



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΕ
ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥΣ**

ΜΠΑΡΟΥΛΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
Β. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ**

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Έχοντας ολοκληρώσει την παρούσα διπλωματική εργασία οφείλω να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν, άμεσα ή έμμεσα, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Β. Παπαδόπουλο, Καθηγητή Ε.Μ.Π, για την άριστη συνεργασία μας. Οι υποδείξεις του, η συνεχής παρακολούθηση και η καθοδήγησή του κατά τη συγγραφή της εργασίας, συνέβαλαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωσή της.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που με υποστήριξαν. Ειδικότερα ευχαριστώ το Σωτήρη για την υπομονή, τη στήριξη και την κατανόηση που έδειξε, σε στιγμές που το άγχος και η κούραση έκαναν τα εμπόδια να φαίνονται ανυπέρβλητα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Στέλιο και Άρτεμις, που όλα τα χρόνια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο, μου προσέφεραν τα απαραίτητα εφόδια, ηθικά και υλικά, για να ανταπεξέλθω στις δυσκολίες που κατά καιρούς παρουσιάστηκαν. Ιδιαίτερω ευχαριστώ την αδερφή μου, Ειρήνη, για τις ανεκτίμητες συμβουλές και την εμπειρία που, ως μεγαλύτερη, δεν αρνήθηκε ποτέ να μοιραστεί μαζί μου.

ΜΠΑΡΟΥΛΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	3
I. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΩΝ.....	9
2.1 Πεδίο εφαρμογής.....	9
2.2 Χρησιμοποιούμενα υλικά.....	9
2.3 Μέθοδοι κατασκευής.....	10
2.3.1 Απαιτούμενος εξοπλισμός.....	11
2.3.2 Βαθεία δονητική συμπύκνωση (Vibro-compaction).....	12
2.3.3 Βαθεία δονητική αντικατάσταση (Vibro-replacement).....	13
2.3.4 “Ελληνική” Μέθοδος.....	14
2.3.5 Ποιοτικός έλεγχος κατά την κατασκευή.....	16
3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΩΝ.....	18
3.1 Βασικές παράμετροι σχεδιασμού.....	18
3.2 Μορφές αστοχίας χαλικοπασσάλων.....	22
3.2.1 Αστοχία σε πλευρική διόγκωση.....	23
3.2.2 Αστοχία σε διάτμηση.....	24
3.2.3 Αστοχία σε διείδυση.....	24
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	26
4.1 Φέρουσα ικανότητα χαλικοπασσάλων.....	26
4.1.1 Θεωρητικές μέθοδοι.....	26
4.1.2 Εμπειρική μέθοδος Thornburn – Mac Vicar.....	29
4.2 Μέθοδοι υπολογισμού βελτίωσης εδάφους.....	30
• Μέθοδος του ισοδύναμου «τοίχου χαλίκων» Van Impe & De Deer.....	32
• Μέθοδος Priebe.....	38
• Μέθοδος Ισορροπίας (Equilibrium Method).....	39
• Μέθοδος Mattes & Poulos.....	40
• Μέθοδος Goughnour & Bayuk.....	41
4.3 Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού βελτίωσης.....	43

II. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

5.	ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	49
5.1	Ορισμός προσομοιώματος.....	49
5.2	Διαδικασία μόρφωσης προσομοιώματος.....	50
5.3	Επίλυση προσομοιώματος	54
5.4	Παραμετρικές αναλύσεις - Αποτελέσματα.....	57
5.4.1	Επιρροή της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c	60
5.4.2	Επιρροή του ανηγμένου μήκους του χαλικοπασσάλου L/d_c	61
5.4.3	Επιρροή του λόγου μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους E_c/E	63
5.4.4	Επιρροή της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου ϕ_c	64
5.4.5	Επιρροή της επιβαλλόμενης τάσης q	65
5.5	Μερικά συμπεράσματα - Σύγκριση με υπάρχουσες μεθόδους για την εκτίμηση της βελτίωσης του εδάφους	66
6.	ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	72
6.1	Ορισμός προσομοιώματος.....	72
6.2	Διαδικασία μόρφωσης προσομοιώματος.....	74
6.3	Επίλυση προσομοιώματος	77
6.4	Παραμετρικές αναλύσεις – Αποτελέσματα	82
6.4.1	Επιρροή της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c	85
6.4.2	Επιρροή του λόγου μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους E_c/E	86
6.4.3	Επιρροή της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου ϕ_c	87
6.4.4	Επιρροή τις επιβαλλόμενης τάσης q	88
6.4.5	Επιρροή της γωνίας διασταλτικότητας ψ	89
6.5	Γενικά συμπεράσματα σύγκρισης διδιάστατων - τρισδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων	91
6.6	Τοποθέτηση επιφανειακής στρώσης από αμμοχάλικο	92
6.6.1	Παραμετρικές αναλύσεις – Αποτελέσματα.....	92
6.6.2	Συμπεράσματα	94
6.7	Προσέγγιση συνθηκών μονοδιάστατης παραμόρφωσης.....	96
6.7.1	Παραμετρικές αναλύσεις - Αποτελέσματα	96
6.7.2	Συμπεράσματα	101
7.	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	106
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	110

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη θεμελίωσης κατασκευών σε ασθενείς εδαφικούς σχηματισμούς οδήγησε στην ανάπτυξη κατάλληλων πρακτικών, οι οποίες αυξάνουν τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους και μειώνουν τις αναμενόμενες καθιζήσεις. Μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη βελτίωση - ενίσχυση μαλακών εδαφών είναι η κατασκευή πασσάλων από συμπυκνωμένο κοκκώδες υλικό στο ασθενές έδαφος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η συμπεριφορά αργιλικού εδάφους ενισχυμένου με χαλικοπασσάλους. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει αυξανόμενη εφαρμογή, αφού συνδυάζει την ενίσχυση του εδάφους, τη βελτίωσή του καθώς και την αποτόνωση των τάσεων από το φυσικό έδαφος, εξαιτίας της συγκέντρωσης των φορτίων της κατασκευής στους χαλικοπασσάλους.

Αρχικά περιγράφονται αναλυτικά οι μέθοδοι κατασκευής των χαλικοπασσάλων. Η επιλογή της μεθόδου κατασκευής εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους που θα βελτιωθεί, το διαθέσιμο εξοπλισμό και τη σχετική τεχνογνωσία. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής είναι απαραίτητοι ποιοτικοί έλεγχοι που διασφαλίζουν τη συμμόρφωση με τα κριτήρια της μελέτης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται οι βασικές παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η μηχανική συμπεριφορά των χαλικοπασσάλων, όπως η γεωμετρία και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους και του υλικού πλήρωσης του χαλικοπασσάλου. Οι παράμετροι αυτές καθορίζουν και την πιθανή μορφή αστοχίας.

Για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας των χαλικοπασσάλων, παρουσιάζονται τόσο θεωρητικές - ανάλογα με τη μορφή αστοχίας - όσο και εμπειρικές μέθοδοι. Επιπλέον, η εκτίμηση της βελτίωσης εδάφους με πτωχά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά μπορεί να υπολογισθεί μέσω διαφόρων μεθοδολογιών, οι περισσότερες εκ των οποίων βασίζονται στον προσδιορισμό του λόγου καθιζήσεων $\beta = s/s_0$, όπου s η καθίζηση του ενισχυμένου με τους χαλικοπασσάλους εδάφους και s_0 η καθίζηση του φυσικού εδάφους. Οι μεθοδολογίες αυτές περιγράφονται αναλυτικά και επιπλέον συγκρίνονται ορισμένες από τις βασικότερες.

Για μία πιο ακριβή και αναλυτική εκτίμηση της βελτίωσης του ασθενούς εδάφους πραγματοποιούνται αρχικά διδιάστατες και στη συνέχεια πιο ακριβείς τριδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις μέσω κατάλληλου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Στις διδιάστατες αναλύσεις θεωρείται προσομοίωμα ενός χαλικοπασσάλου υπό αξονοσυμμετρικές συνθήκες, υποβαλλόμενος σε μονοδιάστατη παραμόρφωση. Στις τριδιάστατες αναλύσεις μελετάται κάρναβος χαλικοπασσάλων υπό συνθήκες τριαξονικής παραμόρφωσης.

Ειδικότερα εξετάζεται η επιρροή βασικών παραμέτρων στη βελτίωση του εδάφους, η οποία εκφράζεται μέσω του λόγου καθιζήσεων β . Συγκεκριμένα οι παράμετροι που μελετούνται είναι η ανηγμένη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων s/d_c , η επιβαλλόμενη τάση q , ο λόγος μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου-εδάφους E_s/E ,

η γωνία εσωτερικής τριβής φ_c και το ανηγμένο μήκος L/d_c του χαλικοπασσάλου. Επίσης εξετάζεται η γωνία διασταλτικότητας ψ του υλικού του χαλικοπασσάλου, ενώ μελετάται και προσομοίωμα που περιλαμβάνει επιφανειακή στρώση αντικατάστασης του αργιλικού εδάφους από συμπυκνωμένο αμμοχάλικο.

Τα αποτελέσματα των διδιάστατων αναλύσεων συγκρίνονται με αντίστοιχα αποτελέσματα θεωρητικών προσεγγίσεων, όπως και με τις τριδιάστατες αναλύσεις. Οι αποκλίσεις που προκύπτουν μεταξύ διδιάστατων – τριδιάστατων επιλύσεων, οδηγούν στην εκτέλεση επιπλέον αναλύσεων με στόχο την ερμηνεία τους. Οι αναλύσεις αυτές επικεντρώνονται στην προσέγγιση των γεωμετρικών συνθηκών φόρτισης μεταξύ διδιάστατων – τριδιάστατων επιλύσεων, μέσω νέου γεωμετρικού προσομοιώματος.

Τα γενικά συμπεράσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων και των μεταξύ τους συγκρίσεων παρουσιάζονται στην τελευταία ενότητα της παρούσας εργασίας.

ABSTRACT

The need to establish structures in soft soils, led to the development of appropriate practices that increase the bearing capacity of the soil and reduce the expected settlements. One of the methods widely used to improve – strengthen soft soils is the construction of piles of compacted granular material in the weak soil.

This thesis examines the behavior of clayey soil improved by gravel piles. This method has increasing application, as it combines the strengthening and improvement of the soil, as well as the reduction of tensions applied to the soil because of the concentration of the loads of construction on the gravel piles.

Initially, there are described in detail the construction methods of gravel piles. Choosing the appropriate construction method depends on the type of the soil to be improved, the equipment availability and of course the know-how. Quality controls during the construction of gravel piles are essential to ensure compliance with the study's criteria.

Later, are presented and analyzed the parameters which determine the mechanical behavior of gravel piles, such as geometry and geotechnical characteristics of the soil and the filling material of the gravel piles. These parameters also define the potential type of failure.

In order to calculate the bearing capacity of the gravel piles, theoretical methods - depending on the type of failure - and also empirical ones are presented. The assessment of the improvement of the soil with poor geotechnical characteristics can be calculated using various methodologies, most of which are based on determining the settlements factor $\beta = s/s_0$, where s is the settlement of the soil improved with gravel piles and s_0 is the settlement of the natural soil. The methodologies are presented and some of the most important ones are then compared.

For a more accurate and detailed assessment of the improvement of soft soil are performed initially two-dimensional and then more accurate three-dimensional parametric analysis, using appropriate finite element software. On the two-dimensional analysis, it is examined a simulation of a gravel pile under axisymmetric and one-dimensional deformation conditions. The three-dimensional simulation examines a grid of gravel piles under triaxial deformation conditions.

Specifically, it is examined the influence of basic parameters in the improvement of the soil, which is expressed through the settlements factor β . The parameters are the relative axial distance of the gravel piles s/d_c , the applied tension q , the relative stiffness ratio E_c/E , where E_c is the modulus of elasticity of the gravel pile and E is the modulus of elasticity of the soil, the angle of internal friction φ and the relative length L/d_c of the gravel piles. In addition, it is studied the dilatancy angle ψ of the gravel pile. It is also examined a study model that includes a surface layer of compacted gravel to replace the clayey soil.

The results of the two-dimensional analysis are compared with corresponding theoretical approaches as well as the three-dimensional analysis. The differences that come up from the two-and three-dimensional analysis, led to additional analysis in order to approach each other geometric loading conditions through a new geometric model.

Finally, the general conclusions of all parametric tests and the comparisons amongst them are presented in the last section of this paper.

Ι. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα έργα του Πολιτικού Μηχανικού επιβάλλεται πολλές φορές να θεμελιωθούν σε συμπίεστα εδάφη με προβλήματα ευστάθειας και καθιζήσεων, τα οποία πρέπει πρώτα να υποστούν κάποια επέμβαση, ώστε να είναι ικανά να φέρουν με ασφάλεια τα φορτία της κατασκευής. Με τις επεμβάσεις αυτές επιδιώκεται η αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους και η μείωση των καθιζήσεων του έργου. Η βασική στρατηγική είναι να βρεθεί η πιο κατάλληλη, αποτελεσματική και οικονομική μέθοδος για την εκάστοτε περίπτωση που εξετάζεται, έτσι ώστε να βελτιώνει το έδαφος και επομένως να αυξάνει την ασφάλεια της κατασκευής.

Η ποικιλία των μεθόδων αναβάθμισης των συνθηκών θεμελίωσης είναι μεγάλη, γι' αυτό γίνεται διαχωρισμός των μεθόδων σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το βασικό μηχανισμό στον οποίο στηρίζονται [Μπουκοβάλας, 2004; Χρίστουλας, 1998]:

■ Μέθοδοι ενίσχυσης του εδάφους

Μπορεί να εφαρμοστεί αντικατάσταση των επιφανειακών συμπίεστων στρώσεων με κοκκώδη υλικά επίχωσης, εγκατάσταση κατακόρυφων στραγγιστηρίων αυξημένης διαπερατότητας σε σχέση με το περιβάλλον έδαφος, τοποθέτηση χαλικοπασσάλων σε αργιλικά και ιλυώδη εδάφη, εφαρμογή βαθείας δονητικής συμπύκνωσης, τοποθέτηση γεωπλεγμάτων ή ενισχυτικών μεμβρανών, ενεματώσεις, η μέθοδος της ανάμιξης (αφαίρεση υλικού, ανάμιξή του με τσιμέντο και συνέχεια επανατοποθέτησή του) και άλλες.

■ Μέθοδοι βελτίωσης της αντοχής και της ενδοσιμότητας του εδάφους

Για παράδειγμα με προφόρτιση ώστε να αποφευχθούν οι μεγάλες καθιζήσεις ή/και η θραύση του εδάφους από την απευθείας επιβολή του φορτίου. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι το σύνολο σχεδόν των παραμορφώσεων του εδάφους είναι μη αντιστρεπτές, δηλαδή δεν αναιρούνται με την απομάκρυνση του αιτίου που τις προκάλεσε (όπως του επιχώματος προφόρτισης). Άλλη μέθοδος είναι αυτή της συμπύκνωσης σε μη συνεκτικά κυρίως εδάφη, η οποία μπορεί να επιτευχθεί για παράδειγμα με πτώση σημαντικού βάρους από κάποιο ύψος, ηλεκτρώσμωση και άλλες.

■ Μέθοδοι μείωσης του πρόσθετου φορτίου που επιβάλλεται στο έδαφος

Εφαρμόζονται για παράδειγμα με ελάτπωση του ύψους επιχωμάτων, αύξηση κλίσης των πρανών τους, χρήση υλικών επιχωμάτων με μικρότερο ειδικό βάρος (όπως ιπτάμενη τέφρα, διογκωμένη

πολυστερίνη), δημιουργία συνθηκών “επιπλέουσας θεμελίωσης” (βασίζεται στην προφόρτιση που έχει υποστεί το έδαφος σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια λόγω του βάρους των υπερκείμενων γαιών) και άλλες.

Μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιείται ευρύτατα τα τελευταία χρόνια είναι η μέθοδος των χαλικοπασσάλων, η οποία συνδυάζει κυρίως την ενίσχυση του εδάφους, τη βελτίωσή του καθώς και τη μείωση του πρόσθετου φορτίου που αναλαμβάνει το φυσικό έδαφος. [Μπουκοβάλας, 2004]

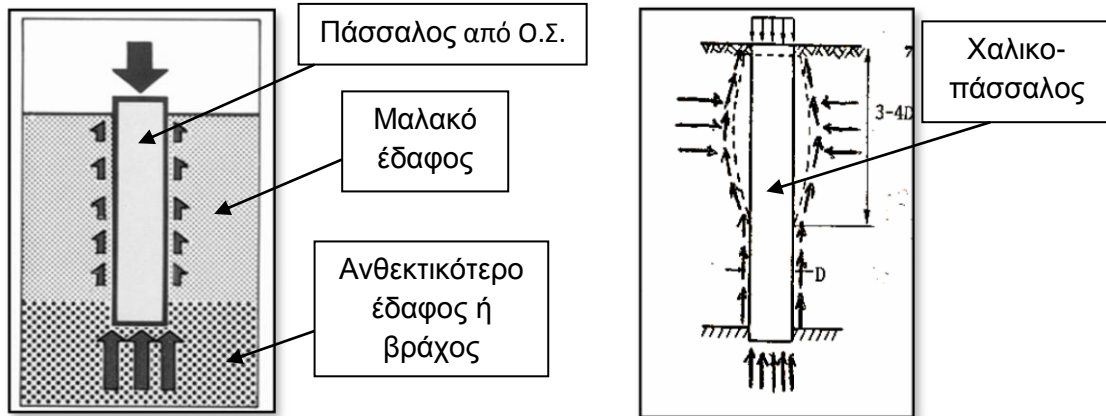
Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αντικατάσταση τμήματος (15%-35%) εδαφικού υλικού από το *in situ* έδαφος από ένα αδρομερές, ανομοιόμορφο και μη συνεκτικό υλικό (όπως για παράδειγμα χάλικες, κροκάλες, θραυστό λατομείου). Έτσι δημιουργείται ένα πιο δύσκαμπτο σύνθετο υλικό με ενισχυμένα μηχανικά χαρακτηριστικά σε σχέση με το αρχικό, του οποίου η συμπεριφορά εξαρτάται τόσο από το αρχικό έδαφος όσο και από το υλικό πλήρωσης.

Η δράση των χαλικοπασσάλων είναι σύνθετη:

- Ενισχύει το έδαφος θεμελίωσης με την αύξηση της μέσης διατμητικής αντοχής του “μικτού” εδάφους (φυσικό έδαφος – χαλικοπάσσαλοι), λόγω της μερικής αντικατάστασης του ασθενούς αρχικού εδάφους με υλικό καλύτερων χαρακτηριστικών.
- Βελτιώνει το έδαφος θεμελίωσης, εξαιτίας της τοπικής συμπύκνωσης του εδάφους κατά την εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων αλλά κυρίως λόγω της επιτάχυνσης της εξέλιξης του φαινομένου της πρωτογενούς στερεοποίησης των αργιλικών εδαφών, μέσω της δυνατότητας δημιουργίας οριζόντιας ροής του νερού των πόρων και της αντίστοιχης μείωσης των υπερπιέσεων τους λόγω εξωτερικής φόρτισης ή σεισμού.
- Μειώνει το πρόσθετο φορτίο που αναλαμβάνει το φυσικό έδαφος, εξαιτίας της συγκέντρωσης των φορτίων της κατασκευής στους χαλικοπασσάλους, λόγω της μεγαλύτερης ακαμψίας τους σε σχέση με το περιβάλλον έδαφος. Αυτή η αποφόρτιση του φυσικού εδάφους γύρω από το χαλικοπάσσαλο έχει ως αποτέλεσμα το “μικτό” έδαφος θεμελίωσης να παρουσιάζει μείωση της συμπίεσότητάς του. [Μπουκοβάλας, 2004]

Οι χαλικοπάσσαλοι διαφέρουν από τους συμβατικούς άκαμπτους πασσάλους από οπλισμένο σκυρόδεμα όχι μόνο ως προς το υλικό κατασκευής (οι χαλικοπάσσαλοι είναι σαφώς πιο συμπίεστοί από τους συμβατικούς πασσάλους) αλλά και ως προς τη συμπεριφορά τους στην ανάληψη φορτίων (Σχήμα 1.1). Οι άκαμπτοι πάσσαλοι είτε μεταφέρουν τα φορτία σε μεγάλο βάθος όπου οι εδαφικές στρώσεις είναι πιο ανθεκτικές (πάσσαλοι αιχμής), είτε μεταφέρουν τα φορτία μέσω της τριβής που αναπτύσσεται στην παράπλευρη επιφάνειά τους (πάσσαλοι τριβής). Επίσης ένας άκαμπτος πάσσαλος καθιζάνει περίπου ως ασυμπίεστο σώμα όταν φορτίζεται. [Καββαδάς, 2007]

Αντίθετα οι χαλικοπάσσαλοι είναι αποτελεσματικοί στην ανάληψη και μεταφορά μικρών φορτίων στα επιφανειακά εδαφικά στρώματα. Επιπλέον με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου ο χαλικοπάσσαλος διογκώνεται πλευρικά με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται πλευρικές πιέσεις στην περιβάλλουσα γεώμαζα.



Σχήμα 1.1α Αναπτυσσόμενες τάσεις σε συμβατικό πάσσαλο από οπλισμένο σκυρόδεμα [Καβαδάς, 2008]

Σχήμα 1.1β Αναπτυσσόμενες τάσεις σε χαλικοπάσσαλο [Χριστούλας, 1998]

2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΩΝ

2.1 Πεδίο εφαρμογής

Η μέθοδος των χαλικοπασσάλων μπορεί να εφαρμοστεί κυρίως σε λεπτόκοκκα εδάφη, των οποίων η κοκκομετρική διαβάθμιση είναι τέτοια ώστε μέσω της συνοχής τους να μπορούν να αποτρέψουν την πλευρική διόγκωση του εισερχόμενου χαλικιού. Τέτοια εδάφη είναι μαλακά μη οργανικά εδάφη (άργιλος, ιλύς) και λεπτόκοκκες αργιλώδεις ή ιλυώδεις άμμοι. Αποφεύγεται η χρήση της μεθόδου σε οργανικά εδάφη, διότι η απαραίτητη συνοχή που απαιτείται για να αποτρέψει την πλευρική διόγκωση του χαλικιού δεν διατηρείται σε βάθος χρόνου. [Ανδρέου, 2009]

2.2 Χρησιμοποιούμενα υλικά

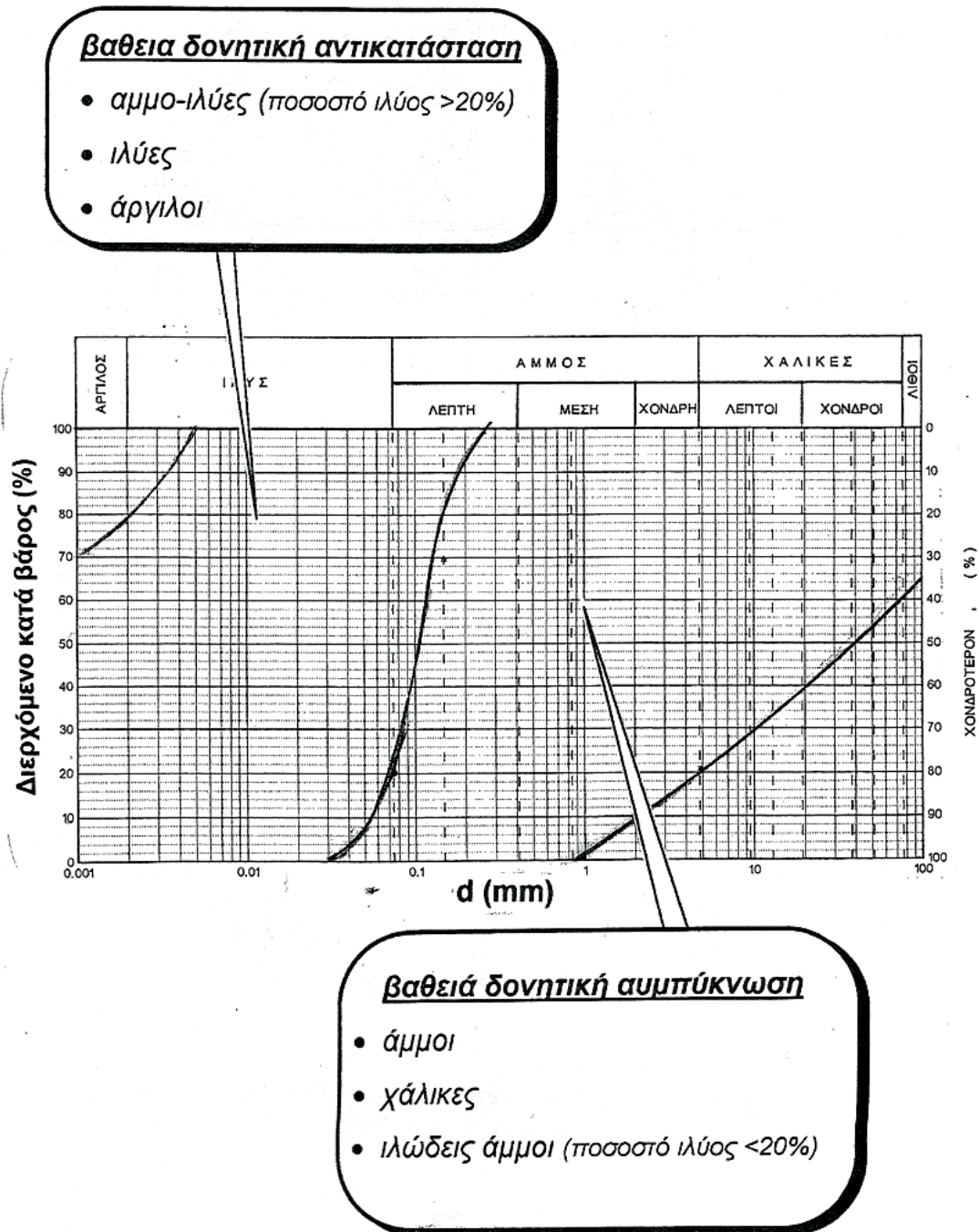
Τα υλικά πλήρωσης των χαλικοπασσάλων πρέπει να πληρούν κάποιες προδιαγραφές:

- Να σχηματίζουν ένα πάσσαλο με σχετικά μεγάλη γωνία εσωτερικής τριβής και πιο άκαμπτο από το περιβάλλον έδαφος. Προτιμώνται θραυστά γωνιώδη σκύρα, λόγω της μεγαλύτερης γωνίας εσωτερικής τριβής που επιτυγχάνουν σε σχέση με τα στρογγυλεμένα.
- Να μην θρυμματίζονται από τα μηχανήματα κατά τη διάρκεια της κατασκευής.
- Να είναι διαπερατά (η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού πρέπει να ικανοποιεί κάποιες προϋποθέσεις, όπως ποσοστό διερχόμενου από το κόσκινο No 200 μικρότερο από 10% και χωρίς αργιλικό υλικό), έτσι ώστε να επιτρέπουν την εύκολη αποστράγγιση. [I.O.K., 2006]
- Να μην περιέχουν προσμίξεις όπως λεπτόκοκκα υλικά, γαιώδεις και φυτικές προσμίξεις. [I.O.K., 2005(α)]

Γενικά τα υλικά κατασκευής των χαλικοπασσάλων πρέπει να είναι ανθεκτικά. Για παράδειγμα συγκεκριμένοι τύποι ψαμμίτη και ασβεστόλιθου θεωρούνται μη ανθεκτικοί σε πολλές περιπτώσεις, ενώ οι σχιστόλιθοι και οι γύψοι δεν χρησιμοποιούνται ποτέ καθώς καταρρέουν σε περίπτωση επαφής τους με το νερό. Επιπλέον ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται όταν ο ασβεστόλιθος υπόκειται σε χημική διάβρωση. [Ανδρέου, 2009]

2.3 Μέθοδοι κατασκευής

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι κατασκευής χαλικοπασσάλων ανάλογα κυρίως με τον τύπο του εδάφους που θα βελτιωθεί, το διαθέσιμο εξοπλισμό και τη σχετική τεχνογνωσία. Οι κυριότερες από αυτές είναι η μέθοδος της βαθιάς δονητικής συμπύκνωσης και η μέθοδος της βαθιάς δονητικής αντικατάστασης, ενώ στην Ελλάδα έχει εφαρμοστεί ευρέως η “ελληνική” μέθοδος. [Μπουκοβάλας, 2004]

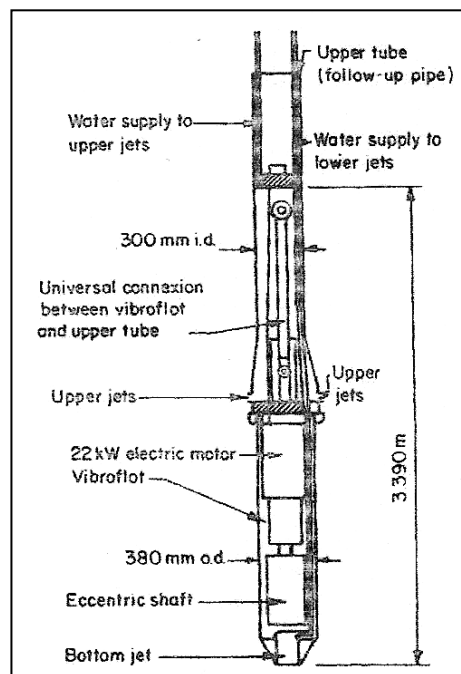


Σχήμα 2.1 Κριτήρια επιλογής της μεθόδου κατασκευής των χαλικοπασσάλων ανάλογα με την κοκκομετρική διαβάθμιση του εδάφους [Μπουκοβάλας, 2004]

2.3.1 Απαιτούμενος εξοπλισμός

Για την εκτέλεση των εργασιών κατασκευής χαλικοπασσάλων, ανάλογα με το είδος της εφαρμοζόμενης μεθόδου, είναι απαραίτητα [I.O.K., 2006]:

- Ερπυστριοφόρος ανυψωτικός γερανός ανυψωτικής ικανότητας, ανάλογης με το βάρος της δονητικής στήλης
- Δονητική τορπίλη υδραυλική ή ηλεκτρική με κινητήρα κατάλληλης ισχύος, ο οποίος κινεί περιστροφικά έκκεντρες μάζες. Το μήκος του δονητή κυμαίνεται στα 2.0 - 4.5 m και η διάμετρος στα 0.30 - 0.40 m. Η συχνότητα των παραγόμενων ταλαντώσεων είναι 30 - 50 Hz και το εύρος τους είναι περίπου 7 - 25 mm. Η αιχμή του δονητή έχει οπές εξόδου νερού ή πεπιεσμένου αέρα, προς τα κάτω ή και προς τα πάνω. [Λεβέντης, 1988]



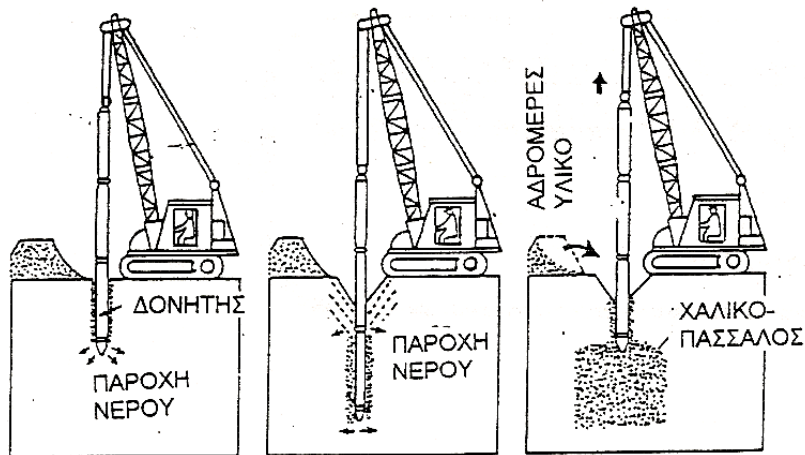
Σχήμα 2.2 Δονητική τορπίλη [I.O.K., 2006]

- Χωματοουργικά μηχανήματα για την εκτέλεση των πάσης φύσεως χωματοουργικών εργασιών όπως εκσκαφείς, φορτωτές, φορητά αυτοκίνητα κλπ.
- Αντλίες νερού και δίκτυα διαχείρισης του απαιτούμενου ύδατος, καθώς σε περίπτωση εφαρμογής της υγρής μεθόδου, οι ποσότητες είναι σημαντικές.
- Αεροσυμπιεστής για την περίπτωση εφαρμογής της ξηρής μεθόδου
- Βοηθητικός εξοπλισμός όπως δεξαμενές, δίκτυα κλπ.

2.3.2 Βαθεία δονητική συμπύκνωση (Vibro-compaction)

Η μέθοδος της βαθιάς δονητικής συμπύκνωσης εφαρμόζεται κυρίως σε χαλαρά μη-συνεκτικά εδάφη, όπως για παράδειγμα με περιεκτικότητα ιλύος μικρότερη από 20% ή περιεκτικότητα αργίλου μικρότερη από 5%.

Η διαδικασία είναι η εξής: η δονητική στήλη (το σύνολο της δονητικής τορπίλης και στελεχών αποτελούμενων από απλούς χαλύβδινους σωλήνες) τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση με τη βοήθεια ανυψωτικού γερανού στο σημείο όπου πρόκειται να εφαρμοστεί η δονητική συμπύκνωση. Με το ίδιο βάρος της δονητικής στήλης, τη βοήθεια νερού που εκτοξεύεται από τα ακροφύσια στην αιχμή του δονητή και σε συνδυασμό με τη δόνηση που επιβάλλεται η δονητική στήλη εισέρχεται στο έδαφος μέχρι το επιθυμητό βάθος, διανοίγοντας διάτρημα σημαντικής διαμέτρου (0.7 - 0.9 m). Η ροή του νερού διατηρεί ανοιχτό κανάλι κατά μήκος των πλευρών του δονητή, επιτρέποντας στο κοκκώδες υλικό που θα διοχετευτεί από την επιφάνεια να φτάνει στο χείλος και ταυτόχρονα αποτρέπει από το να κολλήσει ο δονητής. Αφού η δονητική στήλη φτάσει στο επιθυμητό βάθος αρχίζει η διαδικασία συμπύκνωσης με ανιόντα βήματα της τάξεως των 30 έως 60 cm μέχρι την επιφάνεια, με μειωμένη παροχή νερού. Οι ταλαντώσεις του δονητή οδηγούν στην καλύτερη συμπύκνωση του εδάφους, ενώ ταυτόχρονα διοχετεύεται με σταθερό ρυθμό κοκκώδες υλικό από την επιφάνεια για την πλήρωση των κενών. Ο ρυθμός ανάσυρσης του δονητή εξαρτάται από τον επιδιωκόμενο βαθμό συμπύκνωσης, τον τύπο του εδάφους αλλά και του εξοπλισμού και πρέπει να συμβαδίζει με το ρυθμό παροχής του εισαγόμενου υλικού. Η παραπάνω διαδικασία, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3 έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας συμπυκνωμένης εδαφικής στήλης με διάμετρο που κυμαίνεται από 2 έως 4 m, αναλόγως των συνθηκών. [Ανδρέου, 2009; Ι.Ο.Κ., 2006]



Σχήμα 2.3 Μέθοδος βαθιάς δονητικής συμπύκνωσης (Vibro-compaction)
[Μπουκοβάλας, 2004]

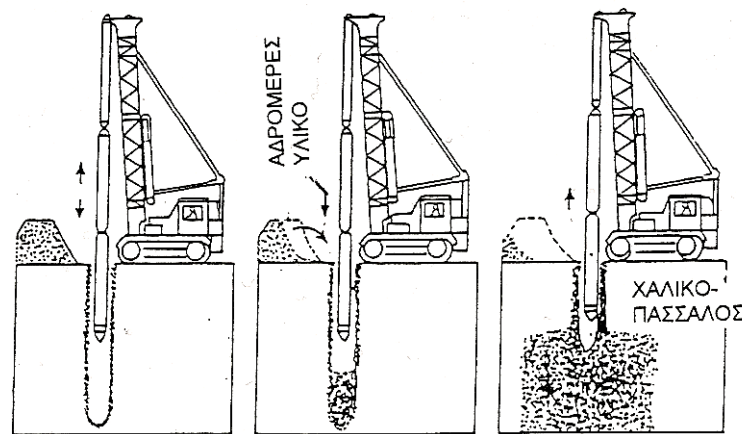
2.3.3 Βαθεία δονητική αντικατάσταση (Vibro-replacement)

Η τεχνική της βαθείας δονητικής αντικατάστασης εφαρμόζεται σε συνεκτικά και συμπιεστά εδάφη (ιλυώδη και αργιλικά), όπου η μέθοδος της βαθείας δονητικής συμπύκνωσης δεν έχει αποτελέσματα.

Η δονητική στήλη, όπως και στην περίπτωση της δονητικής συμπύκνωσης, τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση στο σημείο όπου πρόκειται να εφαρμοστεί η κατασκευή του χαλικοπασσάλου. Με το ίδιο βάρος της δονητικής στήλης, τη βοήθεια νερού που εκτοξεύεται από τα ακροφύσια στην αιχμή του δονητή (κατά την υγρή προχώρηση) ή πεπιεσμένου αέρα (κατά την ξηρή προχώρηση) και σε συνδυασμό με τη δόνηση που επιβάλλεται η δονητική στήλη εισέρχεται στο έδαφος μέχρι το επιθυμητό βάθος.

Κατά την υγρή προχώρηση, η επιβαλλόμενη δόνηση σε συνδυασμό με τη χρήση εκτοξευόμενου νερού έχει ως αποτέλεσμα την πλευρική εκτόπιση και εν μέρει απομάκρυνση (ξέπλυμα) του επιτόπου εδάφους, δημιουργώντας οπή με διάμετρο μεγαλύτερη από τη διάμετρο του δονούμενου στελέχους. Τα τοιχώματα της οπής συγκρατούνται από το ανερχόμενο μίγμα νερού και εδαφικού υλικού γύρω από το στέλεχος καθ' όλη τη διάρκεια κατασκευής του χαλικοπασσάλου. Αφού η δονητική στήλη φτάσει στο επιθυμητό βάθος, αρχίζει η διαδικασία κατασκευής του χαλικοπασσάλου με ανιόντα βήματα της τάξεως των 30 έως 50 cm μέχρι την επιφάνεια και σε κάθε βήμα διοχετεύεται χαλίκι από την επιφάνεια του εδάφους με τη βοήθεια ενός φορτωτή. Σε κάθε βήμα ανόδου, ο δονητής ξαναβυθίζεται και με τη δόνησή του προκαλεί συμπύκνωση του χαλικιού και περαιτέρω εκτόπιση του εδάφους, έτσι ώστε να σχηματίζεται χαλικοπάσσαλος με διάμετρο μεγαλύτερη από αυτήν της οπής. Η διάμετρος της στήλης ποικίλει με το βάθος και είναι γενικά μεγαλύτερη στη βάση και τη στέψη, καθώς και όπου απαντώνται στρώσεις πιο μαλακού εδάφους.

Στην περίπτωση που το έδαφος βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και κατά τη διάτρηση δεν έχουμε καταπτώσεις των παρειών της οπής (απαιτείται αρκετά υψηλή αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους με $c_u > 40 \text{ kPa}$), είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η ξηρή προχώρηση. Κατά την ξηρή προχώρηση, η τροφοδοσία με χαλίκι γίνεται με πλήρωση της οπής από την επιφάνεια χωρίς της χρήση εκτοξευόμενου ύδατος αλλά πεπιεσμένου αέρα, αφού πρώτα εξαχθεί από το έδαφος η δονητική στήλη. [Ανδρέου, 2009; Ι.Ο.Κ., 2005(β)]



Σχήμα 2.4 Μέθοδος βαθιάς δονητικής αντικατάστασης (Vibro-replacement)
[Μπουκοβάλας, 2004]

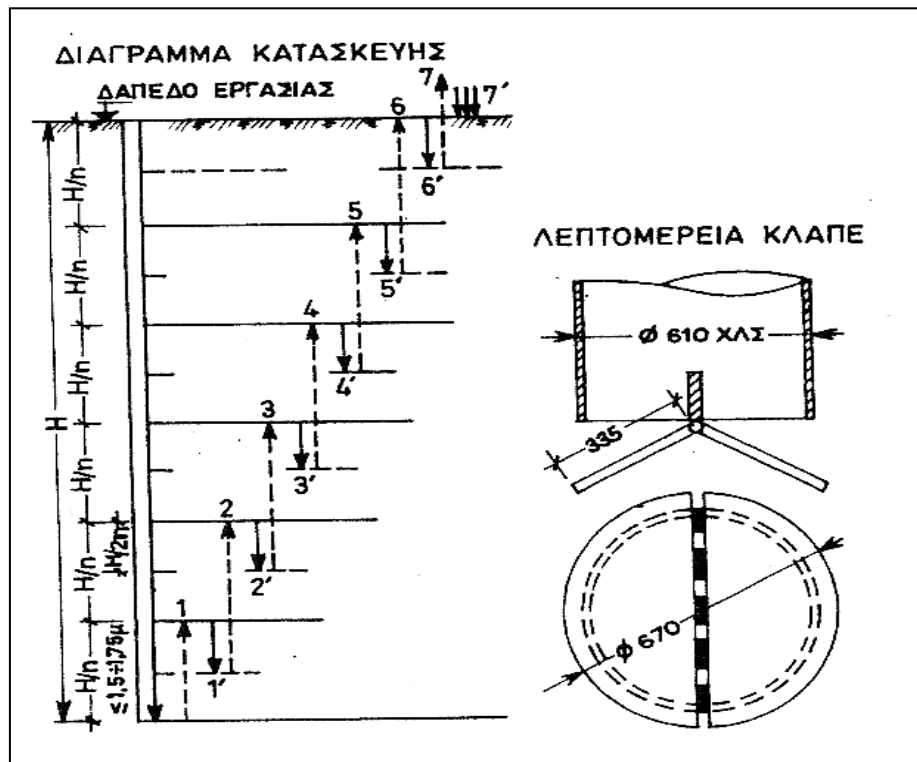
2.3.4 “Ελληνική” Μέθοδος

Η κατασκευή χαλικοπασσάλων με την “ελληνική” μέθοδο ή μέθοδο έμπηξης κλειστού σωλήνα εφαρμόζεται στα ίδια εδάφη που εφαρμόζεται και η βαθιά δονητική αντικατάσταση [Ι.Ο.Κ., 2005(β)] και περιλαμβάνει τις εξής φάσεις εργασίας:

1. Έμπηξη μέσα στο έδαφος ενός άκαμπτου χαλύβδινου σωλήνα εξωτερικής διαμέτρου κατ’ ελάχιστο 600 mm και πωματισμένου προσωρινά στο κάτω άκρο με ειδικό πώμα. Η τοποθέτηση του σωλήνα θα γίνεται είτε δονητικά είτε κρουστικά, με κατάλληλο δονητή ή σφυρί. Το πωμάτισμα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός αρθρωτά συνδεδεμένου και ανοιγόμενου πώματος (κλαπέ), κωνικού ή επίπεδου σχήματος, αποτελούμενου από ένα ή περισσότερα τμήματα που τοποθετείται μόνιμα στο κάτω άκρο του σωλήνα έμπηξης.
2. Ολοκλήρωση της έμπηξης (μέχρι την τελική στάθμη) και πλήρωση του εσωτερικού του σωλήνα με κοκκώδες υλικό, με τη βοήθεια χοάνης που τοποθετείται στο άνω άκρο του σωλήνα.
3. Ελαφρά ανύψωση του σωλήνα σε προκαθορισμένο τμήμα $h_1 = H/n$, όπου H το συνολικό μήκος έμπηξης και n ακέραιος αριθμός, τέτοιος ώστε η τιμή του κλάσματος H/n να μην υπερβαίνει τα 1.25 – 1.75 m γιατί διαφορετικά δεν γίνεται επαρκής συμπύκνωση ή και διεύρυνση. Η ανύψωση στοχεύει στο να ανοίξει το πώμα στην αιχμή του σωλήνα και το κοκκώδες υλικό να πληρώσει το αντίστοιχο τμήμα του διατρήματος, ερχόμενο σε άμεση επαφή με το έδαφος.
4. Στη συνέχεια λειτουργεί ξανά ο δονητής (ή το σφυρί έμπηξης) προκαλώντας μετατόπιση του σωλήνα προς τα κάτω κατά $h_2 = H/2n$, ούτως ώστε το πώμα να ξανακλείσει. Με την επανέμπηξη του σωλήνα

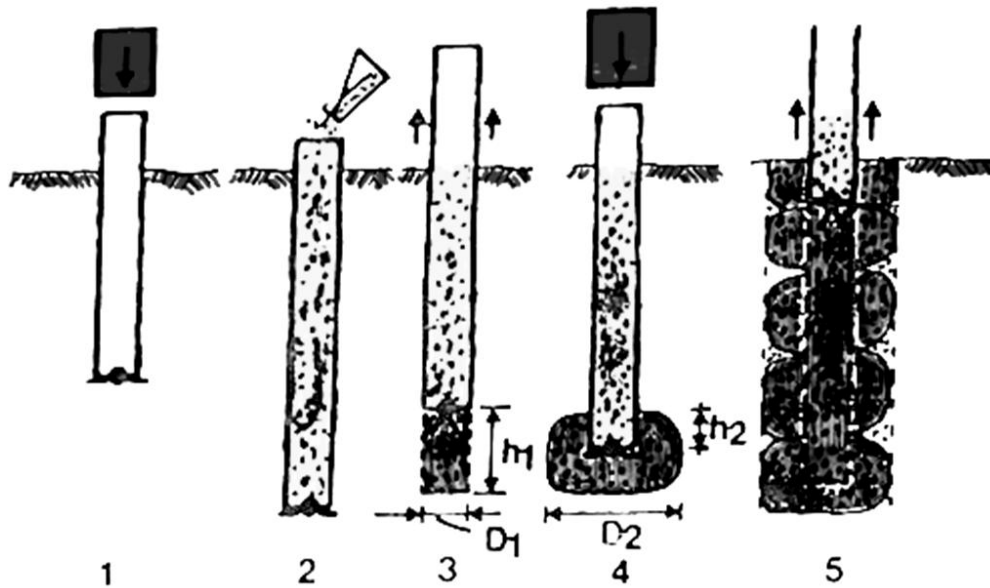
συμπυκνώνεται το κοκκώδες υλικό και διευρύνεται συγχρόνως η διάμετρος του χαλικοπασσάλου από D_1 σε D_2 . Το μήκος ανύψωσης του σωλήνα θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην υπάρχουν καταπτώσεις των τοιχωμάτων της οπής που μένει χωρίς επένδυση.

5. Εκτελούνται διαδοχικές ανυψώσεις και επανεμπήξεις του σωλήνα, έως ότου γίνει πλήρης ανύψωση του σωλήνα, πλήρωση του διατρήματος του σωλήνα με κοκκώδες υλικό και συμπίκνωσή του.



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα κύκλων εξαγωγής - επανέμπηξης του σωλήνα κατά την “ελληνική” μεθοδολογία [Λεβέντης, 1988]

Για να μειωθούν οι τριβές επαφής μεταξύ των σκύρων, τόσο μεταξύ τους όσο και με τα εσωτερικά τοιχώματα του σωλήνα έμπηξης, θα πρέπει να διοχετεύεται μέσα στο σωλήνα μαζί με τα σκύρα και ποσότητα νερού, αρκετή για να γεμίσουν τα κενά. Δημιουργείται έτσι μία υπερπίεση μέσα στο σωλήνα που διευκολύνει το γέμισμα της οπής και παράλληλα αντιμετωπίζονται και οι πλευρικές πιέσεις που ασκούνται στο σωλήνα μετά την έμπηξη από την εδαφική μάζα που τον περιβάλλει. [Λεβέντης, 1988]



Σχήμα 2.6 “Ελληνική” Μέθοδος [Μπουκοβάλας, 2004]

2.3.5 Ποιοτικός έλεγχος κατά την κατασκευή

Κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης των χαλικοπασσάλων πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά τα ακόλουθα:

- Η συμμόρφωση με τα κριτήρια της μελέτης σε σχέση με τα χρησιμοποιούμενα αδρανή πλήρωσης (κοκκομετρική διαβάθμιση, ποσότητα)
- Η τελική μέση διάμετρος των χαλικοπασσάλων, η οποία μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της μέτρησης του χρησιμοποιούμενου όγκου των αδρανών σε κάθε χαλικοπάσσαλο.
- Ο βαθμός συμπύκνωσης, ο οποίος πρέπει να είναι ικανοποιητικός σε κάθε βήμα κατά την ανύψωση. Ο έλεγχος της επίτευξής του εξαρτάται από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιεί ο Ανάδοχος (ανάγνωση της αναπτυσσόμενης πίεσης λαδιών στο υδραυλικό σύστημα ή της τιμής έντασης του ρεύματος στο αμπερόμετρο του δονητή).
- Η πίεση και η παροχή του νερού στις διάφορες φάσεις της εργασίας, έτσι ώστε να παρασύρονται και να απομακρύνονται προς την επιφάνεια τα λεπτόκοκκα συστατικά του εδάφους, αποφεύγοντας τη διείσδυσή τους στο υλικό των χαλικοπασσάλων.
- Η εξασφάλιση της συνέχειας στο “σώμα” του χαλικοπασσάλου, η οποία επιτυγχάνεται με διαρκή καταγραφή του υλικού πλήρωσης με το βάθος.

Μετά την κατασκευή των χαλικοπασσάλων απαιτείται μια σειρά από γεωτεχνικές έρευνες (πρεσσιόμετρα, δοκιμές διείσδυσης SPT, δοκιμή πνετρομέτρου, δοκιμαστική φόρτιση πλάκας), ώστε να διαπιστωθεί άμεσα η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους. [Ι.Ο.Κ., 2005(β), 2006]

3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΩΝ

3.1 Βασικές παράμετροι σχεδιασμού

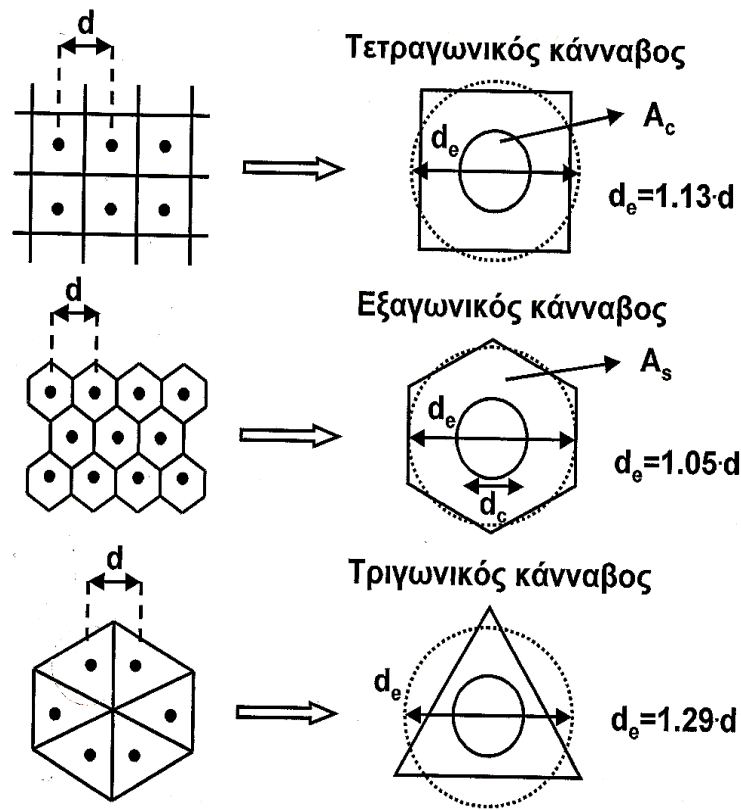
Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά των χαλικοπασσάλων είναι [Παπαδόπουλος & Ανδρέου, 2006]:

- i. Η διάμετρος των χαλικοπασσάλων (d_c)
- ii. Η μεταξύ τους αξονική απόσταση (a)
- iii. Η γωνία εσωτερικής τριβής του κοκκώδους υλικού του χαλικοπασσάλου (φ_c)
- iv. Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους (c_u)
- v. Η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων των εδαφικών υλικών και του υλικού των χαλικοπασσάλων και ιδιαίτερα ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας $\frac{E_c}{E_s}$ στη γραμμικώς ελαστική περιοχή.
- vi. Ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων n , ο οποίος προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και είναι ο λόγος κατανομής του κατακόρυφου φορτίου μεταξύ του χαλικοπασσάλου και του εδάφους.
- vii. Το ανηγμένο μήκος του χαλικοπασσάλου $\frac{L}{d_c}$ το οποίο καθορίζει την πιθανή μορφή αστοχίας του και αναλύεται στην παράγραφο 3.2.

Οπότε αναλυτικότερα για κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους:

- i. Η διάμετρος των χαλικοπασσάλων εξαρτάται από τον επιθυμητό βαθμό συμπύκνωσης, τη μέθοδο εγκατάστασης, την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού πλήρωσης και από τη συνεκτικότητα του φυσικού εδάφους. Μάλιστα η διάμετρος του χαλικοπασσάλου είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η συνεκτικότητα του εδάφους. Οι τιμές της διαμέτρου κυμαίνονται από 0.50 m έως 1.20 m περίπου. Όσο μικρότερη η μέση διάμετρος κόκκου του υλικού πλήρωσης τόσο μικρότερη προκύπτει η διάμετρος του χαλικοπασσάλου. [Χρίστουλας, 1998]
- ii. Αξονική απόσταση: Οι χαλικοπάσσαλοι εγκαθίστανται συνήθως στις κορυφές εξαγωνικού, τριγωνικού ή τετραγωνικού καννάβου. Η επιφάνεια επιρροής του κάθε χαλικοπασσάλου μπορεί να θεωρηθεί ως μία ισοδύναμη κυλινδρική επιφάνεια με διάμετρο d_e της πραγματικής περιοχής του περιβάλλοντος εδάφους που αντιστοιχεί

σε κάθε χαλικοπάσσαλο. Η επιφάνεια επιρροής είναι διαφορετική ανάλογα με το είδος του καννάβου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί. [Παπαδόπουλος & Ανδρέου, 2006]



Σχήμα 3.1 Είδη διάταξης χαλικοπασσάλων με την αντίστοιχη επιφάνεια επιρροής τους [Balaam N.P., Poulos H.G, 1983]

Ο λόγος που εκφράζει το ποσοστό αντικατάστασης του εγγενούς εδάφους από το κοκκώδες υλικό ορίζεται ως συντελεστής αντικατάστασης του εγγενούς εδάφους, ο οποίος εξαρτάται από την επιφάνεια επιρροής του χαλικοπασσάλου d_e και ισούται με:

$$\alpha_s = \frac{A_c}{A} = \frac{A_c}{A_c + A_s} = \left(\frac{d_c}{d_e}\right)^2 \quad (3.1)$$

Όπου $A_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}$ η επιφάνεια του χαλικοπασσάλου

A_s η επιφάνεια του εδάφους που περιβάλλει το χαλικοπάσσαλο και ισχύει:

$$A = A_c + A_s = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4}$$

- iii. Η γωνία εσωτερικής τριβής του κοκκώδους υλικού του χαλικοπασσάλου εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων, την τεχνική εγκατάστασης και από την ενδεχόμενη εισχώρηση λεπτόκοκκου υλικού από το περιβάλλον έδαφος στο σώμα του χαλικοπασσάλου. Η γωνία εσωτερικής τριβής που χρησιμοποιείται συνήθως για το υλικό του χαλικοπασσάλου είναι 38° , όμως στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι

μπορούν να επιτευχθούν και υψηλότερες τιμές μέχρι 45° , εφόσον η διαδικασία δόνησης είναι σταθερά ομοιόμορφη και το υλικό συμπυκνώνεται επίσης ομοιόμορφα. [Χρίστουλας, 1998]

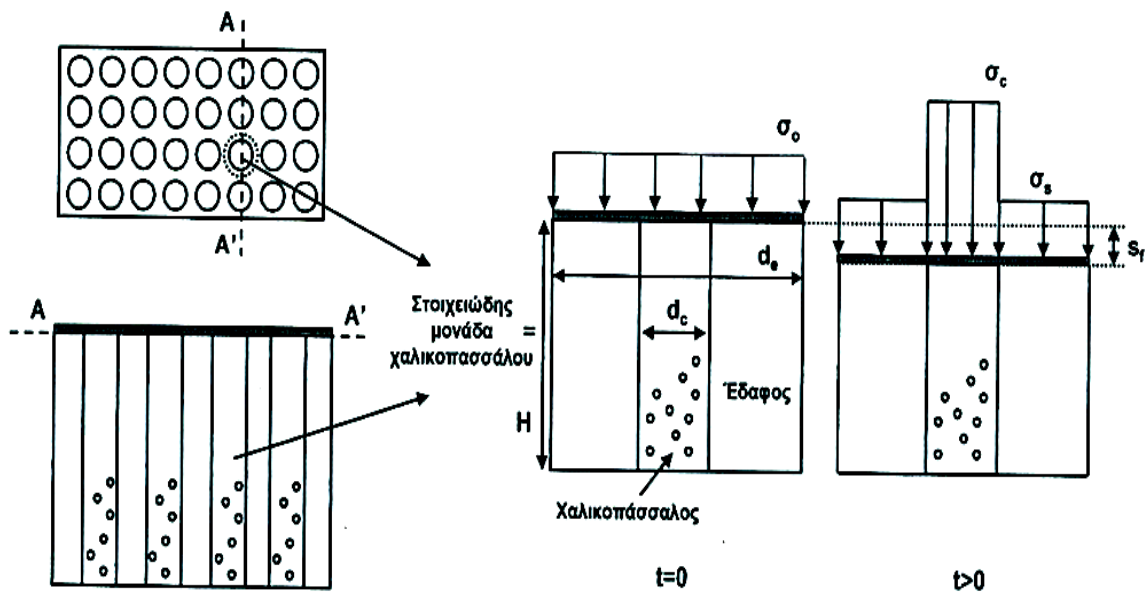
- iv. Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους επηρεάζει τη διάμετρο και τη φέρουσα ικανότητα του χαλικοπασσάλου, καθώς επίσης και τον υπολογισμό της βελτίωσης που υφίσταται το έδαφος.
- v. Ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας $\frac{E_c}{E_s}$, στην γραμμικώς ελαστική περιοχή, καθορίζει τη συγκέντρωση των τάσεων στο χαλικοπάσσαλο και επηρεάζει την εκτίμηση των παραμορφώσεων του ενισχυμένου εδάφους.
- vi. 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. Ορίζεται λοιπόν ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων n , ως ο λόγος της κατανομής του κατακόρυφου φορτίου μεταξύ των δύο στοιχείων:

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \quad (3.2)$$

Όπου σ_c : η κατακόρυφη τάση που κατανέμεται στο χαλικοπάσσαλο

σ_s : η κατακόρυφη τάση που κατανέμεται στο έδαφος

Ο συντελεστής n εξαρτάται από τη σχετική ακαμψία του χαλικοπασσάλου και του εδάφους. Οι τιμές που έχουν προταθεί είναι συνήθως από 2 έως 6. [Παπαδόπουλος & Ανδρέου, 2006]



Σχήμα 3.2 Δίκτυο χαλικοπασσάλων και κατανομή του επιβαλλόμενου φορτίου σε μία στοιχειώδη μονάδα χαλικοπασσάλου [Ανδρέου, 2009]

Η κατανομή των τάσεων για $t > 0$ που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2 δεν είναι άμεση, αλλά αναπτύσσεται σταδιακά με την εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης. Αρχικά επικρατούν στο έδαφος αστράγγιστες συνθήκες και η συμπεριφορά του προσομοιάζεται με ασυμπίεστο 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.

Από την ισορροπία των κατακόρυφων δυνάμεων ισχύει:

$$\begin{aligned}\sigma_o \cdot A &= \sigma_c \cdot A_c + \sigma_s \cdot (A - A_c) \Rightarrow \sigma_o = \sigma_c \cdot \frac{A_c}{A} + \sigma_s \cdot \left(1 - \frac{A_c}{A}\right) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \sigma_o = \sigma_c \cdot a_s + \sigma_s \cdot (1 - a_s) \quad (3.3) \quad [\text{Μπουκοβάλας, 2004}]\end{aligned}$$

Όπου σ_o : η μέση επιβαλλόμενη τάση στην επιφάνεια του εδάφους

a_s : ο συντελεστής αντικατάστασης $\frac{A_c}{A}$

Ειδική περίπτωση αποτελεί ο συνδυασμός άκαμπτης επιφάνειας φόρτισης και ελαστικής συμπεριφοράς χαλικοπασσάλου – εδάφους, όπου από την ισότητα των καθιζήσεων ισχύει:

$$s_s = s_c \Rightarrow \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot H = \frac{\sigma_c}{E_c} \cdot H \Rightarrow \frac{\sigma_c}{\sigma_s} = \frac{E_c}{E_s} = n \quad (3.4)$$

Όπου E_s : το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

E_c : το μέτρο ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου

H : το ύψος του χαλικοπασσάλου

Οπότε από τις σχέσεις (3.3), (3.4) προκύπτει:

$$\sigma_c = n \cdot \sigma_s = n \cdot \left(\frac{\sigma_o}{1 + (n-1) \cdot a_s}\right) = \mu_c \cdot \sigma_o \quad (3.5)$$

$$\sigma_s = \frac{\sigma_o}{1 + (n-1) \cdot a_s} = \mu_s \cdot \sigma_o \quad (3.6)$$

Η συμπεριφορά των χαλικοπασσάλων εξαρτάται και από τον τρόπο που επιβάλλεται το φορτίο, δηλαδή αν επιβάλλεται μέσω εύκαμπτης ή άκαμπτης επιφάνειας φόρτισης. Για παράδειγμα η συγκέντρωση των τάσεων στο χαλικοπάσσαλο είναι πιο μεγάλη στις άκαμπτες επιφάνειες φόρτισης, ενώ στις εύκαμπτες επιφάνειες φόρτισης είναι απαραίτητη η χρήση ενός στρώματος κατανομής τάσεων («μαξιλάρι») [Λεβέντης, 1988] από συμπυκνωμένο κοκκώδες

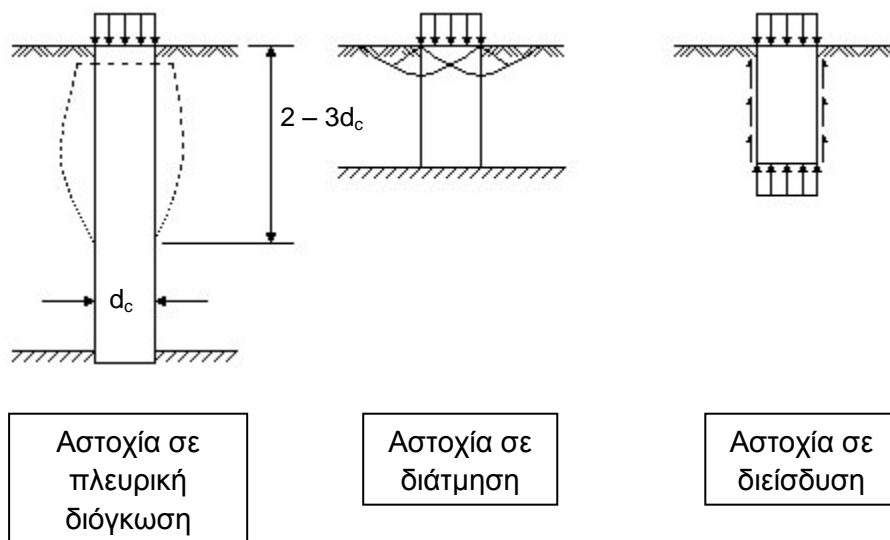
υλικό συνήθως από άμμο, το οποίο διευκολύνει την ομοιόμορφη μεταβίβαση του επιβαλλόμενου φορτίου στους χαλικοπασσάλους. [Ανδρέου, 2009]

3.2 Μορφές αστοχίας χαλικοπασσάλων

Η μορφή αστοχίας του μεμονωμένου χαλικοπασσάλου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (γεωμετρία και υλικό κατασκευής χαλικοπασσάλων, μηχανικά χαρακτηριστικά εδάφους κλπ.) και επομένως δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή. Στην πραγματικότητα η αστοχία θα επέλθει με την μορφή η οποία θα εκδηλωθεί πρώτη κατά τη σταδιακή επιβολή του φορτίου. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να δοκιμάζονται όλες οι πιθανές μορφές αστοχίας και να επιλέγεται εκείνη που οδηγεί στο μικρότερο φορτίο αστοχίας.

Οι πιθανές μορφές αστοχίας, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3, είναι:

- Πλευρική διόγκωση
- Διάτμηση
- Διείσδυση



Σχήμα 3.3 Μορφές αστοχίας μεμονωμένου χαλικοπασσάλου [Μπουκοβάλας, 2004]

3.2.1 Αστοχία σε πλευρική διόγκωση

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. Σε γενικές γραμμές, η πλευρική διόγκωση εκτείνεται σε βάθος έως τρεις διαμέτρους πασσάλου (Σχήμα 3.3) [Μπουκοβάλας, 2004]. Οι Hughes et al. (1982) αναφέρουν ότι κοντά στην επιφάνεια επικρατεί η (αστράγγιστη διατμητική) αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους ενώ σε μεγαλύτερα βάθη είναι το βάρος των υπερκειμένων το οποίο αποτρέπει την πλευρική διόγκωση [Ανδρέου, 2009]. Η αστοχία αυτή παρουσιάζεται τόσο σε μακρείς χαλικοπασσάλους αιχμής όσο και σε πάσσαλους τριβής (αιωρούμενοι) με μήκος μεγαλύτερο από τέσσερις έως έξι φορές τη διάμετρό τους [Barksdale & Bachus, 1983].

Σύμφωνα με το προσομοίωμα πλευρικής διόγκωσης [Μπουκοβάλας, 2007]:

- Το ανώτερο τμήμα του χαλικοπασσάλου εξομοιώνεται με ένα μεγάλων διαστάσεων κυλινδρικό δοκίμιο χαλίκων, το οποίο υπόκειται σε τριαξονική φόρτιση με κατακόρυφη αξονική τάση q και οριζόντια τάση σ_h .
- Το ίδιο βάρος των χαλίκων είναι πολύ μικρό σε σχέση με το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο και έτσι αγνοείται.
- Η οριζόντια τάση κυμαίνεται από σ_{ho} (οριζόντια γεωστατική) στην αρχή της φόρτισης, έως $\sigma_{h,max}$ κατά την αστοχία του χαλικοπασσάλου.
- Η πίεση πόρων στο μέσο του «δοκίμιου χαλίκων» παραμένει υδροστατική.
- Η κατακόρυφη αξονική τάση κατά την αστοχία q_u αντιστοιχεί στη φέρουσα ικανότητα του χαλικοπασσάλου [Hughes & Withers, 1974; Soyes, 1985]:

$$q_u = K_{p,χαλ} \cdot \sigma'_{h,max} \quad (3.7)$$

Όπου q_u : η αξονική φέρουσα ικανότητα του χαλικοπασσάλου

$K_{p,χαλ}$: ο συντελεστής παθητικής ώθησης του υλικού των χαλικοπασσάλων

$\sigma'_{h,max}$: η μέγιστη ενεργός πλευρική τάση του εδάφους που συνδέεται με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u

3.2.2 Αστοχία σε διάτμηση

Η μορφή αυτή αστοχίας εμφανίζεται σε χαλικοπασσάλους με μικρό μήκος που εδράζονται σε στερεό υπόβαθρο (κοντοί χαλικοπάσσαλοι αιχμής), η συμπεριφορά των οποίων προσομοιώνεται με εκείνη επιφανειακών θεμελίων που εδράζονται σε «σύνθετο» έδαφος (Σχήμα 3.3). [Μπουκοβάλας, 2007] Οι περιπτώσεις στην πράξη που εμφανίζεται η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας είναι περιορισμένες. [Ανδρέου, 2009]

3.2.3 Αστοχία σε διείδυση

Η ευστάθεια του συστήματος εξαρτάται από την πλευρική τριβή στη διεπιφάνεια καθώς και από την αντίσταση στην αιχμή. Αν το φορτίο ασκείται αποκλειστικά στο χαλικοπάσσαλο ή αν η καθίζησή του είναι μεγαλύτερη από εκείνη του εδάφους, τότε αναπτύσσονται διατμητικές δυνάμεις στη διεπιφάνεια και ο χαλικοπάσσαλος μπορεί να αστοχήσει, όπως και οι πάσσαλοι από οπλισμένο σκυρόδεμα λόγω ανεπαρκούς πλευρικής τριβής ή αντίστασης αιχμής. Επομένως αν το κατακόρυφο αξονικό φορτίο υπερβεί τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται πλευρικά και την αντίσταση στην αιχμή του, τότε αυτός αστοχεί σε διείδυση (Σχήμα 3.3). Η συγκεκριμένη αστοχία παρουσιάζεται συνήθως σε αιωρούμενους χαλικοπασσάλους με μήκος μικρότερο από τέσσερις φορές τη διάμετρό τους. [Ανδρέου, 2009]

Στο προσομοίωμα διείδυσης πασσάλου θεωρούμε ότι ο πάσσαλος συμπεριφέρεται ως ένας κοινός πάσσαλος τριβής, αλλά θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω [Μπουκοβάλας, 2007]:

- Η παράπλευρη επιφάνεια του χαλικοπασσάλου δεν είναι λεία και επομένως η αστοχία συμβαίνει πάντοτε στο περιβάλλον έδαφος.
- Ο χαλικοπάσσαλος είναι σαφώς πιο συμπιεστός από τους κοινούς πασσάλους και ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας είναι σχετικά μικρός με $\frac{E_c}{E_s} \cong 10 \div 25$.

Από τη ισορροπία των κατακόρυφων δυνάμεων σε ένα οριζόντιο τμήμα, πάχους δz , του χαλικοπασσάλου και με την υπόθεση ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u του περιβάλλοντος εδάφους διατηρείται σταθερή σε όλο το μήκος του, τότε η κατακόρυφη τάση σε βάθος z δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{vz} = \sigma_v + \frac{z}{d_c} \cdot (\gamma \cdot d_c - 4 \cdot c_u) \quad (3.8)$$

Όπου σ_{vz} : η κατακόρυφη τάση σε βάθος z

σ_v : η κατακόρυφη τάση στην κεφαλή του χαλικοπασσάλου

d_c : η διάμετρος του χαλικοπασσάλου

γ : το ειδικό βάρος του χαλικοπασσάλου

Από τη σχέση (3.8) προκύπτει η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων, με τις μέγιστες να επικρατούν στην κορυφή του χαλικοπασσάλου και να ελαττώνονται γραμμικά με το βάθος μέχρι το μηδενισμό τους σε κάποιο βάθος. Συνεπώς, η αύξηση του μήκους του χαλικοπασσάλου κάτω από το συγκεκριμένο βάθος δεν επιφέρει περαιτέρω αύξηση της αντοχής του. Αντίθετα, για μήκος χαλικοπασσάλου μικρότερο από αυτό το βάθος, τμήμα της επιβαλλόμενης τάσης αναλαμβάνεται από το έδαφος κάτω από τον πάσσαλο και επομένως ο χαλικοπάσσαλος αυτός συμπεριφέρεται ως πάσσαλος αιχμής.

Στην περίπτωση που ο χαλικοπάσσαλος είναι τόσο κοντός ώστε η κατακόρυφη τάση στη βάση του να υπερβαίνει την αντίσταση αιχμής, τότε η αστοχία σε διείσδυση προηγείται της αστοχίας σε πλευρική διόγκωση. [Ανδρέου, 2009]

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

4.1 Φέρουσα ικανότητα χαλικοπασσάλων

4.1.1 Θεωρητικές μέθοδοι

Για την πρώτη μορφή αστοχίας με πλευρική διόγκωση του χαλικοπασσάλου, που είναι και η βασικότερη μορφή, η αξονική φέρουσα ικανότητα υπολογίζεται από τη σχέση (3.7) από την οποία προκύπτει:

$$q_u = K_{p,χαλ} \cdot \sigma'_{h,max} \Rightarrow q_u = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi_c}{2}\right) \cdot \sigma'_{h,max} \quad (4.1)$$

$$\sigma'_{h,o} \leq \sigma'_{h,max} \leq \sigma'_{h,p}$$

Όπου q_u : η αξονική φέρουσα ικανότητα του χαλικοπασσάλου

φ_c : η γωνία εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου

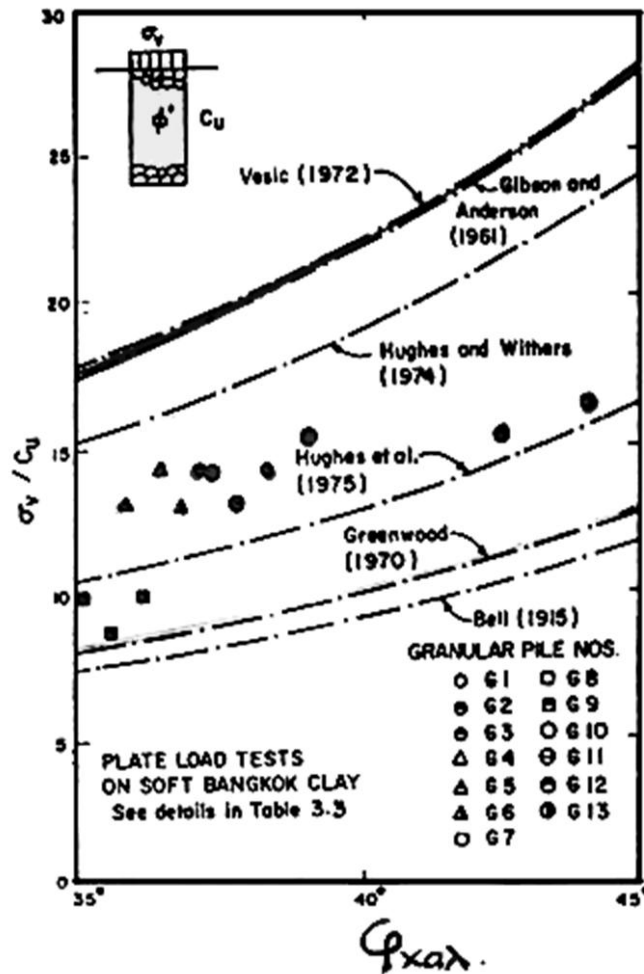
$\sigma'_{h,max}$: η μέγιστη ενεργός πλευρική τάση που ασκεί το έδαφος στο χαλικοπάσσαλο κατά την αστοχία

$\sigma'_{h,o}$: η οριζόντια ενεργός γεωστατική τάση, η οποία επικρατεί στην αρχή της φόρτισης

$\sigma'_{h,p}$: η ενεργός παθητική ώθηση γαιών

Παρατηρείται ότι η φέρουσα ικανότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την παραδοχή η οποία θα γίνει σχετικά με την πλευρική τάση $\sigma'_{h,max}$ που ασκεί το έδαφος στον χαλικοπάσσαλο κατά την αστοχία. Για την παράμετρο αυτή έχουν διατυπωθεί πολλές απόψεις στη βιβλιογραφία που αδηγούν σε άκρως διαφορετικά αποτελέσματα.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί συγκρίνονται οι γνωστότερες παραδοχές με πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμαστικές φορτίσεις χαλικοπασσάλων σε άργιλο συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του περιβάλλοντος εδάφους και της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού των χαλικοπασσάλων. Χαρακτηριστική είναι η διασπορά των αποτελεσμάτων που παρατηρείται.



Σχήμα 4.1 Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού φέρουσας ικανότητας χαλικοπασσάλων και πειραματικών αποτελεσμάτων [Μπουκοβάλας, 2004]

Με βάση όμως τα πειραματικά δεδομένα μπορεί να ορισθεί ένα άνω και ένα κάτω όριο των θεωρητικών προβλέψεων και των αντίστοιχων τιμών της οριζόντιας τάσης:

Το κάτω όριο δίνεται από τη σχέση [Greenwood, 1970]:

$$\sigma_{h,max,lo} = \sigma_{vo} + 2 \cdot c_u \quad (4.2)$$

Το άνω όριο δίνεται από τη σχέση [Hughes & Withers, 1974]:

$$\sigma'_{h,max,up} = \sigma'_{ho} + 4 \cdot c_u \quad (4.3)$$

Τα κάτω όριο αντιστοιχεί στην οριζόντια τάση που προκαλεί αστοχία του μαλακού εδάφους, όπως στην παθητική ώθηση. Το άνω όριο αντιστοιχεί στην αστοχία που προκαλείται με τη μορφή της «διαστολής κυλινδρικής κοιλότητας». [Μπουκοβάλας, 2007]

Για την αστοχία σε διάτμηση, η αξονική φέρουσα ικανότητα προκύπτει από το γενικό τύπο της φέρουσας ικανότητας επιφανειακού θεμελίου που εδράζεται σε “σύνθετο έδαφος”.

Οπότε ισχύει [Μπουκοβάλας, 2004]:

$$q_u = c^* \cdot N_c \cdot \zeta_c + \frac{1}{2} \cdot \gamma^* \cdot d_c \cdot N_\gamma \cdot \zeta_\gamma + \gamma^* \cdot D_f \cdot N_q \cdot \zeta_q \quad (4.4)$$

Όπου N_c , N_γ , N_q : συντελεστές φέρουσας ικανότητας για γωνία εσωτερικής τριβής φ^*

ζ_c , ζ_γ , ζ_q : συντελεστές μορφής θεμελίου

D_f : το βάθος θεμελίωσης

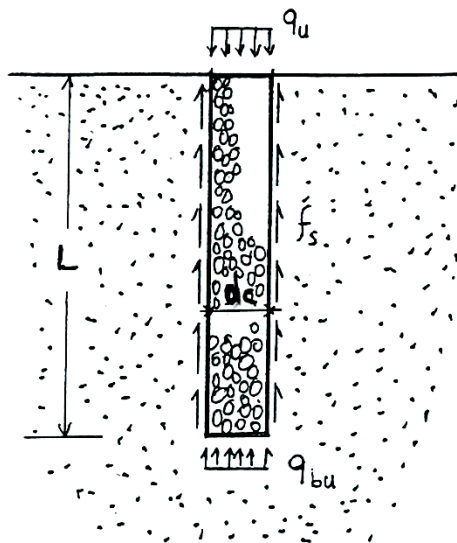
c^* : η μέση φαινόμενη συνοχή με $c^* = (1 - \alpha_s) \cdot c_{εδ}$

γ^* : το μέσο φαινόμενο βάρος μετά από την κατασκευή των χαλικοπασσάλων με $\gamma^* = \alpha_s \cdot \gamma_{χαλ} + (1 - \alpha_s) \cdot \gamma_{εδ}$

$\tan \varphi^* = \alpha_s \cdot \tan \varphi_{χαλ} + (1 - \alpha_s) \cdot \tan \varphi_{εδ}$, όπου φ^* η μέση γωνία διατμητικής τριβής

Η χρησιμοποίηση των c^* , γ^* , φ^* κατά Dimaggio αποσκοπεί στην προσομοίωση του εδάφους με ένα άλλο έδαφος με βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά και αποτελεί ένα τρόπο αποτίμησης της βελτίωσης που επιφέρει η κατασκευή των χαλικοπασσάλων. [Χρίστουλας, 1998]

Για την αστοχία λόγω διείδυσης η αξονική φέρουσα ικανότητα προκύπτει από ισορροπία κατακορύφων δυνάμεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.2 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε χαλικοπάσσαλο που αστοχεί λόγω διείδυσης [Μπουκοβάλας, 2004]

Οπότε προκύπτει:

$$q_u \cdot A_b = q_{bu} \cdot A_b + f_s \cdot A_p \Rightarrow q_u \cdot \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} = q_{bu} \cdot \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} + f_s \cdot \pi \cdot d_c \cdot L \Rightarrow$$

$$\Rightarrow q_u = q_{bu} + f_s \cdot \frac{4 \cdot L}{d_c} \quad (4.5) \quad [\text{Μπουκοβάλας, 2004}]$$

Όπου q_{bu} : η αντίσταση αιχμής

$$A_b: \text{η επιφάνεια αιχμής με } A_b = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}$$

f_s : η πλευρική τριβή με $f_s = \alpha \cdot C_u$, όπου $\alpha = 1.0$ για μαλακές αργίλους

A_p : η παράπλευρη επιφάνεια με $A_p = \pi \cdot d_c \cdot L$

Τελικά από όλες τις μεθόδους το επιτρεπόμενο φορτίο του χαλικοπασσάλου προκύπτει:

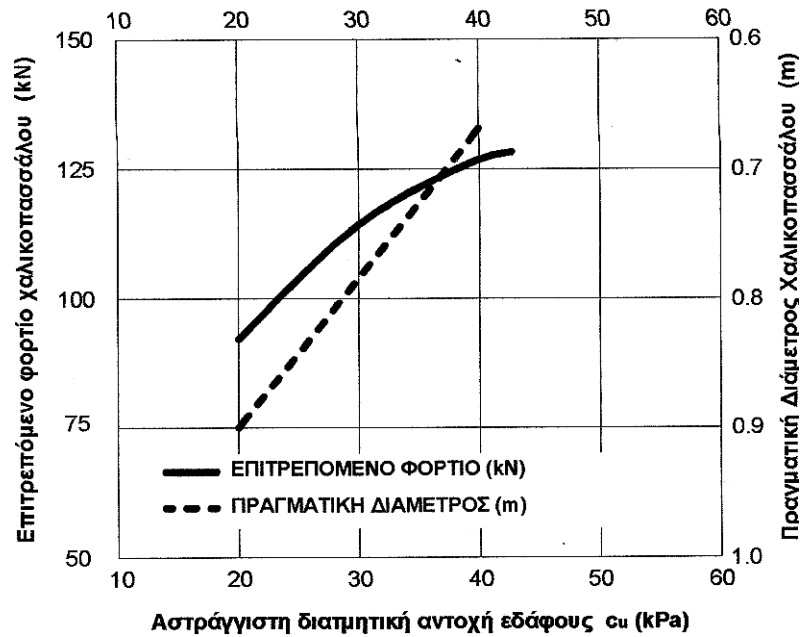
$$q_{\varepsilon\pi} = \frac{q_u}{FS} \quad (4.6)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας FS κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $1.3 \div 2.5$. Οι μικρές τιμές του συντελεστή ασφαλείας μπορούν να δικαιολογηθούν από το γεγονός ότι:

- Η πραγματική διατομή του χαλικοπασσάλου είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη από τη θεωρητική.
- Η γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi_c = 38^\circ$ που χρησιμοποιείται συνήθως για το υλικό του χαλικοπασσάλου θεωρείται πολύ μικρή.
- Το περιβάλλον έδαφος κατά κανόνα φορτίζεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η $\sigma'_{h,max}$.
- Υπάρχει μακροχρόνια αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους από τη διαδικασία στερεοποίησης που επιταχύνεται λόγω της παρουσίας του χαλικοπασσάλου. [Χρίστουλας, 1998]

4.1.2 Εμπειρική μέθοδος Thornburn – Mac Vicar

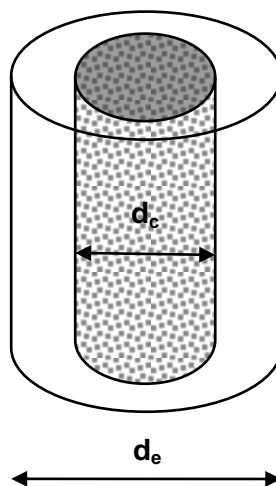
Οι Thornburn - Mac Vicar ξεκινώντας από εργαστηριακές δοκιμές μοντέλων εδαφών με στόχο την προσπάθεια αναπαραγωγής της συμπεριφοράς χαλικοπασσάλων, προχώρησαν σε διατύπωση πρότασης υπολογισμού της αξονικής φέρουσας ικανότητας μεμονωμένου χαλικοπασσάλου σε κορεσμένη άργιλο. Το διάγραμμα που ακολουθεί δίνει το επιτρεπόμενο φορτίο χαλικοπασσάλων σε συνάρτηση με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους και την πραγματική τους διάμετρο. [Χρίστουλας, 1998]



Σχήμα 4.3 Επιτρεπόμενο φορτίο κατά Thornburn - Mac Vicar [Χρίστουλας, 1998]

4.2 Μέθοδοι υπολογισμού βελτίωσης εδάφους

Οι περισσότερες μεθοδολογίες υπολογισμού των καθιζήσεων στηρίζονται στις αρχές διαστολής κυλινδρικής κοιλότητας σε ελαστικό μέσο κατά Vesic [Vesic, 1972]. Θεωρείται καλώς ορισμένο, ομοιόμορφο απειρομήκες φορτίο σε πολύ μεγάλο κάρναβο πασσάλων. Η προσομοίωση του χαλικοπασσάλου διαμέτρου d_c γίνεται μέσω στοιχειώδους κυλινδρικής μονάδας (unit cell) διαμέτρου d_e (Σχήμα 4.4). [Ανδρέου, 2009]



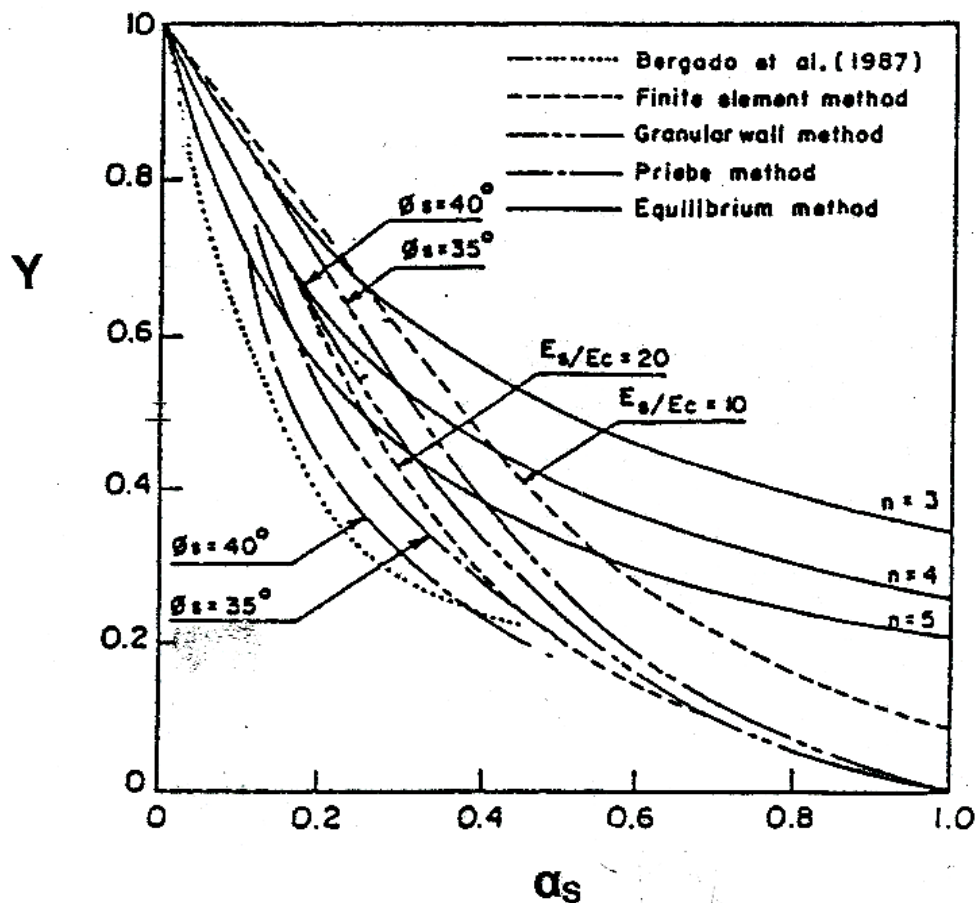
Σχήμα 4.4 Σχηματική απεικόνιση της στοιχειώδους κυλινδρικής μονάδας (unit cell)

Στις περισσότερες διαθέσιμες σχέσεις, οι οποίες αφορούν ομάδα χαλικοπασσάλων σε κορεσμένη άργιλο, χρειάζεται ο προσδιορισμός του λόγου καθιζήσεων Y :

$$Y = \frac{\text{καθίζηση "ενισχυμένου" εδάφους}}{\text{καθίζηση φυσικού εδάφους}} = \frac{s}{s_0} \quad (4.7)$$

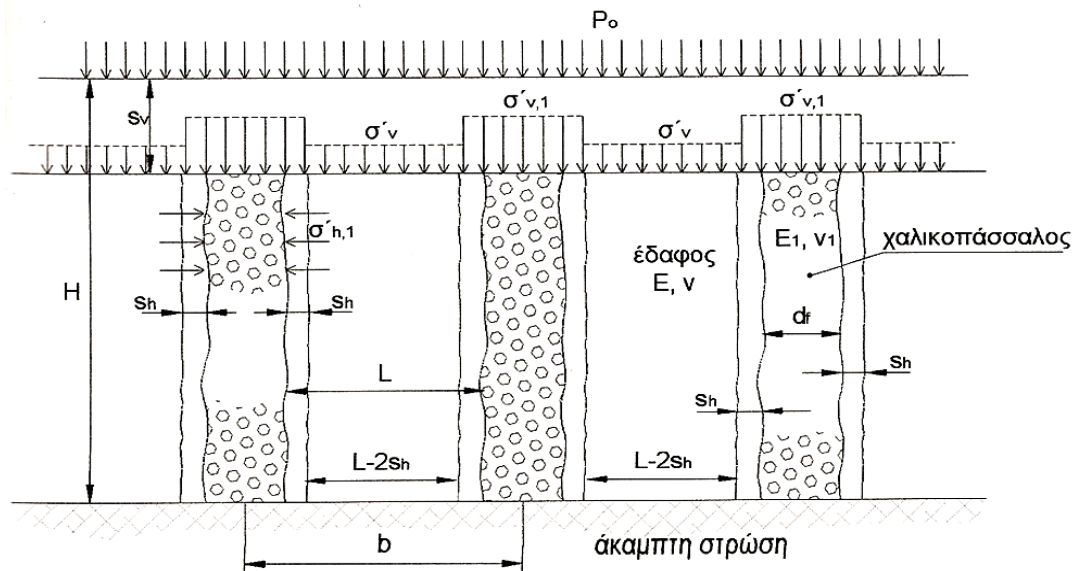
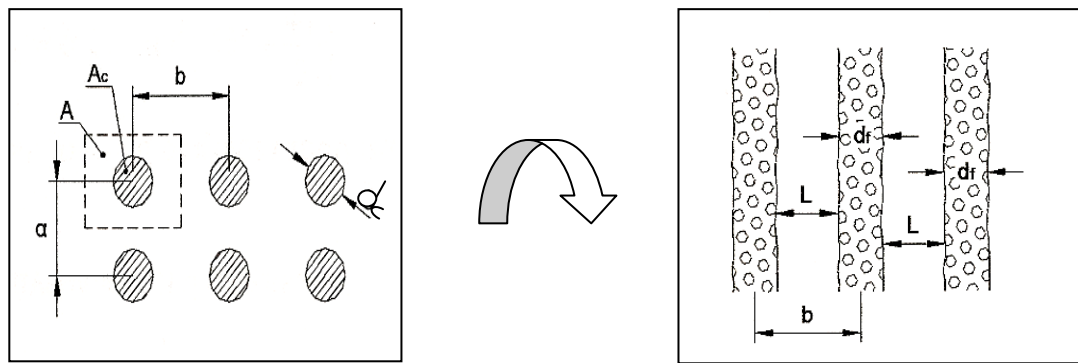
Ο λόγος καθιζήσεων Y συσχετίζεται με διάφορα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους (c_u , E_s) και διάφορα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της ομάδας των χαλικοπασσάλων (d , α_s , E_c , φ_c).

Στο Σχήμα 4.5 που ακολουθεί συνδέεται ο λόγος καθιζήσεων Y με το συντελεστή αντικατάστασης α_s σύμφωνα με διάφορες μεθόδους, κάποιες από τις οποίες θα αναλυθούν παρακάτω, ενώ στο Σχήμα 4.6 συνδέεται ο λόγος καθιζήσεων Y με την αξονική απόσταση d μεταξύ των χαλικοπασσάλων για διάφορες τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του περιβάλλοντος εδάφους c_u και ανάλογα με τον τρόπο δημιουργία της σπής των χαλικοπασσάλων. [Μπουκοβάλας, 2004]



Σχήμα 4.5 Σύγκριση μεθόδων εκτίμησης καθιζήσεων ενισχυμένου εδάφους [Μπουκοβάλας, 2004]

- Αγνοούνται οι διατμητικές τάσεις μεταξύ του χαλικοπασσάλου και της περιβάλλουσας εδαφικής μάζας.



Σχήμα 4.7 Αντικατάσταση των χαλικοπασσάλων με ισοδύναμο «τοίχο χαλίκων» με βάση τη θεωρία των Van Impe & De Deer [Van Impe & De Deer, 1983]

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.7 οι χαλικοπάσσαλοι αντικαθίστανται στους υπολογισμούς από ισοδύναμους «τοίχους» πλάτους d_f το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$d_f = \alpha_s \cdot b = \frac{A_c}{A} \cdot b = \frac{\pi \cdot \frac{d_c^2}{4}}{a \cdot b} \cdot b = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4 \cdot \alpha} \quad (4.8)$$

Όπου α_s : ο συντελεστής αντικατάστασης εδάφους

b : η αξονική απόσταση μεταξύ των ισοδύναμων «τοίχων»

d_c : η διάμετρος του χαλικοπασσάλου

α : η μικρότερη απόσταση μεταξύ των χαλικοπασσάλων

Με βάση τα παραπάνω μεγέθη και το Σχήμα 4.7 η απόσταση L μεταξύ των παρειών των γειτονικών «τοιχών» είναι:

$$L = (1 - \alpha_s) \cdot b = b - \alpha_s \cdot b = b - d_f \quad (4.9)$$

Γίνεται η υπόθεση ότι ο «τοίχος» βρίσκεται σε οριακή ισορροπία και ότι ισχύει το συμβιβαστό των παραμορφώσεων, δηλαδή ο όγκος παραμένει σταθερός (αρχικός όγκος = τελικός όγκος μετά την παραμόρφωση), οπότε:

$$d_f \cdot H = (d_f + 2 \cdot s_h) \cdot (H - s_v) \quad (4.10)$$

Όπου H : το αρχικό ύψος του «τοίχου» (ύψος χαλικοπασσάλου)

s_h : οι οριζόντια παραμόρφωση του τοίχου, η οποία είναι ίση με την αντίστοιχη παραμόρφωση του εδάφους

s_v : η κατακόρυφη παραμόρφωση του τοίχου, η οποία είναι ίση με την αντίστοιχη παραμόρφωση του εδάφους

Επίσης θεωρήθηκε ότι επικρατούν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, οπότε για την κατακόρυφη και οριζόντια παραμόρφωση αντίστοιχα του εδάφους, το οποίο συμπεριφέρεται ελαστικά και ισότροπα, ισχύουν οι σχέσεις:

$$s_v = \frac{H}{E_s} \cdot (1 - \nu_s^2) \cdot \left(\sigma'_v - \frac{\nu_s}{1 - \nu_s} \cdot \sigma'_h \right) \quad (4.11)$$

$$s_h = \frac{L}{2 \cdot E_s} \cdot (1 - \nu_s^2) \cdot \left(\sigma'_h - \frac{\nu_s}{1 - \nu_s} \cdot \sigma'_v \right) \quad (4.12)$$

Όπου E_s : το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

ν_s : ο λόγος Poisson του εδάφους

σ'_v : η ενεργός κατακόρυφη τάση που ασκείται στο έδαφος

σ'_h : η ενεργός αναπτυσσόμενη οριζόντια τάση

Από την ισορροπία των κατακόρυφων δυνάμεων (Σχήμα 4.7) προκύπτει:

$$p_o \cdot b = (d_f + 2 \cdot s_h) \cdot \sigma'_{v,1} + (L - 2 \cdot s_h) \cdot \sigma'_v \quad (4.13)$$

Όπου p_o : η μέση ομοιόμορφα κατανομημένη τάση που ασκείται στο έδαφος και το χαλικοπάσσαλο στην αρχή της φόρτισης

$\sigma'_{v,1}$: η κατακόρυφη αξονική τάση στην κεφαλή του «τοίχου»

Αν η συνοχή του υλικού του χαλικοπασσάλου θεωρηθεί μηδενική, τότε ισχύει:

$$\sigma'_{v,1} = \sigma'_{h,1} \cdot \tan^2\left(45 + \frac{\varphi_c}{2}\right) \quad (4.14)$$

Όπου $\sigma'_{h,1}$: η οριζόντια ενεργός τάση στην πλευρική επιφάνεια του «τοίχου» με

$$\sigma'_{h,1} = \sigma'_h$$

φ_c : η γωνία εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου

Με τη βοήθεια των παραπάνω εξισώσεων υπολογίζεται η σχετική οριζόντια παραμόρφωση $\frac{s_h}{b}$ και στη συνέχεια οι παράμετροι $\frac{s_v}{H}$, $\frac{\sigma'_h}{p_o}$, $\frac{\sigma'_v}{p_o}$.

Η μείωση των καθιζήσεων του ενισχυμένου εδάφους και συνεπώς η βελτίωση που υφίσταται το ασθενές έδαφος με την τοποθέτηση των χαλικοπασσάλων καθορίζεται από τις παραμέτρους:

$$1) \quad m = \frac{F_1}{F_{tot}} = \alpha_s \cdot \frac{\sigma'_{v,1}}{p_o} \quad (4.15)$$

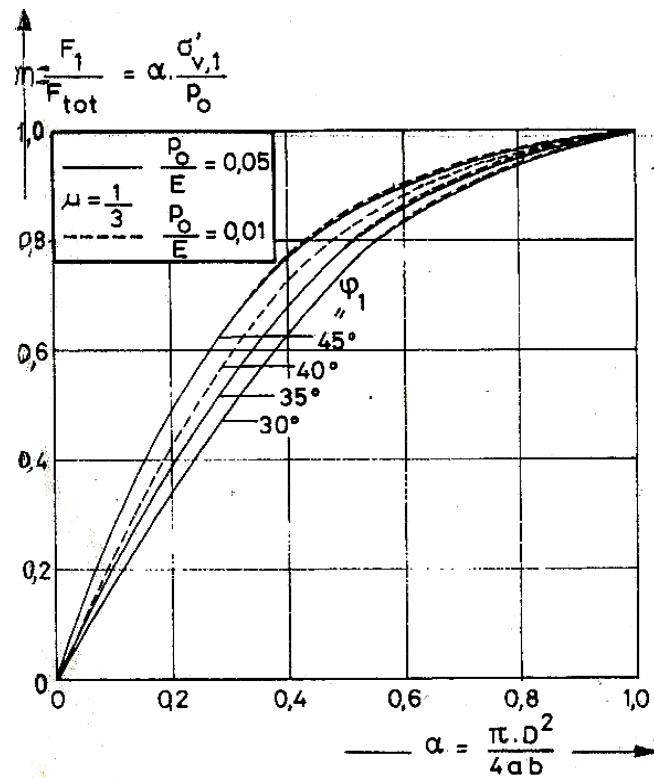
Όπου F_1 : το κατακόρυφο φορτίο που ασκείται στην κεφαλή του χαλικοπασσάλου

F_{tot} : το συνολικό κατακόρυφο φορτίο που ασκείται στην επιφάνεια στην επιφάνεια εμβαδού $a \cdot b$

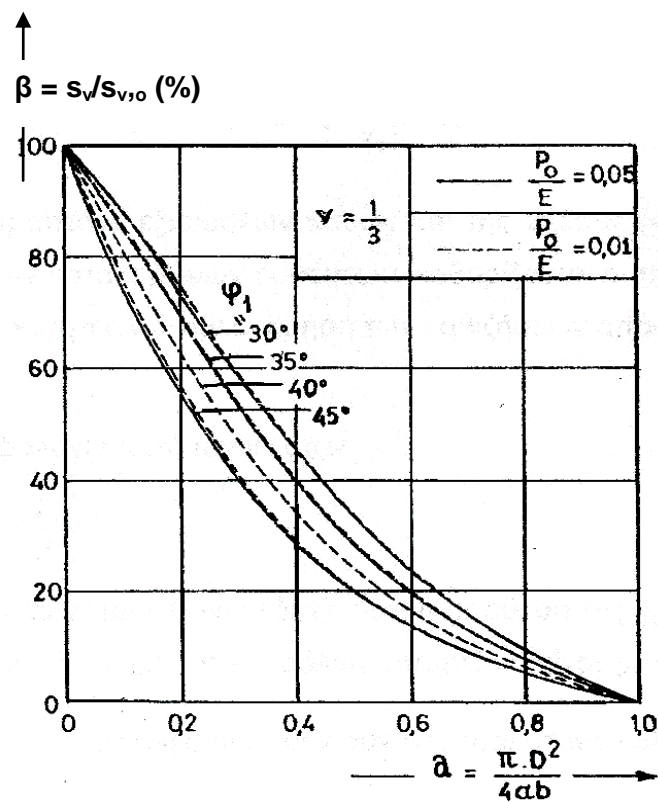
$$2) \quad \beta = \frac{s_v}{s_{v,0}}$$

Η παράμετρος β είναι ο λόγος καθιζήσεων με s_v την καθίζηση του ενισχυμένου εδάφους και $s_{v,0}$ την καθίζηση του φυσικού εδάφους.

Έχουν αναπτυχθεί νομογραφήματα (Σχήματα 4.8, 4.9) που δίνουν τις τιμές των παραπάνω παραμέτρων συναρτήσει του συντελεστή αντικατάστασης του εδάφους α_s για τιμές $\frac{p_o}{E_s} = 0.01$ ή $\frac{p_o}{E_s} = 0.05$ και λόγο Poisson του εδάφους $\nu_s = 0.33$ καθώς και για διάφορες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c . Χρησιμοποιώντας τα νομογραφήματα αυτά μπορεί να προσδιορισθεί η τάση στην κεφαλή του χαλικοπασσάλου και η καθίζηση του «σύνθετου» εδάφους και έτσι να δοθεί μία εκτίμηση για τη βελτίωση που επιφέρει η εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων στο αρχικά ασθενές έδαφος.



Σχήμα 4.8 Νομογράφημα προσδιορισμού της παραμέτρου m [Van Impe & De Deer, 1983]



Σχήμα 4.9 Νομογράφημα προσδιορισμού του λόγου καθιζήσεων β [Van Impe & De Deer, 1983]

2^{ος} τρόπος:

Με βάση τη μεθοδολογία αυτή, θεωρείται ότι το έδαφος και ο χαλικοπάσσαλος συμπεριφέρονται ελαστικά και επομένως η τάση που ασκείται στο χαλικοπάσσαλο είναι μικρότερη από την τάση αστοχίας. Δηλαδή η ανάλυση ισχύει όταν:

$$\sigma'_{v,1} \ll \sigma'_h \cdot \tan^2\left(45 + \frac{\varphi_c}{2}\right) \quad (4.16)$$

Επομένως υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης του ισοδύναμου «τοιχίου χαλίκων» και εφόσον συμπεριφέρεται ελαστικά, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις για το χαλικοπάσσαλο:

$$s_v = \frac{H}{E_c} \cdot (1 - \nu_c^2) \cdot \left(\sigma'_{v,1} - \frac{\nu_c}{1-\nu_c} \cdot \sigma'_h\right) \quad (4.17)$$

$$s_h = \frac{d_f}{2 \cdot E_c} \cdot (1 - \nu_c^2) \cdot \left(\sigma'_h - \frac{\nu_s}{1-\nu_s} \cdot \sigma'_{v,1}\right) \quad (4.18)$$

Όπου E_c : το μέτρο ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου

ν_c : ο λόγος Poisson του υλικού του χαλικοπασσάλου

Για το έδαφος ισχύουν οι σχέσεις (4.11), (4.12) που αναφέρθηκαν παραπάνω, οπότε από την ισότητα των κατακορύφων παραμορφώσεων του συστήματος χαλικοπασσάλου – εδάφους προκύπτει:

$$\frac{1}{E_c} \cdot (1 - \nu_c^2) \cdot \left(\sigma'_{v,1} - \frac{\nu_c}{1-\nu_c} \cdot \sigma'_h\right) = \frac{1}{E_s} \cdot (1 - \nu_s^2) \cdot \left(\sigma'_v - \frac{\nu_s}{1-\nu_s} \cdot \sigma'_h\right) \quad (4.19)$$

Αντίστοιχα από την ισότητα των οριζόντιων παραμορφώσεων προκύπτει:

$$\frac{d_f}{E_c} \cdot (1 - \nu_c^2) \cdot \left(\sigma'_h - \frac{\nu_s}{1-\nu_s} \cdot \sigma'_{v,1}\right) = \frac{L}{E_s} \cdot (1 - \nu_s^2) \cdot \left(\sigma'_h - \frac{\nu_s}{1-\nu_s} \cdot \sigma'_v\right) \quad (4.20)$$

Από τις σχέσεις (4.13), (4.19), (4.20) μπορούν να προσδιορισθούν οι τιμές των $\sigma'_{v,1}$, σ'_h και σ'_v , οι οποίες είναι αναγκαίες για την εκτίμηση των καθιζήσεων.

Αριθμητικές εφαρμογές των παραπάνω απέδειξαν ότι η υπόθεση της ελαστικής συμπεριφοράς του χαλικοπασσάλου και του εδάφους (4.16) ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα μόνο για πολύ μεγάλες τιμές του συντελεστή αντικατάστασης α_s , μεγαλύτερες από 0.7, οι οποίες όμως δεν είναι ρεαλιστικές. Για αυτό το λόγο αυτός ο τρόπος υπολογισμού μπορεί γενικά να παραληφθεί. [Van Impe & De Deer, 1983]

■ Μέθοδος Priebe

Αποτελεί την πιο διαδεδομένη μεθοδολογία διαστασιολόγησης χαλικοπασσάλων. Οι ιδιότητες του εδάφους, ο μηχανικός εξοπλισμός και η διαδικασία εκτέλεσης της μεθόδου επηρεάζουν έμμεσα τα τελικά αποτελέσματα και κυρίως τον υπολογισμό της τελικής διαμέτρου των χαλικοπασσάλων.

Οι βασικές παραδοχές στις οποίες στηρίζεται η μέθοδος είναι:

- Κάθε χαλικοπάσσαλος εμβαδού A_c προσομοιώνεται με μία στοιχειώδη κυλινδρική μονάδα (unit cell) εμβαδού A .
- Οι χαλικοπάσσαλοι εδράζονται επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης.
- Το υλικό των χαλικοπασσάλων θεωρείται απολύτως ασυμπίεστο.
- Αγνοούνται τα ειδικά βάρη του υλικού κατασκευής του χαλικοπασσάλου και της περιβάλλουσας εδαφικής μάζας.
- Οι χαλικοπάσσαλοι συμπεριφέρονται στερεοπλαστικά.
- Η εδαφική στρώση συμπεριφέρεται ελαστικά και ισότροπα ($K_o = 1$) και η διόγκωση του χαλικοπασσάλου διατηρείται σταθερή σε όλο το μήκος του.

Με βάση όλα τα παραπάνω ορίζεται ο συντελεστής βελτίωσης κατά Priebe:

$$n_{\text{Priebe}} = 1 + \alpha_s \cdot \left(\frac{0.5 + f(v_s, \alpha_s)}{K_\alpha \cdot f(v_s, \alpha_s)} - 1 \right) \quad (4.21)$$

$$\text{Όπου } f(v_s, \alpha_s) = \frac{(1-v_s) \cdot (1-\alpha_s)}{1-2 \cdot v_s + \alpha_s}$$

$$\alpha_s: \text{ ο συντελεστής αντικατάστασης εδάφους με } \alpha_s = \frac{A_c}{A}$$

v_s : ο λόγος Poisson του εδάφους

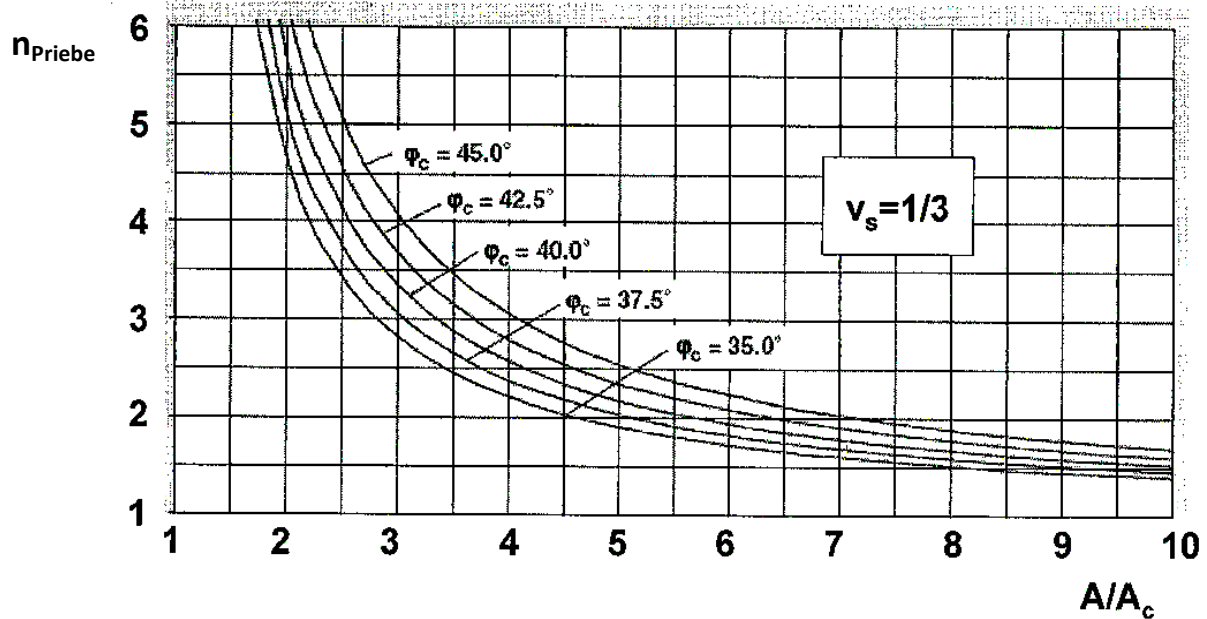
$$K_\alpha: \text{ ο συντελεστής ενεργητικής ώθησης με } K_\alpha = \tan^2\left(45 - \frac{\phi_c}{2}\right)$$

Με τον συντελεστή βελτίωσης n_{Priebe} εκφράζεται ποσοτικά η ενίσχυση της διατμητικής αντοχής του εδάφους με την κατασκευή των χαλικοπασσάλων.

Θεωρώντας για το λόγο Poisson του εδάφους την τιμή $v_s = 0.33$, η οποία είναι αντιπροσωπευτική στις περισσότερες περιπτώσεις μετά το τέλος του συνόλου των καθιζήσεων, τότε από τη σχέση (4.21) προκύπτει:

$$n_{\text{Priebe}} = 1 + \alpha_s \cdot \left(\frac{5 - \alpha_s}{4 \cdot K_\alpha \cdot (1 - \alpha_s)} - 1 \right) \quad (4.22)$$

Η τιμή του συντελεστή βελτίωσης n_{Priebe} εκτιμάται με τη βοήθεια του Σχήματος 4.11 για λόγο Poisson της εδαφικής μάζας $\nu_s = 0.33$ συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c και του λόγου των εμβαδών A/A_c . [Priebe, 1995]



Σχήμα 4.10 Νομογράφημα υπολογισμού του συντελεστή βελτίωσης n_{Priebe} [Priebe, 1995]

■ Μέθοδος Ισοροπίας (Equilibrium Method)

Η μέθοδος βασίζεται στην παραδοχή άκαμπτης επιφάνειας φόρτισης και ελαστικής συμπεριφοράς χαλικοπασσάλου – εδάφους. [Παπαδόπουλος & Ανδρέου, 2006]. Επομένως με βάση την ισότητα των καθιζήσεων προκύπτει:

$$s = \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot L = \frac{\sigma_0}{E_s} \cdot L \cdot \mu_s \Rightarrow s = s_0 \cdot \mu_s \quad (4.23)$$

$$\text{με } \mu_s = \frac{1}{1+(n-1) \cdot \alpha_s}$$

Όπου s : η καθίζηση του ενισχυμένου εδάφους

s_0 : η καθίζηση του εδάφους που δεν έχει υποστεί βελτίωση

σ_s : η κατακόρυφη τάση που κατανέμεται στο έδαφος

σ_0 : η μέση επιβαλλόμενη τάση στην επιφάνεια του εδάφους

E_s : το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

L : το μήκος του χαλικοπασσάλου

■ Μέθοδος Mattes & Poulos

Η μέθοδος εκτίμησης των καθιζήσεων κλασικών άκαμπτων πασσάλων [Mattes & Poulos, 1969] μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση των χαλικοπασσάλων [Greenwood & Kirsch, 1983; Soyeuz, 1985]. Σε αυτή την περίπτωση η επιβαλλόμενη φόρτιση αναλαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από τους χαλικοπασσάλους και οι άμεσες καθιζήσεις αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών καθιζήσεων. Η καθίζηση στην κεφαλή του χαλικοπασσάλου με βάση τη μέθοδο αυτή προκύπτει από τη σχέση:

$$s = \frac{P}{L \cdot E_s} \cdot I_p \quad (4.24)$$

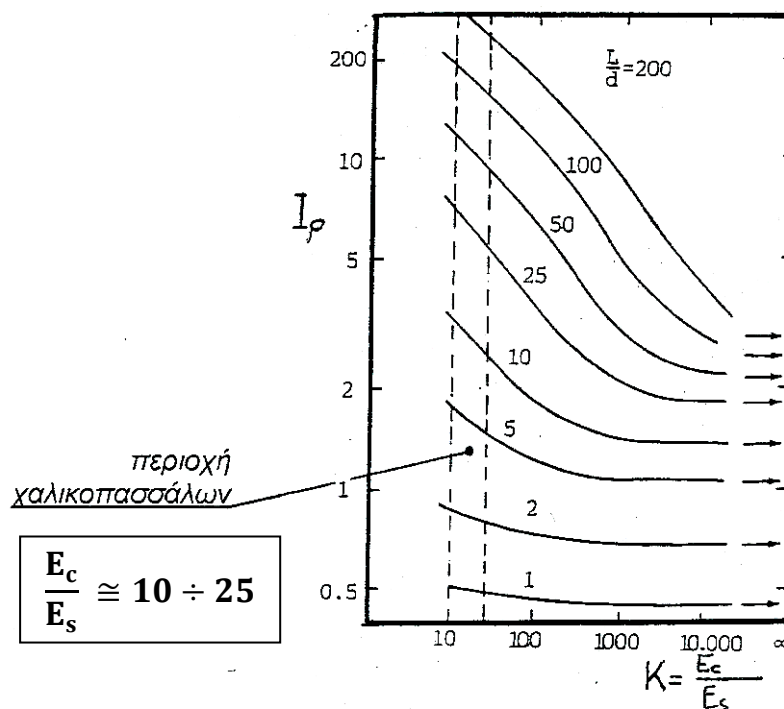
Όπου s : η καθίζηση στην κεφαλή του χαλικοπασσάλου

P : το φορτίο στην κεφαλή του χαλικοπασσάλου

L : το μήκος του χαλικοπασσάλου

E_s : το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

I_p : συντελεστής επιρροής που εξαρτάται από το μήκος και τη διάμετρο του χαλικοπασσάλου και από τη σχετική ακαμψία $K = \frac{E_c}{E_s}$. Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.11) δίνονται οι τιμές του συντελεστή I_p για διάφορους λόγους $\frac{L}{d_c}$ και για διάφορους τιμές του λόγου $\frac{E_c}{E_s}$.



Σχήμα 4.11 Υπολογισμός συντελεστή I_p [Μπουκοβάλας, 2004]

■ Μέθοδος Goughnour & Bayuk

Για την εκτίμηση των καθιζήσεων του ενισχυμένου εδάφους με βάση αυτή τη μέθοδο θεωρήθηκε ότι:

- Κάθε χαλικοπάσσαλος προσομοιώνεται με μία στοιχειώδη κυλινδρική μονάδα (unit cell), στην οποία το φορτίο επιβάλλεται γρήγορα, σταθερά και οδηγεί το χαλικοπάσσαλο και το έδαφος στην ίδια κατακόρυφη παραμόρφωση.
- Οι χαλικοπάσσαλοι συμπεριφέρονται ελαστο – πλαστικά σύμφωνα με το κριτήριο διαρροής Mohr – Coulomb.
- Το έδαφος συμπεριφέρεται σύμφωνα με τη θεωρία στερεοποίησης Terzaghi, τροποποιημένη έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη τις τις ακτινικές και κατακόρυφες παραμορφώσεις.
- Το υλικό των χαλικοπασσάλων είναι πλήρως ασυμπίεστο.

Η ανάλυση των Goughnour & Bayuk περιορίζεται σε κανονικά στερεοποιημένες αργίλους και στηρίζεται στο γεγονός ότι σε κορεσμένο έδαφος και με τη θεώρηση ότι το υλικό των χαλικοπασσάλων είναι ασυμπίεστο, δεν εκδηλώνονται άμεσες παραμορφώσεις. Όσο όμως η αργίλος στερεοποιείται, κατακόρυφα φορτία μεταφέρονται στους χαλικοπασσάλους και όταν η στερεοποίηση ολοκληρωθεί, οι καθιζήσεις σταματούν.

Οι χαλικοπάσσαλοι κατασκευάζονται σε άργιλο στην οποία επικρατούν συνθήκες αρχικής ηρεμίας (K_0), αλλά κατά τη συμπύκνωση των χαλικιών το περιβάλλον έδαφος ωθείται πλευρικά και μπορεί να αυξηθεί ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων. Όμως αν στο έδαφος επικρατούν αστράγγιστες συνθήκες, δεν παρατηρούνται σημαντικές ογκομετρικές μεταβολές κατά τη διάρκεια της κατασκευής και επειδή έχει θεωρηθεί ασυμπίεστο το υλικό των χαλικοπασσάλων, τότε οι μικρές αυτές ογκομετρικές μεταβολές της αργίλου εκτονώνονται μετά την κατασκευή. Επομένως ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων επανέρχεται σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την κατασκευή στην αρχική τιμή του K_0 .

Κατά τη στερεοποίηση υπό το επιβαλλόμενο φορτίο, παύουν να ισχύουν οι συνθήκες αρχικής ηρεμίας (K_0) στο έδαφος, διότι επιβάλλονται σε αυτό πλευρικές πιέσεις λόγω διόγκωσης του χαλικοπασσάλου. Ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων λαμβάνει τιμές μεταξύ K_0 και $1/K_0$, ανάλογα με η γεωμετρία του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, αν η διάμετρος του χαλικοπασσάλου είναι μικρή, τότε οι οριζόντιες παραμορφώσεις στο έδαφος είναι μικρές και ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων είναι κοντά στην τιμή K_0 . Αντίθετα αν η διάμετρος του χαλικοπασσάλου πλησιάζει τη διάμετρο της στοιχειώδους κυλινδρικής μονάδας (unit cell), ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων πλησιάζει την τιμή $1/K_0$.

Με βάση όλα τα παραπάνω για την εκτίμηση της κατακόρυφης παραμόρφωσης και κατά συνέπεια της καθίζησης της αργίλου προέκυψαν οι ακόλουθες σχέσεις [Goughour, 1983]:

$$\varepsilon_v = (1 - \alpha_s) \cdot \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot \log \left(\frac{\sigma'_{v,so} + \Delta\sigma}{\sigma'_{v,so}} \right) \quad (4.25)$$

$$\text{με } \Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma'_{vs}}{1+2 \cdot K_0} \cdot (1 + K + K \cdot K_0) \text{ για } K > 1$$

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma'_{vs}}{1+2 \cdot K_0} \cdot (1 + K + K_0) \text{ για } K \leq 1$$

$$\text{και } K = K_0 + \frac{1}{\varepsilon_v} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{1-\varepsilon_v}} - 1 \right) \cdot \frac{\sqrt{\alpha_s}}{1-\sqrt{\alpha_s}}$$

Όπου ε_v : η κατακόρυφη παραμόρφωση σε κάποιο σημείο (ίδια για το έδαφος και τους χαλικοπασσάλους)

α_s : ο συντελεστής αντικατάστασης εδάφους

C_c : ο δείκτης συμπιεστότητας της αργίλου

e_0 : ο αρχικός δείκτης κενών της αργίλου

$\sigma'_{v,so}$: η αρχική ενεργός κατακόρυφη τάση στην άργιλο

$\Delta\sigma'_{vs}$: η μέση τιμή της μεταβολής της ενεργού κατακόρυφης τάσης στην άργιλο

K : ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων μετά την εφαρμογή του φορτίου

K_0 : ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων σε συνθήκες αρχικής ηρεμίας

4.3 Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού βελτίωσης

Οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν παραπάνω εκτιμούν τη βελτίωση που επιφέρει η εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων στο έδαφος με διαφορετικό τρόπο. Έτσι επιχειρήθηκε για τη σύγκριση των βασικών μεθόδων Van Impe & De Deer, Priebe και Ισορροπίας, η χρήση του παρακάτω παραδείγματος και τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Θεωρήθηκε ασθενές αργιλικό έδαφος λόγου Poisson $\nu_s = 0.33$ και μέτρου ελαστικότητας $E_s = 20 \text{ MPa}$, στο οποίο πρόκειται να ασκηθούν από μελλοντική κατασκευή τάσεις ίσες με $p_o = 200 \text{ kN/m}^2$. Για την ενίσχυση του εδάφους σχεδιάζεται η εγκατάσταση χαλικοπασσάλων διαμέτρου $d_c = 0.70 \text{ m}$ και μήκους $L = 8 \text{ m}$ σε τετραγωνικό κάρναβο.

Αρχικά εφαρμόζεται η μέθοδος Van Impe & De Deer και επιλέγονται τρεις τιμές για το συντελεστή αντικατάστασης $\alpha_s = 0.12, 0.25, 0.4$ για αραιή, μέση και πυκνή διάταξη χαλικοπασσάλων αντίστοιχα, ενώ η γωνία εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου λαμβάνει τιμές ίσες με $\varphi_c = 35^\circ$ και $\varphi_c = 45^\circ$. Οπότε από το Σχήμα 4.9 για $p_o/E_s = 0.01$, $\varphi_c = 35^\circ$ και $\alpha_s = 0.12$ προκύπτει ο λόγος των καθιζήσεων $\beta \approx 84.3\% = 0.843$. Αντίστοιχα για $\alpha_s = 0.25$, $\beta \approx 60\% = 0.6$ και για $\alpha_s = 0.4$, $\beta \approx 40\% = 0.4$. Ομοίως και για $\varphi_c = 45^\circ$ (Πίνακας 4.1). Αν τώρα διατηρηθεί μία σταθερή τιμή για το συντελεστή αντικατάστασης όπως για παράδειγμα $\alpha_s = 0.25$, τότε ο λόγος καθιζήσεων β για γωνία εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου $\varphi_c = 30^\circ$ προκύπτει $\beta \approx 65\% = 0.65$, ενώ για $\varphi_c = 45^\circ$, $\beta \approx 45.7\% = 0.457$ (Πίνακας 4.2).

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 Τιμές του λόγου καθιζήσεων β για διάφορες τιμές του συντελεστή αντικατάστασης α_s

α_s	$\varphi_c = 35^\circ$	$\varphi_c = 45^\circ$
	Λόγος καθιζήσεων β	
0.12	0.843	0.729
0.25	0.600	0.464
0.40	0.400	0.285

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 Τιμές του λόγου καθιζήσεων β για διάφορες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c

$\alpha_s = 0.25$	
$\varphi_c (^\circ)$	Λόγος καθιζήσεων β
30	0.650
35	0.600
45	0.457

Στη συνέχεια εφαρμόζεται με τον ίδιο τρόπο όπως παραπάνω η μέθοδος Priebe και υπολογίζεται ο συντελεστής βελτίωσης n_{Priebe} από τη σχέση:

$$n_{Priebe} = 1 + \alpha_s \cdot \left(\frac{5 - \alpha_s}{4 \cdot K_\alpha \cdot (1 - \alpha_s)} - 1 \right) = 1/\beta \quad \text{για } \nu_s = 0.33 \quad (4.26)$$

$$\text{Όπου } K_\alpha = \tan^2\left(45 - \frac{\varphi_c}{2}\right)$$

Επομένως για τις τιμές του συντελεστή αντικατάστασης α_s που χρησιμοποιήθηκαν πριν και για διάφορες τιμές της γωνίας φ_c , προκύπτουν τα αποτελέσματα των Πινάκων 4.3 και 4.4. Οι τιμές που προέκυψαν για το συντελεστή n_{Priebe} μπορούν να επαληθευθούν και από το Σχήμα 4.11.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 Τιμές του λόγου καθιζήσεων β για διάφορες τιμές του συντελεστή αντικατάστασης α_s

α_s	$\varphi_c = 35^\circ \rightarrow K_\alpha = 0.271$		$\varphi_c = 45^\circ \rightarrow K_\alpha = 0.172$	
	$n_{Priebe} = 1/\beta$	β	$n_{Priebe} = 1/\beta$	β
0.12	1.494	0.669	1.847	0.541
0.25	2.211	0.452	3.051	0.328
0.40	0.292	0.292	5.057	0.198

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4 Τιμές του λόγου καθιζήσεων β για διάφορες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c

$\alpha_s = 0.25$			
$\varphi_c (^\circ)$	K_α	$n_{Priebe} = 1/\beta$	β
30	0.333	1.939	0.516
35	0.271	2.211	0.452
45	0.172	3.051	0.328

Με εφαρμογή της μεθόδου Ισορροπίας (Equilibrium method) ο λόγος καθιζήσεων β υπολογίζεται από τη σχέση:

$$s = s_o \cdot \mu_s \Rightarrow \mu_s = \frac{s}{s_o} = \beta \quad (4.27)$$

$$\text{με } \mu_s = \frac{1}{1 + (n-1) \cdot \alpha_s}$$

Ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων n ισούται με το λόγο των μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους, δηλαδή ισχύει $n = E_c/E_s$ όπως προκύπτει και από τη σχέση (3.4). Επόμενως για διάφορες τιμές του λόγου n και για διάφορες τιμές του συντελεστή αντικατάστασης α_s προκύπτουν τα αποτελέσματα των Πινάκων 4.5 και 4.6.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5 Τιμές του λόγου καθιζήσεων β για διάφορες τιμές του λόγου $n = E_c/E_s$

$\alpha_s = 0.25$	
$n = E_c/E_s$	Λόγος καθιζήσεων β
10	0.308
20	0.174
40	0.093

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6 Τιμές του λόγου καθιζήσεων β για διάφορες τιμές του συντελεστή αντικατάστασης α_s

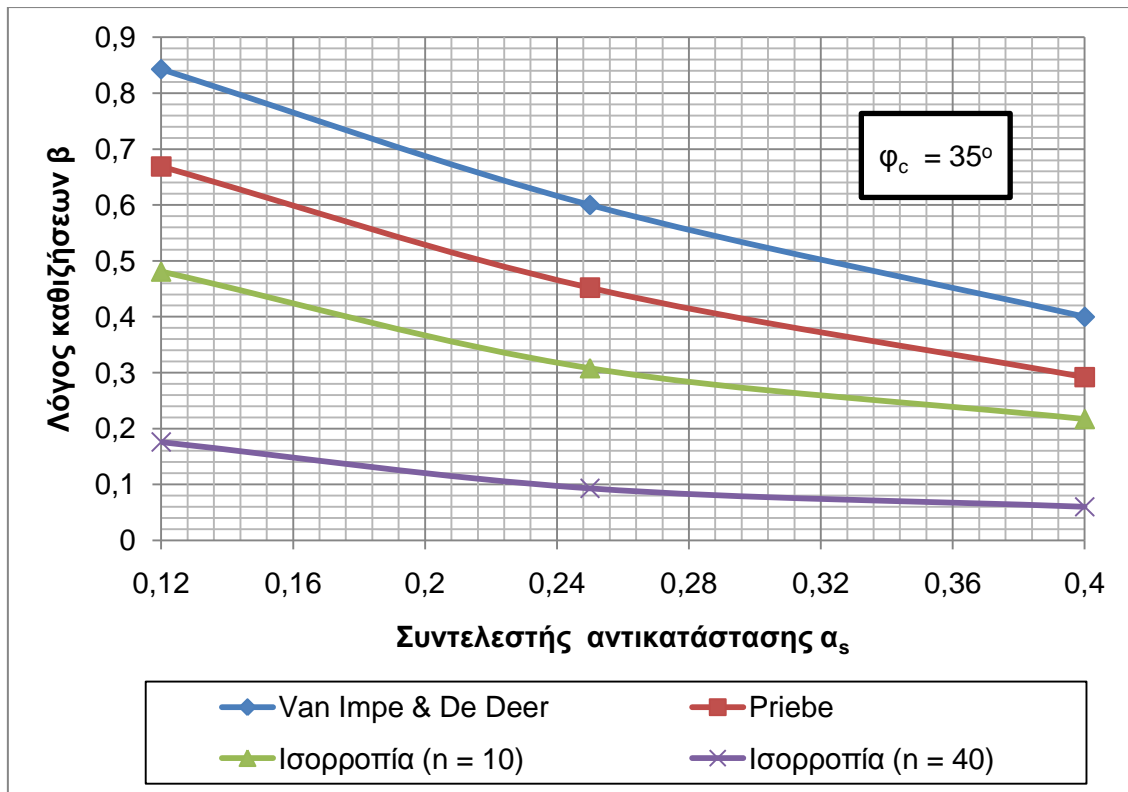
α_s	$n = 10$	$n = 40$
	Λόγος καθιζήσεων β	
0.12	0.481	0.176
0.25	0.308	0.093
0.40	0.217	0.06

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται, σε σχέση με τα απαραίτητα δεδομένα για την εφαρμογή της κάθε μεθόδου, ότι:

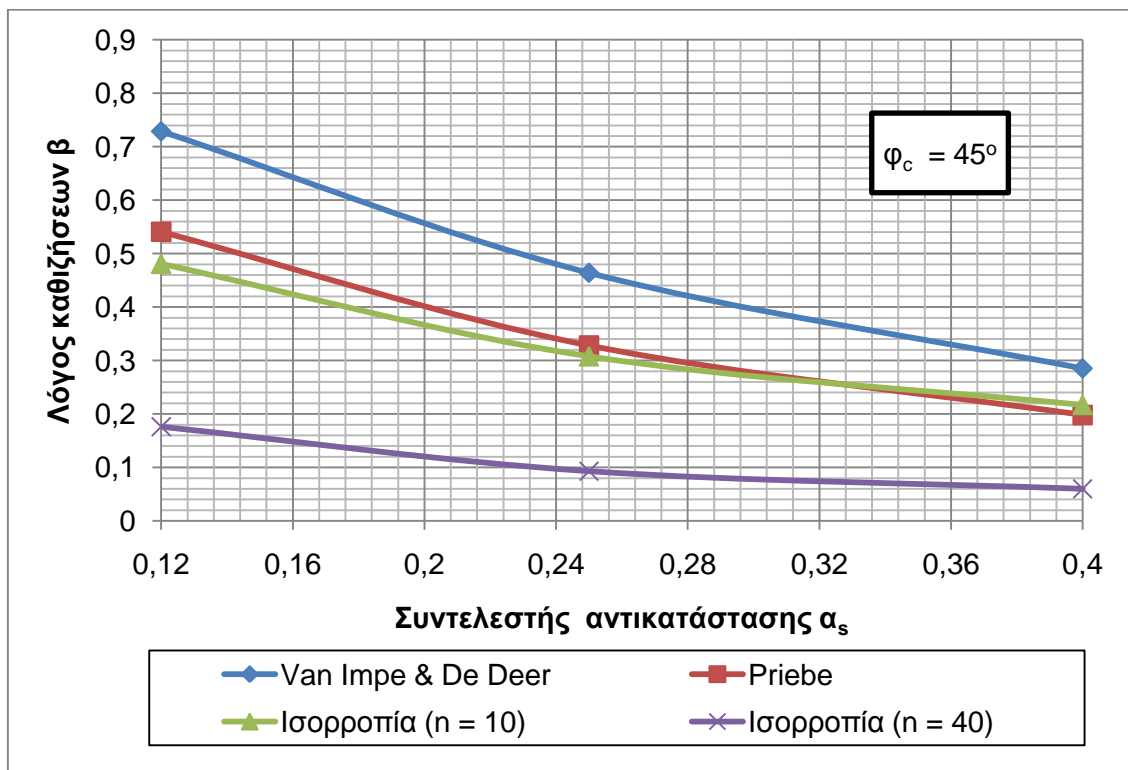
- Οι μέθοδοι Van Impe & De Deer και Priebe λαμβάνουν υπόψη τις ίδιες παραμέτρους για την εκτίμηση της βελτίωσης του εδάφους, δηλαδή τη γωνία εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c και το συντελεστή αντικατάστασης του εγγενούς εδάφους α_s . Τα αποτελέσματα και στις δύο περιπτώσεις προέκυψαν από διαγράμματα και σχέσεις για λόγο Poisson του εδάφους $\nu_s = 0.33$. Όμως στη μέθοδο Van Impe & De Deer για την επιλογή της κατάλληλης κάθε φορά καμπύλης από το διάγραμμα του Σχήματος 4.9 είναι απαραίτητος και ο λόγος της επιβαλλόμενης τάσης προς το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ρ_c/E_s . Και στις δύο μεθόδους το μέτρο ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου αγνοείται στις εκτιμήσεις.
- Η μέθοδος Ισορροπίας λαμβάνει υπόψη το συντελεστή αντικατάστασης του εγγενούς εδάφους α_s και το λόγο των μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους E_c/E_s . Αντίθετα δεν λαμβάνονται υπόψη ο λόγος Poisson του εδάφους ν_s , η γωνία εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c και το μέγεθος της επιβαλλόμενης τάσης ρ_c .

Και στις τρεις μεθόδους δεν λαμβάνεται υπόψη στις εκτιμήσεις το μήκος L των χαλικοπασσάλων, το οποίο όμως επηρεάζει έμμεσα στις απλές αναλύσεις, όπως για παράδειγμα καθορίζει τον τύπο αστοχίας, ενώ στις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στους πίνακες που προηγήθηκαν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και συγκρίνονται στα Σχήματα 4.12 και 4.13:



Σχήμα 4.12 Λόγος καθιζήσεων β συναρτήσει του συντελεστή αντικατάστασης α_s για διάφορες μεθόδους (φ_c = 35°)



Σχήμα 4.13 Λόγος καθιζήσεων β συναρτήσει του συντελεστή αντικατάστασης α_s για διάφορες μεθόδους (φ_c = 45°)

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα παραπάνω είναι:

- Οι μέθοδοι Van Impe & De Deer και Priebe μπορούν να συγκριθούν άμεσα γιατί εξαρτώνται από τις ίδιες παραμέτρους. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ότι οι τιμές των δύο λύσεων βρίσκονται αρκετά κοντά, με τη μέθοδο Van Impe & De Deer να δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα. Επίσης για διάφορες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c , οι τιμές του λόγου καθιζήσεων β δεν διαφέρουν πολύ, με τη μεγαλύτερη διαφορά να παρατηρείται για $\varphi_c = 35^\circ$.
- Η μέθοδος Ισορροπίας δίνει τις μικρότερες τιμές του λόγου καθιζήσεων β , δηλαδή θεωρεί ότι για τις ίδιες τιμές του συντελεστή αντικατάστασης α_s , η βελτίωση του εδάφους είναι μεγαλύτερη. Επίσης για $n = E_s/E_s = 10$ συγκλίνει με τη μέθοδο Priebe, κυρίως για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή αντικατάστασης α_s (αραιή διάταξη). Μάλιστα οι μέθοδοι συμπίπτουν για γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi_c = 45^\circ$ και για τιμή του συντελεστή αντικατάστασης $\alpha_s = 0.33$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13.
- Στη μέθοδο Ισορροπίας παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας E_s/E_s , μειώνεται ο λόγος καθιζήσεων β , δηλαδή μειώνεται η καθίζηση του ενισχυμένου εδάφους σε σχέση με την καθίζηση προ βελτίωσης. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι αύξηση του λόγου των μέτρων ελαστικότητας, συνεπάγεται μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων στο χαλικοπάσσαλο και επομένως μεγαλύτερη βελτίωση του εδάφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και όταν $E_s/E_s = 10$, που είναι η μικρότερη πιθανή τιμή για χαλικοπασσάλους, και για αραιή διάταξη χαλικοπασσάλων με $\alpha_s = 0.12$ ο λόγος των καθιζήσεων β είναι ίσος με 0.481. Επομένως προκύπτει βελτίωση του εδάφους κατά 50% περίπου.
- Είναι λογικό ότι πυκνότερη διάταξη των χαλικοπασσάλων, μειώνει το λόγο καθιζήσεων β και οδηγεί σε βελτιωμένο έδαφος με μικρή μέση παραμορφωσιμότητα. Αυτό φαίνεται από τις καμπύλες της κάθε μεθόδου στα Σχήματα 4.12 και 4.13 και από τα αποτελέσματα των Πινάκων 4.1, 4.3, 4.6. Μάλιστα παρατηρείται ότι ακόμα και με μία αραιή διάταξη των χαλικοπασσάλων, οι καθιζήσεις του ασθενούς εδάφους σύμφωνα με τη συντηρητικότερη μέθοδο Van Impe & De Deer μειώνονται περίπου κατά 15% για γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi_c = 35^\circ$.
- Η γωνία εσωτερικής τριβής φ_c επηρεάζει τα αποτελέσματα των μεθόδων Van Impe & De Deer και Priebe (Πίνακες 4.2, 4.4). Διαπιστώνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η φ_c τόσο μεγαλύτερη η αντοχή των χαλικοπασσάλων και επομένως τόσο μικρότερος ο λόγος καθιζήσεων β (άρα τόσο μεγαλύτερη η βελτίωση του εδάφους), όπως προκύπτει και γραφικά από τη σύγκριση των Σχημάτων 4.12 και 4.13

II. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

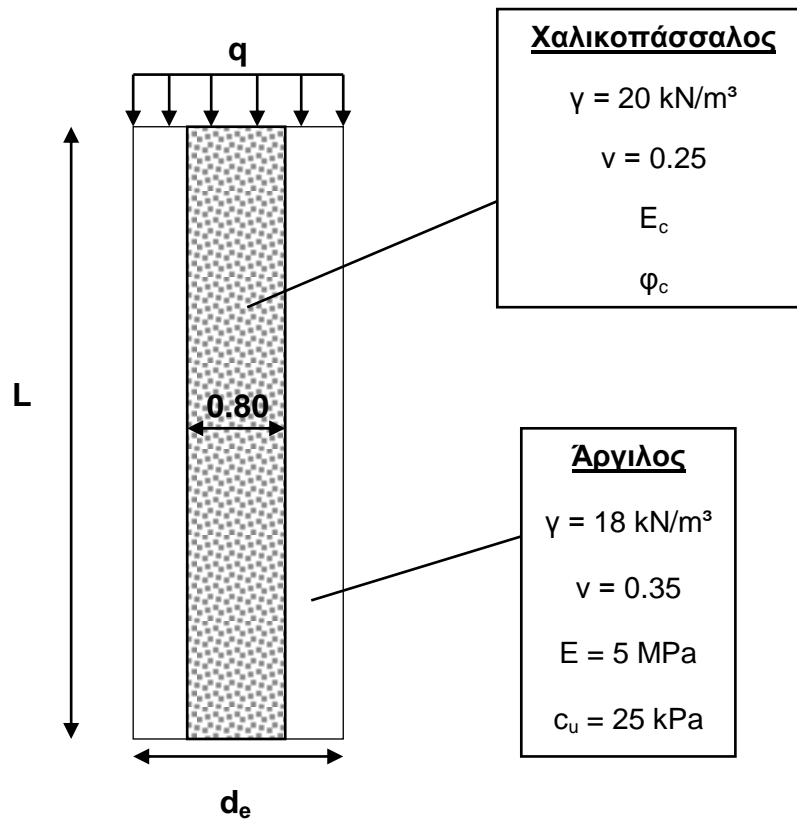
5. ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ο προσδιορισμός της βελτίωσης που υφίσταται το έδαφος μετά την εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων επιχειρήθηκε αρχικά με τη βοήθεια της δισδιάστατης έκδοσης του προγράμματος Plaxis. Το Plaxis2D είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται ευρέως για τη διδιάστατη ανάλυση των τάσεων, των παραμορφώσεων και γενικά της ευστάθειας κατασκευών στη γεωτεχνική μηχανική. Πραγματικές συνθήκες κατασκευών μπορούν να προσομοιωθούν με αξονοσυμμετρικά ή μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης ανάλογα με την περίπτωση. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί ένα σχετικά απλό για το χρήστη γραφικό περιβάλλον, το οποίο δίνει τη δυνατότητα ταχείας δημιουργίας του γεωμετρικού μοντέλου και του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, βασισμένο σε μία αντιπροσωπευτική κατακόρυφη διατομή της περίπτωσης που εξετάζεται.

5.1 Ορισμός προσομοιώματος

Το προσομοίωμα που μελετήθηκε συνίσταται από ένα χαλικοπάσσαλο διαμέτρου $d_c = 0.80 \text{ m}$, μήκους L και με αξονική απόσταση από το γειτονικό χαλικοπάσσαλο s . Ο χαλικοπάσσαλος θεωρείται εγκατεστημένος σε τετραγωνικό κάρναβο και έτσι προκύπτει η αντίστοιχη επιφάνεια επιρροής διαμέτρου d_e . Το υλικό κατασκευής του χαλικοπασσάλου είναι ειδικού βάρους $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, λόγου Poisson $\nu = 0.25$, μέτρο ελαστικότητας E_c και γωνίας εσωτερικής τριβής φ_c . Ο χαλικοπάσσαλος είναι εγκατεστημένος σε κορεσμένο ασθενή αργιλικό σχηματισμό αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $c_u = 25 \text{ kPa}$, στον οποίο η επιβαλλόμενη τάση είναι q . Το ειδικό βάρος του εδάφους είναι $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ και το μέτρο ελαστικότητάς του $E = 5 \text{ MPa}$.

Οι γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού του χαλικοπάσσαλου και της περιβάλλουσας γεώμαζας, καθώς και τα στοιχεία της γεωμετρίας του προσομοιώματος δίνονται στο Σχήμα 5.1 που ακολουθεί. Σε κάποια από τα δεδομένα δεν δίνονται συγκεκριμένες τιμές γιατί στις αναλύσεις έχει προσδιορισθεί, με εφαρμογή διαφόρων τιμών, η επιρροή τους στα τελικά αποτελέσματα.



Σχήμα 5.1 Στοιχεία προσομοιώματος

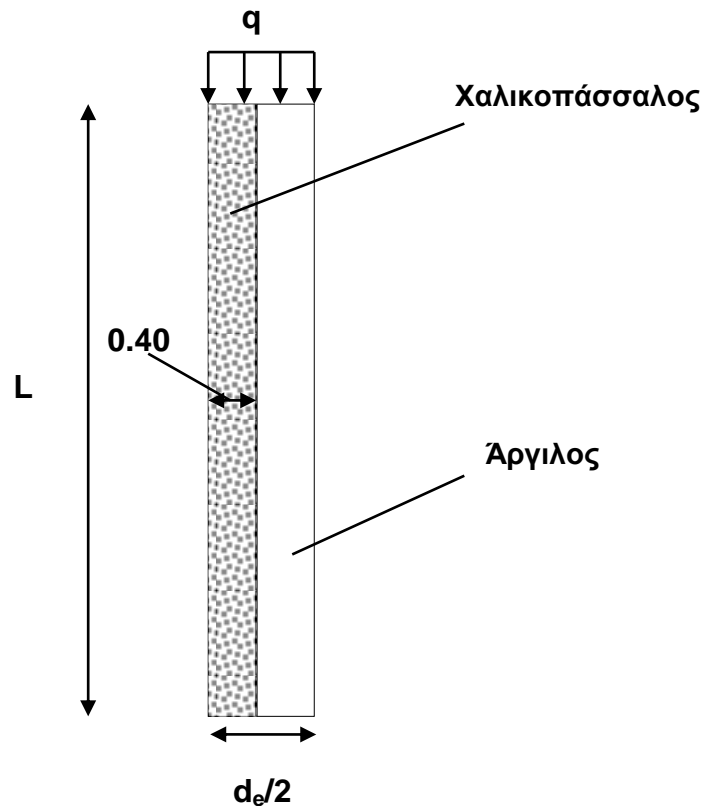
Η αποτίμηση της βελτίωσης που επιφέρει στο έδαφος η εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων απαιτεί και την επίλυση του ανωτέρω προσομοιώματος χωρίς το χαλικοπάσσαλο, αλλά υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσδιορισθεί η μέγιστη καθίζηση προ και μετά της τοποθέτησης των χαλικοπασσάλων και να υπολογισθεί ο λόγος καθιζήσεων του εδάφους.

5.2 Διαδικασία μόρφωσης προσομοιώματος

Για τη μόρφωση του αναλυτικού προσομοιώματος (με το χαλικοπάσσαλο) στο Plaxis2D ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Επιλογή μοντέλου ανάλυσης: αξονοσυμμετρικό ή μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης. Στη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε αξονοσυμμετρικό μοντέλο, αφού ο στόχος είναι η προσομοίωση του χαλικοπασσάλου ορισμένης διαμέτρου με την αντίστοιχη επιφάνεια επιρροής του.
- Ορισμός διαστάσεων περιοχής σχεδίασης και μόρφωση επιθυμητών αποστάσεων καννάβου, ανάλογα με τα δεδομένα της κάθε περίπτωσης που μελετήθηκε.

- Σχεδίαση γεωμετρικού μοντέλου. Με βάση τη θεώρηση αξονοσυμμετρικών συνθηκών το μοντέλο που μελετήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 5.2

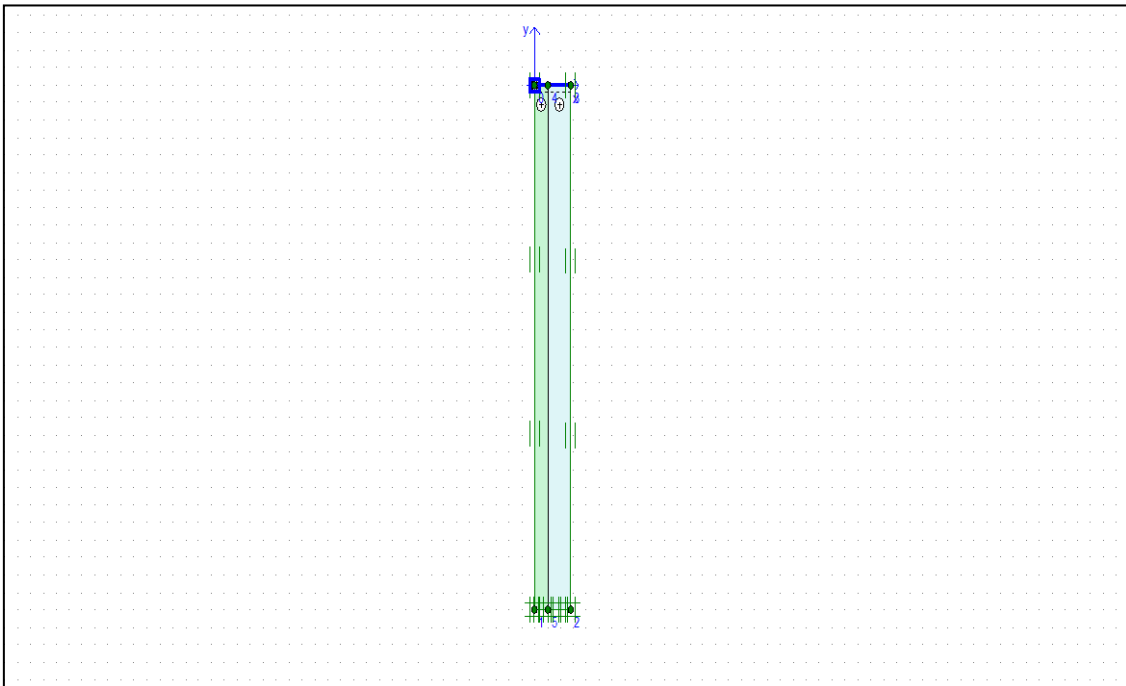


Σχήμα 5.2 Αξονοσυμμετρικό μοντέλο ανάλυσης

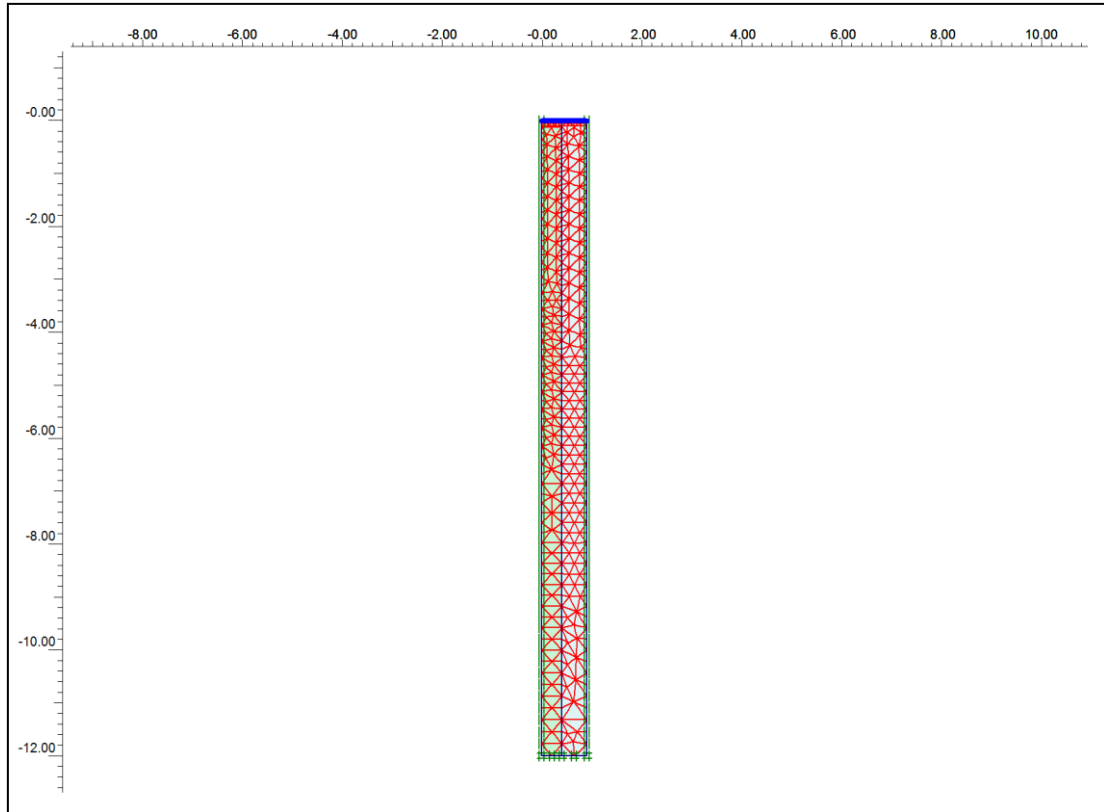
- Τοποθέτηση δύσκαμπτης επιφάνειας φόρτισης, δηλαδή πλάκας πάχους 1 m στην επιφάνεια του εδάφους, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι οι παραμορφώσεις θα είναι ομοιόμορφα κατανομημένες ανάμεσα στο χαλικοπάσσαλο και το περιβάλλον έδαφος. Επίσης προσδιορίζονται ποσοτικά η αξονική ατένεια και η καμπτική δυσκαμψία της πλάκας.
- Τοποθέτηση διεπιφάνειας μεταξύ της πλάκας και της επιφάνειας του εδάφους.
- Επιλογή οριακών συνθηκών ανάλογα με το αν επιτρέπονται ή όχι οι κατακόρυφες ή οι οριζόντιες μετακινήσεις και οι στροφές. Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες οριακές συνθήκες, όπου απαγορεύουν κάθε είδους μετακίνηση και στροφή στη βάση και την οριζόντια μετακίνηση στις κατακόρυφες πλευρές του προσομοιώματος. Επιπλέον στην κορυφή του άξονα συμμετρίας του συγκεκριμένου μοντέλου απαγορεύεται και η στροφή.

- Εισαγωγή των γεωτεχνικών παραμέτρων του υλικού του χαλικοπασσάλου και της περιβάλλουσας γεώμαζας (Σχήμα 5.1) και προσδιορισμός του κατάλληλου εδαφικού μοντέλου. Το εδαφικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το ελαστο-πλαστικό μοντέλο Mohr-Coulomb (MC), το οποίο προσφέρει μία σχετικά ακριβή, απλή και γρήγορη εκτίμηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.
- Δημιουργία πυκνού πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, με ακόμα μεγαλύτερη πύκνωσή του κάτω από την πλάκα σκυροδέματος για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
- Καθορισμός αρχικών εντατικών συνθηκών με τη θεώρηση ότι δεν υπάρχει υδροφόρος ορίζοντας στο συγκεκριμένο προσομοίωμα.

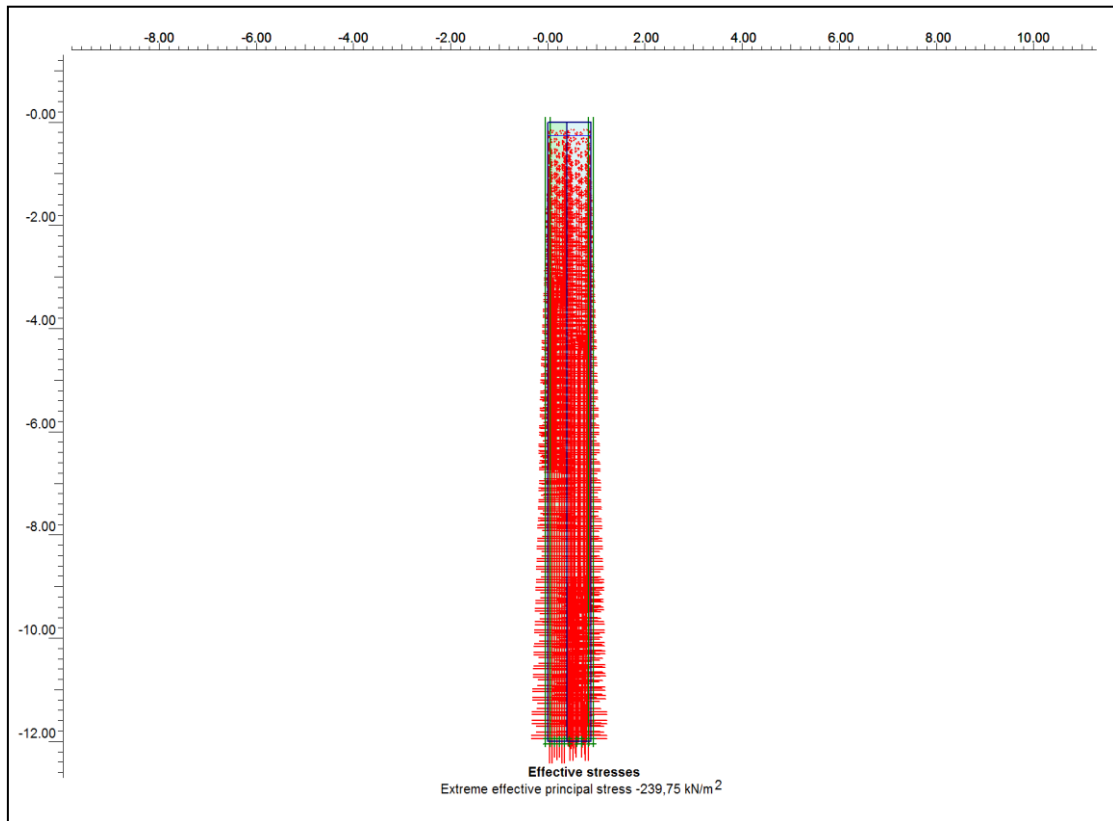
Κάποια από τα παραπάνω βήματα μόρφωσης του προσομοιώματος παρουσιάζονται ενδεικτικά και στα Σχήματα 5.3, 5.4 και 5.5 που ακολουθούν.



Σχήμα 5.3 Απεικόνιση οριακών συνθηκών μοντέλου ανάλυσης στον κάρναβο της περιοχής σχεδίασης



Σχήμα 5.4 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων



Σχήμα 5.5 Αρχικές ενεργές τάσεις χωρίς την ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα

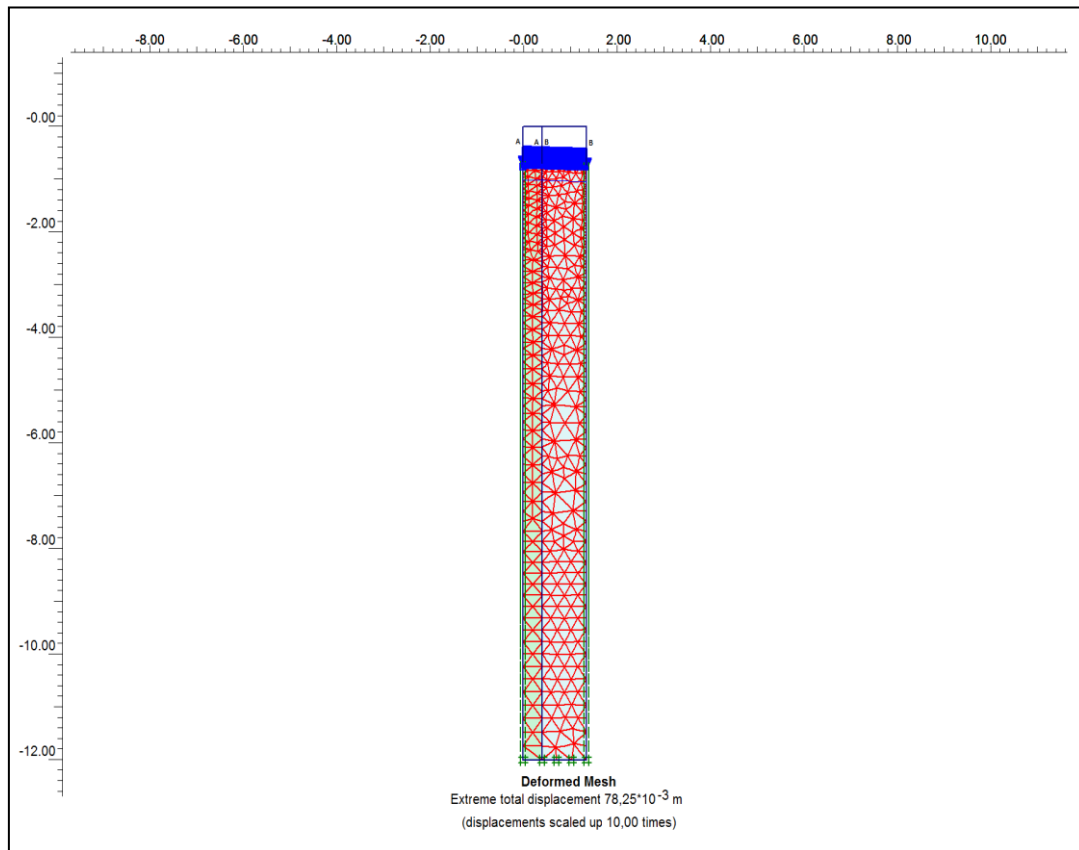
5.3 Επίλυση προσομοιώματος

Μετά τον καθορισμό των αρχικών ενεργών τάσεων είναι πλέον δυνατή η επίλυση του προσομοιώματος. Όμως πριν από την έναρξη της υπολογιστικής διαδικασίας απαιτούνται:

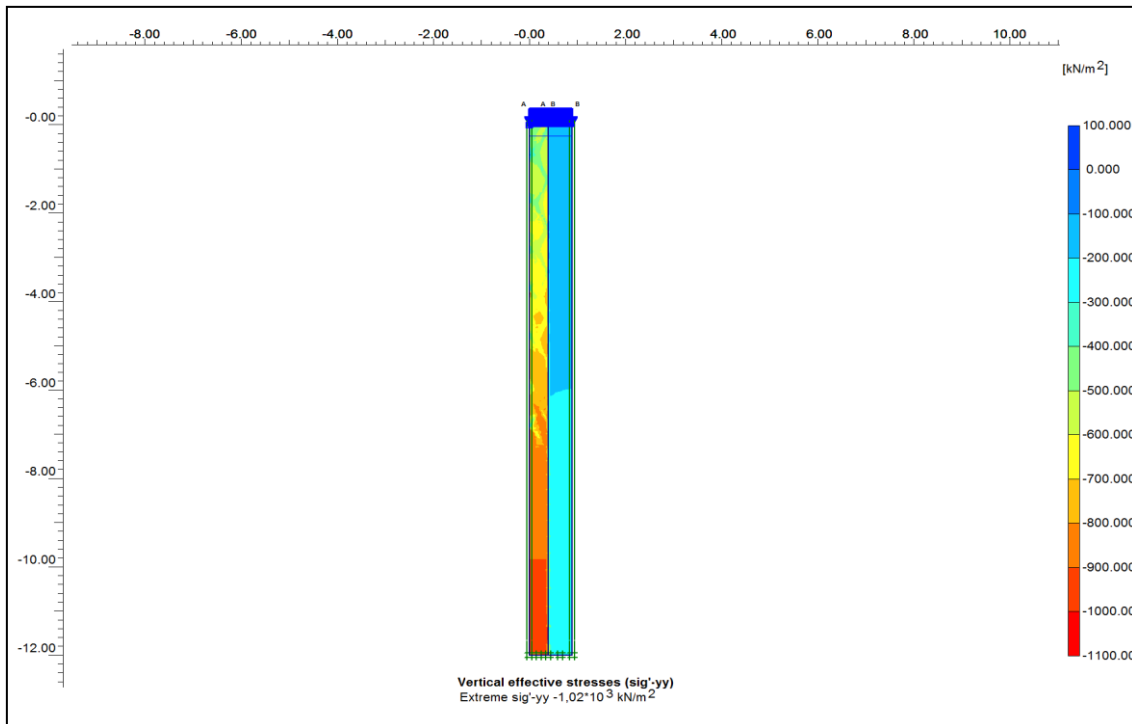
- Ο προσδιορισμός του αριθμού των φάσεων υπολογισμού. Στις συγκεκριμένες αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε μία φάση υπολογισμού.
- Η επιλογή του τύπου υπολογισμών, όπως επίλυση με βάση την πλαστική ανάλυση, η οποία επιλέχθηκε και στις αναλύσεις που διεξήχθησαν.
- Ο έλεγχος του απαιτούμενου αριθμού των υπολογιστικών βημάτων και ο προσδιορισμός της επιθυμητής ακρίβειας στην επαναληπτική διαδικασία που ακολουθείται. Στις περισσότερες αναλύσεις που έγιναν χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις.
- Ο καθορισμός του μεγέθους και της έκτασης της επιβαλλόμενης τάσης q .

Κατά τη διάρκεια της επίλυσης ο χρήστης ενημερώνεται για την πρόοδό της μέσω ενός παραθύρου το οποίο περιέχει πληροφορίες, που συνεχώς ανανεώνονται. Η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς όταν το προσομοίωμα έχει αναλάβει το σύνολο του φορτίου που είχε αρχικά ορισθεί.

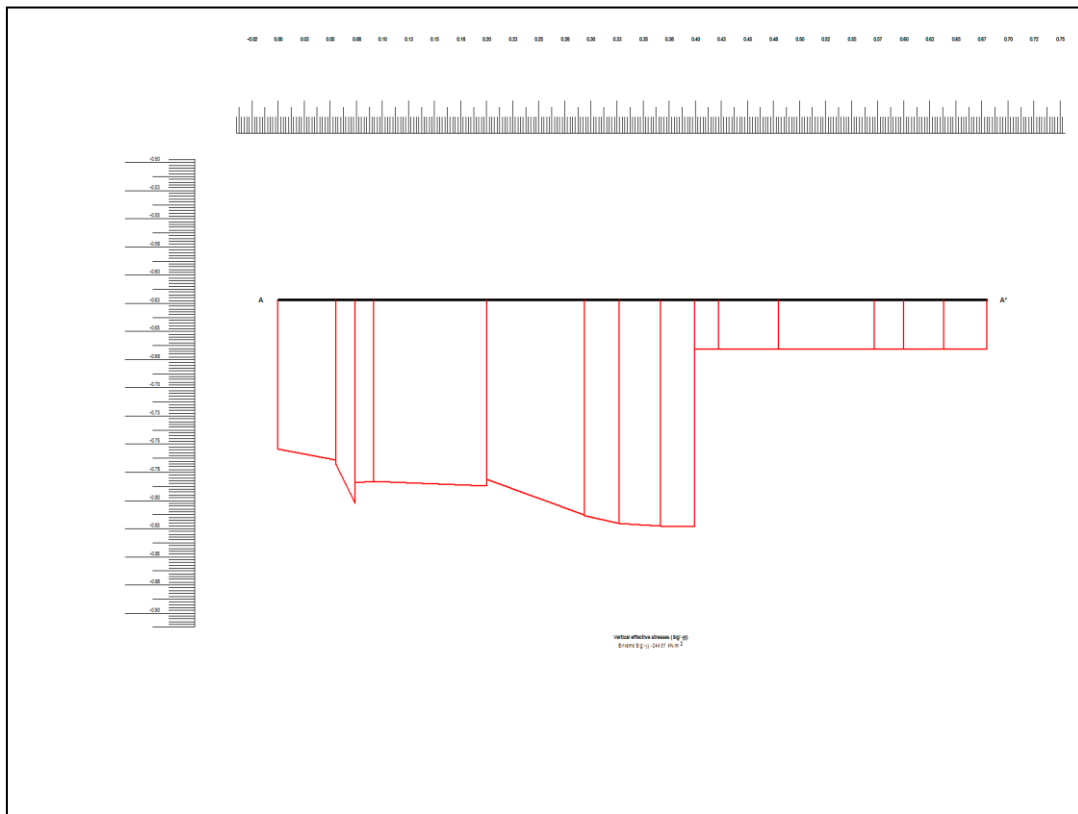
Μετά το τέλος της διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος προκύπτουν στοιχεία για τη μέγιστη καθίζηση του προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε καθώς και για τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Κάποιες από τις αντιπροσωπευτικές εικόνες που προέκυψαν στις συγκεκριμένες αναλύσεις δίνονται στα Σχήματα 5.6, 5.7, 5.8 και 5.9.



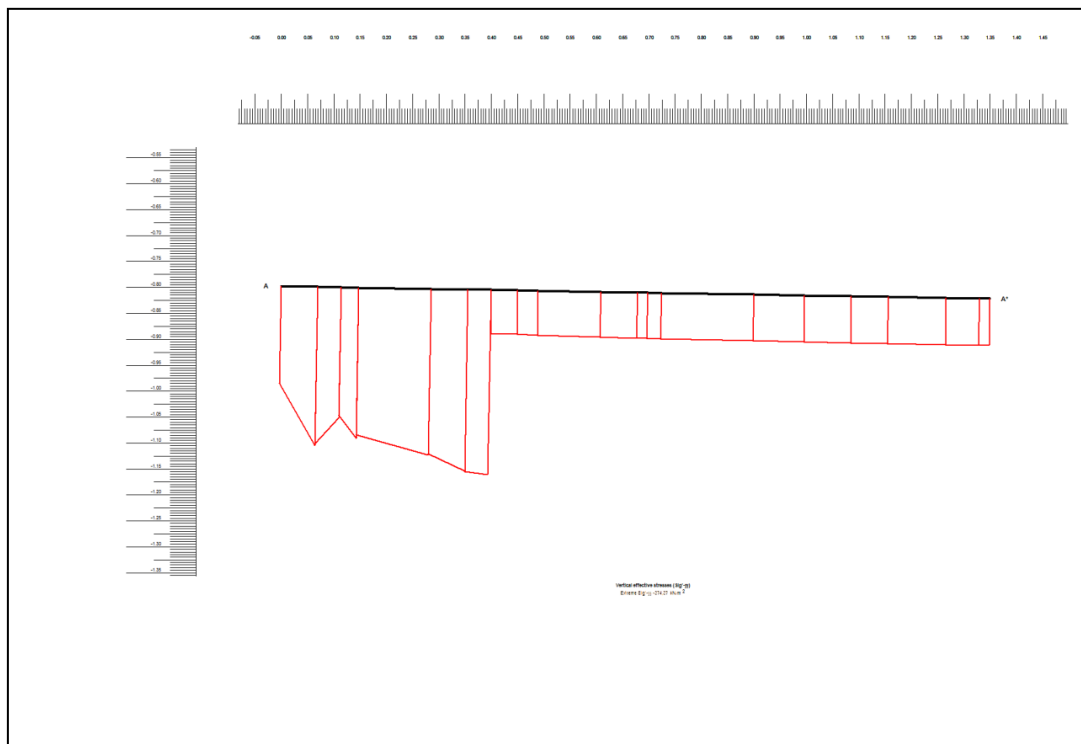
Σχήμα 5.6 Παραμορφωμένο πλέγμα πετρασμένων στοιχείων με την επιβαλλόμενη φόρτιση



Σχήμα 5.7 Αναπτυσσόμενες κατακόρυφες ενεργές τάσεις στο χαλικοπάσσαλο και το περιβάλλον έδαφος με την επιβαλλόμενη φόρτιση



Σχήμα 5.8 Κατανομή κατακόρυφων ενεργών τάσεων κάτω από την πλάκα για ανηγμένη αξονική απόσταση χαλικοπασσάλων $s/d_c = 1.5$



Σχήμα 5.9 Κατανομή κατακόρυφων ενεργών τάσεων κάτω από την πλάκα για ανηγμένη αξονική απόσταση χαλικοπασσάλων $s/d_c = 3.0$

5.4 Παραμετρικές αναλύσεις - Αποτελέσματα

Οι παραμετρικές αναλύσεις που διεξήχθησαν επικεντρώθηκαν στον υπολογισμό των καθιζήσεων του προσομοιώματος με και χωρίς τον χαλικοπάσσαλο, έτσι ώστε να μπορέσει να δοθεί μία εκτίμηση της βελτίωσης που επιφέρει στο ασθενές αργιλικό έδαφος η εγκατάστασή του. Μάλιστα πραγματοποιήθηκαν σειρές αναλύσεων, η διάκριση των οποίων εστιάζεται στη διαφοροποίηση των ακόλουθων βασικών παραμέτρων:

1. Ανηγμένη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων s/d_c
2. Ανηγμένο μήκος του χαλικοπασσάλου L/d_c
3. Λόγος μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_d/E
4. Γωνία εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c
5. Επιβαλλόμενη τάση q

Από τις επιλύσεις των προσομοιωμάτων με και χωρίς το χαλικοπάσσαλο και βάσει των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ανάλυση, υπολογίστηκε ο λόγος καθιζήσεων $\beta = \frac{s}{s_0}$, όπου s η καθίζηση του ενισχυμένου με το χαλικοπάσσαλο εδάφους και s_0 η καθίζηση του φυσικού εδάφους.

Στον Πίνακα 5.1 υπάρχουν οι γεωτεχνικές παράμετροι του αργιλικού σχηματισμού που μελετήθηκε σε όλες τις αναλύσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 Δεδομένα για τον αργιλικό σχηματισμό

γ (kN/m³)	18
ν	0.35
E (Mpa)	5
c_u (kPa)	25

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προσομοιώματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1, ενώ η επιβαλλόμενη τάση, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το χαλικοπάσσαλο σε κάθε σειρά αναλύσεων, οι καθιζήσεις που υπολογίστηκαν για κάθε περίπτωση με και χωρίς τον χαλικοπάσσαλο και οι αντίστοιχοι λόγοι καθιζήσεων που προέκυψαν παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες που ακολουθούν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 1^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενος ο λόγος s/d_c

1^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΩΝ s/d_c

q (kN/m ²)	d_c (m)	L (m)	E_c (Μpa)	φ_c (°)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	12	100	40	20	0.25

s/d_c	d_e (m)	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$
1.5	1.35	$29.31 \cdot 10^{-3}$	$136.42 \cdot 10^{-3}$	0.215
2.0	1.81	$47.55 \cdot 10^{-3}$	$136.44 \cdot 10^{-3}$	0.349
2.5	2.26	$65.20 \cdot 10^{-3}$	$136.45 \cdot 10^{-3}$	0.478
3.0	2.71	$78.25 \cdot 10^{-3}$	$136.46 \cdot 10^{-3}$	0.573

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 2^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενος ο λόγος L/d_c

2^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΤΟ ΑΝΗΓΜΕΝΟ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥ L/d_c

q (kN/m ²)	d_c (m)	s/d_c	E_c (Μpa)	φ_c (°)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	2.0	100	40	20	0.25

L/d_c	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$
10	$35.83 \cdot 10^{-3}$	$93.14 \cdot 10^{-3}$	0.385
15	$47.55 \cdot 10^{-3}$	$136.44 \cdot 10^{-3}$	0.349
20	$58.02 \cdot 10^{-3}$	$177.76 \cdot 10^{-3}$	0.326

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 3^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενος ο λόγος E_c/E

<u>3^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:</u>						
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΣ Ο ΛΟΓΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥ – ΕΔΑΦΟΥΣ E_c/E						

q (kN/m ²)	d_c (m)	s/d_c	L (m)	φ_c (°)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	2.0	12	40	20	0.25

E_c/E	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$
10	$64.39 \cdot 10^{-3}$	$136.44 \cdot 10^{-3}$	0.472
20	$47.55 \cdot 10^{-3}$	$136.44 \cdot 10^{-3}$	0.349
40	$37.48 \cdot 10^{-3}$	$136.44 \cdot 10^{-3}$	0.275

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 4^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενη η γωνία εσωτερικής τριβής φ_c

<u>4^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:</u>						
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΓΩΝΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥ φ_c						

q (kN/m ²)	d_c (m)	s/d_c	L (m)	E_c (Mpa)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	2.0	12	100	20	0.25

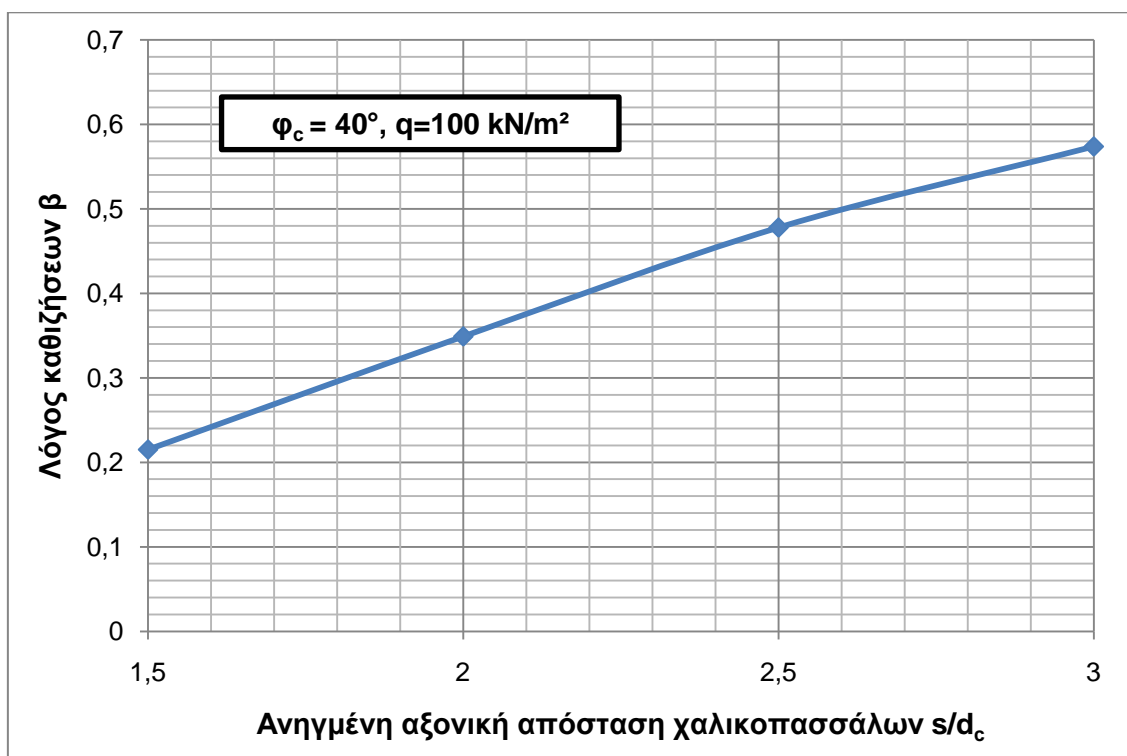
φ_c (°)	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$
37	$50.45 \cdot 10^{-3}$	$136.44 \cdot 10^{-3}$	0.370
40	$47.55 \cdot 10^{-3}$	$136.44 \cdot 10^{-3}$	0.349
45	$44.33 \cdot 10^{-3}$	$136.44 \cdot 10^{-3}$	0.325

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 5^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενη η επιβαλλόμενη τάση q

5^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:						
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ q						
d_c (m)	s/d_c	L (m)	E_c (Μpa)	φ (°)	γ (kN/m³)	ν
0.80	2.0	12	100	40	20	0.25
q (kN/m²)	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$			
50	$18.99 \cdot 10^{-3}$	$56.88 \cdot 10^{-3}$	0.334			
100	$47.55 \cdot 10^{-3}$	$136.44 \cdot 10^{-3}$	0.349			
200	$119.22 \cdot 10^{-3}$	$351.59 \cdot 10^{-3}$	0.339			

5.4.1 Επιρροή της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c

Τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενη την ανηγμένη αξονική απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών χαλικοπασσάλων s/d_c , που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2 συνοψίζονται στο Σχήμα 5.10, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων συναρτήσει της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων.

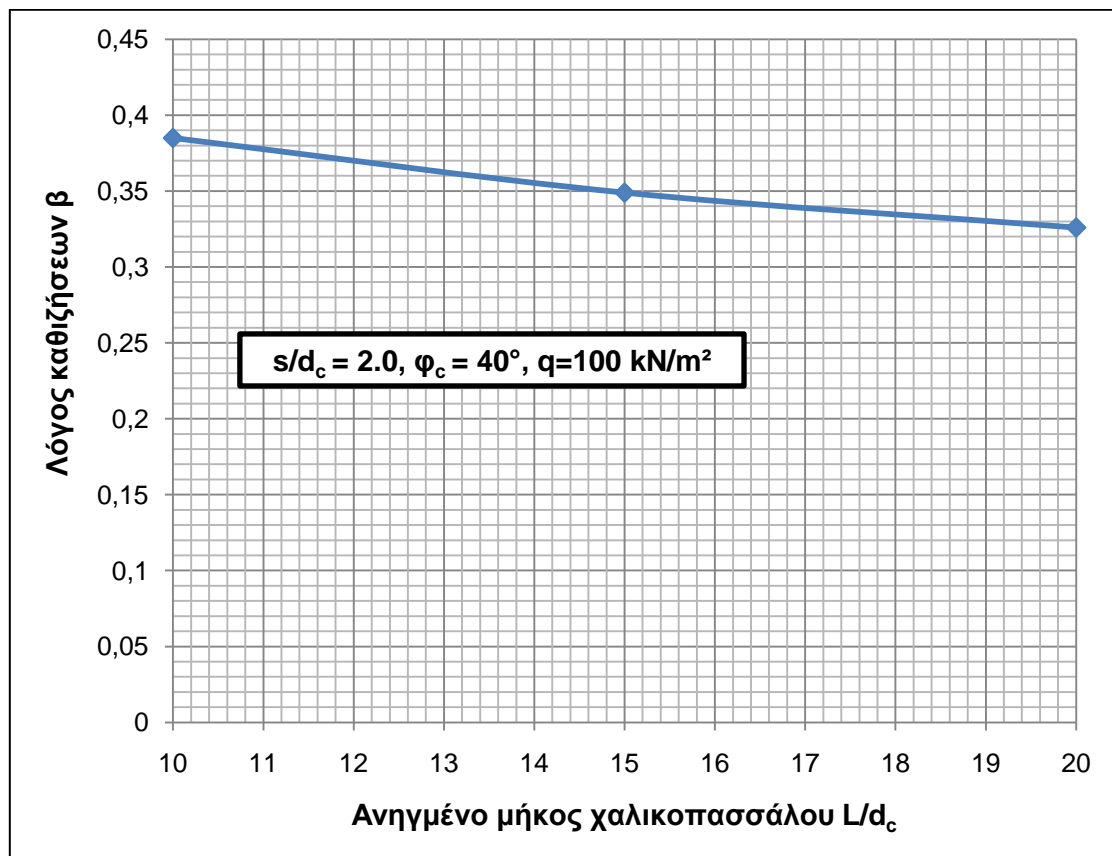


Σχήμα 5.10 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c

Από το παραπάνω σχήμα διαπιστώνεται ότι αύξηση της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων, δηλαδή μείωση του συντελεστή αντικατάστασης του εδάφους, προκαλεί αύξηση του λόγου καθιζήσεων β και επομένως αύξηση της καθίζησης των χαλικοπασσάλων και του περιβάλλοντος εδάφους, με ρυθμό όμως που σταδιακά μειώνεται, όπως φαίνεται και από την ελαφρά μειούμενη κλίση της καμπύλης που σχηματίζεται. Επομένως πυκνότερη διάταξη των χαλικοπασσάλων συνεπάγεται μικρότερη επιβαλλόμενη τάση ανά χαλικοπάσσαλο και οδηγεί σε ένα βελτιωμένο έδαφος με μικρότερη μέση παραμορφωσιμότητα.

5.4.2 Επιρροή του ανηγμένου μήκους του χαλικοπασσάλου L/d_c

Τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενο το ανηγμένο μήκος του χαλικοπασσάλου L/d_c που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3, συνοψίζονται στο Σχήμα 5.11, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων συναρτήσει του ανηγμένου μήκους του χαλικοπασσάλου.



Σχήμα 5.11 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει του ανηγμένου μήκους του χαλικοπασσάλου L/d_c

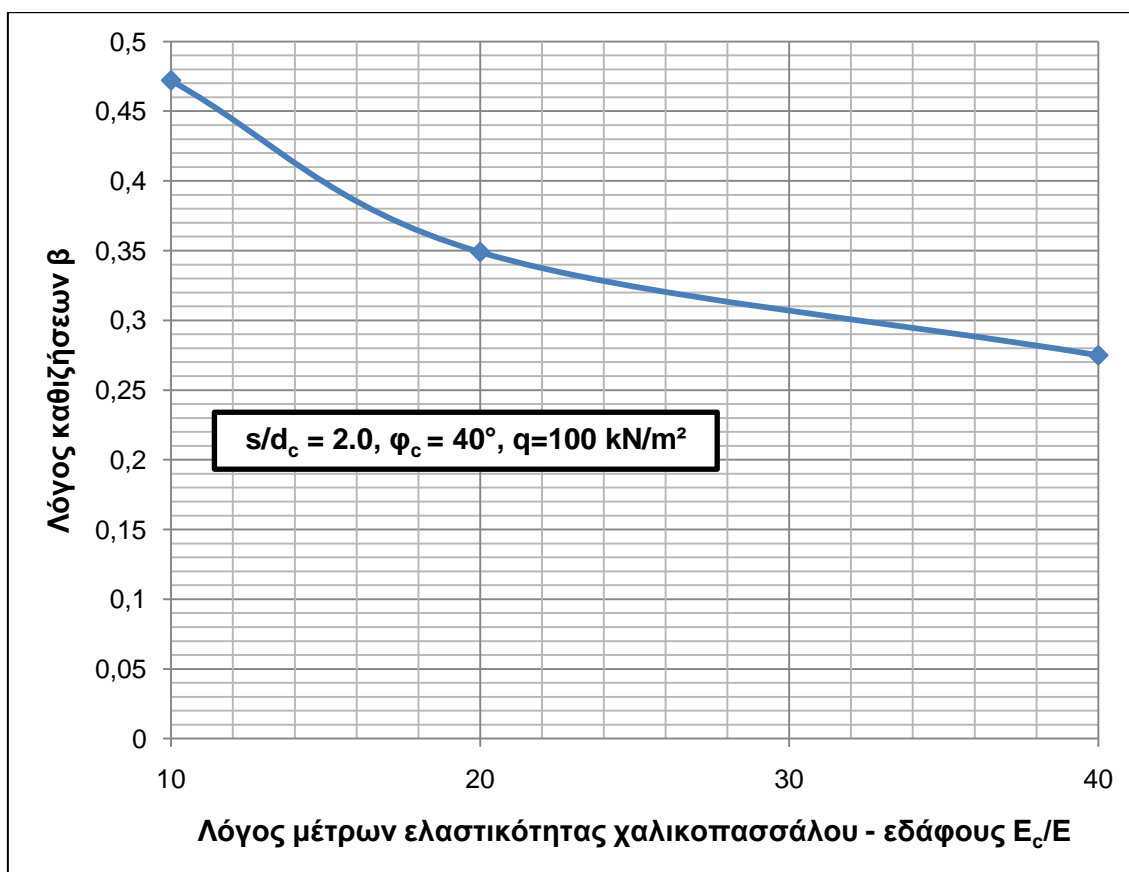
Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι η αύξηση του ανηγμένου μήκους του χαλικοπασσάλου συνεπάγεται μείωση του λόγου καθιζήσεων β και επομένως μείωση των καθιζήσεων των χαλικοπασσάλων και του περιβάλλοντος εδάφους.

Αυτή η μείωση των καθιζήσεων οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του χαλικοπασσάλου, εφόσον οι διάμετρος d_c διατηρείται σταθερή, τόσο μεγαλύτερο είναι το διαθέσιμο βάθος στο οποίο μπορούν να κατανεμηθούν οι τάσεις που αναπτύσσονται λόγω του επιβαλλόμενου φορτίου μέχρι το μηδενισμό τους σε κάποιο βάθος όπως φαίνεται και από τη σχέση (3.8) που διατυπώθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Από τη σχέση αυτή προκύπτει η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων, με τις μέγιστες να επικρατούν στην κορυφή του χαλικοπασσάλου και να ελαττώνονται γραμμικά με το βάθος μέχρι το μηδενισμό τους σε κάποιο βάθος. Συνεπώς, η αύξηση του μήκους του χαλικοπασσάλου κάτω από το συγκεκριμένο βάθος δεν επιφέρει περαιτέρω αύξηση της αντοχής του. Έτσι όσο μικρότερο είναι το μήκος του χαλικοπασσάλου από αυτό το βάθος, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της επιβαλλόμενης τάσης αναλαμβάνεται από το έδαφος κάτω από τον πάσσαλο, το οποίο προφανώς έχει μικρότερη αντοχή από το χαλικοπάσσαλο. Γι'αυτό και για μικρότερα μήκη χαλικοπασσάλου οι καθιζήσεις είναι μεγαλύτερες και η βελτίωση του εδάφους μικρότερη.

Τη σταδιακή μείωση της επιρροής του ανηγμένου μήκους του χαλικοπασσάλου στη μείωση των καθιζήσεων αποδεικνύει και η βαθμιαία μειούμενη κλίση της καμπύλης που προέκυψε στο Σχήμα 5.11. Αξίζει βέβαια να επισημανθεί ότι η επιρροή αυτή δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού από το Σχήμα 5.11 εξάγεται ότι η συνολική μεταβολή του λόγου μείωσης των καθιζήσεων κυμαίνεται στο 18% και επομένως η συμβολή στη βελτίωση του εδάφους είναι μικρή.

5.4.3 Επιρροή του λόγου μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους E_c/E

Τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενο το λόγο των μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_c/E που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4, συνοψίζονται στο Σχήμα 5.12, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων συναρτήσει του λόγου μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους.

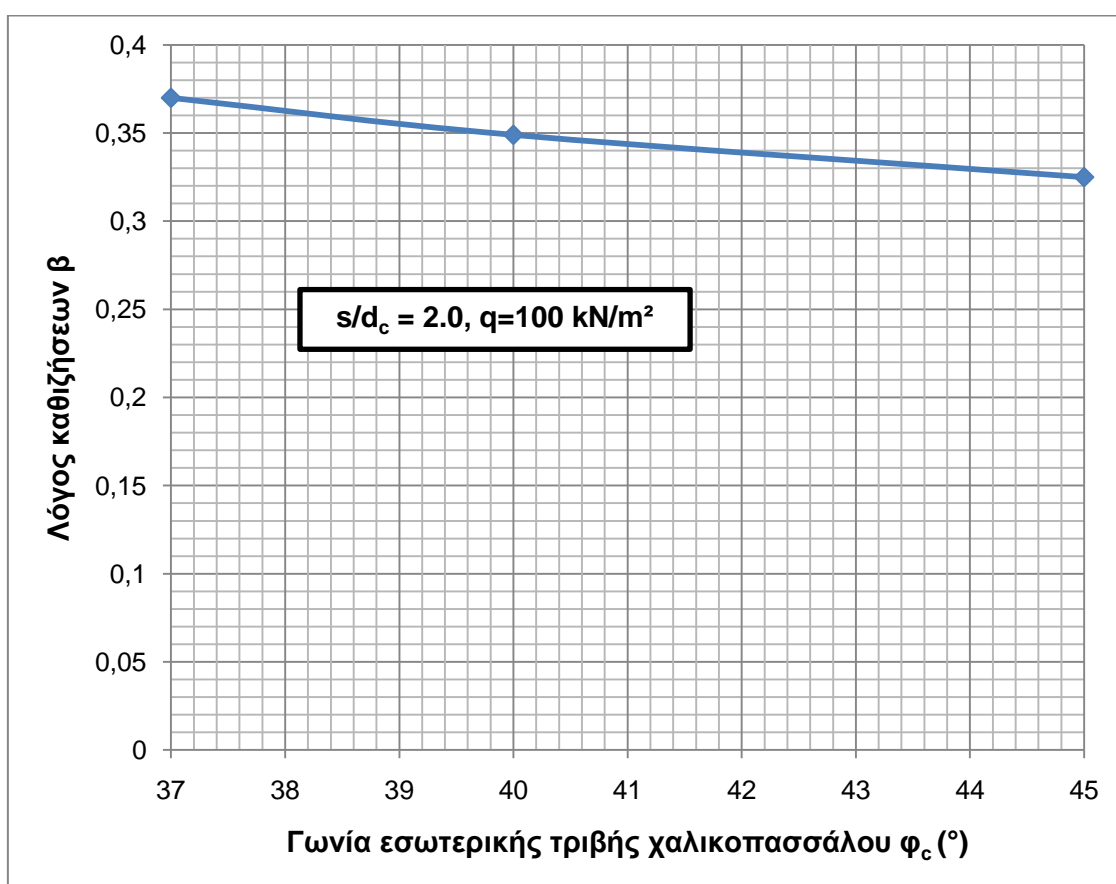


Σχήμα 5.12 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει του λόγου των μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους E_c/E

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι η αύξηση του λόγου των μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους προκαλεί τη μείωση του λόγου καθιζήσεων β και επομένως μείωση των καθιζήσεων του χαλικοπασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους. Η μείωση των καθιζήσεων οφείλεται στη όλο και μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων στο χαλικοπάσσαλο εξαιτίας της σταδιακής αύξησης του λόγου E_c/E . Δηλαδή όσο πιο δύσκαμπτο είναι το σύνθετο έδαφος τόσο μικρότερες καθιζήσεις παρουσιάζει.

5.4.4 Επιρροή της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c

Τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενη τη γωνία εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5, συνοψίζονται στο Σχήμα 5.13, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου.

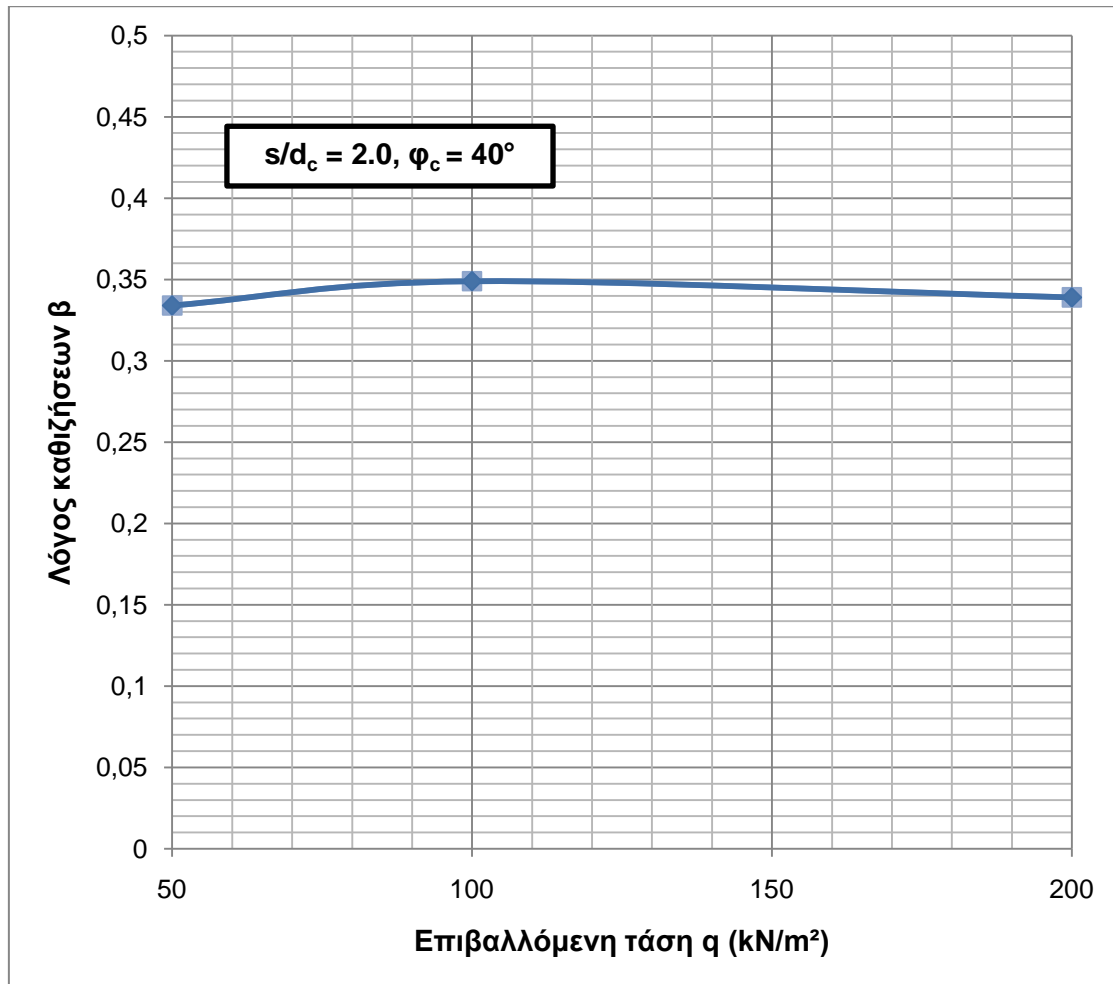


Σχήμα 5.13 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c

Με βάση το παραπάνω σχήμα διαπιστώνεται ότι με την αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου μειώνεται ο λόγος καθιζήσεων β και επομένως μειώνονται και οι καθιζήσεις του χαλικοπασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους. Η σταδιακή αυτή μείωση των καθιζήσεων οφείλεται στην αντίστοιχη σταδιακή αύξηση της αντοχής του υλικού των χαλικοπασσάλων, εξαιτίας της αύξησης της γωνίας εσωτερικής τριβής του.

5.4.5 Επιρροή της επιβαλλόμενης τάσης q

Τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενη την επιβαλλόμενη τάση q που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6, συνοψίζονται στο Σχήμα 5.14, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης.



Σχήμα 5.14 Μεταβολή λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης q

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης ο λόγος καθιζήσεων β παραμένει πρακτικά σταθερός και επομένως το μέγεθος της επιβαλλόμενης τάσης δεν επηρεάζει τη βελτίωση που υφίσταται το έδαφος μετά την εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων. Αυτό εξηγείται από την περίπου ανάλογη σχέση επιβαλλόμενης τάσης – καθιζήσεων που παρατηρείται και στον Πίνακα 5.6. Η αναλογία αυτή (σχεδόν γραμμική συσχέτιση) οφείλεται στο ότι στις διδιάστατες αναλύσεις με τη θεώρηση αξονοσυμμετρικού μοντέλου το προσομοίωμα δεν αστοχεί εφόσον υποβάλλεται σε συνθήκες μονοδιάστατης παραμορφώσης (επιβολή κατακόρυφης ορθής τάσης με ταυτόχρονη παρεμπόδιση των πλευρικών παραμορφώσεων) και επομένως δεν παρατηρείται σημαντική ανάπτυξη πλαστικών ζωνών.

5.5 Μερικά συμπεράσματα - Σύγκριση με υπάρχουσες μεθόδους για την εκτίμηση της βελτίωσης του εδάφους

Η σύγκριση του μεγέθους της βελτίωσης του αργιλικού εδάφους, όπως αυτή προσδιορίστηκε μέσω των διδιάστατων αναλύσεων, πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή της μεθόδου Priebe, η οποία αποτελεί την πιο διαδεδομένη μεθοδολογία διαστασιολόγησης χαλικοπασσάλων και της μεθόδου Ισορροπίας (Equilibrium Method).

Έτσι εξετάστηκε ασθενές αργιλικό έδαφος με λόγο Poisson $\nu = 0.35$ και μέτρου ελαστικότητας $E = 5 \text{ MPa}$. Για την ενίσχυση του εδάφους σχεδιάζεται η εγκατάσταση χαλικοπασσάλων διαμέτρου $d_c = 0.80 \text{ m}$ και μήκους $L = 12 \text{ m}$ σε τετραγωνικό κάναβο.

Αρχικά εφαρμόζεται η μέθοδος Priebe, στην οποία ο συντελεστής βελτίωσης n_{Priebe} υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση που αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο και προκύπτει αντίστοιχα και ο λόγος καθιζήσεων β . Οπότε:

$$n_{Priebe} = 1 + \alpha_s \cdot \left(\frac{0.5 + f(\nu, \alpha_s)}{K_\alpha \cdot f(\nu, \alpha_s)} - 1 \right) = 1/\beta$$

$$\text{Όπου } \alpha_s = \frac{A_c}{A} = \left(\frac{d_c}{d_e} \right)^2$$

$$f(\nu, \alpha_s) = \frac{(1-\nu) \cdot (1-\alpha_s)}{1-2 \cdot \nu + \alpha_s}$$

$$K_\alpha = \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi_c}{2} \right)$$

Επομένως εφαρμόζοντας διάφορες τιμές για τη γωνία εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων φ_c και της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c , από την οποία εξαρτάται η διάμετρος της επιφάνειας επιρροής d_e και επομένως και ο συντελεστής αντικατάστασης του εγγενούς εδάφους α_s , όπως φαίνεται και από τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτουν αντίστοιχα τα αποτελέσματα των Πινάκων 5.7 και 5.8.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7 Τιμές του λόγου καθιζήσεων β για διάφορες τιμές τις γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c

$s/d_c = 2.0 \rightarrow d_e = 1.81 \rightarrow \alpha_s = 0.195$				
φ_c (°)	K_α	$f(v, \alpha_s)$	$n_{\text{Priebe}} = 1/\beta$	β
37	0.249	1.057	1.959	0.510
40	0.217	1.057	2.129	0.470
45	0.172	1.057	2.475	0.404

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8 Τιμές του λόγου καθιζήσεων β για διάφορες τιμές της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c

$\varphi_c = 40^\circ \rightarrow K_\alpha = 0.217$					
s/d_c	d_e (m)	α_s (m)	$f(v, \alpha_s)$	$n_{\text{Priebe}} = 1/\beta$	β
1.5	1.35	0.351	0.648	3.515	0.284
2.0	1.81	0.195	1.057	2.129	0.470
2.5	2.26	0.125	1.338	1.666	0.600
3.0	2.71	0.087	1.533	1.445	0.692

Στη συνέχεια επιχειρήθηκε και ο υπολογισμός του λόγου καθιζήσεων β με τη μέθοδο Ισορροπίας (Equilibrium Method), η οποία βασίζεται στην παραδοχή ελαστικής συμπεριφοράς χαλικοπασσάλου – εδάφους και άκαμπτης επιφάνειας φόρτισης. Επομένως έδαφος και χαλικοπάσσαλοι θα εμφανίζουν την ίδια καθίζηση.

Έτσι προκύπτει η σχέση (4.23) που διατυπώθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο και επομένως ισχύει:

$$s = \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot L = \frac{\sigma_o}{E_s} \cdot L \cdot \mu_s \Rightarrow s = s_o \cdot \mu_s \Rightarrow \mu_s = \frac{s}{s_o} = \beta$$

$$\text{Όπου } \mu_s = \frac{1}{1+(n-1) \cdot \alpha_s} \text{ και } n = E_c/E$$

Επομένως εφαρμόζοντας διάφορες τιμές του λόγου των μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_c/E και της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c , η οποία επηρεάζει τη διάμετρος της επιφάνειας επιρροής d_e και επομένως και το συντελεστή αντικατάστασης του εγγενούς εδάφους α_s προκύπτουν αντίστοιχα τα αποτελέσματα των Πινάκων 5.9 και 5.10.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9 Τιμές του λόγου καθιζήσεων β για διάφορες τιμές του λόγου μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_s/E

$s/d_c = 2.0 \rightarrow d_e = 1.81 \rightarrow \alpha_s = 0.195$	
$n = E_s/E$	$\mu_s = \beta$
10	0.363
20	0.213
40	0.116

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10 Τιμές του λόγου καθιζήσεων $1/\beta$ για διάφορες τιμές της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c

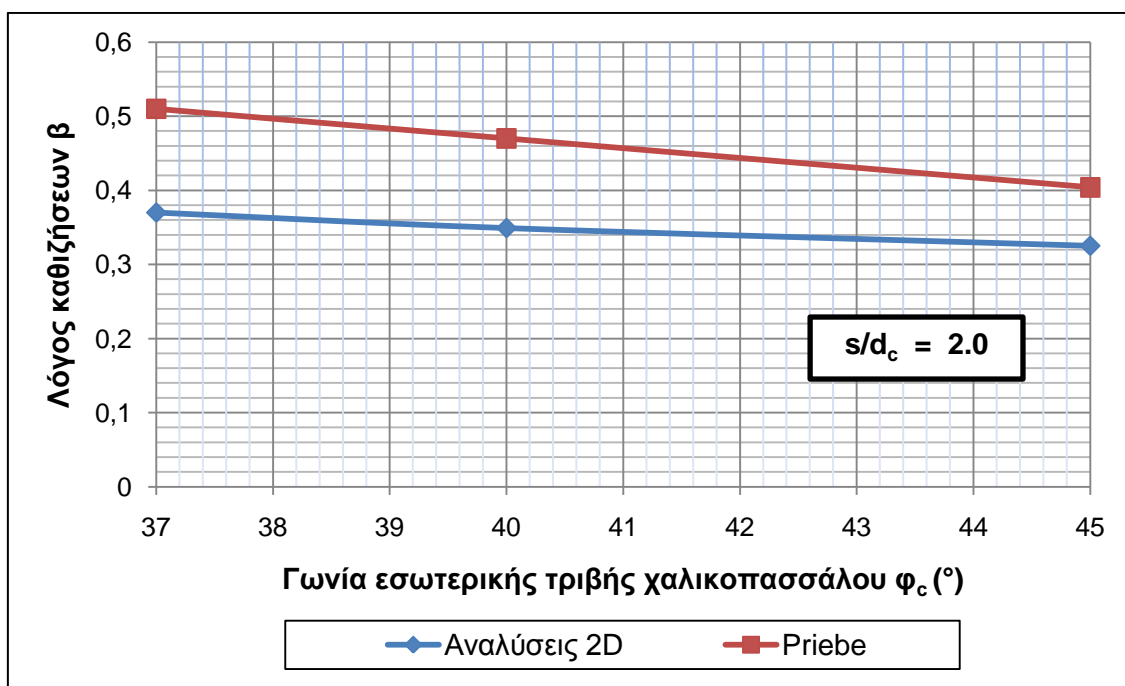
$n = E_s/E = 20$			
s/d_c	d_e (m)	α_s (m)	$\mu_s = \beta$
1.5	1.35	0.351	0.130
2.0	1.81	0.195	0.213
2.5	2.26	0.125	0.296
3.0	2.71	0.087	0.377

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν σε σχέση με τις χρησιμοποιούμενες παραμέτρους είναι:

- Η μέθοδος Priebe λαμβάνει υπόψη της τη γωνία εσωτερικής τριβής φ_c , την ανηγμένη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων s/d_c , από την οποία προκύπτει και η αντίστοιχη διάμετρος της επιφάνειας επιρροής d_e , και το λόγο Poisson ν του αργιλικού εδάφους, ενώ αμελεί το λόγο μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_s/E , το οποίο επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα των διδιάστατων αναλύσεων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.12.
- Η μέθοδος Ισορροπίας λαμβάνει υπόψη μόνο το λόγο μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_s/E και την ανηγμένη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων s/d_c . Αντίθετα δεν λαμβάνονται υπόψη ο λόγος Poisson ν του αργιλικού εδάφους και κυρίως η γωνία εσωτερικής τριβής φ_c του χαλικοπασσάλου, η οποία επηρεάζει τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.13.

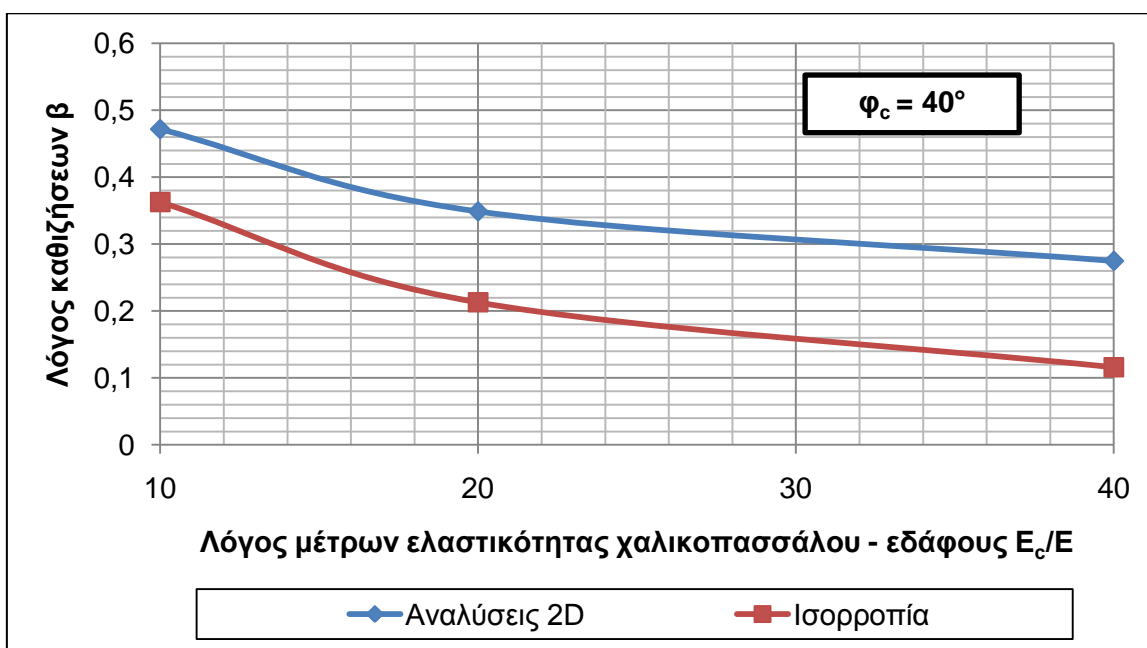
Και στις δύο μεθόδους δεν λαμβάνονται υπόψη το ανηγμένο μήκος του χαλικοπασσάλου L/d_c και η επιβαλλόμενη τάση q , παράμετροι οι οποίες όπως φαίνεται και από τις παραμετρικές αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία που προηγήθηκαν δεν έχουν σημαντική επιρροή στα αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 5.15 συγκρίνονται τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.7 που προέκυψαν με εφαρμογή της μεθόδου Priebe με τα αποτελέσματα της 4^{ης} σειράς διδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων του Πίνακα 5.5.



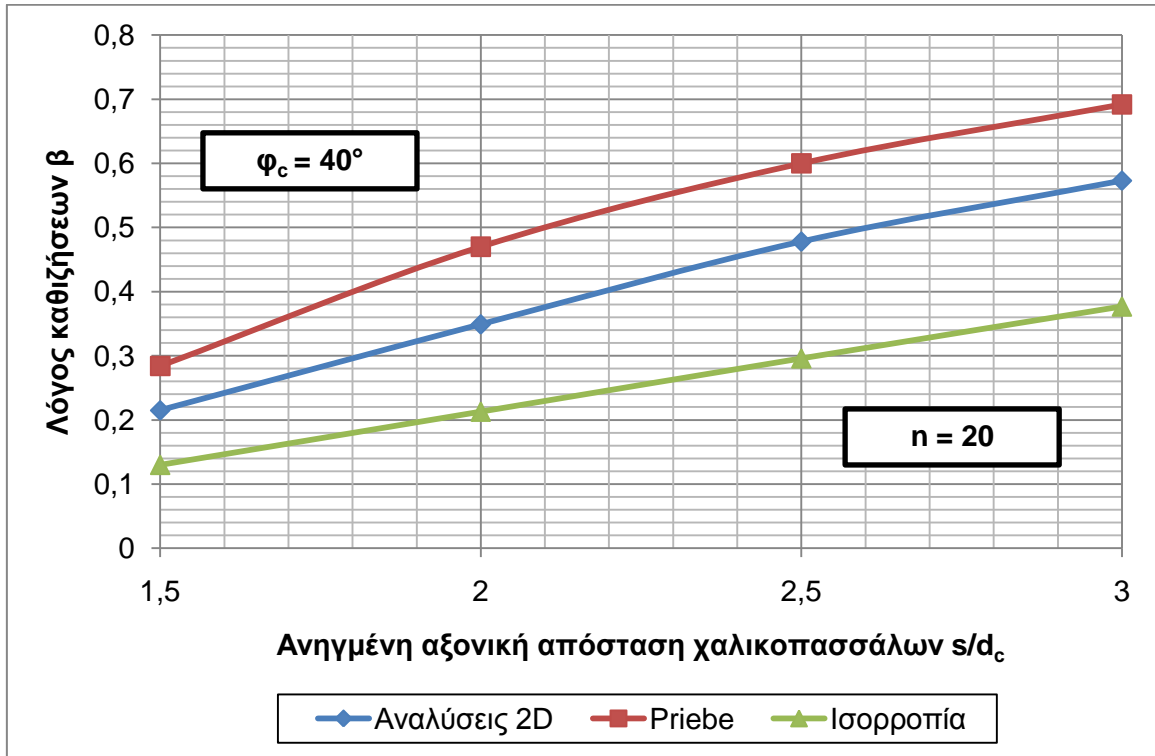
Σχήμα 5.15 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της γωνίας οριακής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c

Στο Σχήμα 5.16 συγκρίνονται τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.9 που προέκυψαν με εφαρμογή της μεθόδου Ισορροπίας (Equilibrium method) με τα αποτελέσματα της 3^{ης} σειράς διδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων του Πίνακα 5.4.



Σχήμα 5.16 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει του λόγου μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους E_c/E

Στο Σχήμα 5.17 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των Πινάκων 5.8 και 5.10 που προέκυψαν από εφαρμογή των μεθόδων Priebe και Ισορροπίας (Equilibrium Method) αντίστοιχα με τα αποτελέσματα της 1^{ης} σειράς διδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων του Πίνακα 5.2.



Σχήμα 5.17 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν σε σχέση με τον υπολογιζόμενο λόγο καθιζήσεων β είναι:

- Με βάση τη μέθοδο Priebe για διάφορες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής των χαλικοπασσάλων ϕ_c προκύπτει μεγαλύτερος σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των διδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων, ενώ υπάρχει μία σταδιακή σύγκλιση των τιμών όσο αυξάνεται η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ_c όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.15.
- Με βάση τη μέθοδο Ισορροπίας για διάφορες τιμές του λόγου μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους E_s/E προκύπτει μικρότερος σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των διδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων, με τη μικρότερη διαφορά να παρατηρείται για λόγο $E_s/E = 10$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16.

- Για διάφορες τιμές της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c προκύπτει μεγαλύτερος με βάση τη μέθοδο Priebe, ενώ με βάση τη μέθοδο Ισορροπίας προκύπτει μικρότερος σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των διδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.17, με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να παρουσιάζει η μέθοδος Ισορροπίας.

Τελικά διαπιστώνεται ότι για το συγκεκριμένο παράδειγμα που μελετήθηκε η μέθοδος Priebe υποεκτιμά το λόγο καθιζήσεων, προτείνοντας μεγαλύτερες καθιζήσεις του ενισχυμένου εδάφους από αυτές που προέκυψαν στη διδιάστατη προσομείωση με το πρόγραμμα Plaxis. Αντίθετα η μέθοδος Ισορροπίας υπερεκτιμά τη συμβολή της κατασκευής χαλικοπασσάλων στη βελτίωση του εδάφους, προτείνοντας μικρότερες καθιζήσεις του ενισχυμένου εδάφους από τις αντίστοιχες των διδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων που προηγήθηκαν.

Οι αποκλίσεις των παραπάνω μεθόδων από τα αποτελέσματα των διδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων οφείλονται στην απουσία βασικών γεωτεχνικών παραμέτρων τόσο των χαλικοπασσάλων όσο και του περιβάλλοντος εδάφους κατά την υπολογιστική διαδικασία, οι οποίες όπως αποδείχθηκε έχουν σημαντική επιρροή.

6. ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Μία ακόμη πιο ακριβή εκτίμηση της βελτίωσης που επιφέρει στο έδαφος η εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων επιχειρήθηκε με τη χρήση της τρισδιάστατης έκδοσης του προγράμματος Plaxis. Το Plaxis3D αποτελεί την εξέλιξη της διδιάστατης έκδοσης που χρησιμοποιήθηκε αρχικά και πρόκειται για ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που επικεντρώνεται σε τριδιάστατες αναλύσεις τάσεων, παραμορφώσεων και ευστάθειας διαφόρων γεωτεχνικών κατασκευών. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί ένα σχετικά απλό για το χρήστη γραφικό περιβάλλον, το οποίο δίνει τη δυνατότητα γρήγορης δημιουργίας ενός πραγματικού τρισδιάστατου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων βασισμένο σε μία επαναλαμβανόμενη κατακόρυφη διατομή της περίπτωσης που εξετάζεται.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου λογισμικού είναι ο απλός γραφικός τρόπος εισαγωγής των στοιχείων του μοντέλου προσομοίωσης, ο οποίος δίνει τη δυνατότητα ταχείας δημιουργίας των σύνθετων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων αλλά και η λεπτομερής παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πλήρους αυτοματοποιημένης υπολογιστικής διαδικασίας.

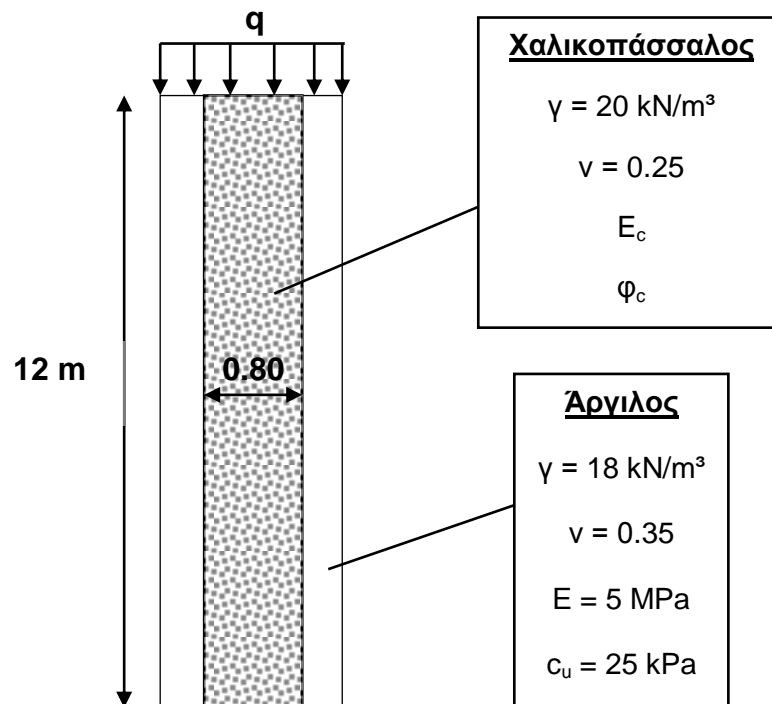
Είναι αντιληπτό ότι τα εργαλεία της τρισδιάστατης αυτής έκδοσης δίνουν τη δυνατότητα ανάλυσης πολυάριθμων πτυχών ακόμα και των πιο πολύπλοκων κατασκευών της γεωτεχνικής μηχανικής.

6.1 Ορισμός προσομοιώματος

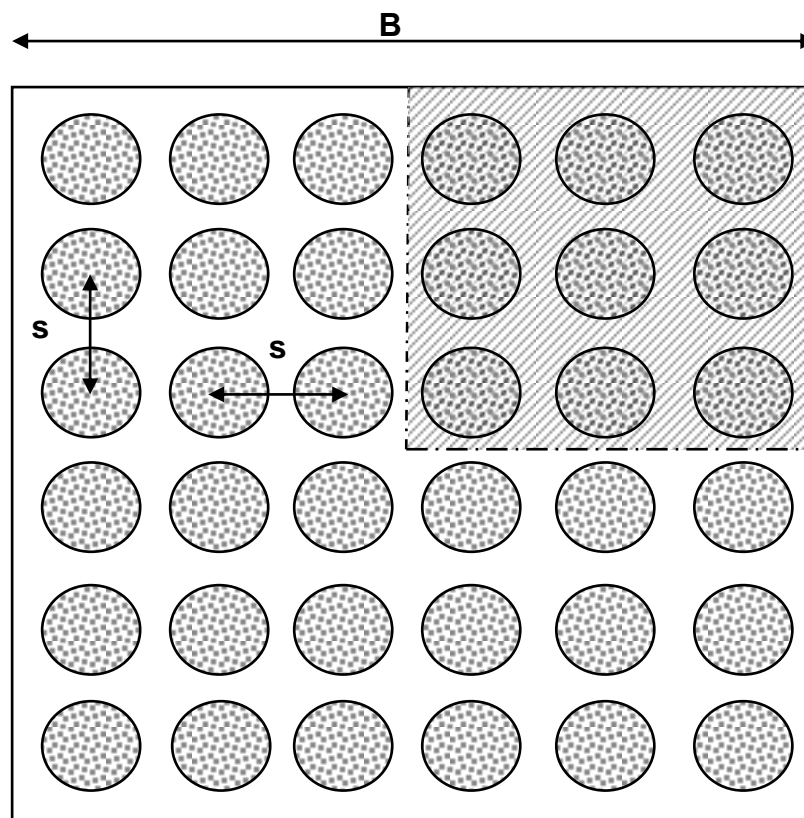
Το προσομοίωμα πλευράς B που επιλέχθηκε συνίσταται από 36 χαλικοπασσάλους διαμέτρου $d_c = 0.80 \text{ m}$ και μήκους $L = 12 \text{ m}$ διατεταγμένους σε 6 σειρές σε τετραγωνικό κάναβο, και με αξονική απόσταση μεταξύ τους s . Το υλικό κατασκευής των χαλικοπασσάλων είναι ειδικού βάρους $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, λόγου Poisson $\nu = 0.25$, μέτρου ελαστικότητας E_c και γωνίας εσωτερικής τριβής φ_c . Οι χαλικοπάσσαλοι είναι εγκατεστημένοι σε κορεσμένο ασθενή αργιλικό σχηματισμό αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $c_u = 25 \text{ kPa}$ στον οποίο η επιβαλλόμενη τάση είναι q . Το ειδικό βάρος του εδάφους είναι $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ και το μέτρο ελαστικότητας $E = 5 \text{ MPa}$.

Οι γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού του κάθε χαλικοπασσάλου και της περιβάλλουσας γεώμαζας, καθώς και τα στοιχεία της γεωμετρίας του προσομοιώματος σε τομή και κάτοψη δίνονται στα Σχήματα 6.1 και 6.2 αντίστοιχα που ακολουθούν. Το τμήμα του προσομοιώματος που μελετήθηκε φαίνεται γραμμοσκιασμένο στο Σχήμα 6.2. Όπως και στις διδιάστατες αναλύσεις που προηγήθηκαν, σε κάποια από τα

δεδομένα δεν δίνονται συγκεκριμένες τιμές γιατί στόχος είναι, με την εφαρμογή διαφόρων τιμών, ο προσδιορισμός της επιρροής τους στα τελικά αποτελέσματα.



Σχήμα 6.1 Στοιχεία χαλικοπασσάλου και περιβάλλουσας γεώμαζας σε κατακόρυφη τομή



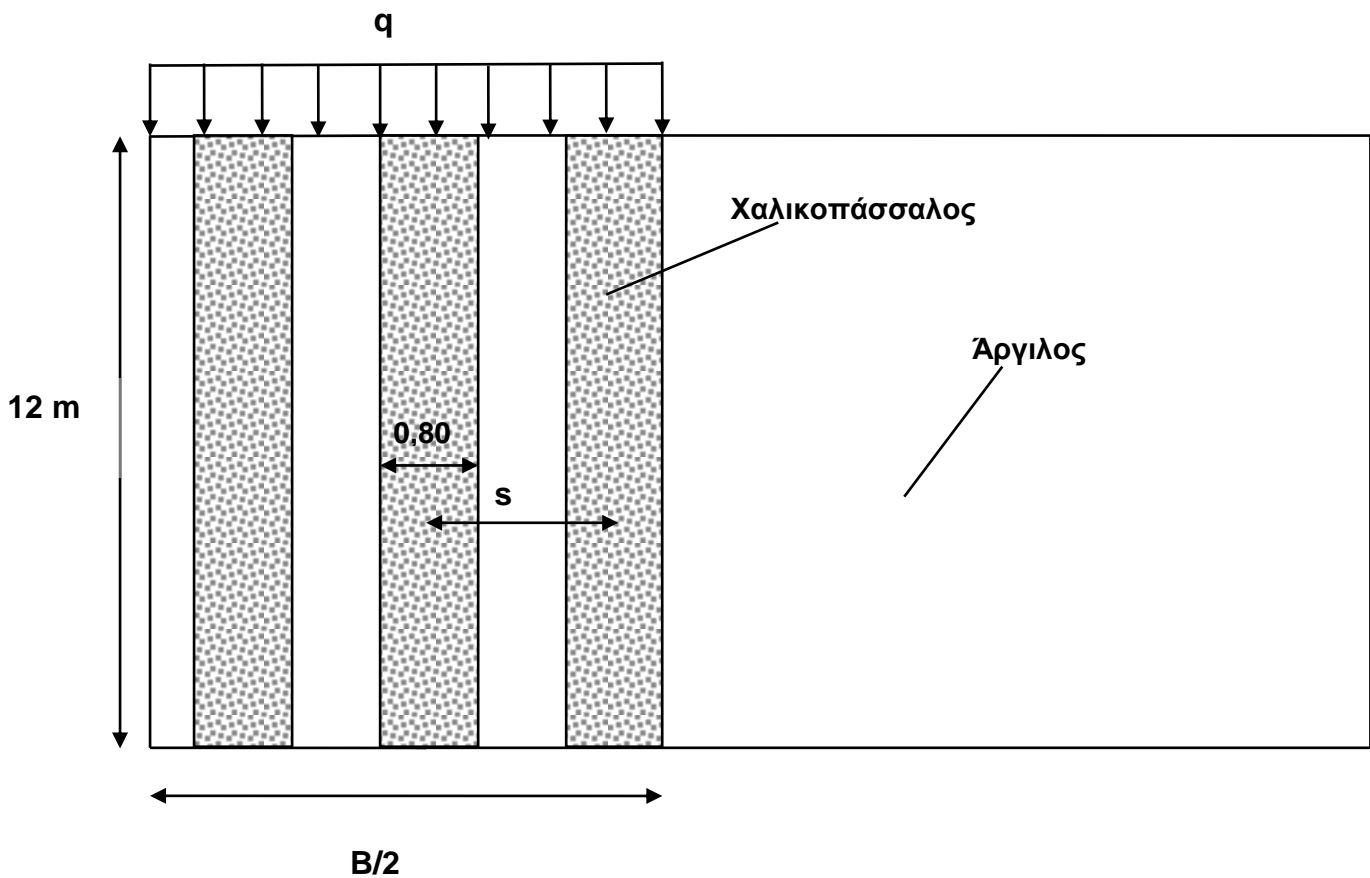
Σχήμα 6.2 Κάτοψη προσομοιώματος

Όπως ακριβώς και στις διδιάστατες αναλύσεις, η αποτίμηση της βελτίωσης που επιφέρει στο έδαφος η εγκατάσταση των χαλικοπάσσάλων απαιτεί και την επίλυση του ανωτέρω προσομοιώματος χωρίς το χαλικοπάσσάλο, αλλά υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να προσδιορισθεί η μέγιστη καθίζηση προ και μετά της τοποθέτησης των χαλικοπάσσάλων και έτσι να υπολογισθεί ο λόγος καθιζήσεων.

6.2 Διαδικασία μόρφωσης προσομοιώματος

Για τη μόρφωση του αναλυτικού προσομοιώματος στο Plaxis3D ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

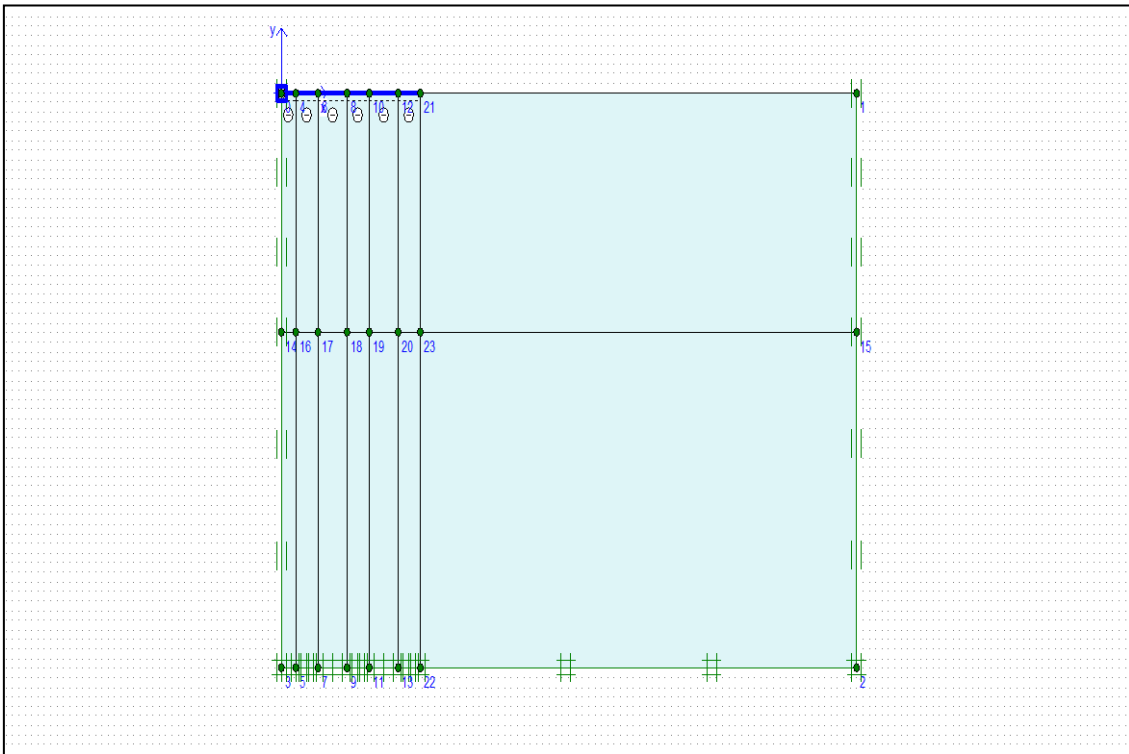
- Ορισμός διαστάσεων περιοχής σχεδίασης και μόρφωση επιθυμητών αποστάσεων καννάβου.
- Σχέδιαση μίας διδιάστατης κατακόρυφης διατομής του μοντέλου. Το μοντέλο σχεδιάζεται αρκετά μεγάλο όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3, ώστε τα όρια του προσομοιώματος να μην επηρεάζουν τα αποτελέσματα της περίπτωσης που εξετάζεται.



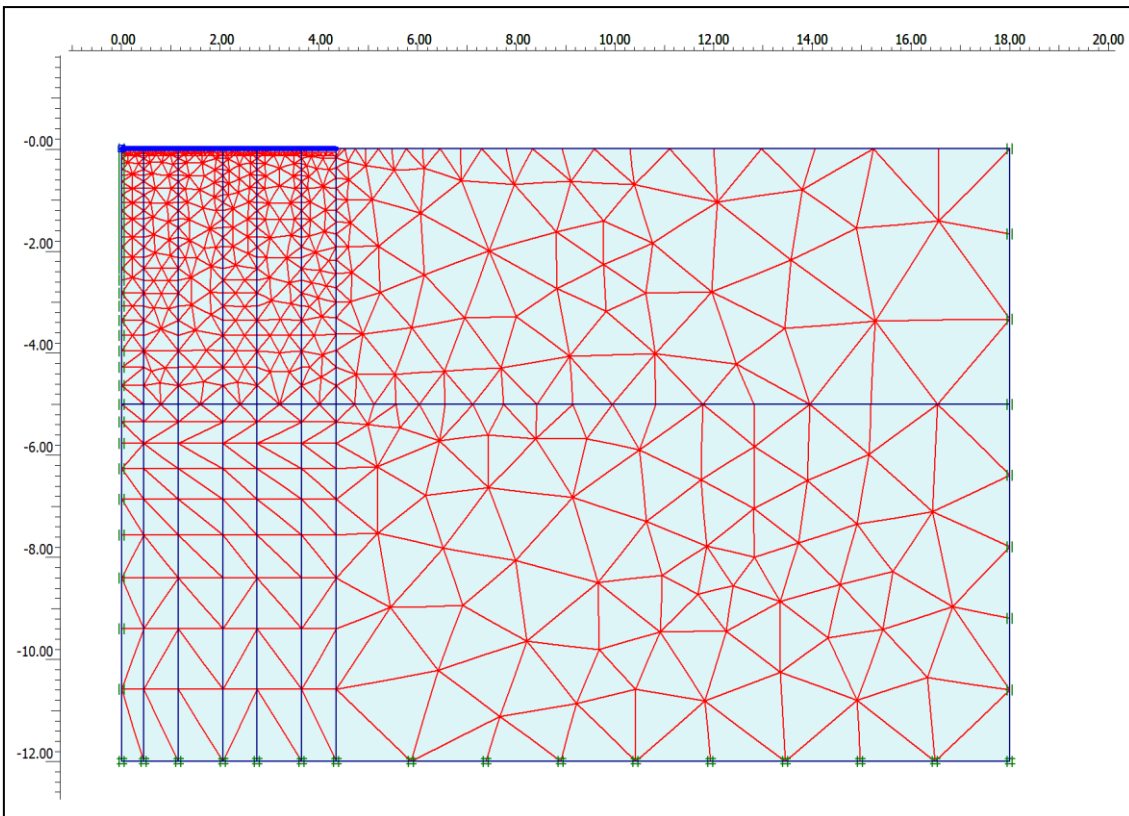
Σχήμα 6.3 Γεωμετρικό μοντέλο ανάλυσης

- Τοποθέτηση δύσκαμπτης επιφάνειας φόρτισης, δηλαδή πλάκας πάχους 1 m στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από την περιοχή που είναι εγκατεστημένοι οι χαλικοπάσσαλοι έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι οι παραμορφώσεις θα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες ανάμεσα στο χαλικοπάσσαλο και το περιβάλλον έδαφος. Επίσης προσδιορίζονται ποσοτικά η αξονική ατένεια και η καμπτική δυσκαμψία της πλάκας.
- Τοποθέτηση διεπιφάνειας μεταξύ της πλάκας και της επιφάνειας του εδάφους.
- Επιλογή οριακών συνθηκών ανάλογα με το αν επιτρέπονται οι κατακόρυφες ή οι οριζόντιες μετακινήσεις και οι στροφές. Συνήθως, όπως και στη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιούνται οι προεπιλεγμένες οριακές συνθήκες όπου απαγορεύουν κάθε είδους μετακίνηση και στροφή στη βάση και την οριζόντια μετακίνηση στις κατακόρυφες πλευρές του προσομοιώματος. Επιπλέον απαγορεύεται η στροφή της πλάκα φόρτισης στα σημεία που τέμνεται με τον άξονα συμμετρίας του προσομοιώματος.
- Εισαγωγή των γεωτεχνικών παραμέτρων του υλικού του χαλικοπασσάλου και της περιβάλλουσας γεώμαζας (Σχήμα 6.1) και προσδιορισμός του κατάλληλου εδαφικού μοντέλου. Το εδαφικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το ελαστο – πλαστικό μοντέλο Mohr – Coulomb (MC), το οποίο προσφέρει μια σχετικά ακριβή και απλή εκτίμηση της συμπεριφοράς του προσομοιώματος. Αρχικά στο γεωμετρικό μοντέλο που σχεδιάστηκε (Σχήμα 6.3) τοποθετείται μόνο το αργιλικό υλικό και στη συνέχεια ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται ενεργοποιούνται οι περιοχές όπου εγκαθίστανται οι χαλικοπάσσαλοι.
- Δημιουργία πυκνού διδιάστατου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, με ακόμα μεγαλύτερη πυκνώσή του κάτω από την άκαμπτη πλάκα μέχρι κάποιο βάθος, για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
- Δημιουργία τρισδιάστατου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, αφού προηγηθεί ο καθορισμός των συντεταγμένων των διαφόρων επιπέδων κατά την τρίτη διάσταση (άξονας z-z). Σε κάθε τέτοιο επίπεδο, το οποίο δημιουργείται όπου υπάρχει ασυνέχεια στη γεωμετρία του προσομοιώματος, επαναλαμβάνεται το διδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα. Στη συγκεκριμένη ανάλυση διαφορετικά επίπεδα ήταν αναγκαία λόγω της ύπαρξης των σειρών από χαλικοπασσάλους μέσα στον ασθενή αργιλικό σχηματισμό.
- Καθορισμός των αρχικών εντατικών συνθηκών με τη θεώρηση ότι δεν υπάρχει υδροφόρος ορίζοντας στο προσομοίωμα που μελετήθηκε.

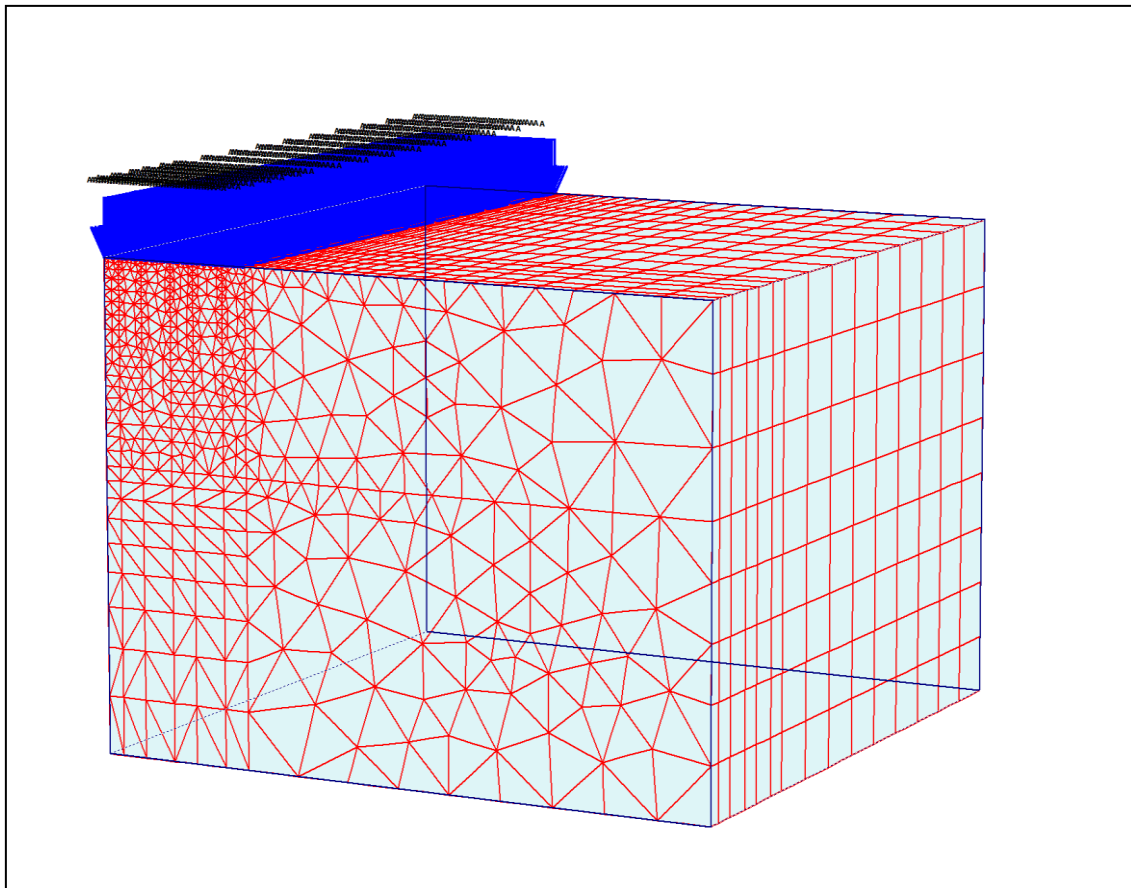
Κάποια από τα παραπάνω βήματα μόρφωσης του προσομοιώματος παρουσιάζονται ενδεικτικά στα Σχήματα 6.4, 6.5 και 6.6 που ακολουθούν.



Σχήμα 6.4 Απεικόνιση οριακών συνθηκών μοντέλου ανάλυσης στον κάνναβο της περιοχής σχεδίασης



Σχήμα 6.5 Διδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων



Σχήμα 6.6 Τριδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

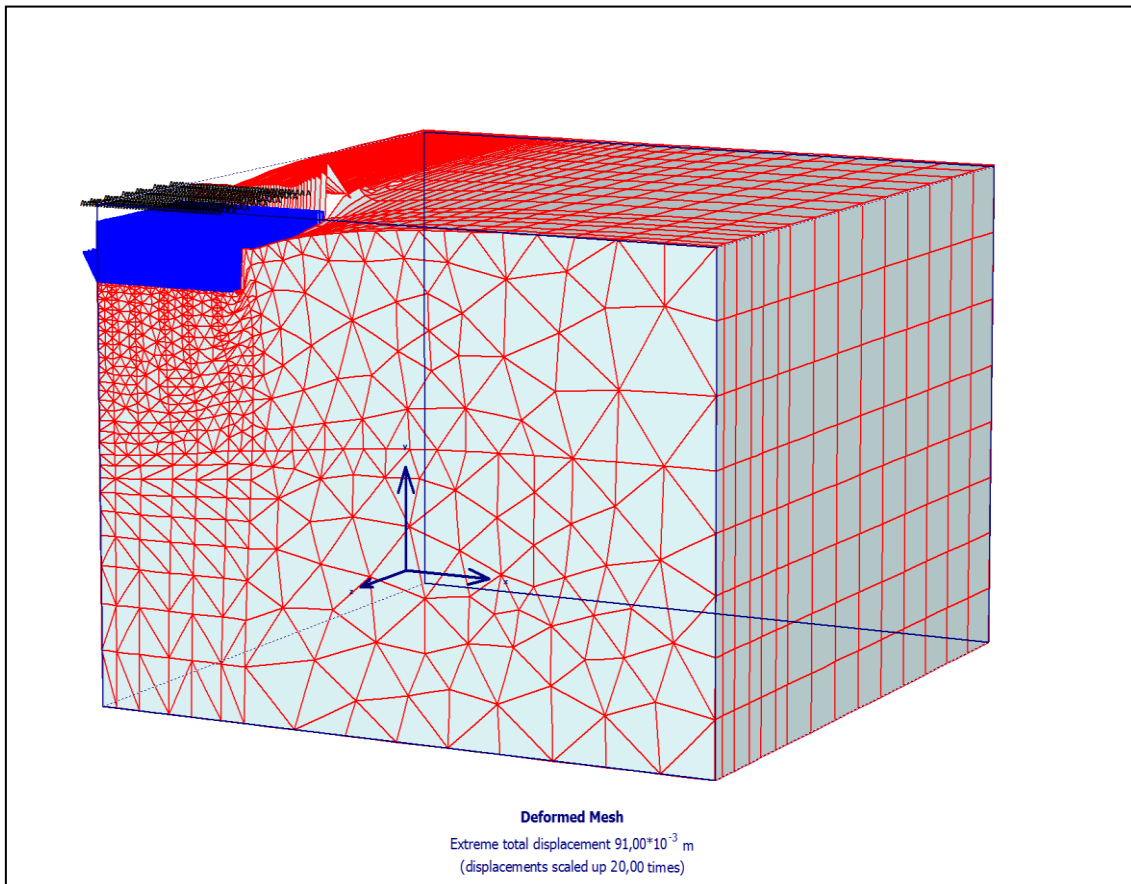
6.3 Επίλυση προσομοιώματος

Για την έναρξη της υπολογιστικής διαδικασίας απαιτούνται:

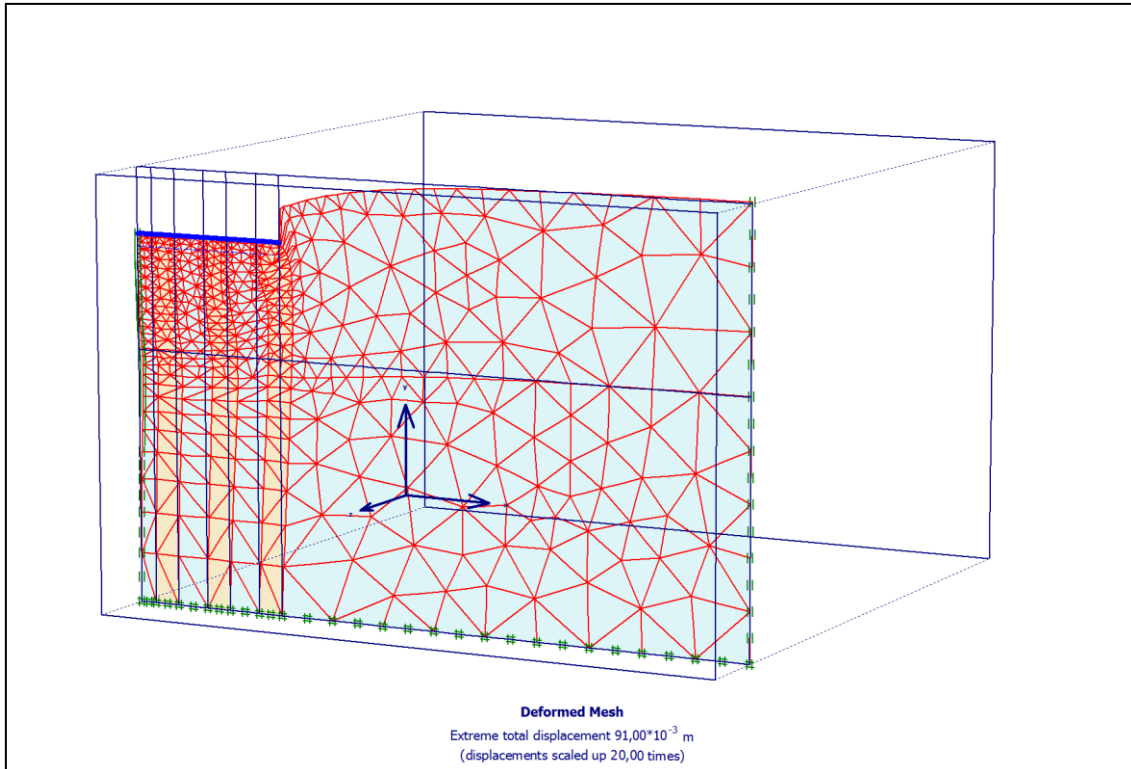
- Ο προσδιορισμός του αριθμού των φάσεων υπολογισμού. Στις αναλύσεις που έγιναν επιλέχθηκαν δύο φάσεις υπολογισμού στις περιπτώσεις που μελετήθηκαν οι καθιζήσεις του προσομοιώματος με το χαλικοπάσσαλο. Στην πρώτη τοποθετήθηκε το υλικό του χαλικοπασσάλου στις αντίστοιχες θέσεις και στην δεύτερη καθορίστηκε το μέγεθος και η έκταση της επιβαλλόμενης φόρτισης και ενεργοποιήθηκαν όλα τα απαιτούμενα στοιχεία του προσομοιώματος. Στις περιπτώσεις που μελετήθηκε το προσομοίωμα χωρίς το χαλικοπάσσαλο επιλέχθηκε μία φάση υπολογισμού.
- Η επιλογή του τύπου υπολογισμών, όπως επίλυση με βάση την πλαστική ανάλυση η οποία επιλέχθηκε και στις αναλύσεις που διεξήχθησαν.
- Ο έλεγχος του απαιτούμενου αριθμού των υπολογιστικών βημάτων και ο προσδιορισμός της επιθυμητής ακρίβειας στην επαναληπτική διαδικασία που ακολουθείται. Συνήθως, όπως και στις συγκεκριμένες αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις.

Κατά τη διάρκεια της επίλυσης ο χρήστης ενημερώνεται για την πρόοδό της μέσω ενός παραθύρου, το οποίο περιέχει πληροφορίες, που συνεχώς ανανεώνονται. Η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς όταν το προσομοίωμα έχει αναλάβει το σύνολο του φορτίου που είχε εξαρχής ορισθεί ή όταν προκύψει αστοχία.

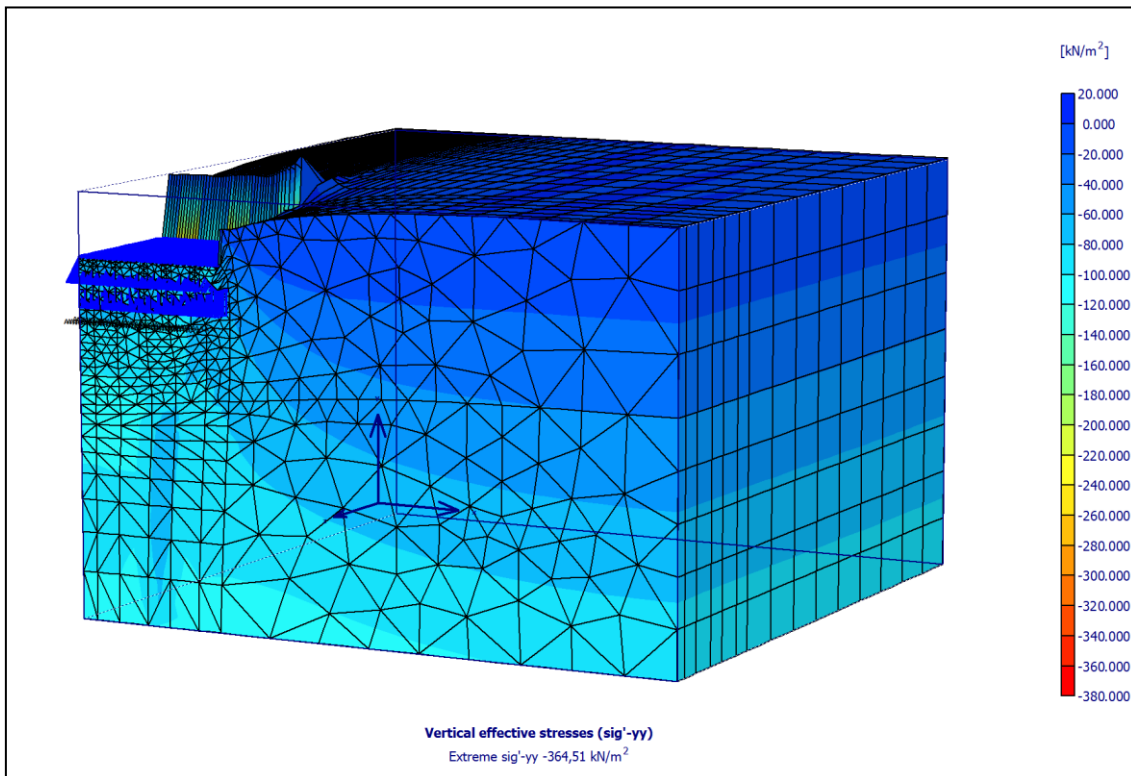
Μετά το τέλος της διαδικασία επίλυσης του προβλήματος προκύπτουν στοιχεία για τη μέγιστη καθίζηση του προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και για τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Κάποιες από τις αντιπροσωπευτικές εικόνες που προέκυψαν στις συγκεκριμένες αναλύσεις δίνονται στα Σχήματα 6.7, 6.8



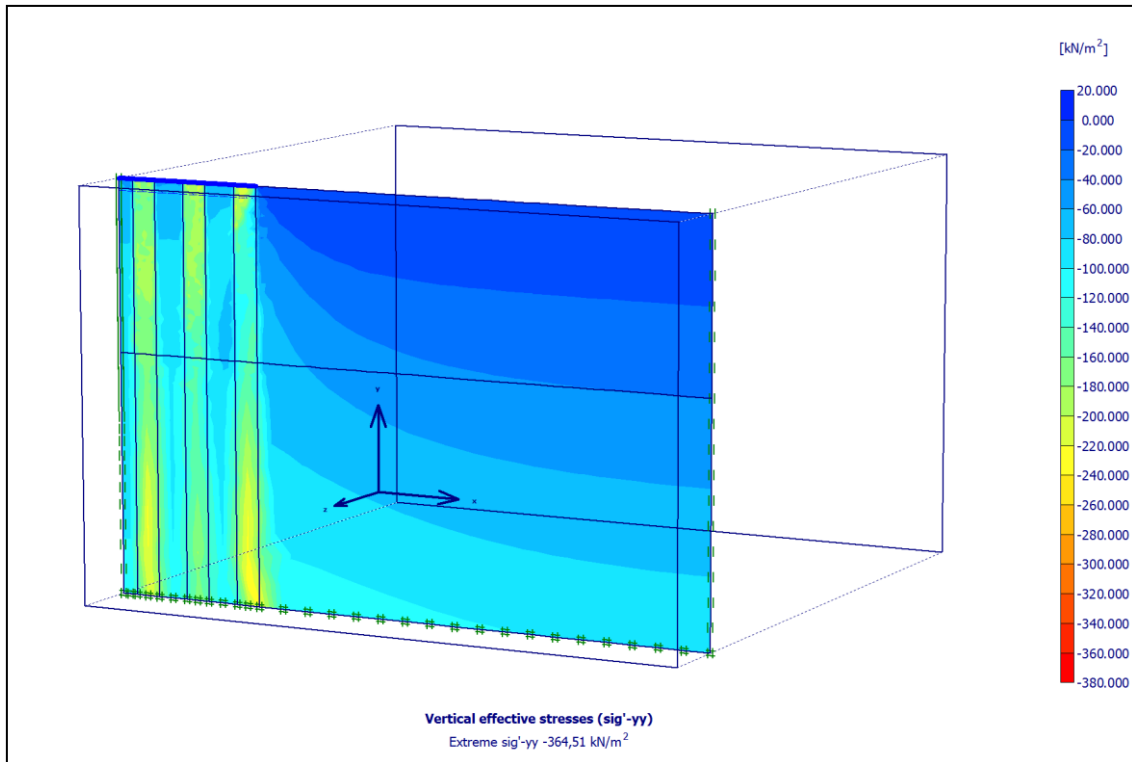
Σχήμα 6.7 Τριδιάστατο παραμορφωμένο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων με την επιβαλλόμενη φόρτιση



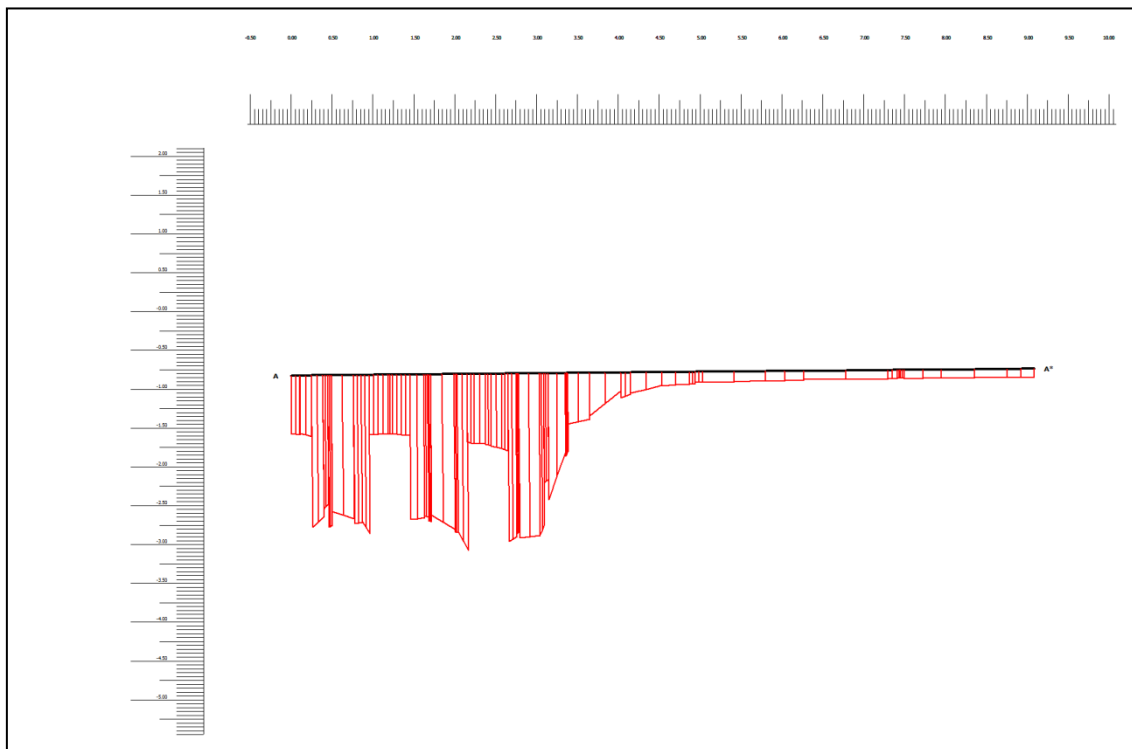
Σχήμα 6.8 Παραμορφωμένο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων σε ένα από τα επίπεδα του προσομοιώματος



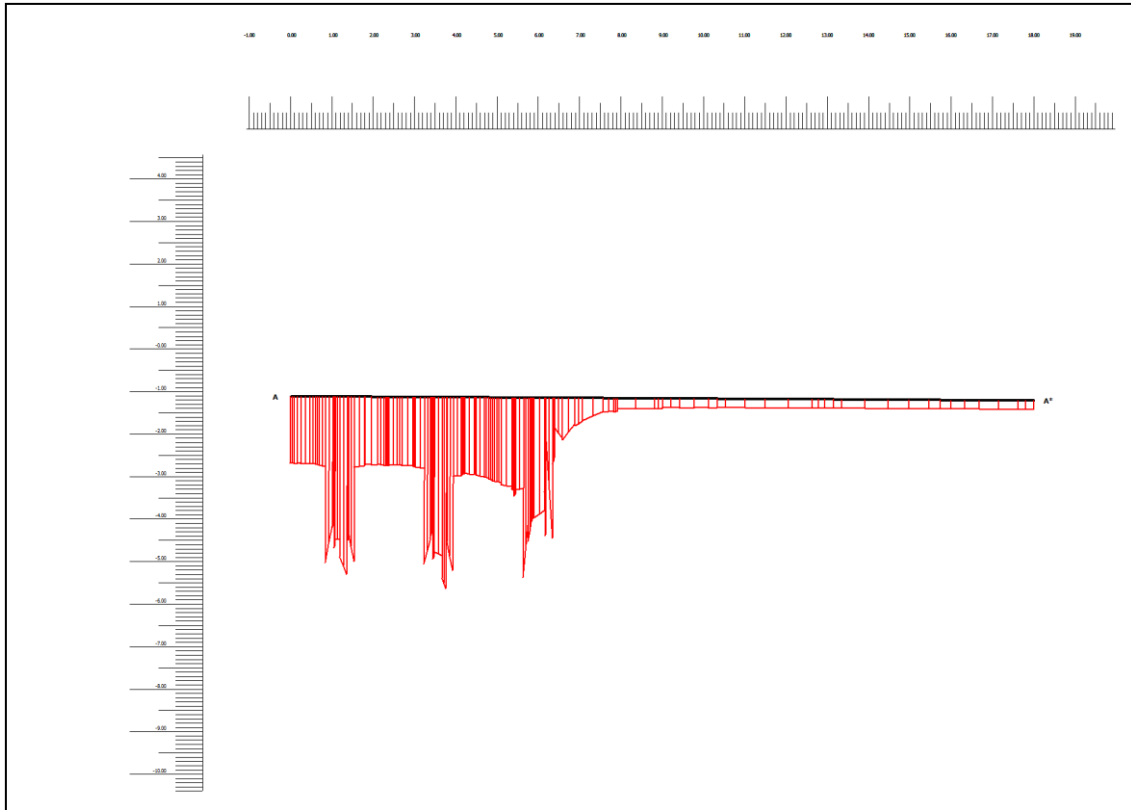
Σχήμα 6.9 Αναπτυσσόμενες κατακόρυφες ενεργές τάσεις στο τριδιάστατο προσομοίωμα



Σχήμα 6.10 Αναπτυσσόμενες κατακόρυφες ενεργές τάσεις σε ένα από τα επίπεδα του προσομοιώματος



Σχήμα 6.11 Κατανομή κατακόρυφων ενεργών τάσεων κάτω από την πλάκα σε ένα από τα επίπεδα του προσομοιώματος για ανηγμένη αξονική απόσταση χαλικοπασσάλων $s/d_c = 1.5$



Σχήμα 6.11 Κατανομή κατακόρυφων ενεργών τάσεων κάτω από την πλάκα σε ένα από τα επίπεδα του προσομοιώματος για ανηγμένη αξονική απόσταση χαλικοπασσάλων $s/d_c = 3.0$

Αξίζει να σχολιασθεί ότι από τα Σχήματα 6.10 και 6.11 παρατηρείται συγκέντρωση του μεγαλύτερου ποσοστού των τάσεων στους χαλικοπασσάλους, λόγω του υψηλότερου μέτρου ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου σε σχέση με το περιβάλλον ασθενές αργιλικό έδαφος. Μάλιστα στο σχήμα όπου η διάταξη των χαλικοπασσάλων είναι πυκνότερη (Σχήμα 6.10 - $s/d_c = 1.5$), η μέση επιβαλλόμενη τάση ανά χαλικοπάσσαλο είναι μικρότερη και επομένως η μέγιστη τάση που παρατηρείται είναι μικρότερη από την αντίστοιχη περίπτωση για αραιότερη διάταξη χαλικοπασσάλων (Σχήμα 6.11 - $s/d_c = 3.0$).

6.4 Παραμετρικές αναλύσεις – Αποτελέσματα

Οι παραμετρικές αναλύσεις που διεξήχθησαν επικεντρώθηκαν στον υπολογισμό των καθιζήσεων του προσομοιώματος με και χωρίς τους χαλικοπασσάλους. Επιχειρήθηκε έτσι να δοθεί μία εκτίμηση της βελτίωσης που επιφέρει στο ασθενές αργιλικό έδαφος η εγκατάστασή τους και να γίνει μία ενδεικτική σύγκριση με κάποια από τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εφαρμογή της διδιάστατης έκδοσης του προγράμματος Plaxis. Έτσι πραγματοποιήθηκαν σειρές αναλύσεων, η διάκριση των οποίων εστιάζεται στη διαφοροποίηση των ακόλουθων βασικών παραμέτρων:

1. Ανηγμένη αξονική απόσταση χαλικοπασσάλων s/d_c
2. Λόγος μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους E_d/E
3. Γωνία εσωτερικής τριβής χαλικοπασσάλου φ_c
4. Επιβαλλόμενη τάση q

Από τις επιλυσεις των προσομοιωμάτων με και χωρίς τους χαλικοπασσάλους και βάσει των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ανάλυση, υπολογίστηκε ο λόγος καθιζήσεων $\beta = \frac{s}{s_0}$, όπου s η καθίζηση του ενισχυμένου με τους χαλικοπασσάλους εδάφους και s_0 η καθίζηση του φυσικού εδάφους.

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι του αργιλικού σχηματισμού που μελετήθηκε σε όλες τις αναλύσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1 Δεδομένα για τον αργιλικό σχηματισμό

γ (kN/m ³)	18
ν	0.35
E (Mpa)	5
c_u (kPa)	25

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προσομοιώματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.3, ενώ η επιβαλλόμενη τάση, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τους χαλικοπασσάλους σε κάθε σειρά αναλύσεων, οι καθιζήσεις που υπολογίστηκαν για κάθε περίπτωση με και χωρίς τους χαλικοπασσάλους και οι αντίστοιχοι λόγοι καθιζήσεων που προέκυψαν παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες που ακολουθούν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 1^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενος ο λόγος s/d_c

1^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΩΝ s/d_c

q (kN/m ²)	d_c (m)	L (m)	E_c (Μρα)	φ_c (°)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	12	100	40	20	0.25

s/d_c	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$
1.5	$43.48 \cdot 10^{-3}$	$111.48 \cdot 10^{-3}$	0.390
2.0	$64.36 \cdot 10^{-3}$	$134.49 \cdot 10^{-3}$	0.479
2.5	$83.68 \cdot 10^{-3}$	$152.40 \cdot 10^{-3}$	0.549
3.0	$102.89 \cdot 10^{-3}$	$165.82 \cdot 10^{-3}$	0.620

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 2^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενος ο λόγος E_s/E

2^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟ Ο ΛΟΓΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥ - ΕΔΑΦΟΥΣ E_s/E

q (kN/m ²)	d_c (m)	s/d_c	L (m)	φ_c (°)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	2.0	12	40	20	0.25

E_s/E	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$
10	$67.37 \cdot 10^{-3}$	$134.49 \cdot 10^{-3}$	0.501
20	$64.36 \cdot 10^{-3}$	$134.49 \cdot 10^{-3}$	0.479
40	$63.34 \cdot 10^{-3}$	$134.49 \cdot 10^{-3}$	0.471

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 3^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενη η γωνία εσωτερικής τριβής φ_c

<u>3^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:</u>
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΓΩΝΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥ φ_c

q (kN/m ²)	d _c (m)	s/d _c	L (m)	E _c (Mpa)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	2.0	12	100	20	0.25

φ_c (°)	s (m)	s ₀ (m)	s/s ₀ = β
37	71.02·10 ⁻³	134.49·10 ⁻³	0.528
40	64.36·10 ⁻³	134.49·10 ⁻³	0.479
45	54.82·10 ⁻³	134.49·10 ⁻³	0.408

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 4^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενη η επιβαλλόμενη τάση q

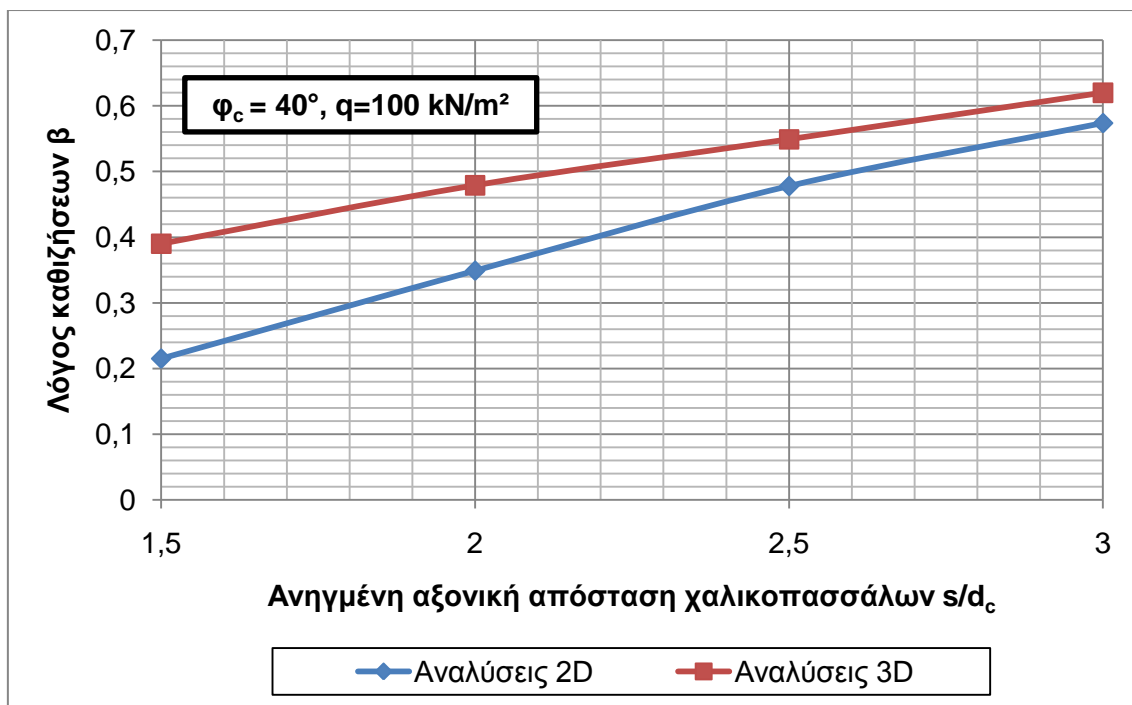
<u>4^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:</u>
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ q

d _c (m)	s/d _c	L (m)	E _c (Mpa)	φ (°)	γ (kN/m ³)	ν
0.80	2.0	12	100	40	20	0.25

q (kN/m ²)	s (m)	s ₀ (m)	s/s ₀ = β
50	25.05·10 ⁻³	46.79·10 ⁻³	0.535
100	64.36·10 ⁻³	134.49·10 ⁻³	0.479
120	91.00·10 ⁻³	228.75·10 ⁻³	0.398
140	125.65·10 ⁻³	442.22·10 ⁻³	0.284

6.4.1 Επιρροή της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c

Τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενη την ανηγμένη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων s/d_c που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2, συνοψίζονται στο Σχήμα 6.12, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων συναρτήσει της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων. Στο ίδιο σχήμα έχει σχεδιαστεί και η αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από τις τριδιάστατες επιλύσεις που έγιναν, έτσι ώστε να δοθεί μία γραφική σύγκριση των αποτελεσμάτων.

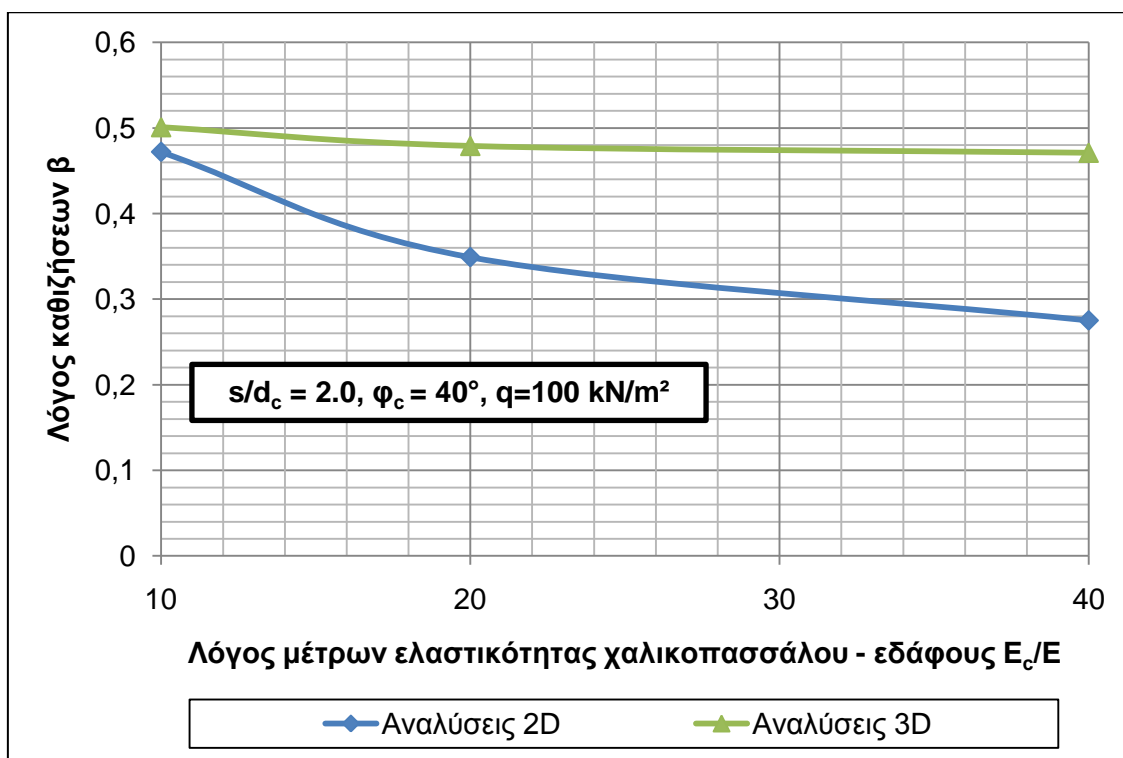


Σχήμα 6.12 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c

Από το παραπάνω σχήμα διαπιστώνεται ότι και στις τριδιάστατες αναλύσεις η αύξηση της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων, δηλαδή η μείωση του συντελεστή αντικατάστασης του εγγενούς εδάφους, οδηγεί σε αύξηση του λόγου καθιζήσεων β και επομένως σε αύξηση των καθιζήσεων του προσομοιώματος που μελετήθηκε. Επομένως επιβεβαιώνεται και από τις δύο παραπάνω καμπύλες ότι πυκνότερη διάταξη των χαλικοπασσάλων, συνεπάγεται μικρότερη τάση ανά χαλικοπάσσαλο και οδηγεί σε ένα βελτιωμένο έδαφος με μικρότερη μέση παραμορφωσιμότητα.

6.4.2 Επιρροή του λόγου μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους E_c/E

Τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενο το λόγο των μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_c/E που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3, συνοψίζονται στο Σχήμα 6.13, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων συναρτήσει του λόγου μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους. Στο ίδιο σχήμα έχει σχεδιαστεί και η αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από τις διδιάστατες επιλύσεις που έγιναν, έτσι ώστε να δοθεί μία γραφική σύγκριση των αποτελεσμάτων.

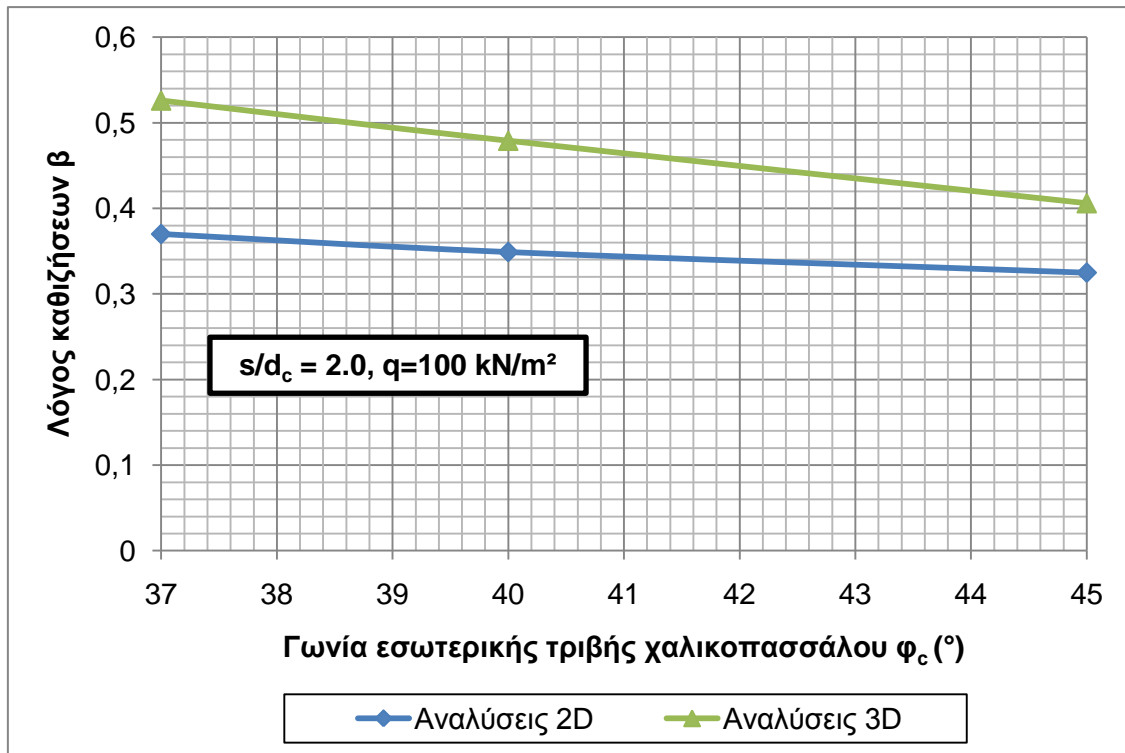


Σχήμα 6.13 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει του λόγου μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_c/E

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι και στις τριδιάστατες αναλύσεις η αύξηση του λόγου μέτρων ελαστικότητας προκαλεί μείωση, έστω και μικρότερη από τις διδιάστατες αναλύσεις, του λόγου καθιζήσεων β και επομένως μείωση των καθιζήσεων του χαλικοπασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους. Αυτή η μείωση των καθιζήσεων που παρατηρείται και στις δύο καμπύλες οφείλεται στη μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων στο χαλικοπάσσαλο εξαιτίας της σταδιακής αύξησης του λόγου E_c/E .

6.4.3 Επιρροή της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου ϕ_c

Τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενη τη γωνία εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου ϕ_c που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4, συνοψίζονται στο Σχήμα 6.14, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου. Στο ίδιο σχήμα έχει σχεδιαστεί και η αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από τις διδιάστατες επιλύσεις που έγιναν, έτσι ώστε να δοθεί μία γραφική σύγκριση των αποτελεσμάτων.

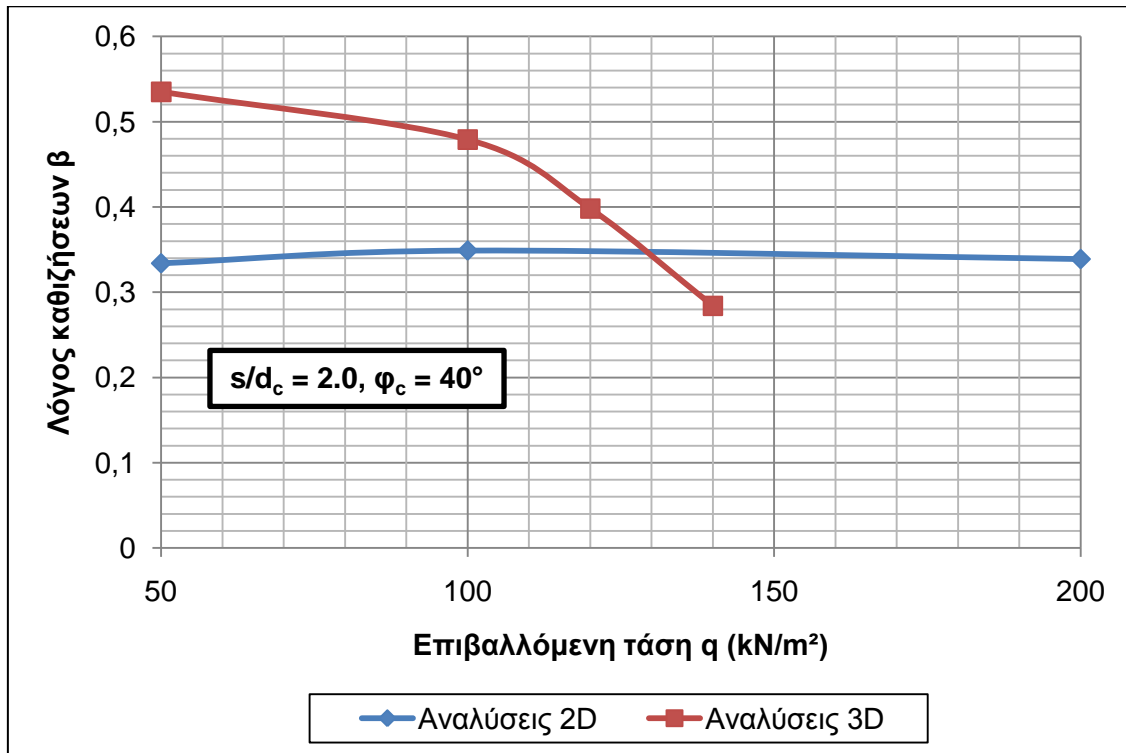


Σχήμα 6.14 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου ϕ_c

Με βάση το παραπάνω σχήμα διαπιστώνεται ότι και στις τριδιάστατες αναλύσεις η αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου, οδηγεί σε μείωση του λόγου καθιζήσεων β και επομένως σε μείωση των καθιζήσεων του χαλικοπασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους. Η σταδιακή αυτή μείωση των καθιζήσεων, μεγαλύτερη στις τριδιάστατες αναλύσεις, οφείλεται στην αντίστοιχη σταδιακή αύξηση της αντοχής του υλικού του χαλικοπασσάλου εξαιτίας της αύξησης της γωνίας εσωτερικής τριβής του.

6.4.4 Επιρροή τις επιβαλλόμενης τάσης q

Τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενη την επιβαλλόμενη τάση q που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5, συνοψίζονται στο Σχήμα 6.15, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων συναρτήσει τις επιβαλλόμενης τάσης. Στο ίδιο σχήμα έχει σχεδιαστεί και η αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από τις διδιάστατες επιλύσεις που έγιναν, έτσι ώστε να δοθεί μία γραφική σύγκριση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 6.15 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης q

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι στις τριδιάστατες αναλύσεις η αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης οδηγεί σε σημαντική μείωση του λόγου καθιζήσεων β και μάλιστα παρατηρείται δυσανάλογα μεγάλη μείωση του λόγου β σε σχέση με την αύξηση της τάσης q . Ειδικότερα, από τον Πίνακα 6.5 διαπιστώνεται ότι στο προσομοίωμα χωρίς τους χαλικοπασσάλους, για μία μικρή αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης αυξάνονται δραματικά οι καθιζήσεις s_0 του αργιλικού εδάφους σε σχέση με τις αντίστοιχες καθιζήσεις s στο ίδιο προσομοίωμα με τους χαλικοπασσάλους και μάλιστα το έδαφος αστοχεί για τάση λίγο μεγαλύτερη από 140 kN/m². Η μεγάλη αυτή αύξηση των καθιζήσεων οφείλεται στην ευρεία ανάπτυξη πλαστικών ζωνών στο προσομοίωμα που εξετάζεται, η έκταση των οποίων είναι πολύ μεγαλύτερη στο έδαφος χωρίς τους χαλικοπασσάλους. Αξίζει να σημειωθεί ότι κοντά στην αστοχία, οι τριδιάστατες αναλύσεις προτείνουν αρκετά μειωμένους λόγους καθιζήσεων β και επομένως η βελτίωση του εδάφους με χαλικοπασσάλους υπό τέτοια φόρτιση είναι σημαντική. Επομένως τα αποτελέσματα αυτής της σειράς αναλύσεων διαφέρουν σημαντικά από τα αντίστοιχα των διδιάστατων αναλύσεων, στα οποία παρατηρείται αναλογία τάσεων – καθιζήσεων όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο 5.4.5.

6.4.5 Επιρροή της γωνίας διασταλτικότητας ψ

Σε όλες τις αναλύσεις που προηγήθηκαν η γωνία διασταλτικότητας ψ του υλικού του χαλικοπασσάλου θεωρήθηκε μηδενική, δηλαδή αγνοήθηκε διόγκωση του εδαφικού υλικού. Γενικά η ογκομετρική παραμόρφωση οφείλεται στη φύση των εδαφικών υλικών, δηλαδή στην ύπαρξη ασύνδετων κόκκων που αλληλεπιδρούν μέσω δυνάμεων τριβής. Επομένως η επιβολή της καθορισμένης τάσης οδηγεί σε αναδιάταξη της δομής των κόκκων και άρα σε μεταβολή του όγκου των κενών. Συγκεκριμένα αν η αρχική δομή είναι χαλαρή, η ογκομετρική παραμόρφωση είναι θετική (μείωση του όγκου), ενώ αν η αρχική δομή είναι πυκνή, η ογκομετρική παραμόρφωση είναι αρνητική (διασταλτικότητα).

Για να ληφθεί υπόψη και η συγκεκριμένη παράμετρος και να εκτιμηθεί η επιρροή της στα αποτελέσματα των αναλύσεων επιχειρήθηκε να δοθεί ενδεικτικά μία σύγκριση των τιμών του λόγου καθιζήσεων β , που προέκυψαν στην 4^η σειρά αναλύσεων με διαφοροποιούμενη την επιβαλλόμενη τάση q , με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν, θεωρώντας ότι η γωνία διασταλτικότητας ψ υπολογίζεται από τη σχέση $\psi \approx \varphi_c - 30^\circ$, όπου $\varphi_c = 40^\circ$ η γωνία οριακής τριβής του υλικού του χαλικοπασσάλου.

Τα αποτελέσματα των καθιζήσεων με και χωρίς το χαλικοπάσσαλο και οι αντίστοιχοι λόγοι καθιζήσεων που προέκυψαν για $\psi = 10^\circ$ στις διδιάστατες και τριδιάστατες αναλύσεις, δίνονται στους Πίνακες 6.6 και 6.7 που ακολουθούν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.6 Αποτελέσματα διδιάστατων αναλύσεων για $\psi = 10^\circ$: μεταβαλλόμενη η επιβαλλόμενη τάση q

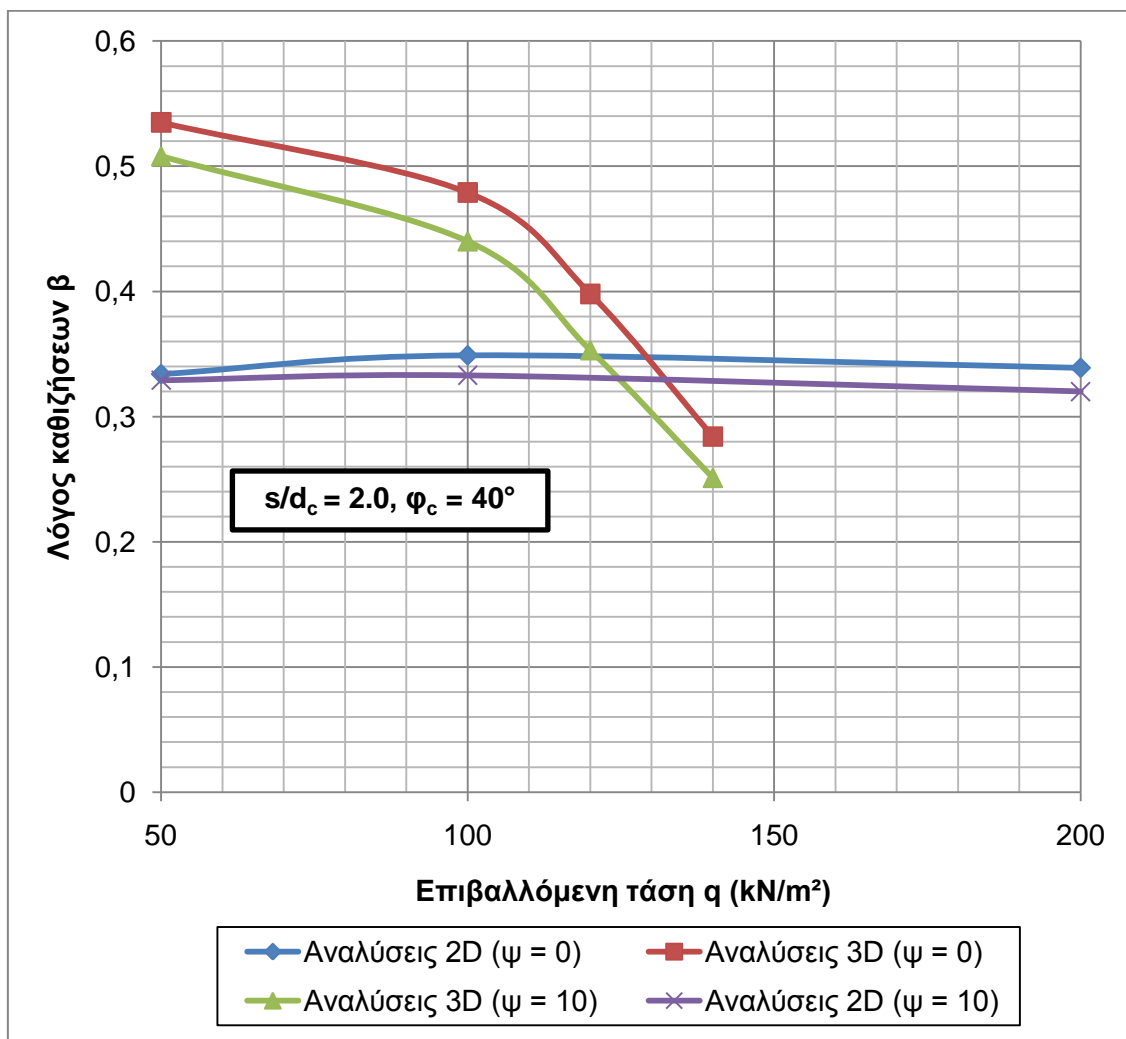
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ q			
q (kN/m²)	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$
50	$18.70 \cdot 10^{-3}$	$56.88 \cdot 10^{-3}$	0.329
100	$45.45 \cdot 10^{-3}$	$136.44 \cdot 10^{-3}$	0.333
200	$112.64 \cdot 10^{-3}$	$351.59 \cdot 10^{-3}$	0.320

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.7 Αποτελέσματα τριδιάστατων αναλύσεων για $\psi = 10^\circ$: μεταβαλλόμενη η επιβαλλόμενη τάση q

ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ q

q (kN/m ²)	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$
50	$23.77 \cdot 10^{-3}$	$46.79 \cdot 10^{-3}$	0.508
100	$59.13 \cdot 10^{-3}$	$134.49 \cdot 10^{-3}$	0.440
120	$80.85 \cdot 10^{-3}$	$228.75 \cdot 10^{-3}$	0.353
140	$111.05 \cdot 10^{-3}$	$442.22 \cdot 10^{-3}$	0.251

Στο Σχήμα 6.16 που ακολουθεί δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης q για γωνία διασταλτικότητας $\psi = 0^\circ$ και $\psi = 10^\circ$, βασιζόμενη στα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αντίστοιχες διδιάστατες και τριδιάστατες αναλύσεις.



Σχήμα 6.16 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης q

Από το Σχήμα 6.16 διαπιστώνεται ότι προκύπτουν μειωμένοι λόγοι καθιζήσεων β στις περιπτώσεις που η γωνία διασταλτικότητας λαμβάνεται $\psi = 10^\circ$, σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για $\psi = 0^\circ$, με τις μεγαλύτερες διαφορές να παρατηρούνται στις τριδιάστατες αναλύσεις. Γενικά συμπεραίνεται ότι με τη συνεκτίμηση της γωνίας διασταλτικότητας ψ προκύπτει μία σχετικά μικρή μέση μείωση των καθιζήσεων του προσομοιώματος με τους χαλικοπασσάλους κατά περίπου 7%, η οποία εξηγείται ως εξής: με την επιβολή της καθορισμένης φόρτισης παρατηρούνται αρχικά καθιζήσεις και άρα μείωση του όγκου του προσομοιώματος (θετική ογκομετρική παραμόρφωση), οι οποίες συνεχίζονται μέχρι ενός ορίου μετά το οποίο, αντί να συνεχίζονται οι καθιζήσεις, το προσομοίωμα αρχίζει να διογκώνεται (αρνητική ογκομετρική παραμόρφωση).

6.5 Γενικά συμπεράσματα σύγκρισης διδιάστατων - τρισδιάστατων παραμετρικών αναλύσεων

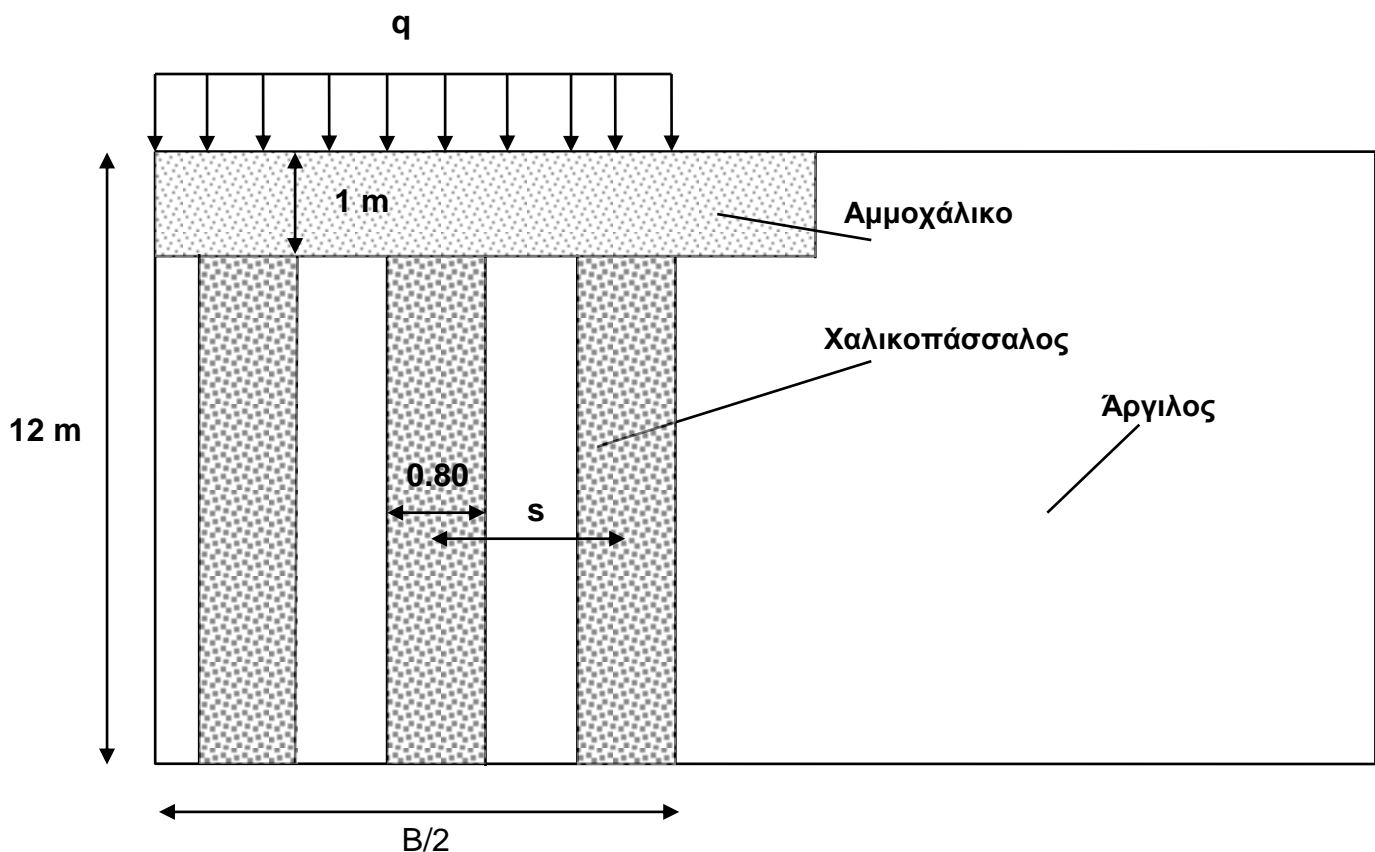
Από τα Σχήματα 6.12 – 6.15 που προηγήθηκαν παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με χρήση της διδιάστατης και τρισδιάστατης έκδοσης του Plaxis αντίστοιχα. Μάλιστα παρατηρείται ότι οι τριδιάστατες αναλύσεις προτείνουν γενικά μεγαλύτερους λόγους καθιζήσεων β για επιβαλλόμενη τάση $q = 100 \text{ kN/m}^2$ (Σχήμα 6.12 – 6.14), ενώ για τιμές της επιβαλλόμενης τάσης κοντά στην αστοχία (Σχήμα 6.15) προτείνουν μικρότερους λόγους β και επομένως μεγαλύτερη βελτίωση του εδάφους.

Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν μπορούν να δικαιολογηθούν από το γεγονός ότι οι τριδιάστατες αναλύσεις που διεξήχθησαν βασίστηκαν σε μία συγκεκριμένη γεωμετρία προβλήματος διαφορετική από εκείνη των διδιάστατων αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, στις τριδιάστατες αναλύσεις θεωρήθηκε ένα προσομοίωμα αποτελούμενο από 36 χαλικοπασσάλους εγκατεστημένους σε τετραγωνικό κάναβο και υποβαλλόμενο σε συνθήκες τριαξονικής παραμόρφωσης, ενώ στις διδιάστατες αναλύσεις μελετήθηκε ένας χαλικοπασσάλος υπό αξονοσυμμετρικές συνθήκες και υποβαλλόμενος σε συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης. Επίσης οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις, όπως η επιβαλλόμενη τάση q ή η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του αργιλικού εδάφους c_u και άλλες ήταν ενδεικτικές και οπωσδήποτε δεν αντιπροσωπεύουν πλήρως το ευρύ φάσμα τιμών που μπορεί να προκύψει στην πραγματικότητα.

Παρά τις αποκλίσεις, και οι διδιάστατες και οι τριδιάστατες αναλύσεις στα Σχήματα 6.12 – 6.14 καταλήγουν σε κοινά συμπεράσματα, ότι δηλαδή η αύξηση του λόγου των μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_s/E , η αύξηση της γωνίας οριακής τριβής ϕ_c του χαλικοπασσάλου και η μείωση της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c οδηγούν σε ένα ενισχυμένο έδαφος με μικρότερη μέση παραμορφωσιμότητα. Επιπλέον συμφωνούν ότι με τη συνεκτίμηση της γωνίας διασταλτικότητας ψ του υλικού του χαλικοπασσάλου, μειώνονται οι καθιζήσεις του ενισχυμένου εδάφους. Επομένως με τις τριδιάστατες επιλύσεις επιβεβαιώνεται η αρχική γενική εικόνα που είχε διαμορφωθεί από τις διδιάστατες αναλύσεις ως προς την επιρροή διαφόρων βασικών παραμέτρων διαστασιολόγησης χαλικοπασσάλων στην βελτίωση του εδάφους, με εξαίρεση την επιρροή της επιβαλλόμενης τάσης q .

6.6 Τοποθέτηση επιφανειακής στρώσης από αμμοχάλικο

Στις αναλύσεις που ακολουθούν μελετήθηκε το προσομοίωμα των αναλύσεων που προηγήθηκαν με τη μόνη διαφορά ότι υπολογίστηκε η περαιτέρω μείωση των καθιζήσεων που επιφέρει στο ήδη ενισχυμένο με τους χαλικοπασσάλους αργιλικό έδαφος, η τοποθέτηση επιφανειακής στρώσης συμπυκνωμένου αμμοχάλικου πάχους ενός μέτρου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.16. Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της στρώσης από αμμοχάλικο επιλέχθηκαν τα ίδια με αυτά των χαλικοπασσάλων.



Σχήμα 6.17 Προσομοίωμα με στρώση από αμμοχάλικο

6.6.1 Παραμετρικές αναλύσεις - Αποτελέσματα

Οι παραμετρικές αναλύσεις που διεξήχθησαν επικεντρώθηκαν στον υπολογισμό των καθιζήσεων του ενισχυμένου με τους χαλικοπασσάλους και το αμμοχάλικο εδάφους, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η επιπλέον μείωση των καθιζήσεων στην οποία οδηγεί η τοποθέτηση της επιφανειακής στρώσης από αμμοχάλικο. Μάλιστα πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές αναλύσεων, η διάκριση των οποίων εστιάζεται στη διαφοροποίηση δύο βασικών παραμέτρων: της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c και της γωνίας οριακής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c .

Στον Πίνακα 6.6 παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι του αργιλικού σχηματισμού που μελετήθηκε σε όλες τις αναλύσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.8 Δεδομένα για τον αργιλικό σχηματισμό

γ (kN/m ³)	18
ν	0.35
E (Μpa)	5
c_u (kPa)	25

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προσομοιώματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.16, ενώ η επιβαλλόμενη τάση, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το χαλικοπάσσαλο και το αμμοχάλικο σε κάθε σειρά αναλύσεων και οι καθιζήσεις του ενισχυμένου με τους χαλικοπασσάλους και τη στρώση από αμμοχάλικο εδάφους που υπολογίστηκαν σε κάθε περίπτωση, παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες που ακολουθούν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.9 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 1^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενος ο λόγος s/d_c

<u>1^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:</u>
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΩΝ s/d_c

q (kN/m ²)	d_c (m)	L (m)	E_c (Μpa)	ϕ_c (°)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	12	100	40	20	0.25

s/d_c	s (m)
1.5	$39.00 \cdot 10^{-3}$
2.0	$57.37 \cdot 10^{-3}$
2.5	$74.59 \cdot 10^{-3}$
3.0	$95.19 \cdot 10^{-3}$

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.10 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 2^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενη η γωνία εσωτερικής τριβής φ_c

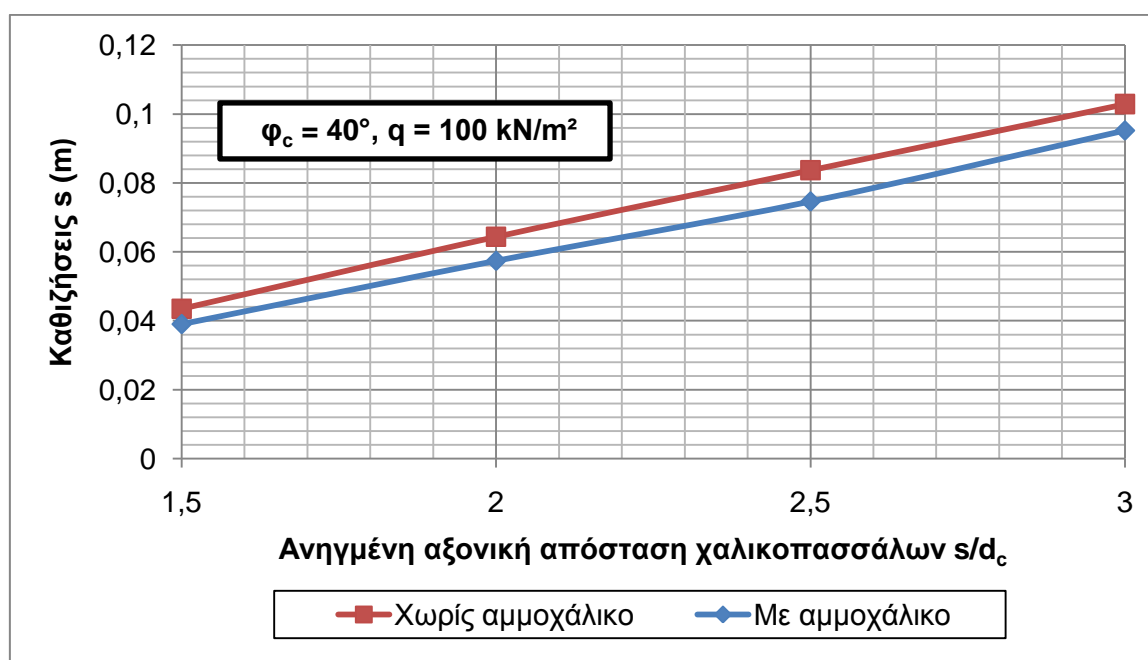
2^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΓΩΝΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥ φ_c

q (kN/m ²)	d _c (m)	s/d _c	L (m)	E _c (Mpa)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	2.0	12	100	20	0.25

φ_c (°)	s (m)
37	64.67 · 10 ⁻³
40	57.37 · 10 ⁻³
45	48.34 · 10 ⁻³

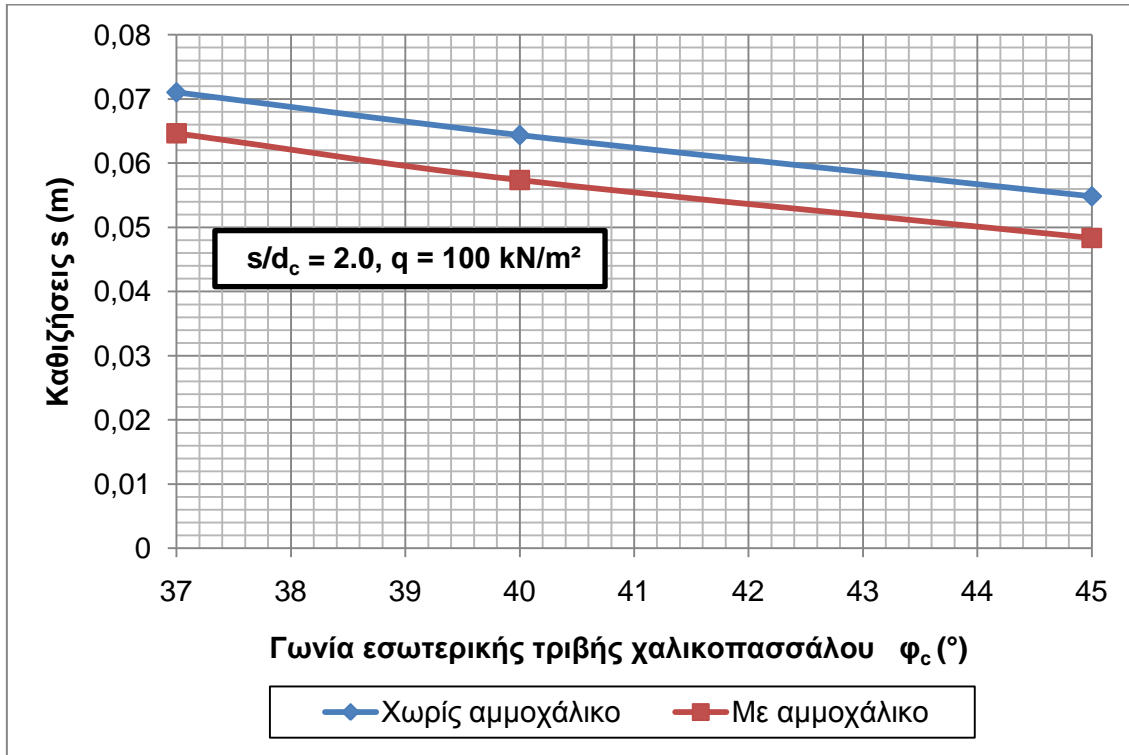
6.6.2 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενη την ανηγμένη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων s/d_c που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.7, συνοψίζονται στο Σχήμα 6.17, στο οποίο δίνεται η μεταβολή των καθιζήσεων s του ενισχυμένου με τους χαλικοπασσάλους και το αμμοχάλικο εδάφους συναρτήσει της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα (Πίνακας 6.2) που προέκυψαν χωρίς τη χρήση της στρώσης από αμμοχάλικο.



Σχήμα 6.18 Μεταβολή των καθιζήσεων s συναρτήσει της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c

Τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενη τη γωνία εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.8, συνοψίζονται στο Σχήμα 6.18, στο οποίο δίνεται η μεταβολή των καθιζήσεων s του ενισχυμένου με τους χαλικοπασσάλους και το αμμοχάλικο εδάφους συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα (Πίνακας 6.4) που προέκυψαν χωρίς τη χρήση της στρώσης από αμμοχάλικο.



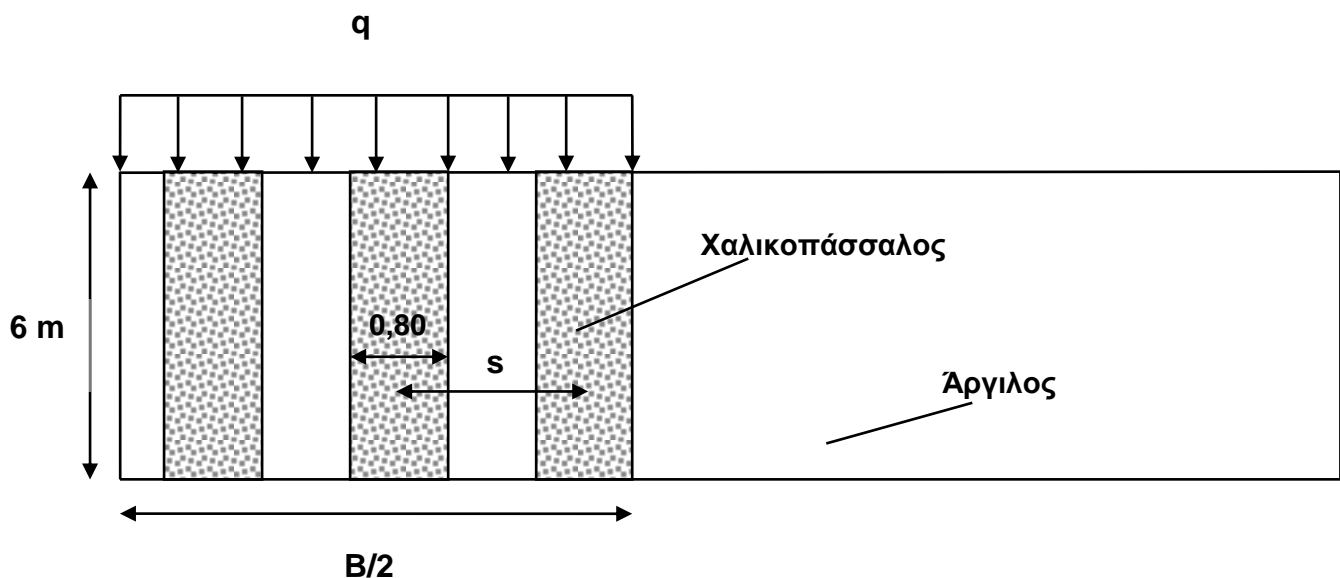
Σχήμα 6.19 Μεταβολή των καθιζήσεων s συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c

Από τα παραπάνω σχήματα διαπιστώνεται ότι η τοποθέτηση της στρώσης από αμμοχάλικο πάχους ενός μέτρου, οδηγεί σε μία περαιτέρω μέση μείωση των καθιζήσεων περίπου κατά 11% του ήδη ενισχυμένου με τους χαλικοπασσάλους εδάφους. Αυτή η μείωση των καθιζήσεων οφείλεται στο γεγονός ότι η τοποθέτηση της στρώσης από αμμοχάλικο, έχει ως αποτέλεσμα την αντικατάσταση μέχρι βάθους ενός μέτρου του ασθενούς αργιλικού υλικού με ένα υλικό, το οποίο έχει τις ίδιες γεωτεχνικές ιδιότητες με αυτές των χαλικοπασσάλων και επομένως παρουσιάζει μικρότερη μέση παραμορφωσιμότητα.

6.7 Προσέγγιση συνθηκών μονοδιάστατης παραμόρφωσης

Από τη σύγκριση των διδιάστατων και τριδιάστατων αναλύσεων που προηγήθηκαν προέκυψαν αποκλίσεις, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι οποίες σε κάποιες περιπτώσεις ήταν σημαντικές.

Επίσης τονίστηκε ότι τα προσομοιώματα που μελετήθηκαν σε κάθε περίπτωση υποβάλλονταν σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, το μεν διδιάστατο σε συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης, το δε τριδιάστατο σε συνθήκες τριαξονικής παραμόρφωσης. Έτσι επιχειρήθηκε η προσέγγιση των συνθηκών μονοδιάστατης παραμόρφωσης και στις τριδιάστατες αναλύσεις, χρησιμοποιώντας το ίδιο προσομοίωμα με πριν, με τη διαφορά ότι αυτή τη φορά μελετήθηκαν χαλικοπάσσαλοι μήκους $L = 6 \text{ m}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.20. Μάλιστα διεξήχθησαν και οι αντίστοιχες διδιάστατες αναλύσεις υπό αξονοσυμμετρικές συνθήκες όπως πριν, αλλά για μήκος χαλικοπασσάλου $L = 6 \text{ m}$, έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα που προέκυψαν.



Σχήμα 6.20 Προσομοίωμα τριδιάστατων αναλύσεων για την προσέγγιση συνθηκών μονοδιάστατης παραμόρφωσης

6.7.1 Παραμετρικές αναλύσεις - Αποτελέσματα

Πραγματοποιήθηκαν σειρές αναλύσεων, οι διάκριση των οποίων επικεντρώνεται στη διαφοροποίηση των ακόλουθων βασικών παραμέτρων:

1. Ανηγμένη αξονική απόσταση χαλικοπασσάλων s/d_c
2. Λόγος μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους E_s/E

3. Γωνία εσωτερικής τριβής χαλικοπασσάλου φ_c

4. Επιβαλλόμενη τάση q

Από τις επιλύσεις των προσομοιωμάτων με και χωρίς τους χαλικοπασσάλους και βάσει των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ανάλυση, υπολογίστηκε ο λόγος καθιζήσεων $\beta = \frac{s}{s_0}$, όπου s η καθίζηση του ενισχυμένου με τους χαλικοπασσάλους εδάφους και s_0 η καθίζηση του φυσικού εδάφους.

Στον Πίνακα 6.11 παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι του αργιλικού σχηματισμού που μελετήθηκε σε όλες τις αναλύσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.11 Δεδομένα για τον αργιλικό σχηματισμό

γ (kN/m ³)	18
ν	0.35
E (Mpa)	5
c_u (kPa)	25

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τριδιάστατου προσομοιώματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.20, ενώ η επιβαλλόμενη τάση, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το χαλικοπάσσαλο σε κάθε σειρά αναλύσεων, οι καθιζήσεις που υπολογίστηκαν για κάθε περίπτωση με και χωρίς τους χαλικοπασσάλους και οι αντίστοιχοι λόγοι καθιζήσεων που προέκυψαν παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες που ακολουθούν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.12 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 1^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενος ο λόγος s/d_c

1^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΩΝ
ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΩΝ s/d_c

q (kN/m ²)	d_c (m)	L (m)	E_c (Mpa)	φ_c (°)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	6	100	40	20	0.25

s/d_c	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$
1.5	$32.22 \cdot 10^{-3}$	$85.08 \cdot 10^{-3}$	0.379
2.0	$44.93 \cdot 10^{-3}$	$90.15 \cdot 10^{-3}$	0.498
2.5	$54.81 \cdot 10^{-3}$	$93.57 \cdot 10^{-3}$	0.586
3.0	$62.27 \cdot 10^{-3}$	$93.64 \cdot 10^{-3}$	0.665

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.13 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 2^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενος ο λόγος E_c/E

<u>2^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:</u>						
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΣ Ο ΛΟΓΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥ – ΕΔΑΦΟΥΣ E_c/E						

q (kN/m ²)	d _c (m)	s/d _c	L (m)	φ _c (°)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	2.0	6	40	20	0.25

E_c/E	s (m)	s ₀ (m)	s/s ₀ = β
10	46.53·10 ⁻³	90.15·10 ⁻³	0.516
20	44.93·10 ⁻³	90.15·10 ⁻³	0.498
40	43.86·10 ⁻³	90.15·10 ⁻³	0.487

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.14 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 3^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενη η γωνία εσωτερικής τριβής φ_c

<u>3^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:</u>						
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΓΩΝΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥ φ_c						

q (kN/m ²)	d _c (m)	s/d _c	L (m)	E _c (Mpa)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	2.0	6	100	20	0.25

φ _c (°)	s (m)	s ₀ (m)	s/s ₀ = β
37	48.85·10 ⁻³	90.15·10 ⁻³	0.542
40	44.93·10 ⁻³	90.15·10 ⁻³	0.498
45	38.83·10 ⁻³	90.15·10 ⁻³	0.431

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.15 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 4^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενη η επιβαλλόμενη τάση q

4^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ q

d_c (m)	s/d_c	L (m)	E_c (Mpa)	φ (°)	γ (kN/m ³)	ν
0.80	2.0	6	100	40	20	0.25

q (kN/m ²)	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$
50	$18.00 \cdot 10^{-3}$	$31.62 \cdot 10^{-3}$	0.569
100	$44.93 \cdot 10^{-3}$	$90.15 \cdot 10^{-3}$	0.498
120	$60.32 \cdot 10^{-3}$	$149.98 \cdot 10^{-3}$	0.402
140	$80.39 \cdot 10^{-3}$	$368.85 \cdot 10^{-3}$	0.218

Αντίστοιχα στις διδιάστατες αναλύσεις για χαλικοπάσσαλο μήκους 6 m η επιβαλλόμενη τάση, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το χαλικοπάσσαλο σε κάθε σειρά αναλύσεων, οι καθιζήσεις που υπολογίστηκαν για κάθε περίπτωση με και χωρίς τους χαλικοπασσάλους και οι αντίστοιχοι λόγοι καθιζήσεων που προέκυψαν παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες που ακολουθούν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.16 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 1^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενος ο λόγος s/d_c

1^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΩΝ s/d_c

q (kN/m ²)	d_c (m)	L (m)	E_c (Mpa)	φ_c (°)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	6	100	40	20	0.25

s/d_c	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$
1.5	$17.35 \cdot 10^{-3}$	$70.81 \cdot 10^{-3}$	0.245
2.0	$29.20 \cdot 10^{-3}$	$70.82 \cdot 10^{-3}$	0.412
2.5	$39.16 \cdot 10^{-3}$	$70.83 \cdot 10^{-3}$	0.553
3.0	$46.87 \cdot 10^{-3}$	$70.84 \cdot 10^{-3}$	0.662

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.17 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 2^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενος ο λόγος E_c/E

<u>2^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:</u>						
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΣ Ο ΛΟΓΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥ – ΕΔΑΦΟΥΣ E_c/E						

q (kN/m ²)	d _c (m)	s/d _c	L (m)	φ _c (°)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	2.0	6	40	20	0.25

E_c/E	s (m)	s ₀ (m)	s/s ₀ = β
10	35.44·10 ⁻³	70.82·10 ⁻³	0.500
20	29.20·10 ⁻³	70.82·10 ⁻³	0.412
40	26.28·10 ⁻³	70.82·10 ⁻³	0.371

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.18 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 3^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενη η γωνία εσωτερικής τριβής φ_c

<u>3^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:</u>						
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΓΩΝΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥ φ_c						

q (kN/m ²)	d _c (m)	s/d _c	L (m)	E _c (Mpa)	γ (kN/m ³)	ν
100	0.80	2.0	6	100	20	0.25

φ _c (°)	s (m)	s ₀ (m)	s/s ₀ = β
37	32.04·10 ⁻³	70.82·10 ⁻³	0.452
40	29.20·10 ⁻³	70.82·10 ⁻³	0.412
45	26.13·10 ⁻³	70.82·10 ⁻³	0.369

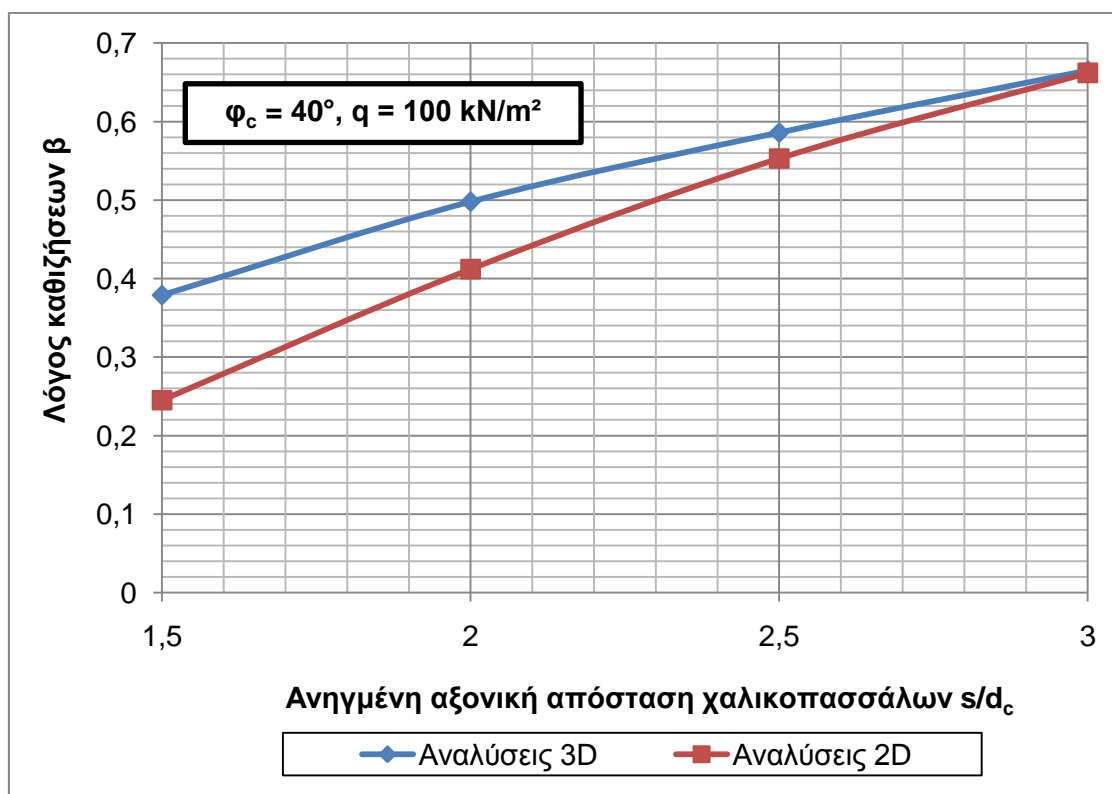
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.19 Δεδομένα και αποτελέσματα για την 4^η σειρά αναλύσεων: μεταβαλλόμενη η επιβαλλόμενη τάση q

4^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:						
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ Η ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ q						
d_c (m)	s/d_c	L (m)	E_c (Mpa)	φ (°)	γ (kN/m ³)	ν
0.80	2.0	6	100	40	20	0.25

q (kN/m ²)	s (m)	s_0 (m)	$s/s_0 = \beta$
50	$12.12 \cdot 10^{-3}$	$32.94 \cdot 10^{-3}$	0.368
100	$29.20 \cdot 10^{-3}$	$70.82 \cdot 10^{-3}$	0.412
200	$76.70 \cdot 10^{-3}$	$178.00 \cdot 10^{-3}$	0.431

6.7.2 Συμπεράσματα

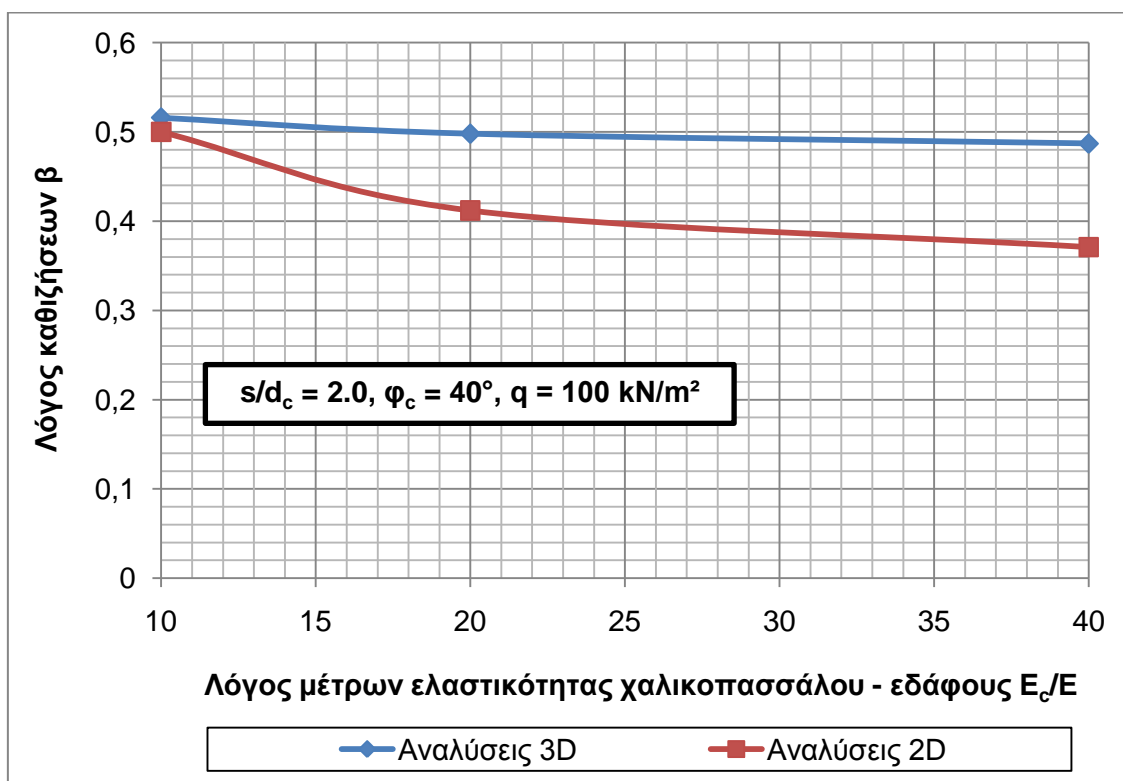
Τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενη την ανηγμένη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων s/d_c που παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.12 και 6.16 από τις τριδιάστατες και διδιάστες αναλύσεις αντίστοιχα, συνοψίζονται στο Σχήμα 6.21, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων συναρτήσει της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων.



Σχήμα 6.21 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται μία σταδιακή σύγκλιση των αποτελεσμάτων και μάλιστα για ανηγμένη αξονική απόσταση χαλικοπασσάλων $s/d_c = 3.0$ οι τιμές του λόγου καθιζήσεων β σχεδόν ταυτίζονται. Αντίθετα η μέγιστη απόκλιση των αποτελεσμάτων φτάνει το 55%, ενώ στις αναλύσεις που προηγήθηκαν οι αποκλίσεις έφταναν μέχρι και το 81%.

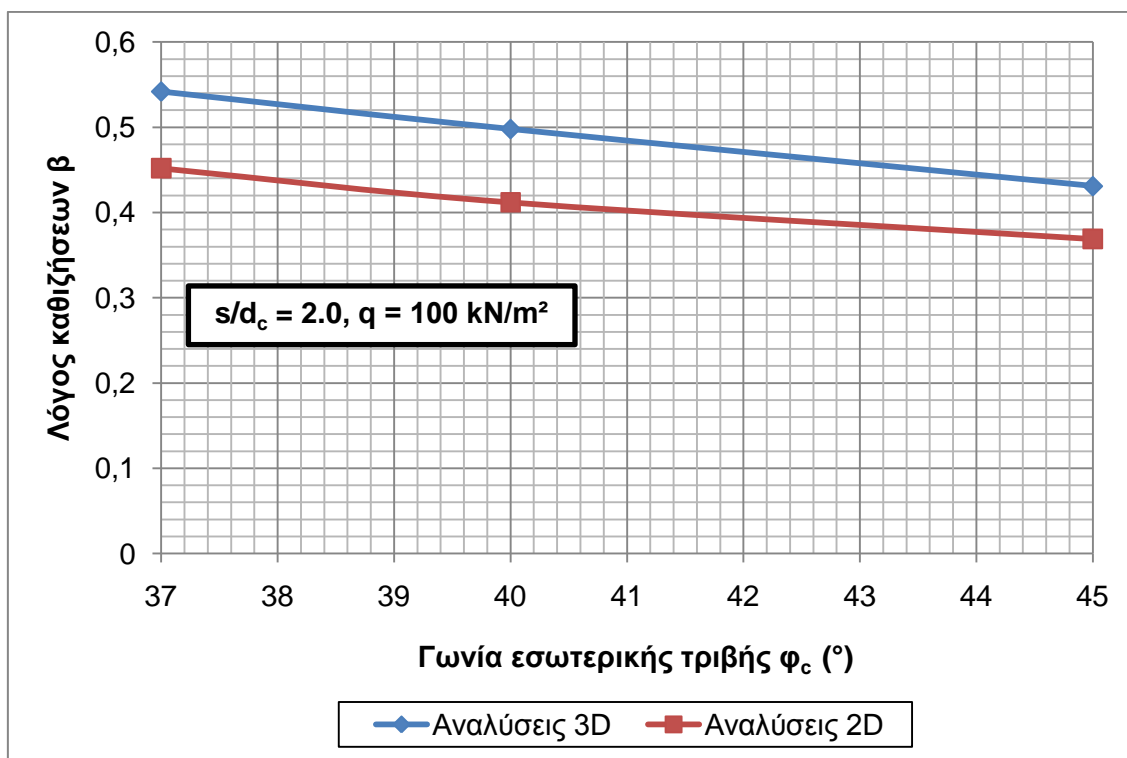
Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενο το λόγο των μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_s/E που παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.13 και 6.17 από τις τριδιάστατες και διδιάστατες αναλύσεις αντίστοιχα, συνοψίζονται στο Σχήμα 6.22, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων συναρτήσει του λόγου μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου - εδάφους.



Σχήμα 6.22 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει του λόγου μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_s/E

Στο παραπάνω σχήμα διαπιστώνεται σημαντική σύγκλιση των τιμών του λόγου καθιζήσεων για $E_s/E = 10$. Αντίθετα η μέγιστη απόκλιση που παρατηρείται για λόγο μέτρων ελαστικότητας $E_s/E = 40$ κυμαίνεται στο 31%, ενώ στις αναλύσεις που προηγήθηκαν η αντίστοιχη μέγιστη απόκλιση έφτανε το 71%.

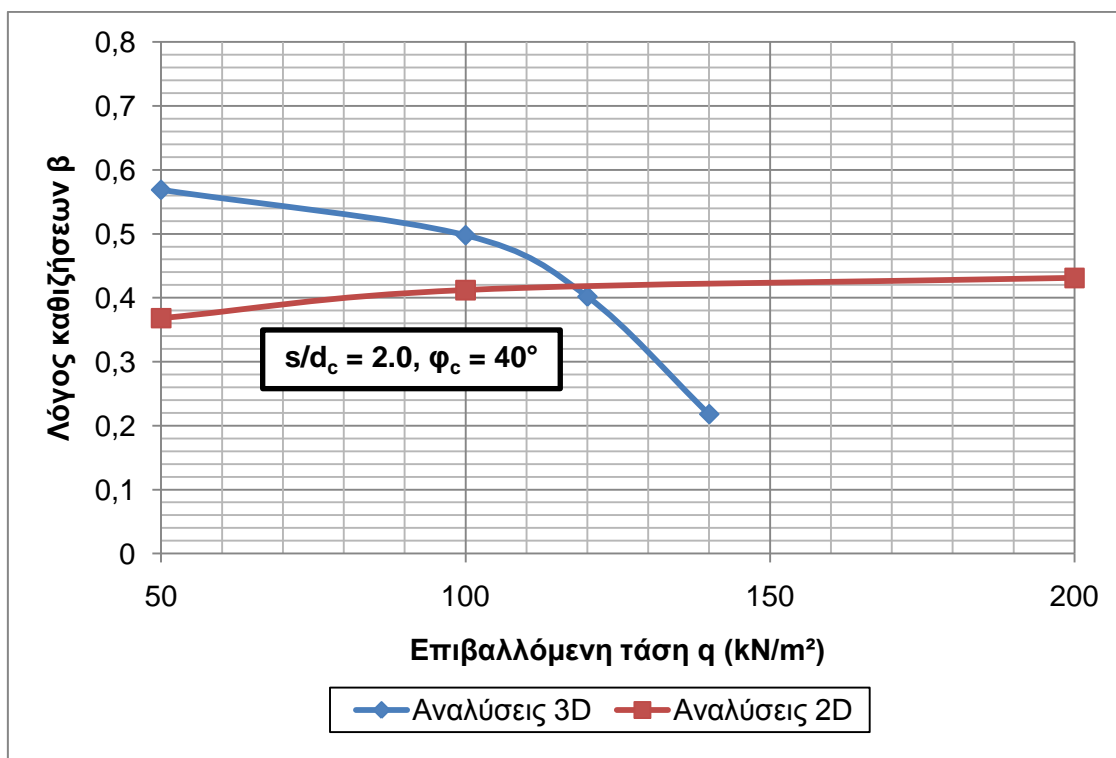
Μείωση των αποκλίσεων παρατηρείται και στο Σχήμα 6.23, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου ϕ_c . Στο παρακάτω σχήμα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των τριδιάστατων και διδιάστατων επιλύσεων με μεταβαλλόμενη τη γωνία εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου ϕ_c , που παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.14 και 6.18 αντίστοιχα.



Σχήμα 6.23 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου ϕ_c

Στο Σχήμα 6.23 παρατηρείται σταδιακή σύγκλιση των αποτελεσμάτων για μεγαλύτερες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου, ενώ η μέγιστη απόκλιση φτάνει το 21%. Αντίθετα στις αναλύσεις που προηγήθηκαν η μέγιστη απόκλιση που προέκυψε κυμάνθηκε στο 43%.

Τέλος, τα αποτελέσματα των επιλύσεων με μεταβαλλόμενη την επιβαλλόμενη τάση q που παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.15 και 6.19 από τις τριδιάστατες και διδιάστατες αναλύσεις αντίστοιχα, συνοψίζονται στο Σχήμα 6.24, στο οποίο δίνεται η μεταβολή του λόγου καθιζήσεων συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης.



Σχήμα 6.24 Μεταβολή του λόγου καθιζήσεων β συναρτήσεις της επιβαλλόμενης τάσης q

Στο Σχήμα 6.24 παρατηρείται ότι για επιβαλλόμενη τάση $q = 50 \text{ kN/m}^2$ και $q = 100 \text{ kN/m}^2$ τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκλίνουν περισσότερο σε σχέση τις αναλύσεις που προηγήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, η απόκλιση για $q = 50 \text{ kN/m}^2$ κυμαίνεται στο 55%, ενώ πριν η αντίστοιχη απόκλιση ήταν 60%. Μάλιστα για $q = 120 \text{ kN/m}^2$ τα αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται. Αντίθετα κοντά στην αστοχία, οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων αυξάνουν αρκετά, εξαιτίας της ευρείας ανάπτυξης πλαστικών ζωνών που αναπτύσσονται στο τριδιάστατο προσομοίωμα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στις αναλύσεις που προηγήθηκαν στο 6.4.4.

Συμπερασματικά, στις τριδιάστατες αναλύσεις που παρουσιάστηκαν έγινε προσπάθεια προσέγγισης των συνθηκών μονοδιάστατης παραμόρφωσης, η οποία επιτυγχάνεται με τη θεώρηση ενός νέου γεωμετρικού προσομοιώματος, στο οποίο ο λόγος B/L είναι διπλάσιος σε σχέση με το προσομοίωμα που μελετήθηκε, όπου B το πλάτος της επιβαλλόμενης φόρτισης και L το μήκος του χαλικοπασσάλου ή το πάχος της εδαφικής στρώσης. Ουσιαστικά προκύπτει ένα προσομοίωμα στο οποίο μία μεγάλης έκτασης φόρτιση επιβάλλεται σε μία συγκριτικά μικρού πάχους εδαφική στρώση. Οι τριδιάστατες αυτές αναλύσεις συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες διδιάστατες, στις οποίες ούτως ή άλλως επικρατούν συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης, για ίδιο μήκος χαλικοπασσάλου.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν διαπιστώνεται ότι παρουσιάζουν πολύ μικρότερες αποκλίσεις σε σχέση με τις αναλύσεις που προηγήθηκαν. Μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις τα αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται.

Επομένως μπορεί να αναφερθεί ότι στις περιπτώσεις όπου το εξεταζόμενο πρόβλημα μπορεί να προσεγγιστεί από συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης, τα αποτελέσματα των διδιάστατων – τριδιάστατων αναλύσεων συγκλίνουν σημαντικά και άρα η ανάλυση μπορεί να προσεγγισθεί ικανοποιητικά από διδιάστατες επιλύσεις.

7. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Οι σειρές αναλύσεων που παρουσιάστηκαν είχαν ως στόχο την παραμετρική διερεύνηση της συμπεριφοράς αργιλικού εδάφους ενισχυμένου με χαλικοπασσάλους. Ειδικότερα εξετάστηκε η επιρροή βασικών παραμέτρων στη βελτίωση του εδάφους, η οποία εκφράστηκε μέσω του λόγου καθιζήσεων $\beta = s/s_0$, όπου s η καθίζηση του ενισχυμένου με τους χαλικοπασσάλους εδάφους και s_0 η καθίζηση του φυσικού εδάφους. Συγκεκριμένα οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι η ανηγμένη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων s/d_c , η επιβαλλόμενη τάση q , ο λόγος μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_s/E , η γωνία εσωτερικής τριβής φ_c και το ανηγμένο μήκος L/d_c του χαλικοπασσάλου. Επίσης εξετάστηκε η γωνία διασταλτικότητας ψ του υλικού του χαλικοπασσάλου και η επιρροή της τοποθέτησης στρώσης από αμμοχάλικο. Τέλος, τα αποτελέσματα των διδιάστατων και τριδιάστατων αναλύσεων, που πραγματοποιήθηκαν με χρήση κατάλληλου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, συγκρίθηκαν μεταξύ τους και με κάποιες από τις πιο διαδεδομένες θεωρητικές μεθόδους διαστασιολόγησης χαλικοπασσάλων (Pribe, Ισορροπία). Από τις συγκρίσεις αυτές προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα, ενώ οι αποκλίσεις διδιάστατων – τριδιάστατων αναλύσεων οδήγησαν σε επιπλέον αναλύσεις με στόχο την ερμηνεία τους.

7.2 Από τις διδιάστατες επιλύσεις προέκυψαν τα ακόλουθα:

- Η μείωση της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c , δηλαδή η αύξηση του συντελεστή αντικατάστασης α_s (πυκνότερη διάταξη των χαλικοπασσάλων), συνεπάγεται μικρότερη επιβαλλόμενη τάση ανά χαλικοπάσσαλο και επομένως μείωση των καθιζήσεων του βελτιωμένου εδάφους.
- Η αύξηση του ανηγμένου μήκους του χαλικοπασσάλου L/d_c συνεπάγεται μία μικρή μείωση του λόγου καθιζήσεων β (κυμαίνεται στο 18%) και επομένως μείωση των καθιζήσεων του ενισχυμένου εδάφους, χωρίς όμως να είναι ιδιαίτερα σημαντική η συμβολή στη βελτίωση του ασθενούς εδάφους.
- Η αύξηση του λόγου των μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_s/E έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του καθιζήσεων του ενισχυμένου εδάφους, λόγω της αυξανόμενης συγκέντρωσης τάσεων στο χαλικοπάσσαλο, ο οποίος παρουσιάζει μικρότερη παραμορφωσιμότητα από το περιβάλλον ασθενές έδαφος.
- Η αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής του χαλικοπασσάλου φ_c οδηγεί σε μείωση των καθιζήσεων του ενισχυμένου εδάφους, λόγω της αυξανόμενης αντοχής του υλικού κατασκευής του χαλικοπασσάλου.

- Με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης q το προσομοίωμα δεν αστοχεί και ο λόγος καθιζήσεων β παραμένει πρακτικά σταθερός, ως αποτέλεσμα της περίπου ανάλογης σχέσης επιβαλλόμενης τάσης – καθιζήσεων (σχεδόν γραμμική συσχέτιση). Αυτή η αναλογία οφείλεται στις συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης, στις οποίες υποβάλλεται ο χαλικοπάσσαλος που μελετάται υπό αξονοσυμμετρικές συνθήκες και οι οποίες δεν επιτρέπουν την ευρεία ανάπτυξη πλαστικών ζωνών.
- Με τη συνεκτίμηση της γωνίας διασταλτικότητας ψ του υλικού του χαλικοπασσάλου, η οποία είχε αρχικά θεωρηθεί μηδενική, προκύπτει μία πολύ μικρή μέση μείωση των καθιζήσεων του προσομοιώματος με τους χαλικοπασσάλους (περίπου 4%) για μεταβλητή επιβαλλόμενη φόρτιση.

7.3 Στη συνέχεια, από τις τριδιάστατες επιλύσεις επιβεβαιώθηκε ουσιαστικά η αρχική εικόνα που είχε ήδη διαμορφωθεί από τις διδιάστατες επιλύσεις ως προς την επιρροή βασικών παραμέτρων στη βελτίωση του εδάφους, με εξαίρεση την επιρροή της επιβαλλόμενης τάσης q . Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των τριδιάστατων αναλύσεων:

- Η μείωση της ανηγμένης αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων s/d_c , η αύξηση της γωνίας οριακής τριβής φ_c του χαλικοπασσάλου και η αύξηση του λόγου των μέτρων ελαστικότητας χαλικοπασσάλου – εδάφους E_s/E , οδηγούν σε ένα ενισχυμένο έδαφος με μικρότερη μέση παραμορφωσιμότητα, όπως και στις διδιάστατες επιλύσεις.
- Η συνεκτίμηση της γωνίας διασταλτικότητας ψ του υλικού του χαλικοπασσάλου οδηγεί σε μέση μείωση των καθιζήσεων του προσομοιώματος με τους χαλικοπασσάλους (περίπου 10%).
- Με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης q , παρατηρείται σημαντική μείωση του λόγου καθιζήσεων β και επομένως μεγαλύτερη βελτίωση του εδάφους, ιδιαίτερα για τιμές της τάσης κοντά στη γενική αστοχία. Αυτό εξηγείται από την ευρεία ανάπτυξη πλαστικών ζωνών στο υποβαλλόμενο σε τριαξονικές συνθήκες παραμορφώσεων προσομοίωμα, η έκταση των οποίων είναι πολύ μεγαλύτερη στο φυσικό, χωρίς τους χαλικοπασσάλους, έδαφος.
- Η τοποθέτηση επιφανειακής στρώσης από αμμοχάλικο, με τις ίδιες γεωτεχνικές ιδιότητες με αυτές των χαλικοπασσάλων, οδηγεί σε επιπλέον μείωση των καθιζήσεων (περίπου 11%) του ενισχυμένου με τους χαλικοπασσάλους εδάφους, όπως μελετήθηκε για μεταβαλλόμενη την ανηγμένη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων s/d_c και τη γωνία εσωτερικής τριβής φ_c του χαλικοπασσάλου. Αυτή η μείωση των καθιζήσεων οφείλεται στην αντικατάσταση μέχρι βάθους ενός μέτρου του ασθενούς αργιλικού υλικού, με ένα υλικό μικρότερης μέσης παραμορφωσιμότητας.

7.4 Τα αποτελέσματα των διδιάστατων επιλύσεων συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα θεωρητικών προσεγγίσεων. Από αυτές τις συγκρίσεις προέκυψε ότι η μέθοδος Priebe προτείνει αυξημένους περίπου κατά 35% λόγους καθιζήσεων β , σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των διδιάστατων επιλύσεων. Από την άλλη, η μέθοδος Ισορροπίας υπερεκτιμά τη συμβολή της κατασκευής χαλικοπασσάλων στη βελτίωση του εδάφους, προτείνοντας αρκετά μικρότερους λόγους καθιζήσεων β , περίπου κατά 65%, σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των διδιάστατων επιλύσεων. Οι αποκλίσεις των θεωρητικών μεθόδων από τις διδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις οφείλονται στην απουσία βασικών γεωτεχνικών παραμέτρων τόσο των χαλικοπασσάλων όσο και του περιβάλλοντος εδάφους κατά την υπολογιστική διαδικασία, οι οποίες έχουν σημαντική επιρροή.

Επιπλέον, συγκρίθηκαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα διδιάστατων – τριδιάστατων επιλύσεων, τα οποία παρουσίασαν αποκλίσεις που σε ορισμένες περιπτώσεις ήταν σημαντικές (η μέγιστη απόκλιση έφτασε μέχρι και 81%). Γενικότερα οι τριδιάστατες επιλύσεις, οι οποίες οπωσδήποτε είναι πιο ακριβείς λόγω του ρεαλιστικότερου προσομοιώματος (τριών διαστάσεων) που μελετούν, προτείνουν μεγαλύτερους λόγους καθιζήσεων β σε σχέση με τις διδιάστατες επιλύσεις και άρα μικρότερη βελτίωση του ασθενούς εδάφους.

Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν μπορούν να δικαιολογηθούν από το γεγονός ότι οι αναλύσεις που διεξήχθησαν βασίστηκαν σε διαφορετική γεωμετρία προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, στις τριδιάστατες αναλύσεις θεωρήθηκε ένα προσομοίωμα αποτελούμενο από 36 χαλικοπασσάλους εγκατεστημένους σε τετραγωνικό κάναβο και υποβαλλόμενο σε συνθήκες τριαξονικής παραμόρφωσης, ενώ στις διδιάστατες αναλύσεις μελετήθηκε ένας χαλικοπασσάλος υπό αξονοσυμμετρικές συνθήκες και υποβαλλόμενος σε συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης. Επίσης οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων και της επιβαλλόμενης τάσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ενδεικτικές και δεν αντιπροσωπεύουν πλήρως το ευρύ φάσμα τιμών που μπορεί να προκύψει στην πραγματικότητα. Παρά τις όποιες αποκλίσεις, διδιάστατες και τριδιάστατες αναλύσεις καταλήγουν σε κοινά συμπεράσματα ως προς την επιρροή των βασικών παραμέτρων που μελετήθηκαν, με εξαίρεση την επιρροή της επιβαλλόμενης φόρτισης.

Τέλος, η προσπάθεια προσέγγισης των συνθηκών μονοδιάστατης παραμόρφωσης και στις τριδιάστατες αναλύσεις, πέρα από τις διδιάστατες, με τη θεώρηση ενός νέου γεωμετρικού προσομοιώματος, οδήγησε σε σημαντική μείωση των μεταξύ τους αποκλίσεων, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις υπήρξε ακόμα και ταύτιση των αποτελεσμάτων. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι εάν η περίπτωση που μελετάται είναι δυνατό να προσεγγισθεί από συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης, τότε τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ικανοποιητικά ως προς την ακρίβειά τους και από διδιάστατες επιλύσεις.

Από όλα τα παραπάνω διαμορφώνεται μία όσο το δυνατόν πληρέστερη εικόνα, σε σχέση με το πώς επιδρούν διάφορες βασικές παράμετροι στη βελτίωση που επιφέρει η κατασκευή χαλικοπασσάλων σε ασθενές αργιλικό

έδαφος. Παράλληλα επιδιώκεται να δοθεί μία πρόταση επίλυσης τριδιάστατων προβλημάτων που προσεγγίζονται από συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης, με τη βοήθεια απλούστερων διδιάστατων αναλύσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

AMBILY A.P., GANDHI S.R. (2004), “Experimental and Theoretical Evaluation of Stone Column in Soft Clay”, International Conference on Geosynthetics and Geoenvironmental Engineering, Bombay, pp. 201 – 206

(www.civil.iitm.ac.in/people/faculty/srgandhi, τελευταία πρόσβαση: 2/2011)

ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ Α.Γ., ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Β.Π. (2002), «Επιφανειακές Θεμελιώσεις», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, σελ. 67 – 74, 77 – 80

ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ Α.Γ., ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Β.Π. (2004), «Θεμελιώσεις με Πασσάλους», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, σελ. 3 -6, 36 – 39, 108 – 111

ΑΝΔΡΕΟΥ Π.Σ. (2009), Διδακτορική Διατριβή: «Προσομοίωση Συμπεριφοράς Εδαφών Βελτιωμένων με Χαλικοπασσάλους», Αθήνα

BALAAM N.P., POULOS H.G. (1983), “The Behavior of Foundations Supported by Clay Stabilized by Stone Columns”, Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Vol 1, pp. 199 – 204

BARKSDALE R.D, BACHUS R.C. (1983), “Design and Construction of Stone Columns”, Vol. I, FHA, pp. 210.

CHRISTOULAS ST., BOUCKOVALAS G., GIANNAROS CH. (2000), “An Experimental Study on Model Stone Columns”, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 6, pp. 11 - 22

GREENWOOD D.A. (1970), “Mechanical Improvement of Soils Below Ground Surface”, International Conference of Ground Engineering, Institution of Civil Engineers, London, Paper II, pp. 11 – 22

GREENWOOD D.A., KIRSCH K. (1983), “Specialist Ground Treatment by Vibratory and Dynamic Methods”, State of the Art, International Conference on Advances in Piling and Ground Treatment for Foundations, London, pp. 17 - 45

GOUGHNOUR R.R. (1983), “Settlement of Vertically Loaded Stone Columns in Soft Ground”, Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Vol. 1, pp. 235 – 240

HUGHES J. M. O., WITHERS N. J. (1974), “Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns”, Ground Engineering, No. 3, Vol. 7, pp. 42-49.

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ (ΙΟΚ) - Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. (2005(α)), «Υποθαλάσσια Κατασκευή Χαλικοπασσάλων», Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ), σελ. 1 – 4

(www.gqde.gr/dmdocuments/09-03-05-00.pdf, τελευταία πρόσβαση: 2/2011)

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ (ΙΟΚ) - Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. (2005(β)), «Δονητική Αντικατάσταση», Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ) 11-03-03-00, Έκδοση 1^η, σελ. 1 - 11
(www.iok.gr/petep/11-03-03-00.pdf, τελευταία πρόσβαση: 2/2011)

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ (ΙΟΚ) - Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. (2006), «Δονητική Συμπύκνωση», Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ) 11-03-02-00, Έκδοση 1.0, σελ. 1-8
(www.iok.gr/petep/11-03-02-00.pdf, τελευταία πρόσβαση: 2/2011)

ΚΑΒΒΑΔΑΣ Μ. (2007), «Στοιχεία Εδαφομηχανικής», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, σελ. 7 – 12, 15 – 18, 22 – 23, 71 – 82, 89 – 103, 150 – 161, 171 – 175, 181 - 191

ΚΑΒΒΑΔΑΣ Μ. (2008), «Σημειώσεις Θεμελιώσεων Τεχνικών Έργων», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, σελ. 155 – 176, 183 – 187

KEMPFERT H.G, GEBRESELASSIE B. (2006), “Excavations and Foundations in Soft Soils”, Springer, Berlin, pp. 467 - 474

ΛΕΒΕΝΤΗΣ Ε. (1988), «Χαλικοπάσσαλοι: Κατασκευή και Έλεγχος», Πρακτικά 1^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα, Τόμος 2, σελ 27 – 33

MATTES N.S., POULOS H.G. (1969), “Settlement of Single Compressible Pile”, Journal of SMFE, ASCE, Vol. 95, SMI, pp.189 - 207

McCABE B.A., McNEILL J.A., BLACK J.A. (2007), “Ground Improvement Using the Vibro – Stone Column Technique”, Joint Meeting of Engineers Ireland West Region and the Geotechnical Society of Ireland, NUI Galway, pp. 1 – 12
(www.engineersireland.ie/media/engineersireland/community/whitepapers, τελευταία πρόσβαση: 2/2011)

ΜΙΧΑΛΗΣ Η.Κ., ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Β.Π., ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ Α.Γ. (2001), «Η Χρήση Χαλικοπασσάλων ως Στοιχείων Ενισχύσεως της Διατμητικής Αντοχής του Εδάφους Θεμελίωσης Επιχωμάτων», 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα, Τόμος 1, σελ. 451 – 458

ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ Γ. (2004), «Σημειώσεις σε Ειδικά Θέματα Θεμελιώσεων», Εκδόσεις ΕΜΠ, σελ . 174-177, 179-181, 184-194, 212-228

ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ Γ. (2007), «Μέρος Β': Βελτίωση – Ενίσχυση Εδαφών», Διαδικτυακές Σημειώσεις για το Μάθημα: Ειδικά Θέματα Θεμελιώσεων, (users.ntua.gr/gbouck/download/special_topics_of_foundation_engineering, τελευταία πρόσβαση: 2/2011)

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Β., ΑΝΔΡΕΟΥ Π. (2006), «Προσομοίωση της Συμπεριφοράς Εδαφών Βελτιωμένων με Χαλικοπασσάλους», 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, σελ. 1 - 7
(library.tee.gr/digital/m2134/m2134_andreou1.pdf, τελευταία πρόσβαση: 2/2011)

PRIEBE H.J (1995), “The Design of Vibro – Replacement”, Technical Paper Reprinted from Ground Engineering, Keller Grundbau GmbH, pp. 1 – 15
(www.getec-ac.de/download/en/pdf/GT07-13E.pdf, τελευταία πρόσβαση: 2/2011)

SOYEZ B. (1985), “Méthodes de Dimensionnement des Colonnes Ballastées”, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, No. 135, pp. 35-51

VAN IMPE W., DE DEER E. (1983), “Improvement of Settlement Behavior of Soft Layers by Means of Stone Columns”, Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Vol. 1, pp. 309 – 312

VESIC A.S. (1972), “Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, pp. 265 - 290

ΧΡΙΣΤΟΥΛΑΣ Σ. (1998), «Επιλογές Εφαρμοσμένης Γεωτεχνικής Μηχανικής», Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα, σελ. 9-13, 36-43, 69 – 71

ZAHMATKESH A., CHOBBASTI A.J. (2010), “Settlement Evaluation of Soft Clay Reinforced by Stone Columns, Considering the Effect of Soil Compaction”, International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, Vol. 3, Issue 2, pp. 159 – 166

(arpapress.com/Volumes/Vol3Issue2/IJRRAS_3_2_05.pdf, τελευταία πρόσβαση: 2/2011)