



## **Ευχαριστίες**

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχάλη Καββαδά για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το πολύ ενδιαφέρον θέμα αλλά και για τη σοφή καθοδήγηση του πάνω στα θέματα της εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Καλό για την πολύτιμη βοήθεια του στην εκμάθηση των απαιτούμενων προγραμμάτων αλλά και τις άμεσες και εκτεταμένες συμβουλές του σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Ακόμη θα πρέπει να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Τζιβάκο για τη βοήθειά του κατά τη διεξαγωγή των αναλύσεων. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη που μου παρείχε σε ολόκληρη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια μελέτης της όλης συμπεριφοράς συστήματος θεμελίωσης πασσάλων – κοιτόστρωσης σε κατακόρυφη φόρτιση και διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ πασσάλων και πλάκας θεμελίωσης στις καθιζήσεις. Προς την επίτευξη του άνωθεν στόχου, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Για τις παραμετρικές αναλύσεις αυτές μορφώθηκαν τρισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα για τον εκάστοτε τύπο θεμελίωσης. Εξετάστηκαν συστήματα θεμελίωσης με μεταβαλλόμενο μήκος πασσάλων και μεταβαλλόμενης μεταξύ τους απόστασης για τέσσερεις διαφορετικούς τύπους αργιλικού υλικού υπό αστράγγιστες συνθήκες: κανονικά στερεοποιημένη άργιλος NC και ομοιογενής άργιλος με αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $C_u=200\text{kPa}$ ,  $C_u=100\text{kPa}$  και  $C_u=20\text{kPa}$  αντίστοιχα. Τέλος, παρουσιάστηκαν και συγκρίθηκαν διαγραμματικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για τους τέσσερεις τύπους εδάφους, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά την επιρροή του μήκους των πασσάλων και την μεταξύ τους απόσταση στην καθίζηση του συστήματος θεμελίωσης.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	1
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Σύνοψη και συμπεράσματα</b>	
1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας .....	3
1.2 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας .....	4
1.3 Γενική θεώρηση του προβλήματος .....	5
1.4 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων .....	5
1.5 Γενικά συμπεράσματα .....	6
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικά στοιχεία</b>	
2.1 Εισαγωγή .....	7
2.2 Γενικά .....	7
2.3 Διάταξη των πασσάλων και κατανομή φορτίου .....	7
2.4 Κατακόρυφη φόρτιση σε ομάδα πασσάλων .....	10
2.4.1 Φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων .....	10
2.4.2 Αποδοτικότητα .....	12
2.5 Καθίζηση ομάδας πασσάλων .....	16
2.5.1 Γενικά .....	16
2.5.2 Λύσεις κατά Η. Roulos .....	17
2.5.3 Ημιεμπειρικές συσχετίσεις .....	22
2.6 Μέθοδοι ανάλυσης πασσαλοσανίδων .....	24
2.6.1 Γενικά .....	24
2.6.2 Απλοποιημένες υπολογιστικές μέθοδοι .....	25
2.6.2.1 Μέθοδος των Roulos-Davis-Randolph (PDR) .....	25
2.6.2.2 Μέθοδος του Burland .....	28
2.6.3 Προσεγγιστικές υπολογιστικές μέθοδοι .....	29
2.6.3.1 Λωριδωτό πέδιλο επί ελατηρίων (strip on springs) GASP.....	29
2.6.3.2 Πλάκα επί ελατηρίων (plate on springs) GARP.....	31
2.6.4 Αυστηρά υπολογιστικές μέθοδοι .....	32
2.6.4.1 2-Διαστατη αριθμητική ανάλυση (FLAC) .....	32
2.6.4.2 3-Διαστατη αριθμητική ανάλυση .....	32
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος</b>	
3.1 Γενικά .....	34
3.2 Προσομοίωση του προβλήματος .....	34
3.2.1 Επιλογή προγραμμάτων .....	34
3.2.2 Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων .....	35
3.3 Τελικό προσομοίωμα .....	35
3.3.1 Διαστάσεις τελικών προσομοιωμάτων .....	35
3.3.2 Παραδοχές .....	37
3.3.3 Συνοριακές συνθήκες .....	38
3.3.4 Συνθήκες φόρτισης της πασσαλοομάδας .....	38
3.3.5 Σχεδιασμός αριθμητικών αναλύσεων .....	40

3.4 Αριθμητικά δεδομένα εδάφους – πασσαλομάδας .....	41
3.5 Ολικές τάσεις σε αστράγγιστες συνθήκες-συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων....	42

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αποτελέσματα αναλύσεων - Διαγράμματα**

4.1 Εισαγωγή .....	44
4.2 Γενικά .....	44
4.3 Διαγράμματα καθιζήσεων .....	44
4.4 Διαγράμματα δυνάμεων .....	45
4.5 Διαγράμματα τάσεων .....	47

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Σχολιασμός διαγραμμάτων - Συμπεράσματα**

5.1 Εισαγωγή .....	66
5.2 Διαγράμματα καθιζήσεων .....	66
5.2.1 Σύστημα θεμελίωσης πλάκα-πάσσαλοι .....	66
5.2.2 Σύστημα θεμελίωσης επί πασσάλων .....	68
5.3 Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων .....	69
5.3.1 Αξονική δύναμη πασσάλων 20m .....	69
5.3.2 Αξονική δύναμη πασσάλων 10m .....	70
5.3.3 Δύναμη που αναλαμβάνει η πλάκα .....	72
5.4 Διαγράμματα κατανομής τάσεων .....	72
5.4.1 Σύστημα θεμελίωσης πλάκα-πάσσαλοι 20m .....	72
5.4.2 Σύστημα θεμελίωσης πλάκα-πάσσαλοι 10m .....	73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	79

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

### **Σύνοψη και συμπεράσματα**

#### **1.1 ΣΚΟΠΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνοψίζεται στην μελέτη της συμπεριφοράς συστήματος θεμελίωσης κοιτόστρωσης επί πασσάλων σε κατακόρυφη φόρτιση και διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ πασσάλων και πλάκας θεμελίωσης, αλληλένδετα συνδεδεμένες με τις επιβαλλόμενες καθιζήσεις του εδαφικού υλικού. Ο στόχος αυτός υλοποιείται με την αριθμητική προσομοίωση του συστήματος εδάφους – πασσαλοομάδας και την εκτέλεση παραμετρικών αναλύσεων με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

Στο θεωρητικό μέρος της διπλωματικής εργασίας συνοψίστηκαν μέθοδοι από τη διεθνή βιβλιογραφία που αφορούν στον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας και της καθίζησης μιας πασσαλοομάδας υπό κατακόρυφη φόρτιση, καθώς και μέθοδοι προσομοίωσης ενός τέτοιου συστήματος θεμελίωσης.

Κατόπιν μορφώθηκαν τα αριθμητικά προσομοιώματα εδάφους – συστήματος θεμελίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι παραμετρικές αναλύσεις με τη μέθοδο αυτή στοχεύουν στη διερεύνηση των καθιζήσεων ενός συστήματος θεμελίωσης που συνδυάζει πλάκα επί πασσάλων. Εξετάστηκε σύστημα θεμελίωσης με μεταβαλλόμενο μήκος πασσάλων και μεταβαλλόμενη ενδιάμεση απόσταση για τέσσερις διαφορετικούς τύπους αργλικού υλικού: κανονικά στερεοποιημένη άργιλος NC και ομοιογενής άργιλος με αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $C_u=200\text{kPa}$ ,  $C_u=100\text{kPa}$  και  $C_u=20\text{kPa}$  αντίστοιχα.

Τέλος, παρουσιάστηκαν και συγκρίθηκαν διαγραμματικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων για τους τέσσερις τύπους εδάφους, ώστε να έχουμε μια ορθότερη εικόνα για την επιρροή του μήκους των πασσάλων και τη μεταξύ τους απόσταση στην καθίζηση του συστήματος θεμελίωσης.

## 1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

- ❖ Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται ο σκοπός και η διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας, αναφέρονται κάποια γενικά στοιχεία για τις πασσαλοομάδες ενώ παράλληλα γίνεται μια συνοπτική περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και των συμπερασμάτων στα οποία κατέληξε η παραμετρική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε.
- ❖ Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας για τη φέρουσα ικανότητα των πασσαλοομάδων καθώς και για την αποδοτικότητα και τον υπολογισμό των καθιζήσεων όταν αυτές υποβάλλονται σε κατακόρυφη φόρτιση. Εκτός, των κλασικών λύσεων γίνεται αναφορά και σε σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης με τη βοήθεια προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών.
- ❖ Στο Κεφάλαιο 3 σκιαγραφείται ο σχεδιασμός και η μόρφωση του τρισδιάστατου προσομοιώματος εδάφους – συστήματος θεμελίωσης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων και συνοψίζονται τα αριθμητικά δεδομένα των παραμετρικών διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν.
- ❖ Στο Κεφάλαιο 4 παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα τα οποία προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις για κάθε σύστημα θεμελίωσης, υπό το εκάστοτε επιβαλλόμενο κατακόρυφο φορτίο και για τους τέσσερις τύπους εδάφους. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται διαγράμματα καθιζήσεων, αξονικών δυνάμεων και κατανομής τάσεων πασσάλων και πλάκας θεμελίωσης.
- ❖ Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται η περιγραφή και ο σχολιασμός των διαγραμμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου καθώς και προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων για την επίδραση του μήκους και της απόστασης μεταξύ των πασσάλων στη συμπεριφορά και στις καθιζήσεις του εκάστοτε συστήματος θεμελιώσεως.
- ❖ Στο Παράρτημα παρουσιάζονται ενδεικτικά εικόνες από το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε ώστε να έχουμε εποπτεία της ζώνης με τις αυξημένες πλαστικές παραμορφώσεις καθώς και της μορφής των καθιζήσεων που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση.

### **1.3 ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ**

Στις περισσότερες περιπτώσεις βαθέων θεμελιώσεων γίνεται χρήση περισσότερων του ενός πασσάλων, δηλαδή μιας συστοιχίας πασσάλων. Η ευεργετική επίδραση της πασσαλοστοιχίας συνοψίζεται τόσο στη μετάδοση των φορτίων σε βαθύτερα στρώματα όσο και στη βελτίωση της συμπεριφοράς του περιβάλλοντος εδάφους. Ωστόσο, οι επί τόπου (in situ) παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι η συμβολή ενός πασσάλου στη φέρουσα ικανότητα της ομάδας (αποδοτικότητα), επηρεάζεται από την ύπαρξη των γειτονικών πασσάλων, με αποτέλεσμα το οριακό εδαφικό φορτίο της ομάδας να μην αντιστοιχεί στο άθροισμα των οριακών φορτίων των μεμονωμένων πασσάλων. Η επιρροή αυτή συνίσταται στη μείωση του οριακού φορτίου εδάφους του μεμονωμένου πασσάλου μέσα στην ομάδα, με αποτέλεσμα να μην θεωρείται πάντα ως βέλτιστη μια λύση ομάδας με μεγάλο αριθμό πασσάλων.

Επίσης και η καθίζηση μιας ομάδας πασσάλων διαφέρει σημαντικά από την καθίζηση ενός μεμονωμένου πασσάλου, υπό φορτίο ίσο με το μέσο φορτίο επί των πασσάλων της ομάδας.

Έτσι για τον ορθολογικότερο σχεδιασμό μιας ομάδας πασσάλων, είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης τόσο των πασσάλων μεταξύ τους, όσο και της ομάδας με το περιβάλλον έδαφος.

Το είδος του περιβάλλοντος εδάφους καθώς και η στρωματογραφία της περιοχής του έργου έχουν ιδιαίτερη σημασία για τον τρόπο μεταβίβασης των φορτίων στο υπέδαφος. Όσο αφορά στους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης των πασσάλων μεταξύ τους καθώς και στις καθιζήσεις των ομάδων, έχουν διερευνηθεί κυρίως με πειραματικές διατάξεις ομοιώματα πασσάλων μικρών διαστάσεων. Αντίστοιχα στοιχεία από πραγματικές διατάξεις πασσάλων είναι σχετικά περιορισμένα, λόγω της μεγάλης κλίμακας και του κόστους των επί τόπου ερευνών.

### **1.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Η τρισδιάστατη απεικόνιση του προσομοιώματος εδάφους – συστήματος θεμελιώσεως πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για τη μόρφωση του καννάβου του προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας των πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 9.0, ενώ για την επίλυση του προβλήματος και την εκτέλεση των παραμετρικών αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας των πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS 6.9 και ABAQUS 6.10.



## 1.5 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων των αριθμητικών προσομοιωμάτων εδάφους – συστήματος θεμελίωσης, για πασσαλοομάδα υπό κατακόρυφο επιβαλλόμενο φορτίο, οδηγούν στα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα:

- Ο συνδυασμός των πασσάλων με κοιτόστρωση οδηγεί σε αισθητή μείωση των καθιζήσεων του συστήματος θεμελίωσης που υπόκειται σε κατακόρυφη φόρτιση. Γενικά όσο αυξάνει το μήκος των πασσάλων τόσο μειώνονται οι καθιζήσεις, υπάρχει όμως ένα όριο στο μήκος πέρα του οποίου η μείωση των καθιζήσεων είναι δυσανάλογη της αύξησης των διαστάσεων των πασσάλων και άρα μη οικονομική.
- Σημαντικό ρόλο στην καθίζηση του συστήματος θεμελίωσης εκτός του μήκους των πασσάλων διαδραματίζει και η μεταξύ τους απόσταση καθώς όσο πιο πυκνή είναι η διάταξή τους τόσο πιο έντονα εμφανίζονται τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης πασσάλου – πασσάλου και πασσάλου – εδάφους. Διαπιστώθηκε ότι για ένα συγκεκριμένο μήκος πασσάλων  $L$ , χαρακτηριστικό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, η αξονική δύναμη που καλείται να φέρει ο μεσαίος πάσσαλος εμφανίζεται αυξημένη και μεγαλύτερη από εκείνη του ακραίου, ενδεικτική της αλληλεπίδρασης εδάφους -συστήματος θεμελίωσης.
- Η συμμετοχή της πλάκας σκυροδέματος στην παραλαβή του κατακόρυφου φορτίου εξαρτάται σημαντικά από τις διαστάσεις της πασσαλοομάδας. Το ποσοστό της κατακόρυφης δύναμης που αναλαμβάνει μειώνεται καθώς αυξάνει το μήκος των πασσάλων ενώ αυξάνει με ταυτόχρονη αύξηση της μεταξύ τους απόστασης.
- Οι ιδιότητες του περιβάλλοντος εδάφους είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας για τη συμπεριφορά της πασσαλοομάδας υποβαλλόμενης σε κατακόρυφη φόρτιση. Ανάλογα με τη σχετική δυσκαμψία εδάφους – συστήματος θεμελίωσης παρατηρείται διαφοροποίηση στον τρόπο ανάπτυξης των πλαστικών παραμορφώσεων και συνεπώς στον τρόπο παραλαβής του κατακόρυφου φορτίου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **Θεωρητικά στοιχεία**

#### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια συγκέντρωσης των θεωρητικών στοιχείων που αφορούν σε ομάδες πασσάλων υπό κατακόρυφο φορτίο. Συγκεκριμένα, παρατίθενται μέθοδοι και τρόποι υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας καθώς και της καθίζησης μιας πασσαλοομάδας. Τέλος, εκτός των αναλυτικών και ευρέως αποδεκτών μεθόδων γίνεται αναφορά και σε νεώτερες αριθμητικές προσεγγίσεις του παραπάνω συστήματος θεμελίωσης που βασικό τους γνώρισμα έχουν τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών.

#### **2.2 ΓΕΝΙΚΑ**

Η χρήση πασσαλοομάδας ως σύστημα θεμελίωσης αποτελεί μια οικονομική επιλογή θεμελίωσης για πολλές περιπτώσεις στις οποίες η χρήση μεμονωμένων πασσάλων δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Υπό αυτές τις συνθήκες η προσθήκη ενός περιορισμένου αριθμού πασσάλων μπορεί να επιφέρει βελτίωση στη φέρουσα ικανότητα του συστήματος θεμελίωσης, στις καθιζήσεις καθώς και στο πάχος του κεφαλόδεσμου. Όμως για τον ορθό σχεδιασμό μιας ομάδας πασσάλων είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης τόσο των πασσάλων μεταξύ τους όσο και της ομάδας με το περιβάλλον έδαφος, αφού η καθίζηση μιας ομάδας πασσάλων διαφέρει σημαντικά από την καθίζηση ενός μεμονωμένου πασσάλου, υπό φορτίο ίσο με το μέσο φορτίο επί των πασσάλων της ομάδας.

#### **2.3 ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΠΑΣΣΑΛΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ**

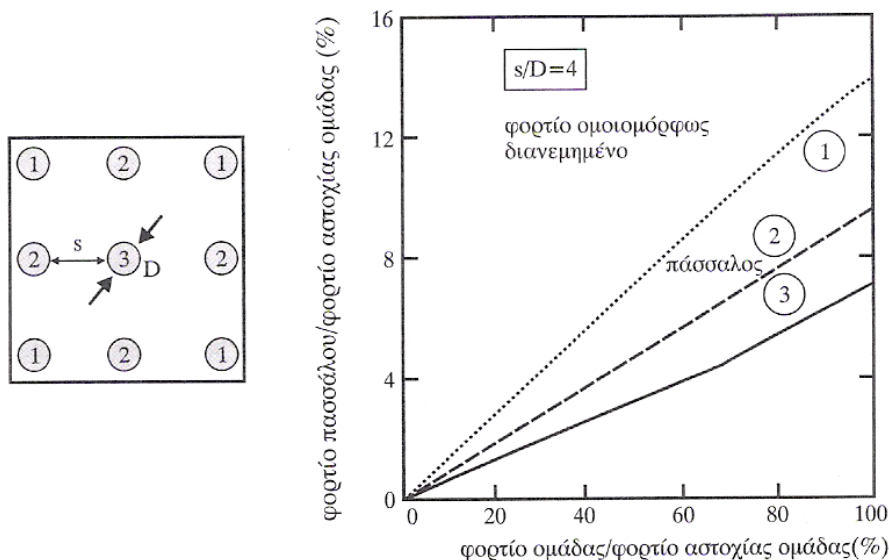
Οι πάσσαλοι ομαδοποιούνται συνήθως σε κάρναβο ορθογωνικής μορφής, το δε φορτίο της ανωδομής μεταφέρεται στην ομάδα και διαμοιράζεται σε κάθε μέλος της μέσω ενός παρεμβαλλόμενου στοιχείου, του κεφαλόδεσμου.

Η σύνθεση της γεωμετρίας της ομάδας συνδέεται στενά με τα επιλεγόμενα τεχνικά χαρακτηριστικά (διάμετρος, μήκος, φέρουσα ικανότητα, καθίζηση) του πασσάλου-μέλους, θεωρούμενου αυτού ως μεμονωμένου. Επειδή όλοι οι συνδυασμοί σχεδιασμού δεν είναι πάντοτε εφικτοί, η σύνθεση μιας ομάδας πασσάλων είναι πολυπαραμετρικό ζήτημα και το κόστος του έργου εξαρτάται από

τις υιοθετούμενες παραδοχές. Σε κάθε όμως περίπτωση η διάταξη της ομάδας πασσάλων θα πρέπει να πληροί κάποιες συνθήκες, όπως συμμετρία για να αποφεύγονται διαφορικές καθιζήσεις και το κέντρο βάρους της ομάδας να συμπίπτει με τον άξονα του επιβαλλόμενου φορτίου έτσι ώστε να αποφεύγεται η περιστροφή και κατανέμονται ευχερέστερα τα φορτία.

Η κατανομή των φορτίων της ανωδομής μεταξύ των πασσάλων της ομάδας συναρτάται με το χαρακτήρα της φόρτισης (κατακόρυφη ή πλάγια, κεντρική ή έκκεντρη, μόνιμη ή προσωρινή), την διάταξη των πασσάλων (κυρίως τη μεταξύ τους απόσταση), την ακαμψία του κεφαλόδεσμου καθώς και τη φύση του φέροντος εδάφους. Σε κάθε περίπτωση αποτελεί πλάνη η άποψη ότι ο κάθε πάσσαλος της ομάδας φέρει το ίδιο φορτίο με τους διπλανούς του. Και εάν ο κεφαλόδεσμος είναι εύκαμπτος και το φορτίο κεντρικό, κατακόρυφο και μόνιμο, τότε οι πιέσεις επαφής θα είναι σχεδόν ομοιόμορφες τόσο σε αμμώδη όσο και σε αργιλικά εδάφη έτσι ώστε οι πάσσαλοι να φέρουν περίπου ίσα φορτία. Πρόκειται ωστόσο μόνο για μια συγκεκριμένη διάταξη των πασσάλων τοποθετούμενων κάτω από επίχωμα με αποκλειστικό στόχο τη μείωση των καθιζήσεων του επιχώματος. Οι καθιζήσεις αυτές δεν είναι βέβαια ομοιόμορφες και θα δημιουργηθεί ένα προφίλ καθιζήσεων τύπου δίσκου, το οποίο πολλές κατασκευές δεν είναι σε θέση να ακολουθήσουν. Όπου όμως χρησιμοποιείται κεφαλόδεσμος για να ισοβαθμίσει τις καθιζήσεις, τα φορτία των πασσάλων της ομάδας διαφοροποιούνται. Ο κεφαλόδεσμος ενδέχεται είτε να εφάπτεται στο υπέδαφος (riled group) είτε όχι (free standing group), στοιχείο το οποίο επίσης διαφοροποιεί την κατανομή του φορτίου στους πασσάλους της ομάδας. Οι σχετικές επιστημονικές πληροφορίες προέρχονται σχεδόν κατά αποκλειστικότητα από δοκιμές σε φυσικά προσομοιώματα. Από τις πληροφορίες αυτές έχουν προκύψει τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- σε αργίλους η παρουσία άκαμπτου κεφαλόδεσμου αυξάνει το φορτίο στους περιμετρικούς πασσάλους και μειώνει τα φορτία στους κεντρικούς.



**Σχήμα 2. 1** Κατανομή των φορτίων μεταξύ των πασσάλων τετραγωνικής πασσαλοομάδας στην ειδική περίπτωση  $s/D=4$  (Whitaker 1957)

- σε άμμους συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο.

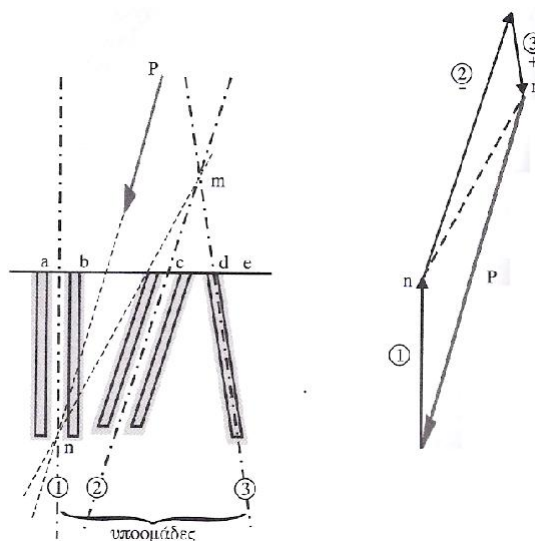
Στην περίπτωση έκκεντρου κατακόρυφου μόνιμου φορτίου είναι δυνατή η αναλυτική εκτίμηση του τμήματος φορτίου το οποίο καλείται να παραλάβει ο κάθε πάσσαλος της ομάδας, εφ' όσον ισχύουν οι ακόλουθες δύο θεωρήσεις: α) ο κεφαλόδεσμος να είναι απολύτως άκαμπτος (άρα θεωρείται εξασφαλισμένη η επιπεδότητα του κατά την περιστροφή), β) το πρόσθετο λόγω εκκεντρότητας φορτίο σε κάθε πάσσαλο είναι ανάλογο της απόστασής του από τον κεντροβαρικό άξονα της ομάδας (καθέτως προς το επίπεδο της ροής).

Τότε το φορτίο σε κάθε πάσσαλο της ομάδας θα είναι ίσο με:

$$P_i = P \left( \frac{1}{n} + \frac{e_x \cdot x_i}{\sum x_i^2} + \frac{e_y \cdot y_i}{\sum y_i^2} \right)$$

όπου P το συνολικό φορτίο της ομάδας,  $e_x$  και  $e_y$  οι εκκεντρότητες του φορτίου ως προς τους δύο οριζόντιους άξονες και  $x_i$ ,  $y_i$  η απόσταση (κατά τους ως άνω άξονες) του κέντρου του κάθε πασσάλου από τον κεντροβαρικό άξονα της ομάδας και n ο αριθμός των πασσάλων της ομάδας.

Όπου το φορτίο είναι κεκλιμένο είναι δυνατόν μερικοί από τους πασσάλους να εγκατασταθούν υπό κλίση ιδίως όταν το φορτίο αυτό έχει χαρακτήρα μόνιμο. Η απλούστερη προσέγγιση του προβλήματος είναι εκείνη όπου οι πάσσαλοι εκλαμβάνονται ως μέλη δικτυώματος (δηλ. αμφιαρθρωτές ράβδοι υπό αξονική και μόνον ένταση), η δε οριζόντια συνιστώσα του φορτίου θεωρείται ότι αναλαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από τους κεκλιμένους πασσάλους. Η ανάλυση των δυνάμεων με τη χρήση των κλασικών γραφικοαναλυτικών μεθόδων της στατικής οδηγεί συνήθως σε ικανοποιητικές λύσεις του προβλήματος. Σημειώνεται πάντως ότι για να είναι το σύστημα ισοστατικό θα πρέπει οι άξονες των πασσάλων να μη συγκλίνουν σε ένα σημείο. Η γραφική ανάλυση κατά Culmann είναι σχετικώς εύχρηστη στις περιπτώσεις ομάδων με δύο μόνο υποομάδες κεκλιμένων πασσάλων.



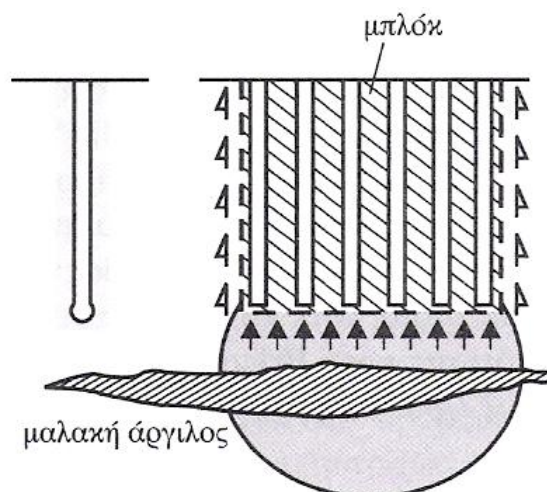
**Σχήμα 2.2 Παράδειγμα εφαρμογής της γραφικής ανάλυσης κατά Culmann στην περίπτωση κεκλιμένου φορτίου και κεκλιμένου πασσάλου**

## 2.4 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΕ ΟΜΑΔΑ ΠΑΣΣΑΛΩΝ

### 2.4.1 Φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων

Η φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων δεν αναμένεται κατ' αρχήν να συμπίπτει με το άθροισμα των φερουσών ικανοτήτων των μεμονωμένων πασσάλων οι οποίοι την αποτελούν και αυτό έγκειται σε δυο λόγους: πρώτον, διότι η εντεινόμενη εδαφική ζώνη γύρω από έναν μεμονωμένο πάσσαλο είναι πολύ μικρότερη εκείνης γύρω και κάτω από μια ομάδα πασσάλων και δεύτερον, διότι επισυμβαίνει αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων της ομάδας, της οποίας η έκταση είναι συνάρτηση της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών πασσάλων, εφ' όσον αλληλοεμπλέκονται οι ζώνες επιρροής των. Τα φαινόμενα αυτά έχουν τις ακόλουθες επιπτώσεις:

- η μέθοδος εγκατάστασης επηρεάζει λιγότερο τη συμπεριφορά της ομάδας απ' ότι ένα μεμονωμένο πάσσαλο, εφ' όσον γύρω και κάτω από την ομάδα η ζώνη διατάραξης του εδάφους είναι σχετικώς μικρή και οι τάσεις μεταβιβάζονται σε αδιατάρακτο έδαφος.
- η παρουσία συμπιεστών εδαφικών στρωμάτων υπό τη βάση μιας ομάδας πασσάλων αναμένεται να προκαλέσουν καθιζήσεις, οι οποίες ενδεχομένως δεν θα επηρεάσουν τα αποτελέσματα μιας δοκιμαστικής φόρτισης μεμονωμένου πασσάλου (τα αποτελέσματα μιας τέτοιας δοκιμής θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με σκεπτικισμό σε ομάδα πασσάλων).



Σχήμα 2. 3 Ενδεικτική διαφορά μεμονωμένου πασσάλου και ομάδας πασσάλων

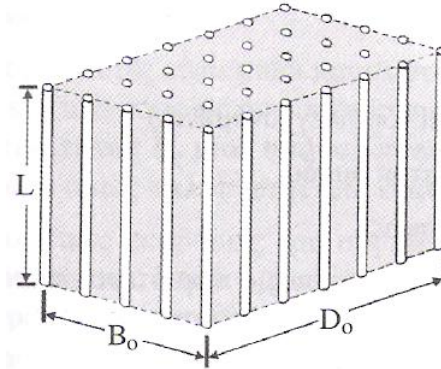
Η φέρουσα ικανότητα μιας ομάδας πασσάλων εγκατεστημένων σε μη-συνεκτικό έδαφος είναι γενικώς μεγαλύτερη του αθροίσματος των φερουσών ικανοτήτων των επί μέρους μελών της ομάδας. Πράγματι, η πλευρική τριβή των πασσάλων η οποία μεταφέρεται στο περιβάλλον έδαφος, οδηγεί σε αύξηση των κατακόρυφων τάσεων στη στάθμη της αιχμής και κατά συνέπεια σε αύξηση της φέρουσας ικανότητας της ομάδας. Δεδομένου όμως ότι η αύξηση αυτή είναι δύσκολο να εκτιμηθεί, συνήθως αγνοείται προσφέροντας ένα πλεόνασμα ασφαλείας.

Η φέρουσα ικανότητα μιας συστοιχίας πασσάλων εγκατεστημένων σε συνεκτικό στρώμα είναι γενικώς μικρότερη του αθροίσματος των επί μέρους ικανοτήτων των μελών της ομάδας. Πρόκειται στην ουσία για ομάδα αιωρούμενων πασσάλων, της οποίας η φέρουσα ικανότητα είναι δυνατόν να προσομοιωθεί με εκείνη μιας γιγάντιας αβαθούς θεμελίωσης με στάθμη έδρασης εκείνη των αιχμών των πασσάλων και της οποίας το μήκος και πλάτος είναι εκείνα της ομάδας. Έτσι η φέρουσα ικανότητα της ομάδας συντίθεται από την 'αβαθή' φέρουσα ικανότητα της βάσης της και την πλευρική τριβή που αναπτύσσεται κατά μήκος των κατακόρυφων πλευρικών ορίων της ομάδας. Είναι βεβαίως κατανοητό ότι η κινητοποίηση της μέγιστης αντίστασης αιχμής απαιτεί την παρουσία μεγάλων καθιζήσεων, οι οποίες ωστόσο υπερβαίνουν κατά πολύ εκείνες που θα μπορούσαν να είναι ανεκτές από την ανωδομή. Λόγω αυτού του φαινομένου δεν συνυπολογίζεται στη φέρουσα ικανότητα της ομάδας παρά μόνο η πλευρική τριβή.

Η ανάλυση του 'αστοχούντος μπλοκ' ως άνω, το οποίο περιλαμβάνει το σύνολο των πασσάλων της ομάδας και του περιεχομένου μεταξύ των πασσάλων εδάφους, ακολουθεί την ίδια πορεία με την ανάλυση που αναφέρεται σε μεμονωμένο πάσσαλο υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- η συνολική πλευρική τριβή αναφέρεται στη περιμετρική επιφάνεια του αστοχούντος μπλοκ, ενώ η συνολική αντοχή αιχμής στην επιφάνεια βάσης του συσσωματώματος
- σε όρους ολικών τάσεων (αστράγγιστες συνθήκες) η κορυφαία διατμητική αντοχή του εδάφους δρα στην περίμετρο, όπου θεωρείται ότι εμφανίζεται διάτμηση μεταξύ εδάφους-εδάφους
- σε όρους ενεργών τάσεων η επιρροή του όρου  $N_\gamma$  στη φέρουσα ικανότητα δεν είναι πλέον αμελητέα, εφ' όσον η νοητή γιγαντιαία αβαθής θεμελίωση έχει μεγάλο πλάτος σε σχέση με το βάθος της, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των συντελεστών φέρουσας ικανότητας κατά Brinch Hansen που αναφέρονται σε βαθιές θεμελιώσεις. Οι Fleming et al (1998) πρότειναν μάλιστα αύξηση της φέρουσας ικανότητας κατά την ποσότητα:  $0.85 \times (0.5\gamma B - u) \times N_\gamma$  και υποστηρίζουν ότι για πασσάλους σε αργιλικά εδάφη η τάση αιχμής είναι γενικώς 10-20 φορές μεγαλύτερη από τη μέση τάση πλευρικής τριβής. Κατά συνέπεια, η αστοχία τύπου μπλοκ μπορεί να προκύψει όταν η αύξηση της επιφάνειας βάσης της ομάδας ακολουθείται από μια πολύ μεγαλύτερη (10-20 φορές) μείωση της πλευρικής επιφάνειας του αστοχούντος μπλοκ. Με άλλα λόγια, αστοχία τύπου μπλοκ είναι εφικτή σε ομάδα με μεγάλο αριθμό μακριών πασσάλων και όχι σε ομάδα με μικρότερο αριθμό κοντύτερων πασσάλων σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις. Στις άμμους ειδικά η τάση αιχμής είναι πολύ μεγαλύτερη (50-200 φορές) της μέσης τάσης πλευρικής τριβής. Επισημαίνεται πάντως ότι οι σύγχρονες τάσεις στο σχεδιασμό των βαθιών θεμελιώσεων ευνοούν τη χρήση μικρού αριθμού πασσάλων με μεγαλύτερες μεταξύ τους αποστάσεις. Υπό αυτές τις συνθήκες η φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων δε θα είναι μικρότερη του αθροίσματος των φερουσών ικανοτήτων των πασσάλων που συνθέτουν την ομάδα. Έτσι θα ήταν προτιμότερο να εξασφαλισθεί η αστοχία τύπου μπλοκ με αποτροπή της αστοχίας μεμονωμένων πασσάλων. Παράδειγμα αποτελεί η συνδυασμένη θεμελίωση γενικής κοιτόστρωσης και ομάδας πασσάλων, ο ρόλος των οποίων είναι να περιορίσουν τις διαφορικές καθιζήσεις σε ανεκτές τιμές (Ρουίλος 1980).

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, η αναλυτική διατύπωση της φέρουσας ικανότητας ομάδας πασσάλων υπό συνθήκες αστοχίας τύπου μπλοκ θα έχει ως εξής:



Σχήμα 2.4 Αστοχία τύπου μπλοκ

Αστράγγιστες συνθήκες:

$$Q_{uB} = Q_{bu} + Q_{Su} = c_{ub} N_c B_o D_o + 2L(B_o + D_o) \bar{c}_{us}$$

Στραγγιζόμενες συνθήκες:

$$Q_{uB} = B_o D_o (c'_b N_c + \gamma L N_q + 0.5 \gamma B_o N_\gamma) + 2L(B_o + D_o) (\bar{c}'_s + \bar{\sigma}'_h \text{tg} \Phi'_s)$$

όπου

$c_{ub}, c'_b$  : η συνοχή του εδάφους κάτω από τη βάση της ομάδας σε όρους ολικών και ενεργών τάσεων αντιστοίχως

$\bar{c}_{us}, \bar{c}'_s$  : η μέση τιμή της συνοχής του εδάφους κατά τη διάσταση L σε λόγους ολικών και ενεργών τάσεων αντιστοίχως

$\bar{\Phi}'_s$  : η μέση τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής του εδάφους κατά τη διάσταση L σε όρους ενεργών τάσεων

$\bar{\sigma}'_h$  : η μέση τιμή της οριζόντιας ενεργού τάσης κατά τη διάσταση L

$N_c, N_q, N_\gamma$  : οι συντελεστές φέρουσας ικανότητας για τις αντίστοιχες τιμές της  $\Phi$  ( $\Phi_u=0, \Phi'_b, \Phi'_s$ ).

Εάν η επιφόρτιση της πασσαλοομάδας καθυστερήσει για κάποιο διάστημα, πχ. έξι μήνες, η συνοχή της διαταραγμένης αργίλου μπορεί να εκληφθεί ίση με εκείνη της αδιατάρακτης αργίλου. Σε κάθε όμως περίπτωση, η φέρουσα ικανότητα σχεδιασμού της ομάδας πασσάλων δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των φερουσών ικανοτήτων των πασσάλων που τη συνθέτουν.

### 2.4.2 Αποδοτικότητα

Η σχέση των δύο προαναφερθέντων μεγεθών (φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων – φέρουσα ικανότητα μεμονωμένου πασσάλου) εκφράζεται από τον συντελεστή αποδοτικότητας, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των δύο φερουσών ικανοτήτων σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_g = \frac{Q_{uB}}{m \cdot n \cdot Q_u} \quad \text{όπου } m, n \text{ ο αριθμός των πασσάλων στην ομάδα}$$

Πρόκειται στην ουσία για τον λόγο του μέσου οριακού φορτίου ανά πάσσαλο της ομάδας προς το οριακό φορτίο ενός αντίστοιχου μεμονωμένου πασσάλου, αφορά δε αποκλειστικά στις πλευρικές τριβές, δεδομένου ότι η αντίσταση τριβής δεν υφίσταται αλλοίωση λόγω των φαινομένων αλληλεπίδρασης και της ενδεχόμενης μη γραμμικότητας του εδαφικού ιστού και της ομάδας πασσάλων.

Ο συντελεστής αποδοτικότητας  $E_g$  εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τους ακόλουθους παράγοντες:

- τον τύπο του εδάφους
- τη σχετική απόσταση  $s/D$  δύο γειτονικών πασσάλων
- τον λόγο μήκος/διάμετρο των πασσάλων
- τον τύπο των πασσάλων (εμπυγνυόμενοι, επί τόπου εγχυόμενοι)
- την διάταξη και τον αριθμό των πασσάλων στην ομάδα
- την έδραση ή όχι του κεφαλόδεσμου στο έδαφος

Η σχετική απόσταση δύο γειτονικών πασσάλων είναι ίσως ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει την αποδοτικότητα της ομάδας. Πράγματι, σε μια κανονική ορθογωνική διάταξη ( $m \times n$ ) πασσάλων, μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί η ελάχιστη απόσταση  $s$  δύο διαδοχικών πασσάλων, ώστε η φέρουσα ικανότητα της ομάδας να ισούται προς το άθροισμα των φερουσών ικανοτήτων των  $m \times n$  πασσάλων.

Εάν  $L$  το σταθερό μήκος κάθε πασσάλου, η περίμετρος της ομάδας θα δίνεται από την αναλυτική έκφραση:  $\Pi = 2s[(m-1)+(n-1)]$

οπότε ο συντελεστής αποδοτικότητας θα έχει ως εξής:

$$E_g = \frac{2s[(m-1)+(n-1)] \cdot L \cdot c_a}{m \cdot n \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot c_a} = 1 \quad \text{όπου } c_a \text{ μοναδιαία πλευρική τριβή και άρα}$$
$$s = \frac{m \cdot n \cdot \pi \cdot D}{2[(m-1)+(n-1)]} = \frac{1.57D \cdot m \cdot n}{m+n-2}$$

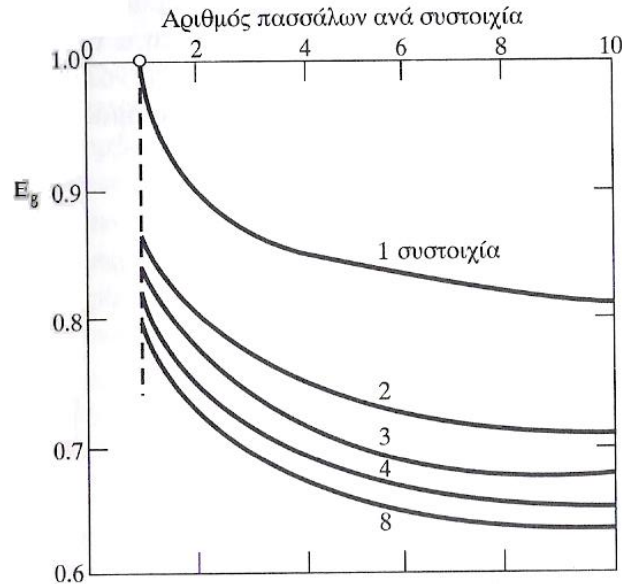
Για ομάδες με μικρό αριθμό πασσάλων προκύπτει  $s \approx 3D$ . Γενικότερα, συνίσταται (για κατασκευαστικούς, οικονομικούς) η  $s$  να παίρνει τιμές μεταξύ  $2,5D$ - $3,5D$ . Αυτές οι τιμές άλλωστε είναι πολύ κοντά και στα πειραματικά δεδομένα, τα οποία υποδεικνύουν ότι ακόμα και υπό τους άνωθεν περιορισμούς που αφορούν στην απόσταση  $s$  ο συντελεστής αποδοτικότητας  $E_g$  μιας ομάδας πασσάλων παραμένει στα όρια των τιμών 0.7 έως 0.9 η διαφορά όμως καλύπτεται από έναν ενιαίο συντελεστή ασφάλειας της τάξης του 2.

Τα τελευταία χρόνια έχουν διατυπωθεί αρκετές αναλυτικές εκφράσεις του συντελεστή αποδοτικότητας, καμιά όμως από αυτές δεν δείχνει να οδηγεί σε ρεαλιστικές εκτιμήσεις. Η πλέον γνωστή είναι αυτή των Converse-Labarre η οποία έχει την ακόλουθη μορφή:

$$E_g = 1 - \frac{a}{90^\circ} \cdot \frac{(n-1)m + (m-1)n}{mn} \quad \text{όπου } \alpha = \arctg(D/s) \quad (\text{Chellis, 1961})$$

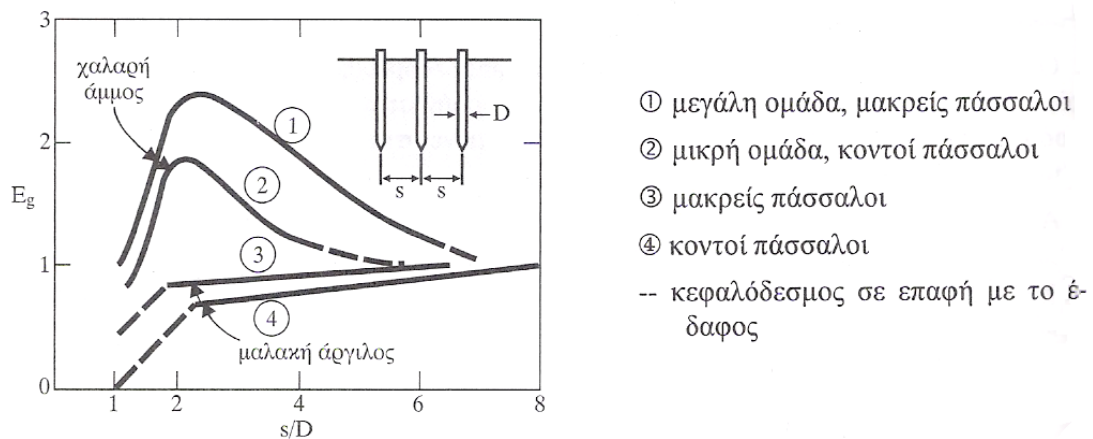


Η γραφική παράσταση της εξίσωσης αυτής δίδεται στο σχήμα 2.5 για  $s=3D$ , παρατηρείται ότι το διάγραμμα αυτό αναπαράγει τα ποιοτικά συμπεράσματα που διατυπώθηκαν προηγουμένως. Όσο δηλαδή ο αριθμός των πασσάλων ανά συστοιχία αυξάνει, η αστοχία τύπου μπλοκ εξασφαλίζεται με μείωση του συντελεστή αποδοτικότητας της ομάδας, και μάλιστα τόσο μεγαλύτερη όσο ο αριθμός των συστοιχιών αυξάνει.



Σχήμα 2.5 Γραφική απεικόνιση της σχέσης των Converse-Labarre

Η επίδραση των υπόλοιπων παραγόντων στη διαμόρφωση της αποδοτικότητας μιας ομάδας πασσάλων (σύμφωνα με τον Meyerhof 1976) διαφαίνεται χαρακτηριστικά στο ακόλουθο πειραματικό διάγραμμα (σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6 Αποδοτικότητα μιας πασσαλοομάδας συναρτήσει της σχετικής απόστασης και της γεωμετρίας των πασσάλων

Παρατηρείται ότι:

- σε μαλακή άργιλο η φέρουσα ικανότητα μιας ομάδας πασσάλων αυξάνει με τη σχετική τους απόσταση, αλλά η φέρουσα ικανότητα του μεμονωμένου πασσάλου παραμένει σταθερή. Κατά τον Kerisel (1961) θα πρέπει να εφαρμόζεται μειωτικός συντελεστής  $\mu$  στη φέρουσα ικανότητα της ομάδας σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

$s/D$	$\mu$
10	1.00
8	0.95
6	0.90
5	0.85
4	0.75
3	0.65
2.5	0.55

- όταν οι πάσσαλοι βρίσκονται πολύ κοντά ( $s/D \leq 2$ ) το μεταξύ τους έδαφος διαταράσσεται σε μεγάλο βαθμό και προκαλείται αύξηση της πίεσης πόρων, εδαφική ανύψωση και μικρή ικανότητα ανάληψης φορτίου
- η παρουσία ενός άκαμπτου κεφαλόδεσμου σε επαφή με το έδαφος αυξάνει τη φέρουσα ικανότητα της ομάδας των πασσάλων και οδηγεί σε αστοχία τύπου μπλοκ ανεξαρτήτως της απόστασης  $s$
- σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων ( $s/D \approx 8$ ) η αποδοτικότητα φτάνει την μονάδα, διότι η αστοχία της ομάδας εκπροσωπείται από διείδυση των μεμονωμένων πασσάλων στο έδαφος
- μακρύτεροι πάσσαλοι υπό αυτήν την μεταξύ του απόσταση οδηγούν σε αύξηση της αποδοτικότητας της ομάδας
- για πασσάλους σε χαλαρή άμμο (ακόμη και σε άμμο μέσης πυκνότητας) η φέρουσα ικανότητα της ομάδας είναι πολύ μεγαλύτερη του αθροίσματος των φερουσών ικανοτήτων των μεμονωμένων πασσάλων ( $E_g > 1$ ), εφ' όσον η σχετική τους απόσταση δεν υπερβαίνει το τριπλάσιο περίπου της διαμέτρου τους, ιδίως σε εμπηγνυόμενους πασσάλους αιχμής ( $E_g = 2,5$  έως 3 όταν  $s/D \approx 2$ ). Κατά τον Vesic (1967) το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση της τριβής σε ομοιογενή άμμο (έως και τρεις φορές) που προκύπτει από αύξηση της πλευρικής τάσης και της πυκνότητας κατά την έμπηξη
- η αποδοτικότητα αυξάνει όσο η ομάδα αυξάνει σε πλήθος και μήκος πασσάλων, και μάλιστα τόσο περισσότερο όσο η άμμος παρουσιάζεται χαλαρότερη. Σε πυκνές άμμους η αποδοτικότητα της ομάδας σπανίως παρουσιάζεται μεγαλύτερη της μονάδας λόγω χαλάρωσης της δομής υπό την έμπηξη, σε αντίθεση με τις χαλαρές άμμους που λόγω συμπύκνωσης της δομής τους οδηγούνται σε αύξηση της πλευρικής τριβής (Vesic, 1967)
- ο  $E_g$  έχει τιμές μεταξύ 0.65 και 0.75 στην περίπτωση επί τόπου έγχυτων πασσάλων σε άμμο ( $s=3D$ )
- εφ' όσον ο κεφαλόδεσμος δεν βρίσκεται σε επαφή με το φέρον έδαφος, η μορφολογία διαφοροποιείται εξαρτώμενη από την απόσταση των πασσάλων όταν  $s/D > 2$  η αστοχία επισυμβαίνει κάτω από την αιχμή των μεμονωμένων

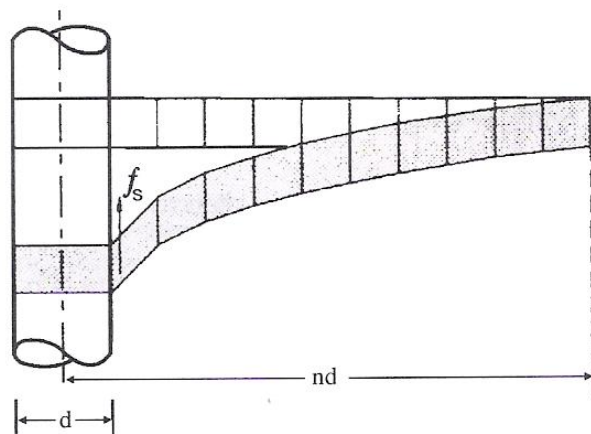
πασσάλων, ενώ όταν  $s/D < 2$  παρουσιάζεται αστοχία τύπου μπλοκ. Για τον κρίσιμο λόγο  $s/D = 2$  θα έχουμε  $E_g = 0.6$  έως  $0.7$

- εάν ο κεφαλόδεσμος είναι σε επαφή με το φέρον έδαφος δεν παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις στη μορφολογία αστοχίας όταν  $s/D > 2$ , ενώ θα είναι  $E_g > 1$  όταν  $s/D > 4$ . Συνήθως η συμβολή του κεφαλόδεσμου στη φέρουσα ικανότητα της ομάδας αγνοείται δεδομένου ότι απαιτείται σημαντική παραμόρφωση του στοιχείου αυτού πριν κινητοποιηθεί πλήρως η φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους. Πάντως στην περίπτωση μη επαφής μπορεί να εκλαμβάνεται  $E_g \approx 0.67$  στις αργίλους, ενώ στην περίπτωση πλήρους επαφής  $E_g = 1$  σε εμπηγνυόμενους πασσάλους και  $E_g = 0.67$  σε εγχυνόμενους πασσάλους σε άμμο

## 2.5 ΚΑΘΙΖΗΣΗ ΟΜΑΔΑΣ ΠΑΣΣΑΛΩΝ

### 2.5.1 Γενικά

Η καθίζηση μιας ομάδας πασσάλων οφείλεται στην παραμόρφωση των εδαφικών στρωμάτων (άμεση, χρόνια) τα οποία βρίσκονται κάτω από την στάθμη των αιχμών των πασσάλων. Όπου οι πάσσαλοι εδράζονται σε ισχυρό φέρον στρώμα (πάσσαλοι αιχμής) δεν τίθεται θέμα καθιζήσεων. Στην περίπτωση όμως των αιωρούμενων πασσάλων, η εκτίμηση των καθιζήσεων της ομάδας υπό την επενέργεια των μόνιμων φορτίων, ενδεχομένως και των αρνητικών τριβών όπου παρουσιάζονται, δεν μπορεί παρά να έχει προσεγγιστικό χαρακτήρα, δεδομένης της πολυπλοκότητας τόσο των μηχανισμών αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων, όσο και μεταξύ ομάδας και περιβάλλοντος εδάφους. Σε γενικές πάντως γραμμές αναμένεται η καθίζηση μιας ομάδας πασσάλων να είναι μικρότερη της καθιζήσεως της αντίστοιχης αβαθούς θεμελίωσης, μεγαλύτερη όμως της καθιζήσεως ενός μεμονωμένου πασσάλου που φέρει το ίδιο φορτίο λειτουργίας με κάθε πάσσαλο της ομάδας. Το φαινόμενο αποδίδεται στη σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών πασσάλων. Πράγματι, κατά τους Cooke et al (1980), αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις και παραμορφώσεις στο περιβάλλον έδαφος καθώς ο πάσσαλος ωθείται προς τα κάτω λόγω του φορτίου. Οι διατμητικές αυτές τάσεις μεταβιβάζονται ακτινικώς μεταξύ διαδοχικών δακτυλίων εδάφους και αποτονώνονται με την απόσταση από τον άξονα του πασσάλου. Θεωρητικά, η αποτόνωση των διατμητικών παραμορφώσεων συμβαίνει σε απόσταση είκοσι δύο διαμέτρων από τον άξονα του πασσάλου ή μέχρι και δέκα διαμέτρων σε ρωγματομένες αργίλους όπως φαίνεται ποιοτικά στο σχήμα 2.7. Οι αποστάσεις αυτές είναι βεβαίως πολύ μεγαλύτερες των συνήθων ( $n=2-3$ ) μεταξύ γειτονικών πασσάλων μιας ομάδας, με αποτέλεσμα τη σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών πασσάλων και την αύξηση των καθιζήσεων της ομάδας.



Σχήμα 2.7 Προσομοίωμα καθιζήσεων πασσάλου κατά Whitaker (1957)

## 2.5.2 Λύσεις κατά Η. Ρουλος

Η πρόσθετη αυτή καθίζηση εκτιμήθηκε από τον Ρουλος (1968) μέσω του συντελεστή αλληλεπίδρασης ως εξής:

$$a_f = \frac{\Delta s}{s_1} = \frac{\text{πρόσθετη καθίζηση λόγω του γειτονικού πασσάλου}}{\text{καθίζηση του μεμον.πασσάλου υπό το ίδιο φορτίο}}$$

Ο συντελεστής  $a_f$  εξαρτάται κυρίως από την απόσταση  $s$ , τον λόγο  $L/D$ , την σχετική ακαμψία πασσάλου-εδάφους, καθώς και τη διαφοροποίηση της ακαμψίας με το βάθος.

Οι τιμές του συντελεστή  $a_f$  υπό αστραγγιστες συνθήκες κυμαίνονται μεταξύ 0.50 και 0.75 για τις συνήθεις αποστάσεις μεταξύ πασσάλων ( $s/D = 2-3$ ) και για μήκη πασσάλων κυμαινόμενα μεταξύ 10-100 φορές της διαμέτρου τους  $D$ . Παρατηρείται ότι η πρόσθετη καθίζηση μειώνεται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των πασσάλων και αυξάνεται με το μήκος τους. Επίσης μειώνεται με την ευκαμψία των πασσάλων, τη μείωση του πάχους του εδαφικού στρώματος και την αύξηση της ακαμψίας του εδάφους κατά το βάθος. Αλλά αυξάνεται ελαφρώς υπό στραγγιζόμενες συνθήκες ( $\nu < 0.5$ ) και όπου οι αιχμές των πασσάλων έχουν διαμορφωθεί σε βολβούς.

Με την αποδοχή της αρχής της επαλληλίας, και κατά αναλογία προς το συντελεστή αποδοτικότητας της ομάδας πασσάλων που αφορούσε τη φέρουσα ικανότητα, μπορεί να ορισθεί για τις καθιζήσεις της ομάδας ο συντελεστής επιτελεστικότητας (performance) ως εξής:

$$R_s = \frac{\text{καθίζηση ομάδας}}{\text{καθίζηση μεμον.πασσάλου}}$$

όταν τα φορτία στην ομάδα και τον μεμονωμένο πάσσαλο βρίσκονται στην ίδια αναλογία ως προς το φορτίο αστοχίας ο συντελεστής ασφάλειας παραμένει ο ίδιος.

Η τιμή του  $R_s$  εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μεταξύ των οποίων η αξονική απόσταση μεταξύ των πασσάλων, οι διαστάσεις των πασσάλων, η σχετική ακαμψία του πασσάλου σε σχέση με το έδαφος, το πάχος του εδάφους κάτω από

την αιχμή των πασσάλων (για πασσάλους τριβής), η φύση του ανθεκτικού υποβάθρου (για πασσάλους αιχμής) κλπ. Θεωρητικές τιμές του  $R_s$  για ομάδες αιωρούμενων πασσάλων τριβής σε ομογενές έδαφος μεγάλου πάχους δίνονται στον πίνακα 2.1 ενώ στον πίνακα 2.2 δίνονται οι θεωρητικές τιμές για ομάδες πασσάλων αιχμής σε ανθεκτικό υπόβαθρο, συναρτήσει του συντελεστή  $K=E_p/E_s$  (συντελεστής ακαμψίας του πασσάλου), όπου  $E_p$  και  $E_s$  τα μέτρα ελαστικότητας πασσάλου και εδάφους αντίστοιχα.

		ΛΟΓΟΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ $R_s$															
		ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΣΣΑΛΩΝ ΣΤΗΝ ΟΜΑΔΑ, $n$															
		4			9			16			25						
Λόγος μή- κος προς διάμετρο $L/B$	Λόγος αξ. προς διάμ. $e/B$	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΠΑΣΣΑΛΟΥ $K$															
		10	100	1000	$\infty$	10	100	1000	$\infty$	10	100	1000	$\infty$				
10	2	1.83	2.25	2.54	2.62	2.78	3.80	4.42	4.48	3.76	5.49	6.40	6.53	4.75	7.20	8.48	8.68
	5	1.40	1.73	1.88	1.90	1.83	2.49	2.82	2.85	2.26	3.25	3.74	3.82	2.68	3.98	4.70	4.75
	10	1.21	1.39	1.48	1.50	1.42	1.76	1.97	1.99	1.63	2.14	2.46	2.46	1.85	2.53	2.95	2.95
25	2	1.99	2.14	2.65	2.87	3.01	3.64	4.84	5.29	4.22	5.38	7.44	8.10	5.40	7.25	10.28	11.25
	5	1.47	1.74	2.09	2.19	1.98	2.61	3.48	3.74	2.46	3.54	4.96	5.34	2.95	4.48	6.50	7.03
	10	1.25	1.46	1.74	1.78	1.49	1.95	2.57	2.73	1.74	2.46	3.42	3.63	1.98	2.98	4.28	4.50
100	2	2.56	2.31	2.26	3.16	4.43	4.05	4.11	6.15	6.42	6.14	6.50	9.92	8.48	8.40	9.25	14.35
	5	1.88	1.88	2.01	2.64	2.80	2.94	3.38	4.87	3.74	4.05	4.98	7.54	4.68	5.18	6.75	10.55
	10	1.47	1.56	1.76	2.28	1.95	2.17	2.73	3.93	2.45	2.80	3.81	5.82	2.95	3.48	5.00	7.88

Πίνακας 2. 1 Τιμές του συντελεστή καθιζήσεων  $R_s$ , για την περίπτωση ομάδας αιωρούμενων πασσάλων τριβής, με άκαμπτο κεφαλόδεσμο, μέσα σε ομογενή εδαφική μάζα μεγάλου πάχους

Λόγος μή- κος προς διάμετρο L/B	Λόγος αξ. αποστάσεως προς διάμ. e/B	ΛΟΓΟΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ R <sub>s</sub> ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΣΣΑΛΩΝ ΣΤΗΝ ΟΜΑΔΑ, n																																															
		4					9					16					25																																
		10	100	1000	∞	∞	10	100	1000	∞	∞	10	100	1000	∞	∞	10	100	1000	∞	∞	10	100	1000	∞	∞																							
10	2	1.83	2.25	2.54	2.62	2.78	3.80	4.42	4.48	3.76	5.49	6.40	6.53	4.75	7.20	8.48	8.68	1.40	1.73	1.88	1.90	1.83	2.49	2.82	2.85	2.26	3.25	3.74	3.82	2.68	3.98	4.70	4.75	1.21	1.39	1.48	1.50	1.42	1.76	1.97	1.99	1.63	2.14	2.46	2.46	1.85	2.53	2.95	2.95
25	2	1.99	2.14	2.65	2.87	3.01	3.64	4.84	5.29	4.22	5.38	7.44	8.10	5.40	7.25	10.28	11.25	1.47	1.74	2.09	2.19	1.98	2.61	3.48	3.74	2.46	3.54	4.96	5.34	2.95	4.48	6.50	7.03	1.25	1.46	1.74	1.78	1.49	1.95	2.57	2.73	1.74	2.46	3.42	3.63	1.98	2.98	4.28	4.50
100	2	2.56	2.31	2.26	3.16	4.43	4.05	4.11	6.15	6.42	6.14	6.50	9.92	8.48	8.40	9.25	14.35	1.88	1.88	2.01	2.64	2.80	2.94	3.38	4.87	3.74	4.05	4.98	7.54	4.68	5.18	6.75	10.55	1.47	1.56	1.76	2.28	1.95	2.17	2.73	3.93	2.45	2.80	3.81	5.82	2.95	3.48	5.00	7.88

Πίνακας 2.2 Τιμές του συντελεστή καθιζήσεων R<sub>s</sub>, για την περίπτωση ομάδας πασσάλων αιχμής, με άκαμπτο κεφαλόδεσμο, μέσα σε ομογενή εδαφική μάζα μεγάλου πάχους

Οι τιμές των ανωτέρω πινάκων αφορούν ομάδες πασσάλων με τετραγωνική διάταξη και άκαμπτο κεφαλόδεσμο. Οι αξονικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων είναι e και το μήκος και η διάμετρος του πασσάλου είναι L και B αντίστοιχα. Οι

επιλύσεις αφορούν ομάδες με 4, 9, 16 και 25 πασσάλους. Έχει όμως διαπιστωθεί ότι ο συντελεστής  $R_s$  μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την τετραγωνική ρίζα του αριθμού των πασσάλων στην ομάδα, οπότε για δεδομένη τιμή του  $K$  και δεδομένες τιμές  $L$ ,  $B$  μπορεί να γίνει επέκταση της τιμής του  $R_s$  από τιμές 16 και 25 πασσάλων ως εξής:

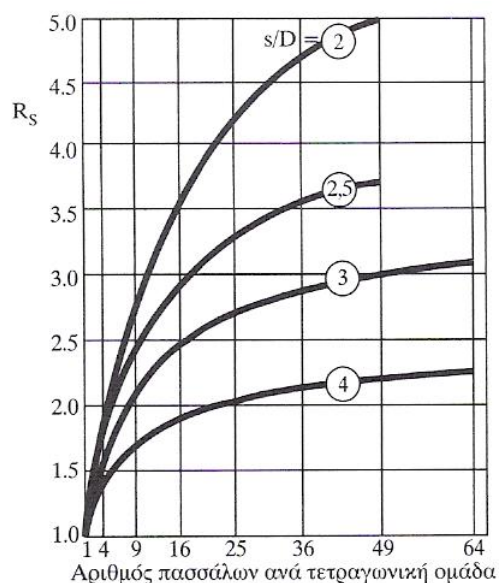
$$R_s = (R_{25} - R_{16})(\sqrt{n} - 5) + R_{25}$$

όπου  $n$ : ο αριθμός των πασσάλων

$R_{25}$ : λόγος καθιζήσεων ομάδας 25 πασσάλων

$R_{16}$ : λόγος καθιζήσεων ομάδας 16 πασσάλων

Οι τιμές όμως του συντελεστή  $R_s$  έχουν εκτιμηθεί και αναλυτικά από τους Cooke et al (1980) και παρουσιάζονται στο διάγραμμα του σχήματος 2.8 που ακολουθεί. Παρατηρείται ότι η καθίζηση μιας ομάδας πασσάλων μπορεί να είναι μέχρι και εξαπλάσια εκείνης του αντίστοιχου μεμονωμένου πασσάλου, αυξάνεται δε κατά μη γραμμικό τρόπο με την αύξηση του αριθμού των πασσάλων σε ομάδα τετραγωνικής κάτοψης, ενώ μειώνεται με την αύξηση της απόστασης των πασσάλων μέσα στην ομάδα, καθώς και με την αύξηση της εδαφικής ακαμψίας κατά το βάθος. Βέβαια ελαστικές θεωρήσεις τέτοιου τύπου προϋποθέτουν ίσα φορτία σε όλους τους πασσάλους της ομάδας και άρα πλήρως εύκαμπτο κεφαλόδεσμο ή εναλλακτικά, ίσες καθιζήσεις μεταξύ των πασσάλων της ομάδας και άρα πλήρως άκαμπτο κεφαλόδεσμο.



**Σχήμα 8** Συντελεστής  $R_s$  συναρτήσει της σχετικής απόστασης των πασσάλων και του αριθμού των πασσάλων σε τετραγωνική ομάδα (Cooke et al, 1980)

Γενικά πάντως, η καθίζηση μιας ομάδας πασσάλων σε σχετικά ομοιόμορφο στρώμα εξαρτάται πρωταρχικά από τις διαστάσεις της ομάδας παρά από τον αριθμό των πασσάλων. Έτσι η τυχόν αύξηση του αριθμού των πασσάλων σε μια ομάδα μόνο οριακά μπορεί να βελτιώσει το μέγεθος της καθιζήσεως της, εκτός από την περίπτωση που  $e > 6B$ .



### 2.5.3 Ημιεμπειρικές συσχετίσεις

Πέραν των άνω κλειστών αναλυτικών προσεγγίσεων, το πρόβλημα της καθίζησης μιας ομάδας πασσάλων μπορεί να αντιμετωπιστεί και κατά τρόπο ημιεμπειρικό, με την υιοθέτηση της έννοιας της ισοδύναμης (εύκαμπτης) πλάκας θεμελίωσης, η οποία υποκαθιστά την ομάδα πασσάλων.

Ειδικότερα για τα συνεκτικά εδάφη, όπου το μέρος της συνολικής καθίζησης το οποίο οφείλεται στην ελαστική βράχυνση των πασσάλων είναι πρακτικά αμελητέο σε σύγκριση με τη συνολική καθίζηση της ομάδας. Η λύση αυτή παρά τον ημιεμπειρικό χαρακτήρα της είναι η πλέον διαδεδομένη στην πράξη. Η ισοδύναμη αυτή πλάκα τοποθετείται στην στάθμη των αιχμών των πασσάλων ή σε βάθος ίσο με 2/3 του μήκους τους, έχει διαστάσεις σε κάτοψη εκείνες της ομάδας των πασσάλων ή ελαφρώς μεγαλύτερες. Έτσι η ομάδα, για την εκτίμηση της καθίζησης, υποκαθίσταται από την ισοδύναμη εύκαμπτη επιφανειακή θεμελίωση και ισχύει ότι και στις επιφανειακές θεμελιώσεις. Σημειώνεται ότι η μεγαλύτερη επιφάνεια της ισοδύναμης πλάκας σε σχέση με εκείνη που ορίζεται από το περίγραμμα των πασσάλων αποδίδεται στη μεταβίβαση των φορτίων στο έδαφος μέσω πλευρικών τριβών. Το ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο στην επιφάνεια της ισοδύναμης πλάκας προκύπτει από την αναγωγή του εξωτερικώς δρώντος φορτίου της ομάδας πασσάλων στην επιφάνεια της πλάκας. Η γεωμετρία του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 2.9 που ακολουθεί.

Για τις άμεσες καθιζήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι συντελεστές βάθους κατά Janbu και ακαμψίας ως προηγουμένως.

Αντίστοιχα, στα μη συνεκτικά εδαφικά υλικά η καθίζηση της ομάδας των πασσάλων οφείλεται στην ελαστική συμπίεση των πασσάλων (βράχυνση) και στην καθίζηση του εδάφους λόγω μεταβίβασης των φορτίων σε αυτό. Η καθίζηση λοιπόν της εδαφικής μάζας εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα του μη συνεκτικού εδάφους, η οποία όμως επηρεάζεται από τον τρόπο κατασκευής των πασσάλων. Οι Beresantzen et al (1961), από δοκιμαστικές φορτίσεις πασσάλων σε λεπτές άμμους παρατήρησαν ότι η καθίζηση μιας ομάδας πασσάλων αυξάνει σχεδόν γραμμικά με το πλάτος της 'ισοδύναμης πλάκας' στις αιχμές των πασσάλων και ότι η καθίζηση δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των πασσάλων στην ομάδα, βλ. σχήμα 2.10).

Ο Vesic (1977) αξιοποιώντας τις παρατηρήσεις του Beresantzen καθώς και από παρατηρήσεις καθιζήσεων ομάδων πασσάλων σε άμμο, πρότεινε για την εκτίμηση καθίζησης ομάδας πασσάλων, την αύξηση της καθίζησης του μεμονωμένου πασσάλου υπό το φορτίο λειτουργίας κατά το συντελεστή

καθιζήσεων  $z_g$ , σύμφωνα με τη σχέση: 
$$\rho_g = z_g \cdot \rho \quad \text{με} \quad z_g = \sqrt{\frac{B_g}{B}}$$

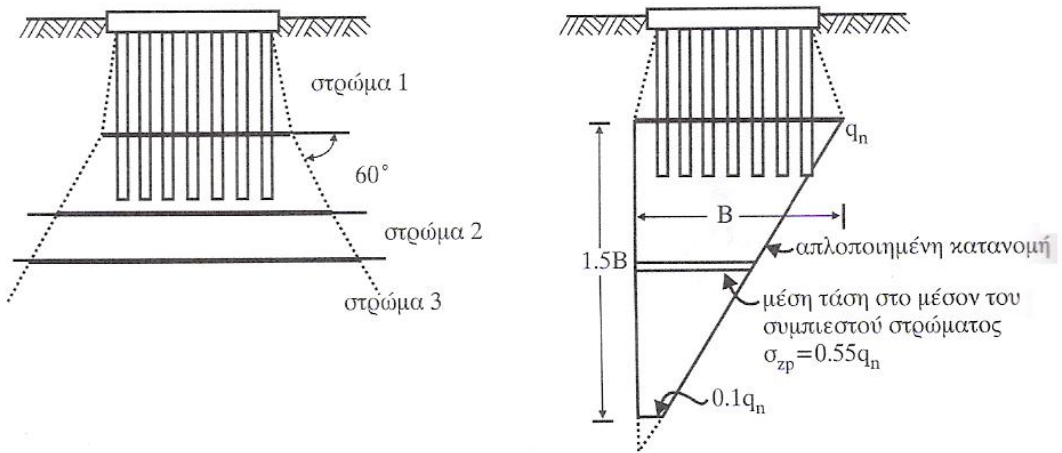
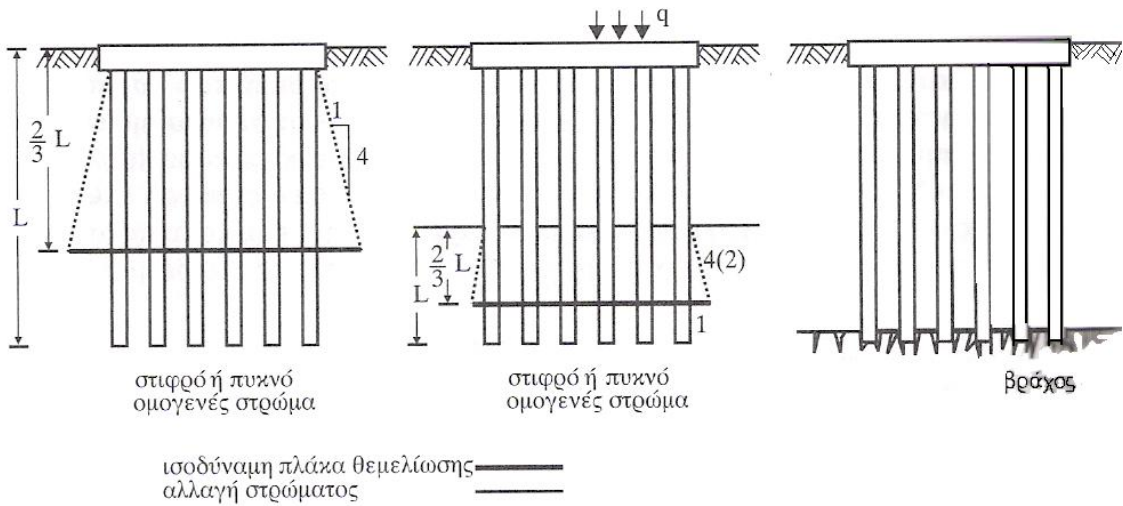
όπου  $\rho_g$ ,  $\rho$  : η καθίζηση της ομάδας και του πασσάλου αντίστοιχα

$B_g$  : το πλάτος της ομάδας πασσάλων

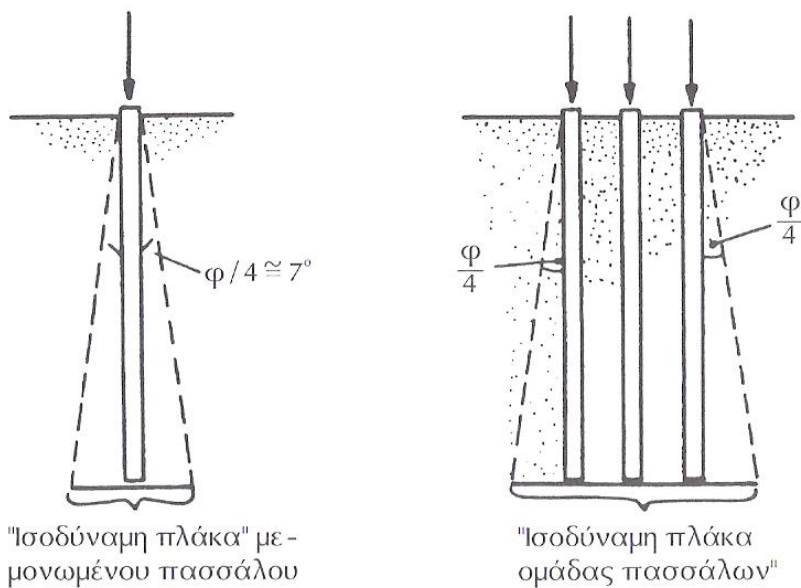
$B$  : η διάμετρος του μεμονωμένου πασσάλου

Είναι λογικό η επίδραση της ομάδας στις καθιζήσεις να είναι πιο έντονη στην περίπτωση των πασσάλων τριβής. Η ανωτέρω σχέση του Vesic έχει προκύψει από παρατηρήσεις σε εμπηγνυόμενους πασσάλους μήκους  $L=15B$ . Έτσι για μήκος πασσάλου  $L>15B$  η καθίζηση πρέπει να υποεκτιμάται, ενώ αντίθετα για  $L<B$  θα πρέπει να υπερεκτιμάται.

Διερεύνηση της αλληλεπίδρασης πασσάλων - κοιτόστρωσης στις καθιζήσεις θεμελιώσεων



Σχήμα 2.9 Αρχές εκτίμησης της καθιζήσης ομάδας πασσάλων με προσομοίωση μιας ισοδύναμης πλάκας θεμελίωσης



Σχήμα 2.10 Ισοδύναμες πλάκες θεμελιώσεων για την εκτίμηση καθιζήσεων σε μη συνεκτικά εδάφη

Τέλος, ο Meyerhof (1976), με βάση το μηχανισμό της ισοδύναμης πλάκας, εκτιμά την καθίζηση ομάδας πασσάλων σε ίντσες για την περίπτωση λόγου  $D/B > 4$ , με τη βοήθεια αποτελεσμάτων επί τύπου δοκιμών (SPT, CPT) με την εμπειρική

$$\text{σχέση: } \rho_g = \frac{2p\sqrt{B}}{N} \times 0.5(\text{in})$$

όπου  $B$  : το πλάτος της ομάδας σε πόδια (ft)

$p$  : πρόσθετη πίεση στην 'ισοδύναμη πλάκα' σε t/sqft, (100 kN/m<sup>2</sup>)

$N$  : μέση διορθωμένη τιμή SPT, για βάθος ίσο με  $4B$  στο φέρον στρώμα

$D$  : βάθος έδρασης των πασσάλων σε πόδια (ft)

Για βάθος έδρασης των πασσάλων  $D < 4B$  ο συντελεστής 0.5 στην παραπάνω σχέση αντικαθίσταται από τον συντελεστή επιρροής βάθους:

$$I = 1 - \frac{D}{8B} \geq 0.5$$

Για την περίπτωση που διαθέτουμε αποτελέσματα δοκιμών CPT οι ανωτέρω σχέσεις του Meyerhof έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$\rho_g = \frac{p\sqrt{B}}{2q_c} \cdot I(\text{in})$$

όπου  $q_c$  : μέση τιμή αντοχής αιχμής κώνου κατά το συμπιεστό βάθος σε t/sqft.

Ο Meyerhof (1976) συνιστά επίσης για την περίπτωση των άμμων, η θέση της 'ισοδύναμης πλάκας' να λαμβάνεται στα  $2/3$  του μήκους τους για την περίπτωση εμπηγνυόμενων πασσάλων και στην αιχμή των πασσάλων, για την περίπτωση πασσάλων με εκσκαφή.

## 2.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΑΣΣΑΛΟΟΜΑΔΩΝ

### 2.6.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι ανάλυσης για ομάδες πασσάλων, κάποιες από τις οποίες έχουν μελετηθεί από τους Roulos et al (1997). Σύμφωνα λοιπόν με τους παραπάνω, μπορεί να γίνει κατηγοριοποίηση των μεθόδων σε τρεις ευρύτερες κατηγορίες:

- Απλοποιημένες υπολογιστικές μέθοδοι
- Προσεγγιστικές υπολογιστικές μέθοδοι
- Αυστηρά υπολογιστικές μέθοδοι

Στις απλοποιημένες μεθόδους συγκαταλέγονται αυτές των Roulos and Davis (1980), του Randolph (1983,1994), των van Impe and Clerq (1995) και του Burland (1995). Όλες περιλαμβάνουν μια σειρά από απλουστεύσεις, οι οποίες αφορούν στην αριθμητική προσομοίωση του εδαφικού προφίλ καθώς και στις συνθήκες φόρτισης της πλάκας.

Οι προσεγγιστικές μέθοδοι βασίζονται σε δύο γενικότερες θεωρήσεις. Η πρώτη μέθοδος βασίζεται σε ένα λωριδωτό πέδιλο επί ελατηρίων 'strip on springs'. Στη μέθοδο αυτή η πλάκα έχει αντικατασταθεί από μια σειρά λωριδωτών πεδίων

ενώ οι πάσσαλοι από ελατήρια κατάλληλης ακαμψίας (Roulos 1991). Η δεύτερη μέθοδος βασίζεται σε πλάκα επί ελατηρίων 'plate on springs' κατά την οποία ο κεφαλόδεσμος αντικαθίσταται από μια πλάκα και την θέση των πασσάλων παίρνουν ελατήρια (Clancy and Randolph 1993, Roulos 1994, Viggiani 1998, Anagnostopoulos and Geogiadis 1998).

Στις αυστηρά υπολογιστικές περιλαμβάνονται μέθοδοι που κάνουν χρήση της αριθμητικής μεθόδου αναλύσεως που στηρίζεται στη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων. Μια προσέγγιση είναι αυτή κατά την οποία γίνεται διακριτοποίηση του συστήματος πλάκα-πασσάλων και χρήση συνοριακών συνθηκών με τη βοήθεια της θεωρίας ελαστικότητας (Butterfield and Banerjee 1971, Brown and Wiesner 1975, Kuwabara 1980, Sinha 1997). Μια άλλη προσέγγιση είναι αυτή που συνδυάζει τη χρήση συνοριακών συνθηκών στους πασσάλους και πεπερασμένων στοιχείων για την πλάκα (Hain and Lee 1978, Ta and Small 1996, Franke et al 1994, Russo and Viggiani 1998). Ακόμα στις μεθόδους αυτές συγκαταλέγεται και η απλοποιημένη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία η οποία συνήθως περιλαμβάνει την προσομοίωση του συστήματος θεμελίωσης ως πρόβλημα επίπεδης έντασης (Desai 1974) ή ως αξονοσυμμετρικό πρόβλημα (Hooper 1974). Τέλος, έχουμε την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία σε 3 διαστάσεις (Zhuang et al 1991, Lee 1993, Wang 1995, Katzenbach et al 1998).

## 2.6.2 Απλοποιημένες υπολογιστικές μέθοδοι

### 2.6.2.1 Μέθοδος των Poulos-Davis-Randolph (PDR)

Για τον υπολογισμό της κατακόρυφης φέρουσας ικανότητας μιας ομάδας πασσάλων, κάνοντας χρήση των απλοποιημένων υπολογιστικών μεθόδων, μπορούμε να προσδιορίσουμε το οριακό φορτίο ως τη μικρότερη από τις δυο ακόλουθες τιμές:

- το συνολικό άθροισμα των οριακών φορτίων τόσο της πλάκας όσο και των μεμονωμένων πασσάλων
- το οριακό φορτίο του συστήματος πλάκας-πασσάλων, στο οποίο συμπεριλαμβάνεται και το μέρος της πλάκας που βρίσκεται έξω από την περιφέρεια των πασσάλων

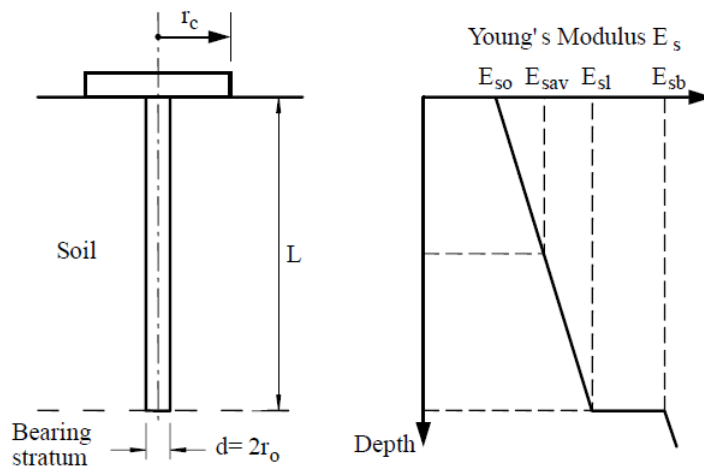
Για να υπολογιστεί η συμπεριφορά του συστήματος στην καθίζηση μπορεί να υιοθετηθεί μια προσέγγιση παρόμοια με αυτή των Roulos and Davis (1980). Ωστόσο, μπορούμε να επεκτείνουμε την παραπάνω μέθοδο κάνοντας χρήση των όσων υποστηρίζει ο Randolph (1994) για τον υπολογισμό του φορτίου που μοιράζεται μεταξύ πλάκας και πασσάλων (βλ. σχήμα 2.11). Σύμφωνα λοιπόν με την προσέγγιση αυτή η ακαμψία της πλάκας του κεφαλόδεσμου μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$K_{pr} = (K_p + K_r(1 - a_{cp})) / (1 - a_{cp}^2 K_r / K_p)$$

όπου  $K_{pr}$ : η ακαμψία της ομάδας πλάκας-πασσάλων

$K_p$ : η ακαμψία της ομάδας των πασσάλων

$K_r$ : η ακαμψία της πλάκας μόνη της  
 $\alpha_{cp}$ : ο παράγοντας αλληλεπίδρασης μεταξύ πλάκας-πασσάλων



**Σχήμα 2. 11** Απλοποιημένο μοντέλο πασσάλου-κεφαλόδεσμου σύμφωνα με τη θεώρηση του Randolph

Ο υπολογισμός της ακαμψίας της πλάκας  $K_r$  μπορεί να γίνει κάνοντας χρήση της θεωρίας της ελαστικότητας όπως για παράδειγμα οι λύσεις των Fraser and Wardle (1976) ή των Mayne andoulos (1999). Ο υπολογισμός της ακαμψίας της ομάδας πασσάλων  $K_p$  μπορεί επίσης να γίνει με βάση την ελαστικότητα όπως περιγράφουν οιoulos and Davis (1980), Fleming et al (1992) ήoulos (1989). Στις τελευταίες περιπτώσεις, η ακαμψία του μεμονωμένου πασσάλου προέρχεται από τη θεωρία της ελαστικότητας και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή που φανερώνει το βαθμό απόδοσης της ακαμψίας στην ομάδα των πασσάλων ο οποίος έχει προκύψει προσεγγιστικά από ελαστικές λύσεις.

Η αναλογία για το ολικό επιβαλλόμενο φορτίο που φέρεται από την πλάκα είναι:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{(K_r(1 - \alpha_{cp}))}{(K_p + K_r(1 - \alpha_{cp}))} = X$$

όπου  $P_r$ : το φορτίο που φέρεται από την πλάκα

$P_t$ : το ολικό επιβαλλόμενο φορτίο

Ο παράγοντας αλληλεπίδρασης μεταξύ πλάκας-πασσάλων  $\alpha_{cp}$  μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\alpha_{cp} = 1 - \ln(r_c - r_0) / \zeta$$

όπου  $r_c$ : μέση ακτίνα του κεφαλόδεσμου, (αναφέρεται σε στην ισοδύναμη περιοχή της πλάκας που αντιστοιχεί σε έναν πάσσαλο)

$r_0$ : ακτίνα του πασσάλου

$$\zeta = \ln(r_m / r_0)$$

$$r_m = \{0.25 + \xi [2.5 \rho (1 - \nu) - 0.25] * L$$

$$\xi = E_{sl} / E_{sb}$$

$$\rho = E_{sav} / E_{sl}$$

$\nu$  : ο λόγος του Poissons για το έδαφος

$L$  : μήκος πασσάλου

$E_{sl}$  : το μέτρο ελαστικότητας του Young του εδάφους στη στάθμη της αιχμής του πασσάλου

$E_{sb}$  : το μέτρο ελαστικότητας του Young του φέροντος στρώματος εδάφους κάτω από τον πασσάλου

$E_{sav}$  : ο μέσος όρος των μέτρων ελαστικότητας του Young του εδάφους γύρω από τον πάσσαλο (βλ. σχήμα 2.11)

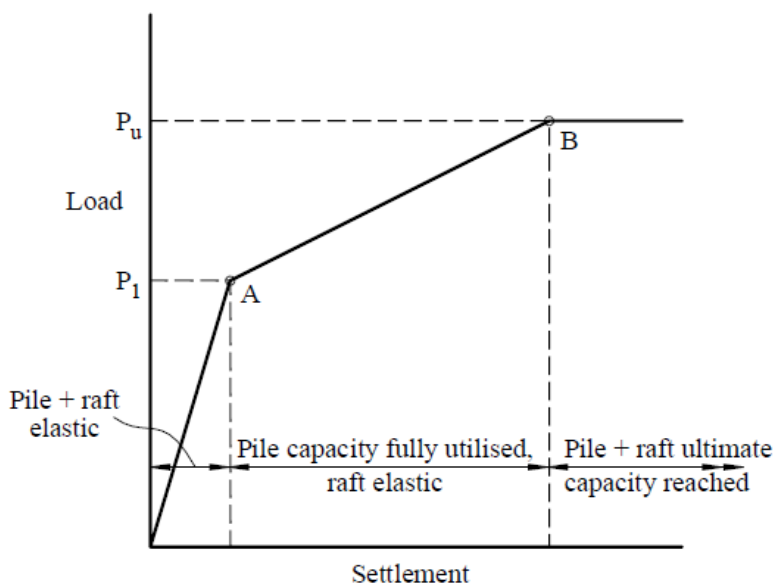
Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός διαγράμματος φορτίου-καθίζησης όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.12. Στο διάγραμμα αυτό βλέπουμε ότι η ακαμψία της πασσαλομάδας παραμένει σταθερή έως ότου ενεργοποιηθεί πλήρως η ικανότητα παραλαβής του φορτίου από όλους τους πασσάλους. Κάνοντας την παραδοχή ότι η κινητοποίηση όλων των πασσάλων συμβαίνει ταυτόχρονα, το συνολικό φορτίο  $P_1$  που εφαρμόζεται και κατά το οποίο επιτυγχάνεται η ικανότητα του πασσάλου δίνεται από τη σχέση:

$$P_1 = P_{up} / (1 - X)$$

όπου  $P_{up}$ : οριακή φέρουσα ικανότητα των πασσάλων της ομάδας

$X$ : αναλογία του φορτίου που φέρουν οι πάσσαλοι

Πέρα από το σημείο A, όπως καθίσταται εμφανές και στο σχήμα 2.12, η ακαμψία του συστήματος θεμελίωση είναι ίση με αυτή της πλάκας μόνη της  $K_r$  και αυτό συνεχίζεται έως ότου η φέρουσα ικανότητα της πασσαλομάδας φτάσει στην οριακή τιμή  $P_{up}$  (σημείο B) από όπου και ο κλάδος γίνεται οριζόντιος.



Σχήμα 2. 12 Απλοποιημένο διάγραμμα φορτίου - καθίζησης

### 2.6.2.2 Μέθοδος του Burland

Όταν οι πάσσαλοι σχεδιάζονται με σκοπό τη μείωση των καθιζήσεων και την ανάπτυξη της μέγιστης φέρουσας ικανότητας για το φορτίο σχεδιασμού ο Burland (1995) πρότεινε την ακόλουθη απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού:

- Υπολογισμός της ολικής καθίζησης της πλάκας ξεχωριστά λόγω του ολικού μακροχρόνιου φορτίου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.13 το φορτίο σχεδιασμού  $P_0$  δίνει ολική καθίζηση  $S_0$ .
- Αξιολόγηση μιας αποδεκτής καθίζησης σχεδιασμού  $S_d$ , η οποία θα εμπεριέχει και ένα περιθώριο ασφαλείας.
- Η διαφορά του φορτίου  $P_0 - P_1$  αναμένονται να την παραλάβουν οι πάσσαλοι για να μειώσουν την καθίζηση. Η αξονική δυσκαμψία των πασσάλων αυτών θα κινητοποιηθεί πλήρως και για το λόγο αυτό δεν χρειάζεται να συμπεριληφθεί και συντελεστής ασφάλειας. Ωστόσο, ο Burland προτείνει ο 'παράγοντας κινητοποίησης' να ληφθεί ίσος με 0.9 του οριακού φορτίου  $P_{su}$ .

Αν οι πάσσαλοι βρίσκονται κάτω από στήλες οι οποίες μεταφέρουν ένα φορτίο που υπερβαίνει το  $P_{su}$ , τότε η πασσαλοομάδα μπορεί να προσομοιωθεί κατά την ανάλυση με μια πλάκα πάνω στην οποία επενεργούν στήλες με μειωμένα φορτία (βλ. σχήμα 10). Τα φορτία αυτά υπολογίζονται ως εξής:

$$Q_r = Q - 0.9 P_{su}$$

- Οι ροπές κάμψης μπορούν να παραχθούν αναλύοντας την πασσαλοομάδα ως μια πλάκα η οποία υπόκειται σε μειωμένα φορτία  $Q_r$ .
- η διαδικασία για τον υπολογισμό της καθίζησης της ομάδας πασσάλων δεν προβλέπεται ρητά από τον Burland, αλλά θεωρείται αποδεκτό να υιοθετηθεί η προσέγγιση του Randolph (1994) κατά την οποία:

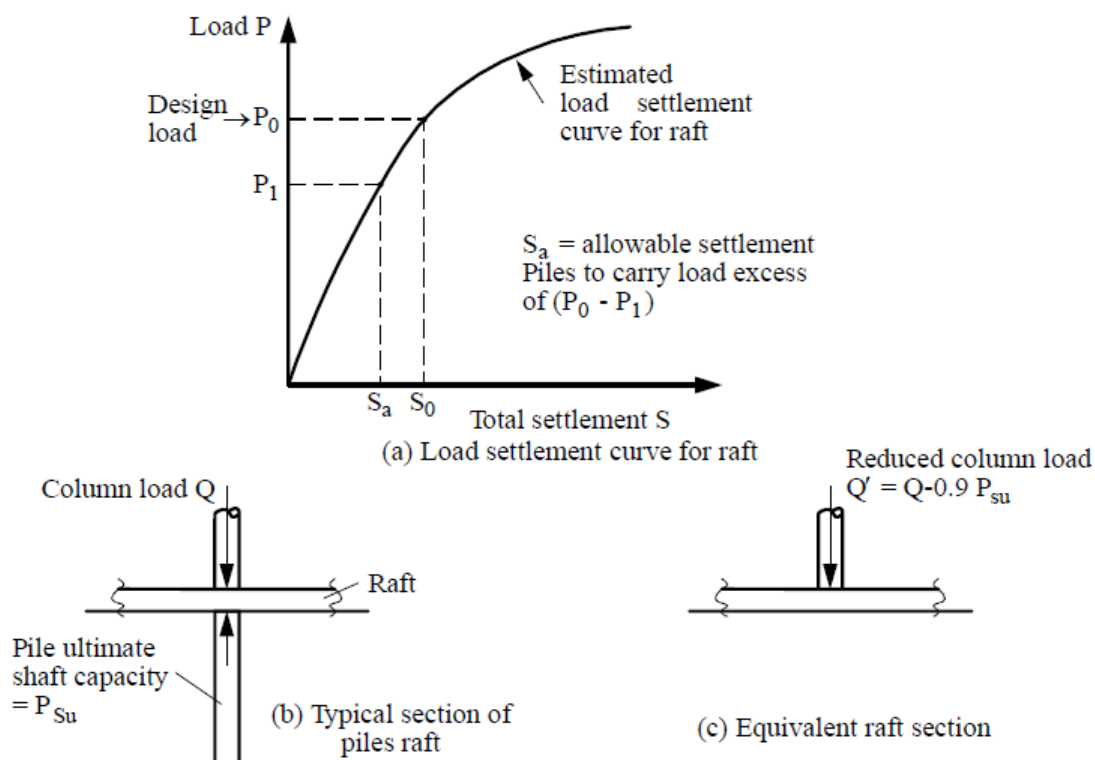
$$S_{pr} = S_r \times K_r / K_{pr}$$

όπου  $S_{pr}$ : καθίζηση της πασσαλοομάδας

$S_r$ : καθίζηση μόνο της πλάκας υποβαλλόμενη στο ολικό φορτίο

$K_r$ : ακαμψία της πλάκας

$K_{pr}$ : ακαμψία της πασσαλοομάδας



Σχήμα 2. 13 Απλοποιημένη μέθοδος κατά Burland

## 2.6.3 Προσεγγιστικές υπολογιστικές μέθοδοι

### 2.6.3.1 Λωριδωτό πέδιλο επί ελατηρίων (strip on springs) GASP

Ένα παράδειγμα της μεθόδου αυτής παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14 σύμφωνα με τον Ρουλος (1991). Η πλάκα αντικαθίσταται από μια λωρίδα ενώ οι πάσσαλοι υποστηρίζονται από ελατήρια. Γίνονται προσεγγιστικές παραδοχές για τις τέσσερις συνιστώσες της αλληλεπίδρασης (πλάκα-στοιχεία πλάκας, πασσάλου-πασσάλου, πλάκας-πασσάλου, πασσάλου-πλάκας) και η επιρροή των τμημάτων της πλάκας έξω από το τμήμα της λωρίδας στο στάδιο της ανάλυσης λαμβάνεται υπόψη υπολογίζοντας τις καθιζήσεις του εδάφους σε ελεύθερο πεδίο που υπολογίζονται αριθμητικά στις θέσεις αυτές. Αυτές οι καθιζήσεις στη συνέχεια ενσωματώνονται στην ανάλυση, και το τμήμα της λωρίδας έχει αναλυθεί έτσι ώστε να εξασφαλίζεται έναντι των καθιζήσεων και των ροπών που οφείλονται στο επιβαλλόμενο φορτίο της λωρίδας και στις καθιζήσεις του εδάφους που οφείλονται στα τμήματα έξω από την πλάκα.

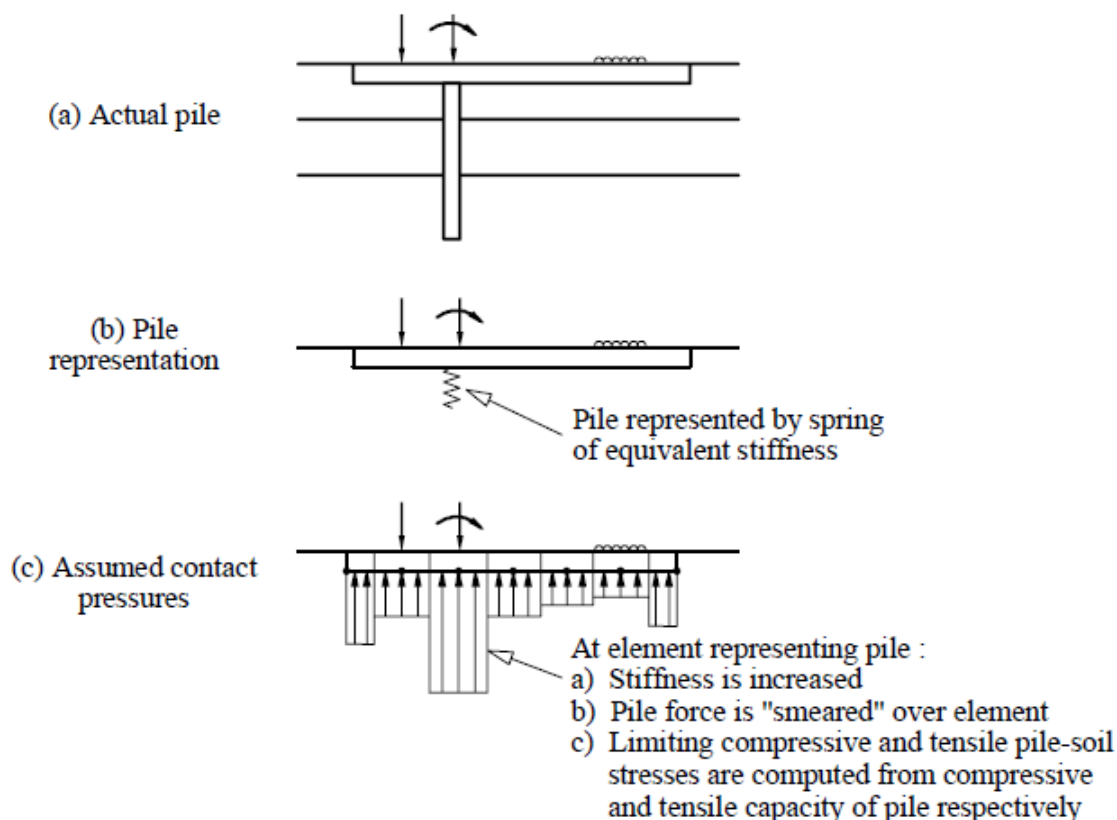
Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί με τη βοήθεια ενός προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή GASP (Geotechnical Analysis of Strip with piles) και έχει αποδειχθεί ότι η υπολογιζόμενη καθίζηση είναι σε συμφωνία με πληρέστερες μεθόδους ανάλυσης. Ωστόσο, έχει ορισμένους σημαντικούς περιορισμούς, συγκεκριμένα γιατί δεν μπορεί να γίνει θεώρηση στρεπτικών ροπών στην πλάκα



αλλά και γιατί δεν μπορεί να δώσει συνεπείς καθιζήσεις σε ένα σημείο αν μέσω του εν λόγω σημείου αναλύονται λωρίδες σε δύο κατευθύνσεις.

Η GASP μπορεί να λάβει υπόψη τη μη-γραμμικότητα του εδάφους κατά ένα προσεγγιστικό τρόπο περιορίζοντας τις πιέσεις επαφής λωρίδας-εδάφους έτσι ώστε να μην υπερβαίνει τη φέρουσα ικανότητα (σε θλίψη) ή την ικανότητα ανύψωσης σε εφελκυσμό. Τα φορτία των πασσάλων είναι επίσης περιορισμένα έτσι ώστε να μην υπερβαίνουν τις ικανότητες θλίψης και ανύψωσης των πασσάλων. Ωστόσο, η οριακή φέρουσα ικανότητα του φορτίου των πασσάλων πρέπει να είναι προκαθορισμένη, και συνήθως εκλαμβάνεται ίση με εκείνη του μεμονωμένου πασσάλου. Στην πραγματικότητα, όπως φαίνεται και από τους Katzenbach et al (1998), το φορτίο που μεταφέρεται στο έδαφος από την πλάκα μπορεί να έχει ευεργετική επίδραση στη συμπεριφορά του πασσάλου στο σύστημα της πασσαλοομάδας. Για το λόγω αυτό οι υποθέσεις που εμπλέκονται στην αριθμητική προσομοίωση των πασσάλων στην ανάλυση GASP τείνουν να είναι συντηρητικές.

Κατά την διεξαγωγή μιας μη-γραμμικής ανάλυσης στην οποία αναλύονται λωρίδες σε δύο κατευθύνσεις, διαπιστώθηκε σκόπιμο να γίνει θεώρηση της μη γραμμικότητας μόνο προς τη μία κατεύθυνση (την πιο μεγάλη), ενώ προς την άλλη κατεύθυνση (τη μικρότερη) οι πάσσαλοι και η πλάκα να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρονται ελαστικά. Μια τέτοια διαδικασία αποφεύγει τη μη ρεαλιστική διαρροή του εδάφους κάτω από τη λωρίδα και επομένως μη ρεαλιστική πρόβλεψη της καθίζησης.



Σχήμα 2.14 Αναπαράσταση μοντέλου στο οποίο ο πάσσαλος έχει αντικατασταθεί με ελατήριο μέσω ανάλυσης GASP (Poulos 1991)

### 2.6.3.2 Πλάκα επί ελατηρίων (plate on springs) GARP

Σε αυτή τη μέθοδο ανάλυσης, η πλάκα του κεφαλόδεσμου αναπαρίσταται από μια ελαστική πλάκα, το έδαφος από ένα ελαστικό συνεχές μέσο και οι πάσσαλοι αντικαθίστανται από ελατήρια που αλληλεπιδρούν. Κάποιες από τις πρώτες προσεγγίσεις τη κατηγορίας αυτής (Hongladarom et al 1973) αμέλησαν κάποια από τα στοιχεία αλληλεπίδρασης και έτσι προέκυψαν ακαμψίες της πασσαλοομάδας οι οποίες ήταν πολύ μεγάλες.

Ο Roulos (1994) χρησιμοποίησε τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την πλάκα με απώτερο σκοπό τη συνεκτίμηση των φαινομένων αλληλεπίδρασης μέσω προσεγγιστικών ελαστικών λύσεων. Η ανάλυση διεξήχθη με τη βοήθεια ενός προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή GARP (Geotechnical Analysis of Raft with Piles). Έγιναν παραδοχές για τη στρωματοποίηση του εδαφικού προφίλ, για τα αποτελέσματα των πασσάλων που φτάνουν την οριακή φέρουσα ικανότητα (τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό), την ανάπτυξη της φέρουσας ικανότητας αστοχίας κάτω από την πλάκα, και την παρουσία καθιζήσεων λόγω ελεύθερου εδάφους που δρουν στο σύστημα θεμελίωσης. Οι προσεγγίσεις που εμπλέκονται είναι παρόμοιες με εκείνες που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα GASP.

Σε μια μεταγενέστερη έκδοση του προγράμματος GARP (Sales et al 2000) η ανάλυση της πλάκας με πεπερασμένες διαφορές έχει αντικατασταθεί με την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ενώ έχει χρησιμοποιηθεί μια τροποποιημένη προσέγγιση για την εξέταση της ανάπτυξης της οριακής φέρουσας ικανότητας στους πασσάλους.

Ο Russo (1980) και οι Russo and Viggiani (1997) έχουν περιγράψει μια παρόμοια προσέγγιση με τις παραπάνω μεθόδους, κατά την οποία οι διάφορες αλληλεπιδράσεις υπολογίζονται από την θεωρία ελαστικότητας, και η μη-γραμμική συμπεριφορά των πασσάλων θεωρείται ως παρελκόμενο της υπερβολικής καμπύλης φορτίου-καθίζησης για μεμονωμένους πασσάλους. Η αλληλεπίδραση πασσάλου-πασσάλου εφαρμόζεται μόνο για την ελαστική συνιστώσα της καθίζησης του πασσάλου, ενώ η μη-γραμμική συνιστώσα της καθίζησης του πασσάλου θεωρείται ότι θα προκύψει μόνο από τη φόρτιση αυτού του συγκεκριμένου πασσάλου.

Οι περισσότερες αναλύσεις για μια ομάδα πασσάλων βασίζονται στο ότι η πλάκα του κεφαλόδεσμου αντιμετωπίζεται σαν μια λεπτή πλάκα και έχει ενδιαφέρον να δούμε ποια είναι η επίδραση της θεώρησης παχιάς πλάκας στις αριθμητικές προβλέψεις. Οι Roulos et al (2001) έχουν εξετάσει την επίδραση της μεθόδου με την προσομοίωση του κεφαλόδεσμου ως μια λεπτή πλάκα. Έχουν προβεί σε αναλύσεις τυπικών προβλημάτων χρησιμοποιώντας κατ' αρχάς, ένα πρόγραμμα τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων στο οποίο η πλάκα είχε προσομοιωθεί πρωτίστως χρησιμοποιώντας θεωρία κελυφών, και δευτερευόντως, δημιουργώντας μια πλάκα πάχους 0.3m. Κατά την ανάλυση έγινε η παραδοχή ότι δεν υπάρχει ολίσθηση μεταξύ πλάκας και εδάφους ούτε μεταξύ πασσάλων και εδάφους. Διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρχε μεγάλη διαφορά στις αποκλίσεις που υπολογίστηκαν για την πλάκα, τόσο για την άκαμπτη όσο και την εύκαμπτη πλάκα.

Το συμπέρασμα ήταν ότι η χρήση λεπτών στοιχείων κελύφους για την προσομοίωση της πλάκας θα οδηγήσει σε λογικές τιμές των αποκλίσεων, και ως εκ

τούτου και ροπές, όσο η πλάκα δεν είναι υπερβολικά χοντρή. Οι τάσεις στο έδαφος θα είναι υψηλότερες για την ανάλυση λεπτού κελύφους, και η επίδραση αυτή μπορεί να γίνει σημαντική αν έχουμε σημαντική διαρροή του εδάφους λόγω συγκεντρωμένων φορτίων.

## **2.6.4 Αυστηρά υπολογιστικές μέθοδοι**

### **2.6.4.1 2-Διαστατη αριθμητική ανάλυση (FLAC)**

Οι μέθοδοι σε αυτή την κατηγορία διαφαίνονται από τις αναλύσεις του περιγράφονται από τους Desai (1974), Hewitt and Gue (1994) και από τους Pradoso and Kulhawy (2001). Σε παλαιότερες περιπτώσεις, το διαθέσιμο και ευρέως διαδεδομένο πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή FLAC είχε χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση και αριθμητική ανάλυση της πασσαλοομάδας θεωρώντας το ως ένα πρόβλημα επίπεδης έντασης σε δύο διαστάσεις, ή ως ένα αξονοσυμμετρικό πρόβλημα σε τρεις διαστάσεις. Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η ανάγκη για σημαντικές παραδοχές κατέστη αναγκαία, ειδικότερα σε ότι αφορούσε στους πασσάλους, οι οποίοι έπρεπε να δεσμευτούν κινηματικά με ένα τοίχο στον οποίο να δοθεί ισοδύναμη ακαμψία ίση με την ολική ακαμψία των πασσάλων που αντικαθιστούσε. Προβλήματα παρουσιάστηκαν επίσης και στην αναπαράσταση του συγκεντρωμένου φορτίου σε μια τέτοια ανάλυση, δεδομένου ότι και αυτό θα έπρεπε να δεσμευτεί κινηματικά με τη σειρά του με το υπόλοιπο προσομοίωμα. Στην περίπτωση που το πρόβλημα δεν περιλαμβάνει ομοιόμορφη φόρτιση σε συμμετρική πασσαλοομάδα, ίσως είναι αναγκαίο να διεξαχθούν αναλύσεις για κάθε μια από τις διευθύνσεις προκειμένου να λάβουμε εκτιμήσεις για το προφίλ των καθιζήσεων και των ροπών της πλάκας. Όπως και στην περίπτωση της μεθόδου πλάκα επί ελατηρίων έτσι και σε αυτή τη μέθοδο η ανάλυση αδυνατεί να υπολογίσει τη στρεπτική ροπή της πλάκας.

### **2.6.4.2 3-Διαστατη αριθμητική ανάλυση**

Μια ολοκληρωμένη τρισδιάστατη ανάλυση θεμελίωσης που αποτελείται από ομάδα πασσάλων μπορεί να διεξαχθεί με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Katzenbach et al 1998) ή με τη βοήθεια του διαθέσιμου και ευρέως διαδεδομένου προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή FLAC 3D. Κατ' αρχήν η χρήση ενός τέτοιου προγράμματος καταργεί την ανάγκη για προσεγγιστικές παραδοχές που είναι συνυφασμένες με όλες τις παραπάνω αναλύσεις. Κάποια προβλήματα σαφώς παραμένουν, κυρίως σε σχέση με την προσομοίωση της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους και σε σχέση με το κατά πόσον πρέπει να χρησιμοποιηθούν στοιχεία διεπιφάνειας. Αν αυτό κριθεί αναγκαίο, τότε οι προσεγγίσεις αναφέρονται συνήθως στην ανάθεση κοινών ιδιοτήτων ακαμψίας. Εκτός από αυτή τη δυσκολία, το βασικό πρόβλημα είναι ο χρόνος που απαιτείται για την εξαγωγή μιας λύσης. Αν και μια τέτοιου είδους μη γραμμική ανάλυση θεμελίωσης με πασσαλοομάδα κρίνεται χρονοβόρα, η αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας αφήνει περιθώρια για πλήρη

ανάπτυξη στο μέλλον. Τέτοιου είδους αναλύσεις είναι πιο κατάλληλες για την εξαγωγή λύσεων αναφοράς με βάση τις οποίες θα γίνεται σύγκριση με τις λύσεις απλούστερων αναλύσεων και όχι για το συνήθη σχεδιασμό.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **Αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος**

#### **3.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί ο τρόπος επιλογής και κατασκευής του προσομοιώματος το οποίο προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια στο φυσικό μας πρόβλημα, ομάδα πασσάλων με άκαμπτο κεφαλόδεσμο επί συνεκτικού εδάφους. Επίσης θα γίνει αναφορά στις παραδοχές που έγιναν κατά την παραμετρική διερεύνηση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων ώστε να καταλήξουμε στα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο.

#### **3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ**

##### **3.2.1 Επιλογή προγραμμάτων**

Η σχεδίαση και η διακριτοποίηση όλων των προσομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις αυτής της εργασίας έγιναν στο περιβάλλον του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Ansys 9.0. Επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος κώδικας γιατί είναι σχετικά απλός στη χρήση, έχει φιλικό γραφικό περιβάλλον που καθιστά τη δημιουργία του γεωμετρικού μοντέλου αρκετά γρήγορη διαδικασία.

Για τη διακριτοποίηση των προσομοιωμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα, εξαεδρικά, οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία. Η διακριτοποίηση του καννάβου είναι πολύ πυκνότερη στην περιοχή των πασσάλων σε σχέση με αυτή της πλάκας και του περιβάλλοντος εδάφους, για λόγους ακριβείας και καλύτερων αποτελεσμάτων. Ο κάνναβος των πεπερασμένων στοιχείων (κατά τους άξονες  $x$   $y$ ) γίνεται πιο αδρός καθώς απομακρυνόμαστε από την πασσαλομάδα, ενώ η διακριτοποίηση των μοντέλων σε σχέση με το βάθος (κατά  $z$ ) έχει κρατηθεί σταθερή ανά 1m.

Στην συνέχεια για την διεξαγωγή των αναλύσεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.9 και Abaqus 6.10 χρησιμοποιήθηκε ένα πρόγραμμα γραμμένο σε Fortran το οποίο μετατρέπει τα δεδομένα του Ansys σε δεδομένα Abaqus με τη μορφή ενός input file (αρχείο κειμένου). Στο αρχείο αυτό εισάγονται με τον κατάλληλο τρόπο τα δεδομένα και οι παράμετροι του προβλήματός μας. Για τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν θεωρήσαμε  $m$  ως μονάδα μήκους και  $kN$  ως μονάδα συγκεντρωμένου φορτίου, συνεπώς τα παράγωγα μεγέθη εξάγονται κατ' αντιστοιχία των δύο παραπάνω θεμελιωδών.

### 3.2.2 Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων

Τα πεπερασμένα στοιχεία από τα οποία μορφώθηκε ο κάρναβος του εδάφους του προσομοιώματος στο Abaqus όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι τρισδιάστατα, εξαεδρικά, οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου C3D8R, στα οποία έχουν δοθεί ιδιότητες εδάφους. Χαρακτηριστικό των στοιχείων αυτών είναι το ότι αδυνατούν να παραλάβουν ροπή. Για να έχουμε λοιπόν μια πιο αντιπροσωπευτική προσομοίωση των πασσάλων αλλά και για να εξασφαλίσουμε ομοιόμορφη μετακίνηση, τα κέντρα τους έχουν ενωθεί (ανά 1m) με στοιχεία δοκού B31 (beam elements). Η επιλογή αυτή βοηθάει επίσης στο να υπολογίζονται οι δυνάμεις (reaction forces) αυτόματα από το πρόγραμμα χωρίς να χρειαστεί να ολοκληρώσουμε ανηγμένες τάσεις επί επιφάνειας. Ακόμα τα σημεία εντός και επί της περιφέρειας του πασσάλου ( $D=1m$ ) έχουν συνδεθεί με το κεντρικό κόμβο με άκαμπτα στοιχεία δοκού (MPC) έτσι ώστε το φορτίο που επιβάλλεται στον πάσσαλο να παραλαμβάνεται ομοιόμορφα από όλη την επιφάνεια του και όχι μόνο από τον κεντρικό κόμβο. Στα στοιχεία δοκού καθώς και στα πεπερασμένα στοιχεία του κεφαλόδεσμου έχουν δοθεί ιδιότητες σκυροδέματος.

Με την παραπάνω διαδικασία επιτυγχάνεται η κατασκευή ενός ρεαλιστικού προσομοιώματος για την ομάδα πασσάλων με κεφαλόδεσμο η οποία μπορεί να αναλάβει ομοιόμορφο κατακόρυφο φορτίο.

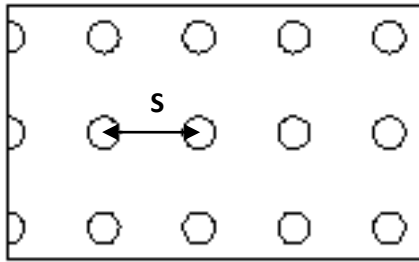
## 3.3 ΤΕΛΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

### 3.3.1 Διαστάσεις τελικών προσομοιωμάτων

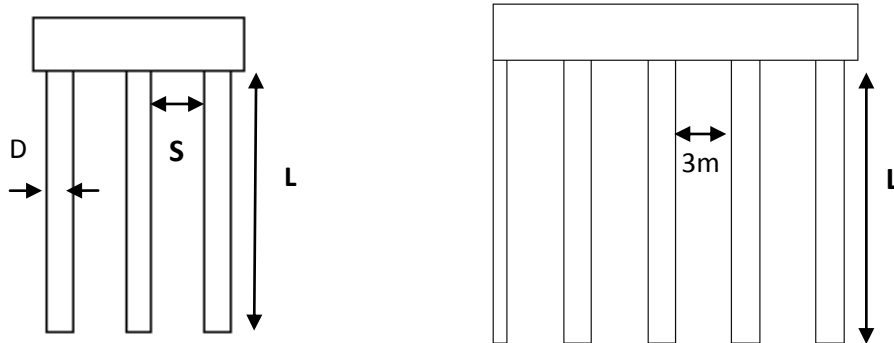
Το αρχικό μοντέλο που επιλέχθηκε να μελετηθεί ήταν μια ομάδα πασσάλων  $3 \times 9$  με πασσάλους διαμέτρου  $D=1m$ , μήκους  $L$  μεταβλητό (εξετάστηκαν οι ακόλουθες περιπτώσεις  $L=20m$ ,  $L=10m$ ,  $L=7m$ ,  $L=5m$ ) και απόσταση μεταξύ  $S_x=3D$  σταθερή και  $S_y$  μεταβλητή (εξετάστηκαν οι ακόλουθες περιπτώσεις  $S=3D$   $S=4D$   $S=5D$   $S=6D$ ).

Για λόγους συμμετρίας όμως αλλά κυρίως για μείωση του υπολογιστικού κόστους μελετήθηκε το μισό μοντέλο, όπως αυτό διαφαίνεται στα σχήματα 3.1 και 3.2.

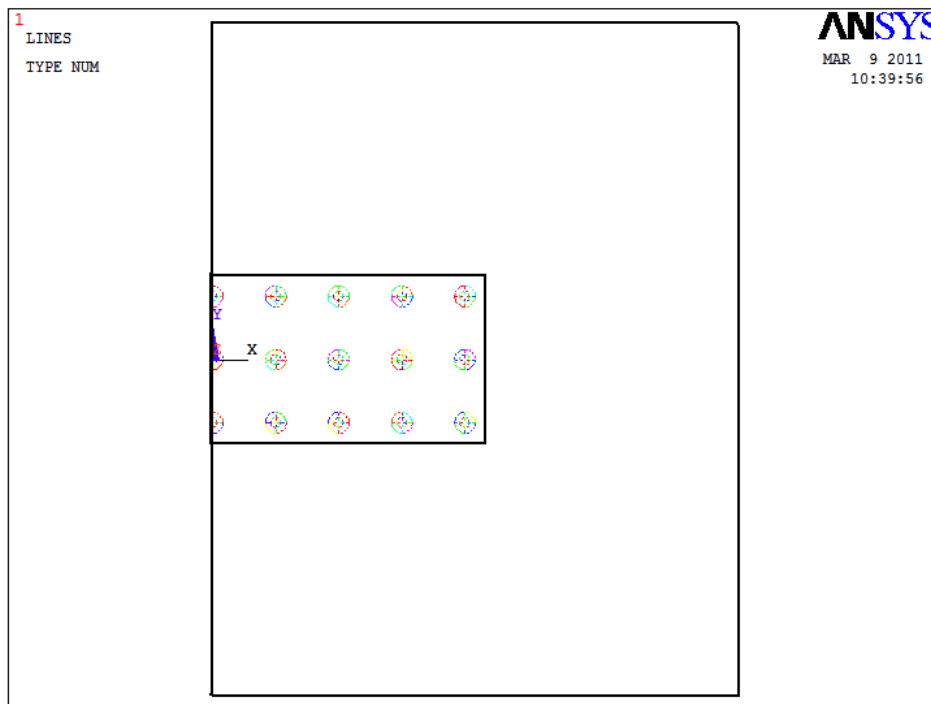
Οι διαστάσεις του περιβάλλοντος εδάφους δεν διερευνήθηκαν παραμετρικά λόγω υπερβολικά μεγάλου υπολογιστικού χρόνου αλλά επιλέχθηκαν ντετερμινιστικά στηριζόμενοι σε βιβλιογραφικές αναφορές (Bowles, 1996) ώστε να δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Έτσι προέκυψε το προσομοίωμα που φαίνεται στο σχήμα 3.3, το βάθος του οποίου έχουμε κρατήσει στα 44m (τουλάχιστον δύο φορές το μήκος των πασσάλων).



Σχήμα 3.1 Κάτοψη μοντέλου



Σχήμα 3.2 Τομή μοντέλου κατά τις δυο διευθύνσεις



Σχήμα 3.3 Κάτοψη του συστήματος πασσαλομάδας - περιβάλλοντος εδάφους

Συνεπώς λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω καταλήγουμε σε 4 προσομοιώματα από τα οποία με τις κατάλληλες τροποποιήσεις στις παραμέτρους και τις ιδιότητες μπορούν να πραγματοποιηθούν οι αντίστοιχες αναλύσεις.

- S=3D

πλάκα 13×8m, έδαφος 25×32m, βάθος 44m

συνεπώς είχαμε ένα προσομοίωμα όγκου 35408m<sup>3</sup> και 122646 στοιχείων

- S=4D

πλάκα 13×10m, έδαφος 25×32m, βάθος 44m

συνεπώς είχαμε ένα προσομοίωμα όγκου 35460m<sup>3</sup> και 138032 στοιχείων

- S=5D

πλάκα 13×12m, έδαφος 24×36m, βάθος 44m

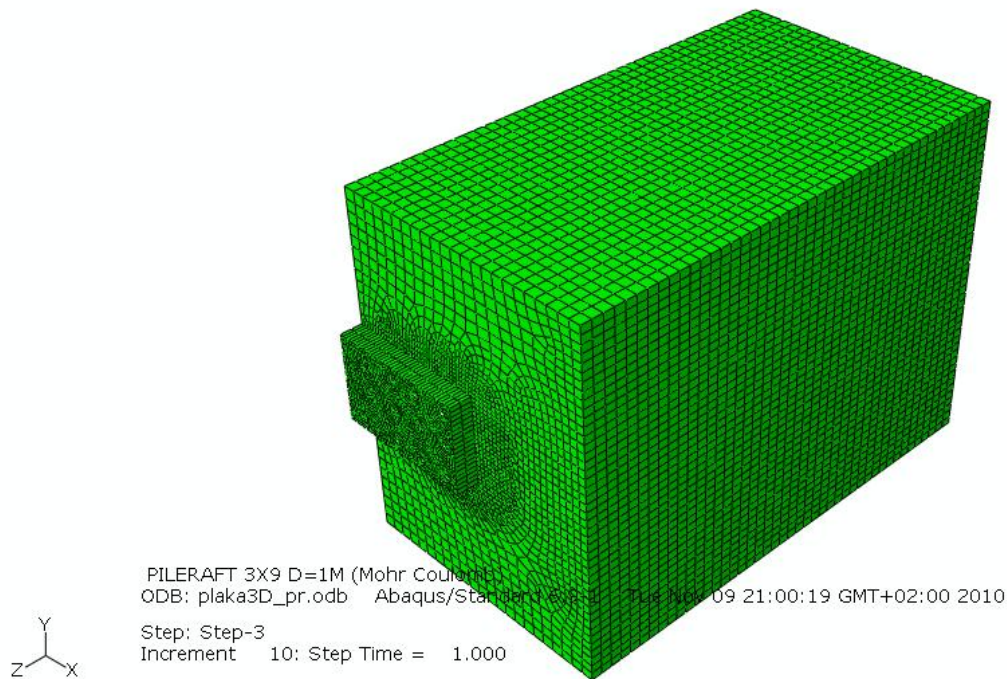
συνεπώς είχαμε ένα προσομοίωμα όγκου 38328m<sup>3</sup> και 140084 στοιχείων

- S=6D

πλάκα 13×14m, έδαφος 24×40m, βάθος 44m

συνεπώς είχαμε ένα προσομοίωμα όγκου 42604m<sup>3</sup> και 146790 στοιχείων

Η μορφή των προσομοιωμάτων αυτών φαίνεται παρακάτω:



**Εικόνα 3.4** Τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα για σύστημα θεμελίωσης στο οποίο η απόσταση μεταξύ των πασσάλων είναι S=3D

### 3.3.2 Παραδοχές

Οι παραδοχές που έγιναν στις παραμετρικές αναλύσεις αφορούν στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους και στην παραμορφωσιμότητα της διατομής των πασσάλων. Για λόγους απλοΰστευσης και ταχύτητας των αναλύσεων, θεωρήθηκε



κοινή παραμόρφωση εδάφους και πασσάλου στην διεπιφάνεια τους. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι η οποιαδήποτε παραμόρφωση (π.χ. μετατόπιση) στην παρειά ενός πασσάλου συνεπάγεται ίση παραμόρφωση για το στοιχείο εδάφους που εφάπτεται της παρειάς. Η συγκεκριμένη θεώρηση μπορεί να προσομοιώσει την περίπτωση που το έδαφος θλίβεται. Στην περίπτωση όμως που η παρειά του πασσάλου «αποκολλάται» από το περιβάλλον έδαφος, η παραπάνω παραδοχή δεν βρίσκει πρακτική εφαρμογή καθότι το έδαφος αδυνατεί να παραλάβει εφελκυσμό.

Ακόμα λόγω κατασκευής των πασσάλων από οπλισμένο σκυρόδεμα, θεωρούμε ότι οι παραμορφώσεις που παρατηρούνται στην διατομή τους (εξετάζοντας τομή ενός πασσάλου με το οριζόντιο επίπεδο) είναι ελάχιστες σε σχέση με τις αντίστοιχες παραμορφώσεις που υφίσταται το έδαφος. Συνεπώς, θεωρούμε ότι οι πάσσαλοι είναι πρακτικά απαραμόρφωτοι στη διατομή τους. Η παραδοχή σταθερής διατομής των πασσάλων γίνεται για να προσδώσουμε έμφαση στην αλληλεπίδραση εδάφους-πασσάλου και όχι την συγκέντρωση του ενδιαφέροντός μας στην εντατική κατάσταση των πασσάλου ως μεμονωμένων στοιχείων.

Επίσης για λόγους συντομικών συνθηκών αλλά και για ορθότερο υπολογισμό των καθιζήσεων οι τρεις κεντρικοί 'μισοί' πάσσαλοι (πάσσαλοι παρειάς) δεν έχουν προσομοιωθεί με στοιχεία δοκού B31 όπως οι υπόλοιποι αλλά με στοιχεία τύπου C3D8R στα οποία έχουν δοθεί ιδιότητες σκυροδέματος. Αλλά έχουμε συνδέσει στην πάνω εξωτερική επιφάνεια των πασσάλων τους περιφερειακούς κόμβους με τον κεντρικό με άκαμπτα στοιχεία επιφάνειας (MPC) έτσι ώστε το επιβαλλόμενο φορτίο να κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια τους.

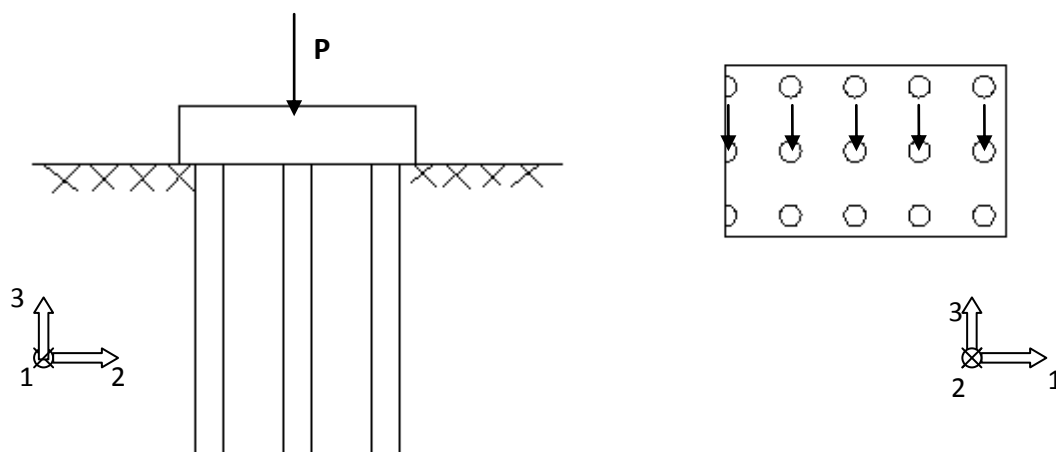
### **3.3.3 Συνοριακές συνθήκες**

Στο περιβάλλον του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS οι άξονες 1, 2, 3 αντιστοιχούν στους άξονες x, y, z του προγράμματος ANSYS. Ο πυθμένας των μοντέλων εδράζεται σε πακτώσεις που δεσμεύουν την κατακόρυφη και την πλευρική μετατόπιση, καθώς και την στροφή του. Οι πλευρικές επιφάνειες στηρίζονται σε κυλίσεις, οι οποίες δεσμεύουν την πλευρική μετατόπιση των αριθμητικών προσομοιωμάτων αλλά επιτρέπουν την ελεύθερη παραμόρφωσή τους κατά τον άξονα 3.

### **3.3.4 Συνθήκες φόρτισης της πασσαλοομάδας**

Το κάθε προσομοίωμα πασσαλοομάδας-εδάφους αναλύθηκε με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.9 και Abaqus 6.10 για κατακόρυφη φόρτιση των κεντρικών πασσάλων με συγκεντρωμένο φορτίο P κατά την αρνητική φορά του άξονα 3 (βλ. σχήμα 3.5). Σε όλα τα προσομοιώματα ισχύουν συνθήκες στατικής φόρτισης. Το επιβαλλόμενο κατακόρυφο φορτίο μπορεί να ασκείται σημειακά στον κεντρικό πάσσαλο αλλά λόγω της παρουσίας της πλάκας σκυροδέματος ύψους 2m (πολύ δύσκαμπτη πλάκα) ισοδυναμεί με ομοιόμορφα κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο  $p=P/A$  όπου A επιφάνεια επιρροής φορτίου. Για τον παραπάνω λόγο, η τελευταία σειρά πασσάλων φορτίζεται με το μισό φορτίο.

Η φόρτιση του προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε σε τρία 3 βήματα. Στο πρώτο βήμα (Step 1) έγινε εφαρμογή γεωστατικών τάσεων στο προσομοίωμα. Στο δεύτερο βήμα (Step 2) αφαιρέθηκαν τα στοιχεία εδάφους που υπήρχαν στη θέση των πασσάλων και του κεφαλόδεσμου και προστέθηκαν τα στοιχεία τύπου B31 (beam elements) των πασσάλων και της πλάκας. Στο τρίτο βήμα (Step 3) εφαρμόστηκε το συγκεντρωμένο κατακόρυφο φορτίο στους κεντρικούς κόμβους των πασσάλων στο επίπεδο της πλάκας ( $z = +2\text{m}$ ).



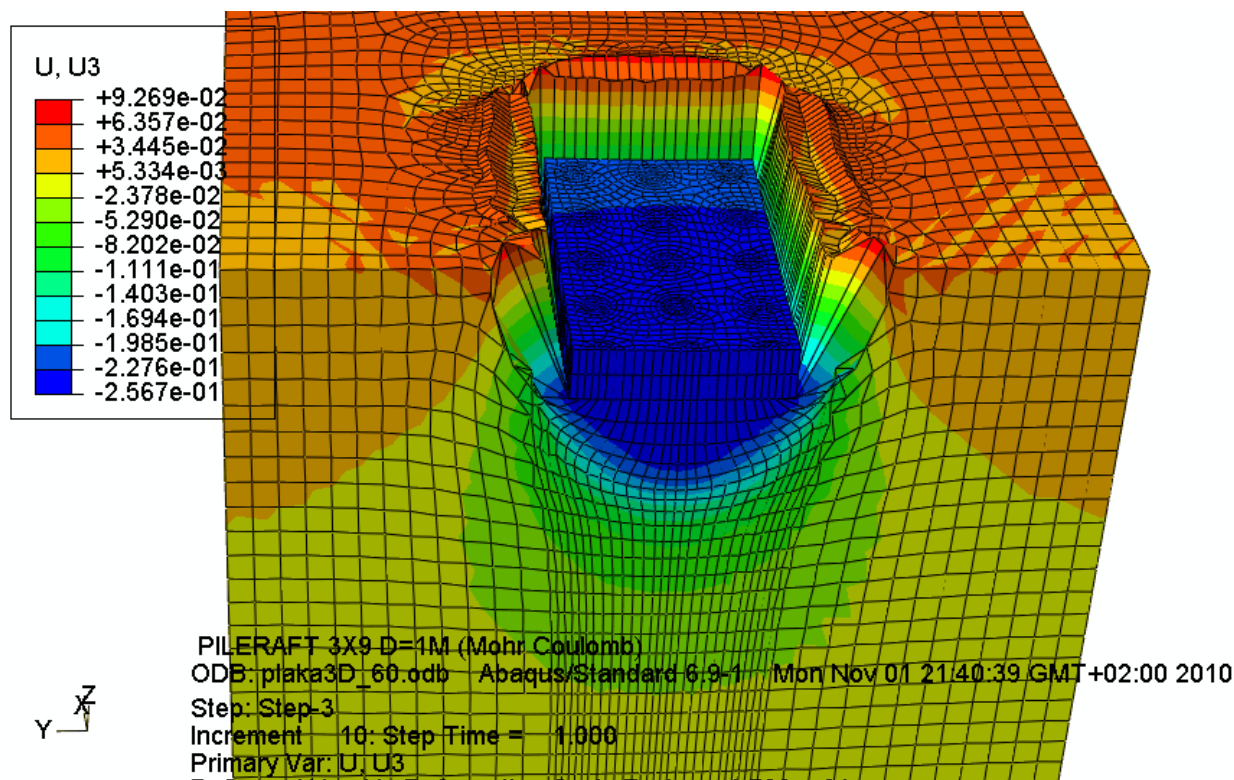
Σχήμα 15 Τρόπος επιβολής του φορτίου

Η τιμή του κατακόρυφου επιβαλλόμενου φορτίου δεν είναι σταθερή αλλά ανάλογα την παραμετρική ανάλυση αλλάζει. Για να μπορούμε να έχουμε συγκρίσιμες καθιζήσεις επιλέγουμε μια τιμή του φορτίου  $P$  που αντιστοιχεί σε καθίζηση πλάκας ( $L=0$ ) περίπου 25cm (όπως αυτό εικονίζεται στην εικόνα 3.7). Έτσι έχουν προκύψει οι ακόλουθες συνθήκες φόρτισης:

<b>S=3D</b>	
NC	P=2860kN
E=60MPa	P=28000kN
E=30MPa	P=13300kN
E=6MPa	P=1620kN
<b>S=4D</b>	
NC	P=3700kN
E=60MPa	P=35000kN
E=30MPa	P=16600kN
E=6MPa	P=2020kN
<b>S=5D</b>	
NC	P=4500kN
E=60MPa	P=41900kN
E=30MPa	P=20000kN
E=6MPa	P=2440kN

S=6D	
NC	P=5338kN
E=60MPa	P=48200kN
E=30MPa	P=23000kN
E=6MPa	P=2800kN

Πίνακας 3.6 Τιμές του φορτίου το οποίο επιβάλλουμε σε κάθε σύστημα θεμελίωσης ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και της απόστασης μεταξύ των πασσάλων.



Εικόνα 3.7 Παραμορφωμένος κάρναβος σύμφωνα με τον οποίο έγινε η επιλογή του φορτίου (scale factor 19)

### 3.3.5 Σχεδιασμός αριθμητικών αναλύσεων

Αφού οριστικοποιήθηκαν οι διαστάσεις και οι μορφή των προσομοιωμάτων όπως αυτό περιγράφηκε παραπάνω προχωρήσαμε στην διεξαγωγή των ακόλουθων αναλύσεων. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις για την περίπτωση μόνο πλάκας (γενική κοιτόστρωση πάχους 2m) από όπου και προσδιορίστηκε το κατακόρυφο επιβαλλόμενο φορτίο όπως αυτό αναλύθηκε παραπάνω. Στη φάση αυτή ενεργοποιήθηκε μόνο η πλάκα σκυροδέματος οι διαστάσεις της οποίας ανάλογα με την παραμετρική διερεύνηση παρουσιάστηκαν πρωτύτερα. Η ανάλυση αυτή καθώς και οι ακόλουθες που θα αναφέρουμε έγιναν για τις εξής περιπτώσεις:

- Απόσταση μεταξύ των πασσάλων: S=3D, S=4D, S=5D, S=6D
- Εδαφικό προφίλ: NC, E=60MPa, E=30MPa, E=6MPa

Στη συνέχεια ακολούθησαν οι αναλύσεις για σύστημα θεμελίωσης πλάκα-πασσάλων. Στην φάση αυτή ενεργοποιήθηκαν και η πλάκα και οι πάσσαλοι ταυτόχρονα. Εκτός των παραπάνω παραμέτρων, έδαφος και απόσταση μεταξύ των πασσάλων, στην περίπτωση αυτή εξετάσαμε και διαφορετικά μήκη πασσάλων. Έτσι έγιναν αναλύσεις για L=20m, L=10m, L=7m, L=5m.

Τέλος εξετάστηκε η περίπτωση κατά την οποία η πλάκα παραμένει ανενεργή και το φορτίο μεταφέρεται στο έδαφος εξ ολοκλήρου από τους πασσάλους. Για αυτή τη διερεύνηση κρατήσαμε σταθερό το μοντέλο της προηγούμενης περίπτωσης (πλάκα και πάσσαλοι) και απενεργοποιήσαμε την πλάκα δίνοντας στο έδαφος 1m κάτω από την πλάκα ένα πολύ χαμηλό μέτρο ελαστικότητας  $E_{νέο}=1/20E_{παλιό}$ . Οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν για μήκη πασσάλων L=20m και L=10m αντίστοιχα.

Συνεπώς, χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν 112 αναλύσεις για να καταλήξουμε στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

### 3.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΔΑΦΟΥΣ – ΠΑΣΣΑΛΟΜΑΔΑΣ

Για τον εδαφικό σχηματισμό εξετάστηκαν οι ακόλουθες 4 περιπτώσεις:

- Κανονικά στερεοποιημένη άργιλος NC με αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $C_u$  αυξανόμενη γραμμικά με το βάθος.  
Αναλυτικά θεωρήσαμε ότι η  $C_u$  αυξάνεται με το βάθος σύμφωνα με τη σχέση  $C_u = 0,25\sigma'_v$  όπου  $\sigma'_v$  κατακόρυφος ενεργός τάση συνεπώς  $C_u = 0,25\gamma'z = 2,5z$   
z : το βάθος της κάθε διακριτοποιημένης στρώσης  
 $\gamma'$ : 10kN/m<sup>3</sup> το ειδικό βάρος του εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες
- Ομοιογενής άργιλος με  $C_u=20$ kPa
- Ομοιογενής υπερστερεοποιημένη άργιλος OC με  $C_u=100$ kPa
- Ομοιογενής υπερστερεοποιημένη άργιλος OC με  $C_u=200$ kPa

Η ανάλυση του προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε για φόρτιση του εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες. Συνεπώς, για το έδαφος θεωρήθηκε λόγος Poisson=0,499 και ολικό ειδικό βάρος  $\gamma=20$ kN/m<sup>3</sup>, αποφεύγοντας την ακριβή τιμή του λόγου  $\nu_u=0,50$  για λόγους συμβατότητας του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση έγινε με χρήση της θεωρίας ελαστο-πλαστικότητας σύμφωνα με το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb.

Τα μήκη των πασσάλων που μελετήθηκαν είχαν τις εξής διαστάσεις:

- L=20m
- L=10m
- L=7m
- L=5m

Το υλικό από το οποίο ήταν κατασκευασμένα είναι οπλισμένο σκυρόδεμα μέτρου ελαστικότητας  $E_b=25\text{GPa}$ , ειδικού βάρους  $\gamma_b=25\text{kN/m}^3$  και δείκτη Poisson  $\nu_b=0,20$ . Το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους λήφθηκε  $E_u=300C_u$ . Η στάθμη της κεφαλής των πασσάλων συμπίπτει με την επιφάνεια της πλάκας σκυροδέματος. Η τιμή του  $K_0$  έχει πάρει τιμές από 0.75 - 1.0 ανάλογα με τις περιπτώσεις εδάφους για λόγους που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

### 3.5 ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΩΘΗΣΕΩΝ $K_0$

Για τις αναλύσεις υπό αστράγγιστες συνθήκες θα έπρεπε να λάβουμε συντελεστή οριζόντιων ωθήσεων  $K_0=0,5$ . Ειδικότερα για την περίπτωση της υποστερεοποιημένης αργίλου όπου έχει θεωρηθεί  $\Delta C_u=0,25\Delta\sigma'_0$  αν λάβουμε τιμή  $K_0=0,5$  και μόνο για αυτή τη τιμή ο κύκλος Mohr-Coulomb των γεωστατικών τάσεων ξεπερνά στην περιβάλλουσα  $C_u=0,25\sigma'_{vo}=0,25\gamma'$  (βλ. σχήμα 3.8). Ακριβώς επειδή δεν επιθυμούμε οριακό κύκλο Mohr-Coulomb με την περιβάλλουσα  $C_u$  στις γεωστατικές συνθήκες έγινε χρήση του συντελεστή ωθήσεων σε αστράγγιστες συνθήκες  $K_{0undrained}$ . Ο υπολογισμός του μεγέθους αυτού περιγράφεται παρακάτω:

Από την εδαφομηχανική είναι γνωστό ότι για τις ολικές οριζόντιες τάσεις ισχύει:

$$\sigma_{ho} = \sigma'_{ho} + u_0 = K_0 \sigma'_{vo} + u_0 = K_0 (\sigma_{vo} - u_0) + u_0$$

$$K_{0undrained} = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad \text{οπότε θα έχουμε}$$

$$K_{0undrained} = \frac{\sigma_{ho}}{\sigma_{vo}} = K_0 - K_0 \frac{u_0}{\sigma_{vo}} + \frac{u_0}{\sigma_{vo}}$$

επειδή όμως για στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στην επιφάνεια του εδάφους θα ισχύει ότι:

$$\frac{u_0}{\sigma_{vo}} = \frac{\gamma_w \cancel{z}}{\gamma_s \cancel{z}} = \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$$

όπου  $z$ : το βάθος σε m

$\gamma_w$ :  $10\text{kN/m}^3$  το ειδικό βάρος του νερού

$\gamma_s$ :  $20\text{kN/m}^3$  το ειδικό βάρος του νερού

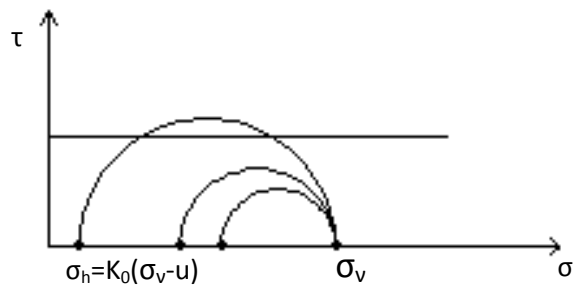
και συνεπώς προκύπτει ότι:

$$K_{0undrained} = K_0 + (1 - K_0) \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$$

άρα το  $K_{0\text{undrained}}$  είναι ο ισοδύναμος συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων  $K_0$  που χρησιμοποιήσαμε για τις αστράγγιστες συνθήκες του γεωστατικού βήματος των αναλύσεων. Το  $K_{0\text{undrained}}$  δεν είναι ιδιότητα του εδάφους. Ανάλογα λοιπόν με το έδαφος που εξετάζουμε επιλέγουμε ένα  $K_{0\text{undrained}}$  κατάλληλο ώστε να μην έχουμε αστοχία στις γεωστατικές συνθήκες. Έτσι προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές:

- 0.750 για κανονικά στερεοποιημένα άργιλο NC και υπερστερεοποιημένα με  $C_u=200\text{kPa}$
- 0.875 για ομοιογενή άργιλο με αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $C_u=100\text{kPa}$
- 1.00 για ομοιογενή άργιλο με αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $C_u=20\text{kPa}$

Γενικότερα υιοθετήσαμε για μικρές τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $C_u$  μεγάλο  $K_{0\text{undrained}}$  για να αποφύγουμε την αστοχία στο γεωστατικό βήμα και για να μην συσσωρευτούν πλαστικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 3.8 Κύκλος Mohr σε όρους ολικών τάσεων

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **Αποτελέσματα αναλύσεων - Διαγράμματα**

#### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Για τις παραμετρικές αναλύσεις του παρόντος κεφαλαίου χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.9 και Abaqus 6.10. Κατόπιν αριθμητικής ολοκλήρωσης που πραγματοποιήθηκε με χρήση των άνωθεν προγραμμάτων προέκυψαν τα διαγράμματα, τα οποία παρατίθενται εντός του κεφαλαίου, στα οποία είναι εμφανής η επιρροή του μήκους των πασσάλων καθώς και η όποια επίδραση-αλληλεπίδραση με το περιβάλλον έδαφος στις καθιζήσεις της πασσαλοομάδας.

#### **4.2 ΓΕΝΙΚΑ**

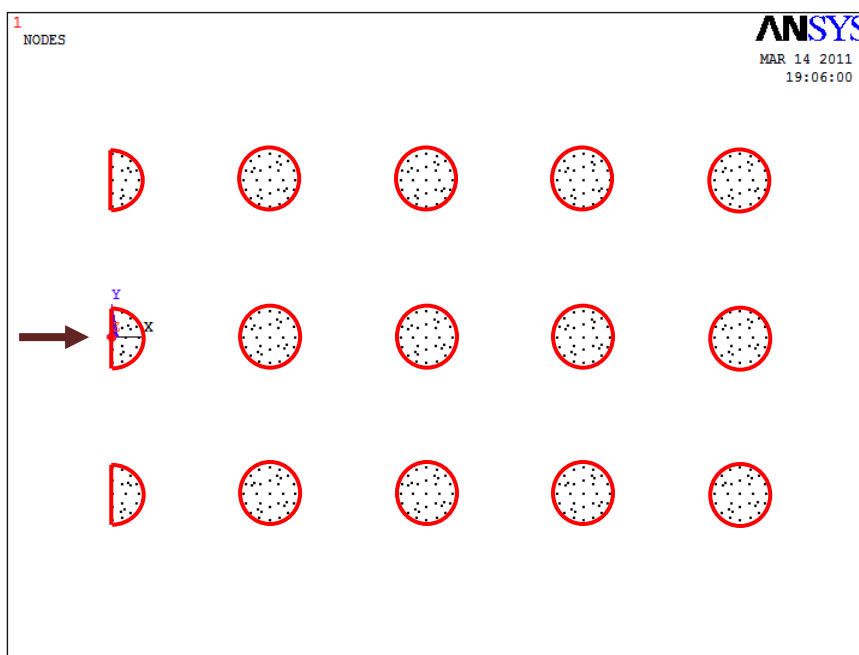
Το τελευταίο βήμα (Step 3) της ανάλυσης, στο οποίο πραγματοποιείται και η κατακόρυφη φόρτιση της πασσαλοομάδας με συγκεντρωμένη δύναμη  $P$  εκτελέστηκε ακολούθως σε 10 μικρότερα βήματα (increments). Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, έδωσαν αποτελέσματα για καθένα από τα 10 αυτά βήματα φόρτισης. Για την διεξαγωγή όμως των ακόλουθων διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του τελευταίου βήματος (increment 10), κατά το οποίο το έκαστον σύστημα θεμελίωσης έχει παραλάβει ασφαλώς όλο το φορτίο και έχει επέλθει το τελικό στάδιο ισορροπίας με ταυτόχρονη ολοκλήρωση όλων των εντατικών μεγεθών του εξεταζόμενου συστήματος (καθίζηση, δύναμη, τάση). Τα αποτελέσματα αυτά μεταφέρθηκαν σε λογιστικά φύλλα του Microsoft Excel όπου και μορφώθηκαν τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στην συνέχεια.

#### **4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ**

Στα αρχικά διαγράμματα εμφανίζεται η καθίζηση  $u_3$  του κεντρικού κόμβου του κεντρικού πασσάλου όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.1 ακριβώς κάτω από την πλάκα θεμελιώσεως (στάθμη 0) ανηγμένη ως προς τη διάμετρο  $D$  του πασσάλου, συναρτήσει του μεταβαλλόμενου μήκους των πασσάλων  $L$  ανηγμένο επίσης ως προς τη διάμετρο  $D$ . Στα πρώτα 4 διαγράμματα (4.1.α), 4.1.β), 4.2.α), 4.2.β)) έχει εξεταστεί η περίπτωση συστήματος θεμελίωσης όπου λειτουργούν και η πλάκα και οι πάσσαλοι. Οι τιμές του λόγου  $L/D$  που έχουν εξεταστεί για τη συγκεκριμένη περίπτωση είναι αντίστοιχα 0, 5, 7, 10, 20 ενώ, έχει γίνει παραμετρική διερεύνηση τόσο όσο αφορά στην απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S$ , όσο και για τις ιδιότητες

του περιβάλλοντος εδάφους. Έτσι το διάγραμμα 4.1.α) αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο NC, το διάγραμμα 4.1.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=60\text{MPa}$  και  $C_u=200\text{MPa}$ , το διάγραμμα 4.2.α) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=30\text{MPa}$  και  $C_u=100\text{MPa}$  και το διάγραμμα 4.2.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=6\text{MPa}$  και  $C_u=20\text{MPa}$ .

Τα επόμενα 4 διαγράμματα (4.3.α), 4.3.β), 4.4.α), 4.4.β)) αναφέρονται στην περίπτωση όπου η πλάκα είναι απενεργοποιημένη και λειτουργούν μόνο οι πάσσαλοι μήκους 10m και 20m αντίστοιχα. Ομοίως και εδώ έχει γίνει παραμετρική διερεύνηση τόσο για την απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S$ , όσο και για τις ιδιότητες του περιβάλλοντος εδάφους. Έτσι το διάγραμμα 4.3.α) αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο NC, το διάγραμμα 4.3.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=60\text{MPa}$  και  $C_u=200\text{MPa}$ , το διάγραμμα 4.4.α) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=30\text{MPa}$  και  $C_u=100\text{MPa}$  και το διάγραμμα 4.4.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=6\text{MPa}$  και  $C_u=20\text{MPa}$ . Το κατακόρυφο επιβαλλόμενο φορτίο δεν παραμένει σταθερό αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με το περιβάλλον έδαφος και την απόσταση μεταξύ των πασσάλων με απώτερο σκοπό την αδιαστικοποίηση ως προς την τελική καθίζηση, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 4.3.16 Κεντρικός κόμβος κεντρικού πασσάλου στον οποίο αναφέρεται η καθίζηση των διαγραμμάτων 4.1-4.4

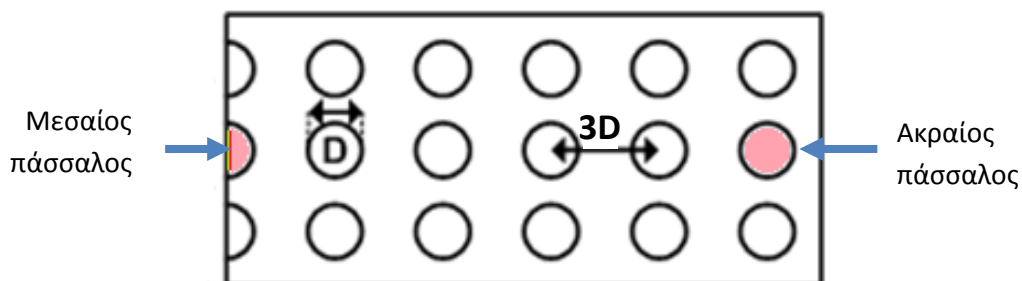
#### 4.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται η αξονική δύναμη  $F$  που αναλαμβάνουν οι πάσσαλοι μέσα στην πασσαλοομάδα, ανηγμένη ως προς το φορτίο  $P$  που θα αναλάμβανε θεωρητικά ένας μεμονωμένος πάσσαλος, συναρτήσει του βάθους  $z$  ανηγμένο ως προς τη διάμετρο τους  $D$ . Στο φορτίο  $P$  εκτός του επιβαλλόμενου φορτίου συμπεριλαμβάνεται και το ίδιο βάρος της πλάκας θεμελίωσης το οποίο υπολογίζεται σύμφωνα τον τύπο  $B=\gamma \times V$  όπου  $\gamma=25\text{kN/m}^3$



ειδικό βάρος σκυροδέματος και  $V$  ο όγκος της πλάκας σε  $m^3$ . Στα διαγράμματα παρατίθεται συγκριτικά ο λόγος της δύναμης  $F/P$  που αναλαμβάνει ένας ακραίος και ένας μεσαίος πάσσαλος όπως αυτοί φαίνονται στο σχήμα 4.4.2. Τα πρώτα 4 διαγράμματα (4.5.α, 4.5.β, 4.6.α και 4.6.β) αναφέρονται στην περίπτωση πλάκας θεμελίωσης με πασσάλους 20m. Για αυτή την περίπτωση έχει εξεταστεί παραμετρικά τόσο για η απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S$ , όσο και οι ιδιότητες του περιβάλλοντος εδάφους. Έτσι το διάγραμμα 4.5.α) αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο NC, το διάγραμμα 4.5.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=60\text{MPa}$  και  $C_u=200\text{MPa}$ , το διάγραμμα 4.6.α) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=30\text{MPa}$  και  $C_u=100\text{MPa}$  και το διάγραμμα 4.6.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=6\text{MPa}$  και  $C_u=20\text{MPa}$ .

Τα επόμενα διαγράμματα (4.7.α, 4.7.β, 4.8.α, 4.8.β) αναφέρονται στην περίπτωση πλάκας θεμελίωσης με πασσάλους μήκους 10m για ακραίους και μεσαίους αντίστοιχα. Ομοίως και εδώ έχουμε προβεί σε παραμετρική διερεύνηση τόσο για την απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S$ , όσο και για τις ιδιότητες του περιβάλλοντος εδάφους. Έτσι το διάγραμμα 4.7.α) αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο NC, το διάγραμμα 4.7.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=60\text{MPa}$  και  $C_u=200\text{MPa}$ , το διάγραμμα 4.8.α) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=30\text{MPa}$  και  $C_u=100\text{MPa}$  και το διάγραμμα 4.8.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=6\text{MPa}$  και  $C_u=20\text{MPa}$ . Το κατακόρυφο επιβαλλόμενο φορτίο, όπως έχει είδη αναφερθεί, δίνεται συναρτήσει των ιδιοτήτων του εδάφους θεμελίωσης και της αποστάσεως μεταξύ των πασσάλων ώστε η μέγιστη τελική καθίζηση της πλάκας εδράσεως της κοιτόστρωσης να είναι σταθερή και περίπου ίση με 25cm.



**Σχήμα 4.4.17** Οι πάσσαλοι στους οποίους αναφέρεται η κατανομή των δυνάμεων για τα διαγράμματα 4.5 - 4.8

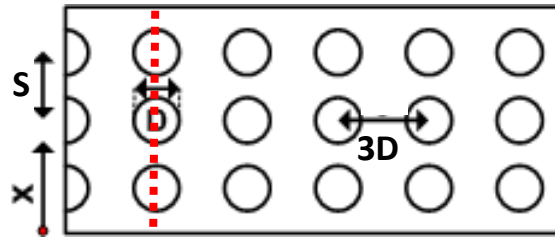
Στη συνέχεια παραθέτονται 4 διαγράμματα (4.9.α, 4.9.β, 4.10.α και 4.10.β) στα οποία διαφαίνεται το ποσοστό του συνολικού φορτίου που αναλαμβάνει η πλάκα θεμελίωσης. Πρόκειται για διαγράμματα στα οποία διαφαίνεται ο λόγος του φορτίου που αναλαμβάνει η πλάκα  $P_{\text{πλάκας}}$  προς το συνολικό φορτίο  $P_{\text{ολικό}}$ , συναρτήσει του λόγου μήκος πασσάλων  $L$  αδιαστατοποιημένος ως προς τη διάμετρο  $D$ . Στο συνολικό φορτίο  $P_{\text{ολικό}}$  περιλαμβάνεται το κατακόρυφο επιβαλλόμενο φορτίο καθώς και το ίδιο βάρος της πλάκας όπως αυτό υπολογίστηκε νωρίτερα. Αντίστοιχα το φορτίο της πλάκας  $P_{\text{πλάκας}}$  προέκυψε αφαιρώντας από το κατακόρυφο επιβαλλόμενο φορτίο το φορτίο του αναλαμβάνουν οι πάσσαλοι. Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται σύστημα θεμελίωσης το οποίο περιλαμβάνει πλάκα με

πασσάλους μεταβαλλόμενου μήκους  $L/D = 0, 5, 7, 10, 20$ . Ομοίως και εδώ πραγματοποιήθηκε παραμετρική διερεύνηση τόσο για την απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S$ , όσο και για τις ιδιότητες του περιβάλλοντος εδάφους. Έτσι το διάγραμμα 4.9.α) αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο NC, το διάγραμμα 4.9.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=60\text{MPa}$  και  $C_u=200\text{MPa}$ , το διάγραμμα 4.10.α) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=30\text{MPa}$  και  $C_u=100\text{MPa}$  και το διάγραμμα 4.10.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=6\text{MPa}$  και  $C_u=20\text{MPa}$ .

#### **4.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΑΣΕΩΝ**

Στα διαγράμματα που επισυνάπτονται παρακάτω εμφανίζεται η κατανομή των τάσεων δύο μέτρα κάτω από τη στάθμη των πασσάλων. Πρόκειται για την πρόσθετη κατακόρυφη τάση  $\Delta\sigma_z$  (έχει αφαιρεθεί η γεωστατική τάση σε εκείνη τη στάθμη) κανονικοποιημένη ως προς την επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση σχεδιασμού  $\sigma_d$  που αντιστοιχεί στο επιβαλλόμενο φορτίο  $P$ , συναρτήσει της θέσης  $x$  αδιαστατικοποιημένης ως προς την εγκάρσια διάσταση της πασσαλοστοιχίας  $S$  (βλ. σχήμα 4.5.3). Έτσι, σύμφωνα με την παραπάνω παραδοχή οι πάσσαλοι βρίσκονται στις θέσεις  $-1, 0, +1$  αντίστοιχα. Τα διαγράμματα 4.11.α, 4.11.β, 4.12.α και 4.12.β αναφέρονται στην περίπτωση πλάκας θεμελίωσης με πασσάλους  $20\text{m}$ , συνεπώς η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων ( $S33$  όπως αυτές προκύπτουν από την αριθμητική επίλυση που διερευνήθηκε με τον επιλύτη (solver) του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Abaqus) αναφέρεται στη στάθμη  $-22$ . Επιπλέον, για την συγκεκριμένη περίπτωση έχει πραγματοποιηθεί παραμετρική διερεύνηση τόσο για την απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S$ , όσο και για τις ιδιότητες του περιβάλλοντος εδάφους. Έτσι το διάγραμμα 4.11.α) αναφέρεται σε πασσαλοομάδα με απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=3D$ , το διάγραμμα 4.11.β) σε πασσαλοομάδα με απόσταση  $S=4D$ , το διάγραμμα 4.12.α) σε πασσαλοομάδα με απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=5D$  και το διάγραμμα 4.12.β) σε πασσαλοομάδα με απόσταση  $S=6D$ .

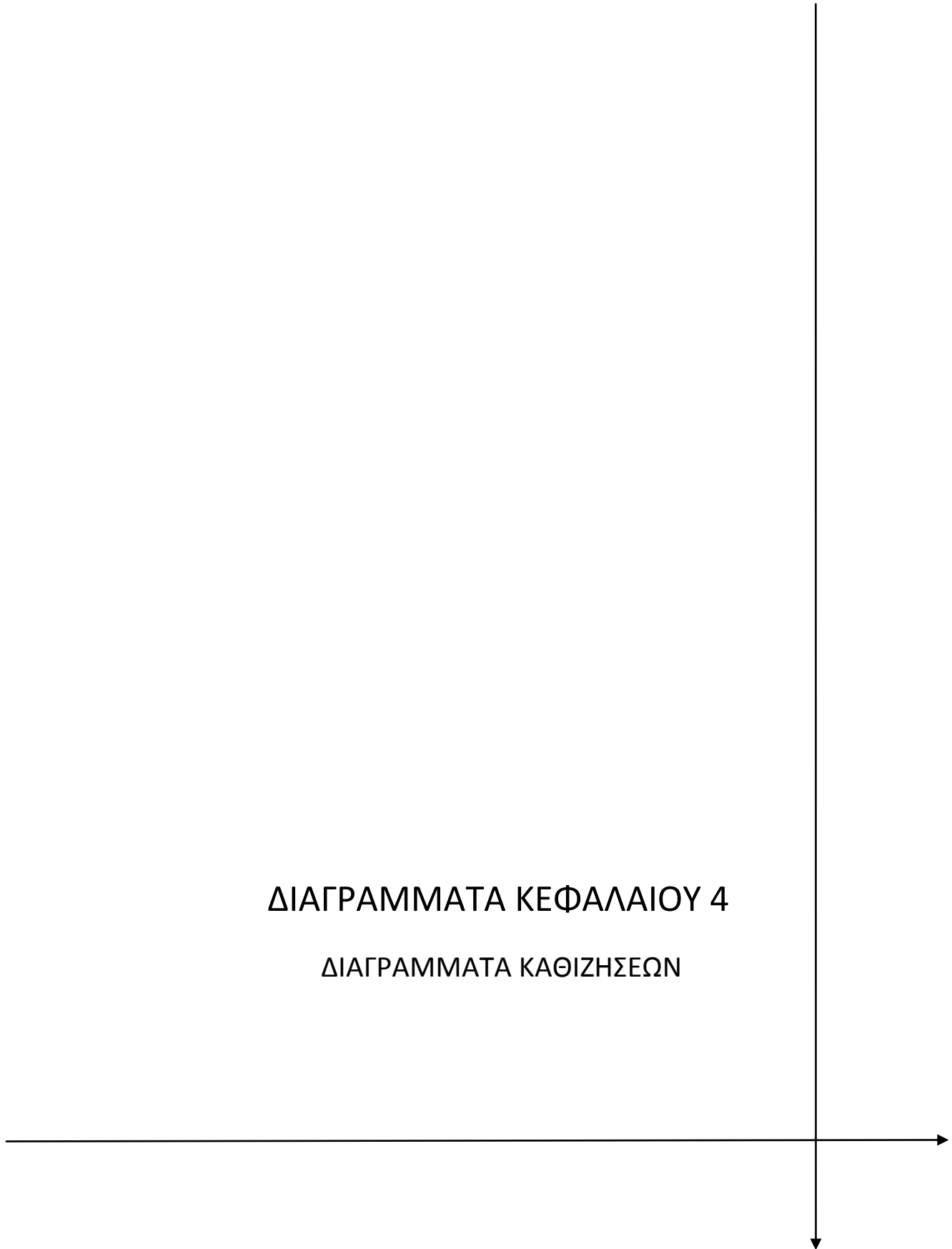
Τέλος, τα διαγράμματα 4.13.α, 4.13.β, 4.14.α και 4.14.β αναφέρονται στην περίπτωση πλάκας θεμελίωσης με πασσάλους μήκους  $10\text{m}$ , συνεπώς η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων αναφέρεται στη στάθμη  $-12$ . Ομοίως και εδώ έχει γίνει παραμετρική ανάλυση τόσο για την απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S$ , όσο και για τις ιδιότητες του περιβάλλοντος εδάφους. Έτσι το διάγραμμα 4.13.α) αναφέρεται σε πασσαλοομάδα με απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=3D$ , το διάγραμμα 4.13.β) σε πασσαλοομάδα με απόσταση  $S=4D$ , το διάγραμμα 4.14.α) σε πασσαλοομάδα με απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=5D$  και το διάγραμμα 4.14.β) σε πασσαλοομάδα με απόσταση  $S=6D$ . Το κατακόρυφο επιβαλλόμενο φορτίο και σε αυτή την περίπτωση διαφέρει ανάλογα με το περιβάλλον έδαφος και την απόσταση μεταξύ των πασσάλων.

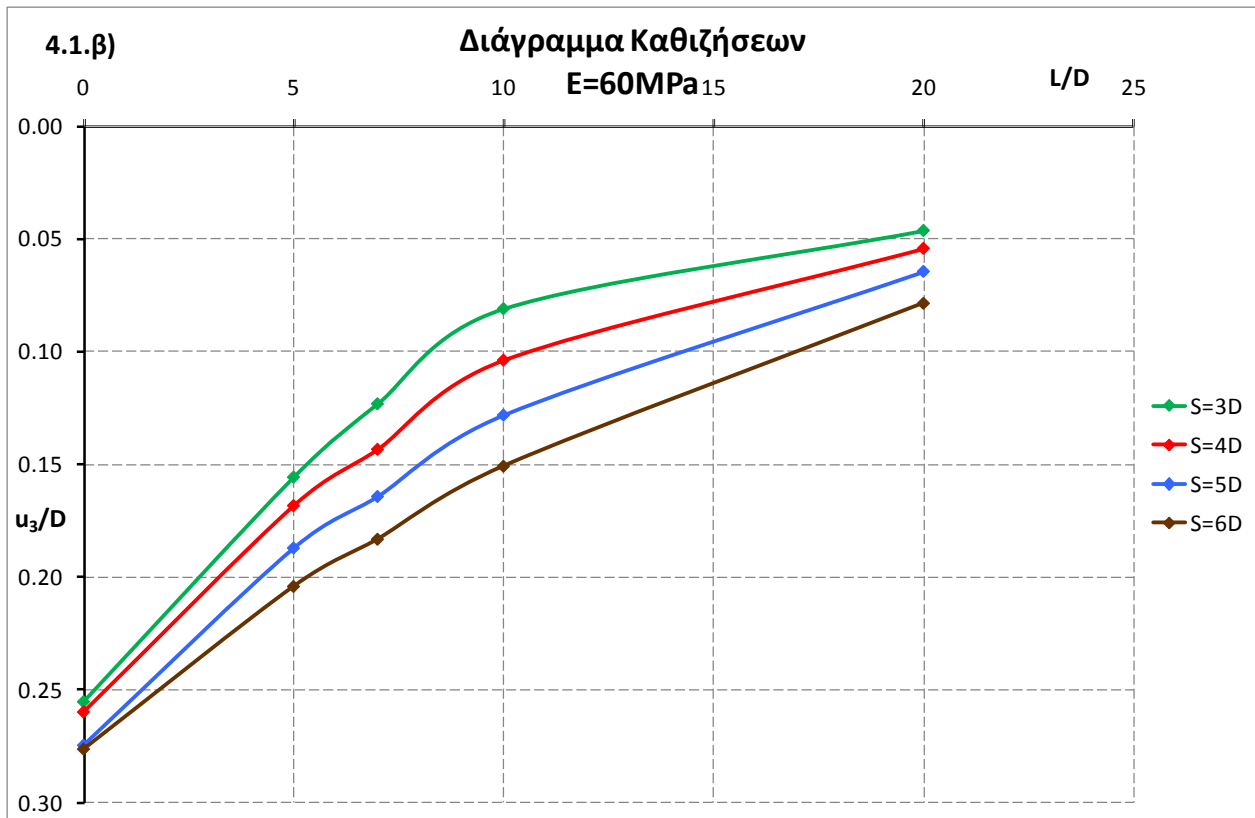
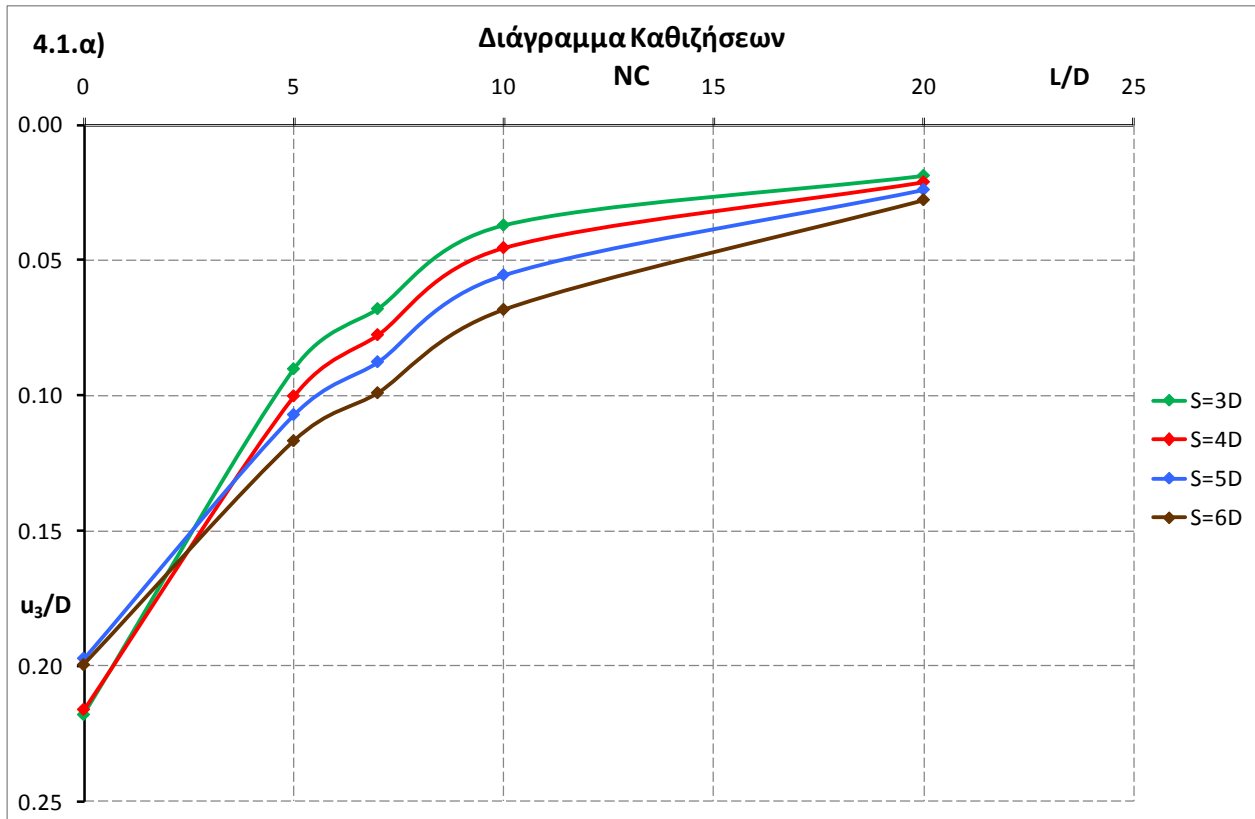


Σχήμα 4.5.18 Απεικόνιση των μεγεθών βάση των οποίων κανονικοποιούνται τα διαγράμματα τάσεων καθώς και της θέσης στην οποία έγινε και ο υπολογισμός των τάσεων

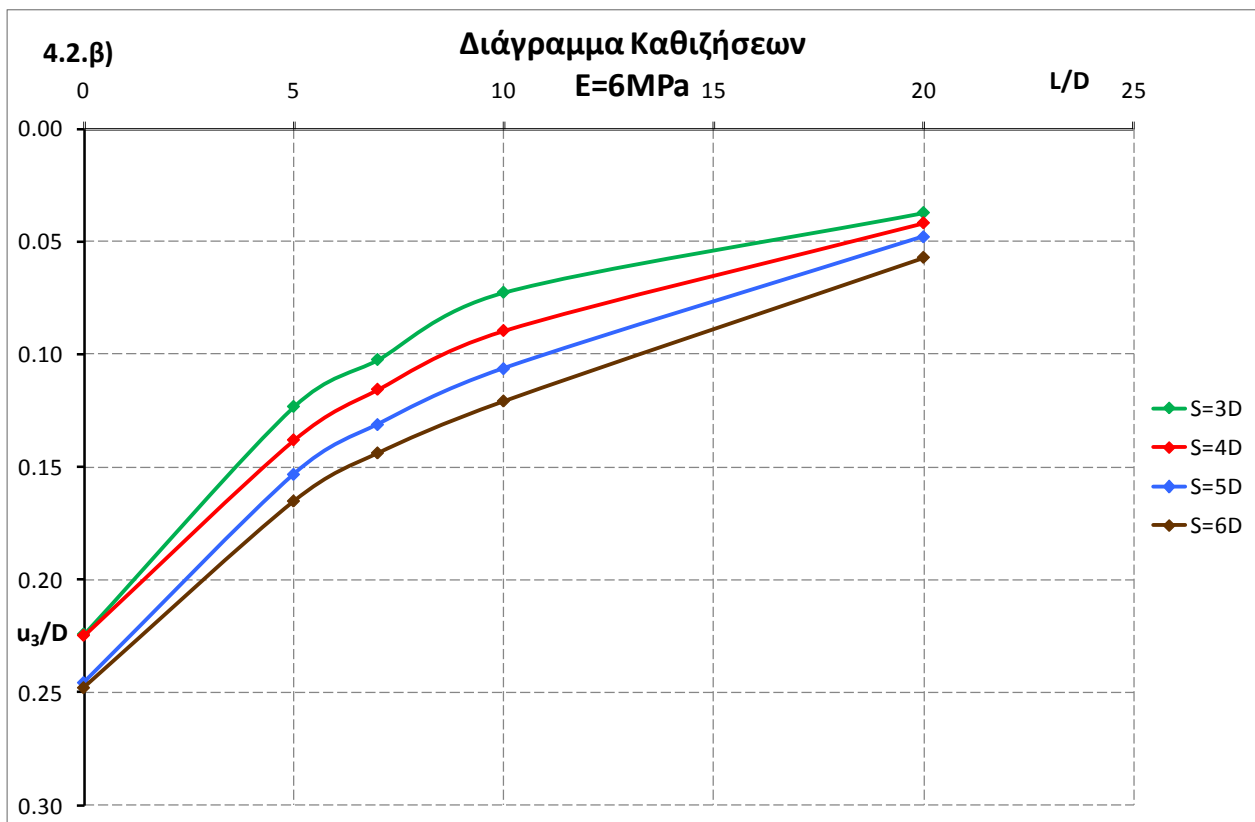
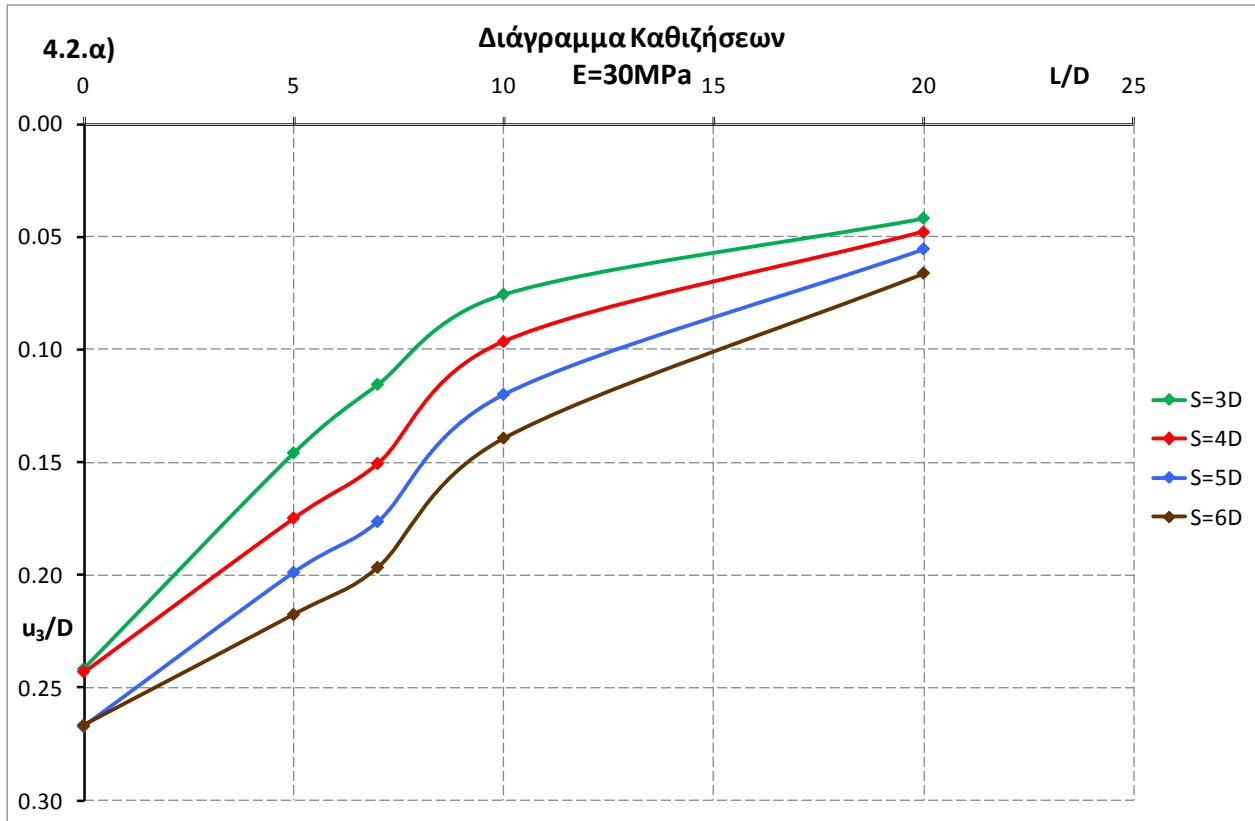
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ

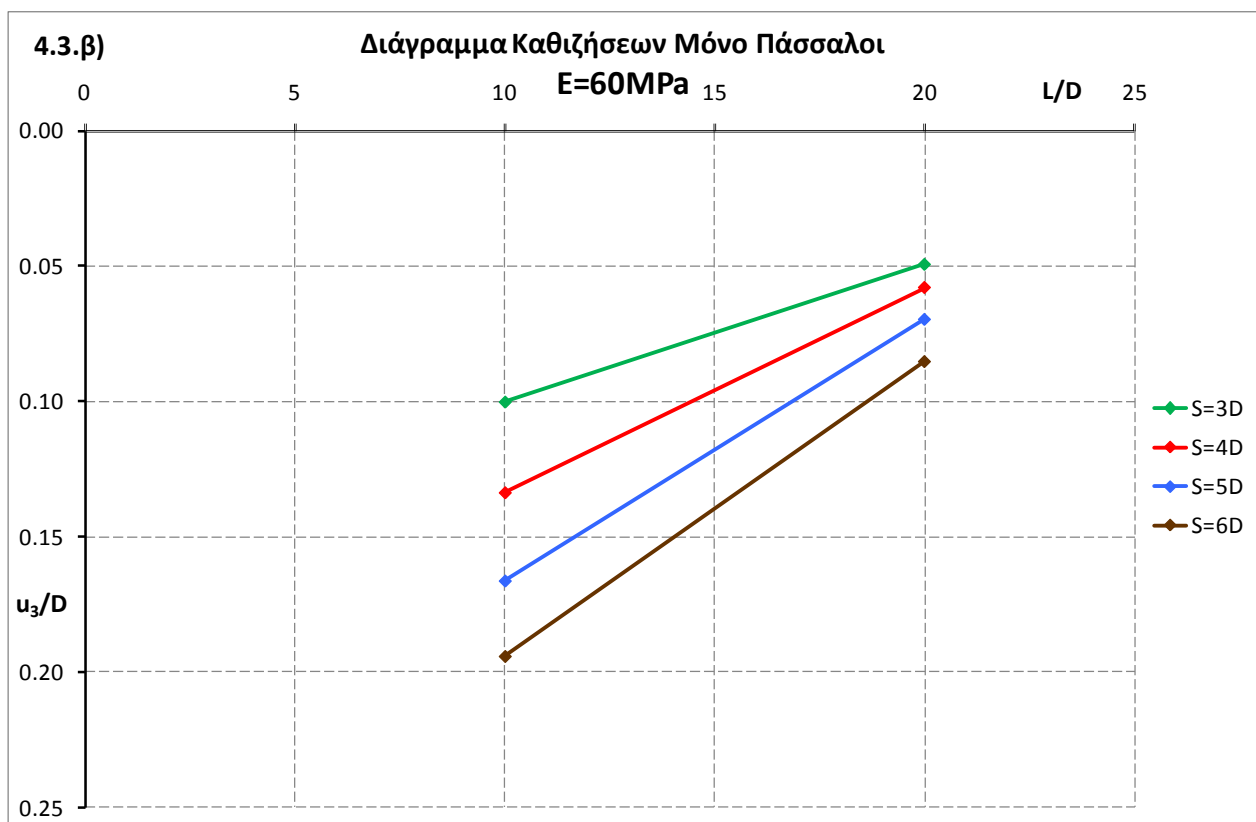
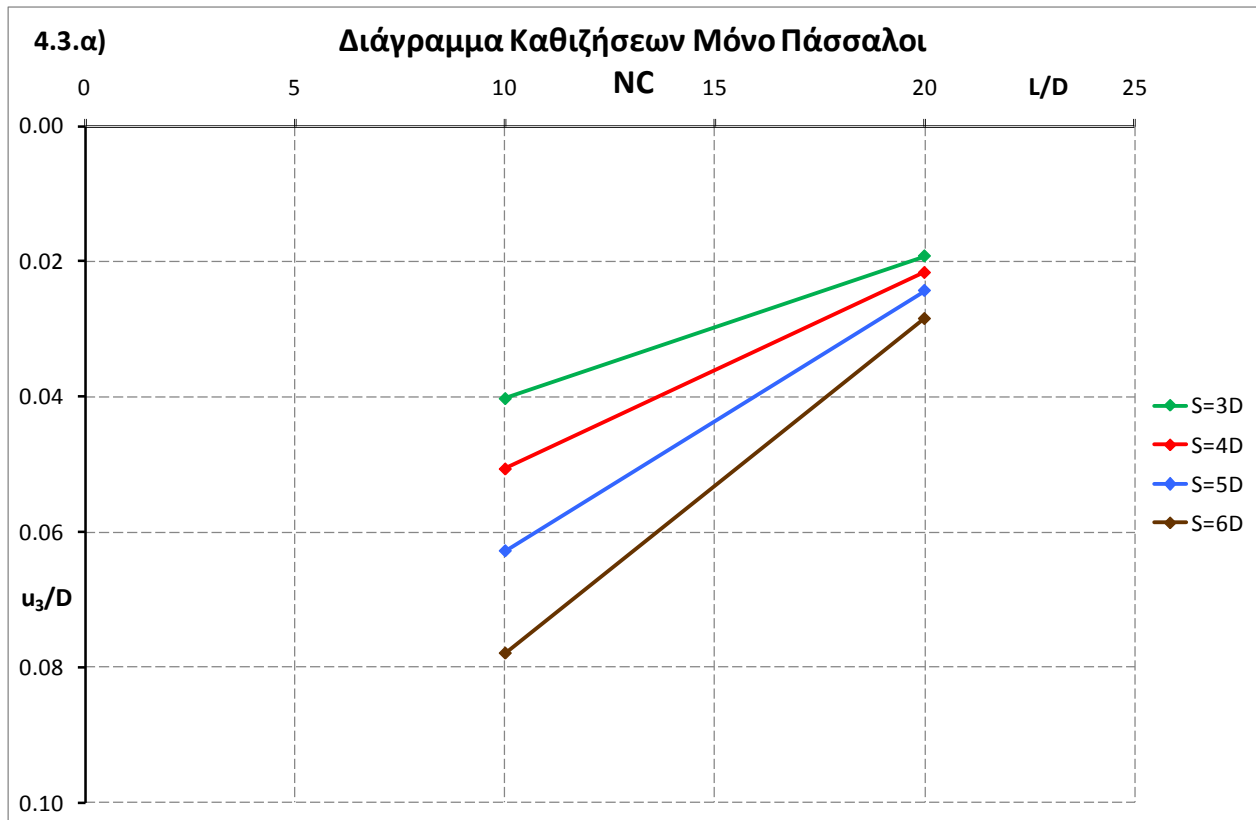




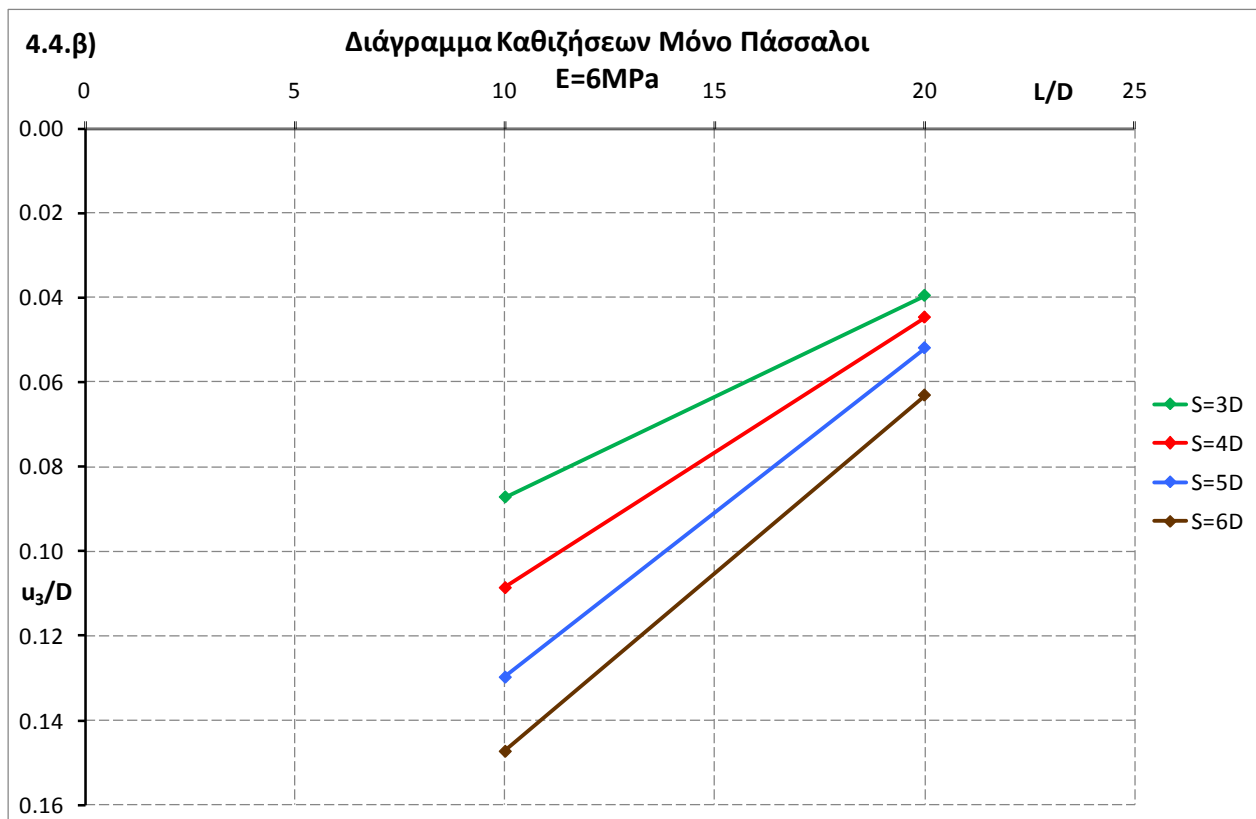
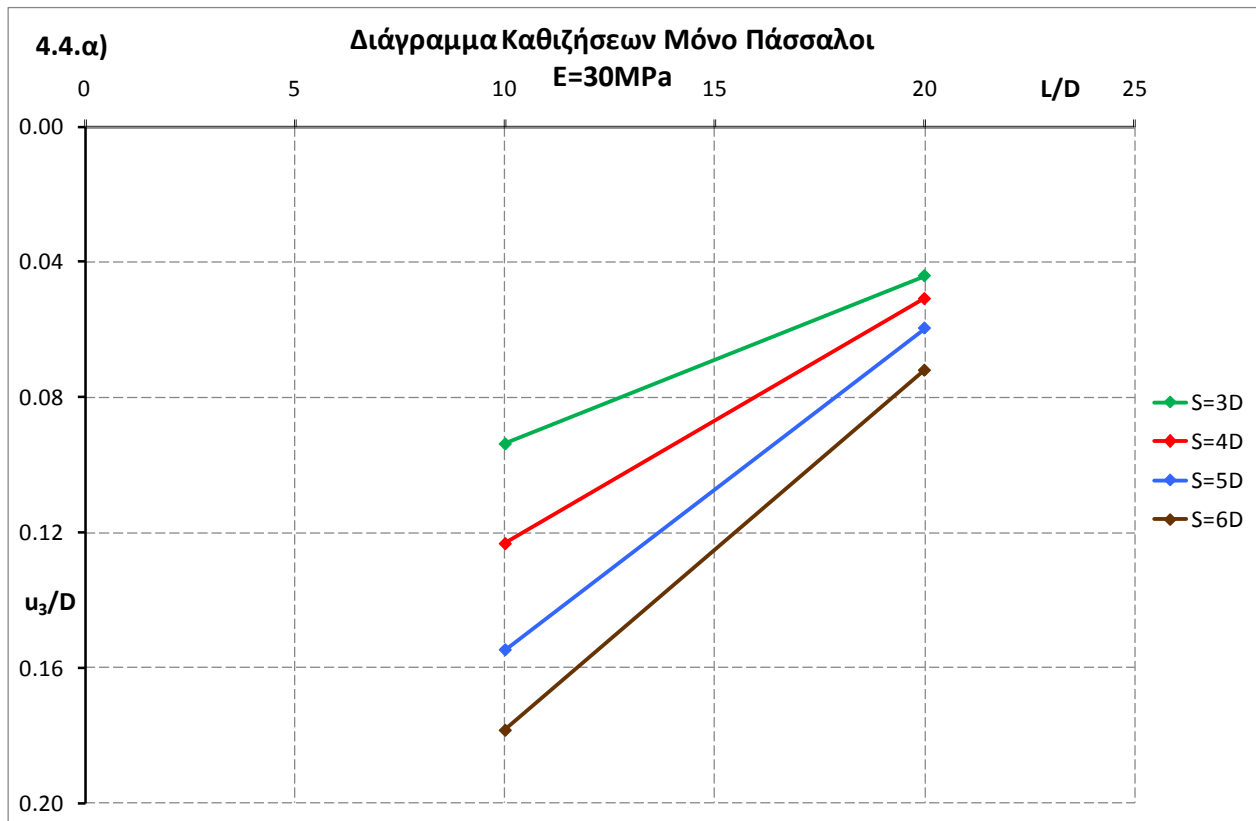
Διάγραμμα 4.1 Συγκεντρωτικά διαγράμματα καθιζήσεων στην στάθμη κάτω από την πλάκα (στάθμη 0) για τον κεντρικό κόμβο του κεντρικού πασσάλου για διαφορετικά μήκη πασσάλων,  $L=0,5,7,10,20$  m και απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=3,4,5,6$  D. Το διάγραμμα 4.1.α) αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο NC και το 4.1.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=60\text{MPa}$ .



Διάγραμμα 4.2 Συγκεντρωτικά διαγράμματα καθιζήσεων στην στάθμη κάτω από την πλάκα (στάθμη 0) για τον κεντρικό κόμβο του κεντρικού πασσάλου για διαφορετικά μήκη πασσάλων, L=0,5,7,10,20 m και απόσταση μεταξύ των πασσάλων S=3,4,5,6 D. Το διάγραμμα 4.2.α) αναφέρεται σε ομοιογενή άργιλο με E=30MPa και το 4.2.β) σε ομοιογενή άργιλο με E=6MPa.



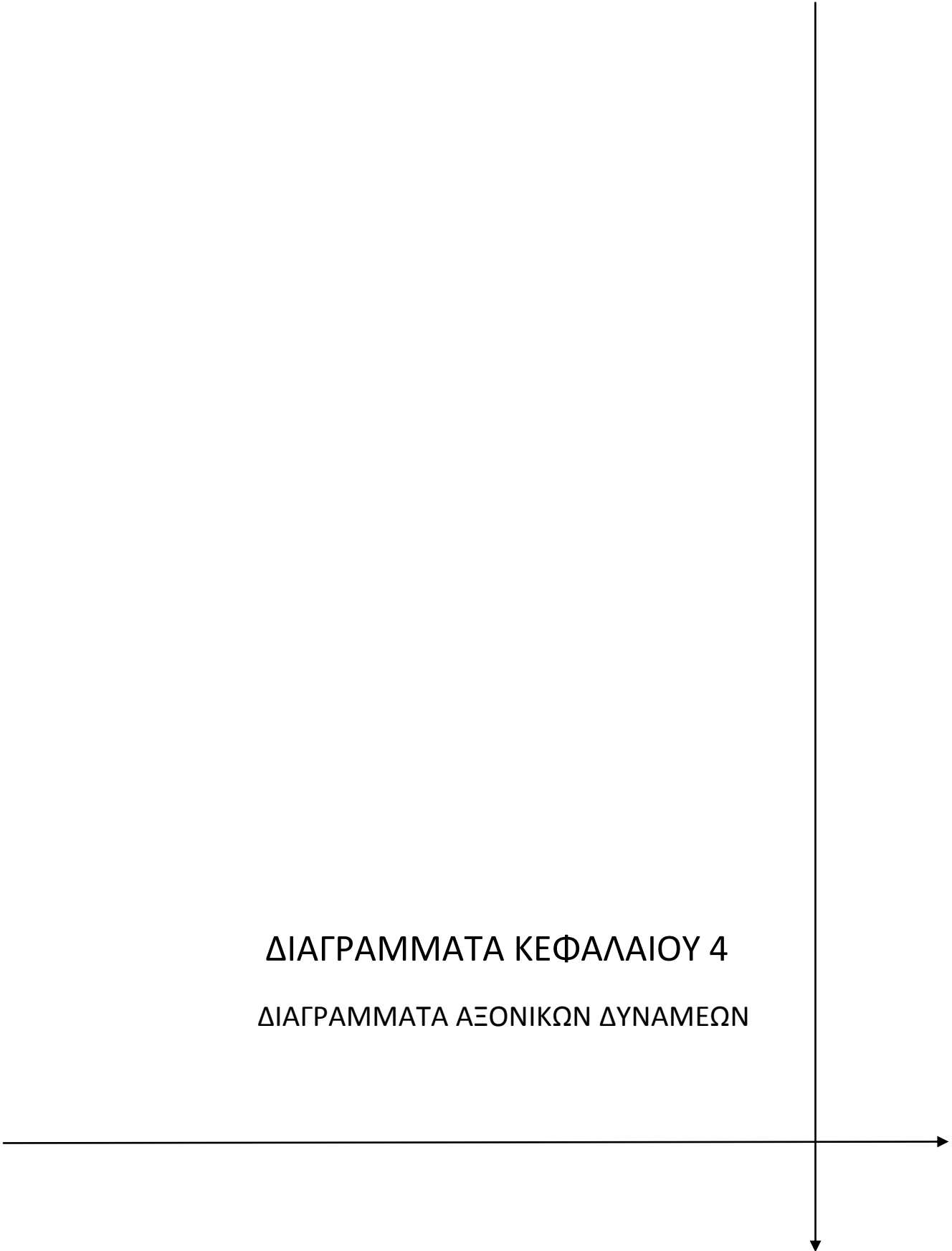
Διάγραμμα 4.3 Συγκεντρωτικά διαγράμματα καθιζήσεων στη στάθμη 0 για την περίπτωση όπου λειτουργούν μόνο οι πάσσαλοι. Το διάγραμμα 4.3.α) αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο NC και το 4.3.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=60\text{MPa}$ .

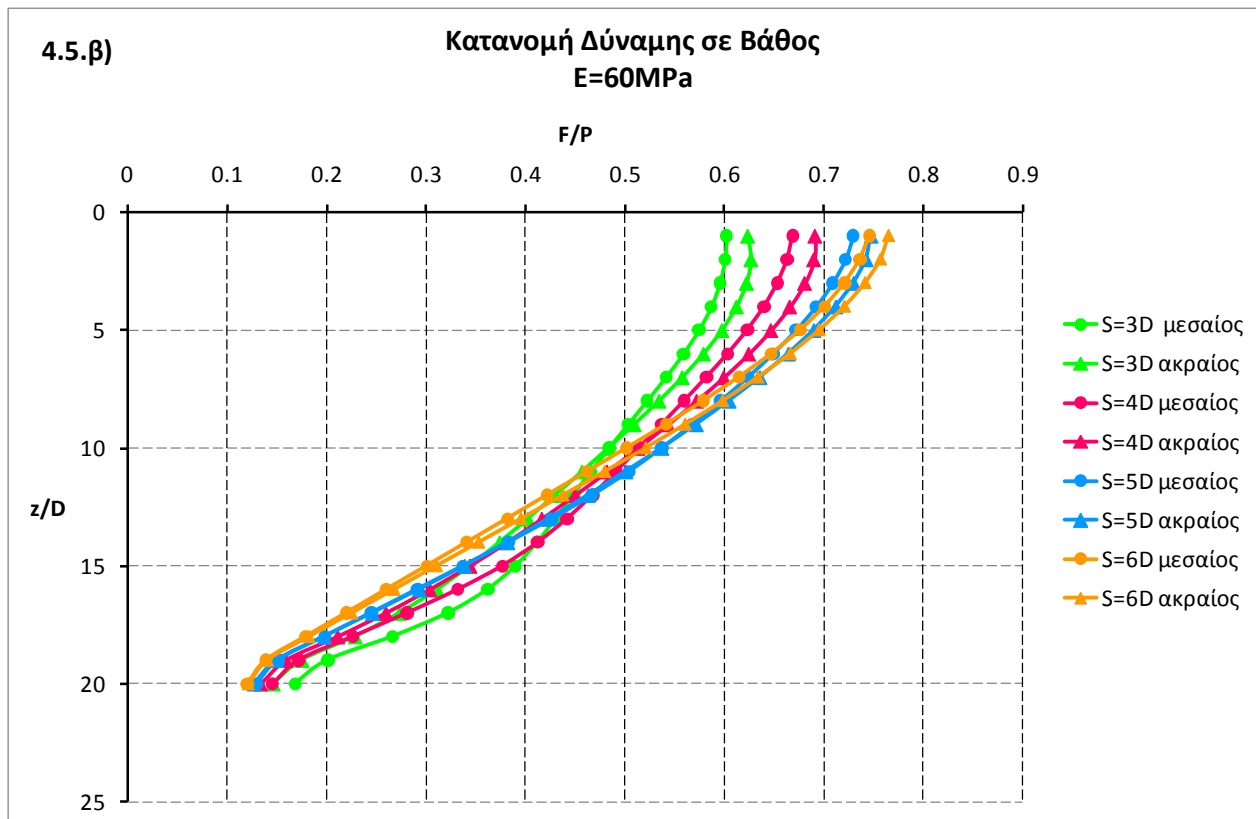
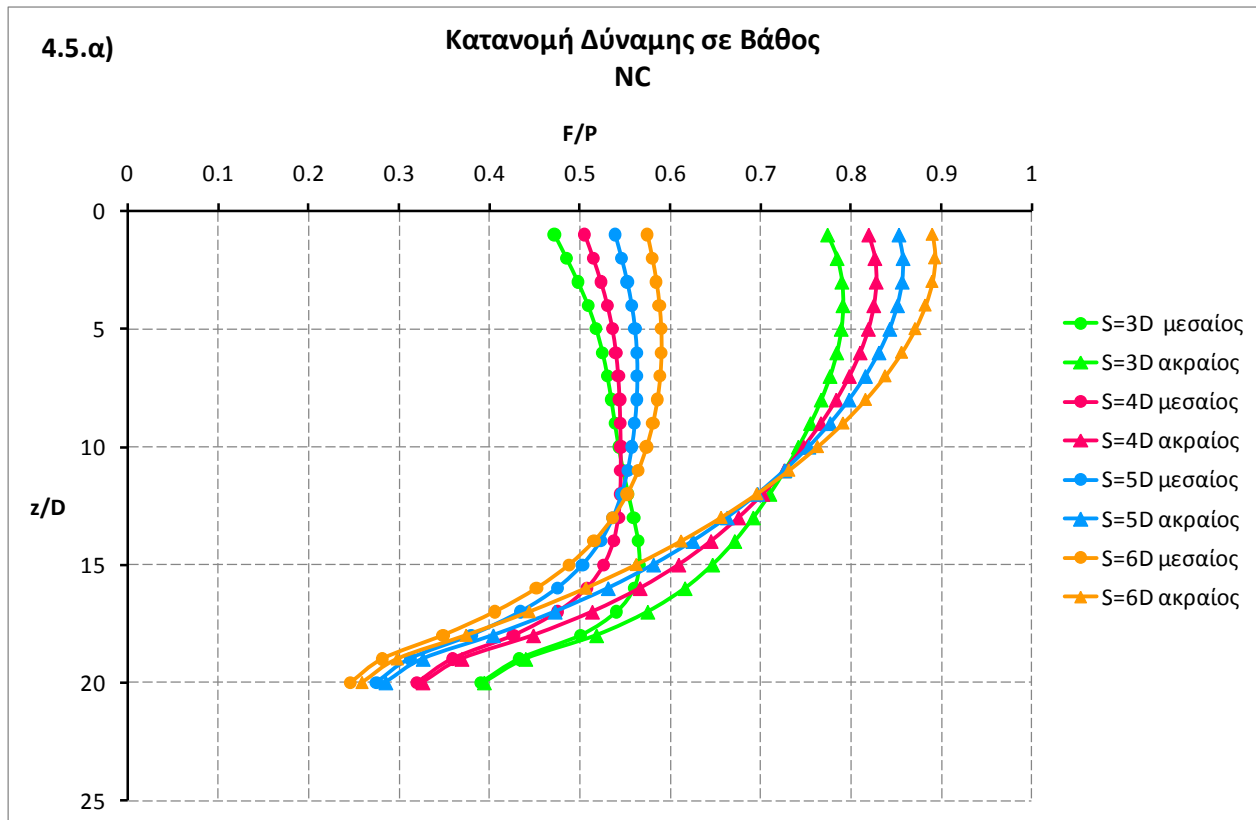


Διάγραμμα 4.4 Συγκεντρωτικά διαγράμματα καθιζήσεων στη στάθμη 0 για την περίπτωση όπου λειτουργούν μόνο οι πάσσαλοι. Το διάγραμμα 4.4.α) αναφέρεται σε ομοιογενή άργιλο με E=30MPa και το 4.4.β) σε ομοιογενή άργιλο με E=6MPa.

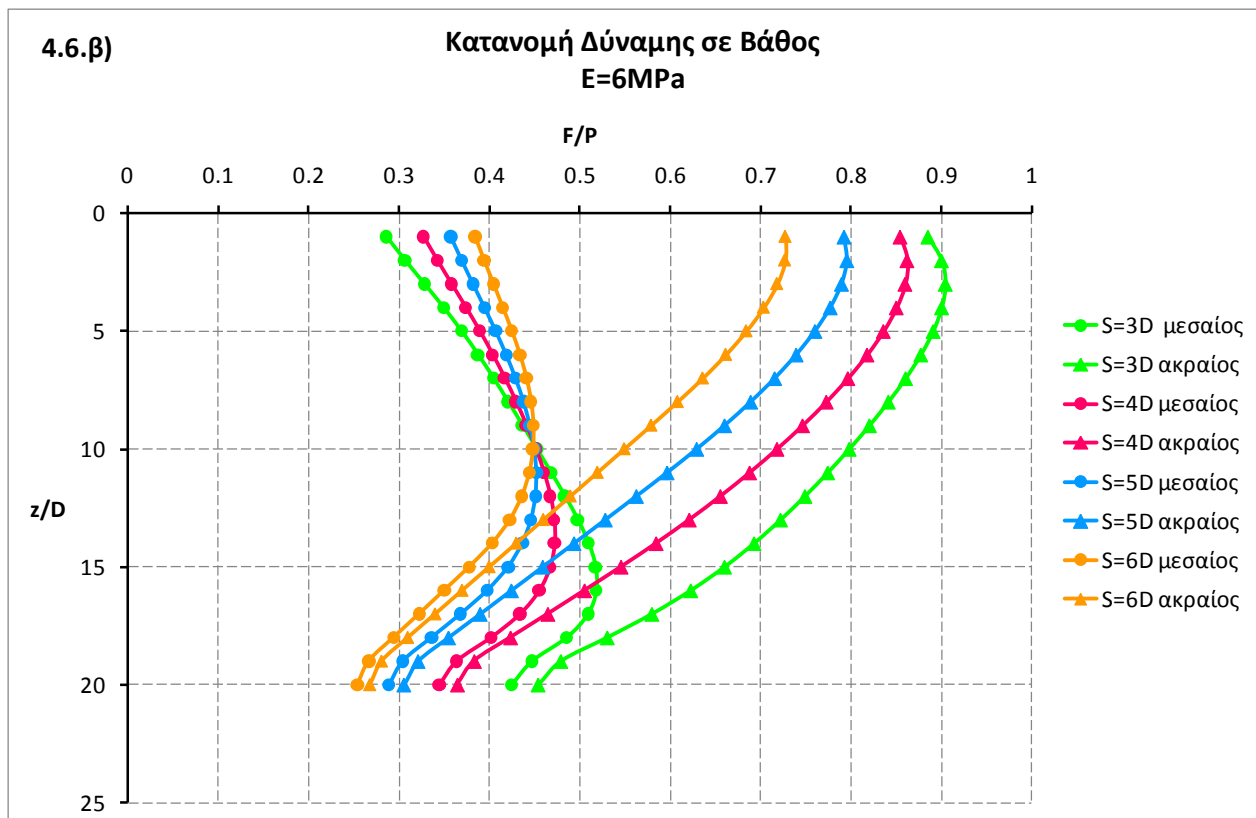
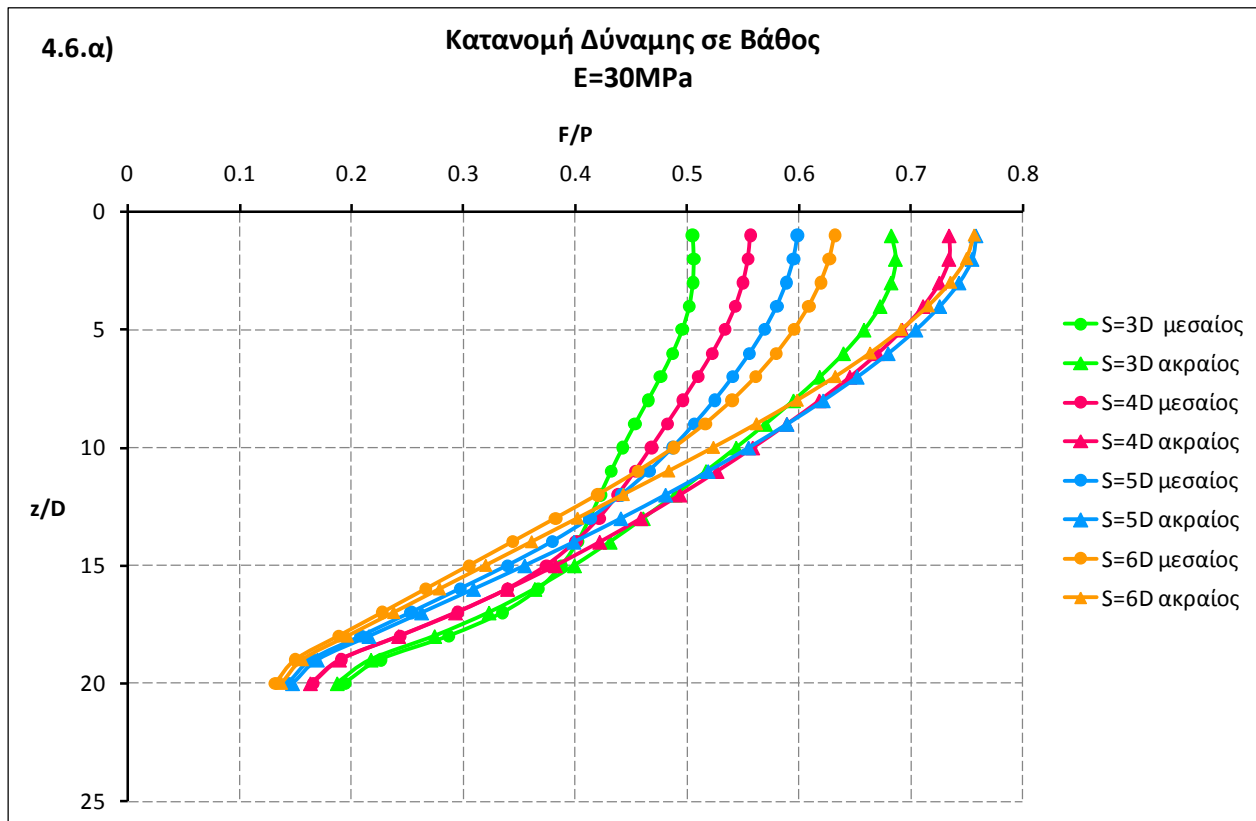


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4  
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

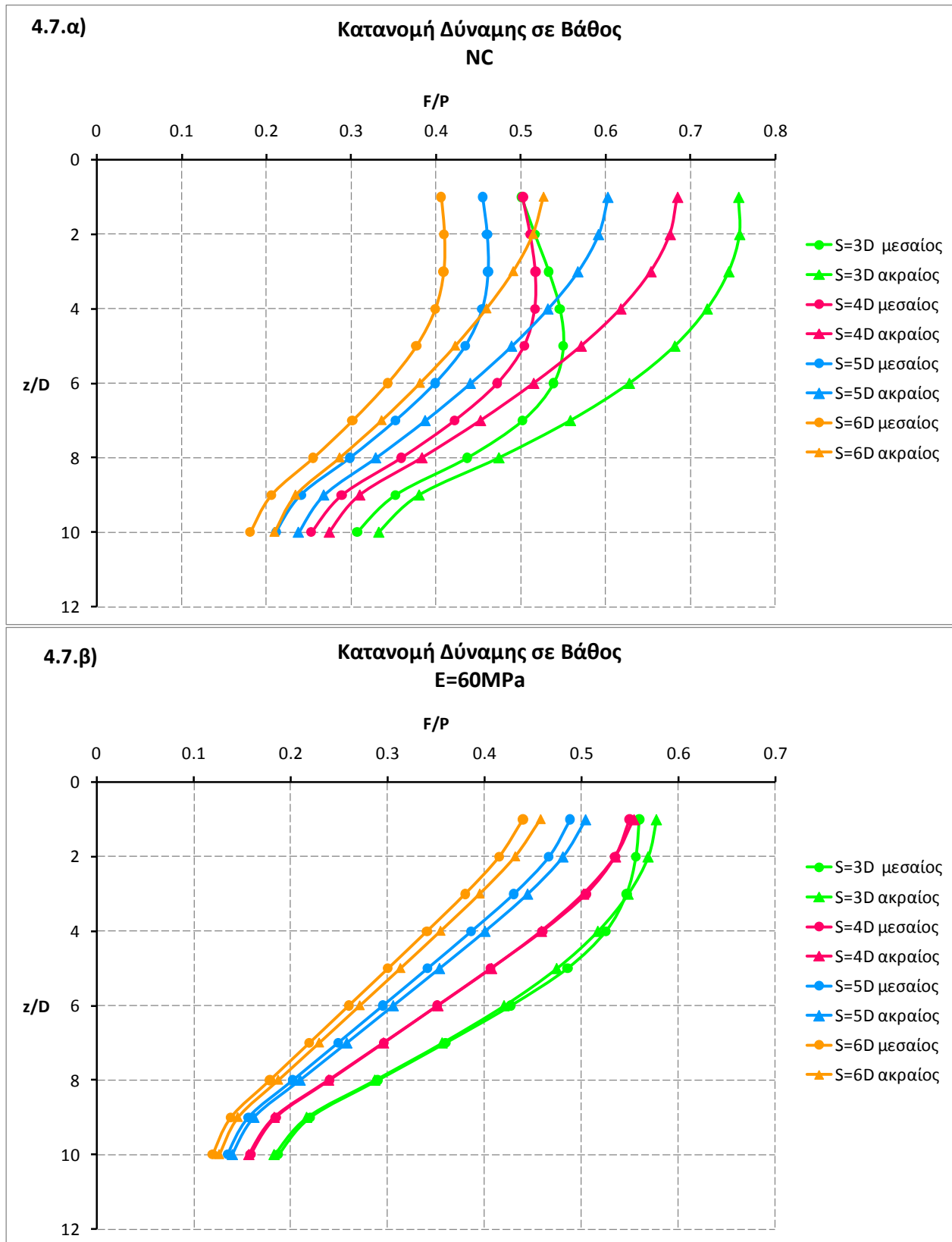




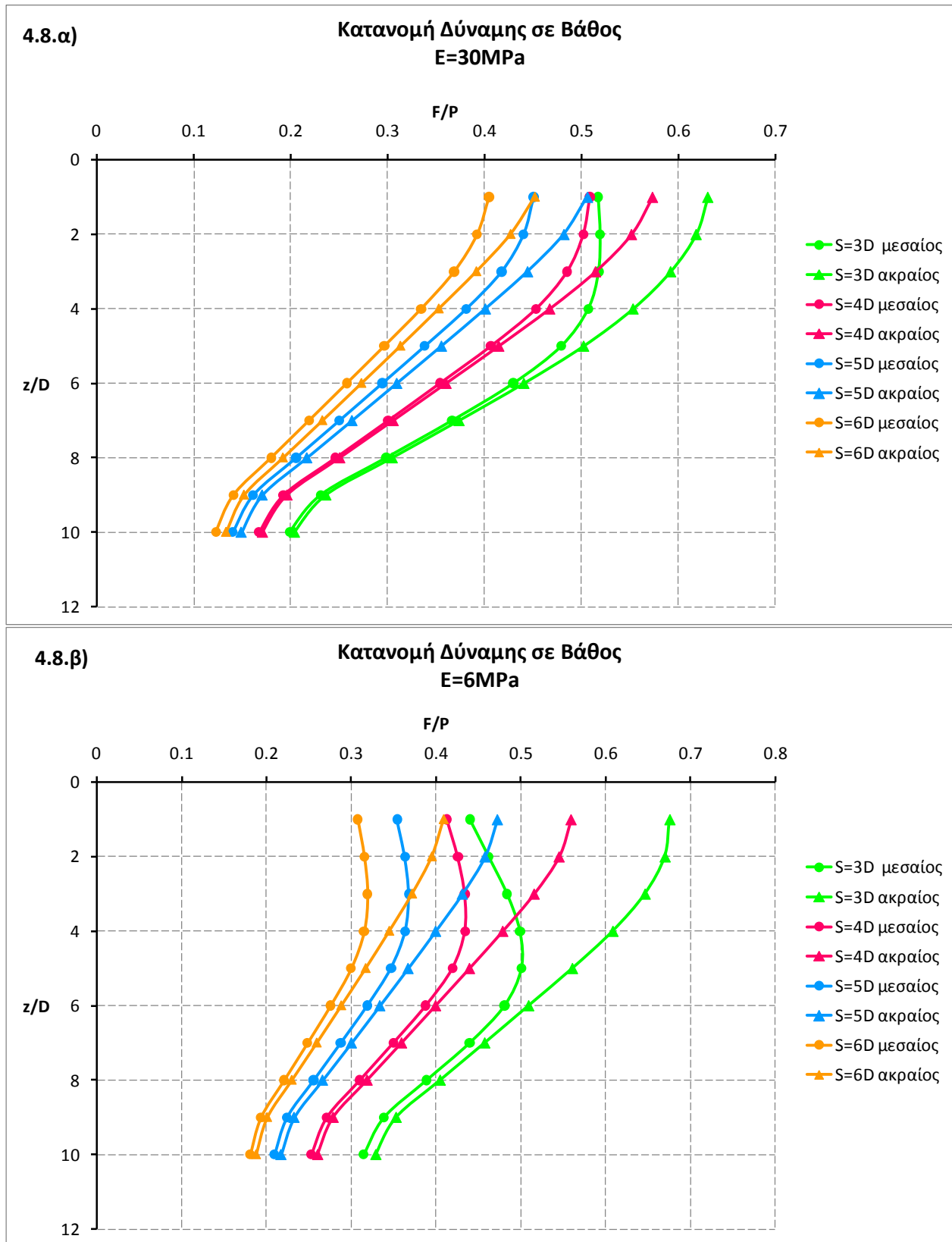
Διάγραμμα 4.5 Συγκεντρωτικά διαγράμματα κατανομής αξονικής δύναμης στους πασσάλους για την περίπτωση προσομοίωσης πλάκα με πασσάλους 20m. Το διάγραμμα 4.5.α) αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένο άργιλο NC και το 4.5.β) σε ομοιογενή άργιλο με  $E=60\text{MPa}$ .



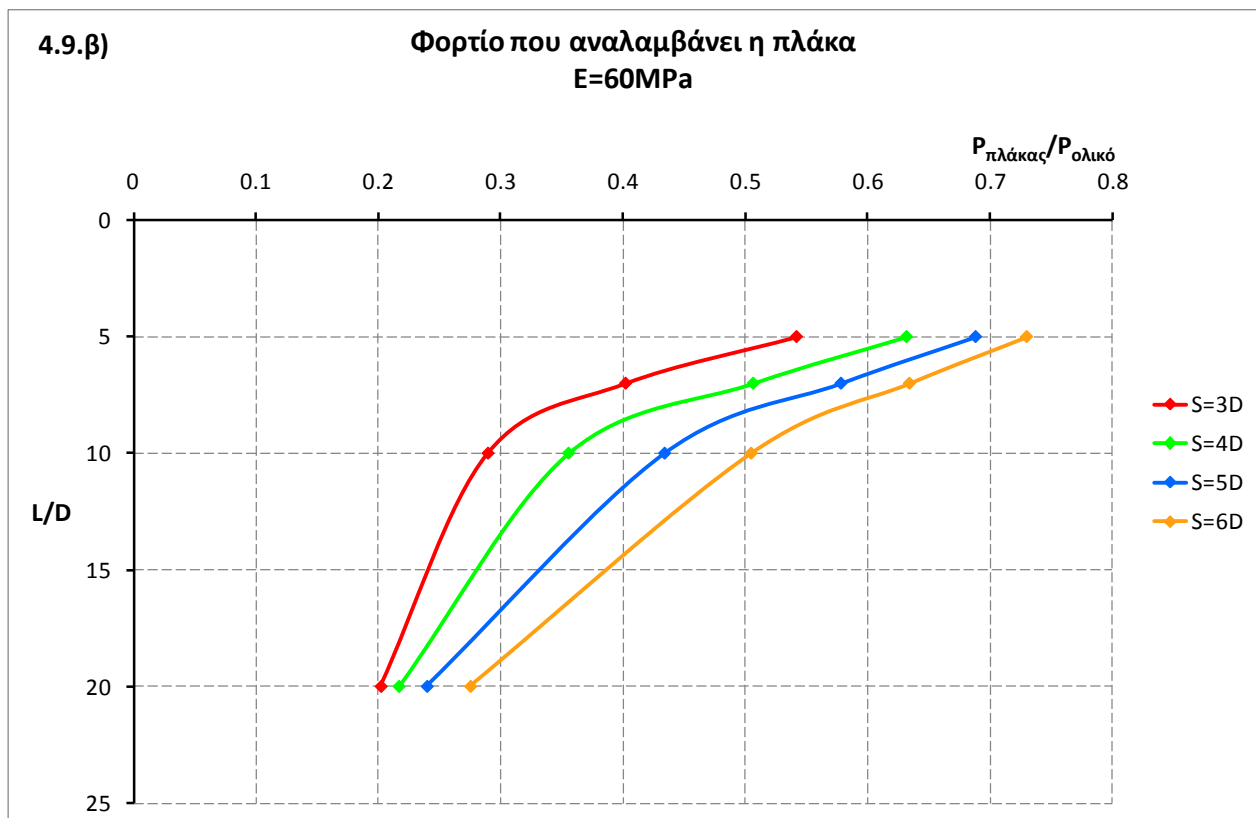
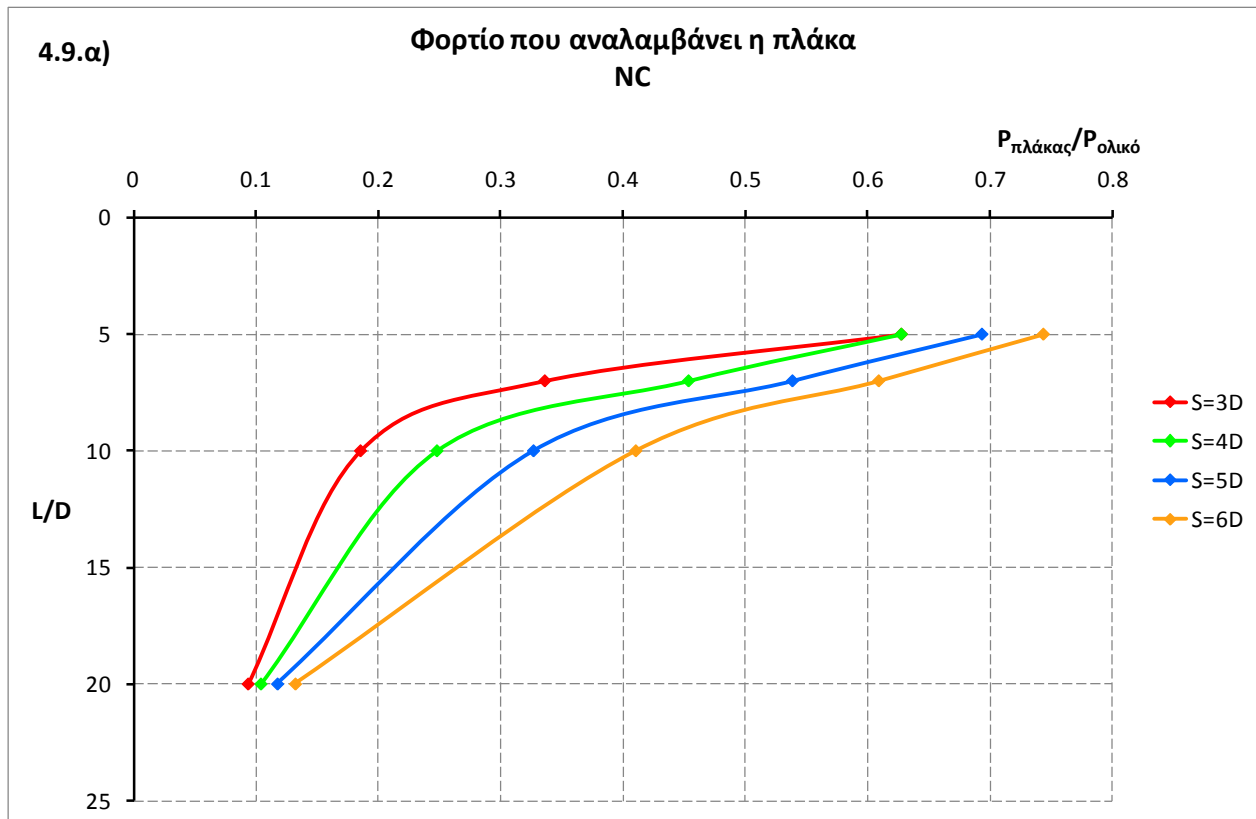
Διάγραμμα 4.6 Συγκεντρωτικά διαγράμματα κατανομής αξονικής δύναμης στους πασσάλους για την περίπτωση προσομοίωσης πλάκα με πασσάλους 20m. Το διάγραμμα 4.6.α) αναφέρεται σε ομοιογενή άργιλο με E=30MPa και το 4.6.β) σε ομοιογενή άργιλο με E=6MPa.



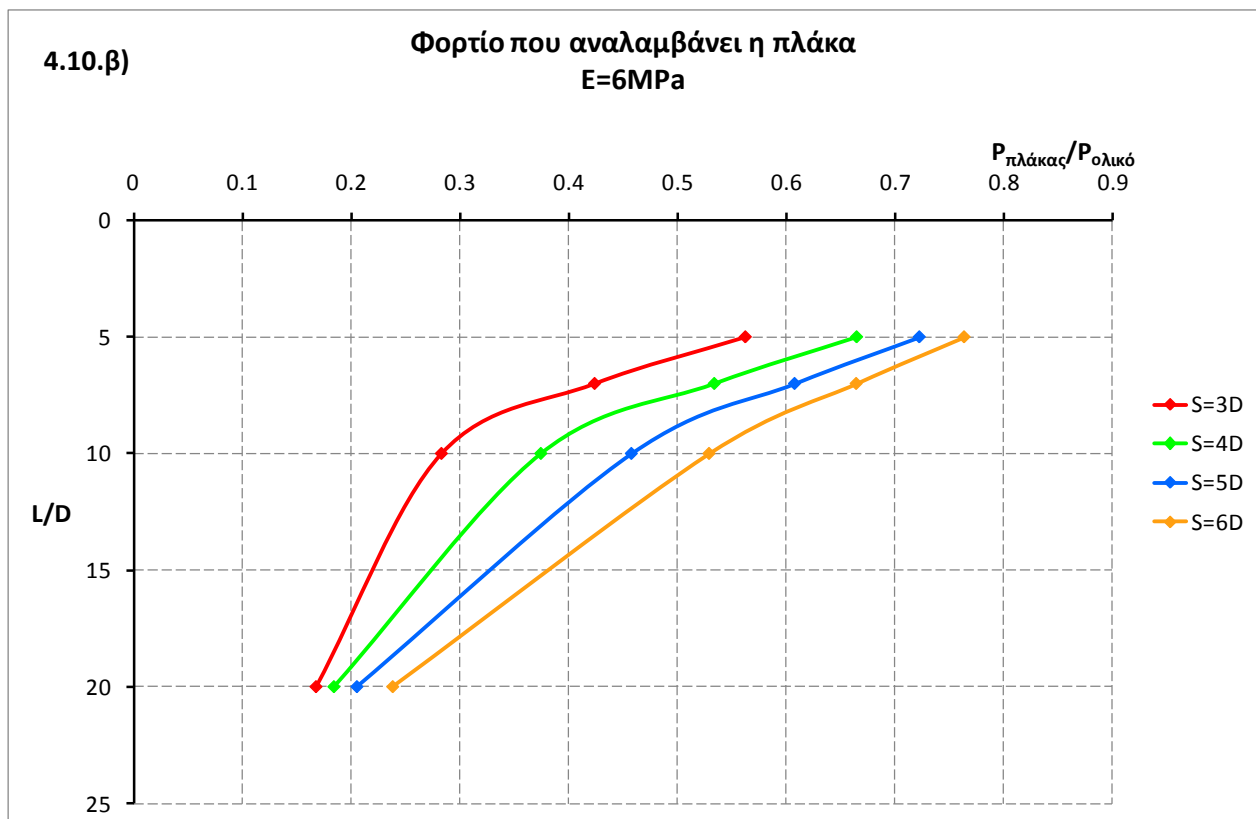
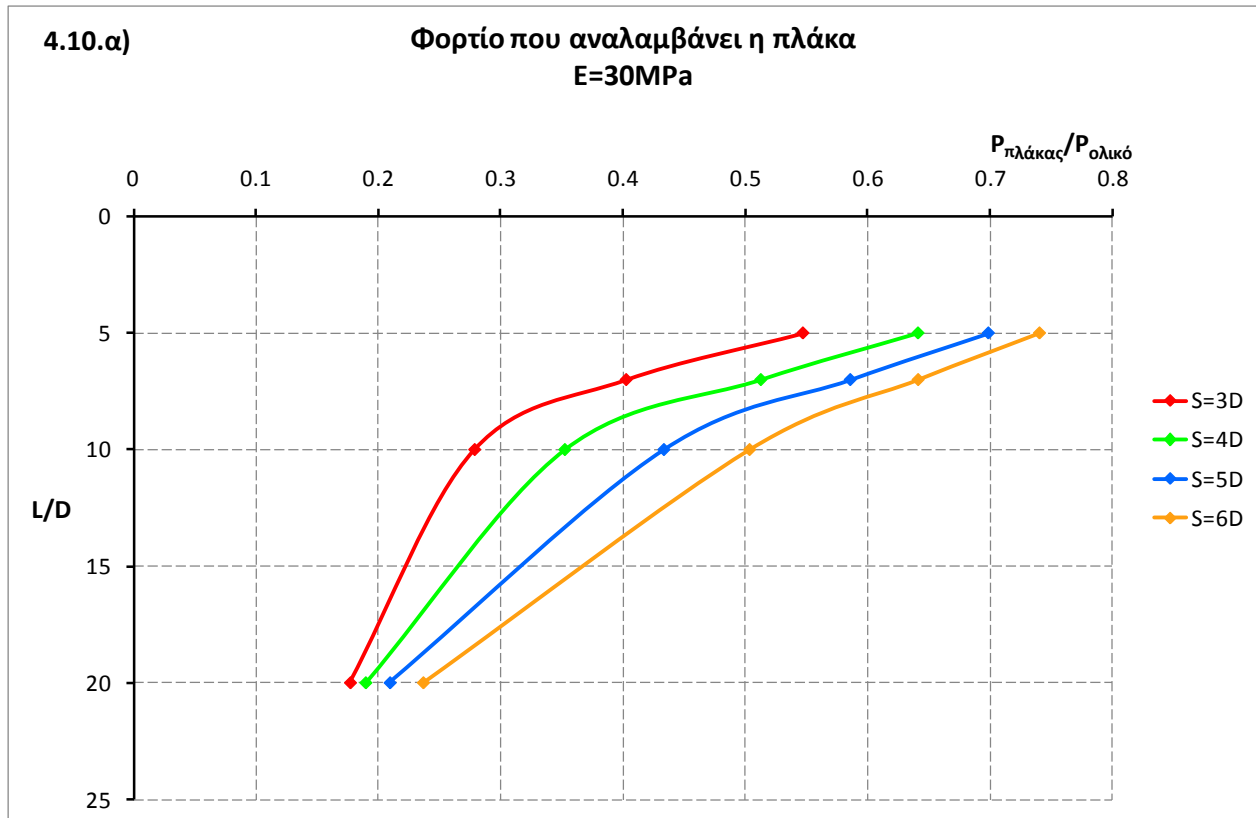
Διάγραμμα 4.7 Συγκεντρωτικά διαγράμματα κατανομής αξονικής δύναμης στους πασσάλους για την περίπτωση προσομοίωσης πλάκα με πασσάλους 10m. Το διάγραμμα 4.7.α) αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο NC και το 4.7.β) σε ομοιογενή άργιλο με E=60MPa.



Διάγραμμα 4. 8 Συγκεντρωτικά διαγράμματα κατανομής αξονικής δύναμης στους πασσάλους για την περίπτωση προσομοίωσης πλάκα με πασσάλους 10m. Το διάγραμμα 4.8.α) αναφέρεται σε ομοιογενή άργιλο με E=30MPa και το 4.8.β) σε ομοιογενή άργιλο με E=6MPa.



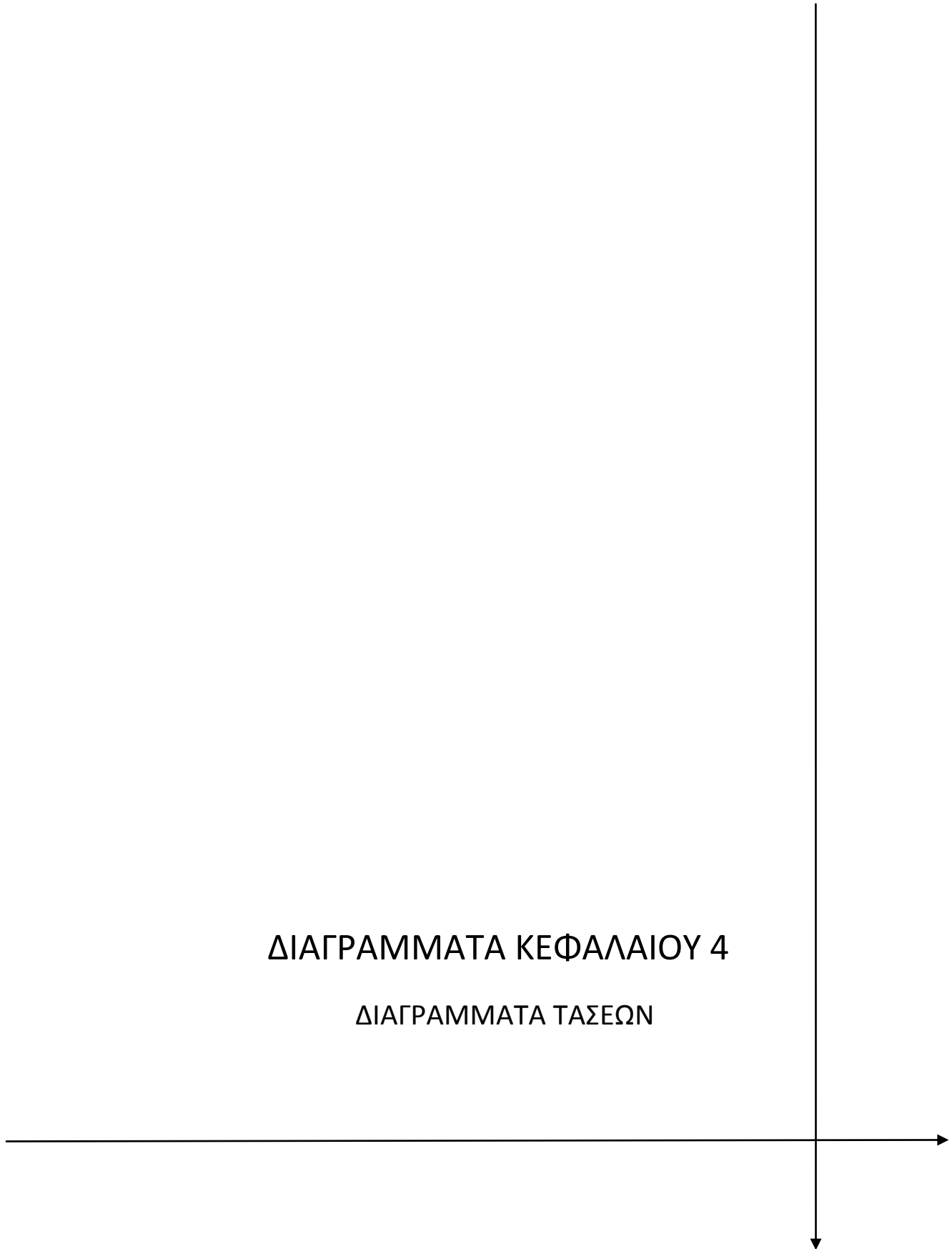
Διάγραμμα 4. 9 Διαγράμματα του φορτίου που αναλαμβάνει η πλάκα της πασσαλοομάδας για τα συστήματα με πασσάλους 10m και 20m, αντίστοιχα. Το 4.9.α) αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο NC και το 4.9.β) σε ομοιογενή άργιλο με E=60MPa.



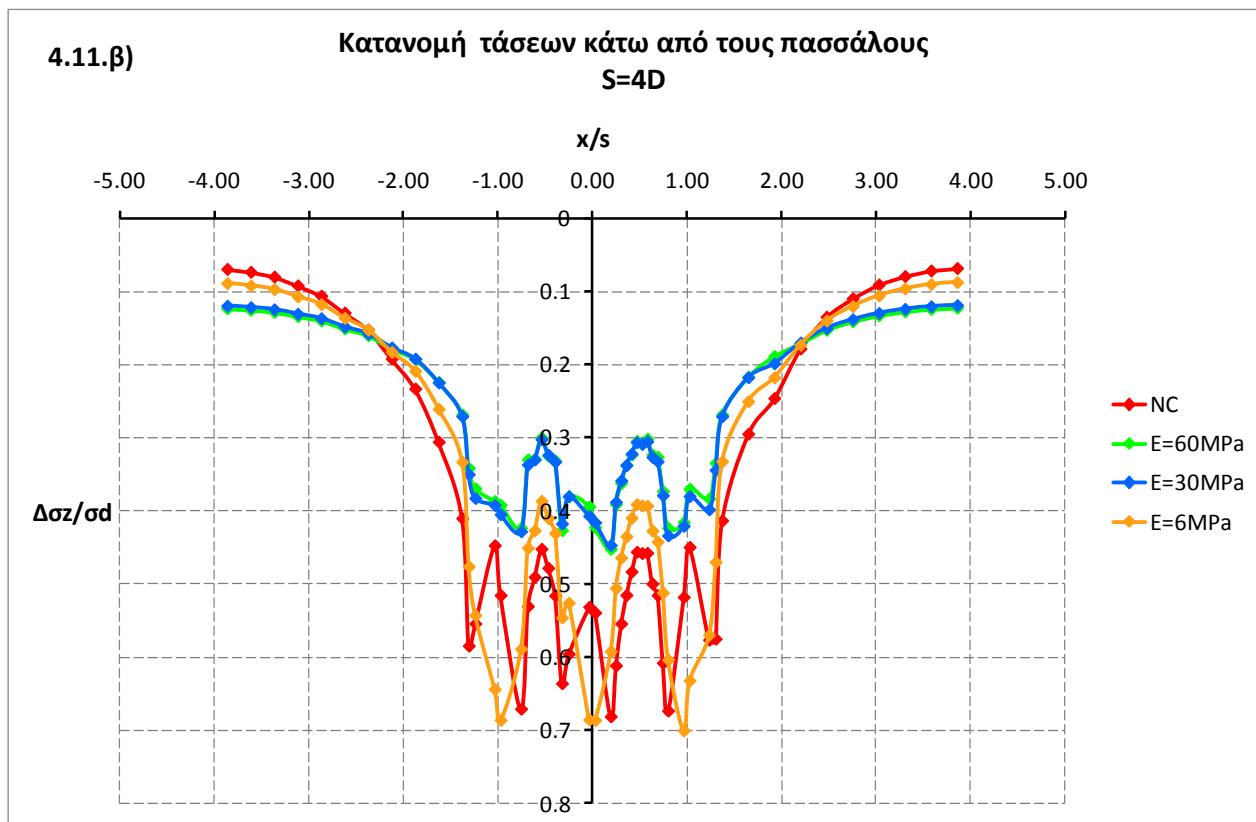
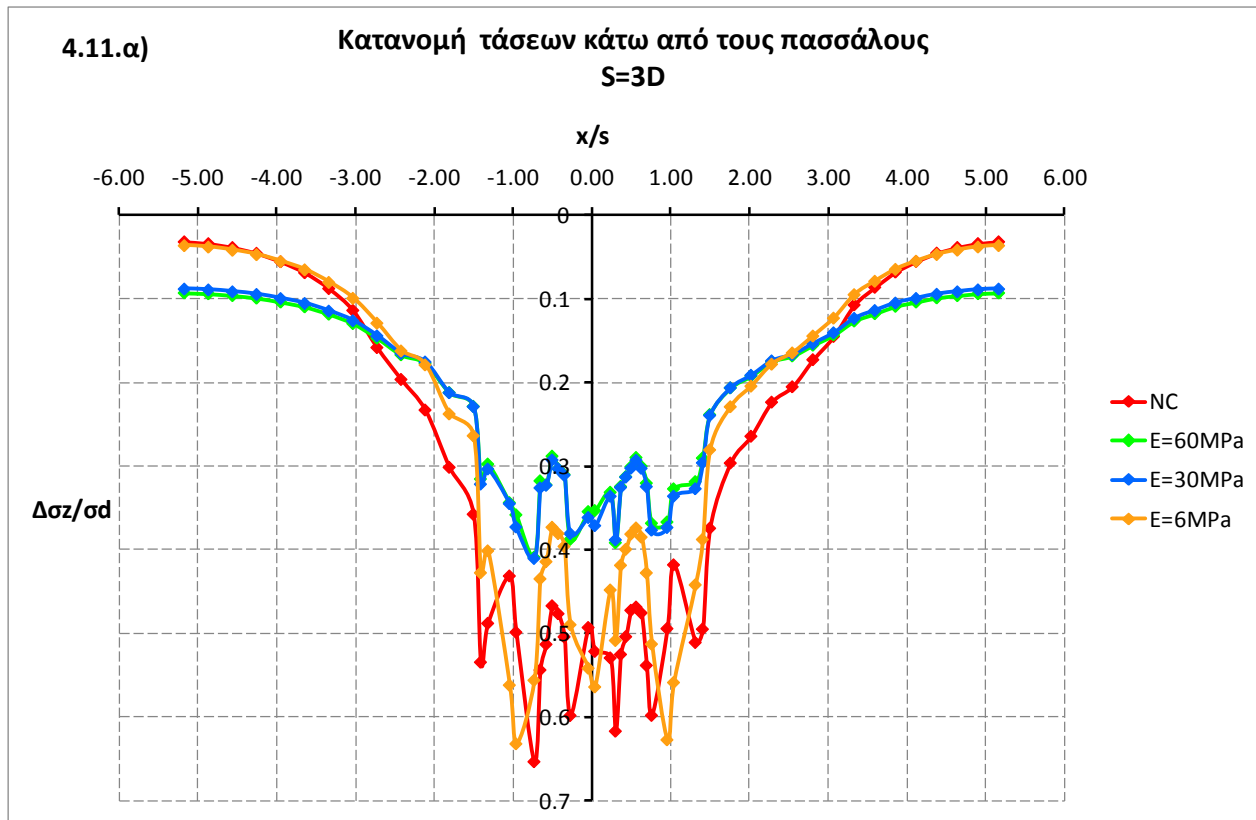
Διάγραμμα 4.10 Διαγράμματα του φορτίου που αναλαμβάνει η πλάκα της πασσαλοομάδας για τα συστήματα με πασσάλους 10m και 20m, αντίστοιχα. Το 4.10.α) αναφέρεται σε ομοιογενή άργιλο με E=30MPa και το 4.10.β) σε ομοιογενή άργιλο με E=6MPa.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

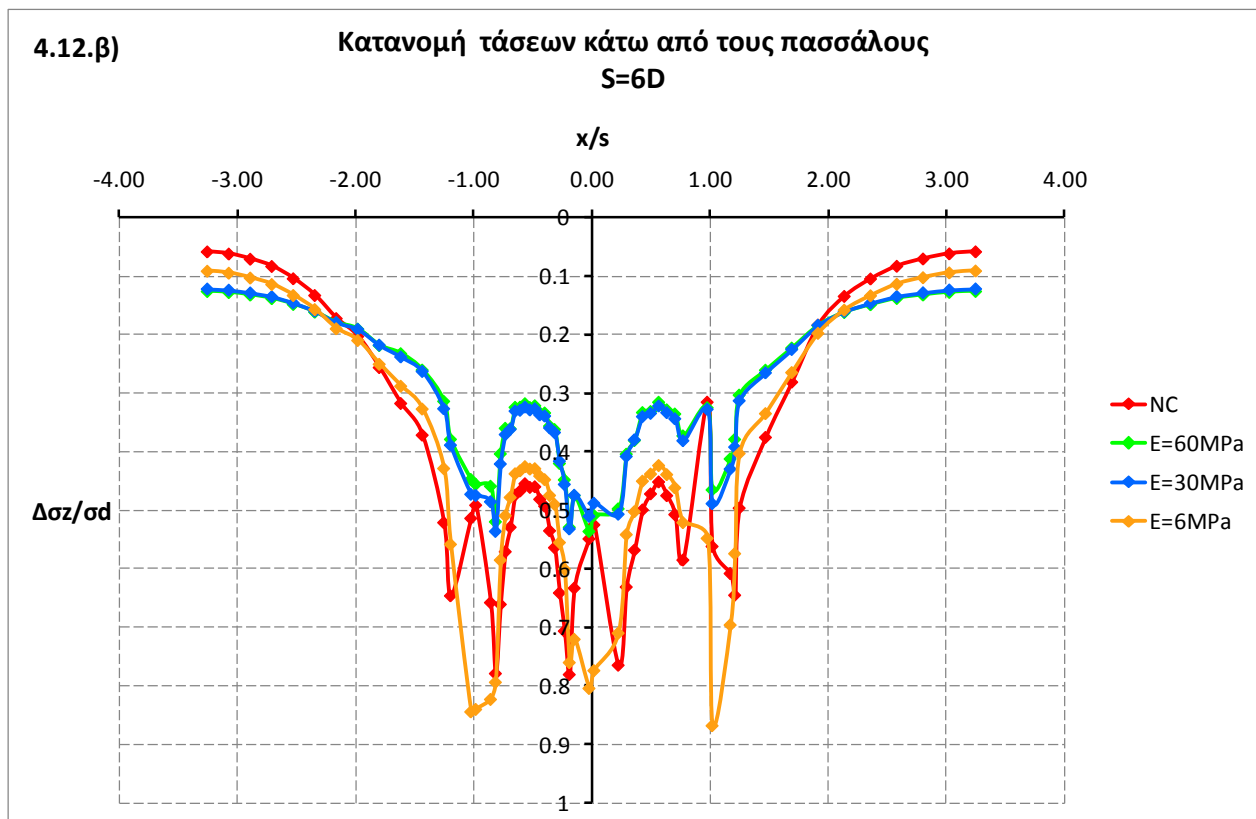
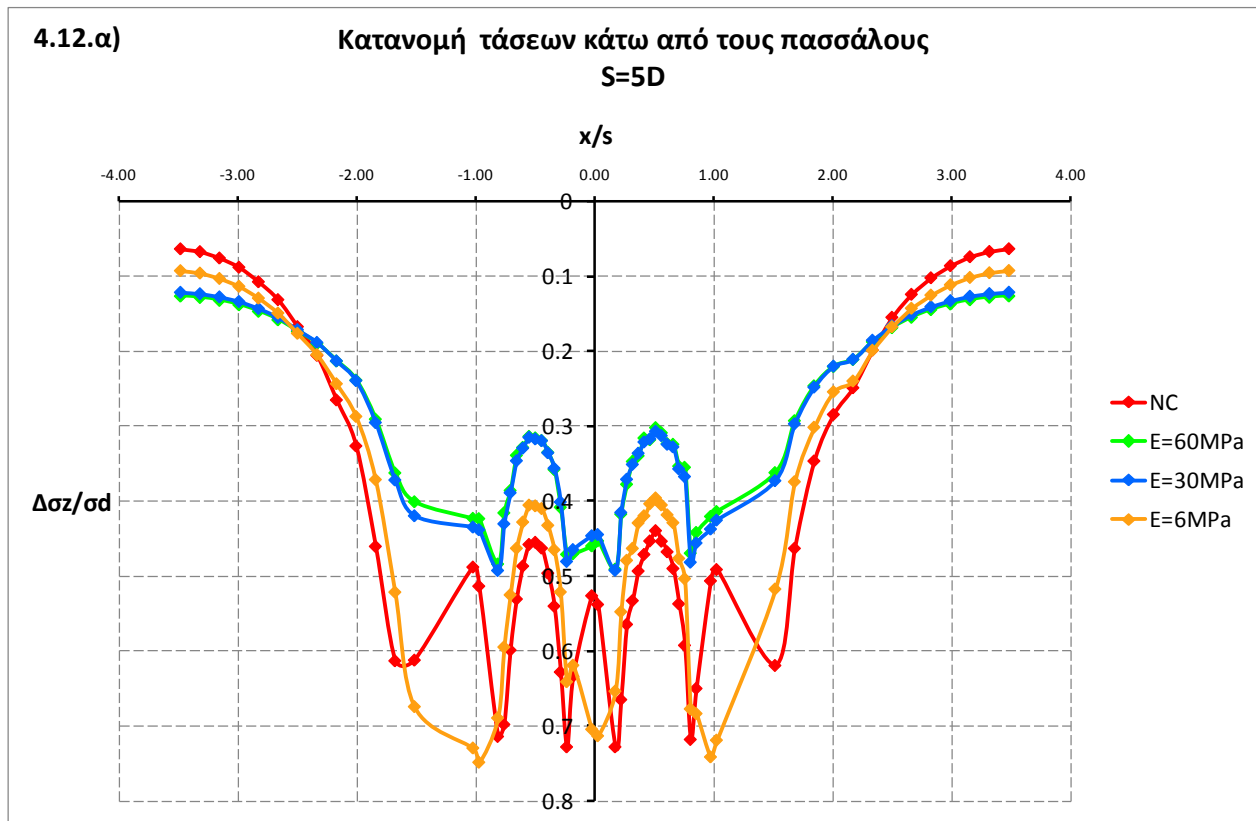
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΑΣΕΩΝ



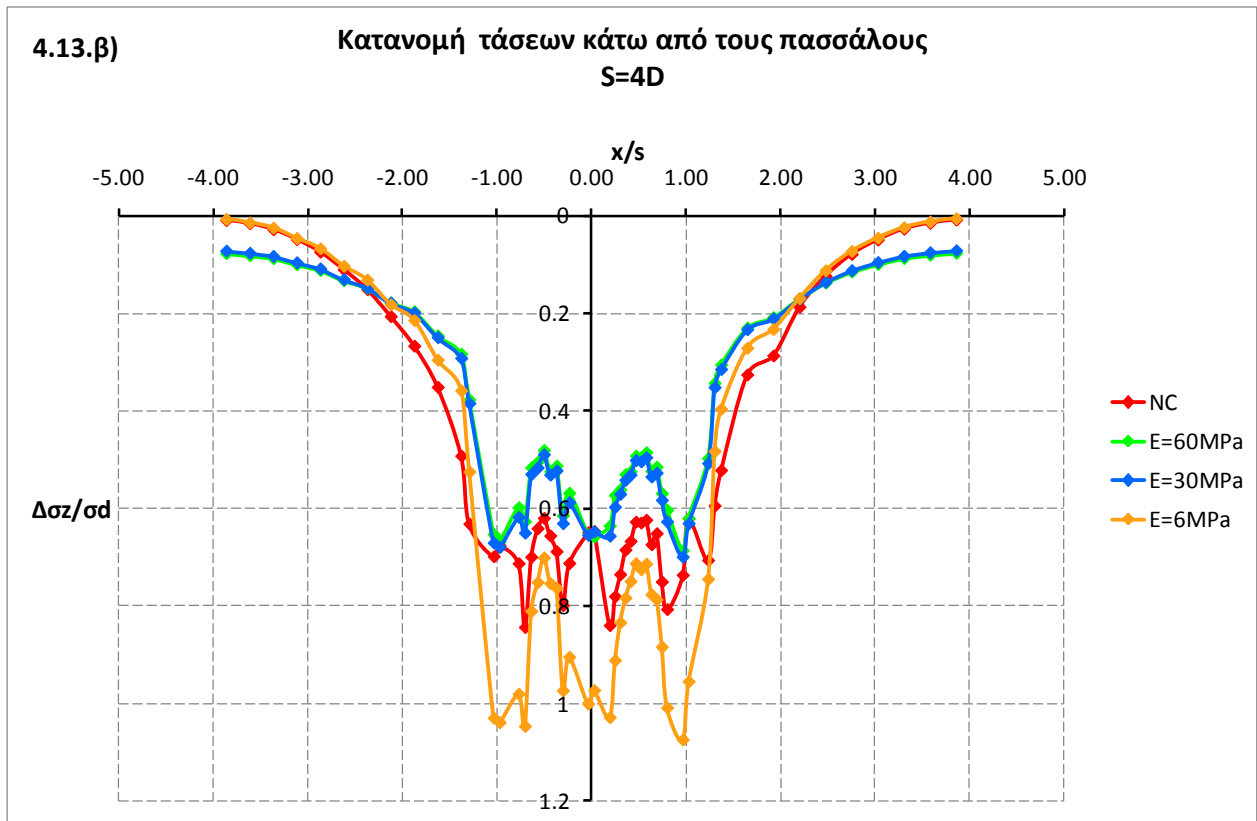
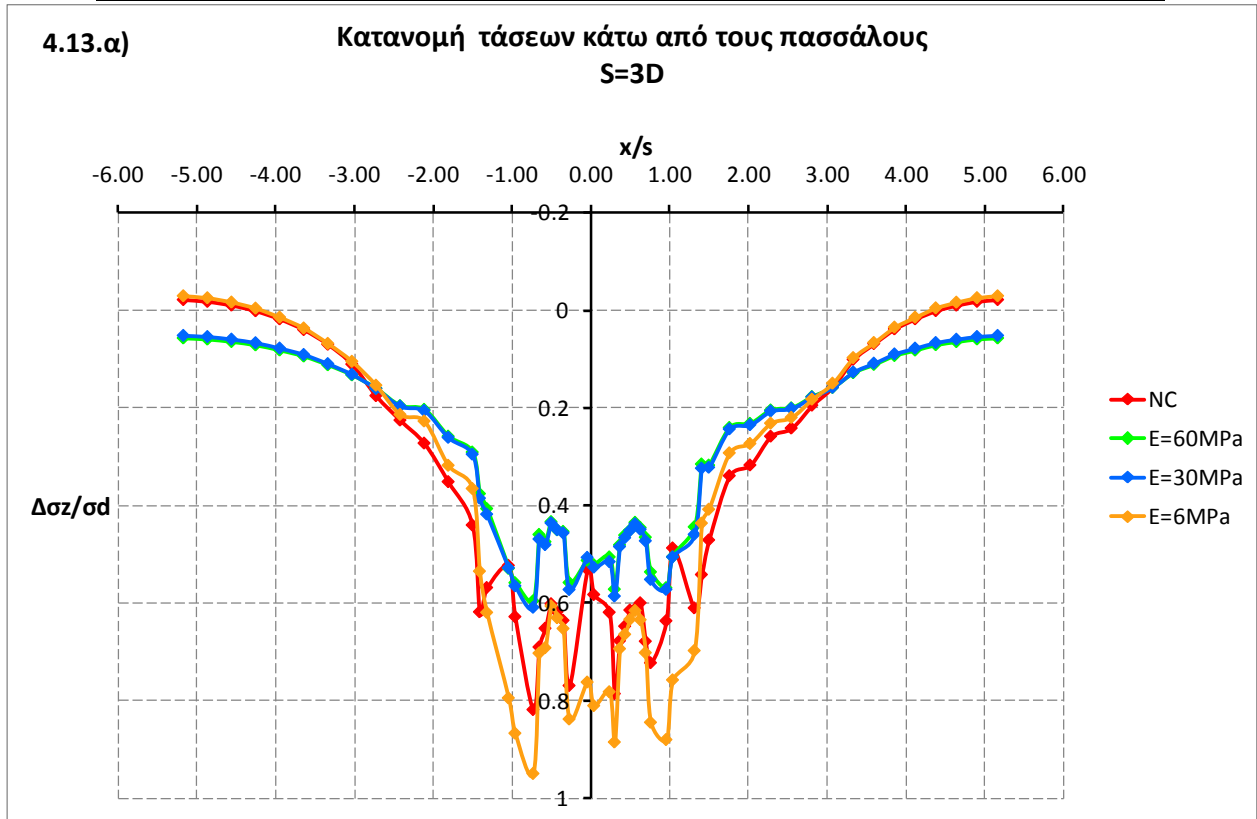




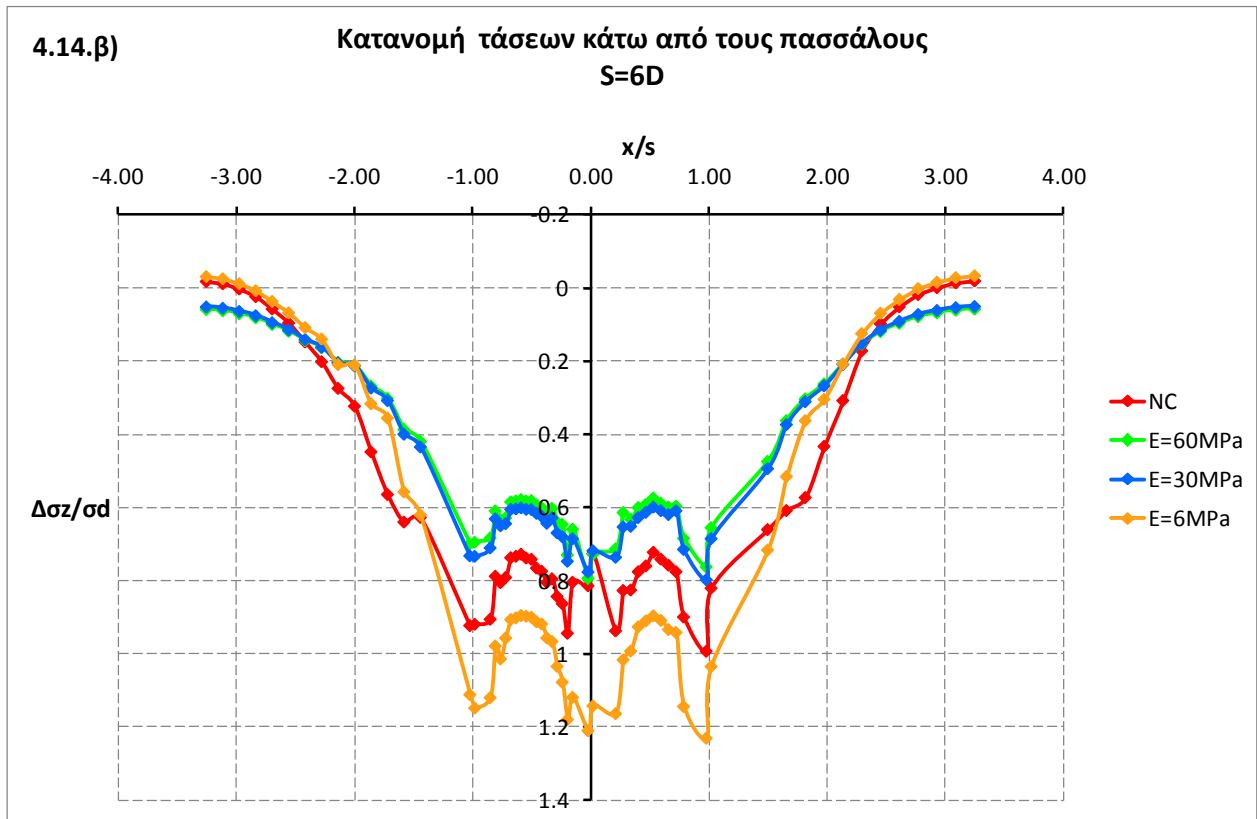
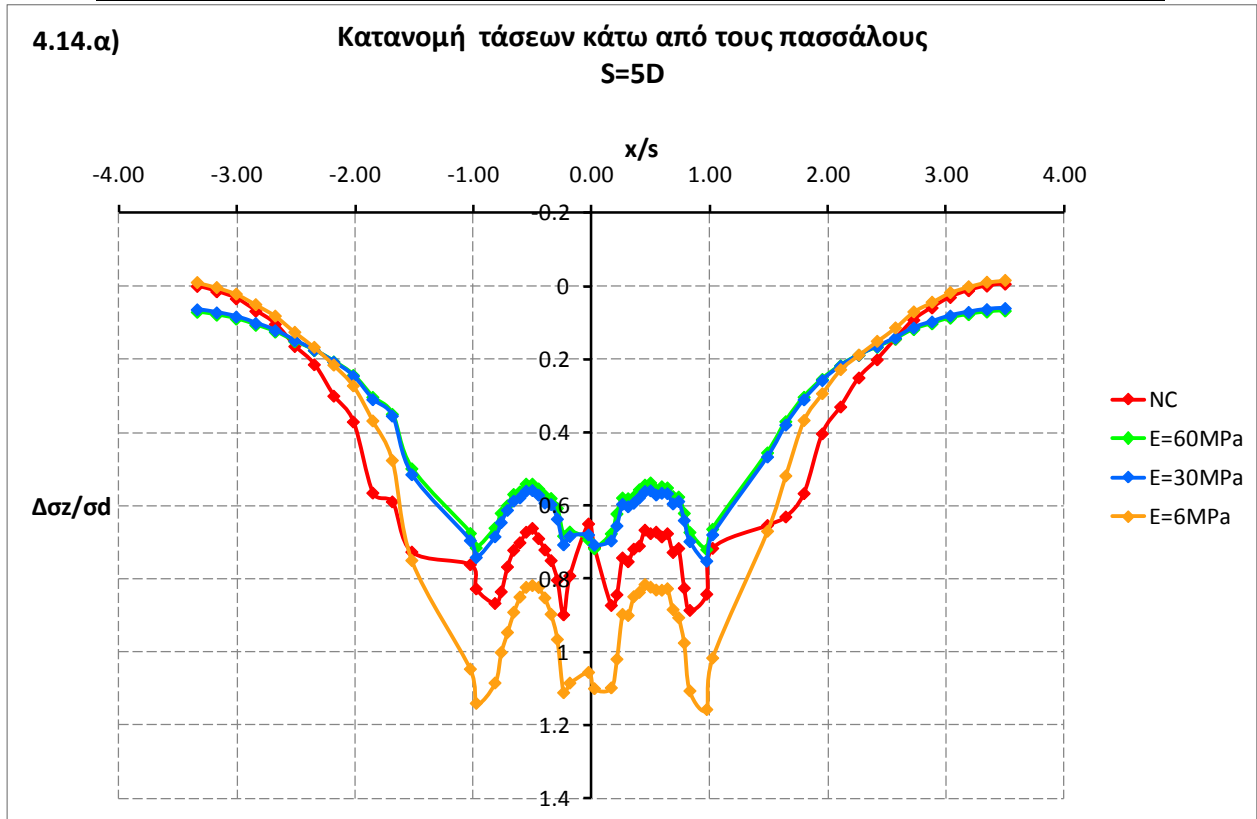
Διάγραμμα 4.11 Συγκεντρωτικά διαγράμματα τάσεων κατά την y διεύθυνση, 2m κάτω από τη στάθμη των πασσάλων μήκους 20m. Οι πάσσαλοι βρίσκονται στις θέσεις 0,+1,-1. Το 4.11.α) αναφέρεται σε πασσαλοομάδα με απόσταση μεταξύ των πασσάλων S=3D και το 4.11.β) για απόσταση S=4D.



Διάγραμμα 4. 12 Συγκεντρωτικά διαγράμματα τάσεων κατά την y διεύθυνση, 2m κάτω από τη στάθμη των πασσάλων μήκους 20m. Οι πάσσαλοι βρίσκονται στις θέσεις 0,+1,-1. Το 4.12.α) αναφέρεται σε πασσαλοομάδα με απόσταση μεταξύ των πασσάλων S=5D και το 4.12.β) για απόσταση S=6D.



Διάγραμμα 4. 13 Συγκεντρωτικά διαγράμματα τάσεων κατά την y διεύθυνση, 2m κάτω από τη στάθμη των πασσάλων μήκους 10m. Οι πάσσαλοι βρίσκονται στις θέσεις 0,+1,-1. Το 4.13.α) αναφέρεται σε πασσαλοομάδα με απόσταση μεταξύ των πασσάλων S=3D και το 4.13.β) για απόσταση S=4D.



Διάγραμμα 4.14 Συγκεντρωτικά διαγράμματα τάσεων κατά την  $y$  διεύθυνση, 2m κάτω από τη στάθμη των πασσάλων μήκους 10m. Οι πάσσαλοι βρίσκονται στις θέσεις 0,+1,-1. Το 4.14.α) αναφέρεται σε πασσαλοομάδα με απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=5D$  και το 4.14.β) για απόσταση  $S=6D$ .

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **Σχολιασμός διαγραμμάτων - Συμπεράσματα**

#### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το παρόν κεφάλαιο συνοψίζει μία προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις παραμετρικές αναλύσεις των προηγούμενων κεφαλαίων τόσο για τα εντατικά μεγέθη του πασσάλου όσο και για εκείνα της πλάκας θεμελίωσης. Τα μεγέθη των οποίων τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν για τέσσερεις τύπους αργίλου (NC,  $C_u=200\text{kPa}$ ,  $C_u=100\text{kPa}$ ,  $C_u=20\text{kPa}$ ) και για μεταβαλλόμενη απόσταση μεταξύ των πασσάλων ( $S=3D$ ,  $S=4D$ ,  $S=5D$ ,  $S=6D$ ), ήταν η καθίζηση του συστήματος θεμελίωσης, η αξονική δύναμη των πασσάλων και της πλάκας καθώς και η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων στο έδαφος κάτω από το εκάστοτε φέρον σύστημα θεμελίωσης. Ακολουθεί, ο σχολιασμός των συγκριτικών διαγραμμάτων που παρατέθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την επιρροή των διαστάσεων των πασσάλων και των ιδιοτήτων της εδαφικής μάζας σε μεγέθη που κρίνονται σημαντικά για τον σχεδιασμό συστημάτων θεμελίωσης που συνδυάζουν κοιτόστρωση και πασσάλους.

#### **5.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ**

##### **5.2.1 Σύστημα θεμελίωσης πλάκα-πάσσαλοι**

Στα διαγράμματα 4.1.α), 4.1.β), 4.2.α), 4.2.β) παρουσιάζεται η σχέση της καθίζησης του συστήματος  $u_3$  με το μήκος των πασσάλων  $L$  αδιαστατοποιημένα και τα δύο ως προς τη διάμετρο  $D$  των πασσάλων. Σε κάθε διάγραμμα, για κάθε έναν από τους τέσσερεις τύπους αργίλου (NC,  $E=60\text{MPa}$ ,  $E=30\text{MPa}$ ,  $E=6\text{MPa}$ ) παραθέτονται συγκριτικά τέσσερεις περιπτώσεις μεταβαλλόμενης απόστασης  $S$  μεταξύ των πασσάλων. Όπως γίνεται εμφανές όλα τα διαγράμματα ξεκινούν με ένα λόγο καθίζησης  $u_3/D$  της πλάκας ( $L/D=0$ ) κοντά στο 0,25 έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.

Ειδικότερα για το διάγραμμα 4.1.α), όπου έχουμε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο, παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται το μήκος των πασσάλων ενώ το φορτίο παραμένει το ίδιο (για σταθερό  $S$  και ίδιο τύπο εδάφους) η καθίζηση όπως είναι αναμενόμενο μειώνεται. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί στη φάση αυτή είναι ότι μέχρι κάποιο μήκος πασσάλων, περίπου στα  $9m$ , η μείωση της καθίζησης είναι αρκετά σημαντική, ενώ για μεγαλύτερες τιμές του μήκους των πασσάλων η μείωση είναι περιορισμένη. Για παράδειγμα μπορούμε να εξετάσουμε την περίπτωση όπου

η απόσταση μεταξύ των πασσάλων είναι  $S=4D$ . Η μεταβολή του λόγου  $L/D$  συναρτήσει της μέγιστης επιφανειακής καθίζησης αδιαστατικοποιημένης ως προς την διάμετρο των πασσάλων  $D$  δεν εξελίσσεται με γραμμικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα από  $0 \rightarrow 5$  η μεταβολή του λόγου  $u_3/D$  είναι 0,12 μονάδες (0.22-0.10) σχεδόν διπλάσια από τη μεταβολή του  $5 \rightarrow 10$  που είναι της τάξης του 0,05 (0.10-0.45) επίσης μεγαλύτερη από αυτή μεταξύ  $10 \rightarrow 20$  που φτάνει μόλις στα 0,027. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι για ένα μήκος πασσάλων μεγαλύτερο του  $9-10D$  και για την διάταξη πασσαλοστοιχίας που αναλύθηκε εντός των πλαισίων αυτής της διπλωματικής εργασίας, η συνεισφορά τους στην μείωση των καθιζήσεων κρίνεται μικρή και συνεπώς, το κόστος κατασκευής της θεμελίωσης αυξάνει σημαντικά χωρίς να επιφέρεται υπολογίσιμη μείωση καθίζησης. Από τη μορφή της καμπύλης του διαγράμματος (εκεί όπου αλλάζει η κλίση της καμπύλης) μπορούμε να υιοθετήσουμε μια τιμή του λόγου του μήκους των πασσάλων ως προς τη διάμετρό τους από την οποία και μετά η κατασκευή του συστήματος θεμελίωσης καθίσταται μη συμφέρουσα είναι  $L/D \approx 9-10$ .

Ένας άλλος παράγοντας που φαίνεται να επηρεάζει την καθίζηση του συστήματος θεμελίωσης είναι η απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S$ . Όπως διαφαίνεται και στο διάγραμμα 4.1.α) η μείωση της καθίζησης για ένα δεδομένο λόγο  $L/D$  είναι εμφανώς μεγαλύτερη όταν  $S=3D$  σε σχέση με την περίπτωση όπου  $S=6D$ . Για παράδειγμα στις περιπτώσεις όπου  $S=3D$  και  $S=4D$  οι δύο καμπύλες ξεκινούν από το ίδιο σημείο 0.22 στη συνέχεια όμως η μείωση του λόγου καθίζησης για την πράσινη καμπύλη ( $S=3D$ ) είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό έγκειται στο γεγονός ότι όσο αυξάνει η απόσταση μεταξύ των πασσάλων τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης πασσάλου-πασσάλου και πασσάλου-εδάφους γίνονται λιγότερο σημαντικά.

Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα 4.1.β), το οποίο και αφορά σε υπερστερεοποιημένη άργιλο με  $C_u=200\text{kPa}$  και  $E=60\text{MPa}$ . Στην περίπτωση αυτή για την επίδραση του μήκους των πασσάλων στην καθίζηση του συστήματος θεμελίωσης ισχύουν λίγο πολύ τα ίδια που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ότι δηλαδή μέχρι κάποια τιμή του μήκους των πασσάλων η χρήση της πασσαλοομάδας είναι πολύ ευεργετική. Η τιμή αυτή του λόγου  $L/D$  και για αυτή την περίπτωση φαίνεται να είναι η ίδια ( $L/D \approx 9$ ). Ωστόσο, η επίδραση της απόστασης μεταξύ των πασσάλων  $S$  στην περίπτωση αυτή φαίνεται να είναι πιο έντονη. Οι καμπύλες εμφανώς ξεχωρίζουν η μια από την άλλη όταν πρόκειται για ένα τόσο δύσκαμπτο υπέδαφος.

Τα ίδια συμπεράσματα ισχύουν και για τα επόμενα δύο διαγράμματα 4.2.α) και 4.2.β) τα οποία αναφέρονται σε ομοιογενή άργιλο με  $E=30\text{MPa}$  και  $E=6\text{MPa}$  αντίστοιχα. Η επίδραση του μήκους των πασσάλων καθώς και η μεταξύ τους απόσταση επηρεάζουν σημαντικά την καθίζηση του συστήματος θεμελίωσης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι παρ' όλο που η καθίζηση που εικονίζεται στα διαγράμματα αναφέρεται στον κεντρικό κόμβο του κεντρικού πασσάλου, όπως έχει αναπτυχθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, αντιπροσωπεύει πλήρως την καθίζηση όλου του συστήματος θεμελίωσης. Η παρουσία της δύσκαμπτης πλάκας σκυροδέματος στον κεφαλόδεσμο μας εξασφαλίζει ότι το σύστημα μας θα καθιζάνει σχεδόν ομοιόμορφα. Μικρή ίσως εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση υπερστερεοποιημένου άργιλου  $E=60\text{MPa}$  και απόστασης μεταξύ των πασσάλων  $S=6D$  όπου λόγω διαστάσεων της πλάκας αλλά και λόγω της σχετικής

δυσκαμψίας εδάφους- πλάκας παρατηρείται μια διαφορετική καθίζηση στην πλάκα η οποία όμως είναι αμελητέα για τα δεδομένα του προβλήματος που εξετάζουμε (ο αναγνώστης παραπέμπεται για διευκρινήσεις στον παραμορφωμένο κάρναβο του παραρτήματος).

## 5.2.2 Σύστημα θεμελίωσης επί πασσάλων

Στα διαγράμματα 4.3.α), 4.3.β), 4.4.α), 4.4.β) παρουσιάζεται η σχέση της καθίζησης του συστήματος  $u_3$  με το μήκος των πασσάλων  $L$  αδιαστατοποιημένα και τα δύο ως προς τη διάμετρο  $D$  των πασσάλων. Πρόκειται για την περίπτωση συστήματος θεμελίωσης κατά το οποίο ο φέρων μηχανισμός του συστήματος θεμελίωσης εκφυλίζεται στο σύστημα πασσάλων, απεμπλέκοντας κατά αυτό τον τρόπο την συνεισφορά της πλάκας κοιτοστρώσεως. Σε κάθε διάγραμμα, για κάθε μια από τις τέσσερις περιπτώσεις αργλικού εδαφικού υλικού σε αστράγγιστες συνθήκες ( $NC$ ,  $E=60MPa$ ,  $E=30MPa$ ,  $E=6MPa$ ) παραθέτονται συγκριτικά τέσσερις περιπτώσεις μεταβαλλόμενης απόστασης  $S$  μεταξύ των πασσάλων. Στα διαγράμματα αυτά σε αντίθεση με τα προηγούμενα έχει γίνει παραμετρική διερεύνηση μόνο για δύο μήκη πασσάλων 10m και 20m αντίστοιχα μιας και το φορτίο είναι αρκετά μεγάλο για να το παραλάβουν εξ ολοκλήρου μόνο πάσσαλοι μικρότερων διαστάσεων, αφού θα έδιναν αρκετά μεγάλη καθίζηση κάτι που δεν θα είχε πρακτικό ενδιαφέρον.

Πιο συγκεκριμένα, στο διάγραμμα 4.3.α) το οποίο αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο παρατηρούμε, ότι η αύξηση του μήκους των πασσάλων ή η μείωση της μεταξύ τους απόστασης μειώνει την καθίζηση του συστήματος. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί όσον αφορά το μήκος των πασσάλων είναι ότι η αύξηση του μήκους  $L$  κατά 10m προκαλεί την ίδια μείωση της καθίζησης τόσο στην ομάδα πασσάλων όσο και στην περίπτωση εδράσεως πλάκας θεμελιώσεως επί πασσάλων σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Συνεπώς η επιρροή του μήκους των πασσάλων είναι η ίδια είτε πρόκειται για σύστημα θεμελίωσης που λειτουργούν πλάκα και πάσσαλοι μαζί είτε για σύστημα θεμελίωσης που λειτουργούν μόνο οι πάσσαλοι. Επίσης το ίδιο παρατηρείται και για την επιρροή της απόστασης μεταξύ των πασσάλων. Η ελάττωση της καθίζησης λόγω μείωσης της απόστασης μεταξύ των πασσάλων στην περίπτωση που λειτουργούν μόνο οι πάσσαλοι είναι ανάλογη αυτής όπου συνεισφέρει και η πλάκα.

Παρόμοια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και για τα ακόλουθα διαγράμματα 4.3.β), 4.4.α), 4.4.β) για ομοιογενείς αργίλους με  $E=60MPa$ ,  $E=30MPa$ ,  $E=6MPa$  αντίστοιχα. Μόνο που στις εξετασθείσες περιπτώσεις όσο πιο δύσκαμπτο γίνεται το έδαφος τόσο η επιρροή του μήκους των πασσάλων εμφανίζεται εντονότερη. Η επιρροή της απόστασης μεταξύ των πασσάλων είναι εξίσου σημαντική και σε αυτή την περίπτωση αρκεί να κοιτάξουμε τη διαφορά στο λόγο  $u_3/D$  μεταξύ των περιπτώσεων για  $S=3D$  και  $S=6D$ . Η διαφορά αυτή αποδίδεται σε φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ πασσάλου-πασσάλου και πασσάλου-εδάφους, αφού η επιλογή του φορτίου όπως έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε οι τιμές της καθίζησης 'ιδανικά' να συμπίπτουν.

## 5.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

### 5.3.1 Αξονική δύναμη πάσσαλων 20m

Στα διαγράμματα 4.5.α), 4.5.β), 4.6.α), 4.6.β) εμφανίζεται η κατανομή του λόγου της αξονικής δύναμης  $F$  που αναλαμβάνει ο πάσσαλος μέσα στην πασσαλοομάδα ως προς τη δύναμη  $P$  του μεμονωμένου πασσάλου σε συνάρτηση με το βάθος  $z$  αδιαστατοποιημένο ως προς τη διάμετρο του πασσάλου  $D$ . Πρόκειται για τη περίπτωση συστήματος θεμελίωσης άκαμπτης πλάκας θεμελίωσης επί πασσάλων μήκους 20m. Σε κάθε διάγραμμα, για κάθε έναν από τους τέσσερις τύπους αργίλου (NC,  $E=60\text{MPa}$ ,  $E=30\text{MPa}$ ,  $E=6\text{MPa}$ ) παρατίθεται συγκριτικά για τέσσερις περιπτώσεις μεταβαλλόμενης απόστασης  $S$  μεταξύ των πασσάλων η κατανομή της αξονικής δύναμης ενός ακραίου και ενός μεσαίου πασσάλου.

Αρχικά στο διάγραμμα 4.5.α), το οποίο αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο, η πρώτη παρατήρηση που μπορούμε να επισημάνουμε, συνοψίζεται στο γεγονός ότι ο ακραίος πάσσαλος παραλαμβάνει μεγαλύτερο φορτίο σε σχέση με το μεσαίο. Η πασσαλοομάδα ουσιαστικά συμπεριφέρεται σαν ένα δύσκαμπτο θεμέλιο. Παρατηρείται ακόμα, κυρίως για τον ακραίο πάσσαλο, ότι τα πρώτα μέτρα του πασσάλου αναλαμβάνουν ένα μεγάλο ποσοστό της δύναμης το οποίο σταδιακά μειώνεται. Πιο συγκεκριμένα, μετά από κάποιο μήκος η μείωση αυτή είναι αρκετά απότομη, από τη μορφή των καμπυλών διαφαίνεται ότι η τιμή αυτή είναι περίπου στα 10m. Θα μπορούσαμε λοιπόν να συμπεράνουμε ότι υπάρχει ένα 'κρίσιμο μήκος' για τους πασσάλους πέρα του οποίου η συμμετοχή τους στην παραλαβή του κατακόρυφου φορτίου παύει να είναι αποδοτική και σε σύγκριση με το κόστος κατασκευής τους θα μπορούσαμε να πούμε μάλλον απαγορευτική.

Στο ίδιο διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε την επίδραση της απόστασης  $S$  μεταξύ των πασσάλων στην κατανομή της δύναμης. Είναι φανερό ότι όσο μεγαλώνει η μεταξύ τους απόσταση μεγαλώνουν και οι διαστάσεις της πλάκας συνεπώς οι πάσσαλοι καλούνται να παραλάβουν μεγαλύτερο φορτίο. Επίσης αν κοιτάξουμε προσεκτικά τις καμπύλες του διαγράμματος, κυρίως για το μεσαίο πάσσαλο, θα παρατηρήσουμε ότι από την τιμή του λόγου  $z/D=12$  και κάτω οι καμπύλες αλλάζουν θέση. Ενώ μέχρι πρότινος αυτές με το μικρότερο  $S$  ήταν στην αριστερή πλευρά από το σημείο εκείνο και κάτω μεταβαίνουν στη δεξιά, ειδικότερα στην περίπτωση όπου  $S=3D$  όχι μόνο δεν παραμένει σταθερό αλλά αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί ο κάθε πάσσαλος καλείται να παραλάβει μέρος του φορτίου των γειτνιαζόντων αυτού πασσάλων το οποίο όπως εξηγείται και στη θεωρία κατανέμεται στο έδαφος υπό γωνία (βλ. Κεφάλαιο 2.5.3) και λόγω αλληλεπίδρασης επηρεάζει τους γειτονικούς πασσάλους. Έτσι η επιρροή της απόστασης  $S$  φαίνεται ξεκάθαρα κυρίως στο μεσαίο πάσσαλο ο οποίος δέχεται την μεγαλύτερη επιρροή λόγω της θέσης του και ιδιαίτερα για την περίπτωση  $S=3D$  όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων είναι μεγαλύτερη.

Στο επόμενο διάγραμμα 4.5.β) παρουσιάζεται το ίδιο σύστημα θεμελίωσης πάνω σε υπερστερεοποιημένη άργιλο  $E=60\text{MPa}$ . Σε αυτή την περίπτωση λόγω του πολύ δύσκαμπτου εδάφους η σχετική δυσκαμψία του συνολικού συστήματος μειώνεται, με αποτέλεσμα οι δύο πάσσαλοι (ακραίος και μεσαίος) να αναλαμβάνουν σχεδόν το ίδιο ποσοστό δύναμης. Έχουμε λοιπόν μια πιο ομοιόμορφη κατανομή τάσεων. Η μείωση της αναλαμβανόμενης δύναμης σε σχέση



με το βάθος γίνεται πολύ πιο απότομα σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση ενώ το βάθος στο οποίο γίνεται αισθητή η επιρροή της απόστασης  $S$  είναι λίγο πιο κάτω στα 14m. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση όπου έχουμε απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=3D$  τα φαινόμενα της αλληλεπίδρασης είναι τόσο έντονα ώστε από τα 14m και κάτω ο μεσαίος πάσσαλος φτάνει σε σημείο να αναλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό δύναμης από τον ακραίο. Επίσης παρατηρείται ότι οι πάσσαλοι στην αιχμή τους φτάνουν ανεξαρτήτως απόστασης  $S$  και θέσης στο ίδιο σημείο.

Μια ενδιαμέση περίπτωση σε σχέση με τις δύο προηγούμενες παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.6.α) το οποίο αναφέρεται σε μια ομοιογενή άργιλο με  $E=30\text{MPa}$ . Η επιρροή της απόστασης  $S$  στην περίπτωση αυτή ξεκινάει από τα 11m. Η μορφή των καμπύλων γραμμών μέχρι τα 11m μοιάζει πιο πολύ με την πρώτη περίπτωση κανονικά στερεοποιημένης αργίλου NC, ενώ από τα 11m και κάτω συμπίπτει με τη μορφή των καμπύλων για υπερστερεοποιημένη άργιλο. Και εδώ φαίνεται έντονα η αλληλεπίδραση πασσάλων- εδάφους για την περίπτωση που έχουμε απόσταση  $S=3D$ , ενώ και πάλι η αιχμή των πασσάλων τείνει σε κοινό σημείο.

Τέλος ακολουθεί το διάγραμμα 4.6.β) το οποίο αναφέρεται σε ομοιογενή άργιλο με  $E=6\text{MPa}$ , αρκετά εύκαμπτο έδαφος. Συνεπώς η σχετική δυσκαμψία του συνολικού συστήματος είναι αρκετά μεγάλη, με αποτέλεσμα ο λόγος της δύναμης που αναλαμβάνει ο ακραίος πάσσαλος σε σχέση με το μεσαίο να είναι πολύ μεγαλύτερος (0.9 έναντι 0.3). Για την περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι η επιρροή της απόστασης  $S$  εμφανίζεται νωρίτερα στα 10m. Η επιρροή αυτή εμφανίζεται κατά κύριο λόγο στο μεσαίο πάσσαλο του οποίου η αναλαμβανόμενη δύναμη αυξάνεται σημαντικά από τα 10m και κάτω τόσο για την περίπτωση απόστασης μεταξύ των πασσάλων  $S=3D$  όσο και για  $S=4D$ . Σε αντίθεση με τις παραπάνω δύο περιπτώσεις ομοιογενούς αργίλου εδώ ο λόγος της δύναμης που φτάνει στην αιχμή των πασσάλων διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση.

Συμπερασματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η κατανομή της αξονικής δύναμης τους πασσάλους εξαρτάται από τη θέση του πασσάλου καθώς και από τη σχετική δυσκαμψία συστήματος θεμελίωσης – εδάφους. Επίσης η δυσκαμψία του εδάφους παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιρροή της απόστασης μεταξύ των πασσάλων  $S$ , παρατηρήθηκε ότι όσο πιο εύκαμπτο είναι το έδαφος θεμελίωσης τόσο πιο κοντά στην επιφάνεια (σε μικρότερο βάθος) γίνεται διακριτή η αλληλεπίδραση του συστήματος πασσάλων-εδάφους.

### **5.3.2 Αξονική δύναμη πασσάλων 10m**

Στα διαγράμματα 4.7.α), 4.7.β), 4.8.α), 4.8.β) παρουσιάζεται η κατανομή του λόγου της αξονικής δύναμης  $F$  που αναλαμβάνει ο πάσσαλος μέσα στην πασσαλοομάδα ως προς τη δύναμη  $P$  του μεμονωμένου πασσάλου σε συνάρτηση με το βάθος  $z$  αδιαστατοποιημένο ως προς τη διάμετρο του πασσάλου  $D$ . Πρόκειται για τη περίπτωση συστήματος θεμελίωσης άκαμπτης πλάκας επί πασσάλων μήκους 10m. Σε κάθε διάγραμμα, για κάθε έναν από τους τέσσερις τύπους αργίλου (NC,  $E=60\text{MPa}$ ,  $E=30\text{MPa}$ ,  $E=6\text{MPa}$ ) παρατίθεται συγκριτικά για τέσσερις περιπτώσεις

μεταβαλλόμενης απόστασης  $S$  μεταξύ των πασσάλων η κατανομή της αξονικής δύναμης ενός ακραίου και ενός μεσαίου πασσάλου.

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο για συνολικό μήκος πασσάλων 20m από τα 10m περίπου και κάτω ανάλογα την περίπτωση διαπιστώθηκε μια μεταβολή στη συμπεριφορά των πασσάλων έναντι της αξονικής δύναμης. Στην περίπτωση αυτή όπου το συνολικό μήκος των πασσάλων είναι 10m έχουμε μια ελαφρώς τροποποιημένη συμπεριφορά.

Στο πρώτο διάγραμμα της ομάδας αυτής 4.7.α) το οποίο αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο NC παρατηρείται μια συμπεριφορά του συστήματος θεμελίωσης όμοια με αυτής ενός δύσκαμπτου θεμελίου, δηλαδή παραλαβή του μεγαλύτερου μέρους του φορτίου από τον ακραίο πάσσαλο. Η επίδραση της απόστασης μεταξύ των πασσάλων  $S$  γίνεται αισθητή στον μεσαίο πάσσαλο από τα πρώτα κίολας μέτρα του μήκους όπου παρατηρείται μια σταθερή κατανομή και ειδικότερα για την περίπτωση όπου  $S=3D$  αφού από τα 2m μέχρι τα 7m παρατηρείται μια μικρή αύξηση της αξονικής δύναμης. Για τους ακραίους πασσάλους η κατανομή της αξονικής δύναμης σε σχέση με το βάθος γίνεται πιο απότομα σε αντίθεση με τις περιπτώσεις της παραπάνω παραγράφου. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι ασχέτως με τον τρόπο που μεταφέρεται το φορτίο στο υπέδαφος ο λόγος της δύναμης που φτάνει στην αιχμή των πασσάλων είναι σταθερός για κάθε περίπτωση.

Αντίστοιχες είναι και οι παρατηρήσεις για το επόμενο διάγραμμα 4.7.β) που αναφέρεται σε ένα πολύ δύσκαμπτο στρώμα υπερστερεοποιημένου αργίλου με  $E=60\text{MPa}$ . Εδώ λόγω του ότι η σχετική δυσκαμψία του συστήματος θεμελίωσης μειώθηκε αισθητά ο ακραίος και ο μεσαίος πάσσαλος παραλαμβάνουν το ίδιο ποσοστό της επιβαλλόμενης αξονικής δύναμης.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να παρατηρήσουμε ότι όταν η μεταξύ απόσταση των πασσάλων κατά τη μια διεύθυνση αυξάνει, οδηγούμαστε σε πλάκα θεμελίωσης με μεγαλύτερες διαστάσεις, με αποτέλεσμα η πλάκα να αναλαμβάνει κάποιο ποσοστό του επιβαλλόμενου φορτίου, έτσι ώστε οι πάσσαλοι για την περίπτωση  $S=6D$  φέρουν μικρότερο ποσοστό αξονικής δύναμης σε σύγκριση με εκείνο που φέρουν οι πάσσαλοι οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε απόσταση  $S=3D$ .

Ομοίως και για το διάγραμμα 4.8.α) το οποίο αναφέρεται σε ομοιογενή άργιλο με  $E=30\text{MPa}$ , το οποίο αποτελεί μια ενδιάμεση περίπτωση σε σχέση με τις δύο παραπάνω. Και εδώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι καμπύλες για  $S=3D$  όπου είναι εμφανής η αλληλεπίδραση των γειτονικών πασσάλων, ενώ παρατηρούμε ότι τόσο ο ακραίος όσο και ο μεσαίος πάσσαλος τείνουν στην αιχμή τους σε ένα κοινό λόγο  $F/P$  για κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

Τέλος ακολουθεί το διάγραμμα 4.8.β) το οποίο αναφέρεται σε ένα πολύ εύκαμπτο έδαφος, ομοιογενής άργιλος με  $E=6\text{MPa}$ . Η περίπτωση αυτή είναι παρόμοια με αυτή της κανονικά στερεοποιημένου αργίλου NC του διαγράμματος 4.7.α). Αυτό που ίσως έχει ενδιαφέρον είναι ότι από ένα λόγο  $z/D=6$  οι πάσσαλοι ακραίοι και μεσαίοι συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο.

### 5.3.3 Δύναμη που αναλαμβάνει η πλάκα

Στα διαγράμματα 4.9.α), 4.9.β), 4.10.α), 4.10.β) παρουσιάζεται το ποσοστό του φορτίου που αναλαμβάνει η πλάκα  $P_{\text{πλάκας}}$  ως προς το συνολικό επιβαλλόμενο κατακόρυφο φορτίο  $P_{\text{ολικό}}$  σε συνάρτηση με το μήκος των πασσάλων αδιαστατοποιημένο ως προς τη διάμετρο του πασσάλου  $D$ . Πρόκειται για την περίπτωση συστήματος θεμελίωσης άκαμπτης πλάκας θεμελιώσεως επί πασσάλων μεταβαλλόμενου μήκους. Σε κάθε διάγραμμα, για κάθε έναν από τους τέσσερις τύπους αργίλου (NC,  $E=60\text{MPa}$ ,  $E=30\text{MPa}$ ,  $E=6\text{MPa}$ ) παρατίθεται συγκριτικά για τέσσερις περιπτώσεις μεταβαλλόμενης απόστασης  $S$  μεταξύ των πασσάλων οι αντίστοιχες κατανομές.

Στο διάγραμμα 4.9.α) το οποίο αναφέρεται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται το μήκος των πασσάλων τόσο αυξάνεται η συμμετοχή της πλάκας στην παραλαβή του κατακόρυφου φορτίου. Επίσης όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S$  τόσο αυξάνει το ποσοστό του φορτίου που μεταφέρεται στην πλάκα, κάτι που δικαιολογείται αφού αυξάνοντας το  $S$  μεγαλώνουν οι διαστάσεις της πλάκας ενώ συγχρόνως η διατομή των πασσάλων παραμένει σταθερή με αποτέλεσμα η πλάκα να διαθέτει μεγαλύτερη επιφάνεια για την ανάληψη του κατακόρυφου φορτίου. Ακόμα παρατηρείται ότι μέχρι κάποιο μήκος (7-8m) η αύξηση του φορτίου της πλάκας γίνεται απότομα ενώ από το μήκος αυτό και η αύξηση είναι δυσανάλογη και χωρίς ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον.

Ομοίως, το ίδιο παρατηρούμε και στα ακόλουθα διαγράμματα 4.9.β), 4.10.α) και 4.10.β) τα οποία αναφέρονται σε ομοιογενείς αργίλους με  $E=60\text{MPa}$ ,  $E=30\text{MPa}$  και  $E=20\text{MPa}$  αντιστοίχως, η μορφή και των τριών διαγραμμάτων δεν διαφέρει αισθητά.

Αυτό που ίσως έχει ενδιαφέρον να προσέξουμε είναι ότι το ποσοστό του φορτίου που αναλαμβάνει η πλάκα δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη δυσκαμψία του εδάφους, αλλά παραμένει σχεδόν σταθερό για κάθε περίπτωση και μεταξύ των τιμών 0.2 - 0.75. Επίσης, φαίνεται ότι για μήκος πασσάλων 20m ούτε η μεταξύ τους απόσταση παίζει σημαντικό ρόλο αφού το ποσοστό του φορτίου της πλάκας τείνει προς την τιμή 0.2.

## 5.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΑΣΕΩΝ

### 5.4.1 Σύστημα θεμελίωσης πλάκα-πάσσαλοι 20m

Στα διαγράμματα 4.11.α), 4.11.β), 4.12.α), 4.12.β) παρουσιάζεται η κατανομή της πρόσθετης κατακόρυφης τάσης  $\Delta\sigma_z$  σε στάθμη 2m κάτω από την αιχμή των πασσάλων μήκους 20m αδιαστατοποιημένη ως προς την επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση σχεδιασμού  $\sigma_d$  που αντιστοιχεί στο επιβαλλόμενο φορτίο  $P$ , συναρτήσει της θέσης  $x$  αδιαστατοποιημένης ως προς την εγκάρσια διάσταση της πασσαλοστοιχίας  $S$  (βλ. σχήμα 4.5.3). Η θέση των πασσάλων στα ακόλουθα διαγράμματα είναι στις θέσεις -1, 0, +1. Σε κάθε διάγραμμα, για κάθε μια από τις

τέσσερις περιπτώσεις για την απόσταση  $S$  μεταξύ των πασσάλων παρατίθενται συγκριτικά οι τέσσερις τύποι αργίλου (NC,  $E=60\text{MPa}$ ,  $E=30\text{MPa}$ ,  $E=6\text{MPa}$ ).

Στο διάγραμμα 4.11.α) το οποίο αναφέρεται σε απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=3D$ , παρατηρείται ότι στη στάθμη του εδάφους κάτω από την αιχμή των πασσάλων φτάνει μόλις το 40% με 60% της πρόσθετης κατακόρυφης τάσης ανάλογα με τον τύπο της αργίλου. Στις περιοχές του εδάφους μεταξύ των πασσάλων παρατηρείται κάποια μείωση των τάσεων το οποίο ήταν αναμενόμενο και δικαιολογείται από το συμβιβαστό των παραμορφώσεων, καθώς το ενδιάμεσο έδαφος συμπυκνώνεται με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια εκτόνωση της επιβαλλόμενης τάσης μεταξύ των πασσάλων. Επίσης παρατηρούμε ότι οι τάσεις σβήνουν καθώς απομακρυνόμαστε από την πασσαλοομάδα έως ότου μηδενιστούν φτάνοντας στα όρια του εδαφικού προσομοιώματος.

Η ίδια μορφή παρατηρείται και στα διαγράμματα 4.11.β), 4.12.α) και 4.12.β) που ακολουθούν για απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=4D$ ,  $S=5D$  και  $S=6D$  αντίστοιχα. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι όσο αυξάνει η απόσταση μεταξύ των πασσάλων η κατανομή της τάσης είναι πιο ομοιόμορφη. Οι απότομες μεταβολές των τιμών της τάσης στις θέσεις εκατέρωθεν των πασσάλων οφείλονται στον κάρναβο των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετρική ανάλυση, επειδή στα σημεία αυτά η πυκνότητα του κάρναβου αλλάζει εμφανίζεται συγκέντρωση τάσεων.

#### **5.4.2 Σύστημα θεμελίωσης πλάκα-πάσσαλοι 10m**

Στα διαγράμματα 4.13.α), 4.13.β), 4.14.α), 4.14.β) παρουσιάζεται η κατανομή της πρόσθετης κατακόρυφης τάσης  $\Delta\sigma_z$  σε στάθμη 2m κάτω από την αιχμή των πασσάλων μήκους 10m αδιαστατοποιημένη ως προς την επιβαλλόμενη κατακόρυφη τάση σχεδιασμού  $\sigma_d$  που αντιστοιχεί στο επιβαλλόμενο φορτίο  $P$ , συναρτήσει της θέσης  $x$  αδιαστατοποιημένης ως προς την εγκάρσια διάσταση της πασσαλοστοιχίας  $S$  (βλ. σχήμα 4.5.3). Η θέση των πασσάλων στα ακόλουθα διαγράμματα είναι στις θέσεις -1, 0, +1. Σε κάθε διάγραμμα, για κάθε μια από τις τέσσερις περιπτώσεις για την απόσταση  $S$  μεταξύ των πασσάλων παρατίθενται συγκριτικά οι τέσσερις τύποι αργίλου (NC,  $E=60\text{MPa}$ ,  $E=30\text{MPa}$ ,  $E=6\text{MPa}$ ).

Στο διάγραμμα 4.13.α) το οποίο αναφέρεται σε απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=3D$ , παρατηρείται ότι στη στάθμη του εδάφους κάτω από την αιχμή των πασσάλων τώρα που μειώθηκε το μήκος των πασσάλων φτάνει μόλις το 60% με 90% της πρόσθετης κατακόρυφης τάσης ανάλογα με τον τύπο της αργίλου. Στις περιοχές του εδάφους μεταξύ των πασσάλων όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο παρατηρείται κάποια απομείωση των τάσεων αυτών. Ακόμα αξίζει να σημειωθεί πως ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που έχουμε μαλακό έδαφος (άργιλος κανονικά στερεοποιημένη ή ομοιογενής με  $E=6\text{MPa}$ ) η τάση που φτάνει στην επιφάνεια είναι εφελκυστική (αρνητική) με αποτέλεσμα να προκαλεί ανασήκωμα στο έδαφος (βλ. παραμορφωμένο κάρναβο του παραρτήματος).

Την ίδια μορφή παρουσιάζουν και τα τελευταία τρία διαγράμματα 4.13.β), 4.14.α) και 4.14.β) που αναφέρονται σε απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $S=4D$ ,  $S=5D$  και  $S=6D$  αντίστοιχα. Όπως και προηγουμένως έτσι και σε αυτή την περίπτωση με τους πασσάλους μήκους 10m παρατηρείται ότι όταν αυξάνει η απόσταση μεταξύ

### Διερεύνηση της αλληλεπίδρασης πασσάλων - κοιτόστρωσης στις καθιζήσεις θεμελιώσεων

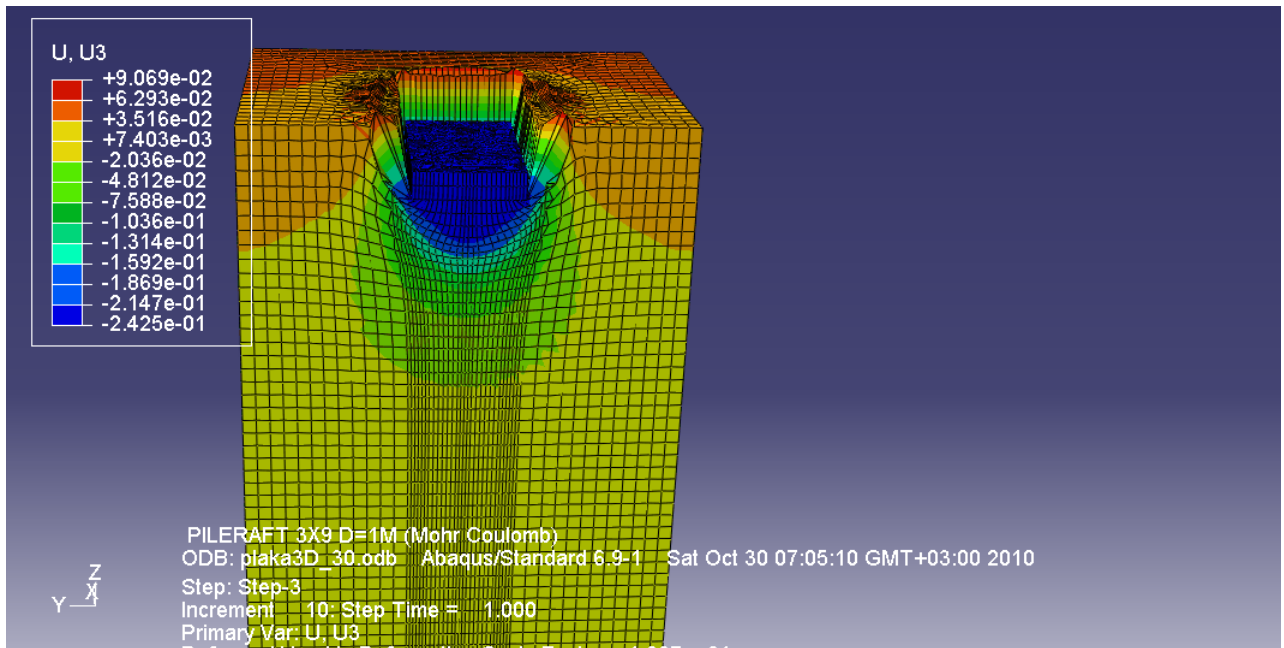
των πασσάλων (ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις 5D και 6D) η κατανομή των τάσεων είναι πιο ομοιόμορφη. Η επιφανειακή τάση και σε αυτές τις περιπτώσεις όταν το σύστημα θεμελίωσης εδράζεται σε μαλακό έδαφος καταλήγει εφελκυστική.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

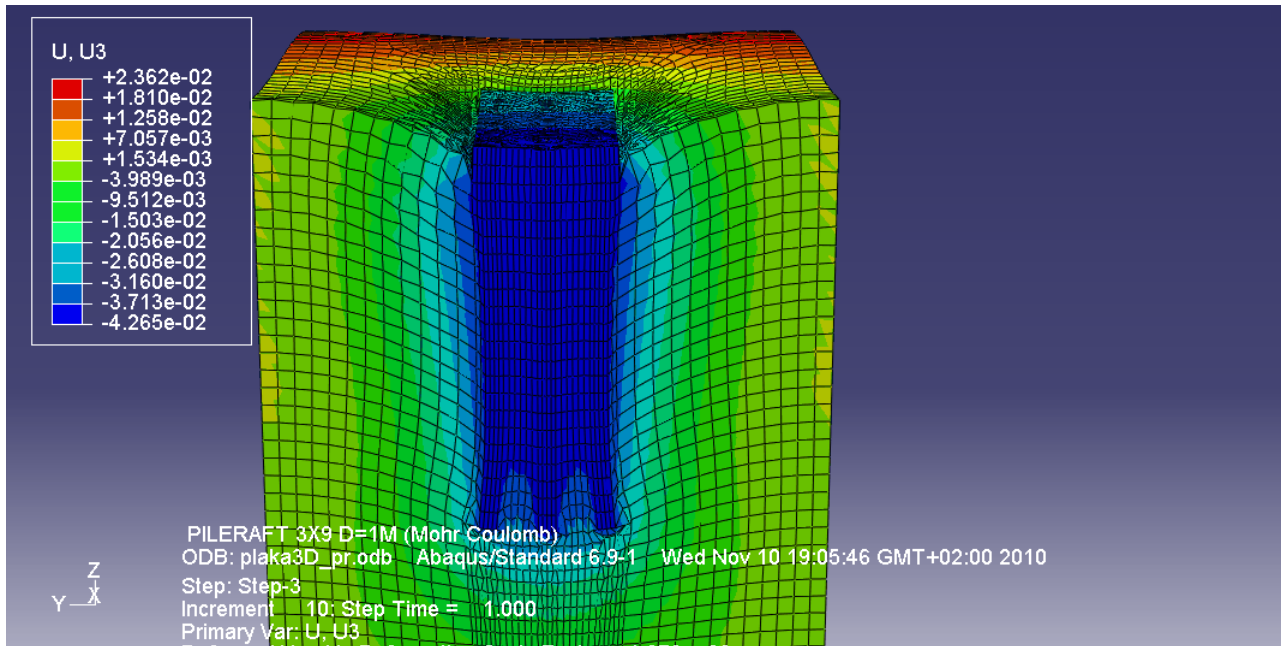
### **Εικόνες από το γραφικό περιβάλλον του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus**

#### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια δείγματα εικόνων από το γραφικό περιβάλλον του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus προκειμένου να έχουμε εποπτεία της ζώνης με τις αυξημένες πλαστικές παραμορφώσεις καθώς και της μορφής των καθιζήσεων που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση.

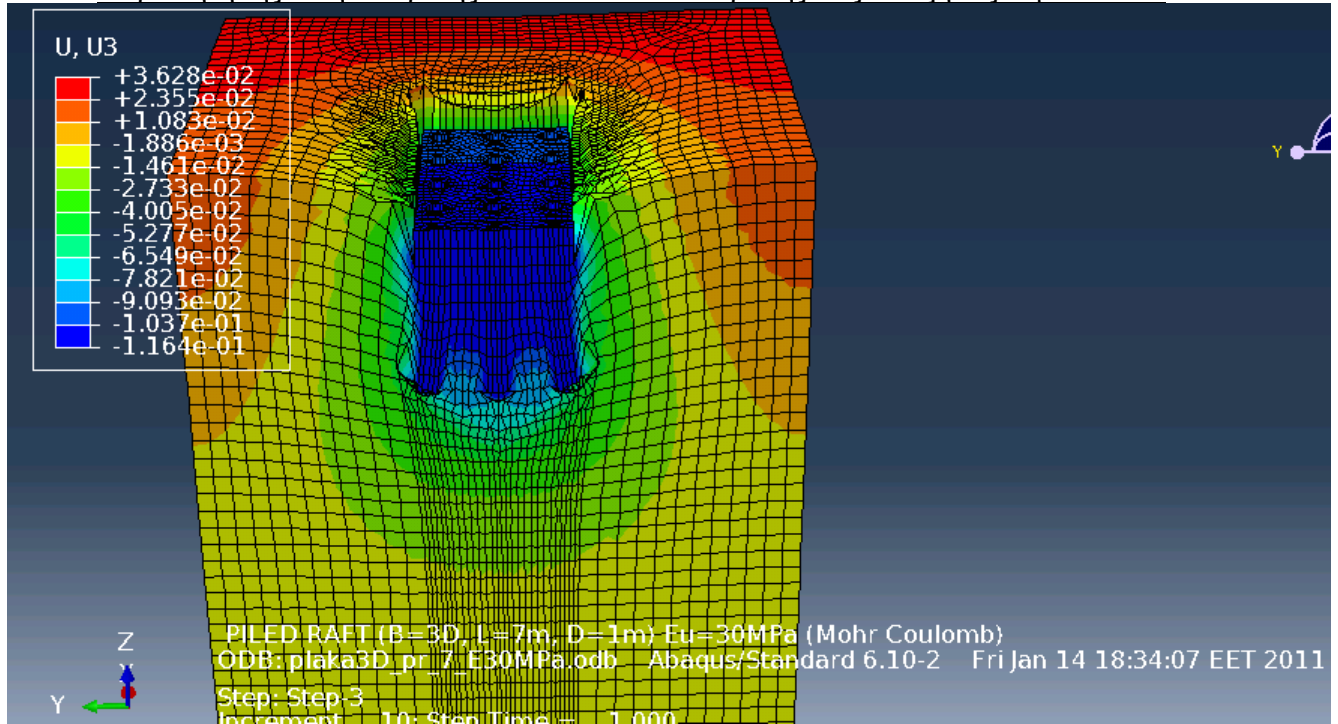


**Εικόνα 1 Παραμορφωμένος κώνναβος σε όρους κατακόρυφης μετακίνησης για πλάκα θεμελίωσης**

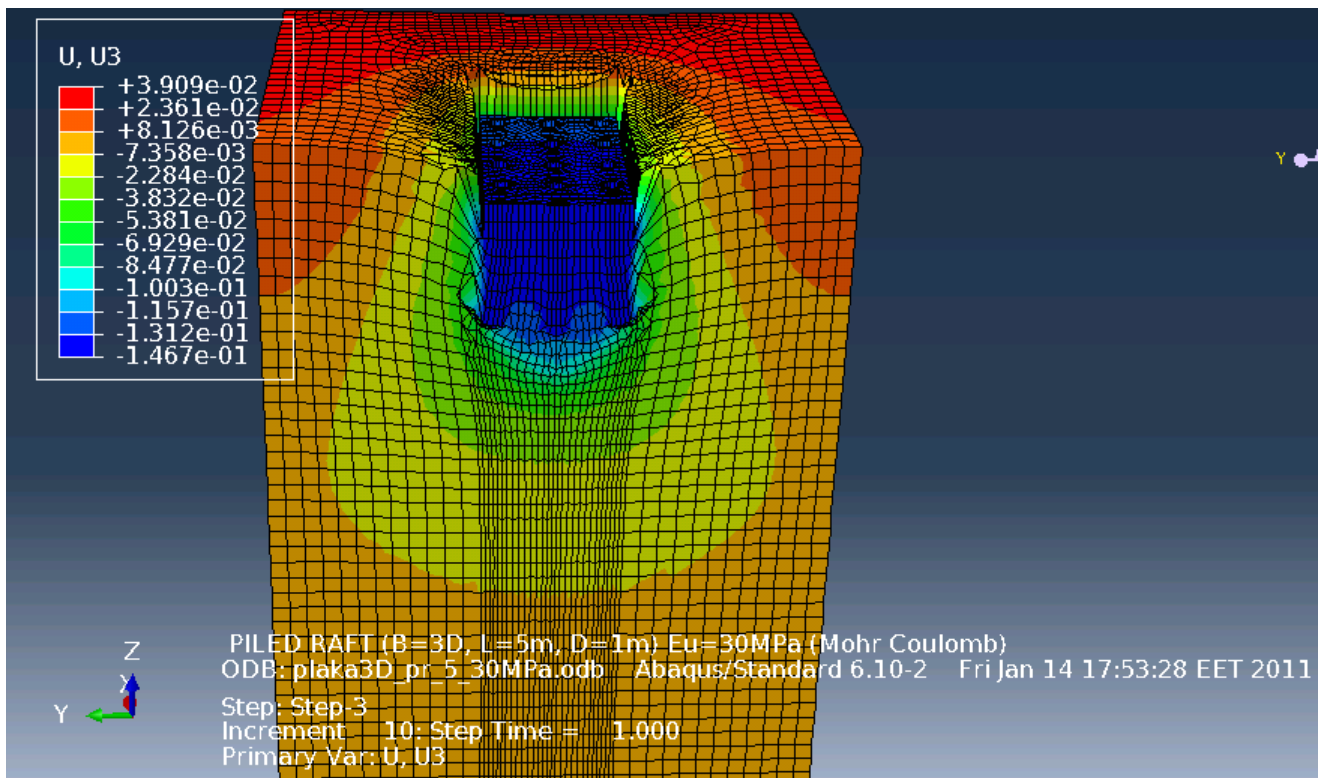


**Εικόνα 2 Παραμορφωμένος κώνναβος σε όρους κατακόρυφης μετακίνησης για σύστημα θεμελίωσης πλάκας επί πασσάλων μήκους 20m και μεταξύ τους απόστασης S=3D**

Διερεύνηση της αλληλεπίδρασης πασσάλων - κοιτόστρωσης στις καθιζήσεις θεμελιώσεων

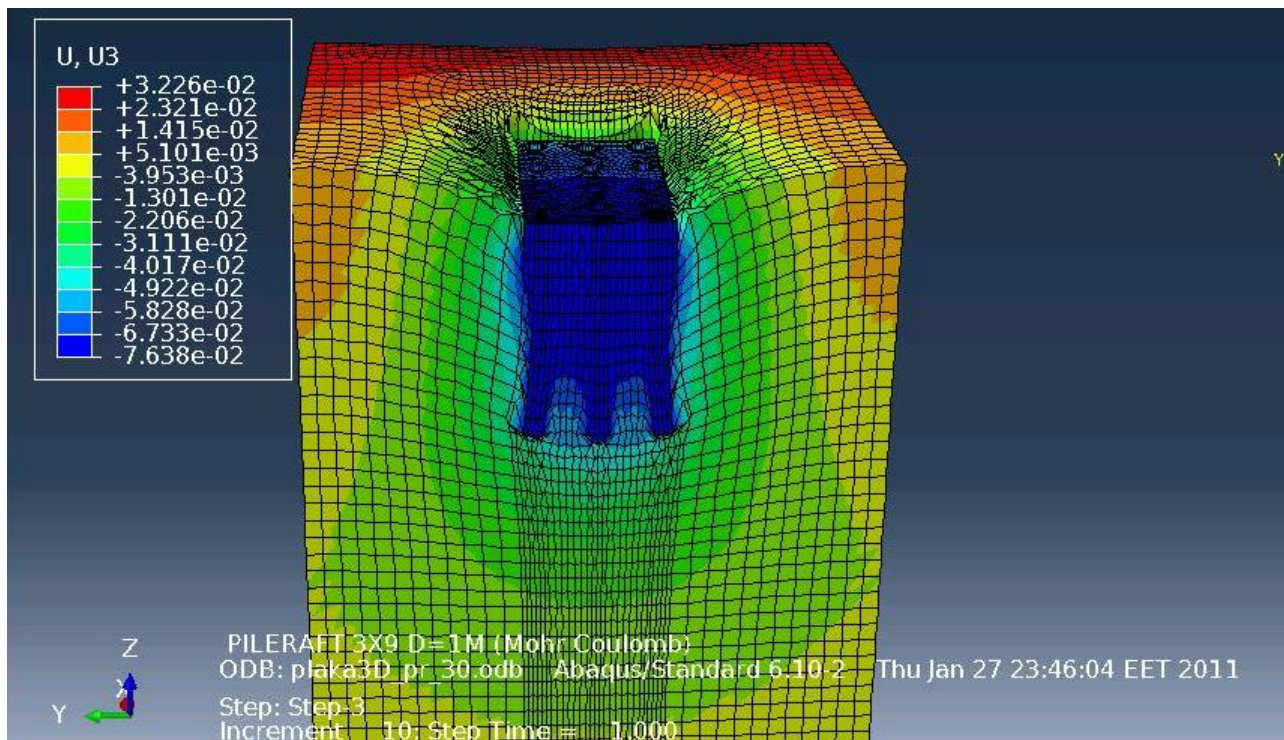


Εικόνα 3 Παραμορφωμένος κάναβος σε όρους κατακόρυφης μετακίνησης για σύστημα θεμελίωσης πλάκας επί πασσάλων μήκους 7m και μεταξύ τους απόστασης  $S=3D$



Εικόνα 4 Παραμορφωμένος κάναβος σε όρους κατακόρυφης μετακίνησης για σύστημα θεμελίωσης πλάκας επί πασσάλων μήκους 5m και μεταξύ τους απόστασης  $S=3D$





**Εικόνα 5 Παραμορφωμένος κάρναβος σε όρους κατακόρυφης μετακίνησης για σύστημα θεμελίωσης πλάκας επί πασσάλων μήκους 10m και μεταξύ τους απόστασης S=3D**

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Αναγνωστόπουλος Α., Παπαδόπουλος Β. (2004) «Θεμελιώσεις με πασσάλους», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
2. Καββαδάς Μ., Θεμελιώσεις Τεχνικών Έργων (2005)
3. Καββαδάς Μ., Στοιχεία Εδαφομηχανικής (2004)
4. Αναγνωστόπουλος Α. Γ., Παπαδόπουλος Β. Π. (2002) «Επιφανειακές θεμελιώσεις», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
5. Κωστόπουλος Σ. Δ. Γεωτεχνικές Κατασκευές Ι, Ανάλυση των Αρχών Σχεδιασμού και Κατασκευής, Εκδόσεις Ιων.
6. Παπαδρακάκης Μ., (2001) «Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
7. Poulos, H. G., and Davis, E. H. (1980). Pile foundation analysis and design. John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y.
8. Anagnostopoulos, C. and Georgiadis, M. (1998). A Simple Analysis of Piles in Raft Foundations”.
9. Brown, P.T. and Wiesner, T.J. (1975). The Behaviour of Uniformly Loaded Piled Strip Footings, Soils and Foundations.
10. Burland, J.B. (1995). Piles as Settlement Reducers. Keynote Address, 18<sup>th</sup> Italian Congress on Soil Mechanics, Pavia, Italy.
11. Burland, J.B., Broms, B.B. and de Mello, V.F.B. (1977). Behaviour of Foundations and Structures. Proc. 9 ICSMFE, Tokyo.
12. Butterfield, R. and Banerjee, P.K. (1971). The Elastic Analysis of Compressible Piles and Pile Groups. Geotechnique.
13. Clancy, P. and Randolph, M.F. (1993). Analysis and Design of Piled raft Foundations.
14. Davis, E.H. and Poulos, H.G. (1972). The Analysis of Piled Raft Systems
15. De Sanctis, L., Mandolini, A., Russo, G. and Viggiani, C. (2001). Some Remarks on the Optimum Design of Piled Rafts. Personal Communication of paper submitted for publication.
16. Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, C. and Reul, O. (1998). “Piled Raft Foundation – Interaction Between Piles and Raft”. Darmstadt Geotechnics, Darmstadt Univ. of Technology.
17. Kuwabara, F. (1989). An Elastic Analysis for Piled Raft Foundations in a Homogeneous Soil. Soils and Foundations.
18. Hooper, J.A. (1974). Review of Behaviour of Piled Raft Foundations. CIRIA, London.
19. Poulos, H.G. (1991). Analysis of Piled Strip Foundations. Comp. Methods & Advances in Geomechs., ed. Beer et al, Balkema, Rotterdam.
20. Poulos, H.G. (1989). “Pile Behaviour – Theory and Application”. Geotechnique.
21. Poulos, H.G. (1994). An Approximate Numerical Analysis of Pile-Raft Interaction. Int. J. NAM Geomechs.
22. Poulos, H.G. (2000). Pile-Raft Interaction – Alternative Methods of Analysis. Developments in Theor. Geomechanics, Ed. D.W. Smith, & J.P. Carter, Balkema, Rotterdam.

23. Poulos, H.G. (2001). Piled Raft Foundations – Design and Applications. Geotechnique.
24. Randolph , M.F. (1983). Design of Piled Foundations. Cambridge Univ. Eng. Dept.
25. Randolph , M.F. (1994). Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts. S.O.A. Report, New Delhi.
26. Russo, G. (1998). Numerical Analysis of Piled Rafts.
27. Russo, G. and Viggiani, C. (1998). “Factors Controlling Soil-Structure Interaction for Piled Rafts”. Darmstadt Geotechnics, Darmstadt Univ. of Technology.
28. Small, J.C. and Zhang, H.H. (2000). Piled Raft Foundations Subjected to General Loadings. Developments in Theor. Geomechanics, Ed. D.W. Smith, & J.P. Carter, Balkema, Rotterdam.
29. Van Impe, W.F. and Lungu, I. (1996). Technical Report on Settlement Prediction Methods for Piled Raft Foundations. Ghent Univ., Belgium.