

# Διερεύνηση της Τριδιάστατης Απόκρισης Ομάδας Χαλικοπασσάλων και Σύγκριση με Αξονοσυμμετρικές Συνθήκες

## 3-D Analyses of Reinforced Soils with Stone Columns and Comparison with Axisymmetric Conditions

ΑΝΔΡΕΟΥ, Π. Διδάκτωρ Μηχανικός της Σχολής Πολ. Μηχ. Ε.Μ.Π., DEA Γεωτεχνική Μηχ. (ENPC), Μηχ. Μεταλλείων Ε.Μ.Π.

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ, Β. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Τομέας Γεωτεχνικής ΕΜΠ

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Βασικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση της αξονοσυμμετρικής θεώρησης μεμονωμένου χαλικοπασσάλου σε σχέση με τη συμπεριφορά της αντίστοιχης ομάδας χαλικοπασσάλων για τον υπολογισμό της μείωσης των καθιζήσεων, μέσω του συντελεστή βελτίωσης, εφόσον έχουν αρχικά παρουσιαστεί διαγράμματα μεταβολής του συγκεκριμένου μεγέθους σε σχέση με τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των βελτιωμένων εδαφών. Συμπεραίνεται ότι οι αποκλίσεις είναι έντονες και γίνονται ακόμα εντονότερες όσο το έδαφος έχει χαμηλότερα μηχανικά χαρακτηριστικά.

**ABSTRACT :** The main objective of this study is to examine the influence of important factors on the design of stone column groups and to conclude some practical results through three-dimensional numerical analyses using the finite element code ABAQUS. Design charts are presented, demonstrating the variation of settlement reduction factor and the results are compared with analytical methods based on the axisymmetric theory of unit cell under the same conditions. The comparison between these different approaches is studied and evaluated.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνική των χαλικοπασσάλων έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα τα τελευταία χρόνια για τη βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης. Προκειμένου για αργιλικά εδάφη, επιτυγχάνεται αύξηση της διατμητικής αντοχής-φέρουσας ικανότητας, μείωση των καθιζήσεων και επιτάχυνση της στερεοποίησης (Barksdale & Bachus, 1983, Bergado et al., 1994, Schweiger & Pande, 1986).

Παρόλα αυτά, δεν είναι λίγες οι φορές, ακόμα και σήμερα, όπου μελέτες εκτεταμένης επιφάνειας φόρτισης περιοχών βελτιωμένων με χαλικοπασσάλους επιλέγεται να επιλυθούν ελαστικά ή να γίνει χρήση εμπειρικών συσχετίσεων ή αναλυτικών λύσεων που στηρίζονται στην έννοια της στοιχειώδους μονάδας χαλικοπασσάλου 'unit cell'. Επίσης, η προσομοίωση της βελτιωμένης περιοχής με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

περιορίζεται κυρίως στην αξονοσυμμετρική ανάλυση μεμονωμένου χαλικοπασσάλου.

Για τους παραπάνω λόγους, στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αρχικά τα αποτελέσματα από τις τριδιάστατες αναλύσεις ομάδας χαλικοπασσάλων και προτείνονται διαγράμματα μεταβολής του συντελεστή βελτίωσης  $\beta$  σε σχέση με τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των βελτιωμένων εδαφών. Στη συνέχεια, ακολουθεί σύγκριση των τριδιάστατων αναλύσεων με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πιο γνωστή και ευρέως διαδεδομένη αναλυτική μεθοδολογία μεμονωμένου χαλικοπασσάλου, τη μεθοδολογία Priebe (1995). Αποδεικνύεται ότι οι αποκλίσεις είναι έντονες και γίνονται ακόμα εντονότερες όσο το έδαφος έχει χαμηλότερα μηχανικά χαρακτηριστικά (Ανδρέου, 2009).

## 2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Ο βασικός σκοπός της τριδιάστατης παραμετρικής ανάλυσης είναι η μελέτη της μείωσης των καθιζήσεων, μέσω της μεταβολής του συντελεστή βελτίωσης, σε διατάξεις ομάδας χαλικοπασσάλων 6x6 με το πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων Abaqus<sup>3D</sup>.

Ο κάρναβος των Πεπερασμένων Στοιχείων ήταν ιδιαίτερα πυκνός στα όρια των χαλικοπασσάλων και αραιώνει προς τα όρια του συστήματος, προκειμένου να μην επιβαρύνεται η υπολογιστική διαδικασία. Τα όρια του κάθε προσομοιώματος ήταν αρκετά απομακρυσμένα από τα στοιχεία των χαλικοπασσάλων ώστε να αποφεύγονται αριθμητικά λάθη από τις συνοριακές συνθήκες. Οι μετακινήσεις της βάσης δεσμεύονται σε όλες τις αναλύσεις ενώ πλευρικά επιτρέπονται οι μετακινήσεις μέσα στο προσομοίωμα και δεσμεύονται οι μετακινήσεις εκτός από αυτό.

Οι πέντε εδαφικοί, αργιλικόι σχηματισμοί που μελετήθηκαν συμβολίζονται ως s1, s2, s3, s4 και s5 αντίστοιχα και αποτελούν ομοιογενείς (s1, s2, s3) καθώς και ανομοιογενείς (s4, s5) σχηματισμούς. Τα συγκεντρωτικά στοιχεία με τις ιδιότητες των εδαφικών σχηματισμών και του υλικού κατασκευής των χαλικοπασσάλων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η επιλογή των αργιλικών ιδιοτήτων έγινε με σκοπό να προσομοιωθεί η συμπεριφορά χαρακτηριστικών εδαφών που συνήθως βελτιώνονται με τη μέθοδο των χαλικοπασσάλων. Επίσης, οι ιδιότητες του χαλικοπασσάλου συμφωνούν με τις ιδιότητες που προτείνονται κατά τις Γαλλικές Συστάσεις (Revue Française de Géotechnique, 2005). Η προσομοίωση τόσο του εδάφους όσο και των χαλικοπασσάλων έγινε με τη χρήση του καταστατικού νόμου συμπεριφοράς Mohr Coulomb.

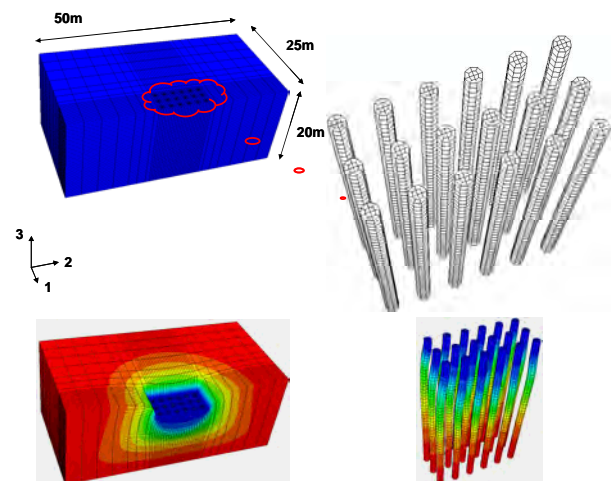
Η απόσταση μεταξύ των χαλικοπασσάλων θεωρήθηκε ότι ήταν 1.6, 2, 2.4 και 3.2m οπότε ο συντελεστής αντικατάστασης ήταν 0.195, 0.125, 0.087 και 0.049 αντίστοιχα. Για τους τρεις πρώτους εδαφικούς σχηματισμούς πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για 3 μήκη χαλικοπασσάλων, 6, 12 και 20m, ενώ για τους 2 τελευταίους έγιναν αναλύσεις με χαλικοπασσάλους μήκους 20m. Η διάμετρος των πασσάλων διατηρήθηκε σταθερή και ίση με 0.8m. Η επιβολή της φόρτισης έγινε με άκαμπτη αβαρή πλάκα, τα όρια της οποίας εξέιχαν από την ομάδα των χαλικοπασσάλων κατά μισή διάμετρο. Έγινε η υπόθεση ότι ο

συντελεστής ουδέτερης ώθησης διατηρείται σταθερός, ίσος με 0.5, ενώ στις περιπτώσεις όπου χαλικοπάσσαλοι 20 μέτρων βελτίωσαν το έδαφος s2 και s3 θεωρήθηκε ότι ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης είχε μεγαλύτερη τιμή (0.9).

Πίνακας 1. Παράμετροι και ιδιότητες των εδαφικών σχηματισμών και του υλικού κατασκευής των χαλικοπασσάλων (γίνεται η υπόθεση ότι το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους είναι 200 φορές μεγαλύτερο της συνοχής του)

Table 1. Material properties of the five tested soil profiles (s1 to s5) and the gravel of the stone column (it has been assumed that  $E_s = 200c_u$ )

|        | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\nu$ | $\phi$ (°) | $z$<br>(m)     | $c$<br>(kPa) | $E_s$<br>(MPa) |
|--------|----------------------------------|-------|------------|----------------|--------------|----------------|
| s1     | 18                               | 0.4   | 2          | 0              | 50           | 10             |
|        |                                  |       |            | 20             | 50           | 10             |
| s2     | 18                               | 0.4   | 2          | 0              | 30           | 6              |
|        |                                  |       |            | 20             | 30           | 6              |
| s3     | 18                               | 0.4   | 2          | 0              | 20           | 4              |
|        |                                  |       |            | 20             | 20           | 4              |
| s4     | 18                               | 0.4   | 2          | 0              | 50           | 10             |
|        |                                  |       |            | 5 <sup>-</sup> | 50           | 10             |
|        |                                  |       |            | 5 <sup>+</sup> | 20           | 4              |
| s5     | 18                               | 0.4   | 2          | 20             | 80           | 16             |
|        |                                  |       |            | 0              | 20           | 4              |
|        |                                  |       |            | 5 <sup>-</sup> | 20           | 4              |
| Χαλίκι | 20                               | 0.25  | 37/40/43   | 5 <sup>+</sup> | 20           | 4              |
|        |                                  |       |            | 20             | 80           | 16             |
|        |                                  |       |            | 0              | 2            | 60             |
|        |                                  |       |            | 20             | 2            | 60             |



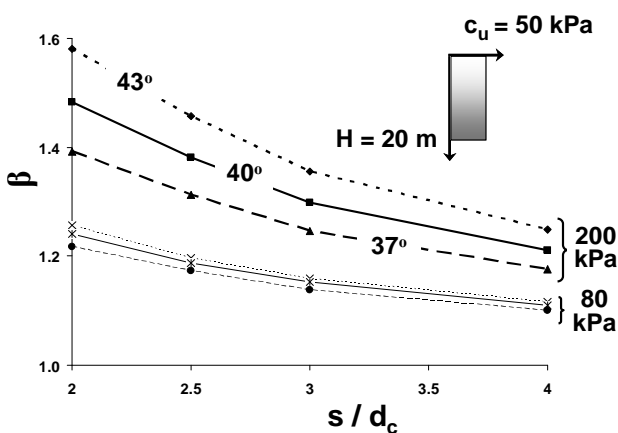
Σχήμα 1. Γεωμετρία και κάρναβος Πεπερασμένων Στοιχείων ομάδας χαλικοπασσάλων διάταξης 6x6, με σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 2m και μήκος 20m πριν και μετά την επιβολή της φόρτισης

Figure 1. Numerical model for a typical 6x6 stone column configuration before and after the pressure application (H=20 m, s=2 m)

Από τις αναλύσεις που προέκυψαν μελετήθηκε η μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης  $\beta$ , ο οποίος εκφράζει το λόγο των καθιζήσεων πριν και μετά τη βελτίωση. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η γεωμετρία και ο κάρναβος των Πεπερασμένων Στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ομάδας χαλικοπασσάλων σε διάταξη 6x6 με σχετική απόσταση μεταξύ των πασσάλων 2m και μήκος 20m.

### 3. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΩΝ

Στα Σχήματα 2, 3 και 4 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης για το έδαφος s1, για διαφορετικά μήκη χαλικοπασσάλων, 20, 12 και 6m αντίστοιχα υπό διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής και επιβαλλόμενες τάσεις. Τα αποτελέσματα είναι αδιαστατοποιημένα σε σχέση με το λόγο της απόστασης ανάμεσα στα κέντρα των χαλικοπασσάλων και τη διάμετρό τους. Στα Σχήματα παρουσιάζονται μόνο οι δύο ακραίες επιβαλλόμενες τάσεις (200 και 80kPa) διότι οι ενδιάμεσες τιμές φόρτισης που μελετήθηκαν (160 και 120kPa) έδιναν αποτελέσματα εντός των ανωτέρω ορίων.

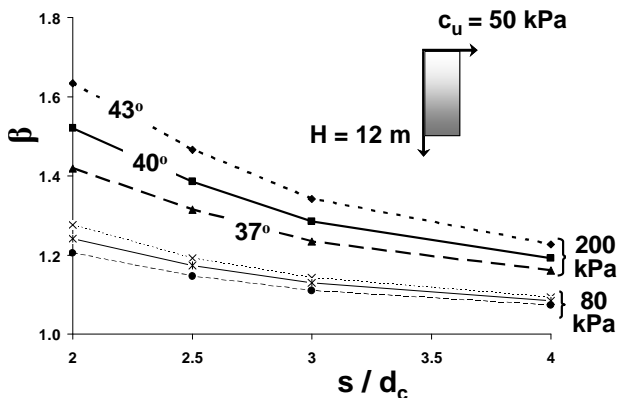


Σχήμα 2. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης διάταξης 6x6 χαλικοπασσάλων, μήκους 20m, στο έδαφος s1 για διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής (43°, 40° και 37°) και επιβαλλόμενες τάσεις (200 και 80kPa)

Figure 2. Variation of settlement reduction factor  $\beta$  with normalized stone column spacing  $s/d_c$  at different applied pressures (80, 200 kPa) and friction angles (37°, 40°, 43°) for soil profile s1 with improvement depth  $H=20$  m

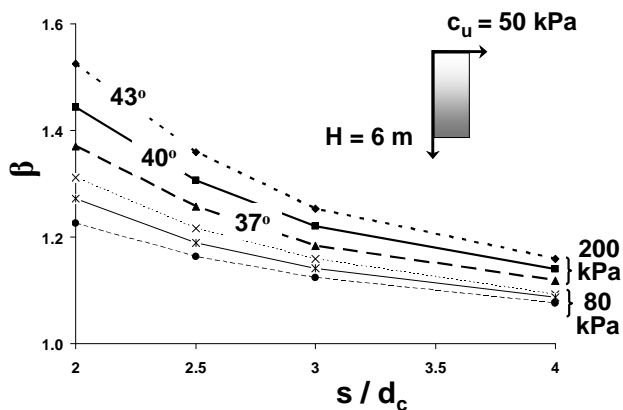
Από τα αποτελέσματα της τριδιάστατης ανάλυσης παρατηρείται ότι ο συντελεστής βελτίωσης  $\beta$  αυξάνει κυρίως με την αύξηση της

φόρτισης και κατά δεύτερο λόγο με τη μείωση της αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων καθώς και την αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής. Σημειώνεται ότι η μείωση της απόστασης ανάμεσα στα κέντρα των πασσάλων δηλώνει αύξηση του συντελεστή αντικατάστασης.



Σχήμα 3. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης διάταξης 6x6 χαλικοπασσάλων, μήκους 12m, στο έδαφος s1 για διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής (43°, 40° και 37°) και επιβαλλόμενες τάσεις (200 και 80kPa)

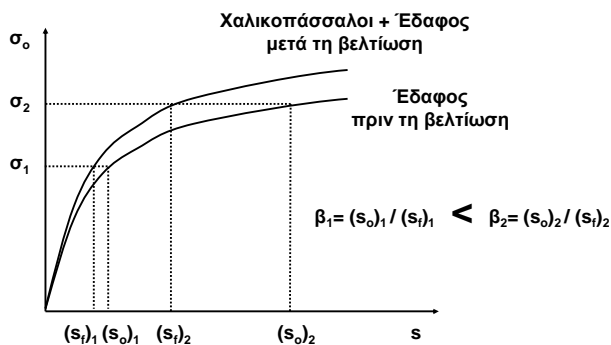
Figure 3. Variation of settlement reduction factor  $\beta$  with normalized stone column spacing  $s/d_c$  at different applied pressures (80, 200 kPa) and friction angles (37°, 40°, 43°) for soil profile s1 with improvement depth  $H=12$  m



Σχήμα 4. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης διάταξης 6x6 χαλικοπασσάλων, μήκους 6m, στο έδαφος s1 για διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής (43°, 40° και 37°) και επιβαλλόμενες τάσεις (200 και 80kPa)

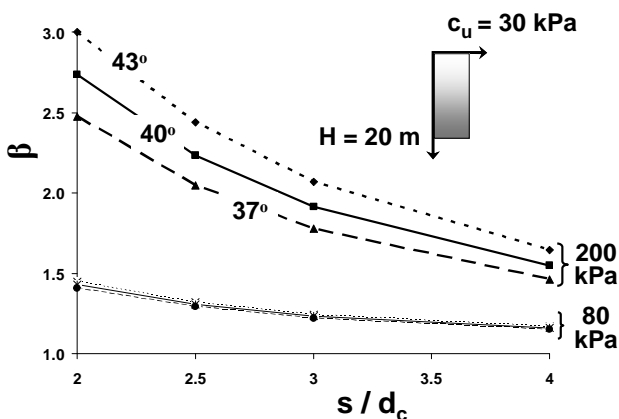
Figure 4. Variation of settlement reduction factor  $\beta$  with normalized stone column spacing  $s/d_c$  at different applied pressures (80, 200 kPa) and friction angles (37°, 40°, 43°) for soil profile s1 with improvement depth  $H=6$  m

Η αύξηση του συντελεστή βελτίωσης  $\beta$  με την αύξηση του φορτίου μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα μέσω του Σχήματος 5. Με την αύξηση του φορτίου, για παράδειγμα από  $\sigma_1$  σε  $\sigma_2$ , ο συντελεστής μείωσης των καθιζήσεων, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των καθιζήσεων του εδάφους πριν τη βελτίωση προς τις καθιζήσεις του συστήματος μετά τη βελτίωση, θα αυξάνει από  $\beta_1$  σε  $\beta_2$ .

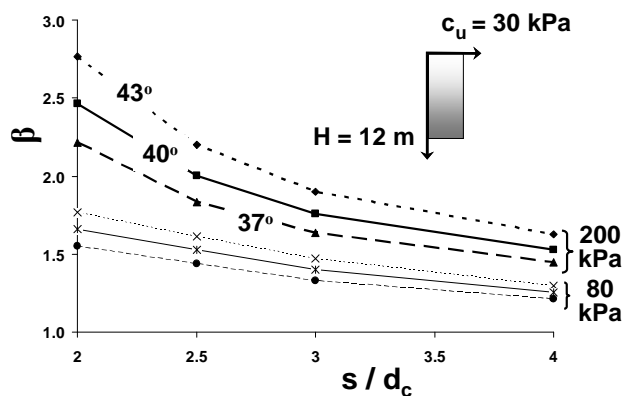


Σχήμα 5. Εξέλιξη του συντελεστή βελτίωσης με την αύξηση του φορτίου  
Figure 5. Graphical representation of settlement reduction factor in respect to applied pressure

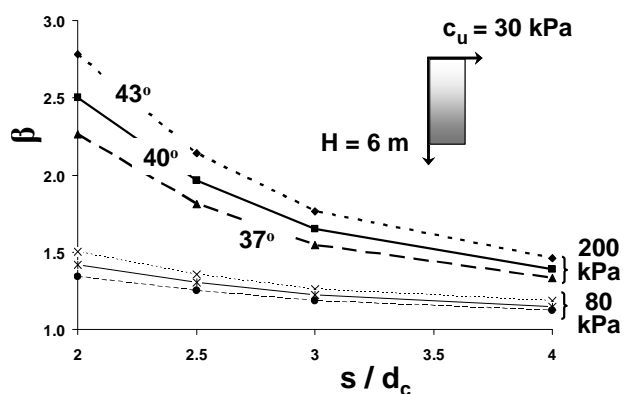
Στα Σχήματα 6, 7 και 8 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης για το έδαφος s2.



Σχήμα 6. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης διάταξης 6x6 χαλικοπασσάλων, μήκους 20m, στο έδαφος s2 για διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής (43, 40 και 37°) και επιβαλλόμενες τάσεις (200 και 80kPa)  
Figure 6. Variation of settlement reduction factor  $\beta$  with normalized stone column spacing  $s/d_c$  at different applied pressures (80, 200 kPa) and friction angles (37°, 40°, 43°) for soil profile s2 with improvement depth  $H=20$  m



Σχήμα 7. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης διάταξης 6x6 χαλικοπασσάλων, μήκους 12m, στο έδαφος s2 για διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής (43, 40 και 37°) και επιβαλλόμενες τάσεις (200 και 80kPa)  
Figure 7. Variation of settlement reduction factor  $\beta$  with normalized stone column spacing  $s/d_c$  at different applied pressures (80, 200 kPa) and friction angles (37°, 40°, 43°) for soil profile s2 with improvement depth  $H=12$  m

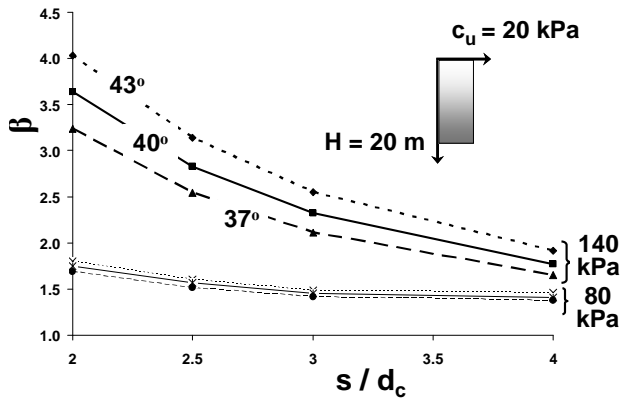


Σχήμα 8. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης διάταξης 6x6 χαλικοπασσάλων, μήκους 6m, στο έδαφος s2 για διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής (43, 40 και 37°) και επιβαλλόμενες τάσεις (200 και 80kPa)  
Figure 8. Variation of settlement reduction factor  $\beta$  with normalized stone column spacing  $s/d_c$  at different applied pressures (80, 200 kPa) and friction angles (37°, 40°, 43°) for soil profile s2 with improvement depth  $H=6$  m

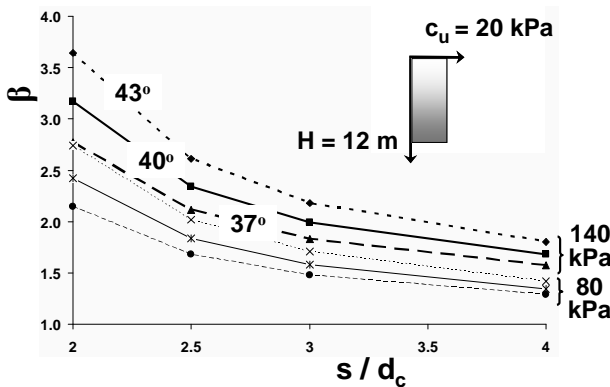
Από τα αποτελέσματα της τριδιάστατης ανάλυσης για το έδαφος s2 παρατηρείται ότι και από τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το έδαφος s1. Η βασικότερη όμως διαφορά είναι ο μεγαλύτερος συντελεστής βελτίωσης που επιτυγχάνεται για το έδαφος με τα ασθενέστερα μηχανικά χαρακτηριστικά.

Στα Σχήματα 9, 10 και 11 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης για το

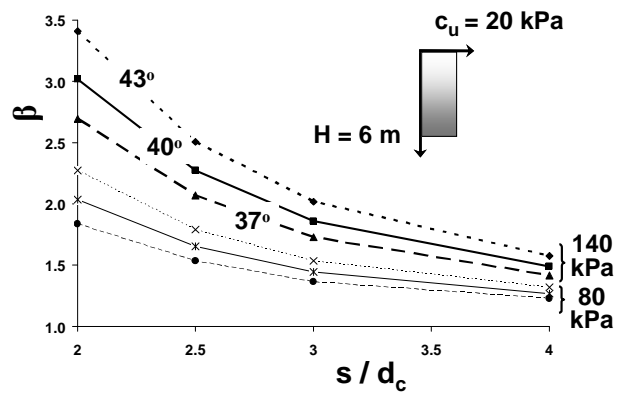
έδαφος s3 και προκύπτει ό,τι και από τα αποτελέσματα για το έδαφος s1 και s2. Η μόνη διαφορά εστιάζεται στο μεγαλύτερο συντελεστή βελτίωσης για το έδαφος s3 σε σχέση με τα άλλα εδάφη διότι έχει τις χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες και συνεπώς επιδέχεται μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης.



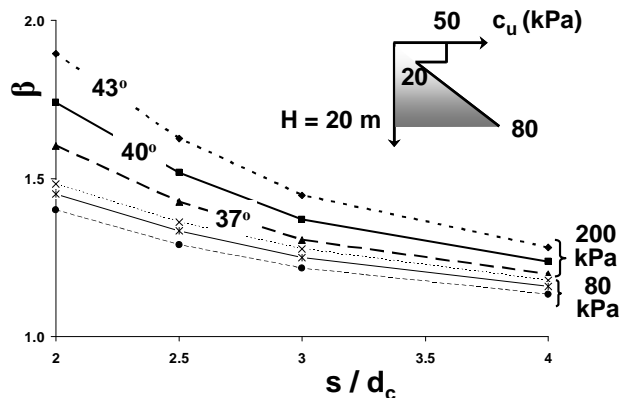
Σχήμα 9. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης διάταξης 6x6 χαλικοπασσάλων, μήκους 20m, στο έδαφος s3 για διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής (43°, 40° και 37°) και επιβαλλόμενες τάσεις (140 και 80kPa)  
Figure 9. Variation of settlement reduction factor  $\beta$  with normalized stone column spacing  $s/d_c$  at different applied pressures (80, 140kPa) and friction angles (37°, 40°, 43°) for soil profile s3 with improvement depth  $H=20$  m



Σχήμα 10. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης διάταξης 6x6 χαλικοπασσάλων, μήκους 12m, στο έδαφος s3 για διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής (43°, 40° και 37°) και επιβαλλόμενες τάσεις (140 και 80kPa)  
Figure 10. Variation of settlement reduction factor  $\beta$  with normalized stone column spacing  $s/d_c$  at different applied pressures (80, 140kPa) and friction angles (37°, 40°, 43°) for soil profile s3 with improvement depth  $H=12$  m



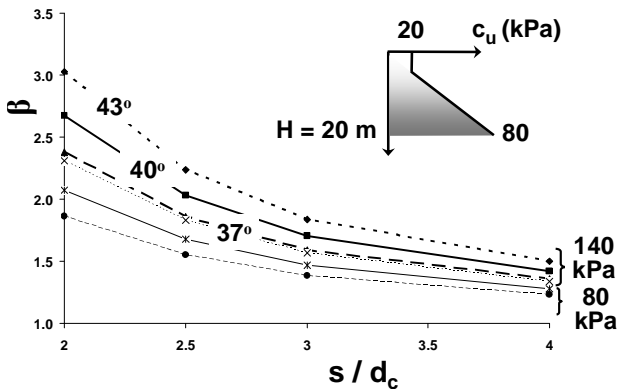
Σχήμα 11. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης διάταξης 6x6 χαλικοπασσάλων, μήκους 6m, στο έδαφος s3 για διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής (43°, 40° και 37°) και επιβαλλόμενες τάσεις (140 και 80kPa)  
Figure 11. Variation of settlement reduction factor  $\beta$  with normalized stone column spacing  $s/d_c$  at different applied pressures (80, 140kPa) and friction angles (37°, 40°, 43°) for soil profile s3 with improvement depth  $H=6$  m



Σχήμα 12. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης διάταξης 6x6 χαλικοπασσάλων, μήκους 20m, στο έδαφος s4 για διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής (43°, 40° και 37°) και επιβαλλόμενες τάσεις (200 και 80kPa)  
Figure 12. Variation of settlement reduction factor  $\beta$  with normalized stone column spacing  $s/d_c$  at different applied pressures (80, 200kPa) and friction angles (37°, 40°, 43°) for soil profile s4 with improvement depth  $H=20$  m

Στα Σχήματα 12 και 13 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης για τα εδάφη s4 και s5 αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι οι αυξημένες μηχανικές ιδιότητες της επιφανειακής στρώσης βελτιώνουν την απόκριση του βελτιωμένου συστήματος. Από τη σύγκριση των Σχημάτων 12 και 13 διακρίνεται ότι οι ιδιότητες της επιφανειακής

στρώσης επηρεάζουν έντονα την απόκριση του συστήματος. Οι χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες της επιφανειακής στρώσης (έδαφος s5) οδηγούν σε μεγαλύτερους συντελεστές βελτίωσης με τη μέθοδο των χαλικοπασσάλων.



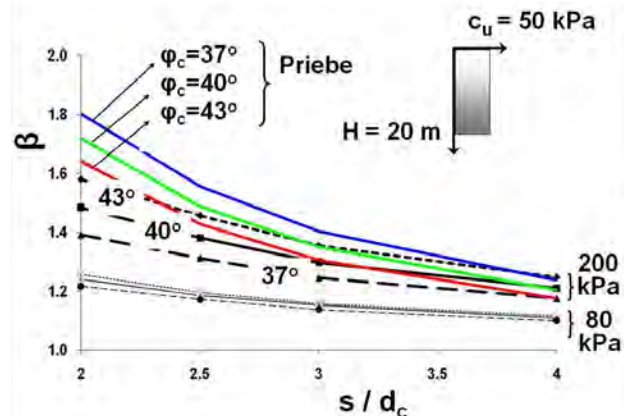
Σχήμα 13. Μεταβολή του συντελεστή βελτίωσης διάταξης 6x6 χαλικοπασσάλων, μήκους 20m, στο έδαφος s5 για διάφορες γωνίες εσωτερικής τριβής (43°, 40° και 37°) και επιβαλλόμενες τάσεις (140 και 80kPa)  
Figure 13. Variation of settlement reduction factor  $\beta$  with normalized stone column spacing  $s/d_c$  at different applied pressures (80, 140 kPa) and friction angles (37°, 40°, 43°) for soil profile s5 with improvement depth  $H=20$  m

#### 4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΟΜΑΔΑΣ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΩΝ ΜΕ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

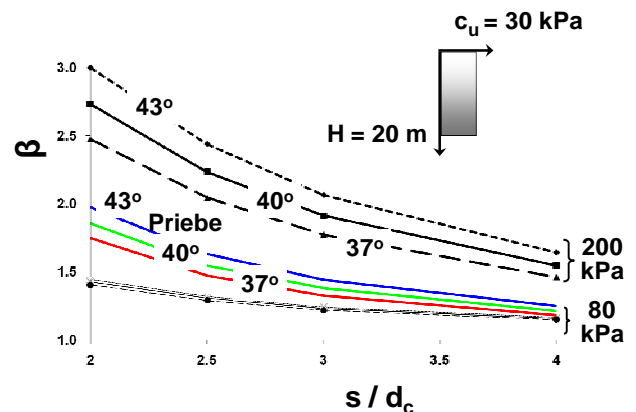
Η πιο διαδεδομένη αναλυτική μέθοδος υπολογισμού των τελικών καθιζήσεων μεμονωμένου χαλικοπασσάλου είναι η μέθοδος Priebe. Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται οι τελικές καθιζήσεις καθώς και ο συντελεστής βελτίωσης δεν θα αναπτυχθούν εκτενέστερα στο συγκεκριμένο σημείο. Στα σχήματα 14, 15 και 16 που ακολουθούν συγκρίνεται η τριδιάστατη απόκριση της ομάδας των χαλικοπασσάλων με την αξονοσυμμετρική ανάλυση κατά Priebe, για χαλικοπάσσαλο ύψους 20 m, στους εδαφικούς σχηματισμούς s1, s2 και s3 αντίστοιχα.

Διακρίνεται λοιπόν ότι ο συντελεστής βελτίωσης κατά Priebe είναι ανεξάρτητος από την επιβαλλόμενη τάση. Δηλαδή, τα αποτελέσματα τόσο υπό φόρτιση 200 όσο και υπό 80kPa είναι τα ίδια. Τα αποτελέσματα επηρεάζονται μόνο από την αλλαγή της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου. Σημειώνεται επίσης ότι το εύρος διακύμανσης

του συντελεστή βελτίωσης, από τις αξονοσυμμετρικές αναλύσεις, δεν είναι μεγάλο, ανεξάρτητα από το έδαφος βελτίωσης. Αντίστοιχα συμπεράσματα προέκυψαν και για τα εξεταζόμενα μήκη χαλικοπασσάλων 12 και 6m.



Σχήμα 14. Σύγκριση της τριδιάστατης απόκρισης ομάδας χαλικοπασσάλων με την αξονοσυμμετρική ανάλυση Priebe, στο έδαφος s1 με μήκος πασσάλων 20m  
Figure 14. Comparison between the 3D stone column group results and the axisymmetric Priebe analysis for soil profile s1 with improvement depth  $H=20$  m

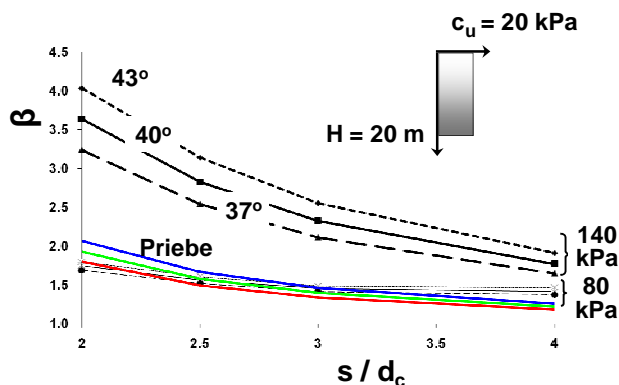


Σχήμα 15. Σύγκριση της τριδιάστατης απόκρισης ομάδας χαλικοπασσάλων με την αξονοσυμμετρική ανάλυση Priebe, στο έδαφος s2 με μήκος πασσάλων 20m  
Figure 15. Comparison between the 3D stone column group results and the axisymmetric Priebe analysis for soil profile s2 with improvement depth  $H=20$  m

Συνεπώς, από τα προηγούμενα Σχήματα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το ύψος των χαλικοπασσάλων ο



συντελεστής βελτίωσης που προκύπτει με βάση τη μέθοδο Priebe παραμένει περίπου σταθερός. Η μικρή διακύμανση των τιμών οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στην αλλαγή του μέτρου συμπίεστικότητας. Επίσης, μπορεί να σημειωθεί ότι λόγω των συνθηκών προσομοίωσης μονοδιάστατης συμπίεσης το βελτιωμένο σύστημα δεν αστοχεί όσο χαμηλά και αν είναι τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και όσο μεγάλη και αν είναι η επιβαλλόμενη φόρτιση.



Σχήμα 16. Σύγκριση της τριδιάστατης απόκρισης ομάδας χαλικοπασσάλων με την αξονοσυμμετρική ανάλυση Priebe, στο έδαφος s3 με μήκος πασσάλων 20m  
Figure 16. Comparison between the 3D stone column group results and the axisymmetric Priebe analysis for soil profile s3 with improvement depth  $H=20m$

Κατά τη θεωρία 'unit cell' θεωρείται ότι η επιφάνεια φόρτισης είναι πολύ πολύ μεγάλη, δηλαδή ο λόγος  $B/H$  είναι ιδιαίτερα μεγάλος. Στις 3-Δ αναλύσεις που έγιναν, ο λόγος  $B/H$  κυμάνθηκε από 0.5 έως 3-3.5. Οι μεγάλες τιμές του λόγου σημειώθηκαν στις περιπτώσεις όπου οι χαλικοπάσσαλοι ήταν αραιά τοποθετημένοι ( $s/d_c=4$ ) και ταυτόχρονα το μήκος των χαλικοπασσάλων ήταν μικρό ( $H=6m$ ). Σε αυτές τις περιπτώσεις λοιπόν παρατηρήθηκε ότι οι αποκλίσεις των 3-Δ αναλύσεων με αυτές του μεμονωμένου χαλικοπασσάλου μειώνονταν. Πιθανολογείται ότι σε πολύ μεγάλους λόγους  $B/H$  τα 3-Δ αποτελέσματα θα συγκλίνουν με αυτά των μεμονωμένων χαλικοπασσάλων.

Συνεπώς, οι διαφορές ανάμεσα στις 3-Δ αναλύσεις και την αξονοσυμμετρική ανάλυση εστιάζονται κυρίως στις υποθέσεις της θεωρίας 'unit cell', οι οποίες θεωρούν μεγάλους λόγους  $B/H$  και συνθήκες προσομοίωσης ανάλογες των συνθηκών μονοδιάστατης συμπίεσης.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις 3-Δ αναλύσεις ομάδας 6x6 χαλικοπασσάλων προέκυψαν βασικά συμπεράσματα αναφορικά με την επιρροή του κάθε παράγοντα διαστασιολόγησης των χαλικοπασσάλων στον συντελεστή βελτίωσης των καθιζήσεων. Ο αυξημένος συντελεστής βελτίωσης αποτελεί συνήθως το ζητούμενο στα τεχνικά έργα οπότε παρακάτω αναφέρεται το ποιά θα πρέπει να είναι η μεταβολή του κάθε παράγοντα ξεχωριστά ώστε να αυξηθεί ο συγκεκριμένος συντελεστής. Η παράθεση ξεκινά με τους παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο το τελικό αποτέλεσμα και καταλήγει με τους παράγοντες που επηρεάζουν λιγότερο και δεν κρίνουν αποφασιστικά τα τελικά αποτελέσματα:

α) Ο συντελεστής βελτίωσης  $\beta$  αυξάνει όταν αυξάνει ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας  $E_c/E_s$ . Στις αναλύσεις είχε θεωρηθεί ότι το μέτρο ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου παρέμενε σταθερό ( $E_c=60MPa$ ) και άλλαζε μόνο το μέγεθος  $E_s$ . Η διακύμανση του λόγου  $E_c/E_s$  στις παραμετρικές αναλύσεις ήταν 6 (έδαφος s1), 10 (έδαφος s2) και 15 (έδαφος s3) με σκοπό να μελετηθεί με ευκρίνεια η επιρροή των συγκεκριμένων παραμέτρων. Όσο πιο μικρό ήταν το  $E_s$  τόσο πιο μεγάλος ήταν ο λόγος  $E_c/E_s$  και τόσο πιο μεγάλος ο συντελεστής βελτίωσης  $\beta$ .

Παρατηρήθηκε ακόμα ότι τα τελικά αποτελέσματα εξαρτώνται όχι μόνο από το μέγεθος  $E_s$  αλλά και από το μέτρο ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου  $E_c$ , αλλά ο συντελεστής  $\beta$  επηρεάζεται πολύ περισσότερο από τη μεταβολή του μεγέθους  $E_s$  παρά από το μέγεθος  $E_c$ .

Το προαναφερόμενο συμπέρασμα προέκυψε από το εξεταζόμενο εύρος μεγεθών των παραμετρικών αναλύσεων. Σαφώς, χρίζει αναφοράς ότι στην πραγματικότητα όσο μικρότερο είναι το  $E_s$  (και αντίστοιχα το  $c_u$ ) τόσο μικρότερη είναι η συμπύκνωση του υλικού του χαλικοπασσάλου που επιτυγχάνεται κατά την κατασκευή του, δηλαδή όσο «μαλακότερο» είναι το έδαφος τόσο ευκολότερα ενδίδει αυτό κατά τη διάρκεια συμπύκνωσης του χαλικοπασσάλου, με αποτέλεσμα την αύξηση της διαμέτρου του, χωρίς να είναι εφικτή η αποτελεσματική συμπύκνωσή του.

β) Ο συντελεστής βελτίωσης  $\beta$  αυξάνει όταν αυξάνεται η επιβαλλόμενη τάση  $\sigma_0$ . Στις αναλύσεις είχε επιλεγεί ο καταστατικός νόμος συμπεριφοράς Mohr Coulomb, οπότε με την

αύξηση της τάσης διευρύνεται η πλαστική ζώνη τόσο του εδάφους πριν τη βελτίωση όσο και του βελτιωμένου συστήματος, με συνέπεια να αυξάνει και ο συντελεστής βελτίωσης. Το ποσοστό βελτίωσης σε συγκεκριμένο έδαφος εξαρτάται άμεσα από το ποσοστό αύξησης της τάσης.

γ) Ο συντελεστής βελτίωσης  $\beta$  αυξάνει όταν μειώνεται ο λόγος  $s/d_c$  ή όταν αυξάνεται ο συντελεστής αντικατάστασης  $\alpha_s$ . Στις αναλύσεις είχε θεωρηθεί ότι η διάμετρος των χαλικοπασσάλων παρέμενε σταθερή ( $d_c=0.8m$ ), συνεπώς η μείωση της αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων ( $s$ ) αύξανε το συντελεστή βελτίωσης  $\beta$ . Αντίστοιχα, και η αύξηση της διαμέτρου του χαλικοπασσάλου θα αυξάνει το ποσοστό βελτίωσης, διότι αυξάνεται ο συντελεστής αντικατάστασης.

δ) Ο συντελεστής βελτίωσης  $\beta$  αυξάνει όταν αυξάνεται η γωνία εσωτερικής τριβής του χαλικιού. Η αύξηση της συμπίκνωσης του χαλικιού αυξάνει το τελικό ποσοστό βελτίωσης ενώ η αύξηση είναι μεγαλύτερη όσο πιο μεγάλη είναι η επιβαλλόμενη τάση, όσο πιο κοντά βρίσκονται τα κέντρα των χαλικοπασσάλων και όσο πιο ασθενή είναι τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

Αποδείχτηκε ακόμα ότι οι διαφορές που προέκυψαν ανάμεσα στις 3-Δ αναλύσεις και την αξονοσυμμετρική ανάλυση κατά Priebe εστιάζονται κυρίως στις υποθέσεις της θεωρίας 'unit cell', οι οποίες θεωρούν μεγάλους λόγους  $B/H$  και συνθήκες προσομοίωσης ανάλογες των συνθηκών μονοδιάστατης συμπίεσης. Μάλιστα, σημειώθηκε ότι οι αποκλίσεις ήταν έντονες και γίνονται ακόμα εντονότερες όσο το έδαφος έχει χαμηλότερα μηχανικά χαρακτηριστικά.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABAQUS, Inc. (2004), ABAQUS V.6.4 User's manual. Providence, Rhode Island, USA.
- Ανδρέου, Π. (2009), "Προσομοίωση της συμπεριφοράς εδαφών βελτιωμένων με χαλικοπασσάλους". Διδακτορική Διατριβή στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Τομέας Γεωτεχνικής, σελ. 265.
- Barksdale R.D. and Bachus, R.C. (December 1983), "Design and construction of stone columns". Vol. I, pp. 210.
- Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. (December 1983), "Design and construction of stone columns". Vol. II-Appendixes, pp. 45.
- Bergado, D. T., Chai J. C., Alfaro M. C., Balasubramaniam A. S. (1994),

"Improvement Techniques of Soft Ground Subsiding and Lowland Environment". Balkema, pp. 222.

Priebe, H.J. (1995), "The design of vibro-replacement". Reprinted from: Ground Engineering, Keller Grundbau GmbH, Technical paper 12-61E, 16 pages.

Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et ouvrages sensibles au tassement (2005). Revue Française de Géotechnique, 2<sup>ème</sup> trim., N° 111, pp. 3-16.

Schweiger, H.F. and Pande, G.N. (1986) "Numerical analysis of stone column supported foundations". Computers and Geotechnics, Vol.2, pp. 347-372