



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Διερεύνηση της Απόκρισης Ομάδας Πασσάλων υπό  
Οριζόντια Φόρτιση**



**Εκπόνηση: Γκαραγκούνη Ελένη**

**Μπαρέκα Σπυριδούλα**

**Επιβλέπων: Κωμοδρόμος Αιμίλιος, Επικ. Καθηγητής**

**ΒΟΛΟΣ**

**ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2002**



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 921/1  
Ημερ. Εισ.: 08-03-2004  
Δωρεά:  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ ΠΜ  
2002  
ΓΚΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000072533

*Η εργασία αυτή αφιερώνεται  
ολόψυχα στους γονείς μας.*

## *Ευχαριστίες*

*Ευχαριστούμε τον κ. Κωμοδρόμο Αιμ., Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τη συνεχή επιστημονική και ηθική υποστήριξη που μας παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.*

*Σημαντική ήταν και η συμβολή των κ. Γιαννακόπουλο Α. και Ντακούλα Π., οι οποίοι με εύστοχες παρατηρήσεις και διορθώσεις συνέβαλαν στη βελτίωση αυτού του συγγράμματος και τους ευχαριστούμε θερμά γι' αυτό.*

*Θεωρούμε επίσης χρέος μας να ευχαριστήσουμε όλους τους καθηγητές μας, για τις πολύτιμες γνώσεις που μας προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας. Είναι αξιέπαινη η προσπάθειά τους για την παροχή υψηλού επιπέδου εκπαίδευσης στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.*

*Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ακόμη, τις οικογένειες μας για τη συμβολή τους με κάθε δυνατό τρόπο σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	Εισαγωγή.....	1
2.	Μέθοδοι υπολογισμού απόκρισης σε οριζόντια φόρτιση	
2.1	Γενικά.....	3
2.2	Μέθοδοι προσδιορισμού απόκρισης πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση.	5
2.3	Σχολιασμός των μεθοδολογιών επίλυσης.....	9
3.	Παρουσίαση Δοκιμαστικής Φόρτισης	
3.1	Γενικά.....	10
3.2	Περιγραφή Έργου-Εδαφικές Συνθήκες.....	10
3.3	Τεχνική περιγραφή δοκιμαστικής φόρτισης.....	13
3.3.1	Διάταξη φορτιζόμενου συστήματος.....	13
3.3.2	Διάταξη οργανομέτρησης.....	13
3.4	Πρόγραμμα επιβολής φορτίου-Αποτελέσματα.....	13
4.	Αντίστροφη Ανάλυση	
4.1	Εφαρμογή της μεθόδου $p$ - $\gamma$ .....	16
4.1.1	Προσδιορισμός καμπυλών $p$ - $\gamma$ υπεδάφους.....	16
4.1.2	Προσδιορισμός καμπύλης απόκρισης πασσάλου.....	17
4.2	Ανάλυση με χρήση του FLAC <sup>3D</sup> .....	19
4.2.1	Διακριτοποίηση του προβλήματος.....	19
4.2.2	Παραμετρική ανάλυση μεμονωμένου πασσάλου.....	21
4.3	Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	23
5.	Παραμετρική ανάλυση ομάδας πασσάλων	
5.1	Φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων.....	25
5.2	Παραμετρικές επιλύσεις.....	26
5.2.1	Κάναβος του προβλήματος και διαδικασία φόρτισης.....	26
5.2.2	Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	29
5.3	Αποτίμηση συντελεστή απομείωσης.....	33
6.	Παραμετρική ανάλυση ομάδας πασσάλων σε σκληρές αργίλους	
6.1	Γενικά.....	36
6.2	Παραμετρικές επιλύσεις.....	36
6.2.1	Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	36
6.3	Αποτίμηση συντελεστή απομείωσης.....	40
7.	Συμπεράσματα.....	42

**Παράρτημα Α: Απεικόνιση Αποτελεσμάτων Αριθμητικής Ανάλυσης Μεμονωμένου Πασσάλου**

**Παράρτημα Β: Απεικόνιση Αποτελεσμάτων Παραμετρικής Ανάλυσης Ομάδας Πασσάλων**

**Παράρτημα Γ: Απεικόνιση Αποτελεσμάτων Παραμετρικής Ανάλυσης Ομάδας Πασσάλων σε Σκληρή Άργιλο**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

## 1. Εισαγωγή

Η απόκριση των θεμελιώσεων με πασσάλους σε συνθήκες οριζόντιας φόρτισης αποτέλεσε και αποτελεί σημαντικό ερευνητικό πεδίο. Το είδος της φόρτισης, στατική ή δυναμική, η συμπεριφορά του περιβάλλοντος εδαφικού υλικού, γραμμική ελαστική ή μη-γραμμική, η γειτνίαση με άλλα στοιχεία θεμελίωσης ίδιας ή διαφορετικής μορφής, αποτελούν μερικά από τα στοιχεία που συνθέτουν το δύσκολο προς ανάλυση πρόβλημα.

Πρώτες προσεγγίσεις του προβλήματος αποτέλεσαν οι μέθοδοι υπολογισμού του οριακού φορτίου και του αντίστοιχου επιτρεπόμενου με εφαρμογή συντελεστή ασφαλείας. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί ουσιαστικά στον έλεγχο θραύσης του στοιχείου θεμελίωσης χωρίς να δίνει τις αναγκαίες κινηματικές πληροφορίες οι οποίες επηρεάζουν την απόκριση και τυχόν ανάπτυξη καταναγκασμών στην ανωδομή. Για τον λόγο αυτό ακόμα και την εποχή που οι υπολογιστικές μέθοδοι δεν ήταν σε θέση να δώσουν τις ανωτέρω πληροφορίες η αναγκαιότητα γνώσης τους οδήγησε στη διεξαγωγή δοκιμαστικών φορτίσεων. Το υπερβολικό εντούτοις κόστος διεξαγωγής δοκιμαστικών φορτίσεων περιόρισε την εκτέλεση τους μόνο σε ιδιαίτερης σημασίας έργα εδραζόμενα σε προβληματικά εδάφη.

Η επιστημονική πρόοδος σε συνδυασμό με τη συνεχή αύξηση της υπολογιστικής ισχύος οδήγησαν στη βελτίωση των μεθόδων προσέγγισης του προβλήματος με τη διατύπωση, κατά το τέλος της δεκαετίας 1960 και τις αρχές της επόμενης δεκαετίας, μεθοδολογιών ικανών να προβλέψουν την κινηματική και εντατική κατάσταση πασσάλων υπό οριζόντια φόρτιση. Κατά τις μεθόδους αυτές η αντίσταση του περιβάλλοντος εδάφους προσομοιώνεται με ελατηριακές σταθερές, η δυσκαμψία των οποίων θεωρήθηκε σταθερή αρχικά, ενώ στη συνέχεια αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι μη-γραμμικής ανάλυσης ικανοί να ενσωματώσουν ελατήρια με μη-γραμμική συμπεριφορά. Αντιπροσωπευτική και τελική πρόταση των μεθοδολογιών αυτών αποτελεί η γνωστή και ευρέως εφαρμοζόμενη μέθοδος p-y. Η ευρεία χρήση της μεθόδου σε συνδυασμό με την εμπειρία που αποκτήθηκε από τη διεξαγωγή αντίστροφων αναλύσεων την κατέστησε ιδιαίτερα χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών.

Η περαιτέρω εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων επέτρεψε τη χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων και των Πεπερασμένων Διαφορών για την προσέγγιση του προβλήματος. Πρόκειται για μεθόδους ιδιαίτερα σύνθετες σε σχέση με τις απλές



προγραμματιστικά υπορουτίνες της μεθόδου p-y με αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και εν γένει μη-γραμμικό προγραμματισμό, ενώ εξυπνοείται ότι η γνώση των μηχανισμών που αναπτύσσονται στο πλαίσιο αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλου και προϋποθέτουν βαθιά γνώση γενικής μηχανικής και εδαφομηχανικής αποτελεί το σημαντικότερο ίσως παράγοντα για την επιτυχή εφαρμογή της όλης μεθοδολογίας. Η μέθοδος των αριθμητικών μεθόδων έρχεται συμπληρωματικά να καλύψει δύο ουσιαστικά κενά που αφήνει ανέπαφα η μέθοδος p-y. Το πρώτο αφορά στην εντατική και κινηματική κατάσταση του περιβάλλοντος εδάφους, όπου και όταν οι πληροφορίες αυτές κρίνονται αναγκαίες και το δεύτερο στην απόκριση ομάδας πασσάλων, πεδίο με αυξημένο ενδιαφέρον για τις θεμελιώσεις με πασσάλους τόσο σε πλευρική όσο και αξονική φόρτιση.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται απόπειρα *Διερεύνησης της απόκρισης ομάδας πασσάλων υπό οριζόντια φόρτιση*. Για την επίτευξη του στόχου χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα δοκιμαστικής φόρτισης και πραγματοποιούνται αρχικά αντίστροφες αναλύσεις με χρήση της μεθόδου p-y και του προγράμματος FLAC<sup>3D</sup>, για την επαλήθευση των παραμέτρων σχεδιασμού του υπεδάφους. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται το πρόγραμμα FLAC<sup>3D</sup> για την ανάλυση ομάδας πασσάλων υπό οριζόντια φόρτιση με στόχο την αποτίμηση συμπεριφοράς ομάδας και τον προσδιορισμό του οριακού και επιτρεπόμενου φορτίου, όσο και για τη δυσκαμψία ομάδας, που συνήθως αποτελεί το πιο ενδιαφέρον στοιχείο για την προσομοίωση της απόκρισης των πασσαλοθεμελιώσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

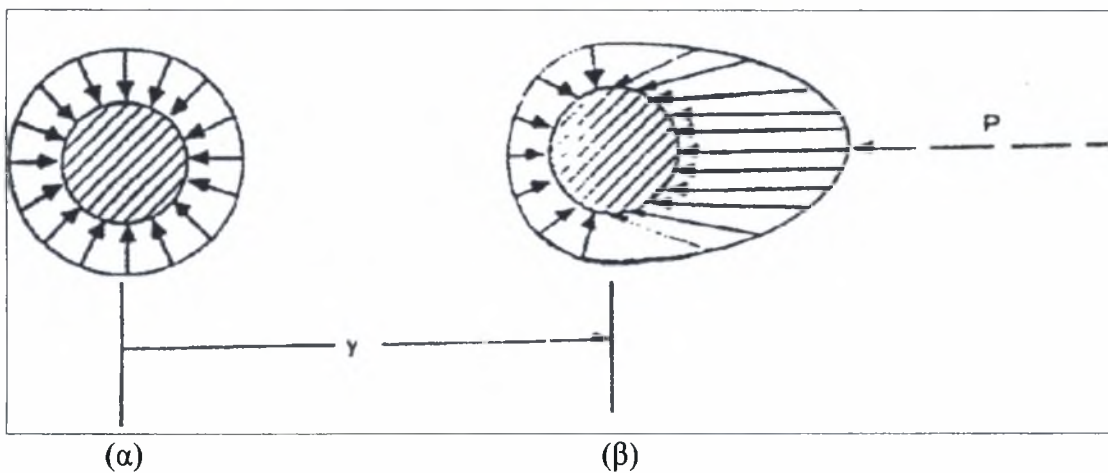
Μέθοδοι υπολογισμού απόκρισης σε οριζόντια φόρτιση

## 2. Μέθοδοι υπολογισμού απόκρισης σε οριζόντια φόρτιση

### 2.1 Γενικά

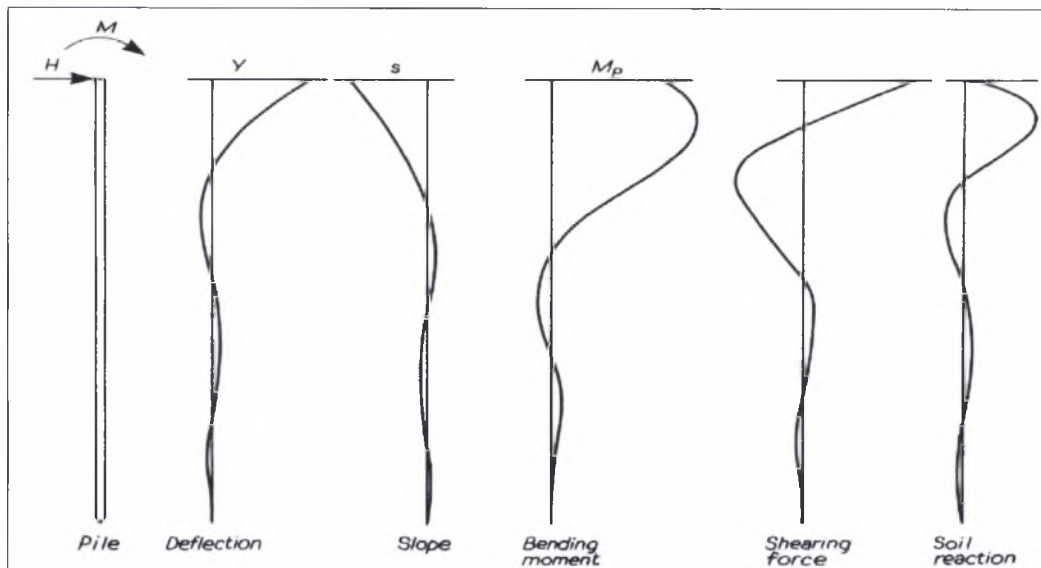
Η απόκριση πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση καθορίζεται από τη δυσκαμψία του και από τη μεταβολή των ωθήσεων εδάφους που επιφέρει το κινηματικό πεδίο στο οποίο η εξωτερική δράση οδηγεί.

Στο σχήμα 2.1α, παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων περιμετρικά του πασσάλου πριν την επιβολή οριζόντιας δύναμης. Η ομοιόμορφη κατανομή τάσεων μεταβάλλεται κατά την πρόκληση μετακίνησης  $y$  και παίρνει τη μορφή του σχήματος 2.1β. Σύμφωνα με αυτό, οι τάσεις μειώνονται στο πίσω μέρος του πασσάλου και αυξάνονται μπροστά από αυτόν. Στο ίδιο σχήμα η δύναμη  $P$  εκφράζει την ολοκλήρωση των τάσεων αντίστασης επί του πασσάλου.



Σχήμα 2.1: Παρουσίαση ανάπτυξης πλευρικών ωθήσεων σε πάσσαλο προ και μετά την πρόκληση οριζόντιας μετακίνησης [10].

Σε απεικόνιση στο κατακόρυφο επίπεδο η επιβολή οριζόντιας δύναμης  $H$  και ροπής  $M$  στην κεφαλή του πασσάλου οδηγεί στα διαγράμματα του σχήματος 2.2, όπου παρουσιάζεται η κινηματική και εντατική κατάσταση του πασσάλου.



Σχήμα 2.2: Μετακίνηση, κλίσεις, καμπτικές ροπές, τέμνουσες δυνάμεις και ωθήσεις του εδάφους για ελαστικές συνθήκες [10].

Πρώτη προσέγγιση του προβλήματος πασσάλων υπό οριζόντια φόρτιση αποτέλεσε ο προσδιορισμός του οριακού και επιτρεπόμενου φορτίου. Δεδομένου εντούτοις ότι καθοριστικό στοιχείο για το σχεδιασμό των κατασκευών που εδράζονται σε πασσάλους αποτελεί το μέγεθος της μετακίνησης και οι καταναγκασμοί που προκαλούνται από αυτό για δεδομένο φορτίο, προέκυψε η ανάγκη προσδιορισμού της καμπύλης απόκρισης φορτίου-μετακίνησης.

Η καμπύλη αυτή είναι σε θέση να προσομοιώσει την απόκριση πασσάλου και να ενσωματωθεί στη διαδικασία επίλυσης και σχεδιασμού της ανωδομής. Για τον προσδιορισμό της καμπύλης απόκρισης ή προσομοίωσης απαιτείται αριθμητική ανάλυση αλληλεπίδρασης πασσάλου-περιβάλλοντος εδάφους. Είναι προφανές ότι η απόκριση εξαρτάται από τη δυσκαμψία του πασσάλου και από τη μεταβολή των ωθήσεων του εδάφους. Για την πρώτη παράμετρο η γραμμική ελαστική ανάλυση θεωρείται ικανοποιητική, ενώ αντίθετα για τη δεύτερη απαιτείται ελαστοπλαστική θεώρηση.

## **2.2 Μέθοδοι προσδιορισμού απόκρισης πασσάλων υπό οριζόντια φόρτιση**

Εκτεταμένες έρευνες έχουν γίνει για τον υπολογισμό της αντίστασης πασσάλων σε οριζόντια φόρτιση. Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες θα μπορούσαν να διαχωρισθούν σε τέσσερις κατηγορίες:

- I. Μέθοδοι υπολογισμού του οριακού φορτίου.
- II. Μέθοδοι υπολογισμού της επιτρεπόμενης μετακίνησης υπό το οριζόντιο φορτίο λειτουργίας.
- III. Αριθμητικές μέθοδοι.
- IV. Δοκιμαστικές φορτίσεις.

### **I. Μέθοδοι υπολογισμού οριακού φορτίου σε πασσάλους**

#### A. Μέθοδος Brinch Hansen [6]:

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη θεωρία ωθήσεων εδάφους

Τα πλεονεκτήματα αυτής είναι τα ακόλουθα:

1. Εφαρμόζεται σε c-φ εδάφη
2. Εφαρμόζεται σε στρωσιγενή εδάφη

Η μέθοδος αυτή εντούτοις συνοδεύεται και από καθοριστικά μειονεκτήματα:

1. Εφαρμόζεται μόνο σε κοντούς πασσάλους
2. Απαιτεί λύσεις δοκιμής-λάθους για να εντοπίσει το σημείο περιστροφής

#### B. Μέθοδος Broms [6]:

Η μέθοδος Broms βασίζεται επίσης στη θεωρία ωθήσεων εδάφους με απλοποιητικές θεωρήσεις ως προς την κατανομή της οριακής αντίστασης κατά μήκος του πασσάλου.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

1. Εφαρμόζεται και σε κοντούς και σε μεγάλοι μήκους πασσάλους
2. Βρίσκει πεδίο εφαρμογής τόσο σε καθαρά συνεκτικά εδάφη, όσο και σε μη-συνεκτικά
3. Μπορεί να εφαρμοσθεί τόσο σε ελεύθερης κεφαλής όσο και σε δεσμευμένους πασσάλους, οι οποίοι μπορούν να αναλυθούν ξεχωριστά

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

1. Δεν εφαρμόζεται σε στρωσιγενή εδάφη
2. Προϋποθέτει ότι το υπέδαφος είναι αμιγώς αργιλικό ή αμμώδες.

## II. Μέθοδοι υπολογισμού επιτρεπόμενης μετακίνησης υπό φορτίο λειτουργίας

### A. Μέθοδος ελατηριακών σταθερών Reeze and Matloc, Poulos [6]:

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, θεωρείται ότι το έδαφος συμπεριφέρεται ως μία σειρά από ανεξάρτητα γραμμικά ελαστικά ελατήρια.

Αυτή η μέθοδος εμφανίζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1. Είναι σχετικά απλή
2. Είναι σε θέση να λάβει υπόψη παράγοντες όπως η μη-γραμμική απόκριση, η μεταβλητότητα των ελατηριακών σταθερών με το βάθος και κατά συνέπεια να εφαρμοστεί σε στρωσιγενή εδάφη
3. Παρουσιάζει ευρεία εφαρμογή και αντίστοιχη συσσωρευμένη εμπειρία

Για τους παραπάνω λόγους, έχει αποκτηθεί μεγάλη εμπειρία εφαρμόζοντας τη θεωρία αυτή σε πρακτικά προβλήματα.

Η μέθοδος αυτή εντούτοις συνοδεύεται και από ορισμένα μειονεκτήματα:

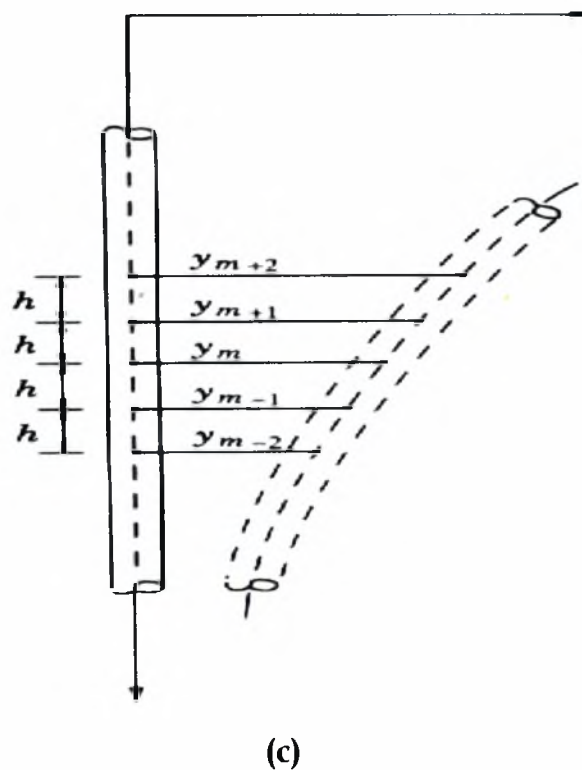
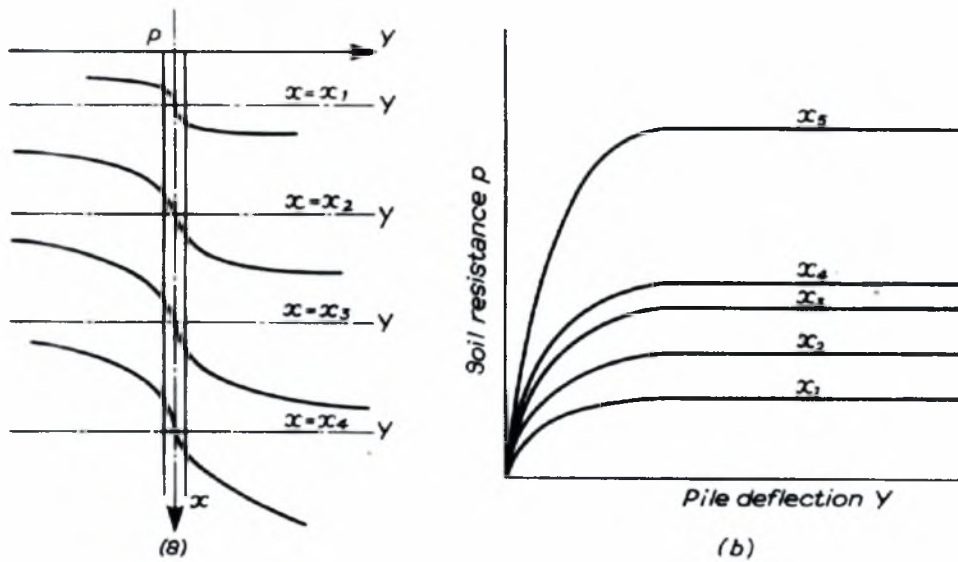
1. Η τιμή των ελατηριακών σταθερών προσομοίωσης του εδάφους δεν είναι μονοσήμαντη αλλά, εξαρτάται από το επίπεδο παραμόρφωσης του εδάφους.
2. Αναγάγει το συνεχές πρόβλημα σε διακριτό, γεγονός που απαιτεί κατάλληλη διακριτοποίηση.

### B. Μέθοδος καμπυλών p-y

Η μέθοδος προσομοίωσης της απόκρισης του εδάφους με καμπύλες p-y είναι σε θέση να λάβει υπόψη τη μετελαστική συμπεριφορά του εδάφους. Οι καμπύλες αυτές δίνουν την αναμενόμενη οριζόντια μετακίνηση εδαφικής στρώσης μέχρι την πλήρη διαρροή του εδάφους, σχήμα 2.3b.

Οι καμπύλες p-y είναι ανεξάρτητες από το σχήμα και τη δυσκαμψία του πασσάλου και δεν επηρεάζονται από τη φόρτιση των ανώτερων και κατώτερων υποστρώσεων. Η υπόθεση αυτή δεν είναι καθολοκληρίαν ορθή. Η εμπειρία ωστόσο δείχνει ότι η μετακίνηση του πασσάλου σε οποιοδήποτε βάθος μπορεί, για πρακτικούς σκοπούς, να θεωρηθεί ότι εξαρτάται μόνο από την αντίδραση του εδάφους στο βάθος αυτό.

Έτσι, το έδαφος μπορεί να αντικατασταθεί από ένα μηχανισμό αποτελούμενο από μια ομάδα χαρακτηριστικών καμπυλών  $p$ - $y$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3b.



Σχήμα 2.3: Ομάδα καμπυλών  $p$ - $y$  που αντιπροσωπεύουν τον παραμορφωμένο πάσσαλο. (a) Σχήμα των καμπυλών για διαφορετικά βάθη  $x$  κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, (b) καμπύλες σχεδιασμένες σε κοινό άξονα, (c) παρουσίαση του παραμορφωμένου πασσάλου. [6]

Η απλότητα της μεθόδου και των απαιτούμενων υπολογισμών, σε συνδυασμό με τον εύκολο τρόπο καθορισμού των καμπυλών  $p$ - $y$  συνιστούν τα κύρια πλεονεκτήματα της και επέτρεψαν τη συνεχή και ευρεία χρήση της.

### III. Αριθμητικές Μέθοδοι

Η αριθμητική ανάλυση, σε αντίθεση με τις εμπειρικές μεθόδους προσδιορισμού, χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα προσέγγισης του προβλήματος με ικανοποιητική ακρίβεια, ενώ παρέχει πληροφορίες αναφορικά με την αναμενόμενη εντατική και κινηματική κατάσταση του πασσάλου και του περιβάλλοντος εδαφικού σχηματισμού. Η αριθμητική ανάλυση είναι σε θέση να ενσωματώσει στη διαδικασία υπολογισμού τις ιδιαιτερότητες του κάθε προβλήματος, ενώ η ακρίβεια της προσέγγισης επιτρέπει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση της αντοχής των συστατικών υλικών του προβλήματος.

Οι αριθμητικές μέθοδοι βρίσκουν επίσης σημαντικό πεδίο εφαρμογής στην περίπτωση όπου η αλληλεπίδραση πασσάλων-εδάφους-πασσάλων είναι πρακτικά αδύνατο να εκτιμηθεί από τις προαναφερθείσες μεθόδους.

Για τη διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων οι μέθοδοι που προαναφέρθηκαν κρίνονται ανεπαρκείς, καθώς εξετάζουν τη συμπεριφορά ενός μόνο πασσάλου. Η αριθμητική ανάλυση του προβλήματος έγινε με χρήση του προγράμματος Πεπερασμένων Διαφορών, FLAC<sup>3D</sup>. Πρόκειται για πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών, με δυνατότητα ανάλυσης τρισδιάστατων προβλημάτων. Το FLAC<sup>3D</sup> είναι σε θέση να προσομοιώσει τη συμπεριφορά εδάφους, βράχου και άλλων υλικών με κατάλληλους καταστατικούς νόμους, κριτήρια και επιφάνειες θραύσης και διαρροής.

Συμπερασματικά, το FLAC<sup>3D</sup> προσφέρει στο χρήστη πολλαπλές δυνατότητες για να επιλύσει σύνθετα προβλήματα της μηχανικής και ειδικότερα της βραχομηχανικής και της εδαφομηχανικής.

### IV. Δοκιμαστικές φορτίσεις

Η δοκιμαστική φόρτιση είναι ιδιαίτερως χρήσιμη για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας των πασσάλων και θεωρείται απαραίτητη στα σημαντικά έργα. Επειδή



πρόκειται για μία ακριβή και χρονοβόρα δοκιμή γίνεται προσπάθεια κατά την εκτέλεση της να συλλεγεί ο μέγιστος όγκος των πληροφοριών.

Το πρόγραμμα φόρτισης συνίσταται στη σταδιακή επιβολή του φορτίου, καθώς και μέτρηση της χρονικής εξέλιξης των μετακινήσεων. Περιλαμβάνει συνήθως τρία ή και περισσότερα στάδια φόρτισης - αποφόρτισης - επαναφόρτισης κατά τα οποία προσδιορίζονται οι καμπύλες απόκρισης φορτίου - οριζόντιας μετακίνησης και φορτίου - στροφής της κεφαλής του πασσάλου.

Η περαιτέρω συλλογή πληροφοριών εντατικών και κινηματικών μεγεθών καθ' όλο το μήκος του πασσάλου, με χρήση παραμορφωσιμέτρων (strain gages) δίνει τη δυνατότητα διεξαγωγής αντίστροφων αναλύσεων και επαλήθευσης των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας του υπεδάφους.

### **2.3 Σχολιασμός των μεθοδολογιών επίλυσης**

Οι μεθοδολογίες της πρώτης προσέγγισης αποτελούν και χρονικά την πρώτη απόπειρα λύσης του προβλήματος. Περιορίζονται στον προσδιορισμό του οριακού και επιτρεπόμενου φορτίου χωρίς να είναι σε θέση να προβλέψουν το αντίστοιχο μέγεθος μετακίνησης. Το μειονέκτημα αυτό επιχειρεί να λύσει η δεύτερη ομάδα μεθοδολογιών με απλά σχετικά αριθμητικά προσομοιώματα και υπολογιστικό κόστος. Η προσέγγιση αυτή θα μπορούσε να αποκαλεσθεί "υβριδική" καθ' ότι συνδυάζει χρήση απλοποιημένων αριθμητικών μεθόδων και της θεωρίας ωθήσεων εδάφους.

Η ανάπτυξη τέλος αποτελεσματικών υπολογιστικών μεθόδων και ισχυρών υπολογιστικών μέσων επέτρεψε την πλήρη προσομοίωση και ανάλυση προβλημάτων αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευών, χαρακτηριστικό παράδειγμα της οποίας αποτελεί η περίπτωση πασσάλου ή ομάδας πασσάλων υπό οριζόντια φόρτιση.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Παρουσίαση δοκιμαστικής φόρτισης

### **3. Παρουσίαση δοκιμαστικής φόρτισης**

#### **3.1 Γενικά**

Για τη διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων αξιολογήθηκαν αρχικά τα αποτελέσματα της δοκιμαστικής φόρτισης φρεατοπασσάλου, η οποία διεξήχθη από τη ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε. τον Αύγουστο του 1995, στη θέση κατασκευής της γέφυρας ζεύξης του ποταμού Αλιάκμονα του νέου κλάδου της Εθνικής Οδού Ευζώνων - Αθήνας.

Η εκτελεσθείσα δοκιμαστική φόρτιση είχε ως στόχο τον προσδιορισμό του επιτρεπόμενου κατακόρυφου και οριζόντιου φορτίου του δοκιμαζόμενου πασσάλου, καθώς και της γενικότερης συμπεριφοράς του κάτω από τις φορτίσεις αυτές. Τα αποτελέσματα και συμπεράσματα από τη διεξαχθείσα φόρτιση χρησίμευσαν για τους τελικούς ελέγχους επιβεβαίωσης της συμπεριφοράς των πασσάλων των βάθρων της νέας γέφυρας στη θέση αυτή. Ο δοκιμαζόμενος πάσσαλος κατασκευάστηκε ειδικά για το σκοπό αυτό με τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά, διαστάσεις κλπ., όπως οι πάσσαλοι του έργου.

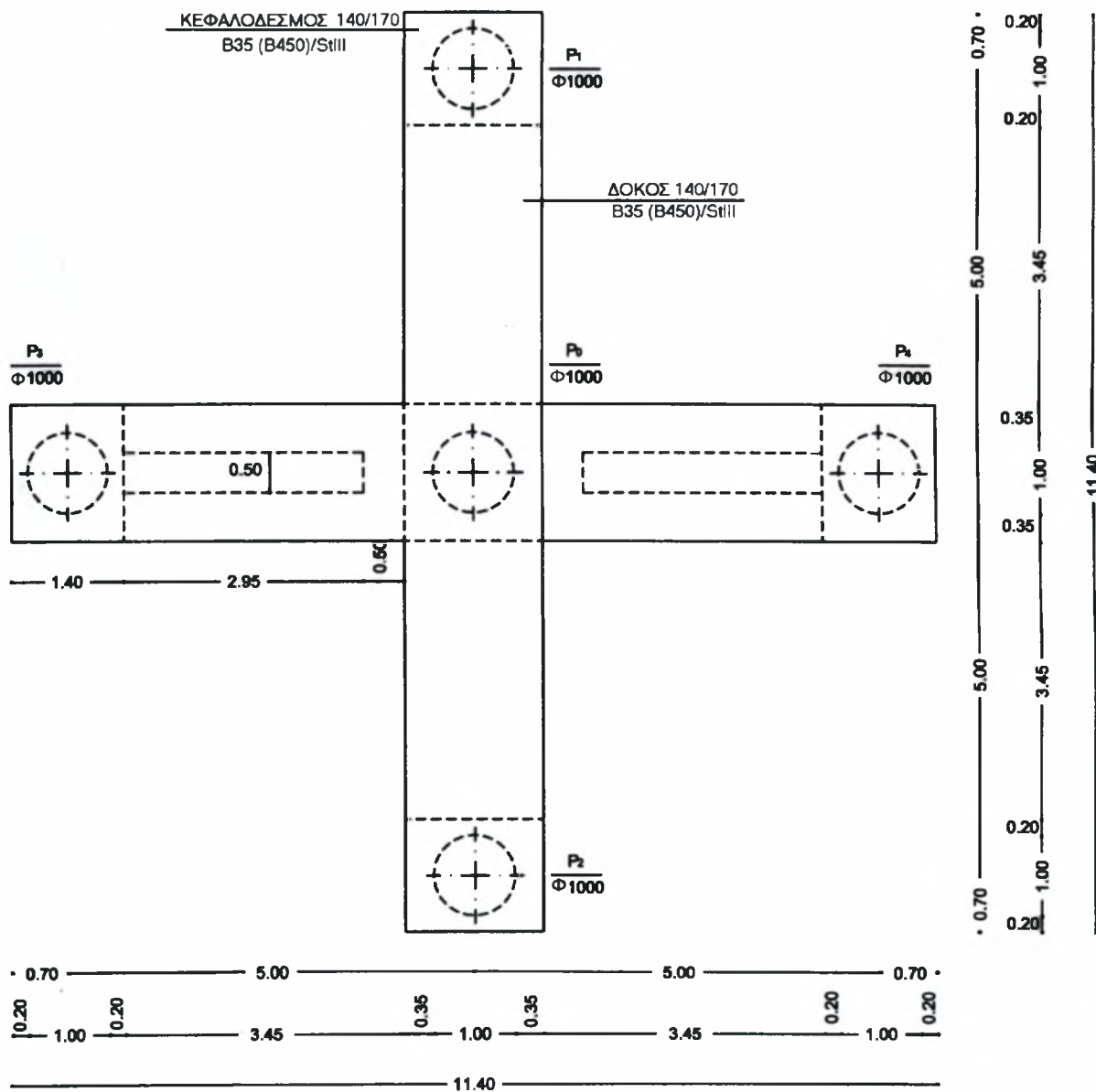
#### **3.2 Περιγραφή έργου - Εδαφικές συνθήκες**

Η θέση της δοκιμαστικής φόρτισης επιλέχθηκε σε αντιπροσωπευτικό σημείο, από πλευράς εδαφικών συνθηκών, 20 m περίπου ανάντη της γέφυρας, στην ανατολική όχθη της βρεχόμενης κοίτης του Αλιάκμονα. Η διάταξη της φόρτισης φαίνεται στο σχήμα 3.1. Η απλοποιημένη εδαφική τομή στο σημείο αυτό, περιλαμβάνει τα στρώματα που δίνονται στο σχήμα 3.2.

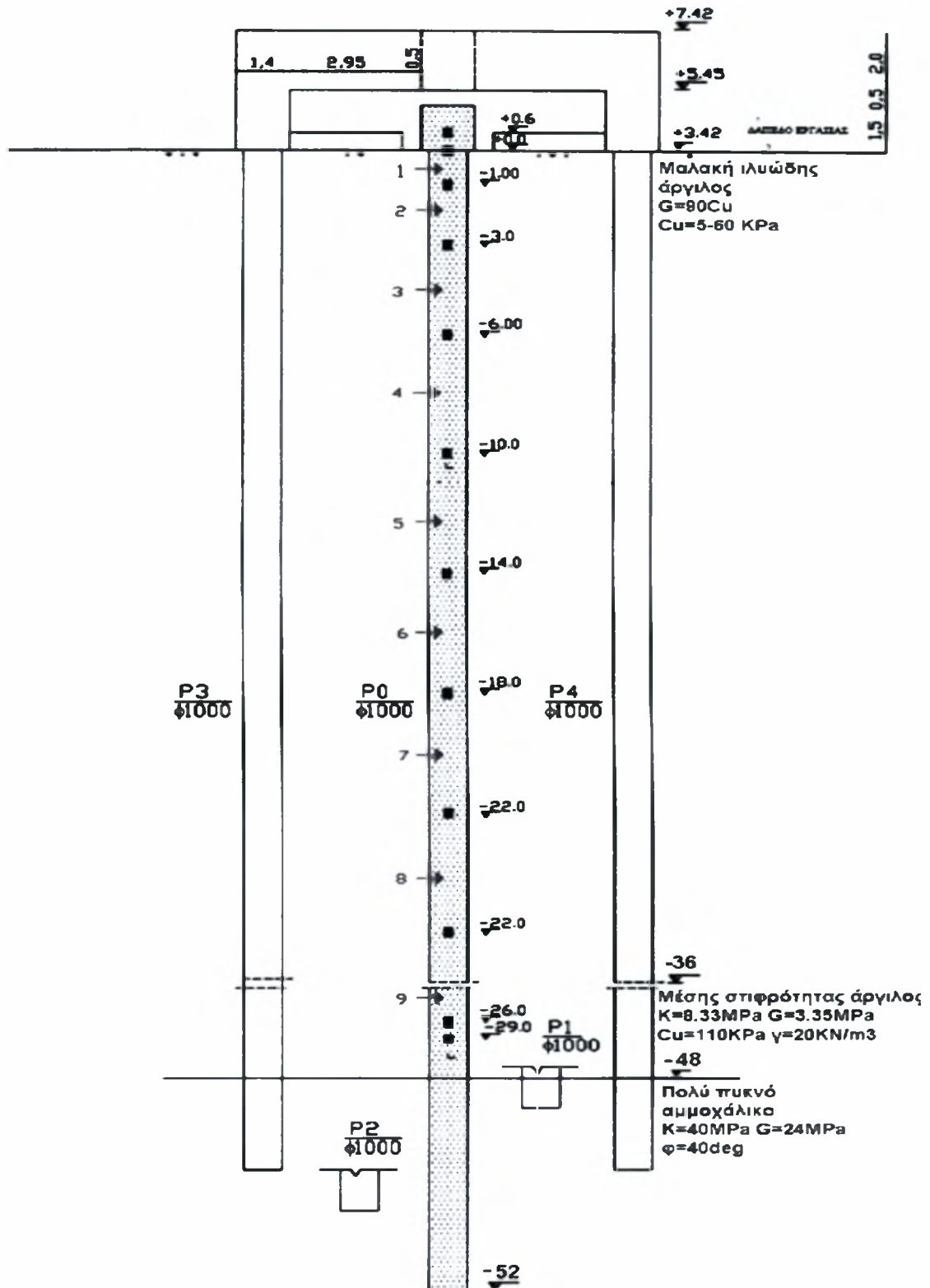
Σύμφωνα με τη γεωτεχνική τομή σχεδιασμού της ανωτέρω μελέτης, επιφανειακά και μέχρι βάθος 15 m εμφανίζονται συμπιεστές χαλαρές έως μέσης πυκνότητας αμμοίλυδες στρώσεις. Ακολουθεί συμπιεστή στρώση αργίλου, μαλακής έως μέσης συνεκτικότητας μέχρι βάθος 36 m, ενώ βαθύτερα, μέχρι το βάθος των 48 m εμφανίζεται στρώση ιλυώδους αργίλου, μέσης συνεκτικότητας έως σιφρής. Της στρώσης αυτής υπόκειται πυκνό αμμοχάλικο πάχους 4-5 m περίπου, το οποίο και αποτελεί το στρώμα έδρασης της αιχμής των πασσάλων.

Οι πάσσαλοι κατασκευάστηκαν από σκυρόδεμα B25. Οι κατά μήκος οπλισμοί τους είναι 33Φ25 St III στο άνω τμήμα, ενώ βαθύτερα από 11 m και μέχρι την αιχμή του πασσάλου, ο διαμήκης οπλισμός μειώνεται σε 17Φ22. Ο πάσσαλος της δοκιμής

κατασκευάσθηκε με τις ίδιες διαστάσεις, βάθος, οπλισμό κλπ., όπως οι πάσσαλοι των μεσοβάθρων της γέφυρας.



Σχήμα 3.1: Τυπική διάταξη δοκιμαστικής φόρτισης πασσάλου σε κάτωψη [8]



Σχήμα 3.2: Εδαφική τομή σχεδιασμού -Τομή διάταξης φόρτισης [8]

Παρατήρηση: Με 1 έως 9 συμβολίζονται οι θέσεις τοποθέτησης των strain-gages του κορμού του πασσάλου, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την αντίστροφη ανάλυση της κατακόρυφης φόρτισης.

### **3.3 Τεχνική περιγραφή δοκιμαστικής φόρτισης**

#### **3.3.1 Διάταξη φορτιζόμενου συστήματος**

Για τη διεξαγωγή της δοκιμαστικής φόρτισης μελετήθηκε από τη ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε. και κατασκευάστηκε από τον Ανάδοχο διάταξη πέντε έγχυτων πασσάλων διαμέτρου 100 cm σε σχήμα σταυρού. Ο δοκιμαζόμενος κεντρικός πάσσαλος κατασκευάστηκε με ίδιες διαστάσεις και σπλισμό με τους πασσάλους του έργου, ενώ οι τέσσερις ακραίοι πάσσαλοι, μήκους 48.6 m, αποτελούν τους πασσάλους ανάληψης του εφελκυστικού φορτίου που μεταβιβάζεται μέσω της σταυροειδούς δοκού κατά την κατακόρυφη φόρτιση.

Το όλο σύστημα παρέχει τη δυνατότητα εξάσκησης οριζόντιων φορτίων επί της κεφαλής του δοκιμαζόμενου πασσάλου στο επίπεδο του εδάφους, έτσι ώστε να μελετηθεί και να ελεγχθεί η συμπεριφορά του σε κάμψη.

#### **3.3.2 Διάταξη οργανομέτρησης**

Η μέτρηση του επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια υδραυλικών γρύλων διπλής ενέργειας, δυνατότητας 2500 kN έκαστος και ακρίβεια ανάγνωσης μικρότερη των 2 kN.

Για τη μέτρηση της μετακίνησης στην κεφαλή του πασσάλου τοποθετήθηκαν τέσσερα μηκυσιόμετρα ακριβείας 0.01 mm και 0.001 mm. Τα μηκυσιόμετρα ήταν ηλεκτρονικά με κεντρικό ψηφιακό σύστημα καταγραφής συνδεδεμένα με φορητό Η/Υ, έτσι ώστε να ελέγχεται κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο η εξέλιξη της φόρτισης, να λαμβάνονται πολυάριθμες αναγνώσεις ανα 2 min και να μηδενίζονται τα περιθώρια σφάλματος ανάγνωσης.

### **3.4 Πρόγραμμα επιβολής φορτίου - Αποτελέσματα**

Το πρόγραμμα επιβολής φορτίου και γενικά ο τρόπος διεξαγωγής της φόρτισης και της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων καθορίστηκε σύμφωνα με τις Δημόσιες Τεχνικές Προδιαγραφές (ΥΠΕΧΩΔΕ, Ε106-86/5) και τις διεθνείς περί τούτου οδηγίες (Γαλλικοί και Γερμανικοί Κανονισμοί, καθώς και οι Αμερικάνικοι Κανονισμοί ASTM D1143-81/87).

Μετά το πέρας της κατακόρυφης φόρτισης, κατά την οποία διασφαλίστηκε ο πάσσαλος από αστοχία σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε οριζόντια φόρτιση, με ανιόντα βήματα φορτίου της τάξης των 10 t. Πραγματοποιήθηκαν δύο κύκλοι φόρτισης, των οποίων τα στάδια έχουν ως ακολούθως:

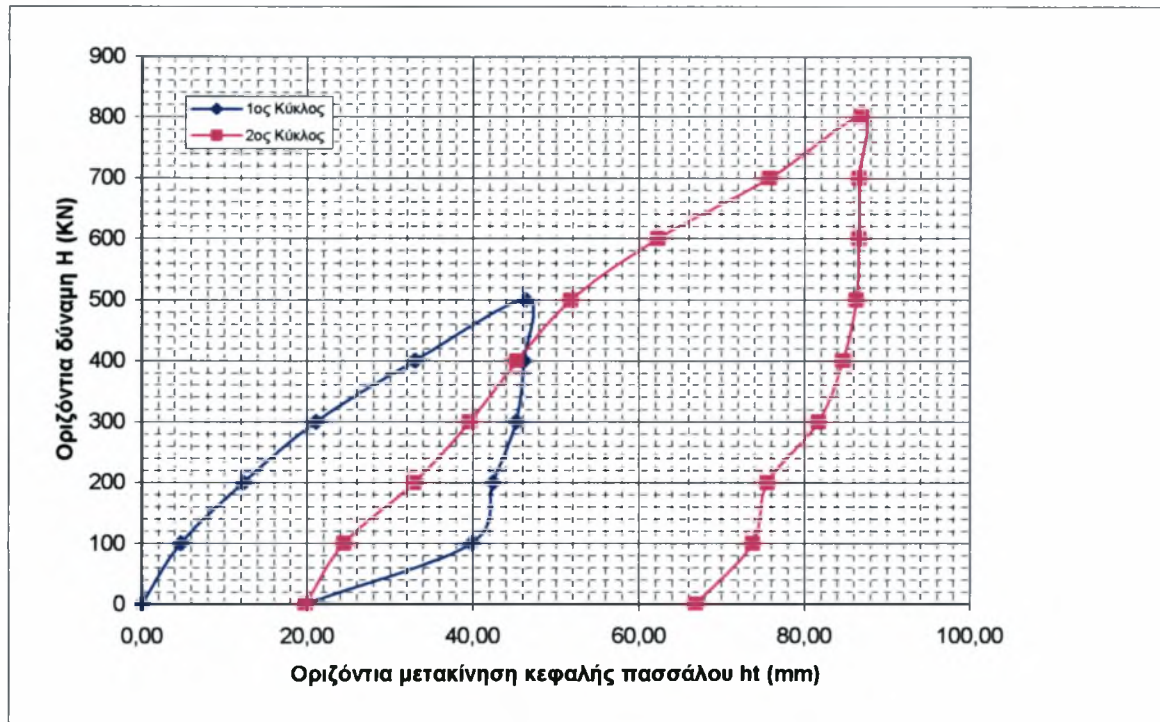
1<sup>ος</sup> κύκλος: 0 → 10 t → 20 t → 30 t → 40 t → 50 t → φόρτιση  
 0 ← 10 t ← 20 t ← 30 t ← 40 t ← αποφόρτιση

2<sup>ος</sup> κύκλος: 0 → 10 t → 20 t → 30 t → 40 t → 50 t → φόρτιση  
 → 60 t → 70 t → 80 t →  
 ← 60 t ← 70 t ← 80 t ←  
 0 ← 10 t ← 20 t ← 30 t ← 40 t ← 50 t ← αποφόρτιση

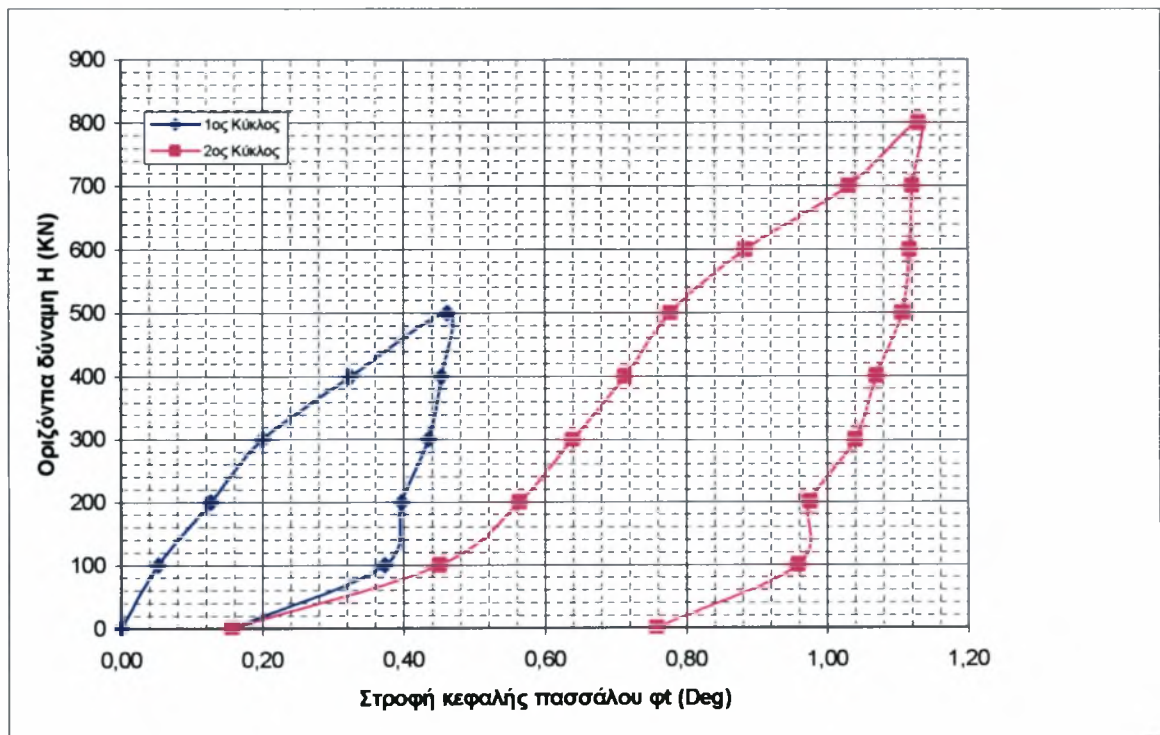
Λόγω της άμεσης απόκρισης των οριζόντιων μετακινήσεων των πασσάλων σε οριζόντια φόρτιση η οποία δεν παρουσιάζει φαινόμενα υστερητικής συμπεριφοράς, τα στάδια επιβολής οριζόντιου φορτίου διήρκησαν 10 έως 20 min μέχρι τη σταθεροποίηση της οριζόντιας μετακίνησης.

Η επεξεργασία των μετρήσεων οδήγησε στα συγκεντρωτικά διαγράμματα των σχημάτων 3.3, 3.4. Από τα σχετικά διαγράμματα προκύπτει ότι το οριακό οριζόντιο φορτίο του δοκιμαζόμενου πασσάλου υπό καθεστώς ελεύθερης κεφαλής υπερβαίνει τους 80 t. Στο φορτίο αυτό αντιστοιχεί μέση οριζόντια μετακίνηση 85 mm η οποία αποτελεί και το όριο χρήσης του εμβόλου του γρύλλου. Για το λόγο αυτό η δοκιμαστική φόρτιση τερματίστηκε στην προανεφερθείσα τιμή φορτίου, όπου εμφανίζεται πλασματικά και μεγαλύτερη δυσκαμψία του πασσάλου. Η γενικότερη συμπεριφορά του πασσάλου αντιστοιχεί σε μακρύ πάσσαλο, ήτοι δραστηριοποίηση του πασσάλου σε μεγάλο βάθος, κινητοποίηση του εδάφους σε μεγάλο βάθος, μικρές στροφές και μεγάλες μετακινήσεις της κεφαλής.





Σχήμα 3.3: Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης-οριζόντιου φορτίου στην κεφαλή του πασσάλου



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα στροφής στην κεφαλή του πασσάλου συναρτήσεως του επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Αντίστροφη ανάλυση

## 4. Αντίστροφη ανάλυση

### 4.1 Εφαρμογή της Μεθόδου p-y

#### 4.1.1 Προσδιορισμός καμπυλών p-y υπεδάφους

Για τον προσδιορισμό των ελατηριακών σταθερών του εδάφους καθ' όλο το μήκος του πασσάλου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επίλυση των πασσάλων των βαθρών της γέφυρας για διαφορετικές συνθήκες πάκτωσης και καθορισμένα φορτία κεφαλής, πραγματοποιήθηκε *αντίστροφη ανάλυση*. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία καμπύλες p-y (βλ. Matlock, H.(1970), Reese, L.C.(1974) [5]) για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους κάτω από οριζόντια φόρτιση.

Σύμφωνα με τη γεωτεχνική τομή σχεδιασμού τα πρώτα 36 m του εδάφους θεμελίωσης αποτελούνται από συνεκτικά υλικά. Για τον προσδιορισμό των καμπυλών p-y δημιουργήθηκε πρόγραμμα στο EXCEL έχοντας ως βάση τη μεθοδολογία του Matlock. Στα υπόλοιπα 16 m και μέχρι βάθους 52 m, υπάρχουν αμμώδη εδαφικά υλικά. Οι καμπύλες p-y για το στρώμα αυτό, υπολογίστηκαν σύμφωνα με την μεθοδολογία των Reese et al. [5]

Το συνεκτικό στρώμα των 36 m χωρίστηκε σε τρεις επιμέρους στρώσεις, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά όπως αυτά προέκυψαν από την αντίστροφη ανάλυση:

*1<sup>η</sup> Στρώση:* Για βάθος από 1-5 m η συνοχή εκτιμήθηκε  $c=20$  kPa. Η καμπύλη p-y σχεδιάστηκε σε βάθος 2 m, το οποίο θεωρείται αντιπροσωπευτικό της στρώσης αυτής.

*2<sup>η</sup> Στρώση:* Για βάθος από 5-15 m η συνοχή εκτιμήθηκε  $c=40$  kPa. Η καμπύλη p-y σχεδιάστηκε σε βάθος 8 m.

*3<sup>η</sup> Στρώση:* Για βάθος από 15-36 m η συνοχή εκτιμήθηκε  $c=60$  kPa. Η καμπύλη p-y σχεδιάστηκε σε βάθος 26 m.

Το αμμώδες στρώμα χωρίστηκε σε δύο επιμέρους στρώσεις με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

*4<sup>η</sup> Στρώση:* Για βάθος από 36-48 m η γωνία τριβής λήφθηκε ως  $\phi(\text{deg})=40.00$ . Το βάθος υπολογισμού είναι στα 42 m.

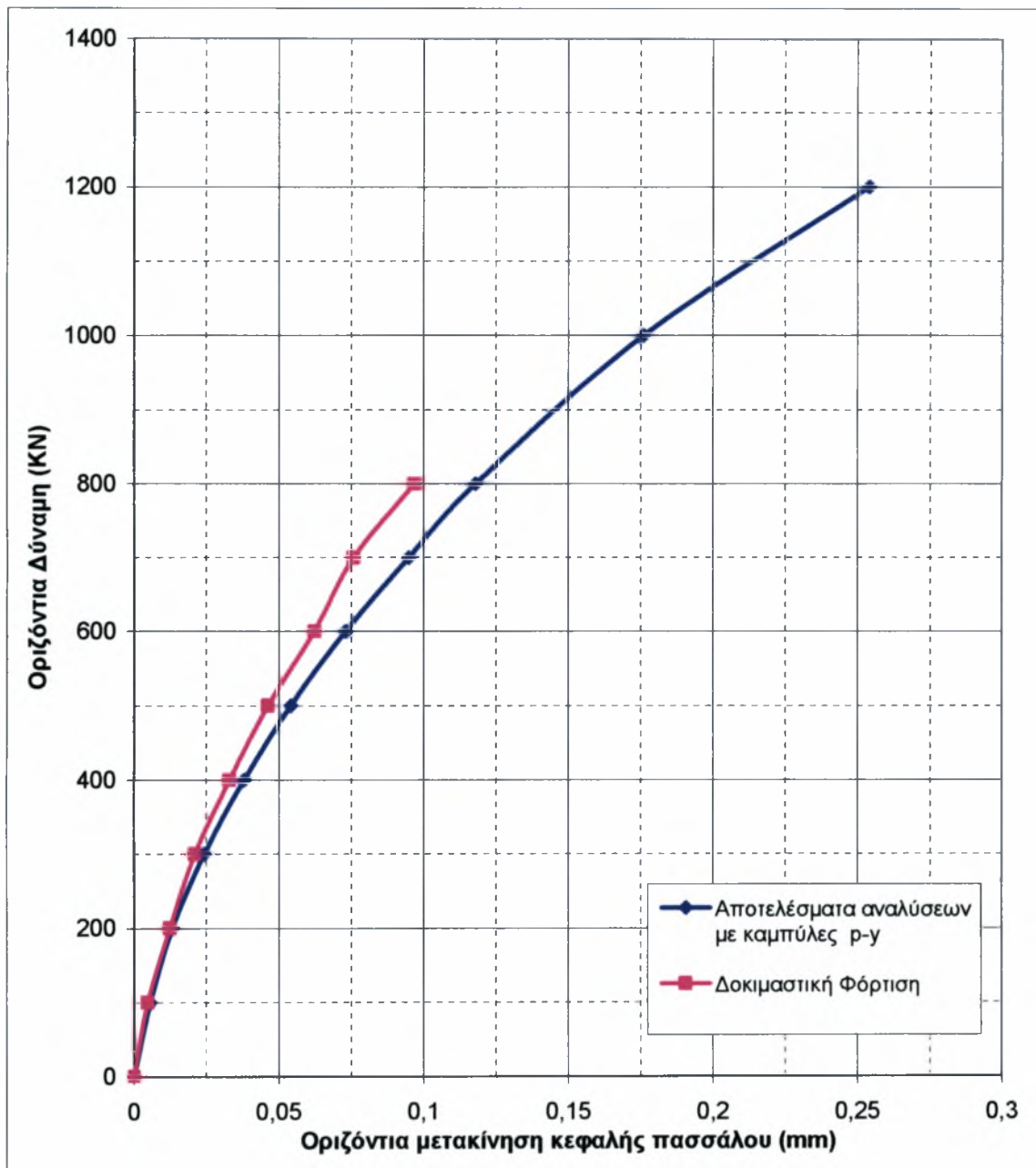
*5<sup>η</sup> Στρώση:* Από τα 48 m έως το βάθος έδρασης των 52 m η γωνία τριβής παραμένει η ίδια με την παραπάνω στρώση, ενώ το βάθος υπολογισμού της καμπύλης p-y είναι στα 50 m.

Οι μεθοδολογίες υπολογισμού, οι καμπύλες  $p$ - $y$  που προκύπτουν από αυτές, καθώς και οι εδαφικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα Α.

#### 4.1.2 Προσδιορισμός καμπύλης απόκρισης πασσάλου

Οι καμπύλες  $p$ - $y$  μαζί με τα υπόλοιπα γεωμετρικά δεδομένα και τις παραμέτρους τροφοδότησαν σχετικό πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή, με το οποίο πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις για τιμές φορτίων ίσες με αυτές που επιβλήθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Σκοπός αυτών είναι η προσομοίωση του εδάφους, το οποίο διακριτοποιήθηκε ανά 1 m. Πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις για οριζόντιο φορτίο 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000 και 1200 KN. Τα διαγράμματα Οριζόντιας Μετακίνησης-Βάθους για τις παραπάνω φορτίσεις δίνονται στα σχήματα Α.11-Α.20.

Στο σχήμα 4.1 δίνεται το τελικό διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης της κεφαλής του πασσάλου συναρτήσει του οριζόντιου φορτίου, έτσι όπως υπολογίσθηκε, προς σύγκριση με το αντίστοιχο πραγματικό διάγραμμα που προέκυψε από τα αποτελέσματα της δοκιμαστικής φόρτισης. Παρατηρείται ότι η ανάλυση με χρήση των προτεινόμενων καμπυλών οριζόντιας αντίδρασης του εδάφους-μετακίνησης, προσομοιάζει ικανοποιητικά την καμπύλη οριζόντιου φορτίου-μετακίνησης που μετρήθηκε κατά τη δοκιμή. Κατά συνέπεια, οι καμπύλες αυτές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των εντατικών και κινηματικών μεγεθών των πασσάλων θεμελίωσης υπό τη δράση οριζόντιων φορτίων. Σημειώνεται ότι οι καμπύλες αυτές αντιστοιχούν στην περίπτωση ενός και μόνο πασσάλου και δεν λαμβάνουν υπόψη την απομείωση λόγω ομάδας πασσάλων.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα μετακίνησης της κεφαλής του πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση. Αποτελέσματα προσομοίωσης-δοκιμής

## 4.2 Ανάλυση με χρήση του FLAC<sup>3D</sup>

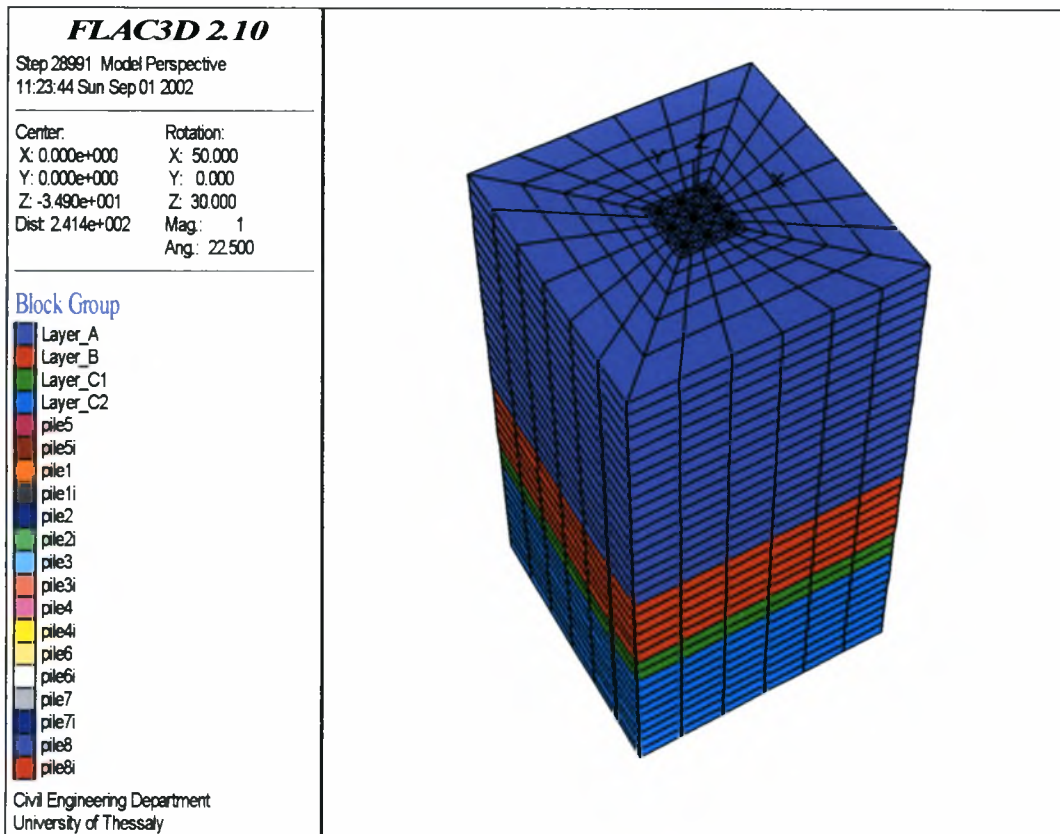
### 4.2.1 Διακριτοποίηση του προβλήματος

Για τη διακριτοποίηση ενός προβλήματος στον κώδικα FLAC<sup>3D</sup> πρέπει να οριστούν τρεις βασικές παράμετροι:

1. Ο κάνναβος πεπερασμένων διαφορών
2. Ο καταστατικός νόμος συμπεριφοράς και οι ιδιότητες των υλικών
3. Οι οριακές συνθήκες και το αρχικό εντατικό πεδίο.

Μετά τον προσδιορισμό των παραπάνω στοιχείων, ακολουθούν οι εξαιτίσεις και οι αλλαγές στο σύστημα και υπολογίζεται η τελική απόκριση του. Στο FLAC<sup>3D</sup> η επίλυση ολοκληρώνεται μετά από μία σειρά υπολογιστικών βημάτων, ο αριθμός των οποίων ελέγχεται αυτόματα από τον κώδικα ή καθορίζεται από τον χρήστη. Όμως, ο τελευταίος είναι εκείνος που τελικά θα αποφασίσει εάν ο αριθμός των υπολογιστικών βημάτων επαρκεί για τη λύση του προβλήματος.

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι θα ακολουθήσει αριθμητική ανάλυση ομάδας πασσάλων, κατασκευάστηκε κάνναβος πεπερασμένων διαφορών ο οποίος περιλαμβάνει 9 πασσάλους σε διάταξη 3x3. Ο κάνναβος κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής της γεωμετρίας του όταν αυτό χρειάζεται. Για την προσομοίωση της δοκιμαστικής φόρτισης θεωρήθηκε ενεργός μόνο ο κεντρικός πάσσαλος. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται ο κάνναβος της ομάδας των πασσάλων, ο οποίος περιλαμβάνει 12192 στοιχεία και 11835 κόμβους. Οι διαστάσεις του καννάβου είναι 39 m κατά τη διεύθυνση x και y και βάθους 70 m.



Σχήμα 4.1: Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιείται στην ανάλυση, με τη δυνατότητα μεταβολής των διαστάσεων.

Δεδομένου ότι το έδαφος εμφανίζει περιορισμένη αντοχή σε ελκυσμό, εισήχθησαν στοιχεία διεπιφανειών για να επιτρέψουν το διαχωρισμό του πασσάλου από το περιβάλλον έδαφος. Ο διαχωρισμός λαμβάνει χώρα κυρίως κοντά στην κορυφή και στο πίσω μέρος του πασσάλου, σε βάθος που δεν ξεπερνά συνήθως το 20% του μήκους του. Ο διαχωρισμός αυτός θεωρείται, σε συνδυασμό με την τοπική διαρροή κοντά στην επιφάνεια του εδάφους όπου αναπτύσσονται υψηλές θλιπτικές τάσεις, ως ο κύριος λόγος για τη μη-γραμμικότητα των καμπυλών φορτίου-μετακίνησης.

Επιπροσθέτως, τα στοιχεία διεπιφανειών μπορούν να διαχωριστούν όταν η αναπτυσσόμενη τάση κατά μήκος της διεπιφάνειας υπερβεί το όριο αντοχής της. Μόλις δημιουργηθεί το κενό μεταξύ πασσάλου-εδάφους, οι ορθές και διατμητικές τάσεις μηδενίζονται. Οι διεπιφάνειες έχουν μηδενική αντοχή σε ελκυσμό, ενώ η θλιπτική τους αντοχή τείνει στο άπειρο. Η δυσκαμψία τους είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη αυτής του εδάφους.

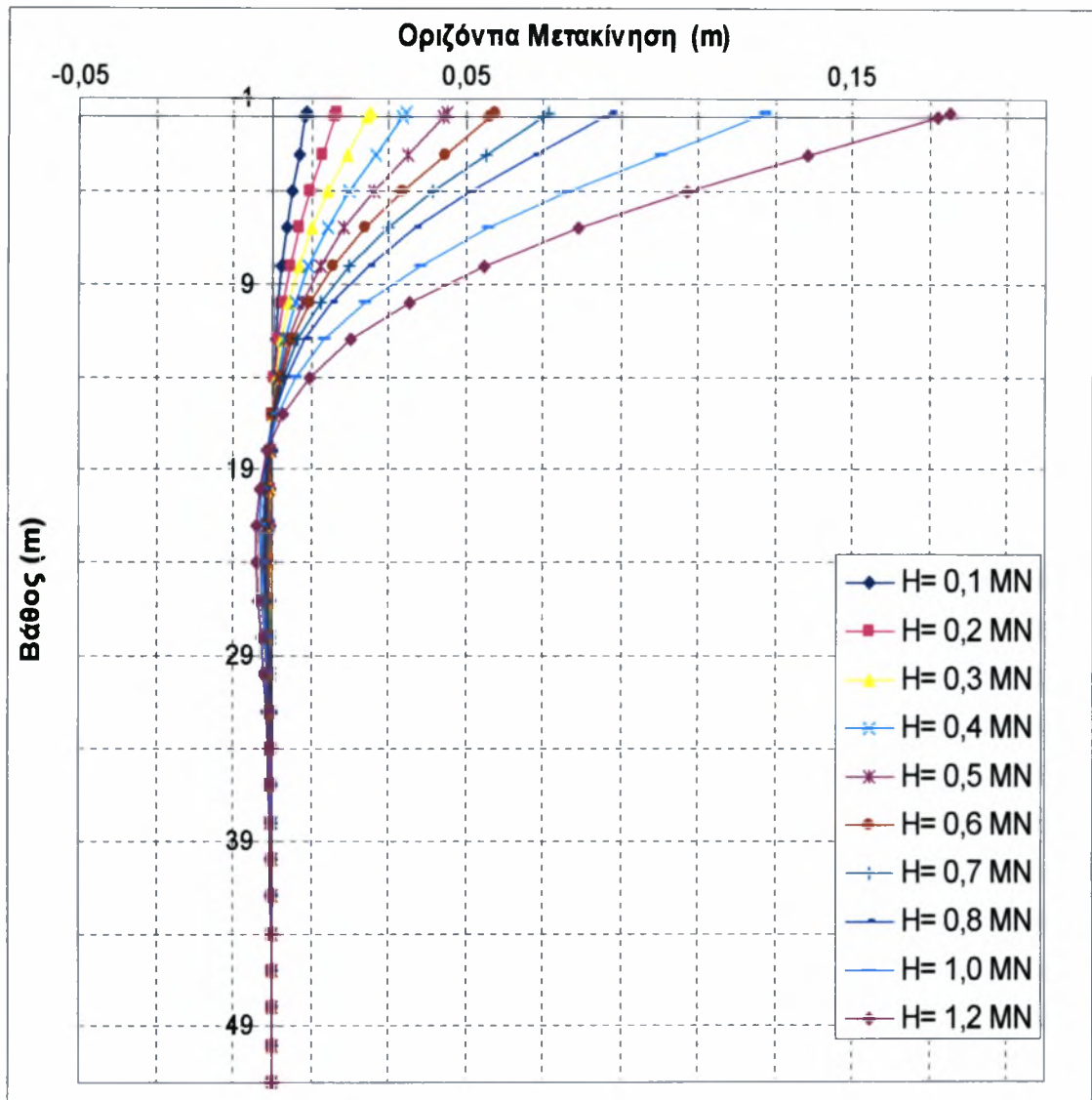
Η χρήση των διεπιφανειών οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν 88 στοιχεία διεπιφανειών τα οποία

κάλυψαν τα πρώτα 10 m του πασσάλου. Ενδεικτικά ο υπολογιστικός χρόνος για ομάδα πασσάλων με δέκα στάδια φόρτισης είναι 36 ώρες σε υπολογιστή Pentium III 700MHz.

Μετά την ολοκλήρωση της μόρφωσης του καννάβου, ακολουθεί ο προσδιορισμός του καταστατικού νόμου συμπεριφοράς του υλικού ή των υλικών που προσομοιώνονται, καθώς και των ιδιοτήτων τους. Για την ανάλυση του παρόντος προβλήματος επιλέχθηκε ο νόμος Mohr-Coulomb για την προσομοίωση των εδαφικών στρώσεων.

#### **4.2.2 Παραμετρική ανάλυση μεμονωμένου πασσάλου**

Πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις σε δέκα στάδια μονότονης φόρτισης. Τα πρώτα 8 βήματα είναι ίδια με αυτά της δοκιμαστικής φόρτισης, ξεκινώντας από τα 100 kN και καταλήγοντας στα 800 kN με σταθερή αύξηση 100 KN. Εφαρμόστηκαν δύο επιπλέον βήματα φόρτισης στα 1000 και 1200 kN. Η διεύθυνση του φορτίου για τις τρέχουσες αναλύσεις είναι κατά τη διεύθυνση  $x$ . Τα αποτελέσματα φαίνονται παραστατικά στο διάγραμμα που ακολουθεί:

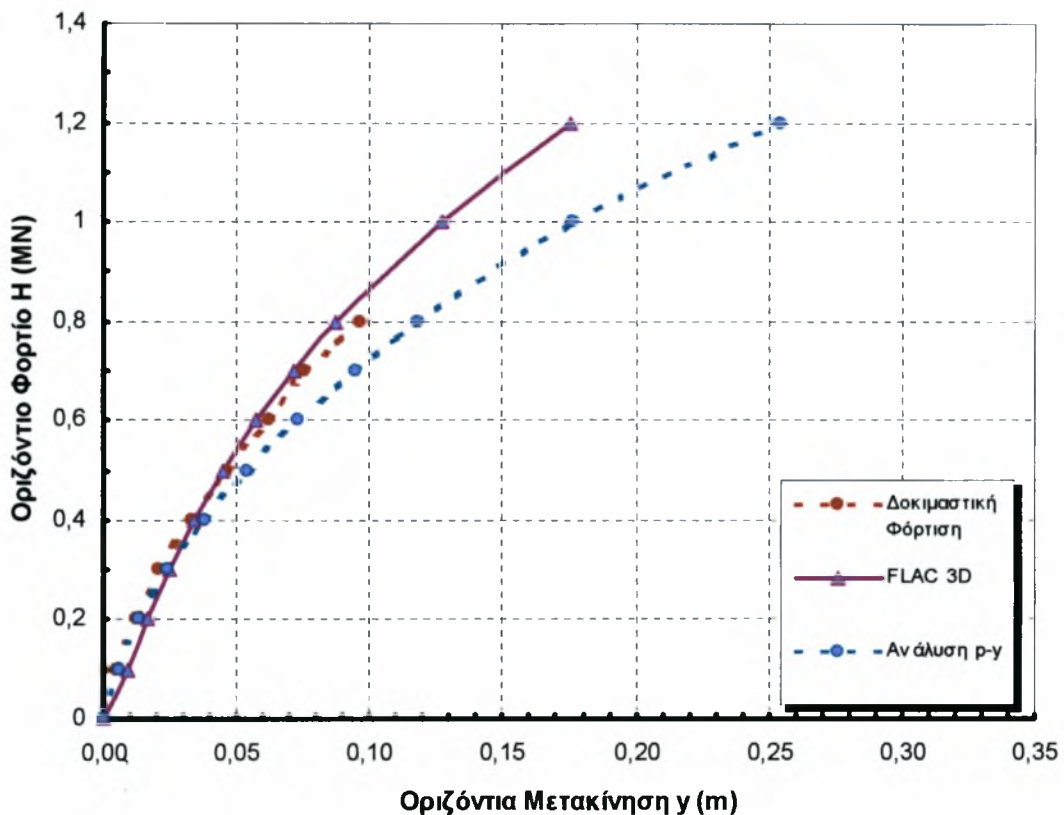


Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Οριζόντιας Μετακίνησης-Βάθους πασσάλου σε μαλακή άργιλο  
Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης μεμονωμένου πασσάλου συναρτήσει του βάθους σε μαλακή άργιλο.



### 4.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της αντίστροφης ανάλυσης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Συγκεντρωτικό διάγραμμα Οριζόντιου Φορτίου – Μετακίνησης, για τις διάφορες μεθόδους ανάλυσης

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η προσομοίωση που έγινε με το FLAC<sup>3D</sup> προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά του πασσάλου όπως αυτή διαφαίνεται από τα αποτελέσματα της δοκιμαστικής φόρτισης. Παρατηρείται μικρή μόνο απόκλιση κατά την οποία το έδαφος παρουσιάζεται ελαφρώς πιο δύσκαμπτο από ότι πραγματικά είναι.

Ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν και από την ανάλυση που έγινε με τη βοήθεια των καμπυλών p-y, με μικρότερη όμως ακρίβεια. Παρατηρείται ότι η ανάλυση με χρήση των προτεινόμενων καμπυλών οριζόντιας αντίδρασης του εδάφους-μετακίνησης, προσομοιάζει ικανοποιητικά την καμπύλη οριζόντιου φορτίου-μετακίνησης που μετρήθηκε κατά τη δοκιμαστική φόρτιση. Κατά συνέπεια, οι

καμπύλες αυτές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των εντατικών και κινηματικών μεγεθών των πασσάλων θεμελίωσης υπό τη δράση οριζόντιου φορτίου.

Σημειώνεται ακόμη ότι τα αποτελέσματα σχεδόν συμπίπτουν για τιμές φορτίου έως το 50% του οριακού οριζόντιου, δηλ. μέχρι τα 0,4 MN, τιμή αισθητά μεγαλύτερη του φορτίου λειτουργίας.

Η γενικότερη συμπεριφορά του πασσάλου της δοκιμής, ο οποίος συμπεριφέρεται ως πάσσαλος ελεύθερης κεφαλής, αντιστοιχεί σε μακρύ πάσσαλο, ήτοι δραστηριοποίηση του πασσάλου σε μεγάλο βάθος, κινητοποίηση του εδάφους σε μεγάλο βάθος, μικρές στροφές και σημαντικές οριζόντιες μετακινήσεις, χωρίς ωστόσο να επιτυγχάνεται εύκολα η αστοχία της διατομής του πασσάλου. Αυτό φαίνεται και από τις καμπύλες απόκρισης εδάφους, που δίνονται στο Παράρτημα Α, όπου δεν υφίσταται παραμόρφωση του πασσάλου για βάθη μεγαλύτερα των 20 m. Στα ίδια συμπεράσματα οδηγείται κανείς και από τα αποτελέσματα της ανάλυσης με το FLAC<sup>3D</sup>.

Η μέγιστη μετακίνηση είναι 17.5 cm, βαθμιαία μειούμενη σε μηδενική τιμή στο βάθος των 17 m. Προφανώς, για μικρότερο εφαρμοζόμενο φορτίο τόσο οι μετακινήσεις όσο και η κινητοποιούμενη περιοχή, μειώνονται ανάλογα. Η κινητοποιούμενη περιοχή είναι μεγαλύτερη στο μπροστινό μέρος του πασσάλου από ότι στο πίσω και αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός της ύπαρξης των διεπιφανειών γύρω από τον πάσσαλο, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα διαχωρισμού ανάμεσα στο έδαφος και τον πάσσαλο για συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης. Στη συγκεκριμένη στρωματογραφία, όπου το αργιλικό έδαφος στην επιφάνεια μπορεί να διαχωρισθεί από τον πάσσαλο λόγω της συνοχής που το χαρακτηρίζει, η χρήση διεπιφανειών θεωρήθηκε απαραίτητη. Η διείσδυση της διεπιφάνειας είναι της τάξης των 10 cm στην κορυφή του πασσάλου και μειώνεται στο 1 cm σε βάθος 8 m. Τα αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν από το FLAC<sup>3D</sup> δίνονται στο Παράρτημα Α στα σχήματα Α.21 και Α.22.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Παραμετρική ανάλυση ομάδας πασσάλων

## 5. Παραμετρική ανάλυση ομάδας πασσάλων

### 5.1 Φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων

Η φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων είναι συνήθως μικρότερη από το επιμέρους άθροισμα των φερουσών ικανοτήτων των πασσάλων που την αποτελούν κυρίως λόγω της αλληλεπίδρασης πασσάλου – εδάφους – πασσάλου που αναπτύσσεται.

Η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας ομάδας πασσάλων μπορεί να αποδοθεί από την εξίσωση 5.1.

$$G_e = \frac{(Q_u)_G}{nQ_u} \quad (5.1)$$

όπου:

$(Q_u)_G$ =η οριακή οριζόντια αντίσταση της ομάδας των πασσάλων

$n$ =ο αριθμός των πασσάλων της ομάδας

$Q_u$ = η οριακή οριζόντια αντίσταση του ενός πασσάλου.

Μια σειρά από ομάδες πασσάλων εξετάστηκαν υπό οριζόντια φόρτιση σε άργιλο από τους Prakash και Saran (1967). Η αποδοτικότητα της ομάδας,  $G_e$ , ως αποτέλεσμα αυτών των πειραμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση 5.1. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1. Από τα αποτελέσματα του πειράματος προκύπτει το συμπέρασμα ότι η αποδοτικότητα για διάταξη 3x3 είναι μικρότερη από αυτή της ομάδας υπό διάταξη 2x2. Ακόμη, αν συγκριθούν οι τιμές του πίνακα με τις αντίστοιχες τιμές για μη συνεκτικά εδάφη, παρατηρείται ότι η αποδοτικότητα είναι μικρότερη στα συνεκτικά εδάφη.

S/D	$G_e$		
	Διάταξη 2x2	Διάταξη 3x3	Συνιστώμενη Τιμή
3,0	0,42	0,39	0,40
3,5	0,50	0,42	0,45
4,0	0,57	0,44	0,50
4,5	0,61	0,47	0,55
5,0	0,63	0,48	0,55
6,0 <sup>b</sup>	-	-	0,65
8,0 <sup>b</sup>	-	-	1,00

όπου:

S=η σχετική απόσταση μεταξύ διαδοχικών πασσάλων

D=η διάμετρος του πασσάλου

Πίνακας 5.1: Αποδοτικότητα ομάδας πασσάλων σε συνεκτικά εδάφη. [6]

Η φέρουσα ικανότητα της ομάδας των πασσάλων μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση 5.1 σε συνδυασμό με τον πίνακα 5.1.

Επειδή για  $S/D > 5$  δεν υπάρχουν τιμές της αποδοτικότητας, προτείνεται για  $S/D = 6$  η τιμή  $G_e = 0.65$ , ενώ για τιμές  $S/B \geq 8$  η αποδοτικότητα  $G_e$  λαμβάνεται ως μονάδα.

Θα πρέπει εντούτοις να σημειωθεί ότι οι συντελεστές απομείωσης εξαρτώνται από σειρά παραγόντων τόσο της γεωμετρίας των πασσάλων όσο και της στρωματογραφίας και διατμητικής αντοχής του υπεδάφους. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται στη συνέχεια παραμετρικές αναλύσεις ομάδας πασσάλων για την τομή σχεδιασμού και για θεώρηση επιφανειακής στρώσης σκληρής αργίλου.

## 5.2 Παραμετρικές επιλύσεις

Έχοντας ως στόχο τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων μιας ομάδας και την εκτίμηση της επίδρασης τόσο του οριακού οριζόντιου φορτίου όσο και της δυσκαμψίας των πασσάλων της ομάδας, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση. Ακόμη και στην περίπτωση που διατίθενται δεδομένα από μία δοκιμαστική φόρτιση υπό οριζόντια δράση, καθώς και αποτελέσματα με καμπύλες  $p$ - $y$ , απαιτούνται περαιτέρω υπολογισμοί για τον καθορισμό της απόκρισης ομάδας πασσάλων. Πρέπει να σημειωθεί ότι, σε πολλές περιπτώσεις όπου η αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους χαρακτηρίζεται από μη-γραμμική συμπεριφορά, η οποία

πασσάλου-εδάφους χαρακτηρίζεται από μη-γραμμική συμπεριφορά, η οποία προκύπτει από την αποκόλληση του εδάφους στο πίσω μέρος του πασσάλου και τη διαρροή του εδάφους μπροστά από τον πάσσαλο, όπου κυριαρχούν υψηλές θλιπτικές τάσεις, η τρισδιάστατη ανάλυση θεωρείται πιο ακριβής για να προβλέψει τη μείωση τόσο του οριακού οριζόντιου φορτίου όσο και της δυσκαμψίας της ομάδας των πασσάλων.

Για την εξέταση του προβλήματος, εκτελέστηκαν αναλύσεις με μεταβολή του επιβαλλόμενου φορτίου και της απόστασης μεταξύ των πασσάλων

Η απόσταση μεταξύ των πασσάλων είναι ίσως ο κυριώτερος παράγοντας που επηρεάζει την αποδοτικότητα της ομάδας. Για την εξασφάλιση συντελεστή απομείωσης της τάξης της μονάδας, η ενδιάμεση απόσταση υπερβαίνει την τιμή 6D. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα μεγάλη και μη πρακτική στις κατασκευές θεμελιώσεων. Συνήθεις τιμές βρίσκονται στο όριο:

$$2.5D < S < 3.5D$$

Η απόσταση  $S=2D$  θεωρείται ως η μικρότερη δυνατή. Στην περίπτωση αυτή, το έδαφος μεταξύ των πασσάλων διαταράσσεται σε μεγάλο βαθμό και προκαλείται αύξηση της πίεσης πόρων, εδαφική ανύψωση και μικρή ικανότητα ανάληψης φορτίου.

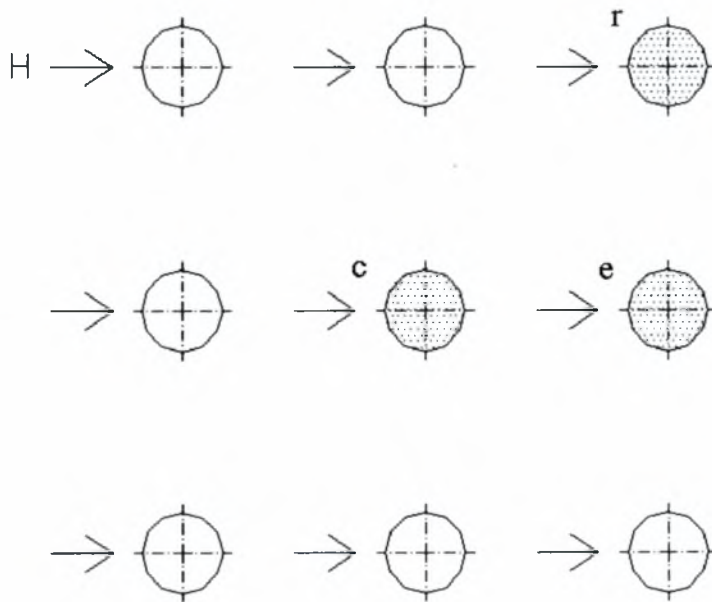
### 5.2.1 Κάνναβος του προβλήματος και διαδικασία φόρτισης

Ο κάνναβος που εξετάστηκε περιλαμβάνει ομάδα πασσάλων σε διάταξη 3x3. Η σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων λήφθηκε ίση με 2D, 3D και 6D. Σε όλες τις αριθμητικές αναλύσεις τα βήματα φόρτισης λήφθηκαν κατά τον ίδιο τρόπο με αυτά του μεμονωμένου πασσάλου. Το μέγεθος του καννάβου διαφοροποιούνταν για τις διάφορες αναλύσεις, εξαρτώμενο από τη σχετική απόσταση των πασσάλων της ομάδας. Πιο αναλυτικά, ο κάνναβος της ομάδας λήφθηκε 36 m στη διεύθυνση x και y όταν η απόσταση μεταξύ των πασσάλων ήταν 2D. Στην περίπτωση της σχετικής απόστασης των 3D οι παραπάνω διαστάσεις πήραν την τιμή των 39 m, ενώ για 6D απόσταση αυξήθηκαν στα 48 m. Οι διαστάσεις αυτές έχουν αρκετά μεγάλες τιμές για την αποφυγή παρενεργειών από τις συνοριακές συνθήκες. Ο αριθμός των στοιχείων και των κόμβων παρέμεινε αμετάβλητος για όλες τις παραμετρικές αναλύσεις

χρησιμοποιήθηκαν μεταξύ του κάθε πασσάλου και του περιβάλλοντος αυτού εδάφους καλύπτοντας τα πρώτα 10 m αυτών των πασσάλων.

Για την ανάλυση επιλέχθηκε μια ομάδα πασσάλων ελεύθερης κεφαλής όπου η ίδια φόρτιση δρα σε κάθε πάσσαλο ταυτόχρονα. Η λύση αυτή επιλέχτηκε για να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ του μεμονωμένου πασσάλου της δοκιμαστικής φόρτισης και των πασσάλων της ομάδας. Η διαδικασία προσομοίωσης είναι όμοια αυτής του μεμονωμένου πασσάλου. Περιλαμβάνει, δηλαδή, το αρχικό βήμα στο οποίο εισάγονται οι αρχικές συνθήκες και ακολουθούν δέκα βήματα φόρτισης. Τα πρώτα οχτώ βήματα ακολουθούν την διαδικασία της δοκιμαστικής φόρτισης. Αρχίζοντας από τα 0.1MN και τελειώνοντας στα 0.8MN με σταθερή επαύξηση των 0.1MN, ενώ ακολουθούν δύο επιπλέον βήματα στα 1.0MN και 1.2MN. Το προαναφερθέν φορτίο εφαρμόζεται στην κορυφή του κάθε πασσάλου πάντα κατά την διεύθυνση  $x$ .

Η διάταξη των πασσάλων και ο τρόπος επιβολής της φόρτισης, φαίνεται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Διάταξη φόρτισης της ομάδας των πασσάλων.

Οι παραμετρικές επιλύσεις με τον κώδικα FLAC<sup>3D</sup> πραγματοποιήθηκαν για το σύνολο της ομάδας, στο παρόν εδάφιο όμως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους που σημειώνονται στο σχήμα 5.1. Η συλλογιστική με την οποία επιλέχθηκαν οι παραπάνω, είναι η εξής:

- Ο κεντρικός πάσσαλος (c) βρίσκεται στη δυσμενέστερη όλων κατάσταση όσον αφορά στις μετακινήσεις, αφού το έδαφος που τον περιβάλλει διαταράσσεται περιμετρικά από τους υπόλοιπους πασσάλους.
- Ο πάνω δεξιά (r), εμφανίζεται ως ο πλέον δύσκαμπτος της ομάδας γιατί το περιβάλλον έδαφος υφίσταται τη μικρότερη δυνατή διατάραξη.
- Ο μεσαίος δεξιά πάσσαλος (e) προσεγγίζει μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ των ακραίων καταστάσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

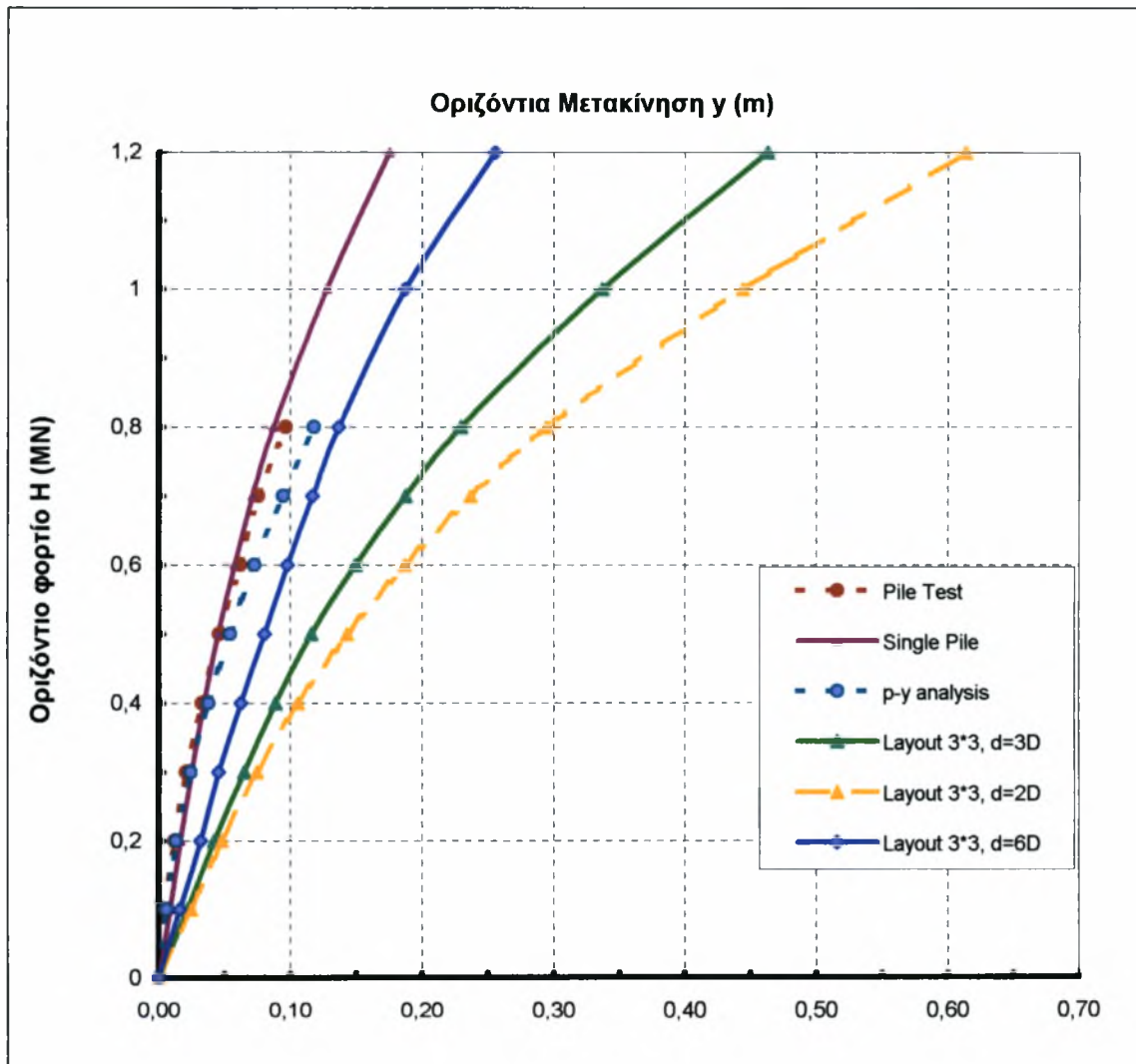
### 5.2.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Έγιναν επιλύσεις για τις δέκα διαφορετικές φορτίσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω για μαλακή άργιλο, καθώς και για τις τρεις διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων. Στο Παράρτημα Β (Σχήματα Β.1-Β.9) παρουσιάζονται αναλυτικά οι καμπύλες οριζόντιας μετακίνησης συναρτήσεως του βάθους για τους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους (c, e, r).

Στα σχήματα Β.10, Β.11, Β.12 παρουσιάζεται η μεταβολή της μετακίνησης κατά τη διεύθυνση φόρτισης στο επίπεδο  $y=0$  για σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων της ομάδας 2D, 3D και 6D αντίστοιχα, στην περίπτωση της μαλακής άργιλου. Οι μετακινήσεις αυτές αντιστοιχούν σε επιβολή φορτίου 0.8 MN στην κεφαλή κάθε πασσάλου. Η αλληλεπίδραση μεταξύ πασσάλου-εδάφους φαίνεται ποιοτικά από την ενοποίηση των περιοχών των μετακινήσεων. Όταν η απόσταση είναι πολύ μικρή, σχήμα Β.10, παρατηρείται κοινή μετακίνηση στην επιφάνεια γύρω από τους πασσάλους. Η ενοποίηση του περιγράμματος των μετακινήσεων δείχνει το βαθμό αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων της ομάδας, ο οποίος επηρεάζεται όχι μόνο από την απόσταση αλλά και από τη φόρτιση. Από τα παραπάνω σχήματα συμπεραίνεται πόσο σημαντική είναι η διαφοροποίηση της απόστασης μεταξύ των πασσάλων.

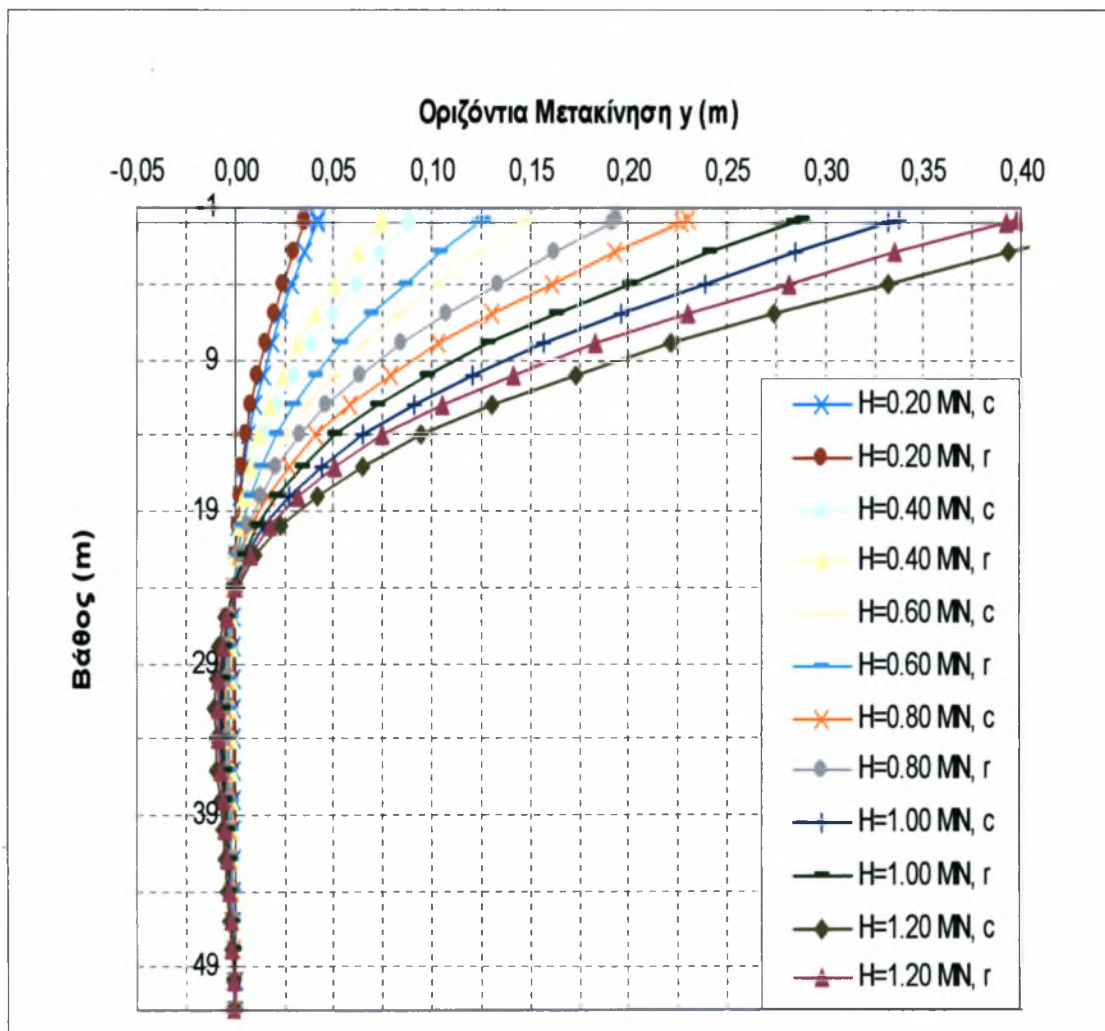


Στο σχήμα 5.2 δίνεται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης στην κεφαλή του κεντρικού πασσάλου για τις διάφορες επιλύσεις που έγιναν και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά του μεμονωμένου πασσάλου. Περισσότερο δύσκαμπτη είναι η περίπτωση όπου η απόσταση μεταξύ των πασσάλων είναι 6D.



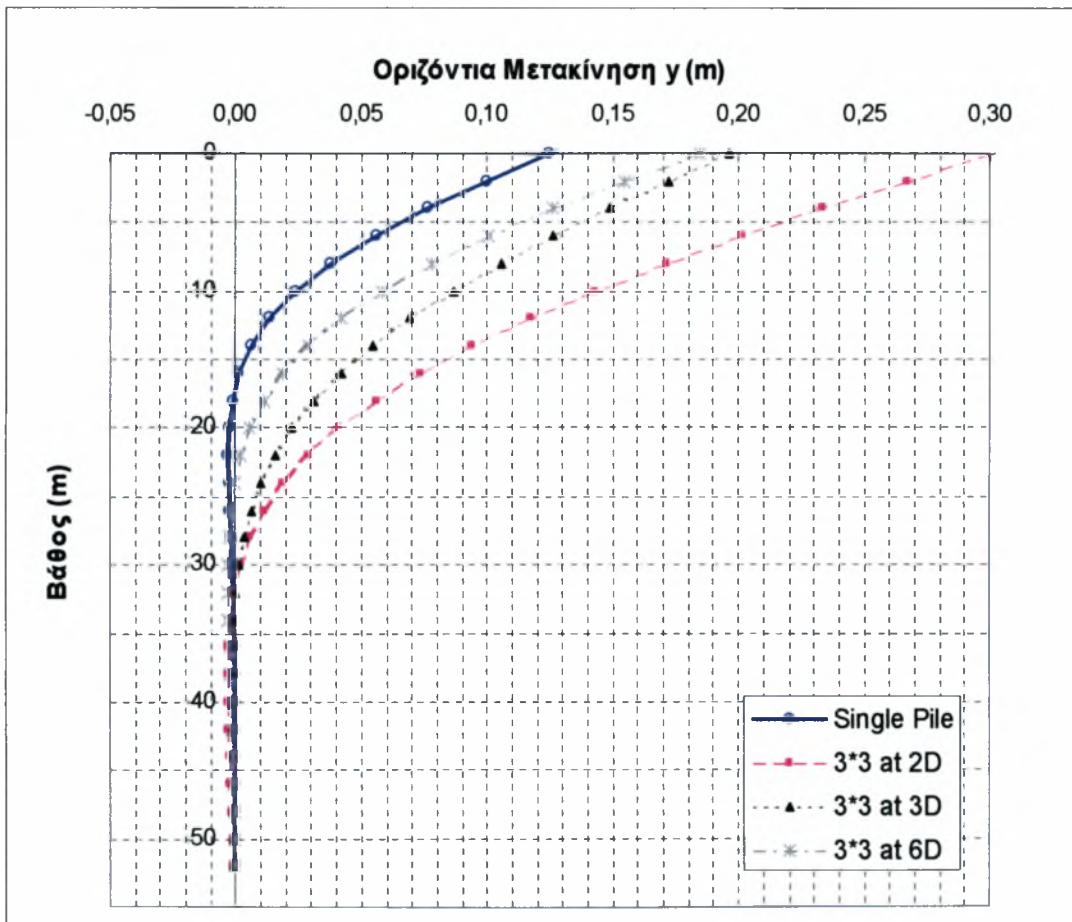
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης για τις διάφορες μεθόδους ανάλυσης.

Η σύγκριση των διαγραμμάτων φορτίου-μετακίνησης για τον κεντρικό πάσσαλο *c* και τον ακριανό *r*, όπως φαίνεται από το σχήμα 5.3, μαρτυρεί διαφορά μετακίνησης στην κορυφή του πασσάλου της τάξεως του 20% για τη μέγιστη οριζόντια φόρτιση, όταν η σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων είναι 3D. Η διαφορά αυτή είναι μικρότερη για τους υπόλοιπους πασσάλους της ομάδας, οδηγώντας σε μια διαφορά της τάξης του 10%.



Σχήμα 5.3: Συγκεντρωτικό διάγραμμα για τους πασσάλους *c*, *r*.

Στην ομάδα των πασσάλων παρατηρείται κινητοποίηση σε μεγαλύτερο βάθος εν συγκρίσει με αυτό του μεμονωμένου πασσάλου. Η κινητοποίηση αυτή φτάνει μέχρι τα 30 m και είναι τόσο πιο έντονη όσο η σχετική απόσταση των πασσάλων είναι μικρότερη. Το διάγραμμα αυτό μαρτυρεί για ακόμη μία φορά ότι οι πάσσαλοι της ομάδας με απόσταση 6D πλησιάζουν πολύ τη συμπεριφορά του μεμονωμένου πασσάλου.

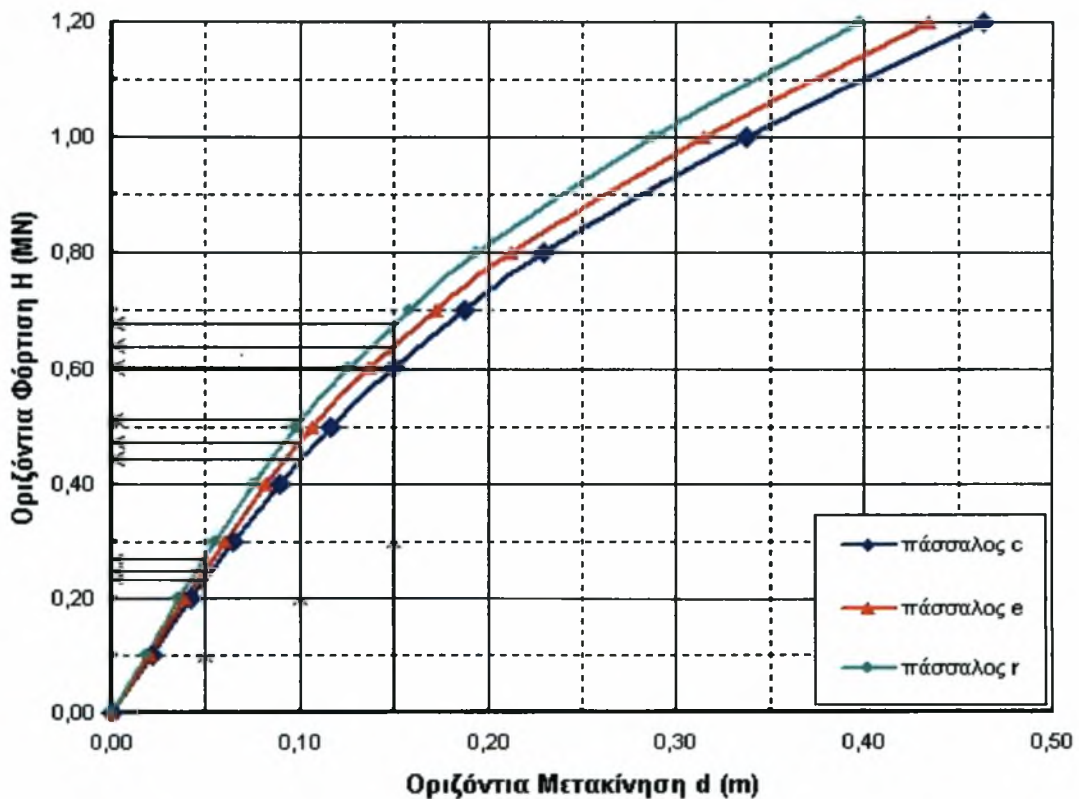


Σχήμα 5.4: Διάγραμμα Οριζόντιας Μετακίνησης συναρτήσει του βάθους για πάσσαλο της ομάδας υπό οριζόντια φόρτιση  $H=1000$  kN.

### 5.3 Αποτίμηση Συντελεστών Απομείωσης

Όπως έχει προαναφερθεί, για σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων μικρότερη του 3D η μείωση τόσο στη φέρουσα ικανότητα υπό οριζόντια φόρτιση όσο και στη δυσκαμψία είναι σημαντική και εξαρτάται από την τιμή του φορτίου και της μετακίνησης. Ο καθορισμός της φέρουσας ικανότητας και ως εκ τούτου της δυσκαμψίας μιας θεμελίωσης, είναι εξαιρετικής σημασίας κυρίως για κατασκευές μεγάλου μεγέθους.

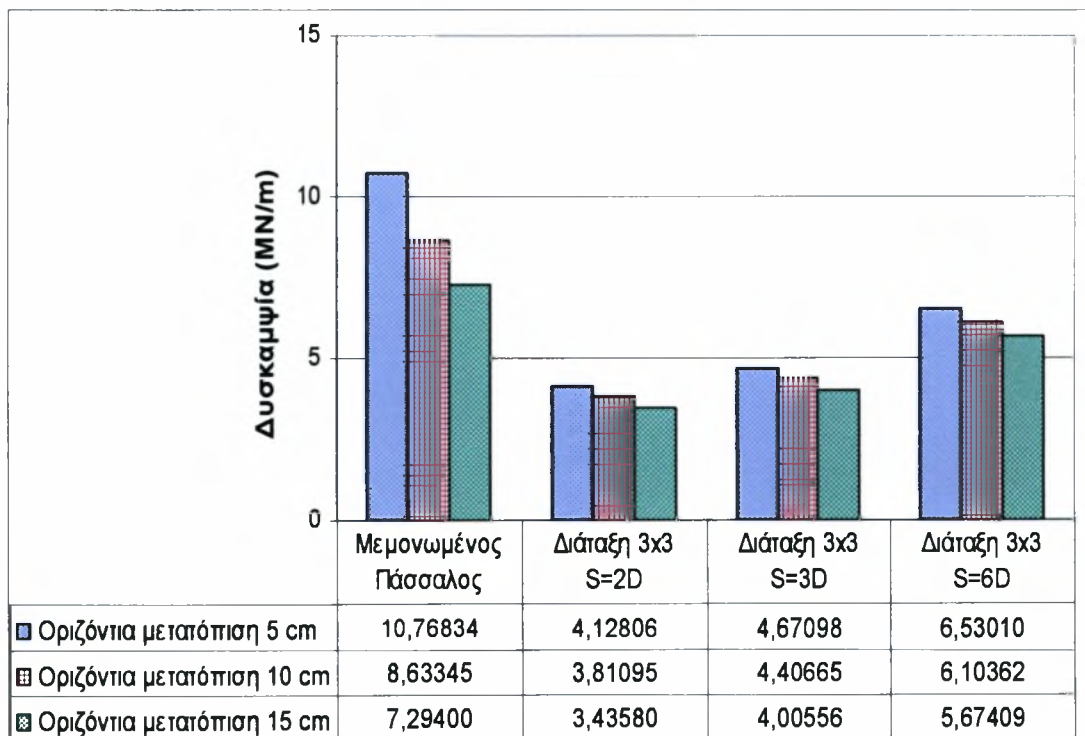
Έγινε υπολογισμός της δυσκαμψίας της ομάδας των πασσάλων για οριζόντια μετακίνηση 5, 10 και 15 cm. Για το σκοπό αυτό βρέθηκε το φορτίο που αντιστοιχεί στις παραπάνω μετακινήσεις για κάθε ένα από τους εννέα πασσάλους της ομάδας. Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικά το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης για τους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους c, e και r όταν η μεταξύ τους απόσταση είναι 3D.



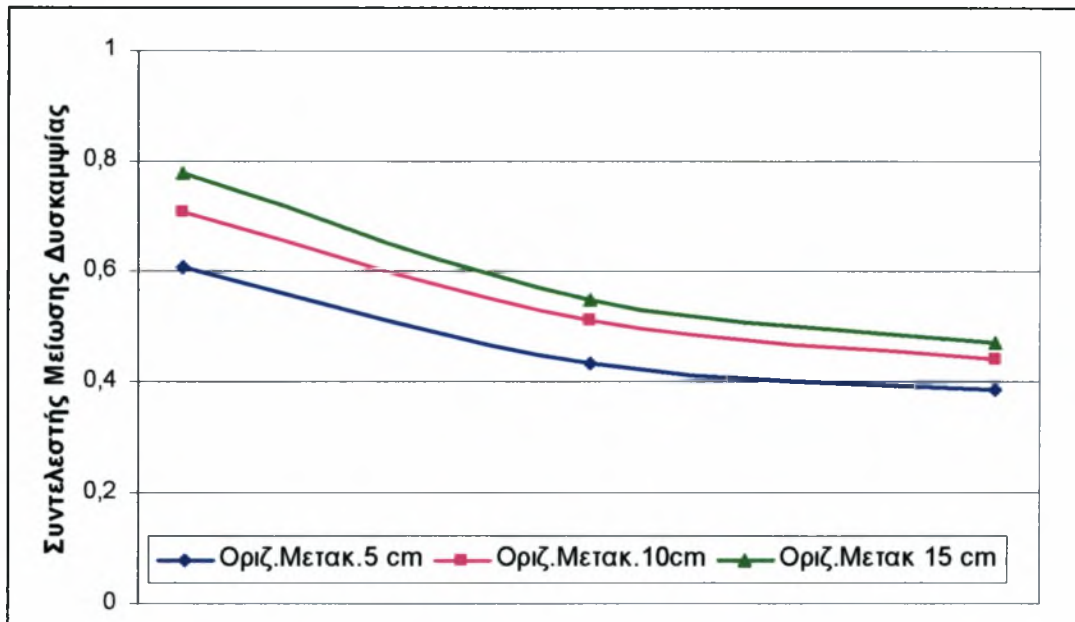
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης για S=3D.

Στο ιστόγραμμα του σχήματος 5.6 παρουσιάζεται η διαφοροποίηση της τιμής της δυσκαμψίας του μεμονωμένου πασσάλου και της ομάδας για τις μετακινήσεις των 5, 10 και 15 cm στην κεφαλή του πασσάλου. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της ομάδας κάθε πάσσαλος αυτής φορτίστηκε με το ίδιο φορτίο, όπως και στην ανάλυση του μεμονωμένου πασσάλου. Στο σχήμα 5.7 φαίνεται η μείωση του συντελεστή δυσκαμψίας ανάλογα με την απόσταση μεταξύ των πασσάλων. Παρατηρεί κανείς ότι η μείωση αυτή, όπως καθορίζεται από τη σχέση 5.2, μπορεί να φτάσει το 40%.

$$R_G = \frac{\text{Δυσκαμψία της ομάδας των πασσάλων}}{\text{Άθροισμα δυσκαμψιών του κάθε πασσάλου}} \quad (5.2)$$



Σχήμα 5.6: Παρουσίαση της μεταβολής της δυσκαμψίας μεμονωμένου πασσάλου και ομάδας πασσάλων σε διάφορες διατάξεις για μετακίνηση 5, 10 και 15 cm στην κεφαλή του πασσάλου.



**Διάταξη 3x3**  
**S=6D**

**Διάταξη 3x3**  
**S=3D**

**Διάταξη 3x3**  
**S=2D**

Σχήμα 5.7: Μεταβολή του μειωτικού συντελεστή δυσκαμψίας για μετακινήσεις 5, 10 και 15 cm στην κεφαλή του πασσάλου.

Συγκρίνοντας τις τιμές του μειωτικού συντελεστή δυσκαμψίας  $R_G$  με τις συνιστώμενες κατά Prakash και Saran παρατηρείται ότι για μικρές σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων και για μικρές μετακινήσεις οι τιμές αυτές σχεδόν συμπίπτουν. Για μεγαλύτερες μετακινήσεις ο συντελεστής  $R_G$  αυξάνει και κατά συνέπεια αυξάνει και η απόκλιση από τις συνιστώμενες τιμές κατά Prakash και Saran. Γενικά ο συντελεστής  $G_0$  εμφανίζεται ως πιο συντηρητικός συγκρινόμενος με τις τιμές που προέκυψαν από τις αναλύσεις του FLAC.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Παραμετρική ανάλυση ομάδας πασσάλων σε σκληρές αργίλους

## 6. Παραμετρική ανάλυση ομάδας πασσάλων σε σκληρές αργίλους

### 6.1 Γενικά

Για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς ομάδας πασσάλων σε αργιλικά εδάφη, επιχειρήται στο παρών κεφάλαιο η διερεύνηση του ίδιου προβλήματος σε σκληρή άργιλο. Η απόκριση ομάδας για οποιαδήποτε ενδιάμεση διατμητική αντοχή αργιλικού εδαφικού υλικού, θα μπορούσε να προσεγγισθεί με χρήση ενδιάμεσων τιμών του Μειωτικού Συντελεστή Δυσκαμψίας των δύο ακραίων επιλύσεων.

### 6.2 Παραμετρικές επιλύσεις

Οι επιλύσεις και στην περίπτωση αυτή, έγιναν τόσο για μεμονωμένο πάσσαλο όσο και για ομάδα πασσάλων. Η εξέταση του προβλήματος έγινε με όμοιο τρόπο όπως στην περίπτωση της μαλακής αργίλου, δηλαδή η διάταξη μεταξύ των πασσάλων της ομάδας παρέμεινε 3x3 και οι τιμές τόσο για το επιβαλλόμενο φορτίο όσο και για τη σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων δεν μεταβλήθηκαν. Η συνοχή της σκληρής αργίλου θεωρήθηκε ότι μεταβάλλεται με το βάθος από 100 έως 150 kPa.

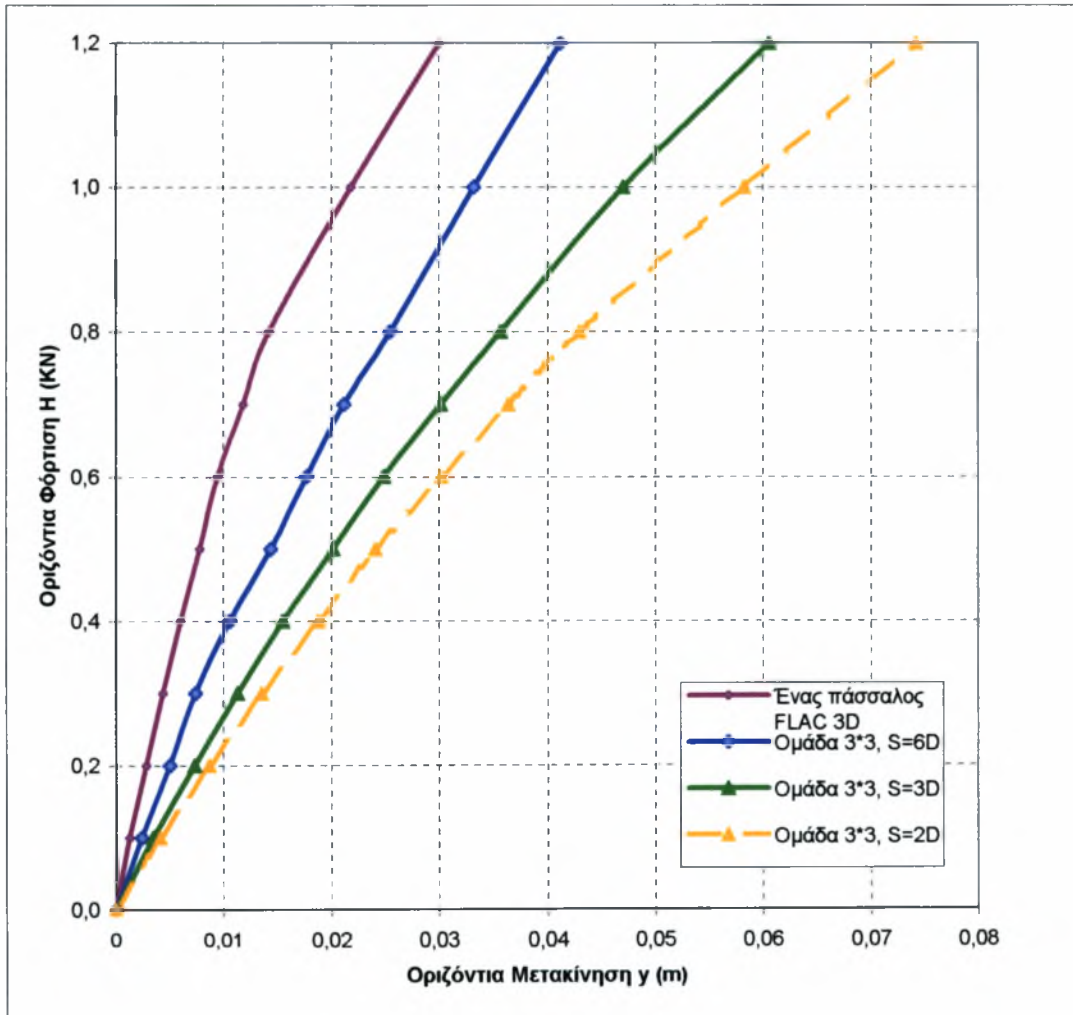
#### 6.2.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Έγιναν επιλύσεις για τις δέκα διαφορετικές φορτίσεις για σκληρή άργιλο, καθώς και για τις τρεις διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων. Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται αναλυτικά οι καμπύλες οριζόντιας μετακίνησης συναρτήσει του βάθους για το μεμονωμένο πάσσαλο και για τους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους (c, e, r).

Στα σχήματα Γ.13, Γ.14, Γ.15 παρουσιάζεται ο τρόπος μεταβολής της μετακίνησης κατά τη διεύθυνση φόρτισης στο επίπεδο  $y=0$  για σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων της ομάδας 2D, 3D και 6D αντίστοιχα, στην περίπτωση της σκληρής αργίλου. Οι μετακινήσεις αυτές αντιστοιχούν σε επιβολή φορτίου 0.8 MN στην κεφαλή κάθε πασσάλου. Η αλληλεπίδραση μεταξύ πασσάλου-εδάφους φαίνεται ποιοτικά από την ενοποίηση των περιοχών των μετακινήσεων.

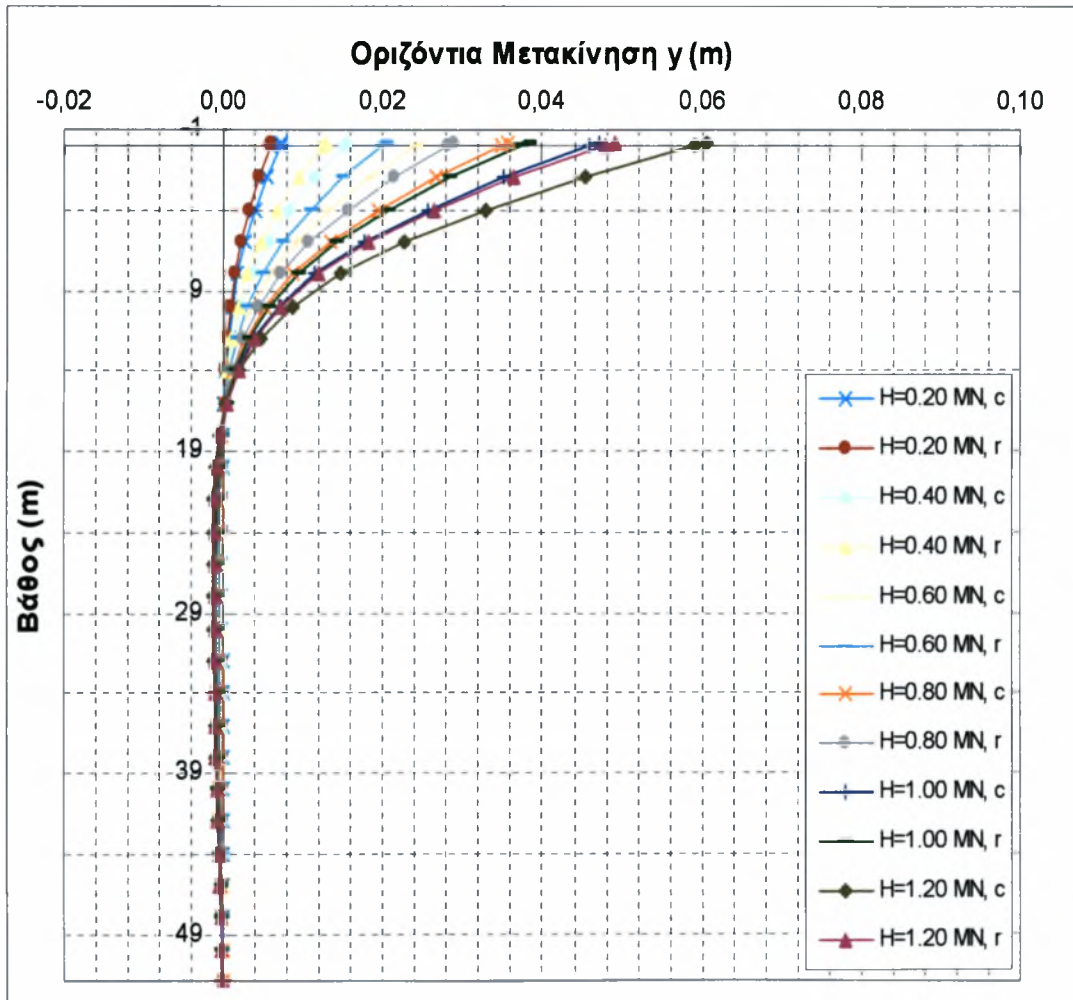


Στη σκληρή άργιλο έχουμε παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της μαλακής αργίλου όσον αφορά στην απόκριση των πασσάλων συναρτήσει της μεταξύ των απόστασης, οι μετακινήσεις ωστόσο είναι πολύ μικρότερες μέχρι και 85%. Επίσης, ομοίως με την περίπτωση της μαλακής αργίλου, το σύστημα είναι περισσότερο δύσκαμπτο για σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 6D, όπως προκύπτει απο το σχήμα 6.1.



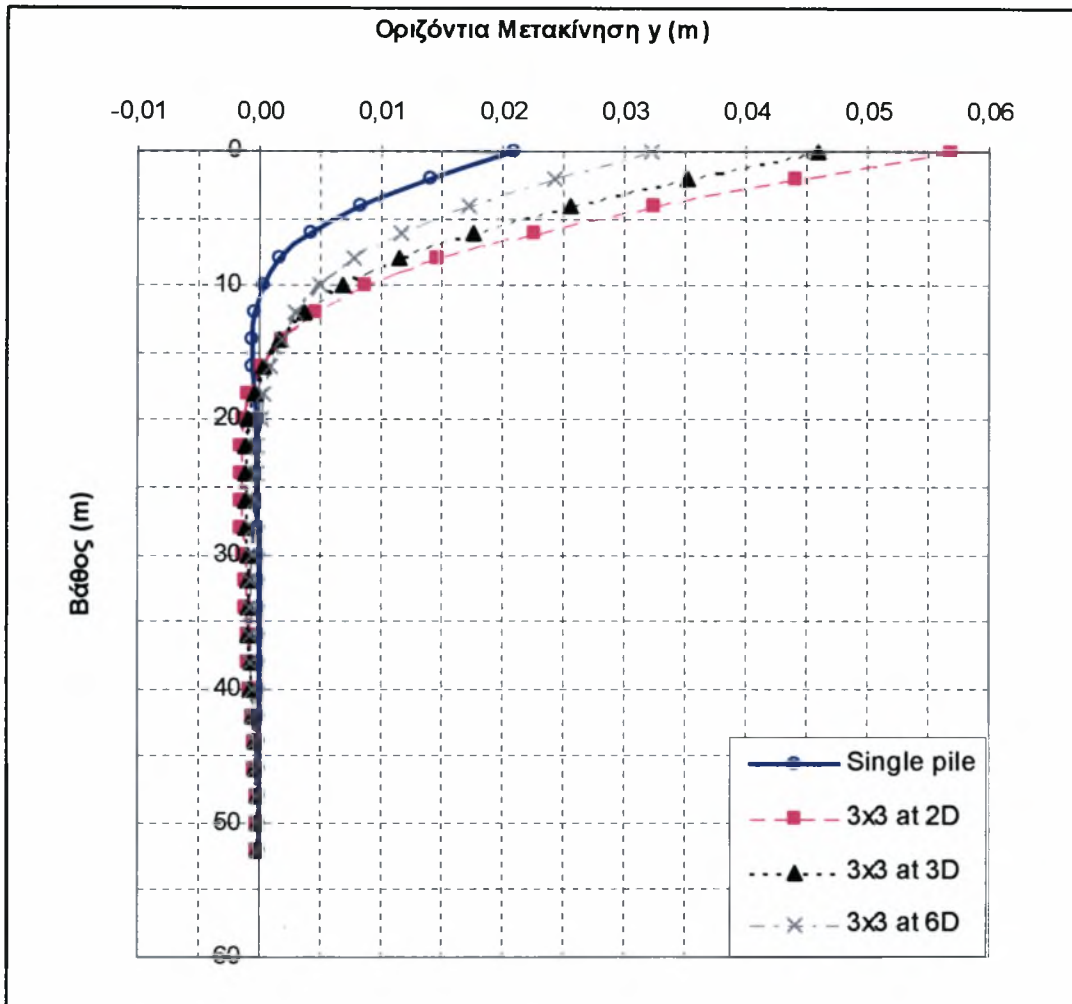
Σχήμα 6.1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα Οριζόντιου Φορτίου – Μετακίνησης, για σιφρή άργιλο.

Η σύγκριση των διαγραμμάτων φορτίου-μετακίνησης για τον κεντρικό πάσσαλο  $c$  και τον ακριανό  $r$ , όπως φαίνεται από το σχήμα 6.2, μαρτυρεί μία διαφορά μετακίνησης στην κορυφή του πασσάλου της τάξεως του 10% για τη μέγιστη οριζόντια φόρτιση, όταν η σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων είναι 3D. Η διαφορά αυτή είναι μικρότερη για τους υπόλοιπους πασσάλους της ομάδας και ουσιαστικά δεν υπάρχει διαφοροποίηση ανάλογα με τη θέση του κάθε πασσάλου στην ομάδα.



Σχήμα 6.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα για τους πασσάλους  $c, r$ .

Στην ομάδα των πασσάλων παρατηρείται κινητοποίηση σε μεγαλύτερο βάθος εν συγκρίσει με αυτό του μεμονωμένου πασσάλου. Η κινητοποίηση αυτή φτάνει μέχρι τα 17 m και είναι τόσο πιο έντονη όσο η σχετική απόσταση των πασσάλων είναι μικρότερη. Το διάγραμμα αυτό μαρτυρεί για ακόμη μία φορά ότι οι πάσσαλοι της ομάδας με απόσταση 6D πλησιάζουν πολύ τη συμπεριφορά του μεμονωμένου πασσάλου.

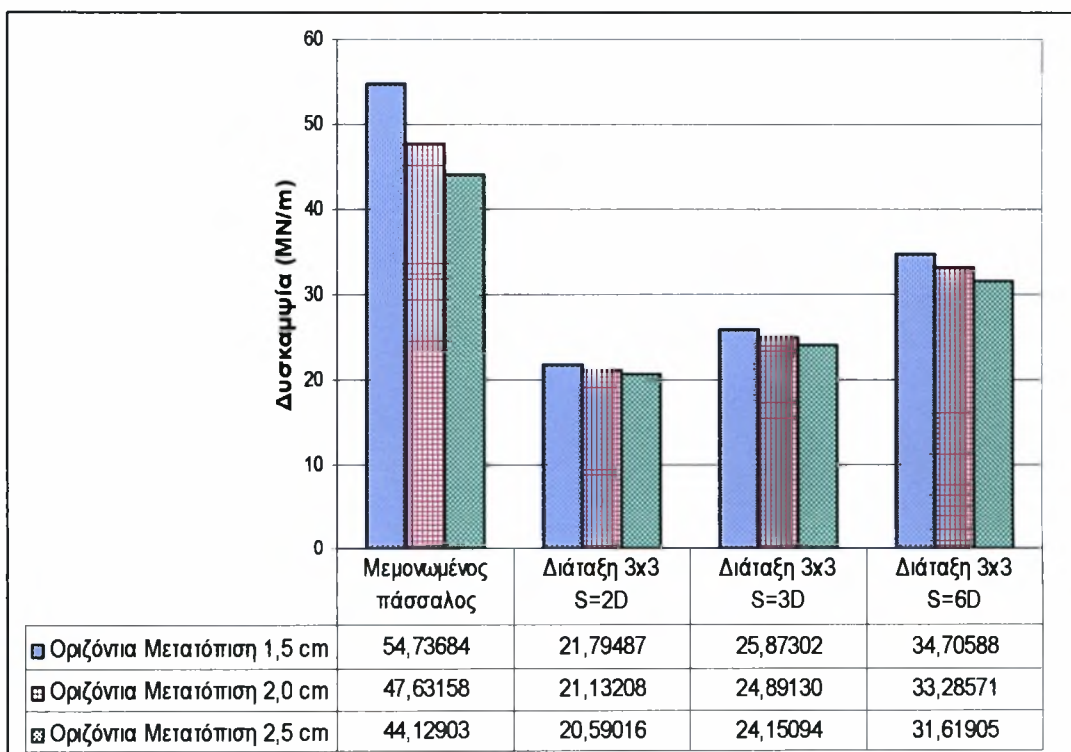


Σχήμα 6.3: Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης συναρτήσει του βάθους για πάσσαλο της ομάδας υπό οριζόντια δράση  $P=1000\text{kN}$ .

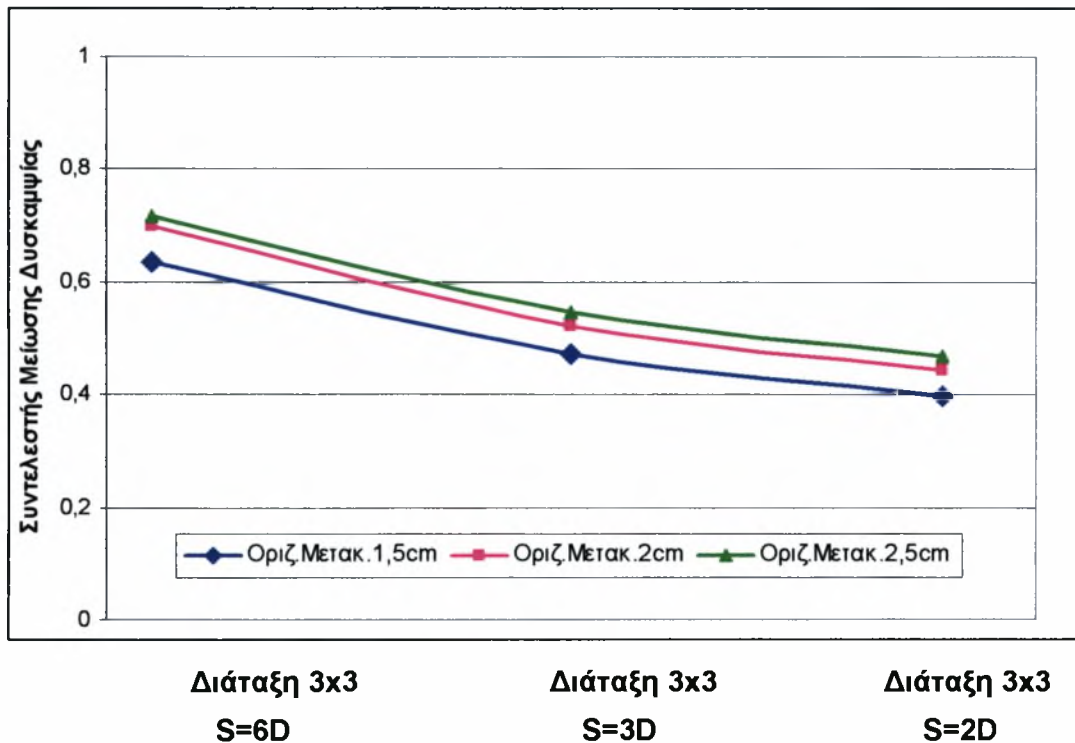
### 6.3 Αποτίμηση Συντελεστών Απομείωσης

Έγινε υπολογισμός της δυσκαμψίας της ομάδας των πασσάλων, όπως και για τη μαλακή άργιλο. Στην περίπτωση όμως αυτή ο υπολογισμός της δυσκαμψίας έγινε για οριζόντια μετακίνηση 1.5, 2, 2.5 cm καθώς οι προκύπτουσες μετακινήσεις είναι πολύ μικρές συγκρινόμενες με αυτές της μαλακής αργίλου.

Στο ιστόγραμμα του σχήματος 6.4 παρουσιάζεται η διαφοροποίηση της τιμής της δυσκαμψίας του μεμονωμένου πασσάλου και της ομάδας για τις μετακινήσεις των 1.5, 2 και 2.5 cm στην κεφαλή του πασσάλου. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της ομάδας κάθε πάσσαλος αυτής φορτίστηκε με το ίδιο φορτίο, όπως και στην ανάλυση του μεμονωμένου πασσάλου. Στο σχήμα 6.5 φαίνεται η μείωση του συντελεστή δυσκαμψίας ανάλογα με την απόσταση μεταξύ των πασσάλων. Παρατηρεί κανείς ότι η μείωση αυτή, μπορεί να φτάσει το 40%.



Σχήμα 6.4: Παρουσίαση της μεταβολής της δυσκαμψίας μεμονωμένου πασσάλου και ομάδας πασσάλων σε διάφορες διατάξεις για μετακίνηση 1.5, 2.0 και 2.5 cm στην κεφαλή του πασσάλου.



Σχήμα 6.5: Μεταβολή του μειωτικού συντελεστή δυσκαμψίας για μετακινήσεις 1.5, 2.0 και 2.5 cm στην κεφαλή του πασσάλου.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μειωτικού συντελεστή δυσκαμψίας για μαλακή και σκληρή άργιλο παρατηρείται ότι οι τιμές αυτών είναι ίδιες για τις διάφορες αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων. Ομοίως και στην περίπτωση αυτή η μείωση του συντελεστή δυσκαμψίας μπορεί να φτάσει το 60%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

## 7. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό του βαθμού της αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλων για ποικίλες αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων ομάδας υπό καθεστώς οριζόντιας φόρτισης. Ειδικότερο στόχο αποτέλεσε ο προσδιορισμός του βαθμού απομείωσης τόσο της φέρουσας ικανότητας όσο και του συντελεστή δυσκαμψίας, για επίπεδο φόρτισης όσο το φορτίο σχεδιασμού ή και μεγαλύτερο. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε αντίστροφη ανάλυση μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης της δοκιμαστικής φόρτισης, με σκοπό την επαλήθευση των εδαφικών παραμέτρων. Έχοντας καθορίσει αυτές τις παραμέτρους, μελετήθηκε η συμπεριφορά ομάδας πασσάλων και η επίδραση της διάταξης αυτών τόσο στη δυσκαμψία όσο και στην οριακή φέρουσα ικανότητα οριζόντιας φόρτισης. Σημειώνεται ότι οι πάσσαλοι της ομάδας είναι ελεύθερης κεφαλής και σε κάθε πάσσαλο δρα το ίδιο οριζόντιο φορτίο ταυτόχρονα. Η λύση αυτή επιλέχθηκε ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των πασσάλων της ομάδας με αυτά του μεμονωμένου της δοκιμαστικής φόρτισης.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της αντίστροφης ανάλυσης για το *μεμονωμένο πάσσαλο*, οδήγησε στη διατύπωση των ακόλουθων συμπερασμάτων:

- Η προσομοίωση που έγινε με το FLAC<sup>3D</sup> προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά του πασσάλου όπως αυτή διαφαίνεται από τα αποτελέσματα της δοκιμαστικής φόρτισης. Παρατηρείται μικρή μόνο απόκλιση κατά την οποία το έδαφος παρουσιάζεται ελαφρώς πιο δύσκαμπτο από ότι πραγματικά είναι.
- Ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν και από την ανάλυση που έγινε με τη βοήθεια των καμπυλών  $p$ - $y$ , όπου ο πάσσαλος εμφανίζεται ελαφρώς πιο εύκαμπτος. Κατά συνέπεια, οι καμπύλες αυτές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των εντατικών και κινηματικών μεγεθών των πασσάλων θεμελίωσης υπό τη δράση οριζόντιου φορτίου.
- Τα αποτελέσματα της αντίστροφης ανάλυσης πρακτικά συμπίπτουν με αυτά της δοκιμαστικής φόρτισης για τιμές φορτίου έως το 50% του οριακού οριζόντιου, δηλ. μέχρι τα 0,4 MN, τιμή αισθητά μεγαλύτερη του φορτίου λειτουργίας.
- Η μέγιστη μετακίνηση είναι 17.5 cm, βαθμιαία μειούμενη σε μηδενική τιμή στο βάθος των 17 m. Προφανώς, για μικρότερο εφαρμοζόμενο φορτίο τόσο οι μετακινήσεις όσο και η κινητοποιούμενη περιοχή, μειώνονται ανάλογα. Η



κινητοποιούμενη περιοχή είναι μεγαλύτερη στο μπροστινό μέρος του πασσάλου από ότι στο πίσω και αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός της ύπαρξης των διεπιφανειών γύρω από τον πάσσαλο, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα διαχωρισμού ανάμεσα στο έδαφος και τον πάσσαλο για συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης. Το κενό διαχωρισμού είναι της τάξης των 10 cm στην κορυφή του πασσάλου και μειώνεται στο 1 cm σε βάθος 8 m.

Η εξέταση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής ανάλυσης, οδήγησε στη διατύπωση των ακόλουθων συμπερασμάτων για ομάδα πασσάλων σε μαλακή άργιλο:

- Περισσότερο δύσκαμπτη είναι η περίπτωση όπου η απόσταση μεταξύ των πασσάλων είναι 6D, όπως προκύπτει από τα διαγράμματα φορτίου-μετακίνησης στην κεφαλή του πασσάλου.
- Η σύγκριση των διαγραμμάτων φορτίου-μετακίνησης για τον κεντρικό πάσσαλο c και τον ακραίο r, μαρτυρεί διαφορά μετακίνησης στην κορυφή αυτού της τάξεως του 20% για τη μέγιστη οριζόντια φόρτιση, όταν η σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων είναι 3D. Η διαφορά αυτή είναι μικρότερη για τους υπόλοιπους πασσάλους της ομάδας, οδηγώντας σε διαφορά της τάξης του 10%.
- Στην ομάδα των πασσάλων παρατηρείται κινητοποίηση σε μεγαλύτερο βάθος εν συγκρίσει με αυτό του μεμονωμένου πασσάλου. Η κινητοποίηση αυτή φτάνει μέχρι τα 30 m και είναι τόσο πιο έντονη όσο η σχετική απόσταση των πασσάλων είναι μικρότερη. Το γεγονός αυτό μαρτυρεί για ακόμη μία φορά ότι οι πάσσαλοι της ομάδας με απόσταση 6D προσεγγίζουν πολύ τη συμπεριφορά του μεμονωμένου πασσάλου.
- Η απόκριση μιας ομάδας πασσάλων διαφέρει από αυτή του μεμονωμένου πασσάλου, εξαρτάται δε από τον τρόπο διάταξης. Βρέθηκε ότι η σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων επιδρά σημαντικά στη μείωση του συντελεστή δυσκαμψίας και της ικανότητας της κατασκευής να φέρει τα οριζόντια φορτία, για προκαθορισμένα επιτρεπτά όρια μετακίνησης. Για μία ομάδα με απόσταση μικρότερη του 3D μεταξύ των πασσάλων αυτής, η μείωση του συντελεστή δυσκαμψίας και της φέρουσας ικανότητας μπορεί να φτάσει το 60%.

Από την παραμετρική ανάλυση που έγινε για ομάδα πασσάλων σε σκληρή άργιλο, προέκυψαν τα ακόλουθα:



- Στη σκληρή άργιλο έχουμε παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της μαλακής άργιλου όσον αφορά στην απόκριση των πασσάλων συναρτήσει της μεταξύ των απόστασης, οι μετακινήσεις όπως άλλωστε αναμένεται είναι πολύ μικρότερες μέχρι και 85%. Επιπρόσθετα, κατ' αντιστοιχίαν της περίπτωσης της μαλακής άργιλου, το σύστημα είναι περισσότερο δύσκαμπτο για σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 6D.
- Η σύγκριση των διαγραμμάτων φορτίου-μετακίνησης για τον κεντρικό πάσσαλο  $c$  και τον ακριανό  $r$ , μαρτυρεί μία διαφορά μετακίνησης στην κορυφή του πασσάλου της τάξεως του 10% για τη μέγιστη οριζόντια φόρτιση, όταν η σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων είναι 3D. Η διαφορά αυτή είναι μικρότερη για τους υπόλοιπους πασσάλους της ομάδας και ουσιαστικά δεν υπάρχει διαφοροποίηση ανάλογα με τη θέση του κάθε πασσάλου στην ομάδα.
- Στην ομάδα των πασσάλων παρατηρείται κινητοποίηση σε μεγαλύτερο βάθος εν συγκρίσει με αυτό του μεμονωμένου πασσάλου. Η κινητοποίηση αυτή φτάνει μέχρι τα 17 m και είναι τόσο πιο έντονη όσο η σχετική απόσταση των πασσάλων είναι μικρότερη. Το διάγραμμα αυτό καταδεικνύει επίσης ότι οι πάσσαλοι της ομάδας με απόσταση 6D πλησιάζουν πολύ τη συμπεριφορά του μεμονωμένου πασσάλου.
- Τα αποτελέσματα των επιλύσεων που έγιναν για τη σκληρή άργιλο οδήγησαν περίπου στις ίδιες τιμές του μειωτικού συντελεστή δυσκαμψίας, συγκριτικά με αυτές της μαλακής άργιλου, ανεξάρτητα από το πόσο δύσκαμπτο είναι το σύστημα.

Η απόκριση της ομάδας των πασσάλων επηρεάζεται σημαντικά από τα επιτρεπτά όρια μετακίνησης. Συνεπώς, για τη μη-γραμμική ανάλυση μιας κατασκευής απαιτείται η ύπαρξη καμπυλών φορτίου-μετακίνησης που να προσομοιώνουν την απόκριση της θεμελίωσης. Η τρισδιάστατη ανάλυση είναι ικανή να καθορίσει τις καμπύλες αυτές με κατάλληλη ακρίβεια, όταν είναι γνωστοί οι συντελεστές διατμητικής αντοχής και παραμόρφωσης του εδάφους μέσω της καμπύλης φορτίου-μετακίνησης για ένα πάσσαλο. Τα στοιχεία αυτά λαμβάνονται από τη δοκιμαστική φόρτιση ή ακόμη από την ανάλυση μέσω των κατάλληλων καμπυλών  $p$ - $y$ . Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία είναι εξαιρετικά χρονοβόρα και επίπονη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

A

**Απεικόνιση Αποτελεσμάτων Αριθμητικής Ανάλυσης  
Μεμονωμένου Πασσάλου**

## **A.1 Μεθοδολογία σχεδιασμού των καμπυλών p-y για αργιλικά και αμμώδη εδαφικά υλικά**

Σύμφωνα με τη γεωτεχνική τομή σχεδιασμού, το έδαφος θεμελίωσης των βάθρων συνίσταται από αργιλικά και αμμώδη υλικά. Στα παρακάτω γίνεται περιγραφή βήμα προς βήμα της μεθοδολογίας υπολογισμού των καμπυλών p-y.

### **A.1.1 Μαλακή άργιλος**

#### **Στατική φόρτιση**

Η διαδικασία υπολογισμού των χρησιμοποιούμενων μεγεθών στις καμπύλες p-y, σύμφωνα με το κριτήριο του Matlock για μαλακές αργίλους και βραχυχρόνια στατική φόρτιση, περιγράφεται βήμα προς βήμα παρακάτω:

1. Εκτιμάται, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, η διατμητική αντοχή και το ειδικό βάρος του εδάφους συναρτήσει του βάθους. Επίσης, υπολογίζεται η τιμή του  $e_{50}$ , δηλαδή της παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στο μισό της μέγιστης διατμητικής αντοχής. Εάν δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τον προσδιορισμό του  $e_{50}$ , τότε λαμβάνονται οι τιμές του παρακάτω πίνακα:

<b>Κατηγορία Αργίλου</b>	<b><math>e_{50}</math></b>	<b><math>E_c</math></b>
Μαλακή	0,020	50
Μέτρια	0,010	100
Σπφρή	0,005	200

2. Υπολογίζεται η οριακή αντοχή του εδάφους ανά μονάδα μήκους του άξονα του πασσάλου, χρησιμοποιώντας τη μικρότερη από τις παρακάτω δύο τιμές:

$$P_u = \left( 3 + \frac{\gamma}{c} x + \frac{0.5}{b} x \right) cD \quad (\text{A.1})$$

$$P_u = 9cD \quad (\text{A.2})$$

Όπου:

$\gamma$  = το μέσο ειδικό βάρος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το βάθος που σχεδιάζεται η καμπύλη  $p$ - $y$   
 $x$  = το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το σημείο που σχεδιάζεται η καμπύλη  $p$ - $y$   
 $c$  = η διατμητική αντοχή στο βάθος  $x$   
 $D$  = το πλάτος του πασσάλου

3. Υπολογίζεται η μετακίνηση  $y_{50}$  στο ήμισυ της οριακής αντίστασης του εδάφους, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$y_{50} = 2,5 e_{50}D \quad (\text{A.3})$$

4. Τα σημεία της καμπύλης  $p$ - $y$  υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{p}{p_u} = 0,5 \left( \frac{y}{y_{50}} \right)^{1/3} \quad (\text{A.4})$$

### Κυκλική φόρτιση

Η επίδραση της κυκλικής φόρτισης όπως παρουσιάζεται από τον Matlock έχει ως ακολούθως:

1. Κατασκευάζουμε τις καμπύλες  $p$ - $y$  όπως προηγουμένως για τιμές του  $p$  μικρότερες του  $0,72p_u$ .
2. Λύνουμε τις εξισώσεις (A.1) και (A.2) για να προσδιορίσουμε το κρίσιμο βάθος  $x_r$ . Αν το ειδικό βάρος και η διατμητική αντοχή του εδάφους παραμένει σταθερή με το βάθος, τότε αυτό υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$x_r = \frac{6cD}{\gamma D + 0,5c} \quad (\text{A.5})$$

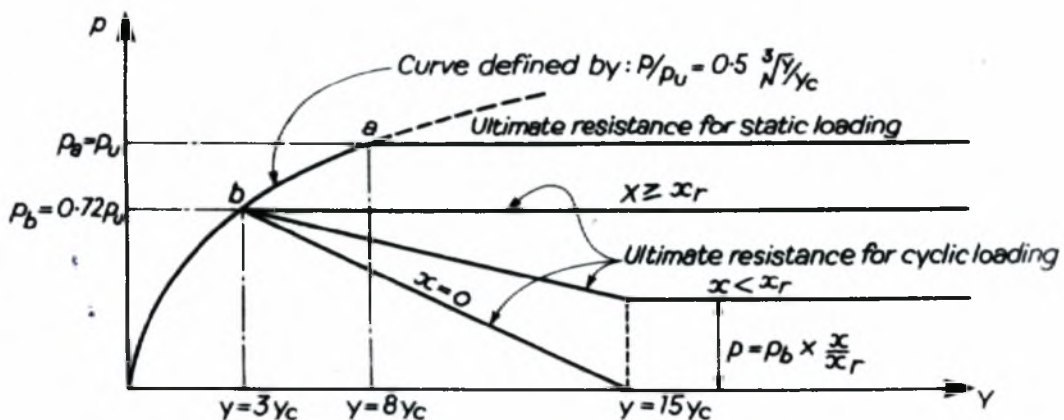
3. Αν το βάθος υπολογισμού της καμπύλης  $p$ - $y$  είναι μεγαλύτερο ή ίσο του  $x_r$ , τότε το  $p$  είναι ίσο με  $0,72p_u$  για όλες τις τιμές του  $y$  μεγαλύτερες του  $3y_{50}$ .

4. Αν το βάθος υπολογισμού της καμπύλης  $p$ - $y$  είναι μικρότερο του  $x_r$ , τότε η τιμή του  $p$  μειώνεται γραμμικά από την τιμή  $0,72p_u$  στο  $y=3y_{50}$ , στην τιμή που δίνεται από την παρακάτω σχέση για μετατόπιση  $y= 15y_{50}$

$$p=0,72p_u \frac{x}{x_r} \quad (\text{A.6})$$

η τιμή του  $p$  παραμένει σταθερή πέραν του  $y= 15y_{50}$ .

Όλα τα παραπάνω φαίνονται αναλυτικά στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα Α.1: Καμπύλη  $p$ - $y$  για μαλακή έως μέτρια άργιλο. [5]

## A.1.2 Άμμος

Ο υπολογισμός των καμπύλων  $p$ - $y$  σε άμμους, για πασσάλους υπό οριζόντια εξαίτηση, περιγράφηκε από τους Reese, Cox και Koop. Τα βήματα υπολογισμού έχουν ως ακολούθως:

1. Λαμβάνονται οι εδαφικές παράμετροι  $\phi$ ,  $\gamma$  από εργαστηριακές ή επί τόπου δοκιμές και επιλέγεται η διάμετρος του πασσάλου  $D$ .
2. Χρησιμοποιούνται οι παρακάτω παράμετροι για τον υπολογισμό της αντίστασης του εδάφους.

$$\alpha = \frac{\phi}{2} \quad \beta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad K_0 = 0.4 \quad \text{και} \quad K_A = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$$

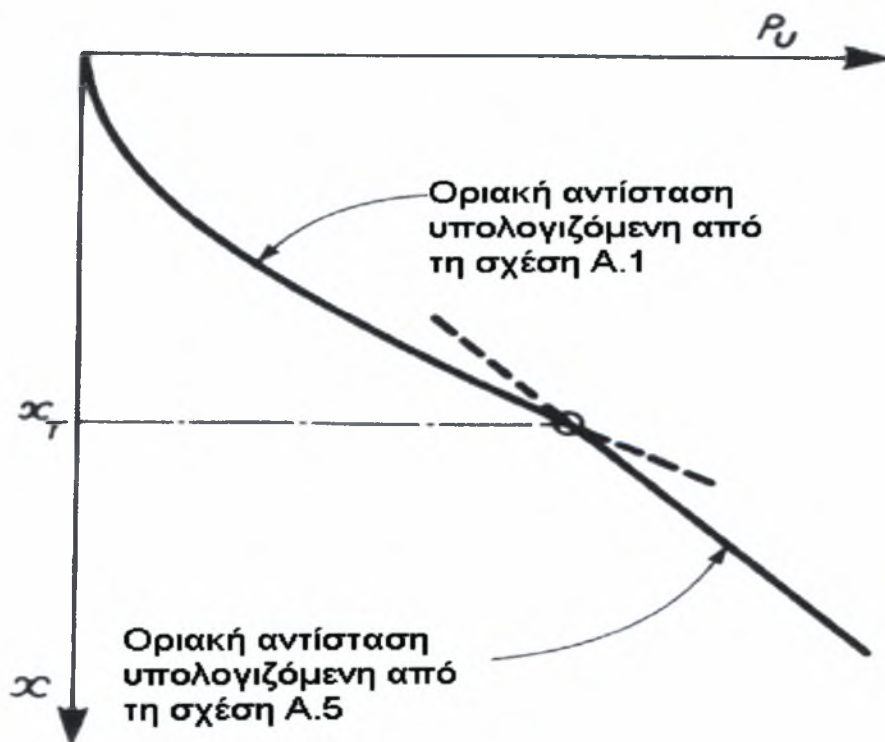
3. Υπολογίζεται η οριακή αντίσταση του εδάφους  $p_{cr}$  ανά μονάδα μήκους του πασσάλου κοντά στην εδαφική επιφάνεια, από την εξίσωση:

$$p_{cr} = \gamma x \left[ \frac{K_0 x \tan \phi \sin \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (D + x \tan \beta \tan \alpha) + K_0 x \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - K_{AD} \right] \quad (A.7)$$

4. Υπολογίζεται η οριακή αντίσταση του εδάφους  $p_{cd}$  ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, από την εξίσωση:

$$p_{cd} = K_A D \gamma x (\tan^2 \beta - 1) + K_0 D \gamma x \tan \phi \tan^4 \beta \quad (A.8)$$

5. Σχεδιάζονται οι καμπύλες  $p_{cr}$  και  $p_{cd}$  συναρτήσει του βάθους  $x$ . Το σημείο τομής των καμπυλών προσδιορίζει το κρίσιμο βάθος  $x_r$ , όπως φαίνεται στο σχήμα A.2.



Σχήμα A.2: Εύρεση κρίσιμου βάθους για οριζόντια φόρτιση πασσάλου σε μη συνεκτικά εδάφη [5]

6. Επιλέγεται το βάθος στο οποίο σχεδιάζονται οι καμπύλες  $p$ - $y$ .
7. Λαμβάνεται η τιμή  $y_u$  από το λόγο  $3D/80$  (Σχήμα Α.3).
8. Υπολογίζεται η τιμή  $p_u$  που αντιστοιχεί στην τιμή  $y_u$  από την εξίσωση:

$$p_u = A' p_c \quad (\text{A.9})$$

Οι τιμές της μεταβλητής  $A'$  λαμβάνονται από το σχήμα Α.4α για στατική ή κυκλική φόρτιση. Οι τιμές του  $p_c$  υπολογίζονται από την εξίσωση Α.7 για σημεία πάνω από το κρίσιμο βάθος ή από την εξίσωση Α.8 για τιμές μεγαλύτερες αυτού. Έχοντας υπολογίσει τα  $p_u$  και  $y_u$ , σχεδιάζεται το σημείο  $u$ .

9. Προσδιορίζεται το σημείο  $m$  της καμπύλης  $p$ - $y$  για  $y=y_m=D/60$  και

$$p_m = B' p_c \quad (\text{A.10})$$

Η τιμή της μεταβλητής  $B'$  δίδεται από το σχήμα Α.4β. Οι τιμές του  $p_c$  υπολογίζονται από την εξίσωση Α.7 για σημεία πάνω από το κρίσιμο βάθος ή από την εξίσωση Α.8 για τιμές μεγαλύτερες αυτού.

10. Σχεδιάζεται η κλίση του αρχικού τμήματος της καμπύλης  $p$ - $y$ , δηλαδή από την αρχή των αξόνων μέχρι το σημείο  $k$ , επιλέγοντας την κατάλληλη τιμή του  $n_h$  από το σχήμα Α.5.
11. Καθορίζεται η παραβολή που ταιριάζει μεταξύ των σημείων  $k$  και  $m$  από την εξίσωση

$$p = C y^{1/n} \quad (\text{A.11})$$

και από την κλίση της ευθείας μεταξύ των  $m$  και  $u$ , όπου

$$m = \frac{p_u - p_m}{y_u - y_m} \quad (\text{A.12})$$

Στην εξίσωση Α.11, το  $n$  δίδεται από

$$n = \frac{p_m}{m y_m} \quad (\text{A.13})$$

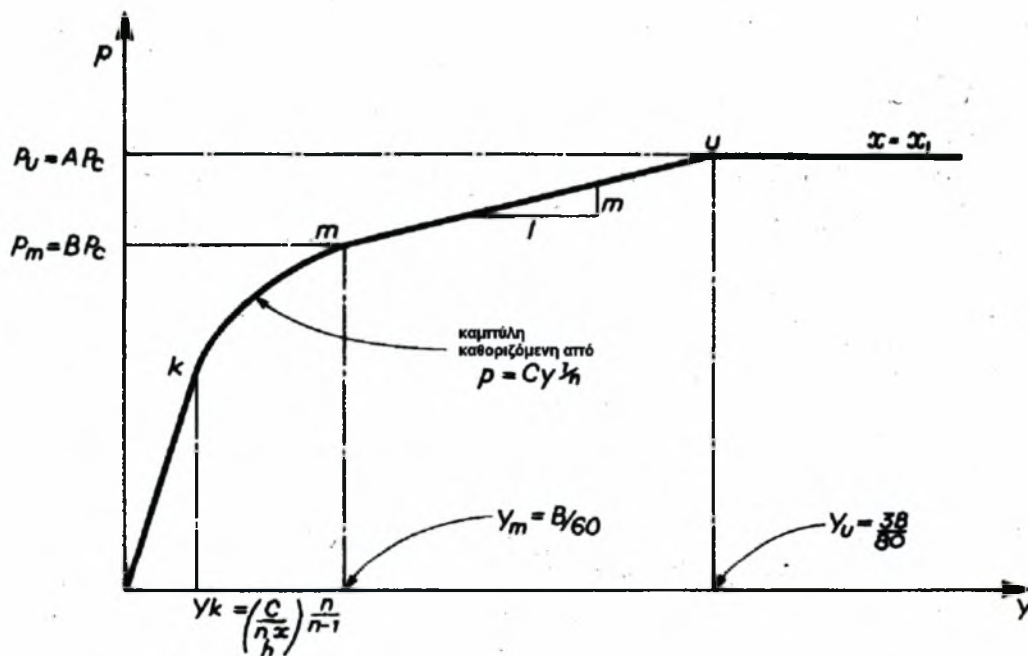
και η μεταβλητή C από

$$C = \frac{p_m}{y_m^{1/n}} \quad (\text{A.14})$$

Το σημείο k δίδεται από

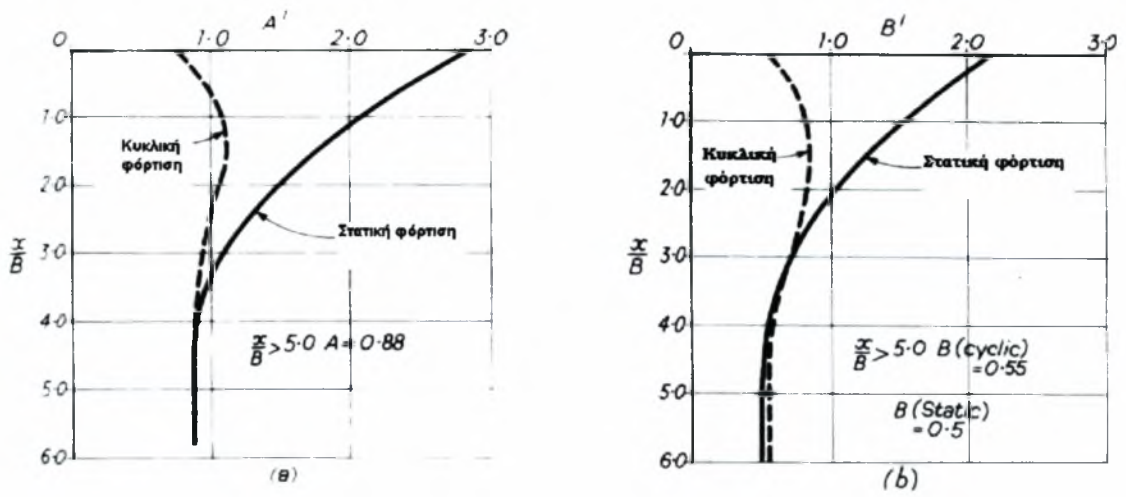
$$y_k = \left( \frac{C}{n \cdot x} \right)^{n/(n-1)} \quad (\text{A.15})$$

όπου x είναι το βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους για το οποίο σχεδιάζεται η καμπύλη p-y.

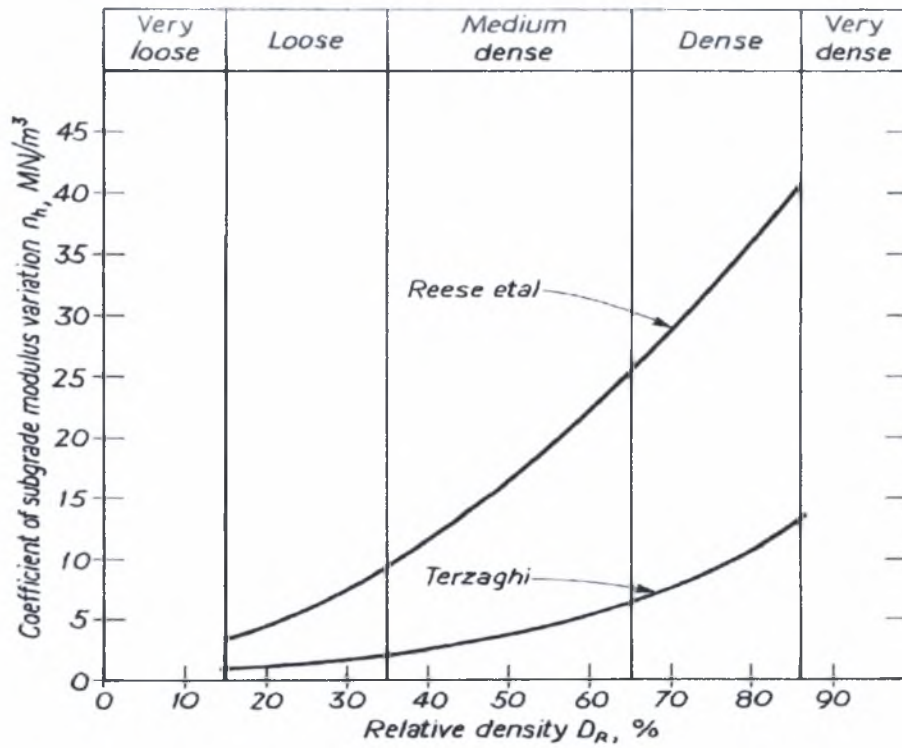


Σχήμα Α.3: Καμπύλη p-y για άμμους [5]





Σχήμα Α.4: Διαγράμματα για τον υπολογισμό των συντελεστών Α' και Β' [5]



Σχήμα Α.5: Σχέση μεταξύ του συντελεστή  $n_h$  και της σχετικής πικνότητας  $D_R$  της άμμου [5]

## ***A.2 Παρουσίαση των καμπυλών $p-y$***

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες  $p-y$  οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση τη διαδικασία που προαναφέρθηκε. Πρόκειται για τις καμπύλες που σχεδιάστηκαν τόσο για το αργιλικό όσο και για το αμμώδες εδαφικό στρώμα, χωρίζοντας τα σε επιμέρους στρώσεις.

## ΚΑΜΠΥΛΕΣ P-Y ΣΕ ΜΑΛΑΚΗ ΑΡΓΙΛΟ

Είδη φορτίσεων	Στατική	Κυκλική
----------------	---------	---------

Συνθήκες φόρτισης= Στατική	
x(m)=	2,00
b(m)=	1,00
γ(KN/m <sup>3</sup> )=	19
c(Kpa)=	20
Κατηγορία αργίλου	Μέτρια

Κατηγορία αργίλου	e <sub>30</sub>	E <sub>c</sub>
Μαλακή	0,02	50
Μέτρια	0,01	100

e <sub>50</sub> =	0,01
x <sub>r</sub> =	4,14

Η μέγιστη αντίσταση του εδάφους ανά μονάδα μήκους είναι η μικρότερη από τις παρακάτω τιμές

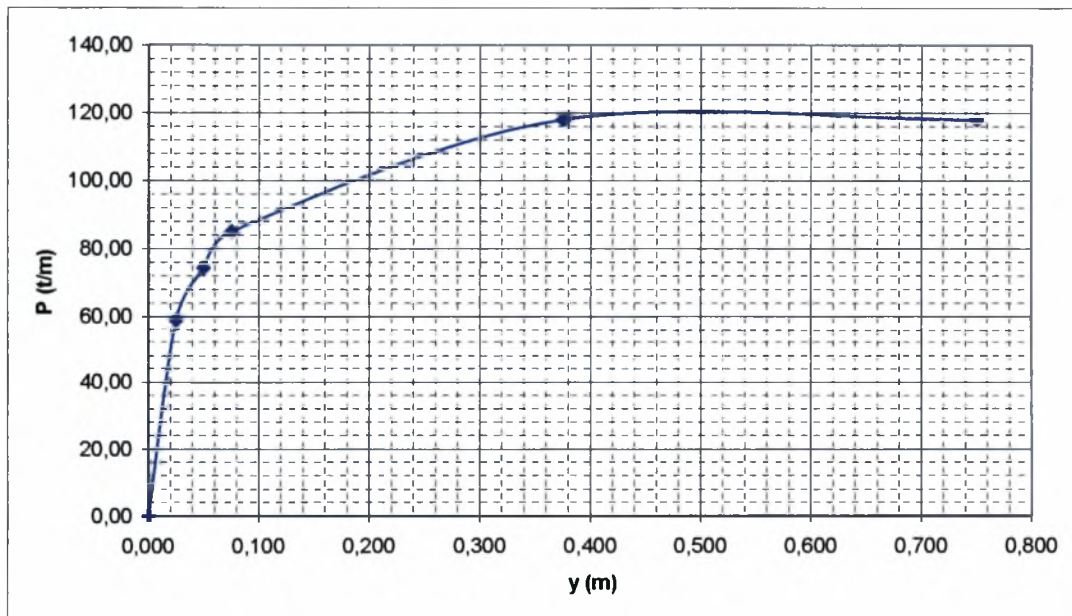
$$\left. \begin{array}{l} P_u = 118 \\ P_u = 180 \end{array} \right\} \Rightarrow P_u \text{ (KN/m)} = 118$$

Χαρακτηριστικές τιμές διαγράμματος P-y

y=	0,000
y <sub>50</sub> =	0,025
2y <sub>50</sub> =	0,050
3y <sub>50</sub> =	0,075
15y <sub>50</sub> =	0,375
30y <sub>50</sub> =	0,750

P=	0,00
P <sub>(y=y<sub>50</sub>)</sub> =	59,00
P <sub>(y=2y<sub>50</sub>)</sub> =	74,34
P <sub>(y=3y<sub>50</sub>)</sub> =	84,96
P <sub>(y=15y<sub>50</sub>)</sub> =	118,00
P <sub>(y=30y<sub>50</sub>)</sub> =	118,00

$P_{min} = 41,064$



Σχήμα Α.6: Καμπύλη p-y της μαλακής αργίλου σε βάθος 2 m.

## ΚΑΜΠΥΛΕΣ P-Y ΣΕ ΜΑΛΑΚΗ ΑΡΓΙΛΟ

Είδη φορτίσεων	Στατική	Κυκλική
----------------	---------	---------

Συνθήκες φόρτισης= Στατική	
x(m)=	8,00
D(m)=	1,00
γ(kN/m <sup>3</sup> )=	19
c(kPa)=	40
Κατηγορία αργίλου	Μέτρια

Κατηγορία αργίλου	e <sub>50</sub>	E <sub>c</sub>
Μαλακή	0,02	50
Μέτρια	0,01	100

e <sub>50</sub> =	0,01
χ <sub>r</sub> =	6,15

Η μέγιστη αντίσταση του εδάφους ανά μονάδα μήκους είναι η μικρότερη από τις παρακάτω τιμές

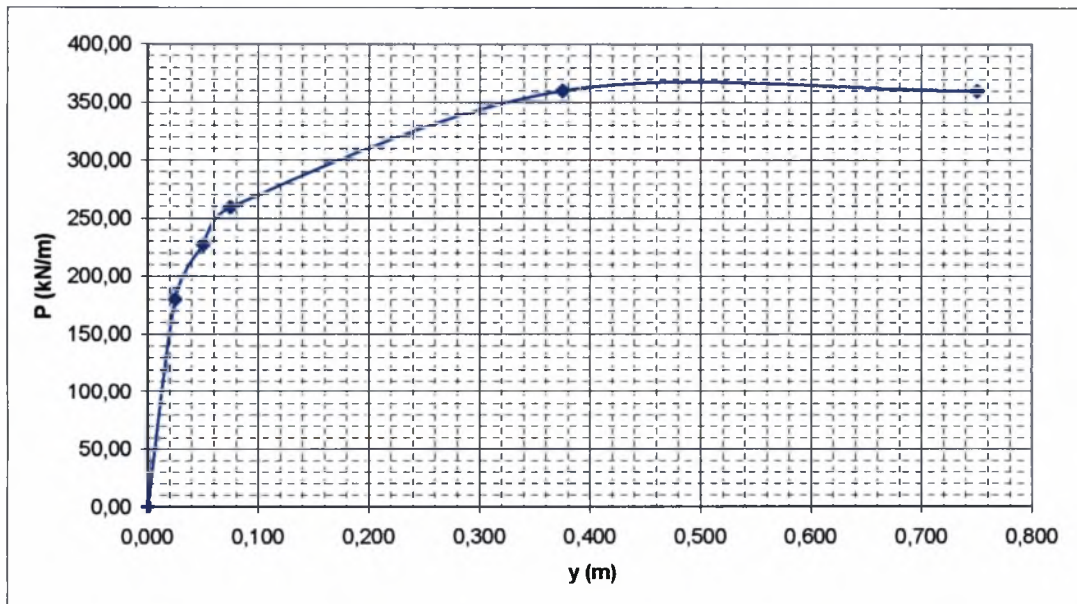
$$\begin{array}{l}
 P_u = 432 \\
 P_u = 360
 \end{array}
 \} \Rightarrow P_u \text{ (kN/m)} = 360$$

Χαρακτηριστικές τιμές διαγράμματος P-y

y=	0,000
y <sub>50</sub> =	0,025
2y <sub>50</sub> =	0,050
3y <sub>50</sub> =	0,075
15y <sub>50</sub> =	0,375
30y <sub>50</sub> =	0,750

P=	0,00
P <sub>(y=y<sub>50</sub>)</sub> =	180,00
P <sub>(y=2y<sub>50</sub>)</sub> =	226,79
P <sub>(y=3y<sub>50</sub>)</sub> =	259,20
P <sub>(y=15y<sub>50</sub>)</sub> =	360,00
P <sub>(y=30y<sub>50</sub>)</sub> =	360,00

$P_{min} = 336,96$



Σχήμα Α.7: Καμπύλη p-y της μαλακής αργίλου σε βάθος 8 m.

## ΚΑΜΠΥΛΕΣ P-Y ΣΕ ΜΑΛΑΚΗ ΑΡΓΙΛΟ

Είδη φορτίσεων	Στατική	Κυκλική
----------------	---------	---------

Συνθήκες φόρτισης=	Στατική
x(m)=	26,00
D(m)=	1,00
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )=	19
c(kPa)=	60
Κατηγορία αργίλου	Μαλακή

Κατηγορία αργίλου	e <sub>50</sub>	E <sub>c</sub>
Μαλακή	0,02	50
Μέτρια	0,01	100

e <sub>50</sub> =	0,02
χ <sub>r</sub> =	7,35

Η μέγιστη αντίσταση του εδάφους ανά μονάδα μήκους είναι η μικρότερη από τις παρακάτω τιμές

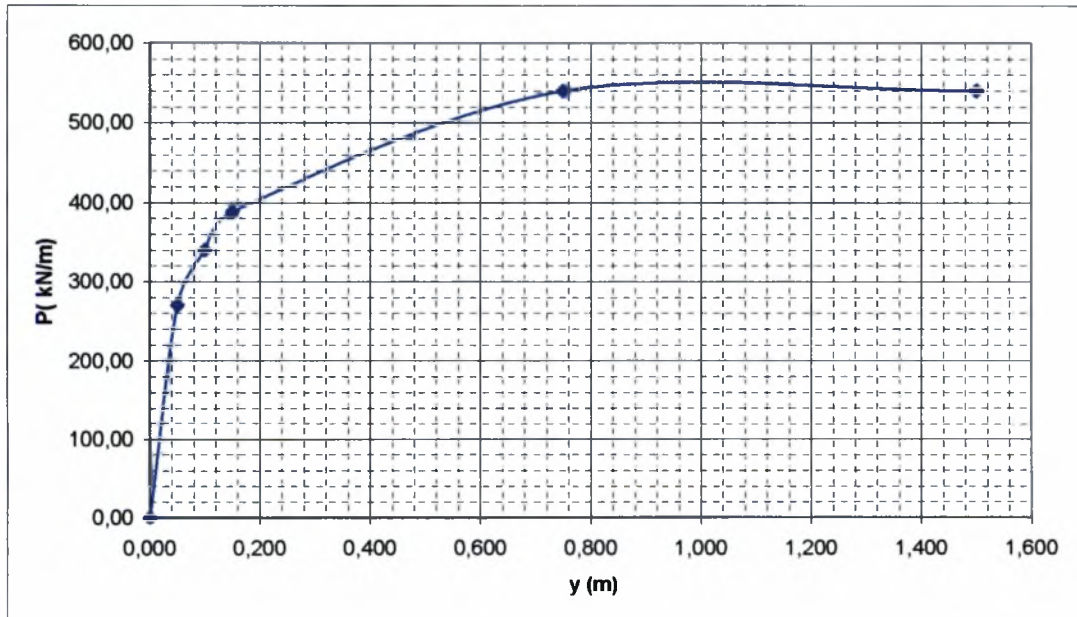
P <sub>u</sub> = 1454	} =>	P <sub>u</sub> (kN/m) = 540
P <sub>u</sub> = 540		

Χαρακτηριστικές τιμές διαγράμματος P-y

y=	0,000
y <sub>50</sub> =	0,050
2y <sub>50</sub> =	0,100
3y <sub>50</sub> =	0,150
15y <sub>50</sub> =	0,750
30y <sub>50</sub> =	1,500

P=	0,00
P <sub>(y=y<sub>50</sub>)</sub> =	270,00
P <sub>(y=2y<sub>50</sub>)</sub> =	340,18
P <sub>(y=3y<sub>50</sub>)</sub> =	388,80
P <sub>(y=15y<sub>50</sub>)</sub> =	540,00
P <sub>(y=30y<sub>50</sub>)</sub> =	540,00

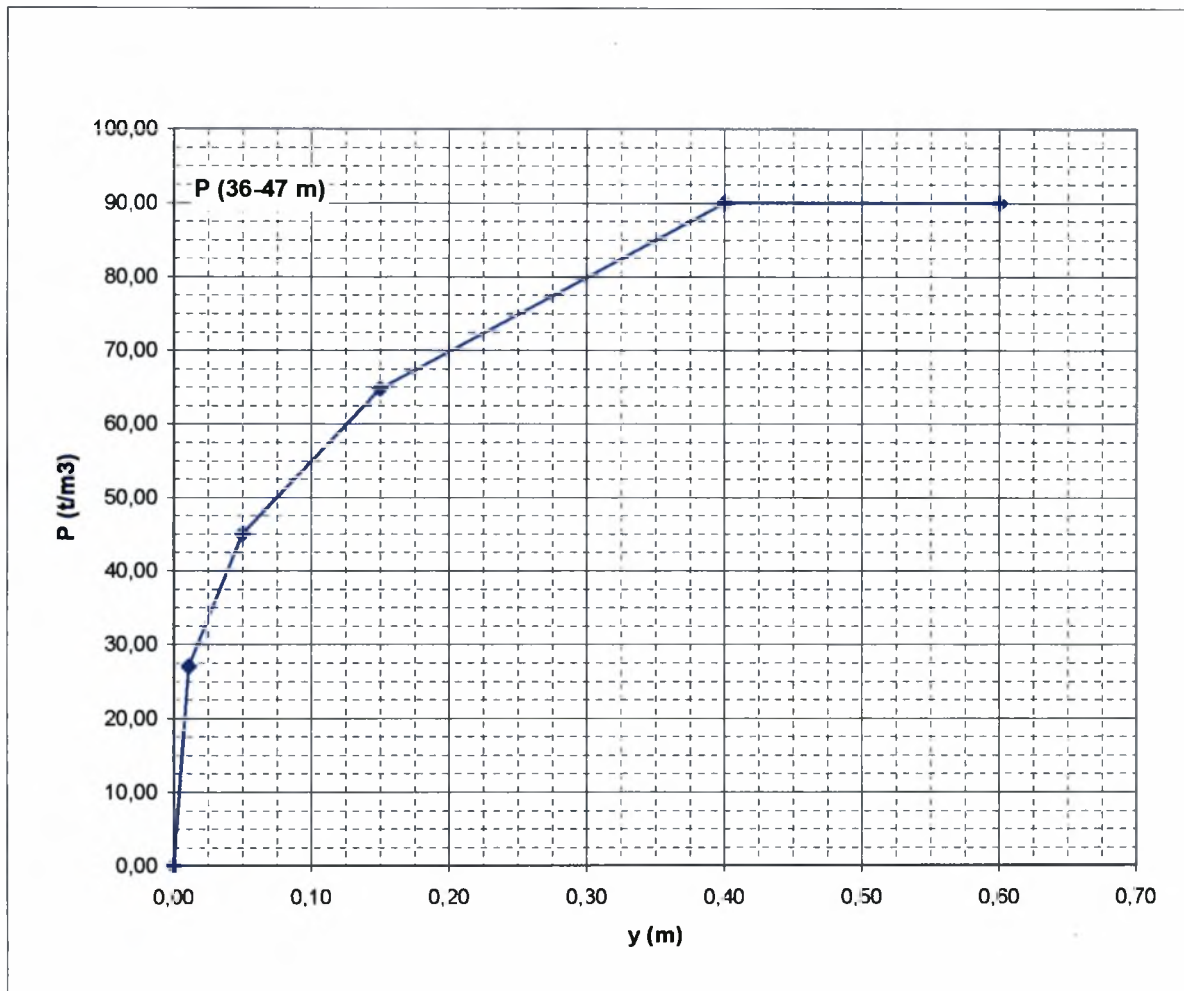
P<sub>min</sub> = 1375,92



Σχήμα Α.8: Καμπύλη p-y της μαλακής αργίλου σε βάθος 26 m.

## ΚΑΜΠΥΛΗ P-Y ΣΕ ΑΜΜΟ

y (cm)	P (36-47 m)
0,00	0,00
0,01	27,00
0,05	45,00
0,15	64,80
0,40	90,00
0,60	90,00

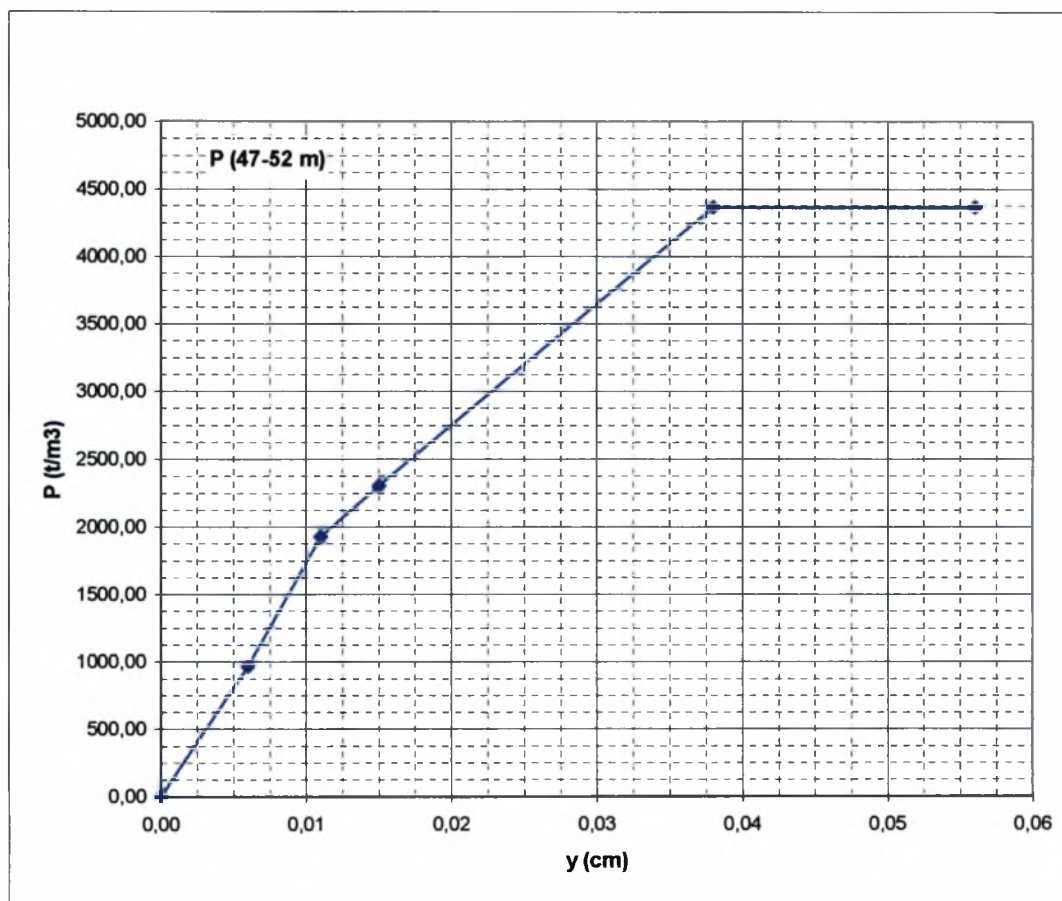


Σχήμα Α.9: Καμπύλη  $p$ - $y$  της άμμου σε βάθος 42 m.



### ΚΑΜΠΥΛΗ P-Y ΣΕ ΑΜΜΟ

y (cm)	P (47-52 m)
0,000	0,000
0,006	964,635
0,011	1929,270
0,015	2306,263
0,038	4365,540
0,056	4365,540



Σχήμα Α.10: Καμπύλη  $p$ - $y$  της άμμου σε βάθος 50 m.

### **A.3 Πρόγραμμα επεξεργασίας καμπυλών $p$ - $y$**

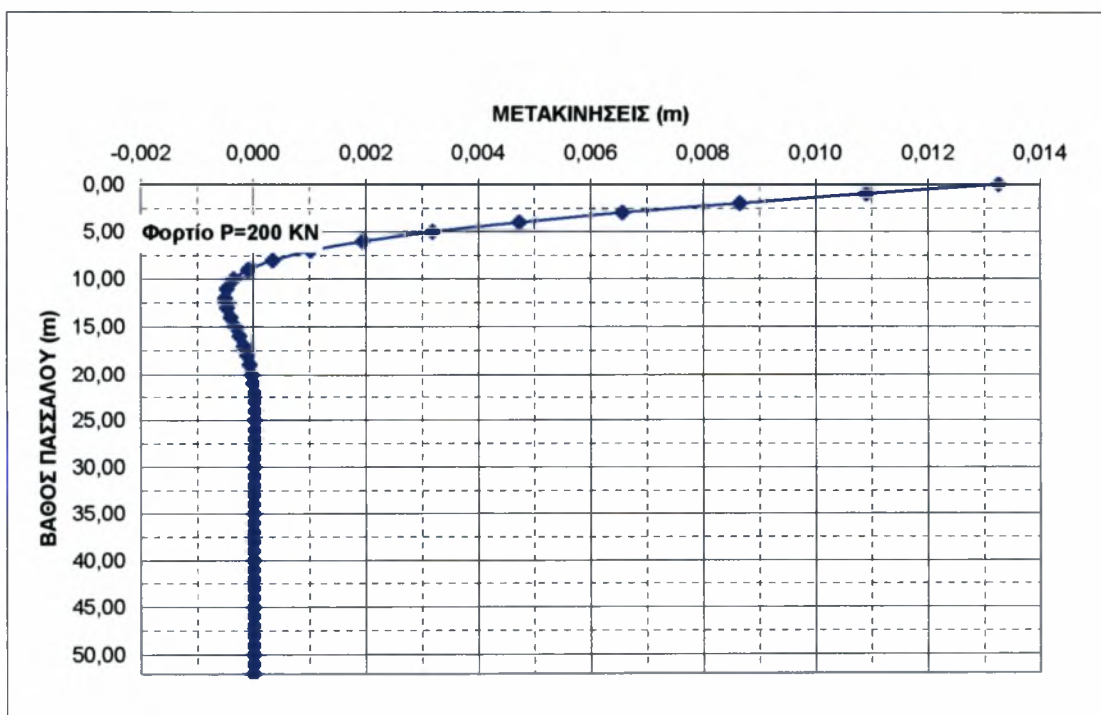
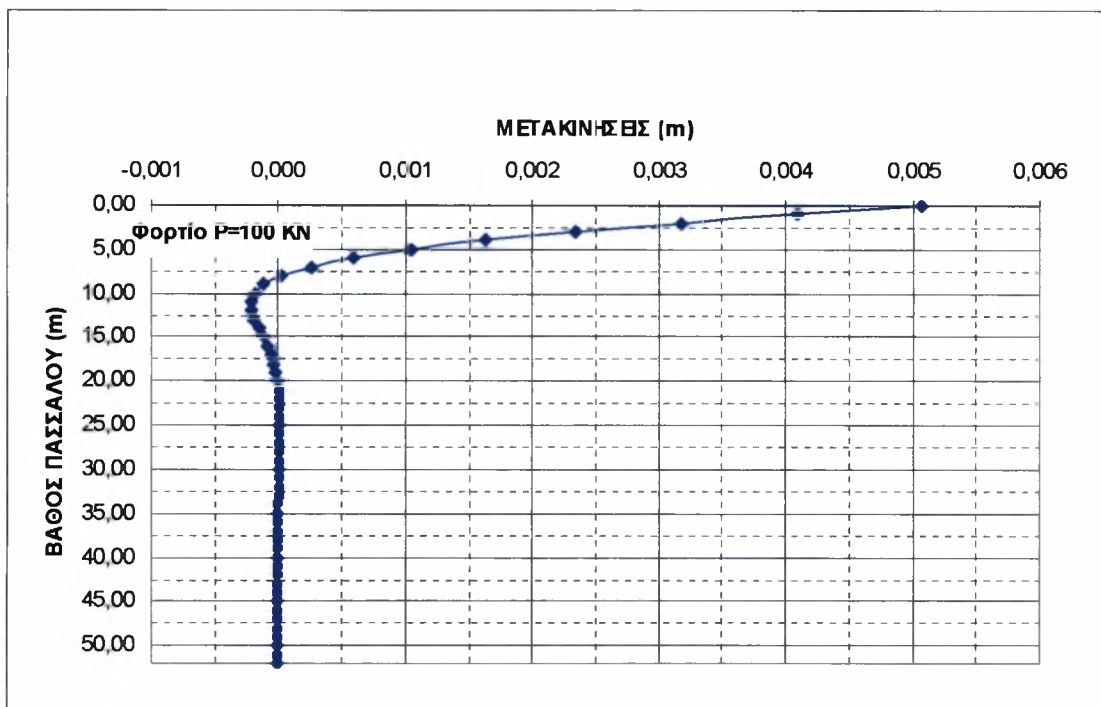
Οι καμπύλες  $p$ - $y$  μαζί με τα υπόλοιπα γεωμετρικά δεδομένα και τις παραμέτρους τροφοδότησαν σχετικό πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή, με το οποίο πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις για τιμές φορτίων ίσες με αυτές που επιβλήθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Σκοπός αυτών είναι η προσομοίωση του εδάφους, το οποίο διακριτοποιήθηκε ανά 1 m. Πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις για οριζόντιο φορτίο 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000 και 1200 KN. Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά οι εδαφικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν.

		<b>Εδαφικές Παράμετροι</b>					
		<b><math>\nu</math></b>	<b>G (Mpa)</b>	<b>c (kPa)</b>	<b>K (Mpa)</b>	<b><math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\phi</math> (deg)</b>
<b>Εδαφικές Στρώσεις</b>	<b>1-5 m</b>	0,30	1,8	20	3,96	20	-
	<b>5-15 m</b>	0,30	3,6	40	7,92	20	-
	<b>15-36 m</b>	0,30	5,4	60	11,88	20	-
	<b>36-47 m</b>	0,32	3,35	110	8,33	20	40
	<b>47-52 m</b>	0,25	24	-	40	22	40



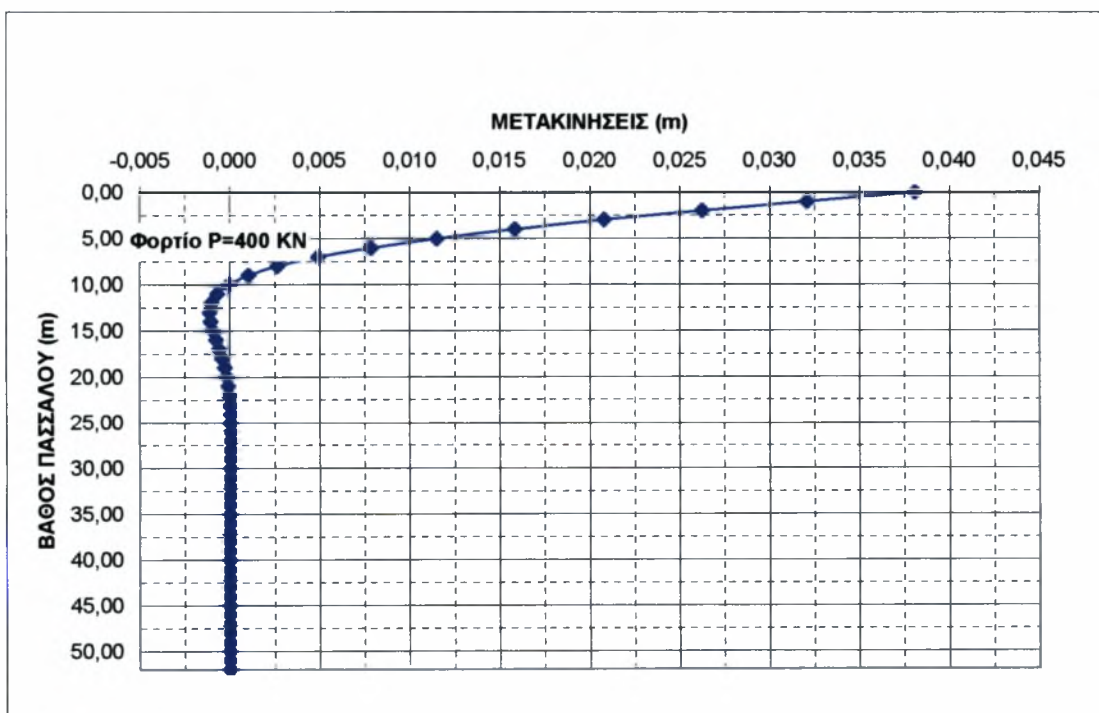
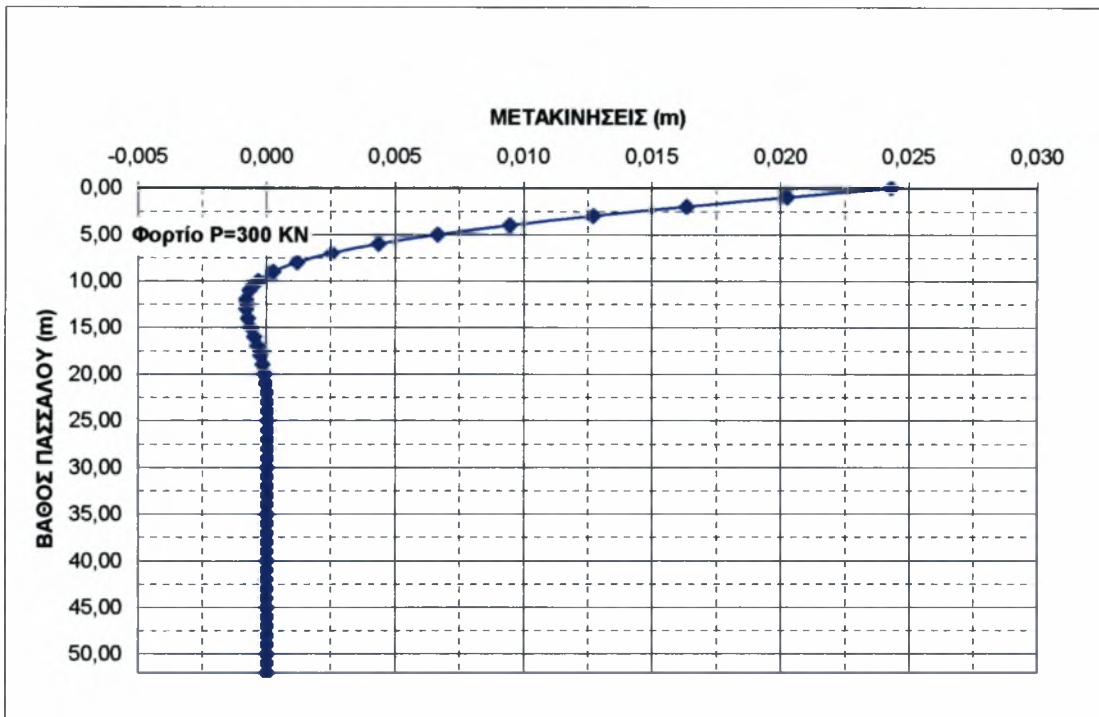
#### ***A.4 Παρουσίαση καμπυλών απόκρισης εδάφους***

Μετά την επεξεργασία του παραπάνω προγράμματος προέκυψαν τα εν συνεχεία διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν την παραμόρφωση του πασσάλου συναρτήσει του βάθους υπό της οριζόντιας φόρτισης των 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000 και 1200 KN.



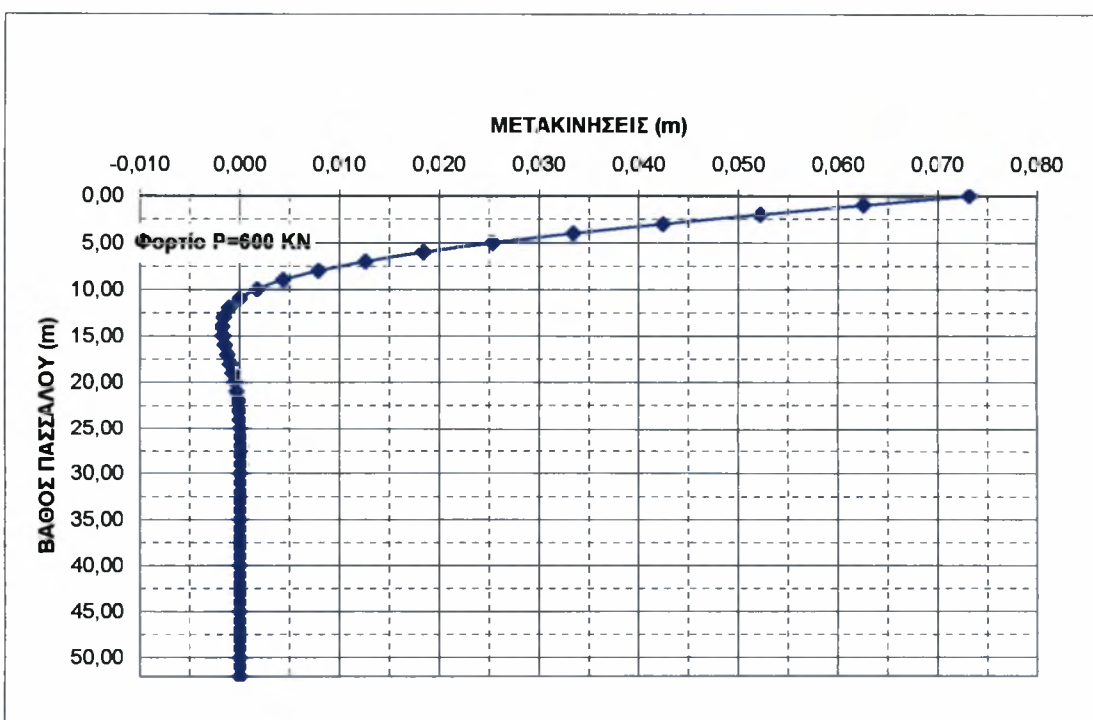
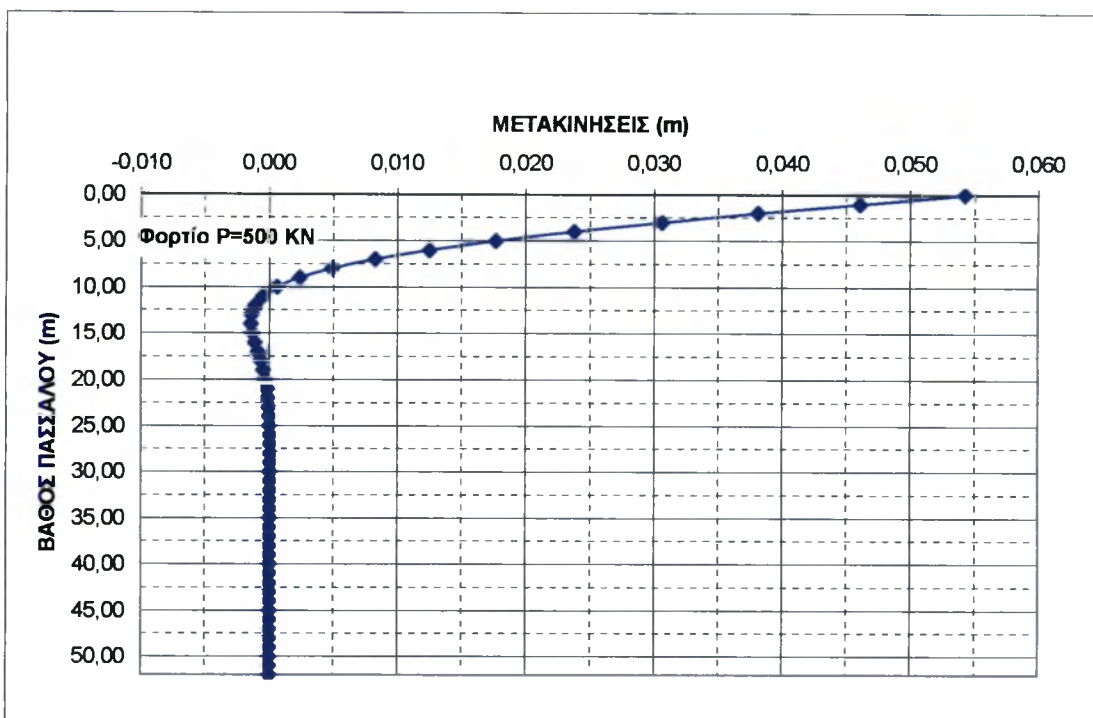
Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης πασσάλου συναρτήσει του βάθους για φορτίο P=100 kN και 200 kN αντίστοιχα.

Σχήματα  
A.11-A.12



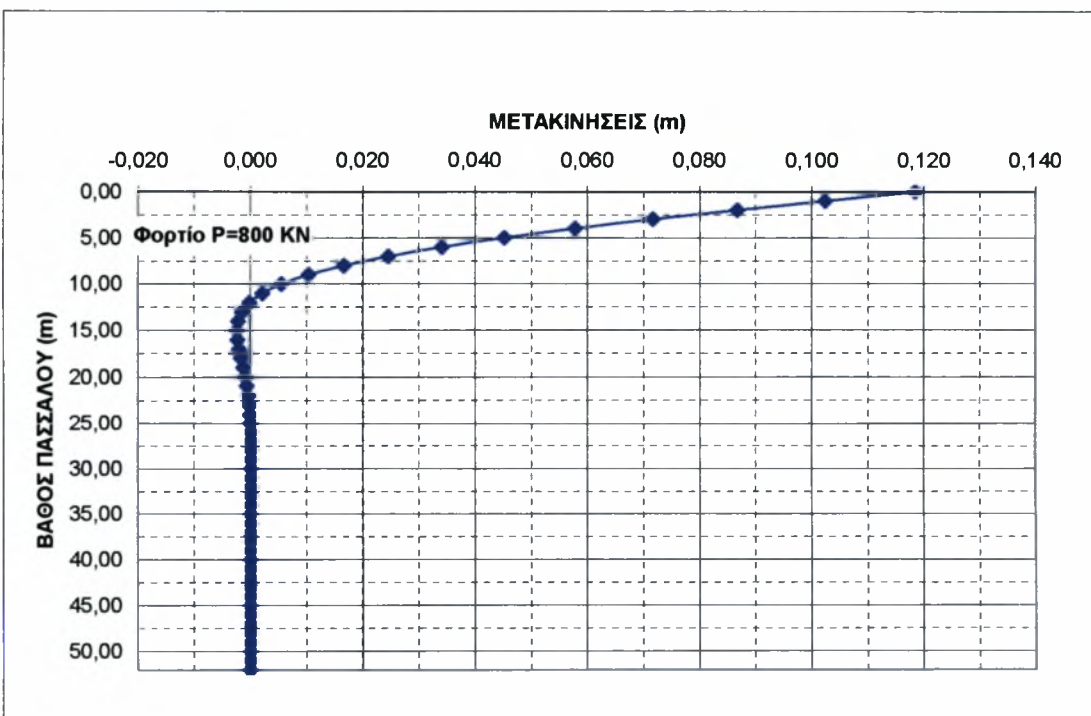
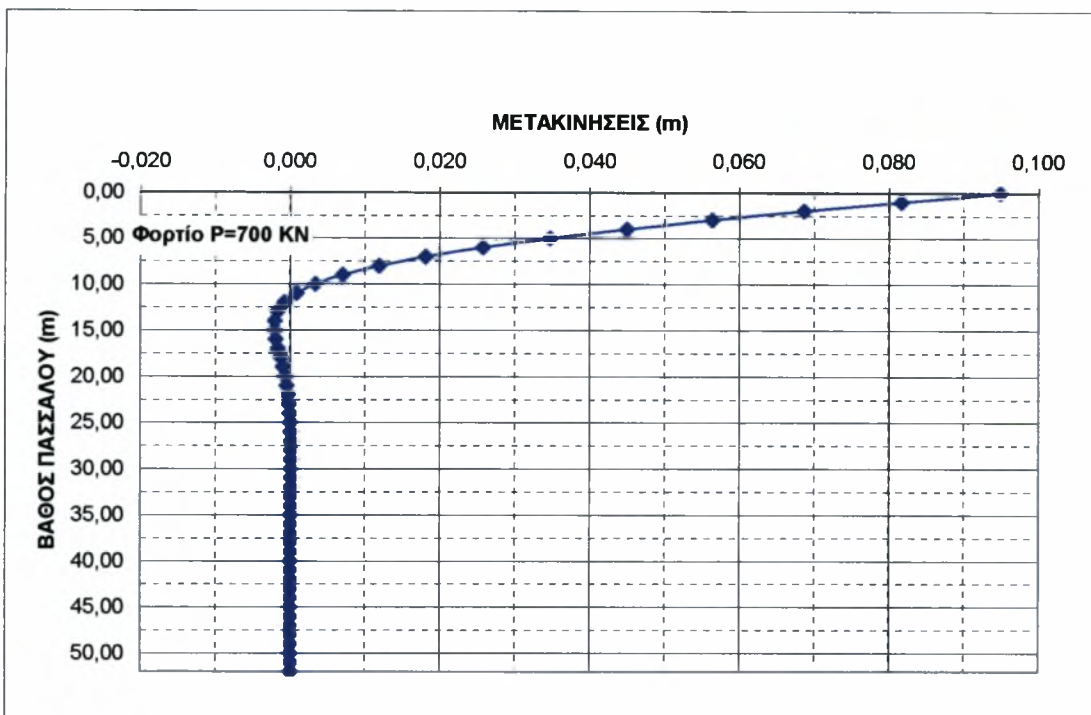
Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης πασσάλου συναρτήσει του βάθους για φορτίο P=300 KN και 400 KN αντίστοιχα

Σχήματα  
Α.13-Α.14



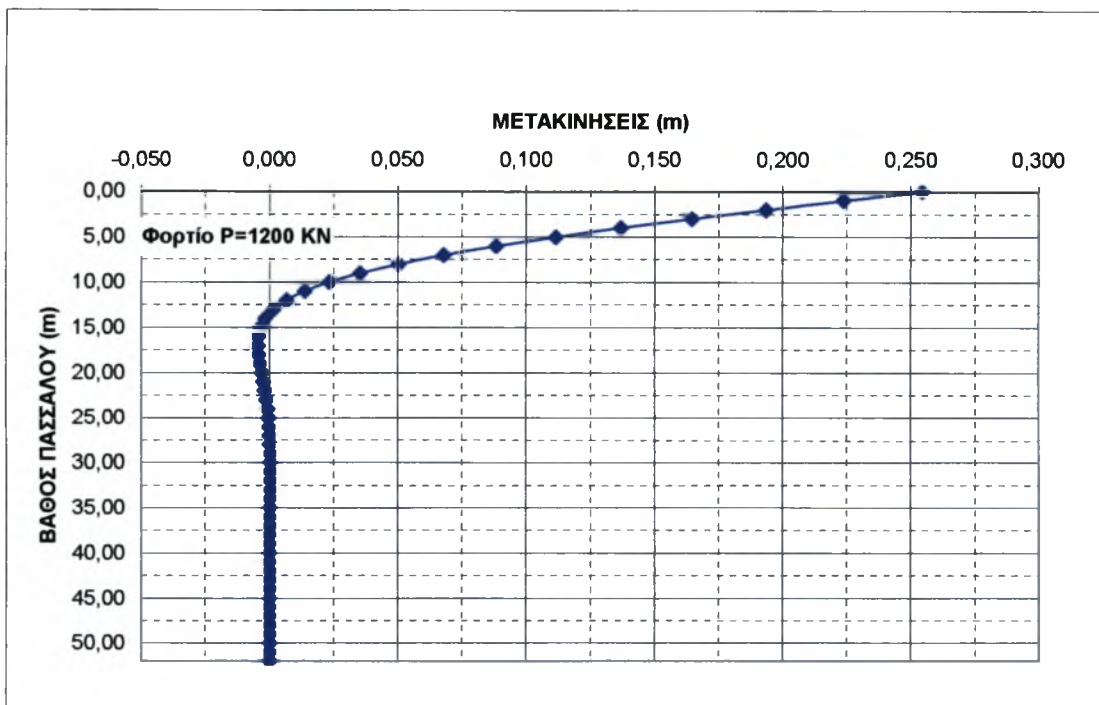
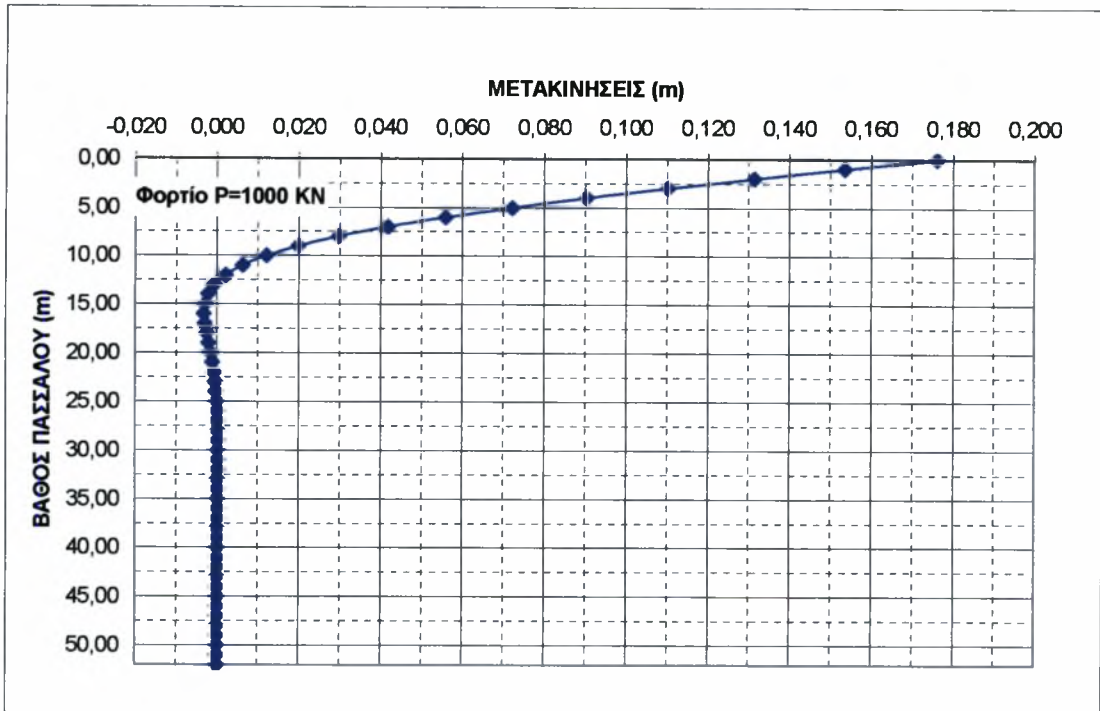
Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης πασσάλου συναρτήσει του βάθους για φορτίο P=500 KN και 600 KN αντίστοιχα

Σχήματα  
Α.15-Α.16



Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης πασσάλου συναρτήσει του βάθους για φορτίο P=700 KN και 800 KN αντίστοιχα

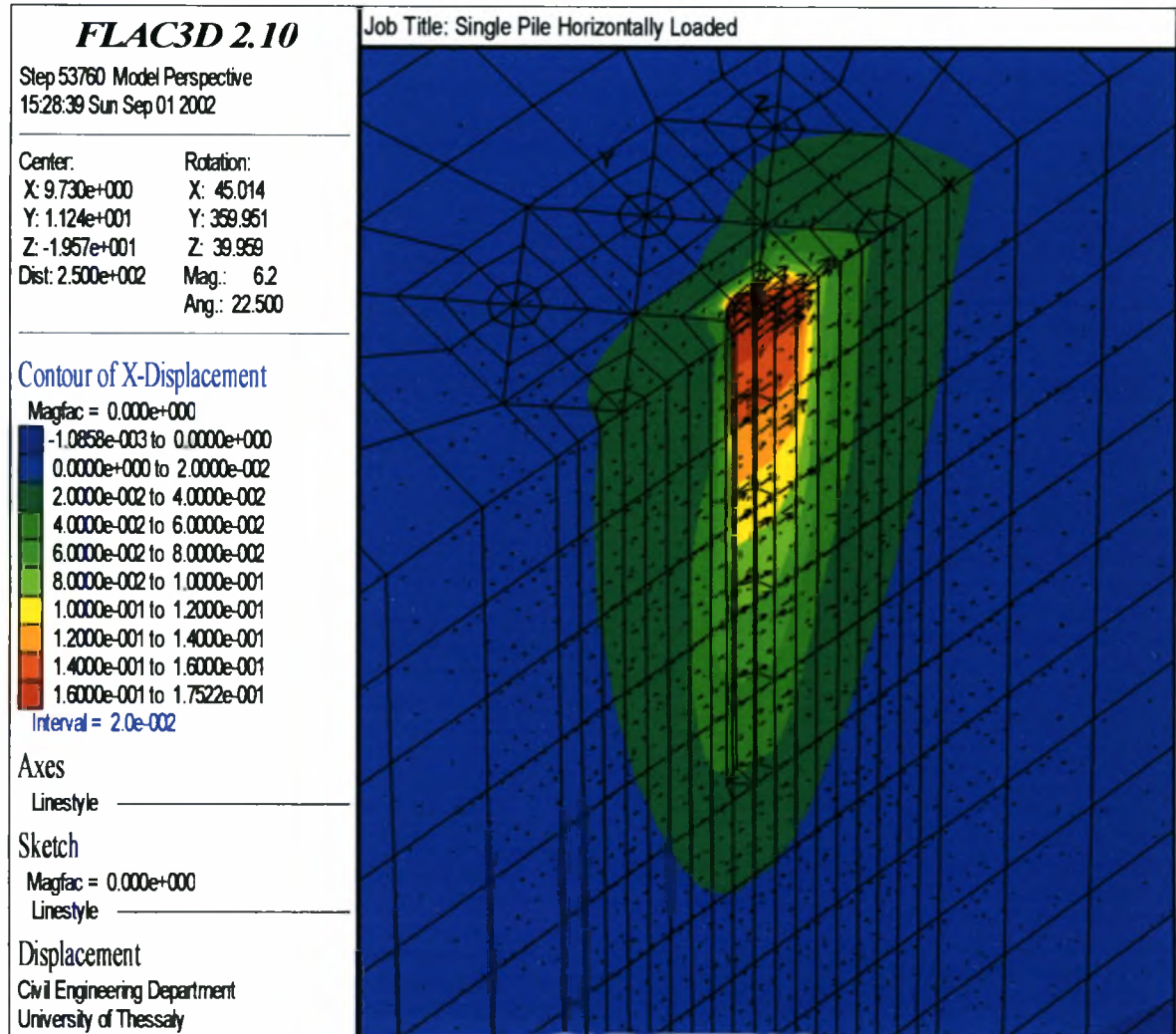
Σχήματα  
Α.17-Α.18



Διάγραμμα οριζόντιας μετακίνησης πασσάλου συναρτήσεως του βάθους για φορτίο P=1000 KN και 1200 KN αντίστοιχα

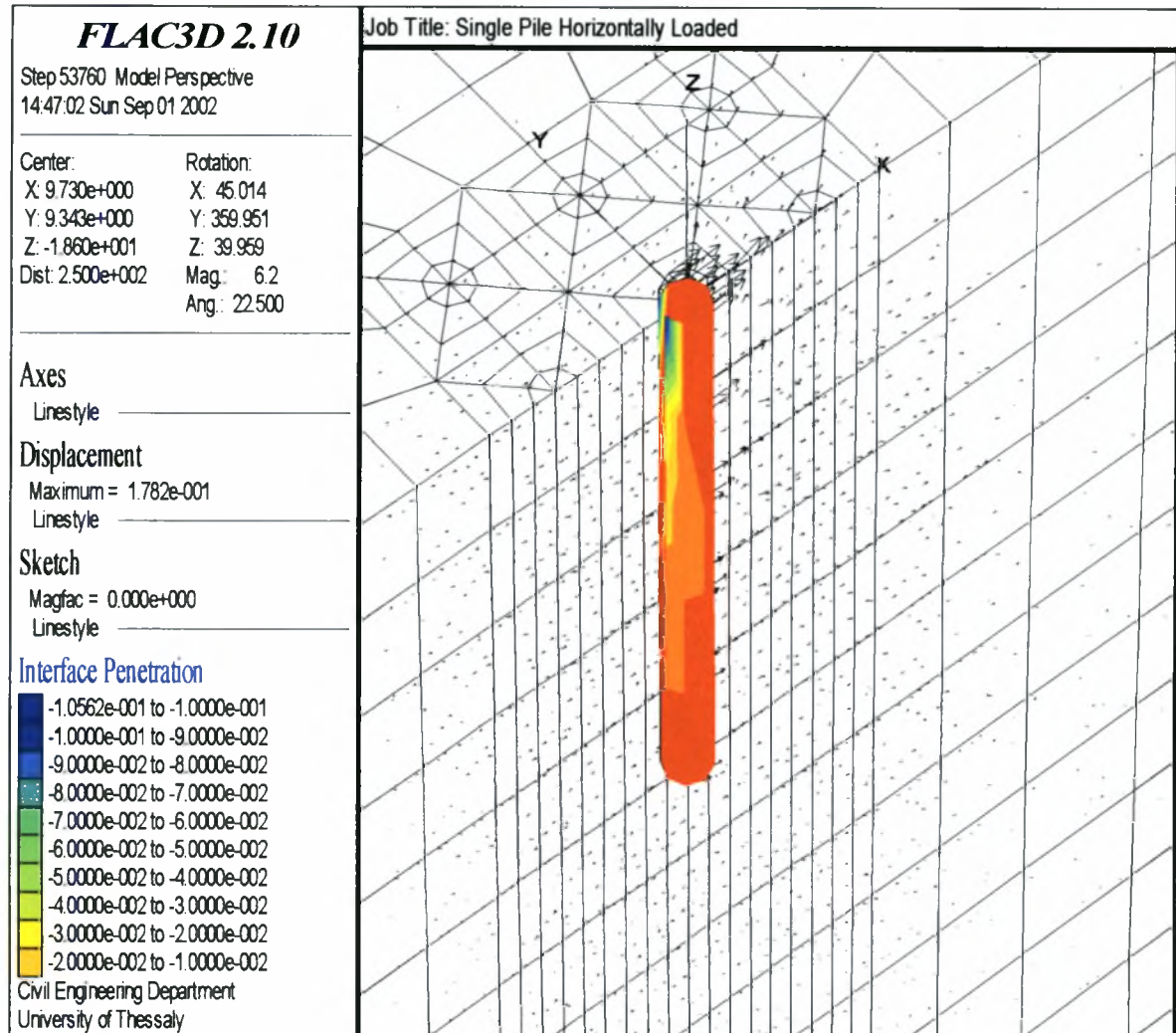
Σχήματα  
Α.19-Α.20





Περιοχές ίσων μετακινήσεων (m) κατά τη διεύθυνση του φορτίου και διανύσματα  
μετακινήσεων για H=1.2MN σε μαλακή άργιλο.

Σχήμα Α.21



Κατανομή του κενού των διεπιφανειών κατά μήκος του πασσάλου για H=1.2MN

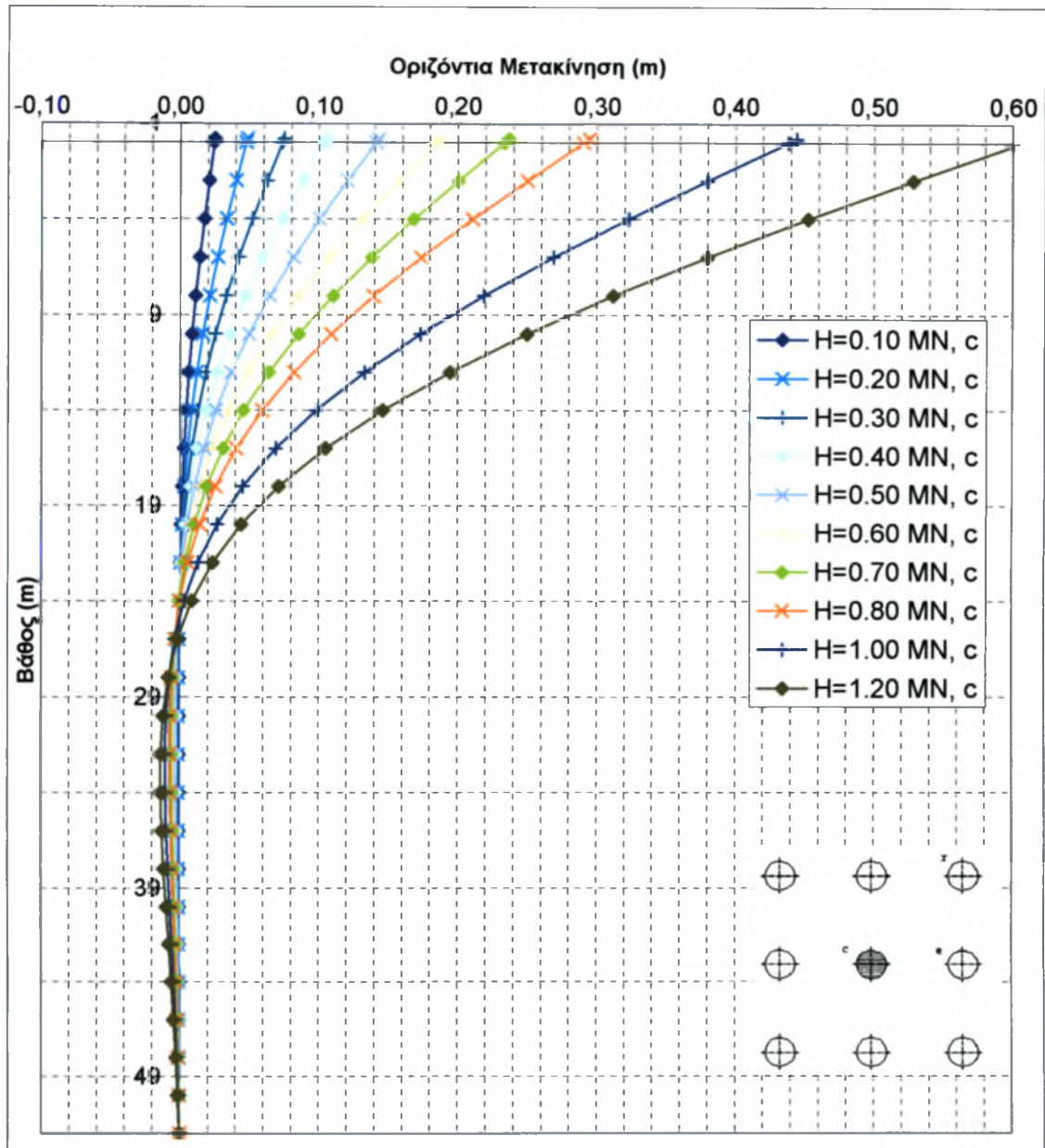
Σχήμα Α.22



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Απεικόνιση Αποτελεσμάτων Παραμετρικής Ανάλυσης Ομάδας Πασσάλων  
σε Μαλακή Άργιλο

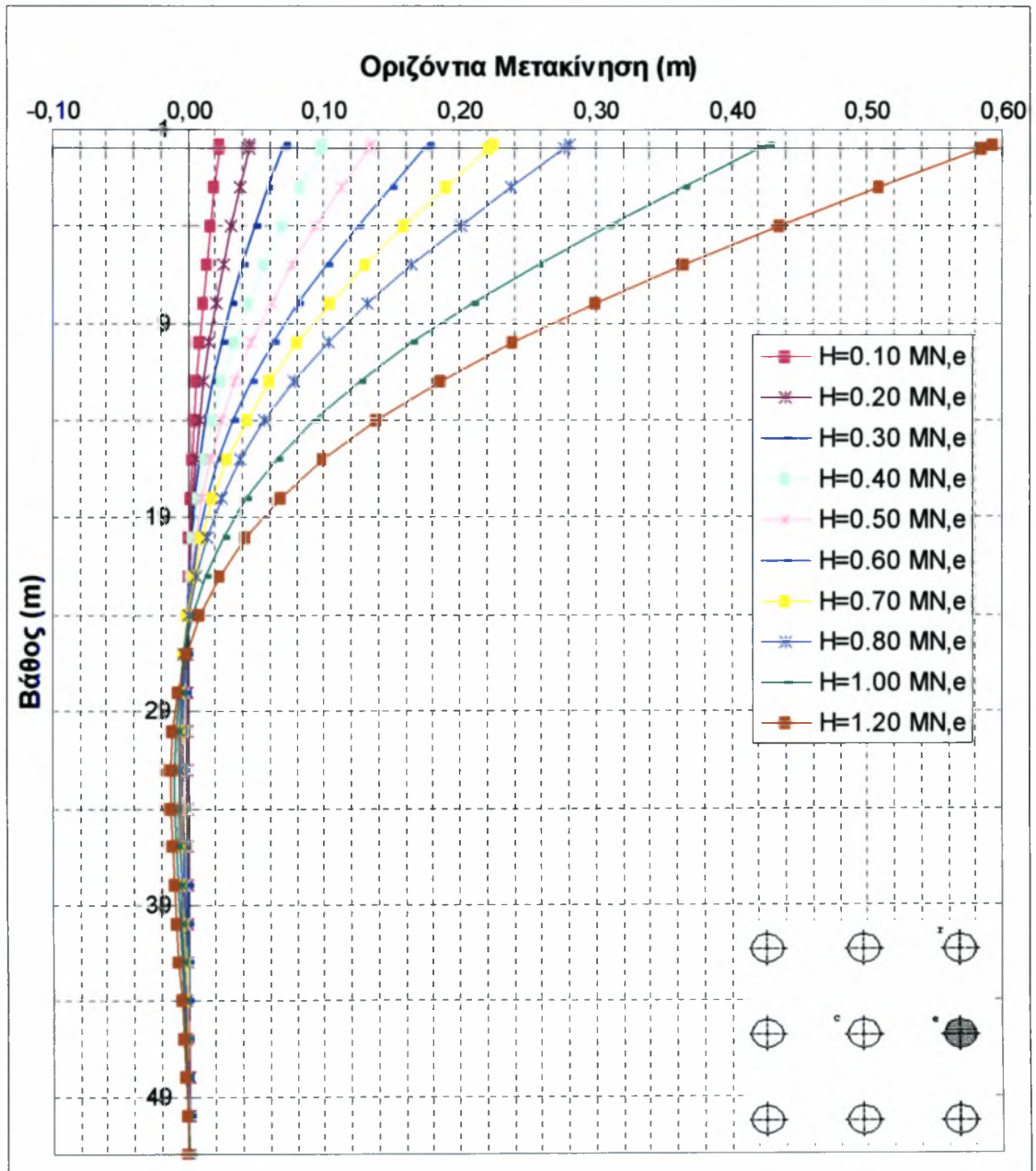
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 2D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου c της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε μαλακή άργιλο.

Σχήμα Β.1

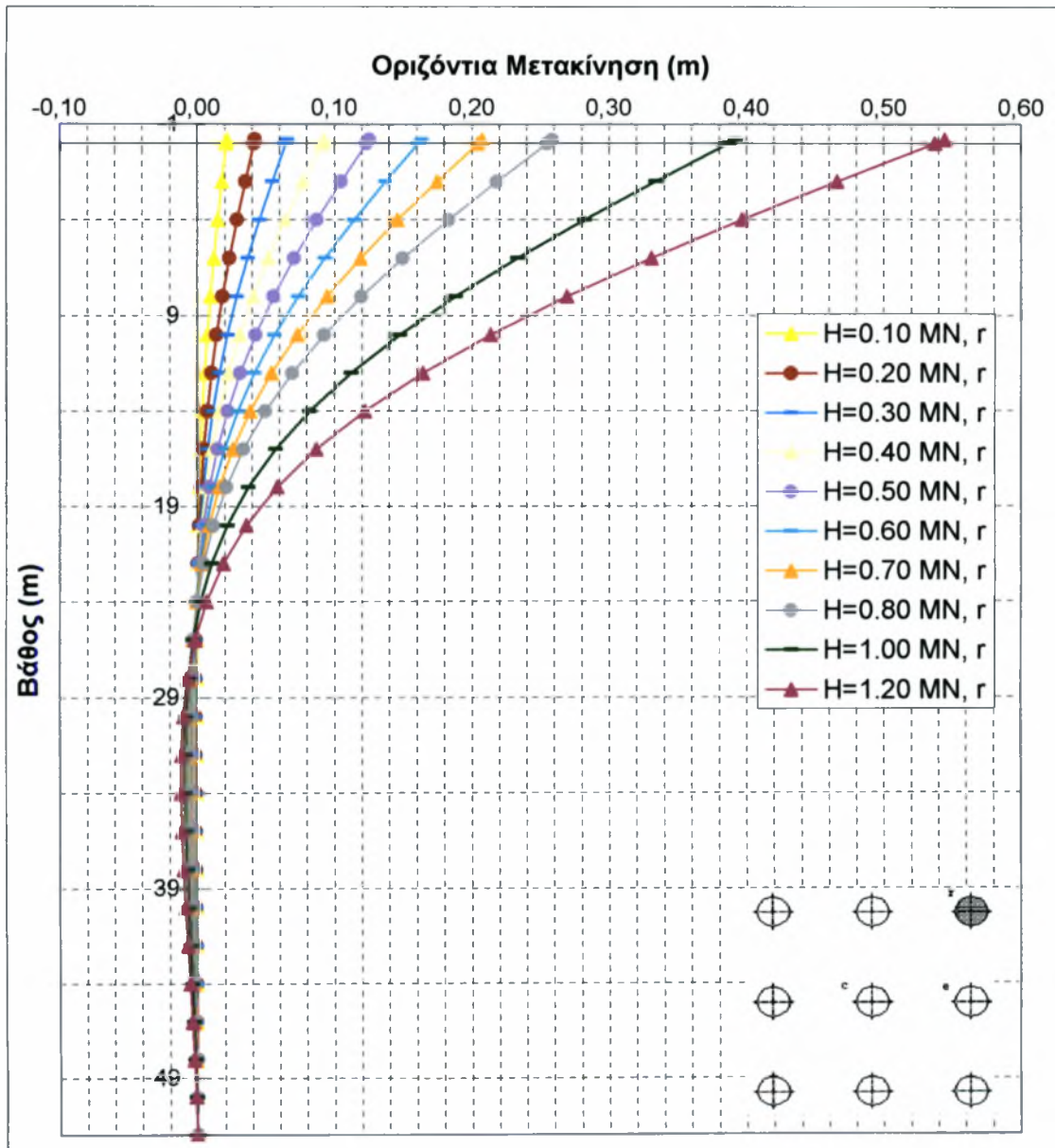
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 2D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου  $e$  της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε μαλακή άργιλο.

Σχήμα Β.2

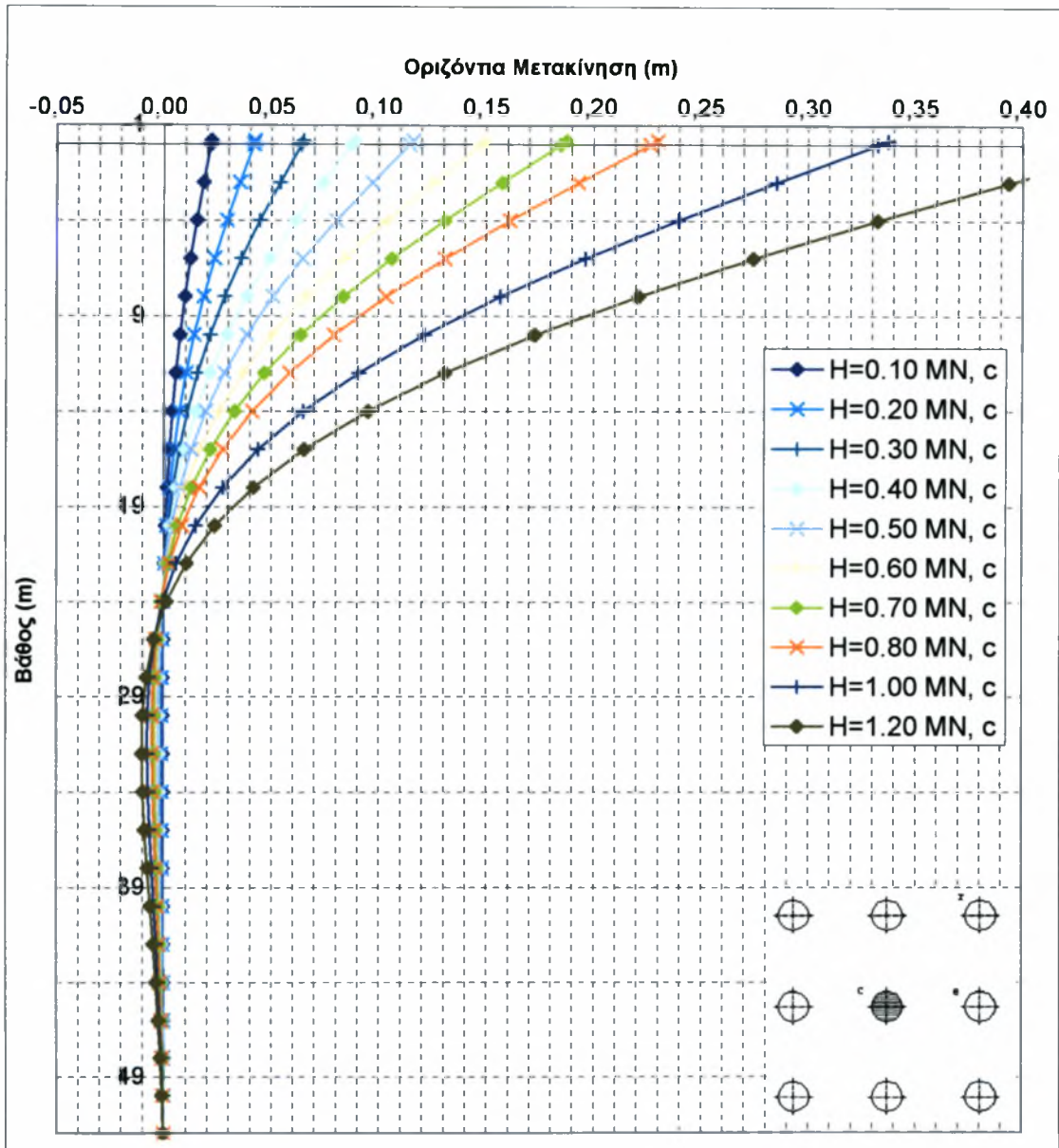
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 2D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου r της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε μαλακή άργιλο.

Σχήμα Β.3

Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 3D

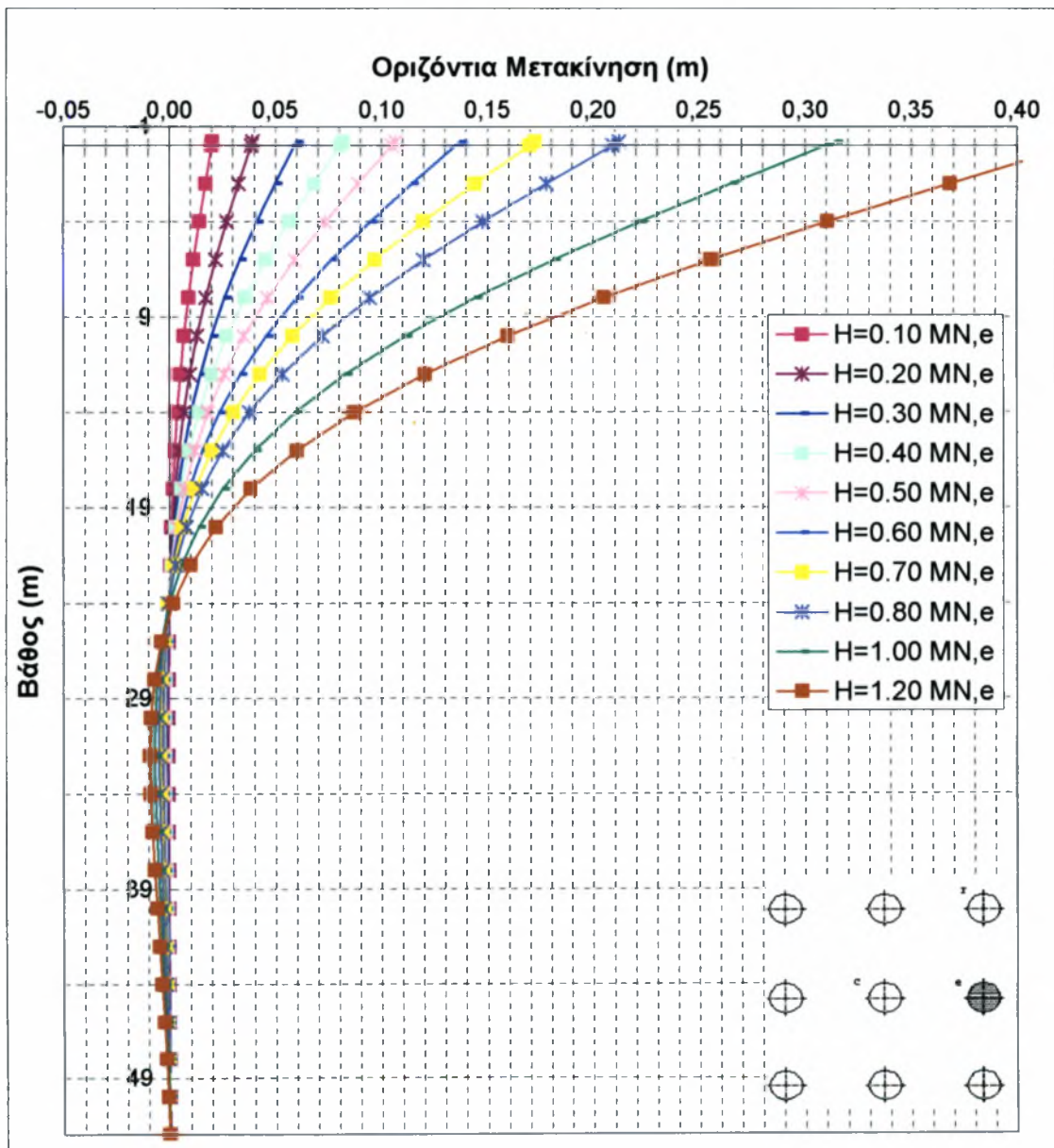


Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου c της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε μαλακή άργιλο.

Σχήμα Β.4



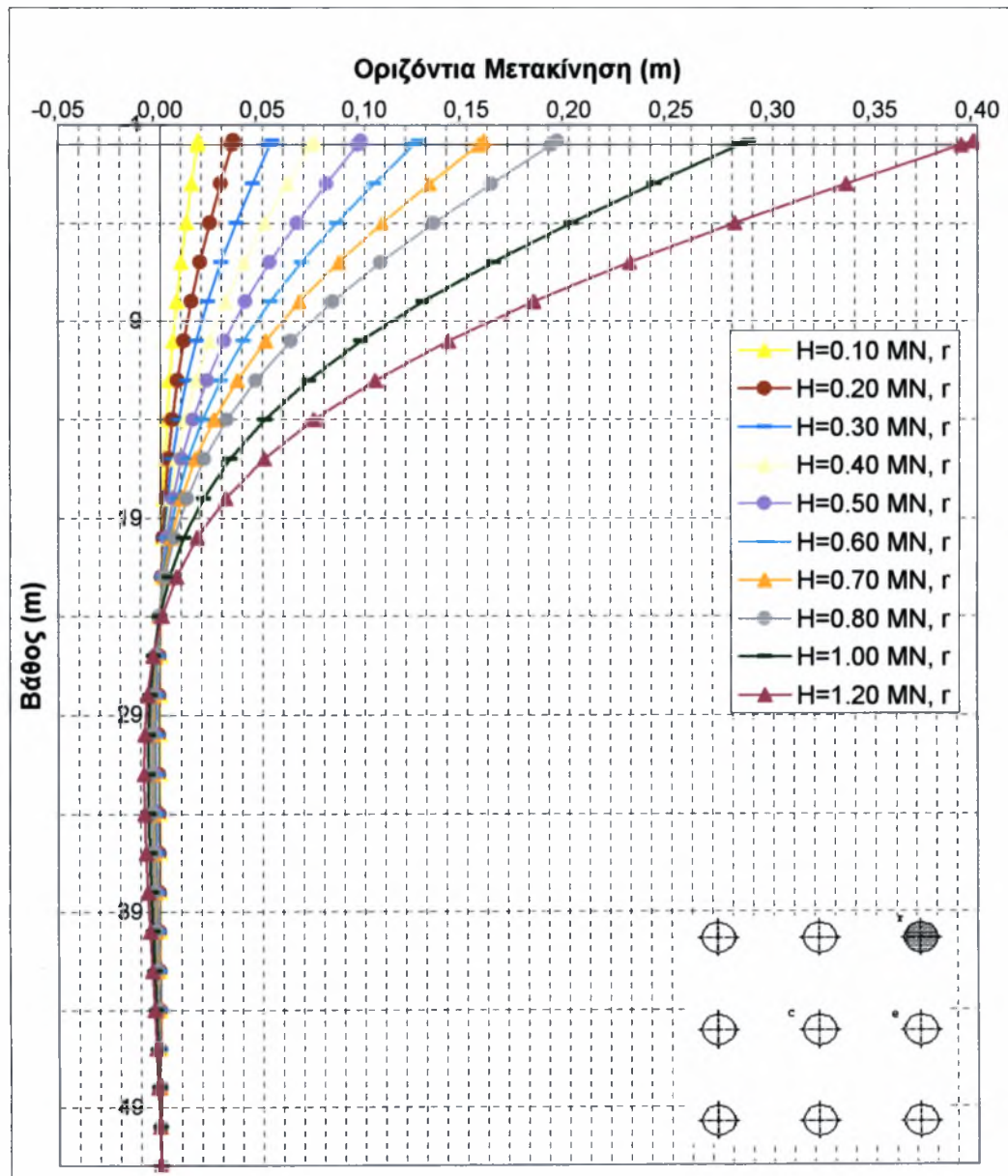
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 3D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου  $e$  της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε μαλακή άργιλο.

Σχήμα Β.5

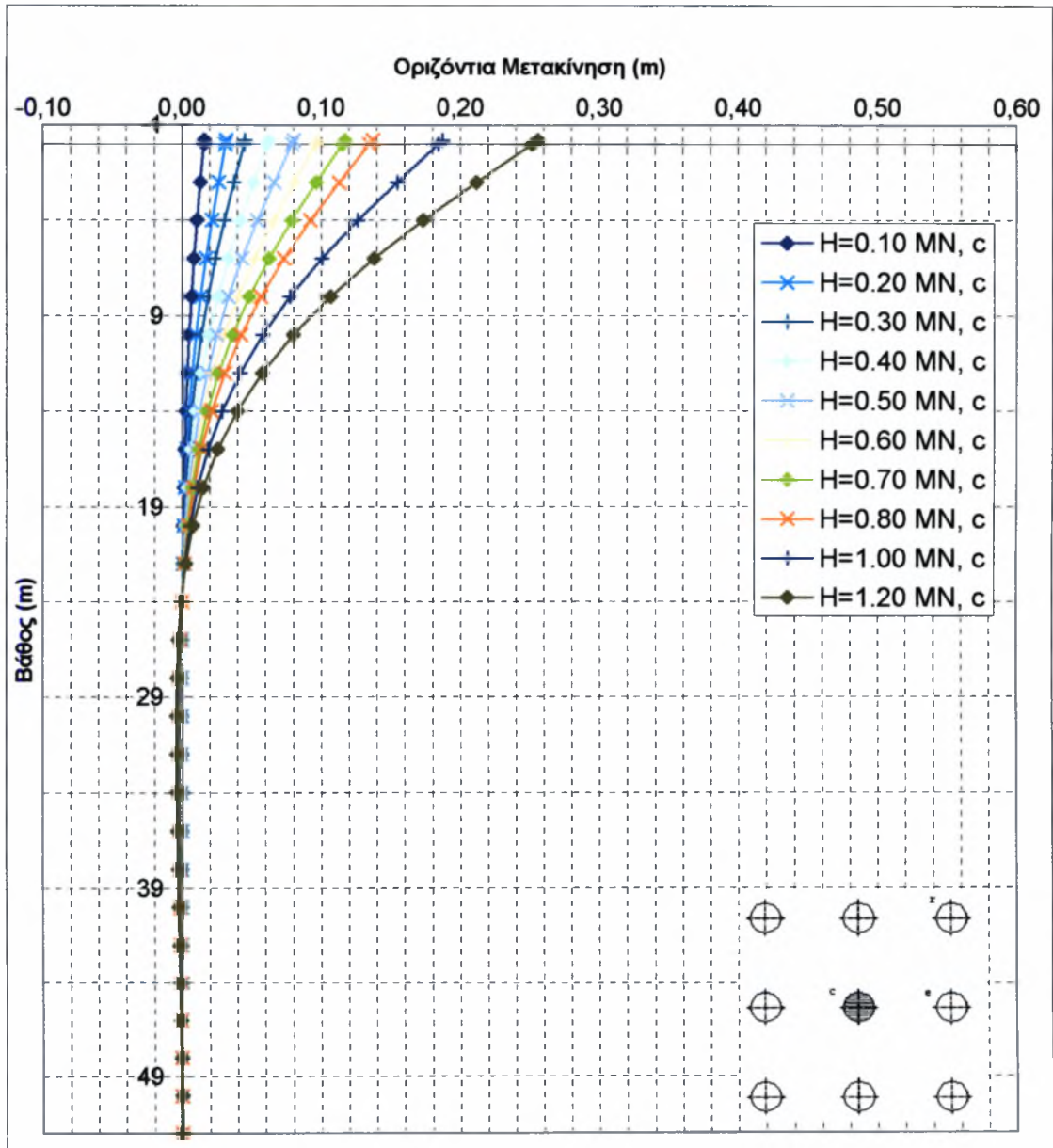
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 3D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου r της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε μαλακή άργιλο.

Σχήμα Β.6

Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 6D

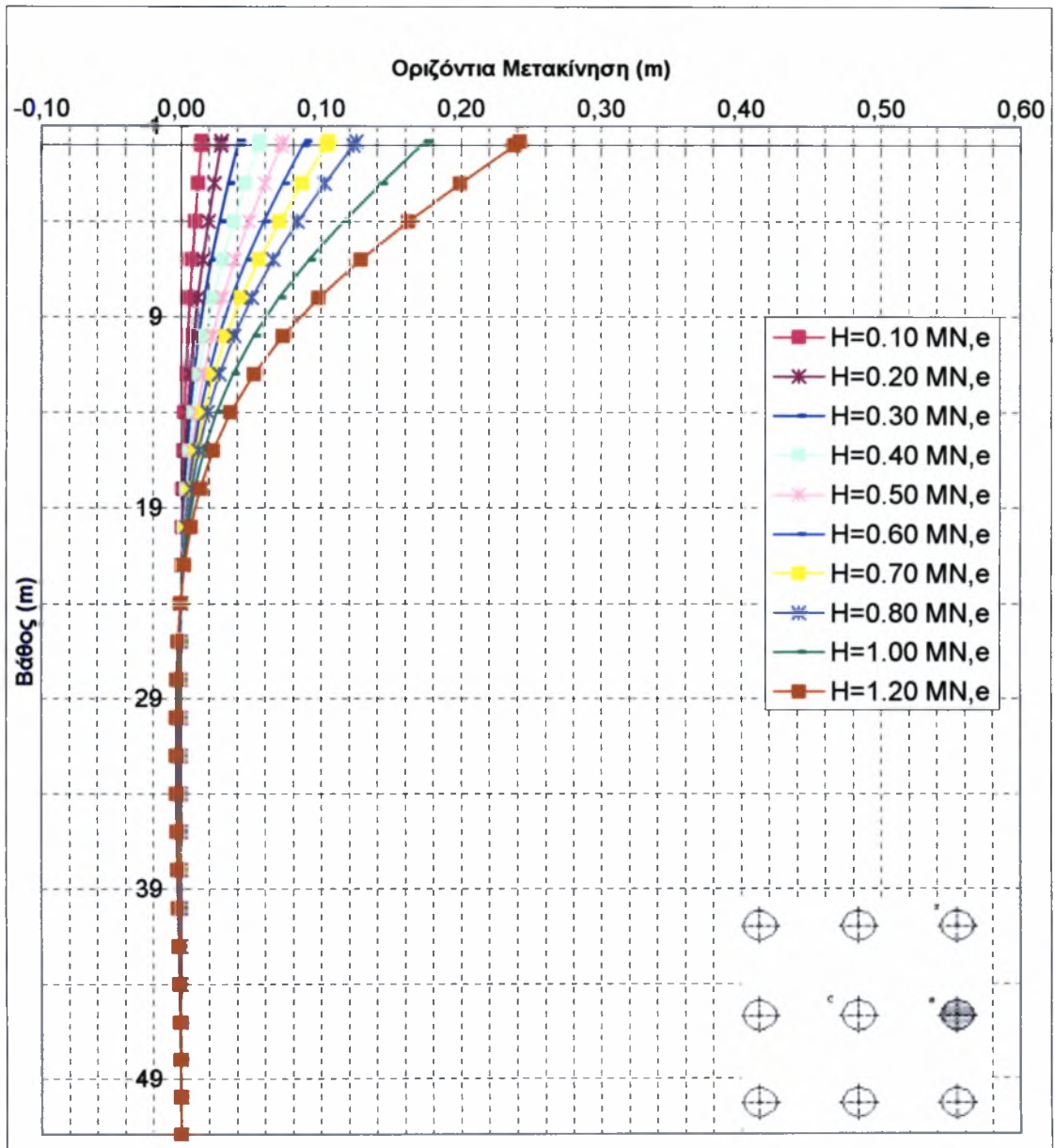


Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου c της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε μαλακή άργιλο.

Σχήμα Β.7



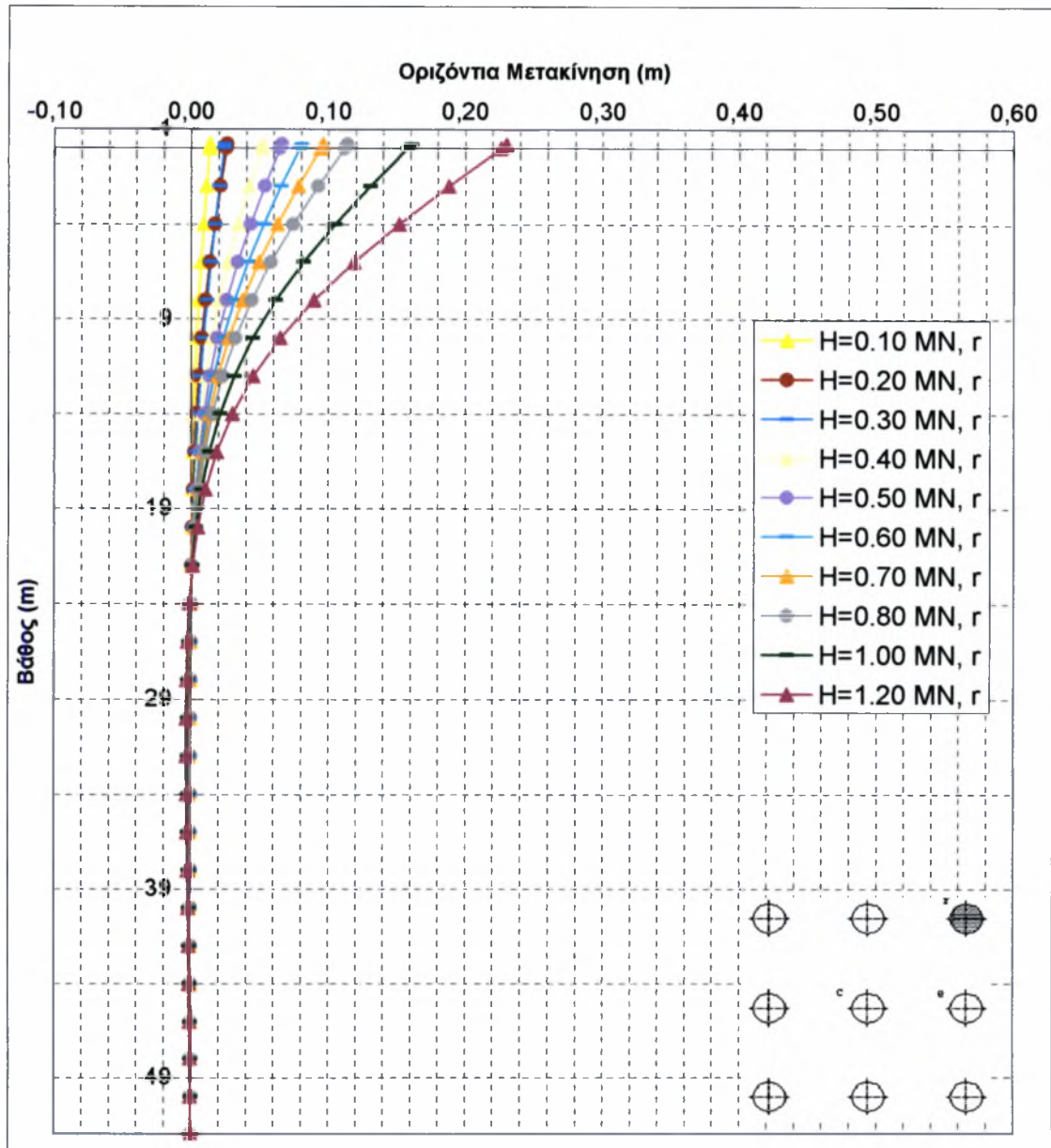
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 6D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου  $e$  της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε μαλακή άργιλο

Σχήμα Β.8

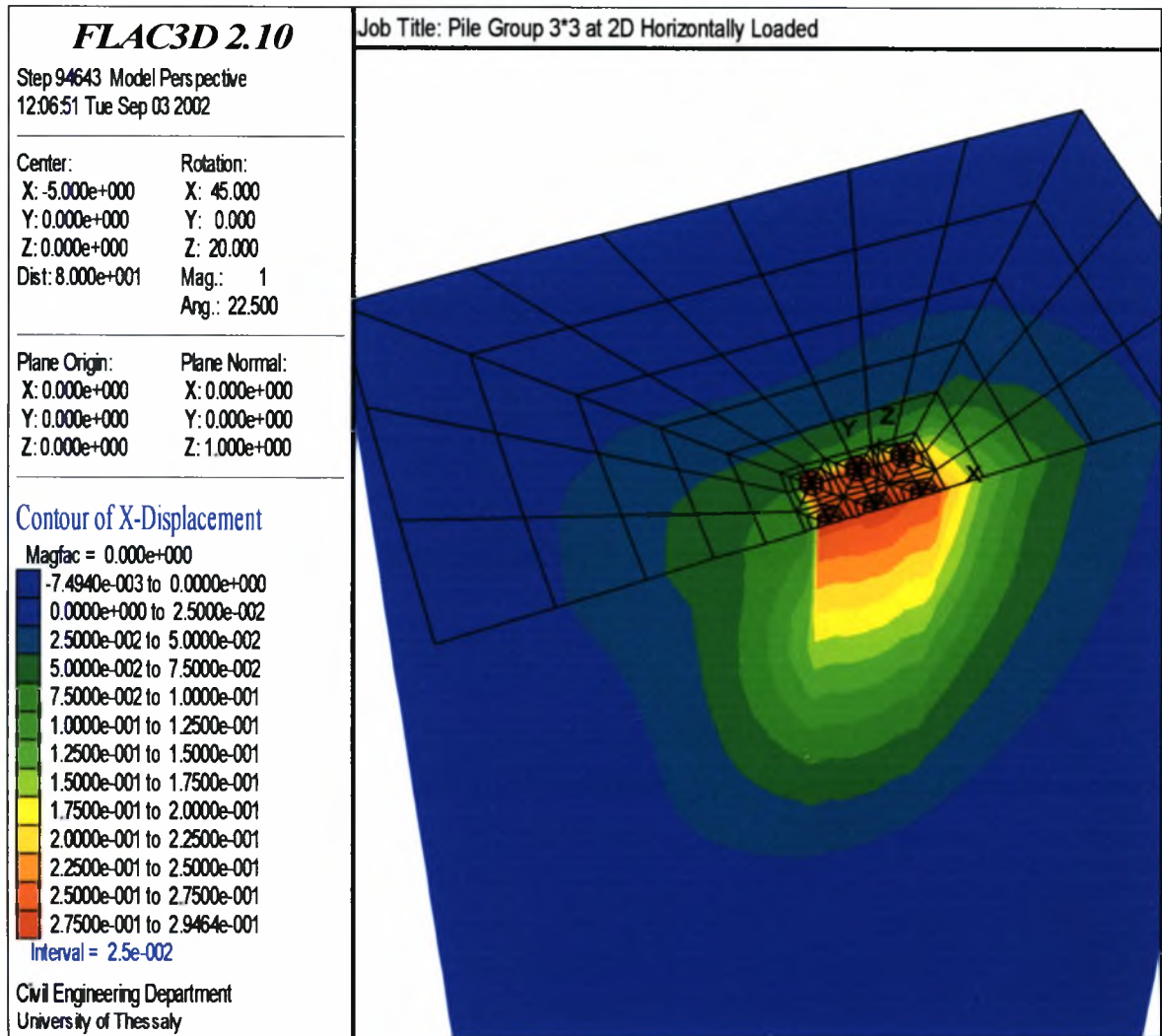
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 6D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου r της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε μαλακή άργιλο.

Σχήμα Β.9

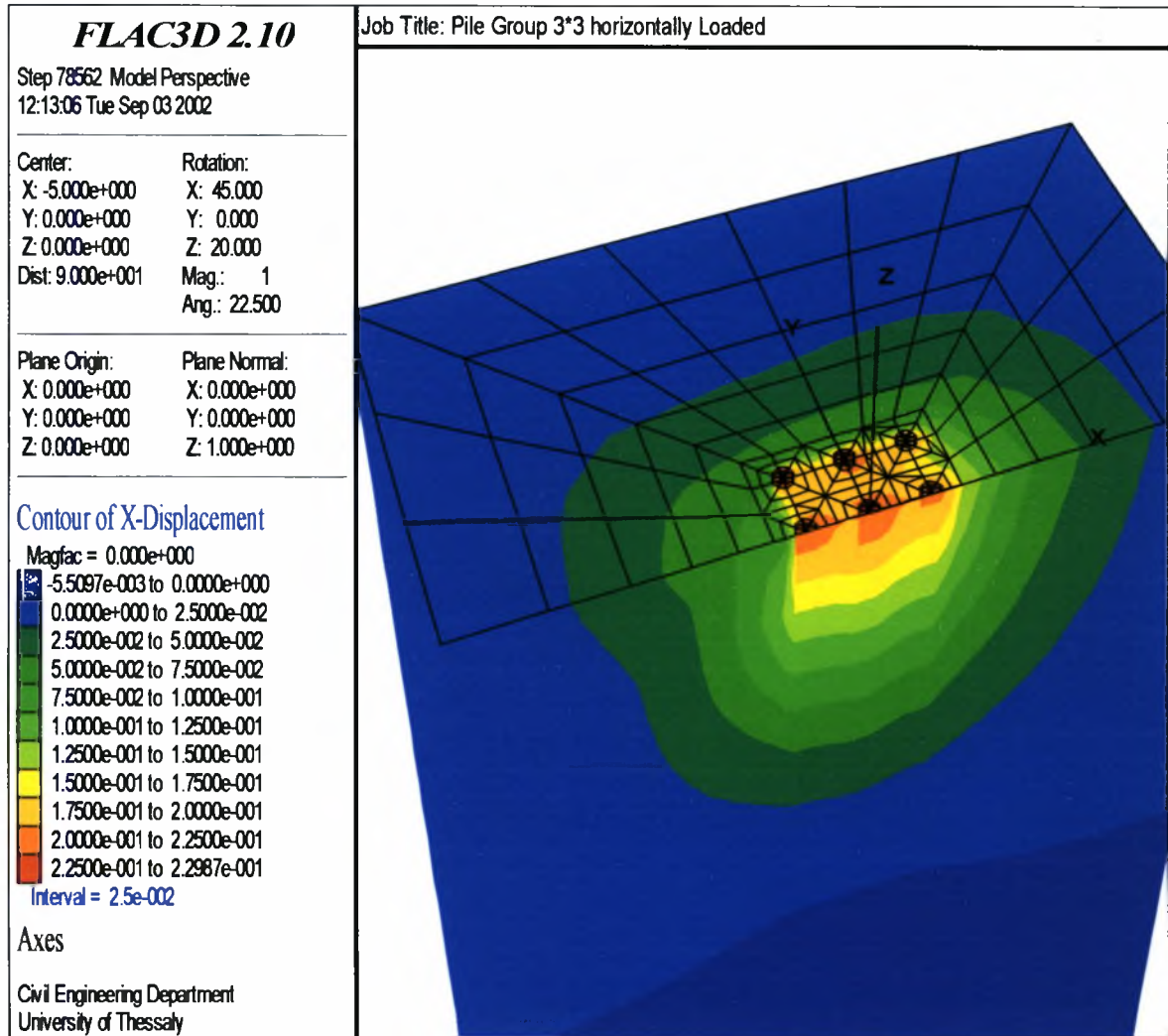
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 2D



Περιοχές ίσων μετακινήσεων στη διεύθυνση της φόρτισης για απόσταση 2D.

Σχήμα Β.10

Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 3D

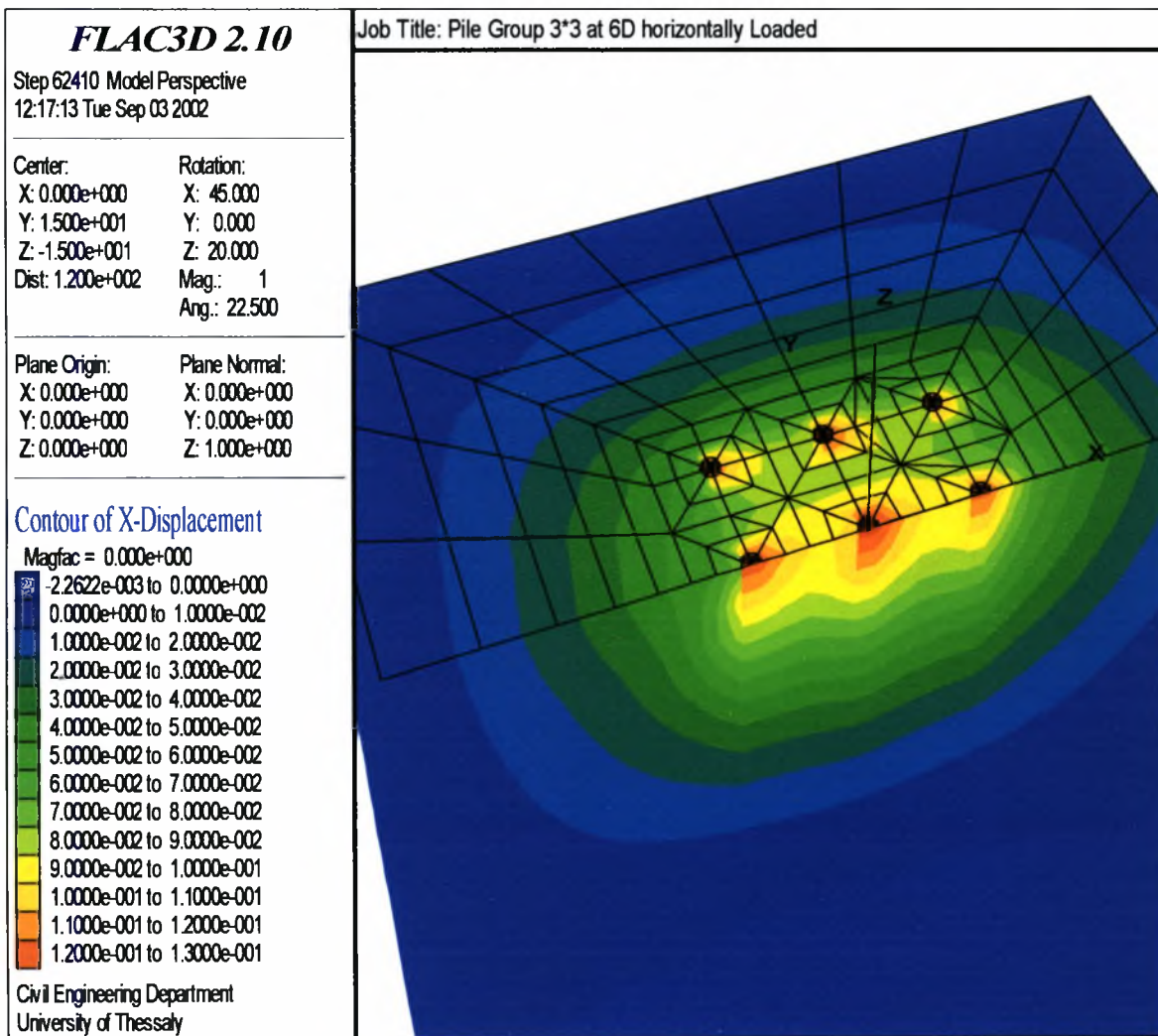


Περιοχές ίσων μετακινήσεων στη διεύθυνση της φόρτισης για απόσταση 3D.

Σχήμα Β.11

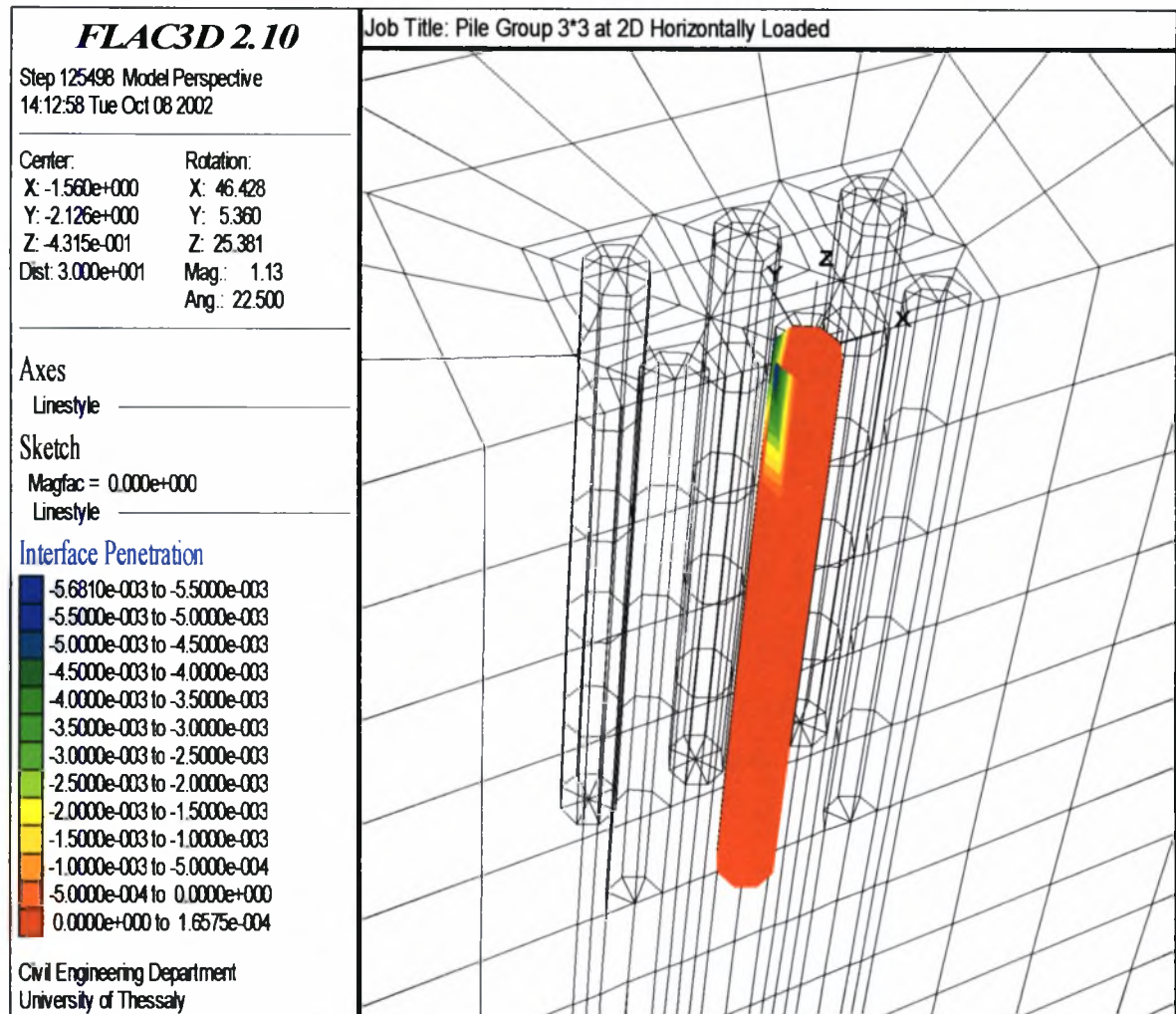


Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 6D



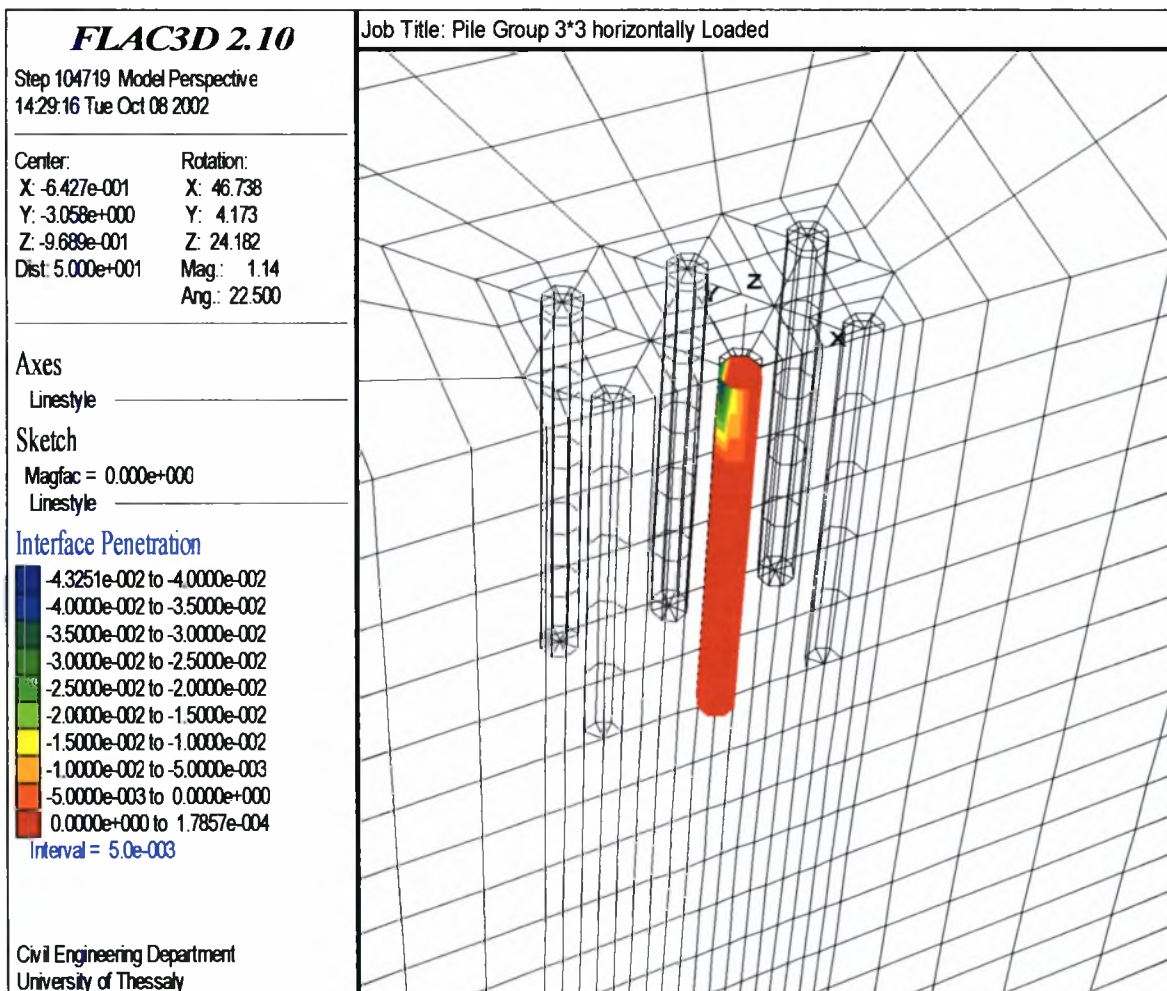
Περιοχές ίσων μετακινήσεων στη διεύθυνση της φόρτισης για απόσταση 6D.

Σχήμα Β.12



Κατανομή του κενού της διεπιφάνειας κατά μήκος του πασσάλου για  $H=1,2 \text{ MN}$ ,  
για σχετική απόσταση των πασσάλων  $S=2D$

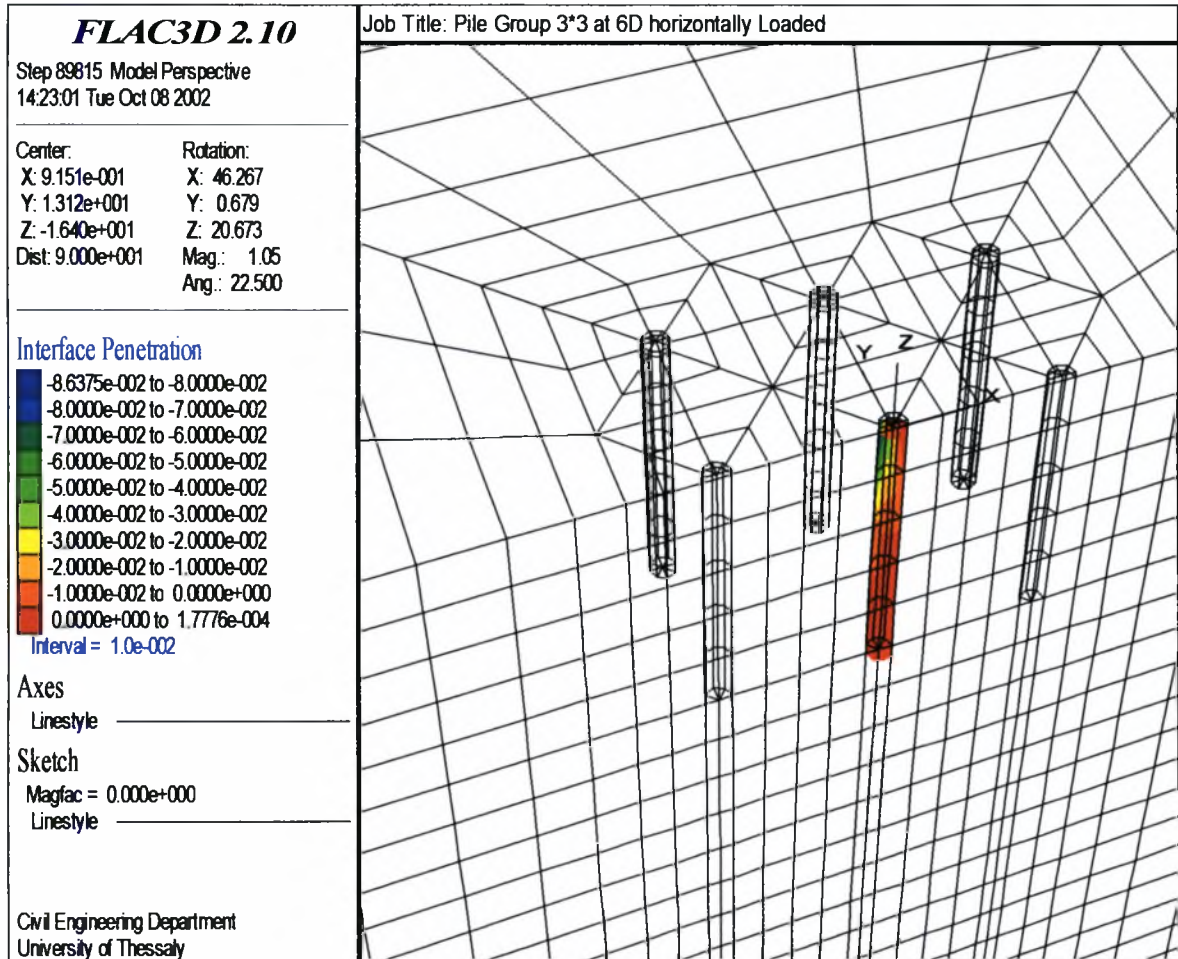
Σχήμα Β.13



Κατανομή του κενού της διεπιφάνειας κατά μήκος του πασσάλου για  $H=1,2$  MN,  
για σχετική απόσταση των πασσάλων  $S=3D$

Σχήμα Β.14





Κατανομή του κενού της διεπιφάνειας κατά μήκος του πασσάλου για  $H=1,2$  MN,  
για σχετική απόσταση των πασσάλων  $S=6D$

Σχήμα Β.15

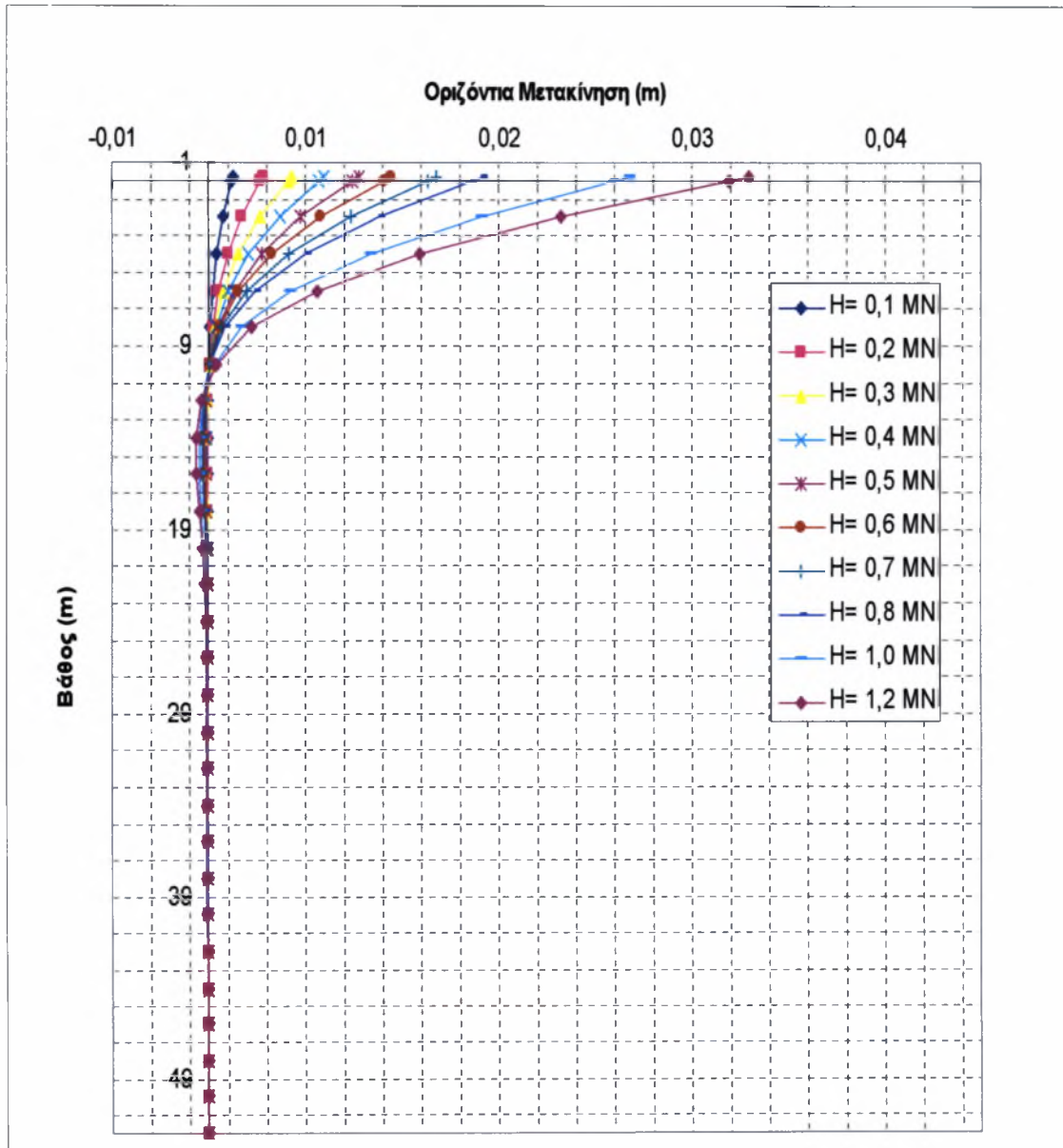


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



**Απεικόνιση Αποτελεσμάτων Παραμετρικής Ανάλυσης Ομάδας Πασσάλων  
σε Σκληρή Άργιλο**

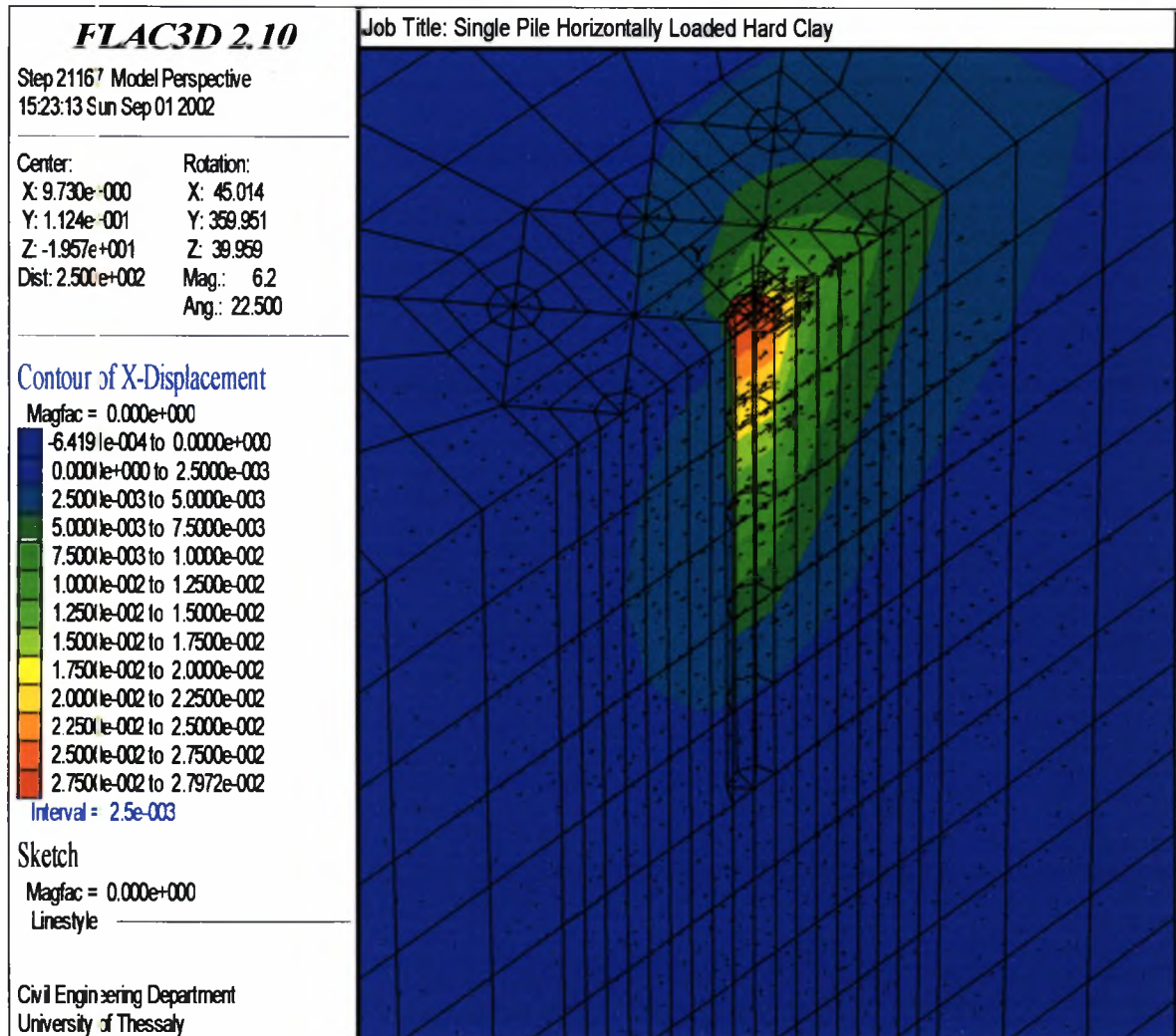
Μεμονωμένος πάσσαλος



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης μεμονωμένου πασσάλου συναρτήσει του βάθους σε σιφρή άργιλο.

Σχήμα Γ.1

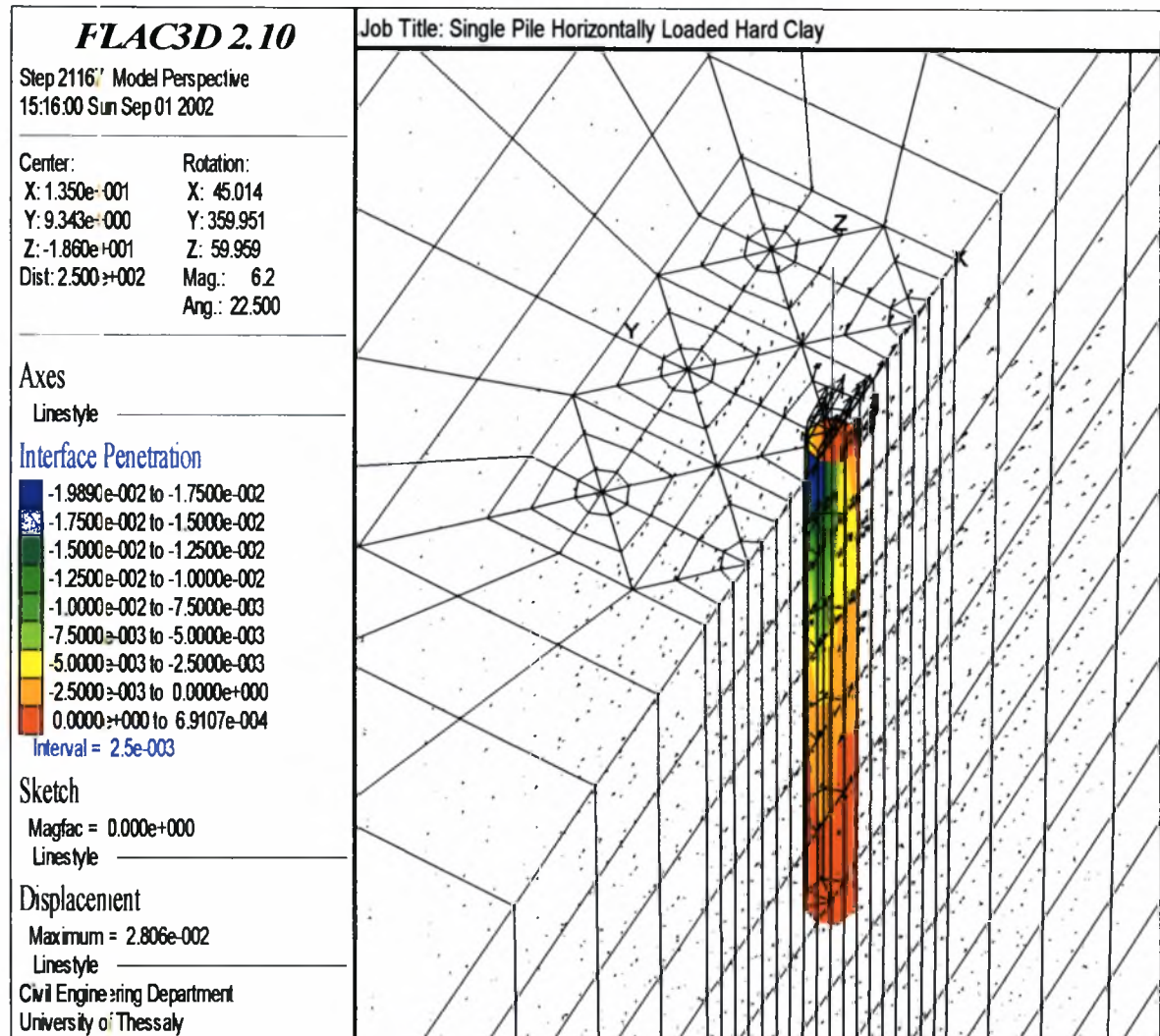
### Μεμονωμένος πάσσαλος



Περιοχές ίσων μετακινήσεων και διανύσματα μετακινήσεων για  $H=1.2\text{MN}$  σε σιφρή άργιλο.

Σχήμα Γ.2

Μεμονωμένος πάσσαλος

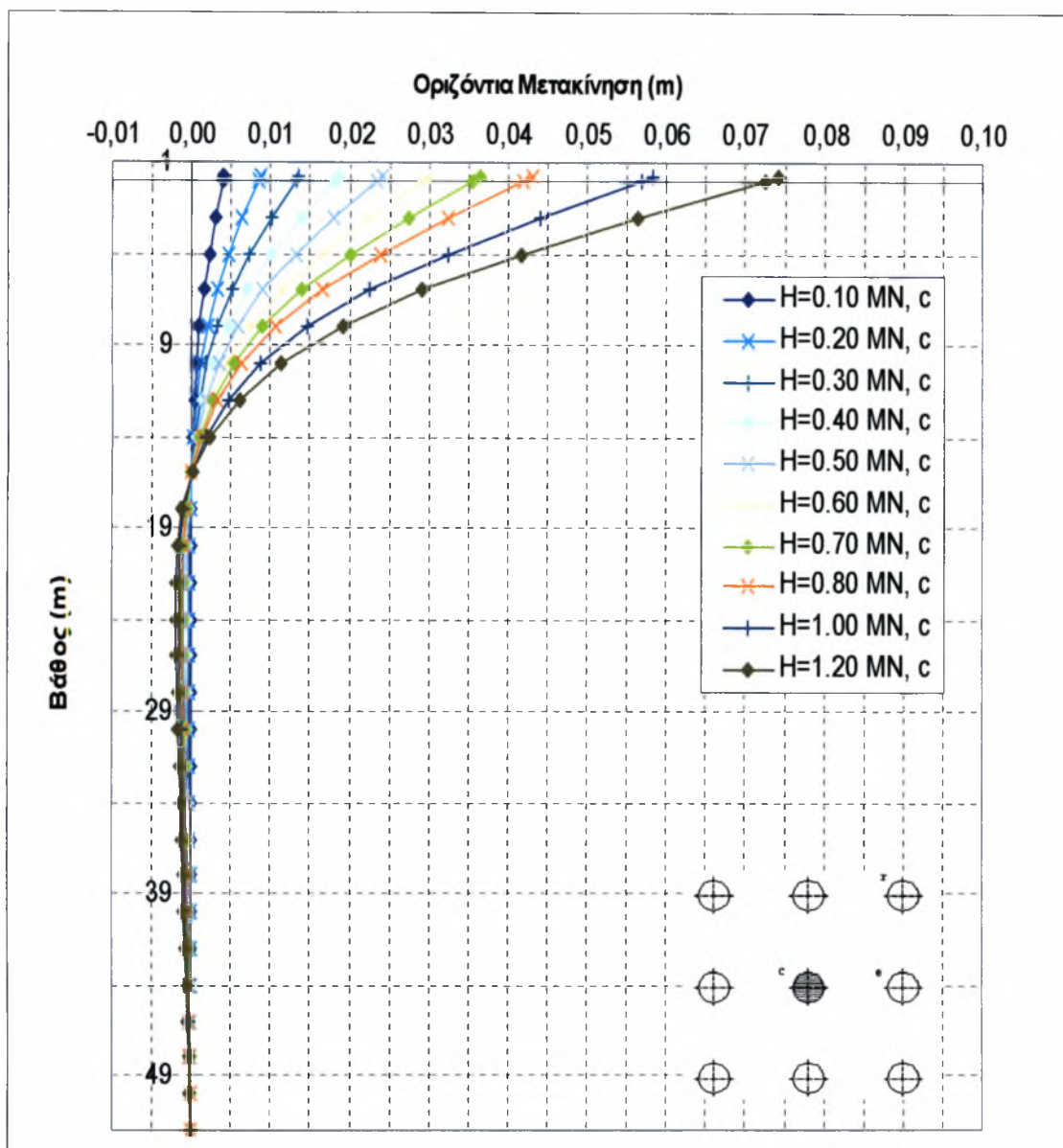


Κατανομή της διείσδυσης των διεπιφανειών κατά μήκος του πασσάλου για H=1.2MN

Σχήμα Γ.3



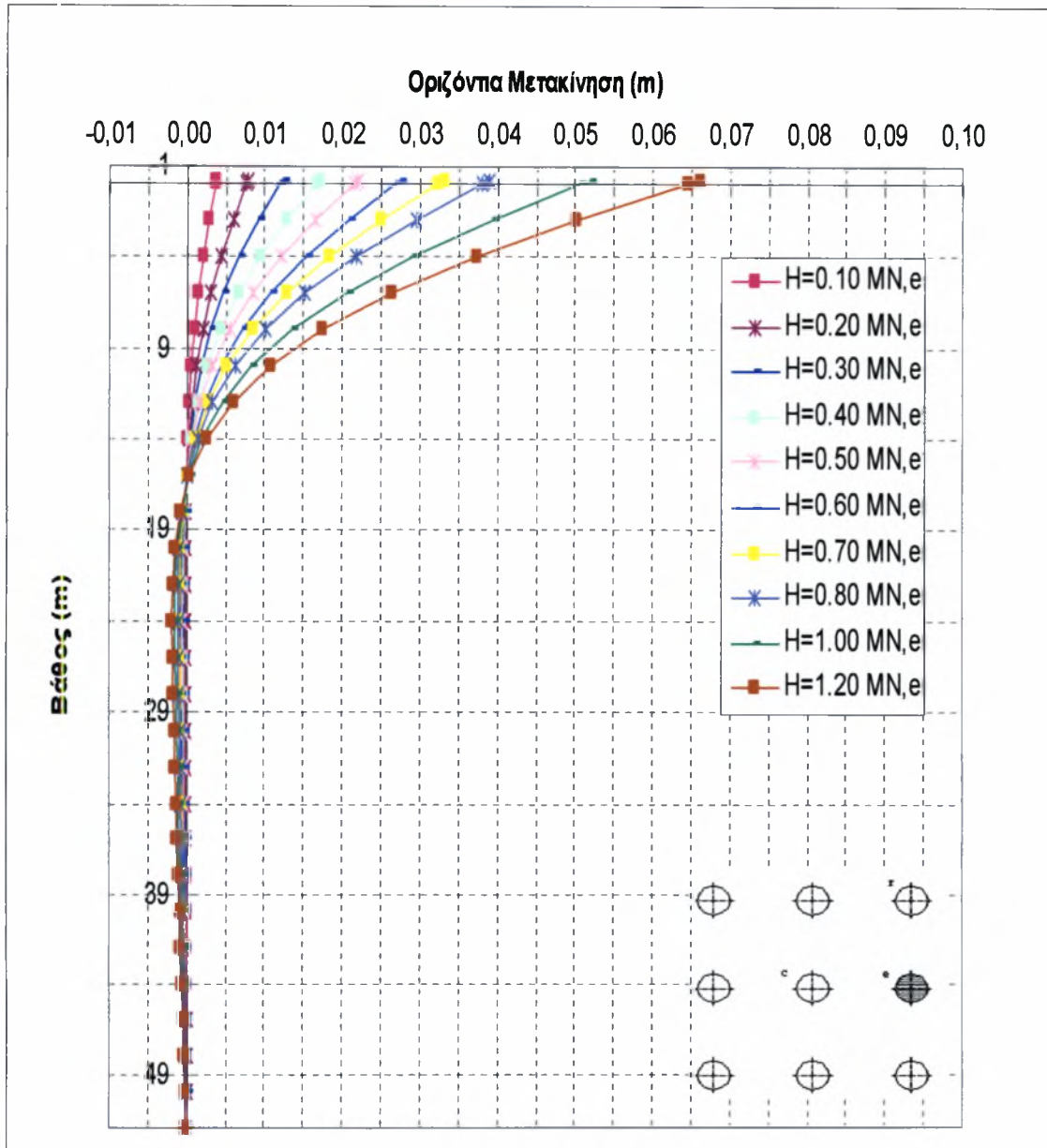
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 2D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου c της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε σιφήρή άργιλο.

Σχήμα Γ.4

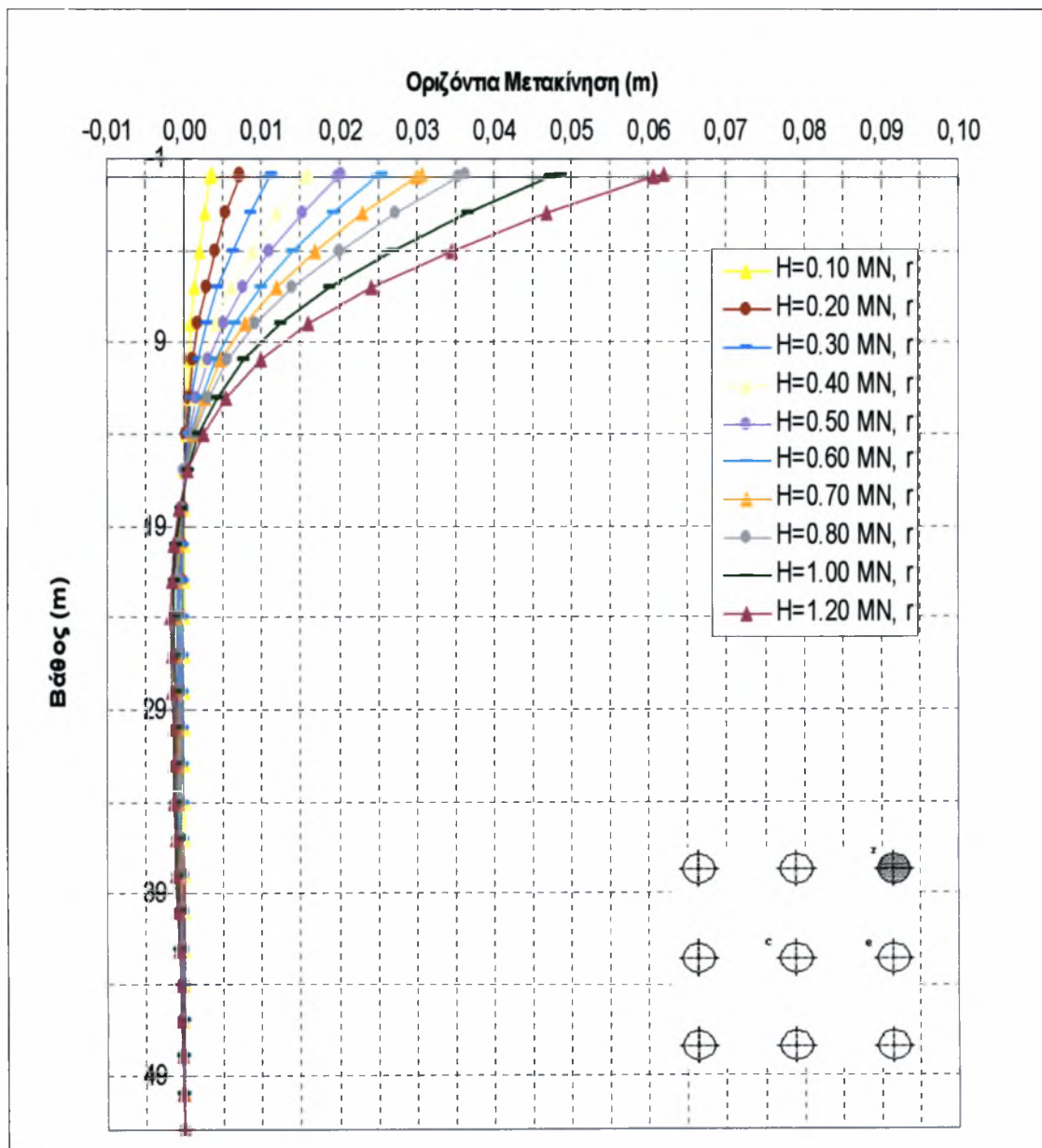
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 2D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου  $e$  της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε στιφρή άργιλο.

Σχήμα Γ.5

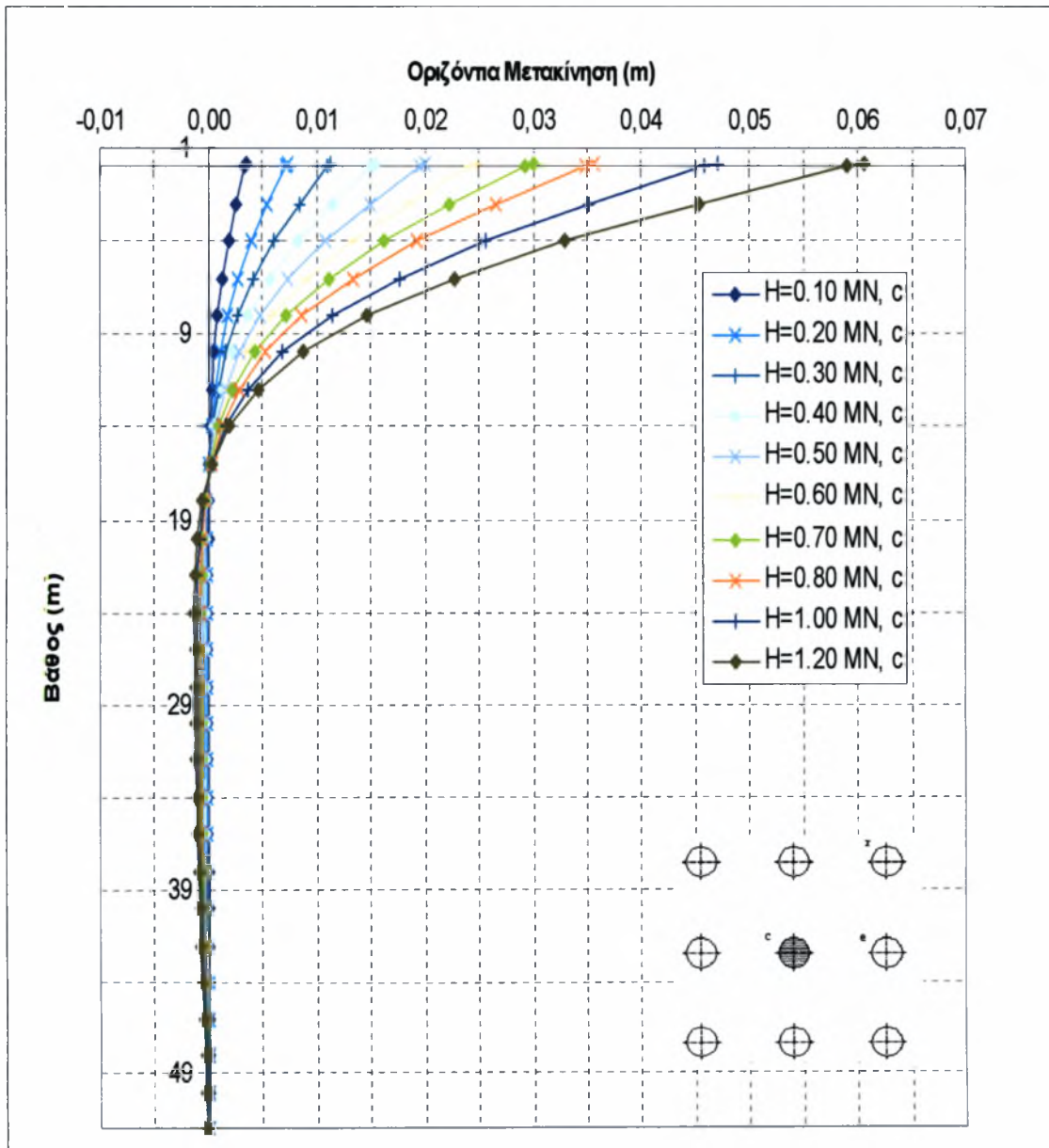
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 2D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου  $r$  της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε σιφρή άργιλο.

Σχήμα Γ.6

Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 3D

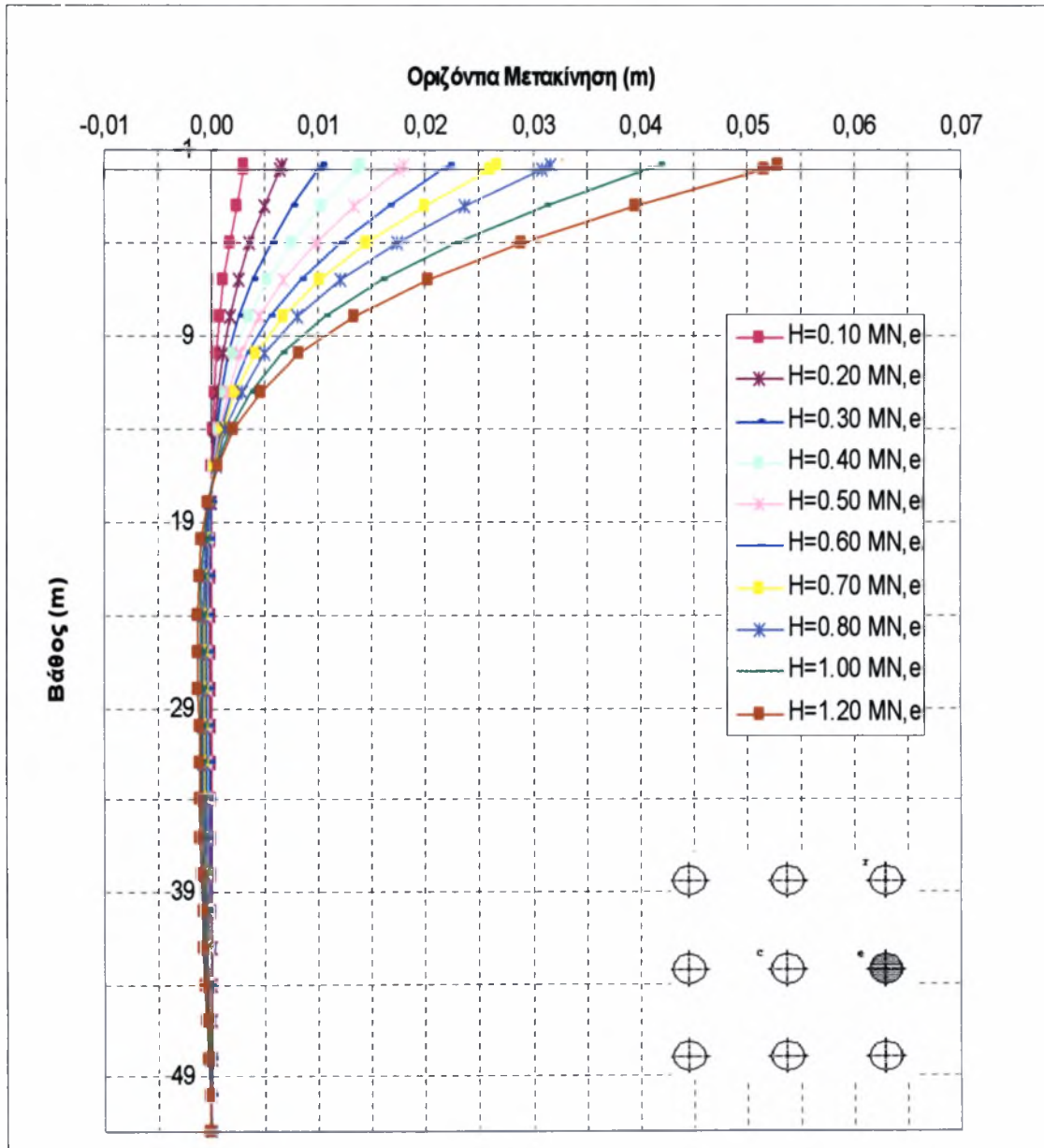


Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου c της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε σιφνή άργιλο.

Σχήμα Γ.7



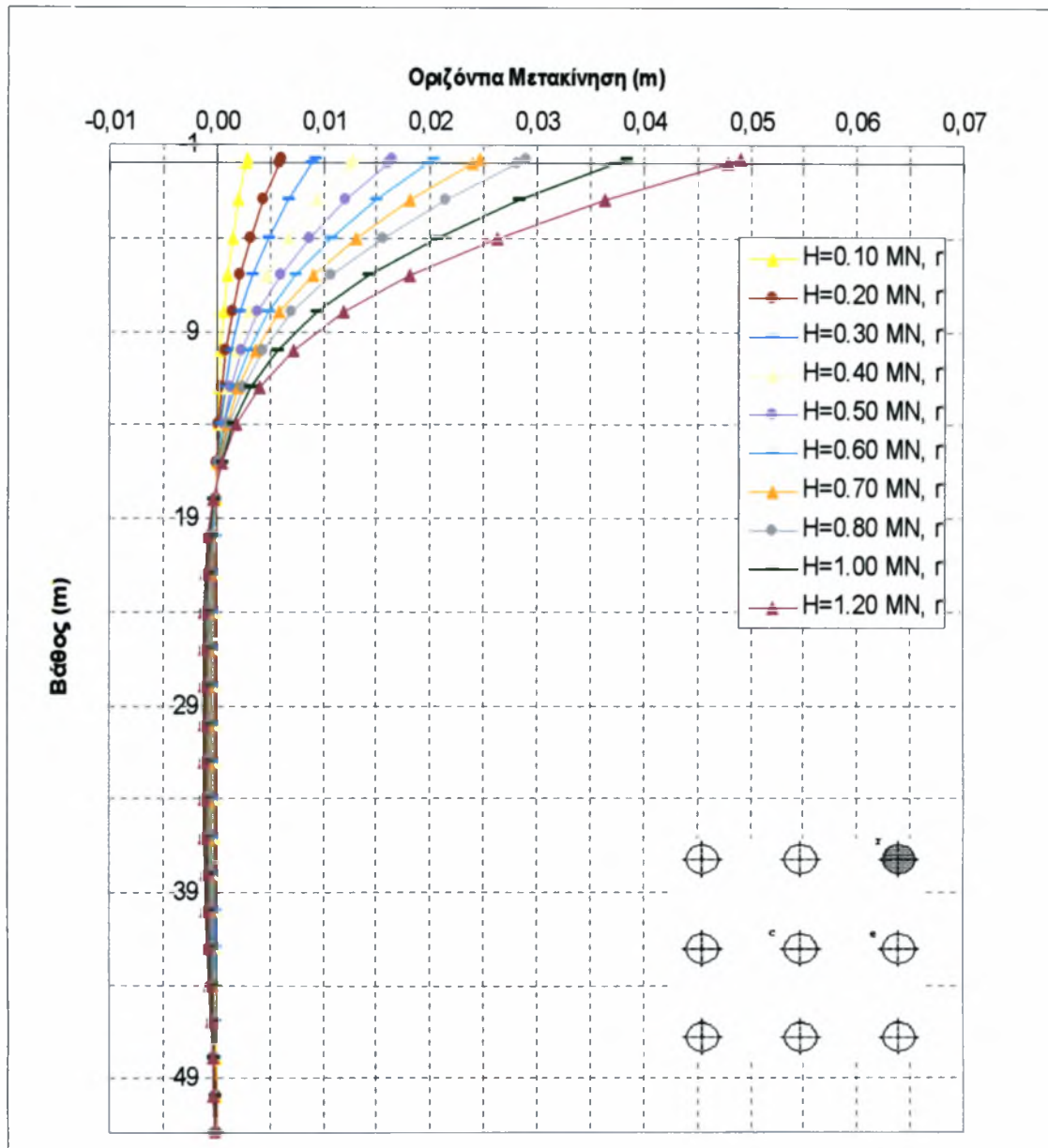
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 3D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου  $e$  της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε σιφρή άργιλο.

Σχήμα Γ.8

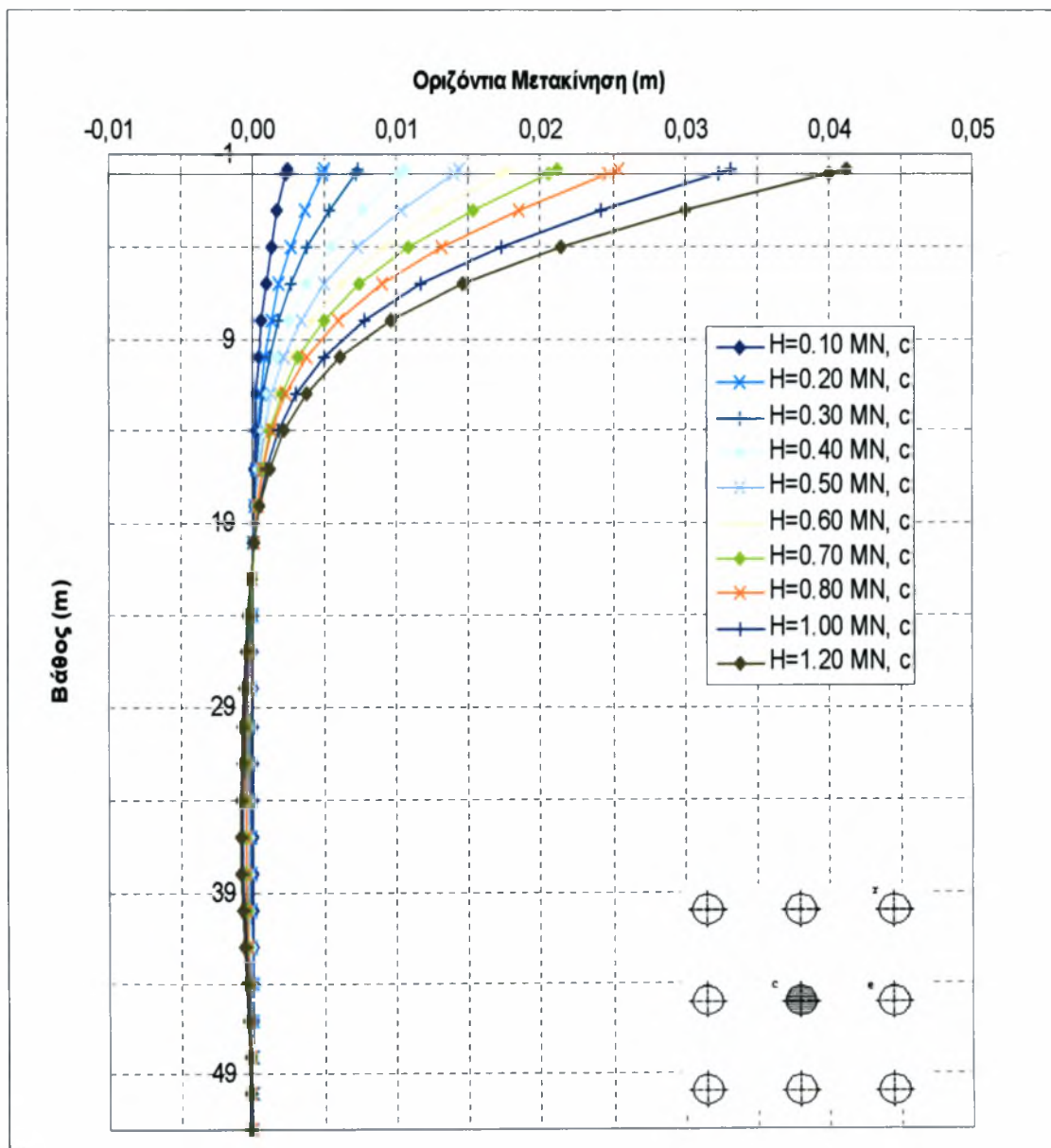
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 3D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου  $r$  της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε σιφνή άργιλο.

Σχήμα Γ.9

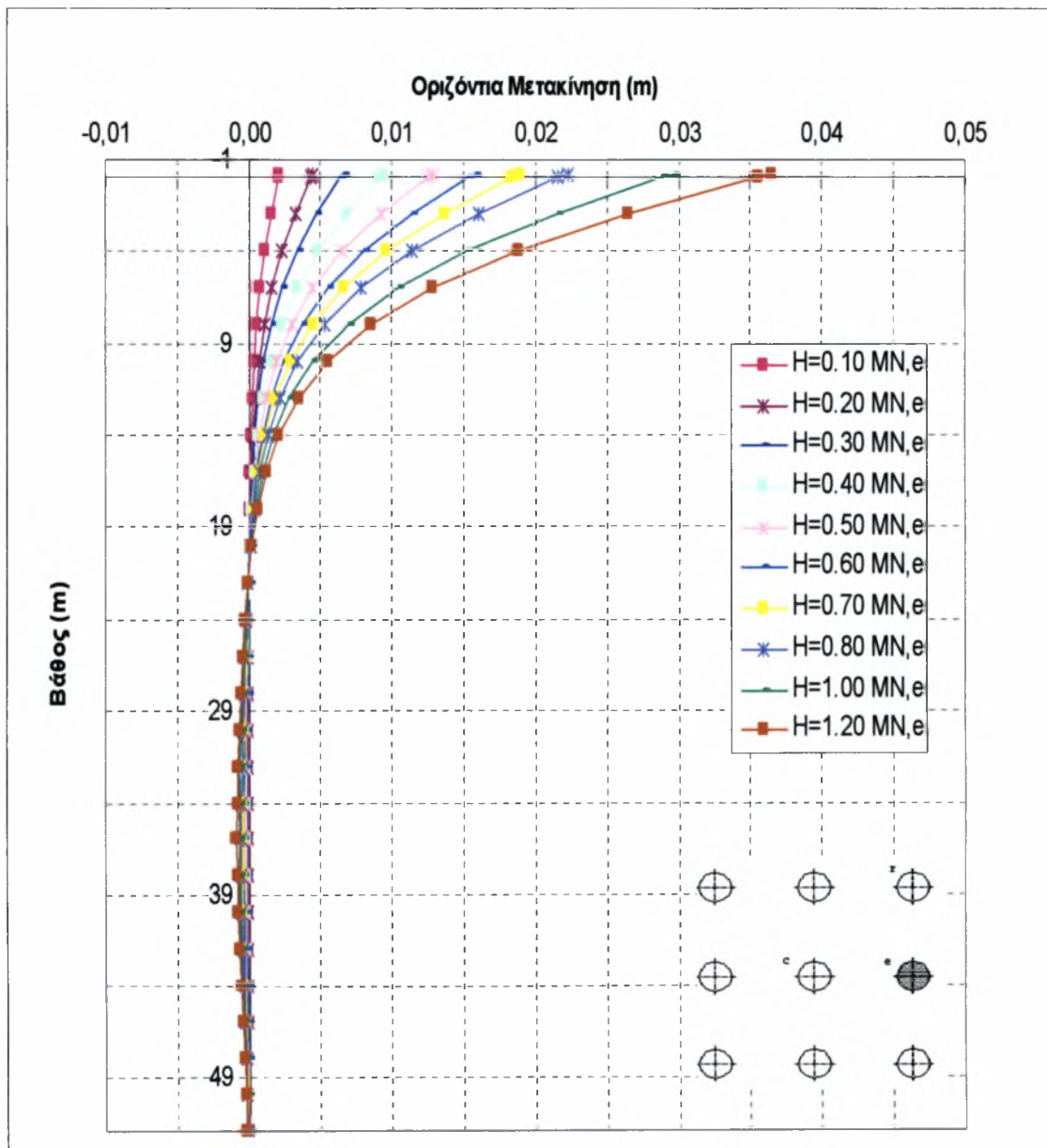
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 6D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου c της ομάδας συναρτήσεσι του βάθους, σε: σιπρή άργιλο.

Σχήμα Γ.10

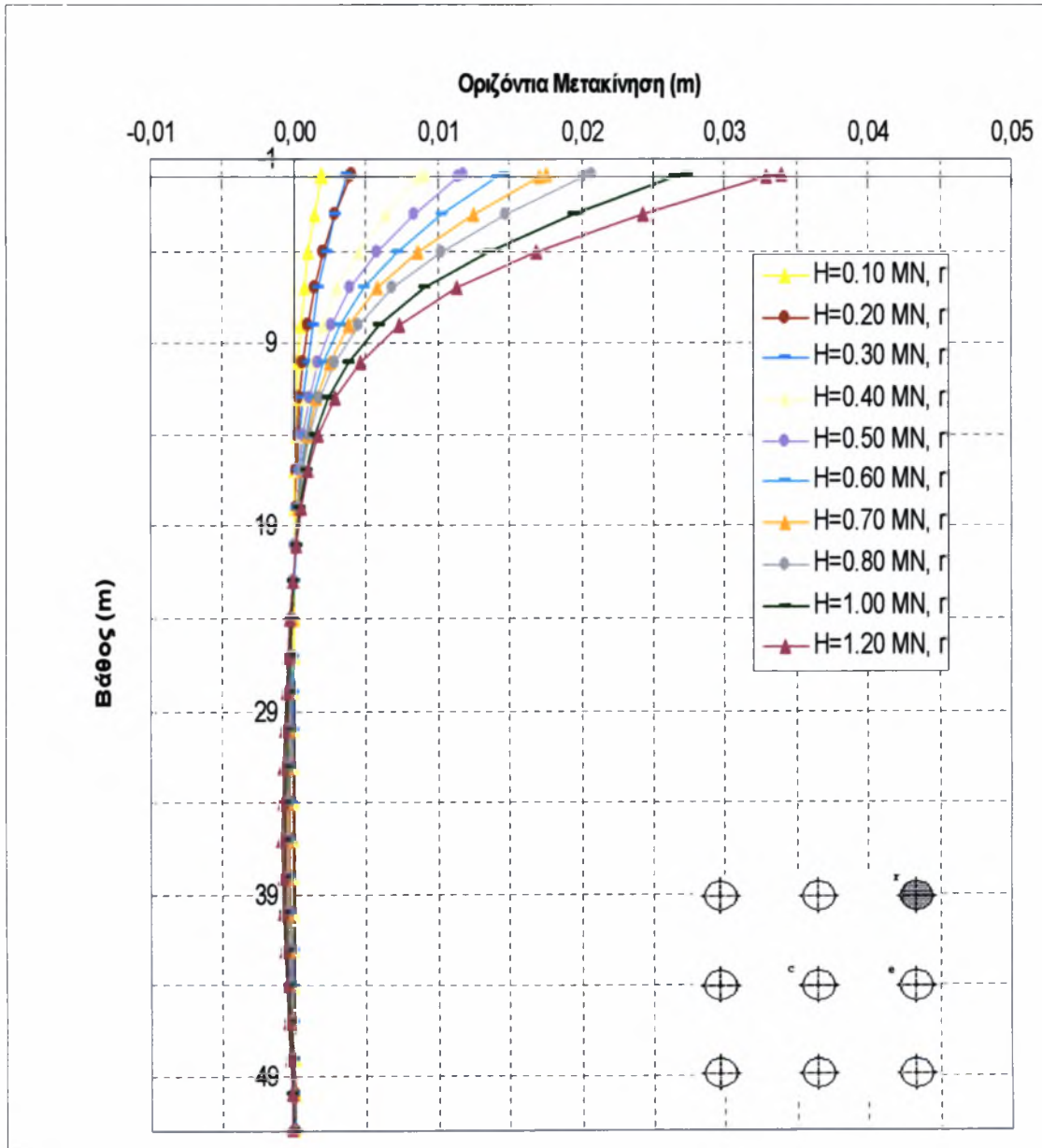
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 6D



Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου  $e$  της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε: σφιγρή άργιλο.

Σχήμα Γ.11

Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 6D

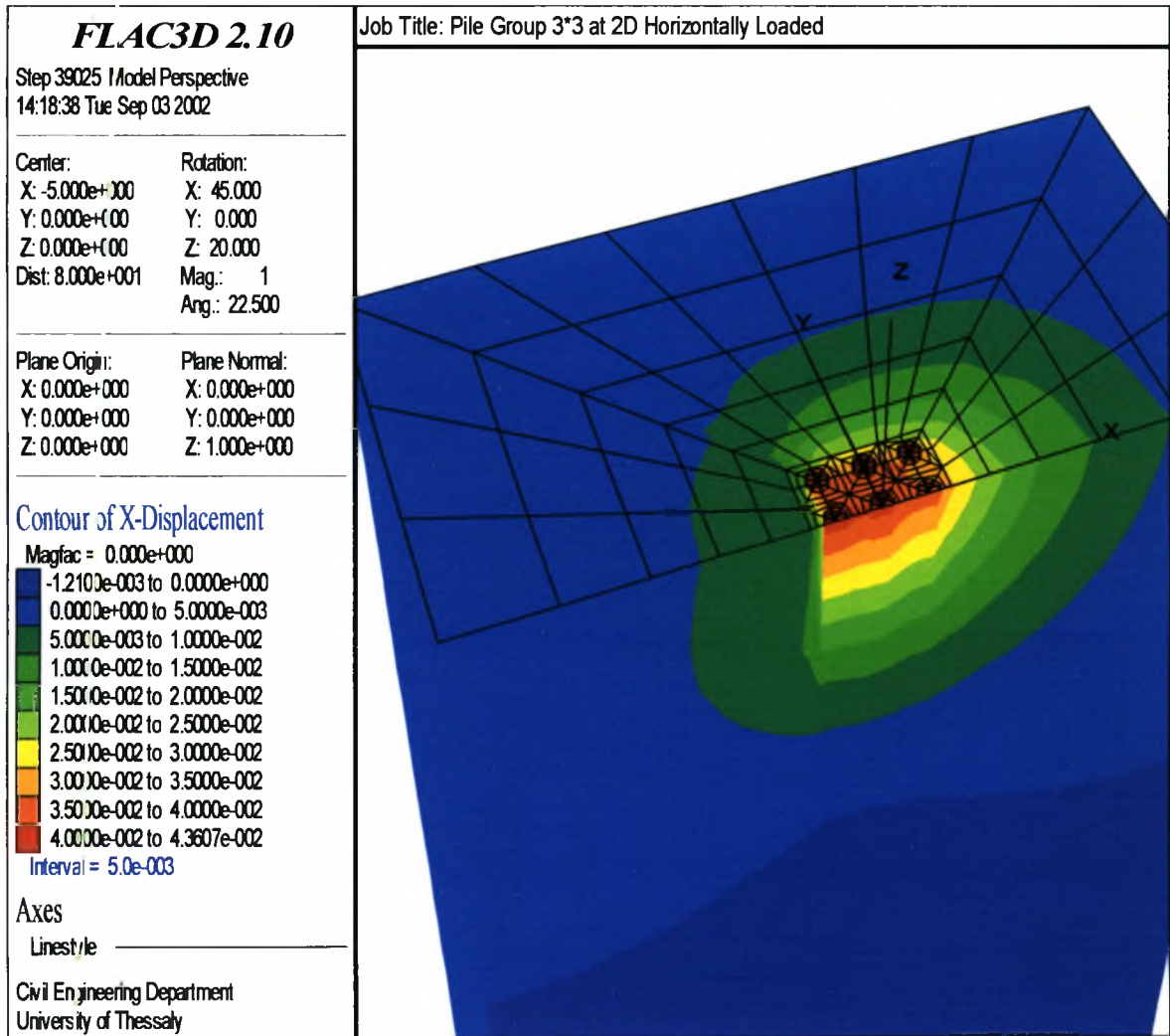


Μεταβολή της οριζόντιας μετακίνησης του πασσάλου r της ομάδας συναρτήσει του βάθους, σε στιφρή άργιλο

Σχήμα Γ.12



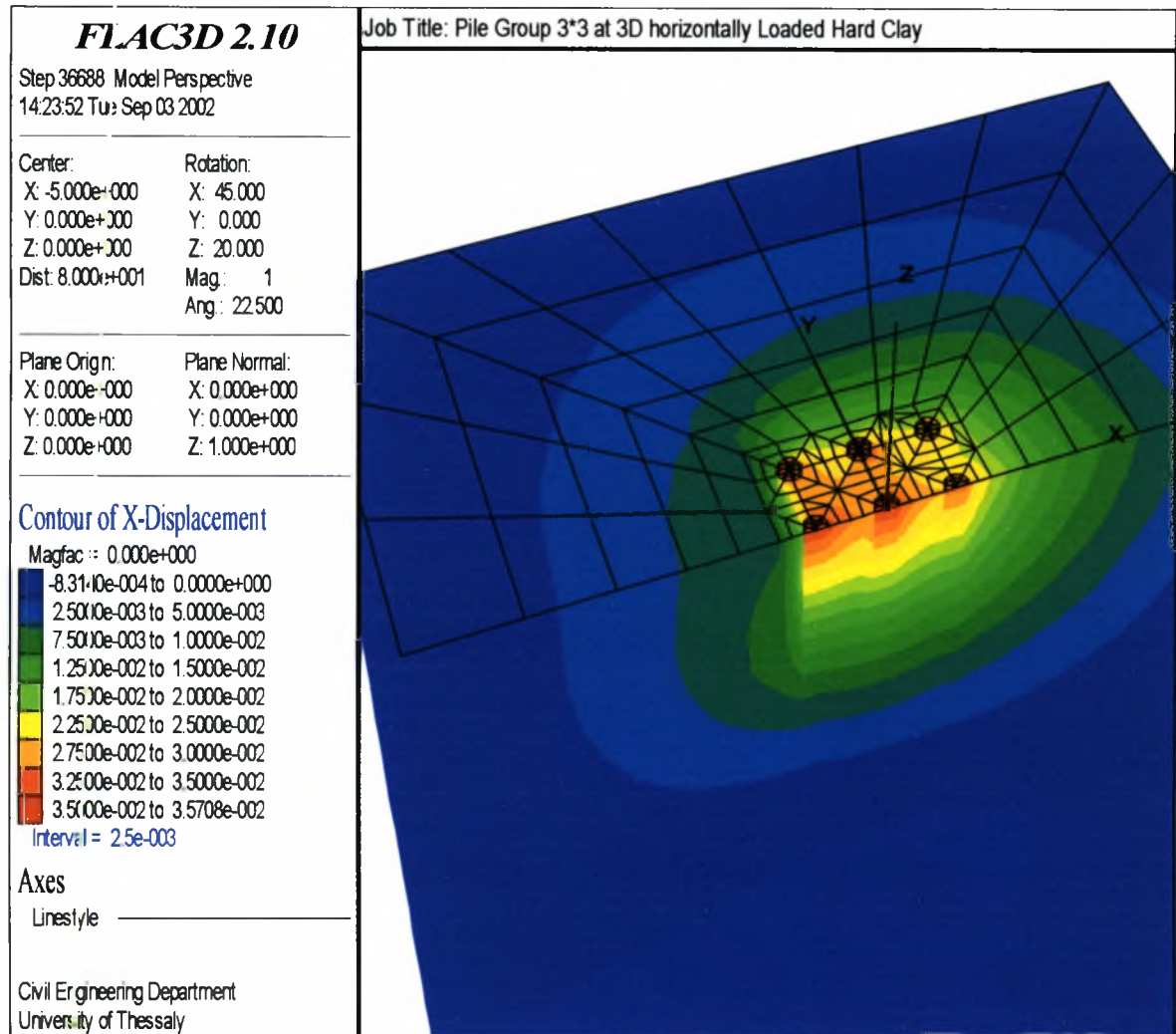
Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 2D



Περιοχές ίσων μετακινήσεων στη διεύθυνση της φόρτισης για απόσταση 2D.

Σχήμα Γ.13

### Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 3D

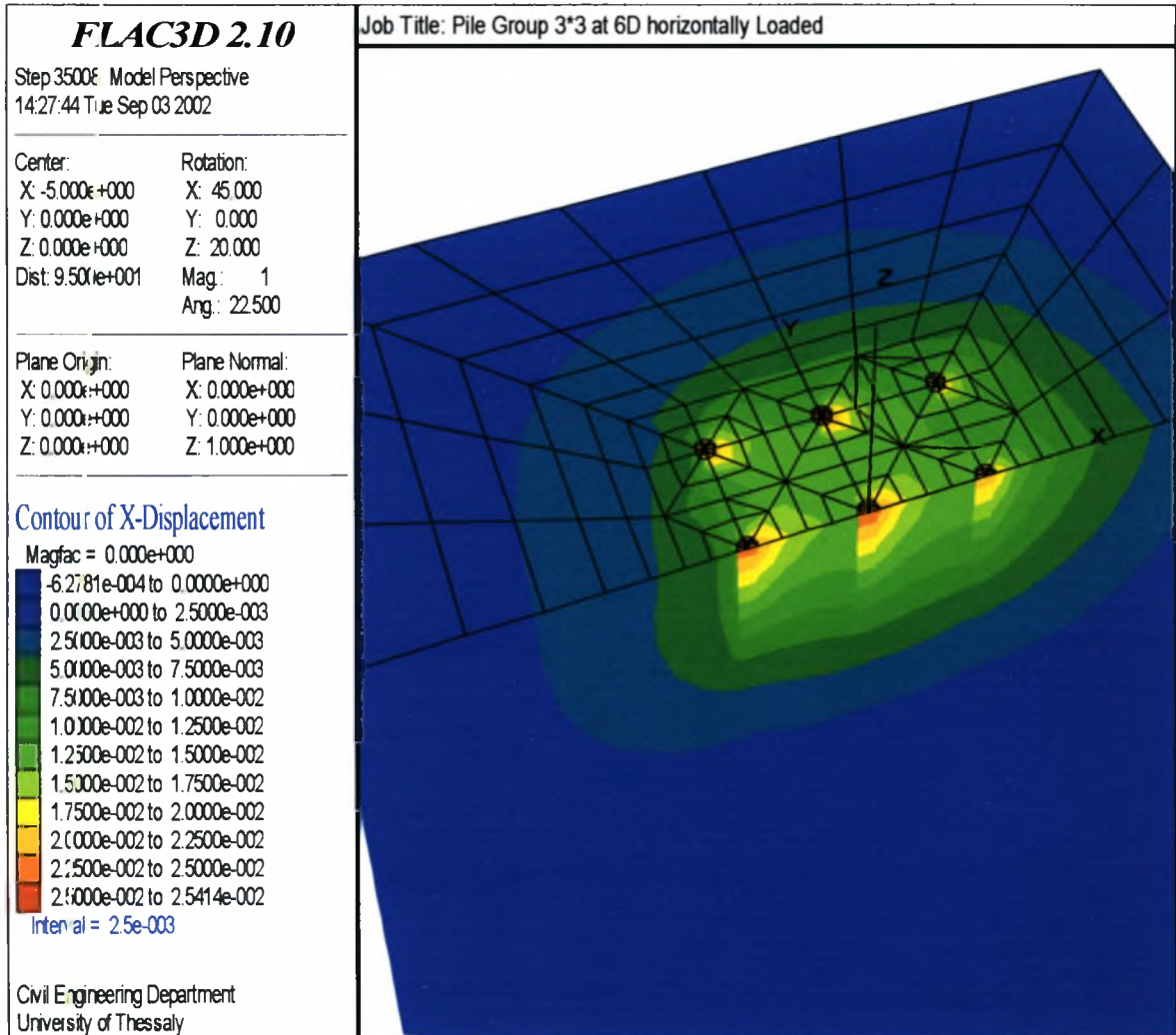


Περιοχές ίσων μετακινήσεων στη διεύθυνση της φόρτισης για απόσταση 3D.

Σχήμα Γ.14

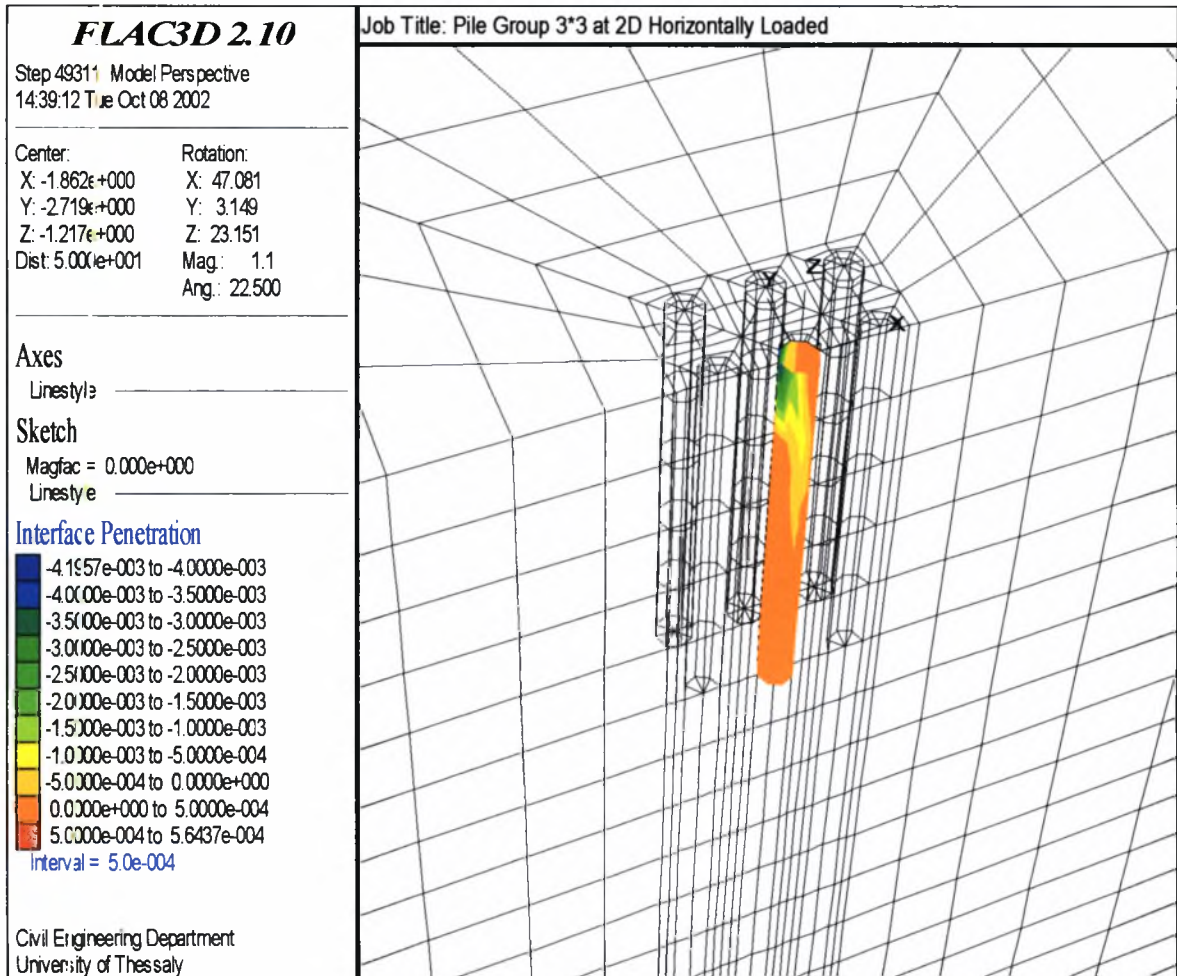


Ομάδα πασσάλων σε απόσταση 6D



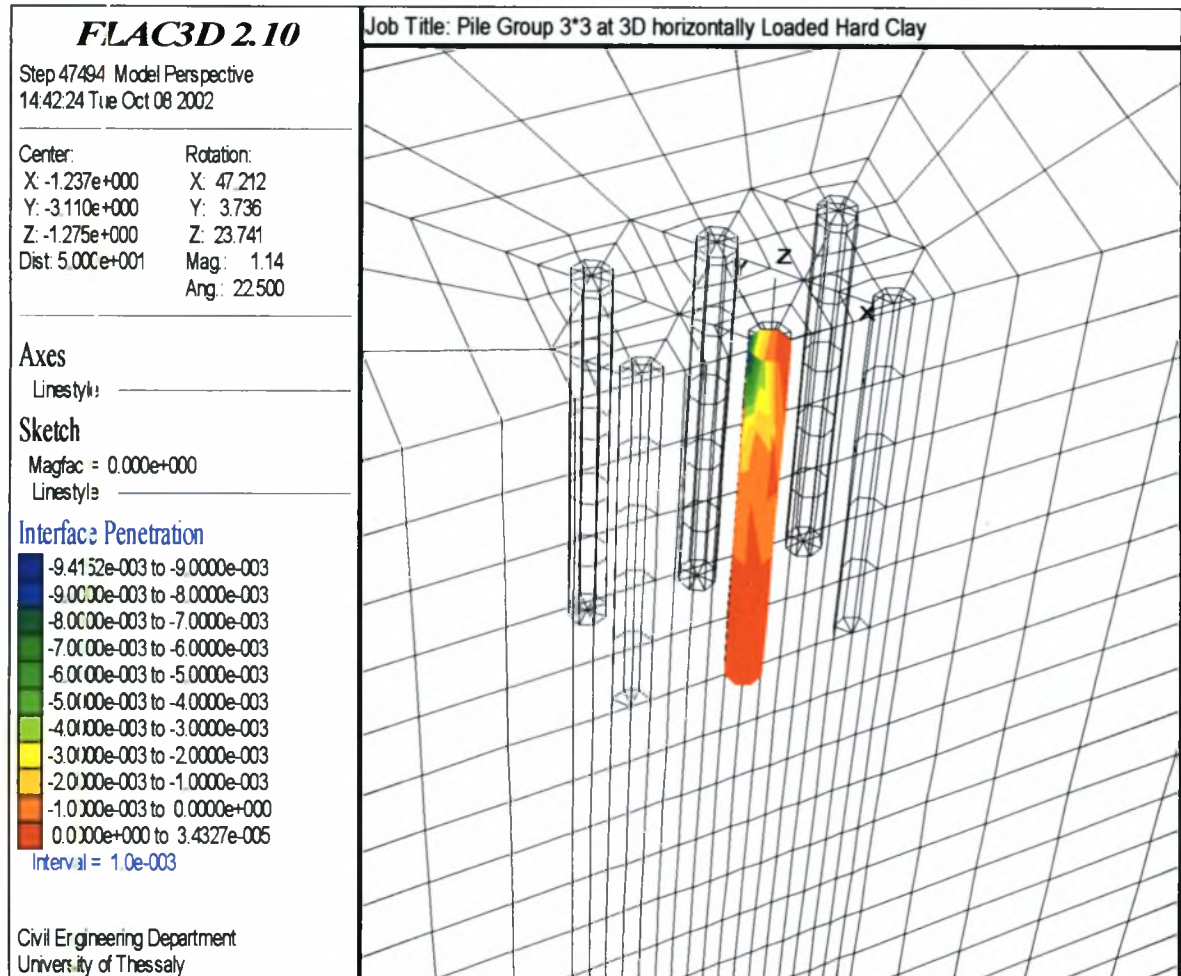
Περιοχές ίσων μετακινήσεων στη διεύθυνση της φόρτισης για απόσταση 6D.

Σχήμα Γ.15



Κατανομή του κενού των διεπιφανειών κατά μήκος του πασσάλου για  $H=1,2 \text{ MN}$ ,  
για σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=2D$

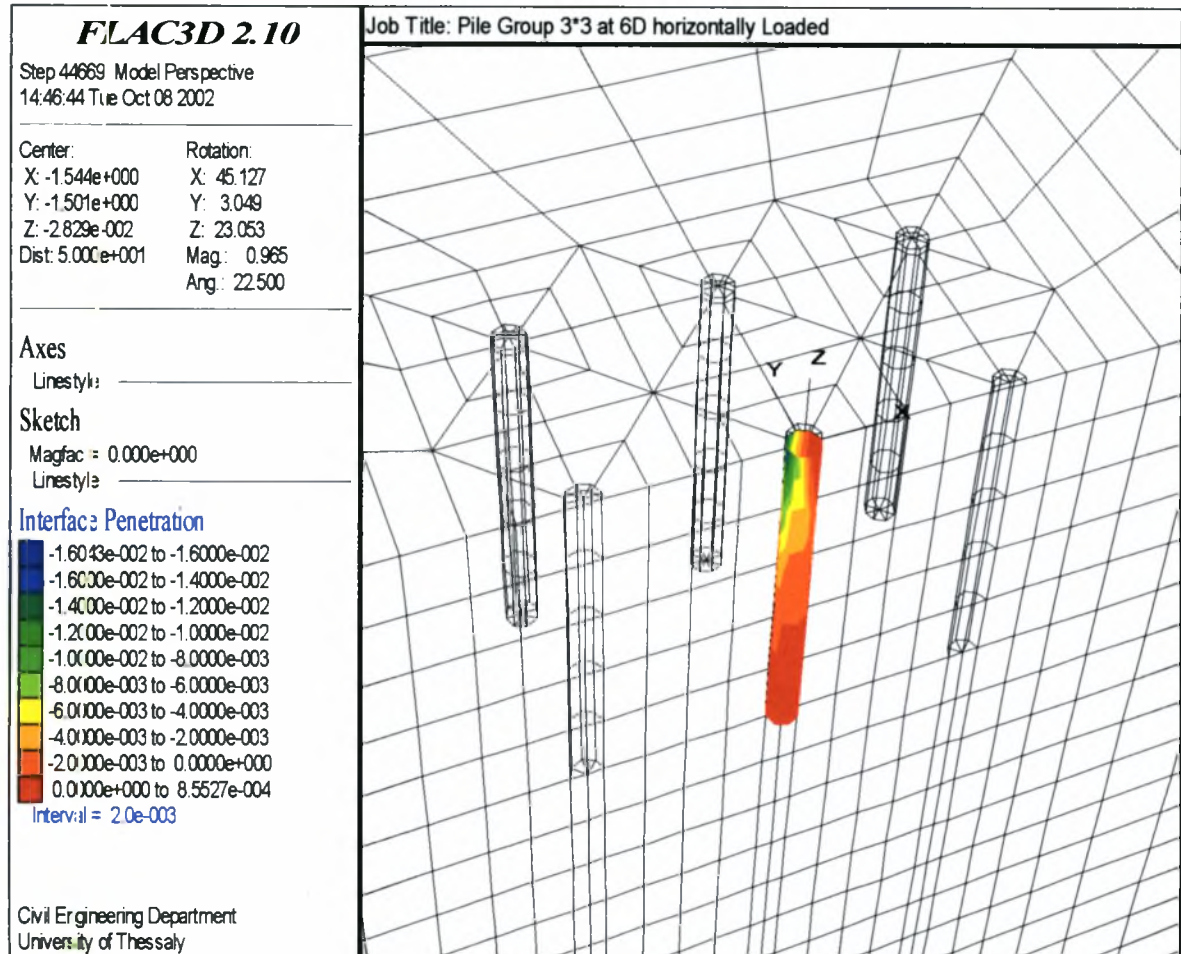
Σχήμα Γ.16



Κατανομή του κενού των διεπιφανειών κατά μήκος του πασσάλου για  $H=1,2$  MN, για σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=3D$

Σχήμα Γ.17





Κατανομή του κενού των διεπιφανειών κατά μήκος του πασσάλου για  $H=1,2$  MN, για σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=6D$

Σχήμα Γ.18

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Κωμοδρόμος Αιμ. (2001), Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική – Γραμμική-Μη Γραμμική Ανάλυση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
- [2] Κωστόπουλος Σ. (1999), Σημειώσεις Γεωτεχνικών Κατασκευών, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας
- [3] Κωστόπουλος Σ. (2000), Σημειώσεις Εδαφομηχανικής IV (Διίχνευση της Γεωμάζας), Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας
- [4] H.G Poulos (1989), Pile behaviour- theory and application
- [5] M.J. Tomlinson (1993), Pile Design and Construction Practice
- [6] Prakash & Sharma (1990), Pile foundations in Engineering Practice, Willey-interscience publication
- [7] FLAC (1998), Fast Langrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions
- [8] ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε. (1995), Τεύχος μελέτης: Αξιολόγηση αποτελεσμάτων δοκιμαστικής φόρτισης πασσάλου Φ100 cm στον Αλιάκμονα.
- [9] Comodromos E. (2002), Response prediction of horizontally loaded pile groups, submitted for publication.

### ***Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις:***

- [10] <http://mceer.Buffalo.edu/research/Highway Prj/Bullarticles/Oct96Vol10No4.asp>
- [11] <http://www.hnd.usace.army.mil/techinfo/ti/818-02/chap4.pdf>
- [12] <http://sbe.napier.ac.uk/projects/piledesign/guide/chapter2.htm>
- [13] <http://sokocalo.engr.ucdavis.edu/~jeremic/publications/piles0.1.pdf>

