

Ανάπτυξη αρνητικών τριβών σε ομάδες πασσάλων: Αποτίμηση επιπτώσεων στους επιμέρους πασσάλους

Development of negative friction in pile groups: Effects on piles constituting the group

ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ, Α.
ΜΠΑΡΕΚΑ, Σ.

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Επίκουρος Καθηγητής, Π.Θ.
Πολιτικός Μηχανικός Π.Θ., Υπ. Διδάκτωρ Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Αντικείμενο του παρόντος άρθρου αποτελεί η ειδικότερη διερεύνηση ανάπτυξης αρνητικών τριβών σε ομάδες πασσάλων και η αποτίμηση των επιπτώσεων της δράσης αυτής στους επιμέρους πασσάλους της ομάδας. Από τρισδιάστατες μη γραμμικές επιλύσεις προκύπτει εξάρτηση από την επιφανειακή φόρτιση, τη διάταξη, τη θέση, τη δυσκαμψία και τη διατμητική αντοχή κατά μήκος της διεπιφάνειας. Παρατηρείται επίσης σημαντική διαφοροποίηση σε ομάδες πασσάλων με ελεύθερη κεφαλή και ομάδα πασσάλων πακτωμένη σε ενιαίο κεφαλόδεσμο. Επιπρόσθετα, όταν η κατασκευή επιχώματος προηγείται της εφαρμογής του φορτίου λειτουργίας του πασσάλου οι επιπτώσεις των αρνητικών τριβών είναι σημαντικά μικρότερες από την αντίστροφη περίπτωση.

ABSTRACT: The aim of this paper is to evaluate the influence of negative skin friction on pile foundations. Three dimensional nonlinear analyses for a single pile and pile groups have shown that the dragload of a pile in a group depends on the surface load, the pile configuration, the pile position in a group, the interface ultimate skin friction and stiffness. It has been demonstrated that for fixed-head friction pile groups the dragload group effect is significantly greater than in the case of free-head end-bearing pile groups. It has also been revealed that when the construction of an embankment precedes the application of the foundation working load, the effect of negative skin friction is considerably smaller than in the reverse case.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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. Επιπρόσθετα παρατηρείται 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 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. Ας σημειωθεί ακόμη, ότι στη περίπτωση ομάδας πασσάλων οι

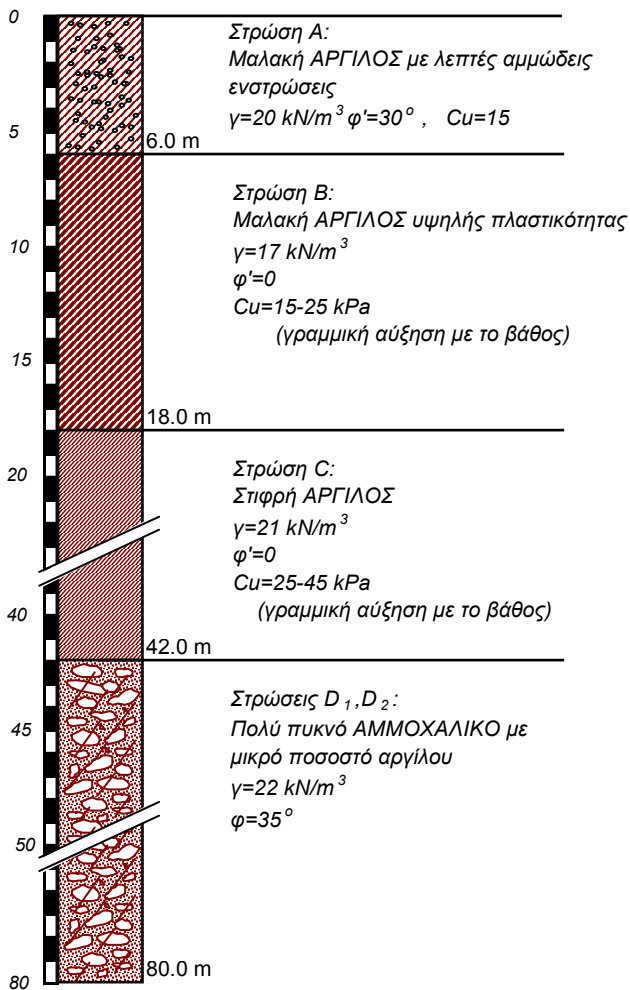
επιπτώσεις της αλληλεπίδρασης είναι ακόμη πιο σύνθετες λόγω της παρουσίας των παρακείμενων πασσάλων, η οποία τείνει να μειώσει την καθίζηση του εδάφους ανάμεσα στους πασσάλους (Kuwabara and, Poulos 1989). Συνέπεια της ανωτέρω δράσης αποτελεί το γεγονός ότι οι εσωτερικοί πάσσαλοι ομάδας με ενιαίο κεφαλόδεσμο αναλαμβάνουν μικρότερα επιπρόσθετα φορτία, ενώ στη 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 στην 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 τον 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. Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν και οι Comodromos and Bareka (2005) εξετάζοντας τις ίδιες περιπτώσεις. Ειδικότερο αντικείμενο του παρόντος άρθρου αποτελεί η αποτίμηση των επιπτώσεων των αρνητικών τριβών στις ομάδες πασσάλων τόσο συνολικά όσο και

επιμέρους στους χαρακτηριστικούς πασσάλους.

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΑΡΝΗΤΙΚΩΝ ΤΡΙΒΩΝ

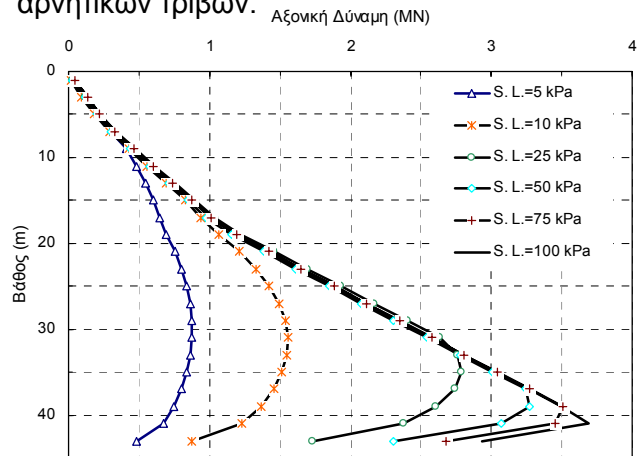
Η κατανόηση του μηχανισμού ανάπτυξης των αρνητικών τριβών μπορεί να γίνει ευκολότερα αντιληπτή με την ανάλυση απλών σχετικά γεωμετρικών προβλημάτων. Σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναφερθεί η ανάπτυξη των αρνητικών τριβών αρχίζει όταν παρατηρείται 'ανάρτηση' του περιβάλλοντος εδάφους στον εξεταζόμενο πάσσαλο. 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). Η σταδιακή ανάπτυξη των επιπτώσεων των αρνητικών τριβών παρουσιάζεται από τους Comodromos and Bareka (2005) σε σχετικά διαγράμματα μετά από ανάλυση πασσάλου σε πολυστρωματικό έδαφος. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε ανάλυση πασσάλου διαμέτρου $D=1.50$ m, μήκους 45 m σε στρωματογραφία και εδαφικές παραμέτρους του Σχήματος 1. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση του προγράμματος FLAC^{3D} ver. 2.1 (2002). Για την προσομοίωση του εδάφους χρησιμοποιήθηκε μη συζευγμένος καταστατικός νόμος Mohr-Coulomb, ενώ κατά μήκος της διεπιφάνειας εδάφους πασσάλων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διεπιφάνειας με κριτήριο διατμητικής αντοχής Coulomb. Οι επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αναφέρονται στην κατασκευή του πασσάλου και στη συνέχεια στην κατασκευή επιχώματος, σε συνδυασμό με δράση αξονικής δύναμης ίσης με αυτή του επιτρεπόμενου φορτίου του πασσάλου. Ειδικότερα πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις για επιχώματα ισοδύναμων πιέσεων 5, 10, 25, 50, 75 και 100 KPa και αξονικό φορτίου 4500 kN. Στο Σχήμα 2 δίνεται η κατανομή της αξονικής δύναμης που προκύπτει από την ανάπτυξη των αρνητικών τριβών. Είναι φανερό ότι η προκαλούμενη δύναμη μεγαλώνει συναρτησί του φορτίου, στην αρχή σχεδόν αναλογικά, ενώ στο τέλος η αύξηση είναι περιορισμένη.



Σχήμα 1. Εδαφική τομή και παράμετροι σχεδιασμού για την ανάλυση μεμονωμένου πασσάλου σε πολυστρωματικό έδαφος.
Figure 1. Soil profile and design parameters for the single pile analysis in multilayered soil.

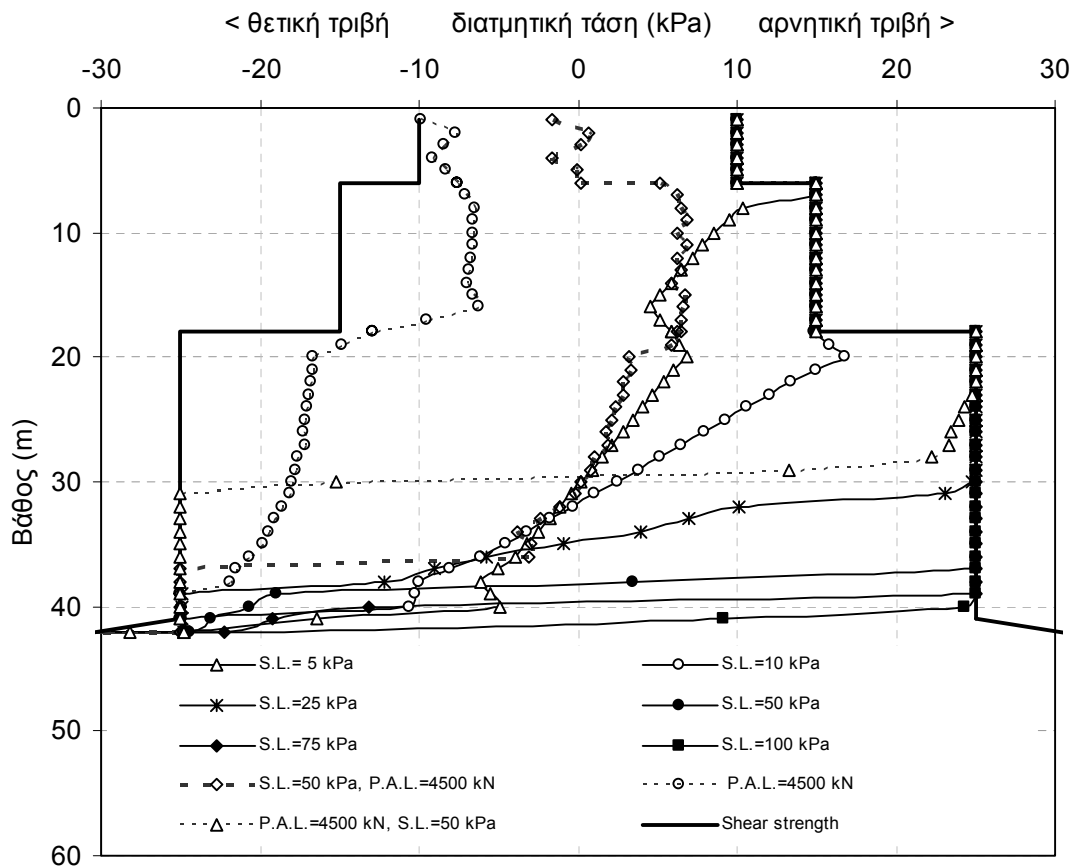
Εξήγηση γι'αυτό μπορεί να δώσει το Σχήμα 3, όπου δίνεται η ανάπτυξη της διατμητικής τάσης κατά μήκος του πασσάλου για κάθε φόρτιση. Από το σχήμα αυτό διαφαίνεται τότε εκδηλώνεται πλήρης κινητοποίηση των επιπτώσεων της ανάπτυξης αρνητικών τριβών κατά μήκος του πασσάλου. Χαρακτηριστικά, για επιχώμα που αντιστοιχεί σε ασκούμενη στην επιφάνεια τάση 5 kPa πλήρης κινητοποίηση καταγράφεται για τα πρώτα 7.5 m, ενώ για επιχώματα με τάσεις μεγαλύτερες των 75 kPa παρατηρείται πλήρης σχεδόν κινητοποίηση καθ'όλο το βάθος. Ας σημειωθεί ακόμη ότι το ουδέτερο σημείο για την περίπτωση των 5 kPa βρίσκεται σε σημαντικό βάθος (30m), όχι ιδιαίτερα μικρότερο των 40 m που αντιστοιχούν στο φορτίο επιχώματος 100 kPa, βλ. Σχήμα 4. Παρ'όλα αυτά οι διαφορές στο προκαλούμενο φορτίο είναι πολύ μεγάλη, δεδομένου ότι

κυρίαρχο στοιχείο για το μέγεθος της προκαλούμενης δύναμης αποτελεί ο βαθμός κινητοποίησης και όχι η θέση του ουδέτερου σημείου. Αυτή είναι και η ποιοτική διαφορά ανάμεσα στις συμβατικές μεθοδολογίες, όπου θεωρείται πλήρης κινητοποίηση πάνω από το ουδέτερο σημείο, με αποτέλεσμα την πρόβλεψη υπερβολικών δυνάμεων λόγω αρνητικών τριβών. Αντίθετα, τριδιάστατες αριθμητικές μη γραμμικές επιλύσεις είναι σε θέση να λάβουν υπόψη τη μερική κινητοποίηση και να οδηγήσουν σε ακριβέστερες προβλέψεις, οι οποίες για τις περιπτώσεις φορτίων μικρής κινητοποίησης δίνουν αισθητά μικρότερες επιπτώσεις αρνητικών τριβών.

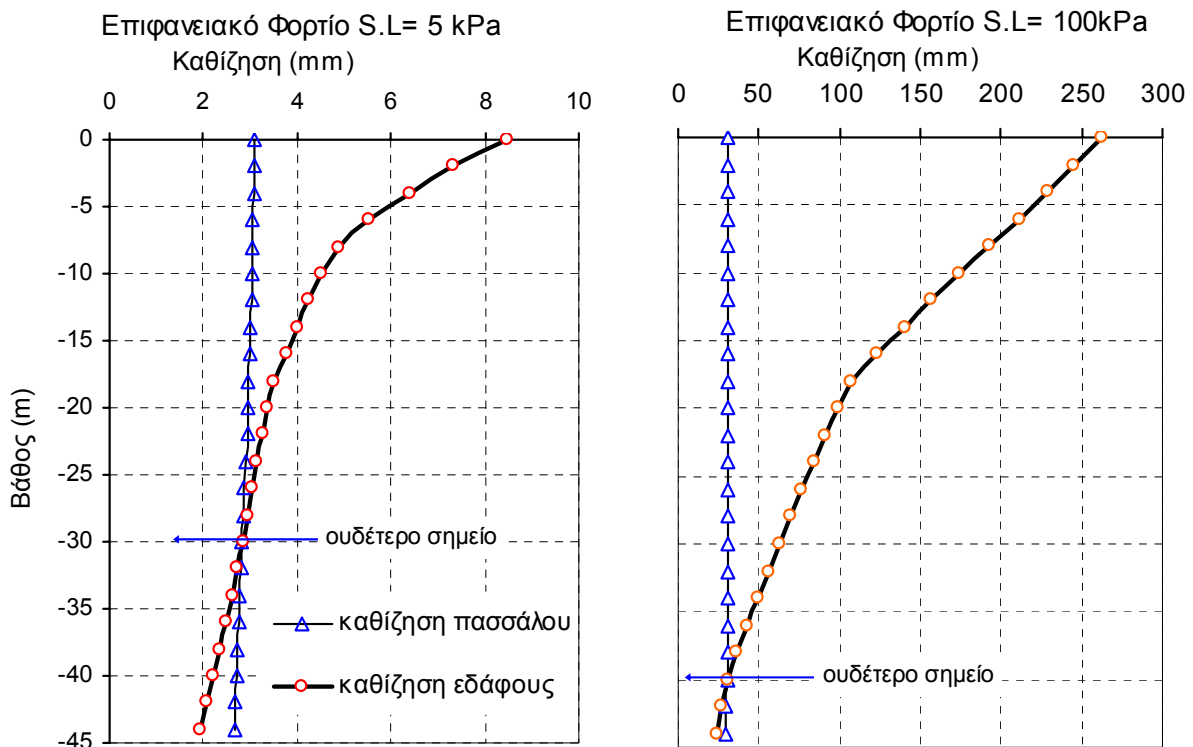


Σχήμα 2. Κατανομή αξονικής δύναμης κατά μήκος του πασσάλου για διάφορες επιφανειακές φορτίσεις (S.L.).
Figure 2. Dragload distribution along the pile for various surface loads (S.L.).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης και το Σχήμα 5, όπου δίνεται η κατανομή αξονικής καταπόνησης του πασσάλου για επιφανειακή πίεση 50 kPa (S.L.= 50 kPa) και φορτίο στη κεφαλή του πασσάλου ίσο με 4.5 MN. (P.A.L.= 4.5 MN). Οι αναλύσεις περιλαμβάνουν τις ακόλουθες περιπτώσεις: (α) φορτίο κεφαλής χωρίς φορτίο επιχώματος, (β) επιβολή του φορτίου κεφαλής και μετά επιβολή του φορτίου επιχώματος, (γ) επιβολή του φορτίου επιχώματος και στη συνέχεια επιβολή του φορτίου κεφαλής, (δ) επαλληλία των δύο φορτίσεων (χρησιμοποιείται συχνά από συμβατικές μεθοδολογίες). Οι συνδυασμοί (β)-(δ), όπως άλλωστε αναμενόταν, οδηγούν σε φορτία σημαντικά μεγαλύτερα ως αποτέλεσμα των αρνητικών τριβών. Η διαφοροποίηση εντούτοις των φάσεων επιβολής των φορτίων είναι επίσης σημαντική.

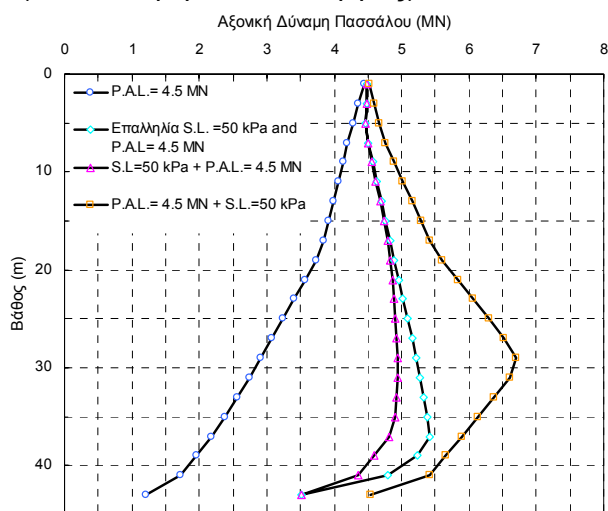


Σχήμα 3. Κατανομή διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια κατά μήκος του πασσάλου για διάφορες επιφανειακές πιέσεις (S.L.) και αξονικό φορτίο στην κεφαλή του πασσάλου (P.A.L.).
 Figure 3. Interface shear stress distribution along the pile for various surface loads (S.L.) and pile axial load (P.A.L.).



Σχήμα 4. Καθίζηση πασσάλου και περιβάλλοντος εδάφους για επιφανειακό φορτίο 5 και 100 kPa
 Figure 4. Pile and surrounding soil settlements for a surface load of: (a) 5 and (b) 100 kPa

Συγκεκριμένα, ο συνδυασμός (β) οδηγεί σε αισθητά μεγαλύτερη αξονική δύναμη απ'ότι ο αντίστροφος συνδυασμός (γ), (6.7 MN ο συνδυασμός β και 4.94 MN ο συνδυασμός γ). Στην περίπτωση (β) η πρόσθετη αξονική δύναμη είναι 2.2 MN (σχεδόν 50% του φορτίου λειτουργίας), ενώ στη περίπτωση (γ) 0.44 MN (10% του φορτίου λειτουργίας).



Σχήμα 5. Κατανομή αξονικής δύναμης για συνδυασμού επιτρεπόμενου φορτίου και επιφανειακών πιέσεων.

Figure 5. Dragload distribution for pile working load and surface load combinations.

Η καθίζηση του πασσάλου λόγω της εφαρμογής του φορτίου λειτουργίας χωρίς φορτίο επιχώματος είναι ίση με 6.5 mm, ενώ στη περίπτωση (γ) ανέρχεται σε 28.6 mm και στη περίπτωση (β) είναι 37.8 mm. Κατά συνέπεια, για το ίδιο φορτίο λειτουργίας το ελατήριο προσομοίωσης της αξονικής αντίστασης είναι ίσο με 0.69, 0.12 and 0.16 GN/m για τις περιπτώσεις (α), (β) and (γ) αντίστοιχα. Ο μειωτικός συντελεστής της δυσκαμψίας λόγω της δράσης των αρνητικών τριβών ανέρχεται σε 82% and 76% για τις περιπτώσεις (β) και (γ), αντίστοιχα.

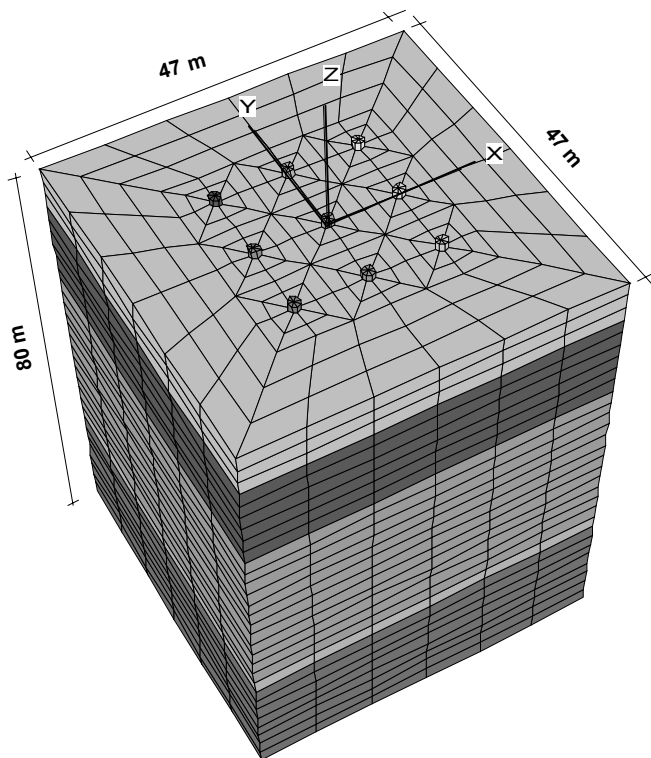
Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης κρίνεται ότι οι επιπτώσεις των αρνητικών τριβών είναι ιδιαίτερα σημαντικές τόσο για την πρόσθετα ασκούμενη δύναμη, όσο και για τη δυσκαμψία του ελατηρίου προσομοίωσης. Κατά συνέπεια θα πρέπει ανάλογα με τις κατασκευαστικές φάσεις της θεμελίωσης και της κατασκευής να λαμβάνονται οι κατάλληλες τιμές για την ανάλυση και τον σχεδιασμό των έργων. Θα πρέπει να σημειωθεί ακόμη ότι τα ανωτέρω συμπεράσματα προκύπτουν από την ανάλυση αλληλεπίδρασης εδάφους και μεμονωμένου πάσσαλου. Οι περιπτώσεις

ομάδων πασσάλων, που κατά κύριο λόγο βρίσκουν πεδίο εφαρμογής, αποτελούν ακόμη πιο σύνθετη περίπτωση, σύμφωνα και με όσα αναφέρονται στην εισαγωγή του παρόντος. Το θέμα αυτό θα αποτελέσει το ιδιαίτερο αντικείμενο της επόμενης παραγράφου.

3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΡΝΗΤΙΚΩΝ ΤΡΙΒΩΝ ΣΕ ΟΜΑΔΕΣ ΠΑΣΣΑΛΩΝ

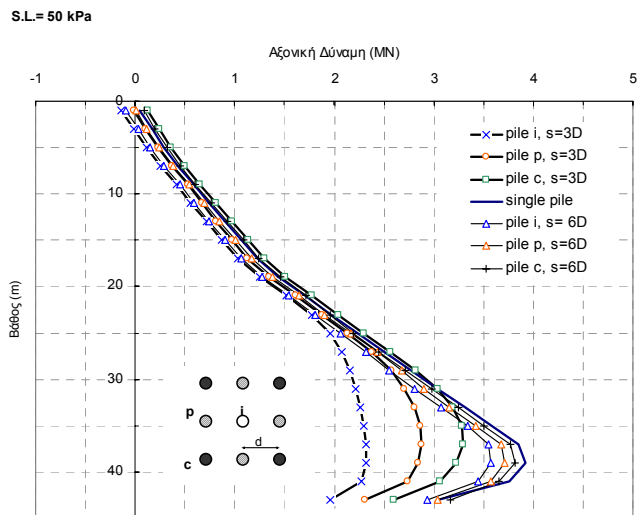
Η αποτίμηση των επιπτώσεων των αρνητικών τριβών σε ομάδες πασσάλων αποτελεί πιο σύνθετο θέμα από το αντίστοιχο του μεμονωμένου πάσσαλου, όπως αυτό παρουσιάζεται στην προηγούμενη παράγραφο. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στους πασσάλους της ομάδας, ανάλογα με τις οριακές συνθήκες στη κεφαλή τους (ελεύθερης ή πακτωμένης κεφαλής) μεταβάλλει την κατανομή των φορτίων και τις καθιζήσεις ανάλογα με τη θέση του πασσάλου στην ομάδα (Comodromos et al. 2003, Comodromos 2004). Ως αποτέλεσμα της δράσης αυτής οι εσωτερικοί πάσσαλοι ομάδας με πακτωμένη κεφαλή, στους οποίους δεν αναρτάται το περιβάλλον έδαφος, αναλαμβάνουν τελικά πρόσθετες δυνάμεις. Είναι κατανοητό ότι η σύνθετη αυτή δράση, ανάλογα και με τις οριακές συνθήκες στη κεφαλή, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των επιπτώσεων στους εξωτερικούς πασσάλους.

Για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων των αρνητικών τριβών σε ομάδες πασσάλων πακτωμένων σε ενιαίο κεφαλόδεσμο πραγματοποιήθηκε τριδιάστατη μη γραμμική ανάλυση με χρήση του προγράμματος FLAC^{3D}. Ο κάρναβος ανάλυσης δίνεται στο Σχήμα 6 και περιλαμβάνει ομάδα σε διάταξη 3*3 με πασσάλους διαμέτρου $D=3.0$ m, μήκους 45.0 m. Πραγματοποιήθηκαν δύο επιλύσεις. Κατά την πρώτη η αξονική απόσταση των πασσάλων ήταν 3.0D ενώ κατά τη δεύτερη αυξήθηκε σε 6.0D. Το προσομοίωμα περιλαμβάνει 8763 στοιχεία, 9961 κόμβους και 7766 στοιχεία διεπιφάνειας. Οι διαστάσεις του προσομοιώματος λήφθηκαν ιδιαίτερα μεγάλες έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί κάθε επίπτωση από τις οριακές συνθήκες στην υπολογιστική διαδικασία. Πρώτη επίλυση απετέλεσε η εφαρμογή επιφανειακού φορτίου 50 kPa και για τις δύο διατάξεις. Στο Σχήμα 7 δίνεται η κατανομή της αξονικής επιβάρυνσης για τους ακραίους, περιμετρικούς και κεντρικούς πασσάλους, καθώς και για τον μεμονωμένο πάσσαλο.



Σχήμα 6. Κάνναβος πεπερασμένων διαφορών ομάδας πασσάλων σε πολυστρωματικό έδαφος.
Figure 6. Finite difference mesh of pile group in multilayered soil.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για διατάξεις με μεγάλη αξονική απόσταση, ο βαθμός αλληλεπίδρασης μειώνεται (Comodromos, 2004). Σε αυτό το γεγονός θα πρέπει να αποδοθεί η διαφοροποίηση της αξονικής δύναμης των πασσάλων των δύο όμοιας διάταξης ομάδων πασσάλων, αλλά με διπλάσια αξονική απόσταση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 1. Παρατηρείται ότι, για τη συχνά εφαρμοζόμενη απόσταση πασσάλων 3.0D, οι επιπτώσεις των αρνητικών τριβών είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε ομάδα πασσάλων με ενιαίο κεφαλόδεσμο απ'ότι σε ομάδα με πασσάλους ελεύθερης κεφαλής. Ειδικότερα, οι επιπτώσεις ομάδας είναι 41, 27 και 16% για τον εσωτερικό, τον περιμετρικό και το γωνιακό πάσσαλο. Η αύξηση της απόστασης των πασσάλων σε 6.0D οδηγεί σε σχεδόν αμελητέο ποσοστό, 9, 5 and 3%, για τους αντίστοιχους πασσάλους. Με στόχο τον προσδιορισμό των επιπτώσεων σε περίπτωση ανάλυσης λειτουργικότητας πραγματοποιήθηκαν πρόσθετες επιλύσεις για την ομάδα με αξονική απόσταση 3.0D, στην οποία παρατηρούνται μεγάλες επιπτώσεις. Οι επιλύσεις αφορούν στο συνδυασμό του επιφανειακού φορτίου 50 kPa και αξονικής δύναμης στην κεφαλή 40.5 MN (4.5 MN ανά πάσσαλο).



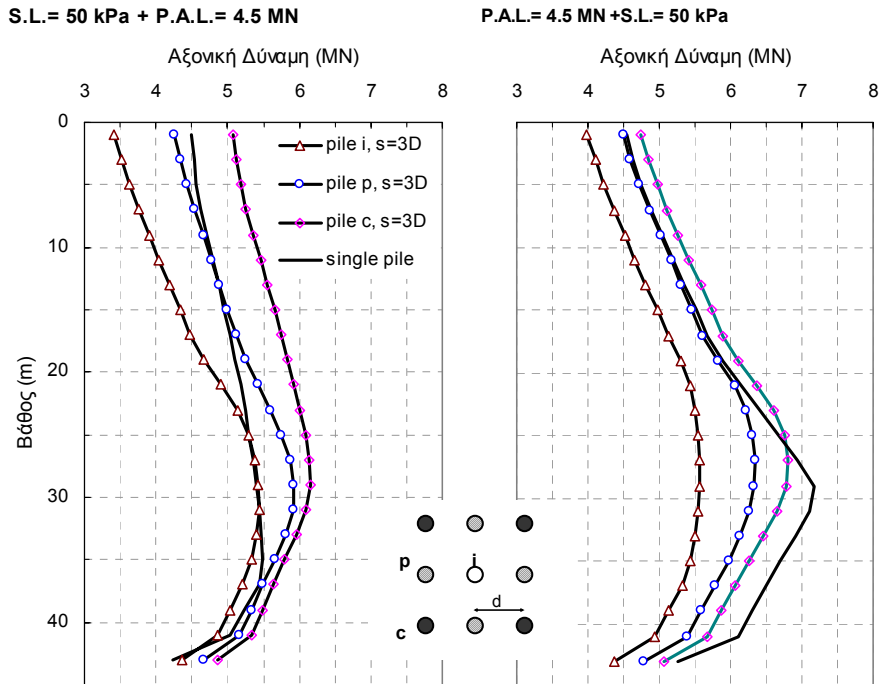
Σχήμα 7. Κατανομή αξονικής δύναμης για επιφανειακό φορτίο 50 KPa σε ομάδα 3*3.
Figure 7. Dragload distribution for a S.L. of 50 kPa, 3*3 group and spacing 3.0D and 6.0D.

Σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναφερθεί στην ανάλυση μεμονωμένου πασσάλου, η κατασκευή του επιχώματος πριν την ανάληψη του φορτίου λειτουργίας οδηγεί σε μικρότερες συνολικά αξονικές δυνάμεις. Στο Σχήμα 8α δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης κατά την οποία εφαρμόζεται πρώτα το φορτίο του επιχώματος και στη συνέχεια το φορτίο κεφαλής. Η αναπτυσσόμενη μέγιστη αξονική δύναμη στον κεντρικό πάσσαλο είναι ίδιας τάξης με αυτήν του μεμονωμένου πασσάλου, ενώ στον περιμετρικό και ακραίο πάσσαλο οι δυνάμεις είναι αισθητά μεγαλύτερες. Ειδικότερα, αναπτύσσονται δυνάμεις 5.44, 5.92 και 6.15 MN, στον κεντρικό, τον περιμετρικό και τον ακραίο πάσσαλο αντίστοιχα, ενώ η μέγιστη τιμή στον μεμονωμένο είναι 5.48 MN.

Η άθροιση των φορτίων των εννέα πασσάλων της ομάδας οδηγεί σε συνολικό φορτίο 53.7 MN, ήτοι 33% μεγαλύτερο από το συνολικό φορτίο κεφαλής των 40.5 MN. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην ανάπτυξη των αρνητικών τριβών και θα πρέπει να ληφθεί υπόψη για την εξασφάλιση του προβλεπόμενου συντελεστή ασφαλείας έναντι θραύσης. Σημαντικές επιπτώσεις προκύπτουν επίσης και για τη δυσκαμψία των ελατηριακών σταθερών προσομοίωσης της απόκρισης των πασσάλων σε κατακόρυφα φορτία. Χωρίς την ανάπτυξη αρνητικών τριβών η ελατηριακή σταθερά, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της εφαρμοζόμενης δύναμης προς τη βύθιση είναι ίση με 1.23 GN/m. Η ανάπτυξη αρνητικών τριβών λόγω του επιχώματος των 50 kPa οδηγεί σε καθίζηση της κεφαλής των

πασσάλων κατά 45 mm και η αντίστοιχη αξονική δυσκαμψία είναι ίση με 0.9 GN/m. Ως επίπτωση των αρνητικών τριβών κατά συνέπεια προκύπτει μείωση της δυσκαμψίας

κατά 27%. Ας σημειωθεί ότι το ποσοστό αυτό είναι σημαντικά μικρότερο απ'ότι στην περίπτωση μεμονωμένου πασσάλου όπου ο μειωτικός συντελεστής ανέρχεται σε 76%.



Σχήμα 8. Κατανομή αξονικής δύναμης για συνδυασμό επιφανειακού φορτίου (S.L.) και φορτίου λειτουργίας (P.A.L.): (α) εφαρμογή S.L.=50 KPa και στη συνέχεια P.A.L.=4.5 MN, (β) αντιστροφή. Figure 8. Axial force distribution for the combination of surface load (S.L.) and working load (P.A.L.): (a) application of S.L.= 50 kPa and then P.A.L.=4.5 MN, (b) inverse sequence.

Πίνακας 1. Πρόβλεψη αξονικής δύναμης και επίπτωσης ομάδας πασσάλων με ενιαίο κεφαλόδεσμο Table 1. Predicted dragload and group effect for piles in a fixed-head pile group

	Φορτίο ανά πάσσαλο (MN)	Καθίζηση κεφαλής (mm)	Μέγ. Φορτίο ομάδας (MN)	Δύναμη (MN), επίπτωση ομάδας (%)			Μεμονωμένος (MN)
				Ακράιος	Περιμετρικός	Εσωτερικός	
Επιφαν. Φορτ. 50 kPa, ομάδα 3*3 με s=3D	0		27.0	3.29 16%	2.88 27%	2.32 41%	3.92
Επιφαν. Φορτ. 50 kPa, ομάδα 3*3 με s=6D	0		33.7	3.82 3%	3.71 5%	3.58 9%	
				Μέγ. Αξον. (MN), γενική επίπτωση ομάδας (%)			
Επιφαν. Φορτ. 50 kPa, ομάδα 3*3 με s=3D	4.5 ¹	45.3	53.7	6.15	5.92	5.44	5.48
				133%			
Επιφαν. Φορτ. 50 kPa, ομάδα 3*3 με s=3D	4.5 ²	45.9	57.9	6.80	6.30	5.55	4.5
				143%			
Ομάδα 3*3 με s=3D, (Comodromos, 2003)	4.5	33	40.5	5.22 116% ³	4.19 93% ³	2.79 62% ³	

Επιβεβαιώνεται κατά συνέπεια ότι οι επιπτώσεις των αρνητικών τριβών στην ομάδα είναι σημαντικά μικρότερες απ'ότι στον μεμονωμένο πάσσαλο. Η άθροιση των

φορτίων των εννέα πασσάλων της ομάδας οδηγεί σε συνολικό φορτίο 53.7 MN, ήτοι 33% μεγαλύτερο από το συνολικό φορτίο κεφαλής των 40.5 MN. Σημαντικές επιπτώσεις

προκύπτουν επίσης και για τη δυσκαμψία των ελατηριακών σταθερών προσομοίωσης της απόκρισης των πασσάλων σε κατακόρυφα φορτία. Χωρίς την ανάπτυξη αρνητικών τριβών η ελατηριακή σταθερά, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της εφαρμοζόμενης δύναμης προς την βύθιση είναι ίση με 1.23 GN/m. Η ανάπτυξη αρνητικών τριβών λόγω του επιχώματος των 50 kPa οδηγεί σε καθίζηση της κεφαλής των πασσάλων κατά 45 mm και η αντίστοιχη αξονική δυσκαμψία είναι ίση με 0.9 GN/m (μείωση κατά 27%). Το ποσοστό αυτό είναι σημαντικά μικρότερο απ'ότι στην περίπτωση μεμονωμένου πασσάλου όπου ο μειωτικός συντελεστής ανέρχεται σε 76%. Η κατάσταση επιβαρύνεται όταν εφαρμοσθεί η αντίστροφη πορεία κατασκευής. Κατά την περίπτωση αυτή ο κεντρικός, ο περιμετρικός και ο ακραίος πάσσαλος αναλαμβάνουν δυνάμεις 5.55, 6.30 και 6.80 MN. Το συνολικά αναλαμβανόμενο φορτίο αυξάνεται σε 57.95 MN, ήτοι 43% μεγαλύτερο από το εφαρμοζόμενο των 40.5 MN. Οι καθιζήσεις της ομάδας παραμένουν εντούτοις οι ίδιες (45.3 και 45.9 mm).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο του παρόντος άρθρου απετέλεσε ο προσδιορισμός των επιπτώσεων των αρνητικών τριβών σε θεμελιώσεις με πασσάλους καθώς και αποτίμηση των επιπτώσεων αυτών στους επιμέρους πασσάλους της ομάδας. Τριδιάστατες μη γραμμικές αναλύσεις ομάδας πασσάλων επιβεβαίωσαν τα συμπεράσματα που αναφέρθηκαν για μεμονωμένο πάσσαλο περί υπερεκτίμησης των αναπτυσσόμενων αξονικών δυνάμεων όταν χρησιμοποιούνται απλοποιημένες προσεγγίσεις ή αναλύσεις γραμμικής ελαστικότητας. Οι επιπτώσεις της ομάδας στη μείωση της ανάπτυξης των αρνητικών τριβών είναι σημαντικές για τη συνήθως εφαρμοζόμενη απόσταση πασσάλων 3.0D, ενώ για αποστάσεις μεγαλύτερες των 6.0D η μείωση είναι πρακτικά αμελητέα και οι πάσσαλοι αναλαμβάνουν δυνάμεις ίδιας τάξης με αυτές του μεμονωμένου πάσσαλου. Η αλληλουχία επιβολής του φορτίου κεφαλής και της κατασκευής επιχώματος καθορίζουν ιδιαίτερα την απόκριση της θεμελίωσης. Η κατασκευή του επιχώματος μετά την επιβολή του φορτίου οδηγεί σε αύξηση της αναπτυσσόμενης αξονικής δύναμης.

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, θα συνιστούσε απερισκεψία η αλόγιστη χρήση των ποσοστών αυτών σε διαφορετικές εδαφικές συνθήκες και διατάξεις πασσάλων.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Combarieu O. (1985), 'Frottement négatif sur les pieux. Paris' Laboratoire Central des Ponts et Chaussées; Rapport de recherche LCPC, Paris, p. 136.
- Comodromos E, Anagnostopoulos C, Georgiadis M. (2003), 'Numerical assessment of axial pile group response based on load test', *Computers and Geotechnics*, Vol. 30 No. 6, pp 505-515.
- Comodromos E, Bareka S. (2005), 'Evaluation of Negative Skin Friction Effects in Pile Foundations Using 3D Nonlinear Analysis', *Computers and Geotechnics*, Vol. 32, No. 3, pp. 210-221.
- Comodromos E. (2004), 'Response Evaluation of Axially Loaded Fixed Head Pile Groups using 3D Nonlinear Analysis' *Soils and Foundations*, Vol. 44 No, 2, pp. 31-39.
- Fellenius B.H. (1972), 'Downdrag on long piles in clay due to negative skin friction', *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 9 No. 4, pp. 323-337
- Itasca Consulting Group Inc. FLAC^{3D}: Fast lagrangian analysis of continua. Minneapolis: User's manual , 2002.
- Jeong S. (1992), 'Nonlinear three dimensional analysis of downdrag on pile groups'. PhD thesis, Texas A & M University, USA.
- Kuwabara F. and Poulos H.G. (1989), 'Downdrag forces in group of piles', *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115 No. 6, pp. 806-818.
- Lee C.J., Bolton M.D. and Al-Tabbaa. (2002), 'Numerical modelling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations', *Géotechnique* Vol. 52 No. 5, pp. 325-335.
- Poorooshasb H.B., Alagmir M. and Miura N. (1996), 'Negative skin friction on Rigid and deformable piles', *Computers and Geotechnics* Vol. 18 No. 2, pp. 109-126.
- Poulos H.G. and Davis E.H. (1980), 'Pile foundation analysis and design', J. Wiley & Sons, Singapore, p. 397.