



Διπλωματική Εργασία

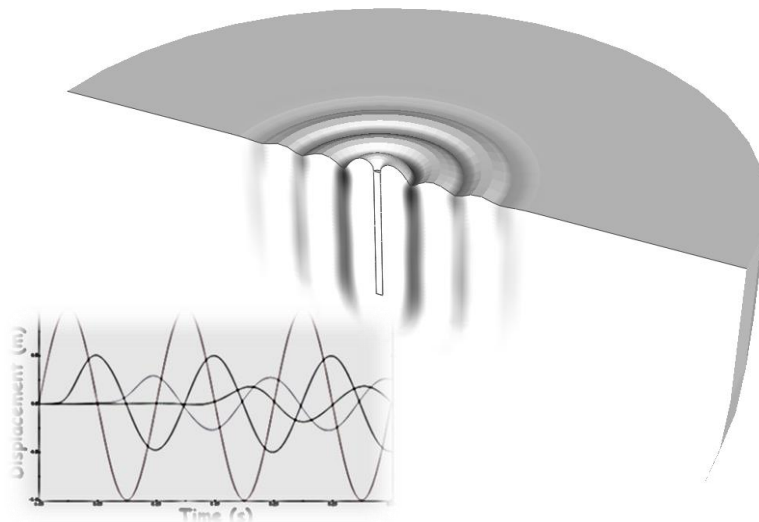
**Κωνσταντίνος Κανελλόπουλος**

Επιβλέπων:

**Καθηγητής Γ. Γκαζέτας**

Νοέμβριος 2017

Στατικοί και δυναμικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης μεταξύ πασσάλων:  
Ελαστικό και μη ελαστικό έδαφος



Static and dynamic interaction factors between piles:  
Elastic and inelastic soil

Diploma Thesis

**Konstantinos Kanellopoulos**

Supervisor:

**Professor G. Gazetas**

November 2017







## **Ευχαριστίες**

*Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε κάποιους ανθρώπους που ήταν κοντά μου όλο αυτό το διάστημα.*

*Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Γ. Γκαζέτα για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου πρόσφερε αμέριστα καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Κυρίως, όμως, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω, γιατί παρακολουθώντας τη διδασκαλία του τα τελευταία χρόνια, πιστεύω πως έμαθα να σκέφτομαι και να προσεγγίζω ένα οποιοδήποτε πρόβλημα Πολιτικού Μηχανικού με έναν διαφορετικό, απ' ότι είχα συνηθίσει, τρόπο, που στηρίζεται στην απλή λογική και την κριτική σκέψη.*

*Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την Φ. Γελαγώτη, που ήταν πάντα πρόθυμη να απαντήσει στις όποιες απορίες είχα σχετικά με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus) που χρησιμοποίησα, καθώς και τους Ρ. Κουρκουλή, Ε. Γεωργίου και Μ. Λόλη που ο καθένας με τη βοήθειά του συνέβαλε στην ταχύτερη περάτωση της εργασίας μου.*

*Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω και τους δικούς μου ανθρώπους (συγγενείς, φίλους κτλ) για την στήριξή τους, παρ' όλο τον ελάχιστο χρόνο που τους αφιέρωσα.*



# Πίνακας Περιεχομένων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγικά στοιχεία .....	11
1.1.1 Σκοπός της εργασίας .....	11
1.1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	11
1.1.3 Δομή της εργασίας .....	12
1.1.4 Καταστατικό προσομοίωμα εδάφους .....	12
1.2 Πρόγραμμα υπολογισμού των ελαστικών δυσκαμψιών ομάδας πασσάλων (Matlab) .....	14
Σχήματα .....	17

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

2.1 Στατικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης .....	25
2.1.1 Σκοπός .....	25
2.1.2 Τρισδιάστατο προσομοίωμα .....	25
2.1.3 Αποτελέσματα αναλύσεων – Σχολιασμός .....	27
2.1.4 Συμπεράσματα .....	28
2.2 Δυναμικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης .....	29
2.2.1 Ελαστικό έδαφος .....	29
2.2.1.1 Σκοπός .....	29
2.2.1.2 Τρισδιάστατα προσομοιώματα .....	29
2.2.1.3 Αποτελέσματα αναλύσεων – Σχολιασμός .....	31
2.2.1.4 Συμπεράσματα .....	34
2.2.2 Μη ελαστικό έδαφος .....	35
2.2.2.1 Σκοπός .....	35
2.2.2.2 Τρισδιάστατα προσομοιώματα .....	35
2.2.2.3 Αποτελέσματα αναλύσεων – Σχολιασμός .....	37
2.2.2.4 Συμπεράσματα .....	39
Σχήματα .....	41

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

3.1 Στατικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης .....	77
3.1.1 Σκοπός .....	77

3.1.2 Τρισδιάστατο προσομοίωμα .....	77
3.1.3 Αποτελέσματα αναλύσεων – Σχολιασμός .....	78
3.1.4 Συμπεράσματα .....	81
3.2 Δυναμικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης .....	82
3.2.1 Ελαστικό έδαφος .....	82
3.2.1.1 Σκοπός .....	82
3.2.1.2 Τρισδιάστατα προσομοιώματα .....	82
3.2.1.3 Αποτελέσματα αναλύσεων – Σχολιασμός .....	83
3.2.1.4 Συμπεράσματα .....	85
3.2.2 Μη ελαστικό εδάφος .....	86
3.2.2.1 Σκοπός .....	86
3.2.2.2 Τρισδιάστατα προσομοιώματα .....	86
3.2.2.3 Αποτελέσματα αναλύσεων – Σχολιασμός .....	87
3.2.2.4 Συμπεράσματα .....	90
Σχήματα .....	91

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΟΜΑΔΑ ΠΑΣΣΑΛΩΝ 2 x 2**

4.1 Ελαστικό έδαφος .....	123
4.1.1 Σκοπός .....	123
4.1.2 Τρισδιάστατο προσομοίωμα .....	123
4.1.3 Διαδικασία υπολογισμού των σύνθετων δυσκαμψιών της ομάδας .....	123
4.1.4 Αποτελέσματα – Σχολιασμός .....	125
4.1.5 Συμπεράσματα .....	126
4.2 Μη ελαστικό έδαφος .....	127
4.2.1 Σκοπός .....	127
4.2.2 Τρισδιάστατο προσομοίωμα .....	127
4.2.3 Διαδικασία υπολογισμού των σύνθετων δυσκαμψιών της ομάδας .....	127
4.2.4 Αποτελέσματα – Σχολιασμός .....	129
4.2.5 Συμπεράσματα .....	130
Σχήματα .....	131
Βιβλιογραφικές παραπομπές .....	143
Παράρτημα .....	147



# 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

---

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

### 1.2 Πρόγραμμα υπολογισμού των ελαστικών δυσκαμψιών ομάδας πασσάλων (Matlab)



# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

### 1.1.1 Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην κατανόηση των φαινομένων και των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα καθώς οι πάσσαλοι αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον έδαφος και εν συνεχεία μεταξύ τους, τόσο για στατικές συνθήκες φόρτισης (ελαστικό + μη ελαστικό έδαφος), όσο και για δυναμικές (ελαστικό + μη ελαστικό έδαφος).

### 1.1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Ως γνωστόν, για στατικές συνθήκες φόρτισης, η μετακίνηση ενός πασσάλου αυξάνεται αν αυτός βρίσκεται μέσα στο παραμορφωσιακό πεδίο που δημιουργείται από έναν γειτονικό πάσσαλο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η συνολική μετακίνηση την ομάδας πασσάλων, και συνεπώς να μειώνεται η δυσκαμψία της. Η αλληλεπίδραση αυτή, μεταξύ των πασσάλων, καθώς και ο υπολογισμός της μειωμένης δυσκαμψίας της ομάδας, ποσοτικοποιείται με τη βοήθεια των συντελεστών αλληλεπίδρασης (σ.α.) και της μεθόδου της επαλληλίας (superposition method) αντίστοιχα, που εισήγαγε πρώτος ο Η. Roulos (1968). Ως συντελεστής αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο πασσάλων ορίζεται ο λόγος της μετακίνησης του δεύτερου πασσάλου που προκαλείται από το παραμορφωσιακό πεδίο που δημιουργεί ο πρώτος πάσσαλος, προς τη μετακίνηση του πρώτου, ενώ με τη μέθοδο της επαλληλίας προσεγγίζεται η δυσκαμψία της ομάδας θεωρώντας την αλληλεπίδραση πασσάλων ανά ζεύγη, μη λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη την πιθανή επιρροή των ενδιάμεσων πασσάλων (μεταξύ του κάθε ζεύγους) στους σ.α. (Σημείωση: για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη μέθοδο της επαλληλίας και τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας της ομάδας βάσει αυτής της μεθόδου ανατρέξτε στην αντίστοιχη βιβλιογραφία που αναγράφεται στο τέλος).

Για δυναμικές συνθήκες φόρτισης, όμως, η δυσκαμψία της ομάδας δεν είναι απαραίτητο ότι θα μειώνεται. Καθώς μια ομάδα πασσάλων ταλαντώνεται (έστω κατακόρυφα) κύματα φεύγουν από τις περιφέρειες όλων των πασσάλων και προσκρούουν πάνω σε γειτονικούς πασσάλους. Αν μια τυχαία χρονική στιγμή που η ομάδα κινείται προς τα κάτω, τα κύματα που προσκρούουν πάνω στους πασσάλους τείνουν να παρασύρουν την ομάδα προς τα κάτω, τότε πράγματι η μετακίνησή της θα αυξηθεί και η κατακόρυφη δυσκαμψία της θα μειωθεί. Σε διαφορετική περίπτωση, όμως, που τα κύματα τείνουν να παρασύρουν προς τα πάνω την ομάδα, τότε η μετακίνησή της θα μειωθεί και η δυσκαμψία της θα αυξηθεί. Φαίνεται λοιπόν, ότι η δυναμική δυσκαμψία ομάδας πασσάλων επηρεάζεται άμεσα από την

απόσταση που απέχουν οι πάσσαλοι μεταξύ τους αλλά και από την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων στο έδαφος. Γίνεται αντιληπτή, έτσι, η πολυπλοκότητα που υπάρχει στον υπολογισμό των δυναμικών δυσκαμψιών ομάδας πασσάλων, σε σύγκριση με το αντίστοιχο στατικό πρόβλημα, πόσο μάλλον δε όταν ληφθεί υπόψη και η ανελαστικότητα του εδάφους.

### 1.1.3 Δομή της εργασίας

Προς αυτήν την κατεύθυνση, και με τη βοήθεια του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι κατακόρυφοι, στατικοί και δυναμικοί, σ.α., τόσο για πλήρως ελαστικό έδαφος, όσο και για εντόνως ανελαστικό. Στην συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι οριζόντιοι, στατικοί και δυναμικοί, σ.α., για ελαστικό και μη ελαστικό έδαφος. Τέλος, στο κεφάλαιο 4, επιχειρείται η αξιολόγηση της μεθόδου της επαλληλίας και των σ.α. για πλήρως ελαστικό έδαφος, μέσα από τη σύγκριση των δυσκαμψιών (κατακόρυφη, οριζόντια και περιστροφική) μιας ομάδας πασσάλων 2x2, που προκύπτουν από τη μέθοδο αυτή και από τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus). Ακόμα ελέγχεται αν η μέθοδος της επαλληλίας θα μπορούσε να εφαρμοστεί και στην περίπτωση που το έδαφος δεν συμπεριφέρεται ελαστικά.

(Σημείωση: η γεωμετρία του προβλήματος, οι ιδιότητες των υλικών, καθώς και όποιες παραδοχές έγιναν αναφέρονται σε κάθε κεφάλαιο)

### 1.1.4 Καταστατικό προσομοίωμα εδάφους

Στα επόμενα κεφάλαια, η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του εδάφους ακολουθεί κριτήριο διαρροής Von Mises με μη γραμμικό κινηματικό νόμο κράτυνσης και συσχετισμένο νόμο πλαστικής ροής. Το συγκεκριμένο καταστατικό προσομοίωμα περιγράφει με σχετική ακρίβεια την κρατυνόμενη συμπεριφορά του εδάφους και η επιφάνεια διαρροής του είναι ομαλή. Είναι ικανό να προσομοιάσει την πλάστιμη συμπεριφορά της αργίλου υπό αστράγγιστες συνθήκες, η οποία θεωρείται ανεξάρτητη από τη μέση ενεργό τάση.

Σύμφωνα με το κριτήριο διαρροής Von Mises, η εξέλιξη των τάσεων περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha,$$

όπου  $\sigma_0$  είναι η σταθερή τιμή της τάσης σε μηδενική πλαστική παραμόρφωση και  $\alpha$  είναι η συνιστώσα της κινηματικής κράτυνσης που ορίζει την εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής στον χώρο των τάσεων.

Η ακόλουθη συνάρτηση  $F$  ορίζει την ανεξάρτητη των τάσεων επιφάνεια διαρροής:

$$F = f(\sigma - \alpha) - \sigma_0.$$

Με δεδομένη τη συσχετισμένη πλαστική ροή, ο ρυθμός πλαστικής ροής δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \bar{\epsilon}^{pl} \partial F / \partial \sigma,$$

όπου  $\bar{\epsilon}^{pl}$  είναι ο ισοδύναμος ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης.

Ο νόμος εξέλιξης των τάσεων αποτελείται από δύο συνιστώσες :

**(α)** έναν ισοτροπικό νόμο κράτυνσης, ο οποίος περιγράφει την μεταβολή της ισοδύναμης τάσης, που ορίζει το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής  $\sigma_0$ , ως μία συνάρτηση

της πλαστικής παραμόρφωσης :

$$\sigma_0 = \sigma_0 + Q_\infty (1 - e^{-b \bar{\epsilon}^{pl}}),$$

όπου η παράμετρος  $Q_\infty$  ορίζει τη μέγιστη μεταβολή του μεγέθους της επιφάνειας διαρροής, ενώ η παράμετρος  $b$  ορίζει το ρυθμό αυτής της μεταβολής με την  $\bar{\epsilon}^{pl}$ . Για  $Q_\infty=0$ , το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής παραμένει σταθερό και το προσομοίωμα εκφυλίζεται σε μη γραμμικό μοντέλο κινηματικής κράτυνσης.

**(β)** έναν μη γραμμικό κινηματικό νόμο κράτυνσης, που περιγράφει την εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής στο τασικό πεδίο (όπως ορίζεται μέσω της παραμέτρου  $\alpha$ ). Ο κινηματικός νόμος κράτυνσης ορίζεται ως υπέρθεση ενός καθαρά κινηματικού όρου (γραμμικός νόμος κράτυνσης Ziegler) και ενός όρου χαλάρωσης, που εισάγει τη μη γραμμική συμπεριφορά. Η εξέλιξη της κινηματικής συνιστώσας της τάσης διαρροής περιγράφεται ως εξής:

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

όπου  $C$  είναι το αρχικό μέτρο της κινηματικής κράτυνσης ( $C = \sigma_y/\epsilon_y = E$ ) και η παράμετρος  $\gamma$  καθορίζει τον ρυθμό μείωσης της κινηματικής κράτυνσης με την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης.

Η εξέλιξη των συνιστωσών της κινηματικής και της ισοτροπικής κράτυνσης απεικονίζεται στα **Σχήματα 1.1 (α)** και **(β)** για μονοαξονική και πολυαξονική φόρτιση αντιστοίχως. Ο νόμος εξέλιξης για τη συνιστώσα της κινηματικής κράτυνσης υποδεικνύει ότι η παράμετρος  $\alpha$  εμπεριέχεται σε κύλινδρο ακτίνας :

$$\sqrt{\frac{2\alpha^S}{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{c}{\gamma}$$

όπου  $\alpha^S$  είναι το μέγεθος της παραμέτρου  $\alpha$  στον κορεσμό. Εφόσον η επιφάνεια διαρροής παραμένει φραγμένη, συμπεραίνεται πως οποιοδήποτε τασικό σημείο

πρέπει να βρίσκεται εντός κυλίνδρου ακτίνας  $\sqrt{(2/3)} \sigma_y$ , όπου  $\sigma_y$  η τάση διαρροής. Ομοίως σε μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις, οποιοδήποτε τασικό σημείο περιέχεται εντός κυλίνδρου ακτίνας  $\sqrt{(2/3)} (\sigma^s + \alpha^s)$ , όπου  $\sigma^s$  είναι η ισοδύναμη τάση που ορίζει το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής στις μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις.

Η μέγιστη τάση διαρροής για κορεσμένο έδαφος είναι:

$$\sigma_y = C/\gamma + \sigma_o$$

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

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

Επομένως, από τα παραπάνω προκύπτει :

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

## 1.2 Πρόγραμμα υπολογισμού ελαστικών δυσκαμψιών (Matlab)

Με αφορμή τη δημοσίευση των Dobry & Gazetas (1988) με τίτλο “Simple method for dynamic stiffness and damping of floating pile groups”, όπου προτείνονται απλοποιημένες σχέσεις για την εύρεση των κατακόρυφων και οριζόντιων σ.α. (σύντομη περιγραφή τους δίνεται στο Κεφάλαιο 2), αποφασίσθηκε να δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα, στην γλώσσα προγραμματισμού Matlab, το οποίο χρησιμοποιώντας τις σχέσεις αυτές και τη μέθοδο της επαλληλίας που προαναφέρθηκε, αλλά και κάποια δεδομένα εισόδου που καλείται να δώσει ο χρήστης, να υπολογίζει και να παρουσιάζει τις ελαστικές δυναμικές δυσκαμψίες (κατακόρυφη, οριζόντια και περιστροφική) ομάδας πασσάλων, καθώς και τη δύναμη που αναλαμβάνει ο κάθε πάσσαλος συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0 = \omega d/V_s$  ( $\omega$  = κυκλική συχνότητα ταλάντωσης,  $d$  = περίμετρος των πασσάλων,  $V_s$  = ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων), που αντιπροσωπεύει τη συχνότητα διέγερσης της ομάδας. Τα δεδομένα εισόδου, που πρέπει να δωθούν φαίνονται στο **Σχήμα 1.2** και είναι τα εξής:

- οι συντεταγμένες των κέντρων των πασσάλων (Coordinates of piles)
- οι κατακόρυφες δυναμικές (σύνθετες) δυσκαμψίες του μεμονομένου πασσάλου για τιμές του  $\alpha_0$  από 0 (στατικό πρόβλημα) ως 1, με βήμα 0.05 (Dynamic vertical complex-valued impedance of a single pile (kN/m))
- η διάμετρος των πασσάλων ( $d$  (m))
- το μέτρο ελαστικότητας των πασσάλων ( $E_p$  (kPa))
- το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ( $E_s$  (kPa))
- ο βαθμός αποσβέσεως  $\xi$  (ksi)

- η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων ( $V_s$  (m/s))
- το πάχος της εδαφικής στρώσης ( $H$  (m))
- ο λόγος poisson του εδάφους ( $\nu$ )
- το πλάτος του κατακόρυφου φορτίου (Amplitude of vertical load (kN))
- το πλάτος του οριζόντιου φορτίου (Amplitude of lateral load (kN))
- το πλάτος της ροπής (Amplitude of moment (kNm))
- η κατακόρυφη στατική δυσκαμψία του μεμονομένου πασσάλου (Static stiffness of a single pile (kN/m))

Η οριζόντια και η περιστροφική δυσκαμψία του μεμονομένου πασσάλου δεν χρειάζεται να δωθεί καθώς υπολογίζονται από τις σχέσεις, αντίστοιχα,

$$K_h^S = d \times E_s \times (E_p/E_s)^{0.21} \quad \text{και}$$

$$K_{rx}^S = 0.15 \times d^3 \times E_s \times (E_p/E_s)^{0.75}$$

Αφού δωθούν, λοιπόν, όλα τα δεδομένα εισόδου, πατώντας “Calculate!” εμφανίζονται τα διαγράμματα (έστω για ομάδα πασσάλων 2x2 με απόσταση  $s = 2d = 2\text{m}$  μεταξύ των πασσάλων) (**Σχήμα 1.3**). Κάτω αριστερά (Plan view of piles) παρουσιάζεται η κάτοψη της ομάδας. Στην πρώτη σειρά διαγραμμάτων (Vertical) παρουσιάζονται με τη σειρά το πραγματικό μέρος της κατακόρυφης δυσκαμψίας (ανοιγμένο με τον αριθμό των πασσάλων επί την κατακόρυφη στατική δυσκαμψία του μεμονομένου πασσάλου), το φανταστικό μέρος της (ανοιγμένο με την ίδια ποσότητα) και η δύναμη που αντιστοιχεί σε κάθε πάσσαλο (ανοιγμένη με το μέσο φορτίο που αντιστοιχεί σε κάθε πάσσαλο αν δεν ληφθεί υπόψη η μεταξύ τους αλληλεπίδραση). Αντίστοιχα, στη δεύτερη (Lateral) και την τρίτη (Rocking) σειρά παρουσιάζονται αδιαστατοποιημένα τα πραγματικά και φανταστικά μέρη των δυσκαμψιών, καθώς και η δύναμη που αναλαμβάνει ο κάθε πάσσαλος χωριστά συναρτήσει της παραμέτρου  $\alpha_0$ . Ακριβώς κάτω από το κουμπί “Calculate!” ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον πάσσαλο για τον οποίο θέλει να εμφανίζεται το διάγραμμα που δείχνει την δύναμη που αναλαμβάνει. Τέλος, με το κουμπί “Clear results”, καθαρίζονται όλα τα δεδομένα εισόδου, καθώς και τα διαγράμματα, ώστε να δώσει ο χρήστης νέες τιμές.

Σημειώσεις:

- το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να δεχθεί μέχρι και 9 πασσάλους, διότι κρίθηκε ότι ο αριθμός είναι ικανοποιητικός για την παρούσα εργασία. Σε περίπτωση που αυτό επιθυμηθεί, είναι εύκολο να τροποποιηθεί ο κώδικας ώστε να αυξηθεί ο αριθμός των πασσάλων.
- Στο τέλος του τεύχους (**Παράρτημα**) παρατίθεται τόσο ο κώδικας που υπολογίζει τις τιμές των διαγραμμάτων που αναφέρθηκαν, όσο και ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για το λεγόμενο “Graphical User Interface” (GUI)



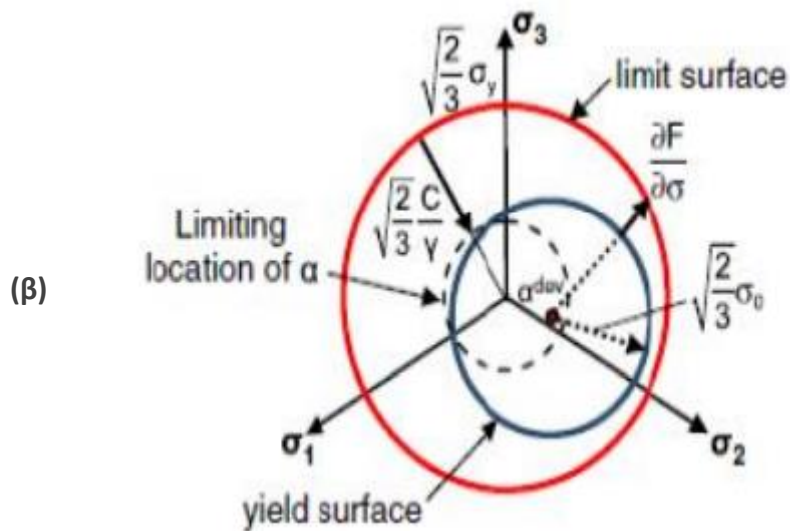
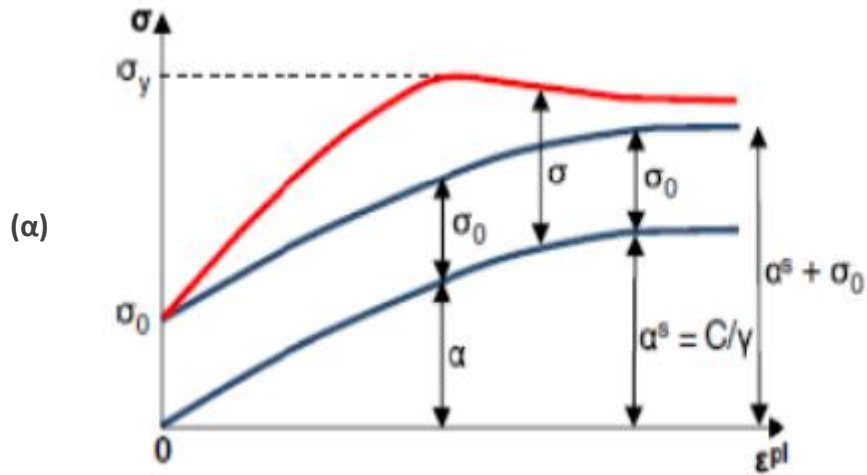


# Σχήματα 1<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

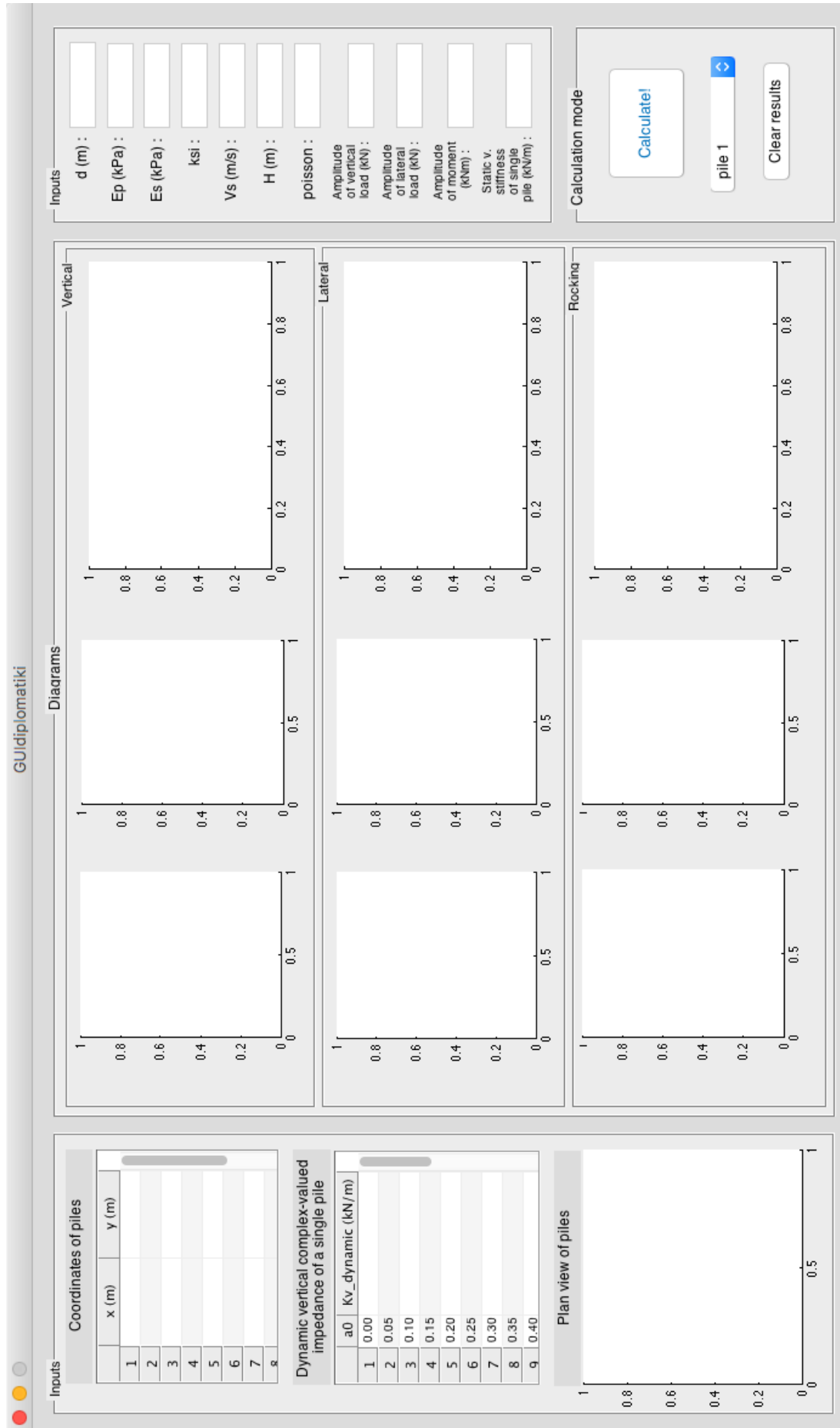
---

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

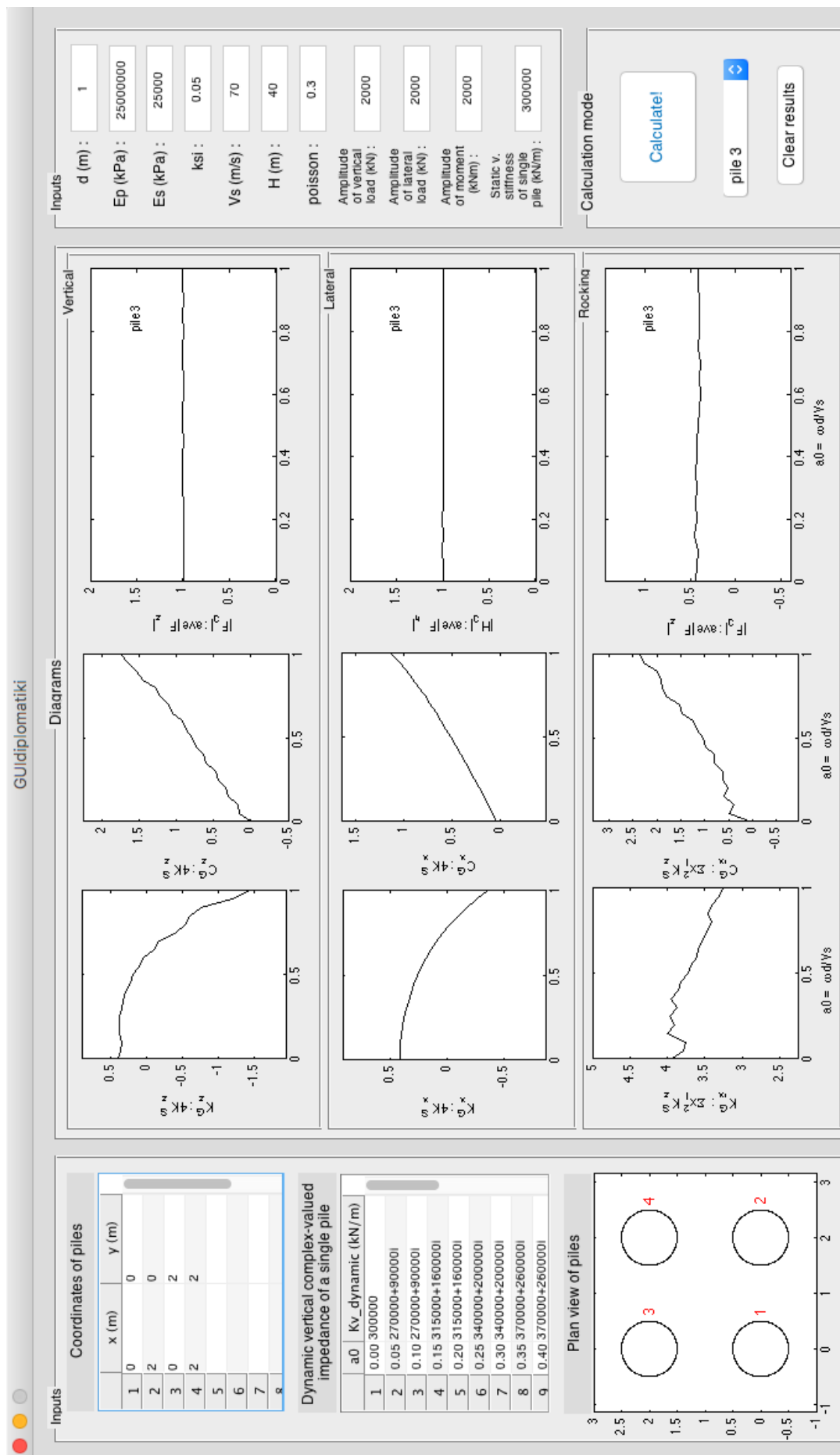




**Σχήμα 1.1:** Καταστατικό προσομοίωμα Von Mises: εξελίξη των συνιστωσών της κράτυνσης(ισοτροπικής και κινηματικής) : **(α)** απλοποιημένη μονοδιάστατη απεικόνιση και **(β)** τρισδιάστατη απεικόνιση [Anastasopoulos et al., 2010].



**Σχήμα 1.2:** Πρόγραμμα υπολογισμού των δυσκαμψιών (κατακόρυφης, οριζόντιας και περιστροφικής) ομάδας πασσάλων και της δύναμης που ασκείται σε κάθε πάσσαλο συναρτήσει της παραμέτρου  $a_0$  (πριν την εισαγωγή των δεδομένων)



**Σχήμα 1.3:** Πρόγραμμα υπολογισμού των δυσκαμψιών (κατακόρυφης, οριζόντιας και περιστροφικής) ομάδας πασσάλων και της δύναμης που ασκείται σε κάθε πάσσαλο συναρτήσει της παραμέτρου  $a_0$  (παρουσίαση αποτελεσμάτων)



# 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

---

## ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

2.1 Στατικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης

2.2 Δυναμικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης

2.2.1 Ελαστικό έδαφος

2.2.2 Μη ελαστικό έδαφος





## 2 Κατακόρυφοι συντελεστές αλληλεπίδρασης

### 2.1 Στατικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης

#### 2.1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να μελετηθεί η συμπεριφορά του κατακόρυφου στατικού συντελεστή αλληλεπίδρασης (σ.α.) ( $\alpha_v$ ) μεταξύ (αιωρούμενων) πασσάλων που απέχουν απόσταση 2d, 5d και 10d ο ένας από τον άλλον, όπου d η διάμετρος του πασσάλου (1 m), για **μετάβαση από το πλήρως ελαστικό έδαφος στο εντόνως ανελαστικό**, και για τις εξής τρεις περιπτώσεις:

#### (α) ύπαρξη μόνο ενός πασσάλου

Σε αυτήν την περίπτωση ο δεύτερος πάσσαλος (παθητικός, που στο εξής θα αναφέρεται ως “πάσσαλος xd”, όπου  $x = 2$  ή 5 ή 10) που απέχει απόσταση 2d, 5d ή 10d, από τον πρώτο (ενεργητικός, που στο εξής θα αναφέρεται “πάσσαλος 0d”), απουσιάζει,

#### (β) ύπαρξη και του δεύτερου πασσάλου

Σε αυτήν την περίπτωση ο δεύτερος πάσσαλος (2d, 5d ή 10d) βρίσκεται στη θέση του και εξετάζεται η επιρροή του στο σ.α. ( $\alpha_v$ ), συγκρίνοντάς τον με την (α) περίπτωση που απουσιάζει,

#### (γ) ύπαρξη και του δεύτερου πασσάλου με ταυτόχρονη παρουσία των άλλων δύο

Σε αυτήν την περίπτωση μελετάται η πιθανή επιρροή των “ενδιάμεσων” πασσάλων στο σ.α. ( $\alpha_v$ ), συγκρίνοντάς τον με την περίπτωση (β) προκειμένου να ελεγχθεί ο βαθμός στον οποίο ισχύει η μέθοδος της επαλληλίας (superposition method) που εισήγαγε ο H. Roulos (1968). Για παράδειγμα, έστω ότι εξετάζεται ο σ.α. μεταξύ των πασσάλων 0d (ενεργητικός) και 5d (παθητικός). Η ύπαρξη των “ενδιάμεσων” πασσάλων 2d και 10d είναι πιθανό να επηρεάσει το παραμορφωσιακό πεδίο και να δώσει διαφορετικά αποτελέσματα από την περίπτωση (β) που απουσιάζουν.

#### 2.1.2 Τρισδιάστατο προσομοίωμα

Προκειμένου, λοιπόν, να παραχθούν οι κατακόρυφοι στατικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης, για ελαστικό και μη ελαστικό έδαφος, μεταξύ πασσάλων που απέχουν απόσταση 2d, 5d και 10d ο ένας από τον άλλον, χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο προσομοίωμα που φαίνεται στο **Σχήμα 2.1**. Λόγω της συμμετρίας του προβλήματος προσομοιώθηκε το μισό πρόβλημα, με σκοπό τη μείωση του

υπολογιστικού κόστους. Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οκτακομβικά εξαεδρικά “brick type” (C3D8). Ακόμα, θεωρήθηκαν συνθήκες πλήρης συγκόλλησης μεταξύ εδάφους και πασσάλων. Οι διαστάσεις των πασσάλων είναι  $L = 20$  m και  $d = 1$  m ( $L/d = 20$ ), ενώ οι ιδιότητές τους είναι οι εξής:

- μέτρο ελαστικότητας  $E_p = 25000$  MPa
- λόγος poisson  $\nu = 0.2$
- ειδικό βάρος  $\gamma_p = 25$  kN/m<sup>3</sup>

Αντίστοιχα, οι ιδιότητες του εδάφους είναι:

- μέτρο ελαστικότητας  $E_s = 90$  MPa ( $E_p / E_s = 280$ )
- λόγος poisson  $\nu = 0.49$
- αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u = 50$  kPa
- ειδικό βάρος  $\gamma_s = 17.5$  kN/m<sup>3</sup>

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του προσομοιώματος, σε όρους φέρουσας ικανότητας τουλάχιστον, γίνεται σύγκριση μεταξύ του οριακού φορτίου που προκύπτει από το Abaqus και του αντίστοιχου που προκύπτει από τη θεωρητική σχέση

$$P_{\text{ορ. θεωρ.}} = \pi d L S_u + \frac{\pi d^2}{4} 9 S_u$$

Η καμπύλη φορτίου  $P$  (kN) – μετατόπισης (m), μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Abaqus, δίνεται στο **Σχήμα 2.2**, από την οποία προκύπτει ότι

$$P_{\text{ορ. Abaqus}} \approx 4500 \text{ kN}$$

Αντίστοιχα, από τη θεωρητική σχέση, για  $d = 1 + 0.25$  m (προσαυξάνεται η διάμετρος του πασσάλου κατά 0.25 m, που είναι το μήκος του εδαφικού πεπερασμένου στοιχείου που εφάπτεται της περιφέρειας του πασσάλου, για να ληφθεί υπόψη η πλήρης συγκόλληση μεταξύ εδάφους και πασσάλου), προκύπτει

$$P_{\text{ορ. θεωρ.}} \approx 4480 \text{ kN}$$

Συνεπώς, το προσομοίωμα κρίνεται αποδεκτό σε όρους φέρουσας ικανότητας.

Πρέπει, ακόμα, να ελεγχθεί αν τα σύνορα του προσομοιώματος είναι επαρκώς απομακρυσμένα ώστε να μην επηρεάζουν το πεδίο των παραμορφώσεων που αναπτύσσεται. Πράγματι, για ελαστική ανάλυση με κατακόρυφη μετατόπιση του πασσάλου  $0d$  ίση με 1 m, **Σχήμα 2.3**, γίνεται φανερό ότι τα σύνορα δεν επηρεάζουν το μετακινησιακό πεδίο, τουλάχιστον για τιμές κατακόρυφης μετακίνησης μεγαλύτερες ή ίσες του 1 % του ενός μέτρου. Δεν χρειάζεται να γίνει και ανελαστική ανάλυση για να βρεθεί μέχρι που εκτείνεται το παραμορφωσιακό πεδίο, αφού,

όπως θα αποδειχθεί και παρακάτω, η έκτασή του είναι σαφώς πιο περιορισμένη συγκρητικά με αυτό της ελαστικής ανάλυσης. Άρα το προσομοίωμα είναι κατάλληλο και ως προς τις θέσεις των συνόρων του.

### 2.1.3 Αποτελέσματα αναλύσεων – Σχολιασμός

Η **(α)** περίπτωση, κατά την οποία απουσιάζουν όλοι οι παθητικοί πάσσαλοι (2d, 5d και 10d), αποτυπώνεται στο **Σχήμα 2.5 (α)**. Στον οριζόντιο άξονα του σχήματος το 0 συμβολίζει την πλήρη ελαστικότητα, ενώ οι υπόλοιπες τιμές (0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 και 0.1) αναφέρονται στην επιβαλλόμενη κατακόρυφη μετακίνηση του πασσάλου 0d σε μη ελαστικό έδαφος. Για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων δίνεται, για κάθε τιμή κατακόρυφης μετακίνησης που αναφέρθηκε παραπάνω, το αντίστοιχο φορτίο που αναλαμβάνει ο πάσσαλος σαν ποσοστό του οριακού φορτίου (**Σχήμα 2.4**). Είναι εμφανές ότι από την τιμή 0.01 m κι έπειτα το έδαφος έχει πλαστικοποιηθεί πλήρως. Παρατηρώντας, λοιπόν, το **Σχήμα 2.5 (α)** γίνονται αντιληπτά τα εξής δύο φαινόμενα:

- πρώτον, (για δεδομένη τιμή κατακόρυφης μετακίνησης του πασσάλου 0d), η απομείωση του σ.α. ( $\alpha_v$ ) για αύξηση της απόστασης από 2d σε 10d, γεγονός που ήταν αναμενόμενο, αφού λόγω της δυστημσίας του εδάφους οι διατμητικές παραμορφώσεις απομειώνονται καθώς αυξάνεται η απόσταση από τον πάσσαλο 0d, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.6**, και
- δεύτερον, (για δεδομένη απόσταση, έστω 2d), η ραγδαία απομείωση του σ.α. ( $\alpha_v$ ) για μετάβαση από την ελαστικότητα στην έντονη ανελαστικότητα. Το γεγονός αυτό εξηγείται εύκολα αν συγκρίνει κανείς το **Σχήμα 2.6** (ελαστική ανάλυση) με το **Σχήμα 2.7** (ανελαστική ανάλυση με κατακόρυφη μετακίνηση του πασσάλου 0d ίση με 0.02 m). Λόγω των πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στην περιφέρεια του πασσάλου 0d (**Σχήμα 2.8**) το έδαφος αδυνατεί να παρακολουθήσει την μετακίνησή του, ο οποίος “γλιστράει” προς τα κάτω, όπως φαίνεται πολύ χαρακτηριστικά στα **Σχήματα 2.7** και **2.8**, με αποτέλεσμα το παραμορφωσιακό πεδίο που αναπτύσσεται να είναι αισθητά μικρότερο συγκρητικά με το αντίστοιχο της ελαστικής ανάλυσης.

**Σημείωση:** στις λεπτομέρειες των σχημάτων δείχνεται με κόκκινο χρώμα οι πάσσαλοι που “ενεργοποιούνται” κάθε φορά. Οι υπόλοιποι αποτελούνται από στοιχεία εδάφους.

Η **(β)** περίπτωση, κατά την οποία ο δεύτερος πάσσαλος (2d, 5d ή 10d) βρίσκεται στη θέση του, αποτυπώνεται στο **Σχήμα 2.5 (β)**, όπου γίνεται σύγκριση μεταξύ της

(α) και (β) περίπτωσης προκειμένου να εκτιμηθεί η επιρροή της ύπαρξης του δεύτερου πασσάλου. Η (α) περίπτωση συμβολίζεται με  $x_d$  ενώ η (β) με  $x_d-p$ , όπου  $x = 2, 5$  ή  $10$  και  $p$  συμβολίζει την ύπαρξη και του δεύτερου πασσάλου. Παρατηρώντας, λοιπόν, το Σχήμα 1.4 (β) προκύπτει ότι η επίδραση της ύπαρξης του δεύτερου πασσάλου στον κατακόρυφο στατικό σ.α. ( $\alpha_v$ ) είναι πρακτικά ασήμαντη. Υπάρχει κάποια τάση για απομείωσή του, κυρίως για πιο ελαστικό έδαφος, αλλά θεωρείται αμελητέα.

Τέλος, η ( $\gamma$ ) περίπτωση, κατά την οποία εκτός από την ύπαρξη του δεύτερου πασσάλου υπάρχουν και οι “ενδιαμέσοι”, αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.5 ( $\gamma$ ), όπου γίνεται σύγκριση μεταξύ της (β) και ( $\gamma$ ) περίπτωσης προκειμένου να εκτιμηθεί η επιρροή της ύπαρξης των “ενδιαμέσων” πασσάλων. Η ( $\gamma$ ) περίπτωση συμβολίζεται με  $all-x_d$ , όπου  $x = 2, 5$  ή  $10$  και  $all$  συμβολίζει την ύπαρξη και των ενδιάμεσων πασσάλων. Παρατηρώντας, λοιπόν, το Σχήμα 1.4 ( $\gamma$ ) είναι εμφανές ότι η ύπαρξη των “ενδιάμεσων” πασσάλων δεν επιδρά στον κατακόρυφο στατικό σ.α. ( $\alpha_v$ ). Επιβεβαιώνεται, δηλαδή, η μέθοδος την επαλληλίας του H. Poulos (1968).

#### 2.1.4 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτουν επιγραμματικά τα εξής συμπεράσματα για τους **κατακόρυφους στατικούς σ.α.**:

- όσο αυξάνει η απόσταση μεταξύ των πασσάλων που αλληλεπιδρούν μειώνεται ο σ.α.
- όσο περισσότερο πλαστικοποιήται το έδαφος τόσο περισσότερο μειώνεται ο σ.α. σε σημείο που μπορεί να γίνει πρακτικά αμελητέος
- η ύπαρξη του δεύτερου πασσάλου, συγκριτικά με τη μη ύπαρξη αυτού, δεν επηρεάζει πρακτικά το σ.α.
- η ύπαρξη των “ενδιαμέσων” πασσάλων δεν επηρεάζουν το σ.α. μεταξύ δύο πασσάλων, ισχύει δηλαδή η μέθοδος της επαλληλίας του **H. Poulos** (1968).

## 2.2 Δυναμικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης

### 2.2.1 Ελαστικό έδαφος

#### 2.2.1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να παρουσιάσει και να συγκρίνει τους κατακόρυφους δυναμικούς σ.α. ( $\alpha_v$ ) μεταξύ πασσάλων (ή πασσάλου και σημείου του εδάφους σε περίπτωση που απουσιάζει ο δεύτερος πάσσαλος) σε **ελαστικό έδαφος** που απέχουν απόσταση  $2d$ ,  $5d$  ή  $10d$ , συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης του πασσάλου  $0d$ , αλλά και να ελέγξει το βαθμό στον οποίο ισχύει η μέθοδος της επαλληλίας (Ρουλος). Ο σ.α. παρουσιάζεται με δύο διαφορετικούς, ισοδύναμους, τρόπους. Ο πρώτος έχει τη μορφή

$$\alpha_v = \alpha_v(\text{real part}) + i \alpha_v(\text{imaginary part}),$$

όπου:  $\alpha_v(\text{real part})$  = το πραγματικό μέρος του μιγαδικού αριθμού =  $|\alpha_v| \cos \phi$

$\alpha_v(\text{imag. part})$  = το φανταστικό μέρος του μιγαδικού αριθμού =  $|\alpha_v| \sin \phi$

και ο δεύτερος

$$\alpha_v = |\alpha_v| e^{i\phi},$$

όπου:  $|\alpha_v|$  = το μέτρο του σ.α. (**amplitude**) =  $(\alpha_v(\text{real part})^2 + \alpha_v(\text{imag. part})^2)^{0.5}$

$\phi$  = διαφορά φάσης (**phase**) της ταλάντωσης μεταξύ του πασσάλου  $0d$  και του δεύτερου πασσάλου =  $\tan^{-1}(\alpha_v(\text{imag. part}) / \alpha_v(\text{real part}))$

Θα εξετασθούν, όπως και προηγουμένως (στους κατακόρυφους στατικούς σ.α.), οι τρεις περιπτώσεις, δηλαδή ( **$\alpha$** ) η μη ύπαρξη δεύτερου πασσάλου, ( **$\beta$** ) η ύπαρξη αυτού και ( **$\gamma$** ) η ύπαρξη των “ενδιάμεσων” πασσάλων. Όλα τα παραπάνω θα μελετηθούν για τους εξής τρεις λόγους  $E_p/E_s$  : ( **$\alpha$** ) **1000**, ( **$\beta$** ) **500** και ( **$\gamma$** ) **100**.

#### 2.2.1.2 Τρισδιάστατα προσομοιώματα

Αρχικά, μία από τις δυσκολίες που υπάρχουν στα δυναμικά προβλήματα είναι η αντανάκλαση των κυμάτων που προσπίπτουν στα σύνορα του μοντέλου. Λόγω των πεπερασμένων διαστάσεων του προσομοιώματος, δεν είναι εφικτό τα κύματα να ταξιδέψουν στο άπειρο όπως θα συνέβαινε στην πραγματικότητα, με αποτέλεσμα να αλλοιώνουν τα αποτελέσματα. Προς αυτήν την κατεύθυνση εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ τους τρία διαφορετικά προσομοιώματα, ώστε να επιλεγθεί το πλέον κατάλληλο για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Το πρώτο μοντέλο που εξετάστηκε (**Σχήμα 2.9**) είναι παρόμοιο με αυτό των στατικών αναλύσεων, δηλαδή αποτελείται από σύνορα τα οποία αντανakλούν τα κύματα. Ο λόγος που

εξετάσθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο είναι για να ελεγχθεί το κατά πόσο αυτές οι αντανakλάσεις επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Το δεύτερο μοντέλο που εξετάσθηκε (**Σχήμα 2.10**), χρησιμοποιεί, στα σύνορά του, πεπερασμένα στοιχεία που έχουν την ιδιότητα να απορροφούν τα προσπίπτοντα κύματα. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται infinite elements (CIN3D8). Τέλος, το τρίτο μοντέλο που εξετάσθηκε (**Σχήμα 2.11**), χρησιμοποιεί, στα σύνορά του, αποσβεστήρες (dashpots). Και στα τρία μοντέλα τοποθετήθηκε απόσβεση τύπου Rayleigh της τάξης του 5%. Προκειμένου να γίνει η σύγκριση των τριων μοντέλων, οι κορυφές των πασσάλων υποβλήθηκαν σε εξαναγκασμένη ταλάντωση μισής περιόδου (παλμός) και εξετάσθηκε, στη διάρκεια του χρόνου, πώς ο συγκεκριμένος παλμός επηρεάζει ένα σημείο της επιφάνειας του εδάφους που απέχει από τον πάσσαλο απόσταση  $2d$ . Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.12** το πρώτο μοντέλο με τα “συμβατικά” σύνορα έχει τις μεγαλύτερες αντανakλάσεις, ακολουθεί το τρίτο μοντέλο με τους αποσβεστήρες, ενώ το δεύτερο μοντέλο με τα infinite elements δίνει τις μικρότερες αντανakλάσεις που πρακτικά είναι αμελητέες. Συνεπώς επιλέγεται το δεύτερο μοντέλο (**Σχήμα 2.10**) για να γίνουν οι αναλύσεις χωρίς την ύπαρξη του δεύτερου πασσάλου (σημείωση: το συγκεκριμένο μοντέλο είναι αξονοσυμμετρικό, συνεπώς θα μπορούσε να γίνει ανάλυση σε δύο διαστάσεις, παρ’ όλα αυτά επιλέγεται η ανάλυση σε τρεις διαστάσεις κυρίως για την εξοικείωση του γράφοντα με τα τρισδιάστατα προσομοιώματα). Στη συνέχεια, προκειμένου να γίνουν οι αναλύσεις με την ύπαρξη του δεύτερου πασσάλου αλλά και των ενδιάμεσων, δημιουργήθηκε ακόμα ένα μοντέλο που και αυτό κάνει χρήση των infinite elements (**Σχήμα 2.13**). Ο έλεγχος αυτού του μοντέλου γίνεται συγκρίνοντας το με το προσομοίωμα που επιλέχθηκε προηγουμένως για τον έναν πάσσαλο. Έτσι, στο **Σχήμα 2.14** φαίνεται ότι τα δύο μοντέλα δίνουν πρακτικά τα ίδια αποτελέσματα για την ύπαρξη του ενός πασσάλου, άρα το προσομοίωμα κρίνεται ως αποδεκτό.

Όσον αφορά τη γεωμετρία του προβλήματος οι διαστάσεις των μοντέλων φαίνονται στα αντίστοιχα σχήματα, ενώ οι πάσσαλοι έχουν μήκος  $L = 20$  m και διάμετρο  $d = 1$  m. Οι ιδιότητές τους είναι οι εξής:

- ειδικό βάρος  $\gamma_p = 25$  kN/m<sup>3</sup>
- μέτρο ελαστικότητας  $E_p = 25000$  MPa
- λόγος poisson  $\nu = 0.2$

Αντίστοιχα, οι ιδιότητες του εδάφους είναι:

- ειδικό βάρος  $\gamma_s = 17.5$  kN/m<sup>3</sup>
- μέτρο ελαστικότητας  $E_s = 25, 50, 250$  MPa ( $E_p / E_s = 1000, 500, 100$ )
- λόγος poisson  $\nu = 0.40$
- απόσβεση τύπου Rayleigh της τάξης του 5%

Τέλος, πρέπει να βρέθει ο αριθμός των περιόδων που θα ταλαντώνεται ο πάσσαλος  $0d$ , ώστε το εύρος ταλάντωσης των σημείων  $2d$ ,  $5d$  και  $10d$  να έχει σταθεροποιηθεί. Για το σκοπό αυτό έγινε μία ανάλυση με 10 κύκλους ταλάντωσης, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στο **Σχήμα 2.15**. Είναι φανερό ότι το εύρος ταλάντωσης των σημείων σταθεροποιείται σχεδόν αμέσως. Παρ' όλα αυτά επιλέγεται οι αναλύσεις που θα ακολουθήσουν στη συνέχεια να γίνουν με 4 κύκλους ταλάντωσης, για να υπάρχει κάποιο περιθώριο για κάποιες αναλύσεις που πιθανόν το εύρος ταλάντωσης να μην σταθεροποιείται αμέσως.

### 2.2.1.3 Αποτελέσματα αναλύσεων – Σχολιασμός

Αρχικά, πριν περάσουμε στην παρουσίαση και το σχολιασμό των αποτελεσμάτων θα περιγραφεί σύντομα ο τρόπος με τον οποίο επεξεργάστηκαν τα αποτελέσματα που πάρθηκαν από το Abaqus ώστε να προκύψουν οι σ.α.. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.16** η ταλάντωση στο σημείο που απέχει απόσταση  $5d$  από τον ταλαντούμενο πάσσαλο  $0d$  ξεκινάει με μία χρονική καθυστέρηση βάση της οποίας υπολογίζεται η διαφορά φάσης στην ταλάντωση του ενώ το εύρος της ταλάντωσης πάρθηκε από τον τελευταίο κύκλο. Γνωρίζοντας, λοιπόν, το εύρος (amplitude) και τη διαφορά φάσης (phase) της ταλάντωσης είναι εύκολο να γραφεί ο σ.α. είτε με τον πρώτο είτε με το δεύτερο τρόπο που προαναφέρθηκαν. Ακολουθεί η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Ξεκινώντας, όπως πάντα, με την **(α)** περίπτωση, όπου ο δεύτερος πάσσαλος απουσιάζει, στο **Σχήμα 2.17** παρουσιάζονται οι κατακόρυφοι δυναμικοί σ.α. ( $\alpha_v$ ), και με τους δύο ισοδύναμους τρόπους, για διαφορετικές αποστάσεις ( $2d$ ,  $5d$  και  $10d$ ) μεταξύ πασσάλου  $0d$  και σημείου εδάφους (αφού απουσιάζει ο δεύτερος πάσσαλος) συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης του πασσάλου  $0d$ , για λόγο  $E_p / E_s = 1000$ . Η συχνότητα διέγερσης  $f$  βρίσκεται “κρυμμένη” μέσα στην αδιάστατη παράμετρο  $\alpha_0 = \omega d / V_s$ , όπου

$\omega = 2 \pi f$  (rad/s) και

$$V_s \text{ (m/s)} = \text{ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

Στα πρώτα δύο διαγράμματα του **Σχήματος 2.17** γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το Abaqus και της απλουστευμένης σχέσης

$$\alpha_v \approx \left(\frac{S}{r_0}\right)^{-0.5} \exp(-\beta \omega S / V_s) \exp(-i \omega S / V_s) \text{ (Dobry \& Gazetas 1988),}$$

όπου:  $S$  = η απόσταση μεταξύ του πασσάλου  $0d$  και σημείου της επιφάνειας του εδάφους που αλληλεπιδρούν

$$r_0 = d/2$$

$$\beta = \text{ο βαθμός αποσβέως } \xi$$

Παρατηρείται αξιοθαύμαστη συνέπεια μεταξύ των δύο, δεδομένων πάντα των απλουστεύσεων της αναλυτικής σχέσης. Από το **Σχήμα 2.17 (γ)** γίνονται αντιληπτά τα εξής φαινόμενα:

- πρώτον, η απομείωση του μέτρου του σ.α. (amplitude) με την αύξηση της απόστασης από τον πάσσαλο  $0d$  (φαινόμενο που εξηγήθηκε νωρίτερα στη στατική ανάλυση)
- δεύτερον, η αύξηση του μέτρου του σ.α. για μετάβαση από τη στατική στη δυναμική ανάλυση αντίστοιχα, γεγονός που είναι αναμενόμενο αφού, ως γνωστόν, στα στατικά προβλήματα η ακτίνα επιρροής είναι μικρότερη συγκριτικά με τα δυναμικά προβλήματα
- τρίτον, η σταδιακή μείωση του μέτρου του σ.α. καθώς αυξάνει η συχνότητα διέγερσης του πασσάλου  $0d$ . Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία το πλάτος της ταλάντωσης αρμονικού κύματος φθίνει με τον όρο  $e^{-\xi(\omega/V_s)S}$ . Συνεπώς, όσο αυξάνει η συχνότητα τόσο περισσότερο θα μειώνεται το πλάτος της ταλάντωσης.

Στο **Σχήμα 2.17 (δ)** παρουσιάζεται η αύξηση της διαφοράς φάσης με την αύξηση της απόστασης από την πηγή (πάσσαλος  $0d$ ). Το φαινόμενο είναι απολύτως λογικό και δεν χρειάζεται περεταίρω ερμηνεία. Στη συνέχεια στο **Σχήμα 2.18** παρουσιάζεται το πραγματικό και το φανταστικό μέρος των σ.α. για λόγο  $E_p / E_s = 500$  και  $100$ , ενώ στο **Σχήμα 2.19** γίνεται σύγκριση των σ.α. για όλους του λόγους  $E_p / E_s$ . Από το σχήμα αυτό είναι φανερό ότι ο σ.α. μειώνεται όσο ο λόγος  $E_p / E_s$  μικραίνει, δηλαδή όσο το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους  $E_s$  αυξάνει (σκληρό έδαφος). Αυτό σημαίνει ότι σε ένα δύστημο έδαφος οι πάσσαλοι θα αλληλεπιδρούν λιγότερο μεταξύ τους ή ανάποδα σε ένα εύτημο έδαφος η αλληλεπίδραση μεταξύ πασσάλων θα παίζει σπουδαιότερο ρόλο. Πράγματι, το **Σχήμα 2.20** εξηγεί πλήρως την παραπάνω διαπίστωση. Αν συγκρίνει κανείς το **Σχήμα 2.20 (α)** με το **Σχήμα 2.20 (β)** θα διαπιστώσει ότι στο πρώτο σχήμα που το έδαφος είναι πιο εύτημο ( $E_p / E_s = 1000$ ), οι διατμητικές παραμορφώσεις μεταδίδονται αρκετά μακριά από τον πάσσαλο  $0d$  συγκριτικά με το δεύτερο σχήμα που λόγω της δυστημίας του εδάφους ( $E_p / E_s = 100$ ) οι διατμητικές παραμορφώσεις “σβήνουν” απότομα κοντά στον πάσσαλο.

Συνεχίζοντας με τη **(β)** περίπτωση, όπου υπάρχει και ο δεύτερος πάσσαλος, στο **Σχήμα 2.21** μελετάται η επίδρασή του στους κατακόρυφους δυναμικούς σ.α. για αποστάσεις μεταξύ πασσάλων  $2d$ ,  $5d$  και  $10d$ , και λόγους  $E_p / E_s = 1000$ ,  $500$ ,  $100$ . Από το σχήμα αυτό παρατηρούνται τα εξής τρία φαινόμενα:



- πρώτον, η μείωση του μέτρου του σ.α. συγκριτικά με την περίπτωση που αυτός απουσίαζε. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται παραστατικά αν παρατηρήσει κανείς τις διαφορές στις ισοϋψείς των κατακόρυφων μετακινήσεων μεταξύ του **Σχήματος 2.22** (απουσιάζει ο δεύτερος πάσσαλος) και του **Σχήματος 2.23** (ο δεύτερος πάσσαλος βρίσκεται στη θέση του). Στο δεύτερο σχήμα είναι εμφανές ότι ο πάσσαλος 2d αντιδράει στη μετακίνηση που του επιβάλλεται, γι' αυτό και το μετακινήσιό πεδίο του **Σχήματος 2.23** δεν είναι “ομοιόμορφο” όπως του **Σχήματος 2.22**
- δεύτερον, η επίδραση του δεύτερου πασσάλου στο σ.α. γίνεται σημαντικότερη όσο ο λόγος  $E_p / E_s$  μικραίνει, δηλαδή όσο η δυσστησία του εδάφους αυξάνει. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται παραστατικά από τη σύγκριση του **Σχήματος 2.23** ( $E_p / E_s = 100$ , δύστημο έδαφος) και του **Σχήματος 2.24** ( $E_p / E_s = 1000$ , εύτημο έδαφος). Από το δεύτερο σχήμα, που το έδαφος είναι εύτημο παρατηρείται ότι η μετακίνηση που μπαίνει στην κεφαλή του πασσάλου 0d πρακτικά φτάνει μέχρι την αιχμή του χωρίς απομείωση, γεγονός που οφείλεται στη μικρή διατμητική αντίσταση που του ασκεί το έδαφος όταν αυτός κατεβαίνει, με αποτέλεσμα τα κύματα να ξεκινούν απ' όλο το μήκος του και να εξαναγκάζουν το γειτονικό πάσσαλο 2d να μετακινηθεί χωρίς να μπορεί να προβάλει ιδιαίτερη αντίσταση (μεγάλος σ.α.). Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει στο δύστημο έδαφος όπου η αιχμή του ταλαντούμενου πασσάλου 0d δεν αντιλαμβάνεται την πραγματική μετακίνηση που επιβάλλεται στην κορυφή του, με αποτέλεσμα το πλάτος των κυμάτων που εκπέμπονται από την περιφέρεια του πασσάλου να βαίνει μειούμενο από την κορυφή προς την αιχμή του. Με αυτόν τον τρόπο ο γειτονικός πάσσαλος 2d είναι σε θέση να προβάλει περισσότερη αντίσταση (μικρός σ.α.) όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.23**, όπου οι ισοϋψείς των κατακόρυφων μετακινήσεων αλλάζουν καθ ύψος του, αφού πλέον η αιχμή του είναι “πακτωμένη” σε σχέση με το **Σχήμα 2.24** που είναι σαν να “αιωρείται” ολόκληρος ο πάσσαλος.
- τρίτον, η επίδραση του δεύτερου πασσάλου στο σ.α. γίνεται σημαντικότερη όσο αυξάνει η συχνότητα (κυρίως για το δύστημο έδαφος όπου ο δεύτερος πάσσαλος είναι σε θέση να προβάλει κάποια αντίσταση). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα μικρού μήκους κύματα που εκπέμπονται στις υψηλότερες συχνότητες δεν είναι σε θέση να μετακινήσουν με την ίδια ευκολία τον πάσσαλο στον οποίο προσπίπτουν (μικρός σ.α.)

Τα φαινόμενα που περιγράφησαν παραπάνω μπορούν να ερμηνευτούν και από το **Σχήμα 2.25** με τη βοήθεια του μειωτικού συντελεστή  $\psi$  που είναι ο λόγος του σ.α. με την ύπαρξη του δεύτερου πασσάλου προς τον σ.α. χωρίς την ύπαρξη δεύτερου πασσάλου.

Κλείνοντας με την (**γ**) περίπτωση, όπου εκτός από τον δεύτερο πάσσαλο υπάρχουν και οι ενδιάμεσοι πάσσαλοι, εξετάζεται το κατά πόσο ισχύει η μέθοδος της επαλληλίας (**Poulos**) για λόγους  $E_p / E_s = 1000, 500, 100$ . Στο **Σχήμα 2.26** είναι ξεκάθαρο ότι η ύπαρξη των ενδιάμεσων πασσάλων δεν παίζουν πρακτικά κάποιο ρόλο, επιβεβαιώνοντας έτσι τη μέθοδο της επαλληλίας.

#### 2.2.1.4 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτουν επιγραμματικά τα εξής συμπεράσματα για τους **κατακόρυφους δυναμικούς ελαστικούς σ.α.:**

- η απλουστευμένη σχέση των (**Dobry & Gazetas 1988**) αποτελεί μία σχετικώς καλή πρώτη προσέγγιση των κατακόρυφων δυναμικών ελαστικών σ.α.
- ο σ.α. μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από τον πάσσαλο  $0d$
- ο σ.α. αυξάνεται καθώς γίνεται η μετάβαση από το στατικό στο δυναμικό πρόβλημα
- ο σ.α. έχει την τάση να μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης του πασσάλου  $0d$
- ο σ.α. μειώνεται καθώς ο λόγος  $E_p/E_s$  μικραίνει, δηλαδή καθώς το έδαφος γίνεται όλο και πιο δύσμητο
- ο σ.α. μειώνεται αν ληφθεί υπόψη η ύπαρξη του δεύτερου πασσάλου
- η επίδραση του δεύτερου πασσάλου είναι σημαντικότερη στα δύσμητα εδάφη με αποτέλεσμα ο σ.α. να μειώνεται αισθητά σε σύγκριση με τα εύμητα εδάφη που είναι μεγαλύτερος
- η επίδραση του δεύτερου πασσάλου γίνεται σημαντικότερη όσο αυξάνει η συχνότητα (κυρίως για τα δύσμητα εδάφη) με αποτέλεσμα ο σ.α. να μειώνεται
- η επίδραση των ενδιάμεσων πασσάλων είναι αμελητέα (ισχύει η μέθοδος της επαλληλίας (**Poulos**))

## 2.2.2 Μη ελαστικό έδαφος

### 2.2.2.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να παρουσιάσει και να συγκρίνει τους κατακόρυφους δυναμικούς σ.α. ( $\alpha_u$ ) μεταξύ πασσάλων (ή πασσάλου και σημείου του εδάφους σε περίπτωση που απουσιάζει ο δεύτερος πάσσαλος) σε **μη ελαστικό έδαφος** που απέχουν απόσταση 2d, 5d ή 10d, συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης του πασσάλου 0d, αλλά και να ελέγξει το βαθμό στον οποίο ισχύει η μέθοδος της επαλληλίας (Ρουλιος). Θα εξετασθεί, ακόμα, η επίδραση της μεταβολής του λόγου  $G/S_u$  (=300, 600, 1350 για σταθερό  $S_u$ ) στους σ.α. για απόσταση μεταξύ πασσάλων ίση με 2d.

Όπως και προηγουμένως, θα εξετασθούν, οι τρεις περιπτώσεις, δηλαδή ( $\alpha$ ) η μη ύπαρξη δεύτερου πασσάλου, ( $\beta$ ) η ύπαρξη αυτού και ( $\gamma$ ) η ύπαρξη των ενδιάμεσων πασσάλων. Όλα τα παραπάνω θα μελετηθούν για κατακόρυφη αρμονική ταλάντωση του πασσάλου 0d με πλάτος **0.01** και **0.03** m, που αντιστοιχούν σε φορτία που φτάνουν το 95 και 98%, αντίστοιχα, της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου για στατική κατακόρυφη φόρτιση (**Σχήμα 2.4**).

### 2.2.2.2 Τρισδιάστατα προσομοιώματα

#### ➤ $G/S_u \approx 600$

Αρχικά, κρίθηκε σκόπιμο να εξετασθεί το κατά πόσο η χρήση των infinite elements είναι απαραίτητη, προκειμένου να απορροφηθούν τα κύματα που δημιουργούνται από την ταλάντωση του πασσάλου 0d, στα εντόνως μη ανελαστικά προβλήματα. Προς το σκοπό αυτό έγιναν δύο αναλύσεις όπου ο πάσσαλος 0d ταλαντώθηκε με περίοδο  $T = 0.15$  sec (6 κύκλοι ταλάντωσης) και πλάτος ταλάντωσης 0.01 m. Στην πρώτη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα από την ελαστική ανάλυση με τα infinite elements (**Σχήμα 2.13**), ενώ για τη δεύτερη ανάλυση δημιουργήθηκε ένα νέο μοντέλο χωρίς απορροφητικά σύνορα (απαιτήθηκε ο μισός χρόνος ανάλυσης με το νέο μοντέλο, 5 ώρες έναντι 10 με το πρώτο) (**Σχήμα 2.27**). Και στα δύο μοντέλα τοποθετήθηκε απόσβεση τύπου Rayleigh της τάξης του 2%. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.28 (α)** η ταλάντωση σημείου του εδάφους που απέχει απόσταση 2d από τον πάσσαλο 0d είναι παραπλήσια και για τα δύο μοντέλα. Όμως, είναι φανερό ότι για απόσταση 10d (**Σχήμα 2.28 (β)**), το δεύτερο μοντέλο χωρίς τα απορροφητικά σύνορα δεν είναι κατάλληλο, καθώς οι αντανάκλασεις είναι εμφανείς. Συνεπώς, επιλέγεται το πρώτο μοντέλο με τα infinite elements.

Η γεωμετρία του προβλήματος και οι ιδιότητες των πασσάλων παραμένουν ίδιες με αυτές του αντίστοιχου ελαστικού, ενώ οι ιδιότητες του εδάφους είναι οι ακόλουθες:

- ειδικό βάρος  $\gamma_s = 17.5 \text{ kN/m}^3$
- μέτρο ελαστικότητας  $E_s = 90 \text{ MPa}$  ( $E_p / E_s = 280$ )
- λόγος poisson  $\nu = 0.49$
- απόσβεση τύπου Rayleigh της τάξης του 2%
- αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u = 50 \text{ kPa}$

Στη συνέχεια, κρίθηκε σημαντικό να ερευνηθεί ο βαθμός στον οποίο το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε, με παραμέτρους  $\sigma_0 = 8.66$ ,  $C = 90000$  και  $\gamma = 1154.7$ , αναπαράγει τις καμπύλες  $G/G_0$ - $\gamma$  και  $\xi$ - $\gamma$  των υλικών. Προς αυτήν την κατεύθυνση προσομοιώθηκαν στο Abaqus πειράγματα ανακυκλικής απλής διάτμησης για διάφορα πλάτη διατμητικής παραμόρφωσης, και προέκυψαν, μετά από επεξεργασία των αποτελεσμάτων, τα **Σχήματα 2.29 (α)** και **(β)**, απ' όπου προκύπτει πως τουλάχιστον για το διάγραμμα  $G$ - $\gamma$ , το καταστατικό προσομοίωμα που επιλέχθηκε αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση. Όσον αφορά το διάγραμμα  $\xi$ - $\gamma$  παρατηρείται ότι για μικρές διατμητικές παραμορφώσεις το καταστατικό προσομοίωμα δίνει μηδενική απόσβεση, γεγονός όμως που δεν αποτελεί πρόβλημα, αφού το έδαφος θα έχει μία απόσβεση της τάξης του 2%, πέρα από την απόσβεση λόγω της ανελαστικότητάς του. Ακόμα, στο ίδιο διάγραμμα παρατηρείται αυξημένη απόσβεση για σχετικώς μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις ( $\gamma \approx 0.005$ ), που θα αυξηθεί κι άλλο αν προστεθεί και η απόσβεση του 2%. Παρ' όλα αυτά, διατμητικές παραμορφώσεις της τάξης του 0.005 ή και μεγαλύτερες εμφανίζονται μόνο πολύ κοντά στον πάσσαλο που ταλαντώνεται, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.30**, συνεπώς δεν θα επηρεαστεί το συνολικό πρόβλημα από την αυξημένη τιμή της απόσβεσης.

#### ➤ $G/S_u \approx 300$

Δεδομένου ότι θα εξετασθεί μόνο η περίπτωση όπου οι δύο πάσσαλοι απέχουν 2d δημιουργήθηκε ένα νέο, μικρότερο προσομοίωμα, για εξοικονόμηση χρόνου, που φαίνεται στο **Σχήμα 2.31**.

Οι ιδιότητες των υλικών παραμένουν ίδιες με μόνη διαφορά το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ώστε να προκύψει ο λόγος  $G/S_u = 300$ .

Το καταστατικό προσομοίωμα έχει παραμέτρους  $\sigma_0 = 5.77$ ,  $C = 44400$  και  $\gamma = 553$  και τα διαγράμματα  $G/G_0$ - $\gamma$  και  $\xi$ - $\gamma$  που δίνει φαίνονται στα **Σχήματα 2.32 (α)** και **(β)** αντίστοιχα. Για το διάγραμμα  $G/G_0$ - $\gamma$ , η σχετικά μεγάλη τιμή που παρατηρείται για  $\gamma = 0.005$  δεν αποτελεί πρόβλημα, αφού δεν ξεφεύγει πολύ από το σύνηθες εύρος τιμών, ενώ όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.33**, διατμητικές παραμορφώσεις αυτής της τάξης μεγέθους και μεγαλύτερες εμφανίζονται μόνο πολύ κοντά στην περιφέρεια του πασσάλου. Για το διάγραμμα  $\xi$ - $\gamma$ , οι μικρές αποσβέσεις που παρατηρούνται θα αυξηθούν λόγω της απόσβεσης 2% που εισάγεται στο μοντέλο.

➤  $G/S_u \approx 1350$

Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο προσομοίωμα με την προηγούμενη περίπτωση, ενώ, και εδώ, η μόνη αλλαγή στις ιδιότητες των υλικών είναι στο μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ώστε να προκύψει ο λόγος  $G/S_u = 1350$ , που αντιστοιχεί σε ένα πολύ σκληρό έδαφος με μέτρο ελαστικότητας περί τα 200 MPa.

Το καταστατικό προσομοίωμα έχει παραμέτρους  $\sigma_0 = 12.37$ ,  $C = 200000$  και  $\gamma = 2694.3$  και τα διαγράμματα  $G/G_0$ - $\gamma$  και  $\xi$ - $\gamma$  που δίνει φαίνονται στα **Σχήματα 2.34 (α)** και **(β)** αντίστοιχα. Το μόνο πρόβλημα εντοπίζεται στην αυξημένη απόσβεση για  $\gamma = 0.005$ . Στην πραγματικότητα, όμως, διατμητικές παραμορφώσεις αυτής της τιμής και μεγαλύτερες εμφανίζονται μόνο πολύ κοντά στην περιφέρεια του πασσάλου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.35**, συνεπώς δεν θα επηρεαστεί το συνολικό πρόβλημα από την αυξημένη τιμή της απόσβεσης.

### 2.2.2.3 Αποτελέσματα αναλύσεων – Σχολιασμός

➤  $G/S_u \approx 600$

Ξεκινώντας, με την **(α)** περίπτωση, όπου ο δεύτερος πάσσαλος απουσιάζει, στα **Σχήματα 2.36** και **2.37** παρουσιάζονται οι κατακόρυφοι δυναμικοί σ.α., και με τους δύο ισοδύναμους τρόπους, για διαφορετικές αποστάσεις (2d, 5d και 10d) μεταξύ πασσάλου 0d και σημείου του εδάφους (αφού απουσιάζει ο δεύτερος πάσσαλος) συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης του πασσάλου 0d, και πλάτος ταλάντωσής του ίσο με **0.01** και **0.03 m** αντίστοιχα. Και τα δύο σχήματα είναι στην ίδια κλίμακα ώστε να μπορούν να συγκριθούν, όπως και τα επιμέρους διαγράμματα ( $\gamma$ ) και ( $\delta$ ) των σχημάτων, προκειμένου να φανεί η συνεισφορά του πραγματικού και του φανταστικού μέρους στον σ.α.. Παρατηρώντας τα, λοιπόν, γίνονται αντιληπτά τα εξής φαινόμενα (φαινόμενα που έχουν ειπωθεί προηγουμένως, όπως π.χ. η μείωση των σ.α. με την αύξηση της απόστασης από τον πάσσαλο 0d, δεν θα αναφερθούν):

- πρώτον, η σημαντική μείωση των σ.α. καθώς οι πλαστικοποιήσεις γύρω από τον πάσσαλο 0d γίνονται όλο και πιο έντονες. Το φαινόμενο εξηγήθηκε αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα (στατικό πρόβλημα).
- δεύτερον, η ραγδαία μείωση του σ.α. καθώς αυξάνει η συχνότητα διέγερσης του πασσάλου 0d. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε και στο ελαστικό δυναμικό πρόβλημα με τη διαφορά ότι εδώ η μείωση είναι πολύ πιο έντονη και οφείλεται στην αύξηση της υστερητικής απόσβεσης  $\xi$ . Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το πλάτος της ταλάντωσης αρμονικού κύματος φθίνει με τον όρο  $e^{-\xi(\omega/V_s)s}$ . Συνεπώς, τώρα (στο μη ελαστικό πρόβλημα) που το  $\xi$  έχει αυξηθεί αναμένεται μείωση των σ.α. καθώς αυξάνει η συχνότητα διέγερσης.

Στο **Σχήμα 2.38** που ακολουθεί, παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα πραγματικά και τα φανταστικά μέρη σ.α. που έχουν προκύψει από την ελαστική σχέση (Dobry & Gazetas) και από μη ελαστικές αναλύσεις στο Abaqus για κατακόρυφο πλάτος ταλάντωσης ίσο με 0.01 και 0.03 m αντίστοιχα και απόσταση 5d μεταξύ πασσάλου 0d και σημείου της επιφάνειας του εδάφους. Είναι φανερό η μείωση των σ.α καθώς γίνεται η μεταβάση από το ελαστικό στο εντόνως ανελαστικό πρόβλημα.

Συνεχίζοντας με τη **(β)** περίπτωση, όπου ο δεύτερος πάσσαλος βρίσκεται στη θέση του, στο **Σχήμα 2.39** μελετάται η επίδραση του δεύτερου πασσάλου στους κατακόρυφους δυναμικούς σ.α. σε μη ελαστικό έδαφος για αποστάσεις μεταξύ πασσάλων ίσες με 2d, 5d και 10d, και πλάτος ταλάντωσης του πασσάλου 0d ίσο με **0.01** και **0.03 m** αντίστοιχα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι ο δεύτερος πάσσαλος παίζει κάποιο ρόλο κυρίως για μικρές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων (2d) και μικρότερο ρόλο για μεγαλύτερες αποστάσεις (5d και 10d)

Κλείνοντας με την **(γ)** περίπτωση, όπου εκτός από τον δεύτερο πάσσαλο υπάρχουν και οι ενδιάμεσοι πάσσαλοι, εξετάζεται το κατά πόσο ισχύει η μέθοδος της επαλληλίας (**Poulos**) σε μη ελαστικό έδαφος για πλάτος ταλάντωσης του πασσάλου 0d ίσο με **0.01** και **0.03 m** αντίστοιχα. Στο **Σχήμα 2.40** είναι ξεκάθαρο ότι η ύπαρξη των ενδιάμεσων πασσάλων δεν παίζουν ρόλο, επιβεβαιώνοντας έτσι τη μέθοδο της επαλληλίας και στο μη ελαστικό δυναμικό πρόβλημα.

#### ➤ Σύγκριση $G/S_u \approx 300, 600, 1350$

Στα **Σχήματα 2.41** και **2.42** παρουσιάζονται, και με τους δύο ισοδύναμους τρόπους, οι κατακόρυφοι δυναμικοί σ.α., για απόσταση μεταξύ των πασσάλων ίση με 2d και λόγους  $G/S_u \approx 300, 600, 1350$ . Παρατηρώντας τα δύο σχήματα (που βρίσκονται στην ίδια κλίμακα) είναι εμφανές, για ακόμα μια φορά, η μείωση των σ.α. καθώς αυξάνονται οι πλαστικοποιήσεις γύρω από τον πάσσαλο. Το πιο σημαντικό συμπέρασμα, όμως, που προκύπτει είναι η μείωση του μέτρου των σ.α. καθώς ο λόγος  $G/S_u$  αυξάνει. Το φαινόμενο εξηγείται παραστατικά με τη βοήθεια των **Σχημάτων 2.43** και **2.44**. Στο **Σχήμα 2.43** ( $G/S_u = 1350$ ), λόγω της μεγάλης δυστημής του εδάφους, φαίνεται ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται μόνο πολύ κοντά στην περιφέρεια του πασσάλου, με αποτέλεσμα να μην μεταδίδονται οι μετακινήσεις μακριά από τον πάσσαλο και, έτσι, ο σ.α. είναι μικρός. Αντίθετα, στο **Σχήμα 2.44** ( $G/S_u = 300$ ), λόγω της μικρής δυστημής του εδάφους, οι πλαστικές παραμορφώσεις εκτείνονται πιο μακριά, με αποτέλεσμα να αυξάνει ο σ.α..

#### 2.2.2.4 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτουν επιγραμματικά τα εξής συμπεράσματα για τους **κατακόρυφους δυναμικούς μη ελαστικούς σ.α.**:

- έντονη μείωση των σ.α. καθώς το πρόβλημα γίνεται όλο και πιο ανελαστικό
- έντονη μείωση των σ.α. καθώς αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης του πασσάλου  $0d$
- μικρή η επιρροή της ύπαρξης του δεύτερου πασσάλου (και κυρίως για κοντινές αποστάσεις)
- μηδενική η επιρροή της ύπαρξης των ενδιάμεσων πασσάλων (ισχύει η μέθοδος της επαλληλίας (**Poulos**))
- μείωση του μέτρου των σ.α. καθώς αυξάνει ο λόγος  $G/S_u$



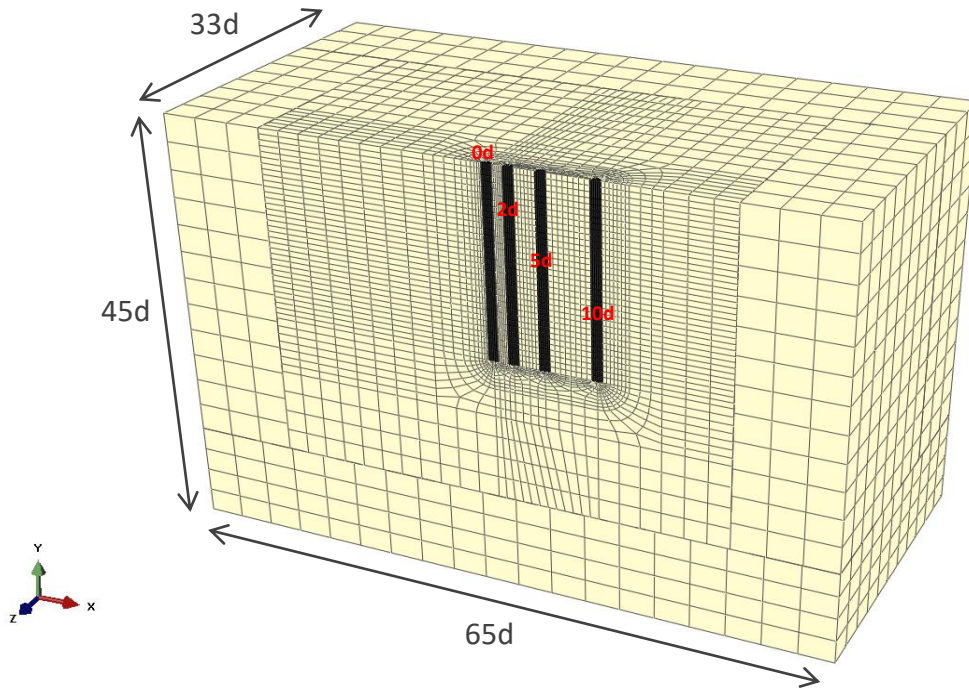


# Σχήματα 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

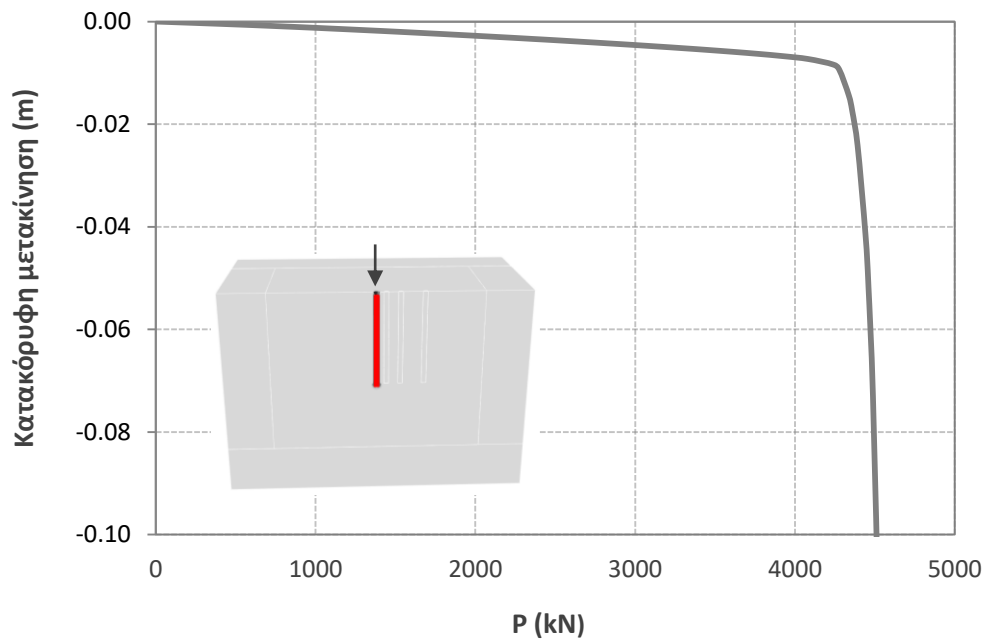
---

ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

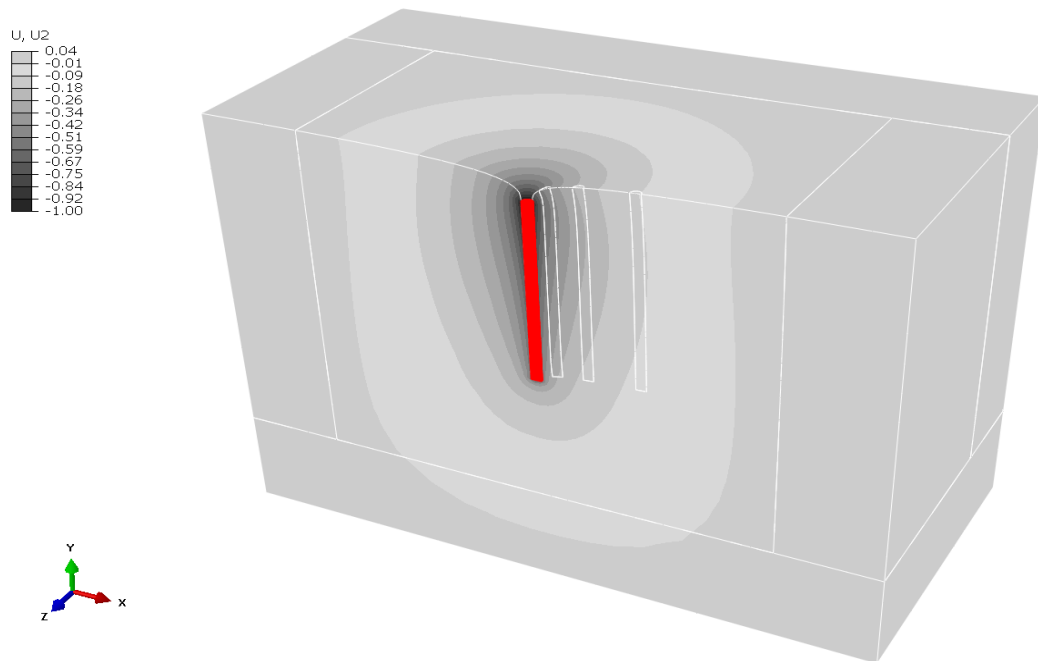




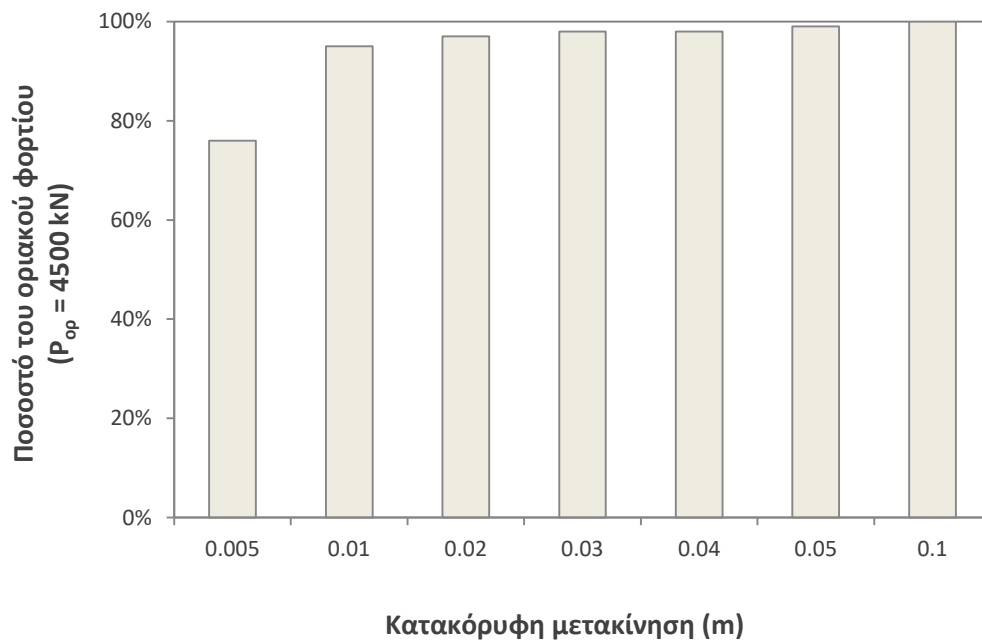
Σχήμα 2.1: Τρισδιάστατο προσομοίωμα για τον υπολογισμό των κατακόρυφων σ.α.



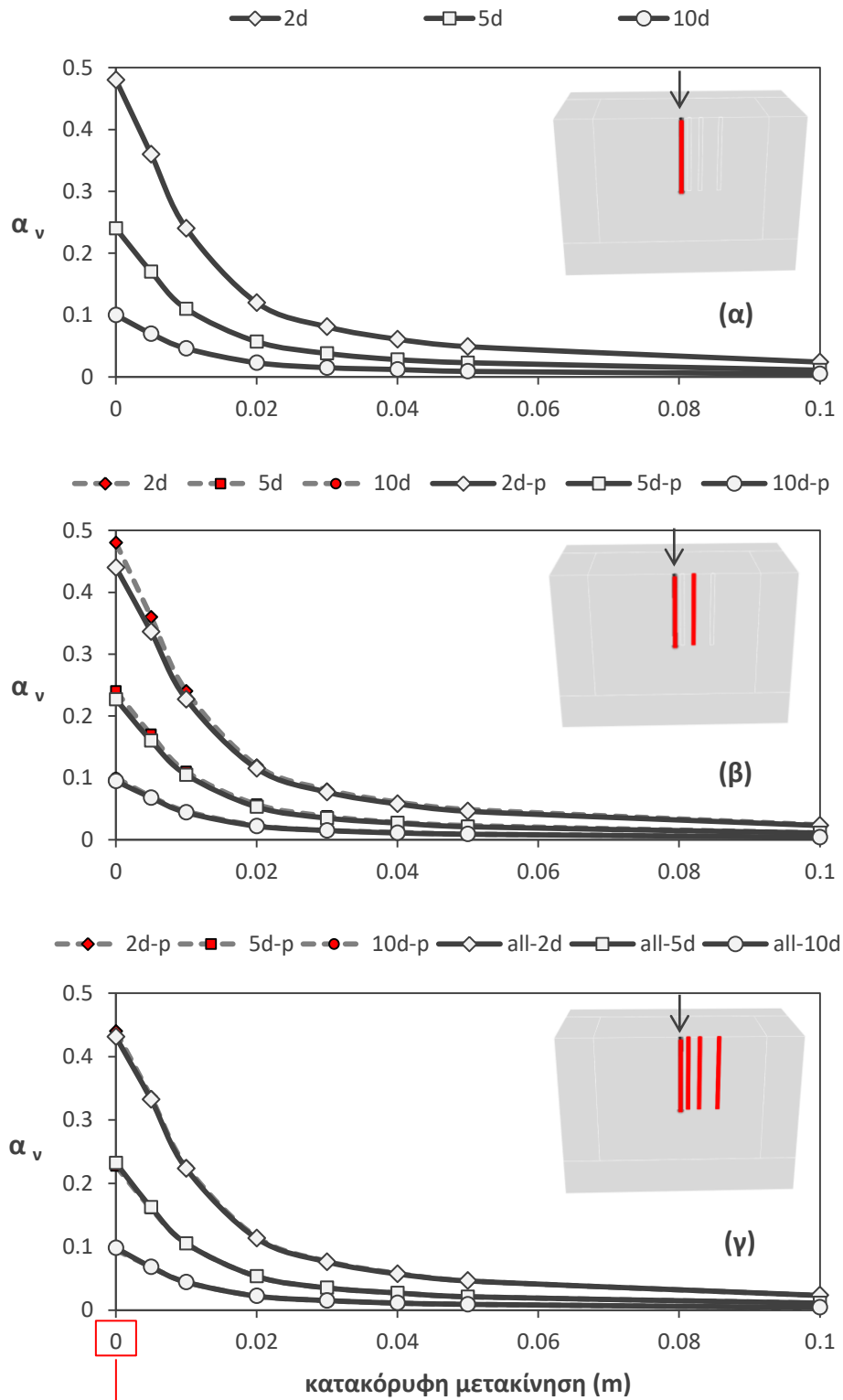
Σχήμα 2.2: Καμπύλη φορτίου  $P$  (kN) – Κατακόρυφης μετακίνησης (m) (Abaqus)



Σχήμα 2.3: Ελαστική στατική ανάλυση: ισοϋψείς κατακόρυφων μετακινήσεων μεγαλύτερων ή ίσων του 1% της κατακόρυφης μετακίνησης του πασσάλου  $0d (=1m)$

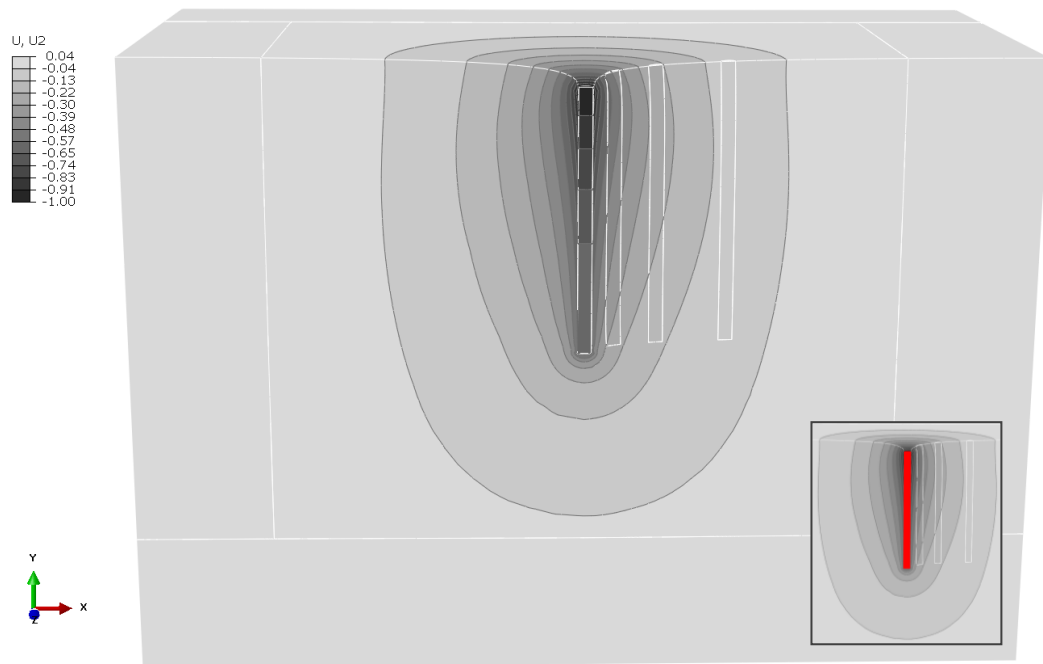


Σχήμα 2.4: Ποσοστό του οριακού φορτίου που αναλαμβάνει ο πάσσαλος  $0d$  συναρτήσει της επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης στην κορυφή του

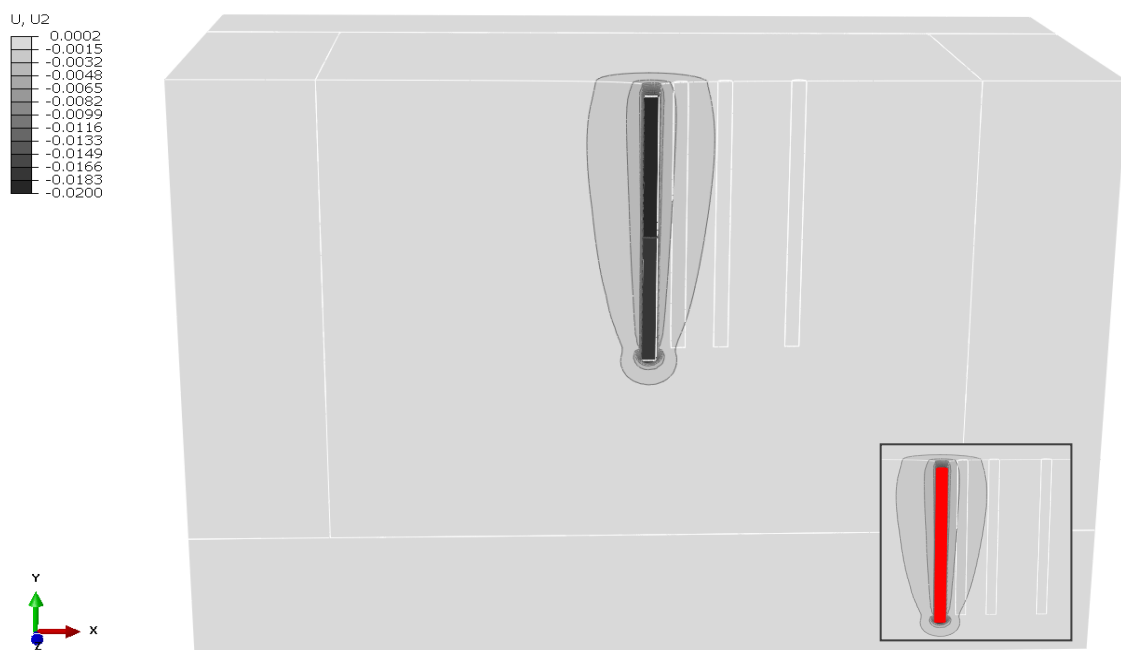


πλήρως ελαστικό  $\longrightarrow$  εντόνως ανελαστικό

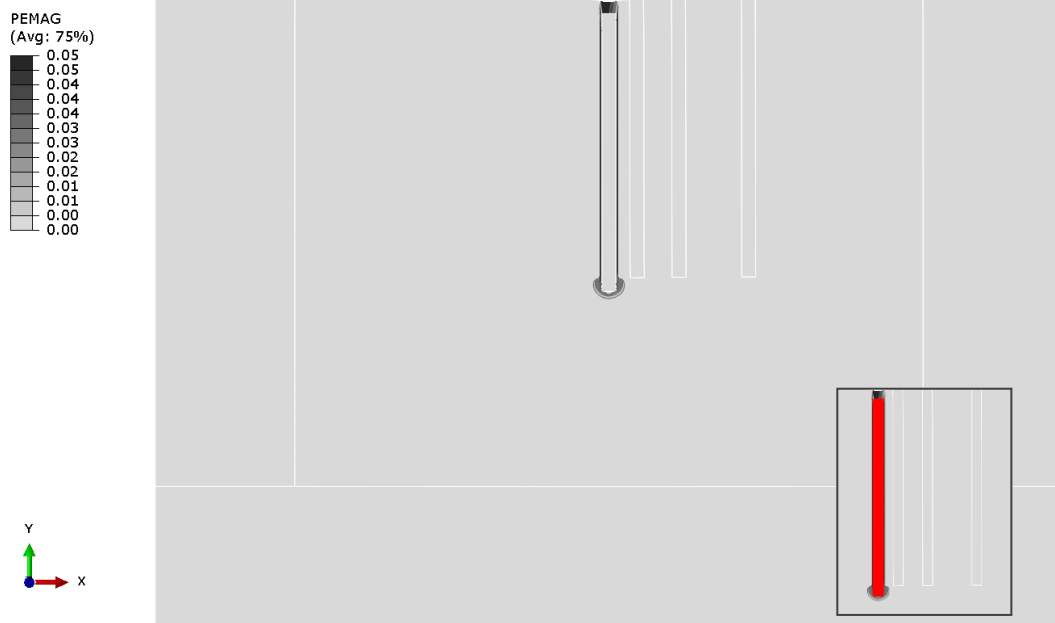
**Σχήμα 2.5:** Στατικοί  $\sigma_v$  για την περίπτωση της ύπαρξης (α) του ενός πασσάλου, (β) των δύο πασσάλων (και σύγκριση με την περίπτωση της ύπαρξης του ενός), (γ) όλων των πασσάλων (και σύγκριση με τη περίπτωση της ύπαρξης των δύο), συναρτήσεως της κατακόρυφης μετακίνησης του πασσάλου  $0d$ . Το μηδέν στον οριζόντιο άξονα συμβολίζει την πλήρη ελαστικότητα. Κινούμενοι από το 0 προς το 0.1 του ορ. άξονα γίνεται σταδιακή μετάβαση από την ελαστικότητα στην έντονη ανελαστικότητα



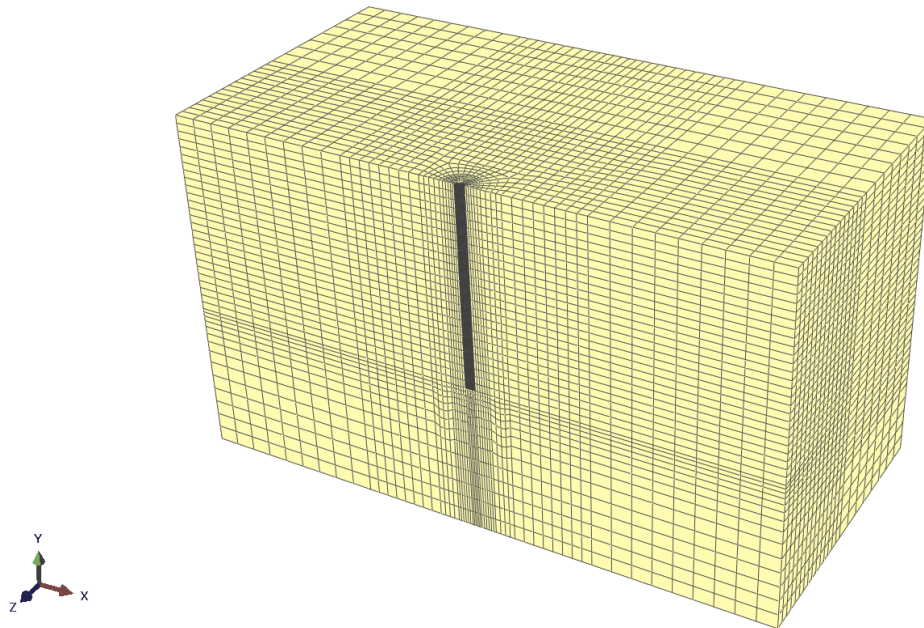
Σχήμα 2.6: **Ελαστική στατική** ανάλυση: ισοϋψείς κατακόρυφων μετακινήσεων για κατακόρυφη μετακίνηση της κορυφής του πασσάλου  $0d$  ίση με 1 m



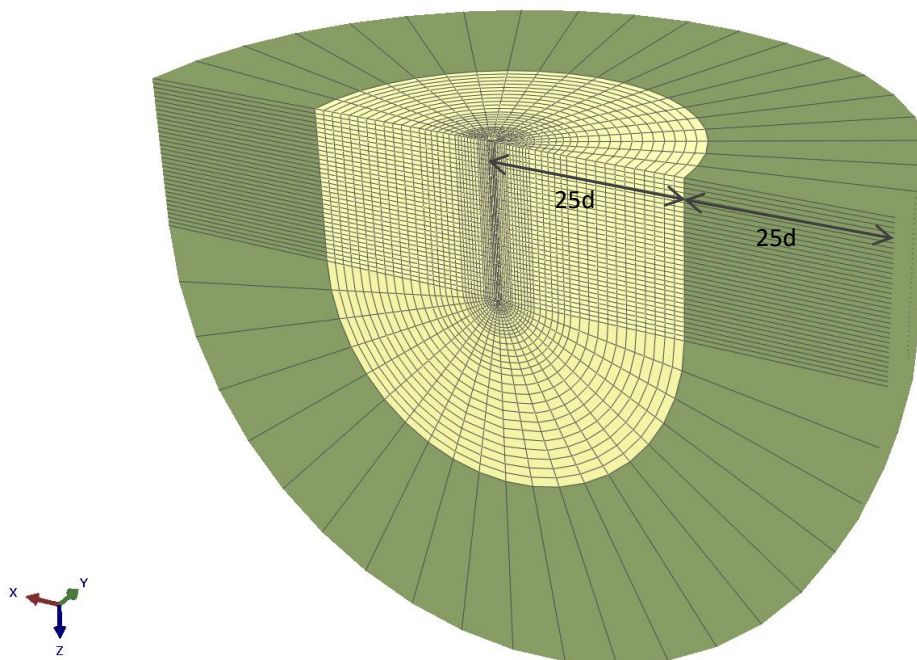
Σχήμα 2.7: **Μη ελαστική στατική** ανάλυση: ισοϋψείς κατακόρυφων μετακινήσεων για κατακόρυφη μετακίνηση της κορυφής του πασσάλου  $0d$  ίση με 0.02 m



Σχήμα 2.8: Μη ελαστική στατική ανάλυση: ισοϋψείς πλαστικών παραμορφώσεων για κατακόρυφη μετακίνηση της κορυφής του πασσάλου  $0d$  ίση με  $0.02\text{ m}$

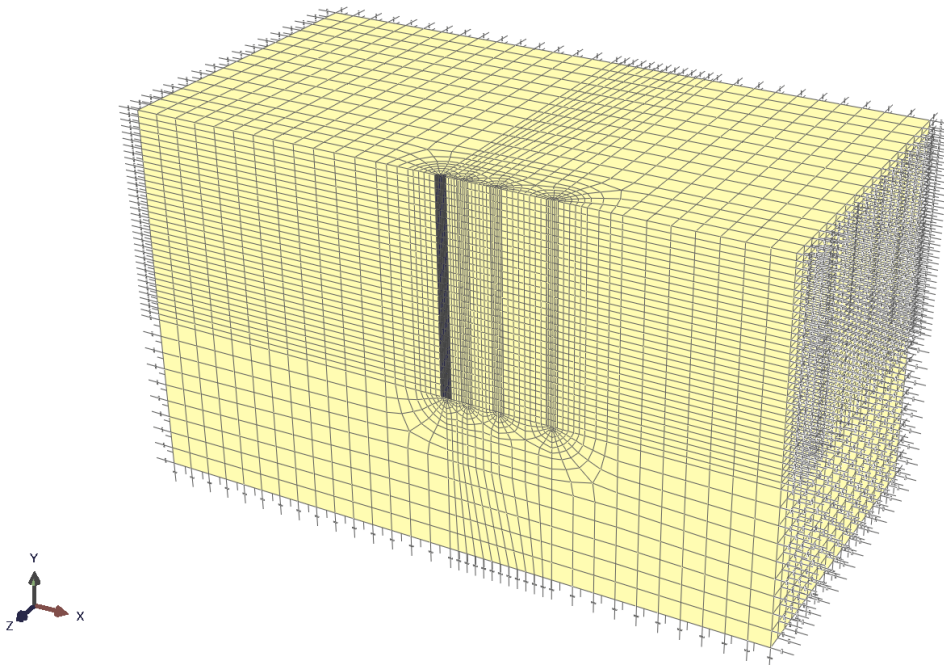


Σχήμα 2.9: Τρισδιάστατο προσομοίωμα με συμβατικά (μη απορροφητικά) σύνορα

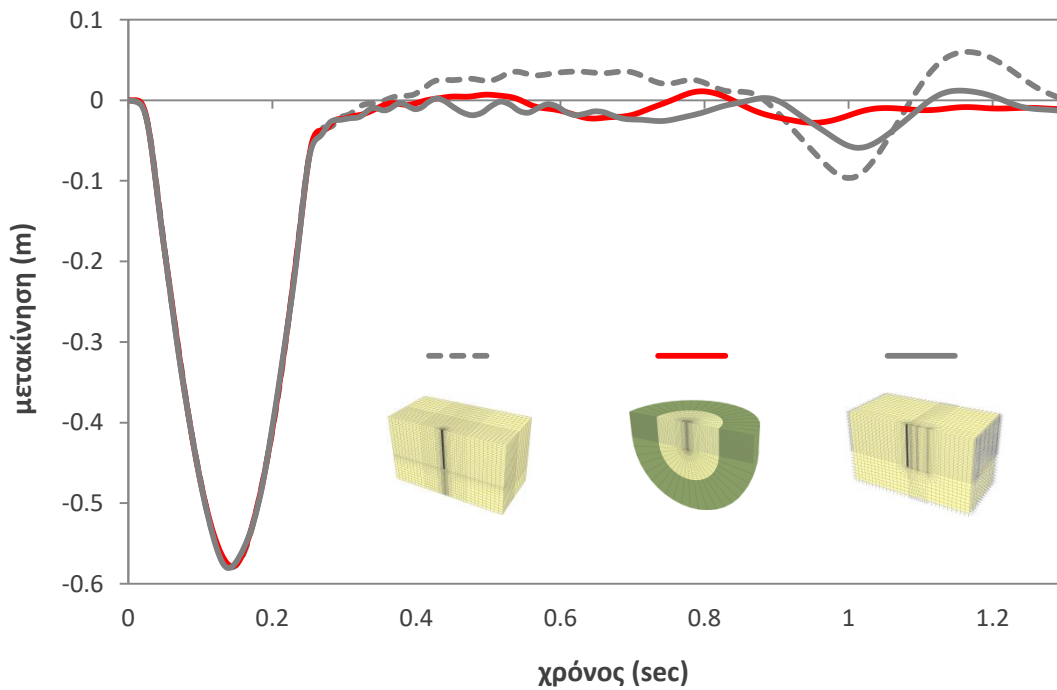


Σχήμα 2.10: Τρισδιάστατο προσομοίωμα με απορροφητικά σύνορα (infinite elements, πράσινο χρώμα)

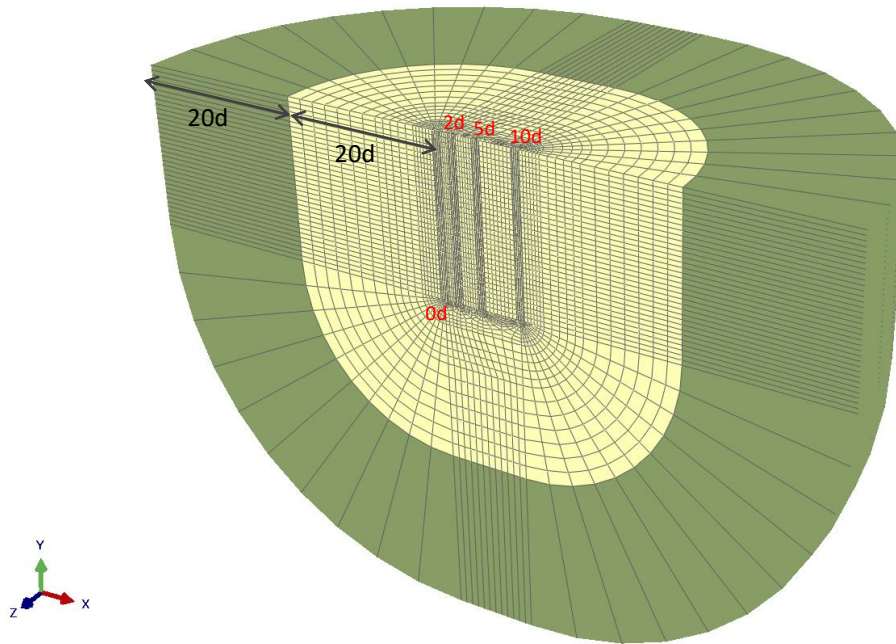




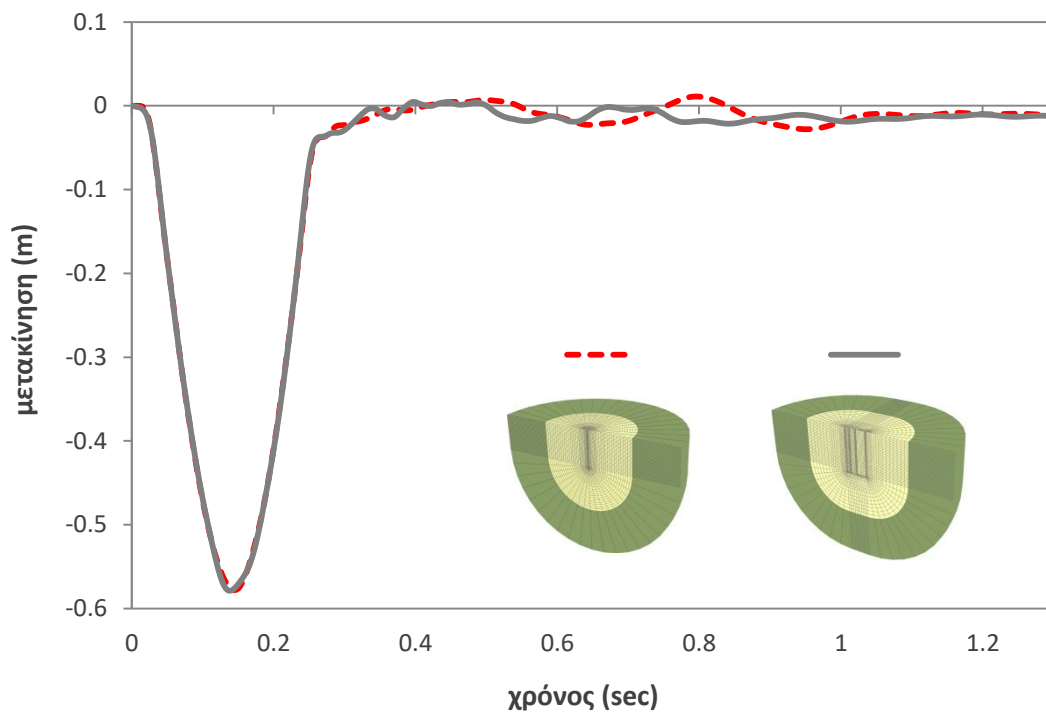
Σχήμα 2.11: Τρισδιάστατο προσομοίωμα με αποσβεστήρες στα σύνορα



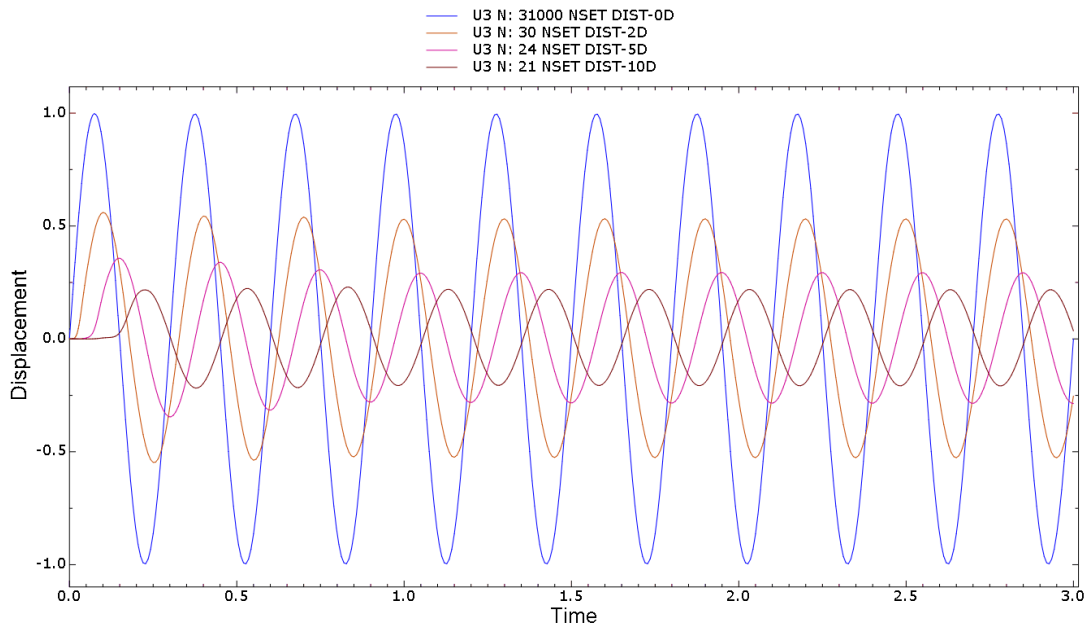
Σχήμα 2.12: Ελαστική δυναμική ανάλυση: Κατακόρυφη μετακίνηση σημείου της επιφάνειας του εδάφους που απέχει από τον ταλαντούμενο πάσσαλο απόσταση 2d συναρτήσει του χρόνου



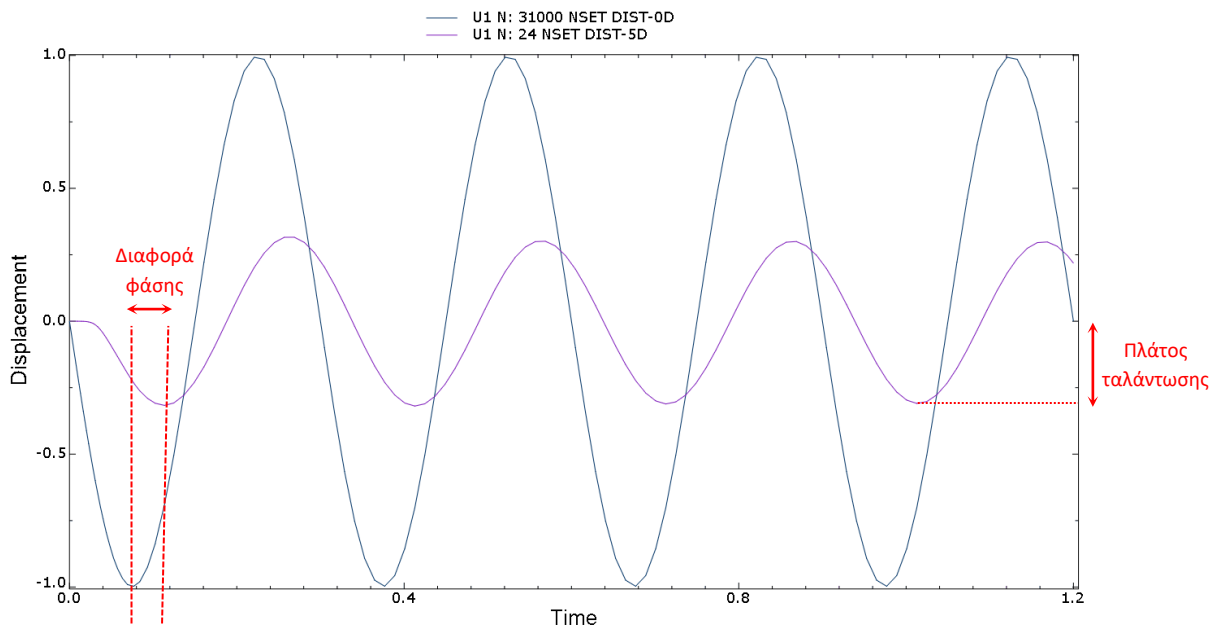
**Σχήμα 2.13:** Τρισδιάστατο προσομοίωμα με απορροφητικά σύνορα (infinite elements, πράσινο χρώμα) για την προσομοίωση των περιπτώσεων (β) και (γ), όπου υπάρχει ο δεύτερος πάσσαλος και οι “ενδιάμεσοι” αντίστοιχα



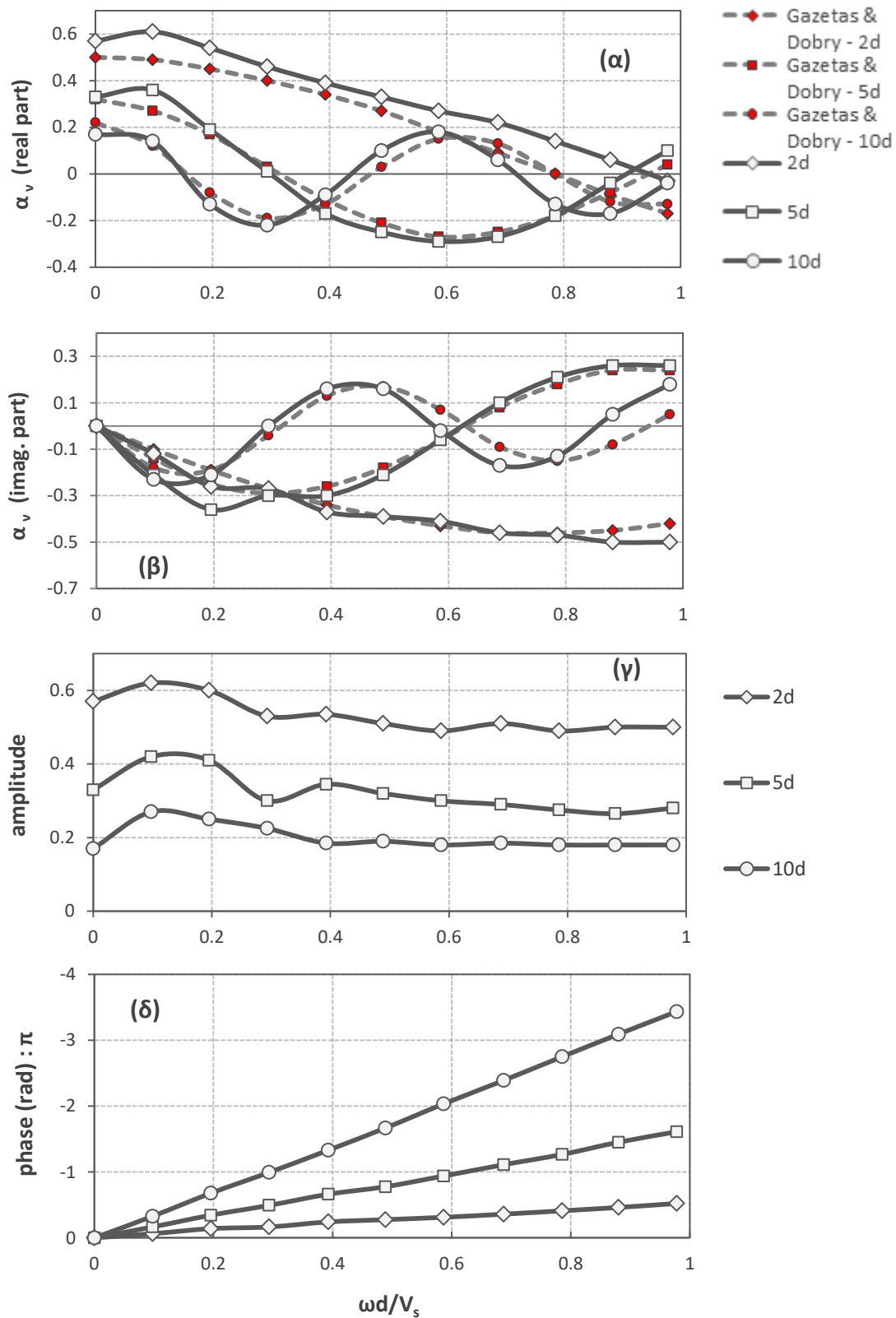
**Σχήμα 2.14:** Ελαστική δυναμική ανάλυση: Κατακόρυφη μετακίνηση σημείου της επιφάνειας του εδάφους που απέχει από τον ταλαντούμενο πάσσαλο απόσταση  $2d$  συναρτήσει του χρόνου



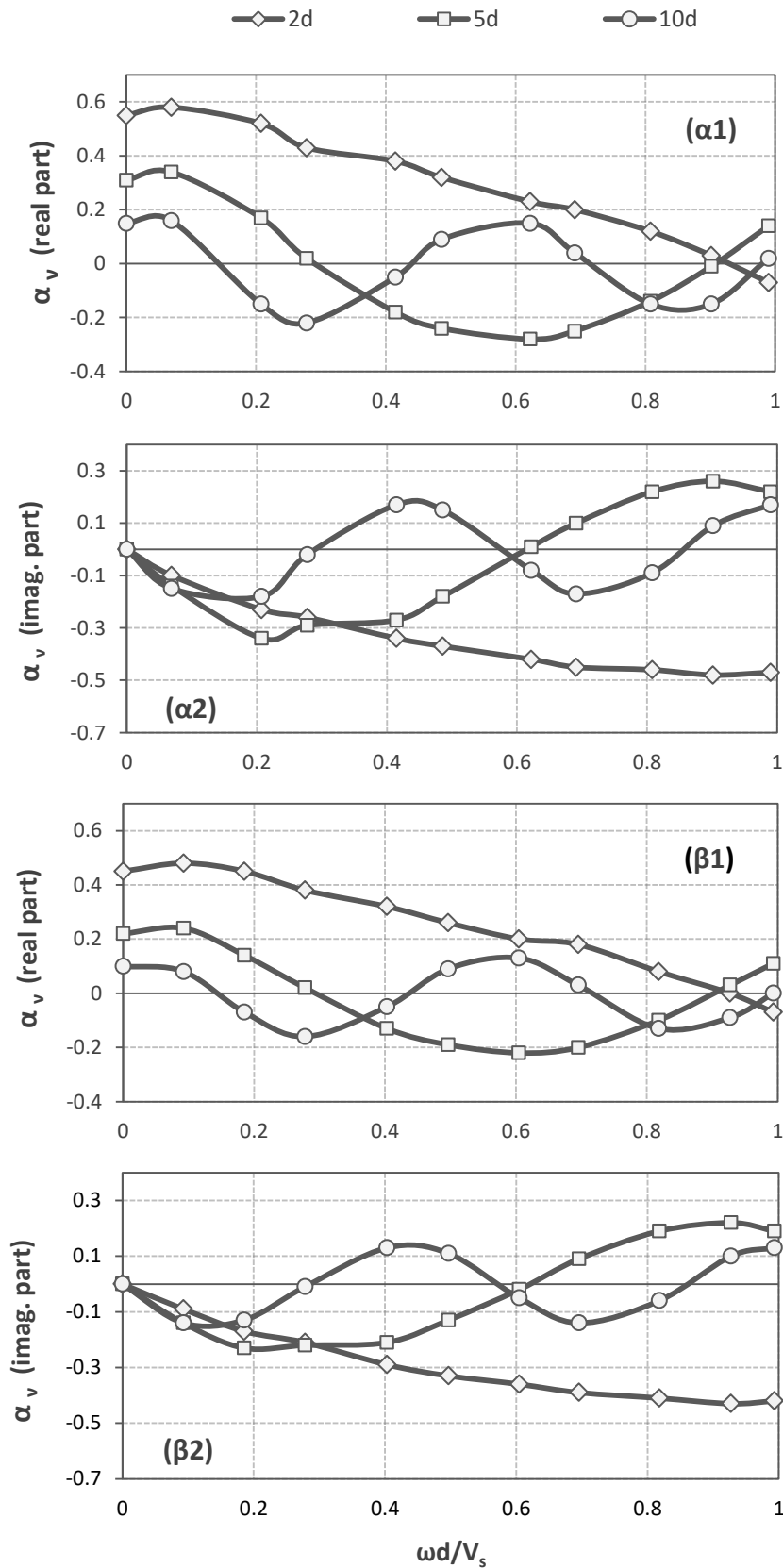
Σχήμα 2.15: Διάγραμμα μετακίνησης (m) – χρόνου (sec) της κορυφής του πασσάλου 0d και σημείων που απέχουν από αυτόν απόσταση 2d, 5d και 10d



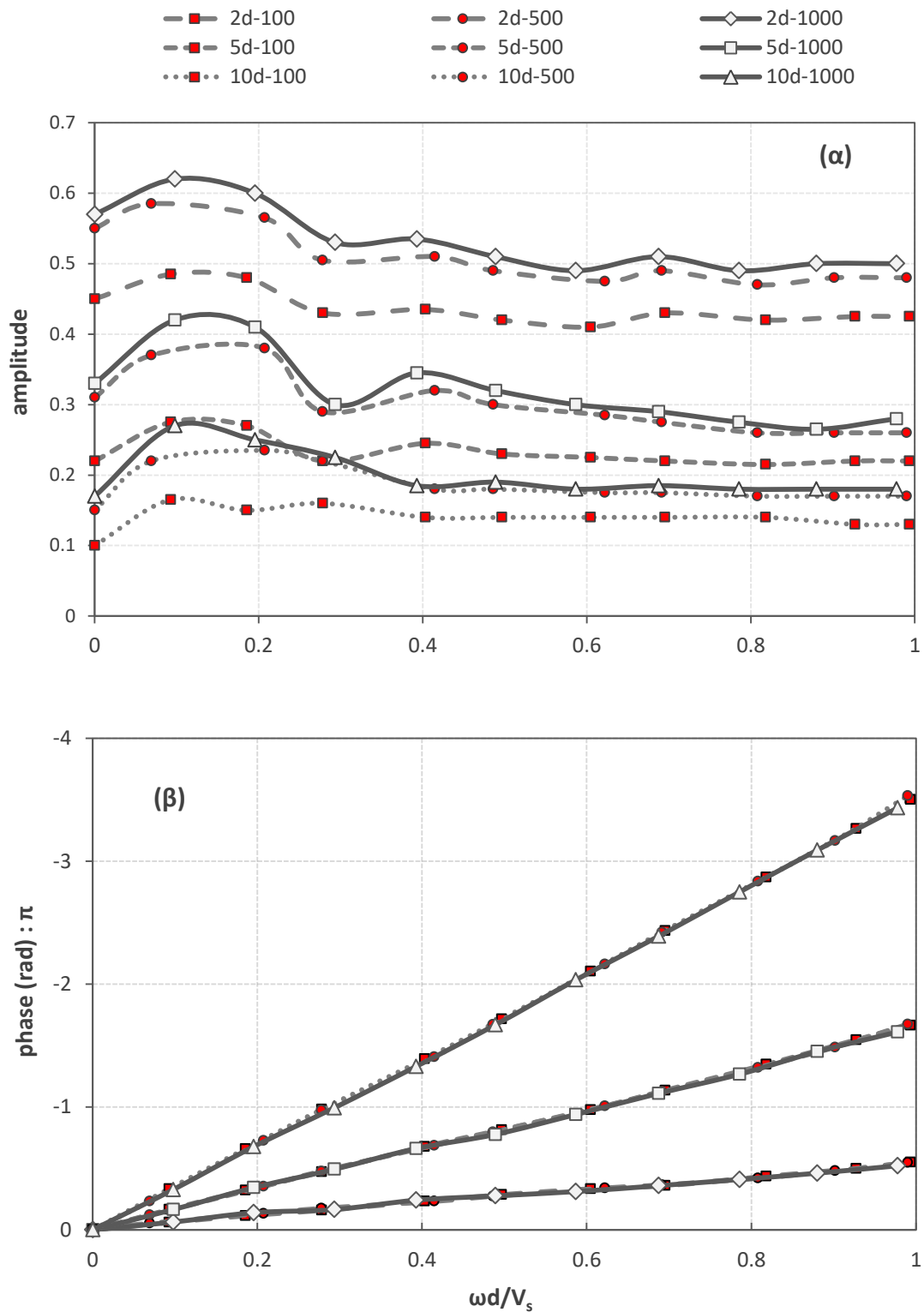
Σχήμα 2.16: Διάγραμμα μετακίνησης (m) – χρόνου (sec) της κορυφής του πασσάλου 0d και σημείου που απέχει από αυτόν απόσταση 5d



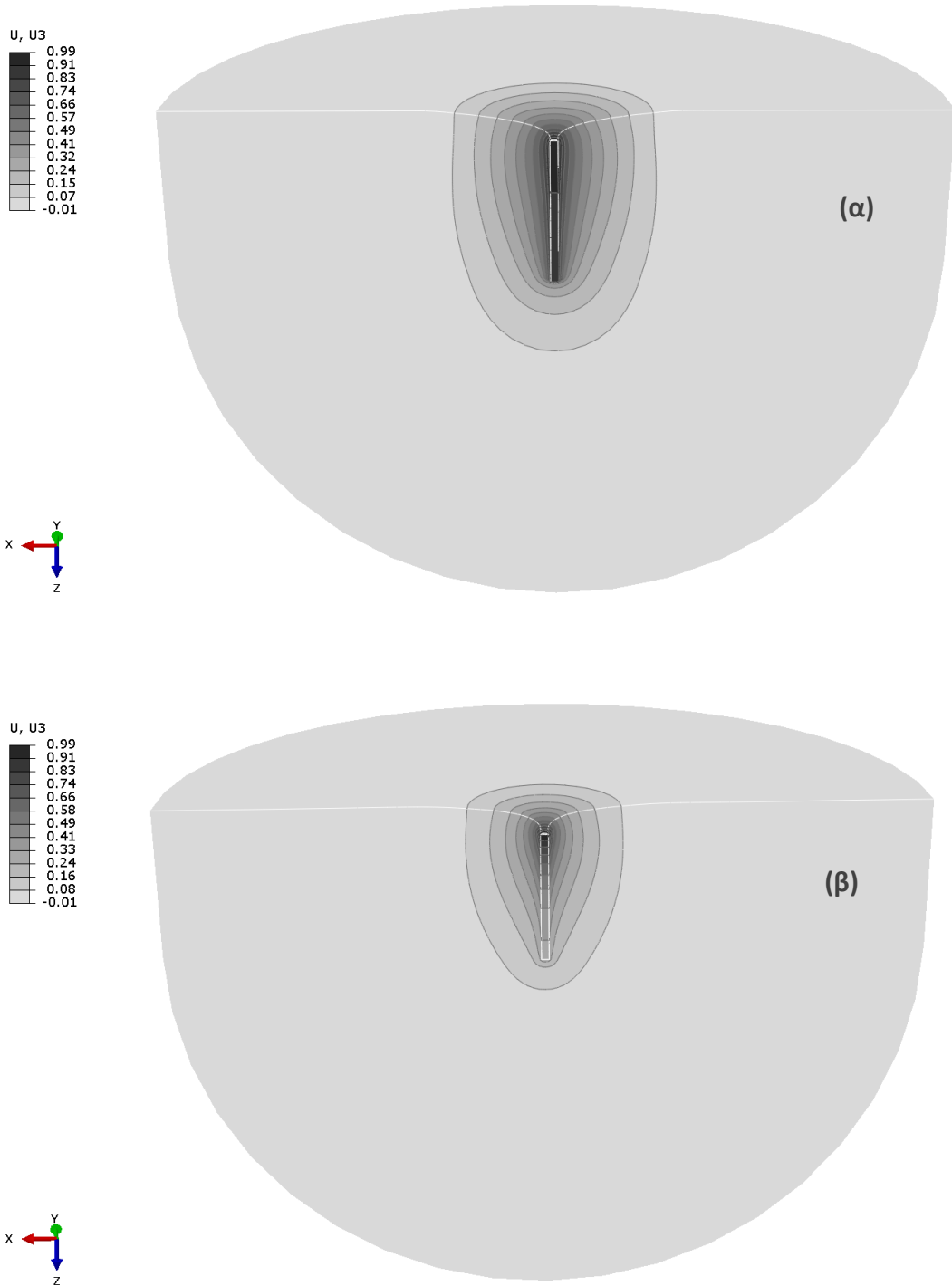
**Σχήμα 2.17:** Ελαστική ανάλυση: (α) Σύγκριση πραγματικού μέρους του σ.α. (θεωρία-ABAQUS), (β) Σύγκριση φανταστικού μέρους του σ.α. (θεωρία-ABAQUS), (γ) Μέτρο του σ.α., (δ) Διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών ακτινικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$  για λόγο  $E_p/E_s = 1000$



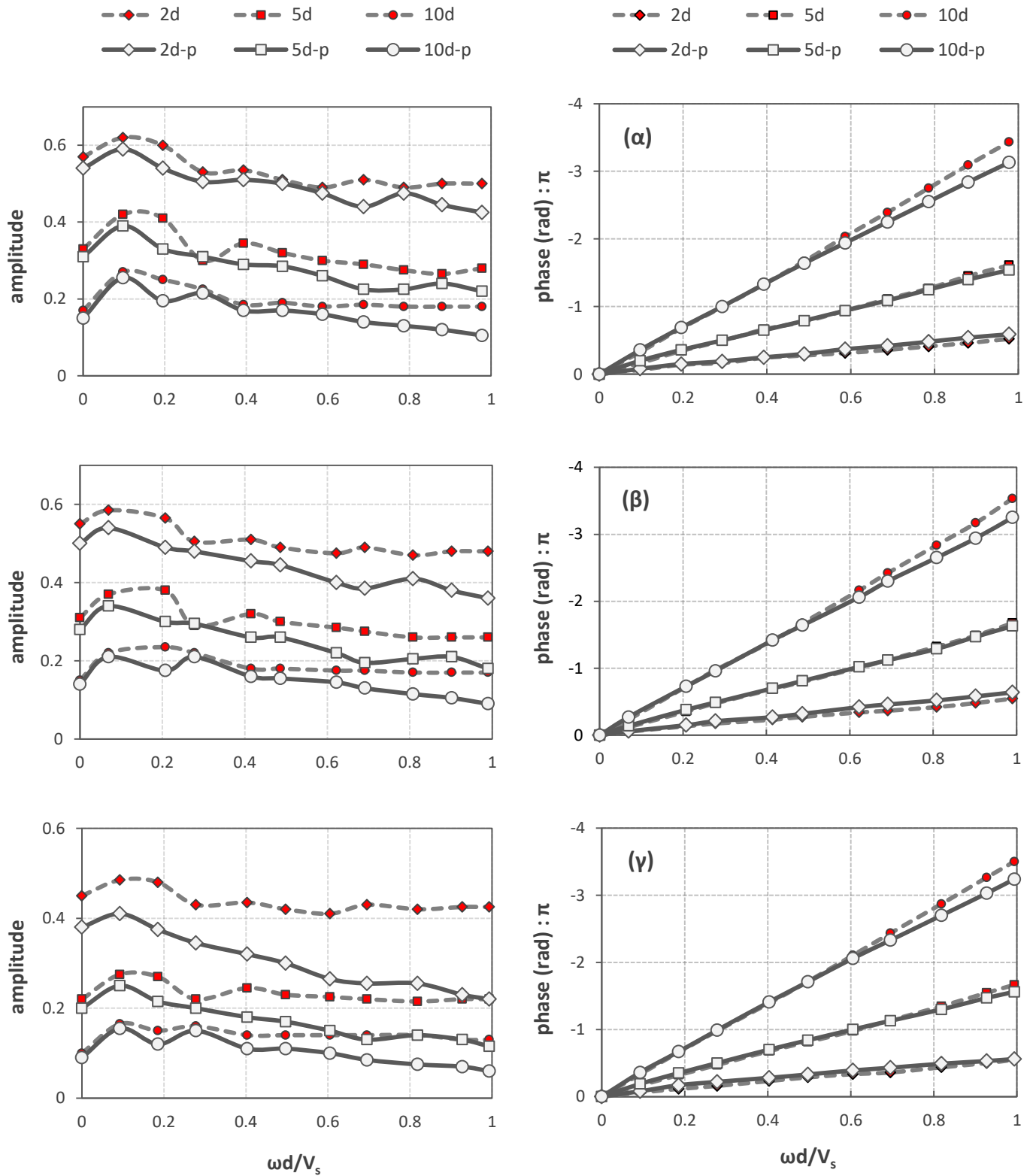
Σχήμα 2.18: Ελαστική ανάλυση: (α1) Πραγματικό και (α2) φανταστικό μέρος του σ.α. για λόγο  $E_p/E_s = 500$ , (β1) πραγματικό και (β2) φανταστικό μέρος του σ.α. για λόγο  $E_p/E_s = 100$ , συναρτήσει διαφορετικών ακτινικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$



Σχήμα 2.19: Ελαστική ανάλυση: Σύγκριση (α) του μέτρου του σ.α. και (β) της διαφοράς φάσης του σ.α., ως προς διαφορετικές ακτινικές αποστάσεις (2d, 5d, 10d), διαφορετικούς λόγους  $E_p/E_s$  (1000, 500, 100) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$

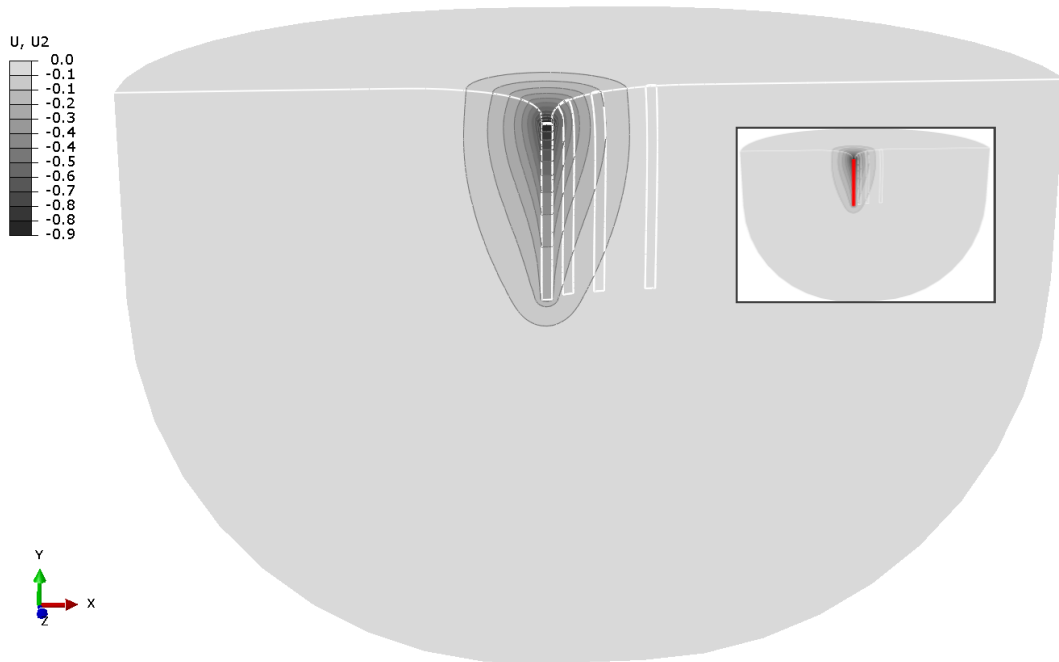


**Σχήμα 2.20: Ελαστική δυναμική** ανάλυση: **(α)** Στιγμιότυπο ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  τη χρονική στιγμή  $T/4$ , όπου  $T = 0.9 \text{ sec}$ , για λόγο  $E_p / E_s = 1000$ , **(β)** Στιγμιότυπο ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  τη χρονική στιγμή  $T/4$ , όπου  $T = 0.3 \text{ s}$ , για λόγο  $E_p / E_s = 100$

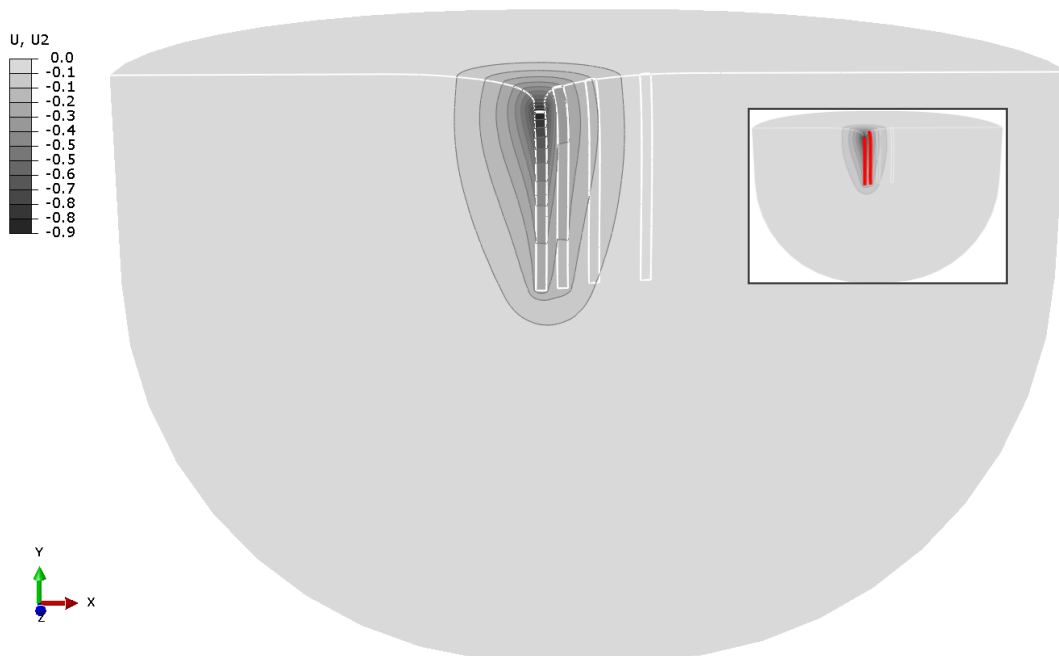


**Σχήμα 2.21: Ελαστική** ανάλυση: Επίδραση της ύπαρξης του δεύτερου πασσάλου, συγκριτικά με τη μη ύπαρξη αυτού, στο μέτρο και τη διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών ακτινικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για λόγους  $E_p/E_s =$  (α) 1000, (β) 500, (γ) 100

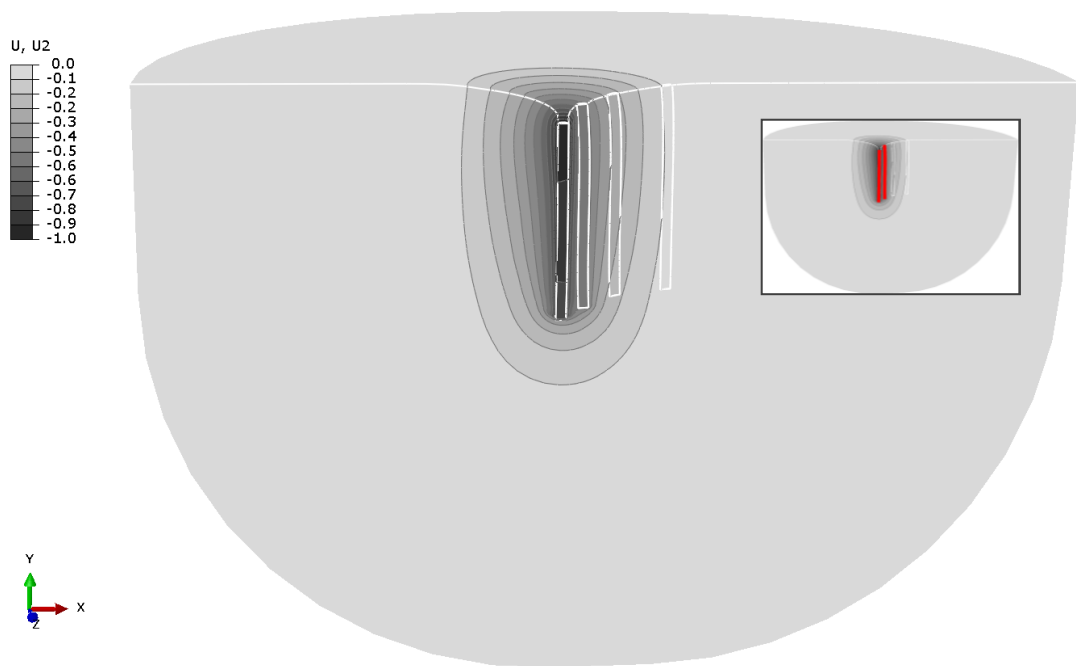




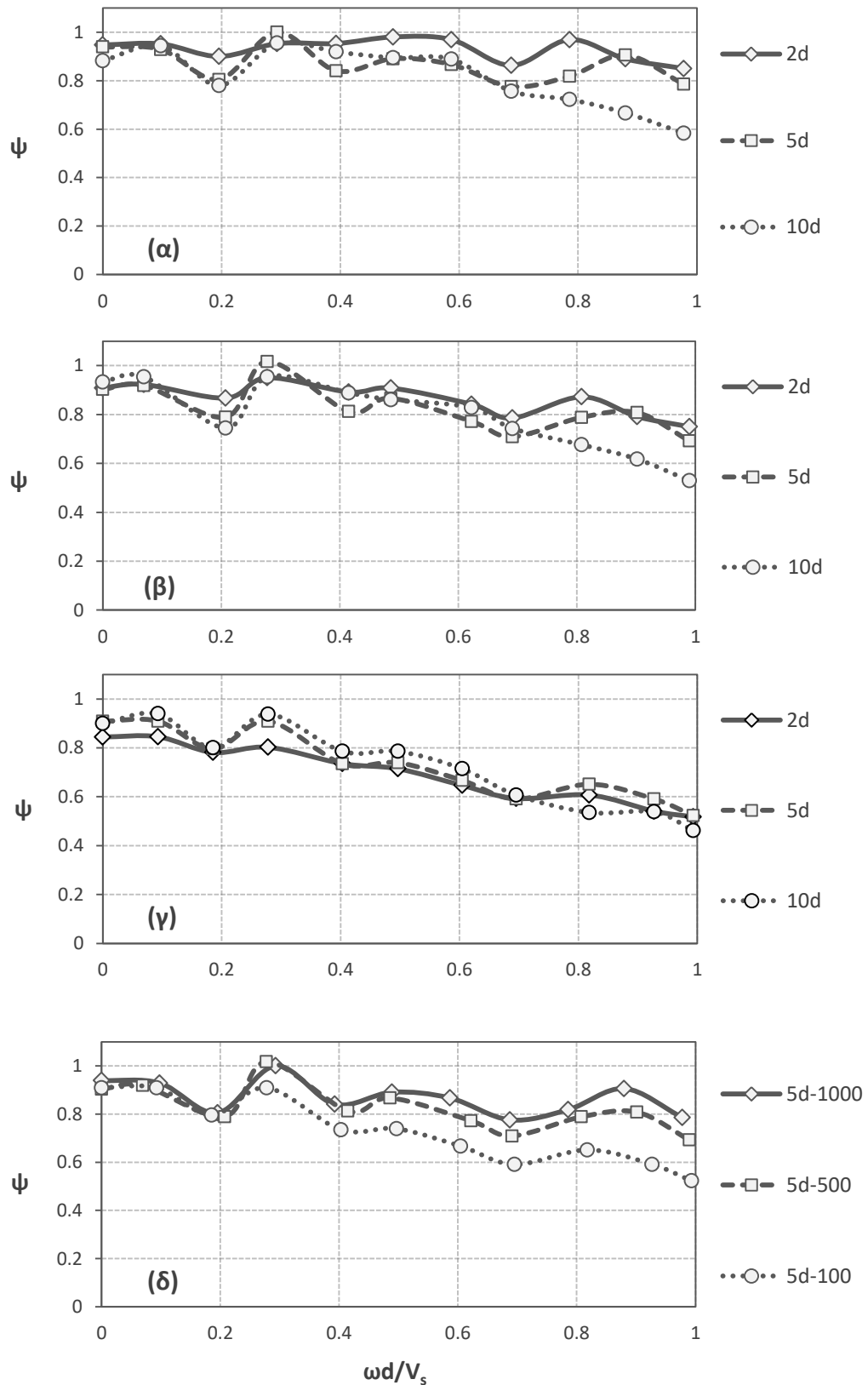
**Σχήμα 2.22:** Ελαστική δυναμική ανάλυση: (α) Στιγμιότυπο ταλάντωσης του πασσάλου Od τη χρονική στιγμή T/4 (χωρίς την ύπαρξη δεύτερου πασσάλου), όπου  $T = 0.3 \text{ sec}$ , για λόγο  $E_p / E_s = 100$



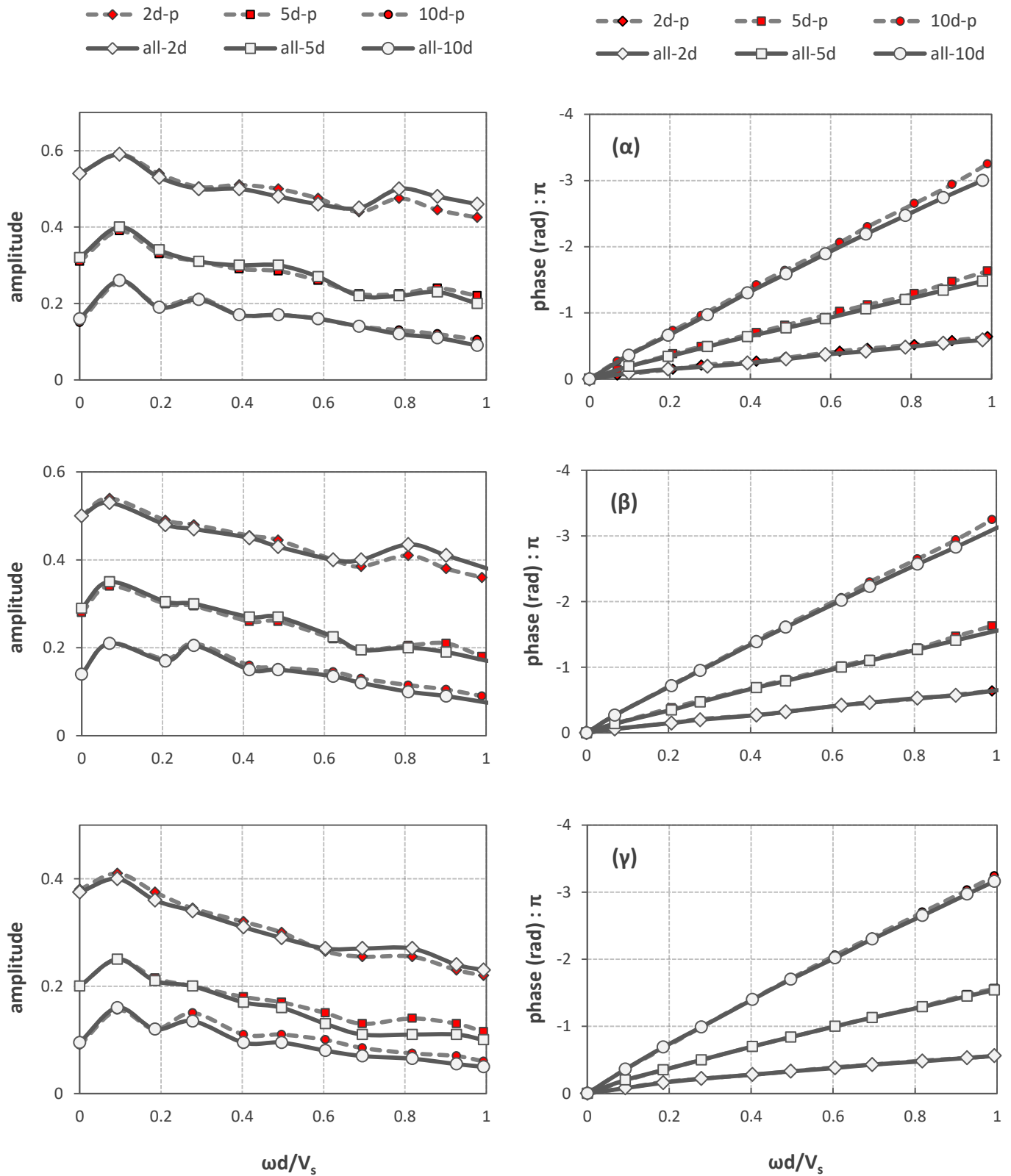
**Σχήμα 2.23:** Ελαστική δυναμική ανάλυση: (α) Στιγμιότυπο ταλάντωσης του πασσάλου Od τη χρονική στιγμή T/4 (με ύπαρξη δεύτερου πασσάλου), όπου  $T = 0.3 \text{ sec}$ , για λόγο  $E_p / E_s = 100$



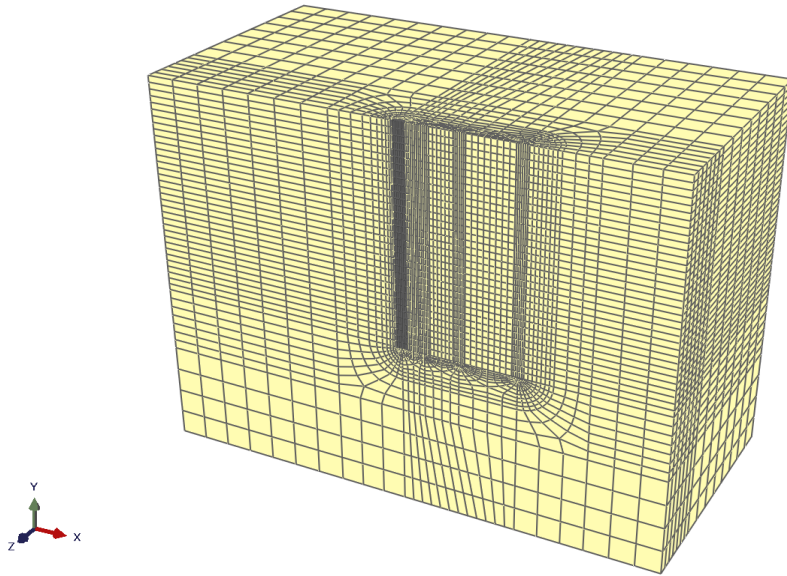
**Σχήμα 2.24:** Ελαστική δυναμική ανάλυση: (α) Στιγμιότυπο ταλάντωσης του πασσάλου 0d τη χρονική στιγμή  $T/4$  (με ύπαρξη δεύτερου πασσάλου), όπου  $T = 0.9$  sec, για λόγο  $E_p / E_s = 1000$



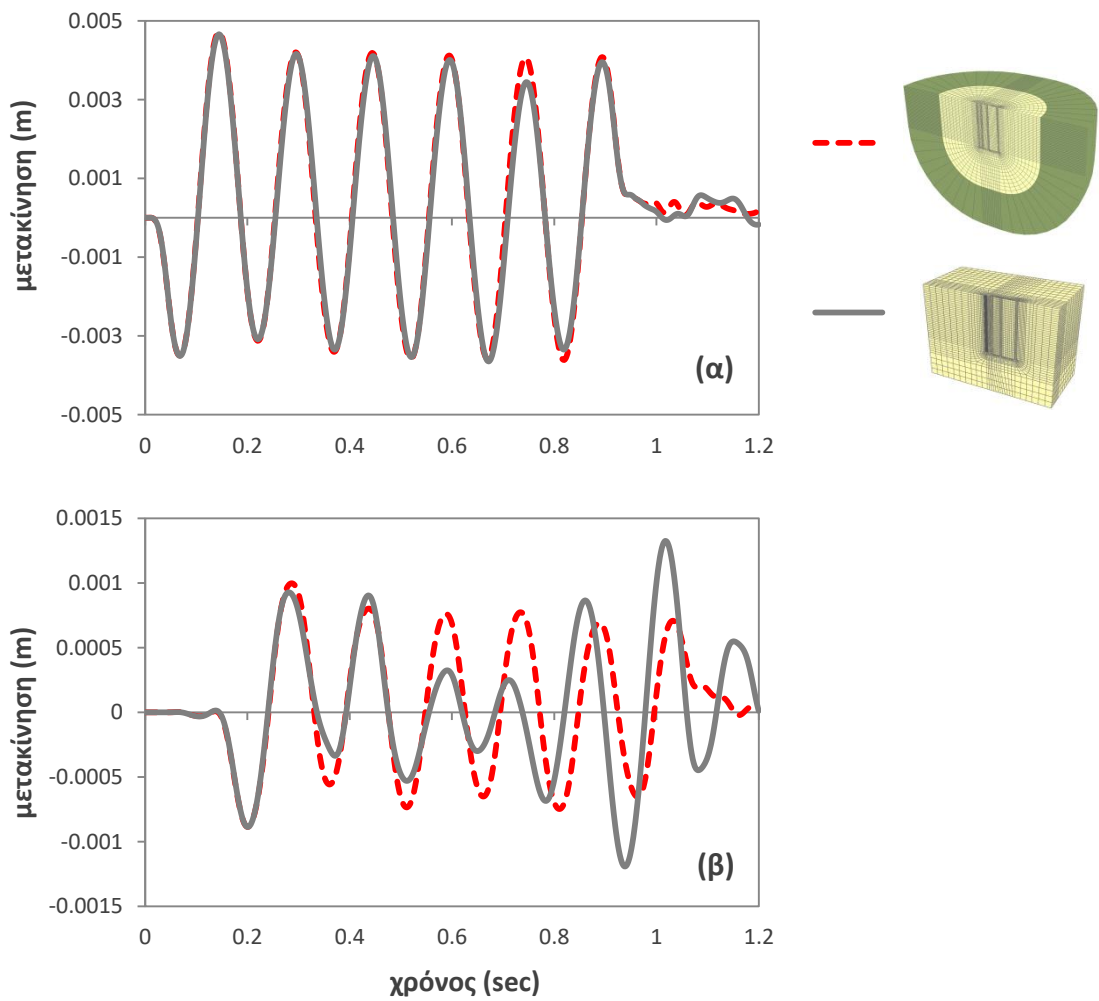
**Σχήμα 2.25:** Ελαστική ανάλυση: Μειωτικός συντελεστής  $\psi$ , συναρτήσει διαφορετικών ακτινικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της παραμέτρου  $\alpha_0$ , για λόγο  $E_p/E_s =$  (α) 1000, (β) 500, (γ) 100. (δ) Μειωτικός συντελεστής  $\psi$ , συναρτήσει ακτινικής απόστασης 5d και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για λόγο  $E_p/E_s = 1000, 500, 100$



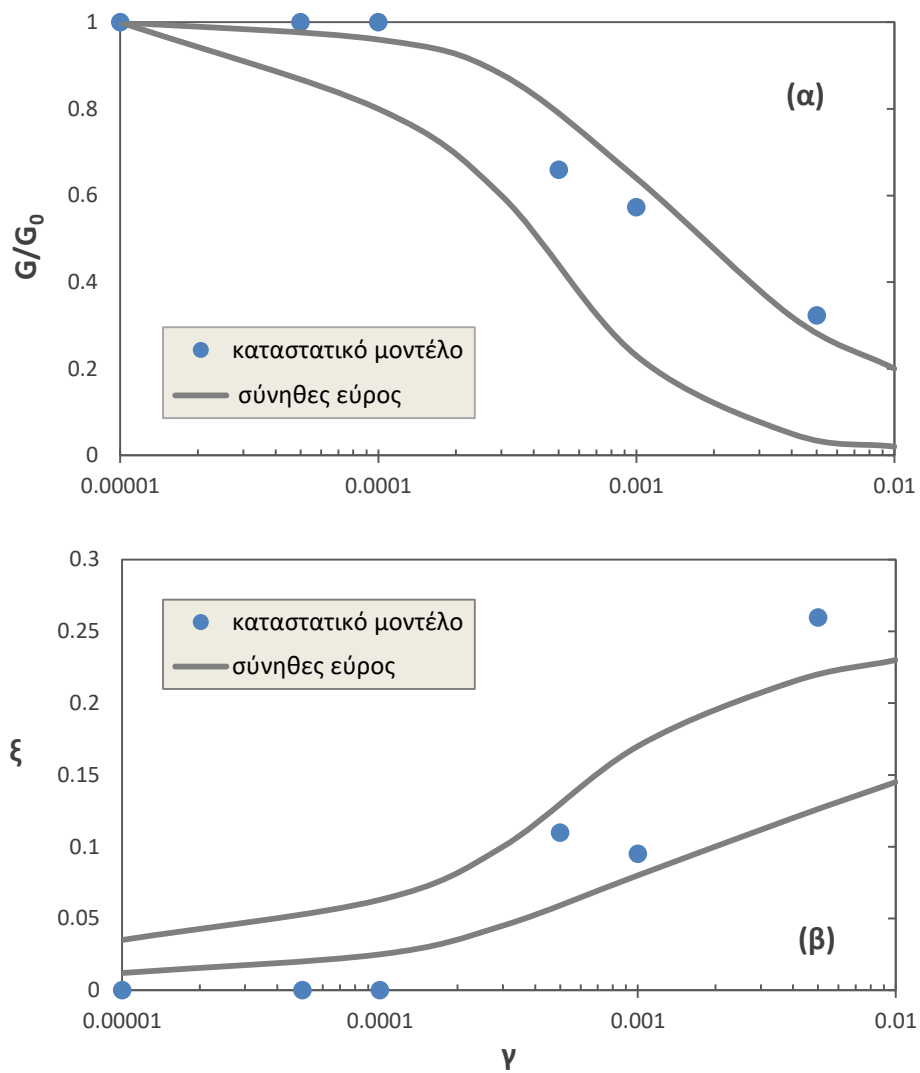
**Σχήμα 2.26:** Ελαστική ανάλυση: Επίδραση της ύπαρξης όλων των πασσάλων (0d, 2d, 5d, 10d), συγκριτικά με την ύπαρξη δύο πασσάλων (0d, xd, όπου  $x = 2, 5, 10$ ), στο μέτρο και τη διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για λόγους  $E_p/E_s = (\alpha) 1000, (\beta) 500, (\gamma) 100$



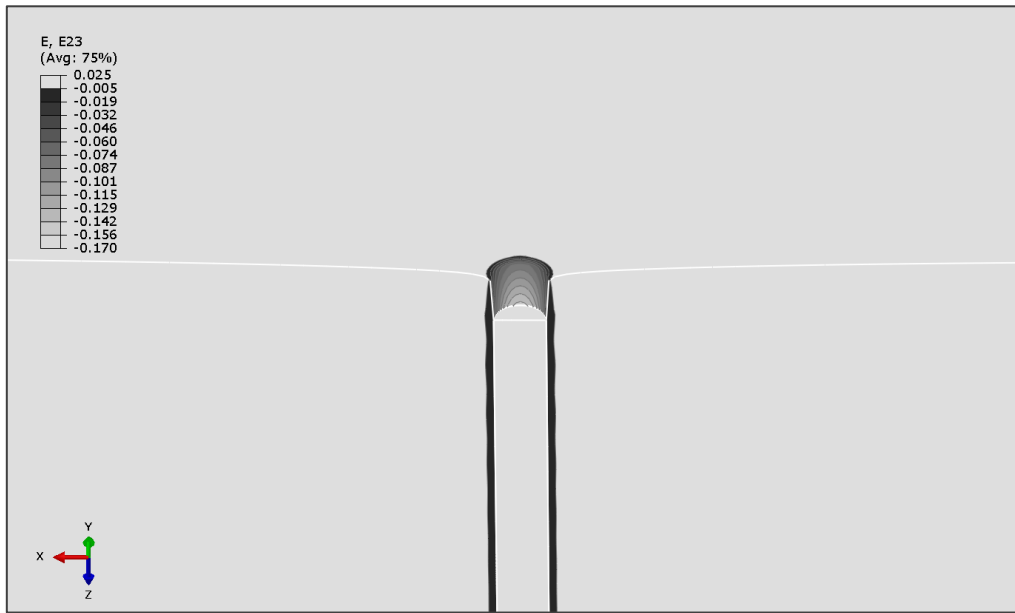
Σχήμα 2.27: Τρισδιάστατο προσομοίωμα χωρίς την ύπαρξη απορροφητικών συνόρων



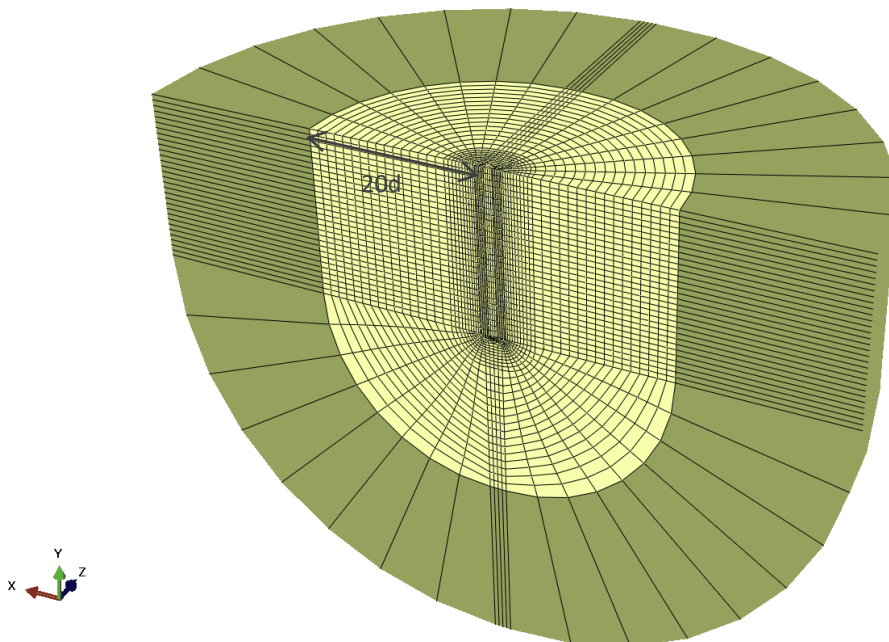
Σχήμα 2.28: Μη ελαστική ανάλυση: Κατακόρυφη μετακίνηση σημείου της επιφάνειας του εδάφους που απέχει από τον πάσσαλο 0d (α) 2d και (β) 10d, συναρτήσεως του χρόνου



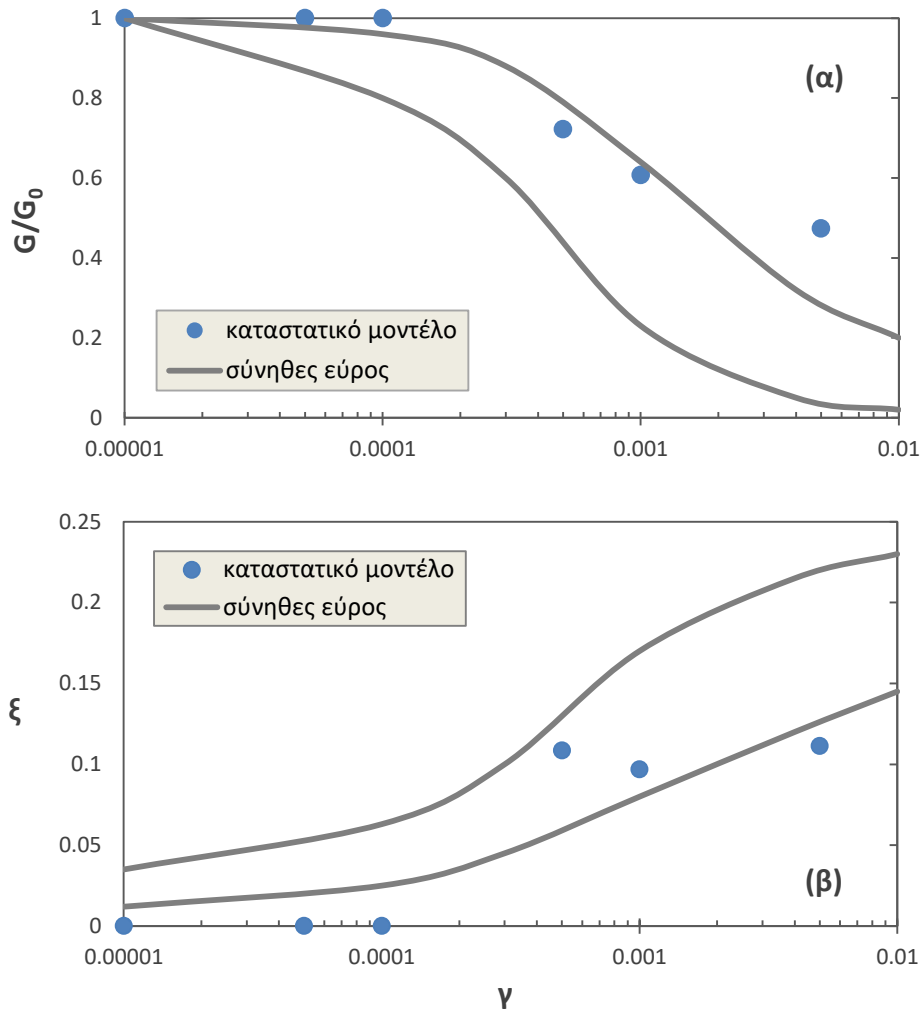
Σχήμα 2.29: (α) Καμπύλες  $G/G_0 - \gamma$ , (β) Καμπύλες  $\xi - \gamma$  : Σύγκριση καμπυλών από βιβλιογραφία με το καταστατικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ( $G/S_u \approx 600$ )



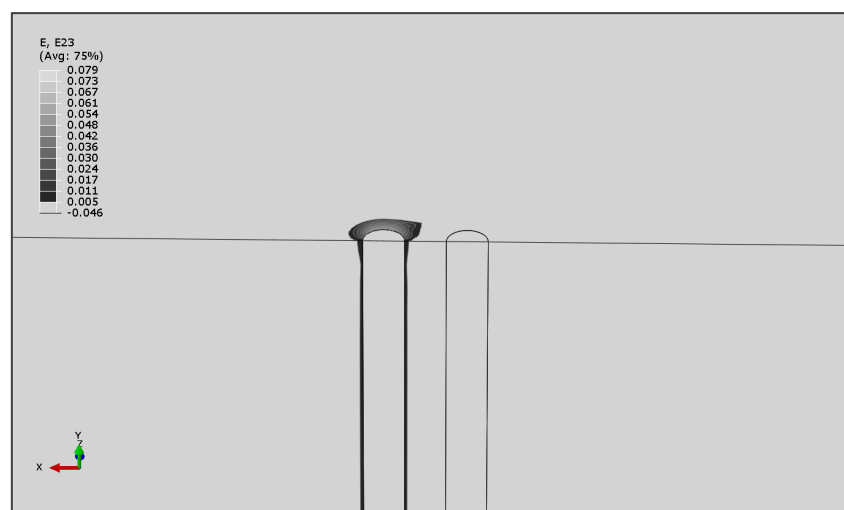
**Σχήμα 2.30:** Μη ελαστική δυναμική ανάλυση ( $G/S_u \approx 600$ ): Διατμητικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται τη χρονική στιγμή  $T/4$  ( $T = 0.45$  sec). Με ανοιχτό γκρι χρώμα είναι οι διατμητικές παραμορφώσεις με τιμές μικρότερες του 0.005 (σε απόλυτη τιμή)



**Σχήμα 2.31:** Τρισδιάστατο προσομοίωμα με απορροφητικά σύνορα (infinite elements, πράσινο χρώμα)

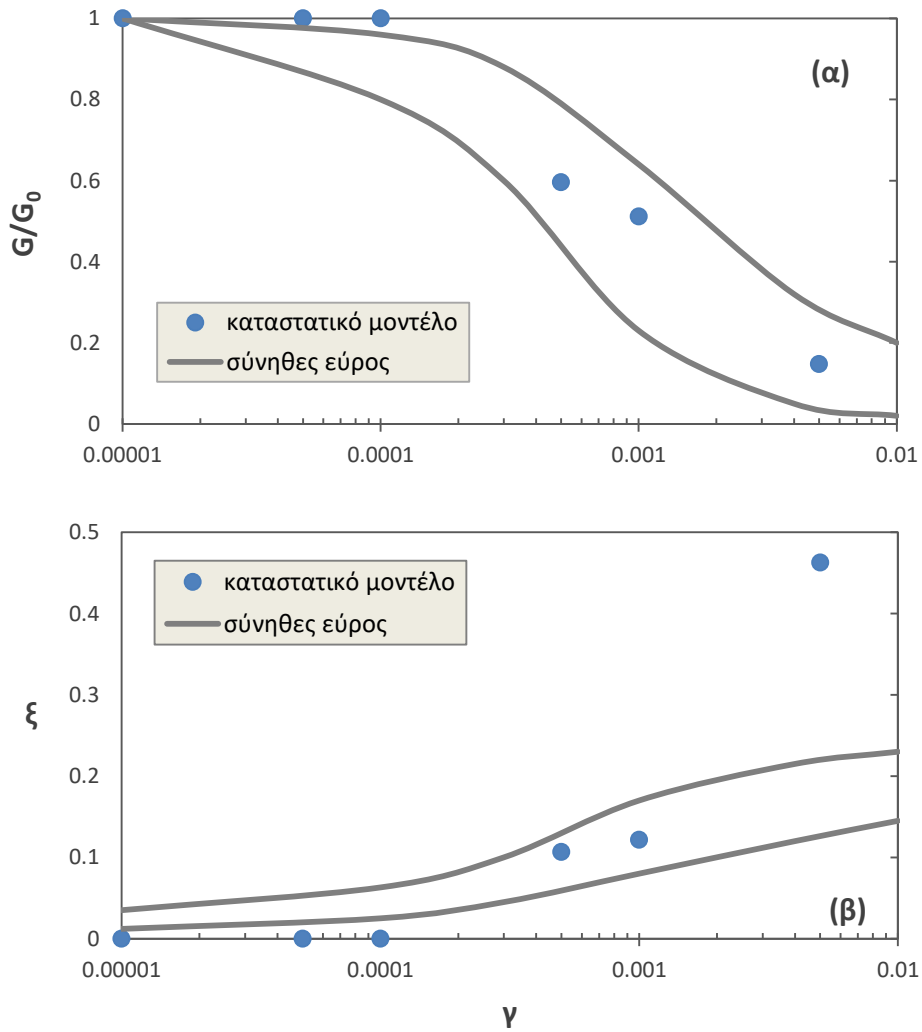


Σχήμα 2.32: (α) Καμπύλες  $G/G_0 - \gamma$ , (β) Καμπύλες  $\xi - \gamma$  : Σύγκριση καμπυλών από βιβλιογραφία με το καταστατικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ( $G/S_u \approx 300$ )

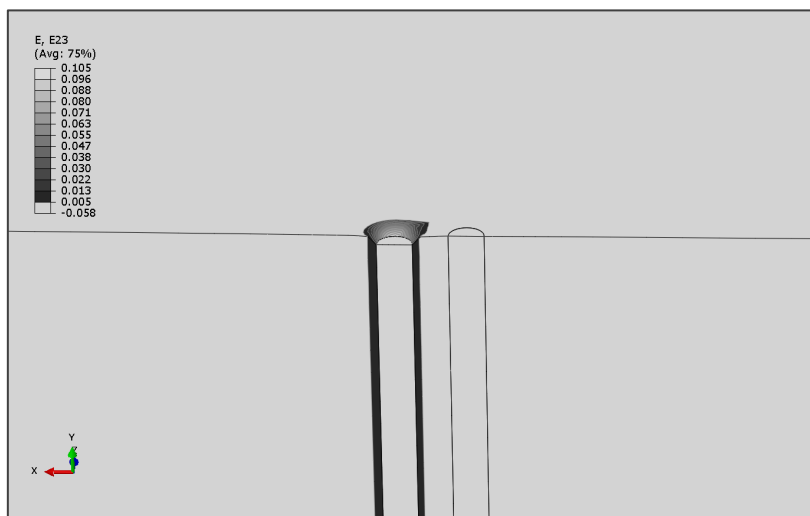


Σχήμα 2.33: Μη ελαστική δυναμική ανάλυση ( $G/S_u \approx 300$ ): Διατμητικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται τη χρονική στιγμή  $T/4$  ( $T = 0.6$  sec). Με ανοιχτό γκρι χρώμα είναι οι διατμητικές παραμορφώσεις με τιμές μικρότερες του 0.005 (σε απόλυτη τιμή)

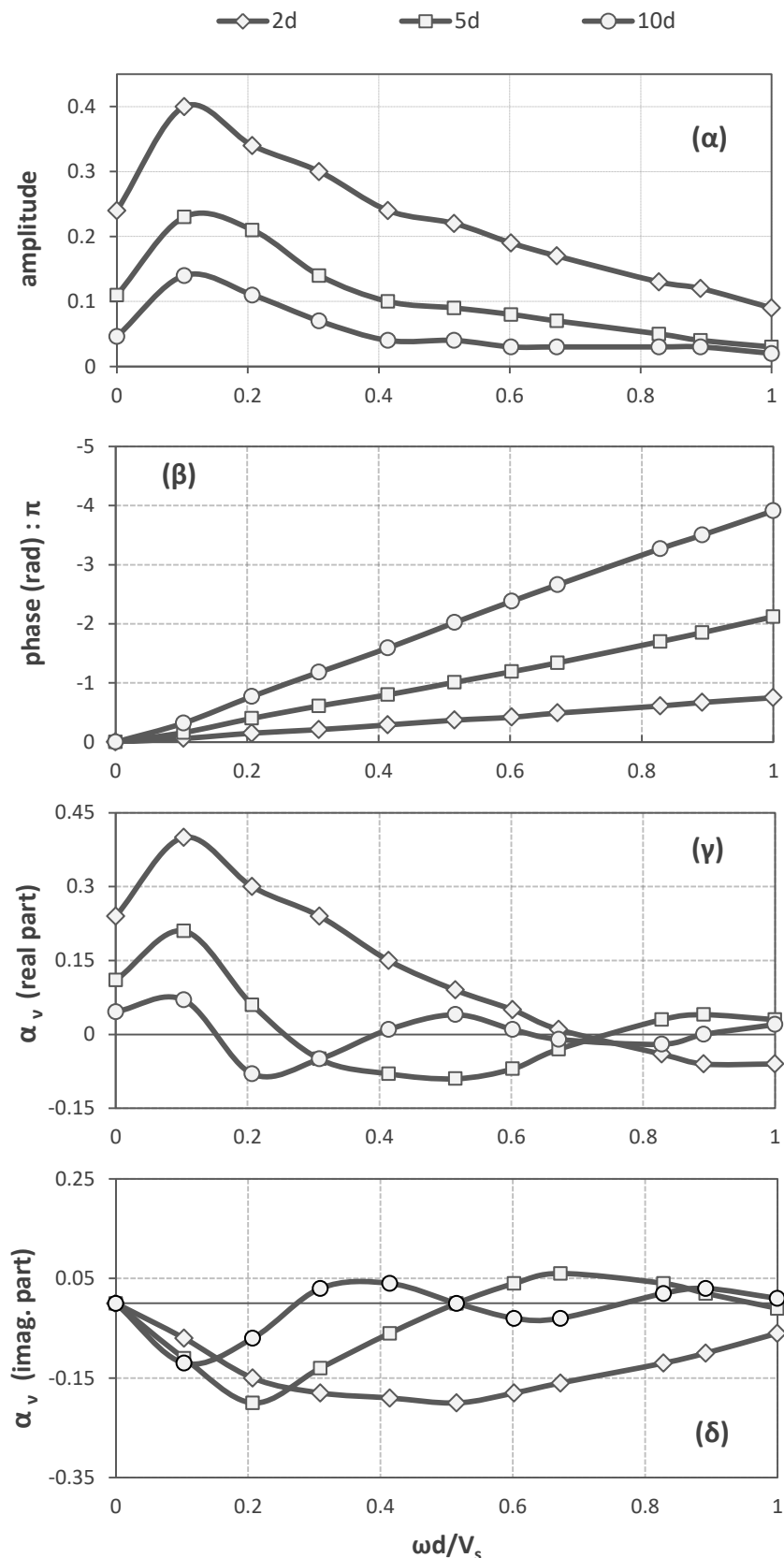




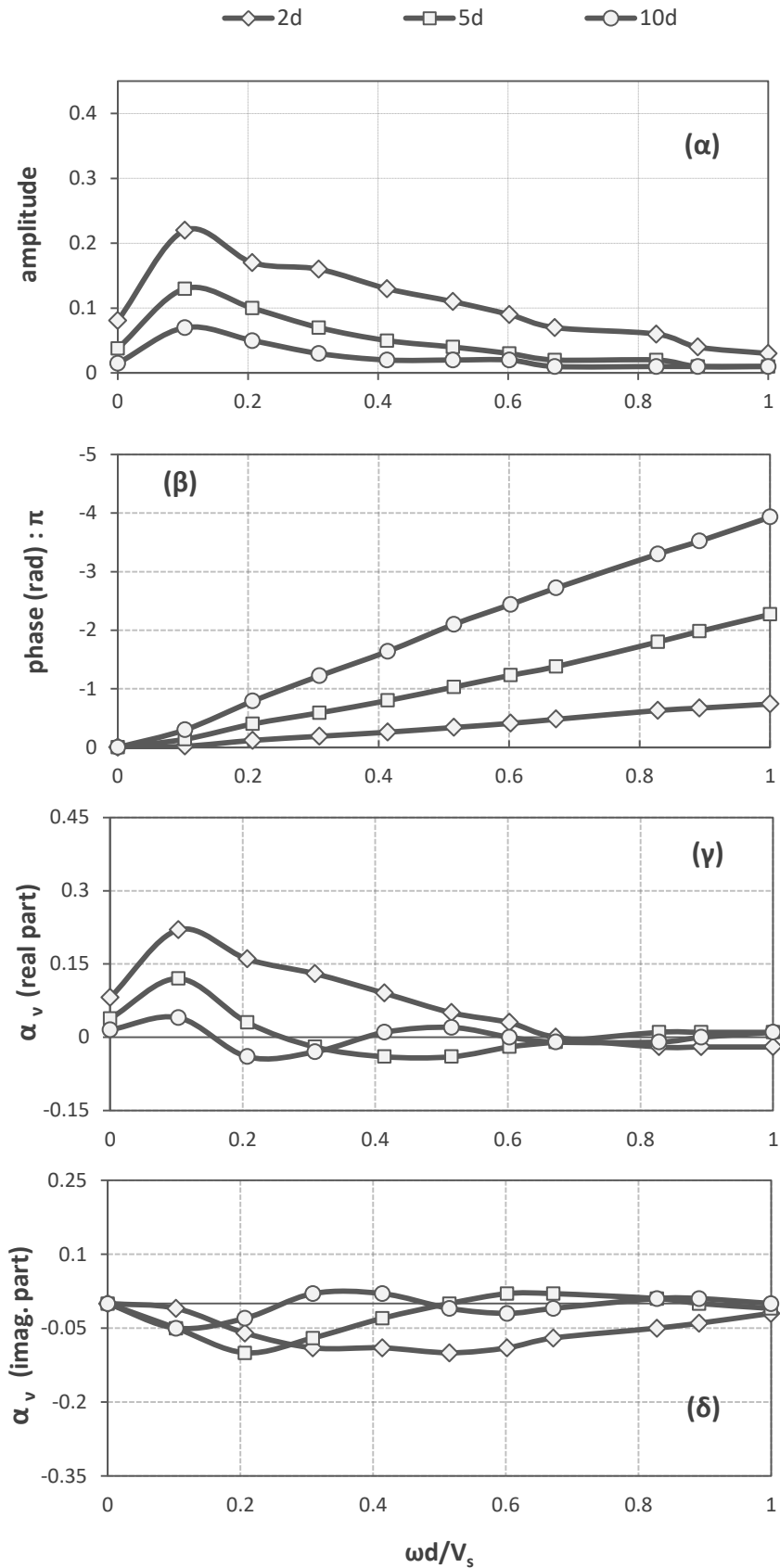
Σχήμα 2.34: (α) Καμπύλες  $G/G_0 - \gamma$ , (β) Καμπύλες  $\xi - \gamma$  : Σύγκριση καμπυλών από βιβλιογραφία με το καταστατικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ( $G/S_u \approx 1350$ )



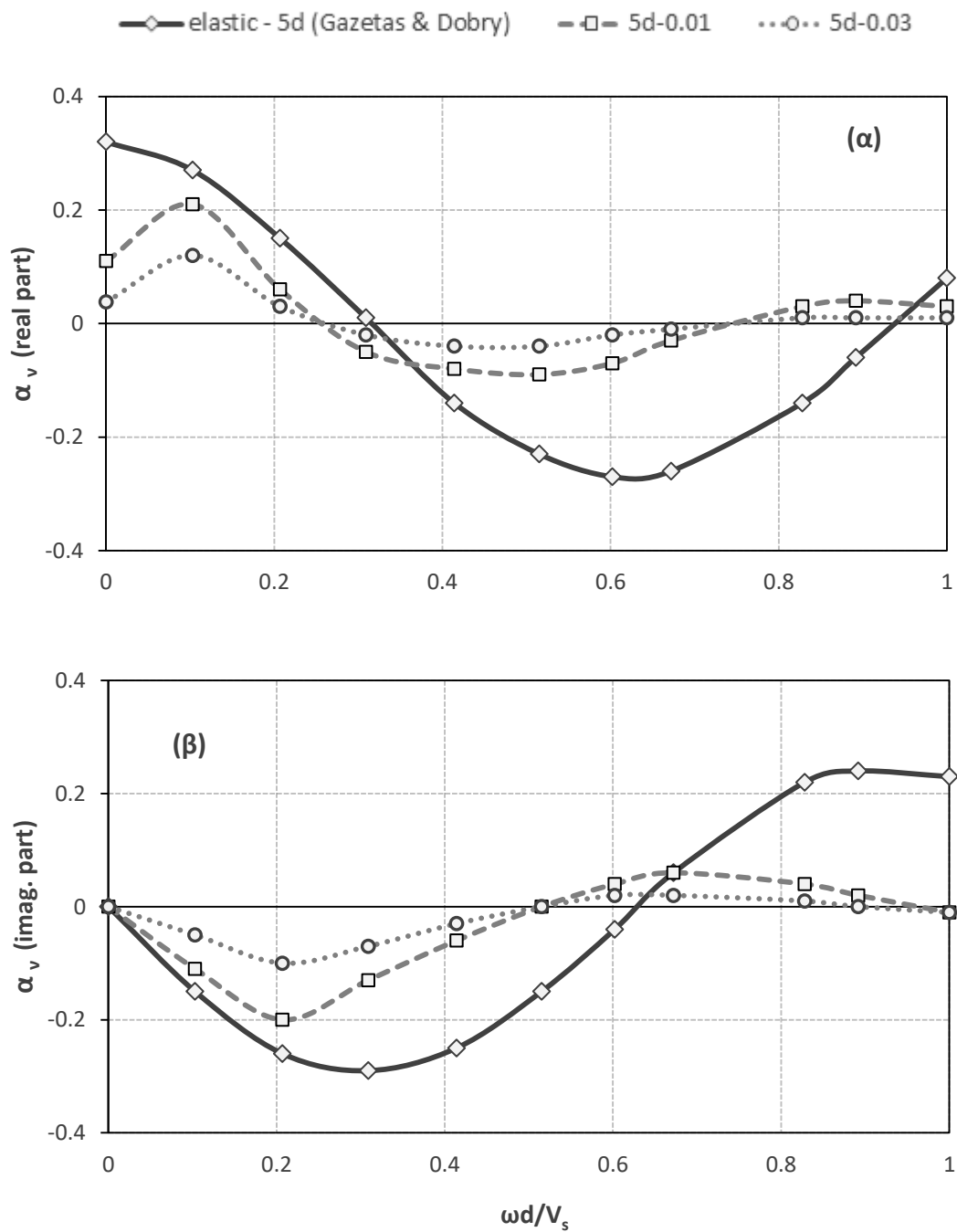
Σχήμα 2.35: Μη ελαστική δυναμική ανάλυση ( $G/S_u \approx 1350$ ): Διατμητικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται τη χρονική στιγμή  $T/4$  ( $T = 0.3$  sec). Με ανοιχτό γκρι χρώμα είναι οι διατμητικές παραμορφώσεις με τιμές μικρότερες του **0.005** (σε απόλυτη τιμή)



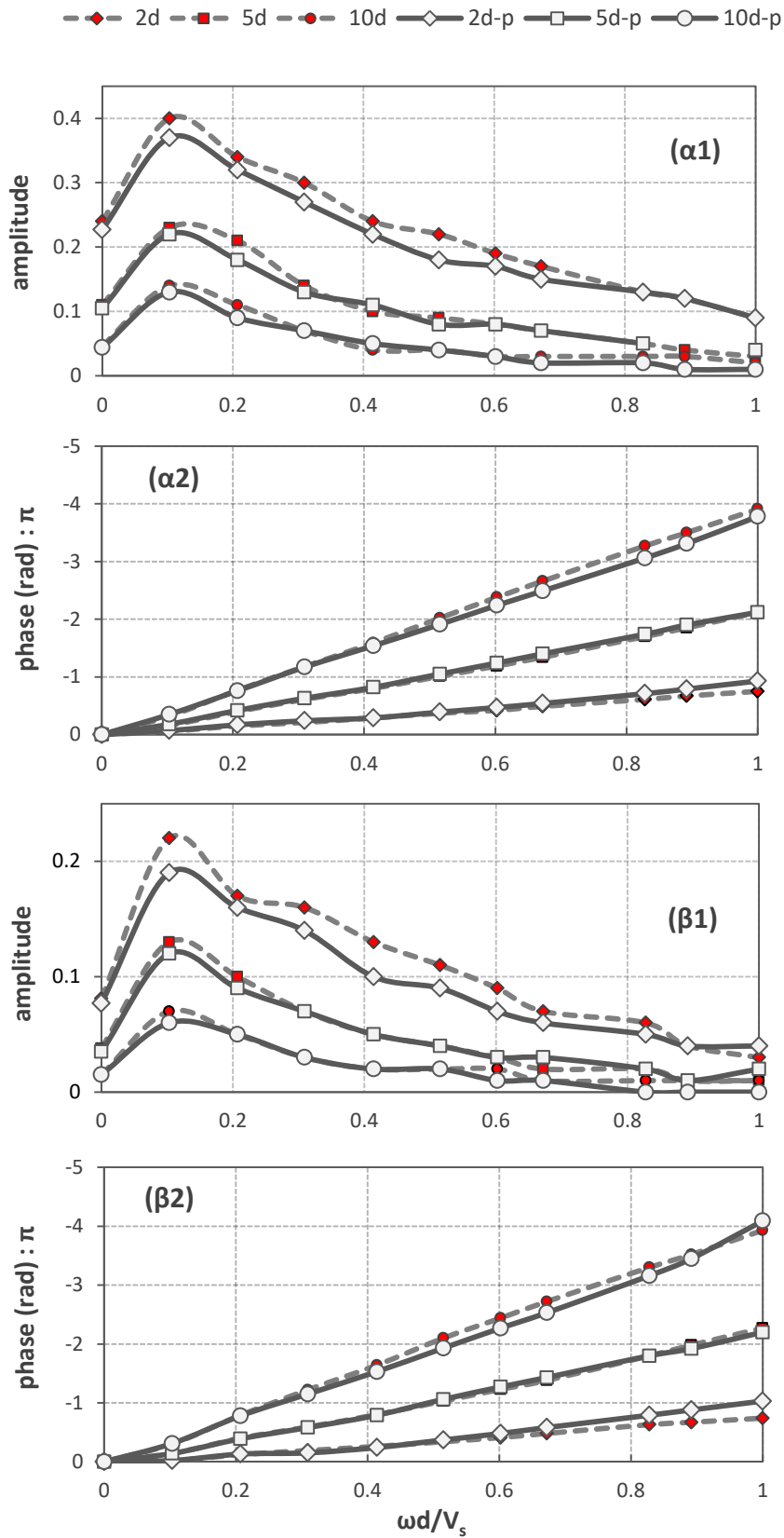
**Σχήμα 2.36:** Μη ελαστική ανάλυση ( $G/S_u=600$ ): (α) Μέτρο του σ.α., (β) διαφορά φάσης του σ.α., (γ) πραγματικό μέρος του σ.α., (δ) φανταστικό μέρος του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών ακτινικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για κατακόρυφο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με **0.01 m**.



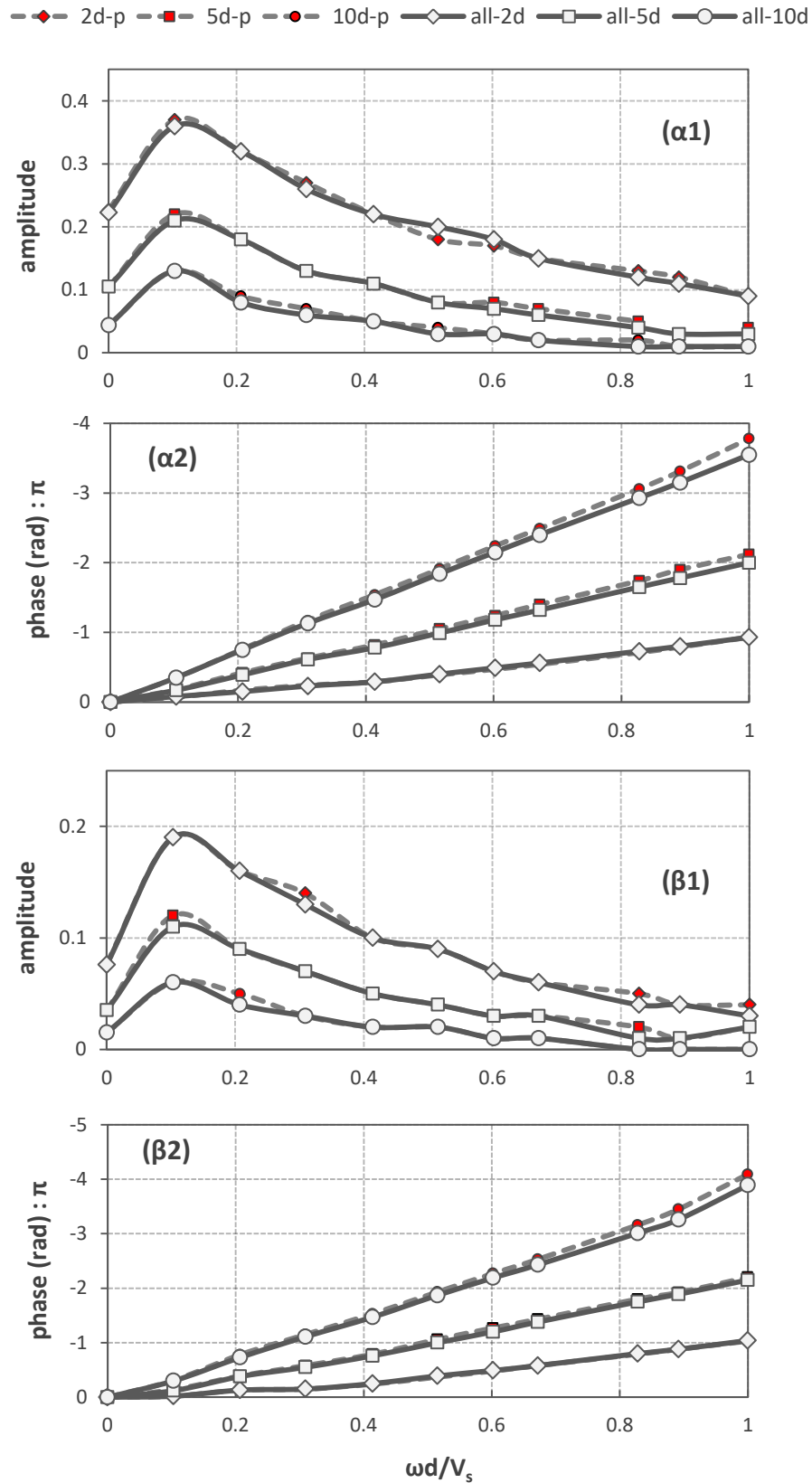
**Σχήμα 2.37:** Μη ελαστική ανάλυση ( $G/S_v=600$ ): (α) Μέτρο του σ.α., (β) διαφορά φάσης του σ.α., (γ) πραγματικό μέρος του σ.α., (δ) φανταστικό μέρος του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών ακτινικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για κατακόρυφο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου 0d ίσο με **0.03 m**.



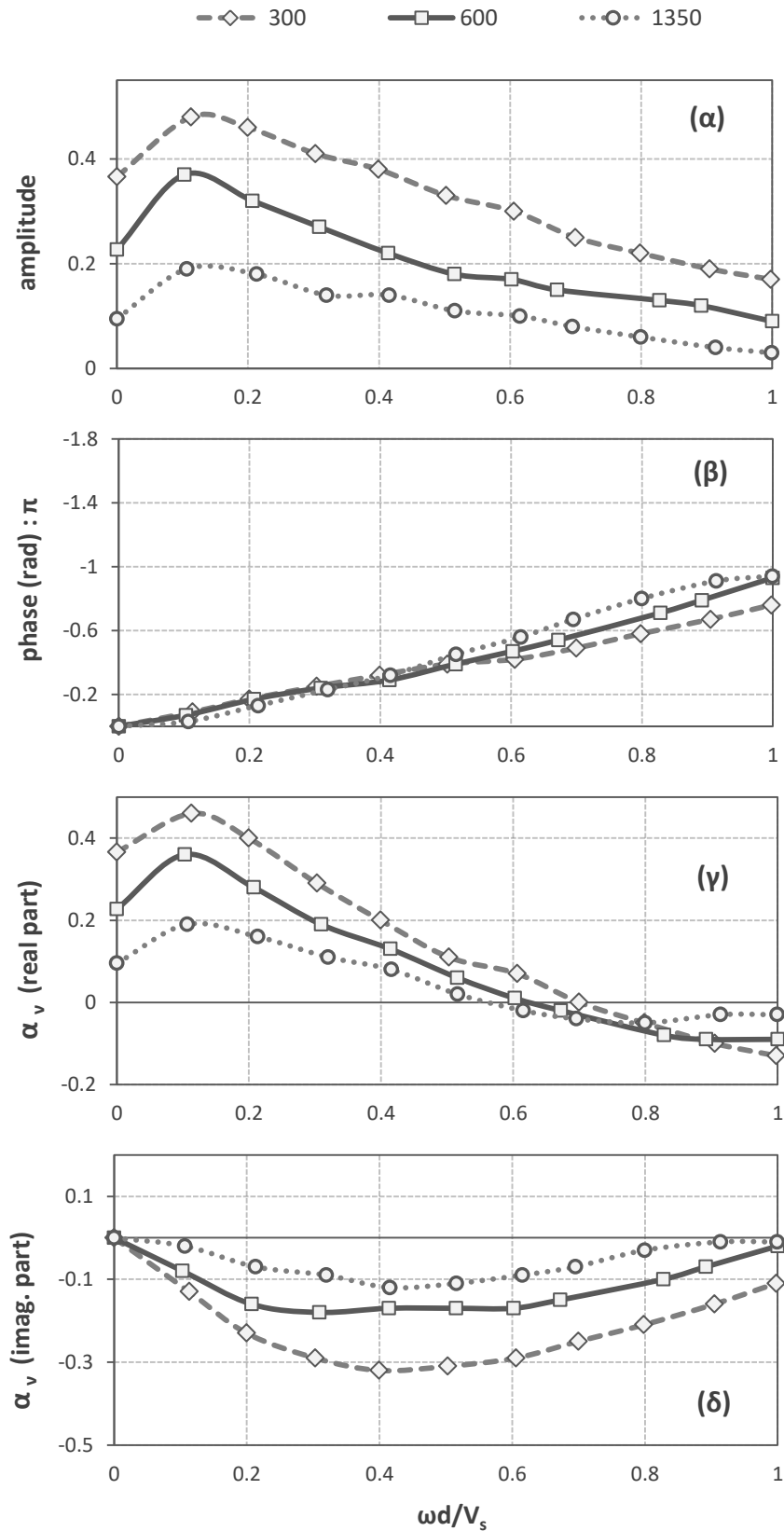
**Σχήμα 2.38:** (α) Πραγματικό μέρος του σ.α., (β) φανταστικό μέρος του σ.α.: Σύγκριση των **μη ελαστικών** αναλύσεων από το ABAQUS ( $G/S_u=600$ ), για κατακόρυφο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με 0.01 και 0.03, με την **ελαστική** λύση από τη θεωρία, για ακτινική απόσταση  $5d$ , συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ .



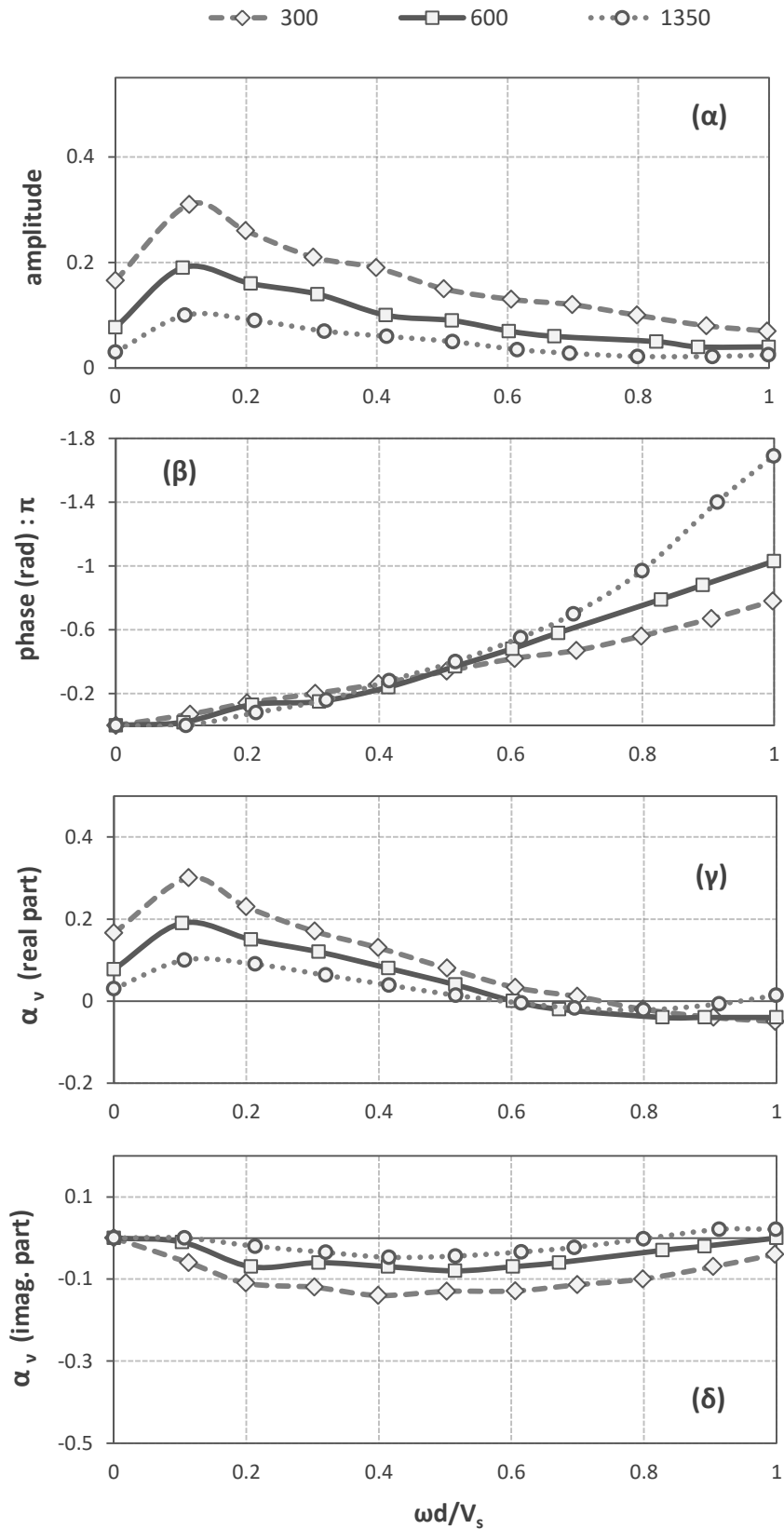
**Σχήμα 2.39: Μη ελαστική** ανάλυση ( $G/S_u=600$ ): Επίδραση της ύπαρξης του δεύτερου πασσάλου, συγκριτικά με τη μη ύπαρξη αυτού, στο μέτρο και τη διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών ακτινικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για κατακόρυφο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου 0d ίσο με **(α1, α2) 0.01 m** και **(β1, β2) 0.03m**



**Σχήμα 2.40:** Μη ελαστική ανάλυση ( $G/S_u=600$ ),: Επίδραση της ύπαρξης όλων των πασσάλων (0d, 2d, 5d, 10d), συγκριτικά με την ύπαρξη δύο πασσάλων (0d, xd, όπου  $x = 2, 5, 10$ ), στο μέτρο και τη διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για κατακόρυφο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου 0d ίσο με **(α1, α2) 0.01 m** και **(β1, β2) 0.03 m**

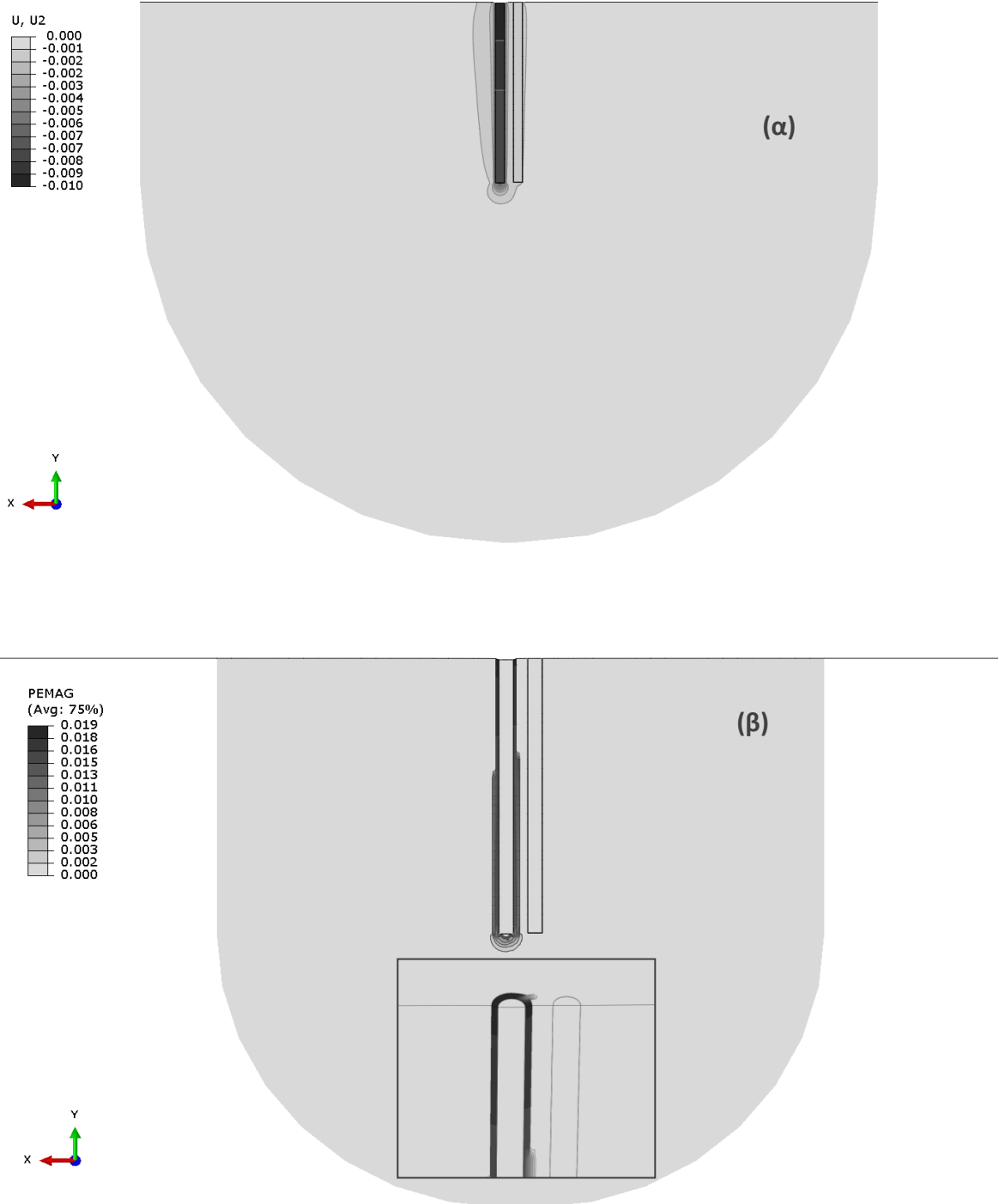


**Σχήμα 2.41: Μη ελαστική ανάλυση:** Σύγκριση (α) του μέτρου του σ.α., (β) της διαφοράς φάσης του σ.α., (γ) του πραγματικού μέρους του σ.α. και (δ) του φανταστικού μέρους του σ.α. συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για σταθερή ακτινική απόσταση  $2d$ , λόγους  $G/S_u = 1350, 600, 300$  και κατακόρυφο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με  $0.01 \text{ m}$

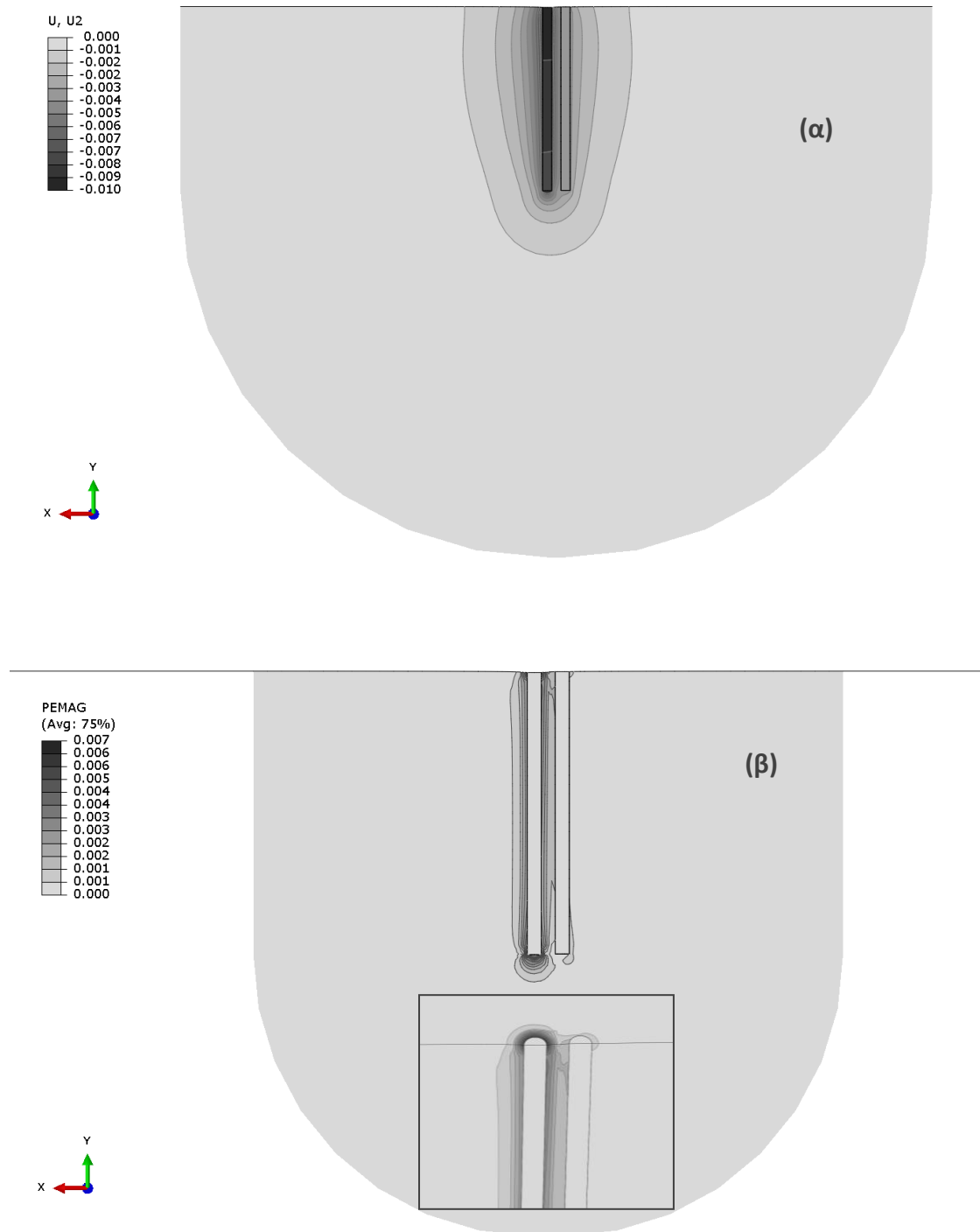


Σχήμα 2.42: Μη ελαστική ανάλυση: Σύγκριση (α) του μέτρου του σ.α., (β) της διαφοράς φάσης του σ.α., (γ) του πραγματικού μέρους του σ.α. και (δ) του φανταστικού μέρους του σ.α. συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για σταθερή ακτινική απόσταση  $2d$ , λόγους  $G/S_u = 1350, 600, 300$  και κατακόρυφο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με  $0.03 \text{ m}$





Σχήμα 2.43: Μη ελαστική στατική ανάλυση ( $G/S_u \approx 1350$ ): (α) Ισοϋψείς κατακόρυφων μετακινήσεων, (β) ισοϋψείς πλαστικών παραμορφώσεων, για κατακόρυφη μετακίνηση του πασσάλου  $0d$  ίση με  $0.01\text{ m}$



Σχήμα 2.44: Μη ελαστική στατική ανάλυση ( $G/S_u \approx 300$ ): (α) Ισοψείς κατακόρυφων μετακινήσεων, (β) ισοψείς πλαστικών παραμορφώσεων, για κατακόρυφη μετακίνηση του πασσάλου  $0d$  ίση με 0.01 m

# 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

---

## ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

3.1 Στατικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης

3.2 Δυναμικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης

3.2.1 Ελαστικό έδαφος

3.2.2 Μη ελαστικό έδαφος



## 3 Οριζόντιοι συντελεστές αλληλεπίδρασης

### 3.1 Στατικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης

#### 3.1.1 Σκοπός

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να μελετηθεί η συμπεριφορά των οριζόντιων στατικών συντελεστών αλληλεπίδρασης (σ.α.) ( $\alpha_h$ ) μεταξύ πασσάλων που απέχουν απόσταση 2d, 5d και 10d ο ένας από τον άλλον ή μεταξύ πασσάλου και σημείου του εδάφους (αν ο δεύτερος πάσσαλος απουσιάζει), όπου d η διάμετρος του πασσάλου (1 m), για μετάβαση από το πλήρως ελαστικό έδαφος στο εντόνως ανελαστικό. Σε αντίθεση με τον κατακόρυφο συντελεστή αλληλεπίδρασης, όπου ήταν ο ίδιος για όλα εκείνα τα σημεία που απείχαν από τον πάσσαλο 0d ίση απόσταση (2d, 5d και 10d), ο οριζόντιος σ.α. μεταξύ πασσάλου και σημείου του εδάφους που απέχει σταθερή απόσταση από τον πάσσαλο μεταβάλλεται, καθώς αλλάζει η γωνία  $\theta$  που ορίζεται από τη διεύθυνση της μετακίνησης του πασσάλου και την ευθεία που ενώνει το σημείο με τον πάσσαλο. Για το λόγο αυτό υπολογίζονται δύο σ.α.:

- ο  $\alpha_{h0}$ , για  $\theta = 0^\circ$  και
- ο  $\alpha_{h90}$ , για  $\theta = 90^\circ$

Γνωρίζοντας αυτούς τους δύο, προκύπτουν οι σ.α. για οποιαδήποτε γωνία  $\theta$  είναι επιθυμητή βάση της σχέσης:

$$\alpha_h(\theta^\circ) \approx \alpha_h(0^\circ) \cos^2\theta + \alpha_h(90^\circ) \sin^2\theta \quad (\text{Poulos}) \quad (\text{A})$$

η εγκυρότητα της οποίας θα ελεγχθεί στη συνέχεια.

Θα εξετασθούν, όπως και προηγουμένως (στους κατακόρυφους σ.α.), οι τρεις περιπτώσεις, δηλαδή ( $\alpha$ ) η μη ύπαρξη δεύτερου πασσάλου, ( $\beta$ ) η ύπαρξη αυτού και ( $\gamma$ ) η ύπαρξη των “ενδιάμεσων” πασσάλων.

#### 3.1.2 Τρισδιάστατο προσομοίωμα

Προκειμένου, λοιπόν, να παραχθούν οι οριζόντιοι στατικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης, για ελαστικό και μη ελαστικό έδαφος, μεταξύ πασσάλου και σημείου εδάφους (περίπτωση ( $\alpha$ )), χρησιμοποιήθηκε το ήδη υπάρχον τρισδιάστατο προσομοίωμα του Σχήματος 2.10, ενώ για τις περιπτώσεις ( $\beta$ ) και ( $\gamma$ ) δημιουργήθηκε νέο προσομοίωμα (Σχήμα 3.1). Θεωρήθηκαν, όπως και πριν, συνθήκες πλήρους συγκόλλησης μεταξύ εδάφους και πασσάλων. Οι διαστάσεις των πασσάλων είναι  $L = 20$  m και  $d = 1$  m ( $L/d = 20$ ), ενώ οι ιδιότητές τους είναι οι εξής:

- μέτρο ελαστικότητας  $E_p = 25000 \text{ MPa}$
- λόγος poisson  $\nu = 0.2$
- ειδικό βάρος  $\gamma_p = 25 \text{ kN/m}^3$

Αντίστοιχα, οι ιδιότητες του εδάφους είναι:

- μέτρο ελαστικότητας  $E_s = 90 \text{ MPa}$  ( $E_p / E_s = 280$ )
- λόγος poisson  $\nu = 0.49$
- αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u = 50 \text{ kPa}$
- ειδικό βάρος  $\gamma_s = 17.5 \text{ kN/m}^3$

Στη συνέχεια, εξετάζεται αν τα σύνορα των μοντέλων είναι επαρκώς απομακρυσμένα από τον πάσσαλο  $0d$  ώστε να μην επηρεάζουν το παραμορφωσιακό πεδίο. Για το σκοπό αυτό έγιναν 2 ελαστικές αναλύσεις (μία για το κάθε μοντέλο) αφού ως γνωστόν οι ελαστικές παραμορφώσεις μεταδίδονται μακρύτερα από τις αντίστοιχες πλαστικές. Από τα **Σχήματα 3.2** και **3.3** φαίνεται ότι τα σύνορα δεν επηρεάζουν το μετακινησιακό πεδίο, τουλάχιστον για τιμές οριζόντιας μετακίνησης μεγαλύτερες ή ίσες του 1 % του ενός μέτρου. Συνεπώς, τα προσομοιώματα είναι κατάλληλα ως προς τις θέσεις των συνόρων τους.

### 3.1.3 Αποτελέσματα αναλύσεων – Σχολιασμός

Οι σ.α. για την **(α)** περίπτωση (απουσία του δεύτερου πασσάλου) παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.4**. Στον οριζόντιο άξονα του σχήματος το 0, όπως και προηγουμένως, συμβολίζει την πλήρη ελαστικότητα, ενώ οι υπόλοιπες τιμές (0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 και 0.1) αναφέρονται στην επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση του πασσάλου  $0d$  σε μη ελαστικό έδαφος. Προκειμένου αυτές οι οριζόντιες μετακινήσεις να συσχετισθούν με τη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση ( $Q_u$ ), έγινε μία ανελαστική ανάλυση, όπου στη κορυφή του πασσάλου τοποθετήθηκε οριζόντιο φορτίο  $Q_u$ . Για την εύρεση του φορτίου έγινε χρήση της σχέσης

$$Q_u = \sqrt{2M_u 9S_u d} = \sqrt{2 \times 2500 \text{ kNm} \times 9 \times 50 \text{ kPa} \times 1\text{m}} = 1500 \text{ kNm},$$

όπου  $M_u$  είναι η ροπή αντοχής του πασσάλου και θεωρήθηκε ίση με 2500 kNm. Η καμπύλη φορτίου – μετακίνησης που προέκυψε φαίνεται στο **Σχήμα 3.5**, βάση της οποίας είναι εφικτή η έκφραση του φορτίου που αντιστοιχεί στη κάθε μία προαναφερθείσα οριζόντια μετακίνηση ως ποσοστό του οριακού φορτίου  $Q_u$  (**Σχήμα 3.6**). Έχοντας αυτά υπόψη και παρατηρώντας τα τρία διαγράμματα του **Σχήματος 3.4** προκύπτουν τα εξής:

- στο **Σχήμα 3.4 (α)** που παρουσιάζονται οι οριζόντιοι σ.α., για γωνία  $\theta = 0^\circ$ , παρατηρείται, αρχικά, η μείωση των σ.α. με την αύξηση της απόστασης από τον πάσσαλο Od. Το φαινόμενο ήταν αναμενόμενο και οφείλεται στις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται, λόγω της τρισδιάστατης φύσης του προβλήματος, απομειώνοντας έτσι τις οριζόντιες μετακινήσεις. Ακόμα, στο ίδιο διάγραμμα είναι εμφανής η μείωση των σ.α. για μετάβαση από το ελαστικό στο εντόνως ανελαστικό πρόβλημα (όχι στον ίδιο βαθμό με το κατακόρυφο στατικό πρόβλημα). Το γεγονός αυτό εξηγείται παραστατικά, αν παρατηρήσει και συγκρίνει κανείς τα **Σχήματα 3.7** και **3.8**. Στο **Σχήμα 3.8** που το έδαφος είναι μη ελαστικό φαίνεται ότι οι οριζόντιες μετακινήσεις δεν μεταδίδονται μακριά, συγκρητικά με τις αντίστοιχες του ελαστικού εδάφους, λόγω των πλαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κοντά στην κορυφή του πασσάλου (**Σχήμα 3.9**). Επίσης, από το ίδιο διάγραμμα προκύπτει ότι για σημεία του εδάφους που βρίσκονται κοντά στον πάσσαλο Od, η απομείωση των σ.α. λόγω της ανελαστικότητας του εδάφους “κλειδώνει” σε μία συγκεκριμένη τιμή που μάλιστα είναι αρκετά μεγαλύτερη του μηδενός (στο αντίστοιχο κατακόρυφο στατικό πρόβλημα οι σ.α. πρακτικά μηδενίζονταν). Αυτό εξηγείται ως εξής: παρ’ όλο που το έδαφος έχει πλαστικοποιηθεί μπροστά από τον πάσσαλο, τα σημεία που βρίσκονται σχετικά κοντά είναι λογικό να νιώθουν το “σπρώξιμο” με αποτέλεσμα ο σ.α. να μην μηδενίζεται. Τέλος, στο ίδιο διάγραμμα τοποθετούνται οι σ.α. που προκύπτουν από τη σχέση

$$\beta_{HH} = 0.6 / (s/d)^{2/3} \quad \text{(Gazetas)} \quad \text{(B)}$$

που όπως φαίνεται αποτελεί μία εύλογη προσέγγιση για πρακτικά προβλήματα, κυρίως για αποστάσεις μεταξύ πασσάλων  $> 2d$ .

- στο **Σχήμα 3.4 (β)** που παρουσιάζονται οι οριζόντιοι σ.α., για γωνία  $\theta = 90^\circ$ , παρατηρούνται φαινόμενα ανάλογα με τους κατακόρυφους στατικούς σ.α. και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κοινή παράμετρος και των δύο προβλημάτων είναι η μετάδοση των παραμορφώσεων μέσω της διάτμησης (σε αντίθεση με την περίπτωση που  $\theta = 0^\circ$ , όπου οι παραμορφώσεις μεταδίδονται μέσω της συμπίεσης του εδάφους μπροστά από τον πάσσαλο Od). Έτσι, πέρα των φαινομένων που παρατηρήθηκαν και προηγουμένως, εδώ φαίνεται ότι οι σ.α. μειώνονται ραγδαία καθώς γίνεται η μετάβαση από το ελαστικό στο εντόνως ανελαστικό πρόβλημα, όπου και πρακτικά μηδενίζουν. Ακόμη, στο ίδιο διάγραμμα τοποθετούνται οι σ.α. που προκύπτουν από τη **σχέση (B)** πολλαπλασιασμένη με 0.5 (Gazetas) για να προκύψουν οι σ.α. για  $\theta=90^\circ$ .
- τέλος, στο **Σχήμα 3.4 (γ)** που παρουσιάζονται οι οριζόντιοι σ.α., για γωνία  $\theta=45^\circ$ , γίνεται σύγκριση μεταξύ των σ.α. που προκύπτουν από το Abaqus με

εκείνους που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τη **σχέση (Α)**, επιβεβαιώνοντας πρακτικά την εγκυρότητα της σχέσεως (αποκλίνει μόνο για μεγάλες μετακινήσεις του πασσάλου  $0d$  και απόσταση απ' αυτόν ίση με  $2d$ )

Συνεχίζοντας με την περίπτωση **(β)**, όπου εξετάζεται η επιρροή της ύπαρξης του δεύτερου πασσάλου, στο **Σχήμα 3.10** παρουσιάζονται οι σ.α., βάσει του οποίου προκύπτουν τα εξής:

- στο **Σχήμα 3.10 (α)** που παρουσιάζονται οι οριζόντιοι σ.α., για γωνία  $\theta = 0^\circ$ , παρατηρείται η έντονη επίδραση του δεύτερου πασσάλου στους σ.α. όταν αυτός βρίσκεται κόντα στον πάσσαλο  $0d$  και κυρίως όσο το έδαφος πλαστικοποιείται όλο και περισσότερο. Το φαινόμενο εξηγείται και παραστατικά με τη βοήθεια του **Σχήματος 3.11** και **3.12**, όπου είναι φανερή η αντίσταση που προβάλλει ο πάσσαλος  $2d$ , λειτουργώντας σαν πρόβολος, και μην αφήνοντας τις ισοϋψείς των οριζοντίων μετακινήσεων να “περάσουν από μέσα του”. Όταν ο δεύτερος πάσσαλος βρίσκεται πιο μακριά, όπως ο πάσσαλος  $5d$  και ακόμα περισσότερο ο  $10d$ , η επιρροή του στους σ.α. είναι όλο και μικρότερη (αμεληταία για τον  $10d$ ), αφού όπως φαίνεται πάλι στο **Σχήμα 3.11** το παραμορφωσιακό πεδίο έχει εξασθενήσει αρκετά σ' αυτές τις αποστάσεις.
- στο **Σχήμα 3.10 (β)** που παρουσιάζονται οι οριζόντιοι σ.α., για γωνία  $\theta = 90^\circ$ , παρατηρήθηκε το εξής αξιοπερίεργο φαινόμενο: η ύπαρξη του δεύτερου πασσάλου όχι μόνο δεν απομείωνει τους σ.α. αλλά αντίθετα τους αυξάνει. Αυτό εξηγείται αν παρατηρήσει και συγκρίνει κανείς προσεκτικά τα **Σχήματα 3.13 (α)** και **3.13 (β)**. Στο πρώτο από τα δύο σχήματα, όπου ο δεύτερος πάσσαλος απουσιάζει φαίνεται ότι ακριβώς πάνω από τον πάσσαλο  $0d$  οι ισοϋψείς των οριζοντίων μετακινήσεων δημιουργούν ένα κοίλωμα. Όταν όμως ο δεύτερος πάσσαλος βρίσκεται στη θέση του (**Σχήμα 3.13 (β)**) το κοίλωμα αυτό εξαφανίζεται, αφού αν ένα τμήμα της διατομής του πασσάλου μπει μέσα στο κοίλωμα, τότε όλη η διατομή θα ακολουθήσει, δεδομένου ότι κάθε διατομή του πασσάλου πρέπει να έχει την ίδια μετακίνηση (Σημείωση: αν δεν υπήρχε ο δεύτερος πάσσαλος τότε το εδαφικό σημείο που θα υπήρχε στη θέση του προφανώς δεν θα έμπαινε μέσα στο κοίλωμα, με αποτέλεσμα να έχει μικρότερη μετακίνηση). Η μόνη περίπτωση που ο σ.α. δεν αυξάνεται με την ύπαρξη του δεύτερου πασσάλου και παραμένει ο ίδιος, είναι για ελαστικό έδαφος, γεγονός που εξηγείται από το **Σχήμα 3.14**, όπου φαίνεται ότι το κοίλωμα που αναφέρθηκε προηγουμένως είναι πολύ μικρότερο.
- τέλος, στο **Σχήμα 3.10 (γ)** που παρουσιάζονται οι οριζόντιοι σ.α., για γωνία  $\theta=45^\circ$ , είναι φανερό ότι η ύπαρξη του δεύτερου πασσάλου δεν παίζει κάποιο ρόλο, γεγονός που ήταν αναμενόμενο αν σκεφτεί κανείς ότι αυτή η περίπτωση αποτελεί κατά κάποιο τρόπο ένα “μέσο όρο” των προηγούμενων



δύο, όπου στην πρώτη ο δεύτερος πάσσαλος απομειώνει τον σ.α. και στη δεύτερη τον αυξάνει.

Κλείνοντας με την **(γ)** περίπτωση, στο **Σχήμα 3.15** παρουσιάζονται οι σ.α. που λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη των “ενδιάμεσων” πασσάλων συγκρίνοντάς τους με την περίπτωση **(β)**. Είναι προφανές ότι οι “ενδιάμεσοι” πάσσαλοι δεν παίζουν απολύτως κανένα ρόλο, επιβεβαιώνοντας ακόμα μια φορά την ισχύ της μεθόδου της επαλληλίας (Ρουλιος).

### 3.1.4 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτουν επιγραμματικά τα εξής συμπεράσματα για τους **οριζόντιους στατικούς σ.α.**:

- μείωση των σ.α. όσο αυξάνει η απόσταση μεταξύ των πασσάλων που αλληλεπιδρούν
- για  $\theta=0^\circ$ , μείωση των σ.α. για μετάβαση από το ελαστικό στο εντόνως ανελαστικό πρόβλημα (όχι στον ίδιο βαθμό με το κατακόρυφο στατικό πρόβλημα που η μείωση ήταν ραγδαία). Για αποστάσεις μεταξύ του πασσάλου  $0d$  και σημείου του εδάφους της τάξης των  $2d$ , ο σ.α. “κλειδώνει” σε μία τιμή αρκετά μεγαλύτερη του μηδενός
- για  $\theta=0^\circ$ , η σχέση **(B)** αποτελεί μία καλή προσέγγιση για την πράξη, ενώ πολλαπλασιάζοντάς την με 0.5 προσεγγίζονται οι σ.α. για  $\theta=90^\circ$
- για  $\theta=90^\circ$ , έντονη μείωση των σ.α. για μετάβαση από το ελαστικό στο εντόνως ανελαστικό πρόβλημα, όπου και πρακτικά μηδενίζονται
- επιβεβαίωση της εγκυρότητας της σχέσης **(A)**, βάσει της οποίας προκύπτουν οι σ.α. για τυχαία γωνία  $\theta$ , εφόσον είναι γνωστοί οι σ.α. για  $\theta=0^\circ$  και  $\theta=90^\circ$
- για  $\theta=0^\circ$ , έντονη απομείωση των σ.α. λόγω της ύπαρξης του δεύτερου πασσάλου για κοντινές αποστάσεις της τάξεως του  $2d$  και καθώς το έδαφος πλαστικοποιείται όλο και περισσότερο. Μικρότερη έως ασήμαντη η επιρροή της ύπαρξης του δεύτερου πασσάλου για μεγαλύτερες αποστάσεις
- για  $\theta=90^\circ$ , **αύξηση** των σ.α. λόγω της ύπαρξης του δεύτερου πασσάλου εκτός από την περίπτωση που το έδαφος είναι ελαστικό
- η ύπαρξη των “ενδιάμεσων” πασσάλων δεν επηρεάζουν τους σ.α. μεταξύ δύο πασσάλων, ισχύει δηλαδή η μέθοδος της επαλληλίας του Η. Ρουλιος (1968).

## 3.2 Δυναμικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης

### 3.2.1 Ελαστικό έδαφος

#### 3.2.1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να παρουσιάσει και να συγκρίνει τους οριζόντιους δυναμικούς σ.α. ( $\alpha_h(0^\circ)$ ,  $\alpha_h(90^\circ)$ ) και για ορισμένες περιπτώσεις  $\alpha_h(45^\circ)$ ) μεταξύ πασσάλων (ή πασσάλου και σημείου του εδάφους σε περίπτωση που απουσιάζει ο δεύτερος πάσσαλος) σε **ελαστικό έδαφος** που απέχουν απόσταση  $2d$ ,  $5d$  ή  $10d$ , συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης του πασσάλου  $0d$ , αλλά και να ελέγξει το βαθμό στον οποίο ισχύει η μέθοδος της επαλληλίας (Roulos). Οι σ.α. θα παρουσιαστούν, όπως και οι αντίστοιχοι κατακόρυφοι, με τους δύο ισοδύναμους τρόπους, που για λόγους εποπτείας αναφέρονται ξανά παρακάτω: ο πρώτος έχει τη μορφή

$$\alpha_h = \alpha_h(\text{real part}) + i \alpha_h(\text{imaginary part}),$$

όπου:  $\alpha_h(\text{real part})$  = το πραγματικό μέρος του μιγαδικού αριθμού =  $|\alpha_h| \cos \phi$

$\alpha_h(\text{imag. part})$  = το φανταστικό μέρος του μιγαδικού αριθμού =  $|\alpha_h| \sin \phi$

και ο δεύτερος

$$\alpha_h = |\alpha_h| e^{i\phi},$$

όπου:  $|\alpha_h|$  = το μέτρο του σ.α. (**amplitude**) =  $(\alpha_h(\text{real part})^2 + \alpha_h(\text{imag. part})^2)^{0.5}$

$\phi$  = διαφορά φάσης (**phase**) της ταλάντωσης μεταξύ του πασσάλου  $0d$  και του δεύτερου πασσάλου =  $\tan^{-1}(\alpha_h(\text{imag. part}) / \alpha_h(\text{real part}))$

Θα εξετασθούν, όπως και προηγουμένως, οι τρεις περιπτώσεις, δηλαδή ( **$\alpha$** ) η μη ύπαρξη δεύτερου πασσάλου, ( **$\beta$** ) η ύπαρξη αυτού και ( **$\gamma$** ) η ύπαρξη των “ενδιάμεσων” πασσάλων. Όλα τα παραπάνω θα μελετηθούν για λόγο  $E_p/E_s$  : ( **$\alpha$** ) **1000**

#### 3.2.1.2 Τρισδιάστατα προσομοιώματα

Τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις περιπτώσεις ( **$\alpha$** ), ( **$\beta$** ) και ( **$\gamma$** ) είναι τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των κατακόρυφων δυναμικών σ.α. (**Σχήμα 2.10** -> περίπτωση ( **$\alpha$** ) και **Σχήμα 2.13** -> περιπτώσεις ( **$\beta$** ), ( **$\gamma$** )) αντίστοιχα. Όσον αφορά τη γεωμετρία του προβλήματος παραμένει η ίδια, ενώ και οι ιδιότητες του πασσάλου και του εδάφους παραμένουν ως έχουν, δηλαδή, για τον πάσσαλο:

- ειδικό βάρος  $\gamma_p = 25 \text{ kN/m}^3$

- μέτρο ελαστικότητας  $E_p = 25000 \text{ MPa}$
- λόγος poisson  $\nu = 0.2$

και για το έδαφος:

- ειδικό βάρος  $\gamma_s = 17.5 \text{ kN/m}^3$
- μέτρο ελαστικότητας  $E_s = 25 \text{ MPa}$  ( $E_p / E_s = 1000$ )
- λόγος poisson  $\nu = 0.40$
- απόσβεση τύπου Rayleigh της τάξης του 5%

### 3.2.1.3 Αποτελέσματα αναλύσεων – Σχολιασμός

Ξεκινώντας, με την **(α)** περίπτωση, όπου ο δεύτερος πάσσαλος απουσιάζει, στα **Σχήματα 3.16, 3.17, (3.18 + 3.19)** παρουσιάζονται οι οριζόντιοι δυναμικοί σ.α. ( $\alpha_h(0^\circ)$ ,  $\alpha_h(90^\circ)$  και  $\alpha_h(45^\circ)$  αντίστοιχα), και με τους δύο ισοδύναμους τρόπους, για διαφορετικές αποστάσεις (2d, 5d και 10d) μεταξύ πασσάλου 0d και σημείου εδάφους (αφού απουσιάζει ο δεύτερος πάσσαλος) συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης του πασσάλου 0d, για λόγο  $E_p / E_s = 1000$ .

Στα πρώτα δύο διαγράμματα του **Σχήματος 3.16**, όπου  $\theta=0^\circ$ , γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το Abaqus και της απλουστευμένης σχέσης

$$\alpha_h(0^\circ) \approx \left(\frac{S}{r_0}\right)^{-0.5} \exp(-\beta\omega S/V_{La}) \exp(-\acute{\iota}\omega S/V_{La}) \text{ (Dobry \& Gazetas 1988)},$$

όπου:  $S$  = η απόσταση μεταξύ του πασσάλου 0d και σημείου της επιφάνειας του εδάφους που αλληλεπιδρούν

$$r_0 = d/2$$

$$\beta = \text{ο βαθμός αποσβέως } \xi$$

$$V_{La} = 3.4 V_s / [\pi(1-\nu)]$$

Παρατηρείται ικανοποιητική συνέπεια μεταξύ των δύο, δεδομένων πάντα των απλουστεύσεων της αναλυτικής σχέσης. Επίσης από το **Σχήμα 3.16 (γ)** γίνονται αντιληπτά τα εξής φαινόμενα:

- μείωση των σ.α. καθώς αυξάνει η απόσταση από τον πάσσαλο 0d, όπως ήταν αναμενόμενο
- αύξηση των σ.α. για μετάβαση από το στατικό στο δυναμικό πρόβλημα (εξηγήθηκε προηγουμένως)
- σταδιακή μείωση των σ.α. καθώς αυξάνει η συχνότητα διέγερσης του πασσάλου 0d (κυρίως για αποστάσεις από τον πάσσαλο ίσες με 5d και 10d). Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, το πλάτος της ταλάντωσης αρμονικού κύματος φθίνει με τον όρο  $e^{-\xi(\omega/V_s)S}$ . Συνεπώς, όσο αυξάνει η συχνότητα και

η απόσταση  $S$  από τον πάσσαλο  $0d$ , τόσο περισσότερο θα μειώνεται το πλάτος του κύματος, άρα και οι σ.α..

Συνεχίζοντας με τα δύο πρώτα διαγράμματα του **Σχήματος 3.17**, όπου  $\theta=90^\circ$ , γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το Abaqus και της απλουστευμένης σχέσης

$$\alpha_h(90^\circ) \approx \alpha_v \approx \left(\frac{S}{r_0}\right)^{-0.5} \exp(-\beta\omega S/V_s) \exp(-\dot{\omega}S/V_s) \quad (\text{Dobry \& Gazetas 1988}),$$

όπου και παρατηρείται σχεδόν απόλυτη ταύτιση μεταξύ των δύο. Επίσης από το **Σχήμα 3.17 (γ)** προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα με αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως για  $\theta=0^\circ$  με εξαίρεση την τρίτη κουκίδα. Είναι φανερό πως καθώς η συχνότητα διέγερσης αυξάνει, οι σ.α. δεν μειώνονται αλλά αυξάνονται μέχρι ενός σημείου και στη συνέχεια φαίνεται να σταθεροποιούνται.

Στη συνέχεια, στα πρώτα δύο διαγράμματα του **Σχήματος 3.18**, όπου  $\theta=45^\circ$ , γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το Abaqus και της σχέσης

$$\alpha_h(\theta) \approx \alpha_h(0^\circ) \cos^2\theta + \alpha_h(90^\circ) \sin^2\theta \quad (\text{Poulos}),$$

όπου  $\alpha_h(0^\circ)$  και  $\alpha_h(90^\circ)$  προέκυψαν από τη χρήση των θεωρητικών σχέσεων (Dobry & Gazetas 1988) που προαναφέρθηκαν. Είναι εμφανής η ικανοποιητική σύμπτωση μεταξύ των δύο. Ακόμη, προκειμένου να ελεγχθεί, για ακόμα μια φορά η εγκυρότητα της παραπάνω σχέσης του Η. Poulos, σαν δεδομένα εισόδου εισήχθησαν τα  $\alpha_h(0^\circ)$  και  $\alpha_h(90^\circ)$  που προέκυψαν από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων, και στη συνέχεια συγκρίθηκε το αποτέλεσμα της θεωρητικής σχέσης με τους σ.α.  $\alpha_h(45^\circ)$  που προέκυψαν απευθείας από το Abaqus (**Σχήμα 3.19**). Έτσι, λοιπόν, παρατηρώντας κανείς το **Σχήμα 3.19** συνειδητοποιεί, για ακόμα μια φορά, την ακρίβεια της συγκεκριμένης σχέσης.

Συνεχίζοντας με τη **(β)** περίπτωση, όπου ο δεύτερος πάσσαλος βρίσκεται στη θέση του, στο **Σχήμα 3.20** παρουσιάζεται η επίδραση του δεύτερου πάσσαλου στους οριζόντιους δυναμικούς σ.α.  $\alpha_h(0^\circ)$  και  $\alpha_h(90^\circ)$  για αποστάσεις μεταξύ πασσάλων  $2d$ ,  $5d$  και  $10d$ . Είναι φανερό πως και για τις δύο γωνίες  $\theta$  ο δεύτερος πάσσαλος απομειώνει ως ένα βαθμό τα μέτρα των σ.α., ενώ παρατηρείται και μικρή αύξηση στη διαφορά φάσης, για  $\theta=0^\circ$ , λόγω της ύπαρξής του.

Κλείνοντας με τη **(γ)** περίπτωση, στο **Σχήμα 3.21** παρουσιάζεται η επίδραση των ενδιάμεσων πασσάλων στο μέτρο και τη διαφορά φάσης των σ.α. για  $\theta=0^\circ$  και  $\theta=90^\circ$ . Παρατηρεί κανείς μια μικρή επίδραση των “ενδιάμεσων” πασσάλων για  $\theta=0^\circ$  που πρακτικά είναι ασήμαντη, όπως συμβαίνει και για  $\theta=90^\circ$ . Επαληθεύεται, δηλαδή, ξανά η μέθοδος της επαλληλίας (Poulos) και για την περίπτωση της οριζόντιας ελαστικής δυναμικής φόρτισης.

### 3.2.1.4 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτουν επιγραμματικά τα εξής συμπεράσματα για τους **οριζόντιους δυναμικούς ελαστικούς σ.α.**:

- η απλουστευμένες σχέσεις των **(Dobry & Gazetas 1988)** για τον υπολογισμό των  $\alpha_h(0^\circ)$  και  $\alpha_h(90^\circ)$  αποτελούν καλές προσεγγίσεις των οριζόντιων δυναμικών ελαστικών σ.α.
- η σχέση του Η. Ρουλος για τον υπολογισμό των  $\alpha_h(\theta^\circ)$ , όπου  $\theta$  τυχαία γωνία, επαληθεύτηκε πλήρως
- οι  $\alpha_h(0^\circ)$  και  $\alpha_h(90^\circ)$  μειώνονται με την αύξηση της απόστασης από τον πάσσαλο  $0d$
- οι  $\alpha_h(0^\circ)$  και  $\alpha_h(90^\circ)$  αυξάνονται καθώς γίνεται η μετάβαση από το στατικό στο δυναμικό πρόβλημα
- ο  $\alpha_h(0^\circ)$  έχει την τάση να μειώνεται καθώς αυξάνει η συχνότητα διέγερσης, ενώ ο  $\alpha_h(90^\circ)$  αυξάνεται στις μικρές και μεσαίες συχνότητες και στη συνέχεια φαίνεται να σταθεροποιείται
- οι  $\alpha_h(0^\circ)$  και  $\alpha_h(90^\circ)$  μειώνονται αν ληφθεί υπόψη η ύπαρξη του δεύτερου πασσάλου
- η επίδραση των ενδιάμεσων πασσάλων είναι πρακτικώς αμεληταία (ισχύει η μέθοδος της επαλληλίας (Ρουλος))

### 3.2.2 Μη ελαστικό έδαφος

#### 3.2.2.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να παρουσιάσει και να συγκρίνει τους οριζόντιους δυναμικούς σ.α.  $\alpha_h(0^\circ)$  και  $\alpha_h(90^\circ)$  μεταξύ πασσάλων (ή πασσάλου και σημείου του εδάφους σε περίπτωση που απουσιάζει ο δεύτερος πάσσαλος) σε **μη ελαστικό έδαφος** που απέχουν απόσταση 2d, 5d ή 10d, συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης του πασσάλου 0d, αλλά και να ελέγξει το βαθμό στον οποίο ισχύει η μέθοδος της επαλληλίας (Ρουλος). Θα εξετασθεί, ακόμα, η επίδραση της μεταβολής του λόγου  $G/S_u$  (=300, 600, 1350 για σταθερό  $S_u$ ) στον  $\alpha_h(0^\circ)$  για απόσταση μεταξύ πασσάλων ίση με 2d.

Όπως και προηγουμένως, θα εξετασθούν, οι τρεις περιπτώσεις, δηλαδή (**α**) η μη ύπαρξη δεύτερου πασσάλου, (**β**) η ύπαρξη αυτού και (**γ**) η ύπαρξη των “ενδιάμεσων” πασσάλων. Όλα τα παραπάνω θα μελετηθούν για οριζόντια αρμονική ταλάντωση του πασσάλου 0d με πλάτος **0.01** και **0.03** m, μετακινήσεις που αντιστοιχούν σε φορτία που φτάνουν το 31 και 54%, αντίστοιχα, της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου για στατική οριζόντια φόρτιση (**Σχήμα 3.6**).

#### 3.2.2.2 Τρισδιάστατα προσομοιώματα

##### ➤ $G/S_u \approx 600$

Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια μοντέλα με αυτά των ελαστικών αναλύσεων. Η γεωμετρία του προβλήματος και οι ιδιότητες των πασσάλων παραμένουν ίδιες με αυτές του αντίστοιχου ελαστικού, ενώ οι ιδιότητες του εδάφους είναι οι ακόλουθες:

- ειδικό βάρος  $\gamma_s = 17.5 \text{ kN/m}^3$
- μέτρο ελαστικότητας  $E_s = 90 \text{ MPa}$  ( $E_p / E_s = 280$ )
- λόγος poisson  $\nu = 0.49$
- απόσβεση τύπου Rayleigh της τάξης του 2%
- αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u = 50 \text{ kPa}$

Το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το ίδιο με αυτό των κατακόρυφων ανελαστικών αναλύσεων με παραμέτρους  $\sigma_0 = 8.66$ ,  $C = 90000$  και  $\gamma = 1154.7$ . Δεδομένου ότι στο κατακόρυφο ανελαστικό πρόβλημα (όπου επικρατεί η εξ ολοκλήρου η διάτμηση) η σχετικά μεγάλη τιμή απόσβεσης, που προκύπτει από τη χρήση του καταστατικού προσομοιώματος για διατμητικές παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 0.005, δεν επηρέαζε το πρόβλημα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ούτε και στο οριζόντιο ανελαστικό θα παίζει κάποιο ρόλο, αφού δεν αναμένεται να αναπτυχθούν μεγαλύτερες διατμητικές παραμορφώσεις συγκρητικά με το κατακόρυφο (όπου όλη η μετακίνηση που αναγκαζόταν να πάρει η κεφαλή του

πασσάλου “μετατρεπόμενος” σε διατμητικές παραμορφώσεις στο έδαφος). Συνεπώς, είναι ορθή η χρήση του συγκεκριμένου προσομοιώματος.

➤  **$G/S_u \approx 300$**

Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο προσομοίωμα από το αντίστοιχο κατακόρυφο πρόβλημα (Σχήμα 2.31)

Οι ιδιότητες των υλικών παραμένουν ίδιες με μόνη διαφορά το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ώστε να προκύψει ο λόγος  $G/S_u = 300$ .

Το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το ίδιο με αυτό των αντίστοιχων κατακόρυφων ανελαστικών αναλύσεων με παραμέτρους  $\sigma_0 = 5.77$ ,  $C = 44400$  και  $\gamma = 553$ . Για το λόγο που εξηγήθηκε αμέσως πριν, οι όποιες μικροαποκλίσεις από το σύνηθες εύρος των καμπυλών  $G/G_0$ - $\gamma$  και  $\xi$ - $\gamma$  δεν αποτελούν πρόβλημα.

➤  **$G/S_u \approx 1350$**

Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο προσομοίωμα με την προηγούμενη περίπτωση, ενώ, και εδώ, η μόνη αλλαγή στις ιδιότητες των υλικών είναι στο μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ώστε να προκύψει ο λόγος  $G/S_u = 1350$ .

Το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το ίδιο με αυτό των αντίστοιχων κατακόρυφων ανελαστικών αναλύσεων με παραμέτρους  $\sigma_0 = 12.37$ ,  $C = 200000$  και  $\gamma = 2694.3$ . Και εδώ, για τον ίδιο λόγο, οι καμπύλες  $G/G_0$ - $\gamma$  και  $\xi$ - $\gamma$  κρίνονται αποδεκτές.

### 3.2.2.3 Αποτελέσματα αναλύσεων – Σχολιασμός

➤  **$G/S_u \approx 600$**

Ξεκινώντας, με την (α) περίπτωση, όπου ο δεύτερος πάσσαλος απουσιάζει, στα Σχήματα 3.22 και 3.23, παρουσιάζονται οι οριζόντιοι δυναμικοί σ.α., για  $\theta=0^\circ$ , και με τους δύο ισοδύναμους τρόπους, για διαφορετικές αποστάσεις (2d, 5d και 10d) μεταξύ πασσάλου 0d και σημείου του εδάφους (αφού απουσιάζει ο δεύτερος πάσσαλος) συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης του πασσάλου 0d, και πλάτος ταλάντωσής του ίσο με **0.01** και **0.03 m** αντίστοιχα. Και τα δύο σχήματα είναι στην ίδια κλίμακα ώστε να μπορούν να συγκριθούν, όπως και τα επιμέρους διαγράμματα ( $\gamma$ ) και ( $\delta$ ) των σχημάτων, προκειμένου να φανεί η συνεισφορά του πραγματικού και του φανταστικού μέρους στον σ.α.. Παρατηρώντας τα, λοιπόν, γίνονται αντιληπτά τα εξής φαινόμενα (φαινόμενα που έχουν ειπωθεί προηγουμένως, όπως π.χ. η μείωση των σ.α. με την αύξηση της απόστασης από τον πάσσαλο 0d, δεν θα αναφερθούν):

- η σημαντική μείωση των  $\alpha_h(0^\circ)$  καθώς οι πλαστικοποιήσεις γύρω από τον πάσσαλο 0d γίνονται όλο και πιο έντονες. Το φαινόμενο εξηγήθηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο (στατικό πρόβλημα). Μια πιο παραστατική απεικόνιση του φαινομένου φαίνεται στο **Σχήμα 3.24**, όπου πλοτάρεται το πραγματικό και το φανταστικό μέρος των  $\alpha_h(0^\circ)$  από την ελαστική σχέση των Dobry & Gazetas και από τις ανελαστικές αναλύσεις του Abaqus, για απόσταση 5d.
- η έντονη μείωση του  $\alpha_h(0^\circ)$  καθώς αυξάνει η συχνότητα διέγερσης του πασσάλου 0d, που σχεδόν μηδενίζει για τις μεγαλύτερες αποστάσεις (5d, 10d). Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε και στο ελαστικό δυναμικό πρόβλημα με τη διαφορά ότι εδώ η μείωση είναι πολύ πιο έντονη και οφείλεται στην αύξηση της υστερητικής απόσβεσης  $\xi$ . Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το πλάτος της ταλάντωσης αρμονικού κύματος φθίνει με τον όρο  $e^{-\xi(\omega/V_s)s}$ . Συνεπώς, τώρα (στο μη ελαστικό πρόβλημα) που το  $\xi$  έχει αυξηθεί αναμένεται μείωση των σ.α. καθώς αυξάνει η συχνότητα διέγερσης.
- η μικρή συνεισφορά του φανταστικού μέρους του σ.α. στον σ.α. για κοντινές αποστάσεις (2d), αφού η ταχύτητα των  $p$  κυμάτων, που επικρατούν στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι γενικώς μεγάλη, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά φάσης μεταξύ του πασσάλου 0d και ενός κοντινού σε αυτόν σημείο του εδάφους.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.25** και **3.26** οι οριζόντιοι δυναμικοί σ.α., για  $\theta=90^\circ$ . Παρατηρώντας τα γίνονται αντιληπτά τα εξής φαινόμενα:

- όπως και για  $\theta=0^\circ$ , έτσι και τώρα οι  $\alpha_h(90^\circ)$  απομειώνονται αισθητά καθώς γίνεται μετάβαση από το ελαστικό στο εντόνως ανελαστικό πρόβλημα. Το **Σχήμα 3.27**, που απεικονίζει το πραγματικό και το φανταστικό μέρος των  $\alpha_h(90^\circ)$  από την ελαστική θεωρία των Dobry & Gazetas και από τις ανελαστικές αναλύσεις του Abaqus, για απόσταση 5d, αποδεικνύει την παραπάνω πρόταση
- σε αντίθεση με το αντίστοιχο ελαστικό πρόβλημα όπου ο  $\alpha_h(90^\circ)$  αυξανόταν και στη συνέχεια παράμενε σταθερός καθώς η συχνότητα αυξανόταν, τώρα ο  $\alpha_h(90^\circ)$  αυξάνεται μεν αρχικά αλλά στις υψηλές συχνότητες έχει την τάση να μειώνεται, λόγω της επίδρασης της αποσβέσεως  $\xi$
- το φανταστικό μέρος του σ.α. συνεισφέρει περίπου το ίδιο με το πραγματικό μέρος στον σ.α., καθώς η ταχύτητα των  $s$  κυμάτων, που επικρατούν για  $\theta=90^\circ$  είναι σχετικά μικρή, με αποτέλεσμα η διαφορά φάσης να μην είναι πλέον ασήμαντη όπως προηγουμένως για  $\theta=0^\circ$ .

Συνεχίζοντας με τη **(β)** περίπτωση, όπου ο δεύτερος πάσσαλος βρίσκεται στη θέση του, στα **Σχήματα 3.28** και **3.29** μελετάται η επίδραση του δεύτερου πασσάλου στους οριζόντιους δυναμικούς σ.α.  $\alpha_h(0^\circ)$  και  $\alpha_h(90^\circ)$  σε μη ελαστικό έδαφος για



αποστάσεις μεταξύ πασσάλων 2d, 5d και 10d, και πλάτος ταλάντωσης του πασσάλου 0d ίσο με **0.01** και **0.03 m** αντίστοιχα. Στο **Σχήμα 3.28**, για  $\theta=0^\circ$ , φαίνεται η μείωση που επιφέρει ο δεύτερος πάσσαλος στο μέτρο του σ.α.  $\alpha_h(0^\circ)$  (εκτός από την περίπτωση που οι δύο πάσσαλοι απέχουν 10d), αλλά και μια μικρή αύξηση στη διαφορά φάσης που πρακτικά είναι ασήμαντη. Επίσης, στο **Σχήμα 3.29**, για  $\theta=90^\circ$ , παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο με αυτό των στατικών αναλύσεων, όπου η ύπαρξη του δεύτερου πασσάλου είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση και όχι τη μείωση των σ.α.  $\alpha_h(90^\circ)$ , με τη διαφορά ότι εδώ, από μία συγκεκριμένη συχνότητα και μετά ο δεύτερος πάσσαλος παίζει μειωτικό ρόλο στο σ.α..

Κλείνοντας με τη **(γ)** περίπτωση, στα **Σχήματα 3.30** και **3.31** παρουσιάζεται η επίδραση των ενδιάμεσων πασσάλων στο μέτρο και τη διαφορά φάσης των σ.α. για  $\theta=0^\circ$  και  $\theta=90^\circ$  αντίστοιχα. Παρατηρεί κανείς μια μικρή επίδραση των ενδιάμεσων πασσάλων για  $\theta=0^\circ$  που πρακτικά είναι ασήμαντη, όπως συμβαίνει και για  $\theta=90^\circ$ . Επαληθεύεται, δηλαδή, ξανά η μέθοδος της επαλληλίας (Ρουίλος) και για την περίπτωση της οριζόντιας ελαστικής δυναμικής φόρτισης.

#### ➤ Σύγκριση $G/S_u \approx 300, 600, 1350$

Στα **Σχήματα 3.32** και **3.33** παρουσιάζονται, και με τους δύο ισοδύναμους τρόπους, οι οριζόντιοι δυναμικοί σ.α.  $\alpha_h(0^\circ)$ , για απόσταση μεταξύ των πασσάλων ίση με 2d και λόγους  $G/S_u \approx 300, 600, 1350$ . Παρατηρώντας τα δύο σχήματα (που βρίσκονται στην ίδια κλίμακα) είναι εμφανής, για ακόμα μια φορά, η μείωση των σ.α. καθώς αυξάνονται οι πλαστικοποιήσεις γύρω από τον πάσσαλο. Το πιο σημαντικό συμπέρασμα, όμως, που προκύπτει είναι η μείωση του μέτρου των σ.α. καθώς ο λόγος  $G/S_u$  αυξάνει. Το φαινόμενο εξηγείται παραστατικά με τη βοήθεια των **Σχημάτων 3.34** και **3.35**. Στο **Σχήμα 3.34** ( $G/S_u = 300$ ), λόγω της μικρής δυστημσίας του εδάφους, φαίνεται ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται σε μια σχετικά μεγάλη περιοχή γύρω από την κορυφή του πασσάλου 0d, περικλείοντας ακόμα και τον δεύτερο πάσσαλο και αναγκάζοντάς τον να μετακινηθεί αρκετά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο  $\alpha_h(0^\circ)$ . Αντίθετα, στο **Σχήμα 3.35** ( $G/S_u = 1350$ ), λόγω της μεγάλης δυστημσίας του εδάφους, οι πλαστικές παραμορφώσεις περιορίζονται κοντά στην κορυφή του πασσάλου 0d, με αποτέλεσμα, ο  $\alpha_h(0^\circ)$ , να μειώνεται.

### 3.2.2.4 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτουν επιγραμματικά τα εξής συμπεράσματα για τους **οριζόντιους δυναμικούς μη ελαστικούς σ.α.:**

- έντονη μείωση των  $\alpha_h(0^\circ)$  και  $\alpha_h(90^\circ)$  καθώς γίνεται μετάβαση από το ελαστικό στο εντόνως ανελαστικό πρόβλημα

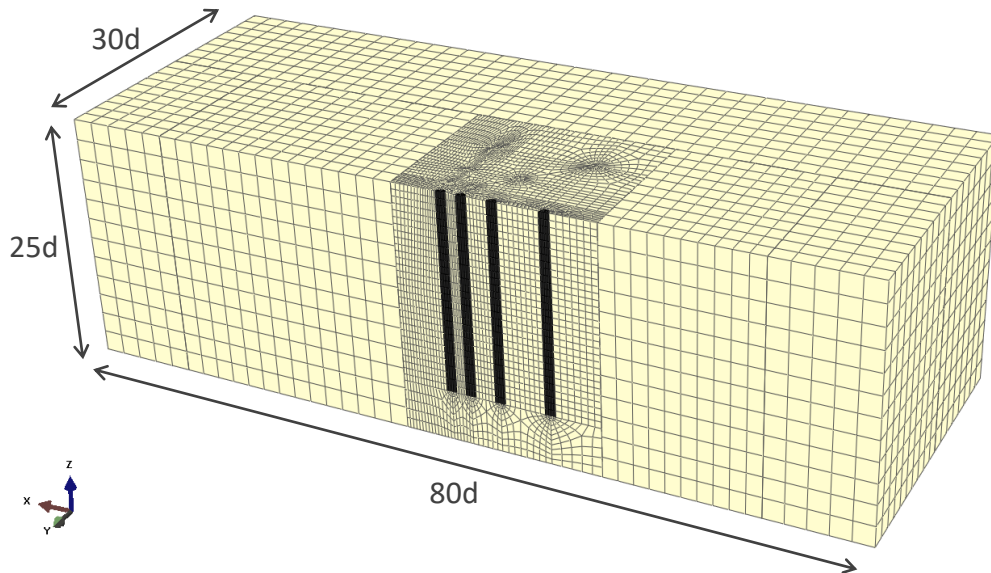
- έντονη μείωση του  $\alpha_h(0^\circ)$  καθώς αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης του πασσάλου  $0d$
- σταδιακή αύξηση και εν συνεχεία μείωση του  $\alpha_h(90^\circ)$  καθώς αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης του πασσάλου  $0d$
- μείωση του  $\alpha_h(0^\circ)$  λόγω της επιρροής του δεύτερου πασσάλου
- αύξηση (για μικρές συχνότητες) και εν συνεχεία μείωση (για υψηλότερες) του  $\alpha_h(90^\circ)$  λόγω της επιρροής του δεύτερου πασσάλου
- αμελητέα η επιρροή της ύπαρξης των “ενδιάμεσων” πασσάλων (ισχύει η μέθοδος της επαλληλίας (**Poulos**))
- μείωση του μέτρου των σ.α. καθώς αυξάνει ο λόγος  $G/S_u$

# Σχήματα 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

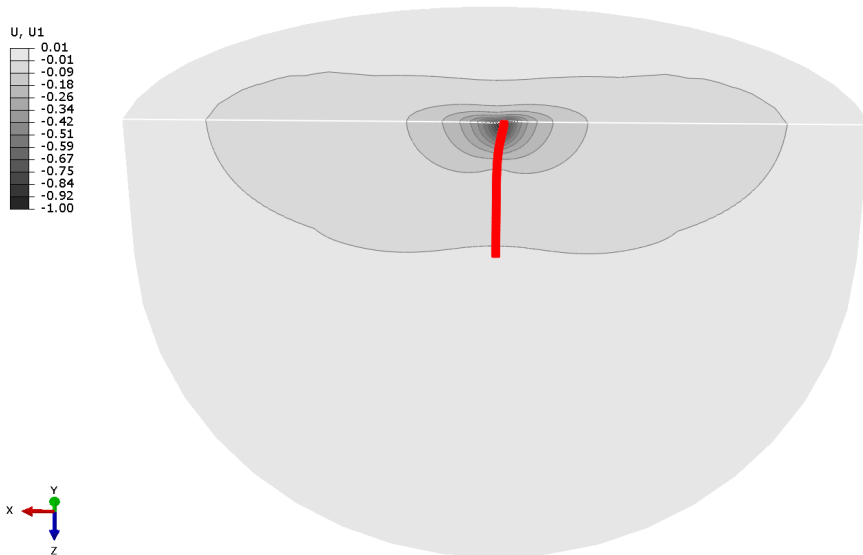
---

ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

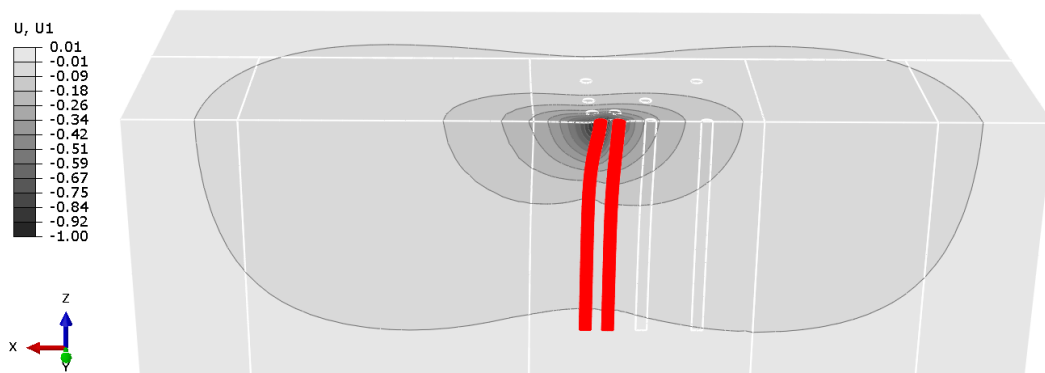




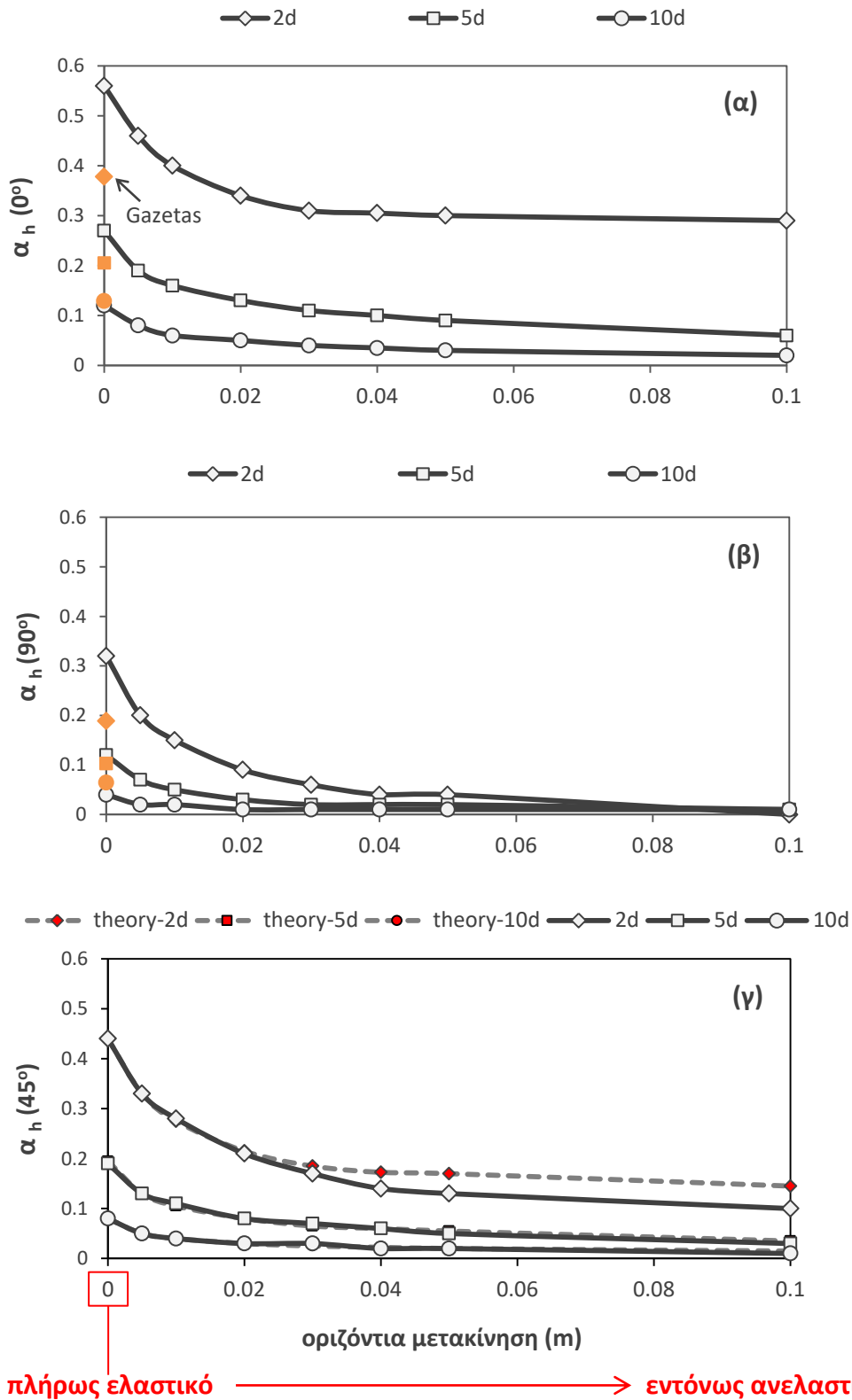
Σχήμα 3.1: Τρισδιάστατο προσομοίωμα για τον υπολογισμό των οριζόντιων στατικών σ.α.



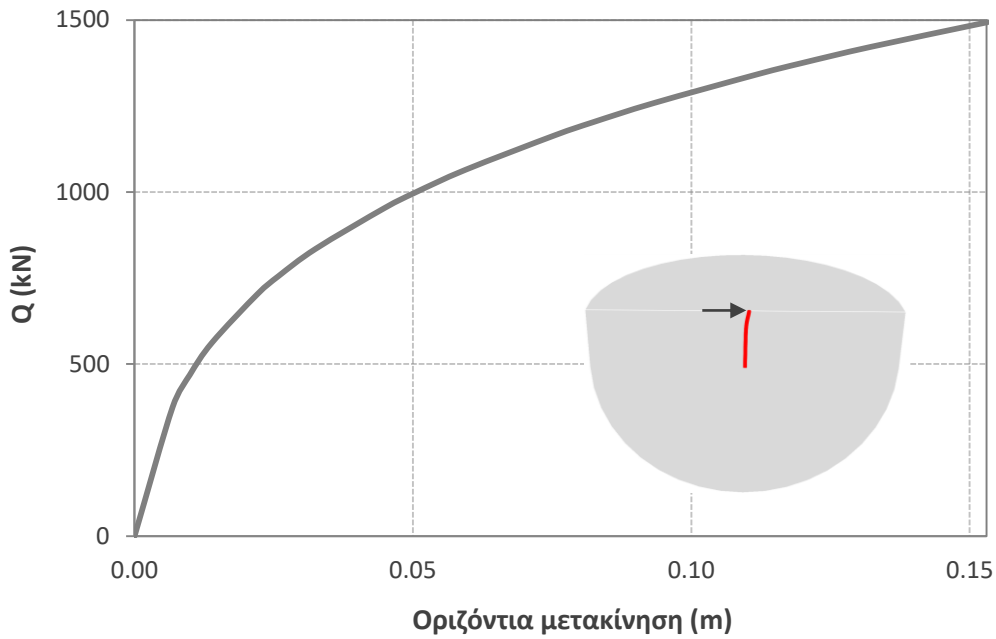
Σχήμα 3.2: Ελαστική στατική ανάλυση: ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων μεγαλύτερων ή ίσων του 1% της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου  $0d (=1m)$



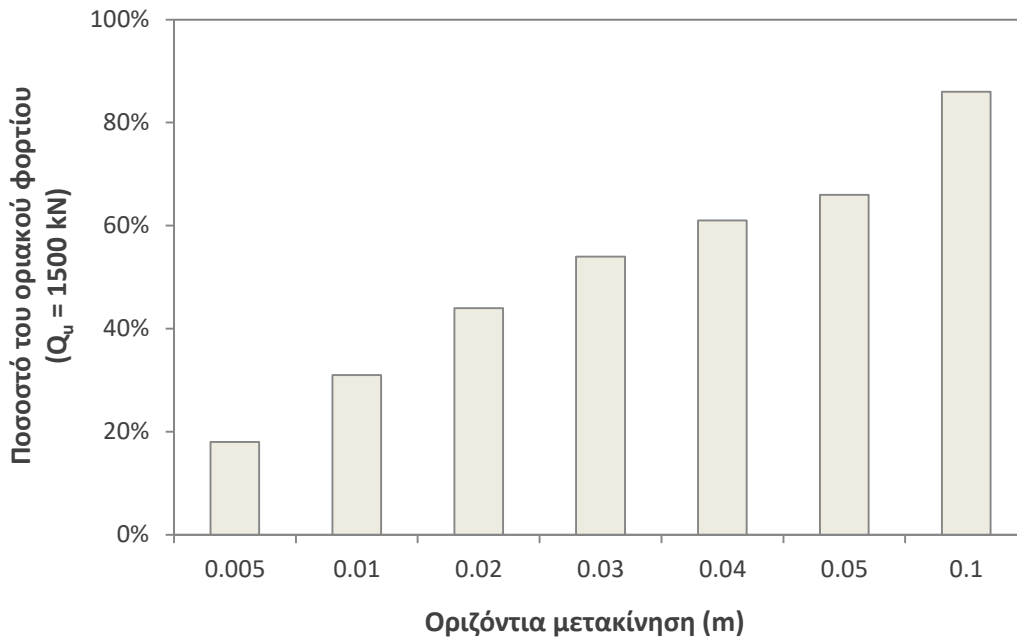
Σχήμα 3.3: Ελαστική στατική ανάλυση: ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων μεγαλύτερων ή ίσων του 1% της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου  $0d (=1m)$



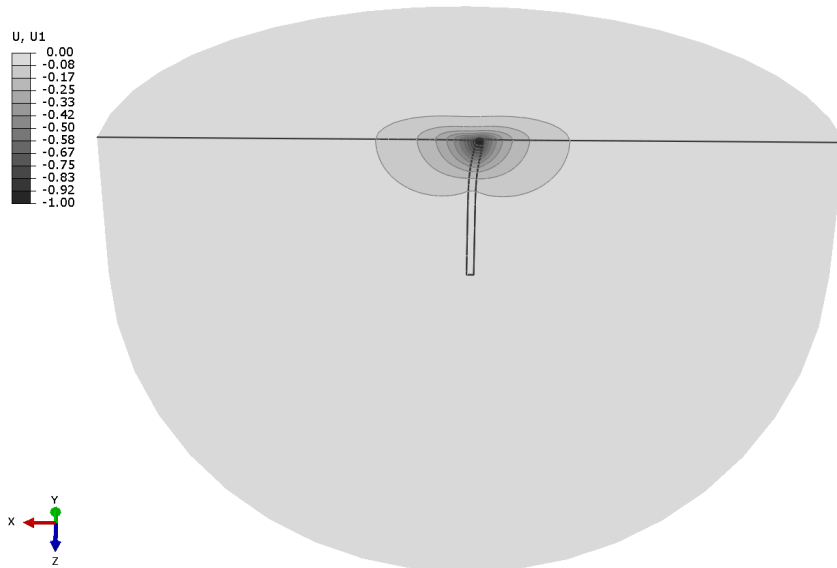
Σχήμα 3.4: Στατικός σ.α. για (α)  $\theta = 0^\circ$ , (β)  $\theta = 90^\circ$ , συναρτήσει διαφορετικών ακτινικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου 0d. Το 0 στον οριζόντιο άξονα συμβολίζει την πλήρη ελαστικότητα. (γ) Σύγκριση αποτελέσματος, όπως προκύπτουν από το ABAQUS και από τη χρήση τύπου που δίνεται από τη θεωρία, για  $\theta = 45^\circ$



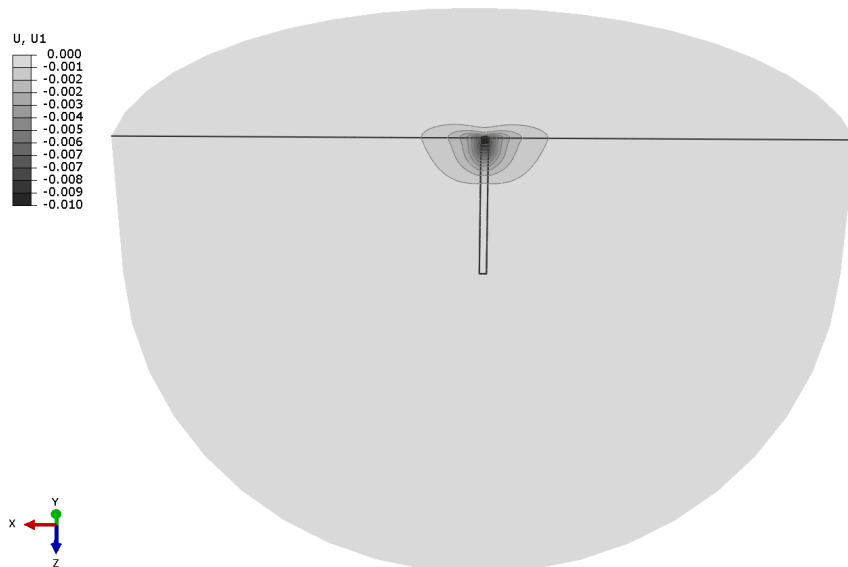
Σχήμα 3.5: Καμπύλη φορτίου  $Q$  (kN) – Οριζόντιας μετακίνησης (m) (Abaqus)



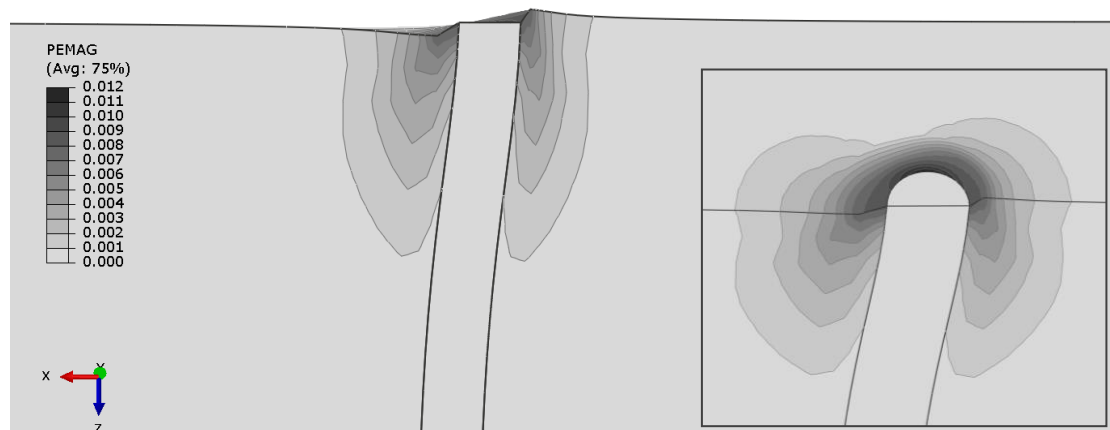
Σχήμα 3.6: Ποσοστό του οριακού φορτίου που αναλαμβάνει ο πάσσαλος  $O_d$  συναρτήσει της επιβαλλόμενης οριζόντιας μετακίνησης στην κορυφή του



Σχήμα 3.7: **Ελαστική στατική** ανάλυση: ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων για οριζόντια μετακίνηση της κορυφής του πασσάλου  $0d$  ίση με 1 m

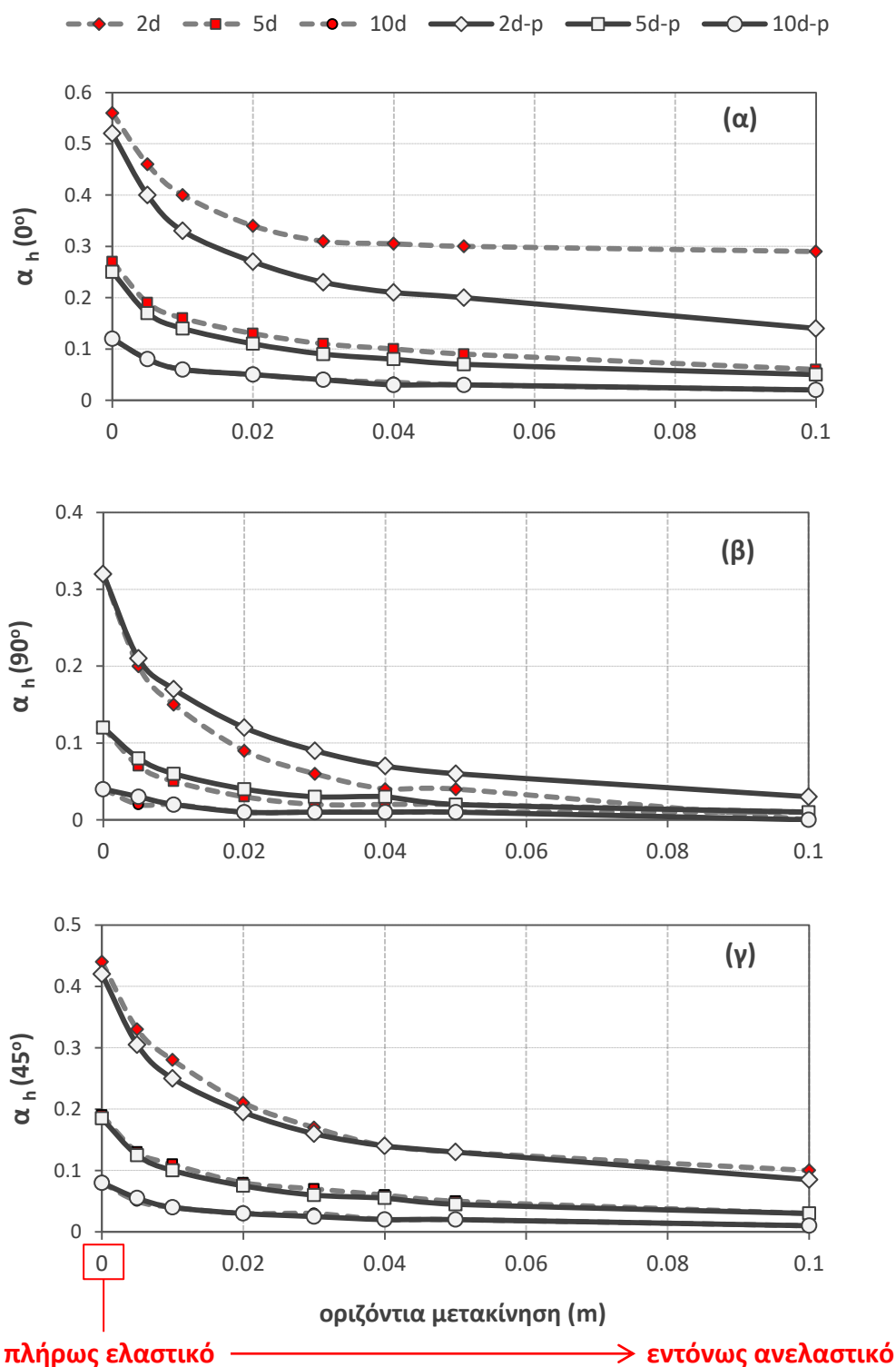


Σχήμα 3.8: **Μη ελαστική στατική** ανάλυση: ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων για οριζόντια μετακίνηση της κορυφής του πασσάλου  $0d$  ίση με 0.01 m

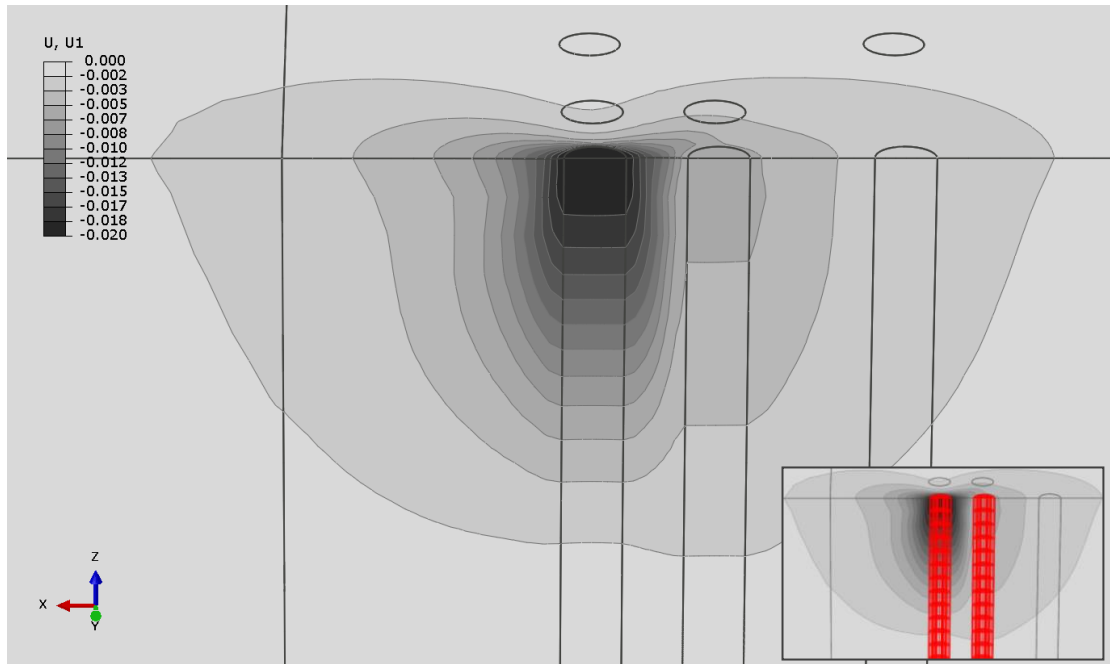


Σχήμα 3.9: **Μη ελαστική στατική** ανάλυση: ισοϋψείς πλαστικών παραμορφώσεων για οριζόντια μετακίνηση της κορυφής του πασσάλου  $0d$  ίση με 0.01 m

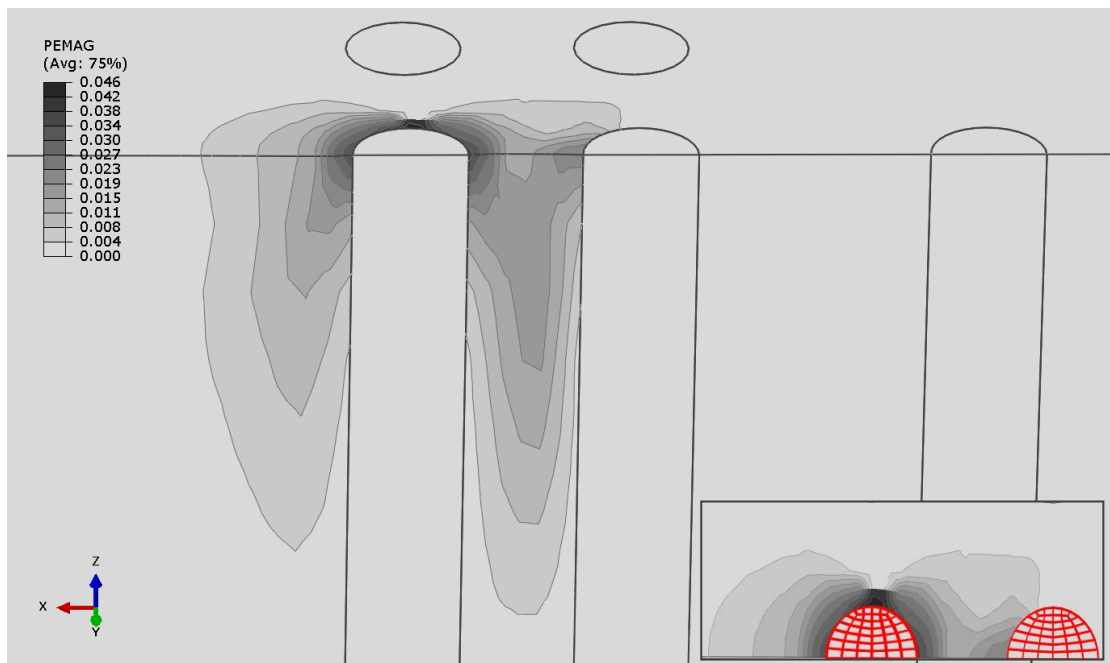




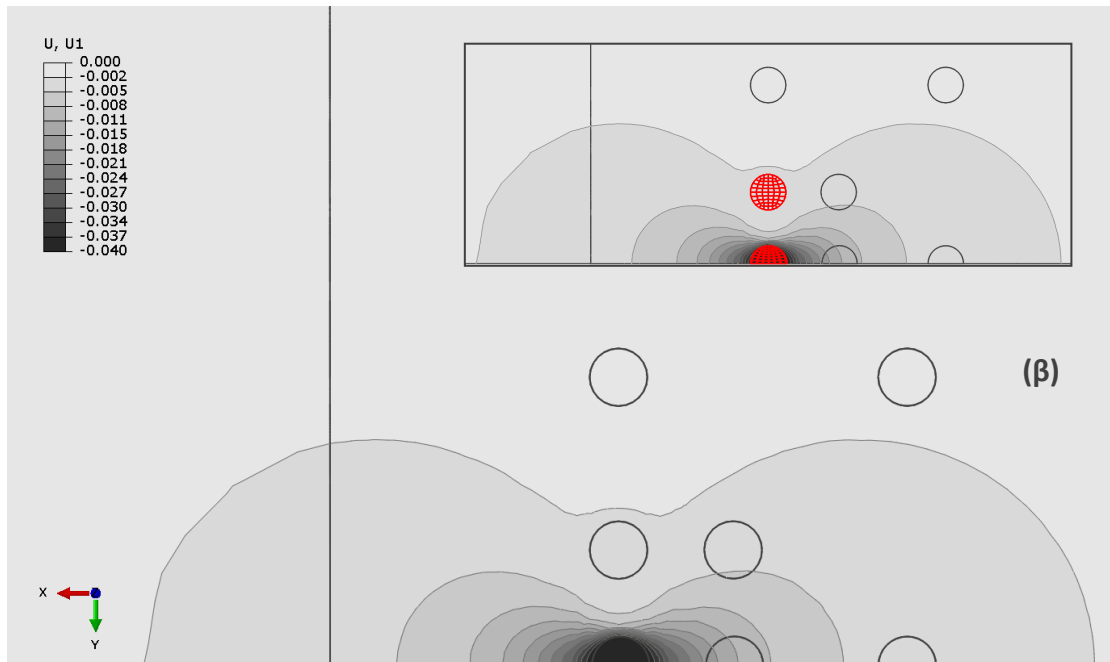
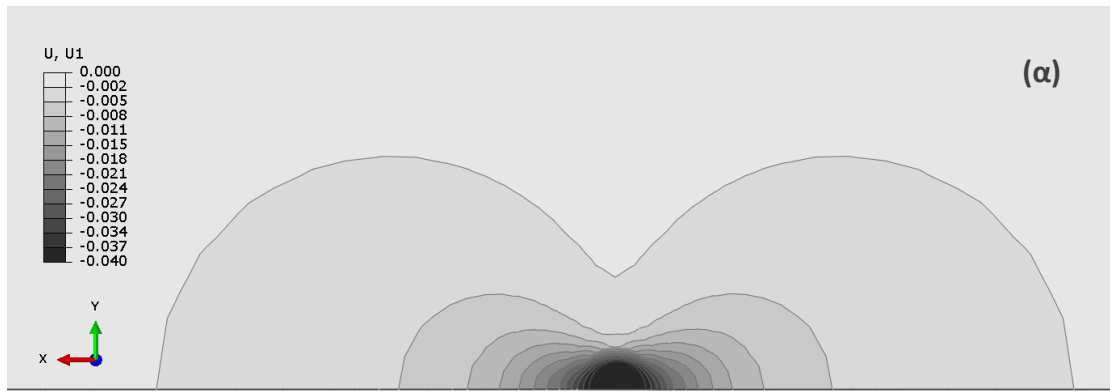
**Σχήμα 3.10:** Στατικός  $\sigma_a$  για την περίπτωση της ύπαρξης και δεύτερου πασσάλου (2d ή 5d ή 10d) που βρίσκεται στη διεύθυνση (α)  $0^\circ$ , (β)  $90^\circ$  και (γ)  $45^\circ$ , (και σύγκριση με την περίπτωση της μη ύπαρξης δεύτερου πασσάλου), συναρτήσεως της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου 0d. Το 0 στον οριζόντιο άξονα συμβολίζει την πλήρη ελαστικότητα.



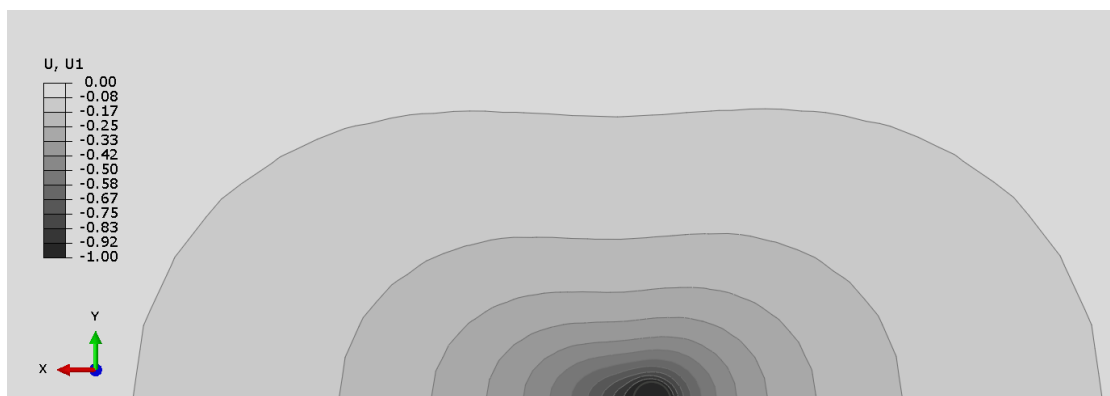
Σχήμα 3.11: Μη ελαστική στατική ανάλυση: ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων για οριζόντια μετακίνηση της κορυφής του πασσάλου  $0d$  ίση με  $0.02\text{ m}$



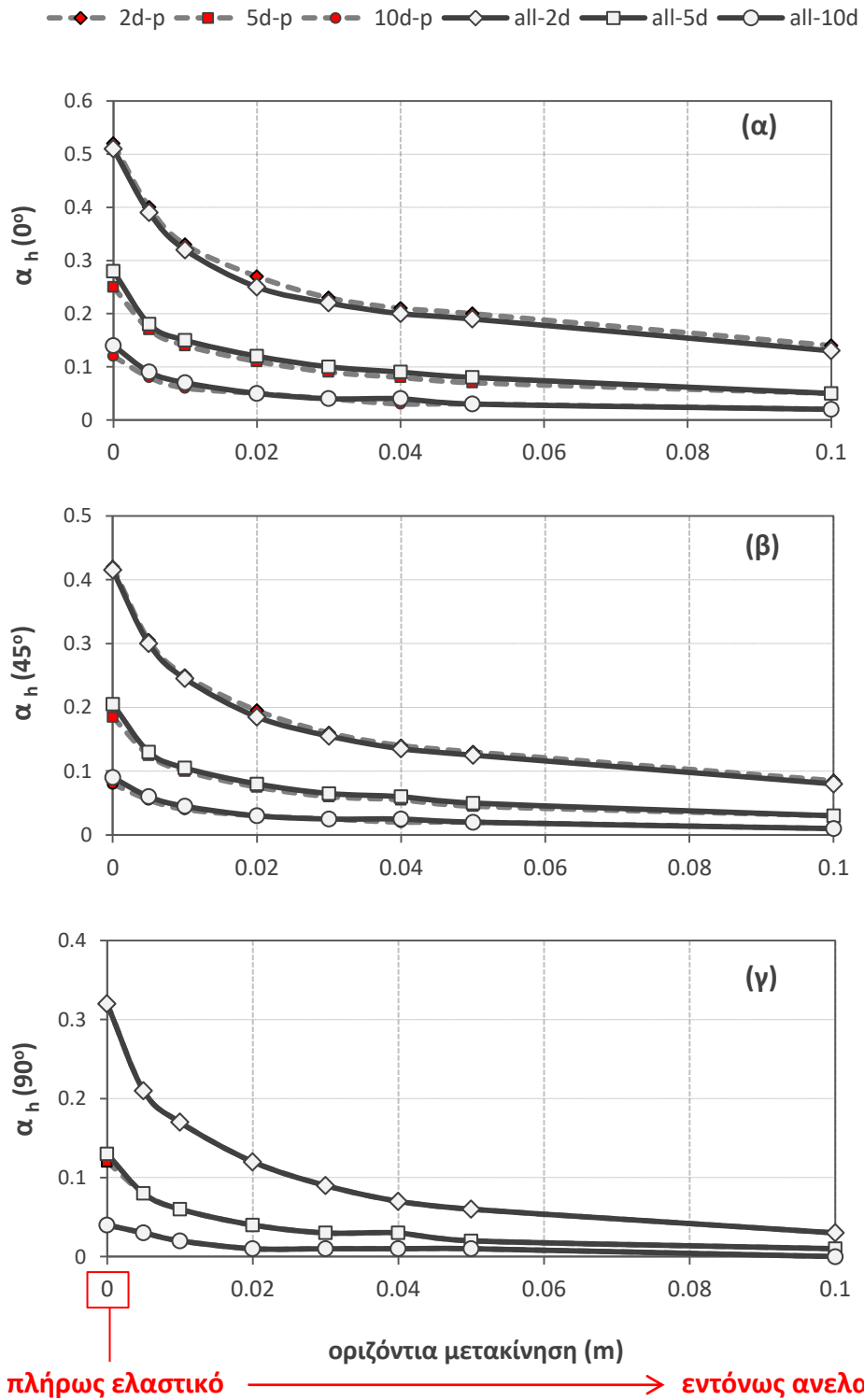
Σχήμα 3.12: Μη ελαστική στατική ανάλυση: ισοϋψείς πλαστικών παραμορφώσεων για οριζόντια μετακίνηση της κορυφής του πασσάλου  $0d$  ίση με  $0.02\text{ m}$



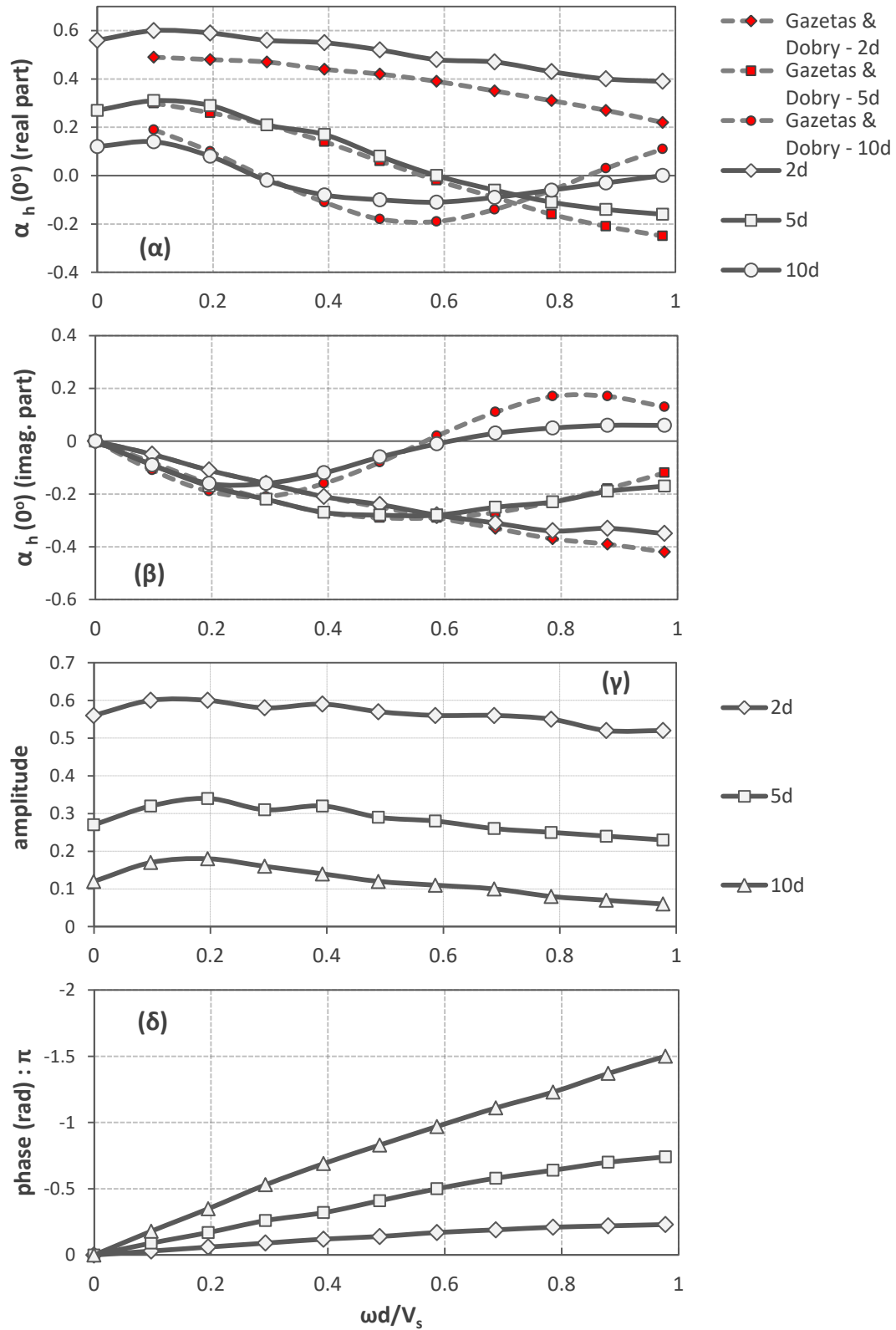
Σχήμα 3.13: Μη ελαστική στατική ανάλυση: ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων για οριζόντια μετακίνηση της κορυφής του πασσάλου  $0d$  ίση με  $0.04\text{ m}$ , (α) απουσία δεύτερου πασσάλου και (β) ύπαρξη δεύτερου πασσάλου



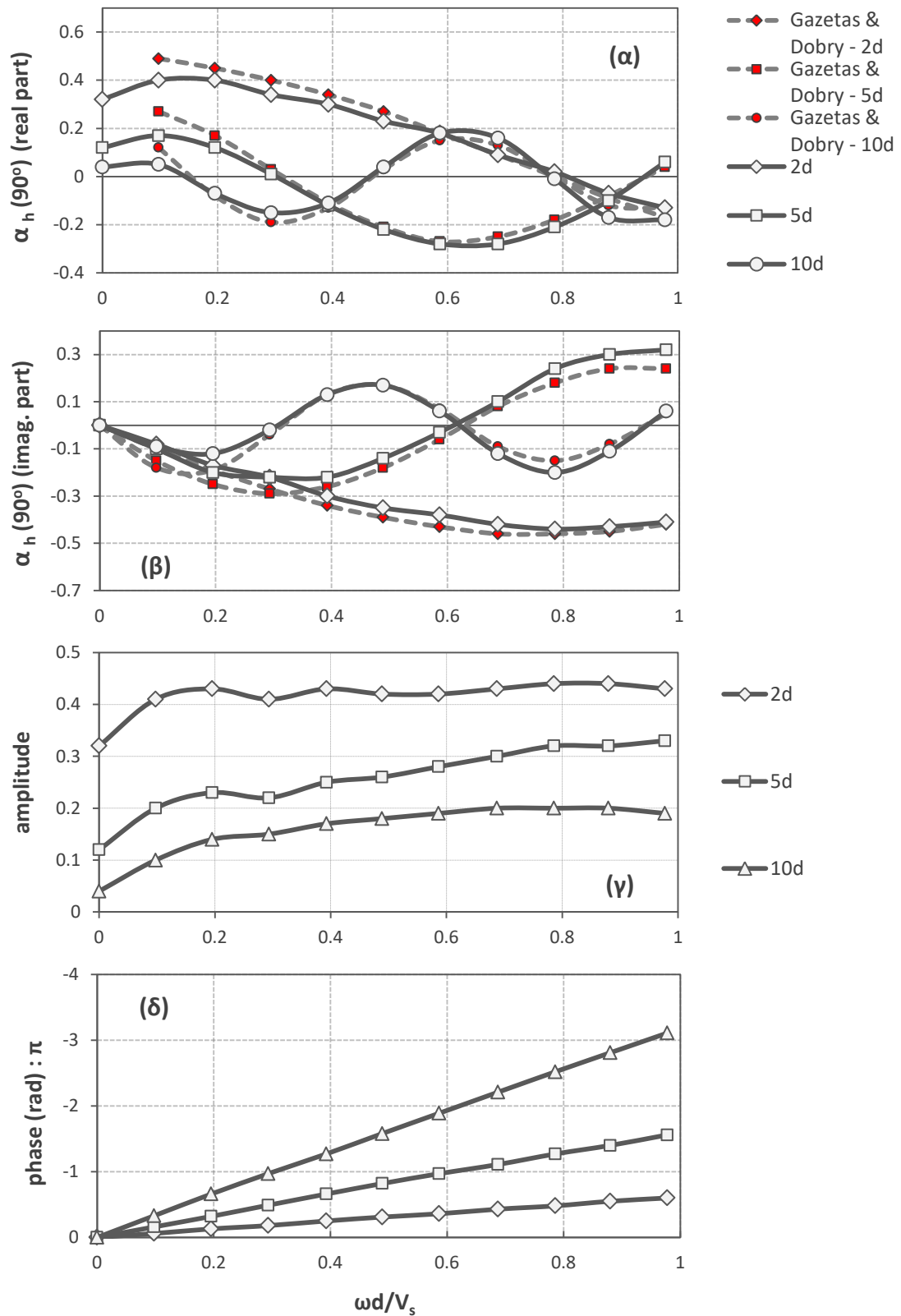
Σχήμα 3.14: Ελαστική στατική ανάλυση: ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων για οριζόντια μετακίνηση της κορυφής του πασσάλου  $0d$  ίση με  $1\text{ m}$



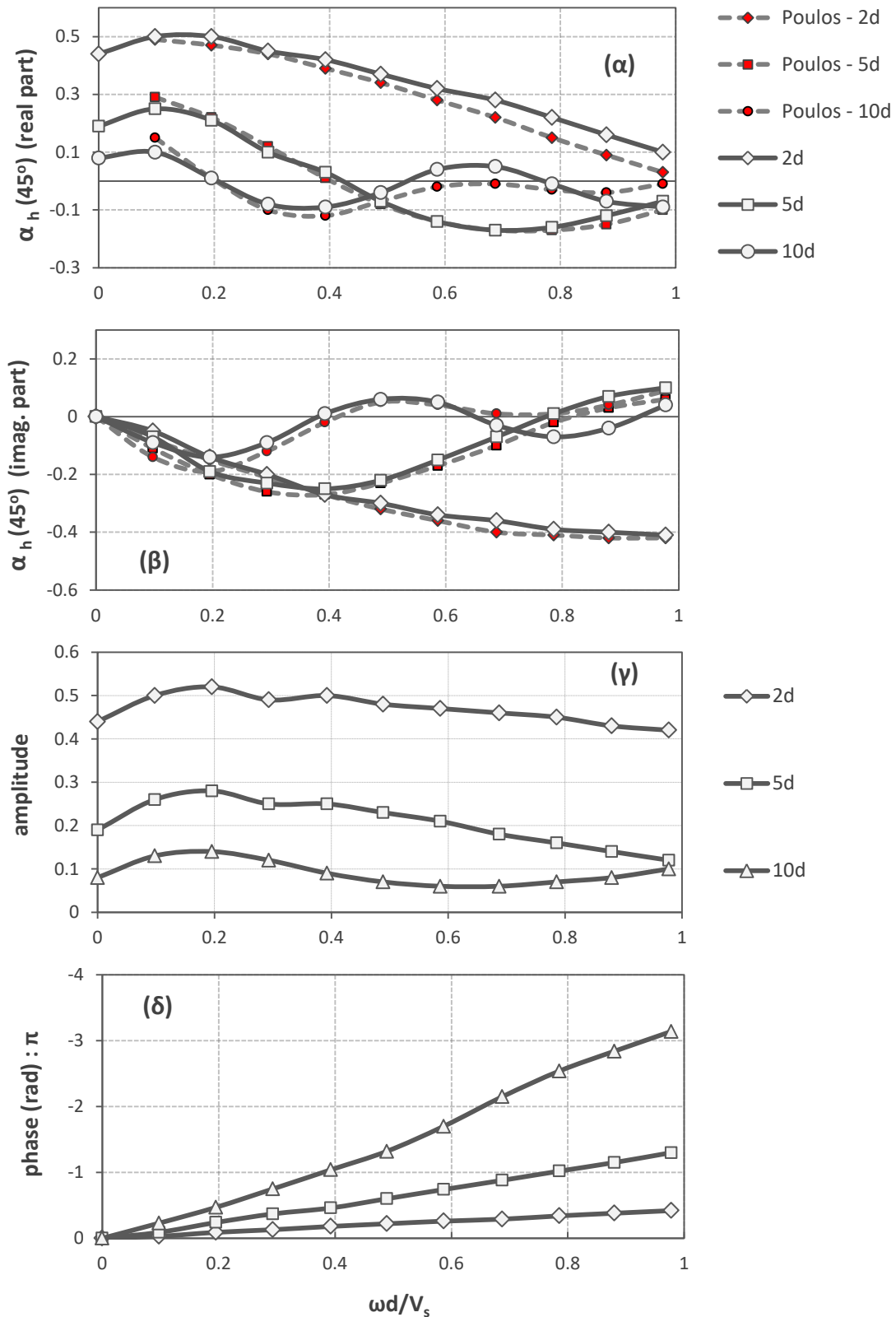
**Σχήμα 3.15:** Στατικός σ.α. για την περίπτωση της ύπαρξης όλων των πασσάλων (2d, 5d, και 10d) που βρίσκονται στη διεύθυνση (α)  $0^\circ$ , (β)  $90^\circ$  και (γ)  $45^\circ$ , (και σύγκριση με τη περίπτωση της ύπαρξης δεύτερου πασσάλου), συναρτήσει της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου 0d. Το 0 στον οριζόντιο άξονα συμβολίζει την πλήρη ελαστικότητα.



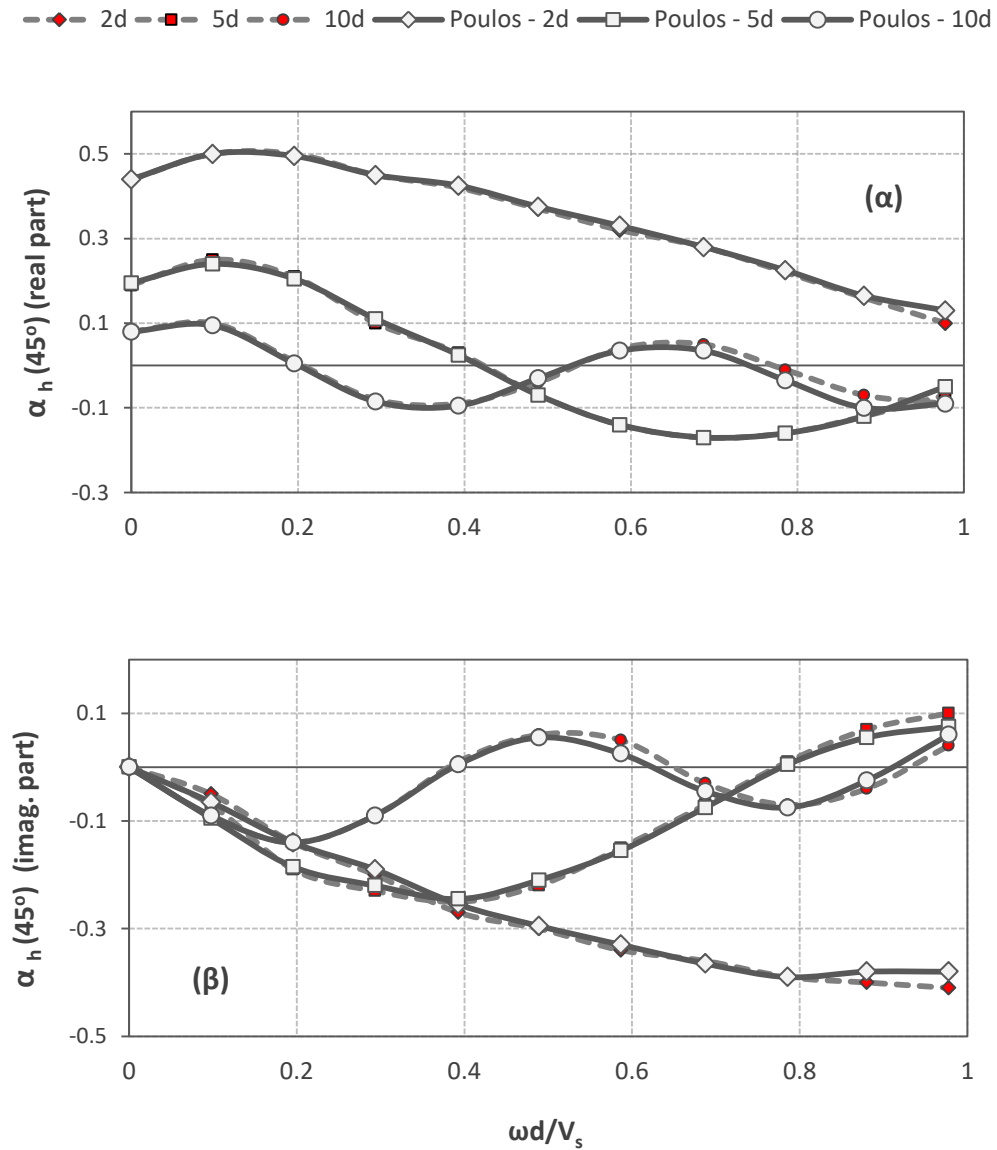
Σχήμα 3.16: Ελαστική ανάλυση: (α) Σύγκριση πραγματικού μέρους του σ.α. (θεωρία-ABAQUS), (β) σύγκριση φανταστικού μέρους του σ.α. (θεωρία-ABAQUS), (γ) μέτρο του σ.α., (δ) διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για  $\theta = 0^\circ$



Σχήμα 3.17: Ελαστική ανάλυση: (α) Σύγκριση πραγματικού μέρους του σ.α. (θεωρία-ABAQUS), (β) σύγκριση φανταστικού μέρους του σ.α. (θεωρία-ABAQUS), (γ) μέτρο του σ.α., (δ) διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για  $\theta = 90^\circ$

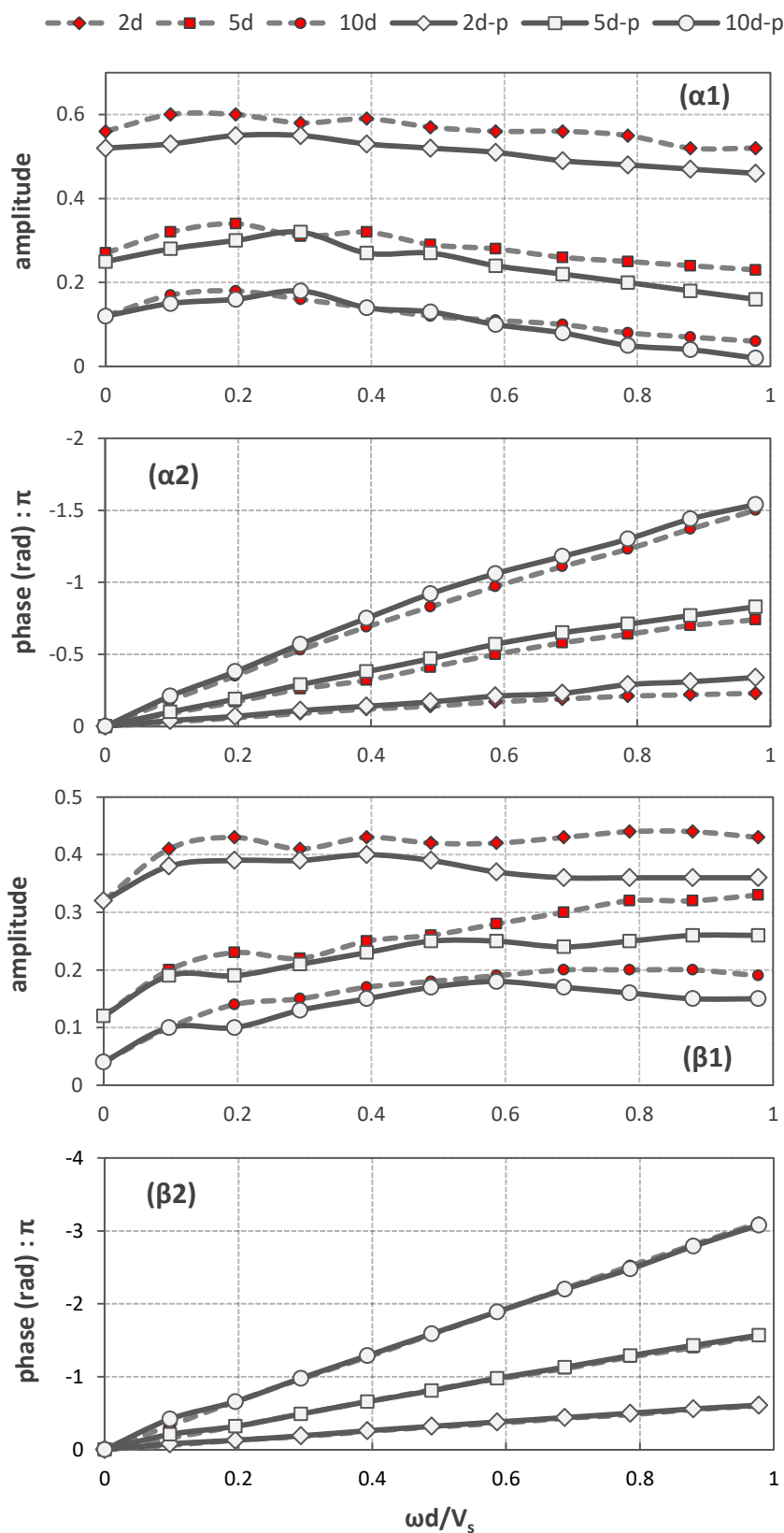


Σχήμα 3.18: Ελαστική ανάλυση: (α) Σύγκριση πραγματικού μέρους του  $\sigma_a$ . (θεωρία-ABAQUS), (β) σύγκριση φανταστικού μέρους του  $\sigma_a$ . (θεωρία-ABAQUS), (γ) μέτρο του  $\sigma_a$ , (δ) διαφορά φάσης του  $\sigma_a$ , συναρτήσει διαφορετικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για  $\theta = 45^\circ$

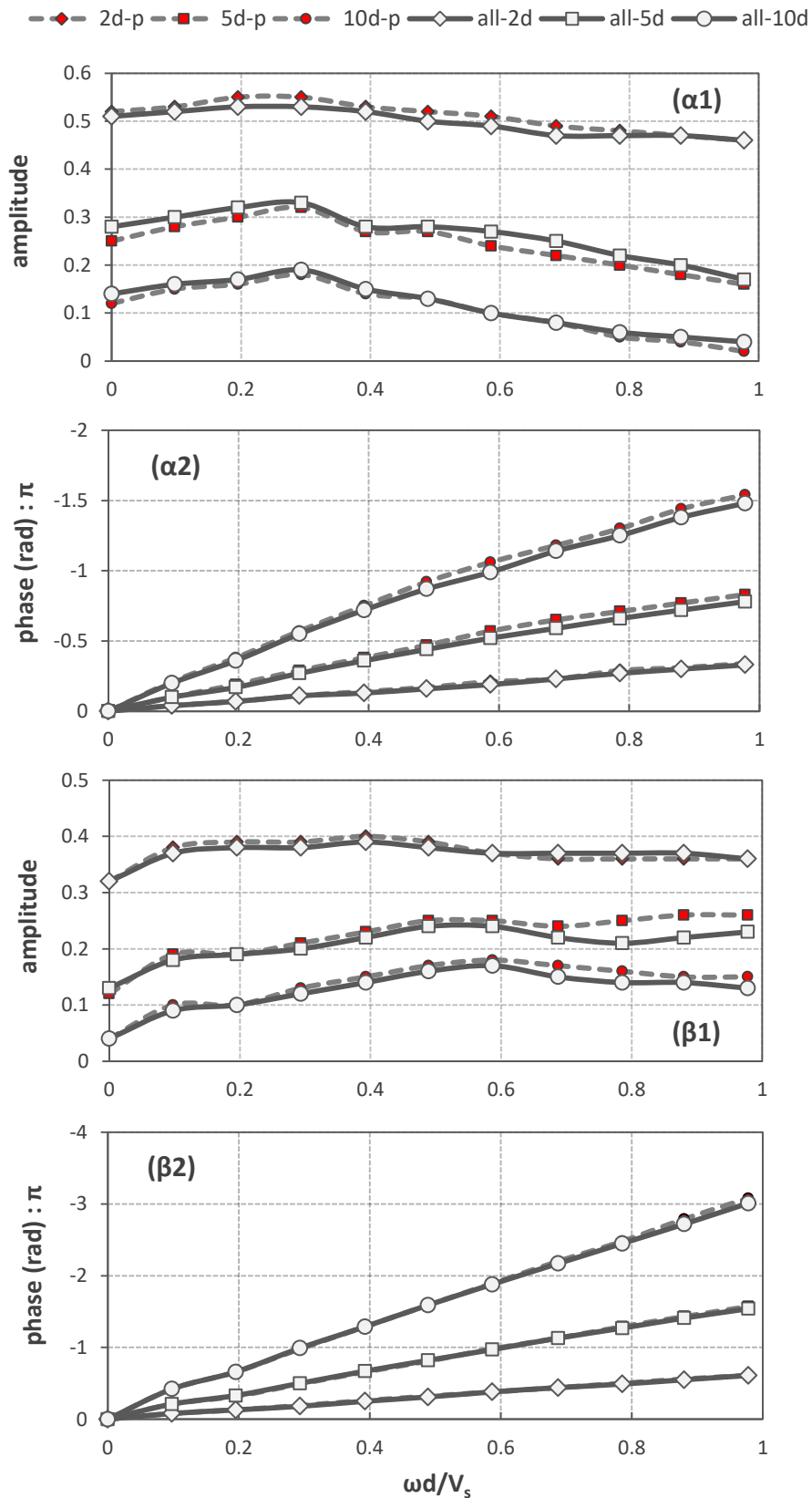


**Σχήμα 3.19:** Σύγκριση (α) πραγματικού και (β) φανταστικού μέρους του σ.α. (θεωρία-ABAQUS), με δεδομένα εισόδου στον θεωρητικό τύπο τους σ.α.  $\alpha_h(0^\circ)$  και  $\alpha_h(90^\circ)$ , όπως προέκυψαν από το ABAQUS, συναρτήσει διαφορετικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για  $\theta = 45^\circ$

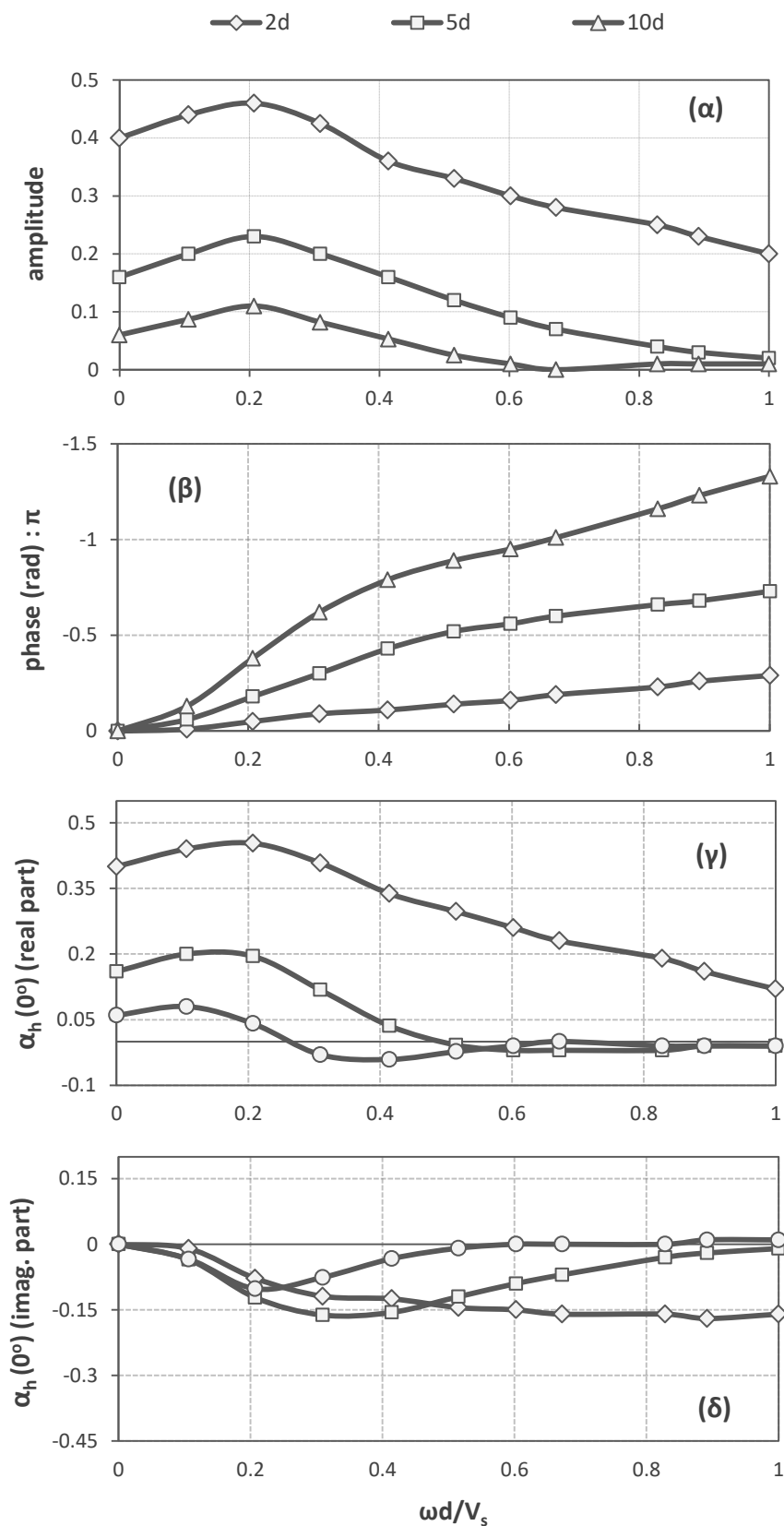




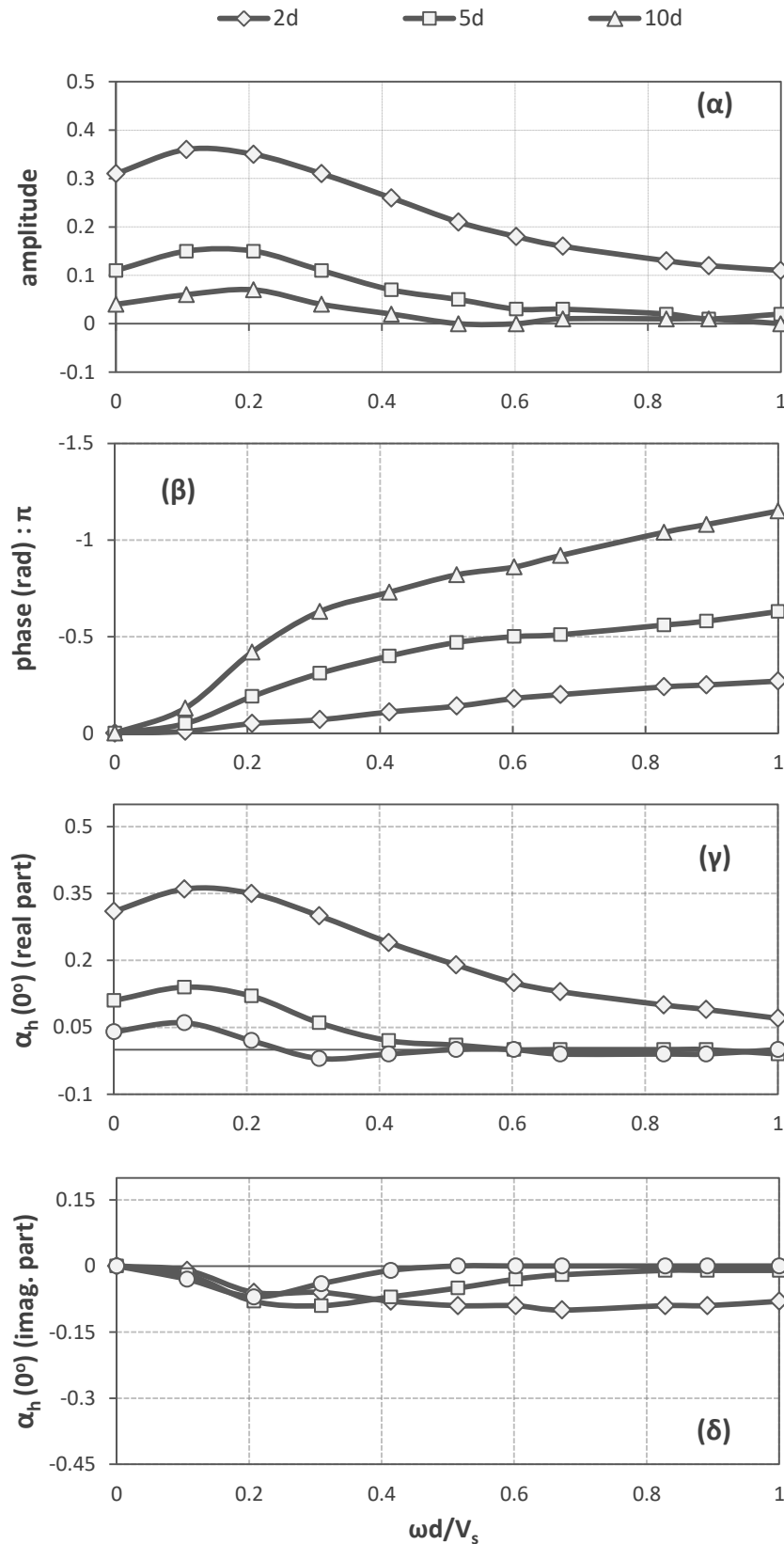
Σχήμα 3.20: Ελαστική ανάλυση: Επίδραση της ύπαρξης του δεύτερου πασσάλου, συγκριτικά με τη μη ύπαρξη αυτού, στο μέτρο και τη διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για (α1, α2)  $\theta = 0^\circ$ , και (β1, β2)  $\theta = 90^\circ$



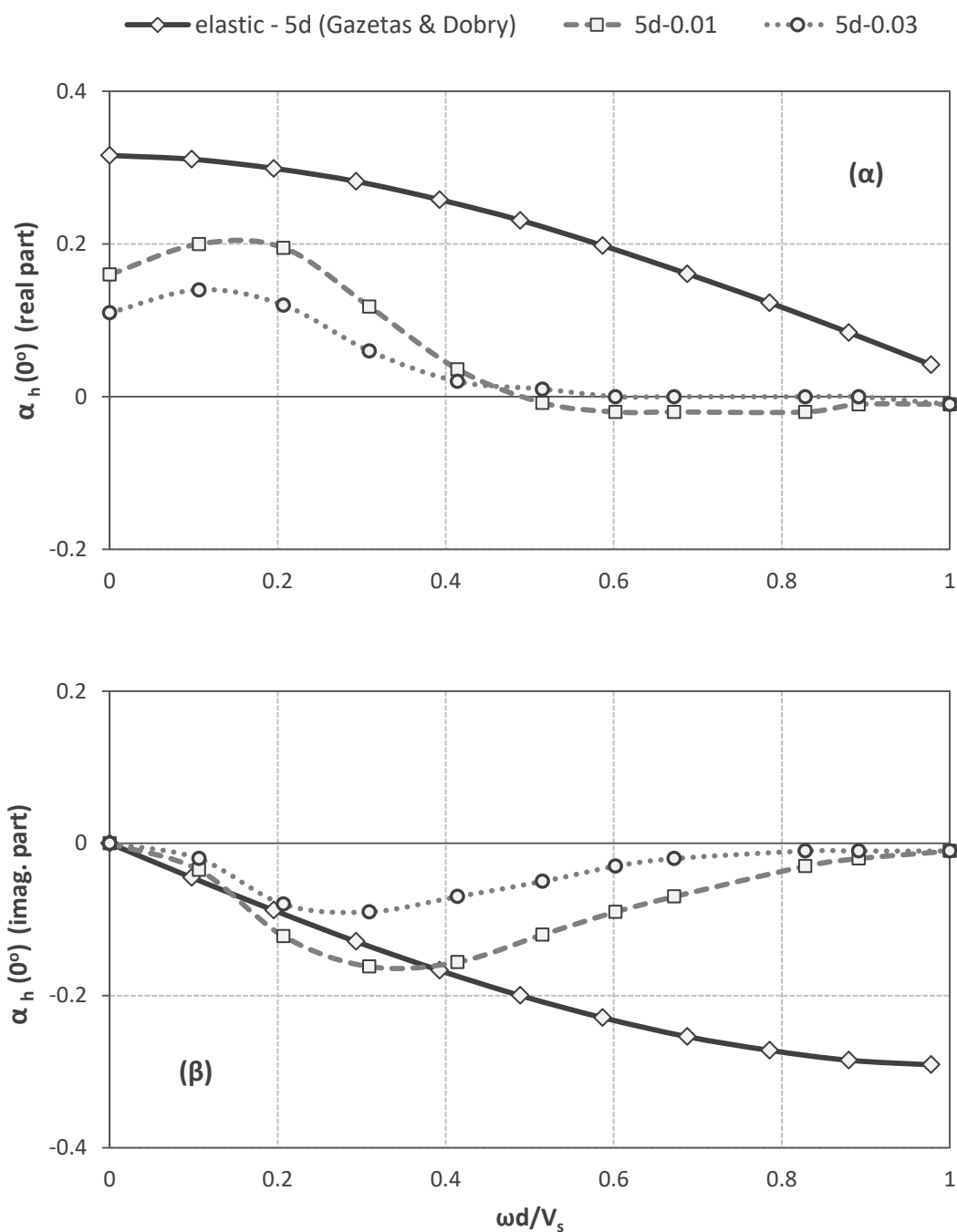
Σχήμα 3.21: Ελαστική ανάλυση: Επίδραση της ύπαρξης όλων των πασσάλων (0d, 2d, 5d, 10d), συγκριτικά με την ύπαρξη δύο πασσάλων (0d, xd, όπου  $x = 2, 5, 10$ ), στο μέτρο και τη διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για (α1, α2)  $\theta = 0^\circ$ , και (β1, β2)  $\theta = 90^\circ$



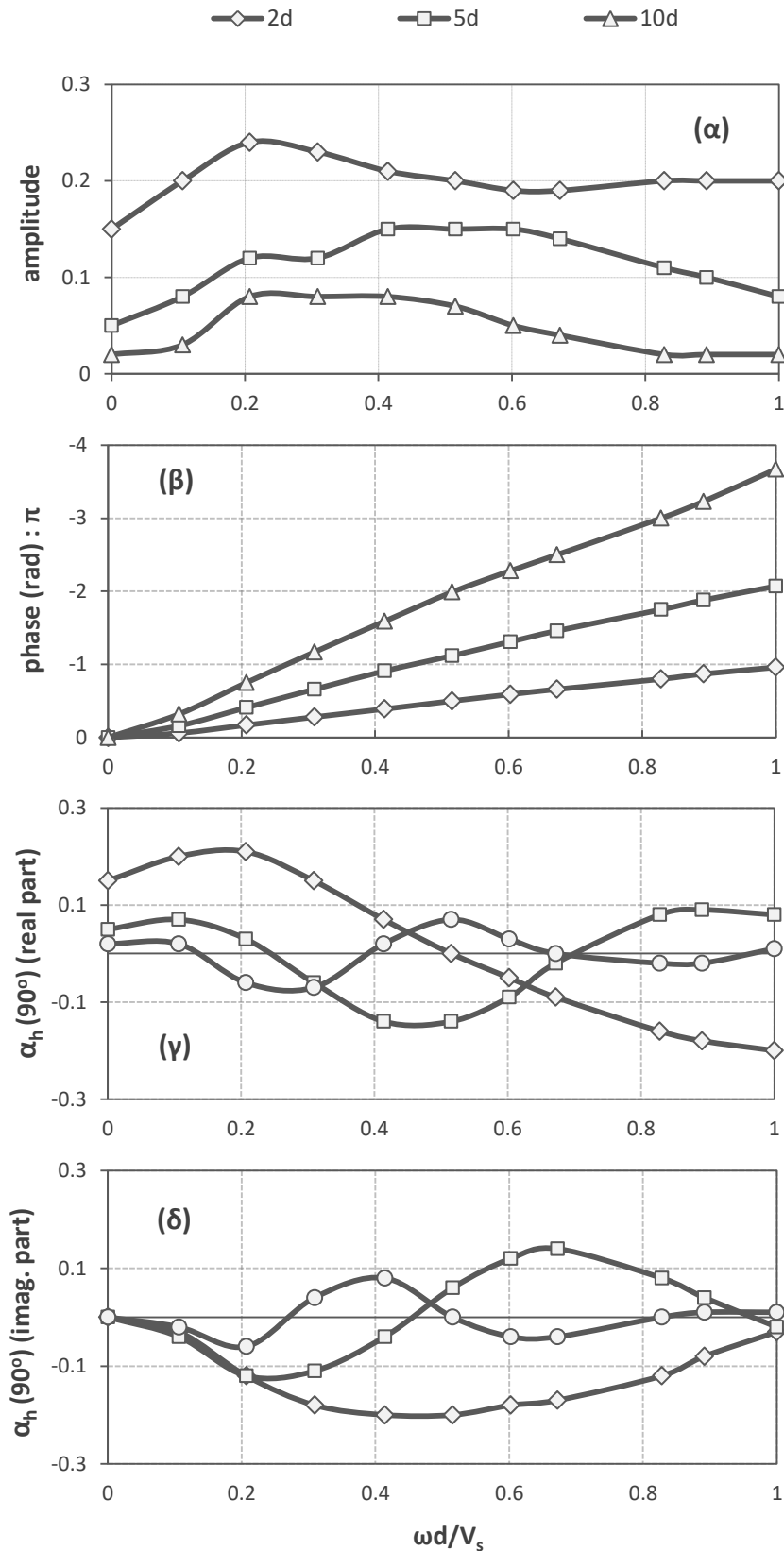
**Σχήμα 3.22: Μη ελαστική** ανάλυση ( $G/S_u = 600$ ): **(α)** Μέτρο του σ.α., **(β)** διαφορά φάσης του σ.α., **(γ)** πραγματικό μέρος του σ.α., **(δ)** φανταστικό μέρος του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για κατακόρυφο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με **0.01m** και  $\theta = 0^\circ$



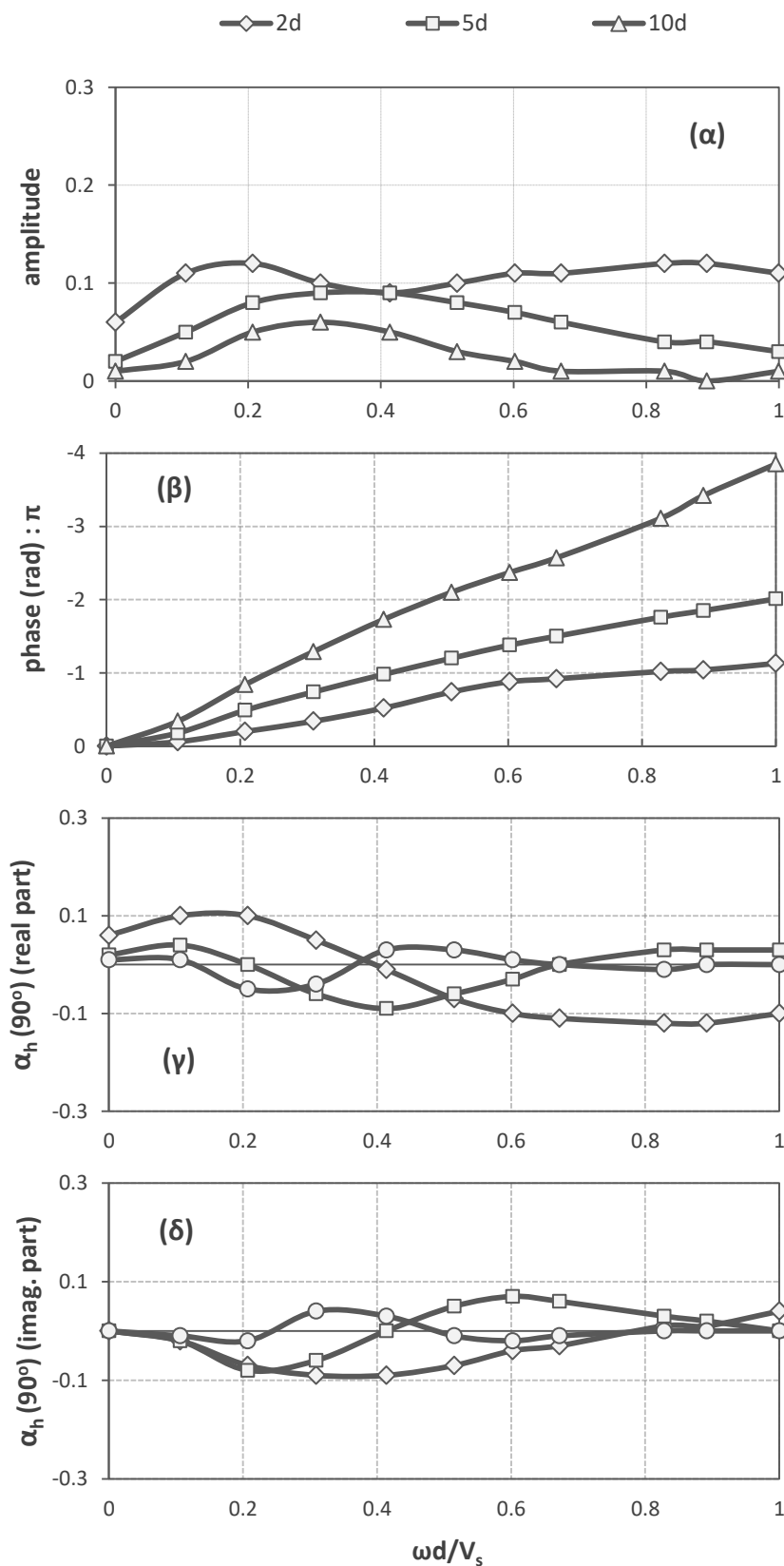
Σχήμα 3.23: Μη ελαστική ανάλυση ( $G/S_u = 600$ ): (α) Μέτρο του σ.α., (β) διαφορά φάσης του σ.α., (γ) πραγματικό μέρος του σ.α., (δ) φανταστικό μέρος του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για κατακόρυφο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με  $0.03m$  και  $\theta = 0^\circ$



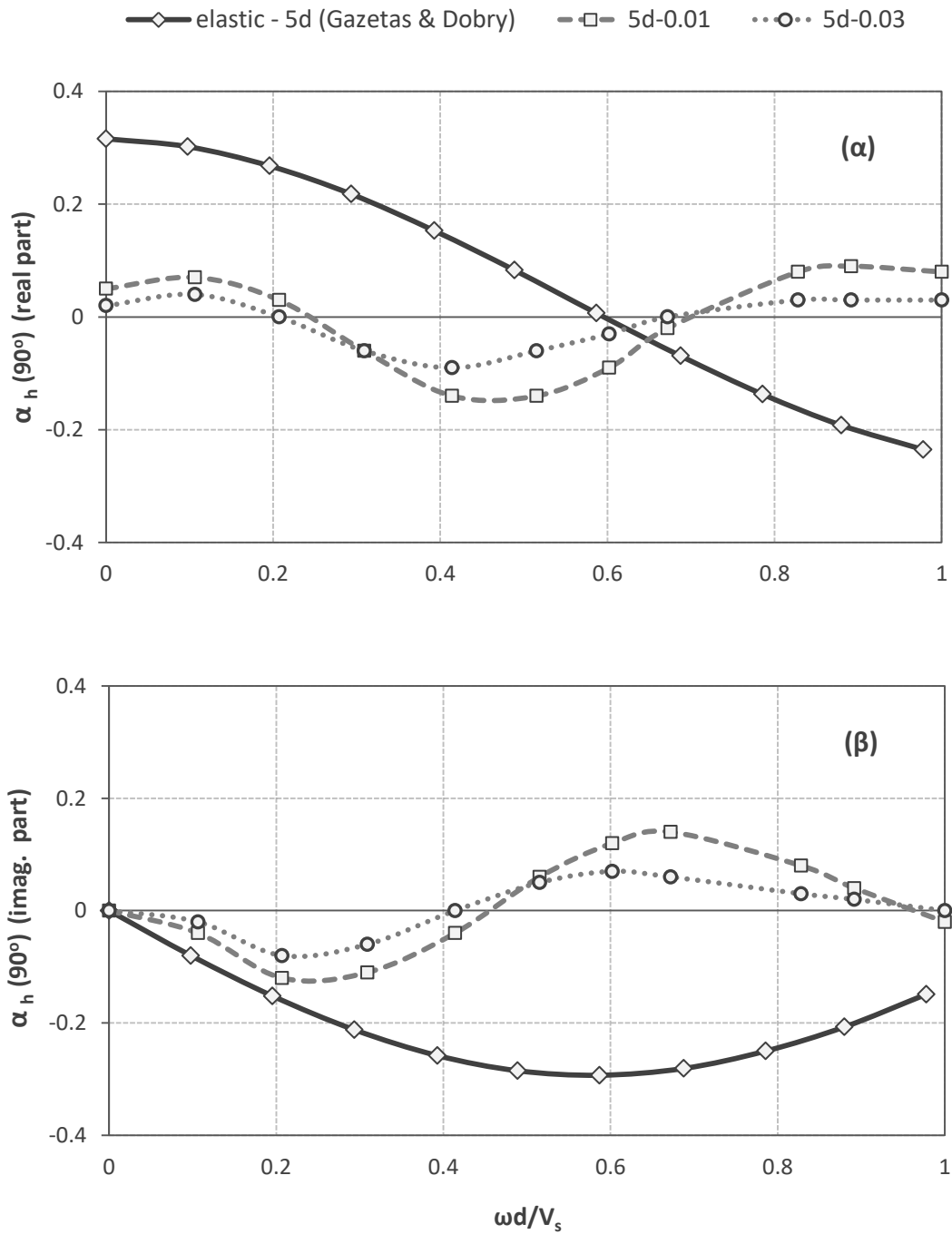
**Σχήμα 3.24:** (α) Πραγματικό μέρος του σ.α., (β) φανταστικό μέρος του σ.α.: Σύγκριση των **μη ελαστικών** αναλύσεων από το ABAQUS ( $G/S_u = 600$ ), για οριζόντιο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με 0.01 και 0.03, με την **ελαστική** λύση από τη θεωρία, για απόσταση  $5d$ , συναρτήσεως της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για  $\theta = 0^\circ$



**Σχήμα 3.25: Μη ελαστική** ανάλυση ( $G/S_u = 600$ ): **(α)** Μέτρο του σ.α., **(β)** διαφορά φάσης του σ.α., **(γ)** πραγματικό μέρος του σ.α., **(δ)** φανταστικό μέρος του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για κατακόρυφο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με **0.01m** και  $\theta = 90^\circ$

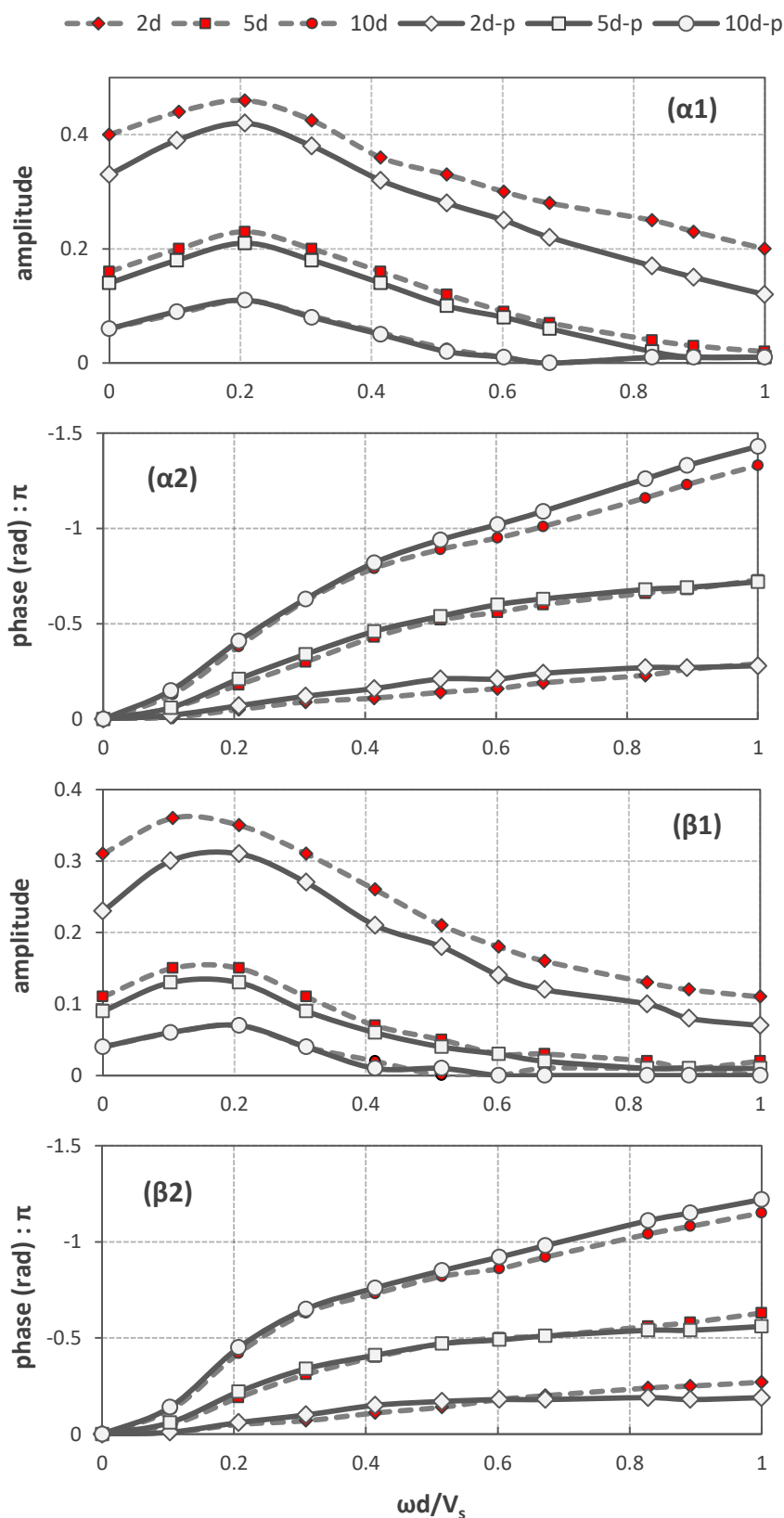


**Σχήμα 3.26: Μη ελαστική** ανάλυση ( $G/S_u = 600$ ): **(α)** Μέτρο του σ.α., **(β)** διαφορά φάσης του σ.α., **(γ)** πραγματικό μέρος του σ.α., **(δ)** φανταστικό μέρος του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για κατακόρυφο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με **0.03m** και  $\theta = 90^\circ$

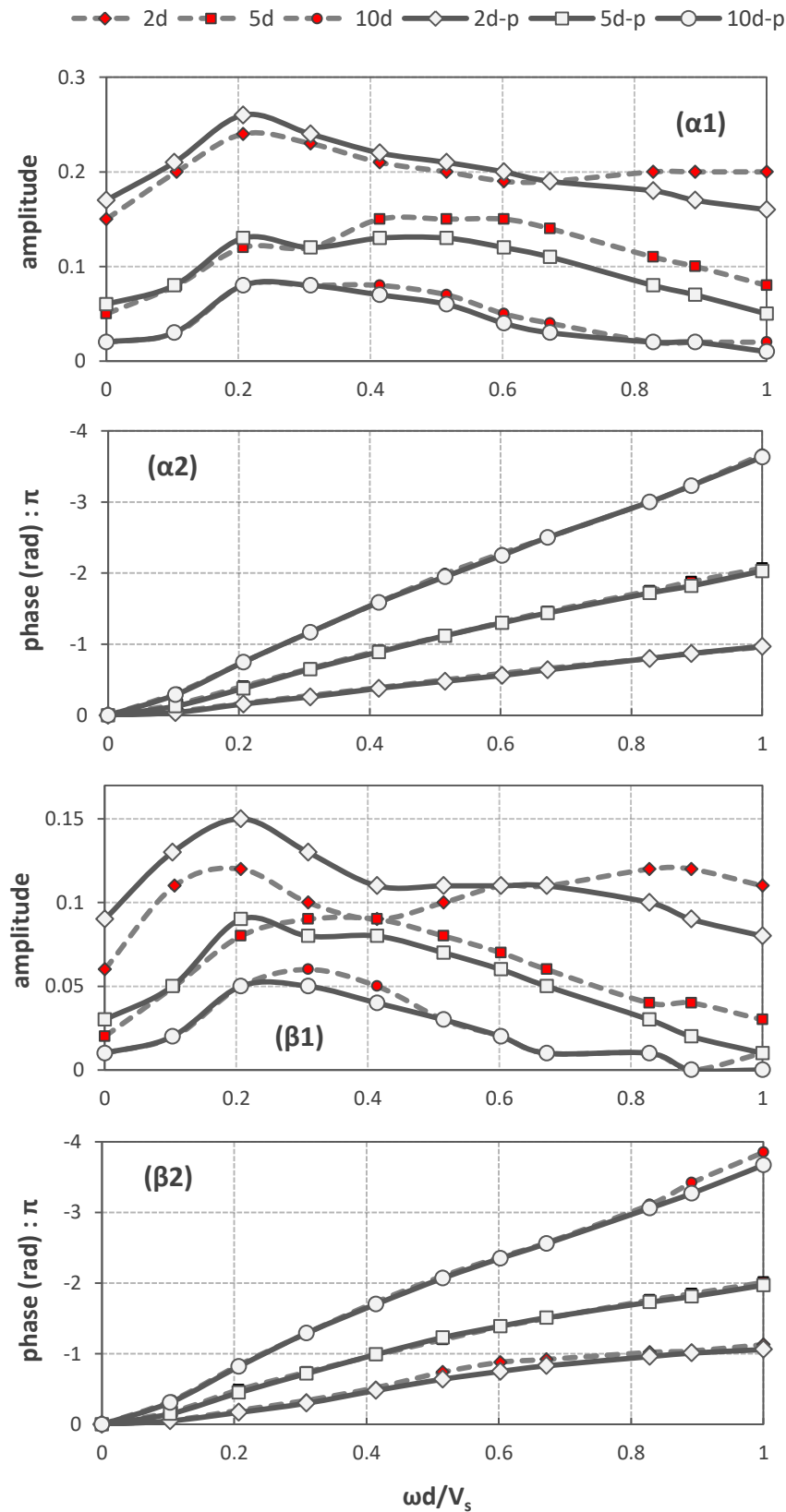


Σχήμα 3.27: (α) Πραγματικό μέρος του σ.α., (β) φανταστικό μέρος του σ.α.: Σύγκριση των μη ελαστικών αναλύσεων από το ABAQUS ( $G/S_u = 600$ ), για οριζόντιο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με 0.01 και 0.03, με την ελαστική λύση από τη θεωρία, για απόσταση  $5d$ , συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για  $\theta=90^\circ$

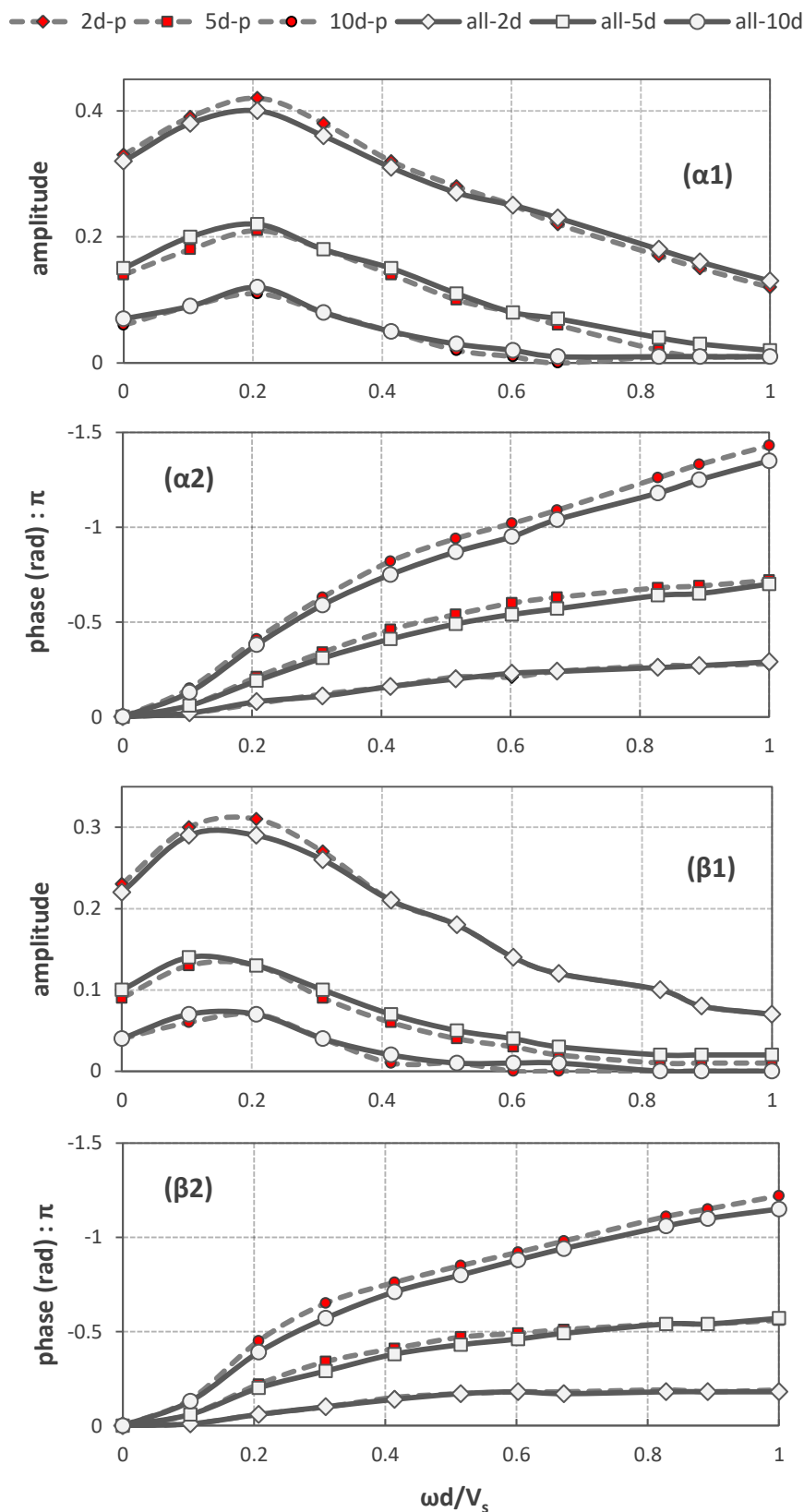




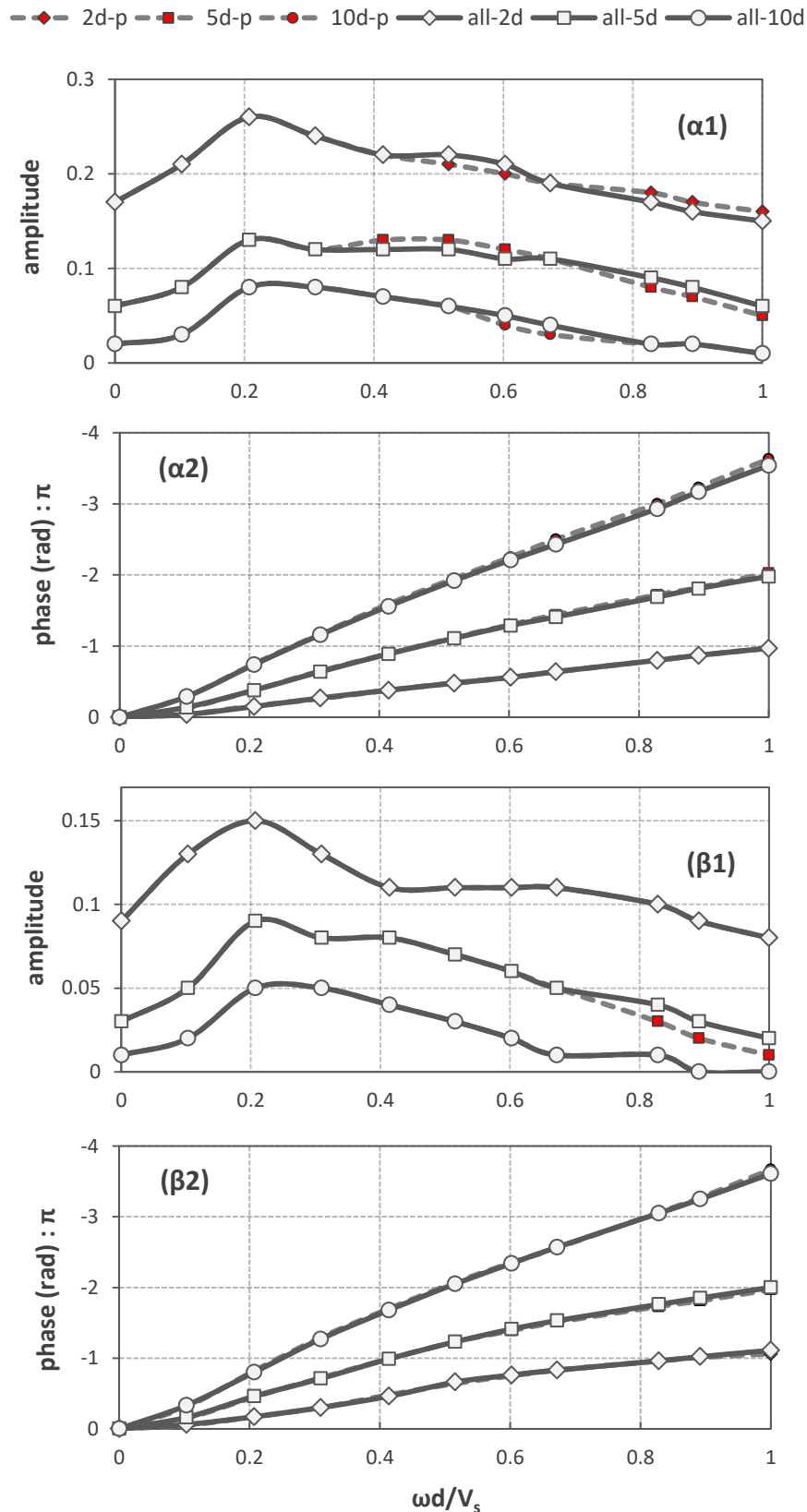
**Σχήμα 3.28: Μη ελαστική** ανάλυση ( $G/S_u = 600$ ): Επίδραση της ύπαρξης του δεύτερου πασσάλου, συγκριτικά με τη μη ύπαρξη αυτού, στο μέτρο και τη διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για οριζόντιο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου 0d ίσο με **(α1, α2) 0.01 m** και **(β1, β2) 0.03 m**, και  $\theta = 0^\circ$



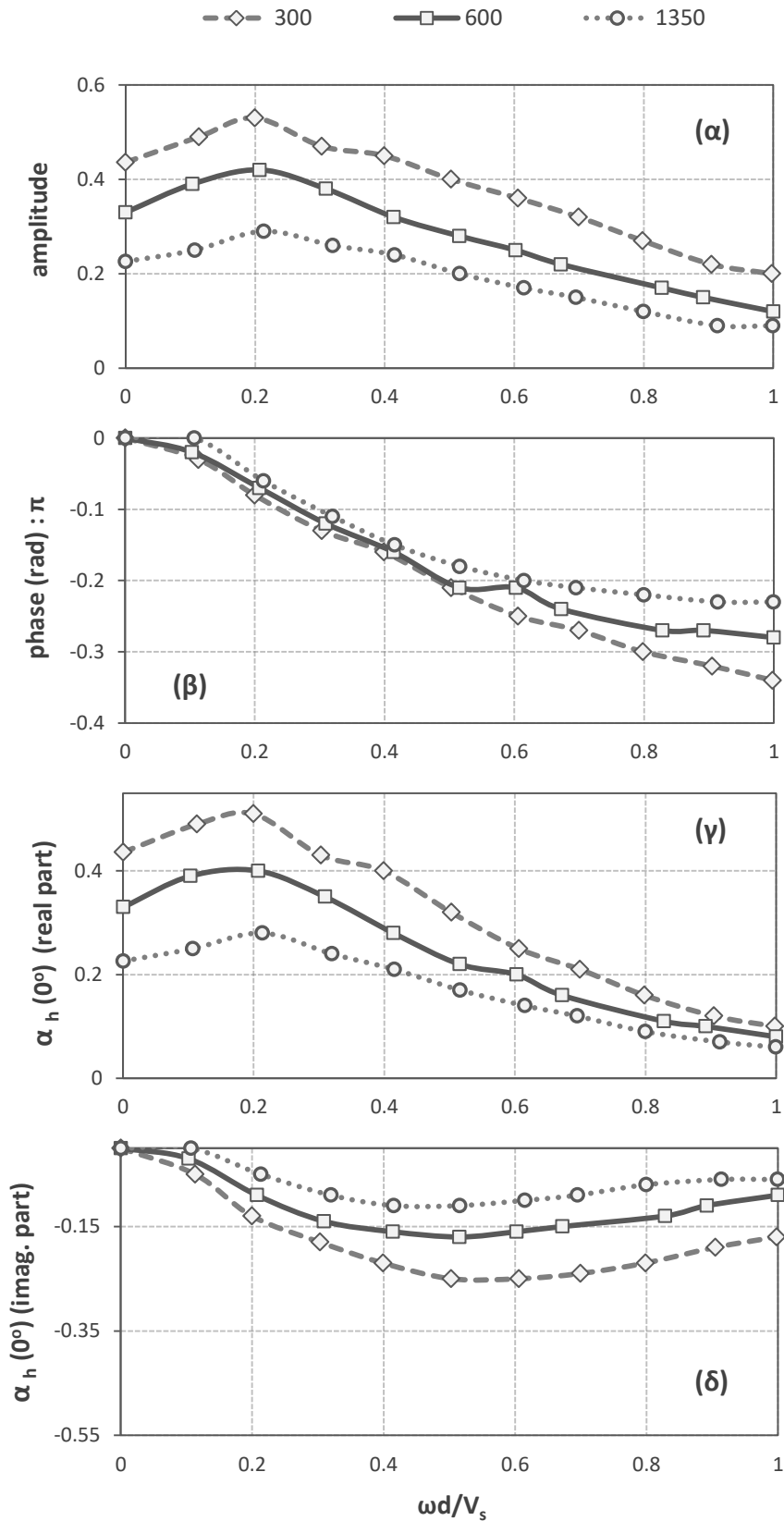
**Σχήμα 3.29: Μη ελαστική** ανάλυση ( $G/S_u = 600$ ): Επίδραση της ύπαρξης του δεύτερου πασσάλου, συγκριτικά με τη μη ύπαρξη αυτού, στο μέτρο και τη διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει διαφορετικών αποστάσεων (2d, 5d, 10d) και της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για οριζόντιο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με **(α1, α2) 0.01 m** και **(β1, β2) 0.03 m**, και  $\theta = 90^\circ$



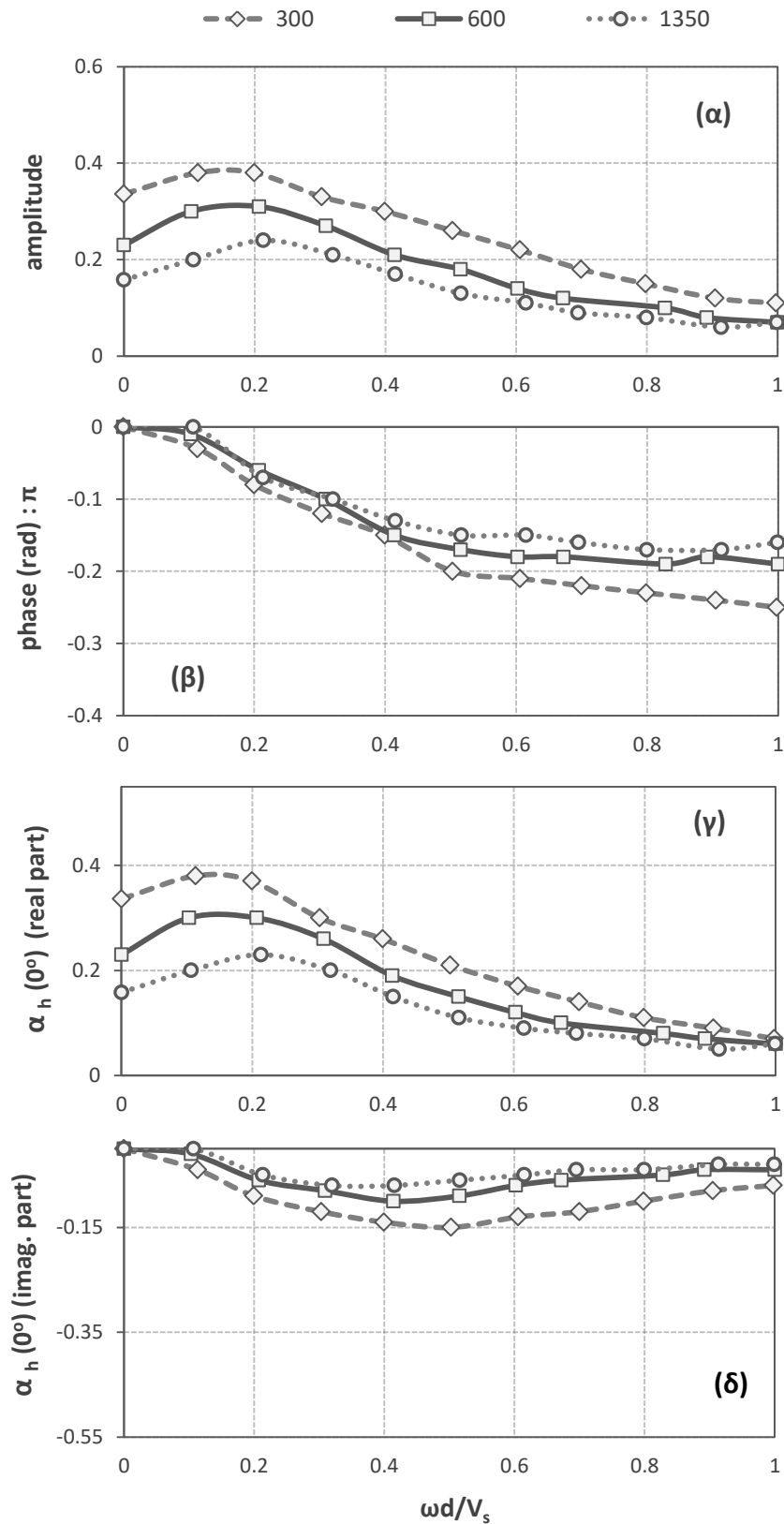
**Σχήμα 3.30: Μη ελαστική** ανάλυση ( $G/S_u = 600$ ): Επίδραση της ύπαρξης όλων των πασσάλων (0d, 2d, 5d, 10d), συγκριτικά με την ύπαρξη δύο πασσάλων (0d, xd, όπου  $x = 2, 5, 10$ ), στο μέτρο και τη διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για οριζόντιο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου 0d ίσο με **(α1, α2) 0.01 m** και **(β1, β2) 0.03 m**, και  $\theta = 0^\circ$



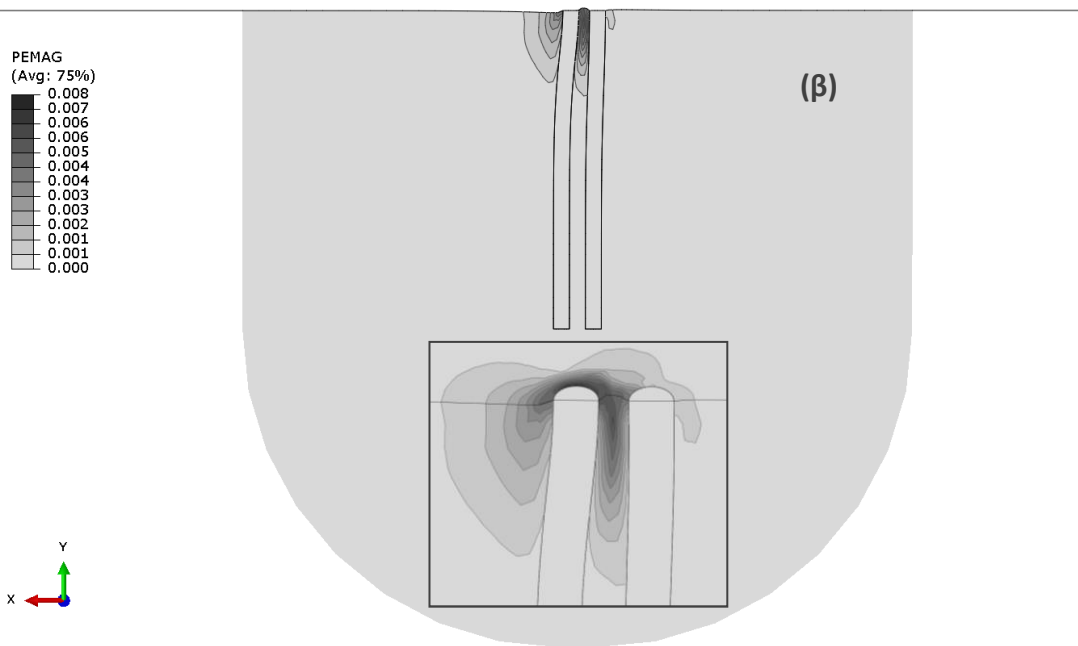
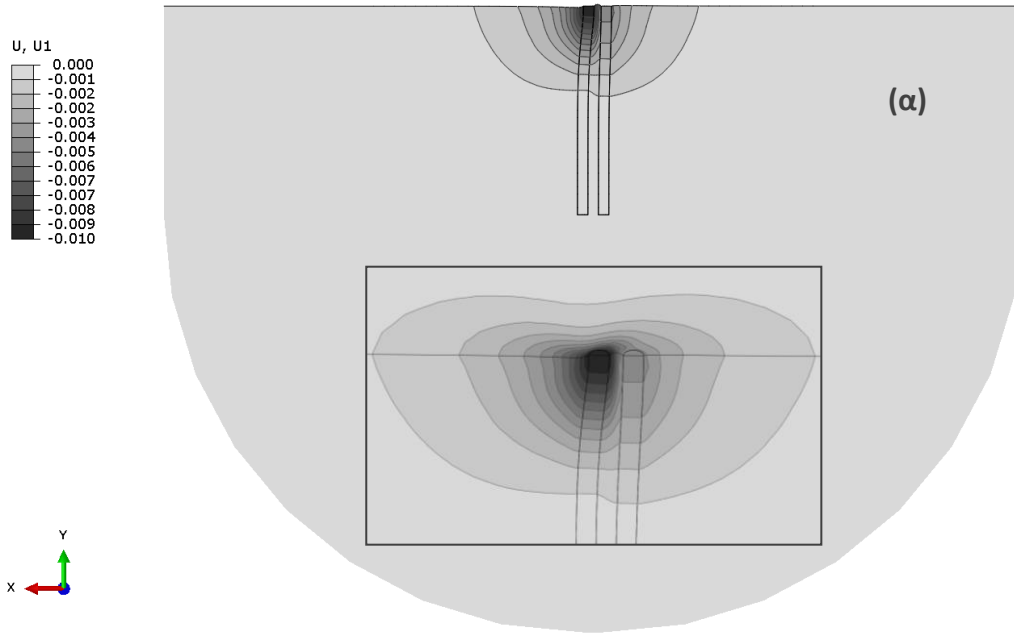
**Σχήμα 3.31: Μη ελαστική** ανάλυση ( $G/S_u = 600$ ): Επίδραση της ύπαρξης όλων των πασσάλων (0d, 2d, 5d, 10d), συγκριτικά με την ύπαρξη δύο πασσάλων (0d, xd, όπου  $x = 2, 5, 10$ ), στο μέτρο και τη διαφορά φάσης του σ.α., συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για οριζόντιο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου 0d ίσο με **(α1, α2) 0.01 m** και **(β1, β2) 0.03 m**, και  $\theta = 90^\circ$



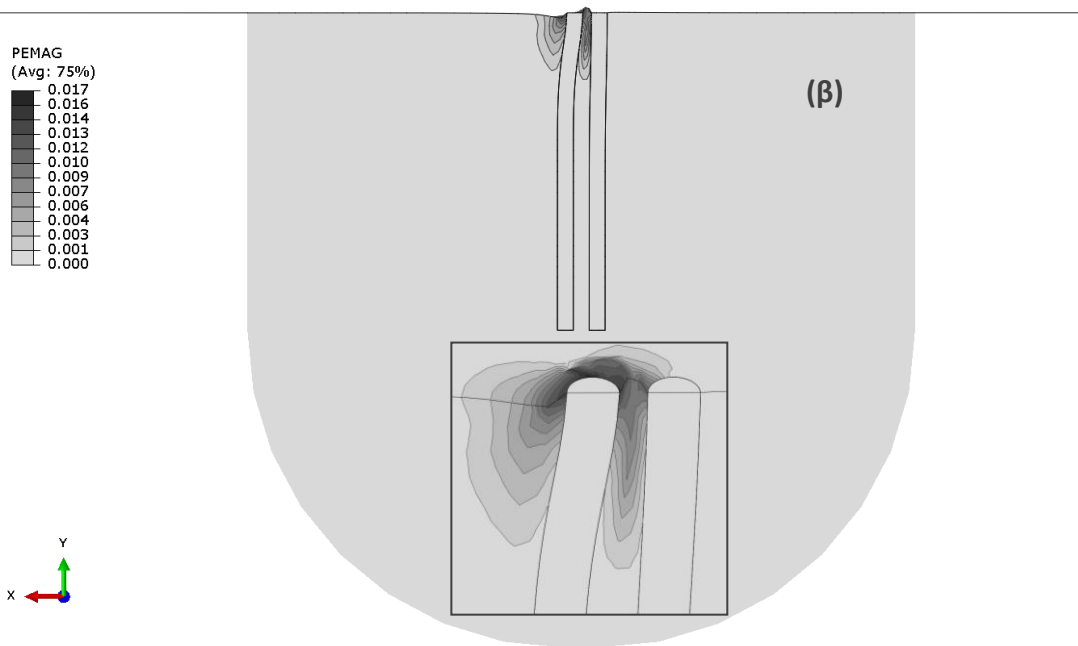
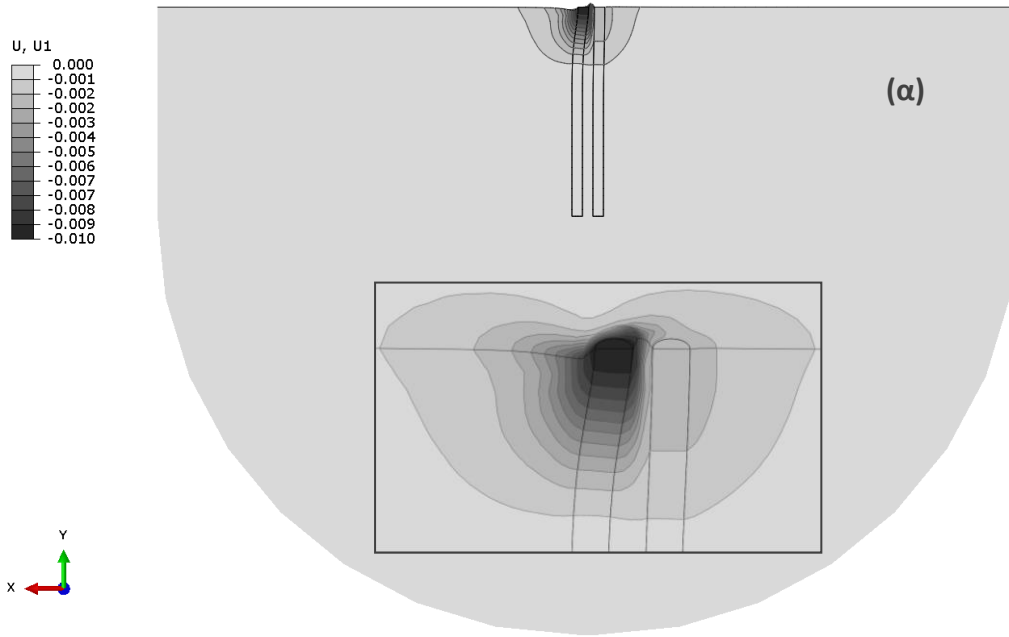
**Σχήμα 3.32: Μη ελαστική** ανάλυση: Σύγκριση **(α)** του μέτρου του σ.α., **(β)** της διαφοράς φάσης του σ.α., **(γ)** του πραγματικού μέρους του σ.α. και **(δ)** του φανταστικού μέρους του σ.α. συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για σταθερή απόσταση  $2d$ , λόγους  $G/S_u = 1350, 600, 300$  και οριζόντιο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με **0.01 m**



**Σχήμα 3.33: Μη ελαστική** ανάλυση: Σύγκριση **(α)** του μέτρου του σ.α., **(β)** της διαφοράς φάσης του σ.α., **(γ)** του πραγματικού μέρους του σ.α. και **(δ)** του φανταστικού μέρους του σ.α., συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου  $\alpha_0$ , για σταθερή απόσταση  $2d$ , λόγους  $G/S_u = 1350, 600, 300$  και οριζόντιο εύρος ταλάντωσης του πασσάλου  $0d$  ίσο με **0.03 m**



Σχήμα 3.34: Μη ελαστική στατική ανάλυση ( $G/S_u \approx 300$ ): (α) Ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων, (β) ισοϋψείς πλαστικών παραμορφώσεων, για οριζόντια μετακίνηση του πασσάλου  $0d$  ίση με 0.01 m



Σχήμα 3.35: Μη ελαστική στατική ανάλυση ( $G/S_u \approx 1350$ ): (α) Ισοϋψείς οριζόντιων μετακινήσεων, (β) ισοϋψείς πλαστικών παραμορφώσεων, για οριζόντια μετακίνηση του πασσάλου  $0d$  ίση με 0.01 m



# 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

---

## ΟΜΑΔΑ ΠΑΣΣΑΛΩΝ 2x2

3.1 Ελαστικό έδαφος

3.2 Μη ελαστικό έδαφος



## 4 Ομάδα πασσάλων 2 x 2

### 4.1 Ελαστικό έδαφος

#### 4.1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να παρουσιάσει και να συγκρίνει τις σύνθετες δυσκαμψίες (κατακόρυφη, οριζόντια και περιστροφική) ομάδας πασσάλων 2x2 ( $s = 2d$ ), όπως αυτές προκύπτουν άμεσα από την προσομοίωση στο Abaqus της μισής, λόγω συμμετρίας, ομάδας, και από τη χρήση της μεθόδου των σ.α.. Θα εξετασθεί, έτσι, ο βαθμός αξιοπιστίας της μεθόδου των σ.α. σε ελαστικό έδαφος. Χρησιμοποιήθηκαν, για λόγους σύγκρισης, τόσο οι σ.α. που προέκυψαν από αναλύσεις στο Abaqus, λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη και του δεύτερου πασσάλου, όσο και οι σ.α. που προκύπτουν από τις απλοποιητικές σχέσεις των (Dobry & Gazetas).

#### 4.1.2 Τρισδιάστατο προσομοίωμα

Το συμμετρικό μοντέλο που δημιουργήθηκε για την προσομοίωση της ομάδας πασσάλων φαίνεται στο **Σχήμα 4.1**. Χρησιμοποιήθηκαν, και σε αυτήν την περίπτωση απορροφητικά σύνορα (infinite elements).

Όσον αφορά τη γεωμετρία του προβλήματος οι πάσσαλοι απέχουν απόσταση  $s = 2d$  ( $d = 1$  m) και έχουν μήκος 20 m. Οι ιδιότητές τους είναι οι εξής:

- ειδικό βάρος  $\gamma_p = 25$  kN/m<sup>3</sup>
- μέτρο ελαστικότητας  $E_p = 25000$  MPa
- λόγος poisson  $\nu = 0.2$

Αντίστοιχα, οι ιδιότητες του εδάφους είναι:

- ειδικό βάρος  $\gamma_s = 17.5$  kN/m<sup>3</sup>
- μέτρο ελαστικότητας  $E_s = 25$ MPa ( $E_p / E_s = 1000$ )
- λόγος poisson  $\nu = 0.40$
- απόσβεση τύπου Rayleigh της τάξης του 5%

#### 4.1.3 Διαδικασία υπολογισμού των σύνθετων δυσκαμψιών της ομάδας

- **Κατακόρυφη (σύνθετη) δυσκαμψία**

Για τον άμεσο προσδιορισμό της κατακόρυφης δυσκαμψίας  $K_z^G$ , όπου ο δείκτης G συμβολίζει το group, από την προσομοίωση της μισής ομάδας έγιναν τα εξής:

τοποθετήθηκε κατακόρυφο αρμονικό φορτίο (με διάφορες περιόδους), το εύρος του οποίου είναι αδιάφορο λόγω της ελαστικότητας του εδάφους, στην κορυφή των πασσάλων (το συνολικό φορτίο της ομάδας προκύπτει αν πολλαπλασιαστεί το φορτίο που τοποθετήθηκε στους πασσάλους επί 4), και καταγράφηκε η κατακόρυφη απόκριση του ενός πασσάλου (που προφανώς συμπίπτει με της ομάδας). Η αρμονική κατακόρυφη μετακίνηση της ομάδας είναι φυσικό να έχει μια μικρή διαφορά φάσης από την αρμονική δύναμη που επιβάλλεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η δυσκαμψία της ομάδας να είναι ένας μιγαδικός αριθμός, που θα έχει τη μορφή

$$K_z^G = \frac{F_0 e^{i\omega t}}{u_0 e^{i(\omega t - \phi)}} = \check{K}_z^G + i \alpha_0 C_z^G$$

όπου:  $F_0$  = το πλάτος του φορτίου ταλάντωσης

$u_0$  = το πλάτος της κατακόρυφης μετακίνησης της ομάδας

$\phi$  = η διαφορά φάσης φορτίου και μετακίνησης

$\check{K}_z^G$  = το πραγματικό μέρος της δυσκαμψίας

$\alpha_0 C_z^G$  = το φανταστικό μέρος της δυσκαμψίας

$\alpha_0 = \omega d / V_s$

Για τον έμμεσο προσδιορισμό της δυσκαμψίας της ομάδας με την μέθοδο των σ.α., χρειάζονται, εκτός από τους ίδιους τους σ.α., και οι κατακόρυφες δυναμικές δυσκαμψίες του μεμονομένου πασσάλου  $K_z^S$  για τις διάφορες συχνότητες, οι οποίες προέκυψαν με τη βοήθεια του Abaqus. Τελικά, με τη βοήθεια της μεθόδου των σ.α., η κατακόρυφη δυσκαμψία της ομάδας δίνεται από την σχέση

$$K_z^G = (4 K_z^S) / (1 + \alpha_v(s) + \alpha_v(s\sqrt{2}))$$

- **Οριζόντια (σύνθετη) δυσκαμψία**

Για τον άμεσο υπολογισμό της οριζόντιας δυσκαμψίας  $K_h^G$  της ομάδας από το συμμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω με μόνη διαφορά την κατεύθυνση φόρτισης (οριζόντια).

Για τον έμμεσο προσδιορισμό της δυσκαμψίας της ομάδας με την μέθοδο των σ.α., χρειάστηκαν, εκτός από τους ίδιους τους σ.α., και οι οριζόντιες δυναμικές δυσκαμψίες του μεμονομένου πασσάλου  $K_h^S$  για τις διάφορες συχνότητες, οι οποίες προέκυψαν με τη βοήθεια του Abaqus. Τελικά, με τη βοήθεια της μεθόδου των σ.α., η κατακόρυφη δυσκαμψία της ομάδας δίνεται από την σχέση

$$K_h^G = (4 K_h^S) / (1 + \alpha_v(s) + 0.5 \alpha_v(s\sqrt{2}) + \alpha_h(s) + 0.5 \alpha_h(s\sqrt{2}))$$

- **Περιστροφική (σύνθετη) δυσκαμψία**

Για τον άμεσο προσδιορισμό της περιστροφικής δυσκαμψίας  $K_{rx}^G$ , χρησιμοποιήθηκε το ίδιο μοντέλο με μόνη διαφορά την τοποθέτηση άκαμπτου κεφαλοδέσμου, που φαίνεται στο **Σχήμα 4.2** (δεν αλληλεπιδρά με το έδαφος), ώστε να ασκηθεί πάνω του αρμονική ροπή για διάφορες περιόδους. Στη συνέχεια, καταγράφηκε η στρόφη του κεφαλοδέσμου, η οποία είχε μια μικρή διαφορά φάσης από την αρμονική ροπή που επιβλήθηκε, και εν τέλει προέκυψαν οι περιστροφικές δυσκαμψίες της ομάδας συναρτήσει διαφόρων συχνοτήτων.

Για τον έμμεσο προσδιορισμό της δυσκαμψίας της ομάδας με την μέθοδο των σ.α., χρειάστηκαν, εκτός από τους ίδιους τους σ.α., και οι περιστροφικές δυναμικές δυσκαμψίες του μεμονομένου πασσάλου  $K_{rx}^S$  για τις διάφορες συχνότητες, οι οποίες προέκυψαν με τη βοήθεια του Abaqus. Οι κατακόρυφες δυναμικές δυσκαμψίες του ενός πασσάλου είναι ήδη γνωστές από πριν. Τελικά, με τη βοήθεια της μεθόδου των σ.α., η περιστροφική δυσκαμψία της ομάδας δίνεται από την σχέση

$$K_{rx}^G = 4 K_{rx}^S + K_z^S s^2 \frac{1}{1 - \alpha_v (s\sqrt{2})}$$

(Σημείωση: για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα βήματα της μεθόδου των σ.α. και τις σύνθετες δυναμικές δυσκαμψίες, ανατρέξτε στην αντίστοιχη βιβλιογραφία που παρατίθεται, καθώς η περιγραφή τους δεν αποτελεί μέρος της παρούσας εργασίας)

#### 4.1.4 Αποτελέσματα – Σχολιασμός

Ξεκινώντας με την παρουσίαση και το σχολιασμό των διαγραμμάτων της κατακόρυφης δυσκαμψίας  $K_z^G$ , στο **Σχήμα 4.3** παρουσιάζονται, με τη σειρά, το πραγματικό και το φανταστικό μέρος, καθώς και το μέτρο της δυναμικής δυσκαμψίας της ομάδας πασσάλων, συναρτήσει της συχνότητας ταλάντωσής της. Από τα διαγράμματα αυτά είναι εμφανής η συνέπεια της μεθόδου των σ.α., ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες ταλάντωσης. Ακόμα, είναι φανερό πως η απλοποιημένη σχέση των Dobry & Gazetas για την πρόβλεψη των κατακόρυφων σ.α. δουλεύει εξαιρετικά, ακόμα και για κοντινές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων της τάξης των 2d (σε προηγούμενη ενότητα, όπου έγινε η παρουσίαση των κατακόρυφων ελαστικών δυναμικών σ.α. υπήρχαν κάποιες μικρές αποκλίσεις μεταξύ της σχέσης αυτής και των αποτελεσμάτων από το Abaqus για την απόσταση 2d).

Συνεχίζοντας με τα αποτελέσματα της οριζόντιας δυσκαμψίας  $K_h^G$ , στο **Σχήμα 4.4** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα. Παρατηρείται, ελαφρώς μικρότερη

αξιοπιστία της μεθόδου των σ.α., σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, ιδίως στις υψηλές συχνότητες ταλάντωσης. Και εδώ οι αντίστοιχες σχέσεις των Dobry & Gazetas για τον υπολογισμό των οριζόντιων σ.α. ( $\alpha_h(0^\circ)$  και  $\alpha_h(90^\circ)$ ) δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Κλείνοντας, με τα αποτελέσματα της περιστροφικής δυσκαμψίας  $K_{rx}^G$ , (Σχήμα 4.5) αποδεικνύεται η ικανοποιητική ακρίβεια της μεθόδου των σ.α., καθώς και της απλοποιημένης σχέσης των Dobry & Gazetas για τον υπολογισμό των κατακόρυφων σ.α..

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι οι οριζόντιες και κατακόρυφες δυσκαμψίες, υποεκτιμώνται, έστω και λίγο από την μέθοδο των σ.α., ενώ αντίθετα η περιστροφική δυσκαμψία υπερεκτιμάται (ελάχιστα), γεγονός που δείχνει ότι οι σ.α. παίζουν (έστω και λίγο) παραπάνω ρόλο απ' ότι θα έπρεπε. Παρόμοια φαινόμενα παρατηρούνται και στο στατικό πρόβλημα, όπου, για την κατακόρυφη δυσκαμψία π.χ., καθώς ο ένας πάσσαλος κατεβαίνει, παρασέρνει προς τα κάτω και το διπλάνο του, μειώνοντας, έτσι, την κατακόρυφη δυσκαμψία της ομάδας. Όσο μεγαλύτερος ο σ.α., τόσο μειώνεται η δυσκαμψία. Ο λόγος που το δυναμικό πρόβλημα δίνει παρόμοια αποτελέσματα με το στατικό οφείλεται στη μικρή απόσταση μεταξύ των πασσάλων (2d), η οποία δεν είναι αρκετή ώστε τα κύματα που ξεκινούν από τους ταλαντούμενους πασσάλους να συναντήσουν τους γειτονικούς τους με κάποια σημαντική διαφορά φάσης, ώστε να προκύψουν διαφορετικά αποτελέσματα.

#### 4.1.5 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτουν επιγραμματικά τα εξής συμπεράσματα για την ομάδα πασσάλων 2x2 σε **ελαστικό έδαφος**:

- ικανοποιητική ακρίβεια της μεθόδου της επαλληλίας με χρήση των σ.α. (**Poulos**) και στα τρία είδη δυσκαμψίας (κατακόρυφη, οριζόντια, περιστροφική) για τη συγκεκριμένη ομάδα πασσάλων
- ικανοποιητική ακρίβεια των απλοποιητικών σχέσεων (**Dobry & Gazetas**) για την πρόβλεψη των κατακόρυφων και οριζόντιων σ.α.

## 4.2 Μη ελαστικό έδαφος

### 4.2.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να παρουσιάσει και να συγκρίνει τις σύνθετες δυσκαμψίες (κατακόρυφη, οριζόντια και περιστροφική) ομάδας πασσάλων 2x2 ( $s = 2d$ ), όπως αυτές προκύπτουν άμεσα από την προσομοίωση στο Abaqus της μισής, λόγω συμμετρίας, ομάδας, και από τη χρήση της μεθόδου των σ.α.. Θα εξετασθεί, έτσι, αν και σε ποιο βαθμό η μέθοδος της επαλληλίας με χρήση των σ.α. (Poulos) είναι εφαρμόσιμη στην περίπτωση που το έδαφος δεν συμπεριφέρεται ελαστικά.

### 4.2.2 Τρισδιάστατο προσομοίωμα

Το τρισδιάστατο προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το ίδιο με αυτό των ελαστικών αναλύσεων. Η γεωμετρία του προβλήματος παραμένει ως έχει, όπως και οι ιδιότητες των πασσάλων. Η μόνη αλλαγή βρίσκεται στις εδαφικές ιδιότητες, οι οποίες έχουν ως εξής:

- ειδικό βάρος  $\gamma_s = 17.5 \text{ kN/m}^3$
- μέτρο ελαστικότητας  $E_s = 90 \text{ MPa}$  ( $E_p / E_s = 280$ )
- λόγος poisson  $\nu = 0.49$
- απόσβεση τύπου Rayleigh της τάξης του 2%
- αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u = 50 \text{ kPa}$

### 4.2.3 Διαδικασία υπολογισμού των σύνθετων δυσκαμψιών της ομάδας

- **Κατακόρυφη (σύνθετη) δυσκαμψία**

Για τον άμεσο προσδιορισμό της δυσκαμψίας  $K_z^G$ , από την προσομοίωση της μισής ομάδας έγιναν τα εξής: τοποθετήθηκε, στην ομάδα, αρμονικό κατακόρυφο φορτίο ίσο με 9200 kN, δηλαδή ο κάθε πάσσαλος φορτίστηκε με 2300 kN. Υπενθυμίζεται ότι το οριακό φορτίο του πασσάλου σε κατακόρυφη στατική φόρτιση είχε βρεθεί περίπου 4500 kN. Στο **Σχήμα 4.6 (α)** παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα το πλάτος της κατακόρυφης ταλάντωσης της ομάδας, και το ποσοστό του στατικού οριακού φορτίου στο οποίο αντιστοιχεί το κάθε πλάτος, συναρτήσει της συχνότητας ταλάντωσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο γίνεται αντιληπτός ο βαθμός ανελαστικότητας του εδάφους. Στη συνέχεια, καταγράφηκε η απόκριση της ομάδας, και με τη διαδικασία που περιγράφηκε και στο αντίστοιχο ελαστικό πρόβλημα, προέκυψε η κατακόρυφη δυσκαμψία της για διάφορες συχνότητες ταλάντωσης.

Για τον έμμεσο προσδιορισμό της δυσκαμψίας με τη μέθοδο των σ.α. η διαδικασία υπολογισμού αρχίζει λίγο να περιπλέκεται. Αφού βρεθεί η κατακόρυφη

δυναμική δυσκαμψία του ενός πασσάλου για φορτίο 2300 kN, θα πρέπει να υπολογιστούν και οι σ.α.  $\alpha_v(s)$  και  $\alpha_v(s\sqrt{2})$ . Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να είναι γνωστό το πλάτος της ταλάντωσης που θα τοποθετηθεί στον πάσσαλο 0d. Το πλάτος αυτό (για κάθε συχνότητα είναι διαφορετικό και βρέθηκε να έχει τιμές από 0.01 m για τις χαμηλές συχνότητες μέχρι 0.001 m για τις υψηλότερες) θα προκύψει από το πλάτος ταλάντωσης του μονού πασσάλου που ταλαντώθηκε νωρίτερα με αρμόνικη δύναμη 2300 kN. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η δυσκαμψία της ομάδας χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη σχέση από το ελαστικό πρόβλημα.

- **Οριζόντια (σύνθετη) δυσκαμψία**

Για τον άμεσο προσδιορισμό της δυσκαμψίας  $K_h^G$ , από την προσομοίωση της μισής ομάδας έγιναν τα εξής: τοποθετήθηκε, στην ομάδα, αρμονικό οριζόντιο φορτίο ίσο με 8000 kN, δηλαδή ο κάθε πάσσαλος φορτίστηκε με 2000 kN. Υπενθυμίζεται ότι το οριακό φορτίο του πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση είχε βρεθεί περίπου 1500 kN. Και σε αυτήν την περίπτωση, στο **Σχήμα 4.6 (β)**, παρουσιάζεται ο βαθμός ανελαστικότητας του εδάφους. Στη συνέχεια, καταγράφηκε η απόκριση της ομάδας και με τη διαδικασία που περιγράφηκε και στο αντίστοιχο ελαστικό πρόβλημα, προέκυψε η οριζόντια δυσκαμψία της ομάδας για διάφορες συχνότητες ταλάντωσης.

Για τον έμμεσο προσδιορισμό της δυσκαμψίας με τη μέθοδο των σ.α. ακολουθήθηκε η αντίστοιχη διαδικασία που περιγράφηκε ακριβώς παραπάνω για την κατακόρυφη δυσκαμψία.

- **Περιστροφική (σύνθετη) δυσκαμψία**

Για τον άμεσο προσδιορισμό της δυσκαμψίας  $K_{rx}^G$ , από την προσομοίωση της μισής ομάδας έγιναν τα εξής: τοποθετήθηκε, στην ομάδα, αρμονική ροπή ίση με 25000 kNm. Το πλάτος της κατακόρυφης ταλάντωσης των πασσάλων, συναρτήσει της συχνότητας ταλάντωσης, φαίνεται στο **Σχήμα 4.6 (γ)**, όπως και το ποσοστό του στατικού οριακού φορτίου στο οποίο αντιστοιχεί το κάθε πλάτος. Στη συνέχεια, καταγράφηκε η απόκριση της ομάδας και με τη διαδικασία που περιγράφηκε και στο αντίστοιχο ελαστικό πρόβλημα, προέκυψε η περιστροφική δυσκαμψία της ομάδας για διάφορες συχνότητες ταλάντωσης.

Για τον έμμεσο προσδιορισμό της δυσκαμψίας με τη μέθοδο των σ.α., αρχικά, υπολογίζεται η σύνθετη δυσκαμψία  $K_{rx}^S$  του μεμονομένου πασσάλου για όλο το εύρος συχνοτήτων, αφού πρώτα βρεθεί, με τη βοήθεια του Abaqus, η ροπή που αντιστοιχεί στον κάθε πάσσαλο της ομάδας για κάθε μία συχνότητα (προφανώς είναι η ίδια και για τους τέσσερις). Στη συνέχεια, υπολογίζεται η σύνθετη δυσκαμψία  $K_z^S$  του μεμονομένου πασσάλου για όλο το εύρος συχνοτήτων, αφού πρώτα βρεθεί, με τη βοήθεια του Abaqus, η δύναμη που αντιστοιχεί στον κάθε



πάσσαλο της ομάδας για κάθε μία συχνότητα (είναι η ίδια και για τους τέσσερις). Τέλος, υπολογίζεται ο σ.α.  $\alpha_n(s\sqrt{2})$  μεταξύ δύο πασσάλων, όπου ο ενεργητικός πάσσαλος ταλαντώνεται με πλάτος ίσο με αυτό που προκύπτει από την κατακόρυφη ταλάντωση του μεμονομένου πασσάλου (υπολογίστηκε νωρίτερα για τον προσδιορισμό του  $K_z^S$ ), για κάθε συχνότητα ξεχωριστά. Έτσι, κάνοντας χρήση της σχέσης που παρουσιάστηκε στο αντίστοιχο ελαστικό πρόβλημα, προσδιορίζεται η περιστροφική δυσκαμψία της ομάδας με τη μέθοδο των σ.α., σε μη ελαστικό έδαφος.

#### 4.2.4 Αποτελέσματα – Σχολιασμός

Ξεκινώντας με την παρουσίαση και το σχολιασμό των διαγραμμάτων της κατακόρυφης δυσκαμψίας  $K_z^G$  σε μη ελαστικό έδαφος, στο **Σχήμα 4.7** παρουσιάζονται, με τη σειρά, το πραγματικό και το φανταστικό μέρος, καθώς και το μέτρο της δυναμικής δυσκαμψίας της ομάδας πασσάλων, συναρτήσει της συχνότητας ταλάντωσής της. Βλέποντας τα διαγράμματα αυτά, παρατηρεί κανείς την εντυπωσιακή συνέπεια της μεθόδου της επαλληλίας με τη χρήση των σ.α., ακομά και στην περίπτωση που το έδαφος συμπεριφέρεται εντόνως ανελαστικά.

Συνεχίζοντας με τα αποτελέσματα της οριζόντιας δυσκαμψίας  $K_h^G$ , στο **Σχήμα 4.8** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα. Εδώ, πλέον, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ της μεθόδου επαλληλίας και των αποτελεσμάτων από το Abaqus, σε βαθμό που την καθιστά κατάλληλη μόνο για μια πρώτη ποιοτική προσέγγιση.

Κλείνοντας, με τα αποτελέσματα της περιστροφικής δυσκαμψίας  $K_{rx}^G$ , (**Σχήμα 4.9**), είναι φανερή η ανικανότητα της μεθόδου της επαλληλίας να περιγράψει με ακρίβεια το φαινόμενο.

Τέλος, αξίζει να γίνει σύγκριση μεταξύ των μέτρων των δυσκαμψιών που προκύπτουν για ελαστικό έδαφος και των αντίστοιχων για μη ελαστικό. Στο **Σχήμα 4.10** γίνεται η σύγκριση αυτή και για τα τρία είδη δυσκαμψιών. Είναι φανερό ότι οι κατακόρυφες και οι οριζόντιες δυσκαμψίες γίνονται όλο και μεγαλύτερες, καθώς αυξάνεται η συχνότητα, στο μη ελαστικό έδαφος σε σύγκριση με το ελαστικό. Αυτό, πιθανόν, οφείλεται στο εξής: όπως περιγράφηκε σε προηγούμενα κεφάλαια ο σ.α. μεταξύ δύο πασσάλων σε μη ελαστικό έδαφος είναι μικρότερος συγκρητικά με τον αντίστοιχο σε ελαστικό, ενώ μειώνεται έντονα (σχεδόν μηδενίζει) όσο αυξάνει η συχνότητα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση που οι πάσσαλοι βρίσκονται κοντά ο ένας με τον άλλο, οι σ.α. παίζουν ανάλογο ρόλο με το στατικό πρόβλημα, δηλαδή μειώνουν τη δυσκαμψία της ομάδας. Συνεπώς, οι μικρές τιμές που παίρνουν στο μη ελαστικό έδαφος έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται η δυσκαμψία της ομάδας. Για

την περιστροφική δυσκαμψία, που οι σ.α. παίζουν αυξητικό ρόλο, παρατηρείται ότι στο μη ελαστικό έδαφος η δυσκαμψία της ομάδας είναι μικρότερη συγκριτικά με το ελαστικό έδαφος, όπως αναμενόταν.

#### 4.2.5 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτουν επιγραμματικά τα εξής συμπεράσματα για την ομάδα πασσάλων 2x2 σε **μη ελαστικό έδαφος**:

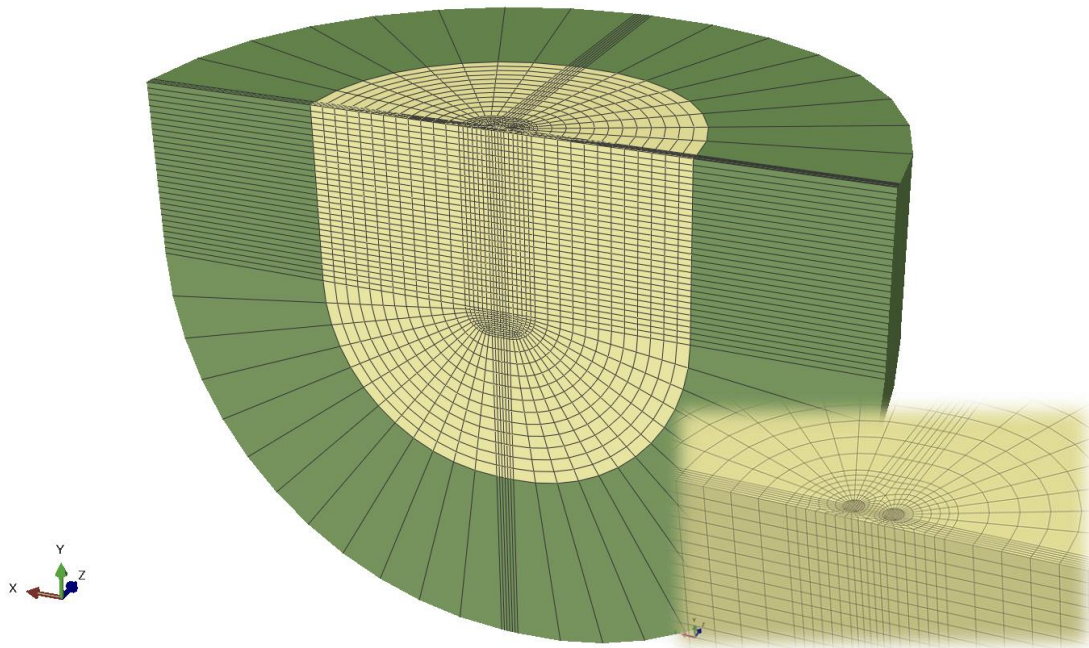
- ικανοποιητική ακρίβεια της μεθόδου των σ.α. για τον προσδιορισμό της κατακόρυφης δυσκαμψίας της συγκεκριμένης ομάδας πασσάλων 2x2
- ανικανότητα της μεθόδου των σ.α. να περιγράψει με ακρίβεια την οριζόντια και περιστροφική δυσκαμψία της ομάδας πασσάλων 2x2
- αύξηση του μέτρου της κατακόρυφης και οριζόντιας δυσκαμψίας της ομάδας πασσάλων 2x2 στο μη ελαστικό έδαφος συγκριτικά με το ελαστικό
- μείωση του μέτρου της περιστροφικής δυσκαμψίας της ομάδας πασσάλων 2x2 στο μη ελαστικό έδαφος συγκριτικά με το ελαστικό

# Σχήματα 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

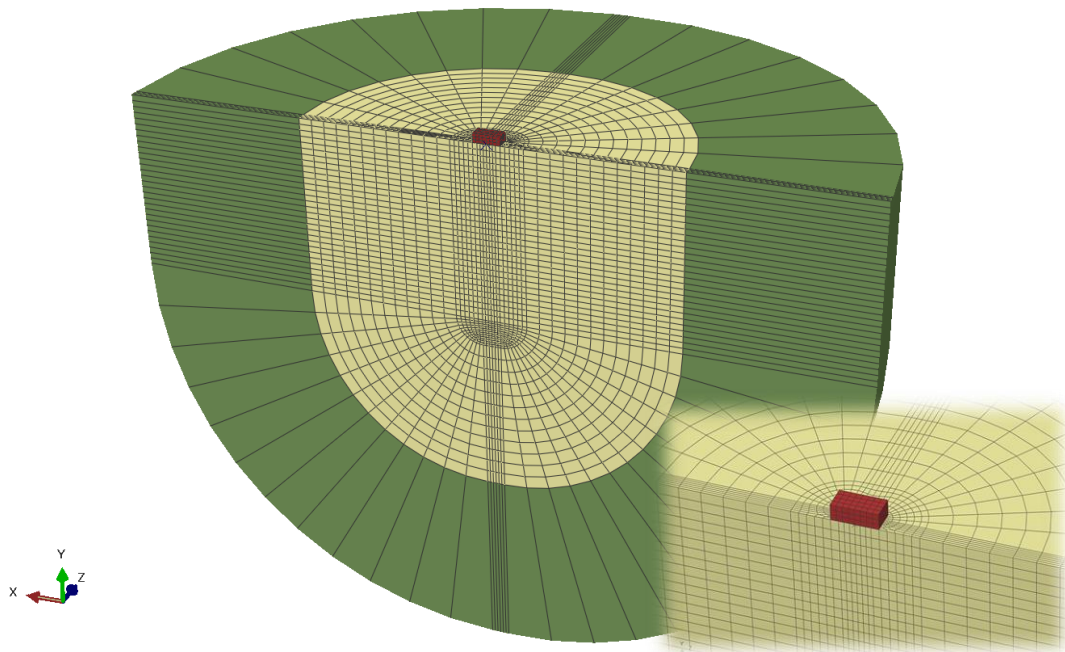
---

ΟΜΑΔΑ ΠΑΣΣΑΛΩΝ 2x2

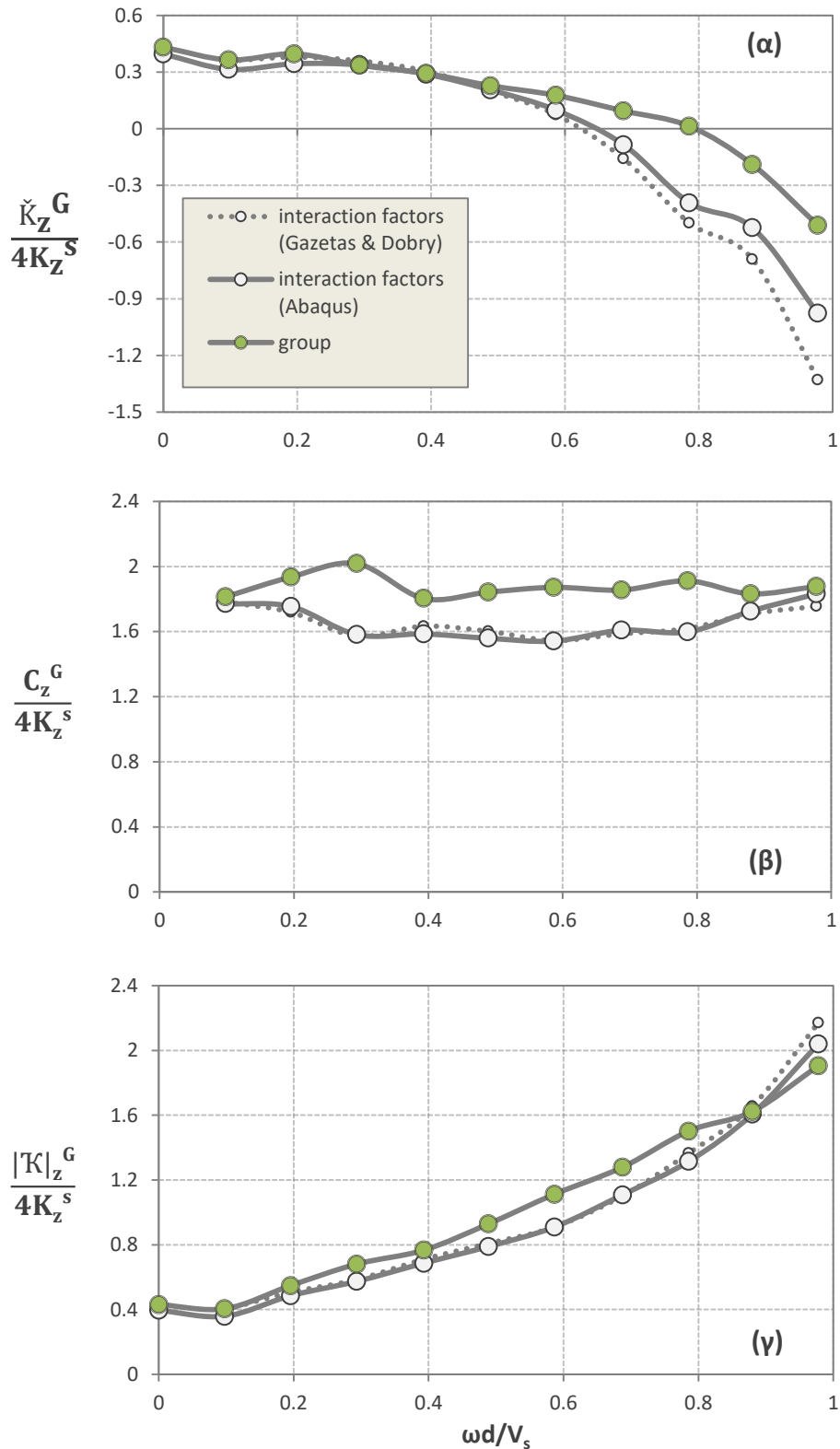




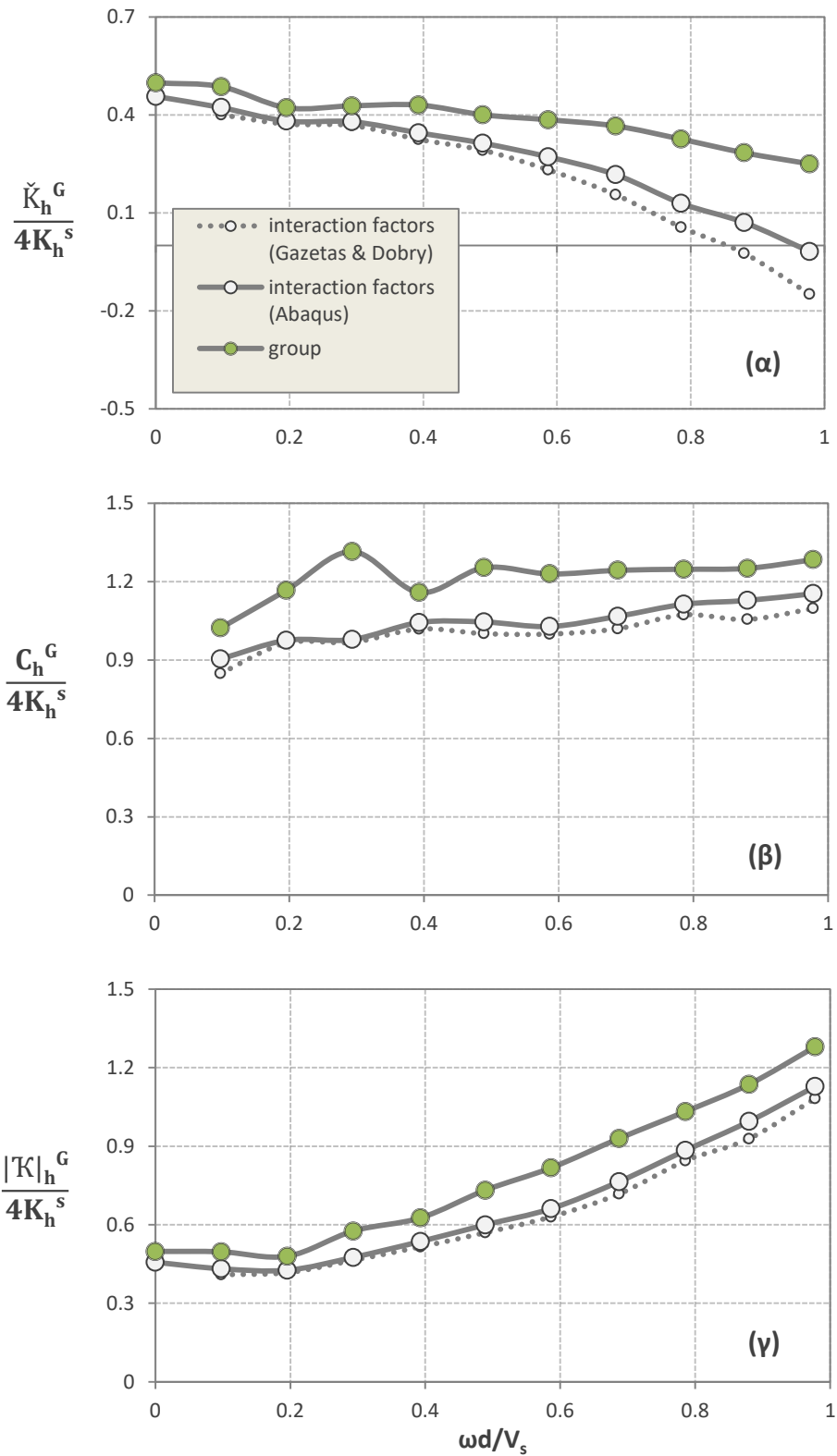
**Σχήμα 4.1:** Τρισδιάστατο προσομοίωμα για τον υπολογισμό της κατακόρυφης και οριζόντιας δυσκαμψίας της ομάδας πασσάλων 2x2



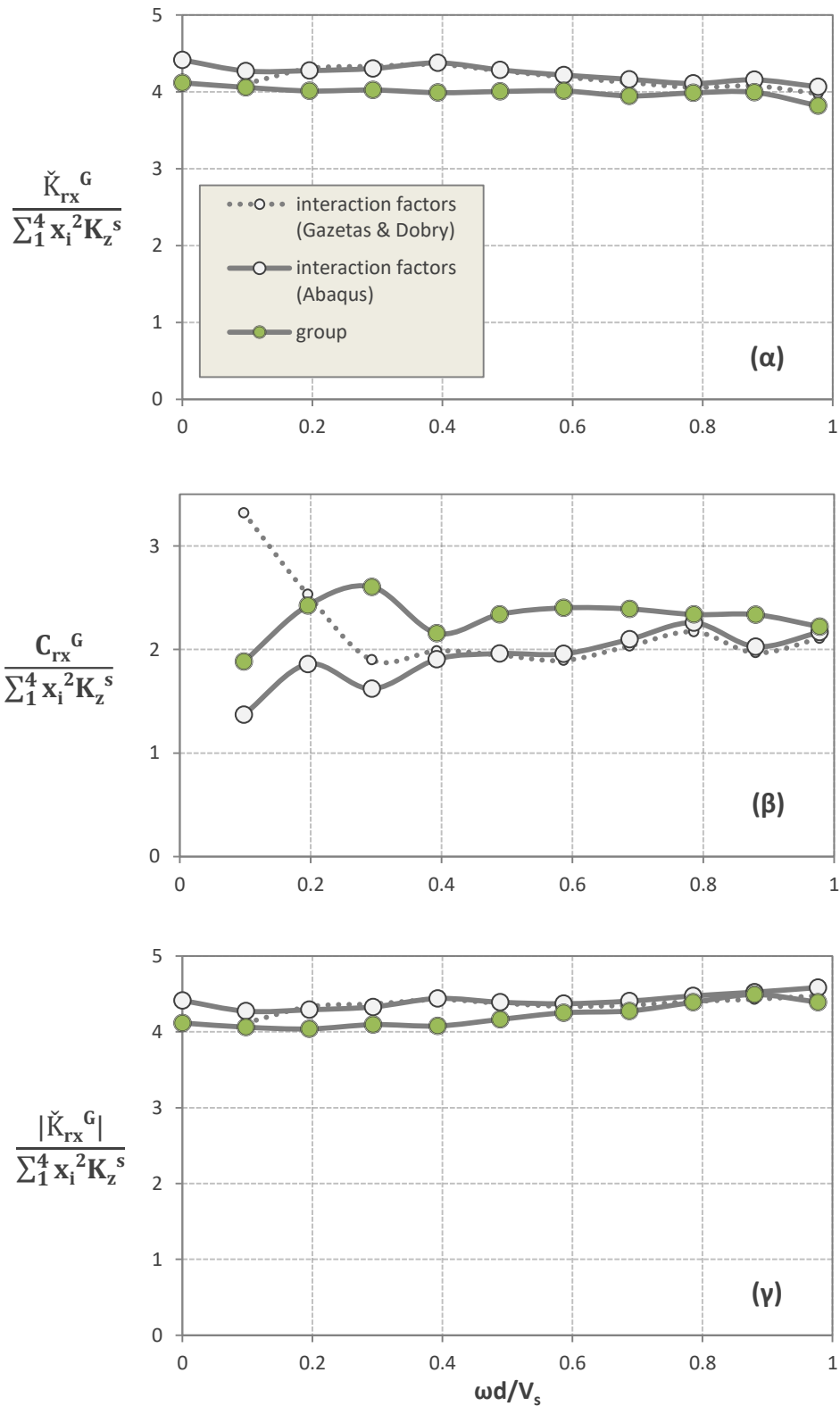
**Σχήμα 4.2:** Τρισδιάστατο προσομοίωμα (με κεφαλόδεσμο) για τον υπολογισμό της περιστροφικής δυσκαμψίας της ομάδας πασσάλων 2x2



Σχήμα 4.3: Σύγκριση της κατακόρυφης δυσκαμψίας ομάδας πασσάλων 2x2 ( $s = 2d$ ), όπως προκύπτει από το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και από τη χρήση της μεθόδου των σ.α., για **ελαστική** συμπεριφορά του εδάφους: (α) πραγματικό μέρος, (β) φανταστικό μέρος και (γ) μέτρο της κατακόρυφης δυσκαμψίας

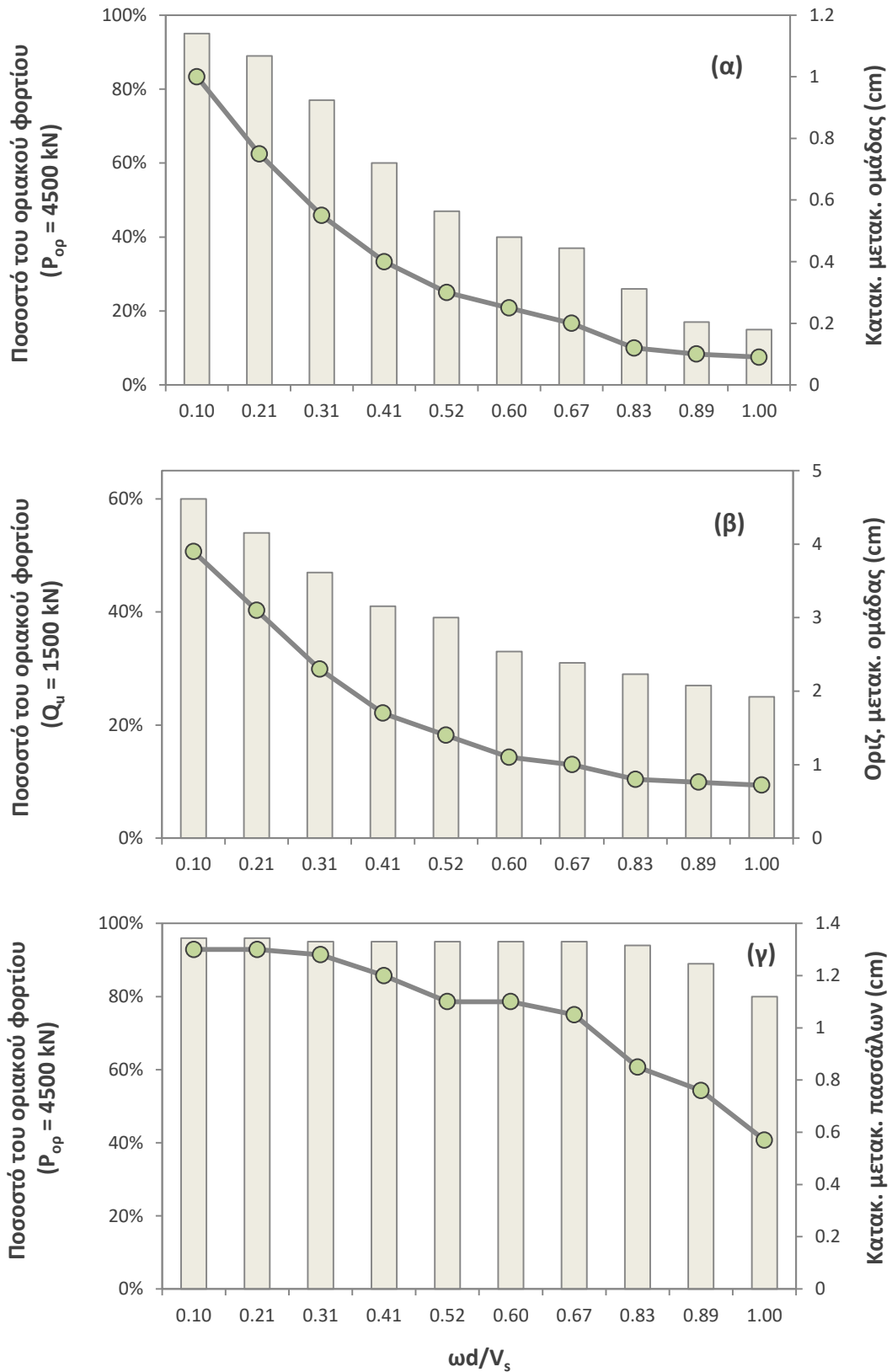


**Σχήμα 4.4:** Σύγκριση της **οριζόντιας δυσκαμψίας** ομάδας πασσάλων 2x2 ( $s = 2d$ ), όπως προκύπτει από το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και από τη χρήση της μεθόδου των σ.α., για **ελαστική** συμπεριφορά του εδάφους: **(α)** πραγματικό μέρος, **(β)** φανταστικό μέρος και **(γ)** μέτρο της οριζόντιας δυσκαμψίας

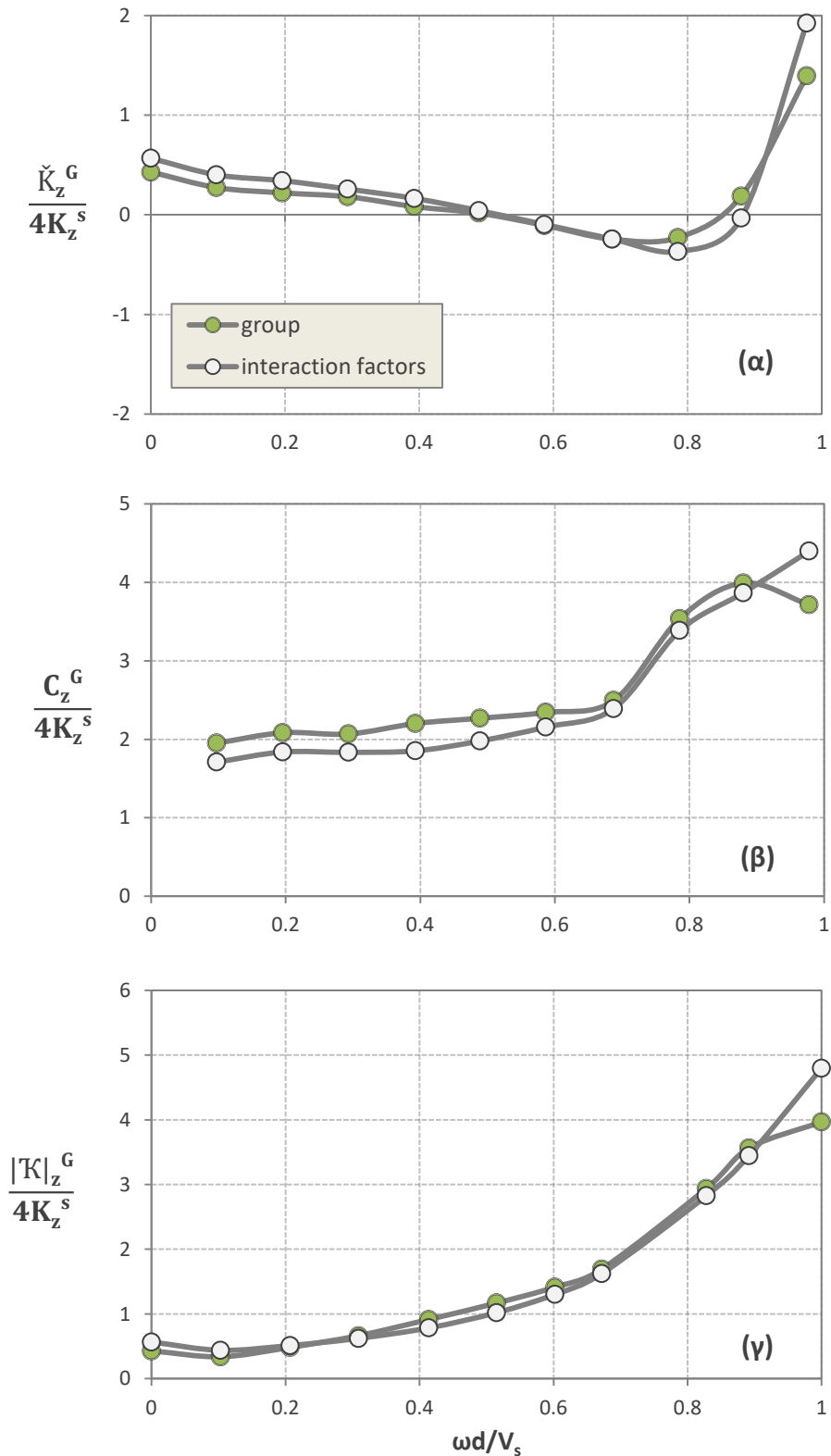


**Σχήμα 4.5:** Σύγκριση της περιστροφικής δυσκαμψίας ομάδας πασσάλων 2x2 ( $s = 2d$ ), όπως προκύπτει από το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και από τη χρήση της μεθόδου των σ.α., για **ελαστική** συμπεριφορά του εδάφους: **(α)** πραγματικό μέρος, **(β)** φανταστικό μέρος και **(γ)** μέτρο της περιστροφικής δυσκαμψίας

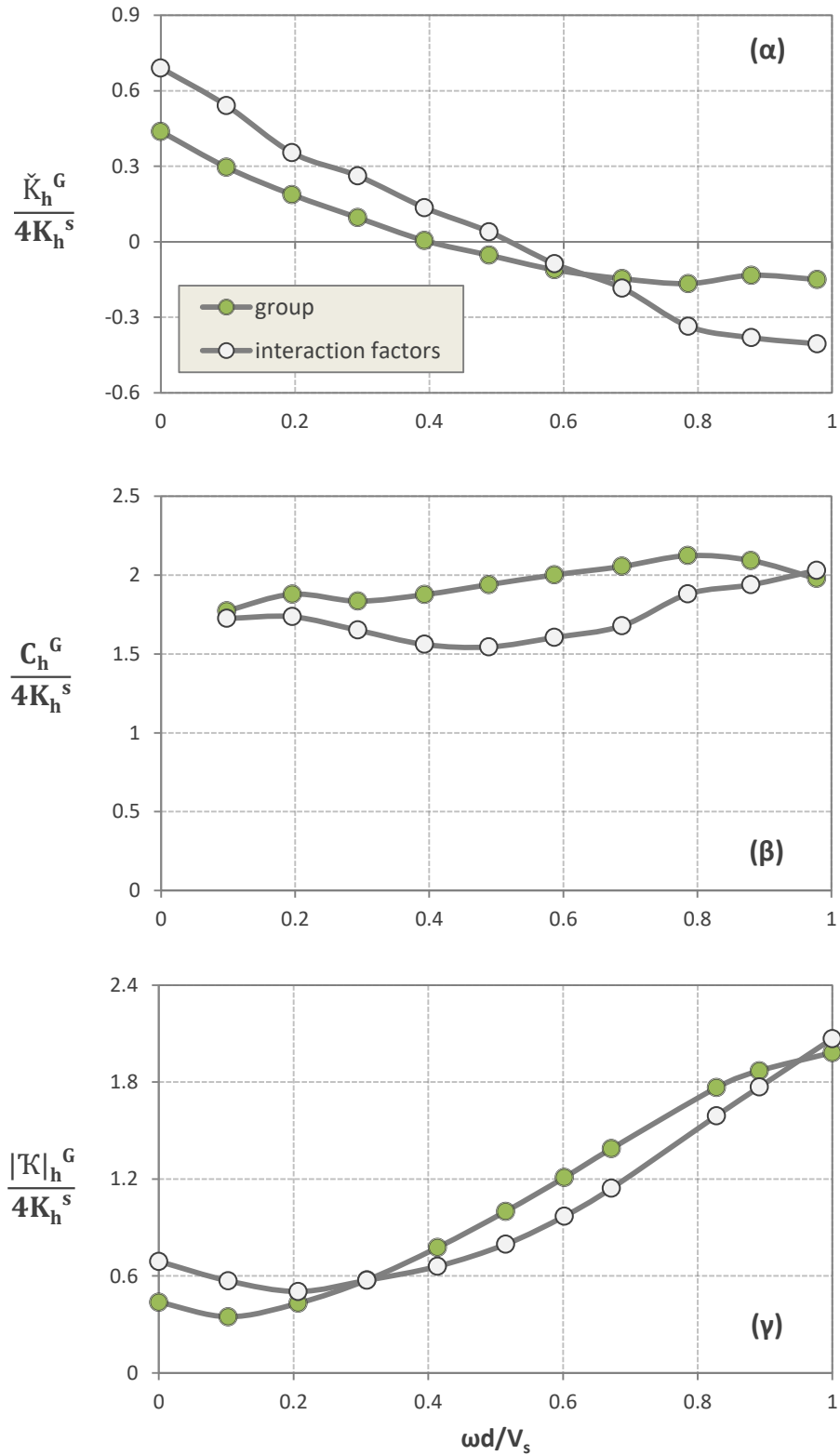




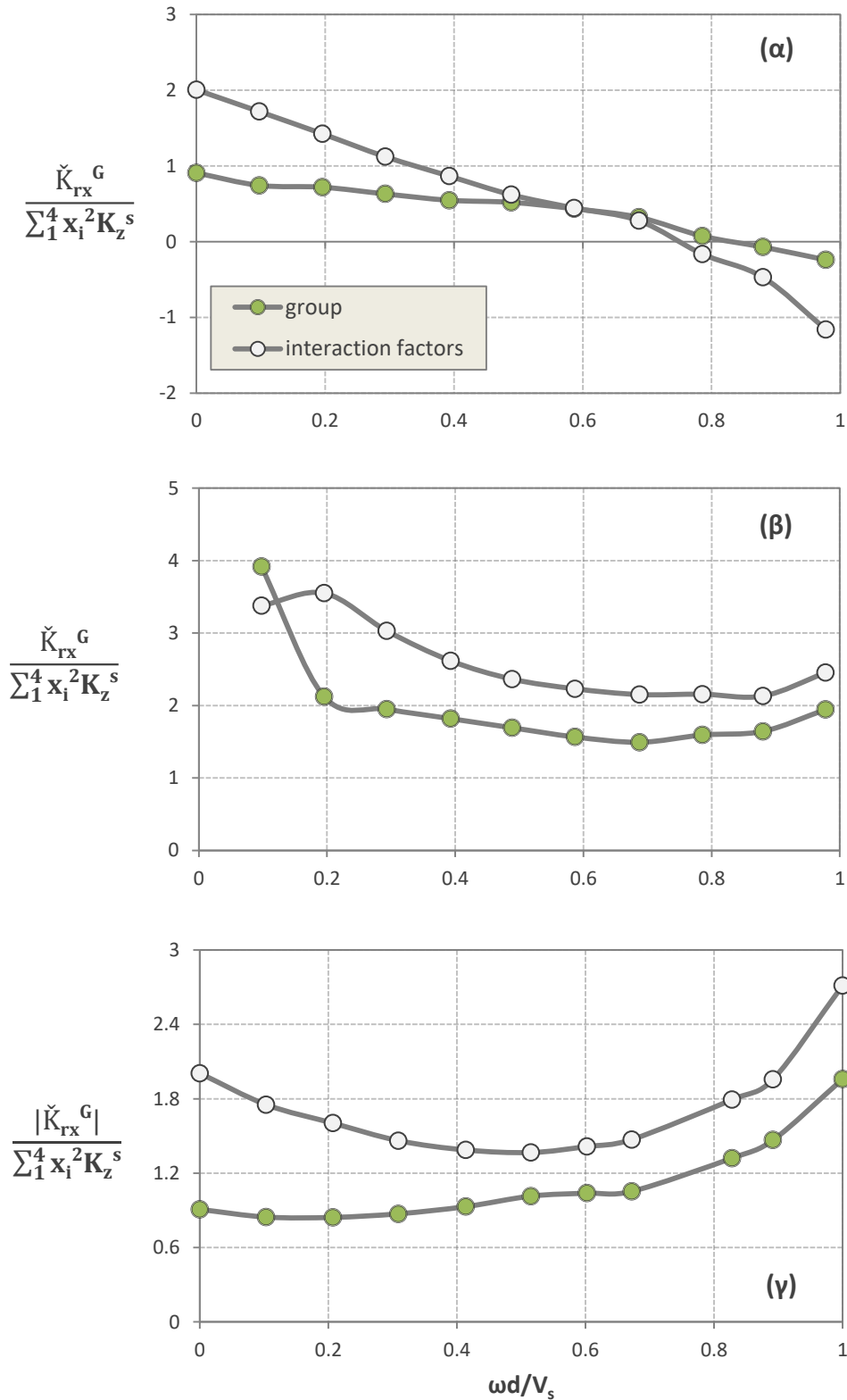
**Σχήμα 4.6:** Πλάτος ταλάντωσης της ομάδας πασσάλων (πράσινοι κύκλοι) και ποσοστό του οριακού στατικού φορτίου (κατακόρυφου και οριζόντιου) στο οποίο αντιστοιχεί το κάθε πλάτος (ράβδοι): **(α)** κατακόρυφη ταλάντωση, **(β)** οριζόντια ταλάντωση, και **(γ)** περιστροφική ταλάντωση της ομάδας



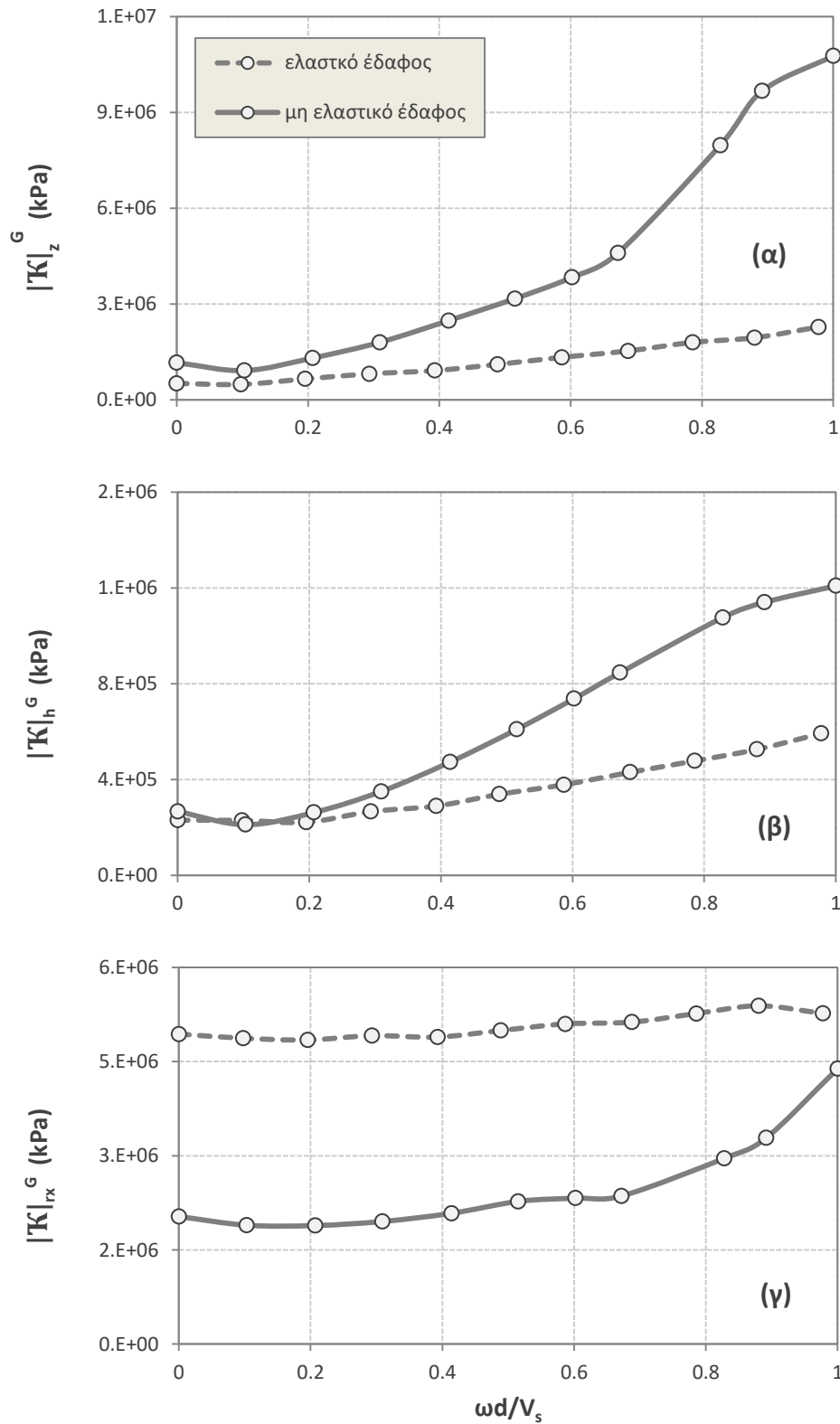
**Σχήμα 4.7:** Σύγκριση της κατακόρυφης δυσκαμψίας ομάδας πασσάλων 2x2 ( $s = 2d$ ), όπως προκύπτει από το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και από τη χρήση της μεθόδου των σ.α., για **μη ελαστική** συμπεριφορά του εδάφους: **(α)** πραγματικό μέρος, **(β)** φανταστικό μέρος και **(γ)** μέτρο της κατακόρυφης δυσκαμψίας



**Σχήμα 4.8:** Σύγκριση της **οριζόντιας δυσκαμψίας** ομάδας πασσάλων 2x2 ( $s = 2d$ ), όπως προκύπτει από το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και από τη χρήση της μεθόδου των σ.α., για **μη ελαστική** συμπεριφορά του εδάφους: **(α)** πραγματικό μέρος, **(β)** φανταστικό μέρος και **(γ)** μέτρο της οριζόντιας δυσκαμψίας



**Σχήμα 4.9:** Σύγκριση της περιστροφικής δυσκαμψίας ομάδας πασσάλων  $2 \times 2$  ( $s = 2d$ ), όπως προκύπτει από το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και από τη χρήση της μεθόδου των σ.α., για **μη ελαστική** συμπεριφορά του εδάφους: **(α)** πραγματικό μέρος, **(β)** φανταστικό μέρος και **(γ)** μέτρο της περιστροφικής δυσκαμψίας



Σχήμα 4.10: Σύγκριση των μέτρων των σύνθετων δυσκαμψιών ομάδας πασσάλων 2x2 ( $s = 2d$ ), για **ελαστικό** και **μη ελαστικό** έδαφος, συναρτήσει της συχνότητας ταλάντωσής της: **(α)** κατακόρυφη δυσκαμψία, **(β)** οριζόντια δυσκαμψία, **(γ)** περιστροφική δυσκαμψία



# Βιβλιογραφικές παραπομπές





Abaqus 6.13 Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp.

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

Chandra Shekhar Goit, Masato Saitoh, and Mylonakis G. (2016). “Principle of superposition for assessing horizontal dynamic response of pile groups encompassing soil nonlinearity”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 82, 73-83

Chen S.L., and Chen L.Z. (2008). “Note on the Interaction Factor for Two Laterally Loaded Piles”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 134, No. 11, 1685-1690

Chen S.L., Song C.Y., and Chen L.Z. (2011). “Two-pile interaction factor revisited”, Can. Geotech. J. 48, 754-766

Dobry, R. & Gazetas, G. (1988). “Simple method for dynamic stiffness and damping of floating pile groups”, Geotechnique 38, No. 4, 557-574

El-Marsafawi H., Kaynia A.M., and Novak M. “The superposition approach to pile group dynamics”, in Geotechnical Special Publication No. 34 (Piles under dynamic loads), ASCE, 114-135

Gazetas G. (1983). “Analysis of machine foundation vibrations: state of the art”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 2, No. 1, 2-42

Gazetas G. (1991). “Foundation vibrations”, in Foundation Engineering Handbook, Springer US, 553-593

Gazetas G., Ke Fan, Kaynia A., and Kausel E. (1991). “Dynamic interaction factors for floating pile groups”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 10, 1531-1548

Poulos, H. G. (1968). “Analysis of the settlement of pile groups”, Geotechnique 18, No. 4, 449-471

Poulos, H. G. (1971). “Behavior of laterally-loaded piles II: pile groups”, J. Soil Mech. Found. Engrg. Div., ASCE, 97(5), 733-751

Poulos, H. G., and Davis, E.H., (1980). *Pile foundation analysis and design*. Wiley, New York, N.Y.

Γκαζέτας Γ., “Σημειώσεις εδαφοδυναμικής”, τεύχος που διανέμεται στους φοιτητές του μαθήματος “Εδαφοδυναμική”

Γκαζέτας Γ., “Σημειώσεις αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής”, τεύχος που διανέμεται στους φοιτητές του μαθήματος “Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής”



# Παράρτημα



## Παράρτημα

### ➤ Συνάρτηση υπολογισμού δυσκαμψιών και δυνάμεων

```
function [K_v_g,K_h_g,K_m_g,q0,Khh,Kmm,dist_m,F_h,F_v,F_m] =
diplomatiki(d,Ep,Es,ksi,Vs,H,poisson,coord,number_of_piles,F_v_g,F_h_g,
M_g,k_v_d)
```

```
Khh = d * Es * (Ep/Es)^0.21; %kN/m
Kmm = 0.15 * d^3 * Es * (Ep/Es)^0.75;
```

```
fs = 0.25 * (Vs/H);
```

```
poisson = 0.3;
VL_a = (3.4*Vs)/(pi*(1-poisson));
```

```
Max = max(coord(:,1));
Min = min(coord(:,1));
x_middle = Min + abs(Max-Min)/2;
```

```
for j = 1:number_of_piles
    dist_m(j) = abs(coord(j,1) - x_middle);
end
```

```
l=1;
for a0=0:0.05:1
```

```
    omega = Vs*a0/d;
    f = omega/(2*pi);
    if f>fs
        Dh_h = 0.8*ksi + 1.1 * f * d * (Ep/Es)^0.17 * Vs^(-1);
        Dm_m = 0.35*ksi + 0.35 * f * d * (Ep/Es)^0.2 * Vs^(-1);
    else
        Dh_h = 0.8*ksi;
        Dm_m = 0.25*ksi;
    end
```

```
    k_h_d(l) = Kh_h + Dh_h*2*Kh_h*i;
    k_rx_d(l) = Km_m + Dm_m*2*Km_m*i;
```

```
    for j = 1:number_of_piles
        for k = 1:number_of_piles
            distance(j,k) = sqrt((coord(j,1)-coord(k,1))^2 +
(coord(j,2)-coord(k,2))^2);
            a_v(j,k) = (distance(j,k)/(d/2))^(1/2) * exp(-
ksi*omega*distance(j,k)/Vs) * exp(-i*omega*distance(j,k)/Vs);

            theta(j,k) = atan((abs(coord(k,2)-coord(j,2)) /
abs(coord(k,1)-coord(j,1))));
            a_h(j,k) = (distance(j,k)/(d/2))^(1/2) * exp(-
ksi*omega*distance(j,k)/VL_a) * exp(-i*omega*distance(j,k)/VL_a) ...
* cos(theta(j,k))^2 + ...
            (distance(j,k)/(d/2))^(1/2) * exp(-
ksi*omega*distance(j,k)/Vs) * exp(-i*omega*distance(j,k)/Vs) * ...
            sin(theta(j,k))^2;
        end
    end
end
```

```

for j = 1:number_of_piles+1
    for k = 1:number_of_piles+1

        if k==j & j~=number_of_piles+1
            K_v(j,k) = 1;
            K_h(j,k) = 1;
            K_m(j,k) = 1;
        elseif j == number_of_piles+1 & k == number_of_piles+1
            K_v(j,k) = 0;
            K_h(j,k) = 0;
            K_m(j,k) = number_of_piles * k_rx_d(1) * k_v_d(1);
        elseif j<number_of_piles+1 & k<number_of_piles+1 & j~=k
            K_v(j,k) = a_v(j,k);
            K_h(j,k) = a_h(j,k);
            if coord(j,1) <= x_middle
                if coord(k,1) > x_middle
                    K_m(j,k) = - a_v(j,k);
                else
                    K_m(j,k) = a_v(j,k);
                end
            else
                if coord(k,1) < x_middle
                    K_m(j,k) = - a_v(j,k);
                else
                    K_m(j,k) = a_v(j,k);
                end
            end
        elseif k == number_of_piles+1 & j~=k
            K_v(j,k) = -k_v_d(1);
            K_h(j,k) = -k_h_d(1);
            K_m(j,k) = -k_v_d(1) * dist_m(j);
        else
            K_v(j,k) = k_v_d(1);
            K_h(j,k) = k_h_d(1);
            K_m(j,k) = k_v_d(1) * dist_m(k);
        end
    end
end

K_v = K_v * 1/k_v_d(1);
K_h = K_h * 1/k_h_d(1);
K_m = K_m * 1/k_v_d(1);

for j=1:number_of_piles+1
    if j~=number_of_piles+1
        arrow_v(j) = 0;
        arrow_h(j) = 0;
        arrow_m(j) = 0;
    else
        arrow_v(j) = F_v_g;
        arrow_h(j) = F_h_g;
        arrow_m(j) = M_g;
    end
end

sol_v = K_v\arrow_v';
sol_h = K_h\arrow_h';
sol_m = K_m\arrow_m';

```

```

K_v_g(1) = F_v_g/sol_v(number_of_piles+1);
K_h_g(1) = F_h_g/sol_h(number_of_piles+1);
K_m_g(1) = M_g/sol_m(number_of_piles+1);

for w=1:number_of_piles
    F_h(w,1)=sol_h(w);
    F_v(w,1)=sol_v(w);
    F_m(w,1)=sol_m(w);
end

q0(1) = omega * d / Vs;
l=1+1;
end

```

### ➤ Κώδικας για το Graphical User Interface (GUI)

```

function varargout = GUIdiplomatiki(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @GUIdiplomatiki_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @GUIdiplomatiki_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before GUIdiplomatiki is made visible.
function GUIdiplomatiki_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = GUIdiplomatiki_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
varargout{1} = handles.output;

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

d = str2double(get(handles.edit1, 'String'));
coord = str2double(get(handles.uitable1, 'Data'));
l=1;
for i=1:length(coord)
    if coord(i,1)>-1000000000
        number_of_piles = 1
        l=l+1;
    end
end
for i=1:number_of_piles
    angle = linspace(0,2*pi,360);
    x = coord(i,1) + d/2 * cos(angle);
    y = coord(i,2) + d/2 * sin(angle);
    axes(handles.axes1)
    plot(x,y, '.', 'Color', 'k'); hold on

text(coord(i,1)+0.6, coord(i,2), num2str(i), 'FontSize', 12, 'Color', 'r', '
FontWeight', 'bold')
    minxaxis = min(coord(:,1));
    minyaxis = min(coord(:,2));
    maxxaxis = max(coord(:,1));
    maxyaxis = max(coord(:,2));
    axis([minxaxis-1, maxxaxis+1, minyaxis-1, maxyaxis+1])
    axis('equal')
end

Ep = str2double(get(handles.edit2, 'String'));
Es = str2double(get(handles.edit3, 'String'));
ksi = str2double(get(handles.edit4, 'String'));
Vs = str2double(get(handles.edit5, 'String'));
H = str2double(get(handles.edit6, 'String'));
poisson = str2double(get(handles.edit7, 'String'));
F_v_g = str2double(get(handles.edit8, 'String'));
F_h_g = str2double(get(handles.edit9, 'String'));
M_g = str2double(get(handles.edit10, 'String'));
k_v_static = str2double(get(handles.edit11, 'String'));
kvd = str2double(get(handles.uitable2, 'Data'));
k_v_d = kvd(:,2);

[K_v_g, K_h_g, K_m_g, q0, Khh, Kmm, dist_m, F_h, F_v, F_m] =
diplomatiki(d, Ep, Es, ksi, Vs, H, poisson, coord, number_of_piles, F_v_g, F_h_
g, M_g, k_v_d);

axes(handles.axes2)
xx = real(K_v_g)/(number_of_piles*k_v_static);
plot(q0, xx, '.', 'Color', 'k')
axis([0, 1, min(xx)-0.5, max(xx)+0.5])
ylabel(['K_z^G :
', num2str(number_of_piles), 'K_z^S'], 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'd')

axes(handles.axes3)
yy = imag(K_v_g)/(number_of_piles*k_v_static);
plot(q0, yy, '.', 'Color', 'k')
axis([0, 1, min(yy)-0.5, max(yy)+0.5])

```



```

ylabel(['C_z^G :
',num2str(number_of_piles),'K_z^S'],'FontSize',10,'FontWeight','d')

axes(handles.axes4)
zz = real(K_h_g)/(number_of_piles*Khh);
plot(q0,zz, '.', 'Color','k')
axis([0,1,min(zz)-0.5,max(zz)+0.5])
ylabel(['K_x^G :
',num2str(number_of_piles),'K_x^S'],'FontSize',10,'FontWeight','d')

axes(handles.axes5)
l = length(q0);
maxqq=-1000;
for w = 1:l
    qq(w)=imag(K_h_g(w))/(number_of_piles*Khh*q0(w));
    if qq(w)>maxqq & qq(w)~=Inf
        maxqq = qq(w);
    end
end
plot(q0,qq, '.', 'Color','k')
axis([0,1,min(qq)-0.5,maxqq+0.5])
ylabel(['C_x^G :
',num2str(number_of_piles),'K_x^S'],'FontSize',10,'FontWeight','d')

axes(handles.axes6)
sum=0;
for w = 1:number_of_piles
    sum = sum + dist_m(w)^2;
end
xx = real(K_m_g)/(sum * k_v_static);
plot(q0,xx, '.', 'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
xlabel(['a0 = ', '\omega', 'd/Vs'],'FontSize',10,'FontWeight','d')
ylabel(['K_{rx}^G : ', '\Sigma', 'x_i^2
K_z^S'],'FontSize',10,'FontWeight','d')

axes(handles.axes7)
xx = imag(K_m_g)/(sum * k_v_static);
plot(q0,xx, '.', 'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
xlabel(['a0 = ', '\omega', 'd/Vs'],'FontSize',10,'FontWeight','d')
ylabel(['C_{rx}^G : ', '\Sigma', 'x_i^2
K_z^S'],'FontSize',10,'FontWeight','demi')

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)

d = str2double(get(handles.edit1,'String'));
coord = str2double(get(handles.uitable1,'Data'));
l=1;
for i=1:length(coord)
    if coord(i,1)>-1000000000
        number_of_piles = l;
        l=l+1;
    end
end
Ep = str2double(get(handles.edit2,'String'));
Es = str2double(get(handles.edit3,'String'));
ksi = str2double(get(handles.edit4,'String'));
Vs = str2double(get(handles.edit5,'String'));
H = str2double(get(handles.edit6,'String'));
poisson = str2double(get(handles.edit7,'String'));
F_v_g = str2double(get(handles.edit8,'String'));
F_h_g = str2double(get(handles.edit9,'String'));
M_g = str2double(get(handles.edit10,'String'));
k_v_static = str2double(get(handles.edit11,'String'));

```

```

kvd = str2double(get(handles.uitable2, 'Data'));
k_v_d = kvd(:,2);

[K_v_g,K_h_g,K_m_g,q0,Khh,Kmm,dist_m,F_h,F_v,F_m] =
diplomatiki(d,Ep,Es,ksi,Vs,H,poisson,coord,number_of_piles,F_v_g,F_h_g,
M_g,k_v_d);

contents = get(hObject, 'Value')

switch contents

    case 1
        if number_of_piles >= 1
            axes(handles.axes8)
            xx = abs(F_v(1,:))/(F_v_g/number_of_piles);
            plot(q0,xx,'Color','k')
            axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
            ylabel(['|F_1| : ', 'ave |F_z|' ])
            text(0.8,max(xx)+0.5,'pile1')

            axes(handles.axes9)
            xx = abs(F_h(1,:))/(F_h_g/number_of_piles);
            plot(q0,xx,'Color','k')
            axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
            ylabel(['|H_1| : ', 'ave |F_h|' ])
            text(0.8,max(xx)+0.5,'pile1')

            axes(handles.axes10)
            xx = abs(F_m(1,:))/(F_v_g/number_of_piles);
            plot(q0,xx,'Color','k')
            axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
            ylabel(['|F_1| : ', 'ave |F_z|' ])
            xlabel(['a0 =
', '\omega', 'd/Vs'], 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'd')
            text(0.8,max(xx)+0.5,'pile1')
        end
    case 2
        if number_of_piles >= 2
            axes(handles.axes8)
            xx = abs(F_v(2,:))/(F_v_g/number_of_piles);
            plot(q0,xx,'Color','k')
            axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
            ylabel(['|F_2| : ', 'ave |F_z|' ])
            text(0.8,max(xx)+0.5,'pile2')

            axes(handles.axes9)
            xx = abs(F_h(2,:))/(F_h_g/number_of_piles);
            plot(q0,xx,'Color','k')
            axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
            ylabel(['|H_2| : ', 'ave |F_h|' ])
            text(0.8,max(xx)+0.5,'pile2')

            axes(handles.axes10)
            xx = abs(F_m(2,:))/(F_v_g/number_of_piles);
            plot(q0,xx,'Color','k')
            axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
            ylabel(['|F_2| : ', 'ave |F_z|' ])
            xlabel(['a0 =
', '\omega', 'd/Vs'], 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'd')
            text(0.8,max(xx)+0.5,'pile2')
        end
end

```

```

end
case 3
if number_of_piles >= 3
axes(handles.axes8)
xx = abs(F_v(3,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_3| : ','ave |F_z|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile3')

axes(handles.axes9)
xx = abs(F_h(3,:))/(F_h_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|H_3| : ','ave |F_h|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile3')

axes(handles.axes10)
xx = abs(F_m(3,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_3| : ','ave |F_z|' ])
xlabel(['a0 =
','\omega', 'd/Vs'], 'FontSize',10, 'FontWeight', 'd')
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile3')
end
case 4
if number_of_piles >= 4
axes(handles.axes8)
xx = abs(F_v(4,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_4| : ','ave |F_z|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile4')

axes(handles.axes9)
xx = abs(F_h(4,:))/(F_h_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|H_4| : ','ave |F_h|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile4')

axes(handles.axes10)
xx = abs(F_m(4,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_4| : ','ave |F_z|' ])
xlabel(['a0 =
','\omega', 'd/Vs'], 'FontSize',10, 'FontWeight', 'd')
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile4')
end
case 5
if number_of_piles >= 5
axes(handles.axes8)
xx = abs(F_v(5,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_5| : ','ave |F_z|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile5')

```

```

axes(handles.axes9)
xx = abs(F_h(5,:))/(F_h_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|H_5| : ','ave |F_h|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile5')

axes(handles.axes10)
xx = abs(F_m(5,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_5| : ','ave |F_z|' ])
xlabel(['a0 =
','\omega', 'd/Vs'], 'FontSize',10, 'FontWeight', 'd')
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile5')
end
case 6
if number_of_piles >= 6
axes(handles.axes8)
xx = abs(F_v(6,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_6| : ','ave |F_z|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile6')

axes(handles.axes9)
xx = abs(F_h(6,:))/(F_h_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|H_6| : ','ave |F_h|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile6')

axes(handles.axes10)
xx = abs(F_m(6,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_6| : ','ave |F_z|' ])
xlabel(['a0 =
','\omega', 'd/Vs'], 'FontSize',10, 'FontWeight', 'd')
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile6')
end
case 7
if number_of_piles >= 7
axes(handles.axes8)
xx = abs(F_v(7,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_7| : ','ave |F_z|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile7')

axes(handles.axes9)
xx = abs(F_h(7,:))/(F_h_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|H_7| : ','ave |F_h|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5,'pile7')

axes(handles.axes10)
xx = abs(F_m(7,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx,'Color','k')

```

```

axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_7| : ', 'ave |F_z|' ])
xlabel(['a0 =
', '\omega', 'd/Vs'], 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'd')
text(0.8,max(xx)+0.5, 'pile7')
end
case 8
if number_of_piles >= 8
axes(handles.axes8)
xx = abs(F_v(8,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx, 'Color', 'k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_8| : ', 'ave |F_z|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5, 'pile8')

axes(handles.axes9)
xx = abs(F_h(8,:))/(F_h_g/number_of_piles);
plot(q0,xx, 'Color', 'k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|H_8| : ', 'ave |F_h|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5, 'pile8')

axes(handles.axes10)
xx = abs(F_m(8,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx, 'Color', 'k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_8| : ', 'ave |F_z|' ])
xlabel(['a0 =
', '\omega', 'd/Vs'], 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'd')
text(0.8,max(xx)+0.5, 'pile8')
end
case 9
if number_of_piles >= 9
axes(handles.axes8)
xx = abs(F_v(9,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx, 'Color', 'k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_9| : ', 'ave |F_z|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5, 'pile9')

axes(handles.axes9)
xx = abs(F_h(9,:))/(F_h_g/number_of_piles);
plot(q0,xx, 'Color', 'k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|H_9| : ', 'ave |F_h|' ])
text(0.8,max(xx)+0.5, 'pile9')

axes(handles.axes10)
xx = abs(F_m(9,:))/(F_v_g/number_of_piles);
plot(q0,xx, 'Color', 'k')
axis([0,1,min(xx)-1,max(xx)+1])
ylabel(['|F_9| : ', 'ave |F_z|' ])
xlabel(['a0 =
', '\omega', 'd/Vs'], 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'd')
text(0.8,max(xx)+0.5, 'pile9')
end
otherwise
end
end

```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes1)

cla reset
axes(handles.axes2)
cla reset
axes(handles.axes3)
cla reset
axes(handles.axes4)
cla reset
axes(handles.axes5)
cla reset
axes(handles.axes6)
cla reset
axes(handles.axes7)
cla reset
axes(handles.axes8)
cla reset
axes(handles.axes9)
cla reset
axes(handles.axes10)
cla reset
```





