



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ



ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΠΑΣΣΑΛΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΚΑΤΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέποντες : Σπ. Κωστόπουλος, Αναπλ. Καθηγητής ΠΘ
Αιμ. Κωμοδρόμος, Επικ. Καθηγητής ΠΘ
Π. Ντακούλας, Επικ. Καθηγητής ΠΘ

Βόλος, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2001

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θεωρώ χρέος μου από τη θέση αυτή να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τους καθηγητές μου Δρ.Σ.Κωστόπουλο, Δρ.Α.Κωμοδρόμο και Δρ.Π.Ντακούλα για την εμπιστοσύνη την οποία μου έδειξαν καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν, στα πλαίσια της άσπογης συνεργασίας που είχαμε, τόσο κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, όσο και καθ'ολη τη διάρκεια των σπουδών μου. Ειδικότερα, οφείλω να ευχαριστήσω κατά πρώτο λόγο τον Δρ. Σπ. Κωστόπουλο, Αν. Καθηγητή ΠΘ για τη σύλληψη και ανάλυση του θέματος που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία, για την βιβλιογραφία που επέλεξε και διέθεσε, καθώς και για τη βοήθειά του στην τελική διαμόρφωση του κειμένου. Επίσης, τον Δρ.Αιμ. Κωμοδρόμο, Επ. Καθηγητή ΠΘ για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε και την υπομονή που επέδειξε ώστε να γίνει ο προσδιορισμός της τελικής μορφής του αναλυτικού προσομοιώματος, καθώς και για την καθοριστική συμβολή του στον εντοπισμό σφαλμάτων και την διόρθωσή τους. Επιπλέον, ευχαριστώ τον Δρ. Π. Ντακούλα, Επ. Καθηγητή ΠΘ για τις κατευθύνσεις και συμβουλές που μου έδωσε σε κρίσιμα σημεία της διαμόρφωσης του αναλυτικού προσομοιώματος.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου για τη στήριξη που μου παρείχαν με κάθε δυνατό τρόπο καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΚΑΤΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Βόλος, Σεπτέμβριος 2001

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την θεμελίωση του κτιρίου του τμήματος Χωροταξίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας κατασκευάστηκαν επί τόπου εγχυόμενοι πάσσαλοι διαμέτρου Φ800mm και μήκους περίπου 32m σύμφωνα με την γεωτεχνική μελέτη του έργου που εξετέλεσε η εταιρία ΥΔΡΟΕΡΕΥΝΑ Α.Ε. Κατά τους διεθνείς κανονισμούς, η μεγάλη έκταση του έργου θεμελίωσης με πασσάλους επέβαλλε την εκτέλεση τουλάχιστον μίας δοκιμαστικής φόρτισης πασσάλου. Προς τούτο αποφασίσθηκε η εκ των υστέρων διεξαγωγή δοκιμαστικής φόρτισης ενός τυπικού πασσάλου του έργου. Ο σχεδιασμός της δοκιμής έγινε από τον Αν. Καθηγητή ΠΘ κ. Σ. Κωστόπουλο σε συνεργασία με την εταιρία γεωτεχνικών ερευνών και μελετών ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε, η υλοποίηση της δοκιμής ανατέθηκε στην τελευταία, ενώ τα δομικά στοιχεία του συστήματος κατασκευάστηκαν από την ΘΕΜΕΛΙΟΔΟΜΗ Α.Ε μέσω της αναδόχου εταιρίας κατασκευής του όλου έργου ΕΡΓΟΤΕΚ Α.Ε.

Σκοπός της εν λόγω δοκιμαστικής φόρτισης ήταν η διακρίβωση του οριακού κατακόρυφου και οριζόντιου φορτίου ενός τυπικού πασσάλου του έργου, καθώς και η γενικότερη συμπεριφορά του σε όλες τις φάσεις εξαίτισης. Τα αποτελέσματα της δοκιμής χρησίμευσαν στους τελικούς ελέγχους επιβεβαίωσης της συμπεριφοράς των πασσάλων θεμελίωσης του νέου κτιρίου.

Η δοκιμαστική φόρτιση πασσάλου αποτελεί αναμφισβήτητα ένα πολύ ενδιαφέρον πείραμα υπό κλίμακα 1:1, με το οποίο καθίσταται εφικτή η μελέτη της απόκρισης ενός καθορισμένου τύπου πασσάλου εγκατεστημένου σε συγκεκριμένη γεωμάζα υπό την επενέργεια των επιβαλλόμενων εξαιτίσεων, συνήθως κατακόρυφων ή οριζόντιων φορτίων. Αν και οι διεθνείς κανονισμοί (Ευρωκώδικας 7, Αμερικανικοί Κανονισμοί ASTM κ.α.) επιβάλλουν την εκτέλεση τέτοιων δοκιμών σε κάθε δομικό έργο όπου ενέχονται πάσσαλοι σε σημαντικό αριθμό, εν τούτοις το υψηλό κόστος μίας δοκιμαστικής φόρτισης πασσάλου συχνά οδηγεί στην πράξη τόσο τον ιδιοκτήτη όσο και τον κατασκευαστή του έργου θεμελίωσης στην “διακριτική αποφυγή” τέτοιων δοκιμών, παρά την όποια εμμονή του υπεύθυνου γεωτεχνικού μηχανικού στην τήρηση των κανόνων της σωρευμένης διεθνούς εμπειρίας.

Η απουσία πειραματικών δεδομένων από μία δοκιμαστική φόρτιση πασσάλου, πριν από την κατασκευή των καθ’αυτό πασσάλων της θεμελίωσης (πάσσαλοι παραγωγής), οδηγεί τον γεωτεχνικό μηχανικό κατά την φάση σχεδιασμού του έργου στην - συχνά “τυφλή”- εφαρμογή συμβατικών μεθόδων υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας και της καθίζησης ενός μεμονωμένου πασσάλου. Στην καλύτερη περίπτωση, ο γεωτεχνικός μηχανικός ενσωματώνει στον σχεδιασμό την δική του πείρα και γνώσεις με την υιοθέτηση “προσωπικών” συντελεστών στις αναλυτικές-“κλειστού” τύπου-εκφράσεις. Η προσφυγή σε σύγχρονες αριθμητικές μεθόδους αποτελεί μάλλον την εξαίρεση, δεδομένης της - κατά συνήθεια μικρής έκτασης - συμβατικής γεωτεχνικής διασκόπησης, όσον και της - επίσης σημαντικού κόστους - ανάλυσης μέσω της εφαρμογής έγκυρων κωδίκων λογισμικού λ.χ. των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων, πεπερασμένων διαφορών και συνοριακών στοιχείων. Και βεβαίως, θεωρείται εκ των ουκ άνευ η οργανομετρική παρακολούθηση του έργου κατά τις φάσεις κατασκευής και λειτουργίας του, προκειμένου να εκτιμηθεί η επιτελεστικότητά του έργου. Ως συνέπεια λοιπόν της πλημμελούς εφαρμογής του γεωτεχνικού συστήματος :

“Διασκόπηση - Δοκιμαστική Φόρτιση - (Αριθμητική) Ανάλυση - Οργανομέτρηση”

σε κάθε συγκεκριμένο έργο θεμελίωσης με πασσάλους, ο γεωτεχνικός μηχανικός έχει στην διάθεσή του περιορισμένο όγκο πληροφοριών, κατά κανόνα σε πολύ διαφορετικής φύσεως γεωσχηματισμούς, προκειμένου να πορευθεί στην κατεύθυνση του ασφαλούς λειτουργικού και οικονομικού σχεδιασμού των πασσαλώσεων.

Κάθε δοκιμαστική φόρτιση πασσάλου αποτελεί λοιπόν γεωτεχνική πρόκληση και πρόσκληση: πρόκληση μεν στην όποια υπάρχουσα βάση δεδομένων, πρόσκληση δε στην επιστημονική διερεύνηση του προβλήματος της αλληλεπίδρασης μεταξύ του πασσάλου και της περιβάλλουσας αυτόν γεωμάζας.

Στα πλαίσια αυτής της συλλογιστικής, η εκτέλεση μίας δοκιμαστικής φόρτισης πασσάλου στους ιδιάζοντες εδαφικούς σχηματισμούς της περιοχής του Πεδίου του Άρεως στον Βόλο, όπου και οι εγκαταστάσεις των Πολυτεχνικών Τμημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (ΠΘ), αποτέλεσε το έναυσμα για την υλοποίηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Πόσο μάλλον όταν ο υπογραφόμενος είχε την ευτυχή συγκυρία να παρακολουθήσει εκ του σύνεγγυς το όλο πείραμα.

Η παρούσα εργασία βασίστηκε στην ιδέα της “αντίστροφης ανάλυσης”(back analysis) του συστήματος “Δοκιμαστικός Πάσσαλος – Περιβάλλουσα Γεωμάζα” σε διάφορες φάσεις εξάιτισης με την βοήθεια του γνωστού κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC^{3D}. Αντικείμενο της εργασίας αυτής ήταν εξ’αρχής η σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων της απόκρισης ενός μεμονωμένου πασσάλου σε κατακόρυφα και οριζόντια φορτία, με στόχο τον εμπλουτισμό της υπάρχουσας γνώσης αφ’ενός, και τον έλεγχο των διαθέσιμων αναλυτικών εργαλείων “κλειστού τύπου” αφ’ετέρου. Θεωρείται βεβαίως αναγκαίο να τονισθεί στο σημείο αυτό ότι τα συμπεράσματα της επιστημονικής έρευνας που διεξήχθη στα πλαίσια της Διπλωματικής αυτής Εργασίας δεν είναι γενικής ισχύος και κατ’ουδένα τρόπο θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν απ’ευθείας στην πράξη. Συνιστούν απλώς μια μικρή συμβολή στον ευρύτερο επιστημονικό χώρο της Γεωτεχνικής Μηχανικής των βαθειών θεμελιώσεων.

Η οργάνωση της παρούσας εργασίας έχει ως ακολούθως :

Στο πρώτο μέρος (παράγραφοι 2 και 3) περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διάταξη (φορέας, πρόγραμμα φόρτισης, μέσα διΐχνευσης), οι κρατούσες γεωτεχνικές συνθήκες και η μεθοδολογία κατασκευής των πασσάλων του έργου, όπως αυτά παρατίθενται στα αντίστοιχα τεύχη.

Στο δεύτερο μέρος (παράγραφος 4) παρουσιάζονται κριτικά οι πλέον γνωστές αναλυτικές μεθοδολογίες υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας και καθιζήσεων μεμονωμένου πασσάλου.

Στο τρίτο μέρος (παράγραφος 5) γίνεται συνοπτική περιγραφή του Κώδικα FLAC^{3D} και εκτίθεται λεπτομερειακά η σύνθεση του αναλυτικού προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε εν συνεχεία στις παραμετρικές αναλύσεις ακολουθεί δε η συστηματική επεξεργασία των αναλυτικών αποτελεσμάτων και σύγκριση τους με τα πειραματικά αποτελέσματα και εκείνα των κλειστών αναλυτικών μεθόδων.

Η εργασία κλείνει με την παράθεση των συμπερασμάτων της έρευνας.

Στο συνημμένο Παράρτημα παρατίθενται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων (Π4) και των “κλειστών” υπολογισμών (Π2, Π3) μαζί με την εδαφοτεχνική τομή του εδάφους (Π1).

3. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΠΕΛΑΦΟΥΣ

3.1 Εισαγωγή

Η πρώτη φάση της γεωτεχνικής διασκόπησης εκτελέστηκε τον Ιανουάριο 1998 στην περιοχή κατασκευής του έργου από την εταιρία ΥΔΡΟΕΡΕΥΝΑ Α.Ε και είχε τους εξής στόχους :

1. Διαπίστωση της στρωματογραφίας του εδάφους.
2. Καταγραφή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.
3. Προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων των εδαφικών στρώσεων στην θέση κατασκευής του έργου.

Στην βάση των στοιχείων που συγκεντρώθηκαν από την γεωτεχνική διασκόπηση αποφασίστηκε ο τρόπος θεμελίωσης του κτιρίου μέσω πασσάλων.

Μετά την υλοποίηση της δοκιμαστικής φόρτισης του πασσάλου εκτελέστηκε σε δεύτερη φάση πρόσθετη διασκόπηση στην ίδια θέση από την εταιρία ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε. με την υλοποίηση μίας δοκιμής στατικής πενετρομέτρησης τύπου Begemann.

3.2 Εργασίες υπαίθρου

Οι γεωτεχνικές εργασίες υπαίθρου περιελάμβαναν την εκτέλεση μίας (1) δειγματοληπτικής γεώτρησης, καθώς και επί τόπου δοκιμών.

Για την εκτέλεση των γεώτρησης χρησιμοποιήθηκε περιστροφικό γεωτρύπανο τύπου LONG YEAR. Τα τοιχώματα της γεώτρησης επενδύθηκαν με σωλήνα μέχρι τέτοιου βάθους ώστε να εξασφαλίζεται η οπή της διάτρησης από πλευρικές καταπτώσεις, καθώς και η απόληψη δειγμάτων καλής ποιότητας.

Η διάτρηση της γεώτρησης εκτελέστηκε στο διάστημα από 26/11/1997 έως 03/12/1997 σύμφωνα με τις “Τεχνικές Προδιαγραφές Δειγματοληπτικών Γεωτρήσεων Ξηράς για Γεωτεχνικές Έρευνες”, Ε101-83 του ΥΠΕΧΩΔΕ.

Η δοκιμή στατικής πενετρομέτρησης εκτελέστηκε τον Μάιο 1998 σύμφωνα με τις “Προδιαγραφές Επί τόπου Δοκιμών Εδαφομηχανικής (Ε106-86)” του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε και με τους Αμερικανικούς Κανονισμούς ASTM D3441-75Τ,.

3.2.1 Δειγματοληψία

Κατά την εκτέλεση της γεώτρησης έγινε συνεχής δειγματοληψία, η οποία περιελάμβανε την απόληψη των ακολούθων τύπων δειγμάτων :

- αδιατάρακτων με χρήση τόσο του εμβολοφόρου δειγματολήπτη Piston (συνολικά 9 τεμάχια), όσο και του δειγματολήπτη Shelby (2 τεμάχια)
- Αντιπροσωπευτικών σε εδαφικούς σχηματισμούς με χρήση του δειγματολήπτη απλού τοιχώματος διαμέτρου T101mm κατά την τεχνική του “φραγμού” (διακοπή της παροχής του νερού προς την κοπτική κεφαλή υπό σταθερή ταχύτητα διείσδυσης)
- αντιπροσωπευτικών με χρήση του διαιρετού δειγματολήπτη Terzaghi (Split Spoon Sampler) κατά την διάρκεια εκτέλεσης των Τυποποιημένων Δοκιμών Διείσδυσης (Standard Penetration Test ή SPT)

Όλα τα ως άνω δείγματα τοποθετήθηκαν με την σειρά απόληξης σε ειδικά κιβώτια κατάλληλα επισημασμένα και μεταφέρθηκαν αμέσως στο εργαστήριο.

3.2.2 Επί τόπου δοκιμές

Στην γεώτρηση εκτελέσθηκαν Δοκιμές Τυποποιημένης Διείσδυσης (SPT), ενώ όπως σημειώθηκε προηγουμένως, παραπλευρώς εκτελέσθηκε μία δοκιμή Στατικής Πενетроμέτρησης (CPT). Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στο Παράρτημα του παρόντος.

Οι δοκιμές (SPT) έγιναν με χρήση δειγματολήπτη εξωτερικής διαμέτρου 50.8mm, εσωτερικής 34.8 mm και μήκους 60cm με τυποποιημένη αιχμή. Κατά την δοκιμή αυτή καταγράφονται οι απαιτούμενες κρούσεις για την διείσδυση του πρό-τυπου δειγματολήπτη κατά 450mm (150mm διαδοχικά τρεις φορές). Οι κρούσεις προκλήθηκαν από σφύρα βάρους 640 kN, με ελεύθερη πτώση από ύψος 760 mm. Το άθροισμα του αριθμού των κτύπων των δύο τελευταίων διεισδύσεων αποτελεί τον αριθμό N. Ως “άρνηση” (A) χαρακτηρίζεται η αδυναμία διείσδυσης του δειγματολήπτη στο έδαφος κατά 150 mm μετά την επιβολή 50 κρούσεων.

Στα συνημμένα στο Παράρτημα του παρόντος φύλλα εδαφοτεχνικής τομής καταγράφεται ο αριθμός κρούσεων N κατά το βάθος. Η άρνηση παρουσιάζεται στις ως άνω εδαφοτεχνικές τομές ως λόγος 50/λ, όπου λ η επιτευχθείσα διείσδυση σε εκατοστά μετά τον 50ο κτύπο.

Η δοκιμή (CPT) εκτελέσθηκε κατά τρόπον ανεξάρτητο κάθε γεωτρητικής και δειγματοληπτικής δραστηριότητας, αποτέλεσε όμως χρησιμότερο συμπλήρωμα των αδιατάρακτων δειγματοληψιών και της εργαστηριακής επεξεργασίας στους σχετικώς μαλακούς και χαλαρούς σχηματισμούς της περιοχής του έργου. Υλοποιήθηκαν με την προώθηση τυποποιημένου κώνου αιχμής 10cm² μέσα στο έδαφος υπό συνεχή υδραυλική πίεση και σταθερή ταχύτητα τη βοήθεια λεπτών στελεχών. Ανά διαστήματα 200mm καταγράφηκε στο μανόμετρο η προς τούτο απαιτούμενη για την διείσδυση πίεση. Η προώθηση των στελεχών εκτελέσθηκε κατ’αρχήν χωρίς πλευρικές τριβές χάρις στον εξωτερικό σωλήνα επένδυσης των στελεχών· κατά διαστήματα όμως, κώνος και μανδύας προωθήθηκαν από κοινού, οπότε καταγράφηκε η συνολική ένδειξη (αντίσταση αιχμής και πλευρική τριβή).

Πρόκειται για μια πολύ διαδεδομένη επί τόπου δοκιμή με σημαντική αξιοπιστία, αμεσότητα, ταχύτητα και σχετικώς μικρό κόστος. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της δοκιμής ανιχνεύθηκαν λεπτές ενστρώσεις άμμου, κυρίως όμως επαληθεύθηκε το εδαφικό προφίλ που υπέδειξε η δειγματοληπτική γεώτρηση. Από τις μετρήσεις της αντίστασης αιχμής και της πλευρικής τριβής του πεντρομέτρου εκτιμάται μέσω εμπειρικών σχέσεων το μέτρο παραμόρφωσης της κάθε στρώσης, καθώς και η συνοχή της υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η αντίσταση αιχμής του πεντρομέτρου (q_c) κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.8 έως 1.0 MPa για τα πρώτα 17m και εν συνεχεία, μέχρι βάθους 32m, μεταξύ των τιμών 1.0-2.0 MPa, εκτός των αμμωδών λεπτών ενστρώσεων όπου η τιμή της είναι κατά πολύ μεγαλύτερη. Η πλευρική τριβή (f_s) του πεντρομέτρου παρουσιάζει σταθερή μέση τιμή ίση με 40kPa εκτός των ως άνω ενστρώσεων όπου, όπως και η αντίσταση αιχμής, η τιμή της είναι μεγαλύτερη.

3.2.3 Τοποθέτηση πιεζομετρικών σωλήνων

Μετά το πέρας της γεωτρητικής διαδικασίας τοποθετήθηκε μέσα στην οπή πιεζομετρικός σωλήνας διαμέτρου 1,5'', διάτρητος από το βάθος του 1.0m μέχρι το τελικό βάθος της γεώτρησης. Εν συνεχεία, ο κυκλικός δακτύλιος μεταξύ πιεζομετρικού σωλήνα και παρειών της γεώτρησης πληρώθηκε με χαλίκι από το βάθος του 1.0m έως το τέλος της γεώτρησης, ενώ το ανώτερο τμήμα της οπής σφραγίσθηκε με σιμεντοκονίαμα όπου και τοποθετήθηκε μεταλλικό καπάκι με λουκέτο. Πρόκειται

λοιπόν για ανοικτό πιεζόμετρο τύπου φρέατος, το οποίο επιτρέπει την υδραυλική επικοινωνία των συναντώμενων εδαφικών στρώσεων.

3.3. Εργαστηριακές δοκιμές

Στα δείγματα που απολήφθηκαν από την γεώτρηση εκτελέστηκαν οι ακόλουθες εργαστηριακές δοκιμές κατάταξης και προσδιορισμού των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των συναντώμενων σχηματισμών :

- κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα
- όρια Atterberg
- ειδικό βάρος γαιών
- ειδικό βάρος στερεών
- προσδιορισμός λόγου κενών
- ποσοστό φυσικής υγρασίας
- μονοδιάστατη στερεοποίηση
- ανεμπόδιση θλίψη
- αξονομετρική συμπίεση χωρίς στερεοποίηση και στράγγιση (UU).

Η εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών έγινε σύμφωνα με τις “Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής” Ε105-86 και τις “Προδιαγραφές Εργαστηριακών Βραχομηχανικής” Ε103-84 του ΥΠΕΧΩΔΕ. Για όσα θέματα δεν καλύπτονταν από τις ως άνω Προδιαγραφές εφαρμόστηκαν οι αντίστοιχες Αμερικανικές Προδιαγραφές της ASTM (American Society of Testing and Materials).

3.4. Στρωματογραφία και εδαφικά χαρακτηριστικά

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εργασιών υπαίθρου και των εργαστηριακών δοκιμών, η στρωματογραφία του υπεδάφους στην περιοχή της εκτελεσθείσας γεώτρησης, παρουσιάζεται ως εξής :

ΣΤΡΩΣΗ 1: (0.0~2.0m) Τεχνητές επιχωματώσεις

Στα πρώτα 2.0m περίπου της γεώτρησης συναντήθηκαν τεχνητές επιχωματώσεις αποτελούμενες από καστανή άργιλο με χάλικες.

ΣΤΡΩΣΗ 2: (2.0~17.0m) Τεφρή, μαλακή ιλύς (ML-OL)

Εις βάθος μεταξύ 2.0 και 17.0m συναντήθηκε μία στρώση αποτελούμενη από τεφρή μαλακή ιλύ, χαμηλής έως μέσης πλασ(τ)ιμότητας, με κυμαινόμενο ποσοστό λεπτής άμμου, οργανικών προσμίξεων και οστράκων. Από τις δοκιμές κατάταξης προέκυψε ότι η ιλύς είναι χαμηλής έως μέσης πλασ(τ)ιμότητας ενώ ο δείκτης υδαρότητας παρουσιάζει σταθερά τιμές μεγαλύτερες του 1.50. Από τις δοκιμές ανεμπόδισης θλίψης προκύπτουν τιμές $q_u = 56$ έως 69 kN/m^2 υπό αντίστοιχες αξονικές παραμορφώσεις 13.2~14.6%. Στις δοκιμές τυποποιημένης διείδυσης καταγράφηκε αριθμός κρούσεων N από 0 έως 6, ο οποίος χαρακτηρίζει το σχηματισμό ως μαλακό. Από δύο δοκιμές αξονομετρικής συμπίεσης χωρίς στερεοποίηση και χωρίς μέτρηση των πίεσης πόρων (UU) προκύπτει συνοχή υπό αστράγγιστες συνθήκες $c_u = 38$ έως 50 kN/m^2 και αντίστοιχη γωνία διατμητικής αντοχής $\phi_u = 0^\circ$ έως 6° .

ΣΤΡΩΣΗ 3: (17.0~32.0m) Καστανοκίτρινη μαλακή αργιλοϊλύς (CL-ML)

Εις βάθος μεταξύ 17.0 και 32.0m συναντάται στρώση αποτελούμενη από καστανοκίτρινη, μαλακή έως μέσης αντοχής αργιλοϊλύ, με άμμο και χάλικες κατά θέσεις. Από τις δοκιμές κατάταξης προκύπτει ότι η αργιλοϊλύς είναι χαμηλής πλασ(τ)ιμότητας, ενώ ο δείκτης υδαρότητας παρουσιάζει τιμές μεταξύ 0.7 και 2.0. Από μία δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης προκύπτει τιμή $q_u = 46 \text{ kN/m}^2$ και αντίστοιχη αξονική παραμόρφωση 14.1%. Στις δοκιμές τυποποιημένης διείδυσης σημειώθηκε χαμηλός αριθμός κρούσεων N χαρακτηρίζοντας τον σχηματισμό μαλακό έως μέσης αντοχής. Από μία δοκιμή αξονομετρικής συμπίεσης χωρίς στερεοποίηση και χωρίς μέτρηση της πίεσης πόρων (UU) προκύπτει πολύ χαμηλή τιμή της συνοχής υπό αστράγγιστες συνθήκες $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ και αντίστοιχη γωνία $\phi_u = 4^\circ$.

ΣΤΡΩΣΗ 4: (32.0~37.5m) Καστανοκίτρινοι ως καστανότεφροι, μέσης πυκνότητας ιλυώδεις χάλικες με άμμο (GP-ML)

Εις βάθος μεταξύ 32.0m και 37.5m συναντάται στρώση αποτελούμενη από καστανοκίτρινους έως καστανότεφρους, μέσης πυκνότητας ιλυώδεις χάλικες με άμμο. Στις δοκιμές τυποποιημένης διείδυσης σημειώθηκε αριθμός κρούσεων N ίσο με 20~34 χαρακτηρίζοντας τον σχηματισμό ως μέσης έως πυκνής απόθεσης.

3.5. Υπόγεια νερά

Ο υδροφόρος ορίζοντας συναντήθηκε εις βάθος 1.00m κατά την διάρκεια εκτέλεσης της γεώτρησης. Σημειώνεται ότι κατά τις των εργασίες αυτές, η καθημερινή πρωινή μέτρηση της στάθμης των υπόγειων υδάτων έδειξε ότι η τελευταία παρέμενε σταθερή εις βάθος από 1.90 έως 2.20m από την εδαφική επιφάνεια. Όταν όμως η γεώτρηση έφθασε εις βάθος της τάξεως των 32.0m περίπου, όπου και συναντήθηκε η στρώση με ιλυώδη χάλικια και άμμο, η στάθμη των υπόγειων υδάτων ανέβηκε, στην τελευταία δε πρωινή μέτρηση ήταν εις βάθος 1.0m από την επιφάνεια, υποδεικνύοντας πιθανότητα αρτεσιανής υδροφορίας.

4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΠΑΣΣΑΛΟΥ

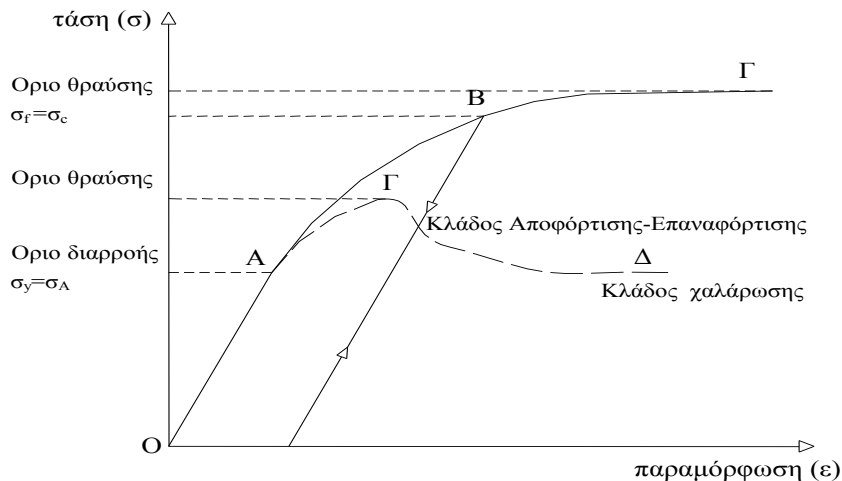
4.1 Γενικές έννοιες

Είναι γνωστόν ότι η συμπεριφορά του εδάφους αποκλίνει από την γραμμική ελαστικότητα ακόμη και σε χαμηλές στάθμες εξαιτίας. Στο σχήμα 4.1 απεικονίζεται η τυπική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων με κλάδους διαφορετικής συμπεριφοράς: συγκεκριμένα, στο τμήμα ΟΑ το υλικό διέπεται από γραμμική (ενδεχομένως ελαστική) συμπεριφορά, στο τμήμα ΑΓ από ελαστοπλαστική-κρατυνόμενη συμπεριφορά, ενώ το τμήμα ΓΔ αντιστοιχεί σε ελαστοπλαστική συμπεριφορά με χαλάρωση.

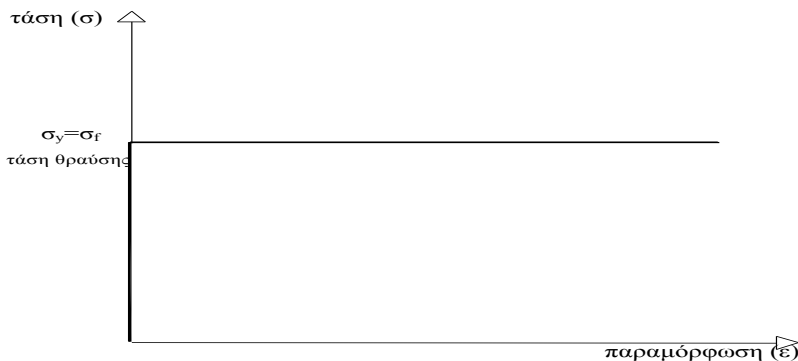
Η ύπαρξη και το μέγεθος καθενός από τους παραπάνω κλάδους εξαρτάται από την σύσταση και τις ιδιότητες του κάθε γεωυλικού. Στόχο της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς ενός υλικού αποτελεί η διατύπωση κατάλληλου καταστατικού νόμου ο οποίος :

- να καταγράφει τον μηχανισμό εκδήλωσης του φαινομένου
- να παρακολουθεί στενά την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων
- να μη-παραβιάζει θεμελιώδη ενεργειακά αξιώματα.

Υπεραπλουστευμένη προσέγγιση της καμπύλης του σχήματος (4.1) αποτελεί η στερεοπλαστική συμπεριφορά (σχήμα 4.2), στην οποία βασίζεται η θεωρία φέρουσας ικανότητας του εδάφους .



Σχήμα 4.1 Σχηματική απεικόνιση του καταστατικού νόμου συμπεριφοράς εδαφικού υλικού



Σχήμα 4.2 Απλουστευμένη προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς μέσω του στερεοπλαστικού προσομοιώματος

4.2. Φέρουσα ικανότητα μεμονωμένου πασσάλου

Το αξονικό φορτίο Q το οποίο φέρει ένας μεμονωμένος πάσσαλος μεταβιβάζεται στο έδαφος μέσω της πλευρικής τριβής και της αντίστασης αιχμής (σχήμα 4.3). Το οριακό φορτίο του πασσάλου, δηλαδή το φορτίο στο οποίο το περιβάλλον έδαφος αστοχεί, δίδεται από την σχέση :

$$Q_u = Q_b + Q_s = A_b q_b + \sum_{i=1}^n f_{si} A_{si}$$

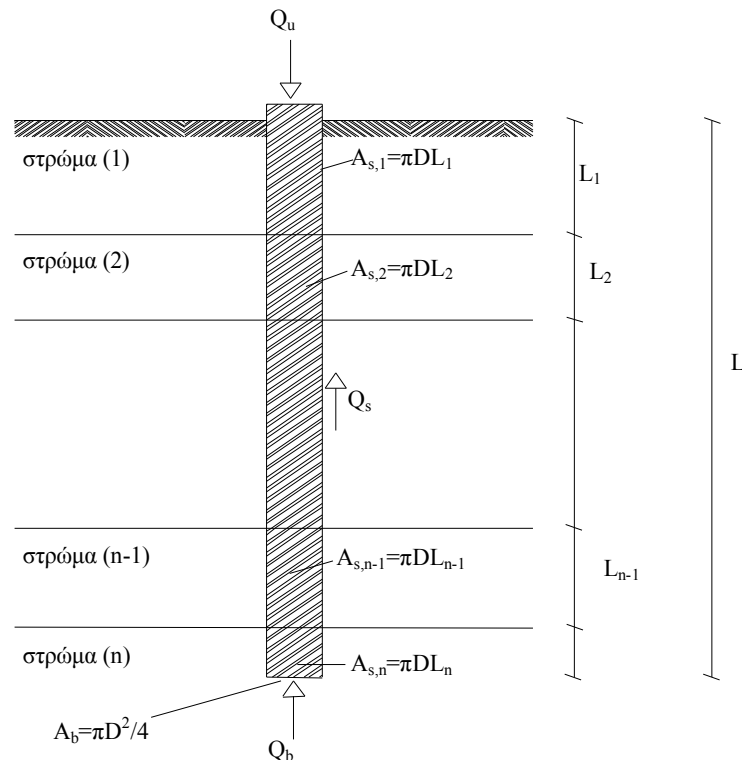
όπου

- Q_b : το οριακό φορτίο αντίστασης αιχμής
- Q_s : το οριακό φορτίο πλευρικής τριβής
- A_b : το εμβαδόν της αιχμής του πασσάλου
- q_b : η φέρουσα ικανότητα της αιχμής του πασσάλου ανά μονάδα επιφάνειας
- A_{si} : το εμβαδόν της παράπλευρης επιφάνειας του τμήματος του πασσάλου το οποίο βρίσκεται μέσα στην εδαφική στρώση i
- f_{si} : η οριακή πλευρική τριβή πασσάλου-εδάφους ανά μονάδα επιφάνειας για την εδαφική στρώση i
- n : ο αριθμός των στρώσεων.

Στον προσδιορισμό του οριακού φορτίου δεν λαμβάνεται συνήθως υπόψιν το βάρος του πασσάλου, καθώς αυτό αντισταθμίζεται περίπου από το βάρος του εδάφους το οποίο αντικαθιστά.

Οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι υπολογισμού του οριακού φορτίου πασσάλου (φέρουσα ικανότητα) είναι οι ακόλουθες :

- Μέθοδοι βασιζόμενες σε εργαστηριακά μετρηθείσες ιδιότητες του εδάφους
- Εμπειρικές μέθοδοι βασιζόμενες σε αποτελέσματα επί τόπου δοκιμών (SPT, CPT, πρεσσιομετρήσεις)



Σχήμα 4.3 Οριακό αξονικό φορτίο πασσάλου

Στην πρώτη ομάδα μεθόδων, η οριακή αντίσταση αιχμής ενός πασσάλου σε συνεκτικό έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες, όπως στην εξεταζόμενη περίπτωση, εκφράζεται από την σχέση :

$$q_b = \omega \cdot c_{u,b} \cdot N_c$$

- όπου $c_{u,b}$: η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους στην αιχμή του πασσάλου (προκύπτει συνήθως από δοκιμές αξονομετρικής συμπίεσης)
- N_c : συντελεστής φέρουσας ικανότητας, η τιμή του οποίου αυξάνει από 6.2 για κυκλικά επιφανειακά θεμέλια σε 9.0 για πασσάλους με $L/D \geq 4$
- ω : Διορθωτικός συντελεστής ο οποίος χρησιμοποιείται για την αναγωγή των εργαστηριακών μετρήσεων σε αντοχή ρωγματώσεων

Αντιστοίχως, η οριακή πλευρική τριβή ενός πασσάλου σε συνεκτικό έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης εκφράζεται από την σχέση :

$$f_s = a \cdot c_u$$

- όπου a : εμπειρικός συντελεστής πρόσφυσης, η τιμή του οποίου προκύπτει από δοκιμαστικές φορτίσεις πασσάλων
- c_u : η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους.

Η συνάφεια θα είναι πάντοτε μικρότερη της αρχικής αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, λόγω του ότι αφ' ενός προκαλείται διατάραξη της δομής του συνεκτικού εδάφους από τα εκσκαπτικά μηχανήματα, αφ' έτερου διότι επέρχεται χαλάρωση του εδάφους από την αποτόνωση των πλευρικών τάσεων λόγω εκσκαφής. Προκύπτει λοιπόν ότι η συνάφεια εξαρτάται από την τεχνική εκσκαφής, αλλά και από τις καθυστερήσεις που προηγούνται της σκυροδέτησης.

Στην δεύτερη ομάδα μεθόδων είναι δυνατός ο άμεσος προσδιορισμός της οριακής αντίστασης αιχμής του πασσάλου από δοκιμές στατικής πενετρομέτρησης (CPT) κατά την σχέση :

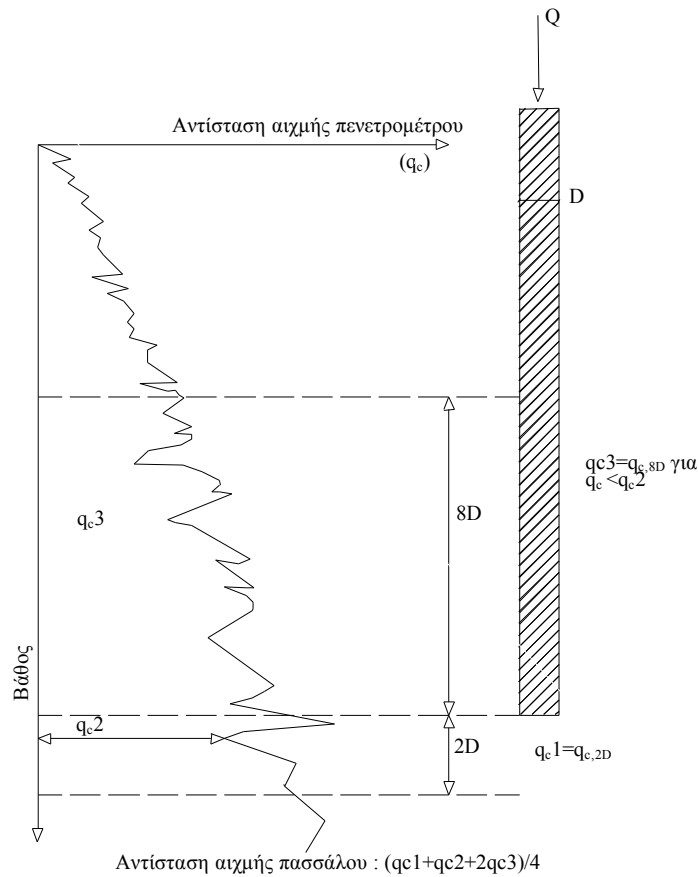
$$q_b = (q_{c1} + q_{c2} + 2q_{c3})/4$$

- όπου q_{c1} : η μέση τιμή της αντίστασης της αιχμής του πενετρομέτρου στο στρώμα πάχους 2D κάτω από την αιχμή του πασσάλου (σχήμα 4.4)
- q_{c2} : η ελάχιστη τιμή της αντίστασης της αιχμής του πενετρομέτρου στο στρώμα πάχους 2D κάτω από την αιχμή του πασσάλου
- q_{c3} : η μέση τιμή της αντίστασης της αιχμής του πενετρομέτρου στο στρώμα πάχους 8D επάνω από την αιχμή του πασσάλου.

Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό της μέσης τιμής υπεισέρχεται ο περιορισμός $q_c \leq q_{c2}$.

Στην περίπτωση όπου το έδαφος αποτελείται από άμμο με λεπτά χαλίκια, η αντίσταση αιχμής q_c στην παραπάνω σχέση μειώνεται συνήθως στην πράξη κατά 30%, ενώ όταν αυτό αποτελείται μόνον από χάλικες η μείωση είναι 50%.

Στην περίπτωση όπου διατίθενται αποτελέσματα δοκιμών τυποποιημένης διείδυσης (SPT), ο προσδιορισμός της οριακής αντίστασης αιχμής μπορεί να γίνει με την βοήθεια νομογραφιών .



Σχήμα 4.4 Προσδιορισμός της οριακής αντίστασης αιχμής από τα αποτελέσματα της δοκιμής στατικής πεντρομέτρησης (CPT)

Για την εκτίμηση της οριακής πλευρικής τριβής του πασσάλου (f_s) από τα αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών έχουν προταθεί αρκετές εμπειρικές σχέσεις, μερικές από τις οποίες είναι οι ακόλουθες :

$f_s = f_c$ όπου f_c : η πλευρική τριβή στατικού πεντρομέτρου που διαθέτει μανδύα

$f_s = 0.11 e^{-3 \tan \varphi} q_c$ όπου q_c : η αντίσταση αιχμής στατικού πεντρομέτρου
 φ : η γωνία διατμητικής αντοχής του εδάφους, η τιμή της οποίας μπορεί να εκτιμηθεί εμμέσως και εμπειρικά από την q_c

$f_s = 2N$ (σε kN/m^2) όπου N : ο αριθμός κτύπων για διείδυση 450 mm στη δοκιμή SPT

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω σχέσεις δίδουν την οριακή πλευρική τριβή πασσάλου εκτόπισης. Στους πασσάλους χωρίς εκτόπιση, όπου οι οριζόντιες τάσεις που ασκεί το έδαφος στην παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου

είναι σημαντικά μικρότερες, η τιμή του f_s που προκύπτει από τις παραπάνω σχέσεις διαιρείται με εμπειρικό συντελεστή ίσο προς 2.

4.2.2 Επιτρεπόμενο αξονικό φορτίο (DIN 4014).

Με την μεθοδολογία αυτή υπολογίζεται η αξονική αντίσταση μεμονωμένου πασσάλου σε θλίψη και εφελκυσμό. Η φέρουσα ικανότητα προκύπτει ως συνάρτηση των καθιζήσεων και συναρτάται με το μήκος και την διάμετρο του πασσάλου, καθώς και με τα εδαφοτεχνικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εδάφους. Ο Γερμανικός Κανονισμός DIN 4014 δίδει την δυνατότητα υπολογισμού του επιτρεπόμενου-και όχι του οριακού-αξονικού φορτίου του πασσάλου, ή αλλιώς του φορτίου σχεδιασμού, το οποίο έχει διαιρεθεί με κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας που καλύπτει τις αβεβαιότητες της μεθόδου υπολογισμού, των σφαλμάτων στην εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων και των ατελειών στην κατασκευή, συντελεστή ο οποίος επίσης περιορίζει την καθίζηση του πασσάλου σε “επιτρεπτά όρια”.

Το συνολικό φορτίο $Q_{(s)}$ του πασσάλου που αντιστοιχεί σε καθίζηση s δίδεται από την σχέση:

$$Q_{(s)} = Q_{s(s)} + Q_{r(s)}$$

- όπου $Q_{s(s)}$: η αντίσταση αιχμής για καθίζηση (s)
 $Q_{r(s)}$: η πλευρική τριβή για καθίζηση (s)

Η αντίσταση αιχμής $Q_{s(s)}$ δίδεται από την σχέση :

$$Q_{s(s)} = A_F \sigma_{s(s)}$$

- όπου A_F : το εμβαδόν της αιχμής του πασσάλου
 $\sigma_{s(s)}$: η αντίσταση αιχμής ανά μονάδα επιφανείας για καθίζηση (s): η τιμή του $\sigma_{s(s)}$ προσδιορίζεται από τους ακόλουθους πίνακες 4.2 και 4.3 συναρτήσει του λόγου s/D , όπου D είναι η διάμετρος του πασσάλου για μη-συνεκτικά και συνεκτικά εδάφη αντιστοίχως για την χρησιμοποίηση των πινάκων αυτών θα πρέπει να είναι γνωστή η αντίσταση αιχμής στατικού πενетроμέτρου (CPT), ενώ στα συνεκτικά εδάφη αντιστοίχως η αστράγγιστη διατμητική αντοχή (S_u).

Η οριακή αντίσταση αιχμής του πάσσαλου είναι ίση προς :

$$Q_{sg} = A_F \sigma_{sg}$$

- όπου σ_{sg} : η οριακή αντίσταση αιχμής ανά μονάδα επιφάνειας, η οποία αναπτύσσεται όταν η καθίζηση είναι $\sigma_{sg} = 0.1D$

s/D	Πίνακας 4.2 Προσδιορισμός της αντίστασης αιχμής ανά μονάδα επιφανείας			
	Αντίσταση αιχμής πασσάλου σ_s (MN/m ²)			
	$q_c = 10$ MN/m ²	$q_c = 15$ MN/m ²	$q_c = 20$ MN/m ²	$q_c = 25$ MN/m ²
0.02	0.7	1.05	1.4	1.75
0.03	0.9	1.35	1.8	2.25
0.1 (=s _g /D)	2.0	3.0	3.5	4.0

Πίνακας 4.3 Προσδιορισμός της αντίστασης αιχμής ανά μονάδα επιφανείας		
s/D	Αντίσταση αιχμής πασσάλου σ_s (MN/m ²)	
	$S_u=0.1$ MN/m ²	$S_u=0.2$ MN/m ²
0.02	0.35	0.9
0.03	0.45	1.1
0.1 (= s_g/D)	0.80	1.5

Οι παραπάνω τιμές ισχύουν όταν $w_L < 80\%$. Για ενδιάμεσες τιμές των q_c και S_u γίνεται γραμμική παρεμβολή.

Στην περίπτωση όπου δεν διατίθενται αποτελέσματα δοκιμών στατικής πενетроμέτρησης (CPT), αλλά διατίθενται αποτελέσματα Δοκιμής Τυποποιημένης Διεϊσδυσης (SPT), το DIN 4014 ορίζει ότι ο προσδιορισμός του q_c (που απαιτείται στον πίνακα 4.2) μπορεί να γίνει με βάση τα στοιχεία του πίνακα 4.4 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.4 Τιμές σχεδιασμού της αντοχής αιχμής CPT	
Είδος Εδάφους	q_c / N (MN/m ²)
Λεπτή ως μεσόκοκκη άμμος ή ιλυώδης άμμος	0.3 έως 0.4
Άμμος ή άμμος με λίγα χαλίκια	0.5 έως 0.6
Καλά διαβαθμισμένη άμμος	0.5 έως 1.0
Αμμώδη χαλίκια ή καθαρά χαλίκια	0.8 έως 1.0

Η πλευρική τριβή $Q_{r(s)}$, του πασσάλου δίδεται από την σχέση :

$$Q_r(s) = \sum_{i=1}^n [A_{mi} \tau_{mi}(s)]$$

όπου n : ο αριθμός των στρωμάτων εδάφους μέσα από τα οποία διέρχεται ο πάσσαλος

A_{mi} : το εμβαδόν της παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου στο στρώμα i

$\tau_{mi}(s)$: η πλευρική τριβή ανά μονάδα επιφανείας στο στρώμα (i) για καθίζηση (s).

Η τιμή $\tau_{mi}(s)$ αυξάνει γραμμικά με την καθίζηση (s) μέχρι την οριακή τιμή τ_{mf} η οποία αναπτύσσεται όταν η καθίζηση γίνει ίση προς (s_{rg}), εν συνέχεια δε παραμένει σταθερή. Για τα μη-συνεκτικά εδάφη ο προσδιορισμός της (τ_{mf}) συναρτήσει της αντίστασης αιχμής στατικού πενетроμέτρου βασίζεται στον ακόλουθο πίνακα 4.5, ενώ για τα συνεκτικά εδάφη το τ_{mf} εξαρτάται από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή και προσδιορίζεται από τον πίνακα 4.6 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.5 Προσδιορισμός τ_{mf} από την δοκιμή CPT	
Αντίσταση αιχμής πενетроμέτρου q_c (MN/m ²)	Οριακή πλευρική τριβή πασσάλου τ_{mf} (MN/m ²)
0	0.0
5	0.04
10	0.08
≥ 15	0.12
Για ενδιάμεσες τιμές του q_c γίνεται γραμμική παρεμβολή	

Πίνακας 4.6 Προσδιορισμός τ_{mf} από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή.	
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή S_u (MN/m ²)	Οριακή πλευρική τριβή πασσάλου τ_{mf} (MN/m ²)
0.0	0.0
0.025	0.025
0.1	0.04
0.2	0.06
Για ενδιάμεσες τιμές του S_u γίνεται γραμμική παρεμβολή	

Η καθίζηση s_{rg} , στην οποία αναπτύσσεται η οριακή πλευρική τριβή δίδεται από την σχέση :

$$s_{rg} = 0.5 Q_{rg} + 0.5 \leq 3cm$$

όπου Q_{rg} η συνολική οριακή πλευρική τριβή του πασσάλου ως εξής :

$$Q_{rg} = \sum_{i=1}^n [A_{mi} \tau_{mf,i}]$$

Στην περίπτωση των εφελκόμενων πασσάλων

$$s_{rg,εφελκ.} = 1.3 s_{rg}$$

Για να θεωρηθεί ο πάσσαλος ασφαλής θα πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής δύο συνθήκες :

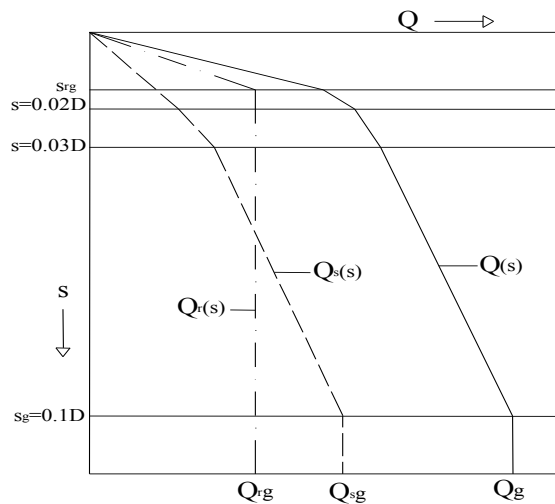
1. Το φορτίο P το οποίο ασκεί η ανωδομή στον πάσσαλο πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο του οριακού φορτίου Q_g διαιρεμένου με έναν συντελεστή ασφαλείας, συνήθως με τιμή 2, κατά την σχέση :

$$P \leq Q_g / 2$$

Σε ορισμένες περιπτώσεις φόρτισης ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να έχει τιμές μικρότερες του 2, σύμφωνα με το DIN 1054.

2. Για καθίζηση (s) ίση προς την επιτρεπόμενη καθίζηση του έργου, πρέπει το φορτίο P να είναι μικρότερο ή ίσο του φορτίου $Q_{(s)}$ που προκύπτει με βάση το ακόλουθο διάγραμμα 4.5 :

$$P \leq Q_{(s)} = Q_{s(s)} + Q_{r(s)}$$



Σχήμα 4.5 Σχέση αξονικού φορτίου-καθίζησης κατά DIN 4014

4.3 Καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου

4.3.1 Εισαγωγή

Η εκτίμηση των καθιζήσεων στην περίπτωση των βαθειών θεμελιώσεων βασίζεται στις ίδιες αρχές που διέπουν την περίπτωση των αβαθών θεμελιώσεων. Υπάρχουν όμως σημαντικές διαφορές που προέρχονται τόσο από τον τρόπο διαταράξης του περιβάλλοντος τον πάσσαλο εδάφους όσο και από τον διαφορετικό τρόπο μετάδοσης των φορτίων από τον πάσσαλο στο έδαφος.

Οι συνήθεις μέθοδοι εκτίμησης μπορούν να διαχωρισθούν ως εξής :

- Εμπειρικές μέθοδοι
- Ημ εμπειρικές συσχετίσεις βασιζόμενες στην εκτίμηση της συμπεριφοράς του εδάφους βάσει δοκιμών συμπίεσόμετρου
- Μέθοδοι δισδιάστατης ελαστικότητας κατά Boussinesq, η οποία εκλαμβάνει το έδαφος ως ελαστικό ημχώρο
- Μέθοδοι “ελατηριακής σταθεράς”, στις οποίες το έδαφος αντικαθίσταται από μία σειρά ελατηρίων κατανομημένων κατά μήκος του πασσάλου (μονοδιάστατη ελαστικότητα)
- Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων, στις οποίες λαμβάνονται υπόψη η μη γραμμική σχέση μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων του εδάφους, καθώς και η ύπαρξη περιοχής πλαστικής συμπεριφοράς του εδάφους όταν υπερβληθεί το όριο διαρροής .

4.3.2 Εμπειρικές μέθοδοι

Η καθίζηση ενός μεμονωμένου πασσάλου προέρχεται τόσο από την βράχυνση του σώματος του πασσάλου, όσο και από την παραμόρφωση του περιβάλλοντος εδάφους. Η τελευταία οφείλεται κατά κύριο λόγο στην στερεοποίηση του εδάφους που υπόκειται του ποδός του πασσάλου, αλλά και στην εδαφική παραμόρφωση γύρω από την πλευρική επιφάνειά του. Σχετική είναι και η εμπειρική μέθοδος Vesic (1977) η οποία εκτιμά την καθίζηση ως άθροισμα τριών συνιστωσών :

1. Καθίζηση λόγω αξονικής παραμόρφωσης του σώματος του πα-σάλου κατά την σχέση :

$$S_o = (Q_b + a_s Q_s) L A_o E_o$$

- οπου Q_b : φορτίο αιχμής υπό συνθήκες λειτουργίας
 Q_s : φορτίο πλευρικής τριβής υπό συνθήκες λειτουργίας
 a_s : εμπειρικός συντελεστής
 L : μήκος του πασσάλου
 A_o : διατομή του πασσάλου
 E_o : μέτρο ελαστικότητας του πασσάλου

2. Καθίζηση λόγω εδαφικής παραμόρφωσης στην βάση του πασ-σάλου κατά την σχέση :

$$S_b = Q_b c_b / D q_{bu}$$

- οπου c_b : εμπειρικός συντελεστής
 D : διάμετρος πασσάλου

- q_{bu} : οριακή αντίσταση αιχμής
 3. Καθίζηση λόγω εδαφικής παραμόρφωσης στην παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου κατά την σχέση :

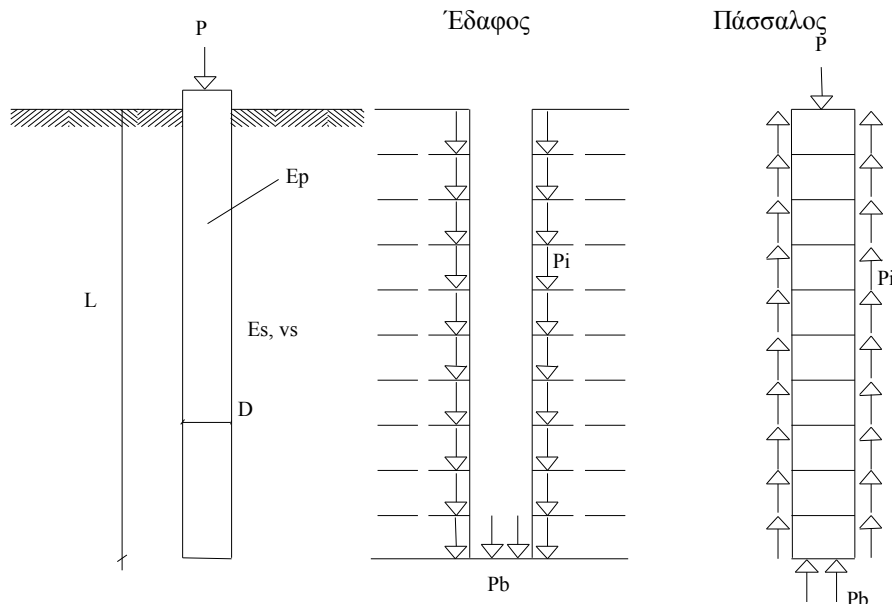
$$S_c = Q_s c_s / L_D q_u$$

όπου c_s : εμπειρικός συντελεστής
 L_D : θαμμένο μήκος πασσάλου

Τελικώς θα είναι $S = S_o + S_b + S_c$.

4.3.3 Μέθοδοι ελαστικότητας

Στις μεθόδους ελαστικότητας ο πάσσαλος διαιρείται σε έναν αριθμό (n) ομοιόμορφων φορτιζομένων στοιχείων (σχήμα 4.1). Το στοιχείο (i) του πασσάλου ασκεί στο παράπλευρο έδαφος μία τάση p_i με φορά προς τα κάτω, ενώ αντιστοίχως το έδαφος ασκεί στον πάσσαλο την ίδια τάση με φορά προς τα άνω. Ανάλογη είναι και η φόρτιση πασσάλου-εδάφους στην αιχμή του. Εν συνεχεία ο πάσσαλος εκλαμβάνεται ως μία ελαστική ράβδος και εκφράζονται δε οι μετακινήσεις (s_i) του κάθε στοιχείου του πασσάλου συναρτήσει του συνόλου των φορτίων p_j ($j=1$ έως n) και του (p_b). Αντιστοίχως, οι μετακινήσεις (s_i) του εδάφους εκφράζονται συναρτήσει του συνόλου των φορτίων (p_j) και του (p_b) με την βοήθεια των εξισώσεων Mindlin, οι οποίες δίδουν την μετακίνηση ενός σημείου μέσα στον ελαστικό ημίχωρο, που προκαλείται από ένα φορτίο σε κάποιο άλλο σημείο του ημιχώρου. Από την εξίσωση των μετακινήσεων πασσάλου και εδάφους προκύπτει ένα σύστημα ($n+1$) εξισώσεων με ($n+1$) αγνώστους. Η επίλυση του συστήματος δίδει τα φορτία (p_i) με βάση τα οποία υπολογίζεται εν συνεχεία η καθίζηση του πασσάλου.



Σχήμα 4.6 Αξονική ανάλυση πασσάλου σε ελαστικό ημίχωρο

Η ως άνω μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε μία σειρά παραμετρικών αναλύσεων όπου προέκυψαν νομογραφήματα από τα οποία μπορεί να υπολογισθεί άμεσα η καθίζηση του πασσάλου ως εξής :

$$S = \frac{PI}{E_s D}$$

- Όπου P : το αξονικό φορτίο του πασσάλου
 E_s : το μέτρο ελαστικότητας του περιβάλλοντος εδάφους
 D : η διάμετρος του πασσάλου
 I : ένας συντελεστής καθίζησης που προσδιορίζεται από τις σχέσεις :

$$I = I_o R_k R_h R_v \quad (\text{πάσσαλος τριβής})$$

$$I = I_o R_k R_b R_v \quad (\text{πάσσαλος αιχμής})$$

- I_o : συντελεστής καθίζησης, ο οποίος αναφέρεται στην περίπτωση ενός άκαμπτου πασσάλου μέσα σε ένα συμπιεστό στρώμα απείρου βάθους με λόγο Poisson $\nu_s = 0.5$
 R_k : διορθωτικός συντελεστής σχετικής δυσκαμψίας
 R_h : διορθωτικός συντελεστής, ο οποίος εκφράζει την επίδραση ενός ασυμπιέστου στρώματος εις βάθος h κάτω από την επιφάνεια του εδάφους
 R_v : διορθωτικός συντελεστής ο οποίος χρησιμοποιείται όταν ο λόγος Poisson ν_s είναι διάφορος του 0.5
 R_b : διορθωτικός συντελεστής, που αναφέρεται στην ακαμψία του στρώματος στο οποίο εδράζεται η αιχμή του πασσάλου.

Έχει αποδειχθεί ότι η παραπάνω μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια και για περισσότερα του ενός στρώματα εδάφους, αρκεί να μη διαφέρουν πολύ τα μέτρα ελαστικότητάς των ($E_{\max}/E_{\min} \leq 5$). Στην περίπτωση αυτή ως μέτρο ελαστικότητας του εδάφους χρησιμοποιείται το μέσο μέτρο ελαστικότητας των διαφόρων στρωμάτων, που προσδιορίζεται από την σχέση :

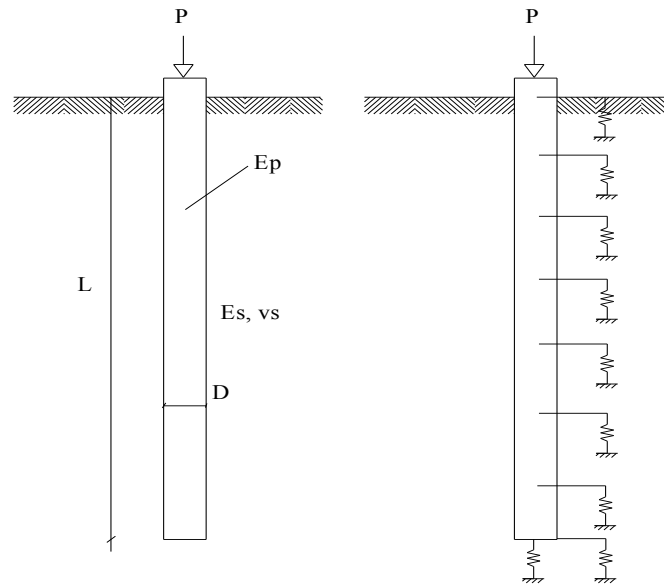
$$E_m = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n E_i h_i$$

- Όπου : L : το μήκος του πασσάλου
 E_i, h_i : το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος της εδαφικής στρώσης i
 n : ο αριθμός των εδαφικών στρώσεων.

4.3.4 Μέθοδοι Ελατηριακής Σταθεράς

Στην μέθοδο αυτή ο πάσσαλος εκλαμβάνεται ως ελαστική ράβδος η οποία διαιρείται σε (n) τμήματα. Κάθε τμήμα της συνδέεται με ένα αξονικό μη-γραμμικό ελατήριο το οποίο αναπαριστά την πλευρική τριβή πασσάλου-εδάφους. Επίσης, τοποθετείται ένα ελατήριο στην αιχμή του πασσάλου το οποίο αναπαριστά την αντίσταση αιχμής του πασσάλου. Η ακαμψία των ελατηρίων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την διάμετρο του πασσάλου, μπορεί δε να μεταβάλλεται με το βάθος αναλόγως με του είδους των εδαφικών στρώσεων. Η πλευρική τριβή ανά μονάδα επιφανείας (t) αυξάνει συναρτήσει της σχετικής μετακίνησης πασσάλου-εδάφους (z) μέχρι την οριακή πλευρική τριβή (f_s), αντιστοίχως δε η αντίσταση αιχμής (q) αυξάνει συναρτήσει της καθίζησης αιχμής του πασσάλου (z) μέχρι την οριακή της τιμή.

Με δεδομένα τα χαρακτηριστικά του πασσάλου (διαστάσεις και μέτρο ελαστικότητας E_p) και τα χαρακτηριστικά των ελατηρίων, είναι εύκολο να γίνει η επίλυση με χρήση μίας αριθμητικής μεθόδου, από την οποία προκύπτει η πλήρης μη-γραμμική σχέση φορτίου-καθίζησης στην κεφαλή του πασσάλου.



Σχήμα 4.7 Ελατηριακό προσομοίωμα αξονικής ανάλυσης πασσάλου

5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

5.1 Ο κώδικας FLAC^{3D}

Το FLAC^{3D} είναι ένα πρόγραμμα γεωτεχνικής μηχανικής που λειτουργεί σε περιβάλλον MS-Windows και χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές στον τρισδιάστατο χώρο. Προσφέρει την δυνατότητα ανάλυσης σε τρεις διαστάσεις προσομοιώνοντας την συμπεριφορά τρισδιάστατων δομών εδάφους ή /και βράχου, καθώς και άλλων υλικών τα οποία εισέρχονται σε περιοχή πλαστικής συμπεριφοράς όταν υπερβληθεί το όριο διαρροής.

Το πρόγραμμα έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην μελέτη και τον σχεδιασμό γεωτεχνικών κατασκευών καλύπτοντας όλο το φάσμα των έργων ενός γεωτεχνικού μηχανικού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις αβαθείς και βαθιές θεμελιώσεις, στην ευστάθεια πρανών, στον σχεδιασμό τοίχων αντιστήριξης και διαφραγμάτων, καθώς και σε υπόγεια έργα όπως σήραγγες και ορυχεία. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση κατασκευών υπό δυναμική καταπόνηση (σεισμικές διεργασίες), αλλά και σε έργα με παρουσία ροής και μεταφορά ενέργειας.

Μία από τις δυνατότητες του FLAC^{3D} που το κατατάσσουν στα κορυφαία προγράμματα γεωτεχνικής μηχανικής είναι οι μεθοδολογίες ανάλυσης που διαθέτει. Στο FLAC^{3D} μπορεί να επιλέχθει μεταξύ η στατική μηχανική ανάλυση, η ανάλυση υπόγειων ροών (υδραυλική ανάλυση) ή η μεταφορά θερμότητας /ενέργειας (θερμική ανάλυση), τέλος δε ανάλογα με την φύση του προβλήματος συνδυασμό των παραπάνω αναλύσεων όλες αυτές μπορούν να υλοποιηθούν τόσο υπό στατικές φορτίσεις όσο και υπό δυναμικές. Τα χαρακτηριστικά αυτά του FLAC^{3D} δίδουν στον χρήστη την δυνατότητα εναλλακτικών στρατηγικών προσομοίωσης, όπου όμως όσο πιο πολύπλοκες είναι αυτές τόσο οι απαιτήσεις μνήμης και χρόνου αυξάνουν.

Τα πρότυπα μοντέλα συμπεριφοράς που ενσωματώνει το FLAC^{3D} είναι δέκα (10), εκ των οποίων τρία αφορούν στην ελαστική συμπεριφορά του εδάφους και έξι στην πλαστική συμπεριφορά. Μερικά από τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην πλαστικότητα είναι εκείνο του Drucker-Prager, τον Mohr-Coulomb και το τροποποιημένο μοντέλο Cam-Clay. Είναι γνωστόν ότι η συμπεριφορά του εδάφους παρεκκλίνει από τα όρια της γραμμικής ελαστικότητας ακόμη και για μικρά βήματα φόρτισης, για τον λόγο αυτό τα παραπάνω μοντέλα χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κρατυνόμενη ελαστο-πλαστική συμπεριφορά του εδάφους και άλλων υλικών μέσω των η οποία κατά το δυνατόν προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά τους. Κάθε ζώνη στον κάνναβο του FLAC^{3D} μπορεί να συνίσταται από διαφορετικό υλικό ή να έχει διάφορες ιδιότητες, να χαρακτηρίζεται δε από συνεχή βαθμωτή ή στατιστική κατανομή οποιασδήποτε ζητούμενης ιδιότητας προσδιοριστεί. Επιπλέον, μία διεπιφάνεια ή μία επίπεδη επιφάνεια είναι διαθέσιμες για να αντιπροσωπεύσουν τις ευδιάκριτες επαφές μεταξύ δύο ή περισσότερων τμημάτων του καννάβου στοιχείων. Στις διεπιφάνειες λαμβάνει χώραν ολίσθηση ή και χωρισμός, προσομοιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την παρουσία ελαττωμάτων, ενώσεων κόμβων ή και τριβή ορίων.

Το πρόγραμμα έχει την ικανότητα αυτόματης δημιουργίας τρισδιάστατου καννάβου/πλέγματος, τα οποία δημιουργούνται με τον χειρισμό και την σύνδεση των προκαθορισμένων μορφών. Το FLAC^{3D} έχει την δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας οποιουδήποτε τρισδιάστατου σχήματος με στόχο την καλύτερη προσομοίωση του καννάβου στο πραγματικό πρόβλημα. Ο τρισδιάστατος χώρος ορίζεται από ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων, στοιχείο που παρέχει ευελιξία στην δημιουργία του προσομοιώματος και ευκολία στον καθορισμό των παραμέτρων των τρισδιάστατων ζωνών.

Το FLAC^{3D} μπορεί με αρκετά ικανοποιητικό τρόπο να προσομοιάσει διάφορα είδη φόρτισης, καθώς και το τασικό πεδίο που επικρατεί. Παραδείγματος χάριν, μπο-

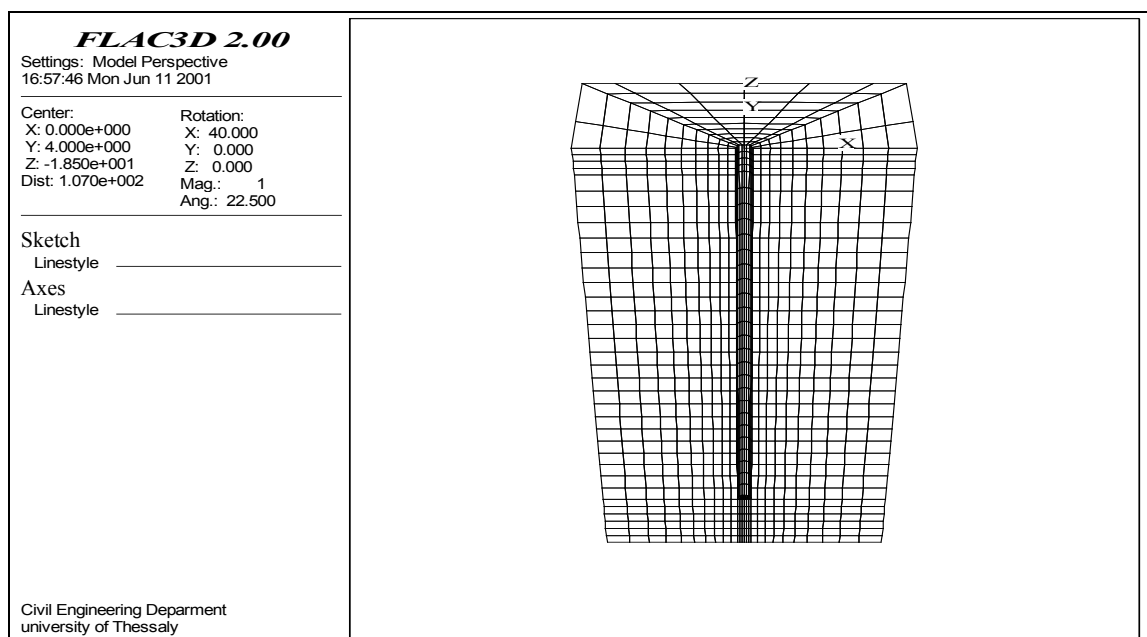
ρεί να προσομοιάσει το αρχικό εντατικό πεδίο λόγω της βαρύτητας, καθώς και εκείνο λόγω της ύπαρξης ροής. Επίσης, την εφαρμογή συγκεντρωμένων και κατανεμημένων δυνάμεων ή και μετακινήσεων στα σύνορα του εδαφικού περιβάλλοντος. Επιπλέον, έχει την δυνατότητα υπολογισμού ενεργών και ολικών τάσεων ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη.

Με αλλά λόγια το $FLAC^{3D}$ είναι ένα ισχυρό και χρήσιμο εργαλείο στα χέρια του γεωτεχνικού μηχανικού. Θα πρέπει όμως, τα αποτελέσματα να αντιμετωπίζονται με κριτικό πνεύμα και σκέψη.

5.2 Περιγραφή του αναλυτικού προσομοιώματος

Η σύνθεση του προσομοιώματος προσέβλεψε στην αναλυτική διατύπωση των φαινομένων που διέπουν την δοκιμαστικής φόρτιση του πασσάλου που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2 του παρόντος. Τα χαρακτηριστικά του πασσάλου και οι εδαφικές παράμετροι έχουν αναφερθεί προηγουμένως στις προηγούμενες παραγράφους του παρόντος πονήματος.

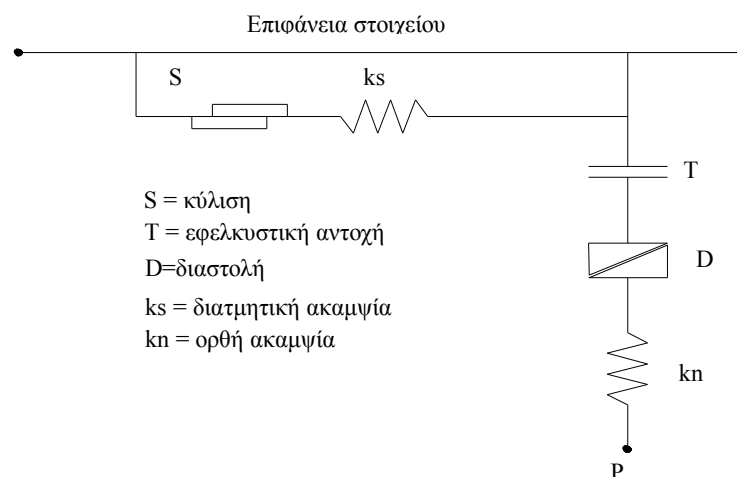
Ως κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας στην ζητούμενη ανάλυση, της κατά-κόρυφης φόρτισης του δοκιμαστικού πασσάλου ορίζεται το επίπεδο το οποίο διέρχεται από τον άξονα του πασσάλου. Οι άξονες συντεταγμένων για το εξεταζόμενο προσομοίωμα τοποθετούνται στην κεφαλή του πασσάλου, ενώ ο κατακόρυφος άξονας z είναι προσανατολισμένος κατά μήκος του πασσάλου. Το προσομοίωμα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1, έχει διαστάσεις (σε m) $16 \times 16 \times 37$ και έχει διακριθεί σε πεπερασμένα στοιχεία της τάξεως των 50cm ύψους και 80cm πλάτους. Η κορυφή του προσομοιώματος εκλαμβάνεται ως ελεύθερη επιφάνεια. Η βάση του προσομοιώματος έχει δεσμευθεί ως προς τις μετακινήσεις κατά την διεύθυνση του άξονα z . Επίσης, δεσμεύσεις κινήσεων έχουν τοποθετηθεί και στα πλευρικά σύνορα του προσομοιώματος. Ο πάσσαλος έχει μήκος 32 m και διάμετρο 80cm, τοποθετείται δε στην μέση του άξονα των x και στην αρχή του άξονα των y . Έχει χωριστεί σε στοιχεία, οι διαστάσεις των οποίων ταυτίζονται με εκείνες του καννάβου. Συνολικώς ο κάνναβος αποτελείται από 11,144 στοιχεία και περιλαμβάνει 13,192 κόμβους.



Σχήμα 5.1 Κάνναβος στοιχείων εδάφους πριν από την τοποθέτηση του πασσάλου

Η αξονική δύναμη ενός πασσάλου είναι άθροισμα της πλευρικής αντίστασης τριβής και της αντίστασης αιχμής στην βάση του. Η πλευρική αντίσταση τριβής (skin friction) προσομοιάζεται μέσω στοιχείων διεπιφάνειας μεταξύ των τοιχωμάτων του πασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους. Τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες της διεπιφάνειας είναι συνάρτηση της αντίστασης τριβής του πασσάλου και του εδάφους. Μια δεύτερη σειρά διεπιφανειακών στοιχείων τοποθετείται μεταξύ της βάσης του πασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους.

Σκοπός της τοποθέτησης των στοιχείων διεπιφάνειας είναι η “συνένωση” των περιοχών που έχουν διαφορετικές ιδιότητες και μέγεθος. Οι διεπιφάνειες έχουν τις ιδιότητες της τριβής, της συνοχής, της διαστολής, των ορθών και διατμητικών ακαμψιών και της εφελκυστικής αντοχής. Στην περίπτωση αυτή η συνοχή και η γωνία διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας είναι αντιστοίχως η συνάφεια και η γωνία τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του πασσάλου και του εδαφικού υλικού.



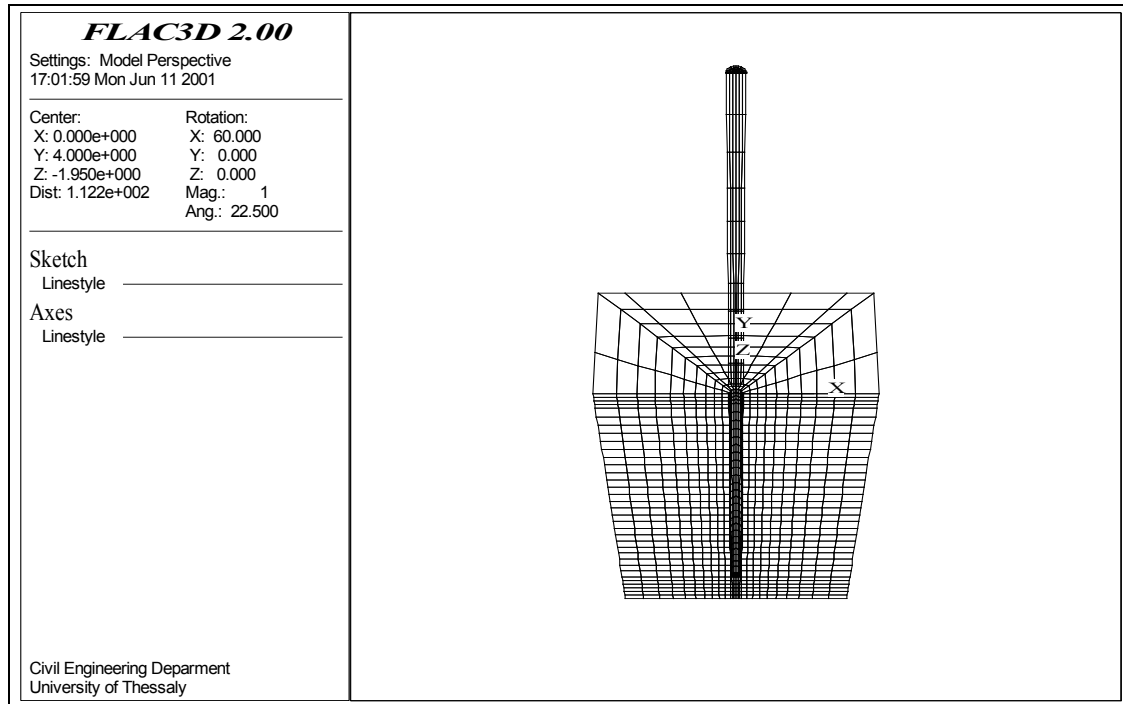
Σχήμα 5.2 Τα στοιχεία της διεπιφάνειας του καταστατικού προσομοιώματος

Κατασκευάζεται πρώτα ο κάρναβος στοιχείων που αντιπροσωπεύει το έδαφος, τοποθετούνται δε εν συνεχεία οι διεπιφάνειες στα όρια των εδαφικών στρώσεων με τον πάσσαλο. Ο κάρναβος του πασσάλου αυτού-τούτου κατασκευάζεται ξεχωριστά, μετακινείται δε εν συνεχεία για να έλθει σε επαφή με τις διεπιφάνειες. Το σχήμα 5.3 παρουσιάζει τον κάρναβο του πασσάλου και τον κάρναβο του εδάφους πριν ο πάσσαλος έλθει σε επαφή με τις διεπιφάνειες.

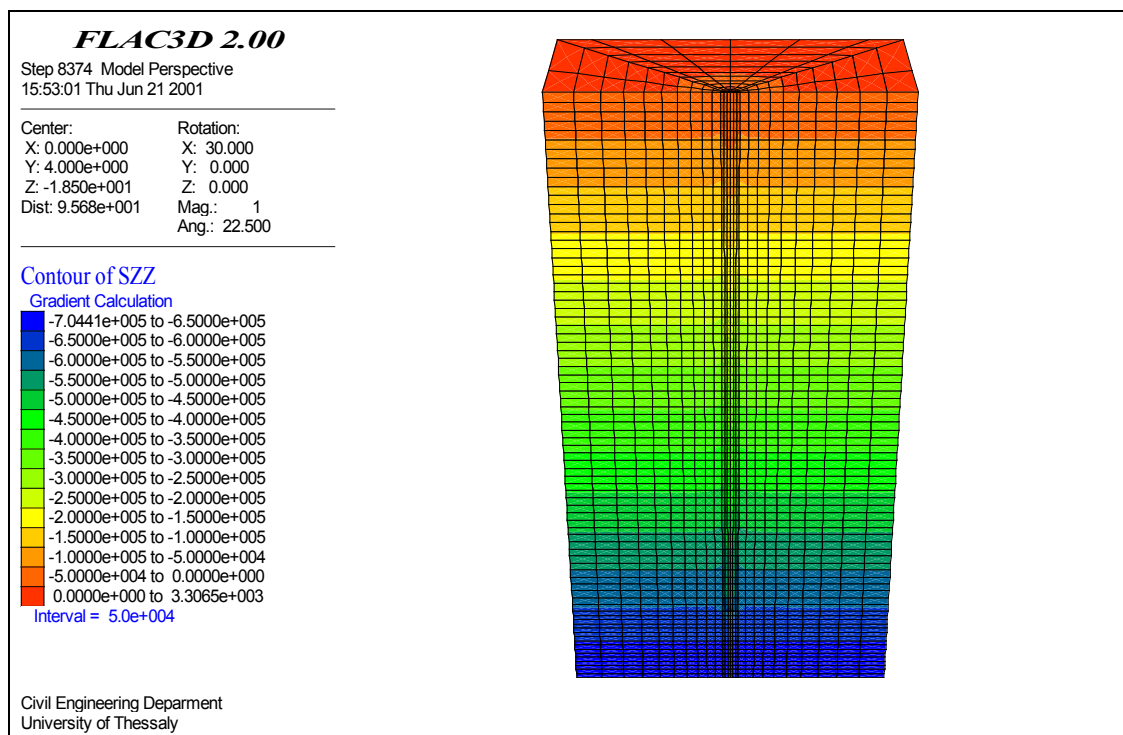
Η διεπιφάνεια του πασσάλου παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην λύση του προβλήματος, εφ' όσον λανθασμένες επιλογές παραμέτρων της διεπιφάνειας μπορούν να οδηγήσουν σε λάθος αποτελέσματα. Παραδείγματος χάριν, θέτοντας την γωνία διατμητικής αντοχής ϕ ίση με μηδέν (0°) ο πάσσαλος ολισθαίνει μέσα στο περιβάλλον έδαφος, φαινόμενο το οποίο κατά κανόνα δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα. Μεγάλες τιμές της ορθής και διατμητικής ακαμψίας και της συνοχής στην διεπιφάνεια της βάσης έχει ως στόχο να αποτρέψει ακριβώς την ολίσθηση του πασσάλου στην βάση του.

Το μοντέλο έρχεται σε πρώτη ισορροπία των δυνάμεων κάτω από την επίδραση του γεωστατικού πεδίου τάσεων πριν από την τοποθέτηση του πασσάλου. Εισάγεται η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα, ο οποίος βρίσκεται εις βάθος 1.0m από την εδαφική επιφάνεια. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες τάσεις (σ_{zz}) στο αρχικό εντατικό πεδίο. Στο FLAC^{3D} η επίλυση ολοκληρώνεται μετά από μια σειρά υπολογιστικών βημάτων, ο αριθμός των οποίων ελέγχεται αυτόματα από τον κώδικα ή καθορίζεται από τον χρήστη εάν ο αριθμός βημάτων δεν επαρκεί για την επίλυση του προβλήματος.

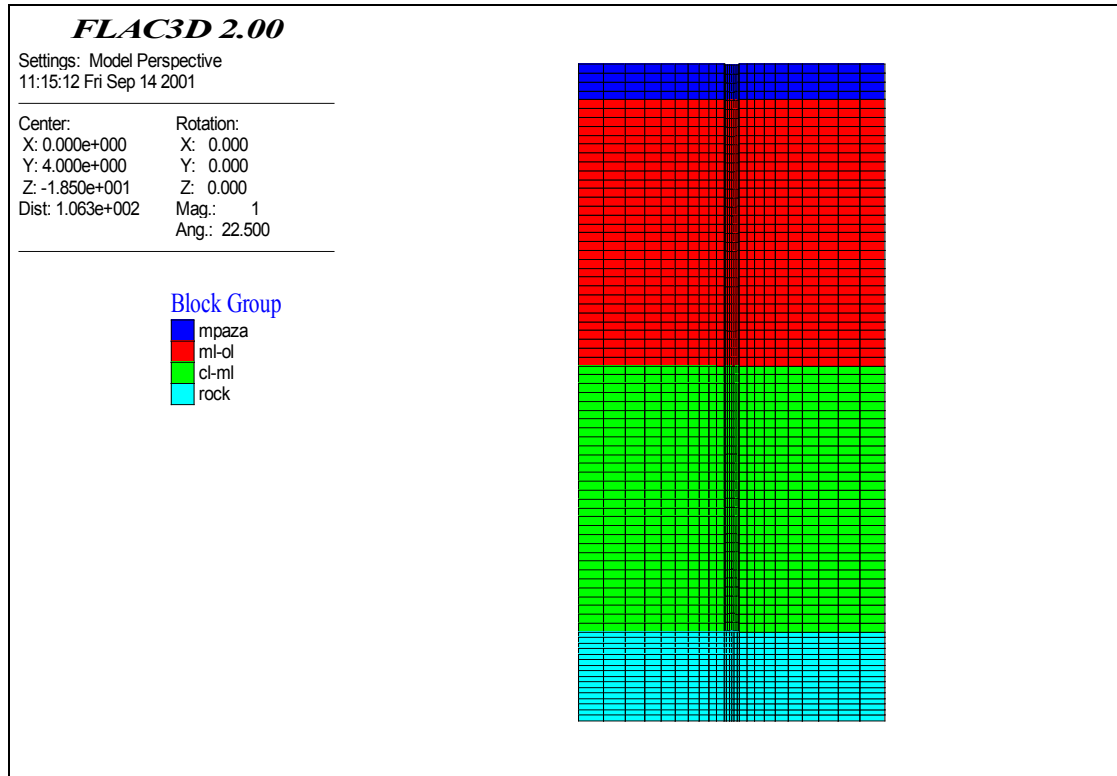
Στο επόμενο στάδιο ανάλυσης το προσομοίωμα έρχεται σε ισορροπία μετά την τοποθέτηση του πασσάλου. Η εισαγωγή του τελευταίου προσομοιάζεται με την αλλαγή των ιδιοτήτων της ζώνης (η οποία αντιπροσώπευε έδαφος) με τις ιδιότητες του πασσάλου από σκυρόδεμα. Για τον πάσσαλο θεωρείται ότι η συμπεριφορά του είναι ελαστική και όχι πλαστική, διότι τα φορτία τα οποία εφαρμόστηκαν ήταν μικρότερα από το φορτίο “θραύσεως” του κορμού του καθώς το μέτρο ελαστικότητας του πασσάλου σε σχέση με εκείνα του περιβάλλοντος εδάφους είναι πολύ μεγαλύτερο.



Σχήμα 5.3 Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων στο σύστημα εδάφους-πασσάλου



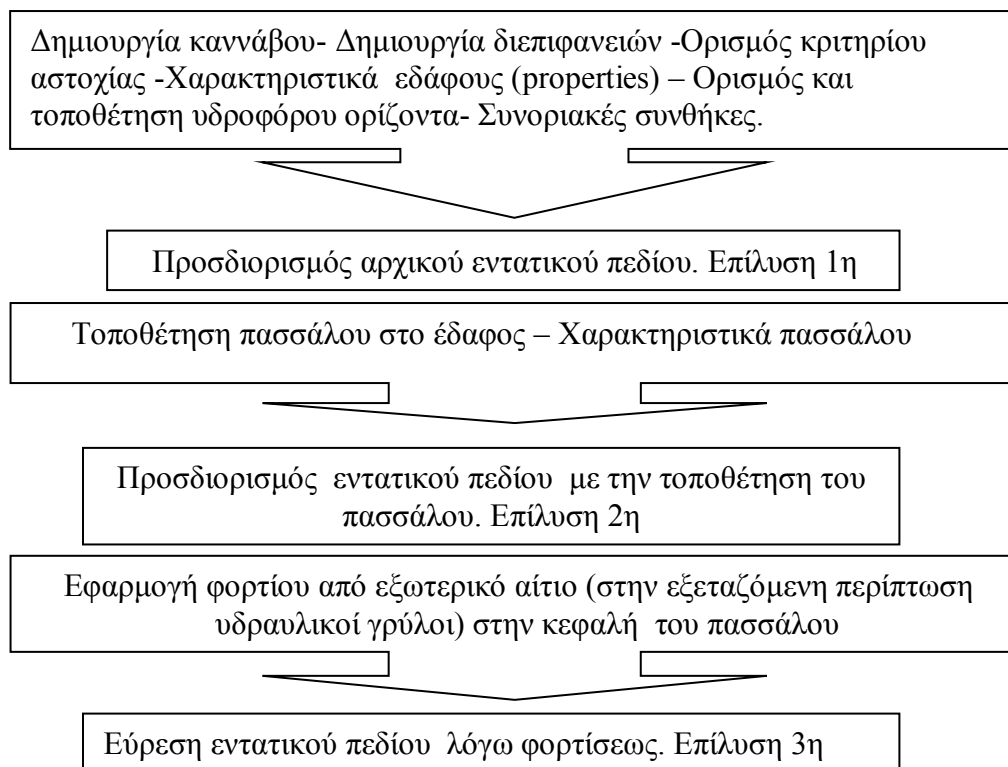
Σχήμα 5.4 Κατακόρυφες γεωστατικές τάσεις, szz, στο αρχικό εντατικό πεδίο



Σχήμα 5.5 Απεικόνιση των εδαφικών ζωνών και του πασσάλου

Τέλος, η επίλυση επαναλαμβάνεται με την διαφορά ότι το φορτίο που ασκείται στον πάσσαλο είναι πλέον το φορτίο που ασκήθηκε κατά την δοκιμαστική φόρτίσή του, διαδικασία η οποία προσομοιάζεται με την εφαρμογή αξονικής πίεσης (τάσης) στην κεφαλή του πασσάλου.

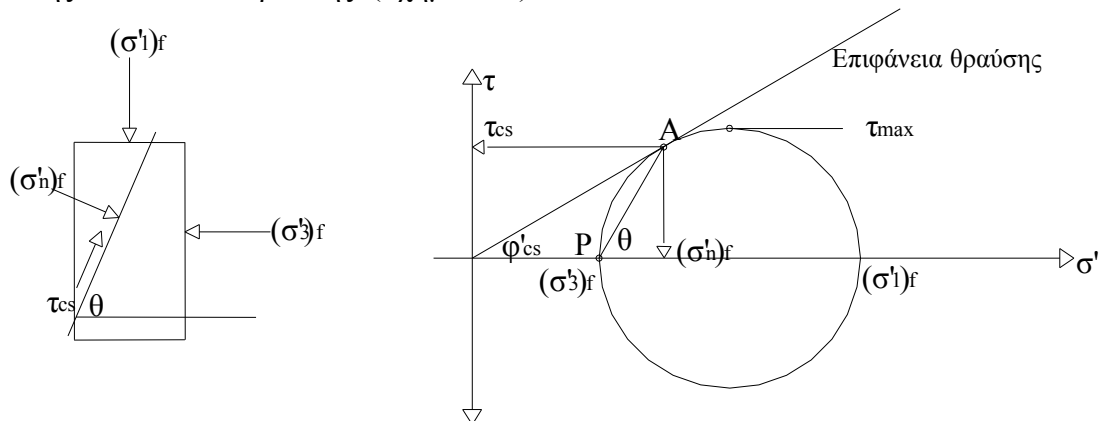
Η δομή του προσομοιώματος δίδεται σχηματικά στο ακόλουθο σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6 Δομή προσομοιώματος και στάδια επίλυσεων

Ο καταστατικός νόμος συμπεριφοράς και οι ιδιότητες των υλικών υπαγορεύουν το είδος της απόκρισης του προσομοιώματος σε κάποια εξαίτηση (π.χ φόρτιση). Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες μη-γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών είναι το καθεστώς των τάσεων. Το τελευταίο καθορίζει την θραύση του εδαφικού μέσου και δεν μπορεί να προσδιορισθεί με χρήση κριτηρίων όπως η αντοχή σε θλίψη και ελκυσμό. Αντιθέτως, η πραγματικότητα των τριών διαστάσεων, όπου ελλοχεύει η παρουσία τάσεων ελκυσμού, σύνθλιψης και διάτμησης, επιβάλλει την χρήση σύνθετων κριτηρίων, τα οποία λαμβάνουν υπόψιν τους το τρισδιάστατο καθεστώς των τάσεων.

Το κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε στις επιλύσεις είναι το κριτήριο Mohr-Coulomb, το οποίο βασίζεται στον θεμελιώδη νόμο τριβής του Coulomb. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό η διατμητική αντοχή αυξάνει αυξανόμενης της ορθής τάσης στο επίπεδο θραύσης (σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6 Απεικόνιση του κριτηρίου τριβής Mohr-Coulomb στο επίπεδο ορθής τάσης και διατμητικής αντοχής

Μαθηματικώς το κριτήριο εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση

$$\tau = c + \tan \varphi$$

από την οποία προκύπτει η σχέση :

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi$$

Πλεονέκτημα του κριτηρίου Mohr-Coulomb αποτελεί η αποδεδειγμένη ισχύς του για πολλές κατηγορίες εδαφών.

Οι παράμετροι που απαιτούνται για την χρήση του παραπάνω κριτηρίου αστοχίας είναι οι ακόλουθες :

- K : μέτρο διόγκωσης
- G : μέτρο διάτμησης
- c : συνοχή
- φ : γωνία εσωτερικής τριβής
- ψ : γωνία διαστολής
- σ^t : οριακή τάση εφελκυσμού

6. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

6.1 Παραδοχές

Στόχος των παραμετρικών αναλύσεων ήταν να επιτευχθεί σύμπτωση μετρούμενων και υπολογιζόμενων μεγεθών (πλευρικής τριβής, αξονικής δύναμης, μετακίνησης στην κεφαλή και κατά μήκος του πασσάλου).

Πραγματοποιήθηκε σειρά παραμετρικών αναλύσεων για την διερεύνηση της απόκρισης του πασσάλου υπό εναλλακτικές εδαφικές συνθήκες. Η διάκριση των παραμετρικών αναλύσεων εστιάζεται στην διαφοροποίηση του μέτρου ελαστικότητας και της συνοχής των εδαφικών στρώσεων υπό αστράγγιστες συνθήκες. Ουσιώδη ρόλο στην ανάλυση έχει η συνοχή των εδαφικών στρώσεων αλλά και η τριβή στην διεπιφάνεια του πασσάλου-εδάφους. Ο λόγος που επιλέχθηκαν οι παράμετροι αυτές έγκειται στο γεγονός ότι ο πάσσαλος λειτουργεί κατ'ουσίαν ως "πάσσαλος τριβής", μεταφέρει δηλαδή το ασκούμενο φορτίο στο περιβάλλον έδαφος μέσω της πλευρικής αντίστασης που αναπτύσσεται μεταξύ εδάφους-πασσάλου. Η διαπίστωση αυτή στηρίχθηκε στην επεξεργασία των δεδομένων του μεταθετού παραμορφωσιμέτρου, από το οποίο προέκυψε, ως ελεγχθη προηγουμένως, ότι η πλευρική δύναμη που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου αποτελεί ποσοστό 80-85% του ασκούμενου φορτίου, ώστε μόνον το 15-20% του φορτίου αυτού να μεταφέρεται στην βάση του πασσάλου για να παραληφθεί από την αντίσταση αιχμής.

Μια δεύτερη παραδοχή επιβάλλει το μέτρο ελαστικότητας να μη μεταβάλλεται αναλόγως του φορτίου, γεγονός το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερες καθιζήσεις από τις "πραγματικές" σε μικρότερες στάθμες φορτίου (σε σχέση πάντοτε με το οριακό φορτίο). Οφείλεται τούτο στο ότι το πραγματικό μέτρο ελαστικότητας είναι μεγαλύτερο από εκείνο που χρησιμοποιείται στις επίλυσεις του κώδικα FLAC^{3D}. Για να επιτευχθεί η μεταβολή αυτή του μέτρου ελαστικότητας απαιτούνται ειδικές υπορουτίνες και χρήση των ειδικών εντολών FISH για εξωτερικό προγραμματισμό του κώδικα FLAC^{3D}, με αποτέλεσμα ο υπολογιστικός χρόνος και το υπολογιστικό κόστος για κάθε επίλυση να είναι πολύ μεγάλα: η οδός αυτής της αντιμετώπισης του προβλήματος ξεφεύγει λοιπόν από τα όρια της παρούσας εργασίας.

6.2 Αποτελέσματα των αριθμητικών Αναλύσεων

Πραγματοποιήθηκαν οι κατωτέρω επτά παραμετρικές αναλύσεις οι οποίες περιλαμβάνουν τρία στάδια επίλυσης η καθεμία, στάδια τα οποία περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Κατά την παραμετρική ανάλυση Α υιοθετούνται οι αναφερόμενες τιμές που παρατίθενται στον πίνακα 6.1 και είναι οι προτεινόμενες τιμές σχεδιασμού στην γεωτεχνική μελέτη του έργου (ΥΔΡΟΕΡΕΥΝΑ Α.Ε).

Πίνακας 6.1 Παράμετροι εδαφικών στρώσεων κατά την Παραμετρική Ανάλυση Α							
Στρώση	Συνοχή c (kPa)	φ (°)	E (MPa)	ν	K (MPa)	G (MPa)	γ (KN/m ³)
Τεχνητές επιχωματώσεις	0	25	12	0.30	10.0	4.7	21
Τεφρή μαλακή Ιλύς	40	2	5	0.40	8.3	1.8	19
Μαλακή Αργιλοίλος	25	6	7	0.40	11.7	2.7	18
Ιλυώδεις Χάλικες με Άμμο	0	35	100	0.30	83.3	38.5	20

όπου E: το μέτρο Ελαστικότητας

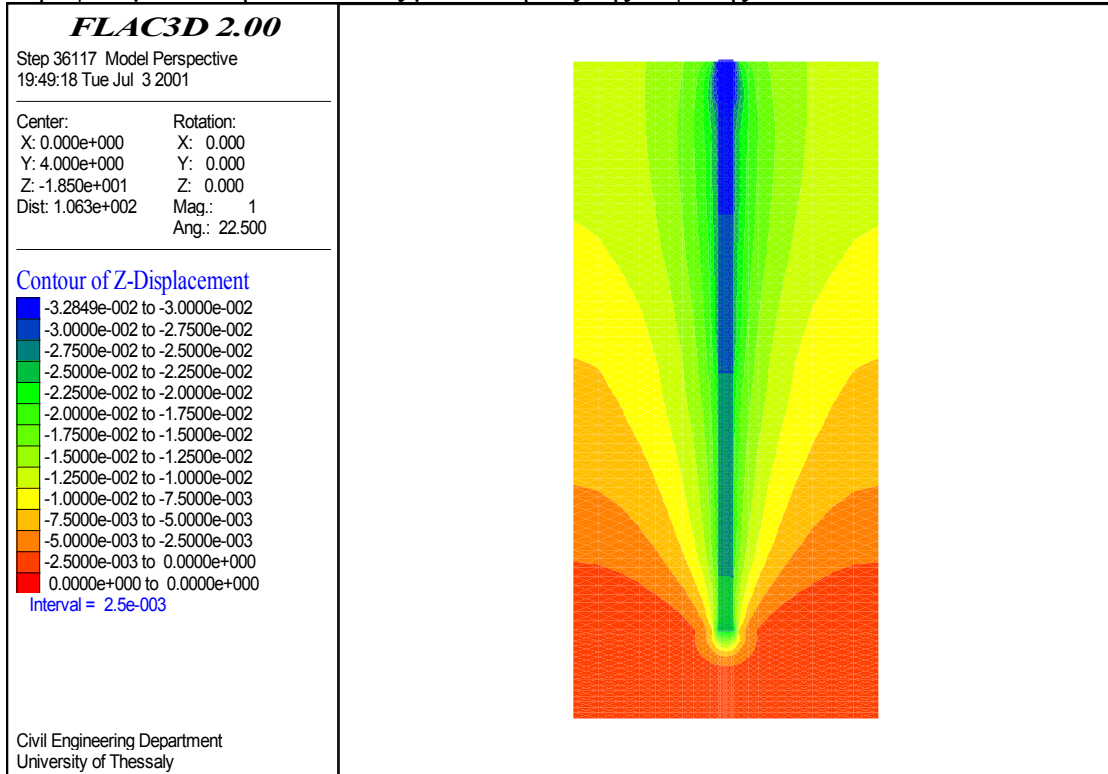
K: το μέτρο Διόγκωσης

G: το μέτρο Διάτμησης
 ν : ο λόγος Poisson

Το μέτρο διόγκωσης K και το μέτρο διάτμησης G δίδονται από τις σχέσεις

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \text{ και } G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Τα αποτελέσματα των επιλύσεων κατά το τελευταίο στάδιο, το στάδιο φόρτισης του πασσάλου, απεικονίζονται στο σχήμα 6.1 ως ισοτιμές των κατά-κόρυφων μετακινήσεων και ως μετακινήσεις της κεφαλής του πασσάλου.



Σχήμα 6.1 Ισοτιμές κατακόρυφων μετακινήσεων και μετακίνηση κεφαλής στο στάδιο φόρτισης

Για τις υπόλοιπες παραμετρικές αναλύσεις οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 6.2 Παράμετροι εδαφικών στρώσεων κατά την Παραμετρική Ανάλυση Β

Στρώση	c (kPa)	φ (°)	E (MPa)	ν	K (MPa)	G (MPa)	γ (KN/m ³)
Τεχνητές επιχωματώσεις	15	25	12	0.30	10.0	7.0	21
Τεφρή μαλακή Ιλύς	40	6	5	0.42	10.4	1.8	19
Μαλακή Αργιλοίλυσ	25	6	7	0.42	14.5	2.7	18
Ιλυώδεις Χάλικες με Άμμο	0	35	75	0.30	62.5	28.8	20

Πίνακας 6.3 Παράμετροι εδαφικών στρώσεων κατά την Παραμετρική Ανάλυση Γ

Στρώση	c (kPa)	φ (°)	E (MPa)	ν	K (MPa)	G (MPa)	γ (KN/m ³)
Τεχνητές επιχωματώσεις	15	25	18	0.30	15.0	7.0	21
Τεφρή μαλακή Ιλύς	33	5	5	0.42	10.4	1.8	19
Μαλακή Αργιλοίλυσ	40	5	7	0.42	14.5	2.7	18
Ιλυώδεις Χάλικες με Άμμο	0	35	100	0.30	83.3	38.5	20

Πίνακας 6.4 Παράμετροι εδαφικών στρώσεων κατά την Παραμετρική Ανάλυση Δ

Στρώση	c (kPa)	φ (°)	E (MPa)	ν	K (MPa)	G (MPa)	γ (KN/m ³)
Τεχνητές επιχωματώσεις	15	25	18	0.30	15.0	7.0	21
Τεφρή μαλακή Ιλύς	40	6	5	0.40	8.3	1.8	19
Μαλακή Αργιλοίλος	40	6	7	0.40	11.7	2.7	18
Ιλυώδεις Χάλικες με Άμμο	0	35	100	0.30	83.3	38.5	20

Πίνακας 6.5 Παράμετροι εδαφικών στρώσεων κατά την Παραμετρική Ανάλυση Ε

Στρώση	c (kPa)	φ (°)	E (MPa)	ν	K (MPa)	G (MPa)	γ (KN/m ³)
Τεχνητές επιχωματώσεις	15	25	18	0.30	15.0	7.0	21
Τεφρή μαλακή Ιλύς	33	0	5	0.40	8.3	1.8	19
Μαλακή Αργιλοίλος	40	0	7	0.40	11.7	2.7	18
Ιλυώδεις Χάλικες με Άμμο	0	35	100	0.30	83.3	38.5	20

Πίνακας 6.6 Παράμετροι εδαφικών στρώσεων κατά την Παραμετρική Ανάλυση ΣΤ

Στρώση	c (kPa)	φ (°)	E (MPa)	ν	K (MPa)	G (MPa)	γ (KN/m ³)
Τεχνητές επιχωματώσεις	15	25	18	0.3	15.0	7.0	21
Τεφρή μαλακή Ιλύς	40	6	10	0.4	16.7	3.7	19
Μαλακή Αργιλοίλος	25	6	10	0.4	16.7	3.7	18
Ιλυώδεις Χάλικες με Άμμο	0	35	100	0.3	83.3	38.5	20

Πίνακας 6.7 Παράμετροι εδαφικών στρώσεων κατά την Παραμετρική Ανάλυση Η

Στρώση	c (kPa)	φ (°)	E (MPa)	ν	K (MPa)	G (MPa)	γ (KN/m ³)
Τεχνητές επιχωματώσεις	0	25	10	0.30	8.3	3.7	21
Τεφρή μαλακή Ιλύς	40	2	5	0.45	16.67	1.7	19
Μαλακή Αργιλοίλος	25	6	7	0.45	23.3	2.4	18
Ιλυώδεις Χάλικες με Άμμο	0	35	100	0.30	83.3	38.5	20

Από τις ως άνω επιλύσεις επαληθεύεται η αρχική υπόθεση, σύμφωνα με την οποία το έδαφος είναι πιο δύσκαμπτο σε φορτία μικρότερα από το φορτίο διαρροής. Το γεγονός αυτό διαφαίνεται και από τα αποτελέσματα των αναλύσεων όπου διακρίνεται διαφορά 3-6mm στην μετρούμενη μετακίνηση της κεφαλής υπό φορτία 3200kN και 2720kN.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει εμμέσως από τις ως άνω αναλύσεις είναι ότι η στρώση των τεχνητών επιχωματώσεων έχει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά του συστήματος. Με άλλα λόγια, η ζώνη αυτή είναι αρκετά συμπυκνωμένη εξ αρχής ώστε να έχει υψηλή ακαμψία και συνοχή. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις επί τόπου δοκιμές (SPT και CPT) που εκτελέστηκαν, όπου δεν παρουσιάστηκε κάποια τέτοια ένδειξη. Οι τιμές αυτές των παραμέτρων αποδεικνύεται ότι είναι ρεαλιστικές, εφ'όσον οι διαφορές στην τιμή της υπολογιζόμενης πλευρικής τριβής με την μετρούμενη είναι μόλις της τάξεως του 2-4%.

Από την επί τόπου γεωτεχνική διασκόπηση και τις εργαστηριακές δοκιμές που εκτελέστηκαν σε δοκίμια προέκυψε τιμή της συνοχής στην τάξη των 25kPa και 35kPa στις στρώσεις 2, 3 αντιστοίχως. Από τις αριθμητικές όμως επιλύσεις, αλλά και από την επεξεργασία των μετρήσεων της δοκιμαστικής φόρτισης προέκυψε συνοχή μεγαλύτερη κατά 15-35%.

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, σκοπός των αναλύσεων ήταν η συμπίεση της υπολογιζόμενης πλευρικής τριβής και της μετακίνησης στην κεφαλή του πασσάλου με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές. Από τις παραμετρικές αναλύσεις παρατηρήθηκε απόκλιση 5-12% στην τιμή της πλευρικής τριβής

για το σύνολο των επιλύσεων. Για την μετακίνηση του πασσάλου, ιδιαίτερα στην στάθμη του οριακού φορτίου, καταγράφηκε απόκλιση που κυμαίνεται από 5% έως 30% · το τελευταίο ποσοστό, που αποτελεί και την μέγιστη απόκλιση στις αναλύσεις, προκύπτει από την επίλυση με τις παραμέτρους σχεδιασμού που προτείνονται από την γεωτεχνική διασκόπηση.

Οι μετακινήσεις που προκύπτουν λόγω του οριακού φορτίου κυμαίνονται μεταξύ 19 και 32mm. Σημειώνεται εδώ ότι η μετακίνηση της κεφαλής του πασσάλου είναι το άθροισμα της βράχυνσης που υφίσταται ο πάσσαλος και της καθίζησής του. Εφαρμόζοντας θεμελιώδεις σχέσεις της θεωρίας της ελαστικότητας προκύπτει ότι η βράχυνση του πασσάλου για φορτίο 4,080 kN είναι περίπου 10mm· στην πραγματικότητα αναμένεται να είναι μικρότερη διότι κατά την ελαστική θεώρηση το φορτίο ασκείται σε όλο το μήκος του πασσάλου, ενώ κατά τεκμήριο το φορτίο μειώνεται κατά το μήκος του πασσάλου. Η αξονική μετακίνηση των 32mm προκύπτει από την παραμετρική ανάλυση στην οποία χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που προτείνονται στην γεωτεχνική μελέτη του έργου. Εν συνεχεία παρατίθεται ο πίνακας 6.8, ο οποίος καταγράφει την υπολογιζόμενη και την μετρούμενη μετακίνηση της κεφαλής του πασσάλου σε κάθε φάση ανάλυσης για φορτίο 4,080kN, 3,400kN και 2,720kN.

Φορτίο	Μετρούμενες μετακινήσεις πασσάλου	Μετακινήσεις κεφαλής πασσάλου Ανάλυση						
		A	B	Γ	Δ	E	ΣΤ	H
2,720kN	12.21	20.02	17.82	15.47	13.72	15.88	14.02	16.90
3,400kN	13.58	23.81	22.51	18.26	17.42	21.81	17.95	20.17
4,080kN	22.43	32.85	26.05	23.53	19.32	29.59	21.77	24.45

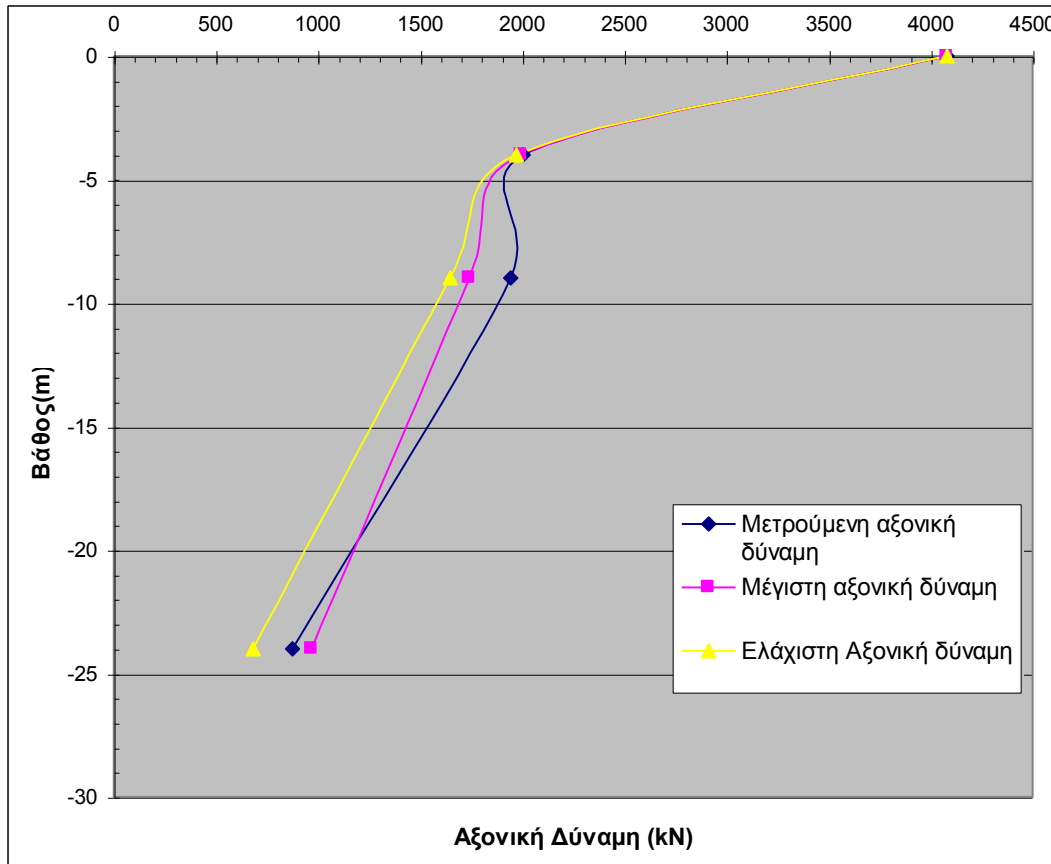
Η υπολογισθείσα πλευρική τριβή του πασσάλου συγκρίθηκε με την πλευρική τριβή που προκύπτει από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του μεταθετού παραμορφωσιμέτρου, ως η διαφορά του ασκούμενου φορτίου μειωμένου κατά την αξονική δύναμη του πασσάλου (σε διάφορες στάθμες φορτίου). Παρατηρήθηκαν οι ακόλουθες αποκλίσεις :

1. Στην στάθμη των 4m η υπολογιζόμενη πλευρική τριβή έχει απόκλιση της τάξεως του 0.2-5% από την μετρούμενη τιμή της.
2. Στην στάθμη των 9m η πλευρική τριβή έχει απόκλιση 10-17% από την μετρούμενη τιμή της.
3. Στην στάθμη των 24m η απόκλιση της πλευρικής τριβής ποικίλει.

Είναι αναμενόμενο ότι η απόκλιση διαφοροποιείται αναλόγως του είδους της παραμετρικής ανάλυσης και του εξεταζόμενου φορτίου. Στον ακόλουθο πίνακα 6.9 φαίνονται οι τιμές στις οποίες κυμαίνονται η υπολογιζόμενη και η μετρούμενη αξονική δύναμη.

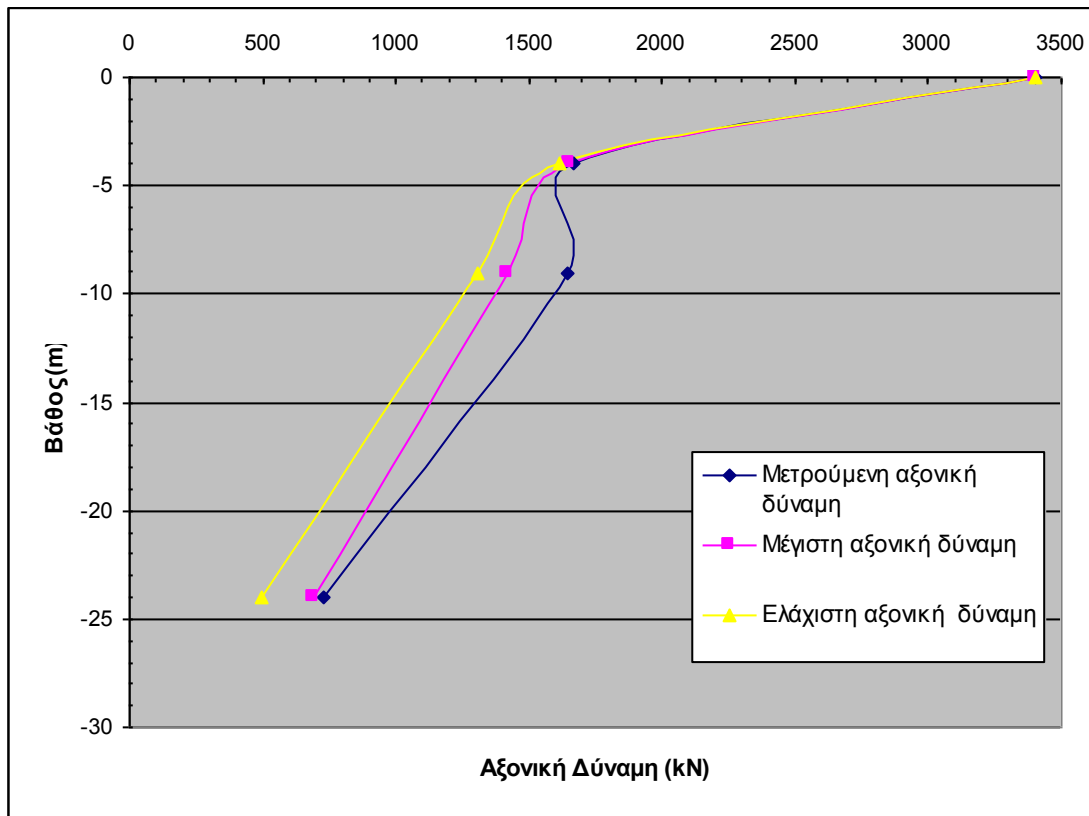
Βάθος	Υπολογιζόμενη Αξονική δύναμη			Μετρούμενη Αξονική δύναμη		
	Φορτίο 2720kN	Φορτίο 3400kN	Φορτίο 4080kN	Φορτίο 2720kN	Φορτίο 3400kN	Φορτίο 4080kN
4m	1261-1345	1614-1649	1972-1994	1341	1667	2006
9m	1016-1169	1305-1422	1648-1742	1317	1643	1945
24m	306-506	498-690	683-970	556	725	870

Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζονται για το φορτίο 4,080 kN η μέγιστη και η ελάχιστη υπολογιζόμενη αξονική δύναμη, καθώς και η μετρούμενη αξονική δύναμη συναρτήσει του βάθους.

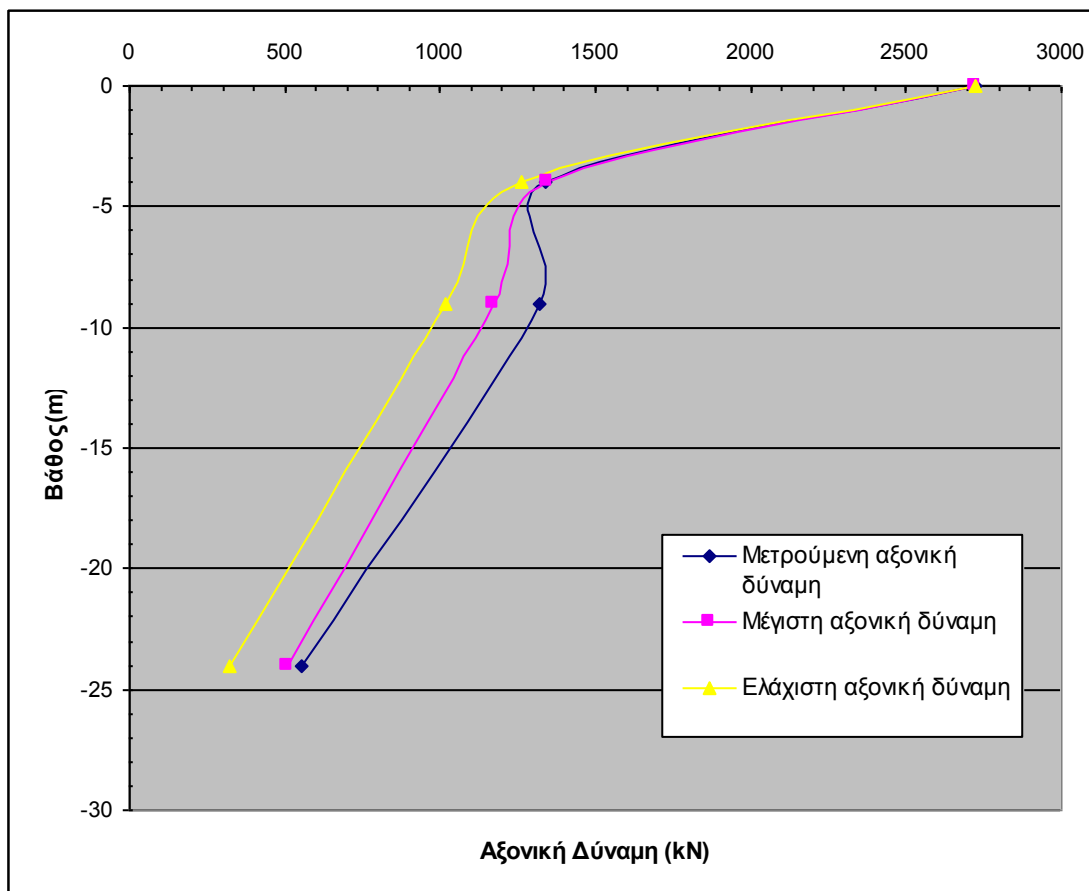


Σχήμα 6.2 Κατανομή της αξονικής δύναμης κατά το βάθος για φορτίο 4,080 kN

Ομοίως, στις στάθμες φορτίου των 3,400 και 2,720 kN παρουσιάζονται οι αντίστοιχες κατανομές αξονικής δύναμης στα σχήματα 6.3 και 6.4. Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως παρατηρείται ότι στα βαθύτερα εδαφικά στρώματα η τιμή της αξονικής δύναμης διαφοροποιείται από την “πραγματική”, γεγονός που αποδίδεται στις εδαφικές παραμέτρους που έχουν υιοθετηθεί στο FLAC^{3D} (κυρίως η συνοχή c και η γωνία διατμητικής αντοχής ϕ). Βεβαίως, κατάλληλη αλλαγή των παραμέτρων αυτών θα μπορούσε να οδηγήσει σε μικρότερες αποκλίσεις τιμών της αξονικής δύναμης και της πλευρικής τριβής, θα προέκυπταν όμως αντιστοίχως σημαντικές αποκλίσεις στην καθίζηση του πασσάλου. Για πιστότερα αποτελέσματα θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ο εξωτερικός προγραμματισμός του FLAC^{3D} που αφορά στην μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας και οποίος, ως ελέγχθη, ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 6.3 Κατανομή της αξονικής δύναμης κατά το βάθος για φορτίο 3,400 kN



Σχήμα 6.4 Κατανομή της αξονικής δύναμης κατά το βάθος για φορτίο 2,720 kN

Η μεταβολή του λόγου Poisson παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία του προσομοιώματος διότι επηρεάζει έμμεσα τόσο την τιμή του μέτρου διόγκωσης όσο και εκείνη του μέτρου διάτμησης. Μεταβολή της τιμής του λόγου έστω κατά 0.5 επιφέρει σημαντική μεταβολή της καθίζησης του πασσάλου προς την πλευρά της μετρούμενης καθίζησης.

Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την κατανομή της πλευρικής τριβής και της αντίστασης αιχμής είναι η ακαμψία της στρώσης έδρασης. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας, τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη που φέρει η αιχμή του πασσάλου, επιπλέον δε, τόσο μικρότερη είναι η συνολική καθίζηση του πασσάλου. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στις επιλύσεις ήταν 75 και 100MPa και, σε συνάρτηση με τις αλλαγές που υιοθετήθηκαν στις υπόλοιπες παραμέτρους, προέκυψε η πλέον αξιόπιστη κατανομή των δυνάμεων με κριτήριο πάντοτε την καθίζηση του πασσάλου.

Έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο ο ουσιώδης ρόλος των διεπιφανειών και πόσο σημαντική είναι η χρήση τους. Κατάλληλη επιλογή των τιμών των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν μία διεπιφάνεια μπορούν να οδηγήσουν σε ένα διαφορετικό κινηματικό μηχανισμό από εκείνο που παρουσιάζεται στην πραγματικότητα. Μικρή τιμή της διατμητικής και της ορθής ακαμψίας έχει ως αποτέλεσμα ο πάσσαλος να ολισθαίνει επάνω στην διεπιφάνεια χωρίς να αναπτύσσεται πλευρική τριβή. Η επιλογή των τιμών των παραμέτρων στις επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έγινε με το σκεπτικό ότι η γύρω από τον πάσσαλο περιοχή ήταν διαταραγμένη σε μία ζώνη πάχους 10cm και ότι ο πάσσαλος χαρακτηρίζεται από σημαντική πλευρική τριβή, άρα και υψηλή τιμή ακαμψίας. Οι προτεινόμενες από το FLAC^{3D} σχετικές τιμές είναι για την διατμητική και ορθή ακαμψία μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την ακαμψία του υλικού του πασσάλου, ενώ για την συνοχή η μέγιστη τιμή της είναι ίση με την συνοχή του εδαφικού υλικού.

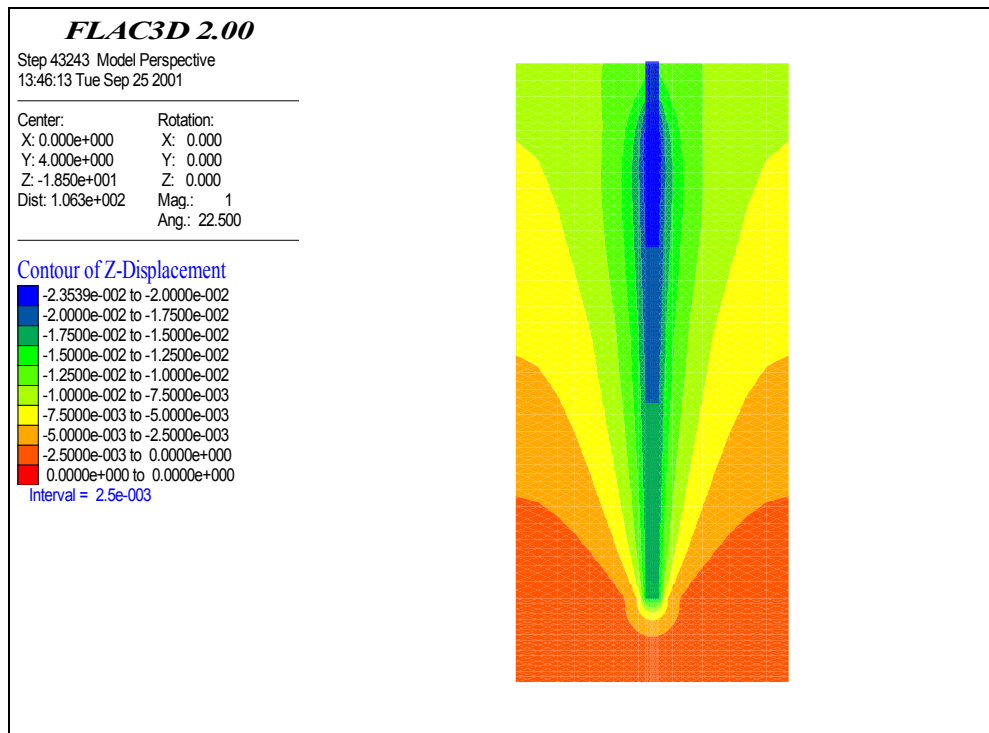
Από τις παραμετρικές αναλύσεις που υλοποιήθηκαν εκείνη που “πλησίασε” τα μέγιστα τις μετρήσεις της δοκιμαστικής φόρτισης είναι η ανάλυση Γ και η Δ, όπου οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στους προηγούμενους πίνακες 6.3 και 6.4. Οι δύο αυτές αναλύσεις έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα όσον αφορά την κατακόρυφη μετακίνηση και την αξονική δύναμη. Επιλέγεται ως καλύτερη η ανάλυση Γ διότι η συμπεριφορά του προσομοιώματος ως προς την αξονική δύναμη κατά το βάθος είναι καλύτερη αν και οι μετακινήσεις που προκύπτουν έχουν απόκλιση 15% από της ανάλυσης Δ.

Φορτίο	Μετρούμενη μετακίνηση πασσάλου (mm)	Ανάλυση Γ	Ανάλυση Δ
2,720kN	12.21	15.47	13.72
3,400kN	13.58	18.26	17.42
4,080kN	22.43	23.53	19.32

Βάθος	Μετρούμενη Αξονική δύναμη			Ανάλυση Γ			Ανάλυση Δ		
	Φορτίο (kN)			Φορτίο (kN)			Φορτίο (kN)		
	2,720	3,400	4,080	2,720	3,400	4,080	2,720	3,400	4,080
4m	1341	1667	2006	1276	1636	1994	1275	1614	1974
9m	1317	1643	1945	1063	1390	1719	1024	1305	1648
27m	556	725	870	434	661	887	325	524	700

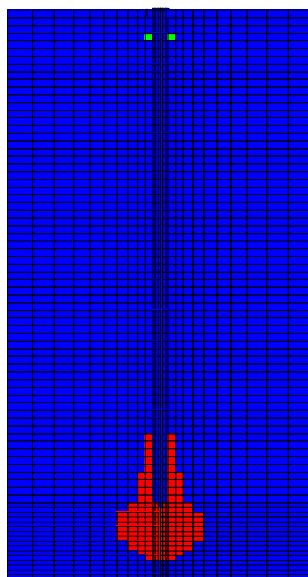
Με τις παραμέτρους αυτές το προσομοίωμα απεικονίζει αρκετά ικανοποιητικά την συμπεριφορά του συστήματος στην στάθμη φόρτισης των 4,080 kN αλλά και στις μικρότερες στάθμες φορτίων. Η αξονική μετακίνηση του πασσάλου

δίδεται στο ακόλουθο σχήμα 6.5 και παρουσιάζεται στο σχήμα 6.7 η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων.

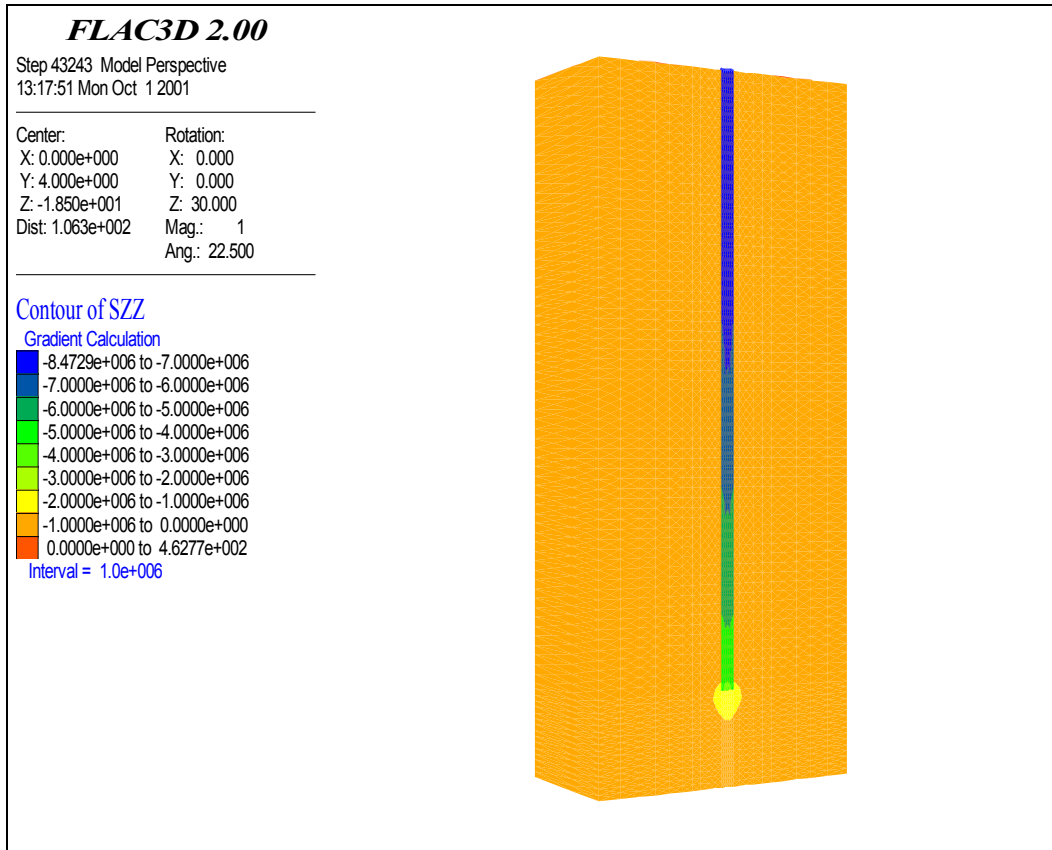


Σχήμα 6.5 Ισοτιμές κατακόρυφων μετακινήσεων και μετακίνηση κεφαλής στο στάθμη φορτίου των 4080 kN

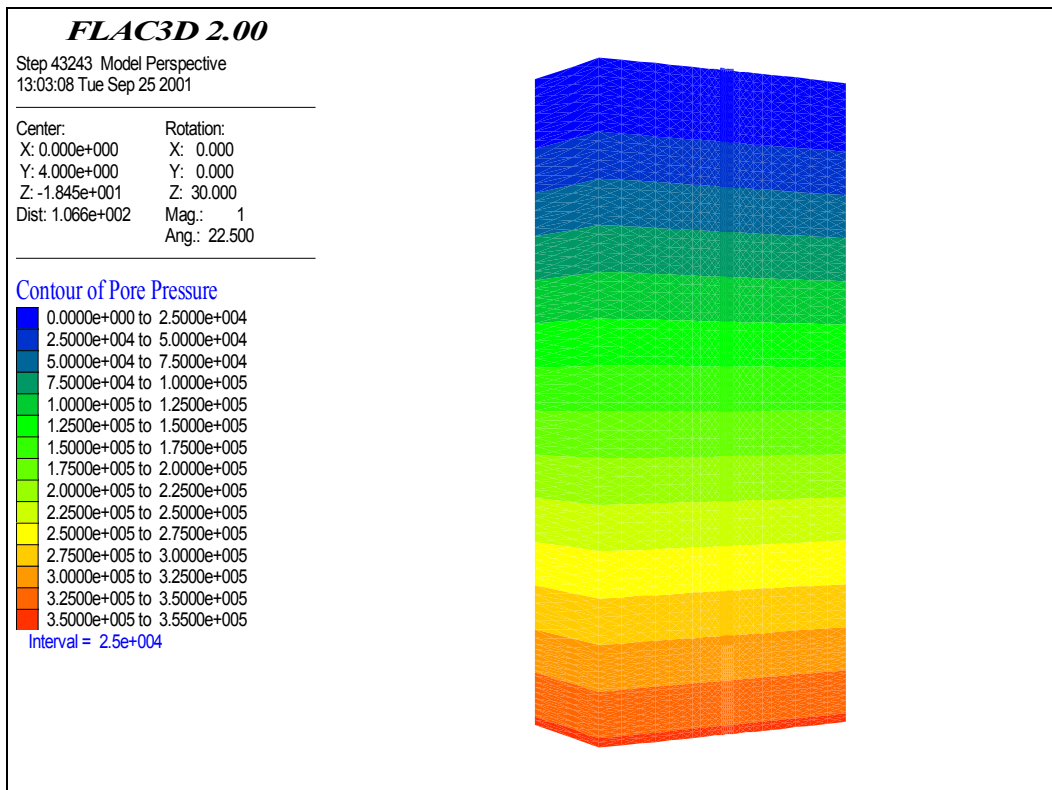
Παρατηρείται ότι η καθίζηση του πασσάλου μειώνεται με το βάθος, σε απόσταση δε ίση με 2.5D από την αιχμή του πασσάλου έχει αυτή μηδενισθεί · το συμπέρασμα αυτό είναι σύμφωνο με την διεθνή εμπειρία. Επίσης, ο μηχανισμός αστοχίας του περιβάλλοντος εδάφους είναι παρόμοιος με αυτόν που έχει περιγραφεί από τον Meyerhof (1951). Η επιφάνεια αστοχίας δεν εξικνύεται στο επίπεδο της αιχμής του πασσάλου, σύμφωνα με τον μηχανισμό αστοχίας Terzaghi, αλλά επεκτείνεται στις υπομετρικά ανώτερες στάθμες. Στο ακόλουθο σχήμα 6.6 με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εδαφικές ζώνες που έχουν πλαστικοποιηθεί παρατηρείται ότι η γεωμετρία της ζώνης ακολουθεί την παραδοχή του μηχανισμού αστοχίας του Meyerhof.



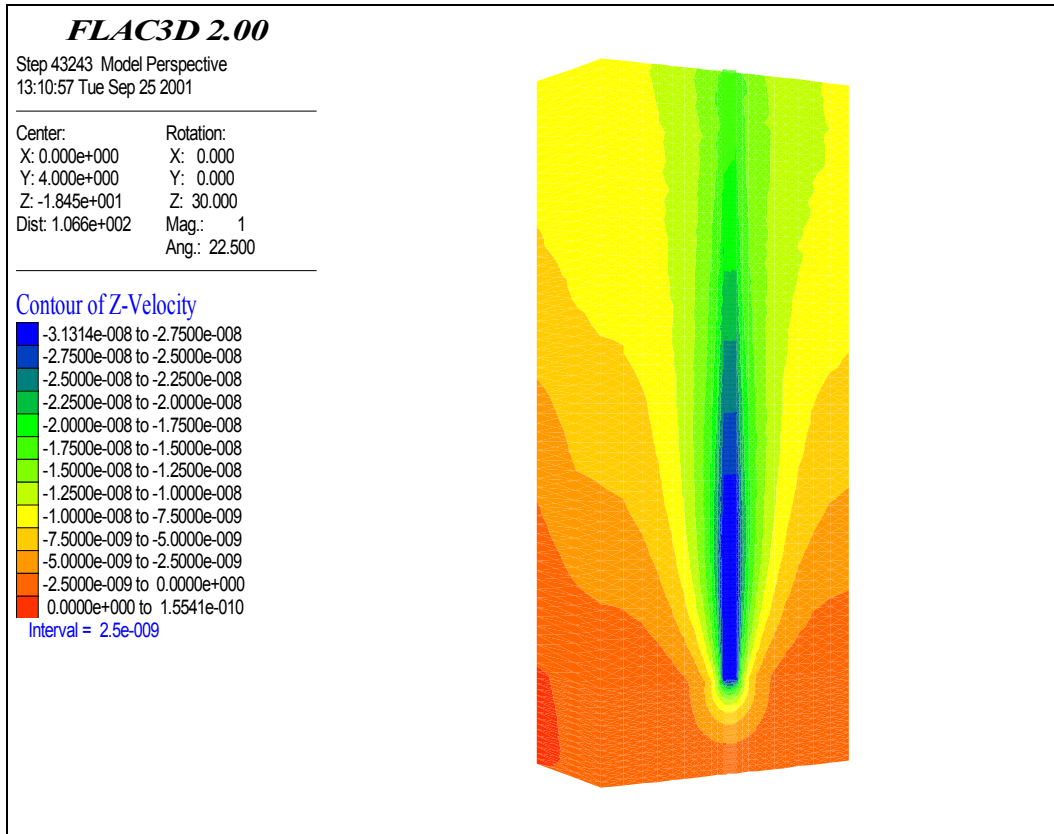
Σχήμα 6.6 Ζώνες πλαστικοποίησης κατά την φόρτιση του πασσάλου με φορτίο τριπλάσιο του επιτρεπόμενου



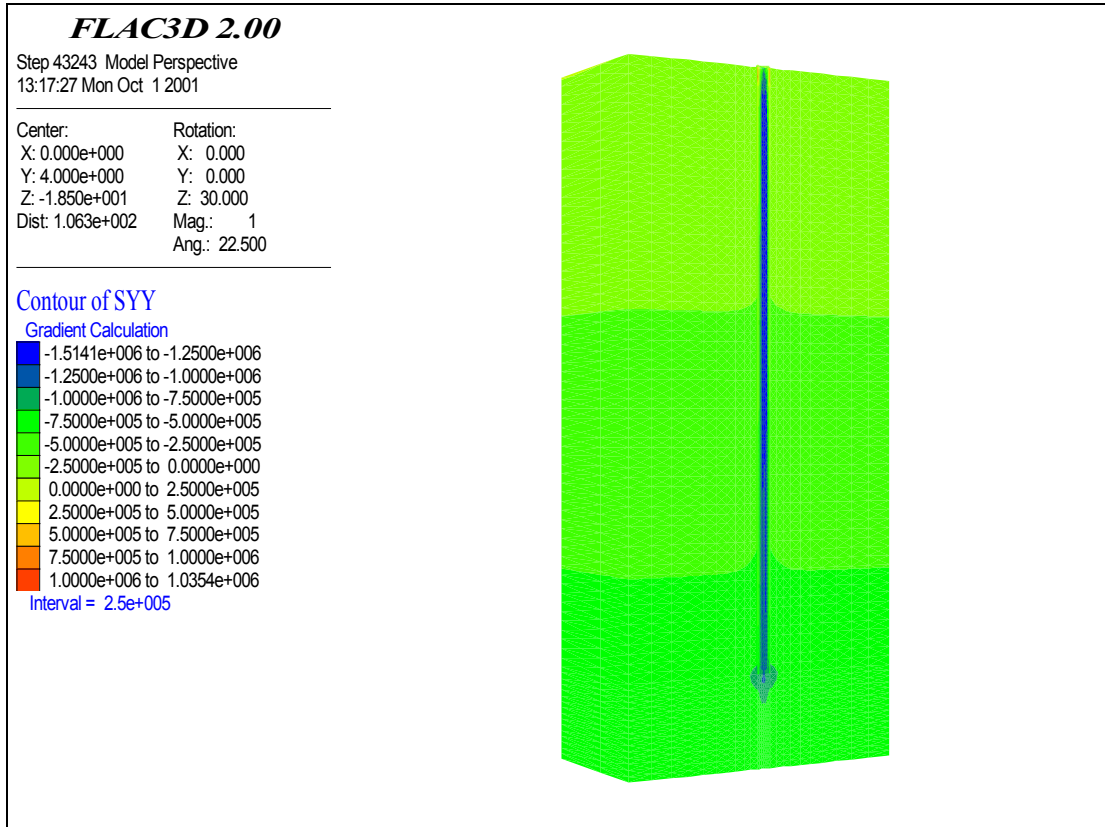
Σχήμα 6.7 Κατακόρυφες τάσεις, szz, στο τελικό εντατικό πεδίο μετά την φόρτιση



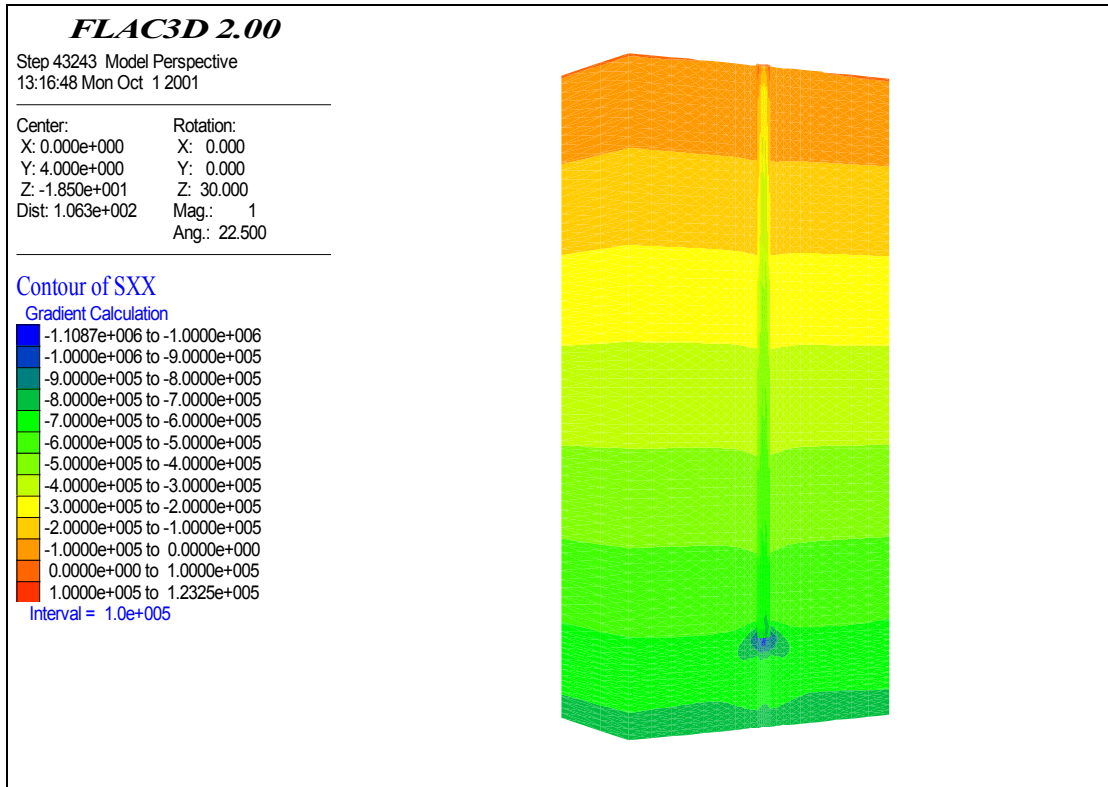
Σχήμα 6.8 Κατανομή της πίεσης πόρων



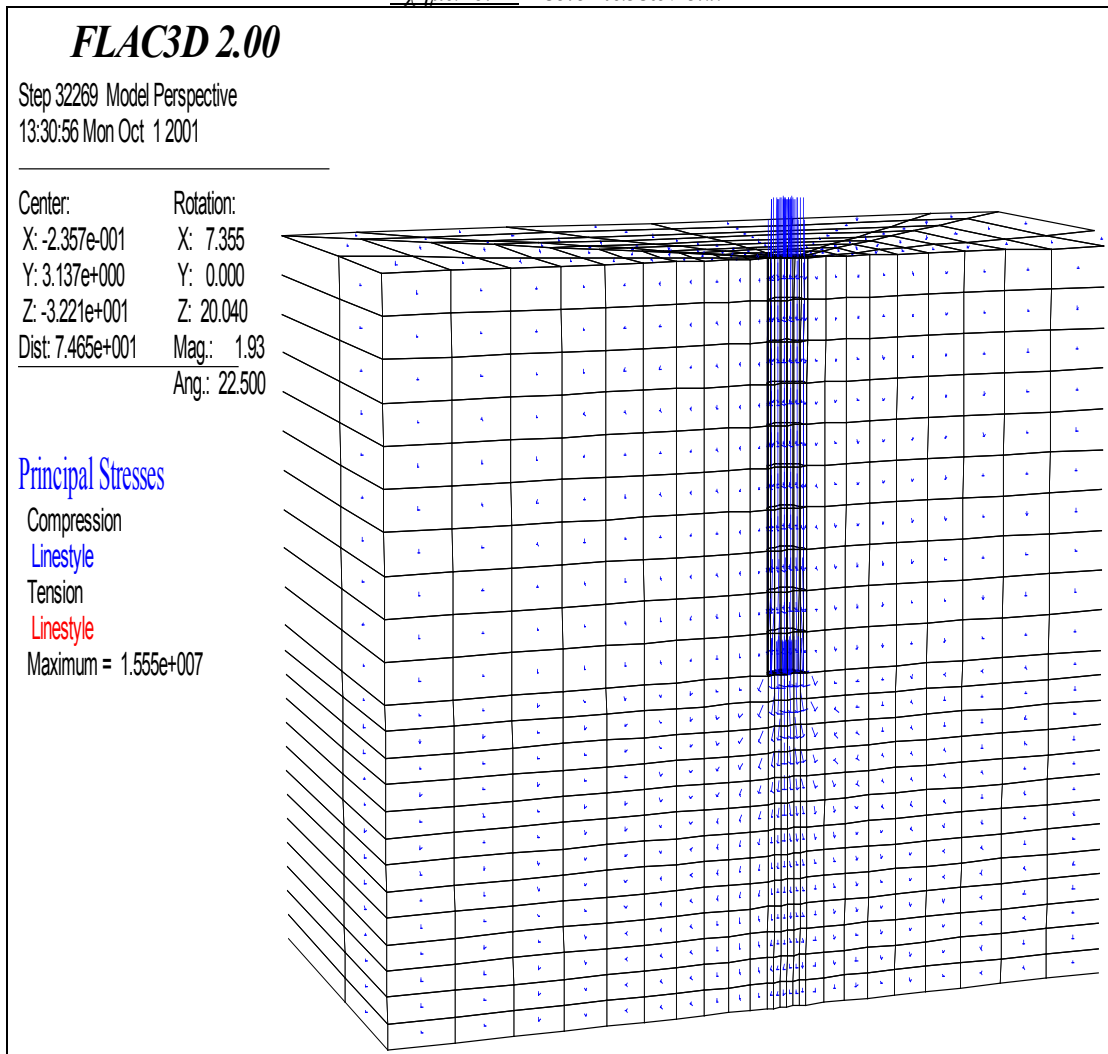
Σχήμα 6.9 Απεικόνιση του ρυθμού μεταβολής της κατακόρυφης μετακίνησης



Σχήμα 6.10 Πεδίο τάσεων σ_{yy}



Σχήμα 6.11 Πεδίο τάσεων σ_{xx}



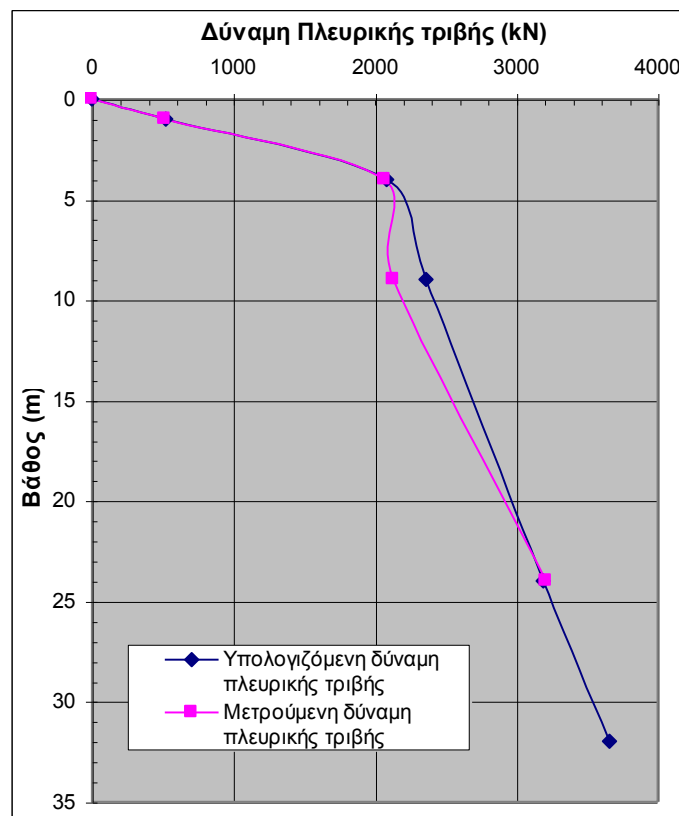
Σχήμα 6.12 Πεδίο κυρίων τάσεων στο κατώτερο τμήμα του πασσάλου

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι η φόρτιση του πασσάλου συνεπάγεται μικρή στροφή των κυρίων τάσεων, η οποία γίνεται πιο έντονη όσον αυξάνει το βάθος. Το φαινόμενο αυτό ήταν αναμενόμενο εφόσον το προσομοίωμα ακολουθεί τον μηχανισμό αστοχίας του Meyerhof. Επίσης, η κατανομή των θλιπτικών τάσεων στο εσωτερικό του πασσάλου είναι φθίνουσα κατά το βάθος, γεγονός επίσης αναμενόμενο εφ'όσον ο εν λόγω πάσσαλος λειτουργεί ως πάσσαλος τριβής και παραλαμβάνει το φορτίο μέσω της πλευρικής τριβής.

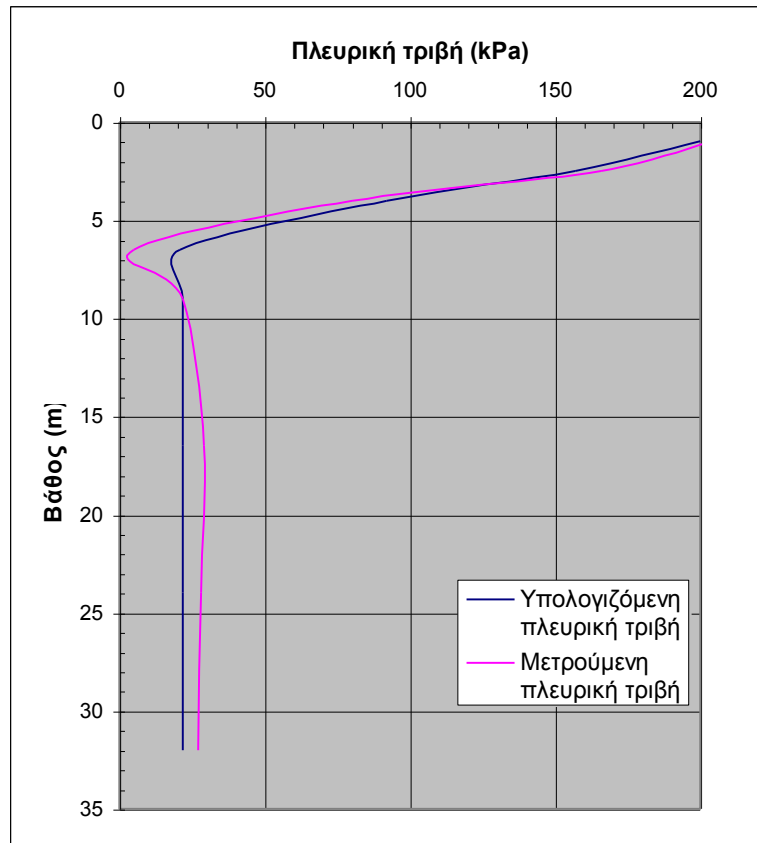
Από τις επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν επαληθεύθηκε ότι οι τρεις πάσσαλοι του συστήματος δοκιμαστικής φόρτισης δεν αλληλεπιδρούν και δεν συμπεριφέρονται ως ομάδα πασσάλων. Για τον λόγο αυτό προτιμήθηκε ο κάρναβος του FLAC^{3D} να αποτελείται από ένα και μόνον πάσσαλο ώστε να προκύπτει κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο.

Από το σχήμα 6.9, όπου απεικονίζεται ο ρυθμός μεταβολής της αξονικής μετακίνησης με το βάθος, προκύπτει ότι τα ενδιάμεσα στρώματα της μαλακής αργιλοϊλύως είναι τα πλέον παραμορφώσιμα και υφίστανται την μεγαλύτερη καθίζηση.

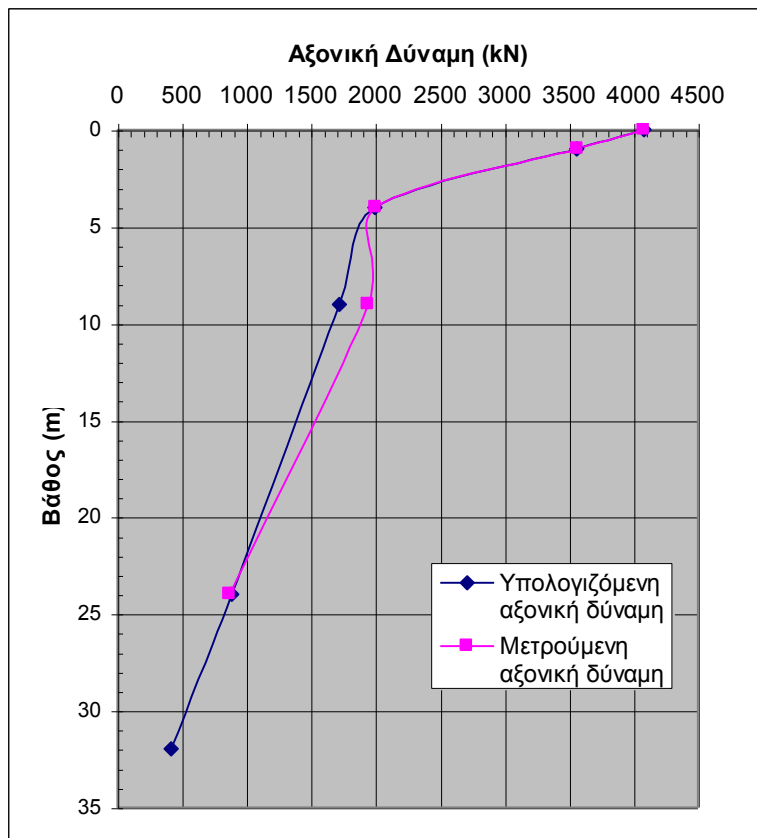
Στα σχήματα 6.13 έως και 6.15 που ακολουθούν απεικονίζονται η κατανομή της αξονικής δύναμης και της δύναμης πλευρικής τριβής κατά το βάθος, όπως αυτές προέκυψαν από την ανάλυση Γ και επί τόπου μετρήσεων. Επίσης απεικονίζεται η κατανομή της πλευρικής τριβής κατά το βάθος,



Σχήμα 6.13 Κατανομή της δύναμης πλευρικής τριβής με το βάθος

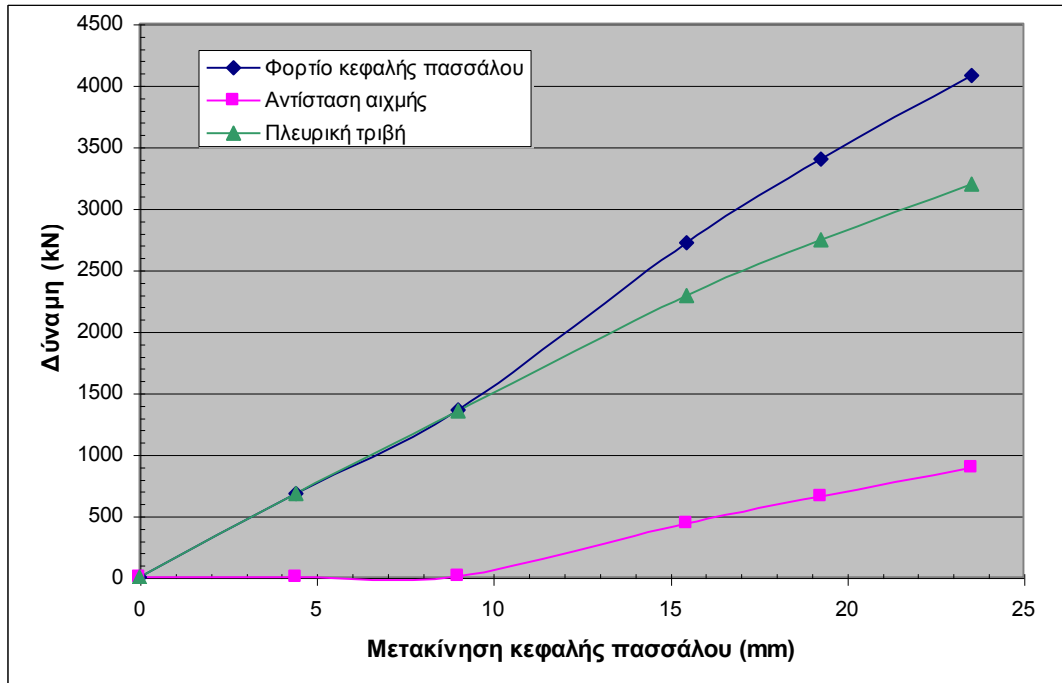


Σχήμα 6.14 Κατανομή της τάσης πλευρικής τριβής με το βάθος



Σχήμα 6.15 Κατανομή της αξονικής δύναμης με το βάθος

Τέλος, στο σχήμα 6.16 απεικονίζεται η μεταβολή του φορτίου κεφαλής, της αντίστασης αιχμής καθώς και της πλευρικής τριβής σε σχέση με την μετακίνηση στην κεφαλή του πασσάλου. Η μορφή του διαγράμματος οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η πλαστικοποίηση του υλικού δεν έχει ακόμη επισυμβεί και γι' αυτό τον λόγο δεν έχει κινητοποιηθεί πλήρως η αντίσταση αιχμής, ενώ δεν έχει σταθεροποιηθεί η πλευρική τριβή. Παρατηρείται επίσης, στις χαμηλές στάθμες φορτίων κινητοποίησης μόνο της πλευρικής τριβής και καθόλου της αντίστασης αιχμής του πασσάλου.



Σχήμα 6.16 Κατανομή του φορτίου σε σχέση με την μετακίνηση της κεφαλής του πασσάλου

7. Σύγκριση κώδικα FLAC^{3D} και κλειστών μεθόδων

Παρ' όλη την διαδεδομένη χρήση των πασσάλων ως τεχνολογίας θεμελίωσης δομημάτων, η χρήση αριθμητικών μεθόδων μη-γραμμικής ανάλυσης (μη-γραμμική συμπεριφορά) δεν χρησιμοποιείται σε τόσο βαθμό όσο οι «κλειστές μέθοδοι», αν και δίδει την δυνατότητα επίλυσης του προβλήματος με μεγαλύτερη προσέγγιση. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στην δυσκολία κατανόησης και χρήσης της θεωρίας και τεχνικής των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών, αλλά και των εξειδικευμένων μαθηματικών που απαιτούνται για να περιγραφεί ένα πρόβλημα. Έτσι λοιπόν, οι συνήθειες εν χρήσει μέθοδοι υπολογισμού φέρουσας ικανότητας και καθιζήσεων πασσάλων βασίζονται κατά κύριο λόγο σε εμπειρικού τύπου αναλυτικές σχέσεις και απλοποιητικές παραδοχές.

Η θεωρία της ελαστικότητας, αν και αποτέλεσε ένα ιστορικό βήμα στην περιγραφή και κατανόηση της συμπεριφοράς ενός πασσάλου, δεν αρκεί για να περιγράψει ρεαλιστικά την “πραγματική” του συμπεριφορά. Εξάλλου πολύ λίγα γεωυλικά και μόνον σε χαμηλές στάθμες εξάιτισης μπορούν να προσομοιωθούν από την γραμμική ελαστικότητα, όπως για παράδειγμα ο βράχος υπό την επενέργεια φορτίων μικρών σε σχέση με την οριακή αντοχή του. Ευρεία όμως είναι η χρήση της ελαστικότητας στην εκτίμηση των καθιζήσεων.

Από την εργαστηριακή διερεύνηση της συμπεριφοράς αργιλικών εδαφών προκύπτει μη-γραμμική συμπεριφορά, η οποία μπορεί να υποδιαιρεθεί σε πολλαπλά υπομήματα με γραμμική συμπεριφορά. Στην περίπτωση όπου το επιβαλλόμενο φορτίο μιας θεμελίωσης οδηγεί σε διαδρομή τάσεων εντός ενός τέτοιου γραμμικού βήματος, είναι επαρκώς αποδεκτή η γραμμική ανάλυση για το δεδομένο και μόνο τμήμα. Σε υψηλές όμως στάθμες φόρτισης, όπου η συμπεριφορά του γεωυλικού αποκλίνει από τα όρια της ελαστικότητας, η τεχνική αυτή αδυνατεί να εκτιμήσει ρεαλιστικά την μετακίνηση/καθίζηση του πασσάλου. Η απόκλιση αυτή αποδίδεται στην μη δυνατότητα προσαρμογής του μέτρου ελαστικότητας στην εκάστοτε στάθμη φόρτισης (αντιθέτως διατηρείται αυτό σταθερό καθ' όλη την διάρκεια φόρτισης). Συνεπώς, η χρήση της γραμμικής ελαστικότητας για την σύζευξη των εντατικών και κινηματικών μεγεθών αποτελεί επιλογή περιορισμένης ακριβείας.

Στους ακόλουθους πίνακες παρατίθενται οι αξονικές μετακινήσεις της κεφαλής του πασσάλου, όπως αυτές έχουν υπολογισθεί με την βοήθεια των “κλειστών” αναλυτικών μεθόδων και με τον κώδικα FLAC^{3D}, καθώς και οι αντίστοιχες μετακινήσεις που μετρήθηκαν in situ κατά την δοκιμαστική φόρτιση.

Φορτίο (kN)	Αξονική μετακίνηση πασσάλου		
	Υπολογιζόμενες με το FLAC ^{3D}	Υπολογιζόμενες με την ελαστική θεωρία	Μετρηθείσες
680	-	6mm	9.80mm
1,360	-	12mm	10.60mm
2,720	12-20mm	25mm	12.21mm
3,400	16-24mm	31mm	13.58mm
4,080	19-32mm	37mm	22.43mm

Παρατηρείται ότι από την στάθμη του φορτίου λειτουργίας (3,400kN) οι μετακινήσεις βάσει των κλειστών μεθόδων αποκλίνουν από τις μετρηθείσες σε ποσοστό 150% ενώ αντιθέτως στις χαμηλές στάθμες φορτίου (680 και 1360kN) το ποσοστό απόκλισης μειώνεται σημαντικά, λ.χ για την φόρτιση των 1,360kN η διαφορά είναι της τάξης του 10%. Οι υπολογιζόμενες μέσω του FLAC^{3D} αξονικές

μετακινήσεις του πασσάλου παρατηρείται ότι έχουν εύρος απόκλισης πολύ μικρότερο της τάξεως του 1 έως 5 mm.

Ο υπολογισμός του επιτρεπόμενου φορτίου μεμονωμένου πασσάλου κατά το DIN 4014, οδηγεί σε φορτία σχεδιασμού μικρότερο του πραγματικού, και τούτο διότι δεν παρέχεται με την μεθοδολογία η δυνατότητα υπολογισμού του φορτίου υπό κρατυνόμηση, και κατά επέκτασιν πλαστική συμπεριφορά του περιβάλλοντος εδάφους. Απο την επί τόπου δοκιμή φόρτισης υιοθετήθηκε το φορτίο αστοχίας στην στάθμη των 4080kN, με κριτήριο στην στάθμη αυτή το έδαφος αρχίζει να διαρρέει χωρίς όμως να είναι το οριακό φορτίο. Επίσης, η καθίζηση που υπολογίζεται με το DIN 4014 είναι σημαντικά μεγαλύτερη απο την μετρηθείσα πράγματι για το επιτρεπόμενο φορτίο η υπολογιζόμενη καθίζηση είναι της τάξης των 80mm ενώ η αντίστοιχη μετρηθείσα είναι μόλις 12mm. Οι αποκλίσεις αυτές αποδίδονται στον μεγάλο ενιαίο συντελεστής ασφαλείας ($\Sigma A \geq 2$) που υιοθετεί το DIN 4014, συντελεστής ο οποίος οδηγεί σε μικρότερη φέρουσα ικανότητα απο την πραγματική.

Ως εμπειρικές μέθοδοι ή ως θεωρίες με απλοποιητικές παραδοχές, οι κλειστές μέθοδοι κρύβουν πολλές αβεβαιότητες και για τον λόγο αυτό εισάγεται ο ενιαίος συντελεστής ασφαλείας (ΣA) με τιμές αρκετά υψηλές της τάξεως του 2 και 3. Οι τιμές αυτές, εάν συγκριθούν με τις αντίστοιχες τιμές που αναφέρονται σε κοινά οικοδομικά έργα, παρουσιάζονται ως διπλάσιες ή και τριπλάσιες πολλές φορές (λ.χ ο χάλυβας καλύπτεται από (ΣA) ίσο με 1.15). Οφείλεται αυτό στο ότι οι “κλειστές” επιλύσεις δεν μπορούν να χρησιμεύσουν στην επαλήθευση πειραματικών αποτελεσμάτων (τάσεων, μετακινήσεων) που αναφέρονται στην αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής. Αντιθέτως, η δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής που προσφέρει ο κώδικας FLAC^{3D} οδηγεί στον σχεδιασμό γεωτεχνικών κατασκευών με συντελεστή ασφαλείας (ΣA) πλησίον της μονάδας.

Ένα ακόμη θέμα προκύπτει απο το ότι οι κλειστές μέθοδοι εκλαμβάνουν την βράχυνση του πασσάλου λόγω του φορτίου ως ομοιόμορφη σε όλο το μήκος του κάτι το οποίο δεν ισχύει εφ’όσον με το βάθος η βράχυνση του πασσάλου μειώνεται. Αντιθέτως στο FLAC^{3D} είναι δυνατή η προσομοίωση του φαινομένου αυτού κατά τρόπο ρεαλιστικό.

Τέλος οι αριθμητικές μέθοδοι, όπως ο κώδικας FLAC^{3D}, παρέχουν την δυνατότητα τόσο εντοπισμού των στοιχείων εκείνων των εδαφικών ζωνών τα οποία εισέρχονται στην πλαστική περιοχή όσο και τον υπολογισμό των μετακινήσεων του περιβάλλοντος εδάφους σε οποιαδήποτε θέση. Έτσι, μπορούν να παρακολουθηθούν όλα τα στάδια εξέλιξης ενός φαινομένου και να κατανοηθεί καλύτερα ο μηχανισμός αστοχίας του πασσάλου, κάτι στο οποίο οι κλειστές μεθόδους αδυνατούν. Ακόμη, το κάθε πρόβλημα αντιμετωπίζεται από τους κώδικες τύπου FLAC^{3D} όπως είναι στην πραγματικότητα, δηλαδή ως ένα αμιγώς τρισδιάστατο πρόβλημα · για παράδειγμα η πλευρική τριβή του πασσάλου αναπτύσσεται σε όλη την περίμετρο του και όχι σε ένα επίπεδο όπως δέχονται οι κλειστές μέθοδοι.

Πάραυτα σημαντικό πλεονέκτημα των “κλειστών μεθόδων” αποτελεί ο απαιτούμενος χρόνος επίλυσης και η ευκολία χρήσης συγκριτικά με τις αριθμητικές μεθόδους (λ.χ. μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων).

Οι διαφορές ανάμεσα στις αναλυτικές και τις κλειστές μεθόδους είναι παρά πολλές, απο το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται μέχρι τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Οι αναλυτικές μέθοδοι έχουν σαφή πλεονεκτήματα όπως διαφαίνεται παραπάνω, αλλά υστερούν σε υπολογιστικό κόστος και ευκολία χρήσης. Για αυτούς τους δυο κυρίως λόγους χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην πράξη οι κλειστές μέθοδοι.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την επαναξιολόγηση των αποτελεσμάτων δοκιμαστικής φόρτισης εγχυόμενου πασσάλου *in situ* και την κατανόηση της αλληλεπίδρασης πασσάλου και περιβάλλοντος εδάφους χρησιμοποιήθηκε προσομοίωμα στον κώδικα πεπερασμένων διαφορών $FLAC^{3D}$, που έχει τις διαστάσεις του πραγματικού πασσάλου, καθώς και τα εδαφικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εδάφους. Επίσης, έγινε ανάλυση του προβλήματος με “κλειστές” αναλυτικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην πράξη κατά τον σχεδιασμό θεμελιώσεων με πασσάλους. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο των επιλύσεων είναι τα ακόλουθα :

1. Οι κλειστές μέθοδοι αποδίδουν ικανοποιητικά τις μετακινήσεις για χαμηλές στάθμες φορτίου, ενώ στις υψηλές στάθμες οι τιμές αποκλίνουν από τις “πραγματικές” (μετρούμενες).
2. Το οριακό φορτίο αστοχίας του πασσάλου που υπολογίζεται μέσω κλειστών μεθόδων είναι μικρότερο από το πραγματικό διότι ο ενιαίος συντελεστής ασφάλειας που εφαρμόζεται στις μεθόδους αυτές έχει συνήθως υψηλή τιμή (3) για να καλύψει σφάλματα και λάθη.
3. Η απόκλιση των τιμών των εδαφικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο προσομοίωμα για να προκύψει σύμπτωση μετρούμενων και υπολογιζόμενων μεγεθών με τις τιμές που προέκυψαν από την γεωτεχνική διασκόπηση αποδίδεται στη διατάραξη του εδαφικού δοκιμίου.
4. Ο ρόλος που παίζει η διεπιφάνεια πασσάλου και περιβάλλοντος εδάφους στο προσομοίωμα είναι ιδιαίτερα σημαντικός, εφ’όσον ορίζει καταλυτικά την συμπεριφορά του πασσάλου και την αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους. Ορθή επιλογή των τιμών των παραμέτρων στην διεπιφάνεια επιτρέπουν στον κώδικα $FLAC^{3D}$ την ορθότερη κατανομή του φορτίου του πασσάλου σε αντίσταση αιχμής και πλευρικής τριβής, καθώς και των μετακινήσεων πασσάλου-περιβάλλοντος εδάφους.
5. Παραμετρικές αναλύσεις με χρήση του αριθμητικού προσομοιώματος απέδειξαν ότι τα πρότυπα συμπεριφοράς που έχουν υιοθετηθεί από την διεθνή εμπειρία ισχύουν και στην εξεταζόμενη περίπτωση· δηλαδή, είναι ρεαλιστικός ο μηχανισμός αστοχίας κατά Meyerhof (1951) ενώ η καθίζηση του πασσάλου αποσβένεται σε απόσταση 2.5D από την αιχμή του.
6. Σταθερή τιμή του μέτρου ελαστικότητας E του περιβάλλοντος εδάφους σε όλες τις φάσεις φόρτισης οδηγεί σε σημαντική απόκλιση των αποτελεσμάτων του αριθμητικού προσομοιώματος από τις μετρηθείσες τιμές. Η απόκλιση αποδίδεται στην μη-γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων με αποτέλεσμα το μέτρο ελαστικότητας να μεταβάλλεται συνεχώς με την αύξηση του φορτίου ή/και της παραμόρφωσης.
7. Η συμπεριφορά του πασσάλου μπορεί να προσομοιωθεί με χρήση κατάλληλων συνδυασμών τιμών στις εδαφικές παραμέτρους. Ιδιαίτερη βαρύτητα στο προσομοίωμα έχει η συνοχή c και η γωνία διατμητικής αντοχής ϕ .
8. Η χρήση του κατάλληλου καταστατικού νόμου (λ.χ. Mohr-Coulomb, Modified Cam-Clay) δίδει στον χρήστη την δυνατότητα αξιόπιστης προσομοίωσης της συμπεριφοράς του εξεταζόμενου φαινομένου.
9. Τέλος, κάθε αποτελέσμα που προκύπτει από επίλυση μέσω αριθμητικών προσομοιωμάτων πρέπει να ελέγχεται από τον χρηστή με κριτική σκέψη και να μη εκλαμβάνεται *a priori* ως απόλυτη αλήθεια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κωστόπουλος, Σ. (1999), Σημειώσεις Γεωτεχνικών Κατασκευών, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, σελ.420
- [2] Κωστόπουλος, Σ. (1996), Σημειώσεις Εδαφομηχανικής I,II (Πειραματική και Θεωρητική), Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, σελ.408
- [3] Κωστόπουλος, Σ. (1996), Σημειώσεις Εδαφομηχανικής III (Διασκόπηση της Γεωμάζας), Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, σελ.221
- [4] Κωστόπουλος, Σ.(2000), Σημειώσεις Εδαφομηχανικής IV(Διΐχνευση της Γεωμάζας), Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, σελ.220
- [5] Κωμοδρόμος, Αιμ. (2001), Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική, Εκδόσεις Ζήτη
- [6] Αναγνωστόπουλος, Α Θεμελιώσεις με Πασσάλους, Εκδόσεις Συμεών, σελ. 60
- [7] Αναγνωστόπουλος, Χρ.(1994), Θεμελιώσεις-Αντιστηρίξεις, Έκδοση Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, σελ.135
- [8] DIN 4014, (1990), “Bohrpfahle”, Deutsche Norm
- [9] Poulos H.G. and Davis E.H. (1980), Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley & Sons, New York USA, page 357
- [10] Αναγνωστόπουλος Α., Ζερβογιάννης Χ., Καλτεζιώτης Ν., Frank R., Χριστούλας Στ., “Οργανομετρικές Δοκιμαστικές Φορτίσεις Πασσάλων στην Ελλάδα”, 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, σελ.173-180
- [11] Cooke R.W. and Price G.(1973), “Strains and Displacements around friction piles”, Building Research Establishment,
- [12] Davis A.G. and Robertson A. (1975), “Economic pile testing”, Ground Engineering, page 53-56
- [13] Lizzi F.(1983), “Ultimate bearing capacity of friction piles- Calculated from load tests on pilot piles, Ground Engineering, page 41-45
- [14] Fellenius E. (1980), “The analysis of results from outpine pile loads tests”, Ground Engineering, page 19-31
- [15] Delapierre J. and Dufours Ch. (1980), “Analyses of horizontal loading tests on Franki piles”, Ground Engineering, page 22-26

ΤΕΥΧΗ

- [1] ΥΔΡΟΕΡΕΥΝΑ Α.Ε (1998), «Εκτέλεση Γεωτεχνικής Έρευνας σε οικόπεδο επί των οδών Σέκερη και Αλαμάνας στην περιοχή Πεδίο Άρεως Βόλου»
- [2] ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε (1998), «Αξιολόγηση αποτελεσμάτων δοκιμαστικής φόρτισης φρεατοπασσάλου θεμελίωσης Φ800 mm»
- [3] ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε (1998), «Έλεγχος συνέχειας σκυροδέτησης πασσάλων Φ800 mm»

Επεξεργασία Αποτελεσμάτων Μεταθετού Παραμορφοσίμετρου

