

# Ανάλυση της Συμπεριφοράς Χαλικοπασσάλων

## Analysis of Stone Column behavior

Σ. ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ, Δρ. Πολ. Μηχανικός, Αν. Καθηγητής, Παν. Θεσσαλίας  
Α. ΣΤΕΦΑΝΑΤΟΥ, Μεταλλειολόγος Μηχανικός-Πολ. Μηχανικός ΕΜΠ  
Α. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ, Δρ. Πολ. Μηχανικός, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια προσομοίωσης της συμπεριφοράς ενός μαλακού αργιλικού σχηματισμού “ενισχυμένου” με χαλικοπασσάλους με την βοήθεια ενός ευρέως χρησιμοποιούμενου κώδικα πεπερασμένων διαφορών (FLAC<sup>3D</sup>). Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με μεταβλητές τέσσερις βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν έντονα την αλληλεπίδραση χαλικοπασσάλου-περιβάλλουσας γεωμάζας και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από εμπειρικές μεθόδους διαστασιολόγησης. Συμπεραίνεται ότι ο Συντελεστής Αντικατάστασης Εδάφους αποτελεί σημαντικότερη παράμετρο στην βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, καθώς συναρτάται άμεσα με τον έλεγχο των καθιζήσεων του συστήματος· στόχος αυτός προσεγγίζεται επαρκώς με τον συμβατικό σχεδιασμό κατά Priebe.

**ABSTRACT:** A usual soft soil reinforced with stone columns is investigated through parametric analyses using the Finite Difference code FLAC<sup>3D</sup>. On this goal four parameters of major importance in the design have been chosen and the numerical results are compared with the findings using conventional design methods. As evidenced from the analyses the Area Replacement Factor plays a major role in the optimization of the design, as it related strongly with the control of settlements, a goal which can be approached adequately by the Priebe design method.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η αυξημένη ανάγκη για την κατασκευή έργων Πολιτικού Μηχανικού σε συμπιεστά αργιλικά εδάφη οδήγησε στην υιοθέτηση τεχνικών οι οποίες αναβαθμίζουν τις συνθήκες θεμελίωσης, ώστε να είναι εφικτή η ασφαλής έδραση των έργων.

Η αρχή της τεχνικής των χαλικοπασσάλων ειδικότερα βασίζεται στην αντικατάσταση μέρους του in situ εδάφους (10% έως 35%) με γεωυλικό υψηλότερων χαρακτηριστικών (κυρίως αδρομερές), μέσω ανόρυξης κατακόρυφης κυλινδρικής οπής στο υπέδαφος και την εν συνεχεία πλήρωση της με άμμο (αμμοπάσσαλοι ή sand columns) ή χάλικες (χαλικοπάσσαλοι ή stone columns). Κατ’ αυτόν τον τρόπο η γεωμάζα μετατρέπεται σ’ ένα δυσκαμπτότερο “σύνθετο” υλικό, το οποίο αποτελείται από το αδρομερές κλάσμα υπό μορφήν

κυλίνδρων ανά αποστάσεις, όσο και από το εγγενές γεωυλικό στα ενδοδιαστήματα μεταξύ των χαλικοπασσάλων.

Αντικείμενο της εργασίας αυτής απετέλεσε η διερεύνηση μέσω παραμετρικών αναλύσεων της επιρροής που ασκούν βασικές παράμετροι σχεδιασμού των χαλικοπασσάλων στην απόκριση του “ενισχυμένου” εδάφους. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίνονται με τις εν χρήσει κλειστές αναλυτικές μεθόδους σχεδιασμού, εις τρόπον ώστε να προκύψουν πρακτικά συμπεράσματα που αφορούν στον βέλτιστο και οικονομικότερο σχεδιασμό της εδαφικής “βελτίωσης” με την εγκατάσταση χαλικοπασσάλων.

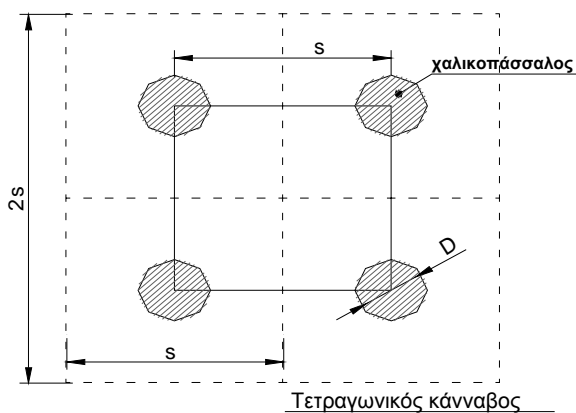
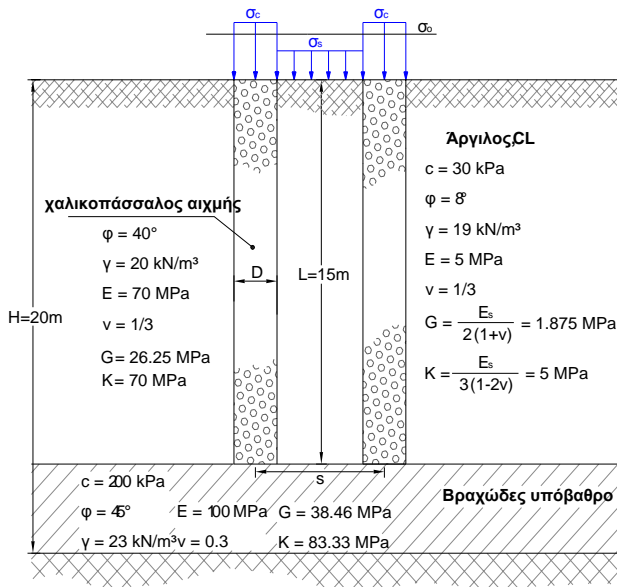
### 2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Για την διερεύνηση της συμπεριφοράς του ενισχυμένου με χαλικοπασσάλους αργιλικού εδά-

φους μορφώθηκε αναλυτικό προσομοίωμα αλληλεπίδρασης, η επίλυση του οποίου έγινε με την βοήθεια του γνωστού κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC<sup>3D</sup>.

Το προσομοίωμα συνίσταται σε ομάδα τεσσάρων χαλικοπασσάλων αιχμής με διάμετρο  $D$  και σταθερό μήκος  $L = 15.0\text{m}$ , σε τετραγωνική διάταξη με αξονική απόσταση  $s$ . Το έδαφος εγκατάστασης είναι συνήθης μαλακός αργιλικός σχηματισμός (CL) με παραμέτρους διατμητικής αντοχής  $c = 30\text{kPa}$  και  $\Phi = 8^\circ$ , μέτρο δε παραμόρφωσης  $E = 5\text{MPa}$ . Οι γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού των χαλικοπασσάλων, του περιβάλλοντος αργιλικού εδάφους, καθώς και η υιοθετούμενη γεωμετρία δίδονται στο Σχήμα 1.

Για την προσομοίωση της μη γραμμικής ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του γεωυλικού υιοθετήθηκε ο ελαστικός τέλεια πλαστικός καταστατικός νόμος Mohr-Coulomb σε συσχέτιση με μη-συζευγμένο κανόνα διαρροής.



Σχήμα 1. Γεωτεχνικά και γεωμετρικά στοιχεία του προσομοιώματος  
Figure 1. Geotechnical and geometrical configuration of the model

## FLAC3D 2.00

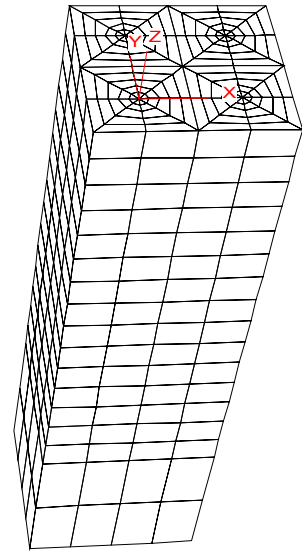
Center: X: 1.306e+000 Y: 1.883e+000 Z: -9.451e+000 Dist: 5.780e+001  
Rotation: X: 48.731 Y: 6.434 Z: 7.714 Mag.: 1.16 Ang.: 22.500

Sketch

Linestyle

Axes

Linestyle



Σχήμα 2. Κώνναβος του προσομοιώματος  
Figure 2. Computational mesh

Οι επιλύσεις εκτελέστηκαν με ομοιόμορφη επιφόρτιση στατικού χαρακτήρα (σχήμα 1). Για την προσομοίωση της κατανομής των τάσεων μεταξύ των χαλικοπασσάλων και του περιβάλλοντος εδάφους εισάγεται ο Συντελεστής Συγκέντρωσης Τάσεων  $n$  ( $= \sigma_c / \sigma_s$ ) ως εξής :

$$\sigma_s = \frac{1}{1 + (n-1) \cdot a_s} \cdot \sigma_0 \quad \text{και} \quad \sigma_c = \frac{n}{1 + (n-1) \cdot a_s} \cdot \sigma_0$$

όπου

$\sigma_s$  : η τάση (εκ κατανομής) που ασκείται στο περιβάλλον έδαφος

$\sigma_c$  : η τάση (εκ κατανομής) που ασκείται στην κεφαλή του χαλικοπασσάλου

$\sigma_0$  : μέσο ομοιόμορφο επιβαλλόμενο φορτίο

$a_s$  : Συντελεστής Αντικατάστασης Εδάφους (Area Replacement Factor), που ορίζεται ως ο λόγος που εκφράζει το ποσοστό αντικατάστασης του εγγενούς εδάφους με το κοκκώδες υλικό και αποδίδεται από την ακόλουθη σχέση :

$$a_s = \frac{A_c}{A} = \frac{A_c}{A_c + A_s} \Rightarrow a_s = \frac{\pi \cdot D^2 / 4}{\pi \cdot D_e^2 / 4} = \left( \frac{D}{D_e} \right)^2$$

όπου  $A_c$  : η επιφάνεια του χαλικοπασσάλου

$A_s$  : η επιφάνεια του εδάφους που περιβάλλει τον χαλικοπασσάλου

$D_e$  : η επιφάνεια επιρροής του κάθε χαλικοπασσάλου μπορεί να εκληφθεί ως μία ισοδύναμη κυλινδρική επιφάνεια με διάμετρο  $D_e$  της "πραγματικής" περιοχής του περιβάλλοντος εδάφους.

Συνολικά η επιφάνεια επιρροής του χαλικοπασσάλου είναι  $A = A_c + A_s$ .

Η διαδικασία της επίλυσης παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχ.3.



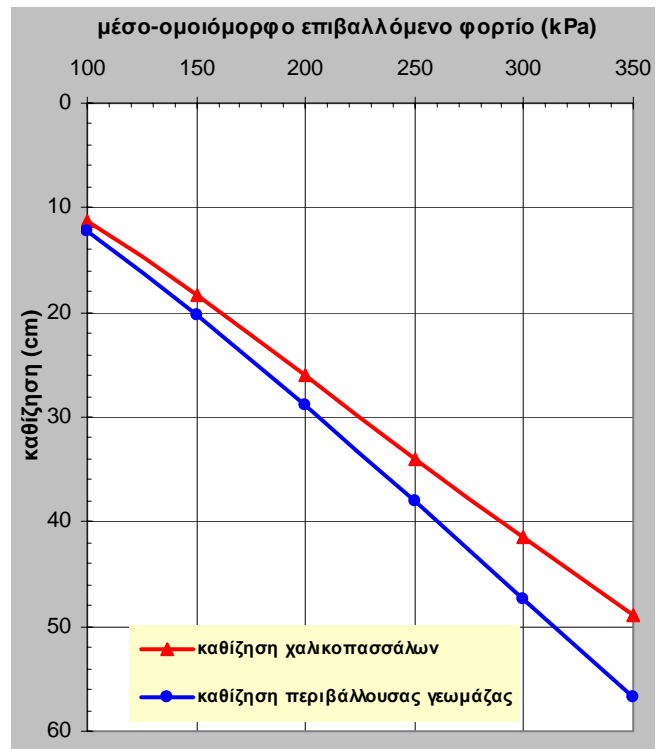
Σχήμα 3. Διαδικασία επίλυσης  
Figure 3. Analytical procedure

### 3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι παραμετρικές αναλύσεις εστίασθηκαν στην διερεύνηση των ακόλουθων τεσσάρων βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση πασσάλου – περιβάλλουσας γεωμάζας :

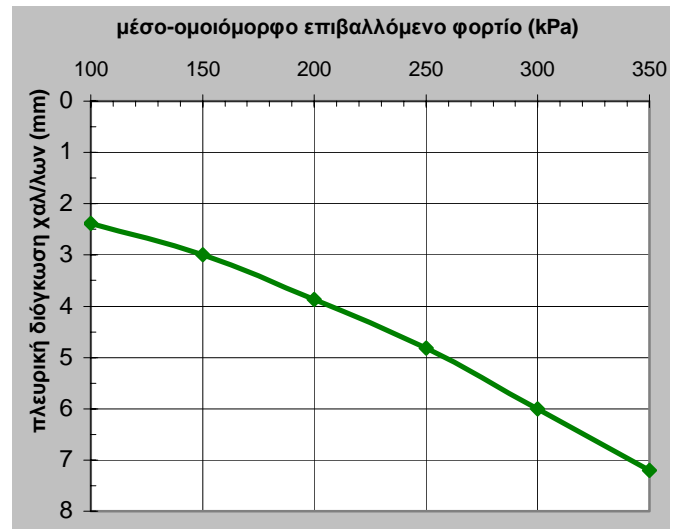
1. Μέσο επιβαλλόμενο φορτίο
2. Αξονική απόσταση μεταξύ των χαλικοπασσάλων
3. Διάμετρος των χαλικοπασσάλων
4. Συντελεστής Συγκέντρωσης Τάσεων, Συντελεστής Αντικατάστασης Εδάφους.

Με διαφοροποιούμενη την πρώτη παράμετρο οι επιλύσεις πραγματοποιήθηκαν για χαλικοπασσάλους με διάμετρο  $D = 1.0\text{m}$ , μεταξύ των αξονική απόσταση  $s = 2.5\text{m}$  και συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων ίσον προς 2. Τα δεδομένα που υιοθετήθηκαν στις επιλύσεις, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές παρουσιάζονται, ενδεικτικά στα γραφήματα που ακολουθούν (σχ. 4 έως 10).



Σχήμα 4. Μεταβολή των καθιζήσεων συναρτήσει του μέσου επιβαλλόμενου φορτίου ( $D=1.0\text{m}$ ,  $s=2.5\text{m}$ )

Figure 4. Settlement as a function of the average applied load ( $D=1.0\text{m}$ ,  $s=2.5\text{m}$ )

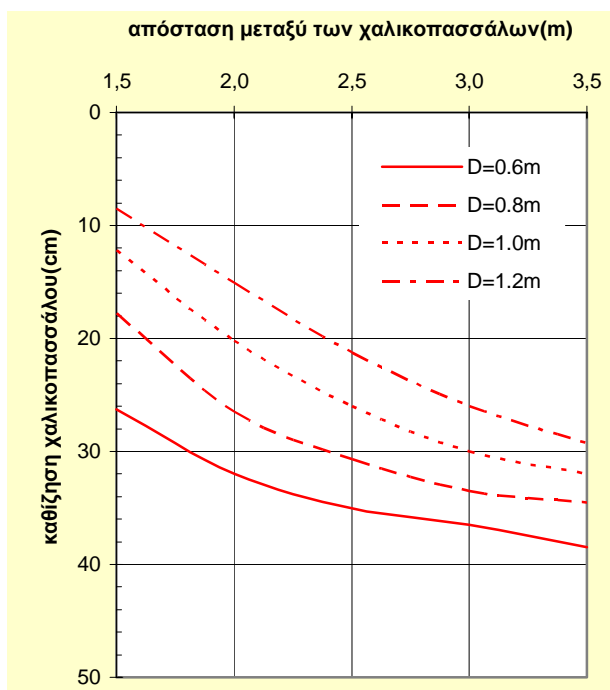


Σχήμα 5. Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων συναρτήσει του μέσου επιβαλλόμενου φορτίου ( $D=1.0\text{m}$ ,  $s=2.5\text{m}$ )

Figure 5. Lateral bulging of the columns as a function of the average applied load ( $D=1.0\text{m}$ ,  $s=2.5\text{m}$ )

Από την πρώτη σειρά παραμετρικών αναλύσεων, με διαφοροποιούμενο το επιβαλλόμενο φορτίο ( $\sigma_0$ ), προκύπτει ότι η αύξηση του τελευταίου συνεπάγεται περίπου γραμμική αύξηση της καθίζησης των χαλικοπασσάλων και της περιβάλλουσας γεωμάζας. Εξ' άλλου, για μικρές τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου, οι καθιζήσεις των χαλικοπασσάλων και της περιβάλλουσας γεωμάζας είναι περίπου ίσες, ενώ η αύξηση του φορτίου οδηγεί σε υψηλότερες καθιζήσεις της γεωμάζας σε σχέση με εκείνες των χαλικοπασσάλων. Τέλος, αύξηση του μέσου επιβαλλόμενου φορτίου συνεπάγεται αύξηση της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων, δηλαδή μεγαλύτερες οριζόντιες παραμορφώσεις.

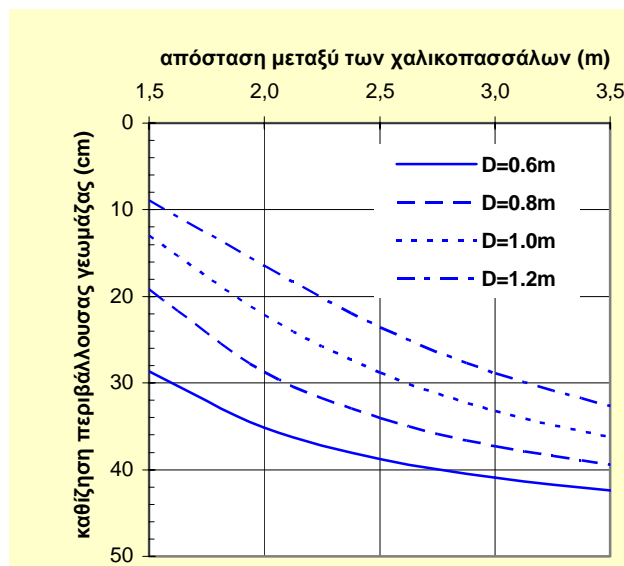
Στις αναλύσεις με διαφοροποιούμενη την αξονική απόσταση μεταξύ των χαλικοπασσάλων επελέγησαν τέσσερις διάμετροι ως εξής :  $D= 0.6, 0.8, 1.0$  και  $1.2\text{m}$  υπό σταθερή μέση επιβαλλόμενη τάση  $\sigma_0 = 200\text{kPa}$  και συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων  $n = 2$ .



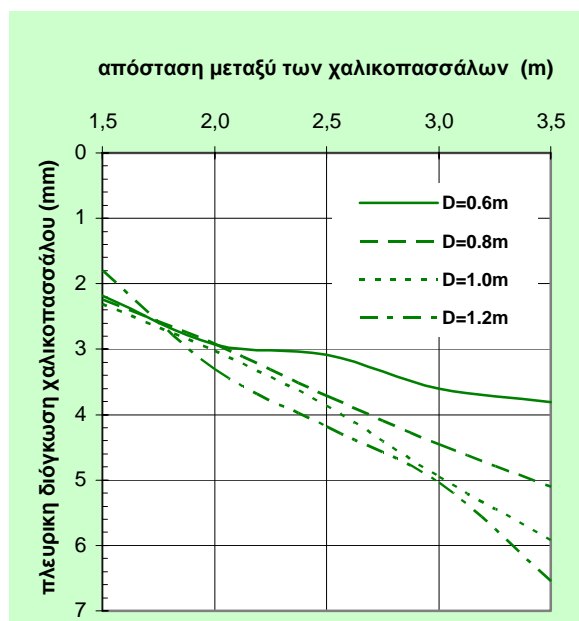
Σχήμα 6. Μεταβολή των καθιζήσεων του χαλικοπασσάλου συναρτήσει της μεταξύ των αξονικής απόστασης για διάφορες τιμές της διαμέτρου των  
Figure 6. Column settlement as a function of their diameter and the distance between them

Από την δεύτερη αυτή σειρά παραμετρικών αναλύσεων προκύπτουν τα ακόλουθα :

Αύξηση της αξονικής απόστασης μεταξύ των χαλικοπασσάλων για σταθερή τιμή της διαμέτρου των, δηλαδή μείωση του συντελεστή αντικατάστασης του εδάφους, συνεπάγεται μη γραμμική αύξηση της καθίζησης των χαλικοπασσάλων και της περιβάλλουσας γεωμάζας, με ρυθμό όμως ελαττούμενο μονοτόνως.



Σχήμα 7. Μεταβολή των καθιζήσεων της περιβάλλουσας γεωμάζας συναρτήσει της μεταξύ των χαλικοπασσάλων αξονικής απόστασης για διάφορες τιμές της διαμέτρου των  
Figure 7. Soil settlement as a function of their diameter and the distance between them



Σχήμα 8. Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων συναρτήσει της μεταξύ των αξονικής απόστασης

για διάφορες τιμές της διαμέτρου των

Figure 8. Lateral bulging of the column as a function of their diameter and the distance between them

Επισημαίνεται ότι για χαμηλές τιμές του Συντελεστή Αντικατάστασης (συνδυασμός μεγάλης αξονικής απόστασης και μικρής διαμέτρου ώστε  $a_s < 0.05$ ) η προκύπτουσα καθίζηση παραμένει περίπου σταθερή με την περαιτέρω αύξηση της αξονικής απόστασης. Εξ' άλλου, για υψηλές τιμές του Συντελεστή Αντικατάστασης ( $a_s > 0.20$ ) η πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων είναι χαμηλή και παραμένει σχεδόν σταθερή, ενώ αντιθέτως καθίσταται σημαντική για χαμηλές τιμές του συντελεστή. Μεγάλη πυκνότητα στην διάταξη των χαλικοπασσάλων συνεπάγεται μικρότερη επιβαλλόμενη τάση ανά χαλικοπάσσαλο και κατά συνέπεια, μικρότερες οριζόντιες και κατάκόρυφες παραμορφώσεις.

Από την τρίτη σειρά παραμετρικών αναλύσεων, με διαφοροποιούμενο τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων, για διάφορες τιμές της διαμέτρου και της αξονικής απόστασης μεταξύ των χαλικοπασσάλων προκύπτουν τα ακόλουθα:

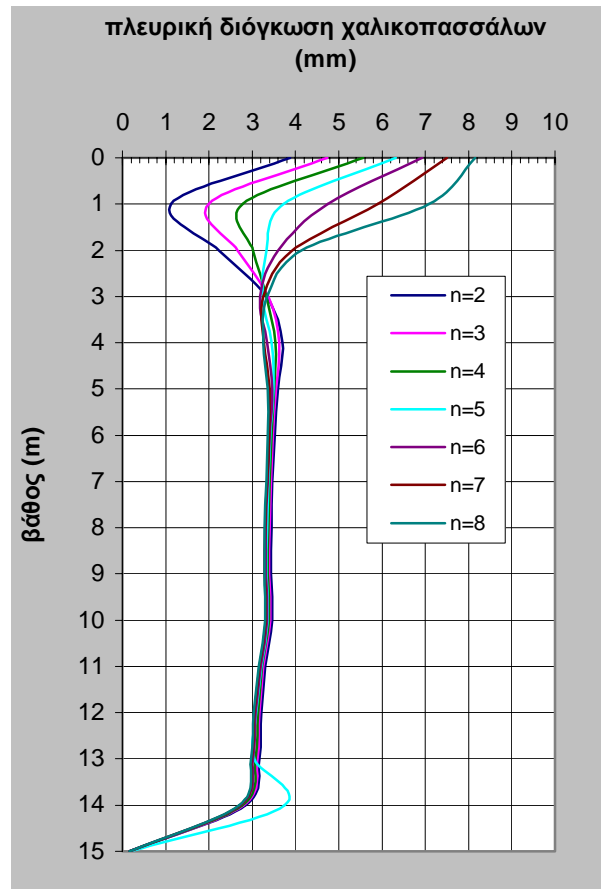
Σε χαμηλές τιμές του συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων η καθίζηση των χαλικοπασσάλων είναι μικρότερη εκείνης στην περιβάλλουσα γεωμάζα. Οι καθιζήσεις εξισώνονται για τιμές του συντελεστή της τάξεως του 5 – 7, ενώ για υψηλότερες τιμές παρατηρείται ότι η καθίζηση της περιβάλλουσας γεωμάζας είναι μικρότερη εκείνης των χαλικοπασσάλων.

Η πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων εις βάθος μεγαλύτερο των 3.0m περίπου παραμένει σταθερή και είναι ανεξάρτητη της τιμής του Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων, γεγονός από το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αναπτυσσόμενη πλευρική πίεση από το περιβάλλον έδαφος εμποδίζει την περαιτέρω ανάπτυξη οριζόντιων παραμορφώσεων (σχήμα 9).

Από την τέταρτη σειρά παραμετρικών αναλύσεων, με διαφοροποιούμενη την διάμετρο των χαλικοπασσάλων, για διάφορες τιμές της μεταξύ των αξονικής απόστασης, προκύπτουν τα ακόλουθα:

Αυξανόμενη της διαμέτρου των χαλικοπασσάλων μειούνται τόσο οι καθιζήσεις των όσο και εκείνες της περιβάλλουσας γεωμάζας. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην αύξηση του Συντελεστή Αντικατάστασης Εδάφους και κατά

συνέπεια, στην ικανότητα του “σύνθετου” εδάφους να αναλαμβάνει υψηλότερα φορτία.



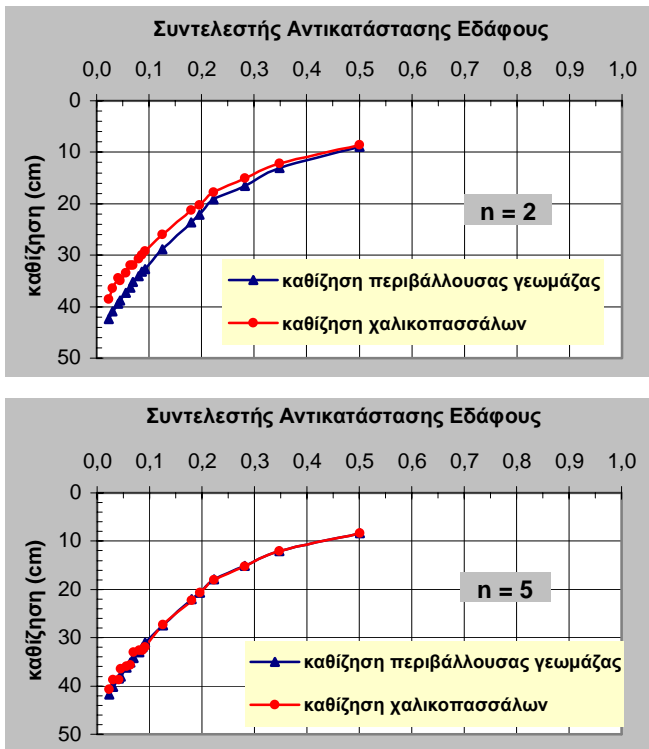
Σχήμα 9. Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων συναρτήσει του βάθους για διάφορες τιμές του Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων ( $D=1.0m, s=2.5m$ )

Figure 9. Lateral bulging of a column as a function of depth and the Stress Concentration Factor ( $D=1.0m, s=2.5m$ )

Για μεγάλες τιμές του Συντελεστή Αντικατάστασης Εδάφους (μεγάλες τιμές της διαμέτρου σε μικρή μεταξύ των αξονική απόσταση, δηλαδή  $a_s > 0.3$ ) και Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων της τάξεως του 2 έως 5, οι προκύπτουσες καθιζήσεις των χαλικοπασσάλων και της περιβάλλουσας γεωμάζας είναι περίπου ίσες, εφόσον ουσιαστικώς προκύπτει ένα ενιαίο “σύνθετο” έδαφος με ευνοϊκότερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων που αναφέρθηκαν προκύπτουν συμπεράσματα που αφορούν στην επιρροή του Συντελεστή Αντικατάστασης Εδάφους και στην εκτιμηθείσα καθίζηση τόσο των χαλικοπασσάλων όσο και της περιβάλλουσας γεωμάζας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για μέση επιβαλλόμενη τάση

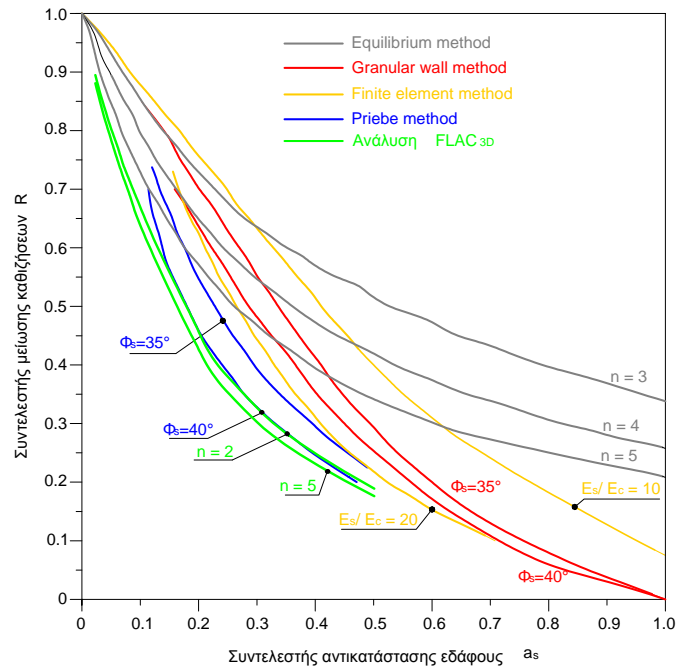
$\sigma_0 = 200\text{kPa}$  και Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων  $n = 2$  και  $n = 5$  παρουσιάζονται στα διαγράμματα του Σχήματος 10.



Σχήμα 10. Μεταβολή των καθιζήσεων συναρτήσει του Συντελεστή Αντικατάστασης Εδάφους  
Figure 10. Settlements as a function of the Soil Area Replacement Factor

Διαφαίνεται από τα ως άνω ότι ο Συντελεστής Αντικατάστασης είναι μία από τις βασικότερες παραμέτρους σχεδιασμού ομάδας χαλικοπασσάλων για την “ενίσχυση” ενός μαλακού αργιλικού σχηματισμού. Προκύπτει ακόμη ότι η εκτιμώμενη καθίζηση των χαλικοπασσάλων και της περιβάλλουσας γεωμάζας παρουσιάζει το ίδιο μέγεθος για σταθερή τιμή του Συντελεστή Αντικατάστασης ανεξαρτήτως των γεωμετρικών στοιχείων της διάταξης των χαλικοπασσάλων (αξονική απόσταση και διάμετρος). Μείωση του Συντελεστή Αντικατάστασης συνεπάγεται αύξηση των αναμενόμενων καθιζήσεων των χαλικοπασσάλων και της περιβάλλουσας γεωμάζας, εφόσον μειούται ο βαθμός αντικατάστασης του in situ εδάφους με το υλικό των χαλικοπασσάλων (υψηλότερων γεωτεχνικών χαρακτηριστικών). Επομένως, για μικρές τιμές του Συντελεστή Αντικατάστασης δεν επιτυγχάνεται ικανοποιητική “ενίσχυση” του εδάφους, ώστε να είναι εφικτή η ανάληψη σημαντικών φορτίων.

Σε όλες τις θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς και αφορούν στον σχεδιασμό των χαλικοπασσάλων, ο βαθμός ενίσχυσης του εδάφους εκτιμάται μέσω του Συντελεστή Μείωσης Καθιζήσεων (Settlement Reduction Ratio). Στο ακόλουθο διάγραμμα (σχήμα 11) απεικονίζεται η μεταβολή του συναρτήσε του Συντελεστή Αντικατάστασης, όπως η συσχέτιση αυτή προκύπτει με χρήση διαφόρων συμβατικών μεθόδων διαστασιολόγησης.

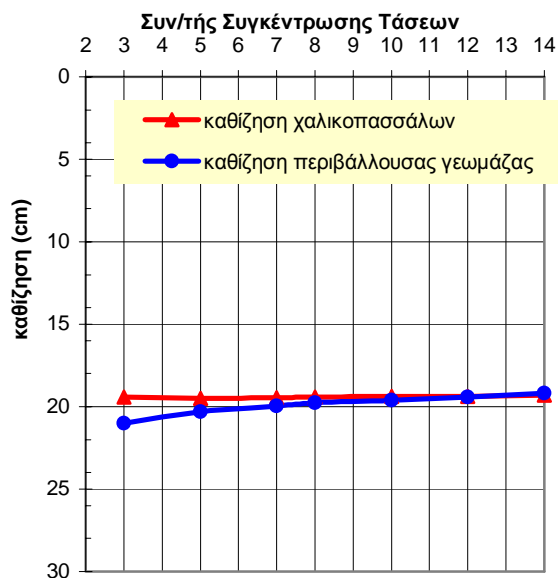


ΣΧΗΜΑ 11. Σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης των καθιζήσεων «ενισχυμένου» εδάφους

Figure 11. Comparison of the various predictive methods of the settlements in the strengthened ground

Παρατηρείται ότι η μέθοδος Priebe (1995) οδηγεί σε συγκρίσιμα αποτελέσματα με εκείνα που προκύπτουν από τον κώδικα FLAC<sup>3D</sup>.

Πραγματοποιήθηκε επίσης ελαστική επίλυση του προβλήματος με διαφοροποιούμενο τον Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων, για χαλικοπασσάλους με διάμετρο  $D=1.0\text{m}$ , μεταξύ των αξονική απόσταση  $s=2.5\text{m}$  και για μέσο επιβαλλόμενο φορτίο  $\sigma_0=200\text{kPa}$  (σχ. 12). Από την επίλυση αυτή διαπιστώθηκε ότι η εξίσωση των εκτιμώμενων καθιζήσεων των χαλικοπασσάλων και της περιβάλλουσας γεωμάζας προκύπτει για υψηλές τιμές του Συντελεστή Συγκέντρωσης των Τάσεων, και μάλιστα περί την τιμή 14 του λόγου σχετικής ακαμψίας του υλικού του χαλικοπασσάλου και του εδάφους.



Σχήμα 12. Μεταβολή των καθιζήσεων συναρτήσει του Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων με ελαστική συμπεριφορά των υλικών

Figure 12. Settlements as a function of the stress concentration function for elastic behavior of the materials.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αύξηση του Συντελεστή Αντικατάστασης του Εδάφους συνεπάγεται μικρότερες τιμές του Συντελεστή Μείωσης των Καθιζήσεων, δηλαδή οι αναμενόμενες καθιζήσεις του ενισχυμένου εδάφους είναι πολύ μικρότερες εκείνων που θα προέκυπταν χωρίς ενίσχυση.

Γίνεται σαφές ότι η αύξηση του Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων επιφέρει μεγαλύτερη μείωση των αναμενόμενων καθιζήσεων του “ενισχυμένου” εδάφους για συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των χαλικοπασσάλων (σταθερή τιμή του  $a_s$ ).

Οι καθιζήσεις των χαλικοπασσάλων είναι γενικώς μικρότερες εκείνων της περιβάλλουσας γεωμάζας για μικρές τιμές του Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων, γεγονός το οποίο αποδίδεται στην μεγαλύτερη ακαμψία του υλικού των χαλικοπασσάλων ( $E_c / E_s = 70 / 5 = 14$ ).

Εξίσωση των καθιζήσεων διαπιστώνεται για τιμές του Συντελεστή Συγκέντρωσης των Τάσεων της τάξεως του 5 – 7, γεγονός το οποίο έρχεται σε αντίθεση με την αρχή του συμβιβαστού των παραμορφώσεων, όπου εξίσωση των καθιζήσεων θα πρέπει να συμ-

βαίνει για τιμή του Συντελεστή Συγκέντρωσης των Τάσεων ίσου περίπου με τον λόγο σχετικής ακαμψίας του υλικού των χαλικοπασσάλων και του εδάφους, δηλ  $n = 14$ . Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην υιοθέτηση του αναλυτικού προσομοιώματος με ελαστοπλαστική συμπεριφορά των υλικών.

#### 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Balaam, N.P. & Poulos, H.G. (1983). The behaviour of foundations supported by clay stabilized by Stone Columns. Proceedings, 8<sup>th</sup> European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Vol.1, 199-204.
- Das, B.M. (1999). Principles of Foundation Engineering. Fourth Edition, Ch.12, 815-819.
- Goughnour, R.R. (1983). Settlement of vertically loaded Stone Columns in soft ground. Research & Development. Proceedings, 8<sup>th</sup> European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Vol.1, 235-240.
- Hughes, J.M.O. & Withers, N.J. (1974). Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns. Ground Engineering, Vol.7, No3, 42-49.
- Das, B.M. (1999). Principles of Foundation Engineering. Fourth Edition, Ch.12, 815-819.
- Hughes, J.M.O. & Withers, N.J. (1974). Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns. Ground Engineering, Vol.7, No3, 42-49.
- Μιχάλης, Η.Κ., Παπαδόπουλος, Β.Π., Αναγνωστόπουλος, Α.Γ. (2001). Η χρήση Χαλικοπασσάλων ως στοιχείων ενισχύσεως της διατμητικής αντοχής του εδάφους θεμελίωσης επιχωμάτων. Πρακτικά, 4<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα, Τόμος 1, 451-458.
- Μπουκοβάλας, Γ. (1999). Σημειώσεις σε Ειδικά Θέματα Θεμελιώσεων, ΕΜΠ.212-224.
- Munfakh, G.A., Abramson, L.W., Barksdale R.D., Juran, I. (1987). In-situ Ground Reinforcement in “Soil Improvement – A Ten Year Update. Geotechnical Special Publication No. 12, Welsh J.P. (ed)
- Priebe, H.J. (1995). The design of vibro replacement. Keller Grundbau GmbH, Offenbach, Germany, 1-16.
- Van Impe, W.E. (1980). Soil Improvement Techniques and Their Evolution. Ch.4, 48-66.

Van Impre, W. & De Beer, E. (1983). Improvement of settlement behaviour of soft layers by means of Stone Columns. Proceedings, 8<sup>th</sup> European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Vol.1, 309-312.

Στεφανάτου, Α.(2003). Ανάλυση Συμπεριφοράς των Χαλικοπασσάλων. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Xanthakos, P.P., Abramson L.W., Bruce, D.A. (1994). Ground Control and Improvement. Ch.4, 242-253, 274-277.