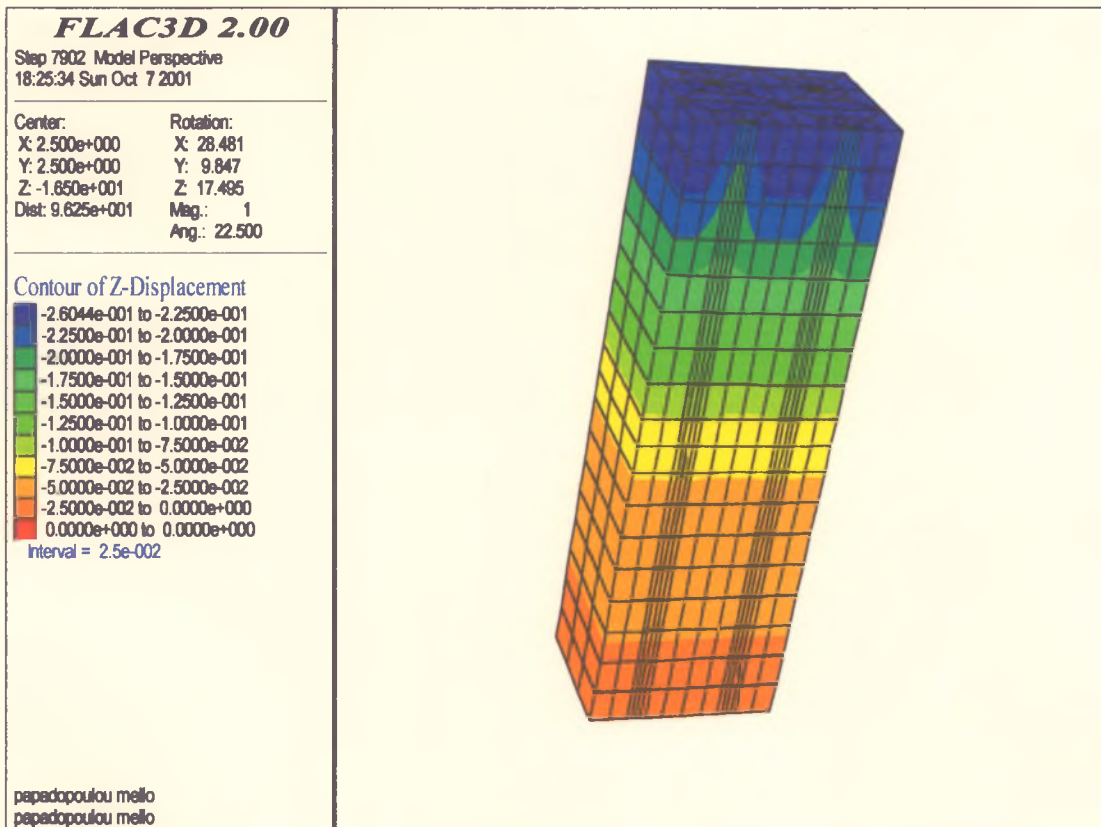


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάλυση της συμπεριφοράς των χαλικοπασσάλων
Η περίπτωση του Λιμένος Αιγίου



Μέλλω-Μαρία Παπαδοπούλου
Αικατερίνη Δημάκη

Επιβλέπων καθηγητής:
Δρ. Σ. Κωστόπουλος

Βόλος, Σεπτέμβριος 2001



αρ. εισ. 282 / Π.Α.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000062973



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 634/1
Ημερ. Εισ.: 15-10-2001
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ
2001
ΠΑΠ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάλυση της συμπεριφοράς των χαλικοπασσάλων
Η περίπτωση του Λιμένος Αιγίου

Μέλλω-Μαρία Παπαδοπούλου
Αικατερίνη Δημάκη

Επιβλέπων καθηγητής:
Δρ. Σ. Κωστόπουλος

Βόλος, Σεπτέμβριος 2001

*Η εργασία αυτή αφιερώνεται
ολόψυχα στους γονείς μας.*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θεωρούμε χρέος μας από τη θέση αυτή να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερω τους καθηγητές μας Δρ. Σ. Κωστόπουλο, Δρ. Α. Κωμοδρόμο και Δρ. Π. Ντακούλα για την εμπιστοσύνη με την οποία μας περιέβαλαν και για τις πολύτιμες γνώσεις που μας προσέφεραν, στα πλαίσια της άψογης συνεργασίας που είχαμε, τόσο κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μας εργασίας, όσο και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας. Είναι αξιέπαινη η προσπάθεια τους για την παροχή υψηλού επιπέδου εκπαίδευσης στον Τομέα Γεωτεχνικής Μηχανικής του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Ειδικότερα, οφείλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά κατά πρώτο λόγο τον Δρ. Σ. Κωστόπουλο για τη σύλληψη του θέματος που διαπραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία, για το μεγάλο εύρος της βιβλιογραφίας που επέλεξε και μας διέθεσε καθώς και για τη βοήθειά του στην τελική διαμόρφωση του κειμένου. Επίσης, τον Δρ. Α. Κωμοδρόμο για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε και την υπομονή που επέδειξε δουλεύοντας μαζί μας, ώστε να γίνει ο αρχικός προσδιορισμός της μορφής του προσομοιώματος και για την καθοριστική συμβολή του στην τελική μορφή αυτού. Επιπλέον, εκφράζουμε τις ευχαριστίες μας προς τον Δρ. Π. Ντακούλα για τις κατευθύνσεις που μας έδωσε σε κρίσιμα σημεία της διαμόρφωσης του προσομοιώματος.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε, ακόμη, τους φίλους μας που μας στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια και ιδιαίτερα τον συμφοιτητή μας Ν. Καττή για την βοήθειά του. Τέλος, ευχαριστούμε τις οικογένειες μας για τη συμβολή τους με κάθε δυνατό τρόπο σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

Μέλλω-Μαρία Παπαδοπούλου

Αικατερίνη Δημάκη

Βόλος, Σεπτέμβριος 2001

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΧΟΜΕΝΩΝ

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ: ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΛΑΦΟΥΣ ΜΕ ΧΑΛΙΚΟΠΑΣΣΑΛΟΥΣ

1. Εισαγωγή.....	1-1
2. Τεχνολογία χαλικοπασσάλων.....	1-4
2.1 Μέθοδοι εγκατάστασης.....	1-4
2.1.1 Δονητική αντικατάσταση (vibro-replacement).....	1-4
2.1.2 Δονητική εκτόπιση (vibro-displacement).....	1-5
2.2 Έλεγχος κατά την κατασκευή.....	1-6
2.3 Πεδίο εφαρμογής.....	1-7
3. Μηχανική συμπεριφορά των χαλικοπασσάλων.....	1-8
3.1 Βασικές παράμετροι.....	1-8
3.2 Μορφές αστοχίας.....	1-9
3.2.1 Αστοχία λόγω πλευρικής διόγκωσης.....	1-11
3.2.2 Αστοχία λόγω διείδυσης.....	1-11
3.2.3 Αστοχία σε διάτμηση.....	1-13
4. Σχεδιασμός των χαλικοπασσάλων.....	1-14
4.1 Εμπειρικές μέθοδοι.....	1-14
4.1.1 Μέθοδος Thornburn – Mc Vicar.....	1-14
4.1.2 Μέθοδος Greenwood.....	1-15
4.2 Ελαστική θεώρηση.....	1-16
4.3 Πλαστική ανάλυση.....	1-17
4.4 Σχόλια επί των μεθόδων σχεδιασμού.....	1-19
5. Μηχανική συμπεριφορά του βελτιωμένου εδάφους.....	1-20
5.1 Γενικά.....	1-20
5.2 Βασικές σχέσεις.....	1-21
5.3 Κατανομή του φορτίου.....	1-22
5.4 Φέρουσα ικανότητα χαλικοπασσάλου.....	1-24
5.5 Κρίσιμο μήκος χαλικοπασσάλου.....	1-26
5.6 Παραμορφωσιμότητα του χαλικοπασσάλου.....	1-27
5.7 Καθίζηση βελτιωμένου εδάφους.....	1-28
5.8 Γενική ευστάθεια των επιχωμάτων.....	1-30
5.9 Θεώρηση του προβλήματος.....	1-31
5.9.1 Οριακή ισοροπία κατά Rankine.....	1-31
5.9.2 Ελαστική προσέγγιση.....	1-33

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΛΙΜΕΝΟΣ ΑΙΓΙΟΥ

6. Γεωτεχνικές και γεωφυσικές διασκοπήσεις.....	2-1
6.1 Εισαγωγή.....	2-1
6.2 Βάθη του θαλάσσιου πυθμένα.....	2-2
6.3 Στρωματογραφία.....	2-3
6.4 Εργαστηριακές δοκιμές.....	2-6
6.4.1 Γενικά.....	2-6
6.4.2 Φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών στρώσεων.....	2-6
6.4.3 Αστράγγιστη διατμητική αντοχή των αργιλικών στρώσεων.....	2-7
6.4.4 Συμπιεστότητα των αργιλικών στρώσεων.....	2-7

6.4.5	Συντελεστής στερεοποίησης των αργιλικών στρώσεων.....	2-8
7.	Ανάλυση του συστήματος θεμελίωσης.....	2-9
7.1	Εισαγωγή.....	2-9
7.2	Εκτίμηση των καθιζήσεων χωρίς βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης.....	2-11
7.2.1	Εκτίμηση των καθιζήσεων σύμφωνα με την υπάρχουσα μελέτη.....	2-11
7.2.2	Αναλυτικός υπολογισμός των καθιζήσεων (ελαστική θεώρηση).....	2-11
7.3	Προτεινόμενη βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης.....	2-14
7.4	Στάδια κατασκευής της προτεινόμενης λύσης.....	2-15
7.5	Έλεγχος στατικής ευστάθειας.....	2-16

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ: ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

8.	Γενικά.....	3-1
9.	Προσομοίωση του προβλήματος.....	3-2
9.1	Ιδιαιτερότητα του προβλήματος.....	3-2
9.3	Παρουσίαση του κώδικα FLAC ^{3D} -Δυνατότητες και λειτουργίες.....	3-3
9.3	Διακριτοποίηση του προβλήματος.....	3-4
9.3.1	Μόρφωση καννάβου και συνθήκες ορίου.....	3-6
9.3.2	Καταστατικός νόμος και ιδιότητες υλικών.....	3-7
9.3.3	Επιλύσεις.....	3-9
9.3.3.α	Αρχικό εντατικό πεδίο.....	3-9
9.3.3.β	Μηχανική και υδραυλική επίλυση της εξαίτισης.....	3-10
9.4	Υπολογισμός καθιζήσεων του βελτιωμένου εδάφους με θεώρηση οριακής ισοροπίας κατά Rankine.....	3-15
10.	Παραμετρική ανάλυση του προβλήματος.....	3-16
10.1	Παραμετρικές επιλύσεις.....	3-16
10.1.1	Ανάλυση με διαφοροποιούμενο επιβαλλόμενο φορτίο.....	3-16
10.1.2	Ανάλυση με διαφοροποιούμενη αξονική απόσταση χαλικοπασσάλων.....	3-20
10.1.3	Ανάλυση με διαφοροποιούμενη διάμετρο χαλικοπασσάλων.....	3-35
10.2	Συμπεράσματα παραμετρικών αναλύσεων.....	3-48

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

A1.	Διαγράμματα για την δεύτερη σειρά παραμετρικών αναλύσεων.....	A-1
A2.	Διαγράμματα για την τρίτη σειρά παραμετρικών αναλύσεων.....	A-45
A3.	Γενικά συμπεράσματα και έλεγχος σχετικά με την ορθότητα του προσομοιώματος.....	A-81

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βελτίωση εδάφους με χαλικοπασσάλους

1. Εισαγωγή

Η παρουσία εδαφών χαμηλής γεωτεχνικής ποιότητας στο περιβάλλον κατασκευής ορισμένων τεχνικών έργων επιβάλλει κατά κανόνα την ενίσχυση και βελτίωσή τους, ειδικότερα όταν πρόκειται για μαλακές αργίλους. Για παράδειγμα, μεγάλα επιχώματα σε ασθενή εδάφη επιβάλλουν την βελτίωση των τελευταίων εις τρόπον ώστε να είναι εφικτή η ευχερής κατασκευή και η επιτυχής λειτουργία των επιχωμάτων. Σε τέτοιες περιπτώσεις η μέθοδος βελτίωσης οφείλει να διασφαλίζει την ευστάθεια του έργου και ταυτόχρονα τον περιορισμό των καθιζήσεων.

Τις προηγούμενες δεκαετίες έχει μελετηθεί και εφαρμοσθεί επιτυχώς μια πληθώρα επί τόπου τεχνικών βελτίωσης του εδάφους. Πρόκειται για τις μεθόδους που αναφέρονται ως προφόρτιση, επιφανειακή συμπύκνωση, βαθιά δονητική συμπύκνωση, τοποθέτηση στραγγιστηρίων, εγκατάσταση χαλικοπασσάλων, οπλισμένη γη. Οι μέθοδοι αυτές περιλαμβάνουν κατά κανόνα (αλλά όχι μόνον) την εγκατάσταση «βελτιωτικών στοιχείων» στο έδαφος, τα οποία αποσκοπούν στη βελτίωση των *in situ* μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους ή στην μεταφορά και ανάληψη φορτίων από πλέον ικανά υλικά· έτσι, η συμπεριφορά του βελτιωμένου εδάφους επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά όχι μόνον του *in situ* εδαφικού στοιχείου, αλλά και εκείνα του εγκατεστημένου νέου στοιχείου.

Η βελτίωση μέσω κατακόρυφων στραγγιστηρίων δεν είναι πάντοτε εύκολο να ικανοποιήσει συγχρόνως και τις δύο αυτές απαιτήσεις. Κατά συνέπεια, πολλές φορές κρίνεται απαραίτητη η ενίσχυση των μαλακών αργίλων με χαλικοπασσάλους. Η όλη αντίληψη της μεθόδου εδράζεται στην αντικατάσταση του 10% έως 30% του *in situ* εδάφους με υλικό καλύτερων χαρακτηριστικών· το υλικό αυτό μορφώνεται ως πάσσαλος. Ανάλογα με τη μέθοδο εγκατάστασης, στο δημιουργείται στο έδαφος μια κυλινδρική οπή, η οποία πληρούται με άμμο (sand stones) ή με χάλικες (stone columns)· η δεύτερη περίπτωση αφορά στους χαλικοπασσάλους. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το έδαφος μετατρέπεται σε ένα δυσκαμπτότερο σύνθετο υλικό, το οποίο αποτελείται από το κοκκώδες υλικό υπό μορφήν κυλίνδρων και το εγγενές υλικό στα ενδιάμεσα των πασσάλων διαστήματα.

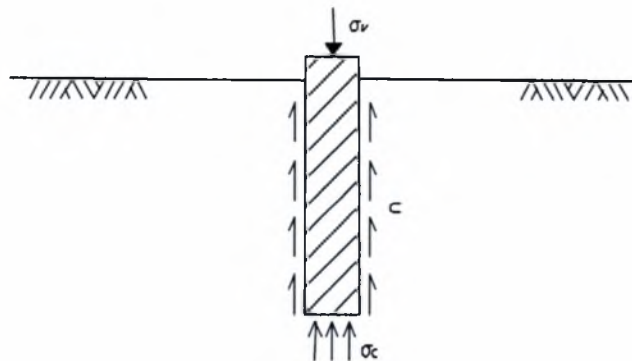
Με την εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων προκύπτει:

1. Αύξηση της συνολικής διατμητικής αντοχής του «σύνθετου» εδάφους, μέσω της μερικής αντικατάστασης του ασθενούς αρχικού εδάφους με υλικό καλύτερων χαρακτηριστικών, αλλά και λόγω της οριζόντιας στράγγισης προς τους χαλικοπασσάλους· δηλαδή, οι χαλικοπάσσαλοι παίζουν το ρόλο στραγγιστηρίων, με αποτέλεσμα να επιταχύνεται η στερεοποίηση της αργίλου.
2. Μείωση των καθιζήσεων, εφόσον μειώνεται η συμπιεστότητα του «σύνθετου» εδάφους.

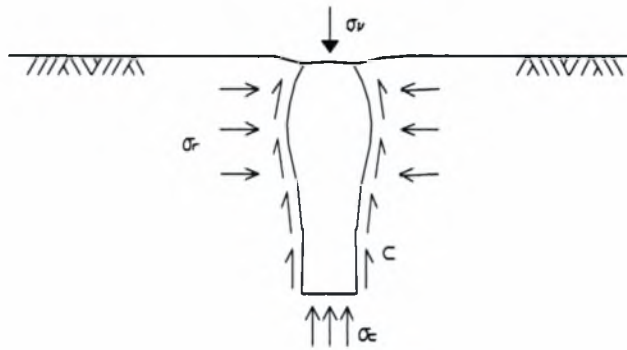
Ως συνέπεια, βελτιώνεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους επειδή η διαφορά στο μέτρο παραμόρφωσης του *in situ* εδάφους και του υλικού των χαλικοπασσάλων είναι τόσο σημαντική ώστε μεγάλο μέρος του φορτίου να αναλαμβάνεται από τους χαλικοπασσάλους.

Ειδικότερα στην περίπτωση μικρής ομάδας χαλικοπασσάλων υπό την επενέργεια χαμηλών φορτίων που επιβάλλονται σχετικά γρήγορα, ο βασικός τους ρόλος είναι η βελτίωση της βραχυπρόθεσμης φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Αντίθετα στην περίπτωση εκτεταμένων φορτίων, η παρουσία των χαλικοπασσάλων στοχεύει στην μείωση των καθιζήσεων και την βελτίωση της μακροχρόνιας εδαφικής συμπεριφοράς.

Σε σχέση με τους συμβατικούς άκαμπτους πασσάλους, εκτός βεβαίως των προφανών διαφορών μεταξύ τους, όπως λ.χ. το υλικό πλήρωσης και τα χαρακτηριστικά του (κυρίως στην διαπερατότητα), οι χαλικοπασσαλοί διαφέρουν από τους πρώτους και σε ένα άλλο σημείο· είναι αποτελεσματικοί για την ανάληψη μικρών φορτίων κοντά στην επιφάνεια κι αυτό διότι αδυνατούν να μεταφέρουν τις επιβαλλόμενες τάσεις στα βαθύτερα στρώματα. Επιπλέον, τα δύο είδη πασσάλων συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο υπό την επενέργεια φορτίων. Συγκεκριμένα, όταν ένας άκαμπτος πάσσαλος από οπλισμένο σκυρόδεμα φορτίζεται, καθιζάνει περίπου ως ασυμπίεστο στοιχείο αναπτύσσοντας τάσεις στην αιχμή του και στην περιφέρειά του (Σχ. 1.1). Αντιθέτως, ένας χαλικοπάσσαλος από συμπυκνωμένο μη συνεκτικό κοκκώδες υλικό αναπτύσσει μεν τάσεις αιχμής και πλευρικής τριβής, παραλλήλως όμως διογκώνεται πλευρικά εις τρόπον ώστε να αναπτύσσονται και πλευρικές πιέσεις (Σχ. 1.2).



Σχήμα 1.1 Τάσεις σε πάσσαλο από Ο/Σ



Σχήμα 1.2 Τάσεις σε χαλικοπάσσαλο

Παρόλο που η μέθοδος ήταν γνωστή στη Γαλλία από το 1830, μόλις τις τελευταίες δεκαετίες επαναχρησιμοποιήθηκε συστηματικά και η συμπεριφορά του βελτιωμένου εδάφους κατά την φόρτιση μελετάται μέχρι και τις μέρες μας. Η μέθοδος των χαλικοπασσάλων ξεκίνησε ως μία προσαρμογή της μεθόδου δονητικής συμπύκνωσης (vibroflotation method), η οποία χρησιμοποιούνταν για την συμπύκνωση χαλαρών άμμων και την βελτίωση της αντοχής μαλακών συνεκτικών εδαφών υπό τον υπόγειο ορίζοντα.

2. Τεχνολογία των χαλικοπασσάλων

2.1 Μέθοδοι εγκατάστασης χαλικοπασσάλων

Σε παγκόσμια κλίμακα έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι εγκατάστασης των χαλικοπασσάλων· οι μέθοδοι αυτές διαφοροποιούνται ανάλογα με την εφαρμοσιμότητα και τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού στην κάθε περιοχή. Εν συνεχεία αναφέρονται οι συνηθέστερες τεχνικές εγκατάστασης.

2.1.1 Δονητική αντικατάσταση (vibro-replacement)

Κατά την διαδικασία της δονητικής αντικατάστασης εκτελείται ένα διάτρημα στο έδαφος μέχρι το προτεινόμενο βάθος με τη βοήθεια ειδικού δονητή (vibroflot). Ο δονητής αυτός συντίθεται από κυλινδρικό σώμα διαμέτρου 0.30 έως 0.40m και μήκους 2 έως 5m· περικλείει ένα δονητικό σύστημα το οποίο αποτελείται από διάταξη περιστροφής έκκεντρων μαζών και κινητήρα ηλεκτρικής ισχύος 75-200kW, ώστε η συχνότητα δόνησης να είναι 50-60Hz. Ο ειδικός δονητής αναρτάται από γερανό και διεισδύει στο έδαφος τόσο με τη δράση του ίδιου του βάρους του και των σωλήνων που τον ακολουθούν, όσο και με την εκτόξευση νερού και την δόνηση του συνόλου. Η ρυθμιζόμενη εκτόξευση του νερού (jetting) προς τα κάτω (ή και προς τα επάνω) υλοποιείται από ενσωματωμένες βοηθητικές εξαρτήσεις. Η διάνοιξη του διατρήματος με συνδυασμό δόνησης και εκτόξευσης νερού οδηγεί σε εγκάρσιες διαστάσεις διατρήματος 0.70 έως 1.00m. Όταν ο ειδικός δονητής αποσύρεται, η διάμετρος της οπής που έχει ανοιχθεί είναι μεγαλύτερη από εκείνη του δονητή, ενώ ποικίλει με το βάθος· είναι γενικώς μεγαλύτερη στη βάση και την στέψη της οπής, καθώς και όπου απαντώνται στρώσεις μαλακότερου εδάφους. Το κοκκώδες υλικό (χάλικες), με το οποίο πληρούται το διάτρημα κατά στρώσεις, συμπυκνώνεται εν συνεχεία με την βοήθεια του δονητικού συστήματος· η δόνηση αυτή πρακτικώς δεν επηρεάζει το συνεκτικό έδαφος που περιβάλλει την στήλη.

Η τεχνική αυτή, γνωστή ως «υγρή μέθοδος», εφαρμόζεται σε ασταθή εδάφη με μικρή αστράγγιστη συνοχή και υψηλό υπόγειο ορίζοντα· και τούτο διότι σε αυτή την περίπτωση οι παρειές του διατρήματος δεν θα ήταν ευσταθείς και θα κατέρρεαν· όμως, η συνεχής ροή νερού προς τα άνω παρασύρει το υλικό προς την επιφάνεια επιτρέποντας στο υλικό πλήρωσης να επεκτείνεται μέχρις ότου επιτευχθεί ισορροπία.

Κατά γενικό πρακτικό κανόνα, τα όρια εφαρμογής της μεθόδου είναι σε εδάφη με αστράγγιστη διατμητική αντοχή $C_u=10-50\text{kPa}$.

Το βασικό μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η επίπτωση στο περιβάλλον: εφόσον απαιτούνται μεγάλες ποσότητες νερού, η διάθεσή του πρέπει να ακολουθηθεί αποδεκτούς περιβαλλοντικούς κανόνες, ενώ η συσσώρευση λιμναζό-

ντων υδάτων στο εργοτάξιο επηρεάζει δυσμενώς τις συνθήκες κατασκευής των χαλικοπασσάλων.

2.1.2 Δονητική εκτόπιση (vibro-displacement)

Κατά την μέθοδο αυτή, γνωστή ως «ξηρή», ο κυλινδρικός δονητής εκτοπίζει το έδαφος πλευρικός καθώς προωθείται σ' αυτό, ενώ εκτοξεύεται συμπιεσμένος αέρας ώστε να διευκολυνθεί η διείσδυση. Μόλις ο δονητής φθάσει στο επιθυμητό βάθος αποσύρεται και το διάτρημα πληρούται με υλικό κατά στρώσεις και συμπυκνώνεται σταδιακά. Οι συνθήκες αυτές προϋποθέτουν λοιπόν ικανότητα αυτοϋποστήριξης των πλευρικών τοιχωμάτων του διατρήματος, συνθήκη η οποία πληρούται εφόσον η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του *in situ* εδάφους είναι αρκετά υψηλή και ο υπόγειος ορίζοντας χαμηλά. Οι χαλικοπάσσαλοι που προκύπτουν με χρήση της μεθόδου αυτής είναι συνήθως μικρότερης διαμέτρου από εκείνη της υγρής μεθόδου, εφόσον υλοποιούνται σε πιο στιφρά εδάφη και η ποσότητα του υλικού που απομακρύνεται είναι κατά πολύ μικρότερη. Κατά γενικό πρακτικό κανόνα, τα όρια εφαρμογής της μεθόδου είναι σε εδάφη με αστράγγιστη διατμητική αντοχή $C_u=30-60\text{kPa}$. Εννοείται ότι από πλευράς περιβαλλοντικών επιπτώσεων η ξηρή μέθοδος υπερτερεί της υγρής μεθόδου.

Με τις ως άνω δύο μεθόδους ελέγχονται οι εγκάρσιες διαστάσεις των χαλικοπασσάλων, δηλαδή η διάμετρός τους· απαιτείται πάραυτα ιδιαίτερη προσοχή κατά την εκτέλεση, δεδομένου ότι η διάμετρος του δονητή είναι μικρή σε σχέση με την επιθυμητή τελική διάμετρο του χαλικοπασσάλου.

Επισημαίνεται ότι το εργοτάξιο επιβαρύνεται με βαριά μηχανήματα και σύνθετα συγκροτήματα (γερανοί, φορτωτές, ηλεκτρογεννήτριες, αντλίες, δονητές *vibroflot*, σωλήνες κ.λ.π.), ενώ κατά την διαδικασία χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες νερού, οι οποίες πολλές φορές είναι προβληματικό να ανεβρεθούν.

Οι μέθοδοι είναι τυποποιημένες και αποτελούν προνόμιο ελάχιστων εταιριών. Από οικονομικής πλευράς, υπάρχει το πλεονέκτημα της ταχύτητας και της δυνατότητας κατασκευής χαλικοπασσάλων σημαντικής διαμέτρου.

2.2 Έλεγχος κατά την κατασκευή

Η διαδικασία κατασκευής των χαλικοπασσάλων επηρεάζει ως ένα βαθμό την απόδοσή τους. Οι ακόλουθες παράμετροι έχουν βαρύνουσα σημασία κατά την κατασκευή:

- (1) η πραγματική διάμετρος που επιτυγχάνεται επί τόπου
- (2) η επίδραση της διείσδυσης λεπτοκόκκων στην διαπερατότητα και την γωνία διατμητικής αντοχής των χαλικοπασσάλων
- (3) η επίδραση της μεθόδου κατασκευής στο περιβάλλον έδαφος και σε ήδη εγκατεστημένους χαλικοπασσάλους.

Κατά τον προσδιορισμό της πραγματικής διαμέτρου ενός χαλικοπασσάλου είναι απαραίτητη η καταγραφή της ποσότητας του υλικού πλήρωσης και το βάθος. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, ο συνολικός όγκος του χαλικοπασσάλου συνδέεται με τον συνολικό όγκο των χαλίκων που χρησιμοποιήθηκαν αφαιρουμένων βεβαίως των απωλειών στην επιφάνεια. Για την επιβεβαίωση της μέγιστης συμπυκνωμένης διαμέτρου απαιτείται συνεχής καταγραφή των τιμών στο αμπερόμετρο του δονητή, ενώ η συμπύκνωση πρέπει να γίνεται επιμελώς σε όλες τις στρώσεις των χαλίκων.

Σημαντικός παράγοντας για την επιτυχή κατασκευή των χαλικοπασσάλων είναι η συνεχής διατήρηση της προς τα πάνω ροής του εκτοξευόμενου νερού, έτσι ώστε να παρασύρονται τα λεπτόκοκκα συστατικά του εδάφους. Κατ' αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η διείσδυση των τελευταίων στο σώμα του χαλικοπασσάλου και ευνοείται η σταθεροποίησή του.

2.3 Πεδίο εφαρμογής

Οι χαλικοπάσσαλοι προορίζονται για την ενίσχυση αργιλικών και ιλυωδών εδαφών. Επομένως, το κριτήριο κοκκομετρίας για την εφαρμογή τους είναι το διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο Νο200 να είναι τουλάχιστον 18%.

Η αποτελεσματικότητα των χαλικοπασσάλων στις μαλακές αργίλους μεγάλης ευαισθησίας είναι αμφισβητήσιμη, λόγω της επίδρασης της διαδικασίας εγκατάστασης στη διατμητική αντοχή του *in situ* εδάφους. Γενικώς, οι χαλικοπασσαλοι δεν συνιστώνται σε εδάφη με ευαισθησία μεγαλύτερη του 5.

Τα φορτία που καλούνται να παραλάβουν κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 100 και 300kN.

3. Μηχανική συμπεριφορά των χαλικοπασσάλων

3.1 Βασικές παράμετροι

Η μηχανική συμπεριφορά ενός χαλικοπασσάλου, εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- (1) την διάμετρο του χαλικοπασσάλου
- (2) την απόσταση μεταξύ τους
- (3) την γωνία διατμητικής αντοχής των χαλίκων
- (4) την διατμητική αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους
- (5) τον λόγο των τάσεων μεταξύ χαλικοπασσάλου-εδάφους
- (6) την σχέση τάσεων –παραμορφώσεων του εδάφους.

Η διάμετρος των χαλικοπασσάλων υπαγορεύεται από τον επιθυμητό βαθμό βελτίωσης, την μέθοδο εγκατάστασης, το μέγεθος των χαλίκων και την αντοχή του εδάφους. Ειδικότερα, η διάμετρος είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο η συνεκτικότητα του εδάφους είναι μικρότερη. Οι τιμές της διαμέτρου κυμαίνονται συνήθως στην πράξη μεταξύ 0.45m και 1.20m. Οι μικρότερες τιμές αντιστοιχούν σε χαλικοπασσάλους με υλικό μέσης διαμέτρου κόκκου 4cm, ενώ οι μεγαλύτερες αφορούν σε χάλικες διαμέτρου 10cm.

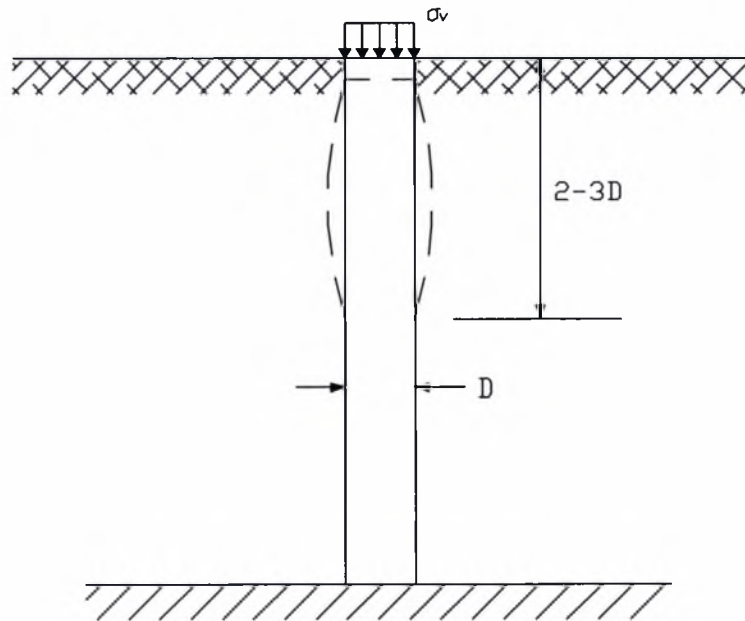
Ο κάρναβος των χαλικοπασσάλων μορφώνεται συνήθως τετραγωνικός ή τριγωνικός, με απόσταση μεταξύ των αξόνων των πασσάλων που κυμαίνεται από 1.5m έως 3.5m. Οι χαλικοπάσσαλοι μπορεί να κατασκευάζονται σε σειρές ή σε μικρές ομάδες στην περίπτωση μικρών φορτίων ή και σε μεγαλύτερες ομάδες για πιο εκτεταμένα καταναμημένα φορτία όπως π.χ. επιχώματα.

Η γωνία διατμητικής αντοχής των χαλίκων εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα τους, την τεχνική εγκατάστασης και την ενδεχόμενη εισχώρηση λεπτόκοκκου υλικού από το περιβάλλον έδαφος στο σώμα του χαλικοπασσάλου. Ο Greenwood (1970) πρότεινε την τιμή των 35° για την γωνία αυτή, όμως σε δοκιμές άμεσης διάτμησης καταγράφηκαν γωνίες μεταξύ 40° και 45° . Επισημαίνεται όμως ότι επιτυγχάνονται γωνίες διατμητικής αντοχής 40° έως 45° , εφόσον η εγκατάσταση γίνεται με vibroflot, η διαδικασία δόνησης είναι σταθερώς ομοιόμορφη και το υλικό συμπυκνώνεται επίσης ομοιόμορφα. Επίσης, οι Greenwood και Kirsch (1984) κατέληξαν μέσω παραμετρικών αναλύσεων στο συμπέρασμα ότι διαφορές της τάξεως των 5° στη γωνία διατμητικής αντοχής προκαλεί σχετικώς μικρή διαφοροποίηση στην τελική φέρουσα ικανότητα και την καθίζηση των χαλικοπασσάλων. Παρ' όλα αυτά, η γωνία αυτή μπορεί να έχει μεγάλη επίδραση στην διατμητική αντοχή του βελτιωμένου εδάφους.

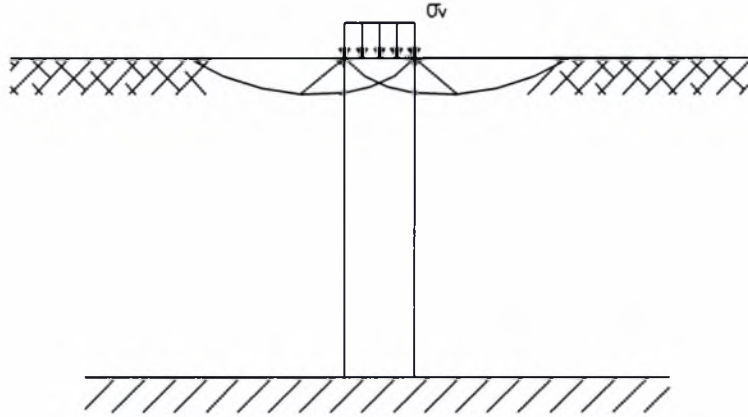
3.2 Μορφές αστοχίας των χαλικοπασσάλων

Στην πράξη, οι χαλικοπασσαλοί κατασκευάζονται συνήθως εις τρόπον ώστε να διαπερνούν ολόκληρο το στρώμα της μαλακής αργίλου και να φθάνουν έως το υποκείμενο στέρεο υπόβαθρο. Μπορούν όμως να κατασκευασθούν και ως αιωρούμενοι πάσσαλοι (floating piles) με την αιχμή τους στο αργλικό στρώμα.

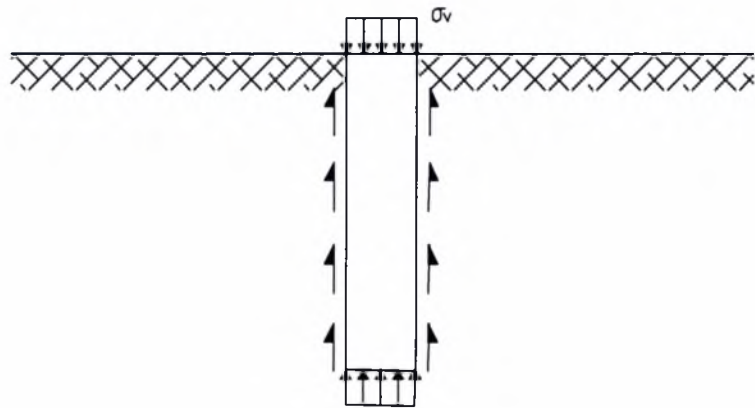
Οι χαλικοπασσαλοί μπορεί να αστοχήσουν μεμονωμένα ή και ως ομάδα. Οι μηχανισμοί αστοχίας τους παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα (Σχ. 3.1α, Σχ. 3.1β, Σχ.3.1γ).



Σχήμα 3.1α Θραύση λόγω πλευρικής διόγκωσης



Σχήμα 3.1β Θραύση λόγω διάτμησης



Σχήμα 3.1γ Θραύση λόγω διείσδυσης

3.2.1 Αστοχία λόγω πλευρικής διόγκωσης

Οι χαλικοπάσσαλοι είναι πιο άκαμπτοι από το έδαφος το οποίο αντικαθιστούν. Επειδή αποτελούνται από υλικό μη-συνεκτικό, η δυσκαμψία τους εξαρτάται από την πλευρική παρεμπόδιση του περιβάλλοντος εδάφους· αν αυτή η δεν είναι επαρκής, ο χαλικοπάσσαλος αστοχεί λόγω πλευρικής διόγκωσης (Σχ. 3.1α). Εφόσον η πλευρική πίεση που ασκεί το έδαφος αυξάνει με το βάθος, η διαρροή του χαλικοπάσσαλου είναι επίσης συνάρτηση του βάθους και λαμβάνει χώρο στο ανώτερο τμήμα του. Αυτός ο μηχανισμός αστοχίας παρουσιάζεται είτε ο χαλικοπάσσαλος εδράζεται σε στερεό υπόβαθρο είτε είναι αιωρούμενος στο στρώμα της αργίλου (συνήθως συμβαίνει η πρώτη περίπτωση). Πρόκειται για μακρούς χαλικοπάσσλους, το μήκος των οποίων υπερβαίνει τέσσερις φορές τη διάμετρό τους. Η λειτουργία του χαλικοπάσσαλου είναι ανάλογη με εκείνη ενός μη-συνεκτικού εδαφικού δείγματος υπό αξονομετρική συμπίεση με πλευρική τάση ίση με τη μέγιστη πλευρική αντοχή του εδάφους που περιβάλλει τον χαλικοπάσσαλο. Όσον ο χαλικοπάσσαλος διογκώνεται, η πλευρική αντίσταση του εδάφους φθάνει την οριακή της τιμή, όπου ο πάσσαλος πλαστικοποιείται και πλέον διογκώνεται απεριόριστα. Στην περίπτωση αυτή, η οριακή τάση στον χαλικοπάσσαλο εκφράζεται από την σχέση:

$$\sigma_v'(or.) = K_{p\chi\alpha\lambda.} \cdot \sigma_h'(max) \quad (3.1)$$

όπου: $\sigma_v'(or.)$: ενεργός αξονική οριακή τάση στον χαλικοπάσσαλο

$K_{p\chi\alpha\lambda.} = \text{ef}^2(45^\circ + \varphi/2)$: ο συντελεστής παθητικών ωθήσεων του υλικού του χαλικοπάσσαλου

$\sigma_h'(max) = \sigma_{r0}' + 4C_u$: η ενεργός διατμητική αντοχή του εδάφους που συνδέεται με την αστράγγιστη διατμητική συνοχή του C_u

$\sigma_{r0}' = \sigma_3 - u = (K_0 \cdot q) - u$: η οριζόντια ώθηση που προέρχεται από το σύνολο των υπερκείμενων φορτίων, σε ένα κρίσιμο βάθος από την κεφαλή, ίσο περίπου με $2D$

K_0 : συντελεστής ουδέτερης ώθησης ($K_0 \approx 0.6$ συνήθως)

q : κατακόρυφη τάση από το σύνολο των υπερκείμενων φορτίων

Είναι ενδεχόμενο οι χάλικες να εισέλθουν στην πλαστική περιοχή, όμως αυτό δεν συνεπάγεται αναγκαστικά αστοχία, εφόσον μπορούν να περιέλθουν σε κατάσταση πλαστικής ισορροπίας (κρατυνόμενη συμπεριφορά).

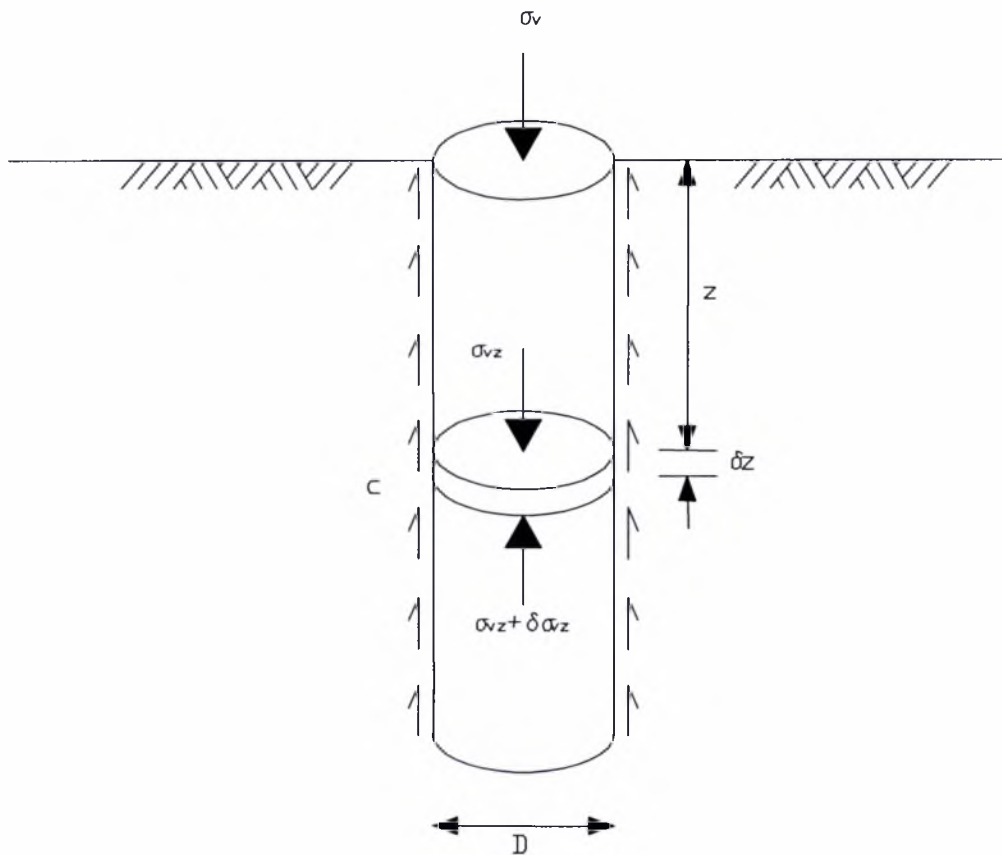
3.2.2 Αστοχία λόγω διείδυσης

Η ευστάθεια του σύνθετου συστήματος «έδαφος – χαλικοπάσσαλος» εξαρτάται επίσης από την πλευρική τριβή (skin friction) στην διεπιφάνειά τους, καθώς και από την αντίσταση στην αιχμής τους. Για παράδειγμα, αν το φορτίο ασκείται αποκλειστικά στον χαλικοπάσσαλο ή αν η καθίζησή του είναι μεγαλύτερη από εκείνη του εδάφους, αναπτύσσονται διατμητικές δυνάμεις στη διεπιφάνεια. Η εν λόγω μορφή αστοχίας αφορά στην ισορροπία των κατακόρυφων δυνάμεων που ασκούνται στον χαλικοπάσσαλο. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, ο χαλικοπάσσαλος μπορεί να αστοχήσει όπως και οι πάσσαλοι από O/Σ , λόγω ανεπαρκούς πλευρικής τριβής ή αντίστασης αιχμής. Έτσι, αν το κατακόρυφο φορτίο υπερβεί τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται πλευρικά στον χαλικοπάσσαλο και την

αντίσταση στην αιχμή του, αυτός αστοχεί σε διείσδυση (Σχ. 3.1γ). Από την ισορροπία δυνάμεων σ' ένα οριζόντιο τμήμα του χαλικοπασσάλου και υποθέτοντας σταθερή συνοχή c του περιβάλλοντος εδάφους σε όλο το μήκος του, προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_{vz} = \sigma_v + \frac{z}{D}(\rho D - 4c) \quad (3.2)$$

όπου ρ : η «ενεργή» πυκνότητα των χαλίκων
 σ_{vz} : η κατακόρυφη τάση εις βάθος z
 σ_v : η επιφορτική τάση.



Σχήμα 3.2 Δυνάμεις σε οριζόντιο τμήμα χαλικοπασσάλου

Από την ως άνω σχέση προκύπτει η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων με το βάθος, οι οποίες παρουσιάζονται μέγιστες στην κορυφή του χαλικοπασσάλου, ελαττώνονται δε σταδιακά για να φθάσουν τη μηδενική τιμή σε κάποιο βάθος. Κατά συνέπεια, οποιαδήποτε αύξηση του μήκους του χαλικοπασσάλου κάτω απ' αυτό το βάθος δεν θα αυξήσει την αντοχή του, ενώ όσο το μήκος του μειώνεται, κάποιο τμήμα της επιβαλλόμενης τάσης αναλαμβάνεται από το έδαφος κάτω από τον χαλικοπασσάλο οπότε αυτός συμπεριφέρεται ως

πάσσαλος αιχμής. Αν ο χαλικοπάσσαλος είναι τόσο κοντός ώστε η τάση στη βάση του να υπερβαίνει την αντίσταση αιχμής, τότε η αστοχία σε διείδυση θα προηγηθεί της αστοχίας από πλευρική διόγκωση.

Η μορφή αυτή αστοχίας αναφέρεται στους χαλικοπασσάλους που δεν διαπερνούν ολόκληρο το στρώμα της μαλακής αργίλου κι επομένως, δεν εδράζονται σε στερεό υπόβαθρο.

3.2.3 Αστοχία σε διάτμηση

Σε αυτή την περίπτωση, ο χαλικοπάσσαλος εδράζεται σε στέρεο υπόβαθρο και το μήκος του είναι μικρότερο του $4D$. Η μορφή αυτή αστοχίας προσομοιώνεται με την διατμητική αστοχία θεμελίου, το οποίο εδράζεται σε «μικτό» έδαφος, με παραμέτρους εξαρτώμενες και από το υλικό των χαλικοπασσάλων και από το περιβάλλον έδαφος.

Γενικώς:

- Χαλικοπάσσαλοι που εδράζονται σε στέρεο υπόβαθρο με μήκος $L > 4D$ πρέπει να ελέγχονται έναντι αστοχίας λόγω πλευρικής διόγκωσης
- Χαλικοπάσσαλοι που εδράζονται σε στέρεο υπόβαθρο με μήκος $L < 4D$ πρέπει να ελέγχονται έναντι αστοχίας λόγω διάτμησης
- Αιωρούμενοι χαλικοπάσσαλοι με μήκος $L < 4D$, εκτός από τις δύο μορφές αστοχίας, πρέπει να ελέγχονται και σε διείδυση.

Πάντως, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή της κατάλληλης τιμής της παραμέτρου c , δεδομένου ότι δεν παρουσιάζεται συνήθως με σταθερή τιμή σε όλο το βάθος του στρώματος· κατά συνέπεια, άλλη τιμή πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά τον έλεγχο της αστοχίας λόγω πλευρικής διόγκωσης, που επισυμβαίνει στο άνω τμήμα του χαλικοπασσάλου, και άλλη κατά την αστοχία σε διείδυση, η οποία εξαρτάται από τη συνοχή στην αιχμή του.

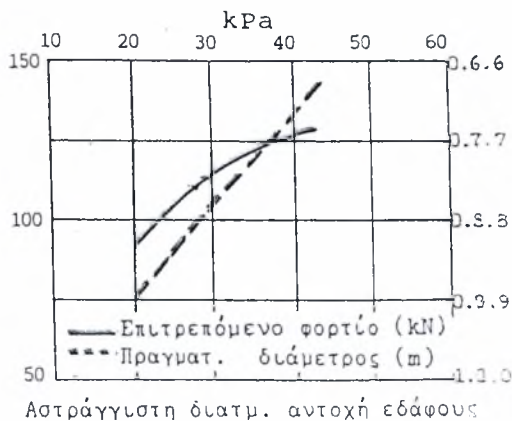
4. Σχεδιασμός των χαλικοπασσάλων

4.1 Εμπειρικές μέθοδοι

Οι μηχανισμοί αστοχίας που προαναφέρθηκαν και αποσκοπούν στον προσδιορισμό του οριακού φορτίου «θραύσης» μεμονωμένου χαλικοπασσάλου αποτελούν τη βάση για τον θεωρητικό τρόπο διαστασιολόγησης των χαλικοπασσάλων. Παρακάτω αναφέρονται οι εμπειρικές μέθοδοι διαστασιολόγησης.

4.1.1 Κατά Thornburn-Mac Vicar (1968)

Στη βάση των αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών σε φυσικό προσομοίωμα εδαφών και την προσπάθεια αναπαραγωγής της συμπεριφοράς των χαλικοπασσάλων, οι Thornburn-Mac Vicar προχώρησαν σε διατύπωση πρότασης διαστασιολόγησης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζουν σε διάγραμμα (Σχήμα 4.1) το επιτρεπόμενο φορτίο χαλικοπασσάλου σε σχέση τόσο με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους όσο και με την πραγματική διάμετρο.



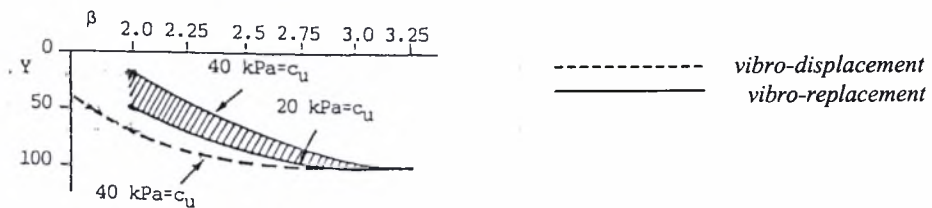
Σχήμα 4.1 Επιτρεπόμενο φορτίο χαλικοπασσάλων κατά Thornburn

Ο χαρακτήρας της μεθόδου αυτής διαστασιολόγησης είναι εντελώς ενδεικτικός και η πραγματική διάμετρος πρέπει να ελέγχεται στο εργοτάξιο μέσω του όγκου του υλικού που χρησιμοποιείται.

4.1.2 Κατά Greenwood (1972)

Ο Greenwood πρότεινε τη διαστασιολόγηση των χαλικοπασσάλων με κριτήριο την μείωση των καθιζήσεων που προκύπτει από την κατασκευή των χαλικοπασσάλων κάτω από θεμελιώσεις μεγάλων διαστάσεων.

Οι προτάσεις Greenwood έχουν το πλεονέκτημα ότι λαμβάνουν υπόψη τόσο την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους, όσο και την μέθοδο κατασκευής τους (vibro-displacement ή vibro-replacement). Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται, κατά Greenwood, η μείωση των καθιζήσεων γ , συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των χαλικοπασσάλων β και της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του περιβάλλοντος εδάφους. Η μείωση των καθιζήσεων εκφράζεται ως ο λόγος καθίζησης του βελτιωμένου εδάφους προς την καθίζηση του αρχικού εδάφους.



Σχήμα 4.1 Επιτρεπόμενο φορτίο χαλικοπασσάλων κατά Greenwood

4.2 Ελαστική θεωρία

Το 1981 οι Balaam και Booker έδωσαν ελαστική λύση στο πρόβλημα, υποθέτοντας ότι τόσο ο χαλικοπάσσαλος όσο και το περιβάλλον έδαφος συμπεριφέρονται γραμμικώς ελαστικά. Σε μία από τις αναλύσεις τους υπέθεσαν ότι το μέτρο του Young του χαλικοπασσάλου ήταν δεκαπλάσιο από εκείνο της αργίλου, ενώ ο συντελεστής Poisson ήταν ο αυτός και για τα δύο υλικά. Σε σύγκριση με τις τιμές που καταγράφηκαν πειραματικώς σε υλικά με την ίδια αναλογία στα μέτρα Young, η ελαστική θεωρία οδήγησε σε πολύ μικρότερες τιμές των παραμορφώσεων του βελτιωμένου εδάφους.

Πολλοί είναι οι παράγοντες που οδήγησαν σε αυτή την ασυμφωνία. Στα πειράματα οι συντελεστές Poisson των χαλίκων και της αργίλου ήταν μάλλον διαφορετικοί. Πάραυτα, ακόμη και μετά την χρήση διαφορετικών συντελεστών Poisson για τα δύο υλικά στην ελαστική θεωρία, η διαφορά εξακολουθούσε να είναι σημαντική. Ο δεύτερος παράγοντας που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι το υλικό πλήρωσης στο εργαστήριο παρουσιάζει μεγάλη ανισοτροπία εξαιτίας της διαδικασίας τοποθέτησής του στη συσκευή. Και πάλιν όμως ο παράγοντας αυτός δεν ήταν ο βασικός λόγος της διαφοράς στα αποτελέσματα.

Στην πραγματικότητα, οι χαλικοπάσσαλοι μικρής διατομής διαρρέουν σε υψηλές τιμές τάσεων (σε σχέση με τις τάσεις του περιβάλλοντος εδάφους). Αυτή η συμπεριφορά του υλικού πλήρωσης των χαλικοπασσάλων διαφέρει από την συμπεριφορά που έχει υποθεθεί στην ελαστική ανάλυση. Η τελευταία οδηγεί σε ορθότερες λύσεις για μεγάλες τιμές της διαμέτρου του χαλικοπασσάλου, οπότε η συμπεριφορά τους πλησιάζει την ελαστικότητα. Έρευνες του Charles (1976) έδειξαν ότι το άνω όριο για την εφαρμογή της ελαστικότητας προσεγγίζεται όταν ο λόγος των κυρίων τάσεων στους χάλικες και το έδαφος είναι ποσοστό άνω του 80% του λόγου αυτού στην αστοχία.

Από πειράματα του Charles & Watts (1983), διαπιστώθηκε ότι όταν ο λόγος των μέτρων Young είναι χαμηλότερος, οι ελαστικές υποθέσεις ισχύουν και για μικρότερες τιμές διατομών των χαλικοπασσάλων.

4.3 Πλαστική ανάλυση

Οι διευθύνσεις των κυρίων τάσεων είναι η κατακόρυφη, η ακτινική και η εφαπτομενική. Κατ' ουσίαν διατμητικές τάσεις στις δύο τελευταίες διευθύνσεις προκαλούνται τόσο εξαιτίας απότομων αλλαγών στην διατμητική αντοχή του εδάφους με το βάθος όσο και λόγω της αύξησης της πλευρικής τάσης στον χαλικοπάσσαλο με το βάθος. Το μέγεθος της επίδρασης που έχει η αύξηση της πλευρικής τάσης με το βάθος εξαρτάται από την ενεργό πυκνότητα του εδάφους και την γωνία διατμητικής αντοχής των χαλίκων. Αγνοώντας της διατμητικές τάσεις εφαπτομενικά και ακτινικά, τα αποτελέσματα επηρεάζονται γενικώς ελάχιστα.

Για την πλαστική φάση της ανάλυσης, οι χάλικες θεωρείται ότι συμπεριφέρονται στερεοπλαστικά και ότι είναι ασυμπίεστοι. Η διαρροή υποτίθεται ότι ακολουθεί το κριτήριο Mohr-Coulomb, ενώ χρησιμοποιούνται οι ενεργές παράμετροι αντοχής. Το έδαφος καθ' υπόθεσιν συμπεριφέρεται σύμφωνα με την θεωρία στερεοποίησης του Terzaghi, προσαρμοσμένη εις τρόπον ώστε να λαμβάνονται υπ' όψιν οι οριζόντιες και κατακόρυφες παραμορφώσεις.

Η κατασκευή του χαλικοπασσάλου θεωρείται ότι υλοποιείται σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο στην οποία επικρατούν συνθήκες αρχικής ηρεμίας (K_0). Η κατά κάποιον τρόπο διεύδυση των χαλίκων πλευρικά στο περιβάλλον έδαφος μέσω της διαδικασίας κατασκευής μπορεί προσωρινά να αυξήσει τον συντελεστή πλευρικών ωθήσεων. Αν το έδαφος δεν είναι ελεύθερα στραγγιζόμενο, δεν μπορεί να προκύψει σημαντική ογκομετρική μεταβολή κατά την σύντομη σχετικά διάρκεια της κατασκευής των χαλικοπασσάλων. Επίσης, επειδή οι χάλικες εκλαμβάνονται ως άκαμπτοι, οι μικρές ογκομετρικές μεταβολές που παρατηρούνται στην άργιλο μετά την κατασκευή προκαλούν αποτόνωση των τάσεων. Θεωρείται, λοιπόν, ότι ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων σύντομα θα επανέλθει στην αρχική του τιμή (K_0).

Όσον όμως εξελίσσεται η στερεοποίηση υπό το επιβαλλόμενο φορτίο, οι συνθήκες (K_0) στο έδαφος παύουν να ισχύουν διότι επιβάλλονται σε αυτό πλευρικές πιέσεις λόγω διόγκωσης του χαλικοπασσάλου. Ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων λαμβάνει πλέον τιμές μεταξύ (K_0) και ($1/K_0$) αναλόγως της γεωμετρίας του προβλήματος. Έτσι, αν η διάμετρος του χαλικοπασσάλου είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την διάμετρο της ζώνης επιρροής της, οι οριζόντιες παραμορφώσεις στο έδαφος θα είναι μικρές και ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων θα παραμείνει κοντά στην τιμή (K_0). Στην αντίθετη περίπτωση, θα πλησιάσει την τιμή ($1/K_0$).

Σύμφωνα με τις ως άνω υποθέσεις εργασίας, προέκυψαν εξισώσεις (Goughnour & Bayuk – 1979) με ενεργές παραμέτρους, από τις οποίες υπολογίζεται η κατακόρυφη παραμόρφωση και κατά συνέπεια η καθίζηση της αργίλου. Οι εξισώσεις αυτές είναι οι ακόλουθες:

$$\varepsilon_v = (1 - \alpha_s) \frac{C_c}{1 + e_s} \log_{10} \left[\frac{(P_o)_{vc} + \Delta P}{(P_o)_{vc}} \right] \quad (4.1)$$

$$\Delta P = \frac{(\Delta P)_{vc}^*}{1 + 2K_o} [1 + K + K_o K], K > 1 \quad (4.2)$$

$$\Delta P = \frac{(\Delta P)_{vc}^*}{1 + 2K_o} [1 + K + K_o], K \leq 1 \quad (4.3)$$

- Όπου ε_v : η κατακόρυφη παραμόρφωση (ίδια για την άργιλο και τους χάλικες)
 α_s : ο συντελεστής αντικατάστασης όπως ορίζεται πιο κάτω
 C_c : ο δείκτης συμπίεστικότητας της άργιλου
 e_o : ο αρχικός δείκτης κενών της άργιλου
 $(P_o)_{vc}$: η αρχική ενεργός κατακόρυφη τάση στην άργιλο
 $(\Delta P)_{vc}^*$: η μέση αύξηση της ενεργού κατακόρυφης τάσης στην άργιλο
 K : ο συντελεστής πλευρικών πιέσεων που εφαρμόζεται στις προσαυξήσεις φορτίου
 K_o : ο αρχικός συντελεστής πλευρικών πιέσεων.

4.4 Σχόλια επί των μεθόδων σχεδιασμού

Εκτός από τις μεθόδους ανάλυσης που προαναφέρθηκαν, έγιναν συγχρόνως και πολλές μετρήσεις πεδίου που βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς των χαλικοπασσάλων.

Παρ' όλα αυτά, όλες οι έρευνες δεν αποσαφήνισαν επαρκώς τον τρόπο με τον οποίο διαφορετικές εδαφικές παράμετροι επηρεάζουν την αλληλεπίδραση των χαλικοπασσάλων και του περιβάλλοντος εδάφους κατά την φόρτιση. Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις βασίσθηκαν σε διάφορες υποθέσεις σχετικά με την εδαφική συμπεριφορά, μερικές από τις οποίες μπορεί να είναι αμφισβητήσιμες. Από την άλλη πλευρά, οι επί τόπου μετρήσεις αναφέρονται σε συγκεκριμένες συνθήκες που είναι δύσκολο να γενικευθούν.

Από τα παραπάνω προέκυψε η ανάγκη διεξαγωγής πειραμάτων και εργαστηριακών δοκιμών τόσο για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των χαλικοπασσάλων όσο και της αλληλεπίδρασής τους με το περιβάλλον έδαφος, αλλά και για την διασταύρωση των αποτελεσμάτων με εκείνα των μεθόδων ανάλυσης.

Όμως και αυτή η τακτική παρουσίασε διάφορα προβλήματα. Κατ' αρχάς δεν ήταν δυνατόν να προσομοιωθούν με ακρίβεια οι πραγματικές συνθήκες· πιο συγκεκριμένα, δεν ήταν δυνατόν να αποληφθούν αδιατάρακτα δοκίμια για την δοκιμή του συμπιεσομέτρου· συνεπώς, τα δοκίμια ήταν αναμοχλευμένα και αυτό επηρέαζε τις μετρήσεις. Ακόμη, στις πραγματικές συνθήκες, η μαλακή άργιλος μπορεί να παρουσιάζει μεγαλύτερη ανισοτροπία από την άργιλο στο εργαστήριο. Η εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων όμως, προκαλεί μεγάλη αναδιάταξη των σωματιδίων της άργιλου στην περιβάλλουσα ζώνη, με αποτέλεσμα να διαταράσσεται σημαντικά η αρχική δομή της. Έτσι, οι συνθήκες εργαστηρίου πλησιάζουν τις πραγματικές συνθήκες πεδίου σε μεγαλύτερο βαθμό απ' αυτόν που θα περίμενε κάποιος.

5. Μηχανική συμπεριφορά του βελτιωμένου εδάφους

5.1 Γενικά

Τα περισσότερα φορτία, όπως αυτά των θεμελιώσεων ή των επιχωμάτων, επιβάλλονται στους γαλικοπασσάλους και στο περιβάλλον έδαφος με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμορφώνονται κατακόρυφως τα δύο στοιχεία κατά ίσες ποσότητες. Με ίσες λοιπόν τις κατακόρυφες παραμορφώσεις χαλίκων και αργίλου, η κατανομή των τάσεων στα δύο υλικά προσαρμόζεται στην χρονικά εξαρτώμενη ογκομετρική μεταβολή του μαλακού εδάφους. Εφόσον οι χάλικες είναι απαραμόρφωτοι σε σχέση με την άργιλο, σχεδόν όλη η ογκομετρική μεταβολή θα επισυμβεί στην άργιλο και θα προκαλέσει σε αυτήν κατακόρυφες και οριζόντιες παραμορφώσεις.

5.2 Βασικές σχέσεις

Όπως ελέχθη και προηγουμένως, οι χαλικοπασσάλοι κατασκευάζονται σε κάρναβο είτε τριγωνικό είτε τετραγωνικό, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.1.

Η απόσταση μεταξύ των κέντρων των χαλικοπασσάλων χαρακτηρίζεται (s). Όμως, είναι απαραίτητο για την ανάλυση να ληφθεί υπ' όψιν η ισοδύναμη ακτίνα επιρροής των χαλικοπασσάλων (D_e) που ορίζει την επιφάνεια επιρροής τους. Έτσι, για τον τριγωνικό κάρναβο ισχύει

$$D_e = 1.05s \quad , \quad (5.1)$$

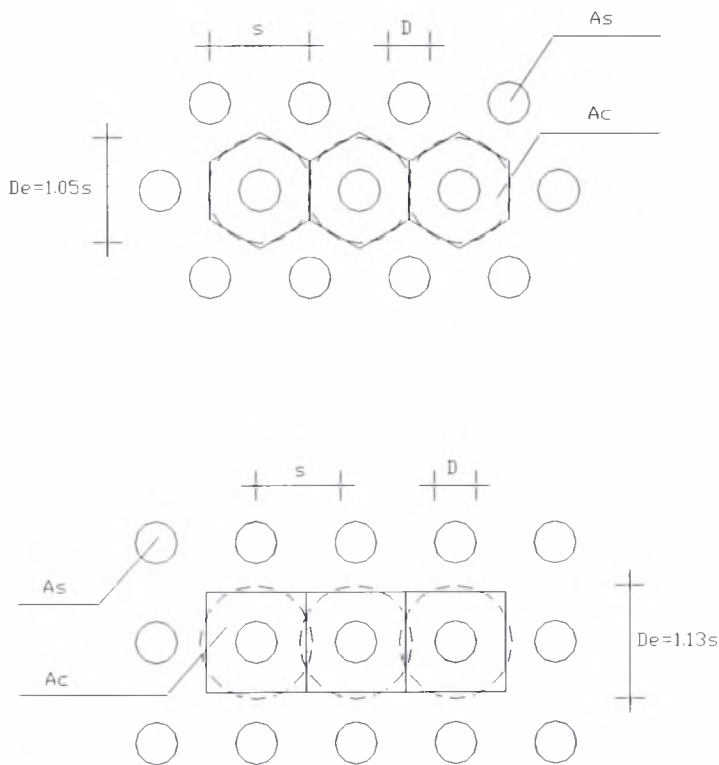
ενώ για τον τετραγωνικό κάρναβο είναι

$$D_e = 1.13s \quad . \quad (5.2)$$

Ορίζεται επίσης ο συντελεστής αντικατάστασης (*Area Replacement Factor*), που εκφράζει το ποσοστό αντικατάστασης του εγγενούς εδάφους και αποδίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$a_s = \frac{A_s}{A_s + A_c} \quad , \quad (5.3)$$

όπου A_s και A_c διακρίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



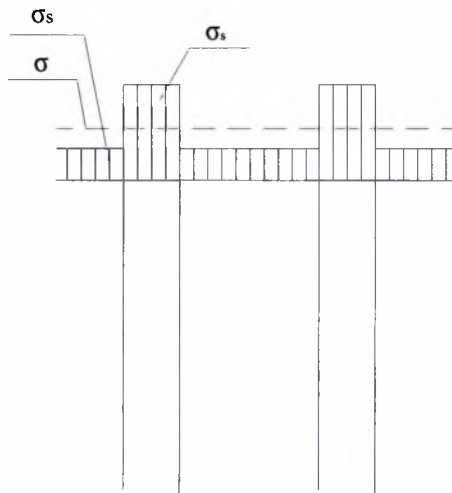
Σχήμα 5.1 Διατάξεις χαλικοπασσάλων

5.3 Κατανομή του φορτίου

Όταν φορτίζεται το βελτιωμένο έδαφος, παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων στον χαλικοπάσσαλο συνοδευόμενη από μείωσή τους στο περιβάλλον έδαφος. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι, κατά την φόρτιση, ο χαλικοπάσσαλος έχει την ίδια περίπου καθίζηση με την περιβάλλουσα άργιλο, επειδή όμως η ακαμψία του είναι μεγαλύτερη από εκείνη της άργιλου, οι τάσεις συγκεντρώνονται σε αυτόν. Η κατανομή του κατακόρυφου φορτίου εκφράζεται από τον *συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων (Stress Concentration Factor)* ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} , \quad (5.4)$$

όπου (σ_c) η τάση που ασκείται στον χαλικοπάσσαλο και (σ_s) η τάση που ασκείται στο περιβάλλον έδαφος, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.



Σχήμα 5.2 Κατανομή τάσεως στους χαλικοπασσάλους και στο έδαφος

Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το μέγεθος της σχετικής δυσκαμψίας των υλικών και τον λόγο (a_s). Οι τιμές που έχουν προταθεί κυμαίνονται μεταξύ 2 και 6 (Barksdale & Bachus – 1983), με πιο ενδεδειγμένες τις τιμές 3 και 4. Έχουν προταθεί όμως και μεγαλύτερες τιμές.

Η μέση τιμή της τάσης (σ), δεδομένου του συντελεστή αντικατάστασης, είναι:

$$\sigma = \sigma_c a_s + \sigma_s (1 - a_s) . \quad (5.5)$$

Εξαιτίας λοιπόν της μεγάλης ακαμψίας των χαλικοπασσάλων, το μεγαλύτερο μέρος των τάσεων συγκεντρώνεται σ' αυτόν. Η συγκέντρωση αυτή που αντιστοιχεί σε αποφόρτιση του περιβάλλοντος εδάφους δεν είναι άμεση, αλλά αναπτύσσεται σταδιακά με την εξέλιξη της πρωτεύουσας στερεοποίησης της άργιλου. Πράγματι, την στιγμή που θα επιβληθεί το φορτίο στο βελτιωμένο έδαφος η τάση στην άργιλο θα είναι μεγαλύτερη, διότι σε αυτήν επικρατούν

αστράγγιστες συνθήκες και συμπεριφέρεται ως ασυμπιέστο υλικό. Με την αποτόνωση όμως της πίεσης πόρων και λόγω της ακτινικής ροής προς τους χαλικοπασσάλους, η σχετική δυσκαμψία αργίλου – χαλίκων διαφοροποιείται και μάλιστα όσο οι πιέσεις πόρων αποτονούνται τόσο η σχετική δυσκαμψία του χαλικοπασσάλου αυξάνει. Η προοδευτικότητα αυτή της ανάληψης φορτίου συμφωνεί με επί τόπου παρατηρήσεις και μετρήσεις.

Συνήθως στην επιφάνεια του βελτιωμένου εδάφους τοποθετείται ένα στρώμα άμμου και χαλίκων, το οποίο διευκολύνει την μεταβίβαση του επιβαλλόμενου φορτίου στους χαλικοπασσάλους. Επίσης, με την πάροδο του χρόνου, όσον η άργιλος στερεοποιείται, προκαλείται επιπλέον μεταφορά φορτίου στους χαλικοπασσάλους λόγω αρνητικής τριβής (Munfakh et . al . 1984).

5.4 Φέρουσα ικανότητα χαλικοπασσάλου

Σύμφωνα με τη σύγχρονη θεώρηση, το υλικό των χαλικοπασσάλων συγκρατείται από τις πλευρικές τάσεις του εδάφους ως να βρίσκεται στην τριαξονική συσκευή. Η φόρτίσή του συνίσταται στην κατακόρυφη τάση σ_v' (λόγω της εξωτερικής φόρτισης) και στην πλευρική σ_r' (λόγω της πλευρικής πίεσης που ασκεί το έδαφος).

Η συμπεριφορά του φυσικού εδάφους μπορεί να προσομοιωθεί με εκείνη ενός δοκιμίου που υποβάλλεται σε δοκιμή πρεσσιόμετρου.

Θεωρώντας ότι οι χάλικες βρίσκονται σε οριακή ισορροπία, η αξονική οριακή τάση μέσα στον πάσσαλο δίδεται από τη σχέση 5.6 .

Επομένως η φέρουσα ικανότητα, επομένως, για τη βασικότερη μορφή αστοχίας (bulging failure), είναι:

$$q_u = A \cdot \varepsilon \varphi^2 (45^\circ + \varphi/2) \cdot (\sigma_{r0}' + 4Cu) \quad (5.6)$$

όπου:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} : \text{διατομή κορμού}$$

D : πραγματική διάμετρος του κορμού

Για την αστοχία λόγω διείσδυσης η φέρουσα ικανότητα θα είναι αντιστοίχως:

$$q_u \frac{\pi D^2}{4} = q_{bu} \frac{\pi D^2}{4} + f_s \pi D L \Rightarrow$$

$$q_u = q_{bu} + f_s \frac{4L}{D} \quad (5.7)$$

όπου:

$$q_{bu} = 9 \cdot Cu : \text{η αντίσταση αιχμής}$$

$f_s = a \cdot Cu$: πλευρική τριβή, όπου a εκφράζει φαινόμενα μαλάκυνσης της αργίλου από τις τεχνικές εγκατάστασης είναι $a = 1,00$ για μαλακές συνεκτικές αργίλους.

Για την αστοχία διατμητικού τύπου λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι «μικτού εδάφους»: c^* , $\tan \varphi^*$, γ^* , όπου:

$$c^* = (1 - \alpha_s) c_{εδ}$$

$$\tan \varphi^* = (1 - \alpha_s) \tan \varphi_{εδ} + \alpha_s \tan \varphi_{χαλ}$$

$$\gamma^* = \alpha_s \gamma_{χαλ} + (1 - \alpha_s) \gamma_{εδ}$$

Σ' αυτή την περίπτωση η φέρουσα ικανότητα του «μικτού εδάφους» είναι:

$$q_u = c^* N_c + q N_q + \frac{1}{2} \gamma^* B N_\gamma \quad (5.8)$$

Κατ' επέκταση το επιτρεπόμενο φορτίο κατ' επέκταση θα ισούται με:

$$q_{επ} = \frac{q_u}{FS} \quad (5.9)$$

όπου:

FS = Συντελεστής Ασφαλείας = 1.25 έως 2.50 περίπου.

Οι μικρές τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας μπορούν να δικαιολογηθούν από το γεγονός ότι:

- Η γωνία διατμητικής αντοχής $\phi=40^\circ$ για το υλικό των χαλικοπασσάλων που χρησιμοποιείται συνήθως θεωρείται πολύ μικρή
- Η πραγματική διατομή του χαλικοπασσάλου είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη από τη θεωρητική
- Υπάρχει μακροχρόνια αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους λόγω στερεοποίησης.

Σχετικά με το τελευταίο, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της κανονικά στερεοποιημένης αργίλου έχει βρεθεί ότι αυξάνεται γραμμικά με την ενεργή τάση (Leonards 1962). Η στερεοποίηση οδηγεί σε αύξηση των ενεργών τάσεων λόγω αποτόνωσης της πίεσης πόρων.

5.5 Κρίσιμο μήκος χαλικοπασσάλου

Οι Hughes et.al. (1976) όρισαν το «κρίσιμο μήκος» μεμονωμένου χαλικοπασσάλου θεωρώντας τον ως πάσσαλο θεμελίωσης. Πέρα απ' αυτό το μήκος, ο χαλικοπάσσαλος δεν συνεισφέρει επί πλέον στη φέρουσα ικανότητα, συνεχίζει όμως να μειώνει την καθίζηση εδραζόμενος σε στερεότερο υπόβαθρο. Με τυπικές παραμέτρους εδάφους και χαλικοπασσάλου, το κρίσιμο μήκος είναι περίπου τέσσερις φορές η διάμετρος του χαλικοπασσάλου.

5.6 Παραμορφωσιμότητα του χαλικοπασσάλου

Όσον αφορά στην ακτινική παραμόρφωση του χαλικοπασσάλου (ϵ_{sr}), αυτή είναι συνάρτηση της διαμέτρου του. Συγκεκριμένα, όσον αυξάνεται η διάμετρος τόσο ο λόγος (ϵ_{sr}/ϵ_v) μειώνεται. Έτσι, για μικρές τιμές του συντελεστή αντικατάστασης (α_s) οι ακτινικές παραμορφώσεις του χαλικοπασσάλου είναι πολύ μεγάλες ώστε αυτός να διαστέλλεται, ενώ για μεγάλες τιμές του (α_s) δεν παρατηρείται μεταβολή του όγκου στο σώμα του χαλικοπασσάλου και αυτός συμπεριφέρεται ελαστικά.

5.7 Καθίζηση βελτιωμένου εδάφους

Όσον αφορά την εκτίμηση των καθιζήσεων ενός χαλικοπασσάλου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θεωρία των Mattes-Poulos για τους κλασσικούς πασσάλους θεμελίωσης. Υπενθυμίζεται στην περίπτωση αυτή ότι το φορτίο θεμελίωσης μεταφέρεται πρακτικά στο υλικό του χαλικοπασσάλου (μεμονωμένος χαλικοπάσσαλος) και ότι οι άμεσες ψευδοελαστικές καθιζήσεις αποτελούν το μέγιστο μέρος των ολικών παραμορφώσεων. Πάντως και οι δύο αυτές τιμές των καθιζήσεων μπορούν να εκτιμηθούν εισάγοντας τις αντίστοιχες τιμές αστράγγιστου και στραγγιζόμενου μέτρου ελαστικότητας στη σχέση των Mattes-Poulos:

$$S = \frac{P}{LE_{εδ}} I_p \quad (5.10)$$

όπου:

S: η καθίζηση στην κεφαλή του χαλικοπασσάλου

L: το μήκος του χαλικοπασσάλου

P: το φορτίο στην κεφαλή του χαλικοπασσάλου

$E_{εδ}$: το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

I_p : ο συντελεστής επιρροής που εξαρτάται από τη σχετική ακαμψία ($K=E_{χαλ}/E_{εδ}$), όπου $E_{χαλ}$ είναι το μέτρο ελαστικότητας του χαλικοπασσάλου (μια λογική εκτίμηση της τιμής αυτής είναι μεταξύ 10 και 25).

Σχετικά με το ενισχυμένο έδαφος, οι περισσότερες προσεγγίσεις υπολογισμού των καθιζήσεων βασίζονται στην θεώρηση ότι κάθε χαλικοπάσσαλος έχει μία επιφάνεια επιρροής με ακτίνα D_c (unit cell). Το προσομοίωμα που λαμβάνει υπόψη την παραπάνω θεώρηση είναι ανάλογο με τη δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης. Έτσι, όλη η ζώνη επιρροής του χαλικοπασσάλου (unit cell) περιορίζεται από ένα άκαμπτο όριο μηδενικής τριβής, ενώ οι κατακόρυφες παραμορφώσεις είναι ομοιόμορφες σε κάθε οριζόντιο επίπεδο.

Ορίζεται ο *συντελεστής μείωσης των καθιζήσεων (Settlement Reduction Ratio)* :

$$R = \frac{S_t}{S_o} \quad (5.11)$$

όπου:

S_t : η καθίζηση του ενισχυμένου εδάφους

S_o : η καθίζηση του αρχικού εδάφους.

Ο συντελεστής μείωσης των καθιζήσεων (R) συνδέεται στενά με τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων (n). Έχει αποδειχθεί ότι οι οριζόντιες τάσεις στην άργιλο επηρεάζονται ελάχιστα από διαφοροποιήσεις στη διάμετρο των χαλικοπασσάλων, οπότε η μείωση της συμπίεστικότητας είναι συνάρτηση κυρίως της μείωσης των κατακόρυφων τάσεων στην άργιλο. Σημαντική όμως μείωση της κατακόρυφης τάσης στην άργιλο επέρχεται μόνο όταν η διάμετρος των χαλικοπασσάλων είναι αρκετά μεγάλη και η απόσταση μεταξύ τους αρκετά

μικρή, όταν δηλαδή ο συντελεστής αντικατάστασης (α_s) είναι σημαντικός (μεταξύ 0.25 και 0.33).

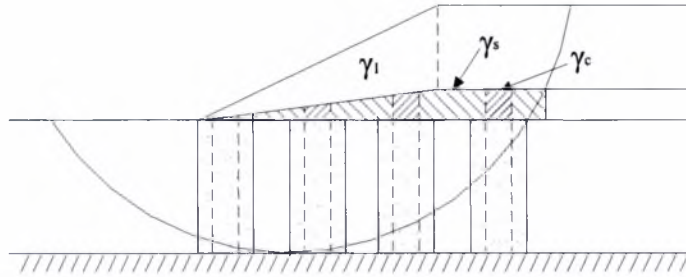
Η αποτελεσματικότητα των χαλικοπασσάλων στην αύξηση του βαθμού στερεοποίησης αυξάνεται σημαντικά και με την αύξηση της διείδυσης του, ενώ σημαντικές μειώσεις της καθίζησης επιτυγχάνονται μόνον όταν ο χαλικοπασσαλός διαπερνάει ολόκληρο το στρώμα της αργίλου.

Επιπλέον, δοκιμές συμπιεσομέτρου και επί τόπου μετρήσεις υποδεικνύουν ότι μεγαλύτερη στερεοποίηση επισυμβαίνει κοντά στον χαλικοπασσαλο, μειώνεται δε όσον η απόσταση απ' αυτόν αυξάνει.

Γενικώς, οι Besanscon, et.al. (1984) αναφέρουν μειώσεις της καθίζησης κατά 1.5 έως 4.2 φορές, βασιζόμενοι σε 13 περιπτώσεις ενίσχυσης του εδάφους με χαλικοπασσάλους.

5.8 Γενική ευστάθεια των επιχωμάτων

Όταν χρησιμοποιούνται για την ευστάθεια επιχωμάτων, οι χαλικοπάσσαλοι σχεδιάζονται με βάση την ανάλυση κυκλικής ολίσθησης όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, λαμβάνοντας υπόψη την αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου, την αντίσταση τριβής του χαλικοπασσάλου, τον συντελεστή αντικατάστασης και την κατάσταση φόρτισης.



Σχήμα 5.3 Ανάλυση ευστάθειας επιχώματος σύμφωνα με την “profile method”

Όπως και στην ανάλυση ευστάθειας πρανών για κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης, έτσι και στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η απλοποιημένη μέθοδος των λωρίδων, λαμβανομένου υπόψη και του Συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων.

Στη μέθοδο γνωστή ως “profile method”, κάθε σειρά χαλικοπασσάλων θεωρείται ως μία συνεχόμενη λωρίδα πλάτους w . Κάθε λωρίδα κοκκώδους ή συνεκτικού υλικού αναλύεται με βάση την πραγματική γεωμετρία και τις πραγματικές του ιδιότητες. Για έναν οικονομικό σχεδιασμό, πρέπει να ληφθεί υπόψη η συγκέντρωση των τάσεων στον χαλικοπάσσαλο, η οποία προκαλεί αύξηση της ανθιστάμενης διατμητικής δύναμης. Το φαινόμενο προσομοιώνεται τοποθετώντας λεπτές πλασματικές λωρίδες εδάφους επάνω από το έδαφος και τους χαλικοπασσάλους, στη στάθμη της διεπιφάνειας με το επίχωμα. (Σχ. 5.3) Το βάρος των λωρίδων αυτών πάνω από τους χαλικοπασσάλους είναι σχετικά μεγάλο, έτσι ώστε να προκαλέσει τον επιθυμητό βαθμό συγκέντρωσης τάσεων, όταν προστίθενται στις τάσεις του επιχώματος. Αντίθετα, το βάρος τους επάνω από το έδαφος πρέπει να είναι αρνητικό, για να προσδώσει την αρμόζουσα μείωση των τάσεων.

Στην μέθοδο “Average shear strength method”, οι Aboshi, et.al. (1979) χρησιμοποίησαν τις παραμέτρους του «μικτού εδάφους» για να ορίσουν τη μέση διατμητική αντοχή του ενισχυμένου εδάφους. Η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υπολογιστικά προγράμματα τα οποία υποθέτουν τη συγκέντρωση τάσεων στους χαλικοπασσάλους.

5.9 Θεώρηση του προβλήματος

Η ανάλυση του προβλήματος του βελτιωμένου εδάφους με χαλικοπασσάλους έχει μέχρι τώρα αντιμετωπισθεί με δύο τρόπους: α) με την θεωρία της οριακής ισορροπίας κατά Rankine και β) με ελαστική προσέγγιση.

5.9.1 Οριακή ισορροπία κατά Rankine

Η οριακή ισορροπία κατά Rankine βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

1. Συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.
2. Κατακόρυφο όριο, λείο (δεν αναπτύσσονται τριβές στη διεπιφάνεια) και άκαμπτο.
3. Επαρκής παράλληλη μετάθεση του κατακόρυφου ορίου, ώστε να κινητοποιηθεί πλήρως η διατμητική αντοχή του εδάφους κατά Mohr-Coulomb.
4. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής c, ϕ έχουν σταθερές τιμές σε κάθε σημείο των επιπέδων αστοχίας.
5. Η συνολική αντιστηριζόμενη γεωμάζα χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφη διασταλτικότητα.
6. Η άνω επιφάνεια της αντιστηριζόμενης γεωμάζας είναι οριζόντια και αφόρτιστη.
7. Οι τάσεις έχουν σταθερές τιμές σε κάθε δεδομένο βάθος υπό την οριζόντια (Άρα, ο ενδεχόμενος ΥΟ είναι προς αυτήν και οι υπερπιέσεις πόρων είναι μηδενικές).

Σ' αυτή την περίπτωση οι χαλικοπάσσαλοι βρίσκονται αρχικά υπό καθεστώς αξονομετρικής συμπίεσης (K_0), λόγω γεωστατικού πεδίου. Οι γεωστατικές συνθήκες συνίστανται στην κατακόρυφη γεωστατική τάση ($\sigma_{v0} = \gamma z$) και στην οριζόντια γεωστατική τάση ($\sigma_{h0} = K_0 \sigma_{v0}$), όπου (K_0) ο συντελεστής πλευρικών πιέσεων σε ηρεμία.

Όταν η πλευρική δρώσα τάση σ_h αυξηθεί, λόγω επιφόρτισης, από την αρχική τιμή της (σ_{h0}) στην οριακή τιμή (σ_{hp}), οι χαλικοπάσσαλοι θα περιέλθουν στην οριακή κατάσταση παθητικής ισορροπίας. Τότε ο συντελεστής πλευρικών πιέσεων λαμβάνει πλέον την τιμή ($K_p = \sigma_{hp} / \sigma_{v0}$) και ονομάζεται συντελεστής παθητικών ωθήσεων.

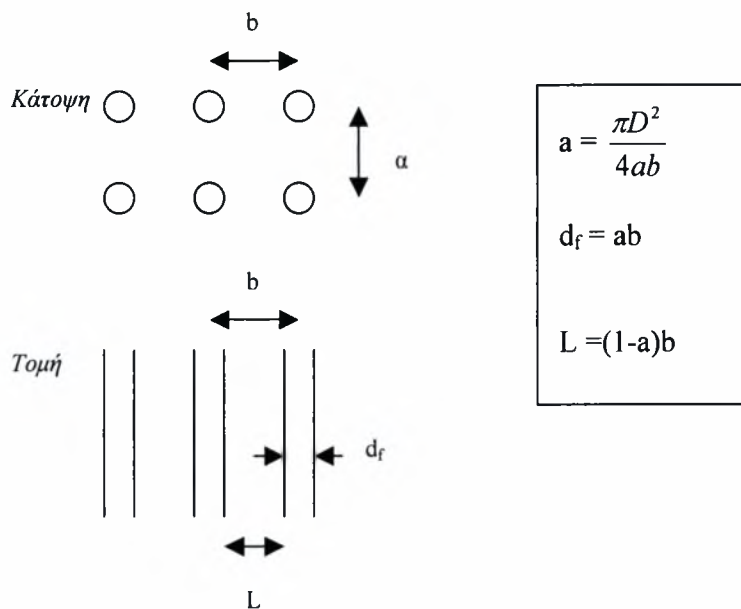
Κατόπιν τούτων, για την ανάλυση οι χαλικοπάσσαλοι αντικαθίστανται από τοίχους χαλίκων ("stone walls") με ισοδύναμη διατομή ('Improvement of settlement behaviour of soft layers by means of stone columns' by W. Van Impe & E. De Beer). Το ισοδύναμο πλάτος d_f του τοίχου (Σχήμα 5.4) δίνεται ως:

$$d_f = \frac{\pi D^2}{4a} \quad (5.12)$$

όπου :

D : η διάμετρος του χαλικοπασσάλου

a : η μικρότερη απόσταση μεταξύ των χαλικοπασσάλων

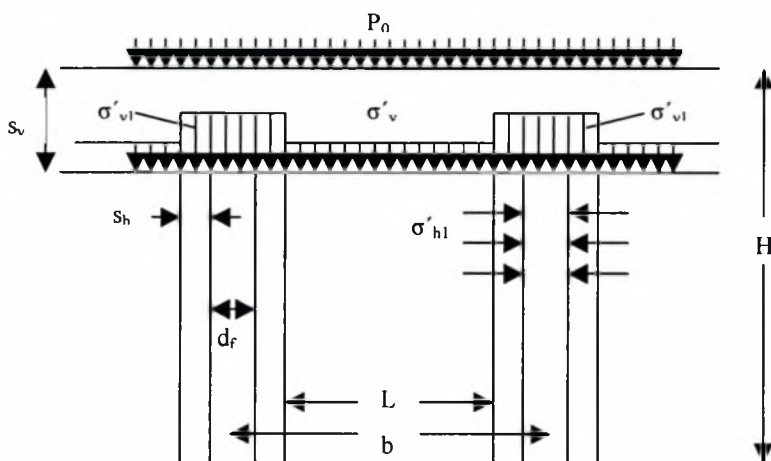


Σχήμα 5.4 Ισοδύναμο πλάτος d_f

Ακόμη, οι διατμητικές τάσεις μεταξύ χαλικοπασσάλων και περιβάλλοντος εδάφους αμελούνται, όπως αμελούνται επίσης και το ίδιο βάρος εδάφους και χαλίκων ('the only weight of the soil and columns also is neglected'). Τέλος, το στρώμα κάτω από τους χαλικοπασσάλους θεωρείται απαραμόρφωτο.

Η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογισμού βασίζεται στην υπόθεση ότι οι «τοιχοί χαλίκων» ενώ βρίσκονται σε κατάσταση οριακής ισορροπίας παραμορφώνονται υπό σταθερό όγκο. Έτσι, κατά το παρακάτω σχήμα (Σχ. 5.5) θα είναι:

$$d_f H = (d_f + 2s_h)(H - s_v) \tag{5.13}$$



Σχήμα 5.5 Παραμόρφωση βελτιωμένου εδάφους υπό επιβαλλόμενο φορτίο P_0

Για την παραμόρφωση του εδάφους, υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, θα ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$s_v = \frac{H}{E} (1 - \nu^2) (\sigma'_{v'} - \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma'_{h'}) \quad (5.14\alpha)$$

$$s_h = \frac{L}{2E} (1 - \nu^2) (\sigma'_{h'} - \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma'_{v'}) \quad (5.14\beta)$$

Από την κατακόρυφη ισορροπία προκύπτει ότι (βλ. Σχ. 5.5):

$$P_0 b = (d_f + 2s_h) \sigma'_{v'} + (L - 2s_h) \sigma'_{v'} \quad (5.15)$$

Αν ϕ_1 είναι η γωνία διατμητικής αντοχής του «τοίχου χαλίκων» και $c_1=0$, τότε σύμφωνα με τη θεωρία οριακής ισορροπίας κατά Rankine θα είναι:

$$\begin{aligned} \sigma'_{v'} &= \sigma'_{h'} \cdot K_p \Rightarrow \\ \sigma'_{v'} &= \sigma'_{h'} \cdot \tan^2(45^\circ + \phi_1/2) \end{aligned} \quad (5.16)$$

Επιπλέον θα ισχύει και η σχέση:

$$\sigma'_{h'} = \sigma'_{h'}$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, αναπτύσσονται αναλυτικές εκφράσεις που δίδουν την οριζόντια και κατακόρυφη παραμόρφωση (s_h) και (s_v) αντίστοιχα του «τοίχου χαλίκων» και τις ενεργές οριζόντιες και κατακόρυφες τάσεις στο έδαφος ($\sigma'_{v'}$) και ($\sigma'_{h'}$).

5.9.2 Ελαστική προσέγγιση

Ο Balaam (1978) παρουσίασε εξισώσεις για γραμμική ελαστική συμπεριφορά υλικού υπό συνθήκες φόρτισης όμοιες με αυτές που θεωρούνται στον χαλικοπάσσαλο.

Γίνεται η υπόθεση λείων ορίων ('smooth end conditions'), ενώ οι χάλικες και η άργιλος εκλαμβάνονται ως υλικά με γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Ιδιαίτερη προσοχή δίδεται στην επιλογή των παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά της αργίλου.

Υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης του ισοδύναμου «τοίχου χαλίκων» και με την υπόθεση παρουσίας φορτίου μικρότερου του φορτίου αστοχίας, οι παραμορφώσεις δίνονται από τις σχέσεις:

- Για τον χαλικοπάσσαλο:

$$s_v = \frac{H}{E_1} (1 - \nu_1^2) (\sigma'_{v'} - \frac{\nu_1}{1 - \nu_1} \sigma'_{h'}) \quad (5.17\alpha)$$

$$s_h = \frac{d_f}{2E_1} (1 - \nu_1^2) (\sigma'_h - \frac{\nu_1}{1 - \nu_1} \sigma'_{\nu l}) \quad (5.17\beta)$$

όπου E_1 και ν_1 το μέτρο ελαστικότητας και ο συντελεστής Poisson των χαλίκων

- Για το έδαφος ισχύουν οι σχέσεις 5.18.

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις :

$$\frac{1 - \nu^2}{E_1} (\sigma'_{\nu l} - \frac{\nu_1}{1 - \nu_1} \sigma'_h) = \frac{1 - \nu^2}{E} (\sigma'_\nu - \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma'_h) \quad (5.18\alpha)$$

$$\frac{(1 - \nu^2)L}{E} (\sigma'_h - \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma'_\nu) = \frac{(\nu^2 - 1)d_f}{E_1} (\sigma'_h - \frac{\nu_1}{1 - \nu_1} \sigma'_{\nu l}) \quad (5.18\beta)$$

Με τη βοήθεια των εξισώσεων (5.18) καθώς και της (5.15), ορίζονται οι τιμές των $(\sigma'_{\nu l})$, (σ'_ν) και (σ'_h) , οι οποίες είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό των καθιζήσεων από τις σχέσεις 5.14α και 5.17α.

Φυσικά, η παραπάνω λύση του προβλήματος ισχύει όταν :

$$\sigma'_{\nu l} \ll \sigma'_h \tan^2(45^\circ + \varphi_1/2)$$

Αριθμητικές εφαρμογές των παραπάνω έδειξαν ότι η υπόθεση της γραμμικά ελαστικής συμπεριφοράς του χαλικοπασσάλου μπορεί να είναι ρεαλιστική μόνο όταν $a = \frac{\pi D^2}{4ab} > 0.7$. Τόσο μεγάλες τιμές όμως τιμές δεν συναντώνται στους χαλικοπασσάλους.

Η περίπτωση του λιμένος Αιγίου

6. Γεωτεχνικές και γεωφυσικές διασκοπήσεις

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και επαναξιολογούνται τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών και γεωφυσικών διασκοπήσεων που εκπονήθηκαν από το Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων (ΚΕΔΕ) και το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ). Σκοπός των εργασιών αυτών ήταν η διερεύνηση των συνθηκών υπεδάφους στον πυθμένα της ζώνης της νέας προβλήτας του λιμένα Αιγίου. Οι εκθέσεις του ΚΕΔΕ χρονολογούνται το 1993 και το 1995. Η έκθεση του 1993 περιλαμβάνει δεκατρείς υποθαλάσσιες γεωτρήσεις οι οποίες αναπτύχθηκαν στον πυθμένα (με υψόμετρο κεφαλής 7 έως 11.5m) έως βάθος κυμαινόμενο μεταξύ 25 και 42m περίπου. Οι συγκεκριμένες γεωτρήσεις ήταν συνεχούς δειγματοληψίας με παράλληλη εκτέλεση Δοκιμών Τυποποιημένης Διείσδυσης (SPT). Η έκθεση του 1995 που εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή Ε.Μ.Π. κ.Γκαζέτα περιλαμβάνει τέσσερις γεωτρήσεις με επιτόπου δοκιμές SPT και μερική δειγματοληψία, με στόχο τη διερεύνηση του εδαφικού προφίλ σε μεγαλύτερα βάθη (έως και 56m). Κατά τη διάρκεια του έτους 1995 εκτελέστηκαν από το ΙΓΜΕ σε συνεργασία με την ερευνητική ομάδα του καθηγητή κ.Γκαζέτα γεωφυσικές διασκοπήσεις στον όρμο του Αιγίου, με σκοπό την γενική στρωματογραφική μελέτη και την εκτίμηση του βάθους του βραχώδους υποβάθρου, καθώς και τον εντοπισμό τυχόν ενεργών ρηγμάτων ή άλλων ασυνεχειών. Χρησιμοποιήθηκαν τα συστήματα σεισμικής ανάκλασης Uniboom, Sparker, 3.5kHz και ένα βυθόμετρο τύπου Furuno. Πρέπει να σημειωθεί ότι από τις παραπάνω γεωτρήσεις, λόγω μετακίνησης του έργου από την αρχική του θέση, μόνο μια γεώτρηση του ΚΕΔΕ ανήκε στην νέα περιοχή του έργου. Για το λόγο αυτό ανορύχθηκαν το έτος 1997 τέσσερις συμπληρωματικές γεωτρήσεις από το ΚΕΔΕ στην νέα περιοχή του έργου, εκ των οποίων μόνο στις δυο από αυτές διατίθενται γεωτεχνικές πληροφορίες.

6.2 Βάθη του θαλάσσιου πυθμένα

Ο βυθομετρικός χάρτης του όρμου του Αιγίου συγκροτήθηκε στην βάση των βυθομετρικών στοιχείων που συλλέχθηκαν από το ΙΓΜΕ. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ακρίβεια των μετρήσεων στην παράκτια ζώνη του έργου είναι μειωμένη εξαιτίας του ότι οι διαδρομές σεισμικής ανάκλασης δεν επεκτάθηκαν σε αρκετή απόσταση από την ακτή. Σημειώνεται επίσης ότι το ΙΓΜΕ συνέκρινε το χάρτη που προέκυψε με τον υπάρχοντα χάρτη της ίδιας περιοχής που είχε εκδοθεί υπό την επίβλεψη της Υδρογραφικής Υπηρεσίας του ΓΕΝ (1984).

6.3 Στρωματογραφία

Από την ανάλυση των καταγραφών σεισμικής ανάκλασης δεν διαπιστώθηκε η παρουσία βραχώδους υποβάθρου σε σχετικώς μικρό βάθος, γεγονός που αποδίδεται στο ότι οι διαδρομές σεισμικής ανάκλασης δεν έφτασαν αρκετά κοντά στην ακτή. Ωστόσο, μπορεί να παρατηρηθεί ότι σε μικρή απόσταση από την ακτή εμφανίζεται αναβαθμίδα κροκαλοπαγούς στρώματος, το οποίο μπορεί να υποτεθεί ότι βυθίζεται απότομα προς βορρά και πως αποτελεί το βραχώδες υπόβαθρο της υποθαλάσσιας περιοχής. Εντούτοις διαπιστώθηκαν δυο στρωματογραφικές ενότητες Α και Β· ειδικότερα, η ενότητα Α έχει πάχος που κυμαίνεται από 4 έως 32m και αποτελείται από λεπτόκοκκα θαλάσσια ιζήματα (ιλύες και άργιλοι) διαταγμένα σε σαφείς οριζόντες μικρού πάχους, ενώ η ενότητα Β αποτελείται από λιγότερο λεπτόκοκκο ίζημα (άργιλος με παρουσία ιλύων, άμμων και χαλίκων) υπό μορφή οριζόντων συνήθως ασυνεχών και διακοπτόμενων· το πάχος της στρώσης είναι μεγαλύτερο των 20m και σε πολλά σημεία περιέχει θύλακες αερίων, ενώ το ανώτερο τμήμα της –επονομαζόμενο υποενότητα Β1- αποτελείται από άμμους και χάλικες με πάχος περίπου 2 έως 4m.

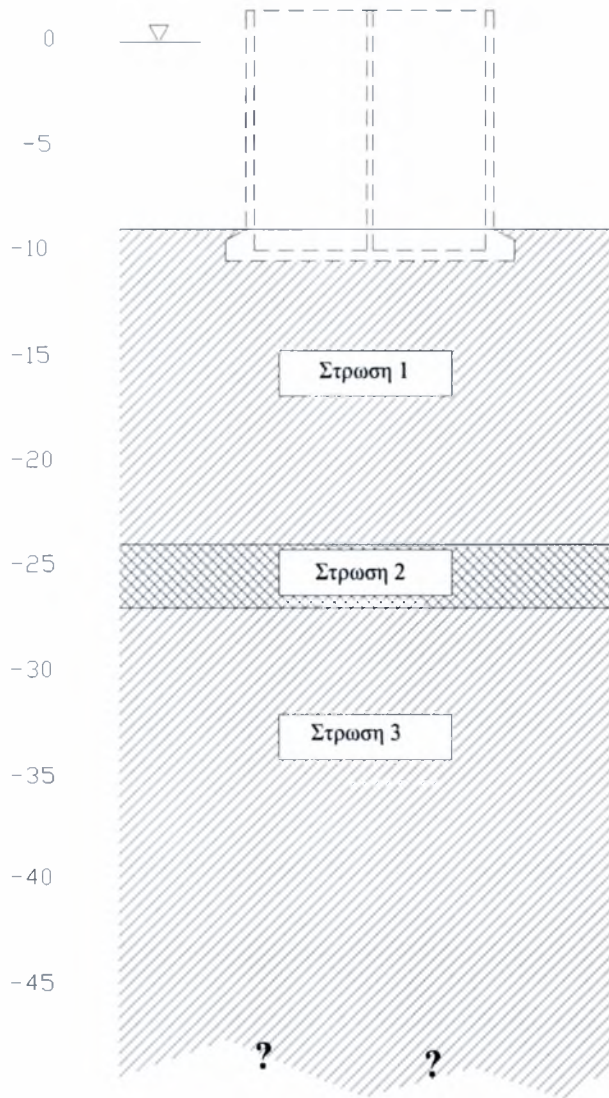
Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας των επί τόπου γεωτεχνικών δοκιμών του ΚΕΔΕ (Εκθέσεις 1993, 1995) επαληθεύονται σε γενικές γραμμές από την μακροσκοπική εκτίμηση του ΙΓΜΕ.

Με εξαίρεση την περιοχή κοντά στην υπάρχουσα προβλήτα, μπορούν να διακριθούν οι ακόλουθες στρώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στη μέση εδαφική τομή του Σχήματος 6.1:

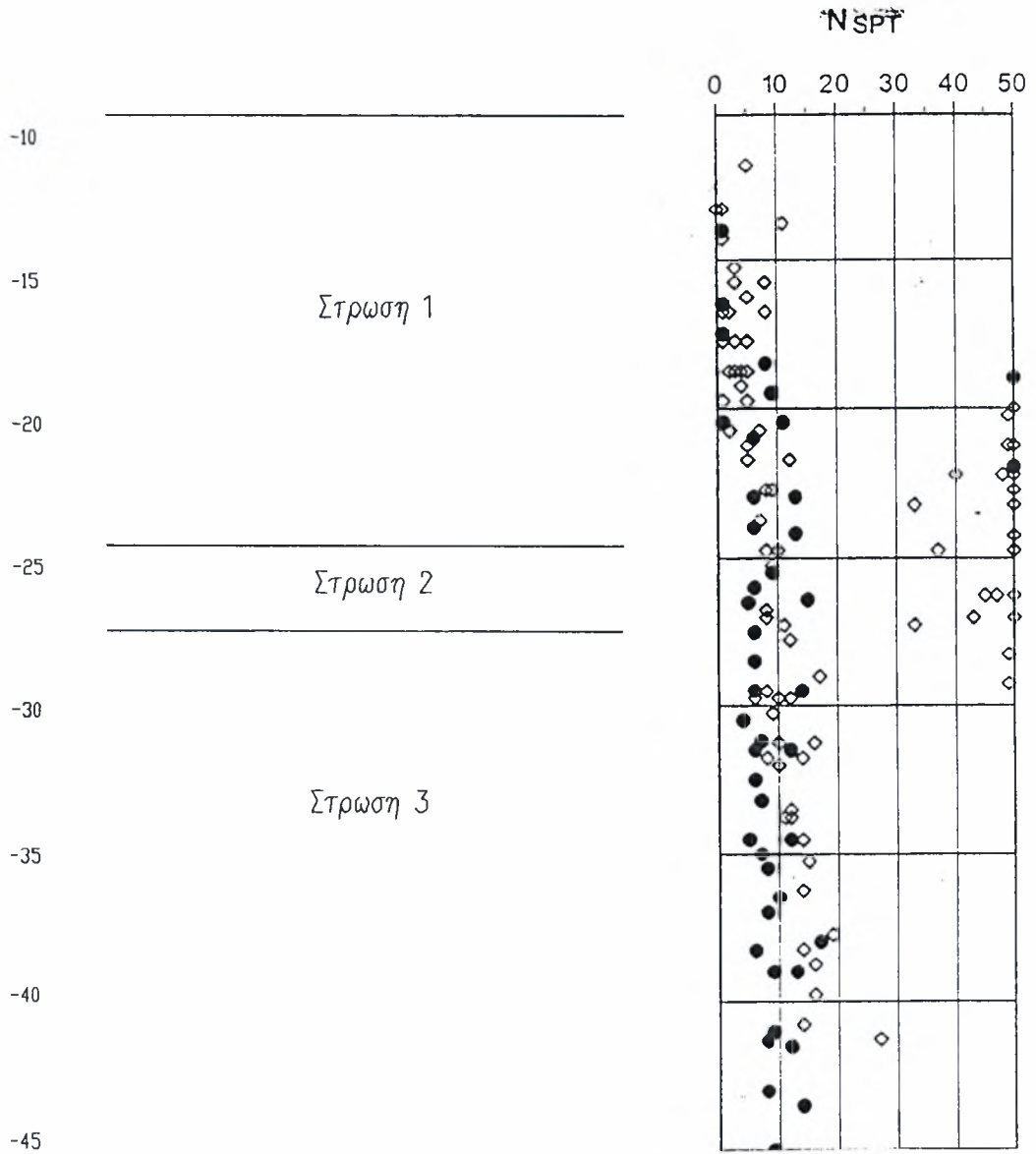
- Στρώση 1 : Αποτελείται από ιλύδη άργιλο (CL) και τοπικές ενστρώσεις ιλύος (ML), έχει δε πάχος 10 έως 15m. Οι επιτόπου δοκιμές κατέγραψαν αριθμό κρούσεων $N_{SPT}=1$, ενώ ο δείκτης πλασ(τ)ιμότητας κυμαίνεται μεταξύ 8 και 20% και ο δείκτης συμπίεστότητας από 0.10 έως 0.36
- Στρώση 2 : Αποτελείται από ιλύδη άμμο (SM) και τοπικά από χάλικες (GP, GW) με πάχος κυμαινόμενο μεταξύ 1 και 6m· οι επιτόπου δοκιμές SPT κατέγραψαν αριθμό κρούσεων $N_{SPT}=6$ έως 50
- Στρώση 3 : Αποτελείται από ιλύδη άργιλο (CL) και τοπικά από ιλύδη άμμο (SM)· το πάχος του στρώματος είναι άγνωστο, εφόσον δεν διαπιστώθηκε βραχώδης πυθμένας. Από τις επιτόπου δοκιμές προκύπτει $N_{SPT}=8$ και δείκτης πλασ(τ)ιμότητας μεταξύ 11 και 23%· η γωνία διατμητικής αντοχής ϕ κυμαίνεται μεταξύ 0° και 16° και η συνοχή από 10 έως 30 kN.

Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών τυποποιημένης διείδυσης (SPT).

Κατά την εκτίμηση του ΙΓΜΕ είναι φανερό ότι τα στρώματα 1,2 σχετίζονται θετικά με την προαναφερθείσα ενότητα Α και την υποενότητα Β1 αντιστοίχως. Για το στρώμα 3 όμως δεν προκύπτει καλή αντιστοίχιση με την ενότητα Β, δεδομένου ότι είναι πολύ λιγότερο χονδρόκοκκο, ενώ διαπιστώθηκε ομοφωνία σε ότι αφορά την παρουσία θυλάκων αερίων.



Σχήμα 6.1 Μέση εδαφική τομή



Σχήμα 6.2 Αποτελέσματα δοκιμών SPT

6.4 Εργαστηριακές δοκιμές

6.4.1 Γενικά

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους εκτελέστηκαν από το ΚΕΔΕ μόνο στα δείγματα που είχαν αποληφθεί από τις γεωτρήσεις του 1993 (διαταραγμένα τύπου Terzaghi και αδιατάρακτα τύπου Shelby). Οι δοκιμές προσδιορισμού των φυσικών ιδιοτήτων περιέλαβαν κοκκομετρικές αναλύσεις και προσδιορισμό των ορίων Attenberg, του ποσοστού υγρασίας, του ειδικού βάρους γαιών του ειδικού βάρους των στερεών κόκκων. Οι δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών εκτελέστηκαν μόνον σε δείγματα τύπου Shelby και περιέλαβαν :

- δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης (UC)
- δοκιμές αξονομετρικής συμπίεσης τύπου U.U. χωρίς στερεοποίηση, χωρίς απόστράγγιση και χωρίς μέτρηση της πίεσης των πόρων
- δοκιμές αξονομετρικής συμπίεσης τύπου CIU σε κορεσμένα δοκίμια (με αρχική στερεοποίηση, χωρίς αποστράγγιση και με μέτρηση της πίεσης πόρων)
- εργαστηριακές δοκιμές πτερύγιου (VST).

Όλες οι ως άνω δοκιμές συνοδεύθηκαν από τον προσδιορισμό του ποσοστού υγρασίας των δειγμάτων, καθώς και του ειδικού βάρους γαιών .

6.4.2 Φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών στρώσεων

Με εξαίρεση τοπικές ιλυώδεις στρώσεις (ML) οι οποίες δεν εμφάνισαν πλασ(τ)ιμότητα στις εργαστηριακές δοκιμές, το στρώμα 1 είναι γενικώς μετρίας πλασ(τ)ιμότητας με όριο υδαρότητας που κυμαίνεται από 23 έως 39% και δείκτη πλασ(τ)ιμότητας που κυμαίνεται μεταξύ 8 και 20%. Μεμονωμένα δείγματα αργιλικής άμμου (SC) του στρώματος αυτού παρουσίασαν όριο υδαρότητας μεταξύ 17 και 21% και δείκτη πλασ(τ)ιμότητας 5 και 7%. Επίσης, μεμονωμένα δείγματα αργίλου του ίδιου στρώματος εμφανίζουν σχετικά υψηλή πλασ(τ)ιμότητα (CH) με όριο υδαρότητας μεταξύ 52 και 60%, και δείκτη πλασ(τ)ιμότητας μεταξύ 25 και 30%. Το στρώμα 3 είναι επίσης μετρίας πλασ(τ)ιμότητας με όριο υδαρότητας κυμαινόμενο μεταξύ 28 και 40%, και δείκτη πλασ(τ)ιμότητας μεταξύ 11 και 23%. Σημειώνεται ότι το στρώμα 3 εμπεριέχει επίσης τοπικές στρώσεις άμμου (SM) οι οποίες είναι μη-πλαστικές.

Τα αποτελέσματα που αφορούν στην φυσική υγρασία έχουν προκύψει είτε άμεσα από εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού φυσικών ιδιοτήτων, είτε έμμεσα από δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών. Στην πλειονότητα τους οι τιμές φυσικής υγρασίας κυμαίνονται μεταξύ 23 και 44% στο στρώμα 1 και μεταξύ 25 και 34% στο στρώμα 3. Στο στρώμα 1 παρατηρείται ότι η φυσική υγρασία των δειγμάτων παρουσιάζεται από ελάχιστα χαμηλότερη του ορίου υδαρότητας έως και αρκετά μεγαλύτερη από αυτό. Τα αποτελέσματα

είναι τυπικά μίας κανονικά στερεοποιημένης αργίλου (NC), η οποία βρίσκεται κατά τόπους σε «υδαρή κατάσταση». Στο στρώμα 3 παρατηρείται ότι η φυσική υγρασία είναι μεν χαμηλότερη του ορίου υδαρότητας, πλην όμως πολύ κοντά σε αυτό. Ελάχιστα είναι τα αποτελέσματα που θα δικαιολογούσαν κάποιο βαθμό προστερεοποίησης· πρόκειται μάλλον και σε αυτήν την περίπτωση για κανονικά στερεοποιημένη άργιλο.

Όσον αφορά στο κορεσμένο μοναδιαίο βάρος του εδαφικού στοιχείου κυμαίνεται μεταξύ 16.7kN/m^3 και 21kN/m^3 στο στρώμα 1, μεταξύ δε 18.5kN/m^3 και 20kN/m^3 στο στρώμα 3. Οι τιμές αυτές έχουν προκύψει τόσο από εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού των φυσικών χαρακτηριστικών όσο και από δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών· από τις τελευταίες, και συγκεκριμένα από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης, προέκυψε ο αρχικός λόγος κενών e_0 των δειγμάτων.

Για το ενδιάμεσο στρώμα αργίλου (στρώμα 2) δεν διατίθενται αποτελέσματα προσδιορισμού φυσικών ιδιοτήτων. Δοκιμές προσδιορισμού φυσικής υγρασίας και ειδικού βάρους γαιών έγιναν σε αμμώδη δείγματα τα οποία δεν θεωρήθηκαν χαρακτηριστικά του γενικευμένου στρώματος 2, λόγω θέσεως και βάθους συλλογής τους (πολύ κοντά στην επιφάνεια του πυθμένα). Τονίζεται ωστόσο ότι ο ρόλος του στρώματος 2 είναι διπλής σημασίας, διότι λειτουργεί τόσο ως ζώνη αποστράγγισης του υπερκείμενου κυρίως στρώματος 1 της πολύ μαλακής αργίλου όσο και ως στρώση ομοιομορφοποίησης των τάσεων που επιβάλλονται στο υποκείμενο στρώμα της μαλακής αργίλου.

6.4.3 Αστράγγιστη διατμητική αντοχή των αργιλικών στρώσεων

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αξονομετρικής συμπίεσης τύπου UU, ανεμπόδιστης θλίψης τύπου UC, και διατμήσεως μέσω πτερυγίου, παρουσιάζονται ως αστράγγιστη διατμητική αντοχή (S_u) συναρτήσει του βάθους και συσχετίζονται με τις αντίστοιχες κρούσεις N_{SPT} . Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ότι είτε τα εργαστηριακά αποτελέσματα διατμητικής αντοχής είναι υπερτιμημένα, είτε οι τιμές N_{SPT} θα έπρεπε να είναι πολύ μεγαλύτερες. Συνεπώς κρίνεται σκόπιμη η συντηρητική εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους.

6.4.4 Συμπιεστότητα των αργιλικών στρώσεων

Στο στρώμα 1 ο δείκτης συμπιεστότητας (C_c) λαμβάνει τιμές από 0.10 έως 0.36, ενώ στο στρώμα 3 από 0.16 έως 0.27. Παρατηρείται ότι ο δείκτης αυτός παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση στο στρώμα 1 απ' ότι στο στρώμα 3· το ίδιο ισχύει και στις τιμές του λόγου κενών.

Όσον αφορά στον κρίσιμο για τον υπολογισμό των καθιζήσεων λόγο $C_c/(1+e_0)$, αυτός κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.06 και 0.15 στο στρώμα 1, παρουσιάζοντας σαφή μείωση με το βάθος, μεταξύ 0.10 και 0.16 στο στρώμα 2, στο οποίο και δεν παρουσιάζει καμία διακύμανση με το βάθος.

Η συσχέτιση των τιμών αυτών με τις αντίστοιχες τιμές της φυσικής υγρασίας είναι απολύτως ικανοποιητική.

6.4.5 Συντελεστής στερεοποίησης των δύο αργιλικών στρώσεων

Εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό του συντελεστή στερεοποίησης των αργιλικών στρωμάτων, η εκτίμηση του μεγέθους αυτού βασίσθηκε αποκλειστικά και μόνον σε εμπειρικές συσχετίσεις. Με βάση τις τιμές του ορίου υδαρότητας προκύπτει ότι η τιμή του C_v κυμαίνεται μεταξύ $8 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ και $3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ και στα δυο αργιλικά στρώματα. Το διαπιστούμενο μεγάλο εύρος καθιστά εξαιρετικά δύσκολη την εκτίμηση του ρυθμού στερεοποίησης του εδάφους λόγω της επιβαλλόμενης φόρτισης. Πάραυτα, αναμένεται σχετικά μικρός ρυθμός στερεοποίησης του υπεδάφους, με εκλεγείσα τιμή σχεδιασμού $C_v = 2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$.

7. Ανάλυση του συστήματος θεμελίωσης

7.1 Εισαγωγή

Η συγκριτική αξιολόγηση των εργαστηριακών και επιτόπου γεωτεχνικών διασκοπήσεων του ΚΕΔΕ αφενός, και των γεωφυσικών διασκοπήσεων εις βάθος από το ΙΓΜΕ αφετέρου, οδήγησαν σε μια προκαταρκτική εικόνα του εδαφικού προφίλ με σαφώς δυσμενή χαρακτηριστικά σε όλο το μήκος του έργου. Η δυσμενής αυτή εικόνα οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη δυο μαλακών αργιλικών στρωμάτων (1 και 3). Κατέστη αμέσως σαφές ότι :

- το αργιλικό στρώμα 1 έπρεπε ή να αντικατασταθεί ή να βελτιωθεί για να είναι δυνατή η απευθείας έδραση του έργου· εναλλακτικά, η θεμελίωση θα έπρεπε να εδρασθεί εις βάθος τέτοιο ώστε να προκύπτει η ελάχιστη επιβάρυνση του στρώματος αυτού
- το αργιλικό στρώμα 3, το πάχος του οποίου σε ορισμένες θέσεις δεν ξεπερνά τα 30m και παραμένει άγνωστο το βάθος μέχρι το στερεό υπόβαθρο, αφενός μεν αποκλείει την όποια χρησιμοποίηση πασσάλων, αφετέρου δε υποδεικνύει ότι για τον περιορισμό των μακροχρόνιων καθιζήσεων σε ανεκτά όρια θα πρέπει η κατασκευή να μην επιβάλλει παρά την ελάχιστη επιφόρτιση.

Για την ταυτόχρονη πλήρωση των ως άνω συνθηκών με οικονομικό τρόπο, η τεχνική της προφόρτισης με στραγγιστήρια υπερτερεί άλλων λύσεων, όπως λ.χ. η εις βάθος δονητική συμπύκνωση ή η εις βάθος δονητική αντικατάσταση. Η μέθοδος λοιπόν αυτή αποτέλεσε τη βάση του οριστικού σχεδιασμού του έργου.

Επίσης, επιλέχθηκε η μόρφωση ανακουφιστικού πρίσματος από σύνηθες κοκκώδες υλικό κάτω από τη θεμελίωση. Οι συνεπαγόμενες εγκάρσιες ωθήσεις, ιδίως λόγω σεισμικής διέγερσης, επιβάλλουν μεταξύ άλλων την κατασκευή χαλικοπασσάλων, με αποκλειστικό σκοπό την πρόσθετη αύξηση της διατμητικής αντοχής της αργιλικής στρώσης 1.

Παρ' όλα αυτά, το βάρος της αντιστηριζόμενης επίχωσης επιβάλλει σημαντικού μεγέθους πρόσθετη ένταση στην αργιλική στρώση 3, ενώ οι αναμενόμενες μακροχρόνιες καθιζήσεις στην στέψη του έργου εκτιμώνται στην τάξη μεγέθους των 50cm· υπό ισχυρή σεισμική διέγερση οι αναμενόμενες παραμένουσες καθιζήσεις ενδέχεται να φθάσουν τα 20 έως 30cm· τα μεγέθη αυτά, των καθιζήσεων δεν είναι βεβαίως ευνοϊκά. Τονίζεται ωστόσο ότι οι υπολογισμοί πρέπει να εκληφθούν μόνον ως ενδεικτικοί της αναμενόμενης πραγματικής συμπεριφοράς, και τούτο διότι πέραν της φυσικής ανομοιογένεια των εδαφικών στρώσεων (λ.χ μεταβλητά πάχη και πυκνότητες), προκύπτει και αβεβαιότητα ως προς τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών λόγω:

- διασποράς των πραγματικών μετρήσεων (επιτόπου και εργαστηριακών)
- ατελειών στις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεριλαμβανομένων και των συνεπειών της διαταραχής των δειγμάτων

- έλλειψης μετρήσεων μερικών παραμέτρων, όπως λ.χ. του καίριας σημασίας συντελεστή στερεοποίησης
- αβεβαιότητας ως προς την στραγγιστική ικανότητα του στρώματος 2.

Οι αναλύσεις βασίσθηκαν στις πλέον πιθανές τιμές εδαφικών παραμέτρων με βάση την υπάρχουσα διεθνή γνώση. Για τον λόγο αυτό τα ως άνω δεδομένα οφείλουν να επιβεβαιωθούν (αμέσως ή εμμέσως) κατά την φάση κατασκευής του έργου μέσω:

- ειδικών επιτόπου ή εργαστηριακών γεωτεχνικών δοκιμών
- ενόργανης παρακολούθησης της χρονικής εξέλιξης των καθιζήσεων και των υπερπιέσεων πόρων.

Τονίζεται εξάλλου ότι η χρονική διάρκεια των διαφόρων κατασκευαστικών φάσεων είναι απαραίτητο να βασισθεί σε τέτοιου είδους τεκμηριωμένες μετρήσεις.

Επισημαίνεται ακόμη ότι ο έλεγχος αρτιότητας της λύσης κατασκευής που επελέγη υπό στατικές συνθήκες, τόσο στην τελική μορφή της προβλήτας όσο και στα επιμέρους στάδια κατασκευής της, περιλαμβάνει τους ακόλουθους ελέγχους:

- φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελίωσης έναντι τοπικής ή γενικευμένης αστοχίας
- καθιζήσεων της κατασκευής
- στατικής και δυναμικής ευστάθειας του κρηπιδότοιχου σε ανατροπή και ολίσθηση.

7.2 Εκτίμηση των καθιζήσεων χωρίς βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης

7.2.1 Εκτίμηση των καθιζήσεων σύμφωνα με την υπάρχουσα μελέτη

Εκτιμήθηκαν αρχικά οι αναμενόμενες καθιζήσεις του υπεδάφους υπό την επενέργεια του ιδίου βάρους της προβλήτας. Για το σκοπό αυτό έγινε η υπόθεση ότι το αμμοχάλικο το οποίο τοποθετήθηκε ως επίχωση στο «ανακουφιστικό» πρίσμα γαιών έχει ειδικό βάρος 18kN/m^3 . Η πρόσθετη ενεργός φόρτιση που οφείλεται στο βάρος του κρηπιδότοιχου είναι ομοιόμορφη και περίπου ίση με 100 kPa . Η ενεργός φόρτιση που επιβάλλουν οι επιχώσεις ανάντη (έξαλος επίχωση και ανακουφιστικό πρίσμα αμμοχάλικου) έχει μέγιστη τιμή περίπου 100 kPa και φθίνει σχεδόν γραμμικά προς την ακτή.

Η αναμενόμενη συνολική καθίζηση περιλαμβάνει τις άμεσες καθιζήσεις στο στρώμα 2 και τις μακροπρόθεσμες καθιζήσεις (λόγω στερεοποίησης και δευτερογενείς) στα στρώματα 1 και 3. Από τις αναλύσεις προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι αναμενόμενες συνολικές καθιζήσεις είναι της τάξεως του 1m ή και μεγαλύτερες. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις μεταβολές στη στρωματογραφία του υπεδάφους ενδέχεται να δημιουργήσει απαγορευτικές διαφορικές και ολικές καθιζήσεις στη νέα προβλήτα. Επιπλέον, θεωρείται αναγκαίο να επισημανθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος των καθιζήσεων θα ολοκληρωθεί σε χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 10 ετών μετά την κατασκευή της προβλήτας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μικρή διαπερατότητα των αργιλικών στρώσεων. Όλα τα ως άνω καθιστούν λοιπόν απαραίτητη τη βελτίωση του υπεδάφους.

7.2.2 Αναλυτικός υπολογισμός των καθιζήσεων (ελαστική θεώρηση)

Με θεώρηση καννάβου $60 \times 60\text{m}$, ο οποίος αντιπροσωπεύει τις «πραγματικές» διαστάσεις του έργου, εκτιμώνται οι καθιζήσεις του συστήματος «χαλικοπάσσαλοι-έδαφος». Ο υπολογισμός περιλαμβάνει τις άμεσες καθιζήσεις του στρώματος 2, καθώς και τις καθιζήσεις από στερεοποίηση των στρωμάτων 1 και 3.

Η καθίζηση από στερεοποίηση του στρώματος 1, χωρίς βελτίωση, οφείλεται στη διπλή κατακόρυφη στράγγιση. Η προφόρτιση δημιουργεί ουσιαστικά συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης. Οι δημοσιευμένες αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού των πρόσθετων τάσεων για διάφορες μορφές επιβεβλημένης φόρτισης αναφέρονται σε ομοιογενή ελαστικά υλικά. Στην προκειμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται το διάγραμμα του Fadum (1948), το οποίο δίνει τιμές σε έναν συντελεστή I_σ συναρτήσεως των αδιάστατων μεγεθών $n=L/z$ και $m=B/z$, όπου L το μήκος του ομοιόμορφου φορτίου, B το πλάτος του και z το βάθος κάτω από τη γωνία του ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου. Έτσι, η πρόσθετη τάση στο συγκεκριμένο σημείο προκύπτει από τη σχέση:

$$\Delta\sigma_v = qI_\sigma \quad (7.1)$$

Η εύρεση της επιφορτικής τάσης καθίσταται λοιπόν εξαιρετικά απλή για οποιοδήποτε άλλο σημείο με υιοθέτηση της αρχής της επαλληλίας. Στο παρόν πρόβλημα, όπου το επιβαλλόμενο φορτίο έχει διαστάσεις $60 \times 60 \text{m}^2$ και μέγεθος $q=100 \text{KPa}$, η επιφορτική τάση στο κέντρο βάρους του φορτίου εις βάθος z θα ισούται με $\Delta\sigma_v=4I_q q$, όπου $L'=B'=30 \text{m}$. Οι επιφορτικές τάσεις στο μέσον των επιμέρους στρωμάτων 1 και 3 παρουσιάζονται στους πίνακες #.1 και #.2 αντίστοιχα. Οι καθιζήσεις των στρωμάτων 1 και 3 είναι το άθροισμα των καθιζήσεων των επιμέρους στρωμάτων και ο υπολογισμός τους παρουσιάζεται στους Πίνακες 7.3 και 7.4 που ακολουθούν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1 Υπολογισμός επιφορτικών τάσεων στο στρώμα 1

Ζώνη	$z_i(\text{m})$	$m=n=30/z_i$	I_q	$\Delta\sigma_v(\text{KPa})$
0-3m	1.5	20.00	0.250	100.0
3-6m	4.5	6.67	0.250	100.0
6-9m	7.5	4.00	0.248	99.2
9-12m	10.5	2.86	0.243	97.2
12-15m	13.5	2.22	0.239	95.6

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2 Υπολογισμός επιφορτικών τάσεων στο στρώμα 2

Ζώνη	$z_i(\text{m})$	$m=n=30/z_i$	I_q	$\Delta\sigma_v(\text{Kpa})$
18-21m	19.5	1.54	0.218	87.2
21-24m	21.5	1.39	0.210	84.0
24-27m	24.5	1.22	0.200	80.0
27-30m	27.5	1.09	0.188	75.2
30-33m	30.5	0.98	0.173	69.2

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3 Υπολογισμός καθιζήσεων στο στρώμα 1

$h_i(\text{m})$	$\sigma'_{vo}(\text{KPa})$	$\Delta\sigma_v(\text{KPa})$	C_c	e_o	$\Delta h(\text{m})$
3	11.25	100.0	0.19	0.75	0.324
3	33.75	100.0	0.19	0.75	0.195
3	56.25	99.2	0.19	0.75	0.144
3	78.75	97.2	0.19	0.75	0.114
3	101.25	95.6	0.19	0.75	0.094
					0.871m

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.4 Υπολογισμός καθιζήσεων στο στρώμα 3

$h_i(\text{m})$	$\sigma'_{vo}(\text{Kpa})$	$\Delta\sigma_v(\text{Kpa})$	C_c	e_o	$\Delta h(\text{m})$
3	157.05	87.2	0.20	0.70	0.068
3	185.55	84.0	0.20	0.70	0.057
3	214.05	80.0	0.20	0.70	0.049
3	242.55	75.2	0.20	0.70	0.041
3	271.05	69.2	0.20	0.70	0.035
					0.250m

Επομένως, οι τελικές καθιζήσεις από στερεοποίηση θα είναι:

$$S = \Delta h_{\sigma_{\tau\rho 1}} + \Delta h_{\sigma_{\tau\rho 2}} = 0.871 + 0.250 = 1.121\text{m}$$

Διαπιστώνεται ότι η παραπάνω τιμή είναι πολύ κοντά σε εκείνη της μελέτης Γκαζέτα (1.13m), γεγονός που επαληθεύει κατά κάποιον τρόπο την επιλογή των παραμέτρων.

Στους παραπάνω πίνακες χρησιμοποιείται η ακόλουθη σήμανση:

z_i : η μέση στάθμη κάθε ζώνης

$\Delta\sigma_v$: η επιφορτική τάση στο μέσο της κάθε ζώνης

h_i : το πάχος της κάθε ζώνης

σ'_{v0} : η αρχική κατακόρυφη τάση $= \gamma_{av} \cdot z_i$

C_c : ο δείκτης συμπιεστότητας

$$\Delta h = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot h \cdot \log\left(1 + \frac{\Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}}\right) : \text{η καθίζηση κάθε ζώνης.}$$

7.3 Προτεινόμενη βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης

Όπως προαναφέρθηκε, η βελτίωση του στρώματος 3 δεν είναι εφικτή, αν και αυτό θα ήταν επιθυμητό λόγω των αναμενόμενων καθιζήσεων του ως άνω στρώματος. Επομένως, η βελτίωση περιορίζεται στο στρώμα 1 με την τοποθέτηση χαλικοπασσάλων πριν από την κατασκευή της νέας προβλήτας σε συνδυασμό με την τοποθέτηση επιχώματος προφόρτισης συνολικού ύψους 12m. Η τελευταία πρέπει να γίνει σε δύο στάδια για να εξασφαλισθεί η ολική ευστάθεια του προσωρινού αναχώματος.

Σημειώνεται επίσης ότι προτείνεται η τοποθέτηση εξυγιαντικής στρώσης αμμοχαλικού στην περιοχή έδρασης του κρηπιδότοιχου μετά την εκσκαφή του υπάρχοντος εδάφους στη θέση αυτή. Οι εργασίες για την τοποθέτηση της εξυγιαντικής στρώσης αμμοχαλικού πρέπει να προηγηθούν της τοποθέτησης του προσωρινού επιχώματος προφόρτισης. Σε περίπτωση δε που το υλικό προφόρτισης περιέχει σημαντικό ποσοστό ιλυώδους ή αργιλώδους υλικού, προτείνεται η τοποθέτηση ενιαίου στρώματος αμμοχαλικού στη βάση του.

Η προσωρινή επίχωση της προφόρτισης επιβάλλει στο έδαφος συνολική επιφόρτιση περίπου ίση προς 10kPa, εκ των οποίων 50kPa τοποθετούνται στο πρώτο στάδιο προφόρτισης και 50 kPa στο δεύτερο.

Εν κατακλείδι, εκτιμήθηκε ότι απαιτείται χρονικό διάστημα ενός έτους περίπου για την ολοκλήρωση καθιζήσεων της τάξεως των 85cm. Έτσι, οι αναμενόμενες καθιζήσεις της τελικής κατασκευής μετά την ολοκλήρωση του προσωρινού επιχώματος προφόρτισης και την κατασκευή της νέας προβλήτας θα είναι της τάξεως των 70cm, θα προέρχονται δε κυρίως από το στρώμα 3 το οποίο δεν επηρεάζεται από την προκείμενη βελτίωση.

7.4 Στάδια κατασκευής της προτεινόμενης λύσης

Στάδιο I : Εκσκαφή και καθαρισμός του πυθμένα

Προτείνεται η εκσκαφή του πυθμένα εις βάθος τουλάχιστον 1m από την ξηρά έως την ισοβαθή των 20m περίπου. Επιπλέον, στη θέση έδρασης των κυψελωτών κιβωτίων του κρηπιδότοιχου προτείνεται η εκσκαφή 3m επιπλέον, με πλάτος στη βάση της εκσκαφής 15m περίπου. Οι κλίσεις των πρανών της πρόσθετης αυτής εκσκαφής είναι τουλάχιστον 3(οριζόντιο):1(κατακόρυφο).

Στάδιο II : Τοποθέτηση εξυγιαντικής στρώσης άμμου

Η στρώση αυτή έχει πάχος 2m και καλείται να παίξει τον ρόλο φίλτρου ώστε να καταστήσει δυνατή την μετέπειτα τοποθέτηση του χονδρόκοκκου υλικού. Είναι επιθυμητό, αν και όχι εύκολο, να ελεγχθεί στην πράξη η «εξυγιαντική» αυτή στρώση άμμου μεταβλητής κοκκομετρικής σύνθεσης καθ' ύψος (εκκινά από λεπτόκοκκη στην επιφάνεια του πυθμένα και καταλήγει σε χονδρόκοκκη). Έμμεση συνέπεια θα ήταν και η εκμηδένιση της πιθανότητας ρευστοποίησης της στρώσης αυτής, ακόμη και υπό σεισμική διέγερση ισχυρότερη και μεγαλύτερης διάρκειας από εκείνη του πρόσφατου σεισμού του Αιγίου.

Στάδιο III : Διάστρωση εξυγιαντικής στρώσης αμμοχάλικου

Μετά την κατασκευή της εξυγιαντικής στρώσης άμμου, ακολουθεί η τοποθέτηση στρώσης αμμοχάλικου πάχους 1m περίπου σε όλη την έκταση του έργου.

Στάδιο IV : Κατασκευή του επιχώματος προφόρτισης

Το επίχωμα προφόρτισης έχει συνολικό μήκος 12m και μορφώνεται σε δύο φάσεις των 6m έκαστη. Η πρώτη φάση προφόρτισης διαρκεί όσο απαιτείται για να αυξηθεί η αντοχή της μαλακής αργιλικής στρώσης σε τέτοιο βαθμό, ώστε να είναι ικανή να φέρει χωρίς κίνδυνο αστοχίας την πρόσθετη επίχωση. Με τις χαρακτηριστικές τιμές των εδαφικών παραμέτρων που επελέγησαν, η χρονική διάρκεια της πρώτης φάσης προφόρτισης είναι της τάξεως των 5 μηνών. Η πρόσθετη χρονική διάρκεια προφόρτισης εκτιμάται από την απαίτηση πραγματοποίησης του 40% περίπου της στερεοποίησης υπό την δράση του συνολικού φορτίου των 12m. Με τις δεδομένες τιμές του συντελεστή C_v , ο χρόνος αυτός προκύπτει περίπου ίσος με 1 μήνα. Οι αναμενόμενες τιμές των καθιζήσεων εκτιμώνται σε 63cm και 40cm με το πέρας έκαστης φάσης προφόρτισης.

Στάδιο V : Κατασκευή των χαλικοπασσάλων

Κατασκευάζονται συμπυκνωμένοι χαλικοπάσσαλοι διαμέτρου 1m σε αμοιβαία απόσταση 5m, κάτω ακριβώς από τα κυψελωτά κιβώτια (δηλ. στο πλάτος των 12m). Η κατασκευή τους έπεται του προηγούμενου σταδίου IV· δηλαδή, οι χαλικοπάσσαλοι κατασκευάζονται εφόσον έχει διαστρωθεί επιπλέον 1m αμμοχάλικου. Στόχος των χαλικοπασσάλων είναι κυρίως η περαιτέρω αύξηση της διατμητικής αντοχής της αργίλου, αλλά και δευτερευόντως μια (μικρή έστω) αύξηση της πυκνότητας των στρώσεων άμμου και αμμοχάλικου.

7.5 Έλεγχος στατικής ευστάθειας

Οι αναλύσεις προσωρινής ευστάθειας υπέδειξαν τον γεωμετρικό σχεδιασμό των επιχωμάτων προφόρτισης. Η κλίση του πρανούς προφόρτισης των πρώτων 6m (πρώτο στάδιο) πρέπει να είναι περίπου 4:1 (οριζόντιο προς κατακόρυφο), ώστε ο ενιαίος συντελεστής ασφάλειας να είναι ικανοποιητικός (>1.00). Η ολοκλήρωση του 90% της στερεοποίησης από την πρώτη φάση προφόρτισης οδηγεί σε αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Στην περίπτωση ολικής ευστάθειας του κρηπιδότοιχου στην φάση λειτουργίας, οι ενιαίοι συντελεστές ασφαλείας υπερβαίνουν την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή για «μόνιμη» ευστάθεια (1.50).

Οι απαιτήσεις ασφαλείας επιβάλλουν επίσης τον γεωμετρικό σχεδιασμό των ανώτερων 6m της δεύτερης φάσης προφόρτισης με κλίση 2:1 και απόσταση 10m τουλάχιστον του πόδα του δεύτερου αυτού αναχώματος από την κορυφή του αναχώματος της πρώτης φάσης, εφόσον έχει εκτελεσθεί το 90% της στερεοποίησης λόγω του πρώτου αναχώματος ή 20m εφόσον το δεύτερο ανάχωμα τοποθετηθεί μόλις πραγματοποιηθεί το 60% της στερεοποίησης.

Η ευστάθεια στη φάση λειτουργίας, νοούμενη ως ενιαίος συντελεστής ασφαλείας, ακόμη και με τις βελτιωμένες παραμέτρους αντοχής του εδάφους λόγω στερεοποίησης, υπολείπεται των ελάχιστων απαιτήσεων ($1.08 < 1.50$). Επιβάλλεται, λοιπόν η ενίσχυση του εδάφους με χαλικοπασσάλους. Η απαιτούμενη «ισοδύναμη» διατμητική αντοχή του εδάφους από την θεμελίωση του κρηπιδότοιχου πρέπει να είναι τουλάχιστον 70kPa.

Προσέγγιση του προβλήματος με αριθμητικές
μεθόδους

8. Γενικά

Παρ' όλη τη διαδεδομένη χρήση των χαλικοπασσάλων για την βελτίωση της απόκρισης των μαλακών εδαφών που χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό συμπίεστότητας, οι μέθοδοι σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι κατά κύριο λόγο βασισμένες σε απλοποιητικές προσεγγίσεις της αλληλεπίδρασης χαλικοπασσάλου-εδάφους σε συνδυασμό με εμπειρικές σχέσεις και δεδομένα.

Η χρήση των ανωτέρω απλοποιητικών μεθόδων μπορεί αναμφισβήτητα να οδηγήσει σε γενικό σχεδιασμό ενός έργου, χωρίς ωστόσο να έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει ακριβή κινηματικά και εντατικά μεγέθη. Δεδομένου ότι ο έλεγχος του σχεδιασμού ενός έργου μπορεί να υλοποιηθεί μόνο μετά από την εισαγωγή των ανωτέρω μεγεθών, θα θεωρούσε κανείς απαραίτητες τις πληροφορίες αυτές. Εντούτοις, η εγγενής δυσκολία του προβλήματος οδήγησε στην αναγκαστική αποδοχή απλοποιημένων μεθόδων σχεδιασμού για τυποποιημένα και σχετικά απλά έργα, όπου η εμπειρία καλείται να συμπληρώσει, να «διορθώσει» ή και να βελτιώσει λύσεις.

Σε ειδικές περιπτώσεις, οι οποίες ξεφεύγουν από τυπικής μορφής προβλήματα, ή ακόμα σε περιπτώσεις όπου το ενδιαφέρον εστιάζεται στην οριακή χρήση των αντοχών των συστατικών υλικών, θεωρείται απαραίτητος ο προσδιορισμός και ο έλεγχος κινηματικών και εντατικών μεγεθών. Επιπροσθέτως, ο προσδιορισμός των ανωτέρω μεγεθών σε περιπτώσεις όπου κύριο μέλημα αποτελεί η διερεύνηση της σύνθετης απόκρισης εδάφους-πασσάλων-επιχώματος, επιβάλλεται με τον ακριβέστερο μάλιστα δυνατό τρόπο.

Η χρήση αριθμητικών μεθόδων μη-γραμμικής ανάλυσης προσφέρει τη δυνατότητα επίλυσης του προβλήματος, επιτρέποντας την ακριβέστερη δυνατή προσέγγισή του. Έτσι, στις ανωτέρω περιπτώσεις όπου κρίνεται απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός κινηματικών και εντατικών μεγεθών, ο μόνος τρόπος προσέγγισης του προβλήματος είναι η χρήση αριθμητικών μεθόδων.

Ακόμη, για τη διερεύνηση της απόκρισης του εδάφους υπό διαφοροποιούμενες εδαφικές συνθήκες ή διαφοροποιούμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με χρήση αριθμητικών μεθόδων, πραγματοποιούνται σχετικώς εύκολα παραμετρικές αναλύσεις, με βάση τις οποίες είναι εφικτός ο προσδιορισμός της βέλτιστης οικονομοτεχνικής λύσης.

9. Προσομοίωση του προβλήματος

9.1 Ιδιαιτερότητα του προβλήματος

Το πρόβλημα που προσεγγίζεται θεωρείται ότι έχει ορισμένα χαρακτηριστικά που το καθιστούν ιδιαίζον. Καταρχάς, πρόκειται για ένα κατεξοχήν τρισδιάστατο πρόβλημα και τούτο διότι η στερεοποίηση δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει χώρα σε δύο διαστάσεις. Πράγματι, η δισδιάστατη στερεοποίηση υιοθετείται μόνο στην περίπτωση αξονοσυμμετρίας. Στην προκειμένη όμως περίπτωση της ομάδας χαλικοπασσάλων, η γεωμετρία παίζει σημαντικό ρόλο, γεγονός το οποίο καθιστά τη ροή μη-αξονομετρική. Επομένως, δεν μπορεί να υποτεθεί δισδιάστατη στερεοποίηση για την προσομοίωση του προβλήματος.

Εξάλλου, αυτό καθ' αυτό το πρόβλημα της στερεοποίησης αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα υπό την έννοια ότι συνδυάζει μηχανικά και υδραυλικά μεγέθη. Ο συνδυασμός λοιπόν που ενδιαφέρει στην περίπτωση των χαλικοπασσάλων είναι η σύζευξη μηχανικής και υδραυλικής λειτουργίας. Πράγματι, με τους χαλικοπασσάλους επιτυγχάνεται η στερεοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους, προκύπτει δε αποτόνωση των υπερπίεσεων πόρων, η οποία με τη σειρά της συνεπάγεται μετακινήσεις στο έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνουν χώρα δύο μηχανικά φαινόμενα: (1) Το νερό σε μία ζώνη αντιδρά στις μηχανικές μεταβολές όγκου με αλλαγή της πίεσης των πόρων, και (2) η αλλαγή της πίεσης πόρων προκαλεί διαφοροποίηση στις ενεργές τάσεις, από τις οποίες εξαρτάται η απόκριση του εδάφους (π.χ. μείωση των ενεργών τάσεων μπορεί να επιφέρει διαρροή του υλικού).

Τέλος, είναι απαραίτητο να προσεγγισθεί το πρόβλημα ως μη-γραμμικό, δεδομένου ότι η συμπεριφορά των υλικών μετά από κάποιο όριο αποκλίνει τόσο από τη γραμμικότητα όσο και από την ελαστικότητα. Οι παραμορφώσεις σε υψηλές τιμές επιφόρτισης είναι παραμένοντες και το υλικό μπορεί να οδηγηθεί στο όριο της διαρροής ή ακόμη και να το ξεπεράσει.

9.2 Παρουσίαση του κώδικα FLAC^{3D}-Δυνατότητες και λειτουργίες

Δεδομένης της ιδιαιτερότητας του προβλήματος, κρίνεται σκόπιμο για την αριθμητική του ανάλυση να επιλεγεί ένας κώδικας ο οποίος να λαμβάνει υπ' όψιν όλα τα ως άνω χαρακτηριστικά που το καθιστούν ιδιαίτερο. Στην συλλογιστική αυτή, επιλέχθηκε ο κώδικας FLAC^{3D}. πρόκειται για ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών, του οποίου η βάση είναι ένας καλά δομημένος αλγόριθμος. Επεκτείνοντας την ικανότητα ανάλυσης στις τρεις διαστάσεις, προσομοιώνει τη συμπεριφορά εδάφους, βράχου και άλλων υλικών, τα οποία εισέρχονται στην πλαστική περιοχή της συμπεριφοράς τους όταν υπερβληθεί το δικό τους όριο διαρροής. Τα υλικά αντιπροσωπεύονται από πολύεδρα στοιχεία σε έναν τρισδιάστατο κάρναβο, ο οποίος ρυθμίζεται έτσι από το χρήστη, ώστε να αρμόζει στη μορφολογία του προβλήματος που προσομοιώνεται. Κάθε στοιχείο συμπεριφέρεται σύμφωνα με έναν ορισμένο γραμμικό ή μη-γραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων, ανάλογα με τις επιβαλλόμενες δυνάμεις και τις οριακές συνθήκες. Το υλικό μπορεί να διαρρεύσει, ενώ ο κάρναβος μπορεί να παραμορφωθεί και να μετακινηθεί μαζί με το υλικό που αντιπροσωπεύεται.

Συνεπώς, το FLAC^{3D} προσφέρει στο χρήστη πολλαπλές δυνατότητες για να επιλύσει σύνθετα προβλήματα της μηχανικής και ειδικότερα της βραχομηχανικής και της εδαφομηχανικής, όπως είναι το πρόβλημα της στερεοποίησης.

Αν ο χρήστης δεν επιλέξει διαφορετικά, το πρόγραμμα θα προβεί σε στατική μηχανική ανάλυση. Εναλλακτικά, μπορεί να επιλεγθεί υδραυλική ανάλυση κατά τρόπον ανεξάρτητο της μηχανικής ή ακόμη να γίνει σύζευξη μηχανικής-υδραυλικής ανάλυσης. Πολλές στρατηγικές προσομοίωσης είναι διαθέσιμες για τη συζευγμένη ανάλυση. Όμως οι πλέον περίπλοκες από αυτές απαιτούν πολύ περισσότερη μνήμη και υπολογιστικό χρόνο. Γενικός κανόνας είναι λοιπόν ότι πρέπει να χρησιμοποιείται η απλούστερη δυνατή προσέγγιση, η οποία θα είναι σύμφωνη με τη ρεαλιστική αναπαραγωγή των φυσικών διαδικασιών που είναι σημαντικές για το πρόβλημα.

9.3 Διακριτοποίηση του προβλήματος

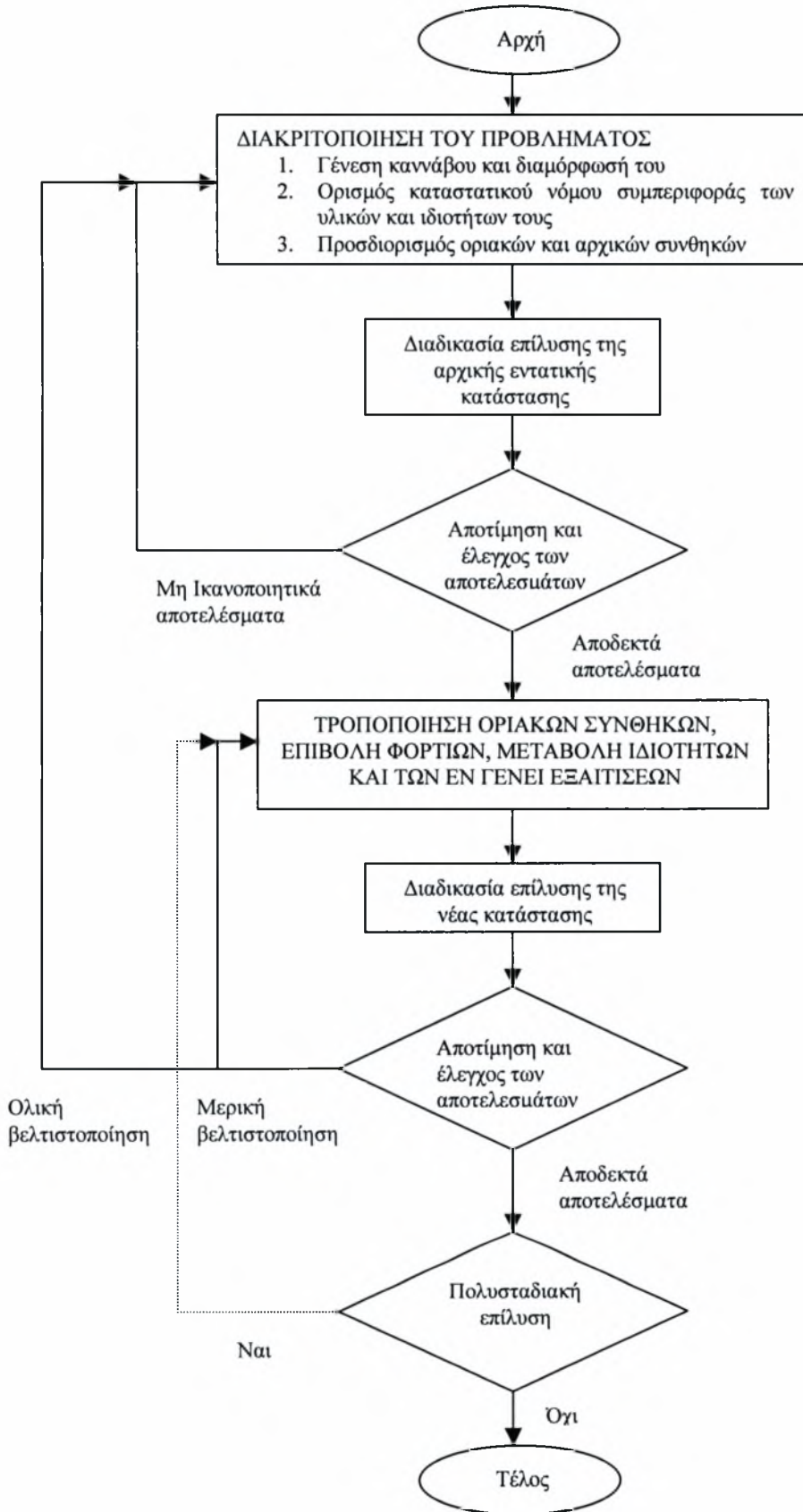
Για τη διακριτοποίηση ενός προβλήματος στον κώδικα FLAC^{3D} πρέπει να οριστούν τρεις βασικές παράμετροι :

1. Ο κάρναβος πεπερασμένων διαφορών.
2. Ο καταστατικός νόμος συμπεριφοράς και οι ιδιότητες των υλικών.
3. Οι συνθήκες ορίου και οι αρχικές συνθήκες.

Ο κάρναβος προσδιορίζει τη γεωμετρία του προβλήματος. Ο καταστατικός νόμος συμπεριφοράς και οι ιδιότητες των υλικών υπαγορεύουν το είδος της απόκρισης του προσομοιώματος σε κάποια εξαίτιση (λ.χ. επιφόρτιση, εκσκαφή κ.ά.). Οι οριακές και οι αρχικές συνθήκες ορίζουν την αρχική κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα (πριν επισυμβούν σ' αυτό αλλαγές ή διαταραχές).

Μετά τον προσδιορισμό των παραπάνω στοιχείων, υπολογίζεται το αρχικό εντατικό πεδίο του προβλήματος. Ακολουθούν οι εξαιτίσεις και οι αλλαγές στο σύστημα και υπολογίζεται η τελική απόκρισή του. 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. Όμως, ο τελευταίος είναι εκείνος που τελικά θα αποφασίσει εάν ο αριθμός των υπολογιστικών βημάτων επαρκεί για την λύση του προβλήματος.

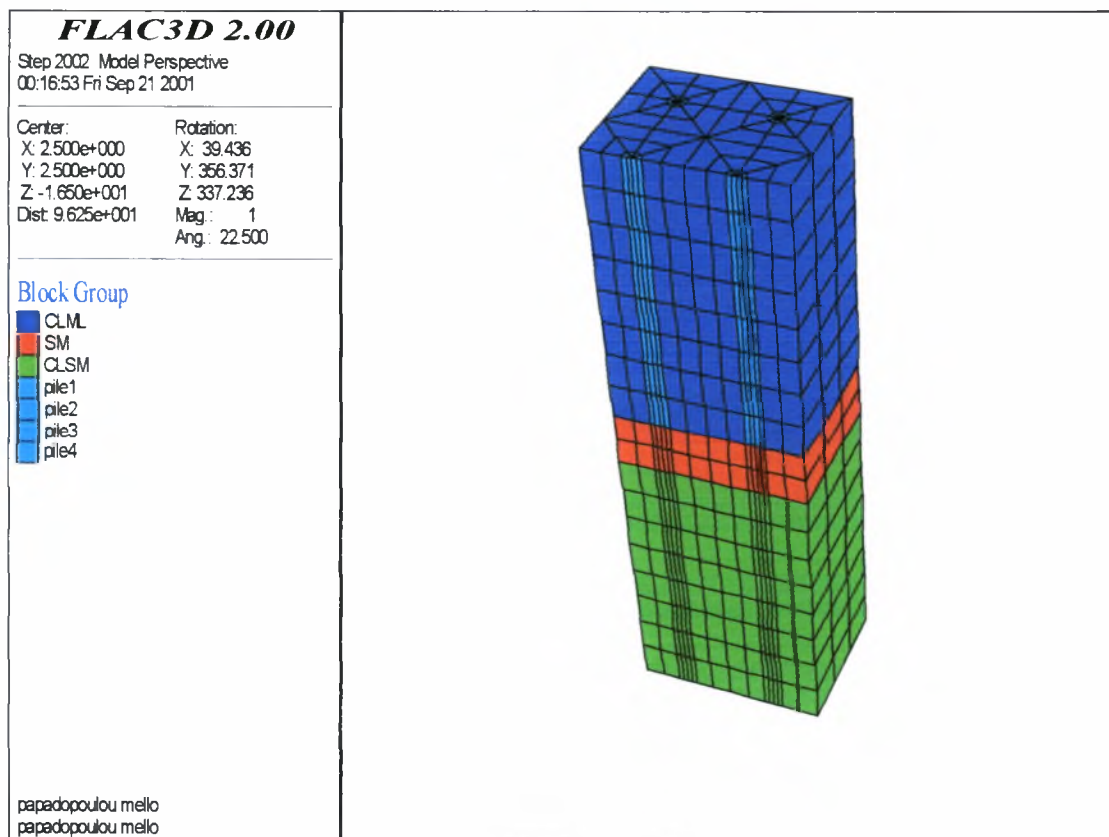
Η γενική διαδικασία επίλυσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.1 και αντιπροσωπεύει τη διαδοχή των διαδικασιών που επισυμβαίνουν στο φυσικό πεδίο.



Σχήμα 9.1 Γενική διαδικασία επίλυσης κατά τον κώδικα $FLAC^{3D}$

9.3.1 Μόρφωση του καννάβου και συνθήκες ορίου

Στο εξεταζόμενο πρόβλημα ο κάνναβος περιλαμβάνει τέσσερις χαλικοπασσάλους διαμέτρου $D=1\text{m}$ σε απόσταση μεταξύ των αξόνων τους ίση με $s=5\text{m}$. Οι άξονες συντεταγμένων του αναλυτικού προσομοιώματος τοποθετούνται στην κεφαλή ενός από τους χαλικοπασσάλους και ο κατακόρυφος άξονας z προσανατολίζεται κατά μήκος του χαλικοπασσάλου με θετικές τιμές προς τα άνω. Το προσομοίωμα έχει διαστάσεις $10 \times 10 \times 33\text{m}^3$ και παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.2. Ο συνολικός κάνναβος του προσομοιώματος συντίθεται από τρεις υποκάνναβους, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν εν προκειμένω τις τρεις εδαφικές στρώσεις του προβλήματος. Δεν απαιτήθηκε ιδιαίτερη διαδικασία σύνδεσης των καννάβων, δεδομένου ότι συμπίπτουν οι κόμβοι των επιμέρους καννάβων που ανήκουν στις κοινές τους επιφάνειες. Το ύψος των διακριτών στοιχείων είναι 1.875m για τα πρώτα και τα τελευταία 15m (Στρώση 1 και 3 αντιστοίχως) και 1.5m για την ενδιάμεση στρώση πάχους 3m . Το πλάτος των στοιχείων που αντιπροσωπεύουν τους χαλικοπασσάλους είναι 0.25m , ενώ εκείνων του περιβάλλοντος εδάφους είναι 1m . Συνολικώς, το προσομοίωμα αποτελείται από $2,304$ στοιχεία και περιλαμβάνει $2,299$ κόμβους.



Σχήμα 9.2 Κάνναβος του προσομοιώματος

Στοιχεία διεπιφανειών δεν χρησιμοποιούνται διότι οι τελευταίες δεν είναι συμβατές με τη λογική της ροής. Συγκεκριμένα, οι διεπιφάνειες αντιμετωπίζονται ως αδιαπέρατα όρια, οπότε και η ροή καθίσταται εξαιρετικά αργή· ως εκ τούτου, στο συγκεκριμένο πρόβλημα έχει αποφευχθεί η χρήση τους.

Σχετικά με τις οριακές συνθήκες, στη στάθμη $z = -33\text{m}$, δηλαδή στη βάση του καννάβου, απαγορεύονται οι μετακινήσεις κατά τις διευθύνσεις x, y, z , ενώ στα πλευρικά όρια του προσομοιώματος (επίπεδα με $x=7.5\text{m}$, $x=-2.5\text{m}$, $y=7.5\text{m}$ και $y=-2.5\text{m}$) απαγορεύονται οι κινήσεις καθέτως προς τα όρια αυτά.

9.3.2 Καταστατικός νόμος και ιδιότητες των υλικών

Μετά την ολοκλήρωση της μόρφωσης του καννάβου, ακολουθεί ο προσδιορισμός του καταστατικού νόμου συμπεριφοράς του υλικού ή των υλικών που προσομοιώνονται καθώς και των ιδιοτήτων τους.

Είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά του εδάφους ξεφεύγει από τα όρια της γραμμικής ελαστικότητας, ακόμη και για μικρά βήματα εξαίτησης. Έτσι, ενώ αρχικώς τα εδαφικά υλικά διέπονται από γραμμική ελαστική συμπεριφορά, εισέρχονται εν συνεχεία στην ελαστοπλαστική κρατυνόμενη περιοχή, είναι δε ενδεχόμενο να ακολουθήσει η χαλάρωσή τους. Το εάν και κατά πόσον τα υλικά θα εμφανίσουν τις παραπάνω συμπεριφορές εξαρτάται από τη σύσταση και τις ιδιότητές τους. Στόχο της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς ενός υλικού αποτελεί η διατύπωση κατάλληλου καταστατικού νόμου που να μπορεί α) να καταγράφει το μηχανισμό εκδήλωσης του φαινομένου, β) να παρακολουθεί στενά την καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων με ανάλογη πρόβλεψη των αναμενόμενων μεγεθών, και γ) να μην παραβιάζει θεμελιώδη ενεργειακά αξιώματα.

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες μη-γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών καθορίζεται από το τοπικό καθεστώς. Το τελευταίο είναι που καθορίζει τη θραύση του υλικού μέσου (εδαφικού στην προκειμένη περίπτωση) και δεν μπορεί να προσδιορισθεί με τη μονομερή χρήση γνωστών απλών κριτηρίων, όπως η αντοχή σε εφελκυσμό, σε σύνθλιψη ή διάτμηση. Αντιθέτως, η «πραγματική» τρισδιάστατη κατάσταση, όπου είναι δυνατή η ταυτόχρονη παρουσία τάσεων ελκυσμού, θλίψης και διάτμησης, επιβάλλει τη χρήση πιο σύνθετων κριτηρίων που λαμβάνουν υπ' όψιν το τρισδιάστατο καθεστώς των τάσεων.

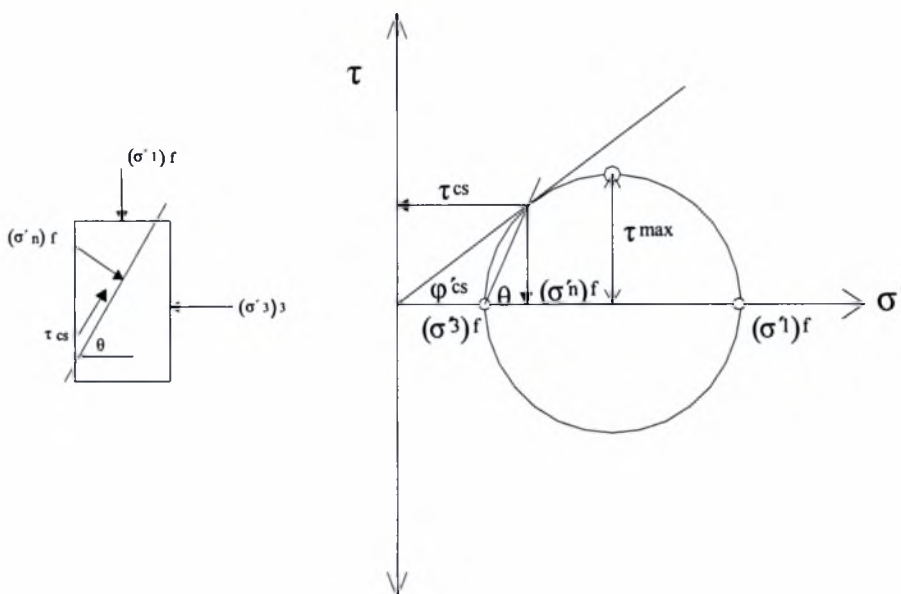
Ο κώδικας FLAC^{3D} παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει μεταξύ δέκα διαφορετικών προσομοιωμάτων συμπεριφοράς, όπου τα πλέον δημοφιλή είναι εκείνα των Mohr–Coulomb, Drucker–Prager και modified Cam–clay.

Για την ανάλυση του προβλήματος του βελτιωμένου εδάφους μέσω χαλικοπασσάλων επιλέχθηκε ο νόμος Mohr-Coulomb τόσο για το υλικό των χαλικοπασσάλων όσο και για το περιβάλλον αργιλικό έδαφος. Ο νόμος αυτός βασίζεται στη θεωρία εσωτερικής τριβής, όπου η διατμητική αντοχή αυξάνει με το μέγεθος της ορθής τάσης στο επίπεδο αστοχίας (Σχήμα 9.3). Ο νόμος εκφράζεται μαθηματικά από την ακόλουθη σχέση:

$$\tau = c + \sigma \tan\varphi \tag{9.1}$$

από την οποία προκύπτει η εν συνεχεία σχέση:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin\varphi + c \cos\varphi \tag{9.2}$$



Σχήμα 9.3 Απεικόνιση του μοντέλου τριβής Mohr-Coulomb στο επίπεδο ορθής και διατμητικής τάσης

Ο νόμος Mohr-Coulomb έχει αποδεδειγμένη ισχύ για πολλές κατηγορίες εδαφών. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται από το FLAC^{3D} για τον συγκεκριμένο νόμο είναι το μέτρο διόγκωσης K , το μέτρο διάτμησης G , η συνοχή c , η γωνία διατμητικής αντοχής φ , η γωνία διαστολής ψ και η οριακή τάση εφελκυσμού σ^t .

Οι ιδιότητες που έχουν τα υλικά των εδαφικών στρώσεων του προσομοιώματος προέκυψαν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων γεωτεχνικής διασκόπησης που έχει εκτελεσθεί, καθώς και τις μελέτες που έχουν συνταχθεί για το λιμάνι του Αιγίου. Οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας των χαλικοπασσάλων έχουν προκύψει από τη διεθνή βιβλιογραφία. Οι ιδιότητες των υλικών συνοψίζονται στον Πίνακα 9.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.1 Ιδιότητες των υλικών του προσομοιώματος

Εδαφικό υλικό	E(KPa)	ν	c(KPa)	ϕ
Στρώση 1	4.5×10^3	0.4	0	20
Στρώση 2	15×10^3	0.3	0	36
Στρώση 3	16×10^3	0.4	25	13
Χαλικοπάσσαλοι	70×10^3	0.2	1	40

Σημειώνεται ότι οι παράμετροι παραμορφωσιμότητας G και K τις οποίες χρησιμοποιεί το FLAC^{3D} προκύπτουν από το μέτρο Young και τον συντελεστή Poisson μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

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

9.3.3 Επιλύσεις

9.3.3.a Αρχικό εντατικό πεδίο

Το προσομοίωμα πρέπει να βρεθεί στην αρχική του ισορροπία πριν διεξαχθεί οποιαδήποτε αλλαγή.

Αρχικώς πραγματοποιείται επίλυση υπό καθεστώς γεωστατικών τάσεων πριν από την εγκατάσταση των χαλικοπασσάλων. Αποδίδονται στις εδαφικές στρώσεις οι τιμές του ειδικού βάρους γαιών, όπως αυτές προέκυψαν από τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής διασκόπησης. Εισάγεται το πεδίο βαρύτητας και προσεγγίζονται οι αρχικές συνθήκες, έτσι ώστε να επιταχυνθεί η επίλυση.

Κατά το δεύτερο στάδιο επίλυσης εισάγονται οι χαλικοπάσσαλοι και το προσομοίωμα έρχεται εκ νέου σε ισορροπία. Η προσομοίωση της εγκατάστασης των χαλικοπασσάλων επιτυγχάνεται με αντικατάσταση των ιδιοτήτων των εδαφικών στοιχείων με εκείνες των χαλικοπασσάλων στις ζώνες που απαρτίζουν τους τελευταίους. Στο στάδιο αυτό εισάγεται γραμμική κατανομή της πίεσης των πόρων με το βάθος.

Οι τιμές του ειδικού βάρους που εισήχθησαν στο προσομοίωμα παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.2 Ειδικά βάρη των γεωυλικών

Εδαφικό υλικό	Στρώση 1	Στρώση 2	Στρώση 3	Χαλικοπάσσαλοι
Ειδικό βάρος(kN/m ³)	17.5	20.1	19.5	20.0

9.3.3.β Μηχανική και υδραυλική επίλυση της εξαίτισης

Για το στάδιο αυτό της επίλυσης ορίζονται οι διαπερατότητες των υλικών. Οι διαπερατότητες των εδαφικών στρώσεων υπολογίζονται στο πρόγραμμα μέσω του συντελεστή στερεοποίησης C_v , ο οποίος και για τις τρεις στρώσεις εκλαμβάνεται ίσος με $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$, καθώς και του συντελεστή μεταβολής όγκου m_v σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad \text{και} \quad m_v = \frac{1}{K + 4G/3}.$$

Η διαπερατότητα των χαλικοπασσάλων λαμβάνεται ίση με 10^{-4} cm/sec .

Για την ανάλυση της υπόγειας ροής απαιτείται επίσης η εισαγωγή του μέτρου διόγκωσης του νερού (K_f). Η «φυσική» τιμή του μεγέθους αυτού είναι 2 GPa, η οποία και υιοθετείται στο προσομοίωμα. Ακόμη, εισάγεται η «πραγματική» τιμή του ειδικού βάρους του νερού.

Επιβάλλεται φορτίο ίσο προς 100 kPa (φορτίο προφόρτισης) στη στάθμη $z=0\text{m}$. Για την προσομοίωση της συγκέντρωσης των τάσεων στους χαλικοπασσάλους επιλέγεται συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων ίσος με δύο ($n=2$) και επιβάλλονται φορτία στην άργιλο και στους χαλικοπασσάλους αντιστοίχως ίσα με:

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{1 + (n-1)a_s} = 97\text{kPa} \quad \text{και} \quad \sigma_c = \frac{n\sigma}{1 + (n-1)a_s} = 194\text{kPa}.$$

Επισημαίνεται ότι η επιβολή του φορτίου προφόρτισης δεν υλοποιείται αναλυτικά σε δύο στάδια, όπως προβλέπεται από τη μελέτη, δεδομένου ότι στο συγκεκριμένο προσομοίωμα δεν τίθεται θέμα ευστάθειας.

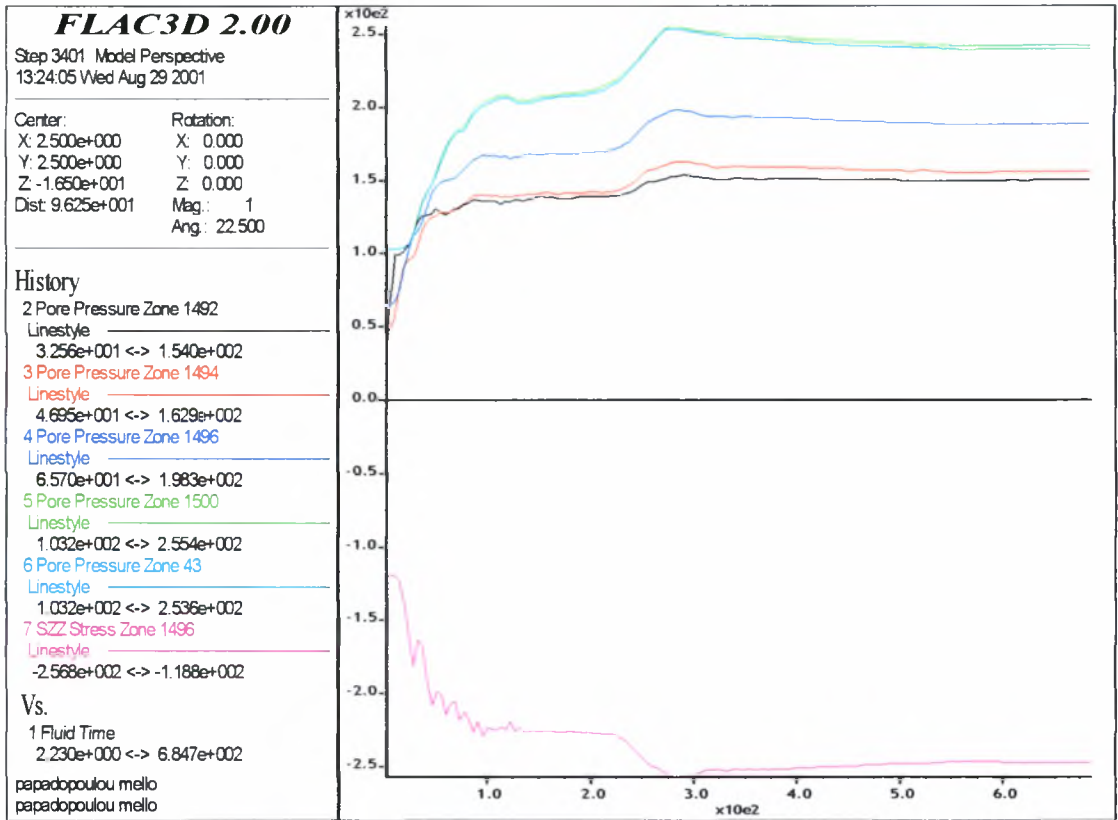
Αρχικώς γίνεται η πραγματική σύζευξη (σε χρόνο) των μηχανικών και υδραυλικών εξισώσεων. Σε αυτό το στάδιο παρατηρείται πολύ αργή επίλυση λόγω του μικρού χρονικού βήματος που αντιστοιχεί σε κάθε βήμα ροής· συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι το ένα δευτερόλεπτο πραγματικής ροής αντιστοιχεί σε βήμα $4.46 \times 10^{-1} \text{ sec}$ του προγράμματος. Αυτό συμβαίνει διότι το χρονικό βήμα ροής στο πρόγραμμα είναι αντιστρόφως ανάλογο του K_f ($\Delta t_f \propto n/K_f k'$, όπου $k' = k/\gamma_f$ η διαπερατότητα που χρησιμοποιείται στο FLAC^{3D}). Η συζευγμένη επίλυση εκτελείται μέχρι να αναπτυχθούν οι πιέσεις πόρων και ισορροπήσει μηχανικά το σύστημα. Στο στάδιο αυτό αναπτύσσονται οι τάσεις και προκύπτουν οι άμεσες καθιζήσεις. Στο Σχήμα 9.4 παρουσιάζεται η εξέλιξη της πίεσης των πόρων (σε τέσσερα διαφορετικά σημεία) και των τάσεων (σε ένα σημείο) με το χρόνο της ροής. Τα σημεία αυτά είναι τα ακόλουθα:

- zone 1492 ($x=1, y=2.5, z=-2$)
- zone 1494 ($x=1, y=2.5, z=-4$)
- zone 1496 ($x=1, y=2.5, z=-6$)
- zone 1500 ($x=1, y=2.5, z=-10$)
- zone 43 ($x=1, y=0.5, z=-10$)

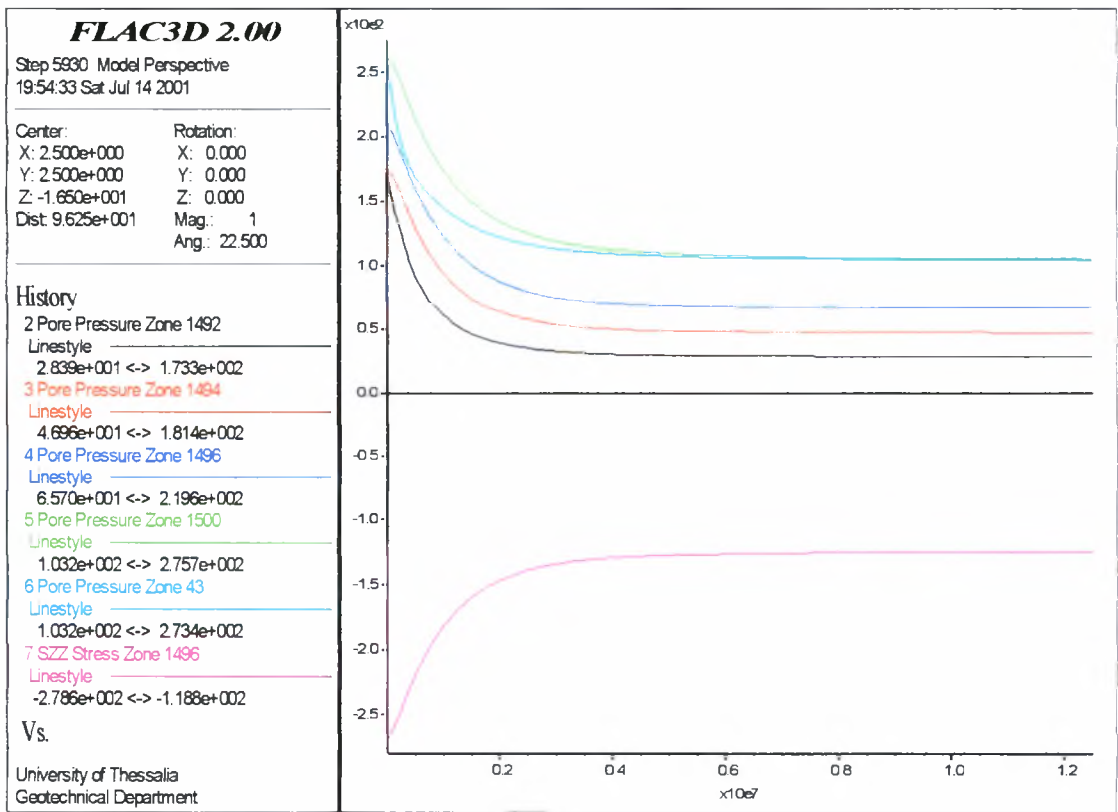
Λόγω της πολύ αργής επίλυσης του προβλήματος υπό συζευγμένες συνθήκες, γίνεται εν συνεχεία αποσύζευξη του μηχανικού και υδραυλικού μέρους και

εκτελείται μόνον η υδραυλική επίλυση έως ότου αποτονωθούν οι πιέσεις πόρων. Για να επιταχυνθεί η επίλυση, στο στάδιο αυτό είναι δυνατόν να εισαχθεί στο πρόγραμμα μεγαλύτερο χρονικό βήμα ροής. Η επίλυση εξελίσσεται μέχρις ότου εκτονωθούν πλήρως οι πιέσεις πόρων, οπότε και προκύπτει ο χρόνος στερεοποίησης του αργιλικού στρώματος. Στο Σχήμα 9.5 παρουσιάζεται η εκτόνωση της πίεσης των πόρων σε συνάρτηση με το χρόνο ροής (στα σημεία του προηγούμενου σχήματος). Διαπιστώνεται ότι η στερεοποίηση ολοκληρώνεται μετά από 0.4×10^7 sec περίπου (1.5 μήνας).

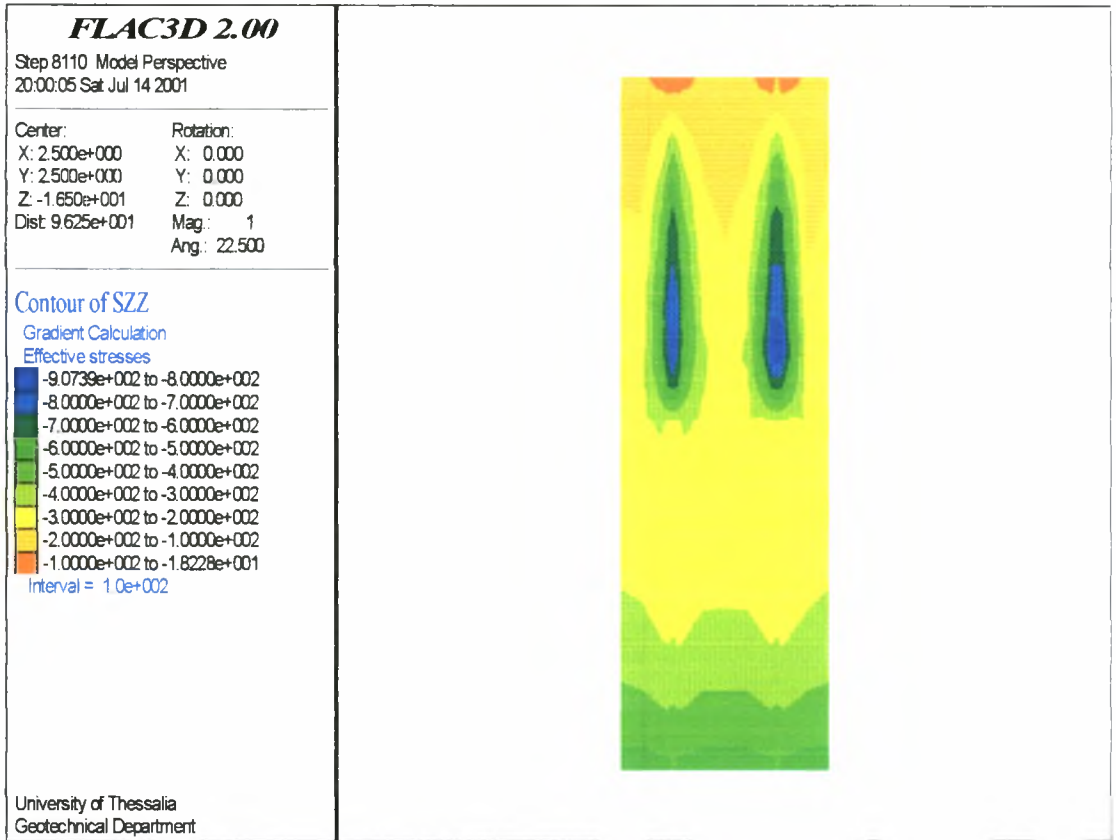
Στο τελευταίο στάδιο, εκτελείται η μηχανική επίλυση του προβλήματος καθιστώντας ανενεργή την διαδικασία επίλυσης της ροής. Στο παρόν στάδιο τροποποιούνται οι τάσεις και λαμβάνονται οι καθιζήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται αντιστοίχως στα Σχήματα 9.6 και 9.7. Σημειώνεται ότι μετά από χρόνο ροής ίσο με 4.8 μήνες, οι καθιζήσεις στην άργιλο ανέρχονται σε 29.6cm. Η διαφορά στην τιμή της καθίζησης, αλλά και στον χρόνο στερεοποίησης, σε σχέση με τις τιμές που έχουν προβλεφθεί από τη μελέτη του έργου (πολύ μεγαλύτερες αυτών του προσομοιώματος) οφείλεται στον περιορισμένο κάρναβο. Οι δε καθιζήσεις στους χαλικοπασσάλους προκύπτουν ίσες με 22.5cm. Στην επόμενη παράγραφο γίνεται σύγκριση της παραπάνω τιμής της καθίζησης, που προκύπτει από την αριθμητική ανάλυση, και της καθίζησης που υπολογίστηκε με αναλυτική διαδικασία επίλυσης. Όσον αφορά, τέλος, στις οριζόντιες μετακινήσεις, η πλευρική διόγκωση στο ανώτερο τμήμα των χαλικοπασσάλων είναι πολύ μικρή (της τάξεως μεγέθους χιλιοστών), γεγονός που αποδίδεται στη σημαντική «περίσφιξη» που υφίστανται οι χαλικοπάσσαλοι από το περιβάλλον έδαφος, καθώς και στο μικρής τάξεως φορτίο όπως προκύπτει και από την ανάλυση που γίνεται στο παράρτημα Α1. Στο Σχήμα 9.8 δίνονται οι ισοτιμές των οριζόντιων μετακινήσεων, ενώ στο Σχήμα 9.9 παρουσιάζεται η πλευρική διόγκωση στην παρειά των χαλικοπασσάλων με το βάθος.



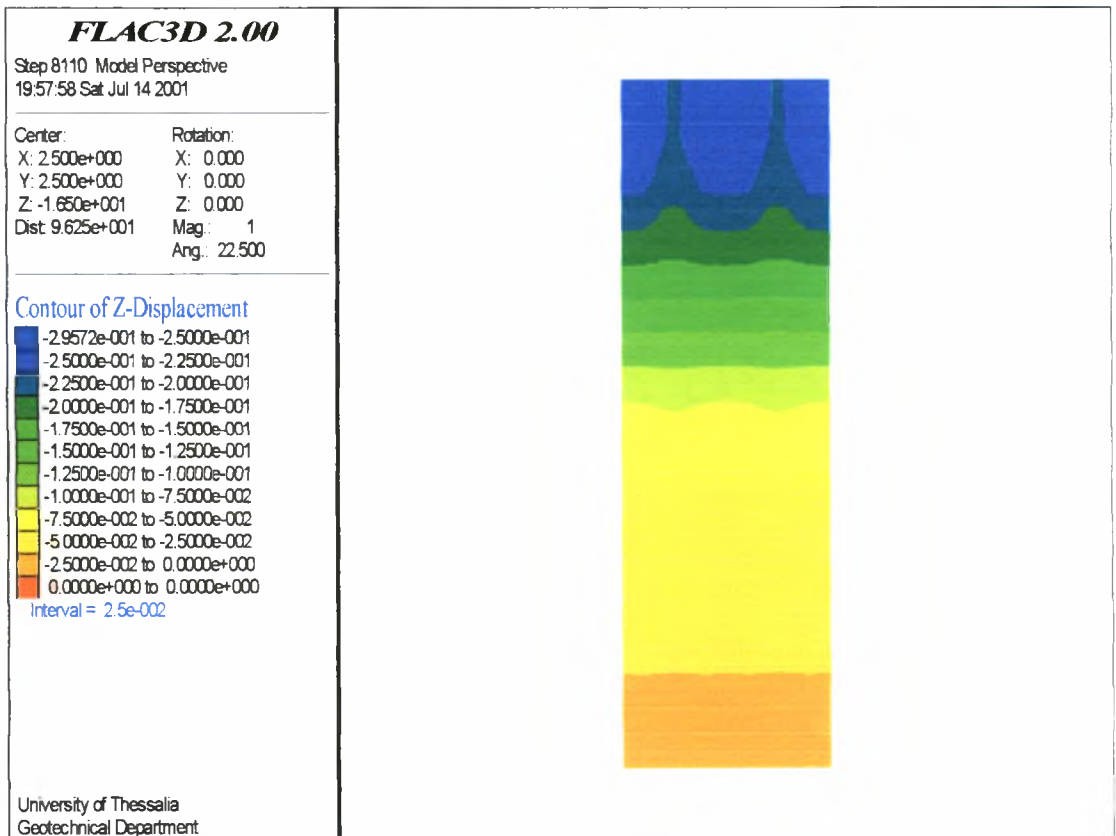
Σχήμα 9.4 Εξέλιξη της πίεσης πόρων και των τάσεων μέχρι την πρώτη μηχανική ισορροπία του συστήματος



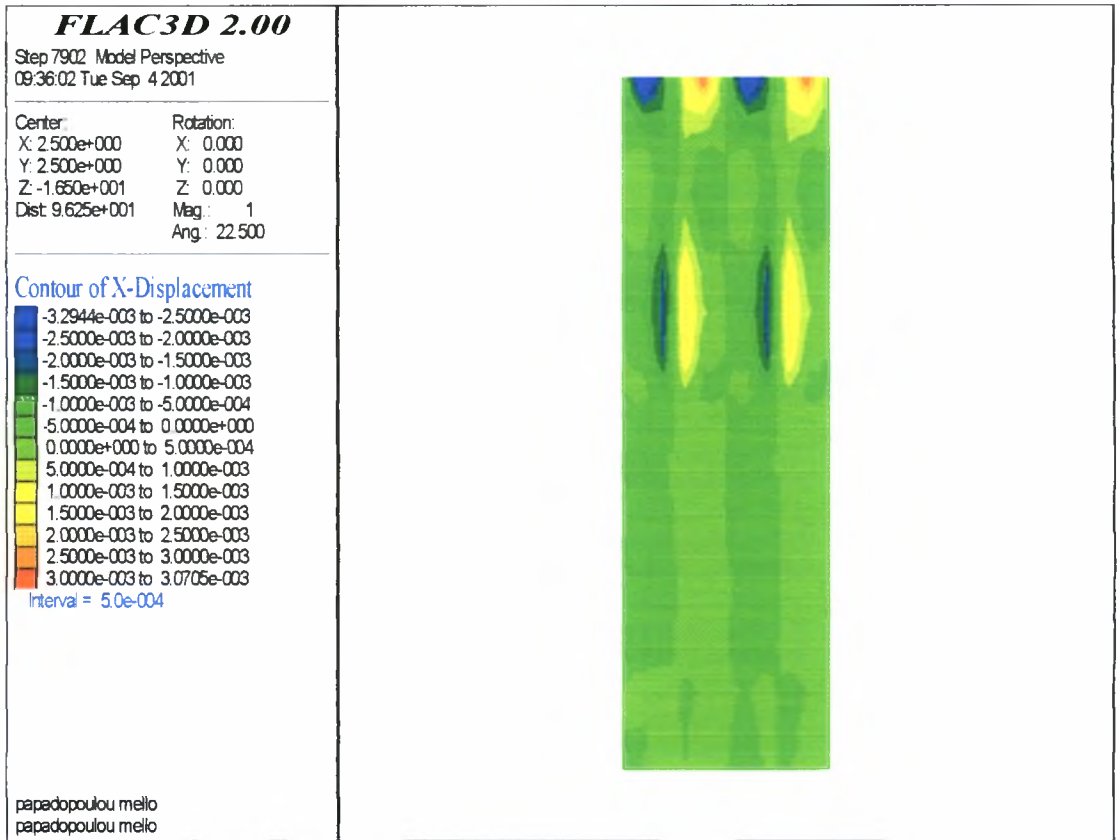
Σχήμα 9.5 Εκτόνωση της πίεσης πόρων κατά τη στερεοποίηση



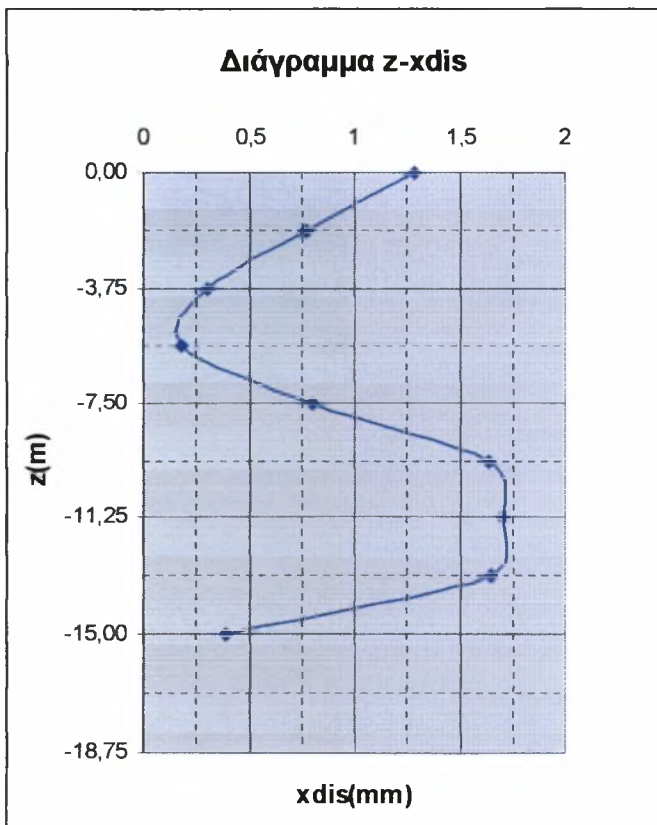
Σχήμα 9.6 Ισοστατικές γραμμές μετά τη στερεοποίηση



Σχήμα 9.7 Ισοτιμές των καθιζήσεων μετά τη στερεοποίηση



Σχήμα 9.8 Ισοτιμές των οριζόντιων μετακινήσεων



Σχήμα 9.9 Πλευρική διόγκωση χαλικοπασσάλου με το βάθος

9.4 Υπολογισμός καθιζήσεων του βελτιωμένου εδάφους με θεώρηση οριακής ισορροπίας κατά Rankine

Για τις εδαφικές και γεωμετρικές συνθήκες του προσομοιώματος έγινε ο υπολογισμός των καθιζήσεων σύμφωνα με τη θεωρία της οριακής ισορροπίας κατά Rankine (παράγραφος 5.9.1), έχοντας ως δεδομένα τα εξής:

$D=1\text{m}$: η διάμετρος των χαλικοπασσάλων
 $s=5\text{m}$: η απόσταση μεταξύ των χαλικοπασσάλων
 $P_o=100\text{KN/m}^2$: το επιβαλλόμενο φορτίο
 $E=4.5\text{Mpa}$: το μέτρο ελαστικότητας της αργίλου
 $\nu=0.4$: ο συντελεστής Poisson της αργίλου
 $H=15\text{m}$: το μήκος του χαλικοπασσάλου
 $\varphi=40^\circ$: η γωνία διατμητικής αντοχής του χαλικοπασσάλου.

Ο συντελεστής αντικατάστασης του βελτιωμένου εδάφους δίδεται από τη σχέση:

$$a = \frac{\pi D^2}{4s^2} = 0.031$$

και επίσης: $\frac{P_o}{E} = 0.022$

Με βάση τους δύο αυτούς λόγους προκύπτει από διαγράμματα (W.Van Impre & E.De Beer) ότι:

$$m = 0.18 = a \frac{\sigma'_{v1}}{P_o} \Rightarrow \sigma'_{v1} = \frac{P_o}{a} \cdot 0.18 = 580\text{kPa}$$

όπου: $m = F_1 / F_{\text{tot}}$

F_1 : το κατακόρυφο φορτίο που μεταφέρεται στους χαλικοπασσάλους

F_{tot} : το ολικό κατακόρυφο στην περιοχή s^2

Οπότε: $F_1 = mF_{\text{tot}} = ms^2P_o = 450\text{kN}$.

Επίσης, από διάγραμμα (W.Van Impre & E.De Beer) προκύπτει $\beta = 0.95 = \frac{s_v}{s_{v0}}$.

$$\text{Άρα } s_{v0} = H(1-\nu^2) \left[1 - \frac{\nu^2}{1-\nu^2} \right] \frac{P_o}{E} = 15 \cdot 0.84 \cdot 0.81 \cdot \frac{100}{4.5 \cdot 10^3} = 0.23\text{m}$$

$$\text{και } s_v = 0.95 \cdot 0.23 = 0.21\text{m}$$

όπου s_{v0} και s_v είναι αντίστοιχα η καθίζηση του εδάφους χωρίς βελτίωση και η καθίζηση του χαλικοπασσάλου.

Η τιμή της καθίζησης του χαλικοπασσάλου όπως προέκυψε από την παραπάνω ανάλυση (21cm) είναι απόλυτα συγκρίσιμη με την καθίζηση που υπολογίστηκε αριθμητικά στο προσομοίωμα (22.5cm).

10. Παραμετρική ανάλυση του προβλήματος

10.1 Παραμετρικές επιλύσεις

Οι παραμετρικές επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC^{3D} είχαν ως στόχο την περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης των χαλικοπασσάλων στη συμπεριφορά του βελτιωμένου εδάφους. Ως εκ τούτου, εκτελέστηκαν αναλύσεις με διαφοροποίηση των ακόλουθων τριών παραμέτρων:

1. Του επιβαλλόμενου φορτίου για σταθερή διάταξη των χαλικοπασσάλων (διάμετρος $D=1.0\text{m}$ και απόσταση μεταξύ των αξόνων $s=5.0\text{m}$).
2. Της απόστασης μεταξύ αξόνων των χαλικοπασσάλων για σταθερές τιμές διαμέτρου και επιβαλλόμενου φορτίου ίσου με 100kPa .
3. Της διαμέτρου των χαλικοπασσάλων για σταθερές τιμές αποστάσεων μεταξύ των αξόνων τους και επιβαλλόμενο φορτίο ίσο με 100kPa .

Επισημαίνεται ότι οι γεωτεχνικές παράμετροι του προβλήματος διατηρήθηκαν σε όλες τις παραπάνω αναλύσεις ίδιες με αυτές του πραγματικού προβλήματος.

10.1.1 Ανάλυση με διαφοροποιούμενο επιβαλλόμενο φορτίο

Έγιναν επιλύσεις για διαφορετικά επιβαλλόμενα φορτία των 50, 100, 150, 200, 250, 300 και 350kPa . Το προσομοίωμα ήταν όμοιο με το αρχικό (των «πραγματικών» συνθηκών), με μόνη διαφορά την επιβαλλόμενη τάση στους χαλικοπασσάλους και την μεταξύ τους άργιλο. Τα δεδομένα, καθώς και τα αποτελέσματα της πρώτης αυτής παραμετρικής ανάλυσης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 10.1 και αναλυτικά στα διαγράμματα 10.1, 10.2, 10.3 και 10.4.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.1 Αναλύσεις με διαφοροποιούμενο φορτίο

D (m)	s (m)	σ_v (kPa)	σ_s (kPa)	σ_c (kPa)	z_{dis} (cm)	z_{cdis} (cm)	x_{dis} (mm)	t (* 10^7sec)
1	5	50	48	97	17,6	14,0	1,7	0,37
1	5	100	97	194	26,0	22,0	3,3	0,40
1	5	150	145	291	34,4	28,0	4,6	0,45
1	5	200	194	388	43,1	36,0	5,8	0,50
1	5	250	242	485	51,9	42,0	7,1	0,53
1	5	300	291	582	60,7	50,0	8,6	0,55
1	5	350	339	679	69,5	56,0	9,3	0,56

Όπου:

D : η διάμετρος των χαλικοπασσάλων

s : η αξονική τους απόσταση

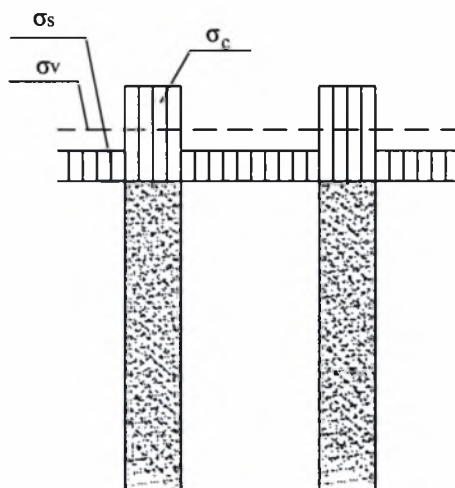
σ_v : η μέση επιβαλλόμενη τάση

σ_c : η επιβαλλόμενη τάση στους χαλικοπασσάλους
 z_{sdis} : η μέγιστη καθίζηση στην άργιλο (στο μέσον της αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων)
 z_{cdis} : η μέγιστη καθίζηση στους χαλικοπασσάλους (στο κέντρο)
 x_{dis} : η πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων
 t : ο χρόνος που απαιτείται για την αποτόνωση των υπερπίεσεων πόρων (\approx με τον χρόνο στερεοποίησης της αργίλου).

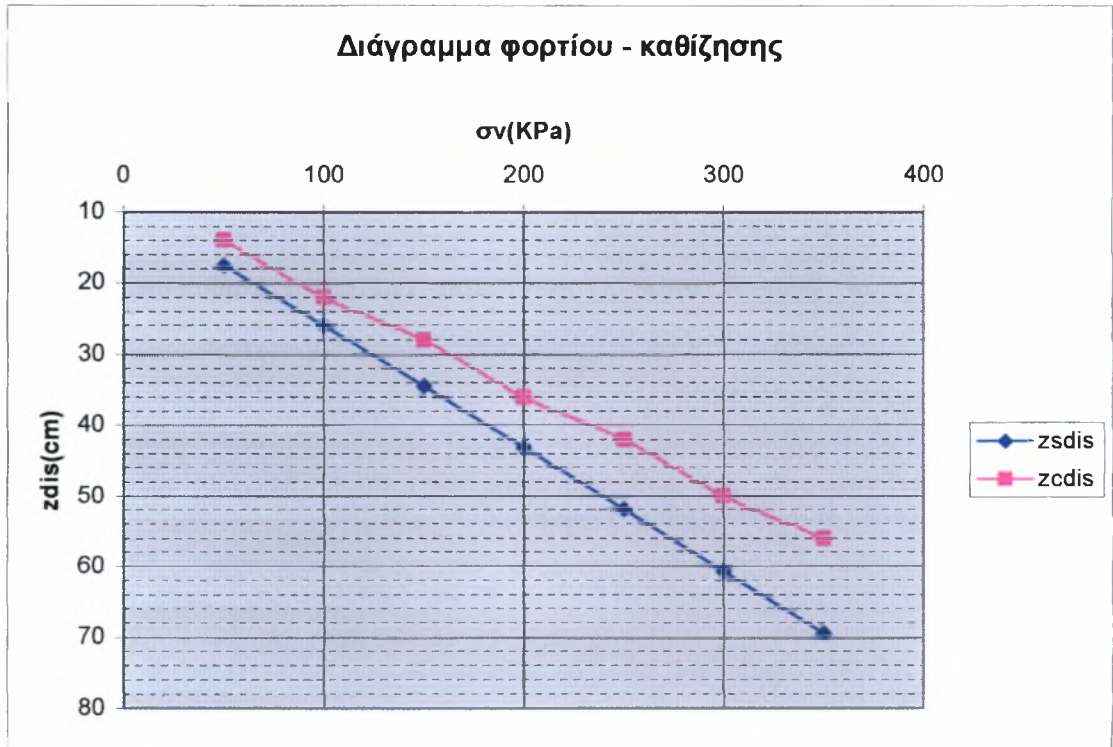
Σημειώνεται ότι η σ_s και η σ_c ακτιμώνται από τις ακόλουθες αναλυτικές σχέσεις:

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

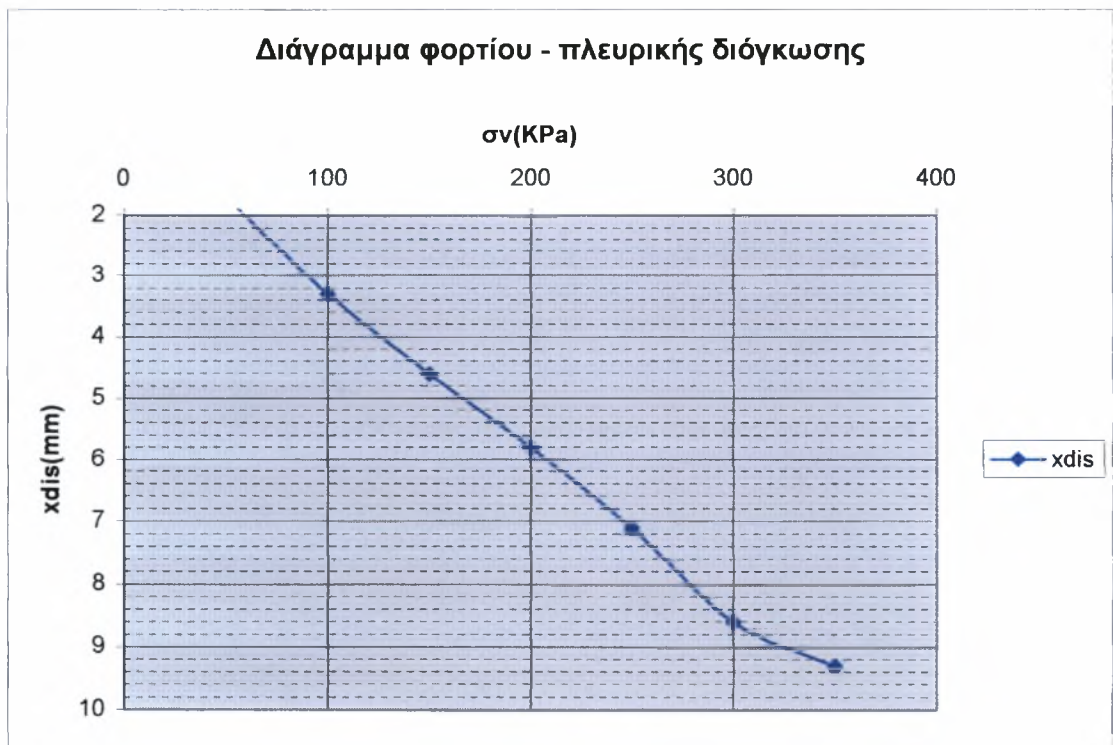
όπου a_s και n ο συντελεστής αντικατάστασης και ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων αντίστοιχα. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η κατανομή των τάσεων στους χαλικοπασσάλους και στο περιβάλλον έδαφος.



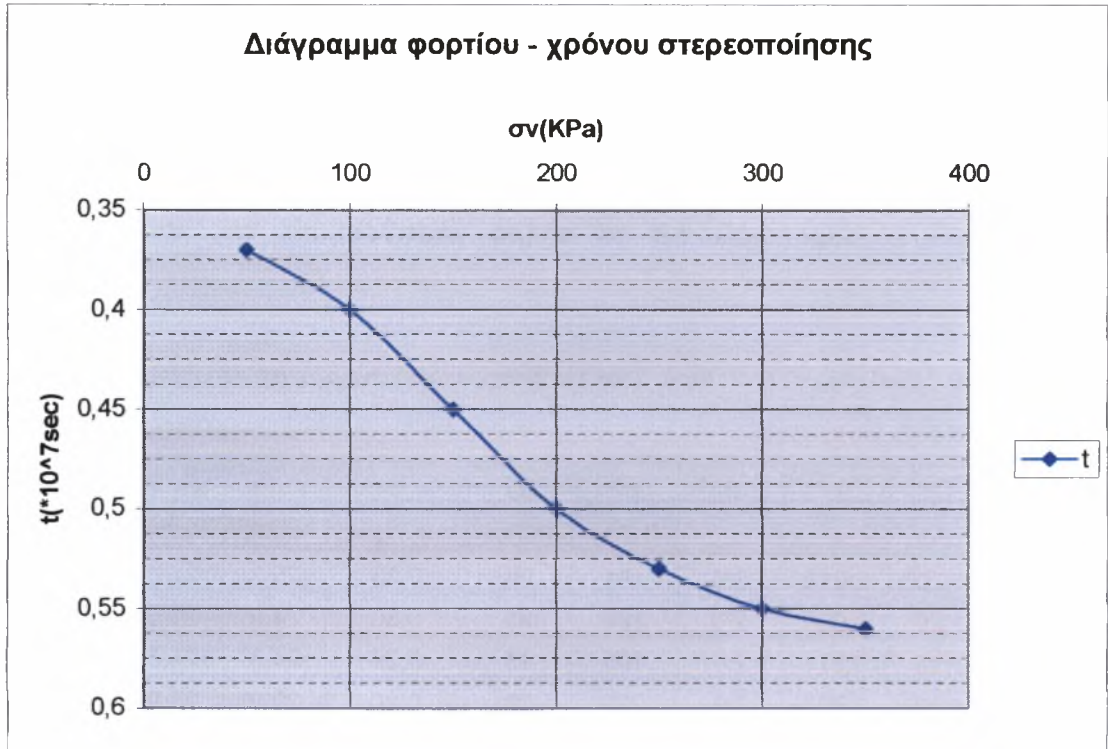
Σχήμα 10.1 Κατανομή τάσεων στο βελτιωμένο με χαλικοπασσάλους έδαφος



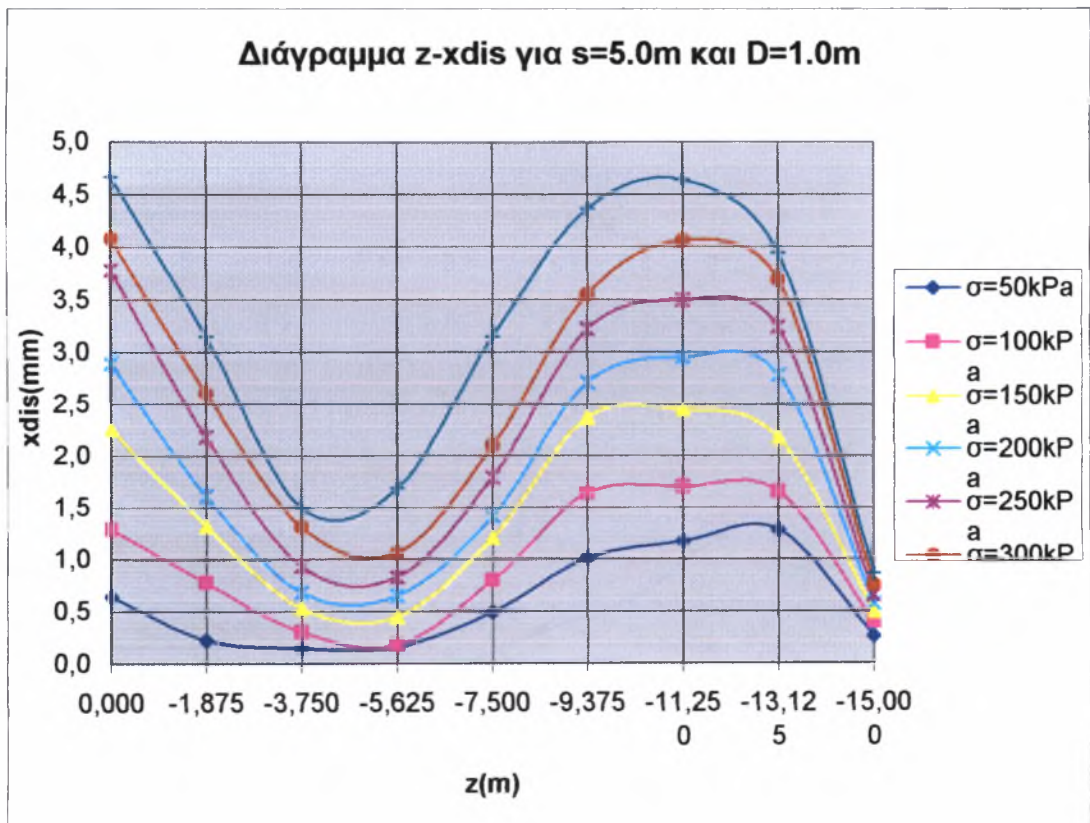
Διάγραμμα 10.1 Μεταβολή καθιζήσεων (zdis) χαλικοπασσάλων και αργίλου με το επιβαλλόμενο φορτίο (σ_v)



Διάγραμμα 10.2 Μεταβολή πλευρικής διόγκωσης χαλικοπασσάλων με το επιβαλλόμενο φορτίο (σ_v)



Διάγραμμα 10.3 Μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης με το επιβαλλόμενο φορτίο



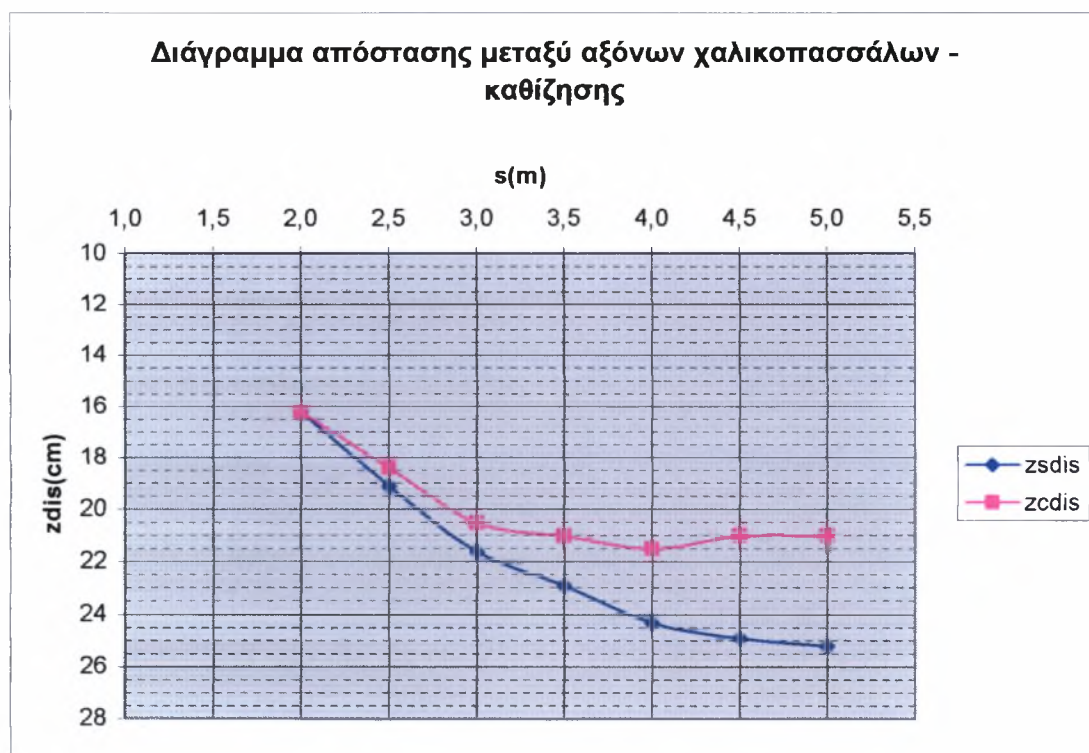
Διάγραμμα 10.4 Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με το βάθος για διαφορετικά φορτία

10.1.2 Ανάλυση με διαφοροποιούμενη αξονική απόσταση χαλικοπασσάλων

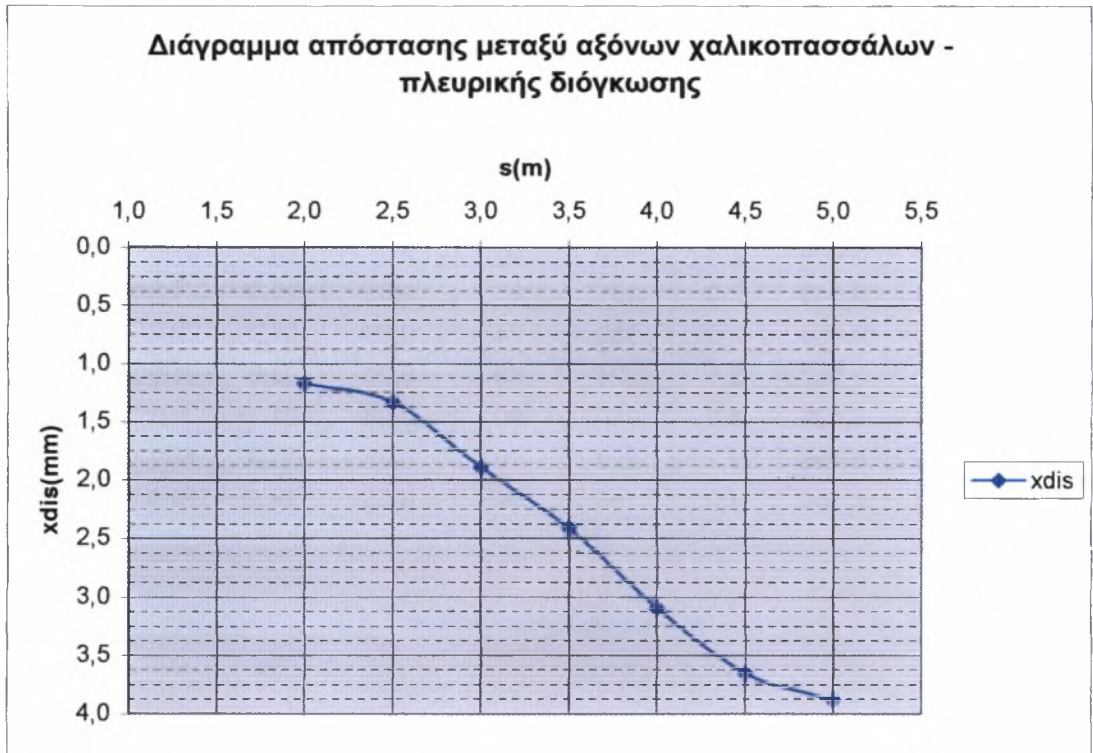
Έγιναν επιλύσεις για οκτώ διαφορετικές τιμές της απόστασης μεταξύ των αξόνων των χαλικοπασσάλων με σταθερή την τιμή της διαμέτρου τους. Έτσι, για διάμετρο 1.2, 1.0, 0.8, 0.6 και 0.45m επιλέχθηκαν αξονικές αποστάσεις 5.0, 4.5, 4.0, 3.5, 3.0, 2.5, 2.0 και 1.5m. Στους πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα πλήρη αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.2 Ανάλυση με $D=σταθερή=1.2m$ και διαφοροποιούμενη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων

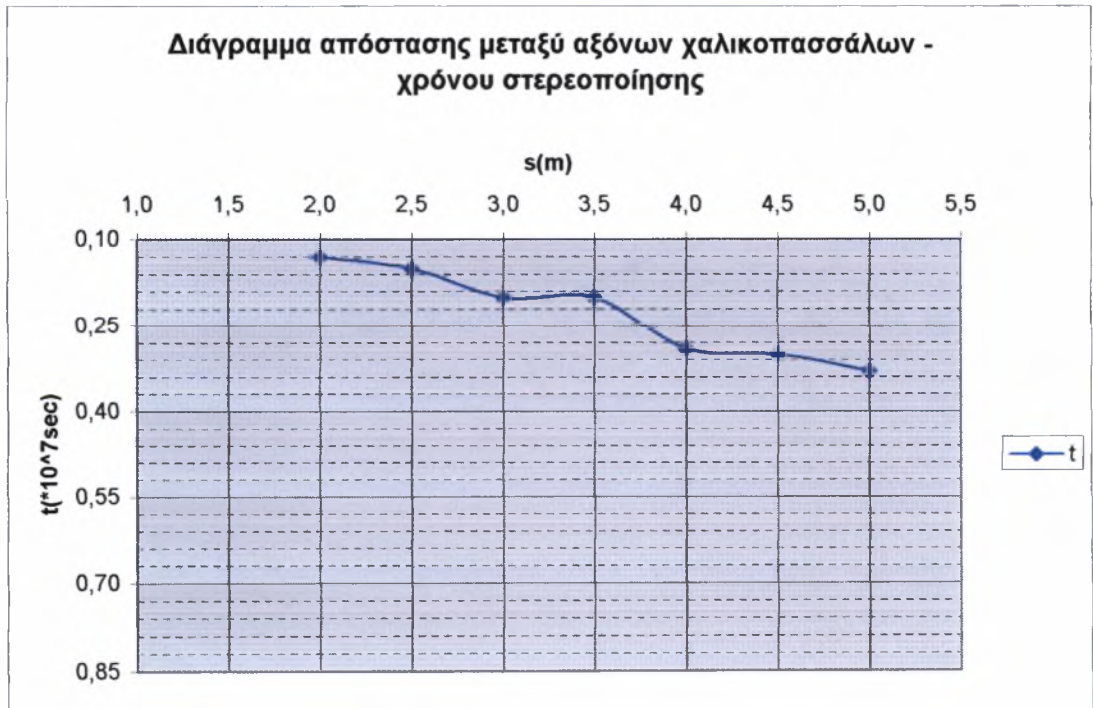
s (m)	D (m)	as	n	σ_c (KPa)	σ_s (KPa)	t *10 ⁷ (sec)	z _{sdis} (cm)	z _{cdis} (cm)	x _{dis} (mm)
5,0	1,20	0,045	2,0	191	96	0,33	25,2	21,0	3,88
4,5	1,20	0,056	2,0	189	95	0,30	24,9	21,0	3,65
4,0	1,20	0,071	2,1	195	93	0,29	24,3	21,5	3,09
3,5	1,20	0,092	2,5	220	88	0,20	22,9	21,0	2,41
3,0	1,20	0,126	3,0	240	80	0,20	21,6	20,5	1,89
2,5	1,20	0,181	3,0	220	73	0,15	19,1	18,4	1,33
2,0	1,20	0,283	3,7	210	57	0,13	16,2	16,2	1,17
1,5	1,20	0,503	-	-	-	-	-	-	-



Διάγραμμα 10.5 Μεταβολή καθιζήσεων με την αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων για $D=1.2m$



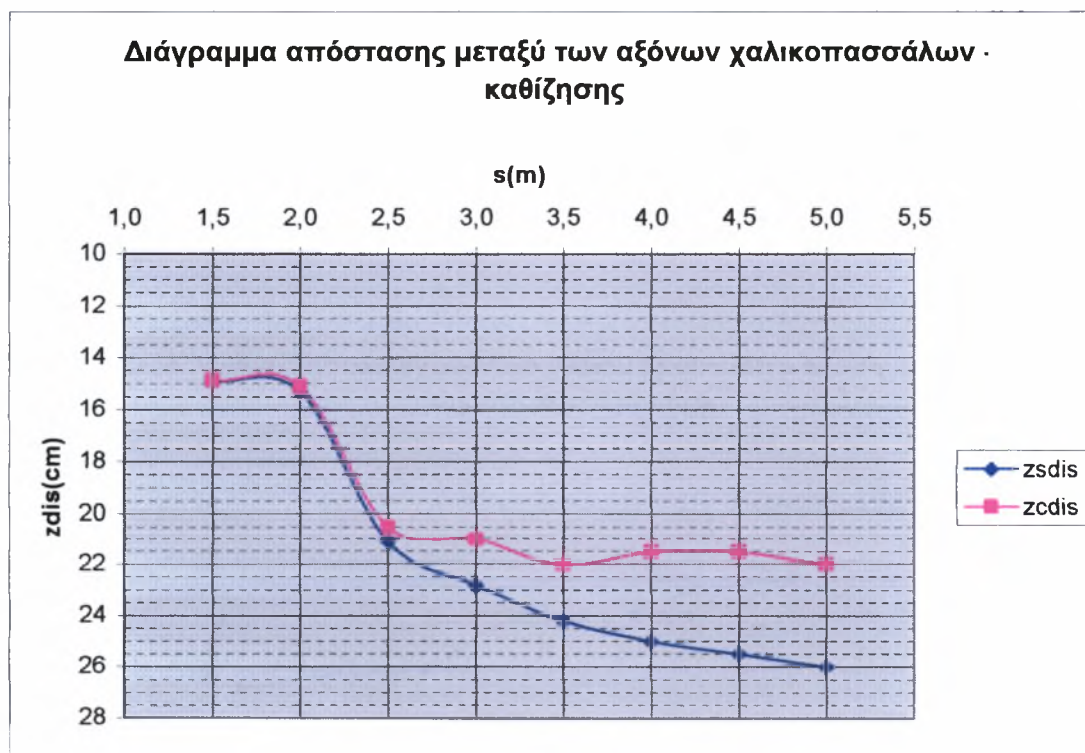
Διάγραμμα 10.6 Μεταβολή πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με την αξονική απόστασή τους για $D=1.2m$



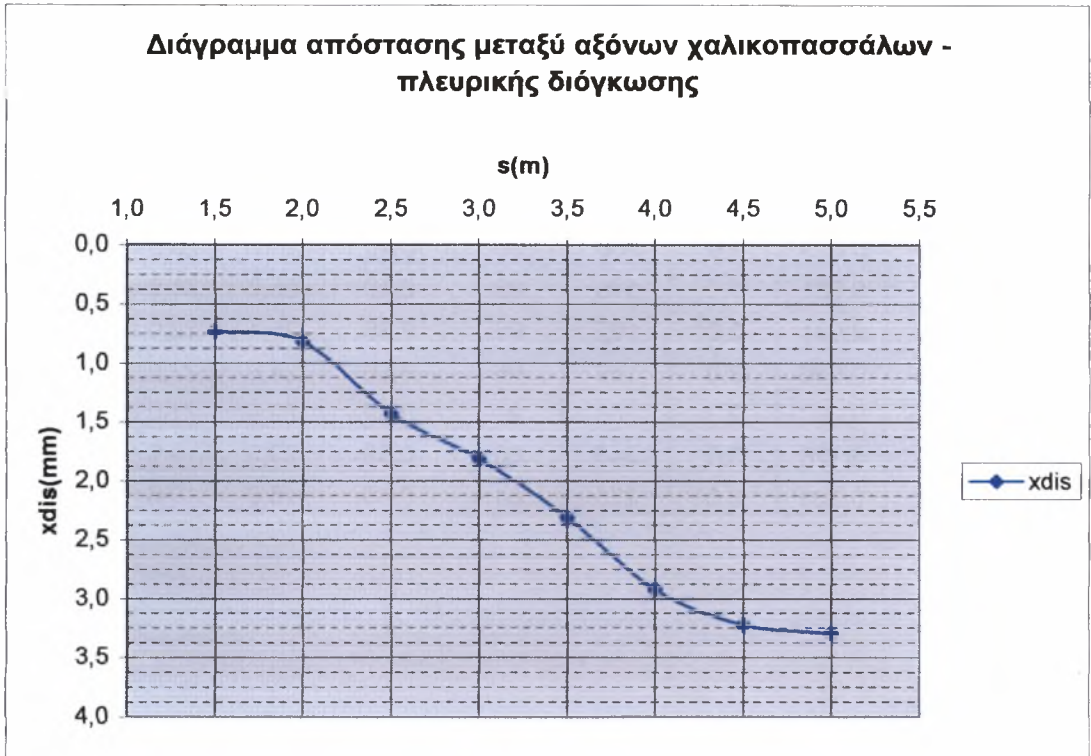
Διάγραμμα 10.7 Μεταβολή χρόνου στερεοποίησης με την αξονική απόστασή των χαλικοπασσάλων για $D=1.2m$

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.3 Ανάλυση με $D=σταθερή=1.0m$ και διαφοροποιούμενη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων

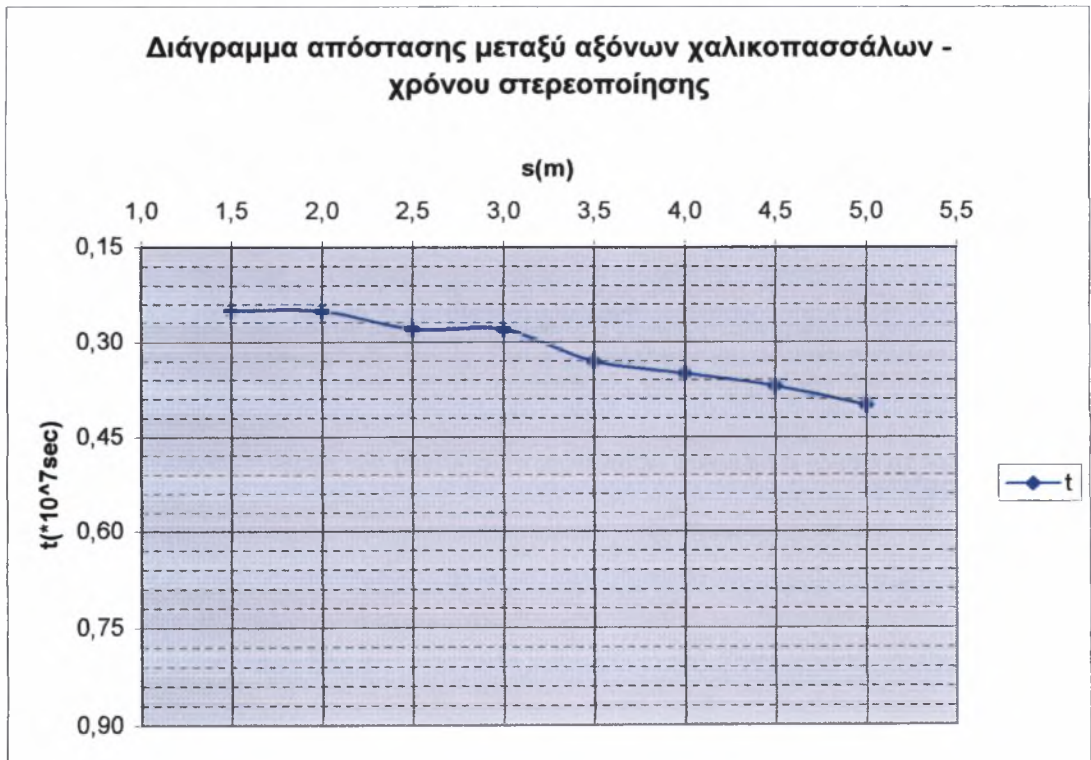
s (m)	D (m)	as	n	σ_c (KPa)	σ_s (KPa)	t *10 ⁷ (sec)	zsdis (cm)	zcdis (cm)	xdis (mm)
5,0	1,00	0,031	2,0	194	97	0,40	26,0	22,0	3,29
4,5	1,00	0,039	2,0	193	96	0,37	25,5	21,5	3,22
4,0	1,00	0,049	2,0	191	95	0,35	25,0	21,5	2,92
3,5	1,00	0,064	2,0	188	94	0,33	24,2	22,0	2,31
3,0	1,00	0,087	2,5	221	88	0,28	22,8	21,0	1,81
2,5	1,00	0,126	3,0	240	80	0,28	21,1	20,5	1,43
2,0	1,00	0,196	3,2	223	70	0,25	15,3	15,1	0,82
1,5	1,00	0,349	4,0	195	49	0,25	14,9	14,9	0,73



Διάγραμμα 10.8 Μεταβολή καθιζήσεων με την αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων για $D=1.0m$



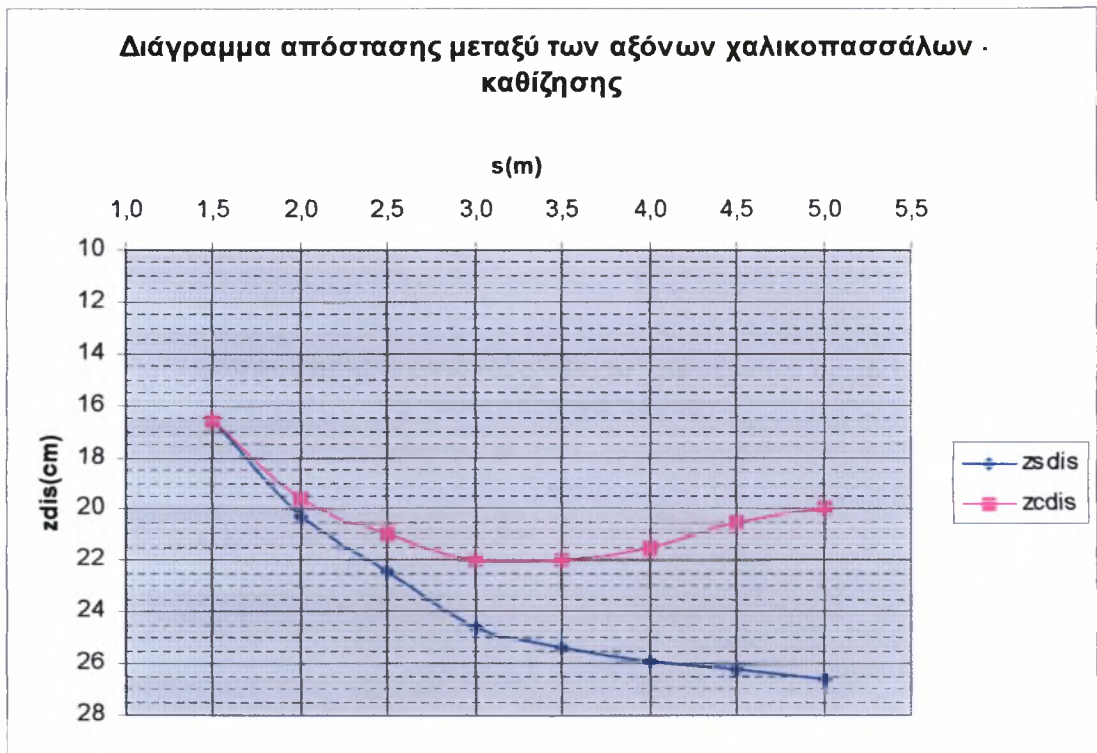
Διάγραμμα 10.9 Μεταβολή πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με την αξονική απόστασή τους για $D=1.0m$



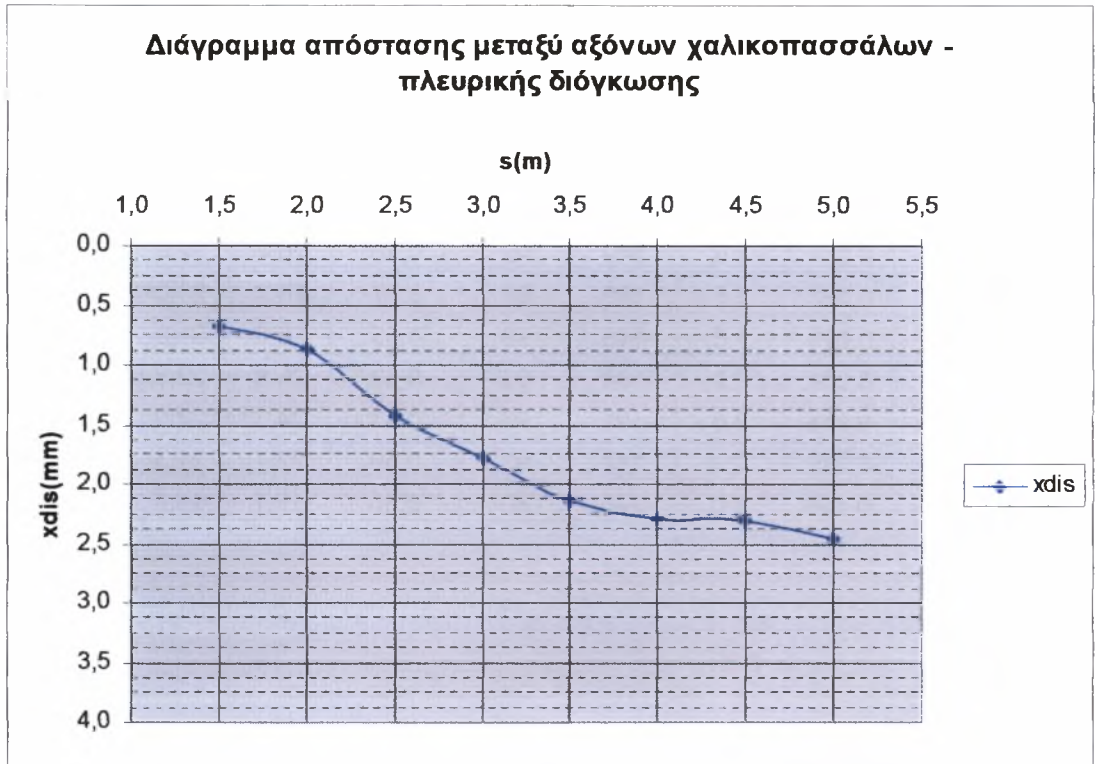
Διάγραμμα 10.10 Μεταβολή χρόνου στερεοποίησης με την αξονική απόστασή των χαλικοπασσάλων για $D=1.0m$

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.4 Ανάλυση με $D=σταθερή=0.8m$ και διαφοροποιούμενη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων

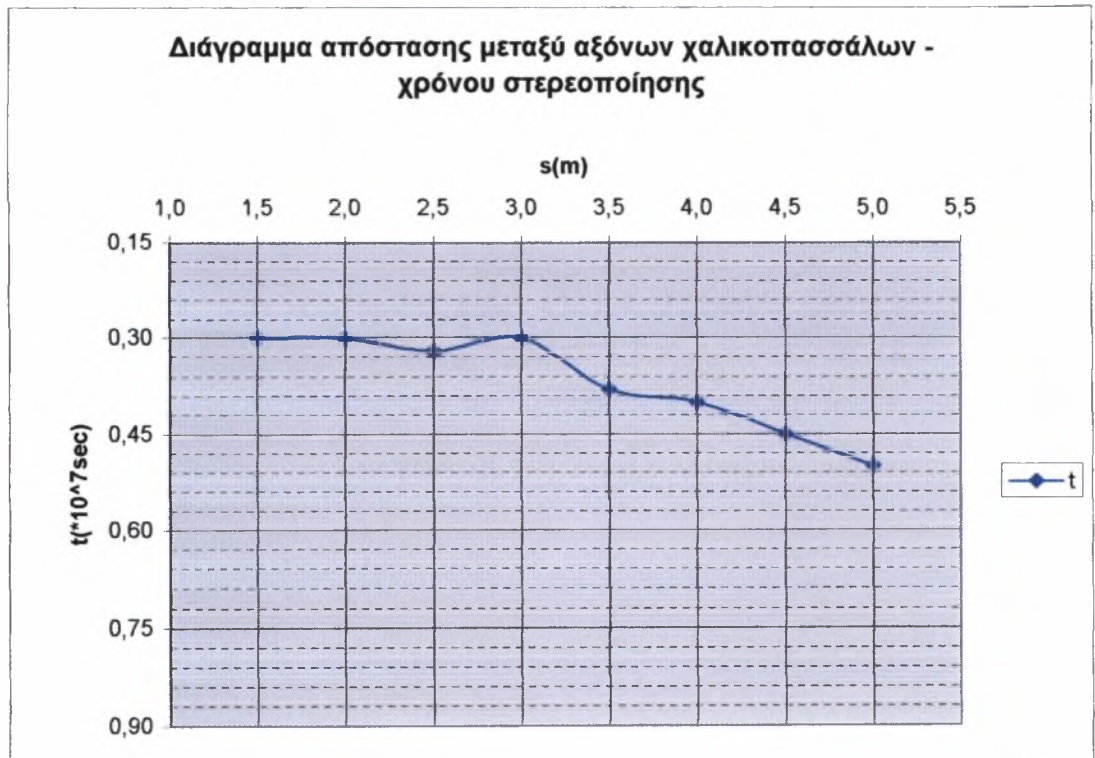
s (m)	D (m)	as	n	σ_c (KPa)	σ_s (KPa)	t *10 ⁷ (sec)	zsdis (cm)	zcdis (cm)	xdis (mm)
5,0	0,80	0,020	1,5	149	99	0,50	26,6	20,0	2,45
4,5	0,80	0,025	1,6	158	99	0,45	26,2	20,5	2,31
4,0	0,80	0,031	1,8	176	98	0,40	25,9	21,5	2,29
3,5	0,80	0,041	2,0	192	96	0,38	25,4	22,0	2,13
3,0	0,80	0,056	2,0	189	95	0,30	24,6	22,0	1,78
2,5	0,80	0,080	2,3	208	91	0,32	22,4	21,0	1,42
2,0	0,80	0,126	3,0	240	80	0,30	20,3	19,6	0,87
1,5	0,80	0,223	3,5	225	64	0,30	16,6	16,6	0,68



Διάγραμμα 10.11 Μεταβολή καθιζήσεων με την αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων για $D=0.8m$



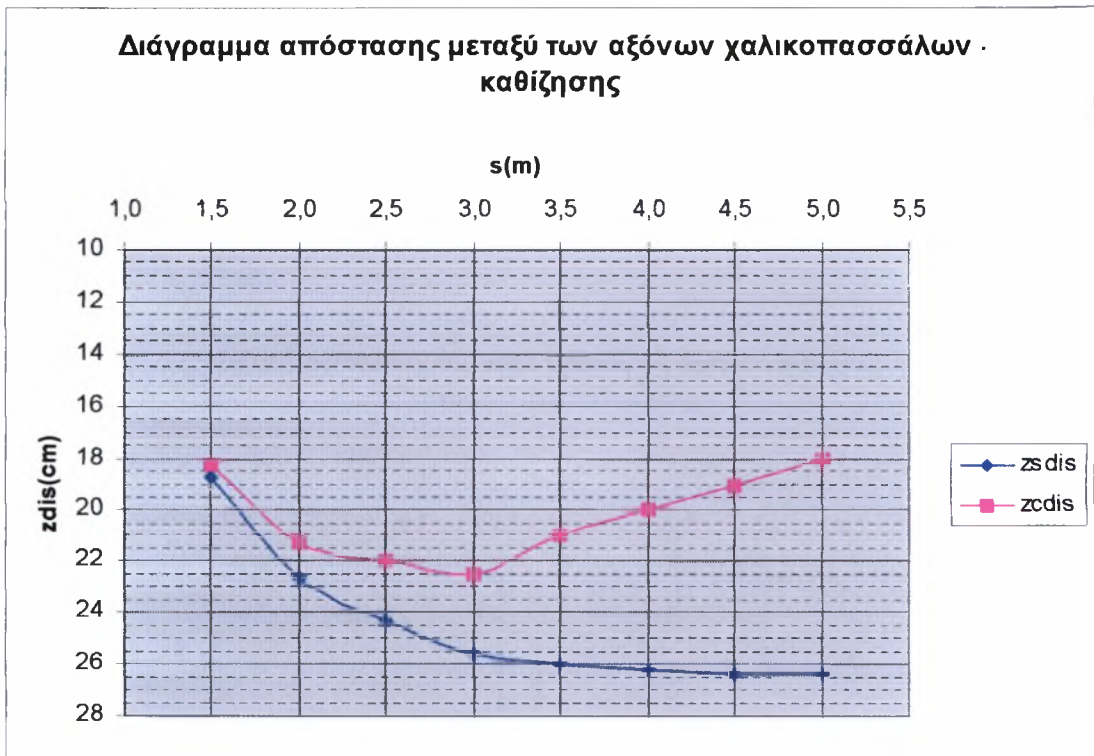
Διάγραμμα 10.12 Μεταβολή πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με την αξονική απόστασή τους για $D=0.8m$



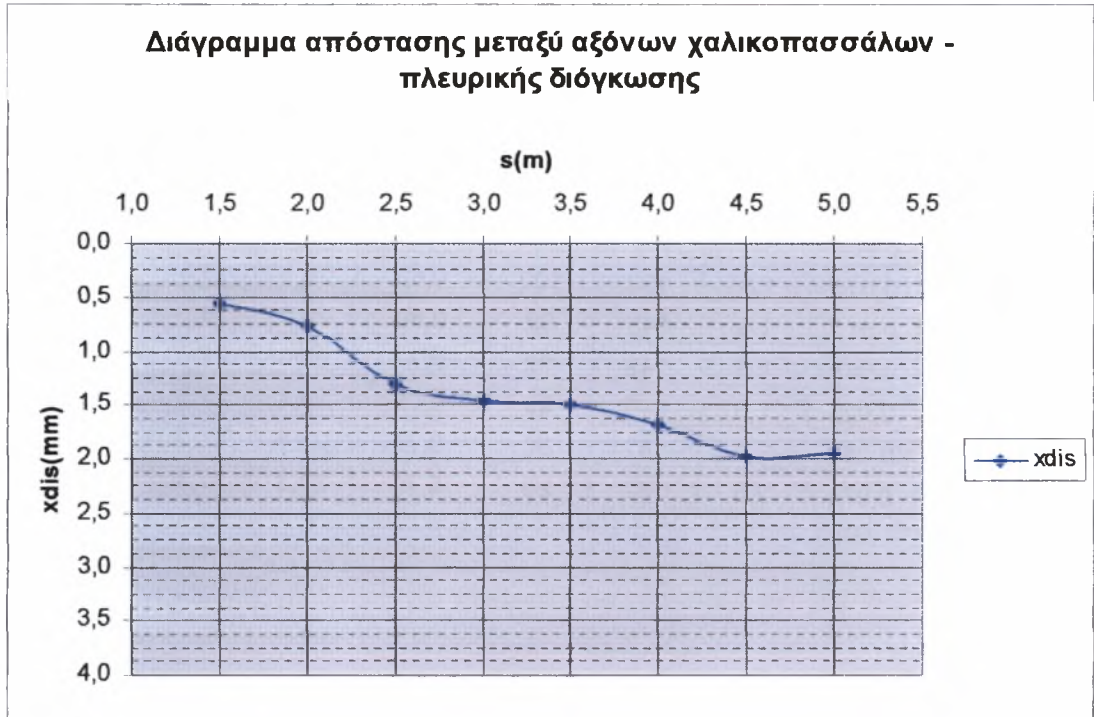
Διάγραμμα 10.13 Μεταβολή χρόνου στερεοποίησης με την αξονική απόστασή των χαλικοπασσάλων για $D=0.8m$

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.5 Ανάλυση με $D=σταθερή=0.6m$ και διαφοροποιούμενη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων

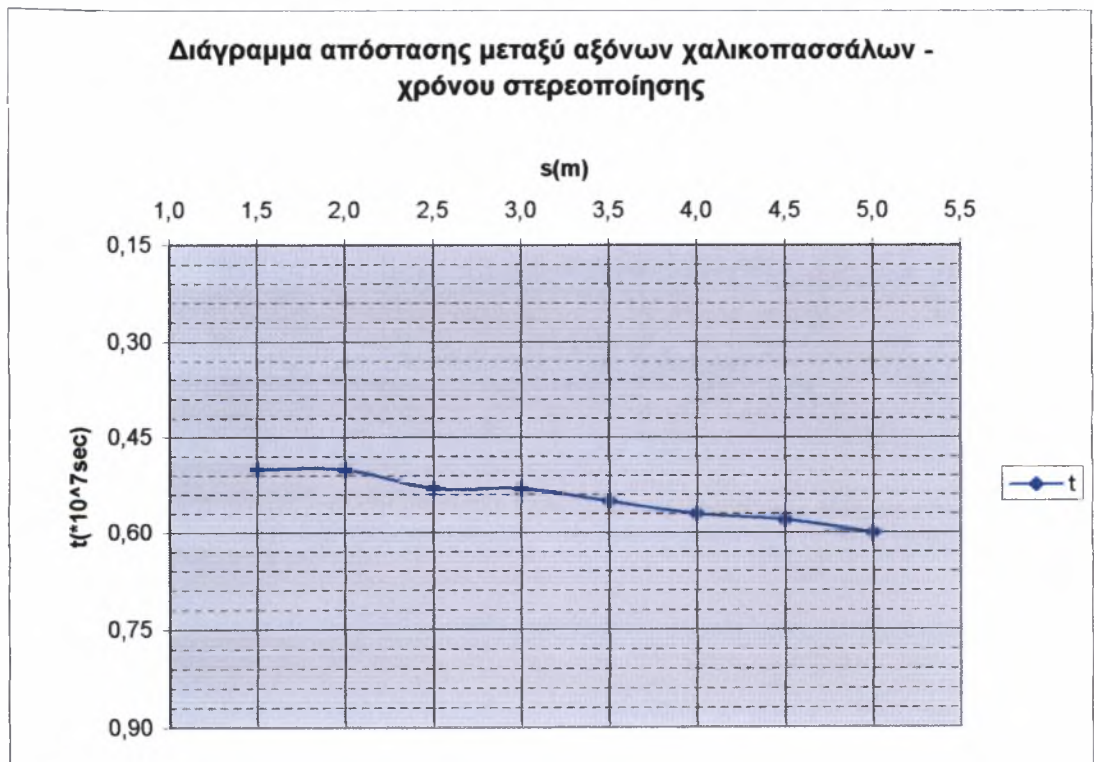
s (m)	D (m)	as	n	σ_c (KPa)	σ_s (KPa)	t *10 ⁷ (sec)	zsdis (cm)	zcdis (cm)	xdis (mm)
5,0	0,60	0,011	1,5	149	99	0,60	26,4	18,0	1,94
4,5	0,60	0,014	1,5	149	99	0,58	26,4	19,0	1,99
4,0	0,60	0,018	1,5	149	99	0,57	26,2	20,0	1,69
3,5	0,60	0,023	1,5	148	99	0,55	26,0	21,0	1,49
3,0	0,60	0,031	2,0	194	97	0,53	25,6	22,5	1,45
2,5	0,60	0,045	2,0	191	96	0,53	24,3	22,0	1,30
2,0	0,60	0,071	2,0	187	93	0,50	22,7	21,3	0,76
1,5	0,60	0,126	3,0	240	80	0,50	18,7	18,3	0,57



Διάγραμμα 10.14 Μεταβολή καθιζήσεων με την αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων για $D=0.6m$



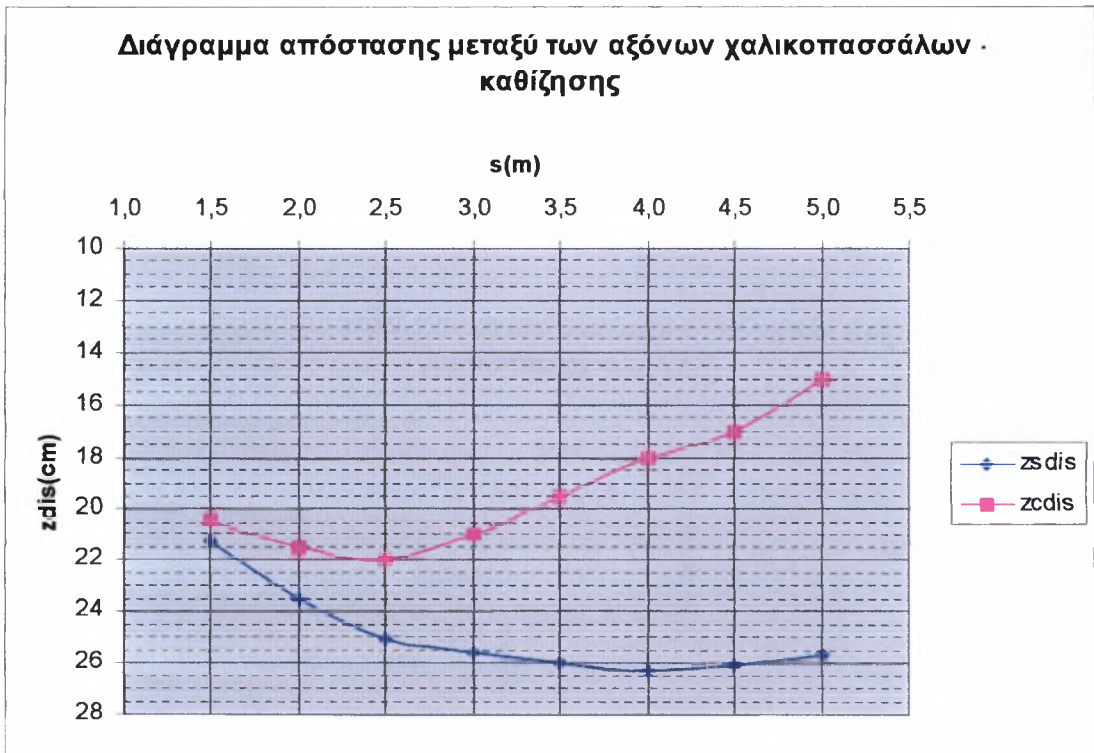
Διάγραμμα 10.15 Μεταβολή πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με την αξονική απόστασή τους για $D=0.6m$



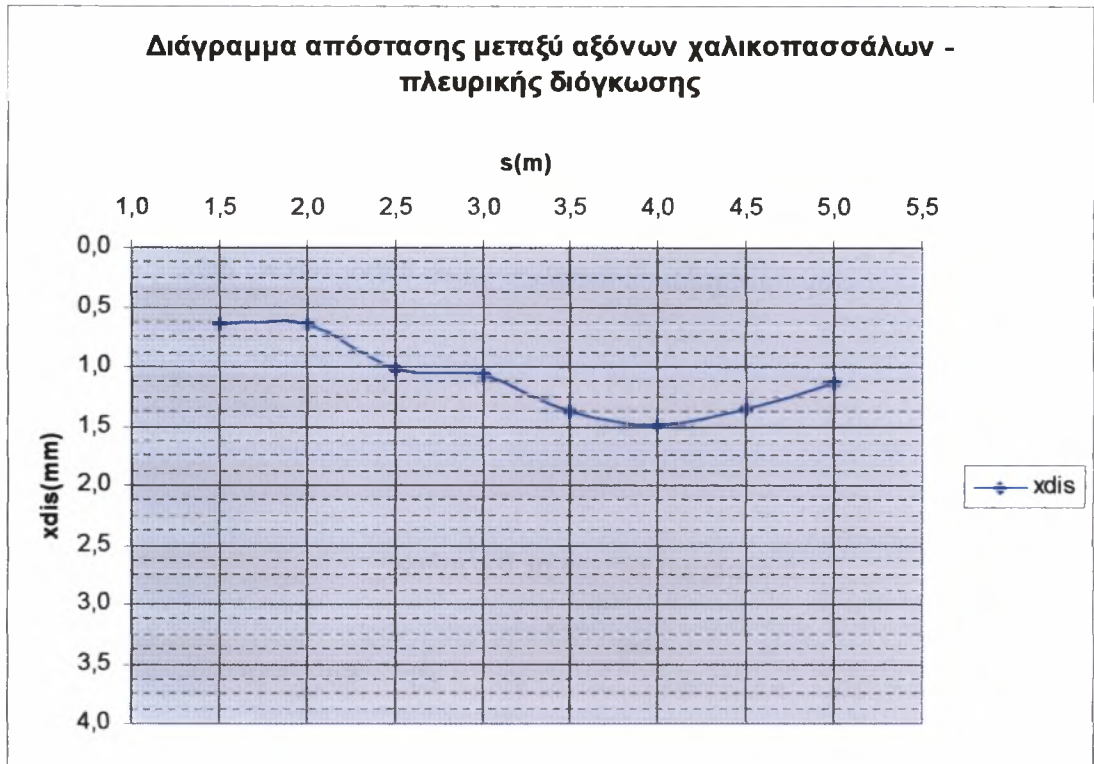
Διάγραμμα 10.16 Μεταβολή χρόνου στερεοποίησης με την αξονική απόστασή των χαλικοπασσάλων για $D=0.6m$

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.6 Ανάλυση με $D=σταθερή=0.45m$ και διαφοροποιούμενη αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων

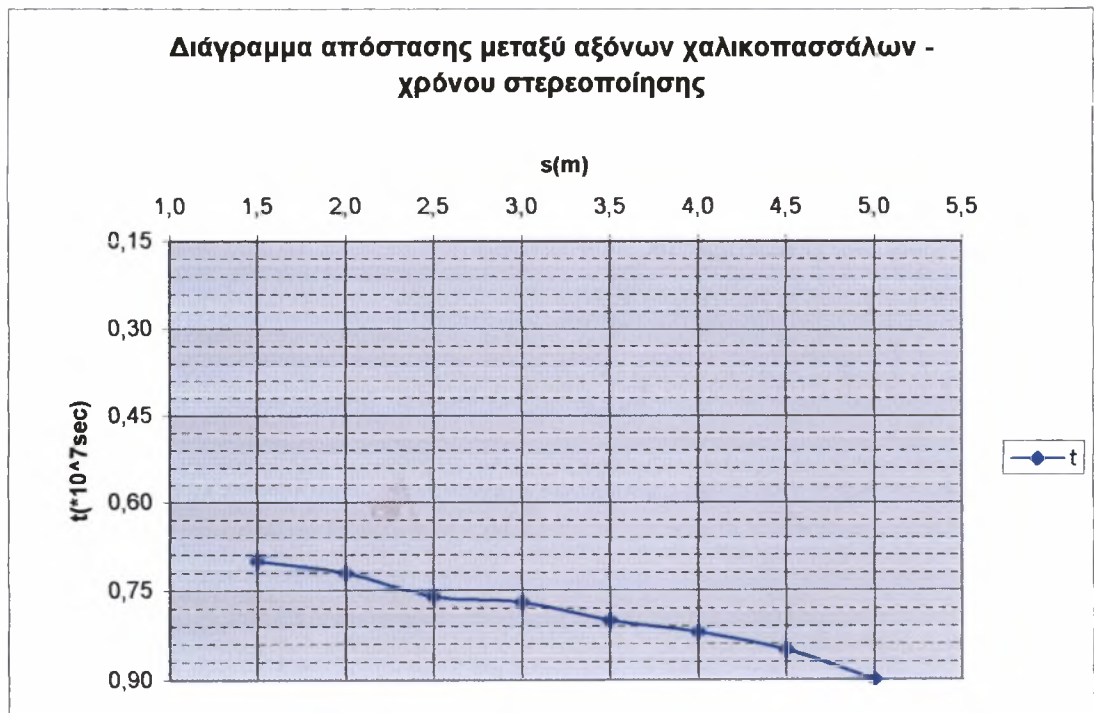
s (m)	D (m)	as	n	σ_c (KPa)	σ_s (KPa)	t *10 ⁷ (sec)	zsdis (cm)	zcdis (cm)	xdis (mm)
5,0	0,45	0,006	1,1	110	100	0,90	25,7	15,0	1,13
4,5	0,45	0,008	1,1	110	100	0,85	26,1	17,0	1,36
4,0	0,45	0,010	1,3	130	100	0,82	26,3	18,0	1,49
3,5	0,45	0,013	1,5	149	99	0,80	26,0	19,5	1,37
3,0	0,45	0,018	1,5	149	99	0,77	25,6	21,0	1,06
2,5	0,45	0,025	1,5	148	99	0,76	25,1	22,0	1,01
2,0	0,45	0,040	2,0	192	96	0,72	23,5	21,5	0,65
1,5	0,45	0,071	2,0	187	93	0,70	21,3	20,4	0,65



Διάγραμμα 10.17 Μεταβολή καθιζήσεων με την αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων για $D=0.45m$

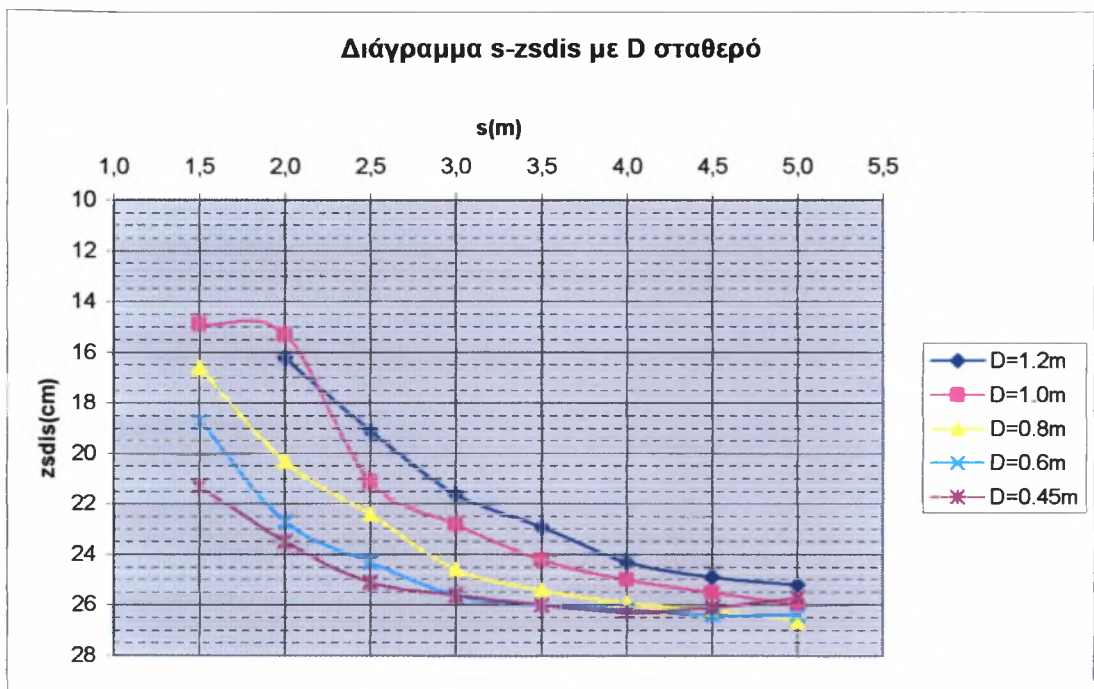


Διάγραμμα 10.18 Μεταβολή πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με την αξονική απόστασή τους για $D=0.45m$

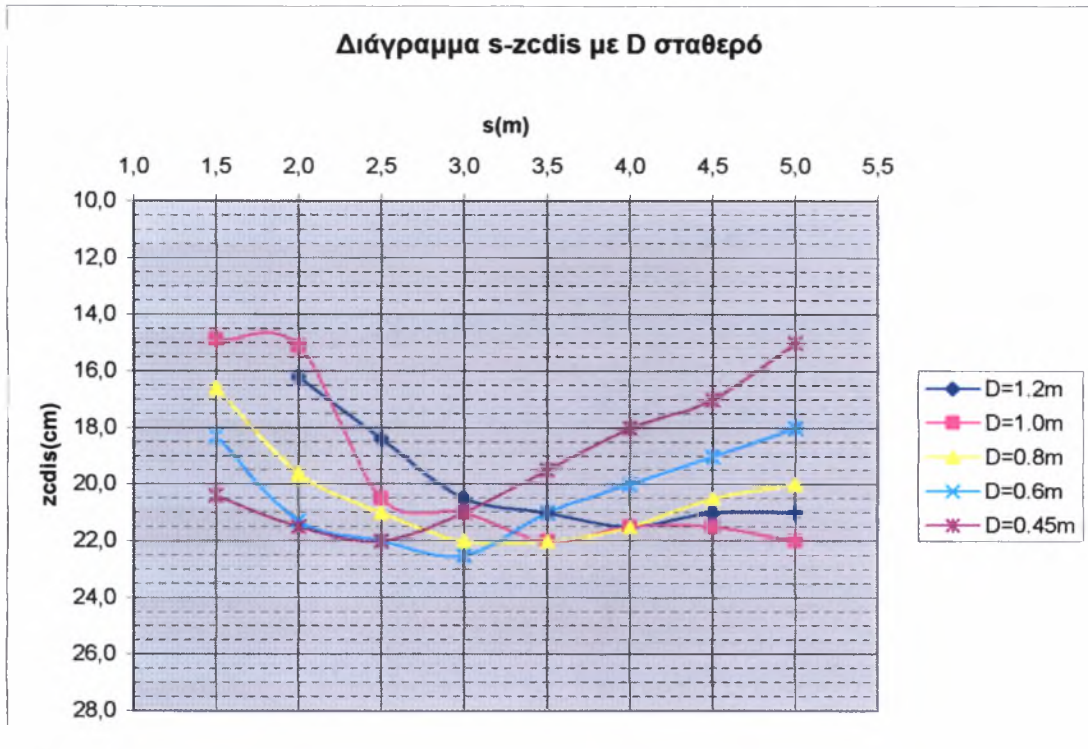


Διάγραμμα 10.19 Μεταβολή χρόνου στερεοποίησης με την αξονική απόστασή των χαλικοπασσάλων για $D=0.45m$

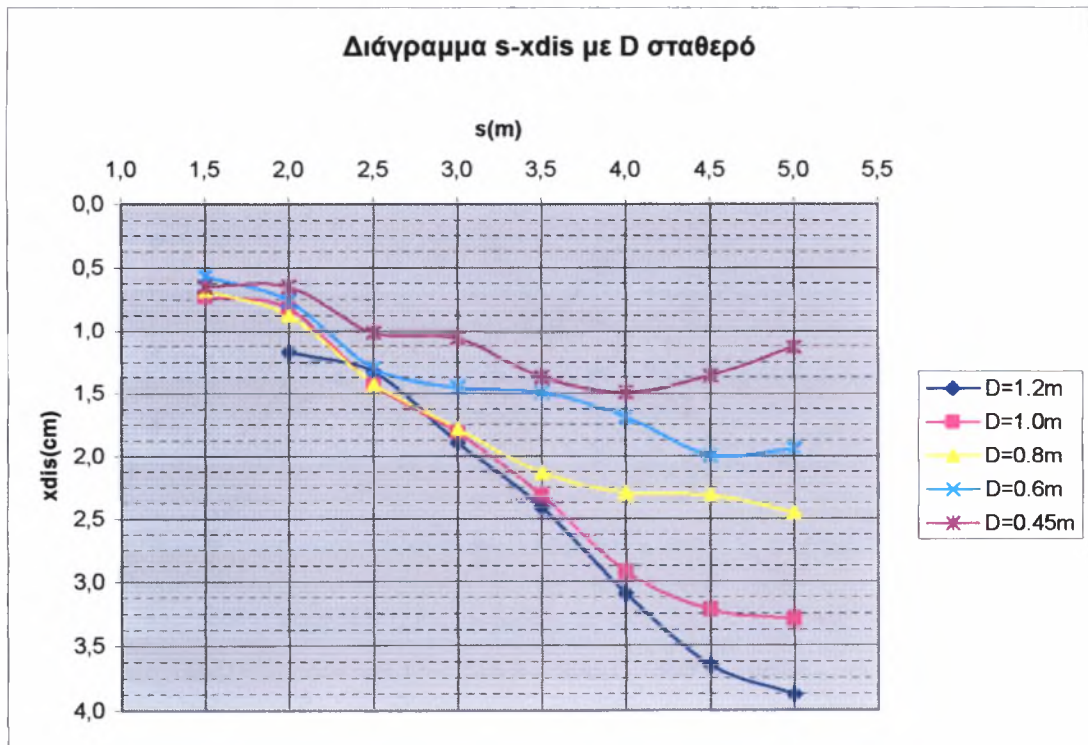
Τα αποτελέσματα της παραμετρικής αυτής ανάλυσης συγκεντρώνονται στα επόμενα διαγράμματα. Συγκεκριμένα, στα Διαγράμματα 10.20, 10.21, 10.22, 10.23 παρουσιάζεται η μεταβολή της καθίζησης του αργιλικού εδάφους, της καθίζησης των χαλικοπασσάλων, της πλευρικής τους διόγκωσης και του χρόνου στερεοποίησης αντιστοίχως συναρτήσει της αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων για διαφορετικές τιμές της διαμέτρου τους, ενώ στα Διαγράμματα 10.24.1, 10.24.2, 10.24.3, 10.24.4 και 10.24.5 παρουσιάζεται η μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με το βάθος για τις διάφορες τιμές της διαμέτρου τους.



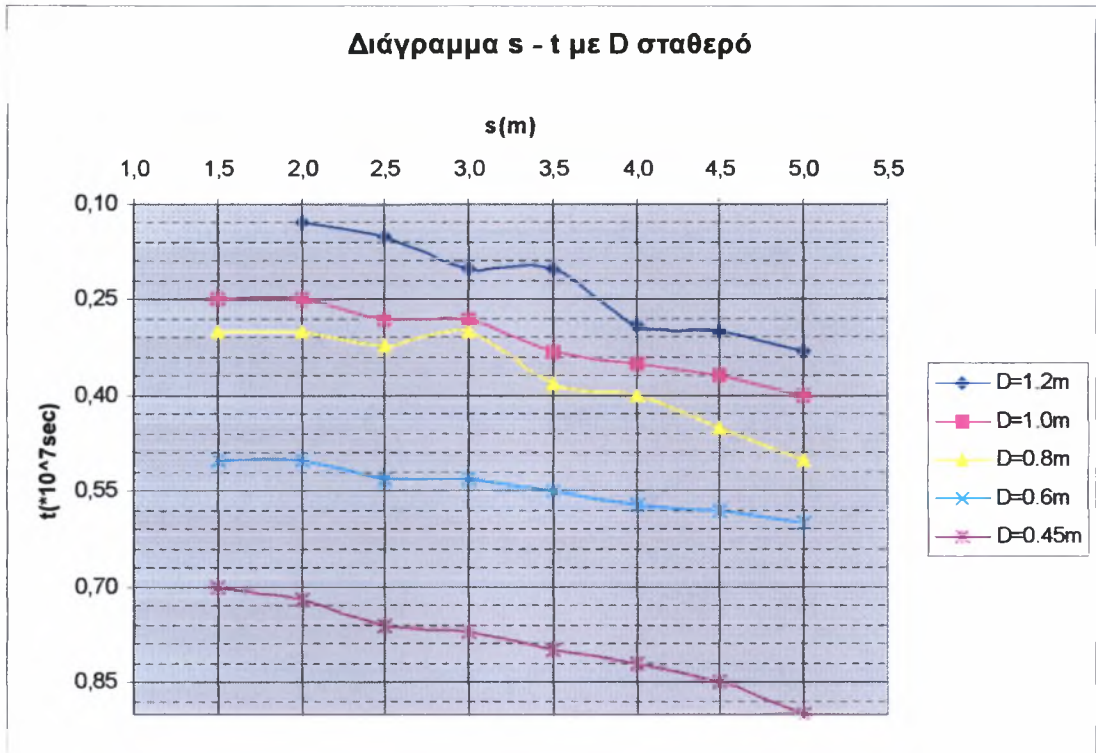
Διάγραμμα 10.20 Μεταβολή της καθίζησης της αργίλου με την αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων για διαφορετικές τιμές της διαμέτρου τους



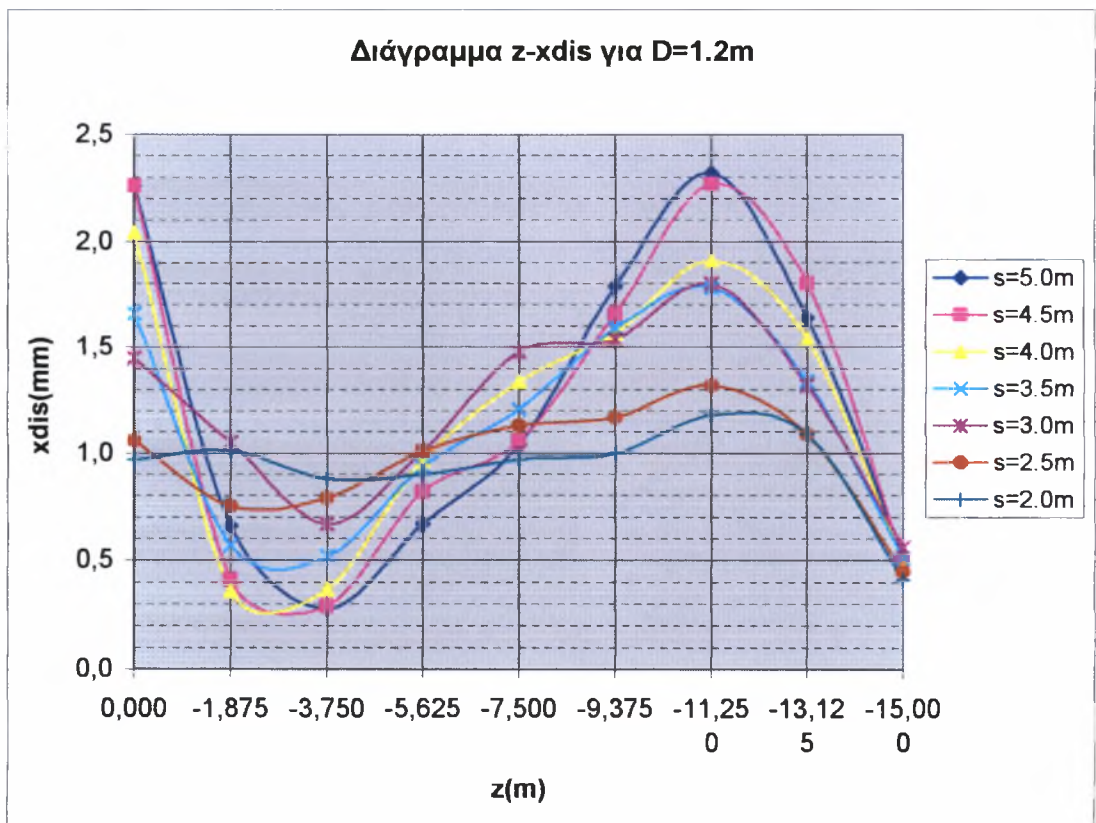
Διάγραμμα 10.21 Μεταβολή της καθίζησης των χαλικοπασσάλων με την αξονική τους απόσταση για διαφορετικές τιμές της διαμέτρου τους



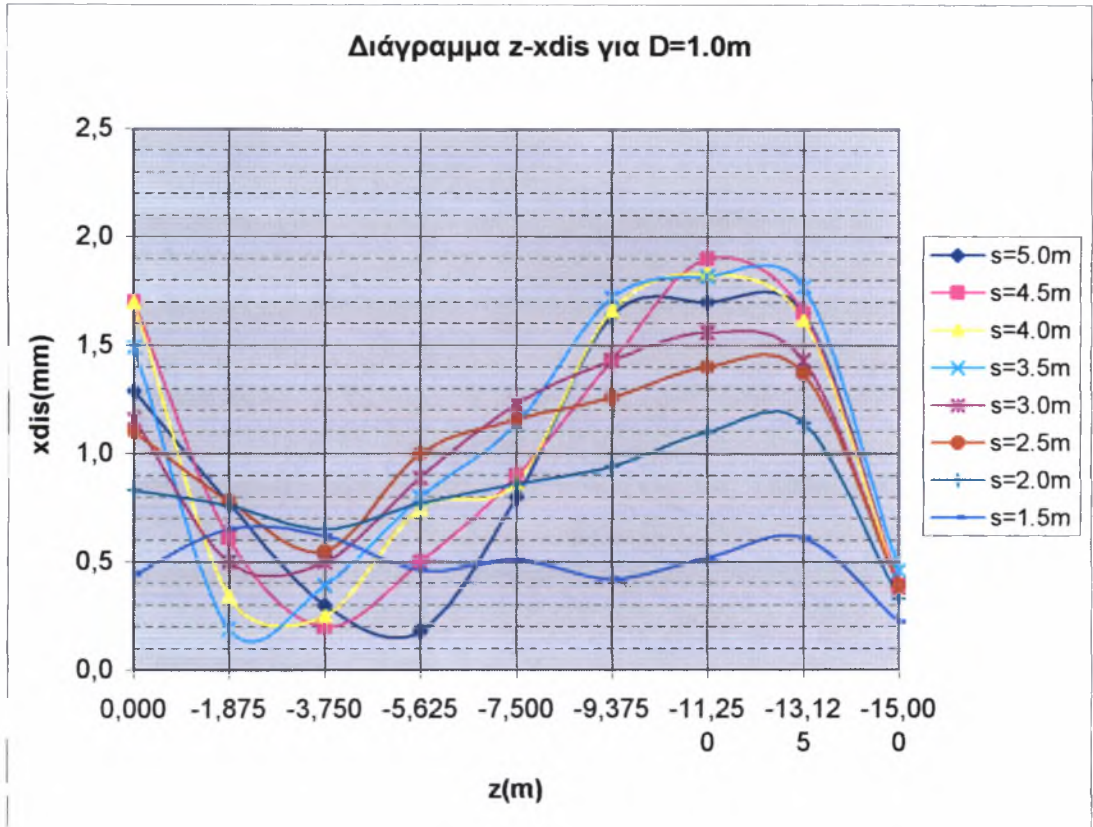
Διάγραμμα 10.22 Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με την αξονική τους απόσταση για διαφορετικές τιμές της διαμέτρου τους



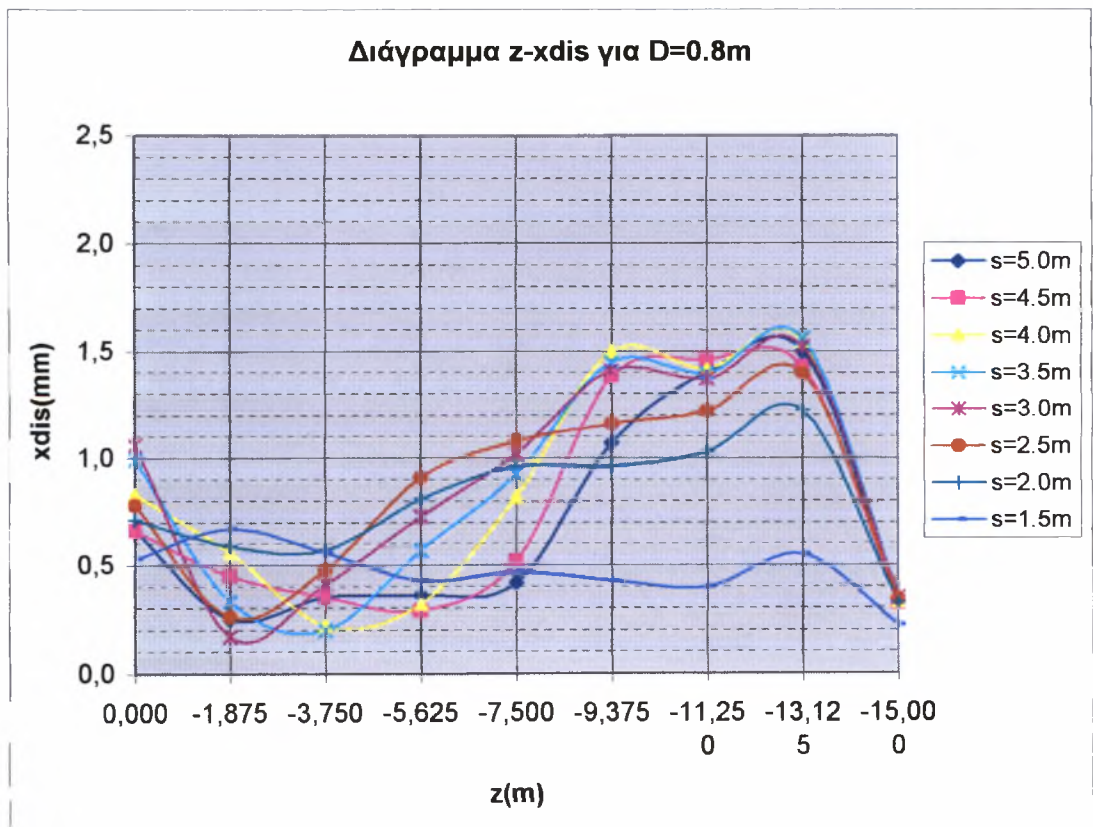
Διάγραμμα 10.23 Μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης με την αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων για διαφορετικές τιμές της διαμέτρου τους



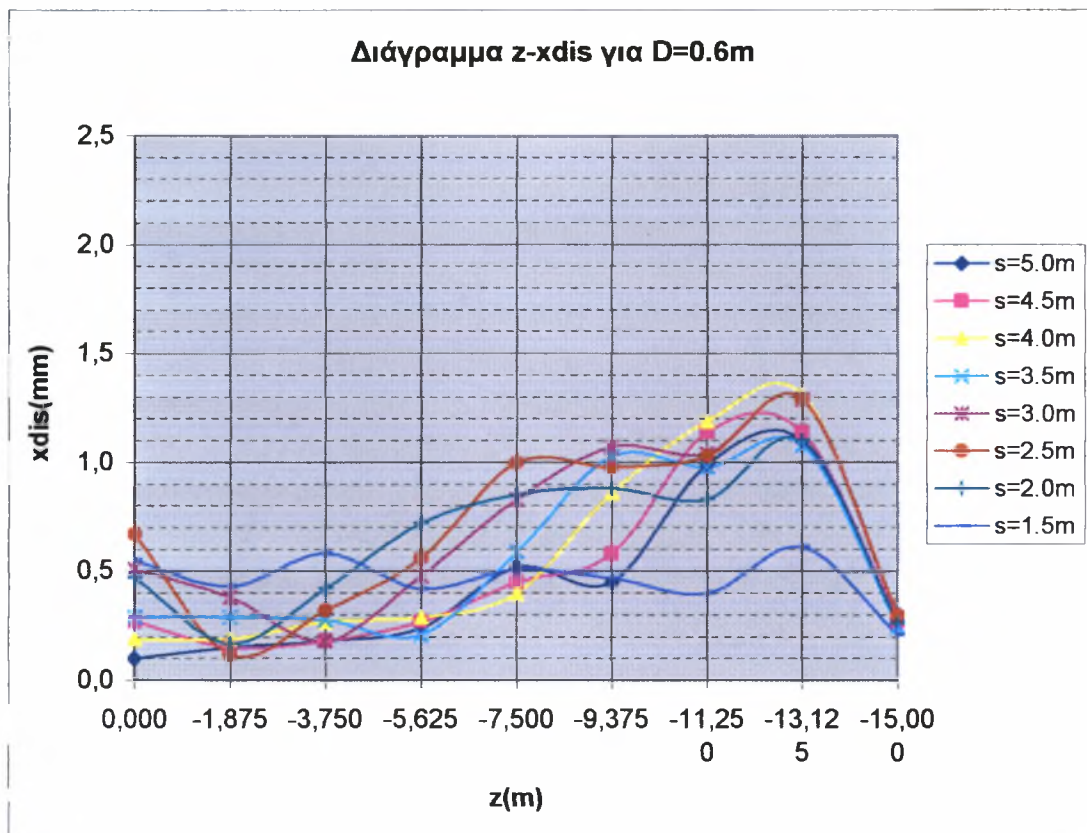
Διάγραμμα 10.24.1 Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με το βάθος για D=1.2m



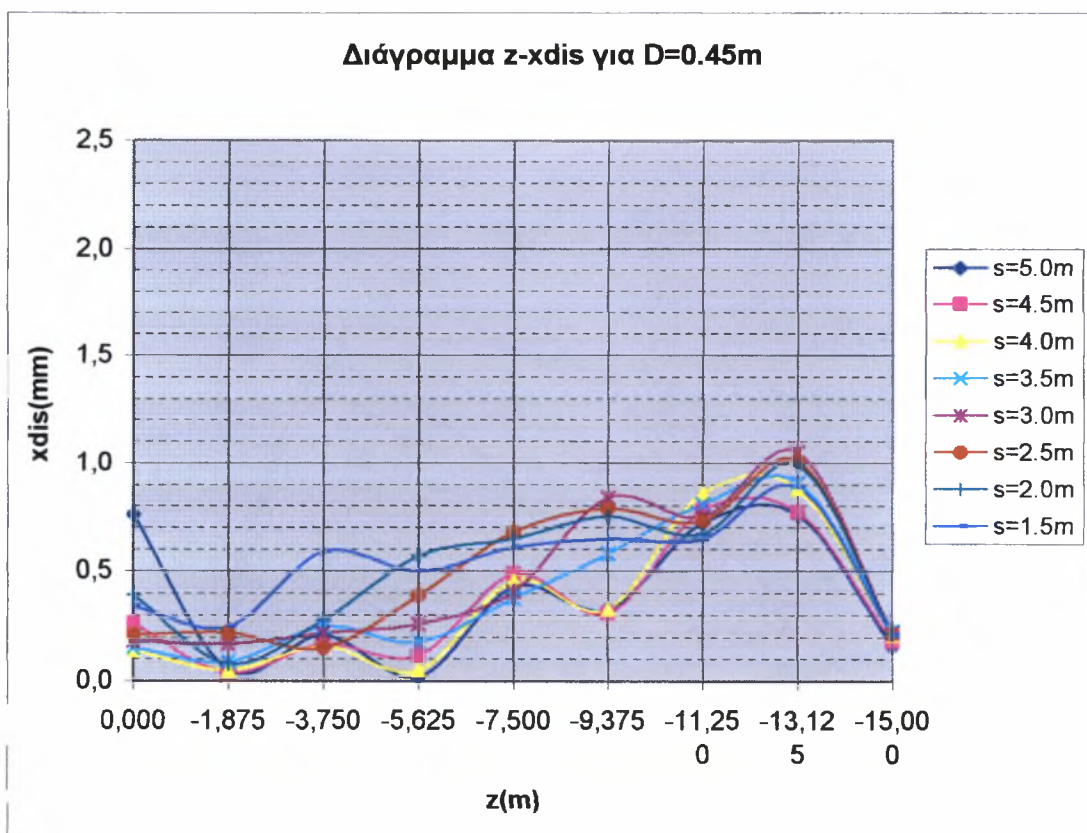
Διάγραμμα 10.24.2 Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με το βάθος για $D=1.0m$



Διάγραμμα 10.24.3 Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με το βάθος για $D=0.8m$



Διάγραμμα 10.24.4 Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με το βάθος για $D=0.6m$



Διάγραμμα 10.24.5 Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με το βάθος για $D=0.45m$

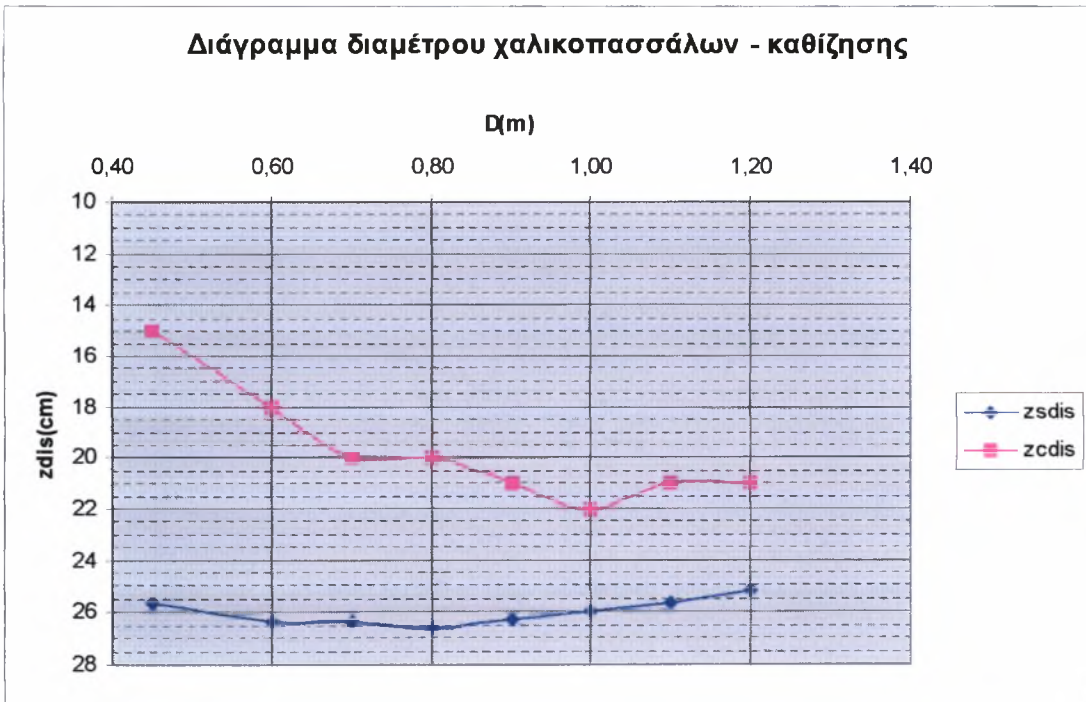


10.1.3 Ανάλυση με διαφοροποιούμενη διάμετρο χαλικοπασσάλων

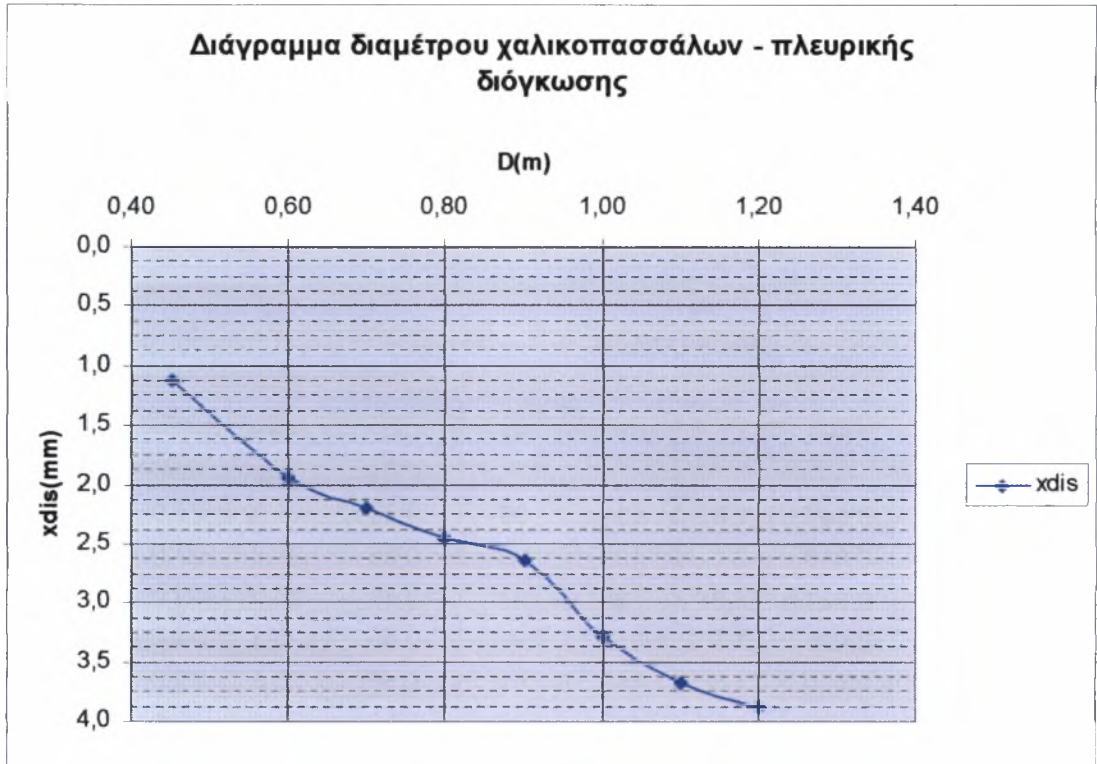
Έγιναν επιλύσεις για οκτώ διαφορετικές τιμές της διαμέτρου των χαλικοπασσάλων για σταθερές τιμές των αποστάσεων μεταξύ των αξόνων τους. Έτσι, για αξονική απόσταση των 5.0, 3.5, 2.5 και 1.5m έγιναν επιλύσεις για διαμέτρους των 1.2, 1.1, 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 και 0.45m. Οι πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν δείχνουν τα αποτελέσματα της παραμετρικής αυτής ανάλυσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.7 Ανάλυση με $s=σταθερή=5.0m$ και διαφοροποιούμενη διάμετρο των χαλικοπασσάλων

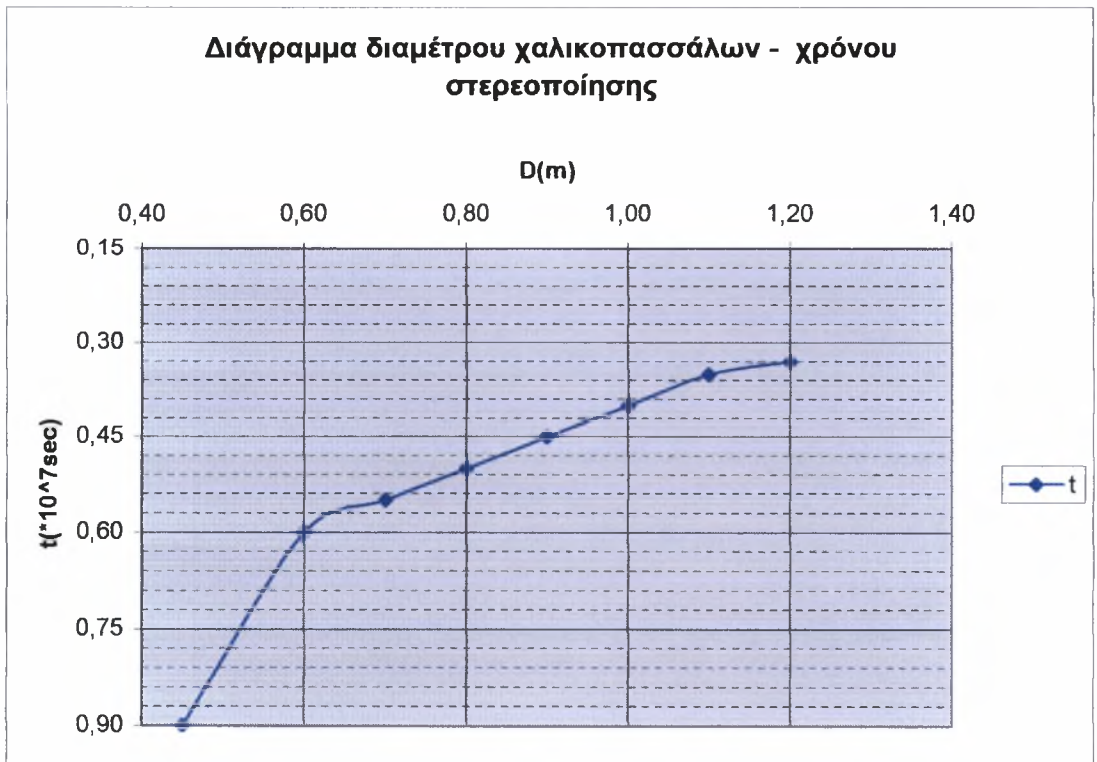
s (m)	D (m)	as	n	σ_c (KPa)	σ_s (KPa)	t *10 ⁷ (sec)	zsd _{is} (cm)	zcd _{is} (cm)	xdis (mm)
5,0	1,20	0,045	2,0	191	96	0,33	25,2	21,0	3,88
5,0	1,10	0,038	2,0	193	96	0,35	25,7	21,0	3,67
5,0	1,00	0,031	2,0	194	97	0,40	26,0	22,0	3,29
5,0	0,90	0,025	1,6	158	98	0,45	26,3	21,0	2,64
5,0	0,80	0,020	1,5	149	99	0,50	26,6	20,0	2,45
5,0	0,70	0,015	1,5	149	99	0,55	26,4	20,0	2,19
5,0	0,60	0,011	1,5	149	99	0,60	26,4	18,0	1,94
5,0	0,45	0,006	1,1	110	100	0,90	25,7	15,0	1,13



Διάγραμμα 10.25 Μεταβολή καθιζήσεων με τη διάμετρο των χαλικοπασσάλων για $s=5.0m$



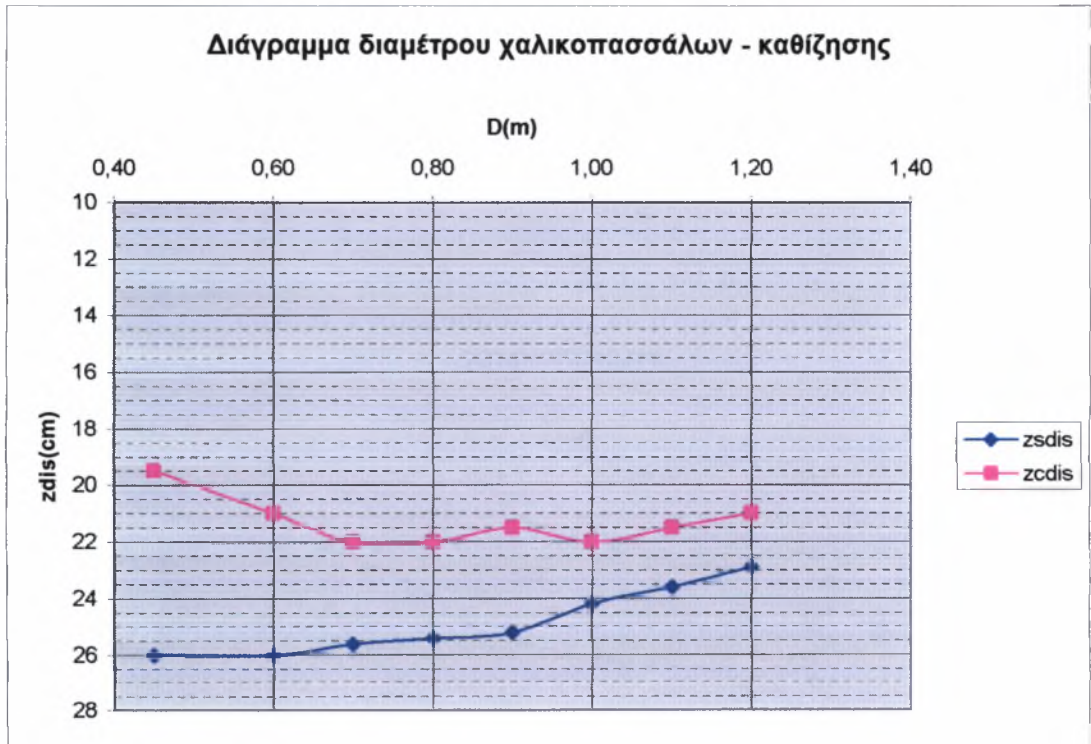
Διάγραμμα 10.26 Μεταβολή πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με τη διάμετρό τους για $s=5.0m$



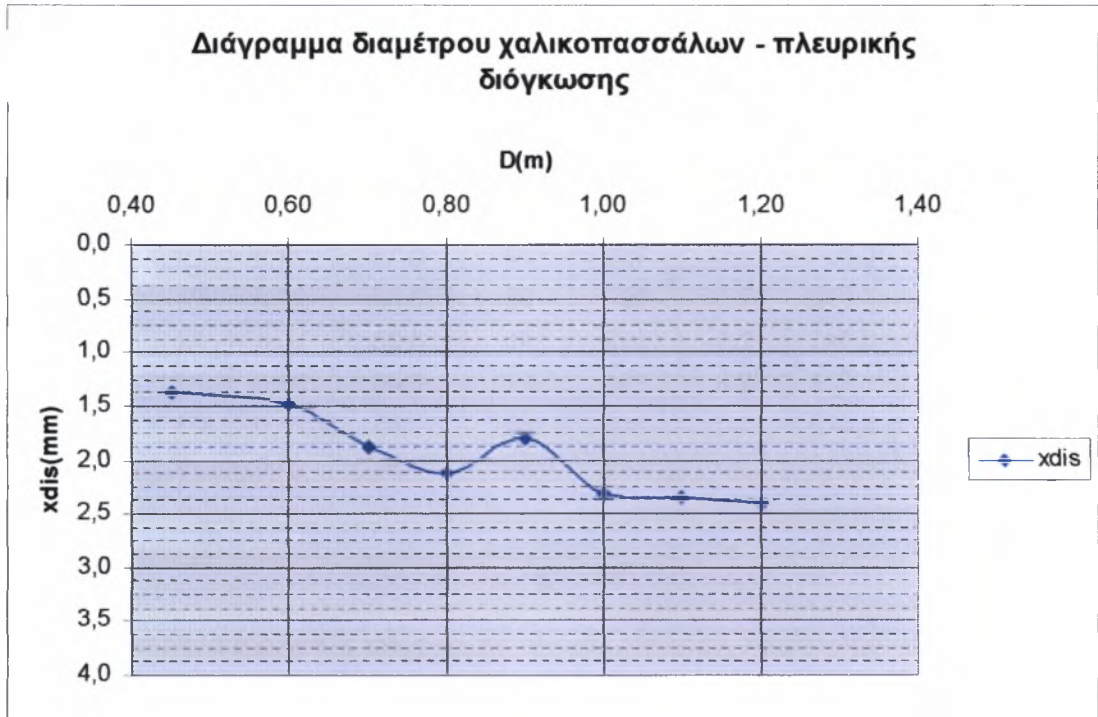
Διάγραμμα 10.27 Μεταβολή χρόνου στερεοποίησης με τη διάμετρο των χαλικοπασσάλων για $s=5.0m$

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.8 Ανάλυση με $s=σταθερή=3.5m$ και διαφοροποιούμενη διάμετρο των χαλικοπασσάλων

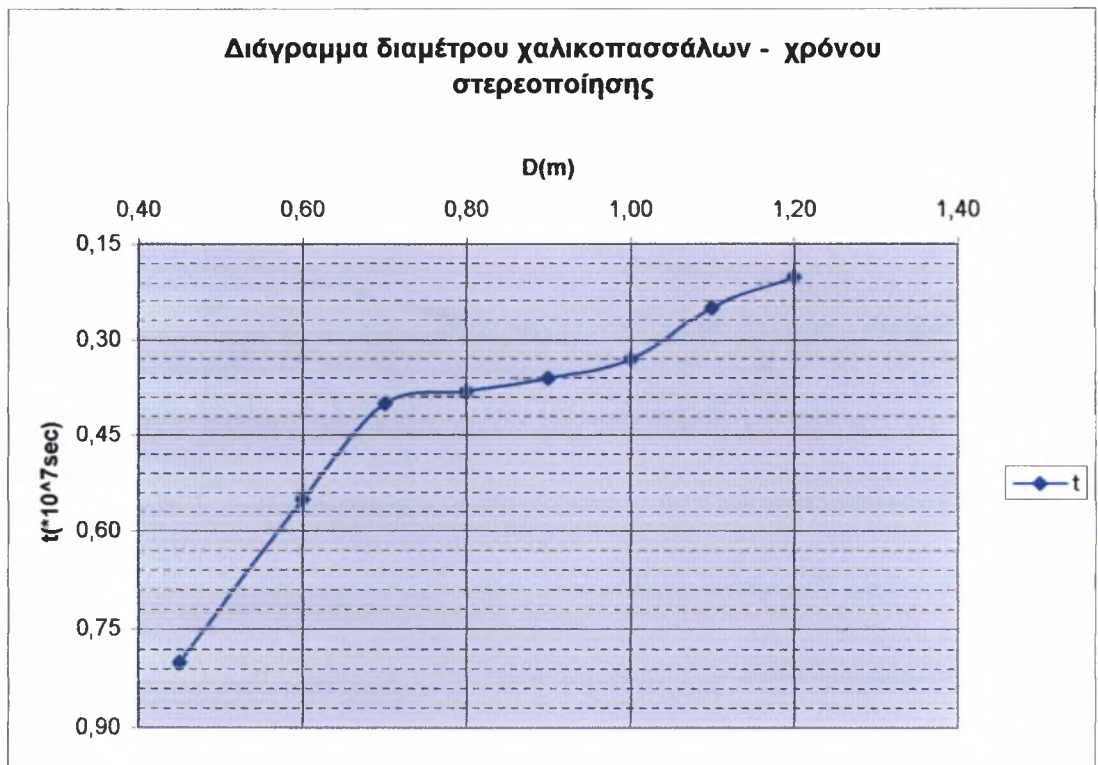
s (m)	D (m)	a_s	n	σ_c (KPa)	σ_s (KPa)	t *10 ⁷ (sec)	z _{sdis} (cm)	z _{cdis} (cm)	x _{dis} (mm)
3,5	1,20	0,092	2,5	220	88	0,20	22,9	21,0	2,41
3,5	1,10	0,078	2,2	201	91	0,25	23,6	21,5	2,34
3,5	1,00	0,064	2,0	188	94	0,33	24,2	22,0	2,31
3,5	0,90	0,052	2,0	190	95	0,36	25,2	21,5	1,81
3,5	0,80	0,041	2,0	192	96	0,38	25,4	22,0	2,13
3,5	0,70	0,031	2,0	194	97	0,40	25,6	22,0	1,88
3,5	0,60	0,023	1,5	148	99	0,55	26,0	21,0	1,49
3,5	0,45	0,013	1,5	149	99	0,80	26,0	19,5	1,37



Διάγραμμα 10.28 Μεταβολή καθιζήσεων με τη διάμετρο των χαλικοπασσάλων για $s=3.5m$



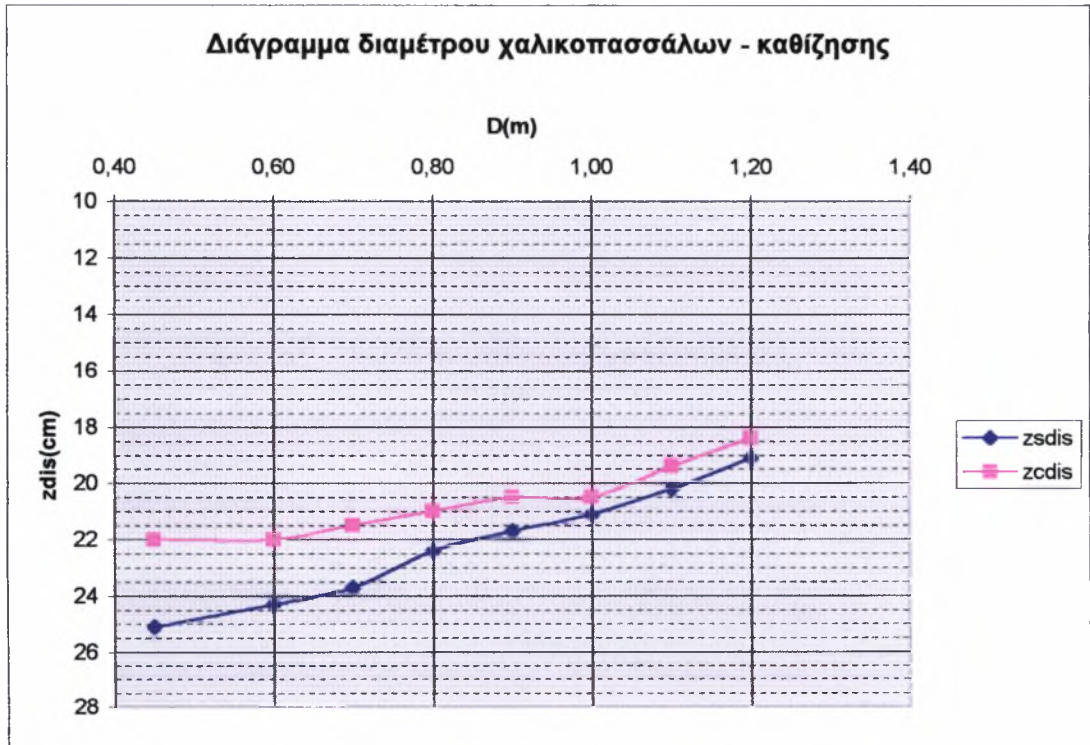
Διάγραμμα 10.29 Μεταβολή πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με τη διάμετρό τους για $s=3.5m$



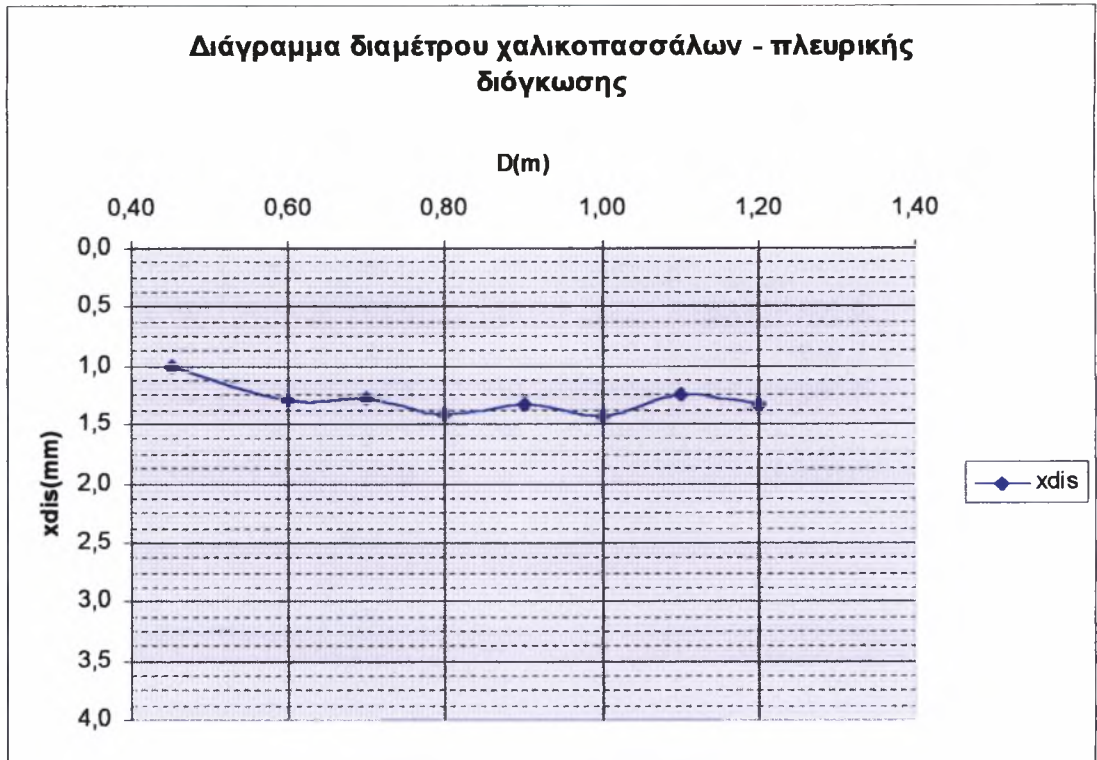
Διάγραμμα 10.30 Μεταβολή χρόνου στερεοποίησης με τη διάμετρο των χαλικοπασσάλων για $s=3.5m$

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.9 Ανάλυση με $s=σταθερή=2.5m$ και διαφοροποιούμενη διάμετρο των χαλικοπασσάλων

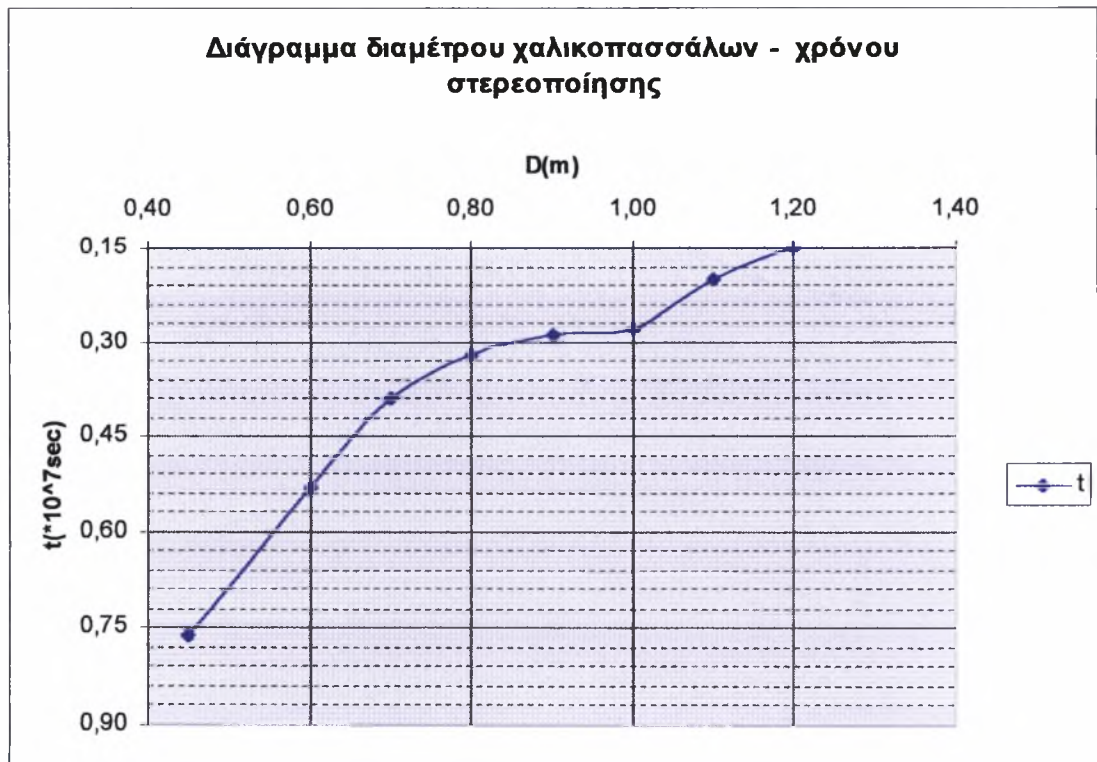
s (m)	D (m)	as	n	σ_c (KPa)	σ_s (KPa)	t *10 ⁷ (sec)	zsdis (cm)	zcdis (cm)	xdis (mm)
2,5	1,20	0,181	3,0	220	73	0,15	19,1	18,4	1,33
2,5	1,10	0,152	3,0	230	77	0,20	20,2	19,4	1,24
2,5	1,00	0,126	3,0	240	80	0,28	21,1	20,5	1,43
2,5	0,90	0,102	2,8	237	85	0,29	21,7	20,5	1,32
2,5	0,80	0,080	2,3	208	91	0,32	22,4	21,0	1,42
2,5	0,70	0,062	2,0	188	94	0,39	23,7	21,5	1,28
2,5	0,60	0,045	2,0	191	96	0,53	24,3	22,0	1,30
2,5	0,45	0,025	1,5	148	99	0,76	25,1	22,0	1,01



Διάγραμμα 10.31 Μεταβολή καθιζήσεων με τη διάμετρο των χαλικοπασσάλων για $s=2.5m$



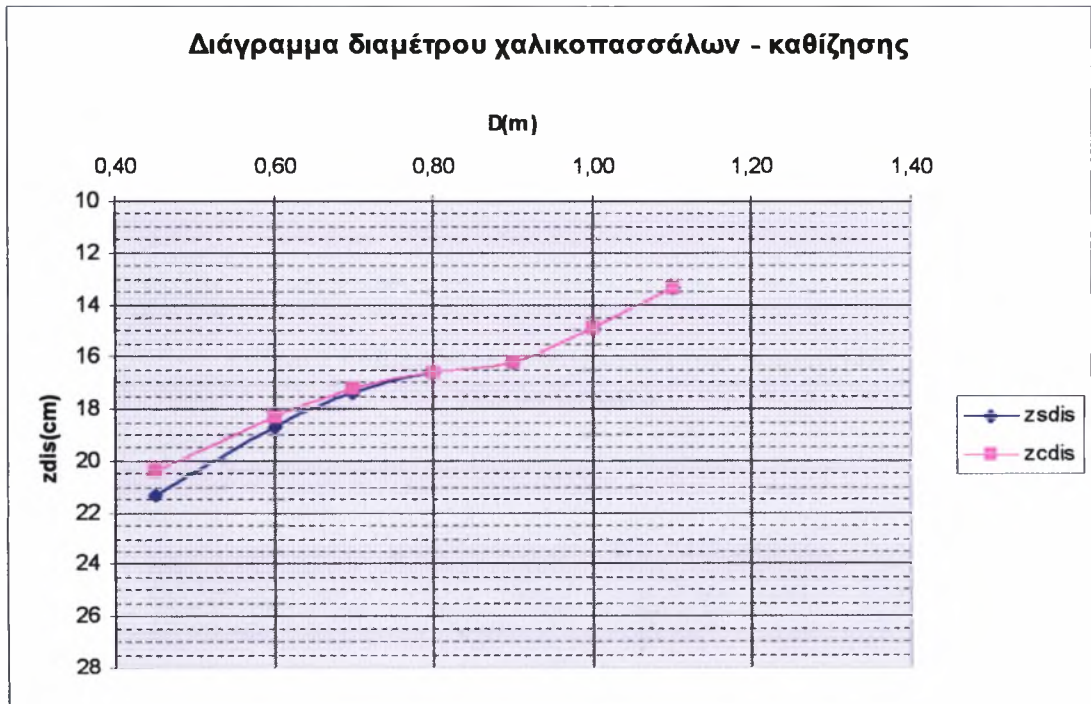
Διάγραμμα 10.32 Μεταβολή πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με τη διάμετρό τους για $s=2.5m$



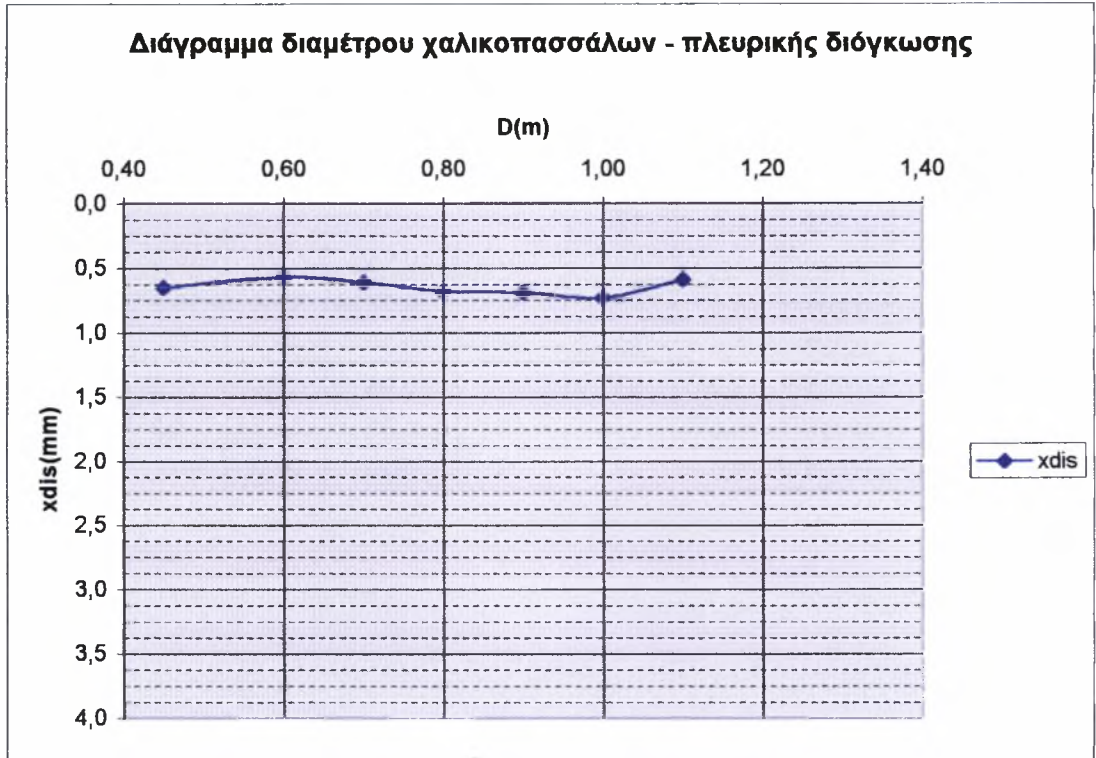
Διάγραμμα 10.33 Μεταβολή χρόνου στερεοποίησης με τη διάμετρο των χαλικοπασσάλων για $s=2.5m$

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.10 Ανάλυση με s =σταθερή=1.5m και διαφοροποιούμενη διάμετρο των χαλικοπασσάλων

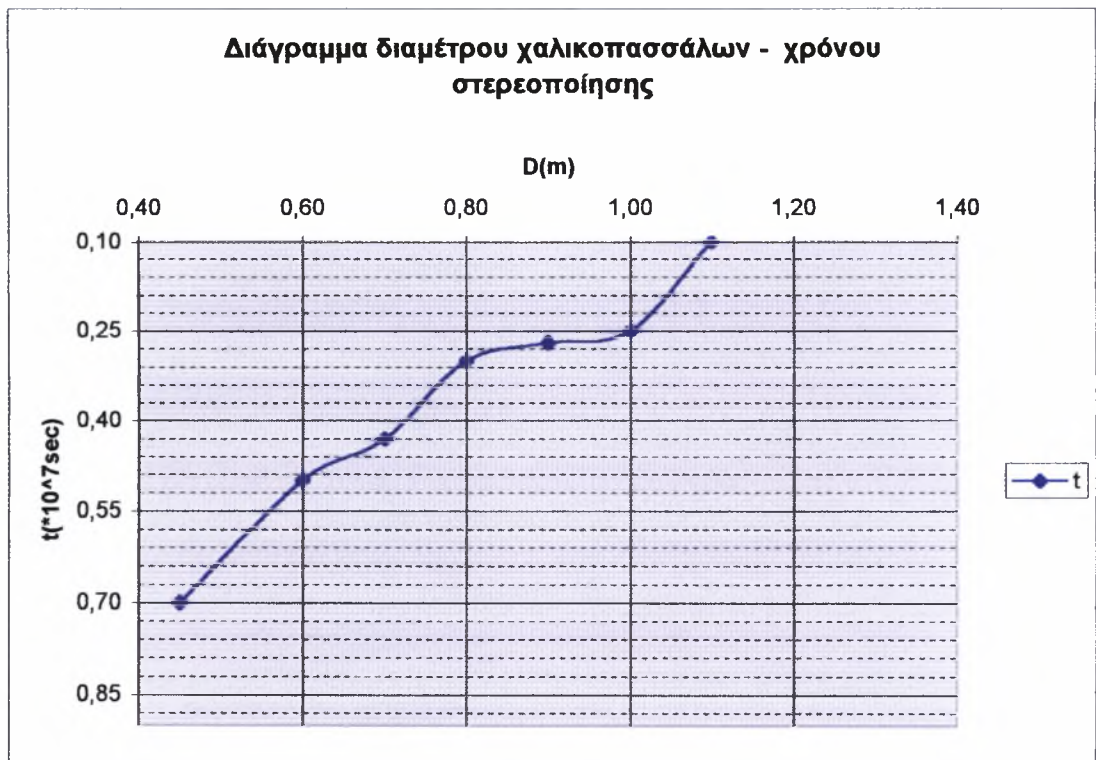
s (m)	D (m)	as	n	σ_c (KPa)	σ_s (KPa)	t *10 ⁷ (sec)	zsdis (cm)	zcdis (cm)	xdis (mm)
1,5	1,20	0,503	-	-	-	-	-	-	-
1,5	1,10	0,422	4,0	176	44	0,10	13,3	13,3	0,59
1,5	1,00	0,349	4,0	195	49	0,25	14,9	14,9	0,73
1,5	0,90	0,283	3,8	212	56	0,27	16,2	16,2	0,69
1,5	0,80	0,223	3,5	225	64	0,30	16,6	16,6	0,68
1,5	0,70	0,171	3,2	233	73	0,43	17,4	17,2	0,61
1,5	0,60	0,126	3,0	240	80	0,50	18,7	18,3	0,57
1,5	0,45	0,071	2,0	187	93	0,70	21,3	20,4	0,65



Διάγραμμα 10.34 Μεταβολή καθιζήσεων με τη διάμετρο των χαλικοπασσάλων για $s=1.5m$

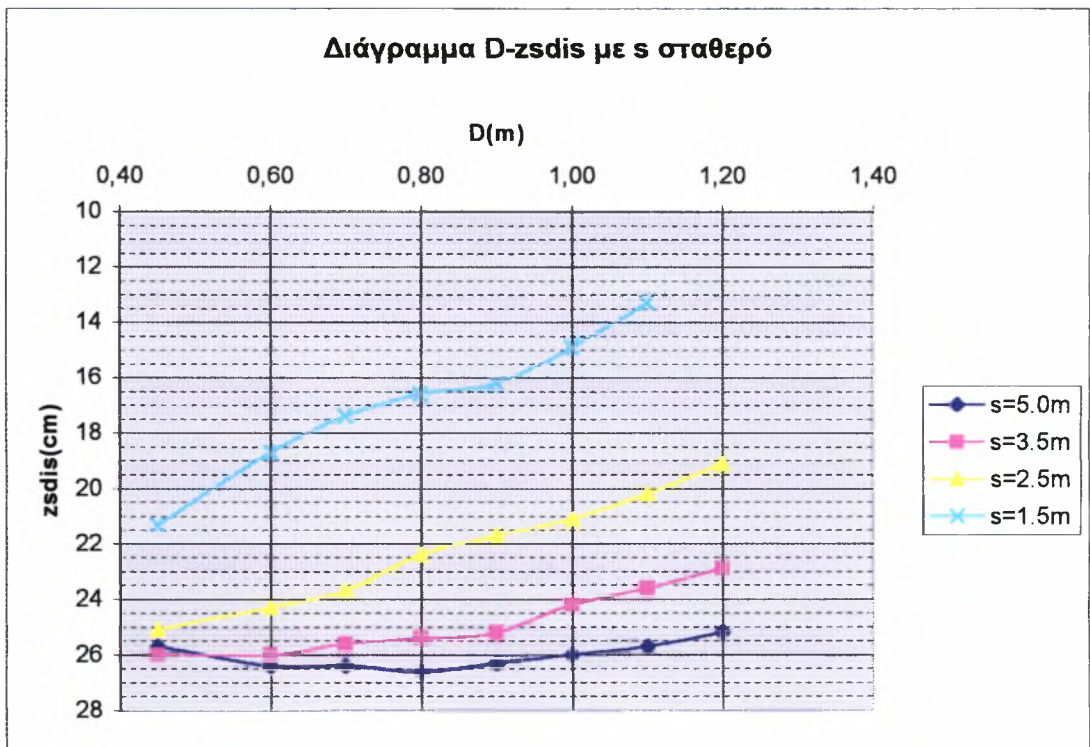


Διάγραμμα 10.35 Μεταβολή πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με τη διάμετρό τους για $s=1.5m$

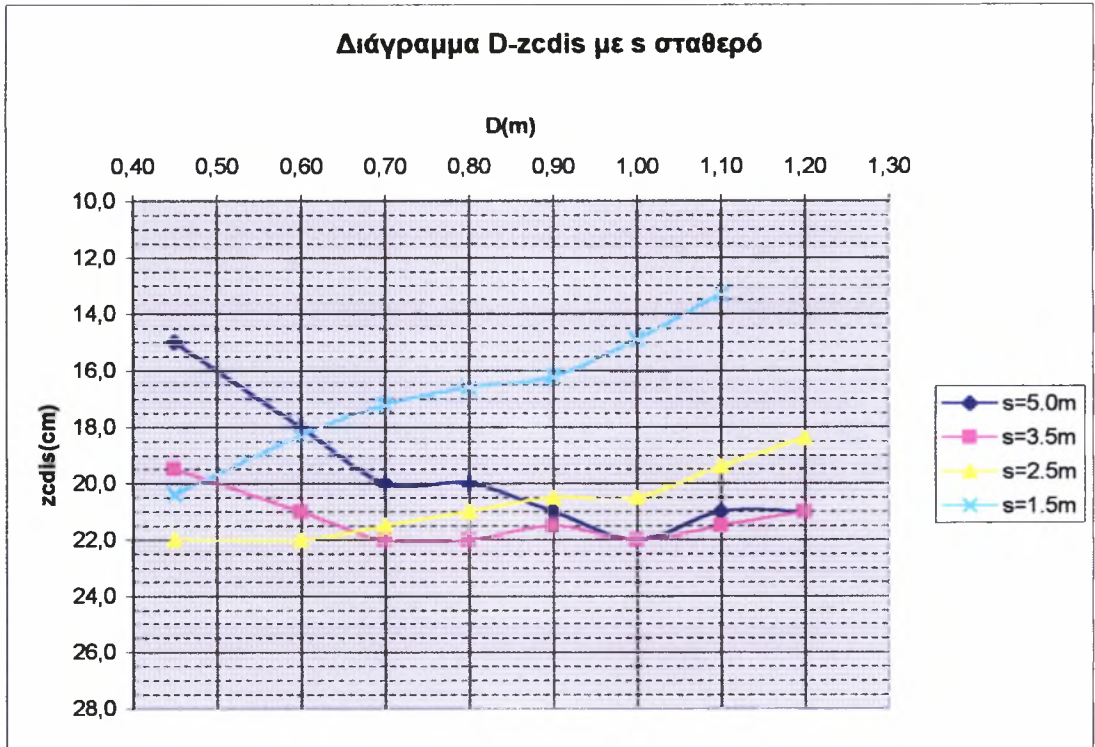


Διάγραμμα 10.36 Μεταβολή χρόνου στερεοποίησης με τη διάμετρο των χαλικοπασσάλων για $s=1.5m$

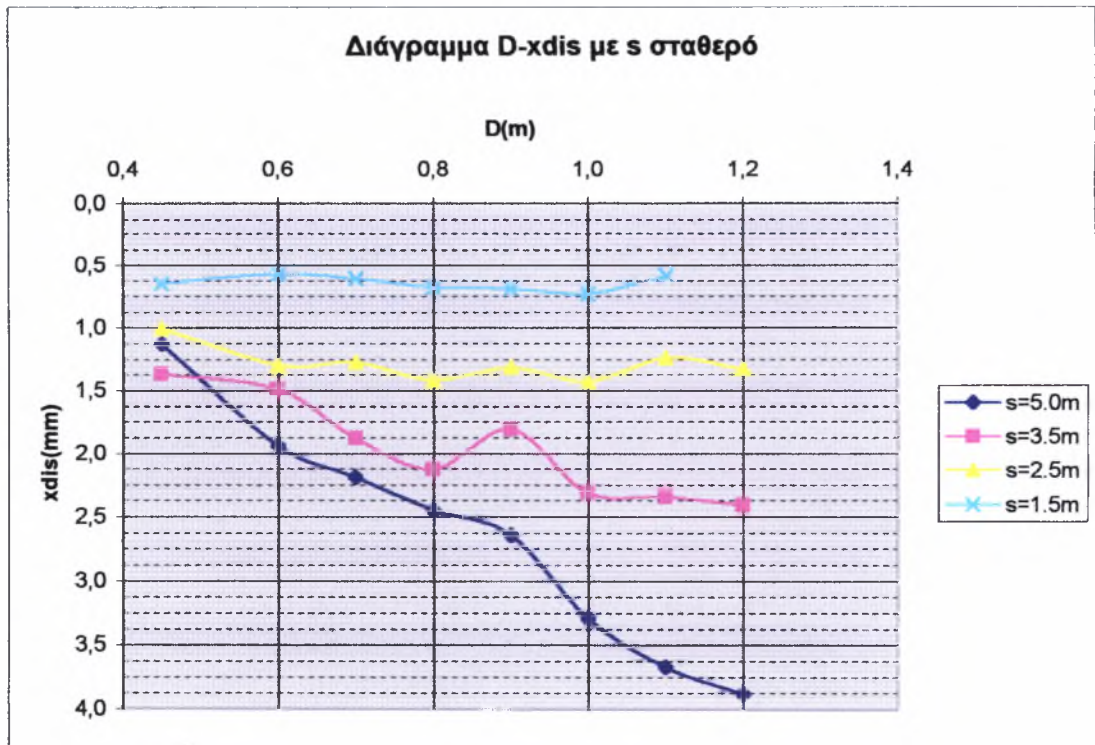
Τα αποτελέσματα της παραμετρικής αυτής ανάλυσης συγκεντρώνονται στα επόμενα διαγράμματα. Συγκεκριμένα, στα Διαγράμματα 10.37, 10.38, 10.39 και 10.40 παρουσιάζεται η μεταβολή της καθίζησης του αργιλικού εδάφους, της καθίζησης των χαλικοπασσάλων, της πλευρικής τους διόγκωσης και του χρόνου στερεοποίησης αντίστοιχα, συναρτήσει της διαμέτρου των χαλικοπασσάλων για διαφορετικές τιμές της απόστασης μεταξύ των αξόνων τους. Η μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με το βάθος για διαφορετικές τιμές της αξονικής τους απόστασης παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 10.41.1, 10.41.2, 10.41.3 και 10.41.4.



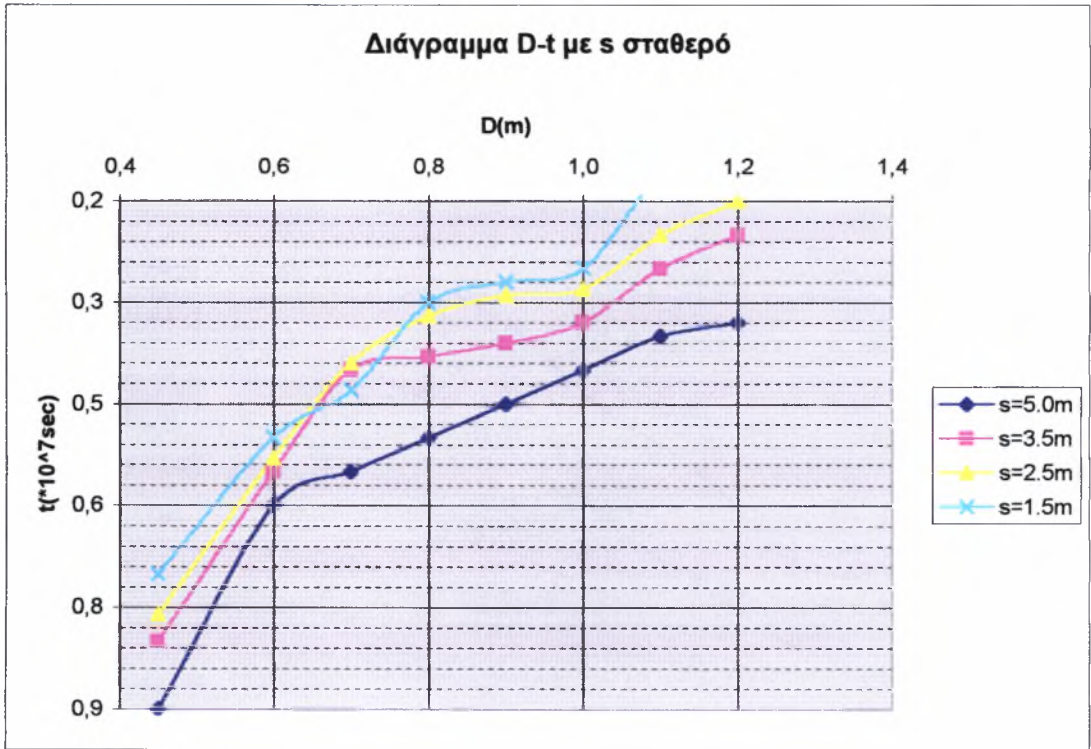
Διάγραμμα 10.37 Μεταβολή της καθίζησης της αργίλου συναρτήσει της διαμέτρου των χαλικοπασσάλων για μεταβαλλόμενη αξονική απόσταση



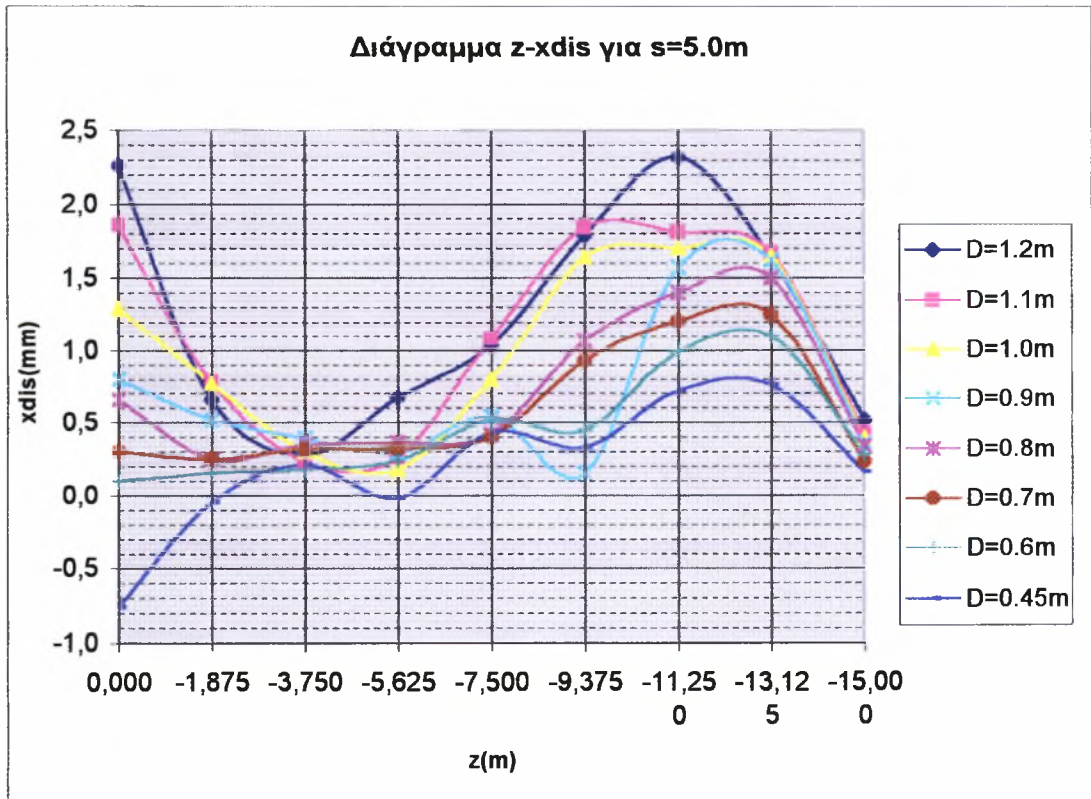
Διάγραμμα 10.38 Μεταβολή της καθίζησης των χαλικοπασσάλων συναρτήσει της διαμέτρου τους για μεταβαλλόμενη αξονική απόσταση



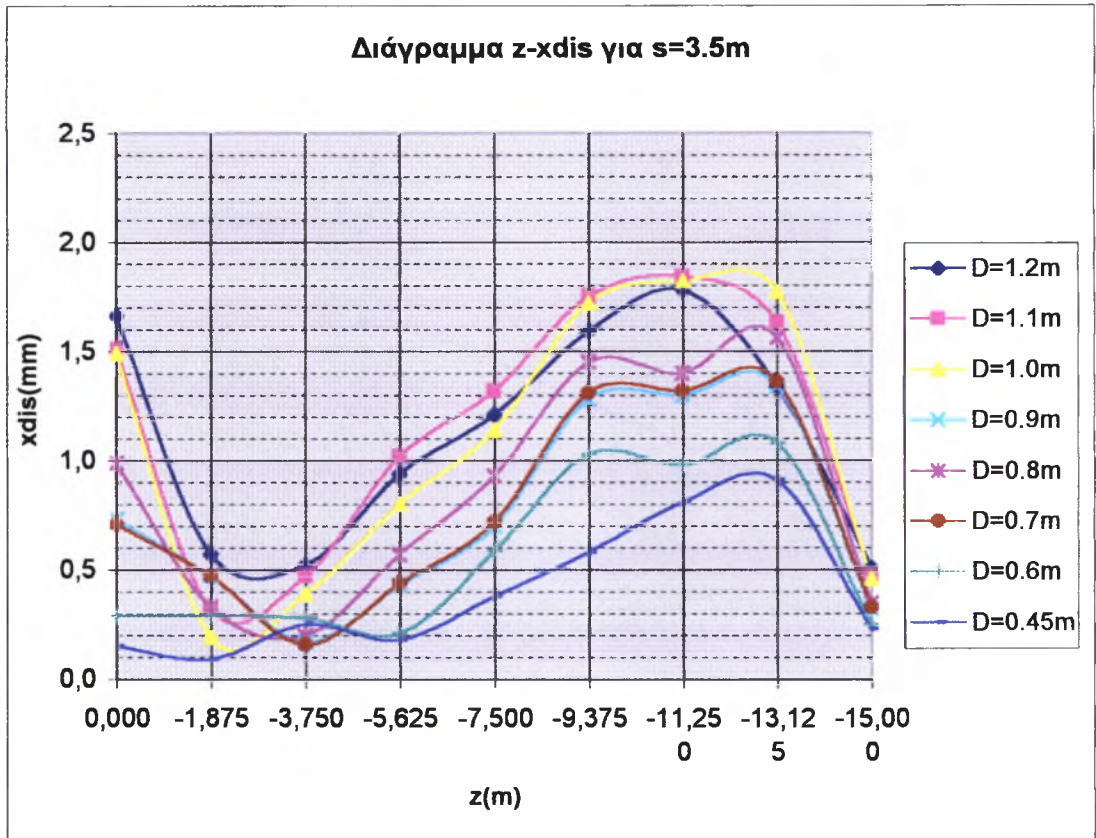
Διάγραμμα 8.39 Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων συναρτήσει της διαμέτρου τους για μεταβαλλόμενη αξονική απόσταση



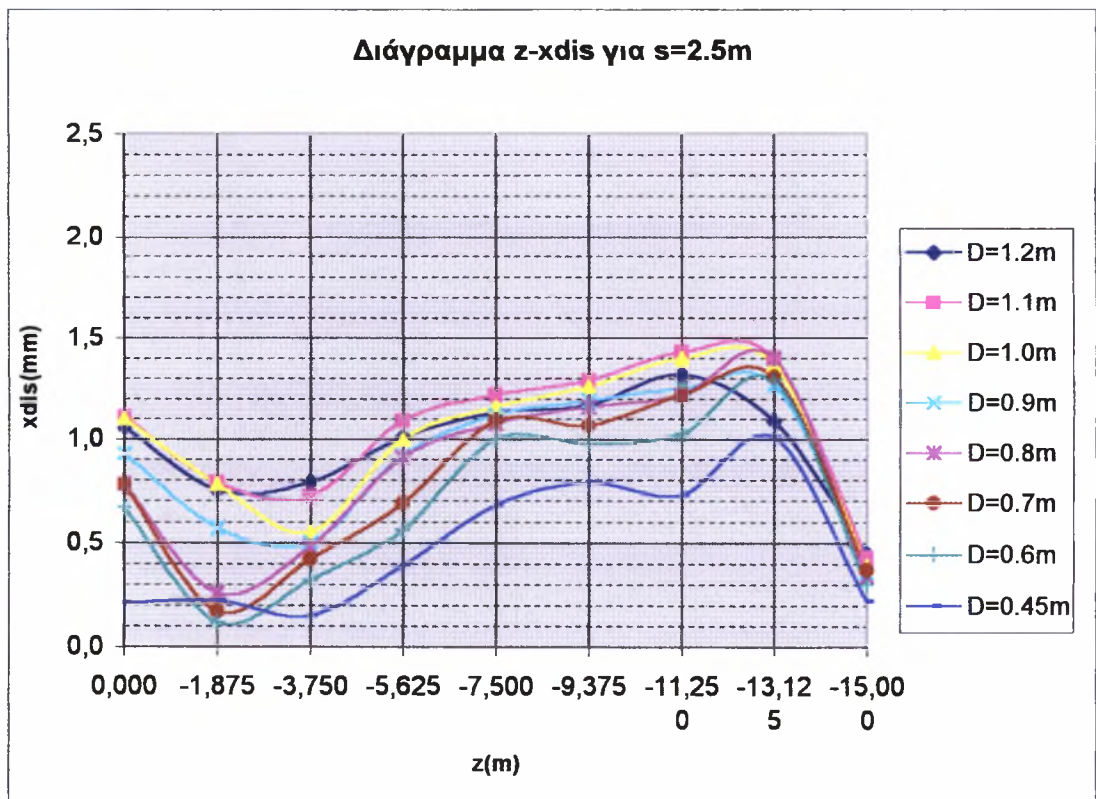
Διάγραμμα 10.40 Μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης συναρτήσει της διαμέτρου των χαλικοπασσάλων για μεταβαλλόμενη αξονική απόσταση



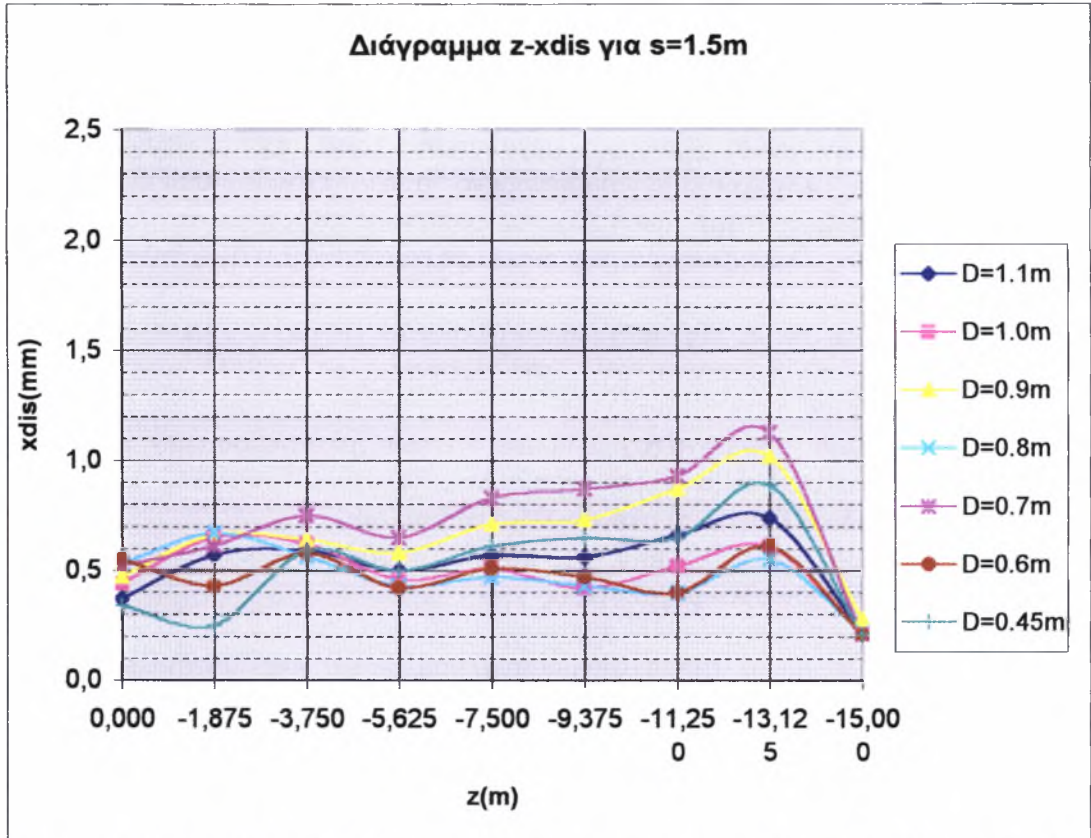
Διάγραμμα 10.41.1 Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με το βάθος για s=5.0m



Διάγραμμα 10.41.2 Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με το βάθος για $s=3.5$ m



Διάγραμμα 10.41.3 Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με το βάθος για $s=2.5$ m



Διάγραμμα 10.41.4 Μεταβολή της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων με το βάθος για s=1.5m

10.2 Συμπεράσματα των παραμετρικών αναλύσεων

Από τα διαγράμματα των τριών παραμετρικών αναλύσεων, οι καθιζήσεις των χαλικοπασσάλων είναι γενικώς μεγαλύτερες από τις καθιζήσεις της περιβάλλουσας αργίλου. Το αναμενόμενο αυτό γεγονός αποδίδεται στη μικρότερη συμπίεστικότητα των χαλικοπασσάλων σε σχέση με το περιβάλλον αργιλικό έδαφος, (λόγος των μέτρων συμπίεστικότητας $E_s/E_c=70/4.5=15.5$).

Από την πρώτη σειρά παραμετρικών αναλύσεων (μεταβαλλόμενο επιβαλλόμενο φορτίο), συμπεραίνεται ότι όσον αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο, τόσο αυξάνεται:

1. η καθίζηση του αργιλικού εδάφους και των χαλικοπασσάλων· η αύξηση μάλιστα αυτή είναι περίπου γραμμική,
2. η πλευρική διόγκωση στους χαλικοπασσάλους,
3. ο χρόνος στερεοποίησης της αργίλου, εφόσον οι καθιζήσεις που θα αναληφθούν είναι μεγαλύτερες.

Από τη δεύτερη σειρά παραμετρικών αναλύσεων (με εναλλακτικές-σταθερές τιμές της διαμέτρου των χαλικοπασσάλων και μεταβαλλόμενη την απόσταση μεταξύ των αξόνων τους), συμπεραίνεται ότι όσον η αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων αυξάνει, τόσο:

1. αυξάνονται οι καθιζήσεις στην άργιλο, ενώ ο ρυθμός αύξησής τους μειώνεται,
2. αυξάνονται οι καθιζήσεις στους χαλικοπασσάλους αρχικά, ενώ πέραν μίας οριακής απόστασης οι καθιζήσεις μειώνονται ή τείνουν να μειωθούν· η μείωση αυτή είναι τόσο πιο έντονη όσο ή διάμετρος των χαλικοπασσάλων είναι μικρότερη
3. αυξάνεται η πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων,
4. αυξάνεται ο χρόνος στερεοποίησης της αργίλου και μάλιστα με σταθερό ρυθμό για όλες τις τιμές του D.

Από την τρίτη σειρά παραμετρικών αναλύσεων (με εναλλακτικές-σταθερές τιμές της αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων και μεταβαλλόμενη την διάμετρό τους, συμπεραίνεται ότι:

1. Αυξανόμενης της διαμέτρου των χαλικοπασσάλων μειώνονται οι καθιζήσεις του αργιλικού εδάφους, ενώ ο ρυθμός μείωσής τους αυξάνει. Για μεγάλες τιμές της αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων ($s=5.0m$), οι καθιζήσεις της αργίλου παραμένουν περίπου οι ίδιες αυξανόμενης της διαμέτρου τους.
2. Όσον αυξάνεται η διάμετρος των χαλικοπασσάλων, αυξάνονται αρχικά και οι καθιζήσεις των μειώνονται όμως για ακόμη μεγαλύτερες τιμές της διαμέτρου. Για μικρή αξονική απόσταση των χαλικοπασσάλων οι καθιζήσεις τους μειώνονται εκ νέου με την αύξηση της διαμέτρου.
3. Αυξανόμενης της διαμέτρου των χαλικοπασσάλων, αυξάνεται και η πλευρική τους διόγκωση, εφόσον το φορτίο που συγκεντρώνεται σε αυτούς είναι μεγαλύτερο.
4. Αυξανόμενης της διαμέτρου των χαλικοπασσάλων, μειώνεται ο χρόνος στερεοποίησης του αργιλικού εδάφους και μάλιστα με τον ίδιο περίπου ρυθμό για όλες τις αξονικές αποστάσεις.

Ακόμη, από τα ως άνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι όσο μειώνεται η διάμετρος των χαλικοπασσάλων τόσο η διαφορά των καθιζήσεων αργίλου και χαλικοπασσάλων αυξάνεται. Για μεγαλύτερες δε τιμές της αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων η παραπάνω διαφορά καθίσταται μεγαλύτερη, ενώ για αξονική απόσταση $s=1.5\text{m}$ σχεδόν μηδενίζεται.

Ως γενικό συμπέρασμα συνάγεται ότι η καθίζηση της αργίλου μειώνεται ταχύτερα με την μείωση της αξονικής απόστασης των χαλικοπασσάλων παρά με την αύξηση της διαμέτρου τους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Α1

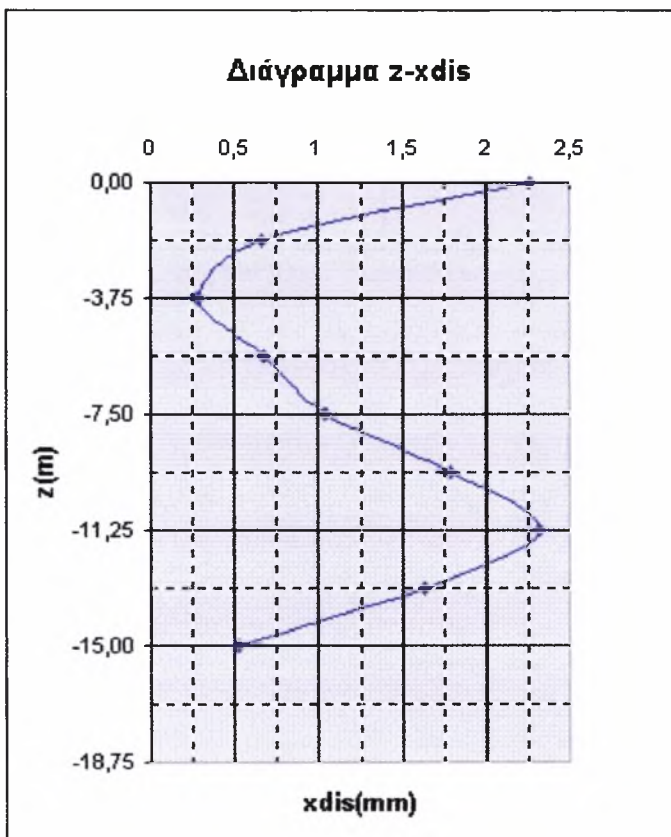
Διαγράμματα για την δεύτερη σειρά παραμετρικών αναλύσεων

Για την δεύτερη σειρά παραμετρικών αναλύσεων, με μεταβαλλόμενο s , παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαγράμματα της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων σε σχέση με το βάθος, καθώς και οι ισοτιμές της οριζόντιας μετακίνησης στο κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται από το μέσο των χαλικοπασσάλων, για σταθερές τιμές της διαμέτρου D .

α) Σταθερή διάμετρος $D=1.2m$

- $s = 5.0m$

xdis(m)	z(m)
2,26	0,000
0,66	-1,875
0,28	-3,750
0,67	-5,625
1,04	-7,500
1,79	-9,375
2,32	-11,250
1,64	-13,125
0,52	-15,000



Διάγραμμα Α1.1 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=5.0m$

FLAC3D 2.00

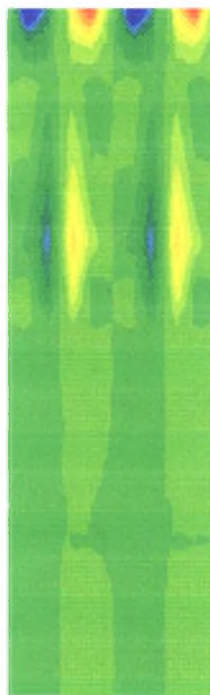
Step 8434 Model Perspective
19:13:55 Mon Sep 24 2001

Center: Rotation:
X: 2.500e+000 X: 0.000
Y: 2.500e+000 Y: 0.000
Z: -1.650e+001 Z: 0.000
Dist: 9.625e+001 Mag.: 1
 Ang.: 22.500

Contour of X-Displacement

-3.8788e-003 to -3.0000e-003
-3.0000e-003 to -2.5000e-003
-2.5000e-003 to -2.0000e-003
-2.0000e-003 to -1.5000e-003
-1.5000e-003 to -1.0000e-003
-1.0000e-003 to -5.0000e-004
-5.0000e-004 to 0.0000e+000
0.0000e+000 to 5.0000e-004
5.0000e-004 to 1.0000e-003
1.0000e-003 to 1.5000e-003
1.5000e-003 to 2.0000e-003
2.0000e-003 to 2.5000e-003
2.5000e-003 to 3.0000e-003
3.0000e-003 to 3.5000e-003
3.5000e-003 to 3.9071e-003

Interval = 5.0e-004

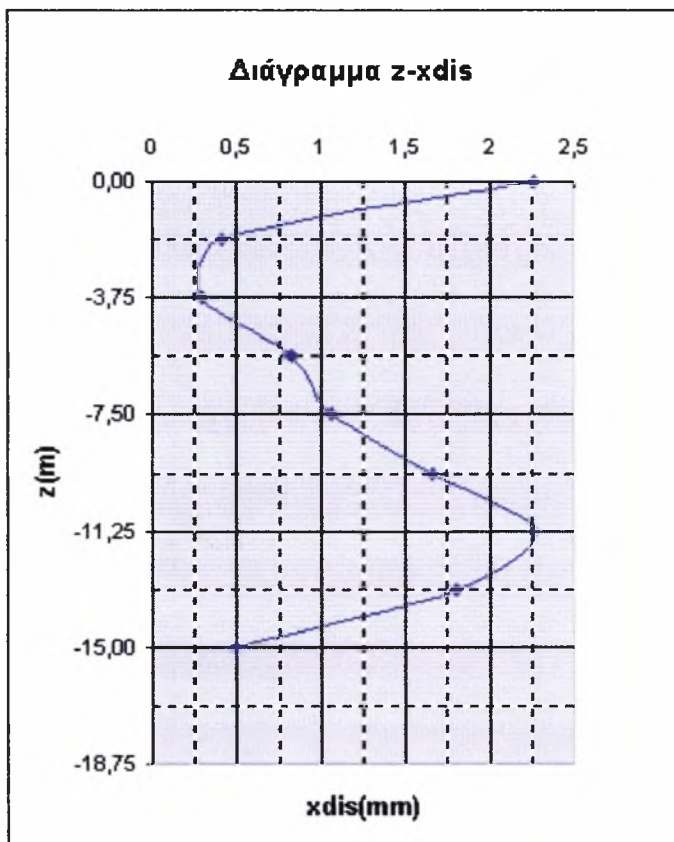


papadopoulou melio
papadopoulou melio

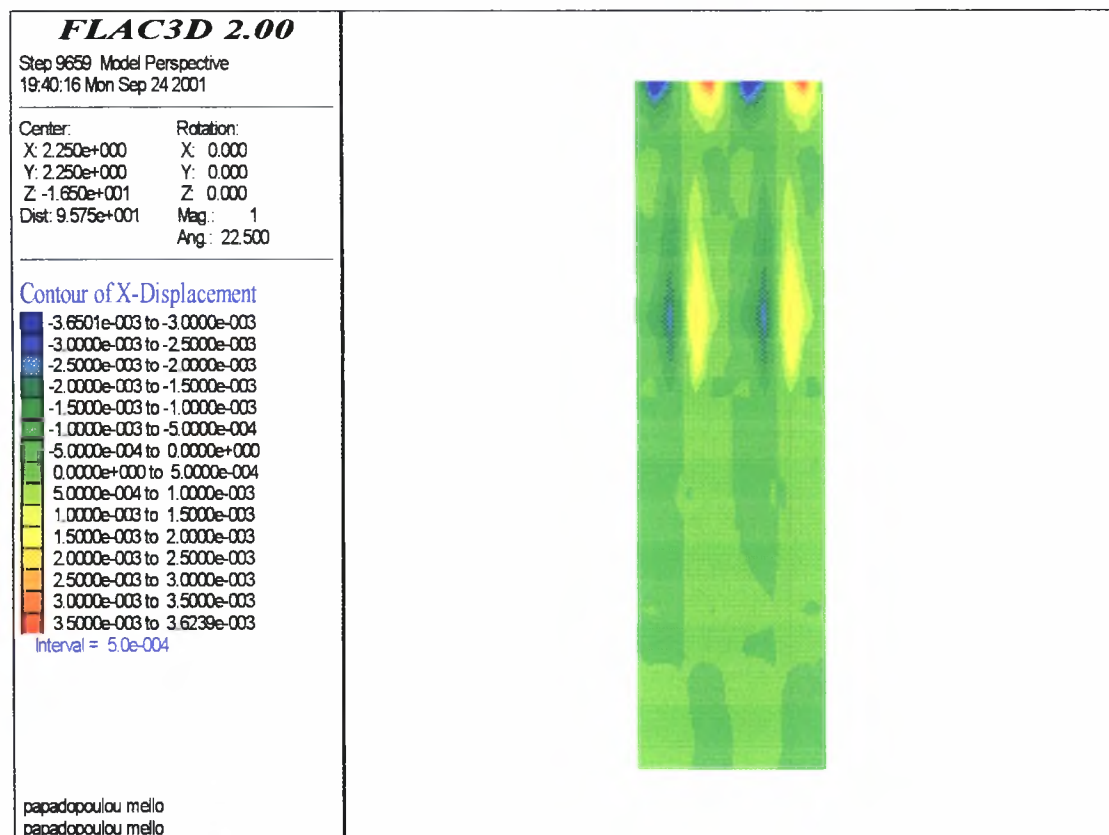
Σχήμα A1.1 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=5.0m$

- $s = 4.5m$

xdis(m)	z(m)
2,26	0,000
0,41	-1,875
0,29	-3,750
0,82	-5,625
1,06	-7,500
1,66	-9,375
2,27	-11,250
1,80	-13,125
0,50	-15,000



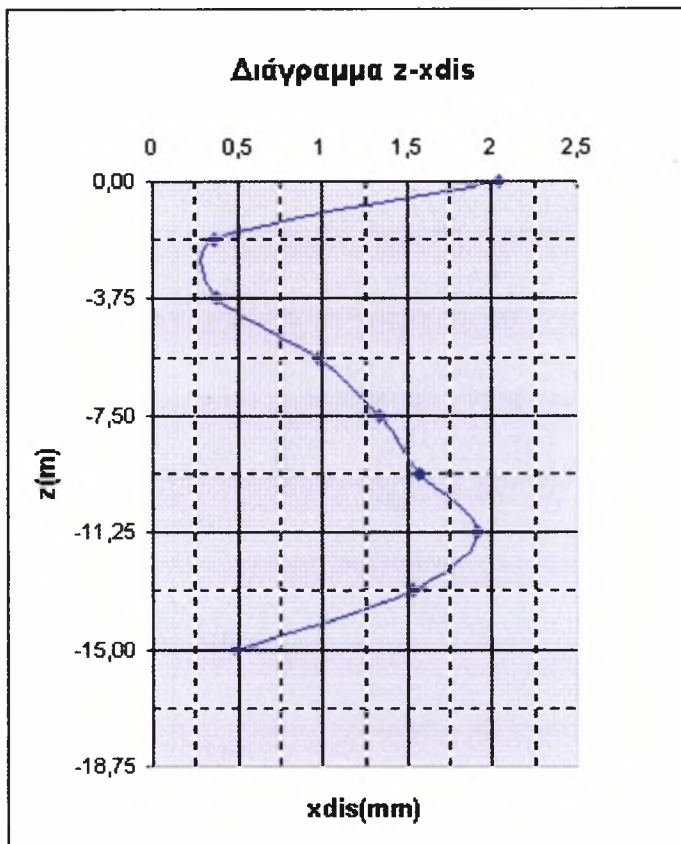
Διάγραμμα A.1.2 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=4.5m$



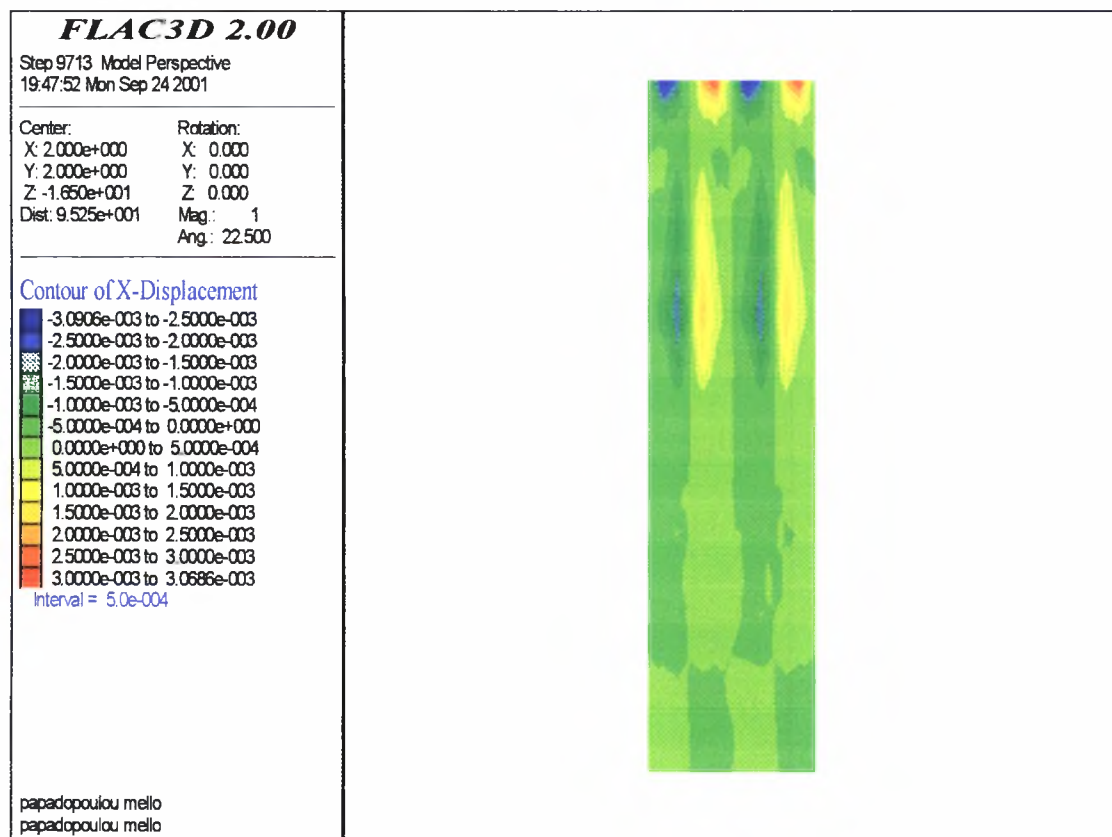
Σχήμα A..2 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=4.5m$

- $s = 4.0m$

xdis(m)	z(m)
2,04	0,000
0,36	-1,875
0,37	-3,750
0,97	-5,625
1,34	-7,500
1,57	-9,375
1,91	-11,250
1,54	-13,125
0,49	-15,000



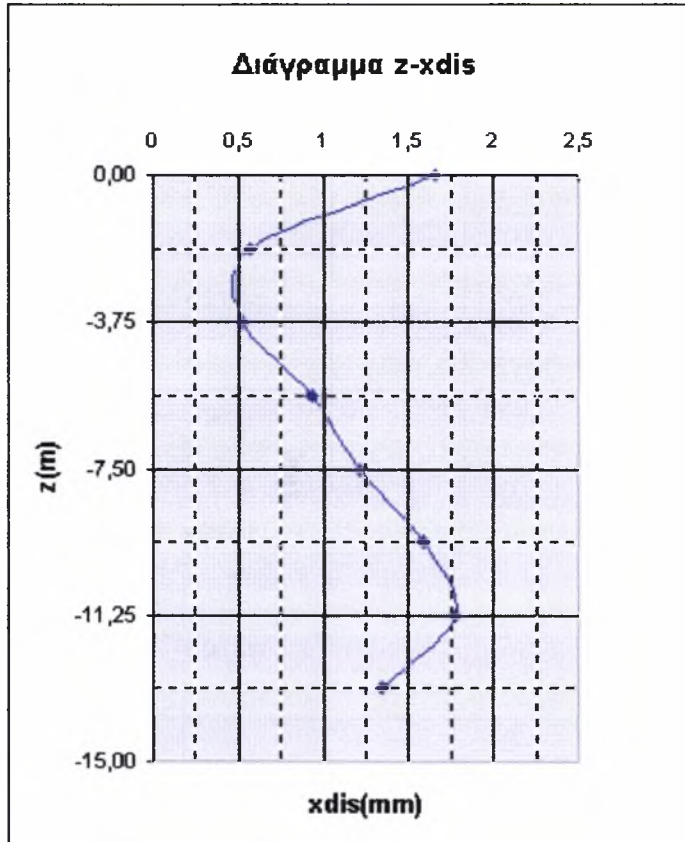
Διάγραμμα A1.3 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=4.0m$



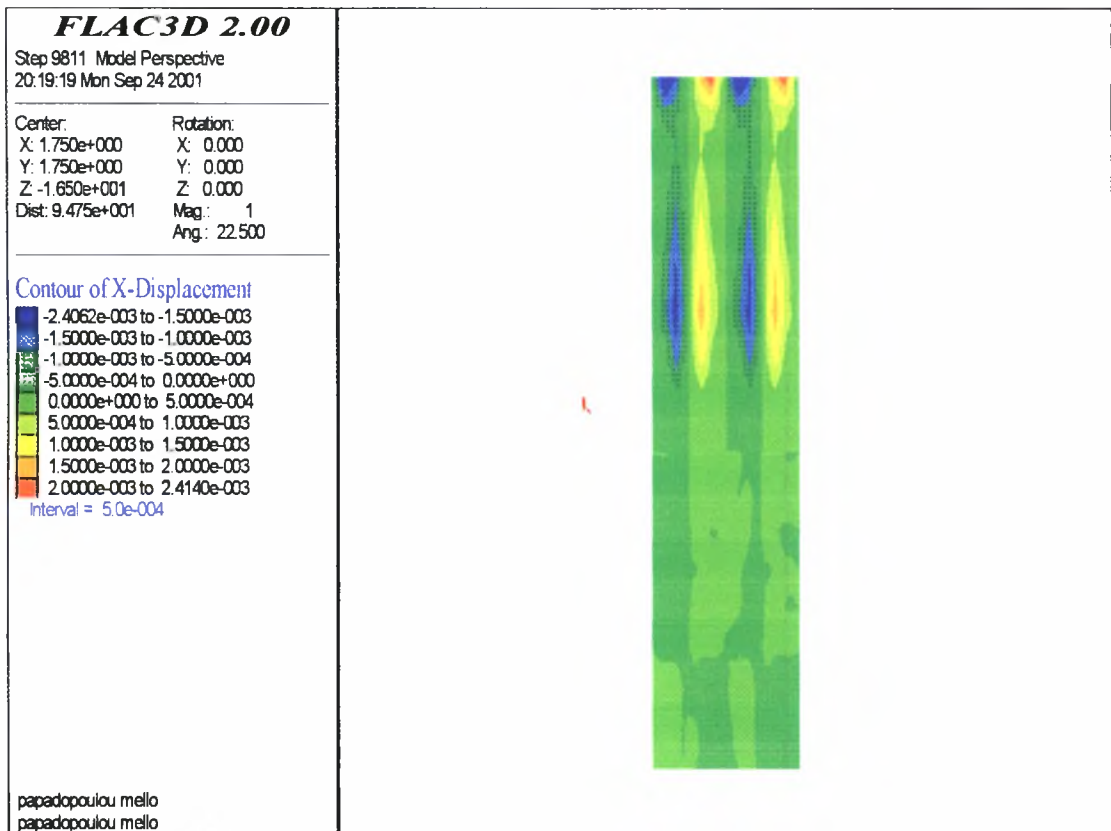
Σχήμα A1.3 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=4.0m$

- $s = 3.5m$

xdis(m)	z(m)
1,66	0,000
0,57	-1,875
0,52	-3,750
0,94	-5,625
1,21	-7,500
1,59	-9,375
1,78	-11,250
1,34	-13,125
0,51	-15,000



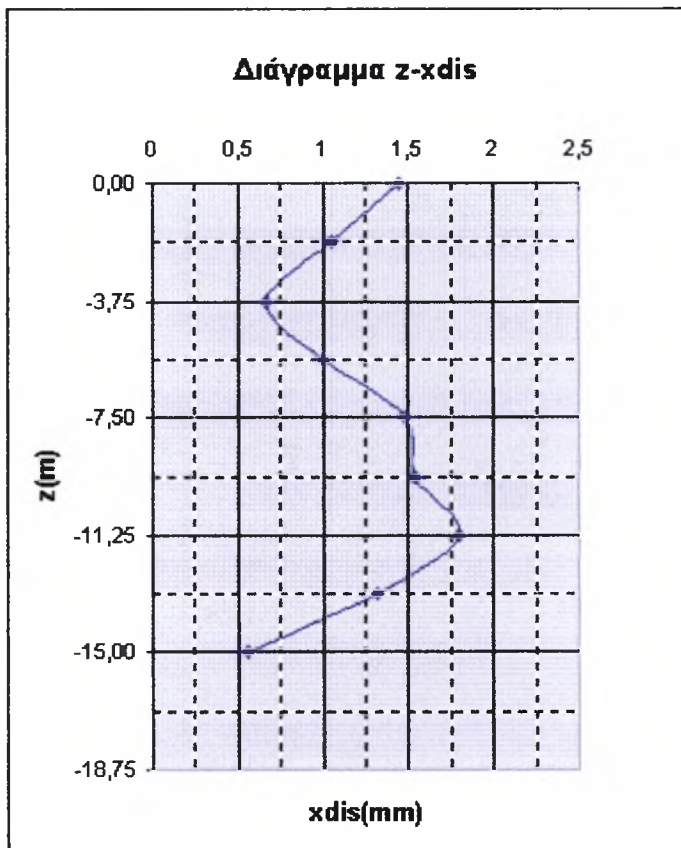
Διάγραμμα A1..4 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=3.5m$



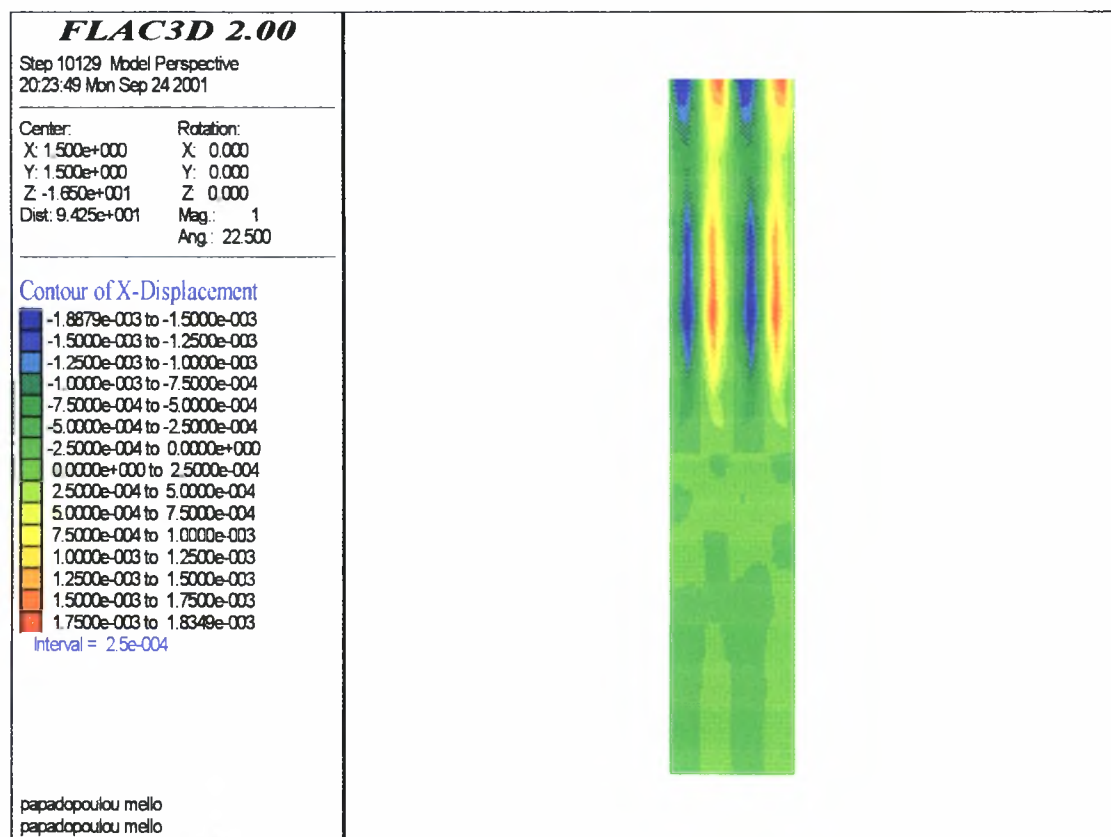
Σχήμα A1.4 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=3.5m$

- $s = 3.0m$

xdis(m)	z(m)
1,45	0,000
1,05	-1,875
0,67	-3,750
1,01	-5,625
1,48	-7,500
1,54	-9,375
1,80	-11,250
1,32	-13,125
0,56	-15,000



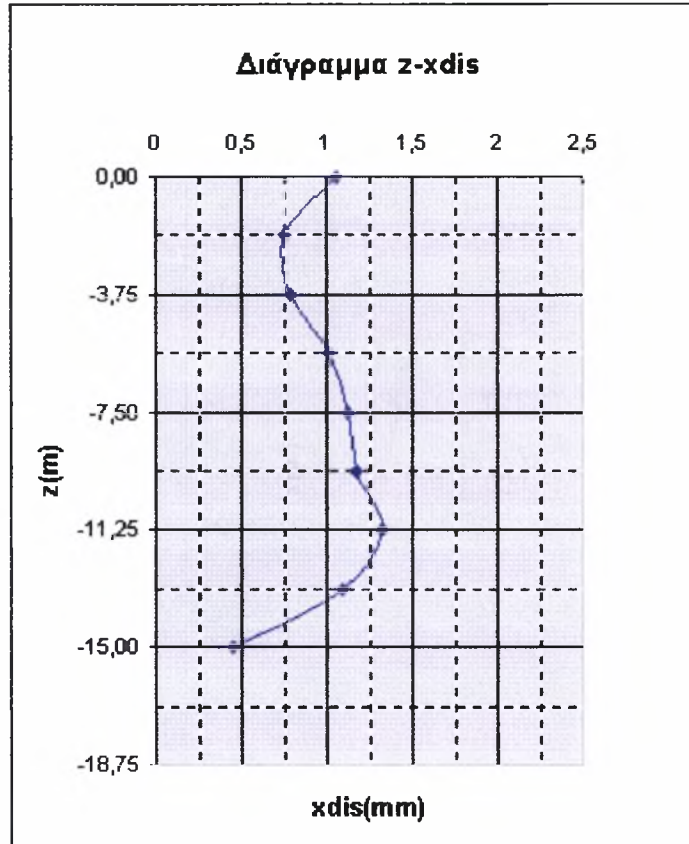
Διάγραμμα A1.5 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=3.0m$



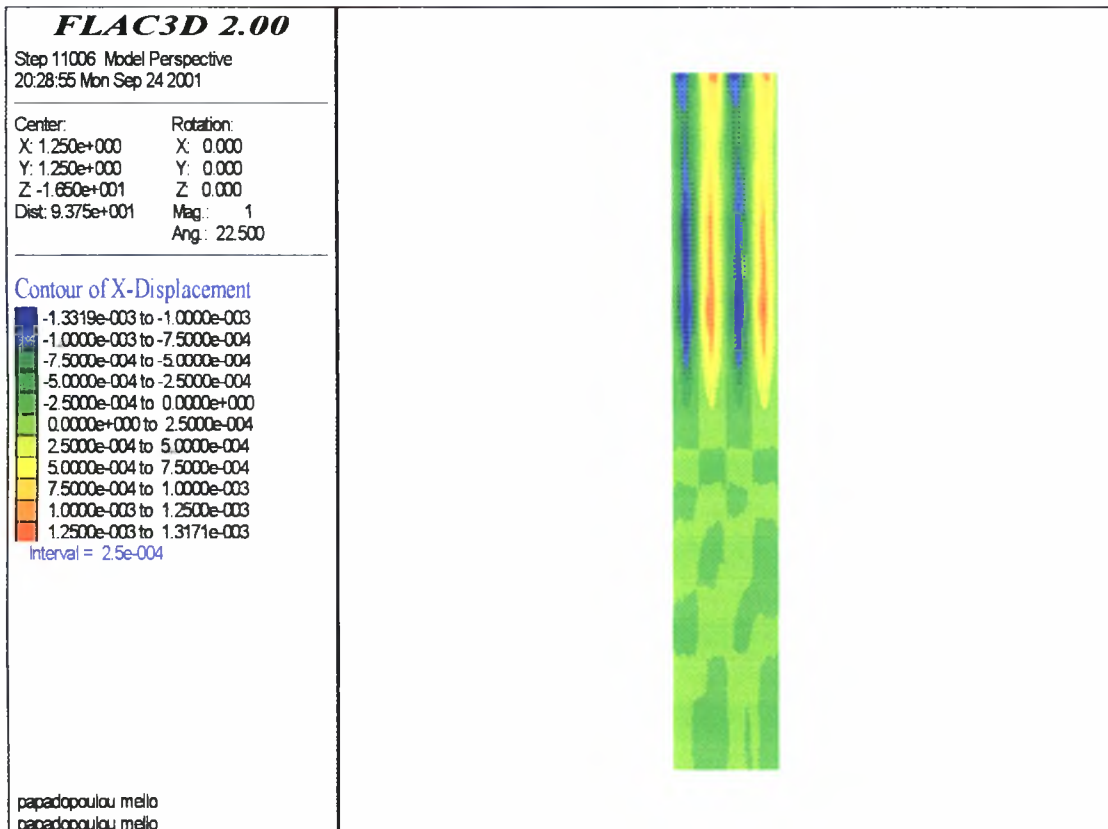
Σχήμα A1.5 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=3.0m$

- $s = 2.5m$

xdis(m)	z(m)
1,06	0,000
0,75	-1,875
0,79	-3,750
1,01	-5,625
1,13	-7,500
1,17	-9,375
1,32	-11,250
1,09	-13,125
0,45	-15,000



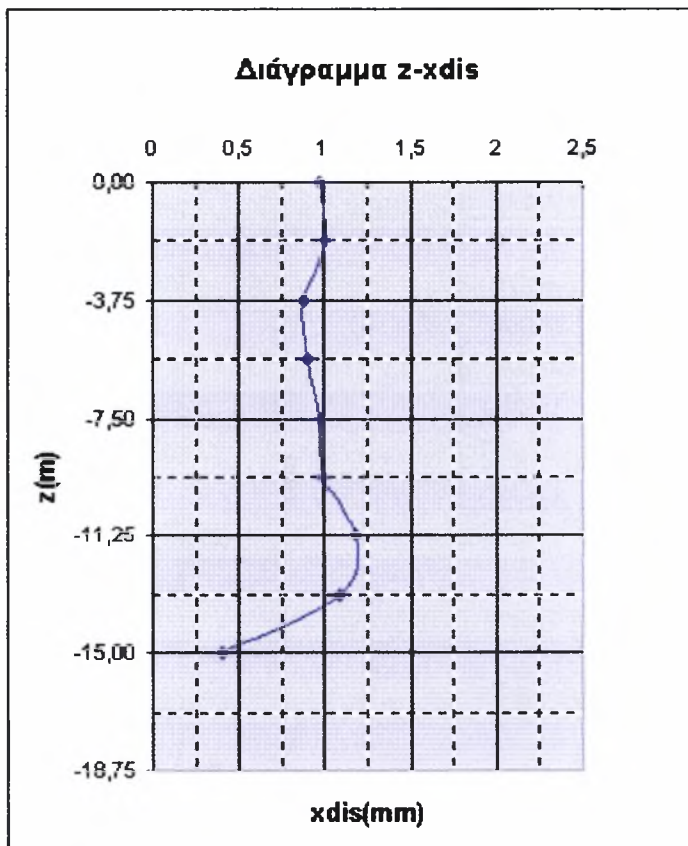
Διάγραμμα A1.6 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=2.5m$



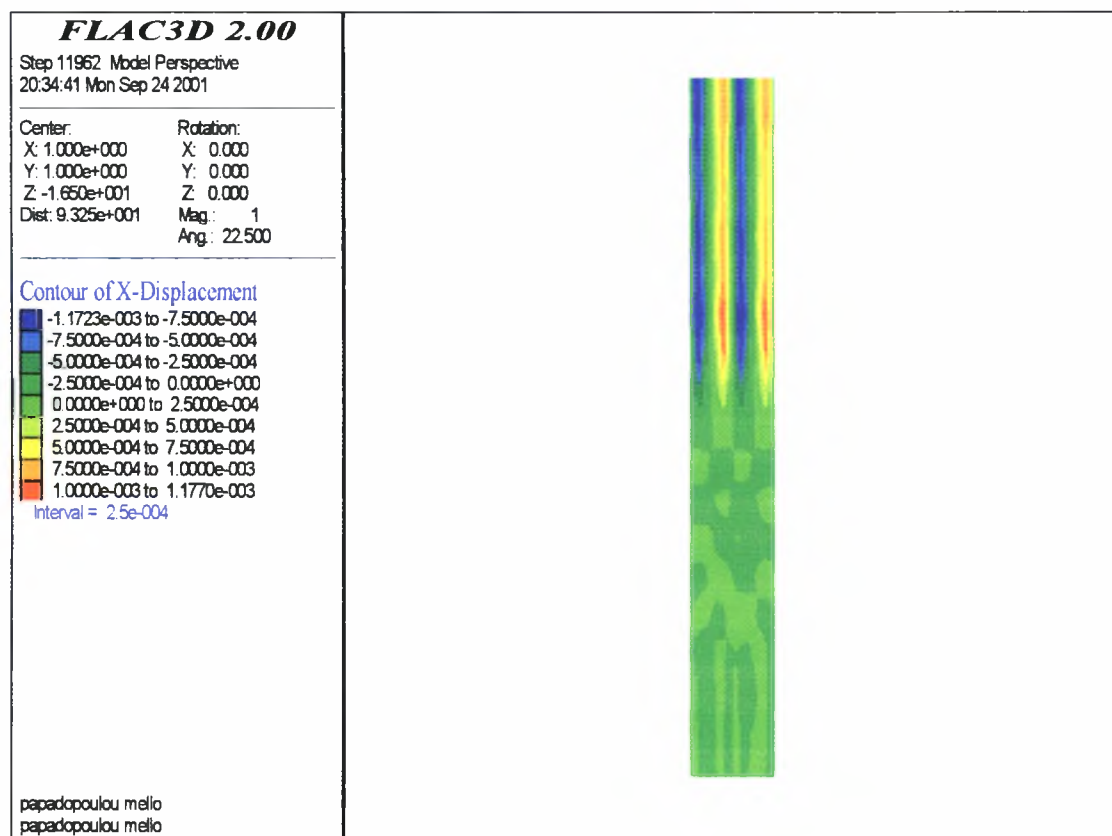
Σχήμα A1.6 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=2.5m$

- $s = 2.0m$

xdis(m)	z(m)
0,97	0,000
1,01	-1,875
0,88	-3,750
0,9	-5,625
0,97	-7,500
1,00	-9,375
1,18	-11,250
1,09	-13,125
0,41	-15,000



Διάγραμμα A1.7 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=2.0m$

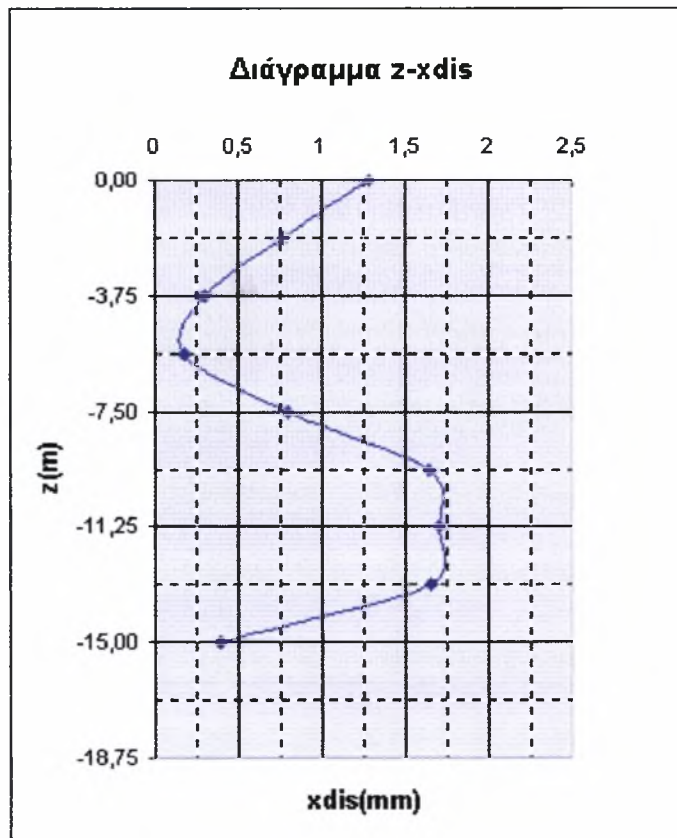


Σχήμα A1.7 Ισομές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=2.0m$

β) Σταθερή διάμετρος $D=1.0m$

- $s = 5.0m$

xdis(m)	z(m)
1,29	0,000
0,77	-1,875
0,30	-3,750
0,18	-5,625
0,80	-7,500
1,64	-9,375
1,70	-11,250
1,65	-13,125
0,39	-15,000

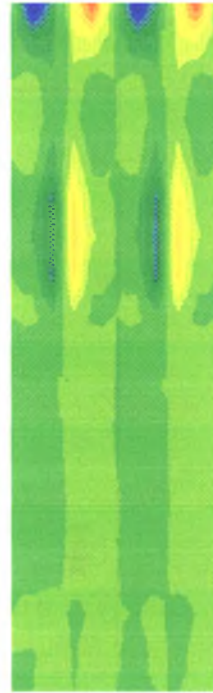
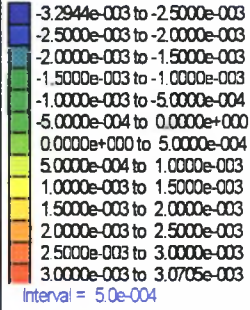


Διάγραμμα A1.8 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=5.0m$

FLAC3D 2.00

Step 7902 Model Perspective
07:45:52 Tue Sep 25 2001

Center:	Rotation:
X: 2.500e+000	X: 0.000
Y: 2.500e+000	Y: 0.000
Z: -1.650e+001	Z: 0.000
Dist: 9.625e+001	Mag.: 1
	Ang.: 22.500

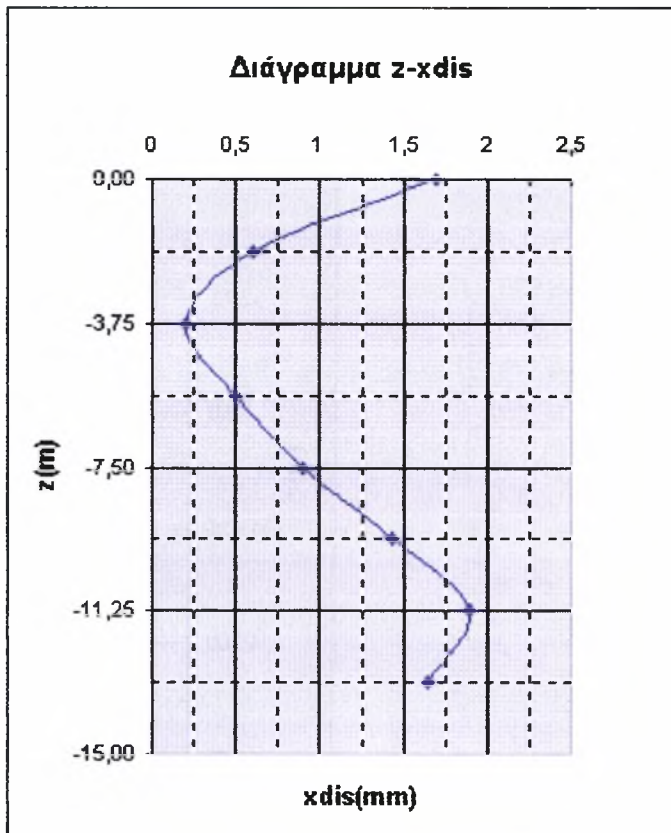
Contour of X-Displacement

papadopoulou mello
papadopoulou mello

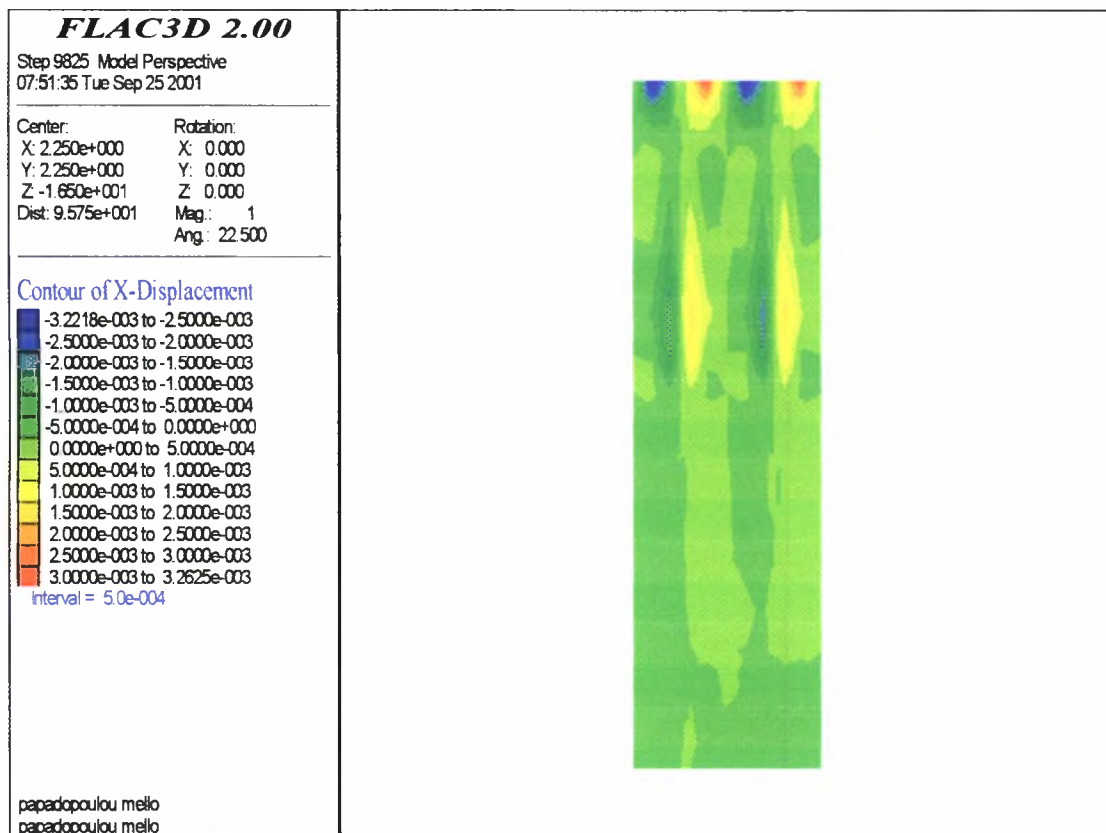
Σχήμα A1.8 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=5.0m$

- $s = 4.5m$

xdis(m)	z(m)
1,70	0,000
0,61	-1,875
0,20	-3,750
0,50	-5,625
0,90	-7,500
1,43	-9,375
1,90	-11,250
1,65	-13,125
0,39	-15,000



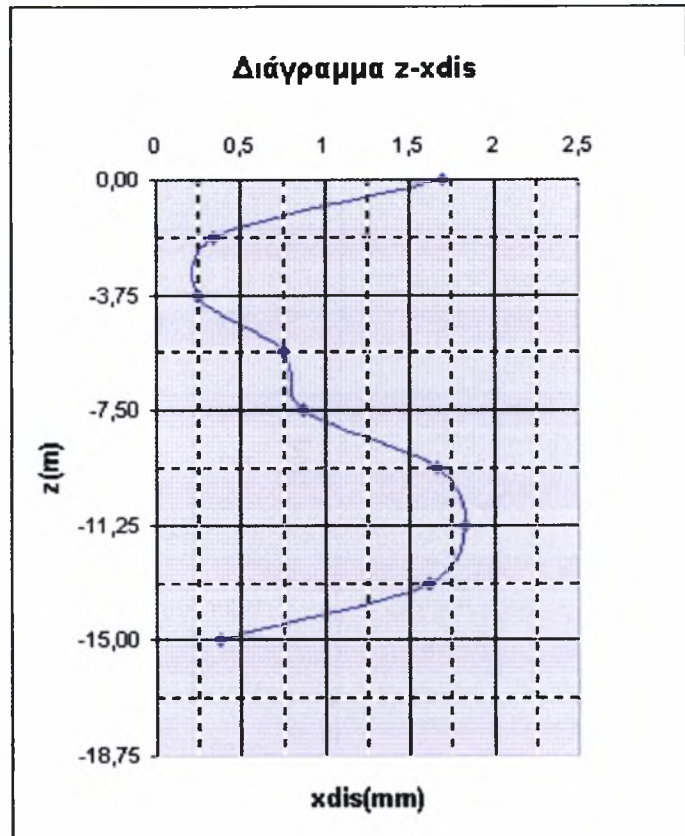
Διάγραμμα A1.9 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=4.5m$



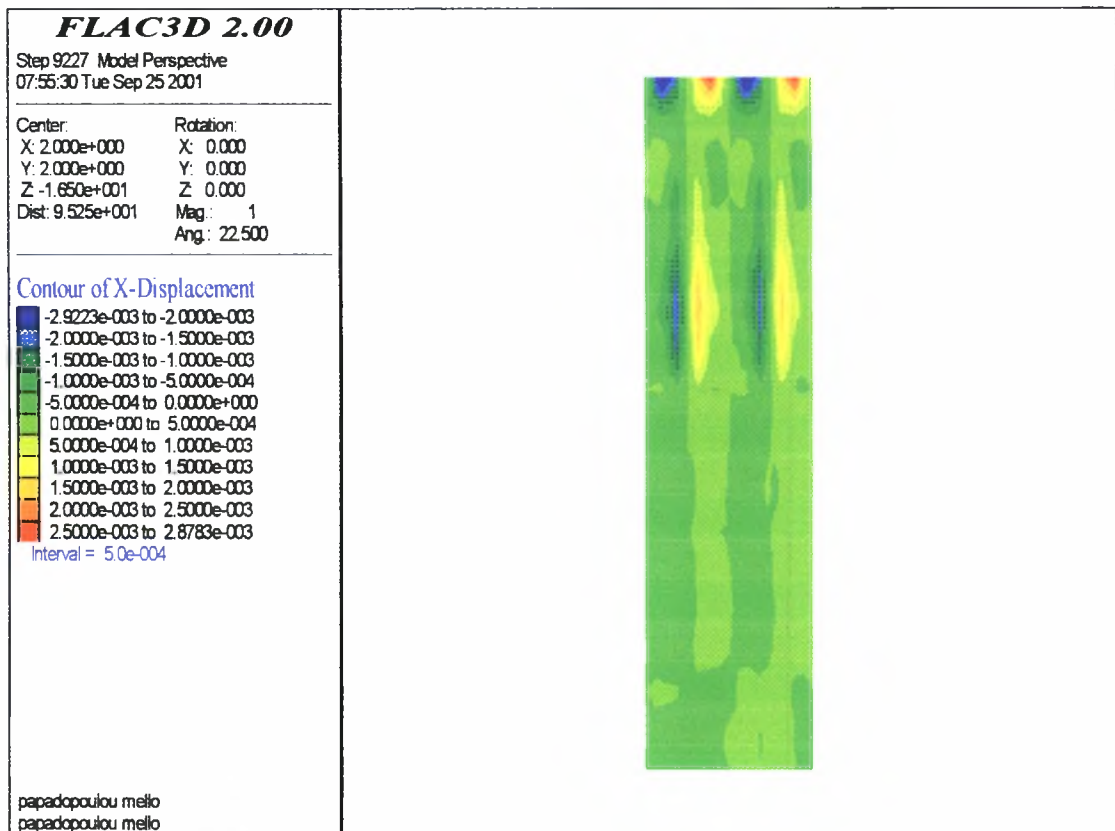
Σχήμα A1.9 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=4.5m$

- $s = 4.0m$

xdis(m)	z(m)
1,70	0,000
0,34	-1,875
0,25	-3,750
0,75	-5,625
0,87	-7,500
1,66	-9,375
1,83	-11,250
1,62	-13,125
0,38	-15,000



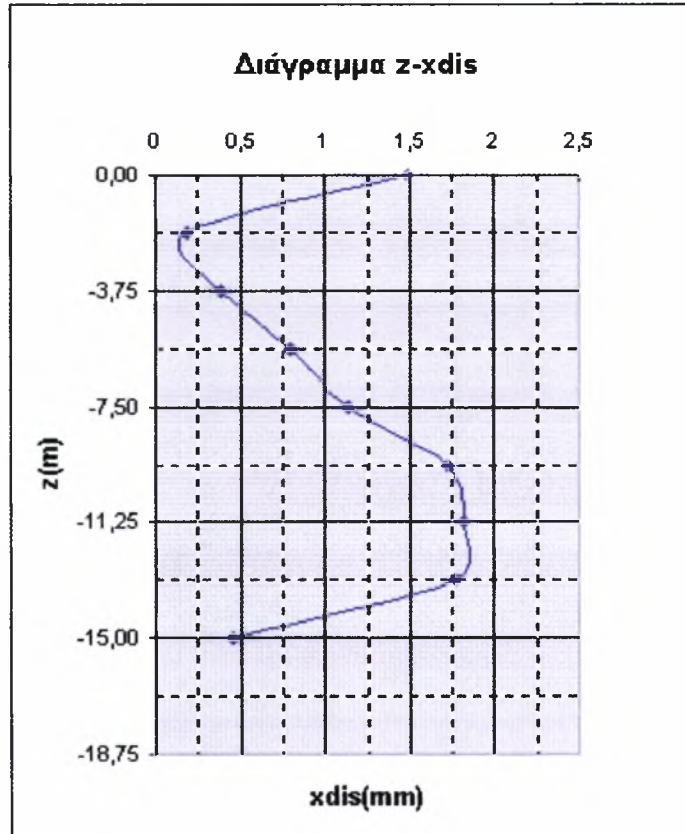
Διάγραμμα A1.10 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=4.0m$



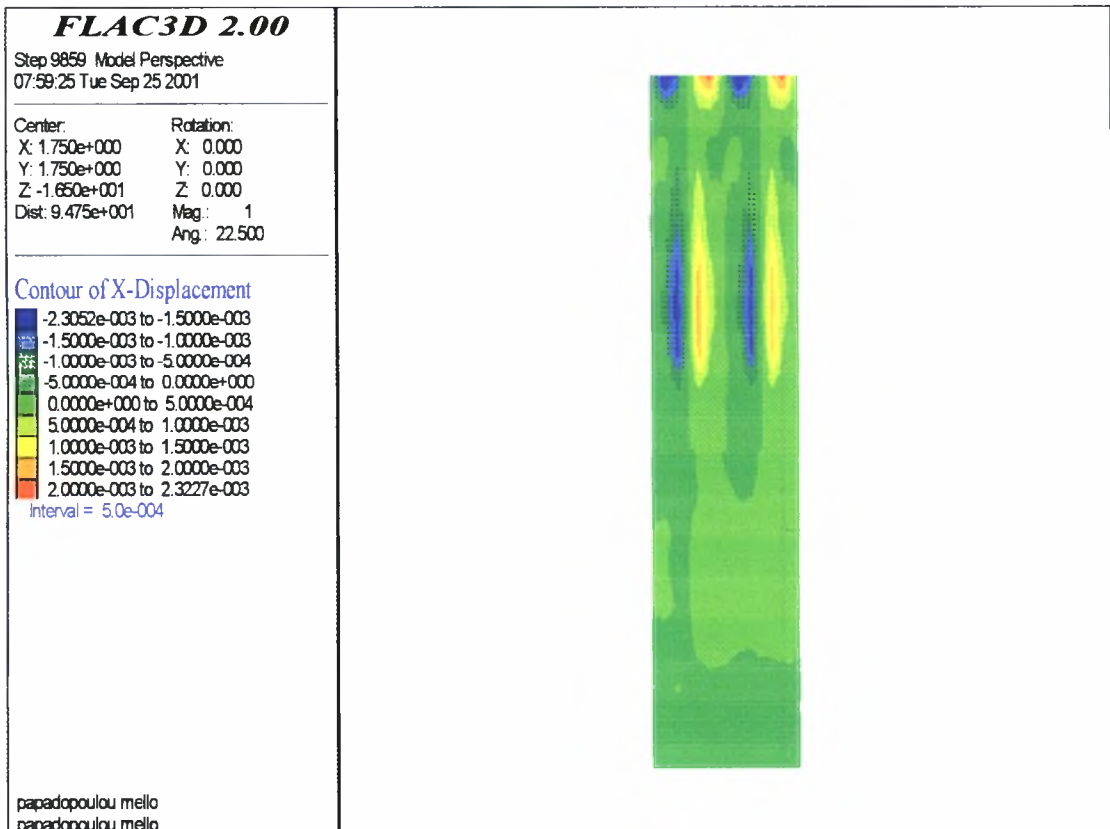
Σχήμα A1.10 Ισοαμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=4.0m$

- $s = 3.5m$

xdis(m)	z(m)
1,49	0,000
0,19	-1,875
0,39	-3,750
0,8	-5,625
1,14	-7,500
1,72	-9,375
1,82	-11,250
1,77	-13,125
0,46	-15,000



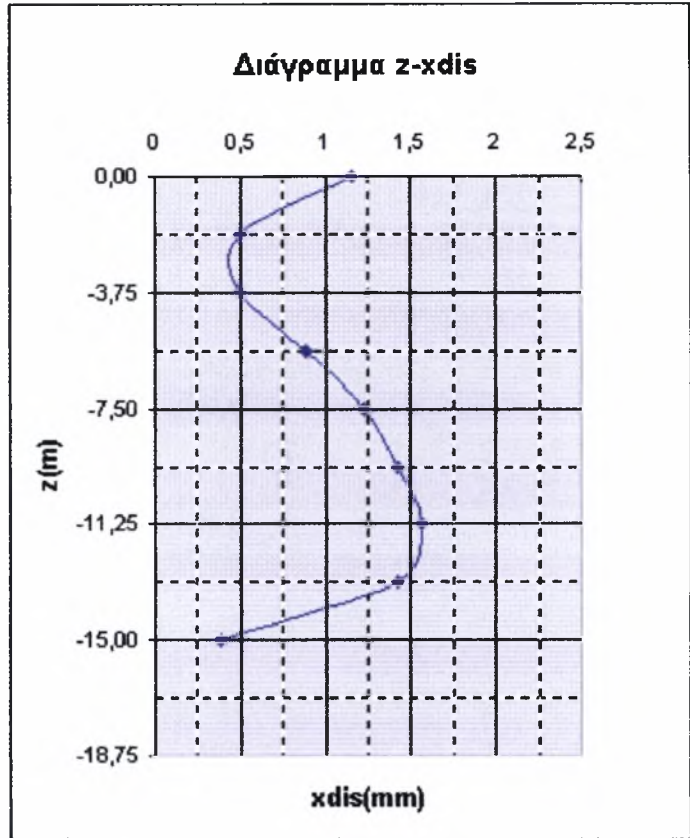
Διάγραμμα A1.11 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=3.5m$



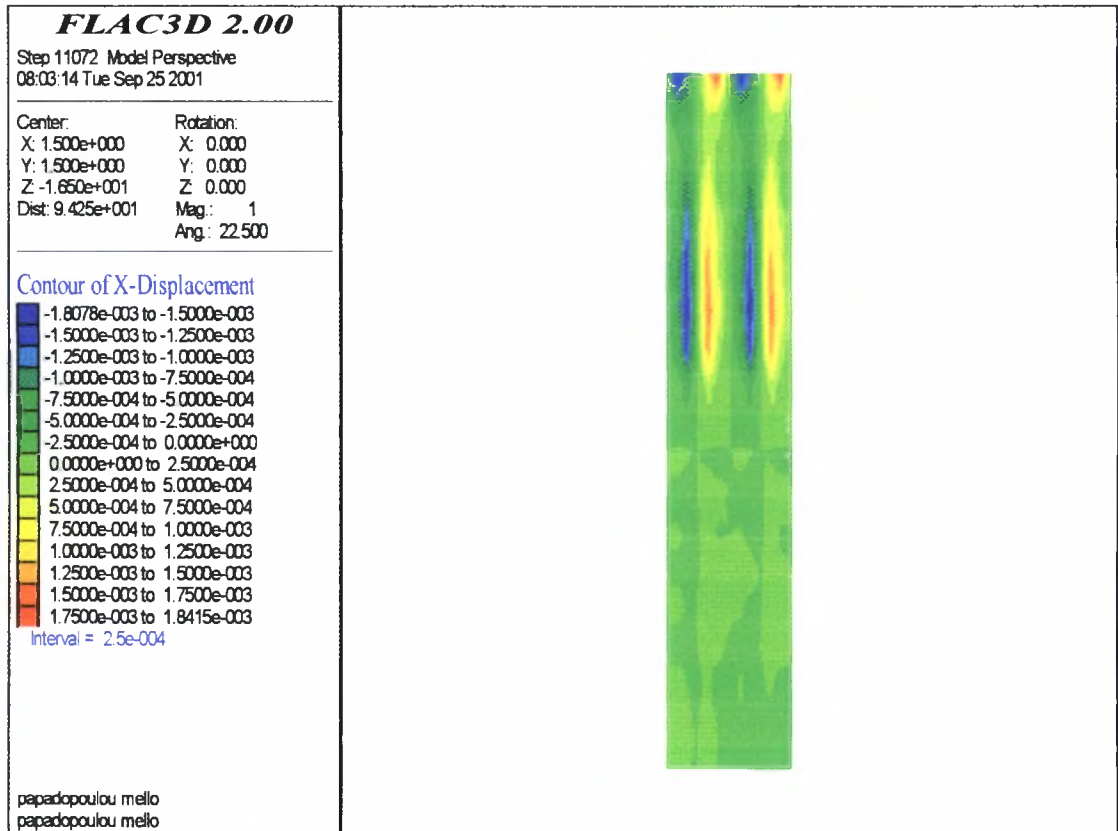
Σχήμα A1.11 Ισοαμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=3.5m$

- $s = 3.0m$

xdis(m)	z(m)
1,16	0,000
0,50	-1,875
0,50	-3,750
0,89	-5,625
1,23	-7,500
1,43	-9,375
1,56	-11,250
1,43	-13,125
0,38	-15,000



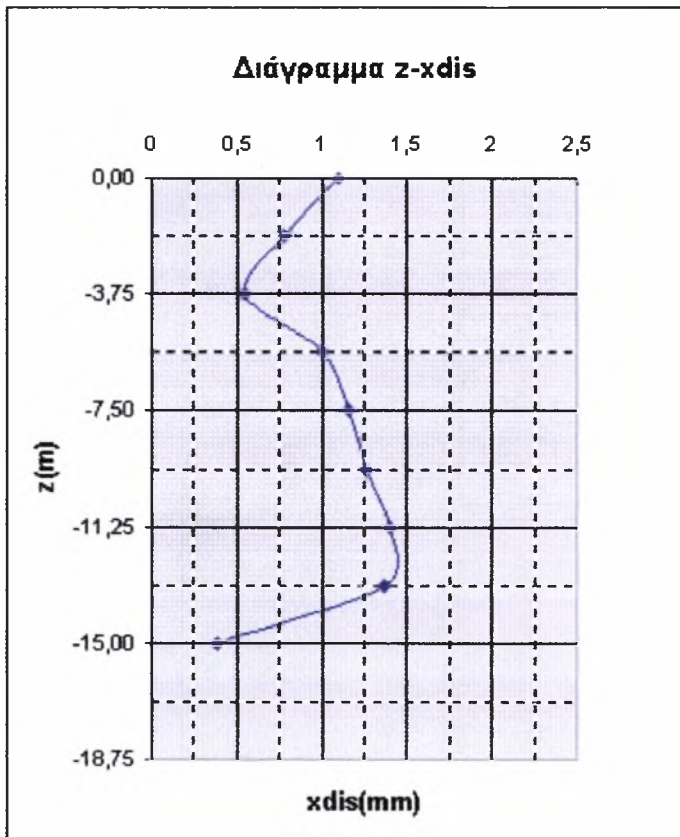
Διάγραμμα A1.12 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=3.0m$



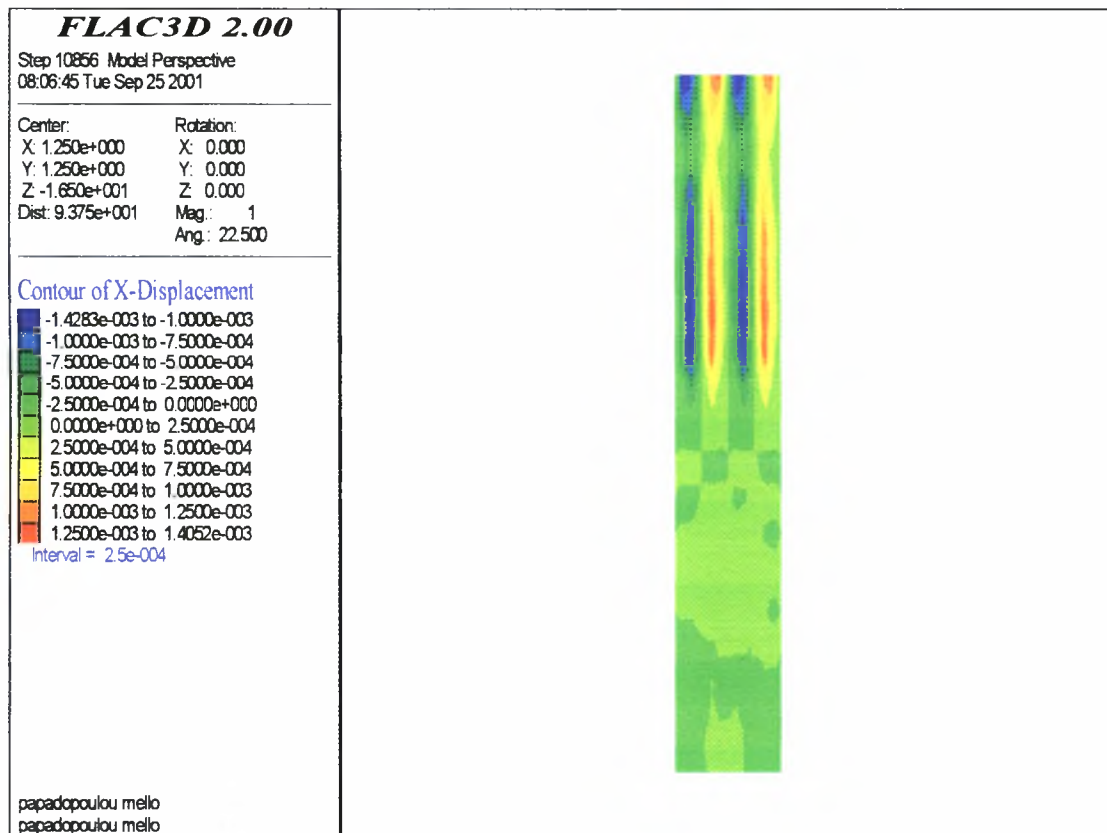
Σχήμα A1.12 Ισοαμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=3.0m$

- $s = 2.5m$

xdis(m)	z(m)
1,10	0,000
0,78	-1,875
0,55	-3,750
1,00	-5,625
1,16	-7,500
1,26	-9,375
1,40	-11,250
1,37	-13,125
0,39	-15,000



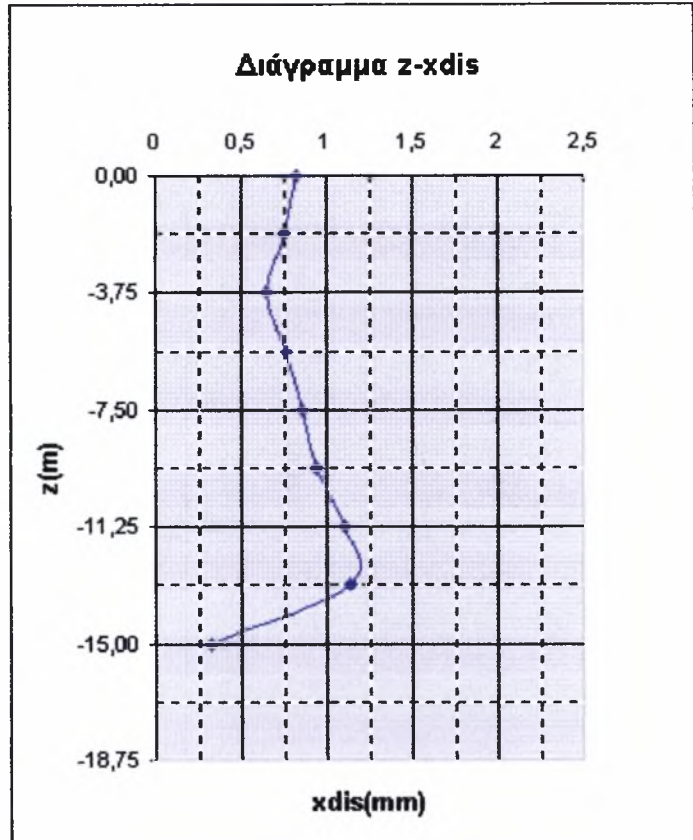
Διάγραμμα A1.13 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=2.5m$



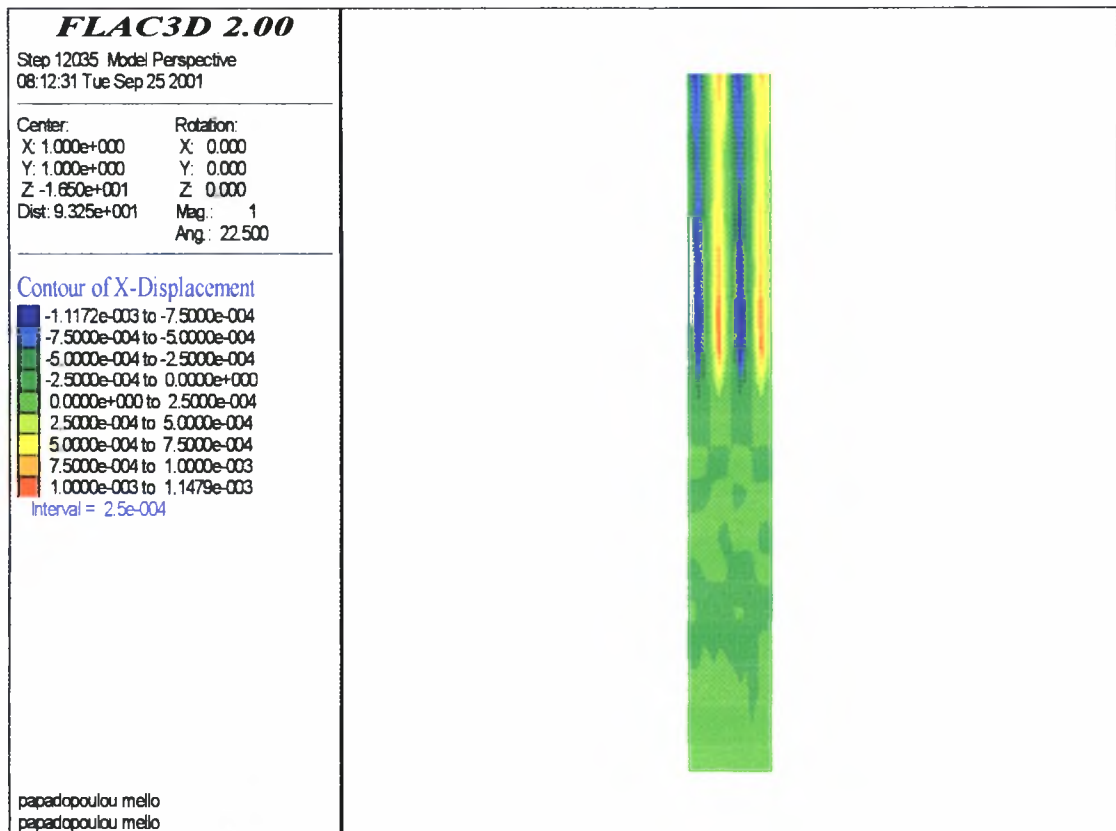
Σχήμα A1.13 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=2.5m$

- $s = 2.0m$

xdis(m)	z(m)
0,83	0,000
0,76	-1,875
0,65	-3,750
0,77	-5,625
0,86	-7,500
0,94	-9,375
1,10	-11,250
1,14	-13,125
0,33	-15,000



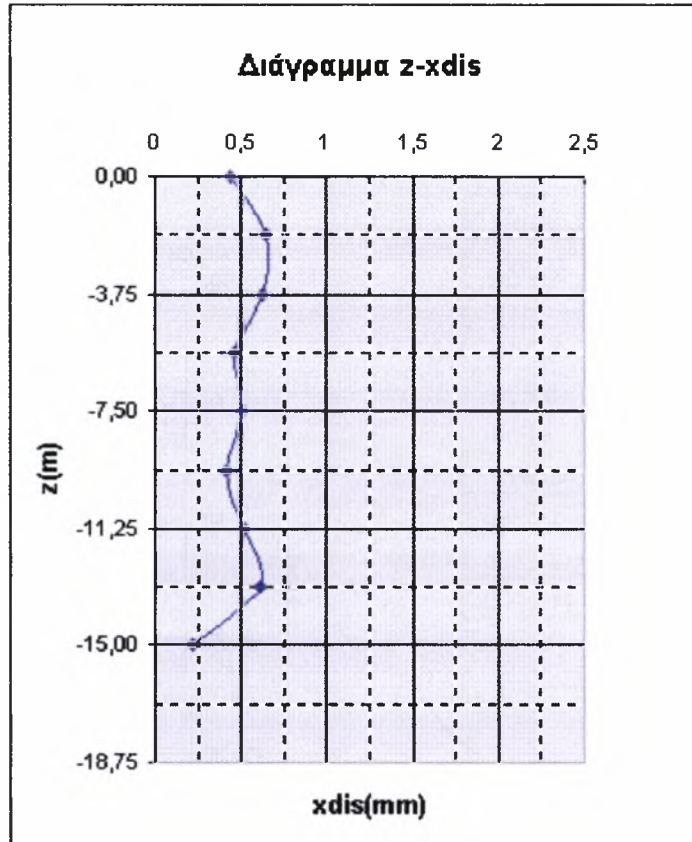
Διάγραμμα A1.14 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=2.0m$



Σχήμα A1.14 Ισομέγς οριζόντιων μετακινήσεων για $s=2.0m$

- $s = 1.5m$

xdis(m)	z(m)
0,44	0,000
0,65	-1,875
0,62	-3,750
0,46	-5,625
0,51	-7,500
0,42	-9,375
0,52	-11,250
0,61	-13,125
0,22	-15,000



Διάγραμμα A1.15 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=1.5m$

FLAC3D 2.00

Step 9986 Model Perspective
08:16:55 Tue Sep 25 2001

Center: X: 7.500e-001 Y: 7.500e-001 Z: -1.650e+001
Rotation: X: 0.000 Y: 0.000 Z: 0.000
Dist: 9.275e+001 Mag.: 1
Ang.: 22.500

Contour of X-Displacement

-7.3354e-004 to -6.0000e-004
-6.0000e-004 to -5.0000e-004
-5.0000e-004 to -4.0000e-004
-4.0000e-004 to -3.0000e-004
-3.0000e-004 to -2.0000e-004
-2.0000e-004 to -1.0000e-004
-1.0000e-004 to 0.0000e+000
0.0000e+000 to 1.0000e-004
1.0000e-004 to 2.0000e-004
2.0000e-004 to 3.0000e-004
3.0000e-004 to 4.0000e-004
4.0000e-004 to 5.0000e-004
5.0000e-004 to 6.0000e-004
6.0000e-004 to 6.5382e-004

Interval = 1.0e-004

papadopoulou melio
papadopoulou melio

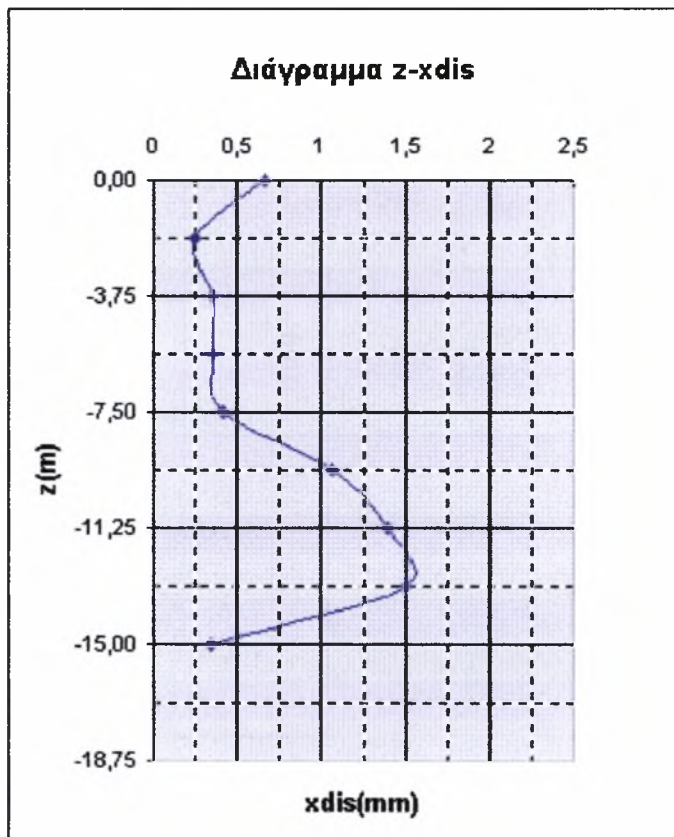


Σχήμα A1.15 Ισοιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=1.5m$

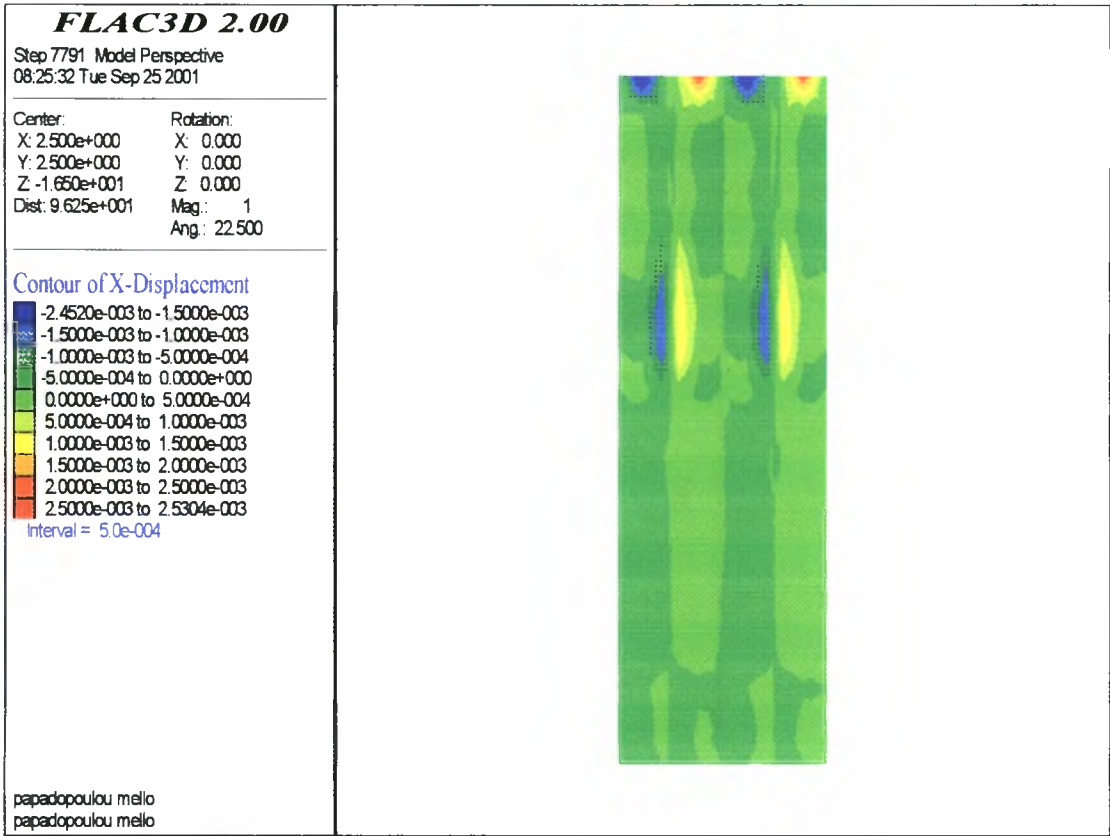
γ) Σταθερή διάμετρος $D=0.8m$

- $s = 5.0m$

xdis(m)	z(m)
0,66	0,000
0,25	-1,875
0,35	-3,750
0,36	-5,625
0,42	-7,500
1,07	-9,375
1,40	-11,250
1,50	-13,125
0,34	-15,000



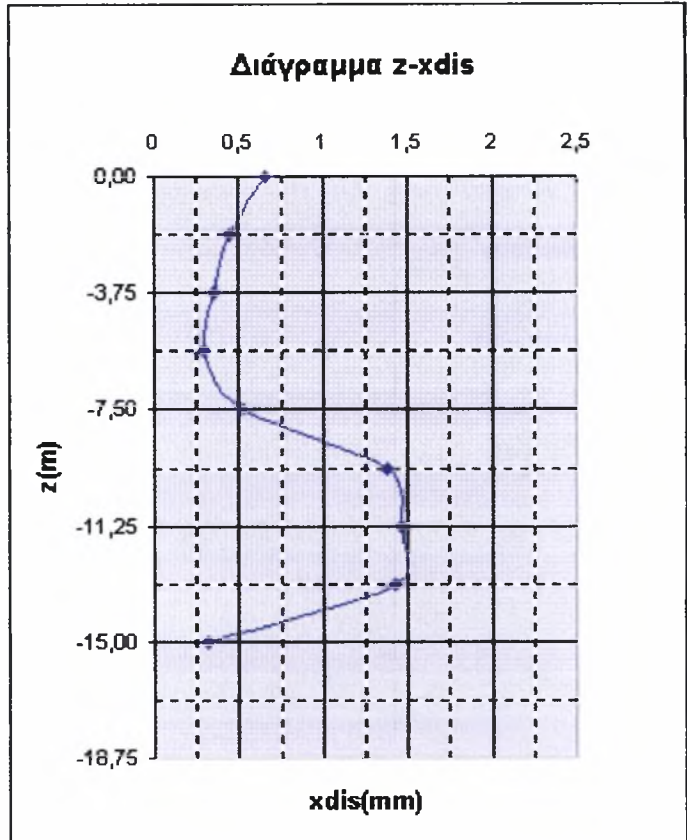
Διάγραμμα A1.16 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=5.0m$



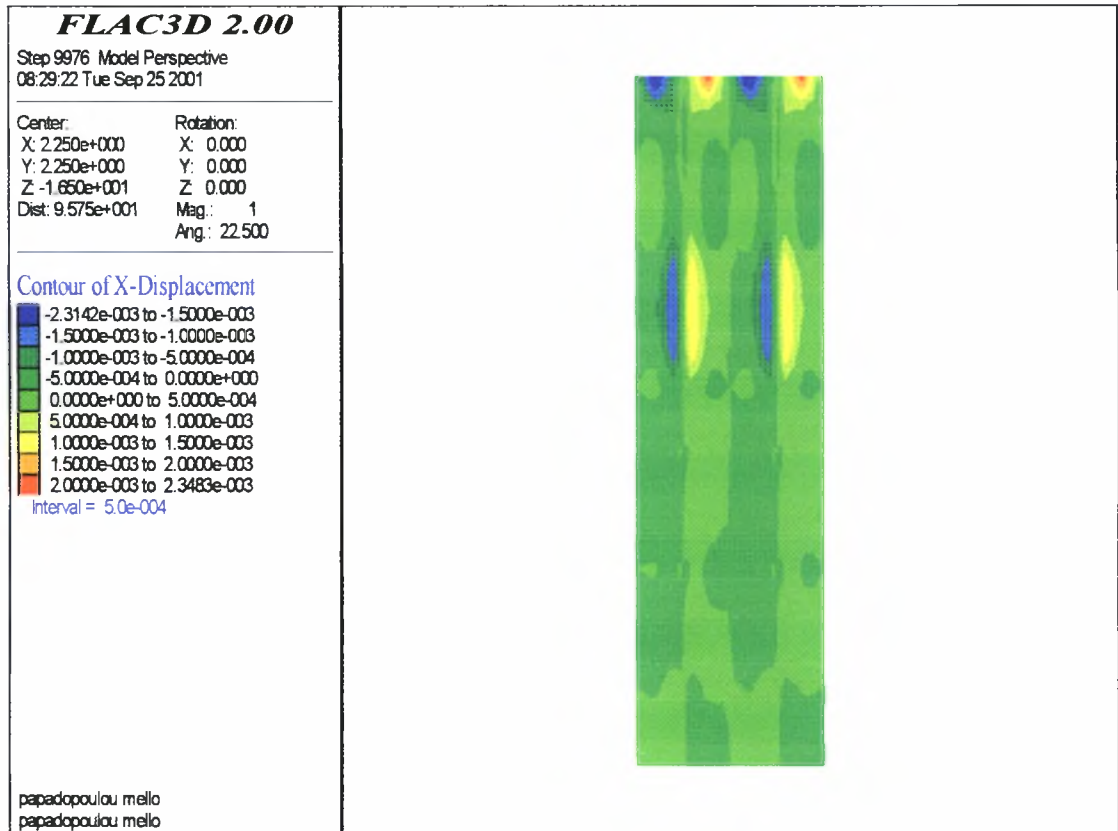
Σχήμα A1.16 Ισομέσ οριζόντιων μετακινήσεων για $s=5.0m$

- $s = 4.5m$

xdis(m)	z(m)
0,66	0,000
0,45	-1,875
0,35	-3,750
0,29	-5,625
0,52	-7,500
1,38	-9,375
1,46	-11,250
1,43	-13,125
0,32	-15,000



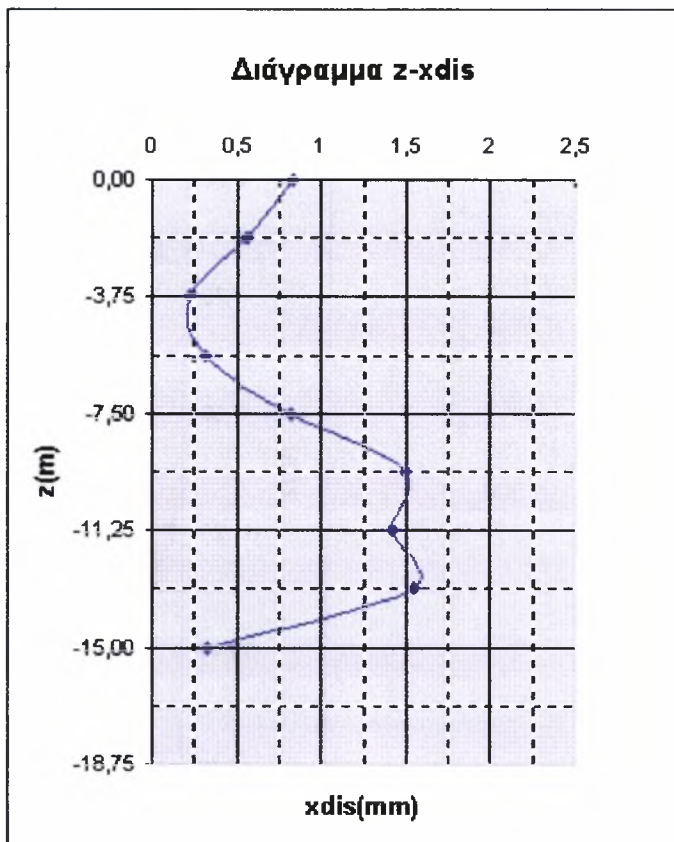
Διάγραμμα A1.17 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=4.5m$



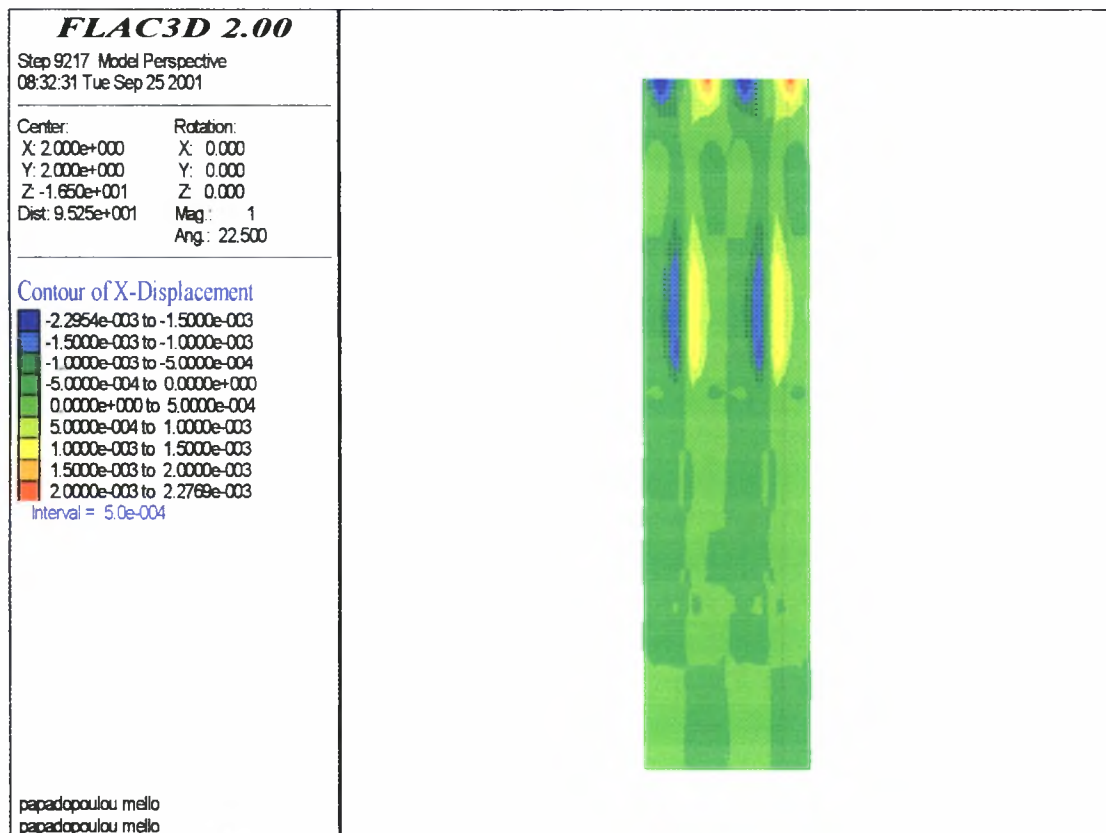
Σχήμα A1.17 Ισομέγς οριζόντιων μετακινήσεων για $s=4.5m$

- $s = 4.0m$

xdis(m)	z(m)
0,83	0,000
0,56	-1,875
0,22	-3,750
0,32	-5,625
0,82	-7,500
1,50	-9,375
1,42	-11,250
1,55	-13,125
0,33	-15,000



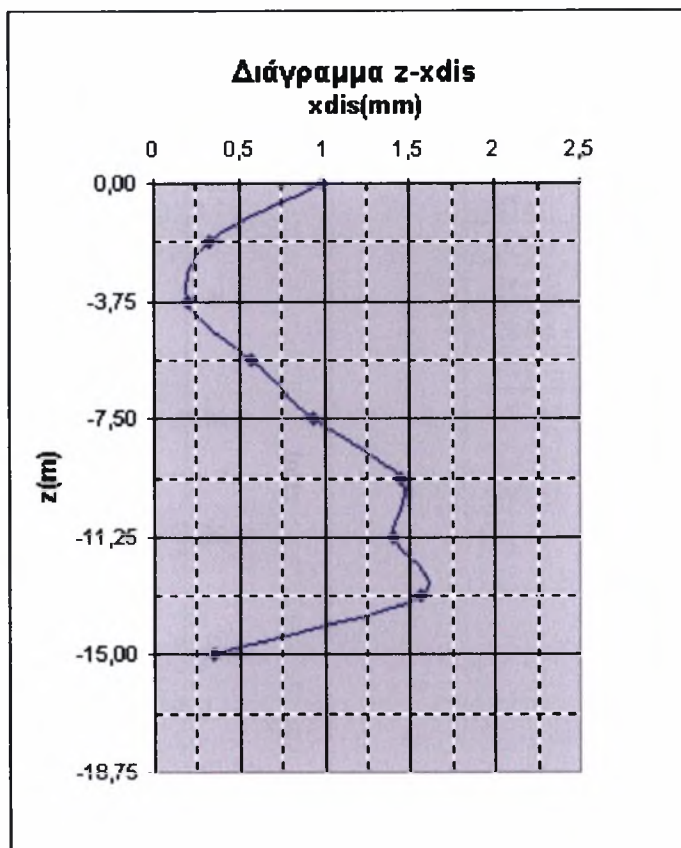
Διάγραμμα A1.18 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=4.0m$



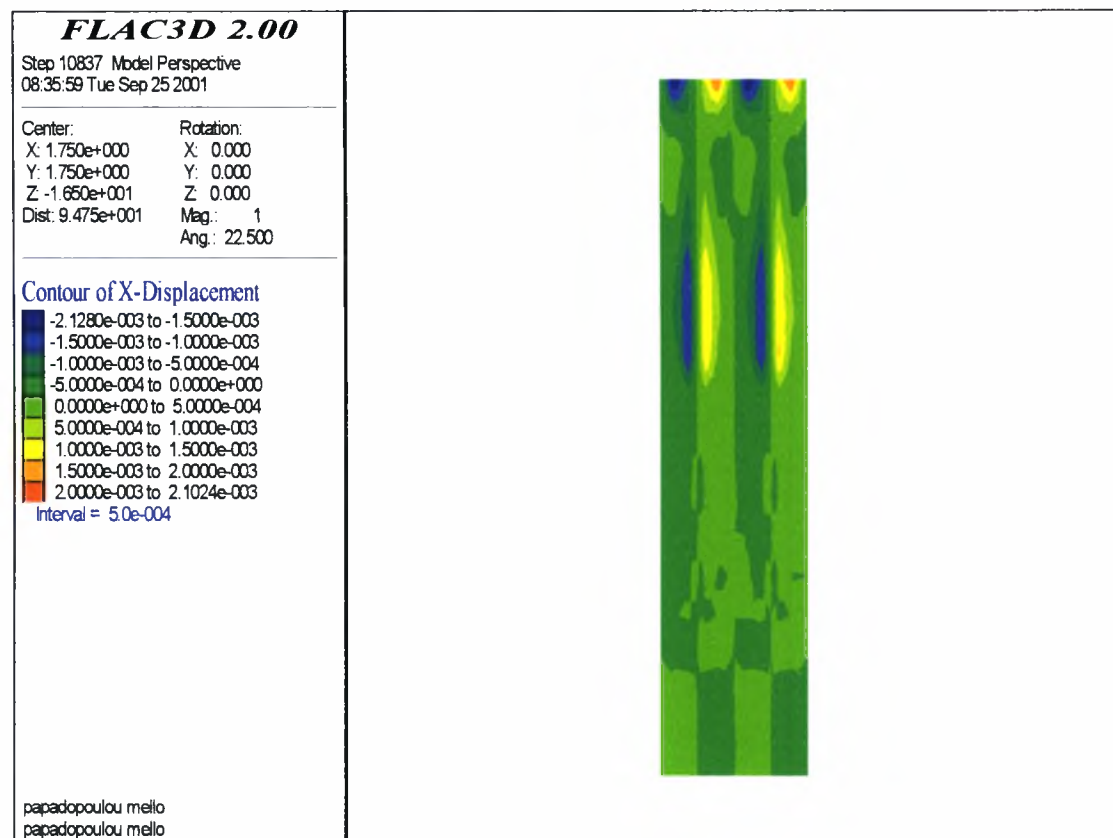
Σχήμα A1.18 Ισοιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=4.0m$

- $s = 3.5m$

xdis(m)	z(m)
0,99	0,000
0,33	-1,875
0,20	-3,750
0,57	-5,625
0,93	-7,500
1,45	-9,375
1,40	-11,250
1,56	-13,125
0,35	-15,000



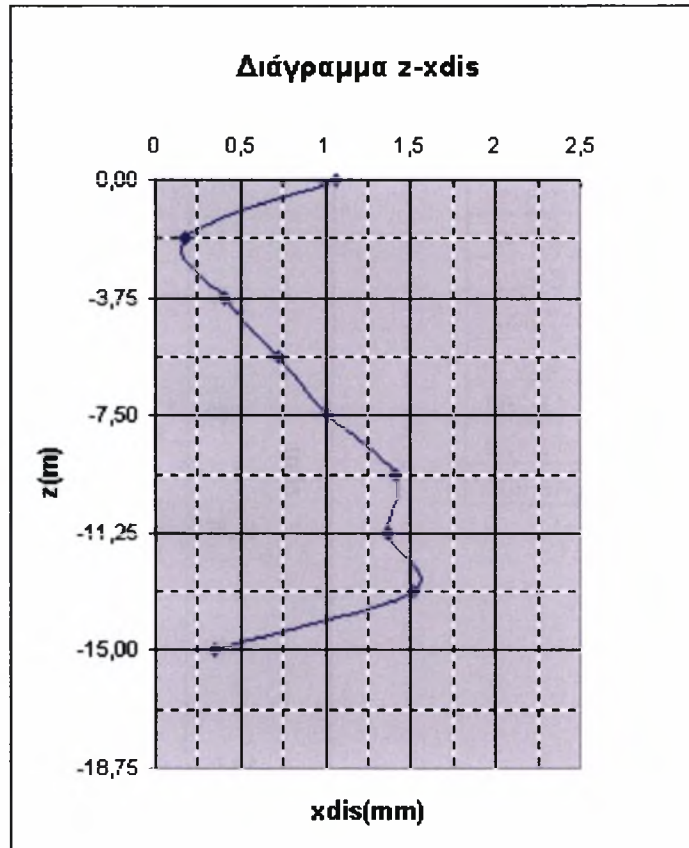
Διάγραμμα A1.19 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=3.5m$



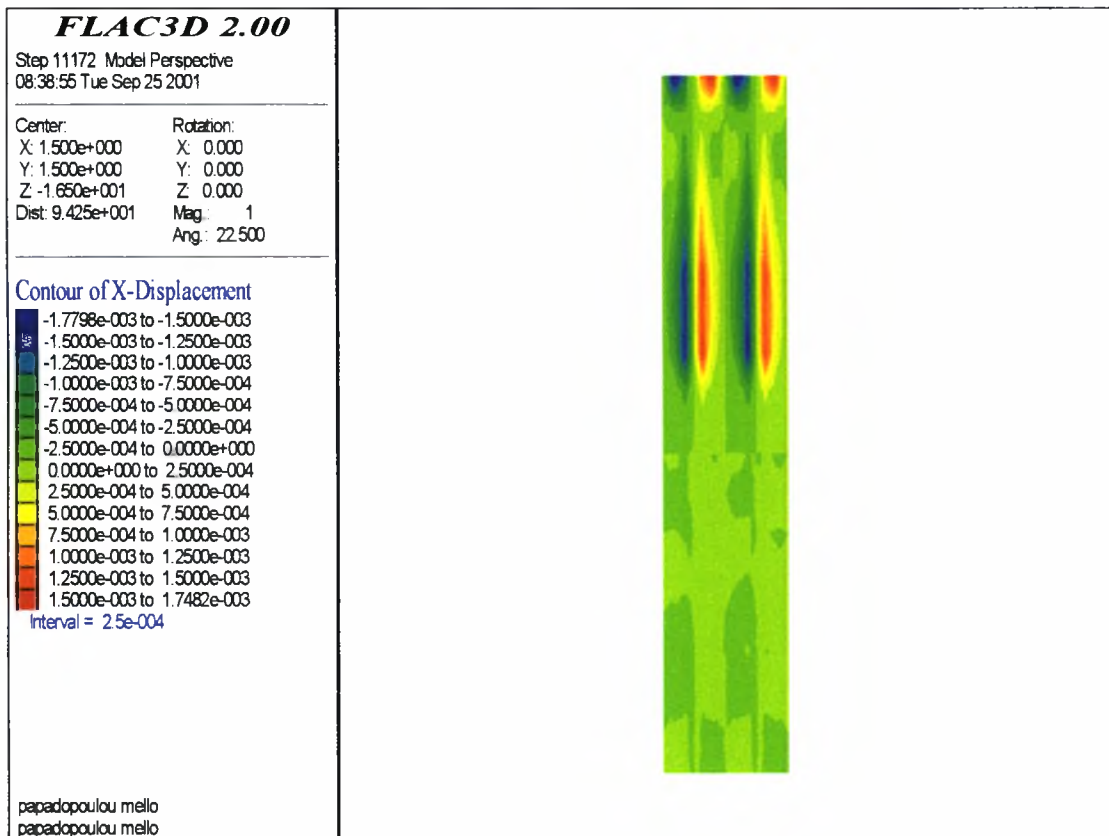
Σχήμα A1.19 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=3.5m$

- $s = 3.0m$

xdis(m)	z(m)
1,06	0,000
0,17	-1,875
0,41	-3,750
0,73	-5,625
1,02	-7,500
1,41	-9,375
1,37	-11,250
1,52	-13,125
0,35	-15,000



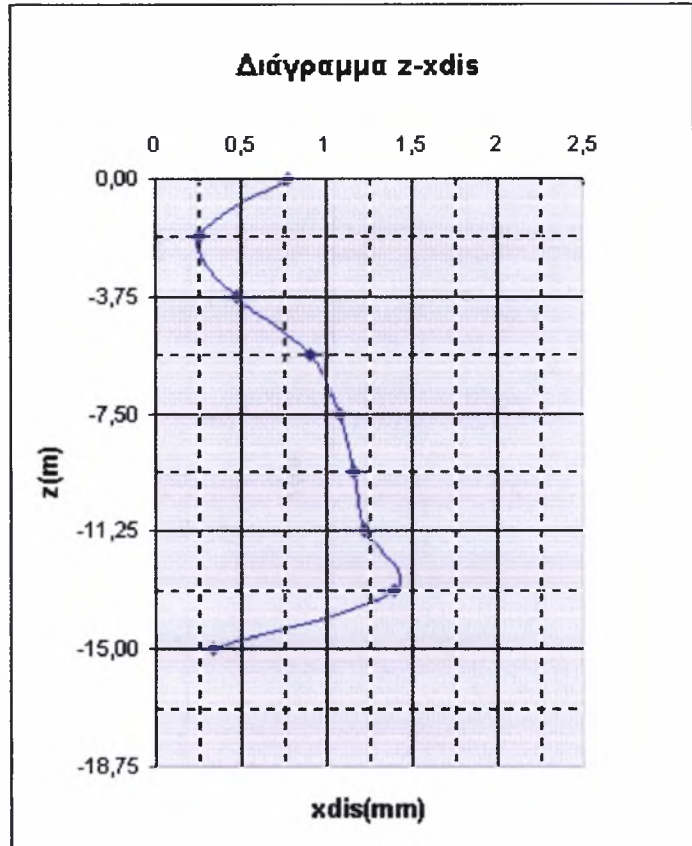
Διάγραμμα A1.20 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=3.0m$



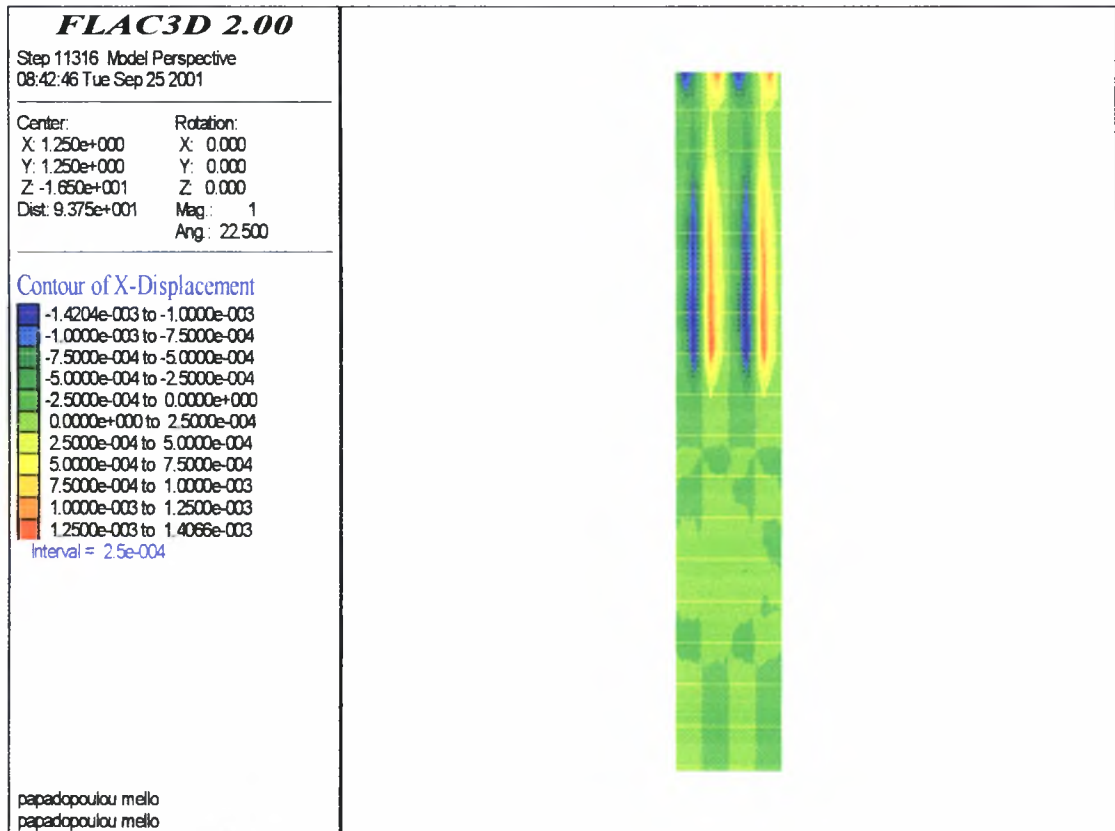
Σχήμα A1.20 Ισομέσ οριζόντιων μετακινήσεων για $s=3.0m$

- $s = 2.5m$

xdis(m)	z(m)
0,78	0,000
0,26	-1,875
0,48	-3,750
0,91	-5,625
1,08	-7,500
1,16	-9,375
1,22	-11,250
1,40	-13,125
0,34	-15,000



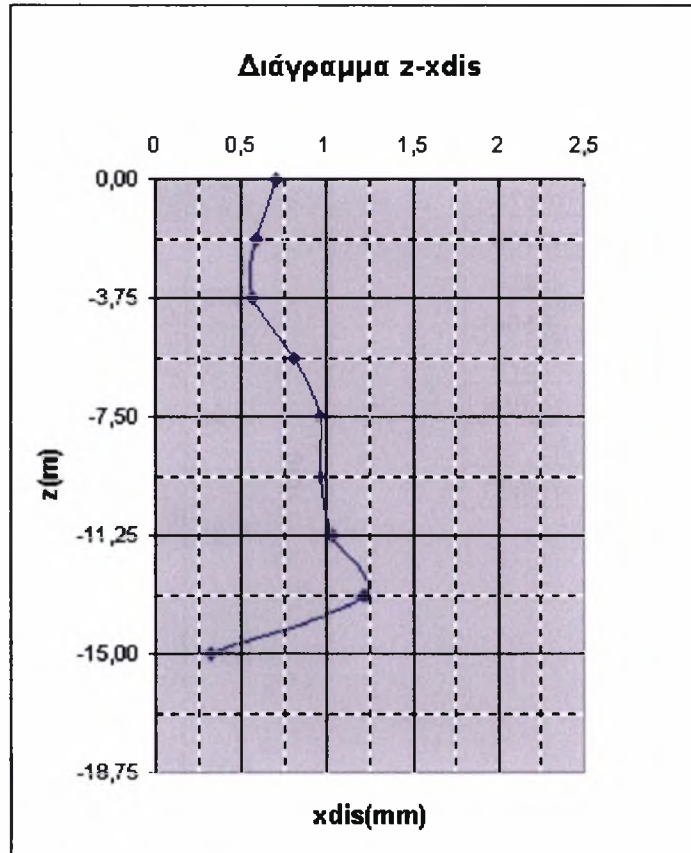
Διάγραμμα A1.21 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=2.5m$



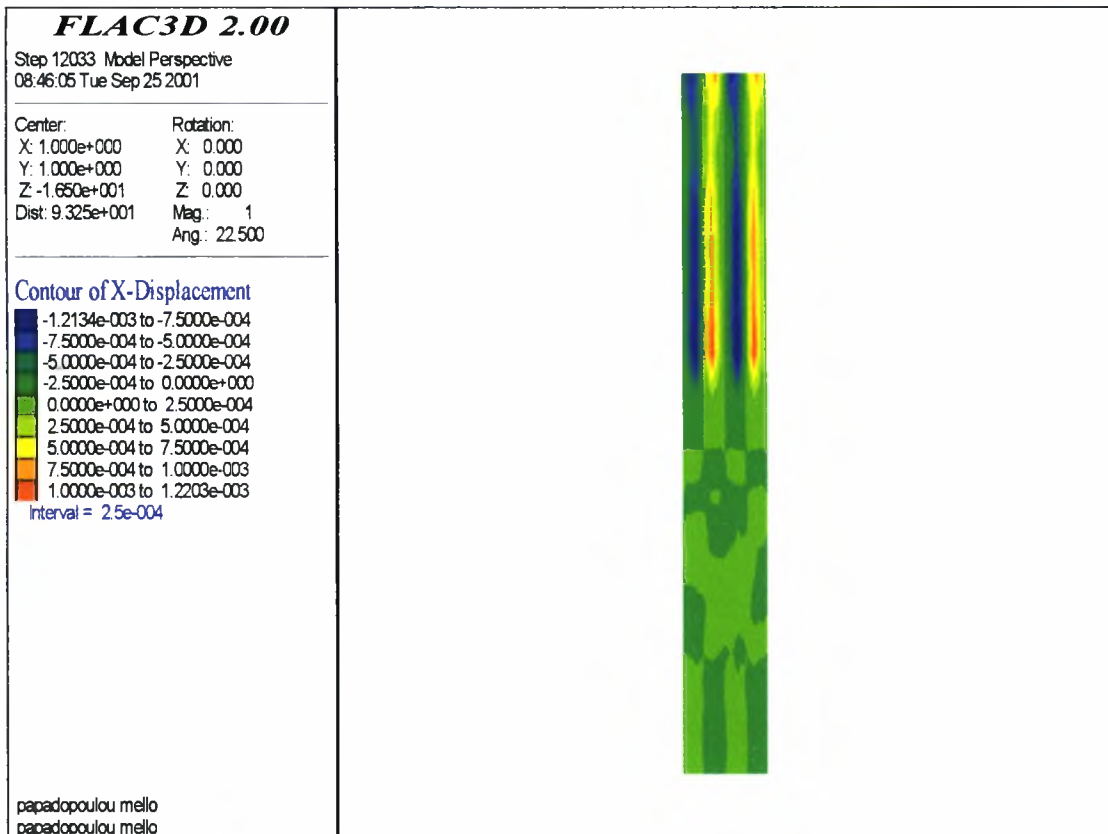
Σχήμα A1.21 Ισομέγς οριζόντιων μετακινήσεων για $s=2.5m$

- $s = 2.0m$

xdis(m)	z(m)
0,71	0,000
0,59	-1,875
0,57	-3,750
0,81	-5,625
0,96	-7,500
0,96	-9,375
1,03	-11,250
1,22	-13,125
0,32	-15,000



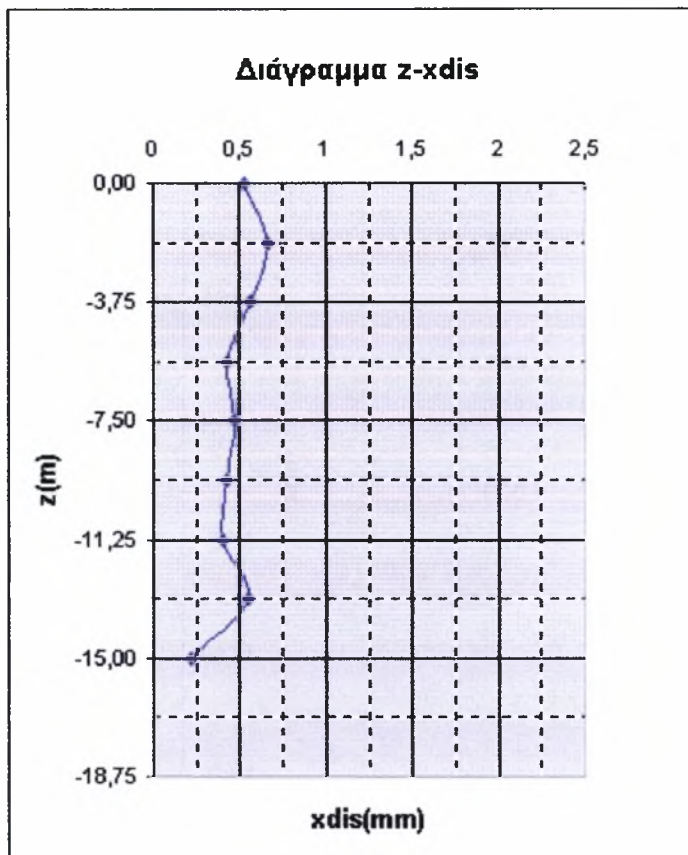
Διάγραμμα A1.22 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s = 2.0m$



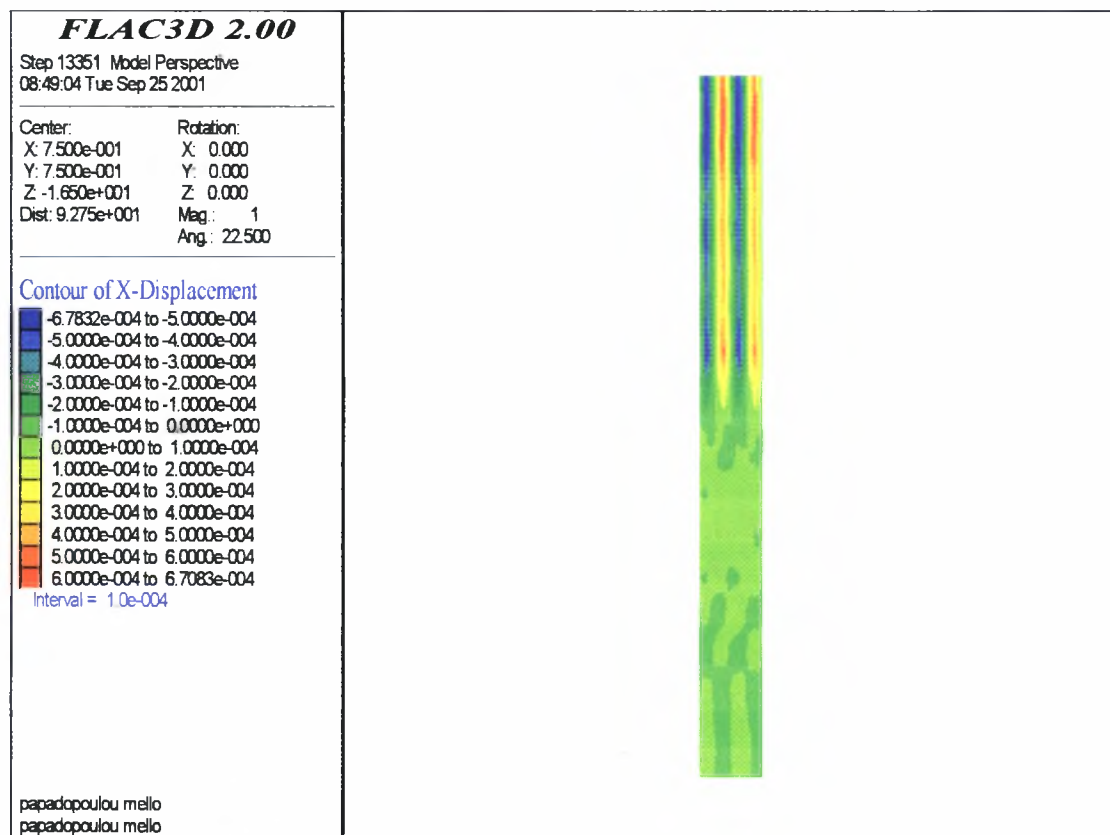
Σχήμα A1.22 Ισομέγς οριζόντων μετακινήσεων για $s = 2.0m$

- $s = 1.5m$

xdis(m)	z(m)
0,53	0,000
0,67	-1,875
0,56	-3,750
0,43	-5,625
0,47	-7,500
0,43	-9,375
0,40	-11,250
0,55	-13,125
0,22	-15,000



Διάγραμμα A1.23 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=1.5m$

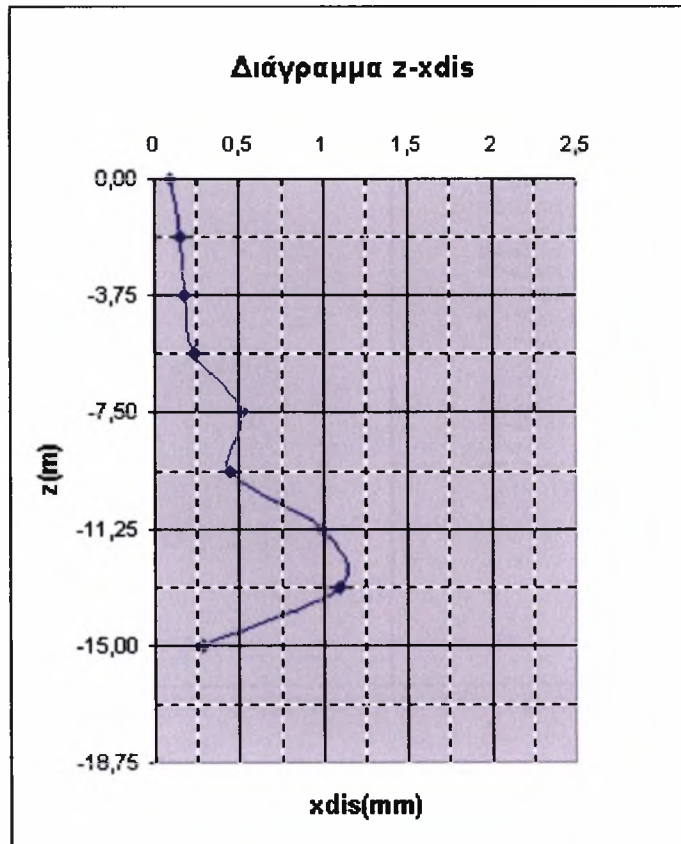


Σχήμα A1.23 Ισοαμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=1.5m$

δ) Σταθερή διάμετρος $D=0.6m$

- $s = 5.0m$

xdis(m)	z(m)
0,10	0,000
0,15	-1,875
0,18	-3,750
0,24	-5,625
0,52	-7,500
0,45	-9,375
0,99	-11,250
1,10	-13,125
0,28	-15,000



Διάγραμμα A1.24 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=5.0m$

FLAC3D 2.00

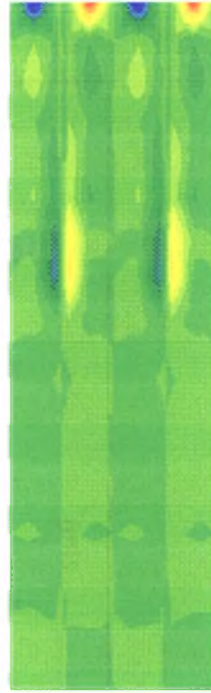
Step 8554 Model Perspective
08:55:09 Tue Sep 25 2001

Center:	Rotation:
X: 2.500e+000	X: 0.000
Y: 2.500e+000	Y: 0.000
Z: -1.650e+001	Z: 0.000
Dist: 9.625e+001	Mag.: 1
	Ang.: 22.500

Contour of X-Displacement

■	-1.9357e-003 to -1.5000e-003
■	-1.5000e-003 to -1.2500e-003
■	-1.2500e-003 to -1.0000e-003
■	-1.0000e-003 to -7.5000e-004
■	-7.5000e-004 to -5.0000e-004
■	-5.0000e-004 to -2.5000e-004
■	-2.5000e-004 to 0.0000e+000
■	0.0000e+000 to 2.5000e-004
■	2.5000e-004 to 5.0000e-004
■	5.0000e-004 to 7.5000e-004
■	7.5000e-004 to 1.0000e-003
■	1.0000e-003 to 1.2500e-003
■	1.2500e-003 to 1.5000e-003
■	1.5000e-003 to 1.7500e-003
■	1.7500e-003 to 1.9526e-003

Interval = 2.5e-004

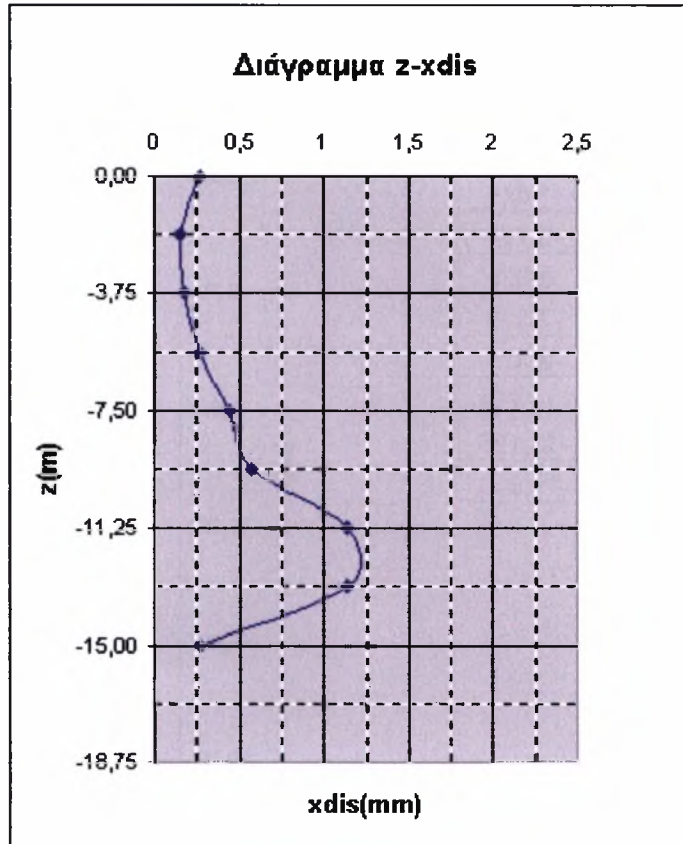


papadopoulou mello
papadopoulou mello

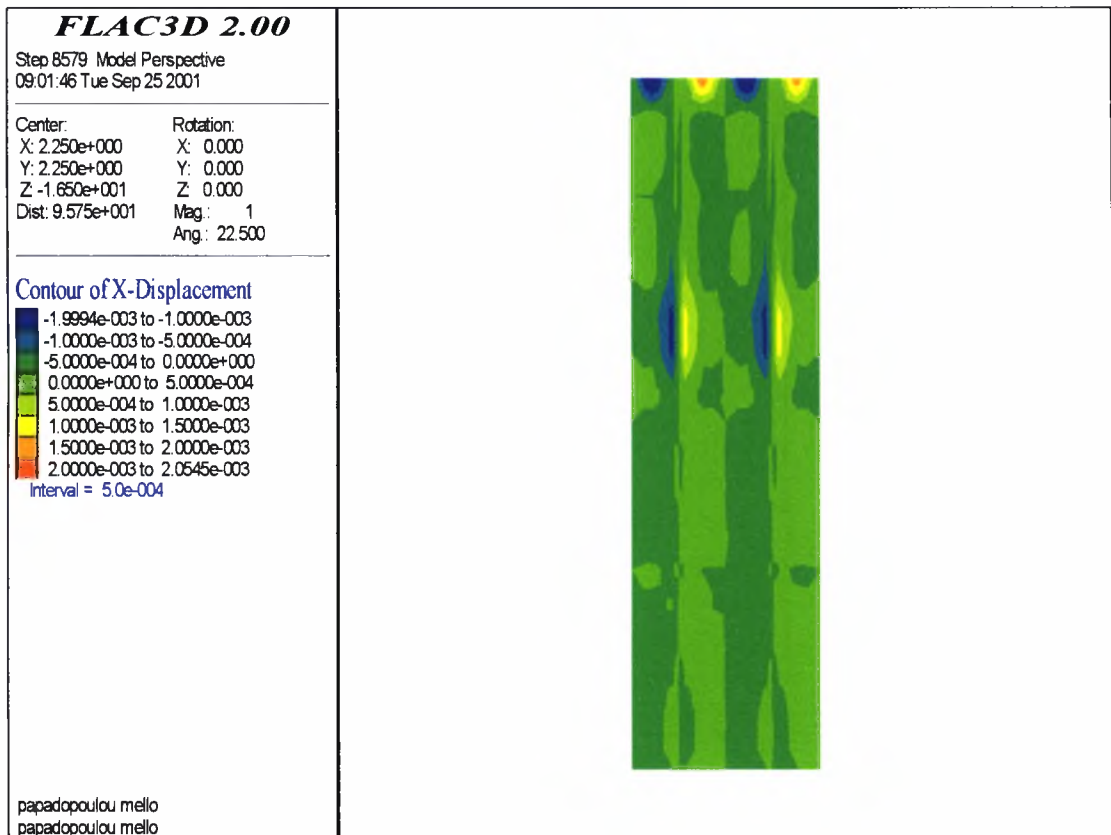
Σχήμα Α1.24 Ισοάμες οριζόντιων μετακινήσεων για $s=5.0m$

- $s = 4.5m$

xdis(m)	z(m)
0,27	0,000
0,15	-1,875
0,18	-3,750
0,27	-5,625
0,45	-7,500
0,58	-9,375
1,14	-11,250
1,14	-13,125
0,27	-15,000



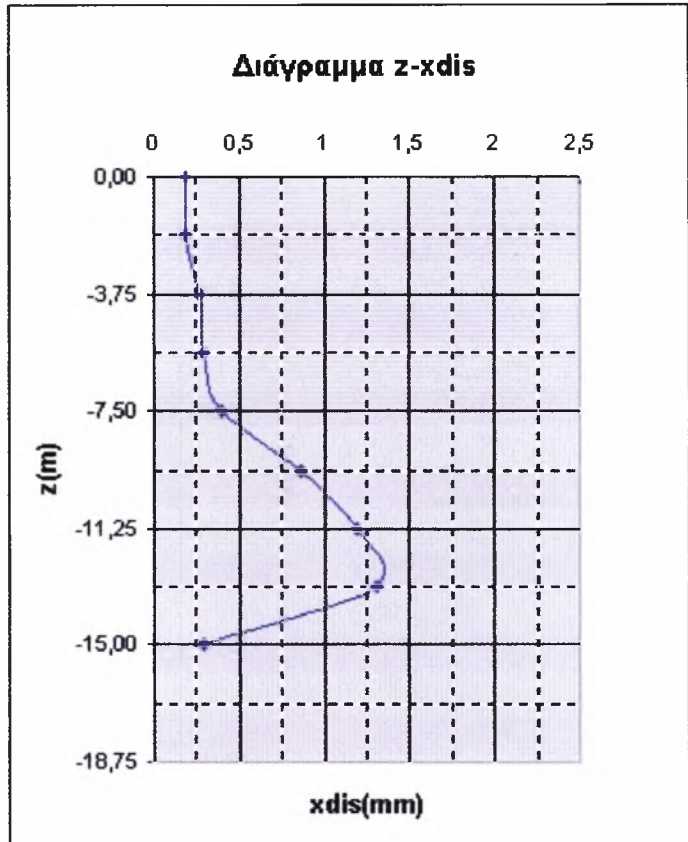
Διάγραμμα A1.25 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=4.5m$



Σχήμα A1.25 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=4.5m$

- $s = 4.0m$

xdis(m)	z(m)
0,19	0,000
0,19	-1,875
0,27	-3,750
0,29	-5,625
0,4	-7,500
0,86	-9,375
1,19	-11,250
1,31	-13,125
0,29	-15,000



Διάγραμμα A1.26 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=4.0m$

FLAC3D 2.00
 Step 10010 Model Perspective
 09:05:44 Tue Sep 25 2001

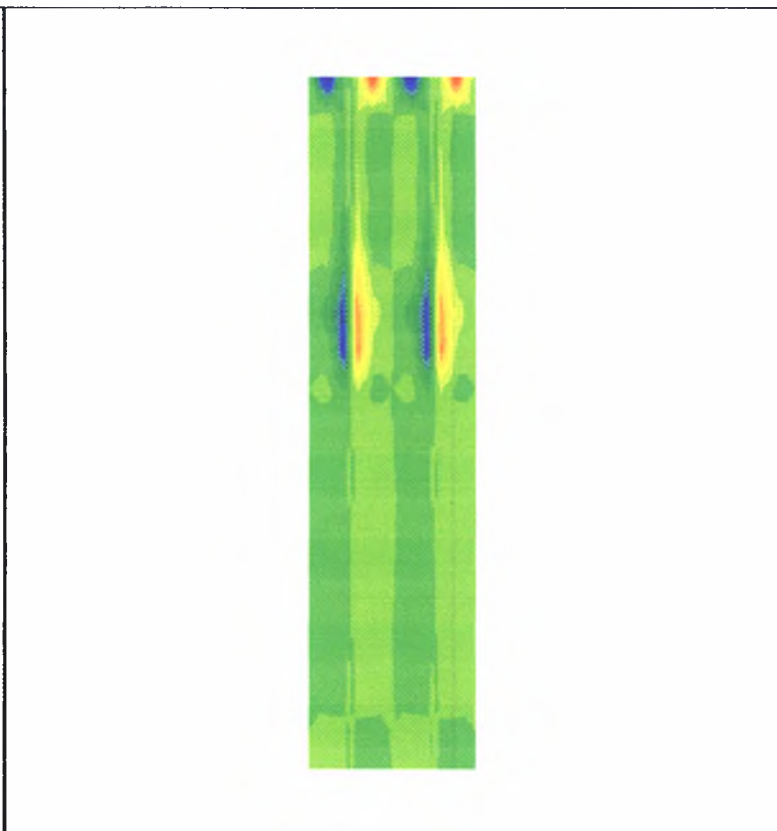
Center: X: 2.000e+000 Y: 2.000e+000 Z: -1.650e+001 Dist: 9.525e+001
 Rotation: X: 0.000 Y: 0.000 Z: 0.000
 Mag.: 1
 Ang.: 22.500

Contour of X-Displacement

- 1.6970e-003 to -1.2500e-003
- 1.2500e-003 to -1.0000e-003
- 1.0000e-003 to -7.5000e-004
- 7.5000e-004 to -5.0000e-004
- 5.0000e-004 to -2.5000e-004
- 2.5000e-004 to 0.0000e+000
- 0.0000e+000 to 2.5000e-004
- 2.5000e-004 to 5.0000e-004
- 5.0000e-004 to 7.5000e-004
- 7.5000e-004 to 1.0000e-003
- 1.0000e-003 to 1.2500e-003
- 1.2500e-003 to 1.5000e-003
- 1.5000e-003 to 1.6755e-003

Interval = 2.5e-004

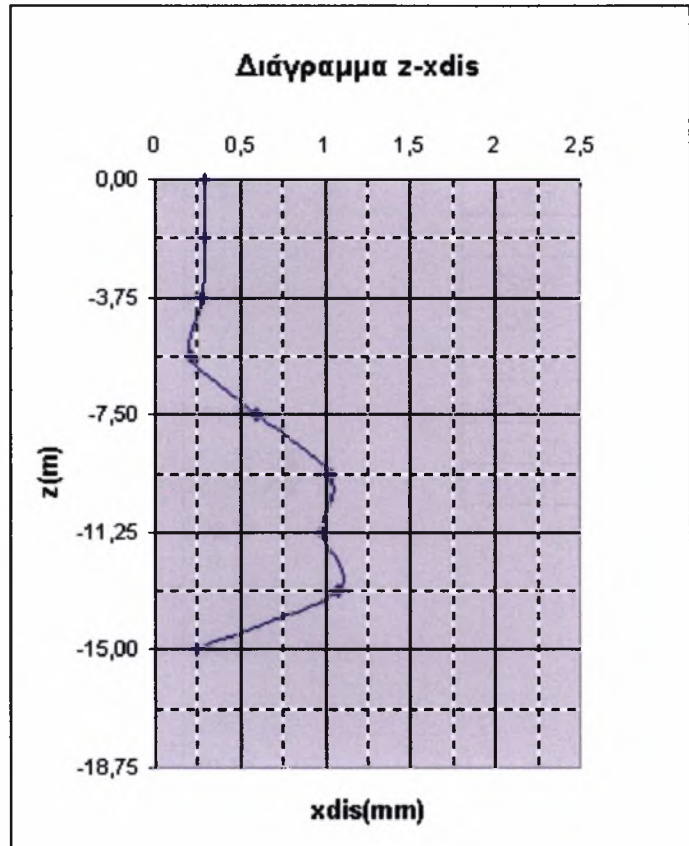
papadopoulos mello
 papadopoulos mello



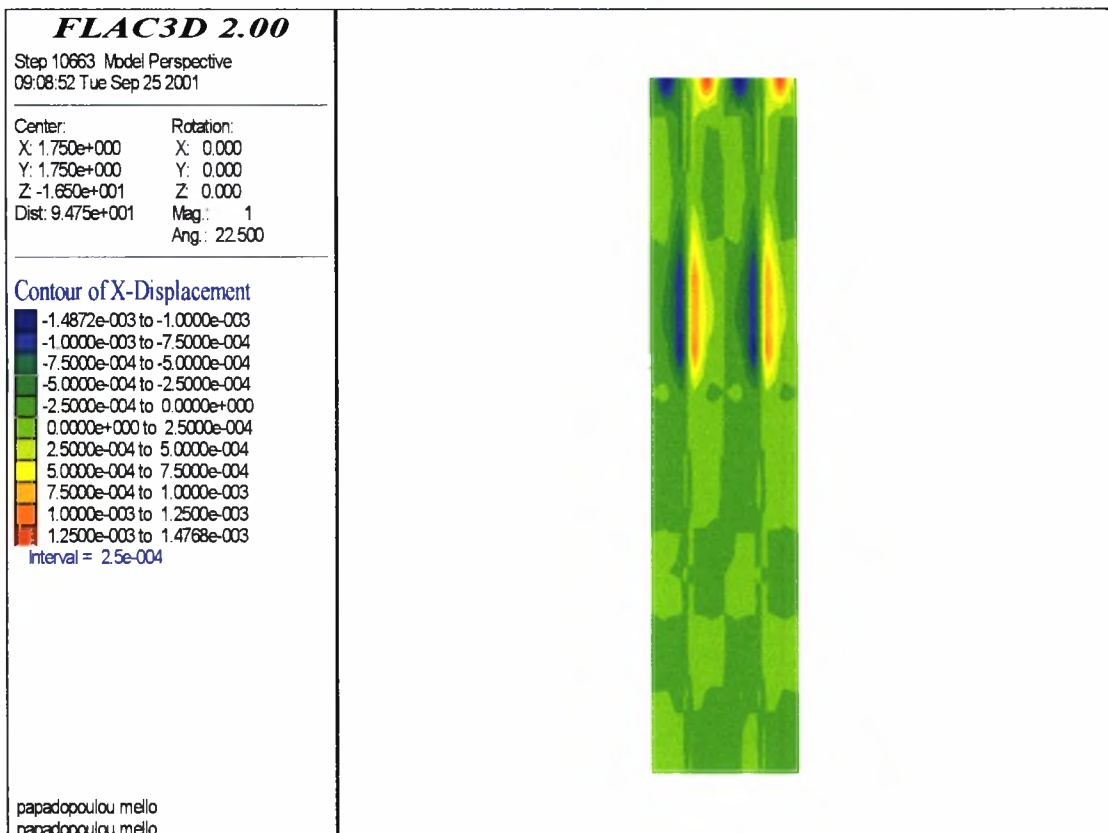
Σχήμα A1.26 Ισομέσ οριζόντιων μετακινήσεων για $s=4.0m$

- $s = 3.5m$

xdis(m)	z(m)
0,29	0,000
0,29	-1,875
0,28	-3,750
0,21	-5,625
0,59	-7,500
1,03	-9,375
0,98	-11,250
1,08	-13,125
0,25	-15,000



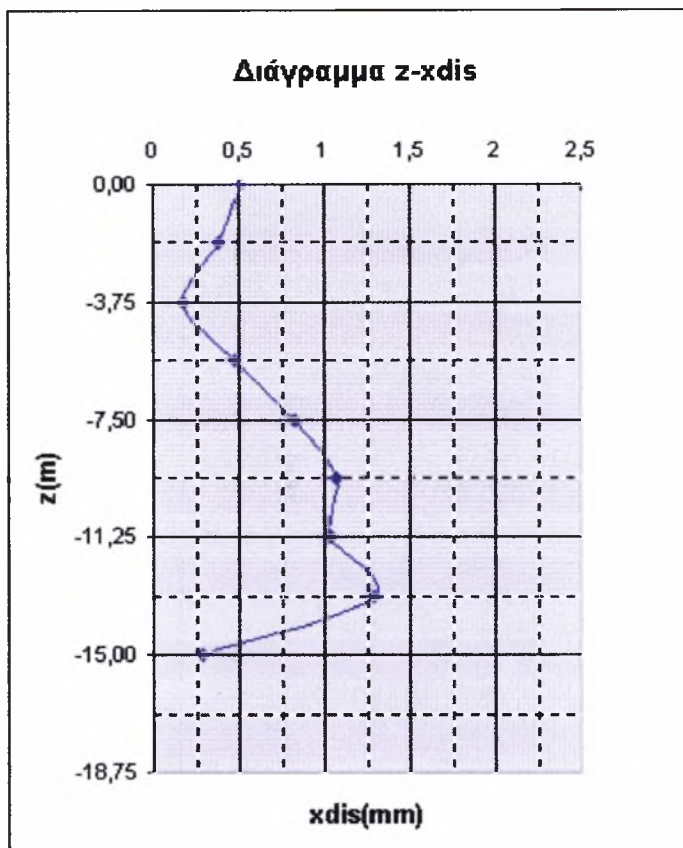
Διάγραμμα A1.27 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=3.5m$



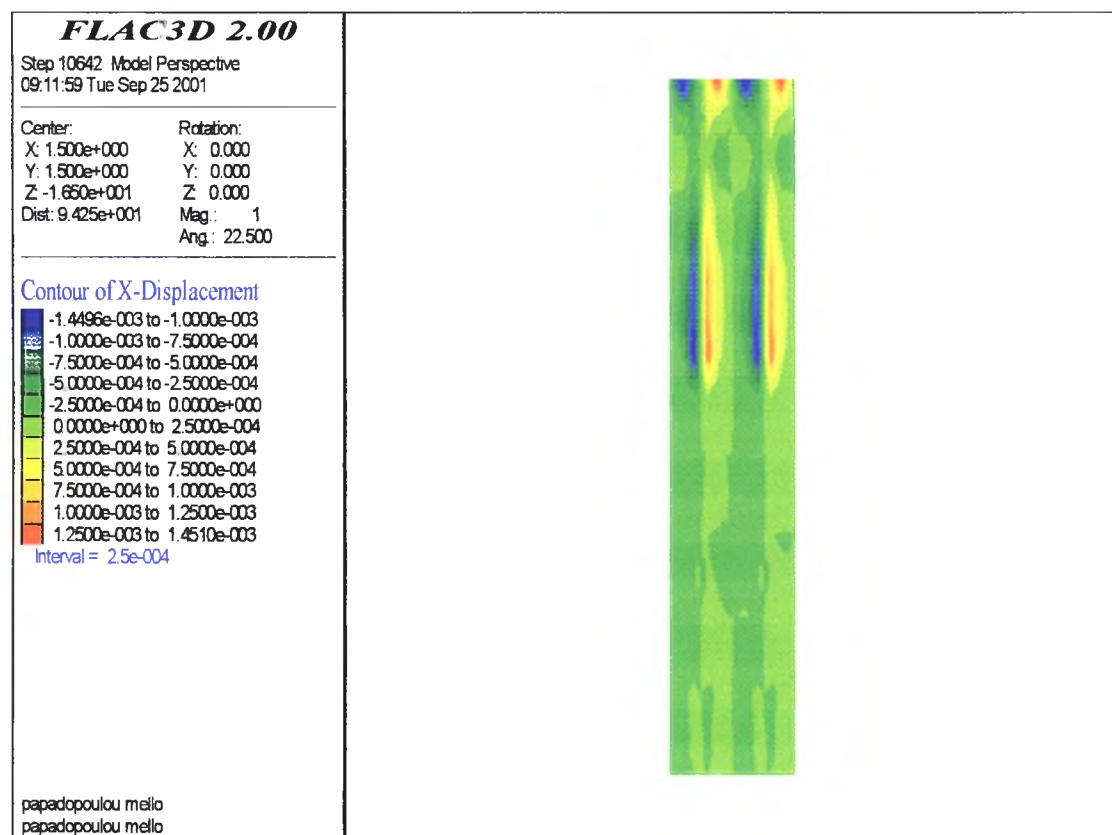
Σχήμα A1.27 Ισομέρες οριζόντιων μετακινήσεων για $s=3.5m$

- $s = 3.0m$

xdis(m)	z(m)
0,51	0,000
0,38	-1,875
0,18	-3,750
0,48	-5,625
0,83	-7,500
1,07	-9,375
1,04	-11,250
1,29	-13,125
0,29	-15,000



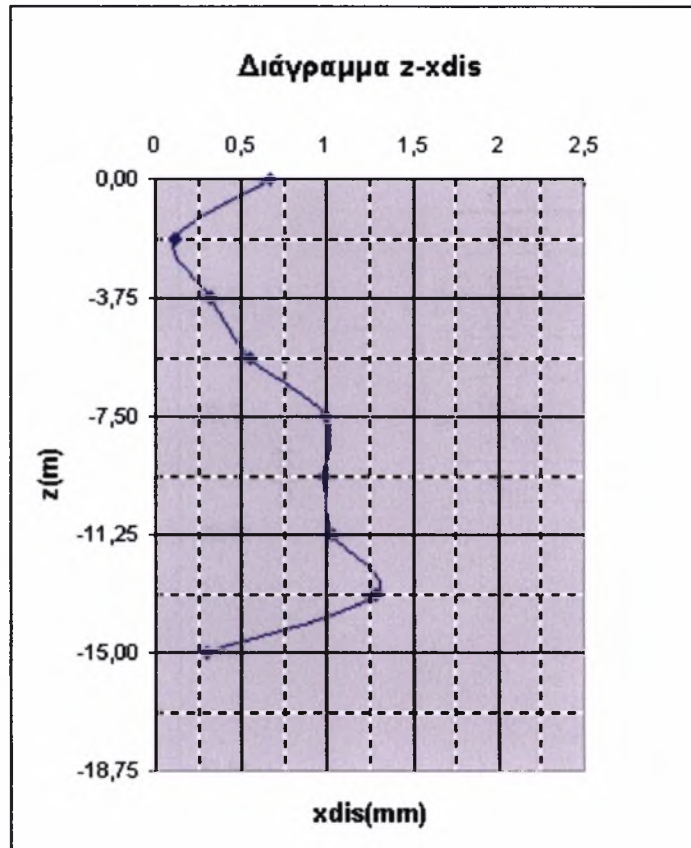
Διάγραμμα A1.28 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=3.0m$



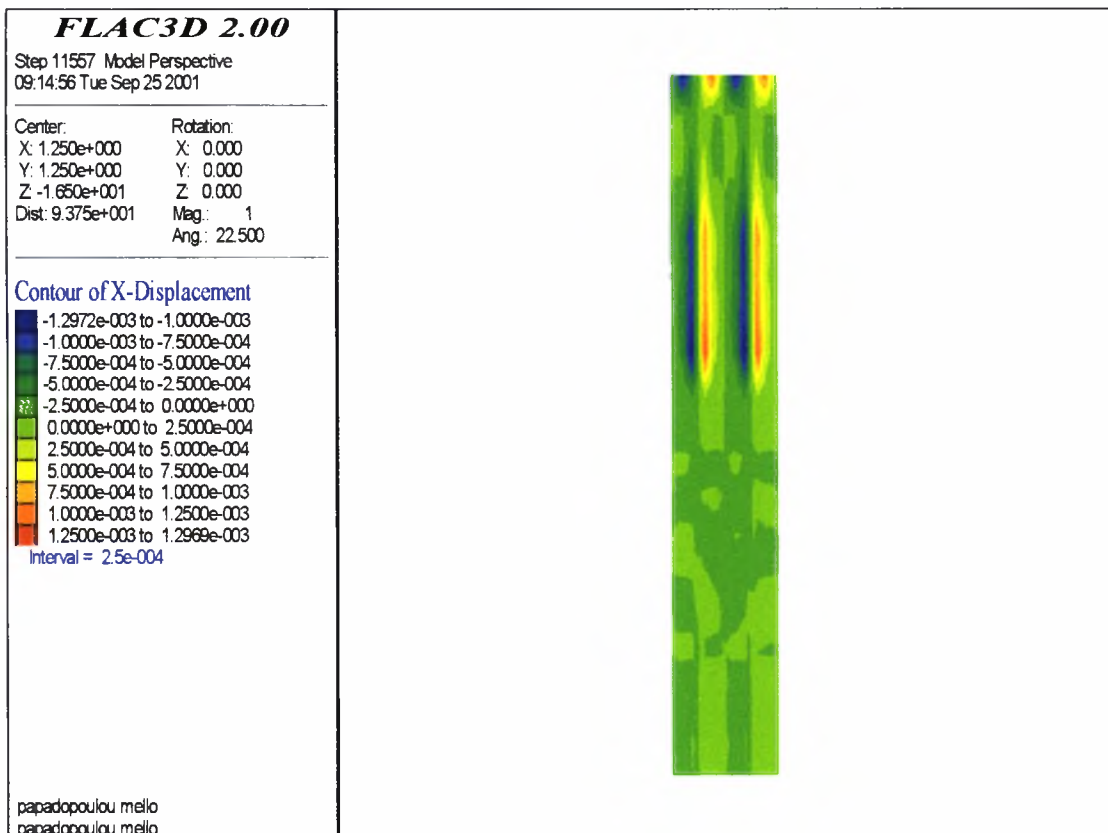
Σχήμα A1.28 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=3.0m$

- $s = 2.5m$

xdis(m)	z(m)
0,67	0,000
0,12	-1,875
0,32	-3,750
0,56	-5,625
1,00	-7,500
0,98	-9,375
1,03	-11,250
1,29	-13,125
0,30	-15,000



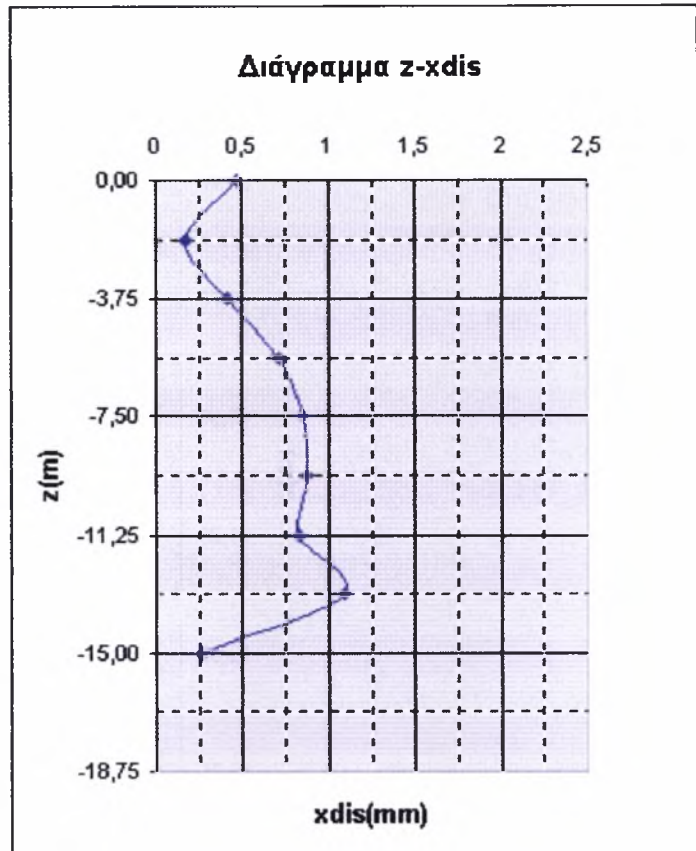
Διάγραμμα A1.29 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=2.5m$



Σχήμα A1.29 Ισομέγς οριζόντιων μετακινήσεων για $s=2.5m$

- $s = 2.0m$

xdis(m)	z(m)
0,47	0,000
0,17	-1,875
0,42	-3,750
0,72	-5,625
0,85	-7,500
0,88	-9,375
0,83	-11,250
1,10	-13,125
0,26	-15,000



Διάγραμμα A1.30 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=2.0m$

FLAC3D 2.00

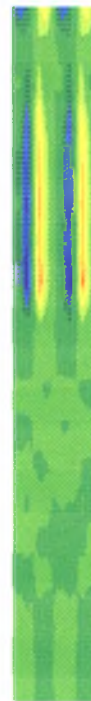
Step 12522 Model Perspective
09:17:58 Tue Sep 25 2001

Center: Rotation:
X: 1.000e+000 X: 0.000
Y: 1.000e+000 Y: 0.000
Z: -1.650e+001 Z: 0.000
Dist: 9.325e+001 Mag: 1
 Ang: 22.500

Contour of X-Displacement

■ -1.0643e-003 to -7.5000e-004
■ -7.5000e-004 to -5.0000e-004
■ -5.0000e-004 to -2.5000e-004
■ -2.5000e-004 to 0.0000e+000
■ 0.0000e+000 to 2.5000e-004
■ 2.5000e-004 to 5.0000e-004
■ 5.0000e-004 to 7.5000e-004
■ 7.5000e-004 to 1.0000e-003
■ 1.0000e-003 to 1.0976e-003
 Interval = 2.5e-004

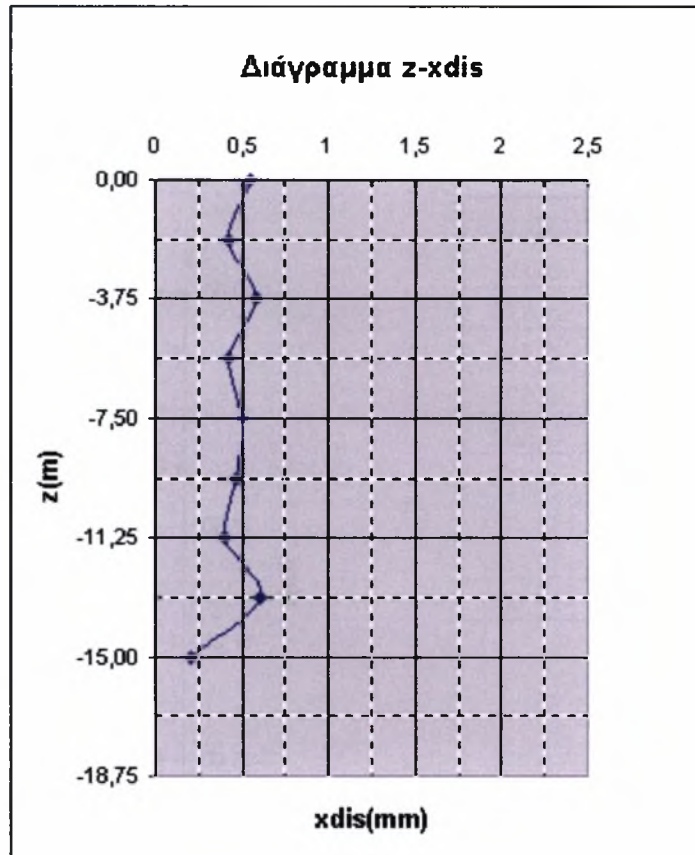
papadopoulos mello
papadopoulos mello



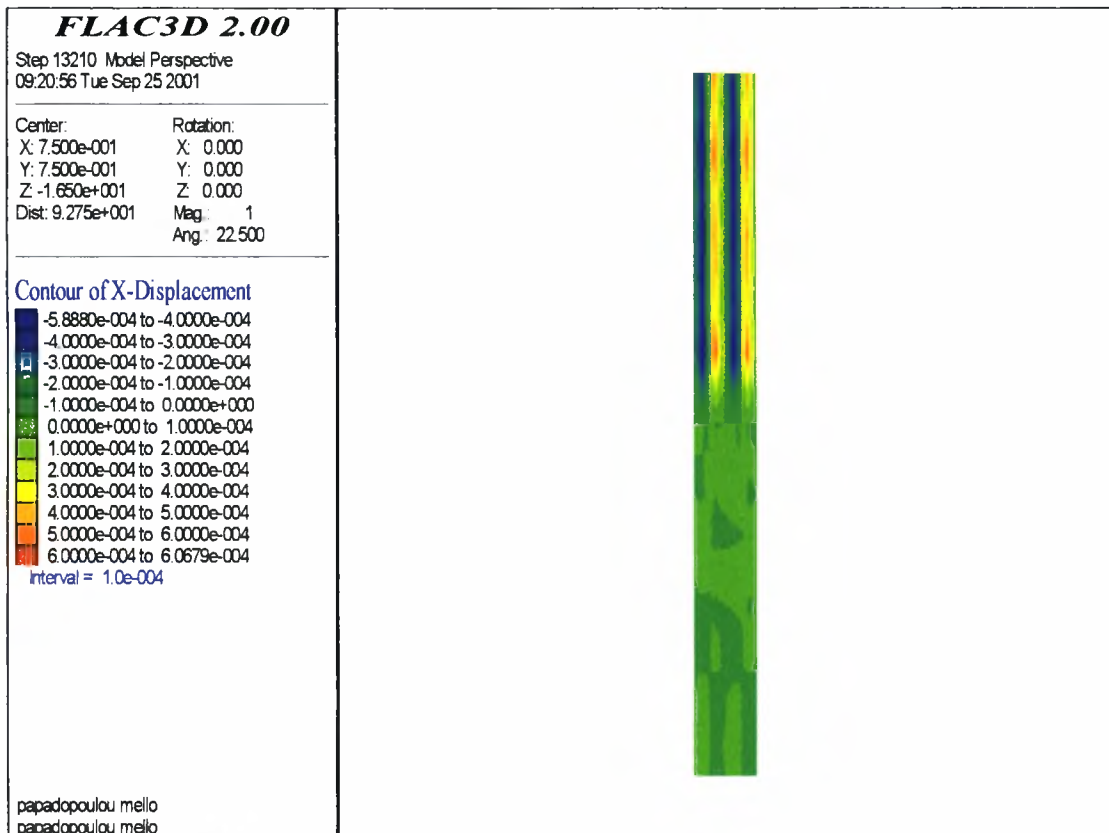
Σχήμα A1.30 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=2.0m$

- $s = 1.5m$

xdis(m)	z(m)
0,55	0,000
0,43	-1,875
0,58	-3,750
0,42	-5,625
0,51	-7,500
0,47	-9,375
0,40	-11,250
0,61	-13,125
0,21	-15,000



Διάγραμμα A1.31 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=1.5m$

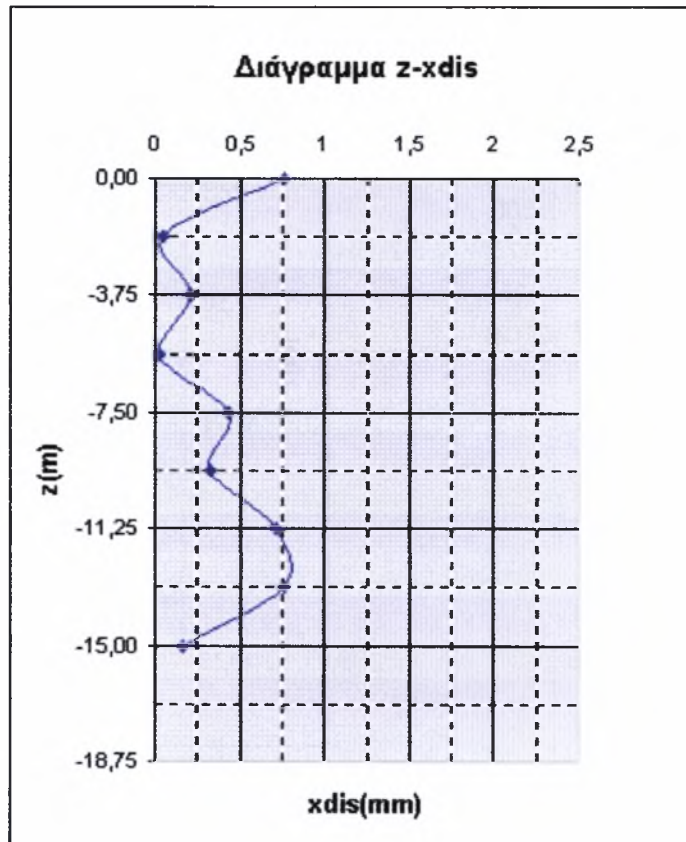


Σχήμα A1.31 Ισοαμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=1.5m$

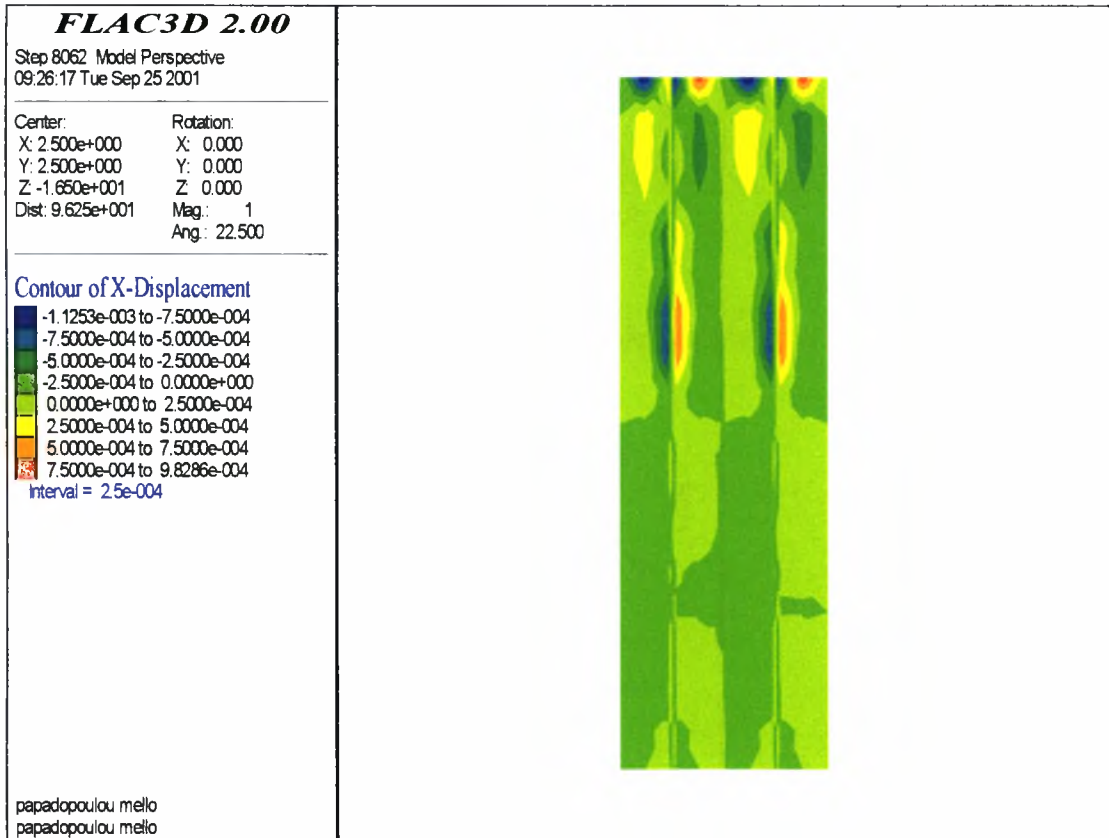
ε) Σταθερή διάμετρος $D=0.45m$

- $s = 5.0m$

xdis(m)	x(m)
0,76	0,000
0,05	-1,875
0,21	-3,750
0,02	-5,625
0,43	-7,500
0,33	-9,375
0,72	-11,250
0,76	-13,125
0,16	-15,000



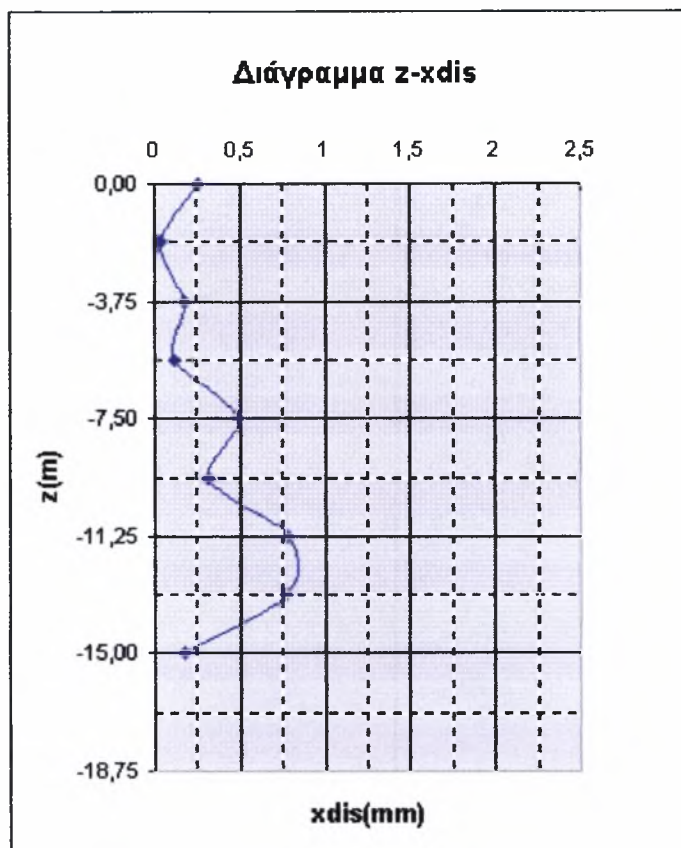
Διάγραμμα A1.32 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=5.0m$



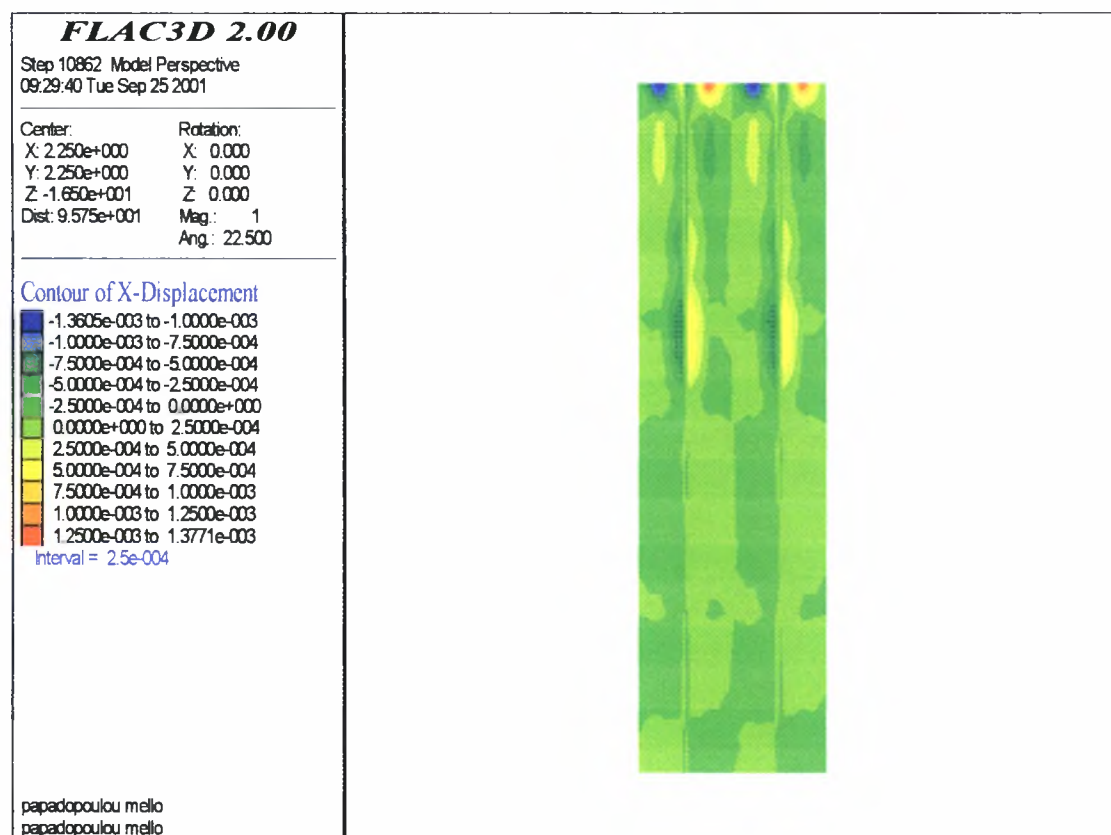
Σχήμα A1.32 Ισομέρες οριζόντιων μετακινήσεων για $s=5.0m$

- $s = 4.5m$

xdis(m)	z(m)
0,26	0,000
0,04	-1,875
0,17	-3,750
0,12	-5,625
0,49	-7,500
0,31	-9,375
0,78	-11,250
0,77	-13,125
0,18	-15,000



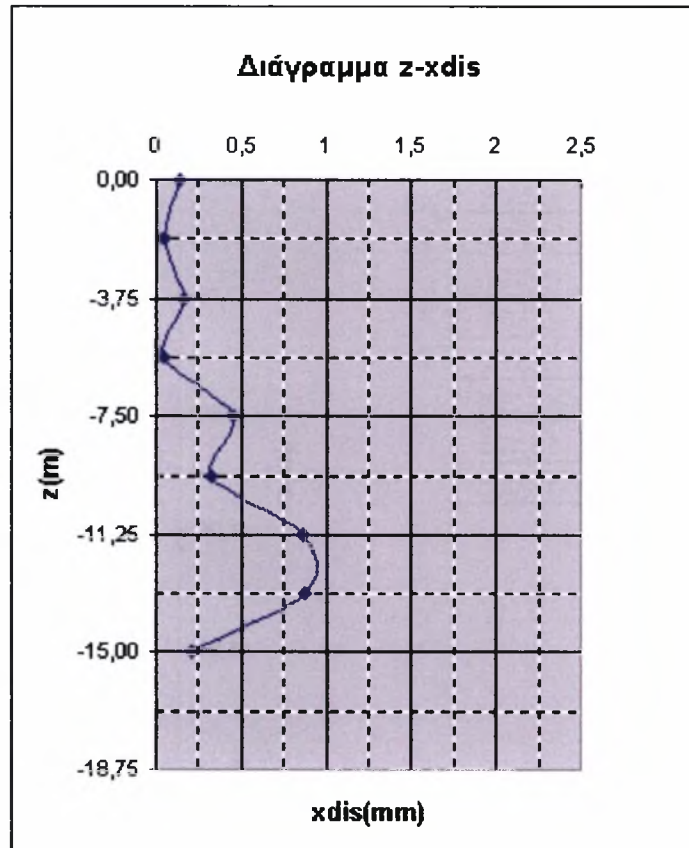
Διάγραμμα A1.33 Πλευρική διόγκωση των χαλυκοपाσσάλων για $s=4.5m$



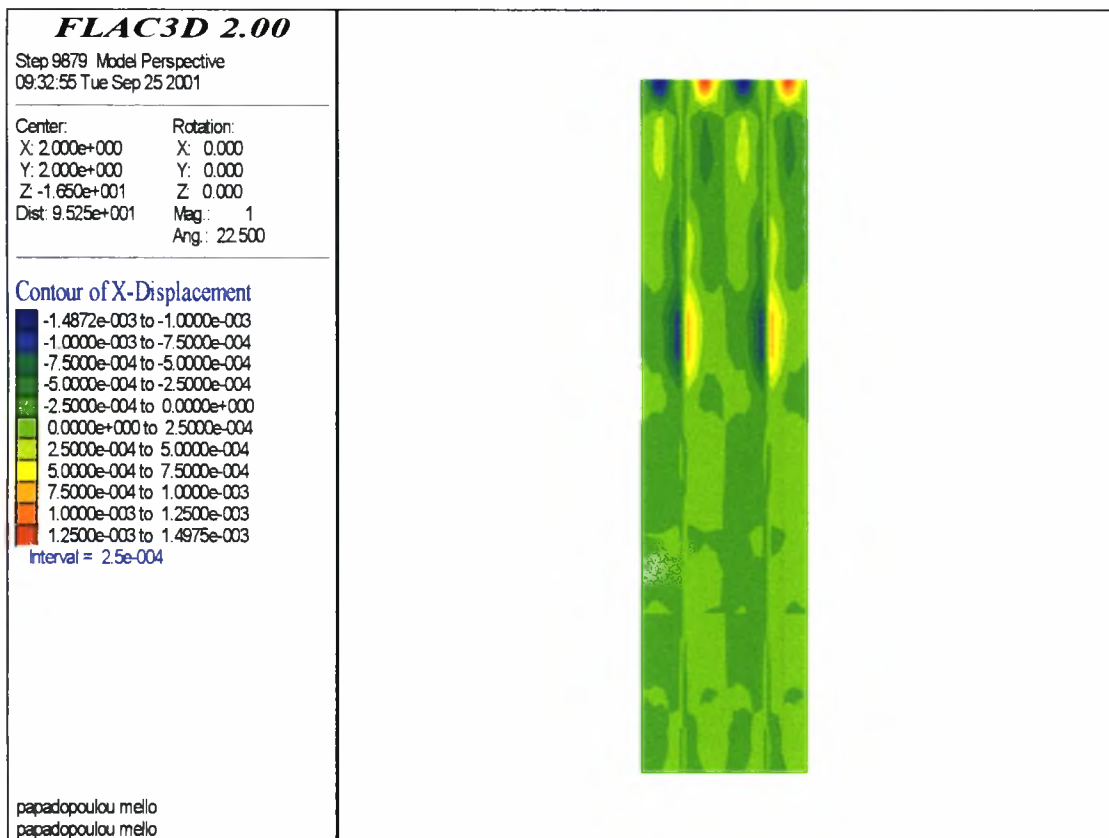
Σχήμα A1.33 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=4.5m$

- $s = 4.0m$

xdis(m)	z(m)
0,14	0,000
0,05	-1,875
0,16	-3,750
0,05	-5,625
0,46	-7,500
0,33	-9,375
0,86	-11,250
0,88	-13,125
0,21	-15,000



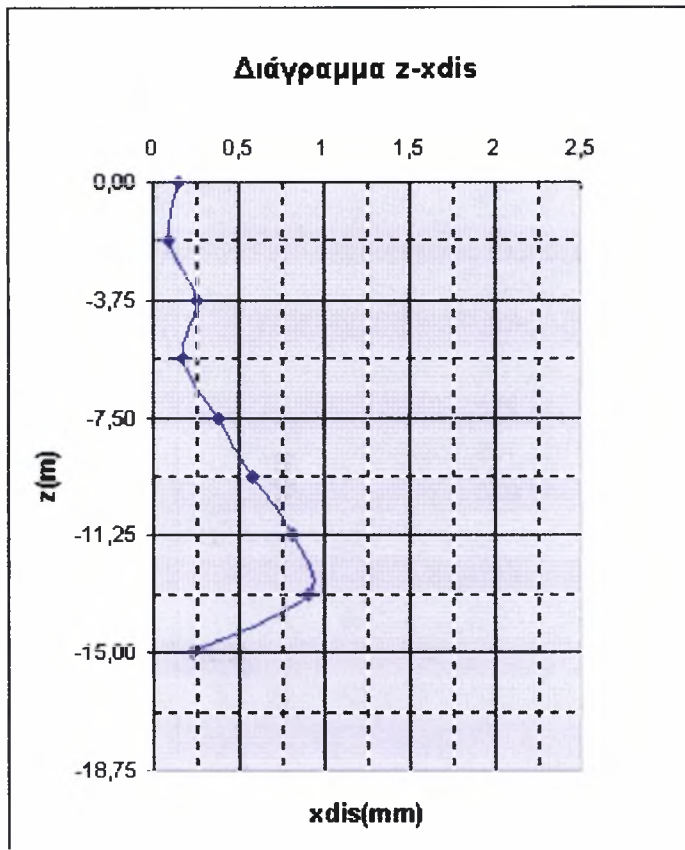
Διάγραμμα A1.34 Πλευρική διόγκωση των χαλυκοπασσάλων για $s=4.0m$



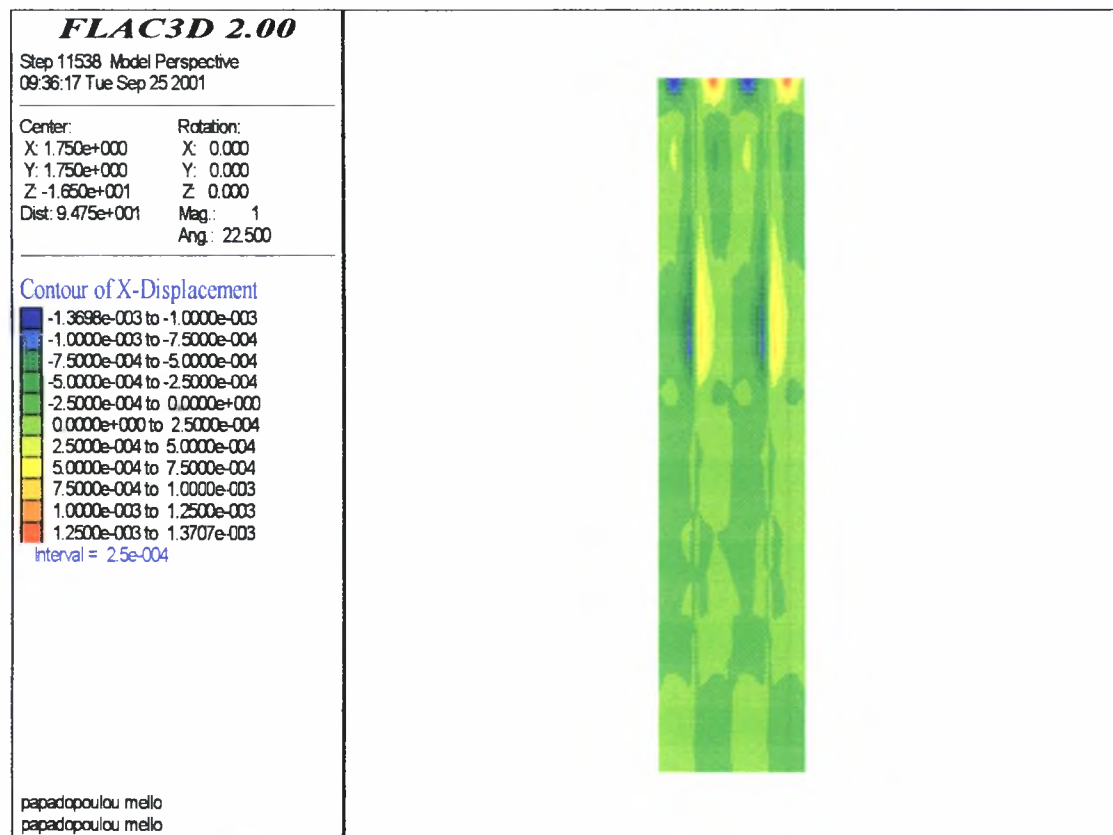
Σχήμα A1.34 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=4.0m$

- $s = 3.5m$

xdis(m)	z(m)
0,15	0,000
0,09	-1,875
0,25	-3,750
0,18	-5,625
0,38	-7,500
0,58	-9,375
0,81	-11,250
0,91	-13,125
0,23	-15,000



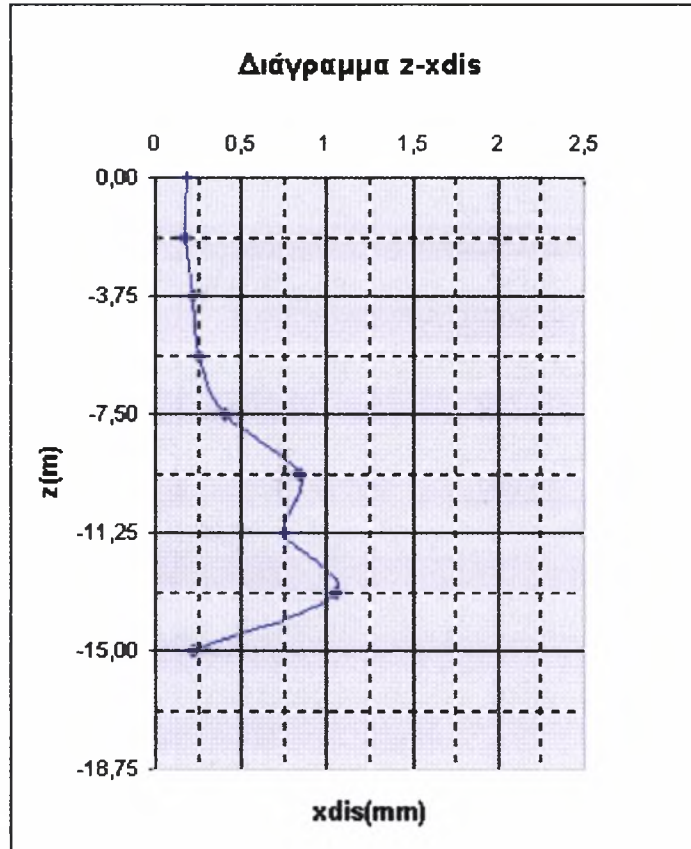
Διάγραμμα A1.35 Πλευρική διόγκωση των χαλυκοπασσάλων για $s=3.5m$



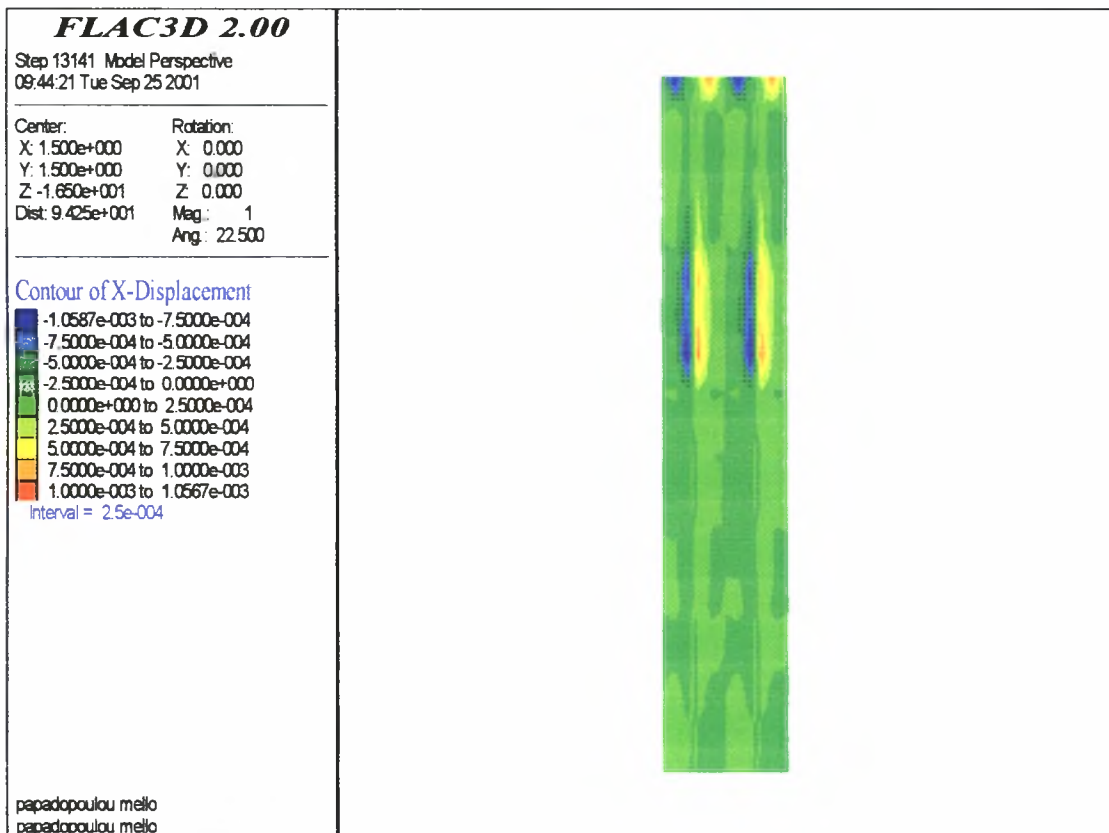
Σχήμα A1.35 Ισομέγς οριζόντιων μετακινήσεων για $s=3.5m$

- $s = 3.0m$

xdis(m)	z(m)
0,18	0,000
0,17	-1,875
0,22	-3,750
0,26	-5,625
0,41	-7,500
0,84	-9,375
0,75	-11,250
1,05	-13,125
0,22	-15,000



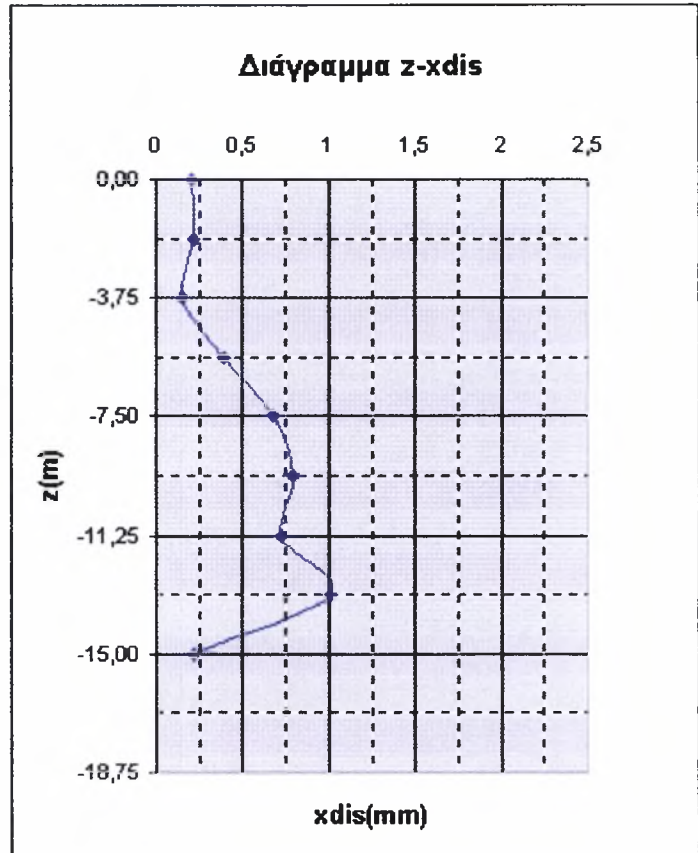
Διάγραμμα A1.36 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=3.0m$



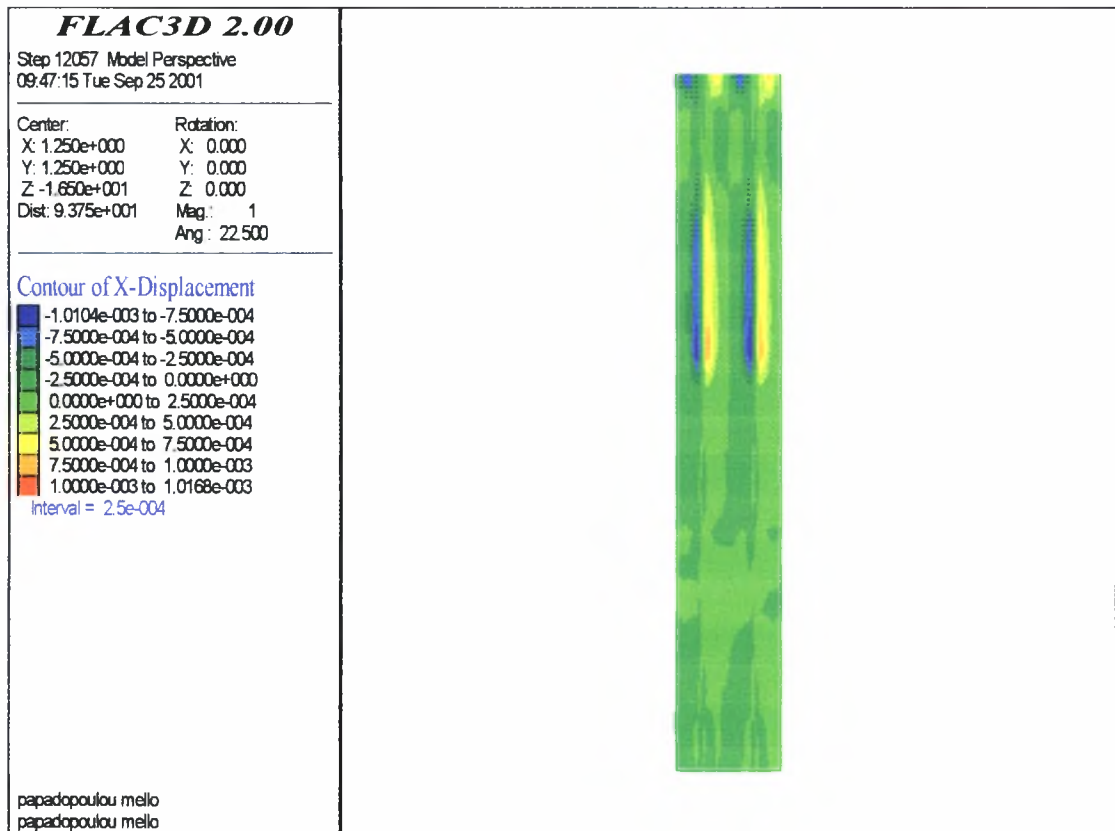
Σχήμα A1.36 Ισοαμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=3.0m$

- $s = 2.5m$

xdis(m)	z(m)
0,21	0,000
0,22	-1,875
0,15	-3,750
0,39	-5,625
0,68	-7,500
0,79	-9,375
0,73	-11,250
1,01	-13,125
0,22	-15,000



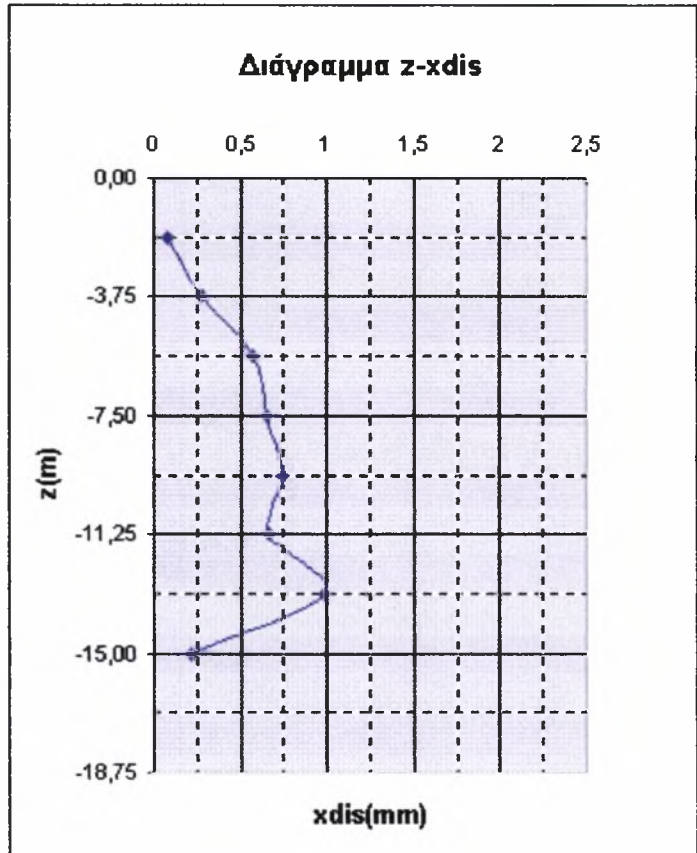
Διάγραμμα A1.37 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=2.5m$



Σχήμα A1.37 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=2.5m$

- $s = 2.0m$

xdis(m)	z(m)
0,39	0,000
0,08	-1,875
0,28	-3,750
0,57	-5,625
0,65	-7,500
0,75	-9,375
0,67	-11,250
0,99	-13,125
0,22	-15,000



Διάγραμμα A1.38 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=2.0m$

FLAC3D 2.00
 Step 13613 Model Perspective
 09:50:34 Tue Sep 25 2001

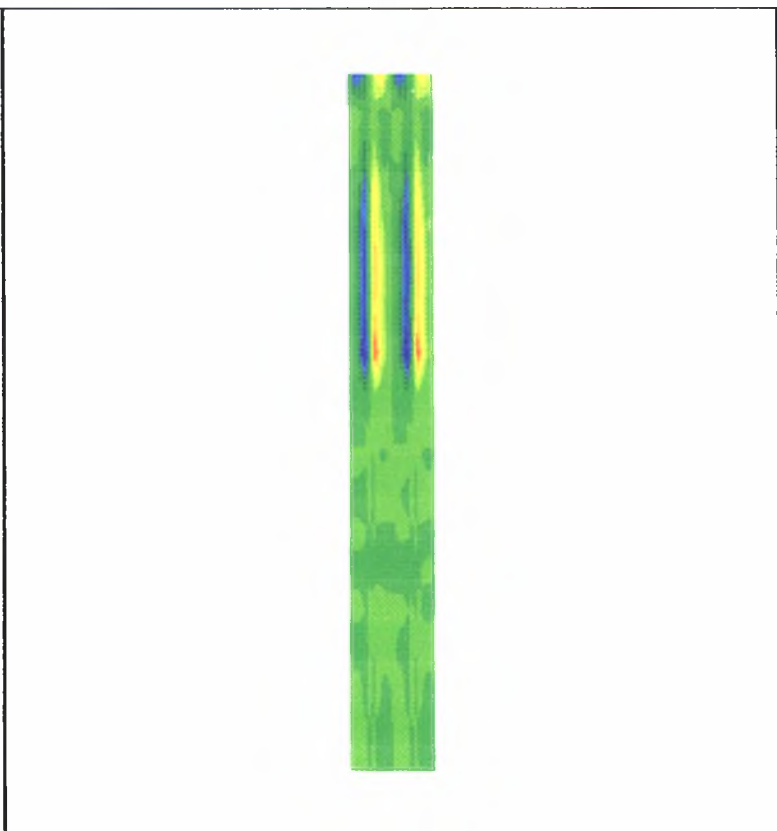
Center: X: 1.000e+000 Y: 1.000e+000 Z: -1.650e+001
 Rotation: X: 0.000 Y: 0.000 Z: 0.000
 Dist: 9.325e+001 Mag.: 1 Ang.: 22.500

Contour of X-Displacement

- 9.7180e-004 to -6.0000e-004
- 6.0000e-004 to -4.0000e-004
- 4.0000e-004 to -2.0000e-004
- 2.0000e-004 to 0.0000e+000
- 0.0000e+000 to 2.0000e-004
- 2.0000e-004 to 4.0000e-004
- 4.0000e-004 to 6.0000e-004
- 6.0000e-004 to 8.0000e-004
- 8.0000e-004 to 9.8859e-004

Interval = 2.0e-004

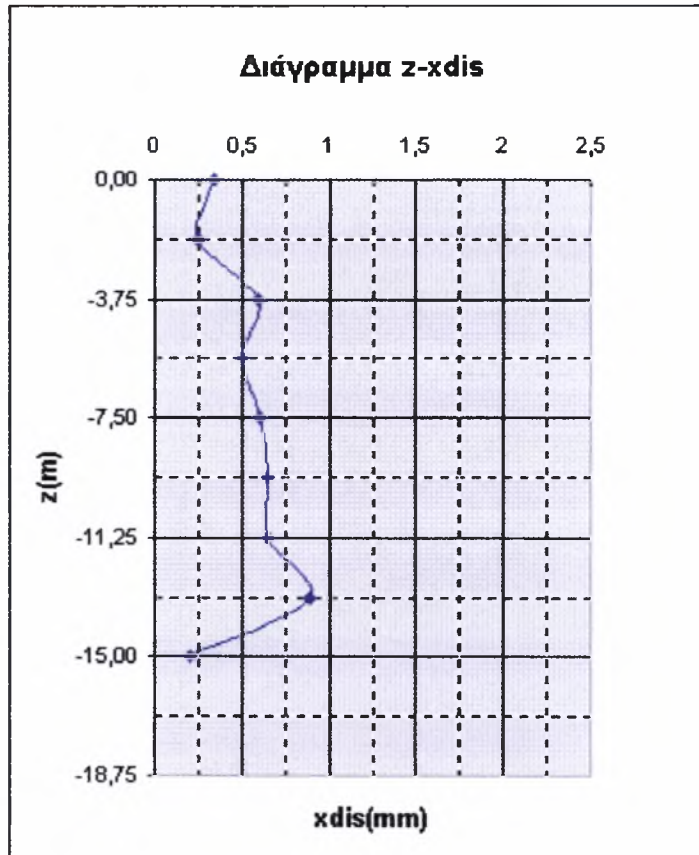
papadopoulou mello
 papadopoulou mello



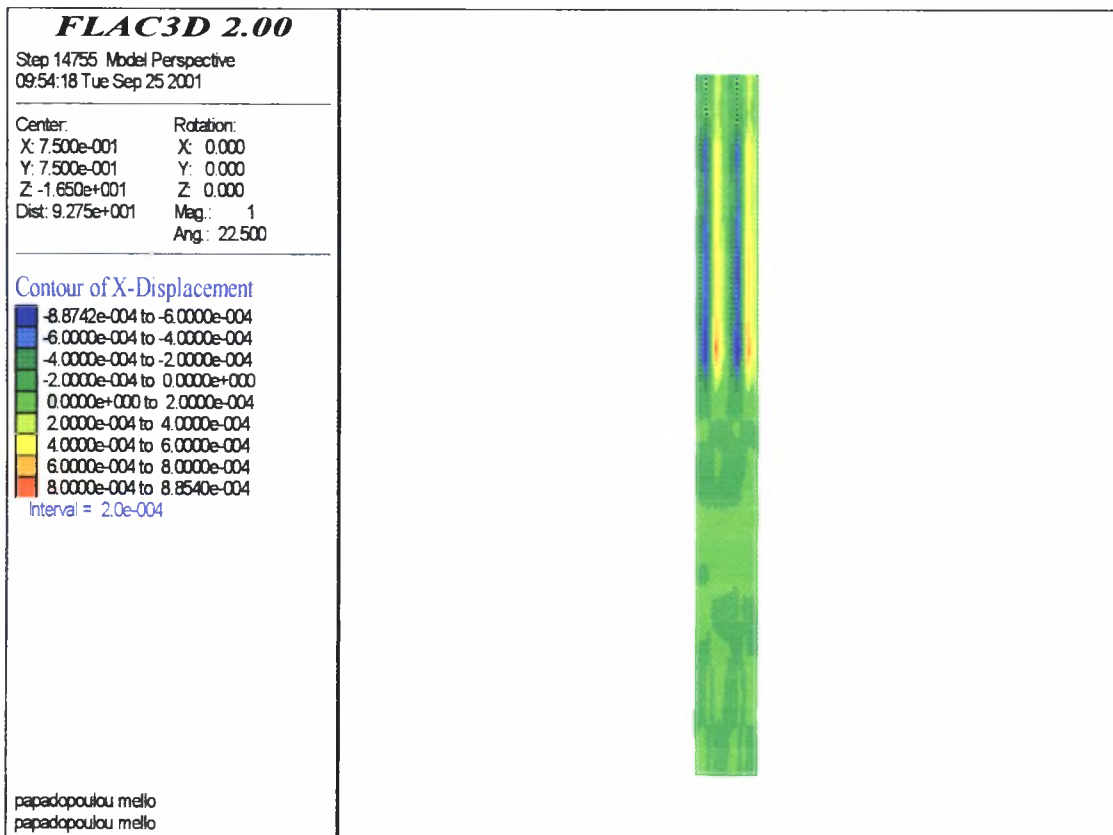
Σχήμα A1.38 Ισοαμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=2.0m$

- $s = 1.5m$

xdis(m)	z(m)
0,34	0,000
0,25	-1,875
0,59	-3,750
0,5	-5,625
0,61	-7,500
0,65	-9,375
0,65	-11,250
0,89	-13,125
0,21	-15,000



Διάγραμμα A1.39 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $s=1.5m$



Σχήμα A1.39 Ισοαμές οριζόντιων μετακινήσεων για $s=1.5m$

A2

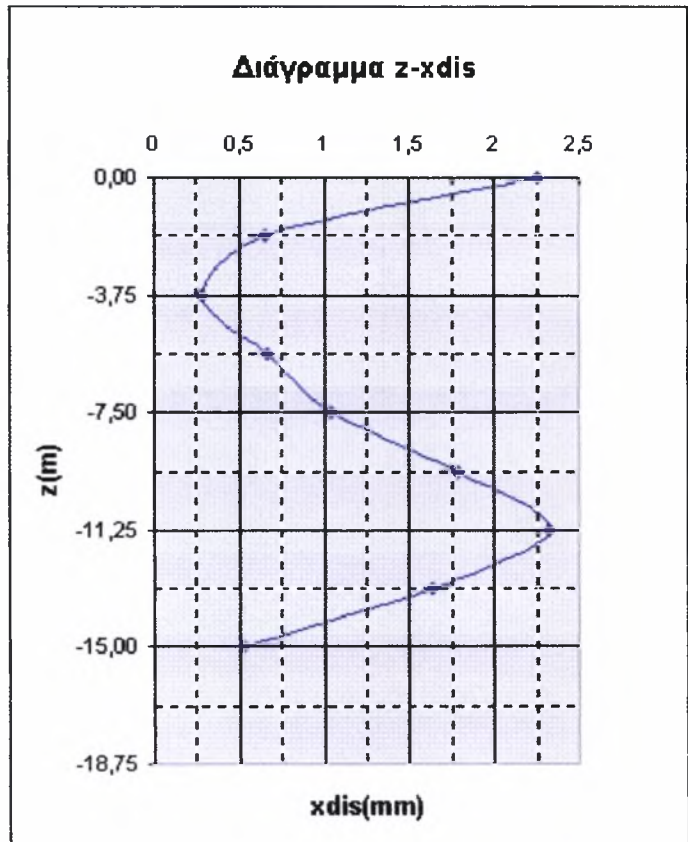
Διαγράμματα για την τρίτη σειρά παραμετρικών αναλύσεων

Για την τρίτη σειρά παραμετρικών αναλύσεων, με μεταβαλλόμενο D , παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαγράμματα της πλευρικής διόγκωσης των χαλικοπασσάλων σε σχέση με το βάθος, καθώς και οι ισοτιμές της οριζόντιας μετακίνησης στο κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται από το μέσο των χαλικοπασσάλων, για σταθερές τιμές της αξονικής απόστασης s .

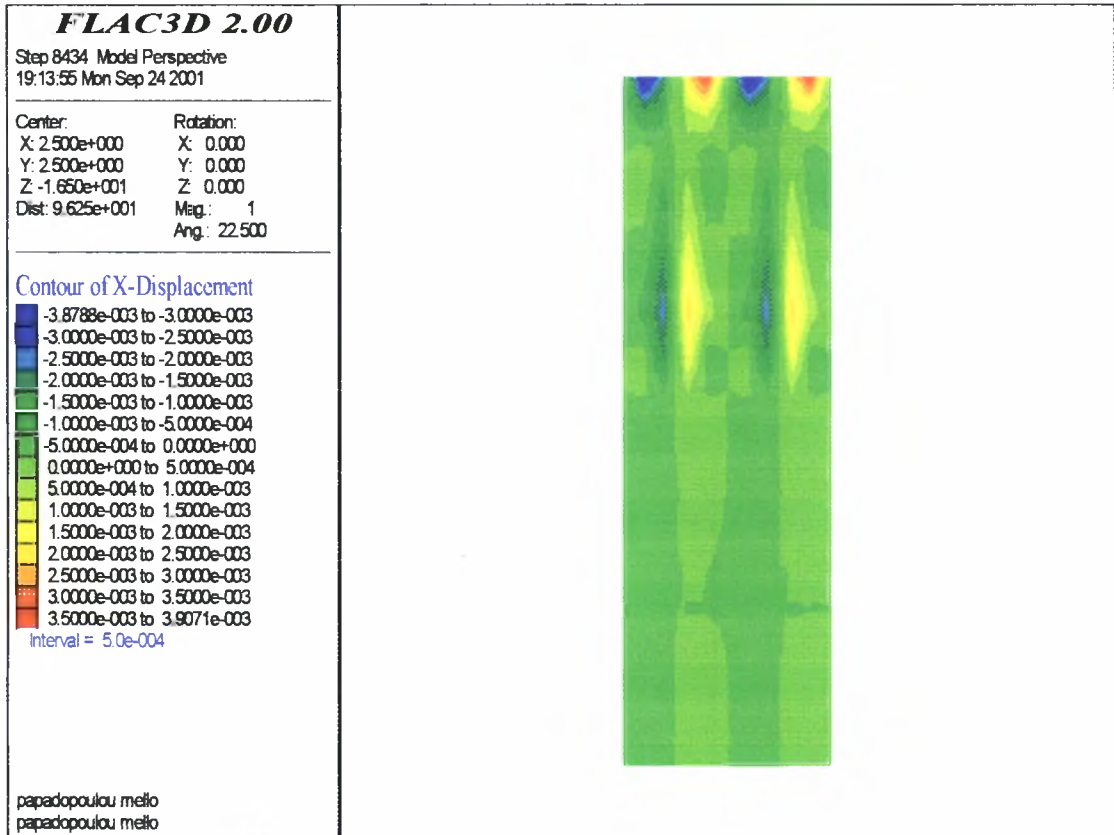
α) Σταθερή αξονική απόσταση $s=5.0m$

- $D = 1.2m$

xdis	z
2,26	0,000
0,66	-1,875
0,28	-3,750
0,67	-5,625
1,04	-7,500
1,79	-9,375
2,32	-11,250
1,64	-13,125
0,52	-15,000



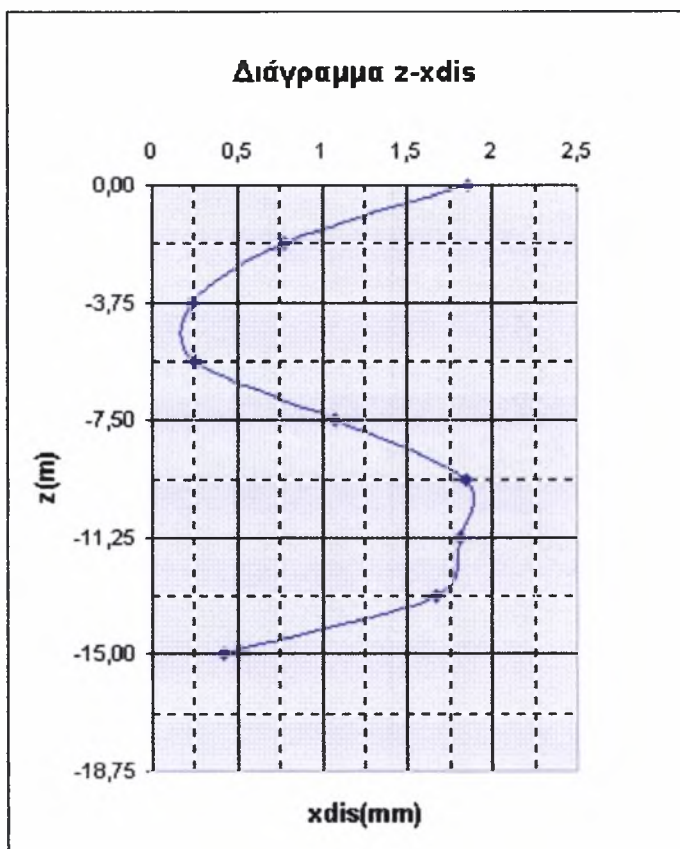
Σχήμα A2.1 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=1.2m$



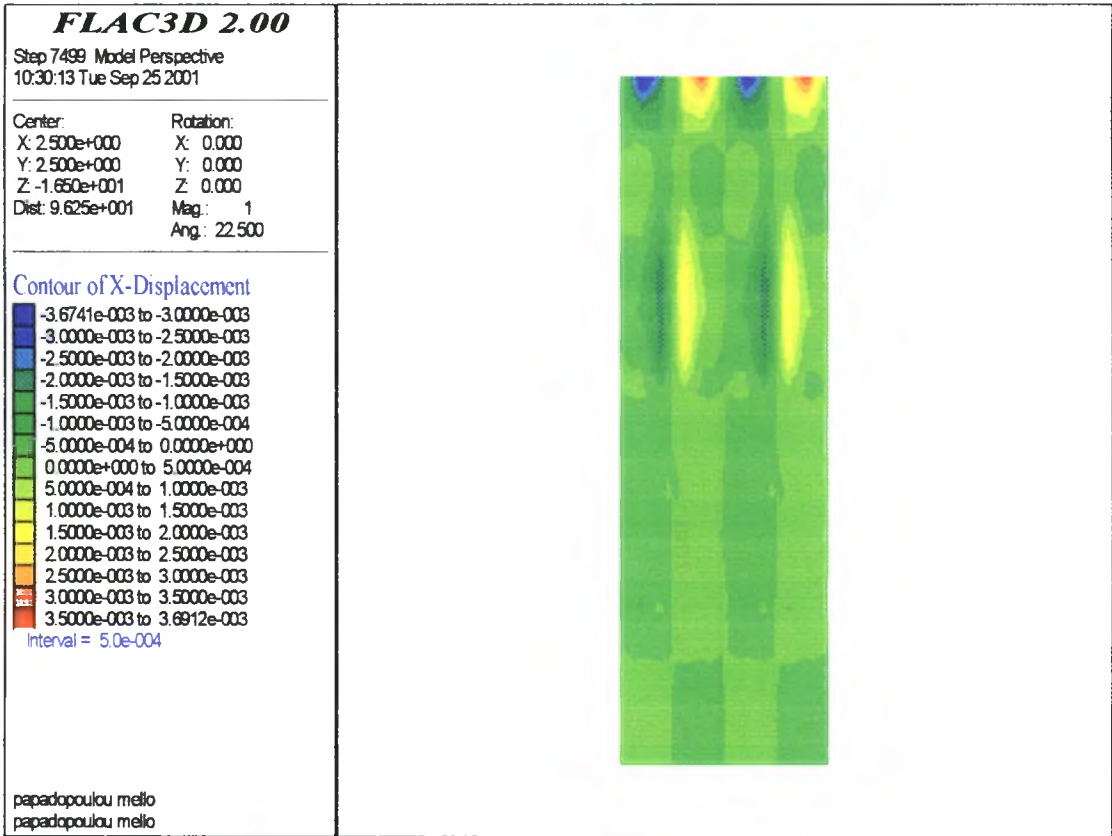
Διάγραμμα A2.1 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=1.2m$

- $D = 1.1m$

xdis(m)	z(m)
1,86	0,000
0,78	-1,875
0,23	-3,750
0,26	-5,625
1,08	-7,500
1,84	-9,375
1,81	-11,250
1,67	-13,125
0,42	-15,000



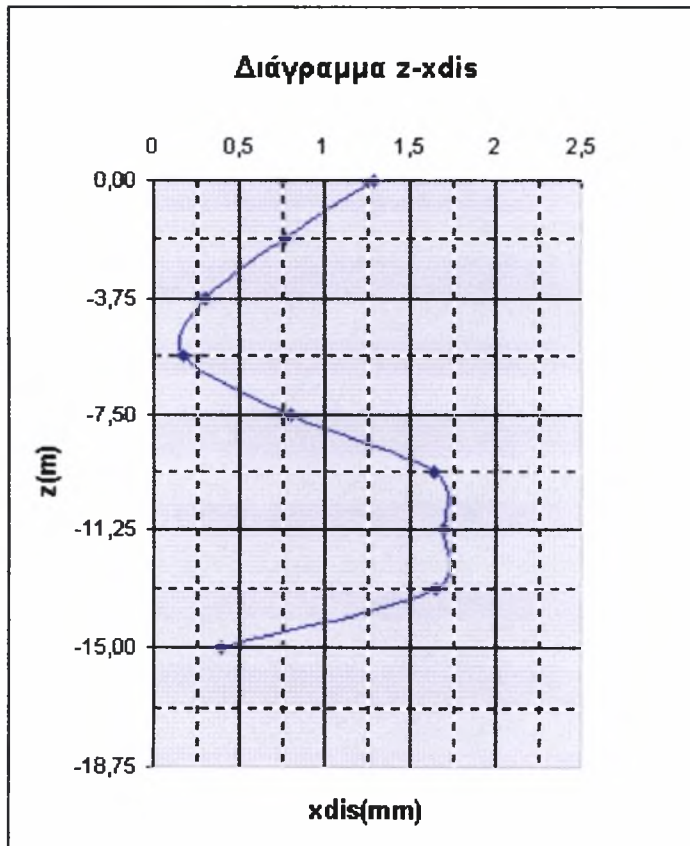
Σχήμα A2.2 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=1.1m$



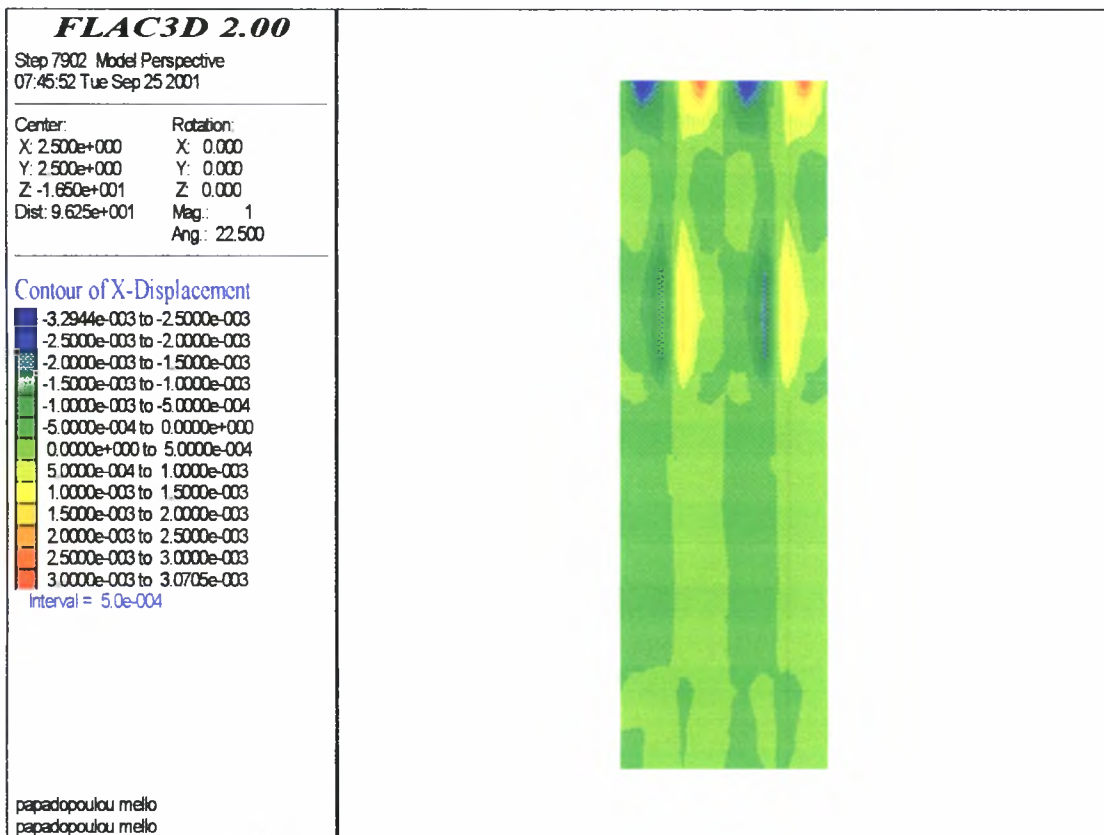
Διάγραμμα A2.2 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=1.1m$

- $D = 1.0m$

xdis(m)	z(m)
1,29	0,000
0,77	-1,875
0,30	-3,750
0,18	-5,625
0,8	-7,500
1,64	-9,375
1,70	-11,250
1,65	-13,125
0,39	-15,000



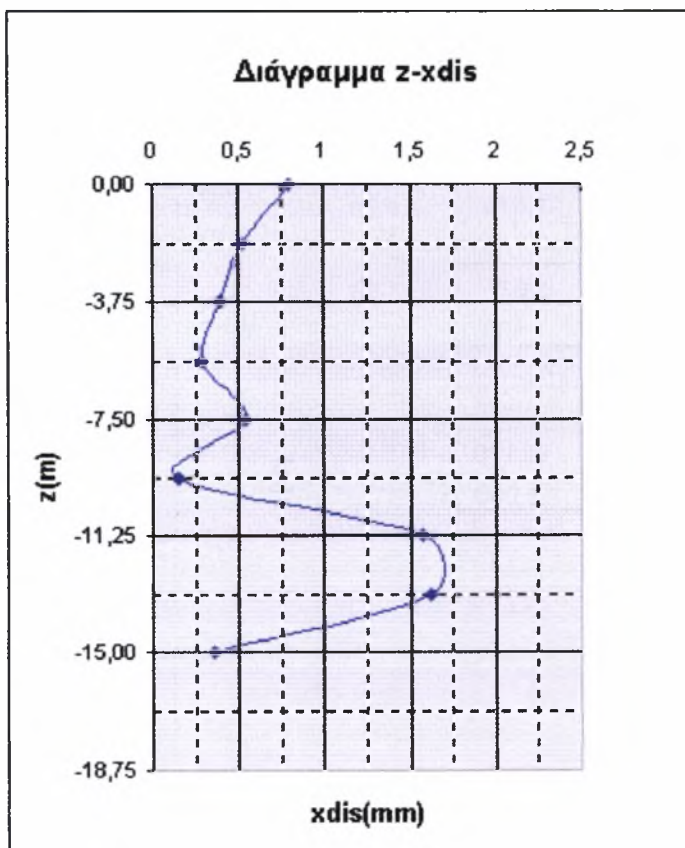
Σχήμα A2.3 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=1.0m$



Διάγραμμα A2.3 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=1.0m$

- $D = 0.9m$

xdis	z
0,80	0,000
0,52	-1,875
0,39	-3,750
0,29	-5,625
0,54	-7,500
0,15	-9,375
1,57	-11,250
1,62	-13,125
0,36	-15,000



Σχήμα A2.4 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.9m$

FLAC3D 2.00

Step 8377 Model Perspective
10:40:40 Tue Sep 25 2001

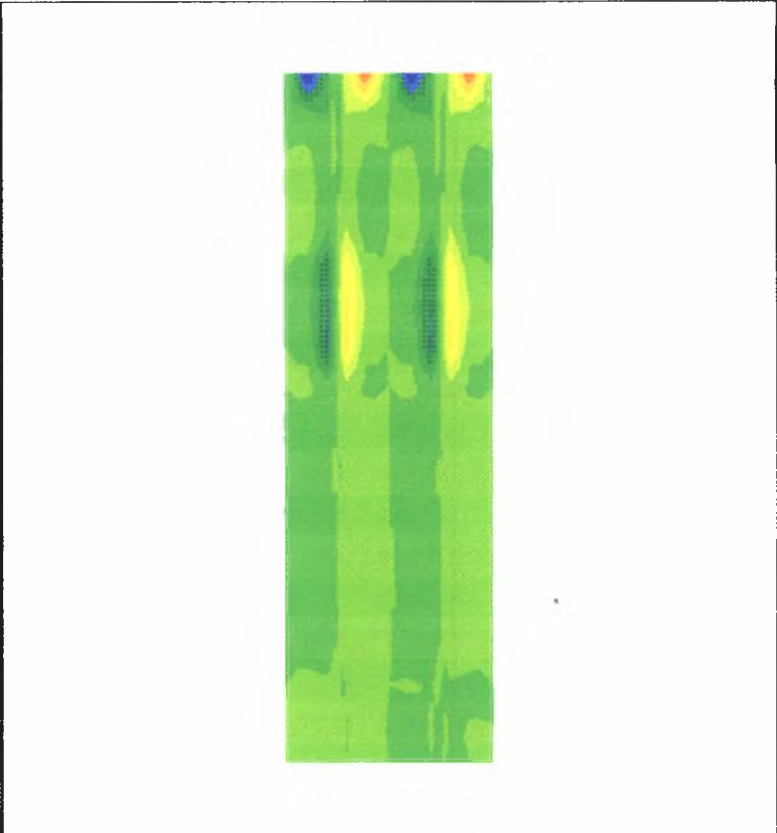
Center: Rotation:
X: 2.500e+000 X: 0.000
Y: 2.500e+000 Y: 0.000
Z: -1.650e+001 Z: 0.000
Dist: 9.625e+001 Mag: 1
 Ang: 22.500

Contour of X-Displacement

- -2.6386e-003 to -2.0000e-003
- -2.0000e-003 to -1.5000e-003
- -1.5000e-003 to -1.0000e-003
- -1.0000e-003 to -5.0000e-004
- -5.0000e-004 to 0.0000e+000
- 0.0000e+000 to 5.0000e-004
- 5.0000e-004 to 1.0000e-003
- 1.0000e-003 to 1.5000e-003
- 1.5000e-003 to 2.0000e-003
- 2.0000e-003 to 2.5000e-003
- 2.5000e-003 to 2.6752e-003

Interval = 5.0e-004

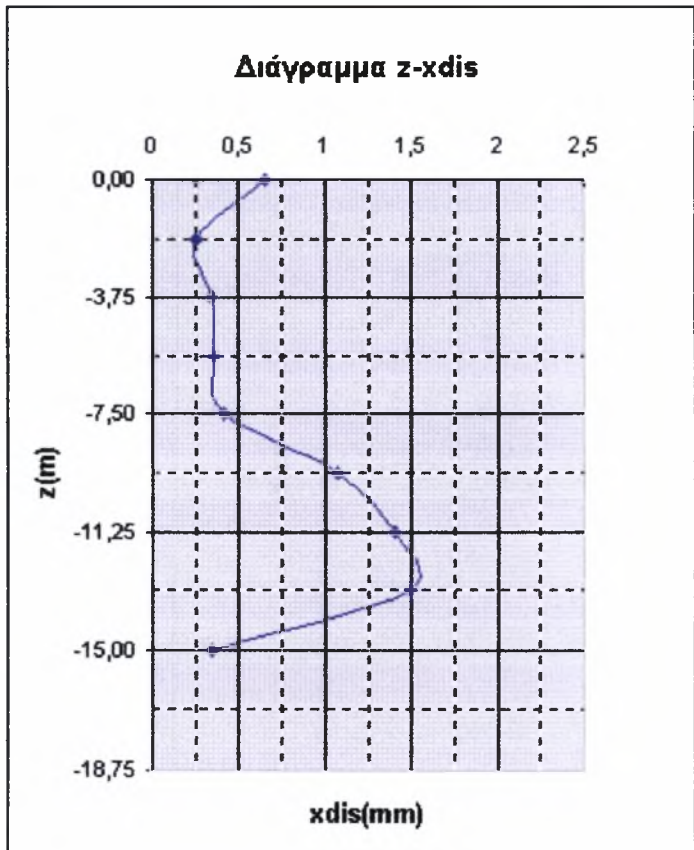
papadopoulou mello
papadopoulou mello



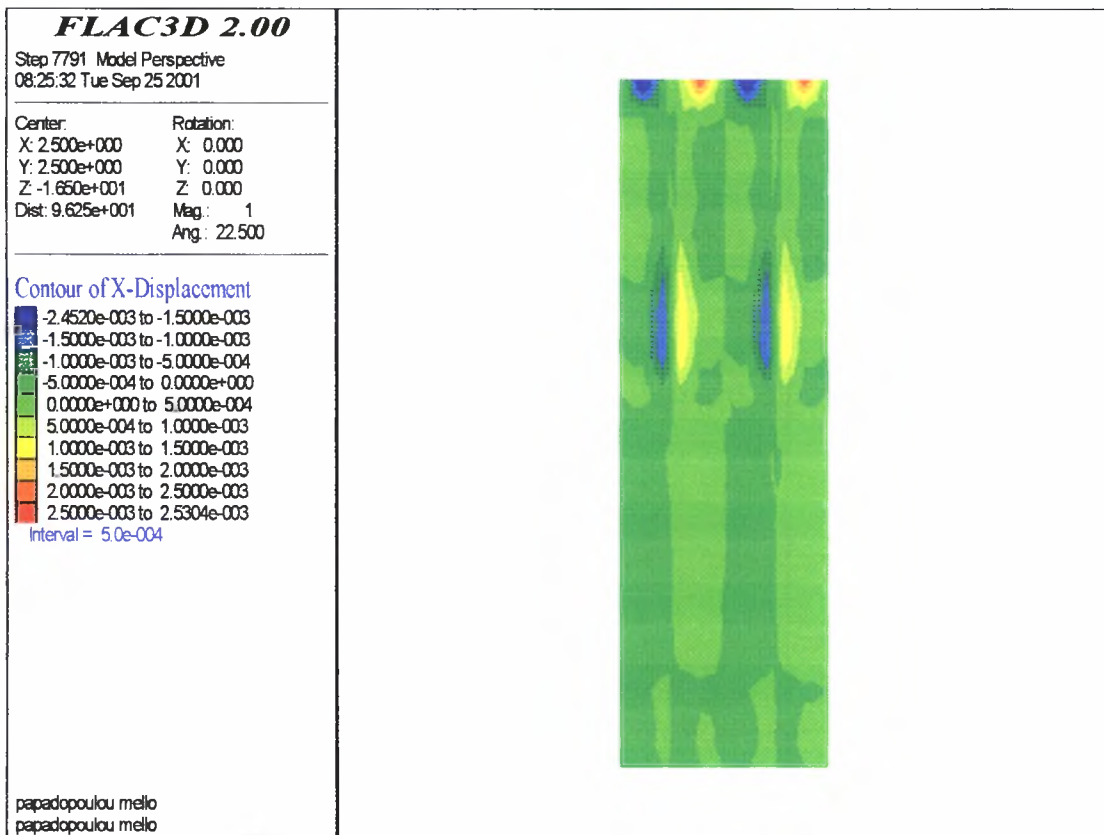
Διάγραμμα A2.4 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.9m$

- $D = 0.8m$

xdis(m)	z(m)
0,66	0,000
0,25	-1,875
0,35	-3,750
0,36	-5,625
0,42	-7,500
1,07	-9,375
1,40	-11,250
1,50	-13,125
0,34	-15,000



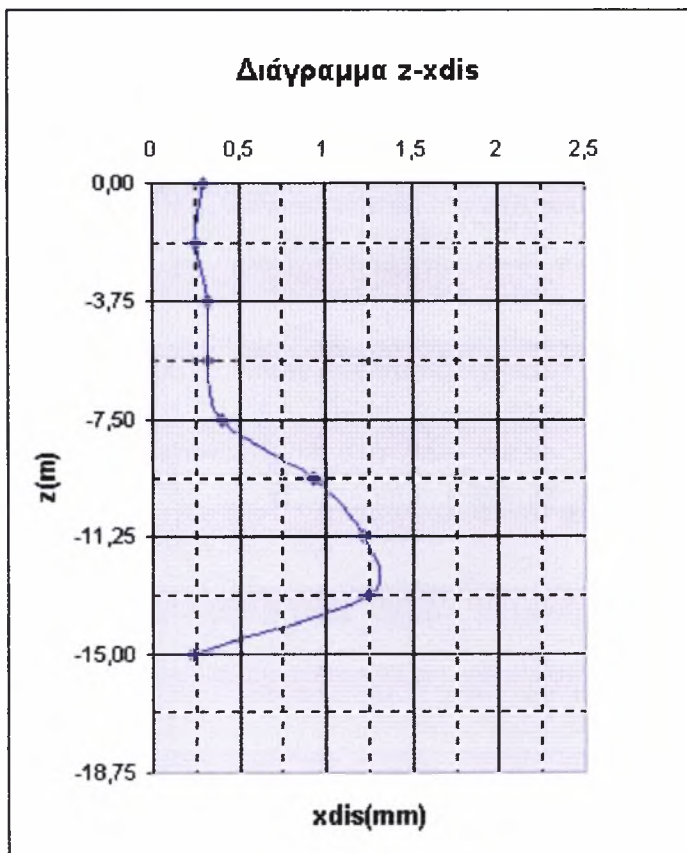
Σχήμα A2.5 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.8m$



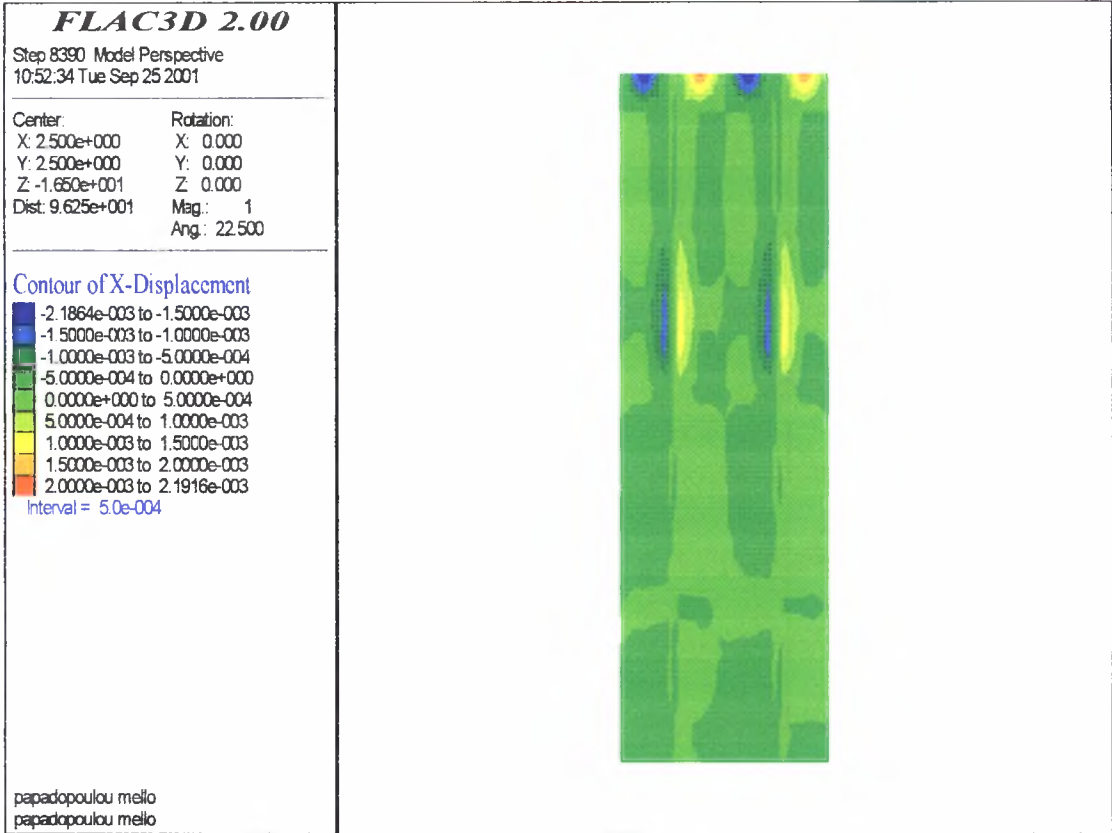
Διάγραμμα A2.5 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για D=0.8m

- D = 0.7m

xdis(m)	z(m)
0,30	0,000
0,25	-1,875
0,32	-3,750
0,32	-5,625
0,40	-7,500
0,93	-9,375
1,21	-11,250
1,25	-13,125
0,23	-15,000



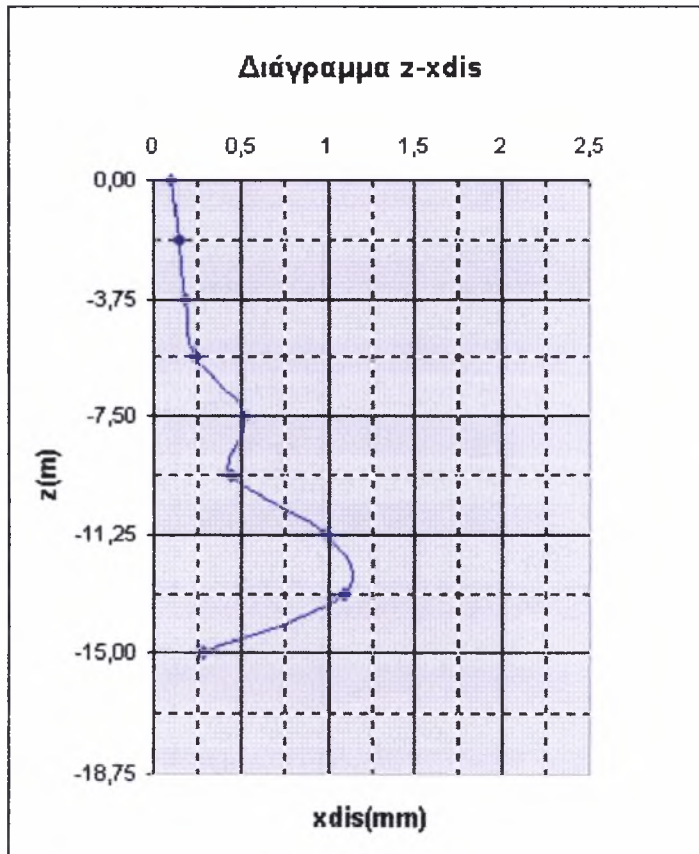
Σχήμα A2.6 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για D=0.7m



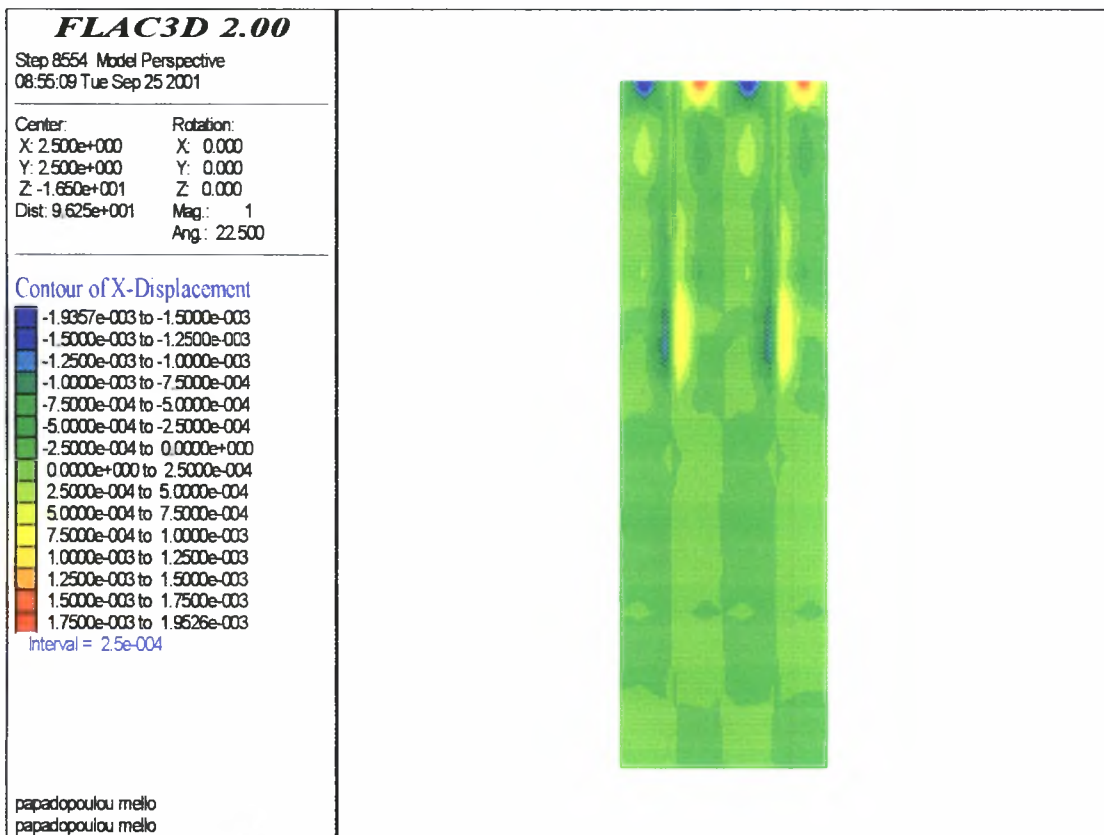
Διάγραμμα A2.6 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.7m$

- $D = 0.6m$

xdis(m)	z(m)
0,10	0,000
0,15	-1,875
0,18	-3,750
0,24	-5,625
0,52	-7,500
0,45	-9,375
0,99	-11,250
1,10	-13,125
0,28	-15,000



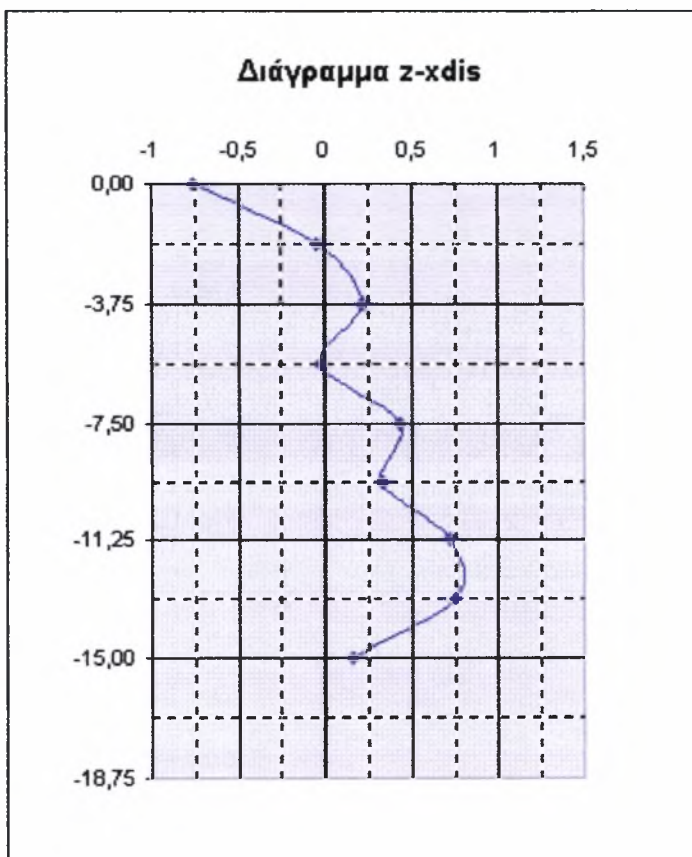
Σχήμα A2.7 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.6m$



Διάγραμμα A2.7 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.6m$

- $D = 0.45m$

xdis(m)	z(m)
-0,76	0,000
-0,05	-1,875
0,21	-3,750
-0,02	-5,625
0,43	-7,500
0,33	-9,375
0,72	-11,250
0,76	-13,125
0,16	-15,000



Σχήμα A2.8 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.45m$

FLAC3D 2.00

Step 8062 Model Perspective
09:26:17 Tue Sep 25 2001

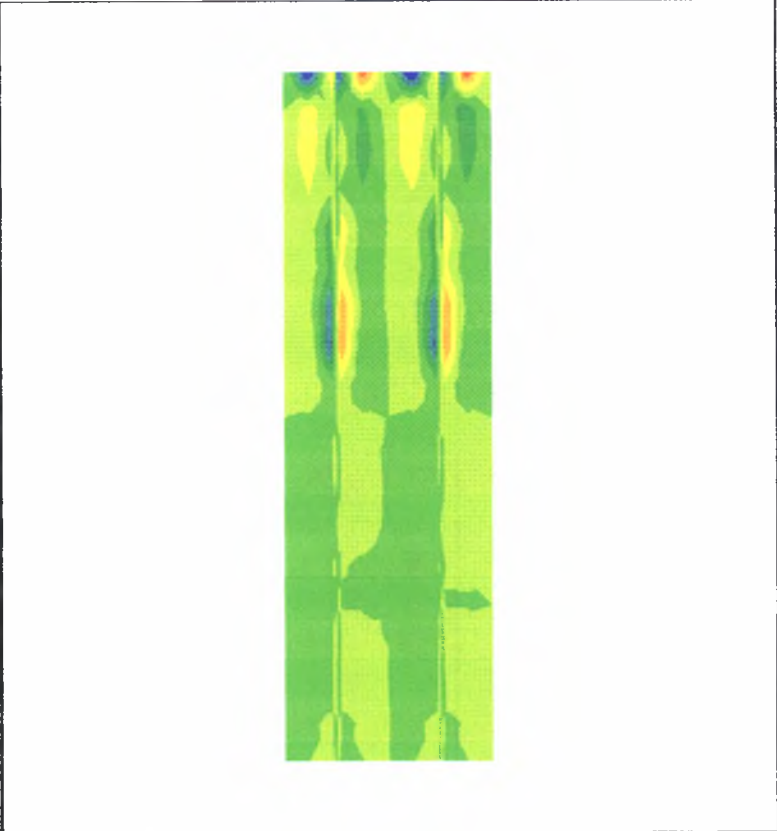
Center: Rotation:
X: 2.500e+000 X: 0.000
Y: 2.500e+000 Y: 0.000
Z: -1.650e+001 Z: 0.000
Dist: 9.625e+001 Mag.: 1
 Ang.: 22.500

Contour of X-Displacement

- 1.1253e-003 to -7.5000e-004
- 7.5000e-004 to -5.0000e-004
- 5.0000e-004 to -2.5000e-004
- 2.5000e-004 to 0.0000e+000
- 0.0000e+000 to 2.5000e-004
- 2.5000e-004 to 5.0000e-004
- 5.0000e-004 to 7.5000e-004
- 7.5000e-004 to 9.8286e-004

Interval = 2.5e-004

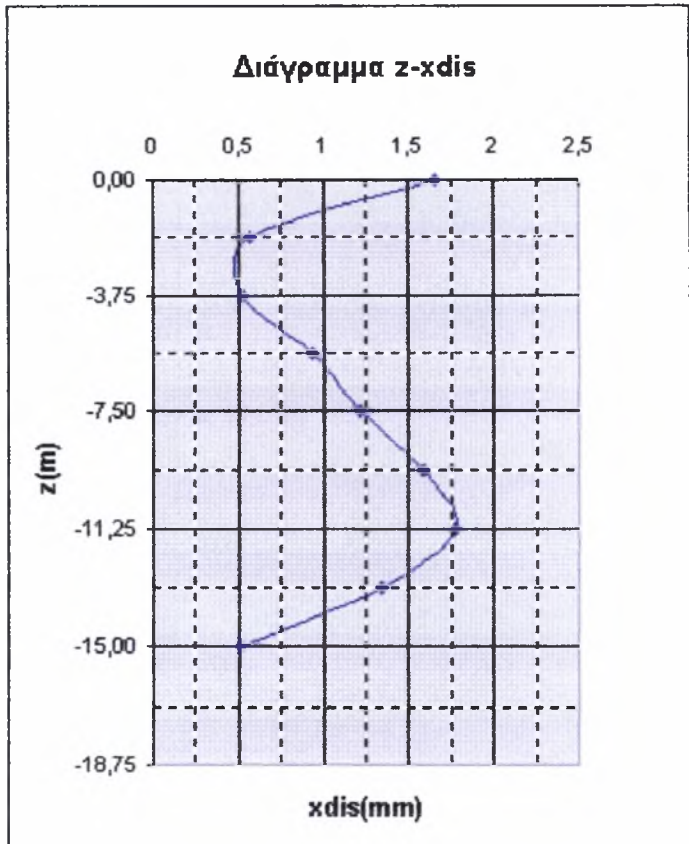
papadopoulou mello
papadopoulou mello



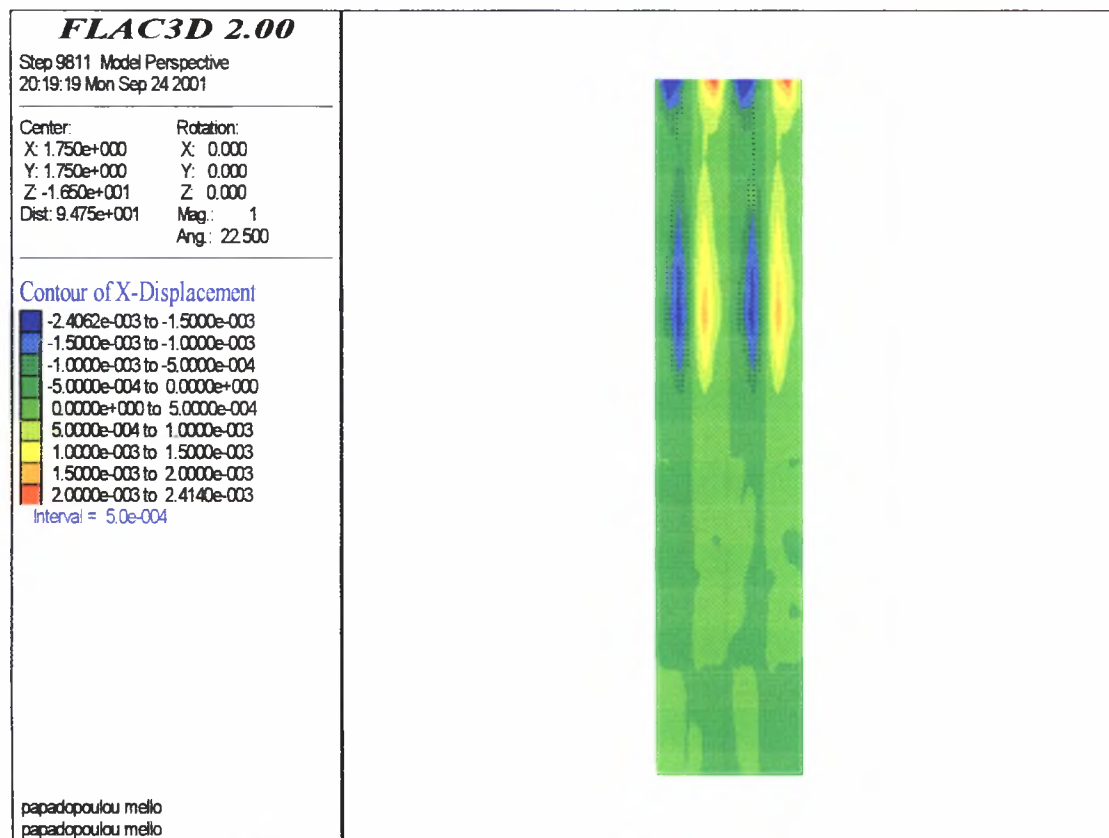
Διάγραμμα A2.8 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.45m$
β) Σταθερή αξονική απόσταση $s=3.5m$

- $D = 1.2m$

xdis(m)	z(m)
1,66	0,000
0,57	-1,875
0,52	-3,750
0,94	-5,625
1,21	-7,500
1,59	-9,375
1,78	-11,250
1,34	-13,125
0,51	-15,000



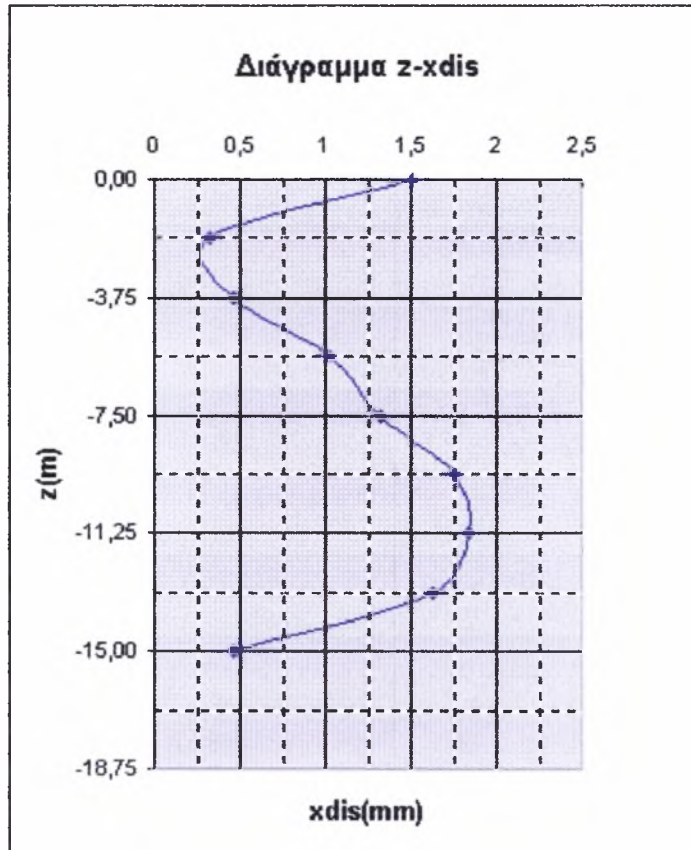
Σχήμα Α2.9 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=1.2m$



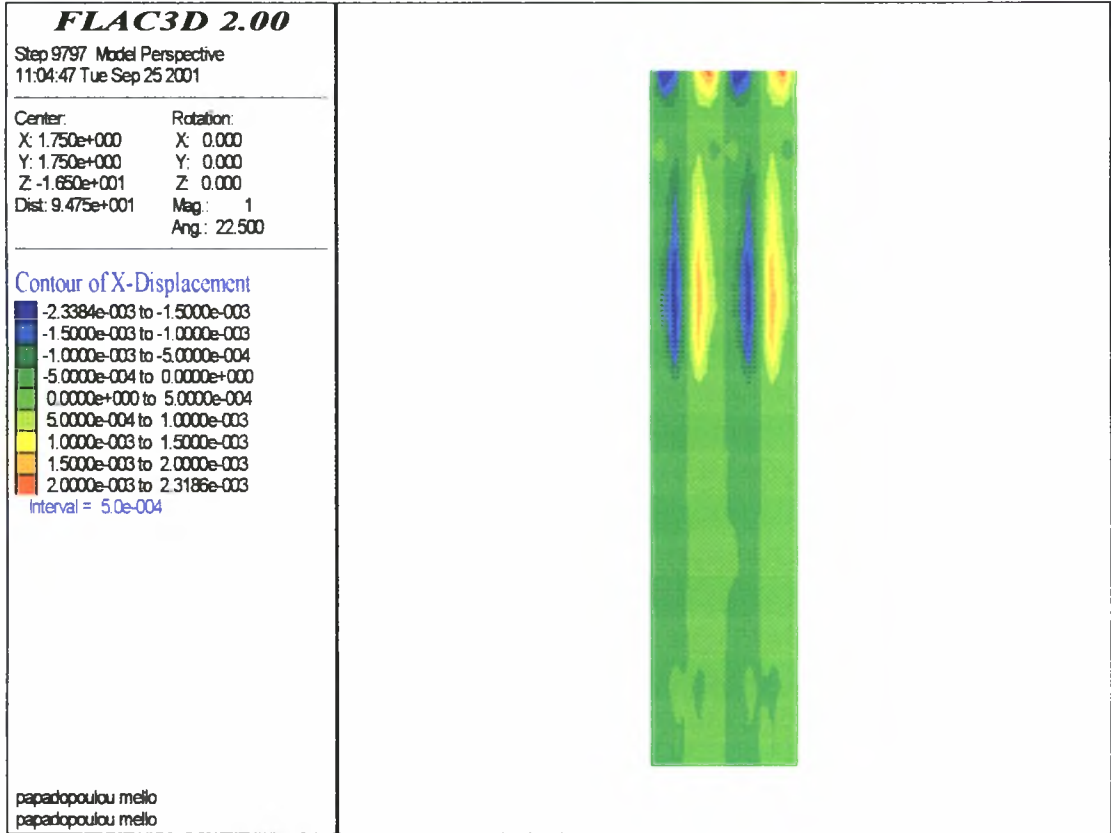
Διάγραμμα Α2.9 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=1.2m$

- $D = 1.1m$

xdis(m)	z(m)
1,51	0,000
0,32	-1,875
0,47	-3,750
1,02	-5,625
1,32	-7,500
1,75	-9,375
1,84	-11,250
1,63	-13,125
0,47	-15,000



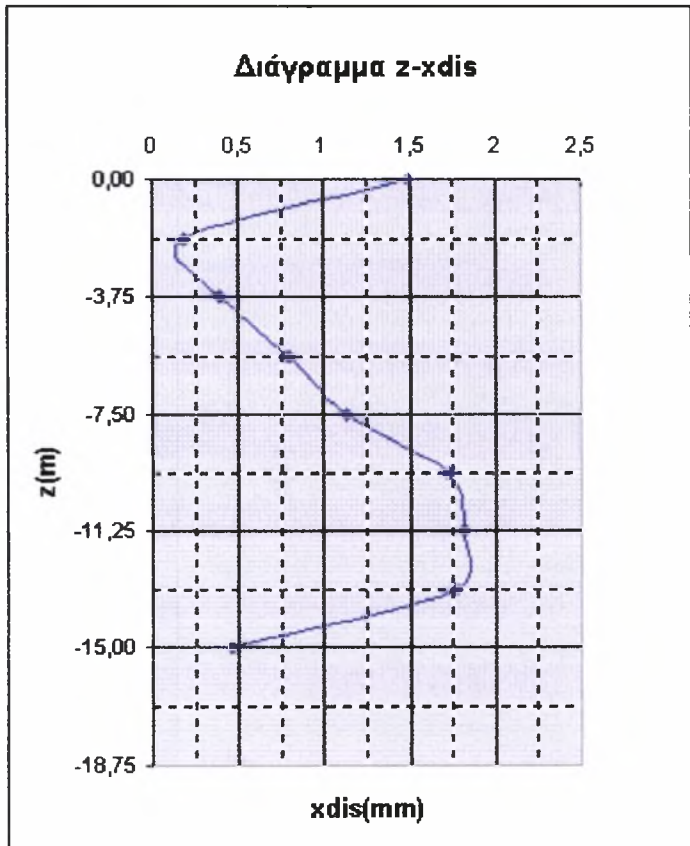
Σχήμα A2.10 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=1.1m$



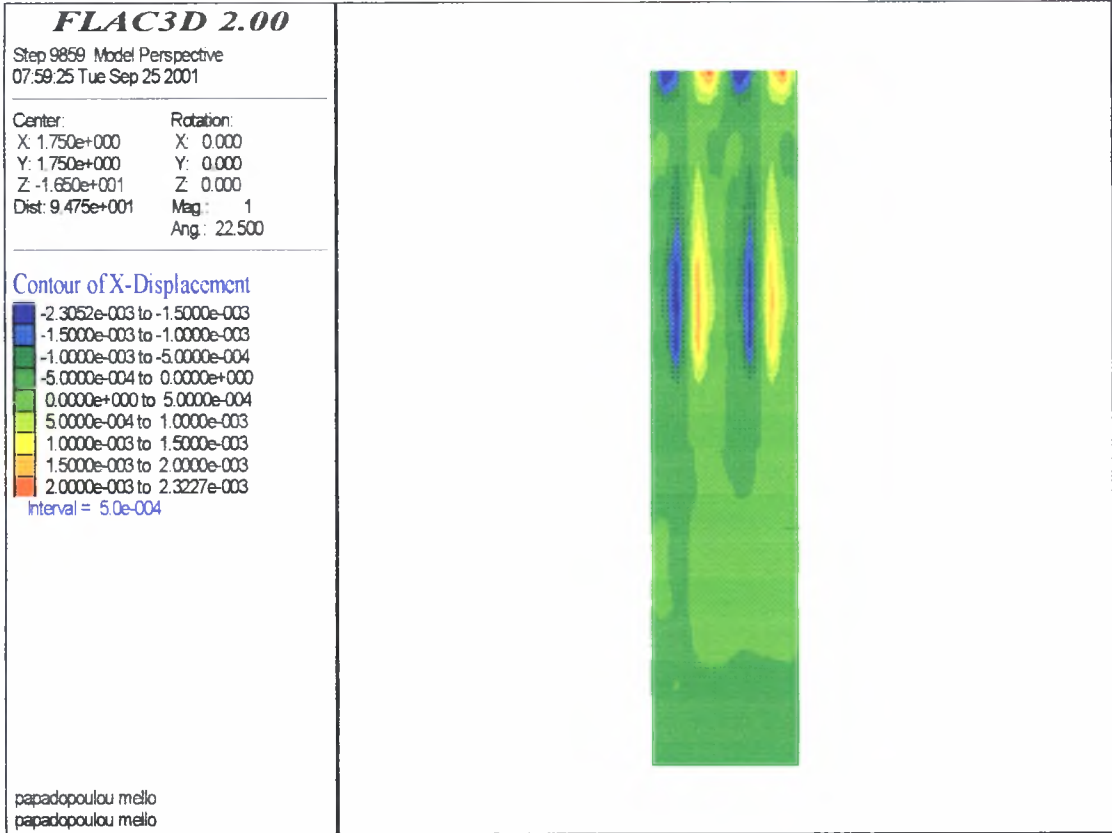
Διάγραμμα A2.10 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=1.1m$

- $D = 1.0m$

xdis(m)	z(m)
1,49	0,000
0,19	-1,875
0,39	-3,750
0,80	-5,625
1,14	-7,500
1,72	-9,375
1,82	-11,250
1,77	-13,125
0,46	-15,000



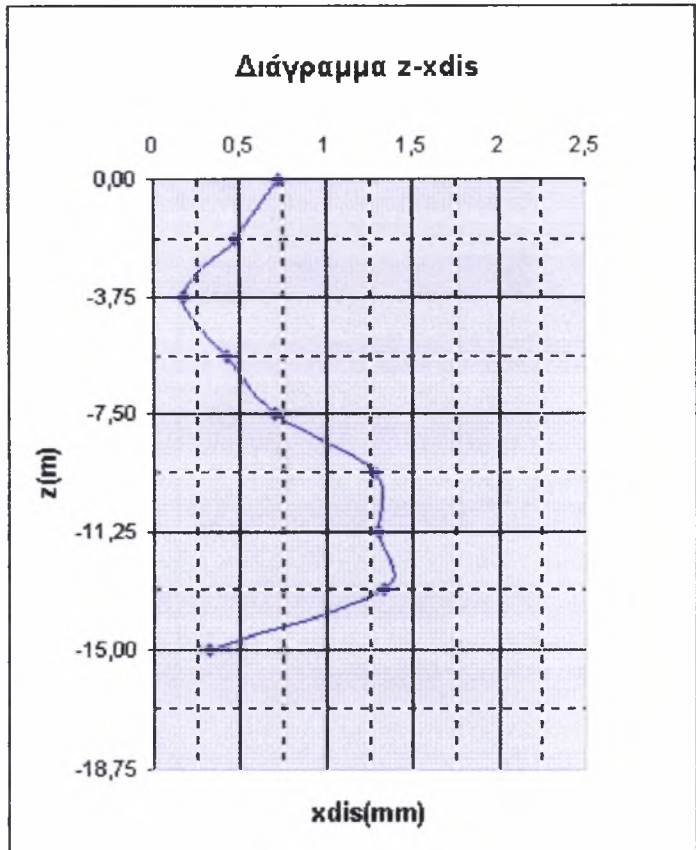
Σχήμα A2.11 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=1.0m$



Διάγραμμα A2.11 Ισοτιμές οριζόντων μετακινήσεων για $D=1.0m$

- $D = 0.9m$

xdis(m)	z(m)
0,73	0,000
0,47	-1,875
0,17	-3,750
0,43	-5,625
0,70	-7,500
1,28	-9,375
1,30	-11,250
1,34	-13,125
0,32	-15,000



Σχήμα A2.12 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.9m$

FLAC3D 2.00

Step 9753 Model Perspective
11:09:47 Tue Sep 25 2001

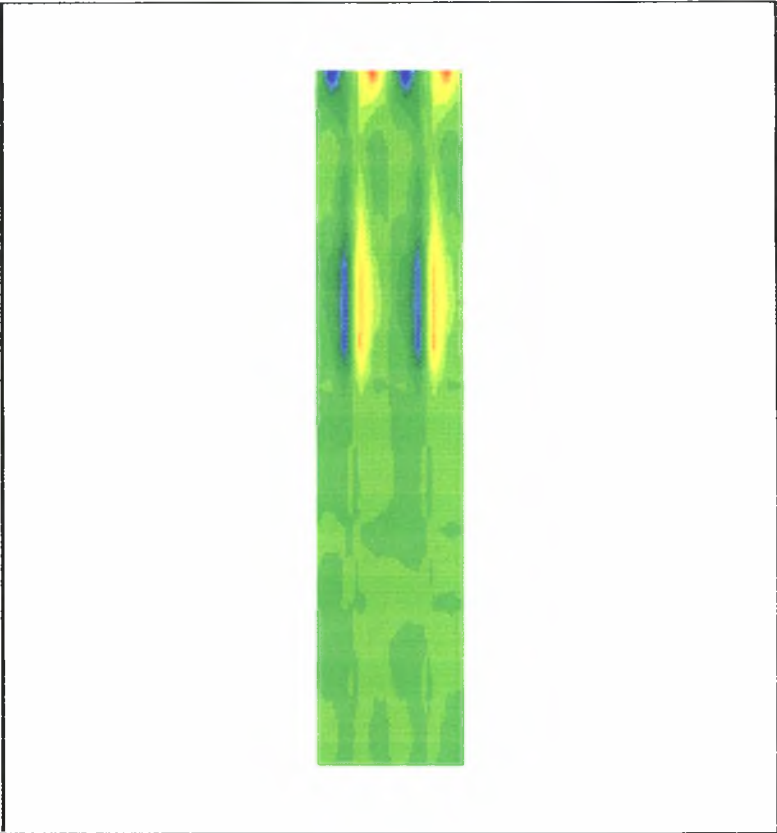
Center: X: 1.750e+000 Y: 1.750e+000 Z: -1.650e+001
 Rotation: X: 0.000 Y: 0.000 Z: 0.000
 Dist: 9.475e+001 Mag.: 1
 Ang.: 22.500

Contour of X-Displacement

- 1.8301e-003 to -1.5000e-003
- 1.5000e-003 to -1.2500e-003
- 1.2500e-003 to -1.0000e-003
- 1.0000e-003 to -7.5000e-004
- 7.5000e-004 to -5.0000e-004
- 5.0000e-004 to -2.5000e-004
- 2.5000e-004 to 0.0000e+000
- 0.0000e+000 to 2.5000e-004
- 2.5000e-004 to 5.0000e-004
- 5.0000e-004 to 7.5000e-004
- 7.5000e-004 to 1.0000e-003
- 1.0000e-003 to 1.2500e-003
- 1.2500e-003 to 1.5000e-003
- 1.5000e-003 to 1.7500e-003
- 1.7500e-003 to 1.8632e-003

Interval = 2.5e-004

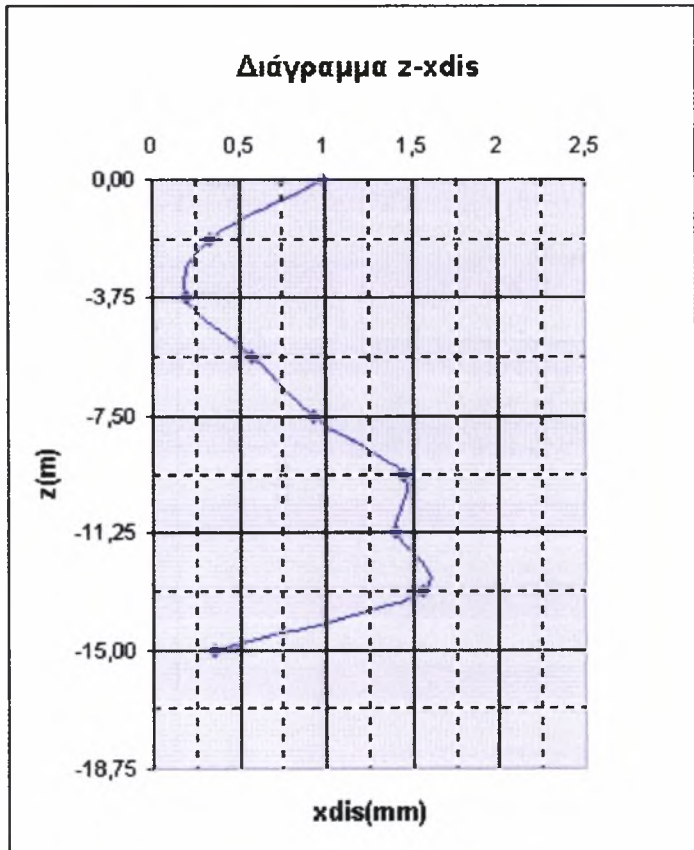
papadopoulou mello
papadopoulou mello



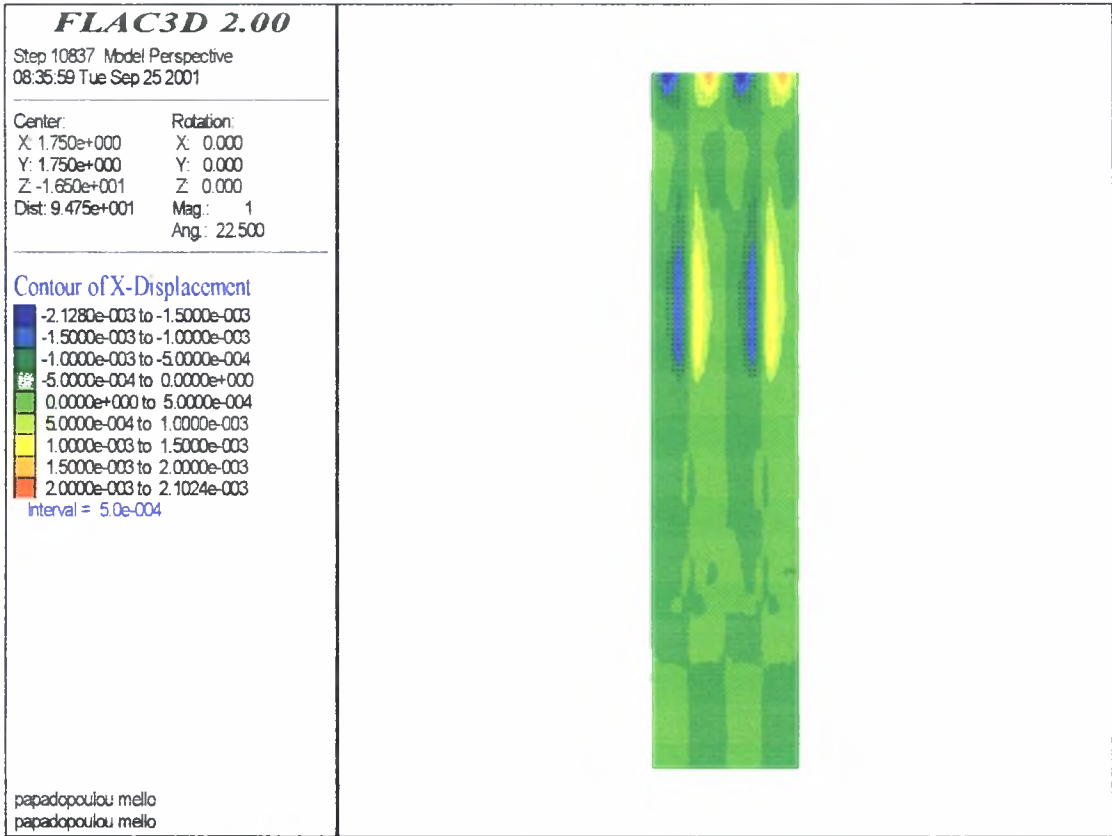
Διάγραμμα A2.12 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για D=0.9m

- D = 0.8m

xdis(m)	z(m)
0,99	0,000
0,33	-1,875
0,2	-3,750
0,57	-5,625
0,93	-7,500
1,45	-9,375
1,40	-11,250
1,56	-13,125
0,35	-15,000



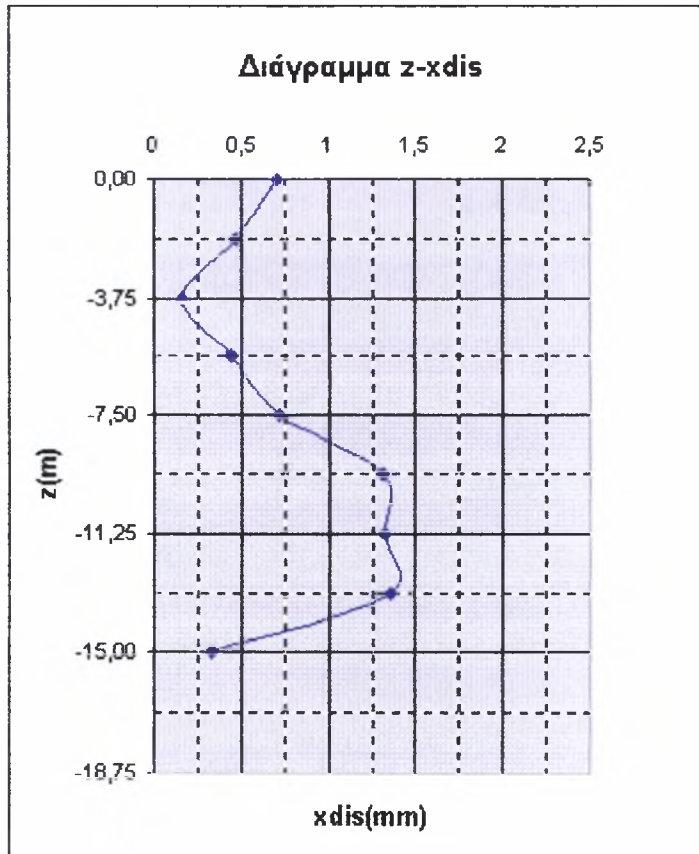
Σχήμα A2.13 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για D=0.8m



Διάγραμμα A2.13 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για D=0.8m

- D = 0.7m

xdis(m)	z(m)
0,71	0,000
0,47	-1,875
0,16	-3,750
0,44	-5,625
0,72	-7,500
1,31	-9,375
1,32	-11,250
1,36	-13,125
0,33	-15,000

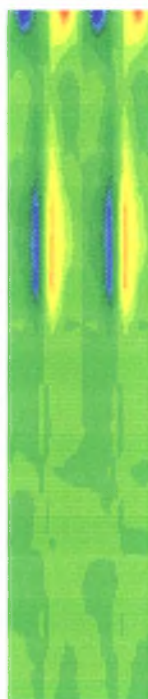
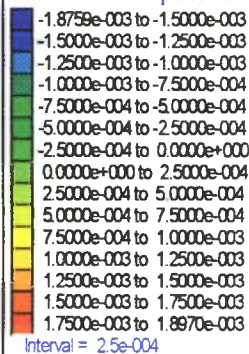


Σχήμα A2.14 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για D=0.7m

FLAC3D 2.00

Step 9854 Model Perspective
11:17:20 Tue Sep 25 2001

Center: Rotation:
X: 1.750e+000 X: 0.000
Y: 1.750e+000 Y: 0.000
Z: -1.650e+001 Z: 0.000
Dist: 9.475e+001 Mag: 1
 Ang: 22.500

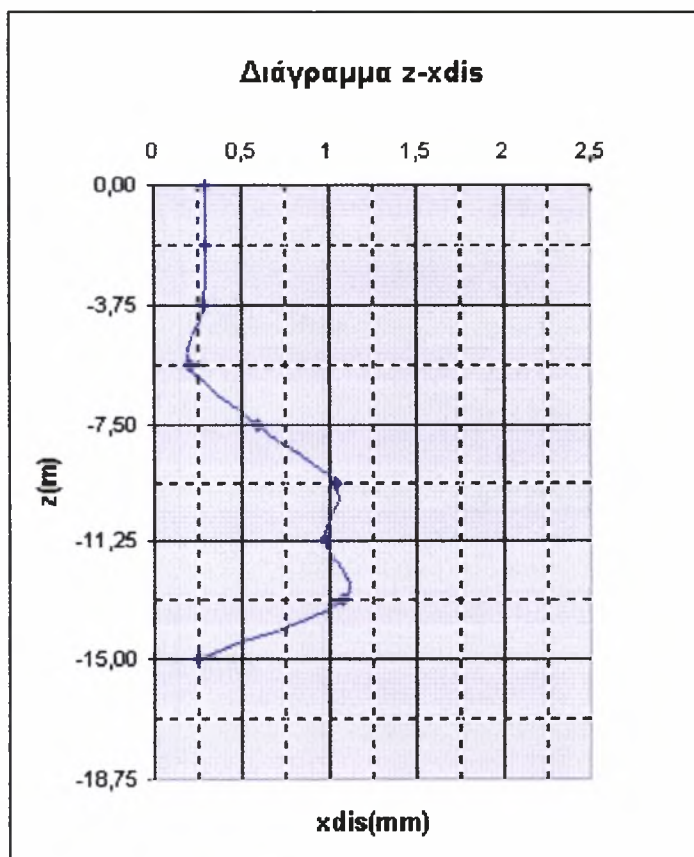
Contour of X-Displacement

papadopoulou mello
papadopoulou mello

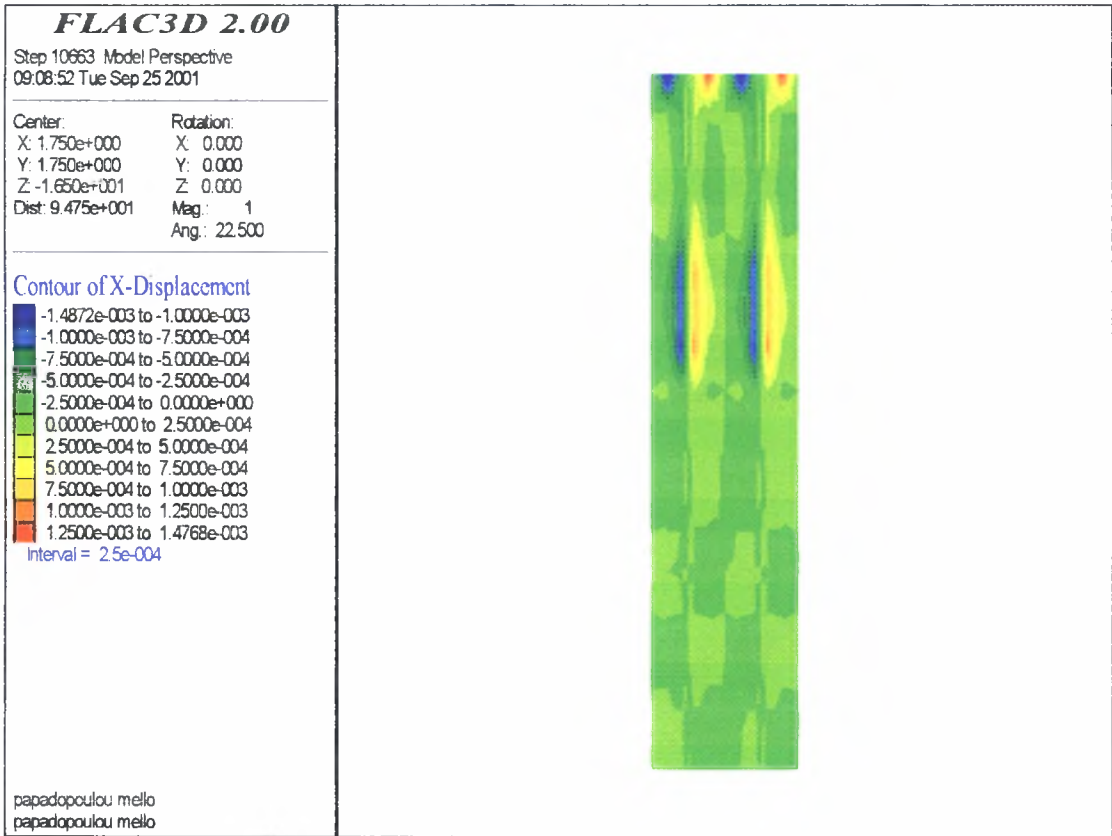
Διάγραμμα A2.14 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.7m$

- $D = 0.6m$

xdis(m)	z(m)
0,29	0,000
0,29	-1,875
0,28	-3,750
0,21	-5,625
0,59	-7,500
1,03	-9,375
0,98	-11,250
1,08	-13,125
0,25	-15,000



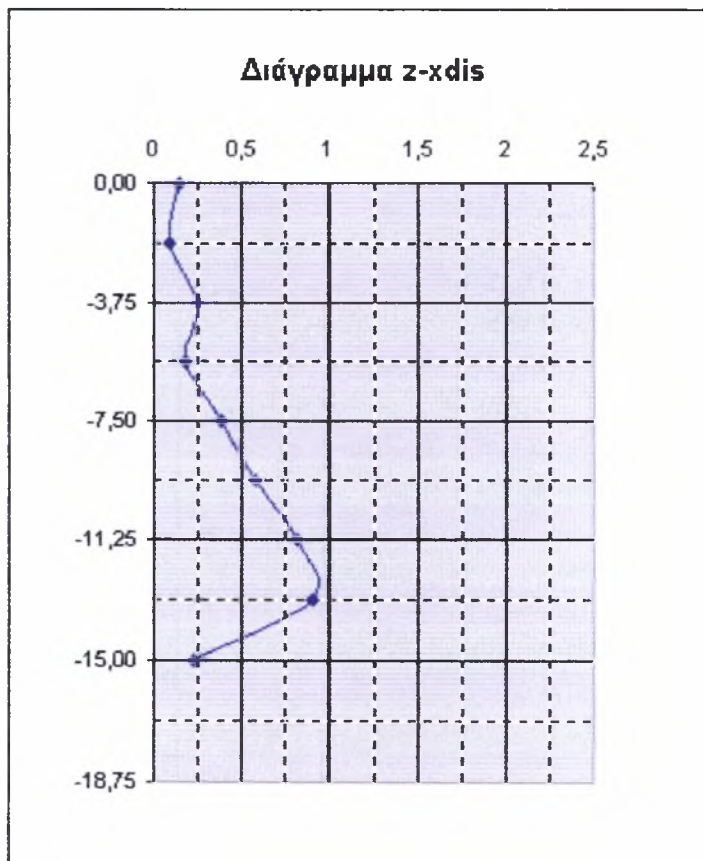
Σχήμα A2.15 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.6m$



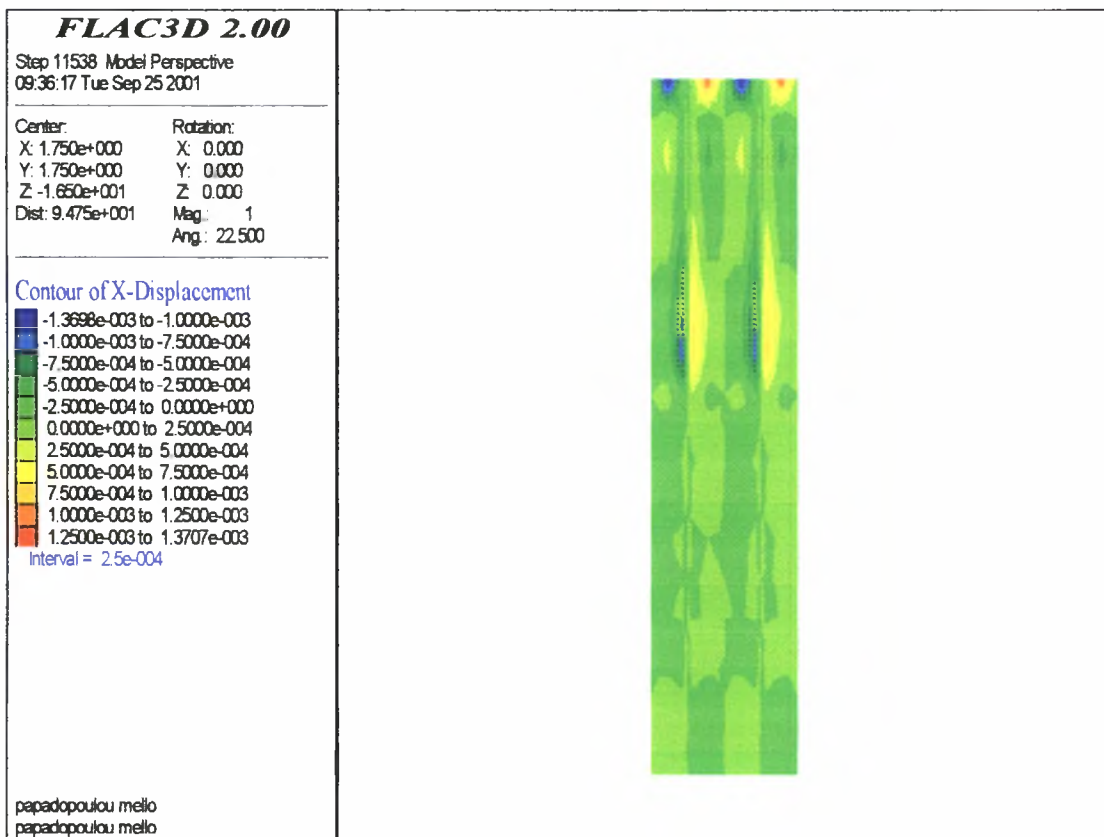
Διάγραμμα A2.15 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.6m$

- $D = 0.45m$

xdis	z
0,15	0,000
0,09	-1,875
0,25	-3,750
0,18	-5,625
0,38	-7,500
0,58	-9,375
0,81	-11,250
0,91	-13,125
0,23	-15,000



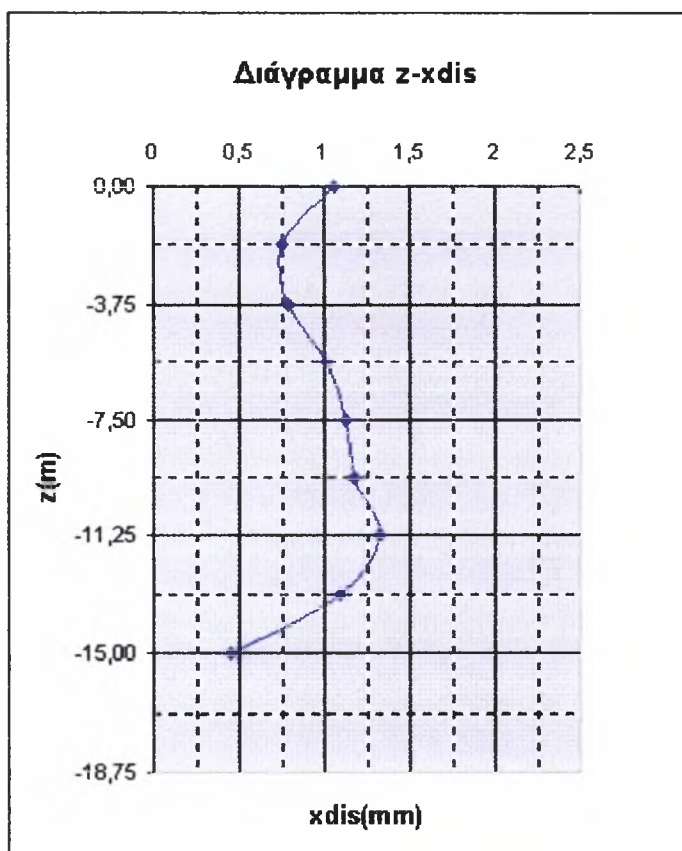
Σχήμα A2.16 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.45m$

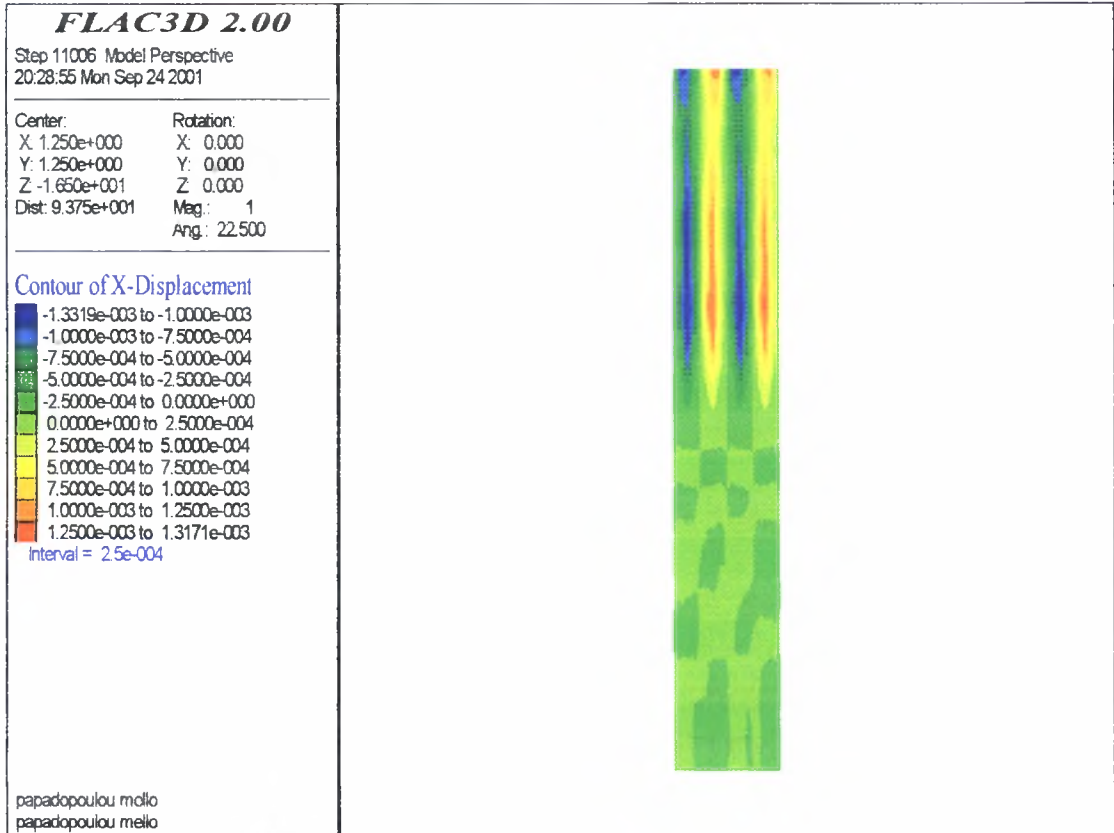


Διάγραμμα A2.16 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.45m$
γ) Σταθερή αξονική απόσταση $s=2.5m$

- $D = 1.2m$

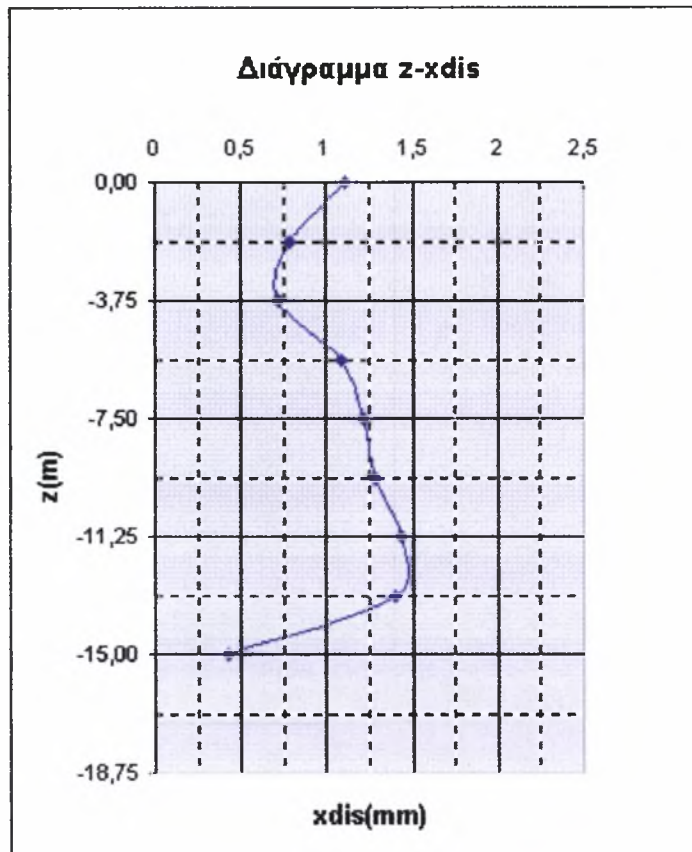
xdis(m)	z(m)
1,06	0,000
0,75	-1,875
0,79	-3,750
1,01	-5,625
1,13	-7,500
1,17	-9,375
1,32	-11,250
1,09	-13,125
0,45	-15,000



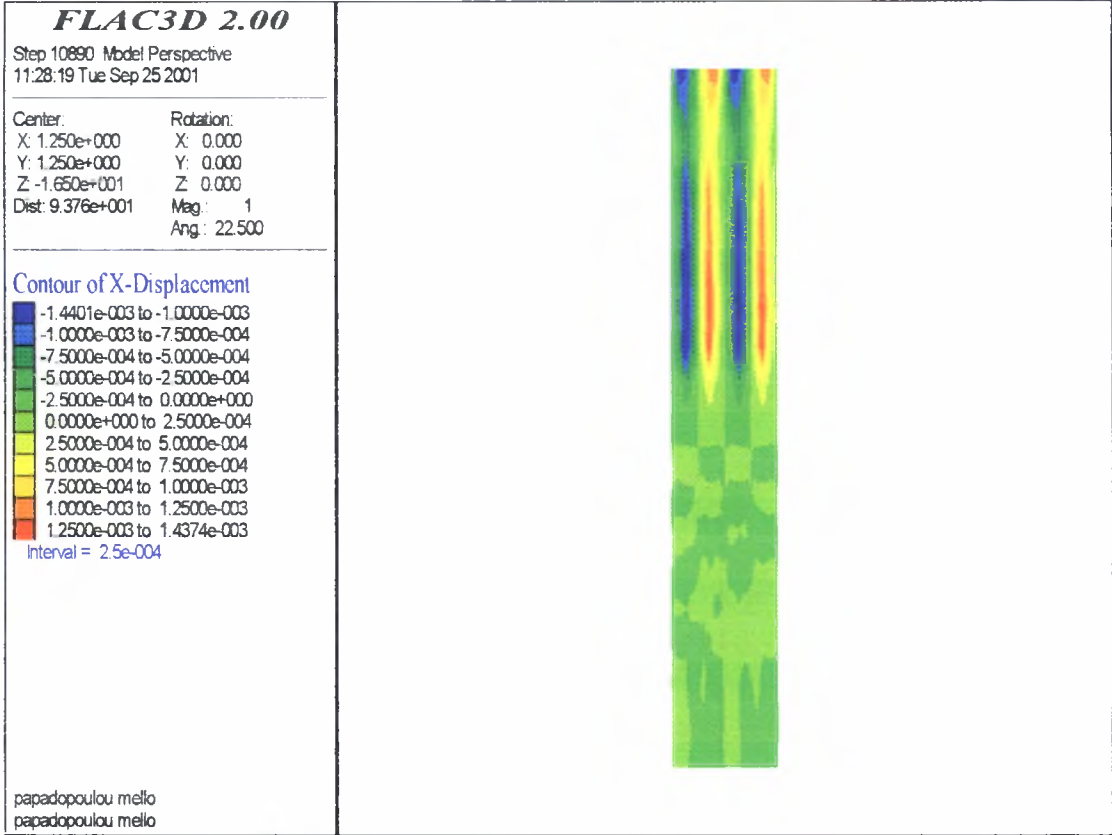
Σχήμα A2.17 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=1.2m$ Διάγραμμα A2.17 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=1.2m$

- $D = 1.1m$

xdis(m)	z(m)
1,11	0,000
0,79	-1,875
0,72	-3,750
1,09	-5,625
1,22	-7,500
1,29	-9,375
1,43	-11,250
1,40	-13,125
0,43	-15,000



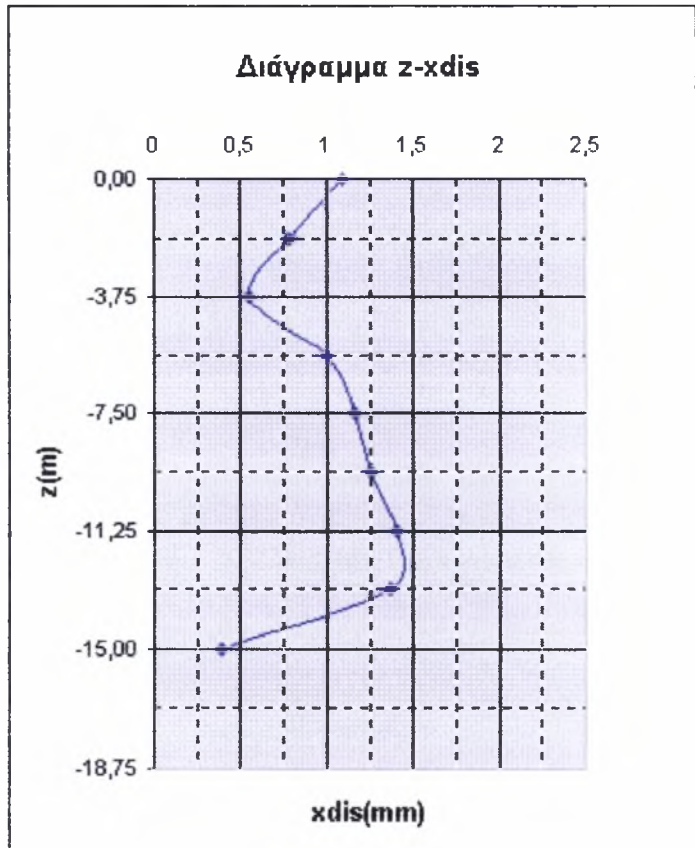
Σχήμα A2.18 Πλευρική διάγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=1.1m$



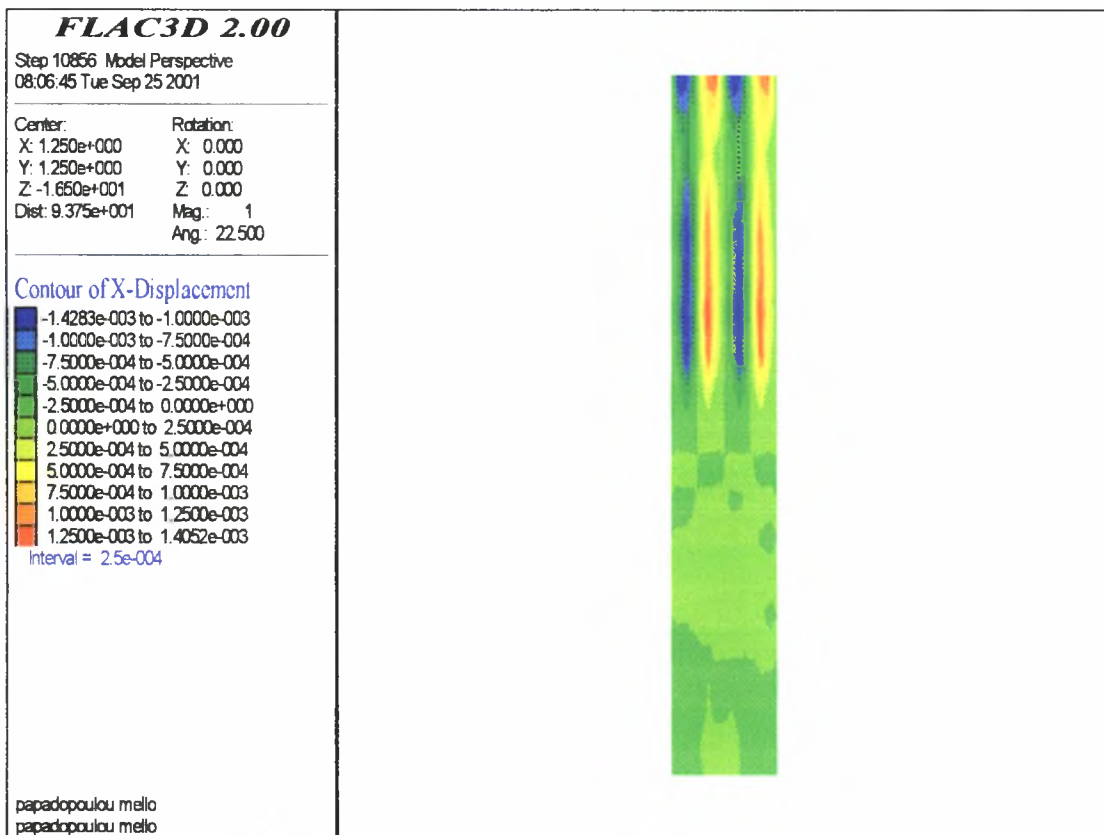
Διάγραμμα A2.18 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=1.1m$

- $D = 1.0m$

xdis(m)	z(m)
1,10	0,000
0,78	-1,875
0,55	-3,750
1,00	-5,625
1,16	-7,500
1,26	-9,375
1,40	-11,250
1,37	-13,125
0,39	-15,000



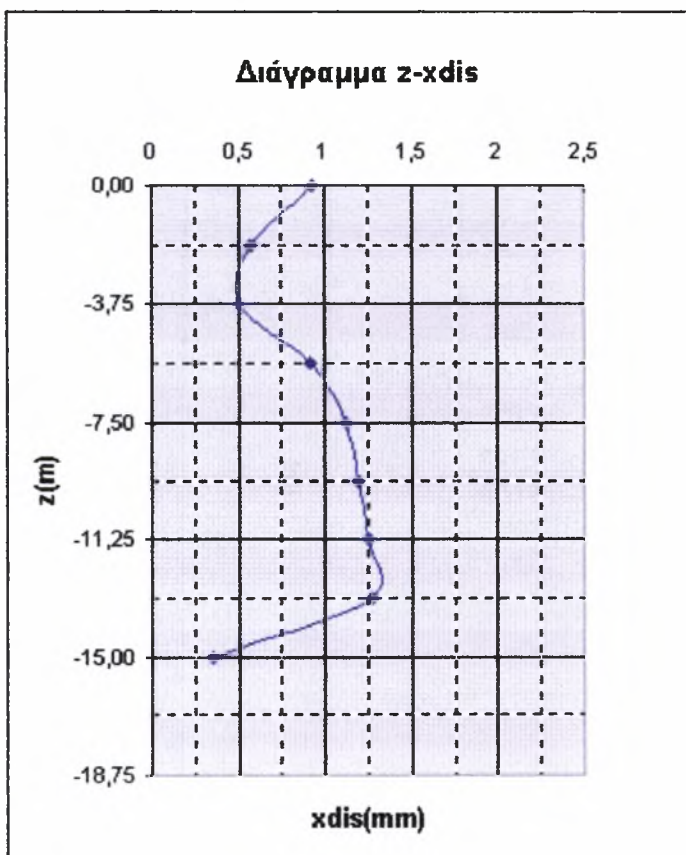
Σχήμα A2.19 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=1.0m$



Διάγραμμα A2.19 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=1.0m$

- $D = 0.9m$

xdis(m)	z(m)
0,93	0,000
0,57	-1,875
0,50	-3,750
0,92	-5,625
1,12	-7,500
1,19	-9,375
1,25	-11,250
1,27	-13,125
0,36	-15,000



Σχήμα A2.20 Πλευρική διόγκωση των χαλικοपाσσάλων για $D=0.9m$

FLAC3D 2.00
 Step 10836 Model Perspective
 11:33:53 Tue Sep 25 2001

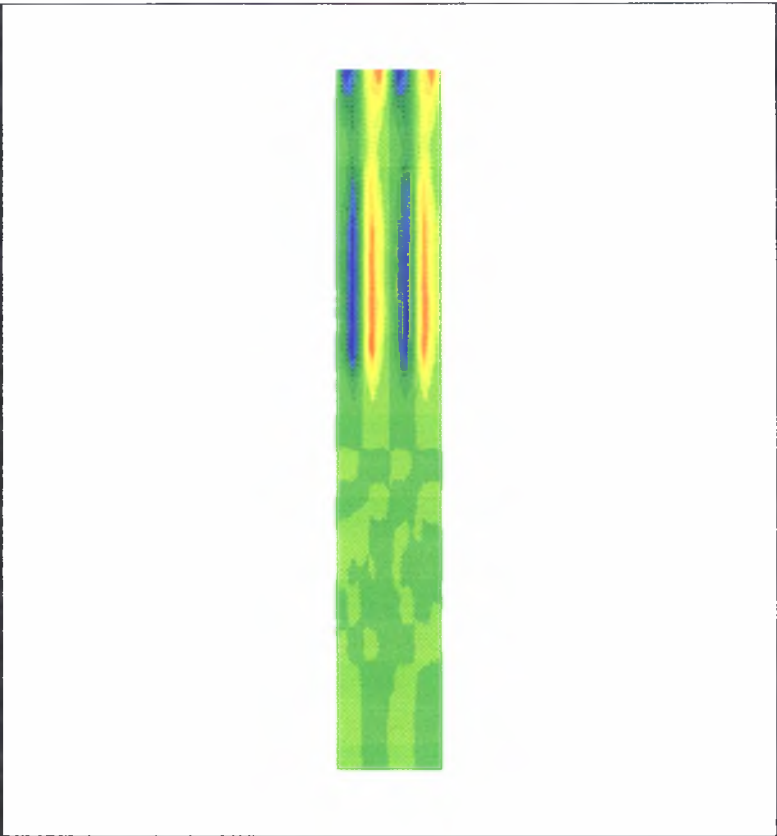
Center: X: 1.250e+000 Y: 1.250e+000 Z: -1.650e+001
 Rotation: X: 0.000 Y: 0.000 Z: 0.000
 Dist: 9.375e+001 Mag: 1 Ang: 22.500

Contour of X-Displacement

-1.3174e-003 to -1.0000e-003
 -1.0000e-003 to -7.5000e-004
 -7.5000e-004 to -5.0000e-004
 -5.0000e-004 to -2.5000e-004
 -2.5000e-004 to 0.0000e+000
 0.0000e+000 to 2.5000e-004
 2.5000e-004 to 5.0000e-004
 5.0000e-004 to 7.5000e-004
 7.5000e-004 to 1.0000e-003
 1.0000e-003 to 1.2500e-003
 1.2500e-003 to 1.3127e-003

Interval = 2.5e-004

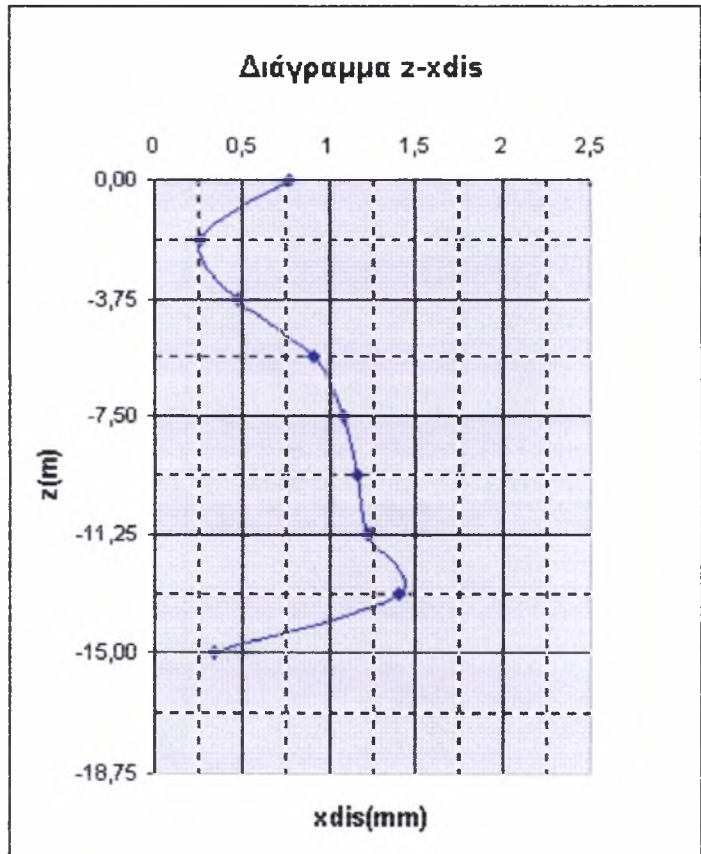
papadopoulou mello
 papadopoulou mello



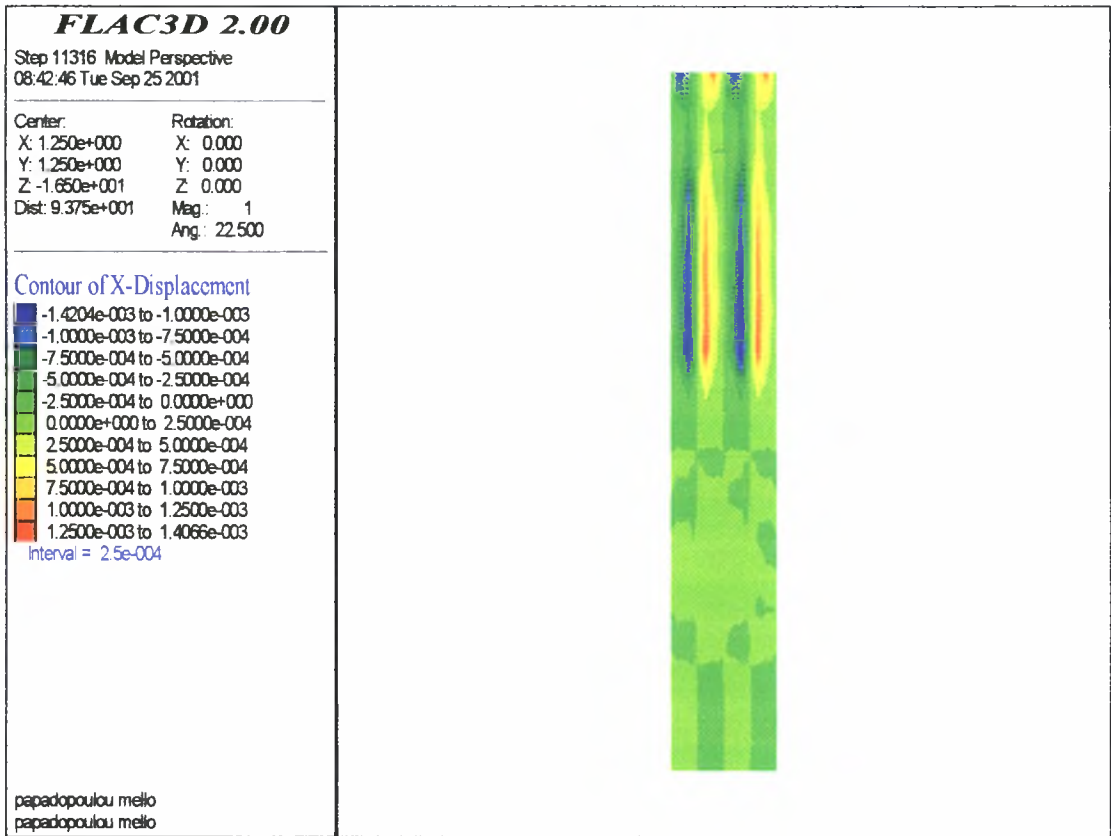
Διάγραμμα A2.20 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για D=0.9m

- $D = 0.8m$

xdis(m)	z(m)
0,78	0,000
0,26	-1,875
0,48	-3,750
0,91	-5,625
1,08	-7,500
1,16	-9,375
1,22	-11,250
1,40	-13,125
0,34	-15,000



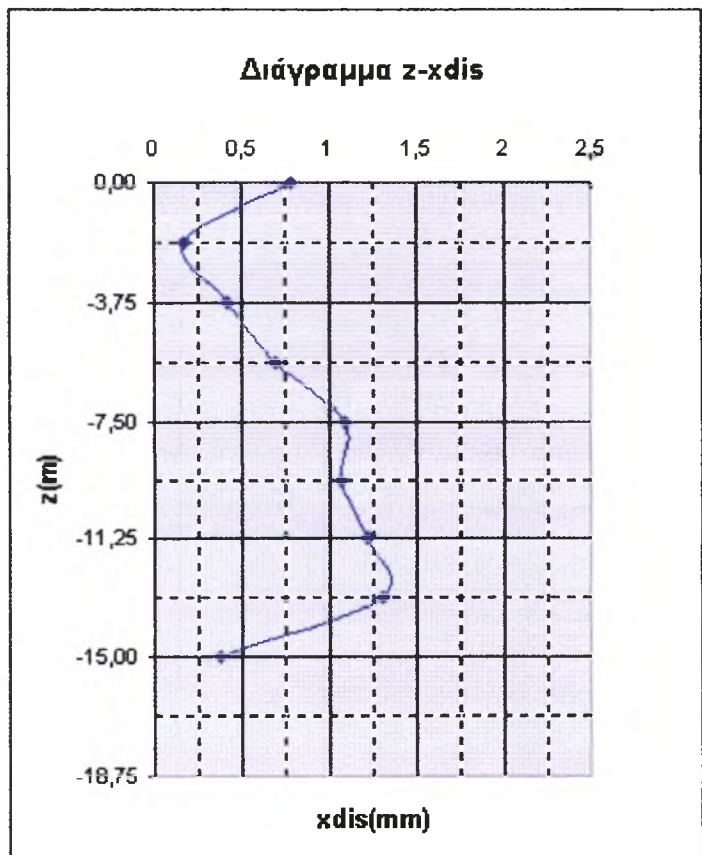
Σχήμα A2.21 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για D=0.8m



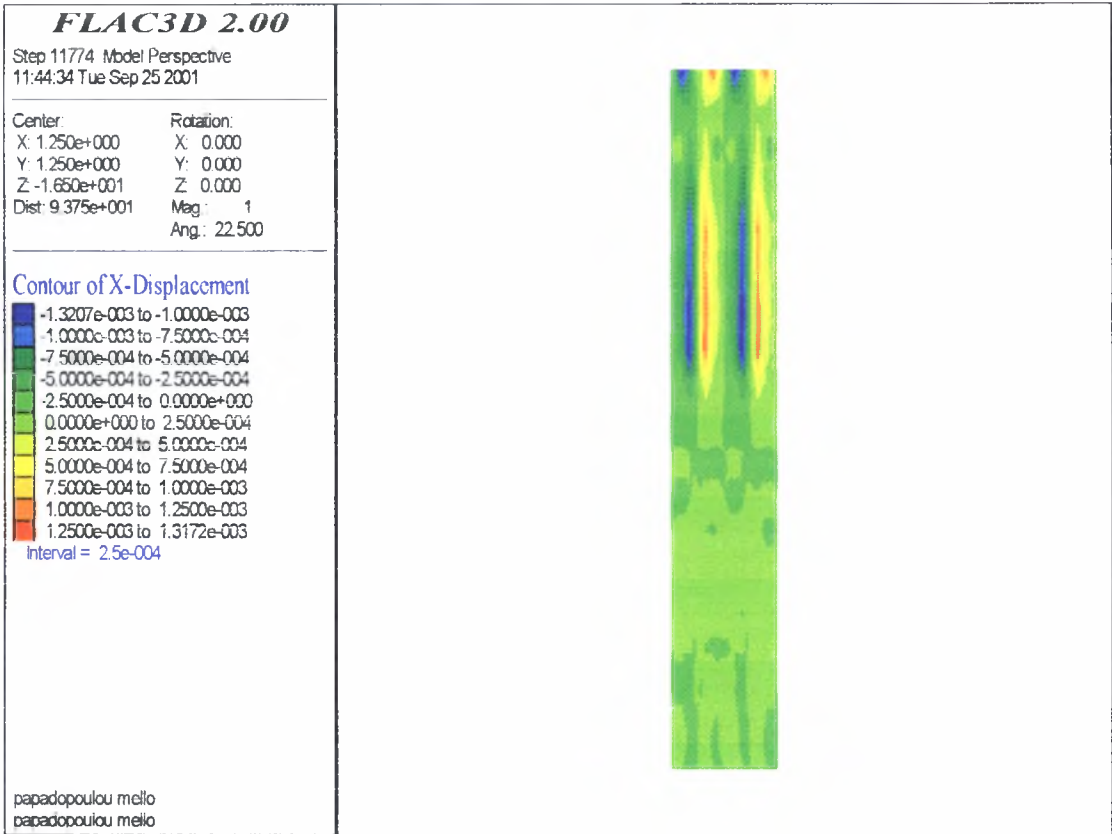
Διάγραμμα A2.21 Ποσοιές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.8m$

- $D = 0.7m$

xdis	z
0,78	0,000
0,17	-1,875
0,42	-3,750
0,69	-5,625
1,09	-7,500
1,07	-9,375
1,22	-11,250
1,31	-13,125
0,37	-15,000



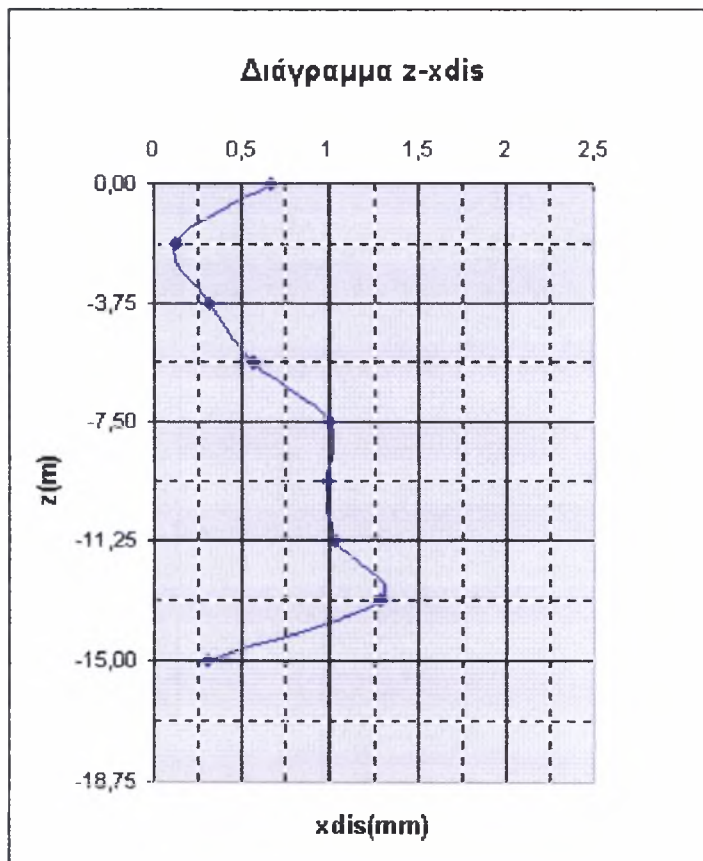
Σχήμα A2.22 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.7m$



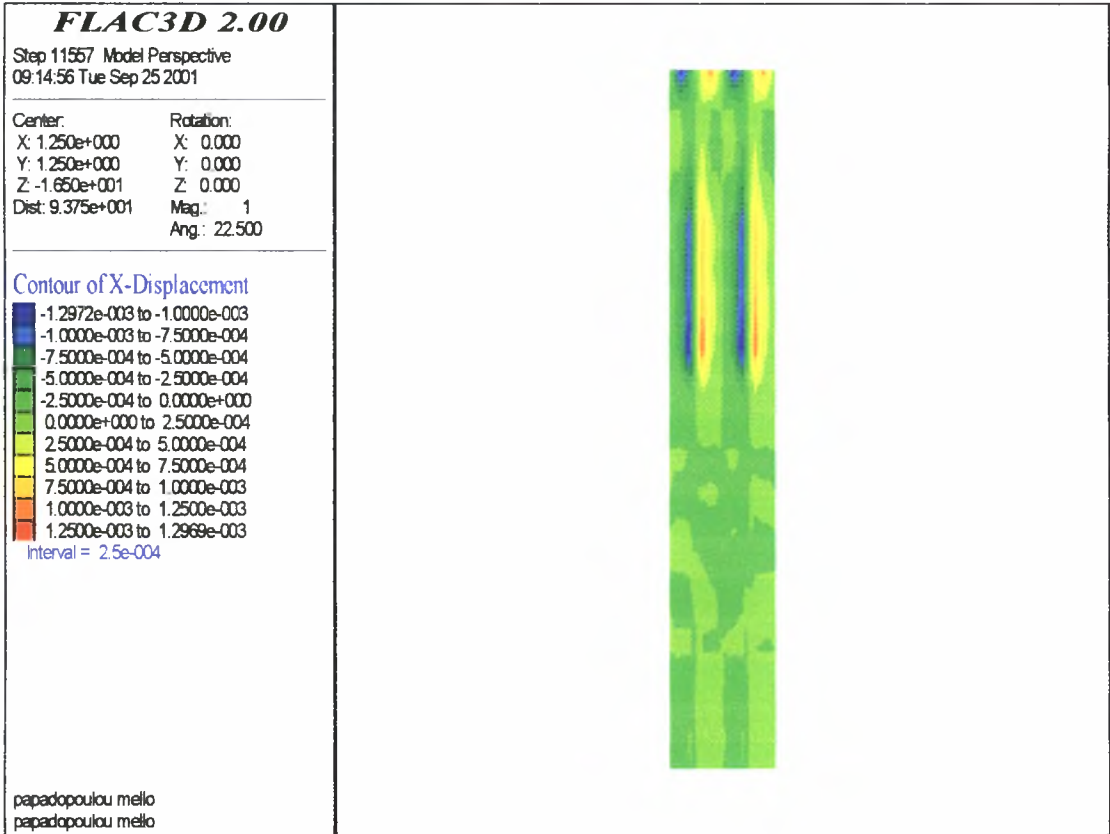
Διάγραμμα A2.22 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.7m$

- $D = 0.6m$

xdis(m)	z(m)
0,67	0,000
0,12	-1,875
0,32	-3,750
0,56	-5,625
1,00	-7,500
0,98	-9,375
1,03	-11,250
1,29	-13,125
0,30	-15,000



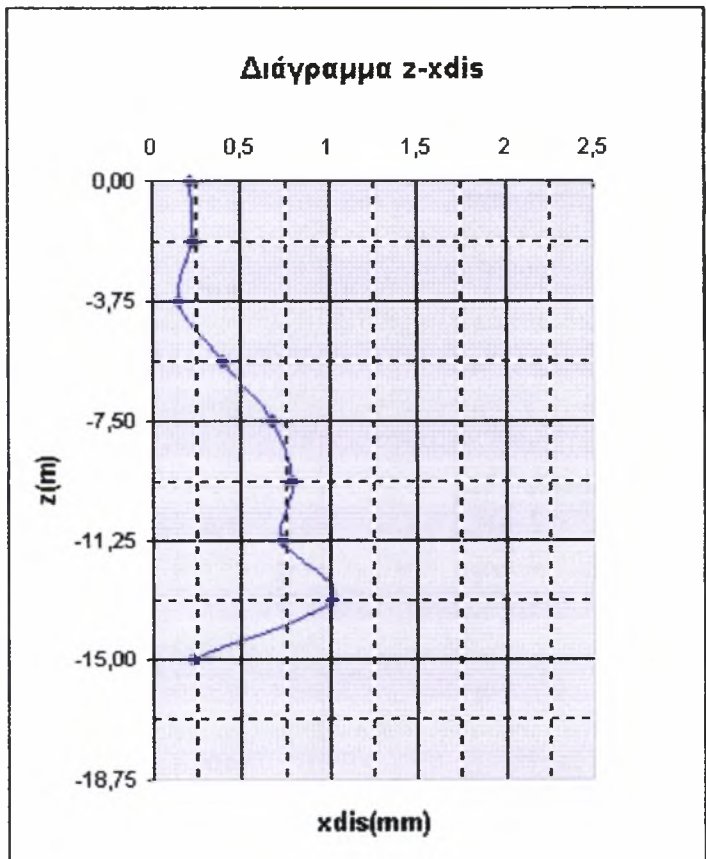
Σχήμα A2.23 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.6m$



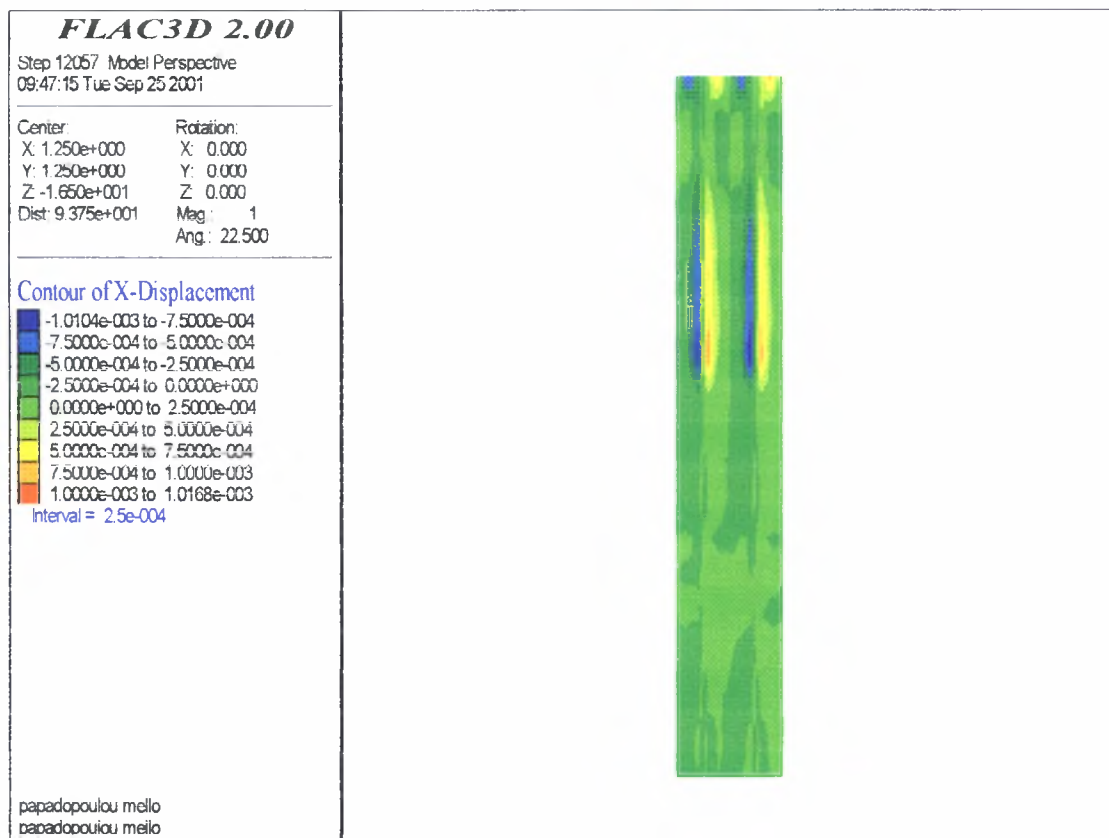
Διάγραμμα A2.23 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.6m$

- $D = 0.45m$

xdis(m)	z(m)
0,21	0,000
0,22	-1,875
0,15	-3,750
0,39	-5,625
0,68	-7,500
0,79	-9,375
0,73	-11,250
1,01	-13,125
0,22	-15,000



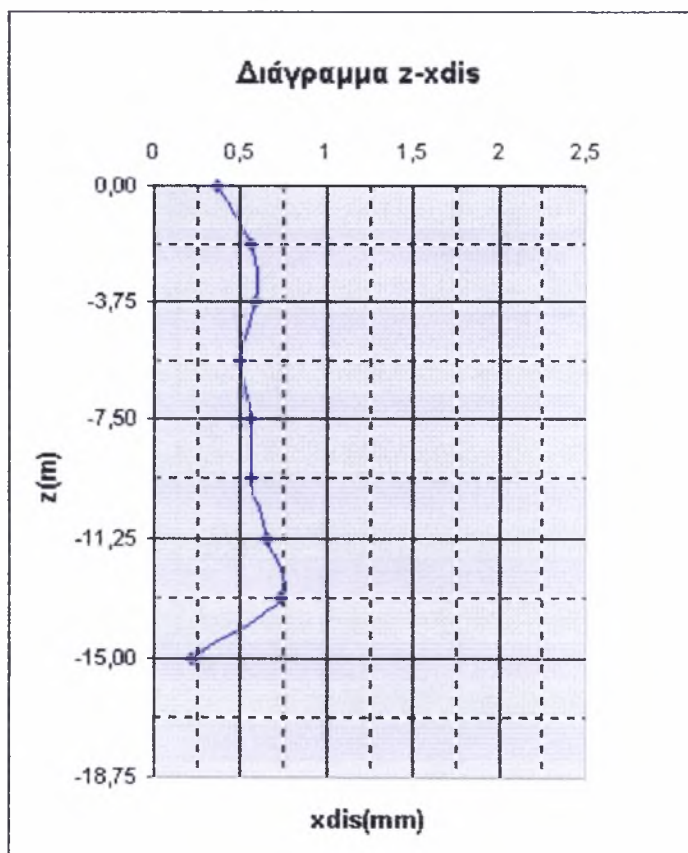
Σχήμα A2.24 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.45m$

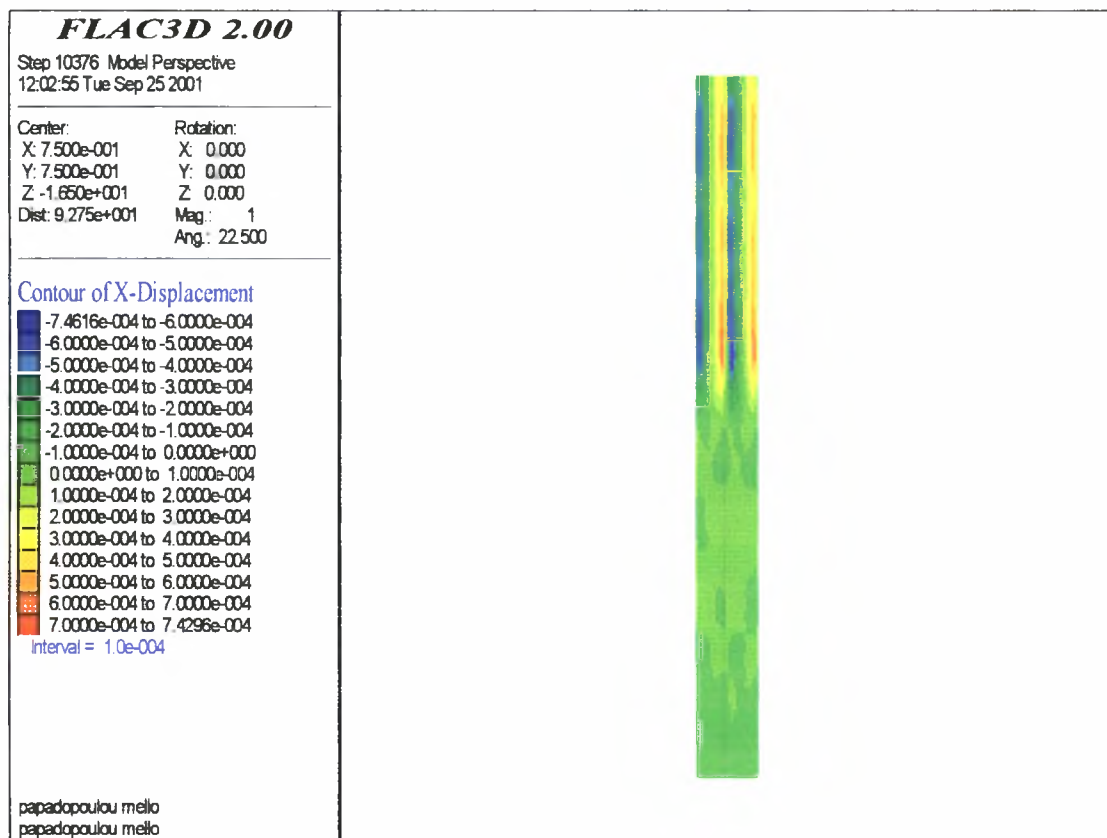


Διάγραμμα A2.24 Ισοπλάτες οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.45m$
δ) Σταθερή αξονική απόσταση $s=1.5m$

- $D = 1.1m$

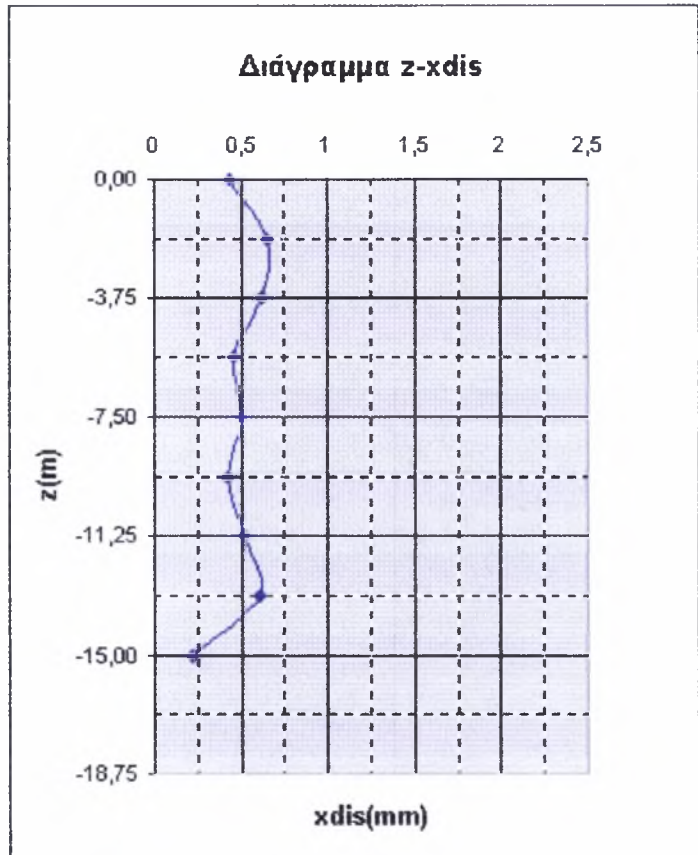
xdis(m)	z(m)
0,37	0,000
0,57	-1,875
0,59	-3,750
0,5	-5,625
0,57	-7,500
0,56	-9,375
0,66	-11,250
0,74	-13,125
0,22	-15,000



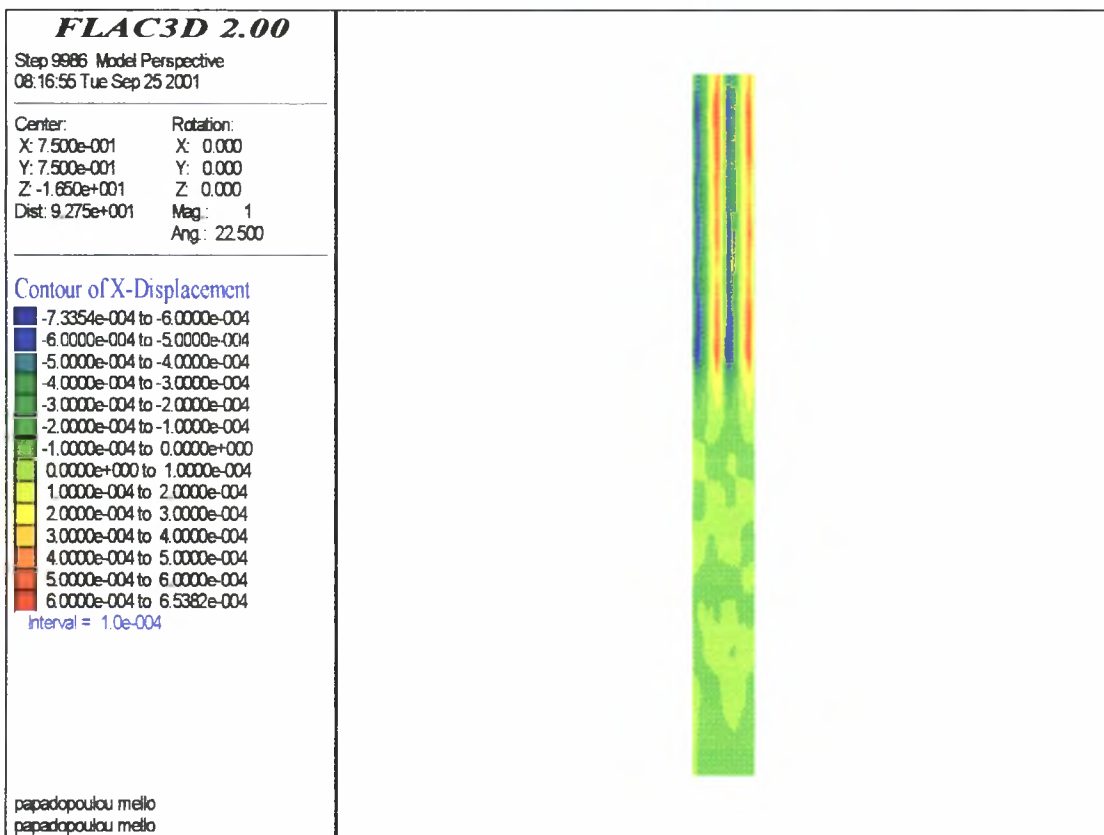
Σχήμα Α2.25 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=1.1m$ Διάγραμμα Α2.25 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=1.1m$

- $D = 1.0m$

xdis(m)	z(m)
0,44	0,000
0,65	-1,875
0,62	-3,750
0,46	-5,625
0,51	-7,500
0,42	-9,375
0,52	-11,250
0,61	-13,125
0,22	-15,000



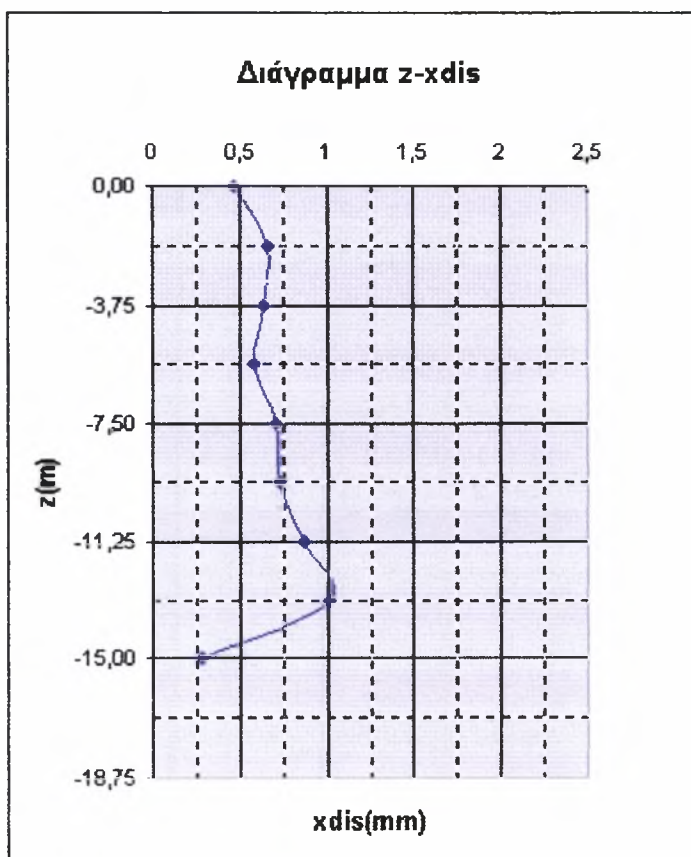
Σχήμα A2.26 Πλευρική διόγκωση των χαλκοπασσάλων για $D = 1.0m$



Διάγραμμα A2.26 Ισομέρες οριζόντιων μετακινήσεων για $D=1.0m$

- $D = 0.9m$

xdis(m)	z(m)
0,47	0,000
0,66	-1,875
0,64	-3,750
0,58	-5,625
0,71	-7,500
0,73	-9,375
0,87	-11,250
1,02	-13,125
0,28	-15,000



Σχήμα A2.27 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.9m$

FLAC3D 2.00

Step 10873 Model Perspective
12:08:06 Tue Sep 25 2001

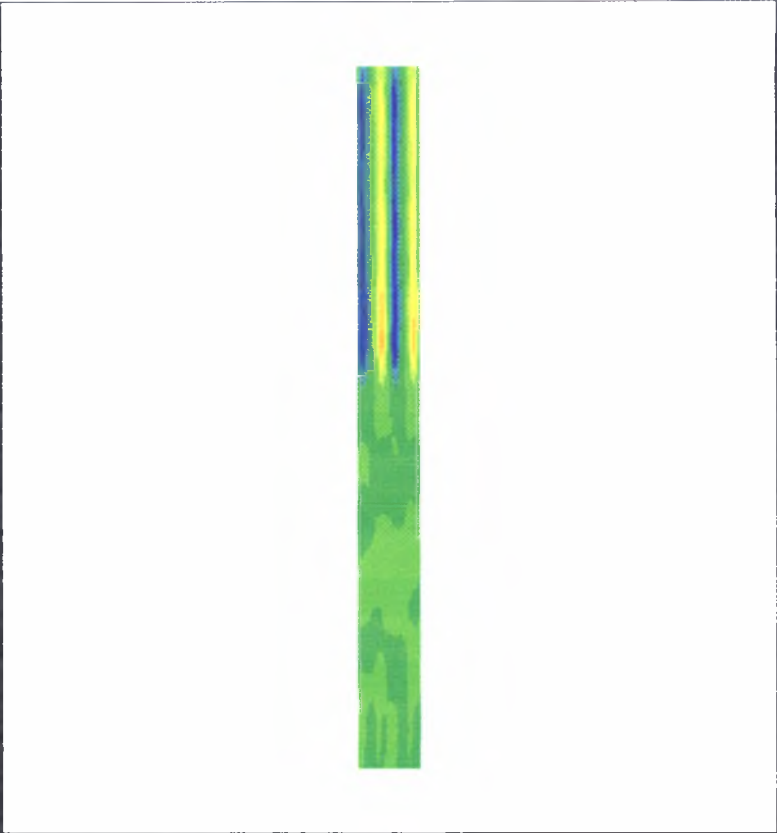
Center: X: 7.500e-001 Y: 7.500e-001 Z: -1.650e+001
 Rotation: X: 0.000 Y: 0.000 Z: 0.000
 Dist: 9.275e+001 Mag: 1
 Ang: 22.500

Contour of X-Displacement

- -9.9951e-004 to -5.0000e-004
- -5.0000e-004 to -2.5000e-004
- -2.5000e-004 to 0.0000e+000
- 0.0000e+000 to 2.5000e-004
- 2.5000e-004 to 5.0000e-004
- 5.0000e-004 to 7.5000e-004
- 7.5000e-004 to 1.0000e-003
- 1.0000e-003 to 1.0213e-003

Interval = 2.5e-004

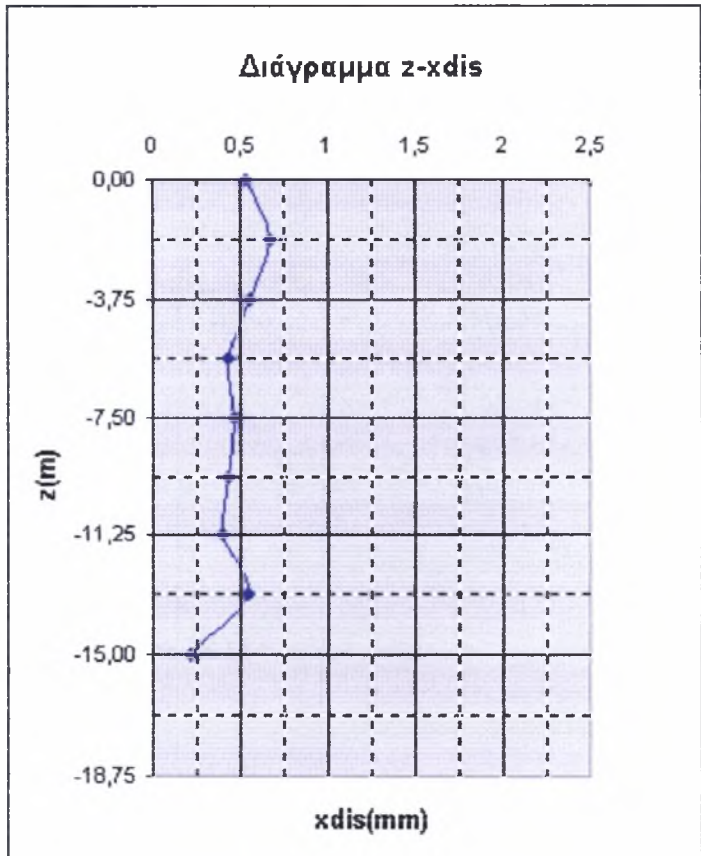
papadopoulou melio
papadopoulou melio



Διάγραμμα A2.27 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για D=0.9m

- D = 0.8m

xdis(m)	z(m)
0,53	0,000
0,67	-1,875
0,56	-3,750
0,43	-5,625
0,47	-7,500
0,43	-9,375
0,40	-11,250
0,55	-13,125
0,22	-15,000

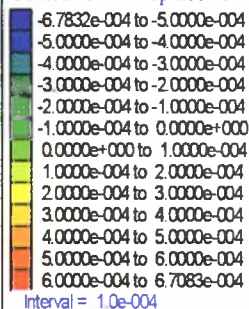


Σχήμα A2.28 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπιασσάλων για D = 0.8m

FLAC3D 2.00Step 13351 Model Perspective
08:49:04 Tue Sep 25 2001

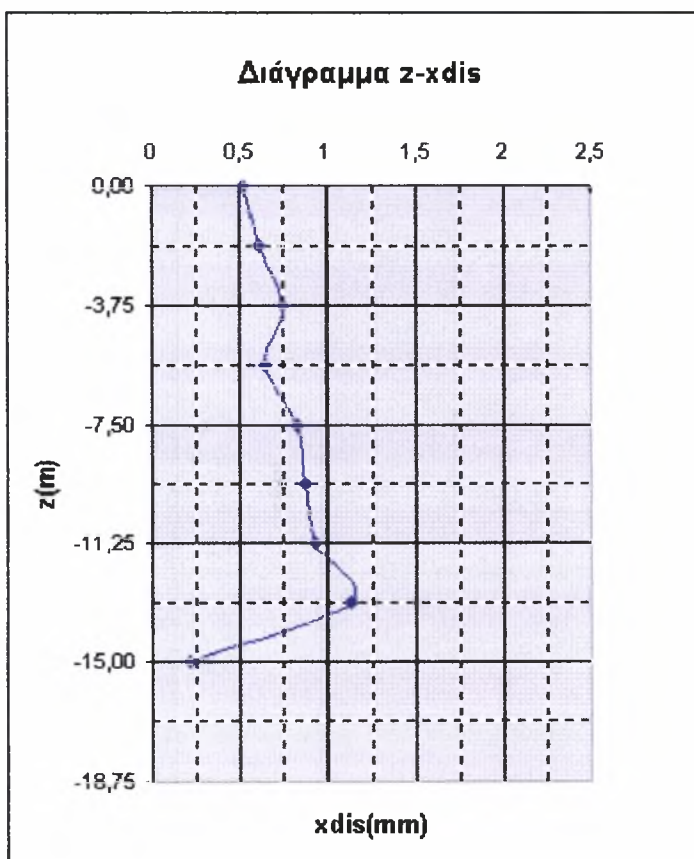
Center: Rotation:
 X: 7.500e-001 X: 0.000
 Y: 7.500e-001 Y: 0.000
 Z: -1.650e+001 Z: 0.000
 Dist: 9.275e+001 Mag.: 1
 Ang.: 22.500

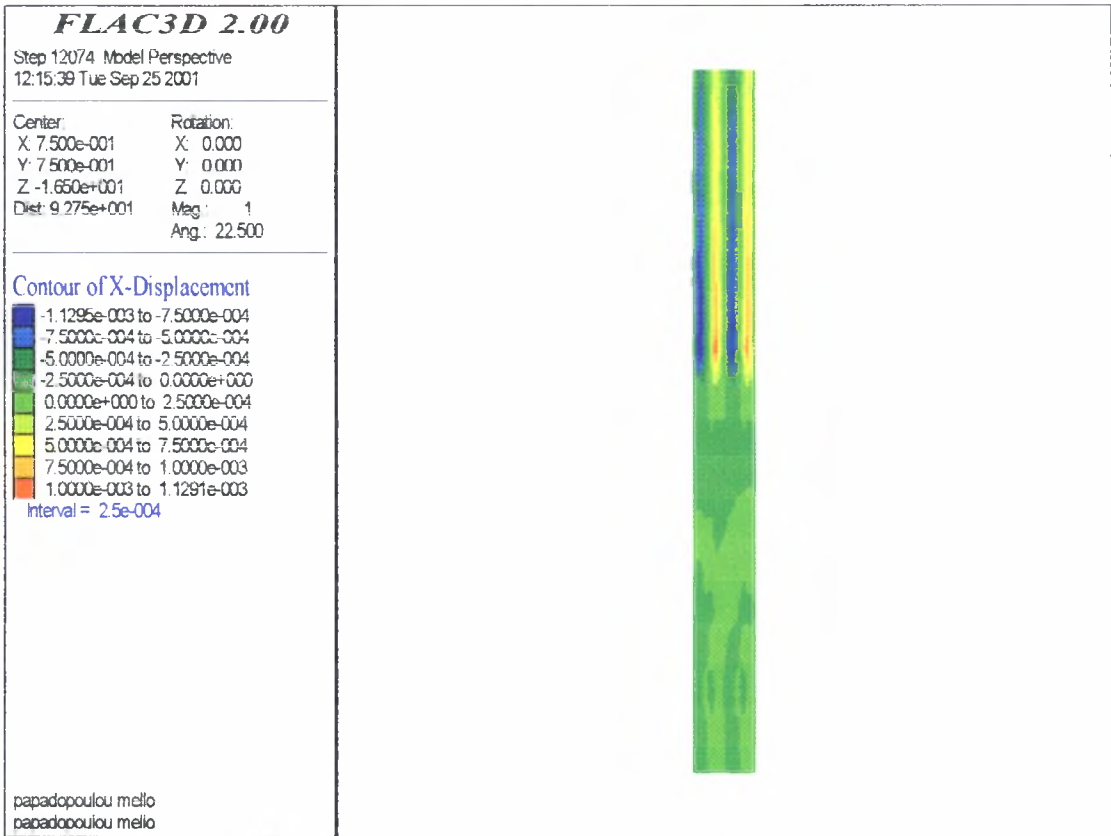
Contour of X-Displacement

papadopoulou mello
papadopoulou melloΔιάγραμμα A2.28 Ισοαμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.8m$

- $D = 0.7m$

xdis(m)	z(m)
0,52	0,000
0,61	-1,875
0,75	-3,750
0,65	-5,625
0,83	-7,500
0,87	-9,375
0,93	-11,250
1,13	-13,125
0,21	-15,000

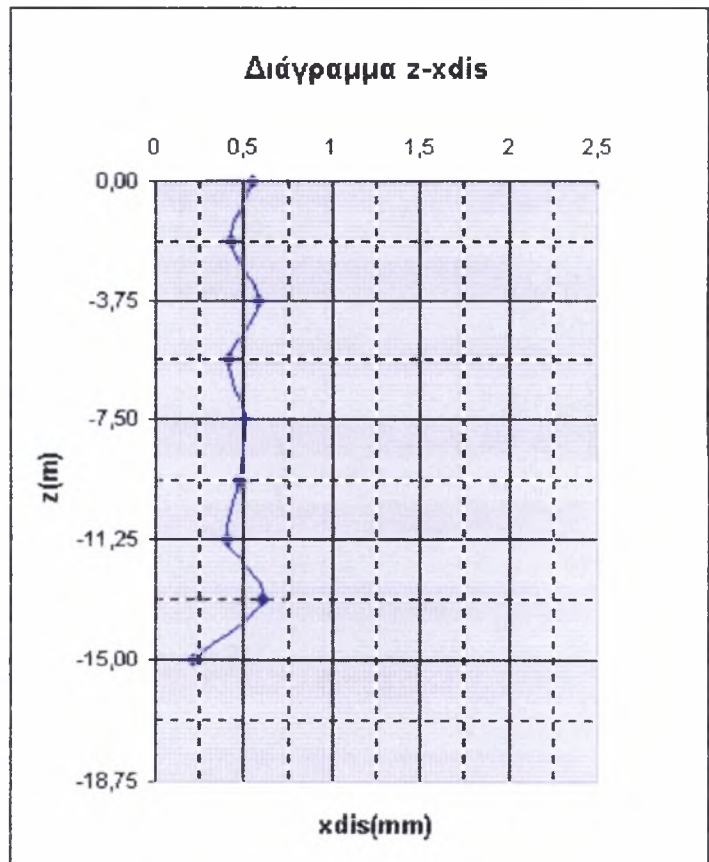
Σχήμα A2.29 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.7m$



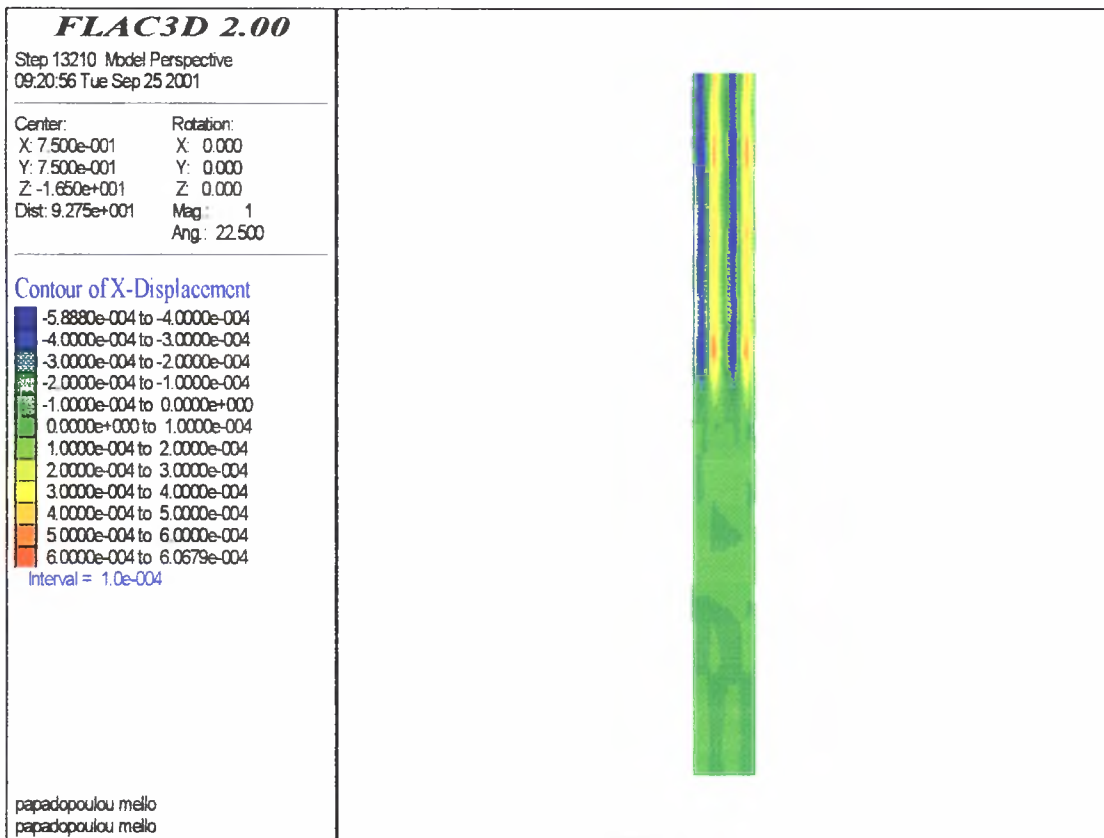
Διάγραμμα A2.29 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.7m$

- $D = 0.6m$

xdis(m)	z(m)
0,55	0,000
0,43	-1,875
0,58	-3,750
0,42	-5,625
0,51	-7,500
0,47	-9,375
0,40	-11,250
0,61	-13,125
0,21	-15,000



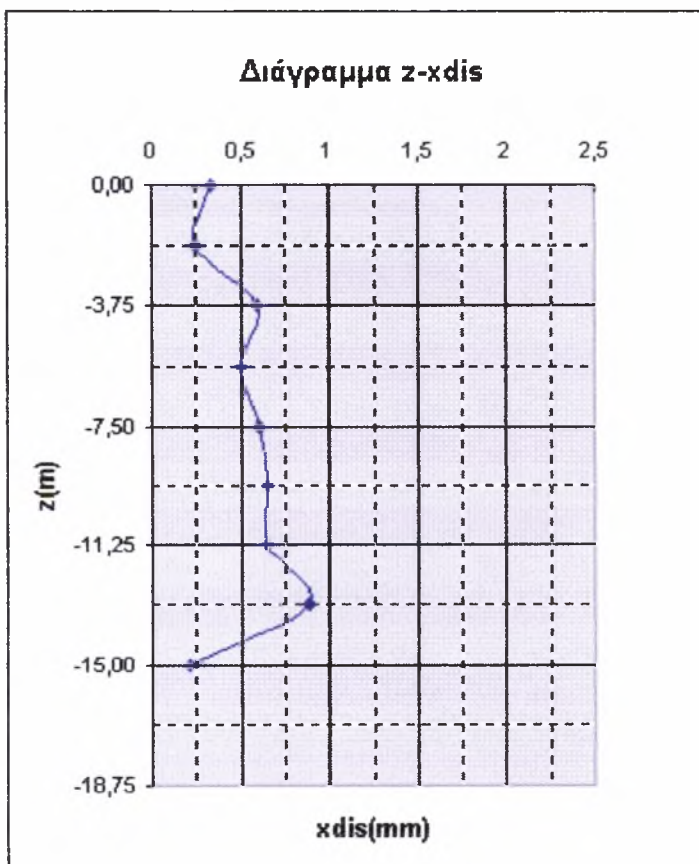
Σχήμα A2.30 Πλευρική διόγκωση των χαλκοπασσάλων για $D = 0.6m$



Διάγραμμα A2.30 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.6m$

- $D = 0.45m$

xdis(m)	z(m)
0,34	0,000
0,25	-1,875
0,59	-3,750
0,50	-5,625
0,61	-7,500
0,65	-9,375
0,65	-11,250
0,89	-13,125
0,21	-15,000



Σχήμα A2.31 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων για $D=0.45m$

FLAC3D 2.00

Step 14755 Model Perspective
09:54:18 Tue Sep 25 2001

Center:	Rotation:
X: 7.500e-001	X: 0.000
Y: 7.500e-001	Y: 0.000
Z: -1.650e+001	Z: 0.000
Dist: 9.275e+001	Mag: 1
	Ang.: 22.500

Contour of X-Displacement

	-8.8742e-004 to -6.0000e-004
	-6.0000e-004 to -4.0000e-004
	-4.0000e-004 to -2.0000e-004
	-2.0000e-004 to 0.0000e+000
	0.0000e+000 to 2.0000e-004
	2.0000e-004 to 4.0000e-004
	4.0000e-004 to 6.0000e-004
	6.0000e-004 to 8.0000e-004
	8.0000e-004 to 8.8540e-004

Interval = 2.0e-004



papadopoulos mello
papadopoulos mello

Διάγραμμα A2.31 Ισοτιμές οριζόντιων μετακινήσεων για $D=0.45m$

A3

Γενικά συμπεράσματα και έλεγχος σχετικά με την ορθότητα του προσομοιώματος

Στα προηγούμενα παραρτήματα έγινε διεξοδική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων όσον αφορά την πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων. Από τις αναλύσεις αυτές προέκυψαν πολύ μικρές πλευρικές διογκώσεις στην κεφαλή των χαλικοπασσάλων, γεγονός που φαινομενικά έρχεται σε αντίθεση με τη βιβλιογραφία. Η αντίθεση αυτή οφείλεται στους εξής παράγοντες:

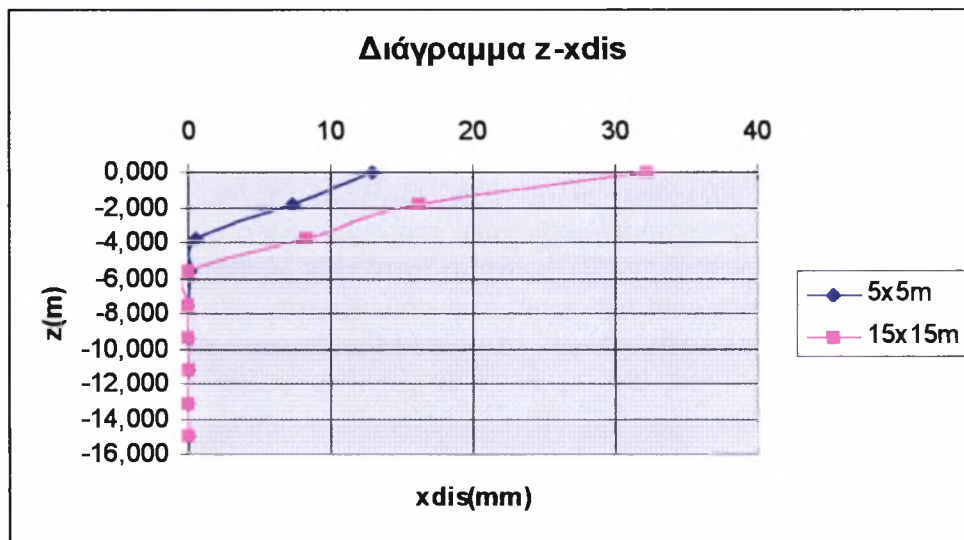
1. Το φορτίο που επιβάλλεται στις παραπάνω παραμετρικές αναλύσεις είναι μικρό σε σχέση με τις διαστάσεις του προβλήματος. Στη βιβλιογραφία, για πειραματικό προσομοίωμα διαστάσεων 2.25cm με μεμονωμένο «χαλικοπάσσαλο» μήκους 1.5cm και διαμέτρου 1.25-3.8cm επιβάλλεται φορτίο 100-400 kPa. Σε αυτή την περίπτωση και για καθίζηση της τάξεως του 21% της διαμέτρου του χαλικοπασσάλου, η πλευρική διόγκωσή του δεν ξεπέρασε το 1mm.
2. Το φορτίο που επιβλήθηκε στο αριθμητικό προσομοίωμα ήταν κατανεμημένο σε όλη την επιφάνεια του καννάβου, σε αντίθεση με τα πειραματικά προσομοιώματα της βιβλιογραφίας, στα οποία είχε επιβληθεί φορτίο μόνον στην κεφαλή του χαλικοπασσάλου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το αφόρτιστο περιβάλλον έδαφος ασκούσε μικρή πλευρική συμπίεση στον χαλικοπάσσαλο, με αποτέλεσμα αυτός να διογκώνεται στην κεφαλή του με μεγαλύτερη ευκολία. Στην περίπτωση αντιθέτως του αριθμητικού προσομοιώματος, η διόγκωση των χαλικοπασσάλων στην κεφαλή παρεμποδίζεται από τη σημαντική πλευρική «περίσφιξη» που του ασκεί το περιβάλλον φορτιζόμενο έδαφος.
3. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στα πειράματα που αναφέρονται στη βιβλιογραφία θεωρήθηκε μεμονωμένος χαλικοπάσσαλος. Στο αριθμητικό προσομοίωμα όμως θεωρήθηκε ομάδα χαλικοπασσάλων σε αξονική απόσταση μεταξύ τους ίση με 5m το μέγιστο. Το γεγονός αυτό ενέτεινε περισσότερο την πλευρική παρεμπόδιση στους χαλικοπασσάλους.
4. Στα πειραματικά προσομοιώματα οι χαλικοπάσσαλοι εδράζονταν σε στέρεο υπόβαθρο, αντίθετα με το αριθμητικό προσομοίωμα όπου θεωρήθηκε μαλακό υπόβαθρο.

Για τους ως άνω λόγους και για την επαλήθευση του αριθμητικού προσομοιώματος έγιναν επιλύσεις με αρκετά μεγάλο φορτίο της τάξεως των 500kPa σε κάρναβο 5x5m² (αρχικός κάρναβος) και 15x15m² (θεώρηση μεμονωμένων χαλικοπασσάλων). Στις επιλύσεις αυτές, τα αποτελέσματα που προέκυψαν προσέγγιζαν κατά πολύ περισσότερο τα πειραματικά αποτελέσματα. Αναλυτικά, τα αποτελέσματα των ως άνω αριθμητικών επιλύσεων παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα.

5x5m 15x15m

xdis(mm)	xdis(mm)	z(m)
12,90	32,30	0,000
7,30	16,20	-1,875
0,60	8,30	-3,750
0,20	0,00	-5,625
0,07	0,00	-7,500
0,06	0,00	-9,375
0,06	0,02	-11,250
0,05	0,00	-13,125
0,03	0,01	-15,000

ΠΙΝΑΚΑΣ Α3.1 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων με το βάθος για κάρναβο 5x5m² και 15x15m²

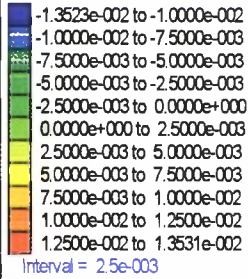


Διάγραμμα Α3.1 Πλευρική διόγκωση των χαλικοπασσάλων με το βάθος

FLAC3D 2.00

Step 3290 Model Perspective
18:20:38 Sat Oct 6 2001

Center: Rotation:
X: 2.500e+000 X: 0.000
Y: 2.500e+000 Y: 0.000
Z: -1.650e+001 Z: 0.000
Dist: 9.625e+001 Mag.: 1
 Ang.: 22.500

Contour of X-Displacement

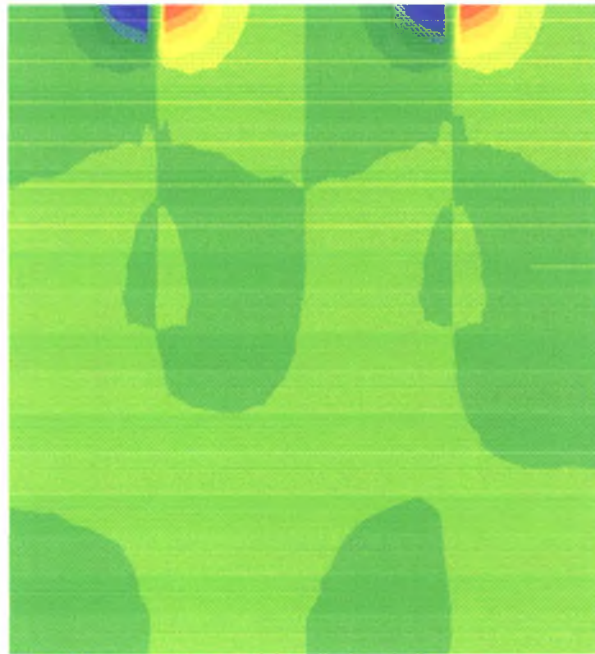
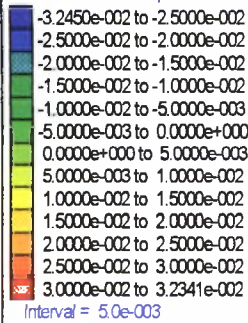
University of Thessalia
Geotechnical Department

Σχήμα A3.1 Ισοτιμές πλευρικής διόγκωσης των χαλικοποασάλων σε κάναβο $5 \times 5 \text{m}^2$

FLAC3D 2.00

Step 1477 Model Perspective
18:55:35 Sat Oct 6 2001

Center: Rotation:
X: 7.500e+000 X: 0.000
Y: 7.500e+000 Y: 0.000
Z: -1.650e+001 Z: 0.000
Dist: 1.062e+002 Mag.: 1
 Ang.: 22.500

Contour of X-Displacement

University of Thessalia
Geotechnical Department

Σχήμα A3.2 Ισοτιμές πλευρικής διόγκωσης των χαλικοποασάλων σε κάναβο $15 \times 15 \text{m}^2$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Appendino M., Di Monaco F., “Use of Expanded Cavity in Columns Group Stability”, Turin, Italy.
- [2] Balaam N.P., Poulos H.G., “ The Behaviour of Foundations Supported by Clay Stabilized by Stone Columns”, University of Sydney, Sydney, N.S.W., Australia.
- [3] Bergado D.T., Chai J.C., Alfaro M.C., Balasubramaniam A.S., “Ground Improvement Using Granular Piles” In Improvement Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment, ch. 3.
- [4] Charles J.A., Watts K.S., “Compressibility of Soft Clay Reinforced with Granular Columns”, Geotechnics Division, Building Research Establishment, Watford, U.K.
- [5] Δρέττας Γ.Χ., Πλατής Α.Δ., Σιώρης Ι.Α., Τσάμης Β.Δ., “Θεμελίωση Λιμενικών Έργων σε Μαλακά Εδάφη Βελτιωμένα με Προφόρτιση και Ενισχυμένα με Χαλικοπάσσάλους”.
- [6] Goughnour R.R., “Settlement of Vertically Loaded Stone Columns in Soft Ground”, Research & Development, Vibroflotation Foundation Company, U.S.A.
- [7] Hughes J.M.O. (Cambridge University – Engineering Department), Withers N.J., “Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns”.
- [8] Juran I., Guermazi A., “Settlement Response of Soft Soils Reinforced by Compacted Sand Columns”.
- [9] Κωμοδρόμος Α. (2001) Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική – Γραμμική-Μη Γραμμική Ανάλυση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- [10] Κωνσταντόπουλος Ι., Σωτηρόπουλος Η., “Επιχώματα Λιμενικών Έργων σε Μαλακή Άργιλο – Επίλυση με Η/Υ”.
- [11] Κωστόπουλος Σ. (1996) Σημειώσεις Εδαφομηχανικής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Βόλος.
- [12] Λεβέντης Ε., “Χαλικοπάσσαλοι: Κατασκευή και έλεγχος”.
- [13] Munfakh G.A., Abramson L.W., Barksdale R.D., Juran I., “In situ ground reinforcement” in Soil Improvement – A Ten Year update, Geotechnical Special Publication No. 12, Edited by Joseph P. Welsh.
- [14] Ξηροτύρη Α., Χατζηγώγος Θ., “Ανάλυση Καθιζήσεων Επιχωμάτων / Ε.Ο. Θεσσαλονίκης-Κατερίνης”.
- [15] Pilot G. (Laboratoire des Ponts et Chaussées – Paris), Chaput D. (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées – Angers), Queyroi D. (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées – Bordeaux), “Improvement of Soft Clay Properties – Usual Methods”.
- [16] Πλατής Α.Δ., Κούσουλος Σ.Γ., Παναγόπουλος Ν.Γ., Μπουκοβάλας Γ.Δ., “Θεμελίωση Λιμενικών Έργων σε Μαλακά Εδάφη Βελτιωμένα και Ενισχυμένα με Γεωσυνθετικά Υλικά”.
- [17] Prowrie W. (1997) Soil Mechanics – Concepts and Applications, E & FN Spon, London.
- [18] Ranjan G. (Civil Engineering - University of Roorkee), Govind Rao B. (Central Building Research), “Skirted Granular Piles for Ground Improvement”, Roorkee, India.
- [19] Σωτηρόπουλος Η., Αλκαλάης Η., Κίτσωνας Α., “Vibrocompaction για Έδραση Κρηπιδότοιχου”.

- [20] Σωτηρόπουλος Η., Σιγάλας Ι., “Γεωτεχνικά Προβλήματα στο Λιμάνι TIANJIN στην Α.Δ. Κίνας”.
- [21] Τσότσος Στ., Ταχιάδης Α., “Εκτίμηση του Χρόνου Παραμονής της Προφόρτισης”.
- [22] Van Impre W., De Beer E., “Improvement of Settlement behaviour of Soft Layers by Means of Stone Columns”, Laboratory of Soil Mechanics, Ghent State University, Ghent, Belgium.
- [23] Wallays M., Delapierre J., Van Den Poel J., “Load transfer Mechanism in Soils Reinforced by Stone or Sand Colymns”, Belgium.
- [24] Χριστούλας Σ., “Ενίσχυση εδαφών με χαλικοπασσάλους” στο Επιλογές Εφαρμοσμένης Γεωτεχνικής Μηχανικής, Εκδόσεις Συμεών, Β΄ Έκδοση, Αθήνα 1998, σελ.36-44.

Μελέτες :

“Γεωτεχνική Μελέτη Λιμένος Αιγίου – Τεχνική έκθεση προς την Περιφέρεια Δυτικής Ελλάδος”, Γκαζέτα Γ., Νοέμβριος 1995.

“Αποτελέσματα Γεωτρήσεων στο Νέο Λιμένα Αιγίου”, Αθήνα, Μάρτιος 1997.

“Τεχνικοοικονομική Μελέτη Λιμένος Αιγίου – Οριστική Μελέτη Λιμενικών Έργων – Τεχνική Έκθεση”, Αθήνα, Ιούλιος 1997.





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ**

Τηλ.: 74.760-61

74233-5

