



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Μπαρέκα Σπυριδούλα
Πολιτικός Μηχανικός Π.Θ.

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΟΜΑΔΑΣ ΠΑΣΣΑΛΩΝ
ΥΠΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΒΟΛΟΣ 2007



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Μπαρέκα Σπυριδούλα
Πολιτικός Μηχανικός Π.Θ.

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΟΜΑΔΑΣ ΠΑΣΣΑΛΩΝ
ΥΠΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

- | | |
|-------------------------|------------------------------------------|
| 1. Κωμοδρόμος Αιμίλιος | Αν. Καθηγητής Π.Θ. (Επιβλέπων Καθηγητής) |
| 2. Γεωργιάδης Μιχάλης | Καθηγητής Α.Π.Θ. |
| 3. Ντακούλας Παναγιώτης | Αν. Καθηγητής Π.Θ. |

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

- | | |
|----------------------------|-----------------------------------------|
| 1. Κωμοδρόμος Αιμίλιος | Αν. Καθηγητής Π.Θ. (Πρόεδρος Επιτροπής) |
| 2. Αθανασόπουλος Γεώργιος | Καθηγητής Π.Π. |
| 3. Αναγνωστόπουλος Χρήστος | Καθηγητής Α.Π.Θ. |
| 4. Γεωργιάδης Μιχάλης | Καθηγητής Α.Π.Θ. |
| 5. Γκαζέτας Γεώργιος | Καθηγητής Ε.Μ.Π. |
| 6. Ντακούλας Παναγιώτης | Αν. Καθηγητής Π.Θ. |
| 7. Χατζηγώγος Θεόδωρος | Καθηγητής Α.Π.Θ. |

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αιμίλιο Κωμοδρόμο, η συνεχής καθοδήγηση του οποίου αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής. Η αδιάκοπη παρουσία του, η ηθική και επιστημονική υποστήριξη του, οι γνώσεις που μου προσέφερε απλόχερα, το ευχάριστο και δημιουργικό περιβάλλον εργασίας που μου διέθεσε καθ' όλη τη διάρκεια των τεσσάρων τελευταίων χρόνων, θα συνθέτουν πάντοτε ένα από τα πιο αξιομνημόνευτα τμήματα της εκπαίδευσης μου.

Θερμά ευχαριστώ επίσης τα μέλη της τριμελούς επιτροπής για τις εύστοχες παρατηρήσεις και διορθώσεις τους, οι οποίες συνέβαλαν στη βελτίωση της διατριβής, καθώς επίσης και τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς επιτροπής για την επιστημονική συνεργασία κατά την ανασκόπηση και παρουσίαση της.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και όλους τους φίλους που στάθηκαν δίπλα μου στη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου, χωρίς την ηθική συμπαράσταση των οποίων, δε θα είχε φτάσει σε πέρας. Η υπομονή τους και η αβίαστη διαθεσιμότητα τους σε στιγμές κούρασης και απογοήτευσης με δυνάμωσαν και με ενθάρρυναν να συνεχίσω. Εύχομαι να μπορέσω να τους το ανταποδώσω διπλά.

Σπυριδούλα Μπαρέκα

στη μητέρα μου,
είναι ο λόγος που έφτασα ως εδώ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Εισαγωγή.....	1
2. Απόκριση μεμονωμένου πασσάλου	
2.1 Γενικά.....	7
2.2 Οριακό και επιτρεπόμενο φορτίο	
2.2.1 Γενικά.....	9
2.2.2 Γεωτεχνικές Μέθοδοι.....	12
2.2.3 Γερμανικός κανονισμός DIN 4014.....	25
2.3 Υπολογισμός καθιζήσεων.....	31
2.4 Προσδιορισμός απόκρισης με χρήση αριθμητικών μεθόδων	
2.4.1 Προσέγγιση με χρήση καμπυλών t-z.....	36
2.4.2 Προσέγγιση με χρήση τριδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης..	40
2.5 Δοκιμή στατικής αξονικής φόρτισης.....	44
3. Ανάλυση απόκρισης ομάδας πασσάλων	
3.1 Γενικά.....	53
3.2 Απλοποιητικές μέθοδοι.....	55
3.3 Ανάλυση με χρήση αριθμητικών μεθόδων.....	60
4. Διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων σε εδαφικό σχηματισμό	
4.1 Γενικά.....	65
4.2 Συσχέτιση της απόκρισης ομάδας πασσάλων με την απόκριση μεμονωμένου πασσάλου.....	66
4.3 Πλαίσιο προσομοίωσης- Αριθμητική ανάλυση.....	69
4.4 Απόκριση πασσάλων σε αργιλικό έδαφος	
4.4.1 Μεμονωμένος Πάσσαλος.....	74
4.4.2 Φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων.....	76
4.4.3 Δυσκαμψία ομάδας πασσάλων.....	80
4.4.4 Κατανομή του φορτίου στους πασσάλους της ομάδας.....	85
4.4.5 Πρόβλεψη απόκρισης ομάδας πασσάλων.....	90
4.5 Απόκριση πασσάλων σε αμμώδες έδαφος	
4.5.1 Μεμονωμένος Πάσσαλος.....	97
4.5.2 Φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων.....	99
4.5.3 Δυσκαμψία ομάδας πασσάλων.....	102
4.5.4 Κατανομή του φορτίου στους πασσάλους της ομάδας.....	106
4.5.5 Πρόβλεψη απόκρισης ομάδας πασσάλων.....	110
4.6 Πρόβλεψη της απόκρισης για διστρωματικά εδάφη.....	112

5. Διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων με έδραση σε βραχώδες υπόβαθρο	
5.1 Γενικά	117
5.2 Παραμετρική αριθμητική ανάλυση	120
5.3 Αριθμητικά αποτελέσματα	
5.3.1 Απόκριση ομάδας και μεμονωμένου πασσάλου	122
5.3.2 Διερεύνηση κατανομής του φορτίου	124
6. Αποτίμηση επιπτώσεων της δράσης αρνητικών τριβών σε πασσάλους	
6.1 Γενικά	133
6.2 Τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση	
6.2.1 Μεμονωμένος πάσσαλος	135
6.2.2 Ανάλυση ομάδας πασσάλων	145
6.3 Συμπεράσματα	153
7. Σύνοψη – συμπεράσματα - προτάσεις	
7.1 Σύνοψη – συμπεράσματα	155
7.2 Πρόταση επέκτασης της ανάλυση σε ομάδες πασσάλων με εύκαμπτο κεφαλόδεσμο	166
Extended summary	173
Βιβλιογραφία	181

Παράρτημα Α: Καμπύλες απόκρισης ομάδων πασσάλων

Παράρτημα Β: Διαγράμματα κατανομής του επιβαλλόμενου φορτίου στους επί μέρους πασσάλους της ομάδας

Παράρτημα Γ: Σύγκριση καμπυλών απόκρισης βάσει αποτελεσμάτων τριδιάστατης ανάλυσης και προταθείσας εξίσωσης

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

A	: Εμβαδόν διατομής του πασσάλου
A_b	: Εμβαδόν βάσης του πασσάλου
γ	: Ειδικό βάρος του εδάφους
B	: Πλάτος της ομάδας των πασσάλων
C	: Περίμετρος πασσάλου
c	: Συνοχή του εδάφους
c_a	: Συνάφεια στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους
c_r	: Αστράγγιστη διατμητική αντοχή αναζυμωμένων δοκιμίων
c_u	: Συνοχή του εδάφους στην αιχμή του πασσάλου υπό αστράγγιστες συνθήκες
c_{uk}	: Χαρακτηριστική τιμή αστράγγιστης διατμητικής αντοχής
δ	: Γωνία τριβής στη διεπιφάνεια πασσάλου - εδάφους
Δu_{si}	: Διάνυσμα σχετικής διατμητικής μετατόπισης
d	: Απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο διαδοχικών πασσάλων
D	: Διάμετρος του πασσάλου
D_f	: Διάμετρος της διευρυμένης βάσης του πασσάλου
E	: Μέτρο ελαστικότητας
F_n	: Ορθή τάση στη διεπιφάνεια
F_s	: Διατμητική τάση στη διεπιφάνεια
z_c	: Κρίσιμο βάθος στις άμμους
z_d	: Ανηγγμένη καθίζηση του μεμονωμένου πασσάλου ως προς τη διάμετρο του
η	: Συντελεστής απόδοσης ομάδας πασσάλων
I	: Διορθωτικός συντελεστής καθίζησης
I_c	: Δείκτης συνεκτικότητας
I_o	: Συντελεστής καθίζησης για ασυμπίεστο πάσσαλο
K_G	: Δυσκαμψία ομάδας πασσάλων
K_{sL}	: Δυσκαμψία μεμονωμένου πασσάλου
K_s	: Συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων
K_o	: Συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας
λ	: Αριθμός των πασσάλων στην ομάδα
L	: Μήκος πασσάλου
n	: Συντελεστής ασφάλειας κατά DIN
n_c	: Αριθμός των στηλών των πασσάλων που έχει η ομάδα
n_n	: Συνολικός αριθμός των πασσάλων που αποτελούν την ομάδα
n_r	: Αριθμός των σειρών των πασσάλων που έχει η ομάδα
n_p	: Αριθμός των πασσάλων μιας σειράς

N_m	: Μέσο αξονικό φορτίο
ξ	: $\arctan (D/d)$ σε μοίρες
OCR	: Βαθμός υπερστερεοποίησης
P	: Φορτίο που ασκείται στους πασσάλους
q_{bk}	: Εμπειρική τιμή αντίστασης αιχμής
q_c	: Αντίσταση αιχμής στατικού πενετρομέτρου
q_{ck}	: Χαρακτηριστική τιμή αντοχής διείδυσης κώνου
q_{sIk}	: Εμπειρική τιμή οριακής παράπλευρης αντίστασης
q_u	: Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη
q_{uk}	: Χαρακτηριστική μονοαξονική θλιπτική αντοχή q_{uk}
Q_u	: Φέρουσα ικανότητα μεμονωμένου πασσάλου
Q_{ug}	: Φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων
R	: Οριακή αντίσταση πασσάλου
R_a	: Συντελεστής επαύξησης καθιζήσεων
R_b	: Οριακή αντίσταση αιχμής
R_s	: Οριακή παράπλευρη αντίσταση
RG	: Συντελεστής απόδοσης της δυσκαμψίας
S	: Καθίζηση πασσάλου
s	: Ανηγμένη αξονική απόσταση πασσάλων ως προς τη διάμετρο τους
S_{mLs}	: Καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου
S_{mG}	: Καθίζηση της ομάδας των πασσάλων
S_{ns}	: Ανηγμένη καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου
S_{nG}	: Ανηγμένη καθίζηση της ομάδας των πασσάλων
σ_n	: Ορθή τάση στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου
σ_v	: Κατακόρυφη γεωστατική τάση
σ'_v	: Ενεργός κατακόρυφη γεωστατική τάση
σ_{vb}	: Κατακόρυφη τάση στη βάση του πασσάλου
σ'_{vb}	: Ενεργός κατακόρυφη τάση στη βάση του πασσάλου
τ_a	: Διατμητική αντοχή παράπλευρης επιφάνειας
φ_a	: Γωνία τριβής μεταξύ πασσάλου και εδάφους
φ'_a	: Γωνία τριβής μεταξύ πασσάλου και εδάφους υπό συνθήκες στράγγισης
φ	: Γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
φ'	: Ενεργός γωνία τριβής για αργιλικό σχηματισμό
φ'_1	: Γωνία εσωτερικής τριβής πριν την εγκατάσταση του πασσάλου
N	: Αριθμός κτύπων της τυποποιημένης δοκιμής διείδυσης
N_c	
N_y	: Συντελεστές φέρουσας ικανότητας
N_q	
w	: Φυσική υγρασία
w_L	: Όριο υδαρότητας
w_P	: Όριο πλαστικότητας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Η εφαρμογή των θεμελιώσεων με πασσάλους αποτέλεσε λύση έδρασης σε προβληματικά εδάφη από αρχαιοτάτων χρόνων. Σύντομη ιστορική αναδρομή μπορεί να καταδείξει ότι σε εδάφη με μικρή διατμητική αντοχή ή/και μεγάλη συμπίεστικότητα η λύση αυτή έτυχε ευρείας εφαρμογής από διάφορους χρονικά αναπτυχθέντες πολιτισμούς σε όλο το εύρος της υδρογείου.



Φώτο 1.1 Θεμελίωση με πασσάλους κατά τη νεολιθική εποχή.

Η χρήση ξύλινων πασσάλων ανάγεται ήδη από τη Νεολιθική εποχή, όπου οι άνθρωποι επέλεξαν, για λόγους επικοινωνίας, άμυνας και διαβίωσης, ως στρατηγικά σημεία εγκατάστασης τους περιοχές γύρω από ποταμούς και λίμνες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν, κατά την εποχή αυτή, οι κάτοικοι των λιμνών της Ελβετίας, της βόρειας Ιταλίας, της Αυστρίας και της ανατολικής Γαλλίας,

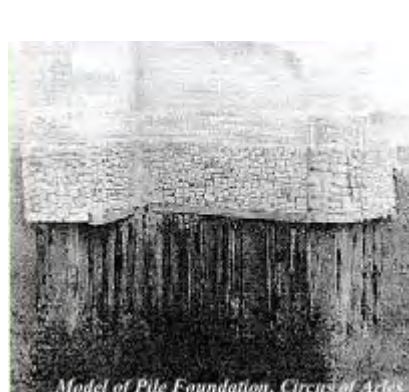
οι οποίοι επέλεξαν τη λύση αυτή για αμυντικούς κυρίως λόγους (στο αρχαίο χωριό Wangen της Ελβετίας χρησιμοποιήθηκαν 50000 πάσσαλοι).

Παρόμοιες λύσεις εφαρμόζονται ταυτόχρονα και στην άλλη πλευρά του Ατλαντικού από τους προγόνους των Αζτέκων στο Μεξικό, όπου ανακαλύφθηκαν οικισμοί σε λιμναίες περιοχές οι οποίοι κατασκευάστηκαν επίσης με χρήση ξύλινων πασσάλων. Τη μέθοδο αυτή εφάρμοσαν και οι αρχαίοι Έλληνες μηχανικοί κατά την εκστρατεία του Μεγάλου Αλέξανδρου καθώς και οι αρχαίοι Κινέζοι μηχανικοί για τη ζεύξη ποταμών. Η λύση αυτή χρησιμοποιήθηκε επίσης για τη θεμελίωση υδραγωγείων από τους αρχαίους Έλληνες και τους Ρωμαίους, ενώ απετέλεσε την κατ'εξοχήν λύση για την έδραση γεφυρών στην κεντρική Ευρώπη κατά τη ρωμαϊκή εποχή. Σημαντική επίσης αναφορά αποτελεί ο ρωμαϊκός ιππόδρομος στη Γαλλία, ο οποίος θεμελιώθηκε σε εμπηγνυόμενους πασσάλους και, σύμφωνα με τις αρχαιολογικές καταγραφές, διατηρήθηκε σε πολύ καλή κατάσταση παρά τη χιλιετή και πλέον ιστορία του. Πιο σύγχρονο παράδειγμα αποτελεί η πόλη του Άμστερνταμ, η κατασκευή της οποίας ανάγεται στις αρχές του δέκατου τέταρτου αιώνα. Η πόλη περιλαμβάνει περισσότερες

από 300 μικρές γέφυρες στα πολυάριθμα κανάλια της, οι οποίες εδράζονται σε πασσάλους. Χαρακτηριστικό επίσης παράδειγμα αποτελεί η πόλη της Βενετίας, η οποία κατασκευάστηκε στο ελώδες δέλτα του ποταμού Πάδου ώστε να προστατευθεί από τους εισβολείς της ανατολικής Ευρώπης. Η Βενεζουέλα, ή μικρή Βενετία, βαπτίστηκε έτσι από ισπανούς εξερευνητές οι οποίοι παρατήρησαν μεγάλη ομοιότητα στον τρόπο κατασκευής των οικισμών από τους ινδιάνους κατοίκους της (καλύβες επί πασσάλων στις όχθες της λίμνης Μαρακάϊμπο). Εφαρμογή της λύσης βρίσκει κανείς και στον ελληνικό χώρο κατά τους προηγούμενους αιώνες (κάστρο της Λευκάδας), καθώς και στις αρχές του αιώνα στην πόλη της Θεσσαλονίκης όταν επεκτάθηκε η πόλη προς την περιοχή της παλιάς παραλίας και την περιοχή όπου προϋπήρξε το βυζαντινό λιμάνι. Η διαχρονική λοιπόν και ευρεία εφαρμογή της λύσης χαρακτηρίζει το ενδιαφέρον και την αποτελεσματικότητα της και σύμφωνα με τους Fleming et al. (1992) *‘... η αρχαιότητα της μεθόδου εγγυάται την αξία της..’*.



Φωτό 1.2 Άποψη ρωμαϊκού υδραγωγείου.



Φωτό 1.3 Θεμελίωση του Ρωμαϊκού Ιπποδρόμου.

Η μέθοδος κατασκευής των πασσάλων ήταν αρχικά χειρονακτική, είτε με έμπηξη είτε με ανόρυξη οπών και πλήρωση τους με αμμοχαλικώδη υλικά. Παρ' ότι οι προσεγγίσεις αυτές εξακολουθούν να εφαρμόζονται, η ανάπτυξη της τεχνολογίας κατά τη βιομηχανική επανάσταση του δεκάτου ένατου αιώνα επέτρεψε την αποτελεσματικότερη και ευρύτερη εφαρμογή της. Ως πρόδρομος εφαρμογή των σημερινών μεθόδων θα μπορούσε να θεωρηθεί η μέθοδος έμπηξης πασσάλων από τον Christofer Polhem το 1740. Η χρήση χαλύβδινων πασσάλων πρωτοεμφανίστηκε κατά τις αρχές του δέκατου ένατου αιώνα, ενώ ακολούθησε κατά τις αρχές του εικοστού αιώνα κατασκευή πασσάλων σκυροδέματος. Η βιομηχανική επανάσταση επέτρεψε τη χρήση νέων μορφών ενέργειας (μηχανές ατμού αρχικά και εσωτερικής καύσης στη συνέχεια) και διευκόλυνε καθοριστικά την κατασκευή των πασσαλοθεμελιώσεων.

Οι τεράστιες δυνατότητες κατασκευής μηχανολογικού εξοπλισμού υψηλών αποδόσεων έδωσαν νέα ώθηση στην υλοποίηση θεμελιώσεων με πασσάλους με αποτέλεσμα η λύση αυτή να μην εφαρμόζεται μόνο σε προβληματικά εδάφη αλλά και σε περιπτώσεις απαιτήσεων ανάληψης μεγάλων φορτίων ανωδομών. Χαρακτηριστική

περίπτωση αποτελεί η κατασκευή υψηλών κτηριακών έργων σε εμπορικά κέντρα και κτήρια γραφείων, ενώ ευρύτατη υπήρξε η χρήση κατά την κατασκευή εξέδρων πετρελαίου.

Το νέο αυτό πεδίο, σε συνδυασμό με την εξάλειψη πρακτικά των κατασκευαστικών προβλημάτων ακόμη και για πασσάλους μεγάλου βάθους, οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης μεθοδολογιών υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας πασσάλων και της απόκρισης τους. Κατά τις πρώτες προσεγγίσεις εφαρμόζονται εμπειρικές κατ'εξοχήν σχέσεις. Οι πρώτες απλοποιητικές προσεγγίσεις του προβλήματος αποσκοπούσαν ουσιαστικά στον έλεγχο θραύσης του στοιχείου θεμελίωσης χωρίς να δίνουν τις αναγκαίες κινηματικές πληροφορίες που επηρεάζουν την απόκριση και την τυχόν ανάπτυξη καταναγκασμών στην ανωδομή. Για το λόγο αυτό, ακόμα και την εποχή που οι υπολογιστικές μέθοδοι δεν ήταν σε θέση να δώσουν τις ανωτέρω πληροφορίες, η αναγκαιότητα γνώσης τους οδήγησε στη διεξαγωγή δοκιμαστικών φορτίσεων. Στη συνέχεια εντούτοις, όπου οι υπολογιστικές απαιτήσεις αυξάνονται και η απόκριση της ανωδομής κάτω από τη δράση διαφόρων τύπων φορτίων καθορίζεται σημαντικά από την αλληλεπίδραση της θεμελίωσης με την ανωδομή, η εμβάθυνση ανάλυσης της απόκρισης των θεμελιώσεων με πασσάλους κρίνεται απαραίτητη.

Κατά τα τελευταία τριάντα χρόνια και ειδικότερα κατά την τελευταία δεκαετία έχουν επιλυθεί ή προσεγγισθεί με ικανοποιητικό τρόπο διάφορα προβλήματα αναφορικά με την απόκριση πασσάλων υπό οριζόντια ή κατακόρυφη φόρτιση. Σημαντικός αριθμός, ωστόσο, παραμένει και συχνά απαιτεί μεγαλύτερη ακρίβεια προσέγγισης από αυτήν που η επιστήμη είναι σε θέση σήμερα, με σχετική ασφάλεια πρόβλεψης, να διαθέσει. Η παράλληλη ανάπτυξη άμεσα συσχετιζόμενων επιστημών, όπως η εμβάθυνση στη γεωτεχνική μηχανική, η συνεχής βελτίωση των υπολογιστικών μεθόδων και οι υπολογιστικές δυνατότητες των ηλεκτρονικών υπολογιστών, έδωσε νέα ώθηση στις δυνατότητες πρόβλεψης της απόκρισης των πασσάλων. Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη ειδικών οργάνων αυτόματης και πολύ ακριβούς καταγραφής εντατικών και κινηματικών μεγεθών επέτρεψε την εκτέλεση, είτε σε μικρής κλίμακας δοκιμές σε εργαστήριο είτε σε μεγάλης κλίμακας στο πεδίο, πειραμάτων και συλλογή πληροφοριών για τον έλεγχο και βελτίωση αριθμητικών προσεγγίσεων και εμπειρικών σχέσεων. Η επιστημονική πρόοδος σε συνδυασμό με τη συνεχή αύξηση της υπολογιστικής ισχύος οδήγησαν στη βελτίωση των μεθόδων προσέγγισης του προβλήματος. Πολύ σημαντική πρόοδος στο πρόβλημα της απόκρισης σημειώθηκε με την εφαρμογή της μεθοδολογίας των ελατηριακών σταθερών, των οποίων η ευρεία χρήση σε συνδυασμό με την εμπειρία που αποκτήθηκε από τη διεξαγωγή αντίστροφων αναλύσεων τις κατέστησε ιδιαίτερα χρήσιμες και αξιόπιστες. Η περαιτέρω εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων επέτρεψε τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών για την προσέγγιση του προβλήματος. Η μέθοδος των αριθμητικών μεθόδων έρχεται συμπληρωματικά να καλύψει δύο ουσιαστικά κενά που αφήνουν πρακτικά ανέπαφα οι ανωτέρω μεθοδολογίες. Το πρώτο αφορά στην εντατική και κινηματική κατάσταση του περιβάλλοντος εδάφους, όπου και όταν οι πληροφορίες αυτές κρίνονται αναγκαίες. Το δεύτερο αναφέρεται στον ακριβή προσδιορισμό της

απόκρισης ομάδας πασσάλων, πεδίο με αυξημένο ενδιαφέρον για τις θεμελιώσεις με πασσάλους τόσο σε πλευρική όσο και σε αξονική φόρτιση και τη μεταβολή της, συναρτήσει του εύρους της καθίζησης. Η δυσκολία στον προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας πασσάλων οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των μελών της και στη μεταφορά φορτίου από τον ένα πάσσαλο στον άλλο μέσω του εδάφους. Οι συνέπειες της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων μιας ομάδας αποτέλεσαν αντικείμενο έρευνας για πολλούς ερευνητές στο παρελθόν. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες των Poulos and Davis (1980), Poulos (1989), Lee (1993), Randolph and Wroth (1978), Randolph (1994), Horikoshi and Randolph (1999), Comodromos et al. (2003) και Comodromos (2004). Ειδικότερη ανάλυση στην ανάπτυξη του έργου τους γίνεται στα αντίστοιχα κεφάλαια της διατριβής.

Η απόκριση ομάδας πασσάλων και ο προσδιορισμός των συνεπειών της αλληλεπίδρασης υπό κατακόρυφη φόρτιση αποτελούν το κύριο αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Ειδικότερα, στόχο της διατριβής αποτελεί κατ'αρχήν ο προσδιορισμός του οριακού και επιτρεπόμενου φορτίου ομάδας πασσάλων για λόγους σύγκρισης με τις διεθνώς προτεινόμενες εμπειρικές κατά βάση μεθοδολογίες. Η απόκριση ομάδας πασσάλων αποτελεί σαφώς πιο δύσκολο αντικείμενο (ούτως ή άλλως εμπειρέχει και το προηγούμενο στάδιο) και εξετάζεται σε δεύτερο στάδιο. Το ενδιαφέρον εστιάζεται ιδιαίτερα στη δυσκαμψία ομάδας πασσάλων, που συνήθως αποτελεί το πιο ενδιαφέρον στοιχείο για την προσομοίωση της απόκρισης των πασσαλοθεμελιώσεων με καθοριστικές επιπτώσεις στο σχεδιασμό της προς θεμελίωση ανωδομής. Η αποτίμηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης στους επιμέρους πασσάλους αποτελεί επίσης ιδιαίτερα ενδιαφέρον σημείο, καθ'ότι καθορίζει το σχεδιασμό της θεμελίωσης και προσδιορίζει τα μέτρα που μπορούν να επιτύχουν ομοιομορφοποίηση των αναπτυσσόμενων δράσεων στους πασσάλους και τον ενιαίο κεφαλόδεσμο που συνδέει τις κεφαλές των πασσάλων. Πέραν των ανωτέρω σημείων εξετάζονται και διάφορα θέματα που αποτελούν ειδικές, σημαντικές εντούτοις περιπτώσεις ανάπτυξης ειδικότερων μηχανισμών των θεμελιώσεων με πασσάλους.

Για την επίτευξη των ανωτέρω στόχων πραγματοποιήθηκε παραμετρική τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση ομάδων πασσάλων διαφορετικής γεωμετρίας, σε διάφορες διατάξεις, σε αργιλικό και αμμώδες έδαφος με διαφορετική διατμητική αντοχή και δυσκαμψία. Οι πάσσαλοι σε όλες τις αναλύσεις θεωρούνται πακτωμένοι σε ενιαίο κεφαλόδεσμο. Για την υλοποίηση των αναλύσεων χρησιμοποιείται το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC^{3D}, η δε μεθοδολογία προσέγγισης του προβλήματος δίνεται αναλυτικά από τον Comodromos (2004). Στόχο της εκτεταμένης παραμετρικής ανάλυσης της διατριβής αποτελεί, πέραν των άλλων, και η διερεύνηση της δυνατότητας επέκτασης της ισχυούσης εφαρμογής της προταθείσας στο ανωτέρω άρθρο εξίσωσης πρόβλεψης της απόκρισης ομάδας πασσάλων, με κατάλληλη τροποποίηση και εισαγωγή του όρου της αξονικής απόστασης, σε διατάξεις πέραν αυτών με αξονική απόσταση 3.0D.

Διάρθρωση Διατριβής

Το κεφάλαιο 2 της διατριβής αφιερώνεται στην ανάλυση των μηχανισμών και στον τρόπο υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας και του προσδιορισμού της απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου. Πραγματοποιείται σύγκριση των διαφόρων μεθοδολογιών καθώς και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εμπειρικών προσεγγίσεων, δοκιμαστικών φορτίσεων και αριθμητικών μεθόδων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται στο κεφάλαιο 3 για την περίπτωση ομάδων πασσάλων. Οι εμπειρικές προσεγγίσεις είναι περιορισμένες σε σχέση με το μεμονωμένο πάσσαλο, το δε πρόβλημα και οι μηχανισμοί που αναπτύσσονται είναι αισθητά πιο περίπλοκοι.

Για την αποτίμηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης των πασσάλων εξετάζονται, στο κεφάλαιο τέσσερα διατάξεις ομάδας 2*3, 3*3 και 5*5 με σχετική απόσταση μεταξύ των μελών της ομάδας 2.0D, 3.0D, 4.0D και 5.0D. Το σχετικό μήκος των πασσάλων λαμβάνεται ίσο με $L/D=25$ και 50. Το έδαφος θεμελίωσης θεωρείται ομογενές. Ειδικότερα εξετάζονται τέσσερις περιπτώσεις αργιλικού εδάφους και τρεις περιπτώσεις αμμώδους εδάφους. Για κάθε περίπτωση πραγματοποιείται και η αντίστοιχη ανάλυση μεμονωμένου πασσάλου με στόχο τη σύγκριση των αποκρίσεων. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων οδηγεί στην πινακοποίηση των επιτρεπομένων και οριακών φορτίων ομάδας και στον προσδιορισμό 'μειωτικών' συντελεστών φέρουσας ικανότητας της ομάδας. Η περαιτέρω χρήση των αποτελεσμάτων επέτρεψε την τροποποίηση της προταθείσας από τον Comodromos (2004) εξίσωσης της απόκρισης ομάδας με χρήση του συντελεστή επαύξησης απόκρισης με την εισαγωγή του όρου της αξονικής απόστασης έτσι ώστε το πεδίο εφαρμογής να διευρυνθεί και σε ομάδες πασσάλων με διατάξεις που έχουν αξονική απόσταση 2.0D έως και 6.0D.

Αποτελεί κοινή διεθνώς παραδοχή ότι η έδραση πασσάλων σε βράχο αποτελεί ιδιαίζουσα περίπτωση, η οποία δεν υπακούει στις σχέσεις απόκρισης που αντιστοιχούν σε εδαφικό μέσο. Είναι ακόμη κοινά διεθνώς αποδεκτό ότι οι ομάδες πασσάλων με έδραση σε βράχο επηρεάζονται αισθητά λιγότερο από το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης ομάδας. Η θεώρηση ενός κάτω ορίου, όπου οι πάσσαλοι εδράζονται σε πρακτικά ασυμπίεστο βράχο και το υπερκείμενο έδαφος είναι μεγάλης συμπίεστικότητας και μικρής διατμητικής αντοχής, οδηγεί προφανώς σε μηδενικές πρακτικά επιπτώσεις τόσο στη φέρουσα ικανότητα ομάδας όσο και στην απόκριση. Αντίθετα στην περίπτωση ιδιαίτερα μαλακού βράχου και υπερκείμενου εδάφους με μεγάλη διατμητική αντοχή και πολύ μικρή συμπίεστικότητα, οδηγεί σε επιπτώσεις που δεν μπορούν να αγνοηθούν, ειδικά στην περίπτωση πασσάλων μεγάλου μήκους. Για την καλύτερη διερεύνηση του θέματος και την ποσοτική και ποιοτική αποτίμηση των επιπτώσεων, πραγματοποιούνται σχετικές αναλύσεις σε αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις υπερκείμενου εδάφους 'ενδιάμεσης' κατάστασης. Οι σχετικές αναλύσεις, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων και τα σχετικά συμπεράσματα δίνονται στο κεφάλαιο 5.

Το κεφάλαιο 6 αφιερώνεται σε ένα άλλο ενδιαφέρον θέμα των θεμελιώσεων με πασσάλους: το θέμα των αρνητικών τριβών. Η χρήση εμπειρικών σχέσεων από συμβατικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των επιπρόσθετων φορτίων στους πασσάλους προϋποθέτει πλήρη κινητοποίηση αρνητικών τριβών πάνω από το ουδέτερο σημείο (σημείο συμβιβαστού μετακινήσεων πασσάλου και περιβάλλοντος εδάφους). Η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε υπερβολικές τιμές φορτίων, δεδομένου ότι για την πλήρη κινητοποίηση των αρνητικών τριβών απαιτείται εν γένει η εκδήλωση μεγάλων καθιζήσεων στο περιβάλλον έδαφος. Αντίστοιχα, δεν απαιτείται κατ' ανάγκη ανάπτυξη μεγάλων καθιζήσεων για την εκδήλωση διολίσθησης κατά μήκος της διεπιφάνειας εδάφους-πασσάλου. Η ακριβής αποτίμηση των ανωτέρω απαιτεί την επίλυση του προβλήματος στο πλαίσιο αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλου κατά την οποία θα λαμβάνονται υπόψη η συνάφεια και η δυσκαμψία κατά μήκος της διεπιφάνειας, η διατμητική αντοχή και η δυσκαμψία του εδάφους καθώς επίσης και η διάταξη των πασσάλων της ομάδας. Για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών εκδήλωσης και ανάπτυξης του φαινομένου και την ποιοτική και ποσοτική αποτίμηση της δράσης σε μεμονωμένο πάσσαλο και ομάδες πασσάλων πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις. Από τα αποτελέσματα προκύπτουν σαφώς μικρότερες επιπτώσεις από αυτές που αντιστοιχούν στο άνω όριο και που πολύ συχνά εφαρμόζονται. Προκύπτει επίσης το συμπέρασμα μείωσης των επιπτώσεων με εφαρμογή κατάλληλης ακολουθίας κατασκευής, στο βαθμό που τούτο είναι κατασκευαστικά δυνατόν, των επιμέρους φάσεων ενός έργου.

Η διατριβή ολοκληρώνεται με το κεφάλαιο 7 στο οποίο δίνεται σύντομη περιγραφή του επόμενου θέματος το οποίο βρίσκεται υπό διερεύνηση και αφορά στην επιρροή του κεφαλόδεσμου στη φέρουσα ικανότητα της ομάδας των πασσάλων και στην κατανομή του φορτίου στα επί μέρους μέλη της. Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται ακόμη σύνοψη της διατριβής, καταγράφονται τα συμπεράσματα και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα επί του θέματος.

Η διατριβή περιλαμβάνει επίσης τρία παράρτημα. Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται οι καμπύλες απόκρισης όλων των διατάξεων ομάδων πασσάλων για τις οποίες πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες μη - γραμμικές αναλύσεις. Κάθε διάγραμμα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη διάταξη και τύπο εδάφους και περιλαμβάνει την απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου και τις αποκρίσεις των ομάδων για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις. Στο παράρτημα Β δίνονται τα διαγράμματα κατανομής του επιβαλλόμενου φορτίου στους επιμέρους πασσάλους της ομάδας συναρτήσει του ποσοστού καθίζησης. Τέλος στο παράρτημα Γ συγκρίνονται οι αριθμητικά προσδιορισθείσες καμπύλες απόκρισης των ομάδων πασσάλων με αυτές που διεξάγονται με την εφαρμογή προτεινόμενης σχέσης προσδιορισμού της απόκρισης με βάση την απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου και τη διάταξη της ομάδας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Απόκριση μεμονωμένου πασσάλου

2.1 Γενικά

Η μεταφορά των αξονικών φορτίων των ανωδομών σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα μέσω των πασσάλων πραγματοποιείται πρακτικά με εκδήλωση πολύ μικρών καθιζήσεων. Σε αυτό το λόγο θα πρέπει να αποδοθεί το γεγονός ότι πρωτίστως οι ερευνητές εστίασαν την προσοχή τους στον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας των πασσάλων και δευτερευόντως στην απόκριση φορτίου - καθιζήσης. Η επέκταση της χρήσης των πασσαλοθεμελιώσεων για την ανάληψη σημαντικά μεγάλων φορτίων ανωδομών ιδιαίτερα ευαίσθητων στην εκδήλωση ολικών ή διαφορικών καθιζήσεων, οδήγησε στην έναρξη διερεύνησης του επιστημονικού πεδίου της απόκρισης των πασσάλων.

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται παρουσίαση των κυριοτέρων μεθόδων προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας πασσάλου καθώς και της απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου. Για την προσέγγιση του προβλήματος χρησιμοποιούνται εμπειρικές μεθοδολογίες, τα αποτελέσματα δοκιμαστικών φορτίσεων και αριθμητικές μέθοδοι.

Παρά το γεγονός ότι οι πάσσαλοι κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, το υλικό κατασκευής τους και τη λειτουργία τους, οι μηχανισμοί ανάπτυξης της αντίστασης τους είναι παρόμοιοι. Η συνολικά αναλαμβανόμενη δύναμη περιορίζεται εντούτοις από την αντοχή του υλικού του πασσάλου, τη διατμητική αντίσταση του περιβάλλοντος εδαφικού σχηματισμού και τις επιπτώσεις που έχει σε αυτήν κατά μήκος της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους ο τρόπος κατασκευής.

Παρά το μεγάλο αριθμό κατηγοριών πασσάλων που μπορούν να οδηγήσουν τα ανωτέρω κριτήρια κατάταξης, για λόγους οικονομοτεχνικούς επικράτησε η χρήση φρεατοπασσάλων και εμπηγνυόμενων πασσάλων. Κύρια διαφορά των δύο μεθόδων αποτελεί ο τρόπος κατασκευής τους και οι επιπτώσεις που αυτός επιφέρει στη φέρουσα ικανότητα και την απόκριση των πασσάλων των δύο αυτών τύπων. Τα κατασκευαστικά πλεονεκτήματα των φρεατοπασσάλων είναι καθοριστικά για τους

εδάφικούς σχηματισμούς της ελληνικής επικράτειας και για το λόγο αυτό η μέθοδος αυτή έχει αποκλειστικά επικρατήσει. Εξάιρεση αποτελεί η κατασκευή πασσάλων σε θαλάσσιο περιβάλλον μεγάλου βάθους, όπου για ευνόητους λόγους χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι σωλήνες.

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

Η επιστημονική πρόοδος και η συσσωρευμένη εμπειρία οδήγησαν στη βελτίωση των μεθόδων προσέγγισης του προβλήματος με τη διατύπωση, κατά το τέλος της δεκαετίας του 1960 και τις αρχές της επόμενης δεκαετίας, μεθοδολογιών ικανών να προβλέψουν την κινηματική και εντατική κατάσταση ενός πασσάλου υπό κατακόρυφη φόρτιση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εμπειρικής προσέγγισης αποτελεί ο γερμανικός κανονισμός DIN 4014. Αντίστοιχο παράδειγμα αριθμητικής προσέγγισης αποτελεί η μεθοδολογία t-z. Κατά τη μέθοδο αυτή η αντίσταση του περιβάλλοντος εδάφους προσομοιώνεται με ελατηριακές σταθερές, η δυσκαμψία των οποίων θεωρήθηκε σταθερή αρχικά, ενώ στη συνέχεια αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι μη-γραμμικής ανάλυσης ικανοί να ενσωματώσουν ελατήρια με μη-γραμμική συμπεριφορά. Η ευρεία χρήση των ανωτέρω προσεγγίσεων σε συνδυασμό με την εμπειρία που αποκτήθηκε από τη διεξαγωγή αντίστροφων αναλύσεων τις κατέστησε ιδιαίτερα χρήσιμες και αξιόπιστες.

Η περαιτέρω εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων επέτρεψε τη χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων και των Πεπερασμένων Διαφορών για την προσέγγιση του προβλήματος. Πρόκειται για μεθόδους ιδιαίτερα σύνθετες σε σχέση με τις απλές προγραμματιστικά υπορουτίνες της μεθόδου t-z, με αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και εν γένει μη-γραμμικό προγραμματισμό. Οι μέθοδοι αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση πολύπλοκων και ιδιαίτερων περιπτώσεων φόρτισης αλλά και για ερευνητικούς σκοπούς. Χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής αποτελεί η ικανότητα υπολογισμού οποιουδήποτε συνδυασμού φόρτισης με σύγχρονη θεώρηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κατασκευής και εδάφους λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση πασσάλου – εδάφους – πασσάλου - ανωδομής. Επιπρόσθετα η μέθοδος των αριθμητικών μεθόδων έρχεται συμπληρωματικά να καλύψει δύο ουσιαστικά κενά που αφήνουν πρακτικά ανέπαφα οι ανωτέρω μεθοδολογίες. Το πρώτο αφορά στην εντατική και κινηματική κατάσταση του περιβάλλοντος εδάφους,

όπου και όταν οι πληροφορίες αυτές κρίνονται αναγκαίες. Το δεύτερο αναφέρεται στον ακριβή προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας πασσάλων, πεδίο με αυξημένο ενδιαφέρον για τις θεμελιώσεις με πασσάλους τόσο σε πλευρική όσο και σε αξονική φόρτιση, και τη μεταβολή της συναρτήσεως του εύρους της καθίζησης. Το δεύτερο αυτό πεδίο θα αποτελέσει το αντικείμενο των επομένων κεφαλαίων, καθώς συνιστά ουσιαστικά και το κύριο θέμα της διατριβής.

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται αρχικά στον προσδιορισμό του οριακού και επιτρεπόμενου φορτίου μεμονωμένου πασσάλου υπό αξονική φόρτιση με χρήση εμπειρικών μεθοδολογιών, όπου χαρακτηριστικές τιμές προσδιορίζονται είτε από πίνακες είτε από διάφορα νομογραφήματα. Ακολουθεί παράγραφος εκτίμησης των καθιζήσεων πάντα με χρήση εμπειρικών μεθοδολογιών. Στη συνέχεια περιγράφεται η μέθοδος των ελατηριακών σταθερών (ανάλυση t-z), η οποία αποτελεί απλοποιημένη προσέγγιση του προβλήματος με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Ακολουθεί η αφιερωμένη στις δοκιμαστικές φορτίσεις παράγραφος και τέλος η αναφορά σε αριθμητικές μεθόδους τριδιάστατης προσομοίωσης του προβλήματος λαμβάνοντας υπόψη μη-γραμμική συμπεριφορά συστατικών υλικών και ανάπτυξη ειδικότερων μηχανισμών.

2.2 Οριακό και επιτρεπόμενο φορτίο

2.2.1 Γενικά

Το οριακό φορτίο μεμονωμένου πασσάλου αντιστοιχεί σε κατάσταση πλήρους ανάπτυξης των μηχανισμών αντίστασης του περιβάλλοντος εδάφους. Η συνολική αυτή αντίσταση R προκύπτει ως άθροισμα της οριακής πλευρικής αντίστασης και της οριακής αντίστασης στη βάση του πασσάλου:

$$R = R_b + R_s \quad (2.1)$$

όπου R_s : οριακή παράπλευρη αντίσταση

R_b : οριακή αντίσταση αιχμής

Το ποσοστό της φέρουσας ικανότητας που φέρεται από την αιχμή και από την παράπλευρη επιφάνεια, εξαρτάται από τη γεωμετρία του πασσάλου και τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του περιβάλλοντος εδάφους. Η πλήρης κινητοποίηση των μηχανισμών αντίστασης εξαρτάται από το μέγεθος της μετακίνησης και τη δυσκαμψία του εδάφους κατά μήκος και στην έδραση του πασσάλου.

Οι πάσσαλοι που διαπερνούν ένα σχετικά μαλακό στρώμα εδάφους και εδράζονται σε πιο δύσκαμπτο έδαφος, αναλαμβάνουν το φορτίο κυρίως μέσω της αντίστασης στην αιχμή τους και αποκαλούνται πάσσαλοι αιχμής. Αντίθετα όταν η συνεισφορά της

αιχμής είναι ιδιαίτερα μικρή, οι πάσσαλοι αποκαλούνται πάσσαλοι τριβής (ή συνάφειας). Στην περίπτωση αυτή η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου οφείλεται στην ανάπτυξη διατμητικής αντίστασης κατά μήκος της παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου. Σε περίπτωση αμμώδους ή ακόμη αργιλικού εδάφους, σε πολύ αργές συνθήκες φόρτισης, ο αναπτυσσόμενος μηχανισμός αντιστοιχεί στην ονομασία του πασσάλου ως τριβής. Στην περίπτωση πασσάλου σε αργιλικό έδαφος και σε συνθήκες γρήγορης φόρτισης ο κύριος όρος ο οποίος χαρακτηρίζει το μηχανισμό πλευρικής αντίστασης είναι η συνάφεια μεταξύ πασσάλου και εδάφους.

Η ανωτέρω ομαδοποίηση γίνεται για λόγους απλούστευσης του προβλήματος δεδομένου ότι ασχέτως ποσοστού πάντα συνυπάρχει αντίσταση τόσο από την παράπλευρη επιφάνεια όσο και από την αιχμή ενός πασσάλου. Κατά γενική ομολογία στα συνεκτικά εδάφη κυριαρχεί η φέρουσα ικανότητα της παράπλευρης επιφάνειας, ενώ στα μη-συνεκτικά εδάφη η συνεισφορά στην ολική φέρουσα ικανότητα της αιχμής και της παράπλευρης επιφάνειας είναι εξ' ίσου σημαντική. Η διαπίστωση αυτή καταγράφεται και από τους διάφορους κανονισμούς όπου οι συντελεστές αντίστασης αιχμής είναι κατά πολύ μεγαλύτεροι στα ψαθυρά εδάφη.

Πέραν των τιμών των επιμέρους αντιστάσεων ενός πασσάλου ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηρίζεται το γεγονός ότι αυτές δεν αναπτύσσονται ταυτόχρονα. Ειδικότερα η παράπλευρη αντίσταση κινητοποιείται πλήρως σε πολύ μικρότερες μετακινήσεις του πασσάλου (τυπικά στο 0.5-2% της διαμέτρου του πασσάλου) σε σχέση με αυτές που απαιτούνται για την κινητοποίηση της αντίστασης αιχμής, η πλήρης κινητοποίηση της οποίας επέρχεται μετά από βύθιση μεγαλύτερη της τάξης του 7% της διαμέτρου του πασσάλου. Η διαπίστωση αυτή αποτελεί την πρώτη ένδειξη μεταβολής της απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου ανάλογα με το επίπεδο καθίζησης. Ακραία περίπτωση αποτελεί η κατηγορία των αποκαλούμενων αιωρούμενων πασσάλων. Πρόκειται για πασσάλους οι οποίοι εμφανίζουν αντίσταση αιχμής, η ενεργοποίηση της όμως απαιτεί καθιζήσεις αισθητά μεγαλύτερες από αυτές που προκαλεί το φορτίο λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή το φορτίο αναλαμβάνεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από την παράπλευρη αντίσταση, σχήμα 2.1.

Για τον προσδιορισμό του οριακού φορτίου χρησιμοποιούνται διάφορες μεθοδολογίες και κανονισμοί, οι οποίες μπορούν να καταταχθούν σε δύο κύριες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται οι μεθοδολογίες στις οποίες χρησιμοποιούνται απ' ευθείας οι γεωτεχνικές παράμετροι διατμητικής αντοχής του περιβάλλοντος εδάφους, των οποίων συνοπτική περιγραφή δίνεται από τους Poulos and Davis (1980). Κατά την προσέγγιση αυτή η πλευρική αντίσταση προσδιορίζεται με χρήση του κριτηρίου Coulomb, ενώ για την αντίσταση αιχμής χρησιμοποιείται η θεωρία επιφανειακών θεμελιώσεων με τροποποίηση των συντελεστών φέρουσας ικανότητας. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μεθοδολογίες όπου για τον προσδιορισμό της αντίστασης αιχμής και της πλευρικής αντίστασης χρησιμοποιούνται πινακοποιημένες τιμές οριακής τιμής πλευρικής τριβής και τάσης έδρασης. Αντιπροσωπευτικές μέθοδοι της κατηγορίας αυτής θεωρούνται ο

γερμανικός κανονισμός DIN 4014, ο οποίος και εφαρμόζεται σύμφωνα με κείμενες διατάξεις και στην ελληνική επικράτεια, καθώς και ο γαλλικός κανονισμός Fascicule 62-V.



Σχήμα 2.1 Απεικόνιση τυπικής μορφής διαγράμματος αιωρούμενου πασσάλου για επιβαλλόμενο φορτίο μικρότερο του επιτρεπόμενου.

Πλεονέκτημα των δύο ανωτέρω κανονισμών αποτελεί η ευκολότερη εφαρμογή τους (για παράδειγμα η πλευρική αντίσταση δεν εξαρτάται από την ασκούμενη πλευρική τάση), η εμπειρία εκτίμησης των προτεινόμενων παραμέτρων οι οποίες προκύπτουν από επεξεργασία των αποτελεσμάτων δεκάδων δοκιμαστικών φορτίσεων καθώς και η αντιστοίχιση φορτίου-καθίζησης για φορτία μικρότερα του οριακού. Η αντιστοίχιση είναι και αυτή εμπειρική, παρέχει εντούτοις σημαντικές πληροφορίες για την προσομοίωση της απόκρισης των πασσάλων. Ας σημειωθεί ότι πρώτος ο γερμανικός κανονισμός στην έκδοση του το 1990 προσδιόριζε την απόκριση φορτίου καθίζησης πασσάλου σε εδαφικό υλικό. Ο γαλλικός κανονισμός αποσκοπούσε μόνο στο οριακό και επιτρεπόμενο φορτίο προ του 1993. Κατά την τροποποίηση του το 1993 δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού της απόκρισης με χρήση της μεθοδολογίας t-z προτείνοντας τον προσδιορισμό των εν λόγω καμπυλών.

Για τον προσδιορισμό του επιτρεπόμενου φορτίου πασσάλου εφαρμόζεται είτε συνολικός συντελεστής επί του οριακού φορτίου (DIN 4014), είτε επιμέρους συντελεστές ασφαλείας (γαλλικός κανονισμός). Ο αντίστοιχος Ευρωκώδικας 7 (Eurocode 7: Geotechnical Design) προβλέπει την εφαρμογή επιμέρους συντελεστών για τον προσδιορισμό του επιτρεπόμενου φορτίου. Στην περίπτωση ωστόσο που πραγματοποιείται ανάλυση λειτουργικότητας με χρήση αριθμητικών μεθόδων, προτείνει επίλυση χωρίς συντελεστή ασφαλείας (η εφαρμογή συντελεστού σε τέτοιου είδους ανάλυση θα παραβίαζε εξ αρχής το στόχο της ανάλυσης), και στη συνέχεια εφαρμογή συντελεστή ασφαλείας επαύξησης των εντατικών μεγεθών κατά τη φάση διαστασιολόγησης.

Τέλος σημειώνεται ότι έχουν κατά καιρούς προταθεί και άλλες μέθοδοι προσδιορισμού του οριακού και επιτρεπόμενου φορτίου με χρήση αποτελεσμάτων

επιτόπου δοκιμών (εξακολουθούν εν μέρει να χρησιμοποιούνται τόσο στο γερμανικό όσο και στο γαλλικό κανονισμό), ενώ ειδική μέθοδος, η αποκαλούμενη δυναμική μέθοδος, προτείνεται για τον προσδιορισμό των αντιστοίχων μεγεθών κατά την εφαρμογή πασσάλων με έμπηξη. Στη συνέχεια περιγράφεται αρχικά η πρώτη κατηγορία, ενώ ακολουθεί η παράθεση του γερμανικού κανονισμού και οι σχετικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 7.

2.2.2 Γεωτεχνικές Μέθοδοι

Κατά τις μεθόδους της κατηγορίας αυτής η οριακή παράπλευρη αντίσταση R_s μπορεί να εκτιμηθεί με ολοκλήρωση της διατμητικής αντοχής τ_α κατά μήκος της διεπιφάνειας πασσάλου – εδάφους. Η τιμή της τ_α δίνεται από την εξίσωση του Coulomb:

$$\tau_\alpha = c_\alpha + \sigma_n \tan \phi_\alpha \quad (2.2)$$

όπου τ_α : διατμητική αντοχή παράπλευρης επιφάνειας
 c_α : συνάφεια στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους
 σ_n : ορθή τάση στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου
 ϕ_α : γωνία τριβής μεταξύ πασσάλου και εδάφους

Η ορθή τάση σ_n εκφράζεται ως συνάρτηση της κατακόρυφης τάσης ως εξής:

$$\sigma_n = K_s \sigma_v \quad (2.3)$$

όπου K_s : συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων.

Με αντικατάσταση της εξίσωσης 2.3 στη 2.2 προκύπτει:

$$\tau_\alpha = c_\alpha + \sigma_v K_s \tan \phi_\alpha \quad (2.4)$$

Η ολοκλήρωση της εξίσωσης 2.4 καθ'όλο το μήκος του πασσάλου δίνεται από την εξίσωση 2.5,

$$R_s = \int_0^L C \tau_\alpha dz = \int_0^L C (c_\alpha + \sigma_v K_s \tan \phi_\alpha) dz \quad (2.5)$$

όπου C : η περίμετρος του πασσάλου
 L : το μήκος του πασσάλου

Η οριακή αντίσταση αιχμής R_b υπολογίζεται με χρήση της θεωρία φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_b = A_b (c N_c + \sigma_{vb} N_q + 0.5 \gamma D N_\gamma) \quad (2.6)$$

όπου A_b : το εμβαδόν βάσης του πασσάλου
 c : η συνοχή του εδάφους
 σ_{vb} : η κατακόρυφη τάση στη βάση του πασσάλου
 γ : το ειδικό βάρος του εδάφους

D : η διάμετρος του πασσάλου
 N_c, N_q, N_γ : συντελεστές φέρουσας ικανότητας, οι οποίοι εξαρτώνται κυρίως από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους, τη σχετική συμπιεστότητα του εδάφους και τη γεωμετρία του πασσάλου

Ως τιμή του συντελεστή N_c για αργιλικό έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης χρησιμοποιείται συνήθως η προτεινόμενη από τον Skempton (1951) η οποία είναι ίση με 9. Σημειώνεται ότι η αντίστοιχη τιμή για επιφανειακή θεμελίωση είναι ίση με 6.17, η δε αύξηση οφείλεται στη μορφή της βαθιάς θεμελίωσης και ισχύει για λόγο μήκους προς διάμετρο πασσάλου μεγαλύτερο του 4.

Από τις εξισώσεις (2.1), (2.5) και (2.6) προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση η οποία προσδιορίζει και το οριακό φορτίο πασσάλου.

$$R = \int_0^L C(c_a + \sigma_v K_s \tan \phi_\alpha) dz + A_b(c N_c + \sigma_{vb} N_q + 0.5 \gamma D N_\gamma) \quad (2.7)$$

Σημειώνεται ότι η ανωτέρω εξίσωση αποτελεί τη γενική έκφραση προσδιορισμού του οριακού φορτίου πασσάλου. Η εφαρμογή της σε αστράγγιστες συνθήκες οδηγεί στη χρήση των αντίστοιχων εδαφικών παραμέτρων υπό συνθήκες ολικών τάσεων. Σε περίπτωση συνθηκών στράγγισης οι εδαφικές παράμετροι λαμβάνονται από αποτελέσματα αντιστοίχων δοκιμών, ενώ ως επικρατούσα εντατική κατάσταση του περιβάλλοντος εδάφους λαμβάνεται η αντιστοιχούσα σε ενεργές τάσεις.

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει επίσης να δίνεται στα μηχανικά χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους, στις περιπτώσεις όπου η διαδικασία τοποθέτησης του πασσάλου προκαλεί διατάραξη του εδάφους. Η τιμή της συνάφειας ή αντίστοιχα της γωνίας τριβής κατά μήκος της διεπιφάνειας θα πρέπει να προσαρμοσθούν κατάλληλα και να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς του οριακού και επιτρεπόμενου φορτίου. Στα επόμενα γίνεται περιγραφή των κριτηρίων που εξετάζονται για την επιλογή των τιμών αυτών τόσο σε αργιλικό όσο και σε αμμώδες έδαφος.

Φέρουσα ικανότητα πασσάλου σε αργιλικό έδαφος

Στην περίπτωση πασσάλων σε αργιλικό έδαφος η φέρουσα ικανότητα υπό αστράγγιστες συνθήκες θεωρείται ως η κρίσιμη κατάσταση εκτός και αν πρόκειται για υπερστερεοποιημένη άργιλο. Η φέρουσα ικανότητα σε στραγγιζόμενες συνθήκες (φόρτιση σε αργές συνθήκες και μεγάλου χρονικού διαστήματος κατά την οποία δεν παρατηρείται υπερπίεση πόρων) παίρνει συνήθως τιμή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της σε αστράγγιστες συνθήκες. Σημειώνεται επίσης ότι οι καθιζήσεις που απαιτούνται για να κινητοποιήσουν τη φέρουσα ικανότητα σε στραγγιζόμενες συνθήκες είναι ιδιαίτερα μεγάλες και συχνά μεγαλύτερες από αυτές που μπορούν να αναλάβουν οι εδραζόμενες ανωδομές (π.χ. ολόσωμες γέφυρες). Λαμβάνοντας κατά

συνέπεια υπόψη ότι το εξασκούμενο φορτίο θα πρέπει να μην οδηγήσει σε αστοχία σε περίπτωση γρήγορης φόρτισης, η φέρουσα ικανότητα πασσάλου σε αργιλικό έδαφος υπολογίζεται με όρους αστράγγιστων συνθηκών. Εάν η άργιλος είναι κορεσμένη, η αστράγγιστη γωνία τριβής φ_u αλλά και η τριβή κατά μήκος της διεπιφάνειας πασσάλου εδάφους, φ_a , θεωρούνται μηδενικές. Συνέπεια της θεώρησης αυτής αποτελεί η μοναδιαία τιμή για το συντελεστή N_q , ενώ ο συντελεστής N_γ είναι ίσος με μηδέν. Με εφαρμογή των ανωτέρω τιμών στην εξίσωση 2.7 οδηγείται κανείς στην απλούστερη μορφή της, 2.8:

$$R = \int_0^L C c_a dz + A_b (c_u N_c + \sigma_{vb}) \quad (2.8)$$

όπου c_u : η συνοχή του εδάφους στο επίπεδο της αιχμής του πασσάλου υπό αστράγγιστες συνθήκες

c_a : η συνάφεια εδάφους - πασσάλου υπό αστράγγιστες συνθήκες

Η συνάφεια c_a πασσάλου-εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του πασσάλου, τη μέθοδο κατασκευής του καθώς και τη σύσταση και τη διατμητική αντοχή του εδάφους. Υπό ιδεατές συνθήκες η συνάφεια θα μπορούσε να υπολογιστεί από την εκτέλεση δοκιμαστικής φόρτισης με κατάλληλη ενοργάνωση. Δεδομένου εντούτοις ότι αυτό δεν είναι εφικτό παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις σημαντικών έργων, χρησιμοποιούνται εμπειρικές τιμές. Μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές προσπάθειες συσχέτισης της συνάφειας με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u , τα αποτελέσματα των οποίων δίνονται από τους Tomlinson (1957,1970), Woodward et al. (1961), Coyle and Reese (1966), McClelland (1974) και άλλους ερευνητές.

Στο σχήμα 2.2 δίνεται η μεταβολή του λόγου c_a/c_u συναρτήσει της τιμής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u (McClelland, 1974). Γενική παραδοχή αποτελεί η υιοθέτηση μοναδιαίου λόγου $c_a/c_u = 1$ για μαλακές άργιλους ($c_u \leq 25$ kPa). Αντίθετα για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε στιφρή άργιλο ο λόγος παίρνει τιμή μικρότερη της μονάδας. Το εύρος διακύμανσης του λόγου στην περίπτωση των στιφρών αργίλων καθορίζεται και από τις επιπτώσεις της διαδικασίας έμπηξης. Μετά από βαθύτερη διερεύνηση του θέματος ο Tomlinson (1970) καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο λόγος c_a/c_u επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό τόσο από το εδαφικό στρώμα που υπέρκειται της στιφρής άργιλου, όσο και από την τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u , (σχήματα 2.3 και 2.4). Νωρίτερα ο ίδιος ερευνητής είχε προτείνει ως οδηγό εκτίμησης της συνάφειας c_a για εμπηγνυόμενους πασσάλους το διάγραμμα του σχήματος 2.5 (Tomlinson, 1963). Τα διαθέσιμα δεδομένα για τη μεταβολή του λόγου c_a/c_u στην περίπτωση των έγχυτων πασσάλων είναι περιορισμένα και τα περισσότερα από αυτά αναφέρονται στην άργιλο του Λονδίνου. Στον πίνακα 2.1 δίνονται οι τιμές c_a/c_u συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u από αδιατάρακτα δοκίμια, καθώς επίσης και συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_r από αναζυμωμένα δοκίμια. Οι Skempton, Meyerhof και Murdock (1959) πρότειναν ως άνω όριο της c_a την τιμή των 96 kPa.

Τύπος εδάφους	Συντελεστής συνάφειας	Τιμή	Αναφορά
Άργιλος Λονδίνου	c_a/c_u	0.25-0.7	Golder & Leonard (1954)
		μέση τιμή: 0.45	Tomlinson (1957)
			Skempton (1959)
Ευαίσθητη άργιλος	c_a/c_r	1	Golder (1957)
Άργιλος μεγάλης διασταλτικότητας	c_a/c_u	0.5	Mohan & Chandra (1961)

Πίνακας 2.1 Τιμές του συντελεστή συνάφειας για έγχυτους πασσάλους σε άργιλο.

Η φέρουσα ικανότητα πασσάλου σε στιφρή ή υπερστερεοποιημένη άργιλο, προσδιορίζεται ως αντιστοιχούσα σε στραγγιζόμενες συνθήκες. Κατά τη θεώρηση στραγγιζόμενων συνθηκών η αντίσταση της παράπλευρης επιφάνειας προσδιορίζεται με βάση τη γωνία τριβής της διεπιφάνειας ϕ'_a σε συνθήκες στράγγισης και ταυτόχρονη θεώρηση μηδενικής συνάφειας. Η συμβολή των συντελεστών N_c και N_γ αγνοείται και η εξίσωση 2.7 μετασχηματίζεται σε:

$$R = \int_0^L C \sigma'_{v'} K_s \tan \phi'_a dz + A_b \sigma'_{vb} N_q \quad (2.9)$$

όπου $\sigma'_{v'}$: η ενεργός κατακόρυφη τάση σε βάθος z

σ'_{vb} : η ενεργός κατακόρυφη τάση στο επίπεδο της αιχμής του πασσάλου

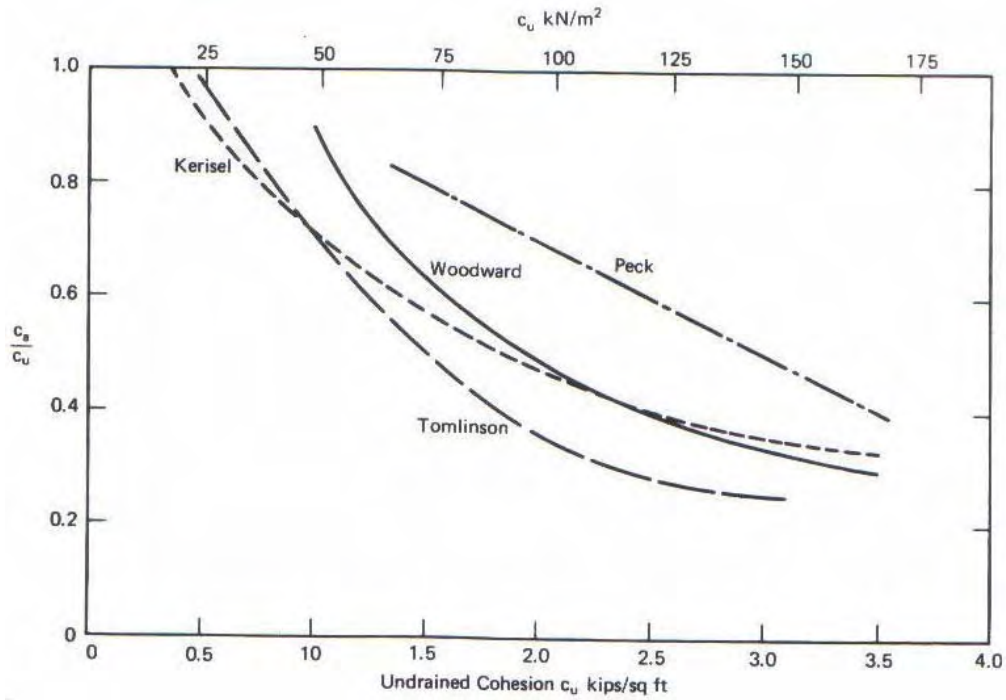
ϕ'_a : η γωνία τριβής ανάμεσα στον πάσσαλο και το έδαφος υπό συνθήκες στράγγισης

Για τον προσδιορισμό του όρου τριβής $\beta = K_s \tan \phi'_a$ προτείνεται από τον Burland (1973) ως κάτω όριο η υιοθέτηση της προσέγγισης που δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση

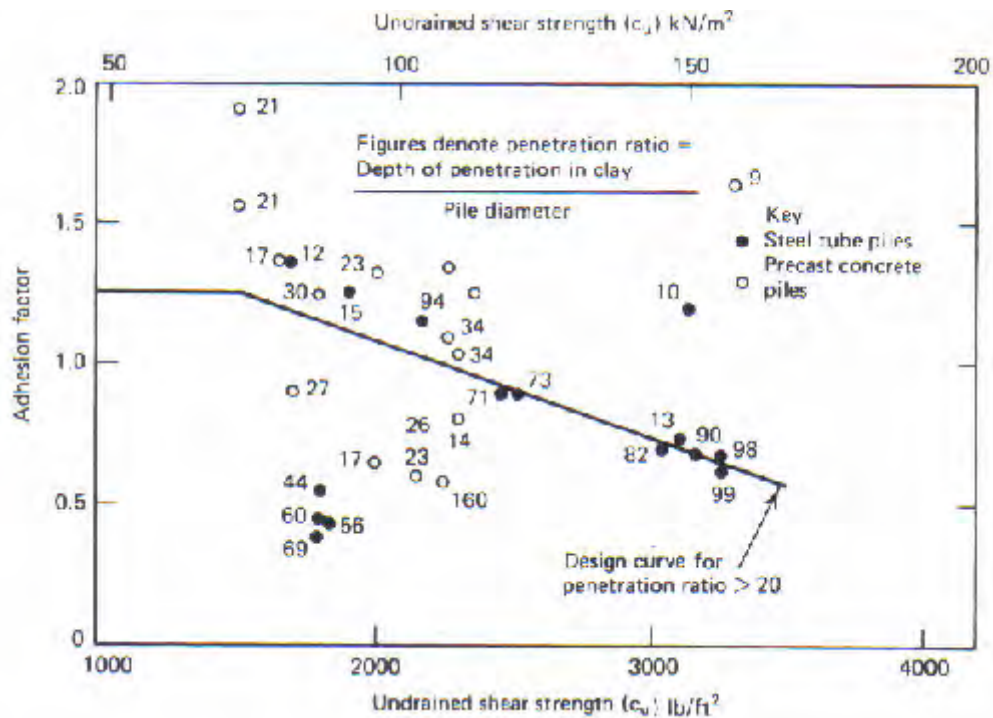
$$\beta = (1 - \sin \phi') \tan \phi' \quad (2.10)$$

όπου ϕ' : η ενεργός γωνία τριβής για αργιλικό σχηματισμό

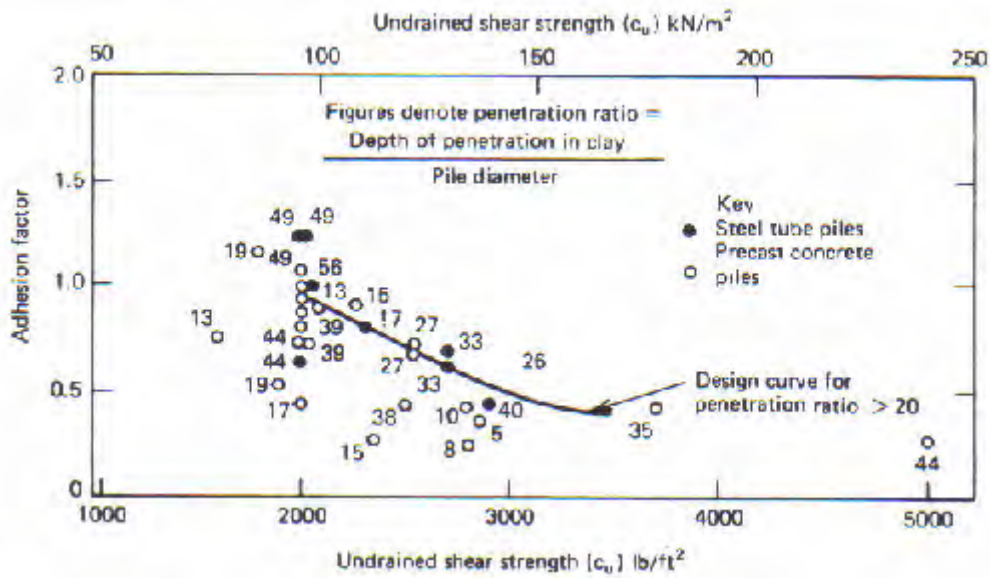
Η ανωτέρω εξίσωση προτείνεται από τον Burland (1973) για κανονικά στερεοποιημένες άργιλους. Για τιμές του ϕ' από 20-30° και εφαρμογή της εξίσωσης 2.10 προκύπτει ότι η τιμή του β κυμαίνεται από 0.24–0.29. Παρόμοιες τιμές προτείνονται και από τον Meyerhof (1976). Σύμφωνα εντούτοις με σχετικές έρευνες προκύπτει ότι η τιμή του β εξαρτάται και από το μήκος του πασσάλου. Ειδικότερα η αύξηση του μήκους οδηγεί σε μείωση της τιμής β , με θεώρηση $\beta=0.15$ για πασσάλους μεγάλους μήκους (μήκος πέραν των 60 m), βλ. Poulos and Davis (1980).



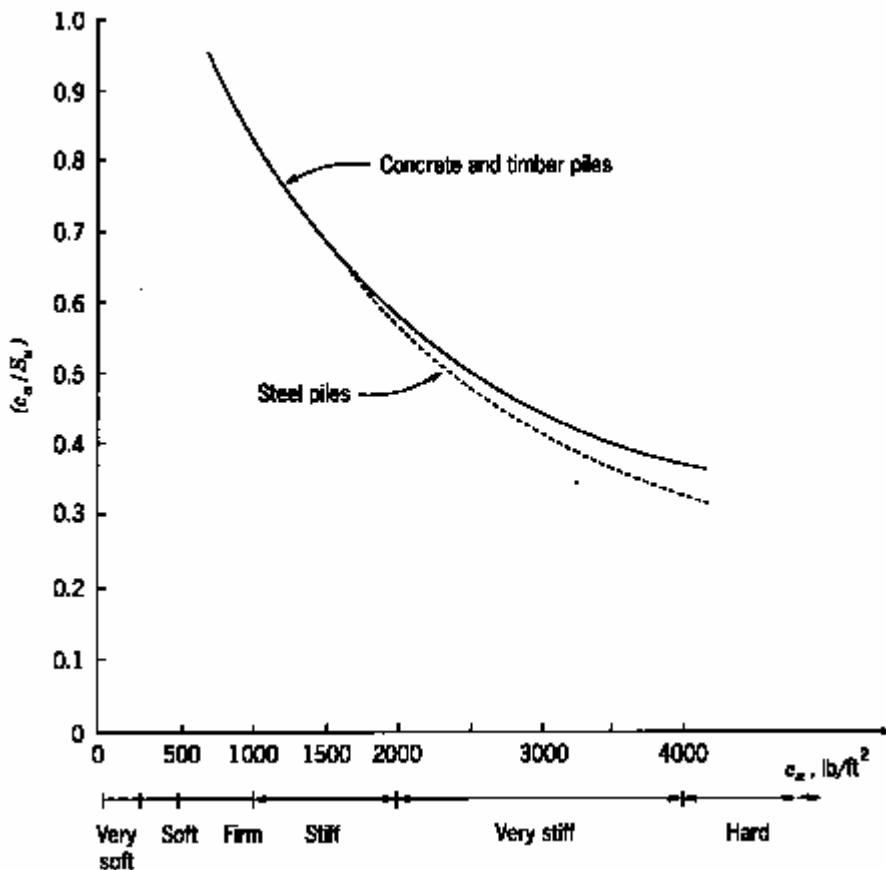
Σχήμα 2.2 Συντελεστής συνάφειας για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε άργιλο (McClelland, 1974).



Σχήμα 2.3 Συντελεστής συνάφειας για την περίπτωση όπου αμμώδες έδαφος υπέρκειται σιφρού συνεκτικού εδάφους (Tomlinson, 1970).



Σχήμα 2.4 Συντελεστής συνάφειας για την περίπτωση στιφρού συνεκτικού εδάφους χωρίς υπερκείμενο (Tomlinson, 1970).



Σχήμα 2.5 Κατανομή του λόγου c_u/S_u συναρτήσει του c_u για διάφορους τύπους αργίλου και για εμπηγνυόμενους πασσάλους (Tomlinson, 1963)

Αντίστοιχα για πασσάλους σε στιφρή άργιλο, ο Burland προτείνει ότι εάν ληφθεί το $K_s = K_0$ και η ϕ'_α προσδιορισθεί από δοκιμή αναζυμωμένου δείγματος, τότε η τιμή του β αποτελεί άνω όριο της πλευρικής τριβής για έγχυτους πασσάλους και κάτω όριο για εμπηγνυόμενους πασσάλους. Αντίστοιχα ο Meyerhof (1976) προτείνει την υιοθέτηση $K_s = 1.5K_0$ για εμπηγνυόμενους πασσάλους (λαμβάνοντας προφανώς υπόψη τη συμπύκνωση του εδάφους που επιφέρει η έμπηξη), ενώ για έγχυτους πασσάλους προτείνει την υιοθέτηση τιμής K_s ίσης με το 50% περίπου της αντίστοιχης για εμπηγνυόμενους.

Για υπερστερεοποιημένες αργίλους ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας K_0 μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά από τη γνωστή σχέση:

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \sqrt{OCR} \quad (2.11)$$

όπου OCR : ο βαθμός υπερστερεοποίησης.

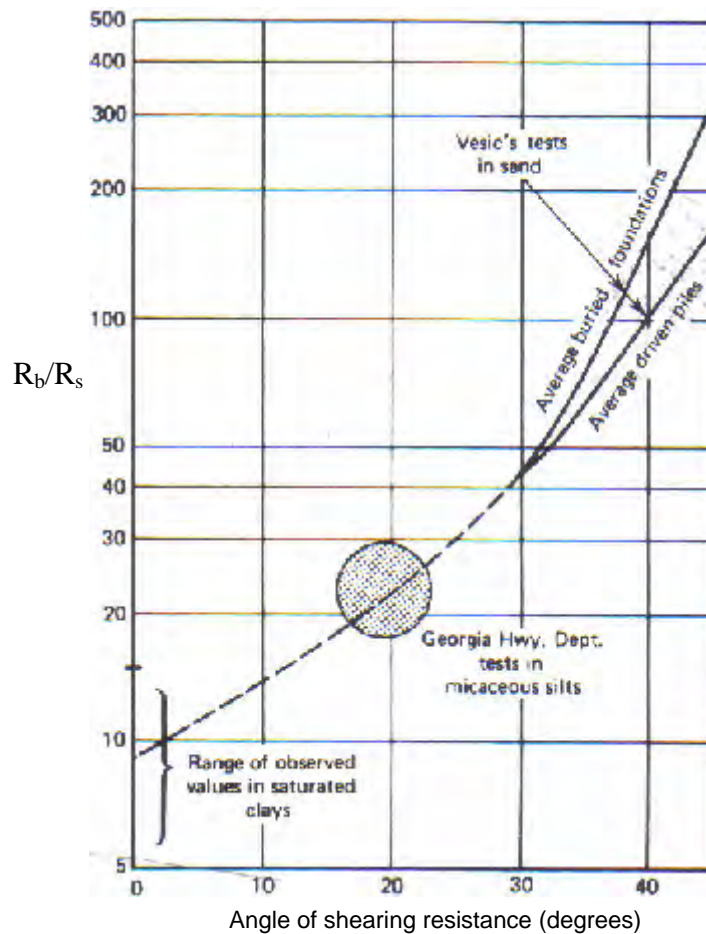
Φέρουσα ικανότητα πασσάλου σε αμμώδες έδαφος

Στην περίπτωση των αμμωδών εδαφών, διάφορες συμβατικές μέθοδοι υπολογισμού της οριακής φέρουσας ικανότητας πασσάλων θεωρούν ότι οι κατακόρυφες τάσεις σ_v και σ_{vb} της εξίσωσης 2.7 είναι ίσες με τις ενεργές γεωστατικές τάσεις. Εκτεταμένες εντούτοις έρευνες, (Vesic, 1967; Kerisel, 1961) οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τόσο η πλευρική αντίσταση όσο και η αντίσταση αιχμής δεν αυξάνονται απαραίτητα γραμμικά με το βάθος, αλλά αντίθετα μετά από ένα κρίσιμο βάθος δεν παρατηρείται περαιτέρω αύξηση. Ειδικότερα, κατά τον Vesic (1967) ο λόγος της αντίστασης αιχμής προς την οριακή αντίσταση της παράπλευρης επιφάνειας R_b/R_s πασσάλου σε ομογενές αμμώδες έδαφος είναι ανεξάρτητος του μεγέθους του πασσάλου και εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα της άμμου και τη μέθοδο τοποθέτησης των πασσάλων. Η συσχέτιση του λόγου R_b/R_s και της γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ , όπως προτάθηκε από τον Vesic (1967) δίνεται στο σχήμα 2.6. Στην ίδια αναφορά καταδεικνύεται ότι οι κατακόρυφες τάσεις πλευρικά του πασσάλου δεν είναι απαραίτητα ίσες με τις ενεργές γεωστατικές τάσεις (οι οποίες είναι γνωστό ότι αυξάνουν με το βάθος), αλλά παίρνουν μια οριακή τιμή σε κάποιο κρίσιμο βάθος πέραν του οποίου δεν αυξάνονται περαιτέρω. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται κατά τον Vesic στην αψίδωση (φαινόμενο θόλου), το οποίο ως σημειωθεί παρατηρείται και στις ομάδες πασσάλων υπό οριζόντια και κατακόρυφη φόρτιση καθώς επίσης και στις σήραγγες.

Οι προτάσεις του Vesic υιοθετούνται στις προτάσεις σχεδιασμού διαφόρων ερευνητών για τον καθορισμό άνω ορίων πλευρικής αντίστασης και αντίστασης αιχμής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η προσέγγιση του McClelland (1969) ο οποίος πρότεινε για μέτριας πυκνότητας καθαρή άμμο τις ακόλουθες παραμέτρους σχεδιασμού: $\phi'_\alpha = 30^\circ$, $K_s = 0.7$ για θλιπτικά φορτία ή $K_s = 0.5$ για εφελκυστικά φορτία,

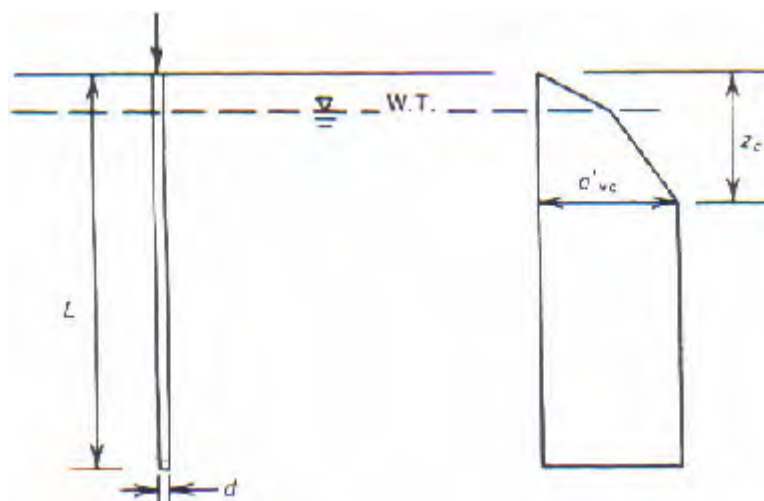
με μέγιστη τιμή πλευρικής αντίστασης 96 kPa και $N_q=41$, ενώ ως μέγιστη αντίσταση αιχμής προτείνεται η τιμή 9.6 MPa.

Ας σημειωθεί ότι κατά τον προσδιορισμό της παράπλευρης αντίστασης και της αντίστασης αιχμής κατά το DIN 4014, το οποίο παρουσιάζεται στη συνέχεια, καθώς επίσης κατά το γαλλικό κανονισμό, αλλά και άλλους ευρωπαϊκούς κανονισμούς δεν λαμβάνεται υπόψη η επικρατούσα κατακόρυφη ή οριζόντια τάση αλλά η πυκνότητα της άμμου μέσω επιτόπου δοκιμών.



Σχήμα 2.6 Μεταβολή του λόγου R_b/R_s με τη γωνία τριβής ϕ (Vesic, 1967).

Σύμφωνα επίσης με σχετική έρευνα του Bolton (1986) επί της διατμητικής αντοχής και της διασταλτικότητας αμμωδών εδαφών, όταν πυκνή άμμος υφίσταται διάτμηση υπό υψηλές θλιπτικές τάσεις, η μέγιστη γωνία τριβής είναι ίση με αυτήν που αντιστοιχεί σε διάτμηση υπό σταθερό όγκο. Κατά συνέπεια όσο το βάθος της διείδυσης πασσάλου αυξάνει η τιμή της φέρουσας ικανότητας αιχμής αυξάνεται με ένα σταδιακά μειούμενο ρυθμό και τείνει, σύμφωνα πάντα με τον Bolton, ασυμπτωτικά στην τιμή των 10-15 MPa.



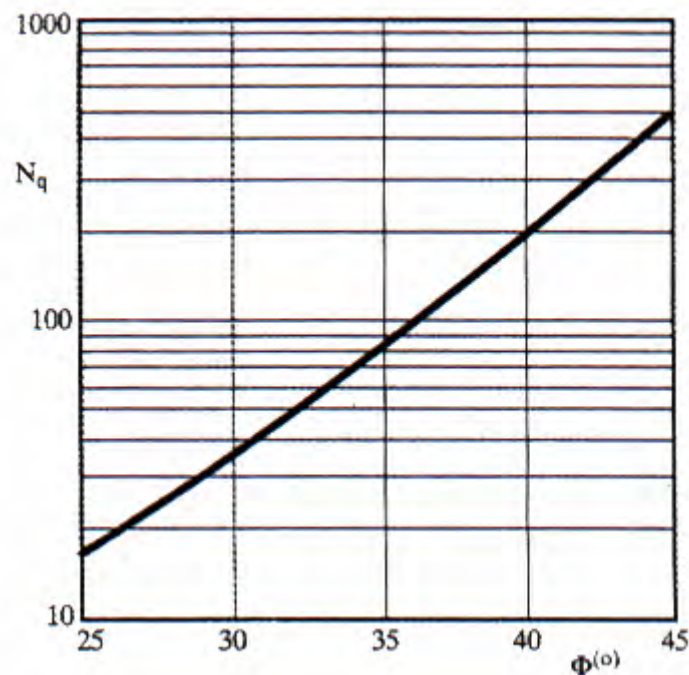
Σχήμα 2.7 Απλοποιημένη κατανομή κατακόρυφων τάσεων παράπλευρα του πασσάλου μέσα σε άμμο (Poulos and Davis, 1980).

Για την ανάπτυξη απλής και αποτελεσματικής μεθόδου εκτίμησης της φέρουσας ικανότητας η οποία να προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα προτείνεται από τους Poulos and Davis (1980), η θεώρηση ενεργών τάσεων αυξανόμενων με το βάθος μέχρι ενός κρίσιμου βάθους, πέραν του οποίου παραμένουν σταθερές (σχήμα 2.7). Η εφαρμογή αυτής της κατανομής ικανοποιεί τα δύο κύρια χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς που παρατηρήθηκαν από τον Vesic, σύμφωνα με τα οποία η μέση οριακή αντίσταση τριβής και η αντίσταση αιχμής παραμένουν αμετάβλητες πέραν από κάποιο συγκεκριμένο βάθος διεξόδου. Για τις περισσότερες των περιπτώσεων το κρίσιμο βάθος θεωρείται ότι βρίσκεται σε βάθος 20 φορές τη διάμετρο του πασσάλου, ενώ σύμφωνα με τον Meyerhof (1976) το κρίσιμο βάθος κυμαίνεται από 10 έως 30 φορές τη διάμετρο.

Για τον προσδιορισμό της τιμής του N_q στην εξίσωση 2.7 δίνονται στη διεθνή βιβλιογραφία τιμές με σημαντικές μεταξύ τους διαφορές ειδικότερα για γωνίες τριβής μεγαλύτερες των 35° . Οι προταθείσες από τους Berezantsev et al (1961) τυγχάνουν ευρείας αποδοχής και δίνονται στο σχήμα 2.8. Η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ θα πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα ώστε να λαμβάνει υπόψη της τον τύπο του μη-συνεκτικού υλικού, τη σχετική του πυκνότητα και τη μέση τάση κατά την αστοχία. Επισημαίνεται ότι ο προσδιορισμός του συντελεστή N_q έχει βασισθεί στην υπόθεση ομοιόμορφου εδάφους άνω και κάτω της αιχμής του πασσάλου. Σε περίπτωση όπου η αιχμή διατρυπά έστω και για λίγο συμπαγές στρώμα, ενώ το έδαφος άνωθεν είναι χαλαρό, συνιστάται η εφαρμογή των τιμών του N_q που αναφέρονται στις αβαθείς θεμελιώσεις και είναι κατά κανόνα μικρότερες από αυτές των βαθειών θεμελιώσεων.

Βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμών του Vesic (1967) εκτιμήθηκαν τιμές του $K_s \tan \phi'_\alpha$ και του αδιάστατου κρίσιμου βάθους z_c/d . Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας της άμμου αλλά μπορούν να εκφραστούν και με τη γωνία τριβής της άμμου κάνοντας χρήση της εξίσωσης 2.12 η οποία έχει προταθεί από το Meyerhof (1956).

$$\phi' = 28 + 15 D_r \quad (2.12)$$



Σχήμα 2.8 Συντελεστής φέρουσας ικανότητας N_q , κατά Berezantev et al. (1961).

Σε περίπτωση πολυστρωματικού εδαφικού σχηματισμού, το κρίσιμο βάθος αναφέρεται στη θέση του πασσάλου που συναντά την άμμο. Το σχήμα 2.9 παρουσιάζει συσχετίσεις μεταξύ του όρου $K_s \tan \phi'_\alpha$, της γωνίας τριβής και του λόγου του κρίσιμου βάθους προς την διάμετρο του πασσάλου z_c/d . Οι τιμές του όρου $K_s \tan \phi'_\alpha$ του σχήματος 2.9(b) αντιστοιχούν σε εμπηγνυόμενους πασσάλους. Η χρήση του διαγράμματος μπορεί εντούτοις να χρησιμοποιηθεί και για έγχυτους πασσάλους υπό την προϋπόθεση μείωσης της γωνίας τριβής ώστε να ληφθεί με τον τρόπο αυτό υπόψη η διαφοροποίηση των δύο ειδών πασσάλων. Οι τιμές που δίνονται στο νομογράφημα του σχήματος 2.9(c) προτείνονται από τον Meyerhof (1976) και βασίζονται στην παραδοχή ότι $\phi'_\alpha = 0.75\phi$. Οι τιμές αυτές είναι συμβατές με αυτές που προτείνονται από τους Reese, Touma και O'Neil (1976) για έγχυτους πασσάλους.

Η τιμή της γωνίας τριβής που χρησιμοποιείται στα διαγράμματα των σχημάτων 2.9 θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη της τη διατάραξη λόγω της τοποθέτησης του πασσάλου, ως εξής:

Εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι

- a) Για τον καθορισμό του συντελεστή φέρουσας ικανότητας N_q , η τιμή της γωνίας τριβής κάτω από τον πάσσαλο θα πρέπει να είναι η τελική τιμή αυτής μετά τη διαδικασία της έμπηξης, που δίνεται από την παρακάτω σχέση σύμφωνα με τον Kishida (1967):

$$\phi = \frac{\phi'_1 + 40}{2} \quad (2.13)$$

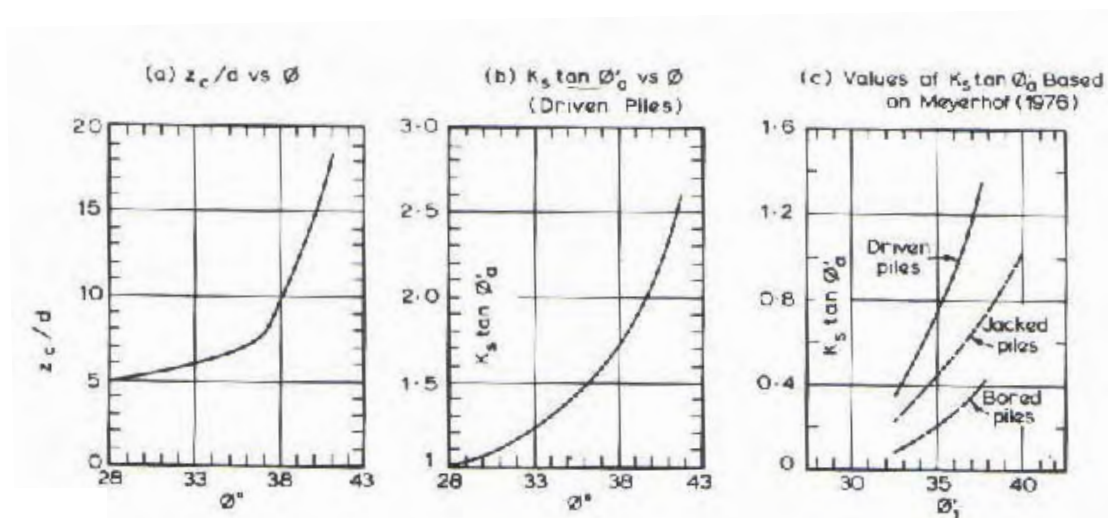
όπου ϕ'_1 : γωνία εσωτερικής τριβής πριν την εγκατάσταση του πασσάλου

- b) Για τον καθορισμό του $K_s \tan \phi'_a$ και του z_c/D η τιμή του ϕ κατά μήκος του άξονα του πασσάλου θα πρέπει να είναι η μέση τιμή πριν και μετά την έμπηξη κατά την εξίσωση:

$$\phi = \frac{3}{4} \phi'_1 + 10 \quad (2.14)$$

Έγχυτοι πάσσαλοι

- a) Για τον καθορισμό του N_q και του z_c/D η τιμή του ϕ μπορεί να ληφθεί ως $\phi'_1 - 3$, για να συμπεριληφθεί η πιθανότητα χαλάρωσης κατά την κατασκευή.
 b) Για τον καθορισμό του $K_s \tan \phi'_a$ χρησιμοποιείται το σχήμα 2.8 λαμβάνοντας απευθείας την τιμή του ϕ'_1 .



Σχήμα 2.9 Τιμές του z_c/D και $K_s \tan \phi'_a$ για πασσάλους σε άμμο.

Πιο απλουστευμένο τρόπο υπολογισμού του όρου $K_s \tan \phi'_a$, αποτελεί η πρόταση των Prakash and Sharma (1990) σύμφωνα με την οποία η τιμή του ϕ_a λαμβάνεται ίση με τα $2/3$ της γωνίας τριβής του εδάφους ενώ η τιμή του K_s προσδιορίζεται από τον πίνακα 2.2, ο οποίος προέκυψε ύστερα από αναλύσεις δοκιμαστικών φορτίσεων του Meyerhof (1976).

Τύπος Πασσάλου	K_s
Έγχυτος πάσσαλος	0.5
Εμπηγνύομενος πάσσαλος τύπου H	0.5-1.0
Εμπηγνύομενοι πάσσαλοι με εκτόπιση	1.0-2.0

Πίνακας 2.2 Τιμές του K_s για διάφορους τύπους πασσάλων σε μη – συνεκτικά εδάφη.

Από την περιγραφή της μεθοδολογίας προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας πασσάλου με απ' ευθείας χρήση των γεωτεχνικών παραμέτρων, καθίσταται φανερό ότι η εφαρμογή των μεθόδων αυτών χαρακτηρίζεται από σχετική περιπλοκότητα κατά την αποτίμηση της αντίστασης της παράπλευρης επιφάνειας και της αντίστασης αιχμής πασσάλου, ειδικά κατά την περίπτωση αμμωδών εδαφών και στραγγιζόμενων συνθηκών, όπου απαιτείται η γνώση της κατακόρυφης τάσης στο όριο της διεπιφάνειας. Στο λόγο αυτό θα πρέπει να αποδοθεί το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή τυγχάνει μικρής εφαρμογής και ότι ουσιαστικά οι διάφοροι κανονισμοί, ειδικά στον ευρωπαϊκό χώρο, προτείνουν τη χρήση τιμών μοναδιαίας τιμής πλευρικής τριβής και τάση αιχμής που εξαρτώνται μόνο από τα χαρακτηριστικά των εδαφικών στρώσεων και όχι από το εντατικό πεδίο στο όριο της διεπιφάνειας.

Φέρουσα ικανότητα πασσάλου σε βραχώδεις υπόβαθρο

Αποτελεί συνήθη τακτική οι εδραζόμενοι σε βραχώδεις σχηματισμούς πάσσαλοι να θεωρούνται ως καθαρά πάσσαλοι αιχμής. Κατά την απλουστευτική αυτή παραδοχή αγνοείται η όποια συνεισφορά της πλευρικής τριβής, η οποία μπορεί υπό συνθήκες να είναι σημαντική. Κύρια αιτιολογία για την απλουστευτική αυτή θεώρηση αποτελεί η δυσκολία εκτίμησης του βαθμού κινητοποίησης της πλευρικής αντίστασης, η οποία βρίσκεται σε πλήρη εξάρτηση από την κινηματική του προβλήματος (ικανοποιητική καθίζηση πασσάλου για την ανάπτυξη πλευρικής αντίστασης) και τη δυσκαμψία του περιβάλλοντος εδάφους. Ακραία περίπτωση αποτελεί η έδραση σε ασυμπίεστο πρακτικά βράχο και πλευρικό έδαφος πολύ μικρής διατμητικής αντοχής και μεγάλης συμπίεστότητας. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση αυτή η μικρή διατμητική παραμόρφωση που προκαλείται στο έδαφος κατά μήκος της επιφάνειας του πασσάλου δεν επιτρέπει την ανάπτυξη διατμητικής αντίστασης. Κατά συνέπεια η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου αντιστοιχεί αποκλειστικά στην αντίσταση αιχμής. Κατά την αντίθετη περίπτωση εντούτοις, όπου ο βραχώδης σχηματισμός είναι ιδιαίτερα συμπίεστος και το υπερκείμενο έδαφος μεγάλης διατμητικής αντοχής, η οποία αναπτύσσεται σε πολύ μικρή διατμητική παραμόρφωση, το ποσοστό της πλευρικής αντίστασης για μικρά επίπεδα φόρτισης μπορεί να αντιστοιχεί σε 20 έως 30%. Το ποσοστό αυτό μειώνεται με την αύξηση του φορτίου.

Για θεμελιώσεις σε βράχο χρησιμοποιούνται συνήθως έγχυτοι πάσσαλοι, οι οποίοι κατασκευάζονται με διάνοιξη μέχρι το βραχώδες υπόβαθρο, στο οποίο διεισδύουν κατά ελάχιστο μήκος της τάξης των δύο διαμέτρων του πασσάλου. Η απόδοση των έγχυτων πασσάλων σε βράχο έχει μελετηθεί εργαστηριακά καθώς και με αναλυτικές μεθόδους μετά από απλοποίηση του προβλήματος (ελαστικός ημίχωρος). Η ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων και η ευρεία δυνατότητα γρήγορων υπολογιστών επέτρεψε την αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος. Ο συνδυασμός της προσέγγισης αυτής με δοκιμαστικές φορτίσεις, ώστε να είναι δυνατή η επιβεβαίωση και ο έλεγχος των αποτελεσμάτων, απετέλεσε στην αρχή συνήθη πρακτική. Καθοριστικό παράγοντα κατά την προσέγγιση με αριθμητικές μεθόδους

αποτελεί η απόκριση κατά μήκος της διεπιφάνειας βράχου-σκυροδέματος και για το λόγο αυτό διεξήχθησαν αρκετές εργαστηριακές ερευνητικές εργασίες (Ladanyi and Domingue, 1980; Pells et al., 1980). Στο θέμα της απόκρισης των πασσάλων με έδραση σε βραχώδες υπόβαθρο αφιερώνεται ειδικό κεφάλαιο της παρούσας όπου η ποιοτική και ποσοτική προσέγγιση του προβλήματος εξετάζεται με τη χρήση αριθμητικής ανάλυσης. Στη συνέχεια δίνονται απλοποιημένες προσεγγίσεις του προβλήματος προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας πασσάλων με έδραση σε βραχώδες υπόβαθρο.

Η έδραση σε αρραγές βραχώδες υπόβαθρο πολύ συχνά οδηγεί σε φέρουσα ικανότητα η οποία περιορίζεται από την αντοχή του συστατικού υλικού του πασσάλου παρά από την αναπτυσσόμενη στο βράχο τάση. Σε περίπτωση αποσαθρωμένων βραχωδών σχηματισμών, η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου μειώνεται δραστικά ανάλογα με το βαθμό αποσάθρωσης καθώς και με τον αριθμό και το είδος των ασυνεχειών. Στις περιπτώσεις που τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ιδιαίτερα δυσμενή και η αντίσταση αιχμής παίρνει περιορισμένη τιμή είναι δυνατόν η πλευρική αντίσταση να συνεισφέρει σε σημαντικό ποσοστό στην ολική αντίσταση. Η αποτίμηση της πλευρικής αντίστασης αποτελεί ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα δεδομένου ότι η αναγωγή του σε έντονο βαθμό ασυνεχούς μέσου σε συνεχές δεν είναι εύκολα δυνατή.

Για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας αιχμής έχουν προταθεί διάφορες μεθοδολογίες, οι κυριότερες των οποίων δίνονται στη συνέχεια.

- Θεωρία φέρουσας ικανότητας για τον υπολογισμό της οριακής αντίστασης αιχμής. Κατά τη μέθοδο αυτή είναι δυνατός ο προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής c και ϕ της βραχομάζας με την εφαρμογή του κριτηρίου των Hoek and Brown.
- Χρήση εμπειρικών τιμών για τον καθορισμό της επιτρεπόμενης τάσης στην αιχμή του πασσάλου. Οι τιμές αυτές προσδιορίζονται συχνά συναρτήσει της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη καθώς και συναρτήσει αποτελεσμάτων επιτόπου δοκιμών και υιοθετούνται από πολλούς κανονισμούς (DIN 4014, Canadian Foundation Engineering Manual).

Από τον Tomlinson (1986) δίνονται τιμές επιτρεπόμενων τάσεων σε βράχο σε πινακοποιημένη μορφή ανάλογα με τον τύπο, την ποιότητα και το διάστημα μεταξύ των διακλάσεων του βράχου. Ο απευθείας προσδιορισμός συναρτήσει της τιμής της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του βράχου αποτελεί πιο εύκολη και αντικειμενική προσέγγιση. Σε γενικές γραμμές οι τιμές της φέρουσας ικανότητας είναι κατά κανόνα μεγαλύτερες από το δεκαπλάσιο της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη. Για την πλήρη κινητοποίηση εντούτοις της οριακής αυτής τιμής απαιτούνται μεγάλες καθιζήσεις και για το λόγο αυτό προτείνεται η υιοθέτηση τιμής της τάξης του $3 q_u$ ως πιο συμβατής με την επιθυμούμενη απόκριση της θεμελίωσης. Στην ίδια τάξη μεγέθους βρίσκεται και ο κανονισμός DIN 4014 για μικρή σχετικά αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη, ενώ για

μεγάλες τιμές προτείνεται η υιοθέτηση αυτούσιας της τιμής σε ανεμπόδιστη θλίψη. Σημαντικά μικρότερη τιμή προτείνεται από τους Ρουίλος and Davis (1980), όπου η προτεινόμενη τιμή είναι ίση με $0.3 q_u$. Πειραματικά αποτελέσματα τεκμηριώνουν ότι η υιοθέτηση της τιμής της τάξης $3 q_u$ για την επιτρεπόμενη τάση σε βράχο εμπεριέχει συντελεστή ασφαλείας της τάξης του 3. Η υιοθέτηση χαμηλότερης τιμής, π.χ $0.3 q_u$ ενδείκνυται όταν το βραχώδες υπόβαθρο εμφανίζει χαρακτηριστικά αδυναμίας όπως καρστικά κενά ή ανοικτές διακλάσεις κοντά στην αιχμή του πασσάλου, ή ακόμη στην περίπτωση μικρής και μόνο διεύθυνσης του πασσάλου στο βραχώδες υπόβαθρο (διεύθυνση μικρότερη της μίας διαμέτρου).

2.2.3 Γερμανικός Κανονισμός DIN 4014

Η προτεινόμενη κατά τον γερμανικό κανονισμό μεθοδολογία καθορίζει το πλαίσιο για το σχεδιασμό κατακόρυφα φορτιζόμενων πασσάλων, ενώ τονίζει ότι ο αξιόπιστος σχεδιασμός απαιτεί χρήση αριθμητικών μεθόδων και αναλυτικών υπολογισμών καθώς και δοκιμαστικών φορτίσεων. Βρίσκει εντούτοις ευρύ πεδίο εφαρμογής δεδομένου ότι εμπεριέχει ποιοτική και ποσοτική αξιοποίηση δεκάδων δοκιμαστικών φορτίσεων. Θα πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι αποτελεί συντηρητική προσέγγιση ώστε να καλύπτει προς την πλευρά της ασφάλειας τη στατιστική επεξεργασία από την οποία προκύπτουν οι προτεινόμενες από αυτόν τιμές μοναδιαίας πλευρικής αντίστασης και αντίστασης αιχμής. Θα πρέπει να σημειωθεί ακόμη ότι οι προτεινόμενες τιμές βρίσκουν πεδίο εφαρμογής ελλείψει αποτελεσμάτων δοκιμαστικής φόρτισης.

Για τον καθορισμό της φέρουσας ικανότητας ο γερμανικός κώδικας DIN 1054 (1976) δίνει τους θεμελιώδεις κανόνες και αποτελεί τη βασική αρχή στα γεωτεχνικά θέματα της Γερμανίας. Ο κώδικας DIN 1054 αποτελεί επίσης το πλαίσιο για το σχεδιασμό πασσάλων, ενώ οι κώδικες DIN 4014 για έγχυτους πασσάλους και DIN 4026 για εμπηγνυόμενους πασσάλους δίνουν πιο λεπτομερείς συστάσεις για το σχεδιασμό και την κατασκευαστική ακολουθία των συγκεκριμένων πασσάλων.

Σημειώνεται ακόμη ότι στη Γερμανία όλοι οι κανονισμοί βασίζονται στη θεώρηση ολικού συντελεστή ασφαλείας, ο οποίος εφαρμόζεται επί του οριακού φορτίου προκειμένου να προσδιορισθεί το επιτρεπόμενο φορτίο. Οι τιμές των προτεινόμενων συντελεστών ασφαλείας για τον προσδιορισμό των επιτρεπόμενων φορτίων μετά από εφαρμογή στο φορτίο που αντιστοιχεί στην οριακή κατάσταση αστοχίας παρατίθενται στον πίνακα 2.3. Ειδικότερα το φορτίο σχεδιασμού ενός πασσάλου προκύπτει μετά από διαίρεση της χαρακτηριστικής τιμής της φέρουσας ικανότητας με τον αντίστοιχο συντελεστή ασφαλείας. Οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας καθορίζονται από το DIN 1055 και διακρίνονται στις εξής τρεις περιπτώσεις:

- *Περίπτωση φόρτισης 1* : μόνιμα φορτία και τακτικά εναλλασσόμενες δράσεις.

- *Περίπτωση φόρτισης 2* : μη τακτικά εναλλασσόμενες δράσεις και δράσεις κατά τη διάρκεια της κατασκευής.
- *Περίπτωση φόρτισης 3* : ασυνήθιστα εναλλασσόμενες και τυχαίες δράσεις.

Στον πίνακα 2.3 δίνονται επίσης οι συντελεστές ασφαλείας σε περίπτωση που αντί της χρήσης γεωτεχνικών δεδομένων χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα δοκιμαστικών φορτίσεων. Όπως φαίνεται από τον πίνακα η αριθμητική τιμή του καθολικού συντελεστή ασφαλείας μειώνεται όσο αυξάνεται η τιμή των δοκιμαστικών φορτίσεων. Παρατηρείται ότι ακόμη και στην περίπτωση διεξαγωγής πέραν των τριών δοκιμαστικών φορτίσεων εφαρμόζεται συντελεστής ασφαλείας, ενώ στην περίπτωση μίας δοκιμαστικής φόρτισης, η πλέον συνήθης περίπτωση κατά την οποία διεξάγονται δοκιμαστικές φορτίσεις, οι προτεινόμενοι συντελεστές είναι ταυτόσημοι με αυτούς που εφαρμόζονται με τη χρήση και μόνο γεωτεχνικών δεδομένων. Η διεξαγωγή στατικών δοκιμών φορτίσεων αποτελεί ιδιαίτερα δύσκολη και οικονομικά επιβαρυντική μέθοδο, ενώ σοβαρό μειονέκτημα της αποτελεί και ο απαιτούμενος χρόνος εκτέλεσης της. Παρουσιάζει εντούτοις σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς τον προσδιορισμό της απόκρισης των πασσάλων και τον προσδιορισμό των ελατηριακών σταθερών προσομοίωσης των θεμελιώσεων με πασσάλους. Υπό την έννοια αυτή καθίστανται, σύμφωνα με όσα ειδικότερα αναφέρονται στην παράγραφο 2.5 ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες. Πέραν των υπολοίπων τα αποτελέσματα των δοκιμαστικών φορτίσεων είναι σε θέση, μετά από διεξαγωγή αντιστρόφων αναλύσεων να προσδιορίσουν την διατμητική αντοχή των εδαφικών στρώσεων και τον βαθμό ενεργοποίησης τους συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου και της κινηματικής κατάστασης στο όριο της παράπλευρης επιφάνειας και της αιχμής των πασσάλων.

Τύπος πασσάλου	Αριθμός δοκιμαστικών φορτίσεων κάτω από τις ίδιες συνθήκες φόρτισης	Συνολικός συντελεστής ασφαλείας n για περίπτωση φόρτισης		
		1	2	3
πάσσαλοι θλίψης	1	2	1.75	1.5
	≥ 2	1.75	1.75	1.3
εφελκυσμένοι πάσσαλοι με κλίση < 2:1*	1	2	2	1.75
	≥ 2	2	1.75	1.3
εφελκυσμένοι πάσσαλοι με κλίση < 1:1*	1	1.75	1.75	1.75
	≥ 2			
πάσσαλοι με εναλλαγή φόρτισης (θλίψη και εφελκυσμός)	≥ 2	2	2	1.75

* για εφελκυσμένους πασσάλους με κλίση ανάμεσα στο 2:1 και στο 1:1 ο συνολικός συντελεστής ασφαλείας λαμβάνεται με γραμμική παρεμβολή ανάλογα με την γωνία κλίσης

Πίνακας 2.3 Συντελεστής ασφαλείας n για τον σχεδιασμό πασσάλων όπως καθορίζεται από τον γερμανικό κανονισμό (DIN 1054).

Στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν αποτελέσματα από δοκιμαστικές φορτίσεις, περιπτώσεις που αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό σχεδιασμού θεμελιώσεων, το οριακό και το επιτρεπόμενο φορτίο καθώς και η απλοποιημένη καμπύλη απόκρισης φορτίου καθίζησης της κεφαλής του πασσάλου προσδιορίζονται με βάση προτεινόμενες τιμές παραμέτρων από τον κανονισμό. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών πραγματοποιείται με τη θεώρηση απλοποιημένων εδαφικών συνθηκών, όπου το εδαφικό υλικό των στρώσεων κατατάσσεται σε συνεκτικό ή ψαθυρό. Η κατάταξη αυτή προσδιορίζεται με βάση μία και μόνο συνθήκη που αναφέρεται στο ποσοστό του λεπτόκοκκου υλικού που διέρχεται από το κόσκινο με διάμετρο 0.06 mm, το οποίο θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 15% (σύμφωνα με το DIN 1054 §2.1.1.1). Στην περίπτωση των συνεκτικών εδαφών η μοναδιαία αντίσταση τριβής καθώς και η τάση αιχμής προσδιορίζονται συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u . Στην περίπτωση των ψαθυρών εδαφών χρησιμοποιείται η αντίσταση αιχμής στατικού πενετρομέτρου q_{sk} (ή q_c σύμφωνα με το διεθνή τρόπο συμβολισμού). Η περίπτωση των βράχων διαχωρίζεται κατά το DIN 4014, όπου προσδιορίζεται μόνο η φέρουσα ικανότητα και όχι και η καμπύλη απόκρισης φορτίου καθίζησης.

Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν αποτελέσματα από στατική δοκιμαστική φόρτιση, ο γερμανικός κανονισμός προτείνει κάποιες τιμές, οι οποίες βασίζονται σε μακροχρόνιες εμπειρίες για τον καθορισμό της φέρουσας ικανότητας ή για την κατασκευή της καμπύλης απόκρισης του πασσάλου. Εάν από αυτές τις τιμές είναι δυνατόν να καθοριστεί η φέρουσα ικανότητα ή/και η καμπύλη απόκρισης εξαρτάται από τον τύπο του πασσάλου. Ως εμπειρικές τιμές νοούνται οι τιμές για την αντίσταση αιχμής $q_{bk(s)}$, τιμές για την οριακή πλευρική τριβή q_{slik} αλλά και τιμές για την ολική αντίσταση του πασσάλου R_k . Στις περισσότερες περιπτώσεις οι τιμές αυτές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ως χαρακτηριστικές τιμές σύμφωνα με τον Ευροκώδικα 7. Μόνο σε πολύ ιδιαίτερες περιπτώσεις δεν μπορούν να εφαρμοστούν και αυτό διότι η επιλογή τους έγινε με μεγάλη προσοχή.

Η χρήση των εμπειρικών τιμών για την αντίσταση αιχμής και την παράπλευρη τριβή όπως δίνονται από το DIN 4014 για έγχυτους πασσάλους εξαρτάται από μερικούς παράγοντες. Οι εδαφικές συνθήκες θα πρέπει να είναι ομοιόμορφες σε όλη την περιοχή ενώ η αντοχή των μη συνεκτικών εδαφών θα πρέπει να καθορίζεται από την αντοχή σε διείσδυση του στατικού πενετρομέτρου q_c και η αντοχή των συνεκτικών εδαφών από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u .

Η δεύτερη συνθήκη είναι ότι το ελάχιστο μήκος διείσδυσης του πασσάλου μέσα σε έδαφος με επαρκή φέρουσα ικανότητα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 2.5 m. Τέτοια εδάφη σύμφωνα με το DIN 1054 νοούνται τα ημί-στερεά συνεκτικά εδάφη ή τα μη συνεκτικά επαρκούς φέρουσας ικανότητας. Ημί-στερεά θεωρούνται τα εδάφη εκείνα τα οποία έχουν δείκτη συνεκτικότητας I_c μεγαλύτερο της μονάδας.

$$I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_p} \geq 1.0 \quad (2.17)$$

όπου w_L : το όριο υδαρότητας

w_p : το όριο πλαστικότητας

w : η φυσική υγρασία

Θεωρείται ότι κάποιο μη συνεκτικό έδαφος έχει επαρκή φέρουσα ικανότητα όταν η σχετική πυκνότητα του είναι μεγαλύτερη του 0.4 για ομοιόμορφο έδαφος και μεγαλύτερη από 0.55 για μη ομοιόμορφο έδαφος. Ως ομοιόμορφο έδαφος θεωρείται εκείνο με συντελεστή ομοιομορφίας μεγαλύτερο του 3 ($U \geq 3$).

Μια άλλη συνθήκη είναι ότι το πάχος του στρώματος με την επαρκή φέρουσα ικανότητα, εκεί δηλαδή που εδράζεται ο πάσσαλος, θα πρέπει να είναι κατά τρεις φορές μεγαλύτερο της διαμέτρου του πασσάλου και τουλάχιστον 1.5 m.

Η διαδικασία που ακολουθείται από το DIN 4014 για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας έγχυτων πασσάλων περιγράφεται παρακάτω.

Η αντίσταση του πασσάλου R υπολογίζεται ως το άθροισμα της αντίστασης αιχμής R_b και της ολικής αντίστασης τριβής στην παράπλευρη επιφάνεια R_s .

$$R_{(s)} = R_{b(s)} + R_{s(s)} \quad (2.18)$$

Τόσο η αντίσταση αιχμής όσο και η αντίσταση τριβής εξαρτώνται από την καθίζηση s της κεφαλής του πασσάλου, τη διάμετρο D του πασσάλου (ή τη διάμετρο D_f της διευρυμένης βάσης, αν υπάρχει) και από την αντοχή του εδάφους που εκφράζεται από το q_{ck} ή το c_{uk} . Η αντοχή του εδάφους ταξινομείται για τα μη συνεκτικά εδάφη σύμφωνα με τη χαρακτηριστική τιμή της αντοχής διείδυσης q_{ck} και για τα συνεκτικά σύμφωνα με τη χαρακτηριστική τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_{uk} . Η αντοχή διείδυσης κώνου q_{ck} καθορίζεται από την αντίστοιχη δοκιμή διείδυσης κώνου CPT ή από δοκιμή δυναμικής διείδυσης. Εάν είναι αδύνατον να διεξαχθεί η CPT, εξαιτίας για παράδειγμα παρουσίας χαλικιών, τότε χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα δοκιμής δυναμικής διείδυσης DPH με τη συσχέτιση:

$$q_{ck} \text{ (MPa)} = N_{10} \text{ (αριθμός χτύπων για διείδυση 10 cm)} \quad (2.19)$$

Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_{uk} μπορεί να καθοριστεί για συνεκτικά εδάφη από δοκιμή διείδυσης κώνου, από δοκιμή πτερυγίου ή από εργαστηριακές δοκιμές.

Στο DIN 4014 δίνονται 4 πίνακες με εμπειρικές τιμές για την αντίσταση αιχμής $q_{bk(s)}$ (MPa) και για την οριακή πλευρική τριβή q_{slk} (q_{ck}) για μη συνεκτικά εδάφη και ένας πίνακας για την οριακή αντίσταση τριβής q_{slk} (c_{uk}) για συνεκτικά εδάφη. Ο πίνακας 2.4 δίνει τις τιμές για αντίσταση αιχμής $q_{bk(s)}$ για μη συνεκτικά εδάφη και ο πίνακας 2.5 για την οριακή πλευρική τριβή q_{slk} . Οι τιμές για την $q_{bk(s)}$ ποικίλουν ανάμεσα στο 0.7 και 4 MPa και εξαρτώνται από την αντοχή του εδάφους, η οποία περιγράφεται από την

αντοχή διείσδυσης κώνου, αλλά και από το λόγο καθίζησης s προς τη διάμετρο D . Οι τιμές της οριακής πλευρικής τριβής q_{slk} ποικίλουν ανάμεσα στα 0 και 0.12 MPa. Οι πίνακες 2.6 και 2.7 συνοψίζουν τις εμπειρικές τιμές για συνεκτικά εδάφη από το DIN 4014. Αν επιχειρηθεί σύγκριση των τιμών για τα συνεκτικά και τα μη συνεκτικά εδάφη παρατηρείται ότι οι τιμές των μη συνεκτικών εδαφών είναι ελαφρώς μεγαλύτερες.

Με τις παραπάνω εμπειρικές τιμές μπορούν να υπολογισθούν η αντίσταση στη βάση του πασσάλου $R_{b(s)}$ και η οριακή αντίσταση κατά μήκος του άξονα R_s .

$$R_{b(s)} = q_{sk(s)} \pi \frac{D_f^2}{4} \quad (2.20)$$

$$R_s = \pi D \sum (q_{silks} L_i)$$

Η χαρακτηριστική τιμή της οριακής φέρουσας ικανότητας R_k του πασσάλου, όπως καθορίζεται από την παραπάνω μέθοδο, θεωρείται ότι κινητοποιείται για την οριακή καθίζηση $s_g = 0.1D$ και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$R_{k(sg)} = R_{bk(s)} + R_{sk(s)} = q_{bk(sg)} \pi \frac{D_f^2}{4} + \pi D \sum (q_{silks(s)} L_i) \quad (2.21)$$

Για πασσάλους οι οποίοι εδράζονται σε βράχο ο DIN 4014 προσφέρει και πάλι εμπειρικές τιμές για τον καθορισμό της φέρουσας ικανότητας πασσάλων. Ο πίνακας 2.8 δίνει τις εμπειρικές τιμές της οριακής αντίστασης αιχμής και της οριακής πλευρικής τριβής, οι οποίες εξαρτώνται από την χαρακτηριστική αντοχή σε μονοαξονική θλίψη q_{uk} του βράχου. Εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμες δοκιμαστικές φορτίσεις για παρόμοιες εδαφικές συνθήκες, η οριακή φέρουσα ικανότητα υπολογίζεται από την εξίσωση 2.21.

Οι προτάσεις του DIN 4014 για πασσάλους εδραζόμενους σε βράχο αγνοούν το γεγονός ότι η φέρουσα ικανότητα τους επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα συστήματα ασυνεχειών που διατρέχουν το βράχο. Οι τιμές της οριακής αντίστασης αιχμής και της πλευρικής αντίστασης δεν είναι μόνο συνάρτηση της χαρακτηριστικής μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής q_{uk} του βράχου, αλλά και των ιδιοτήτων και της κατεύθυνσης των ασυνεχειών.

δείκτης καθίζησης S/D ή S/D _F	χαρακτηριστική αντίσταση αιχμής q_{bk} (MPa)*			
	για μέση τιμή αντίστασης διείσδυσης κώνου q_{sk} (MPa)			
	10	15	20	25
0.02	0.7	1.05	1.4	1.75
0.03	0.9	1.35	1.8	2.25
0.1=S _q	2	3	3.5	4

* ενδιάμεσες τιμές θα πρέπει να λαμβάνονται με γραμμική παρεμβολή. Εάν ο έγχυτος πάσσαλος έχει διευρυμένη βάση, τότε όλες οι τιμές μειώνονται κατά 75%

Πίνακας 2.4 Χαρακτηριστικές τιμές αντίστασης αιχμής q_{bk} , εξαρτώμενες από το δείκτη καθίζησης s/D και τη μέση αντίσταση διείσδυσης κώνου q_{sk} σε μη συνεκτικά εδάφη κατά DIN 4014.

αντοχή μη συνεκτικού εδάφους όπως καθορίζεται από την αντίσταση διείσδυσης κώνου q_{ck} (MPa)	χαρακτηριστική οριακή πλευρική τριβή q_{sIk} (MPa)*
0	0
5	0.04
10	0.08
≥ 15	0.12

* ενδιάμεσες τιμές λαμβάνονται από γραμμική παρεμβολή.

Πίνακας 2.5 Χαρακτηριστικές τιμές της οριακής πλευρικής τριβής q_{sIk} σε μη συνεκτικά εδάφη κατά DIN 4014.

δείκτης καθίζησης S/D ή S/D _F	χαρακτηριστική αντίσταση αιχμής q_{bk} (MPa)*	
	για αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_{uk} (MPa)	
	0.1	0.2
0.02	0.35	0.9
0.03	0.45	1.1
0.1=S _q	0.8	1.5

* ενδιάμεσες τιμές θα πρέπει να υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή. Εάν ο έγχυτος πάσσαλος έχει διευρυμένη βάση, οι τιμές μειώνονται κατά 75%

Πίνακας 2.6 Χαρακτηριστικές τιμές αντίστασης αιχμής q_{bk} , εξαρτώμενες από το δείκτη καθίζησης s/D και την αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_{uk} σε συνεκτικά εδάφη κατά DIN 4014.

αντοχή συνεκτικού εδάφους όπως καθορίζεται από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_{uk} (MPa)	χαρακτηριστική οριακή πλευρική τριβή q_{sik} (MPa)*
0.025	0.025
0.1	0.04
≥ 0.2	0.06
* ενδιάμεσες τιμές λαμβάνονται από γραμμική παρεμβολή.	

Πίνακας 2.7 Χαρακτηριστικές τιμές της οριακής πλευρικής τριβής q_{sik} σε συνεκτικά εδάφη κατά DIN 4014.

χαρακτηριστική μονοαξονική θλιπτική αντοχή q_{uk} (MPa)	χαρακτηριστική οριακή αντίσταση αιχμής q_{bik} (MPa)	χαρακτηριστική οριακή πλευρική τριβή q_{sik} (MPa)
0.5	1.5	0.08
5	5	0.5
20	10	0.5
* ενδιάμεσες τιμές λαμβάνονται με γραμμική παρεμβολή		

Πίνακας 2.8 Χαρακτηριστικές τιμές της οριακής αντίστασης αιχμής q_{bik} και της οριακής πλευρικής τριβής q_{sik} για πασσάλους σε βράχο DIN 4014.

2.3 Υπολογισμός καθιζήσεων

Η μεταφορά των αξονικών φορτίων των ανωδομών σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα μέσω των πασσάλων πραγματοποιείται πρακτικά με εκδήλωση πολύ μικρών καθιζήσεων. Οι πρώτες προσεγγίσεις προσδιορισμού των καθιζήσεων μεμονωμένου πασσάλου ανάγονται στη δεκαετία του 1970 και αποτελούν πρακτικά εμπειρικές προσεγγίσεις. Στην εξίσωση 2.22 δίνεται η προτεινόμενη από τον Vesic (1970, 1977) εκτίμηση της αναμενόμενης καθίζησης.

$$S = \frac{D}{100} + \frac{P L}{A E} \quad (2.22)$$

- όπου S : η καθίζηση στην κεφαλή του πασσάλου σε cm
D : η διάμετρος του πασσάλου σε cm
P : το επιβαλλόμενο φορτίο στη κεφαλή του πασσάλου
A : η διατομή του πασσάλου
L : το μήκος του πασσάλου
E : το μέτρο ελαστικότητας του πασσάλου

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης 2.22 αντιστοιχεί στην καθίζηση του πασσάλου λόγω της παραμόρφωσης του εδάφους ενώ ο δεύτερος προκύπτει από τη βράχυνση του πασσάλου. Το γεγονός ότι ο όρος που ανάγεται στο έδαφος είναι αμετάβλητος του φορτίου και της συμπίεστικότητας του εδάφους οδηγεί ευθύς εξ αρχής στο

συμπέρασμα ότι η ισχύς της εξίσωσης δεν μπορεί να εφαρμοσθεί για διάφορα φορτία. Η εφαρμογή της περιορίζεται στο εύρος του επιτρεπόμενου φορτίου. Η δεύτερη παρατήρηση αναφέρεται στο δεύτερο όρο, όπου για την εκτίμηση της βράχυνσης του πασσάλου θεωρείται σταθερό αξονικό φορτίο καθ' όλο το μήκος του πασσάλου, γεγονός που ισχύει για πασσάλους με πολύ μικρή πλευρική αντίσταση. Οι δύο ανωτέρω παρατηρήσεις αναφέρονται ως απόδειξη του μειωμένου αρχικά ενδιαφέροντος για τις καθιζήσεις των πασσάλων, δεδομένου ότι το πλαίσιο των πολύ μικρών τιμών ήταν από μόνο του επαρκές για το σχεδιασμό των έργων. Ας αναφερθεί χαρακτηριστικά ότι για το σχεδιασμό γεφυρών μέχρι την προηγούμενη δεκαετία (ίσως ακόμη και σήμερα σε αρκετές περιπτώσεις) κατά τις επιλύσεις, για απλουστευτικούς λόγους, οι θεμελιώσεις με πασσάλους προσομοιώνονταν ως πακτώσεις. Σε κάθε περίπτωση η επέκταση της χρήσης των πασσαλοθεμελιώσεων για την ανάληψη σημαντικά μεγάλων φορτίων ανωδομών ιδιαίτερα ευαίσθητων στην εκδήλωση ολικών ή διαφορικών καθιζήσεων οδήγησε στην έναρξη διερεύνησης του επιστημονικού πεδίου της απόκρισης των πασσάλων.

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η διαδικασία προσδιορισμού της αναμενόμενης καθίζησης πασσάλου σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία από τους Poulos and Davis (1980) κατά την οποία γίνεται χρήση νομογραφημάτων από παραμετρικές αναλύσεις, σύμφωνα με το DIN 4014 (καθορισμός τεσσάρων χαρακτηριστικών σημείων), καθώς και με την πρόταση του γαλλικού κανονισμού μετά την τροποποίηση του το 1993 (πρόκειται ουσιαστικά για προσδιορισμό των ελατηριακών σταθερών για περαιτέρω χρήση σε ανάλυση t-z). Η χρήση αριθμητικών μεθόδων για τον προσδιορισμό των καθιζήσεων αποτελεί σήμερα αποτελεσματικότερη μέθοδο, λόγω κυρίως επίλυσης σημαντικών προβλημάτων υπολογιστικών δυνατοτήτων και προσομοίωσης εδαφικών υλικών αλλά και μηχανισμών. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για τον προσδιορισμό της απόκρισης πασσάλου ή ομάδας πασσάλων και όχι για τον προσδιορισμό της καθίζησης που αντιστοιχεί σε ένα δεδομένο φορτίο. Για το λόγο αυτό οι μέθοδοι αυτές εντάσσονται σε διαφορετική παράγραφο, η οποία ακολουθεί.

Μέθοδος των Poulos and Davis

Για τον υπολογισμό των καθιζήσεων μεμονωμένου πασσάλου οι Poulos and Davis (1980) εφαρμόζουν τη θεωρία ελαστικότητας. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική δεδομένου ότι αν και απλοποιητική δεν αφήσεται ιδιαίτερα της πραγματικότητας για τις περισσότερες των περιπτώσεων μέχρι του επιτρεπόμενου φορτίου λειτουργίας. Αντίθετα, σε περίπτωση που στόχο αποτελεί ο προσδιορισμός της απόκρισης μέχρι μεγάλων μετακινήσεων, που χαρακτηρίζουν τη φόρτιση πασσάλου μέχρι το οριακό φορτίο, η μέθοδος δεν συνίσταται και δεν προτείνεται άλλωστε και από τους ίδιους τους ερευνητές.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί σειρά νομογραφημάτων τα οποία προσδιορίστηκαν μετά

από παραμετρικές επιλύσεις. Κατά τις επιλύσεις αυτές ο πάσσαλος χωρίζεται σε ομοιόμορφα φορτιζόμενα επιμέρους στοιχεία και η επίλυση πραγματοποιείται με την παραδοχή μη ολίσθησης κατά μήκος της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους (συμβιβαστό μετακινήσεων κατά μήκος της διεπιφάνειας). Για τον υπολογισμό των μετακινήσεων χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις του Mindlin (1932). Ουσιαστική παραδοχή της μεθόδου αποτελεί επίσης η θεώρηση ομοιόμορφης κατανομής της διατμητικής τάσης κατά μήκος της παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου.

Η αναμενόμενη καθίζηση προσδιορίζεται, σύμφωνα πάντα με τους Poulos and Davis (1980), από την ακόλουθη εξίσωση:

$$S = \frac{P I}{D E_s} \quad (2.23)$$

όπου S : η καθίζηση του πασσάλου

P : το εφαρμοζόμενο αξονικό φορτίο

E_s : το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

D : η διάμετρος του πασσάλου

I : διορθωτικός συντελεστής

: $I_o R_k R_h R_v$ για πασσάλους τριβής

: $I_o R_k R_b R_v$ για πασσάλους αιχμής

I_o : συντελεστής καθίζησης για ασυμπύεστο πάσσαλο σε άπειρο ημι-χώρο με $\nu_s=0.5$

R_k : διορθωτικός συντελεστής για τη συμπίεστικότητα του πασσάλου

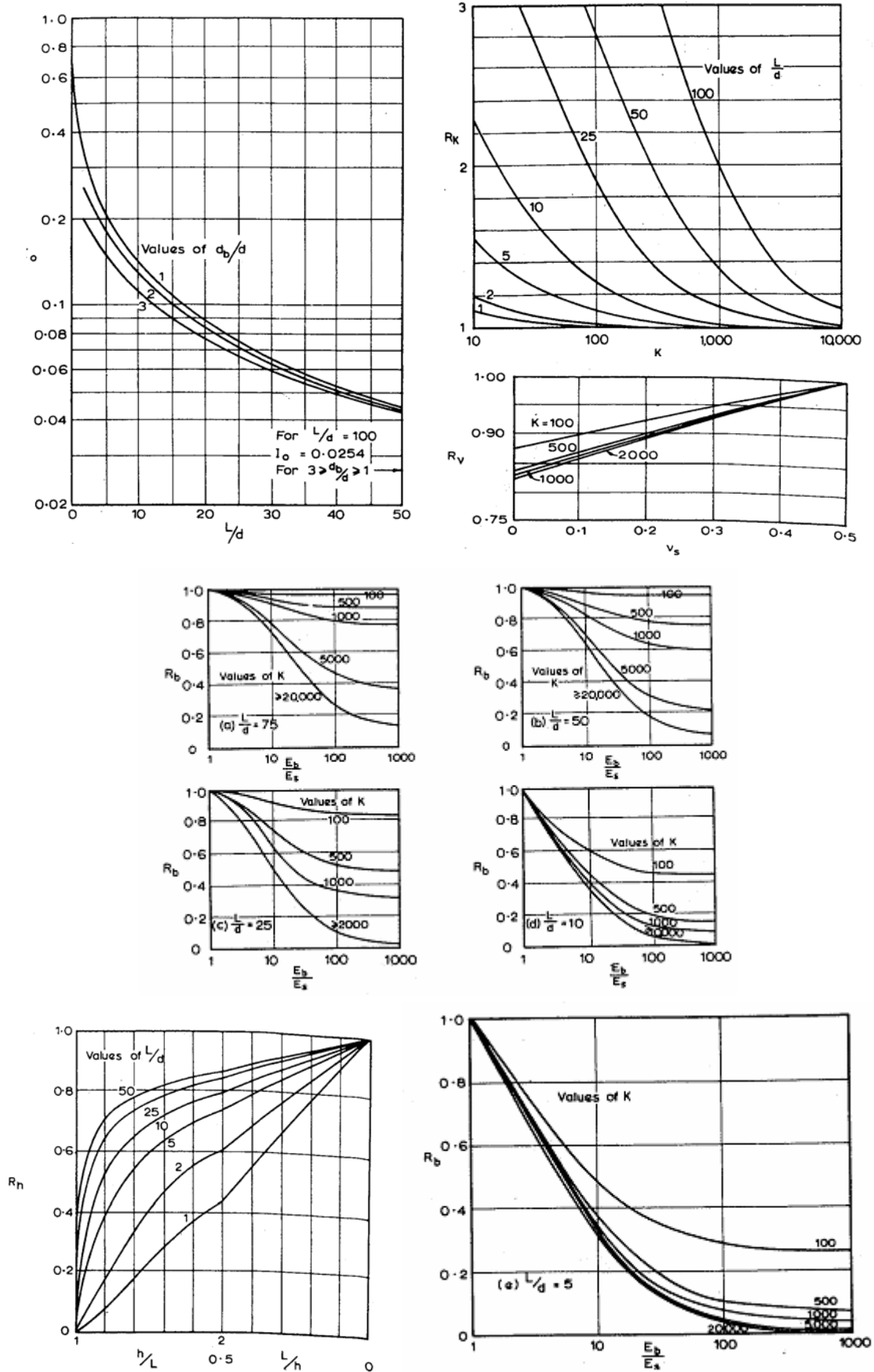
R_h : διορθωτικός συντελεστής για πεπερασμένο πάχος στρώματος το οποίο βρίσκεται πάνω σε δύσκαμπτο υπόβαθρο

R_v : διορθωτικός συντελεστής για την πραγματική τιμή του λόγου Poisson του εδάφους ν_s .

R_b : διορθωτικός συντελεστής για τη δυσκαμψία του υποβάθρου

Οι τιμές των I_o , R_k , R_h , R_v , R_b δίνονται από αντίστοιχα νομογραφήματα συναρτήσεων του λόγου μήκος/διάμετρος του πασσάλου για πασσάλους τριβής ή του λόγου των μέτρων ελαστικότητας του εδάφους στην αιχμή και του περιβάλλοντος εδάφους για πασσάλους αιχμής. Τα νομογραφήματα αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 2.10

Ουσιαστικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι η εφαρμογή της προϋποθέτει ουσιαστικές απλοποιητικές παραδοχές. Ειδικότερα, η σύσταση του εδάφους πρέπει να είναι αμετάβλητη, ενώ ο πάσσαλος θα πρέπει να λειτουργεί είτε ως πάσσαλος αιχμής είτε ως πάσσαλος τριβής. Οι παραδοχές αυτές σε πολύ ειδικές συνθήκες ικανοποιούνται στην ελληνική επικράτεια και για το λόγο αυτό η μέθοδος σπάνια εφαρμόζεται.



Σχήμα 2.10 Τιμές των διορθωτικών συντελεστών για τον υπολογισμό της καθίζησης (Poulos and Davis, 1980).

Μέθοδος DIN 4014

Για τον προσδιορισμό της καμπύλης φορτίου καθίζησης το DIN 4014 χρησιμοποιεί δύο βασικές παραδοχές, οι οποίες προκύπτουν από την εμπειρία δοκιμαστικών φορτίσεων και αντανακλούν τους αναπτυσσόμενους μηχανισμούς λειτουργίας πασσάλου υπό αξονική φόρτιση. Η πρώτη κοινά αποδεκτή διαπίστωση συνίσταται στο γεγονός ότι η πλευρική αντίσταση πασσάλου εκδηλώνεται πρακτικά σε μικρές σχετικά βυθίσεις, αισθητά μικρότερες από αυτές που απαιτούνται για την πλήρη κινητοποίηση της αντίστασης αιχμής. Η διαπίστωση αυτή αποτυπώνεται στην εξίσωση 2.24. Σύμφωνα με αυτήν η απαιτούμενη βύθιση για την πλήρη κινητοποίηση της πλευρικής τριβής αποτελεί συνάρτηση του μεγέθους αντίστασης, ενώ σε κάθε περίπτωση είναι μικρότερη των 3 εκατοστών.

$$S_{sg} = 0.5 R_s (MN) + 0.5cm \leq 3cm \quad (2.24)$$

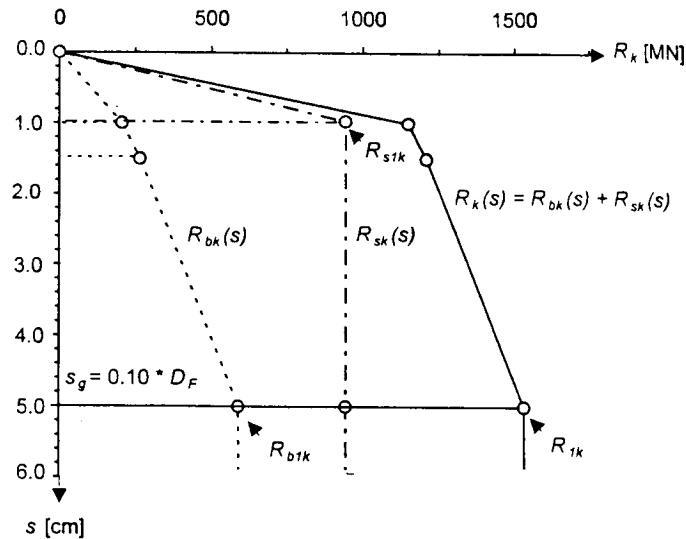
Αντίστοιχα η πλήρης κινητοποίηση της αντίστασης αιχμής απαιτεί βύθιση της τάξης του 10% της διαμέτρου του πασσάλου. Πέραν του ζεύγους τιμών στην οριακή κατάσταση αιχμής, ο γερμανικός κανονισμός προσδιορίζει δύο ακόμη ζεύγη τιμών που αντιστοιχούν σε βύθιση 2% και 3% της διαμέτρου του πασσάλου, όπως φαίνεται και από τους πίνακες 2.4 και 2.6. Κατά τον τρόπο αυτό η καμπύλη φορτίου καθίζησης κατά το DIN 4014 περιλαμβάνει τέσσερα ζεύγη σημείων, ενώ για ειδικές περιπτώσεις διαμέτρων πασσάλων (π.χ. διάμετρος 100 και 150 cm) είναι δυνατόν δύο σημεία να συμπίψουν, οπότε τα ζεύγη μειώνονται σε τρία.

Στο σχήμα 2.11 δίνεται το διάγραμμα απόκρισης φορτίου καθίζησης όπως προσδιορίστηκε από την εφαρμογή του DIN 4014. Ο υπολογισμός αυτός δεν λαμβάνει υπόψη του ότι σε πολυστρωματικό έδαφος η οριακή πλευρική τριβή κινητοποιείται για διαφορετικές τιμές της καθίζησης της κεφαλής του πασσάλου. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία προσδιορισμού της καμπύλης φορτίου καθίζησης δεν ισχύει για την περίπτωση έδρασης πασσάλου σε βραχώδες υπόβαθρο.

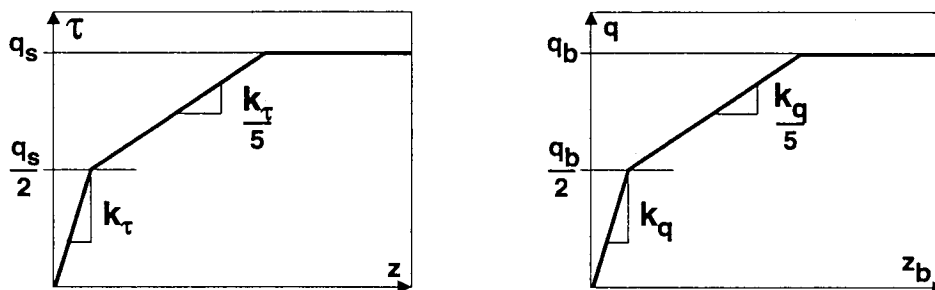
Γαλλικός Κανονισμός 62-V

Μετά την τροποποίηση του γαλλικού κανονισμού το 1993 σχετική διάταξη αφιερώνεται στη δυνατότητα προσδιορισμού της καμπύλης φορτίου-καθίζησης. Η σχετική παράγραφος προτείνει την εφαρμογή αριθμητικής μεθόδου t-z και προσδιορίζει τις γραμμικές ελατηριακές σταθερές με τρεις κλάδους τόσο για την αιχμή όσο και για την παράπλευρη αντίσταση. Στο σχήμα 2.12 δίνεται η μορφή των ελατηριακών σταθερών προσομοίωσης της ενεργοποίησης της πλευρικής τριβής και της αιχμής. Ειδικότερα για επίπεδο φόρτισης κάτω από το 50% των οριακών αντιστάσεων θεωρείται πλήρης δυσκαμψία. Από το όριο του 50% μέχρι το 100% η δυσκαμψία μειώνεται στο 20% της αρχικής. Οι δυσκαμψίες παράπλευρης αντίστασης

και αντίστασης αιχμής προσδιορίζονται από επιτόπου δοκιμή πρεσσιομέτρου. Σημειώνεται ότι οι προτεινόμενες καμπύλες δεν περιλαμβάνουν κατιόντες κλάδους, γεγονός που για αρκετά εδάφη είναι πιο αντιπροσωπευτικές της συμπεριφοράς τους.



Σχήμα 2.11 Καμπύλη απόκρισης φορτίου καθίζησης μεμονωμένου πασσάλου κατά το γερμανικό κανονισμό DIN 4014 (Katzenbach and Moormann, 1997).



Σχήμα 2.12 Καμπύλες προσομοίωσης πλευρικής αντίστασης και αντίστασης αιχμής κατά το γαλλικό κανονισμό 62-V (Bustamante and Frank, 1997).

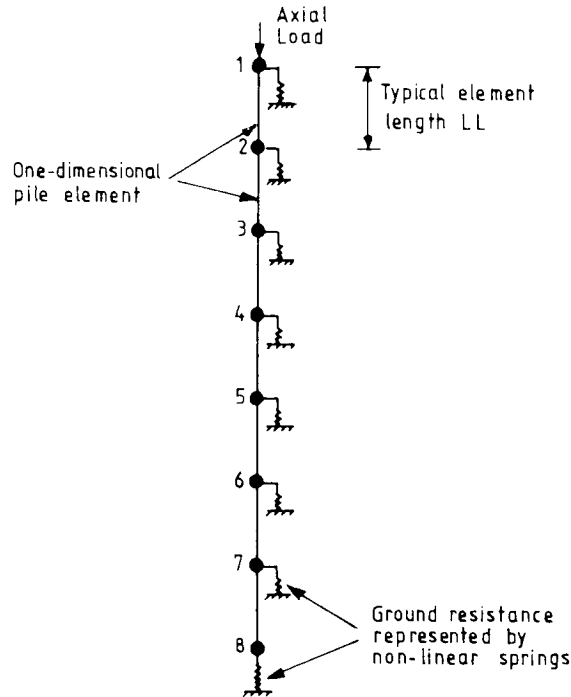
2.4 Προσδιορισμός απόκρισης με χρήση αριθμητικών μεθόδων

2.4.1 Προσέγγιση με χρήση καμπυλών t - z

Η μέθοδος πρωτοεμφανίσθηκε κατά τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Αποτελεί απλουστευμένη προσέγγιση κατά την οποία ο πάσσαλος προσομοιώνεται ως μονοαξονικό στοιχείο με ένα και μόνο βαθμό ελευθερίας, την αξονική μετακίνηση, και αντίστοιχο εντατικό μέγεθος την αξονική δύναμη. Ο πάσσαλος υποδιαιρείται σε επιμέρους τμήματα στα όρια των οποίων αντιστοιχούν οι κόμβοι, όπου εφαρμόζονται δυνάμεις και υπολογίζονται μετακινήσεις. Το έδαφος προσομοιώνεται με ελατηριακές

σταθερές γραμμικής ή μη-γραμμικής μορφής και ανάλογα με την τιμή των μετακινήσεων προσδιορίζονται και οι αντίστοιχες αντιστάσεις σε κάθε σημείο. Η επίλυση του προβλήματος είναι ιδιαίτερα απλή. Στην περίπτωση της γραμμικής ανάλυσης η επίλυση επιτυγχάνεται χωρίς επαναληπτική διαδικασία, ενώ στην περίπτωση της μη-γραμμικής ανάλυσης, περίπτωση που κατά κανόνα εφαρμόζεται, ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία μέχρι η διαφορά εσωτερικού και εξωτερικού έργου να είναι ιδιαίτερα μικρή. Ως κριτήριο σύγκλισης συχνά χρησιμοποιείται η διαφορά μετακινήσεων από το προηγούμενο βήμα επίλυσης ή ακόμη η διαφορά δυνάμεων, ενώ υπάρχει δυνατότητα χρήσης συνδυασμού κριτηρίων ολικών ή κομβικών. Στο σχήμα 2.13 απεικονίζεται η προσομοίωση πασσάλου υπό αξονική φόρτιση.

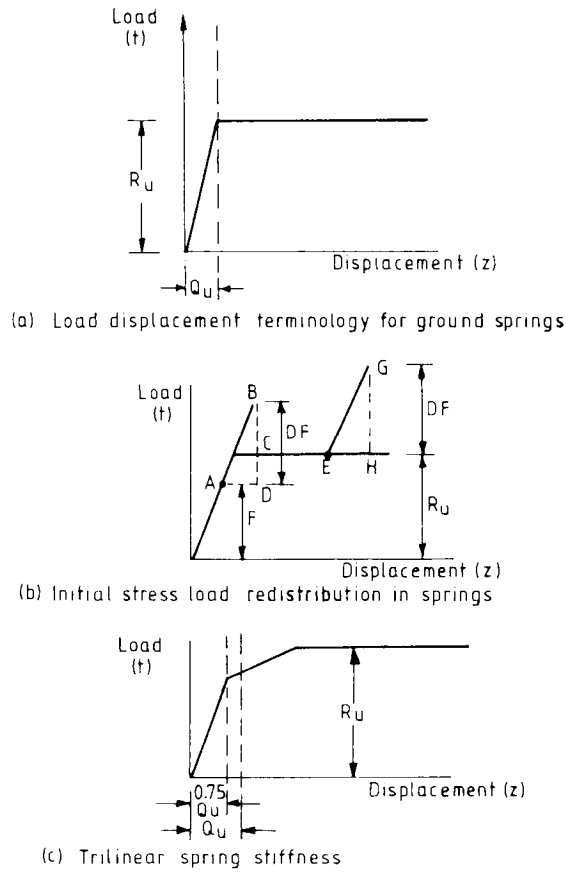
Για την εφαρμογή της προσέγγισης αυτής χρησιμοποιήθηκε αρχικά η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών, ενώ στη συνέχεια κυριάρχησε ως πιο αποτελεσματική η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Οι διαφορές των δύο αριθμητικών μεθόδων είναι ουσιαστικά διαφορές διαδικασίας επίλυσης δεδομένου ότι πρακτικά οδηγείται κανείς σε επιλύσεις γραμμικών εξισώσεων. Κατά τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (implicit method) προσδιορίζεται το μητρώο δυσκαμψίας του προβλήματος και στη συνέχεια αφού αντιστραφεί πολλαπλασιάζεται με το διάνυσμα των φορτίσεων. Το μητρώο δυσκαμψίας είναι σταθερό κατά την περίπτωση της γραμμικής ανάλυσης, ενώ κατά την περίπτωση της μη-γραμμικής ανάλυσης πραγματοποιείται τροποποίηση του σύμφωνα με διάφορα κριτήρια (η τροποποίηση του σε κάθε βήμα επίλυσης επιβαρύνει ουσιαστικά το χρόνο επίλυσης). Κατά τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (explicit method) δεν δημιουργείται μητρώο δυσκαμψίας του προβλήματος και οι επιλύσεις πραγματοποιούνται απευθείας με θεώρηση ενός αρχικού κινηματικού πεδίου το οποίο συνεχώς διορθώνεται μετά από εξέταση του εσωτερικού και εξωτερικού έργου. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί ο σημαντικά αυξημένος χρόνος επιλύσεων ακόμη και στα προβλήματα με μικρό βαθμό μετελαστικής συμπεριφοράς, ενώ ακόμη και τα γραμμικώς ελαστικά προβλήματα επιλύονται με επαναληπτική διαδικασία. Πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι απαιτεί μικρή ποσότητα μνήμης για τη διαχείριση των προβλημάτων. Η εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων και η συνεχώς αυξανόμενη δυνατότητα υπολογιστικής ισχύος κατέστησε το πλεονέκτημα αυτό πρακτικά ουδέτερο. Σημαντικό εντούτοις πλεονέκτημα της μεθόδου παραμένει το γεγονός ότι η δυσκολία προγραμματισμού σε προβλήματα με μεταβλητά όρια και διαστάσεις, όπου η συμπεριφορά των συστατικών υλικών είναι μη-γραμμική, είναι σημαντικά μικρότερη στη περίπτωση των πεπερασμένων διαφορών. Τέλος τονίζεται ότι το πλεονέκτημα της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων εξανεμίζεται κατά την περίπτωση έντονα μη-γραμμικών προβλημάτων όπου οι δύο μέθοδοι απαιτούν πρακτικά τον ίδιο χρόνο επίλυσης.



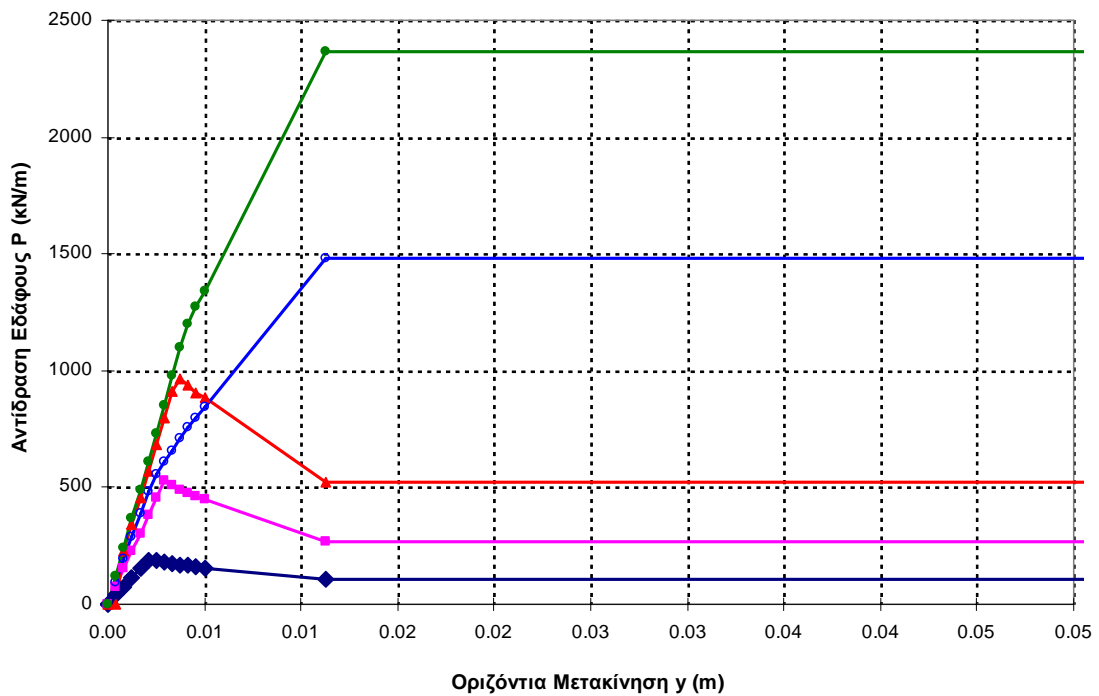
Σχήμα 2.13 Προσομοίωση πασσάλου υπό αξονική φόρτιση (Smith and Griffiths, 1988).

Το πλέον δύσκολο σημείο της μεθοδολογίας $t-z$ αποτελεί ο προσδιορισμός των καμπυλών προσομοίωσης του εδάφους. Για τον προσδιορισμό των καμπυλών μπορούν να εφαρμοσθούν οι προτάσεις διαφόρων ερευνητών. Στο σχήμα 2.11 δίνονται οι προτεινόμενες καμπύλες από τους Bustamante and Frank (1997), ενώ στο σχήμα 2.14 δίνονται οι αντίστοιχες καμπύλες από τους Smith and Griffiths (1988) για γραμμική ελαστική απόκριση ή ακόμη γραμμική ελαστική με πολλαπλούς κλάδους.

Ας σημειωθεί ότι όλες οι ανωτέρω προτεινόμενες καμπύλες δεν εμφανίζουν κατιόντες κλάδους, ενώ στην πραγματικότητα η απόκριση του εδάφους στη διεπιφάνεια με τον πάσσαλο είναι δυνατόν, ανάλογα με τη σύσταση και την αντοχή του, να εμφανίζει και κλάδο χαλάρωσης. Στο σχήμα 2.15 δίνονται χαρακτηριστικές καμπύλες 'p-y' καμπύλες με κατιόντες κλάδους. Κατά τη χρήση κρατυνόμενων καμπυλών απόκρισης (χωρίς κλάδο χαλάρωσης) κύριο στόχο αποτελεί η ανάλυση σχεδιασμού και κατά συνέπεια θα πρέπει να εφαρμόζεται η χαρακτηριστική τιμή αντοχής της αντίστοιχης εδαφικής στρώσης. Αντίθετα κατά την ανάλυση λειτουργικότητας μπορεί να χρησιμοποιείται καμπύλη προσομοίωσης της αντίστασης του εδάφους απευθείας από εργαστηριακές δοκιμές και κατά συνέπεια θα πρέπει να δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής και κατιόντος κλάδου.



Σχήμα 2.14 Ελατηριακές σταθερές προσομοίωσης του εδάφους κατά τους Smith and Griffiths (1988)



Σχήμα 2.15 Ελατηριακές σταθερές προσομοίωσης του εδάφους όπως διεξάγονται από το πρόγραμμα AllPile, ver. 7(2005).

Συνοπτικά θα πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος είναι ιδιαίτερα εύκολη στην εφαρμογή της και ότι κύριο μειονέκτημα της αποτελεί ο προσδιορισμός των καμπυλών απόκρισης και προσομοίωσης του εδάφους. Ο κύριος λόγος που δεν τυγχάνει ευρείας εφαρμογής, σε αντίστιξη με τη μέθοδο $p-y$, για τον προσδιορισμό της απόκρισης πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση, θα πρέπει να αποδοθεί στην αντικειμενικότητα προσδιορισμού των καμπυλών αυτών και στο ερώτημα περί κοινής και ευρείας αποδοχής μιας συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Τονίζεται τέλος ότι η μέθοδος αυτή, με κατάλληλη τροποποίηση των καμπυλών (μείωση της μέγιστης αντίστασης των ελατηριακών σταθερών), χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της απόκρισης ομάδας πασσάλων και χαρακτηρίζεται πάντα από τον ίδιο βαθμό ευκολίας αλλά και προβληματισμού ως προς τις καμπύλες προσομοίωσης του εδάφους.

2.4.2 Προσέγγιση με χρήση τριδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης

Η περαιτέρω εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων συνδέεται με την ανάπτυξη της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων και των Πεπερασμένων Διαφορών, της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος και αποτελεσματικότητας, καθώς επίσης και των καταστατικών νόμων προσομοίωσης της απόκρισης του εδάφους αλλά και των μηχανισμών που αναπτύσσονται στο πλαίσιο της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευών. Η χρήση τριδιάστατης ανάλυσης ήταν αρκετά περιορισμένη κατά τις προηγούμενες δεκαετίες και εφαρμόζονταν πρακτικά για ειδικά προβλήματα μεγάλης σημασίας. Από τις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας άρχισε ουσιαστικά να βρίσκει πεδίο εφαρμογής και στους τομείς αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευών. Κατά τις πρώτες προσεγγίσεις η ανάλυση σπάνια ξέφευγε του πλαισίου της γραμμικής ελαστικότητας. Ας σημειωθεί ότι, ακόμη και σήμερα είναι σπάνιες οι περιπτώσεις μη-γραμμικής τριδιάστατης ανάλυσης για τον προσδιορισμό της απόκρισης των πασσάλων. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σύνθετη σε σχέση με τις απλές προγραμματιστικά υπορουτίνες της μεθόδου $t-z$ με αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και εν γένει μη-γραμμικό προγραμματισμό.

Η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση, πέραν του υψηλότερου δυνατού βαθμού ακριβείας, έρχεται να καλύψει δύο ουσιαστικά κενά, που αφήνουν πρακτικά ανέπαφα οι προηγούμενες μεθοδολογίες. Το πρώτο αφορά στην εντατική και κινηματική κατάσταση του περιβάλλοντος εδάφους, όπου και όταν οι πληροφορίες αυτές κρίνονται αναγκαίες. Το δεύτερο αναφέρεται στον ακριβή προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας πασσάλων, πεδίο με αυξημένο ενδιαφέρον για τις θεμελιώσεις με πασσάλους τόσο σε πλευρική όσο και σε αξονική φόρτιση, και τη μεταβολή της συναρτήσεως του εύρους της καθίζησης, το οποίο εξετάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι αρχές προσομοίωσης και στην περίπτωση της τριδιάστατης ανάλυσης καλούνται να καλύψουν παρόμοιες ανάγκες με την προηγούμενη μέθοδο. Η διαφορετική τοπολογία εντούτοις οδηγεί στη χρήση διαφορετικών στοιχείων και

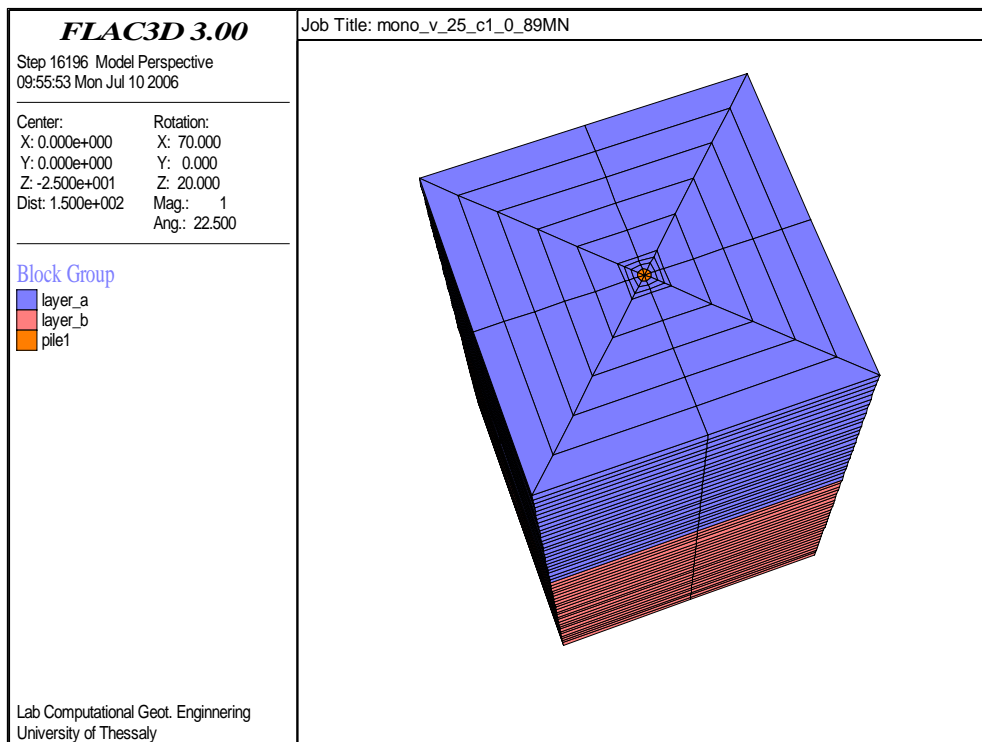
καταστατικών νόμων. Ο πάσσαλος προσομοιώνεται με χρήση τριδιάστατων στοιχείων με θεώρηση γραμμικής ελαστικότητας. Παρ' ότι είναι δυνατή η χρήση νόμων ικανών να περιγράψουν και μετελαστική συμπεριφορά δεν κρίνεται σκόπιμη η χρήση τους, δεδομένο ότι, με εξαίρεση ειδικών περιπτώσεων, η απόκριση τους είναι όντως γραμμική ελαστική. Το περιβάλλον έδαφος προσομοιώνεται επίσης με τριδιάστατα στοιχεία και θεώρηση καταστατικού νόμου μη-γραμμικής συμπεριφοράς, ανάλογα με το είδος του εδάφους και τη συμπεριφορά του, όπως αυτή καταγράφεται από αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών. Σε γενικές γραμμές δεν απαιτείται η χρήση πολύπλοκων και εξειδικευμένων καταστατικών νόμων, ενώ θα μπορούσε, για επιτάχυνση της λύσης, τα εδαφικά στοιχεία που βρίσκονται σε μακρινή απόσταση από τον πάσσαλο να προσομοιωθούν με χρήση γραμμικής ελαστικότητας.

Η χρήση τέλος στοιχείων διεπιφάνειας ανάμεσα στον πάσσαλο και στο έδαφος κρίνεται απαραίτητη με εξαίρεση ειδικές περιπτώσεις. Ας σημειωθεί ότι κατά την αρχική φάση χρήσης της τριδιάστατης ανάλυσης, πολύ συχνά, για λόγους αποτελεσματικότητας ως προς τον απαιτούμενο χρόνο επίλυσης, το έδαφος θεωρούνταν ως γραμμικά ελαστικό υλικό, οι δε επιπτώσεις της μη-γραμμικής συμπεριφοράς μπορούσαν να εισαχθούν μέσω των στοιχείων διεπιφάνειας (στοιχεία με άνω όριο αντοχής και με χαρακτηριστικά παραμορφωσιμότητας). Στην πραγματικότητα τα στοιχεία διεπιφάνειας καλούνται να δώσουν τη δυνατότητα ανάπτυξης του μηχανισμού ολίσθησης η οποία εκδηλώνεται σε μεγάλα φορτία. Προτείνεται κατά συνέπεια η χρήση στοιχείου διεπιφάνειας τύπου Coulomb και η υιοθέτηση δυσκαμψίας για τη διεπιφάνεια κατά μία τουλάχιστον τάξη μεγαλύτερη από αυτήν του περιβάλλοντος εδάφους. Κατά τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η πολύ μικρή συμβολή του στοιχείου της διεπιφάνειας στο κινηματικό πεδίο. Η υιοθέτηση αισθητά μεγαλύτερης δυσκαμψίας οδηγεί σε αριθμητικά προβλήματα, για την επίτευξη δε ικανοποιητικής ακριβείας απαιτείται χρήση αλγορίθμου επίλυσης διπλής οδήγησης και σημαντική αύξηση του χρόνου σύγκλισης (Κωμοδρόμος, 1991).

Θα πρέπει να σημειωθεί εντούτοις ότι ακόμη και στην περίπτωση όπου δεν παρατηρείται ολίσθηση ανάμεσα στο έδαφος και στον πάσσαλο είναι αναγκαία η χρήση στοιχείου διεπιφάνειας ή η εισαγωγή διαφορετικών στοιχείων αντοχής στο εδαφικό στοιχείο που περιβάλλει τον πάσσαλο, με εξαίρεση την περίπτωση πολύ μαλακών αργίλων. Ειδικότερα στην απλή περίπτωση που ο πάσσαλος περιβάλλεται από αργιλικό έδαφος, εάν χρησιμοποιηθεί στοιχείο διεπιφάνειας τύπου Coulomb, η μέγιστη διατμητική αντίσταση παίρνει τιμή ίση με την τιμή συνάφειας ανάμεσα στο έδαφος και τον πάσσαλο. Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιηθεί στοιχείο διεπιφάνειας το σε επαφή στοιχείο εδάφους προσομοιώνεται με το κριτήριο Tresca (υποπερίπτωση του κριτηρίου Mohr-Coulomb, όταν το εδαφικό υλικό εμφανίζει μηδενική τιμή γωνίας τριβής). Σύμφωνα με το κριτήριο Tresca το εδαφικό στοιχείο οδηγείται σε διαρροή όταν η διαφορά μεταξύ των αναπτυσσόμενων κυρίων τάσεων υπερβεί την τιμή της συνοχής του εδάφους. Η θεώρηση αυτή οδηγεί σε συνολική αντίσταση του πασσάλου μεγαλύτερη από αυτήν που προκύπτει με τη θεώρηση στοιχείων διεπιφάνειας ανάμεσα στον πάσσαλο και το έδαφος. Για την καλύτερη

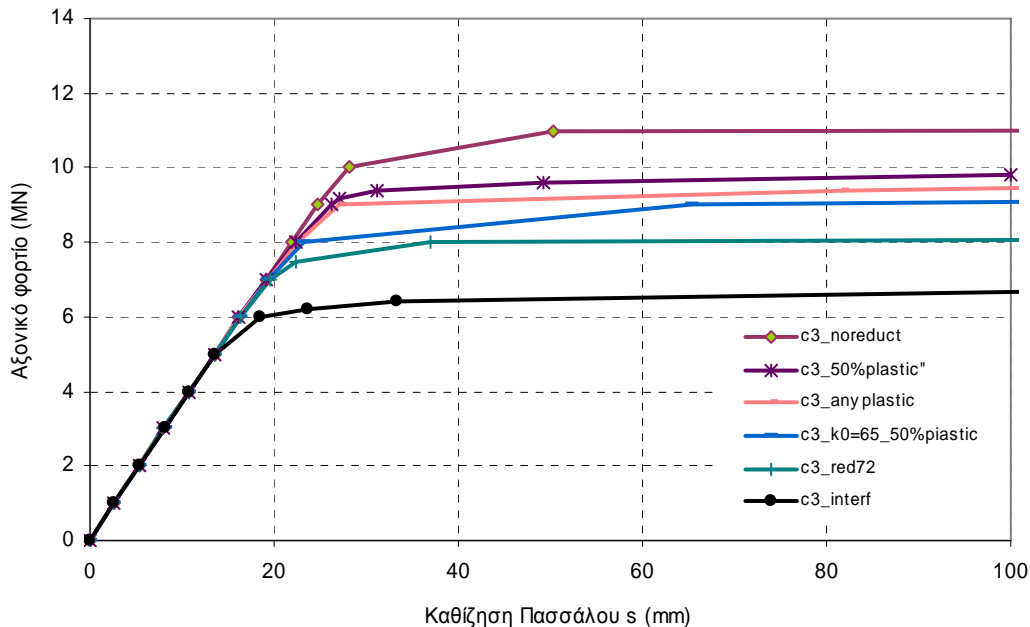
κατανόηση αυτού πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών $FLAC^{3D}$, μεμονωμένου πασσάλου χωρίς και με στοιχεία διεπιφάνειας. Ο κάναβος του προβλήματος απεικονίζεται στο σχήμα 2.16, ενώ στο σχήμα 2.17 δίνονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων, τα δε στοιχεία του προβλήματος δίνονται στον πίνακα 2.9. Από την εξέταση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η δυσκαμψία του πασσάλου είναι ίδια και κατά συνέπεια τα αρχικά τμήματα της καμπύλης απόκρισης φορτίου καθίζησης συμπίπτουν. Οι καμπύλες εμφανίζουν εντούτοις διαφορετική συνολική αντίσταση, γεγονός που αποδίδεται στην ανωτέρω διαπίστωση.

Σχήμα 2.16 Κάνναβος προσομοίωσης προβλήματος πασσάλου σε αξονική φόρτιση



Σε αντίθεση με την αριθμητική προσέγγιση της μεθόδου t-z, όπου η επεξεργασία των αποτελεσμάτων δεν απαιτεί ουσιαστική πρόσθετη εργασία, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της τριδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης είναι ιδιαίτερα κοπιώδης. Ο προσδιορισμός της αξονικής δύναμης απαιτεί προσδιορισμό των τάσεων κάθε στοιχείου στη θέση ενδιαφέροντος και στη συνέχεια ολοκλήρωση στην επιφάνεια του για τον υπολογισμό των δυνάμεων. Αντίστοιχα η κατανομή της αντίστασης τριβής ανάμεσα σε δύο θέσεις του πασσάλου μπορεί να προκύψει μετά από αφαίρεση των δυνάμεων στην κάθε θέση και κατανομή στην παράπλευρη επιφάνεια. Δεδομένου ότι για τον προσδιορισμό της καμπύλης απόκρισης απαιτούνται επιλύσεις για διάφορα επίπεδα φόρτισης, είναι φανερό ότι η 'χειρωνακτική' επεξεργασία είναι πρακτικά αδύνατη. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται, στο βαθμό που το πρόγραμμα ανάλυσης το επιτρέπει, ειδικές υπορουτίνες που επιτρέπουν την αυτοματοποίηση της

διαδικασίας, ενώ εξασφαλίζουν και την αποφυγή λαθών κατά τη φάση μεταφοράς και επεξεργασίας των δεδομένων. Ειδικότερη αναφορά πραγματοποιείται στην παράγραφο διαδικασίας προσομοίωσης του κεφαλαίου 4.



Σχήμα 2.17 Καμπύλες απόκρισης φορτίου-καθίζησης μεμονωμένου πασσάλου με χρήση διεπιφανειών και χωρίς διεπιφάνειες.

	Μέτρο διόγκωσης K (MPa)	Μέτρο διάτμησης G (Mpa)	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u (kPa)	Συνάφεια εδάφους – πασσάλου c_a (kPa)	Γωνία τριβής (deg)	Γωνία τριβής στη διεπιφάνεια (deg)
Χαρακτηριστικά εδάφους	27,78	11,36	100	72	0	0
<i>c3_noreduct</i>	Η διεπιφάνεια γύρω από τον πάσσαλο δεν έχει διαφορετικές ιδιότητες από το περιβάλλον έδαφος. Η συνάφεια ισούται με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή					
<i>c3_red72</i>	Ορίζεται μια λεπτή ζώνη στον κάνναβο γύρω από τον πάσσαλο, στην οποία δίνονται οι ίδιες ιδιότητες με το περιβάλλον έδαφος εκτός από τη συνοχή η οποία παίρνει την τιμή της συνάφειας 72.0 kPa					
<i>c3_anypastic</i>	Η εδαφική ζώνη γύρω από τον πάσσαλο ορίζεται όπως και στην περίπτωση 2, με τη διαφορά ότι η συνοχή στην περιοχή αυτή μειώνεται στα 72.0 kPa όταν πλαστικοποιηθεί οποιοδήποτε στοιχείο στη ζώνη αυτή.					
<i>c3_50%plastic</i>	Η περίπτωση αυτή είναι όμοια με την περίπτωση 3 μόνο που η μείωση στη συνοχή της ζώνης γίνεται όταν εμφανίζεται πλαστικοποίηση στο 50.0% των στοιχείων αυτής.					
<i>c3_interfaces</i>	Γίνεται χρήση διεπιφανειών γύρω από τον πάσσαλο, ενώ λαμβάνεται υπόψη η τιμή της συνάφειας					

Πίνακας 2.9 Στοιχεία του προβλήματος που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.17

Από την καμπύλη απόκρισης φορτίου καθίζησης του σχήματος 2.17 προκύπτει, για όλες τις επιμέρους αναλύσεις, συμπεριφορά που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως τέλεια ελαστοπλαστική. Ο ελαστικός κλάδος είναι για όλες τις περιπτώσεις ίδιας δυσκαμψίας γεγονός που επιβεβαιώνει τη μηδενική συμβολή της δυσκαμψίας των στοιχείων διεπιφάνειας στο κινηματικό πεδίο. Κατά την περίπτωση χρήσης στοιχείων διεπιφάνειας καταγράφεται η μικρότερη τιμή του φορτίου διαρροής. Ο ελαστικός

κλάδος εμφανίζει τη μέγιστη επιμήκυνση κατά την περίπτωση όπου δεν εισάγεται καμία μείωση στην αντοχή του εδάφους που περιβάλλει τον πάσσαλο. Οι υπόλοιπες περιπτώσεις βρίσκονται ανάμεσα στις δύο αυτές οριακές θεωρήσεις.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται απόπειρα διερεύνησης της απόκρισης ομάδας πασσάλων υπό κεντρική κατακόρυφη φόρτιση. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα FLAC^{3D}, για την ανάλυση ομάδας πασσάλων πακτωμένων σε ενιαίο κεφαλόδεσμο υπό κατακόρυφη φόρτιση, με στόχο την αποτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς ομάδας πασσάλων και ειδικότερα τον προσδιορισμό του οριακού και του επιτρεπόμενου φορτίου. Το ενδιαφέρον εστιάζεται επίσης ιδιαίτερα στη δυσκαμψία της ομάδας πασσάλων, η οποία συνήθως αποτελεί την κρίσιμη παράμετρο για τον υπολογισμό των πασσαλοθεμελιώσεων με καθοριστικές επιπτώσεις στο σχεδιασμό της ανωδομής.

2.5 Δοκιμή στατικής αξονικής φόρτισης

Οι δοκιμαστικές φορτίσεις διεξάγονται στη φάση σχεδιασμού της θεμελίωσης σημαντικών τεχνικών έργων έτσι ώστε να επαληθευθεί η επάρκεια του συστήματος θεμελίωσης και να επιβεβαιωθούν οι γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού, οι οποίες προσδιορίζονται από τα εργαστηριακά και επιτόπου αποτελέσματα γεωτεχνικής έρευνας. Αποτελούν την πλέον αξιόπιστη μέθοδο για τον προσδιορισμό όχι μόνο της φέρουσας ικανότητας, αλλά εν γένει της απόκρισης του πασσάλου σε διάφορα επίπεδα φόρτισης.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων κύριο στόχο της δοκιμαστικής φόρτισης πασσάλου αποτελεί ο προσδιορισμός του οριακού φορτίου του δοκιμαζόμενου πασσάλου. Στην περίπτωση αυτή επιβάλλεται το φορτίο, σύμφωνα με τους σχετικούς κανονισμούς, στην κεφαλή του πασσάλου και σε αυτή τη θέση μετράται η βύθιση του πασσάλου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει εντούτοις η πλήρης ενοργάνωση του δοκιμαζόμενου πασσάλου με τοποθέτηση παραμορφωσιμέτρων (strain gages) στις ράβδους χάλυβα του πασσάλου. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατή η μέτρηση των παραμορφώσεων σε διάφορα σημεία καθ' όλο το βάθος του πασσάλου. Από τις μετρήσεις αυτές μπορούν να υπολογισθούν οι επικρατούσες τάσεις και με ολοκλήρωση στην επιφάνεια του πασσάλου και στις ράβδους οπλισμού προσδιορίζεται η αξονική δύναμη σε διάφορες θέσεις. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσδιορισθεί η κατανομή της αξονικής δύναμης με το βάθος, καθώς και η κατανομή της πλευρικής αντίστασης. Περαιτέρω αξιοποίηση των τιμών αυτών επιτρέπει τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής των εδαφικών στρώσεων, καθώς επίσης και την ενεργοποίηση της διατμητικής αντίστασης συναρτήσει της βύθισης του πασσάλου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ο προσδιορισμός της δυσκαμψίας του πασσάλου για το φορτίο λειτουργίας, δεδομένου ότι αυτό είναι και το πιο καθοριστικό σημείο κατά τον υπολογισμό της ανωδομής.

Η εκτέλεση δοκιμαστικής φόρτισης με πλήρη ενοργάνωση επιτρέπει επιπλέον τη διεξαγωγή αντίστροφης ανάλυσης. Ειδικότερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διεξαγωγή τριδιάστατης αντίστροφης ανάλυσης, η οποία επιτρέπει τον προσδιορισμό των επιπτώσεων της διάταξης της δοκιμαστικής φόρτισης στην απόκριση του δοκιμαζόμενου πασσάλου.

Το κόστος της εκτέλεσης δοκιμαστικής φόρτισης πασσάλου είναι ιδιαίτερα σημαντικό και η διαδικασία υλοποίησης της χρονοβόρα. Για το λόγο αυτό κρίνεται ότι θα πρέπει να καταγράφεται και να αξιολογείται ο μέγιστος δυνατός όγκος πληροφοριών.

Μία τυπική δοκιμαστική φόρτιση πασσάλου συντίθεται από τρία βασικά συστήματα υποδομής:

- το σύστημα αντίδρασης, το οποίο καλείται να αναλάβει το επιβαλλόμενο φορτίο
- το σύστημα φόρτισης, μέσω του οποίου επιβάλλεται το προβλεπόμενο φορτίο κατά τα διάφορα βήματα φόρτισης
- το σύστημα μετρήσεων, το οποίο παρέχει όλες τις πληροφορίες για τον έλεγχο και χρονικό καθορισμό των βημάτων φόρτισης

Στο σχήμα 2.18 δίνονται σχηματικά οι εφαρμοζόμενες διατάξεις δοκιμαστικών φορτίσεων. Στο σχήμα 2.18a δίνεται η ιδεώδης δοκιμαστική φόρτιση, όπου υπάρχει μόνο ο δοκιμαζόμενος πάσσαλος και το επιβαλλόμενο φορτίο. Για τη δημιουργία εντούτοις του φορτίου αυτού απαιτείται ισοδύναμο αντίβαρο. Κατά τις πρώτες εκτελέσεις των δοκιμαστικών φορτίσεων η λύση 2.18b αποτελούσε την πλέον εφαρμοζόμενη λύση, λαμβανομένου υπόψη ότι τα απαιτούμενα φορτία είχαν πρακτικά μικρές τιμές. Μειονέκτημα της λύσης, σύμφωνα με τον Poulos (2000), αποτελεί το γεγονός ότι οι δοκοί στήριξης του φορτίου μεταφέρουν σημαντικό φορτίο πλευρικά του δοκιμαζόμενου πασσάλου, προκαλούν αύξηση του εντατικού πεδίου γύρω από τον πάσσαλο και με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η πλευρική αντίσταση του εδάφους. Κατά την επιβολή του φορτίου μέσω του ενδιάμεσου υδραυλικού συστήματος το μεταβιβαζόμενο στο έδαφος φορτίο μέσω των δοκών στήριξης μειώνεται με αποτέλεσμα την ανύψωση του εδάφους πλευρικά του δοκιμαζόμενου πασσάλου. Παρ' ότι η ανύψωση είναι μικρή έχει σημαντική επίπτωση στην προσδιοριζόμενη δυσκαμψία του πασσάλου και ειδικότερα οδηγεί σε υπερεκτίμηση της.

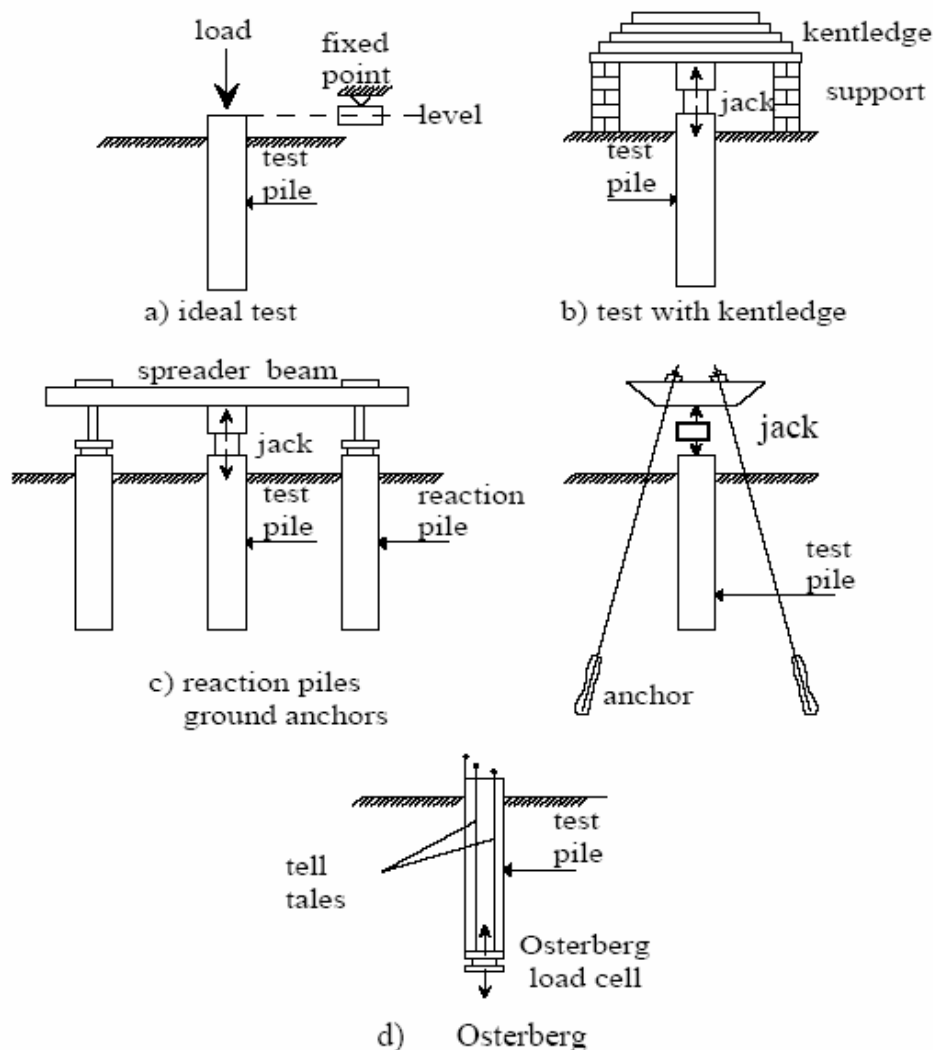
Η διάταξη 2.18c αποτελεί και την πλέον εφαρμοζόμενη σήμερα μορφή. Το επιβαλλόμενο φορτίο μεταφέρεται στο έδαφος είτε μέσω εφελκόμενων πασσάλων (πάσσαλοι αντίδρασης), είτε μέσω αγκυρώσεων. Η διάταξη οδηγεί σε υπερεκτίμηση της δυσκαμψίας του δοκιμαζόμενου πασσάλου, η οποία στην περίπτωση των αγκυρώσεων είναι μικρότερη (Poulos, 2000). Στην περίπτωση χρήσης εφελκόμενων πασσάλων η γεωμετρία της διάταξης θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ελαχιστοποιείται η αλληλεπίδραση μεταξύ του δοκιμαζόμενου πασσάλου και των εφελκόμενων πασσάλων. Σύμφωνα με τους Flemming et al (1992) η σχετική

απόσταση μεταξύ του δοκιμαζόμενου πασσάλου και των πασσάλων αντίδρασης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη για τη μείωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του δοκιμαζόμενου πασσάλου και των πασσάλων αντίδρασης, προτείνεται δε σχετική απόσταση μεγαλύτερη του 5.0D. Αντίστοιχα οι αμερικάνικοι κανονισμοί προτείνουν απόσταση μεγαλύτερη των 6.0D. Για πρακτικούς, ωστόσο, λόγους είναι σχεδόν αναπόφευκτο οι πάσσαλοι να τοποθετούνται σε σχετικά μικρή απόσταση. Συνήθως η σχετική απόσταση μεταξύ του υπό δοκιμή πασσάλου και των πασσάλων αντίδρασης είναι της τάξης του 3 έως 4 φορές τη διάμετρο του πασσάλου. Μια τέτοια απόσταση προκαλεί σημαντική αλληλεπίδραση με συνέπειες στην καμπύλη απόκρισης του πασσάλου και στον υπολογισμό της δυσκαμψίας. Σε σχετική διερεύνηση του θέματος από τους Comodromos et al. (2003) υπολογίσθηκαν οι επιπτώσεις των πασσάλων αντίδρασης στη φέρουσα ικανότητα και τη δυσκαμψία του δοκιμαζόμενου πασσάλου. Πέραν των σημείων αυτών εξετάσθηκε και η μεταβολή της αξονικής δύναμης και της πλευρικής αντίστασης συναρτήσεως του επιβαλλόμενου φορτίου για το δοκιμαζόμενο πάσσαλο και τον αντίστοιχο μεμονωμένο πάσσαλο. Ειδικότερη αναφορά πραγματοποιείται στο τέλος της παραγράφου.

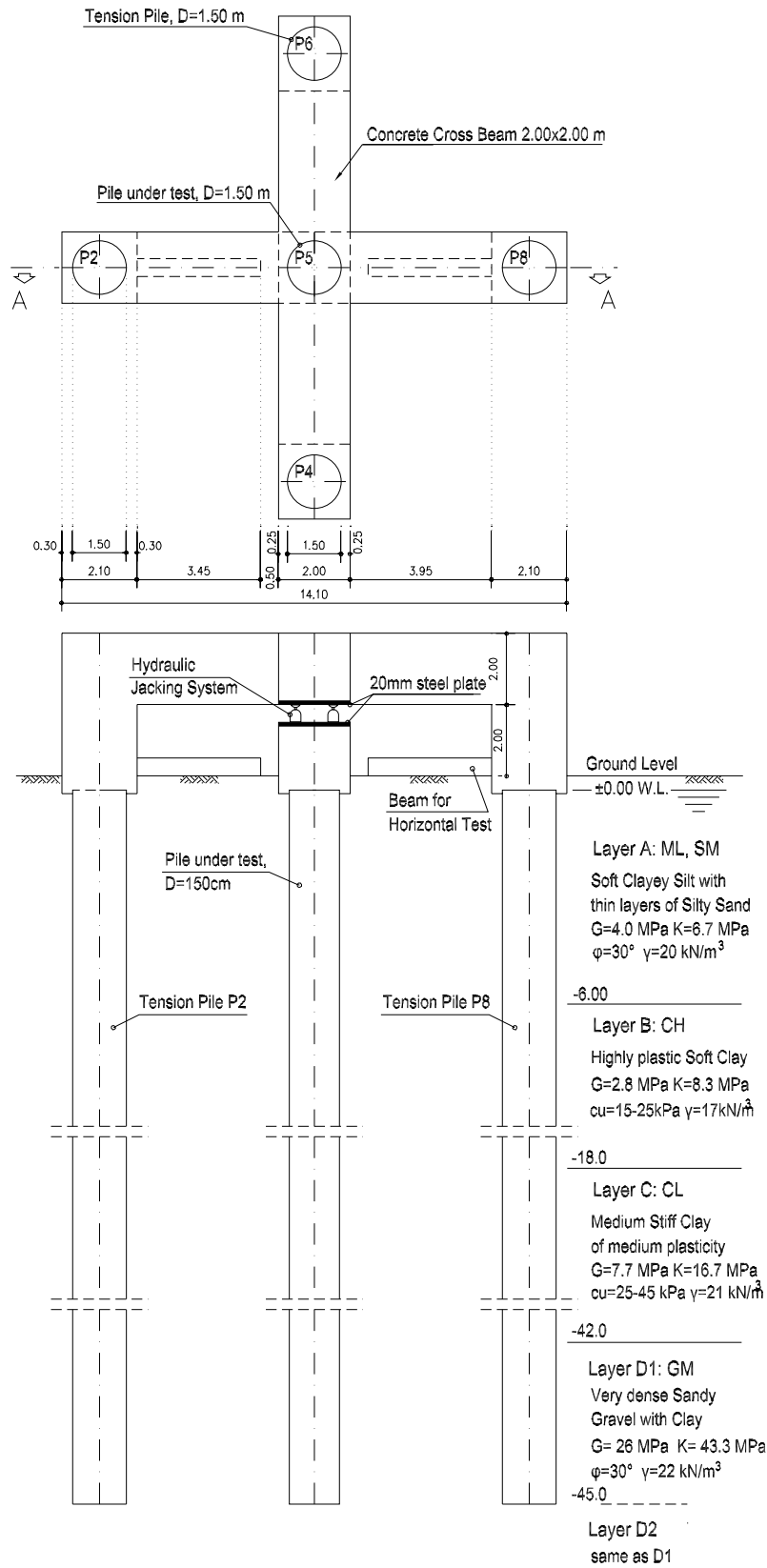
Το σχήμα 2.18d απεικονίζει την περίπτωση δοκιμαστικής φόρτισης με χρήση κυψέλης φόρτισης τύπου Osterberg (Osterberg, 1984). Κατά τη διάταξη αυτή το φορτίο επιβάλλεται στη βάση του πασσάλου μέσω υδραυλικού συστήματος, ενώ η ίδια πίεση ασκείται ταυτόχρονα στην αιχμή του πασσάλου και στο υποκείμενο έδαφος. Η λύση αυτή είναι ιδιαίτερα οικονομική και απαλλαγμένη από τις επιπτώσεις των διαφόρων συστημάτων επιβολής του φορτίου. Μειονέκτημα της αποτελεί το γεγονός ότι το επιβαλλόμενο φορτίο έχει ως άνω όριο την ελάχιστη τιμή μεταξύ των αναπτυσσομένων αντιστάσεων αιχμής και τριβής. Υπό την έννοια αυτή μόνο το ένα από τα μεγέθη αυτά μπορεί να διερευνηθεί μέχρι την οριακή του τιμή.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός δοκιμαστικής φόρτισης και αντίστροφης ανάλυσης. Στην περίπτωση μάλιστα της τριδιάστατης ανάλυσης είναι δυνατόν να προσδιορισθούν με ικανοποιητική ακρίβεια οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μεταξύ του φορτιζόμενου πασσάλου και των στοιχείων ανάληψης του επιβαλλόμενου φορτίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διεξαχθείσα από τους Comodromos et al. (2003) ανάλυση κατά την οποία προσομοιώνεται με τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση δοκιμαστική φόρτιση με εφελκόμενους πασσάλους. Η δοκιμαστική φόρτιση πραγματοποιήθηκε στη θέση του 6^{ου} προβλήτα Θεσσαλονίκης από την εταιρεία ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε. (Κωμοδρόμος και Νάσκος 1994). Το υπέδαφος της ευρύτερης περιοχής του νέου λιμένα της Θεσσαλονίκης χαρακτηρίζεται από υψηλή συμπίεστικότητα και πολύ μικρή διατμητική αντοχή, γεγονός που οδήγησε στην απόφαση πρόσβασης του 6^{ου} προβλήτα μέσω εκτεταμένου μήκους γέφυρας εδραζόμενης σε πασσάλους. Με δεδομένο το μέγεθος του έργου και τη μεγάλη σημασία του αποφασίσθηκε η διεξαγωγή δοκιμαστικής φόρτισης. Η διάταξη της δοκιμαστικής φόρτισης περιελάμβανε το δοκιμαζόμενο πάσσαλο και τέσσερις εφελκόμενους πασσάλους. Όλοι οι πάσσαλοι της

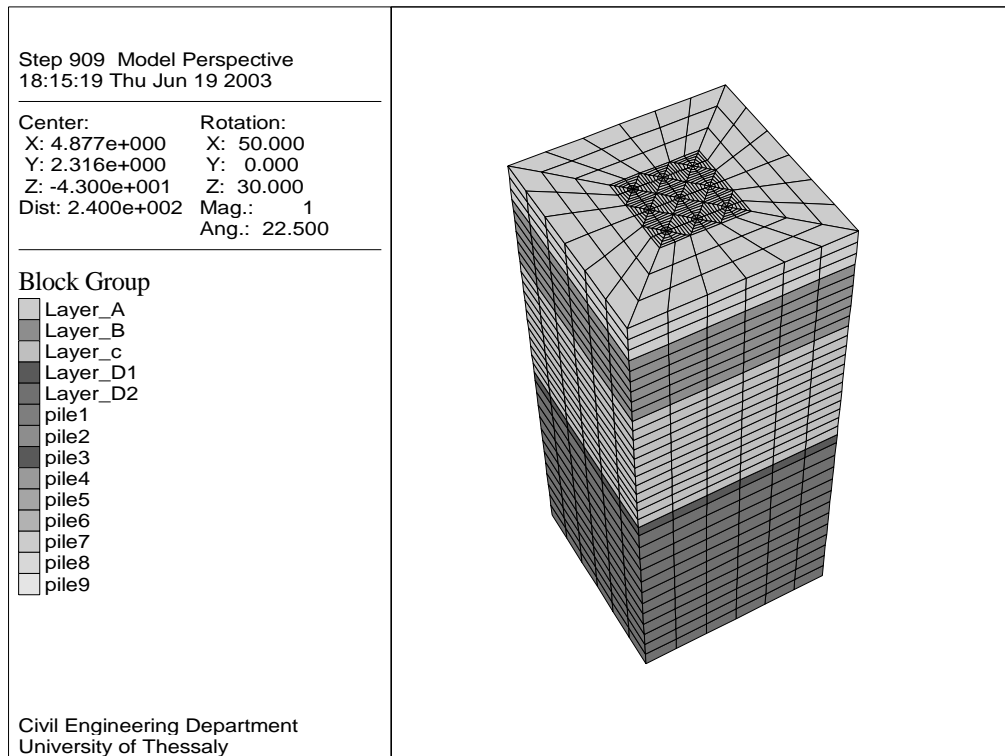
δοκιμαστικής φόρτισης είχαν ίδια γεωμετρία και οπλισμό με τους προς κατασκευή πασσάλους, η δε θέση τους ήταν σε μικρή απόσταση από τη θέση του τελευταίου ακροβάθρου της γέφυρας. Το κατακόρυφο φορτίο επεβλήθη με τη χρήση έξι υδραυλικών γρύλων συνολικής ικανότητας 15 MN, οι οποίοι τοποθετήθηκαν ανάμεσα στο δοκιμαζόμενο πάσσαλο και το σταυροειδούς μορφής σύστημα δοκών σύνδεσης των εφελκόμενων πασσάλων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.19. Αναλυτική παρουσίαση της διάταξης της φόρτισης δίνεται στο σχετικό τεύχος μελέτης, Κωμοδρόμος και Νάσκος (1994). Η εδαφική τομή σχεδιασμού και οι χρησιμοποιηθείσες στην ανάλυση παράμετροι δίνονται αναλυτικά από τους Comodromos et al. (2003) και Κωμοδρόμος (2004).



Σχήμα 2.18 Σχηματικές διατάξεις δοκιμαστικών φορτίσεων (Mandolini et al. 2005)



Σχήμα 2.19 Διάταξη δοκιμαστικής φόρτισης στον 6^ο προβλήτα Θεσσαλονίκης (Comodromos et al., 2003).



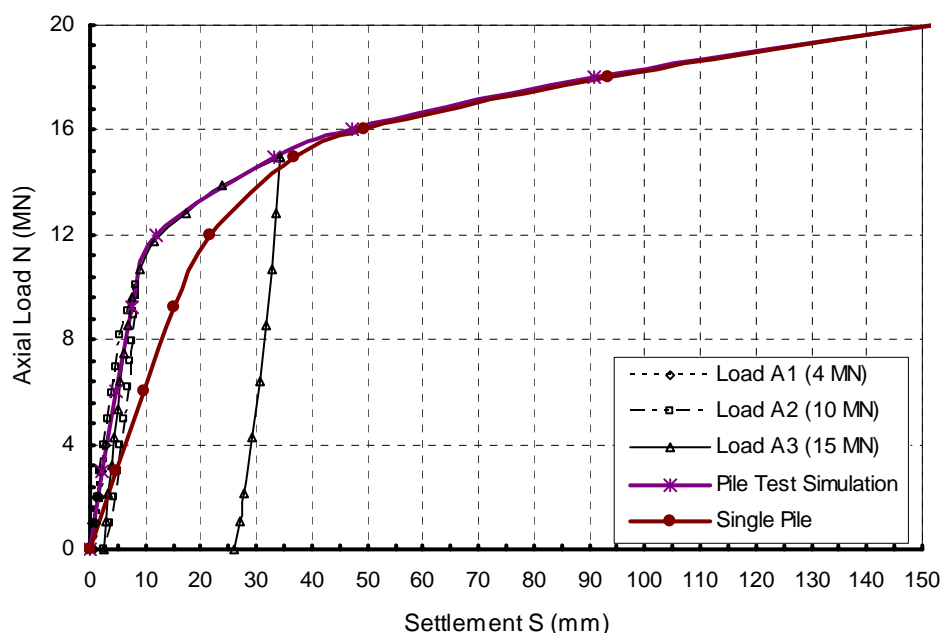
Σχήμα 2.20 Προσομοίωμα ανάλυσης δοκιμαστικής φόρτισης (Comodromos et al., 2003).

Πραγματοποιήθηκε τριδιάστατη αριθμητική ανάλυση με χρήση του προγράμματος FLAC^{3D}, ο δε κάναβος ανάλυσης δίνεται στο σχήμα 2.20. Περιλαμβάνει 12960 στοιχεία και 14488 κόμβους, ενώ έχει τη δυνατότητα ενεργοποίησης ομάδας πασσάλων μέχρι και 3*3. Η ανάλυση περιελάμβανε αρχικά την προσομοίωση της διεξαχθείσας δοκιμαστικής φόρτισης η οποία περιελάμβανε τρεις κύκλους φόρτισης - αποφόρτισης, τους A1, A2 και A3. Κατά τον πρώτο κύκλο επεβλήθη κατακόρυφο φορτίο 4 MN σε βήματα του 1 MN και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αποφόρτιση με το ίδιο βήμα. Ακολούθησε ο κύκλος A2 με φορτίο 10 MN με το ίδιο βήμα φόρτισης και στη συνέχεια αποφόρτιση με το ίδιο πάλι βήμα. Τέλος επεβλήθη το φορτίο της φόρτισης A3 μέχρι της μέγιστης ικανότητας των υδραυλικών γρύλων, φορτίο 15 MN.

Κατά την προσομοίωση της δοκιμαστικής φόρτισης το σύνολο του επιβαλλόμενου φορτίου εξασκείται στη κορυφή του δοκιμαζόμενου πασσάλου, ενώ ταυτόχρονα το ¼ του φορτίου αυτού επιβαλλόταν στη κορυφή κάθε εφελκυσόμενου πασσάλου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται στο σχήμα απόκρισης φορτίου-καθίζησης, 2.21. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και αυτά της δοκιμαστικής φόρτισης βρίσκονται σε αξιοσημείωτη συμφωνία.

Επόμενο στάδιο της ανάλυσης απετέλεσε η αριθμητική ανάλυση με θεώρηση μόνο του δοκιμαζόμενου πασσάλου (μη ενεργοποίηση των εφελκυσόμενων πασσάλων), τα αποτελέσματα της οποίας δίνονται στο ίδιο ανωτέρω σχήμα. Παρατηρείται ότι ο μεμονωμένος πάσσαλος εμφανίζει σημαντικά μικρότερη δυσκαμψία, ενώ η φέρουσα ικανότητα δεν φαίνεται να διαφοροποιείται αισθητά. Η διαφοροποίηση της απόκρισης στα μικρά φορτία θα πρέπει να αποδοθεί στη δράση των εφελκυσόμενων πασσάλων.

Είναι δε αισθητά μεγαλύτερη στα μικρά φορτία όπου η αλληλεπίδραση εμφανίζει τη μέγιστη επίπτωση της. Αντίθετα, όσο αυξάνει η φόρτιση και το περιβάλλον έδαφος πλαστικοποιείται οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μειώνονται μέχρι που εξαλείφονται τελείως όταν επέρχεται πλήρης πλαστικοποίηση (βλ. αναλυτικότερα Comodromos et al. 2003, Comodromos 2004).



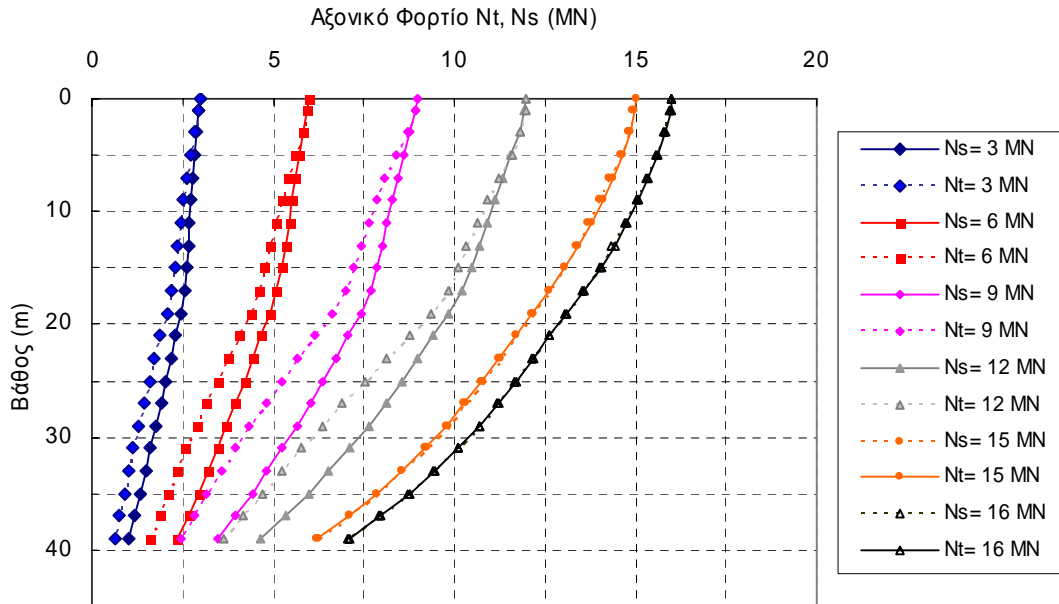
Σχήμα 2.21 Σύγκριση των καμπυλών απόκριση φορτίου-καθίζησης της δοκιμαστικής φόρτισης, της προσομοίωσης της και του μεμονωμένου πασσάλου, (Comodromos et al., 2003).

Το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ του υπό δοκιμή πασσάλου και των εφελκόμενων πασσάλων φαίνεται και από το σχήμα 2.22 στο οποίο παρουσιάζεται η μεταβολή του αξονικού φορτίου κατά μήκος του άξονα του πασσάλου και του μεμονωμένου για διάφορα επίπεδα φόρτισης. Λόγω των εφελκυστικών δυνάμεων που επιβάλλονται από τους πασσάλους αντίδρασης, η συμμετοχή της πλευρικής αντίστασης είναι μεγαλύτερη στο δοκιμαζόμενο πάσσαλο από ό,τι στον μεμονωμένο μέχρι την πλαστικοποίηση. Από το σημείο αυτό και στη συνέχεια οι δύο πάσσαλοι έχουν το ίδιο ποσοστό φορτίου στην αιχμή και στην παράπλευρη επιφάνεια τους.

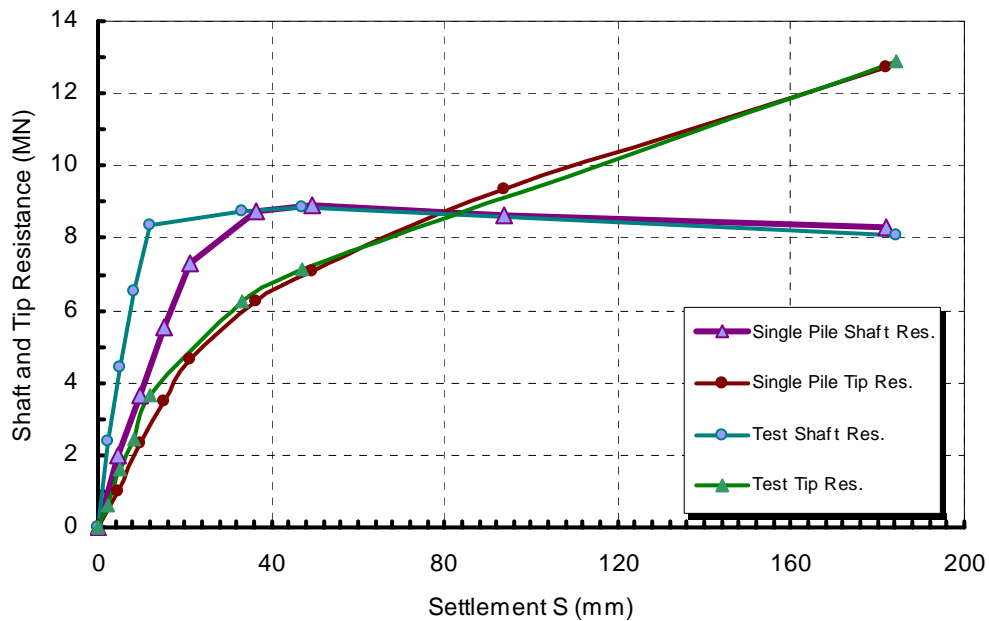
Το σχήμα 2.23 αποτυπώνει επίσης ποιοτικά και ποσοτικά τις επιπτώσεις της δράσης των εφελκόμενων πασσάλων στην απόκριση του φορτιζόμενου πασσάλου.

Παρατηρείται ότι η πλευρική αντίσταση ενεργοποιείται για μικρότερο επίπεδο καθίζησης στην περίπτωση της δοκιμαστικής φόρτισης απ' ό,τι στην περίπτωση του μεμονωμένου πασσάλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ανύψωση των εφελκόμενων πασσάλων, οι οποίοι οδηγούν σε εκδήλωση μεγαλύτερης διατμητικής παραμόρφωσης στο έδαφος ανάμεσα στους πασσάλους και κατά συνέπεια σε μεγαλύτερη ενεργοποίηση της διατμητικής αντίστασης. Από κάποιο σημείο και

έπειτα, όταν επέρχεται πλαστικοποίηση του εδάφους, ο δύο καμπύλες ταυτίζονται. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επιπτώση αυτή παρατηρείται μόνο στην πλευρική αντίσταση, ενώ ελάχιστη είναι η διαφοροποίηση της αντίστασης αιχμής.

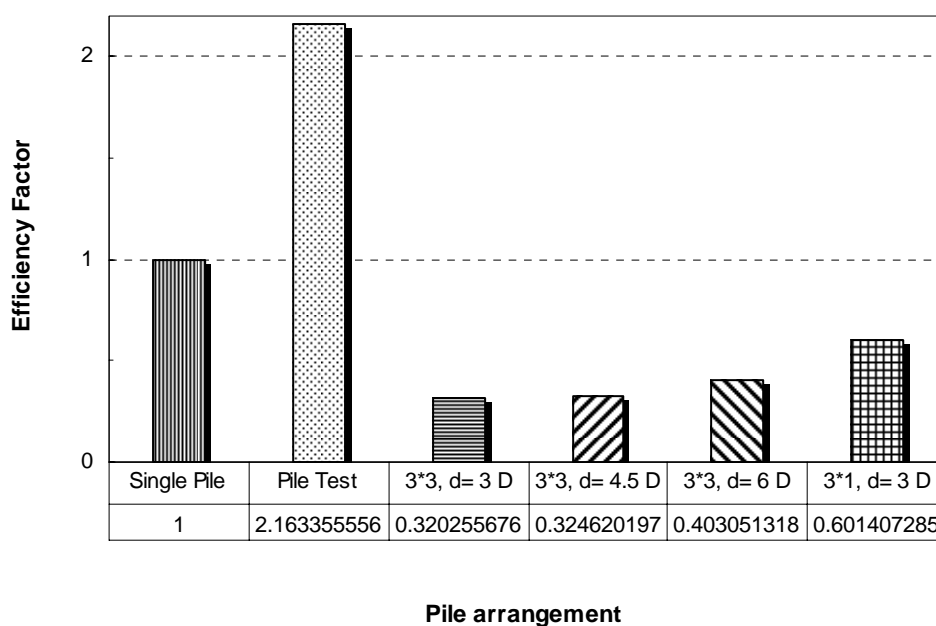


Σχήμα 2.22 Κατανομή του αξονικού φορτίου συναρτήσει του βάθους για τον δοκιμαζόμενο πάσσαλο και για τον πάσσαλο με αριθμητική προσομοίωση, (Comodromos et al, 2003)



Σχήμα 2.23 Μεταβολή της αντίστασης αιχμής και της πλευρικής αντίστασης του δοκιμαζόμενου πάσσалу και του μεμονωμένου συναρτήσει του επιπέδου καθίζησης (Comodromos et al, 2003).

Η προσέγγιση των Comodromos et al. (2003) προτείνεται από τους ίδιους ως μεθοδολογία διόρθωσης των επιπτώσεων που οι εφελκόμενοι πάσσαλοι επιφέρουν στο δοκιμαζόμενο πάσσαλο έτσι ώστε να είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός της απόκρισης του μεμονωμένου πασσάλου. Συμπερασματικά μπορεί να αποτιμηθεί η εν λόγω διόρθωση από το σχήμα 2.24, όπου δίνονται σε ιστογράμματα οι συντελεστές απόδοσης δυσκαμψίας της δοκιμαστικής φόρτισης και διαφόρων ομάδων για το επιτρεπόμενο φορτίο. Παρατηρείται ότι, σε αντίθεση με τις ομάδες όπου καταγράφεται σημαντική μείωση δυσκαμψίας, στην περίπτωση της δοκιμαστικής φόρτισης η δυσκαμψία αυξάνεται πέραν του 200%.



Σχήμα 2.24 Εκτίμηση του συντελεστή απόδοσης δυσκαμψίας στη περίπτωση ομάδων πασσάλων και δοκιμαστικής φόρτισης (Comodromos et al, 2003).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ανάλυση απόκρισης ομάδας πασσάλων

3.1 Γενικά

Το θέμα της απόκρισης του μεμονωμένου πασσάλου απετέλεσε ερευνητικό πεδίο για διάφορους ερευνητές κατά τις προηγούμενες τρεις δεκαετίες. Αποτέλεσμα της ερευνητικής δραστηριότητας είναι η επαρκής, θα μπορούσε κανείς να ισχυρισθεί, κάλυψη του θέματος και της κατανόησης των αναπτυσσόμενων μηχανισμών. Τα ερωτήματα που παραμένουν αναφέρονται περισσότερο σε ειδικές περιπτώσεις, όπως η απόκριση σε περίπτωση έδρασης σε βραχώδες υπόβαθρο ή ακόμη η απόκριση κατά την ανάπτυξη αρνητικών τριβών, τα οποία εξετάζονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια. Με εξαίρεση κατά συνέπεια των ανωτέρω ειδικών σημείων το θέμα της φέρουσας ικανότητας καθώς και της απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου αντιμετωπίζεται ικανοποιητικά με σειρά μεθοδολογιών διαφορετικής προσέγγισης και ακρίβειας.

Παρά την πρόοδο που έχει επιτευχθεί ως προς την απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου, πολλά είναι τα ερωτήματα που παραμένουν αναφορικά με τη φέρουσα ικανότητα και την απόκριση ομάδας πασσάλων. Οι διάφορες μεθοδολογίες που έχουν στο παρελθόν προταθεί είναι σχετικά απλοποιητικές, η αριθμητική ανάλυση έρχεται να καλύψει τα διαθέσιμα μέσα για τη διερεύνηση του ζητήματος, ενώ η εφαρμογή δοκιμαστικών φορτίσεων είναι πρακτικά ανέφικτη σε μέγεθος πραγματικής κλίμακας.

Μετά από συνοπτική βιβλιογραφική εξέταση του θέματος, η οποία δίνεται από τον Comodromos (2004) και τους Comodromos and Bareka (2006), μπορεί κανείς να αναφερθεί σε διάφορες απλοποιητικές εμπειρικές σχέσεις που έχουν προταθεί για το θέμα της φέρουσας ικανότητας και απόκρισης των ομάδων, οι οποίες εντούτοις φαίνεται να μην βρίσκουν πλέον ευρύ πλαίσιο εφαρμογής. Πέραν των εμπειρικών αυτών σχέσεων έχουν κατά καιρούς προταθεί και μειωτικοί συντελεστές σε πινακοποιημένη μορφή ή ακόμη νομογραφήματα για την αποτίμηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων, στηριζόμενοι σε απλοποιητικές παραμετρικές αναλύσεις γραμμικής ελαστικότητας και στην αρχή της επαλληλίας, Butterfield and Banerjee (1971), Poulos and Davis (1980), Poulos (1989).

Προσέγγιση επίσης του προβλήματος βασισμένη στην μεθοδολογία (t-z) αποτελεί η πρόταση του Lee (1993), κατά την οποία προσδιορίζεται η απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου με χρήση καμπυλών προσομοίωσης (t-z) και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται οι λύσεις του Mindlin (1936) για τον προσδιορισμό της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων. Απλούστευση του προβλήματος αποτελεί επίσης η μεθοδολογία των Randolph and Wroth (1978), Randolph (1994) και Horikoshi and Randolph (1999) κατά την οποία η ομάδα των πασσάλων αντικαθίσταται από κάποιο ισοδύναμο φρέαρ. Οι περισσότερες από τις ανωτέρω μεθόδους προϋποθέτουν σημαντικές απλουστεύσεις. Πλεονέκτημα τους αποτελεί η αποτελεσματικότητα τους ως προς τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, με σύνοδο εντούτοις μειονέκτημα την περιορισμένη ακρίβεια σε αρκετές περιπτώσεις.

Παρά τη συνήθη θεώρηση ότι οι ομάδες πασσάλων σε αξονική απόσταση μεγαλύτερη του 3.0D, δεν επιδεικνύουν μειωτική συμπεριφορά, η πραγματική κατάσταση φαίνεται να αποτυπώνει διαφορετικά αποτελέσματα, τα οποία οδηγούν τους διάφορους κανονισμούς να αναθεωρούν τις απόψεις τους επί του θέματος. Με βάση τα αποτελέσματα τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων οι Katzenbach and Moormann (1997) τεκμηρίωσαν σημαντικές επιπτώσεις από την αλληλεπίδραση μεταξύ των ομάδων πασσάλων σε αξονική απόσταση 3.0D, η οποία παραμένει ακόμη και όταν η απόσταση αυξάνεται σε 6.0D. Τα ευρήματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τις διατάξεις του Canadian Foundation Engineering Manual (1985), στο οποίο αναφέρεται ότι σε ομάδες πασσάλων με περισσότερους από 10 πασσάλους απαιτείται αξονική απόσταση πέραν των 7.0D ώστε οι επιμέρους πάσσαλοι να επιδεικνύουν συμπεριφορά ταυτόσημη με αυτή του μεμονωμένου. Η κατά το παρελθόν αγγλική θεώρηση για περιορισμένες επιπτώσεις για διατάξεις ομάδων με αξονική απόσταση πέραν των 3.0D, αναιρείται ουσιαστικά από τη θέση των άγγλων ερευνητών Brooks et al. στο άρθρο τους 'Design of axially loaded piles – United Kingdom practice' (Findlay et al. 1997) όπου αναφέρουν ότι '...For groups of piles calculated working capacity should be adjusted to allow for group action, pile spacing and any other factors which influence the overall efficiency of the pile group. Traditional empirical group analysis formulas are no longer used in the UK'.

Με χρήση τριδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης οι Comodromos et al. (2003) και Comodromos (2004) έδειξαν ότι ο συντελεστής απόδοσης ομάδας φέρουσας ικανότητας δεν ξεφεύγει αισθητά από την τιμή της μονάδας και κατά συνέπεια η επίπτωση αυτή δεν είναι η πλέον σημαντική. Αντίθετα, από τις ανωτέρω αναλύσεις προέκυψε ότι η αλληλεπίδραση έχει σημαντική επίπτωση στο συντελεστή απόδοσης της ομάδας. Επιπρόσθετα έδειξαν ότι ο συντελεστής απόδοσης δυσκαμψίας ομάδας πασσάλων επηρεάζεται όχι μόνο από τη διάταξη των πασσάλων αλλά και από το επίπεδο καθίζησης (ουσιαστικά από το συσχετιζόμενο επίπεδο φόρτισης το οποίο προκαλεί και το βαθμό πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους). Με βάση σειρά αναλύσεων προτείνεται από τον Comodromos (2004) απλοποιημένη εμπειρική σχέση με δυνατότητα πρόβλεψης, τουλάχιστον για δεδομένες εδαφικές συνθήκες, της απόκρισης διαφόρων ομάδων πασσάλων υπό την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η

απόκριση μεμονωμένου πασσάλου. Η εξίσωση αυτή ισχύει για την ευρείας εφαρμογής αξονική απόσταση των 3.0D. Η ισχύς της προταθείσας εμπειρικής σχέσης εξετάσθηκε και για διαφορετικούς εδαφικούς σχηματισμούς, βλ. Comodromos and Bareka (2005b), όπου τεκμηριώνεται η επιτυχής εφαρμογή της εξίσωσης σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους αργιλικών εδαφών οι οποίοι καλύπτουν εύρος από μαλακές έως σκληρές αργίλους. Στόχο της παρούσας διατριβής αποτελεί η διερεύνηση δυνατότητας ισχύος της προταθείσας εξίσωσης για περαιτέρω εδαφικούς σχηματισμούς και διατάξεις. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιείται σειρά παραμετρικών αναλύσεων και αντίστοιχη επεξεργασία αποτελεσμάτων, τα οποία παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο και στα παραρτήματα της διατριβής. Στις επόμενες παραγράφους πραγματοποιείται παρουσίαση των πλέον γνωστών εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της απόκρισης ομάδας πασσάλων, ενώ στη συνέχεια περιγράφεται η προσέγγιση του προβλήματος με αριθμητικές μεθόδους και συνοπτική παράθεση αποτελεσμάτων.

3.2 Απλοποιητικές μέθοδοι

Φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων

Ο ακριβής υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας ομάδας πασσάλων και η απόκριση της αποτελεί ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των πασσάλων μεταξύ τους. Για τον προσδιορισμό της χρησιμοποιούνται συνήθως τα αποτελέσματα των διάφορων μεθόδων υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας μεμονωμένου πασσάλου, με την εισαγωγή συντελεστών αποτίμησης της αλληλεπίδρασης. Ο προσδιορισμός της τιμής των συντελεστών αυτών μπορεί να εφαρμοσθεί για γραμμική ελαστική ανάλυση, ενώ προϋποθέτει κανονικοποιημένη διάταξη, υπέδαφος ενιαίας στρωματογραφίας, διαχωρισμό σε πασσάλους αιχμής ή τριβής και σειρά άλλων περιορισμών που καθιστούν την απλοποιητική αυτή προσέγγιση υπό όρους μόνο αποτελεσματική και εφαρμόσιμη.

Ως συντελεστής απόδοσης ομάδας πασσάλων ορίζεται ο λόγος της φέρουσας ικανότητας της ομάδας προς το άθροισμα των φερουσών ικανοτήτων ισάριθμων μεμονωμένων πασσάλων.

$$\eta = \frac{\text{φερ. ικαν. της ομάδας των πασσάλων}}{\text{άθροισμα της φερ. ικαν. ισάριθμων μεμονωμένων πασσάλων}} \quad (3.1)$$

Κατά συνέπεια η φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων δίνεται από την εξίσωση 3.2

$$Q_{ug} = \lambda \eta Q_u \quad (3.2)$$

Η τιμή του συντελεστή απόδοσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος του εδάφους (συνεκτικό ή μη-συνεκτικό), στο οποίο βρίσκονται οι πάσσαλοι, καθώς και

από τον αριθμό των πασσάλων και τις μεταξύ τους αποστάσεις. Σύμφωνα με τις αρχικές προσεγγίσεις, στα συνεκτικά εδάφη η αποδοτικότητα λαμβάνεται ίση προς τη μονάδα για μεγάλες μεταξύ των πασσάλων αποστάσεις και μειώνεται όσο η απόσταση αυτή μικραίνει. Αντίθετα στα μη-συνεκτικά εδάφη ο συντελεστής αποδοτικότητας είναι στις περισσότερες των περιπτώσεων μεγαλύτερος της μονάδας, δηλαδή η φέρουσα ικανότητα της ομάδας είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των φερουσών ικανοτήτων των μεμονωμένων πασσάλων.

Σύμφωνα με το Canadian Foundation Engineering Manual (1985) στις περιπτώσεις αργιλικών εδαφών με αστράγγιστη διατμητική αντοχή μεγαλύτερη των 100 kPa οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στη φέρουσα ικανότητα είναι περιορισμένες και δεν οδηγούν σε συντελεστή απομείωσης. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, ενώ στην περίπτωση μεγάλων αξονικών αποστάσεων ο συντελεστής είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Στις περιπτώσεις αργιλικών εδαφών με μικρή διατμητική αντοχή προτείνεται η εφαρμογή μειωτικού συντελεστή της τάξης του 70%. Τονίζεται εντούτοις ότι η εφαρμογή του συντελεστή αυτού είναι συντηρητική και ότι θα μπορούσε και στην περίπτωση αυτή να χρησιμοποιηθεί μοναδιαίος συντελεστής. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της παρούσας σύμφωνα με τα οποία ο συντελεστής απόδοσης κυμαίνεται στο όριο της μονάδας. Για τετραγωνικές διατάξεις σε αξονικές αποστάσεις της τάξης των 3.0D ο συντελεστής παίρνει τιμές της τάξης του 0.75 έως 0.90, ανάλογα με τον αριθμό των πασσάλων. Για ορθογωνικές διατάξεις ή ακόμα για διατάξεις μιας μόνο σειράς ο συντελεστής μπορεί να πάρει τιμή ακόμη και μεγαλύτερη της μονάδας.

Στις περιπτώσεις αμμωδών εδαφών ο συντελεστής είναι κατά κανόνα μεγαλύτερος της μονάδας και για το λόγο αυτό προτείνεται η εφαρμογή μοναδιαίου συντελεστή. Η επεξεργασία των επιλύσεων ομάδων πασσάλων σε αμμώδη εδάφη, βλ. επόμενο κεφάλαιο, επιβεβαιώνουν την παρατήρηση. Εξαιρεση αποτελεί η περίπτωση των πολύ χαλαρών αμμωδών σχηματισμών, όπου καταγράφονται τιμές συντελεστών ελαφρά μικρότερες της μονάδας. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι, στις περιπτώσεις μέσης πυκνότητας άμμου ή ακόμη πυκνών άμμων, οι συντελεστές έχουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές.

Για μεγάλο χρονικό διάστημα τύγγχανε εφαρμογής, και ακόμη εφαρμόζεται για λόγους διευκόλυνσης, η θεώρηση ότι η επίδραση από τους γειτονικούς πασσάλους μπορεί να αγνοηθεί όταν η σχετική απόσταση είναι μεγαλύτερη από 3.0D, χωρίς εντούτοις να έχει ποτέ δοθεί επαρκής τεκμηρίωση. Παρ' ότι η θεώρηση αυτή θα μπορούσε να γίνει αποδεκτή για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας ομάδας πασσάλων, η περαιτέρω εφαρμογή της για την απόκριση ομάδας πασσάλων κρίνεται, και από όλες τις σχετικές διεθνείς αναφορές επιβεβαιώνεται, ότι δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας ομάδας πασσάλων συχνά εφαρμόζεται και η προσέγγιση των Converse–La Barre, σύμφωνα με την οποία η τιμή του συντελεστή απόδοσης φέρουσας ικανότητας δίνεται από την εξίσωση 3.3.

$$\eta = 1 - \left[\frac{(n_r - 1) n_p + (n_p - 1) n_r}{n_r n_p} \right] \frac{\xi}{90} \quad (3.3)$$

- όπου n_r : ο αριθμός των σειρών των πασσάλων που έχει η ομάδα
 n_p : ο αριθμός των πασσάλων μιας σειράς
 ξ : $\arctan (D/d)$ σε μοίρες
 D : η διάμετρος των πασσάλων
 d : η απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο διαδοχικών πασσάλων

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή της προσέγγισης των Converse–La Barre οδηγεί εν γένει σε συντηρητικές τιμές συντελεστή φέρουσας ικανότητας, οι οποίοι σε κάθε περίπτωση είναι μειωτικοί.

Πολύ συχνά, πέραν της εκτίμησης της φέρουσας ικανότητας ομάδας πασσάλων με εφαρμογή συντελεστή απομείωσης, εφαρμόζεται και ο έλεγχος αστοχίας ισοδύναμου βάρους. Η ανάπτυξη μηχανισμού θραύσης αυτού του τύπου μπορεί να εμφανισθεί στις περιπτώσεις πασσάλων με μικρή αξονική απόσταση και τετραγωνική διάταξη (ελάχιστη δυνατή περίμετρο). Κατά την περίπτωση αυτή το σύνολο των πασσάλων και το έδαφος που περιλαμβάνεται μεταξύ αυτών, αστοχούν μαζί ως ένα βάρους. Η φέρουσα ικανότητα της ομάδας στην περίπτωση αυτή είναι ίση με το άθροισμα της οριακής πλευρικής αντίστασης που μπορεί να αναπτυχθεί περιμετρικά του ιδεατού βάρους και της φέρουσας ικανότητας της βάσης του βάρους.

$$Q_{ug} = A_b c_{ub} N_c + A_s \bar{c}_u \quad (3.4)$$

- όπου A_b : το εμβαδόν της βάσης του βάρους
 A_s : το εμβαδόν της παράπλευρης επιφάνειας του βάρους
 c_{ub} : η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους στην αιχμή των πασσάλων
 \bar{c}_u : η μέση αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους κατά μήκος των πασσάλων
 N_c : συντελεστής φέρουσας ικανότητας που εξαρτάται από τη γεωμετρία της διάταξης

Καθιζήσεις ομάδας πασσάλων

Για τον προσδιορισμό της καθίζησης ομάδας πασσάλων έχουν προταθεί στο παρελθόν διάφορες εμπειρικές σχέσεις των οποίων η αξιοπιστία, όπως τονίζεται συχνά και από τους ίδιους τους ερευνητές, είναι αισθητά μικρότερη από αυτήν που χαρακτηρίζει την καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου. Τονίζεται ακόμη ότι οι προσεγγίσεις αυτές δίνουν μία και μόνο τιμή που ισχύει για την περίπτωση του επιτρεπόμενου φορτίου.

Ως πρώτη εμπειρική προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί η πρόταση του Skempton (1953) για πασσάλους σε άμμο, οι οποίες βασίζονται σε περιορισμένες παρατηρήσεις δοκιμών επί τόπου. Σύμφωνα με τον Skempton η καθίζηση ομάδας πασσάλων για μέσο φορτίο N_m σε άμμο, μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{S_{mG}}{S_{mLs}} = \frac{(4B+9)^2}{(B+12)^2} \quad (3.5)$$

όπου S_{mLs} : η καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου για μέσο φορτίο N_m
 S_{mG} : η καθίζηση της ομάδας των πασσάλων για μέσο φορτίο N_m
 B : το πλάτος της ομάδας σε ft

Για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε τετραγωνική διάταξη και σε αμμώδες έδαφος προτείνεται από τον Meyerhof (1959) η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{S_{mG}}{S_{mLs}} = \frac{s(5 - \frac{s}{3})}{(1 + \frac{1}{n_r})^2} \quad (3.6)$$

όπου s : ο λόγος της σχετικής απόστασης μεταξύ των πασσάλων προς την διάμετρο
 n_r : ο αριθμός των γραμμών της τετραγωνικής ομάδας

Στην δική του προσέγγιση ο Vesic (1970) συνδέει την καθίζηση της ομάδας πασσάλων με αυτήν του μεμονωμένου δια μέσου της σχέσης:

$$S_{mG} = S_{mLs} \sqrt{\frac{B}{D}} \quad (3.7)$$

όπου B : το πλάτος της ομάδας πασσάλων
 D : η διάμετρος των πασσάλων

Τέλος αναφέρεται η προσέγγιση του Meyerhof (1976) κατά την οποία η καθίζηση της ομάδας πασσάλων συνδέεται με τα αποτελέσματα του αριθμού κτύπων της τυποποιημένης δοκιμής διείσδυσης σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$S_{mG} = \frac{1}{N} (2 q I \sqrt{B}) \quad (3.8)$$

όπου N : αριθμός κτύπων της τυποποιημένης δοκιμής διείσδυσης
 q : κατακόρυφη τάση ασκούμενη στο έδαφος κάτω από τον κεφαλόδεσμο (tsf)
 B : το πλάτος της ομάδας πασσάλων (feet)
 I : συντελεστής επιρροής κυμαινόμενος από 0.5 έως 1.0

Απλουστευμένη προσέγγιση εκτίμησης των καθιζήσεων ομάδας πασσάλων αποτελεί και η αναγωγή του προβλήματος σε γεωτεχνικό πρόβλημα εκτίμησης των καθιζήσεων πλάκας. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή η ομάδα πασσάλων αντικαθίσταται από μία ιδεατή φορτιζόμενη πλάκα και ακολουθείται η κλασσική

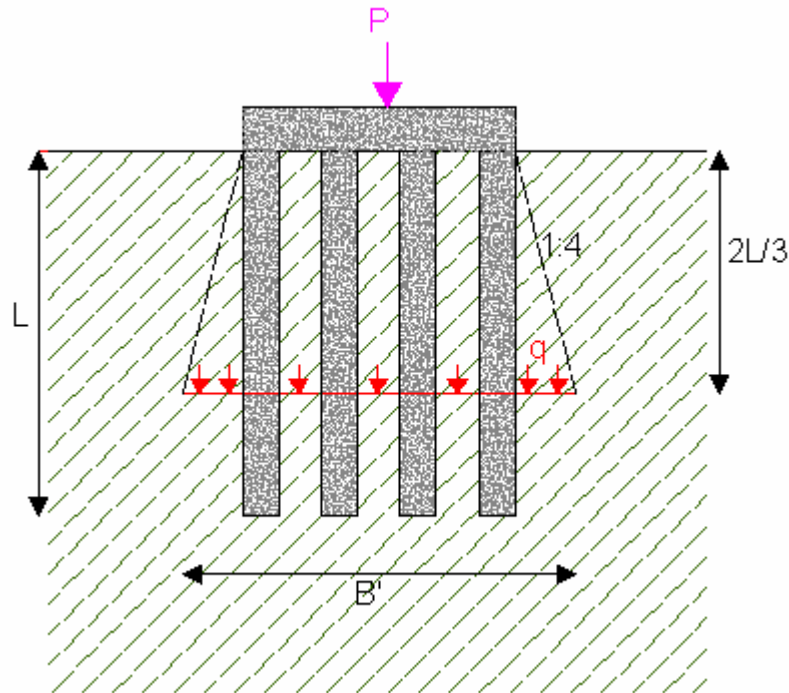
μέθοδος της στερεοποίησης των συνεκτικών εδαφικών στρώσεων που βρίσκονται κάτω από την πλάκα αυτή. Οι διαστάσεις της ιδεατής πλάκας και το βάθος στο οποίο θεωρείται ότι εδράζεται, καθορίζονται από τη σύσταση του εδάφους και τον τύπο των πασσάλων (διαχωρισμός σε τριβής ή αιχμής). Η απλουστευμένη αυτή προσέγγιση αποτυπώνεται στο σχήμα 3.1, το οποίο αναφέρεται στην περίπτωση πασσάλων τριβής σε συνεκτικό έδαφος, ενώ η ιδεατή πλάκα θεωρείται ότι βρίσκεται σε βάθος ίσο προς τα 2/3 του μήκους του πασσάλου. Αντίστοιχα στο σχήμα 3.4 το οποίο αναφέρεται στην περίπτωση που οι αιχμές των πασσάλων εδράζονται σε μη-συνεκτικό έδαφος, η φορτιζόμενη πλάκα θεωρείται ότι εδράζεται στην επιφάνεια του συνεκτικού εδάφους. Το ομοιόμορφο φορτίο με το οποίο φορτίζεται η ιδεατή πλάκα είναι:

$$q = \frac{P}{B_x' B_y'} \quad (3.9)$$

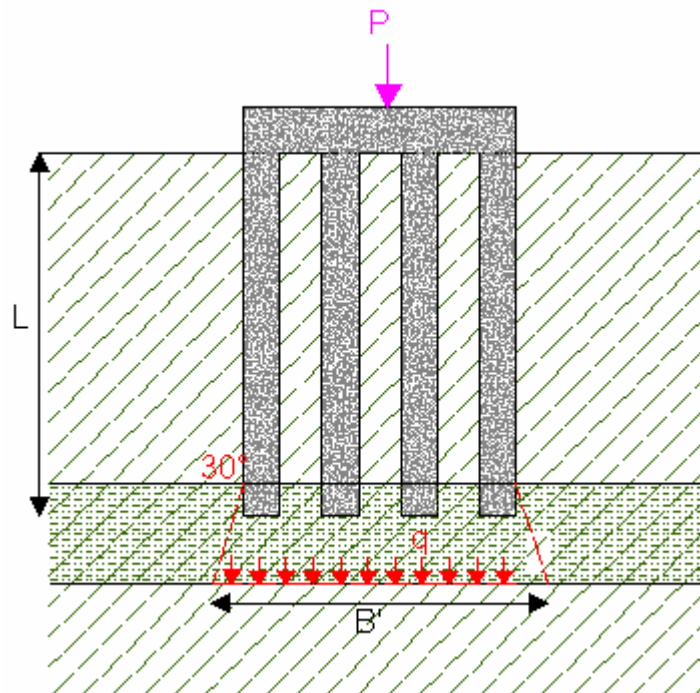
όπου P : το φορτίο που ασκείται στην ομάδα των πασσάλων
 B_x', B_y' : οι διαστάσεις της ιδεατής πλάκας.

Συστηματική προσπάθεια αποτίμησης των καθιζήσεων ομάδων πασσάλων αποτελεί αυτή των Poulos and Davis (1980). Χρησιμοποιείται κατά τη μέθοδο αυτή η τιμή της καθίζησης του μεμονωμένου πασσάλου, η οποία επαυξάνεται με χρήση συντελεστών αλληλεπίδρασης οι οποίοι δίνονται σε πίνακες ή σε νομογραφήματα. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτούνται διάφορες παραδοχές ως προς τη λειτουργία τους. Σημειώνεται ακόμη ότι, δεδομένου ότι οι προτεινόμενες τιμές προκύπτουν από γραμμική ελαστική ανάλυση, παραμένουν αμετάβλητες από το επίπεδο φόρτισης ή καθίζησης.

Συμπερασματικά σημειώνεται ότι η χρήση απλουστευμένων προσεγγίσεων μπορεί να διευκολύνει ως προς το υπολογιστικό κόστος, οδηγεί εντούτοις σε επιλύσεις περιορισμένης ακρίβειας στις περισσότερες περιπτώσεις, δεδομένου ότι οι προσεγγίσεις αυτές προϋποθέτουν μια σειρά απλοποιήσεων. Η ακριβής απόκριση της θεμελίωσης καθώς και ο υπολογισμός της δυσκαμψίας της θεμελίωσης υπό κατακόρυφη φόρτιση είναι δυνατόν να είναι καθοριστική στο σχεδιασμό έργων ανωδομής όπως οι ολόσωμες γέφυρες και άλλα ειδικά έργα. Οι αριθμητικές μέθοδοι σε απλουστευμένη μορφή ή κατά την ακριβέστερη δυνατή περίπτωση της τριδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης εμφανίζουν σαφή πλεονεκτήματα προσδιορισμού της αναμενόμενης απόκρισης πασσαλοθεμελιώσεων.



Σχήμα 3.1 Κατανομή των τάσεων για τον υπολογισμό της καθίζησης στερεοποίησης σε πασσάλους τριβής.



Σχήμα 3.2 Κατανομή των τάσεων για τον υπολογισμό της καθίζησης στερεοποίησης σε πασσάλους αιχμής.

3.3 Ανάλυση με χρήση αριθμητικών μεθόδων

Οι πρώτες εφαρμογές για τον προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας πασσάλων βασίζονται στην απλουστευτική προσέγγιση με χρήση καμπυλών t-z. Αναλυτική

παρουσίαση της μεθόδου δίνεται στην παράγραφο 2.4.1. Η μέθοδος αυτή κύριο στόχο έχει τον προσδιορισμό της απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου. Η επέκταση της μεθόδου και στις ομάδες πασσάλων πραγματοποιείται με την εισαγωγή μειωτικού συντελεστή της πλευρικής κατά κύριο λόγο αντίστασης του εδάφους. Κύριο πλεονέκτημα της αποτελεί η απλότητα της και το πολύ μικρό υπολογιστικό κόστος (πολύ μικρές απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, απλοποιημένοι αριθμητικοί κώδικες και ελάχιστος χρόνος υπολογισμών). Μειονέκτημα της αποτελεί ο προβληματισμός ως προς τον προσδιορισμό των καμπυλών προσομοίωσης του εδάφους καθώς επίσης και η τιμή του συντελεστή μείωσης των καμπυλών στην περίπτωση ομάδας πασσάλων. Κατά τη μέθοδο αυτή δεν λαμβάνεται υπόψη μεταβολή του συντελεστή μείωσης ανάλογα με το επίπεδο καθίζησης ή την πλαστικοποίηση του εδάφους που περιλαμβάνεται ανάμεσα στους πασσάλους. Θα πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι η χρήση της μεθόδου οδηγεί στον προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας χωρίς να είναι σε θέση να προσδιορίσει τη διαφορετική απόκριση των επιμέρους πασσάλων μιας ομάδας ή ακόμη τις επιπτώσεις της διαφοροποίησης αυτής στον κεφαλόδεσμο της ομάδας.

Σε αντίστιξη η τριδιάστατη αριθμητική ανάλυση με χρήση κατάλληλων καταστατικών νόμων προσομοίωσης της απόκρισης των εδαφικών στρώσεων παρουσιάζει σαφές πλεονέκτημα στην ακρίβεια επίλυσης, στην πρόβλεψη απόκρισης κάθε συστατικού στοιχείου (πασσάλου, κεφαλοδέσμου ή εδαφικού υλικού), στην τυχόν μεταβολή της αντίστασης του εδάφους τόσο στην αιχμή όσο και παράπλευρα των πασσάλων συναρτήσει του βαθμού διαρροής του εδάφους. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί ο μεγάλος βαθμός δυσκολίας, οι υψηλές απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, οι ειδικές υπορουτίνες που απαιτούνται για την προσομοίωση μηχανισμών και ο συγκριτικά υπερβολικός χρόνος επιλύσεων που απαιτείται. Σημαντική επιβάρυνση αποτελεί επίσης η επεξεργασία και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των επιλύσεων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται, στο βαθμό που το πρόγραμμα ανάλυσης το επιτρέπει, ειδικές υπορουτίνες που επιτρέπουν την αυτοματοποίηση της διαδικασίας, ενώ εξασφαλίζουν και την αποφυγή λαθών κατά τη φάση μεταφοράς και επεξεργασίας των δεδομένων.

Η εφαρμογή της μεθόδου υλοποιείται με χρήση ειδικών προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών. Αναλυτική περιγραφή της μεθόδου δίνεται στην παράγραφο 2.4.2. Η παρούσα διατριβή αποτελεί ουσιαστικά εφαρμογή της τριδιάστατης μη-γραμμικής αριθμητικής ανάλυσης και στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιείται το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC^{3D} (2003). Αναλυτικότερη περιγραφή της χρήσης και των παραδοχών δίνονται στην παράγραφο 4.3.

Με χρήση τριδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης και του προγράμματος FLAC^{3D} διερευνήθηκε από τους Comodromos et al. (2003) ο προσδιορισμός της απόκρισης δοκιμαστικής φόρτισης, μεμονωμένου πασσάλου και ομάδων πασσάλων. Από τους Comodromos and Bareka (2005α) διερευνήθηκε η αποτίμηση των επιπτώσεων της

ανάπτυξης αρνητικών τριβών σε μεμονωμένο πάσσαλο και σε ομάδα πασσάλων. Από τον Κωμοδρόμο (2004) διερευνήθηκε η απόκριση ομάδας πασσάλων καθώς και των επιμέρους πασσάλων. Επέκταση της εργασίας αυτής απετέλεσε, πέραν της απόκρισης των πασσάλων, ο προσδιορισμός εξίσωσης πρόβλεψης της απόκρισης ομάδας πασσάλων με βάση την απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου Comodromos (2004). Παρόμοια μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε επίσης για τον προσδιορισμό της απόκρισης δοκιμαστικής φόρτισης, ομάδων πασσάλων καθώς επίσης και εξίσωσης πρόβλεψης της απόκρισης ομάδας πασσάλων υπό οριζόντια φόρτιση, Comodromos (2003), Comodromos and Pitilakis (2005).

Αναφορικά με την απόκριση ομάδων πασσάλων υπό κατακόρυφη φόρτιση τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από τις ανωτέρω αναφερόμενες ερευνητικές εργασίες συμπυκνώνονται στα ακόλουθα σημεία:

- Για δεδομένες εδαφικές συνθήκες έγχυτων φρεατοπασσάλων πακτωμένης κεφαλής σε μαλακή έως μέσης στιφρότητας άργιλο και έδραση σε πυκνή άμμο ο συντελεστής φέρουσας ικανότητας μεταβάλλεται από 0.70 έως 1.10, για διατάξεις με αξονική απόσταση 3.0D και 6.0D αντίστοιχα.
- Ακόμη και στις περιπτώσεις όπου οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στη φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων είναι μικρές, καταδεικνύεται σημαντική επίπτωση στο συντελεστή απόδοσης δυσκαμψίας της ομάδας. Ο βαθμός επίπτωσης εξαρτάται τόσο από τη διάταξη όσο και από το επίπεδο καθίζησης της ομάδας. Σε χαμηλό επίπεδο καθιζήσεων η αλληλεπίδραση εμφανίζει τη μέγιστη επίπτωση της, περίπτωση όπου ο κεντρικός πάσσαλος αναλαμβάνει λιγότερο από 50% του φορτίου που αναλαμβάνει ο γωνιακός πάσσαλος για διάταξη ομάδας 3*3 σε αξονική απόσταση 3.0D. Το ποσοστό αυτό μειώνεται περαιτέρω στο 33% στην περίπτωση διάταξης ομάδας 5*5 και ίδια αξονική απόσταση. Όταν η καθίζηση αυξάνει και αρχίζει η πλαστικοποίηση του εδάφους οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μειώνονται σταδιακά ανεξάρτητα της διάταξης της ομάδας, με τελική εξίσωση των αποκρίσεων όταν επέρχεται πλήρης πλαστικοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους (οριακή κατάσταση). Τυχόν αύξηση του αριθμού των πασσάλων οδηγεί σε μεγαλύτερες απαιτήσεις καθιζήσεων προκειμένου να επέλθει εξίσωση της απόκρισης των επιμέρους πασσάλων, ενώ η αύξηση της αξονικής απόστασης οδηγεί σε μείωση των απαιτούμενων καθιζήσεων για την εξομοίωση πάντα της απόκρισης των επιμέρους πασσάλων.

Μετά από επεξεργασία των αποκρίσεων των ομάδων πασσάλων και τη συσχέτιση τους με την απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου προτάθηκε εξίσωση προσδιορισμού επαυξητικού συντελεστή ομάδας πασσάλων R_a . Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή είναι δυνατόν να προσδιορισθεί η απόκριση ομάδας πασσάλων από την αντίστοιχη καμπύλη του μεμονωμένου και πολλαπλασιασμό των καθιζήσεων με τον συντελεστή R_a . Η εξίσωση προσδιορισμού του ανωτέρω συντελεστή δίνεται,

σύμφωνα με τον Comodromos (2004), από την εξίσωση 3.10 η οποία βρίσκει πεδίο εφαρμογής στην ευρέως εφαρμοζόμενη αξονική απόσταση πασσάλων των 3.0D.

$$R_a = A \left[S_{ns}^B N_R^C + S_{ns}^E \left(\frac{1}{N_R} \right)^F \exp^{(N_R)} \right] \quad (3.10)$$

$$N_R = \frac{n}{n_r + n_c} \quad (3.11)$$

όπου R_a : ο συντελεστής επαύξησης της καθίζησης

S_{ns} : η ανηγμένη καθίζηση του μεμονωμένου πασσάλου ως προς τη διάμετρο του

n : ο συνολικός αριθμός των πασσάλων στην ομάδα

n_r, n_c : ο αριθμός των γραμμών και των στηλών στην ομάδα, αντίστοιχα.

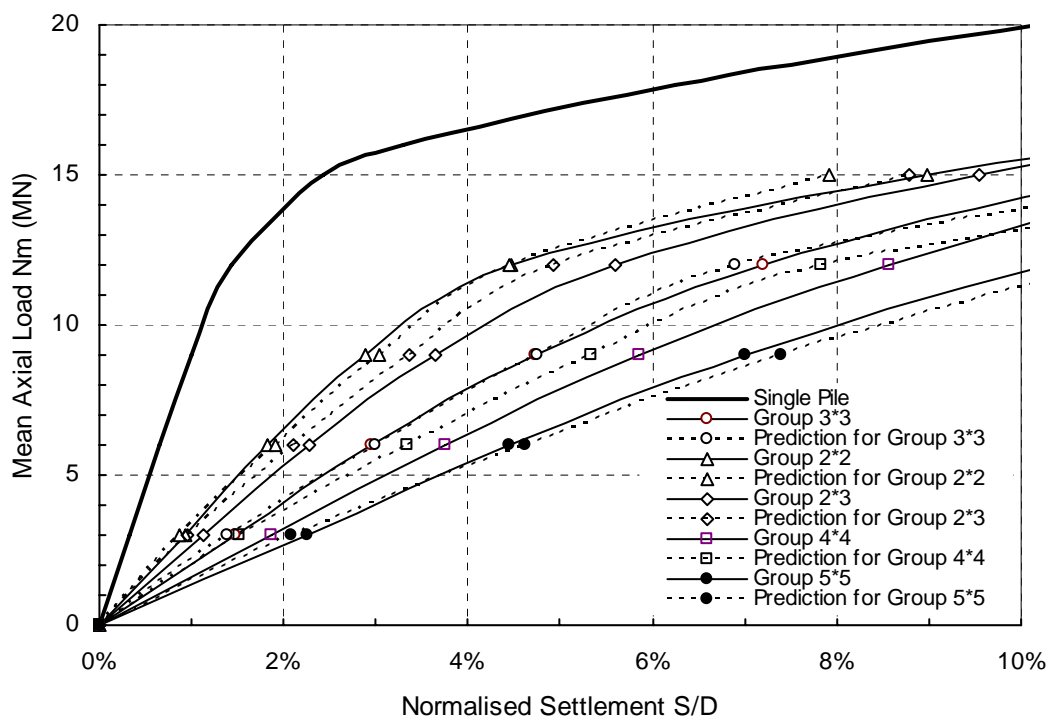
Χρησιμοποιώντας τον συντελεστή R_a από την εξίσωση 3.10 και θεωρώντας ότι η καθίζηση του μεμονωμένου πασσάλου S_{ms} για δεδομένο μέσο φορτίο N_m είναι γνωστή, η εξίσωση 3.12 δίνει την καθίζηση της ομάδας S_{mG} .

$$S_{mG} = R_a S_{mLs} \quad (3.12)$$

Μετά από αριθμητική επεξεργασία με χρήση ειδικής υπορουτίνας, η οποία εντάχθηκε σε φύλλο εργασίας EXCEL, με χρήση της ενσωματωμένης γλώσσας προγραμματισμού, οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων A,B,C,E και F προσδιορίστηκαν σε A=1.3, B=0.05, C=0.5, E=0.07 και F=0.5.

Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η σύγκριση ανάμεσα στις καμπύλες απόκρισης των διαφόρων ομάδων πασσάλων ως αποτέλεσμα της αριθμητικής επεξεργασίας στο FLAC^{3D} και σε αυτές που υπολογίστηκαν κάνοντας χρήση των εξισώσεων 3.10-3.12. Παρατηρείται πολύ μικρή απόκλιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων. Όπως τονίζεται εντούτοις και στο ίδιο το άρθρο η γενικευμένη εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για οποιοδήποτε υπέδαφος και τυχούσα ομάδα προϋποθέτει σχετική έρευνα.

Περαιτέρω διερεύνηση της αξιοπιστίας και επαλήθευση της προταθείσας σχέσης πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Σειρά αποτελεσμάτων τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων σε αργιλικά εδάφη επαλήθευσαν την αξιοπιστία της προταθείσας εξίσωσης, βλ. Comodromos and Bareka (2005b). Περαιτέρω ανάλυση για διερεύνηση της δυνατότητας επέκτασης της ισχύος της προταθείσας εξίσωσης σε διατάξεις με αξονική απόσταση που να καλύπτει το εφαρμοζόμενο εύρος διεξήχθη και αποτελεί αντικείμενο του επόμενου κεφαλαίου.



Σχήμα 3.3 Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων με σχετική απόσταση 3D βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης (3.12), (Comodromos, 2004).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων σε εδαφικό σχηματισμό

4.1 Γενικά

Παρά την εκτεταμένη έρευνα των τελευταίων δεκαετιών αναφορικά με την απόκριση των θεμελιώσεων με πασσάλους, είναι αρκετά τα ερωτήματα που απομένουν και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Το είδος της φόρτισης, στατική ή δυναμική, η συμπεριφορά του περιβάλλοντος εδαφικού υλικού, γραμμική ελαστική ή μη-γραμμική, η γεινίαση με άλλα στοιχεία θεμελίωσης, ίδιας ή διαφορετικής μορφής, αποτελούν μερικά από τα στοιχεία που συνθέτουν το δύσκολο προς ανάλυση πρόβλημα. Οι συνέπειες της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων μιας ομάδας υπό κατακόρυφη φόρτιση εξακολουθεί να αποτελεί ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο, γεγονός που καταγράφεται από τη συνεχή δραστηριότητα και δημοσιεύσεις της διεθνούς ερευνητικής κοινότητας επί του θέματος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην απόκριση της θεμελίωσης ομάδας πασσάλων δεδομένου ότι αυτή επηρεάζει καθοριστικά το σχεδιασμό και τη συμπεριφορά των ανωδομών.

Οι μέθοδοι προσέγγισης και επίλυσης του προβλήματος έχουν να επιδείξουν σημαντική βελτίωση, ως αποτέλεσμα της βελτιούμενης υπολογιστικής ισχύος, της επιστημονικής προόδου σε συναφείς τομείς και της συσσωρευμένης εμπειρίας όπως αυτή αναλυτικά δίνεται στο κεφάλαιο 3. Ειδικότερα οι αριθμητικές μέθοδοι καλύπτουν πλέον συμπληρωματικά δύο ουσιαστικά κενά που άφηναν πρακτικά ανέπαφα οι αρχικές μεθοδολογίες προσέγγισης και επίλυσης του προβλήματος. Το πρώτο αφορά στην εντατική και κινηματική κατάσταση του περιβάλλοντος εδάφους, όπου και όταν οι πληροφορίες αυτές κρίνονται αναγκαίες. Το δεύτερο αναφέρεται στον ακριβή προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας πασσάλων, πεδίο με αυξημένο ενδιαφέρον για τις θεμελιώσεις με πασσάλους τόσο σε πλευρική όσο και σε αξονική φόρτιση, και τη μεταβολή της συναρτήσεως του εύρους της καθίζησης. Με χρήση τριδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης αναφορικά με την απόκριση θεμελιώσεων με πασσάλους υπό κατακόρυφη φόρτιση, οι Comodromos et al. (2003) και Comodromos (2004) έδειξαν ότι η αλληλεπίδραση έχει σημαντική επίπτωση στο συντελεστή απόκρισης της ομάδας. Επιπρόσθετα επισημαίνουν ότι ο συντελεστής απόδοσης δυσκαμψίας ομάδας πασσάλων επηρεάζεται, όχι μόνο από τη διάταξη

των πασσάλων αλλά και από το επίπεδο καθίζησης (ουσιαστικά από το συσχετιζόμενο επίπεδο φόρτισης το οποίο προκαλεί και το βαθμό πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους). Μετά από επεξεργασία σειράς αποτελεσμάτων και λαμβάνοντας υπόψη τους μηχανισμούς που αναπτύσσονται κατά τη φόρτιση ομάδας πασσάλων, προτείνεται από τον Comodromos (2004) απλοποιημένη εμπειρική σχέση με δυνατότητα πρόβλεψης, τουλάχιστον για δεδομένες εδαφικές συνθήκες, της απόκρισης διαφόρων ομάδων πασσάλων συναρτήσει της απόκρισης του αντίστοιχου μεμονωμένου πασσάλου. Η εν λόγω εξίσωση προτείνεται για την ευρείας εφαρμογής αξονική απόσταση των 3.0D και για έγχυτους πασσάλους. Η ισχύς της προταθείσας σχέσης εξετάσθηκε και για διαφορετικούς εδαφικούς σχηματισμούς, βλ. Comodromos and Bareka (2005b), και ειδικότερα σε διαφορετικούς τύπους συνεκτικών εδαφών, οι οποίοι καλύπτουν εύρος από μαλακές έως πολύ στιφρές-σκληρές αργίλους, με ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται αποτίμηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης των πασσάλων κάνοντας παραμετρική ανάλυση με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC^{3D}. Εξετάζονται διατάξεις ομάδας 2*3, 3*3 και 5*5 με σχετική απόσταση μεταξύ των μελών της ομάδας 2.0D, 3.0D, 4.0D και 5.0D. Για όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις πραγματοποιούνται επιλύσεις για δύο σχετικά μήκη πασσάλων, L/D=25 και 50, ενώ σε όλες τις αναλύσεις υιοθετείται διάμετρος πασσάλων ίση με D=1 m. Οι ανωτέρω περιπτώσεις επιλύονται για τέσσερις περιπτώσεις αργιλικού εδάφους και τρεις περιπτώσεις αμμώδους εδάφους. Για κάθε μία από αυτές πραγματοποιείται και η αντίστοιχη ανάλυση μεμονωμένου πασσάλου με στόχο τη σύγκριση των αποκρίσεων. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων οδηγεί στην πινακοποίηση των επιτρεπομένων και οριακών φορτίων ομάδας πασσάλων και στον προσδιορισμό 'μειωτικών' συντελεστών φέρουσας ικανότητας. Η περαιτέρω χρήση των αποτελεσμάτων επέτρεψε την τροποποίηση της προταθείσας από τον Comodromos (2004) εξίσωσης της απόκρισης ομάδας με χρήση του συντελεστή επαύξησης απόκρισης με την εισαγωγή του όρου της αξονικής απόστασης έτσι ώστε το πεδίο εφαρμογής να διευρυνθεί και σε ομάδες πασσάλων με διατάξεις που πρακτικά καλύπτουν όλο το εύρος εφαρμοζόμενων αξονικών αποστάσεων για έγχυτους πάντα πασσάλους. Η μεθοδολογία συσχέτισης της απόκρισης ομάδας και μεμονωμένου πασσάλου απετέλεσε πεδίο έρευνας των Comodromos and Bareka (2006) και δίνεται συνοπτικά στην επόμενη παράγραφο.

4.2 Συσχέτιση της απόκρισης ομάδας πασσάλων με την απόκριση μεμονωμένου πασσάλου

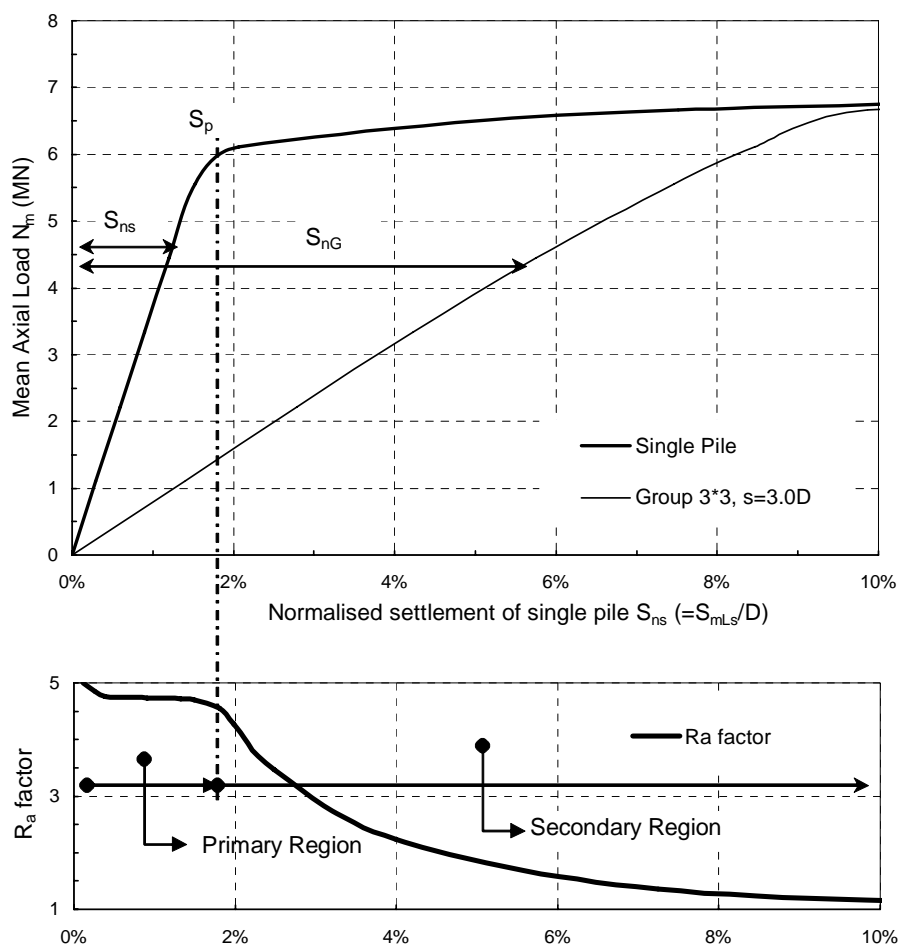
Η απόκριση ομάδας πασσάλων παρουσιάζει παρόμοια μορφή με αυτήν του αντίστοιχου μεμονωμένου πασσάλου. Η ποσοτική προσέγγιση των δύο αποκρίσεων οδηγεί στην εισαγωγή του συντελεστή επαύξησης R_a , ο οποίος οφείλεται και χαρακτηρίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων. Ο συντελεστής R_a μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της καθίζησης της ομάδας των πασσάλων S_{mG} προς την

καθίζηση του μεμονωμένου πασσάλου S_{mLs} ή ως ο λόγος της κανονικοποιημένης καθίζησης της ομάδας S_{nG} προς την κανονικοποιημένη καθίζηση του μεμονωμένου πασσάλου S_{ns} ως προς το ίδιο μέσο φορτίο N_m .

$$R_a = \frac{S_{mG}}{S_{mLs}} = \frac{S_{nG}}{S_{ns}} \quad (4.1)$$

Είναι κοινά αποδεκτό και έχει από πολλούς ερευνητές προταθεί κατά το παρελθόν ότι η τιμή του επαυξητικού αυτού συντελεστή εξαρτάται από τον αριθμό και τη διάταξη της ομάδας των πασσάλων, Fleming et. al (1998). Μετά από σχετικές αναλύσεις και παρατηρήσεις ότι ο συντελεστής R_a μεταβάλλεται ανάλογα με την αναπτυσσόμενη καθίζηση προτείνεται από τον Comodromos (2004) η εισαγωγή στην εξίσωση προσδιορισμού του ανωτέρω συντελεστή της τιμής της καθίζησης. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι ο συντελεστής R_a λαμβάνει τη μέγιστη τιμή επιρροής του σε μικρά φορτία και καθιζήσεις, όταν δηλαδή δεν υπάρχει πλαστικοποίηση του εδάφους και η αλληλεπίδραση εμφανίζει τις μέγιστες συνέπειες της. Όσο αυξάνει το φορτίο του πασσάλου, το έδαφος που περιβάλλει τους πασσάλους πλαστικοποιείται, περιορίζοντας έτσι τη δυνατότητα μεταφοράς φορτίου. Ως αποτέλεσμα της πλαστικοποίησης, οι συνέπειες της αλληλεπίδρασης μειώνονται, ανεξάρτητα από τη διάταξη της ομάδας, φτάνοντας στην οριακή κατάσταση όπου όλοι οι πάσσαλοι στην ομάδα έχουν την ίδια απόκριση. Σε αυτό το επίπεδο φόρτισης, το οποίο αντιστοιχεί σε επίπεδο καθίζησης μεγαλύτερο του 10% της διαμέτρου του πασσάλου, η απόκριση αντιστοιχεί στη φέρουσα ικανότητα και ο επαυξητικός συντελεστής R_a δεν αποκλίνει πολύ από τη μονάδα, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις (περίπτωση πυκνών άμμων) ο συντελεστής παίρνει και τιμές μικρότερες της μονάδας (κατά την περίπτωση αυτή και για το δεδομένο επίπεδο φόρτισης η δράση του συντελεστή R_a είναι μειωτική και όχι επαυξητική). Στο σχήμα 4.1 δίνεται τυπική απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου και ομάδας πασσάλων σε στιφρή άργιλο.

Η μεταβολή του συντελεστή R_a μπορεί να υποδιαιρεθεί σύμφωνα με τους Comodromos and Bareka (2006) σε δύο ζώνες. Στην πρώτη ζώνη η αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων της ομάδας λαμβάνει τη μέγιστη της δράση και κατά συνέπεια ο συντελεστής R_a εμφανίζει τη μέγιστη τιμή. Η αρχή της ζώνης αυτής αντιστοιχεί σε γραμμική ελαστική συμπεριφορά, ενώ η συνεχής αύξηση του φορτίου επιφέρει πλαστικοποίηση του εδάφους στα ανώτερα εδαφικά στρώματα. Στη συνέχεια παρατηρείται σταθερή μείωση του R_a μέχρι η καμπύλη να πάρει χαρακτηριστικά ευθείας. Στην περιοχή αυτή ο συντελεστής R_a συνεχίζει μεν να μειώνεται αλλά με πολύ μικρότερο ρυθμό. Το άνω όριο της ζώνης αυτής αντιστοιχεί στο σημείο όπου η πλευρική αντίσταση του μεμονωμένου πασσάλου φτάνει τη μέγιστη τιμή της, ενώ το περιβάλλον έδαφος κατά μήκος του πασσάλου πλαστικοποιείται. Στο σημείο αυτό η καμπύλη που περιγράφει την απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου εμφανίζει τη μέγιστη καμπυλότητα. Το επίπεδο καθίζησης S , που αντιστοιχεί στο όριο της ζώνης αυτής είναι της τάξης του 1 έως 2%D, ανάλογα με την αντοχή του εδάφους και τη σύσταση του.



Σχήμα 4.1 Μεταβολή του επαυξητικού συντελεστή καθίζησης R_a με το επίπεδο καθίζησης (Comodromos and Bareka, 2006).

Η δεύτερη ζώνη αντιστοιχεί στο μέρος της καμπύλης όπου η πλευρική αντίσταση παραμένει σχεδόν σταθερή, ενώ η αντίσταση αιχμής συνεχίζει να αυξάνεται. Το μέρος αυτό της καμπύλης εξαρτάται κυρίως από τη σύσταση και την αντοχή του εδάφους. Η καμπύλη απόκρισης είναι σχεδόν οριζόντια στην περίπτωση των αργιλικών εδαφών, ιδιαίτερα για μαλακές αργίλους, ενώ εμφανίζει ανοδική τάση στην περίπτωση των αμμωδών εδαφών. Το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο σε πολύ πυκνές άμμους. Στη ζώνη αυτή παρατηρείται σημαντική επιβράδυνση του ρυθμού μείωσης του συντελεστή R_a προσεγγίζοντας τα όρια της μονάδας όταν το επίπεδο καθίζησης πλησιάζει το 10%D περίπου. Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση των μαλακών αργίλων, η φέρουσα ικανότητα μιας ομάδας με μικρή σχετική απόσταση μεταξύ των μελών της μπορεί να είναι μικρότερη από το άθροισμα ισάριθμων μεμονωμένων πασσάλων και επομένως ο συντελεστής R_a είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Για ομάδες σε στιφρή άργιλο με μεγαλύτερη σχετική απόσταση, η φέρουσα ικανότητα της ομάδας συνήθως ισούται με το άθροισμα των φερουσών ικανοτήτων ισάριθμων μεμονωμένων πασσάλων (O' Neil, 1982) και ο συντελεστής R_a παίρνει παραπλήσιες της μονάδας τιμές. Ο συντελεστής R_a μπορεί να πάρει τιμές ελαφρώς μικρότερες της μονάδας στην περίπτωση πασσάλων σε στιφρή άργιλο και σε μεγάλη σχετική

απόσταση μεταξύ τους οπότε η απόδοση της ομάδας είναι ελαφρά μεγαλύτερη της μονάδας. Τα παραπάνω έρχονται να συμφωνήσουν με την ευρέως αποδεκτή παρατήρηση ότι σε ομάδα πασσάλων σε άργιλο εφαρμόζεται μειωτικός συντελεστής κατά τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας σε μαλακή άργιλο, ενώ στην περίπτωση των στιφρών αργίλων αυτό δεν είναι απαραίτητο. (Canadian Foundation Engineering Manual, 1985). Αντίθετα στα αμμώδη εδάφη είναι κοινά αποδεκτό ότι για το συγκεκριμένο επίπεδο καθίζησης ο συντελεστής R_a είναι πάντοτε μικρότερος της μονάδας. Η διαπίστωση αυτή βρίσκεται σε συμφωνία με τη διεθνώς αποδεκτή θεώρηση ότι η φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων σε αμμώδες έδαφος είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα ισάριθμων μεμονωμένων πασσάλων. Λαμβάνοντας υπόψη ωστόσο ότι η καθίζηση και όχι η φέρουσα ικανότητα είναι που παίζει καθοριστικό ρόλο κατά το σχεδιασμό ανωδομής εδραζόμενης σε ομάδα πασσάλων, το ενδιαφέρον εστιάζεται στις τιμές του R_a που αντιστοιχούν σε μικρότερα επίπεδα καθίζησης από την καθίζηση που προκαλεί το οριακό φορτίο. Από το σχήμα 4.1 φαίνεται, ότι αν και περιορισμένου εύρους, η πρόβλεψη της τιμής του R_a για την πρώτη περιοχή καλύπτει την απαιτούμενη απόκριση της ομάδας σε τιμές καθιζήσεων μέχρι την τάξη του 10%D. Τα αποτελέσματα της εκτεταμένης έρευνας διάφορων διατάξεων ομάδων της παρούσας διατριβής έδωσαν τη δυνατότητα αναπροσαρμογής της εξίσωσης υπολογισμού του R_a του Comodromos (2004), η οποία αφορούσε σε διατάξεις ομάδας με απόσταση 3.0D. Κατά την προτεινόμενη τροποποίηση εισάγεται ο όρος της ανηγμένης στην διάμετρο των πασσάλων αξονικής απόστασης (Comodromos and Bareka, 2006) και κατά τον τρόπο αυτό η νέα σχέση βρίσκει πεδίο εφαρμογής σε οποιοδήποτε πρακτικά εφαρμοζόμενη διάταξη πασσάλων.

4.3 Πλαίσιο προσομοίωσης - Αριθμητική ανάλυση

Για τις τριδιάστατες μη-γραμμικές επιλύσεις χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC^{3D}. Ειδικότερα για την προσομοίωση της απόκρισης του εδάφους χρησιμοποιείται ο καταστατικός νόμος συμπεριφοράς Mohr-Coulomb, ο οποίος στην ειδική περίπτωση των αργιλικών εδαφών μεταπίπτει στο νόμο Tresca. Δεδομένου ότι ο νόμος αυτός τυγχάνει ευρείας εφαρμογής για την προσομοίωση εδαφικών υλικών και παρουσιάζεται εκτενώς από διάφορους ερευνητές δεν θεωρείται απαραίτητη η περαιτέρω επεξήγηση του καταστατικού αυτού νόμου. Ο αναγνώστης μπορεί να προσφύγει σε διάφορα βιβλία όπου περιγράφεται το κριτήριο αυτό, χαρακτηριστικά δε αναφέρονται τα συγγράμματα των Chen (1982), Chen and Baladi (1986), Desai and Christian (1977), Owen and Hinton (1980), Κωμοδρόμος (2001).

Ο κώνναβος πεπερασμένων διαφορών κατά τις επιλύσεις ήταν ιδιαίτερα πυκνός στα όρια των πασσάλων, το δε μέγεθος των στοιχείων αυξάνεται με γεωμετρική πρόοδο όσο απομακρύνεται κανείς από τα όρια αυτά προκειμένου να μην επιβαρύνεται η υπολογιστική διαδικασία. Τα όρια κάθε προβλήματος, τόσο πλευρικά όσο και σε βάθος, βρίσκονται αρκετά απομακρυσμένα από τα στοιχεία των

πασσάλων προκειμένου να αποφευχθούν αριθμητικά λάθη από τις οριακές συνθήκες στις θέσεις αυτές. Στη βάση κάθε καννάβου επίλυσης δεσμεύονται όλες οι μετακινήσεις, ενώ πλευρικά επιτρέπονται οι μετακινήσεις μέσα στο επίπεδο του ορίου και δεσμεύονται οι μετακινήσεις εκτός από αυτό. Το γεωμετρικό μέγεθος του χώρου ανάλυσης καθώς και ο αριθμός των στοιχείων και των κόμβων του προβλήματος μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος και τον αριθμό των πασσάλων, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή ακρίβεια. Δεδομένου ότι η προετοιμασία καννάβου τριδιάστατης ανάλυσης αποτελεί από μόνη της ιδιαίτερα κοπιαστική εργασία χρησιμοποιήθηκαν ειδικές υπορουτίνες αυτόματης προετοιμασίας πλέγματος στοιχείων οι οποίες είχαν ήδη ετοιμασθεί από προηγούμενες εργασίες (Comodromos et al., 2003; Comodromos, 2004).

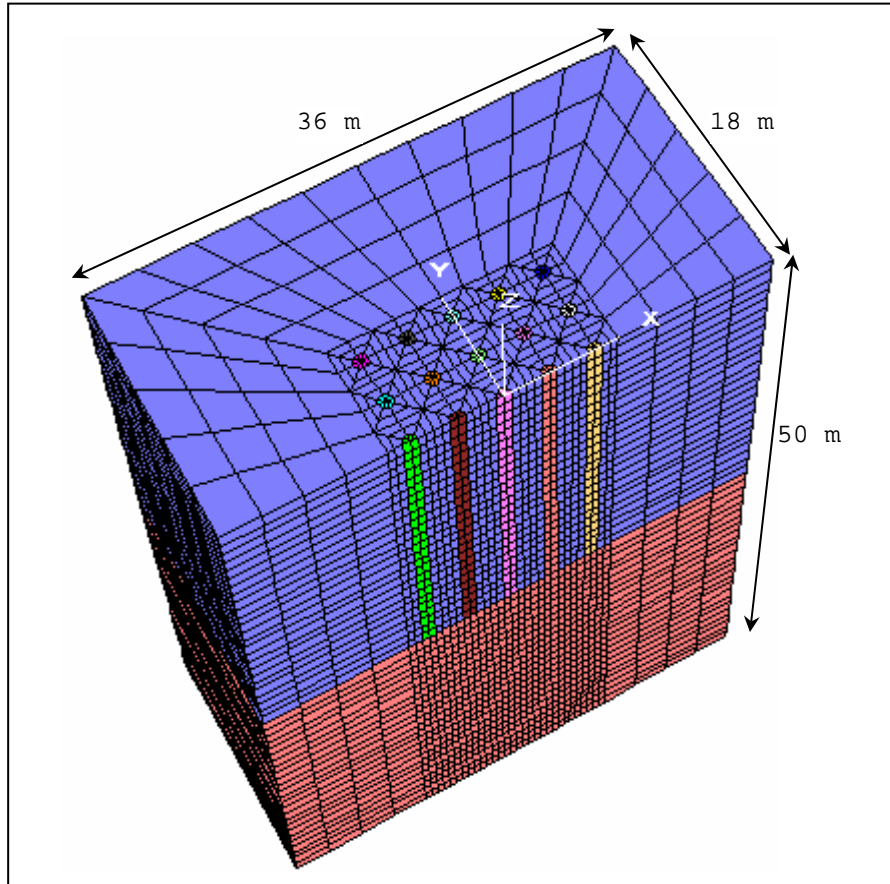
Κατά την ανάλυση εξετάστηκαν επτά διαφορετικά εδαφικά υλικά. Τα τέσσερα πρώτα αφορούν σε συνεκτικά εδάφη και αντιστοιχούν σε μαλακή, μέσης συνεκτικότητας, σφιγρή και πολύ σφιγρή έως σκληρή άργιλο και συμβολίζονται ως C1, C2, C3, C4 αντίστοιχα. Στη συνέχεια εξετάστηκαν τρεις κατηγορίες μη-συνεκτικών εδαφών τα οποία αντιστοιχούν σε χαλαρή, μέτριας πυκνότητας και πολύ πυκνή άμμο με την κωδικοποιημένη ονομασία S1, S2 και S3. Ο πίνακας 4.1 συνοψίζει τις ιδιότητες των επτά εδαφικών κατηγοριών.

	C1	C2	C3	C4	S1	S2	S3
Μέτρο διόγκωσης K (MPa)	8,3	11,1	27,8	33,3	10	25	88,9
Μέτρο διάτμησης G (MPa)	1,8	4,3	11,4	15,4	6	11,6	29,6
Μέτρο του Young E (MPa)	5	10	30	40	15	30	80
Αστράγγιστη Διατμητική αντοχή c_u (kPa)	25	50	100	150			
Συνάφεια εδάφους – πασσάλου στη διεπιφάνεια c_a (kPa)	25	50	72	75			
Γωνία τριβής (deg)					30	35	40
Γωνία τριβής στη διεπιφάνεια (deg)					28	31	35
Φαινόμενο βάρος γ (kN/m ³)	20	20	20	20	20	20	20

Πίνακας 4.1 Παράμετροι και ιδιότητες των επτά εδαφικών τύπων που χρησιμοποιήθηκαν.

Για τις κατηγορίες αυτές εξετάζονται διατάξεις ομάδας 2*3, 3*3 και 5*5 με σχετική απόσταση μεταξύ των μελών της ομάδας 2.0D, 3.0D, 4.0D και 5.0D. Για όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις πραγματοποιούνται επιλύσεις για δύο σχετικά μήκη πασσάλων, $L/D=25$ και 50, ενώ σε όλες τις αναλύσεις υιοθετείται διάμετρος πασσάλων ίση με 1 m. Η συμπεριφορά των πασσάλων θεωρείται σε όλες τις επιλύσεις ως γραμμική ελαστική με λόγο Poisson $\nu=0.2$ και μέτρο ελαστικότητας $E=42000$ MPa (η τιμή αυτή περιλαμβάνει και την αύξηση λόγω της παρουσίας των

ράβδων χάλυβα). Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ο κώνναβος πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ομάδας πασσάλων σε διάταξη 5*5 και σχετικής απόστασης 3.0D, με ανηγμένο μήκος πασσάλων $L/D=25$ m, ο οποίος αποτελείται από 38000 στοιχεία και 39956 κόμβους.

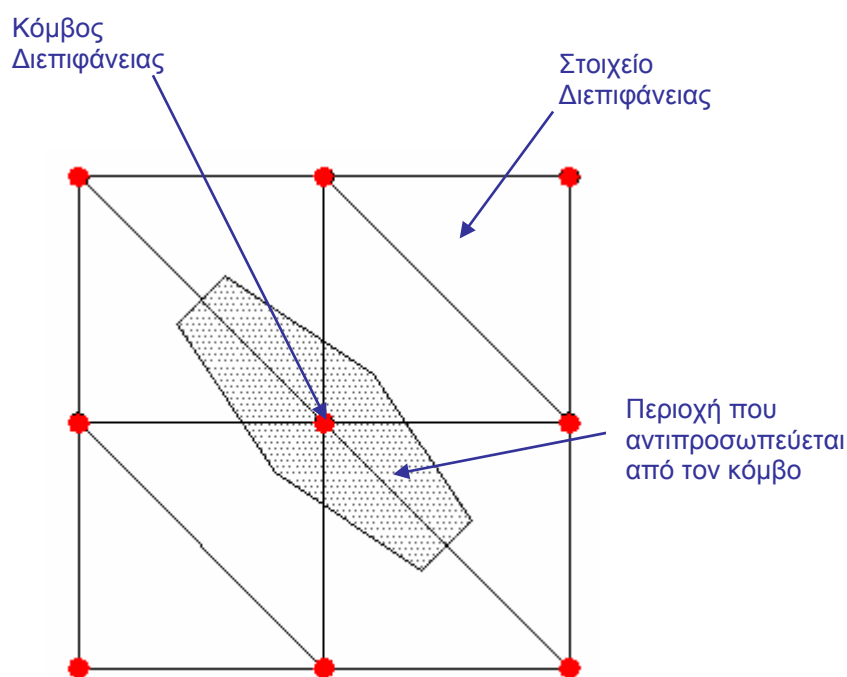


Σχήμα 4.2 Κώνναβος πεπερασμένων διαφορών ομάδας πασσάλων σε διάταξη 5*5 και σχετικής απόστασης 3.0D, με ανηγμένο μήκος πασσάλων $L/D=25$ m, σε τομή $y=0$.

Δεδομένου ότι, με εξαίρεση τις μαλακές αργίλους, η διατμητική αντίσταση που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου είναι κατά κανόνα μικρότερη από αυτήν που διέπει το εδαφικό υλικό, χρησιμοποιούνται στοιχεία διεπιφανειών ανάμεσα στα στοιχεία των πασσάλων και του περιβάλλοντος εδάφους. Τα στοιχεία διεπιφανειών που διαθέτει ο κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών $FLAC^{3D}$ έχουν ιδιότητες τριβής, συνοχής, διαστολής, ορθής και διατμητικής δυσκαμψίας, εφελκυστικής και διατμητικής αντοχής. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται με κάθε γειτνιάζουσα ζώνη με δύο τριγωνικά στοιχεία διεπιφανειών. Οι κόμβοι τους ορίζονται αυτόματα στην κορυφή κάθε στοιχείου της διεπιφάνειας. Όταν κάποια άλλη επιφάνεια του κώνναβου έρθει σε επαφή με το στοιχείο της διεπιφάνειας, η επαφή ανιχνεύεται από τον κόμβο της διεπιφάνειας και χαρακτηρίζεται από ορθή και διατμητική δυσκαμψία καθώς και από τις εκάστοτε ιδιότητες ολίσθησης. Κάθε στοιχείο της διεπιφάνειας κατανέμει την περιοχή του στους κόμβους του με έναν κεντροβαρικό

τρόπο. Κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη περιοχή. Με αυτόν τον τρόπο ολόκληρη η διεπιφάνεια διαιρείται σε ενεργούς κόμβους οι οποίοι αντιπροσωπεύουν ολόκληρη την επιφάνεια της διεπιφάνειας. Το σχήμα 4.3 απεικονίζει τη σχέση ανάμεσα στα στοιχεία της διεπιφάνειας και τους κόμβους αυτής, και την περιοχή που αντιπροσωπεύεται από κάθε κόμβο. Κατά τη διάρκεια κάθε 'χρονικού' βήματος επίλυσης, υπολογίζεται η απόλυτη ορθή διείδυση και η διατμητική παραμόρφωση για κάθε κόμβο διεπιφάνειας και για το αντίστοιχο μέτωπο στόχου. Οι δύο αυτές τιμές χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από τον καταστατικό νόμο των διεπιφανειών για τον υπολογισμό της ορθής δύναμης και του διανύσματος της διατμητικής δύναμης.

Ο καταστατικός νόμος των στοιχείων των διεπιφανειών διέπεται από το μονοδιάστατο γραμμικό κριτήριο διατμητικής αντοχής του Coulomb, εξίσωση 4.2. Στην ίδια εξίσωση περιλαμβάνεται και η γωνία διαστολής της διεπιφάνειας, η οποία πέραν των κινηματικών μεγεθών τα οποία επηρεάζει, προκαλεί και αύξηση των ενεργών ορθών δυνάμεων στο μέτωπο της διεπιφάνειας. Στο σχήμα 4.4 δίνεται σχηματικά το μαθηματικό προσομοίωμα του στοιχείου διεπιφάνειας του FLAC^{3D}. Τα στοιχεία των διεπιφανειών διαχωρίζονται όταν αναπτυχθεί δύναμη ελκυσμού ίση με την εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται κενό ανάμεσα στο έδαφος και τον πάσσαλο και κατά συνέπεια οι διατμητικές και ορθές δυνάμεις μηδενίζονται (πλήρης αποκόλληση εδάφους πασσάλου).



Σχήμα 4.3 Κατανομή της περιοχής που αντιπροσωπεύει κάθε κόμβος διεπιφάνειας.

$$\tau_{\alpha} = c_i + \sigma'_n \tan \delta \quad (4.2)$$

όπου τ_{α} : οριακή διατμητική τάση στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου.
 c_a : συνάφεια μεταξύ εδάφους και πασσάλου.

δ : γωνία τριβής μεταξύ εδάφους και πασσάλου.
 σ'_n : ενεργή ορθή τάση στην επιφάνεια του πασσάλου.

Οι ορθές και διατμητικές τάσεις καθορίζονται από τις εξισώσεις (4.3) και (4.4)

$$F_n^{(t+\Delta t)} = k_n u_n A + \sigma_n A \quad (4.3)$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^{(t)} + K_s \Delta v_{si}^{(t+0.5\Delta t)} A \quad (4.4)$$

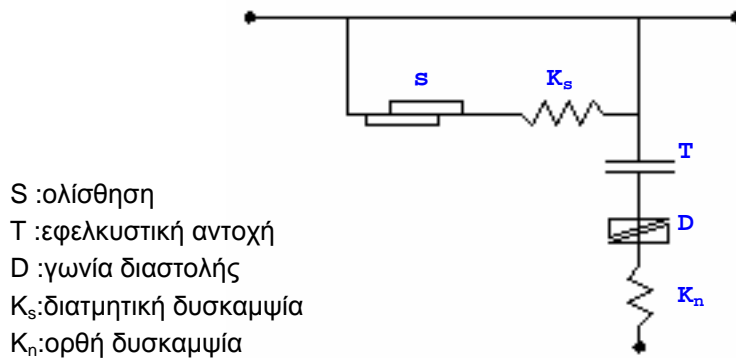
όπου F_n, F_{si} : ορθή και διατμητική τάση αντίστοιχα.

K_n, K_s : ορθή και διατμητική δυσκαμψία αντίστοιχα.

A : περιοχή που σχετίζεται με τον αντίστοιχο κόμβο διεπιφάνειας.

Δv_{si} : διάνυσμα σχετικής διατμητικής μετατόπισης.

u_n : απόλυτη τιμή της διείσδυσης του κόμβου της διεπιφάνειας στο μέτωπο.



Σχήμα 4.4 Παράμετροι καταστατικού νόμου των διεπιφανειών στο FLAC^{3D}.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής των στοιχείων διεπιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν οι προτάσεις διαφόρων ερευνητών. Σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο κεφάλαιο 2 η τιμή της συνάφειας μεταξύ πασσάλου και εδάφους μπορεί να ληφθεί ίση με τη συνοχή του εδάφους για μαλακές αργίλους, ενώ για πιο σκληρές αργίλους θα πρέπει να εφαρμόζεται ένας μειωτικός συντελεστής στη συνοχή του εδάφους (Tomlinson, 1970; Din 4014, 1990). Μετά από επεξεργασία των διαφόρων προτάσεων επιλέχθηκαν για κάθε κατηγορία αργιλικού εδάφους οι προτεινόμενες στον πίνακα 4.1 τιμές. Αντίστοιχα στις άμμους η γωνία τριβής στη διεπιφάνεια πασσάλου εδάφους αντιστοιχεί στην κρίσιμη κατάσταση και είναι μειωμένη σε σχέση με τη γωνία τριβής του περιβάλλοντος εδάφους (Ortigao, 1995). Οι τιμές αυτές εφαρμόζονται σε όλες τις ομάδες πασσάλων και στο μεμονωμένο πάσσαλο κάθε κατηγορίας εδάφους. Σημειώνεται τέλος ότι οι σταθερές προσομοίωσης της δυσκαμψίας λαμβάνονται μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από το εδαφικό υλικό τουλάχιστον, ώστε να αποφευχθεί η πρόσδοση πρόσθετης παραμόρφωσης από τη διεπιφάνεια, σύμφωνα με όσα αναφέρονται και στο κεφάλαιο 2.

Η διαδικασία προσομοίωσης περιλαμβάνει το αρχικό βήμα δημιουργίας του καννάβου προσομοίωσης και απόδοσης των παραμέτρων των υλικών. Στη συνέχεια

ακολουθεί η πρώτη επίλυση κατά την οποία εισάγεται το αρχικό εντατικό πεδίο. Ακολουθεί η επιβολή του φορτίου κατά στάδια. Η σταδιακή επιβολή του φορτίου πραγματοποιείται και ικανοποιεί δύο επιμέρους απαιτήσεις. Η πρώτη απαίτηση προέρχεται από την ανάγκη προσδιορισμού ικανοποιητικού αριθμού τιμών ζεύγους φορτίου-καθίζησης προκειμένου να προσδιορισθεί η καμπύλη φορτίου-καθίζησης μέχρι την οριακή τιμή καθίζησης 10%D, τουλάχιστον. Η δεύτερη απαίτηση προέρχεται από αριθμητικούς και μόνο λόγους ώστε τα διανύσματα φόρτισης στις σχετικές εξισώσεις ισορροπίας να μην προκαλούν αριθμητικές αστάθειες.

Για την επίλυση του προβλήματος του μεμονωμένου πασσάλου για οκτώ στάδια επιβολής του φορτίου ο απαιτούμενος χρόνος επίλυσης κυμαίνεται από 3 έως 24 ώρες σε υπολογιστή Pentium IV με ταχύτητα επεξεργαστή 1900 MHz. Η πρώτη τιμή αναφέρεται σε κάρναβο με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ ενώ η δεύτερη σε αντίστοιχο μήκος $L/D=50$. Σημειώνεται ότι οι τιμές αυτές είναι δυνατόν να αυξηθούν πολύ περισσότερο σε περίπτωση που καθορισθεί ιδιαίτερα υψηλό κριτήριο σύγκλισης ή εν γένει καθορισθεί πλαίσιο ανάλυσης που επιβραδύνει την επίτευξη σύγκλισης. Ο αντίστοιχος χρόνος για ομάδες πασσάλων κυμαίνεται από μία έως και 14 ημέρες. Για τη μείωση του υπερβολικού αυτού απαιτούμενου χρονικού διαστήματος χρησιμοποιήθηκαν έως και τρεις υπολογιστές ταυτόχρονα, ο ένας εκ των οποίων διαθέτει διπλό επεξεργαστή.

Η διαχείριση των αποτελεσμάτων των ανωτέρω επιλύσεων αποτελεί και αυτή από μόνη της ένα ιδιαίτερα κοπιαστικό έργο. Το σύνολο των βάσεων δεδομένων ανέρχεται σε περίπου 30 Gb. Για την ανάκληση των τιμών των παραμέτρων ενδιαφέροντος (μετακινήσεις και τάσεις στους πασσάλους) χρησιμοποιήθηκαν και πάλιν ειδικές υπορουτίνες, οι οποίες δημιουργούν κατάλληλα αρχεία με πινακοποιημένες τιμές, οι οποίες εισάγονται στη συνέχεια με αυτοματοποιημένη διαδικασία στο πρόγραμμα MS EXCEL. Οι καμπύλες απόκρισης για όλες τις ομάδες δίνονται στο παράρτημα Α της διατριβής.

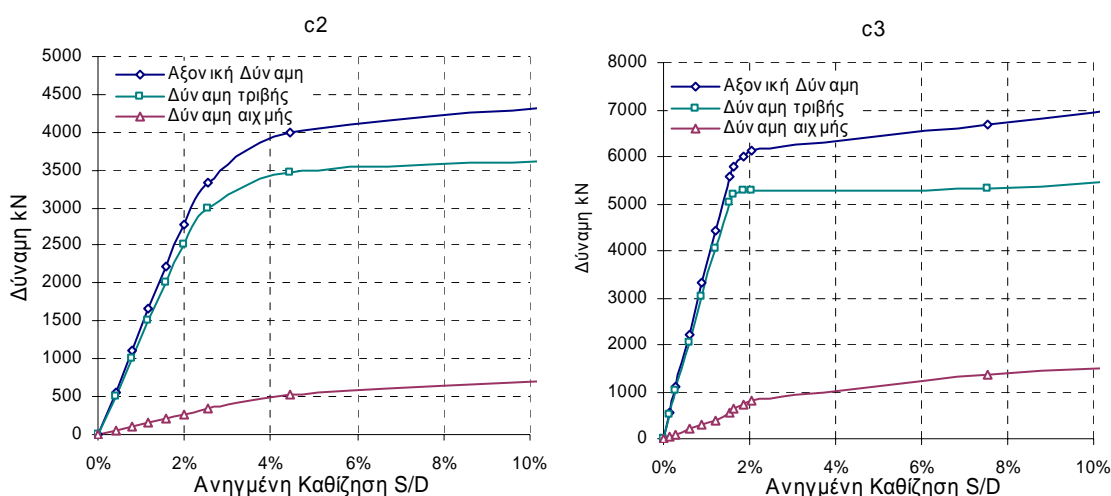
4.4 Απόκριση πασσάλων σε αργιλικό έδαφος

4.4.1 Μεμονωμένος πάσσαλος

Επιλύσεις μεμονωμένων πασσάλων πραγματοποιήθηκαν για όλες τις κατηγορίες συνεκτικών και μη εδαφών και για ανηγμένα στη διάμετρο του πασσάλου μήκη $L/D=25$ και $L/D=50$. Όλες οι επιλύσεις αντιστοιχούν σε έγχυτους πασσάλους. Η απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου των δεκατεσσάρων αυτών περιπτώσεων χρησιμοποιούνται για σύγκριση με τις ομάδες πασσάλων στο αντίστοιχο έδαφος και για το ίδιο μήκος. Η σύγκριση αυτή επιτρέπει τον προσδιορισμό ή την επαλήθευση του συντελεστή επαύξησης της καθίζησης ομάδας πασσάλων R_a .

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η διερεύνηση της κατανομής του

επιβαλλόμενου φορτίου σε αντίσταση αιχμής και πλευρική αντίσταση. Έχει ήδη αναφερθεί ότι σύμφωνα με το γερμανικό κανονισμό DIN 4014 αλλά και άλλους κανονισμούς και ερευνητές η πλήρης ενεργοποίηση της πλευρικής τριβής ολοκληρώνεται σε χαμηλές τιμές καθίζησης αντιστοιχούσες στο 1 ως 3% της διαμέτρου του εξεταζόμενου πασσάλου. Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η μεταβολή της συνολικής αντίστασης καθώς και οι επιμέρους αποκρίσεις της τριβής και της αιχμής μεμονωμένου πασσάλου συναρτήσει της καθίζησης για τις κατηγορίες εδαφών C2 και C3 και με ανηγμένο μήκος $L/D=25$. Παρατηρείται ότι η αντίσταση τριβής κινητοποιείται πλήρως για επίπεδο καθίζησης της τάξης του 2-3%D. Αντίθετα η αντίσταση αιχμής, παρ'ότι εμφανίζει αισθητά μικρότερη τιμή από αυτήν της παράπλευρης τριβής, χαρακτηρίζεται από συνεχή άνοδο μέχρι και του οριακού επιπέδου καθίζησης που αντιστοιχεί στο 10%D. Ας σημειωθεί ακόμη ότι και στις δύο περιπτώσεις το ποσοστό αντίστασης που αναλαμβάνεται από την παράπλευρη τριβή είναι της τάξης του 80% περίπου του συνολικού φορτίου και το υπόλοιπο 20% μεταβιβάζεται στην αιχμή. Τα ποσοστά αυτά αντιστοιχούν στη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου, ενώ στην περίπτωση του επιτρεπόμενου φορτίου η αναλογία είναι ακόμα πιο δυσμενής για το ποσοστό συνεισφοράς της τριβής. Όσο πιο σφιγρή είναι η άργιλος το ποσοστό του φορτίου που φέρεται από την αιχμή αυξάνει και φτάνει στο 29% στην περίπτωση της πολύ σφιγρής άργιλου, κατηγορία C4.

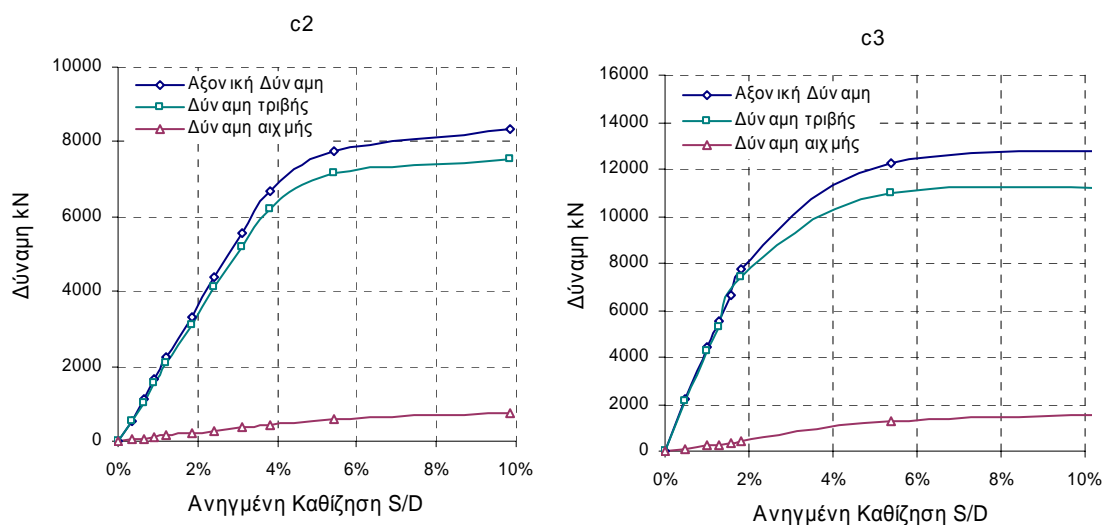


Σχήμα 4.5 Κατανομή της αξονικής δύναμης στην αντίσταση αιχμής και τριβής συναρτήσει της καθίζησης για πάσσαλο σε κατηγορία εδάφους C2 και C3 με ανηγμένο μήκος $L/D=25$

Η αύξηση του μήκους των πασσάλων ($L/D=50$) έχει σαν αποτέλεσμα να αναλαμβάνεται μέσω τριβής, όπως άλλωστε είναι κατανοητό, ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό σε σημείο που στην κατάσταση λειτουργίας τους οι πάσσαλοι αυτοί να μπορούν να θεωρηθούν ως αιωρούμενοι πάσσαλοι. Στο σχήμα 4.6 δίνονται οι αποκρίσεις της συνολικής αντίστασης, της αντίστασης αιχμής και της αντίστασης τριβής για τις κατηγορίες εδαφών C2 και C3.

Από τις ανωτέρω συγκρίσεις συμπεραίνεται ότι στους αργιλικούς σχηματισμούς η αντίσταση των πασσάλων κατά κύριο λόγο οφείλεται στην πλευρική αντίσταση, ενώ

μικρό και μόνο μέρος αναλαμβάνεται από την αιχμή. Το συμπέρασμα δεν καλύπτει προφανώς την ιδιαίτερη περίπτωση των κοντών πασσάλων, όπου εκ των πραγμάτων η πλευρική αντίσταση μειώνεται λόγω της γεωμετρίας.



Σχήμα 4.6 Κατανομή της αξονικής δύναμης στην αντίσταση αιχμής και τριβής συναρτήσει της καθίζησης για πάσσαλο σε κατηγορία εδάφους C2 και C3 με ανηγμένο μήκος $L/D=50$.

Οι ανωτέρω διαπιστώσεις προκύπτουν εμμέσως και από το DIN 4014, δεδομένου ότι μετά από εφαρμογή των προτεινόμενων τιμών σχεδιασμού παράπλευρης μοναδιαίας αντίστασης και τάσης θεμελίωσης οδηγείται κανείς σε παρόμοια εικόνα απόκρισης πασσάλου.

4.4.2 Φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων

Ως συντελεστής απόδοσης της φέρουσας ικανότητας ορίζεται, σύμφωνα με την εξίσωση 3.1, ο λόγος της οριακής φέρουσας ικανότητας της ομάδας των πασσάλων προς την οριακή φέρουσα ικανότητα του μεμονωμένου πασσάλου πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό των πασσάλων μέσα στην ομάδα. Είναι γενικά αποδεκτό ότι σε αργιλικά εδάφη ο συντελεστής αυτός έχει τιμή μικρότερη της μονάδας. Σύμφωνα με το Canadian Foundation Engineering Manual (1985) στις περιπτώσεις αργιλικών εδαφών με αστράγγιστη διατμητική αντοχή μεγαλύτερη των 100 kPa οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στη φέρουσα ικανότητα είναι περιορισμένες και δεν οδηγούν σε συντελεστή απομείωσης. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν ο Comodromos (2004) και οι Comodromos and Bareka (2006), ενώ και εκτενή αποτελέσματα της παρούσας διατριβής επιβεβαιώνουν την εν λόγω θεώρηση. Ειδικότερα για τετραγωνικές διατάξεις με αξονικές αποστάσεις της τάξης των 3.0D ο συντελεστής παίρνει τιμές της τάξης του 0.75 έως 0.90, ανάλογα με τον αριθμό των πασσάλων. Για ορθογωνικές διατάξεις ή ακόμα για διατάξεις μιας μόνο σειράς η τιμή του συντελεστή προσεγγίζει τη μονάδα.

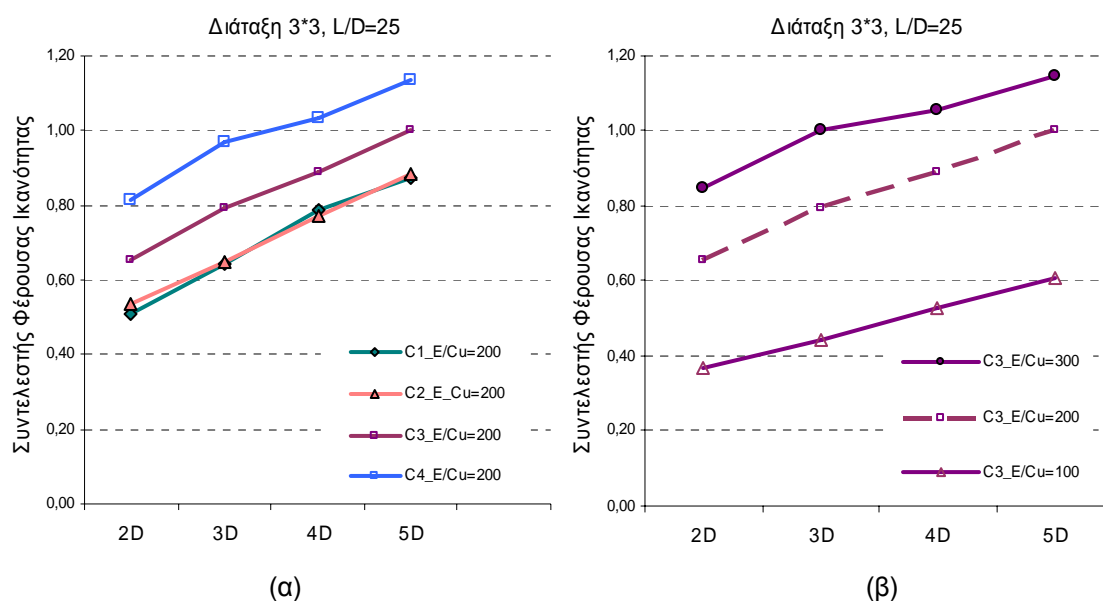
Στον πίνακα 4.2 δίνονται οι τιμές του συντελεστή φέρουσας ικανότητας για τις 76 διαφορετικές περιπτώσεις ομάδων πασσάλων σε αργιλικό έδαφος που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή. Θα πρέπει να διευκρινιστεί στο σημείο αυτό ότι ο συντελεστής φέρουσας ικανότητας, όπως χρησιμοποιείται στην παρούσα, πρακτικά αντιστοιχεί στο συντελεστή απόδοσης για καθίζηση ίση με το 10% της διαμέτρου του πασσάλου. Ας σημειωθεί ακόμη ότι η τιμή της καθίζησης του 10%D δεν αντιστοιχεί στο μέγιστο αναλαμβανόμενο φορτίο για όλες τις ομάδες και υπό την έννοια αυτή η χρήση του όρου “συντελεστής απόδοσης φέρουσας ικανότητας” είναι εν μέρει “καταχρηστική”. Το κριτήριο αυτό είναι αντικειμενικό σε αντίστοιχη με τη σχετική τιμή καθίζησης που αντιστοιχεί στο μέγιστο αναλαμβανόμενο φορτίο. Η καθίζηση του 10%D θεωρείται αντιπροσωπευτική και χρησιμοποιείται χάριν σύγκρισης όλων των επιλύσεων. Στη θεώρηση αυτή αποδίδεται ο προσδιορισμός συντελεστών φέρουσας ικανότητας ελαφρά μεγαλύτερων της μονάδας για ορισμένες περιπτώσεις αναλύσεων σιφρών και σκληρών αργίλων. Από τα αποτελέσματα του πίνακα 4.2 παρατηρείται ότι για τον ίδιο τύπο εδάφους και για την ίδια σχετική απόσταση, η μείωση της φέρουσας ικανότητας γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται ο αριθμός των πασσάλων στην ομάδα και επομένως αυξάνει η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών. Επιπλέον για την ίδια διάταξη ομάδας ο συντελεστής απόδοσης μικραίνει όταν μειώνεται η αντοχή του εδάφους. Τέλος για τον ίδιο τύπο εδάφους και την ίδια διάταξη ο συντελεστής απόδοσης μειώνεται όσο η σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων μικραίνει.

	L/D	C1		C2		C3		C4	
		d	25	50	25	50	25	50	25
2x3	2D	0,66		0,75		0,94		0,94	
	3D	0,73		0,87		1,02		1,02	
	4D	0,87		1,00		1,08		1,08	
	5D								
3x3	2D	0,51	0,51	0,54	0,45	0,85	0,69	0,89	0,72
	3D	0,64	0,60	0,66	0,53	1,00	0,81	1,00	0,85
	4D	0,79	0,69	0,77	0,61	1,05	0,89	1,05	0,93
	5D	0,87	0,77	0,89	0,68	1,15	0,97	1,15	0,99
5x5	2D	0,33	0,27	0,34	0,23	0,54	0,39	0,62	0,43
	3D	0,44	0,33	0,45	0,30	0,72	0,49	0,80	0,53
	4D	0,53	0,40	0,56	0,36	0,87	0,57	0,96	0,64
	5D	0,61	0,44	0,63	0,42	1,01	0,68	1,05	0,72

Πίνακας 4.2 Συντελεστής απόδοσης φέρουσας ικανότητας για διατάξεις ομάδας 2*3, 3*3, 5*5 σε απόσταση 2.0D, 3.0D, 4.0D και 5.0D με λόγο μήκους προς διάμετρο L/D=25 και 50 m για τύπο εδάφους C1, C2, C3 και C4.

Για να διερευνηθεί καλύτερα η μεταβολή του συντελεστή φέρουσας ικανότητας έγιναν συμπληρωματικά κάποιες επιλύσεις οι οποίες λαμβάνουν υπόψη το λόγο E/C_u του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε ο τύπος εδάφους C3, για διάταξη ομάδας 3*3, και μεταβλήθηκε ο λόγος E/C_u από την αρχική του τιμή 300 σε 200 και 100.

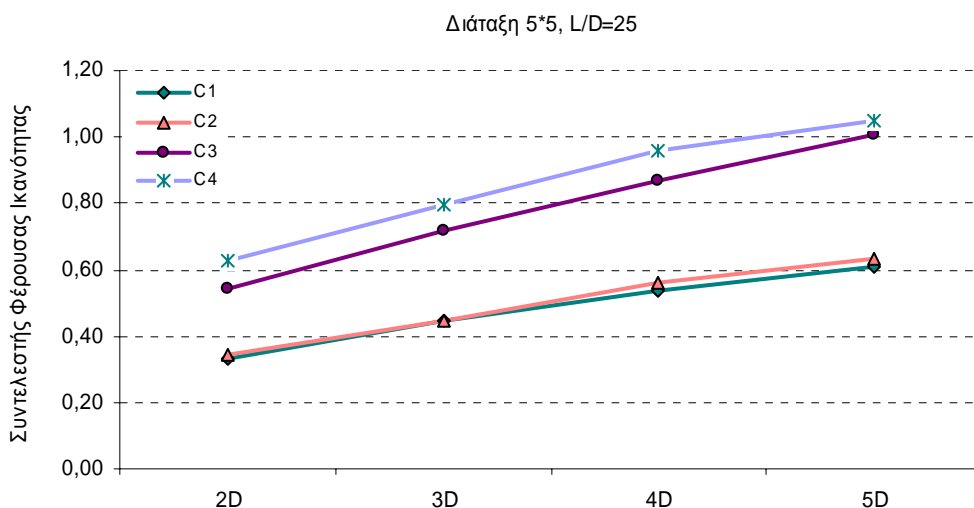
Αντίστοιχα για κατηγορία εδάφους C4 διερευνήθηκε η συμπεριφορά του εν λόγω συντελεστή για μεταβολή του λόγου E/C_u από 270 σε 200. Στο σχήμα 4.7α δίνεται η μεταβολή της απόδοσης της ομάδας συναρτήσει της σχετικής απόστασης των πασσάλων για όλους τους τύπους εδαφών που εξετάστηκαν με λόγο $E/C_u=200$. Παρατηρείται ότι στα σιφρά εδάφη αντιστοιχεί μεγαλύτερος συντελεστής απόδοσης ομάδας ο οποίος εμφανίζει σταθερή άνοδο αυξανόμενης της σχετικής απόστασης μεταξύ των πασσάλων. Αντίστοιχα στο σχήμα 4.7β, όπου δίνεται το ανάλογο διάγραμμα διατηρώντας αυτή τη φορά αμετάβλητο τον τύπο του εδάφους (C3) και μεταβάλλοντας το λόγο E/C_u , παρατηρείται ότι η αύξηση του λόγου E/C_u οδηγεί επίσης σε αύξηση του συντελεστή απόδοσης φέρουσας ικανότητας.



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή φέρουσας ικανότητας για ομάδες πασσάλων με διάταξη 3*3 και $L/D=25$ (α) για όλους τους τύπους εδαφών με λόγο $E/C_u=200$ (β) σε έδαφος κατηγορίας C3 με διαφορετικό λόγο E/C_u

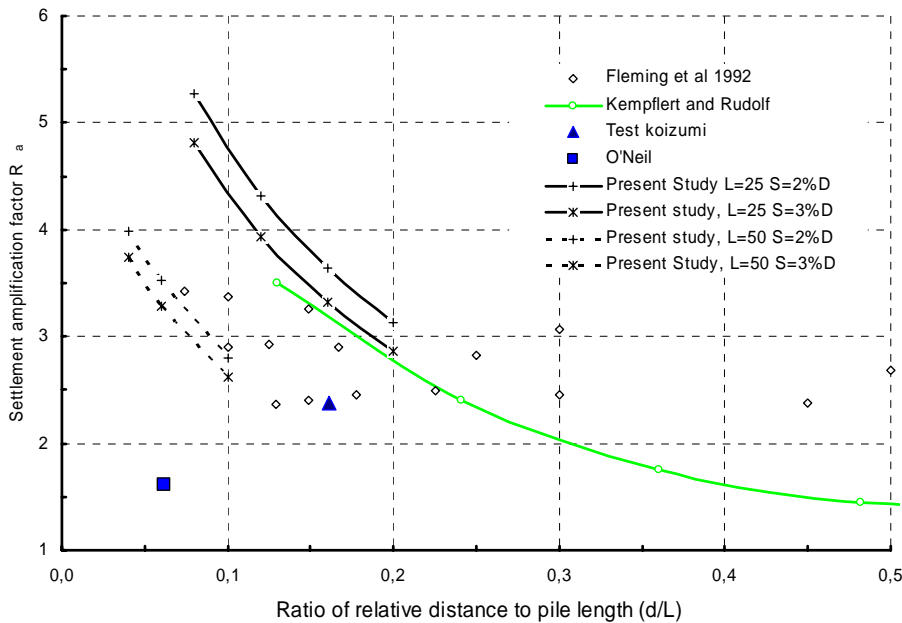
Παρόμοια αυξητική τάση του συντελεστή φέρουσας ικανότητας με την απομάκρυνση των πασσάλων της ομάδας παρατηρείται και για την περίπτωση αύξησης του αριθμού των πασσάλων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8 για διάταξη πασσάλων 5*5. Κατά την αύξηση του μήκους των πασσάλων σε $L/D=50$ παρατηρείται περαιτέρω μείωση της απόδοσης, δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου αναλαμβάνεται από την πλευρική τριβή και επομένως οι συνέπειες της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων είναι πιο έντονες.

Αποδόσεις που φτάνουν ή και ξεπερνούν τη μονάδα συναντώνται στις πολύ σιφρές αργίλους και σε διατάξεις με μικρό σχετικά αριθμό πασσάλων (2*3 και 3*3), μικρό λόγο μήκους προς διάμετρο ($L/D=25$) και για αξονικές αποστάσεις μεγαλύτερες του 4.5D. Τα διαγράμματα απόκρισης όλων των διατάξεων που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στο παράρτημα Α.



Σχήμα 4.8 Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή φέρουσας ικανότητας για ομάδα πασσάλων με διάταξη 5*5 και L/D=25.

Στο σχήμα 4.9 δίνεται η μεταβολή του συντελεστή R_a συναρτήσει του λόγου της σχετικής απόστασης προς το ανηγμένο βάθος των πασσάλων, προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών. Οι προτεινόμενες τιμές για το συντελεστή R_a από τους Fleming et al. (1998) είναι πρακτικά αμετάβλητες με το λόγο d/L γεγονός που θα πρέπει να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι αναλύσεις τους πραγματοποιούνται με θεώρηση γραμμικής ελαστικότητας. Οι προτεινόμενες τιμές είναι παραπλήσιες με αυτές της παρούσας ανάλυσης. Στο ίδιο σχήμα δίνονται οι προτεινόμενες από Kempfert and Rundolf (2005) τιμές του R_a . Τα αποτελέσματα τους αναφέρονται σε συγκεκριμένη ομάδα πασσάλων σε διάταξη 3*3, η δε ανάλυση τους είναι τριδιάστατη μη-γραμμική. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής R_a μειώνεται μειούμενου του λόγου d/L . Παρόμοια μορφή και μέγεθος καταδεικνύουν τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας. Ας σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα της παρούσας απεικονίζονται στο σχήμα 4.9 για επίπεδο καθίζησης 2 και 3%D και για πασσάλους με $L/D=25$ και $L/D=50$. Διακρίνεται χαρακτηριστικά η μετάθεση καμπύλης που απεικονίζει τη μεταβολή του συντελεστή R_a όσο το επίπεδο καθίζησης αυξάνει. Για επίπεδο καθίζησης της τάξης του 10%D, η καμπύλη πρόβλεψης αντιστοιχεί σε τιμές του R_a που προσεγγίζουν τη μονάδα. Ας σημειωθεί ακόμη ότι στο ίδιο σχήμα απεικονίζονται οι μετρηθείσες τιμές δύο ακόμα ομάδων πασσάλων διάταξης 3*3, οι οποίες αναφέρονται από τους O' Neil et al. (1982) και Koizumi and Ito (1967). Οι τιμές τους είναι αισθητά μικρότερες από τις προτεινόμενες από τους υπόλοιπους ερευνητές. Η διαφορά ωστόσο αυτή θα πρέπει να αποδοθεί στο μεγάλο επίπεδο καθίζησης, αφού ο κύριος στόχος των δοκιμαστικών φορτίσεων των ανωτέρω ερευνητών ήταν ο προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας της ομάδας των πασσάλων.



Σχήμα 4.9 Μεταβολή του συντελεστή R_a με το λόγο της αξονικής απόστασης d μεταξύ των πασσάλων προς το μήκος του πασσάλου L για διάταξη ομάδας 3×3 σε αργιλικό έδαφος (Comodromos and Bareka, 2006).

4.4.3 Δυσκαμψία ομάδας πασσάλων

Σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναφερθεί οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης επί της συνολικής δυσκαμψίας της θεμελίωσης, κρίνονται ιδιαίτερα σημαντικές, μπορούν δε να αποτιμηθούν από την εκάστοτε τιμή του συντελεστή επαύξησης καθιζήσεων, R_a . Η τιμή του εν λόγω συντελεστή εξαρτάται από τη γεωμετρία, τον αριθμό και τη διάταξη των πασσάλων, καθώς επίσης και από το επίπεδο καθίζησης. Τη μέγιστη τιμή του εμφανίζει σε μικρά επίπεδα καθιζήσεων όπου το περιβάλλον έδαφος τελεί υπό γραμμική ελαστικότητα και η αλληλεπίδραση εμφανίζει τη μέγιστη δράση της. Αυξανόμενης της καθίζησης προκαλείται σταδιακή και αυξανόμενη πλαστικοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους και οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μειώνονται σταδιακά, ανεξάρτητα από τη διάταξη και τη γεωμετρία της ομάδας. Είναι προφανές ότι για ομάδες πασσάλων με μικρή σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εμφανίζεται με σημαντικά μεγαλύτερες επιπτώσεις απ'ότι στην περίπτωση μεγάλων αξονικών αποστάσεων.

Σύμφωνα με τους Comodromos and Bareka (2006) ο συντελεστής απόδοσης δυσκαμψίας R_G ορίζεται ως ο αντίστροφος αριθμός του συντελεστή επαύξησης καθιζήσεων R_a και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_G = \frac{S_{mLs}}{S_{mG}} \quad (4.5)$$

όπου S_{mG} : η καθίζηση της ομάδας των πασσάλων

S_{mLs} : η καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου υπό μέσο αξονικό φορτίο N_m

Ως μέσο φορτίο N_m ορίζεται το συνολικό φορτίο της ομάδας διαιρούμενο με τον αριθμό των πασσάλων στην ομάδα. Η δυσκαμψία ομάδας πασσάλων για μέσο φορτίο N_m , μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

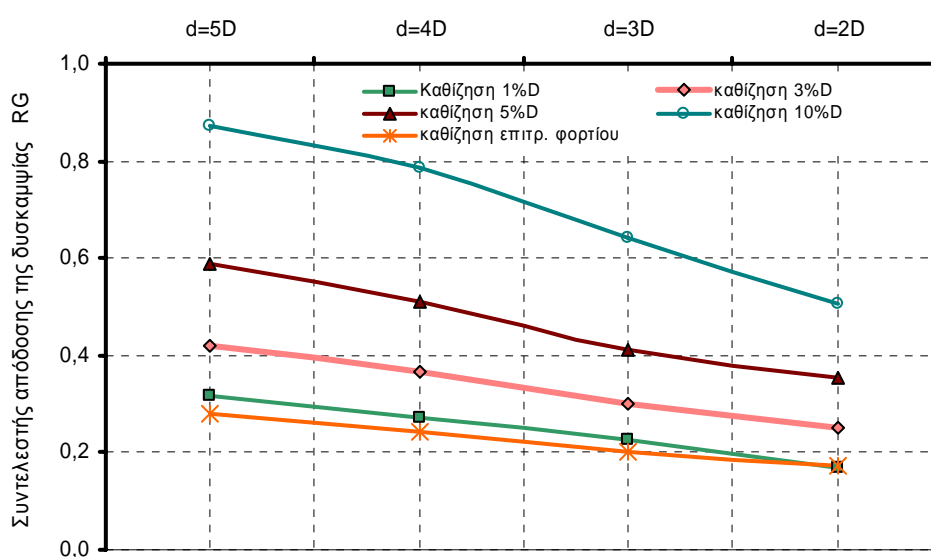
$$K_G = R_G K_{sL} n_n \quad (4.6)$$

όπου K_{sL} : η δυσκαμψία του μεμονωμένου πασσάλου

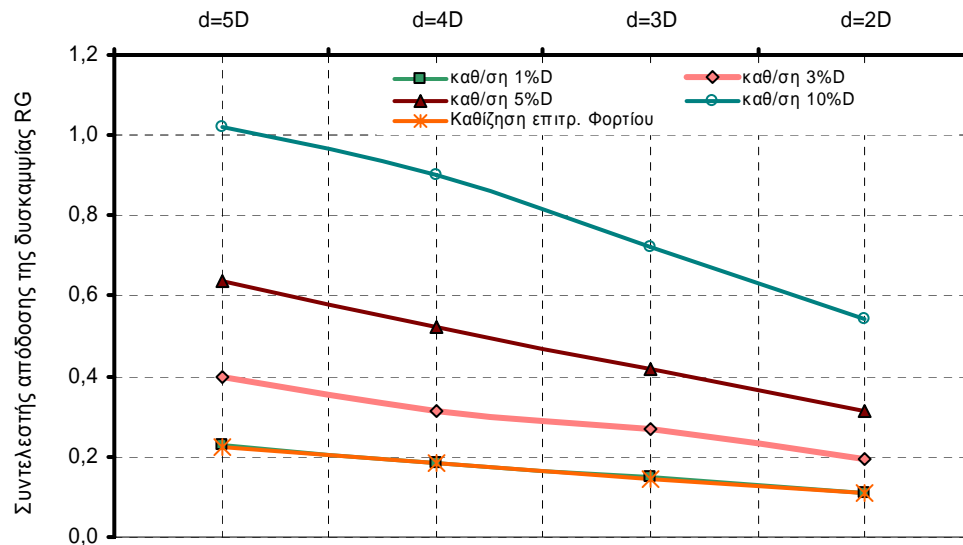
K_G : η δυσκαμψία της ομάδας των πασσάλων

n_n : ο αριθμός των πασσάλων στην ομάδα

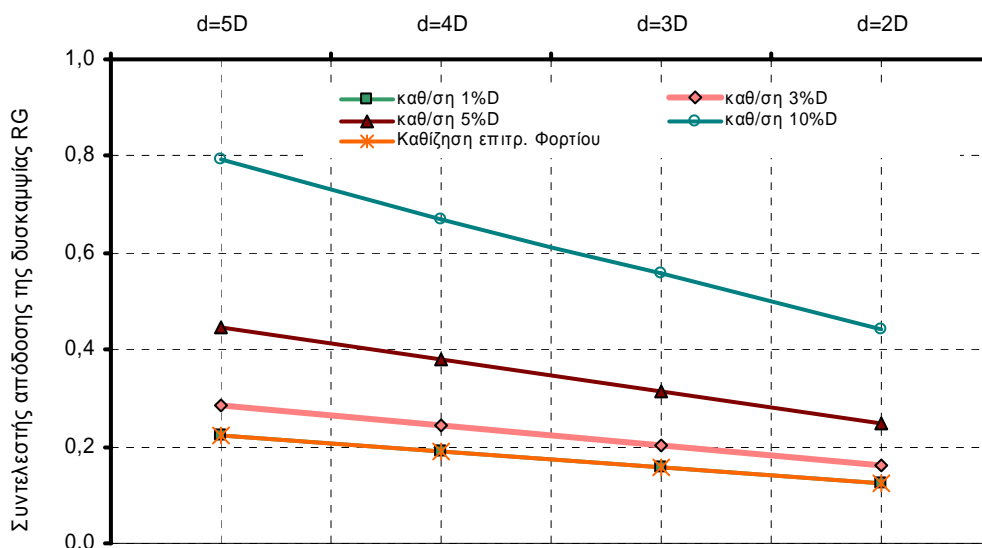
Τα σχήματα 4.10 έως 4.12 παρουσιάζουν τη μεταβολή του συντελεστή απόδοσης της δυσκαμψίας για επίπεδα καθίζησης που αντιστοιχούν στο 1, 3, 5 και 10%D, καθώς επίσης και για την καθίζηση που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο (το επιτρεπόμενο φορτίο ορίζεται ως το 50% του οριακού φορτίου). Παρατηρείται ότι οι καμπύλες εμφανίζουν ομοιόθετη μεταβολή ανάλογα με το επίπεδο καθίζησης ανεξαρτήτως της αξονικής απόστασης, της διάταξης και του αριθμού των πασσάλων. Η μεταβολή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας ομάδας πασσάλων. Από τα ίδια σχήματα είναι επίσης σαφές ότι όσο αυξάνει η αξονική απόσταση των πασσάλων τόσο μειώνονται και οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης. Ειδικότερα παρατηρείται ότι για μικρές σχετικά καθιζήσεις που αντιστοιχούν στο 1 έως 3% της διαμέτρου του πασσάλου, ο συντελεστής μείωσης είναι της τάξης του 30%. Το φαινόμενο αυτό αμβλύνεται αυξανόμενης της καθίζησης. Χαρακτηριστικά για την περίπτωση της ομάδας 3*3 σε έδαφος C1 και αξονική απόσταση 5.0D η μείωση δυσκαμψίας είναι ίση με 70% για καθίζηση που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο, ενώ για καθίζηση ίση με 10%D η μείωση είναι μόνο 11%, σχήμα 4.10. Παρόμοια εικόνα εμφανίζουν και οι υπόλοιπες ομάδες, με μικρότερες εντούτοις διακυμάνσεις.



Σχήμα 4.10 Μεταβολή του συντελεστή απόδοσης της δυσκαμψίας με το επίπεδο καθίζησης για διάταξη ομάδας 3*3, L/D=25 και τύπο εδάφους C1.



Σχήμα 4.11 Μεταβολή του συντελεστή απόδοσης της δυσκαμψίας με το επίπεδο καθίζησης για διάταξη ομάδας 5*5, L/D=25 και τύπο εδάφους C3.



Σχήμα 4.12 Μεταβολή του συντελεστή απόδοσης της δυσκαμψίας με το επίπεδο καθίζησης για διάταξη ομάδας 5*5, L/D=50 και τύπο εδάφους C4.

Ποσοτικά μπορεί να σημειωθεί ότι η επίπτωση στο συντελεστή απόδοσης της δυσκαμψίας αυξάνει όσο αυξάνει ο αριθμός των πασσάλων της ομάδας λόγω της προφανούς αύξησης των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης. Ας σημειωθεί ακόμη ότι στις περιπτώσεις διατάξεων με μικρό αριθμό πασσάλων και ειδικότερα όταν η διάταξη δεν είναι τετραγωνικής μορφής αλλά ορθογωνικής ο συντελεστής απόδοσης δυσκαμψίας μπορεί να ξεπεράσει την τιμή της μονάδας για καθιζήσεις που αντιστοιχούν στο 10%D. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελούν οι διατάξεις 2*3 ή ακόμη πιο χαρακτηριστικά η περίπτωση σειράς πασσάλων 1*3 όπου ο συντελεστής αυτός γίνεται ακόμα μεγαλύτερος σε σιφρές έως πολύ σιφρές αργίλους (C3 και C4). Παρόμοια συμπεριφορά μπορεί να επιδείξει και η ομάδα 3*3 σε σιφρή άργιλο και

μεγάλες αξονικές αποστάσεις. Ας σημειωθεί ακόμη ότι η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στο συντελεστή απόδοσης ομάδας, ο οποίος αποτελεί υποπερίπτωση του συντελεστή απόδοσης δυσκαμψίας. Τα αποτελέσματα αυτά δίνονται στον πίνακα 4.2.

Αυξανόμενου του μήκους των πασσάλων παρατηρείται περαιτέρω μείωση του εν λόγω συντελεστή για μεγάλα επίπεδα καθίζησης, γεγονός που δικαιολογείται, όπως και στην περίπτωση του συντελεστή απόδοσης φέρουσας ικανότητας, από την αύξηση των επιπτώσεων του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Η μείωση αυτή γίνεται αισθητή στο σχήμα 4.12 όπου απεικονίζεται η μεταβολή του συντελεστή απόδοσης της δυσκαμψίας με το επίπεδο καθίζησης για διάταξη ομάδας 5*5, L/D=50 και τύπο εδάφους C4.

Στον πίνακα 4.3 παρατίθενται συνοπτικά όλες οι τιμές του συντελεστή απόδοσης δυσκαμψίας R_G , για επίπεδα καθίζησης 1, 3 5 και 10%D, καθώς και για καθίζηση που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο.

		L/D=25				L/D=50				
		2D	3D	4D	5D	2D	3D	4D	5D	
C1	3*3	1%D	0,17	0,23	0,27	0,32	0,22	0,27	0,32	0,36
		3%D	0,25	0,30	0,37	0,42	0,22	0,27	0,31	0,35
		5%D	0,36	0,41	0,51	0,59	0,28	0,33	0,38	0,43
		10%D	0,51	0,64	0,78	0,87	0,51	0,60	0,69	0,78
		καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,17	0,20	0,24	0,28	0,21	0,24	0,28	0,32
	5*5	1%D	0,11	0,15	0,20	0,26	0,12	0,15	0,19	0,23
		3%D	0,15	0,21	0,26	0,33	0,12	0,15	0,19	0,23
		5%D	0,21	0,29	0,37	0,45	0,14	0,19	0,23	0,28
		10%D	0,38	0,52	0,67	0,79	0,27	0,34	0,42	0,51
		καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,11	0,15	0,20	0,24	0,11	0,14	0,17	0,21
	2*3	1%D	0,27	0,32	0,37					
		3%D	0,36	0,42	0,49					
5%D		0,48	0,58	0,67						
10%D		0,66	0,73	0,85						
	καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,23	0,28	0,32						
C2	3*3	1%D	0,17	0,21	0,25	0,29	0,22	0,25	0,28	0,32
		3%D	0,21	0,25	0,30	0,35	0,22	0,25	0,28	0,32
		5%D	0,30	0,36	0,43	0,50	0,25	0,30	0,33	0,38
		10%D	0,54	0,65	0,77	0,89	0,43	0,50	0,57	0,64
		καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,17	0,21	0,25	0,29	0,21	0,24	0,27	0,31
	5*5	1%D	0,10	0,14	0,18	0,22	0,10	0,14	0,16	0,20
		3%D	0,13	0,17	0,22	0,27	0,11	0,14	0,17	0,20
		5%D	0,17	0,25	0,31	0,39	0,13	0,16	0,20	0,24
		10%D	0,30	0,45	0,56	0,68	0,22	0,28	0,34	0,42
		καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,09	0,14	0,18	0,22	0,10	0,13	0,16	0,20
	2*3	1%D	0,25	0,30	0,34					
		3%D	0,31	0,36	0,42					
5%D		0,43	0,52	0,60						
10%D		0,75	0,87	1,00						
	καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,25	0,30	0,34						
C3	3*3	1%D	0,18	0,22	0,25	0,29	0,24	0,26	0,30	0,33
		3%D	0,32	0,38	0,45	0,52	0,27	0,30	0,35	0,38
		5%D	0,50	0,61	0,71	0,81	0,40	0,47	0,53	0,59
		10%D	0,85	1,00	1,06	1,15	0,70	0,81	0,89	0,97
		καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,18	0,21	0,25	0,29	0,23	0,26	0,30	0,33
	5*5	1%D	0,11	0,15	0,19	0,23	0,24	0,26	0,30	0,22
		3%D	0,20	0,27	0,31	0,40	0,27	0,30	0,35	0,25
		5%D	0,31	0,42	0,52	0,64	0,40	0,47	0,53	0,39
		10%D	0,55	0,72	0,90	1,02	0,70	0,81	0,89	0,72
		καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,11	0,15	0,18	0,22	0,23	0,26	0,30	0,22
	2*3	1%D	0,26	0,31	0,35					
		3%D	0,46	0,54	0,62					
5%D		0,71	0,85	0,95						
10%D		0,94	1,02	1,13						
	καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,26	0,31	0,35						
C4	3*3	1%D	0,18	0,22	0,25	0,29	0,24	0,28	0,28	0,34
		3%D	0,37	0,44	0,52	0,59	0,31	0,35	0,40	0,44
		5%D	0,57	0,69	0,80	0,91	0,48	0,55	0,61	0,67
		10%D	0,89	1,00	1,05	1,15	0,79	0,88	0,94	0,99
		καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,18	0,22	0,25	0,29	0,24	0,27	0,31	0,34
	5*5	1%D	0,11	0,15	0,19	0,23	0,12	0,16	0,19	0,22
		3%D	0,23	0,30	0,38	0,45	0,16	0,20	0,24	0,29
		5%D	0,36	0,48	0,60	0,72	0,25	0,31	0,38	0,45
		10%D	0,63	0,80	0,99	1,08	0,44	0,56	0,67	0,79
		καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,11	0,18	0,19	0,23	0,12	0,16	0,19	0,22
	2*3	1%D	0,26	0,31	0,36					
		3%D	0,53	0,62	0,71					
5%D		0,80	0,95	1,03						
10%D		0,95	1,01	1,08						
	καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,26	0,31	0,35						

Πίνακας 4.3 Τιμές του συντελεστή R_G , για όλες τις επιμέρους αναλύσεις.

4.4.4 Κατανομή του φορτίου στους πασσάλους της ομάδας

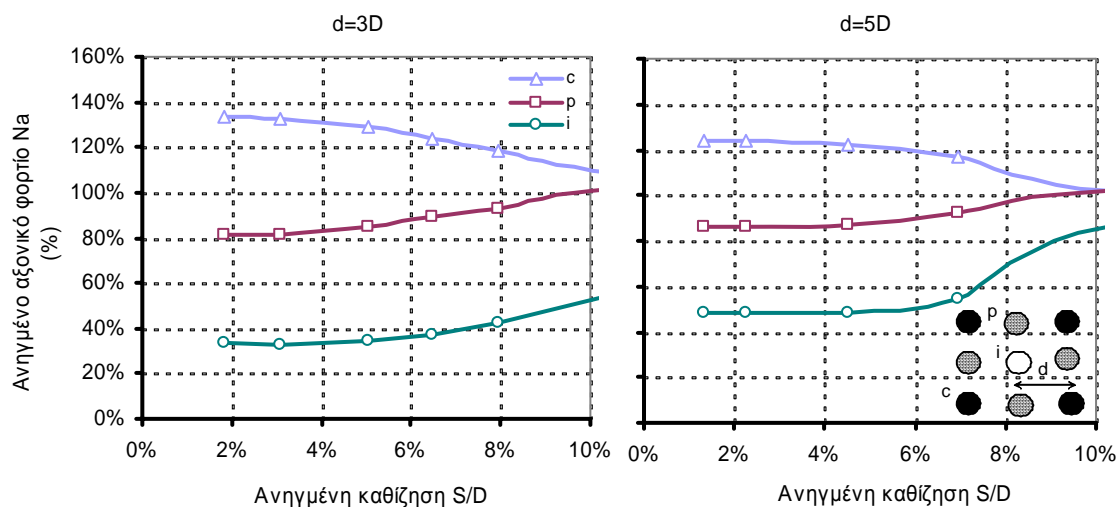
Οι επιμέρους πάσσαλοι ομάδας πασσάλων επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με τη γεωμετρική θέση που κατέχουν στην ομάδα. Σύμφωνα με τον Comodromos et al. (2003) στην περίπτωση πασσάλων ελεύθερης κεφαλής και φόρτιση κάθε πασσάλου με το ίδιο φορτίο κεφαλής η καθίζηση που προκύπτει για τον κεντρικό πάσσαλο είναι η μεγαλύτερη της ομάδας. Αντίστοιχα οι γωνιακοί πάσσαλοι εμφανίζουν τη μικρότερη καθίζηση, ενώ οι περιμετρικοί και ενδιάμεσοι πάσσαλοι εμφανίζουν ενδιάμεσες τιμές. Υπό την έννοια αυτή η δυσκαμψία των επιμέρους πασσάλων παίρνει διαφορετικές τιμές. Παρόμοια είναι και η συμπεριφορά των επιμέρους πασσάλων ομάδας με πακτωμένη κεφαλή. Ειδικότερα από τα αποτελέσματα του Κωμοδρόμος (2004) και Comodromos (2004) σε ομάδες πασσάλων με πακτωμένη κεφαλή οι γωνιακοί πάσσαλοι αναλαμβάνουν μεγαλύτερο φορτίο από τους υπολοίπους, το δε μικρότερο αναλαμβάνει ο κεντρικός πάσσαλος. Εξακολουθεί κατά συνέπεια να ισχύει η θεώρηση διαφορετικής απόκρισης των επιμέρους πασσάλων, με τους γωνιακούς να επιδεικνύουν τη μέγιστη δυσκαμψία, τον κεντρικό τη μικρότερη και τους υπόλοιπους να παίρνουν ενδιάμεσες τιμές. Ας σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι τόσο το αναλαμβανόμενο φορτίο όσο και η αντίστοιχη δυσκαμψία μεταβάλλεται συναρτήσει της καθίζησης ή του επιβαλλόμενου φορτίου (επιπτώσεις πλαστικοποίησης σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναφερθεί).

Για την καλύτερη διερεύνηση και κατανόηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης στους επιμέρους πασσάλους πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των αποτελεσμάτων της εκτενούς τριδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης της παρούσας για πασσάλους πακτωμένης κεφαλής, καθώς και για ομάδες για συγκεκριμένων διαστάσεων κεφαλόδεσμο.

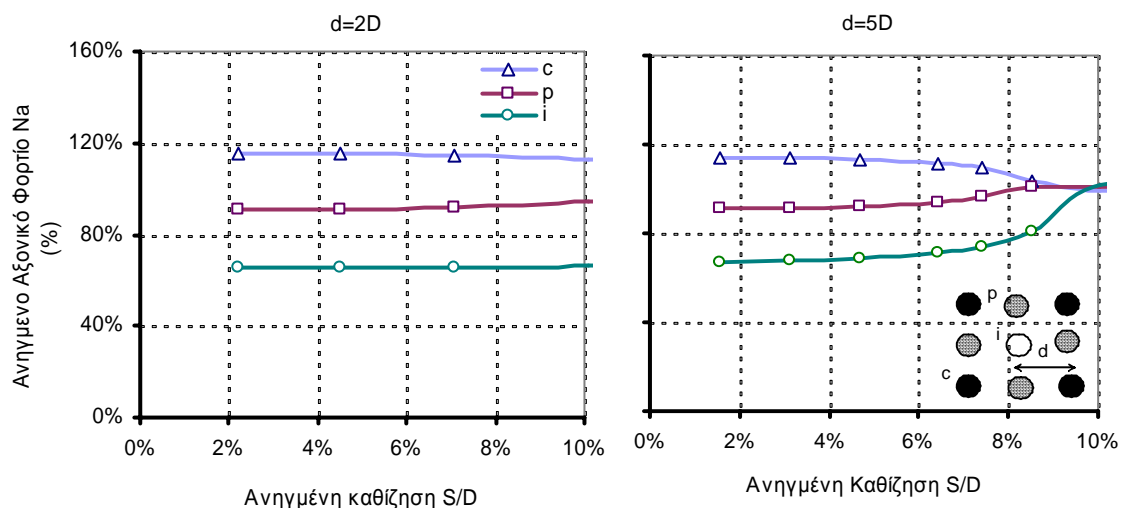
Στο σχήμα 4.13 δίνεται η μεταβολή της κατανομής του επιβαλλόμενου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της διάταξης 3*3, με σχετικό μήκος $L/D=25$ και με αξονική απόσταση πασσάλων 3.0D και 5.0D για έδαφος τύπου C1. Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις ο κεντρικός πάσσαλος i αναλαμβάνει σημαντικά μικρότερο φορτίο από τους υπόλοιπους, ενώ ο γωνιακός πάσσαλος c αναλαμβάνει σημαντικά μεγαλύτερο. Ειδικότερα για τη διάταξη με αξονική απόσταση 3.0D και για επίπεδο καθίζησης που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο ο κεντρικός πάσσαλος αναλαμβάνει το 35% του μέσου φορτίου, ενώ ο γωνιακός το 135%. Υπό την έννοια αυτή ο γωνιακός πάσσαλος εμφανίζεται κατά τέσσερις φορές πιο δύσκαμπτος από τον κεντρικό. Με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου και την εκδήλωση μεγαλύτερων καθιζήσεων, οι οποίες βέβαια συνοδεύονται και από τον αντίστοιχο βαθμό πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους οι διαφορές αυτές μειώνονται και απαλείφονται τελείως με την πλήρη πλαστικοποίηση. Για την πλήρη εκδήλωση του φαινομένου απαιτείται συχνά φορτίο που να οδηγεί σε καθιζήσεις που πλησιάζουν την τιμή του 25%D.

Η αύξηση του μήκους των πασσάλων, σχήμα 4.14, οδηγεί σε παρόμοια

συμπεράσματα, ας σημειωθεί εντούτοις ότι η ψαλίδα των ακραίων τιμών είναι μικρότερη.



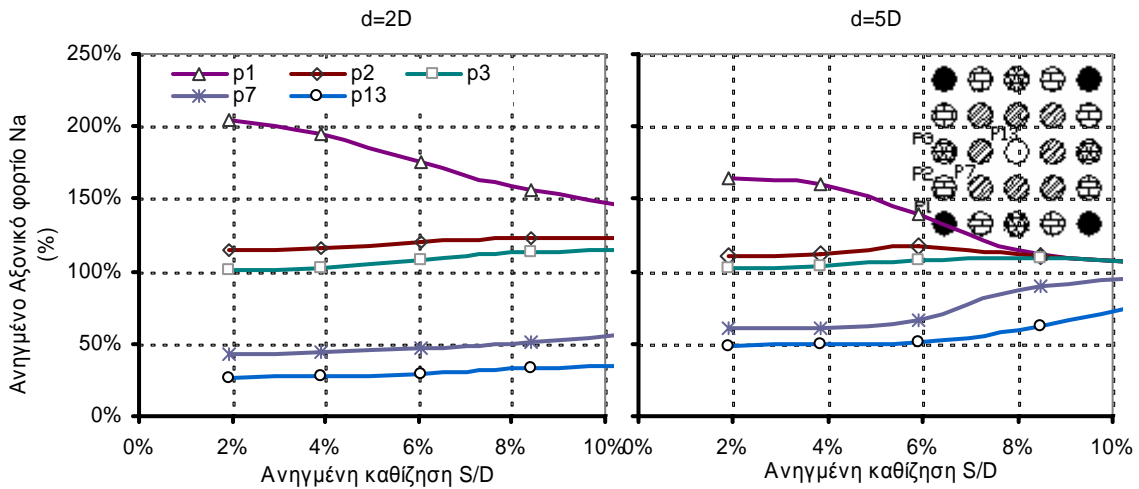
Σχήμα 4.13 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3, ανηγμένο μήκος $L/D=25$, κατηγορία εδάφους C1 και σχετική απόσταση 3.0D και 5.0D.



Σχήμα 4.14 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3, ανηγμένο μήκος $L/D=50$, κατηγορία εδάφους C3 και σχετική απόσταση 2.0D και 5.0D.

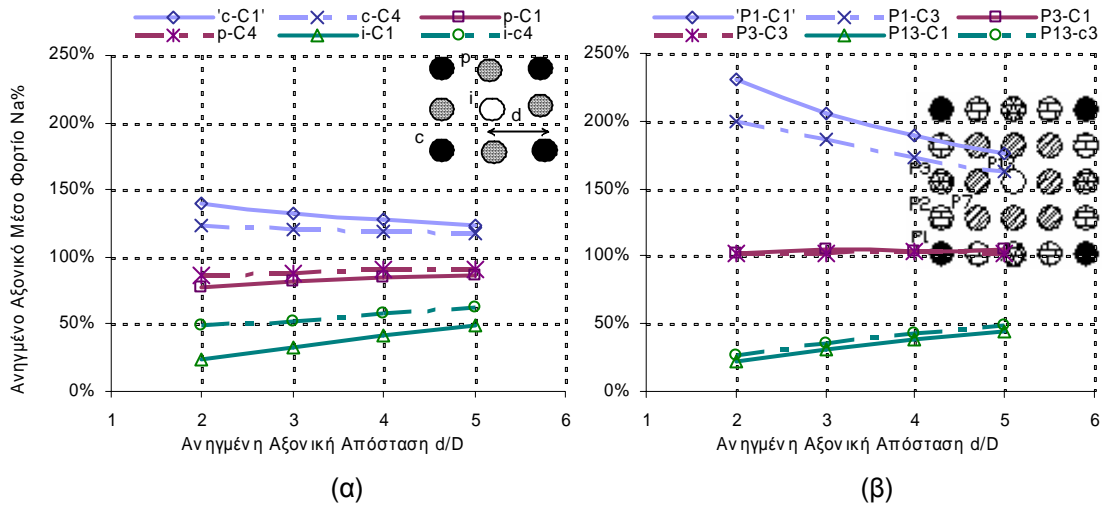
Μεγαλύτερες είναι οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στους επιμέρους πασσάλους, όπως αντίστοιχα και στην εν γένει απόκριση της ομάδας, στις περιπτώσεις διατάξεων με μεγάλο αριθμό πασσάλων. Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται η κατανομή του φορτίου για έδαφος τύπου C3, στους πέντε χαρακτηριστικούς πασσάλους της διάταξης 5*5 με σχετικό μήκος $L/D=25$ και σχετική απόσταση 2.0D και 5.0D. Παρατηρείται η μεγάλη διαφορά στην απόκριση του γωνιακού πασσάλου (χαρακτηριστικός πάσσαλος P1) και του κεντρικού πασσάλου (χαρακτηριστικός πάσσαλος P13). Ας σημειωθεί ότι, και από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του σχήματος 4.15, η αύξηση της αξονικής απόστασης μεταξύ των πασσάλων αμβλύνει

αισθητά τις διαφορές στην απόκριση των χαρακτηριστικών πασσάλων.



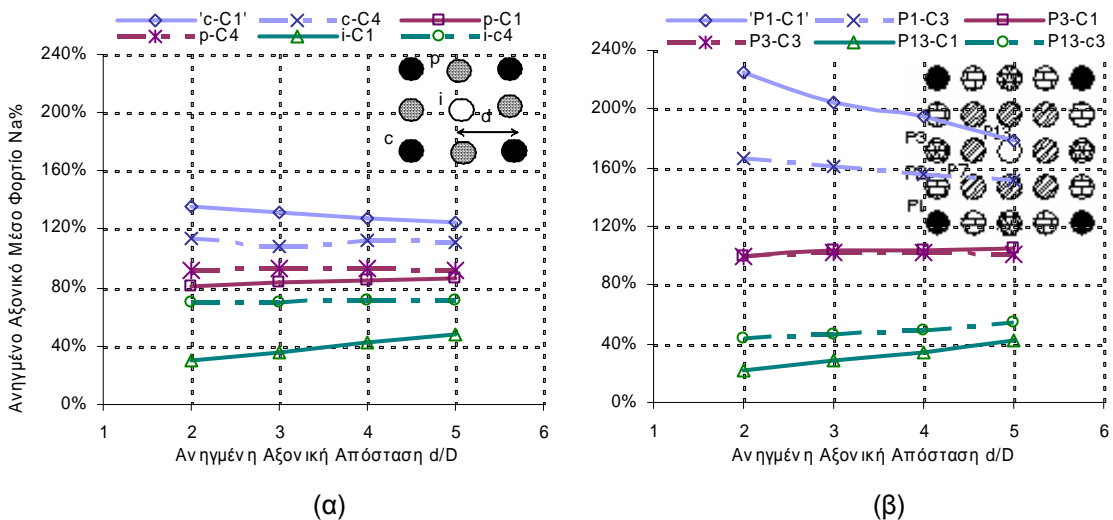
Σχήμα 4.15 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 5*5, ανηγμένο μήκος $L/D=25$, κατηγορία εδάφους C3 και σχετική απόσταση 2.0D και 5.0D.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή της απόκρισης των επιμέρους πασσάλων συναρτήσει της αξονικής απόστασης μεταξύ τους. Η σύγκριση αυτή σε διάγραμμα φορτίου-αξονικής απόστασης μπορεί να γίνει για συγκεκριμένο επίπεδο καθίζησης. Δεδομένου ότι το ενδιαφέρον ανάλυσης και ποσοτικοποίησης της αλληλεπίδρασης εστιάζεται κατά κύριο λόγο στο εύρος των φορτίων λειτουργίας, για να μπορέσουν να αποτιμηθούν οι επιπτώσεις στην ανωδομή, παρουσιάζεται η απόκριση των πασσάλων συναρτήσει της αξονικής απόστασης για φορτίο που αντιστοιχεί σε καθίζηση 3% της διαμέτρου. Με ελάχιστες εξαιρέσεις ειδικών περιπτώσεων η καθίζηση αυτή αποτελεί το άνω όριο ανάληψης του φορτίου λειτουργίας, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις η καθίζηση που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο είναι αισθητά μικρότερη (περίπτωση πολύ σιφρών έως σκληρών αργίλων και αμμωδών εδαφών με μέση έως σχετικά μεγάλη πυκνότητα). Στο σχήμα 4.16(α) δίνεται η μεταβολή του ανηγμένου αναλαμβανόμενου φορτίου για διάταξη 3*3, με $L/D=25$, για διάφορες σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων, για τις δύο ακραίες κατηγορίες C1 και C4 και για καθίζηση 3%D. Οι προκύπτουσες καμπύλες είναι εν γένει ομοιόθετες. Παρατηρείται ότι όσο πιο σιφρή είναι η άργιλος τόσο μικρότερη είναι η διαφοροποίηση του αναλαμβανόμενου φορτίου για τον κάθε πάσσαλο. Ειδικότερα ο γωνιακός πάσσαλος σε μαλακή άργιλο φέρει φορτίο από 145% έως 120% του μέσου φορτίου N_m για μικρές και μεγάλες σχετικές αποστάσεις αντίστοιχα. Σε αντιπαράθεση στην περίπτωση της πολύ σιφρής έως σκληρής αργίλου (κατηγορία C4) η μεταβολή ως προς την απόσταση είναι μικρή και ο πάσσαλος φέρει φορτίο της τάξης του 120% του μέσου εξασκούμενου. Κατά παρόμοιο τρόπο ο κεντρικός πάσσαλος στην περίπτωση της πολύ σιφρής αργίλου φέρει φορτίο 50% έως 60% του N_m , ενώ στη μαλακή άργιλο το φορτίο μεταβάλλεται από 20% έως 50%. Ο περιμετρικός πάσσαλος φαίνεται να αναλαμβάνει περίπου ίδιο φορτίο και στις δύο περιπτώσεις το οποίο κυμαίνεται από 85% έως 90% του μέσου

φορτίου N_m .

Σχήμα 4.16 Σύγκριση κατανομής του ανηγμένου αξονικού μέσου φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης (α) 3*3 και (β) 5*5, με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων και για καθίζηση 3%D, για διάφορες κατηγορίες αργίλου.

Για τη διάταξη 5*5 η διαφορά της κατανομής στο φορτίο μεταξύ των πασσάλων είναι πιο έντονη. Στο σχήμα 4.16(β) δίνεται η μεταβολή του αναλαμβανόμενου φορτίου για τη διάταξη 5*5 με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων για τις δύο κατηγορίες εδάφους C1 και C3 και για καθίζηση 3% της διαμέτρου των πασσάλων. Για την περίπτωση που οι πάσσαλοι βρίσκονται σε αξονική απόσταση 2.0D η δυσκαμψία των γωνιακών και περιμετρικών πασσάλων είναι κατά 8 φορές περίπου μεγαλύτερη από αυτή του κεντρικού και των εσωτερικών πασσάλων. Ο λόγος των δυσκαμψιών μικραίνει αυξανόμενης της αξονικής απόστασης, για δε την απόσταση 5.0D είναι ελαφρά μεγαλύτερος του 3.



Σχήμα 4.17 Σύγκριση κατανομής του ανηγμένου αξονικού μέσου φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης (α) 3*3 και (β) 5*5, με ανηγμένο μήκος $L/D=50$ για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων και για καθίζηση 3%D, για διάφορες κατηγορίες αργίλου.

Στο σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η μεταβολή στην κατανομή του φορτίου μεταξύ των πασσάλων όταν αυξηθεί το σχετικό μήκος σε $L/D=50$. Τα αποτελέσματα είναι ποιοτικά τα ίδια, ενώ ποσοτικά οι διαφορές, σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για μήκη $L/D=25$, είναι σχετικά μικρές. Οι κατανομές των φορτίων στους επιμέρους πασσάλους της ομάδας για όλες τις διατάξεις παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Το πλήθος των αποτελεσμάτων, η αξιολόγηση τους και η διερεύνηση της απόκρισης των επιμέρους πασσάλων για ομάδες πασσάλων πακτωμένης κεφαλής σε αργιλικά εδάφη επιτρέπουν την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, τα οποία σχολιάζονται και στις επόμενες παραγράφους που αναφέρονται σε αμμώδη εδάφη, καθώς σε περιπτώσεις ομάδων με δεδομένο κεφαλόδεσμο.

- Η αύξηση του αριθμού των πασσάλων στην ομάδα, για την ίδια πάντα εδαφική τομή, οδηγεί σε σημαντική διαφοροποίηση της απόκρισης φορτίου-καθίζησης ανάμεσα στον γωνιακό και τον κεντρικό πάσσαλο.
- Αυξανόμενου του επιβαλλόμενου φορτίου και της προκαλούμενης καθίζησης ο λόγος των δυσκαμψιών που επιδεικνύουν οι δύο αυτοί χαρακτηριστικοί πάσσαλοι μειώνεται.
- Η ταύτιση της απόκρισης, κατά την οποία επιτυγχάνεται λόγος δυσκαμψιών παραπλήσιος της μονάδας απαιτεί ελάχιστη καθίζηση μεγαλύτερη από $8\%D$ (περιπτώσεις μικρών σχετικά ομάδων πασσάλων, σε μεγάλη αξονική απόσταση μεταξύ τους και τύπους εδαφών όπου η μέγιστη διατμητική αντοχή αντιστοιχεί σε μικρές παραμορφώσεις). Η τιμή αυτή αυξάνει όταν έστω και ένας από τους ανωτέρω όρους δεν ικανοποιείται, για να πάρει τιμές της τάξης του 25% όταν οι συνθήκες είναι αντίθετες από τις ανωτέρω οριζόμενες. Όλες οι ανωτέρω παρατηρήσεις συσχετίζονται με την εκδήλωση μερικής έως ολικής πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος εδαφικού υλικού.

Θεωρώντας ότι το φορτίο λειτουργίας ενός μεμονωμένου πασσάλου αντιστοιχεί σε επίπεδο καθίζησης της τάξης 1 έως 2% της διαμέτρου του πασσάλου και υιοθετώντας ως αντιπροσωπευτική τιμή συντελεστή επαύξησης της καθίζησης ομάδων R_a το εύρος 3 έως 5 για τις συνήθεις περιπτώσεις ομάδων πασσάλων, προσδιορίζεται ότι η απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου μέχρι το επίπεδο καθίζησης που αντιστοιχεί στο φορτίο λειτουργίας του μπορεί να καλύψει το διάστημα ενδιαφέροντος 3 έως και $10\%D$ της απόκρισης των χαρακτηριστικών πασσάλων και της ομάδας εν γένει. Για το διάστημα αυτό ο λόγος του αναλαμβανόμενου από το γωνιακό πάσσαλο φορτίου προς το αντίστοιχο του κεντρικού πασσάλου είναι της τάξης του $P_o/P_i=1.75-2.0$ για ομάδα πασσάλων $3*3$ με σχετική απόσταση $4.0D$. Για διάταξη ομάδας $5*5$ με την ίδια σχετική απόσταση ο λόγος αυτός αυξάνεται στο 2.5-3.0. Υπό την έννοια αυτή και στο βαθμό που απαιτείται ομοιορροποίηση της κατανομής του κατακόρυφου ενιαίου φορτίου ομάδας στους επιμέρους πασσάλους θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πάσσαλοι με

διαφορετικό μήκος (μεγαλύτερο μήκος στους εσωτερικούς πασσάλους), ενώ εναλλακτικά θα μπορούσε να αυξηθεί και η διάμετρος τους.

4.4.5 Πρόβλεψη απόκρισης ομάδας πασσάλων

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης επιβεβαιώνουν τη θεώρηση ότι η απόκριση ομάδας πασσάλων προσομοιάζει, ως προς τη μορφή, με αυτή του μεμονωμένου πασσάλου. Η δυσκαμψία εντούτοις της ομάδας δεν μπορεί να προκύψει από το απλό γινόμενο της δυσκαμψίας του μεμονωμένου πασσάλου επί τον αριθμό των πασσάλων της ομάδας. Για τον προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας από την αντίστοιχη του μεμονωμένου πασσάλου επιβάλλεται η χρήση συντελεστή επαύξησης καθιζήσεων. Η τιμή του συντελεστή αυτού εξαρτάται, σύμφωνα με όσα έχουν μέχρι τώρα παρουσιασθεί, από τον αριθμό των πασσάλων, τη διάταξη τους, όπως αυτή καθορίζεται από τον αριθμό των στηλών και των γραμμών των πασσάλων, καθώς επίσης και από το επίπεδο φόρτισης που καθορίζει για κάθε ομάδα και είδος εδάφους την εκάστοτε καθίζηση. Η τριδιάστατη μη-γραμμική αριθμητική ανάλυση είναι σε θέση να δώσει την απόκριση μιας ομάδας πασσάλων υπό κατακόρυφη φόρτιση, καθώς επίσης και την απόκριση των επιμέρους πασσάλων. Η όλη διαδικασία απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο και αντίστοιχο υπολογιστικό κόστος. Ας σημειωθεί ότι πέραν αυτού καθ'αυτού του υπολογιστικού χρόνου, ο οποίος για μεγάλες ομάδες μπορεί να ξεπεράσει τη μία εβδομάδα, η δημιουργία του τριδιάστατου καννάβου είναι επίσης δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Στα παραπάνω έρχεται να προστεθεί και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων από τις βάσεις δεδομένων που παράγονται οι οποίες καταλαμβάνουν μνήμη εκατοντάδων MB. Για τους λόγους αυτούς, η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης εφαρμόζεται σε πολύ ειδικές περιπτώσεις και για μεγάλης σπουδαιότητας έργα.

Είναι ιδιαίτερο, κατά συνέπεια, το ενδιαφέρον να μπορεί να προβλεφθεί η απόκριση ομάδας πασσάλων συναρτήσει της απόκρισης του αντίστοιχου μεμονωμένου πασσάλου. Με αυτόν το στόχο και με βάση τα αποτελέσματα τριδιάστατων μη-γραμμικών αναλύσεων προτάθηκε από τον Comodromos (2004) σχετική εξίσωση η οποία είναι σε θέση να δώσει ικανοποιητική πρόβλεψη του συντελεστή R_a και κατά συνέπεια πρόβλεψη της απόκρισης ομάδας συναρτήσει της απόκρισης του αντίστοιχου μεμονωμένου πασσάλου και της διάταξης δεδομένης ομάδας. Η εφαρμογή της προταθείσας εξίσωσης περιορίζεται σε ομάδες πασσάλων με σχετική αξονική απόσταση την ευρέως εφαρμοζόμενη απόσταση των 3.0D. Η επαλήθευση της προταθείσας εξίσωσης πραγματοποιήθηκε για διάφορες διατάξεις και αριθμό πασσάλων για συγκεκριμένη εντούτοις εδαφική τομή. Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων περιλαμβάνουν διατάξεις με διάφορες αξονικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων αποτέλεσε ιδιαίτερα ελκτικό ερευνητικό πεδίο η ιδέα τροποποίησης της προταθείσας από τον Comodromos (2004) σχέσης προσδιορισμού της απόκρισης ομάδας πασσάλων και για ομάδες με οποιαδήποτε

αξονική απόσταση από αυτές που πρακτικά βρίσκουν πεδίο εφαρμογής. Τα αποτελέσματα τριδιάστατων αναλύσεων σε αργιλικούς σχηματισμούς αποτέλεσαν το πεδίο για τον προσδιορισμό και επαλήθευση της τροποποιημένης εξίσωσης, όπως αυτή δίνεται από τους (Comodromos and Bareka, 2006) και παρουσιάζεται στη συνέχεια. Για τον προσδιορισμό και την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προταθείσας εξίσωσης τροποποιήθηκε ελαφρά και η ειδική υπορουτίνα που αρχικά δημιουργήθηκε με χρήση του προγράμματος MS EXCEL και την ενσωματωμένη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic. Η νέα σχέση που ορίζει τον επαυξητικό συντελεστή καθίζησης δίνεται από τις εξισώσεις 4.7 και 4.8. Σύμφωνα με την εξίσωση αυτή ο συντελεστής R_a εξαρτάται από τον αριθμό των γραμμών και στηλών μιας ομάδας πασσάλων, το συνολικό αριθμό των πασσάλων, τη σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων-μελών της ομάδας και την καθίζηση του μεμονωμένου πασσάλου. Ο συντελεστής βαρύτητας της καθίζησης του μεμονωμένου πασσάλου μεταβάλλεται μη-γραμμικά με το επίπεδο της καθίζησης και επομένως απαιτείται να εισαχθούν τουλάχιστον δύο συντελεστές βαρύτητας (B και E) στην εξίσωση 4.7. Η μεταβλητή N_R αντιπροσωπεύει την επίδραση του συνολικού αριθμού των πασσάλων και η διάταξη των πασσάλων εισάγεται στην εξίσωση με επίσης δύο διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας.

$$R_a = A \left[S_{ns}^B (1.23N_R)^C + S_{ns}^E * e^{(0.54N_R)} \right] \ln\left(1.25 + \frac{5}{s}\right) \quad (4.7)$$

$$N_R = \frac{n}{n_r + n_c} \quad (4.8)$$

όπου R_a : επαυξητικός συντελεστής καθίζησης

S_{ns} : ανοιγμένη καθίζηση του μεμονωμένου πασσάλου ως προς τη διάμετρο D

n : συνολικός αριθμός πασσάλων στην ομάδα

n_r, n_c : αριθμός γραμμών και στηλών μέσα στην ομάδα, αντίστοιχα

Μετά τον προσδιορισμό του συντελεστή R_a από την εξίσωση 4.7 και θεωρώντας την καθίζηση του μεμονωμένου πασσάλου S_{mLs} για συγκεκριμένο μέσο φορτίο N_m γνωστή, η εξίσωση 4.9 δίνει την καθίζηση της ομάδας των πασσάλων S_{mG} . Η ίδια εξίσωση συσχετίζει την κανονικοποιημένη καθίζηση του μεμονωμένου πασσάλου με την αντίστοιχη της ομάδας.

$$\begin{aligned} S_{mG} &= R_a S_{mLs} \\ S_{nG} &= R_a S_{ns} \end{aligned} \quad (4.9)$$

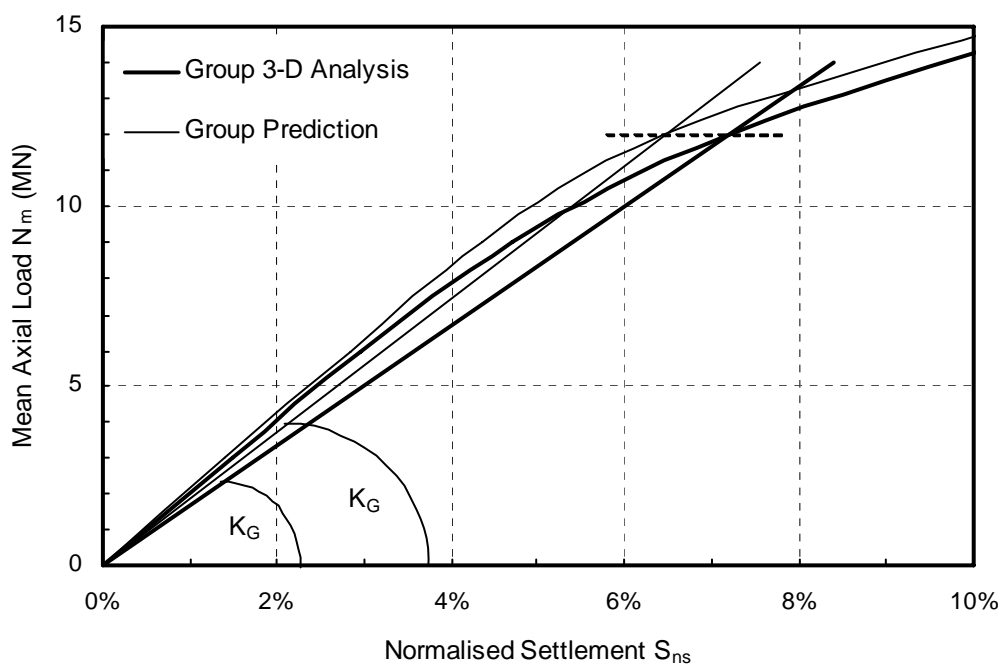
Ο προσδιορισμός των καταλληλότερων τιμών των παραμέτρων A, B, C και E επιτυγχάνεται μέσω της ειδικής υπορουτίνας η οποία είναι σε θέση να διεξάγει 2560000 υπολογισμούς σε κάθε της κλήση. Για την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων, πέραν της παράθεσης της πρόβλεψης στο ίδιο διάγραμμα με τα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων η υπορουτίνα υπολογίζει και το αντίστοιχο σφάλμα όπως επεξηγείται στη συνέχεια.

Σε πολλές περιπτώσεις αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής, στον υπολογισμό της ανωδομής, π.χ μιας γέφυρας, για απλοποίηση της υπολογιστικής διαδικασίας η θεμελίωση με πασσάλους αντικαθίσταται από ένα γραμμικό ελατήριο του οποίου η δυσκαμψία ισούται με την τέμνουσα δυσκαμψία της ομάδας των πασσάλων για την προβλεπόμενη καθίζηση. Σε αυτή την περίπτωση είναι πιο χρήσιμο να λαμβάνεται υπόψη το κριτήριο του μέσου σφάλματος στη δυσκαμψία. Το επίπεδο της καθίζησης όμως δεν είναι γνωστό όταν γίνεται η πρόβλεψη της απόκρισης της ομάδας των πασσάλων, και για το λόγο αυτό εισάγεται η έννοια του όρου K_{err}^m ο οποίος δίνει το μέσο σφάλμα για διάφορα επίπεδα καθίζησης. Στο σχήμα 4.18 απεικονίζεται με έντονη γραμμή η απόκριση μιας ομάδας πασσάλων ενώ με την πιο λεπτή γραμμή σχεδιάστηκε η προβλεπόμενη απόκριση. Η τέμνουσα δυσκαμψία για μια επιθυμητή καθίζηση S_{mG} ορίζεται ως K_G και K_{Gp} για την υπολογιζόμενη και την προβλεπόμενη καμπύλη αντίστοιχα. Το σφάλμα στη δυσκαμψία δίνεται από την εξίσωση 4.10:

$$K_{err} = \frac{K_G - K_{Gp}}{K_G} \quad (4.10)$$

Στην περίπτωση που απαιτείται ο υπολογισμός του μέσου σφάλματος της δυσκαμψίας για j διαφορετικά επίπεδα καθίζησης, η εξίσωση 4.10 παίρνει την ακόλουθη μορφή:

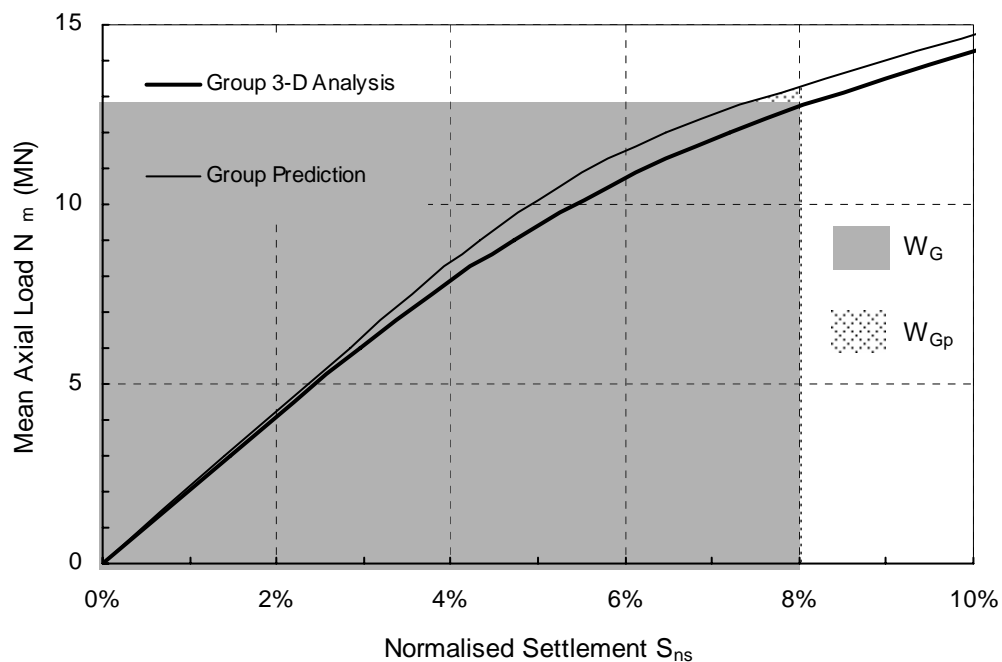
$$K_{err}^m = \frac{1}{j} \sum_{i=1,j} \frac{K_G^i - K_{Gp}^i}{K_G^i} \quad (4.11)$$



Σχήμα 4.18 Προσδιορισμός της τέμνουσας δυσκαμψίας για την υπολογιζόμενη καμπύλη K_G και για την προβλεπόμενη καμπύλη K_{Gp} (Comodromos and Bareka, 2006).

Για το δεύτερο κριτήριο χρησιμοποιείται η έννοια της δυναμικής ενέργειας του εφαρμοζόμενου φορτίου W . Θεωρώντας και πάλι στο σχήμα 4.19 ότι με την έντονη γραμμή απεικονίζεται η υπολογιζόμενη απόκριση μιας ομάδας πασσάλων ενώ με την πιο λεπτή γραμμή σχεδιάζεται η προβλεπόμενη απόκριση, το εμβαδόν της περιοχής κάτω από την έντονη γραμμή δίνει την ενέργεια W_G που παράγεται από την εφαρμογή του φορτίου στην ομάδα. Αντίστοιχα το εμβαδόν της περιοχής κάτω από τη λεπτή γραμμή δίνει την ενέργεια W_{Gp} της προβλεπόμενης απόκρισης. Το σφάλμα ενέργειας μέχρι το επιθυμητό επίπεδο καθίζησης δίνεται από την εξίσωση 4.12.

$$W_{err} = \frac{W_G - W_{Gp}}{W_G} \quad (4.12)$$



Σχήμα 4.19 Προσδιορισμός της δυναμικής ενέργειας της ομάδας W_G που παράγεται από ένα εφαρμοζόμενο φορτίο και της αντίστοιχης ενέργειας της προβλεπόμενης απόκρισης W_{Gp} (Comodromos and Bareka, 2006).

Και οι δύο όροι σφάλματος χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών για τις παραμέτρους A, B, C και E, έτσι ώστε και οι 76 περιπτώσεις που αναλύθηκαν να παρουσιάζουν αποδεκτό όριο σφάλματος. Προφανώς για κάθε υποπερίπτωση θα μπορούσε να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός των παραμέτρων έτσι ώστε το σφάλμα να είναι απειροελάχιστο. Κάτι τέτοιο όμως δεν θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο γιατί οι τιμές αυτές δεν θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε άλλη περίπτωση πέραν της συγκεκριμένης ομάδας πασσάλων για την οποία έγιναν οι υπολογισμοί. Για την περαιτέρω επαλήθευση της προτεινόμενης σχέσης πραγματοποιήθηκαν πρόσθετες επιλύσεις σε διατάξεις 2*2 και 4*4 και για κατηγορία εδάφους C2 και C3 σε σχετική απόσταση 3.0D και σχετικό μήκος πασσάλων $L/D=25$. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και των 80 περιπτώσεων που εξετάστηκαν, οι

βέλτιστες τιμές των παραμέτρων A, B, C και E προσδιορίστηκαν σε A=0.8, B=0.07, C=1.9, και E=-0.08. Κατά συνέπεια η προτεινόμενη γενική εξίσωση 4.7 παίρνει πλέον την ακόλουθη συγκεκριμένη τιμή:

$$R_a = 0.8 \left[S_{ns}^{0.07} (1.23N_R)^{1.9} + S_{ns}^{-0.08} * e^{(0.54N_R)} \right] \ln\left(1.25 + \frac{5}{s}\right) \quad (4.13)$$

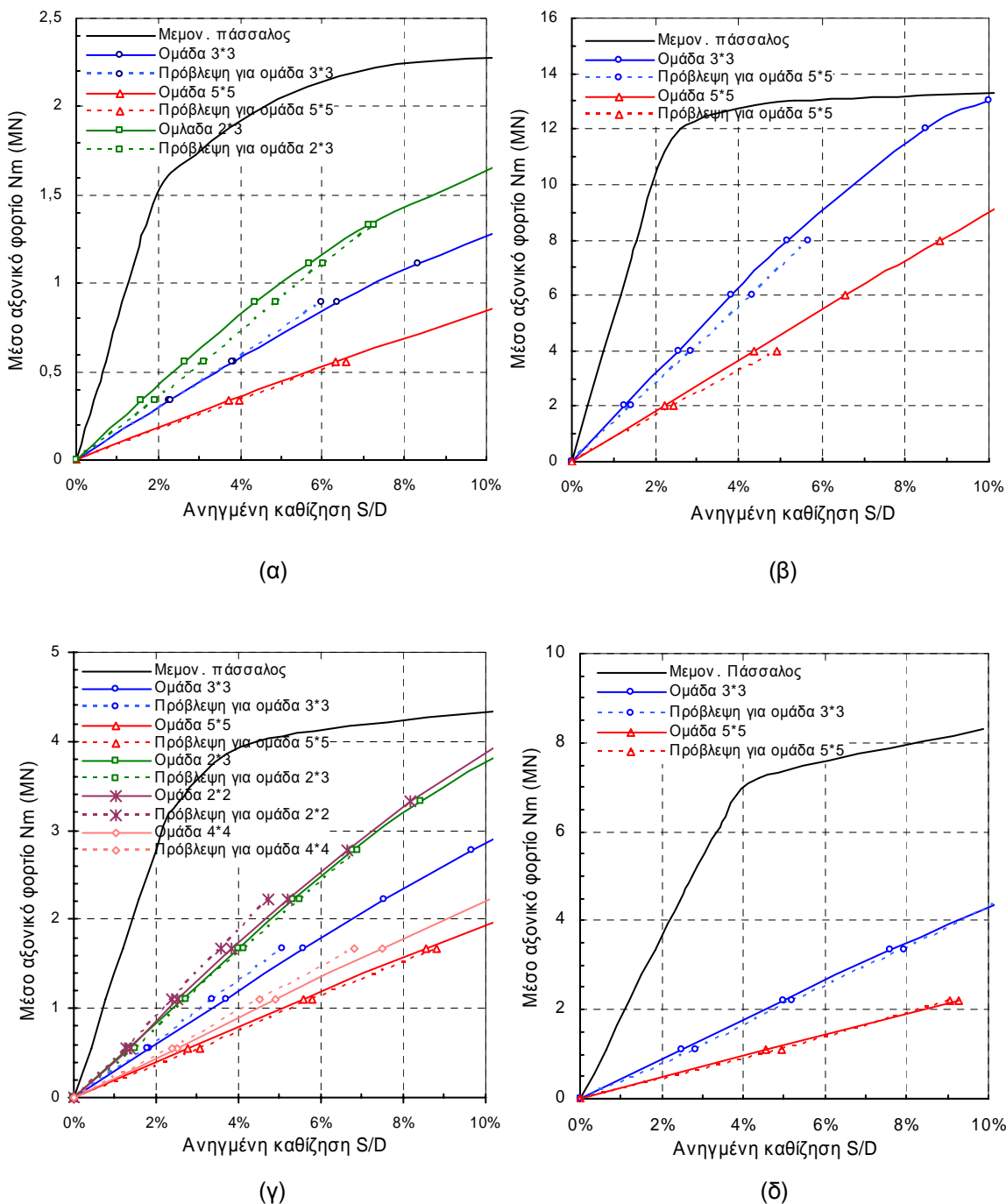
Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις διάφορων διατάξεων ομάδων πασσάλων που εξετάστηκαν στην παρούσα ανάλυση, οι οποίες διεξήχθησαν από το πρόγραμμα FLAC^{3D} (συνεχείς γραμμές) και οι αντίστοιχες της πρόβλεψης της προτεινόμενης εξίσωσης (διακεκομμένες γραμμές) με εφαρμογή των συγκεκριμένων τιμών για τις παραμέτρους A, B, C και E.

L/D	d	C1				C2				C3				C4			
		25		50		25		50		25		50		25		50	
		Wr (%)	Ws (%)	Wr (%)	Ws (%)	Wr (%)	Ws (%)	Wr (%)	Ws (%)	Wr (%)	Ws (%)	Wr (%)	Ws (%)	Wr (%)	Ws (%)	Wr (%)	Ws (%)
2x3	2D	10,32	9,18			7,30	5,99			9,85	9,82			0,90	2,45		
	3D	8,61	8,08			4,30	3,48			7,55	7,44			8,95	8,46		
	4D	8,47	8,02			3,85	3,03			6,36	6,23			7,67	7,18		
	5D																
3x3	2D	1,80	2,60	9,55	6,46	0,90	10,60	9,20	8,10	7,60	8,49	10,17	9,90	3,87	4,46	9,26	9,83
	3D	4,29	5,31	10,10	9,02	8,72	9,70	4,75	3,88	8,35	8,74	9,37	9,05	5,88	6,34	6,67	6,78
	4D	0,47	0,47	10,01	8,99	9,50	10,38	2,62	1,70	7,32	7,74	7,37	7,28	5,49	5,92	10,17	10,32
	5D	2,43	1,95	10,60	9,61	6,04	6,87	2 S	1,96	4,84	5,08	6,05	6,10	3,01	3,38	9,93	10,06
5x5	2D	5,38	5,76	9,05	9,70	9,90	10,60	2,30	2,67	1,24	1,67	5,40	5,30	3,89	3,83	9,23	9,71
	3D	10,30	10,76	10,50	11,40	6,80	7,14	2,79	2,98	8,52	8,47	8,60	8,46	10,70	10,80	9,52	9,41
	4D	9,51	9,55	9,61	10,44	10,10	10,70	8,15	8,85	10,43	10,38	8,55	8,41	9,23	9,22	10,27	10,14
	5D	10,69	10,71	10,05	10,96	9,96	10,53	10,31	11,21	9,79	9,91	10,08	9,92	8,40	8,67	9,03	8,92

Πίνακας 4.4 Συνοπτικός πίνακας τιμών του μέσου σφάλματος της δυσκαμψίας και του σφάλματος της δυναμικής ενέργειας.

Η ακρίβεια των προβλεπόμενων καμπυλών είναι αρκετά ικανοποιητική για τις ανάγκες του σχεδιασμού των περισσοτέρων ανωδομών. Παρόμοια αποτελέσματα διεξήχθησαν από την εφαρμογή της εξίσωσης και στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Στον πίνακα 4.4 συνοψίζονται το σφάλμα της δυναμικής ενέργειας και το μέσο σφάλμα της δυσκαμψίας που αντιστοιχεί σε κάθε μία από τις 76 περιπτώσεις για τις οποίες πραγματοποιήθηκε μη-γραμμική ανάλυση. Το μέγιστο σφάλμα που υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που προαναφέρθηκαν δεν ξεπερνά το 11%, ενώ το μέσο σφάλμα όλων των περιπτώσεων ισούται με 7.5%.

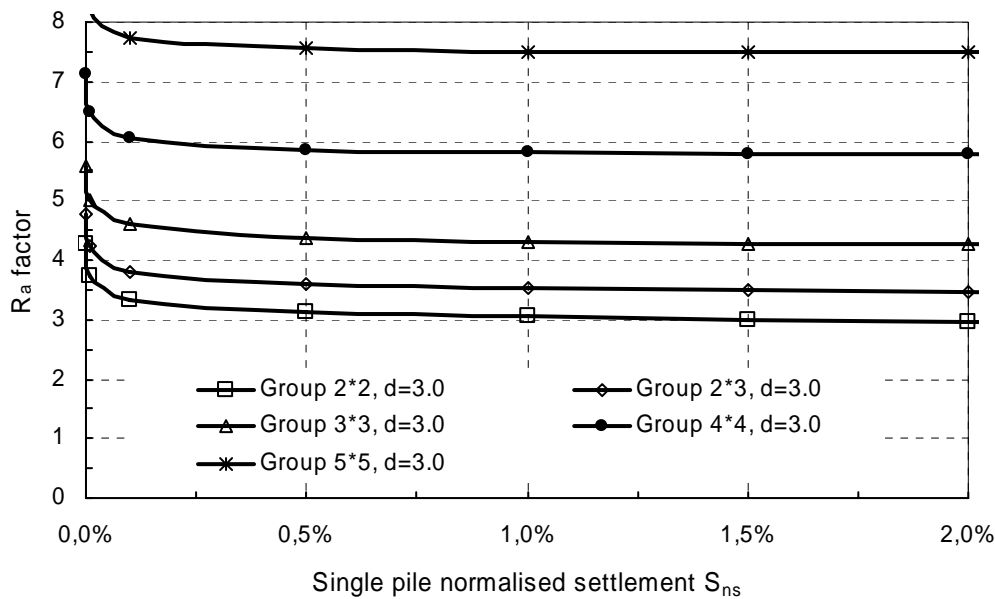
Το σφάλμα γίνεται μικρότερο όσο μειώνεται το επίπεδο καθίζησης, ενώ για καθιζήσεις μέχρι 5% που μπορεί να θεωρηθεί ως το μέγιστο επίπεδο επιτρεπόμενης καθίζησης κατά τη λειτουργία ενός έργου, η ακρίβεια της πρόβλεψης με χρήση της προτεινόμενης εξίσωσης μπορεί να θεωρηθεί ιδιαίτερα ικανοποιητική.



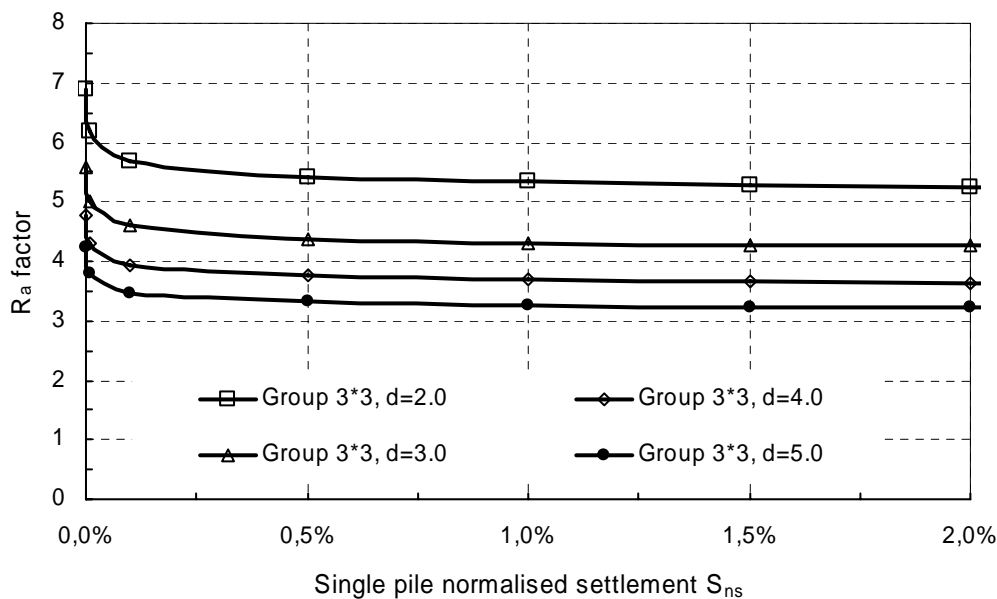
Σχήμα 4.20 Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για: (α) κατηγορία εδάφους C1, $d=2D$ και $L/D=25$ (β) κατηγορία εδάφους C4, $d=4D$ και $L/D=50$ (γ) κατηγορία εδάφους C2, $d=3D$ και $L/D=25$ (δ) κατηγορία εδάφους C2, $d=3D$ και $L/D=50$.

Στα σχήματα 4.21 και 4.22 δίνεται η μεταβολή του συντελεστή επαύξησης καθιζήσεων ομάδας πασσάλων για διάφορες διατάξεις, αριθμό και αξονικές αποστάσεις πασσάλων. Οι προκύπτουσες καμπύλες είναι ομοιοθетες, γεγονός που δίνει την καθολική επίπτωση της καθιζήσης στην απόκριση ομάδας ανεξαρτήτως της ειδικότερης διάταξης της. Παρατηρείται ότι η τιμή του R_a μειώνεται όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των πασσάλων στην ομάδα και όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση

μεταξύ τους. Στο παράρτημα Γ δίνονται όλα τα συγκριτικά διαγράμματα για τις διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν.



Σχήμα 4.21 Μεταβολή του συντελεστή καθίζησης R_a με τη διάταξη της ομάδας για σταθερή σχετική απόσταση $d=3.0D$, όπως διεξήχθη από τις σχέσεις 4.7-4.8 (Comodromos and Bareka, 2006).



Σχήμα 4.22 Μεταβολή του συντελεστή καθίζησης R_a με τη σχετική απόσταση για την ίδια διάταξη ομάδας 3*3, όπως διεξήχθη από τις σχέσεις 4.7-4.8 (Comodromos and Bareka, 2006)

Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι οι προβλεπόμενες από την προταθείσα σχέση καμπύλες απόκρισης βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τις καμπύλες που προσδιορίστηκαν με χρήση τριδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης, ενώ η ακρίβεια πρόβλεψης κρίνεται ικανοποιητική για το σχεδιασμό κάθε είδους ανωδομών, με πιθανή εξαίρεση τις ειδικές περιπτώσεις που απαιτείται πολύ ιδιαίτερη ακρίβεια

(σφάλμα απόκρισης μικρότερο του 10%).

Εκτεταμένη έρευνα πραγματοποιείται στη συνέχεια και για αμμώδη εδάφη. Ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία με αυτήν που αναπτύχθηκε για τα αργιλικά, ενώ εξετάζονται και περιπτώσεις διστρωματικών εδαφών. Τα αποτελέσματα δίνονται και αξιολογούνται στις επόμενες παραγράφους.

4.5 Απόκριση ομάδας πασσάλων σε αμμώδες έδαφος

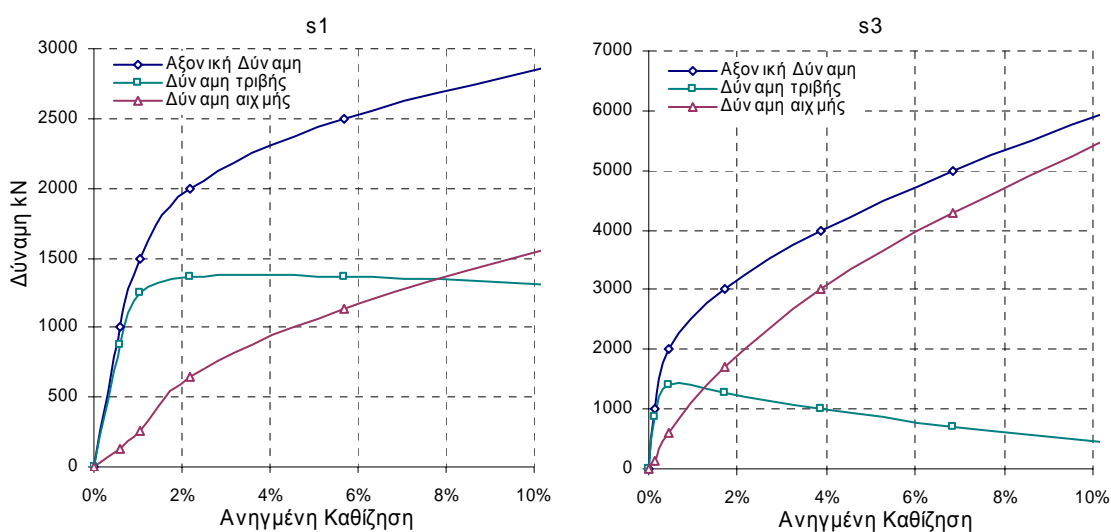
4.5.1 Μεμονωμένος πάσσαλος

Οι επιλύσεις για μεμονωμένο έγχυτο πάσσαλο πραγματοποιούνται για τις τρεις κατηγορίες αμμωδών εδαφών των οποίων τα χαρακτηριστικά δίνονται στον πίνακα 4.1. Στις τρεις αυτές κατηγορίες αντιστοιχούν δύο σειρές αναλύσεων, η πρώτη για ανηγμένο μήκος $L/D=25$ και η δεύτερη για $L/D=50$. Οι επιλύσεις πραγματοποιούνται ως μέτρο σύγκρισης με τις αντίστοιχες ομάδες πασσάλων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης.

Στο σχήμα 4.23 παρουσιάζεται η απόκριση της αντίστασης αιχμής και της παράπλευρης τριβής συναρτήσει της καθίζησης για τις κατηγορίες εδάφους S1 και S3 και για ανηγμένο μήκος $L/D=25$. Η κατανομή των αντιστάσεων και η μεταβολή τους δεν εμφανίζει εικόνα παρόμοια με αυτή των αργιλικών εδαφών. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι η αντίσταση τριβής κινητοποιείται πλήρως σε μικρές σχετικά καθιζήσεις, της τάξης του 1%D ή και νωρίτερα, ενώ η αντίσταση αιχμής χαρακτηρίζεται από συνεχή αύξηση μέχρι και πέραν της οριακής τιμής του 10%D. Ο μηχανισμός είναι ακόμη πιο έντονος στην περίπτωση της πολύ πυκνής άμμου, όπως άλλωστε αναμένεται δεδομένου ότι είναι κοινά παραδεκτό ότι οι πυκνές άμμοι, κατ'αντιστοιχία των πολύ σκληρών αργίλων εμφανίζουν την μέγιστη διατμητική τους αντοχή σε πολύ μικρές παραμορφώσεις. Ειδικότερα παρατηρείται ότι στην περίπτωση της πυκνής άμμου, κατηγορίας S3, η πλήρης κινητοποίηση της πλευρικής τριβής αντιστοιχεί σε καθίζηση της τάξης του 0.5%D, ενώ η αντίσταση αιχμής εμφανίζει συνεχή αύξηση, κατά δε την εκδήλωση της οριακής τιμής της καθίζησης του 10%D αναλαμβάνει το 90% του επιβαλλόμενου φορτίου και η αντίσταση τριβής παραλαμβάνει μόλις το 10%. Στην περίπτωση της χαλαρής άμμου, κατηγορίας S1, η πλήρης κινητοποίηση της πλευρικής τριβής αντιστοιχεί σε καθίζηση της τάξης του 1%D. Η αντίσταση αιχμής εμφανίζει μεν συνεχή αύξηση, το οριακό εντούτοις φορτίο που αναλαμβάνει είναι σημαντικά μικρότερο από την προηγούμενη περίπτωση και ανέρχεται στο 56% του επιβαλλόμενου φορτίου. Κατ'αντίστιξη στην περίπτωση αυτή της χαλαρής άμμου η αντίσταση τριβής παραλαμβάνει αισθητά μεγαλύτερο ποσοστό που αντιστοιχεί στο 43% του επιβαλλόμενου φορτίου. Ας σημειωθεί εντούτοις ότι στην περίπτωση μικρών καθιζήσεων, όπου αντιστοιχεί το επιτρεπόμενο φορτίο, η πλευρική αντίσταση αναλαμβάνει σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό, της τάξης του

80% και το υπόλοιπο 20% μεταβιβάζεται στην αιχμή. Αντίθετα στην πυκνή άμμο ακόμα και σε πολύ μικρές καθιζήσεις η αιχμή είναι αυτή που αναλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό φορτίου γεγονός που δικαιολογεί και τη διαφορά στη συμπεριφορά των πολύ πυκνών άμμων από τα υπόλοιπα εδάφη.

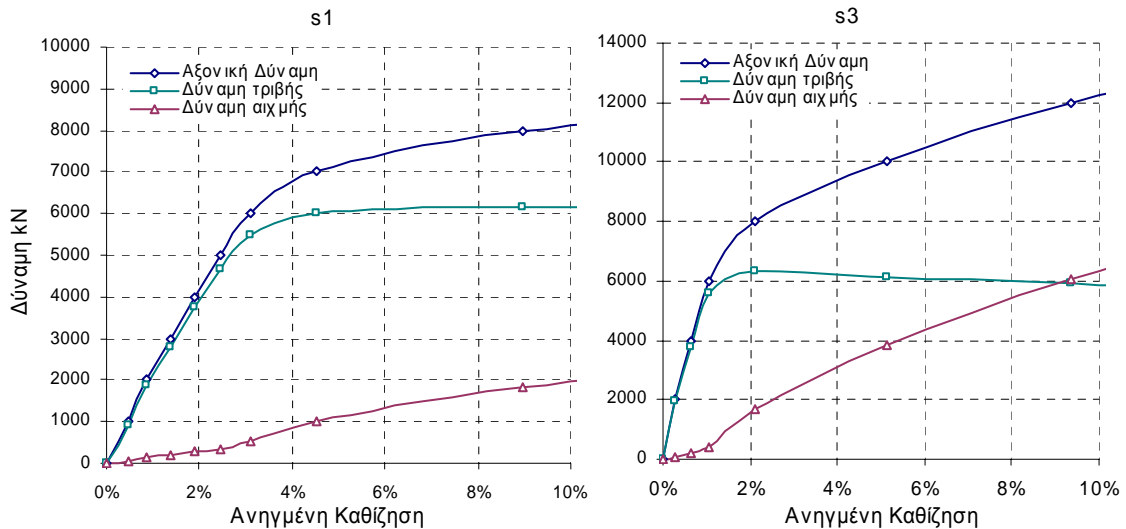
Παρατηρείται επομένως ότι τόσο για επίπεδο καθίζησης που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο, αλλά κυρίως για την οριακή τιμή καθίζησης του 10%D η συνεισφορά της αντίστασης αιχμής είναι σημαντικά μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση των αργιλικών εδαφών. Η διαπίστωση αυτή αποτελεί κοινό τόπο διαφόρων κανονισμών και προτάσεων από ερευνητές και απεικονίζεται χαρακτηριστικά από τους αντίστοιχους πίνακες τάσεων έδρασης του γερμανικού κανονισμού DIN 4014.



Σχήμα 4.23 Κατανομή της αξονικής δύναμης στην αντίσταση αιχμής και τριβής συναρτήσει της καθίζησης για πάσσαλο σε κατηγορία εδάφους S1 και S3 με ανηγμένο μήκος $L/D=25$.

Σε παρόμοια αποτελέσματα και συμπεράσματα οδηγεί και η ανάλυση για περιπτώσεις πασσάλων μεγάλου μήκους, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.24 για τις περιπτώσεις εδάφους S1 και S3 και για ανηγμένο μήκος $L/D=50$. Θα πρέπει να σημειωθεί εντούτοις ότι χαρακτηριστικό της απόκρισης των πασσάλων μεγάλου μήκους αποτελεί το γεγονός ότι η πλήρης κινητοποίηση της πλευρικής τριβής απαιτεί ανάπτυξη μεγαλύτερων τιμών καθιζήσεων, ενώ η αντίσταση αιχμής ως ποσοστό είναι μικρότερο από την περίπτωση των πασσάλων με ανηγμένο μήκος $L/D=25$. Το γεγονός αυτό είναι καθ'όλα αναμενόμενο δεδομένου ότι η αύξηση του μήκους του πασσάλου εκ των πραγμάτων οδηγεί σε αύξηση της πλευρικής αντίστασης. Η εικόνα απόκρισης των πασσάλων μεγάλου μήκους σε χαλαρά αμμώδη εδάφη προσομοιάζει περισσότερο με την αντίστοιχη των αργίλων για κανονικού μήκους και υπό την έννοια αυτή για καθίζηση της τάξης του επιτρεπόμενου φορτίου οι πάσσαλοι αυτοί μπορούν να θεωρηθούν ως αιωρούμενοι πάσσαλοι. Αντίθετα οι πάσσαλοι μεγάλου μήκους σε πυκνή άμμο, αν και για το επιτρεπόμενο φορτίο η προσφορά της αντίστασης τριβής εξακολουθεί να παίζει τον κυρίαρχο ρόλο, για καθίζηση 10%D το εξωτερικώς

επιβαλλόμενο φορτίο ισομοιράζεται μεταξύ αντίστασης αιχμής και παράπλευρης αντίστασης.



Σχήμα 4.24 Κατανομή της αξονικής δύναμης στην αντίσταση αιχμής και τριβής συναρτήσει της καθίζησης για πάσσαλο σε κατηγορία εδάφους S1 και S3 με ανηγμένο μήκος $L/D=50$.

Συμπερασματικά θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ουσιαστική διαφοροποίηση της απόκρισης των μεμονωμένων πασσάλων σε αργιλικά και αμμώδη εδάφη συνίσταται στο γεγονός ότι αυξανόμενης της καθίζησης το ποσοστό που αναλαμβάνει η αιχμή χαρακτηρίζεται από σημαντική αύξηση στα αμμώδη εδάφη, σε αντίθεση με τα αργιλικά εδάφη όπου παρατηρείται μεν αύξηση αλλά δεν οδηγεί σε ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό. Η παρατήρηση αυτή ισχύει σε έντονο βαθμό για τις πυκνές άμμους.

4.5.2 Φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων

Τα διαθέσιμα ερευνητικά αποτελέσματα απόκρισης ομάδων πασσάλων σε άμμο είναι ιδιαίτερα περιορισμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα για αργιλικούς σχηματισμούς. Αποτελεί κοινό τόπο ωστόσο ότι ο συντελεστής απόδοσης φέρουσα ικανότητας ομάδας πασσάλων σε αμμώδη εδάφη ξεπερνάει τη μονάδα. Κατά το σχεδιασμό εντούτοις των τεχνικών έργων σπανίως λαμβάνεται συντελεστής απόδοσης ομάδας μεγαλύτερος της μονάδας, άλλωστε πλέον κρίσιμο ζήτημα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν αποτελεί ο συντελεστής απόδοσης φέρουσας ικανότητας αλλά ο συντελεστής απόδοσης δυσκαμψίας ή κατ'αντιστοιχία ο συντελεστής επαύξησης καθιζήσεων της ομάδας πασσάλων. Η επιβεβαίωση των ανωτέρω απαιτεί διεξαγωγή δοκιμαστικών φορτίσεων ομάδας πασσάλων, γεγονός ιδιαίτερα δύσκολο έως ακατόρθωτο για κανονικούς πασσάλους.

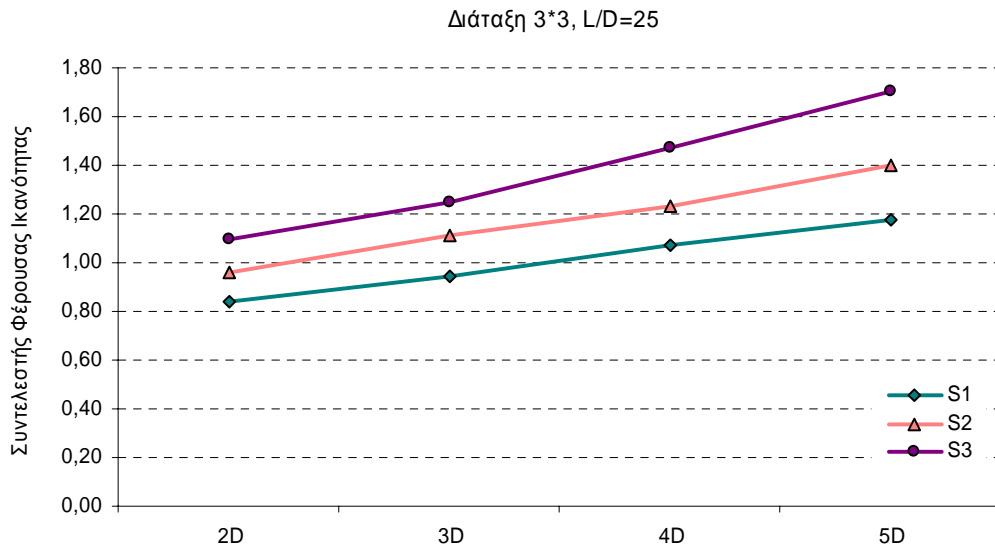
Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης πραγματοποιήθηκαν 60 διαφορετικές αναλύσεις για τις προαναφερθείσες τρεις κατηγορίες αμμωδών εδαφών, για διάφορους αριθμούς πασσάλων, σε διάφορες διατάξεις και για σχετικά μήκη $L/D=25$

και 50, αντίστοιχα. Στον πίνακα 4.5 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που αναφέρονται στο συντελεστή φέρουσας ικανότητας. Στις περισσότερες των περιπτώσεων παρατηρείται ότι ο συντελεστής απόδοσης είναι μεγαλύτερος της μονάδας, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία και με τη μέχρι τώρα καταγεγραμμένη εμπειρία. Ειδικότερα η τιμή του συντελεστή απόδοσης φέρουσας ικανότητας αυξάνει αυξανόμενης της αξονικής απόστασης των πασσάλων, καθώς επίσης και αυξανόμενης της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Αντίθετα μειώνεται όσο αυξάνει ο αριθμός και το βάθος των πασσάλων, περιπτώσεις κατά τις οποίες το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εμφανίζεται σε πιο έντονο βαθμό. Οι μόνες περιπτώσεις που οδηγούν σε συντελεστές μικρότερους της μονάδας είναι αυτές των χαλαρών άμμων σε συνδυασμό με μεγάλο αριθμό πασσάλων.

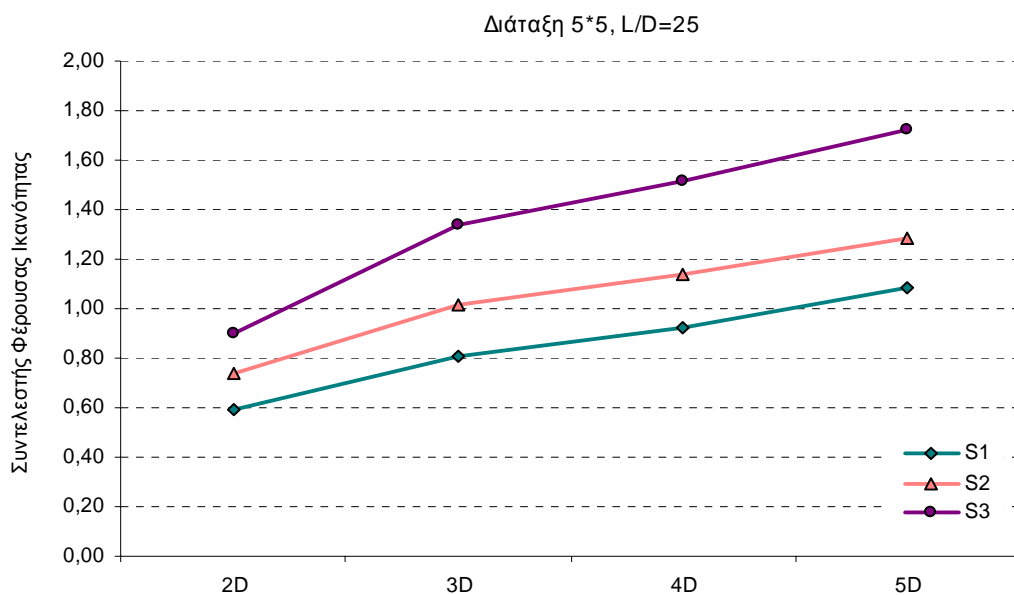
		L/D	S1		S2		S3	
		d	25	50	25	50	25	50
2x3	2D		0,89		0,99		1,11	
	3D		1,02		1,13		1,25	
	4D		1,15		1,29		1,47	
	5D		1,30		1,47		1,72	
3x3	2D		0,84	0,56	0,96	0,86	1,10	1,03
	3D		0,95	0,65	1,12	0,90	1,25	1,09
	4D		1,07	0,73	1,23	0,95	1,47	1,18
	5D		1,18	0,80	1,40	1,01	1,70	1,28
5x5	2D		0,59	0,29	0,74	0,51	0,90	0,81
	3D		0,80	0,37	1,02	0,64	1,34	1,12
	4D		0,92	0,45	1,14	0,74	1,51	1,17
	5D		1,08	0,54	1,28	0,84	1,72	1,25

Πίνακας 4.5 Συντελεστής απόδοσης φέρουσας ικανότητας για διατάξεις ομάδας 2*3, 3*3, 5*5 σε απόσταση 2.0D, 3.0D, 4.0D και 5.0D με λόγο μήκους προς διάμετρο L/D=25 και 50 m για τύπο εδάφους S1, S2 και S3.

Στο σχήμα 4.25 δίνεται η μεταβολή του συντελεστή απόδοσης φέρουσας ικανότητας για διάταξη ομάδας 3*3 και L/D=25 για τους τρεις διαφορετικούς τύπους εδαφών. Παρατηρείται ότι οι καμπύλες είναι ομοιόθετες ως προς την διατμητική αντοχή με την κατηγορία S3 να δίνει τις μεγαλύτερες τιμές. Κοινό χαρακτηριστικό των καμπυλών αποτελεί επίσης η αύξηση της τιμής του συντελεστή αυξανόμενης της αξονικής απόστασης. Ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και από την περίπτωση της διάταξης 5*5 για το ίδιο πάντα ανηγμένο μήκος, σχήμα 4.26. Όλα τα επιμέρους διαγράμματα απόκρισης των διαφόρων διατάξεων δίνονται στο παράρτημα Α.



Σχήμα 4.25 Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή φέρουσας ικανότητας δια ομάδα πασσάλων με διάταξη 3*3 και λόγο L/D=25.

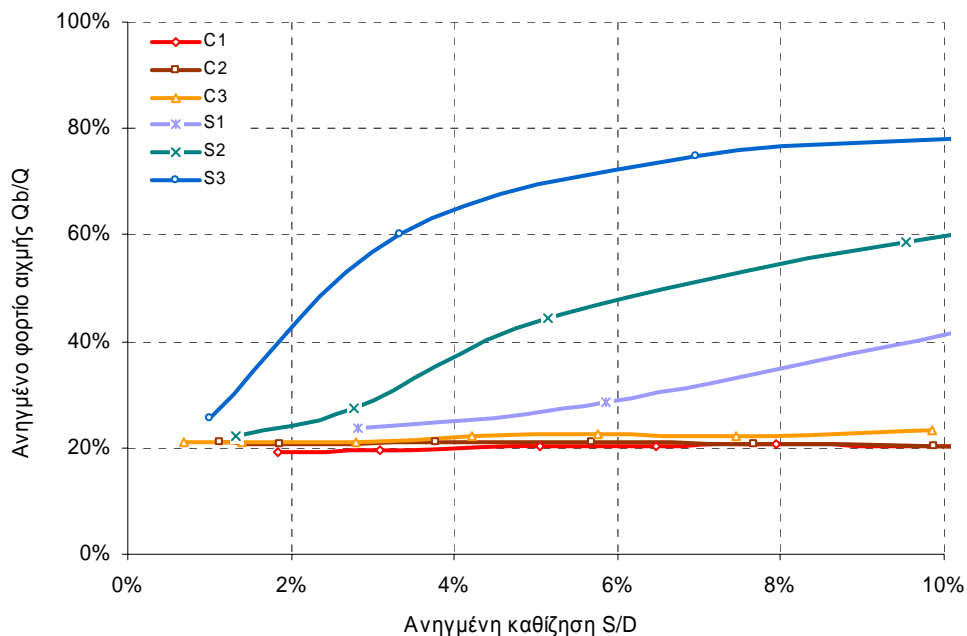


Σχήμα 4.26 Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή φέρουσας ικανότητας δια ομάδα πασσάλων με διάταξη 5*5 και λόγο L/D=25.

Σημαντικά συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από τη σύγκριση της μεταβολής κατανομής του συνολικά επιβαλλόμενου φορτίου σε ομάδα πασσάλων σε αντίσταση αιχμής και παράπλευρης αντίστασης συναρτήσει της καθίζησης της ομάδας. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής απεικονίζονται στο σχήμα 4.27 για την περίπτωση ομάδας πασσάλων με διάταξη 3*3, αξονική απόσταση 3.0D τόσο για τα αργιλικά όσο και για τα αμμώδη εδάφη. Στα αμμώδη εδάφη παρατηρείται ότι αυξανόμενη της καθίζησης αυξάνει και το φορτίο που αναλαμβάνεται από την αιχμή, σε αντίστιξη με τα αργιλικά εδάφη όπου το ποσοστό αυτό παραμένει αμετάβλητο. Ο ρυθμός μεταβολής είναι σημαντικός για μικρές καθιζήσεις, ενώ οι επιπτώσεις της

πλαστικοποίησης έρχονται να μετριάσουν την έκταση του φαινομένου οδηγώντας σε βαθμιαία μειούμενο ρυθμό αυξανόμενης της καθίζησης και προφανώς του επιβαλλόμενου φορτίου και του πεδίου τάσεων στο περιβάλλον έδαφος.

Σημαντική επίσης παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι, για μεν τις αργίλου το αναλαμβανόμενο από τις αιχμές των πασσάλων φορτίο ως ποσοστό του συνολικά επιβαλλόμενου φορτίου είναι της τάξης του 20% και παραμένει σταθερό για όλο το εύρος καθιζήσεων, ενώ για την περίπτωση των αμμωδών εδαφών η αιχμή εκπροσωπεί αρχικά το 25% του επιβαλλόμενου φορτίου με συνεχή αύξηση αυξανόμενων των καθιζήσεων. Η αύξηση είναι ιδιαίτερα έντονη στην περίπτωση των πολύ πυκνών άμμων, γεγονός που διαφοροποιεί την απόκριση ομάδας στην ειδική αυτή περίπτωση.



Σχήμα 4.27 Διάγραμμα μεταβολής της ανηγμένης δύναμης αιχμής συναρτήσει του επιπέδου καθίζησης για διάφορους τύπους εδάφους για ομάδα διάταξης 3*3 με σχετική απόσταση 3.0D και L/D=25.

4.5.3 Δυσκαμψία ομάδας πασσάλων

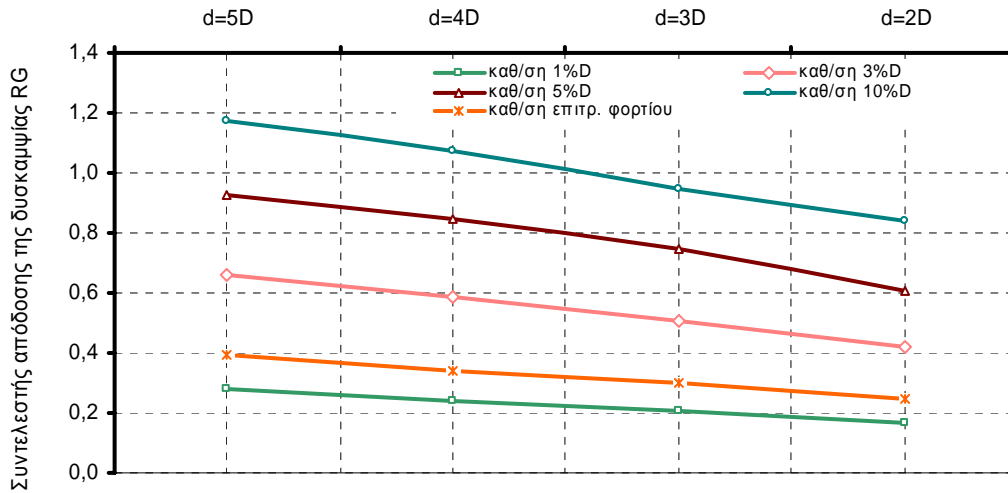
Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται η μεταβολή στη δυσκαμψία των ομάδων πασσάλων που εξετάστηκαν σε σχέση με το μεμονωμένο. Ο συντελεστής απόδοσης της δυσκαμψίας και η δυσκαμψία της ομάδας των πασσάλων ορίστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο (βλ. § 4.4.3).

Στα σχήματα 4.28 έως 4.30 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή απόδοσης της δυσκαμψίας για επίπεδα καθίζησης 1, 3, 5 και 10%, καθώς και για την καθίζηση που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο. Η μεθοδολογία και οι ορισμοί δίνονται στην αντίστοιχη παράγραφο των αργιλικών εδαφών, §4.4.3. Παρατηρείται, και στην

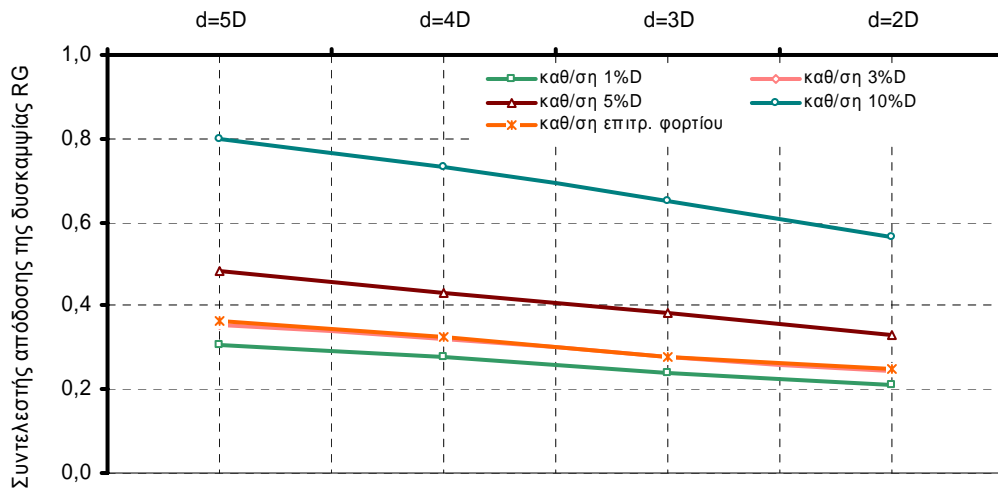
περίπτωση των αμμωδών εδαφών, ότι ο πλέον καθοριστικός παράγοντας επιρροής της δυσκαμψίας είναι το επίπεδο της καθίζησης. Ειδικότερα ο συντελεστής απόδοσης δυσκαμψίας εμφανίζει τις μικρότερες τιμές του σε μικρά επίπεδα καθίζησης, όπου οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή τους. Ας σημειωθεί ότι η διαπίστωση αυτή είναι ταυτόσημη και στις περιπτώσεις των αργιλικών εδαφών. Σε αντίστιξη, για καθιζήσεις που αντιστοιχούν στο οριακό φορτίο ο συντελεστής απόδοσης της δυσκαμψίας ξεπερνά τη μονάδα, δηλαδή η ανηγμένη στον αριθμό των πασσάλων δυσκαμψία της ομάδας για μεγάλες καθιζήσεις εμφανίζεται μεγαλύτερη από αυτήν του μεμονωμένου πασσάλου. Η διαπίστωση αυτή είναι ποιοτικά και μόνο σύμφωνη με την αντίστοιχη των αργιλικών εδαφών, όπου παρουσιάζεται μεν αύξηση, σπάνια όμως και σε ειδικές περιπτώσεις ο συντελεστής απόδοσης δυσκαμψίας για το οριακό επίπεδο καθίζησης παίρνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Ας σημειωθεί ακόμη ότι σε ειδικούς συνδυασμούς ομάδων πασσάλων και αμμωδών εδαφών είναι δυνατόν ο ανωτέρω συντελεστής, ακόμη και για επίπεδα μεγάλων καθιζήσεων να εμφανίζει τιμές ελαφρώς μικρότερες της μονάδας. Χαρακτηριστική περίπτωση αυτή των χαλαρών άμμων, κατηγορία S1, αξονικών αποστάσεων, 2.0D και πασσάλων μεγάλου μήκους $L/D=50$.

Στο σχήμα 4.28 δίνεται η μεταβολή του συντελεστή απόδοσης δυσκαμψίας συναρτήσει του επιπέδου καθίζησης για διάταξη ομάδας 3*3, λόγο μήκους προς διάμετρο 25 και τύπο εδάφους S1. Παρατηρείται ότι για καθίζηση 1%D η δυσκαμψία της ομάδας μειώνεται από 70% έως 80% ανάλογα με τη σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων. Η μείωση αυτή ελαττώνεται σταδιακά με την αύξηση του φορτίου και για την οριακή καθίζηση 10%D η μείωση της δυσκαμψίας είναι 18% για σχετική απόσταση 2.0D, ενώ για το ίδιο επίπεδο καθίζησης η ομάδα με σχετική απόσταση 5.0D επιδεικνύει ανηγμένη δυσκαμψία κατά 20% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του μεμονωμένου πασσάλου.

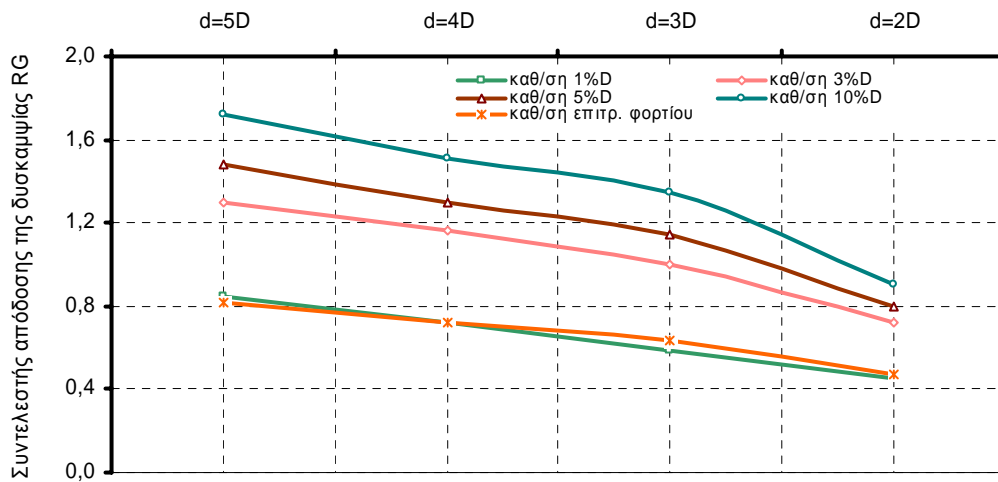
Για την ίδια διάταξη παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση του συντελεστή απόδοσης της δυσκαμψίας όταν αυξάνεται το σχετικό μήκος των πασσάλων σε $L/D=50$. Για μικρές καθιζήσεις ο συντελεστής παίρνει ίδιες τιμές με την προηγούμενη περίπτωση. Αυξανόμενης της καθίζησης ο συντελεστής απόδοσης δυσκαμψίας αυξάνεται κατά παρόμοιο με την προηγούμενη περίπτωση τρόπο, υπολείπεται εντούτοις των τιμών στις αντίστοιχες περιπτώσεις. Η σύγκριση των σχημάτων 4.28 και 4.29 απεικονίζει με εύληπτο τρόπο τις διαφορές αυτές. Ας σημειωθεί ότι, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα περί απόδοσης φέρουσας ικανότητας ομάδας στην ίδια κατηγορία πασσάλων, ο συντελεστής απόδοσης ομάδας είναι μικρότερος της μονάδας για τις περιπτώσεις των μεγάλου μήκους πασσάλων στις κατηγορίες S1 και S2.



Σχήμα 4.28 Μεταβολή του συντελεστή απόδοσης της δυσκαμψίας με το επίπεδο καθίζησης για διάταξη ομάδας 3*3, L/D=25 και τύπο εδάφους S1.



Σχήμα 4.29 Μεταβολή του συντελεστή απόδοσης της δυσκαμψίας με το επίπεδο καθίζησης για διάταξη ομάδας 3*3, L/D=50 και τύπο εδάφους S1.



Σχήμα 4.30 Μεταβολή του συντελεστή απόδοσης της δυσκαμψίας με το επίπεδο καθίζησης για διάταξη ομάδας 5*5, L/D=25 και τύπο εδάφους S3.

Η αύξηση του αριθμού των πασσάλων οδηγεί σε μεγαλύτερες επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης και επομένως, όπως και στις αναλύσεις των αργιλικών εδαφών, σε μικρότερους συντελεστές απόδοσης δυσκαμψίας. Παρόμοια είναι και τα αποτελέσματα στην περίπτωση μείωσης της αξονικής απόστασης μεταξύ των πασσάλων, οι δε επιπτώσεις αποτυπώνονται τόσο στα σχήματα 4.28 έως 4.30, όσο και σε πινακοποιημένη μορφή στον πίνακα 4.6.

		L/D=25				L/D=50				
		2D	3D	4D	5D	2D	3D	4D	5D	
S1	3*3	1%D	0,169	0,206	0,242	0,280	0,212	0,241	0,276	0,308
		3%D	0,421	0,510	0,586	0,662	0,244	0,278	0,318	0,355
		5%D	0,608	0,750	0,848	0,930	0,332	0,381	0,433	0,482
		10%D	0,842	0,946	1,071	1,175	0,563	0,651	0,732	0,798
		καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,246	0,301	0,343	0,395	0,251	0,278	0,327	0,364
	5*5	1%D	0,105	0,140	0,178	0,218	0,106	0,133	0,163	0,194
		3%D	0,262	0,350	0,443	0,537	0,122	0,154	0,188	0,224
		5%D	0,398	0,523	0,652	0,786	0,167	0,210	0,258	0,308
		10%D	0,488	0,804	0,961	1,111	0,288	0,366	0,448	0,535
	καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,157	0,208	0,260	0,314	0,126	0,159	0,195	0,232	
2*3	1%D	0,251	0,297	0,346	0,391					
	3%D	0,588	0,681	0,763	0,837					
	5%D	0,820	0,911	0,985	1,082					
	10%D	0,887	1,025	1,150	1,279					
	καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,352	0,408	0,457	0,500					
S2	3*3	1%D	0,333	0,407	0,481	0,552	0,260	0,298	0,338	0,376
		3%D	0,686	0,826	0,903	0,998	0,377	0,434	0,489	0,534
		5%D	0,807	0,966	1,041	1,161	0,560	0,643	0,723	0,775
		10%D	0,961	1,115	1,229	1,408	0,886	0,943	1,000	1,066
		καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,309	0,377	0,410	0,446	0,264	0,305	0,342	0,363
	5*5	1%D	0,208	0,277	0,350	0,428	0,133	0,167	0,204	0,239
		3%D	0,449	0,592	0,742	0,882	0,194	0,245	0,298	0,350
		5%D	0,594	0,777	0,947	1,097	0,293	0,370	0,448	0,529
		10%D	0,759	1,049	1,201	1,391	0,509	0,641	0,771	0,891
	καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,197	0,263	0,325	0,387	0,137	0,173	0,210	0,248	
2*3	1%D	0,490	0,568	0,636	0,693					
	3%D	0,842	0,931	1,038	1,148					
	5%D	0,877	1,014	1,122	1,272					
	10%D	0,989	1,135	1,294	1,467					
	καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,433	0,482	0,499	0,534					
S3	3*3	1%D	0,683	0,812	0,903	0,976	0,430	0,481	0,527	0,572
		3%D	0,940	1,047	1,218	1,364	0,781	0,866	0,923	0,945
		5%D	0,996	1,143	1,346	1,528	0,955	1,003	1,048	1,104
		10%D	1,096	1,246	1,473	1,700	1,028	1,090	1,180	1,283
		καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,660	0,709	0,815	0,910	0,420	0,469	0,500	0,510
	5*5	1%D	0,449	0,587	0,725	0,848	0,236	0,292	0,347	0,402
		3%D	0,725	0,998	1,163	1,296	0,460	0,569	0,673	0,767
		5%D	0,800	1,146	1,302	1,484	0,640	0,801	0,928	1,016
		10%D	0,901	1,342	1,512	1,725	0,809	1,118	1,170	1,252
	καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,476	0,635	0,725	0,819	0,240	0,296	0,351	0,401	
2*3	1%D	0,683	0,925	0,995	1,084					
	3%D	0,940	1,085	1,251	1,432					
	5%D	1,004	1,184	1,355	1,566					
	10%D	1,112	1,229	1,465	1,719					
	καθ/ση επιτρ. φορτίου	0,647	0,807	0,862	0,985					

Πίνακας 4.6 Πίνακας τιμών του συντελεστή R_G , για το σύνολο των τριδιάστατων μη-γραμμικών αναλύσεων σε αμμώδεις σχηματισμούς.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσο πιο πυκνή είναι η σύσταση των αμμωδών εδαφών τόσο οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μειώνονται για μικρά επίπεδα καθιζήσεων, ενώ για μεγάλες τιμές καθιζήσεων καταγράφεται αύξηση της ανηγμένης δυσκαμψίας της ομάδας σε σχέση με τον αντίστοιχο μεμονωμένο πάσσαλο. Χαρακτηριστική απεικόνιση της ανωτέρω διαπίστωσης αποτελεί το σχήμα 4.30. Η διαπίστωση αυτή βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία για την περί απόδοσης ομάδας

θεώρηση σε αμμώδη και δη πυκνής σύστασης εδάφη.

Στον πίνακα 4.6 δίνονται οι τιμές του συντελεστή απόδοσης δυσκαμψίας R_G για το σύνολο των 60 τριδιάστατων μη-γραμμικών αναλύσεων ομάδων πασσάλων σε αμμώδη εδάφη.

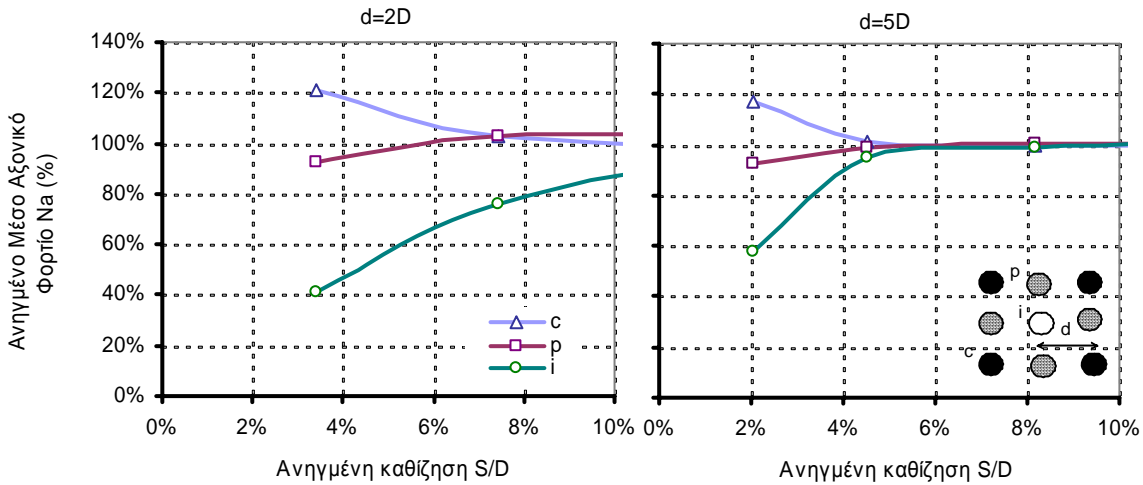
4.5.4 Κατανομή του φορτίου στους πασσάλους της ομάδας

Σύμφωνα με όσα αναφέρονται στην παράγραφο 4.4.4 οι επιμέρους πάσσαλοι ομάδας πασσάλων επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με τη γεωμετρική θέση που κατέχουν στην ομάδα. Για την καλύτερη διερεύνηση και κατανόηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης στους επιμέρους πασσάλους πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των αποτελεσμάτων της εκτενούς τριδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης σε αμμώδη εδάφη για πασσάλους πακτωμένης κεφαλής, καθώς και για ομάδες για συγκεκριμένων διαστάσεων κεφαλόδεσμο, κατά παρόμοιο με τις αργίλους τρόπο.

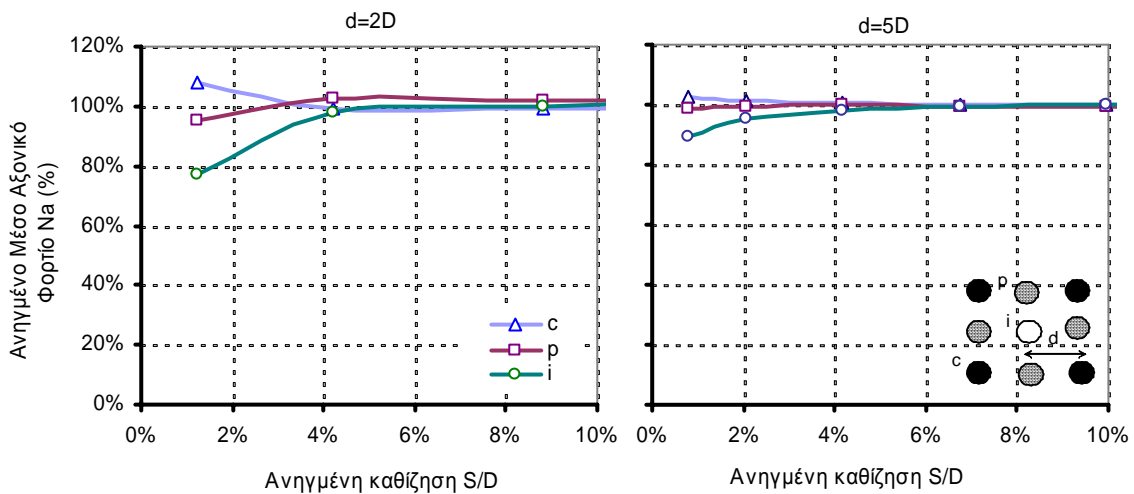
Στο σχήμα 4.31 δίνεται η κατανομή του φορτίου για έδαφος τύπου S1, στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της διάταξης 3*3, με σχετικό μήκος $L/D=25$ και αποστάσεις 2.0D και 5.0D. Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις ο κεντρικός πάσσαλος, *i*, αναλαμβάνει πολύ μικρότερο φορτίο από τους υπόλοιπους. Ειδικότερα ο κεντρικός πάσσαλος αναλαμβάνει φορτίο της τάξης του 40% του μέσου φορτίου στην περίπτωση ομάδας με σχετική αξονική απόσταση 2.0D. Όταν η αξονική απόσταση αυξάνεται σε 5.0D το ποσοστό αυτό αυξάνεται σε 60% του μέσου φορτίου, γεγονός που καταδεικνύει την ευεργετική δράση της αύξησης της αξονικής απόστασης στην ομοιομορφοποίηση της κατανομής του συνολικού φορτίου στους επιμέρους πασσάλους. Αντίθετα ο γωνιακός πάσσαλος επιβαρύνεται με φορτίο 20% μεγαλύτερο του μέσου. Η σύγκριση της απόκρισης του κεντρικού με το γωνιακό πάσσαλο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για επίπεδο καθίζησης 2%D, το οποίο πρακτικά αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο ο γωνιακός πάσσαλος επιδεικνύει τριπλάσια δυσκαμψία από τον κεντρικό. Η διαφορά αυτή μειώνεται αυξανόμενης της καθίζησης, ενώ όταν αυξηθεί και η αξονική απόσταση επέρχεται πλήρης ομοιομορφοποίηση της κατανομής για καθίζηση της τάξης του 10% ή και μικρότερη σε περίπτωση μεγάλων αξονικών αποστάσεων (σχήμα 4.31 για αξονική απόσταση 5.0D).

Ανάλογα αποτελέσματα παρατηρούνται και για τις ενδιάμεσες σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων για την ίδια πάντα κατηγορία εδάφους. Η αύξηση της πυκνότητας της άμμου οδηγεί σε συνεχή μείωση της απόκλισης απόκρισης των δύο αυτών χαρακτηριστικών πασσάλων. Στο σχήμα 4.32 παρουσιάζεται η κατανομή του φορτίου για έδαφος τύπου S3. Παρατηρείται ότι οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων είναι ιδιαίτερα μικρές και οι πάσσαλοι επιδεικνύουν πρακτικά την ίδια συμπεριφορά ανεξάρτητα από τη θέση που καταλαμβάνουν στην ομάδα. Η αύξηση της αξονικής απόστασης των πασσάλων οδηγεί και για την περίπτωση των

πυκνών άμμων στο ίδιο με την κατηγορία S1 ευεργέτημα ομοιομορφοποίησης της απόκρισης των επιμέρους πασσάλων, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο σχήμα 4.32.



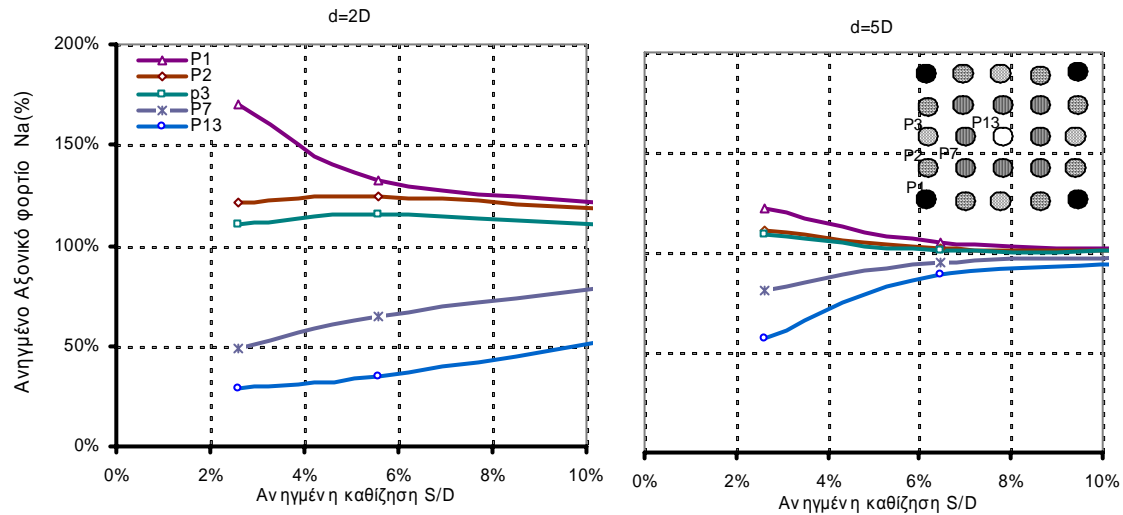
Σχήμα 4.31 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3, ανηγμένο μήκος L/D=25, κατηγορία εδάφους S1 και σχετική απόσταση 2.0D και 5.0D.



Σχήμα 4.32 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3, ανηγμένο μήκος L/D=25, κατηγορία εδάφους S3 και σχετική απόσταση 2.0D και 5.0D.

Στο σχήμα 4.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ομάδας σε διάταξη 5*5, σχετικό μήκος πασσάλων L/D=25, κατηγορία εδάφους μέσης πυκνότητας S2 και αξονικές αποστάσεις 2.0D και 5.0D. Η σύγκριση των σχημάτων 4.32, το οποίο αντιστοιχεί σε διάταξη 3*3 με το σχήμα 4.33, το οποίο αντιστοιχεί σε πολυπληθέστερη ομάδα καταδεικνύει ότι η αύξηση του αριθμού των πασσάλων επιβαρύνει την απόκλιση της απόκρισης των επιμέρους πασσάλων. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του σχήματος 4.33 οδηγεί σε ταυτόσημο με τα προηγούμενα συμπέρασμα ότι η αύξηση της αξονικής απόστασης των πασσάλων οδηγεί σε ομοιομορφοποίηση της

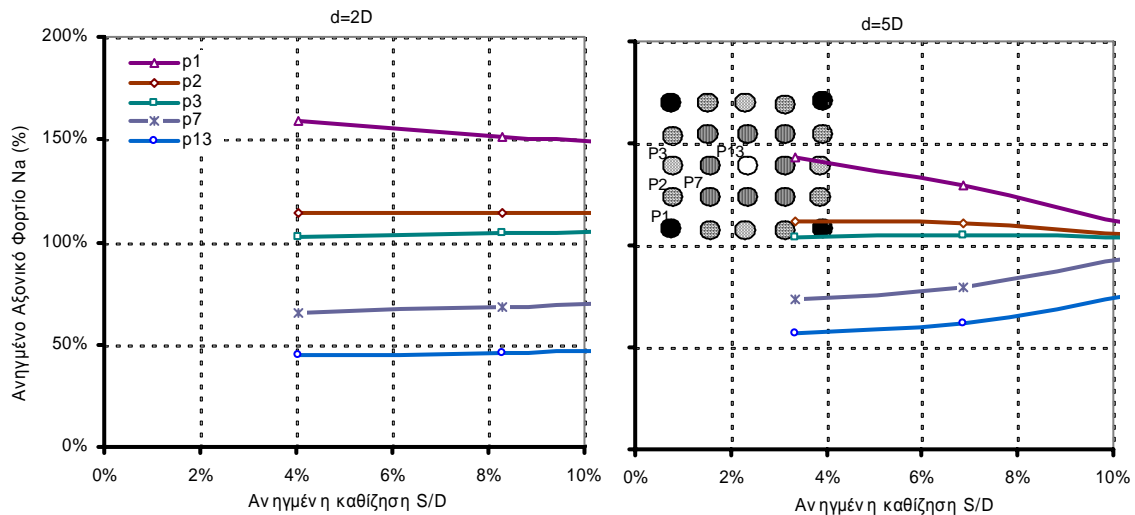
απόκρισης των χαρακτηριστικών πασσάλων.



Σχήμα 4.33 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 5*5, ανηγμένο μήκος $L/D=25$, κατηγορία εδάφους S2 και σχετική απόσταση 2.0D και 5.0D.

Τέλος εξετάζεται η επιρροή του μήκους των πασσάλων στην απόκριση των χαρακτηριστικών πασσάλων των διαφόρων ομάδων. Στο σχήμα 4.34 δίνονται τα αποτελέσματα για την ίδια ακριβώς περίπτωση του σχήματος 4.33, με μόνη διαφορά την αύξηση του σχετικού μήκους των πασσάλων από $L/D=25$ σε $L/D=50$. Παρατηρείται ότι η απόκριση της απόκρισης των χαρακτηριστικών πασσάλων και ειδικότερα του κεντρικού και του γωνιακού είναι μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση με μικρότερο μήκος πασσάλων. Ειδικότερα για την ομάδα με αξονική απόσταση 2.0D και για καθίζηση της τάξης του 4% ο γωνιακός πάσσαλος επιβαρύνεται φορτίου κατά 50% μεγαλύτερο από το μέσο φορτίο, ενώ αντίθετα ο κεντρικός πάσσαλος αναλαμβάνει μόλις το 50% του μέσου φορτίου. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για τη δεδομένη τιμή καθίζησης ο γωνιακός πάσσαλος εμφανίζεται με τριπλάσια δυσκαμψία από αυτήν του κεντρικού. Η διαφορά αυτή ανεπαίσθητα και μόνο μειώνεται αυξανόμενης της καθίζησης. Παρόμοια συμπεριφορά επιδεικνύει αρχικά και η αντίστοιχη ομάδα με αξονική απόσταση 5.0D, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή παρατηρείται αισθητή σύγκλιση αυξανόμενης της καθίζησης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και στην περίπτωση των αμμωδών εδαφών η μεταβολή της απόκρισης των επιμέρους πασσάλων συναρτήσει της αξονικής απόστασης μεταξύ τους. Η σύγκριση αυτή σε διάγραμμα φορτίου-αξονικής απόστασης μπορεί να γίνει για δεδομένο επίπεδο καθίζησης. Δεδομένου ότι το ενδιαφέρον ανάλυσης και ποσοτικοποίησης της αλληλεπίδρασης εστιάζεται κατά κύριο λόγο στο εύρος των φορτίων λειτουργίας, για μπορέσουν να αποτιμηθούν οι επιπτώσεις στην ανωδομή, παρουσιάζεται η απόκριση των πασσάλων συναρτήσει της αξονικής απόστασης για φορτίο που αντιστοιχεί σε καθίζηση 3% της διαμέτρου.

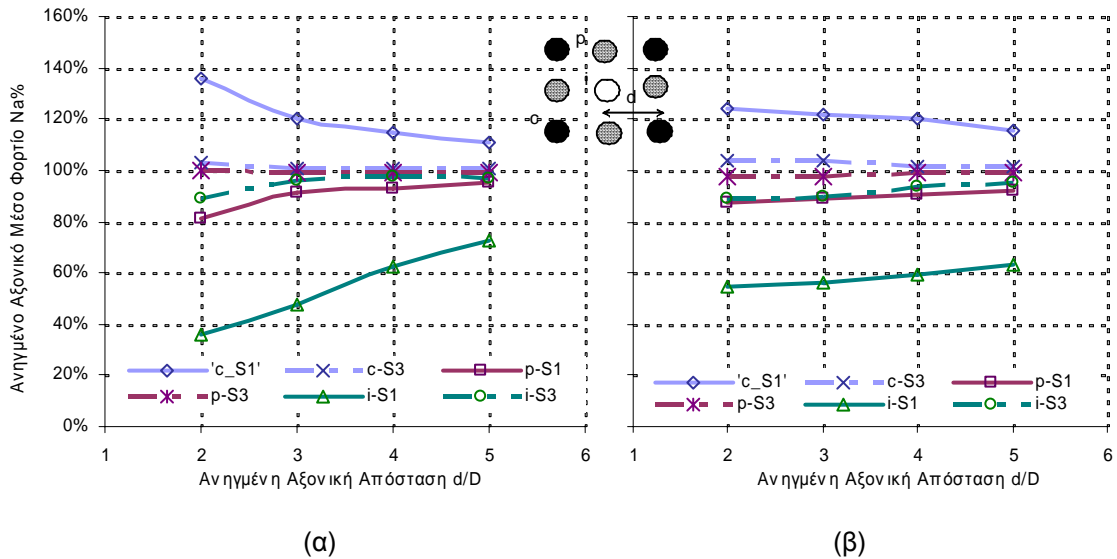


Σχήμα 4.34 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 5*5, ανηγμένο μήκος $L/D=50$, κατηγορία εδάφους S2 και σχετική απόσταση 2.0D και 5.0D.

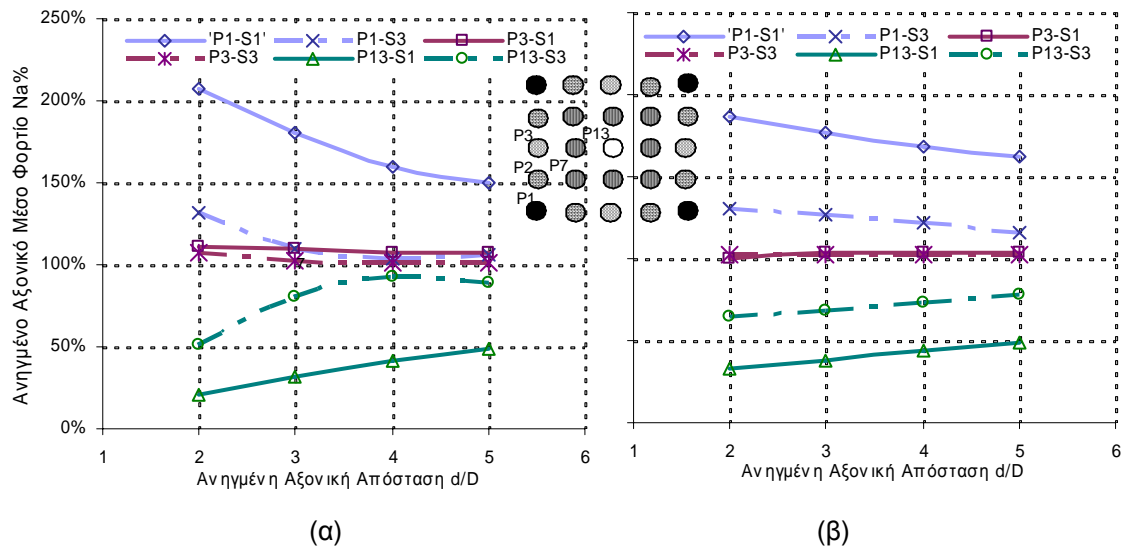
Με ελάχιστες εξαιρέσεις ειδικών περιπτώσεων η καθίζηση αυτή αποτελεί το άνω όριο ανάληψης του φορτίου λειτουργίας, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις η καθίζηση που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο είναι αισθητά μικρότερη (περίπτωση πολύ σιφρών έως σκληρών αργίλων και αμμωδών εδαφών με μέση έως σχετικά μεγάλη πυκνότητα). Στο σχήμα 4.35(α) δίνεται η μεταβολή του ανηγμένου αναλαμβανόμενου φορτίου για διάταξη 3*3, με $L/D=25$, για διάφορες σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων, για τις δύο ακραίες κατηγορίες S1 και S3 και για καθίζηση 3%D. Ως γενικό συμπέρασμα προκύπτει και από τα συγκεκριμένα αποτελέσματα ότι η αύξηση της αξονικής απόστασης οδηγεί σε ομοιομορφοποίηση της απόκρισης των χαρακτηριστικών πασσάλων. Η μεγαλύτερη απόκλιση απόκρισης αντιστοιχεί στις χαλαρές άμμους ενώ στις πολύ πυκνές άμμους η απόκλιση είναι ιδιαίτερα μικρή με συγκλίνουσα μορφή αυξανόμενης της αξονικής απόστασης. Παρόμοια διαγράμματα δίνονται στο σχήμα 4.36 για τη διάταξη 5*5, όπως παρόμοια είναι και τα αποτελέσματα. Μόνη σημαντική διαφορά αποτελεί το γεγονός ότι η τιμή της απόκλισης της απόκρισης των χαρακτηριστικών πασσάλων είναι αισθητά μεγαλύτερη, με παρόμοια εντούτοις καμπύλη σύγκλισης με την αύξηση της αξονικής απόστασης.

Η κατανομή του επιβαλλόμενου φορτίου στους επιμέρους πασσάλους όλων των ομάδων για τις οποίες πραγματοποιήθηκε τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση παρουσιάζεται αναλυτικά σε ειδικά διαγράμματα στο Παράρτημα Β της παρούσας.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας παραγράφου με τα αντίστοιχα για αργιλικούς σχηματισμούς, όπως αυτά παρατίθενται και σχολιάζονται συνοπτικά στην παράγραφο 4.4.4, καθώς και σε αναλυτικά διαγράμματα στο Παράρτημα Β, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στη διαφοροποίηση της απόκρισης των χαρακτηριστικών πασσάλων είναι ιδιαίτερα πιο έντονες στις περιπτώσεις των αργιλικών εδαφών.



Σχήμα 4.35 Σύγκριση καμπυλών απόκρισης ανηγμένου φορτίου-καθίζησης πασσάλων, για τύπο εδάφους S1 και S3, διάταξη 3*3 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων σε ανηγμένη καθίζηση 3%, με ανηγμένο μήκος (α) L/D=25 και (β) L/D=50.



Σχήμα 4.36 Σύγκριση καμπυλών απόκρισης ανηγμένου φορτίου-καθίζησης πασσάλων, για τύπο εδάφους S1 και S3, διάταξη 5*5 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων σε ανηγμένη καθίζηση 3%, με ανηγμένο μήκος (α) L/D=25 και (β) L/D=50.

4.5.5 Πρόβλεψη απόκρισης ομάδας πασσάλων

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης και για την περίπτωση των αμμωδών εδαφών επιβεβαιώνουν τη θεώρηση ότι η απόκριση ομάδας πασσάλων προσομοιάζει, ως προς τη μορφή με αυτή του μεμονωμένου πασσάλου. Κατά παρόμοιο εντούτοις τρόπο με τα αργιλικά εδάφη η δυσκαμψία της ομάδας δεν μπορεί να προκύψει από το απλό γινόμενο της δυσκαμψίας του μεμονωμένου πασσάλου επί τον αριθμό των πασσάλων της ομάδας. Για τον προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας

από την αντίστοιχη του μεμονωμένου πασσάλου επιβάλλεται η χρήση συντελεστή επαύξησης καθιζήσεων τουλάχιστον για μικρά επίπεδα καθιζήσεων. Η τιμή του συντελεστή αυτού εξαρτάται, σύμφωνα με όσα έχουν μέχρι τώρα παρουσιασθεί, από τον αριθμό των πασσάλων, τη διάταξη τους, όπως αυτή καθορίζεται από τον αριθμό των στηλών και των γραμμών των πασσάλων, καθώς επίσης και από το επίπεδο φόρτισης που καθορίζει για κάθε ομάδα και είδος εδάφους την εκάστοτε καθίζηση.

Η δυνατότητα πρόβλεψης της απόκρισης ομάδας πασσάλων συναρτήσει της απόκρισης του αντίστοιχου μεμονωμένου αποτελεί ζητούμενο με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Εφαρμόζεται κατά συνέπεια η ίδια με την παράγραφο 4.4.5 μεθοδολογία και ειδικότερα η χρήση της προταθείσας εξίσωσης προσδιορισμού του συντελεστή επαύξησης καθιζήσεων ομάδας πασσάλων. Χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση των αμμωδών εδαφών οι προσδιορισθείσες τιμές των παραμέτρων Α, Β, C και Ε. Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά για τα επίπεδα καθιζήσεων που αντιστοιχούν στη λειτουργικότητα ενώ η απόκλιση μεγαλώνει όσο αυξάνει η καθίζηση. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η απόδοση της ομάδας στα αμμώδη εδάφη ξεπερνά την τιμή της μονάδας και ιδιαίτερα όσο η πυκνότητα των αμμωδών εδαφών αυξάνει. Ειδικότερα στα πολύ πυκνά εδάφη η αντίσταση αιχμής εμφανίζει συνεχή και ιδιαίτερα έντονη, σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους εδαφών, αύξηση, όπως χαρακτηριστικά αποτυπώνεται στα σχήματα 4.23 και 4.24 για τους μεμονωμένους πασσάλους και στο σχήμα 4.27 για χαρακτηριστική διάταξη ομάδας πασσάλων. Μετά από σχετική διερεύνηση διαπιστώθηκε ότι η προτεινόμενη εξίσωση δεν βρίσκει πεδίο εφαρμογής για την περίπτωση πολύ πυκνής άμμου, κατά κύριο λόγο λόγω της απόκρισης της αντίστασης αιχμής, όπως τεκμηριώνεται από σχετικές αναλύσεις διστρωματικών εδαφών στην επόμενη παράγραφο. Αντίθετα για τις περιπτώσεις χαλαρών και μέσης πυκνότητας αμμωδών εδαφών η εφαρμογή της εξίσωσης οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα με ελαφρά δυσμενέστερο ποσοστό ακρίβειας σε σχέση με τις αργίλους.

Ας σημειωθεί ότι η χρήση κοινής εξίσωσης πρόβλεψης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον δεδομένου ότι δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής σε πολυστρωματικά εδάφη. Σημειώνεται ακόμη ότι η κατασκευή πασσάλων σε πολύ πυκνά αμμώδη εδάφη δεν βρίσκει συχνό πεδίο εφαρμογής δεδομένου ότι η διατμητική αντοχή της κατηγορίας αυτής είναι ιδιαίτερα υψηλή, οι παράμετροι συμπίεστότητας επίσης είναι ιδιαίτερα υψηλές με αποτέλεσμα να δίνεται η δυνατότητα θεμελίωσης με επιφανειακές θεμελιώσεις. Σε κάθε περίπτωση η εφαρμογή της προτεινόμενης εξίσωσης για την περίπτωση πολύ πυκνών αμμωδών εδαφών οδηγεί σε πιο συντηρητική πρόβλεψη από την πραγματική συμπεριφορά ομάδας πασσάλων και υπό την έννοια αυτή θα μπορούσε, η πρόβλεψη αυτή, να αποτελέσει ένα ικανοποιητικό κάτω όριο, σε περίπτωση έλλειψης ακριβέστερης πρόβλεψης.

Στον πίνακα 4.7 συνοψίζονται οι τιμές μέσου σφάλματος με εφαρμογή της μεθοδολογίας δυσκαμψίας και ενέργειας, όπως αυτές αναλυτικά επεξηγούνται στην

παράγραφο 4.4.5 για το σύνολο των 40 περιπτώσεων που αντιστοιχούν στις κατηγορίες S1 και S2.

L/D	d	S1				S2			
		25		50		25		50	
		Wr (%)	Ws (%)	Wr (%)	Ws (%)	Wr (%)	Ws (%)	Wr (%)	Ws (%)
2x3	2D	5,55	9,02			10,60	4,28		
	3D	7,81	6,62			11,90	10,07		
	4D	6,98	5,86			10,77	8,68		
	5D	18,13	12,72			15,5	12,22		
3x3	2D	13,20	7,80	12,50	13,72	4,00	1,54	16,63	15,92
	3D	7,82	6,02	6,00	5,33	1,59	1,29	11,17	10,39
	4D	7,55	5,75	3,72	3,06	0,80	0,55	8,26	7,68
	5D	6,3	5,48	2,57	1,95	1,9	2,43	12,5	12,09
5x5	2D	1,92	3,33	1,34	1,44	10,40	3,50	7,96	10,73
	3D	6,21	5,22	1,11	0,60	15,20	12,69	12,72	11,72
	4D	9,15	7,85	5,94	5,36	18,02	15,12	16,28	15,03
	5D	16,3	14,58	10,96	10,38	20,7	17,63	16,45	15,19

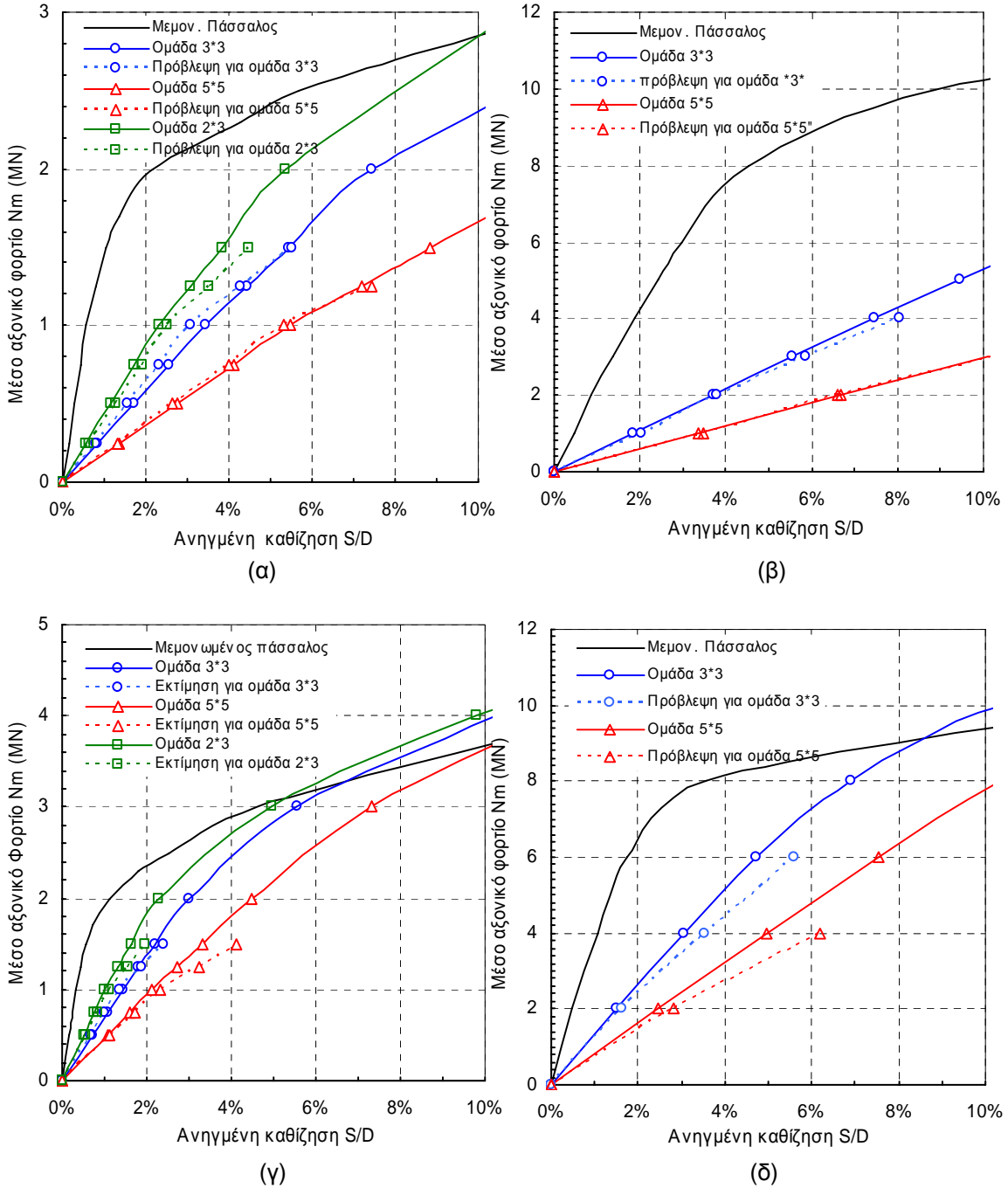
Πίνακας 4.7 Συνοπτικός πίνακας τιμών του μέσου σφάλματος της δυσκαμψίας και του σφάλματος της δυναμικής ενέργειας.

Στο σχήμα 4.37 παρουσιάζεται σύγκριση των καμπυλών απόκρισης διαφόρων ομάδων πασσάλων οι οποίες προέκυψαν μετά από τριδιάστατη αριθμητική ανάλυση με αυτές που προσδιορίζονται με εφαρμογή της εξίσωσης 4.9. Το μέσο σφάλμα για όλες τις περιπτώσεις είναι 8.5%, ενώ και πάλι παρατηρείται ότι το σφάλμα ελαχιστοποιείται όσο μικραίνει το επίπεδο της καθίζησης.

Στο παράρτημα Γ δίνονται όλα τα συγκριτικά διαγράμματα για το σύνολο των περιπτώσεων που εξετάσθηκαν.

4.6 Πρόβλεψη της απόκρισης για διστρωματικά εδάφη

Η χρήση του επαυξητικού συντελεστή R_a βρίσκει εφαρμογή με ικανοποιητική ακρίβεια σε όλους τους τύπους συνεκτικών και μη-συνεκτικών εδαφών πλην των πολύ πυκνών άμμων ή γενικά των εδαφών με μεγάλη δυσκαμψία όπου πρακτικά δεν απαιτείται η χρήση πασσάλων ως στοιχεία θεμελίωσης. Για να διερευνηθεί η αξιοπιστία της προταθείσας εξίσωσης 4.9 και για περιπτώσεις μη-ομογενών εδαφών εξετάστηκε η διάταξη 3*3 με σχετική απόσταση 3.0D για έξι επιπλέον διστρωματικές εδαφικές τομές και για ανηγμένο μήκος $L/D=25$ και 50. Συγκεκριμένα έγινε επιλογή από τους τύπους εδάφους που έχουν ήδη εξεταστεί, έτσι ώστε να συνδυάζεται αργιλικό έδαφος στην παράπλευρη επιφάνεια και αμμώδες στην αιχμή ή αντίστροφα.



Σχήμα 4.37 Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης (α) κατηγορία εδάφους S1, $d=2.0D$ και $L/D=25$ (β) κατηγορία εδάφους S1, $d=3.0D$ και $L/D=50$ (γ) κατηγορία εδάφους S2, $d=3.0D$ και $L/D=25$ (δ) κατηγορία εδάφους S2, $d=5.0D$ και $L/D=50$.

Οι εδαφικές τομές που προσομοιώθηκαν είναι οι εξής:

1. αμμώδες έδαφος τύπου S1 πλευρικά και αργιλικό τύπου C2 στην αιχμή και ανηγμένο μήκος $L/D=25$
2. αμμώδες έδαφος τύπου S2 πλευρικά και αργιλικό τύπου C1 στην αιχμή και

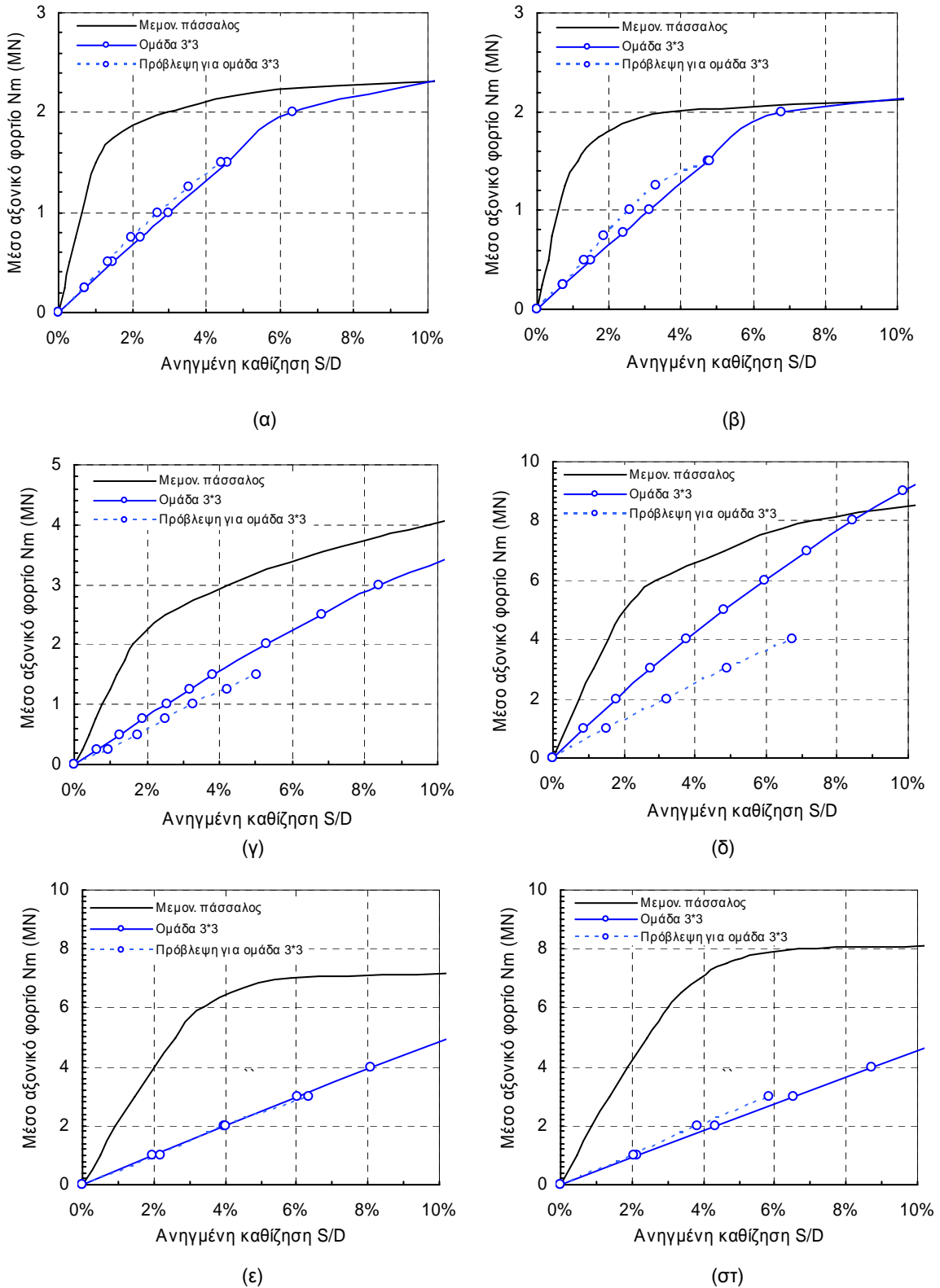
ανηγμένο μήκος $L/D=25$

3. αργιλικό έδαφος τύπου C1 πλευρικά και αμμώδες τύπου S2 στην αιχμή και ανηγμένο μήκος $L/D=25$
4. αργιλικό έδαφος τύπου C2 πλευρικά και αμμώδες τύπου S3 στην αιχμή και ανηγμένο μήκος $L/D=25$
5. αμμώδες έδαφος τύπου S1 πλευρικά και αργιλικό τύπου C2 στην αιχμή και ανηγμένο μήκος $L/D=50$
6. αμμώδες έδαφος τύπου S2 πλευρικά και αργιλικό τύπου C1 στην αιχμή και ανηγμένο μήκος $L/D=50$

Στο σχήμα 4.38 παρουσιάζονται τα διαγράμματα απόκρισης των ομάδων όπως υπολογίστηκαν κάνοντας χρήση του συντελεστή R_a και όπως διεξήχθησαν από τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC^{3D}. Η απόκλιση μεταξύ των δύο μεθοδολογιών είναι πολύ μικρή και ειδικά για καθιζήσεις που αντιστοιχούν στο φορτίο λειτουργίας οι δύο μεθοδολογίες σχεδόν ταυτίζονται. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση όπου οι αιχμές των πασσάλων συναντούν πολύ πυκνή άμμο ενώ πλευρικά υπάρχει μέτριας στιφρότητας άργιλος. Η διαφοροποίηση αυτή ήταν αναμενόμενη όπως και στις καθαρές άμμους λόγω της απόκρισης της αντίστασης αιχμής η οποία συνεχίζει εντόνως να αυξάνεται συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου και η απόδοση της ομάδας ξεπερνά τη μονάδα. Η πρόβλεψη ωστόσο της απόκρισης της ομάδας εξακολουθεί να είναι πιο συντηρητική από την πραγματική συμπεριφορά της ομάδας και υπό την έννοια αυτή θα μπορούσε, να αποτελέσει ένα ικανοποιητικό κάτω όριο, σε περίπτωση έλλειψης ακριβέστερης πρόβλεψης.

Τα συμπεράσματα αυτά μαζί με τα αποτελέσματα που έχουν ήδη διεξαχθεί για τα ομογενή εδάφη, είναι ενθαρρυντικά για την ευρεία και γενική χρήση του συντελεστή R_a .

Για περιπτώσεις πασσάλων που χαρακτηρίζονται ως καθαρά πάσσαλοι αιχμής ο συντελεστής R_a λαμβάνει τιμή ίση ή μικρότερης της μονάδας, αφού οι συνέπειες της αλληλεπίδρασης ως προς την απόκριση της ομάδας είναι αμελητέες. Στις περιπτώσεις αυτές, όπως και στην περίπτωση της πολύ πυκνής άμμου τύπου S3, η χρήση της εξίσωσης 4.9 για την πρόβλεψη της απόκρισης ομάδας πασσάλων δεν βρίσκει ικανοποιητική εφαρμογή. Χαρακτηριστική περίπτωση τέτοιων ομάδων πασσάλων αποτελούν και οι ομάδες με έδραση σε βραχώδες υπόβαθρο, οι οποίες αντιμετωπίζονται με διαφορετικές μεθοδολογίες από αυτές των πασσάλων μέσα σε εδαφικά υλικά και αποτελούν αντικείμενο του επόμενου κεφαλαίου.



Σχήμα 4.38 Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για διστρωματικά εδάφη σε διάταξη 3*3 και d=3.0D
 (α) αμμώδες έδαφος S1 πλευρικά και αργιλικό C2 στην αιχμή L/D=25
 (β) αμμώδες έδαφος S2 πλευρικά και αργιλικό C1 στην αιχμή L/D=25
 (γ) αργιλικό έδαφος C1 πλευρικά και αμμώδες S2 στην αιχμή L/D=25
 (δ) αργιλικό έδαφος C2 πλευρικά και αμμώδες S3 στην αιχμή L/D=25
 (ε) αμμώδες έδαφος S1 πλευρικά και αργιλικό C2 στην αιχμή L/D=50
 (στ) αμμώδες έδαφος S2 πλευρικά και αργιλικό C1 στην αιχμή L/D=50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

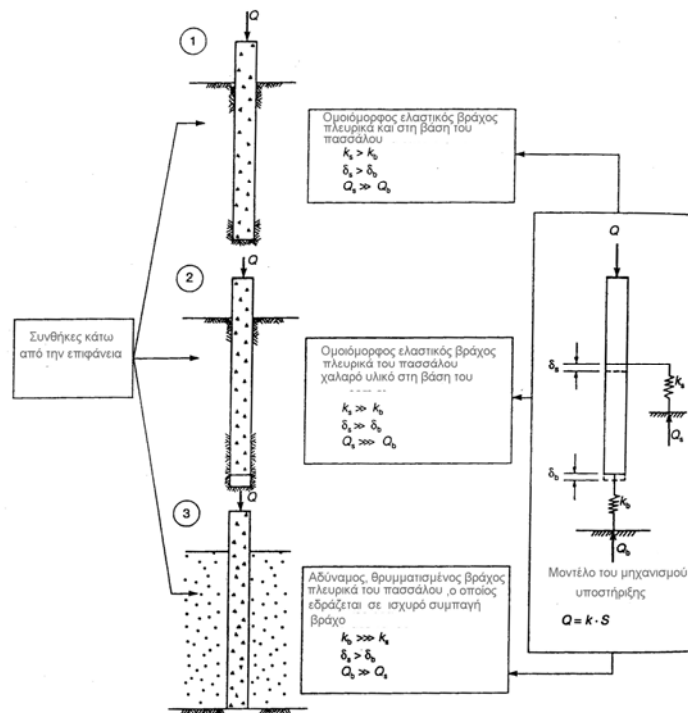
Διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων με έδραση σε βραχώδες υπόβαθρο

5.1 Γενικά

Αντικείμενο του κεφαλαίου αποτελεί η διερεύνηση της συμπεριφοράς ομάδας πασσάλων με έδραση σε βραχώδες υπόβαθρο και πλευρική παρουσία εδαφικών σχηματισμών. Αποτελεί συνήθη τακτική οι εδραζόμενοι σε βραχώδεις σχηματισμούς πάσσαλοι να θεωρούνται ως καθαρά πάσσαλοι αιχμής. Κατά την απλουστευτική αυτή παραδοχή αγνοείται η όποια συνεισφορά της πλευρικής τριβής, η οποία μπορεί υπό συνθήκες να είναι σημαντική. Κύρια αιτιολογία για την απλουστευτική αυτή θεώρηση αποτελεί η δυσκολία εκτίμησης του βαθμού κινητοποίησης της πλευρικής αντίστασης, η οποία βρίσκεται σε πλήρη εξάρτηση από την κινηματική του προβλήματος (ικανοποιητική καθίζηση πασσάλου για την ανάπτυξη πλευρικής αντίστασης) και τη δυσκαμψία του περιβάλλοντος εδάφους. Ακραία περίπτωση αποτελεί η έδραση σε ασυμπύεστο πρακτικά βράχο και πλευρικό έδαφος πολύ μικρής διατμητικής αντοχής και μεγάλης συμπίεστότητας. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση αυτή η μικρή διατμητική παραμόρφωση που προκαλείται στο έδαφος κατά μήκος της επιφάνειας του πασσάλου δεν επιτρέπει την ανάπτυξη διατμητικής αντίστασης. Κατά συνέπεια η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου αντιστοιχεί αποκλειστικά στην αντίσταση αιχμής. Κατά την αντίθετη περίπτωση εντούτοις, όπου ο βραχώδης σχηματισμός είναι ιδιαίτερα συμπίεστος και το υπερκείμενο έδαφος μεγάλης διατμητικής αντοχής, και ιδιαίτερα όταν αυτή αναπτύσσεται σε πολύ μικρή διατμητική παραμόρφωση, το ποσοστό της πλευρικής αντίστασης για μικρά επίπεδα φόρτισης δεν μπορεί να αγνοηθεί.

Στο σχήμα 5.1 απεικονίζεται η συμπεριφορά μεμονωμένου πασσάλου σε βραχώδες υπόβαθρο και η αντίστοιχη προσομοίωση του με μονοδιάστατα στοιχεία. Καθοριστικό παράγοντα, όπως αναφέρεται και ανωτέρω, αποτελεί ο λόγος δυσκαμψίας του ελατηρίου προσομοίωσης της αιχμής προς την αντίστοιχη της παράπλευρης αντίστασης. Για την απλούστευση του προβλήματος, οι Winterkom and Fang, υποδιαιρούν το πρόβλημα σε τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις, όπου θα μπορούσε κανείς να αγνοήσει την παράπλευρη αντίσταση ή την αντίσταση

αιχμής ανάλογα με το λόγο δυσκαμψιών των ελατηρίων και την εκδηλούμενη μετακίνηση πλευρικά ή στην αιχμή του πασσάλου. Θα πρέπει να τονισθεί ότι ο προσδιορισμός της δυσκαμψίας των ελατηριακών σταθερών αποτελεί ίσως το πλέον δύσκολο σημείο της ανάλυσης, όπως αυτή δίνεται στο σχήμα 5.1, δεδομένου ότι δεν συνιστά παρά απλουστευμένη περίπτωση ανάλυσης τύπου t-z. Πέραν από τη δυσκολία προσδιορισμού της δυσκαμψίας των ελατηρίων, στις περισσότερες των περιπτώσεων αυτές μεταβάλλονται ανάλογα με την παραμόρφωση (το επιβαλλόμενο κατ'ουσίαν φορτίο), ενώ στις ομάδες πασσάλων το όλο πρόβλημα περιπλέκεται ακόμη περισσότερο.

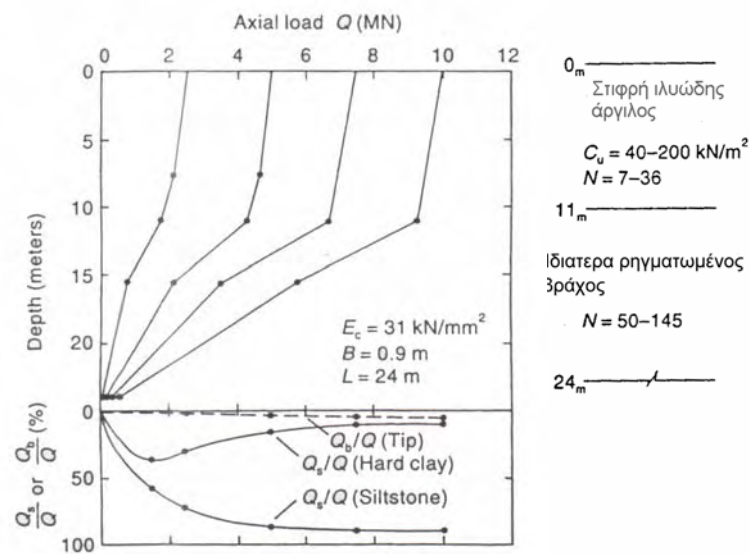


Σχήμα 5.1 Υποδιαίρεση του προβλήματος θεμελίωσης σε πασσάλου σε βράχο σε τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις (Winterkorn and Fang, 1975).

Στις θεμελιώσεις σε βράχο χρησιμοποιούνται συνήθως έγχυτοι πάσσαλοι, οι οποίοι κατασκευάζονται με διάνοιξη μέχρι το βραχώδες υπόβαθρο, στο οποίο διεισδύουν κατά ελάχιστο μήκος της τάξης των δύο διαμέτρων του πασσάλου. Η απόδοση των έγχυτων πασσάλων σε βράχο έχει μελετηθεί εργαστηριακά καθώς και με αναλυτικές μεθόδους μετά από απλοποίηση του προβλήματος (ελαστικός ημίχωρος). Η ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων και η ευρεία δυνατότητα χρήσης γρήγορων υπολογιστών επέτρεψε την αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος. Ο συνδυασμός της προσέγγισης αυτής με δοκιμαστικές φορτίσεις, ώστε να είναι δυνατή η επιβεβαίωση και ο έλεγχος των αποτελεσμάτων, απέτελεσε στην αρχή συνήθη πρακτική. Καθοριστικό παράγοντα κατά την προσέγγιση με αριθμητικές μεθόδους αποτελεί η απόκριση κατά μήκος της διεπιφάνειας βράχου-σκυροδέματος σύμφωνα με τους Ladanyi and Domingue (1980) και Pells et al. (1980).

Η διερεύνηση της επιρροής της γεωμετρίας των πασσάλων (αναλογία διαμέτρου προς μήκος) και των μέτρων συμπίεστικότητας του σκυροδέματος και του βραχώδους υποβάθρου απετέλεσε αντικείμενο αριθμητικής διερεύνησης για τους Rowe et al. (1978), Donald et al. (1980) και τους Rowe and Pells (1980). Κατά τις διερευνήσεις αυτές πραγματοποιείται απλοποίηση του προβλήματος με θεώρηση ενός και μόνο πασσάλου και εφαρμογή γραμμικής ελαστικότητας.

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμαστικών φορτίσεων που πραγματοποιήθηκαν σε έγχυτους πασσάλους οι οποίοι εδράζονται σε ιδιαίτερα ρηγματωμένο βράχο με υπερκείμενο σχηματισμό σιφρής ιλυώδους αργίλου, σε περιοχή της Σιγκαπούρης (Chang & Wong, 1987). Η συμπεριφορά του πασσάλου προσομοιάζει περισσότερο με την απόκριση έγχυτου πασσάλου σε εδαφικούς σχηματισμούς παρά στη γνωστή εικόνα που αντιστοιχεί σε πάσσαλο σε βράχο. Ειδικότερα, στο σχήμα 5.2 φαίνεται ότι το επιβαλλόμενο φορτίο κατανέμεται κατά κύριο λόγο και σχεδόν αποκλειστικά πλευρικά του πασσάλου, ενώ ελάχιστη είναι η συμβολή της αιχμής. Παρ'ότι η περίπτωση αυτή είναι ιδιαίτερη, είναι συχνές οι περιπτώσεις θεμελιώσεων σε κακής ποιότητας βράχο με υπερκείμενο σχηματισμό μεγάλης διατμητικής αντοχής, όπου η παράπλευρη αντίσταση αποτελεί υπολογίσιμο μέγεθος και η απλουστευτική παραδοχή αγνόησης του συνιστά ιδιαίτερα συντηρητική παραδοχή.



Σχήμα 5.2 Κατανομή φορτίου αιχμής Q_s και παράπλευρης επιφάνειας Q_b σε έγχυτους πασσάλους σε βράχο (Chang & Wong, 1987).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ανωτέρω ερευνητών οι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τη φέρουσα ικανότητα και εν γένει την απόκριση πασσάλων σε βράχο είναι οι ακόλουθοι:

- το ανηγμένο ως προς τη διάμετρο μήκος του πασσάλου

- οι τιμές των παραμέτρων παραμορφωσιμότητας του πλευρικού σχηματισμού και του υποκείμενου βραχώδους υποβάθρου
- η διατμητική αντοχή των σχηματισμών πλευρικά και στην αιχμή του πασσάλου
- η κατάσταση των πλευρικών τοιχωμάτων και της αιχμής όσον αφορά στην τραχύτητα, και η τυχόν παρουσία μπεντονίτη ή υλικών καταπτώσεων κατά μήκος της διεπιφάνειας πασσάλου και βραχώδους σχηματισμού
- η πιθανή στρωμάτωση του βραχώδους υποβάθρου και παρουσία στρωμάτων με διαφορετική αντοχή και μέτρα ελαστικότητας

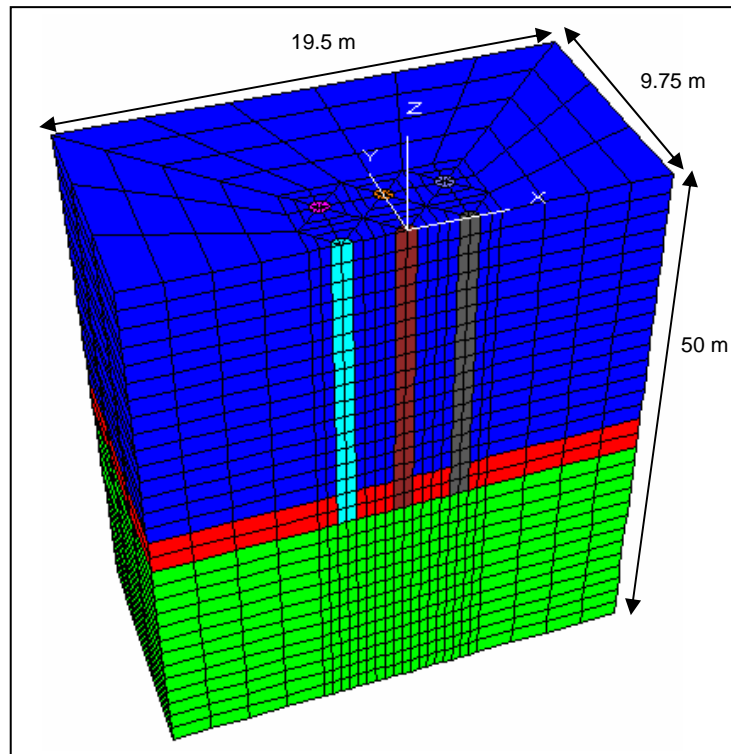
Με στόχο την ειδικότερη διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων με έδραση σε βράχο και την ποιοτική και ποσοτική αποτίμηση των παραγόντων που επηρεάζουν τόσο τη φέρουσα ικανότητα όσο και την απόκριση της ομάδας και των επιμέρους πασσάλων πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση της οποίας τα αποτελέσματα παρατίθενται στις επόμενες παραγράφους.

5.2 Παραμετρική αριθμητική ανάλυση

Κατά την παραμετρική αριθμητική ανάλυση εφαρμόστηκε η ίδια μεθοδολογία προσομοίωσης και επιλύσεων με αυτήν που αναφέρεται για τα αργιλικά εδάφη στην παράγραφο 4.4. Η ανάλυση περιλαμβάνει ομάδα πασσάλων 3*3 σε αξονική απόσταση 3.0D καθώς και ομάδα 2*2 με ίδια αξονική απόσταση πασσάλων. Η διάμετρος των πασσάλων είναι πάντα $D=1$ m, το δε μήκος τους 17 m. Οι πάσσαλοι δεισδύουν κατά 2.0D εντός του βραχώδους σχηματισμού. Ο υπερκείμενος σχηματισμός είναι αργιλικός ή αμμώδης σημαντικής διατμητικής αντοχής ώστε να μην οδηγεί σε πρακτικά αμελητέο ποσοστό πλευρικής αντίστασης και να δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού του ορίου πέραν του οποίου η αντίσταση αιχμής θα μπορούσε να θεωρηθεί ως η συνολική αντίσταση πασσάλου και να αγνοηθεί η παράπλευρη αντίσταση.

Στο σχήμα 5.3 δίνεται ο κάρναβος πεπερασμένων διαφορών για την ομάδα 3*3 στη χαρακτηριστική τομή $y=0$, ο οποίος περιλαμβάνει 9703 κόμβους και 10080 στοιχεία. Για τις δύο αυτές ομάδες πασσάλων και για μήκος 17 m πραγματοποιούνται επιλύσεις θεωρώντας το υπερκείμενο έδαφος αργιλικό με διατμητική αντοχή αυξανόμενη με το βάθος. Παρόμοιες επιλύσεις πραγματοποιούνται επίσης για θεώρηση αμμώδους υπερκείμενου εδαφικού σχηματισμού. Για να διερευνηθεί και η επίδραση του πάχους της εδαφικής στρώσης πλευρικά του πασσάλου διερευνήθηκε συμπληρωματικά και μια τρίτη περίπτωση υπεδάφους. Στην ανάλυση αυτή θεωρείται ότι το υπερκείμενο του βραχώδους σχηματισμού έδαφος είναι αργιλικό, ίδιας σύστασης με αυτό που έχει ήδη αναφερθεί, με μόνη διαφορά το πάχος της αργιλικής στρώσης που φτάνει τα 28 m και μήκος πασσάλου 30 m. Για τις τρεις αυτές εδαφικές τομές πραγματοποιήθηκαν και οι αντίστοιχες επιλύσεις μεμονωμένου πασσάλου

ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα των ομάδων και του μεμονωμένου. Στον Πίνακα 5.1 συνοψίζονται οι εδαφικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν. Το μέτρο μεταβολής όγκου K και το μέτρο διάτμησης G της αργίλου αυξάνονται με το βάθος, ενώ της αμμώδους στρώσης και του βραχώδους υποβάθρου θεωρούνται αμετάβλητα.



Σχήμα 5.3 Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών για ομάδα 9 πασσάλων μήκους 17 m, στην εγκάρσια $y=0$.

	K (MPa)	G (MPa)	γ (κN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Αργιλική στρώση	$2.167 \cdot G$	$40 \cdot c$	19	$60 + (140/15)z$	-
Αμμώδης στρώση	47.5	22	19	-	35
Βραχώδες υπόβαθρο	5555	4166	25	3500	40

Πίνακας 5.1 Παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας του βραχώδους υποβάθρου και των υπερκείμενων εδαφικών σχηματισμών.

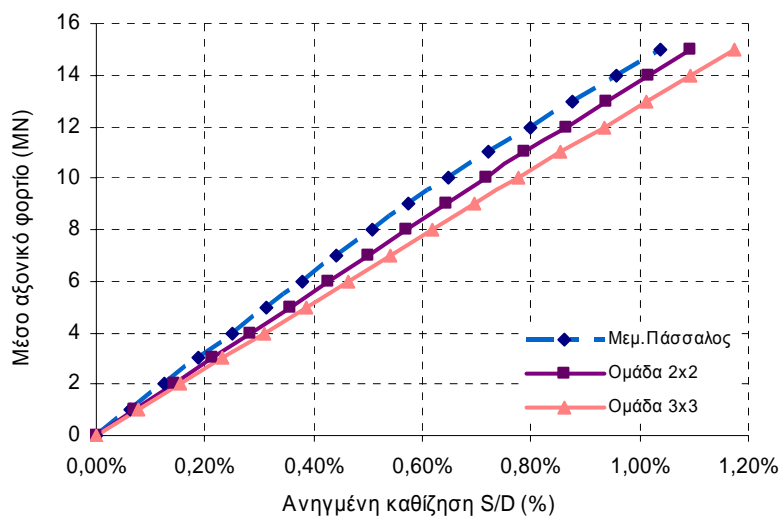
Για την προσομοίωση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του εδάφους χρησιμοποιήθηκε ο καταστατικός νόμος Mohr-Coulomb. Ο πάσσαλος θεωρήθηκε ότι έχει γραμμική ελαστική συμπεριφορά με λόγο Poisson $\nu=0.2$ και μέτρο ελαστικότητας $E=42000$ MPa. Η διαδικασία προσομοίωσης περιλαμβάνει ως πρώτο βήμα την εισαγωγή του αρχικού εντατικού πεδίου και ακολουθεί η φόρτιση κατά βήματα με στόχο τον προσδιορισμό της καμπύλης απόκρισης φορτίου-καθίζησης. Στην ομάδα των πασσάλων εφαρμόζεται συνολικό φορτίο N στον κεντρικό πάσσαλο. Για να προσομοιωθεί το γεγονός ότι οι πάσσαλοι είναι πακτωμένοι σε ενιαίο κεφαλόδεσμο,

δεσμεύτηκαν οι βαθμοί ελευθερίας στους κόμβους των κεφαλών των πασσάλων κατά την οριζόντια διεύθυνση, ενώ όλοι οι κόμβοι της κεφαλής ορίστηκαν ως εξαρτώμενοι (slave) του κεντρικού. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται μηδενική οριζόντια μετακίνηση και ίδια καθίζηση για όλους τους πασσάλους.

5.3 Αριθμητικά αποτελέσματα

5.3.1 Απόκριση ομάδας και μεμονωμένου πασσάλου

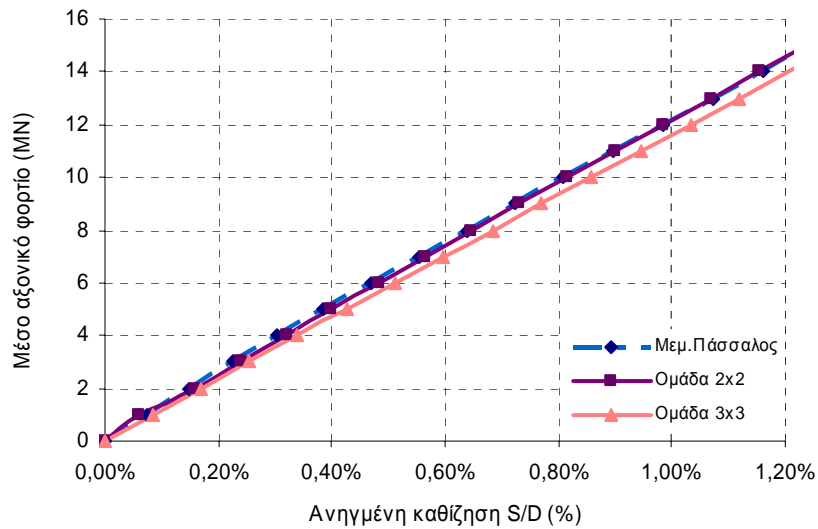
Στα σχήματα 5.4, 5.5 και 5.6 δίνεται η απόκριση των ομάδων και του μεμονωμένου πασσάλου. Ειδικότερα στο σχήμα 5.4 δίνονται οι καμπύλες απόκρισης των ομάδων 2*2 και 3*3 καθώς και του μεμονωμένου πασσάλου, για πασσάλους μήκους 17 m, όπου τα πρώτα 15 m του υπεδάφους αποτελούνται από αργιλικό σχηματισμό ενώ το υπόβαθρο από βραχώδη σχηματισμό. Παρατηρείται μικρή μόνο διαφοροποίηση των ομάδων από το μεμονωμένο πάσσαλο, σε σχέση πάντα με τις ομάδες πασσάλων σε εδαφικούς σχηματισμούς. Η ομάδα 3*3 εμφανίζεται, όπως άλλωστε αναμένεται πιο εύκαμπτη από την ομάδα 2*2. Η μείωση οφείλεται στην αλληλεπίδραση των πασσάλων όπου, όπως τεκμηριωμένα αναφέρεται στις προηγούμενες παραγράφους, για ίδιας μορφής διάταξη και αξονική απόσταση η αύξηση του αριθμού των πασσάλων οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση της δυσκαμψίας.



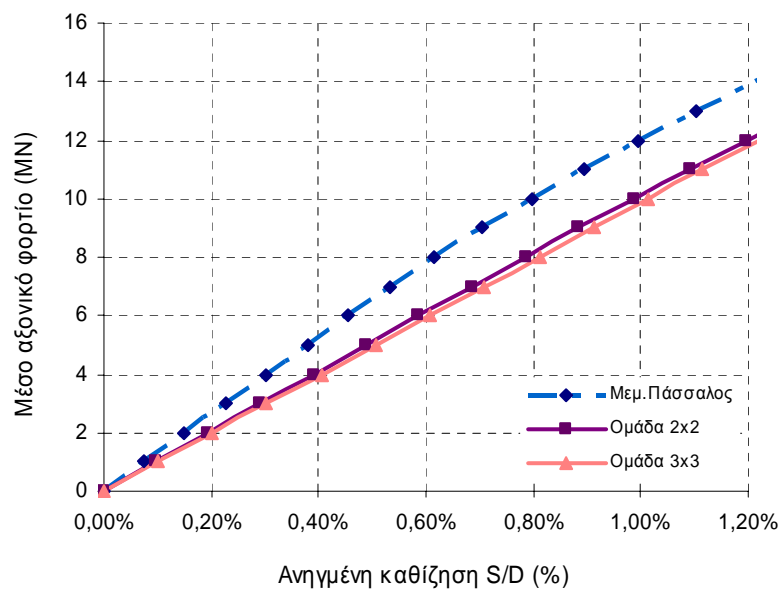
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα απόκρισης ομάδας διάταξης 2*2 και 3*3 και του μεμονωμένου πασσάλου για υπερκείμενο αργιλικό έδαφος πάχους 15 m.

Στην περίπτωση όπου ο ανώτερος εδαφικός σχηματισμός αποτελείται από αμμώδες έδαφος για το ίδιο μέσο αξονικό φορτίο οι αντίστοιχες καμπύλες ταυτίζονται, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5, και κατά συνέπεια η επίπτωση της αλληλεπίδρασης στην ομάδα είναι πρακτικά αμελητέα. Το γεγονός αυτό δεν θα πρέπει να αποδοθεί στη σύσταση του εδάφους αλλά στα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής της συγκεκριμένης αμμώδους στρώσης, τα οποία είναι υποδεέστερα των αντιστοιχών της

αργιλικής στρώσης. Η σύγκριση της απόκρισης των ομάδων πασσάλων σε βραχώδες υπόβαθρο με τις αντίστοιχες ομάδες σε εδαφικούς σχηματισμούς καταδεικνύει τις πολύ μικρότερες επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων. Το γεγονός θα πρέπει να αποδοθεί στην έδραση σε βραχώδες υπόβαθρο και για την ακριβέστερη επεξήγηση του θα πρέπει να αναλυθεί το επιμέρους ποσοστό πλευρικής αντίστασης και αντίστασης αιχμής κατά τα διάφορα βήματα φόρτισης. Αξίζει να σημειωθεί ακόμη ότι το οριακό φορτίο παραμένει πρακτικά αμετάβλητο ανεξάρτητα από τη σύσταση του εδάφους πάνω από το βράχο, γεγονός που συνηγορεί υπέρ της άποψης ότι η αντίσταση του πασσάλου οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αντίσταση αιχμής.



Σχήμα 5.5 Διάγραμμα απόκρισης ομάδας διάταξης 2*2 και 3*3 και του μεμονωμένου πασσάλου για υπερκείμενο αμμώδες έδαφος πάχους 15 m.



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα απόκρισης ομάδας διάταξης 2*2 και 3*3 και του μεμονωμένου πασσάλου για υπερκείμενο αργιλικό έδαφος πάχους 28 m.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μεγαλύτερο υπερκείμενο πάχος αργιλικού σχηματισμού, ήτοι 28 m, η απόκριση των πασσάλων διαφοροποιείται. Το φορτίο που φέρει πλέον η ομάδα είναι μικρότερο, ενώ η διαφοροποίηση μεταξύ μεμονωμένου πασσάλου και ομάδας είναι πιο έντονη. Το γεγονός ότι αν και οι πάσσαλοι έχουν μεγαλύτερο μήκος εμφανίζουν μικρότερη δυσκαμψία για μικρές καθιζήσεις θα πρέπει να αποδοθεί στο γεγονός ότι μεγαλύτερο μέρος του πασσάλου βρίσκεται μέσα σε αργιλικό έδαφος και επομένως η τριβή αναλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό.

Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι για την απόκριση ομάδων πασσάλων με έδραση σε βραχώδη σχηματισμό οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στη φέρουσα ικανότητα και στη δυσκαμψία ομάδας πασσάλων είναι ιδιαίτερα περιορισμένες και ότι οι συντελεστές φέρουσας ικανότητας και δυσκαμψίας παίρνουν πρακτικά μοναδιαία τιμή.

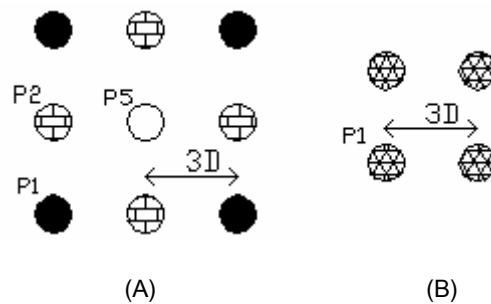
5.3.2 Διερεύνηση κατανομής του φορτίου

Η κατανομή του φορτίου στους επιμέρους πασσάλους και περαιτέρω σε αντίσταση αιχμής και τριβής μπορεί να αποτυπώσει το μηχανισμό λειτουργίας της ομάδας και να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα ως προς τον προσδιορισμό του οριακού φορτίου και της δυσκαμψίας τυχούσας ομάδας με έδραση σε βραχώδες υπόβαθρο. Τα συμπεράσματα μπορούν να αποτελέσουν κατευθυντήριες γραμμές για τις απλές περιπτώσεις έργων, όπου η τριδιάστατη ανάλυση επιβαρύνει δυσανάλογα το κόστος σχεδιασμού και επιμηκύνει το χρόνο εκπόνησης της σχετικής μελέτης. Για την ενδελεχή ανάλυση του μηχανισμού διερευνήθηκε η κατανομή του συνολικού φορτίου της ομάδας στους χαρακτηριστικούς πασσάλους που την αποτελούν, όπως αυτοί απεικονίζονται στο σχήμα 5.7. Συγκεκριμένα στην ομάδα 2*2 και για θεώρηση κεντρικής κατακόρυφης φόρτισης, όλοι οι πάσσαλοι επιδεικνύουν ίδια συμπεριφορά και κατά συνέπεια αναλύεται η κατανομή του φορτίου σε ένα και μόνο πάσσαλο, στον P1. Αντίθετα στην ομάδα 3*3 οι χαρακτηριστικοί πάσσαλοι είναι τρεις. Η επιμέρους συμπεριφορά των πασσάλων μπορεί εξ αρχής να αποτιμηθεί ως ακολούθως:

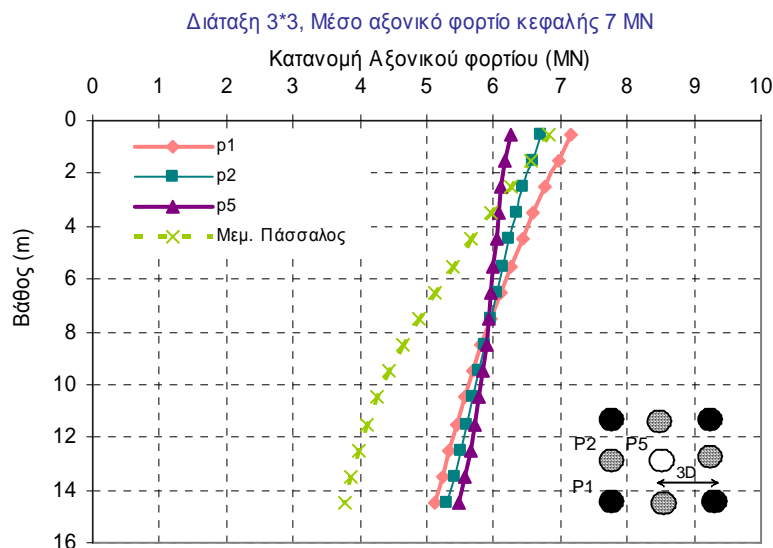
- ο κεντρικός πάσσαλος P5 βρίσκεται σε αλληλεπίδραση με όλους τους υπόλοιπους πασσάλους της ομάδας μέσω του περιβάλλοντος εδάφους
- οι γωνιακοί πάσσαλοι (χαρακτηριστικός πάσσαλος P1) εμφανίζουν το μικρότερο βαθμό αλληλεπίδρασης, ενώ
- οι περιμετρικοί πάσσαλοι (χαρακτηριστικό πάσσαλος P2) αποτελούν ενδιάμεση κατάσταση των δύο ανωτέρω

Η ανάλυση κατανομής του φορτίου σε τριβή και αιχμή για τους χαρακτηριστικούς πασσάλους πραγματοποιείται για δύο επίπεδα φόρτισης, δεδομένου ότι το επίπεδο φόρτισης επηρεάζει την απόκριση των ομάδων και την κατανομή των φορτίων στους επιμέρους πασσάλους (Comodromos et al., 2003; Comodromos, 2004). Δεδομένου ακόμη ότι οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στις ομάδες πασσάλων επιδεικνύουν τη μέγιστη δράση τους σε χαμηλά φορτία (προ της πλαστικοποίησης του εδάφους) το

πρώτο επίπεδο αντιστοιχεί σε μικρό σχετικά μέσο φορτίο, και επομένως μικρή αντίστοιχη καθίζηση, της τάξης των 7 MN. Η δεύτερη εξέταση της κατανομής αντιστοιχεί σε μεγάλο μέσο φορτίο της τάξης των 15 MN. Στο σχήμα 5.8 δίνεται η κατανομή του αναλαμβανόμενου φορτίου από κάθε χαρακτηριστικό πάσσαλο για την περίπτωση ομάδας 3*3, μέσου ασκούμενου φορτίου 7 MN (63 MN συνολικό φορτίο ομάδας) και για υπερκείμενο έδαφος αργιλικής σύστασης αλλά και η αντίστοιχη κατανομή του μεμονωμένου πασσάλου.



Σχήμα 5.7 Χαρακτηριστικοί πάσσαλοι των διατάξεων 3*3 και 2*2

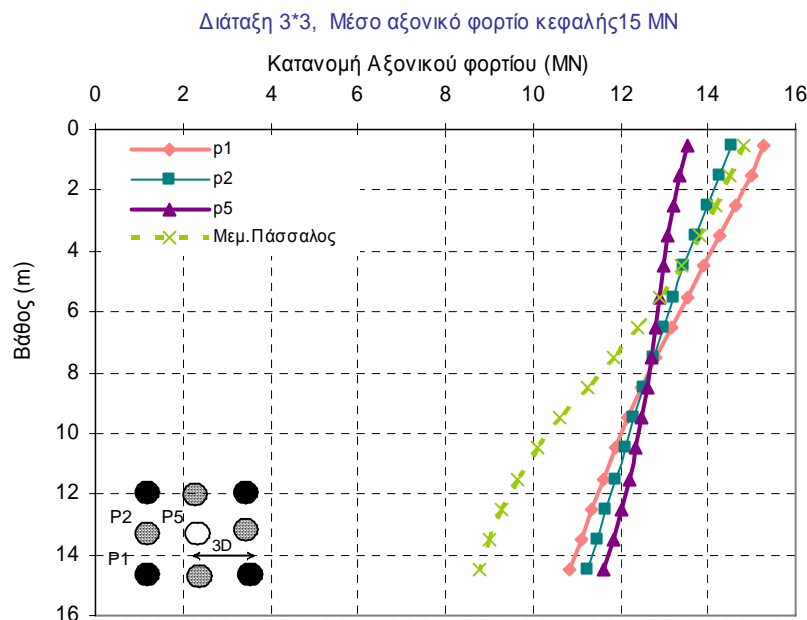


Σχήμα 5.8 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου συναρτήσει του βάθους για τους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας 3*3, με πλευρική στρώση αργιλικού εδάφους πάχους 15 m και μέσο φορτίο 7 MN.

Παρατηρείται ότι ο μεμονωμένος πάσσαλος αναλαμβάνει σημαντικά μεγαλύτερη δύναμη μέσω της πλευρικής αντίστασης απ' ό,τι οι πάσσαλοι της ομάδας. Ειδικότερα στην κεφαλή του μεμονωμένου πασσάλου το φορτίο είναι ίσο με το επιβαλλόμενο (7 MN) ενώ στο βάθος των 15 m το φορτίο μειώνεται στα 3.8 MN. Το φορτίο των 3.2 MN που αντιστοιχεί στο 46% του επιβαλλόμενου φορτίου αναλαμβάνεται από την ανώτερη εδαφική στρώση μέσω ανάπτυξης του μηχανισμού τριβής, ενώ το υπόλοιπο 54% φέρεται από την αιχμή. Από τους πασσάλους της ομάδας ο ακραίος πάσσαλος αναλαμβάνει το μεγαλύτερο φορτίο κεφαλής (7.2 MN), ο κεντρικός πάσσαλος το μικρότερο (6.2 MN) και ο περιμετρικός φορτίο ίσο περίπου με το μέσο επιβαλλόμενο.

Το φορτίο των τριών πασσάλων μειώνεται με το βάθος λόγω της ανάπτυξης του μηχανισμού της τριβής. Η μείωση του εντούτοις είναι σημαντικά μικρότερη από αυτήν του μεμονωμένου πασσάλου. Ειδικότερα ο ακραίος πάσσαλος μεταβιβάζει το 72% του επιβαλλόμενου φορτίου στην αιχμή (βραχώδες υπόβαθρο) και το 28% μέσω τριβής στον αργιλικό εδαφικό σχηματισμό, ο κεντρικός πάσσαλος το 87% στην αιχμή και το 13% στην εδαφική στρώση και ο περιμετρικός πάσσαλος το 79% στην αιχμή και το 21% στον πλευρικό σχηματισμό. Παρατηρείται κατά συνέπεια ότι για μικρά σχετικά φορτία, τα οποία αντιστοιχούν σε καθιζήσεις της τάξης του 0.5%D, οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στην κατανομή των φορτίων είναι σημαντικές.

Η διαφοροποίηση αυτή της κατανομής δεν αναιρείται με την αύξηση του φορτίου. Όταν το μέσο φορτίο αυξάνει στα 15 MN, το οποίο αντιστοιχεί σε καθίζηση 1%D, η κατανομή είναι παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9.

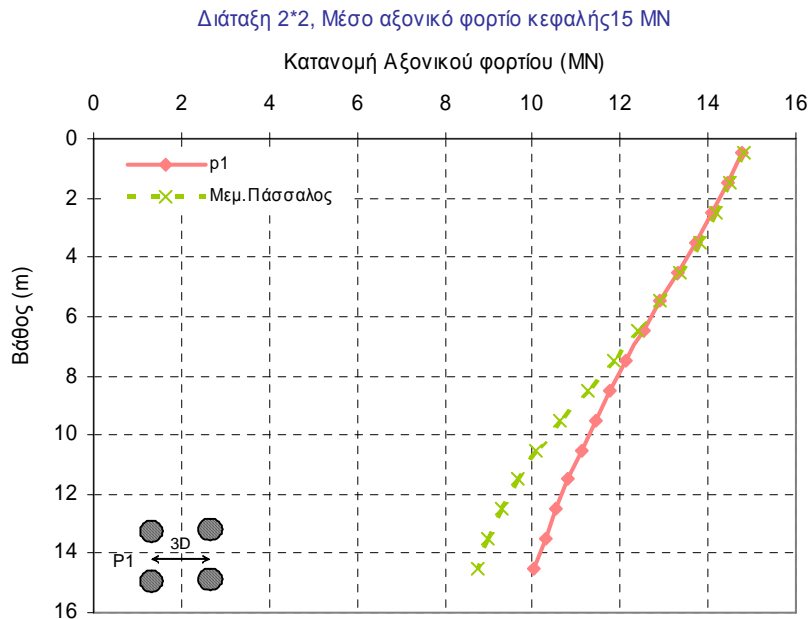


Σχήμα 5.9 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου συναρτήσει του βάθους για τους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας 3*3, με πλευρική στρώση αργιλικού εδάφους πάχους 15 m και μέσο φορτίο 15 MN.

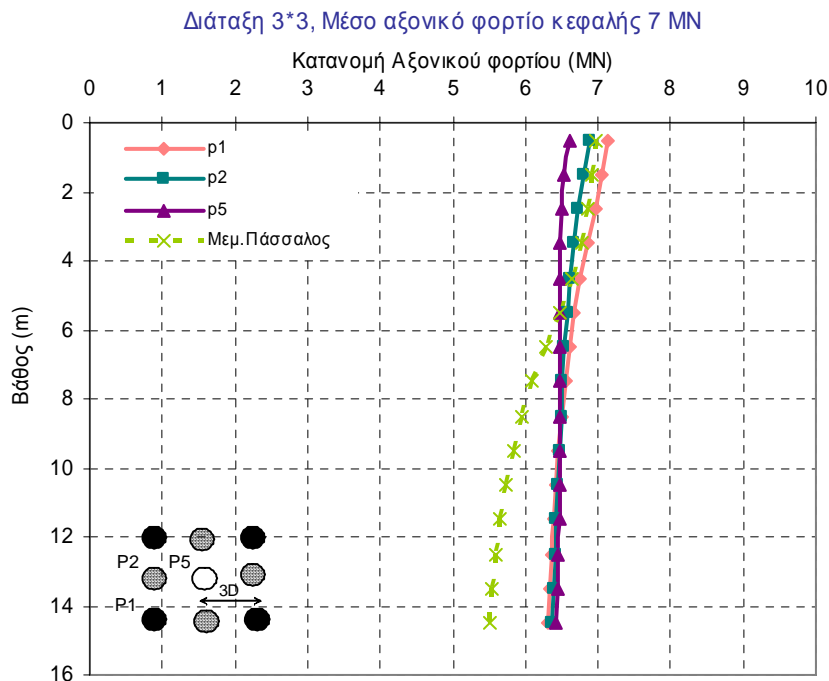
Στη διάταξη 2*2 οι πάσσαλοι της ομάδας διαφοροποιούνται και πάλι ως προς τη συμπεριφορά του μεμονωμένου πασσάλου, με μικρότερη εντούτοις απόκλιση κατανομής, όπως απεικονίζεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 5.10

Στα σχήματα 5.11 και 5.12 δίνεται η κατανομή της αξονικής δύναμης στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας 3*3 για την περίπτωση όπου ο ανώτερος σχηματισμός συνίσταται από αμμώδες έδαφος. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, όπου η στρώση ήταν αργιλική, παρατηρείται μικρότερη παράπλευρη αντίσταση τόσο για μικρά όσο και μεγάλα φορτία, γεγονός που πρέπει να αποδοθεί στη μικρότερη διατμητική αντοχή της στρώσης αυτής και την πλαστικοποίηση του

περιβάλλοντος εδάφους. Οι πάσσαλοι επιδεικνύουν συμπεριφορά πασσάλων αιχμής με πρακτικά αμελητέα παράπλευρη αντίσταση.

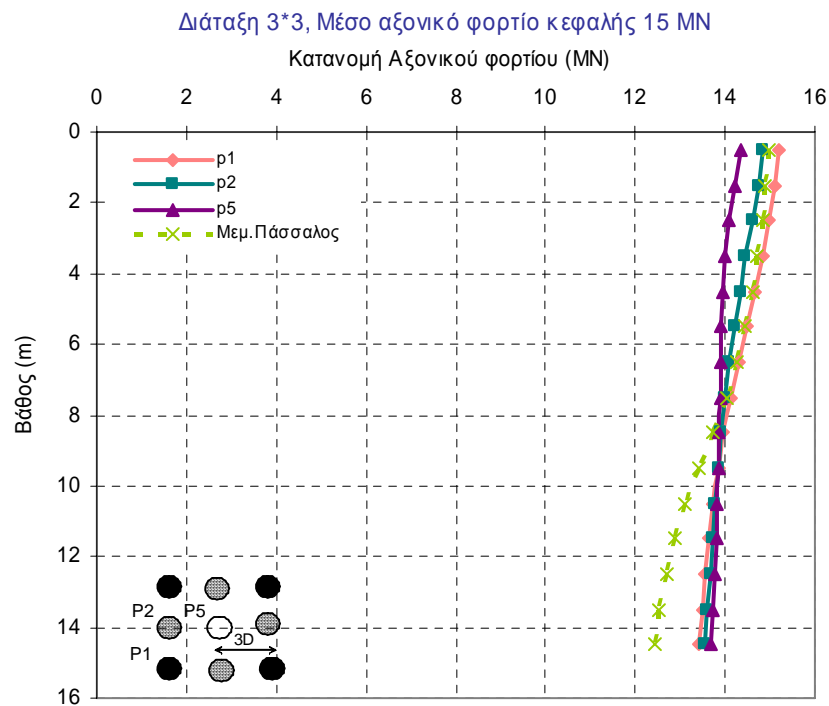


Σχήμα 5.10 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου συναρτήσει του βάθους για τους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας 2*2, με πλευρική στρώση αργιλικού εδάφους πάχους 15 m και μέσο φορτίο 15 MN.



Σχήμα 5.11 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου συναρτήσει του βάθους για τους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας 3*3, με πλευρική στρώση αμμόδους εδάφους πάχους 15 m και μέσο φορτίο 7 MN.

Για μέσο φορτίο 7 MN οι τρεις πάσσαλοι εμφανίζουν μικρή μεταξύ τους διαφοροποίηση κατανομής, με τον ακραίο πάσσαλο να αναλαμβάνει πάντα το μεγαλύτερο φορτίο κεφαλής και τον κεντρικό το μικρότερο. Σε αντίθεση με το μεμονωμένο πάσσαλο ο οποίος μεταβιβάζει το 79% του φορτίου κεφαλής στην αιχμή και το υπόλοιπο 21% πλευρικά, οι πάσσαλοι της ομάδας μεταβιβάζουν κατά μέσον όρο περίπου το 90% στην αιχμή και μόνο το 10% εμφανίζεται ως αντίσταση τριβής. Όταν το μέσο φορτίο αυξάνει στα 15 MN η κατανομή είναι ανάλογη με την προηγούμενη περίπτωση.

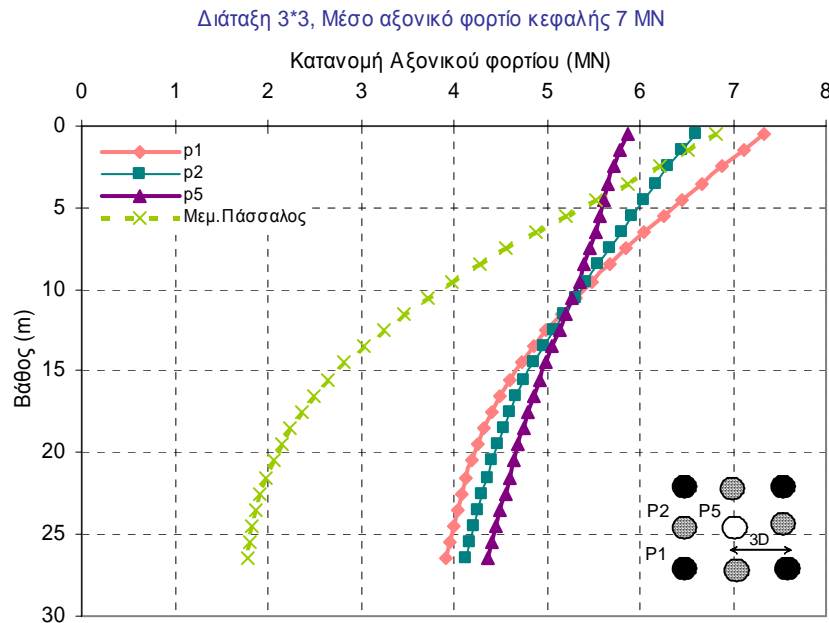


Σχήμα 5.12 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου συναρτήσει του βάθους για τους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας 3*3, με πλευρική στρώση αμμώδους εδάφους πάχους 15 m και μέσο φορτίο 15 MN.

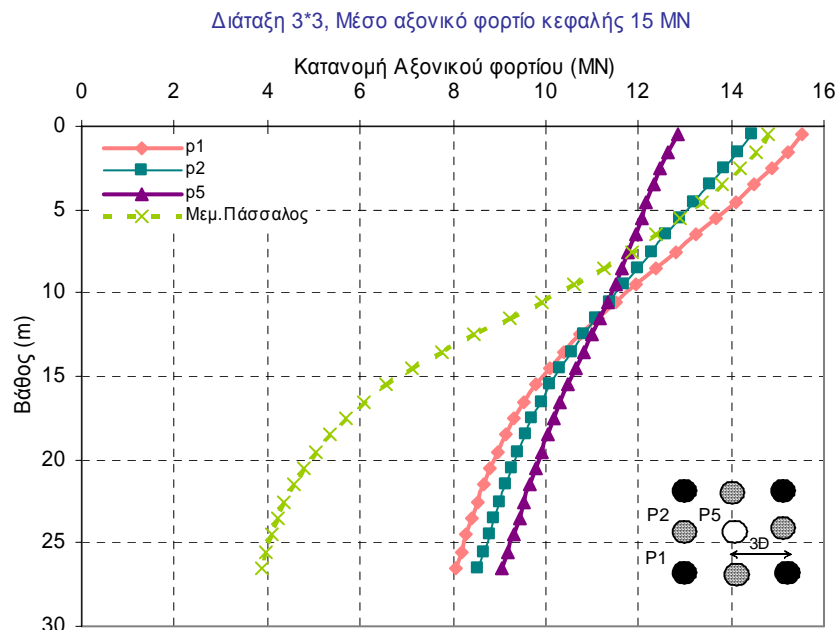
Παρόμοια αποτελέσματα διαφοροποίησης της κατανομής συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου προκύπτουν και για την ομάδα 2*2 για την ίδια σύσταση εδάφους.

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η κατανομή της αξονικής δύναμης στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας 3*3 και 2*2 για την περίπτωση που ο ανώτερος εδαφικός σχηματισμός είναι και πάλι αργιλικός αλλά το πάχος του αυξάνεται στα 28 m και επομένως ο πάσσαλος επιμηκύνεται στα 30 m. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μελών της ομάδας είναι πολύ πιο έντονη, όπως φαίνεται από τα σχήματα 5.13 και 5.14 και επίσης αυξάνει σημαντικά το ποσοστό του φορτίου που αναλαμβάνει η πλευρική τριβή. Συγκεκριμένα για μέσο αξονικό φορτίο 7 MN ο γωνιακός πάσσαλος P1, που είναι και πάλι ο πιο επιβαρημένος, μεταβιβάζει το 53% του φορτίου του στην αιχμή και το υπόλοιπο 47% το φέρει μέσω πλευρικής

αντίστασης, ενώ ο περιμετρικός πάσσαλος μεταφέρει το 75% του φορτίου στην αιχμή και το 25% πλευρικά. Σε αντίστιξη ο μεμονωμένος πάσσαλος κατανέμει το 75% του φορτίου στη πλευρική αντίσταση και μόλις το 25% μεταβιβάζεται στο βραχώδες υπόβαθρο. Εντελώς ανάλογη συμπεριφορά παρατηρείται όταν αυξάνεται το φορτίο στα 15 MN. Η διαφοροποίηση αυτή είναι ίσως και η πιο αξιόλογη της αλληλεπίδρασης μεταξύ πασσάλων ομάδας με έδραση σε βραχώδες υπόβαθρο.

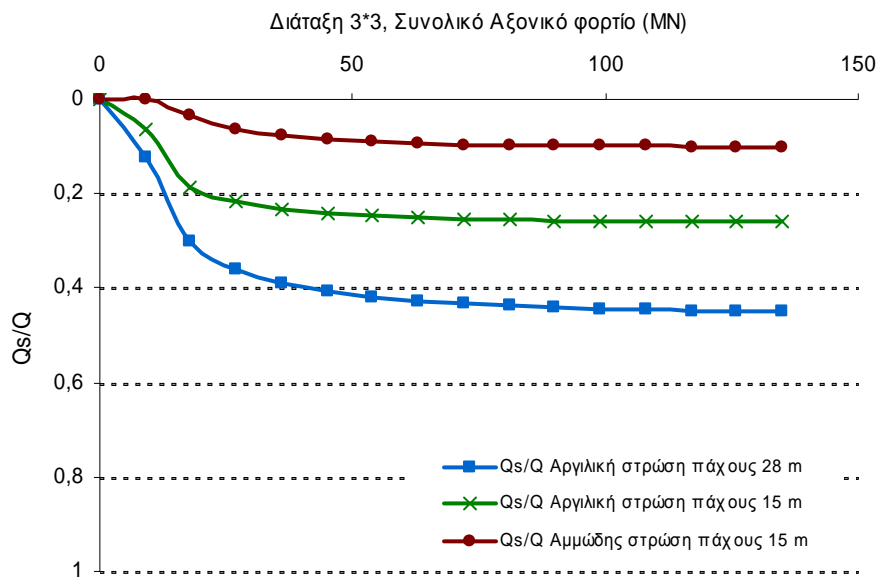


Σχήμα 5.13 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου συναρτήσει του βάθους για τους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας 3*3, με πλευρική στρώση αργιλικού εδάφους πάχους 28 m και μέσο φορτίο 7 MN.



Σχήμα 5.14 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου συναρτήσει του βάθους για τους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας 3*3, με πλευρική στρώση αργιλικού εδάφους πάχους 28 m και μέσο φορτίο 15 MN.

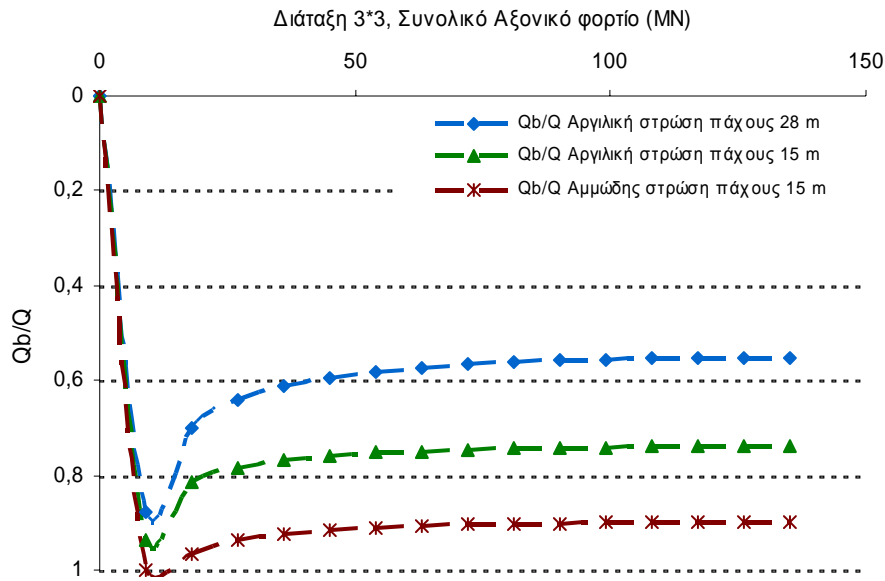
Στο σχήμα 5.15 δίνεται ο λόγος του πλευρικά αναλαμβανόμενου φορτίου της ομάδας Q_s προς το συνολικό ασκούμενο στην κεφαλή φορτίο Q για όλα τα επίπεδα φόρτισης. Για την περίπτωση αργιλικού υπερκείμενου εδαφικού σχηματισμού με πάχος 15 m το ποσοστό σταθεροποιείται με την αύξηση του φορτίου στην τιμή 26% ενώ το ποσοστό αυτό αυξάνει, όπως αναμένεται, σημαντικά και παίρνει την τιμή 45% όταν αυξηθεί το πάχος της αργιλικής στρώσης. Το πάχος του υπερκείμενου εδαφικού σχηματισμού είναι κατά συνέπεια καθοριστικό και μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην αντίσταση ομάδας πασσάλων με έδραση σε βραχώδες υπόβαθρο, ανάλογα πάντα με τη διατμητική αντίσταση που το χαρακτηρίζει. Στην περίπτωση της αμμώδους στρώσης, με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και τη μικρότερη διατμητική αντοχή σε σχέση με την αντίστοιχη της αργιλικής στρώσης, ο λόγος Q_s/Q εμφανίζει μικρότερη τιμή, της τάξης του 10%.



Σχήμα 5.15 Διάγραμμα μεταβολής του λόγου του πλευρικά αναλαμβανόμενου φορτίου Q_s προς το συνολικό ασκούμενο στην κεφαλή φορτίο Q για όλα τα επίπεδα φόρτισης.

Στο σχήμα 5.16 δίνεται η μεταβολή του λόγου του μεταβιβαζόμενου στην αιχμή φορτίου Q_b προς το φορτίο κεφαλής της ομάδας 3*3. Οι καμπύλες του σχήματος είναι προφανώς συμπληρωματικές των αντιστοιχών του σχήματος 5.15 και κατά συνέπεια τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι όμοια με τα ήδη αναφερθέντα

Συμπερασματικά μπορεί να αναφερθεί ό,τι, σε αντίθεση με ομάδες πασσάλων που εδράζονται σε εδαφικά υλικά, στις περιπτώσεις έδρασης σε βραχώδες υπόβαθρο οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης είναι ουσιαστικά περιορισμένες. Εμφανίζουν τη μέγιστη επίπτωση τους σε μικρά σχετικά φορτία, αντιστοιχούντα σε καθιζήσεις της τάξης του 0.5%D. Οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης περιορίζονται στη διαφοροποίηση της κατανομής των φορτίων στους επιμέρους πασσάλους της ομάδας, καθώς επίσης και στην κατανομή του αξονικού φορτίου κατά μήκος του πασσάλου.



Σχήμα 5.16 Διάγραμμα μεταβολής του λόγου του φορτίου αιχμής Q_b προς το συνολικό ασκούμενο στην κεφαλή φορτίο Q για όλα τα επίπεδα φόρτισης.

Τα ανωτέρω συμπεράσματα μπορούν να αποτελέσουν ποιοτική αποτίμηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων όπου ο επιφανειακός σχηματισμός είναι εδαφικός ενώ η έδραση τους πραγματοποιείται σε βραχώδες υπόβαθρο. Τονίζεται εντούτοις ότι τα συγκεκριμένα ποσοστά κατανομής της αντίστασης σε αιχμή και τριβή καθώς επίσης και η κατανομή στους χαρακτηριστικούς πασσάλους των εξετασθείσων ομάδων προέκυψαν για την ανάλυση σε συγκεκριμένες εδαφικές τομές και ότι, πέραν της ποιοτικής αποτίμησης, θα συνιστούσε απερισκεψία η αλόγιστη χρήση των ποσοστών αυτών σε διαφορετικές εδαφικές συνθήκες και διατάξεις πασσάλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

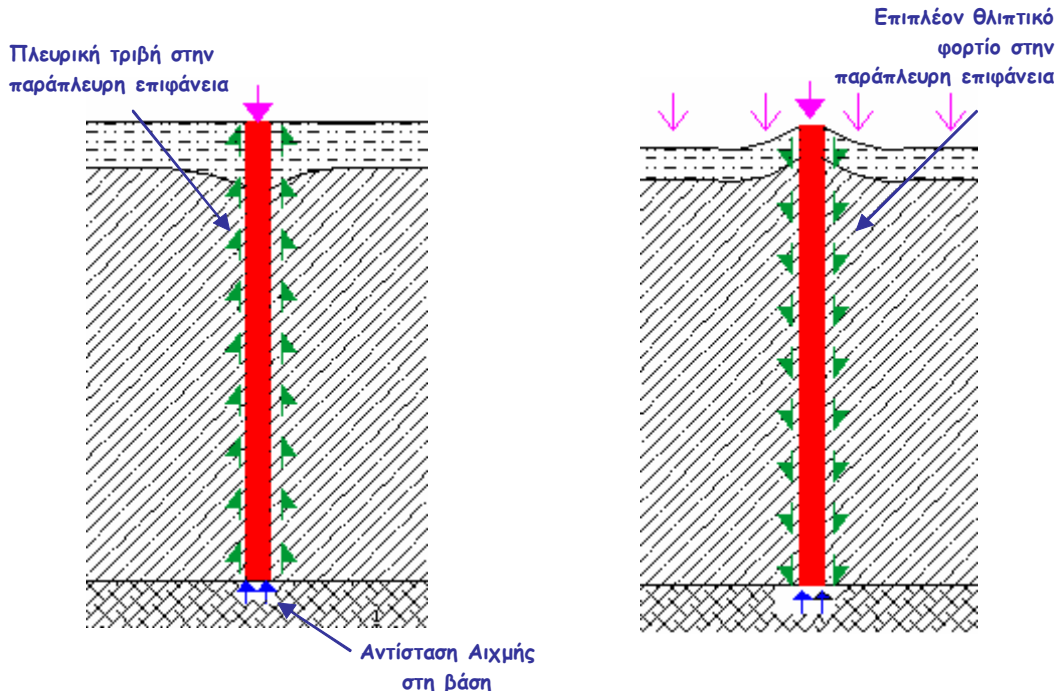
Αποτίμηση επιπτώσεων της δράσης αρνητικών τριβών σε πασσάλους

6.1 Γενικά

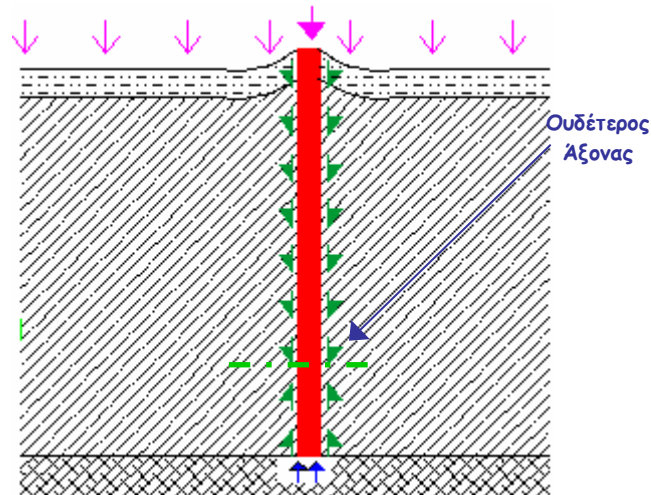
Η κατασκευή επιχωμάτων ή ακόμη η ταπείνωση του υπόγειου ορίζοντα στην άμεση περιοχή θεμελιώσεων με πασσάλους σε συμπιεστά εδάφη οδηγεί σε καθιζήσεις εδάφους μεγαλύτερες από αυτές των πασσάλων, σχήμα 6.1. Αποτέλεσμα του φαινομένου αποτελεί η αύξηση του αξονικού φορτίου των πασσάλων λόγω της ανάρτησης του περιβάλλοντος εδάφους επί των πασσάλων. Η χρήση εμπειρικών σχέσεων από συμβατικές προσεγγίσεις (Fellenius, 1972; Combarieu, 1985) για τον υπολογισμό των επιπρόσθετων φορτίων στους πασσάλους προϋποθέτει πλήρη κινητοποίηση των αρνητικών τριβών πάνω από το ουδέτερο σημείο (σημείο συμβιβαστού μετακινήσεων πασσάλου και περιβάλλοντος εδάφους), σχήμα 6.2.

Η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε υπερβολικές τιμές φορτίων, δεδομένου ότι για την πλήρη κινητοποίηση των αρνητικών τριβών απαιτείται εν γένει η εκδήλωση μεγάλων καθιζήσεων στο περιβάλλον έδαφος. Αντίστοιχα, δεν απαιτείται κατ' ανάγκη ανάπτυξη μεγάλων καθιζήσεων για την εκδήλωση διολίσθησης κατά μήκος της διεπιφάνειας εδάφους-πασσάλου. Οι αρνητικές τριβές δεν εμφανίζονται συνήθως σε όλο το μήκος του πασσάλου αλλά μέχρι ένα συγκεκριμένο βάθος στο οποίο επέρχεται συμβιβαστό μετακινήσεων περιβάλλοντος εδάφους και πασσάλου και το οποίο αποκαλείται ουδέτερο σημείο ή ουδέτερος άξονας. Κατά μήκος τη διεπιφάνειας πάνω από το ουδέτερο σημείο εμφανίζεται η δράση των αρνητικών τριβών, η οποία οδηγεί σε πρόσθετη επιβάρυνση του αναλαμβανόμενου αξονικού φορτίου, ενώ από το ουδέτερο σημείο και κάτω εκδηλώνεται πλευρική αντίσταση στην καθίζηση του πασσάλου και κατά τον τρόπο αυτό μεταφέρεται μέρος του αξονικού φορτίου στο περιβάλλον έδαφος. Είναι αντιληπτό ότι η ακριβής θέση του ουδέτερου σημείου εξαρτάται από το κινηματικό και εντατικό πεδίο και για τον ίδιο πάσσαλο είναι δυνατό να μετατίθεται. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η επιβολή φορτίου πέραν της φέρουσας ικανότητας μεμονωμένου πασσάλου οδηγεί στην εκδήλωση μεγάλων καθιζήσεων και κατά συνέπεια μετάθεσης του συμβιβαστού μετακινήσεων σε ανώτερο θέση. Υπό την έννοια αυτή η δράση της δύναμης αυτής οδηγεί στην μετάθεση του ουδέτερου σημείου σε ανώτερη θέση. Δεδομένου ότι αποτελεί ιδιαίτερα

δύσκολο και περίπλοκο έργο ο προσδιορισμός του ουδέτερου σημείου, εκλαμβάνεται συχνά, για απλουστευτικούς λόγους, ότι βρίσκεται σε βάθος ίσο προς τα $\frac{3}{4}$ του μήκους ενός αιωρούμενου πασσάλου ενώ συμπίπτει σχεδόν με το σημείο επαφής πασσάλου – υποστρώματος στην περίπτωση πασσάλου αιχμής.



Σχήμα 6.1 Σχηματική απεικόνιση της: (α) ανάληψης του φορτίου από την πλευρική τριβή και την αντίσταση αιχμής του πάσσάλου και (β) ανάρτησης του εδάφους πάνω στον πάσσαλο και της ανάπτυξης των αρνητικών τριβών.



Σχήμα 6.2 Σχηματική απεικόνιση θέσης του ουδέτερου άξονα.

Η ακριβής αποτίμηση των επιπτώσεων της δράσης των αρνητικών τριβών απαιτεί την επίλυση του προβλήματος στο πλαίσιο αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλου κατά την οποία θα λαμβάνονται υπόψη η συνάφεια και η δυσκαμψία κατά μήκος της διεπιφάνειας, η διατμητική αντοχή και η δυσκαμψία του εδάφους καθώς επίσης και η

διάταξη των πασσάλων της ομάδας. Ας σημειωθεί ακόμη, ότι στην περίπτωση ομάδας πασσάλων οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης είναι ακόμη πιο σύνθετες λόγω της παρουσίας των παρακείμενων πασσάλων, η οποία τείνει να μειώσει την καθίζηση του εδάφους ανάμεσα στους πασσάλους (Kuwabara and Poulos, 1989). Συνέπεια της ανωτέρω δράσης αποτελεί το γεγονός ότι οι εσωτερικοί πάσσαλοι ομάδας με ενιαίο κεφαλόδεσμο αναλαμβάνουν μικρότερα επιπρόσθετα φορτία, ενώ στην περίπτωση ομάδας χωρίς κεφαλόδεσμο οι εσωτερικοί πάσσαλοι επιδεικνύουν μικρότερες καθιζήσεις (Shibata et al., 1982).

Για την αποτίμηση των επιπτώσεων των αρνητικών τριβών ομάδων πασσάλων αιχμής οι Poulos and Davis (1980) πρότειναν μία απλουστευτική μεθοδολογία βασιζόμενη στη λύση σημειακής φόρτισης σε ελαστικό ημίχωρο. Ως εξέλιξη μπορεί να θεωρηθεί η απλουστευτική μεθοδολογία των Kuwabara and Poulos (1989) κατά την οποία το έδαφος θεωρείται συνεχές ελαστικό μέσο ενώ δίνεται η δυνατότητα ολίσθησης κατά μήκος της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους. Απλουστευμένη μεθοδολογία για την εκτίμηση των επιπτώσεων των αρνητικών τριβών για πασσάλους αιχμής ή τριβής δίνεται τέλος από τους Roogooshasb et al. (1996). Η εφαρμογή των ανωτέρω μεθοδολογιών απαιτεί απλουστευτικές παραδοχές ως προς τη γεωμετρία του προβλήματος και την προσομοίωση της απόκρισης του εδάφους. Η χρήση τους σε απλά σχετικά προβλήματα είναι σε θέση να οδηγήσει στην εκτίμηση των επιπτώσεων των αρνητικών τριβών, τουλάχιστον ως προς το άνω όριο τους. Για σημαντικά εντούτοις έργα, όπου η απόκριση της θεμελίωσης καθορίζει τη διαστασιολόγηση της ανωδομής ενδείκνυται η χρήση ακριβέστερων μεθοδολογιών. Τριδιάστατη προσέγγιση του προβλήματος εμφανίζεται για πρώτη φορά από τον Jeong (1992), με παράβλεψη εντούτοις της ολίσθησης κατά μήκος της διεπιφάνειας πασσάλου-εδάφους, και στη συνέχεια από τον Lee et al. (2002). Στην εν λόγω εργασία πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αναλύσεις σε γνωστά προβλήματα, όπου η σύγκριση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων εργασιών έδειξε σημαντικά μικρότερες επιπτώσεις στις ομάδες πασσάλων. Σύμφωνα με τους Comodromos and Bareka (2005a) και Κωμοδρόμος και Μπαρέκα (2006) οι επιπτώσεις των αρνητικών τριβών είναι σημαντικά μικρότερες στις ομάδες πασσάλων σε σχέση με τις αντίστοιχες σε μεμονωμένο πάσσαλο. Στόχο της διερευνητικής προσπάθειας του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η αποτίμηση των επιπτώσεων των αρνητικών τριβών στις ομάδες πασσάλων τόσο συνολικά όσο και επιμέρους στους χαρακτηριστικούς πασσάλους.

6.2 Τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση

6.2.1 Μεμονωμένος πάσσαλος

Η κατανόηση του μηχανισμού ανάπτυξης των αρνητικών τριβών μπορεί να γίνει ευκολότερα αντιληπτή με την ανάλυση απλών σχετικά γεωμετρικών προβλημάτων. Σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναφερθεί η ανάπτυξη των αρνητικών τριβών αρχίζει

όταν παρατηρείται 'ανάρτηση' του περιβάλλοντος εδάφους στον εξεταζόμενο πάσσαλο. Η ανάρτηση αυτή οδηγεί σε ανάπτυξη πρόσθετης κατακόρυφης δύναμης στους πασσάλους. Όσο οι καθιζήσεις του εδάφους αυξάνουν, τόσο αυξάνει και η ανάρτηση του εδάφους καθώς και η προκαλούμενη πρόσθετη δύναμη. Η δύναμη αυτή εντούτοις δεν μπορεί να υπερβεί αυτή που αντιστοιχεί στην πλήρη κινητοποίηση της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας εδάφους-πασσάλου (άνω όριο αρνητικών τριβών). Για την κατανόηση λοιπόν και καλύτερη περιγραφή του φαινομένου εξετάστηκε αρχικά μια απλοποιημένη περίπτωση μεμονωμένου πασσάλου ο οποίος είχε χρησιμοποιηθεί από τους Lee *et al.* (2002) με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση των αρνητικών τριβών στο μεταφερόμενο φορτίο στον πάσσαλο.

Ο πάσσαλος που εξετάστηκε από τους ανωτέρω ερευνητές είναι διαμέτρου 0.5 m και μήκους 20 m. Το ανώτερο στρώμα της εδαφικής τομής συνίσταται από μαλακή άργιλο και εκτείνεται μέχρι την έδραση του πασσάλου, ενώ το έδαφος πέρα από την αιχμή συνίσταται από πυκνή άμμο. Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν συνοψίζονται στον πίνακα 6.1, ενώ ως φόρτιση λαμβάνεται κατανεμημένο επιφανειακό φορτίο 50 kPa. Για να διερευνηθεί η κατανομή των διατμητικών τάσεων και του φορτίου λόγω αρνητικών τριβών στην περίπτωση πασσάλων τριβής, θεωρήθηκε ότι το έδαφος έδρασης έχει δυσκαμψία όμοια με αυτή του πάνω στρώματος. Στην περίπτωση του πασσάλου αιχμής, η δυσκαμψία του κάτω στρώματος λήφθηκε 1000 φορές μεγαλύτερη από τη δυσκαμψία του πάνω στρώματος. Για τη διεξαγωγή της τριδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης οι ανωτέρω ερευνητές χρησιμοποίησαν το πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων ABACUS. Στο σχήμα 6.3 απεικονίζεται το προς επίλυση πρόβλημα των Lee *et al.*

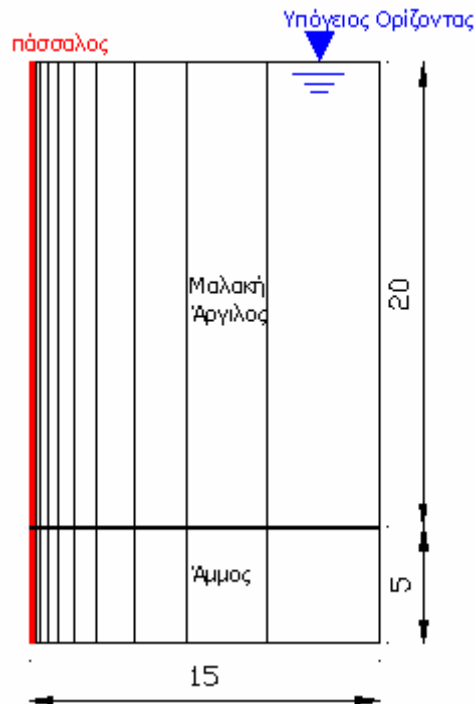
Υλικό	Μοντέλο	E (kPa)	C (kPa)	ν	ϕ (deg)	ψ (deg)	k_0	γ (kN/m ³)
Πάσσαλος από μπετόν	Ισότροπο ελαστικό	2,000,000		0.3			1.0	25
Μαλακή Άργιλος	Mohr-Coulomb	5,000	3	0.3	20	0.1	0.65	18
Έδραση σε άμμο		50,000	0.1	0.3	35	10	0.5	20

Πίνακας 6.1 Τιμές εδαφικών παραμέτρων του προβλήματος των Lee *et al* (2002)

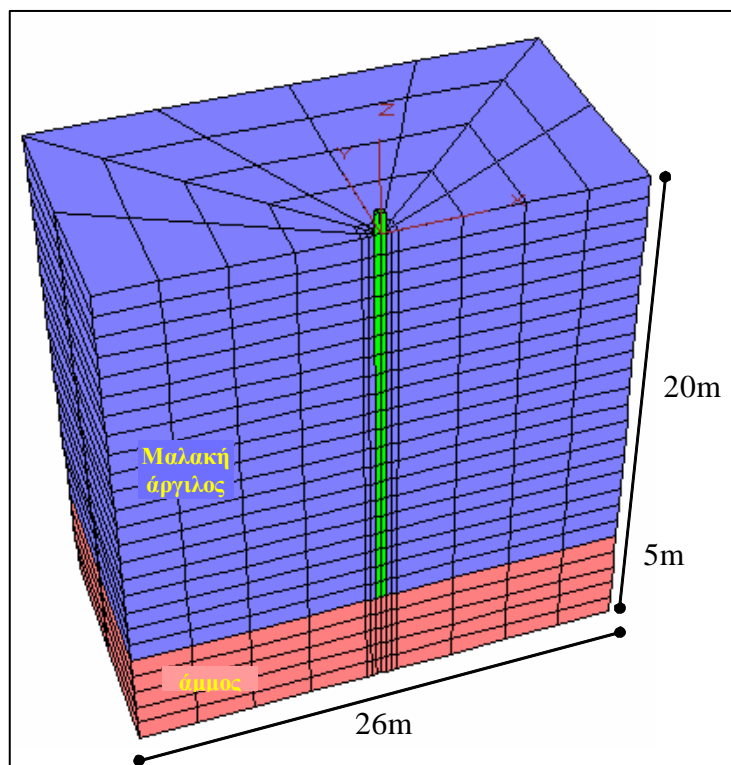
Το ίδιο πρόβλημα εξετάστηκε χρησιμοποιώντας τρισδιάστατη ανάλυση με τη βοήθεια του κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC^{3D}. Στο σχήμα 6.4 παρουσιάζεται ο κάρναβος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ανάλυση, ο οποίος αποτελείται από 2648 στοιχεία και 3116 κόμβους, ενώ κατά μήκος της περιφέρειας του πασσάλου έγινε χρήση 1732 στοιχείων διεπιφανειών. Ο καταστατικός νόμος των στοιχείων διεπιφάνειας δίνεται στην παράγραφο 4.3.

Στο σχήμα 6.5 απεικονίζεται η μεταβολή της αναπτυσσόμενης αξονικής δύναμης και της διατμητικής τάσης κατά μήκος του πασσάλου για τις δύο περιπτώσεις

πασσάλου τριβής και πασσάλου αιχμής. Παρατηρούνται παρόμοιες τιμές και κατανομές με αυτές των αποτελεσμάτων των Lee et al. (2002).

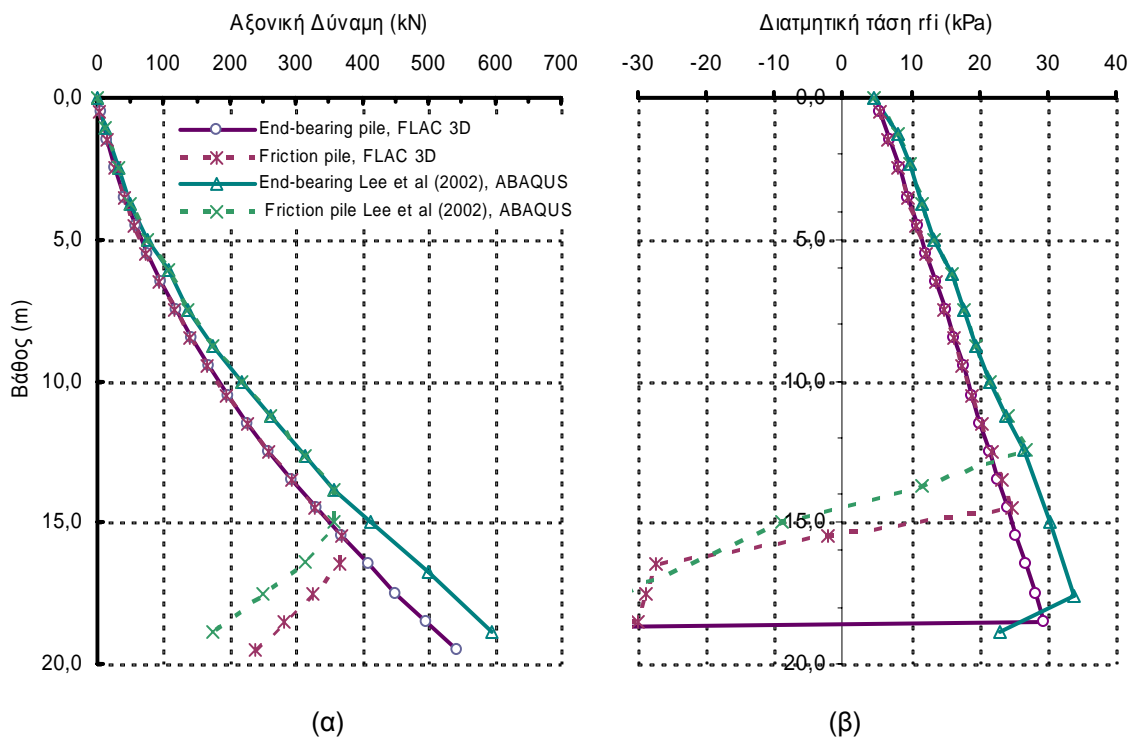


Σχήμα 6.3 Κάνναβος Πεπερασμένων Στοιχείων πασσάλου σε στρωσιγενές έδαφος (Lee et al, 2002).



Σχήμα 6.4 Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών μεμονωμένου πασσάλου για την προσο-
μείωση του προβλήματος των Lee et. al (2002).

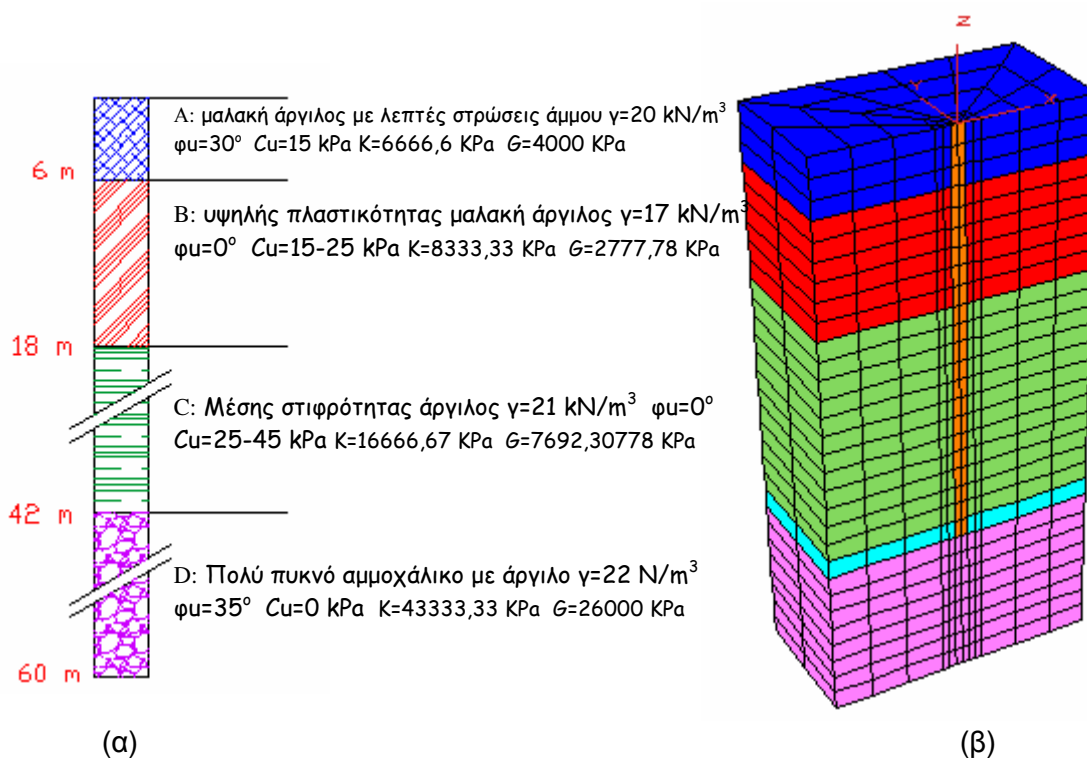
Θα πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η χρήση απλών μεθόδων γραμμικής ελαστικότητας ή η ανάλυση χωρίς δυνατότητα ολίσθησης κατά μήκος του πασσάλου οδηγεί σε υπερεκτίμηση της δράσης του φαινομένου. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι η τριδιάστατη μη γραμμική ανάλυση μπορεί να λάβει υπόψη την οποιαδήποτε κινητοποίηση της πλευρικής τριβής πάνω και κάτω από τον ουδέτερο άξονα σε αντίθεση με τις απλοποιητικές μεθόδους στις οποίες η διατμητική αντοχή θεωρείται ότι φτάνει στα όρια της καθ' όλο το μήκος του άξονα του πασσάλου ή σε όλο το μήκος πάνω από το ουδέτερο σημείο. Η ανάπτυξη της ολίσθησης κατά μήκος του άξονα του πασσάλου εξαρτάται από τη γωνία τριβής της διεπιφάνειας, από το επιφανειακό φορτίο και τις ιδιότητες του εδάφους. Όταν η γωνία τριβής της διεπιφάνειας και η δυσκαμψία του εδάφους έχουν μικρές τιμές, ή η επιφόρτιση είναι μεγάλη, τότε το ολισθαίνον τμήμα αυξάνει και αντίστροφα. Μικρότερο ρόλο από τα παραπάνω παίζει η δυσκαμψία του εδάφους εκτός και αν υπάρχει μικρή επιφανειακή επιφόρτιση σε πολύ σφιχτό έδαφος, αφού η ολίσθηση μπορεί να αναπτυχθεί ακόμα και υπό πολύ μικρές σχετικές μετακινήσεις.



Σχήμα 6.5 Διάγραμμα μεταβολής (α) αξονικής δύναμης και (β) διατμητικής τάσης συναρτήσει του βάθους (Comodromos and Bareka, 2005a)

Στο σχήμα 6.5 παρατηρείται επίσης ότι οι αρνητικές τριβές αναπτύσσονται από την κεφαλή του πασσάλου έως το ουδέτερο σημείο, δηλαδή καταλαμβάνουν το 70% περίπου του μήκους για τον πάσσαλο τριβής και σχεδόν όλο το μήκος του πασσάλου αιχμής. Κάτω από τον ουδέτερο άξονα οι διατμητικές τάσεις στην περιφέρεια του πασσάλου αλλάζουν φορά και δεν επιβάλλουν επιπρόσθετο φορτίο στον πάσσαλο αλλά συμβάλλουν στην ανάληψη του.

Το δεύτερο στάδιο διερεύνησης των επιπτώσεων της δράσης αρνητικών τριβών σε μεμονωμένο πάσσαλο πραγματοποιείται σε πολυστρωματικό έδαφος. Χρησιμοποιείται η εδαφική τομή της περιοχής του 6^{ου} προβλήτα του λιμανιού της Θεσσαλονίκης, δεδομένου ότι για τη θέση αυτή είναι διαθέσιμα γεωτεχνικά στοιχεία καθώς και αποτελέσματα από δοκιμαστική φόρτιση τα οποία μαζί με αυτά της αντίστροφης ανάλυσης που διεξήχθη δίνονται από τους Comodromos *et al* (2003). Το υπέδαφος χαρακτηρίζεται από μεγάλη συμπίεστικότητα και μικρή διατμητική αντοχή μέχρι μεγάλου βάθους. Ειδικότερα, η επιφανειακή στρώση, στρώση Α, συνίσταται από μαλακή άργιλο με λεπτές στρώσεις άμμου, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί στρώση Β μαλακής αργίλου, υψηλής πλαστικότητας, μέχρι βάθους 18 m. Από το βάθος αυτό και μέχρι τα 42 m καταγράφεται η παρουσία μέσης σφιφρότητας αργίλου υψηλής πλαστικότητας, στρώση C. Από τη στάθμη αυτή και μέχρι το πέρας της διερεύνησης ανιχνεύθηκε στρώμα αργίλου με πολύ πυκνό αμμοχάλικο και αργιλικές εντρώσεις κατά θέσεις. Η εδαφική τομή και οι παράμετροι σχεδιασμού των στρώσεων δίνονται στο σχήμα 6.6α. Το μήκος του πασσάλου είναι 44 m και η διάμετρος του 1.5 m.

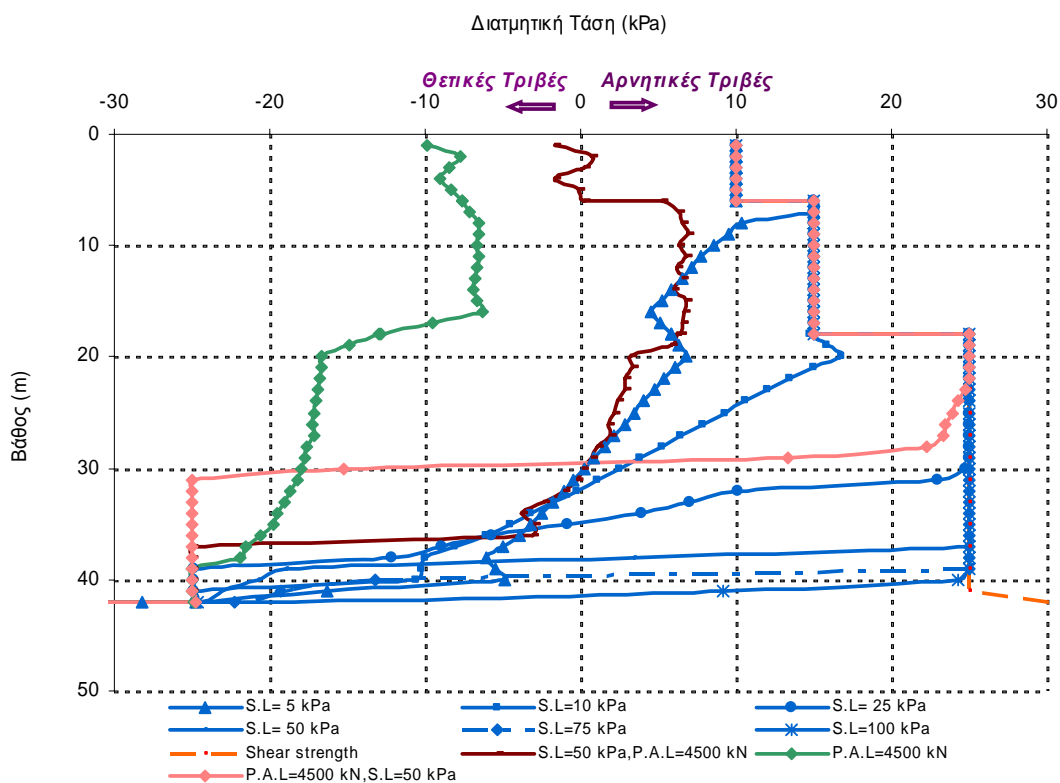


Σχήμα 6.6 (α) Εδαφικό προφίλ και παράμετροι σχεδιασμού για τον μεμονωμένο πάσσαλο μέσα σε πολυστρωματικό έδαφος (β) κάνναβος πεπερασμένων διαφορών

Για να αποτιμηθούν οι επιπτώσεις της δράσης των αρνητικών τριβών στη θέση των επιχωμάτων πρόσβασης πραγματοποιείται αρχικά τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση για μεμονωμένο πάσσαλο. Το πρόβλημα λύθηκε για διάφορα επιφανειακά φορτία, που αντιστοιχούν σε διάφορα ύψη επιχώματος. Επιλύσεις πραγματοποιήθηκαν επίσης και για συνδυασμό επιφανειακής δράσης και αξονικής δύναμης στην κεφαλή του πασσάλου έτσι ώστε, πέρα από την ανάλυση λειτουργικότητας να είναι δυνατή και η σύγκριση των διαφόρων συνδυασμών φόρτισης. Στο σχήμα 6.7 παρουσιάζεται

η κατανομή των διατμητικών τάσεων κατά μήκος του πασσάλου για επιφανειακή φόρτιση 5, 10, 25, 50, 75 και 100 kPa. Στο ίδιο σχήμα δίνονται τα αποτελέσματα περιπτώσεων συνδυασμού επιφανειακής φόρτισης 50 kPa και στη συνέχεια αξονικού φορτίου 4500 kN, αντίστοιχη περίπτωση όπου πρώτα εφαρμόζεται το φορτίο του πασσάλου και στη συνέχεια το επιφανειακό φορτίο και τέλος η περίπτωση με εφαρμογή μόνο αξονικού φορτίου 4500 kN. Παρατηρείται ότι ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται σε μεγάλο βάθος ήδη με την επιβολή του μικρού σχετικά φορτίου των 5 kPa. Θα πρέπει να σημειωθεί εντούτοις ότι η πλήρης ενεργοποίηση της δράσης των αρνητικών τριβών, κατά την οποία η αναπτυσσόμενη διατμητική τάση εξαντλεί το όριο της διατμητικής αντίστασης απαιτεί πολύ μεγαλύτερο φορτίο.

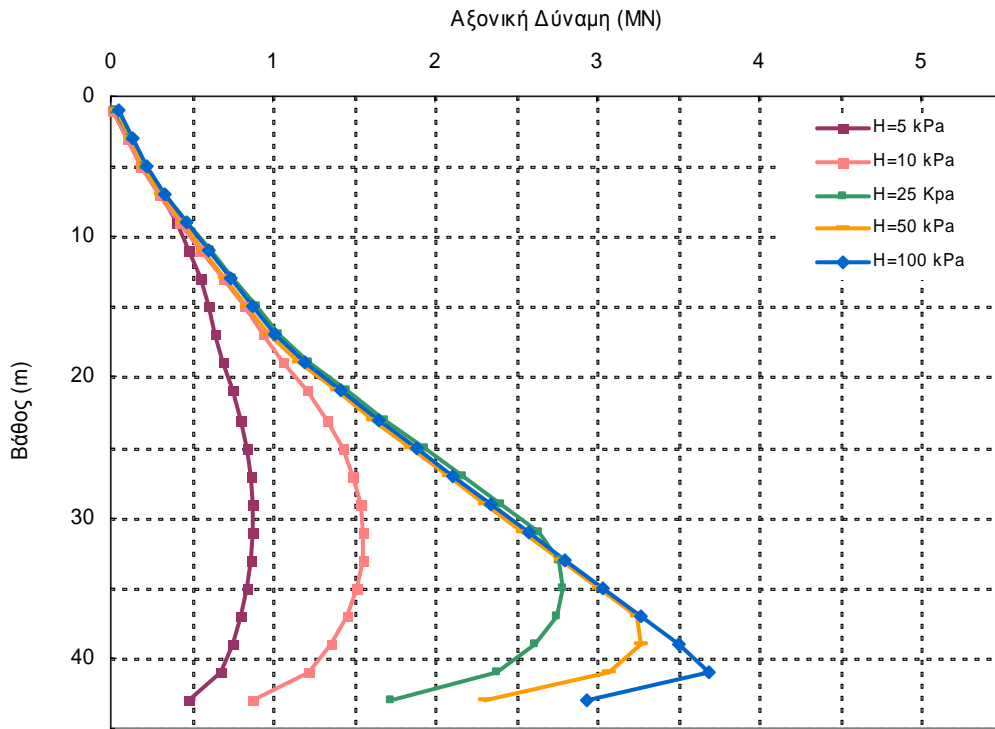
Ιδιαίτερα τονίζεται η διαφορά των αποτελεσμάτων στις περιπτώσεις όπου εφαρμόζεται επιφανειακό φορτίο 50 kPa και αξονικό φορτίο 4500 kN. Στην περίπτωση που επιβάλλεται πρώτα η επιφανειακή φόρτιση και στη συνέχεια το αξονικό φορτίο (περίπτωση S.L.= 50 kPa, P.A.L.= 4500 kN), τα αποτελέσματα είναι σημαντικά ευμενέστερα ως προς τις επιπτώσεις της δράσης των αρνητικών τριβών σε σχέση με την ανάστροφη επιβολή των φορτίσεων (περίπτωση P.A.L.= 4500 kN, S.L.= 50 kPa).



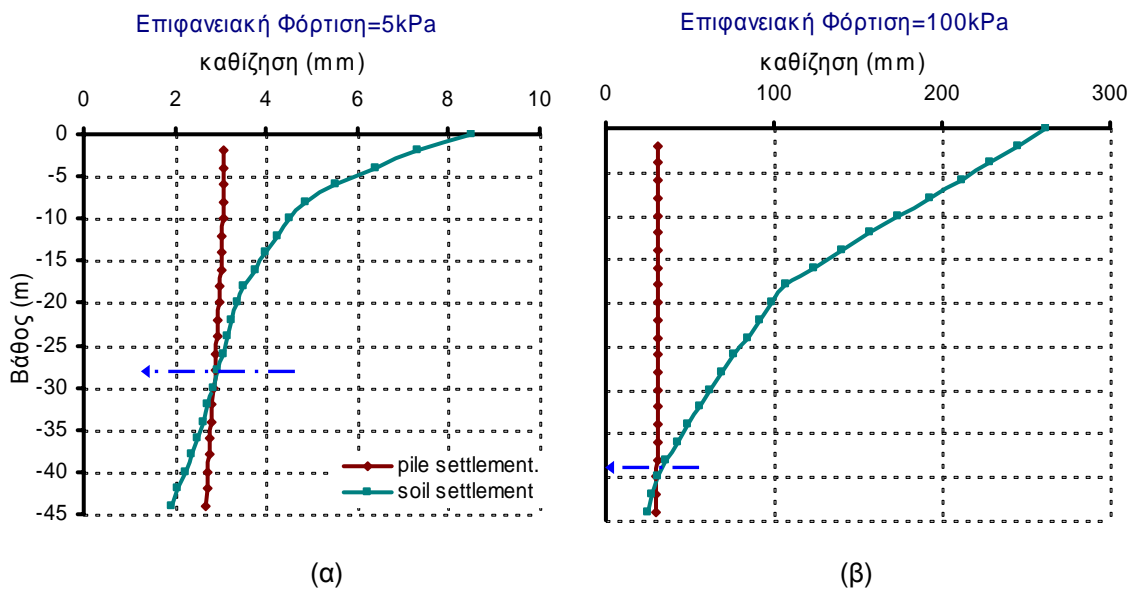
Σχήμα 6.7 Διάγραμμα κατανομής διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου κατά μήκος αυτού, για διάφορες φορτίσεις (Comodromos and Bareka, 2005a).

Από το διάγραμμα κατανομής της αξονικής δύναμης στον πάσσαλο με το βάθος, σχήμα 6.8, συμπεραίνεται ότι ακόμα και για μικρές επιφανειακές φορτίσεις της τάξης των 10 kPa (αντιστοιχεί σε επίχωμα ύψους 0.5 m) η δύναμη στον πάσσαλο φτάνει τα

1.56 MN και παίρνει τη μέγιστη τιμή 3.7 MN όταν η επιφανειακή φόρτιση αυξηθεί στα 100 kPa.



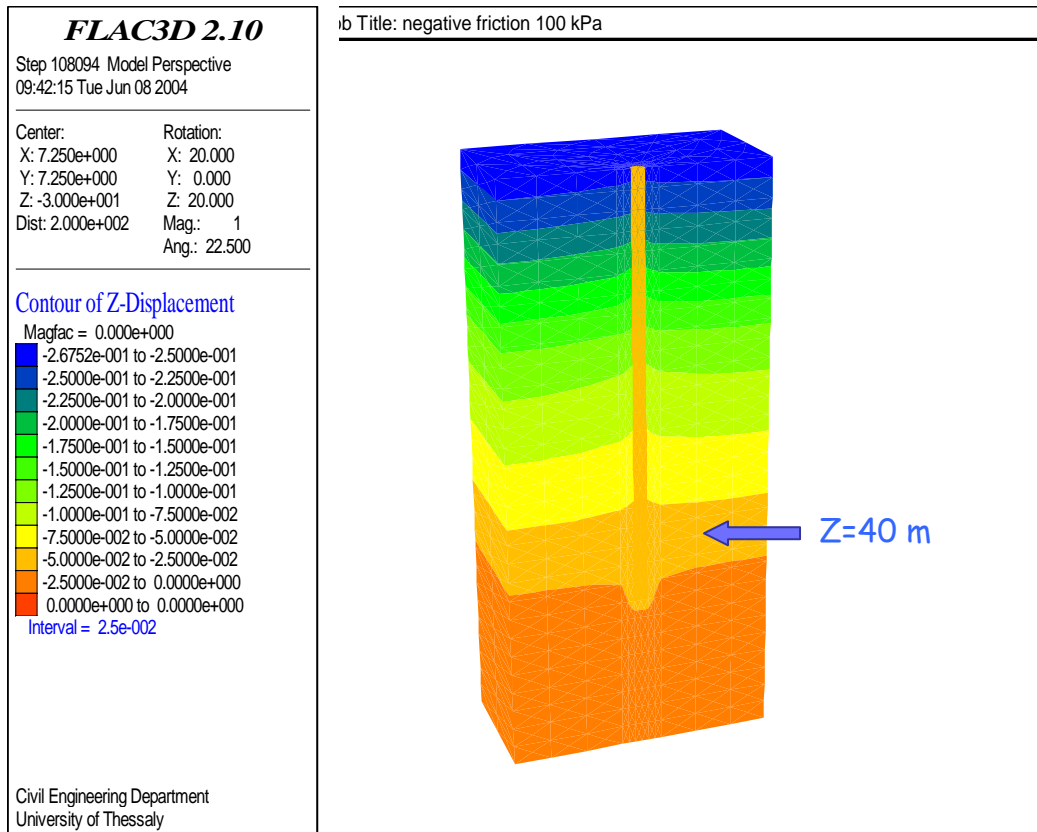
Σχήμα 6.8 Διάγραμμα κατανομής του φορτίου που μεταφέρεται στον πάσσαλο συναρτήσει του βάθους (Comodromos and Bareka, 2005a).



Σχήμα 6.9 Διαγράμματα καθίζησης πάσσαλου και περιβάλλοντος εδάφους για επιφανειακή φόρτιση (α) 5 kPa και (β) 100 kPa (Comodromos and Bareka, 2005a).

Στο σχήμα 6.9 δίνεται το διάγραμμα καθίζησης του πάσσαλου και του περιβάλλοντος εδάφους συναρτήσει του βάθους για δύο περιπτώσεις επιφανειακής φόρτισης. Από το σχήμα γίνεται σαφές ότι όσο αυξάνεται το εξωτερικά επιβαλλόμενο

φορτίο, τόσο αυξάνεται και το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο ουδέτερος άξονας. Στο σχήμα 6.10 απεικονίζονται οι ισοτιμές των μετακινήσεων για φορτίο 100 kPa όπως διεξάγονται από τον κώδικα FLAC^{3D}. Παρατηρείται χαρακτηριστικά ότι το περιβάλλον έδαφος εμφανίζει μεγαλύτερες καθιζήσεις από το μεμονωμένο πάσσαλο μέχρι το βάθος των 40 m, όπου αντιστοιχεί το ουδέτερο σημείο και παρατηρείται εξίσωση των καθιζήσεων για τον πάσσαλο και το περιβάλλον έδαφος.

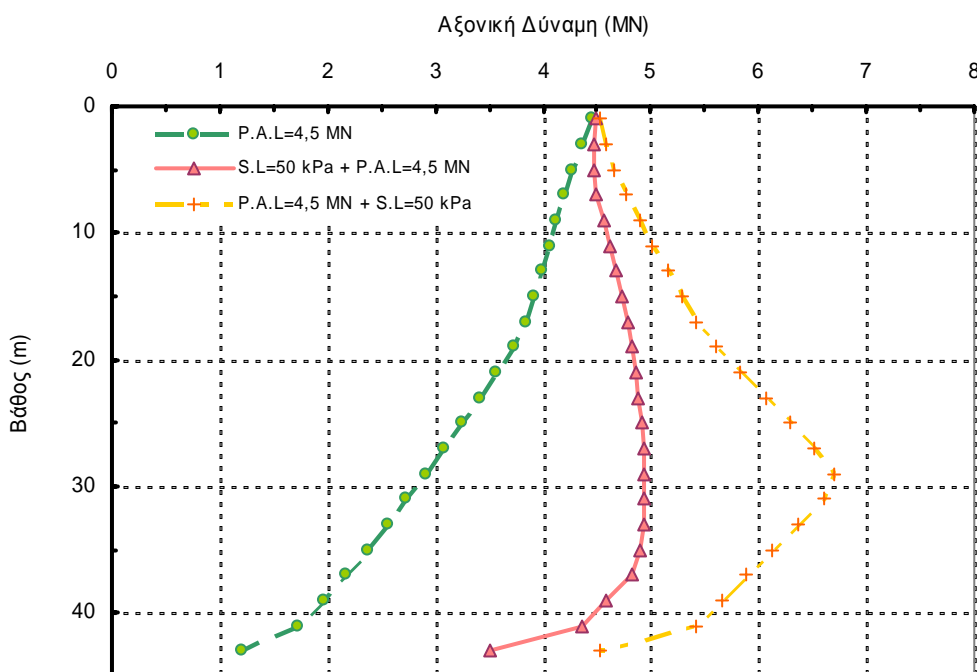


Σχήμα 6.10 Ισοτιμές των μετακινήσεων για φορτίο 100 kPa, αποτελέσματα από FLAC^{3D}

Οι επιλύσεις για διάφορες επιφανειακές φορτίσεις επέτρεψαν την καλύτερη κατανόηση της δράσης των αρνητικών τριβών καθώς και την ποσοτικοποίησή τους για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Επιπρόσθετα καταδεικνύεται η μεγάλη σημασία της κατασκευαστικής ακολουθίας των τεχνικών έργων, όπου αναμένεται δράση αρνητικών τριβών. Για πρακτικούς κυρίως λόγους κατά την κατασκευή των γεφυρών κατασκευάζονται πρώτα οι πάσσαλοι και στη συνέχεια τα επιχώματα πρόσβασης. Ήδη από το σχήμα 6.7, αν ολοκληρώσει κανείς τα διαγράμματα των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων για τις αναφερόμενες περιπτώσεις φορτίσεων (S.L.= 50 kPa, P.A.L.= 4500 kN) και (P.A.L.= 4500 kN, S.L.= 50 kPa) εύκολα μπορεί να αποτιμήσει τη μεγάλη διαφορά. Είναι γενικώς αποδεκτό ότι η επίδραση των αρνητικών τριβών μειώνεται όταν το επίχωμα προηγείται της κατασκευής της γέφυρας (η περίπτωση αναφέρεται στην κατασκευή του πασσάλου, στη συνέχεια του επιχώματος πρόσβασης και στη συνέχεια της γέφυρας οπότε και επιβάλλεται το αξονικό φορτίο).

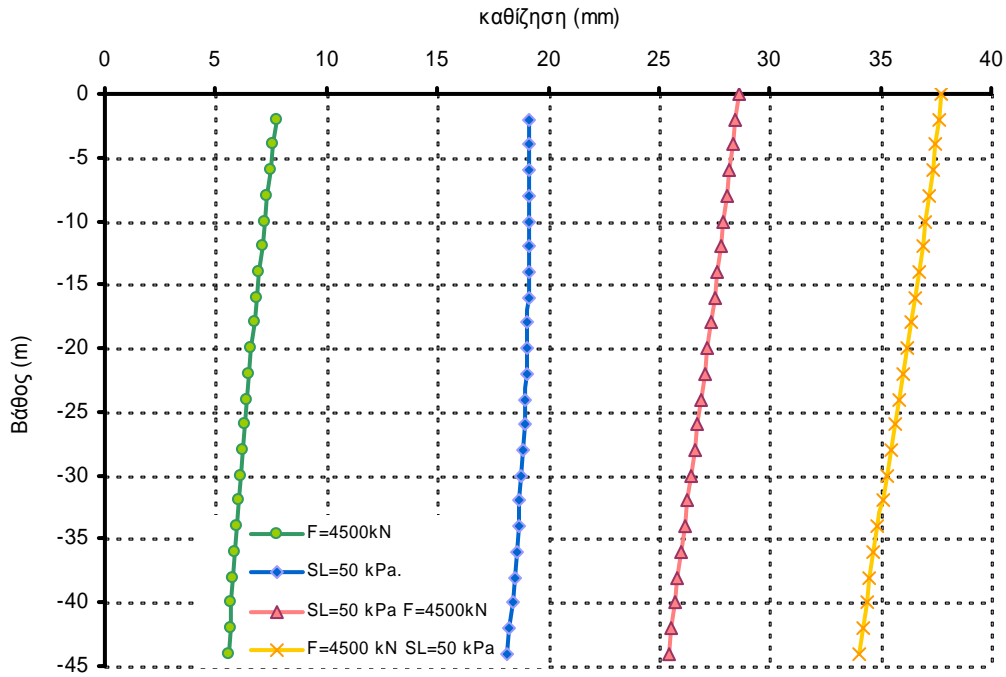
Στο σχήμα 6.11 δίνεται η κατανομή της δύναμης κατά μήκος του πασσάλου για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- (α) Κατά την πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται μόνο το φορτίο λειτουργίας των 4.5 MN. Η δύναμη στην κεφαλή του πασσάλου είναι προφανώς ίση με την επιβαλλόμενη και μειώνεται σταδιακά μέχρι την αιχμή όπου παίρνει την τιμή των 1.2 MN. Το υπόλοιπο φορτίο των 3.3 MN αναλαμβάνεται από την πλευρική αντίσταση.
- (β) Κατά τη δεύτερη περίπτωση επιβάλλεται αρχικά η επιφανειακή φόρτιση των 50 kPa και ακολουθεί το φορτίο λειτουργίας των 4.5 MN (S.L.= 50 kPa, P.A.L.= 4500 kN). Παρατηρείται ότι η αξονική δύναμη του πασσάλου αυξάνεται με το βάθος λόγω της δράσης των αρνητικών τριβών. Το επιπρόσθετο φορτίο είναι εντούτοις αισθητά περιορισμένο και οδηγεί στη μέγιστη τιμή των 4.94 MN, γεγονός το οποίο συνιστά αύξηση της τάξης του 10% του φορτίου λειτουργίας.
- (γ) Κατά την τρίτη περίπτωση επιβάλλεται αρχικά το φορτίο λειτουργίας των 4.5 MN και στη συνέχεια η επιφανειακή φόρτιση των 50 kPa (P.A.L.= 4500 kN, S.L.= 50 kPa). Κατά την περίπτωση αυτή το αξονικό φορτίο του πασσάλου εμφανίζει αισθητά μεγαλύτερη αύξηση, η οποία οδηγεί σε μέγιστη τιμή 6.7 MN, γεγονός το οποίο συνιστά αύξηση της τάξης του 50% του φορτίου λειτουργίας.

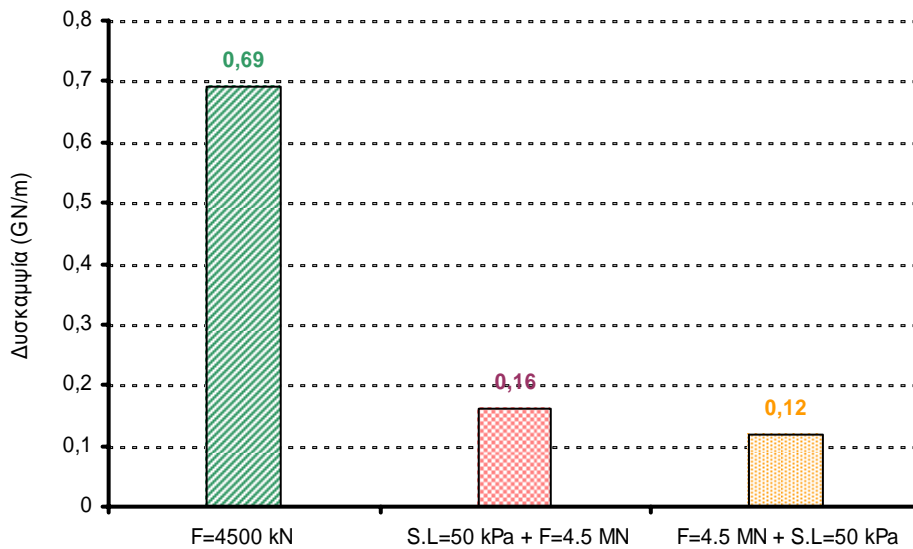


Σχήμα 6.11 Διάγραμμα αξονικής δύναμης στον πάσσαλο συναρτήσει του βάθους για διάφορους συνδυασμούς φόρτισης (Comodromos and Bareka, 2005a).

Σημαντική είναι επίσης και η διαφορά στις προκαλούμενες καθιζήσεις κατά τις τρεις αυτές περιπτώσεις, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζονται στο σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.12 Διάγραμμα καθίζησης-βάθους για διάφορους συνδυασμούς φόρτισης.



Σχήμα 6.13 Ιστογράμμο δυσκαμψίας της θεμελίωσης για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης.

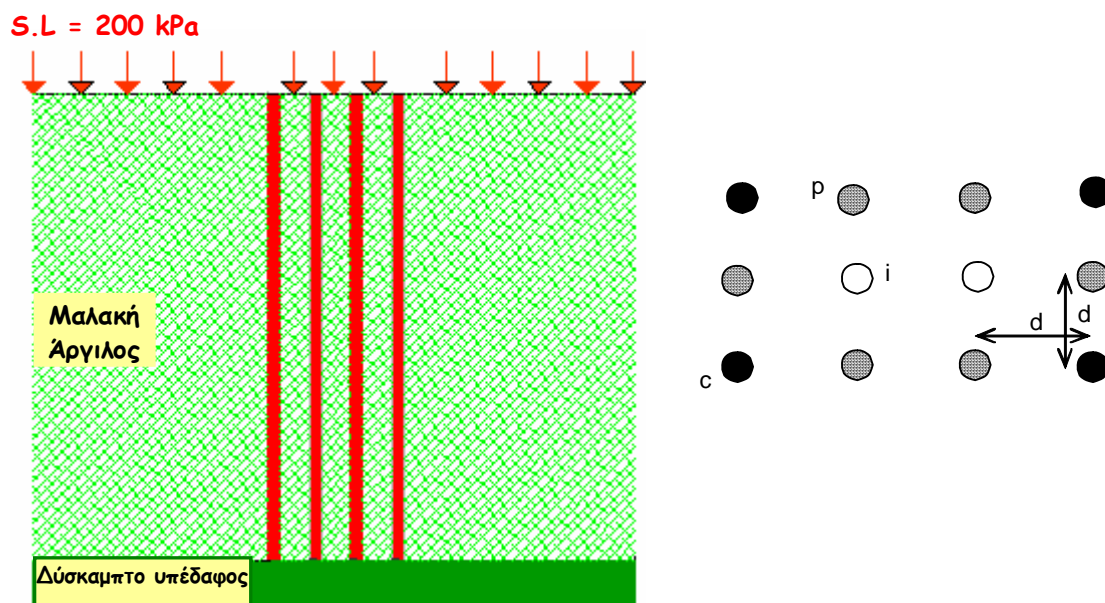
Στο σχήμα 6.13 απεικονίζονται σε μορφή ιστογραμμάτων οι δυσκαμψίες των τριών περιπτώσεων. Ειδικότερα η δυσκαμψία σε κατακόρυφη φόρτιση του μεμονωμένου πασσάλου είναι ίση με 0.69 GN/m για την πρώτη περίπτωση, 0.16 GN/m για τη δεύτερη και 0.12 GN/m για την τρίτη.

Από την παρουσίαση των ανωτέρω διαγραμμάτων προκύπτει με σαφήνεια ο σημαντικός ρόλος της αλληλουχίας κατασκευής των διαφόρων φάσεων και οι επιπτώσεις που αυτή επιφέρει στα εντατικά και κινηματικά μεγέθη για την περίπτωση

πάντα του μεμονωμένου πασσάλου. Στην επόμενη παράγραφο ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία για την αποτίμηση των επιπτώσεων στην περίπτωση της ομάδας πασσάλων.

6.2.2 Ανάλυση ομάδας πασσάλων

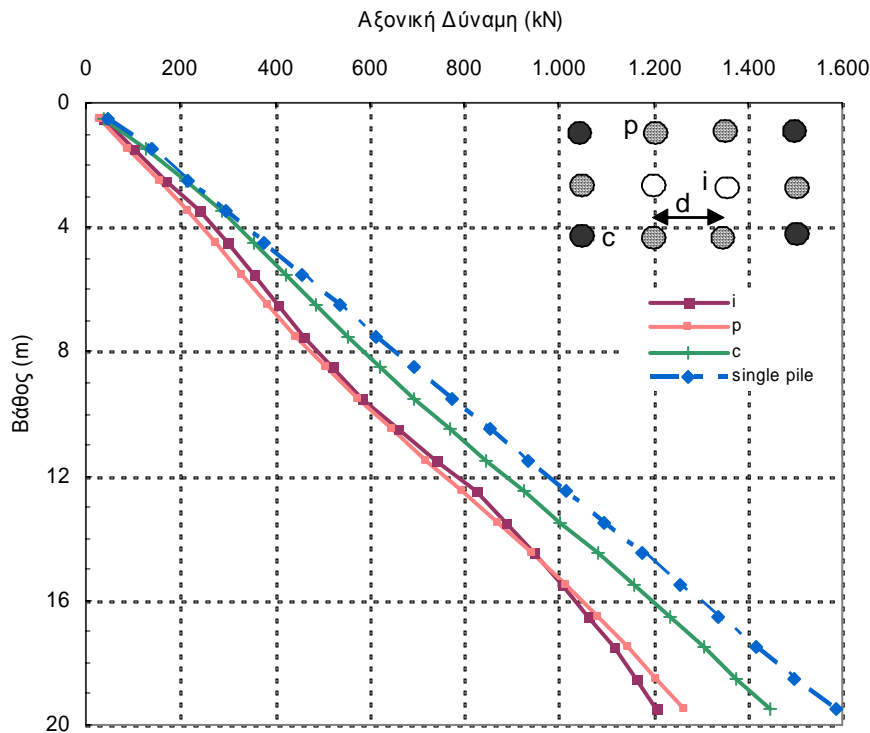
Κατά παρόμοιο τρόπο με τη μεθοδολογία ανάλυσης του μεμονωμένου πασσάλου πραγματοποιείται και για την ομάδα πασσάλων αρχικά απλοποιημένη περίπτωση ανάλυσης, η οποία έχει απασχολήσει ερευνητικά και έχει διερευνηθεί από τρίτους ερευνητές. Επιλέγεται το πρόβλημα το οποίο απασχόλησε τον Combarieu (1985) και το οποίο περιλαμβάνει ομάδα πασσάλων σε διάταξη 3*4, σε αργιλικό έδαφος και με ανένδοτη πρακτικά αιχμή. Το πρόβλημα χαρακτηρίζεται από απλότητα ενώ απετέλεσε και πεδίο έρευνας διαφόρων ερευνητών και υπό την έννοια αυτή μπορούν εύκολα να γίνουν εποικοδομητικές συγκρίσεις. Για την περίπτωση αυτή πραγματοποιήθηκε τριδιάστατη ανάλυση τόσο για την ομάδα των πασσάλων όσο και για το μεμονωμένο πάσσαλο για επιφανειακή φόρτιση 200 kPa. Οι πάσσαλοι είναι διαμέτρου $D=0.5$ m και μήκους $L=20$ m. Στα αποτελέσματα των αναλύσεων γίνεται αναφορά για τους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας: τον κεντρικό πάσσαλο i , τον περιμετρικό πάσσαλο p και τον γωνιακό πάσσαλο c . Οι υπόλοιποι πάσσαλοι επιδεικνύουν ταυτόσημη συμπεριφορά με τους τρεις αυτούς χαρακτηριστικούς πασσάλους, όπως ενδεικτικά συμβολίζεται στο σχήμα 6.14.



D (m)	L (m)	C (kPa)	Φ (deg)	E (MPa)	G (MPa)	ν
0,5	20	30	0	10	3,703	0,35

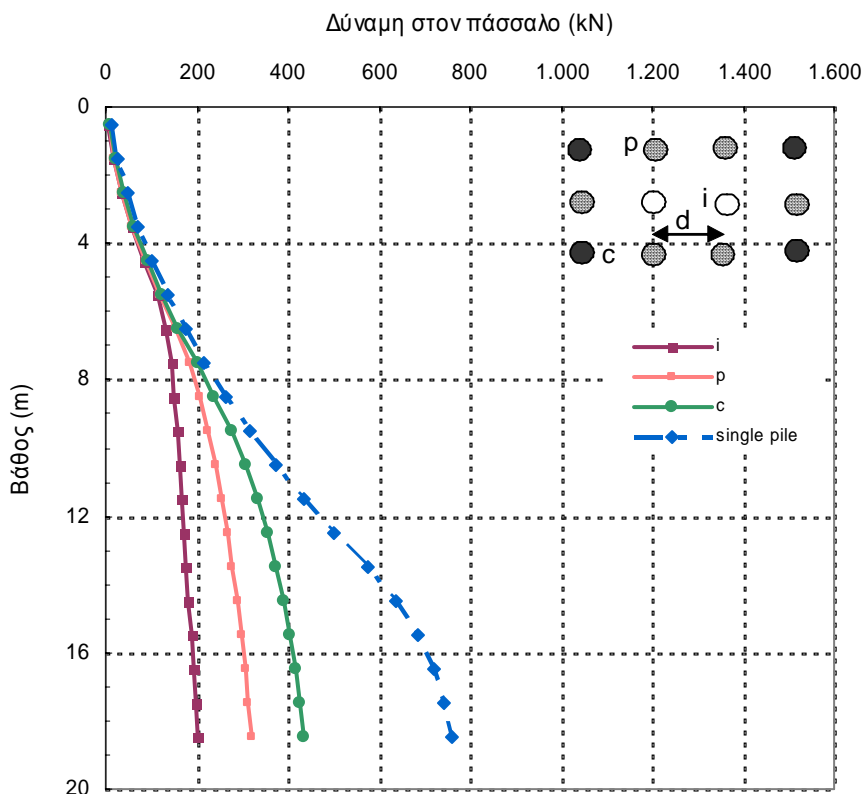
Σχήμα 6.14 Ομάδα πασσάλων σε διάταξη 3x4, περίπτωση Combarieu (1985). Γεωμετρία του προβλήματος, διάταξη των πασσάλων και εδαφικές παράμετροι.

Στο σχήμα 6.15 δίνεται η κατανομή της αξονικής δύναμης για τους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους καθώς και για τον αντίστοιχο μεμονωμένο πάσσαλο. Παρατηρείται ότι ο κεντρικός και ο περιμετρικός πάσσαλος αναλαμβάνουν το ίδιο περίπου φορτίο ενώ ο γωνιακός πάσσαλος προσεγγίζει τη συμπεριφορά του μεμονωμένου πασσάλου. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη τιμή της επιφανειακής φόρτισης. Χρησιμοποιώντας τριδιάστατη ανάλυση και δίνοντας τη δυνατότητα ολίσθησης στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους, οι Lee et al. (2002) προβλέπουν αξονικό φορτίο οφειλόμενο στη δράση των αρνητικών τριβών της τάξης των 1.558 MN. Η τιμή αυτή είναι, πάντα σύμφωνα με τους ανωτέρω ερευνητές κατά πολύ μικρότερη από την περίπτωση ανάλυσης χωρίς διεπιφάνειες κατά την οποία το προκύπτον φορτίο παίρνει την τιμή των 2.640 MN. Η ανάλυση που διεξήχθη στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας με χρήση του κώδικα του FLAC^{3D}, κατά την οποία περιλαμβάνεται η χρήση στοιχείων διεπιφάνειας με δυνατότητα ολίσθησης κατά μήκος της περιμέτρου του πασσάλου οδήγησε σε συνολικό φορτίο λόγω αρνητικών τριβών ίσο με 1.588 MN, τιμή ταυτόσημη με την τιμή των Lee et al.



Σχήμα 6.15 Διάγραμμα κατανομής της αξονικής δύναμης συναρτήσει του βάθους για επιφανειακή φόρτιση 200 kPa (Comodromos and Bareka, 2005a).

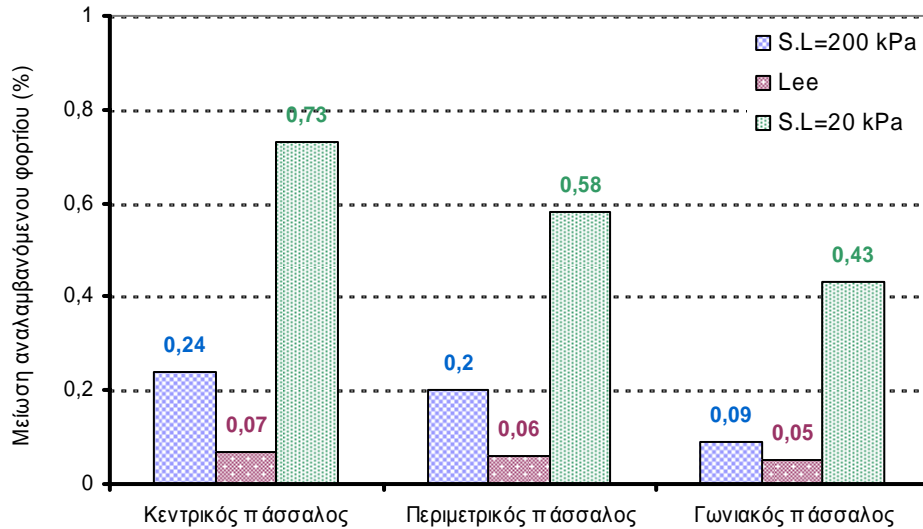
Στη συνέχεια εξετάστηκε η ίδια περίπτωση για πολύ μικρότερο φορτίο, της τάξης των 20 kPa. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 6.16 υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση στη συμπεριφορά μεταξύ των πασσάλων, και πάλι όμως ο γωνιακός πάσσαλος είναι αυτός που πλησιάζει πιο πολύ στην καμπύλη του μεμονωμένου πασσάλου, για λόγους που έχουν ήδη επεξηγηθεί στις προηγούμενες παραγράφους.



Σχήμα 6.16 Διάγραμμα κατανομής της αξονικής δύναμης συναρτήσει του βάθους για επιφανειακή φόρτιση 20 kPa (Comodromos and Bareka, 2005a).

Εξετάζοντας αναλυτικότερα τις επιπτώσεις της δράσης των αρνητικών τριβών στην ομάδα πασσάλων, παρατηρείται ότι για τη φόρτιση των 200 kPa η μείωση του αναλαμβανόμενου αξονικού φορτίου σε σχέση πάντα με το μεμονωμένο πάσσαλο ανέρχεται στο 24% για τον κεντρικό πάσσαλο, 20% για τον περιμετρικό και 9% για το γωνιακό πάσσαλο. Οι αντίστοιχες τιμές που προσδιορίστηκαν από τους Lee *et al.* (2002) είναι 7%, 6% και 5%. Η εφαρμογή αισθητά μικρότερου επιφανειακού φορτίου, περίπτωση των 20 kPa, οδηγεί σε μείωση του αναλαμβανόμενου φορτίου σε σχέση πάντα με τον αντίστοιχο μεμονωμένο, κατά 73% για τον κεντρικό, 58% για τον περιμετρικό και 43% για το γωνιακό. Στο σχήμα 6.17 απεικονίζεται η σύγκριση των ανωτέρω αποτελεσμάτων υπό μορφή ιστογραμμάτων.

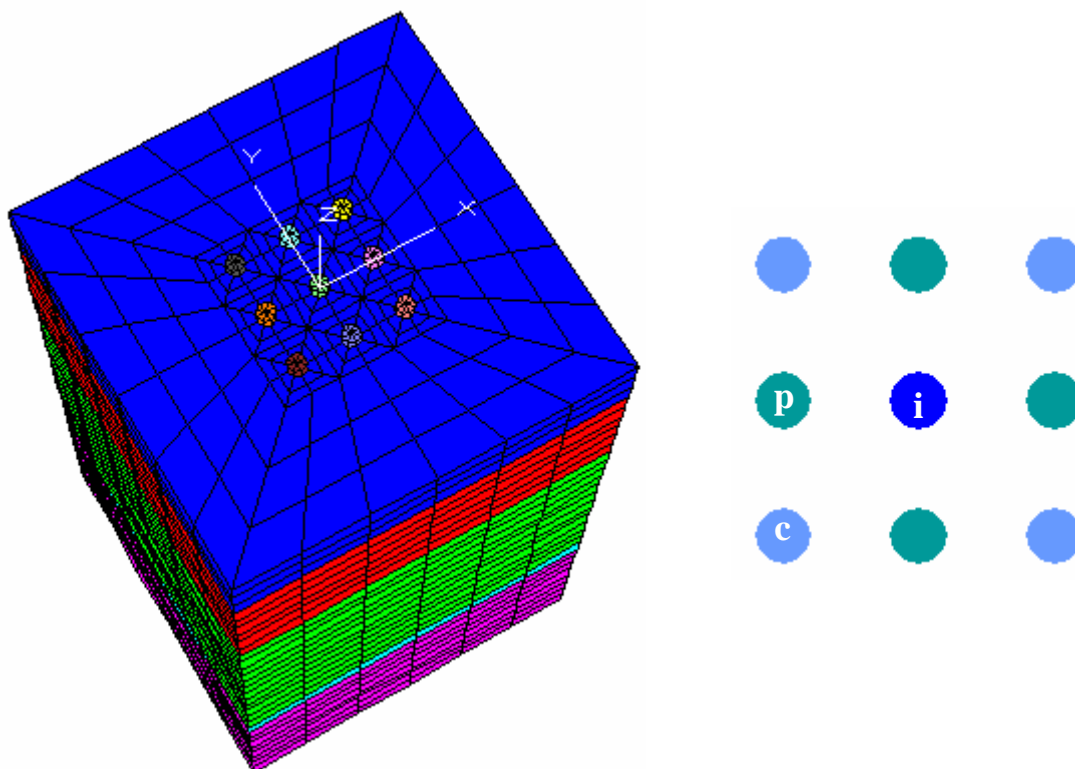
Η πολύ μεγαλύτερη αυτή μείωση θα πρέπει και πάλιν να αποδοθεί στο γεγονός ότι η μέγιστη επιρροή της ομάδας εμφανίζεται για μικρά φορτία όπου δεν έχει αρχίσει ακόμα η πλαστικοποίηση του εδάφους. Σε παρόμοια συμπέρασμα κατέληξαν για τις επιπτώσεις της ομάδας πασσάλων και οι Comodromos *et al.* (2003), Comodromos (2004) και Comodromos and Bareka (2005a).



Σχήμα 6.17 Ιστόγραμμα μείωσης του φορτίου σε σχέση με το μεμονωμένο πάσσαλο.

Το δεύτερο στάδιο διερεύνησης των επιπτώσεων της δράσης αρνητικών τριβών σε ομάδες πασσάλων πραγματοποιείται σε πολυστρωματικό έδαφος κατά αντίστοιχο τρόπο με το μεμονωμένο πάσσαλο και για την εδαφική τομή που αντιστοιχεί στον 6^ο προβλήτα του λιμανιού της Θεσσαλονίκης. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις διάταξης 3*3 με τη διαφορά ότι στην πρώτη περίπτωση θεωρείται αξονική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 3.0D, ενώ στη δεύτερη η σχετική απόσταση αυξάνεται σε 6.0D. Για λόγους σύγκρισης οι πάσσαλοι των ομάδων έχουν ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με τον αντίστοιχο μεμονωμένο πάσσαλο της προηγούμενης παραγράφου. Οι πάσσαλοι και των δύο ομάδων θεωρούνται πακτωμένοι σε ενιαίο κεφαλόδεσμο μεγάλης δυσκαμψίας. Στο σχήμα 6.18 απεικονίζεται ο κάρναβος ανάλυσης ο οποίος ικανοποιεί τις απαιτήσεις προσομοίωσης, όπως αυτές αναπτύσσονται στην αντίστοιχη παράγραφο 4.3. Ο κάρναβος εκτείνεται σε βάθος 80 m, περιλαμβάνει 8712 στοιχεία τριών διαστάσεων, 9961 κόμβους και 7766 στοιχεία διεπιφανειών, ενώ ο πάσσαλος έχει μήκος 45 m.

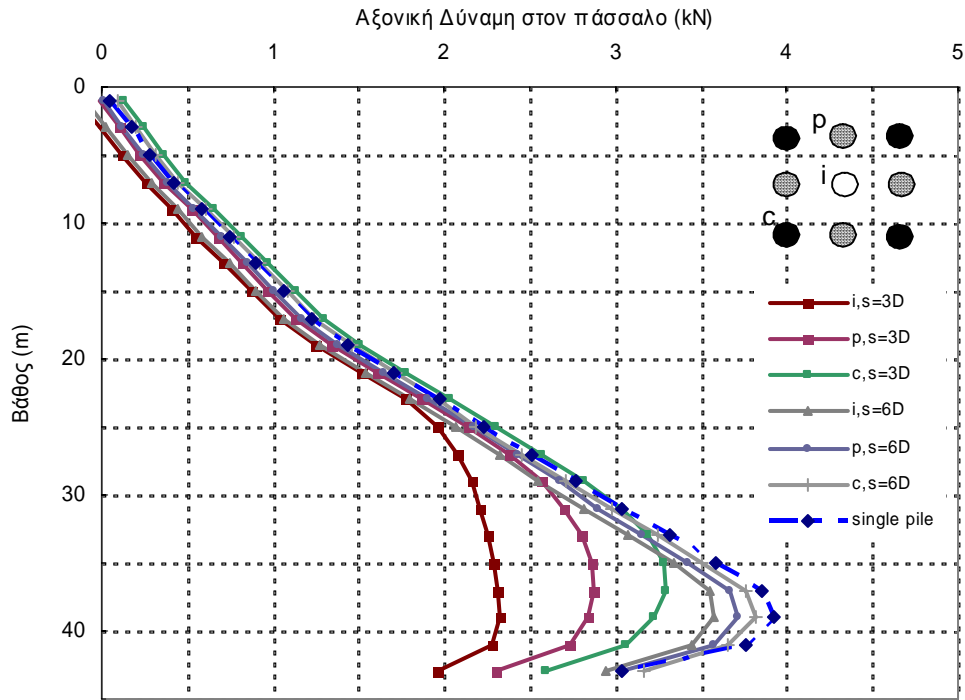
Κατά το πρώτο στάδιο της ανάλυσης, μετά την εισαγωγή του αρχικού εντατικού πεδίου, επιβάλλεται επιφανειακή φόρτιση του εδάφους ίση με 50 kPa και στις δύο διατάξεις. Στο διάγραμμα του σχήματος 6.19 παρουσιάζεται η κατανομή της αξονικής δύναμης στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους για τις ομάδες, καθώς και για τον μεμονωμένο πάσσαλο. Παρατηρείται κατ'αντιστοιχία της προηγούμενης ανάλυσης ομάδας με ελεύθερη κεφαλή, ότι η συμπεριφορά του γωνιακού πασσάλου για την περίπτωση της διάταξης με αξονική απόσταση 6.0D προσεγγίζει την αντίστοιχη του μεμονωμένου πασσάλου. Σε αντίστιξη, και όπως άλλωστε αναμένεται σύμφωνα με όσα έχουν μέχρι τώρα αναφερθεί, ο κεντρικός πάσσαλος της διάταξης με αξονική απόσταση 3.0D εμφανίζει τη μικρότερη επιβάρυνση.



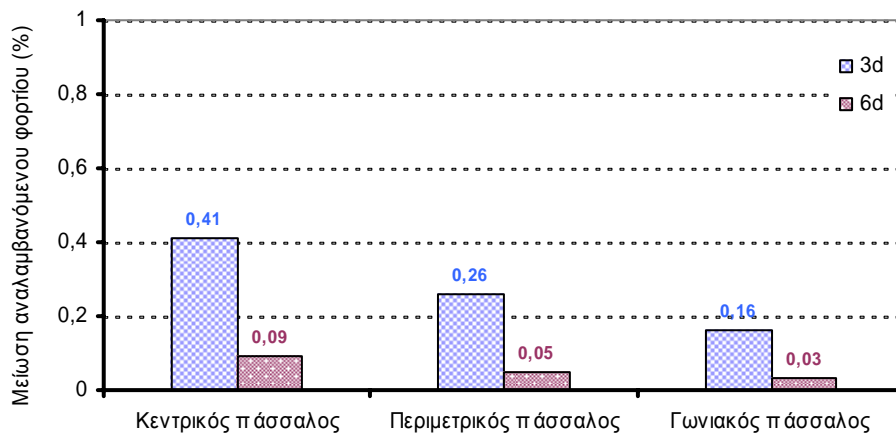
Σχήμα 6.18 Κάνναβος Πεπερασμένων Διαφορών από FLAC^{3D} και διάταξη ομάδας 3*3

Ας σημειωθεί ακόμη ότι στις ομάδες πασσάλων με δεσμευμένη κεφαλή οι επιπτώσεις λόγω της δράσης των αρνητικών τριβών είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες με ελεύθερη κεφαλή. Ειδικότερα για τη διάταξη 3*3 με αξονική απόσταση 3.0D η επερχόμενη μείωση φορτίου για τον κεντρικό πάσσαλο είναι 41%, για τον περιμετρικό 26% και για το γωνιακό 16%. Όταν η αξονική απόσταση αυξηθεί σε 6.0D η μείωση είναι ιδιαίτερα μικρή και ειδικότερα προβλέπεται 9% για τον κεντρικό πάσσαλο, 5% για τον περιμετρικό και 3% για το γωνιακό. Κατά συνέπεια η αύξηση της αξονικής απόστασης, όπως αναμένεται κατά αντίστοιχο τρόπο με τις επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης για φόρτιση ομάδας, μειώνει τις επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης, με μόνη διαφορά ότι στην περίπτωση των αρνητικών τριβών η αύξηση είναι επιβαρυντική.

Στο σχήμα 6.20 απεικονίζεται σε ιστόγραμμα ο συντελεστής μείωσης του φορτίου που αναπτύσσεται λόγω της δράσης των αρνητικών τριβών στους χαρακτηριστικούς πασσάλους ομάδας σε σχέση πάντα με το μεμονωμένο πάσσαλο. Στο σχήμα 6.21 δίνονται οι καθιζήσεις του εδάφους, των ομάδων και του μεμονωμένου πασσάλου, καθώς και η αντίστοιχη θέση του εκάστοτε ουδέτερου σημείου.

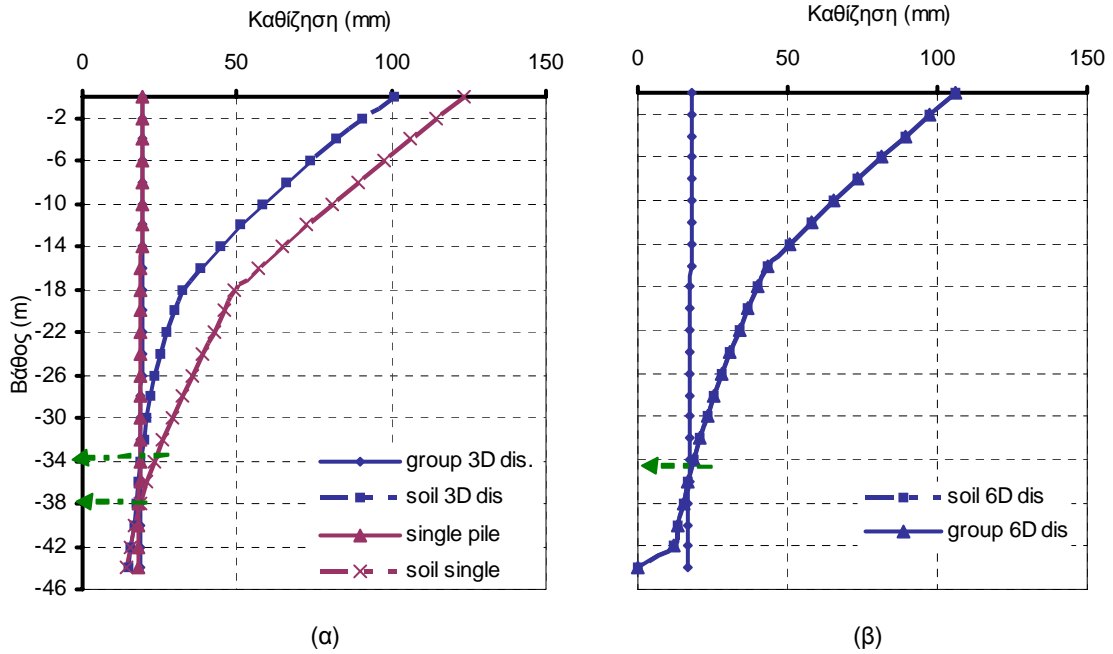


Σχήμα 6.19 Διάγραμμα κατανομής του αξονικού φορτίου στους πασσάλους συναρτήσει του βάθους (Comodromos and Bareka, 2005a).

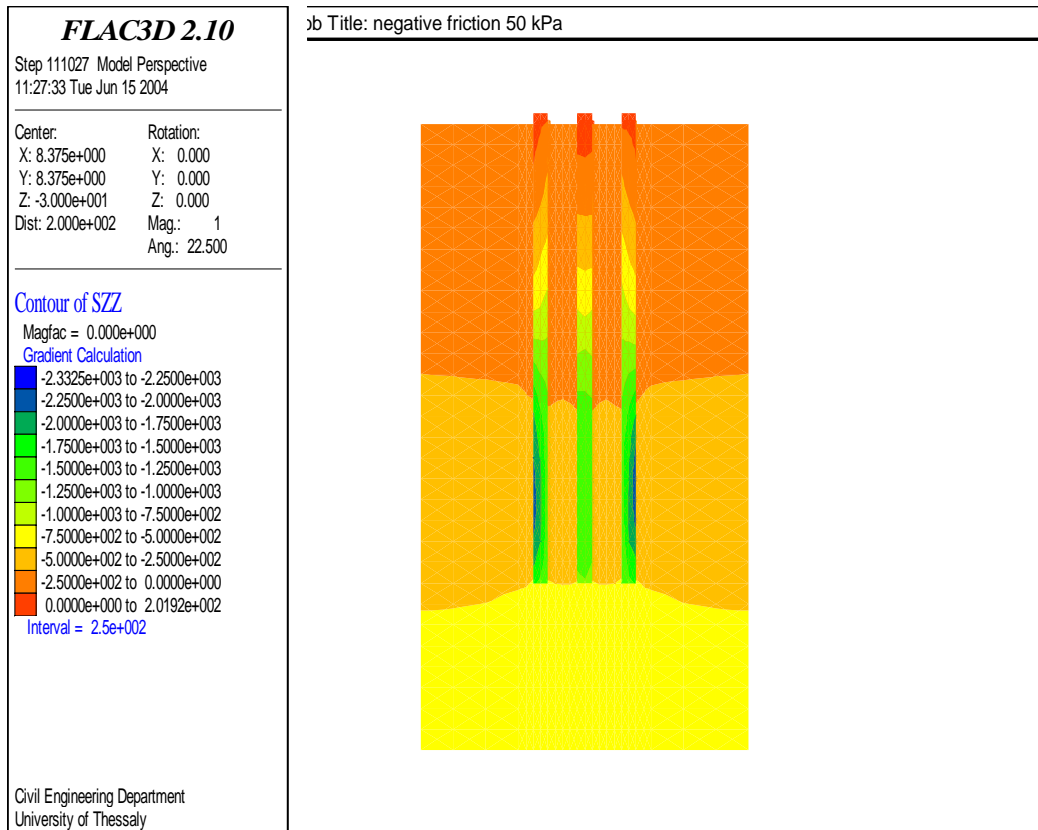


Σχήμα 6.20 Μείωση του φορτίου σε ομάδα πασσάλων λόγω της δράσης των αρνητικών τριβών σε σχέση με το αντίστοιχο πρόβλημα του μεμονωμένου πασσάλου.

Ενδιαφέρουσα είναι τέλος η απεικόνιση των ισοτιμών των τάσεων από την τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση στο σχήμα 6.22, όπου διαφαίνεται η επιβάρυνση των περιμετρικών πασσάλων.

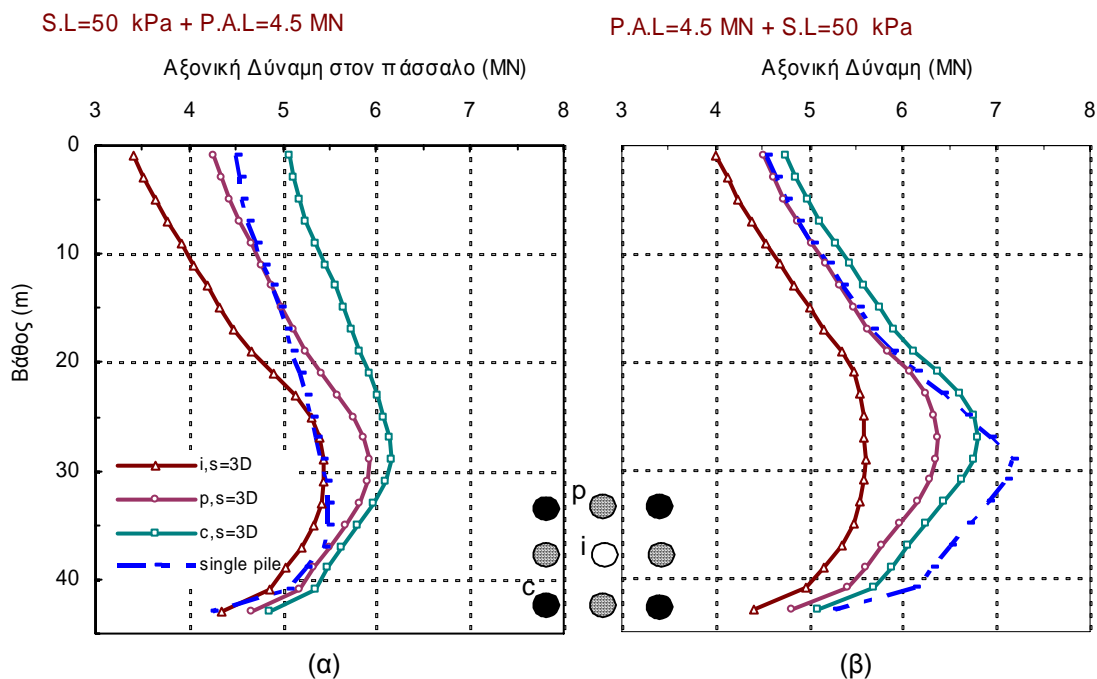


Σχήμα 6.21 Διάγραμμα βυθίσεων για επιφανειακή φόρτιση 50 kPa (α) για την ομάδα με σχετική απόσταση 3.0D και για το μεμονωμένο πάσσαλο (β) για την ομάδα με σχετική απόσταση 6.0D



Σχήμα 6.22 Απεικόνιση ισοτιμών των κατακόρυφων τάσεων για επιφανειακή φόρτιση S.L = 50 kPa, ομάδα 3*3, αξονική απόσταση 3.0D, χαρακτηριστική τομή y=0.

Στο σχήμα 6.23 δίνεται σε αντίστιξη η απόκριση των χαρακτηριστικών πασσάλων σε σύγκριση με το μεμονωμένο πάσσαλο για διαφορετική αλληλουχία φόρτισης. Ειδικότερα στο σχήμα 6.23α απεικονίζεται η κατανομή της αξονικής δύναμης με το βάθος για τους χαρακτηριστικούς πασσάλους στην περίπτωση που επιβάλλεται πρώτα το επιφανειακό φορτίο και στη συνέχεια το αξονικό φορτίο της ομάδας, ενώ στο σχήμα 6.23β εφαρμόζεται η ανάστροφη αλληλουχία. Παρατηρείται ότι στην πρώτη περίπτωση η μέγιστη αναλαμβανόμενη αξονική δύναμη για τον κεντρικό πάσσαλο προσεγγίζει την αντίστοιχη τιμή του μεμονωμένου, ενώ οι υπόλοιποι πάσσαλοι επιβαρύνονται περισσότερο από τη δράση των αρνητικών τριβών και κατά συνέπεια αναλαμβάνουν μεγαλύτερες δυνάμεις. Το άθροισμα της μέγιστης δύναμης και για τους εννέα πασσάλους οδηγεί σε φορτίο κατά 33% μεγαλύτερο από το συνολικά εφαρμοζόμενο φορτίο των 40.5 MN και οφείλεται στη δράση των αρνητικών τριβών. Η κατάσταση επιδεινώνεται όταν το φορτίο λειτουργίας εφαρμόζεται πριν την τοποθέτηση του επιχώματος. Στην περίπτωση αυτή το άθροισμα της μέγιστης δύναμης και για τους εννέα πασσάλους είναι 43% μεγαλύτερο από το συνολικά εφαρμοζόμενο φορτίο των 40.5 MN, σχήμα 6.23(β).



Σχήμα 6.23 Κατανομή φορτίου στους πασσάλους με το βάθος για την περίπτωση φόρτισης (α) πρώτα με επιφανειακή τάση 50 kPa και στη συνέχεια με εφαρμογή του φορτίου λειτουργίας των 4.5 MN και (β) πρώτα με το φορτίο λειτουργίας των 4.5 MN και στη συνέχεια με επιφανειακή φόρτιση 50 kPa (Comodromos and Bareka, 2005a).

Η δυσκαμψία της θεμελίωσης χωρίς να συνυπολογιστεί η επίδραση των αρνητικών τριβών είναι ίση με 1.23 GN/m, ενώ αν ληφθούν υπόψη οι αρνητικές τριβές λόγω της παρουσίας του επιχώματος, η δυσκαμψία μειώνεται στα 0.9 GN/m. Για την ίδια κατά συνέπεια διάταξη η δυσκαμψία σε κατακόρυφο φορτίο των ακροβάθρων γέφυρας είναι κατά 27% μικρότερη από αυτή των μεσοβάθρων. Ως μέτρο σύγκρισης

αναφέρεται ότι στην περίπτωση του μεμονωμένου πασσάλου η αντίστοιχη μείωση δυσκαμψίας λόγω των αρνητικών τριβών είναι της τάξης του 76%. Κατά συνέπεια η δράση των αρνητικών τριβών σε ομάδα πασσάλων δεν μπορεί να αποτελέσει το πολλαπλάσιο αυτής επί του μεμονωμένου πασσάλου πολλαπλασιαζόμενης με τον αριθμό των πασσάλων, γεγονός αντίστοιχο με τη συμπεριφορά ομάδας υπό κατακόρυφη φόρτιση.

6.3 Συμπεράσματα

Τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των αναλύσεων για την εκτίμηση των επιπτώσεων της δράσης των αρνητικών τριβών σε μεμονωμένο πάσσαλο και ομάδες πασσάλων μπορούν να συνοψισθούν στα ακόλουθα σημεία:

- Οι απλοποιημένες γραμμικές ελαστικές προσεγγίσεις υπερεκτιμούν κατά πολύ τις επιπτώσεις του φαινομένου και θα μπορούσαν να αποτελέσουν μόνο άνω όριο της δράσης των αρνητικών τριβών. Αντίθετα οι τριδιάστατες μη-γραμμικές αναλύσεις είναι σε θέση να προσεγγίσουν το πρόβλημα με ιδιαίτερη ακρίβεια.
- Η αλληλουχία των κατασκευαστικών φάσεων ενός τεχνικού έργου επηρεάζει σημαντικά τις επιπτώσεις από τη δράση των αρνητικών τριβών και μπορεί να οδηγήσει μετά από σωστή επιλογή σε σημαντική μείωση τόσο στο κινηματικό όσο και στο εντατικό πεδίο.
- Οι επιπτώσεις της δράσης των αρνητικών τριβών είναι μεγαλύτερες στις ομάδες δεσμευμένης κεφαλής παρά στις ομάδες ελεύθερης κεφαλής.
- Οι επιπτώσεις της δράσης των αρνητικών τριβών είναι αισθητά μεγαλύτερες στους γωνιακούς πασσάλους, μικρότερες στους περιμετρικούς και σημαντικά μικρότερες στους εσωτερικούς και τους κεντρικούς πασσάλους. Ειδικότερα στους γωνιακούς πασσάλους παρατηρείται ότι οι επιπτώσεις είναι παραπλήσιες με αυτές των μεμονωμένων πασσάλων.
- Σε ομάδες πασσάλων με μεγάλη αξονική απόσταση (περίπτωση με αξονική απόσταση 6.0D) όλοι οι πάσσαλοι της ομάδας επηρεάζονται σχεδόν όσο και ο μεμονωμένος και κατά συνέπεια στις περιπτώσεις αυτές οι επιπτώσεις της δράσης των αρνητικών τριβών είναι σημαντικά μεγαλύτερες. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην περιορισμένη επίπτωση της ομάδας, κατά αντίστοιχο τρόπο με τη συμπεριφορά ομάδων υπό κατακόρυφη φόρτιση, με μόνη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή η αύξηση της αξονικής απόστασης είναι επιβαρυντική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Σύνοψη – συμπεράσματα - προτάσεις

7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Η απόκριση ομάδας πασσάλων και ο προσδιορισμός των συνεπειών της αλληλεπίδρασης υπό κατακόρυφη φόρτιση αποτελεί το κύριο αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Η αποτίμηση της αλληλεπίδρασης στη φέρουσα ικανότητα ομάδας πασσάλων αποτελεί το πρώτο ερευνητικό πεδίο της διατριβής με απώτερο στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα διεθνώς προτεινομένων μεθοδολογιών. Η συνολική απόκριση ομάδας πασσάλων αποτελεί ιδιαίτερα πιο σύνθετο αντικείμενο, το οποίο ούτως ή άλλως εμπεριέχει και το προηγούμενο στάδιο, και αποτελεί το δεύτερο και πλέον ουσιαστικό ερευνητικό πεδίο. Το ενδιαφέρον εστιάζεται ιδιαίτερα στη δυσκαμψία ομάδας πασσάλων, που συνήθως αποτελεί και τον καθοριστικό παράγοντα προσομοίωσης της απόκρισης των πασσαλοθεμελιώσεων με σημαντικές επιπτώσεις στο σχεδιασμό της προς θεμελίωση ανωδομής. Η αποτίμηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης στους επιμέρους πασσάλους αποτελεί επίσης ιδιαίτερα ενδιαφέρον σημείο, καθ'ότι καθορίζει το σχεδιασμό της θεμελίωσης και προσδιορίζει τα μέτρα που μπορούν να επιτύχουν ομοιομορφοποίηση των αναπτυσσόμενων δράσεων στους πασσάλους και τον ενιαίο κεφαλόδεσμο που συνδέει τις κεφαλές των πασσάλων. Πέραν των ανωτέρω σημείων εξετάζονται και διάφορα θέματα που αποτελούν ειδικές, σημαντικές εντούτοις περιπτώσεις ανάπτυξης ειδικότερων μηχανισμών των θεμελιώσεων με πασσάλους, όπως η θεμελίωση ομάδας πασσάλων εδραζόμενων σε βραχώδες υπόβαθρο και η ανάπτυξη αρνητικών τριβών.

Ιδιαίτερη προσπάθεια καταβλήθηκε στον προσδιορισμό του επαυξητικού συντελεστή καθίζησης R_a , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος καθίζησης ομάδας πασσάλων και μεμονωμένου, για το ίδιο μέσο φορτίο. Ο συντελεστής αυτός αποδείχτηκε ότι δεν αποτελεί μόνο συνάρτηση της διάταξης των πασσάλων, όπως άλλωστε είναι κοινά αποδεκτό, αλλά εξαρτάται και από το επίπεδο της καθίζησης. Ο προσδιορισμός του ανωτέρω συντελεστή είναι ιδιαίτερα σημαντικός δεδομένου ότι δίνει τη δυνατότητα πρόβλεψης απόκρισης ομάδας με ικανοποιητική ακρίβεια. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή R_a εξετάστηκε η ισχύς προταθείσας σχέσης και στη

συνέχεια προτάθηκε τροποποίηση της ώστε να βρει πεδίο εφαρμογής για το σύνολο σχεδόν των πρακτικώς εφαρμοζομένων διατάξεων ομάδων πασσάλων.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται συνοπτικά και αποτιμούνται τα αποτελέσματα της διατριβής.

Ομάδες πασσάλων σε εδαφικό σχηματισμό

Κύριο αντικείμενο της παρούσας διατριβής απετέλεσε η διερεύνηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων υπό κατακόρυφη φόρτιση και η αποτίμηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μελών της ομάδας. Για το σκοπό αυτό διεξήχθησαν τριδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις για διάφορες διατάξεις ομάδων πασσάλων μέσα σε ομογενή εδάφη, αργιλικά και αμμώδη. Εξετάστηκαν διατάξεις ομάδας 2*3, 3*3 και 5*5 με σχετική απόσταση μεταξύ των μελών της ομάδας 2.0D, 3.0D, 4.0D και 5.0D. Για όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις για δύο σχετικά μήκη πασσάλων, $L/D=25$ και 50, ενώ σε όλες τις αναλύσεις υιοθετείται διάμετρος πασσάλων ίση με $D=1$ m. Οι ανωτέρω περιπτώσεις επιλύονται για τέσσερις περιπτώσεις αργιλικού εδάφους και τρεις περιπτώσεις αμμώδους εδάφους. Για κάθε μία από αυτές πραγματοποιείται και η αντίστοιχη ανάλυση μεμονωμένου πασσάλου με στόχο τη σύγκριση των αποκρίσεων.

Πρώτη κατηγορία αναλύσεων αποτέλεσαν οι περιπτώσεις πασσάλων μέσα σε αργιλικό έδαφος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασε αρχικά η διερεύνηση της συμπεριφοράς του μεμονωμένου πασσάλου και ειδικότερα η διερεύνηση της κατανομής του επιβαλλόμενου φορτίου σε αντίσταση αιχμής και πλευρικής αντίστασης. Σε όλες τις κατηγορίες της αργίλου που αναλύθηκαν και για ανηγμένο μήκος $L/D=25$ το ποσοστό αντίστασης που αναλαμβάνεται από την παράπλευρη τριβή είναι της τάξης του 80% του συνολικού φορτίου και το υπόλοιπο 20% μεταβιβάζεται στην αιχμή. Τα ποσοστά αυτά αντιστοιχούν στη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου, ενώ στην περίπτωση επιβολής του επιτρεπόμενου φορτίου ή μικρότερου η αντίσταση τριβής αναλαμβάνει ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό. Η αύξηση του μήκους των πασσάλων ($L/D=50$) αυτονόητα οδηγεί επίσης στην αύξηση του ποσοστού της αντίστασης τριβής, σε σημείο που κατά την κατάσταση λειτουργίας τους οι πάσσαλοι αυτοί να μπορούν να θεωρηθούν ως αιωρούμενοι πάσσαλοι. Συμπεραίνεται επομένως ότι στους αργιλικούς σχηματισμούς η αντίσταση των πασσάλων κατά κύριο λόγο οφείλεται στην πλευρική αντίσταση, ενώ μικρό και μόνο μέρος αναλαμβάνεται από την αιχμή. Το συμπέρασμα δεν καλύπτει προφανώς την ιδιαίτερη περίπτωση των κοντών πασσάλων, όπου εκ των πραγμάτων η πλευρική αντίσταση μειώνεται λόγω της γεωμετρίας.

Η συμπεριφορά του μεμονωμένου πασσάλου δεν ταυτίζεται με αυτή των πασσάλων της ομάδας, όπως είναι κοινά αποδεκτό, λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτών και συνεπώς επόμενο στάδιο έρευνας απετέλεσε ο προσδιορισμός του

συντελεστή απόδοσης φέρουσας ικανότητας. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποδείχτηκε ότι σε αργιλικά εδάφη ο συντελεστής αυτός γενικά έχει τιμή μικρότερη της μονάδας ενώ σε περιπτώσεις εδαφών με μεγάλη διατμητική αντοχή οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στη φέρουσα ικανότητα είναι περιορισμένες και δεν οδηγούν σε συντελεστή απομείωσης. Επίσης επιβεβαιώνεται η πρόβλεψη συντελεστή μεγαλύτερου της μονάδας στις περιπτώσεις πολύ στιφρών αργίλων για διατάξεις ομάδας με μεγάλες ανηγμένες αξονικές αποστάσεις (μεγαλύτερες του 4.5D). Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι για τον ίδιο τύπο εδάφους και για την ίδια σχετική απόσταση, η μείωση της φέρουσας ικανότητας γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται ο αριθμός των πασσάλων στην ομάδα. Επιπρόσθετα, για την ίδια διάταξη ομάδας ο συντελεστής απόδοσης μικραίνει όταν μειώνεται η αντοχή του εδάφους. Τέλος για τον ίδιο τύπο εδάφους και την ίδια διάταξη, ο συντελεστής απόδοσης μειώνεται όσο η σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων μικραίνει. Κατά την αύξηση του μήκους των πασσάλων παρατηρείται περαιτέρω μείωση της απόδοσης, δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου αναλαμβάνεται από την πλευρική τριβή και επομένως οι συνέπειες της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων είναι πιο έντονες.

Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στη δυσκαμψία της θεμελίωσης και ο αντίστοιχος συντελεστής παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα κυρίως με το επίπεδο της καθίζησης και μάλιστα η επιρροή της αλληλεπίδρασης εμφανίζει τη μέγιστη επίπτωση της σε μικρά επίπεδα καθίζησης. Όσο αυξάνει η καθίζηση και αρχίζει η πλαστικοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους, οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μειώνονται σταδιακά, ανεξάρτητα από τη διάταξη της ομάδας. Η μεταβολή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας ομάδας πασσάλων. Ο συντελεστής απόδοσης της δυσκαμψίας αυξάνει όσο μεγαλώνει η αξονική απόσταση των πασσάλων και επομένως μειώνονται και οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης. Ειδικότερα παρατηρείται ότι για μικρές σχετικά καθιζήσεις που αντιστοιχούν στο 1 έως 3% της διαμέτρου του πασσάλου, ο συντελεστής μείωσης είναι της τάξης του 30%. Το φαινόμενο αυτό αμβλύνεται αυξανόμενης της καθίζησης. Χαρακτηριστικά για την περίπτωση της ομάδας 3*3 σε έδαφος C1 και αξονική απόσταση 5.0D η μείωση δυσκαμψίας είναι ίση με 70% για καθίζηση που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο, ενώ για καθίζηση ίση με 10%D η μείωση είναι μόνο 11%. Παρόμοια εικόνα εμφανίζουν και οι υπόλοιπες ομάδες. Ποσοτικά μπορεί να σημειωθεί ότι η επίπτωση στο συντελεστή απόδοσης της δυσκαμψίας αυξάνεται όσο αυξάνει ο αριθμός των πασσάλων της ομάδας. Ας σημειωθεί ακόμη ότι στις περιπτώσεις διατάξεων με μικρό αριθμό πασσάλων και ειδικότερα όταν η διάταξη δεν είναι τετραγωνικής μορφής αλλά ορθογωνικής ο συντελεστής απόδοσης δυσκαμψίας μπορεί να ξεπεράσει την τιμή της μονάδας για καθιζήσεις που αντιστοιχούν στο 10%D. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελούν οι διατάξεις 2*3 όπου ο συντελεστής αυτός γίνεται ακόμα μεγαλύτερος σε στιφρές έως πολύ στιφρές αργίλους (C3 και C4). Παρόμοια συμπεριφορά μπορεί να επιδείξει και η ομάδα 3*3 σε στιφρή άργιλο και μεγάλες

αξονικές αποστάσεις. Ας σημειωθεί ακόμη ότι η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στο συντελεστή απόδοσης ομάδας, ο οποίος αποτελεί υποπερίπτωση του συντελεστή απόδοσης δυσκαμψίας. Αυξανόμενου του μήκους των πασσάλων παρατηρείται περαιτέρω μείωση του εν λόγω συντελεστή για μεγάλα επίπεδα καθίζησης, γεγονός που δικαιολογείται, όπως και στην περίπτωση του συντελεστή απόδοσης φέρουσας ικανότητας, από την αύξηση των επιπτώσεων του φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Επομένως είναι σημαντικό κατά το σχεδιασμό των έργων να εξετάζεται το επίπεδο της καθίζησης πριν γίνει εκτίμηση της δυσκαμψίας της θεμελίωσης.

Ιδιαίτερα σημαντικές, όπως αποδείχτηκε από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, είναι οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης στην κατανομή του φορτίου στους επί μέρους πασσάλους της ομάδας οι οποίοι επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με τη γεωμετρική θέση που κατέχουν στην ομάδα. Συγκεκριμένα από τις ομάδες πασσάλων πακτωμένης κεφαλής που εξετάστηκαν οι γωνιακοί πάσσαλοι αναλαμβάνουν μεγαλύτερο φορτίο από τους υπολοίπους, το δε μικρότερο αναλαμβάνει ο κεντρικός πάσσαλος, ενώ αντίστοιχα οι περιμετρικοί και ενδιάμεσοι πάσσαλοι εμφανίζουν ενδιάμεσες τιμές. Υπό την έννοια αυτή η δυσκαμψία των επιμέρους πασσάλων παίρνει διαφορετικές τιμές με τους γωνιακούς να επιδεικνύουν τη μέγιστη δυσκαμψία, τον κεντρικό τη μικρότερη και τους υπόλοιπους να παίρνουν ενδιάμεσες τιμές. Ας σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι τόσο το αναλαμβανόμενο φορτίο όσο και η αντίστοιχη δυσκαμψία μεταβάλλεται συναρτήσει της καθίζησης ή του επιβαλλόμενου φορτίου. Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα όλων των διατάξεων ομάδων που εξετάστηκαν καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του αριθμού των πασσάλων στην ομάδα, για την ίδια πάντα εδαφική τομή, οδηγεί σε σημαντική διαφοροποίηση της απόκρισης φορτίου-καθίζησης ανάμεσα στον γωνιακό και τον κεντρικό πάσσαλο, ενώ αυξανόμενου του επιβαλλόμενου φορτίου και της προκαλούμενης καθίζησης ο λόγος των δυσκαμψιών που επιδεικνύουν οι δύο αυτοί χαρακτηριστικοί πάσσαλοι μειώνεται. Ακόμη η ταύτιση της απόκρισης, κατά την οποία επιτυγχάνεται λόγος δυσκαμψιών παραπλήσιος της μονάδας απαιτεί ελάχιστη καθίζηση μεγαλύτερη από 8%D (περιπτώσεις μικρών σχετικά ομάδων πασσάλων, σε μεγάλη αξονική απόσταση μεταξύ τους και τύπους εδαφών όπου η μέγιστη διατμητική αντοχή αντιστοιχεί σε μικρές παραμορφώσεις). Η τιμή αυτή αυξάνει όταν έστω και ένας από τους ανωτέρω όρους δεν ικανοποιείται, για να πάρει τιμές της τάξης του 25% όταν οι συνθήκες είναι αντίθετες από τις ανωτέρω οριζόμενες. Όλες οι ανωτέρω παρατηρήσεις συσχετίζονται με την εκδήλωση μερικής έως ολικής πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος εδαφικού υλικού.

Θεωρώντας ότι το φορτίο λειτουργίας ενός μεμονωμένου πασσάλου αντιστοιχεί σε επίπεδο καθίζησης της τάξης 1 έως 2% της διαμέτρου του πασσάλου και υιοθετώντας ως αντιπροσωπευτική τιμή συντελεστή επαύξησης της καθίζησης ομάδων R_a το εύρος 3 έως 5 για τις συνήθεις περιπτώσεις ομάδων πασσάλων, προσδιορίζεται ότι η απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου μέχρι το επίπεδο καθίζησης που αντιστοιχεί στο φορτίο λειτουργίας του μπορεί να καλύψει το διάστημα ενδιαφέροντος 3 έως και 10%D της απόκρισης των χαρακτηριστικών πασσάλων και

της ομάδας εν γένει. Για το διάστημα αυτό ο λόγος του αναλαμβανόμενου από το γωνιακό πάσσαλο φορτίου προς το αντίστοιχο του κεντρικού πασσάλου είναι της τάξης του $P_i/P_c=1.75-2.0$ για ομάδα πασσάλων 3×3 με σχετική απόσταση $4.0D$. Για διάταξη ομάδας 5×5 με την ίδια σχετική απόσταση ο λόγος αυτός αυξάνεται στο $2.5-3.0$. Υπό την έννοια αυτή και στο βαθμό που απαιτείται ομοιομορφοποίηση της κατανομής του κατακόρυφου ενιαίου φορτίου ομάδας στους επιμέρους πασσάλους θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πάσσαλοι με διαφορετικό μήκος (μεγαλύτερο μήκος στους εσωτερικούς πασσάλους), ενώ εναλλακτικά θα μπορούσε να αυξηθεί και η διάμετρος τους.

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης επιβεβαιώνουν τη θεώρηση ότι η απόκριση ομάδας πασσάλων προσομοιάζει, ως προς τη μορφή, με αυτή του μεμονωμένου πασσάλου. Η δυσκαμψία εντούτοις της ομάδας δεν μπορεί να προκύψει από το απλό γινόμενο της δυσκαμψίας του μεμονωμένου πασσάλου επί τον αριθμό των πασσάλων της ομάδας. Για τον προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας από την αντίστοιχη του μεμονωμένου πασσάλου επιβάλλεται η χρήση συντελεστή επαύξησης καθιζήσεων. Η τιμή του συντελεστή αυτού εξαρτάται, σύμφωνα με όσα έχουν μέχρι τώρα παρουσιασθεί, από τον αριθμό των πασσάλων, τη διάταξη τους, όπως αυτή καθορίζεται από τον αριθμό των στηλών και των γραμμών των πασσάλων, καθώς επίσης και από το επίπεδο φόρτισης που καθορίζει για κάθε ομάδα και είδος εδάφους την εκάστοτε καθίζηση. Η τριδιάστατη μη-γραμμική αριθμητική ανάλυση είναι σε θέση να δώσει την απόκριση μιας ομάδας πασσάλων υπό κατακόρυφη φόρτιση, καθώς επίσης και την απόκριση των επιμέρους πασσάλων. Η όλη διαδικασία απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο και αντίστοιχο υπολογιστικό κόστος. Για τους λόγους αυτούς, η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης εφαρμόζεται σε πολύ ειδικές περιπτώσεις και για μεγάλης σπουδαιότητας έργα. Το πρόβλημα αυτό έδωσε το έναυσμα στον Comodromos (2004) δημιουργίας μιας σχέσης η οποία θα είναι σε θέση να δώσει την απόκριση ομάδας πασσάλων εάν είναι γνωστή η απόκριση του μεμονωμένου πασσάλου πολλαπλασιάζοντας τη με ένα συντελεστή επαύξησης των καθιζήσεων R_a . Η εκτεταμένη έρευνα διαφόρων διατάξεων ομάδων, έδωσε τη δυνατότητα αναπροσαρμογής της εξίσωσης υπολογισμού του R_a του Comodromos (2004), η οποία αφορούσε σε διατάξεις ομάδας με σχετική απόσταση $3.0D$, με την εισαγωγή ενός όρου ο οποίος λαμβάνει υπόψη του την απόσταση μεταξύ των πασσάλων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή της σχέσης αυτής σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων. Σύμφωνα με την εξίσωση αυτή ο συντελεστής R_a εξαρτάται από τον αριθμό των γραμμών και στηλών μιας ομάδας πασσάλων, το συνολικό αριθμό των πασσάλων, τη σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων-μελών της ομάδας και την καθίζηση του μεμονωμένου πασσάλου.

Η ακρίβεια των προβλεπόμενων καμπυλών είναι αρκετά ικανοποιητική για τις ανάγκες του σχεδιασμού των περισσοτέρων ανωδομών. Το μέγιστο σφάλμα που υπολογίστηκε δεν ξεπερνά το 11%, ενώ το μέσο σφάλμα όλων των περιπτώσεων ισούται με 7.5%. Το σφάλμα γίνεται μικρότερο όσο μειώνεται το επίπεδο καθίζησης,

ενώ για καθιζήσεις μέχρι 5% που μπορεί να θεωρηθεί ως το μέγιστο επίπεδο επιτρεπόμενης καθίζησης κατά τη λειτουργία ενός έργου, η ακρίβεια της πρόβλεψης με χρήση της προτεινόμενης εξίσωσης μπορεί να θεωρηθεί ιδιαίτερα ικανοποιητική.

Η ίδια ακολουθία ανάλυσης επεκτάθηκε και στην περίπτωση ομάδων πασσάλων σε αμμώδη εδάφη. Εξετάζοντας και πάλι αρχικά τη συμπεριφορά του μεμονωμένου πασσάλου παρατηρείται ότι η κατανομή των αντιστάσεων και η μεταβολή τους εμφανίζει εικόνα παρόμοια με αυτήν των αργιλικών εδαφών ωστόσο η συμμετοχή της αιχμής τόσο για επίπεδο καθίζησης που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο, αλλά κυρίως για την οριακή τιμή καθίζησης του 10%D είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Η εικόνα απόκρισης των πασσάλων μεγάλου μήκους σε χαλαρά αμμώδη εδάφη προσομοιάζει περισσότερο με την αντίστοιχη των αργίλων για κανονικού μήκους και υπό την έννοια αυτή για καθίζηση της τάξης του επιτρεπόμενου φορτίου οι πάσσαλοι αυτοί μπορούν να θεωρηθούν ως αιωρούμενοι πάσσαλοι. Συμπερασματικά θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ουσιαστική διαφοροποίηση της απόκρισης των μεμονωμένων πασσάλων σε αργιλικά και αμμώδη εδάφη συνίσταται στο γεγονός ότι αυξανόμενη της καθίζησης το ποσοστό που αναλαμβάνει η αιχμή χαρακτηρίζεται από σημαντική αύξηση στα αμμώδη εδάφη, σε αντίθεση με τα αργιλικά εδάφη όπου παρατηρείται μεν αύξηση αλλά δεν οδηγεί σε ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό. Η παρατήρηση αυτή ισχύει σε έντονο βαθμό για τις πυκνές άμμους ενώ μπορεί να έχει ανεπαίσθητη μορφή για τις περιπτώσεις πασσάλων μεγάλου μήκους σε χαλαρά αμμώδη εδάφη.

Στη συνέχεια εξετάστηκε ο συντελεστής απόδοσης της φέρουσας ικανότητας. Στις περισσότερες των περιπτώσεων παρατηρείται ότι ο συντελεστής απόδοσης είναι μεγαλύτερος της μονάδας, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία και με τη μέχρι τώρα καταγεγραμμένη εμπειρία. Ειδικότερα η τιμή του συντελεστή απόδοσης φέρουσας ικανότητας αυξάνει αυξανόμενη της αξονικής απόστασης των πασσάλων, καθώς επίσης και αυξανόμενη της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Αντίθετα μειώνεται όσο αυξάνει ο αριθμός και το βάθος των πασσάλων, περιπτώσεις κατά τις οποίες το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εμφανίζεται σε πιο έντονο βαθμό. Οι μόνες περιπτώσεις που οδηγούν σε συντελεστές μικρότερους της μονάδας είναι αυτές των χαλαρών άμμων σε συνδυασμό με μεγάλο αριθμό πασσάλων.

Σημαντικά συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από τη σύγκριση της μεταβολής της κατανομής του συνολικά επιβαλλόμενου φορτίου σε ομάδα πασσάλων σε αντίσταση αιχμής και παράπλευρης αντίστασης συναρτήσει της καθίζησης της ομάδας. Στα αμμώδη εδάφη παρατηρείται ότι αυξανόμενη της καθίζησης αυξάνει και το φορτίο που αναλαμβάνεται από την αιχμή, σε αντίστιξη με τα αργιλικά εδάφη όπου το ποσοστό αυτό παραμένει αμετάβλητο. Ο ρυθμός μεταβολής είναι σημαντικός για μικρές καθιζήσεις, ενώ οι επιπτώσεις της πλαστικοποίησης έρχονται να μετριάσουν την έκταση του φαινομένου οδηγώντας σε βαθμιαία μειούμενο ρυθμό αυξανόμενη της καθίζησης και προφανώς του επιβαλλόμενου φορτίου και του πεδίου τάσεων στο περιβάλλον έδαφος. Για τις αργίλου το αναλαμβανόμενο από τις αιχμές των

πασσάλων φορτίο ως ποσοστό του συνολικά επιβαλλόμενου φορτίου είναι της τάξης του 20%, ενώ για την περίπτωση των αμμωδών εδαφών η αιχμή εκπροσωπεί αρχικά το 25% του επιβαλλόμενου φορτίου με συνεχή αύξηση αυξανόμενων των καθιζήσεων. Η αύξηση είναι ιδιαίτερα έντονη στην περίπτωση των πολύ πυκνών άμμων, γεγονός που διαφοροποιεί την απόκριση ομάδας στην ειδική αυτή περίπτωση.

Και στην περίπτωση των αμμωδών εδαφών παρατηρείται, ότι ο πλέον καθοριστικός παράγοντας επιρροής της δυσκαμψίας είναι το επίπεδο της καθίζησης. Ειδικότερα ο συντελεστής απόδοσης δυσκαμψίας εμφανίζει τις ελάχιστες τιμές του σε μικρά επίπεδα καθίζησης, όπου οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή τους. Ας σημειωθεί ότι η διαπίστωση αυτή είναι ταυτόσημη και στις περιπτώσεις των αργιλικών εδαφών. Σε αντίστιξη, για καθιζήσεις που αντιστοιχούν στο οριακό φορτίο ο συντελεστής απόδοσης της δυσκαμψίας ξεπερνά τη μονάδα, δηλαδή η ανηγμένη στον αριθμό των πασσάλων δυσκαμψία της ομάδας για μεγάλες καθιζήσεις εμφανίζεται μεγαλύτερη από αυτήν του μεμονωμένου πασσάλου. Η διαπίστωση αυτή είναι ποιοτικά και μόνο σύμφωνη με την αντίστοιχη των αργιλικών εδαφών, όπου παρουσιάζεται μεν αύξηση, σπάνια όμως και σε ειδικές περιπτώσεις ο συντελεστής απόδοσης δυσκαμψίας για το οριακό επίπεδο καθίζησης παίρνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Ας σημειωθεί ακόμη σε ειδικούς συνδυασμούς ομάδων πασσάλων και αμμωδών εδαφών είναι δυνατόν ο ανωτέρω συντελεστής, ακόμη και για επίπεδα μεγάλων καθιζήσεων να εμφανίζει τιμές ελαφρώς μικρότερες της μονάδας. Χαρακτηριστική περίπτωση αυτή των χαλαρών άμμων, κατηγορία S1, αξονικών αποστάσεων, 2.0D και πασσάλων μεγάλου μήκους $L/D=50$.

Η αύξηση του αριθμού των πασσάλων οδηγεί σε μεγαλύτερες επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης και επομένως, όπως και στις αναλύσεις των αργιλικών εδαφών, σε μικρότερους συντελεστές απόδοσης δυσκαμψίας. Παρόμοια είναι και τα αποτελέσματα στην περίπτωση μείωσης της αξονικής απόστασης μεταξύ των πασσάλων. Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσο πιο πυκνή είναι η σύσταση των αμμωδών εδαφών τόσο οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μειώνονται για μικρά επίπεδα καθιζήσεων, ενώ για μεγάλες τιμές καθιζήσεων καταγράφεται αύξηση της ανηγμένης δυσκαμψίας της ομάδας σε σχέση με τον αντίστοιχο μεμονωμένο πάσσαλο. Η διαπίστωση αυτή βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία για την περί απόδοσης ομάδας θεώρηση σε αμμώδη και δη πυκνής σύστασης εδάφη.

Για την καλύτερη διερεύνηση και κατανόηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης στους επιμέρους πασσάλους πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των αποτελεσμάτων της εκτενούς τριδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης για τις επί μέρους αποκρίσεις των πασσάλων που απαρτίζουν την ομάδα.

Και στις άμμους παρατηρήθηκε ότι ο κεντρικός πάσσαλος, i , αναλαμβάνει πολύ μικρότερο φορτίο από τους υπόλοιπους. Ειδικότερα για χαλαρή άμμο και μικρή σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων ο κεντρικός πάσσαλος αναλαμβάνει

φορτίο της τάξης του 40% του μέσου φορτίου. Όταν η αξονική απόσταση αυξάνεται το ποσοστό αυτό αυξάνεται μέχρι και 60% του μέσου φορτίου, γεγονός που καταδεικνύει την ευεργετική δράση της αύξησης της αξονικής απόστασης στην ομοιομορφοποίηση της κατανομής του συνολικού φορτίου στους επιμέρους πασσάλους. Αντίθετα ο γωνιακός πάσσαλος επιβαρύνεται με φορτίο 20% μεγαλύτερο του μέσου. Η σύγκριση της απόκρισης του κεντρικού με το γωνιακό πάσσαλο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για επίπεδο καθίζησης 2%D, το οποίο πρακτικά αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο ο γωνιακός πάσσαλος επιδεικνύει τριπλάσια δυσκαμψία από τον κεντρικό. Η διαφορά αυτή μειώνεται αυξανόμενης της καθίζησης, ενώ όταν αυξηθεί και η αξονική απόσταση επέρχεται πλήρης ομοιομορφοποίηση της κατανομής για καθίζηση της τάξης του 10% ή και μικρότερη σε περίπτωση μεγάλων αξονικών αποστάσεων. Ανάλογα αποτελέσματα παρατηρούνται και για τις ενδιάμεσες σχετικές αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων για την ίδια πάντα κατηγορία εδάφους. Η αύξηση της πυκνότητας της άμμου οδηγεί σε συνεχή μείωση της απόκλισης απόκρισης των δύο αυτών χαρακτηριστικών πασσάλων και για πολύ πυκνές άμμους οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων είναι ιδιαίτερα μικρές και οι πάσσαλοι επιδεικνύουν πρακτικά την ίδια συμπεριφορά ανεξάρτητα από τη θέση που καταλαμβάνουν στην ομάδα. Η αύξηση του αριθμού των πασσάλων επιβαρύνει την απόκλιση της απόκρισης των επιμέρους πασσάλων. Όσον αφορά στην επιρροή του μήκους των πασσάλων στην απόκριση των χαρακτηριστικών πασσάλων των διαφόρων ομάδων, παρατηρήθηκε ότι η απόκλιση της απόκρισης των χαρακτηριστικών πασσάλων και ειδικότερα του κεντρικού και του γωνιακού είναι μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση με μικρότερο μήκος πασσάλων. Ειδικότερα για την ομάδα με αξονική απόσταση 2.0D και για καθίζηση της τάξης του 4% ο γωνιακός πάσσαλος επιβαρύνεται φορτίου κατά 50% μεγαλύτερο από το μέσο φορτίο, ενώ αντίθετα ο κεντρικός πάσσαλος αναλαμβάνει μόλις το 50% του μέσου φορτίου. Η διαφορά αυτή ανεπαίσθητα και μόνο μειώνεται αυξανόμενης της καθίζησης. Παρόμοια συμπεριφορά επιδεικνύει αρχικά και η αντίστοιχη ομάδα με αξονική απόσταση 5.0D, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή παρατηρείται αισθητή σύγκλιση αυξανόμενης της καθίζησης.

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης και για την περίπτωση των αμμωδών εδαφών επιβεβαιώνουν τη θεώρηση κατά παρόμοιο τρόπο με τα αργιλικά εδάφη ότι η δυσκαμψία της ομάδας δεν μπορεί να προκύψει από το απλό γινόμενο της δυσκαμψίας του μεμονωμένου πασσάλου επί τον αριθμό των πασσάλων της ομάδας. Για τον προσδιορισμό της απόκρισης ομάδας από την αντίστοιχη του μεμονωμένου πασσάλου εξετάστηκε η χρήση του συντελεστή R_a , όπως προσδιορίστηκε στην περίπτωση των αργιλικών εδαφών. Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά για τα επίπεδα καθίζησης που αντιστοιχούν στη λειτουργικότητα ενώ η απόκλιση μεγαλώνει όσο αυξάνει η καθίζηση. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η απόδοση της ομάδας στα αμμώδη εδάφη ξεπερνά την τιμή της μονάδας και ιδιαίτερα όσο η πυκνότητα των αμμωδών εδαφών αυξάνει. Ειδικότερα στα πολύ πυκνά εδάφη η αντίσταση αιχμής εμφανίζει συνεχή και

ιδιαίτερα έντονη, σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους εδαφών, αύξηση. Μετά από σχετική διερεύνηση διαπιστώθηκε ότι η προτεινόμενη εξίσωση δεν βρίσκει πεδίο εφαρμογής για την περίπτωση πολύ πυκνής άμμου, κατά κύριο λόγο λόγω της απόκρισης της αντίστασης αιχμής. Αντίθετα για τις περιπτώσεις χαλαρών και μέσης πυκνότητας αμμωδών εδαφών η εφαρμογή της εξίσωσης οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα με ελαφρά δυσμενέστερο ποσοστό ακρίβειας σε σχέση με τις αργίλους. Η χρήση κοινής εξίσωσης πρόβλεψης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον δεδομένου ότι δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής σε πολυστρωματικά εδάφη. Σημειώνεται ακόμη ότι η κατασκευή πασσάλων σε πολύ πυκνά αμμώδη εδάφη δεν βρίσκει συχνό πεδίο εφαρμογής δεδομένου ότι η διατμητική αντοχή της κατηγορίας αυτής είναι ιδιαίτερα υψηλή, οι παράμετροι συμπίεστικότητας επίσης είναι ιδιαίτερα υψηλές με αποτέλεσμα να δίνεται η δυνατότητα θεμελίωσης με επιφανειακές θεμελιώσεις. Σε κάθε περίπτωση η εφαρμογή της προτεινόμενης εξίσωσης για την περίπτωση πολύ πυκνών αμμωδών εδαφών οδηγεί σε πιο συντηρητική πρόβλεψη από την πραγματική συμπεριφορά ομάδας πασσάλων και υπό την έννοια αυτή θα μπορούσε, η πρόβλεψη αυτή, να αποτελέσει ένα ικανοποιητικό κάτω όριο, σε περίπτωση έλλειψης ακριβέστερης πρόβλεψης.

Για να διερευνηθεί η αξιοπιστία της προταθείσας εξίσωσης και για περιπτώσεις μη-ομογενών εδαφών εξετάστηκε η διάταξη 3*3 με σχετική απόσταση 3.0D για έξι επιπλέον διστρωματικές εδαφικές τομές και για ανηγμένο μήκος $L/D=25$ και 50. Συγκεκριμένα έγινε επιλογή από τους τύπους εδάφους που έχουν ήδη εξεταστεί, έτσι ώστε να συνδυάζεται αργιλικό έδαφος στην παράπλευρη επιφάνεια και αμμώδες στην αιχμή ή αντίστροφα. Η απόκλιση μεταξύ των δύο μεθοδολογιών είναι πολύ μικρή και ειδικά για καθιζήσεις που αντιστοιχούν στο φορτίο λειτουργίας οι δύο μεθοδολογίες σχεδόν ταυτίζονται. Εξαιρεση αποτελεί η περίπτωση όπου οι αιχμές των πασσάλων συναντούν πολύ πυκνή άμμο ενώ πλευρικά υπάρχει μέτριας στιφρότητας άργιλος. Η διαφοροποίηση αυτή ήταν αναμενόμενη όπως και στις καθαρές άμμους λόγω της απόκρισης της αντίστασης αιχμής η οποία συνεχίζει εντόνως να αυξάνεται συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου και η απόδοση της ομάδας ξεπερνά τη μονάδα. Η πρόβλεψη ωστόσο της απόκρισης της ομάδας εξακολουθεί να είναι πιο συντηρητική από την πραγματική συμπεριφορά της ομάδας. Τα συμπεράσματα αυτά μαζί με τα αποτελέσματα που έχουν ήδη διεξαχθεί για τα ομογενή εδάφη, είναι ενθαρρυντικά για την ευρεία και γενική χρήση του συντελεστή R_a .

Ομάδες πασσάλων με έδραση σε βραχώδες υπόβαθρο

Αποτελεί κοινή διεθνώς παραδοχή ότι η έδραση πασσάλων σε βράχο αποτελεί ιδιαίτερη περίπτωση, η οποία δεν υπακούει στις σχέσεις απόκρισης που αντιστοιχούν σε εδαφικό μέσο. Είναι ακόμη διεθνώς αποδεκτό ότι οι ομάδες πασσάλων με έδραση σε βράχο επηρεάζονται αισθητά λιγότερο από το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης ομάδας. Η θεώρηση ενός κάτω ορίου, όπου οι πάσσαλοι

εδράζονται σε πρακτικά ασυμπιέστο βράχο και το υπερκείμενο έδαφος είναι μεγάλης συμπιεστότητας και μικρής διατμητικής αντοχής, οδηγεί προφανώς σε μηδενικές πρακτικά επιπτώσεις τόσο στη φέρουσα ικανότητα ομάδας όσο και στην απόκριση. Αντίθετα στην περίπτωση ιδιαίτερα μαλακού βράχου και υπερκείμενου εδάφους με μεγάλη διατμητική αντοχή και πολύ μικρή συμπιεστότητα, οδηγεί σε επιπτώσεις που δεν μπορούν να αγνοηθούν, ειδικά στην περίπτωση πασσάλων μεγάλου μήκους. Για τη διερεύνηση του προβλήματος πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες παραμετρικές μη γραμμικές αναλύσεις οι οποίες περιλαμβάνουν ομάδες πασσάλων με διαφορετική διάταξη και μήκος καθώς και διαφορετική σύσταση πλευρικών εδαφικών σχηματισμών. Ειδικότερα πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις για ομάδες πασσάλων σε διάταξη 2*2 και 3*3 με αξονική απόσταση 3.0D. Η διάμετρος των πασσάλων ήταν $D=1$ m και το μήκος τους $L=17$ m και 28 m. Η επιφανειακή στρώση θεωρήθηκε εδαφικό υλικό αργιλώδους σύστασης κατά τη μία ομάδα επιλύσεων και αμμώδες κατά την άλλη. Η έδραση των πασσάλων πραγματοποιείται σε βραχώδες υπόβαθρο.

Από τα αποτελέσματα των επιλύσεων και τη σχετική επεξεργασία τους παρατηρείται ό,τι, σε αντίθεση με ομάδες πασσάλων που εδράζονται σε εδαφικά υλικά, οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης είναι ουσιαστικά περιορισμένες. Εμφανίζουν τη μέγιστη επίπτωση τους σε μικρά σχετικά φορτία, αντιστοιχούντα σε καθιζήσεις της τάξης του 0,5%D. Οι επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης περιορίζονται στη διαφοροποίηση της κατανομής των φορτίων κεφαλής ανάλογα με τη θέση του πασσάλου στην ομάδα και στην κατά την έννοια του μήκους του πασσάλου κατανομή του αξονικού φορτίου.

Όσο αυξάνεται το μήκος του πασσάλου που βρίσκεται μέσα σε αργιλικό υλικό τόσο αυξάνεται και το ποσοστό του φορτίου που αναλαμβάνει η πλευρική τριβή με παράλληλη αύξηση στην αλληλεπίδραση μεταξύ των μελών της ομάδας των πασσάλων.

Ός προς την απόκριση της ομάδας πασσάλων προκύπτει ότι δεν υπάρχει καμία επίπτωση της αλληλεπίδρασης στην φέρουσα ικανότητα του πασσάλου και της δυσκαμψίας του και κατά συνέπεια οι συντελεστές φέρουσας ικανότητας και δυσκαμψίας έχουν μοναδιαία τιμή.

Τα ανωτέρω συμπεράσματα μπορούν να αποτελέσουν ποιοτική αποτίμηση της απόκρισης ομάδας πασσάλων όπου ο επιφανειακός σχηματισμός είναι εδαφικός ενώ η έδραση τους πραγματοποιείται σε βραχώδες υπόβαθρο. Τονίζεται εντούτοις ότι τα συγκεκριμένα ποσοστά κατανομής της αντίστασης σε αιχμή και τριβή καθώς επίσης και η κατανομή στους χαρακτηριστικούς πασσάλους των εξετασθεισών ομάδων προέκυψαν για την ανάλυση σε συγκεκριμένες εδαφικές τομές και ότι, πέραν της ποιοτικής αποτίμησης, θα συνιστούσε απερισκεψία η αλόγιστη χρήση των ποσοστών αυτών σε διαφορετικές εδαφικές συνθήκες και διατάξεις πασσάλων.

Αρνητικές τριβές

Η κατασκευή επιχωμάτων ή ακόμη η ταπείνωση του υπόγειου ορίζοντα στην άμεση περιοχή θεμελιώσεων με πασσάλους σε συμπιεστά εδάφη οδηγεί σε καθιζήσεις εδάφους μεγαλύτερες από αυτές των πασσάλων. Αποτέλεσμα του φαινομένου αποτελεί η αύξηση του αξονικού φορτίου των πασσάλων λόγω της ανάρτησης του περιβάλλοντος εδάφους επί των πασσάλων. Η χρήση εμπειρικών σχέσεων από συμβατικές προσεγγίσεις (Fellenius 1972, Combarieu 1985) για τον υπολογισμό των επιπρόσθετων φορτίων στους πασσάλους προϋποθέτει πλήρη κινητοποίηση των αρνητικών τριβών πάνω από το ουδέτερο σημείο (σημείο συμβιβαστού μετακινήσεων πασσάλου και περιβάλλοντος εδάφους). Η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε υπερβολικές τιμές φορτίων, δεδομένου ότι για την πλήρη κινητοποίηση των αρνητικών τριβών απαιτείται εν γένει η εκδήλωση μεγάλων καθιζήσεων στο περιβάλλον έδαφος. Αντίστοιχα, δεν απαιτείται κατ' ανάγκη ανάπτυξη μεγάλων καθιζήσεων για την εκδήλωση διολίσθησης κατά μήκος της διεπιφάνειας εδάφους-πασσάλου.

Στην εν λόγω εργασία πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αναλύσεις σε γνωστά προβλήματα, όπου η σύγκριση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων εργασιών έδειξε σημαντικά μικρότερες επιπτώσεις στις ομάδες πασσάλων. Ακόμη εξετάστηκαν οι επιπτώσεις των αρνητικών τριβών τόσο συνολικά όσο και επιμέρους στους χαρακτηριστικούς πασσάλους και στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίπτωση της κατασκευαστικής ακολουθίας στο φαινόμενο σε συγκεκριμένη εδαφική τομή.

Κύριο συμπέρασμα της εργασίας αποτελεί η υπερεκτίμηση των επιπτώσεων του φαινομένου από τις απλοποιημένες γραμμικές ελαστικές προσεγγίσεις οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελέσουν μόνο άνω όριο της δράσης των αρνητικών τριβών. Αντίθετα οι τριδιάστατες μη-γραμμικές αναλύσεις είναι σε θέση να προσεγγίσουν το πρόβλημα με ιδιαίτερη ακρίβεια.

Σημαντική επίσης είναι η παρατήρηση ότι η αλληλουχία των κατασκευαστικών φάσεων ενός τεχνικού έργου επηρεάζει σημαντικά τις επιπτώσεις από τη δράση των αρνητικών τριβών και μπορεί να οδηγήσει μετά από σωστή επιλογή σε σημαντική μείωση τόσο στο κινηματικό όσο και στο εντατικό πεδίο. Συγκεκριμένα η κατασκευή του επιχώματος μετά την επιβολή του φορτίου οδηγεί σε αύξηση της αναπτυσσόμενης αξονικής δύναμης.

Οι επιπτώσεις της δράσης των αρνητικών τριβών είναι αισθητά μεγαλύτερες στους μεμονωμένους πασσάλους από τους πασσάλους της ομάδας και ιδιαίτερα στους γωνιακούς, μικρότερες στους περιμετρικούς και σημαντικά μικρότερες στους εσωτερικούς και τους κεντρικούς πασσάλους. Ειδικότερα στους γωνιακούς πασσάλους παρατηρείται ότι οι επιπτώσεις είναι παραπλήσιες με αυτές των μεμονωμένων πασσάλων. Οι επιπτώσεις της δράσης των αρνητικών τριβών είναι μεγαλύτερες στις ομάδες δεσμευμένης κεφαλής παρά στις ομάδες ελεύθερης κεφαλής.

Σε ομάδες πασσάλων με μεγάλη αξονική απόσταση (περίπτωση με αξονική απόσταση 6.0D) όλοι οι πάσσαλοι της ομάδας επηρεάζονται σχεδόν όσο και ο μεμονωμένος και κατά συνέπεια στις περιπτώσεις αυτές οι επιπτώσεις της δράσης των αρνητικών τριβών είναι σημαντικά μεγαλύτερες. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην περιορισμένη επίπτωση της ομάδας, κατά αντίστοιχο τρόπο με τη συμπεριφορά ομάδων υπό κατακόρυφη φόρτιση, με μόνη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή η αύξηση της αξονικής απόστασης είναι επιβαρυντική.

Τονίζεται τέλος ότι η αποτίμηση των επιπτώσεων των αρνητικών τριβών σε ομάδες πασσάλων σε συγκεκριμένα ποσοστά προέκυψε για την ανάλυση σε συγκεκριμένη εδαφική τομή και ότι, πέραν της ποιοτικής αποτίμησης, τα ακριβή ποσοστά που διεξήχθησαν δεν είναι εφαρμόσιμα σε διαφορετικές εδαφικές συνθήκες και διατάξεις πασσάλων.

7.2 Πρόταση επέκτασης της ανάλυσης σε ομάδες πασσάλων με εύκαμπτο κεφαλόδεσμο

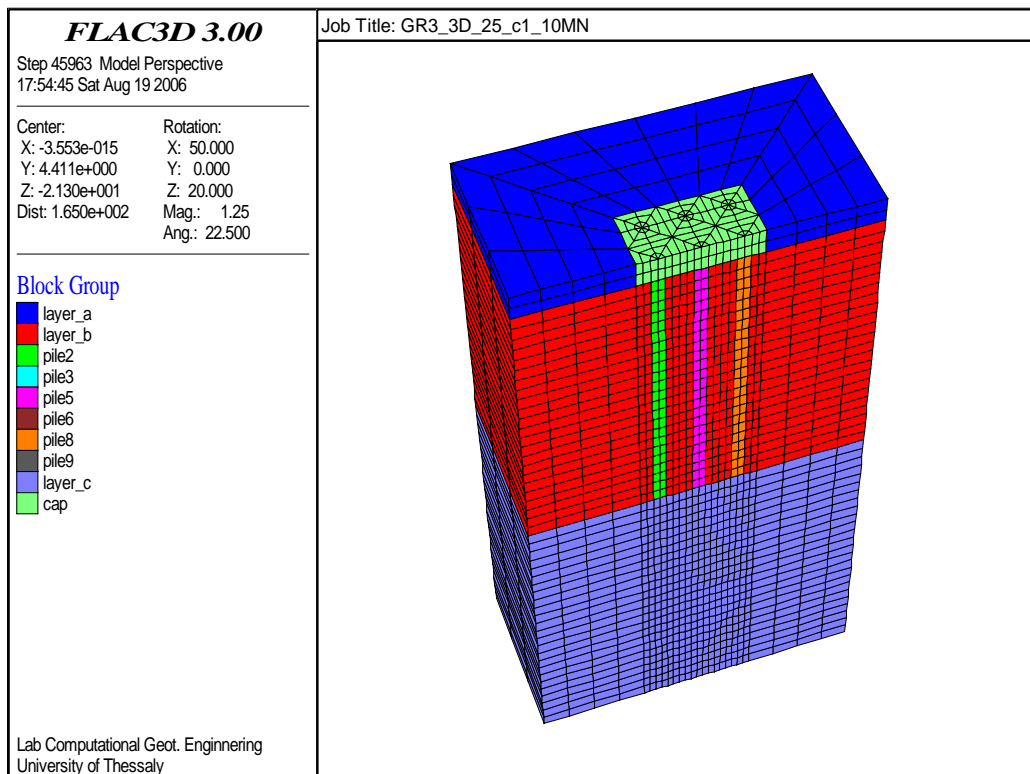
Παρά την εκτεταμένη έρευνα που διεξήχθη αρκετά είναι ακόμα τα πεδία στα οποία θα μπορούσε να γίνει επέκταση της εργασίας αυτής. Ένα από τα επόμενα βήματα διερεύνησης αποτελεί η επιρροή του κεφαλόδεσμου τόσο στη φέρουσα ικανότητα της ομάδας των πασσάλων, όσο και στην κατανομή του φορτίου στους επί μέρους πασσάλους. Το αντικείμενο θα μπορούσε να αποτελέσει προέκταση του πεδίου έρευνας και η υλοποίηση του βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη με διεξαγωγή τριδιάστατων αναλύσεων στο πλαίσιο διπλωματικής εργασίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Σύντομη περιγραφή των αναλύσεων καθώς και παρουσίαση των πρώτων αποτελεσμάτων δίνεται στην επόμενη παράγραφο.

Πέραν ορισμένων ειδικών έργων οι επιμέρους πάσσαλοι ομάδας συνδέονται με ενιαίο κεφαλόδεσμο, ο οποίος μεταφέρει τα φορτία της ανωδομής στους επιμέρους πασσάλους και στο έδαφος έδρασης. Στην περίπτωση που για λόγους απλοποίησης ο κεφαλόδεσμος θεωρηθεί άκαμπτος εξασφαλίζεται κινηματικά η εξίσωση των καθιζήσεων όλων των πασσάλων, ενώ τα φορτία κατανέμονται μόνο στους πασσάλους. Στη περίπτωση εντούτοις που η δυσκαμψία του κεφαλοδέσμου δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη η κατανομή των φορτίων καθώς και η συνεισφορά του υποκείμενου εδάφους εξαρτάται καθοριστικά από τη σχετική προς το έδαφος και τους πασσάλους τιμή της δυσκαμψίας του κεφαλοδέσμου. Η διερεύνηση του πεδίου αυτού μπορεί να αποτελέσει συνέχεια της παρούσας και να συνεισφέρει σημαντικά στο σχεδιασμό έργων που χαρακτηρίζονται κατασκευαστικά από τα ανωτέρω χαρακτηριστικά (μπορεί ως παράδειγμα να αναφερθεί η περίπτωση συνδυασμού γενικής κοιτόστρωσης και πασσάλων, piled raft).

Για την αρχική και μόνο διερεύνηση του προβλήματος και για τη δημιουργία λαβής προς πιθανή συνέχεια πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες αναλύσεις σε παρόμοιες

ομάδες με τις ήδη αναλυθείσες στα προηγούμενα κεφάλαια, με μόνη διαφορά ότι αντί θεώρησης άκαμπτου κεφαλοδέσμου χρησιμοποιείται πλέον κεφαλόδεσμος από πλάκα σκυροδέματος πάχους 2 m.

Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν διατάξεις 3*3 με αξονική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 3.0D και 5.0D και 5*5 με αξονική απόσταση 3.0D για τις 7 κατηγορίες εδάφους, 4 τύποι αργίλου και 3 άμμου, που εξετάστηκαν στο κεφάλαιο 4. Οι εδαφικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν συνοψίζονται στον πίνακα 4.1. Οι διάμετρος των πασσάλων είναι, όπως και στις εξετασθείσες περιπτώσεις 1 m, το δε ανηγμένο μήκος τους 25. Ο κεφαλόδεσμος έχει πάχος 2 m και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του είναι όμοια με αυτά των πασσάλων. Η ανάλυση και σε αυτή την περίπτωση έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών $FLAC^{3D}$. Η διαδικασία προσομοίωσης είναι παρόμοια με αυτή που ακολουθήθηκε στις μέχρι τώρα αναλύσεις ομάδων πασσάλων και περιγράφηκε στην παράγραφο 4.4. Στο σχήμα 7.1 απεικονίζεται ο κάρναβος που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση διάταξης 3*3 με σχετική απόσταση 3.0D.

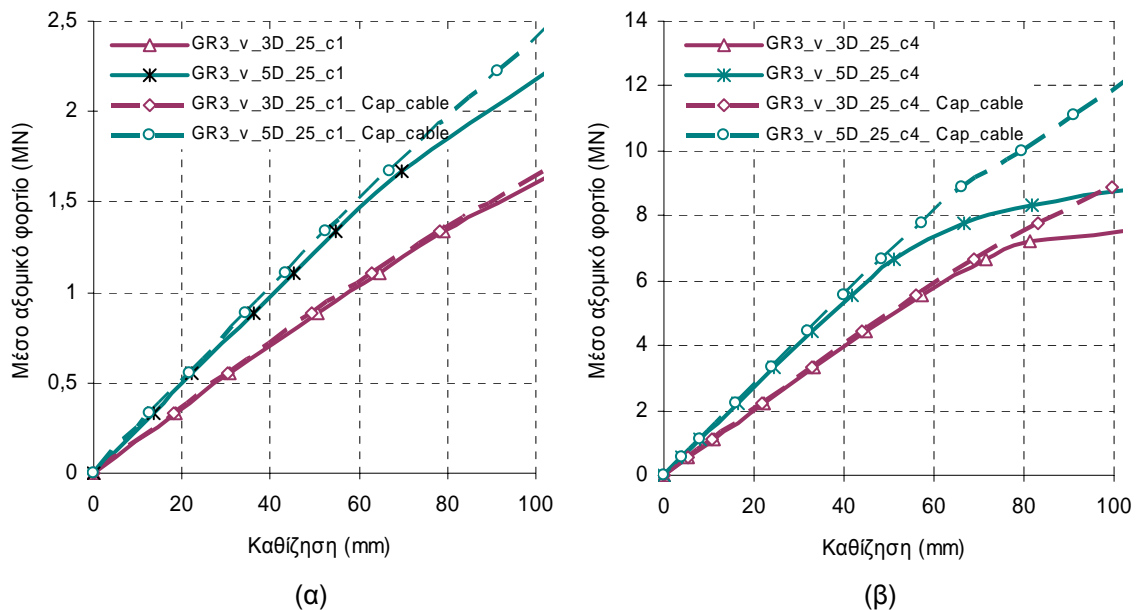


Σχήμα 7.1 Κάρναβος πεπερασμένων διαφορών ομάδας πασσάλων σε διάταξη 3*3 και σχετικής απόστασης 3.0D, με ανηγμένο μήκος πασσάλων $L/D=25$ m, σε τομή $y=0$.

Από την εξέταση των πρώτων αποτελεσμάτων στις αργίλους προκύπτει ότι η συμβολή του κεφαλόδεσμου στη φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης για τη διάταξη 3*3 είναι πολύ μικρή στην περίπτωση των μαλακών αργίλων ενώ παρατηρείται σημαντική αύξηση του οριακού φορτίου της θεμελίωσης στην περίπτωση της πολύ στιφρής αργίλου (κατηγορία C4). Η αύξηση αυτή ισούται με 40% όταν η αξονική

απόσταση μεταξύ των πασσάλων είναι 5.0D, ενώ μειώνεται καθοριστικά στην τιμή 13% για αξονική απόσταση 3.0D, όπως χαρακτηριστικά παρατηρείται στο σχήμα 7.2. Στη διάταξη 5*5 ωστόσο ακόμα και για την περίπτωση της στιφρής αργίλου η φέρουσα ικανότητα δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από την τοποθέτηση του κεφαλόδεσμου και επομένως η συμβολή αυτού είναι αμελητέα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η κατανομή του ποσοστού του επιβαλλόμενου φορτίου στους πασσάλους και στον κεφαλόδεσμο. Πιο συγκεκριμένα το ποσοστό του φορτίου που φέρει ο κεφαλόδεσμος αυξάνει με τη στιφρότητα της αργίλου. Για τη μαλακή άργιλο τύπου C1, για τη διάταξη 3*3 και για σχετική απόσταση 3.0D το ποσοστό αυτό είναι αμελητέο για το φορτίο λειτουργίας, ενώ αυξάνει στο 10% στην οριακή κατάσταση. Στην περίπτωση της στιφρής αργίλου και όσο αυξάνει το επίπεδο της καθίζησης το φορτίο που αναλαμβάνεται από τον κεφαλόδεσμο αυξάνει για να φτάσει το ποσοστό 23%, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο σχήμα 7.3α. Με την αύξηση της αξονικής απόστασης στα 5.0D το ποσοστό αυτό γίνεται αρκετά σημαντικό και για την περίπτωση της αργίλου τύπου C4, ο κεφαλόδεσμος φέρει το 40% του επιβαλλόμενου φορτίου στην οριακή κατάσταση, ποσοστό που συμπίπτει με την αύξηση της φέρουσας ικανότητας, σχήμα 7.2(β).

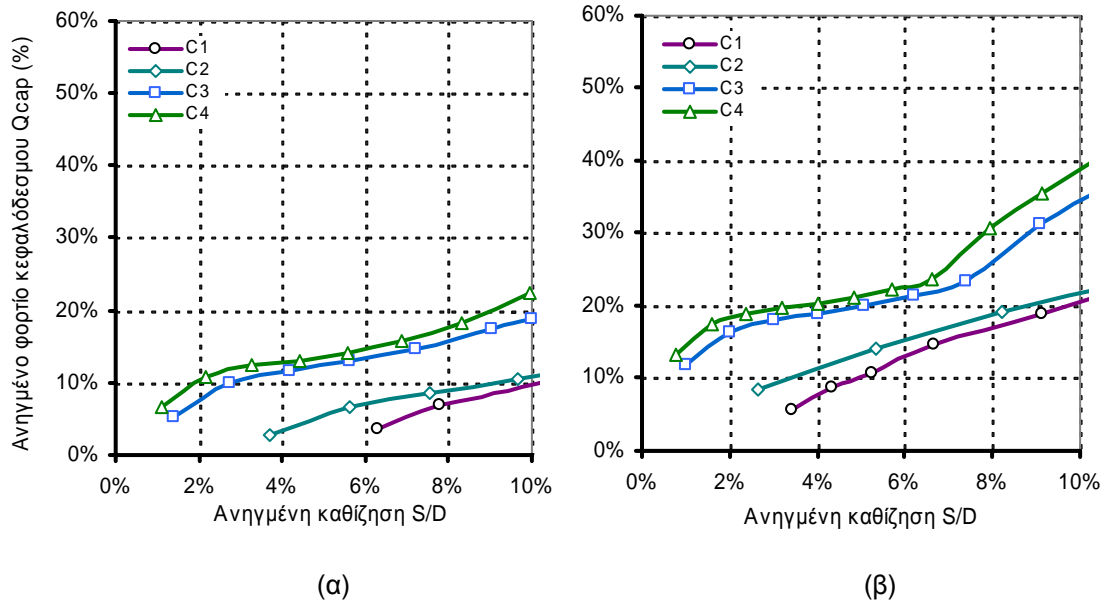


Σχήμα 7.2 Σύγκριση της απόκρισης ομάδας πασσάλων διάταξης 3*3 με παρουσία κεφαλόδεσμου και μη για αργιλικό έδαφος τύπου (α) C1 και (β) C4.

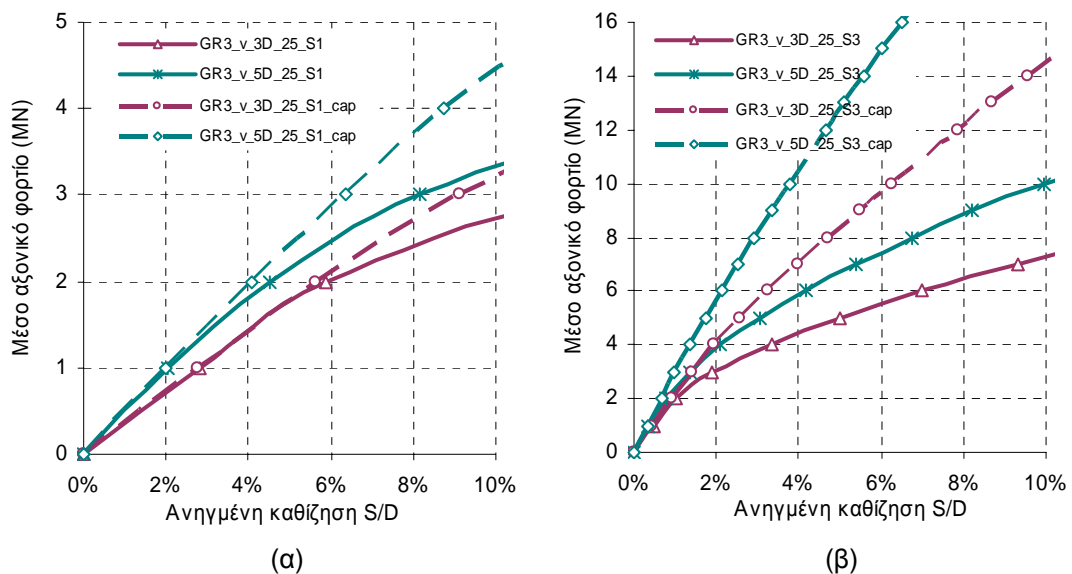
Αναλύοντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην περίπτωση των άμμων παρατηρείται ότι ο ρόλος του κεφαλόδεσμου είναι αρκετά πιο σημαντικός. Ακόμα και στις χαλαρές άμμους και σε μικρή αξονική απόσταση η αύξηση της φέρουσας ικανότητας των πασσάλων είναι αξιοσημείωτη και φτάνει στο 35% για σχετική απόσταση 5.0D. Το ποσοστό αυτό γίνεται ιδιαίτερα υψηλό στην περίπτωση της πυκνής άμμου, όπου η φέρουσα ικανότητα παίρνει αρκετά μεγαλύτερες τιμές από τις

αντίστοιχες χωρίς την παρουσία του κεφαλόδεσμου. Στο σχήμα 7.4 δίνεται σύγκριση της απόκρισης ομάδας πασσάλων διάταξης 3*3 με παρουσία κεφαλόδεσμου και μη, για αμμώδες έδαφος τύπου S1 και S3.

Η αύξηση του αριθμού των πασσάλων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ποσοστού επαύξησης της φέρουσας ικανότητας. Στη χαλαρή άμμο η παρουσία του κεφαλόδεσμου δεν επιφέρει καμία μεταβολή στην απόκριση των πασσάλων ενώ στην πυκνή άμμο αυξάνεται το οριακό φορτίο κατά 30% (σχήμα 7.5).

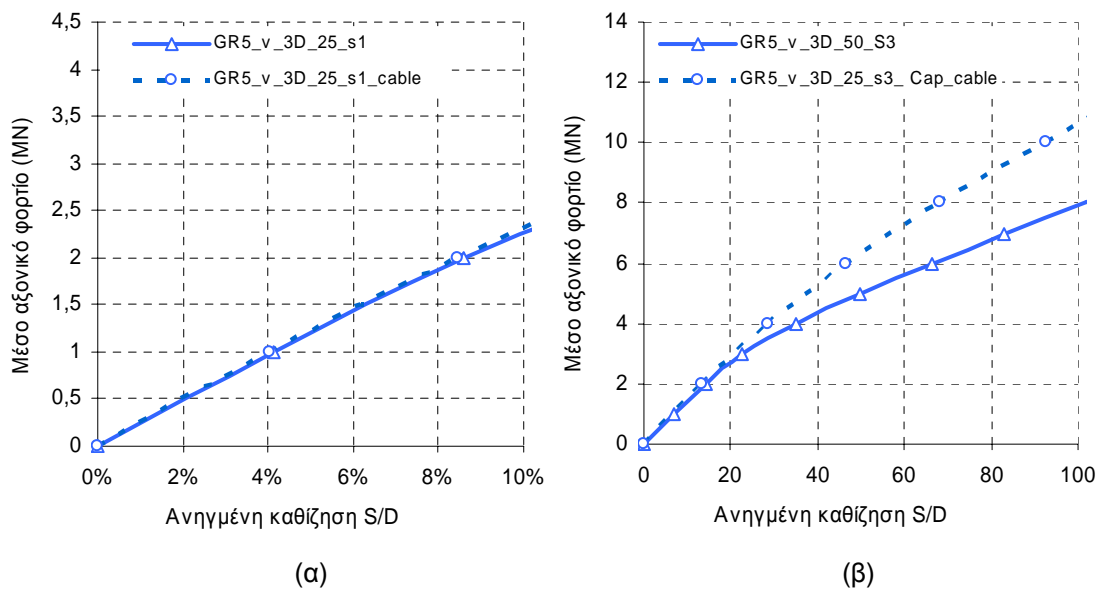


Σχήμα 7.3 Διάγραμμα μεταβολής του ανηγμένου φορτίου που φέρει ο κεφαλόδεσμος συναρτήσει της καθίζησης για τις διάφορες κατηγορίες αργίλου και για διάταξη πασσάλων 3*3 σε απόσταση (α) 3.0D και (β) 5.0D.



Σχήμα 7.4 Σύγκριση της απόκρισης ομάδας πασσάλων διάταξης 3*3 με παρουσία κεφαλόδεσμου και μη για αμμώδες έδαφος τύπου (α) S1 και (β) S3.

Από το διάγραμμα κατανομής του φορτίου στην επιφανειακή και στη βαθιά θεμελίωση παρατηρείται ότι για τη χαλαρή άμμο, τύπου S1, και για διάταξη 3*3 το ποσοστό του φορτίου που φέρει ο κεφαλόδεσμος είναι πολύ μικρό, μόνο 8% για το φορτίο λειτουργίας και 15% για την οριακή κατάσταση και κατά συνέπεια η συνεισφορά του κεφαλόδεσμου στην ανάληψη του φορτίου, για την περίπτωση αυτή, δεν θεωρείται σημαντική. Στην περίπτωση της πυκνής άμμου ωστόσο και όσο αυξάνει το επίπεδο της καθίζησης το φορτίο που αναλαμβάνεται από τον κεφαλόδεσμο είναι αρκετά σημαντικό και σταθεροποιείται στο 35%, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο σχήμα 7.6α.

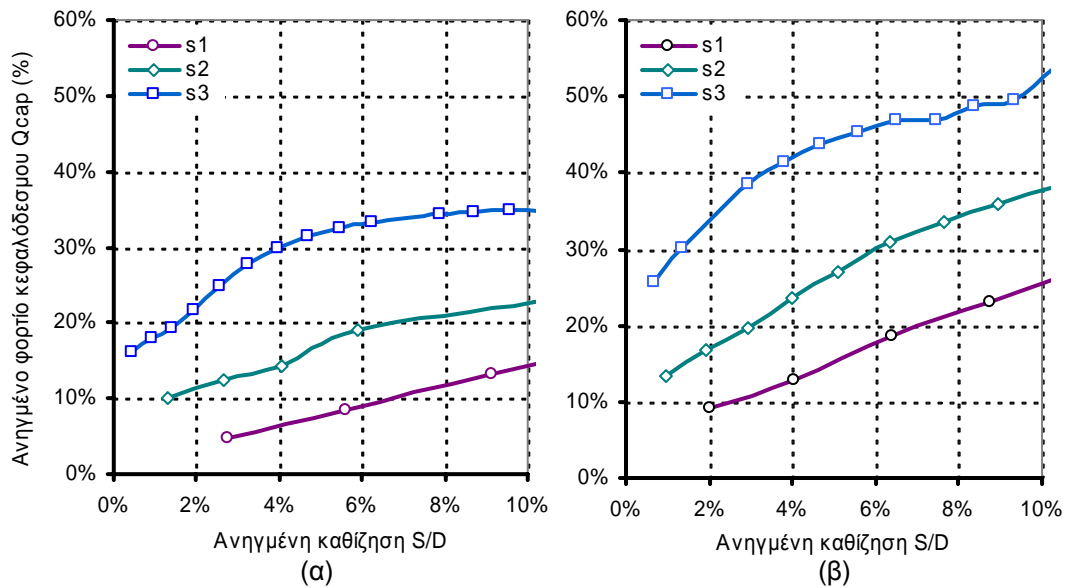


Σχήμα 7.5 Σύγκριση της απόκρισης ομάδας πασσάλων διάταξης 5*5 με παρουσία κεφαλόδεσμου και μη για αμμώδες έδαφος τύπου (α) S1 και (β) S3.

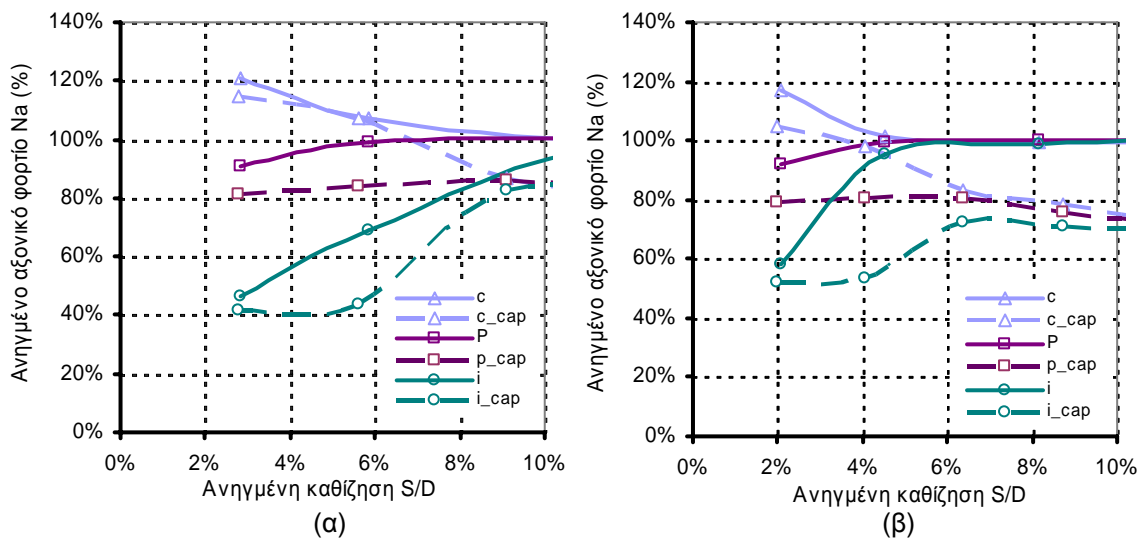
Με την αύξηση της αξονικής απόστασης στα 5.0D το ποσοστό του φορτίου που φέρει ο κεφαλόδεσμος αυξάνει και για την περίπτωση της πυκνής άμμου φτάνει το 50%, δηλαδή το εξωτερικώς επιβαλλόμενο φορτίο ισοκατανέμεται μεταξύ επιφανειακής και βαθιάς θεμελίωσης (σχήμα 7.6β). Στην περίπτωση ομάδας πασσάλων με μεγάλο αριθμό πασσάλων, διάταξη 5*5, και για αξονική απόσταση 3.0D παρατηρείται μείωση του ρόλου του κεφαλόδεσμου ως προς την ανάληψη φορτίου. Ειδικότερα το ποσοστό του φορτίου αυτού φτάνει το 10% για χαλαρές άμμους και αυξάνει στο 20% στην περίπτωση της πυκνής άμμου.

Αξιοσημείωτη είναι επίσης η διαφοροποίηση της κατανομής του φορτίου στους επί μέρους πασσάλους που επέρχεται με την τοποθέτηση του κεφαλόδεσμου. Στο σχήμα 7.7 με διακεκομμένη γραμμή δίνονται οι κατανομές του φορτίου στους επί μέρους πασσάλους για την περίπτωση ομάδας 3*3 και για κατηγορία εδάφους S1 για τις δύο περιπτώσεις σχετικών αποστάσεων που εξετάστηκαν ενώ με συνεχή γραμμή απεικονίζονται οι αντίστοιχες κατανομές χωρίς την παρουσία κεφαλόδεσμου, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.5.4. Δεν παρατηρείται σημαντική

απόκλιση των αποκρίσεων στις δύο περιπτώσεις. Οι πάσσαλοι αναλαμβάνουν και πάλι διαφορετικό φορτίο ανάλογα με τη γεωμετρική θέση που κατέχουν στην ομάδα, με το γωνιακό πάσσαλο να εμφανίζει τριπλάσια δυσκαμψία από τον κεντρικό για χαμηλά επίπεδα καθίζησης. Η ομοιομορφοποίηση των αποκρίσεων επιτυγχάνεται σε μεγάλες καθιζήσεις με όλους τους πασσάλους να αναλαμβάνουν το 85% του μέσου φορτίου για την περίπτωση με αξονική απόσταση 3.0D, ενώ το υπόλοιπο 15% φέρεται από τον κεφαλόδεσμο, όπως καταδεικνύεται στο σχήμα 7.6(α). Ανάλογη συμπεριφορά παρατηρείται και στην περίπτωση με αξονικής απόστασης μεταξύ των πασσάλων 5.0D, σχήμα 7.7(β).



Σχήμα 7.6 Διάγραμμα μεταβολής του ανηγμένου φορτίου που φέρει ο κεφαλόδεσμος συναρτήσει της καθίζησης για τις διάφορες κατηγορίες άμμου και για διάταξη πασσάλων 3*3 σε απόσταση (α) 3.0D και (β) 5.0D.



Σχήμα 7.7 Κατανομή του ανηγμένου φορτίου στους τρεις χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας για διάταξη 3*3 με κεφαλόδεσμο και μη, κατηγορία εδάφους S1 και σχετική απόσταση (α) 3.0D και (β) 5.0D.

Συνοψίζοντας από την επεξεργασία των πρώτων αποτελεσμάτων διαφαίνεται ότι η παρουσία κεφαλόδεσμου στις ομάδες των πασσάλων επηρεάζει την απόκριση της θεμελίωσης στην οριακή κυρίως κατάσταση, ειδικότερα όταν το έδαφος εμφανίζει σημαντική διατμητική αντοχή και υπολογίσιμη σε σχέση με την δυσκαμψία του κεφαλόδεσμου δυσκαμψία. Μικρότερη επιρροή παρουσιάζεται στα αργιλικά εδάφη, όπου ο κύριος μηχανισμός ανάληψης φορτίου όπως αποδείχθηκε στο κεφάλαιο 4 είναι η κινητοποίηση της πλευρικής αντίστασης περιμετρικά των πασσάλων. Στις περιπτώσεις πυκνών αμμωδών εδαφών, όπου βέβαια κάτω από ειδικές συνθήκες και απαιτήσεις θα απαιτηθεί η θεμελίωση με πασσάλους, ο κεφαλόδεσμος συμβάλει σημαντικά στην ανάληψη του επιβαλλόμενου φορτίου, ειδικά στις περιπτώσεις ομάδων με μεγάλη αξονική απόσταση.

Τα πρώτα αυτά συμπεράσματα είναι ενδεικτικά του ενδιαφέροντος αλλά και της πολυπλοκότητας από την οποία διέπεται το σύνθετο αυτό πρόβλημα. Η συστηματική και ενδελεχής ανάλυση του ερευνητικού αυτού πεδίου θα μπορούσε να φωτίσει τους ειδικότερους μηχανισμούς που το χαρακτηρίζουν και να οδηγήσει αρχικά στην κατανόηση τους και στη συνέχεια στην ποιοτική και ποσοτική αποτίμηση των επιμέρους επιπτώσεων της σύνθετης πλέον αλληλεπίδρασης του όλου συστήματος.

Contribution to the response evaluation of axially loaded pile groups

Extended summary

Pile foundations have been the subject of intensive research during the past three decades. Despite this, a lot of questions regarding the interaction between soil, piles and superstructures remain for the scientific community to resolve. While the effect of the interaction between the piles in a group of piles under axial loading remains a topic of interest for the research community, the response of a pile group under axial loading is considered to be among the factors which affecting the most superstructure's behaviour. Based on the experience gained through the research of the last decades, empirical relationships were proposed to estimate the reduction factors on both, the bearing capacity and the stiffness of a group due to the interaction between the piles. Moreover, specific values for these factors have been proposed in tabular form resulting from simplified analyses based on elastic continuum analysis and the principle of superposition, Poulos and Davis (1980), Poulos (1989). Lee (1993) used the load-transfer (t-z) method to estimate the response of a single pile and the Mindlin's solution, Mindlin (1936) to assess the interaction between the piles. Another simplified approach providing a methodology for estimating the settlement of a pile group is the representation by an equivalent pier (Randolph and Wroth, 1978; Randolph, 1994; Horikoshi and Randolph, 1999). Most of the above methods involve soil profile simplifications and other idealisations rendering them computer cost-effective with the drawback however of limited accuracy in many cases. Three-dimensional (3-D) finite element analyses (Katzenbach and Moormann, 1997) demonstrated a remarkable interaction between the piles in a group with a 3.0D spacing, which was not vanished even when spacing increased to 6.0D. Using 3-D nonlinear analysis Comodromos et al. (2003) and Comodromos (2004) demonstrated that the group's bearing capacity efficiency factor was not significantly deviating from unity. On the contrary, it was found that the interaction affects considerably the group stiffness efficiency factor. It was also revealed that the stiffness efficiency factor depends not only on the pile arrangement but on the settlement level as well. Moreover, Comodromos (2004) proposed a simplified relationship with the capability of predicting the response of pile groups, provided that the response of the single pile is known. The application of this relationship was limited to the commonly applied pile spacing of 3.0D and to soil profiles similar to the one used in the analysis. With the aim of examining the validity

of the proposed relationship to different soil profiles Comodromos and Bareka (2005) carried out an extensive numerical analysis for various pile dispositions and different soil profiles covering the range from very soft to hard clays. The validity of the proposed relationship was tested and according to their results was found able to predict the response of pile groups in clayey soils with a notable level of accuracy.

The objective of this thesis is to quantify the effect of the interaction between the piles of a group under axial loading in clayey and sandy soils. The investigation of the validity and probable needs for readjustment of the aforementioned proposed relationship is also a topic that is examined. The research is extended to some special cases of piled foundations such as pile based on rock and piles subjected to the phenomenon of negative friction.

A parametric analysis was carried out in order to investigate the consequences of the interaction between the piles of a group with rigid cap on both the ultimate bearing capacity and the stiffness of individual piles and that of the entire pile group. The piles of the groups are of a diameter of $D=1$ m and a length of 25 and 50 m. Configurations of 2*3, 3*3, and 5*5 were examined with axial distances of 2.0D, 3.0D, 4.0D and 5.0D. Four types of clayey soil and three types of sandy soils were examined in the parametric procedure. The analysis was carried out using the finite difference code FLAC^{3D}.

The evaluation of the results of this extensive parametric numerical analysis allowed the suggestion of reduction factors in tabular form for estimating the bearing capacity of pile groups as a result of the effect of interaction. More specifically for the clayey soils the bearing efficiency factor is found to be generally smaller than unity while application of no reduction factors is necessary for clays with higher strength. This factor takes values bigger than unity in the case of very stiff clays with large axial distances between the piles. It was also observed that for the same soil type and spacing the reduction increases as the number of piles increases. Furthermore, for the same group configuration the effect increases when the soil strength decreases. Finally, for the same soil type and group layout the influence decreases when spacing increases.

This conclusions were also observed in the case of the sandy soils. The difference lays in the exact values of the bearing efficiency factor. In the most of the cases the factor was bigger than unity, which is the world wide accepted aspect. The only cases that the specific factor was lower than unity, were the cases of loose sands in combination with large number of piles in the group.

Another interesting topic that has been examined is the distribution of the applied force in base and shaft resistance. In sandy soils it is observed that when the level of settlement is increased, the percentage of the applied force that is transferred to the base of the piles is also increased. At low levels of settlement 25% of the applied

force is undertaken by the base resistance rising up even to 75% in the case of very dense sand and for the limiting settlement 10%D. This percentage is invariable in clayey soils and stays at 20%. Considering that, pile groups in clays can be regarded as floating piles.

According to all this the effects of interaction to bearing capacity is not very important. On the contrary it has much influence in the foundation stiffness. Examining the results of the parametric analysis it is stated that the stiffness efficiency factor depends on both the pile arrangement and settlement level, with maximum interaction influence at low settlement levels. When settlement increases and plastification occurs the influence of the interaction gradually decreases, no matter the group configuration. Since plastification minimises the effects of interaction, the stiffness efficiency factors approach unity when plastification occurs. Obviously, when piles spacing decreases and the effect of interaction increases, a higher reduction to the group stiffness is observed. At low settlement level, of the order of 1 to 3% of the pile diameter, the reduction factor is of the order of 30% for clayey soils. The effect decreases in an accelerating rate as settlement level increases. It must be also mentioned that the influence to the stiffness efficiency factor amplifies as the number of piles in a group increases. These is also observed in the case of the sandy soils with the difference that accelerating the settlement the stiffness efficiency factor takes values bigger than unity. However, for the settlement that is corresponding to the working load the reduce of the pile group stiffness is significant, even if the bearing capacity factor is larger than unity.

In order to investigate the effect of interaction accurately, the responses of the piles were examined precisely. For both types of soil, the corner piles carry the largest load presenting the maximum stiffness, while the central pile carries the lowest load and has the minimum stiffness. The interior piles demonstrate an intermediate behaviour. The exact load that is being carried and the corresponding stiffness changes with the level of settlement. Bearing in mind the results of all the groups being examined, it can be said that the increase of the number of piles leads to notable differentiation of the response between corner and interior pile. This declination decreases with the application of higher loads. In clayey soils equal response and uniform stiffness for all the piles demands level of settlement bigger than 8%D (cases of small groups, with large spacing and rather rigid soil). This level is increased if these conditions are not fulfilled and rises up to 25% when refer to the exact opposite circumstances. In sandy soils the equalization of the response can be achieved sooner, even when the settlement is 4%D in the case of rather dense sand. These percentages are relative to the proportion of the plastified soil that surrounds the piles.

Bearing in mind that the working load of a single pile, defined as the 59% of the pile bearing capacity, corresponds to a level of settlement of the order of 1.5 to 2%D and assuming an $R_a=3$ to 4 as a representing settlement amplification factor for

commonly adopted pile groups, then the interval of interest of the response of the characteristic piles is limited to a maximum value of 4 to 8%D. For that range it can be seen that the ratio of the load of the corner pile to that of the central is of the order of $P_c/P_i = 1.75$ to 2 for a 3*3 pile group in a spacing of 4.0D in clays. When moving to a 5*5 pile group with the same spacing this ratio attains the value of 2.5 to 3. Based on that remark a question can be raised regarding a variable pile length and the desire of an optimum design in the case of groups with large number of piles. To achieve this goal and eliminate diversification of piles behaviour depending to their specific location in the group the length of central and internal piles can be increased accordingly in order to render uniform the piles' reaction.

The results of the current extensive parametric analyses of pile groups validate previously stated notions that the response of a pile group differs from that of a single pile depending on the particular configuration of the group and the level of settlements. More specifically it was found that the spacing significantly affects both the stiffness efficiency factor and the load capacity at a given level of settlement. The number of piles and the number of rows and columns also play an important role. Even if a 3-D nonlinear numerical analysis provides the ability of establishing the response of a pile group under vertical loading, it must be recognised that the procedure is extremely computationally demanding. Further to the computational time, which in the case of large groups may demand more than a week, a 3-D mesh preparation is also a difficult and time-consuming task in addition to the evaluation of the results from database files exceeding a memory disk space of 200 MB. For these reasons one can deduce that this kind of analysis could be applied only for a limited number of cases.

It was mainly based on the above drawback that Comodromos (2004) derive a relationship giving the ability to define the load-settlement curve of a given pile group based on that of a single pile. The applicability of the proposed relationship was limited to the widely applied spacing of 3.0D and was not validated for soil profiles different than the one of the particular site. The results of the present extensive work covering all kind of clayey and sandy soils and various group configurations give the ability of re-adjusting validate the proposed formula in order to cover pile groups of any applied spacing. In that way assuming that the response of a single pile is established using 3-D analysis, an in-situ test or even an accurate t-z analysis the response of the group could be defined.

As stated previously it could be possible to establish the response of a pile group with a rigid cap, at least for an interval of interest, based on the notion of the amplification factor R_a from which the response of a group is derived from that of the single pile. An extensive effort has been undertaken for incorporating the term of spacing in the relationship proposed by Comodromos (2004) on one hand and satisfy the variation form of the R_a factor as it is observed from the results of the current analysis. The results of different pile groups analysed gave the ability of readjusting a

previously proposed relationship for predicting the response of pile groups in a 3.0D spacing and expand its applicability to commonly applied practical spacings. Pile group configuration, normalised spacing and normalised settlement are introduced in the proposed relationship with different weighting factors. The implementation of a curve fitting procedure allowed an adequate determination of these factors so that even for marginal cases the resulting error remains under the acceptable limit of 10%. This value decreases even more as the level of settlement reduces. The accuracy of the pile group response prediction provided by the proposed relationship can be considered satisfactory for the necessities of most superstructures design. The application of this new relationship provides satisfactory prediction for the specific site and soil profile examined by Comodromos (2004) as presented. Comparing the accuracy of the method for clayey and sandy soils it can be said that in the case of the clayey soils the corresponding error is slightly smaller. The only case that the proposed relationship is not accurate is the case of the very dense where the use of pile foundation is not a common necessity. This declination is attributed to the big base resistance and in consequence to the fact that the group efficiency in sandy soils is often bigger than one especially when the density increases. However even in that case the estimated response is conservative, comparing to the calculated one, and it can be considered as an upper limit in lack of a more accurate approach.

In order to investigate the validity of the proposed relationship in non homogenous soils, the research was extended to two layered soil profiles for 3*3 pile groups with 3.0D spacing. Particularly the soil types that has already been examined was chosen so that clayey soil lies adjacent to the piles and the substratum consists of sand and vice versa. The results were also satisfactory as for the homogenous soils, except for the cases that the piles are based in dense sand. This declination was expected because of the base resistance which grows in connection with the applied force and the group efficiency, as in the case of pure homogenous sandy soil, which is greater than unity.

Having examined the pile behaviour in different types of soil, the question of the difference in the response when the pile group penetrates the soil stratum and bases on rock, came to surface. It is widely accepted that the pile groups based on rock are considered as end-bearing piles neglecting the contribution of the skin friction, which can be considerable in the case that piles lay in weak rock and the soil surrounding them is rather rigid. It is also widely accepted that these pile groups are less affected by the phenomenon of interaction between the piles. The aim of the present research was to evaluate the response of a pile group based on rock and to estimate the distribution of the load to shaft and tip resistance. For this purpose a parametric three dimensional numerical analysis was carried out, including pile groups with various layouts and different lateral soil consistency and shear strength. Useful results arise from the analysis regarding load distribution and the development of shaft and tip resistance as a function of pile position in a group and the level of loading.

More specifically, three dimensional analysis was carried out for pile groups in a 2*2 and a 3*3 layout and a spacing of 3.0D, while the pile length was considered 17 and 28 m. The piles are based on rock which is overlaid by stiff soil. Two groups of analysis were examined. In the first one the overlaying soil is supposed to be clayey, while in the second case a sandy less rigid soil was considered.

The results of the analysis have shown that the interaction effect is limited, contrary to the behaviour of pile groups in earth material. The consequences are maximized in relative small loads which correspond to low level of settlement, in order of 0.5%D. These consequences deal with the differentiation of the load distribution in respect to the exact position of the pile in the group and the axial load distribution regarding the ratio length to depth. It was also observed that as the length of the pile that lies in the soil increases, the percentage of the applied load carried out by the shaft resistance is also increased. This produces a rise in interaction between the piles.

The total response of the group is hardly affected from the interaction between the piles and the bearing capacity factor of the group as well as the group stiffness efficiency factor are equal to unity. The above conclusions compose the general behaviour of piles based on rock but notion should be taken when using the exact results of the analysis and that because they regard specific ground profiles and pile layouts.

The evaluation of the influence of negative friction in pile foundations composed another interest topic that has been examined in terms of the pile behaviour investigation. As a result of fill placement or even lowering the phreatic surface, the soil surrounding the piles of pile foundations in soft ground settles more than the piles. In that case, negative skin friction occurs, producing pile settlement and additional compressive force due to the hanging effect around the pile. The use of closed-form equations resulting from conventional analysis for estimating dragload assumes that the negative skin friction is fully mobilised above the neutral plane. The application of this approach leads to exaggerated dragloads since large settlement may be needed to fully mobilise the negative skin friction on a pile. On the other hand, large settlements are not necessarily needed to initiate slippage at the interface between soil and pile. For an accurate evaluation of both downdrag and dragload the pile-soil interaction should be taken into account in the analysis. Therefore, the ultimate skin friction, the interface stiffness, the soil strength and stiffness as well as the pile configuration must be taken into consideration. In the case of a pile group the effect of soil-pile interaction is more complicated due to the presence of adjacent piles which tends to reduce the soil settlement within the group. Thus the internal piles of a fixed head pile group undertake smaller dragload, while in the case of a free-head pile group they experience smaller dragload.

In this thesis, the effects of negative skin friction in pile foundations were examined. Initially a 3-D numerical analysis is used to estimate the effects of negative friction for

a single pile in a multilayered soil profile. The analysis was then extended to pile groups and the behaviour of piles constituting a group is contrasted to that of a single isolated pile. The effect of the construction sequence (application of the foundation working load prior to or after the construction of the embankment) to the foundation stiffness and the undertaken load is also investigated and quantified.

The case of a single isolated pile in a simplified soil profile was initially examined and compared with previous research. Good agreement was observed between the results of the current study and those of a similar three dimensional analysis. Further analysis of the effect of the combination of negative skin friction with the application of the working load demonstrated that when the construction of the embankment precedes the application of the working load, the effect of negative skin friction is considered smaller in the reverse case.

Three dimensional nonlinear analysis of pile groups verified the conclusion drawn from the single pile analysis for overestimation of dragloads when using simplified elastic approaches. It was also found that the dragload group effect is significantly higher for fixed head than free head piles for the practically adopted spacing of 3.0D. The maximum group effect was observed to be 41% on central pile, whereas the minimum group effect obtains on the corner piles was 16%. When spacing increased to 6.0D the effect was almost negligible, varying from 3% to 9%.

The evaluation of the results of the analysis examines the effect of the construction sequence to the overall response of pile foundations demonstrated that the negative friction effect increases when the construction of the embankment follows the application of the working load. From the single pile analysis, the additional axial force due to the negative friction effect was almost 50% of the working load. On the contrary, when the construction of the embankment precedes the application of the working load, the additional load is limited to 10% of the working load. The effect of negative skin friction to the secant stiffness of the single pile is considerably greater. A stiffness reduction factor of the order of 80% is observed for the above case.

Similar conclusions can be drawn for the specific fixed-head pile group. More specifically when the construction of the embankment precedes the application of the working load the effect of the negative skin friction is minimised. The total embankment load is increased by 33%. Further enlargement of this percentage to 43% is observed when the construction of the embankment follows the application of the working load. Moreover, due to negative skin friction, the overall secant stiffness of the foundation is reduced by 27% for both cases. Finally it should be emphasized that the effect of negative skin friction was quantified from the analysis of the particular soil profile and that the use of these quantitative data would be unwise in soil profiles and pile group configurations different to those they were derived from.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Berezantev, V. G., Khristoforov, V. and Golubkov V. (1961). Load Bearing Capacity and Deformation of Piled Foundations. *Proc. 5th Int. Conf. S. M. & F.E.*, Vol. 2, 11-15.
- Findlay, J.D., Brooks N.J., Mure, J.N. and Heron, W. (1997). Design of axially loaded piles and pile groups – United Kingdom practice. *Design of axially loaded piles – European practice* (eds by de Cock F. and Legrand C.), A. A. Balkema, Rotterdam, 353-376.
- Burland, J. B. (1973). Shaft Friction of Piles in Clay – A simple fundamental approach. *Ground Engineering*, Vol. 6, No. 3:30-42.
- Canadian Geotechnical Society (1985). *Canadian Foundation engineering Manual*. Vancouver.
- Chang, M. F. and Wong I. H. (1987). Shaft friction of drilled piers in weathered rock. *Proc. 6th Int. Conf. on Rock Mech.*, Montreal, ISRM, 313-318
- Chen, W.F. (1982). *Plasticity in Reinforced Concrete*. McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y.
- Chen, W.F and Baladi,G.Y. (1986). *Soil plasticity - theory and implementation*. Elsevier Science Publishing Company, Inc. NY.
- Chow, Y.K. (1986). Analysis of vertically loaded pile groups. *Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 10, No. 1:59 -72.
- Combarieu, O. (1985). *Frottement négatif sur les pieux*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Rapport de Recherche, LCPC, Paris.
- Comodromos, E., Ptilakis, K., Hatzigogos, T. (1992). Procédure Numérique pour la Simulation des Excavations des Sols Elastoplastiques., *Revue Française de Géotechnique*, No. 58:51-66.
- Comodromos, E., Hatzigogos, T., Ptilakis, K.(1992). Finite Element Algorithm for Analyzing Geotechnical Problems with Variable Domain and Boundaries. *NUMOG IV, 4th Inter. Symp. Numer. Mod. Geomech.*, Swansea, U. K., 577-587.
- Comodromos, E., Hatzigogos, T., Ptilakis, K. (1993). Multi-stage finite element algorithm for simulating excavations in elastoplastic soils. *Computer & Structures*, Vol. 46, No. 2:289-298.
- Comodromos, E (2003). Response prediction of horizontally loaded pile groups. *Geotechnical Engineering Journal*, Vol. 34, No. 2:123-133.
- Comodromos, E. M, Anagnostopoulos, C. T. & Georgiadis, M. K. (2003). Numerical

- assessment of axial pile group response based on load test. *Computers and Geotechnics*, Vol. 30, No. 6:505-515.
- Comodromos, E.M. (2004). Response evaluation of axially loaded fixed-head pile groups using 3D nonlinear analysis. *Soils and Foundations*, Vol. 44, No. 2.:31-39.
- Comodromos, E.M and Pitilakis, K(2005). Response evaluation for horizontally loaded fixed-head pile groups using 3D non-linear analysis. *Int. Journal for numerical and analytical methods in Geomechanics*, Vol. 29, No. 6: 597-625.
- Comodromos, E.M. and Bareka, S.V. (2005a). Evaluation of Negative Skin Friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis, *Computers and Geotechnics*, Vol. 32, No. 3:210-221.
- Comodromos, E.M. and Bareka, S.V. (2005b). Response Prediction for Axially Loaded Pile Groups in Clays using 3D Nonlinear Analysis. *16th Int. Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Ozaka, Japan, 2095-2098.
- Comodromos, E.M. and Bareka, S.V. (2006). On the response Prediction of axially Loaded Fixed Head Pile Groups in Clayey Soils', (submitted for publication).
- Coyle, H. M. and Reese, L. C. (1966). Load Transfer for axially Loaded piles in Clay. *Journal of Soil Mech. and Found. Eng.*, ASCE, Vol. 92, SM2: 1-26.
- Desai, C.S. and Christian, J.T., (Eds), (1977). *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, McGraw-Hill Book Co., New York.
- DIN 4014 (1990). *Bored piles - construction procedure - design and bearing behavior*. Berlin, German code.
- DIN 1054 (1990). *Bearing capacity of most commonly used types of piles*. Berlin, German code.
- Donald, I. B., Chiu H. K. and Sloan S. W. (1980). Theoretical analysis of rock socketed piles. *Int. Conf. on Structural Foundations on Rock*, Sydney, 291-302.
- Fellenius, B. H. and Broms, B. B. (1969). Negative skin friction for long piles driven in clay. *7th Int. Conf. on Soil Mech. & Found. Eng.*, Vol 2: 93-98.
- Fellenius, B.H. (1972). Downdrag on long piles in Clay due to negative skin friction. *Canadian Geotech. Journal*, Vol. 9, No. 4: 323-37.
- Fleming, W.G., Weltman, A.J., Randolph, M.F. and Elson W.K. (1992). *Piling engineering*. E & FN Spon, New York .
- Fleming, W.G., Weltman, A.J., Randolph M.F., Elson W.K. (1998). *Piling engineering*. 2nd edition E & FN SPON, London.
- Gill, S. A. (1980). Design and construction of rock sockets. *Int. Conf. on Structural Foundations on Rock*, Sydney, 241-252.
- Golder, H. Q. and Leonard, M. W. (1954). Some tests on bored piles in London Clay', *Géotechnique*, Vol. 4: 32-41.
- Golder H. Q. (1957), 'A note on piles in sensitive Clays', *Géotechnique*, Vol. 7: 192-195.

- Horvath, R.G., Schebesh, D. and Anderson, M. (1989). Load - displacement behaviour of socketed piers – Hamilton General Hospital. *Canadian Geotech. Journal*, Vol. 26, 260-268.
- Horikoshi, K. and Randolph, M. (1999). Estimation of overall settlement of piled raft. *Soils and Foundations*, Vol. 39, No. 2:pp. 59-68.
- Itasca (2002). *FLAC^{3D}, Fast Lagrangian analysis of Continua*. Itasca Consulting group, Minneapolis USA: User's manual.
- Jeong, S. (1992). *Nonlinear three dimensional analysis of downdrag on pile groups*. Ph.D. Thesis, Texas A&M University,
- Johannessen, I. J. and Bjerrum, L. (1965). Measurement of the compression of a steel pile to rock due to settlement of the surrounding clay. *6th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng.*, Vol. 2: 261-264.
- Katzenbach, R. and Moormann, C. (1997). Design of axially loaded piles and pile groups – German practice. *Design of axially loaded piles – European practice* (eds by de Cock F. and Legrand C.), A. A. Balkema, Rotterdam, 177-201.
- Kerisel, J. (1961). Fondations Profondes en Milieu Sableux. *5th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng.*, Vol. 2: 73-83.
- Kempfert, G.G. and Rundolf, M. (2005). Effects of actions due to group effect on the superstructure on pile groups, *16th International Conference on Soil Mech. and Geotech./ Engin.*, Ozaka, Japan, pp. 2133-2136.
- Kishida, H. (1967). Ultimate Bearing Capacity of Piles Driven into Loose Sand. *Soils and Foundations*, Vol. 7, No. 3: 20-29.
- Koizumi, Y. and Ito, K. (1967). Field Tests with Regard Pile Driving and Bearing Capacity of Piled Foundations. *Soils and Foundations* Vol. 7, No. 3:30-53.
- Kuwabara, F. and Poulos, H.G. (1989). Downdrag forces in group of piles. *Journal of Geotech. Eng. ASCE*, Vol. 115, No. 6: 806-18.
- Ladanyi, B. and Domingue, D. (1980). An analysis of bond strength of rock socket piers. *Int. Conf. in Structural Foundations on Rock*, Sydney, 363-373.
- Lee, C. Y. (1993). Pile group settlement analysis by hybrid layer approach. *Journal of Geotech. Eng. ASCE*, Vol. 119, No. 6:984-997.
- Lee, C.J, Bolton, MD, and Al-Tabaa A. (2002). Numerical modelling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations. *Géotechnique*, Vol. 52, No. 5: 325-35.
- Mandolini, A., Russo, G. and Viggiani, (2005). Pile Foundations: Experimental investigations, analysis and design. *16th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechn. Engin.*, Ozaka, Japan, 177-213.
- McClelland, B., Focht, J. A. and Emrich, W. J. (1969). Problems in Design and Installation of Offshore Piles. *Journal of Soil Mech. and Found Eng. ASCE*, Vol. 95, No.6:1419-1514.
- McClelland, B. (1974). Design of Deep Penetration Piles for ocean Structures.

- Journal of Geot. Eng. Div. ASCE*, Vol. 100, No 7:705-747.
- Meyerhof, G.G. (1956). Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. *Journal of Soil Mech. and Found Eng. ASCE*, Vol. 82, No. 1:1-19.
- Meyerhof, G.G. (1959). Comparison of sands and Bearing Capacity of piles. *Journal of Soil Mech. and Found Eng. ASCE*, Vol. 85, No.6:1-29.
- Meyerhof, G.G. (1976). Bearing Capacity and Settlement of pile foundations. *Journal of Soil Mech. and Found Eng. ASCE*, Vol 102, No. 3:195-228.
- Mindlin, R.D. (1936). Force at a point in the Interior of a Semi-Infinite Solid. *Physics*, Vol. 7, 192-195.
- Mohan, D. and Chandra, S. (1961). Frictional resistance of bored piles in expansive clays. *Géotechnique*, Vol. 11: 291.
- O' Neil, M.W., Hawkinw R.A. and Mahar, L.J (1982). Load transfer mechanism in piles and pile groups. *Journal of Geotech. Eng. Div. ASCE*, Vol. 108, No. 12: 1605-1623.
- Ortigao, J.A. (1995). *Soil mechanics in the light of critical state theories*. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Osterberg, J.O. (1984). A new simplified methods for load testing drilled shafts. *Foundation Drilling*, Association of Drilled Shafts Contractors, Vol. 23, No. 6: 9-11
- Osterberg, J. O. and Gill, S.A. (1973). Load transfer mechanisms for piers socketed in hard soils or rock. 9th Canadian Symp. On Rock Mech., Montreal, 235-263.
- Owen, D.R.J., and Hinton, E. (1980). *Finite elements in plasticity: Theory and Practice*. Pineridge Press Ltd, Swansea, U.K.
- Pells P.J.N., Rowe, R.K. and Turner, R.M. (1980). An experimental investigation into side shear for socketed piles in sandstone. *Int. Conf. on Struc. Found. On Rock*, Sydney, 291-302.
- Poorooshasb, H.B., Alagmir, M. and Miura, N. (1996). Negative skin friction on rigid and deformable piles. *Computers and Geotechnics*, Vol. 18 No. 2: 109-206.
- Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. J. Wiley & Sons Ltd, New York.
- Poulos, H.G. and Mattes N.S. (1969). The analysis of downdrag in end-bearing piles'. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engin., 203-208, Mexico City.
- Poulos, H.G. (1989). Pile behaviour – theory and application. *Géotechnique*, Vol. 39, No. 3:366-415.
- Poulos, H.G. (2000). Pile testing – From the designer's viewpoint. *Statnamic Loading Test '98*, Balkema, Rotterdam, 3-21
- Prakash, S. and Sharma H. (1990), *Pile foundations in engineering practice*. John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- Randolf, M.F. and Wroth, C.P. (1978). Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of Geotech. Eng. ASCE*, Vol 104, No. 12:1465-1488.

- Randolf, M.F. (1994). Design method for pile group and piled raft. *13th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.* Vol. 5, 61-82, New Delhi.
- Reese, L.C., Touma, F. T. & O' Neil, M. W. (1976). Behavior of Drilled Piers Under Axial Loading. *Journal of Geotech. Eng. ASCE*, Vol. 102, No. 5: 493-510.
- Rowe R.K., Booker, J.R. and Balaam, N. (1978). Application of the initial stress method to soil-structure interaction. *Int. Journal for numerical and analytical methods in Geomechanics*, Vol. 12, No. 5: 873-880.
- Rowe R.K. and Pells P.J.N. (1998). A theoretical study on pile-rock socket behavior. 'Foundations on rock'. *Int. Conf. on Struc. Found. On Rock*, Sydney, 253-264.
- Rowe R.K. and Armitage H.H. (1987). Theoretical solutions for the axial deformation of drilled shafts in rock. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, 114-142.
- Seidel, J.P. and Haberfield C.M. (1994). A new approach to the prediction of drilled pier performance in rock. *Int. Conf. Design and Constr. of Deep Foundation*, Orlando, FL, 556-585.
- Shibata, T., Sekiguchi, H. and Yukitomo H. (1982). Model test and analysis of negative friction acting on piles. *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 2: 806-18.
- Skempton A.W. (1953), 'Discussion: Piles and Pile Foundations, Settlement of pile Foundations'. *3rd Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.*, Vol. 3: 172-181.
- Smith, I.M. and Griffiths, D.V. (1988). *Programming the finite element method*. 2nd edition, John Wiley & sons Ltd, New York.
- Tan, Y.C., Chow, C.M. and Gue, S.S. (2005). Piled raft with different pile length for medium-rise buildings on very soft clay. *16th Int. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng.*, 2045-2048, Ozaka, Japan.
- Tang, Q., Drumm, E.C. and Bennett, R.M. (1994). Response of drilled shaft foundations in karst during construction loading. *Int. Conf. Design and Constr. of Deep Foundation*, Orlando, FL, 1296-1309.
- The, C.I. and Wong, K.S. (1995). Analysis of downdrag on pile groups. *Géotechnique*, Vol. 45, No. 2:191-207.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. New York: Wiley.
- Thorne, C.P. (1998). The capacity of piers drilled in rock.. *Int. Conf. on Struc. Found. On Rock*, Sydney, 223-233.
- Tomlinson, M. J. (1957). The adhesion of piles Driven in Clay Soils. *4th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Vol. 2: 66-71.
- Tomlinson, M. J. (1970). Some effects of pile driving on skin friction. *Conf. on beh. of piles*, Inst. Civ. Engrs., London: 59-66.
- Tomlinson, M.J. (1994). *Pile design and construction practice*. 4th edition, E & FN Spon, London.
- Tomlinson, M. J. (1977). *Pile design and construction practice*. ICE, Cement and

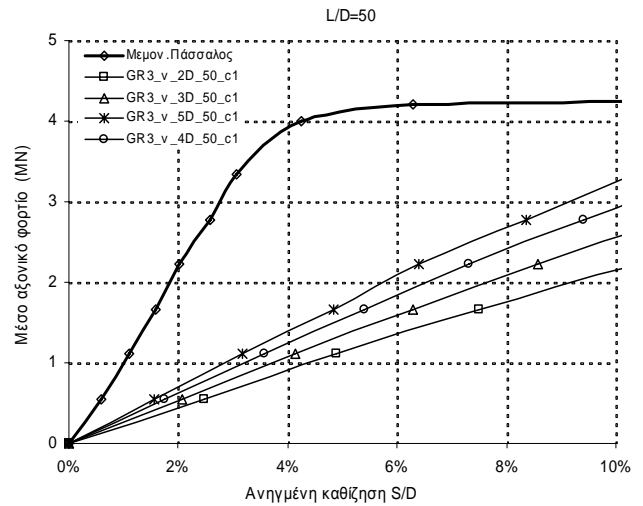
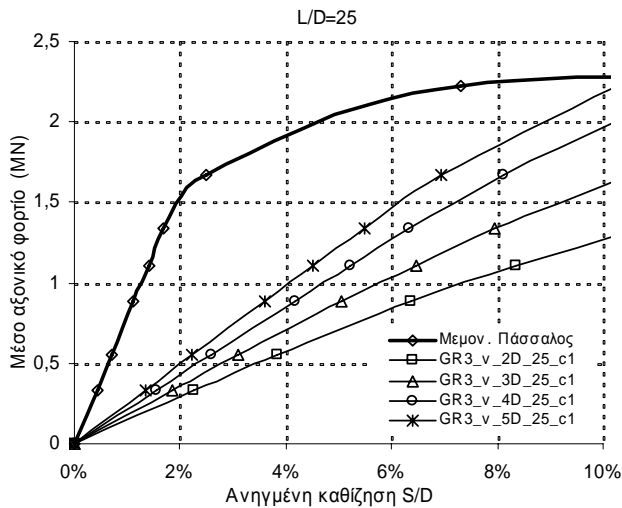
- Concrete Assoc., London.
- Vesic, A. S. (1967). *A study of Bearing Capacity of Deep Foundations*. Final Rep., Proj. B-189, School of Civil Eng., Georgia Inst. Tech., Atlanta.
- Vesic, A. S. (1970). Tests on instrumented piles, Ogeechee river site. *Journal Soil Mech. and Found. Eng. ASCE*, Vol. 96, No. 2: 561-584.
- Vesic, A. S. (1977). *Design of pile foundations*. Transportation research board, TRB, Washington D.C. No. 42.
- Williams, A.F. and Pells P.J.N. (1981). Side resistance rock sockets in sandstone, mudstone and shale. *Canadian Geotech. Journal*, Vol. 18: 502-513.
- Winterkorn, H.F. and Fang, H.F. (1975). *Foundations engineering handbook*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Woodward R. & Boitano J. (1961), 'Pile Loading Tests in Stiff Clays', Proc. 5th Int. Conf. S. M. & F. E., vol. 2,177.
- Wyllie D.C. (1999). *Foundations on rock*. 2nd edition, E&FN Spon, London.
- Αναγνωστόπουλος, Χ., Γεωργιάδης Μ., Πιπιλάκης Κ. (1994). *Θεμελιώσεις – Αντιστηρίξεις*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Α.Π.Θ.
- Κωμοδρόμος Α. (1991). *Συμβολή στην ανάλυση των εκσκαφών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*. Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
- Κωμοδρόμος, Α., και Νάσκος Ν. (1994). *Δοκιμαστική φόρτιση πασσάλου για το έργο του βου προβλήτα του λιμένα Θεσσαλονίκης – Τεχνική Εκθεση*. Θεσσαλονίκη: Γεώγνωση Α.Ε.
- Κωμοδρόμος Α. (2001). *Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Κωμοδρόμος, Α (2004). Αριθμητικός Προσδιορισμός Απόκρισης Ομάδας Πασσάλων με Ενιαίο Κεφαλόδεσμο υπό Κατακόρυφη Φόρτιση. *Τεχνικά Χρονικά*, Τεύχος 1, 57-68.
- Κωμοδρόμος, Α., Μπαρέκα, Σ. (2006). Ανάπτυξη αρνητικών τριβών σε ομάδες πασσάλων: Αποτίμηση επιπτώσεων στους επιμέρους πασσάλους. *5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Τομ. 3, 223-230.
- Μπαρέκα, Σ., Κωμοδρόμος, Α. και Λαζούδη Π. (2006). Διερεύνηση της συμπεριφοράς ομάδα πασσάλων εδραζόμενων σε βραχώδες υπόβαθρο. *5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Τομ. 3, 261-268.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

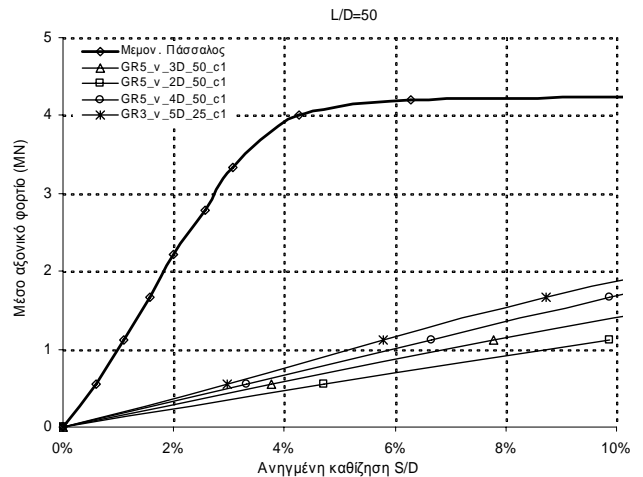
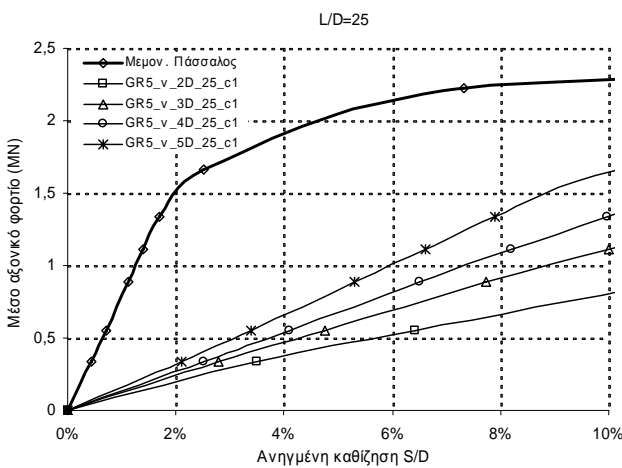
A

Διαγράμματα απόκρισης ομάδων πασσάλων

3*3



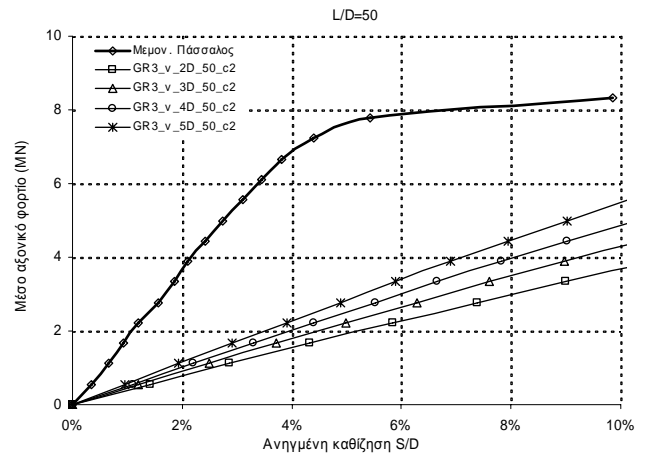
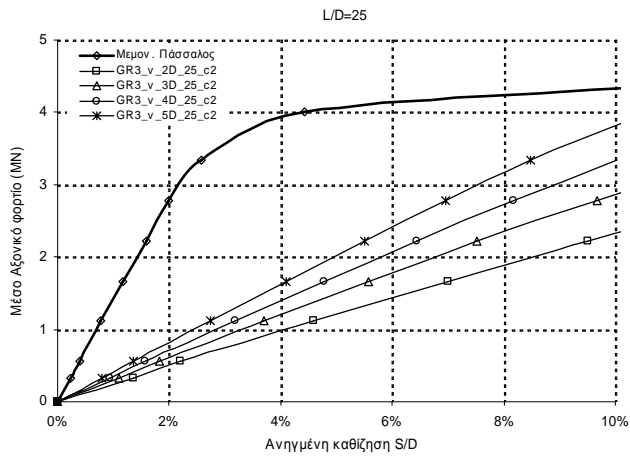
5*5



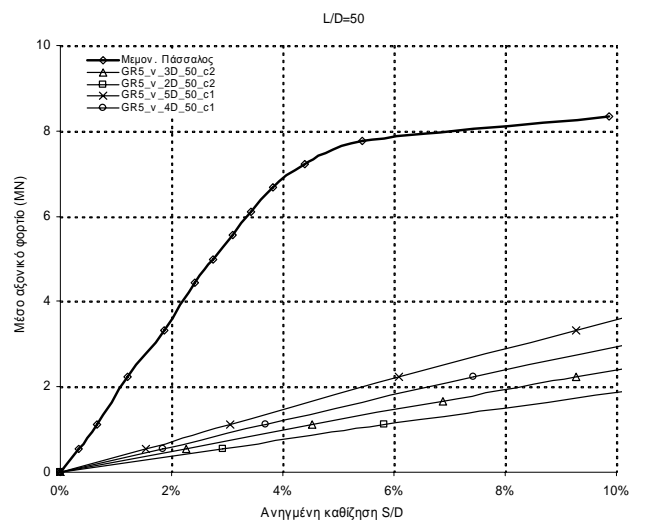
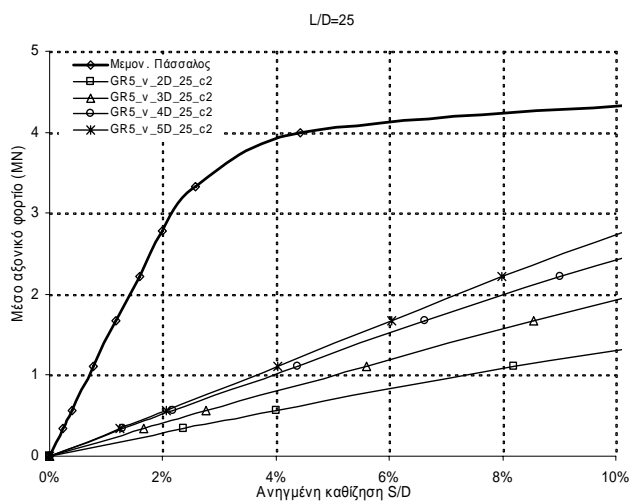
Διαγράμματα απόκρισης για ομάδα πασσάλων 3*3 και 5*5, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C1 με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ και $L/D=50$, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
Α.1-Α.4

3*3



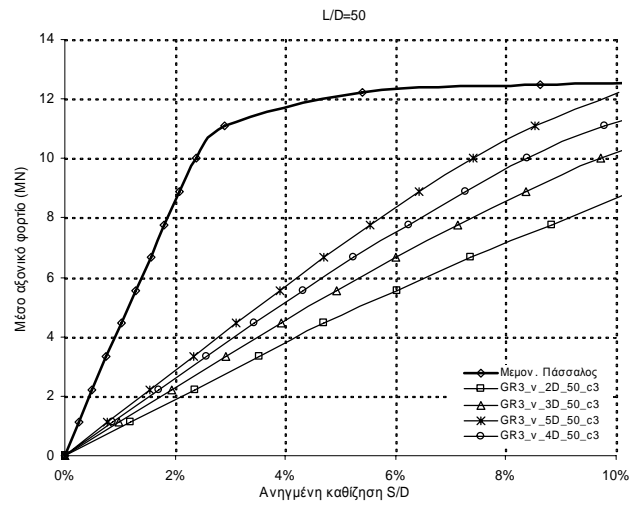
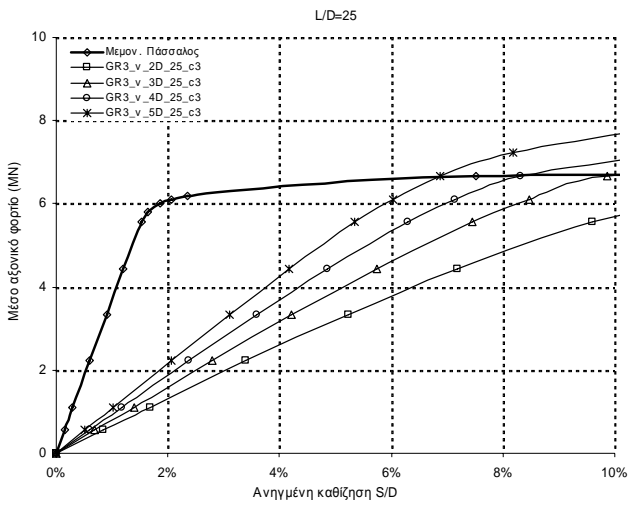
5*5



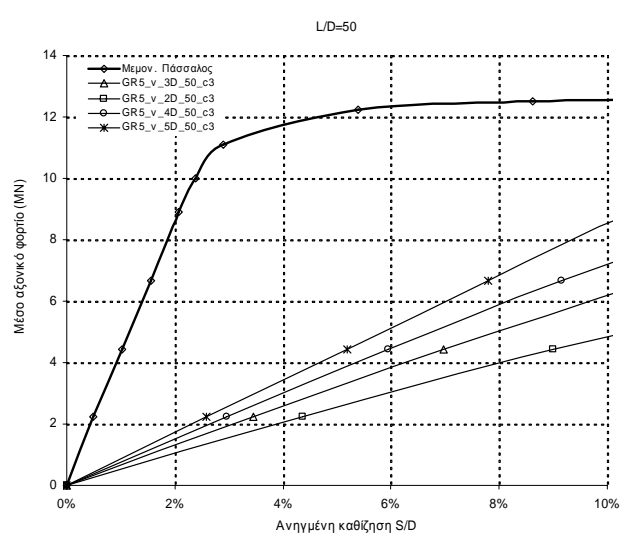
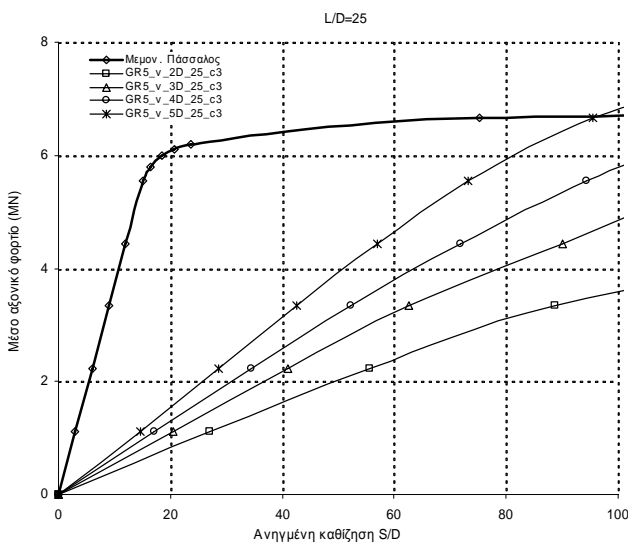
Διαγράμματα απόκρισης για ομάδα πασσάλων 3*3 και 5*5, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C2 με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ και $L/D=50$, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
Α.5-Α.8

3*3



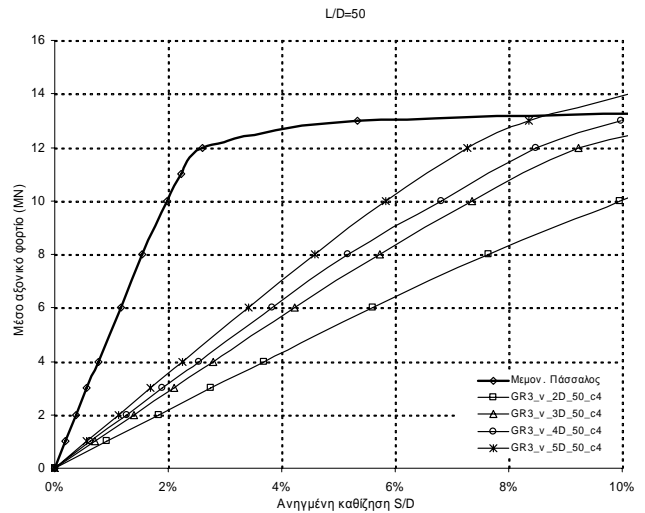
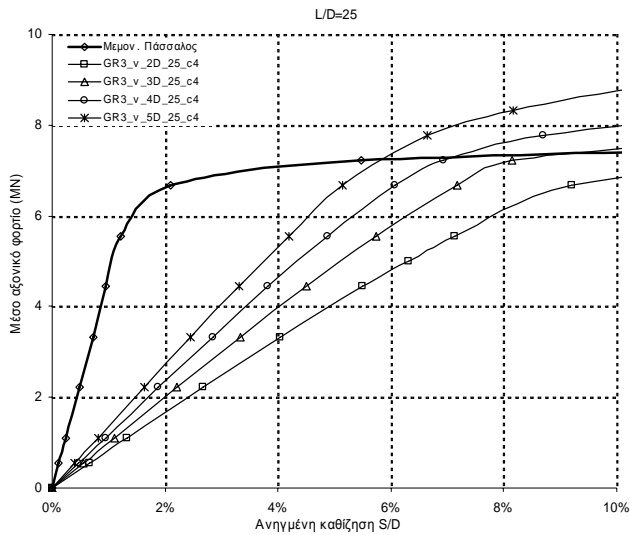
5*5



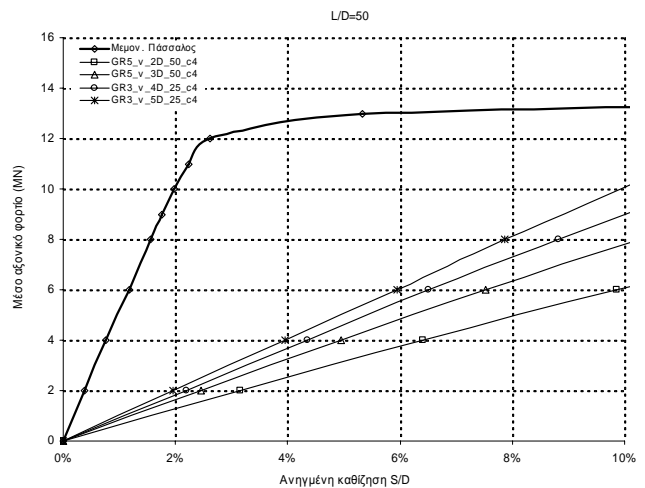
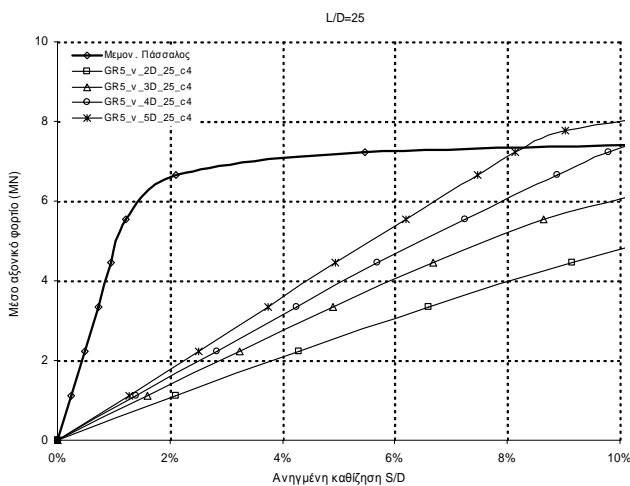
Διαγράμματα απόκρισης για ομάδα πασσάλων 3*3 και 5*5, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C3 με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ και $L/D=50$, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
A.9-A.12

3*3

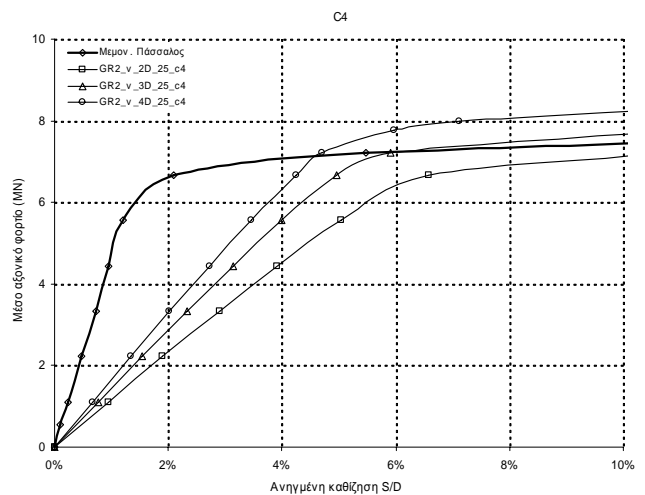
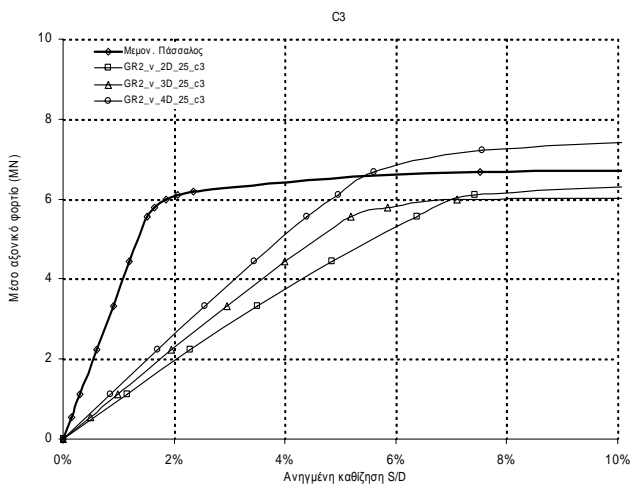
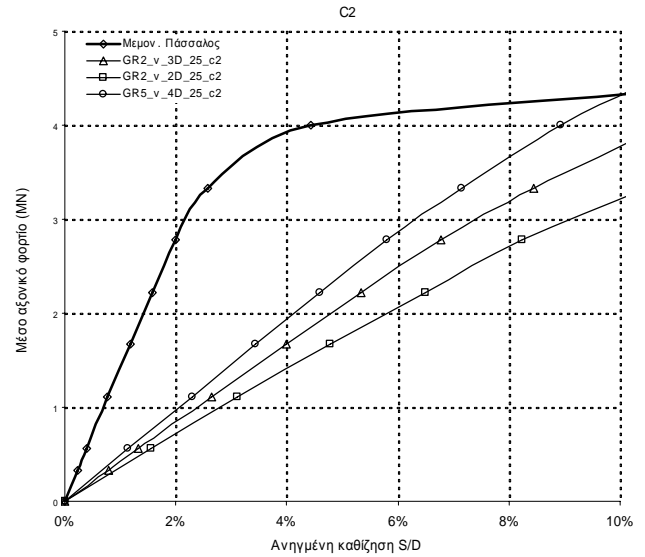
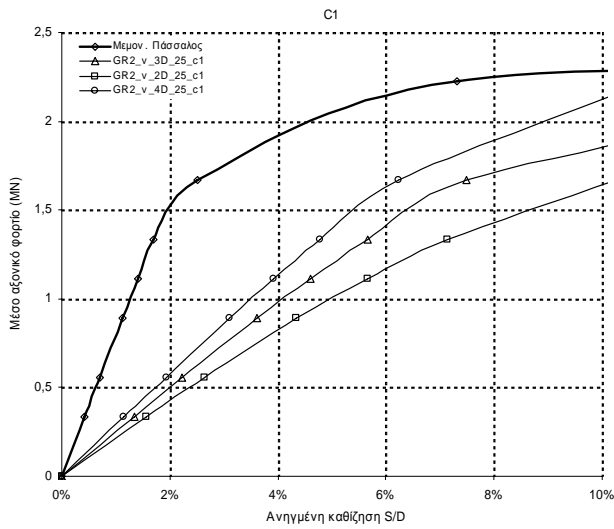


5*5



Διαγράμματα απόκρισης για ομάδα πασσάλων 3*3 και 5*5, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C4 με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ και $L/D=50$, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

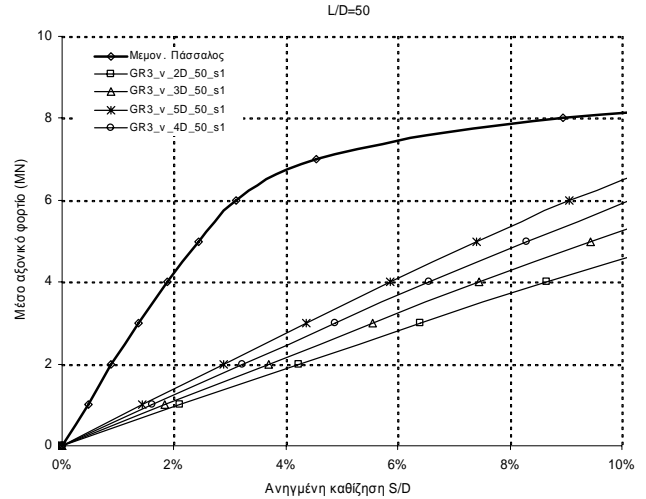
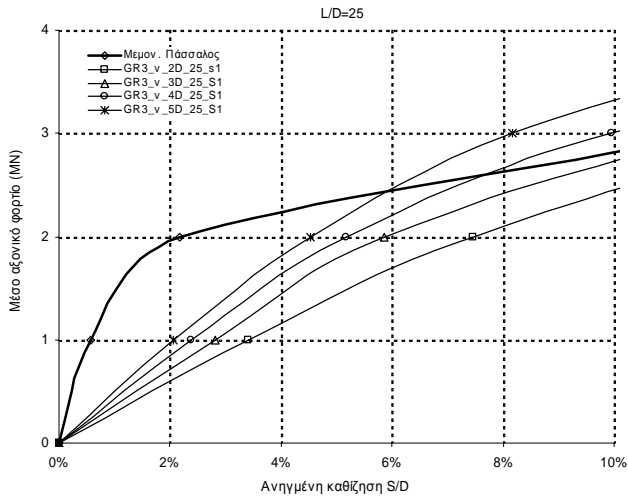
Σχήματα
A.13-A.16



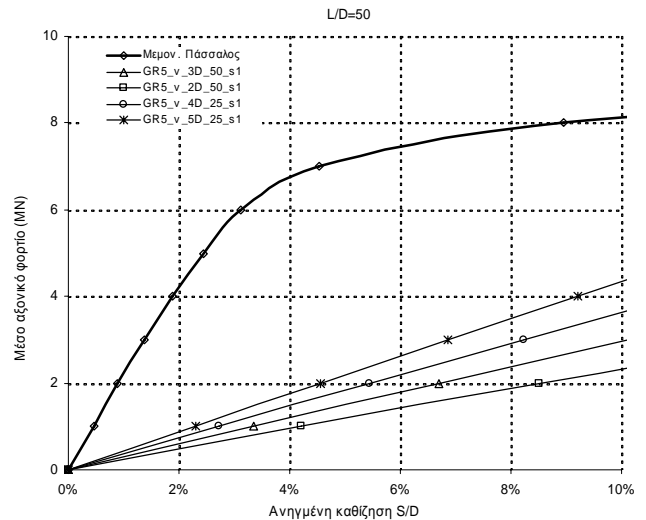
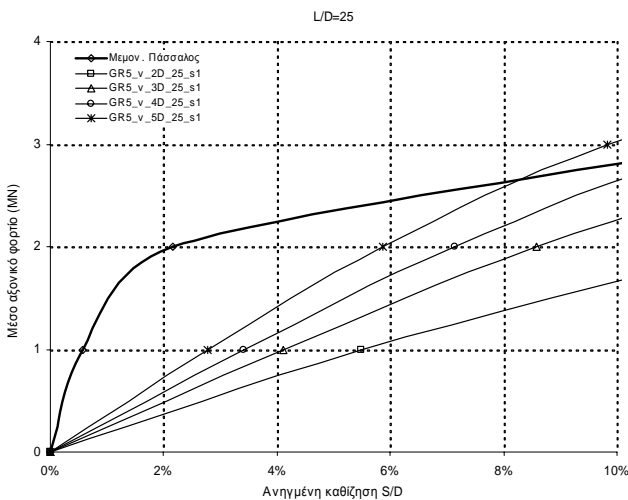
Διαγράμματα απόκρισης για ομάδα πασσάλων 2*3 με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ για τους διάφορους τύπους αργιλικού εδάφους και για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
A.17-A.20

3*3



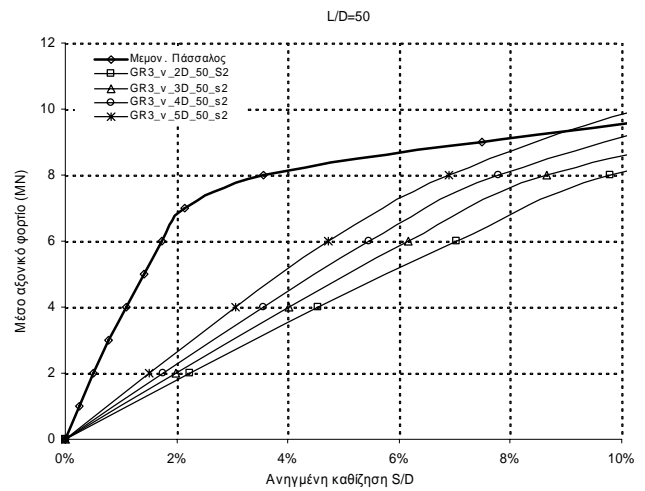
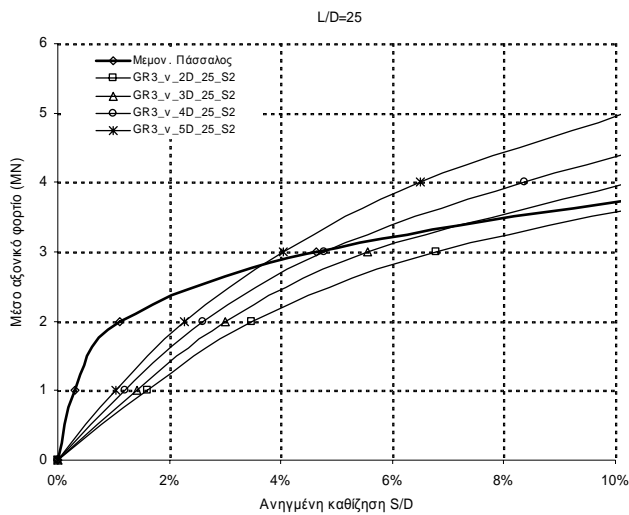
5*5



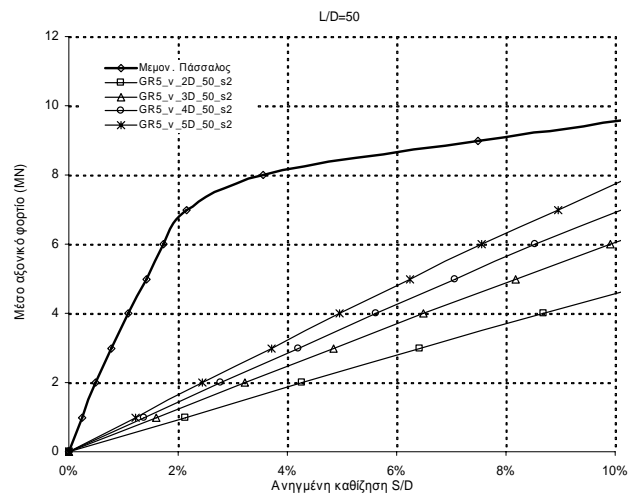
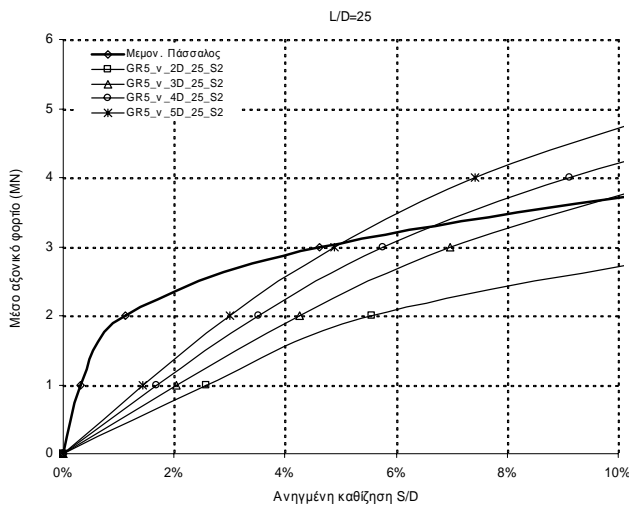
Διαγράμματα απόκρισης για ομάδα πασσάλων 3*3 και 5*5, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S1 με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ και $L/D=50$, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
A.21-A.24

3*3



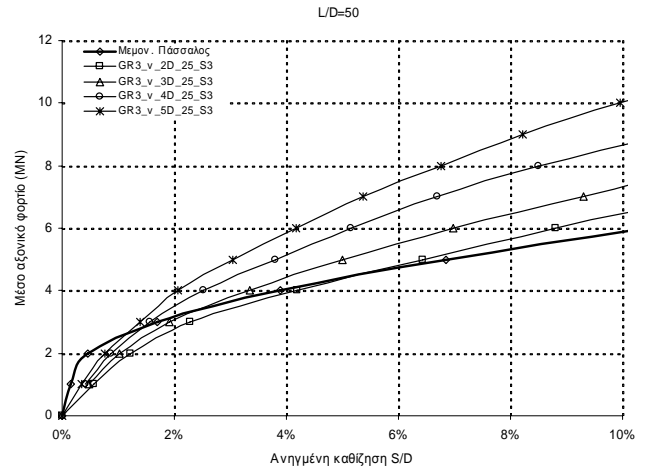
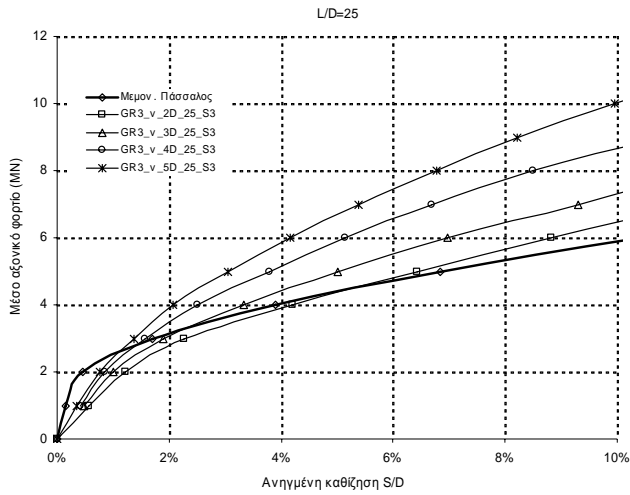
5*5



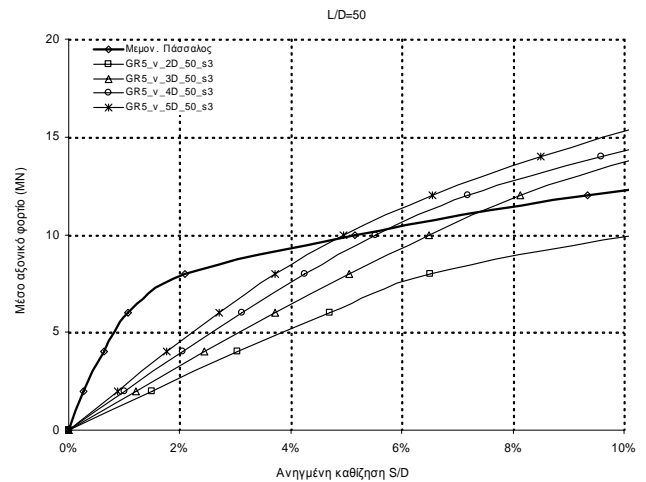
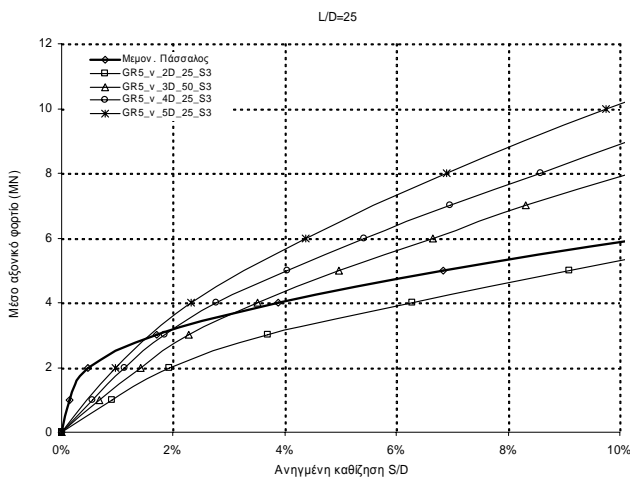
Διαγράμματα απόκρισης για ομάδα πασσάλων 3*3 και 5*5, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S2 με ανηγμένο μήκος L/D=25 και L/D=50, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
A.25-A.28

3*3

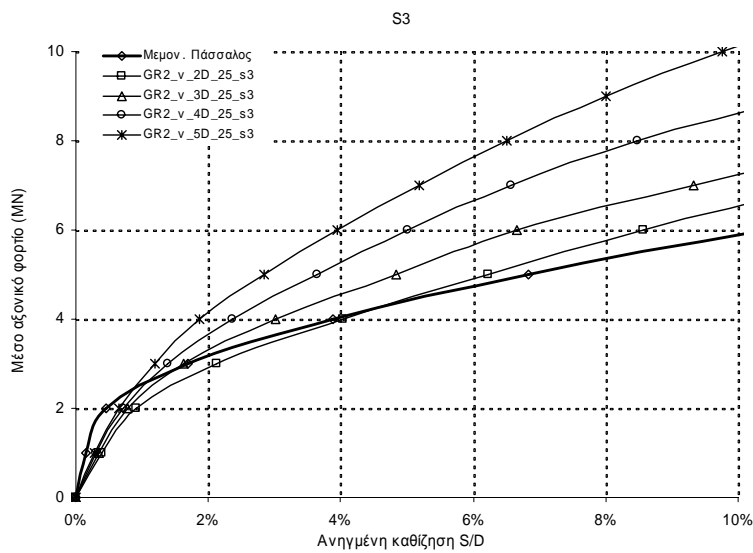
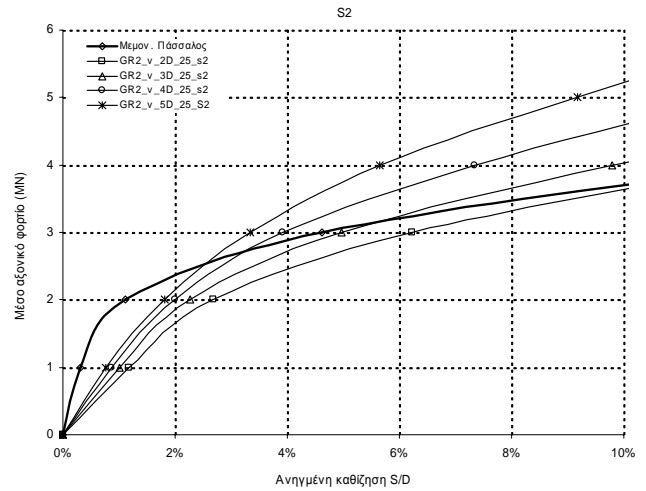
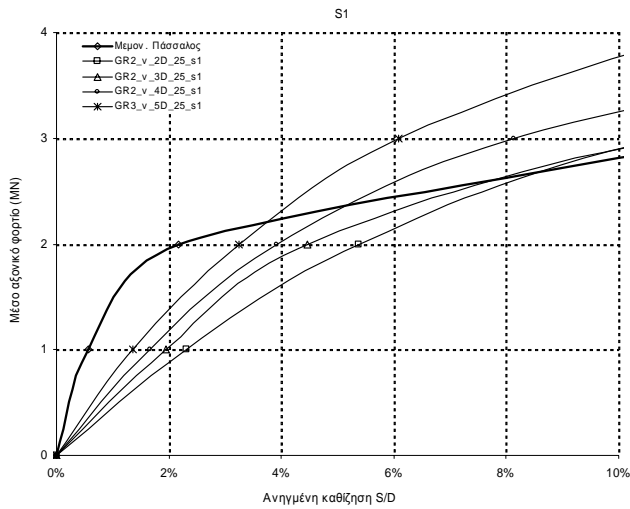


5*5



Διαγράμματα απόκρισης για ομάδα πασσάλων 3*3 και 5*5, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S3 με ανηγμένο μήκος L/D=25 και L/D=50, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
A.29-A.32



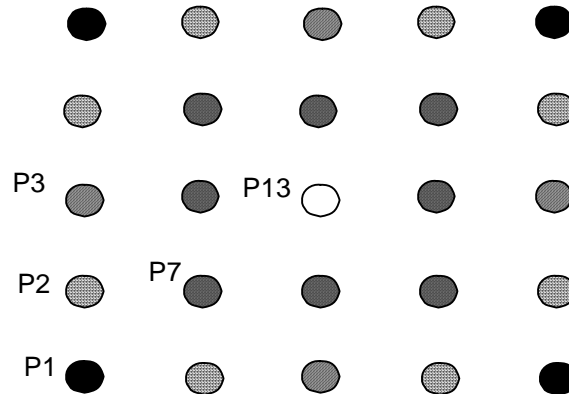
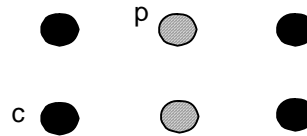
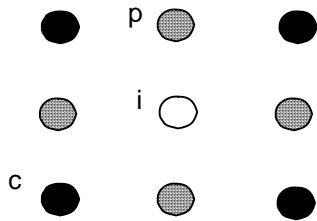
Διαγράμματα απόκρισης για ομάδα πασσάλων 2*3 με ανηγμένο μήκος L/D=25 για τους διάφορους τύπους αμμώδους εδάφους και για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
A.33-A.35

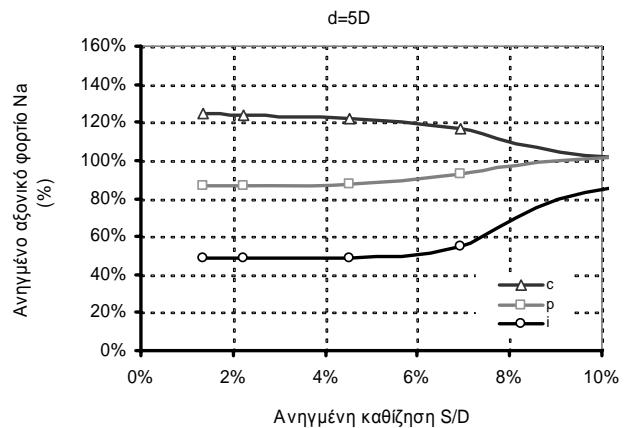
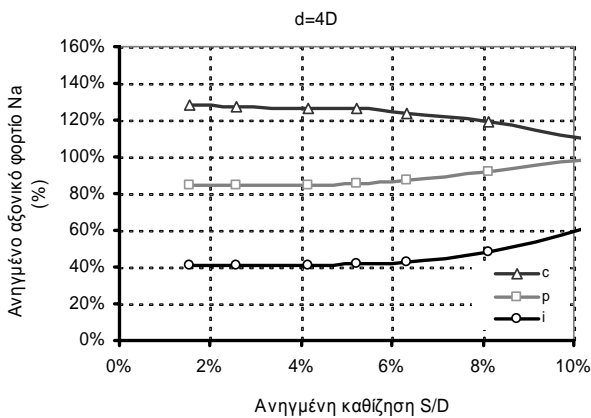
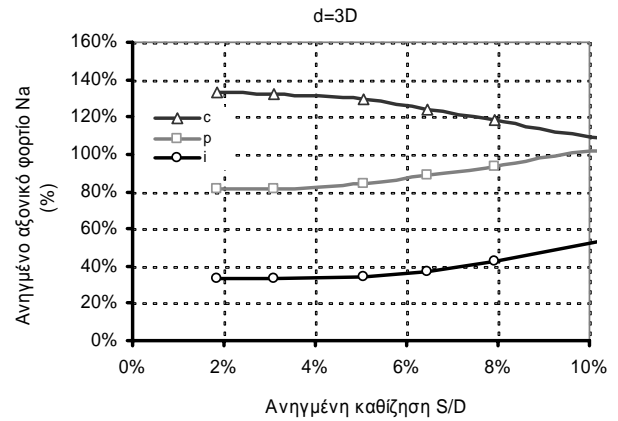
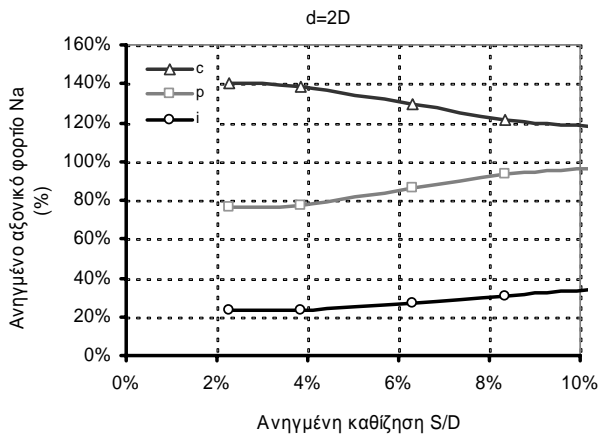
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

B

**Διαγράμματα κατανομής του επιβαλλόμενου φορτίου
στους επί μέρους πασσάλους της ομάδας**

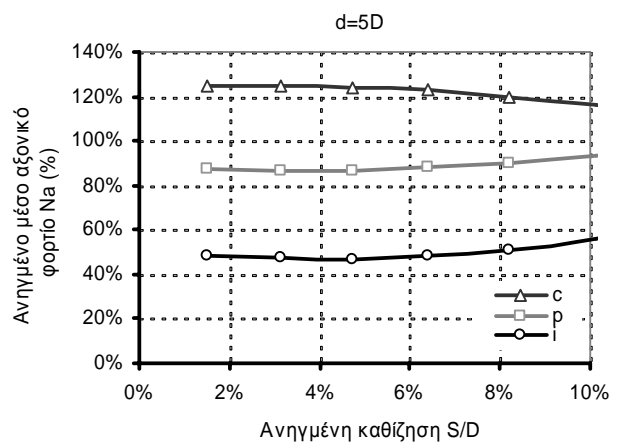
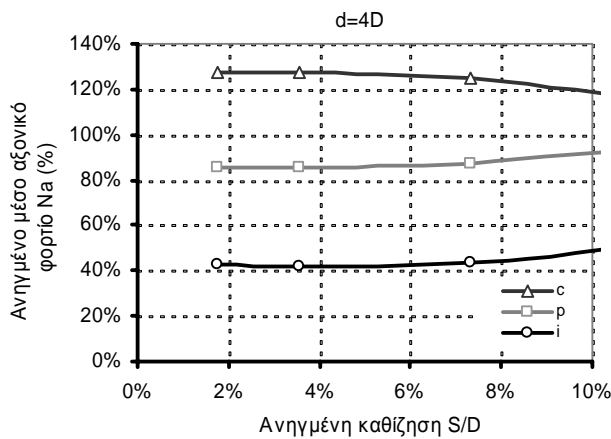
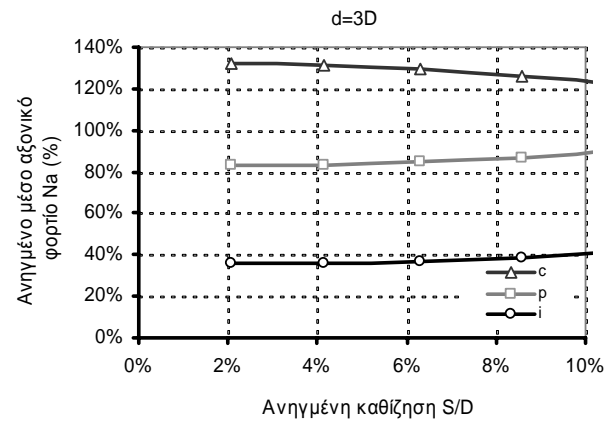
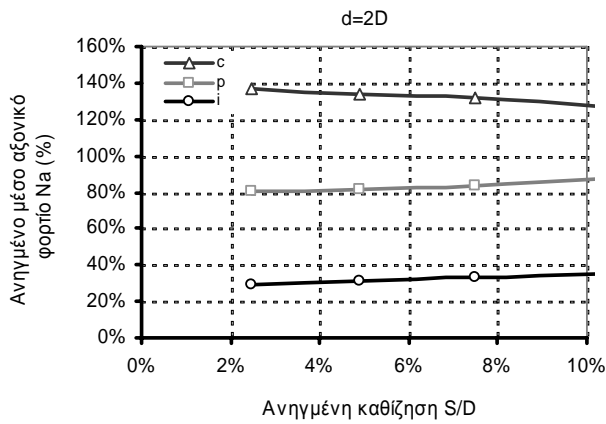


Συμβολισμοί χαρακτηριστικών πασσάλων ομάδων με διάταξη 3*3, 2*3 και 5*5



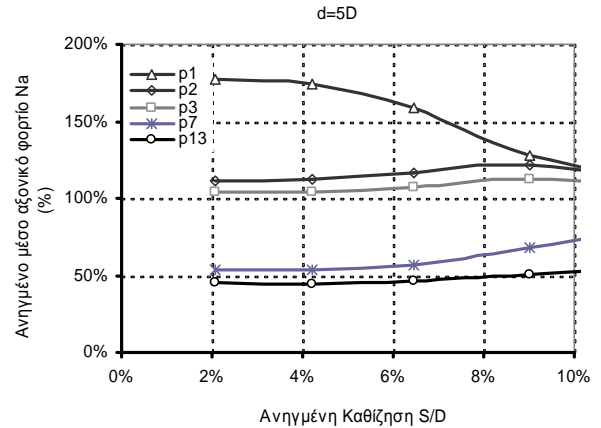
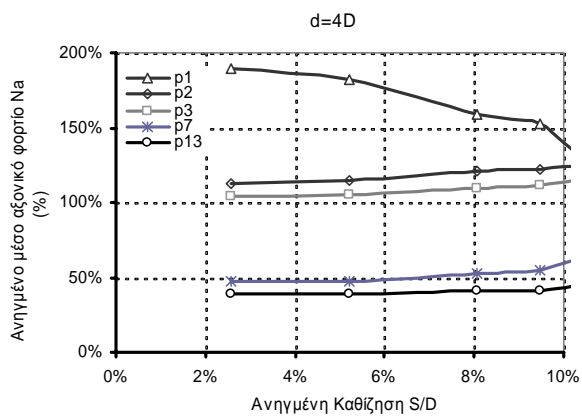
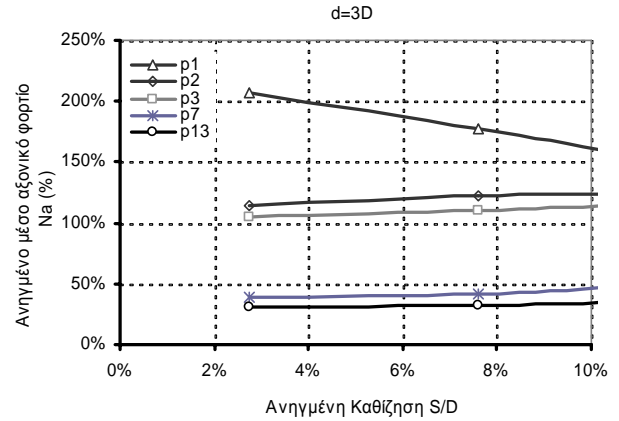
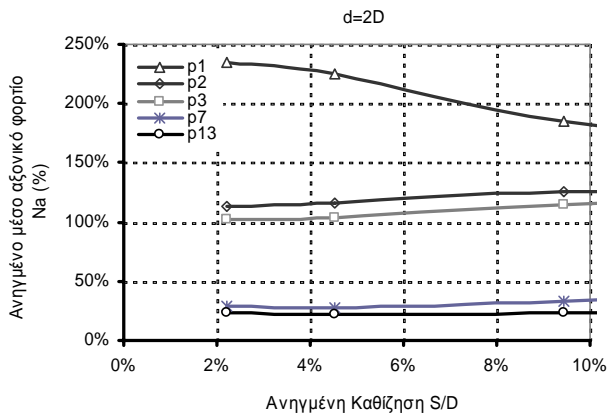
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C1, με ανηγμένο μήκος L/D=25, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.1-B.4



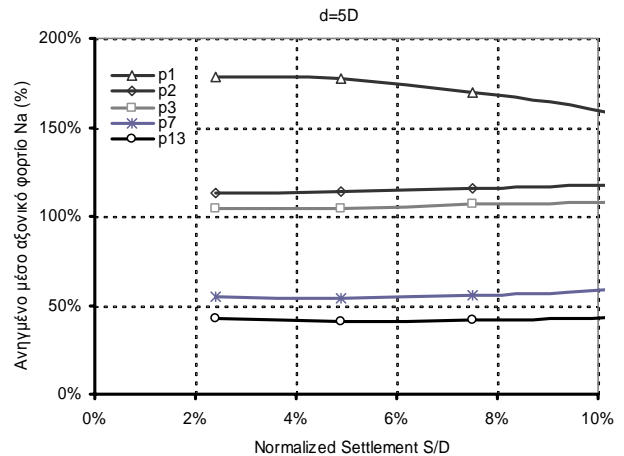
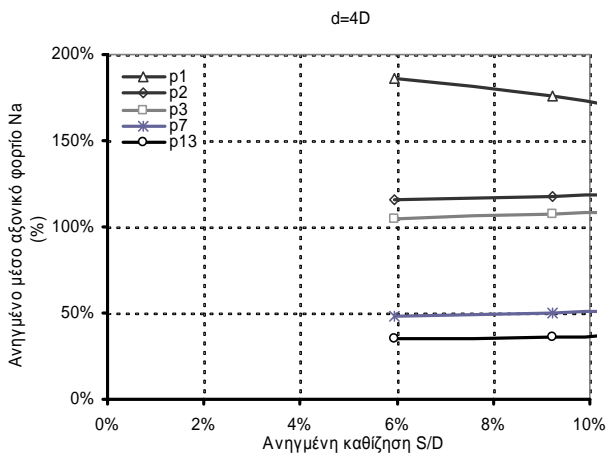
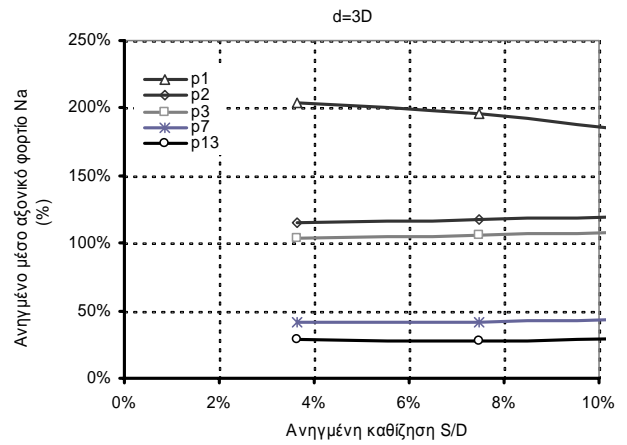
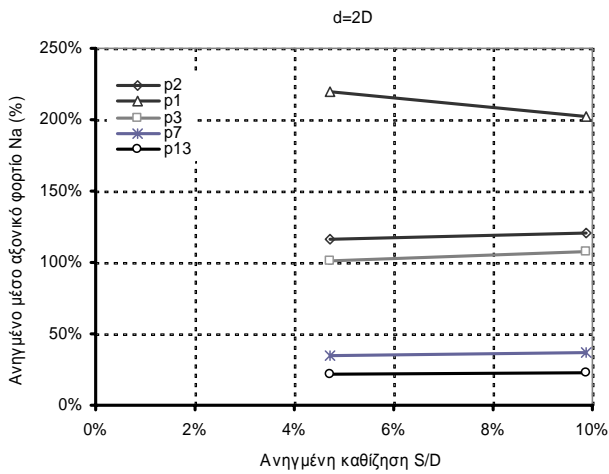
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C1, με ανηγμένο μήκος L/D=50, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.5-B.8



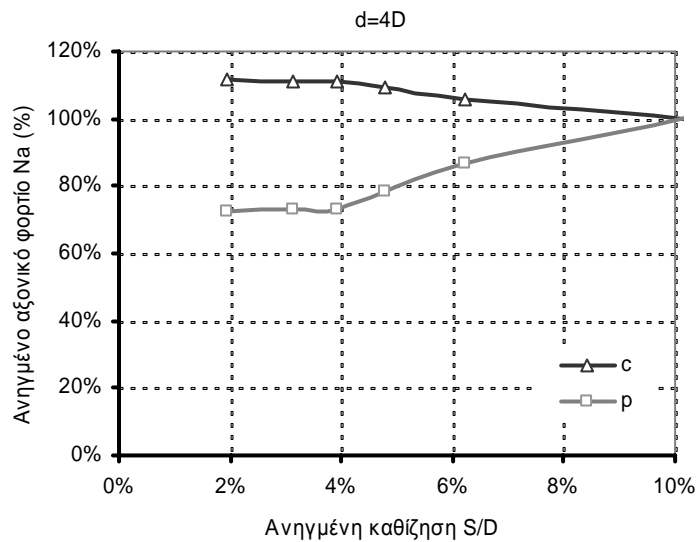
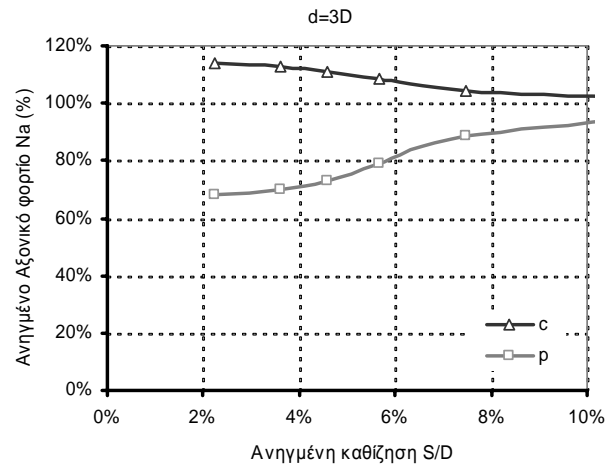
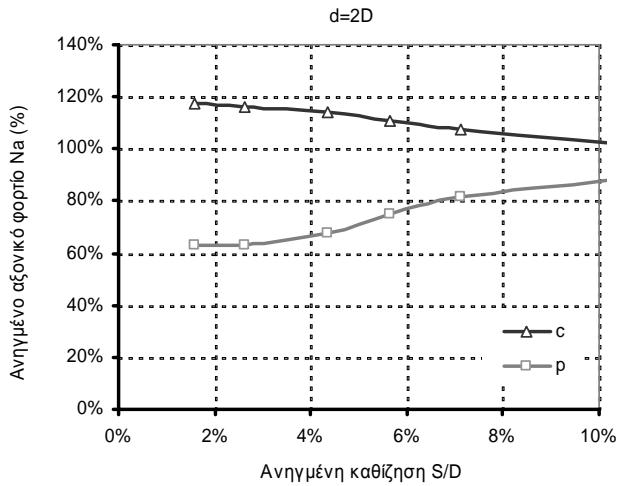
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C1, με ανηγμένο μήκος L/D=25, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.9-B.12



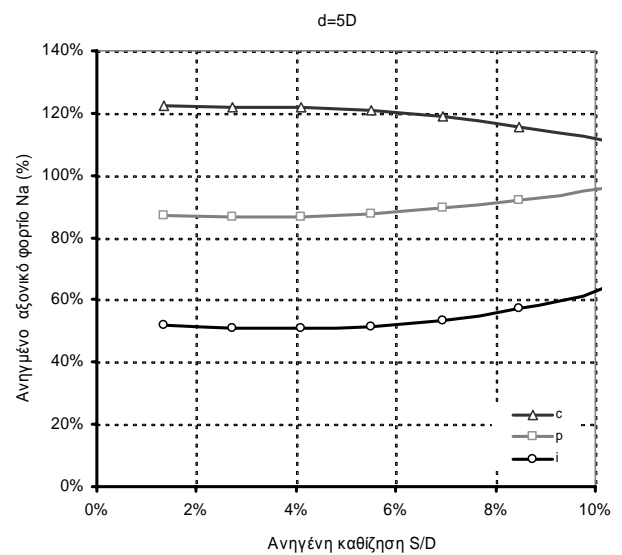
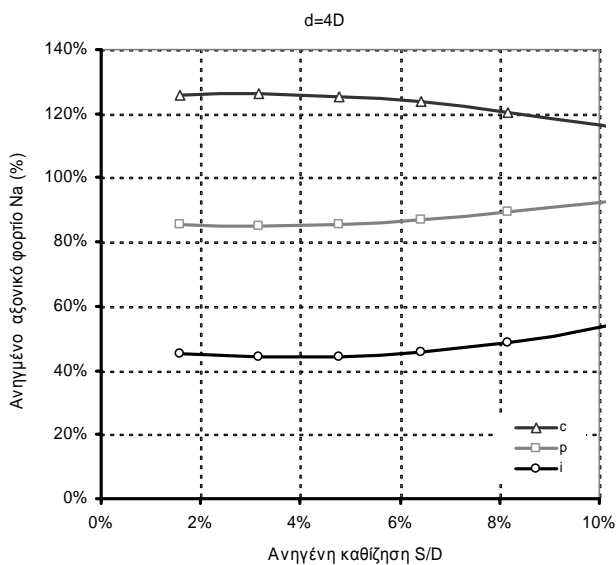
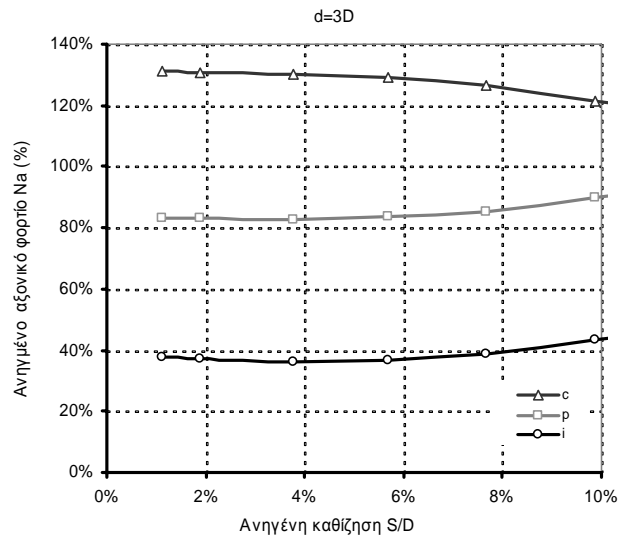
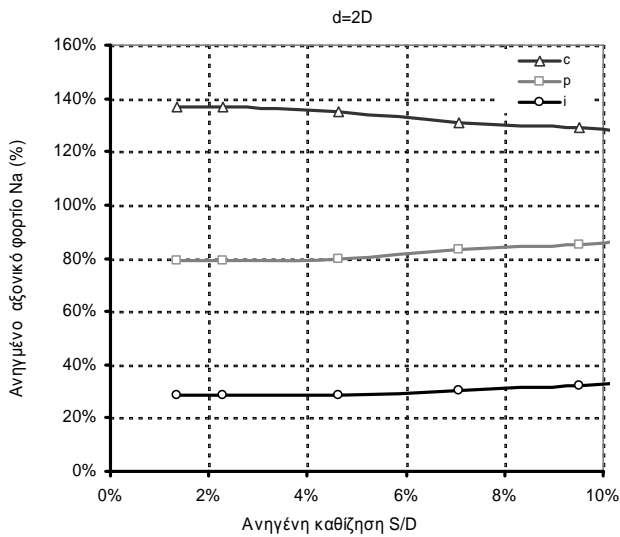
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C1, με ανηγμένο μήκος L/D=50, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.13-B.16



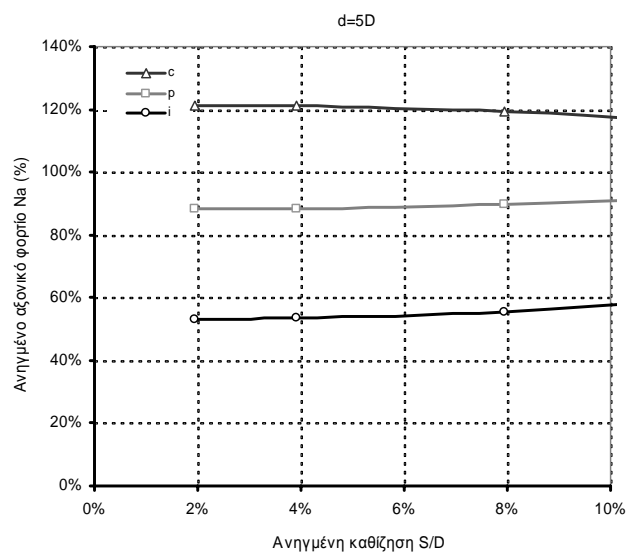
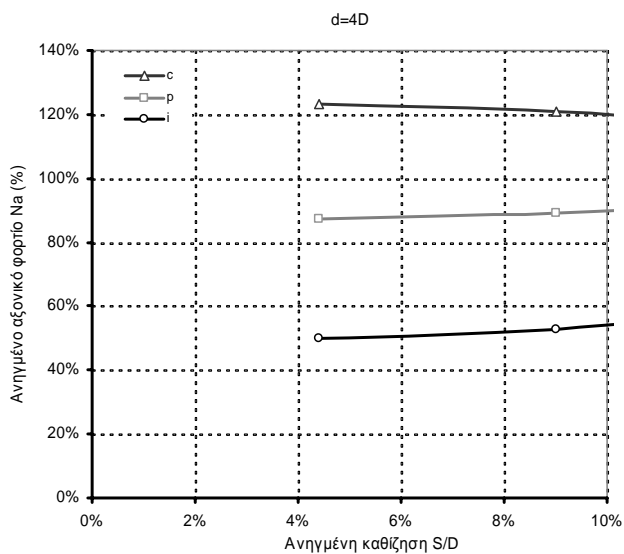
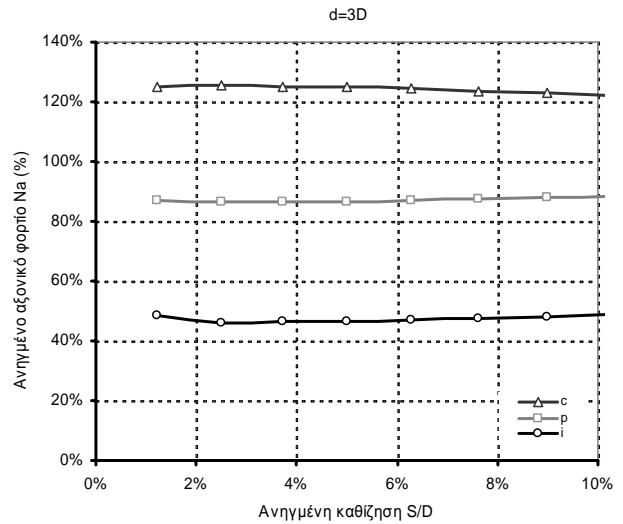
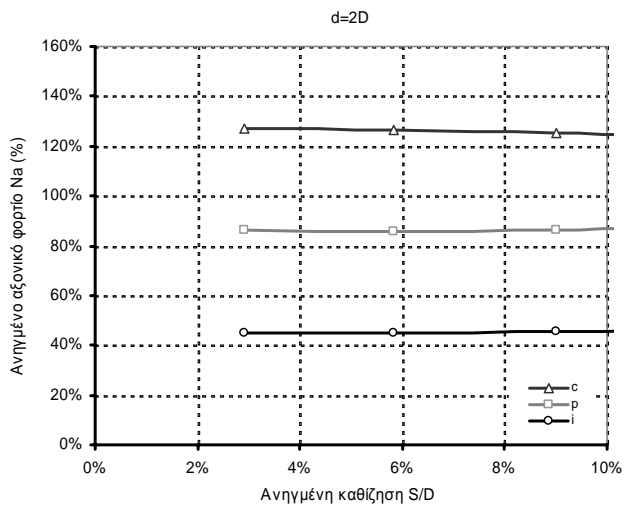
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 2*3, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C1, με ανηγμένο μήκος L/D=25, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.17-B.19



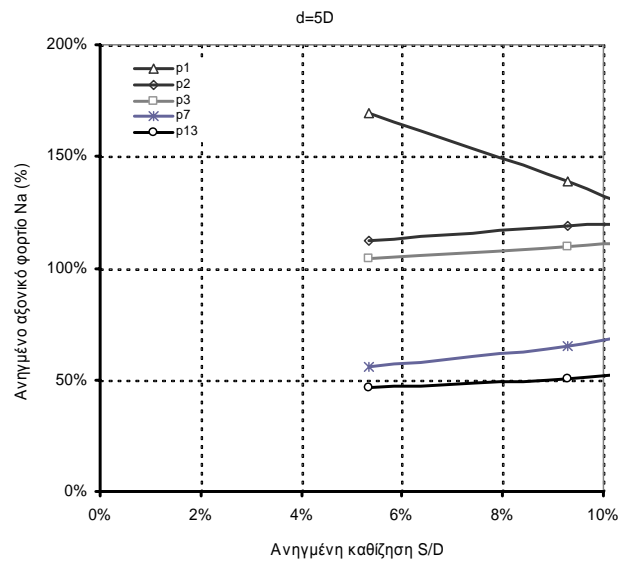
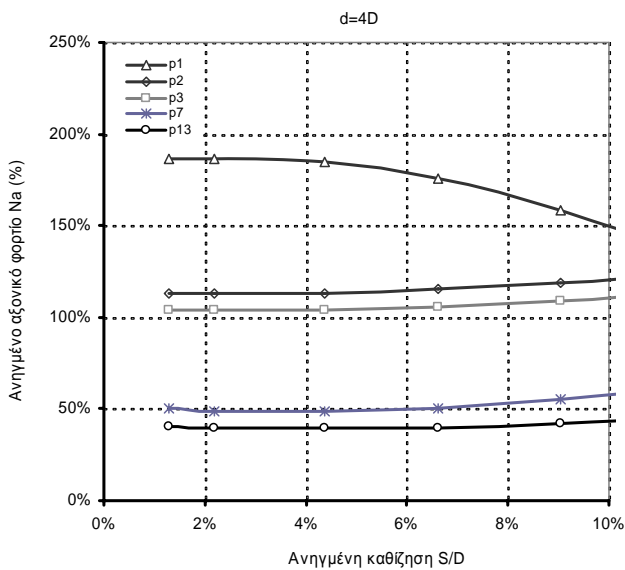
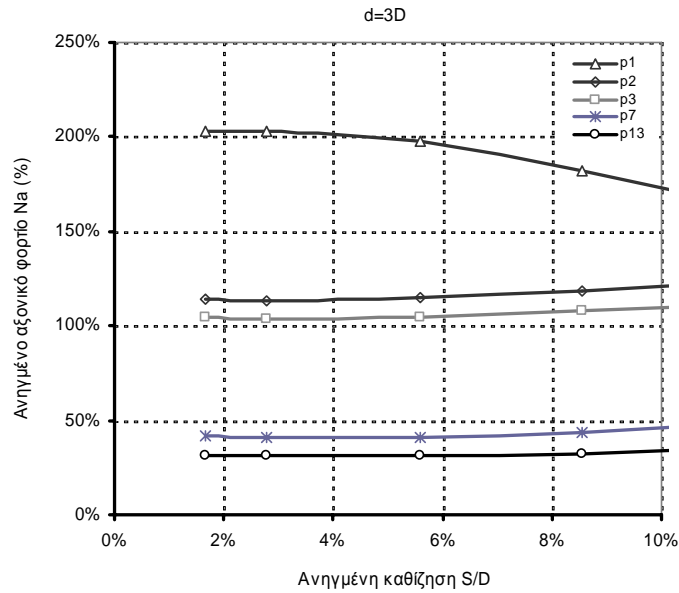
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C2, με ανηγμένο μήκος L/D=25, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.20-B.23



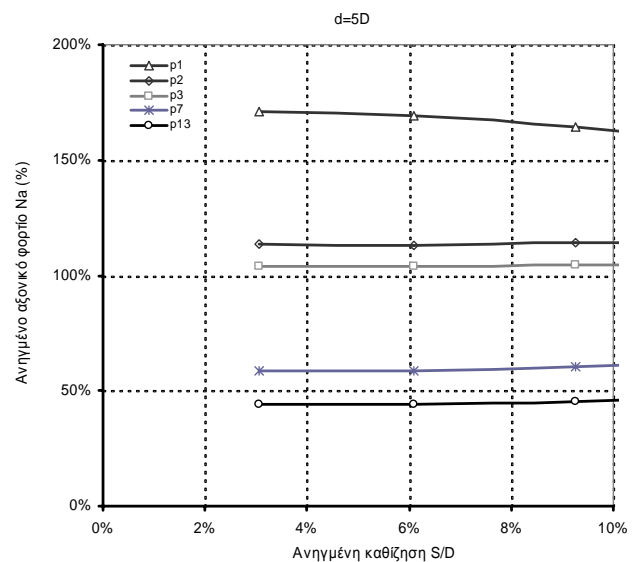
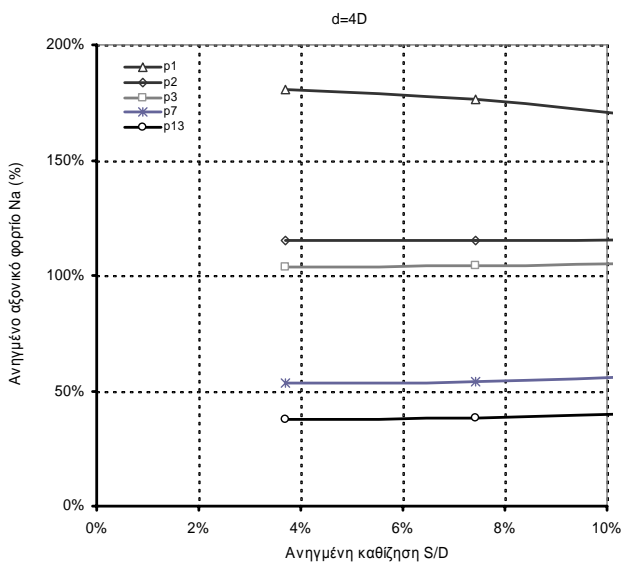
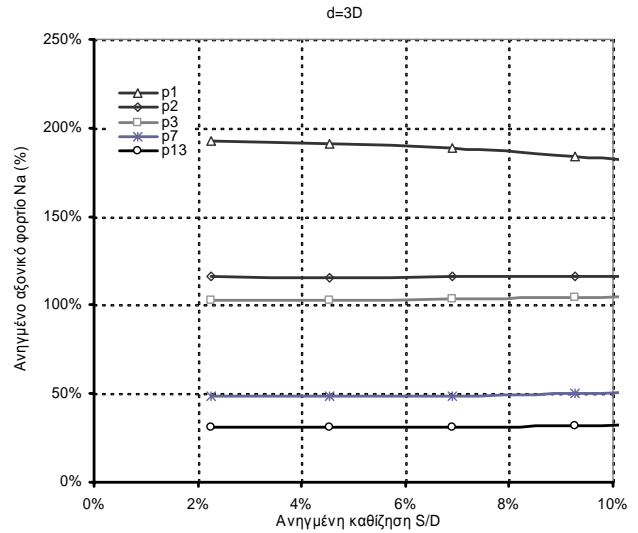
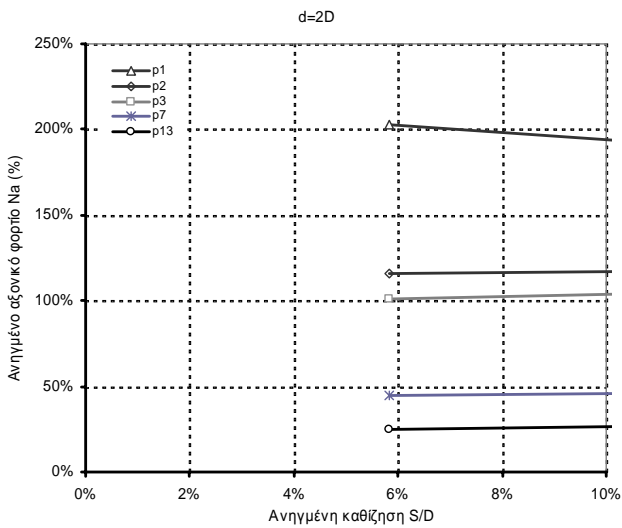
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C2, με ανηγμένο μήκος L/D=50, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.24-B.27



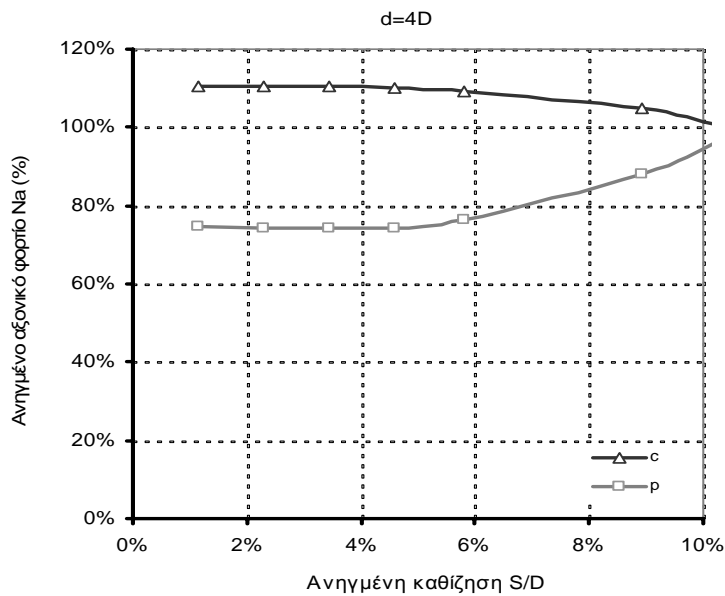
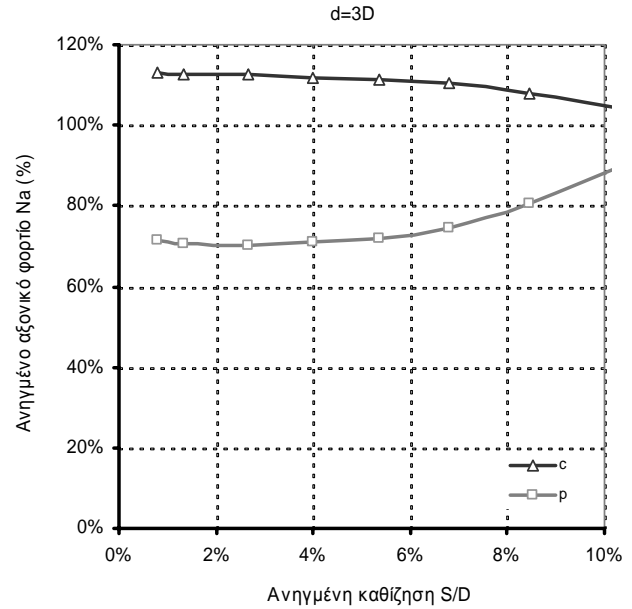
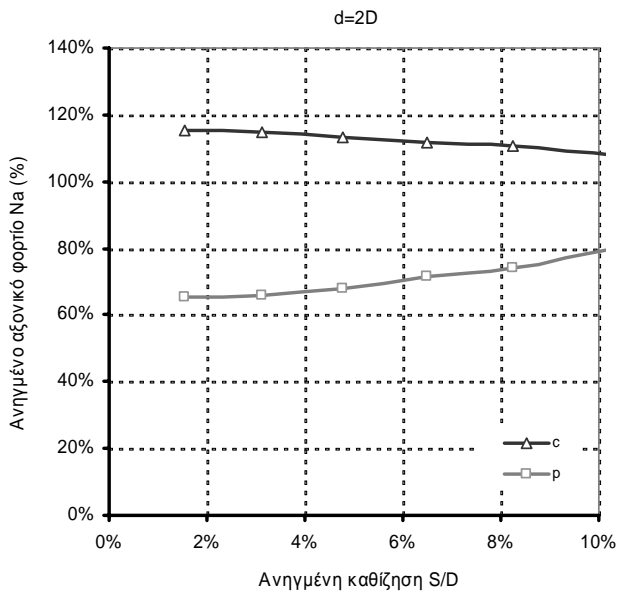
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C2, με ανηγμένο μήκος L/D=25, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.28-B.31



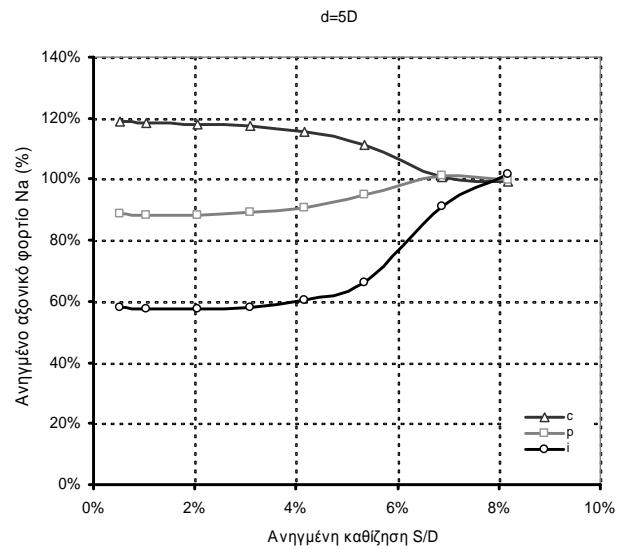
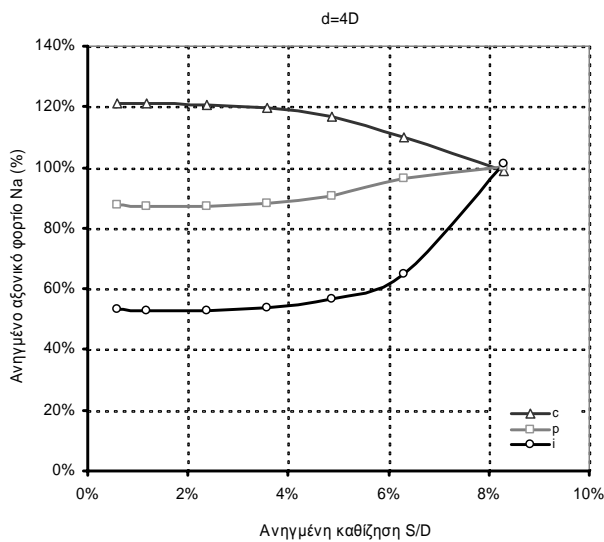
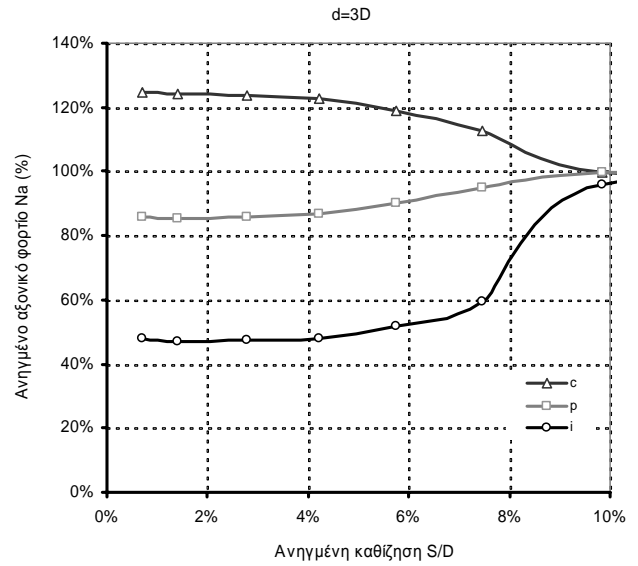
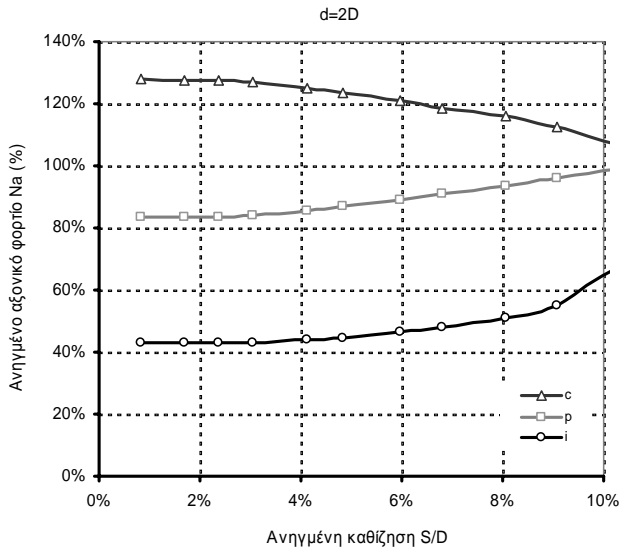
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C2, με ανηγμένο μήκος L/D=50, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.32-B.35



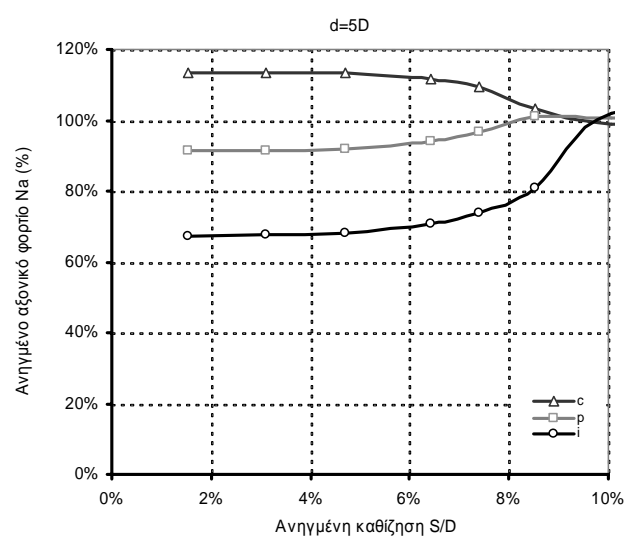
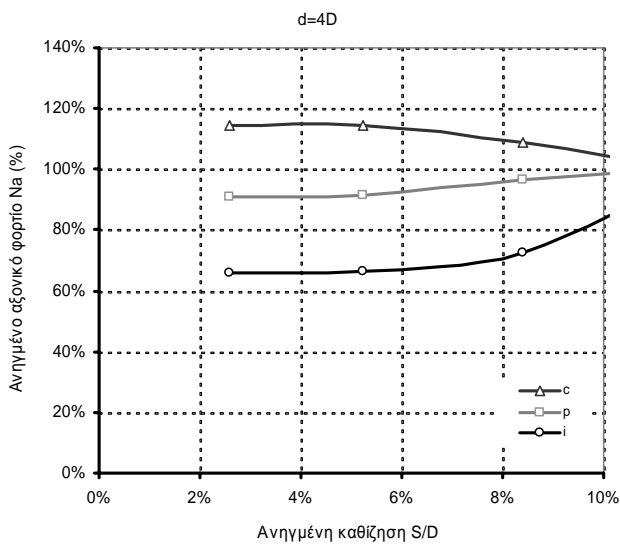
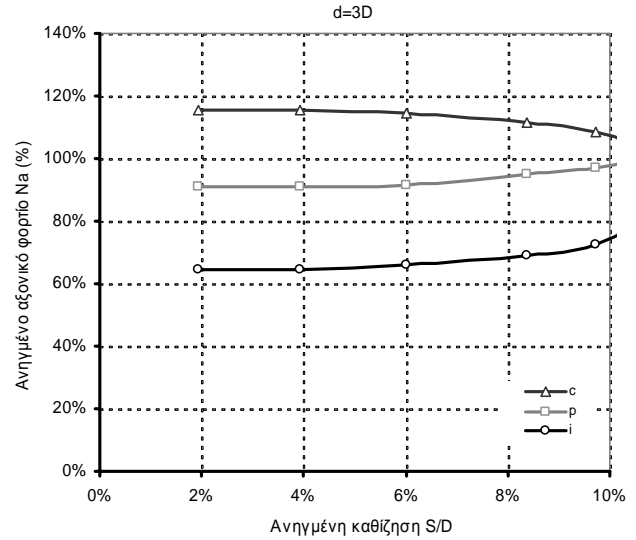
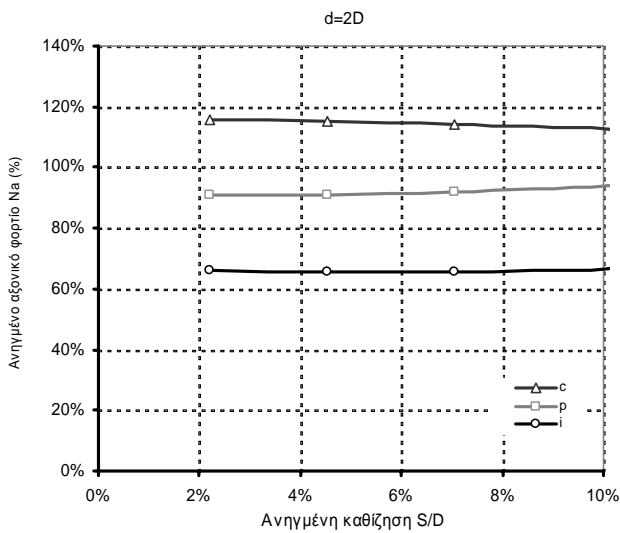
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 2*3, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C2, με ανηγμένο μήκος L/D=25, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.36-B.39



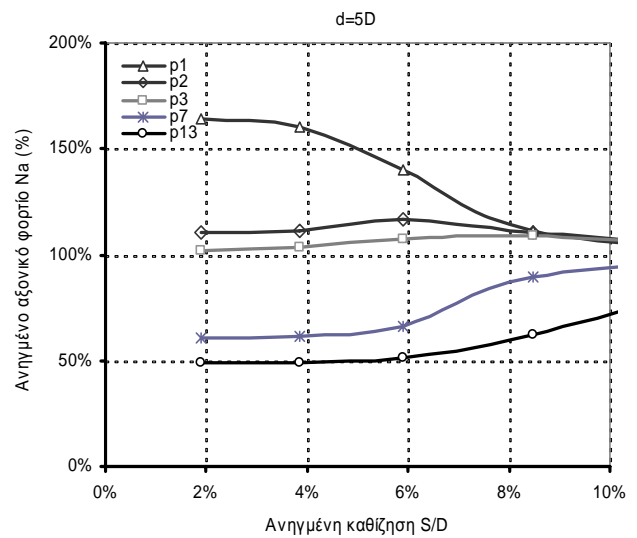
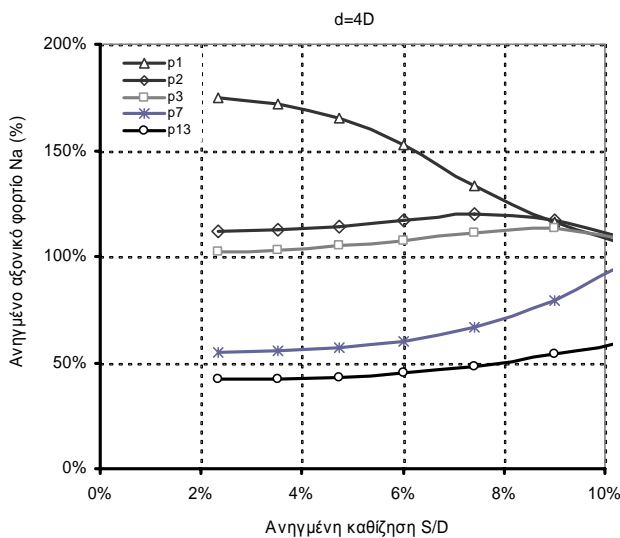
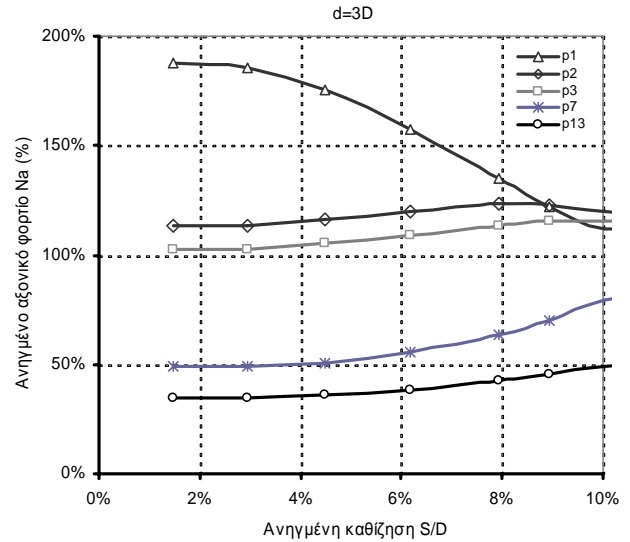
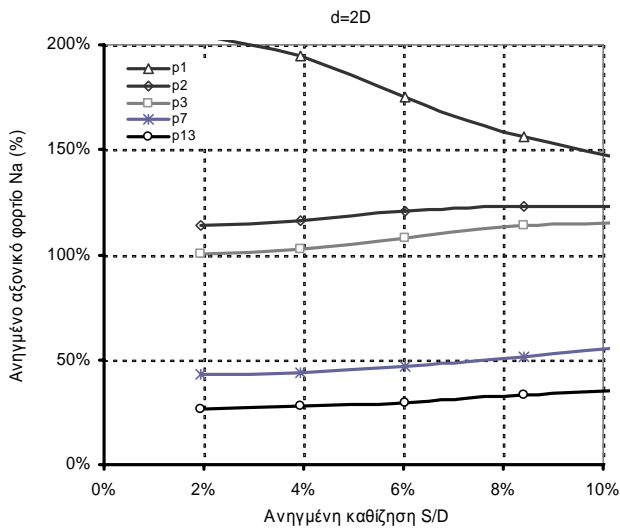
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C3, με ανηγμένο μήκος L/D=25, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.40-B.43



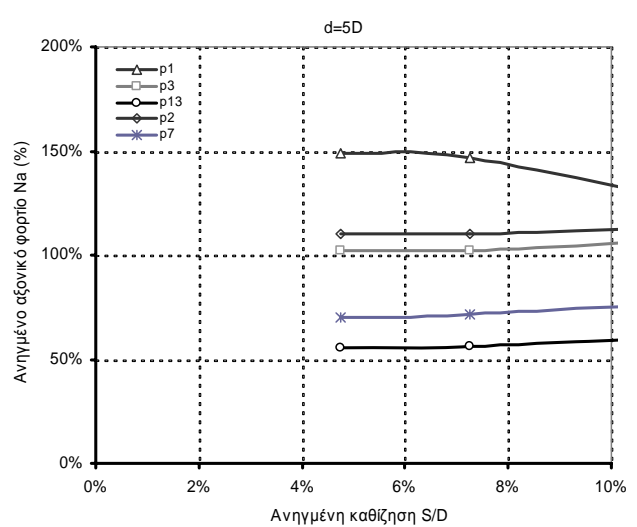
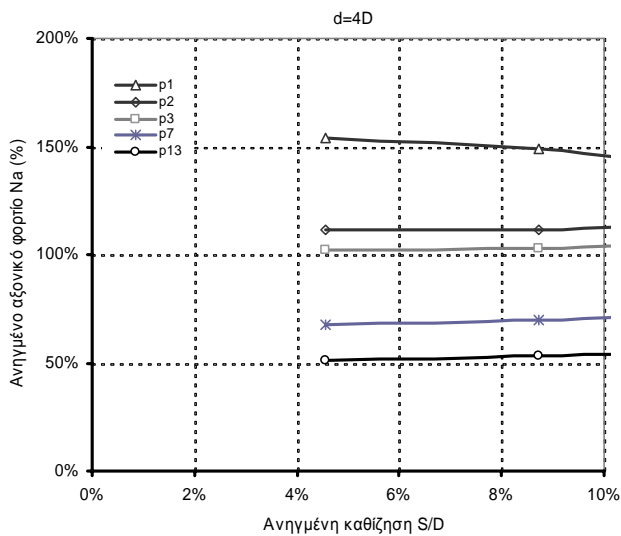
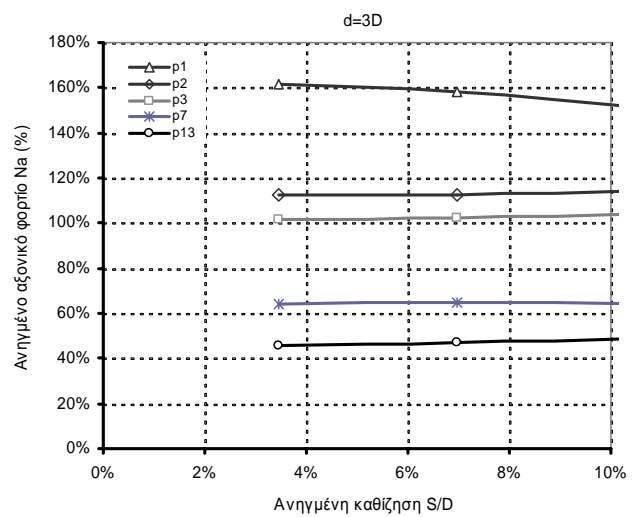
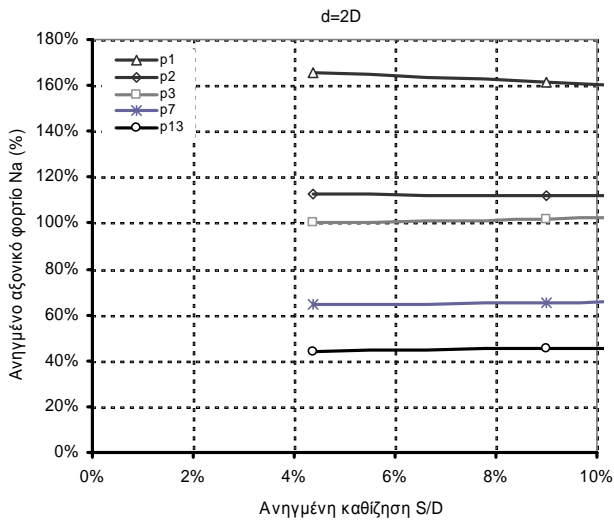
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C3, με ανηγμένο μήκος L/D=50, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.44-B.47



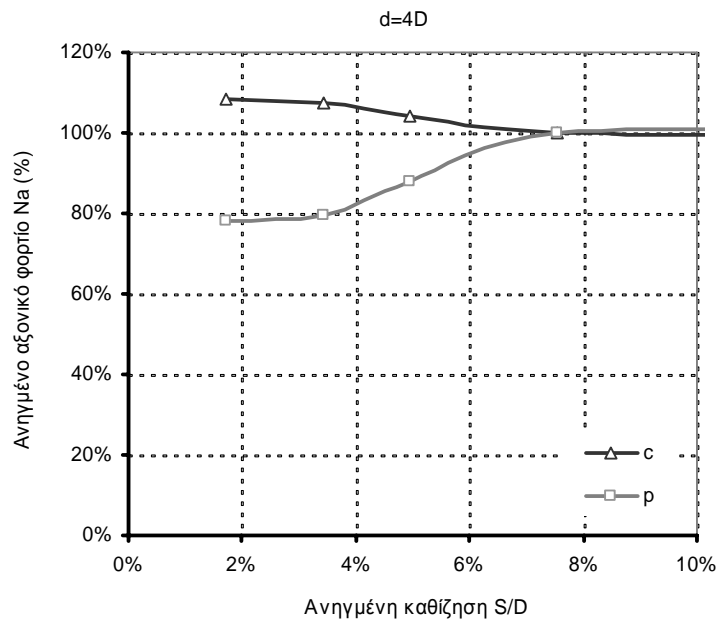
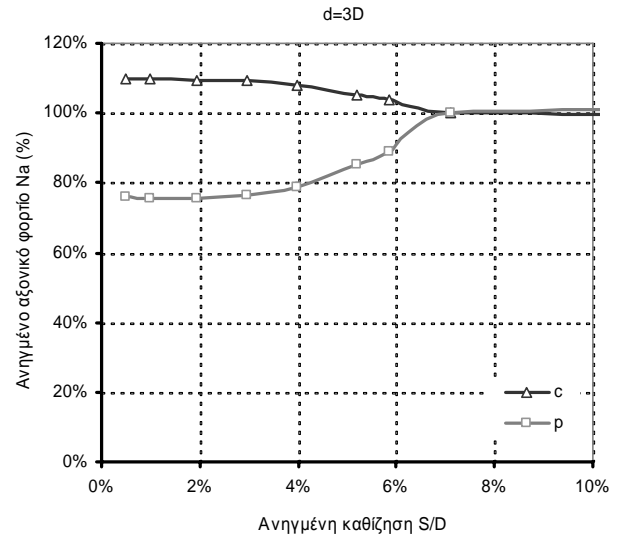
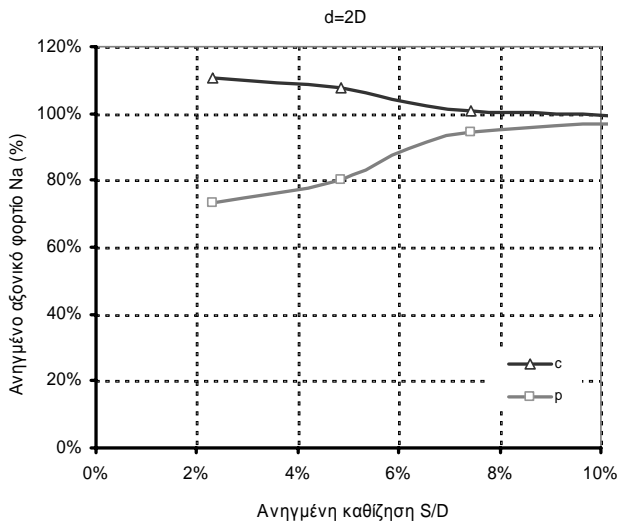
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C3, με ανηγμένο μήκος L/D=25, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.48-B.51



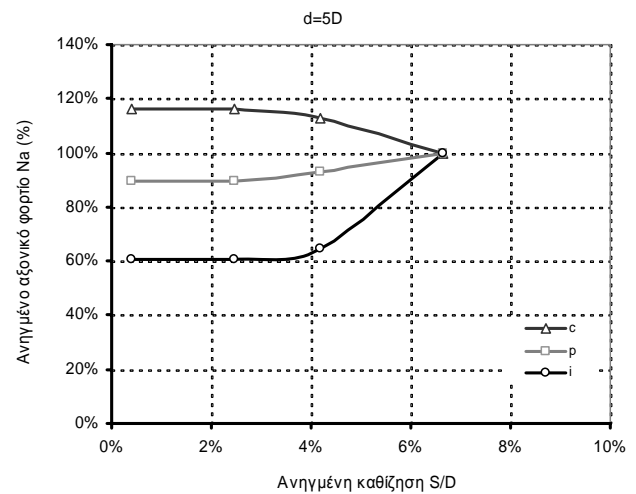
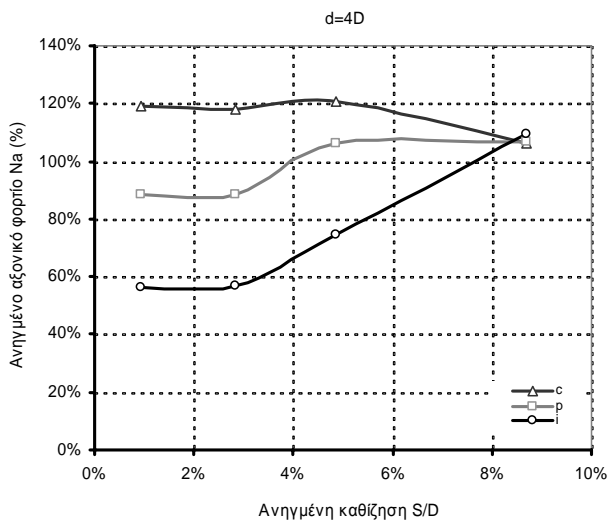
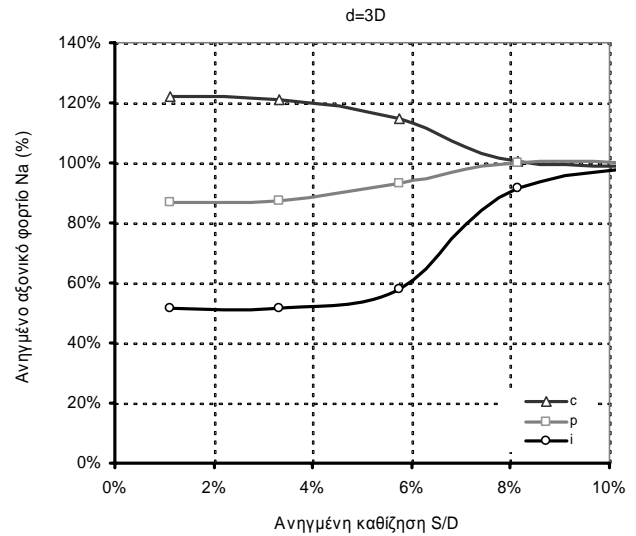
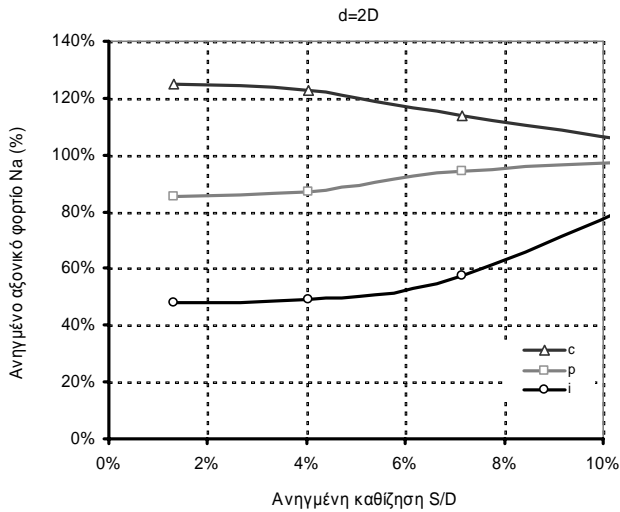
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C3, με ανηγμένο μήκος L/D=50 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.52-B.55



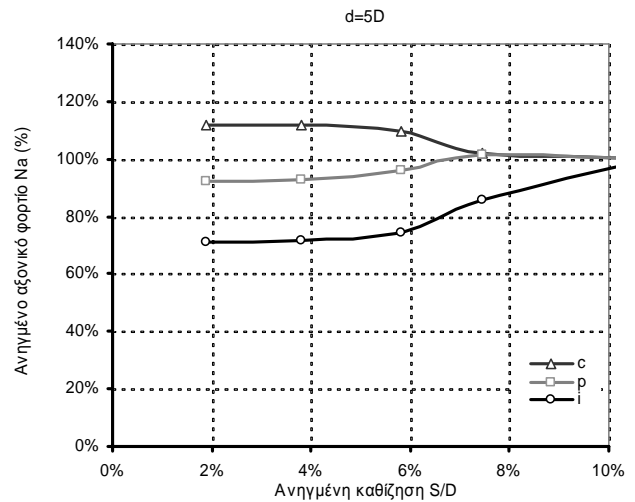
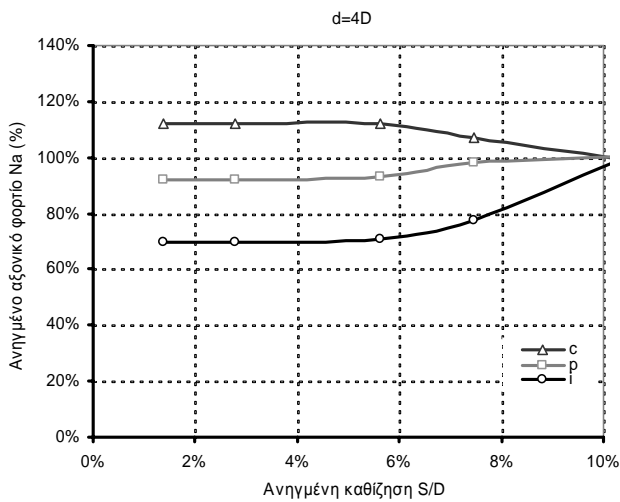
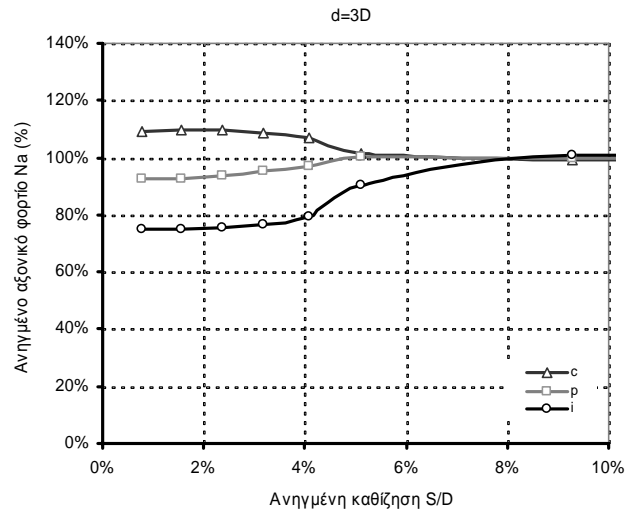
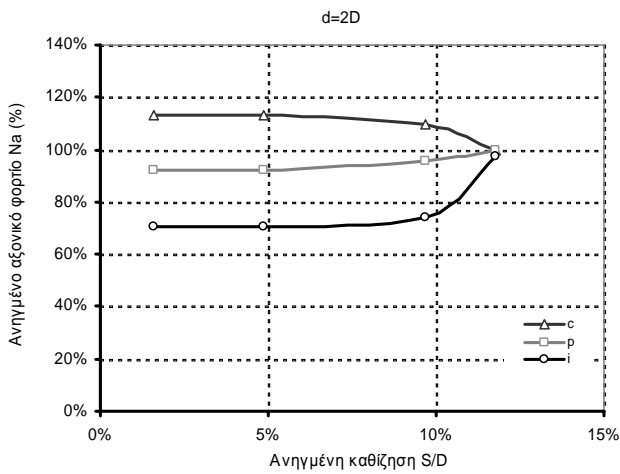
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 2*3, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C3, με ανηγμένο μήκος L/D=25, για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.56-B.58



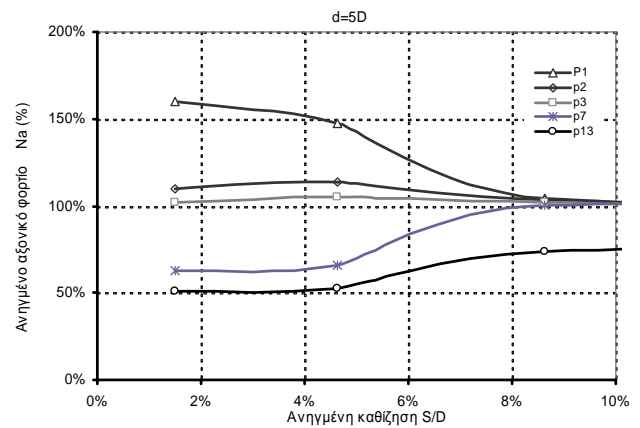
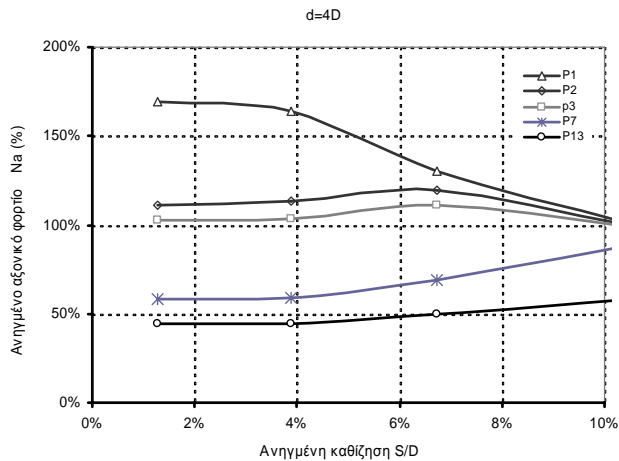
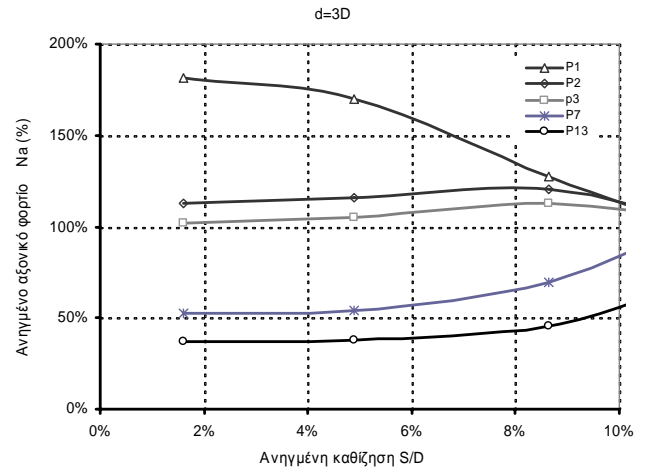
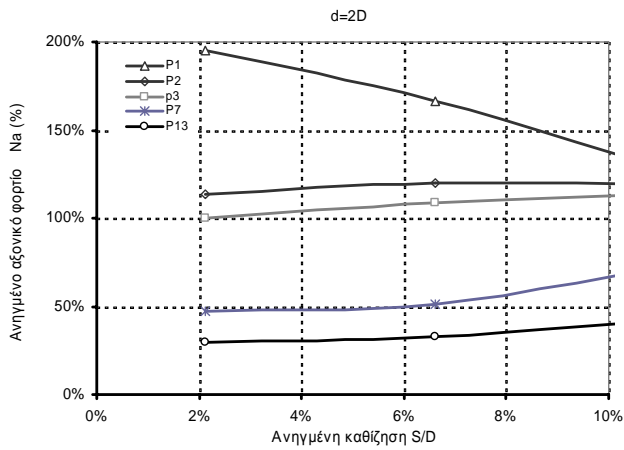
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C4, με ανηγμένο μήκος L/D=25 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.59-B.62



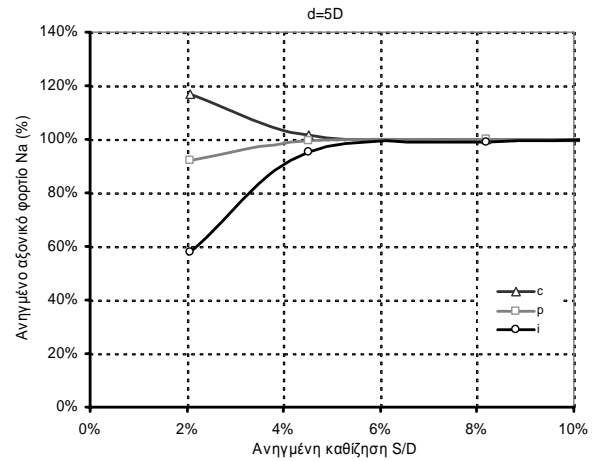
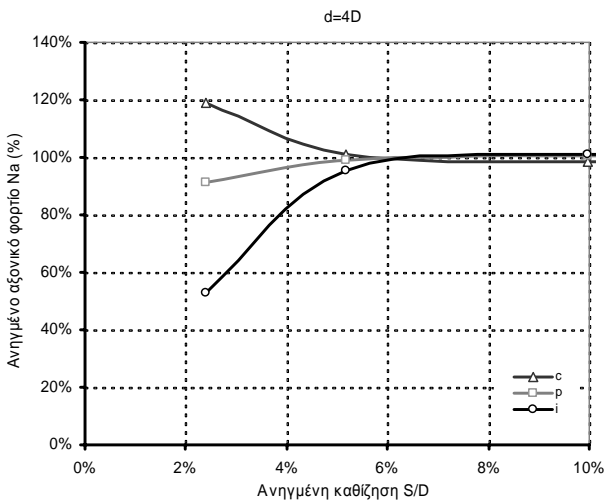
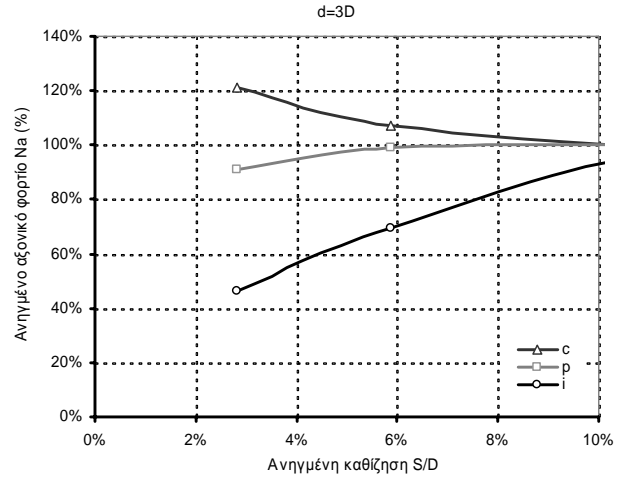
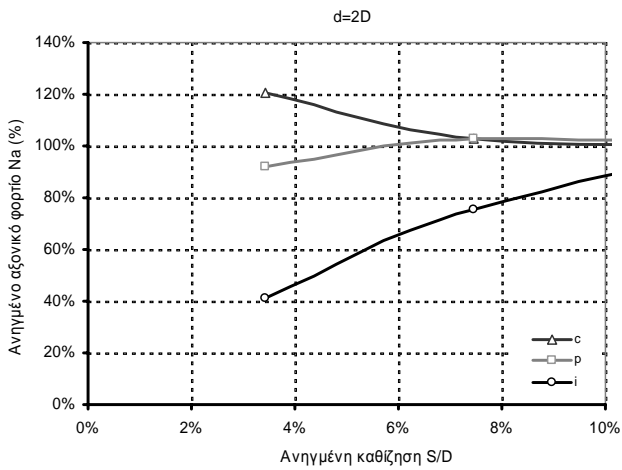
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C4, με ανηγμένο μήκος L/D=50 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.63-B.66



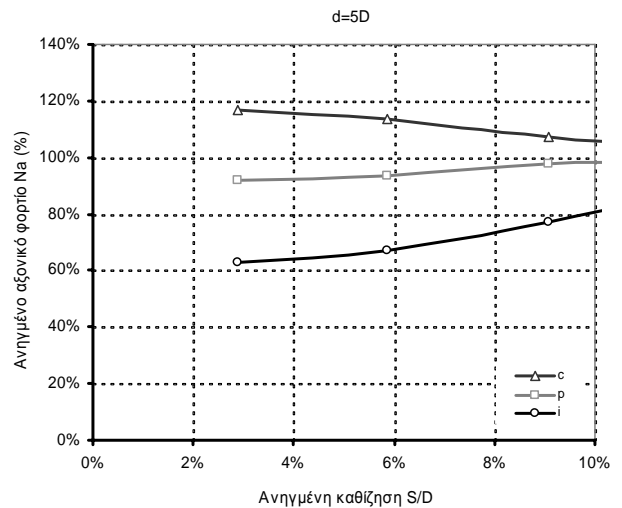
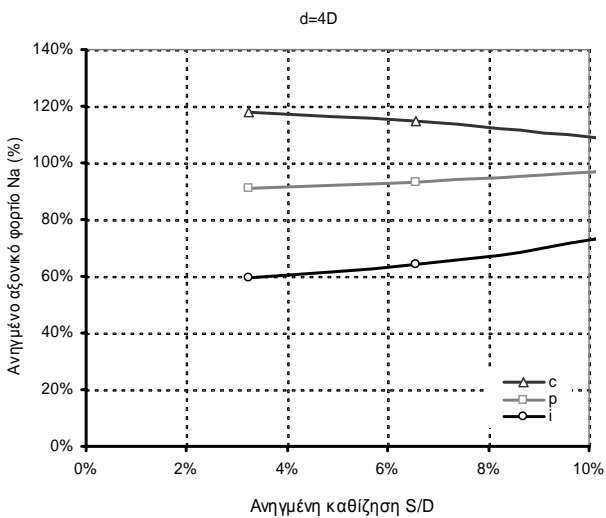
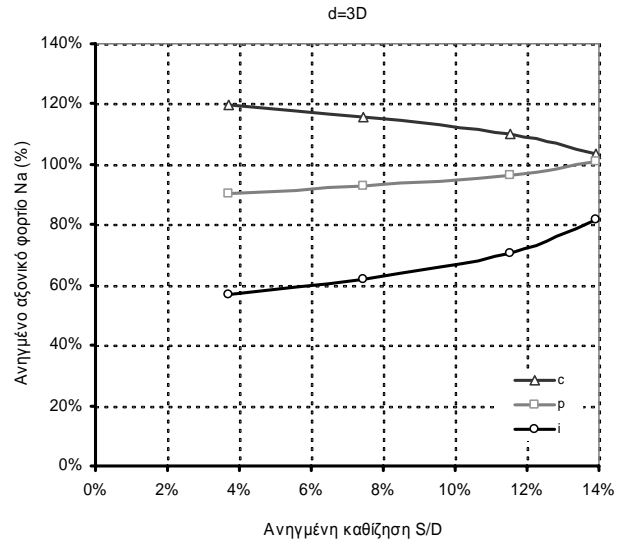
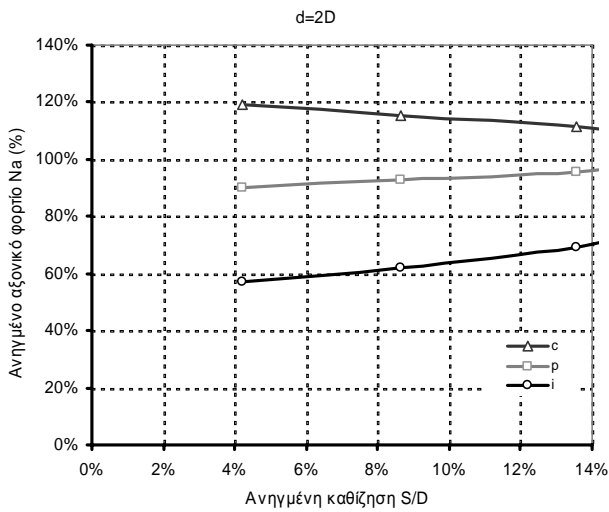
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αργιλικό έδαφος τύπου C4, με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.67-B.70



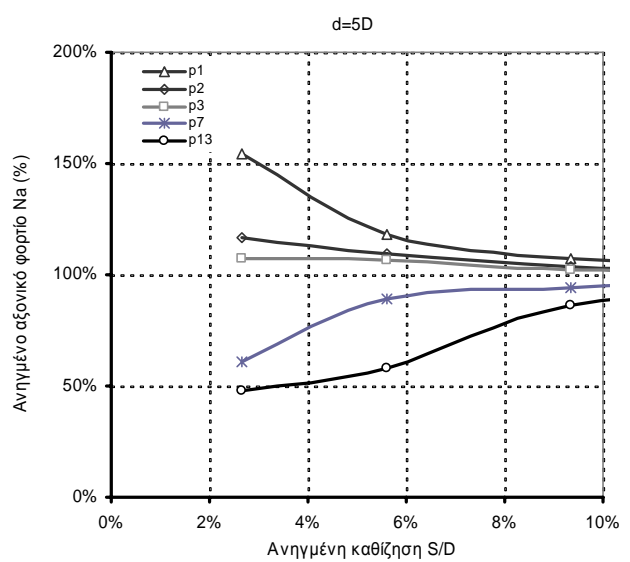
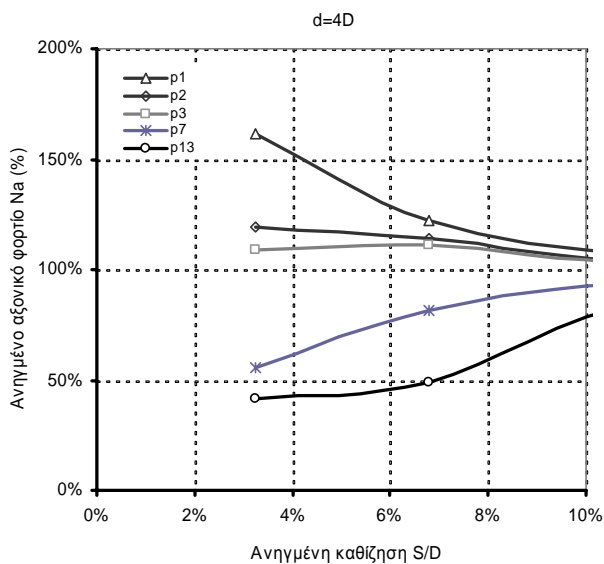
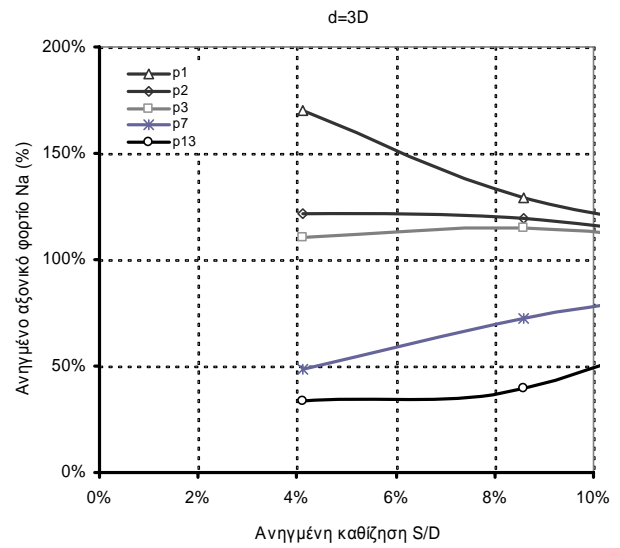
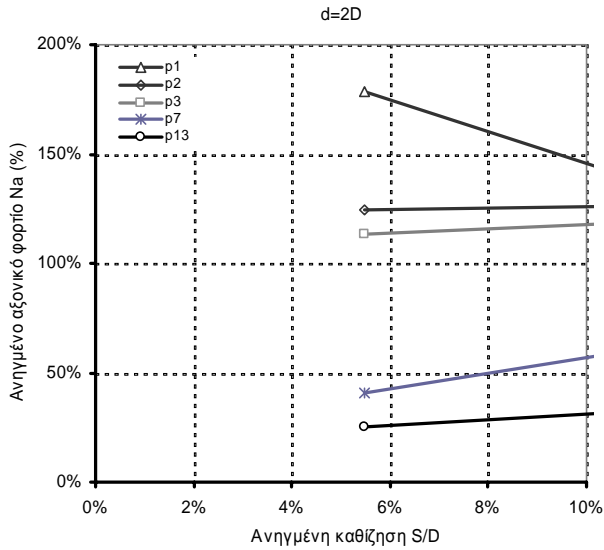
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S1, με ανηγμένο μήκος L/D=25 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.71-B.74



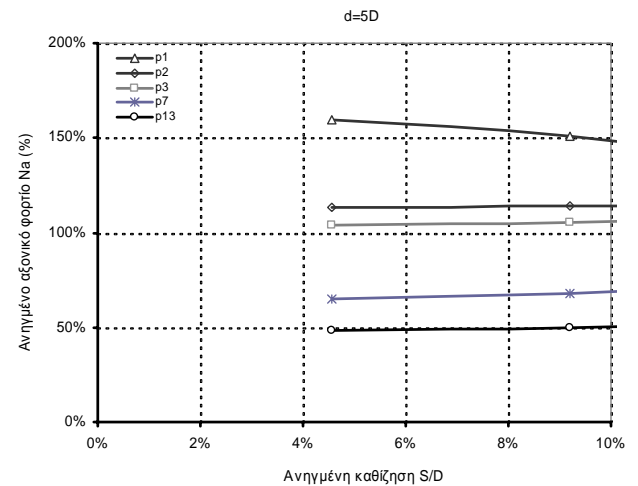
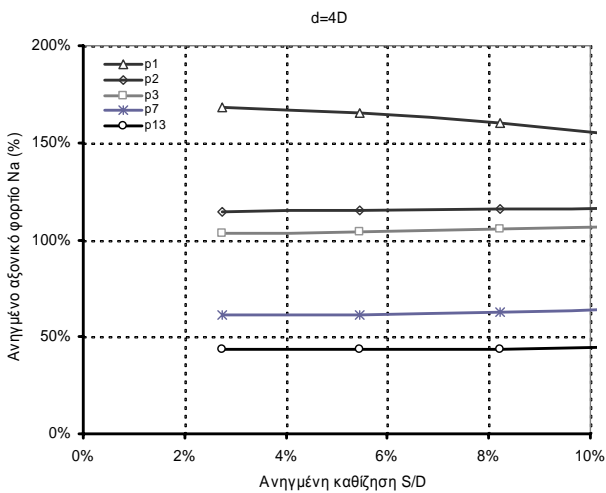
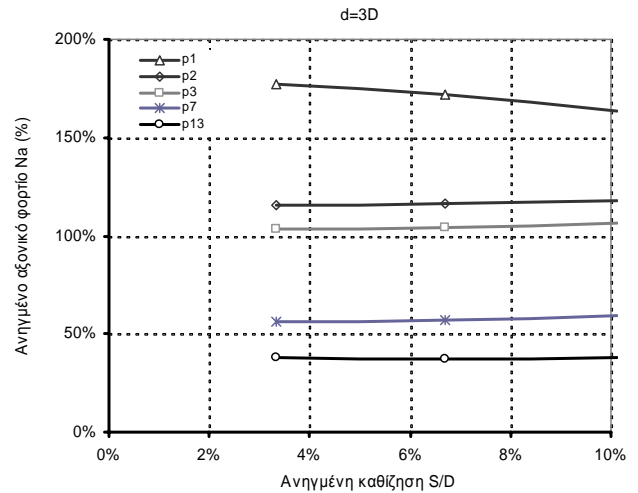
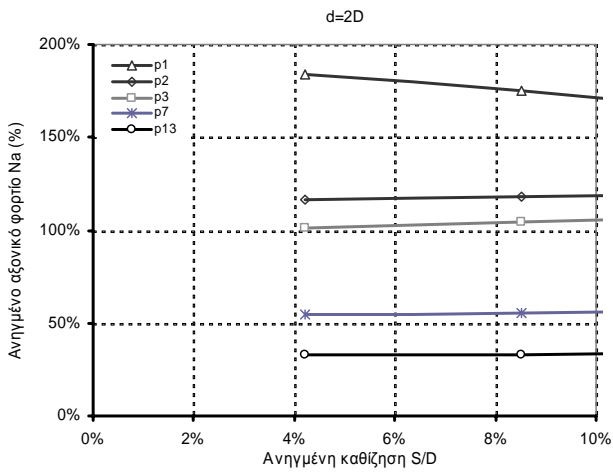
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S1, με ανηγμένο μήκος L/D=50 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.75-B.78



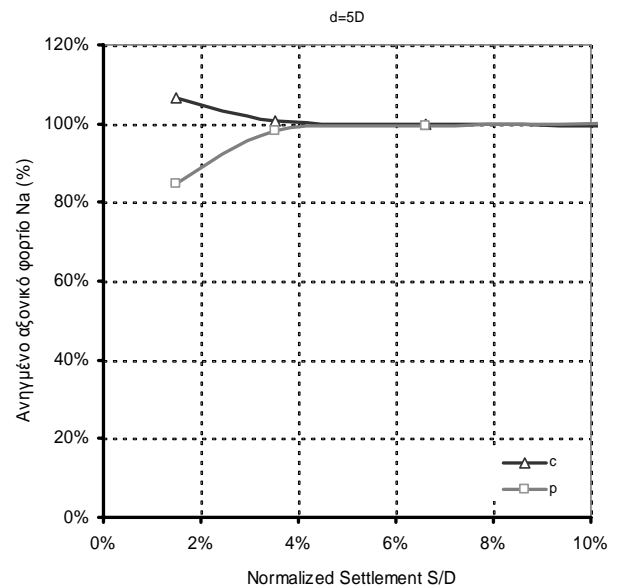
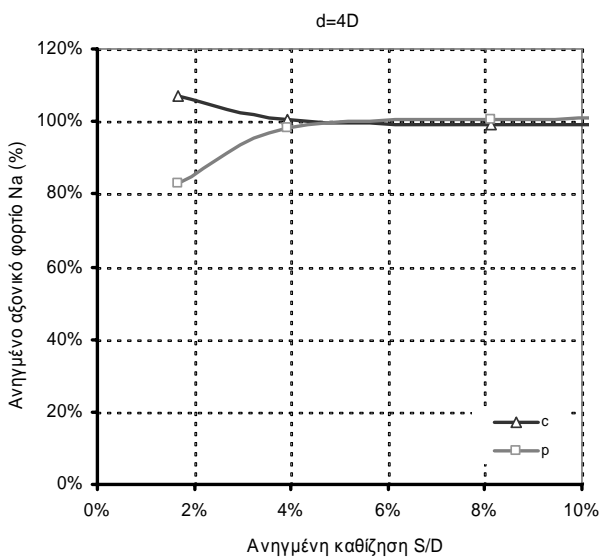
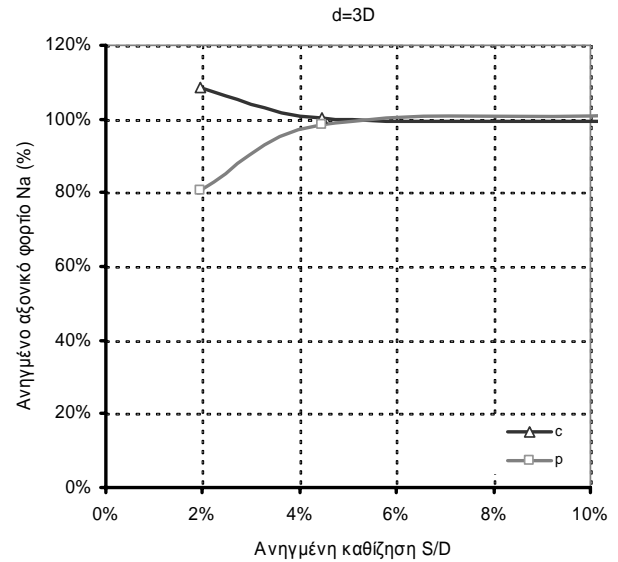
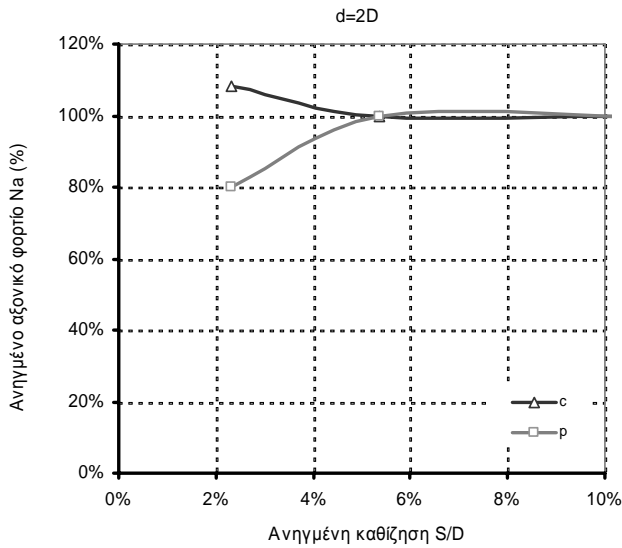
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S1, με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.79-B.82



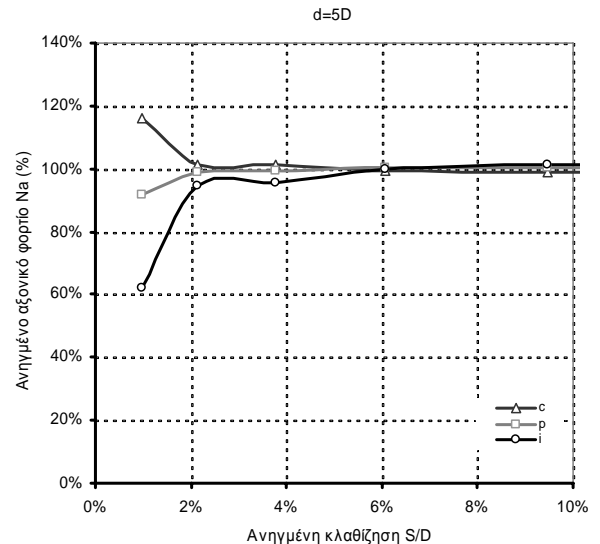
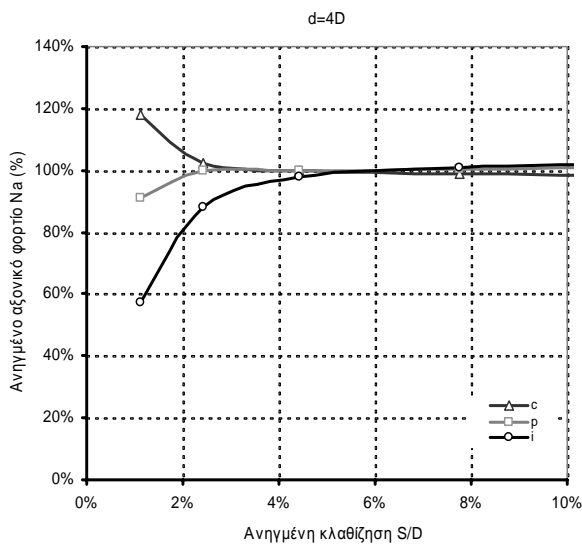
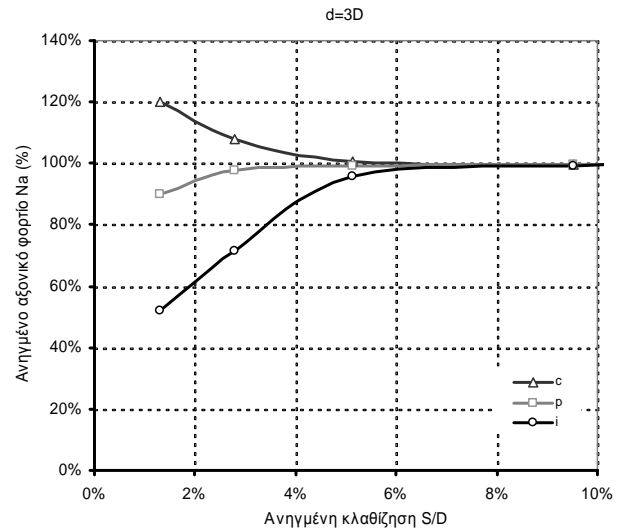
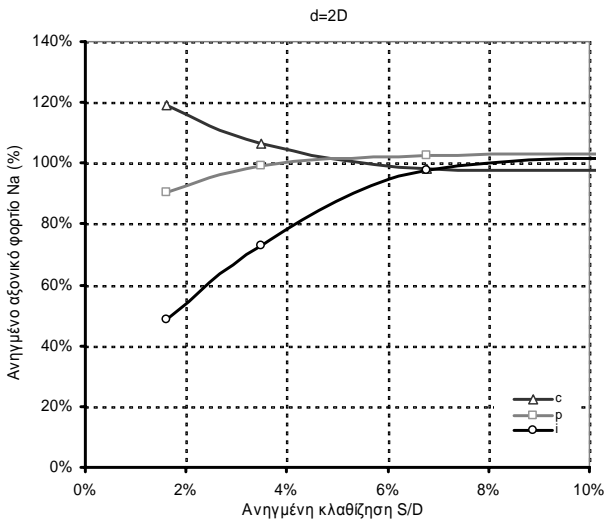
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S1, με ανηγμένο μήκος L/D=50 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.83-B.86



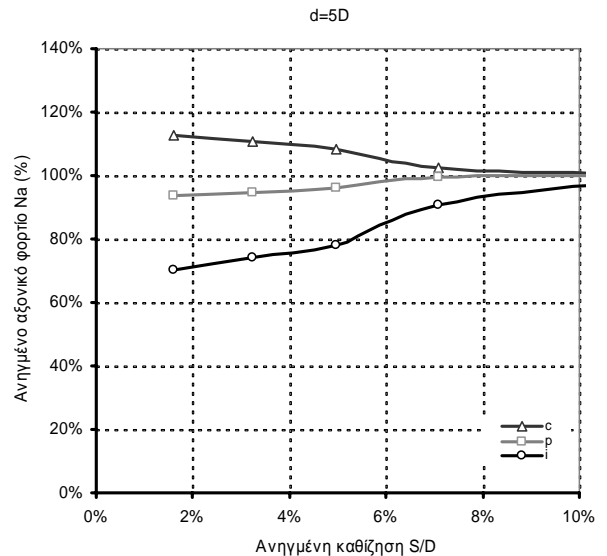
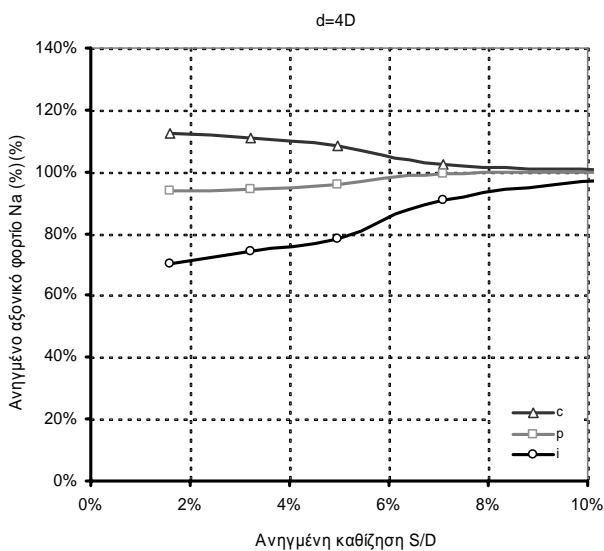
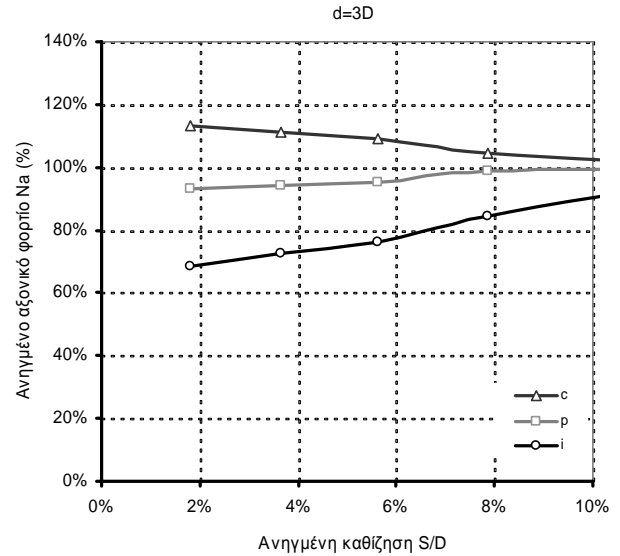
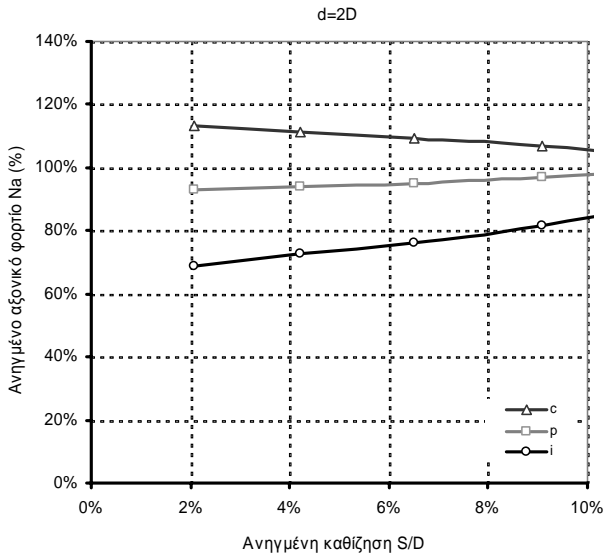
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 2*3, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S1, με ανηγμένο μήκος L/D=25 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.87-B.90



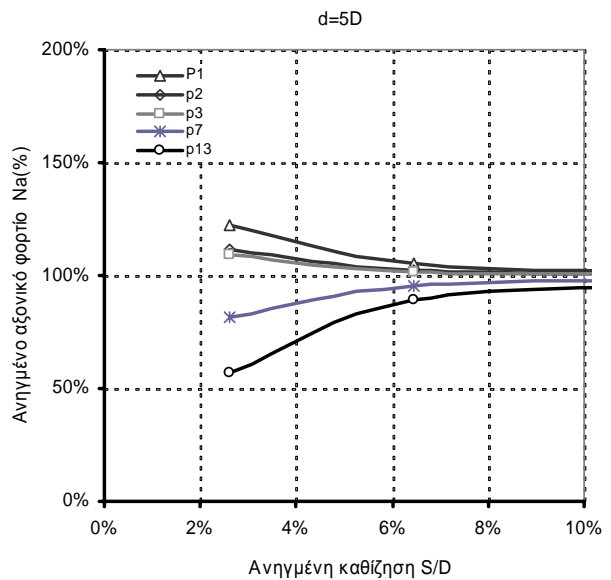
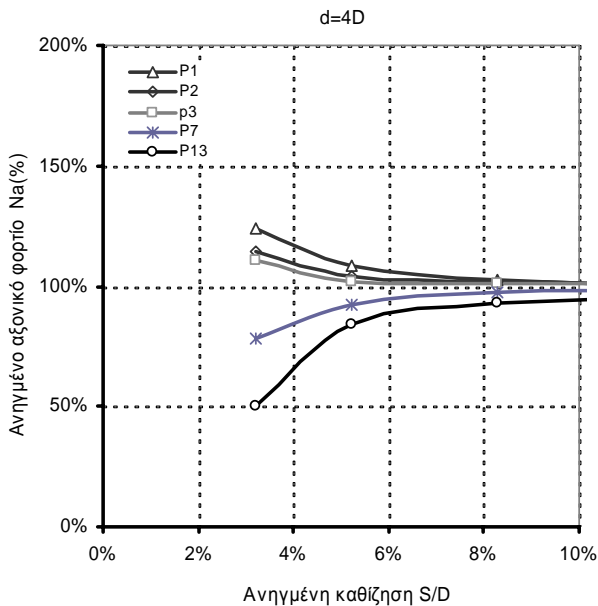
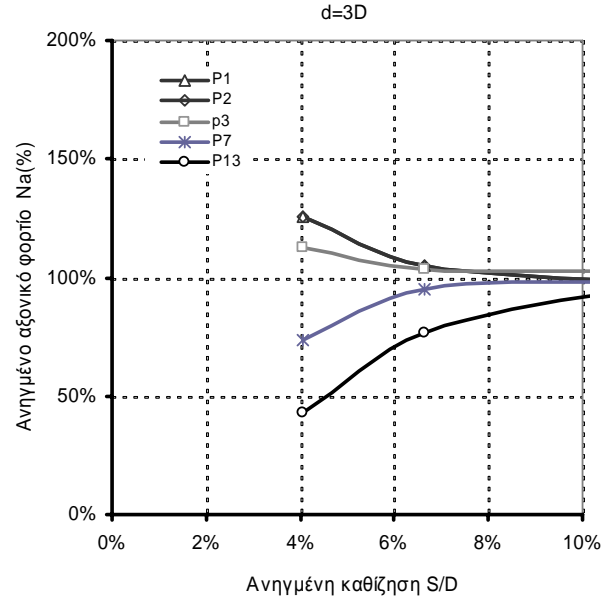
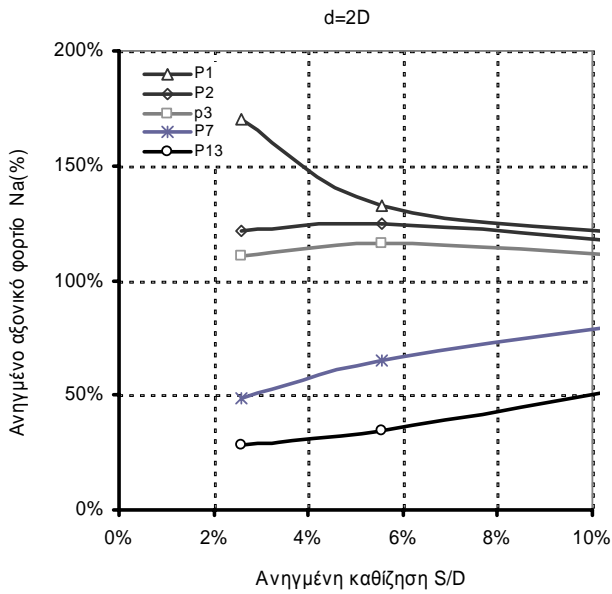
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S2, με ανηγμένο μήκος L/D=25 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.91-B.94



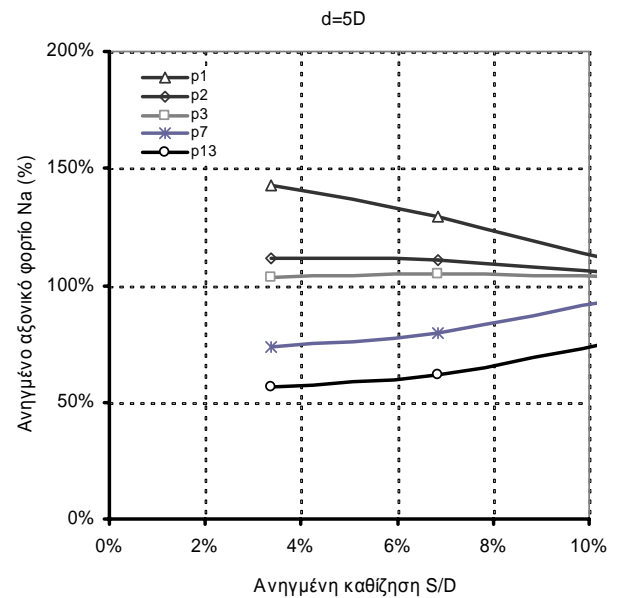
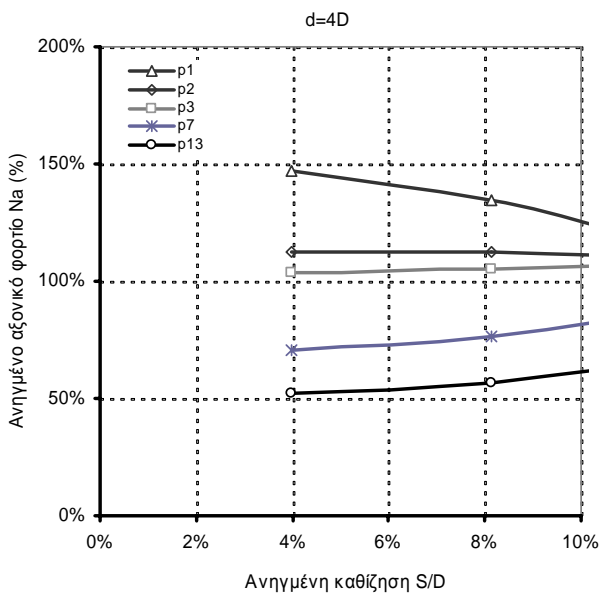
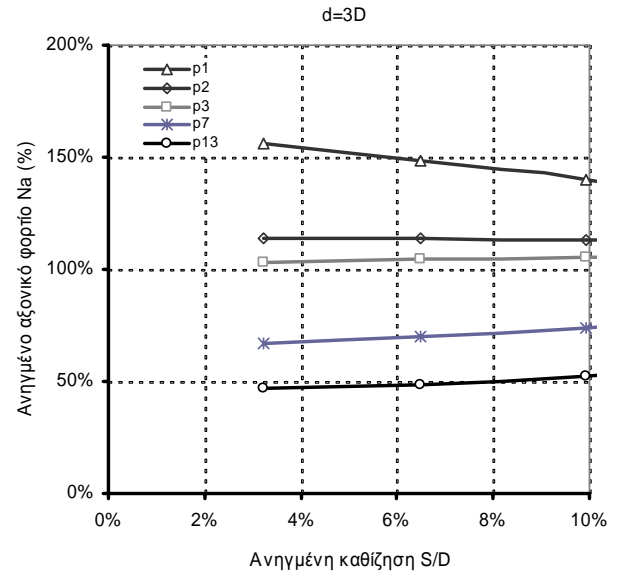
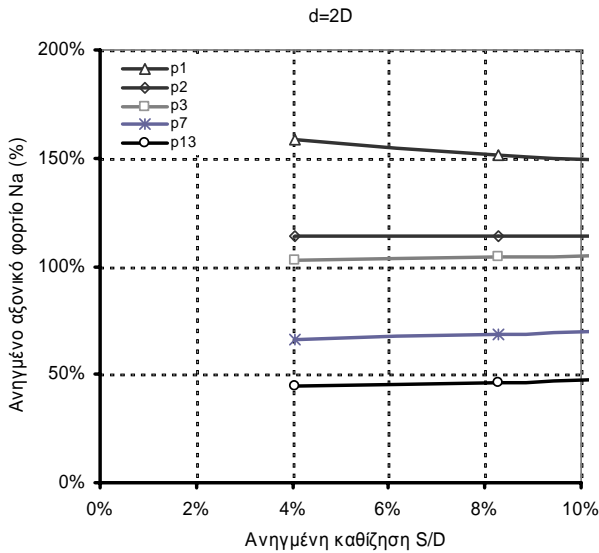
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S2, με ανηγμένο μήκος L/D=50 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.95-B.98



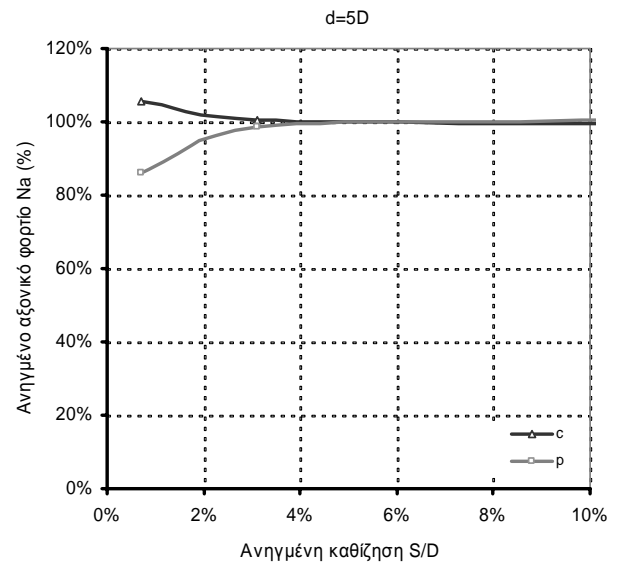
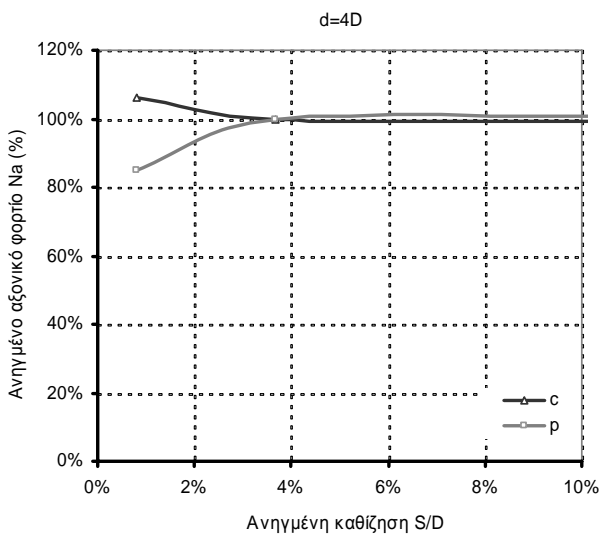
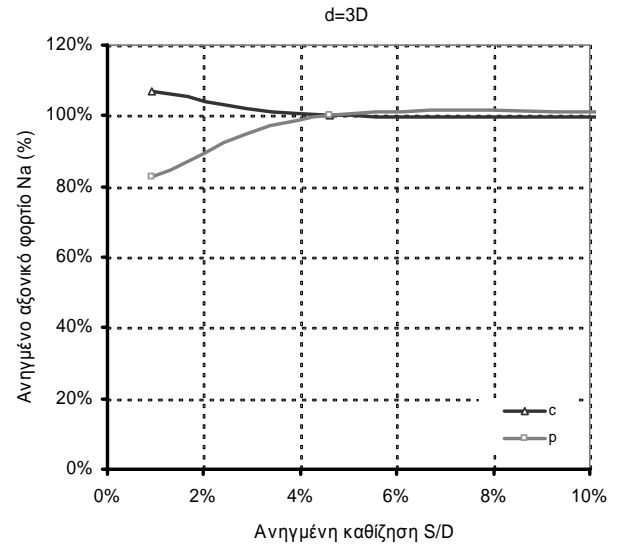
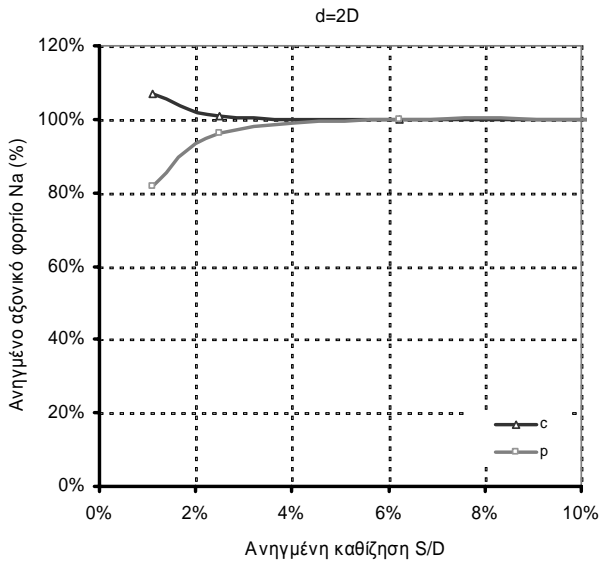
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S2, με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.99-B.102



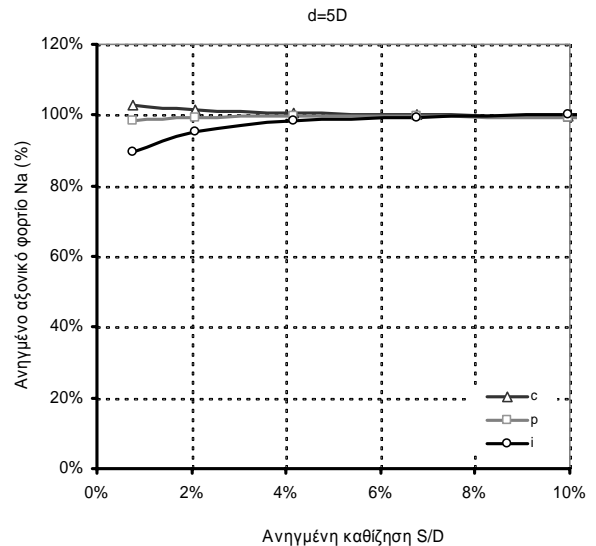
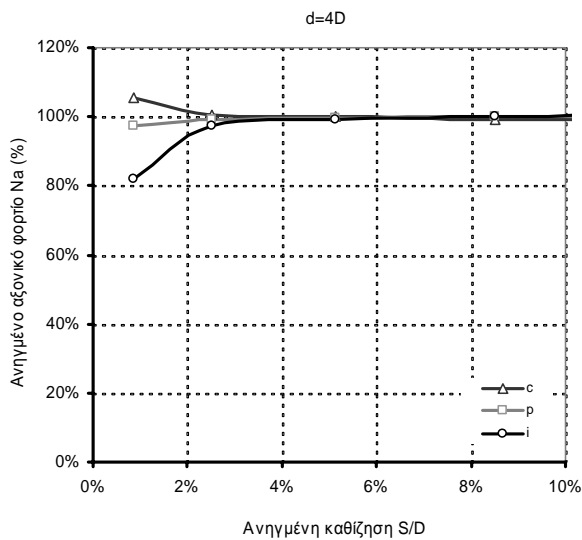
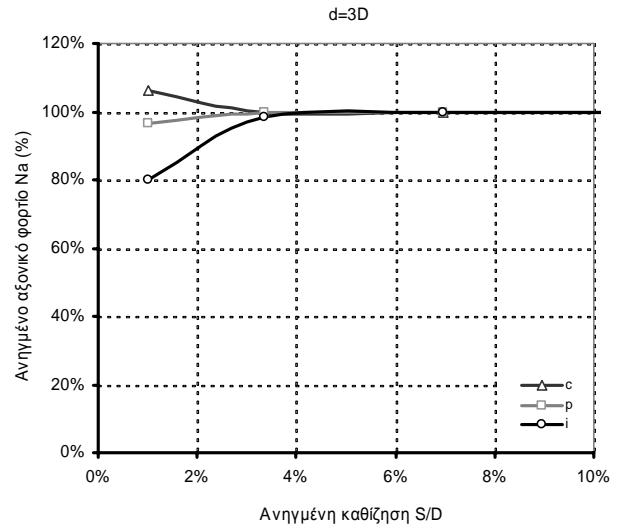
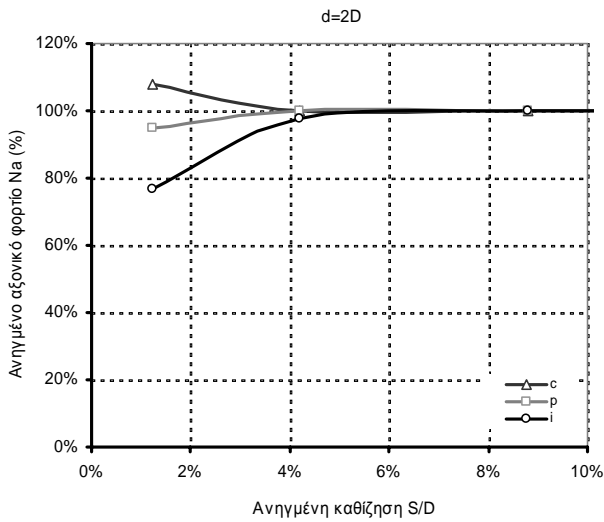
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S2, με ανηγμένο μήκος L/D=50 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.103-B.106



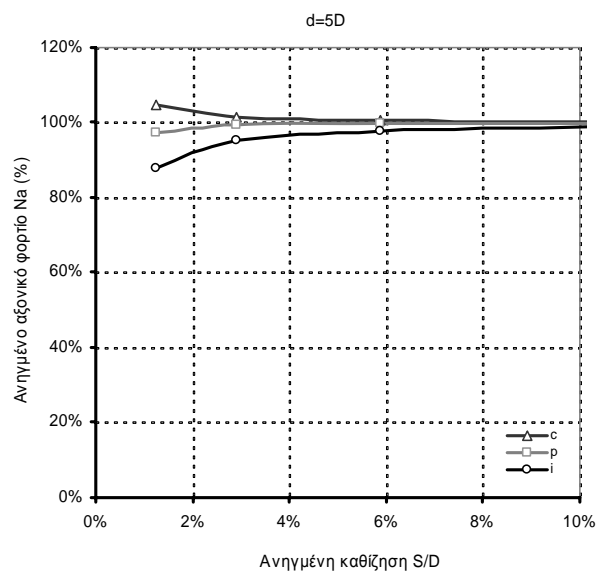
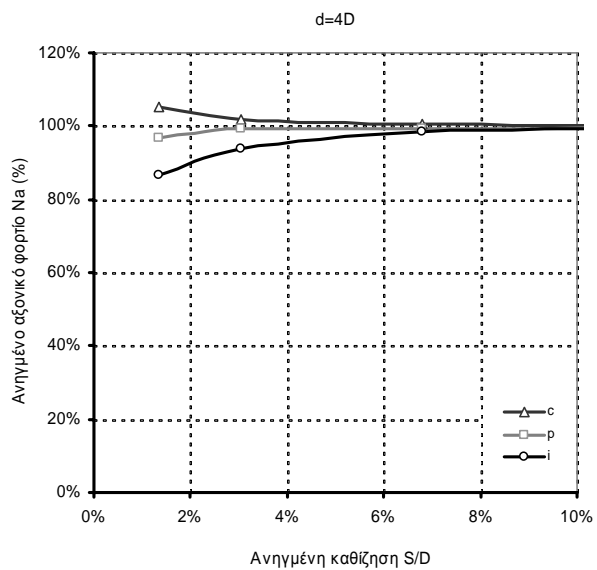
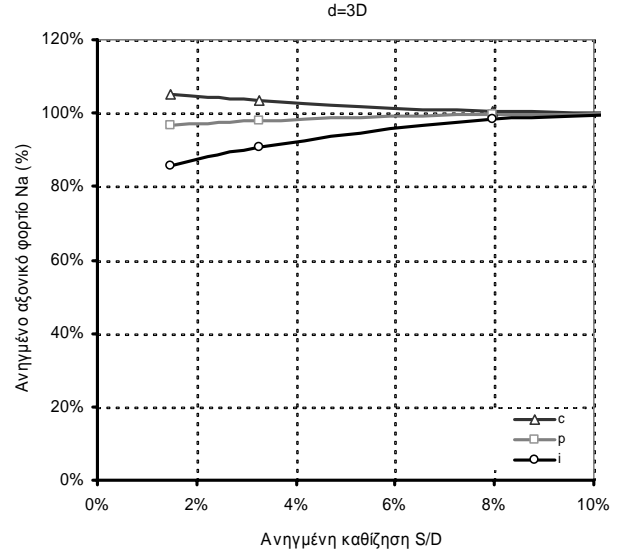
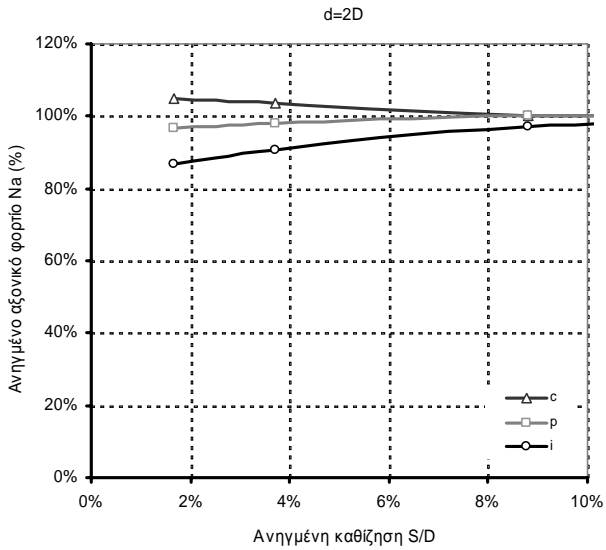
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 2*3, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S2, με ανηγμένο μήκος L/D=25 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.107-B.110



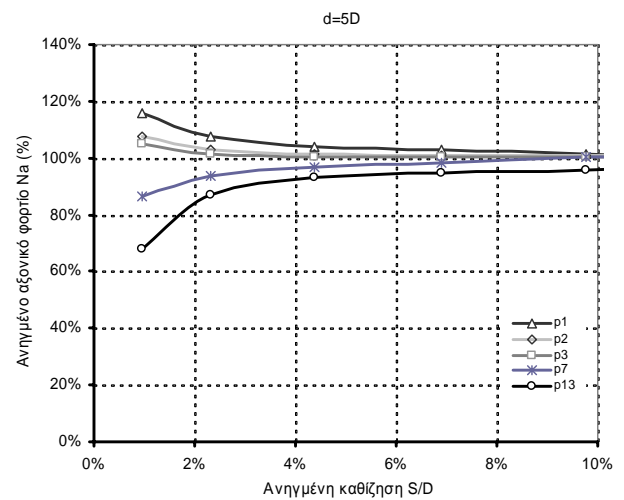
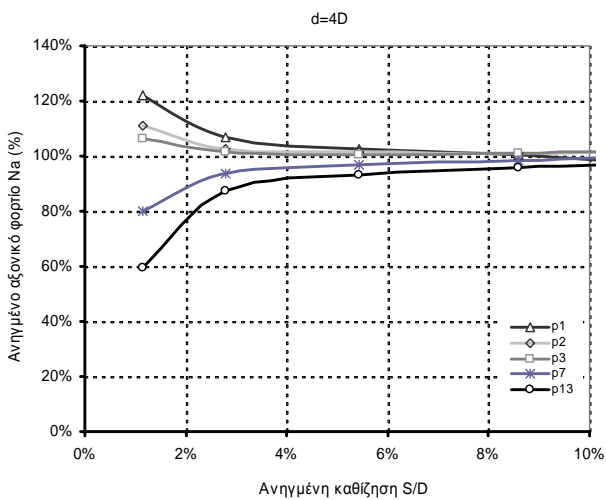
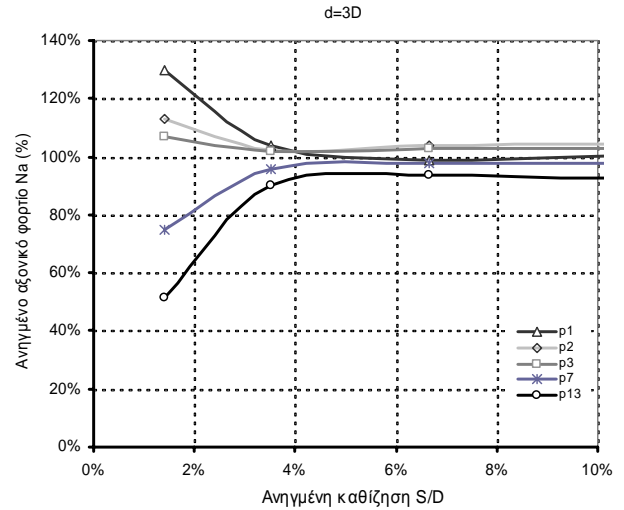
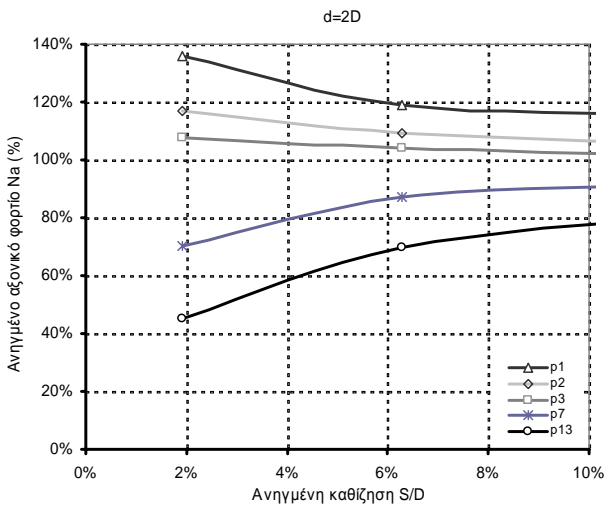
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S3, με ανηγμένο μήκος $L/D=25$ για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.111-B.114



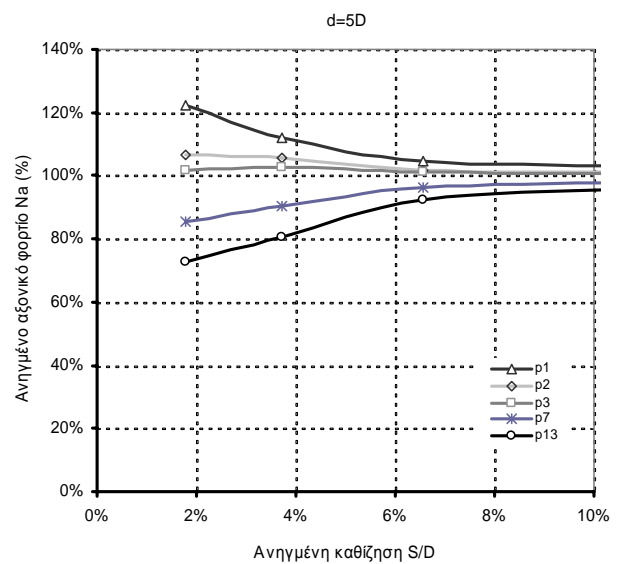
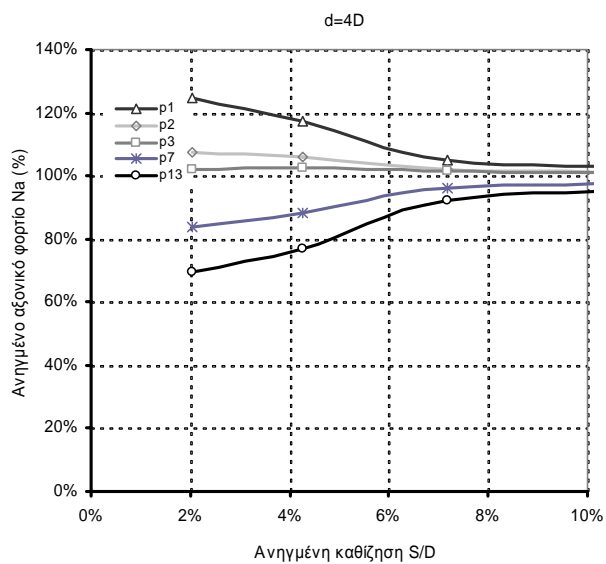
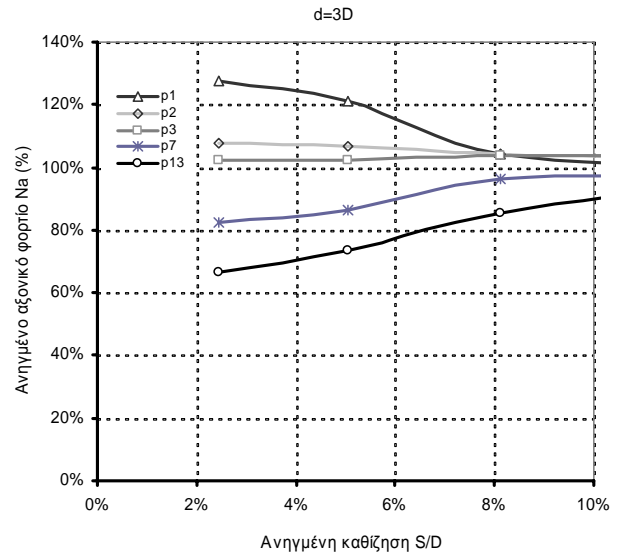
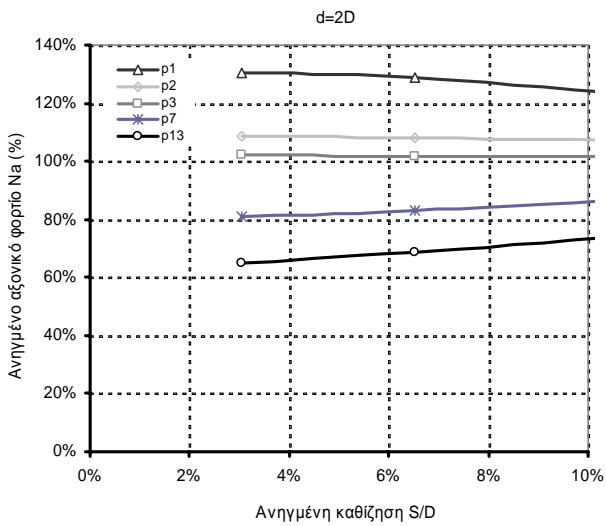
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 3*3, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S3, με ανηγμένο μήκος L/D=50 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.115-B.118



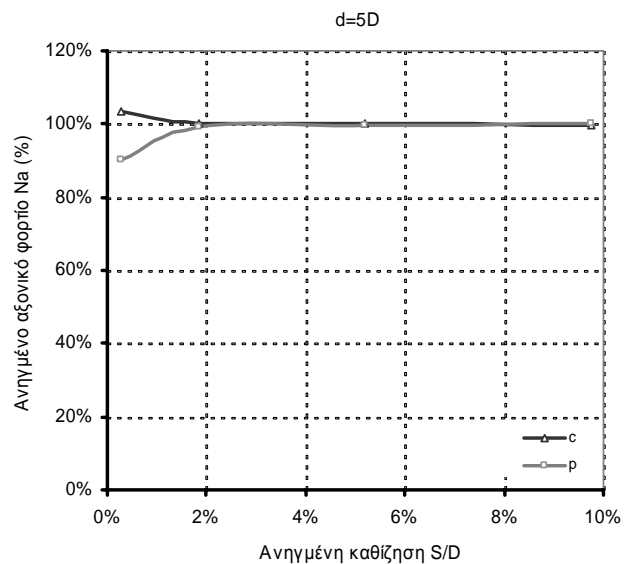
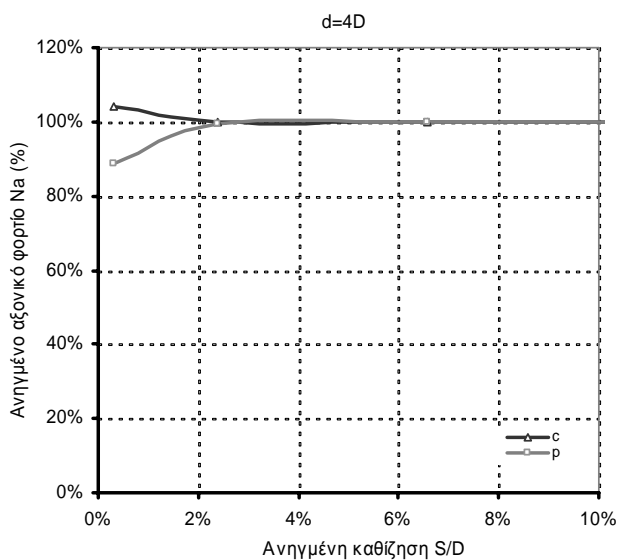
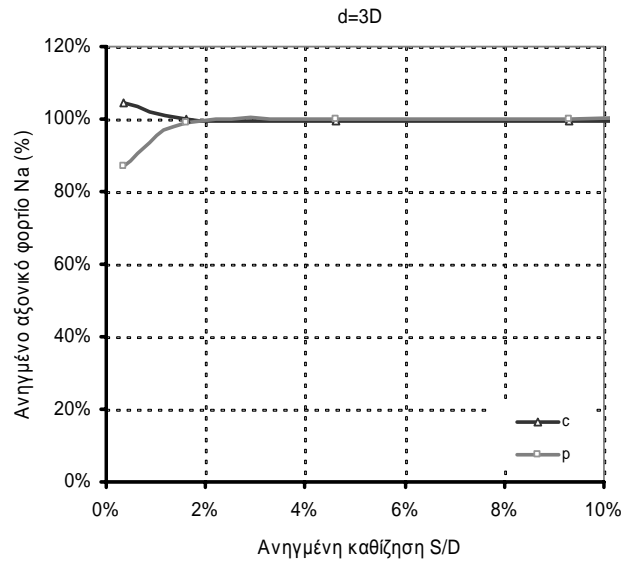
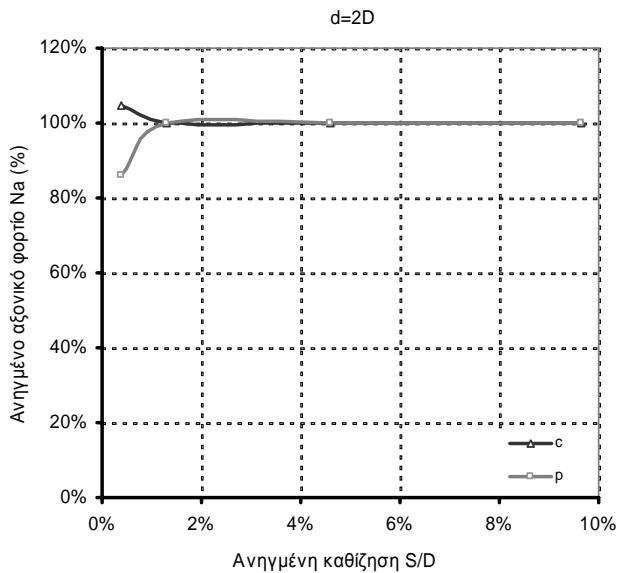
Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S3, με ανηγμένο μήκος L/D=25 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.119-B.122



Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 5*5, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S3, με ανηγμένο μήκος L/D=50 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

Σχήματα
B.123-B.126



Διαγράμματα κατανομής του ανηγμένου μέσου αξονικού φορτίου στους χαρακτηριστικούς πασσάλους της ομάδας διάταξης 2*3, μέσα σε αμμώδες έδαφος τύπου S3, με ανηγμένο μήκος L/D=25 για τις διάφορες σχετικές αποστάσεις.

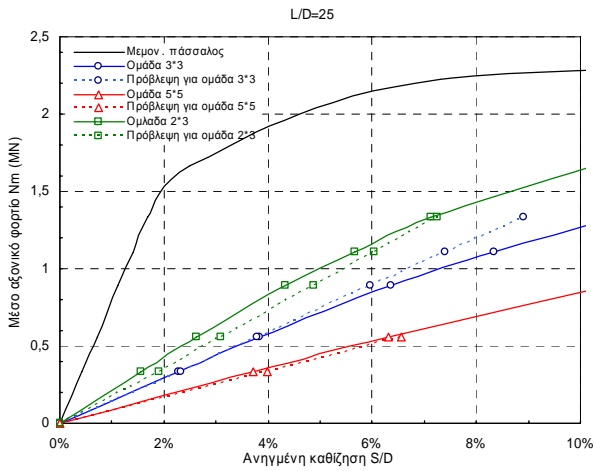
Σχήματα
B.127-B.130

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

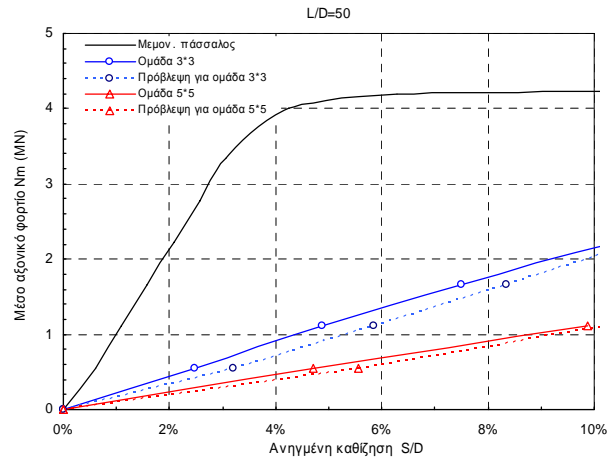


Σύγκριση καμπυλών απόκρισης βάσει αποτελεσμάτων
τριδιάστατης ανάλυσης και προταθείσας εξίσωσης

C1

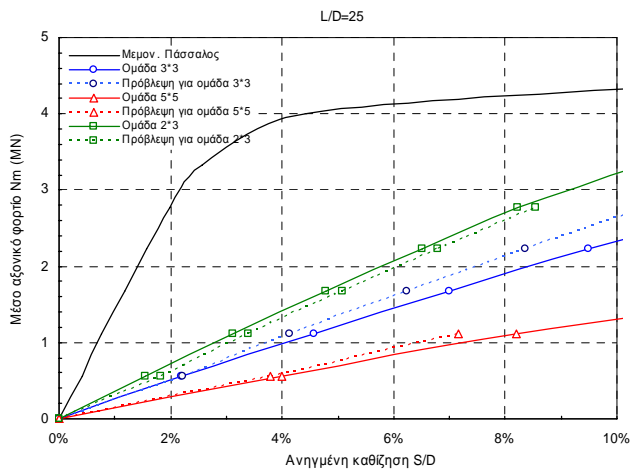


Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	10,3%	7,6%	5,3%

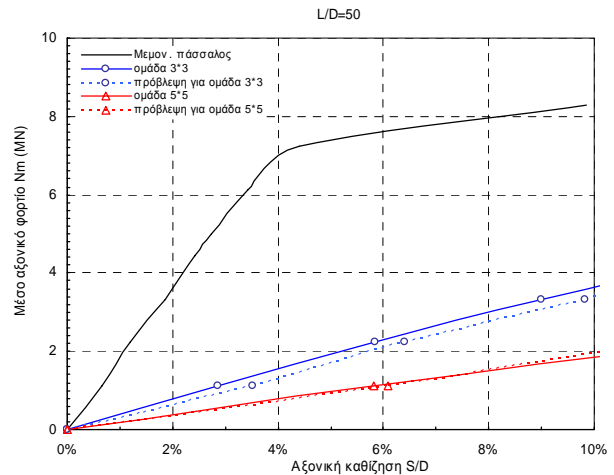


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	9,0%	9,0%

C2



Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	7,3%	10,0%	9,0%

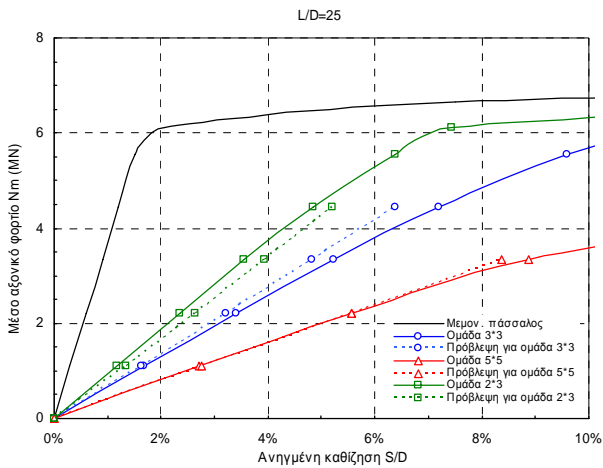


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	9,2%	2,3%

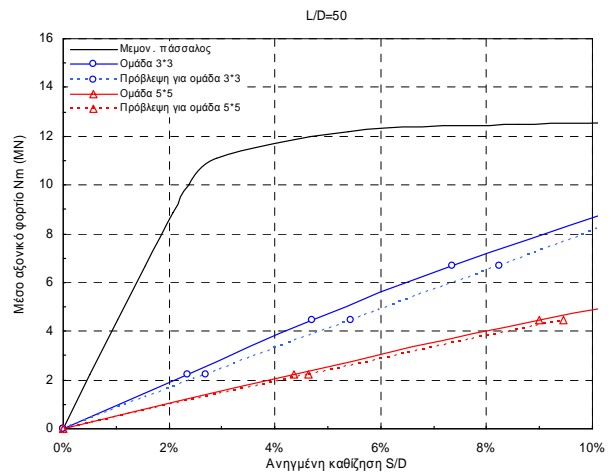
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους C1 και C2 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 2D

Σχήματα
Γ.1-Γ.4

C3

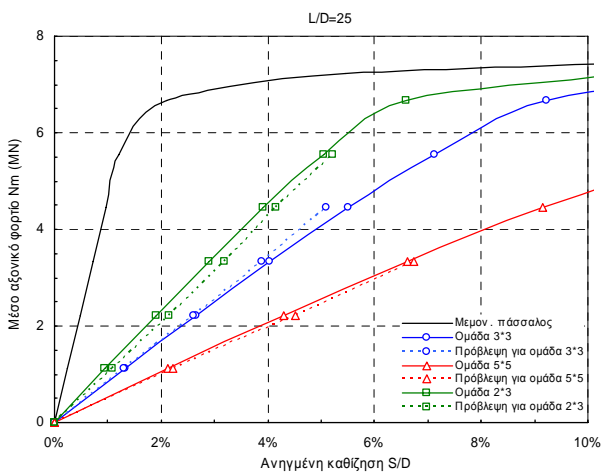


Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	9,8%	7,6%	1,2%

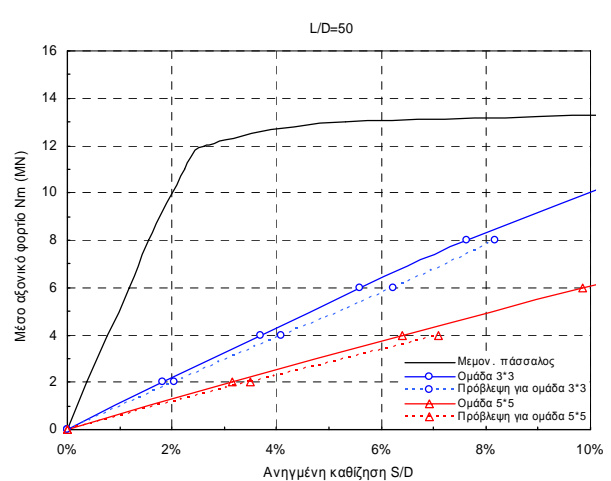


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	10,1%	5,41%

C4



Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	9,7%	3,8%	3,9%

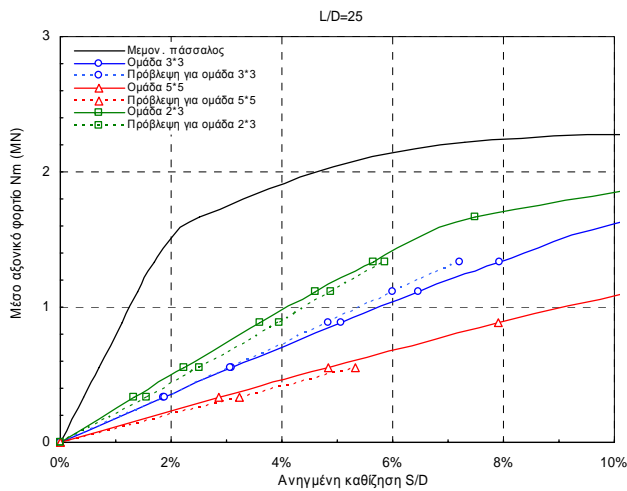


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	9,2%	9,7%

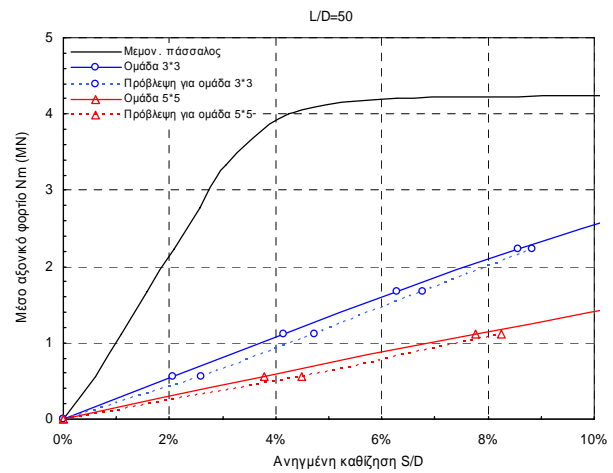
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους C3 και C4 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 2D

Σχήματα
Γ.5-Γ.8

C1

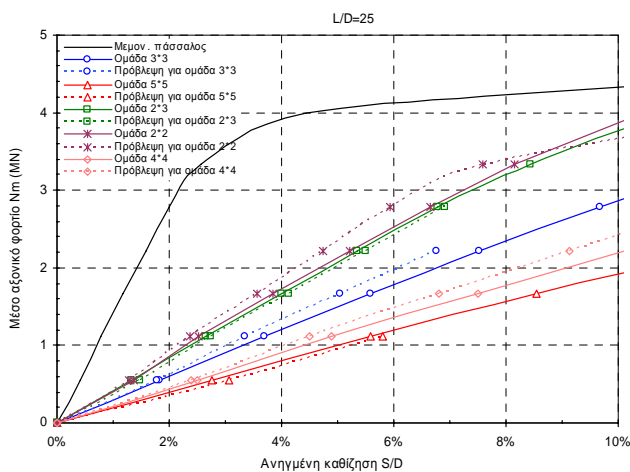


Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	8,6%	4,3%	10,1%

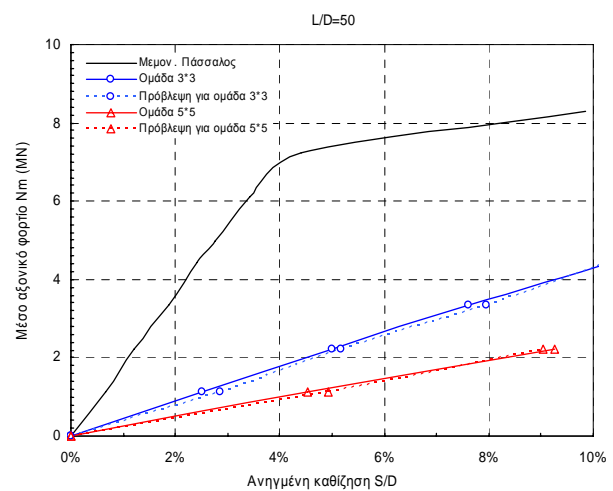


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	10,7%	10,9%

C2



Διάταξη:	2*3	2*2	3*3	4*4	5*5
Σφάλμα:	4,3%	4,6%	8,7%	6,9%	6,8%

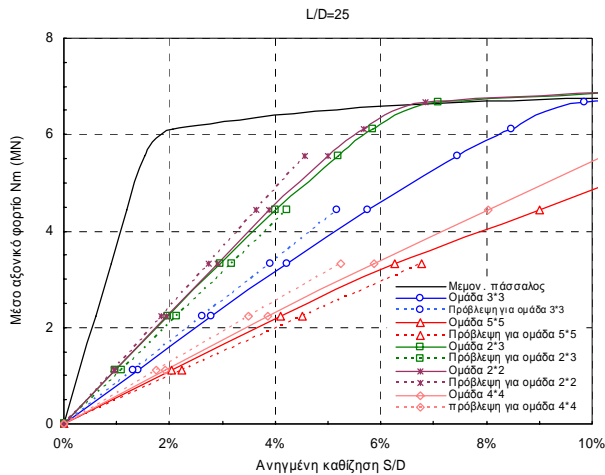


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	4,7%	2,8%

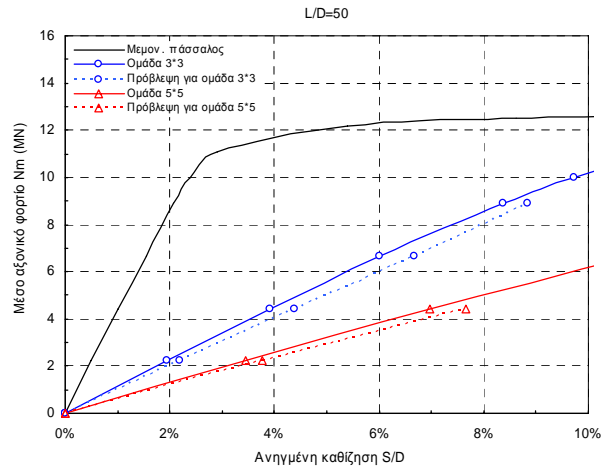
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους C1 και C2 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 3D

Σχήματα
Γ.9-Γ.12

C3

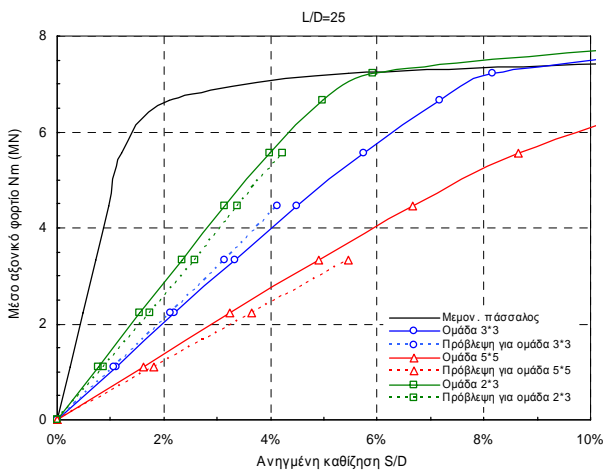


Διάταξη:	2*3	2*2	3*3	4*4	5*5
Σφάλμα:	7,5%	5,9%	8,3%	10,7%	8,5%

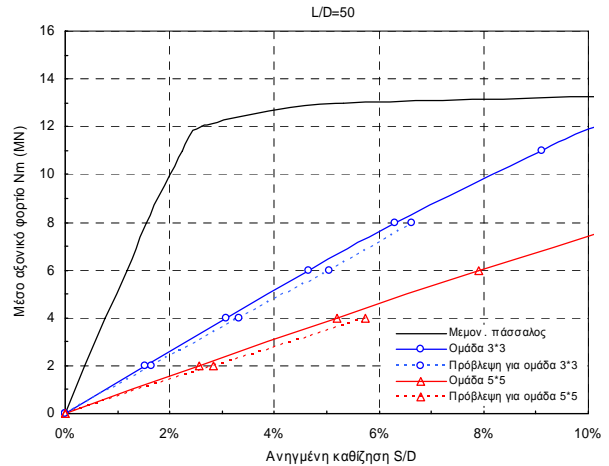


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	9,4%	8,6%

C4



Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	8,9%	5,8%	10,8%

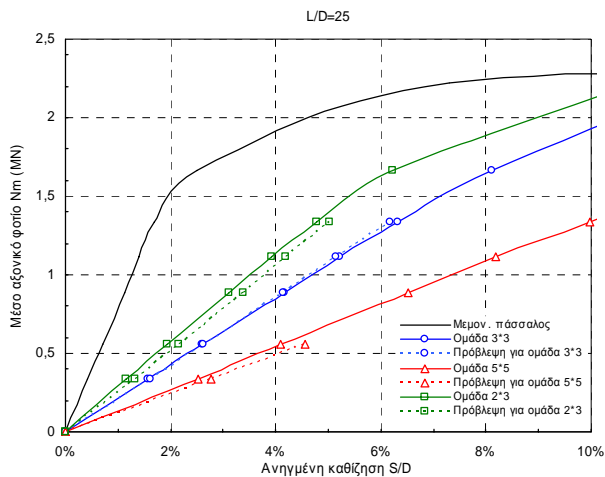


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	6,7%	9,5%

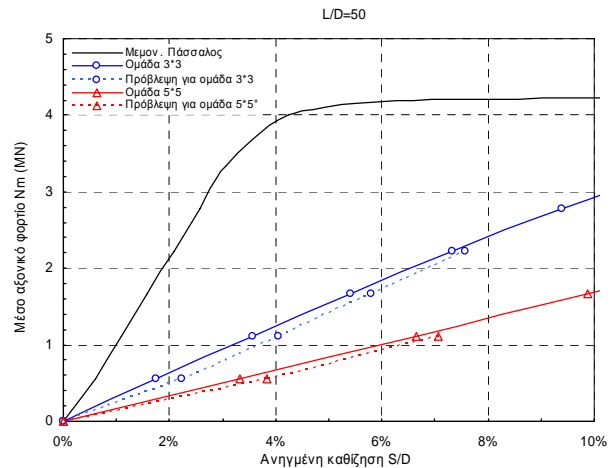
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους C3 και C4 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 3D

Σχήματα
Γ.13-Γ.16

C1

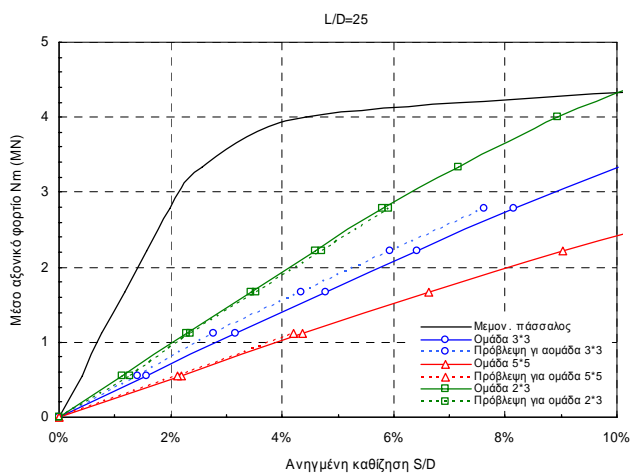


Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	8,5%	0,0%	8,5%

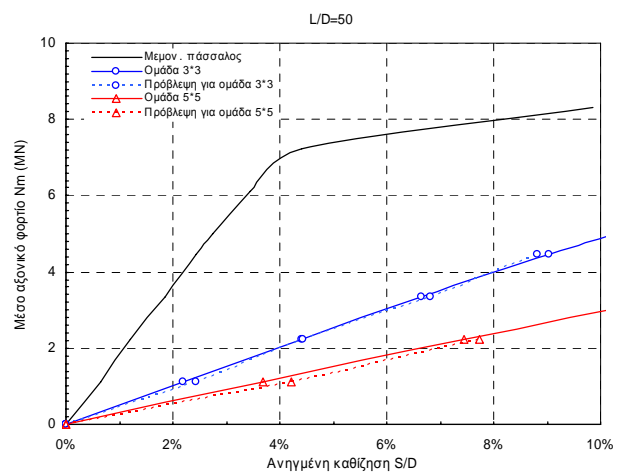


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	10,6%	9,6%

C2



Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	3,8%	10,5%	3,6%

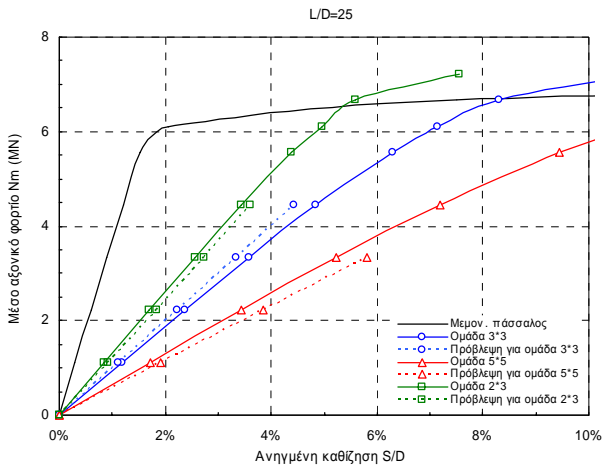


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	2,6%	8,2%

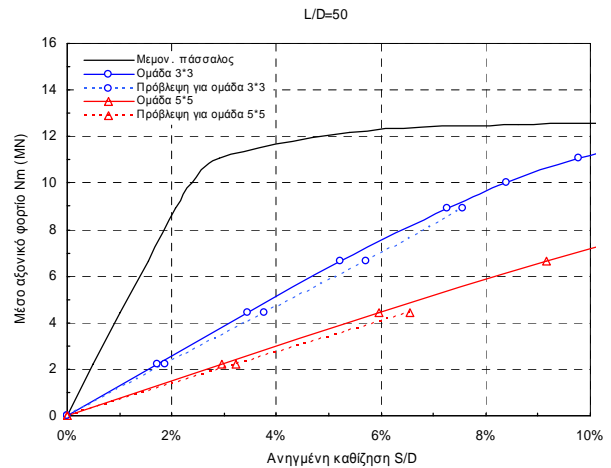
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους C1 και C2 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 4D

Σχήματα
Γ.17-Γ.20

C3

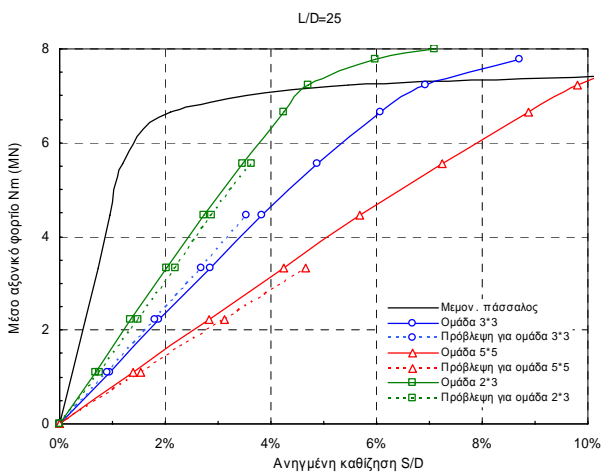


Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	6,4%	7,3%	10,4%

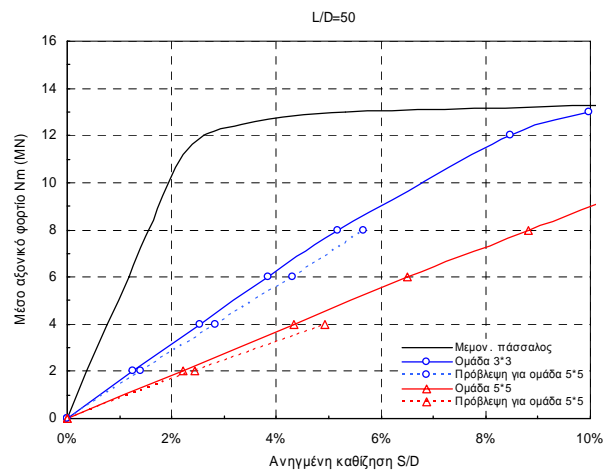


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	7,4%	8,6%

C4



Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	7,6%	5,5%	9,2%

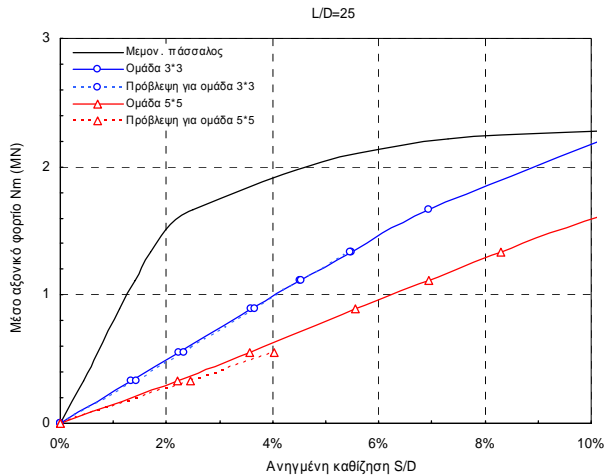


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	10,3%	10,2%

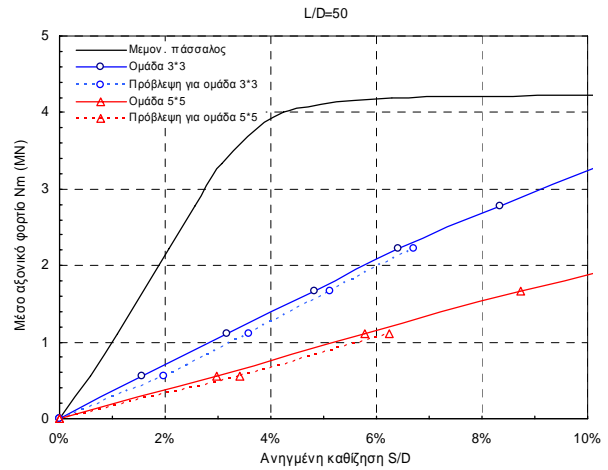
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους C3 και C4 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 4D

Σχήματα
Γ.21-Γ.24

C1

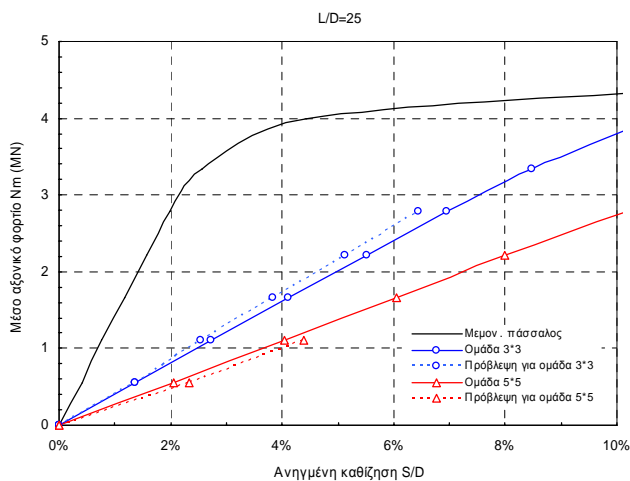


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	2,4%	10,6%

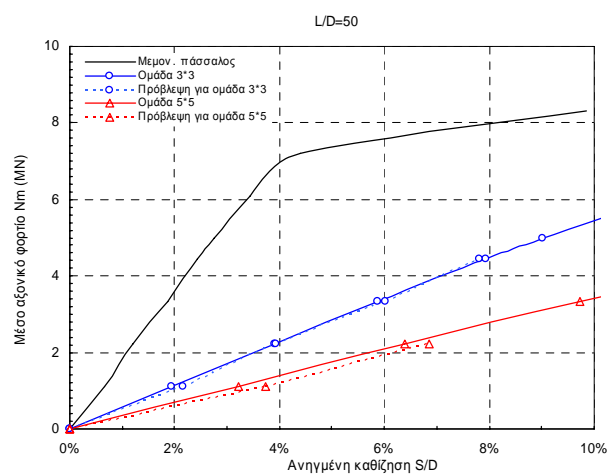


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	10,6%	10,0%

C2



Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	6,04%	9,9%

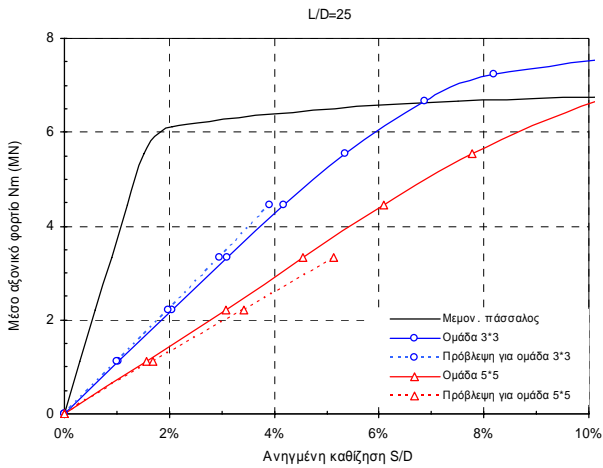


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	2,8%	10,3%

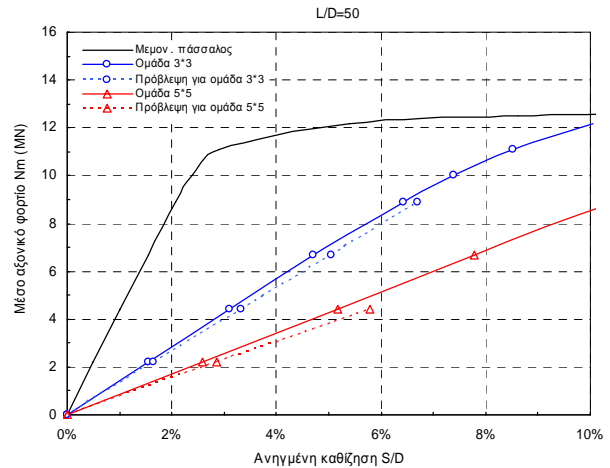
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους C1 και C2 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 5D

Σχήματα
Γ.25-Γ.28

C3

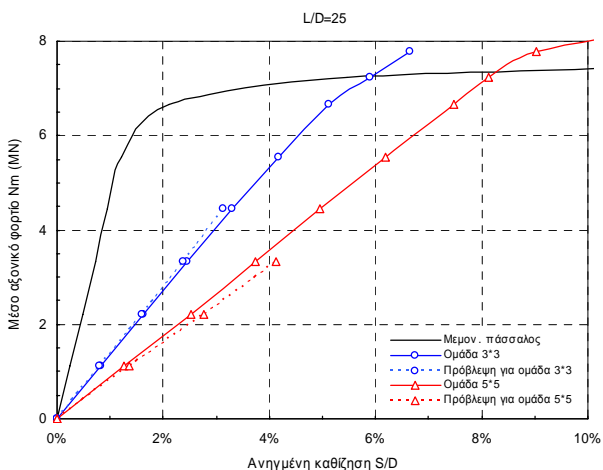


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	4,8%	9,7%

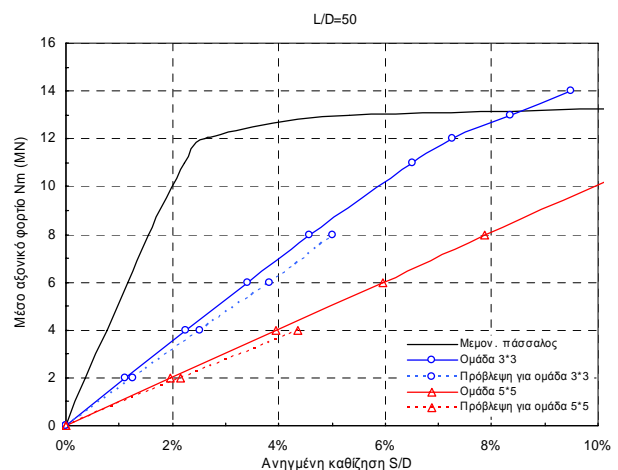


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	6,1%	10,0%

C4



Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	3,0%	8,4%

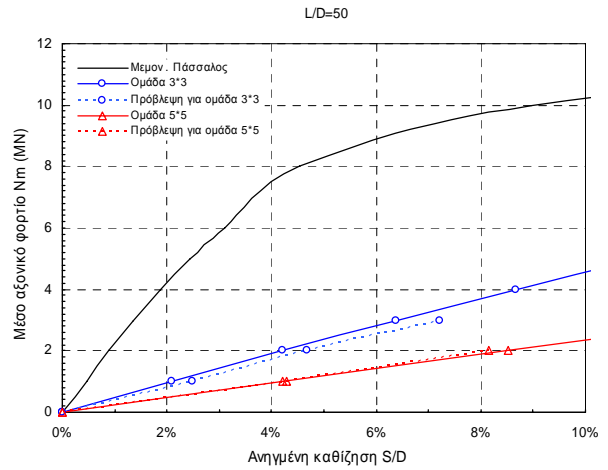
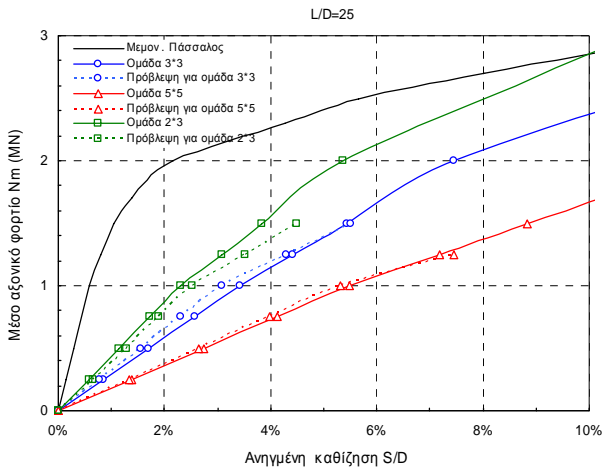


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	9,9%	9,0%

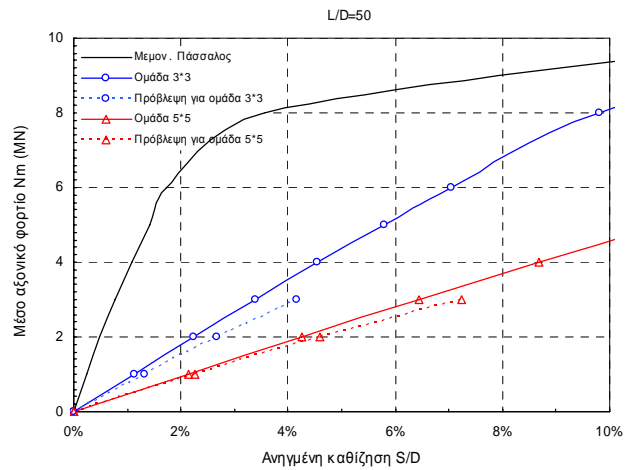
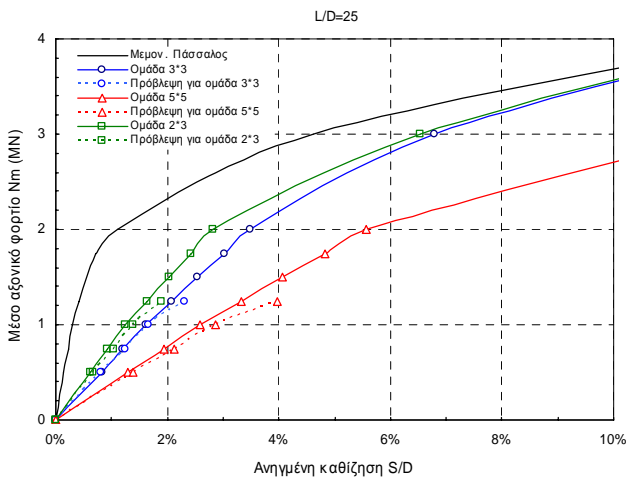
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους C3 και C4 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 5D

Σχήματα
Γ.29-Γ.32

S1



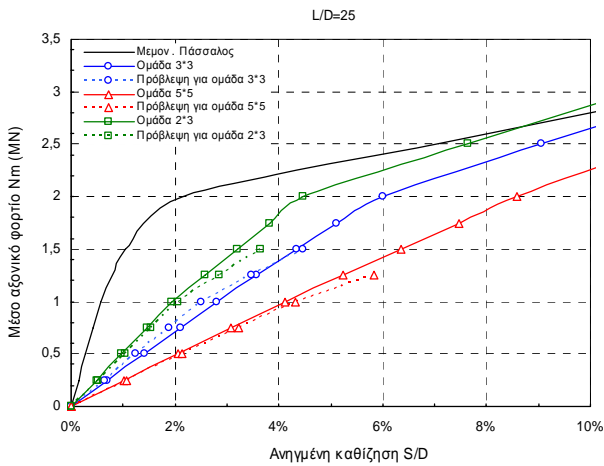
S2



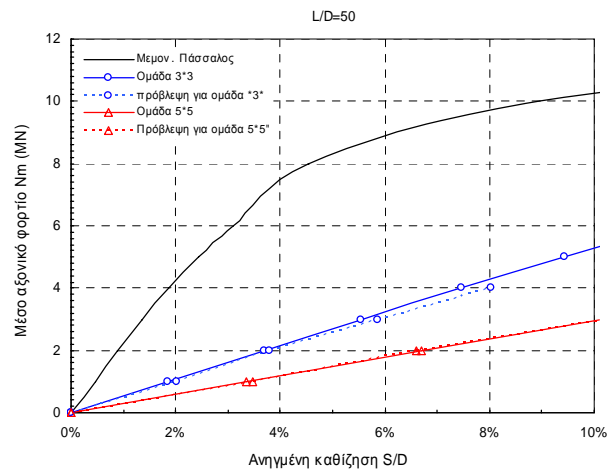
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους S1 και S2 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 2D

Σχήματα
Γ.33-Γ.36

S1

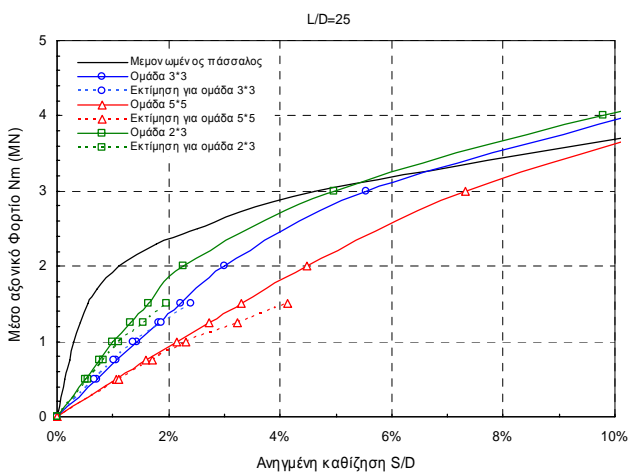


Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	7,8%	7,8%	6,2%

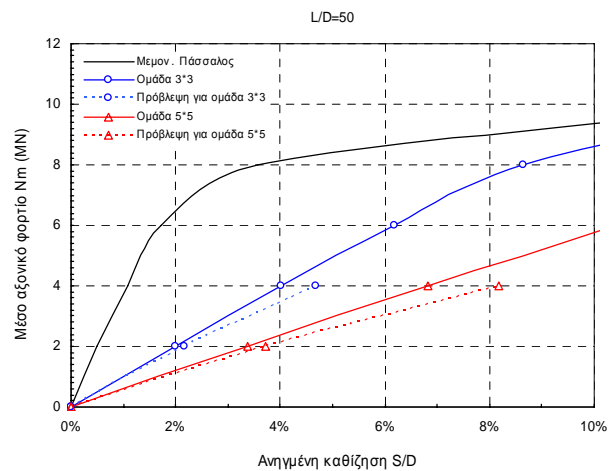


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	6,0%	1,1%

S2



Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	11,9%	1,59%	15,2%

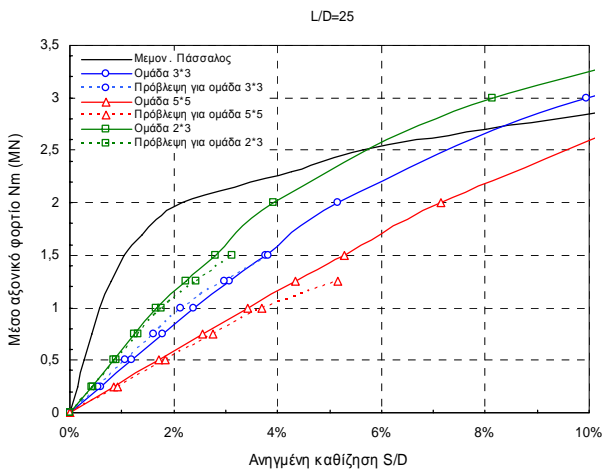


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	11,1%	12,7%

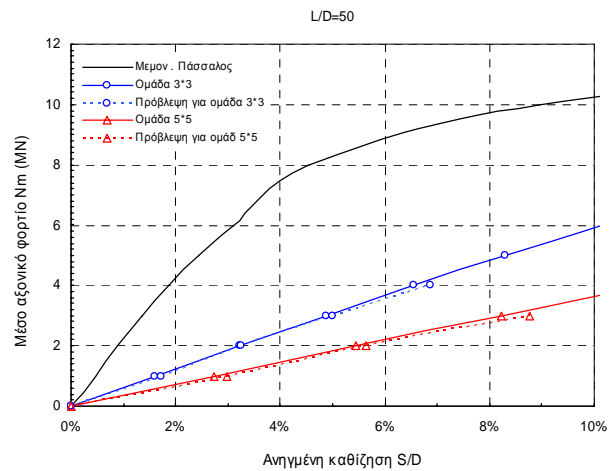
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους S1 και S2 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 3D

Σχήματα
Γ.37-Γ.40

S1

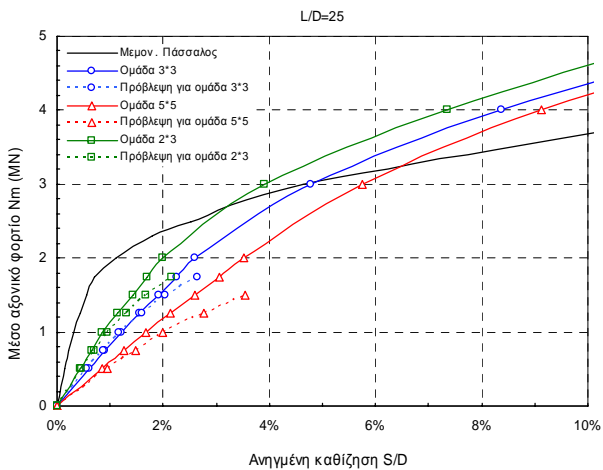


Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	6,9%	7,1%	9,1%

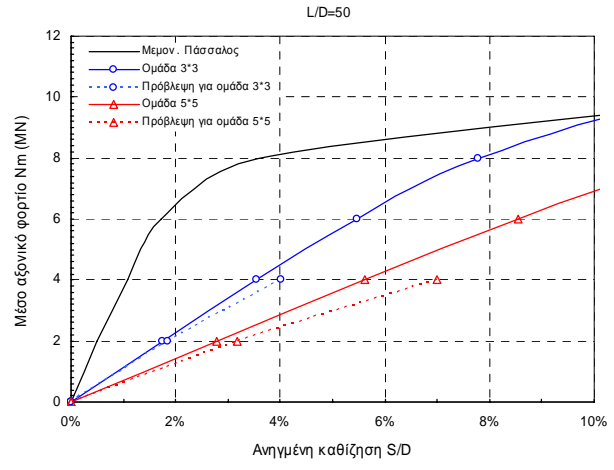


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	3,7%	5,9%

S2



Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	10,8%	0,1%	18,0%

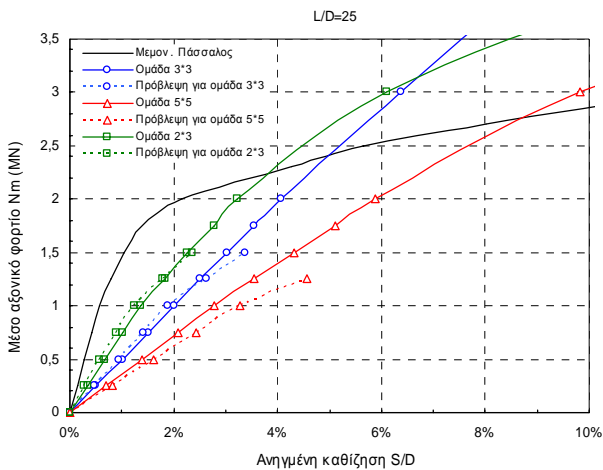


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	8,3%	16,3%

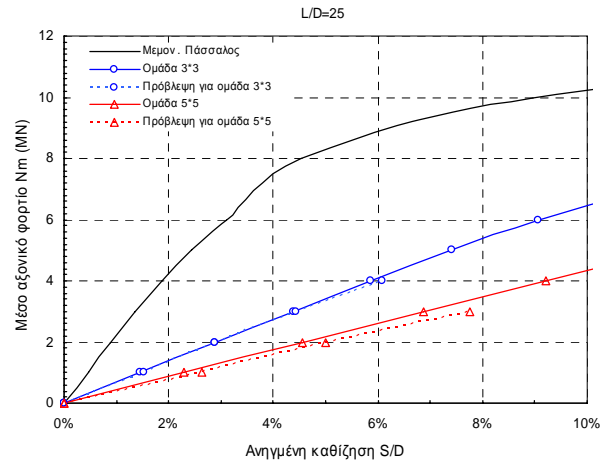
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους S1 και S2 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 4D

Σχήματα
Γ.41-Γ.44

S1

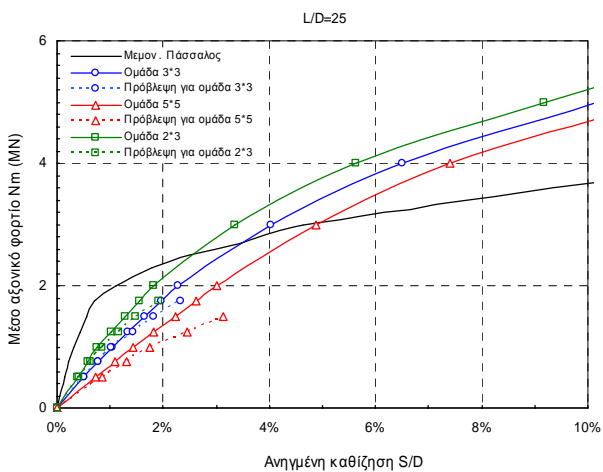


Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	18,1%	6,3%	16,3%

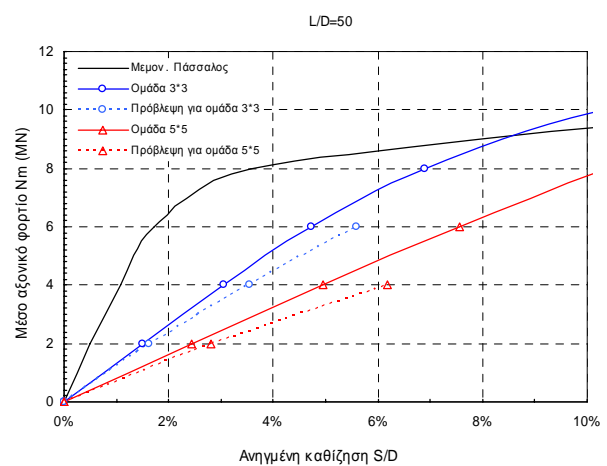


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	2,5%	10,9%

S2



Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	15,5%	1,9%	20,7%

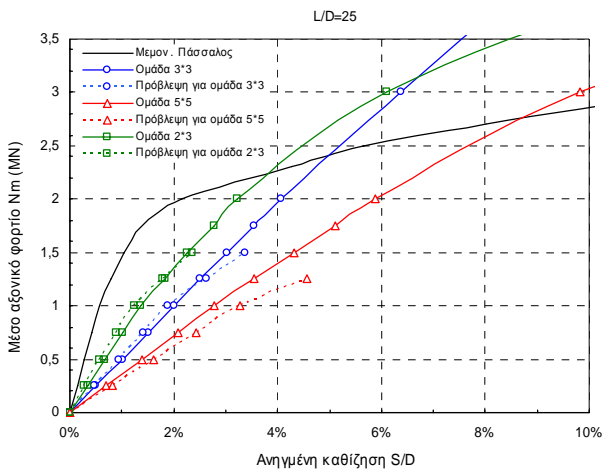


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	12,5%	16,4%

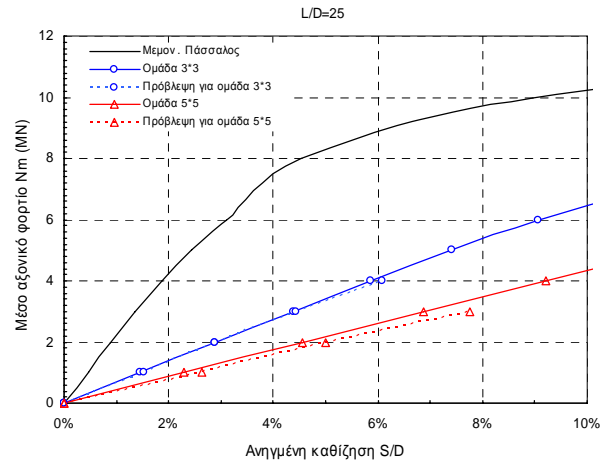
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους S1 και S2 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 5D

Σχήματα
Γ.45-Γ.48

S1

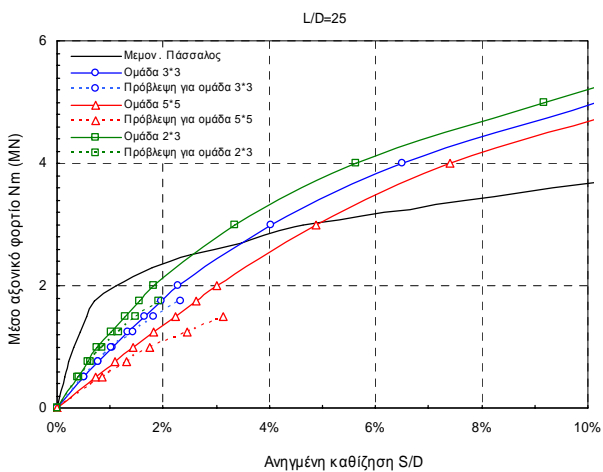


Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	18,1%	6,3%	16,3%

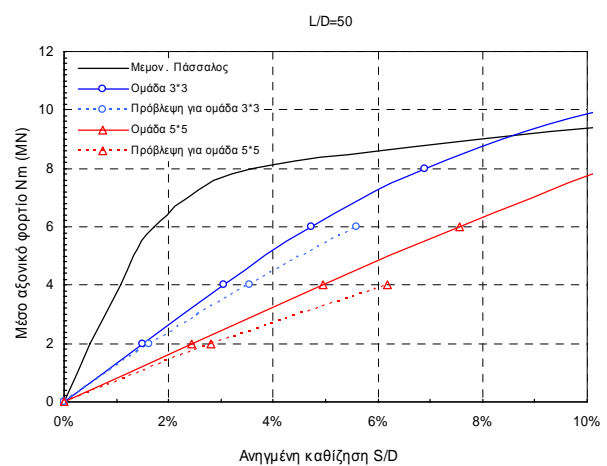


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	2,5%	10,9%

S2



Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	15,5%	1,9%	20,7%

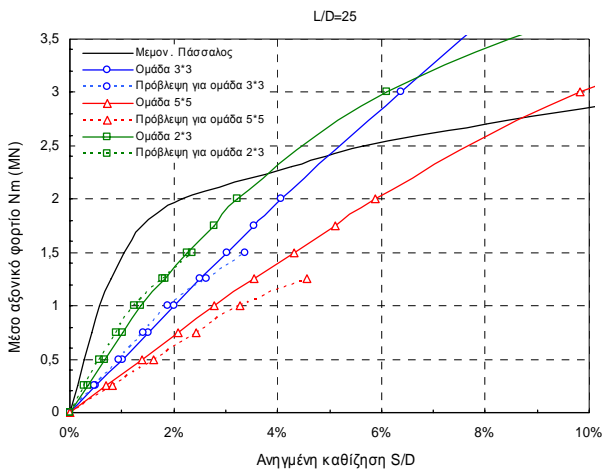


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	12,5%	16,4%

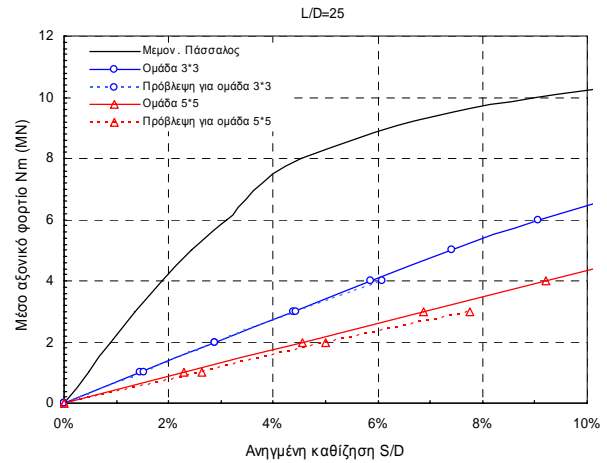
Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους S1 και S2 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 5D

Σχήματα
Γ.45-Γ.48

S1

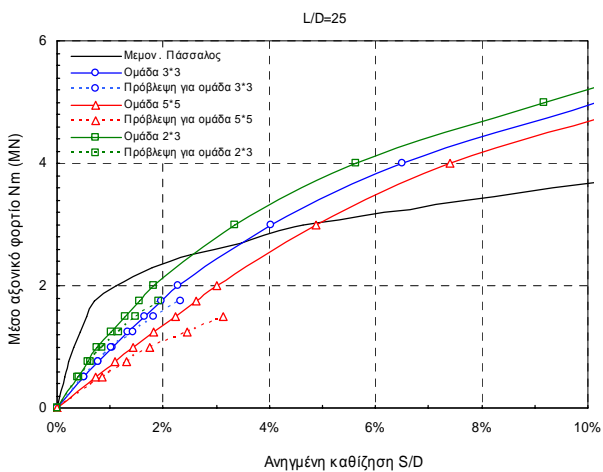


Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	18,1%	6,3%	16,3%

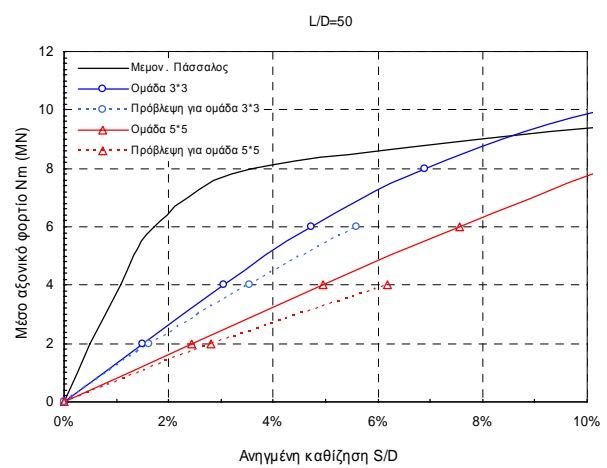


Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	2,5%	10,9%

S2



Διάταξη:	2*3	3*3	5*5
Σφάλμα:	15,5%	1,9%	20,7%



Διάταξη:	3*3	5*5
Σφάλμα:	12,5%	16,4%

Σύγκριση της απόκρισης διάφορων τύπων ομάδας πασσάλων βάσει των αποτελεσμάτων που δίνει η τριδιάστατη μη-γραμμική ανάλυση και η εφαρμογή της προταθείσας σχέσης για κατηγορία εδάφους S1 και S2 και σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 5D

Σχήματα
Γ.45-Γ.48