

Προσομοίωση της Συμπεριφοράς Εδαφών Βελτιωμένων με Χαλικοπασσάλους

Modeling the Behavior of Soil Improved by Stone Columns

ΑΝΔΡΕΟΥ, Π. Μηχ. Μεταλλείων, DEA Γεωτεχνική Μηχ. (ENPC), Υ/Δ Σχολής Πολ. Μηχ. ΕΜΠ
ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ, Β. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Τομέας Γεωτεχνικής ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων για τον προσδιορισμό της επιρροής βασικών παραμέτρων σχεδιασμού των χαλικοπασσάλων στο ενισχυμένο έδαφος, έτσι ώστε να προκύψουν ορισμένα πρακτικά συμπεράσματα για το βέλτιστο και οικονομικότερο σχεδιασμό της θεμελίωσης επί βελτιωμένου εδάφους. Ειδικότερα, μελετάται με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων η επιρροή πλάκας θεμελίωσης, η οποία υπέρκειται του ενισχυμένου εδάφους, στο σύνολο των καθιζήσεων. Ακολουθεί σύγκριση με αναλυτικές μεθόδους.

ABSTRACT : The main objective of this study is to examine the influence of important factors on the design of stone columns and to obtain some practical results. The parametric investigation of the behaviour of a stone column unit cell with the use of finite elements is presented in this study. More specifically, the influence of a mat foundation, that overlies the improved soil, on the total settlements is analyzed. The results of the analyses are compared to analytical solutions.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνική των χαλικοπασσάλων έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα τα τελευταία χρόνια για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του εδάφους θεμελίωσης (Dhouib & Blondeau, 2005). Συνήθως, για την κατασκευή χαλικοπασσάλων μέσα σε αργιλικό μαλακό υπέδαφος, ένας συνδυασμός δόνησης και εκτόξευσης νερού οδηγεί στη διάνοιξη φρεάτων, τα οποία στη συνέχεια γεμίζονται με χονδροί χάλικες, που συμπυκνώνονται με τη βοήθεια του δονητή κατά τη σταδιακή ανάσυρσή του από το φρέαρ (Priebe, 1976, Λεβέντης, 1988).

Προκειμένου για αργιλικά εδάφη, παρατηρείται επιτάχυνση της εξέλιξης του φαινομένου της πρωτογενούς στερεοποίησης, μέσω της δυνατότητας δημιουργίας οριζόντιας ροής του ύδατος των πόρων και αντίστοιχης μείωσης των υπερπίεσών του. Επίσης επιτυγχάνεται μείωση του μεγέθους των καθιζήσεων, δεδομένου ότι η ακαμψία των χαλικοπασσάλων είναι μεγαλύτερη από εκείνη

της περιβάλλουσας εδαφικής μάζας και βελτίωση της διατμητικής αντοχής των μαλακών αργιλικών στρώσεων, με αντίστοιχη αύξηση των συντελεστών ασφάλειας έναντι μηχανισμών θραύσης (Μιχάλης κ.α., 2001, Barksdale & Bachus, 1983).

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς ενισχυμένου εδάφους με χαλικοπασσάλους και η σύγκριση των καθιζήσεων στις περιπτώσεις εύκαμπτης και δύσκαμπτης επιφάνειας φόρτισης.

Αρχικώς, γίνεται συνοπτική περιγραφή της συγκεκριμένης μεθόδου βελτίωσης υπεδάφους και δίνονται οι βασικές παράμετροι διαστασιολόγησής της. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων και προκύπτουν ορισμένα πρακτικά συμπεράσματα για το βέλτιστο και οικονομικότερο σχεδιασμό της θεμελίωσης επί βελτιωμένου εδάφους. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με την αναλυτική μεθοδολογία του Priebe (1995).

Το προτεινόμενο προσομοίωμα γίνεται με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, όπου χρησιμοποιείται αξονοσυμμετρικό μοντέλο,

δηλαδή προσομοιώνεται ένας συγκεκριμένος χαλικοπάσσαλος και η ζώνη επιρροής του. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά τόσο του πασσάλου όσο και του περιβάλλοντος αργιλικού εδάφους και της άκαμπτης πλάκας θεμελίωσης παραμένουν σταθερά, ενώ μεταβάλλεται το ποσοστό αντικατάστασης του εδάφους $\alpha_s = 0.0625, 0.0816, 0.111, 0.16, 0.1975$ και η επιβαλλόμενη τάση $\sigma_o = 50, 80, 100$ kPa. Με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων προέκυψαν διαγράμματα μεταβολής της αδιάστατης παραμέτρου (s/s_o), όπου (s) και (s_o) οι καθιζήσεις με και χωρίς βελτίωση του εδάφους αντίστοιχα, συναρτήσει τόσο του ποσοστού αντικατάστασης όσο και της επιβαλλόμενης τάσης για περιοχή βελτίωσης με εύκαμπτη και δύσκαμπτη επιφάνεια φόρτισης.

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

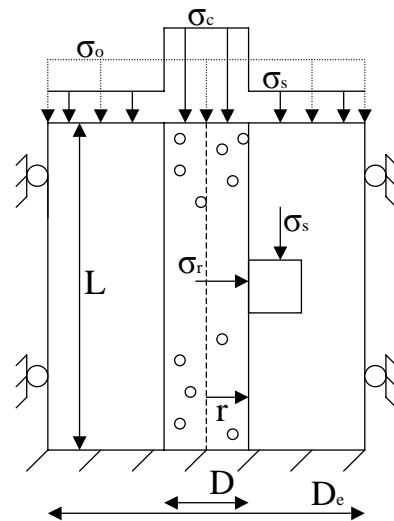
Οι παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό βελτίωσης και την κατανομή των φορτίων είναι η διάμετρος των χαλικοπασσάλων (D) και η μεταξύ τους απόσταση, η γωνία εσωτερικής τριβής του κοκκώδους υλικού του χαλικοπασσάλου (ϕ_c), η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους (c_u) και η σχέση τάσεων παραμορφώσεων των εδαφικών υλικών.

Οι χαλικοπάσσαλοι εγκαθίστανται συνήθως στις κορυφές εξαγωνικού, τριγωνικού ή τετραγωνικού καννάβου. Η επιφάνεια επιρροής του κάθε χαλικοπασσάλου μπορεί να θεωρηθεί ως μια ισοδύναμη κυλινδρική επιφάνεια με διάμετρο (D_e) της πραγματικής περιοχής του περιβάλλοντος εδάφους που αντιστοιχεί σε κάθε χαλικοπάσσαλο (Σχήμα 1). Η τάση (εκ κατανομής) που ασκείται στο περιβάλλον έδαφος είναι (σ_s), η τάση (εκ κατανομής) που ασκείται στην κεφαλή του χαλικοπασσάλου είναι (σ_o) και (L) το μήκος του.

Ο λόγος που εκφράζει το ποσοστό αντικατάστασης του εγγενούς εδάφους από το κοκκώδες υλικό ορίζεται ως συντελεστής αντικατάστασης εδάφους και είναι:

$$\alpha_s = \frac{A_c}{A} = \frac{A_c}{A_c + A_s} = \left(\frac{D}{D_e}\right)^2 \quad (1)$$

όπου $A_c = \pi D^2/4$, η επιφάνεια του χαλικοπασσάλου και A_s ($A = A_c + A_s = \pi D_e^2/4$), η επιφάνεια του εδάφους που περιβάλλει το χαλικοπάσσαλο.



Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση χαλικοπασσάλου

Figure 1. Graphic representation of a stone column.

Κατά τη φόρτιση του σύνθετου εδάφους, παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων στο χαλικοπάσσαλο ενώ αντίθετα, αποτόνωση των τάσεων στο περιβάλλον έδαφος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη ακαμψία του χαλικοπασσάλου. Σύμφωνα με την υπόθεση της ελαστικής συμπεριφοράς και των δύο υλικών, ο χαλικοπάσσαλος θα εμφανίζει την ίδια καθίζηση με το περιβάλλον έδαφος:

$$s_{soil} = s_{column} \Rightarrow \frac{\sigma_s}{E_{s,s}} \cdot L = \frac{\sigma_c}{E_{s,c}} \cdot L \Rightarrow \frac{\sigma_c}{\sigma_s} = \frac{E_{s,c}}{E_{s,s}} = n \quad (2)$$

όπου (s_{soil}), ($E_{s,s}$) η καθίζηση του περιβάλλοντος εδάφους και το μέτρο ελαστικότητάς του και (s_{column}), ($E_{s,c}$) τα αντίστοιχα μεγέθη του χαλικοπασσάλου. Ορίζεται λοιπόν ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων (n) ως ο λόγος της κατανομής του κατακόρυφου φορτίου μεταξύ των δύο στοιχείων. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από τη σχετική ακαμψία του χαλικοπασσάλου και του εδάφους. Οι τιμές που έχουν προταθεί είναι συνήθως από 2 έως 6.

Από την ισορροπία των κατακόρυφων δυνάμεων προκύπτει:

$$\sigma_c = n \cdot \sigma_s = n \cdot \left(\frac{\sigma_o}{1 + (n-1) \cdot \alpha_s}\right) \quad (3)$$

Η κατανομή αυτή των τάσεων αναπτύσσεται σταδιακά με την εξέλιξη του

φαινομένου της στερεοποίησης. Αρχικά, επικρατούν στο έδαφος αστράγγιστες συνθήκες και η συμπεριφορά του προσομοιάζεται με ασυμπύεστο υλικό. Στη συνέχεια, λόγω της ακτινικής ροής του νερού των πόρων προς το χαλικοπάσσαλο, έχουμε εκτόνωση της πίεσης των πόρων και κατά συνέπεια μεταβολή της ακαμψίας. Όσο εκτονώνονται οι πιέσεις των πόρων τόσο αυξάνει η σχετική ακαμψία χαλικοπασσάλου-εδάφους (Han J. & Ye S. L., 2001).

Το κοκκώδες υλικό των χαλικοπασσάλων τους καθιστά πιο δύσκαμπτους από το έδαφος και μάλιστα η δυσκαμψία τους αυτή εξαρτάται από την πλευρική παρεμπόδιση του περιβάλλοντος εδάφους. Αν το επιβαλλόμενο φορτίο αυξηθεί τόσο ώστε η αναπτυσσόμενη πλευρική πίεση να είναι ανεπαρκής τότε η αντοχή του υλικού του χαλικοπασσάλου εξαντλείται και επέρχεται αστοχία υπό μορφή πλευρικής διόγκωσης. Η πλευρική πίεση που ασκεί το έδαφος αυξάνεται με το βάθος, οπότε η μορφή αυτής της αστοχίας εμφανίζεται στο ανώτερο τμήμα του χαλικοπασσάλου. Η αστοχία αυτή παρουσιάζεται τόσο σε χαλικοπασσάλους αιχμής όσο και σε αιωρούμενους με μήκος μεγαλύτερο από τέσσερις έως έξι φορές τη διάμετρό τους (Barksdale & Bachus, 1983). Η συμπεριφορά του χαλικοπασσάλου σε αμιγώς αργιλικό στρώμα είναι ανάλογη εκείνης μη-συνεκτικού εδαφικού στοιχείου υπό αξονοσυμμετρική συμπίεση όπου η πλευρική τάση είναι ίση με τη μέγιστη πλευρική αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους. Στην περίπτωση αυτή, η οριακή τάση στο χαλικοπάσσαλο (κάθετη ενεργός τάση αστοχίας) εκφράζεται από τη σχέση (Hughes & Withers, 1974, Soyez, 1985):

$$\sigma'_{c,lim} = K_{p,c} \cdot \sigma'_r \quad (4)$$

όπου ($\sigma'_{c,lim}$) η οριακή τάση αστοχίας του χαλικοπασσάλου, (σ'_r) η οριζόντια (μέγιστη) ενεργός τάση του εδάφους και ($K_{p,c}$) ο συντελεστής παθητικής ώθησης του υλικού του χαλικοπασσάλου. Ως προς τον υπολογισμό της μέγιστης οριζόντιας ενεργού τάσης του εδάφους, με βάση τα πειραματικά δεδομένα (Barksdale & Bachus, 1983), ορίζουμε άνω όριο των θεωρητικών προβλέψεων:

$$\sigma'_r = \sigma'_{ro} + 4 \cdot c_u \quad (5)$$

όπου (σ'_{ro}) η οριζόντια τάση που ασκείται στο χαλικοπάσσαλο σε κατάσταση ηρεμίας.

3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΠΛΑΚΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

Η μελέτη του βαθμού επίδρασης ή όχι της πλάκας θεμελίωσης στο σύνολο των καθιζήσεων πραγματοποιήθηκε μέσω εκτεταμένης σειράς παραμετρικών αναλύσεων με τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι αξονοσυμμετρικό και εξετάζεται η περίπτωση ενός πασσάλου και της αντίστοιχης επιφάνειας επιρροής του, η οποία εξαρτάται από το συντελεστή αντικατάστασης του εδάφους $\alpha_s = 0.0625, 0.0816, 0.111, 0.16, 0.1975$. Το ύψος του χαλικοπασσάλου θεωρήθηκε ίσο με 10 μέτρα και η πλάκα που εδράζεται πάνω στο βελτιωμένο έδαφος θεωρήθηκε αβαρής, για λόγους ευκρίνειας των αποτελεσμάτων και με ακαμψία ισοδύναμη με αυτήν πλάκας ενός μέτρου. Στην επιβαλλόμενη τάση δόθηκαν οι τιμές $\sigma_o = 50, 80, 100$ kPa.

Οι γεωτεχνικές παράμετροι της αργιλικής στρώσης και του υλικού του χαλικοπασσάλου που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Γεωτεχνικές παράμετροι παραμετρικών αναλύσεων

Table 1. Geotechnical parameters used in the parametric study.

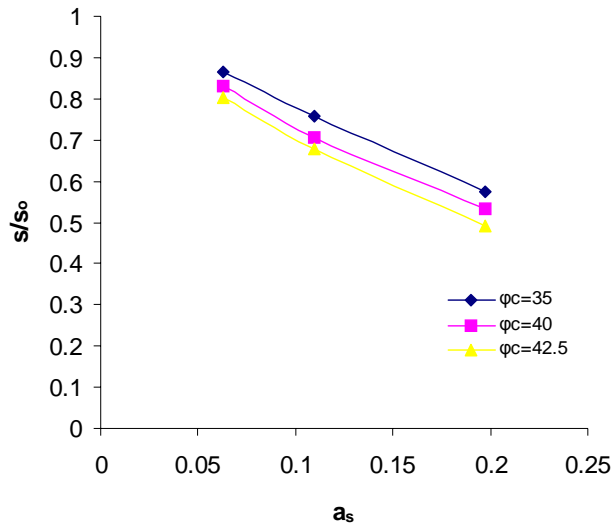
	γ_{dry} (kN/m ³)	γ (kN/m ³)	$K_x=K_y$ (m/day)	E (Mpa)	ν	c' (kN/m ²)	ϕ'
Αργίλος	16	18	0.0001	2.5	0.33	15	20
Χαλίκι	18	20	100	75	0.25	0.5	40

Για την ανάλυση της συμπεριφοράς, τόσο του υλικού των χαλικοπασσάλων όσο και του αργιλικού εδάφους επιλέχθηκε το προσομοίωμα του γραμμικώς ελαστικού-ιδεατά πλαστικού υλικού κατά Mohr-Coulomb.

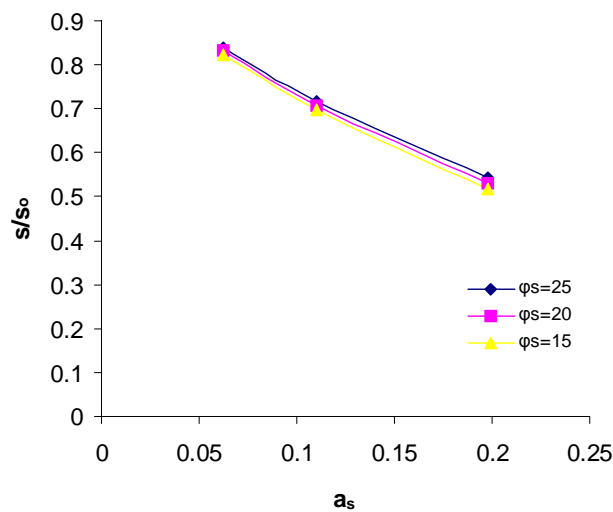
Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται πλάκα θεμελίωσης (δύσκαμπτη επιφάνεια φόρτισης), οι καθιζήσεις εμφανίζονται ομοιόμορφα κατανομημένες. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή δεν χρησιμοποιείται πλάκα θεμελίωσης (εύκαμπτη επιφάνεια φόρτισης), οι καθιζήσεις της αργιλικής στρώσης είναι κατά πολύ μεγαλύτερες του χαλικοπασσάλου. Συγκρίνοντας όμως τις δύο περιπτώσεις, παρατηρούμε ότι οι μέγιστες καθιζήσεις είναι μεγαλύτερες όταν δεν χρησιμοποιείται πλάκα θεμελίωσης.

Αρχικά, υπολογίστηκε η επιρροή της γωνίας εσωτερικής τριβής τόσο του υλικού του χαλικοπασσάλου (ϕ_c) όσο και της αργίλου (ϕ_s), χωρίς πλάκα θεμελίωσης, σε διαγράμματα μεταβολής της αδιάστατης παραμέτρου (s/s_o), συναρτήσεως του ποσοστού αντικατάστασης

(Σχήμα 2, Σχήμα 3). Είναι φανερό ότι η μεταβολή της (φ_c) επηρεάζει περισσότερο τις μέγιστες καθιζήσεις.



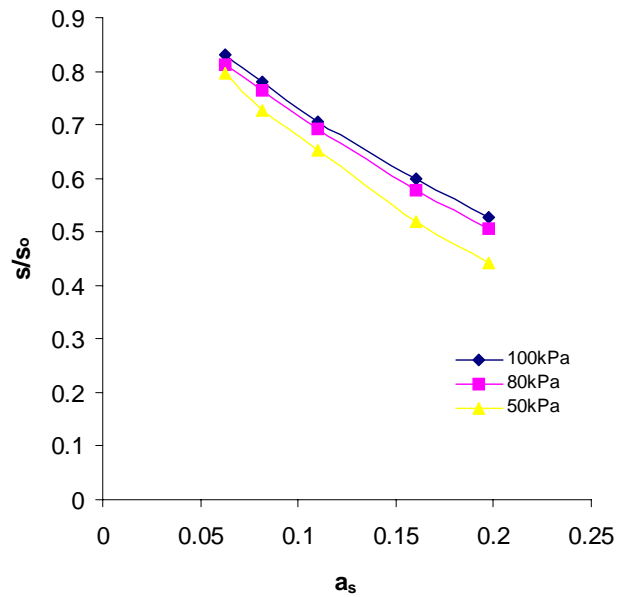
Σχήμα 2. Μεταβολή του λόγου s/s_0 , συναρτήσεως του ποσοστού αντικατάστασης για μεταβαλλόμενη (φ_c) ($\varphi_s=20^\circ$, $\sigma_0=100\text{kPa}$)
Figure 2. Variation of the s/s_0 ratio as a function of a_s for different values of the stone column friction angle ($\varphi_s=20^\circ$, $\sigma_0=100\text{kPa}$).



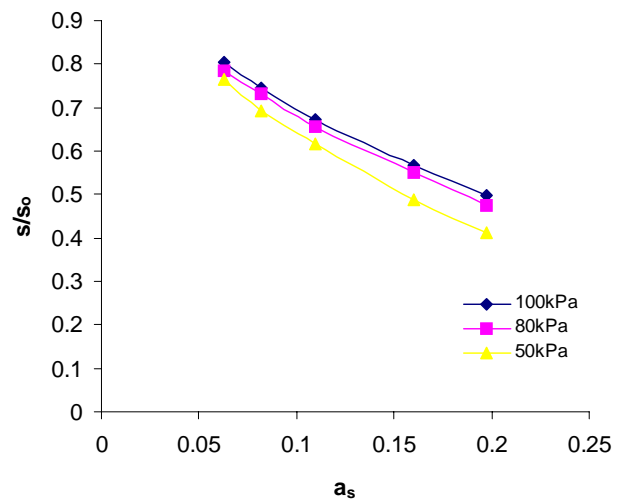
Σχήμα 3. Μεταβολή του λόγου s/s_0 , συναρτήσεως του ποσοστού αντικατάστασης για μεταβαλλόμενη (φ_s) ($\varphi_c=40^\circ$, $\sigma_0=100\text{kPa}$)
Figure 3. Variation of the s/s_0 ratio as a function of a_s for different values of the soil friction angle ($\varphi_c=40^\circ$, $\sigma_0=100\text{kPa}$).

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επιρροή της επιβαλλόμενης τάσης με ή χωρίς πλάκα θεμελίωσης (Σχήμα 4, Σχήμα 5). Είναι φανερό και στις δύο περιπτώσεις ότι όσο αυξάνεται η

επιβαλλόμενη τάση ή μειώνεται ο συντελεστής αντικατάστασης, οι καθιζήσεις αυξάνουν.



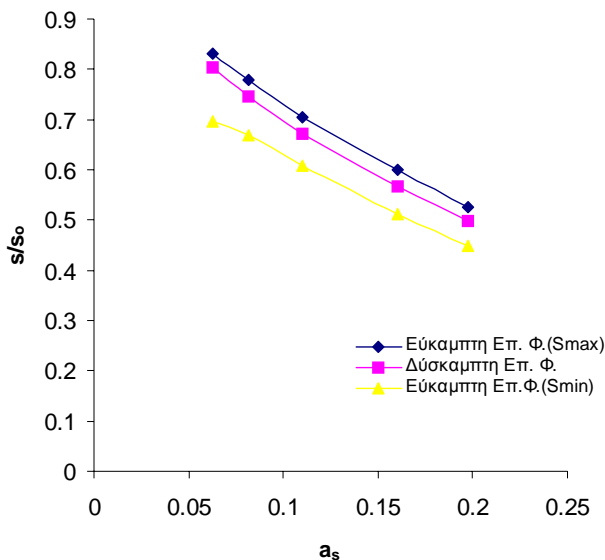
Σχήμα 4. Εύκαμπτη επιφάνεια φόρτισης. Μεταβολή του λόγου s/s_0 , συναρτήσεως του ποσοστού αντικατάστασης για μεταβαλλόμενη επιβαλλόμενη τάση
Figure 4. Flexible loading surface. Variation of the s/s_0 ratio as a function of a_s for different values of imposed stress (σ_0).



Σχήμα 5. Δύσκαμπτη επιφάνεια φόρτισης. Μεταβολή του λόγου s/s_0 , συναρτήσεως του ποσοστού αντικατάστασης για μεταβαλλόμενη επιβαλλόμενη τάση
Figure 5. Rigid loading surface. Variation of the s/s_0 ratio as a function of a_s for different values of imposed stress (σ_0).

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η σύγκριση που έγινε μέσω των παραμετρικών αναλύσεων

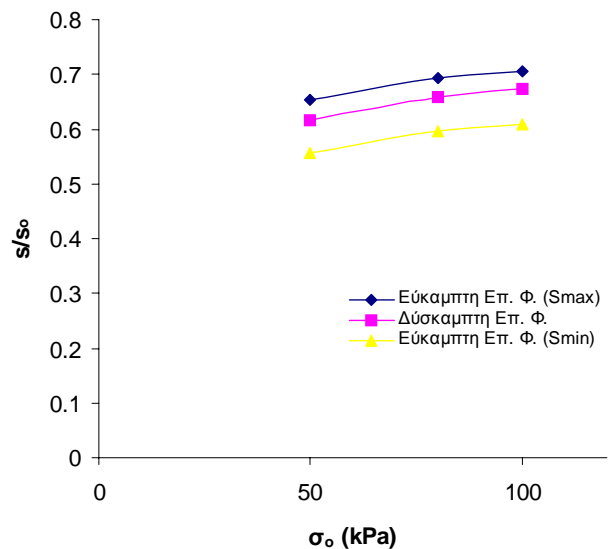
στην επιρροή των καθιζήσεων, ή αλλιώς του λόγου s/s_0 , στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται πλάκα θεμελίωσης, καθώς και στην περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται, συναρτήσει του (a_s) για σταθερή επιβαλλόμενη τάση ($\sigma_0=100\text{kPa}$). Για εύκαμπτη επιφάνεια φόρτισης, παρουσιάζονται εκτός από τις μέγιστες καθιζήσεις (s_{max}) που παρατηρούνται στην άργιλο και οι ελάχιστες καθιζήσεις (s_{min}) που εμφανίζονται στο χαλικοπάσσαλο. Από το Σχήμα 6 προκύπτει ότι οι καθιζήσεις στην περίπτωση της δύσκαμπτης επιφάνειας βρίσκονται ανάμεσα στις μέγιστες και τις ελάχιστες καθιζήσεις της εύκαμπτης επιφάνειας φόρτισης. Επίσης, στην περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται πλάκα θεμελίωσης οι μέγιστες καθιζήσεις είναι σημαντικότερες από την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται. Στη συνέχεια, η σύγκριση των καθιζήσεων θα γίνεται με τις μέγιστες τιμές τους.



Σχήμα 6. Σύγκριση λόγου καθιζήσεων δύσκαμπτης και εύκαμπτης επιφάνειας φόρτισης ($\sigma_0=100\text{kPa}$)
Figure 6. Comparison of the s/s_0 ratio for rigid and flexible loading surface ($\sigma_0=100\text{kPa}$).

Στη συνέχεια, (Σχήμα 7) γίνεται σύγκριση των καθιζήσεων, συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης για δεδομένο ποσοστό αντικατάστασης ($a_s=0,11$). Η τιμή του συγκεκριμένου λόγου είναι ενδεικτική και παρατηρείται σε αρκετές περιπτώσεις στην πράξη. Προκύπτει, όπως και προηγουμένως, ότι οι καθιζήσεις στην περίπτωση της δύσκαμπτης επιφάνειας φόρτισης βρίσκονται ανάμεσα στις μέγιστες (s_{max}) και τις ελάχιστες (s_{min}) καθιζήσεις της εύκαμπτης επιφάνειας

φόρτισης. Επίσης, στην περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται πλάκα θεμελίωσης οι μέγιστες καθιζήσεις είναι σημαντικότερες από την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται πλάκα θεμελίωσης.



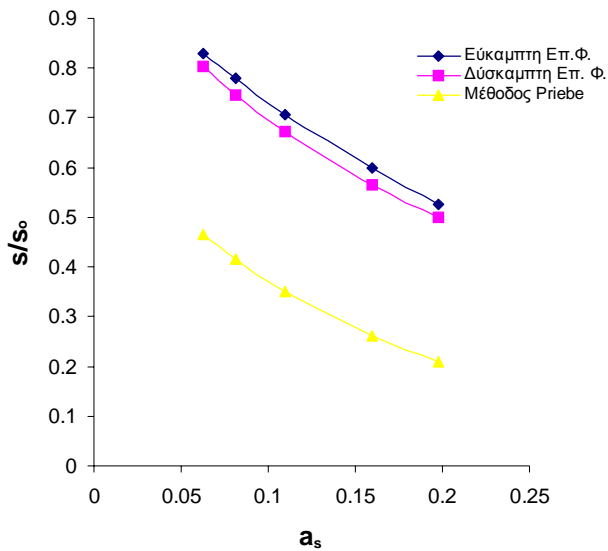
Σχήμα 7. Σύγκριση λόγου καθιζήσεων δύσκαμπτης και εύκαμπτης επιφάνειας φόρτισης ($a_s=0,11$)
Figure 7. Comparison of the s/s_0 ratio for rigid and flexible loading surface ($a_s=0,11$).

4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

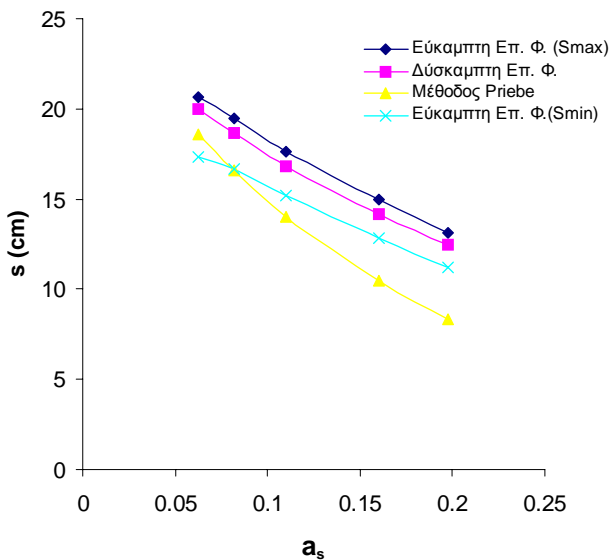
Η πιο διαδεδομένη αναλυτική μέθοδος υπολογισμού καθιζήσεων σε προβλήματα θεμελίωσης με χαλικοπάσσλους είναι η μέθοδος του Priebe (1995). Στο Σχήμα 8 γίνεται σύγκριση των αριθμητικών αναλύσεων με τη μέθοδο του Priebe (1995). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα παρατηρείται ότι δεν μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, καθώς οι αρχικές καθιζήσεις (s_0) που υπολογίζονται με τη μεθοδολογία του Priebe γίνονται μέσω ελαστικής ανάλυσης και είναι ιδιαίτερα υψηλές.

Για να αποφευχθεί το πρόβλημα της ελαστικής μεθόδου υπολογισμού των αρχικών καθιζήσεων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 9 η ίδια σύγκριση, μόνο που χρησιμοποιείται απευθείας το μέγεθος των τελικών καθιζήσεων. Είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα στο συγκεκριμένο σχήμα είναι πλέον συγκρίσιμα.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για διαφορετικές (σ_0) τόσο στην περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται πλάκα θεμελίωσης (Σχήμα 10) όσο και στην περίπτωση όπου γίνεται χρήση της (Σχήμα 11).



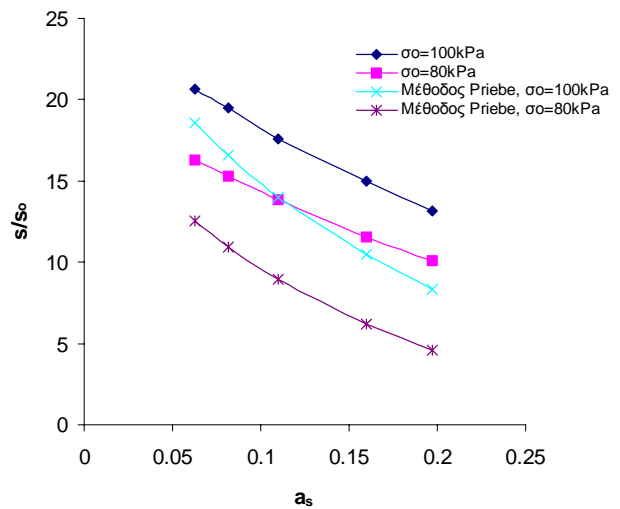
Σχήμα 8. Σύγκριση λόγου καθιζήσεων αναλυτικής και αριθμητικής μεθόδου ($\sigma_0=100\text{kPa}$)
Figure 8. Comparison of analytical and numerical results of the s/s_0 ratio ($\sigma_0=100\text{kPa}$).



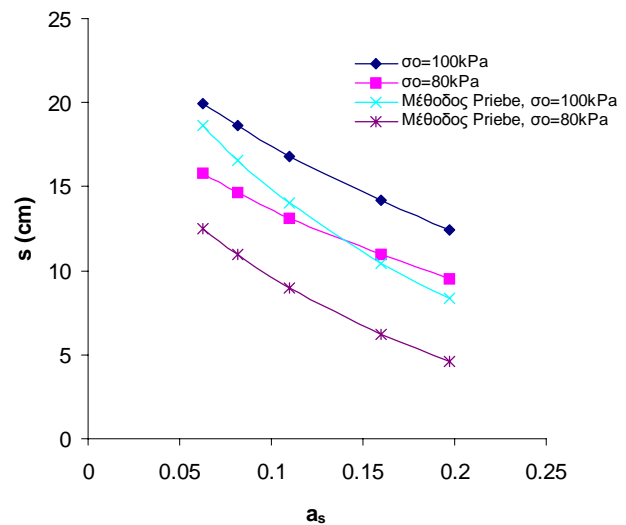
Σχήμα 9. Σύγκριση καθιζήσεων αναλυτικής και αριθμητικής μεθόδου ($\sigma_0=100\text{kPa}$)
Figure 9. Comparison of analytical and numerical results of the settlements ($\sigma_0=100\text{kPa}$).

Τόσο στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 10) όσο και στη δεύτερη (Σχήμα 11), οι καθιζήσεις που προκύπτουν από την ανάλυση με τη μέθοδο του Priebe είναι μικρότερες σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από την αριθμητική ανάλυση. Βέβαια, στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται δύσκαμπτη επιφάνεια φόρτισης η διαφορά αυτή γίνεται μικρότερη όπως και στις περιπτώσεις μικρών (a_s) είτε

χρησιμοποιείται εύκαμπτη είτε δύσκαμπτη επιφάνεια φόρτισης.



Σχήμα 10. Εύκαμπτη επιφάνεια φόρτισης. Σύγκριση καθιζήσεων αναλυτικής και αριθμητικής μεθόδου για διαφορετικές επιβαλλόμενες τάσεις
Figure 10. Flexible loading surface. Comparison of analytical and numerical results for different values of imposed stress (σ_0).



Σχήμα 11. Δύσκαμπτη επιφάνεια φόρτισης. Σύγκριση καθιζήσεων αναλυτικής και αριθμητικής μεθόδου για διαφορετικές επιβαλλόμενες τάσεις
Figure 11. Rigid loading surface. Comparison of analytical and numerical results for different values of imposed stress (σ_0).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα παραπάνω μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν το

σύνολο των καθιζήσεων σε περιπτώσεις θεμελίωσης με χαλικοπασσάλους και χρήσης ή όχι πλάκας θεμελίωσης. Στην πρώτη περίπτωση, οι καθιζήσεις εμφανίζονται να κατανέμονται ομοιόμορφα. Στην αντίθετη περίπτωση, οι καθιζήσεις της αργιλικής στρώσης είναι πολύ μεγαλύτερες του χαλικοπασσάλου. Προκύπτει ότι οι καθιζήσεις στην περίπτωση της δύσκαμπτης επιφάνειας φόρτισης βρίσκονται ανάμεσα στις μέγιστες και τις ελάχιστες καθιζήσεις της εύκαμπτης επιφάνειας φόρτισης.

Παρατηρήθηκε αρχικά ότι η μεταβολή της (φ_c) επηρεάζει περισσότερο τις μέγιστες καθιζήσεις από ότι η μεταβολή της (φ_s).

Επίσης, τόσο στην περίπτωση εύκαμπτης όσο και στην περίπτωση δύσκαμπτης επιφάνειας φόρτισης, η αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης ή η μείωση του συντελεστή αντικατάστασης οδηγούν στην αύξηση των καθιζήσεων.

Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση αναλυτικών με αριθμητικές μεθόδους και παρατηρήθηκε ότι εφόσον οι αρχικές καθιζήσεις (s_0) που υπολογίζονται με την πρώτη μέθοδο γίνονται μέσω ελαστικής ανάλυσης είναι ιδιαίτερα υψηλές, σε σχέση με τη δεύτερη. Επίσης, οι καθιζήσεις που προκύπτουν από τη μεθοδολογία του Priebe είναι μικρότερες σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από την παραμετρική ανάλυση. Βέβαια, στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται δύσκαμπτη επιφάνεια φόρτισης η διαφορά αυτή γίνεται μικρότερη όπως και στις περιπτώσεις μικρών συντελεστών αντικατάστασης είτε χρησιμοποιείται εύκαμπτη είτε δύσκαμπτη επιφάνεια φόρτισης.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Barksdale R.D, Bachus R.C. (December 1983), "Design and construction of stone columns". Vol. I, FHA, pp. 210.

Dhouib A. et Blondeau F. (2005), "Colonnes Ballastées". Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 264p.

Hughes J. M. O., Withers N. J. (1974), "Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns". Ground Engineering, n° 3, Vol. 7, pp. 42-49.

Han J., Ye S. L. (2001), "Simplified method for consolidation rate of stone column reinforced foundations". Journal of Geotechnical and

Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 7, pp 597-603.

Priebe, H.J. (1976), "Abschätzung des Setzungsverhaltens eines durch Stopfverdichtung verbesserten Baugrundes". Bautechnik Vol. 53, p.p. 160-162.

Priebe, H. J. (1995), "The design of vibro replacement". Keller Grundbau GmbH, Offenbach, Germany, pp. 1-16.

Soyez B. (1985), "Méthodes de dimensionnement des colonnes ballastées". Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 135. Paris, pp. 35-51.

Μιχάλης Η. Κ., Παπαδόπουλος Β. Π., Αναγνωστόπουλος Α. Γ. (2001), "Η χρήση χαλικοπασσάλων ως στοιχείων ενισχύσεως της διατμητικής αντοχής του εδάφους θεμελίωσης επιχωμάτων". 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Τόμος 1, σελ. 451-458.

Λεβέντης Ε. (1988), "Χαλικοπάσσαλοι: Κατασκευή και Έλεγχος". 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, Τόμος 2, σελ. 27-33.