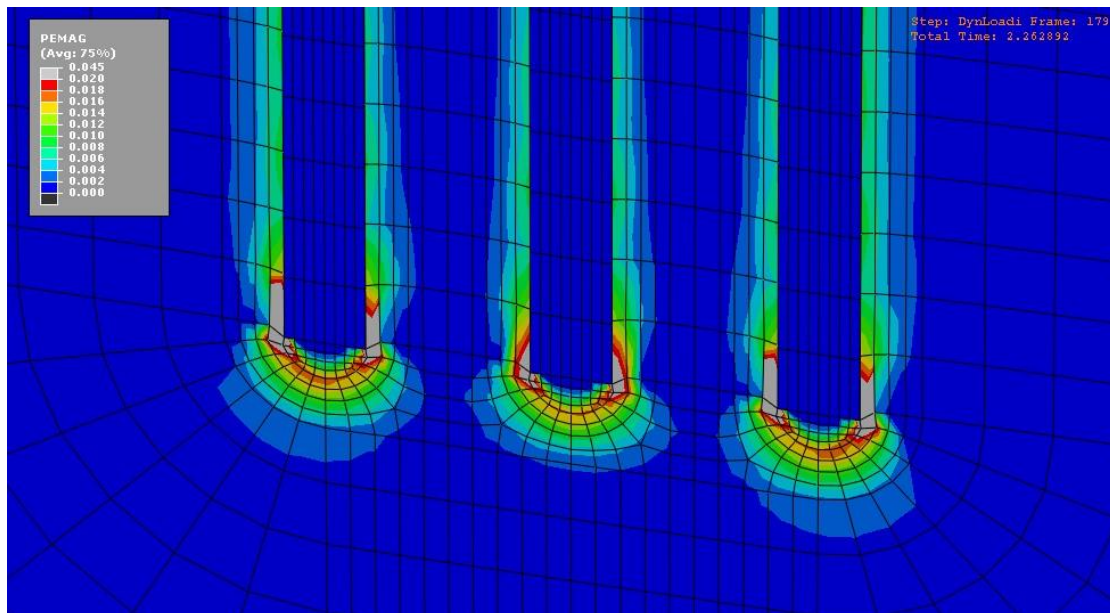
**Εικόνα 6.5** Λεπτομέρεια της Εικόνας 3 ( $\alpha_0=0.1$ ) όπου φαίνονται καλύτερα οι πλαστικές παραμορφώσεις κοντά στην κεφαλή της ομάδας. Είναι εμφανές πως λόγω αλληλεπίδρασης ο μεσαίος πάσσαλος –και το έδαφος που τον περιτριγυρίζει– καταπονείται λιγότερο από τους υπόλοιπους. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**



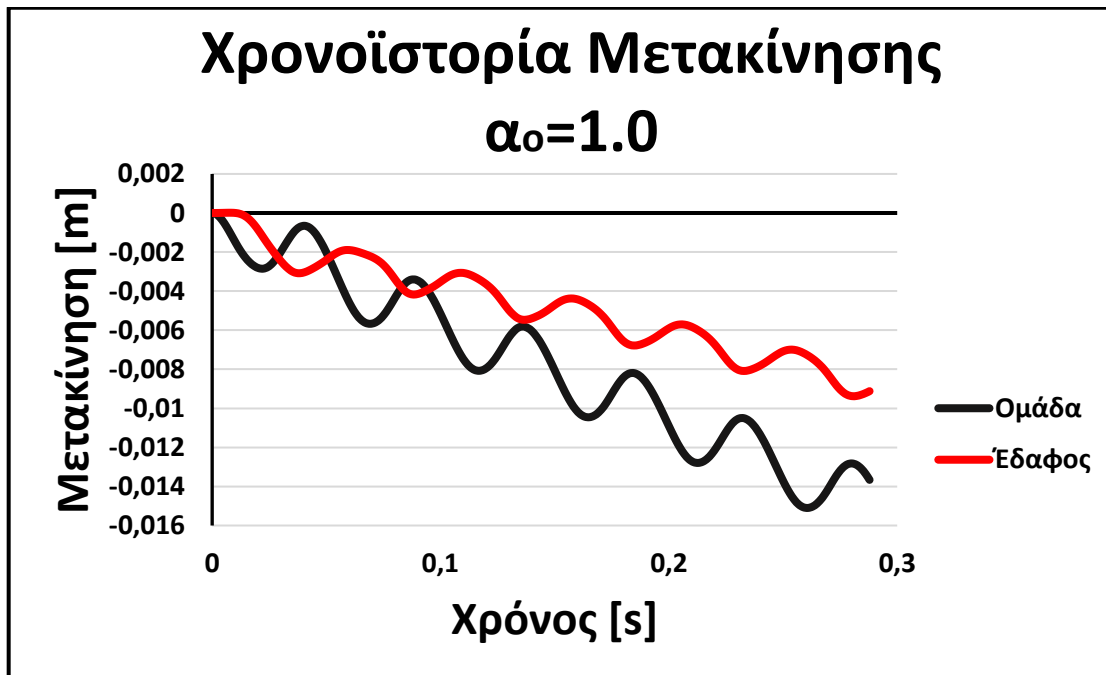
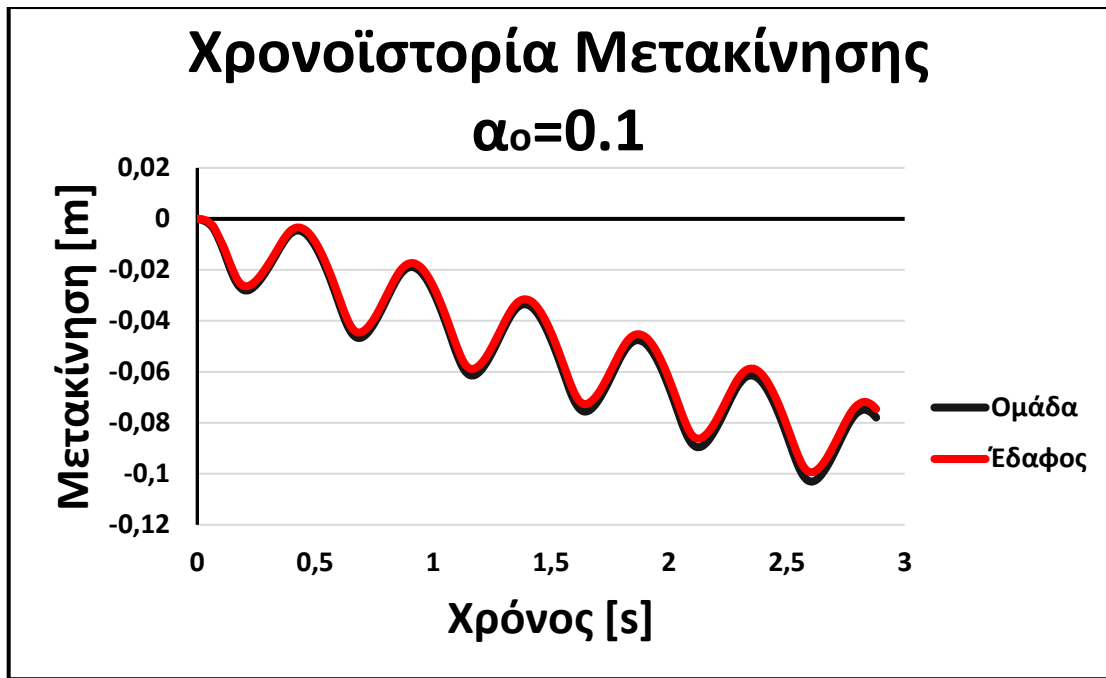
**Εικόνα 6.6** Λεπτομέρεια της Εικόνας 4 ( $\alpha_0=1.0$ ) όπου φαίνονται καλύτερα οι πλαστικές παραμορφώσεις κοντά στην κεφαλή της ομάδας. Εδώ φαίνεται πως οι πάσσαλοι έχουν ολισθήσει σε όμοιο βαθμό κοντά στην επιφάνεια, όμως είναι εμφανές πως, λόγω αλληλεπίδρασης, το έδαφος περιμετρικά της ομάδας καταπονείται περισσότερο από το έδαφος εντός της ομάδας **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**



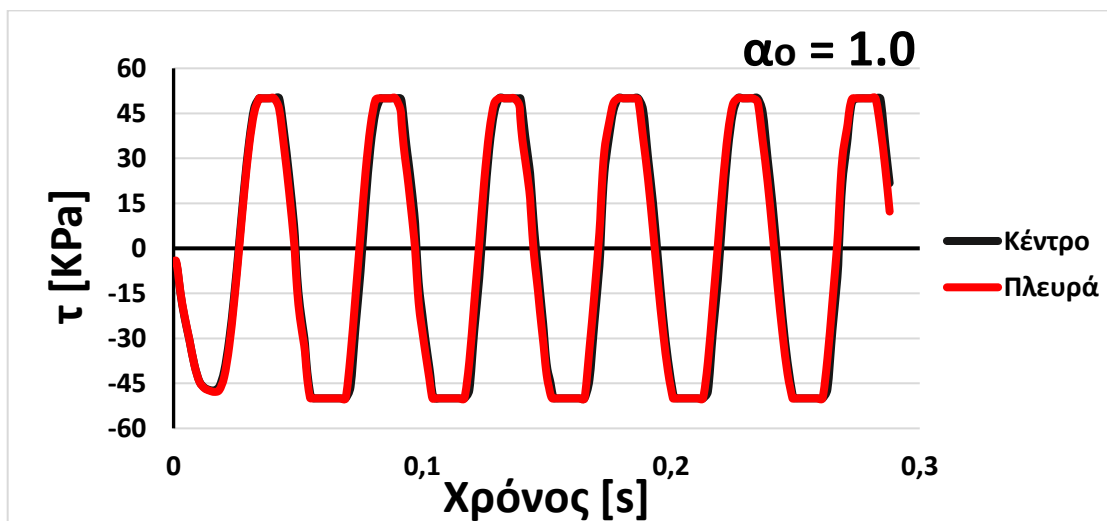
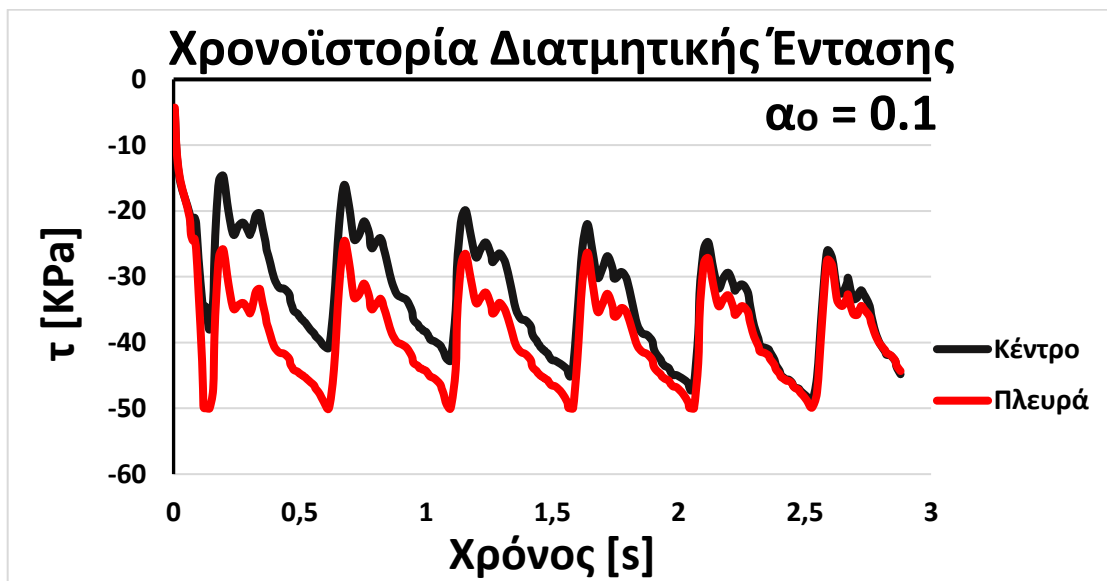
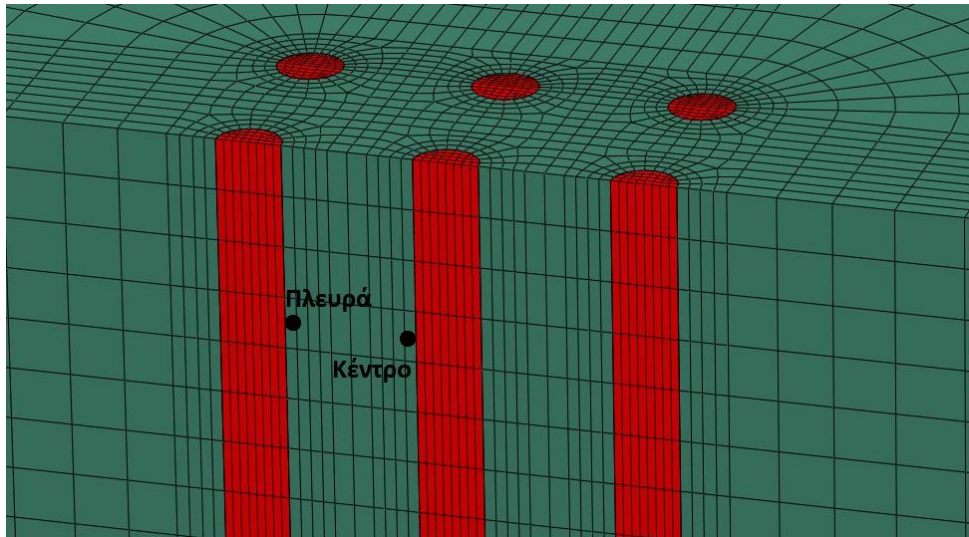
**Εικόνα 6.7** Λεπτομέρεια της Εικόνας 3 ( $\alpha_0=0.1$ ) όπου φαίνονται καλύτερα οι πλαστικές παραμορφώσεις κοντά στην βάση της ομάδας. Σε αυτή την περιοχή δεν παρουσιάζονται φαινόμενα αλληλεπίδρασης και οι πλαστικοποιήσεις είναι όμοιες. Η βάση της ομάδας φαίνεται να τείνει προς λειτουργία «εγκιβωτισμένου θεμελίου», κάτι που είναι γνωστό πως συμβαίνει σε ομάδες με μικρό  $S/D$ . **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**



**Εικόνα 6.8** Λεπτομέρεια της Εικόνας 4 ( $\alpha_0=1.0$ ) όπου φαίνονται καλύτερα οι πλαστικές παραμορφώσεις κοντά στην βάση της ομάδας. Όπως και για την περίπτωση  $\alpha_0=0.1$ , ούτε εδώ παρουσιάζονται φαινόμενα αλληλεπίδρασης και οι πλαστικοποιήσεις είναι και εδώ όμοιες. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 10**

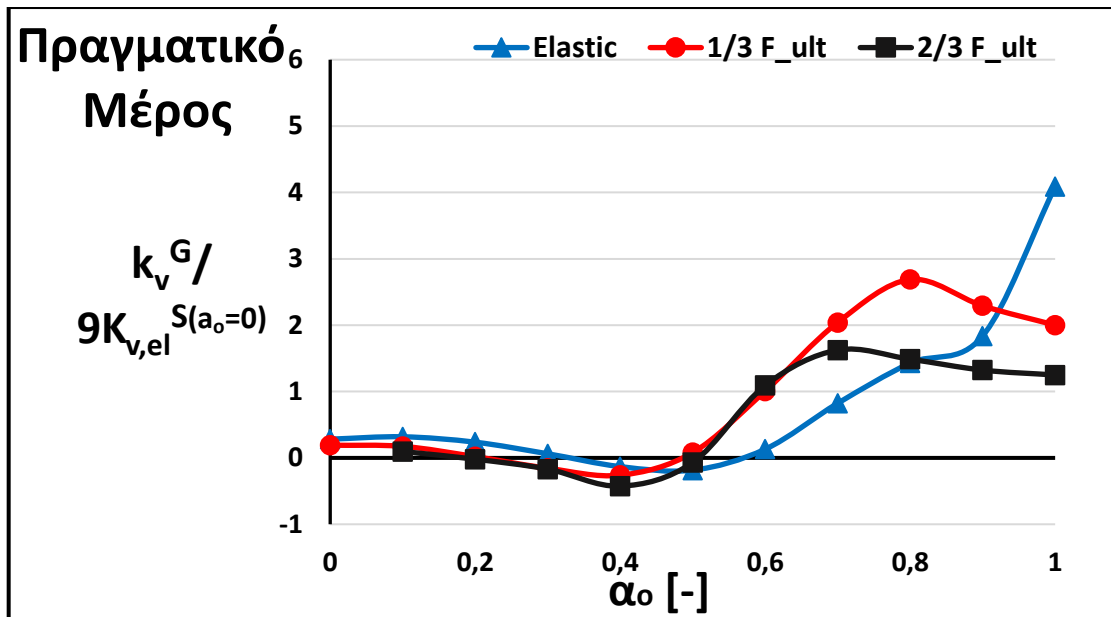


**Εικόνες 6.9-6.10** Χρονοϊστορία μετακινήσεων της κορυφής της ομάδας και ενός σημείου του εδάφους στο ίδιο ύψος, για συχνότητα διέγερσης  $\alpha_0=0.1$  και  $1.0$ . Παρατηρείται συσσώρευση μόνιμων καθιζήσεων σε κάθε κύκλο φόρτισης, μεγαλύτερη για χαμηλές συχνότητες όπως είναι και αναμενόμενο. Επίσης παρατηρείται και ο ρόλος του εδάφους, το οποίο στην χαμηλή συχνότητα κινείται σε όμοια φάση με την ομάδα, στην υψηλή συχνότητα όμως αποκτά διαφορά φάσης και οδηγεί σε αύξηση της σύνθετης στιβαρότητας της θεμελίωσης, όπως θα φανεί στην συνέχεια. Η διαφορά φάσης στην κίνηση αυτή εξηγεί και την διαφορική καθίζηση ομάδας και εδάφους που παρουσιάζεται στην υψίσυχη διέγερση, όπως θα αποδειχθεί στις επόμενες εικόνες.

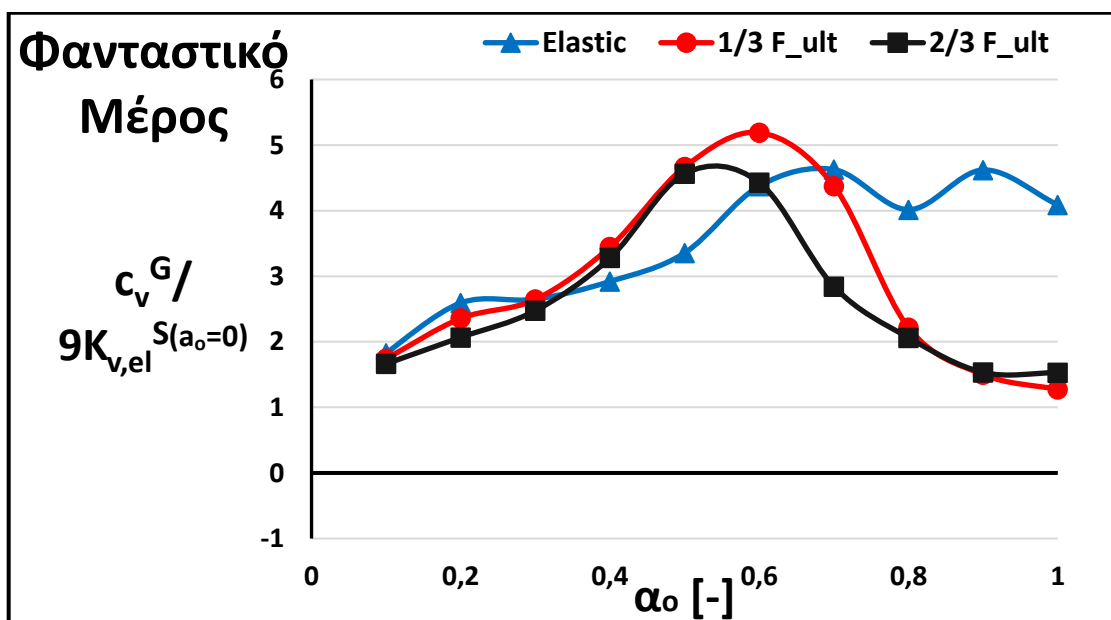


**Εικόνες 6.11-6.13** Τα αδρανειακά φορτία που αναπτύσσονται στο έδαφος λόγω αντίθετης κίνησής του με τους πασσάλους οδηγούν σε διαρροή την διεπιφάνεια, «ξεκλειδώνοντας» την κίνησή του και δημιουργώντας διαφορικές καθιζήσεις μεταξύ εδάφους και πασσάλων.

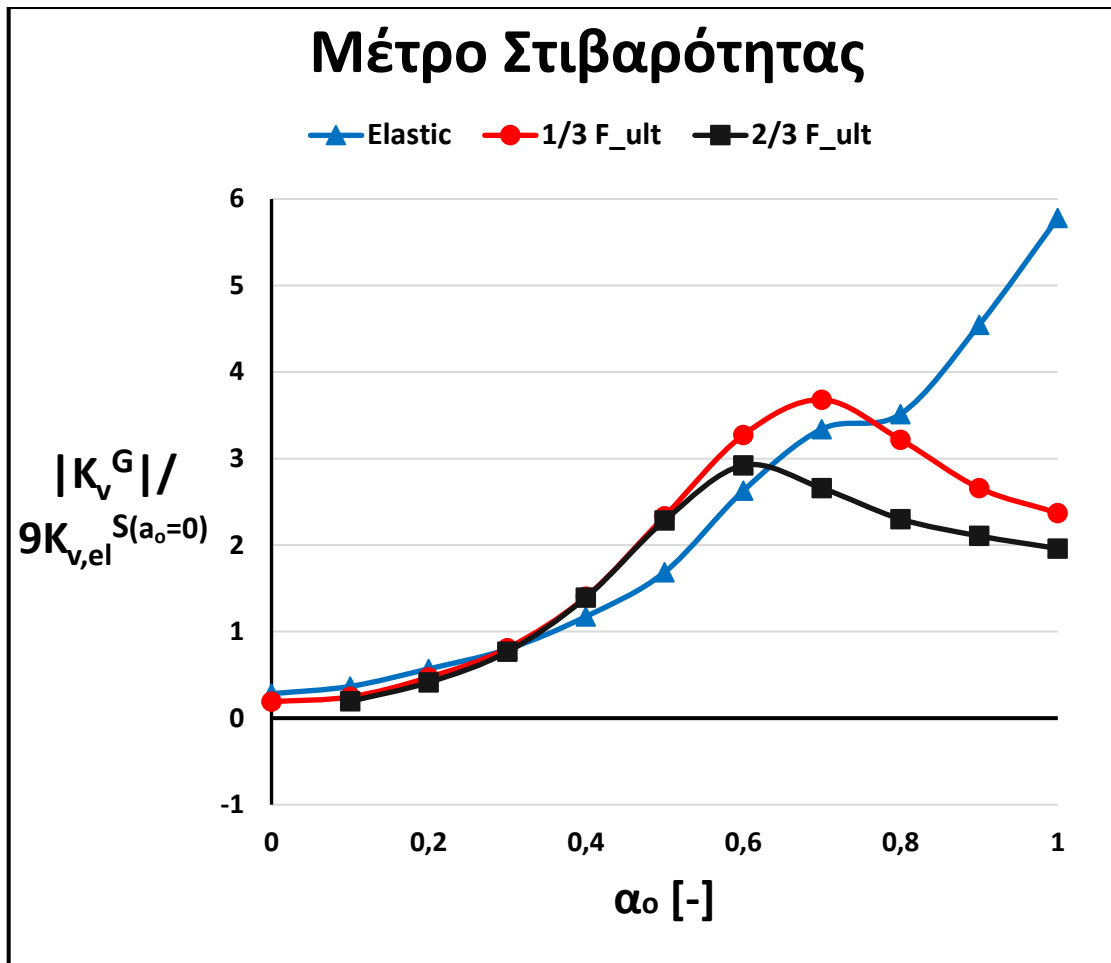




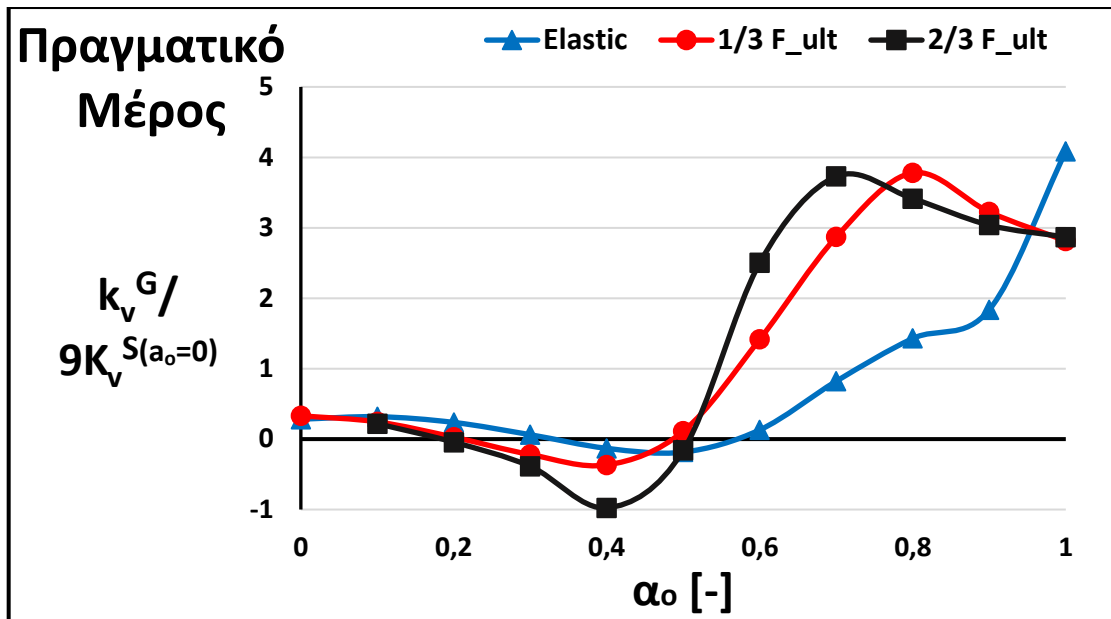
**Εικόνα 6.14-** Εξέλιξη του πραγματικού μέρους της στιβαρότητας συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης, κανονικοποιημένου ως προς το άθροισμα των στατικών, ελαστικών στιβαροτήτων. Η μη-γραμμικότητα δεν φαίνεται να έχει επίδραση στις χαμηλές συχνότητες, ενώ φαίνεται να μετατοπίζει την καμπύλη προς τα αριστερά, αφού οι μη-γραμμικές αναλύσεις παρουσιάζουν μέγιστο πριν την ελαστική. Στις υψηλές συχνότητες το έδαφος ανάμεσα στους πασσάλους ταλαντώνεται σε αντίθετη φάση με την ομάδα, αυξάνοντας την «ακαμψία» του συστήματος, όμως η παρουσία οριακής αντοχής στην διεπιφάνεια θέτει άνω όριο σε αυτή την αύξηση λόγω ολισθήσεων, εξηγώντας την μείωση των μη-γραμμικών αναλύσεων.



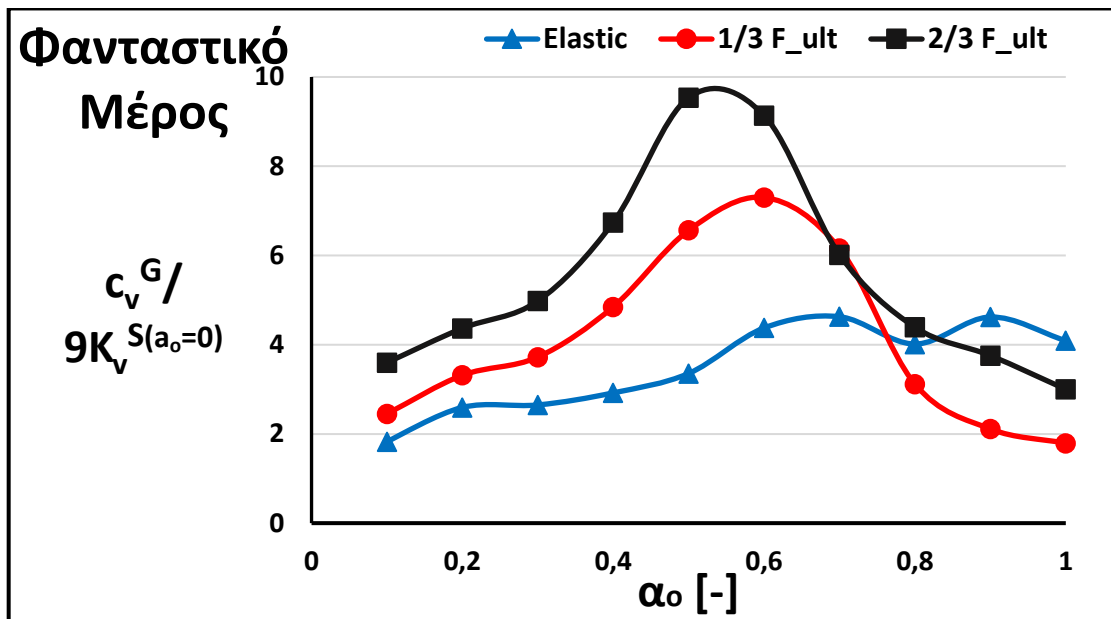
**Εικόνα 6.15-** Εξέλιξη του φανταστικού μέρους της στιβαρότητας συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης, κανονικοποιημένου ως προς το άθροισμα των στατικών, ελαστικών στιβαροτήτων. Η μη-γραμμικότητα δεν φαίνεται να έχει επίδραση στις χαμηλές συχνότητες, ενώ πάλι φαίνεται να μετατοπίζει την καμπύλη προς τα αριστερά, αφού οι μη-γραμμικές αναλύσεις παρουσιάζουν μέγιστο πριν την ελαστική. Η ραγδαία μείωση στις ανελαστικές αναλύσεις αποδίδεται σε μείωση της απόσβεσης ακτινοβολίας λόγω ανάπτυξης ολισθήσεων.



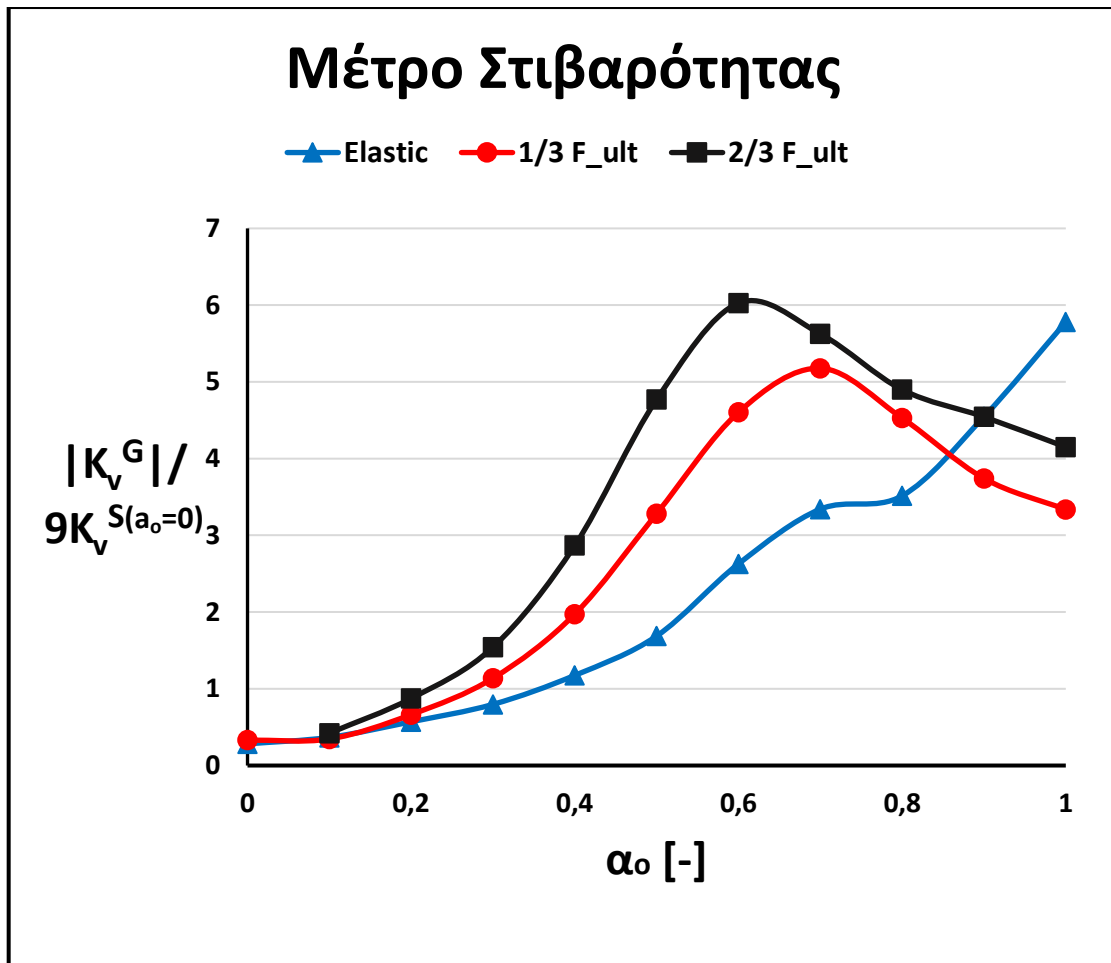
**Εικόνα 6.16-** Εξέλιξη του μέτρου της στιβαρότητας συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης, κανονικοποιημένου ως προς το άθροισμα των στατικών, ελαστικών στιβαροτήτων. Φαίνεται λοιπόν πως συνολικά η μη-γραμμικότητα δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τα αποτελέσματα στις χαμηλές συχνότητες. Όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα, η καμπύλες των μη-γραμμικών αναλύσεων είναι μετατοπισμένες προς τα αριστερά συγκριτικά με την ελαστική, παρουσιάζοντας νωρίτερα μέγιστο. Φαίνεται επίσης η σημαντική επιρροή των ολισθήσεων στις υψηλές συχνότητες, η οποία όπως έχει αναφερθεί συμβαίνει για 2 λόγους: αρχικά, ενώ στις υψηλές συχνότητες το έδαφος κινείται αντίθετα με την ομάδα οδηγώντας σε αύξηση του πραγματικού μέρους υπό ελαστικές συνθήκες, η αδυναμία της διεπιφάνειας να μεταφέρει τις τάσεις μεταξύ πασσάλων και εδάφους οδηγεί σε ολισθήσεις και συνεπώς απομείωση του φαινομένου αυτού· εκτός αυτού, η παρουσία των ολισθήσεων στις υψηλές συχνότητες μειώνει σημαντικά την απόσβεση ακτινοβολίας, οδηγώντας σε μείωση του φανταστικού μέρους έναντι των ελαστικών συνθηκών.



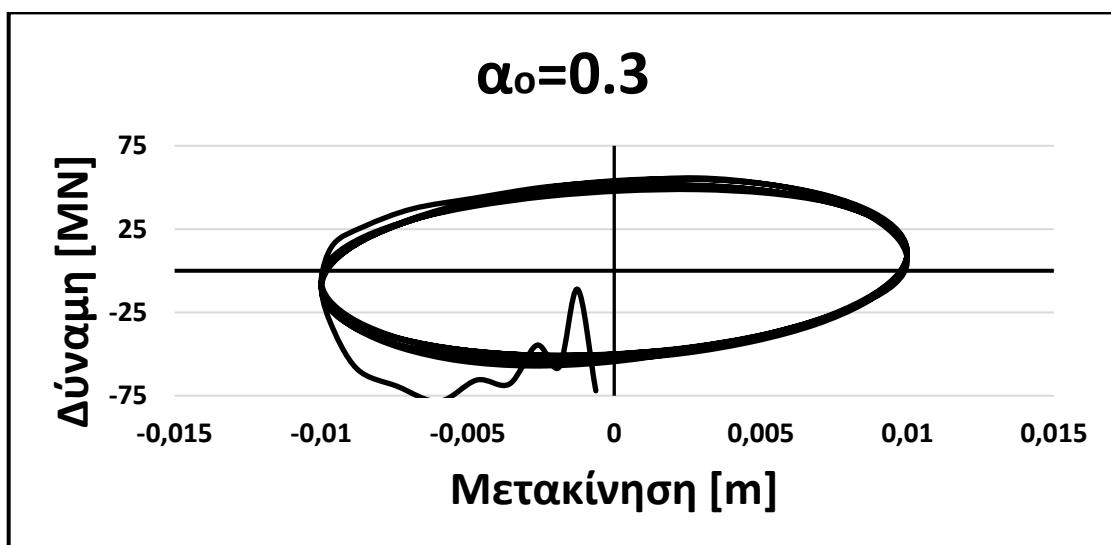
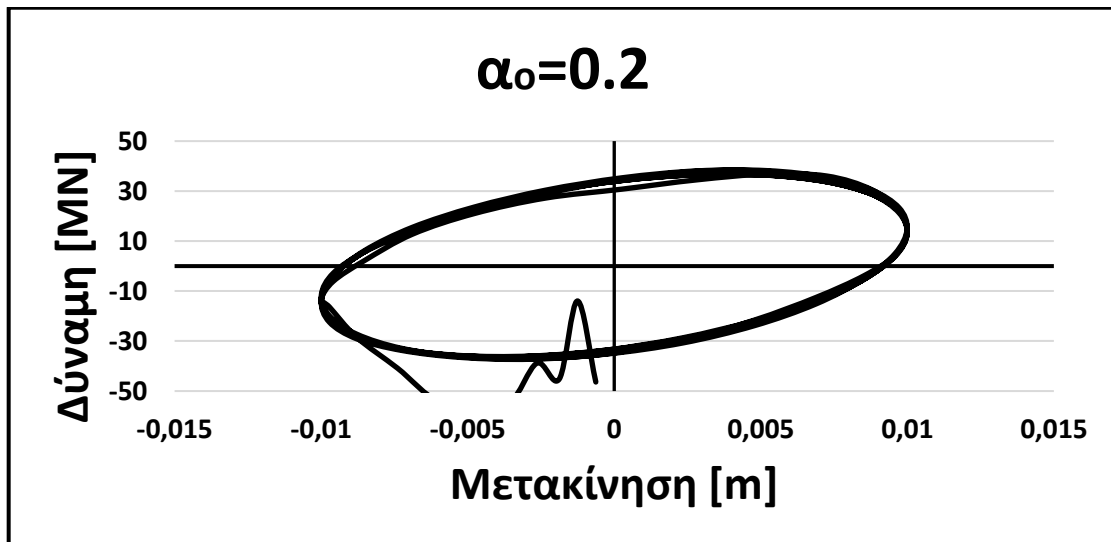
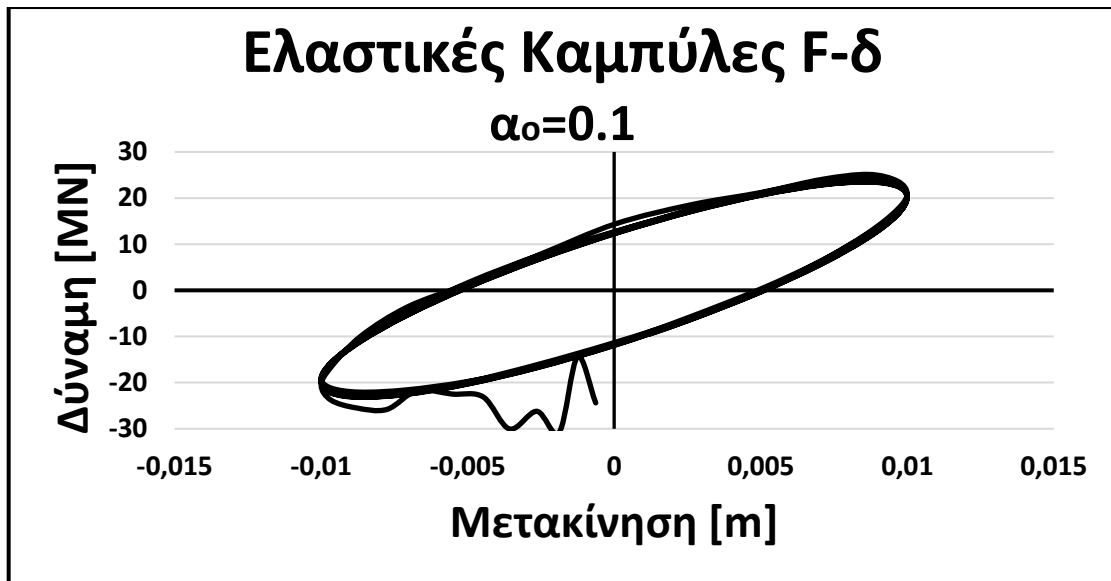
**Εικόνα 6.14α-** Εξέλιξη του πραγματικού μέρους της στιβαρότητας συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης, κανονικοποιημένου ως προς το άθροισμα των στατικών στιβαροτήτων του αντίστοιχου επιπέδου φόρτισης. Εμφανής πλέον η αύξηση της αποδοτικότητας λόγω μείωσης της αλληλεπίδρασης σε χαμηλές συχνότητες, η μετακίνηση της καμπύλης προς χαμηλότερες συχνότητες για αυξανόμενο επίπεδο φόρτισης αλλά και η επίδραση της κυματικής αλληλεπίδρασης που δημιουργεί την απότομη κλίση των μη-γραμμικών καμπυλών στο εύρος  $\alpha_0=0.5-0.8$ .



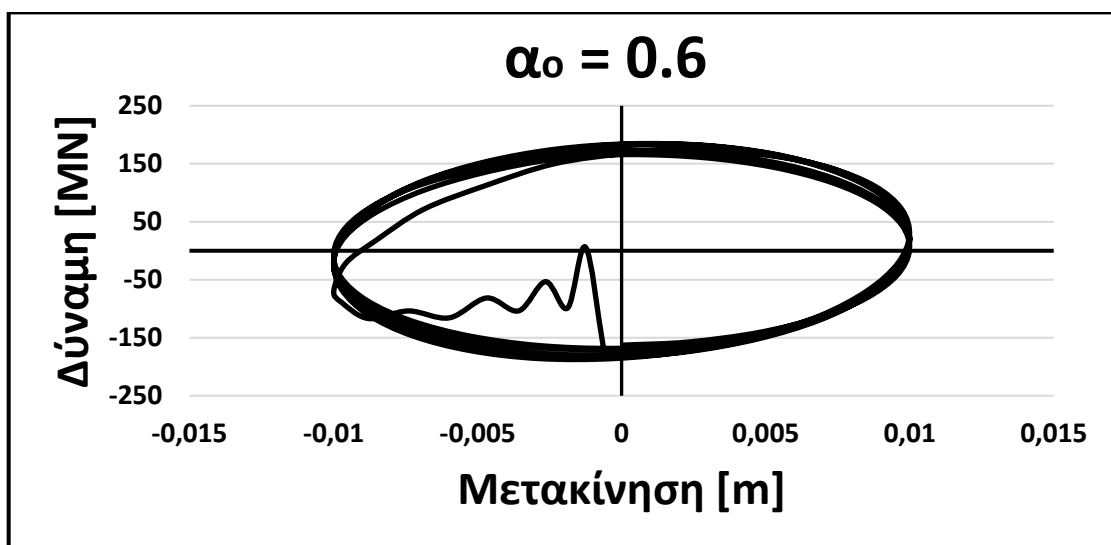
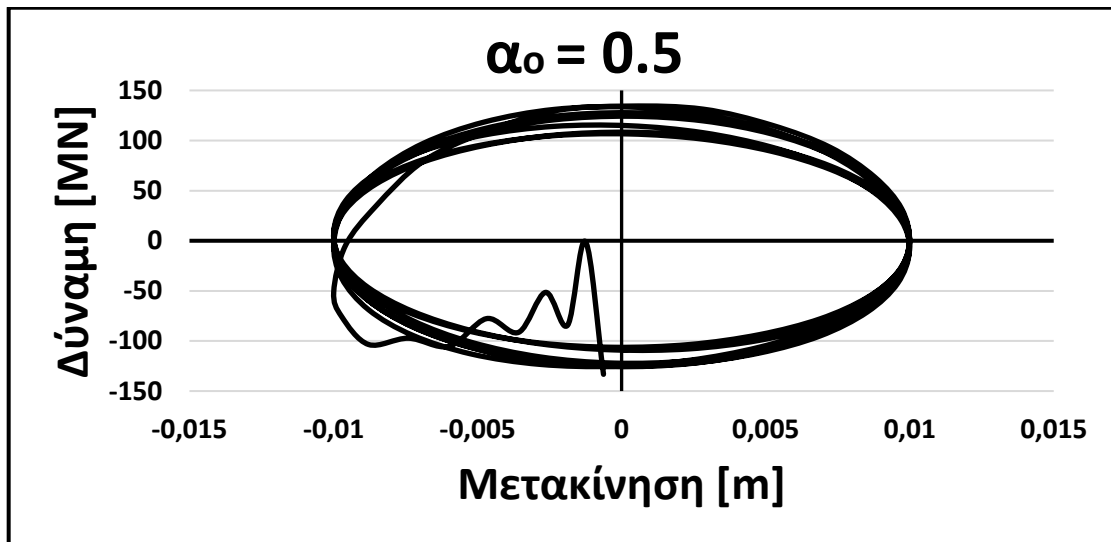
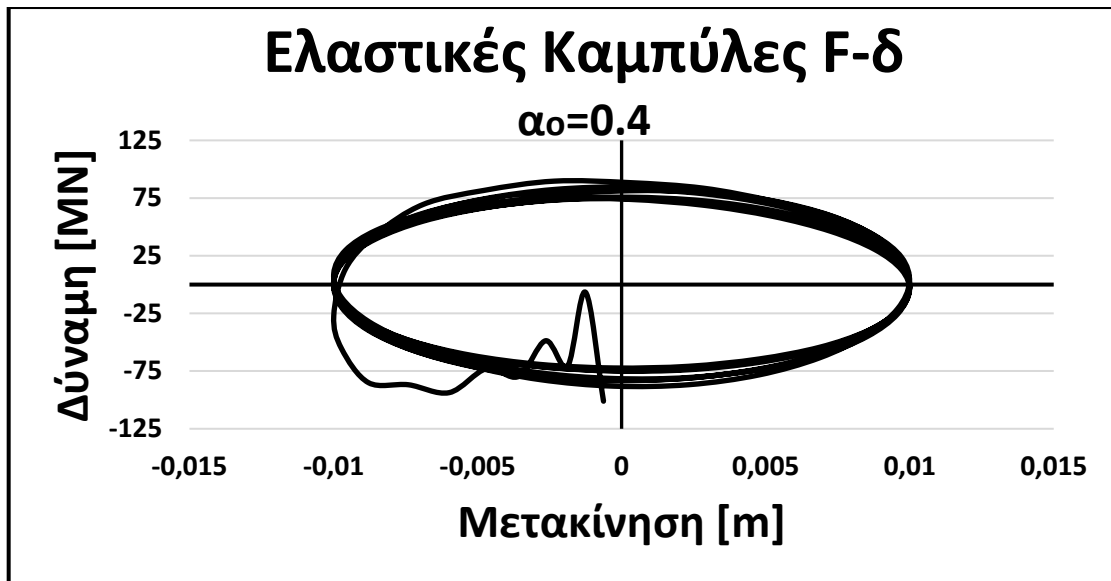
**Εικόνα 6.15α-** Εξέλιξη του φανταστικού μέρους της στιβαρότητας συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης, κανονικοποιημένου ως προς το άθροισμα των στατικών στιβαροτήτων του αντίστοιχου επιπέδου φόρτισης. Εμφανής πλέον η αύξηση της αποδοτικότητας για αυξανόμενο επίπεδο φόρτισης αλλά και η επίδραση της κυματικής αλληλεπίδρασης που δημιουργεί την απότομη κλίση των μη-γραμμικών καμπυλών στο εύρος  $\alpha_0=0.4-0.7$ . Η αύξηση των τιμών για μικρές συχνότητες αποδίδεται στην παρουσία υστερητικής απόσβεσης στα ανελαστικά συστήματα.



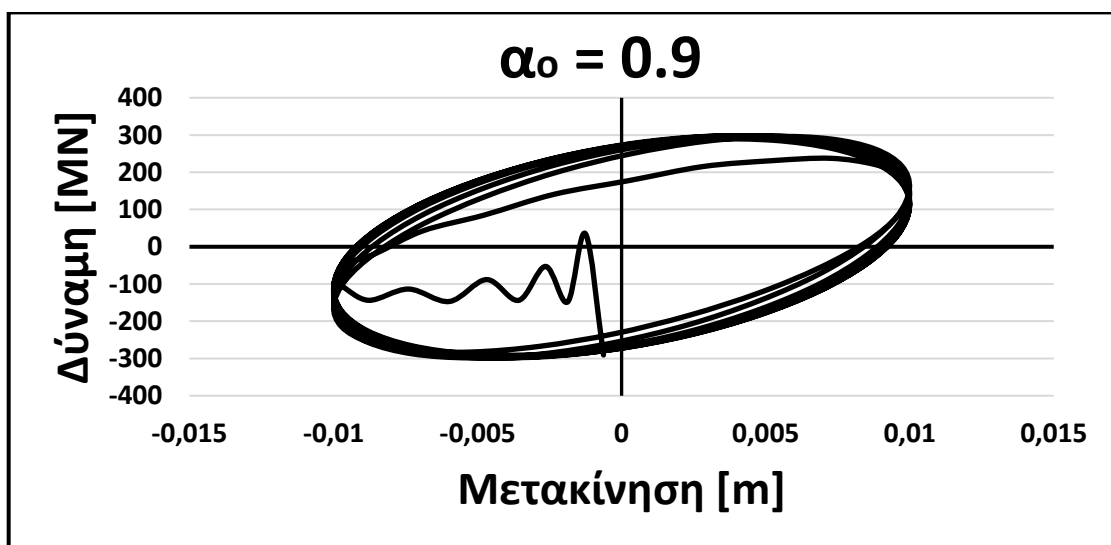
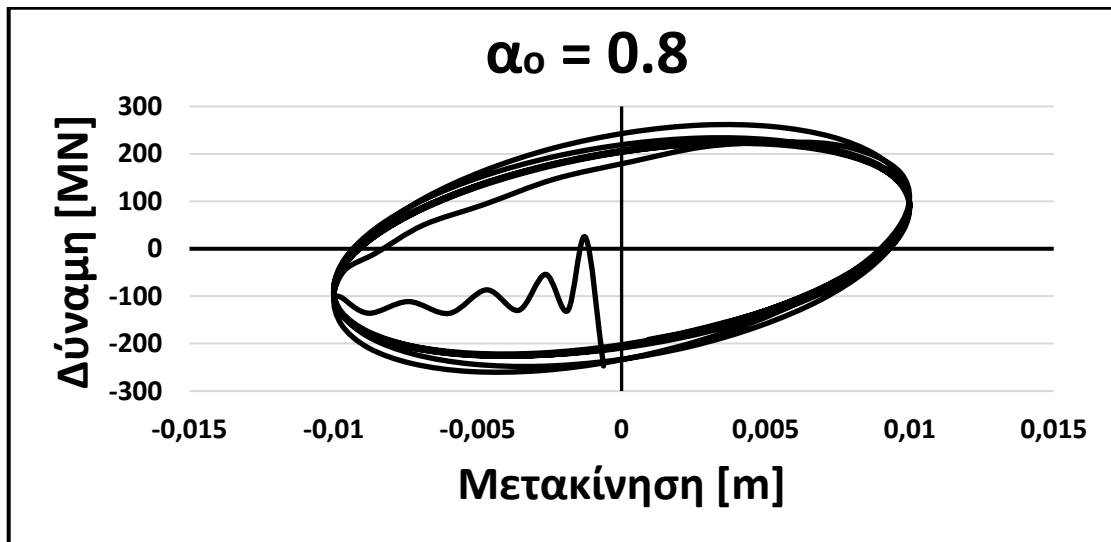
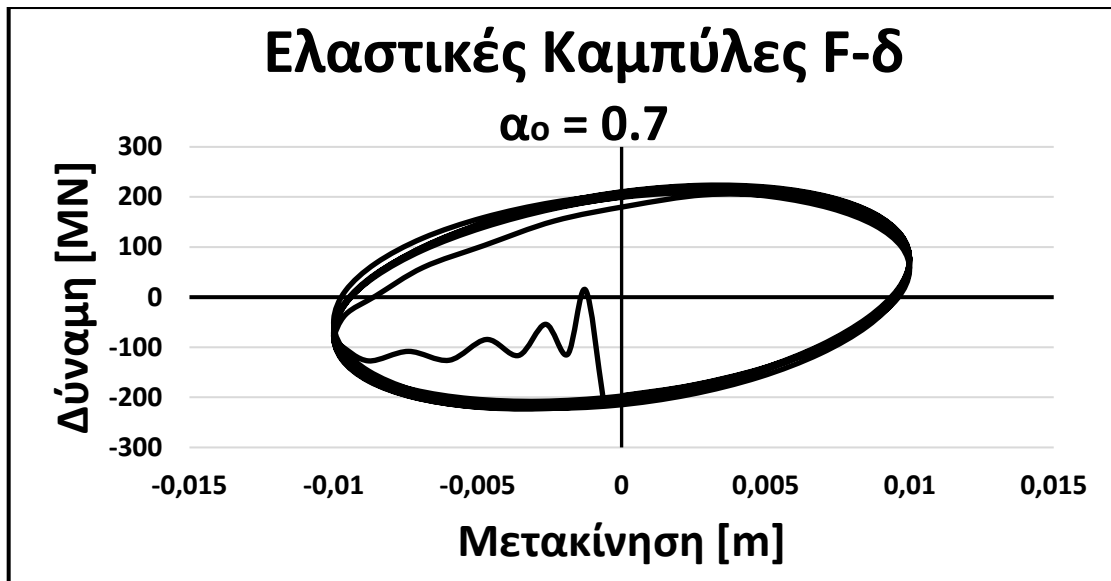
*Εικόνα 6.16α* Εξέλιξη του μέτρου στιβαρότητας της ομάδας συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης και του επιπέδου φόρτισης, κανονικοποιημένου ως προς το άθροισμα των στατικών στιβαροτήτων του αντίστοιχου επιπέδου φόρτισης. Εμφανής η μεγαλύτερη αποδοτικότητα λόγω της μη-γραμμικότητας, η μετατόπιση της καμπύλης προς την περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων για εντονότερη φόρτιση αλλά και η μείωση της αποδοτικότητας στην περιοχή των πολύ υψηλών συχνοτήτων, όπου κυριαρχούν τα αδρανειακά φαινόμενα και η παρουσία ολισθήσεων μειώνει σημαντικά την επίδρασή τους.



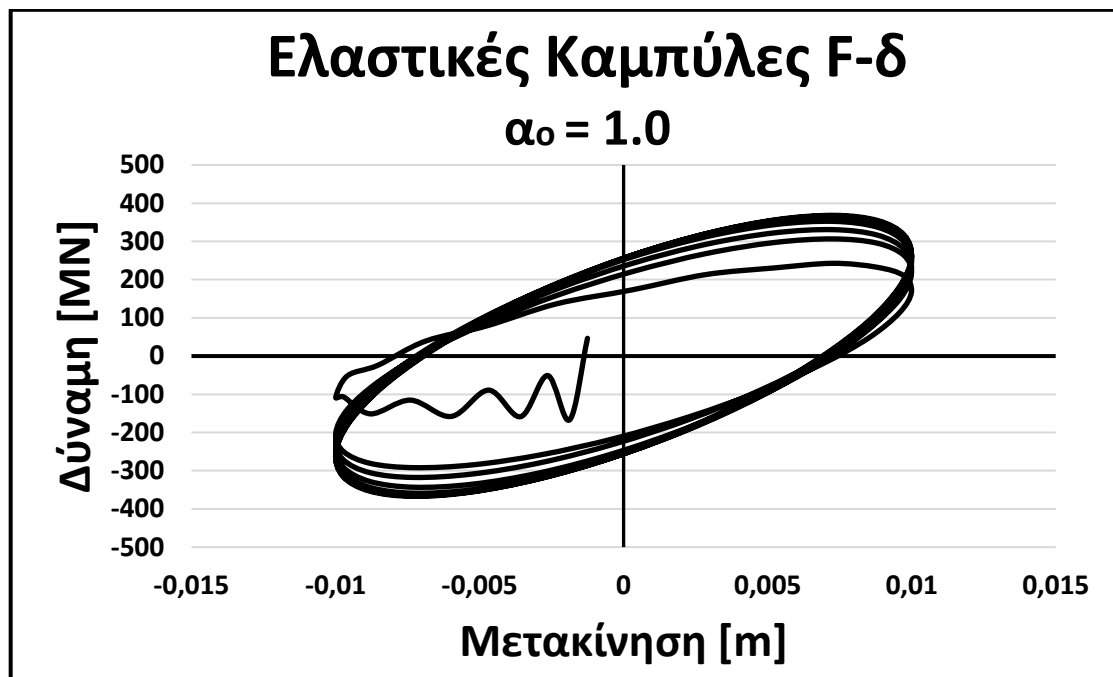
Εικόνες 6.17-6.19 Ελαστικές καμπύλες F-δ για κατακόρυφη δυναμική φόρτιση της πασσαλομάδας



Εικόνες 6.20-6.22 Ελαστικές καμπύλες F-δ για κατακόρυφη δυναμική φόρτιση της πασσαλομάδας

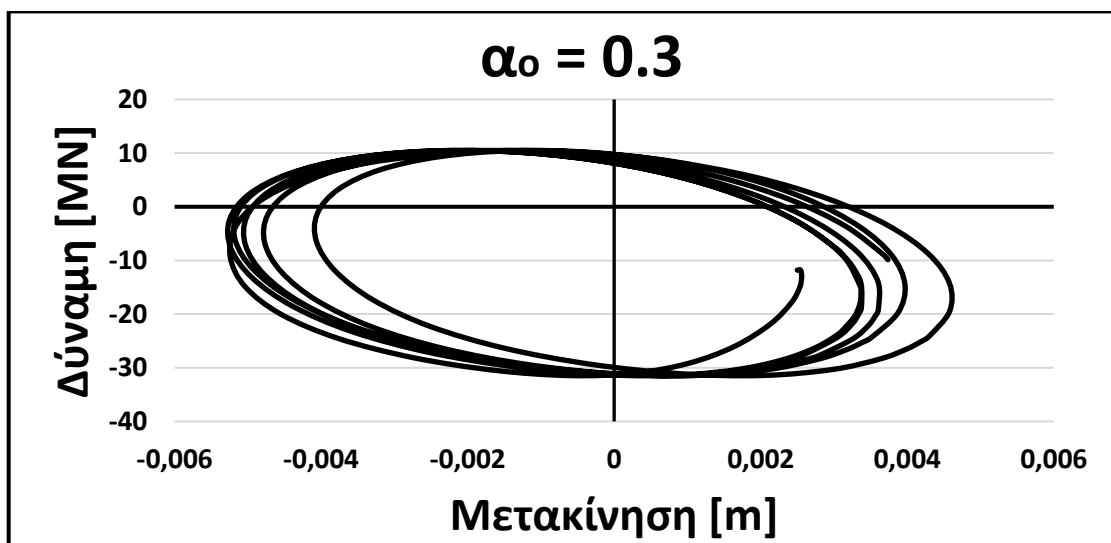
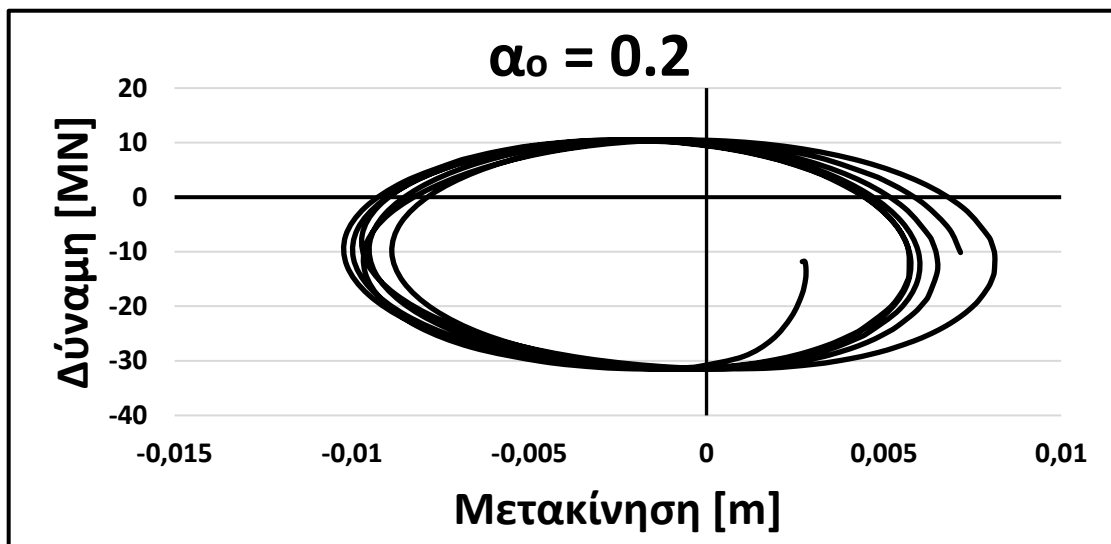
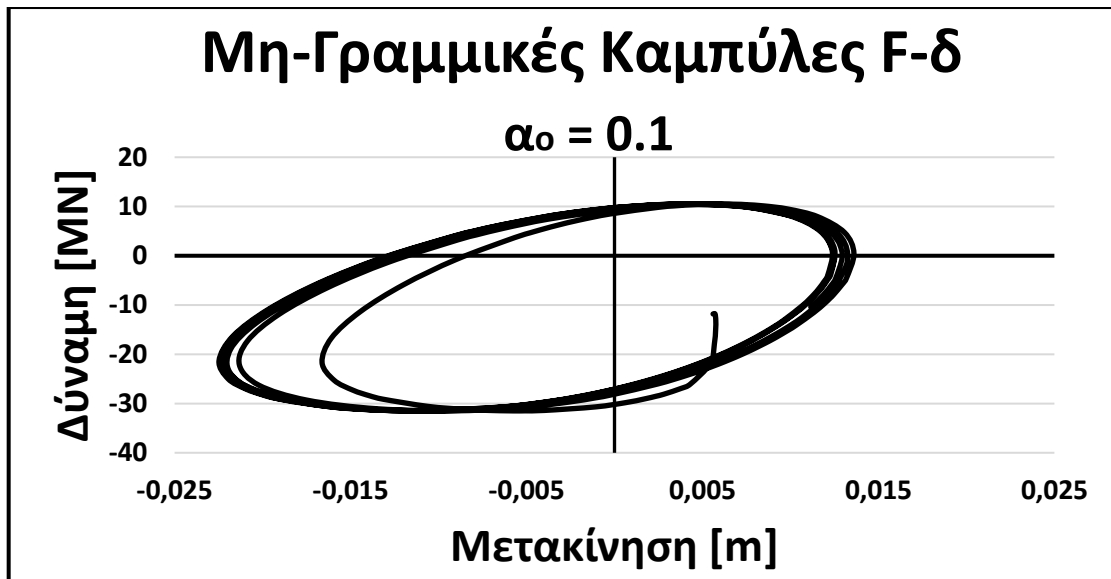


Εικόνες 6.23-6.25 Ελαστικές καμπύλες F-δ για κατακόρυφη δυναμική φόρτιση της πασσαλομάδας

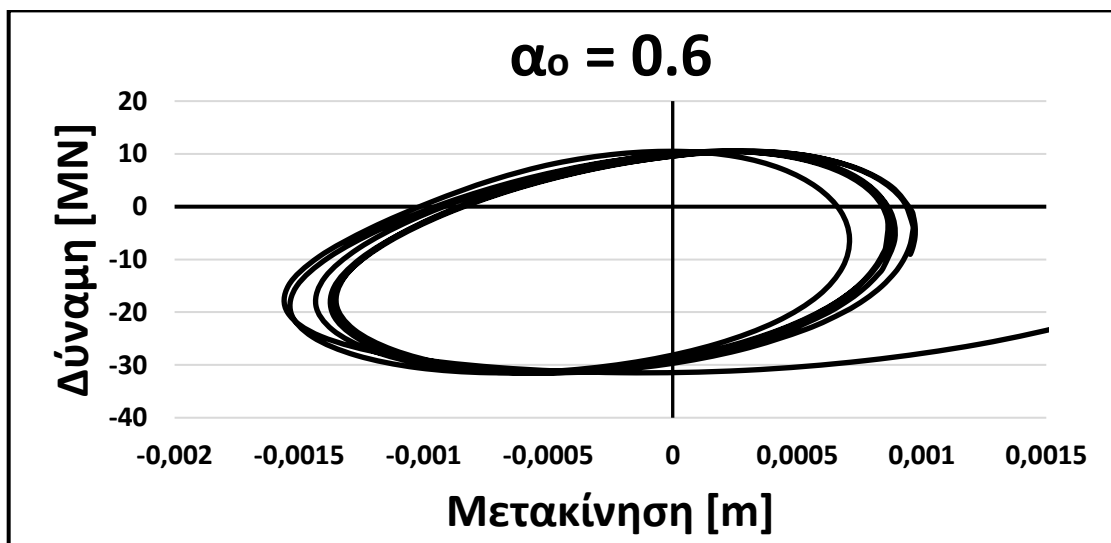
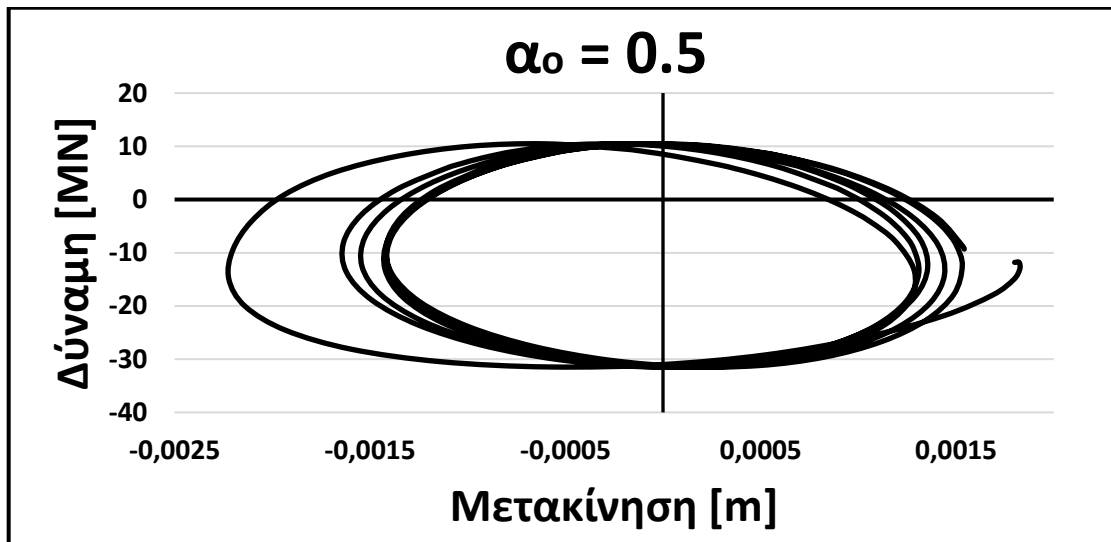
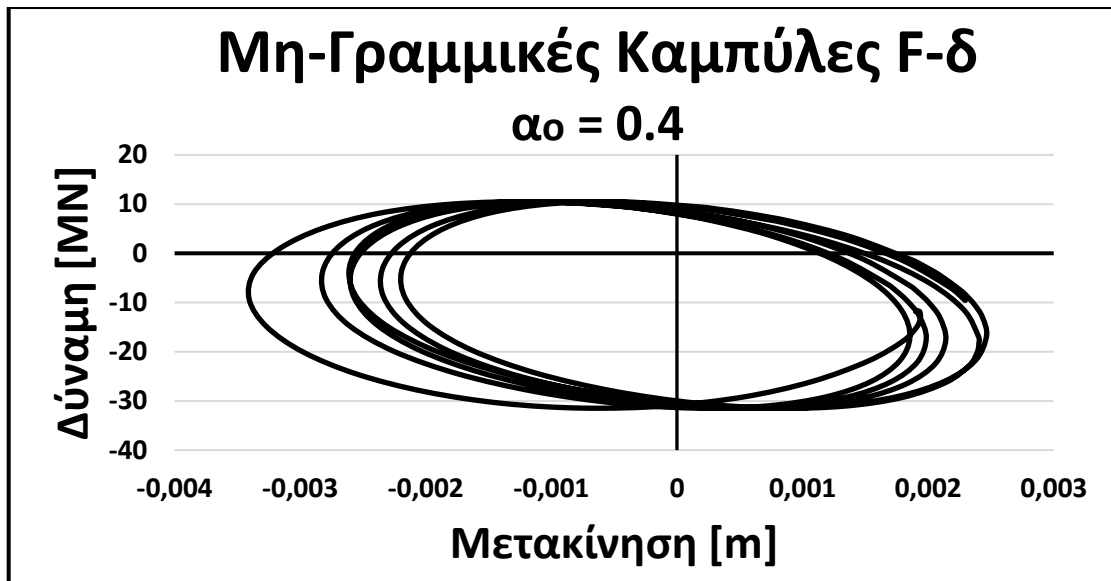


Εικόνα 6.26 Ελαστική καμπύλη F-δ για κατακόρυφη δυναμική φόρτιση της πασσαλομάδας

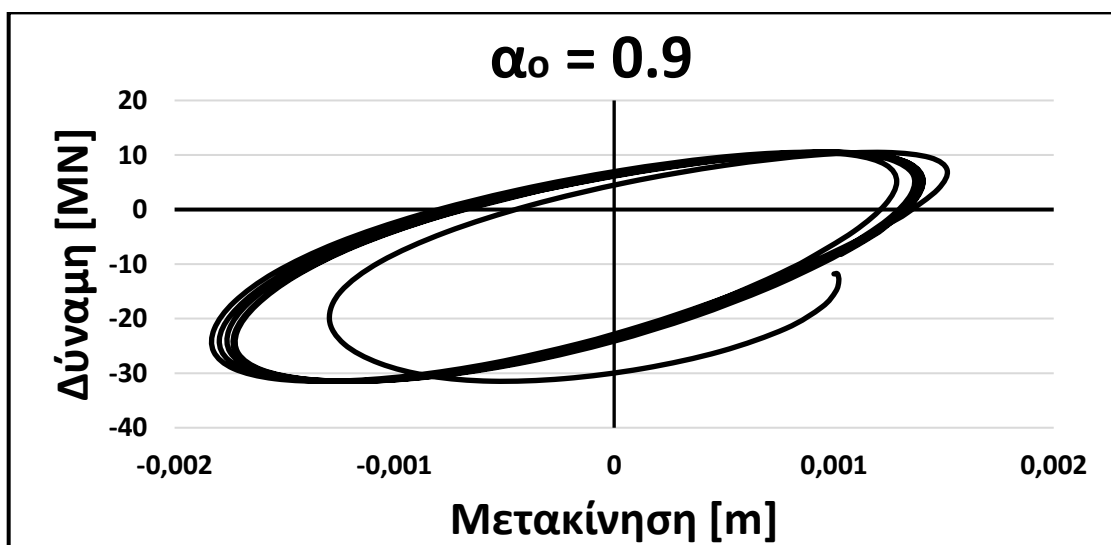
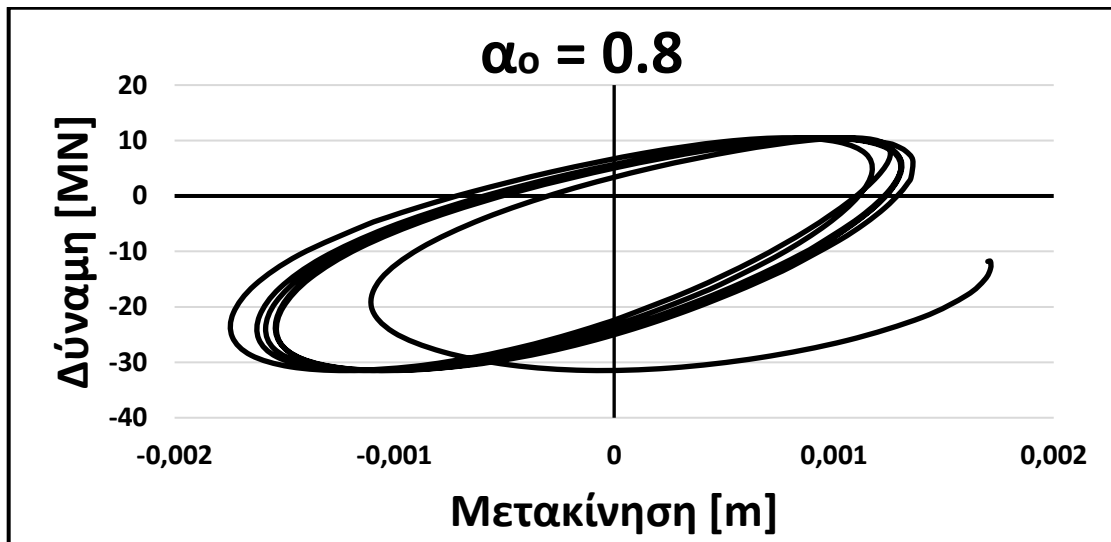
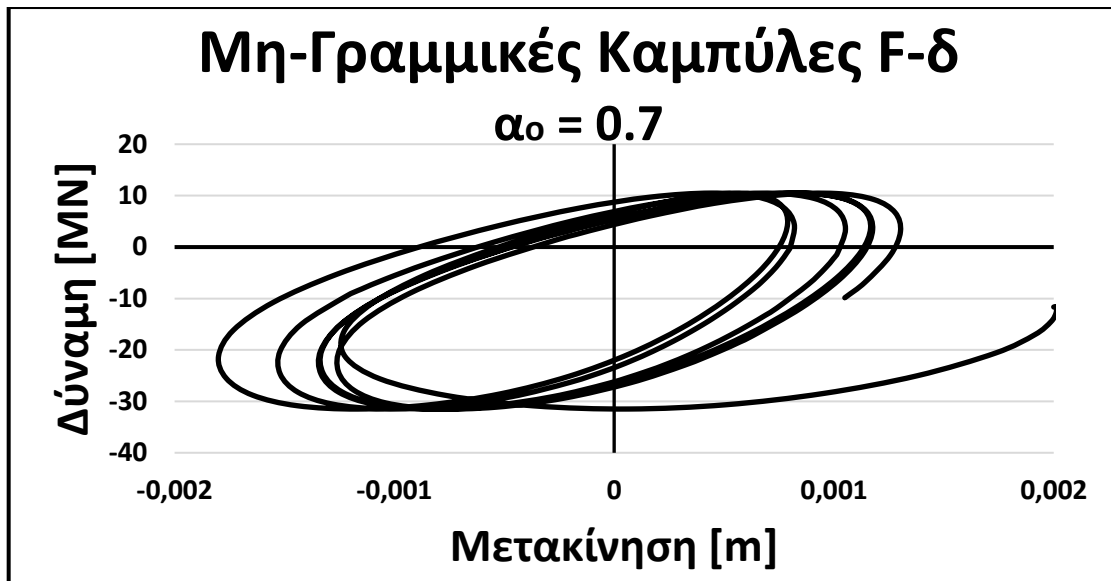




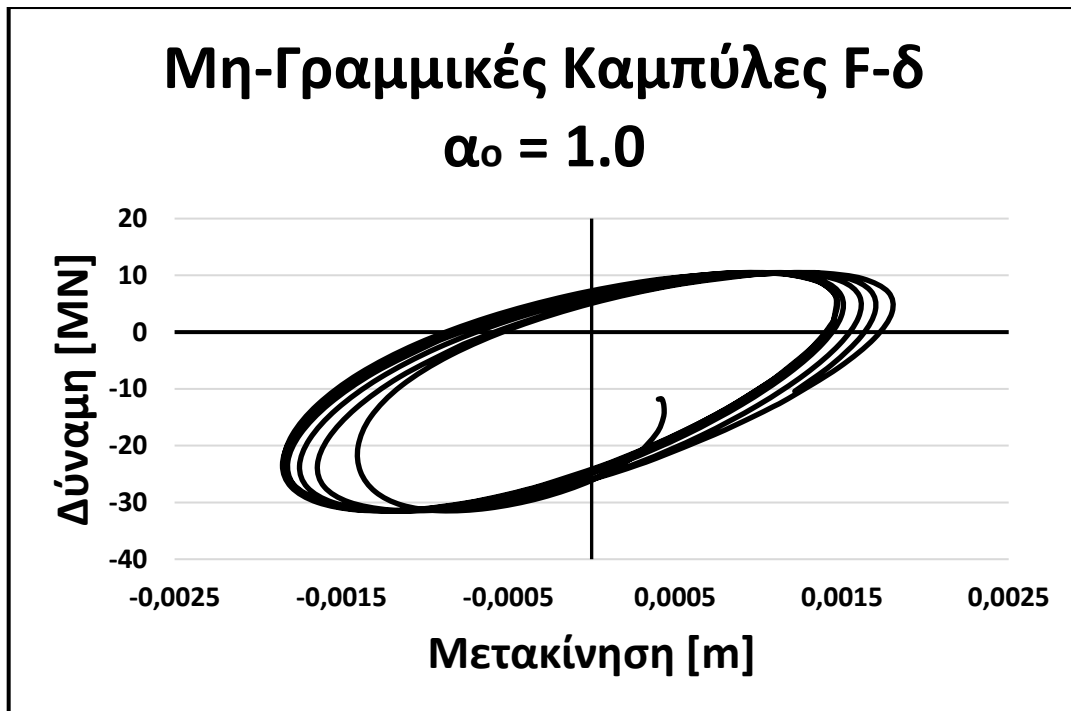
Εικόνες 6.27-6.29 Μη-γραμμικές καμπύλες F-δ για κατακόρυφη δυναμική φόρτιση της πασσαλομάδας



Εικόνες 6.30-6.32 Μη-γραμμικές καμπύλες F-δ για κατακόρυφη δυναμική φόρτιση της πασσαλομάδας

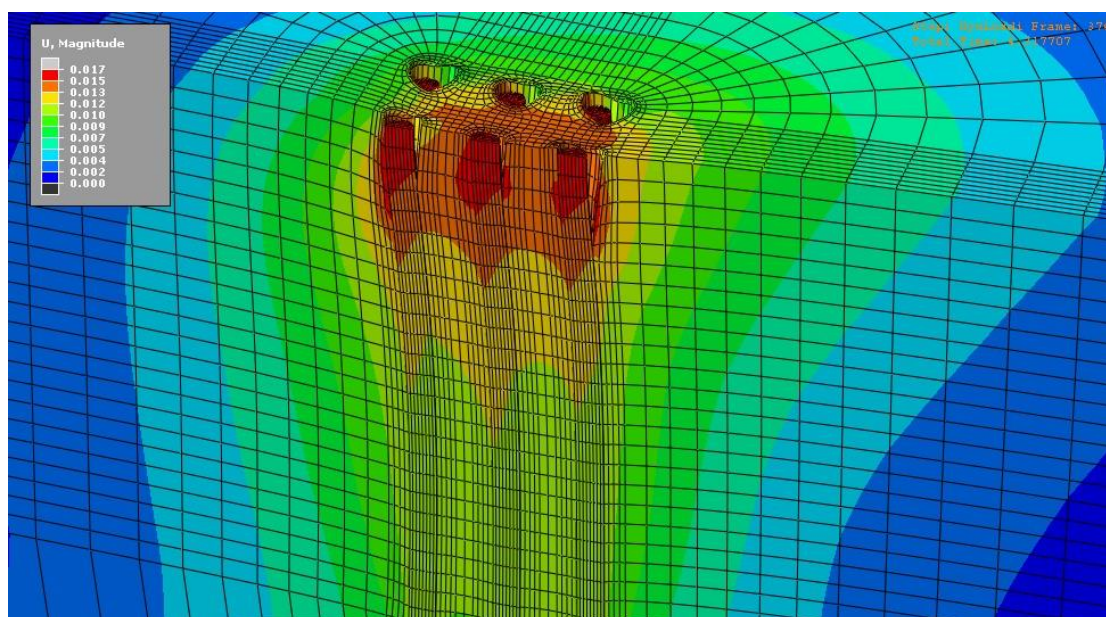


Εικόνες 6.33-6.35 Μη-γραμμικές καμπύλες F-δ για κατακόρυφη δυναμική φόρτιση της πασσαλομάδας

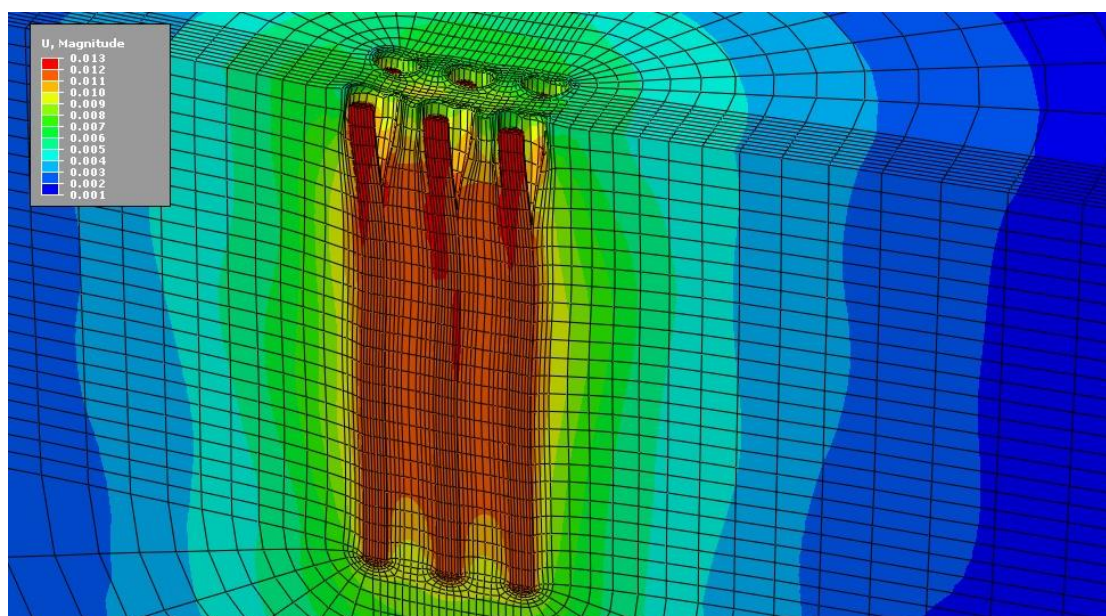


*Εικόνα 6.36 Μη-γραμμική καμπύλη F-δ για κατακόρυφη δυναμική φόρτιση της πασσαλομάδας*

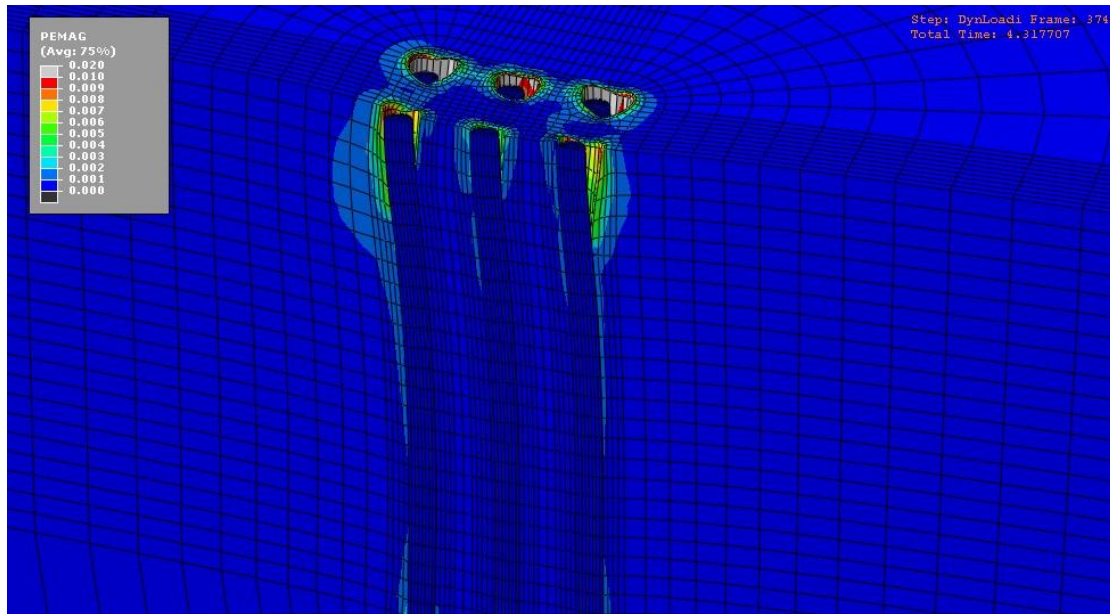
## 6.4 ΣΧΗΜΑΤΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΣΤΙΒΑΡΟΤΗΤΑΣ



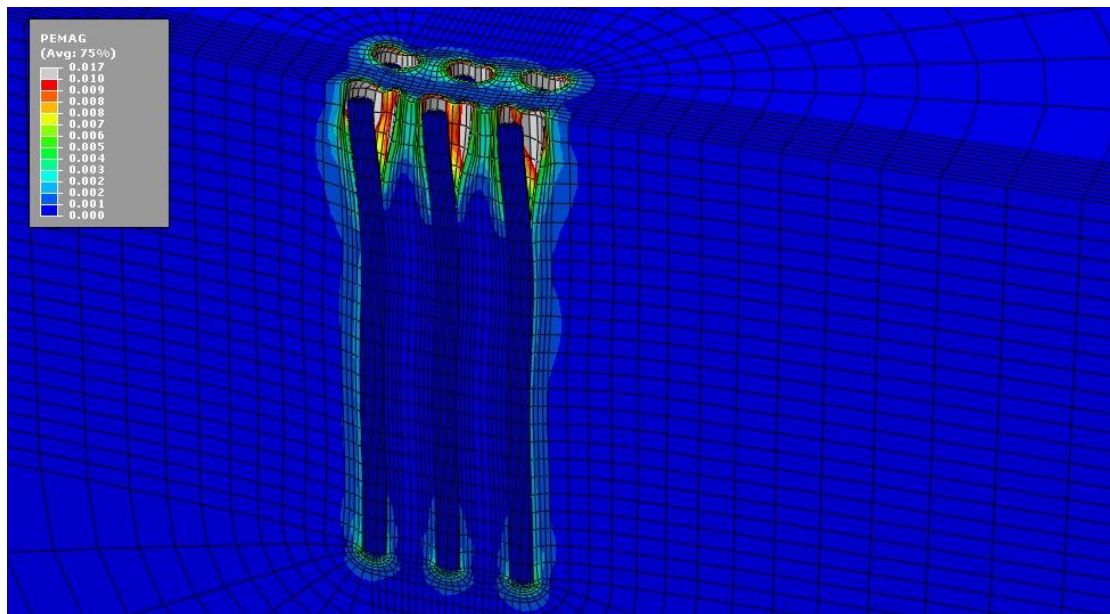
**Εικόνα 6.37** Ισοϋψείς του μέτρου της μετακίνησης την χρονική στιγμή που η μετακίνηση της κεφαλής της ομάδας παίρνει την μέγιστη τιμή της, για  $\alpha=0.1$ . Φαίνεται πως οι μετακινήσεις είναι συγκεντρωμένες στο ενεργό μήκος του πασσάλου. Εμφανής επίσης είναι η δημιουργία κοιλότητας γύρω από τους πασσάλους. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 100.**



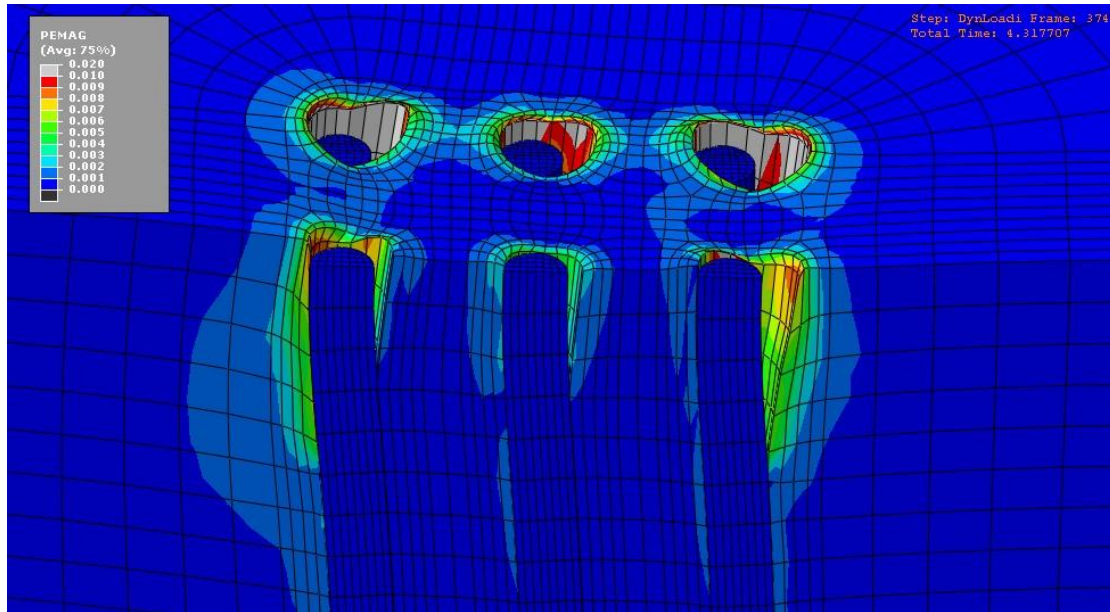
**Εικόνα 6.38** Ισοϋψείς του μέτρου της μετακίνησης την χρονική στιγμή που η μετακίνηση της κεφαλής της ομάδας παίρνει την μέγιστη τιμή της, για  $\alpha=0.8$ . Εδώ οι μετακινήσεις έχουν μετατοπιστεί σε μεγαλύτερο βάθος, αποτέλεσμα της εντονότερης παραμόρφωσης του εδάφους τριγύρω από το ενεργό μήκος των πασσάλων, η οποία αναγκάζει τον κάθε πάσσαλο να παραμορφωθεί σε μεγαλύτερο βάθος, ώστε να εξισορροπήσει το φορτίο που του ασκείται. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 100.**



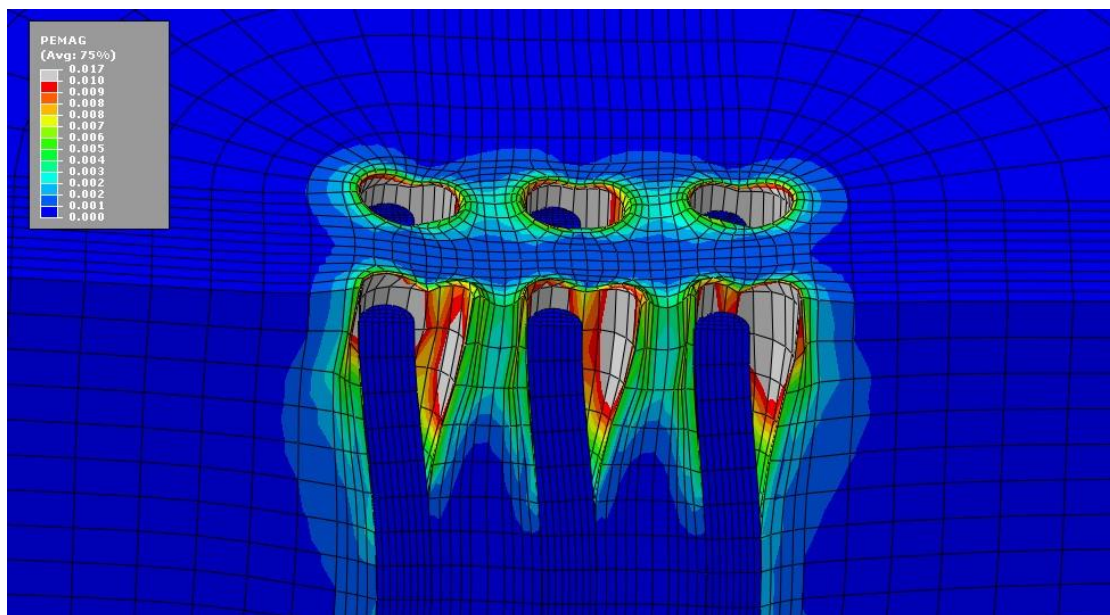
**Εικόνα 6.39** Ισοϋψείς του μέτρου της πλαστικής παραμόρφωσης την χρονική στιγμή που η μετακίνηση της κεφαλής της ομάδας παίρνει την μέγιστη τιμή της, για  $\alpha_0=0.1$ . Εμφανής η διαρροή του εδάφους περιμετρικά από τους πασσάλους και η μόνιμες παραμορφώσεις που έχει αναπτύξει. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 100.**



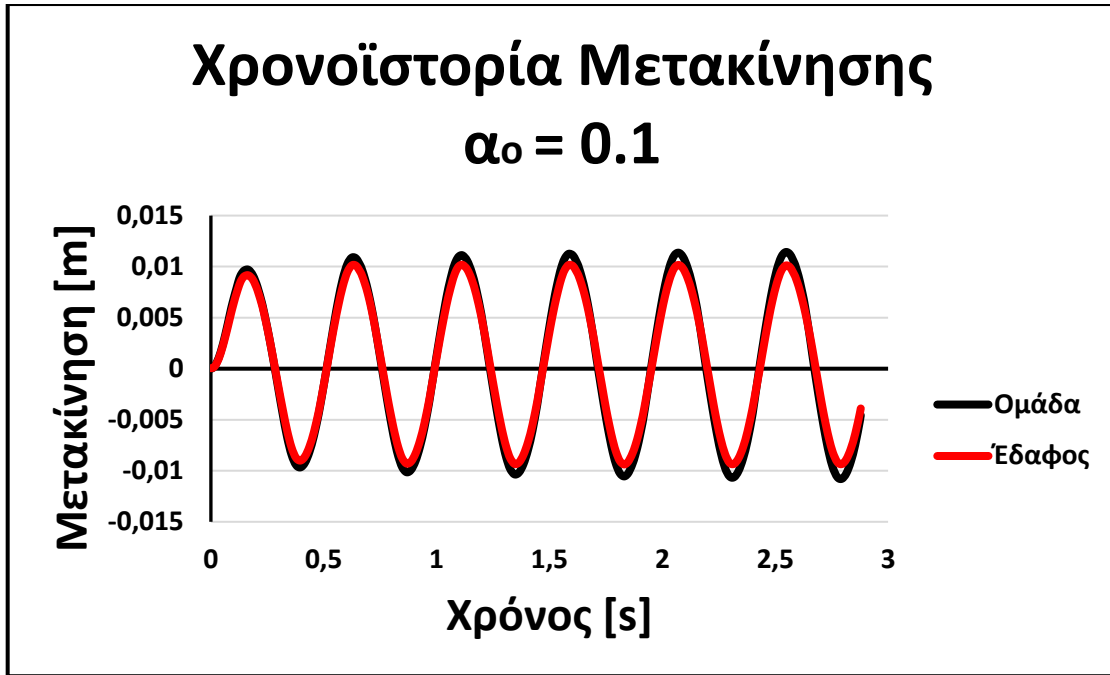
**Εικόνα 6.40** Ισοϋψείς του μέτρου της πλαστικής παραμόρφωσης την χρονική στιγμή που η μετακίνηση της κεφαλής της ομάδας παίρνει την μέγιστη τιμή της, για  $\alpha_0=0.8$ . Ως αποτέλεσμα των μετακινήσεων που έφτασαν σε μεγαλύτερο βάθος, έχουν μεταφερθεί και οι πλαστικές παραμορφώσεις βαθύτερα. Φαίνεται επίσης η εντονότερη παραμόρφωση του εδάφους κοντά στην επιφάνεια. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 100.**



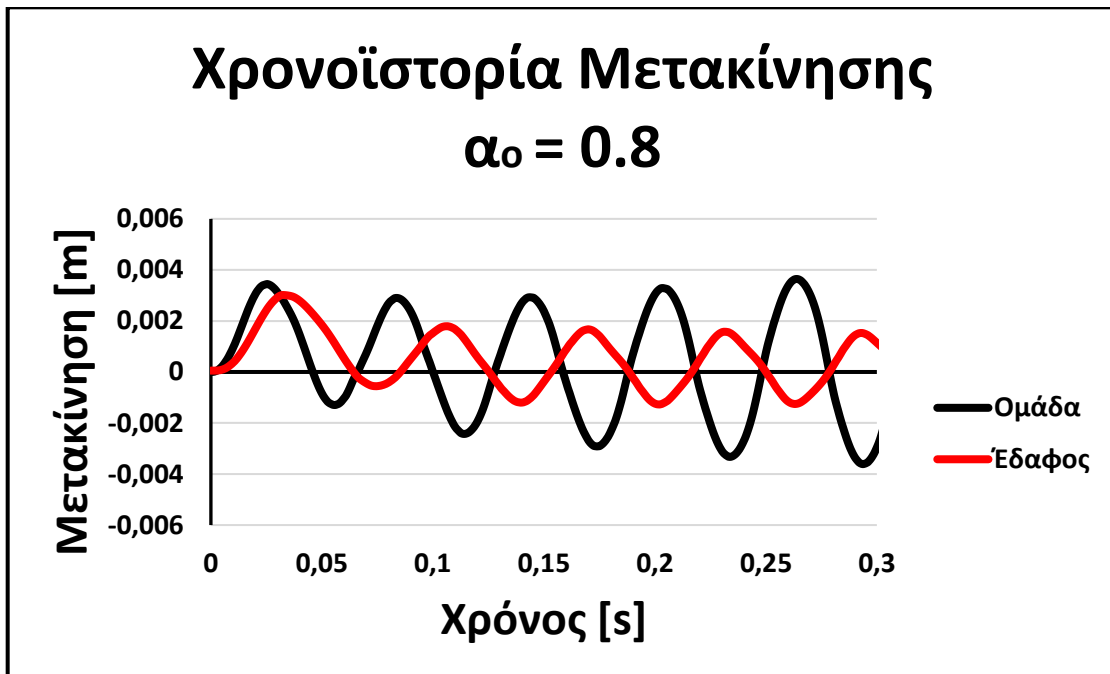
**Εικόνα 6.41** Λεπτομέρεια της Εικόνας 39, όπου φαίνονται καλύτερα οι πλαστικές παραμορφώσεις κοντά στην επιφάνεια για  $\alpha_0=0.1$ . Λόγω αλληλεπίδρασης ο κεντρικός πάσσαλος έχει δεχτεί την μικρότερη καταπόνηση. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 100.**



**Εικόνα 6.42-** Λεπτομέρεια της εικόνας 40, όπου φαίνονται καλύτερα οι πλαστικές παραμορφώσεις κοντά στην επιφάνεια για  $\alpha_0=0.8$ . Εμφανώς εντονότερη η καταπόνηση του εδάφους συγκριτικά με την περίπτωση  $\alpha_0=0.1$ . Εδώ η κίνηση του εδάφους εντός της πασσαλομάδας σε αντίθετη φάση με αυτήν, οδήγησε σε διαρροή και το έδαφος περιμετρικά του μεσαίου πασσάλου. **Συντελεστής μεγέθυνσης παραμορφώσεων = 100.**

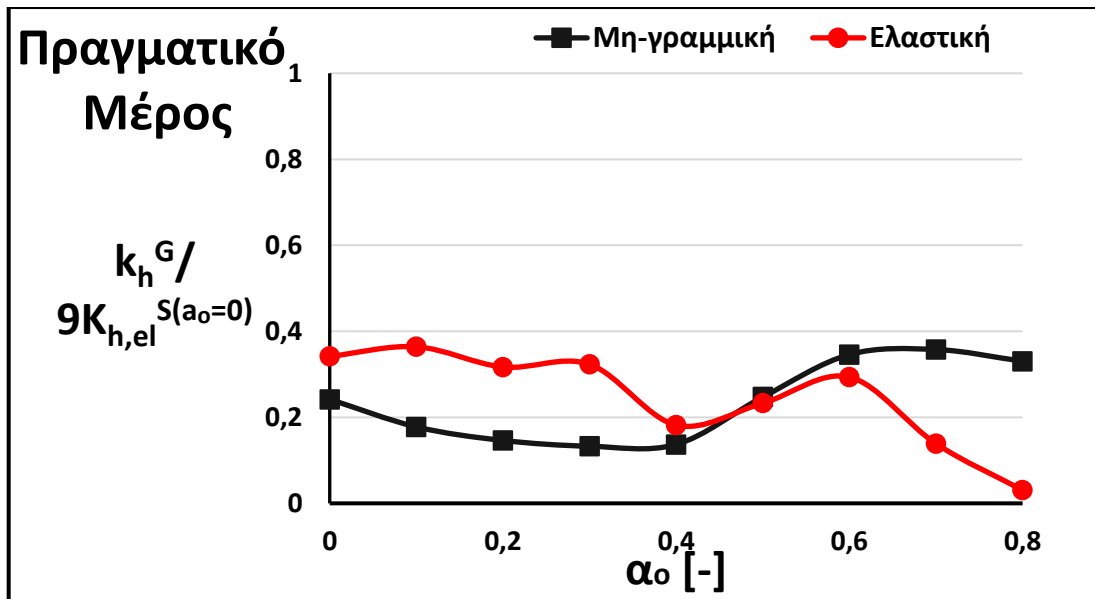


*Εικόνα 6.43- Χρονοϊστορία μετακίνησης της κορυφής της πασσαλομάδας και ενός σημείου του εσωτερικού εδάφους κοντά στην επιφάνεια. Η κίνηση των 2 είναι σε φάση, γεγονός που όπως φάνηκε και στα στιγμιότυπα οδηγεί σε ηπιότερες παραμορφώσεις.*

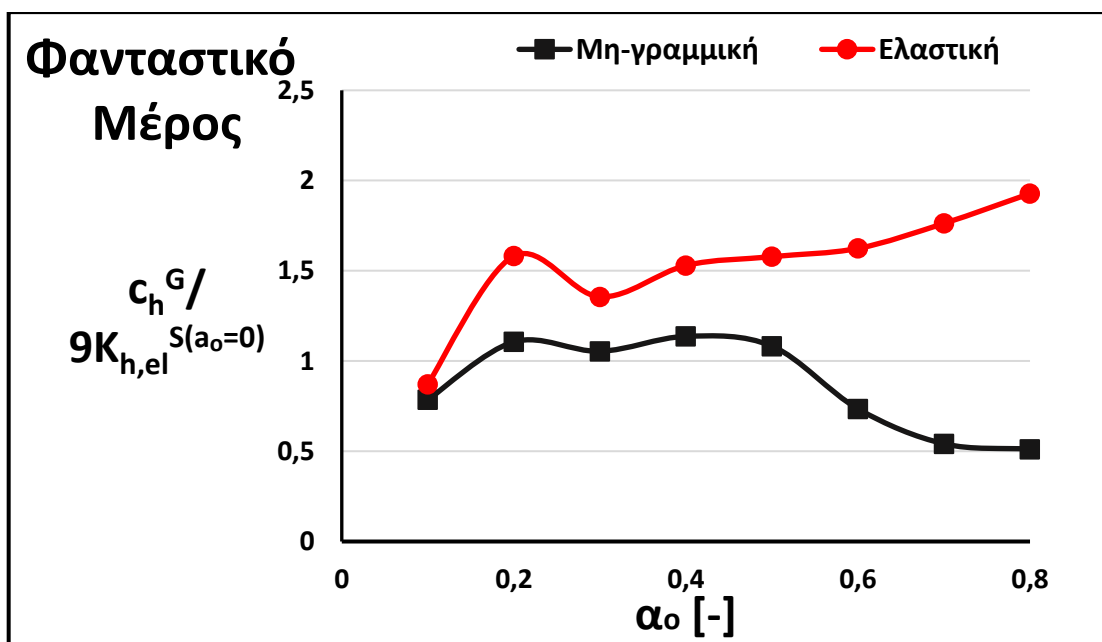


*Εικόνα 6.44- Χρονοϊστορία μετακίνησης της κορυφής της πασσαλομάδας και ενός σημείου του εσωτερικού εδάφους κοντά στην επιφάνεια. Η κίνηση των 2 είναι σε αντίθετη φάση, κάτι που εξηγεί τις εντονότερες μόνιμες παραμορφώσεις που ανέπτυξε το έδαφος κοντά στην επιφάνεια, για διέγερση  $\alpha_0=0.8$ , καθώς εμφανίζονται φαινόμενα κρούσης του πασσάλου πάνω στο έδαφος.*

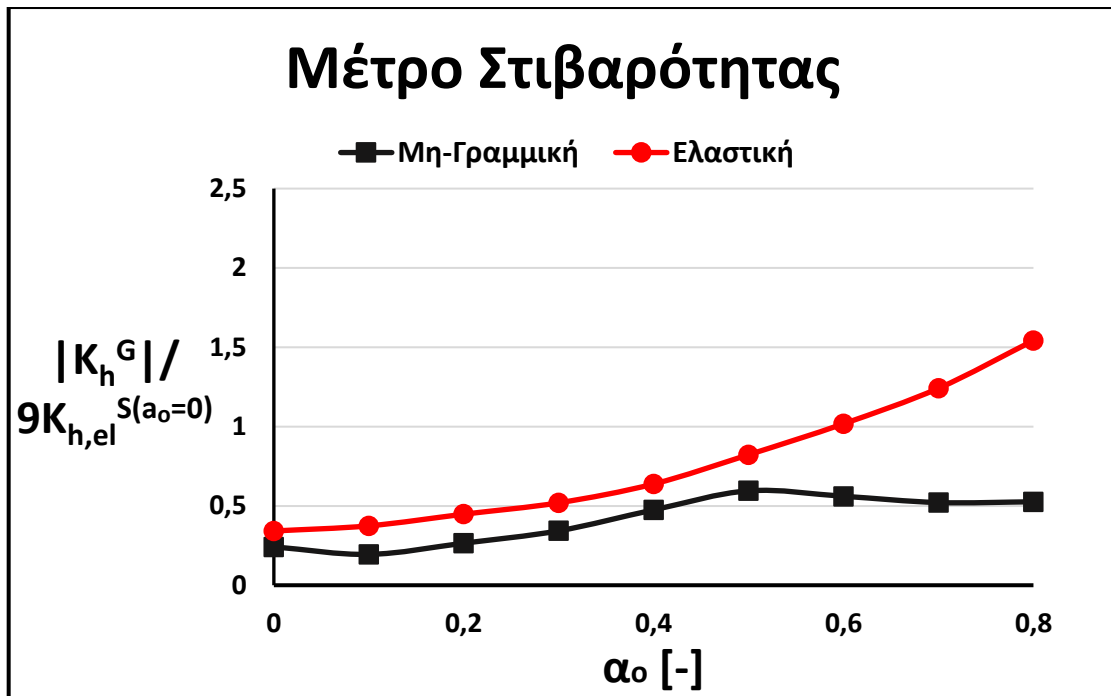




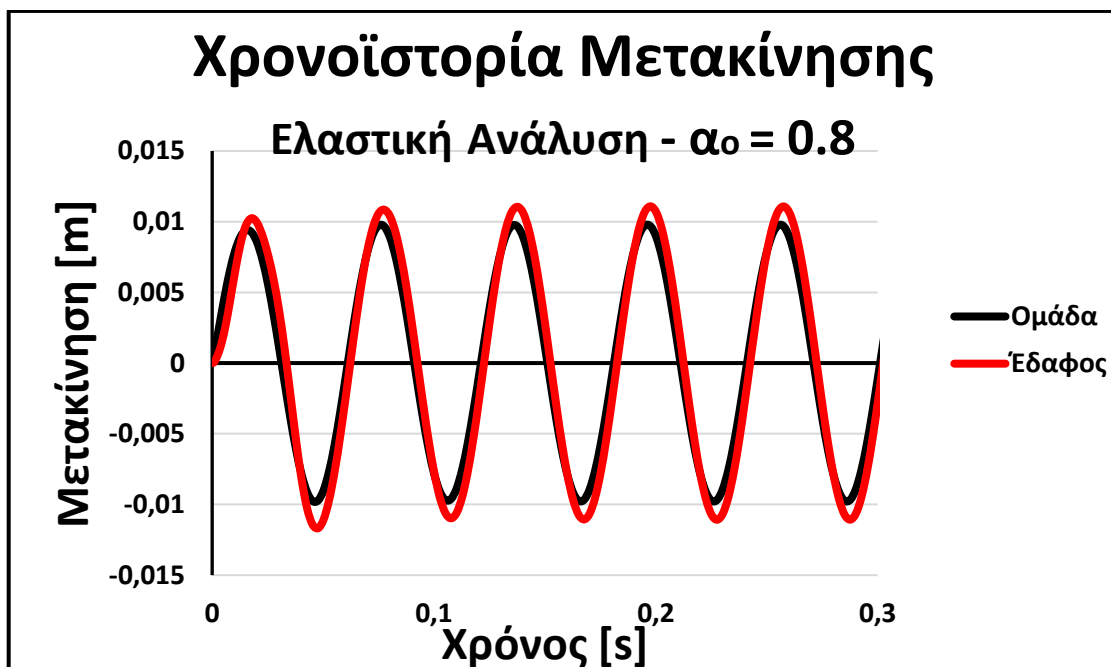
**Εικόνα 6.45-** Εξέλιξη του πραγματικού μέρους της σύνθετης στιβαρότητας της πασσαλομάδας συναρτήσεως της συχνότητας διέγερσης, κανονικοποιημένου ως προς το άθροισμα των στατικών, ελαστικών στιβαροτήτων. Στις χαμηλές συχνότητες η μη-γραμμικότητα μειώνει τις τιμές στο μισό. Σε υψηλές συχνότητες, το ανελαστικό σύστημα παρουσιάζεται πιο «άκαμπτο», αποτέλεσμα είτε των λίγων κύκλων φόρτισης, είτε του εδάφους ενδιάμεσα στους πασσάλους που στην ελαστική ανάλυση κινείται σε φάση με αυτούς, ενώ στην ανελαστική αντίθετα, δημιουργώντας αδρανειακή «αντίσταση».



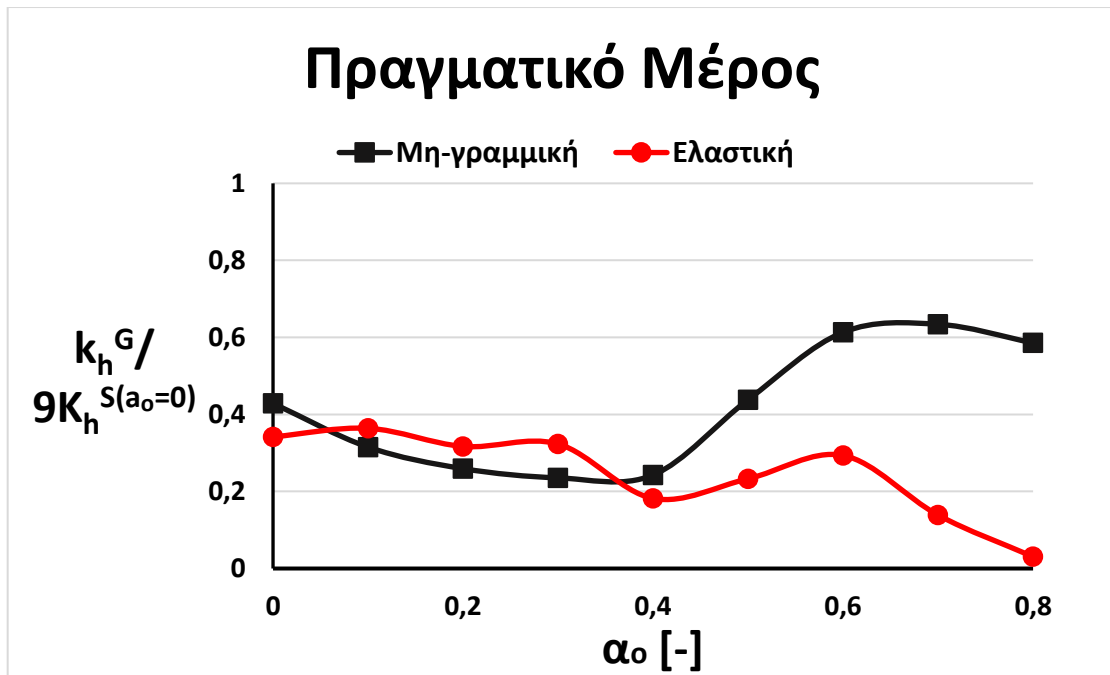
**Εικόνα 6.46-** Εξέλιξη του φανταστικού μέρους της σύνθετης στιβαρότητας της πασσαλομάδας συναρτήσεως της συχνότητας διέγερσης, κανονικοποιημένου ως προς το άθροισμα των στατικών, ελαστικών στιβαροτήτων. Εδώ η μη-γραμμική συμπεριφορά μειώνει σε κάθε συχνότητα τις τιμές με μέγιστη διαφορά στις υψηλές συχνότητες. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μειωμένης απόσβεσης ακτινοβολίας, αφού στο ανελαστικό σύστημα το έδαφος «βλέπει» για ταλάντωση της πηγής μόνο το τμήμα που αντιστοιχεί στην ελαστική του αποτόνωση. Το γεγονός αυτό οδηγεί το ανελαστικό σύστημα και σε «ελαστική» συμπεριφορά, μειώνοντας και την υστερητική απόσβεση ύστερα από τον πρώτο κύκλο φόρτισης.



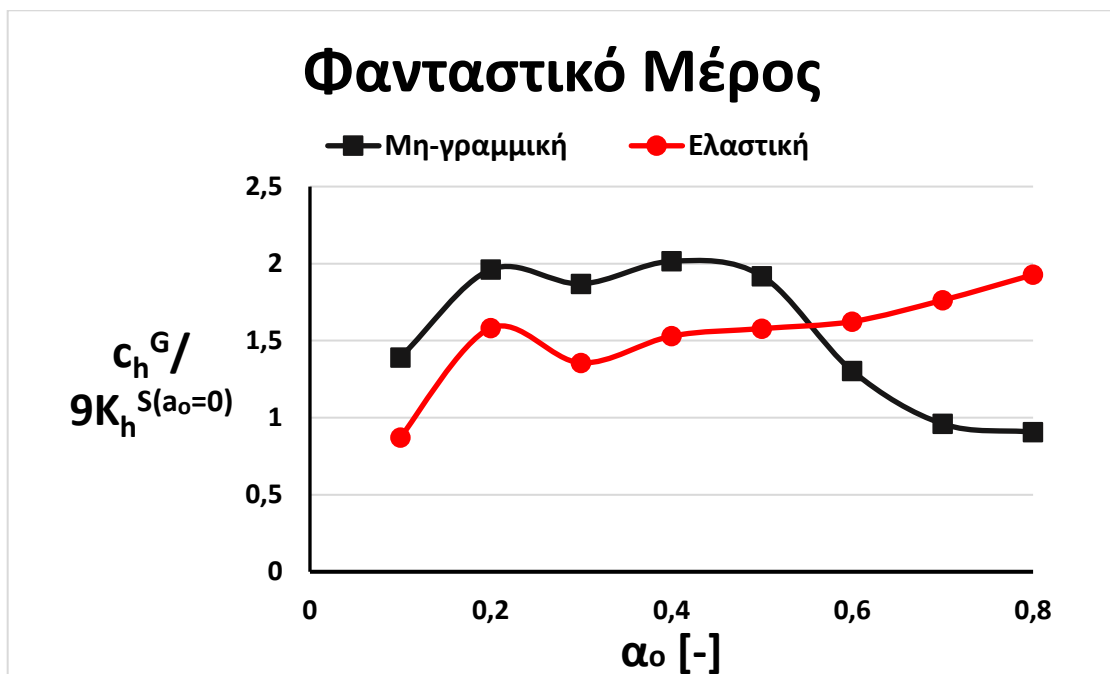
**Εικόνα 6.47-** Εξέλιξη του μέτρου της σύνθετης στιβαρότητας της πασσαλομάδας συναρτημένης της συχνότητας διέγερσης, κανονικοποιημένου ως προς το άθροισμα των στατικών, ελαστικών στιβαροτήτων. Σε αντίθεση με την κατακόρυφη διέγερση, εδώ η ελαστική συμπεριφορά παραμένει πιο «δύσκαμπτη» σε κάθε συχνότητα φόρτισης. Σημαντικότερη είναι η επίδραση της μη-γραμμικότητας στις υψηλές συχνότητες, λόγω της δραστηκής μείωσης του φανταστικού μέρους, αποτέλεσμα κυρίως της μειωμένης απόσβεσης ακτινοβολίας.



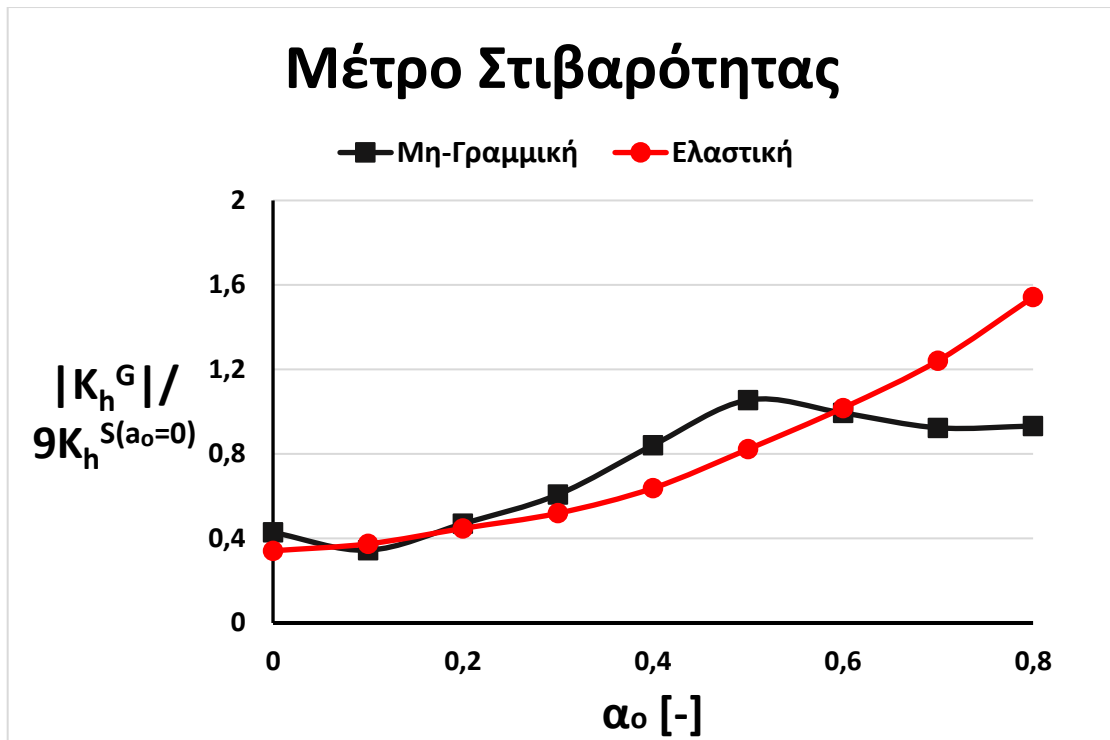
**Εικόνα 6.48-** Χρονοϊστορία μετακίνησης της κορυφής της πασσαλομάδας και ενός σημείου του εσωτερικού εδάφους κοντά στην επιφάνεια, για ελαστική ανάλυση και  $\alpha_0=0.8$ . Η κίνηση των 2 είναι σε φάση, γεγονός που όπως φάνηκε και στο διάγραμμα του πραγματικού μέρους, οδηγεί σε μείωση της «ακαμψίας» του ελαστικού συστήματος.



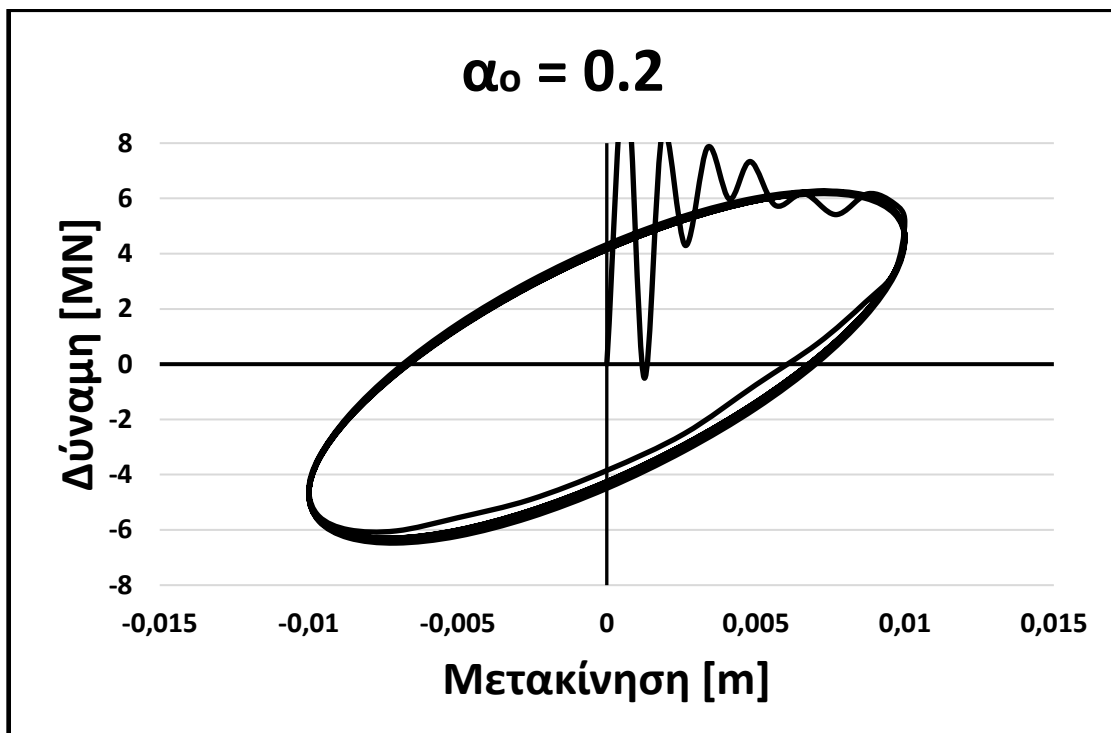
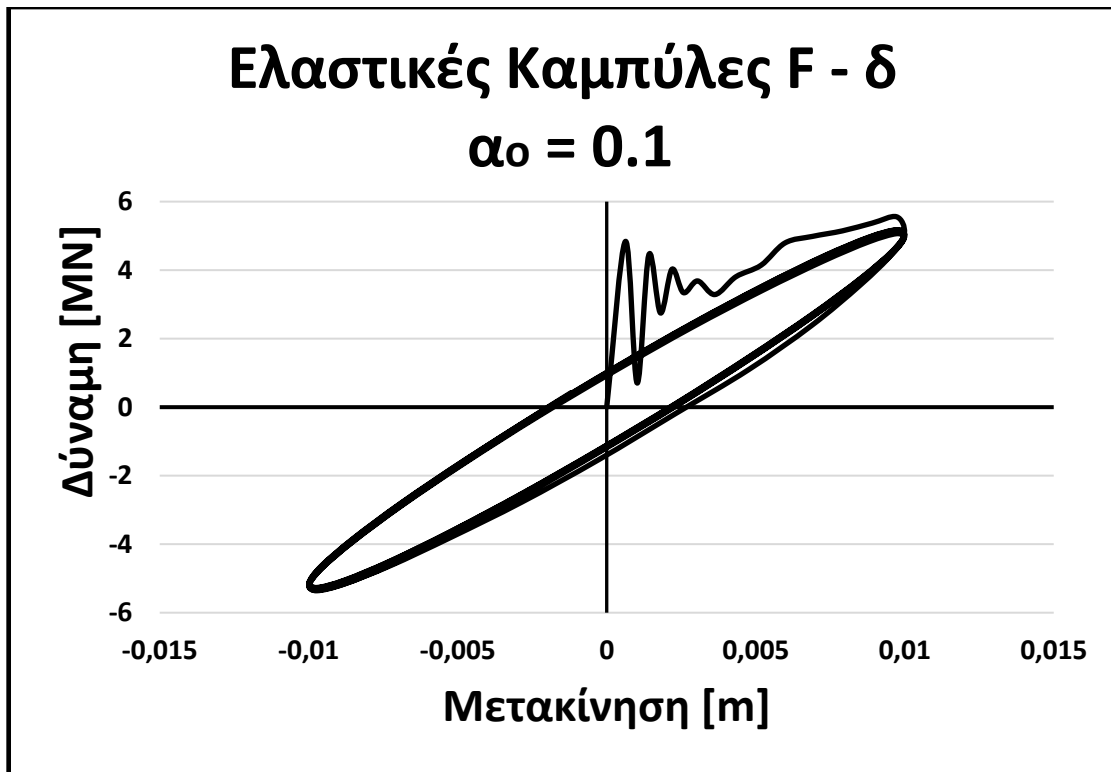
**Εικόνα 6.45α** Εξέλιξη του πραγματικού μέρους της σύνθετης στιβαρότητας της πασσαλομάδας συναρτήσεως της συχνότητας διέγερσης, κανονικοποιημένου ως προς το άθροισμα των στατικών στιβαροτήτων του αντίστοιχου επιπέδου φόρτισης. Στις χαμηλές συχνότητες η μη-γραμμικότητα οδηγεί σε αποδοτικότητα μεγαλύτερη από αυτή του ελαστικού συστήματος. Σε υψηλές συχνότητες, το ανελαστικό σύστημα παρουσιάζεται πιο «άκαμπτο», αποτέλεσμα είτε των λίγων κύκλων φόρτισης, είτε του εδάφους ενδιάμεσα στους πασσάλους που στην ελαστική ανάλυση κινείται σε φάση με αυτούς, ενώ στην ανελαστική αντίθετα, δημιουργώντας αδρανειακή «αντίσταση».



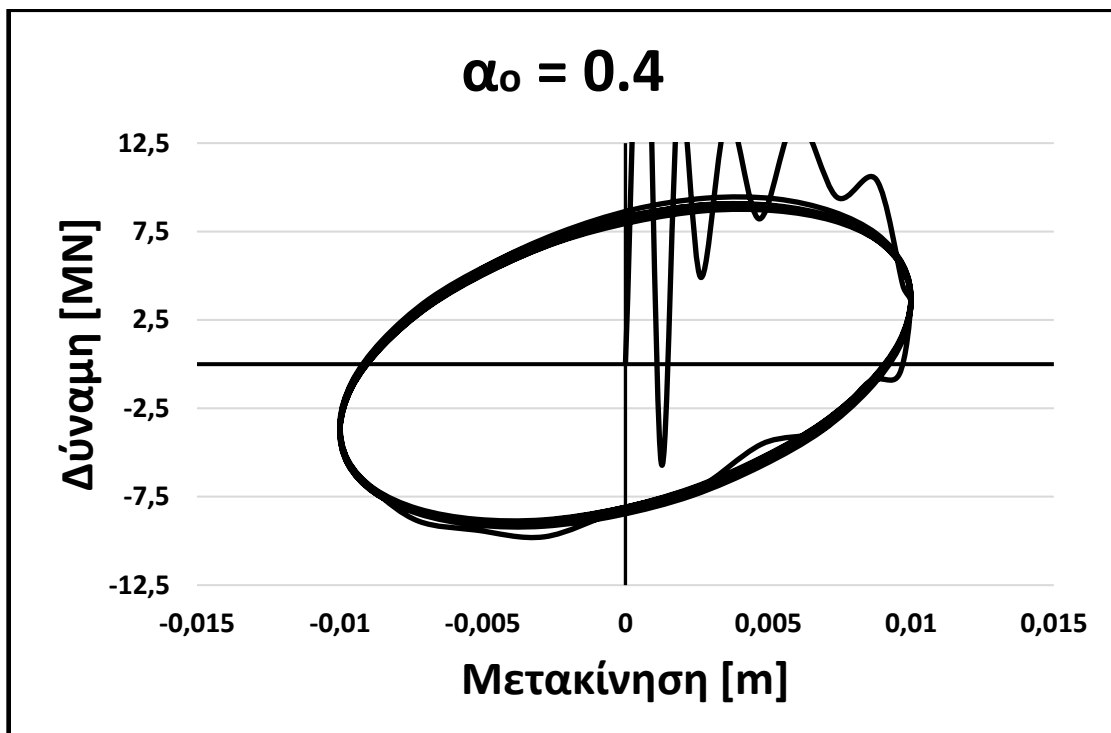
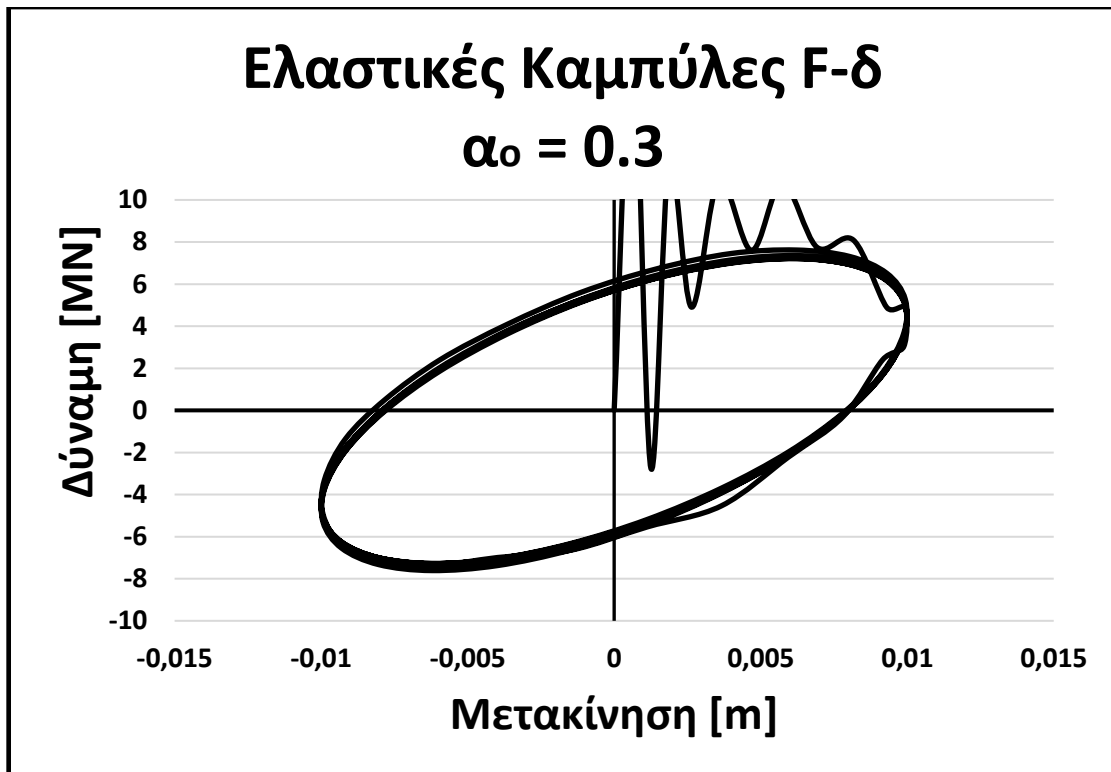
**Εικόνα 6.46α** Εξέλιξη του φανταστικού μέρους της σύνθετης στιβαρότητας της πασσαλομάδας συναρτήσεως της συχνότητας διέγερσης, κανονικοποιημένου ως προς το άθροισμα των στατικών στιβαροτήτων του αντίστοιχου επιπέδου φόρτισης.



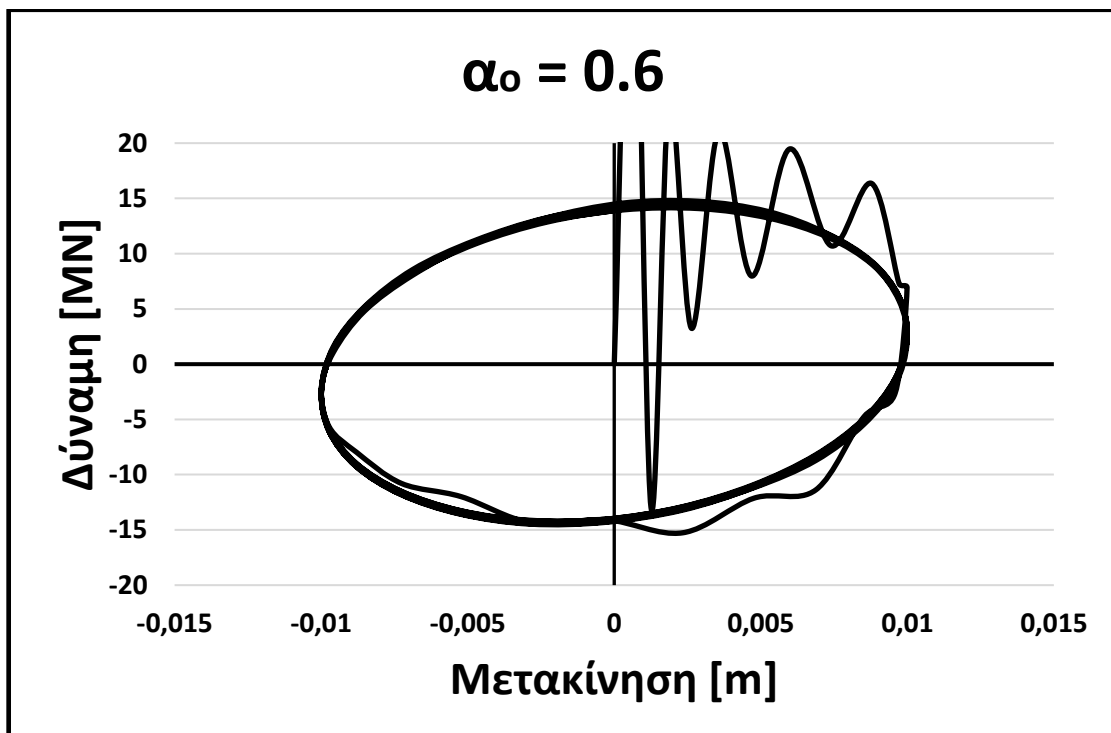
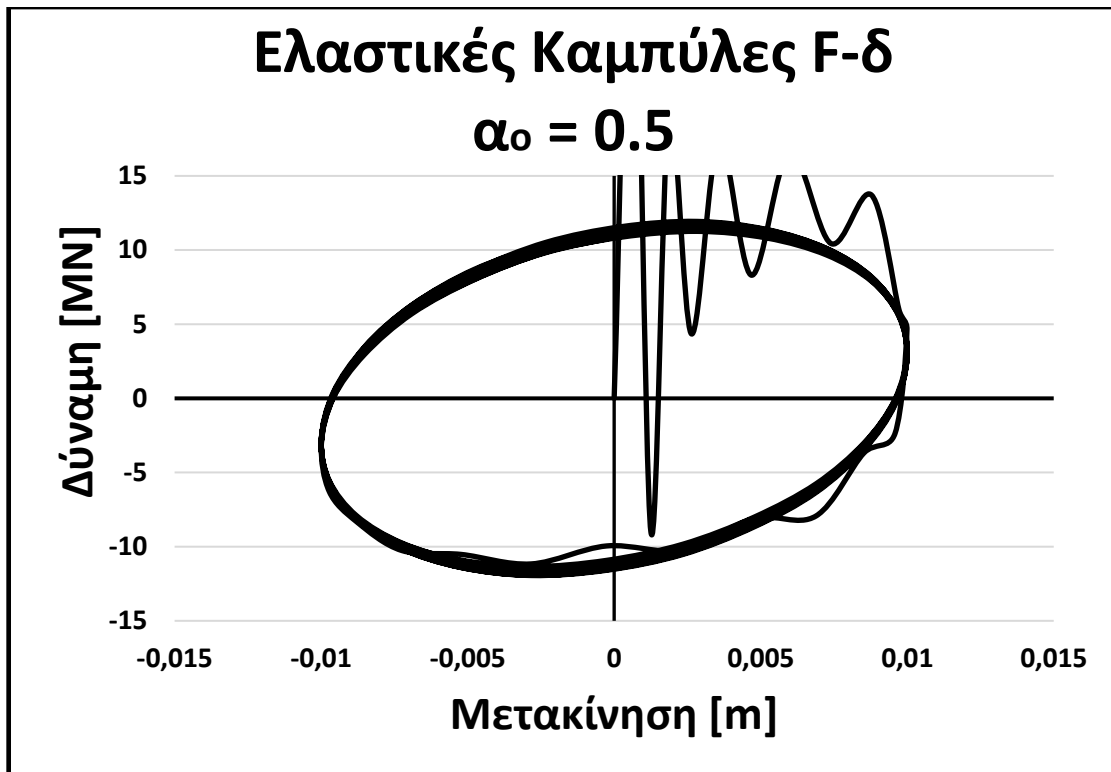
**Εικόνα 6.47-** Εξέλιξη του μέτρου της σύνθετης στιβαρότητας της πασσαλομάδας συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης, κανονικοποιημένου ως προς το άθροισμα των στατικών στιβαροτήτων του αντίστοιχου επιπέδου φόρτισης. Το ανελαστικό σύστημα παρουσιάζει μεγαλύτερη αποδοτικότητα από το ελαστικό σε ένα πολύ μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Στις υψηλές συχνότητες τα αδρανειακά φαινόμενα επικρατούν και η έντονα μειωμένη απόσβεση ακτινοβολίας του ανελαστικού συστήματος, λόγω των μόνιμων παραμορφώσεων του εδάφους γύρω από τους πασσάλους, οδηγεί σε μεγαλύτερη αποδοτικότητα του ελαστικού συστήματος.



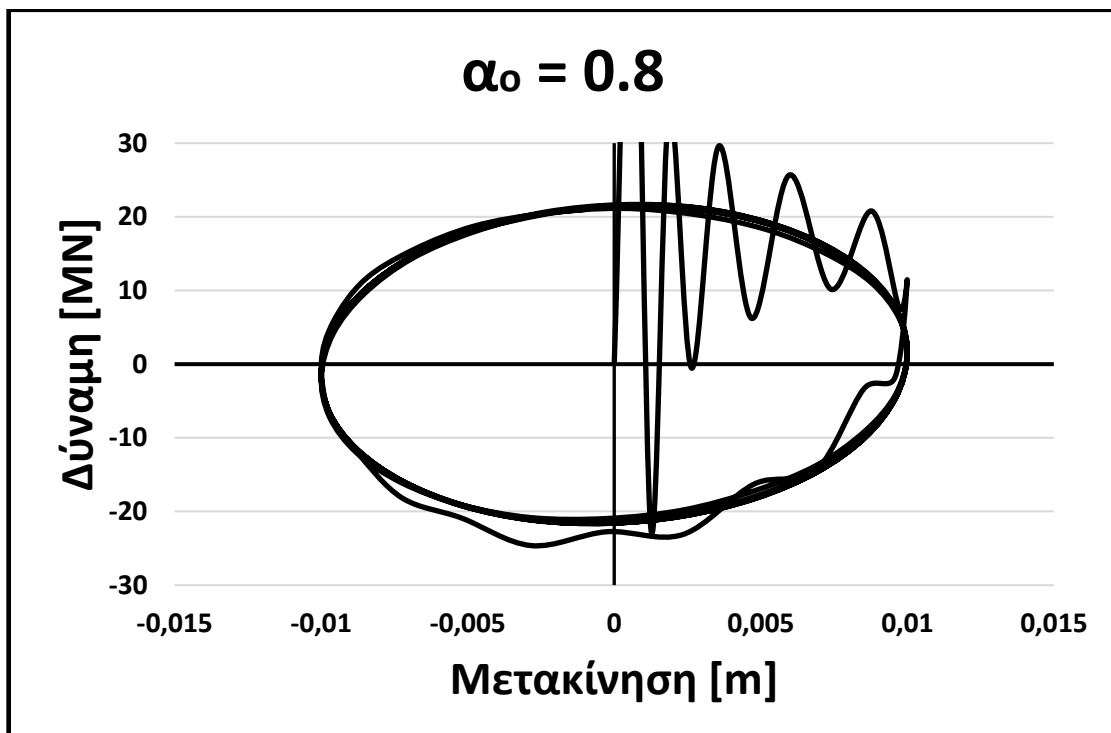
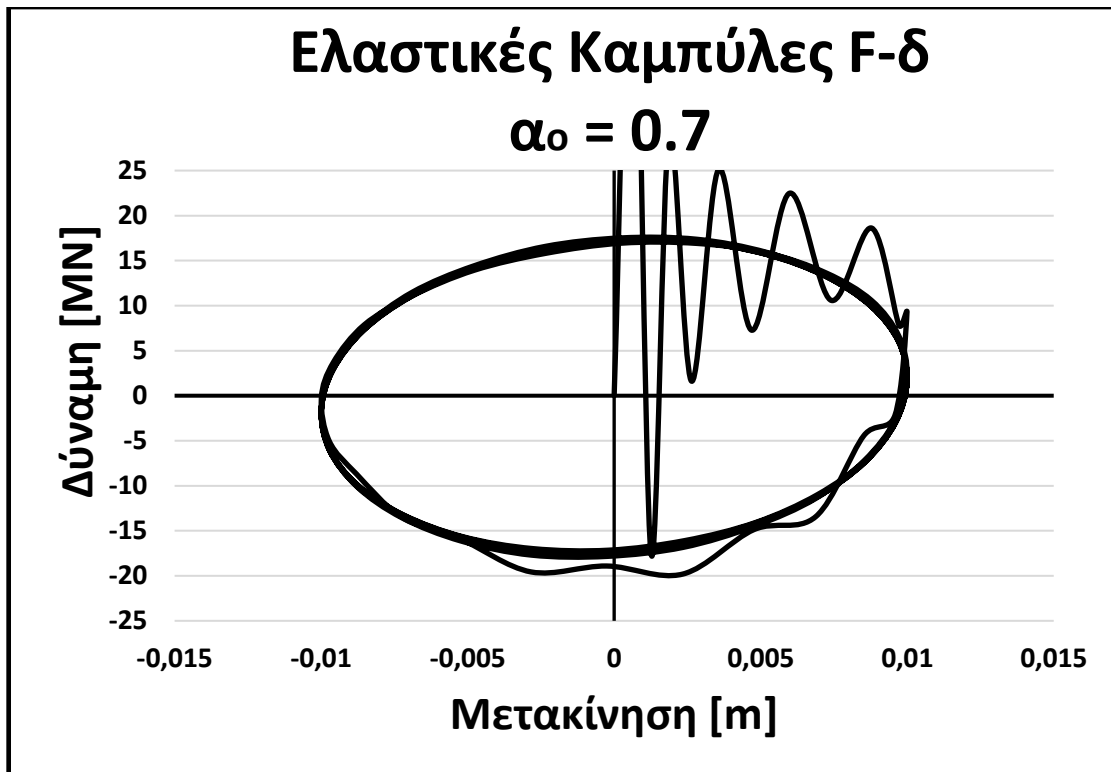
*Εικόνες 6.49-6.50 Καμπύλες Δύναμης-Μετακίνησης της ομάδας για οριζόντια δυναμική φόρτιση και ελαστική ανάλυση. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης, τόσο επικρατεί η απόσβεση ακτινοβολίας της οριζόντιας «ακαμψίας» του συστήματος, τείνοντας όλο και περισσότερο σε συμπεριφορά απλού αποσβεστήρα.*



*Εικόνες 6.51-6.52 Καμπύλες Δύναμης-Μετακίνησης της ομάδας για οριζόντια δυναμική φόρτιση και ελαστική ανάλυση. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης, τόσο επικρατεί η απόσβεση ακτινοβολίας της οριζόντιας «ακαμψίας» του συστήματος, τείνοντας όλο και περισσότερο σε συμπεριφορά απλού αποσβεστήρα.*

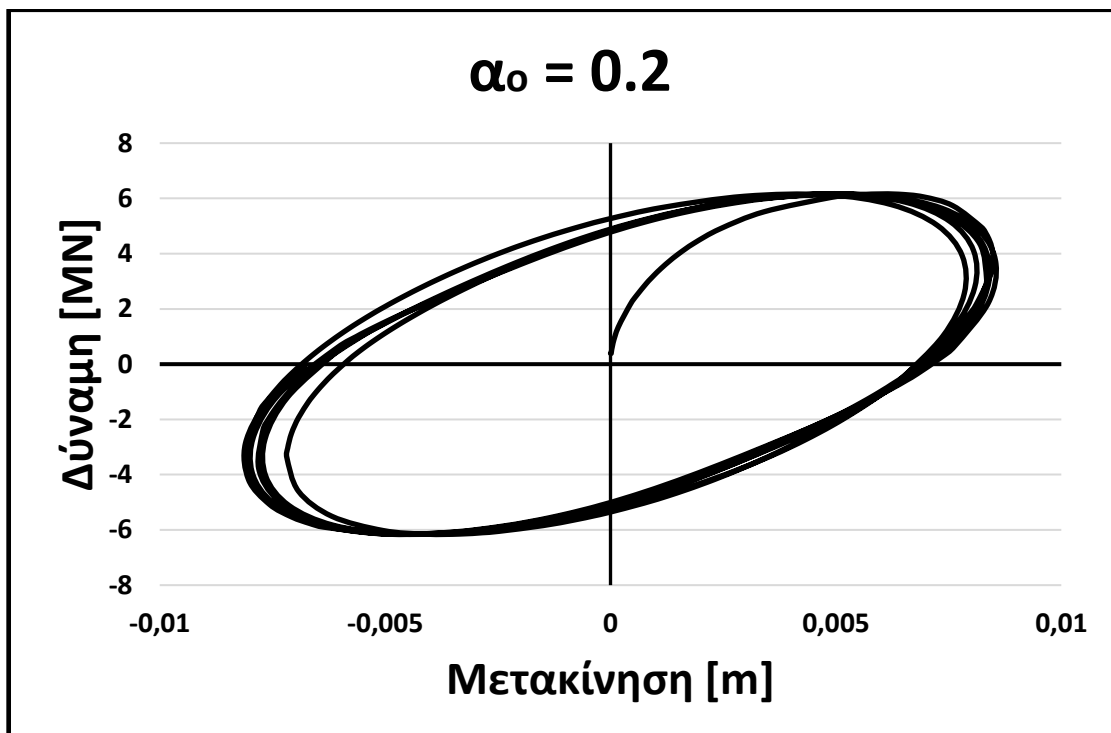
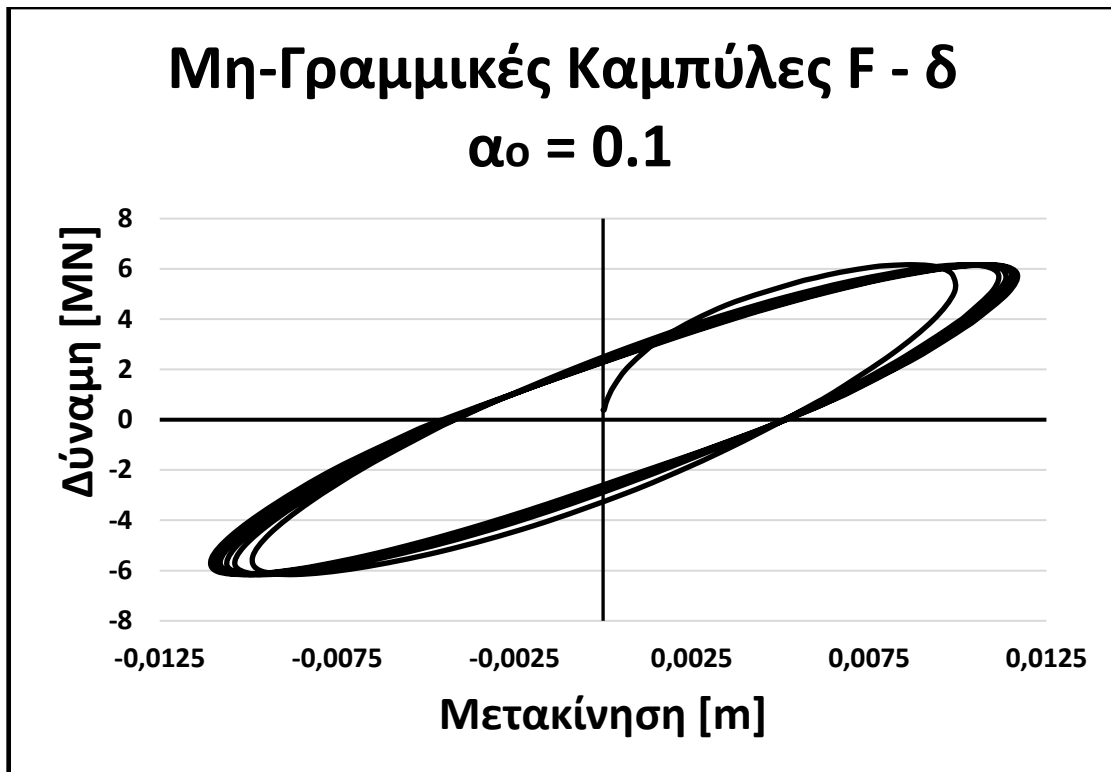


*Εικόνες 6.53-6.54 Καμπύλες Δύναμης-Μετακίνησης της ομάδας για οριζόντια δυναμική φόρτιση και ελαστική ανάλυση. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης, τόσο επικρατεί η απόσβεση ακτινοβολίας της οριζόντιας «ακαμψίας» του συστήματος, τείνοντας όλο και περισσότερο σε συμπεριφορά απλού αποσβεστήρα.*

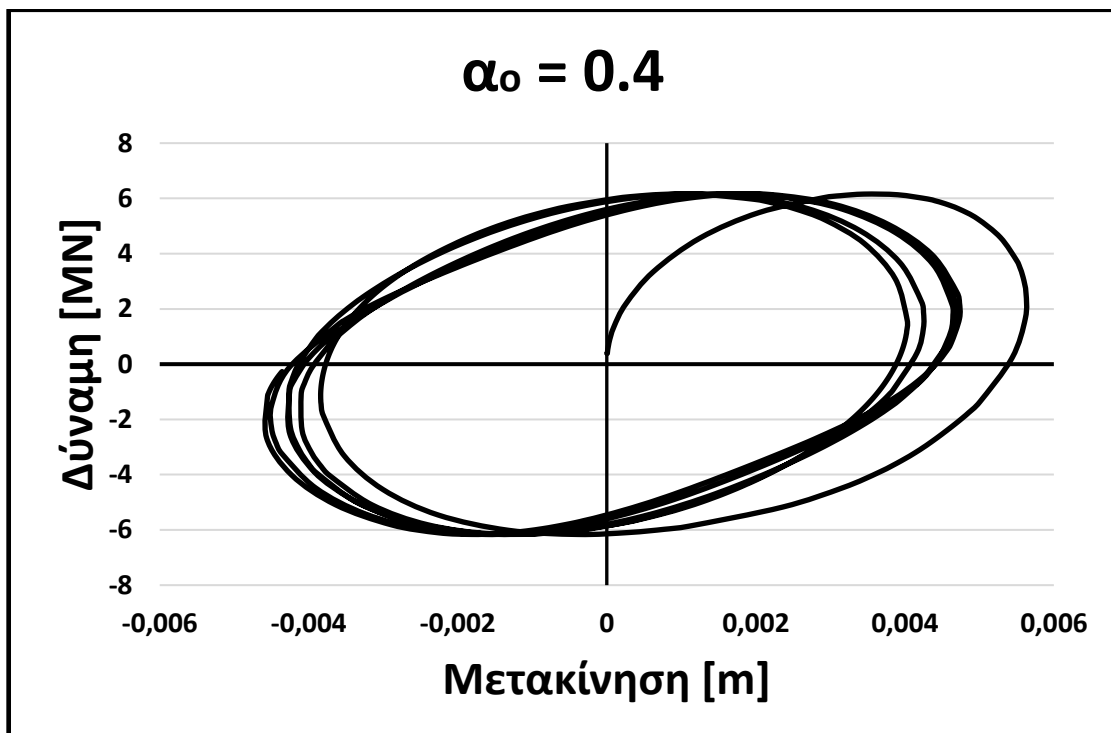
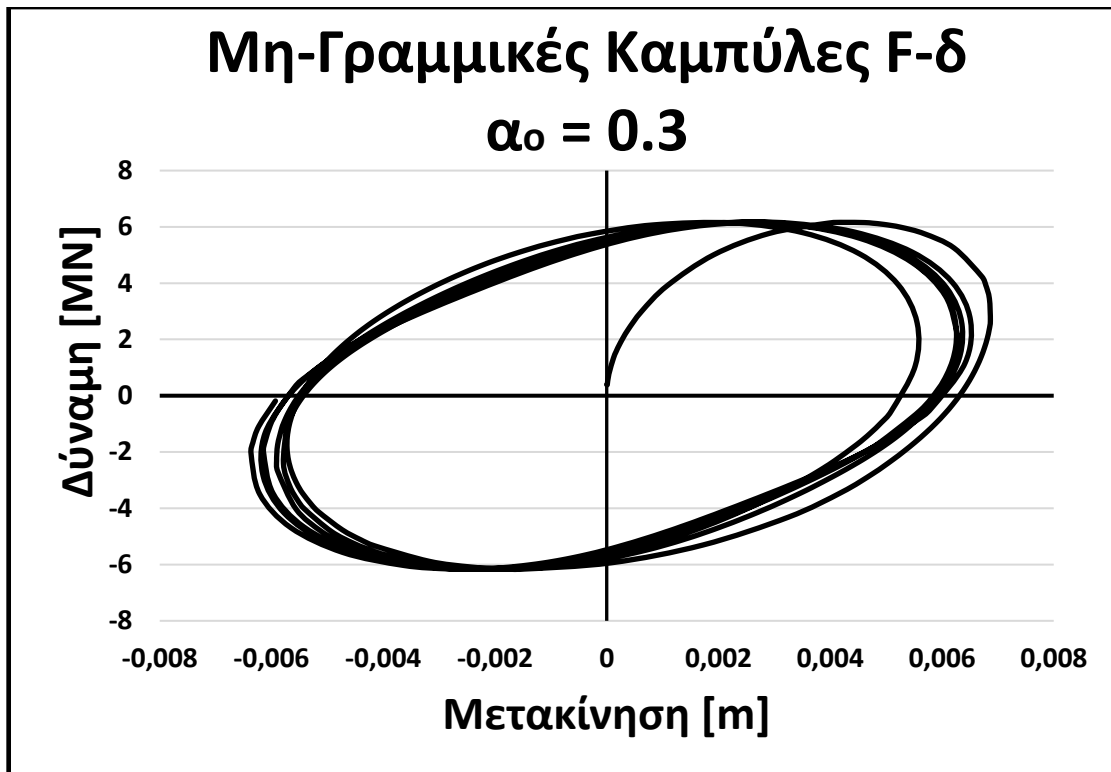


*Εικόνες 6.55-6.56 Καμπύλες Δύναμης-Μετακίνησης της ομάδας για οριζόντια δυναμική φόρτιση και ελαστική ανάλυση. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης, τόσο επικρατεί η απόσβεση ακτινοβολίας της οριζόντιας «ακαμψίας» του συστήματος, τείνοντας όλο και περισσότερο σε συμπεριφορά απλού αποσβεστήρα.*

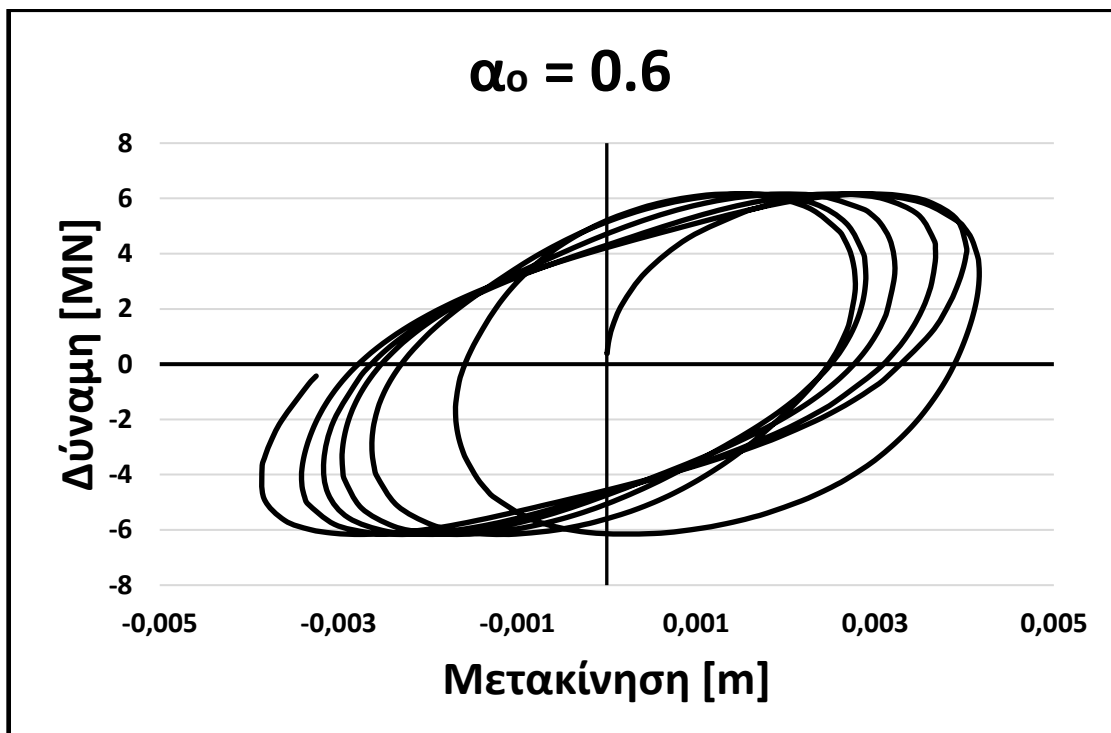
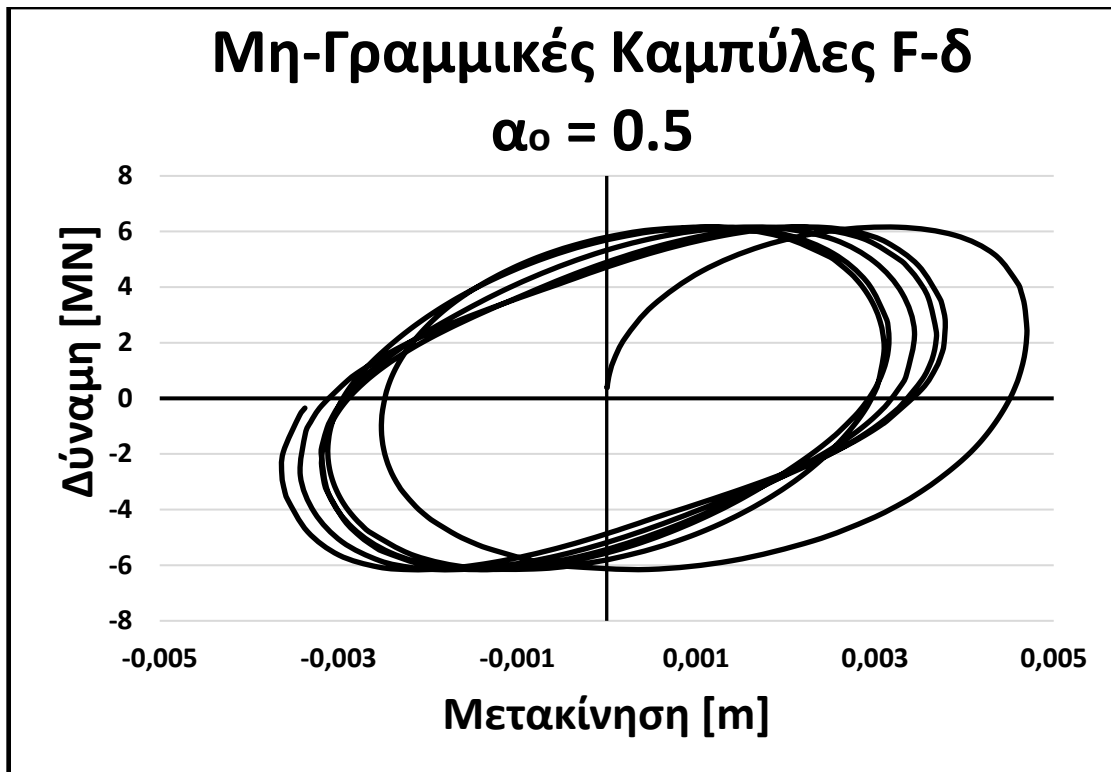




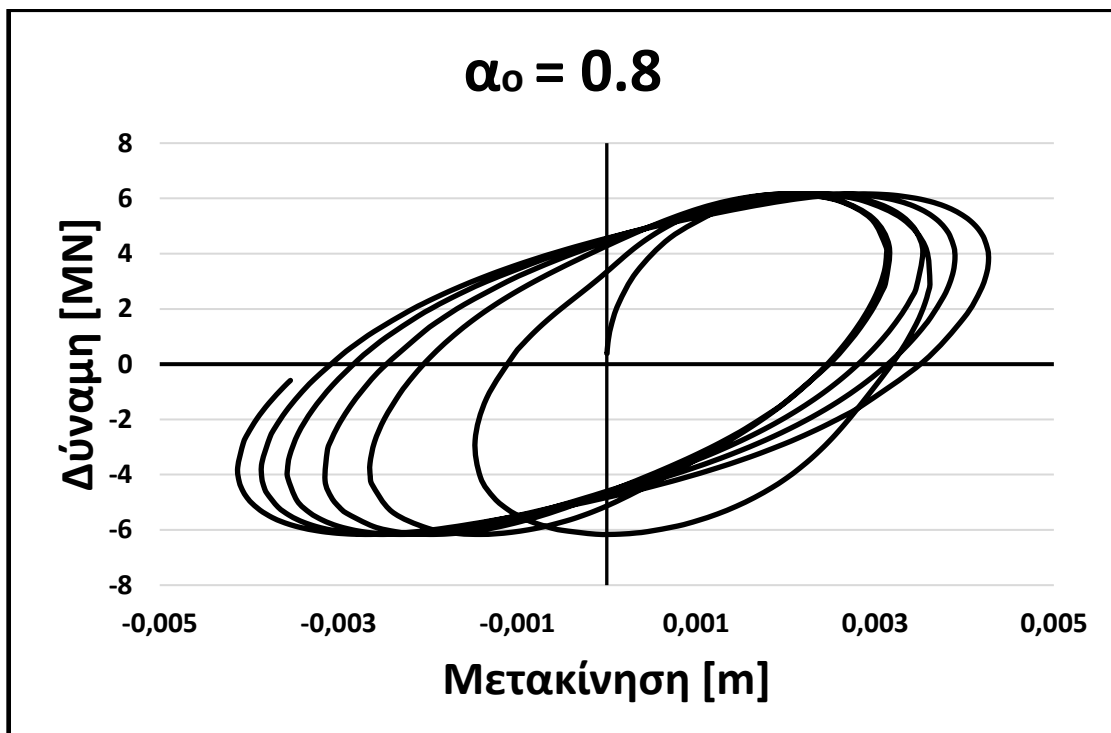
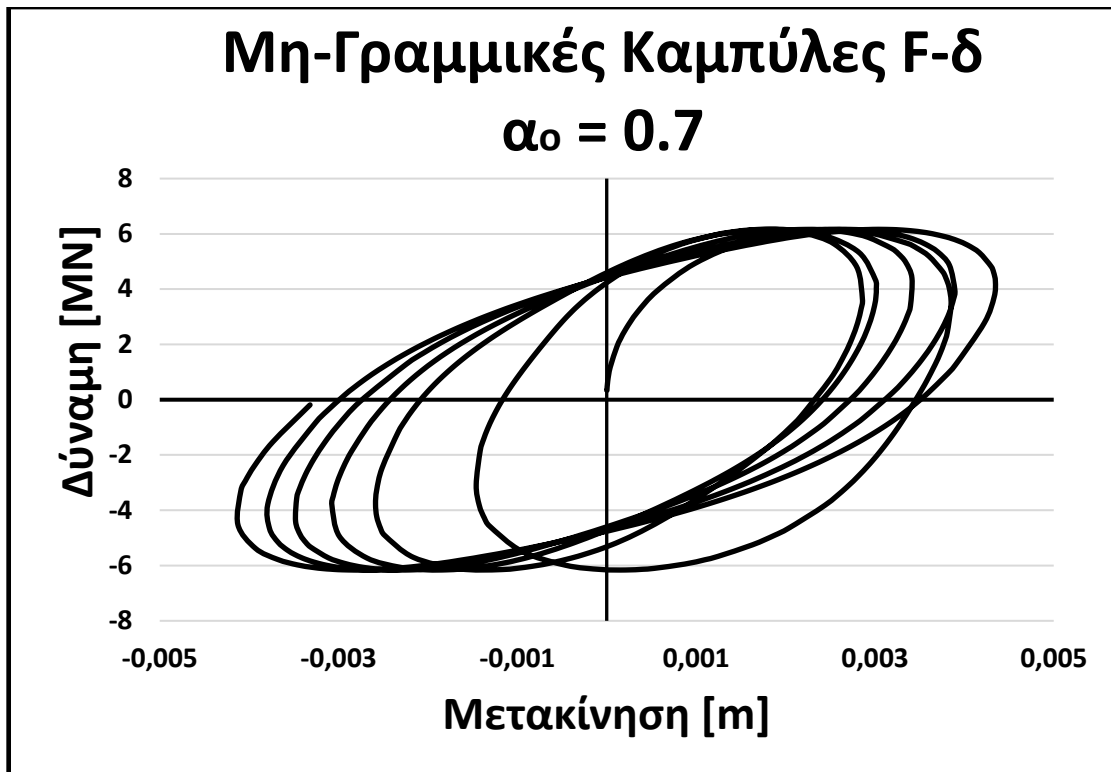
*Εικόνες 6.57-6.58 Καμπύλες Δύναμης-Μετακίνησης της ομάδας για οριζόντια δυναμική φόρτιση και μη-γραμμική ανάλυση. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης, τόσο επικρατεί η απόσβεση ακτινοβολίας της οριζόντιας «ακαμψίας» του συστήματος, όμως στις υψηλές συχνότητες είναι εμφανής η παρουσία ενεργού «ακαμψίας» στο σύστημα, κάτι που υποδηλώνεται από την ύπαρξη κλίσης στην καμπύλη.*



**Εικόνες 6.57-6.58** Καμπύλες Δύναμης-Μετακίνησης της ομάδας για οριζόντια δυναμική φόρτιση και μη-γραμμική ανάλυση. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης, τόσο επικρατεί η απόσβεση ακτινοβολίας της οριζόντιας «ακαμψίας» του συστήματος, όμως στις υψηλές συχνότητες είναι εμφανής η παρουσία ενεργού «ακαμψίας» στο σύστημα, κάτι που υποδηλώνεται από την ύπαρξη κλίσης στην καμπύλη.



**Εικόνες 6.57-6.58** Καμπύλες Δύναμης-Μετακίνησης της ομάδας για οριζόντια δυναμική φόρτιση και μη-γραμμική ανάλυση. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης, τόσο επικρατεί η απόσβεση ακτινοβολίας της οριζόντιας «ακαμψίας» του συστήματος, όμως στις υψηλές συχνότητες είναι εμφανής η παρουσία ενεργού «ακαμψίας» στο σύστημα, κάτι που υποδηλώνεται από την ύπαρξη κλίσης στην καμπύλη.



**Εικόνες 6.57-6.58** Καμπύλες Δύναμης-Μετακίνησης της ομάδας για οριζόντια δυναμική φόρτιση και μη-γραμμική ανάλυση. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης, τόσο επικρατεί η απόσβεση ακτινοβολίας της οριζόντιας «ακαμψίας» του συστήματος, όμως στις υψηλές συχνότητες είναι εμφανής η παρουσία ενεργού «ακαμψίας» στο σύστημα, κάτι που υποδηλώνεται από την ύπαρξη κλίσης στην καμπύλη.

## *Βιβλιογραφία*

- [I] Abaqus 6.13 Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp.
  
- [II] Anastasopoulos I., Gelagoti F., Kourkoulis R., Gazetas G. (2011). “Simplified Constitutive model for Simulation of Cyclic Response of Shallow Foundations: Validation against Laboratory Tests”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 137, No. 12, 1154–1168
  
- [III] Dobry, R. & Gazetas, G. 1988. “Simple method for dynamic stiffness and damping of floating pile groups”, *Geotechnique* 38, No. 4, 557-574
  
- [IV] Gazetas G. & Makris, N., 1991. “Dynamic Analysis of Pile-Soil-Pile Interaction. Part I: Analysis of Axial Vibrations,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 20, No. 2, pp. 115-132.
  
- [V] Gerolymos N., Gazetas G., 2005. “Phenomenological Model Applied to Inelastic Response of Soil-Pile Interaction Systems”, *Soils & Foundations*, Japanese Geotechnical Society, Vol. 45(4), p.p. 119-132.
  
- [VI] Kaynia, A. M. & Kausel, E. (1982a). Dynamic behaviour of pile groups. 2nd Inter. Conf. Numer. Meth. Offshore Piling, Austin, Texas, 509-532.
  
- [VII] Kaynia, A. M. & Kausel, E. (1982b). Dynamic stiffness and seismic response of pile groups. Research Report R82-03, Massachusetts Institute of Technology.
  
- [VIII] Kanellopoulos, K. 2017. “Static and dynamic interaction factors between piles: Elastic and inelastic soil”, Diploma Thesis, NTUA
  
- [IX] Mattes, N. S. & Poulos, H. G. 1969. “Settlement of Single Compressible Pile.” *J.S.M.F.D. ASCE*, vol. 95, SM1: 198-207

- [X] Makris N. & Gazetas G., 1993. "Displacement Phase Differences in a Harmonically Oscillating Pile," *Geotechnique*, Vol. 42, No. 1, pp. 135-150.
- [XI] Mindlin, R.D. 1936. "Force at a point in the Interior of a Semi-Infinite Solid." *Physics* 7: 195
- [XII] Poulos, H. G. & Davis, E. H. 1968. "The Settlement Behaviour of Single Axially-Loaded Incompressible Piles and Piers", *Geotechnique*, vol. 18: 451-471
- [XIII] Poulos, H. G. (1968). "Analysis of the settlement of pile groups." *Geotechnique*, vol. 18: 449-471
- [XIV] Poulos, H. G. & Mattes, N. S. 1969. "The Behaviour of Axially-Loaded End-Bearing Piles." *Geotechnique*, vol. 19: 285-300
- [XIV] Poulos, H. G. (1971). "Behavior of laterally-loaded piles II: pile groups", *J. Soil Mech. Found. Engrg. Div., ASCE*, 97(5), 733-751
- [XV] Trochanis, A. M., Bielak, J., and Christiano, P. 1991. "Three-Dimensional Nonlinear Study of Piles", *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 117(3): 429-447
- [XVI] Vucetic, M., and Dobry, R. 1991. "Effect of soil plasticity on cyclic response." *J. Geotech. Eng.*, 117(1), 89 – 107.
- [XVII] Γκαζέτας, Γ. 2007, «Σημειώσεις ΕδαφοΔυναμικής», Σημειώσεις Μαθήματος, ΕΜΠ
- [XVIII] Γκαζέτας, Γ. 2017, «Αλληλεπίδραση Εδάφους-Θεμελίου-Κατασκευής», Εκδόσεις Τσότρας
- [XIX] Davies, T. G. and Budhu, M. (1986) "Nonlinear analysis of laterally loaded piles in heavily overconsolidated clays", *Geotechnique* Vol. 36 No. 4, pp. 527-538.

