



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

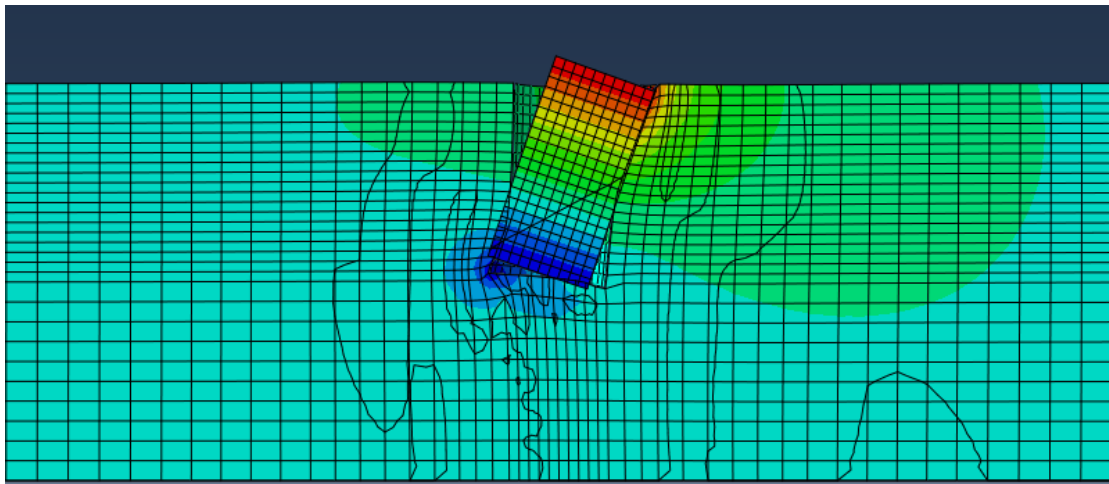
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

# ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΑΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΦΡΕΑΤΩΝ ΠΑΚΤΩΣΕΩΣ

---

**Καλτσάς Δημήτριος**



**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ**

ΑΘΗΝΑ 2012

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η ελαστική απόκριση των άκαμπτων φρεάτων πακτώσεως. Έπειτα από βιβλιογραφική ανασκόπηση συλλέγονται και παρουσιάζονται συνοπτικά οι μεθοδολογίες που προσδιορίζουν τη δυσκαμψία του συστήματος φρέατος-βραχόμαζας. Μία από αυτές, η μεθοδολογία των Carter και Kulhawy, παρέχει ελαστικές σχέσεις υπολογισμού της οριζόντιας μετατόπισης και της στροφής κεφαλής του φρέατος υπό εγκάρσια φόρτιση μέσω συντελεστών δυσκαμψίας των ελατηρίων που προσομοιώνουν το σύστημα φρέατος-βραχόμαζας. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ανωτέρω μεθοδολογίας και η πρόταση βελτιωμένων σχέσεων υπολογισμού ελαστικών μετακινήσεων και στροφών κεφαλής για άκαμπτα φρέατα.

Αρχικά, διερευνώνται οι περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων κατά Carter και Kulhawy. Έπειτα, σχεδιάζονται κατάλληλα προσομοιώματα τριδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων για τη μελέτη του προβλήματος. Στη συνέχεια, εκτελούνται ελαστικές αναλύσεις φρεάτων υποβαλλόμενων σε συγκεντρωμένο εγκάρσιο φορτίο και ροπή κεφαλής. Διερευνώνται περιπτώσεις πλήρους συνάφειας στις διεπιφάνειες φρέατος-βραχόμαζας, καθώς και συνθήκες σχετικής ολίσθησης και αποκόλλησης των συγκεκριμένων διεπιφανειών. Από τις διαφορές που διαπιστώνονται στις μετακινήσεις και τις στροφές ως προς τα αποτελέσματα των Carter και Kulhawy – μεγαλύτερες για φρέατα με διεπιφάνειες – επιχειρείται η ανάπτυξη μίας νέας μεθοδολογίας υπολογισμού των μεγεθών αυτών για άκαμπτα φρέατα με και χωρίς διεπιφάνειες. Εξετάζεται παραμετρικά η επίδραση της γεωμετρίας των φρεάτων, της σχετικής δυσκαμψίας φρέατος-βραχόμαζας, και της εκκεντρότητας της φόρτισης στα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία ξεκινά με τον επαναπροσδιορισμό της θεώρησης άκαμπτων φρεάτων. Κατά τη διαδικασία αυτή μορφώνονται διαγράμματα αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων και στροφών συναρτήσει της σχετικής δυσκαμψίας φρέατος-βραχόμαζας για περιπτώσεις χωρίς στοιχεία διεπιφάνειας. Στα παραπάνω διαγράμματα ελέγχεται για ποιο κάτω όριο σχετικής δυσκαμψίας τα αποτελέσματα μετακινήσεων και στροφών είναι ανεξάρτητα αυτής. Ο χαρακτηρισμός των φρεάτων ως άκαμπτα επιβεβαιώνεται και από το προφίλ της παραμορφωμένης τους κατάστασης, για την οποία συγκρίνονται οι οριζόντιες μετακινήσεις του άξονα του φρέατος με τις αντίστοιχες ενός θεωρητικά απολύτως άκαμπτου στερεού. Για τις περιπτώσεις αυτές και για τη μέγιστη εκκεντρότητα ( $e=30m$ ), απεικονίζονται διαγραμματικά οι αδιαστατοποιημένες τιμές οριζόντιων μετατοπίσεων και στροφών συναρτήσει του λόγου μήκους προς διαμέτρου φρέατος ( $L/D$ ), ακολουθώντας τη συλλογιστική των Carter και Kulhawy. Τοιουτοτρόπως, προσδιορίζονται οι σχέσεις υπολογισμού οριζόντιων μετατοπίσεων και στροφών της κεφαλής άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες. Εφαρμόζοντας τις σχέσεις αυτές και συγκρίνοντας τα αποτελέσματά τους με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, επεκτείνεται η δυνατότητα χρήσης της μεθοδολογίας σε φρέατα, τα οποία αρχικά δεν είχαν θεωρηθεί άκαμπτα εξαρχής. Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας με τα αντίστοιχα των εξισώσεων κατά Carter και Kulhawy.

Στη συνέχεια, η προτεινόμενη μεθοδολογία επεκτείνεται σε προσομοιώματα που λαμβάνουν υπόψη τη διεπιφάνεια φρέατος-βραχόμαζας. Τη μηχανική συμπεριφορά των διεπιφανειών διέπουν συγκεκριμένοι νόμοι αποκόλλησης και σχετικής ολίσθησης, οι οποίοι εισάγονται στα νέα προσομοιώματα. Έπειτα, προσδιορίζονται επακριβώς οι περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων

σύμφωνα με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε και για τις σχέσεις χωρίς διεπιφάνειες. Αντίστοιχα, εξάγονται οι σχέσεις υπολογισμού οριζόντιων μετατοπίσεων και στροφών κεφαλής. Τέλος, προτείνονται συντελεστές  $\Lambda$ , οι οποίοι πολλαπλασιασμένοι επί τους επιμέρους όρους οριζόντιας μετακίνησης και στρόφης των φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες, υπολογίζουν τα αντίστοιχα μεγέθη της θεμελίωσης με διεπιφάνειες. Σημειώνεται ότι το κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο της συγκεκριμένης διαδικασίας προϋποθέτει την αποδοχή υπερεκτίμησης μετακινήσεων των άκαμπτων φρεάτων έως 20%.

## ABSTRACT

At the present diploma thesis the elastic response of the rigid rock sockets is studied. After a thorough literature review, a summary of the methods that determine the rigidity of the socket-rockmass system is presented. One of them, the Carter and Kulhawy method namely, provides elastic equations for the calculation of the lateral displacement and rotation at the head of the shaft under lateral loading, using the stiffness factors of the springs that simulate the socket-rockmass interaction. The purpose of the present diploma thesis is the study of this methodology and the suggestion of an improved methodology for the calculation of the displacements and rotations an the head of the socket.

Initially, the response of rigid sockets, according to Carter and Kulhawy, is investigated. Thereafter, suitable three-dimensional finite element simulations are developed for the study of the problem. Subsequently, elastic analyses are performed for sockets submitted to concentrated lateral load and bending moment at the head. Both cases of tied socket-rockmass interaction and relative slip and gap conditions at the interfaces are studied. Due to the variation of the displacement and rotation results related to the Carter and Kulhawy method – larger for sockets with interfaces – the development of a new methodology is attended, in order to calculate these quantities more accurately for sockets with and without interfaces. The parametric study examines the effect of the shaft geometry, the relative stiffness (moduli ratio) of the shaft material and the rockmass as well as the loading eccentricity on the results of the analyses.

The proposed method begins with the re-determination of rigid sockets. During this procedure, diagrams of the dimensionless deformations versus the relative stiffness are formed for sockets without interface properties. On the specific diagrams an attempt is carried out to determine, for which relative stiffness the displacement results remain unaffected by this value. The classification of sockets as rigid is confirmed by the profile of the deformed shafts, where the horizontal displacements of the socket axis are compared to those of a theoretically rigid body. For these cases and for the maximum eccentricity ( $e=30m$ ), the dimensionless horizontal displacements and rotations are plotted versus the slenderness ratio ( $L/D$ ), following the Carter and Kulhawy reasoning process. Thus, the equations for the calculation of the horizontal displacements and rotations at the head of the socket without interfaces are defined. Applying these equations and comparing the results with those provided by the analyses, the utility of the specific methodology is expanded to sockets that were not classified as rigid initially. Finally, the results of the proposed method are compared to those provided by the Carter and Kulhawy method.

Furthermore, the proposed method is expanded to simulations that take into account the socket-rockmass interface. The mechanical properties of these interfaces are governed by specific physical laws for the detachment and the relative slip, which are simulated thoroughly in these final models. Then, the cases of rigid sockets are accurately determined, according to the procedure followed for the equations without interfaces. Respectively, the equations for the calculation of displacements and rotations are defined. Finally, a set of coefficients ( $\Lambda$ ) is propped, which can be multiplied times the individual terms of the horizontal displacement and rotation equations without interfaces, in order to calculate the corresponding quantities for the foundation with interfaces. It must be noted that adopting this method provides benefit in computational cost, but also overestimates the results of the displacements up to 20%.



## **Ευχαριστίες**

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Μιχάλη Καββαδά, για τη συνεχή του καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της. Επιπλέον, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Τζιβάκο, η συνεισφορά του οποίου και η αμέριστη βοήθειά του ήταν καταλυτική για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου και τους στενούς μου φίλους για τη διαρκή στήριξή τους στην προσπάθεια αυτή.

Καλτσάς Δημήτριος



# Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή .....	17
1.1 Γενικά στοιχεία .....	17
1.2 Ενδοσιμότητα φρέατος σε εγκάρσια φόρτιση – Μέθοδοι υπολογισμού .....	18
1.2.1 Μέθοδοι εδαφικής αντίδρασης .....	18
1.2.2 Θεωρία συνεχούς ελαστικού μέσου .....	28
2 Μεθοδολογία Carter και Kulhawy .....	33
2.1 Παραδοχές .....	33
2.2 Σχέσεις υπολογισμού μετακινήσεων και στροφών .....	37
2.2.1 Εύκαμπτα φρέατα .....	37
2.2.2 Άκαμπτα φρέατα .....	37
2.2.3 Φρέατα ενδιάμεσης δυσκαμψίας .....	38
2.3 Εφαρμογή της μεθόδου .....	39
2.3.1 Θεώρηση δυσκαμψίας κατά Carter και Kulhawy .....	39
2.3.2 Υπολογισμός μετακινήσεων και στροφών κεφαλής .....	40
3 Προσομοίωση και προσδιορισμός του προβλήματος .....	47
3.1 Εισαγωγή .....	47
3.2 Σχεδίαση προσομοιώματος φρέατος βραχομάζας .....	47
3.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιωμάτων .....	47
3.2.2 Διακριτοποίηση του προσομοιώματος .....	47
3.2.3 Συνοριακές συνθήκες .....	50
3.3 Ιδιότητες προσομοιωμάτων .....	50
3.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και παράμετροι αντοχής φρεάτων .....	50
3.3.2 Ιδιότητες εδαφών/βραχομαζών .....	51
3.3.3 Λεπτομέρειες προσομοίωσης .....	52
3.3.4 Βήματα παραμετρικών αναλύσεων .....	52
3.4 Αναλύσεις άκαμπτων φρεάτων – Προσδιορισμός του προβλήματος .....	53
4 Σχέσεις υπολογισμού μετατοπίσεων χωρίς διεπιφάνειες .....	61
4.1 Εισαγωγή – Χαρακτηριστικά αναλύσεων .....	61
4.2 Ο ρόλος της εκκεντρότητας .....	61
4.3 Οριοθέτηση άκαμπτων φρεάτων .....	66



4.3.1	Καμπύλες μετατοπίσεων – σχετικής δυσκαμψίας.....	66
4.3.2	Δυσκαμψία φρεάτων μέσω της παραμορφωμένης κατάστασης.....	69
4.3.3	Θεώρηση περιπτώσεων άκαμπτων φρεάτων.....	76
4.4	Σχέσεις υπολογισμού μετατοπίσεων άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες ....	77
4.5	Διερεύνηση σχέσεων – Προσδιορισμός συνθήκης ακαμψίας.....	80
4.5.1	Σύγκριση με τα αποτελέσματα του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus80	
4.5.2	Πρόταση κριτηρίου ακαμψίας.....	84
4.5.3	Σύγκριση με τα αποτελέσματα των Carter και Kulhawy.....	86
4.6	Συμπεράσματα.....	88
5	Σχέσεις υπολογισμού μετατοπίσεων με διεπιφάνειες.....	89
5.1	Εισαγωγή – Χαρακτηριστικά αναλύσεων.....	89
5.2	Παραδοχές.....	89
5.3	Διεπιφάνεια φρέατος-βραχόμαζας.....	90
5.3.1	Γενικά.....	90
5.3.2	Νόμος τριβής διεπιφάνειας φρέατος-βραχόμαζας.....	90
5.3.3	Νόμος αποκόλλησης διεπιφάνειας φρέατος-βραχόμαζας.....	91
5.4	Ο ρόλος της εκκεντρότητας.....	92
5.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλύσεων με διεπιφάνεια και χωρίς.....	96
5.6	Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων.....	103
5.6.1	Καμπύλες μετατοπίσεων – σχετικής δυσκαμψίας.....	104
5.6.2	Δυσκαμψία φρεάτων μέσω της παραμορφωμένης κατάστασης.....	105
5.6.3	Θεώρηση περιπτώσεων άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες.....	113
5.7	Σχέσεις υπολογισμού μετατοπίσεων άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες.....	114
5.8	Διερεύνηση σχέσεων – Προσδιορισμός κριτηρίου ακαμψίας.....	118
5.8.1	Σύγκριση με τα αποτελέσματα του Abaqus.....	118
5.8.2	Πρόταση κριτηρίου δυσκαμψίας για φρέατα με διεπιφάνειες.....	121
5.8.3	Σύγκριση με τα αποτελέσματα των Carter και Kulhawy.....	123
5.9	Συμπεράσματα.....	124
6	Σύνοψη και αποτίμηση της μεθοδολογίας – Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	125
6.1	Εισαγωγή.....	125
6.2	Συνοπτική ανασκόπηση της μεθοδολογίας.....	125
6.3	Εφαρμογή της μεθοδολογίας.....	127

6.3.1	Εφαρμογή 1 .....	127
6.3.2	Εφαρμογή 2 .....	129
6.4	Συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	131
6.4.1	Συμπεράσματα .....	131
6.4.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	131
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ .....		133
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		196

## Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Μοντέλο εδαφικής αντίδρασης εγκάρσια φορτισμένου φρέατος πακτώσεως και καμπύλες $p$ - $\gamma$ .....	19
Σχήμα 1-2. Καμπύλη $p$ - $\gamma$ κατά Reese (1997) .....	20
Σχήμα 1-3 Καμπύλη $p$ - $\gamma$ υπερβολικού τύπου.....	22
Σχήμα 1-4 Τιμές του $k_{ho}$ από μετρήσεις δοκιμών πεδίου (Cho, 2002) .....	26
Σχήμα 2-1. Εγκάρσια φόρτιση φρέατος πακτώσεως .....	33
Σχήμα 2-2. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής συναρτήσει των λόγων: (a) $E/G^*$ και (b) $L/D$ .....	35
Σχήμα 2-3. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής συναρτήσει των λόγων (a) $E/G^*$ και (b) $L/D$ .....	35
Σχήμα 2-4. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα και στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής συναρτήσει των λόγων (a) $E/G^*$ και (b) $L/D$ .....	36
Σχήμα 2-5. Μετακινήσεις άκαμπτου φρέατος με $L/D=1$ και $E/G^*=500$ .....	41
Σχήμα 2-6. Στροφές άκαμπτου φρέατος με $L/D=1$ και $E/G^*=500$ .....	42
Σχήμα 2-7. Μετακινήσεις άκαμπτου φρέατος με $L/D=1$ και $E/G^*=1000$ .....	42
Σχήμα 2-8. Στροφές άκαμπτου φρέατος με $L/D=1$ και $E/G^*=1000$ .....	43
Σχήμα 2-9. Μετακινήσεις άκαμπτου φρέατος με $L/D=1.5$ και $E/G^*=1000$ .....	43
Σχήμα 2-10. Στροφές άκαμπτου φρέατος με $L/D=1.5$ και $E/G^*=1000$ .....	44
Σχήμα 2-11. Μετακινήσεις φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας με $L/D=2$ και $E/G^*=100$ .....	44
Σχήμα 2-12. Στροφές φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας με $L/D=2$ και $E/G^*=100$ .....	45
Σχήμα 2-13. Μετακινήσεις εύκαμπτου φρέατος με $L/D=3$ και $E/G^*=10$ .....	45
Σχήμα 2-14. Στροφές εύκαμπτου φρέατος με $L/D=3$ και $E/G^*=10$ .....	46
Σχήμα 3-1. Διακριτοποίηση Προσομοιώματος Α ( $Z=25m$ ).....	48
Σχήμα 3-2. Διακριτοποίηση Προσομοιώματος Β ( $Z=20m$ ).....	49
Σχήμα 3-3. Όγκοι προσομοιωμάτων Β,Γ,Δ φρεάτων με διεπιφάνειες .....	50
Σχήμα 3-4. Αδιαστατοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις ( $u/u_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες .....	54
Σχήμα 3-5. Αδιαστατοποιημένες στροφές ( $\theta/\theta_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες .....	54
Σχήμα 3-6. Αδιαστατοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις ( $u/u_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες .....	55

Σχήμα 3-7. Αδιαστατοποιημένες στροφές ( $\theta/\theta_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες .....	55
Σχήμα 3-8. Αδιαστατοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις ( $u/u_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες .....	56
Σχήμα 3-9. Αδιαστατοποιημένες στροφές ( $\theta/\theta_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες .....	56
Σχήμα 3-10. Αδιαστατοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις ( $u/u_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες .....	57
Σχήμα 3-11. Αδιαστατοποιημένες στροφές ( $\theta/\theta_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες .....	57
Σχήμα 4-1. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας ( $L/D=1$ ) .....	62
Σχήμα 4-2. Διάγραμμα στροφών κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας ( $L/D=1$ ).....	62
Σχήμα 4-3. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας ( $L/D=1.5$ ).....	63
Σχήμα 4-4. Διάγραμμα στροφών κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας ( $L/D=1.5$ ).....	63
Σχήμα 4-5. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας ( $L/D=2$ ) .....	64
Σχήμα 4-6. Διάγραμμα στροφών κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας ( $L/D=2$ ).....	64
Σχήμα 4-7. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας ( $L/D=3$ ) .....	65
Σχήμα 4-8. Διάγραμμα στροφών ως προς την εκκεντρότητα ( $L/D=3$ ) .....	65
Σχήμα 4-9. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων κεφαλής συναρτήσει της σχετικής δυσκαμψίας $E/G^*$ για διάφορες τιμές του λόγου $L/D$ .....	68
Σχήμα 4-10. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένης στροφής κεφαλής συναρτήσει της σχετικής δυσκαμψίας $E/G^*$ για διάφορες τιμές του λόγου $L/D$ .....	68
Σχήμα 4-11. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος $L/D=1$ για εκκεντρότητα $e=30m$ και διάφορες τιμές του λόγου $E/G^*$ (ΑΚΑΜΠΤΟ) .....	70
Σχήμα 4-12. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος $L/D=3$ για εκκεντρότητα $e=30m$ και διάφορες τιμές του λόγου $E/G^*$ (ΕΥΚΑΜΠΤΟ).....	70
Σχήμα 4-13. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος $L/D=1.5$ για εκκεντρότητα $e=30m$ και διάφορες τιμές του λόγου $E/G^*$ (ΑΚΑΜΠΤΟ) .....	71
Σχήμα 4-14. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος $L/D=2$ για εκκεντρότητα $e=30m$ και διάφορες τιμές του λόγου $E/G^*$ (ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ).....	71
Σχήμα 4-15. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος $L/D=3$ για εκκεντρότητα $e=15m$ και διάφορες τιμές του λόγου $E/G^*$ (ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ).....	72

Σχήμα 4-16. Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης κεφαλής άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες συναρτήσεως του λόγου $L/D$ ( $e=0$ ).....	78
Σχήμα 4-17. Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες συναρτήσεως του λόγου $L/D$ ( $e=30m$ ) .....	79
Σχήμα 4-18. Διάγραμμα στροφής άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες συναρτήσεως του λόγου $L/D$ ( $e=30m$ ).....	79
Σχήμα 4-19. Διαφορές (%) οριζόντιων μετατοπίσεων ως προς Abaqus (άκαμπτα φρέατα).....	81
Σχήμα 4-20. Διαφορές (%) στροφών ως προς Abaqus (άκαμπτα φρέατα).....	81
Σχήμα 4-21. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων (%) ως προς Abaqus με προσθήκη των περιπτώσεων του πίνακα Πίνακας 4-7 .....	83
Σχήμα 4-22. Διάγραμμα στροφών (%) ως προς Abaqus με προσθήκη των περιπτώσεων του πίνακα Πίνακας 4-7.....	83
Σχήμα 4-23. Κατανομή σφάλματος μετακινήσεων ( $\beta=0.5$ ).....	85
Σχήμα 4-24. Κατανομή σφάλματος μετακινήσεων ( $\beta=0.3$ ).....	85
Σχήμα 4-25. Κατανομή σφάλματος μετακινήσεων ( $\beta=0.4$ ).....	86
Σχήμα 4-26. Οριζόντιες μετακινήσεις άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες ως προς Carter-Kulhawy .....	87
Σχήμα 4-27. Στροφές άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες ως προς Carter-Kulhawy .....	88
Σχήμα 5-1. Περιοχή των τιμών τριβής της εξίσωσης (5-1 για σταθερό συντελεστή τριβής ( $\mu$ ))..	90
Σχήμα 5-2. Ελαστοπλαστικό διάγραμμα ολίσθησης-τριβής της διεπιφάνειας φρέατος-βραχόμαζας .....	91
Σχήμα 5-3. Διάγραμμα υπερκάλυψης-πίεσης της διεπιφάνειας φρέατος-βραχόμαζας.....	92
Σχήμα 5-4. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων συναρτήσεως της εκκεντρότητας ( $L/D=1$ ) .....	92
Σχήμα 5-5. Διάγραμμα στροφών συναρτήσεως της εκκεντρότητας ( $L/D=1$ ).....	93
Σχήμα 5-6. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων συναρτήσεως της εκκεντρότητας ( $L/D=1.5$ )....	93
Σχήμα 5-7. Διάγραμμα στροφών συναρτήσεως της εκκεντρότητας ( $L/D=1.5$ ).....	94
Σχήμα 5-8. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων συναρτήσεως της εκκεντρότητας ( $L/D=2$ ).....	94
Σχήμα 5-9. Διάγραμμα στροφών συναρτήσεως της εκκεντρότητας ( $L/D=2$ ).....	95
Σχήμα 5-10. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων συναρτήσεως της εκκεντρότητας ( $L/D=3$ ).....	95
Σχήμα 5-11. Διάγραμμα στροφών συναρτήσεως της εκκεντρότητας ( $L/D=3$ ).....	96
Σχήμα 5-12. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=1$ , $E/G^*=500$ ).....	97
Σχήμα 5-13. Διάγραμμα στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=1$ , $E/G^*=500$ ) .....	98
Σχήμα 5-14. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=1$ , $E/G^*=750$ ).....	98

Σχήμα 5-15. Διάγραμμα στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=1$ , $E/G^*=750$ ) .....	99
Σχήμα 5-16. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=1$ , $E/G^*=1000$ ).....	99
Σχήμα 5-17. Διάγραμμα στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=1$ , $E/G^*=1000$ ) ..	100
Σχήμα 5-18. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=2$ , $E/G^*=500$ ).....	100
Σχήμα 5-19. Διάγραμμα στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=2$ , $E/G^*=500$ ) ....	101
Σχήμα 5-20. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=2$ , $E/G^*=750$ ).....	101
Σχήμα 5-21. Διάγραμμα στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=2$ , $E/G^*=750$ ) ....	102
Σχήμα 5-22. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=2$ , $E/G^*=1000$ ).....	102
Σχήμα 5-23. Διάγραμμα στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=2$ , $E/G^*=1000$ ) ..	103
Σχήμα 5-24. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων της κεφαλής ως προς $E/G^*$ για τις διάφορες τιμές του λόγου $L/D$ .....	104
Σχήμα 5-25. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένων στροφών της κεφαλής ως προς $E/G^*$ για τις διάφορες τιμές του λόγου $L/D$ .....	105
Σχήμα 5-26. Διάγραμμα κατανομής μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος $L/D=1$ για εκκεντρότητα $e=30m$ και διάφορες τιμές του λόγου $E/G^*$ (ΑΚΑΜΠΤΟ) .....	106
Σχήμα 5-27. Διάγραμμα κατανομής μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος $L/D=3$ για εκκεντρότητα $e=30m$ και διάφορες τιμές του λόγου $E/G^*$ (ΕΥΚΑΜΠΤΟ).....	107
Σχήμα 5-28. Διάγραμμα κατανομής μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος $L/D=1.5$ για εκκεντρότητα $e=30m$ και διάφορες τιμές του λόγου $E/G^*$ (ΑΚΑΜΠΤΟ) .....	107
Σχήμα 5-29. Διάγραμμα κατανομής μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος $L/D=2$ για εκκεντρότητα $e=30m$ και διάφορες τιμές του λόγου $E/G^*$ (ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ).....	108
Σχήμα 5-30. Διάγραμμα κατανομής μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος $L/D=3$ για εκκεντρότητα $e=15m$ και διάφορες τιμές του λόγου $E/G^*$ (ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ).....	108
Σχήμα 5-31. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνεια συναρτήσεως του λόγου $L/D$ ( $e=0$ ) .....	115
Σχήμα 5-32. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες συναρτήσεως του λόγου $L/D$ ( $e=30m$ ) .....	115
Σχήμα 5-33. Διάγραμμα στροφών άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες συναρτήσεως του λόγου $L/D$ ( $e=30m$ ) .....	116
Σχήμα 5-34. Διαφορές (%) οριζόντιων μετατοπίσεων ως προς Abaqus (άκαμπτα φρέατα με διεπιφάνειες).....	118
Σχήμα 5-35. Διαφορές (%) στροφών ως προς Abaqus (άκαμπτα φρέατα με διεπιφάνειες).....	119

Σχήμα 5-36. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων (%) ως προς Abaqus με προσθήκη των περιπτώσεων του Πίνακα 5-8).....	120
Σχήμα 5-37. Διάγραμμα στροφών (%) ως προς Abaqus με προσθήκη των περιπτώσεων του Πίνακα 5-8) .....	121
Σχήμα 5-38. Κατανομή σφάλματος μετακινήσεων ( $\beta'=0.4$ ).....	122
Σχήμα 5-39. Οριζόντιες μετακινήσεις άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες ως προς Carter-Kulhawy .....	123
Σχήμα 5-40. Στροφές άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες ως προς Carter-Kulhawy.....	124
Σχήμα 6-1. Ποσοστιαίες διαφορές οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής υπολογισμένων με συντελεστές $\Lambda$ ως προς Abaqus με διεπιφάνειες .....	128
Σχήμα 6-2. Ποσοστιαίες διαφορές στροφών κεφαλής υπολογισμένων με συντελεστές $\Lambda$ ως προς Abaqus με διεπιφάνειες.....	128

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1-1. Τιμές της παραμέτρου ( $\xi$ ) για διάφορα σχετικά βάθη της αιχμής .....	29
Πίνακας 1-2 Συντελεστές επιρροής κατά τη μέθοδο Douglas and Davis (1964) .....	30
Πίνακας 1-3 Συντελεστές επιρροής κατά τη μέθοδο Carter and Kulhawy .....	31
Πίνακας 2-1 Θεώρηση δυσκαμψίας φρεάτων κατά Carter και Kulhawy .....	39
Πίνακας 2-2 Ενδεικτικές περιπτώσεις φρεάτων για διάφορες κατηγορίες δυσκαμψιών κατά Carter και Kulhawy .....	40
Πίνακας 3-1 Εξωτερικές διαστάσεις προσομοιωμάτων φρέατος-βραχομάζας.....	47
Πίνακας 3-2 Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά προσομοιωμάτων χωρίς διεπιφάνειες .....	48
Πίνακας 3-3 Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά προσομοιωμάτων με διεπιφάνειες.....	49
Πίνακας 3-4. Ελαστικές παράμετροι εδαφών και ασθενών βραχομαζών του προσομοιώματος	51
Πίνακας 3-5 Ποσοστιαίες διαφορές μετακινήσεων και στροφών αναλύσεων χωρίς διεπιφάνειες ως προς Carter και Kulhawy .....	58
Πίνακας 4-1 Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς των αναλύσεων ( $L/D=1$ ) .....	72
Πίνακας 4-2. Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς των αναλύσεων ( $L/D=1.5$ ) .....	73
Πίνακας 4-3. Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς των αναλύσεων ( $L/D=2$ ) .....	74
Πίνακας 4-4. Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς των αναλύσεων ( $L/D=3$ ) .....	75
Πίνακας 4-5 Απολύτως άκαμπτα φρέατα χωρίς διεπιφάνειες .....	77
Πίνακας 4-6. Τιμές των συντελεστών των εξισώσεων μετακινήσεων .....	80
Πίνακας 4-7. Πιθανές περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων.....	82
Πίνακας 4-8. Περιπτώσεις φρεάτων που εντάσσονται στην κατηγορία των άκαμπτων .....	86
Πίνακας 4-9 Περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων κατά Carter και Kulhawy .....	87
Πίνακας 5-1 Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς την αντίστοιχη των αναλύσεων με διεπιφάνειες ( $L/D=1$ ).....	109
Πίνακας 5-2. Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς την αντίστοιχη των αναλύσεων με διεπιφάνειες ( $L/D=1.5$ ).....	110
Πίνακας 5-3. Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς την αντίστοιχη των αναλύσεων με διεπιφάνειες ( $L/D=2$ ).....	111
Πίνακας 5-4. Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς την αντίστοιχη των αναλύσεων με διεπιφάνειες ( $L/D=3$ ).....	112



Πίνακας 5-5 Άκαμπτα φρέατα με διεπιφάνειες.....	113
Πίνακας 5-6 Τιμές των συντελεστών των εξισώσεων μετατοπίσεων με διεπιφάνειες.....	116
Πίνακας 5-7 Πολλαπλασιαστικοί συντελεστές $\Lambda$ για σχέσεις φρεάτων με διεπιφάνειες .....	117
Πίνακας 5-8. Πιθανές περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων.....	119
Πίνακας 5-9. Περιπτώσεις φρεάτων με διεπιφάνειες που εντάσσονται στην κατηγορία των άκαμπτων .....	123
Πίνακας 6-1 Πολλαπλασιαστικοί συντελεστές $\Lambda$ για σχέσεις φρεάτων με διεπιφάνειες .....	126

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά στοιχεία

Ως φρέατα πακτώσεως χαρακτηρίζονται στοιχεία θεμελίωσης με σχετικά μικρή λυγηρότητα, δηλαδή με τιμές του λόγου ( $L/D$ ) μεταξύ 1,5 και 3 (όπου  $L$  το μήκος του φρέατος και  $D$  η διάμετρος του). Τα φρέατα πακτώσεως βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στη θεμελίωση βάθρων γεφυρών. Οι μικρές τιμές της λυγηρότητας εξασφαλίζουν ότι το φρέαρ συμπεριφέρεται ταυτόχρονα ως πρακτικά άκαμπτο στοιχείο και ως βαθιά θεμελίωση (βραχύς πάσσαλος). Οι τυπικές διαστάσεις φρεάτων είναι  $L=8-15m$  και  $D=4-8m$ . Οι διαστάσεις αυτές προσδίδουν στο φρέαρ τη δυνατότητα ανάληψης των κατακόρυφων φορτίων της ανωδομής καθώς και την ασφαλή μεταφορά των σημαντικών οριζόντιων δυνάμεων και ροπών στο έδαφος. Στο τελευταίο συμβάλλει και η σημαντική ποσότητα οπλισμένου σκυροδέματος που παρέχει αντοχή σε μεγάλες ροπές κάμψης. Κατά το σχεδιασμό των φρεάτων πακτώσεως πρέπει να εξασφαλίζεται ένα επαρκές περιθώριο ασφαλείας έναντι κατάρρευσης ενώ παράλληλα οι μετακινήσεις της κεφαλής που οφείλονται στην εκάστοτε φόρτιση να είναι ανεκτές. Οι παραπάνω απαιτήσεις του σχεδιασμού προϋποθέτουν ασφαλώς την αποφυγή αστοχίας της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Η αστοχία συντελείται όταν η θεμελίωση φτάνει σε οριακή δομική κατάσταση, και προσδιορίζεται καθώς η φόρτιση λαμβάνει την τιμή της ονομαστικής συνδυασμένης καμπτοαξονικής αντοχής.

Τα φρέατα πακτώσεως κατασκευάζονται με διάνοιξη οπών στη βραχώμαζα και επί τόπου σκυροδέτηση του φορέα τους. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Συνέχεια του φορέα του βάθρου της γέφυρας στη θεμελίωση χωρίς την παρεμβολή κεφαλόδεσμου
- Μείωση του κόστους κατασκευής της θεμελίωσης σε δύσβατες περιοχές.
- Ανάληψη των σημαντικών εγκάρσιων φορτίων (οριζόντιες δυνάμεις και ροπές)

Η θεώρηση πλήρους πάκτωσης στη στάθμη του φυσικού εδάφους ή σε κάποιο αυθαίρετα προσδιοριζόμενο βάθος δεν είναι αποδεκτή λόγω των μεγάλων εγκάρσιων φορτίων και ροπών, των μεγάλων διαστάσεων της κάτοψης των φρεάτων αλλά και της μικρής σχετικής δυσκαμψίας εδάφους-φρέατος. Συνεπώς, δεν επιτρέπεται η εκτίμηση του θεωρητικού σημείου πακτώσεως του βάθρου με τις συνήθως εφαρμοσμένες απλοποιητικές μεθόδους (π.χ. μέθοδος Broms). Ο ακριβής προσδιορισμός του θεωρητικού σημείου πακτώσεως είναι σημαντικός επειδή επηρεάζει τόσο τη δυσκαμψία των φρεάτων όσο και την ιδιοπερίοδο της κατασκευής σε περίπτωση σεισμικής φόρτισης. Το σημείο πάκτωσης δεν είναι σταθερό, αλλά εξαρτάται από τα επιβαλλόμενα εξωτερικά φορτία. Παρά το γεγονός ότι η παραδοχή πλήρους πάκτωσης στη στάθμη της κεφαλής φαίνεται συντηρητική -άρα και αποδεκτή - θεώρηση, είναι πιθανόν να έχει δυσμενείς συνέπειες στην ανωδομή λόγω της μεταβολής της δυσκαμψίας με αποτέλεσμα να τροποποιεί την απόκριση σε περίπτωση δυναμικής φόρτισης. Η θεώρηση πλήρους πάκτωσης σε συγκεκριμένο βάθος δεν είναι αποδεκτή παραδοχή επειδή:

- Το θεωρητικό βάθος πάκτωσης δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται από το μέγεθος της εγκάρσιας δύναμης  $H$  και της καμπτικής ροπής  $M$ , επομένως δεν υπολογίζεται μονοσήμαντα.
- Η ισοδύναμη δυσκαμψία του φρέατος στο τμήμα μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του σημείου πακτώσεως είναι σύνθετη, δηλαδή δεν μπορεί να αναλυθεί σε ένα οριζόντιο γραμμικό και ένα στροφικό ελατήριο επί του θεωρητικού σημείου πακτώσεως. Πράγματι, επιβάλλοντας εγκάρσια φόρτιση στην κεφαλή του φρέατος, εκτός από την εγκάρσια μετακίνηση προκαλείται και στροφή αυτού, απόκριση που δεν δύναται να περιγραφεί με χρήση δύο ασύζευκτων ελατηρίων (γραμμικού και στροφικού), αλλά απαιτείται η χρήση ενός ισοδύναμου σύνθετου συστήματος με σύζευξη των ελατηρίων.

Επιπλέον, η θεώρηση του συνήθους στατικού προσομοιώματος του φρέατος ως στοιχείο δοκού με εγκάρσια εδαφική αντίδραση υπό μορφή οριζόντιων ελατηρίων τύπου Winkler δεν είναι απολύτως ακριβής στις περιπτώσεις μικρής διαφοράς δυσκαμψίας φρέατος-εδάφους. Η εν λόγω μέθοδος θα πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή και σε συνδυασμό με άλλες ακριβέστερες μεθόδους σε περιπτώσεις φρεάτων πολύ μικρής λυγρηρότητας.

## 1.2 Ενδοσιμότητα φρέατος σε εγκάρσια φόρτιση – Μέθοδοι υπολογισμού

Ως εγκάρσια ενδοσιμότητα του φρέατος ορίζεται η μετακίνηση και η στροφή της κεφαλής του λόγω επιβολής εγκάρσιας φόρτισης (τέμνουσας) και ροπής στην κεφαλή του. Η αντίδραση της βραχόμαζας εξαρτάται από τη μετακίνηση της θεμελίωσης, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την απόκριση της βραχόμαζας και τη δυσκαμψία της θεμελίωσης.

Οι μέθοδοι προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης του φρέατος με το περιβάλλον έδαφος εντάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- μέθοδοι εδαφικής αντίδρασης (subgrade reaction methods)
- θεωρία ελαστικού συνεχούς μέσου (elastic continuum theory)

### 1.2.1 Μέθοδοι εδαφικής αντίδρασης

Η πρώτη προσπάθεια που έγινε για τον προσδιορισμό της ενδοσιμότητας των φρεάτων πακτώσεως σε εγκάρσια φόρτιση αντιμετώπιζε τη βαθιά θεμελίωση ως δοκό σε ελαστικό μέσο. Η θεμελιώδης διαφορική εξίσωση δόθηκε από τον Hetenyi (1946):

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + P_z \frac{d^2 y}{dz^2} - p - w = 0 \quad (1-1)$$

όπου

( $EI$ ): η καμπτική δυσκαμψία του φρέατος,

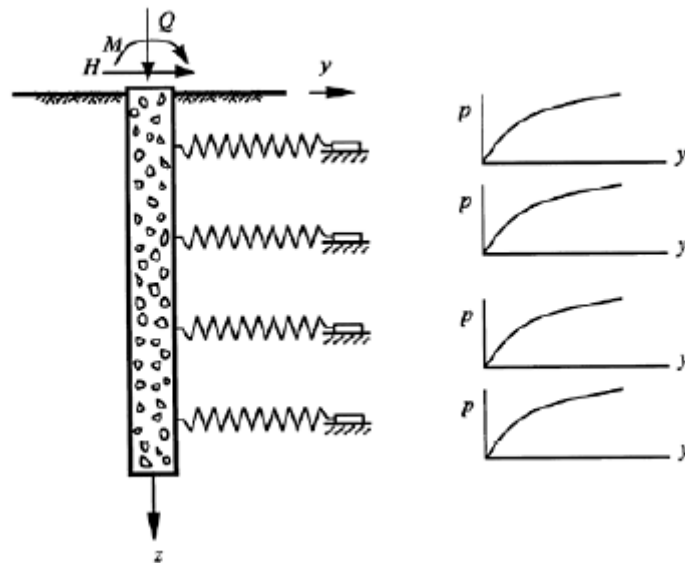
$Y$ : η οριζόντια μετατόπιση σε βάθος  $z$ ,

$P_z$ : το αξονικό φορτίο στην κεφαλή του φρέατος,

$p$ : η οριζόντια αντίδραση το εδάφους ανά μέτρο μήκους και

$w$ : το κατανεμημένο φορτίο κατά μήκος του φρέατος.

Στην εξίσωση (1-1) βασίστηκαν οι μέθοδοι, σύμφωνα με τις οποίες η αλληλεπίδραση εδάφους-φρέατος αναπαριστάται μέσω μιας σειράς ανεξάρτητων μη γραμμικών ελατηρίων. Τα ελατήρια αυτά αποτυπώνονται με καμπύλες εδαφικής αντίδρασης ( $p$ ) συναρτήσεως της οριζόντιας μετακίνησης ( $y$ ) κατά μήκος του φρέατος (καμπύλες  $p$ - $y$ , Reese 1984). Το έδαφος ή ο βράχος αντικαθίσταται από μία σειρά διακριτών μηχανισμών (μη γραμμικά ελατήρια) ώστε σε κάθε βάθος  $z$  η εδαφική ή βραχώδης αντίδραση  $p$  να είναι μη γραμμική συνάρτηση της εγκάρσιας μετατόπισης  $y$ . Στην ιδανική περίπτωση κάθε καμπύλη  $p$ - $y$  θα μπορούσε να αναπαριστά την εδαφική συμπεριφορά ως συνάρτηση της φόρτισης που ασκείται, των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της θεμελίωσης, της στάθμης του υδροφόρου οριζοντα και όποιουδήποτε άλλου παράγοντα καθορίζει την ανωτέρω συμπεριφορά.



**Σχήμα 1-1.** Μοντέλο εδαφικής αντίδρασης εγκάρσια φορτισμένου φρέατος πακτώσεως και καμπύλες  $p$ - $y$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πιο βασικές μέθοδοι εκτίμησης της κλίσης του αρχικού ελαστικού κλάδου των καμπυλών  $p$ - $y$ , δηλαδή του δείκτη βραχώμαζας  $k$  (subgrade reaction modulus). Ο υπολογισμός της συγκεκριμένης παραμέτρου αποτελεί, μαζί με το οριακό φορτίο  $p_{ult}$ , απαραίτητο στοιχείο για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του φρέατος υπό εγκάρσια φόρτιση.

### 1.2.1.1 Γραμμικά ελατήρια Winkler

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει κατανεμημένα ανεξάρτητα γραμμικά ελατήρια. Τα ελατήρια αυτού του τύπου συμπεριφέρονται ως γραμμικώς ελαστικά.

Η σταθερά  $k$  των ελατηρίων δίνεται από τη σχέση:

$$k_h = \frac{E}{D} \quad (1-2)$$

όπου

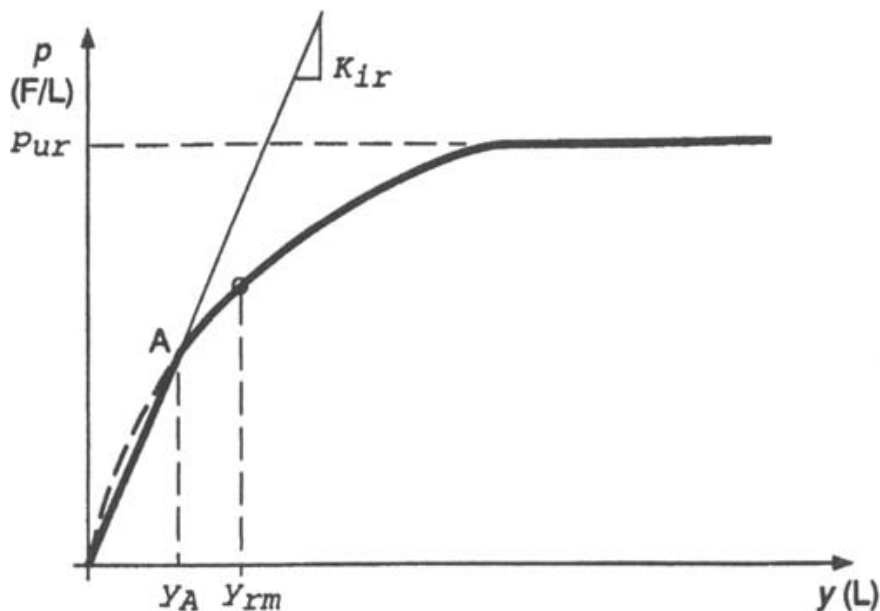
$E$ : το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους και

D: η διάμετρος του φρέατος.

Η μέθοδος ελατηριωτού εδάφους Winkler υποθέτει ότι τα συνεχώς κατενεμημένα ελατήρια δρουν ως ανεξάρτητα ελατήρια, δηλαδή ότι δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ της απόκρισης του εδάφους σε διάφορα βάθη κατά μήκος του φρέατος. Η παραδοχή αυτή δεν είναι ακριβής σε φρέατα με μικρή λυγηρότητα (δηλαδή σε βραχεία φρέατα εντός βράχου με υψηλό μέτρο ελαστικότητας).

### 1.2.1.2 Reese (1997)

Ο Reese πρότεινε κριτήρια για τη χάραξη καμπύλων  $p$ - $y$  έπειτα από αναλύσεις φρεάτων πακτώσεως σε βράχο. Τονίζεται ότι οι προτάσεις αυτές θα πρέπει να θεωρούνται προκαταρκτικές, λόγω των λιγοστών αποτελεσμάτων από δοκιμές φόρτισης στις οποίες έχουν βασιστεί. Για «μαλακό βράχο» αντοχής σε μονοαξονική θλίψη  $\sigma_{ci}=0,5-5$  MPa οι καμπύλες  $p$ - $y$  έχουν την εξής μορφή (Σχήμα 1-2):



Σχήμα 1-2. Καμπύλη  $p$ - $y$  κατά Reese (1997)

Η καμπύλη συντίθεται από τρεις κλάδους, οι οποίοι εκφράζονται από τις εξής σχέσεις:

- Αρχικός, γραμμικός κλάδος ( $y \leq y_A$ ):

$$p = K_{ir}y \quad (1-3)$$

- Ενδιάμεσος, μη γραμμικός κλάδος  $y \geq y_A$  και  $p \leq p_{ur}$ :

$$p = \frac{p_{ur}}{2} \left( \frac{y}{y_{rm}} \right)^{0,25} \quad (1-4)$$

$$y_{rm} = k_{rm}B \quad (1-5)$$

- Τελικός κλάδος ( $p=p_{ur}$ ):

$$p = p_{ur} \quad (1-6)$$

όπου

$K_{ir}$ : η αρχική κλίση της καμπύλης

$p_{ur}$ : η οριακή αντίσταση της βραχόμαζας

$B$ : η διάμετρος του φρέατος

$k_{rm}$ : σταθερά που κυμαίνεται από 0,0005 έως 0,00005 και χρησιμοποιείται για να προσδώσει ενιαία δυσκαμψία στην καμπύλη

Η τιμή του  $y_A$  προκύπτει ως σημείο τομής των δύο πρώτων κλάδων και ισούται με:

$$y_A = \left[ \frac{p_{ur}}{2(y_{rm})^{0,25} K_{ir}} \right]^{1,333} \quad (1-7)$$

Η αρχική κλίση της καμπύλης  $p$ - $\gamma$ ,  $K_{ir}$ , που ταυτίζεται με το δείκτη της βραχόμαζας κατά την οριζόντια διεύθυνση, προσδιορίζεται συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας από τη σχέση:

$$K_{ir} = k_{ir} E_{ir} \quad (1-8)$$

όπου

$E_{ir}$ : το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας και

$k_{ir}$ : αδιάστατος συντελεστής που υπολογίζεται ως εξής

$$k_{ir} = \left( 100 + \frac{400x_r}{3B} \right), \quad 0 \leq x_r \leq 3B \quad (1-9)$$

$$k_{ir} = 500, \quad x_r > 3B \quad (1-10)$$

όπου

$x_r$ : το βάθος από την επιφάνεια

Οι παραπάνω σχέσεις για το  $k_{ir}$  προέκυψαν προσαρμόζοντας αναλύσεις με χρήση καμπυλών  $p$ - $\gamma$  σε αποτελέσματα δοκιμών φόρτισης πεδίου (ανάστροφες αναλύσεις) στις οποίες το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας εκτιμήθηκε από μετρήσεις PMT.

#### Παρατηρήσεις:

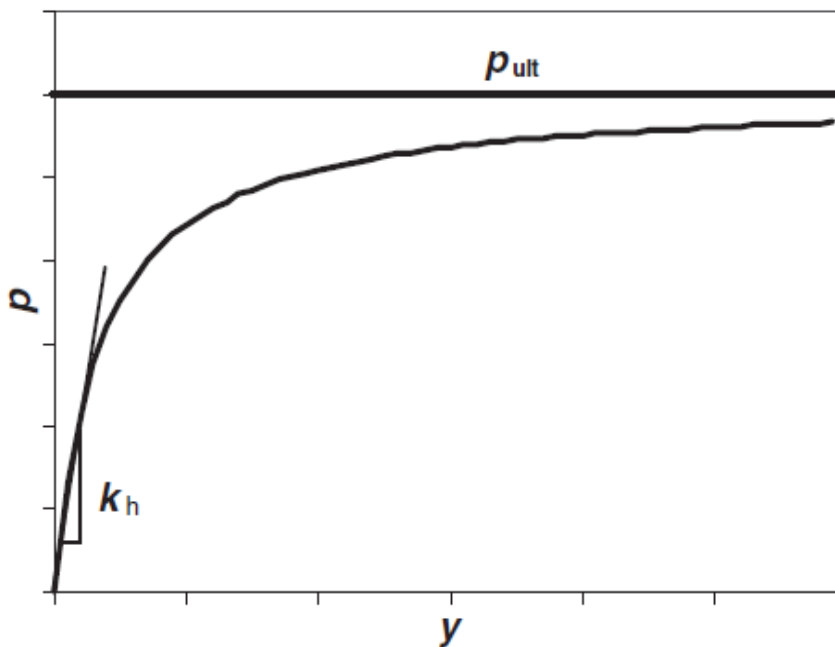
- Οι βιβλιογραφικές αναφορές στις οποίες βασίστηκε η ανάπτυξη των συγκεκριμένων καμπυλών  $p$ - $\gamma$  περιλαμβάνουν μόνο δύο δοκιμές πεδίου.
- Οι συστάσεις για την επιλογή των παραμέτρων στις καμπύλες  $p$ - $\gamma$  είναι ασαφείς και αβάσιμες εμπειρικά.

- Παρά τις αβεβαιότητες, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται εκτενώς.

### 1.2.1.3 Καμπύλες p-y υπερβολικής μορφής (Gabr et al. 2002, Liang and Yang 2006)

Η ακόλουθη μέθοδος βασίστηκε σε έρευνες που διενεργήθηκαν από τις πολιτείες της Βόρειας Καρολίνας και του Οχάιο και παρουσιάστηκαν από τους Gabr et al. (2002) και Liang and Yang (2006) αντίστοιχα. Στόχος των ερευνών ήταν η βελτίωση της μεθοδολογίας χάραξης καμπυλών p-y σε μαλακούς βραχώδεις σχηματισμούς. Οι καμπύλες που προτείνονται βασίζονται στην παρακάτω υπερβολική σχέση μεταξύ της εγκάρσιας εδαφικής αντίδρασης (p) και της εγκάρσιας μετατόπισης (y) και έχουν τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 1-3:

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_h} + \frac{y}{p_{ult}}} \quad (1-11)$$



Σχήμα 1-3 Καμπύλη p-y υπερβολικού τύπου

#### A. Gabr et al. (N. Carolina, 2002)

Στη Β. Καρολίνα διενεργήθηκαν έξι δοκιμές πραγματικών φρεάτων σε τρεις διαφορετικές θέσεις. Οι περιβάλλουσες βραχώδεις ήταν διαβρωμένος ψαμμίτης, μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος και κρυσταλλικά πετρώματα αντίστοιχα. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων για τη βαθμονόμηση των καμπυλών p-y, χρησιμοποιώντας τιμές του συντελεστή  $k_h$  που προσδιορίστηκαν από μετρήσεις PMT. Οι καμπύλες που προέκυψαν εμφάνισαν σχετική συμφωνία με τις μετρήσεις τάσεων και παραμορφώσεων των δοκιμών πεδίου. Η πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε αργότερα για περαιτέρω δοκιμές σε δύο θέσεις επίσης μαλακών σχηματισμών, διαφορετικών από αυτούς που προαναφέρθηκαν.

Για τον προσδιορισμό του δείκτη βραχόμαζας χρησιμοποιήθηκαν τιμές του μέτρου ελαστικότητας που μετρήθηκαν από τα όργανα PMT. Απουσία των εν λόγω μετρήσεων, το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται μέσω των γεωλογικών παραμέτρων της βραχόμαζας κατά Hoek-Brown σύμφωνα με τη σχέση των Hoek-Dietrichs (2006). Επίσης, υιοθετήθηκε ο τύπος του Vesic (1961) για βάθη μέχρι το σημείο περιστροφής. Ο συντελεστής του δείκτη της βραχόμαζας υπολογίζεται ως εξής:

$$k_h = \frac{0,65E_m}{B(1 - \nu_r^2)} \left( \frac{E_m B^4}{E_s I_s} \right)^{1/12} \quad (1-12)$$

όπου:

B: η διάμετρος του φρέατος

$E_m$ : το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας,

$\nu_r$ : ο δείκτης Poisson της βραχόμαζας

$E_s, I_s$ : το μέτρο ελαστικότητας και η ροπή αδράνειας του φρέατος

Ο συντελεστής που υπολογίστηκε πολλαπλασιάζεται με τη διάμετρο του φρέατος και προκύπτει ο δείκτης βραχόμαζας κατά την οριζόντια διεύθυνση:

$$K_h = k_h B \quad (1-13)$$

Για βάθη υπό του σημείου περιστροφής του φρέατος θεωρείται μεγαλύτερη αντίδραση της βραχόμαζας, λόγω της διαφοράς των όγκων που παραλαμβάνουν τη φόρτιση αλλά και λόγω διαφοράς των γεωστατικών τάσεων. Η εκτίμηση του δείκτη της βραχόμαζας για βάθη κάτω από το σημείο περιστροφής παρουσιάζεται στα επόμενα (μέθοδος Cho).

#### Παρατήρηση:

Οι αναλύσεις που συμπεριέλαβαν τιμές από μετρήσεις του PMT παρείχαν αποτελέσματα που συμφωνούσαν με τα αποτελέσματα των δοκιμών φόρτισης πεδίου. Εντούτοις, δε συνεκτιμήθηκε η μη-γραμμική συμπεριφορά του σκυροδέματος του φρέατος, η οποία μειώνει τις παραμορφώσεις περισσότερο από τα κριτήρια  $\rho$ - $\gamma$ . Κατά συνέπεια, ένας περιορισμός για την εφαρμογή του κριτηρίου αυτού από τους Gabr et al. είναι ότι η δυσκαμψία (EI) λαμβάνεται σταθερή. Μία ακόμη πιο ρεαλιστική ανάλυση της αλληλεπίδρασης φρέατος-βραχόμαζας κατά την εγκάρσια φόρτιση οφείλει να λαμβάνει υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά του σκυροδέματος.

#### B. Liang and Yang (Ohio, 2006)

Από τις μελέτες που διενεργήθηκαν στο Οχάιο οι Liang and Yang (2006) πρότειναν μία ακόμα μέθοδο χάραξης υπερβολικών καμπύλων  $\rho$ - $\gamma$ , βασιζόμενοι σε θεωρητικές παραδοχές και αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Ακολούθησε σύγκριση της μεθοδολογίας τους με τα αποτελέσματα δύο δοκιμών φόρτισης πεδίου. Η εφαπτομένη του αρχικού κλάδου των καμπυλών υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$K_h = E_m \left( \frac{B}{B_{ref}} \right) e^{-2\nu_r} \left( \frac{E_s I_s}{E_m B^4} \right)^{0,284} \quad (1-14)$$



όπου

$$B_{ref} = 0,305m$$

και για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας όταν δε διατίθενται αποτελέσματα μετρήσεων των δοκιμών πεδίου

$$E_m = \frac{E_r}{100} e^{GSI/21,7} \quad (1-15)$$

όπου

$E_r$ : το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου

#### Παρατήρηση:

Η επιλογή της μεθόδου για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας αποτελεί σημαντική αστάθμητη παράμετρο στην εφαρμογή της εκάστοτε μεθοδολογίας καμπυλών p-γ. Σε κάποιες περιπτώσεις, η πραγματική απόκριση του φρέατος προσεγγίζεται καλύτερα από τις καμπύλες που συμπεριλαμβάνουν μέτρο ελαστικότητας μετρούμενο από τα όργανα PMT, ενώ σε άλλες προσεγγίζεται καλύτερα μέσω καμπύλων για τις οποίες το μέτρο ελαστικότητας έχει εκτιμηθεί από την παράμετρο GSI. Είναι σημαντικό το σημείο επιλογής του κατάλληλου μέτρου ελαστικότητας για το σχεδιασμό των φρεάτων πακτώσεως καθώς οι καμπύλες p-γ για την ανάλυση βασίζονται σε αυτό.

#### **1.2.1.4 Cho (2002)**

Ο Cho πραγματοποίησε έξι δοκιμές πεδίου πλήρους φόρτισης με στόχο να διερευνήσει το προσομοίωμα του μαλακού βράχου κατά Gabr et al.. Συγκεκριμένα, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών με προβλέψεις που έγιναν βάσει προγενέστερων μεθοδολογιών σχεδιασμού. Επιπρόσθετα, συστάθηκαν συντηρητικές αλλά ακριβείς διαδικασίες σχεδιασμού για το προσομοίωμα ασθενούς βραχώμαζας. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε βραχώμαζα διαφορετική από εκείνη, στην οποία είχαν γίνει οι δοκιμές για την ανάπτυξη του προσομοιώματος, και συγκεκριμένα σε ασθενή βραχώμαζα τριαδικής περιόδου (Triassic Weathered Rock). Η συμπεριφορά της βραχώμαζας διερευνήθηκε και το προσομοίωμα συμπεριλήφθηκε στο λογισμικό LTBASE για την ανάλυση φρεάτων.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε λαμβάνει υπόψη τις εξής βασικές παραδοχές:

- Οι καμπύλες p-γ στιφρής αργίλου πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ασθενή βραχώμαζα (Reese, Cox, Koop 1975).
- Η συμπεριφορά των πασσάλων σε βράχο μπορεί να προβλεφθεί χρησιμοποιώντας το κριτήριο της στιφρής αργίλου (Gabr 1993).
- Μεθοδολογία κατασκευής p-γ καμπυλών κατά τον Reese (1997) που έχει ήδη αναφερθεί.

Ακολουθήθηκαν οι παρακάτω διαδικασίες: προσομοίωση στο ABAQUS πλήθους περιπτώσεων δοκιμών εργαστηρίου και πεδίου με εκτέλεση τριδιάστατων αναλύσεων, εργαστηριακές δοκιμές προσομοίωσης των χαρακτηριστικών των καμπυλών p-γ σε ασθενή βραχώμαζα και, τέλος, δοκιμές πλήρους πεδίου σε πραγματικά φρέατα για την επαλήθευση του προσομοιώματος με μέτρηση φορτίου και παραμορφώσεων και ανάστροφες αναλύσεις.

Αναφορικά με την εκτίμηση των παραμέτρων, λόγω της διαταραγμένης φύσης της βραχώμαζας είναι πολύ δύσκολο να εξαχθούν αδιατάρακτα δοκίμια. Κατά συνέπεια, ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα. Για το λόγο αυτό, ο Cho πρότεινε δύο μεθόδους υπολογισμού: μία που βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις χρησιμοποιώντας γεωλογικές παραμέτρους και μία δεύτερη που χρησιμοποιεί στα αποτελέσματα μετρήσεων της διαστολής του φρέατος κατά τη φόρτισή του. Σύμφωνα με τον Cho, για να εξαχθούν ρεαλιστικά αποτελέσματα απόκρισης, θα πρέπει ο δείκτης της βραχώμαζας να υπολογίζεται για δύο ξεχωριστές περιοχές, πάνω και κάτω από το σημείο περιστροφής του φρέατος. Η συγκεκριμένη απαίτηση οφείλεται στο γεγονός ότι ο όγκος του εδάφους που προσφέρει αντίσταση πάνω από το σημείο στροφής είναι μικρότερος και με μεγαλύτερη διατμητική παραμόρφωση σε σχέση με τον αντίστοιχο όγκο κάτω από το εν λόγω σημείο. Επίσης, στην περιοχή κάτω από το σημείο περιστροφής και πίσω από το φρέαρ ασκούνται μεγαλύτερες γεωστατικές τάσεις. Τέλος, η ξαφνική αύξηση του  $k_{h0}$  οφείλεται και στη διαφορά των διατμητικών παραμορφώσεων πάνω και κάτω από το σημείο στροφής. Όταν η βραχώμαζα πάνω από το σημείο στροφής πλαστικοποιείται, η βραχώμαζα κάτω από αυτό συμπεριφέρεται ακόμα ελαστικά. Επομένως, φαίνεται ότι το  $k_{h0}$  μπορεί να εκφραστεί και ως συνάρτηση του βαθμού πάκτωσης του φρέατος. Για τους παραπάνω λόγους, ο δείκτης της βραχώμαζας αυξάνεται δραματικά κάτω από το σημείο στροφής και υπολογίζεται ως εξής:

$$\mathbf{k}_h = (\mathbf{k}_{h0} + \mathbf{n}_h \mathbf{z}) \mathbf{B}, \quad 0 \leq \mathbf{z} \leq \mathbf{T}_0 \quad (1-16)$$

$$\mathbf{k}_h = [(\mathbf{k}_{h0} + \mathbf{n}_h \mathbf{T}_0) + \mathbf{n}_h (\mathbf{z} - \mathbf{T}_0)] \mathbf{I}_T \mathbf{B}, \quad \mathbf{T}_0 \leq \mathbf{z} \leq \mathbf{L} \quad (1-17)$$

όπου:

$$k_{h0} = \sqrt{\sigma_{ci}} 10^3 \left( 10^{\frac{GSI-10}{40}} \right): \text{η τιμή του δείκτη βραχώμαζας στην επιφάνεια (kN/m}^3\text{)},$$

$$n_h = \left( \frac{2E_p I_p}{k_{h0} L^4} \right) 10^5: \text{ο συντελεστής κατανομής με το βάθος (kN/m}^4\text{)},$$

$$I_T = -28 - 383 \log \left( \frac{T_0}{L} \right): \text{συντελεστής προσαύξησης του } k_h \text{ για βάθη κάτω από το σημείο στροφής,}$$

$$I_T = 1,5 - 8 \log \left( \frac{T_0}{L} \right): \text{ο ίδιος συντελεστής για την περίπτωση της βραχώμαζας τριαδικής εποχής όπου δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη αύξηση πρακτικά,}$$

$$T_0 = L(1 + 0,18 \log K_R): \text{το βάθος του σημείου στροφής,}$$

$$K_R = \frac{E_p I_p}{E_s L^4}: \text{ο συντελεστής σχετικής δυσκαμψίας κατά Roulos and Davis (1980),}$$

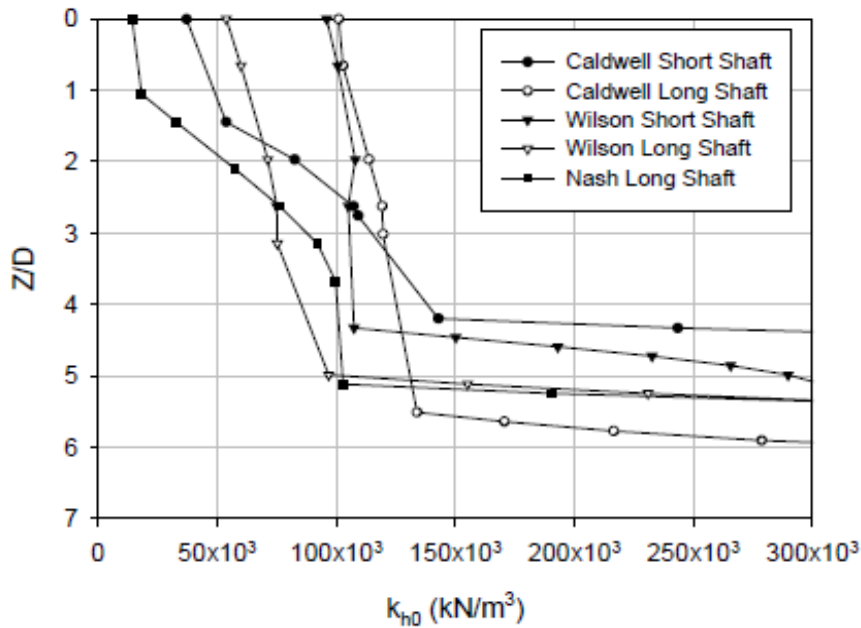
$$E_s = \left( \frac{\sigma_{ci}}{100} \right) 10^{\frac{GSI-10}{40}}: \text{το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας κατά Hoek-Brown (GPa),}$$

$E_p, I_p$ : το μέτρο ελαστικότητας και η ροπή αδράνειας του φρέατος,

L: το μήκος του φρέατος, και

$\sigma_{ci}$ : η αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη

Στο Σχήμα 1-4 παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές κατανομές του δείκτη βραχώμαζας από μετρήσεις πεδίου (Cho 2002):



Σχήμα 1-4 Τιμές του  $k_{h0}$  από μετρήσεις δοκιμών πεδίου (Cho, 2002)

#### 1.2.1.5 Σχέση Carter (1984)

Ο Carter (1984) τροποποίησε τη σχέση υπολογισμού του Vesic που προαναφέρθηκε (1–12), έπειτα από αποτελέσματα δοκιμών που λάμβαναν υπόψη την αποκόλληση του εδάφους από τα τοιχώματα του φρέατος λόγω του εγκάρσιου φορτίου. Η σχέση υπολογισμού του δείκτη της βραχύμαζας είναι σύμφωνα με τον Carter:

$$k_h = \frac{1,0ED}{(1 - \nu^2)D_{ref}} \left( \frac{ED^4}{E_p I_p} \right)^{1/12} \quad (1-18)$$

όπου:

E: το μέτρο ελαστικότητας της βραχύμαζας,

$\nu$ : ο δείκτης Poisson

D: η διάμετρος του φρέατος,

$D_{ref}=1,0m$ : τιμή για το συσχετισμό της διαμέτρου

$E_p, I_p$ : το μέτρο ελαστικότητας και η ροπή αδράνειας του φρέατος

Ο συντελεστής 0,65 της σχέσης του Vesic διπλασιάστηκε για να προσομοιώσει την επαφή του πασσάλου με το έδαφος και στις δύο πλευρές του. Ο Carter όμως πρότεινε απομείωση αυτού από 1,3 σε 1,0 επειδή δεν επικρατούν συνθήκες πλήρους επαφής, αλλά παρατηρείται αποκόλληση.

#### 1.2.1.6 Zhang and Ahmari (2009)

Οι Zhang και Ahmari ανέπτυξαν μια μεθοδολογία ανάλυσης άκαμπτων πασσάλων σε υπερστερεοποιημένη άργιλο υπό εγκάρσια φόρτιση. Η μέθοδος βασίζεται σε καμπύλες  $p$ - $\gamma$

ανεξάρτητων μη γραμμικών ελατηρίων. Ο δείκτης  $k_h$  θεωρείται σταθερός με το βάθος στις υπερτεροποιημένες αργίλους, ακριβώς όπως συμβαίνει και για τις μαλακές βραχώμαζες. Επίσης, συσχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας  $E_s$  (εδώ  $E_m$ ) και εξαρτάται από τη σχετική δυσκαμψία του συστήματος εδάφους-φρέατος. Η σχέση που προσδιορίζει το δείκτη  $k_h$  είναι η σχέση του Glick, διότι συνεκτιμά και την επιρροή της γεωμετρίας της θεμελίωσης:

$$k_h = \frac{22,4E_s(1 - \nu)}{(1 + \nu)(3 - 4\nu)[2 \ln\left(\frac{2L}{D}\right) - 0,443]} \quad (1-19)$$

όπου:

$L, D$ : το μήκος και η διάμετρος του φρέατος αντίστοιχα, και

$E_s, \nu_s$ : το μέτρο ελαστικότητας και ο δείκτης Poisson της βραχώμαζας αντίστοιχα

### 1.2.1.7 Παρατηρήσεις

Οι βασικοί περιορισμοί στην εφαρμογή των μεθόδων εδαφικής αντίδρασης είναι οι εξής:

- Αγνοείται η αλληλεπίδραση εδάφους/βράχου μεταξύ γειτονικών ελατηρίων.
- Οι καμπύλες  $p$ - $\gamma$  δεν αντιστοιχούν ευθέως σε μετρήσιμες ιδιότητες του εδαφικού υλικού, της βραχώμαζας ή της θεμελίωσης.

Εντούτοις, τόσο οι δοκιμές φόρτισης φυσικής κλίμακας όσο και η θεωρία συστήνουν την καθιέρωση αυτών των καμπυλών σε διαφόρους τύπους εδαφών.

Ως πλεονεκτήματα μπορούν να αναφερθούν:

- η δυνατότητα προσομοίωσης της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους/βράχου,
- η ικανότητα προσέγγισης της στρωματογραφίας σε μεγάλο βαθμό,
- η ισχύς της μεθόδου για μη γραμμική καμπτική δυσκαμψία  $EI$  ενός στελέχους από οπλισμένο σκυρόδεμα,
- το γεγονός ότι εμπεριέχει ρεαλιστικές συνοριακές συνθήκες στην κεφαλή του φρέατος,
- το γεγονός ότι η λύση παρουσιάζει την παραμόρφωση, την κλίση, τη διάτμηση, τη ροπή, καθώς και πληροφορίες που χρειάζονται για το δομικό σχεδιασμό του φρέατος συναρτήσει του βάθους, και
- η διαθεσιμότητα αναλυτικών λύσεων.

Οι συνοριακές συνθήκες στην κεφαλή του φρέατος καθορίζονται από το βαθμό πάκτωσης έναντι μετακίνησης και στροφής και από τα φορτία που εφαρμόζονται.

Πρακτικά, η κατανομή της καμπτικής ροπής κατά μήκος του φρέατος προσδιορίζεται μέσω μετρητών έντασης που εγκαθίστανται σε διάφορα σημεία κατά μήκος του φρέατος. Με διπλή παραγωγή της συνάρτησης καμπτικών ροπών κατά μήκος του φρέατος προσδιορίζεται η εδαφική αντίδραση  $p$  ενώ με διπλή ολοκλήρωση αυτής προσδιορίζεται η μετακίνηση  $\gamma$ . Εναλλακτικά, για τη χάραξη των καμπυλών  $p$ - $\gamma$  μπορεί να αποτυπωθεί η μορφή της

παραμορφωμένης θεμελίωσης από μετρήσεις κλισιομέτρων και προσαρμόζοντας τις καμπύλες  $p$ - $y$  ώστε να επιτευχθεί ταύτιση με τις μετρούμενες μετακινήσεις (Brown et al. 1994).

### 1.2.2 Θεωρία συνεχούς ελαστικού μέσου

Μια δεύτερη ομάδα μεθόδων προσομοίωσης της ενδοσιμότητας βασίζεται στη θεωρία του συνεχούς ελαστικού μέσου. Οι απαρχές της προσέγγισης αυτής αποδίδονται στον Ρουλος (1971-1972), ο οποίος πρότεινε μια αριθμητική λύση βασιζόμενη στη μέθοδο των συνοριακών στοιχείων, με τον πάσσαλο να προσομοιώνεται ως μια λεπτή ελαστική λωρίδα και το έδαφος ως ομοιογενές, ισότροπο, ελαστικό υλικό. Η προσέγγιση αυτή είχε ως σκοπό να προσομοιώσει πακτωμένους πασσάλους δύο διαφορετικών συνοριακών συνθηκών στην κεφαλή (επιφάνεια του βράχου):

- -πλήρως πακτωμένος πάσσαλος έναντι μετακίνησης και στροφής στην κεφαλή του (επιφάνεια βράχου) και
- -ελεύθερος πάσσαλος να στραφεί αλλά όχι να μετακινηθεί (αρθρωμένος) στην κεφαλή του (επιφάνεια βράχου).

Στην πρώτη περίπτωση επιχειρείται να προσομοιωθεί μια πακτωμένη βαθιά θεμελίωση ενώ στη δεύτερη ένας πάσσαλος που μεταβιβάζει φορτία στο βράχο, αλλά δεν είναι πακτωμένος σε αυτόν. Παρά το γεγονός ότι οι παραπάνω συνθήκες στην κεφαλή δεν προσομοιώνουν επαρκώς τη συμπεριφορά των περισσότερων φρεάτων πακτώσεως, οι αναλύσεις παρουσιάζουν κάποιες σημαντικές πτυχές της συμπεριφοράς των βαθιών πακτωμένων θεμελιώσεων.

#### 1.2.2.1 Στροφικό ελατήριο στη βάση του φρέατος

Στην απλούστερη περίπτωση, η εγκάρσια ενδοσιμότητα του φρέατος προσομοιώνεται μέσω ενός στροφικού ελατηρίου στη βάση του, θεωρώντας ότι η βάση του φρέατος στρέφεται ως επίπεδος δίσκος, η αντίδραση του βράχου σε κάθε σημείο της βάσης είναι ανάλογη της υποχώρησης και η σταθερά αναλογίας (δείκτης βραχόμαζας, ανάλογος του δείκτη εδάφους) δίνεται από τη σχέση:

$$k_v = \frac{2\xi}{\pi(1+\nu)} \frac{E}{D} \quad (1-20)$$

Ως αποτέλεσμα προκύπτει ότι η δυσκαμψία του στροφικού ελατηρίου της βάσης του φρέατος δίνεται από τη σχέση:

$$K_\phi = \frac{1}{12} k_v \pi^2 R^4 \quad (1-21)$$

ή, ισοδύναμα:

$$K_\phi = \frac{\pi\xi}{12(1+\nu)} ER^3 \quad (1-22)$$

όπου

R: η ακτίνα του φρέατος,

E: το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας,

$\nu$ : ο δείκτης Poisson της βραχώμαζας, και

$\xi$ : μία παράμετρος που εξαρτάται από το βάθος ( $c$ ) της βάσης του φρέατος και δίνεται από τον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 1-1.** Τιμές της παραμέτρου ( $\xi$ ) για διάφορα σχετικά βάθη της αιχμής

$c/D$	$\xi$
0	2.9
1	4.3
2	5.0
3	5.4
4	5.7
10	6.0

### 1.2.2.2 Ζεύγος ισοδύναμων ελατηρίων κατά Douglas and Davis (1964)

Η μέθοδος αναφέρεται στην περίπτωση ενός άκαμπτου φρέατος πλάτους ( $D$ ) και μήκους ( $L$ ) ο οποίος είναι εγκιβωτισμένος σε ελαστικό ημίχωρο με μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ) και λόγο Poisson ( $\nu=0.50$ ). Η ανάλυση, αν και θεωρητικά αναφέρεται στην περίπτωση που ο λόγος του Poisson είναι ίσος με 0.50, μπορεί να εφαρμοστεί και για άλλες τιμές του λόγου αυτού χωρίς σημαντικό σφάλμα. Η μέθοδος συμπεραίνει ότι η μετακίνηση ( $u$ ) και η στρόφη ( $\theta$ ) της κεφαλής του φρέατος πακτώσεως δίνονται από τις σχέσεις:

$$u = I_{hM} \frac{M}{EDL} + I_{hH} \frac{H}{ED} \quad (1-23)$$

$$\theta = I_{\theta M} \frac{M}{EDL^2} + I_{\theta H} \frac{H}{EDL} \quad (1-24)$$

Οι συντελεστές επιρροής  $I_{ij}$  εξαρτώνται από το λόγο  $B/D$  του φρέατος, ενώ κατά προσέγγιση δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$I_{\theta H} = I_{hM} = 1,16 - 0,76 \log\left(\frac{L}{D}\right) \quad (1-25)$$

$$I_{hH} = 1,18 - 0,97 \log\left(\frac{L}{D}\right) \quad (1-26)$$

$$I_{\theta M} = 1,95 - 1,21 \log\left(\frac{L}{D}\right) \quad (1-27)$$

Ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει τυπικές τιμές των συντελεστών επιρροής κατά τη μέθοδο Douglas και Davis (1964).

**Πίνακας 1-2** Συντελεστές επιρροής κατά τη μέθοδο Douglas and Davis (1964)

L/D	$I_{\theta H}=I_{hM}$	$I_{hH}$	$I_{\theta M}$
1	1.16	1.18	1.95
1.5	1.03	1.01	1.74
2	0.93	0.89	1.59
3	0.80	0.72	1.37
4	0.70	0.60	1.22

### 1.2.2.3 Ζεύγος ισοδύναμων ελατηρίων κατά Carter and Kulhawy (1992)

Η μέθοδος του συνεχούς ελαστικού μέσου εξελίχθηκε από τον Randolph (1981) με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Οι λύσεις που παρουσιάστηκαν καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων εύκαμπτων στοιχείων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό μορφή πινάκων. Δεν καλύπτεται όμως επαρκώς όλο το φάσμα των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των φρεάτων στην πραγματικότητα. Για το λόγο αυτό, οι Carter και Kulhawy (1992) επέκτειναν τη μέθοδο του Randolph και για τις περιπτώσεις άκαμπτων και ενδιάμεσης δυσκαμψίας φρεάτων.

Η μέθοδος καταλήγει στον προσδιορισμό της μετακίνησης και στροφής του φρέατος, θεωρούμενου ως απολύτως στερεού, με σχέσεις παρόμοιες των ανωτέρω κατά Douglas and Davis (1964), και τιμές συντελεστών επιρροής:

$$I_{\theta H} = I_{hM} = 0,3 \left( \frac{E}{G^*} \right) \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} \quad (1-28)$$

$$I_{hH} = 0,4 \left( \frac{E}{G^*} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-1/3} \quad (1-29)$$

$$I_{\theta M} = 0,8 \left( \frac{E}{G^*} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^2 \left( \frac{2L}{D} \right)^{-5/3} \quad (1-30)$$

όπου οι τιμές E, G\* αναφέρονται στη βραχόμαζα και (για τιμές του  $\nu=0,3$ ):

$$\frac{E}{G^*} = \frac{2(1+\nu)}{1+\frac{3\nu}{4}} \approx 2,12 \quad (1-31)$$

Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος αναφέρεται σε φρέαρ κυκλικής διατομής διαμέτρου (D) και ενεργού μήκους (L) είναι το ενεργό μήκος του φρέατος. Στην περίπτωση φρέατος ορθογωνικής διατομής χρησιμοποιείται η ίδια μεθοδολογία με τη γεωμετρικά ισοδύναμη διάμετρο του φρέατος.

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τυπικές τιμές των συντελεστών επιρροής κατά τη μέθοδο των Carter and Kulhawy (1992):

**Πίνακας 1-3** Συντελεστές επιρροής κατά τη μέθοδο Carter and Kulhawy

L/D	$I_{\theta H} = I_{HM}$	$I_{HH}$	$I_{\theta M}$
1	0.347	0.673	0.534
2	0.378	0.534	0.673
3	0.398	0.467	0.770
4	0.412	0.424	0.848

Για τον καθορισμό της οριακής λυγηρότητας (L/D) του φρέατος πάνω από την οποία το φρέαρ θεωρείται εύκαμπτο υιοθετήθηκε το κριτήριο του Randolph (1981):

$$\frac{L}{D} \geq \left( \frac{E_p}{G^*} \right)^{2/7} \quad (1-32)$$

Συνεπώς, για εύκαμπτα φρέατα, οι τιμές των συντελεστών επιρροής είναι:

$$I_{\theta H} = I_{HM} = 1.08 \left( \frac{E}{G^*} \right) \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{E_p}{G^*} \right)^{-3/7} \quad (1-33)$$

$$I_{HH} = 0.4 \left( \frac{E}{G^*} \right) \left( \frac{E_p}{G^*} \right)^{-1/7} \quad (1-34)$$

$$I_{\theta M} = 6.4 \left( \frac{E}{G^*} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^2 \left( \frac{E_p}{G^*} \right)^{-5/7} \quad (1-35)$$

Οι προηγούμενες αναλύσεις κατέληξαν στον προσδιορισμό των μετακινήσεων (u,θ) της κεφαλής του φρέατος συναρτήσει των εντατικών μεγεθών (M,H). Οι ανωτέρω σχέσεις είναι πεπλεγμένες, δηλαδή η μετακίνηση (u) εξαρτάται τόσο από την οριζόντια δύναμη (H) όσο και από τη ροπή (M) στην κεφαλή του φρέατος. Έτσι, δεν είναι δυνατή η αντικατάσταση του συστήματος φρέαρ-έδαφος με ένα στροφικό και ένα γραμμικό ελατήριο, αλλά με ένα ισοδύναμο άκαμπτο κατακόρυφο στοιχείο που στηρίζεται σε δύο οριζόντια ελατήρια με δυσκαμψίες  $k_1, k_2$ . Το μήκος του άκαμπτου στοιχείου μπορεί να είναι διαφορετικό από το μήκος του φρέατος πακτώσεως δεδομένου ότι το άκαμπτο στοιχείο είναι ιδεατό και έχει σκοπό να προσομοιάσει τη συμπεριφορά του φρέατος από πλευράς μετακινήσεων και στροφών.

Η ισορροπία του ισοδύναμου συστήματος δίνει:

$$H = k_1 u_1 + k_2 u_2 \quad (1-36)$$

$$M + H d_1 = -k_2 u_2 d_2 \quad (1-37)$$

οπότε επειδή:

$$u = u_1 \quad (1-38)$$



$$\theta = \frac{u_1 - u_2}{d_2} \quad (1-39)$$

προκύπτει:

$$u = \frac{1}{k_1} H + \frac{1}{k_1 d_2} (M + H d_1) \quad (1-40)$$

$$\theta = \frac{1}{k_1 d_2} H + \frac{1}{d_2^2} \left( \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right) (M + H d_1) \quad (1-41)$$

Τονίζεται ότι στις παραπάνω σχέσεις τα μεγέθη (H) και (M+Hd<sub>1</sub>) είναι η εγκάρσια δύναμη και η καμπτική ροπή στο σημείο του φρέατος όπου αρχίζει το ενεργό του τμήμα (κάτω από τον αποσαθρωμένο μανδύα της βραχώμαζας).

Από τις σχέσεις (1-23)(1-24) και (1-40)(1-41) προκύπτουν οι τιμές των σταθερών (k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>) του ισοδύναμου ζεύγους ελατηρίων, καθώς και το μήκος d<sub>2</sub> της μεταξύ τους απόστασης (d<sub>1</sub> είναι το μήκος του ανωτέρω τμήματος του φρέατος που αμελείται, δηλαδή το βάθος του αποσαθρωμένου μανδύα της βραχώμαζας):

$$k_1 = \frac{ED}{I_{hH}} \quad (1-42)$$

$$k_2 = \frac{ED}{\left\{ I_{\theta M} \left( \frac{I_{hH}}{I_{hM}} \right)^2 - I_{hH} \right\}} \quad (1-43)$$

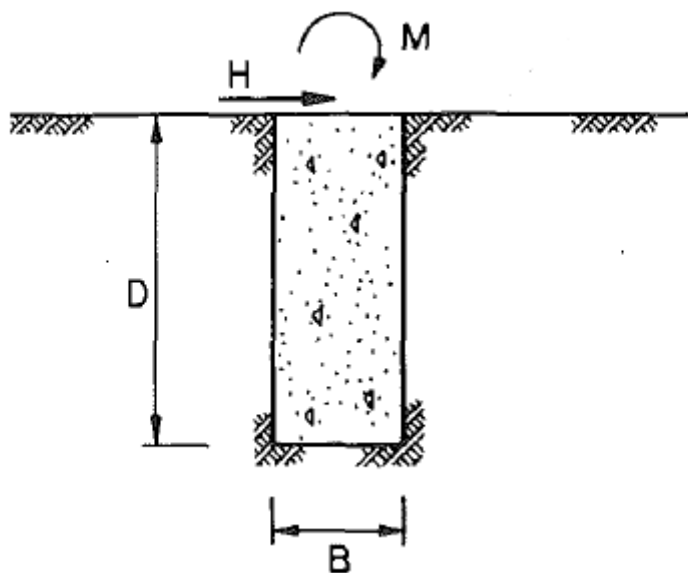
$$d_2 = L \left( \frac{I_{hH}}{I_{hM}} \right) \quad (1-44)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται διεξοδικά η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τους Carter και Kulhawy (1992) για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων και των στροφών της κεφαλής έπειτα από ελαστικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.

# 2 Μεθοδολογία Carter και Kulhawy

## 2.1 Παραδοχές

Η παρούσα μεθοδολογία υπολογίζει τη σύνθετη δυσκαμψία του φρέατος μέσω της ανάλυσης της συμπεριφοράς του εντός ελαστικού ημιχώρου (Σχήμα 2-1), όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 1.2.2.3. Με τον όρο σύνθετη δυσκαμψία νοείται ο προσδιορισμός της μετακίνησης και στροφής της κεφαλής του φρέατος συναρτήσει των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών, της σχετικής δυσκαμψίας υλικού φρέατος-βραχώμαζας και των εντατικών μεγεθών ( $M, H$ ) που επιβάλλονται στην κεφαλή του.



Σχήμα 2-1. Εγκάρσια φόρτιση φρέατος πακτώσεως

Το φρέαρ προσομοιώνεται με ελαστικό κυλινδρικό κέλυφος ενεργού μέτρου ελαστικότητας Young ( $E_e$ ), λόγου Poisson ( $\nu_e$ ), μήκους ( $L$ ) και διαμέτρου ( $D$ ). Για άκαμπτο φρέαρ με καμπτική δυσκαμψία ίση με  $(EI)_e$ , το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του Young υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_e = \frac{(EI)_e}{\frac{\pi D^4}{64}} \quad (2-1)$$

Υποτίθεται ότι το ελαστικό φρέαρ είναι εγκιβωτισμένο σε ομοιογενή, ισότροπο, ελαστικό βραχώδη ή εδαφικό ημίχωρο με ιδιότητες  $E_r$  και  $\nu_r$ . Το φρέαρ υπόκειται σε δεδομένη εγκάρσια φόρτιση κεφαλής ( $H$ ) και ροπή ( $M$ ) (Σχήμα 2-1).

Ως προς την παραμορφωμένη κατάσταση του, έχουν προταθεί συγκεκριμένες εκφράσεις κλειστού τύπου για εύκαμπτα και άκαμπτα φρέατα. Οι εξισώσεις έχουν εξαχθεί από τα αποτελέσματα αναλύσεων με αξονοσυμμετρικά πεπερασμένα στοιχεία υποβαλλόμενα σε μη συμμετρική

φόρτιση. Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάστηκε από τον Wilson (1965) και είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση εύκαμπτων πασσάλων από τον Randolph (1977, 1981). Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οκτακομβικά, τετραπλευρικά και ισοπαραμετρικά, και μέσω της ολοκλήρωσης κατά Gauss προσομοίωσαν το τριδιάστατο πρόβλημα.

Εκτενής παραμετρική διερεύνηση που καλύπτει ένα ευρύ φάσμα δυσκαμψιών φρεάτων πακτώσεως έδειξε ότι η επιρροή του λόγου Poisson της βραχόμαζας μπορεί να αναπαρασταθεί μέσω του τέμνοντος μέτρου διάτμησης της βραχόμαζας ( $G^*$ ) το οποίο ορίζεται από τη σχέση:

$$G^* = G_r \left( 1 + \frac{3\nu_r}{4} \right) \quad (2-2)$$

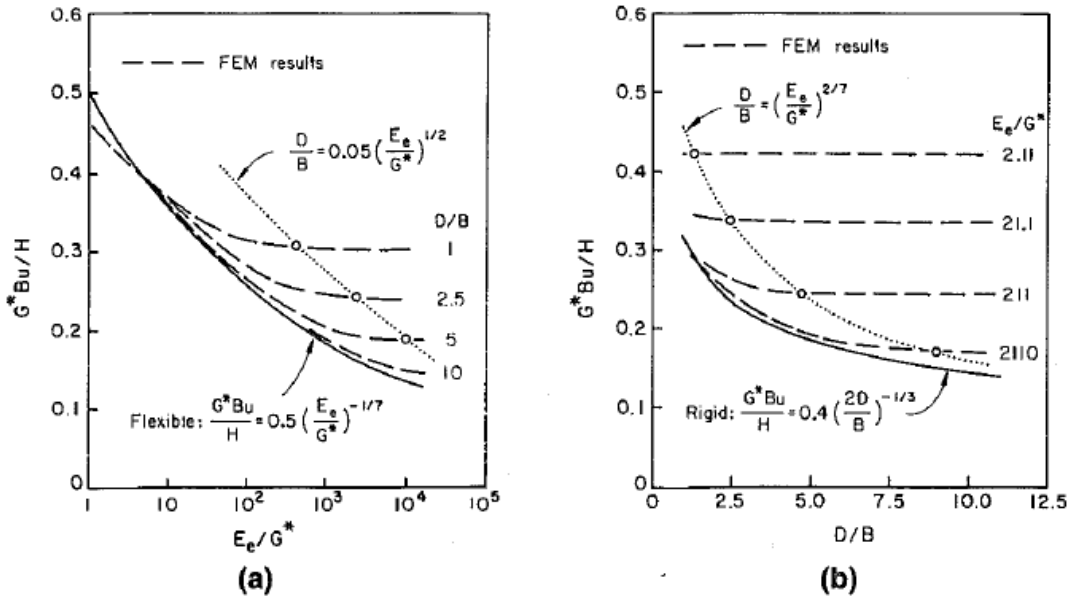
όπου

$G_r$ : το μέτρο διάτμησης της βραχόμαζας.

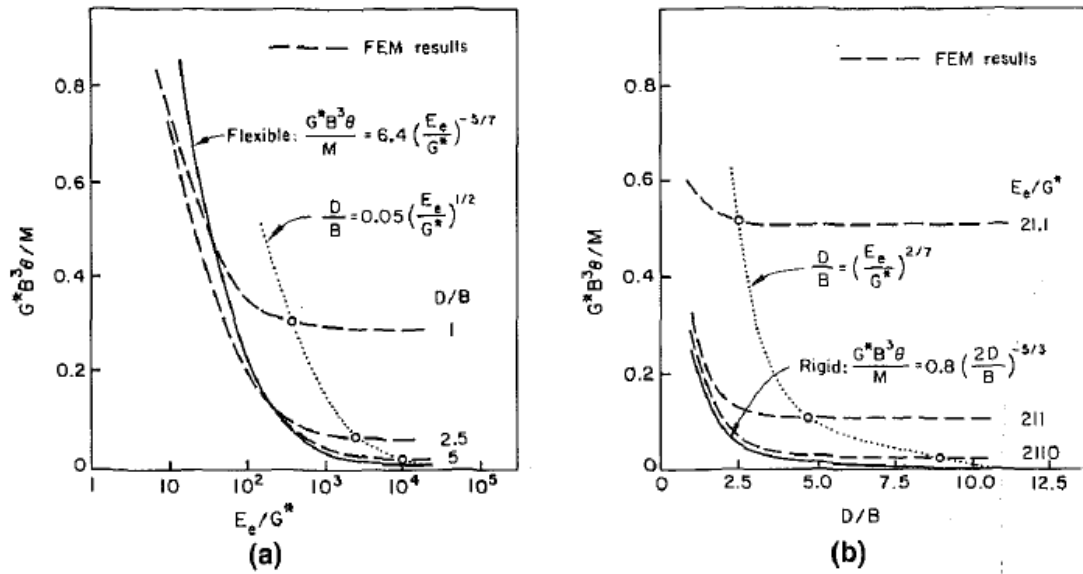
Για ισότροπη βραχόμαζα, το μέτρο διάτμησης ( $G_r$ ) συσχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας ( $E_r$ ) και το λόγο Poisson ( $\nu_r$ ) μέσω της σχέσης:

$$G_r = \frac{E_r}{2(1 + \nu_r)} \quad (2-3)$$

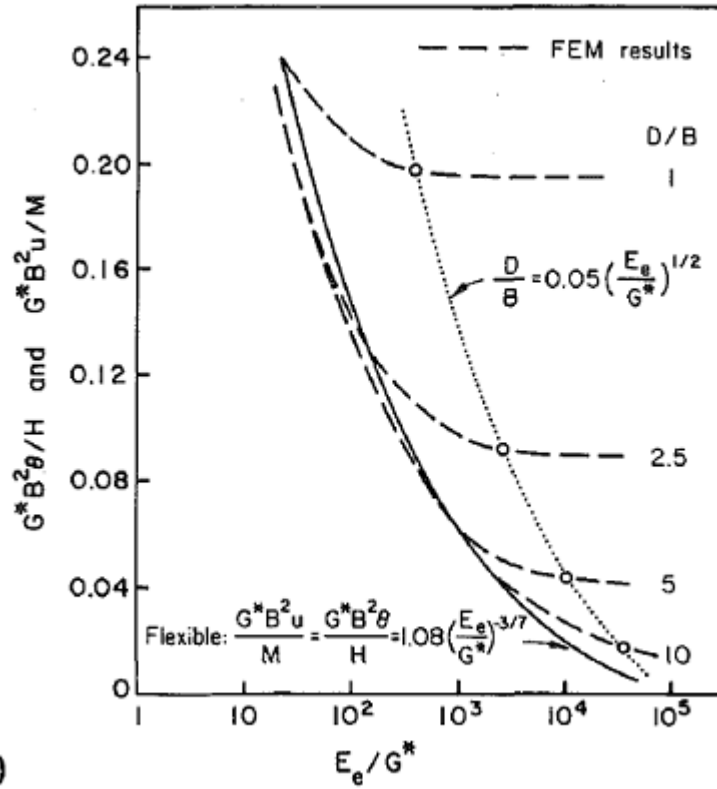
Για ομοιογενή βραχόμαζα διαπιστώθηκε ότι η οριζόντια μετακίνηση ( $u$ ) και η στροφή ( $\theta$ ) του φρέατος στο επίπεδο της επιφάνειας του βράχου εξαρτάται από τη σχετική δυσκαμψία ( $E_e/G^*$ ) και από τη γεωμετρία του φρέατος ( $L/D$ ). Συγκεκριμένα, για να προσδιοριστεί η δυσκαμψία των φρεάτων, οι Carter και Kulhawy χάραξαν διαγράμματα αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων και στροφών συναρτήσει των λόγων  $E_e/G^*$  και  $L/D$  (Σχήμα 2-2, Σχήμα 2-3, Σχήμα 2-4). Στα διαγράμματα αυτά προσδιορίστηκαν τα κάτω όρια ανεξαρτητοποίησης παραμορφώσεων από τους λόγους  $L/D$  και  $E/G^*$  αντίστοιχα (οριζοντίωση των καμπυλών) και προέκυψαν τα κριτήρια δυσκαμψίας των φρεάτων (εστιγμένες καμπύλες στα διαγράμματα). Οι μετακινήσεις και οι στροφές υπολογίστηκαν από ελαστικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Σημειώνεται πως στο εξής ο λόγος ( $E_e/G^*$ ) θα συμβολίζεται με ( $E/G^*$ ) όπου ( $E$ ): το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του φρέατος (οπλισμένο σκυρόδεμα).



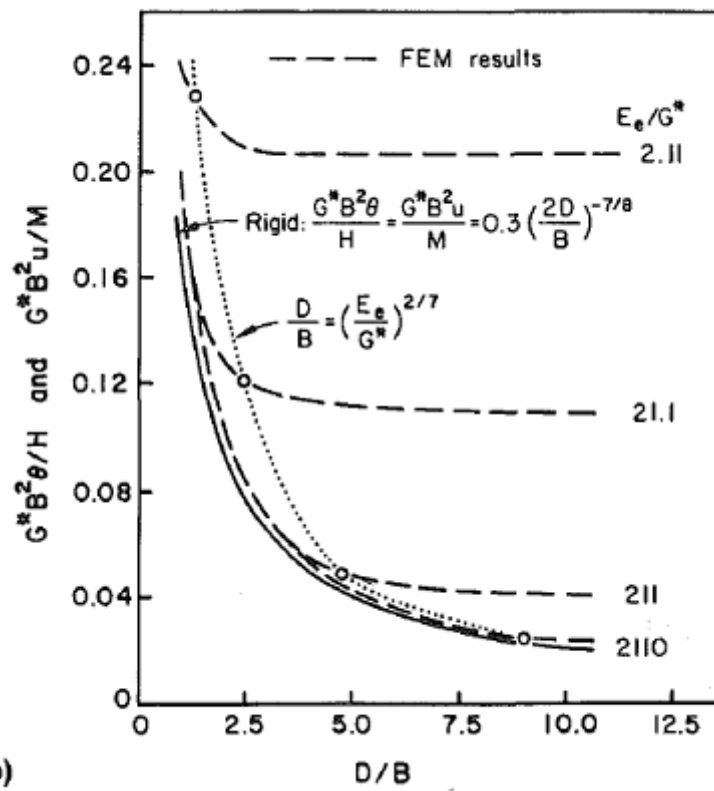
Σχήμα 2-2. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής συναρτήσει των λόγων: (a)  $E/G^*$  και (b)  $L/D$



Σχήμα 2-3. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής συναρτήσει των λόγων (a)  $E/G^*$  και (b)  $L/D$



(a)



(b)

Σχήμα 2-4. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα και στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής συναρτήσει των λόγων (a)  $E/G^*$  και (b)  $L/D$

## 2.2 Σχέσεις υπολογισμού μετακινήσεων και στροφών

### 2.2.1 Εύκαμπτα φρέατα

Ο Randolph (1981) πρότεινε ότι ένα φρέαρ μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα εύκαμπτο όταν:

$$\frac{L}{D} \geq \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{2/7} \quad (2-4)$$

Σε αυτή την περίπτωση η απόκριση του φρέατος εξαρτάται αποκλειστικά από το λόγο των δεικτών ( $E_e/G^*$ ) και του λόγου του Poisson ( $\nu_r$ ) και όχι από τις διαστάσεις του φρέατος. Η συγκεκριμένη διαπίστωση αντικατοπτρίζεται και στα διαγράμματα των Carter και Kulhawy, όπου παρατηρείται οριζοντίωση των καμπυλών στις περιοχές όπου ισχύει η παραπάνω ανίσωση. Οι εξισώσεις που προτάθηκαν από τον Randolph παρέχουν ακριβή υπολογισμό των μετακινήσεων και στροφών και είναι οι εξής:

$$u = 0,50 \left(\frac{H}{G^*D}\right) \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{-1/7} + 1,08 \left(\frac{M}{G^*D^2}\right) \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{-3/7} \quad (2-5)$$

$$\theta = 1,08 \left(\frac{H}{G^*D^2}\right) \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{-3/7} + 6,40 \left(\frac{M}{G^*D^3}\right) \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{-5/7} \quad (2-6)$$

Οι παραπάνω σχέσεις θεωρούνται ακριβείς για το εξής εύρος των παραμέτρων:

$$L/D \geq 10$$

$$10^2 \leq E_e/E_r \leq 10^6$$

Σύμφωνα με τους Carter και Kulhawy, η εφαρμογή των σχέσεων μπορεί να επεκταθεί και για

$$1 \leq E_e/E_r \leq 10^6$$

$$L/D \geq 1$$

### 2.2.2 Άκαμπτα φρέατα

Σε πολλές περιπτώσεις στην πράξη – όπως αυτές που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία – συναντώνται φρέατα πακτώσεως σε μαλακό βράχο ή έδαφος, τα οποία συμπεριφέρονται ως πλήρως άκαμπτα στοιχεία. Σε αυτές τις περιπτώσεις η απόκριση του φρέατος εξαρτάται μόνο από το λόγο των διαστάσεων του ( $L/D$ ) και το λόγο Poisson ( $\nu_r$ ) και όχι από τη σχετική δυσκαμψία φρέατος-βραχόμαζας ( $E/G^*$ ). Το φρέαρ θεωρείται πλήρως άκαμπτο όταν:

$$\frac{L}{D} \leq 0,05 \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{1/2} \quad (2-7)$$

Οι παραμορφώσεις των συγκεκριμένων φρεάτων μπορούν να περιγραφούν με ακρίβεια από τις εξής απλές εξισώσεις κλειστού τύπου:

$$u = 0,4 \left(\frac{H}{G^*D}\right) \left(\frac{2L}{D}\right)^{-1/3} + 0,3 \left(\frac{M}{G^*D^2}\right) \left(\frac{2L}{D}\right)^{-7/8} \quad (2-8)$$

$$\theta = 0,3 \left( \frac{H}{G^* D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} + 0,8 \left( \frac{M}{G^* D^3} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-5/3} \quad (2-9)$$

Επειδή το φρέαρ μετατοπίζεται ως άκαμπτο σώμα σε ελαστικό μέσο, το βάθος του κέντρου στροφής του μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{z_c}{B} = \frac{0,4 \left( \frac{2L}{D} \right)^{-1/3} + 0,3 \left( \frac{e}{D} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8}}{0,3 \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} + 0,8 \left( \frac{e}{D} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-5/3}} \quad (2-10)$$

όπου

$e=M/H$ : η εκκεντρότητα της εγκάρσιας δύναμης  $H$ .

Η αξιοπιστία των παραπάνω σχέσεων αυξάνεται στο εξής εύρος παραμέτρων:

$$1 \leq L/D \leq 10$$

$$E_e/E_r \geq 1$$

### 2.2.3 Φρέατα ενδιάμεσης δυσκαμψίας

Ως φρέατα ενδιάμεσης δυσκαμψίας θεωρούνται εκείνα, των οποίων ο λόγος μήκους προς διάμετρό βρίσκεται εντός των ορίων:

$$0,05 \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{1/2} < \frac{L}{D} < \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{2/7} \quad (2-11)$$

Οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων των Carter και Kulhawy για τα συγκεκριμένα φρέατα προβλέπουν μετακινήσεις σχεδόν πάντα μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίζονται από τις σχέσεις για τα εύκαμπτα φρέατα αλλά και από αυτές για τα άκαμπτα. Συνήθως, οι μετακινήσεις των φρεάτων ενδιάμεσης δυσκαμψίας υπερβαίνουν τις μέγιστες προβλεπόμενες σε ποσοστό όχι μεγαλύτερο από 25%. Χάριν απλότητας, χωρίς έλλειψη ακρίβειας, προτείνεται οι μετακινήσεις των φρεάτων ενδιάμεσης δυσκαμψίας να λαμβάνονται ίσες με 1,25 φορές επί τις μέγιστες που προκύπτουν από τις σχέσεις για εύκαμπτα και άκαμπτα φρέατα, δηλαδή:

$$u = 1,25 m a x \left[ \begin{array}{l} 0,50 \left( \frac{H}{G^* D} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-1/7} + 1,08 \left( \frac{M}{G^* D^2} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-3/7} ; \\ 0,40 \left( \frac{H}{G^* D} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-1/3} + 0,30 \left( \frac{M}{G^* D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} \end{array} \right] \quad (2-12)$$

$$\theta = 1,25 m a x \left[ \begin{array}{l} 1,08 \left( \frac{H}{G^* D^2} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-3/7} + 6,40 \left( \frac{M}{G^* D^3} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-5/7} ; \\ 0,30 \left( \frac{H}{G^* D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} + 0,80 \left( \frac{M}{G^* D^3} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-5/3} \end{array} \right] \quad (2-13)$$

Το βάθος του σημείου πακτώσεως (κέντρο στροφής) μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε περίπτωση ως ο λόγος της μετακίνησης προς τη στροφή:

$$z_c = \frac{u}{\theta} \quad (2-14)$$

Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές ότι το βάθος πακτώσεως δεν είναι σταθερό, αλλά εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (L,D), τις παραμέτρους ελαστικότητας της βραχώμαζας (E,ν) και τα εντατικά φορτία της κεφαλής του φρέατος (M,H).

## 2.3 Εφαρμογή της μεθόδου

### 2.3.1 Θεώρηση δυσκαμψίας κατά Carter και Kulhawy

Σύμφωνα με τις ανισοτικές σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην περιγραφή της μεθόδου ((2-4, (2-7 και (2-11), η θεώρηση της δυσκαμψίας φρεάτων πακτώσεως κατά Carter και Kulhawy συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2-1) για ενδεικτικές τιμές των λόγων E/G\* και L/D.

Πίνακας 2-1 Θεώρηση δυσκαμψίας φρεάτων κατά Carter και Kulhawy

L/D	E/G*	ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ
1	10	Ενδιάμεσο
	50	Ενδιάμεσο
	100	Ενδιάμεσο
	150	Ενδιάμεσο
	500	Άκαμπτο
	750	Άκαμπτο
	1000	Άκαμπτο
1.5	10	Ενδιάμεσο
	50	Ενδιάμεσο
	100	Ενδιάμεσο
	150	Ενδιάμεσο
	500	Ενδιάμεσο
	750	Ενδιάμεσο
	1000	Άκαμπτο
2	10	Εύκαμπτο
	50	Ενδιάμεσο
	100	Ενδιάμεσο
	150	Ενδιάμεσο
	500	Ενδιάμεσο



	750	Ενδιάμεσο
	1000	Ενδιάμεσο
3	10	Εύκαμπτο
	50	Ενδιάμεσο
	100	Ενδιάμεσο
	150	Ενδιάμεσο
	500	Ενδιάμεσο
	750	Ενδιάμεσο
	1000	Ενδιάμεσο

Παρατηρείται ότι, σύμφωνα με τους Carter και Kulhawy οι οποίοι βασίστηκαν στη θεώρηση του Randolph (1981), τα απολύτως άκαμπτα φρέατα περιορίζονται σε περιπτώσεις μικρού λόγου μήκους προς τη διάμετρό τους και για μεγάλες τιμές του λόγου  $E/G^*$ , δηλαδή κακής ποιότητας βραχόμαζες.

### 2.3.2 Υπολογισμός μετακινήσεων και στροφών κεφαλής

Θεωρώντας την κεφαλή των φρεάτων ελεύθερη ως προς τις μετατοπίσεις, εφαρμόστηκαν οι αντίστοιχες σχέσεις των Carter και Kulhawy για τιμή του οριζόντιου φορτίου  $H = 20\text{MN}$  και τιμές ροπής  $M = 0, 300, 600\text{MNm}$ , δηλαδή εκκεντρότητα  $e = 0, 15, 30\text{m}$ .

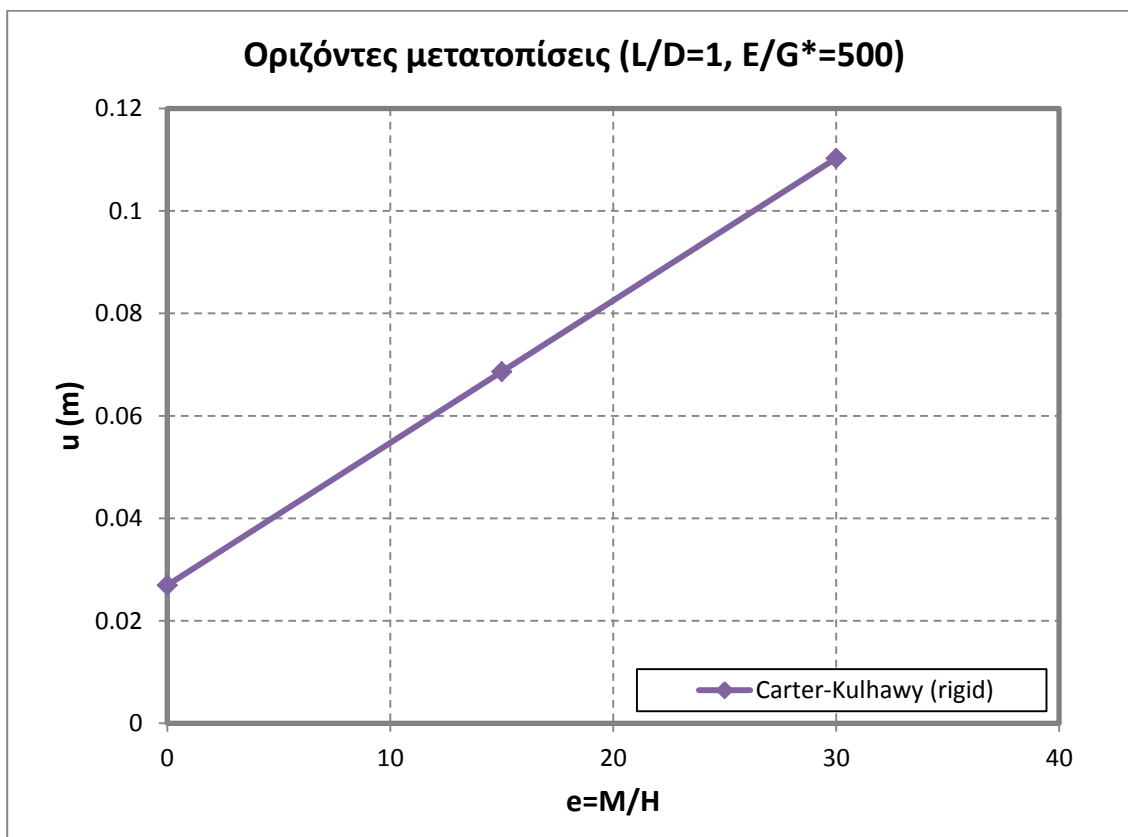
Ενδεικτικά, εφαρμόστηκαν οι σχέσεις για τις εξής περιπτώσεις φρεάτων (Πίνακας 2-2):

**Πίνακας 2-2** Ενδεικτικές περιπτώσεις φρεάτων για διάφορες κατηγορίες δυσκαμψιών κατά Carter και Kulhawy

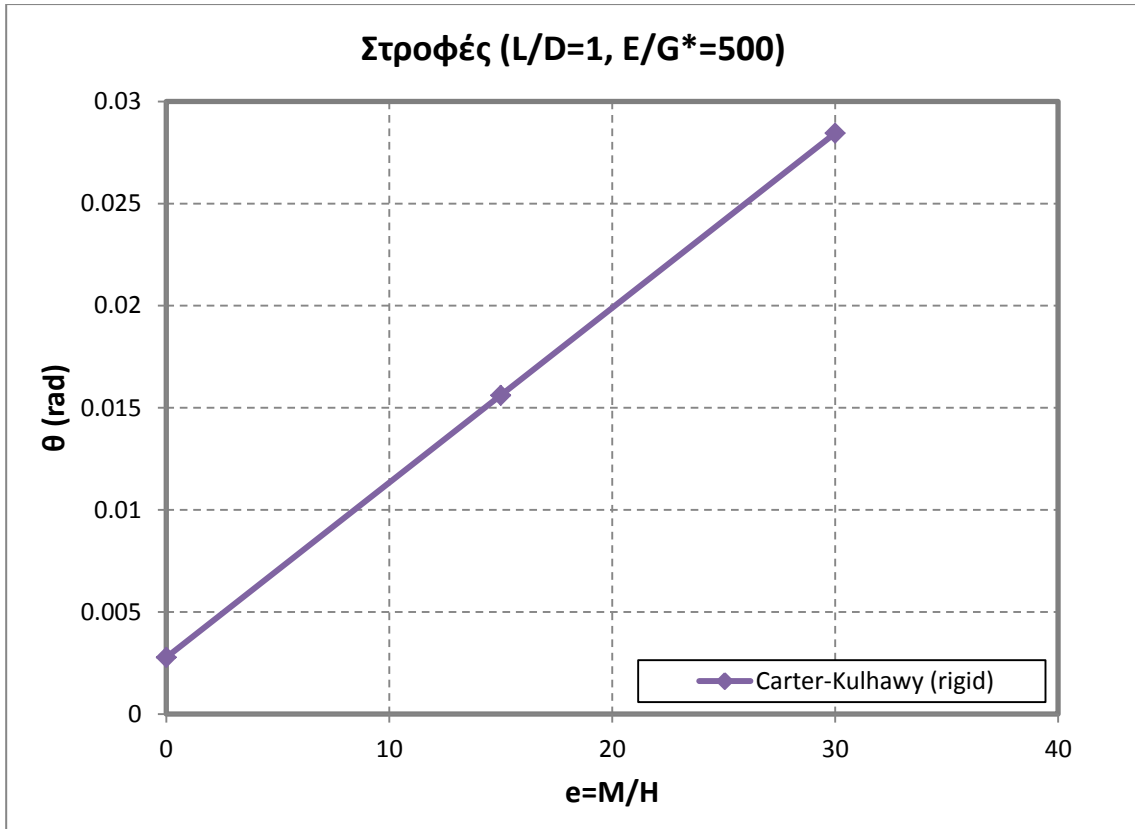
L/D	E/G*	Δυσκαμψία
1	500	Μεγάλη
1	1000	
1.5	1000	
2	100	Ενδιάμεση
3	10	Μικρή

Για όλα τα φρέατα θεωρήθηκε διάμετρος  $D=5\text{m}$ . Επομένως, τα μήκη τους ήταν ίσα με  $L = 5, 7.5, 10$  και  $15\text{m}$  για λόγους  $L/D = 1, 1.5, 2,$  και  $3$  αντίστοιχα. Οι τιμές του λόγου  $E/G^*$  αντιστοιχούν σε εδαφικούς και βραχώδεις/ημιβραχώδεις σχηματισμούς με τιμές του μέτρου ελαστικότητας ίσες με  $E_r=5200, 457, 100$  και  $53 \text{MPa}$  (αντίστοιχα για τους λόγους  $E/G^*=10, 100, 500$  και  $1000$ ). Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά και ιδιότητες των υλικών που συνθέτουν το περιβάλλον έδαφος/βραχόμαζα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3.

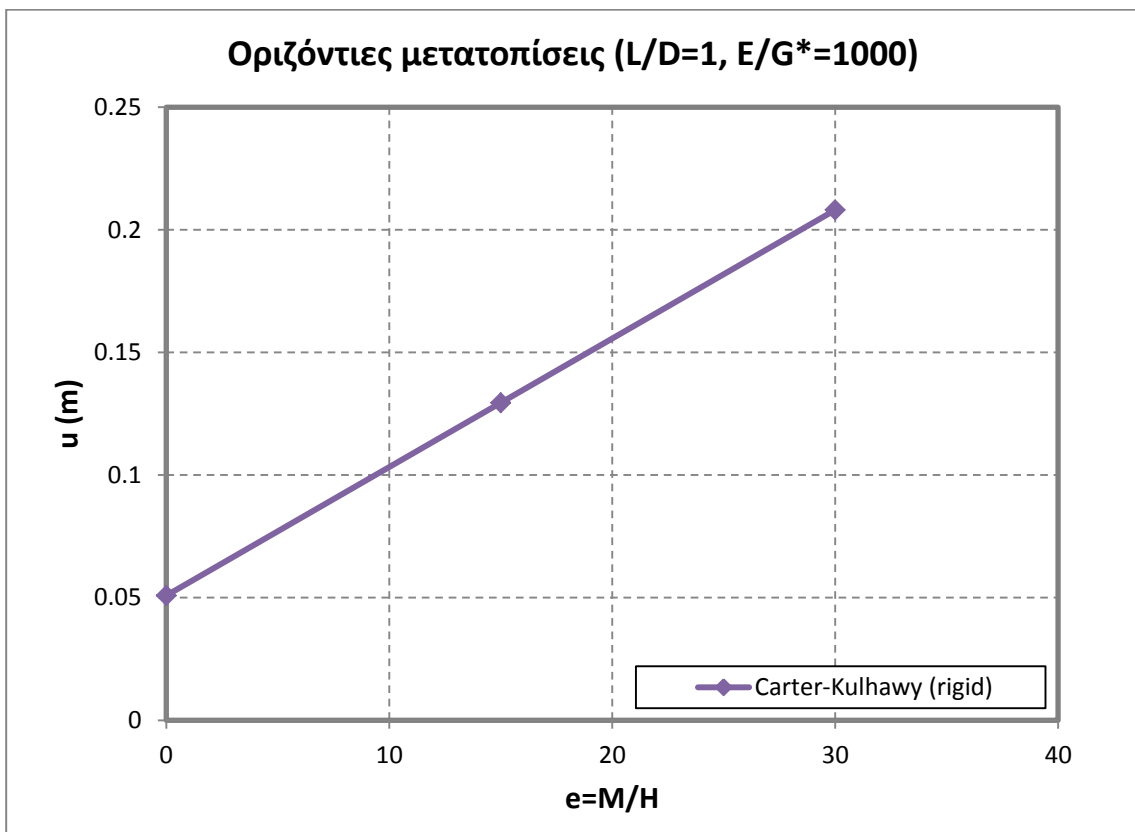
Τα αποτελέσματα των μετακινήσεων και στροφών που προέκυψαν από την εφαρμογή των σχέσεων για τις προαναφερθείσες περιπτώσεις φρεάτων παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα:



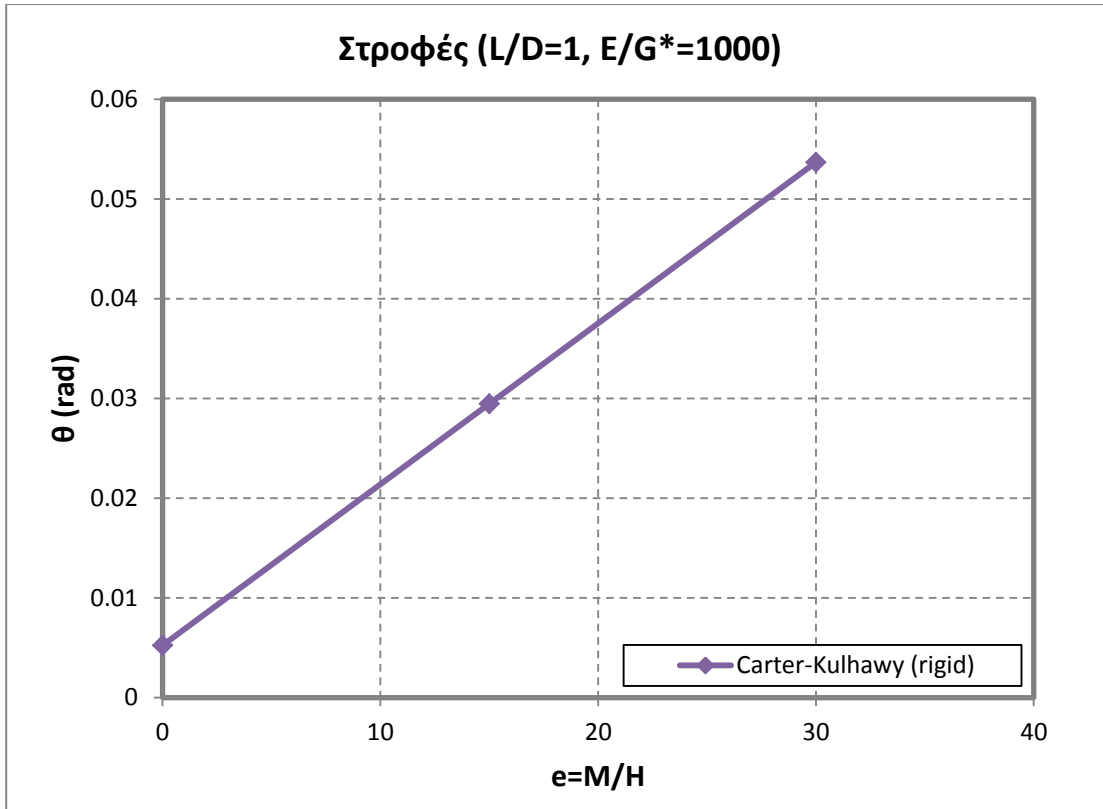
Σχήμα 2-5. Μετακινήσεις άκαμπτου φρέατος με L/D=1 και E/G\*=500



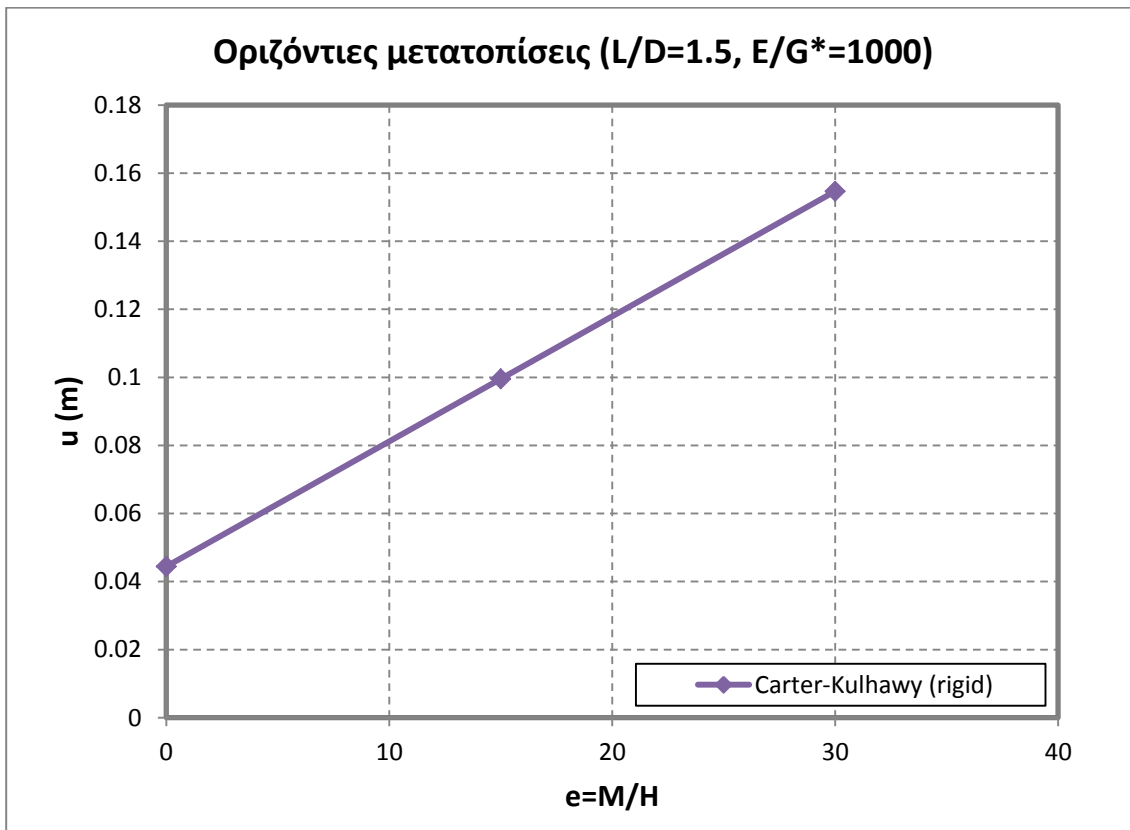
Σχήμα 2-6. Στροφές άκαμπτου φρέατος με  $L/D=1$  και  $E/G^*=500$



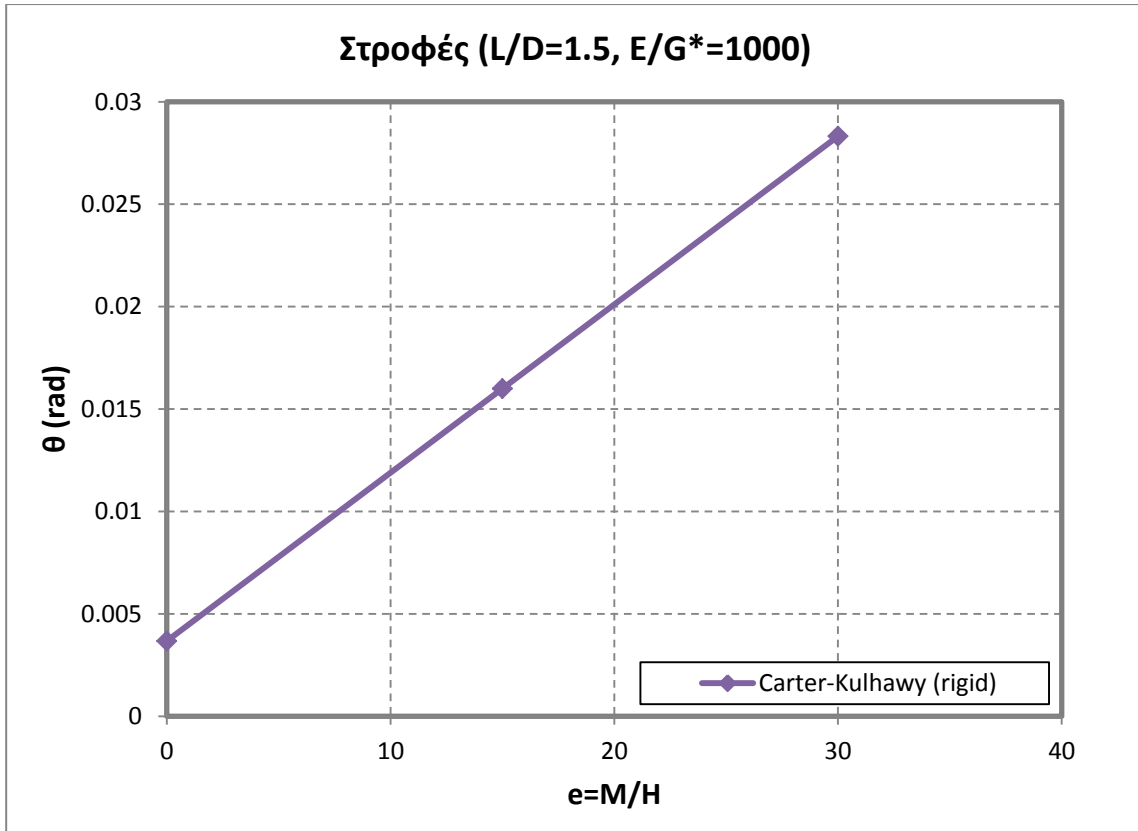
Σχήμα 2-7. Μετακινήσεις άκαμπτου φρέατος με  $L/D=1$  και  $E/G^*=1000$



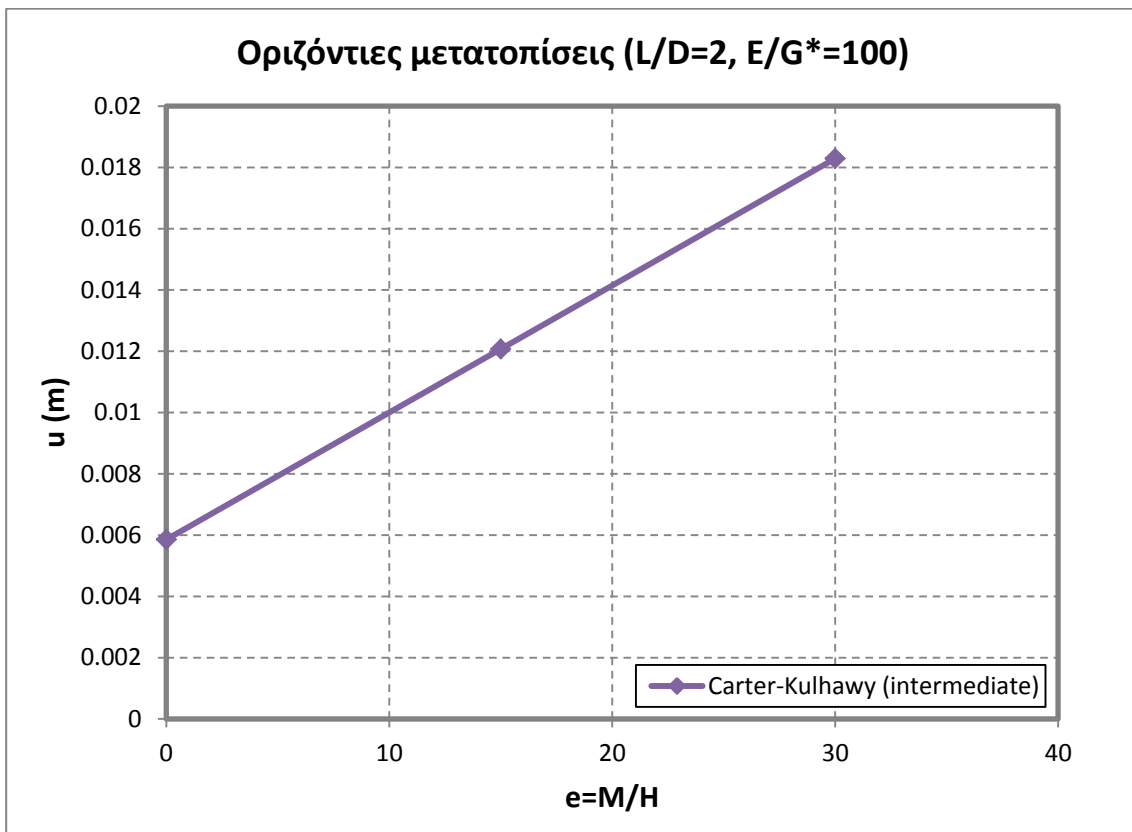
Σχήμα 2-8. Στροφές άκαμπτου φρέατος με  $L/D=1$  και  $E/G^*=1000$



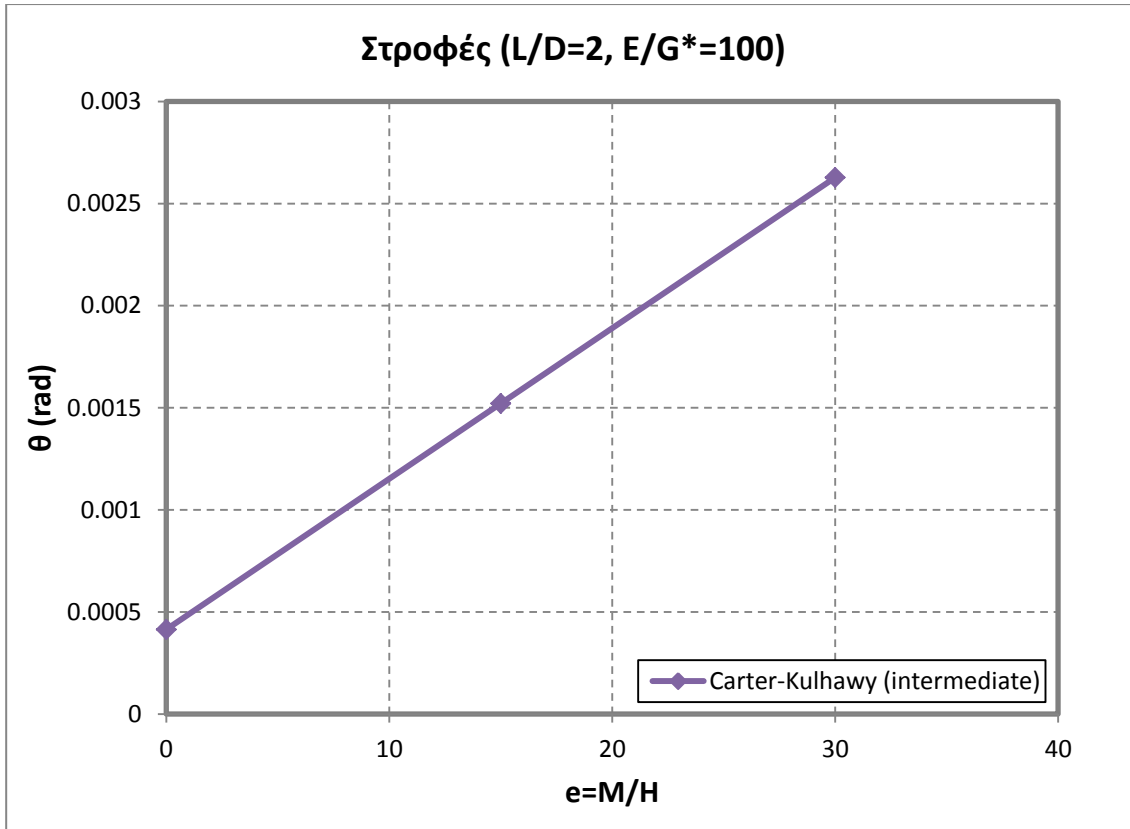
Σχήμα 2-9. Μετακινήσεις άκαμπτου φρέατος με  $L/D=1.5$  και  $E/G^*=1000$



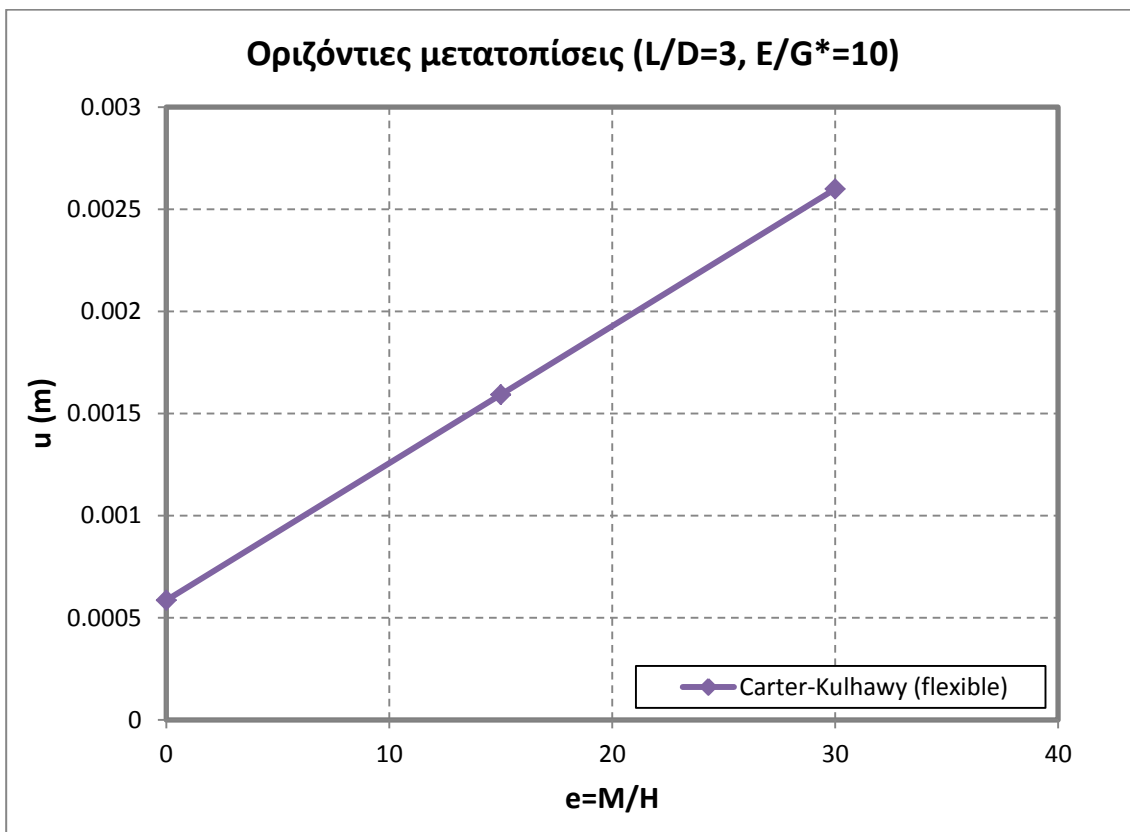
Σχήμα 2-10. Στροφές άκαμπτου φρέατος με  $L/D=1.5$  και  $E/G^*=1000$



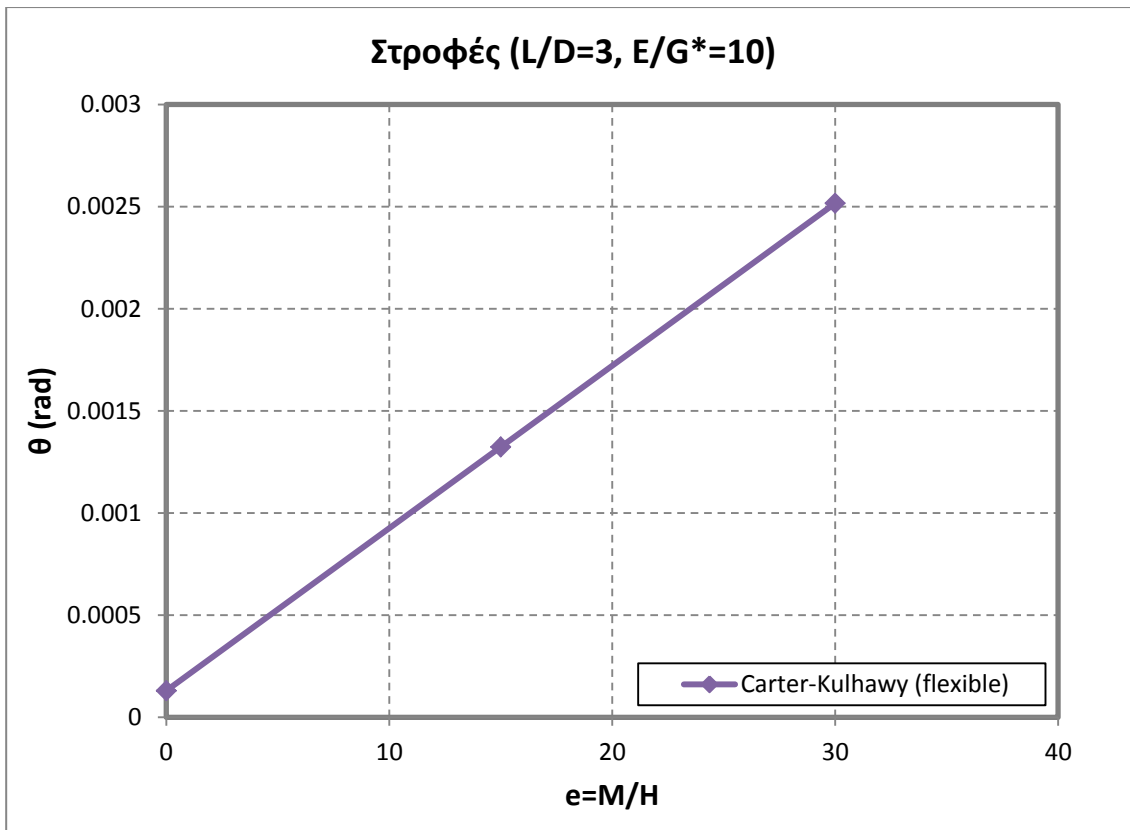
Σχήμα 2-11. Μετακινήσεις φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας με  $L/D=2$  και  $E/G^*=100$



Σχήμα 2-12. Στροφές φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας με  $L/D=2$  και  $E/G^*=100$



Σχήμα 2-13. Μετακινήσεις εύκαμπτου φρέατος με  $L/D=3$  και  $E/G^*=10$



Σχήμα 2-14. Στροφές εύκαμπτου φρέατος με  $L/D=3$  και  $E/G^*=10$

Παρατηρήσεις:

- Οι σχέσεις των Carter και Kulhawy προσδιορίζουν το παραμορφωσιακό μέγεθος της στροφής ως την εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζεται από τον άξονα του φρέατος στην παραμορφωμένη και την απαραμόρφωτη κατάσταση. Το μέγεθος αυτό εξάγεται και από τις αναλύσεις. Επειδή όμως οι τιμές των στροφών είναι μικρές και ισχύει η σχέση ( $\tan\theta=\theta$ ), στο εξής το μέγεθος της στροφής θα συμβολίζεται ως ( $\theta$ ) σε μονάδες rad.
- Οι σχέσεις των Carter και Kulhawy ισχύουν για συνθήκες πλήρους ελαστικότητας, αφού οι καμπύλες των μετακινήσεων και στροφών κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας είναι ευθύγραμμες όπως φαίνεται από τα διαγράμματα για όλες τις περιπτώσεις δυσκαμψίας. Οι τιμές των ανωτέρω μετατοπίσεων είναι ευθέως ανάλογες των φορτίων που τις προκαλούν.
- Για σταθερό λόγο  $L/D$ , δηλαδή ίδια γεωμετρία φρέατος, η αύξηση της σχετικής δυσκαμψίας φρέατος-βραχόμαζας  $E/G^*$ , δηλαδή χαμηλότερης ποιότητας βραχόμαζα, προκαλεί μεγαλύτερες μετακινήσεις και στροφές στην κεφαλή του φρέατος υπό το ίδιο μέγεθος φορτίων.
- Για σταθερό λόγο  $E/G^*$ , δηλαδή ίδια ποιότητα βραχόμαζας, η αύξηση του μήκους του φρέατος – αύξηση του λόγου  $L/D$  – οδηγεί σε μείωση των μετακινήσεων και στροφών της κεφαλής του φρέατος.
- Από τις παραπάνω συγκρίσεις προκύπτει ότι οι μετακινήσεις και οι στροφές της κεφαλής των εύκαμπτων φρεάτων είναι μειωμένες συγκριτικά με τις αντίστοιχες των άκαμπτων.

# 3 Προσομοίωση και προσδιορισμός του προβλήματος

## 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία μόρφωσης του προσομοιώματος των φρέατος-βραχόμαζας και η διακριτοποίηση αυτού. Αναφέρονται επίσης τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας των φρεάτων καθώς και οι ιδιότητες των βραχομαζών και των εδαφών που επιλέχθηκαν για τη διενέργεια των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται διαγραμματικά οι διαφορές στις τιμές των μετακινήσεων και στροφών κεφαλής του φρέατος που προέκυψαν έπειτα από δοκιμαστικές αναλύσεις πλήρως άκαμπτων φρεάτων συγκριτικά με τις αντίστοιχες από εφαρμογή της μεθόδου Carter και Kulhawy.

## 3.2 Σχεδίαση προσομοιώματος φρέατος βραχόμαζας

Τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραμετρικές αναλύσεις σχεδιάστηκαν και διακριτοποιήθηκαν στο περιβάλλον του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 13.0. Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων φρέατος-βραχόμαζας και η διακριτοποίησή τους για τις δύο κατηγορίες αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν: οι μεν με θεώρηση πλήρους συνάφειας, (χωρίς αποκόλληση) και οι δε με στοιχεία διεπιφάνειας που επιτρέπουν αποκόλληση και ολίσθηση μεταξύ των αντίστοιχων επιφανειών.

### 3.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιωμάτων

Σχεδιάστηκαν δύο διαφορετικοί κάναβοι πεπερασμένων στοιχείων με κοινές διαστάσεις κατά τις διευθύνσεις X και Y αλλά και διαφοροποίηση κατά τη διεύθυνση Z. Η εν λόγω διαφορά οφείλεται στα διαφορετικά μήκη φρεάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τη εκτέλεση των αναλύσεων. Θεωρήθηκε απαραίτητο να διακριτοποιούνται 10m επιπλέον κάτω από την αιχμή του φρέατος. Λόγω του ελαστικού καταστατικού προσομοιώματος για τις βραχόμαζες των αναλύσεων, προτιμήθηκε να μην επεκταθεί το προσομοίωμα κατά X και Y. Κατασκευάστηκαν λοιπόν προσομοιώματα με τις εξής διαστάσεις:

**Πίνακας 3-1** Εξωτερικές διαστάσεις προσομοιωμάτων φρέατος-βραχόμαζας

Προσομοίωμα A			Προσομοίωμα B		
X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
65	25	25	65	25	20

### 3.2.2 Διακριτοποίηση του προσομοιώματος

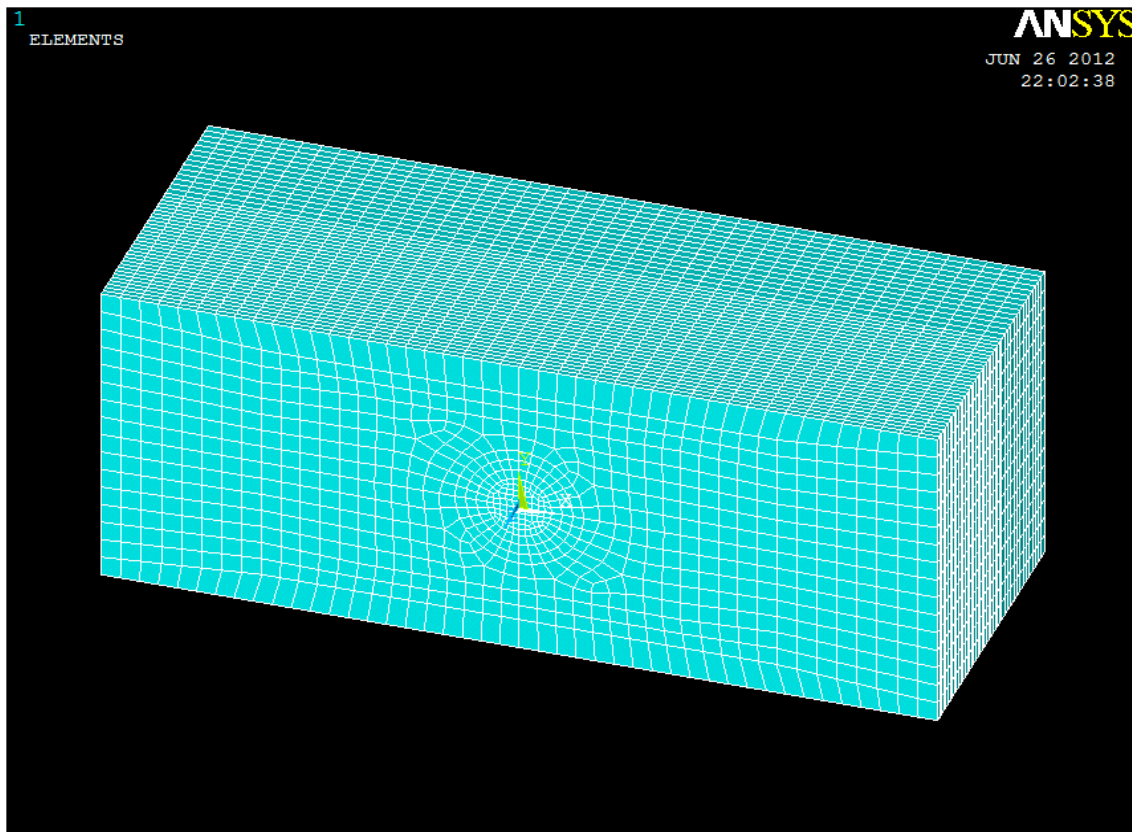
Όπως αναφέρθηκε, η διακριτοποίηση του προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του ANSYS 13.0. Χρησιμοποιήθηκαν τριδιάστατα, οκτακομβικά, εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία



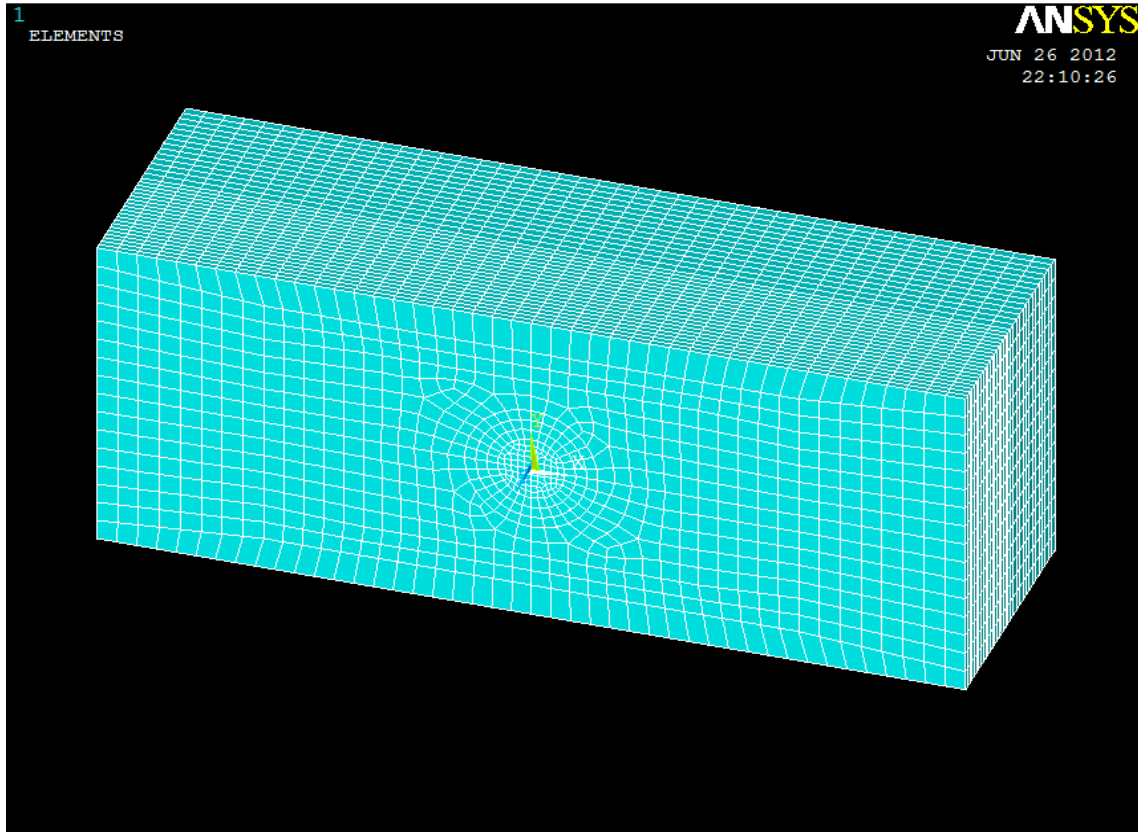
τύπου C3D8. Επιλέχθηκε πυκνό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων για τη διακριτοποίηση των όγκων του φρέατος και της βραχώμαζας που το περιβάλλει, το οποίο σταδιακά αραιώνει με αύξηση της απόστασης των στοιχείων από το φρέαρ. Η διακριτοποίηση του προσομοιώματος κατά τη διεύθυνση του βάθους πραγματοποιήθηκε ανά 0.5m, ενώ οι όγκοι κάτω από το βάθος της αιχμής διακριτοποιήθηκαν ανά 1m. Στα επόμενα, παρατίθενται εικόνες από τα διακριτοποιημένα προσομοιώματα καθώς και συγκεντρωτικοί πίνακες των χαρακτηριστικών τους για τις δύο κατηγορίες – με και χωρίς στοιχεία διεπιφάνειας (Πίνακας 3-3 και Πίνακας 3-2 αντίστοιχα).

Πίνακας 3-2 Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά προσομοιωμάτων χωρίς διεπιφάνειες

	Όγκος (m <sup>3</sup> )	Αριθμός στοιχείων
<b>Προσομοίωμα A</b> (L/D=3)	40.625	38.676
<b>Προσομοίωμα B</b> (L/D=1, 1.5, 2)	32.500	29.886



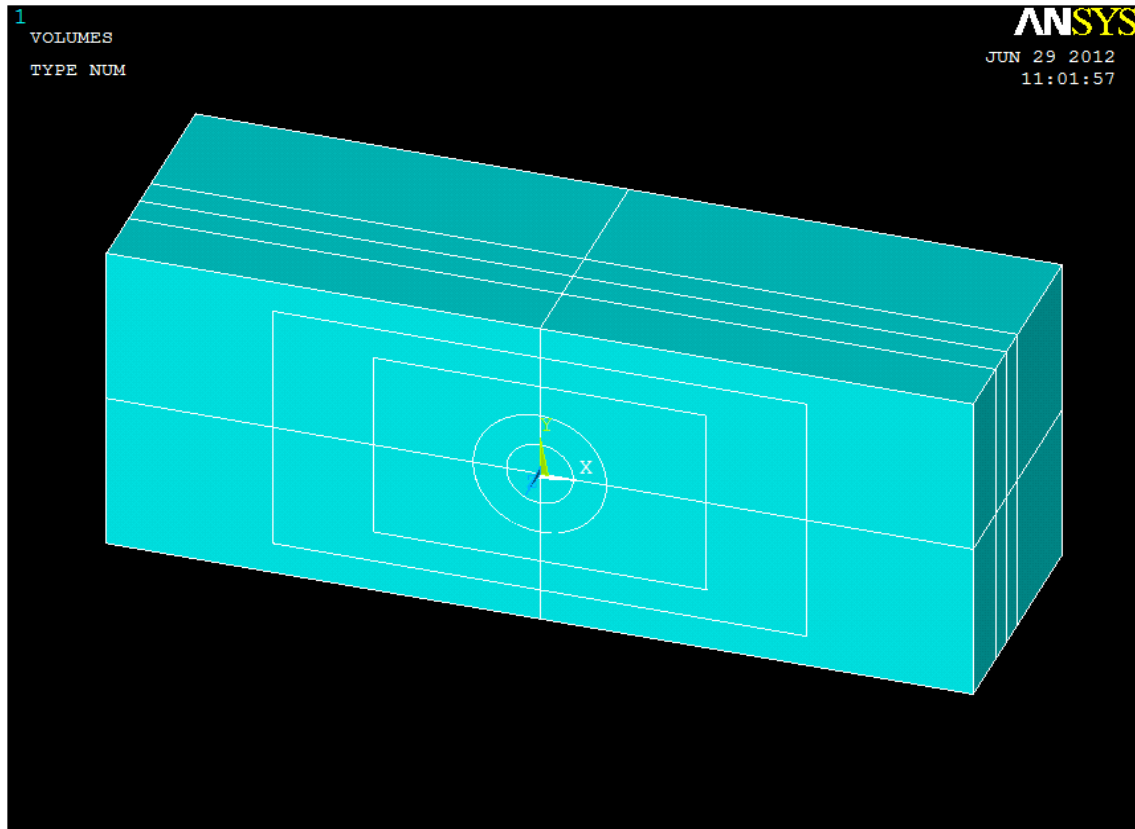
Σχήμα 3-1. Διακριτοποίηση Προσομοιώματος A (Z=25m)



Σχήμα 3-2. Διακριτοποίηση Προσομοιώματος Β (Z=20m)

Πίνακας 3-3 Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά προσομοιωμάτων με διεπιφάνειες

	Όγκος (m <sup>3</sup> )	Αριθμός στοιχείων
Προσομοίωμα Α (L/D=3)	40.625	37.890
Προσομοίωμα Β (L/D=2)	32.500	28.190
Προσομοίωμα Γ (L/D=1.5)	32.500	25.965
Προσομοίωμα Δ (L/D=1)	32.500	25.540



Σχήμα 3-3. Όγκοι προσομοιωμάτων Β,Γ,Δ φρεάτων με διεπιφάνειες

### 3.2.3 Συνοριακές συνθήκες

Στο αρχείο που δημιουργήθηκε για την εισαγωγή των δεδομένων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS 6.10 προσδιορίστηκαν οι παρακάτω συνοριακές συνθήκες:

- Οι κόμβοι της βάσης του προσομοιώματος στο επίπεδο  $xy$  ( $z=25\text{m}$  και  $z=20\text{m}$  αντίστοιχα) είναι πακτωμένοι, καθώς δεσμεύονται οι μετατοπίσεις τους κατά τις τρεις διευθύνσεις.
- Οι μετατοπίσεις των συνοριακών επιπέδων  $xz$  και  $yz$  δεσμεύονται κατά  $y$  και  $x$  αντίστοιχα (κυλίσεις).
- Οι κόμβοι του επιπέδου  $xy$  στην επιφάνεια του εδάφους ( $z=0\text{m}$ ) είναι ελεύθεροι να παραμορφωθούν.

## 3.3 Ιδιότητες προσομοιωμάτων

### 3.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και παράμετροι αντοχής φρεάτων

Η προσομοίωση των φρεάτων πραγματοποιήθηκε με το σχεδιασμό κυλινδρικών όγκων διαμέτρου  $D=5\text{m}$  και μηκών  $L=5, 7.5, 10$  και  $15\text{m}$  αντίστοιχα, για τους διάφορους λόγους  $L/D$  που μελετήθηκαν.

Ως υλικό κατασκευής τους θεωρήθηκε οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 μέτρου ελαστικότητας  $E=25\text{GPa}$ , λόγου Poisson  $\nu=0.20$ , και ειδικού βάρους  $\gamma_b=25\text{kN/m}^3$ .

Οι παραπάνω ιδιότητες εκχωρήθηκαν στα διπλο-ορισμένα στοιχεία του φρέατος μέσω του αρχείου εισαγωγής δεδομένων του Abaqus. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία που απαρτίζουν τον όγκο του φρέατος απομακρύνθηκαν από το προσομοίωμα και στη συνέχεια επανατοποθετήθηκαν σε αυτό, ώστε να τους προσδοθούν νέες ιδιότητες (αυτές του σκυροδέματος).

### 3.3.2 Ιδιότητες εδαφών/βραχομαζών

Σύμφωνα με τα σχήματα Σχήμα 2-5 έως Σχήμα 2-14, για τις παραπάνω τιμές των λόγων L/D, το εύρος του λόγου E/G\* από 10 έως 1000 κρίνεται ικανοποιητικό για την αποτελεσματική διερεύνηση της δυσκαμψίας των φρεάτων. Κατά συνέπεια, επιλέχθηκαν οι εξής λόγοι E/G\* για την παραμετρική διερεύνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

$$E/G^* = [10, 50, 100, 150, 500, 750, 1000] \quad (3-1)$$

Στο σχετικό πίνακα που ακολουθεί, (Πίνακας 3-4) καταγράφονται αναλυτικά όλες οι ιδιότητες των βραχομαζών και των εδαφών που μελετήθηκαν στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Για τον υπολογισμό του λόγου E/G\* λήφθηκε  $E=E_b=25\text{GPa}$  και  $G^*$  το οποίο προκύπτει από το μέτρο ελαστικότητας του κάθε εδάφους ή της κάθε βραχώμαζας αντίστοιχα μέσω των σχέσεων (2-2) και (2-3).

**Πίνακας 3-4.** Ελαστικές παράμετροι εδαφών και ασθενών βραχομαζών του προσομοιώματος

Βραχώμαζα/Εδαφος	$E_m(\text{MPa})$	E/G*
I.	5200	10.2
II.	1020	52
III.	457	116
IV.	348	152
V.	100	530
VI.	70	758
VII.	53	1001

Με τη βοήθεια της εφαρμογής Rocklab, προσδιορίστηκαν οι παράμετροι των υλικών τα οποία αντιστοιχούν σε πραγματικά εδάφη/βραχώμαζες:

- Ο τύπος βραχώμαζας (I) με  $E/G^*=10.2 \approx 10$  αντιστοιχεί σε φλύσχη με παραμέτρους κατά Hoek-Brown ( $GSI=60$ ,  $m_i=5$ ,  $\sigma_{ci}=10$ ), μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου  $E_r=10000$  (Hoek-Dietrichs, 2006) και ισοδύναμη γωνία τριβής  $\phi'=47.23^\circ$ .
- Ο τύπος βραχώμαζας (II) με  $E/G^*=52 \approx 50$  αντιστοιχεί σε μάργα με παραμέτρους κατά Hoek-Brown ( $GSI=55$ ,  $m_i=5$ ,  $\sigma_{ci}=5$ ), μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου  $E_r=2500$  (Hoek-Dietrichs, 2006) και ισοδύναμη γωνία τριβής  $\phi'=42.4^\circ$ .

- Ο τύπος βραχόμαζας (III) με  $E/G^*=116\approx 100$  αντιστοιχεί σε φλύσχη με παραμέτρους κατά Hoek-Brown ( $GSI=20$ ,  $m_i=5$ ,  $\sigma_{ci}=10$ ), μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου  $E_r=10000$  (Hoek-Dietrichs, 2006) και ισοδύναμη γωνία τριβής  $\phi'=35.83^\circ$ .
- Ο τύπος βραχόμαζας (IV) με  $E/G^*=152\approx 150$  αντιστοιχεί σε μάργα με παραμέτρους κατά Hoek-Brown ( $GSI=40$ ,  $m_i=5$ ,  $\sigma_{ci}=5$ ), μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου  $E_r=2500$  (Hoek-Dietrichs, 2006) και ισοδύναμη γωνία τριβής  $\phi'=37.87^\circ$ .
- Τα υλικά (V, VI, VII) με  $E/G^*=530\approx 500$ ,  $E/G^*=758\approx 750$  και  $E/G^*=1001\approx 1000$  αντιστοιχούν σε πυκνές άμμους με ισοδύναμη γωνία τριβής  $\phi'=30^\circ$ .

### 3.3.3 Λεπτομέρειες προσομοίωσης

#### 3.3.3.1 Παραμορφωσιμότητα κεφαλής και επιβαλλόμενα φορτία

Έπειτα από τη διαδικασία ομαδοποίησης των στοιχείων που συνθέτουν το φρέαρ και την περιβάλλουσα βραχόμαζα, ορίστηκε μία ομάδα άκαμπτων συνδέσμων (MPC), η οποία συνέδεε όλους τους κόμβους της κεφαλής του φρέατος με τον κεντρικό κόμβο, όπου επιβαλλόταν το εκάστοτε φορτίο. Η συγκεκριμένη διαδικασία εξυπηρετεί στην ακριβέστερη προσομοίωση των συνθηκών φόρτισης και παραμορφωσιμότητας της κεφαλής. Αναλυτικότερα, επιτρέπεται η επιβολή συγκεντρωμένων ροπών και η καταγραφή αποτελεσμάτων στροφών στην κεφαλή με την προσθήκη στροφικών βαθμών ελευθερίας. Ως αποτέλεσμα, αντικατοπτρίζεται καλύτερα η πραγματική κατάσταση και εξασφαλίζεται η επιπεδότητα της διατομής της κεφαλής του φρέατος.

#### 3.3.3.2 Διεπιφάνειες

Στα προσομοιώματα που αναλύθηκαν με διεπιφάνειες μεταξύ φρέατος και βραχόμαζας, ορίστηκαν οι επιφάνειες που τις συνθέτουν. Ειδικότερα, ορίστηκαν οι ακόλουθες τέσσερις επιφάνειες που προσδιορίζουν τις δύο διεπιφάνειες του προβλήματος:

- Επαφή της βραχόμαζας εντός της κυλινδρικής κοιλότητας με την περιβάλλουσα βραχόμαζα.
- Επαφή της βραχόμαζας εντός της κυλινδρικής κοιλότητας με την υποκείμενη βραχόμαζα.
- Επαφή του φρέατος με την περιβάλλουσα βραχόμαζα.
- Επαφή του φρέατος με την υποκείμενη βραχόμαζα.

Στις διεπιφάνειες περιβάλλουσας και υποκείμενης βραχόμαζας με τη βραχόμαζα εσωτερικά της κυλινδρικής κοιλότητας ορίστηκαν ιδιότητες πλήρους συνάφειας χωρίς αποκόλληση και σχετική ολίσθηση μεταξύ των συμβαλλόμενων επιφανειών. Αντίθετα, στις διεπιφάνειες βραχόμαζας-φρέατος προσδιορίστηκε γωνία τριβής:

$$\delta = \frac{2}{3} \phi' \quad (3-2)$$

με τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής της βραχόμαζας/εδάφους ανάλογα με την ποιότητα (Ενότητα 3.3.2).

#### 3.3.4 Βήματα παραμετρικών αναλύσεων

Στις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας εφαρμόστηκε συγκεντρωμένο εγκάρσιο φορτίο  $H=20\text{MN}$  κατά  $X$  και ροπή  $M=0, 300$ , και  $600\text{MNm}$  (ισοδύναμη εκκεντρότητα  $e=0, 15$ , και

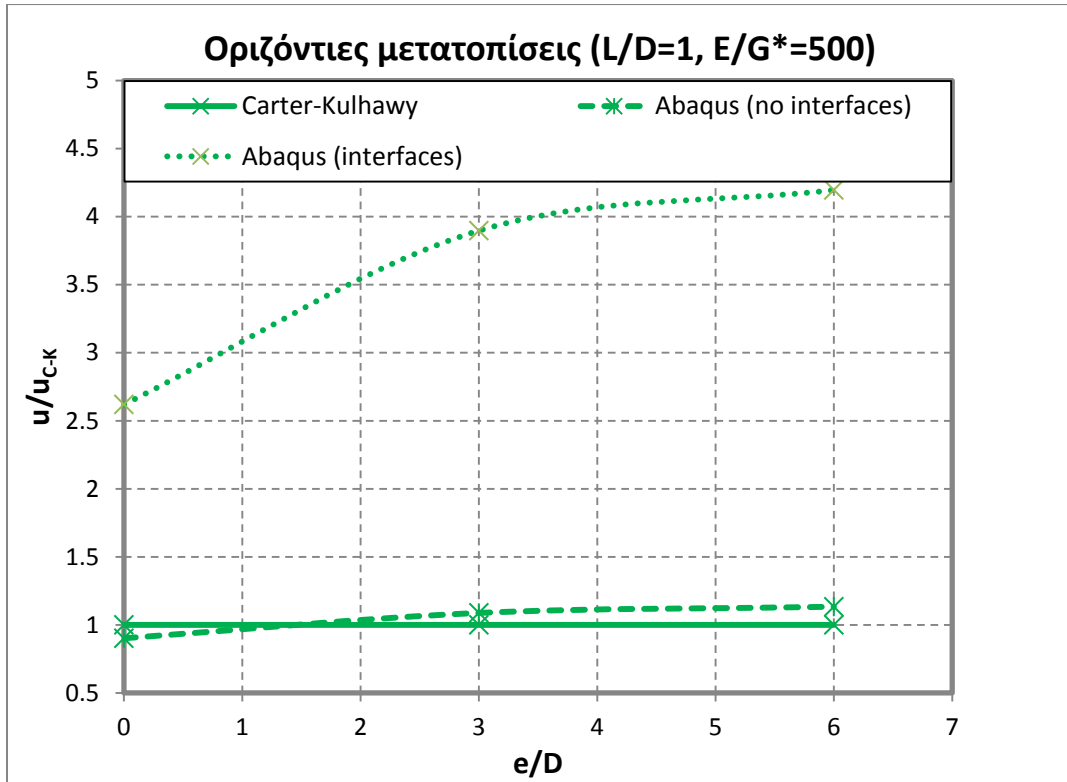
30) κατά περίπτωση περί τον άξονα Y. Η διαδικασία της φόρτισης που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τα ακόλουθα τέσσερα (4) βήματα:

- Αρχικά, μέσω του αρχείου εισαγωγής δεδομένων του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10 επιβάλλονται οι γεωστατικές τάσεις με τιμές μεταξύ των  $\sigma_v=1\text{Pa}$  για  $z=0$  - για λόγους αριθμητικής συμβατότητας - και  $\sigma_v=500\text{MPa}$  για  $z=25\text{m}$  (προσομοίωμα A) ή  $\sigma_v=400\text{MPa}$  για  $z=20\text{m}$  (προσομοίωμα B). Ο συντελεστής οριζόντιων γεωστατικών τάσεων ορίζεται και για τις δύο διευθύνσεις X και Y ίσος με  $k_0=0.5$ . Στο βήμα αυτό «συμμετέχουν» οι διεπιφάνειες βραχόμαζας-βραχόμαζας με συνθήκες πλήρους συνάφειας.
- Στο δεύτερο βήμα, αφαιρούνται τα στερεά στοιχεία βραχόμαζας εντός της κυλινδρικής κοιλότητας και αποκαθίστανται από όμοια στοιχεία με ιδιότητες σκυροδέματος. Τα στοιχεία του φρέατος έχουν ήδη οριστεί δύο φορές στον κώδικα, μία με τις ιδιότητες του εκάστοτε εδάφους/βραχόμαζας και μία με τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Ειδικά για τα προσομοιώματα με διεπιφάνειες, αφαιρούνται οι διεπιφάνειες βραχόμαζας-βραχόμαζας και προστίθενται οι αντίστοιχες μεταξύ βραχόμαζας-σκυροδέματος, όπως ορίστηκαν στο 3.3.2.
- Το τρίτο βήμα περιλαμβάνει την εφαρμογή φορτίων βαρύτητας επί του όγκου του φρέατος. Ορίζεται το μέτρο και η φορά της επιτάχυνσης της βαρύτητας και υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη και οι παραμορφώσεις του φρέατος που οφείλονται αποκλειστικά στο ίδιο βάρος.
- Στο τέταρτο και τελευταίο βήμα, εφαρμόζεται σταδιακά η εγκάρσια φόρτιση (οριζόντιο συγκεντρωμένο φορτίο και ροπή). Η επιβολή του φορτίου επιμερίστηκε σε 10 βήματα, για τα οποία λαμβάνονται αποτελέσματα τάσεων και παραμορφώσεων της κεφαλής και του άξονα του φρέατος.

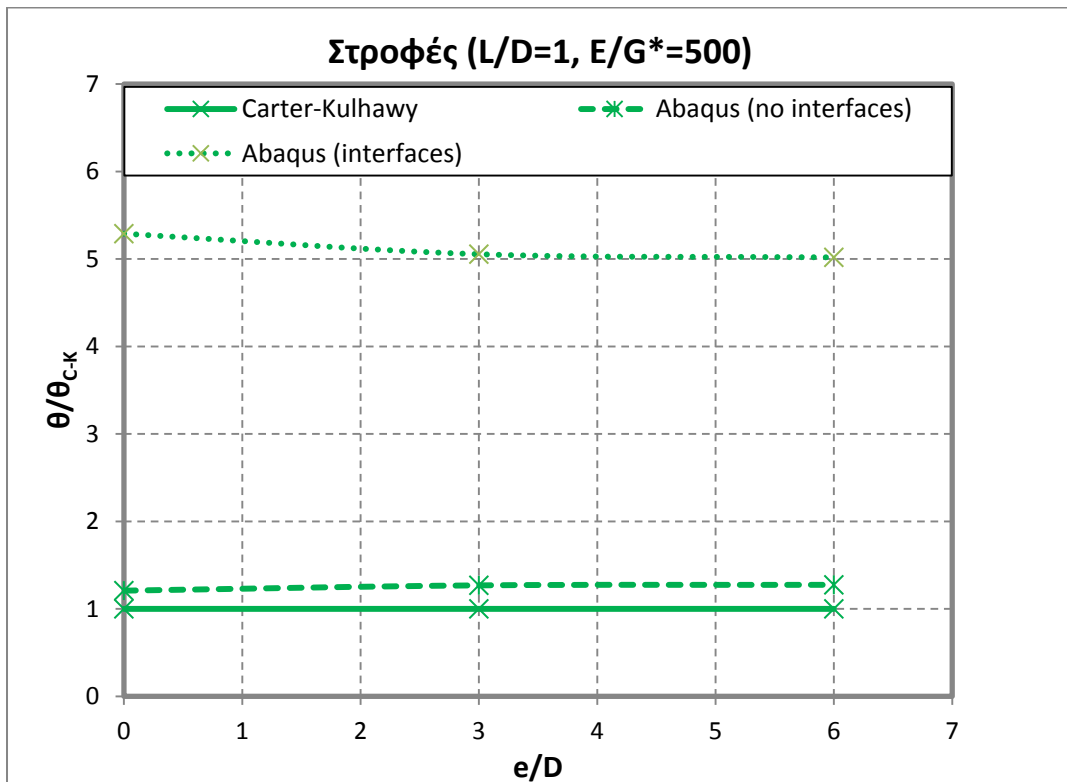
### 3.4 Αναλύσεις άκαμπτων φρεάτων – Προσδιορισμός του προβλήματος

Εισάγοντας τα παραπάνω δεδομένα του προσομοιώματος στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10, εκτελέστηκαν ελαστικές αναλύσεις με οριζόντιο φορτίο  $H=20\text{MN}$  και ροπή  $M=0, 300$  και  $600\text{MNm}$  για τα φρέατα που οι Carter και Kulhawy θεωρούν άκαμπτα (Πίνακας 2-1). Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εντάσσονται σε δύο κατηγορίες: εκείνες που επιτρέπουν την αποκόλληση και τη σχετική ολίσθηση στις διεπιφάνειες και αυτές που θεωρούν πλήρη συνάφεια φρέατος-βραχόμαζας.

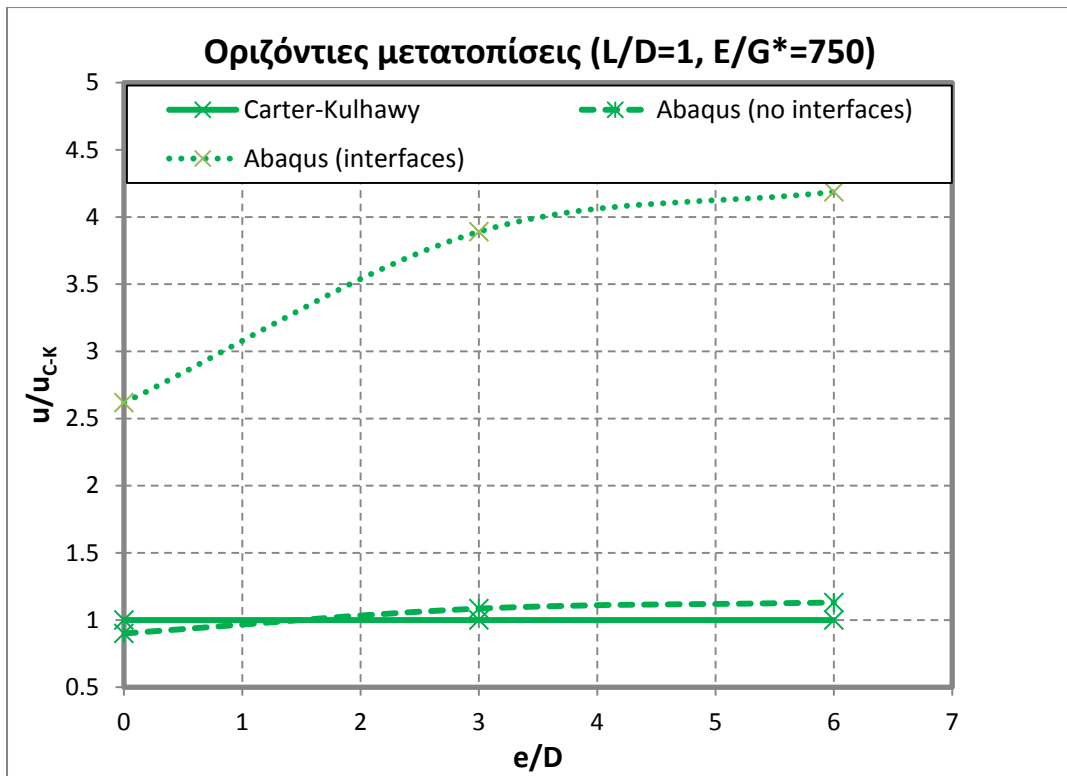
Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προσδιορίστηκαν οι μετακινήσεις και οι στροφές της κεφαλής έπειτα από την ολοκλήρωση της φόρτισης. Οι τιμές αυτές συγκρίθηκαν με τις υπολογισμένες κατά τη μεθοδολογία των Carter και Kulhawy (σχέσεις (2-8) και (2-9)). Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα λόγου μετακινήσεων και στροφών κεφαλής ως προς την εκάστοτε εκκεντρότητα ( $e=M/H$ ). Η εκκεντρότητα έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς τη διάμετρο του φρέατος ( $e/D$ ), ενώ οι μετατοπίσεις και οι στροφές ως προς τις τιμές τους κατά Carter και Kulhawy ( $u/u_{C-K}$  και  $\theta/\theta_{C-K}$ ).



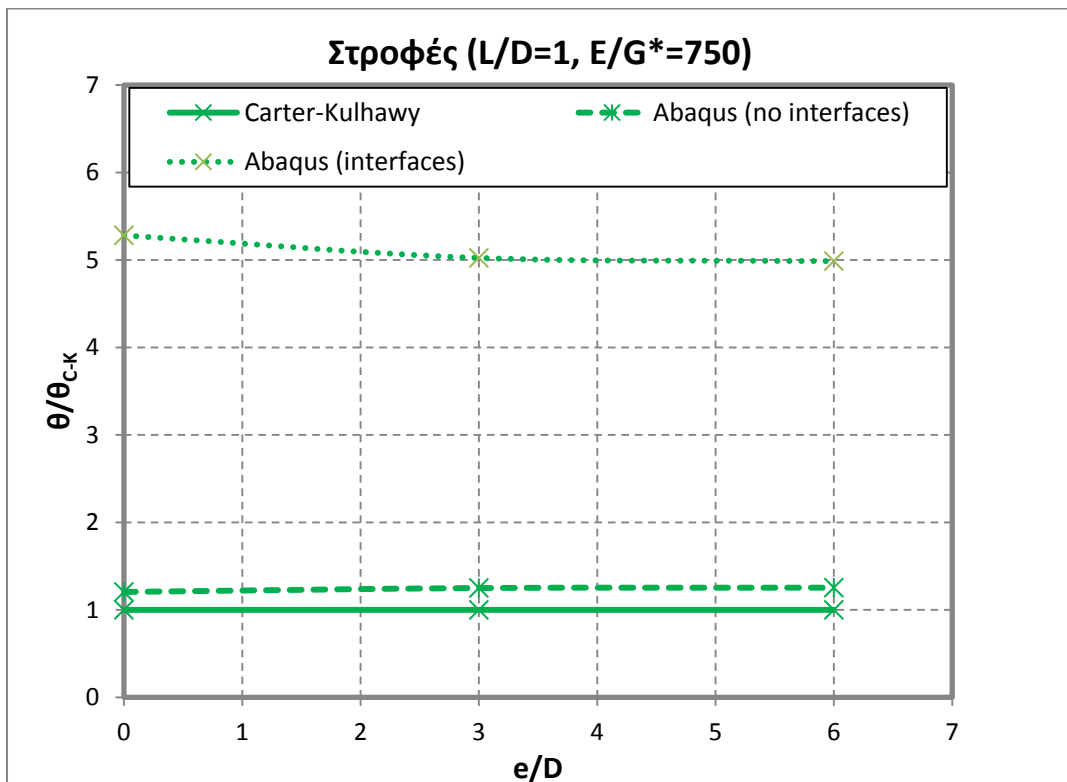
Σχήμα 3-4. Αδιαστατοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις ( $u/u_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες



Σχήμα 3-5. Αδιαστατοποιημένες στροφές ( $\theta/\theta_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες

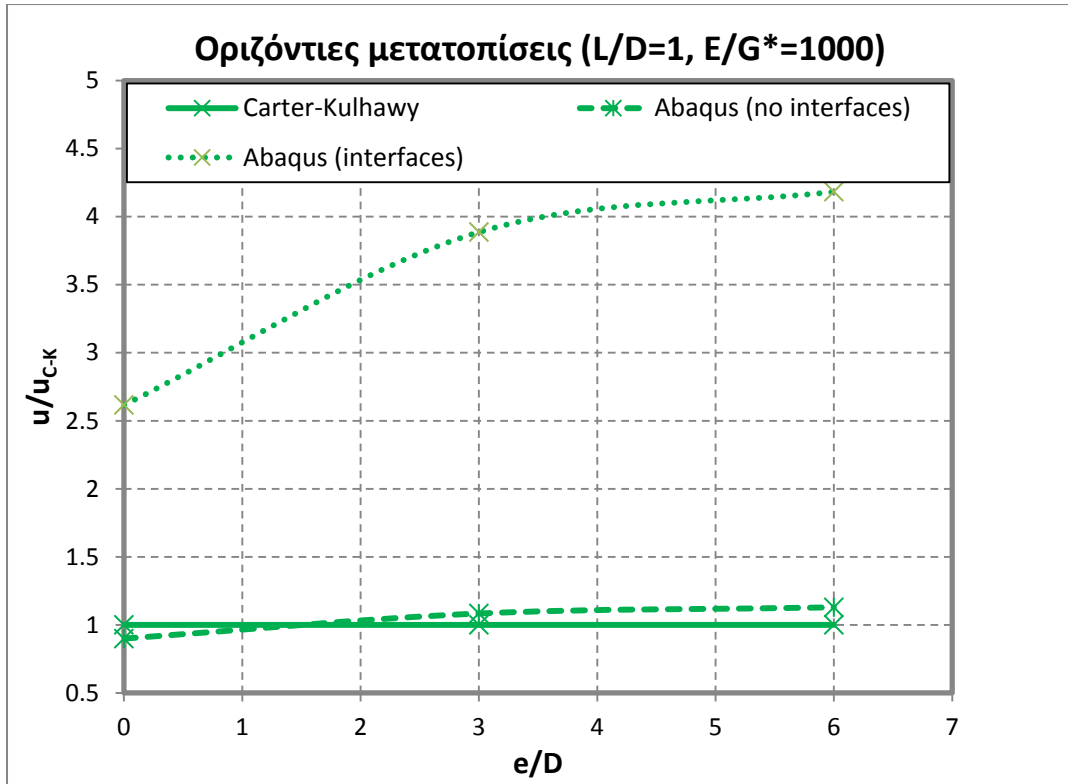


Σχήμα 3-6. Αδιαστατοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις ( $u/u_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες

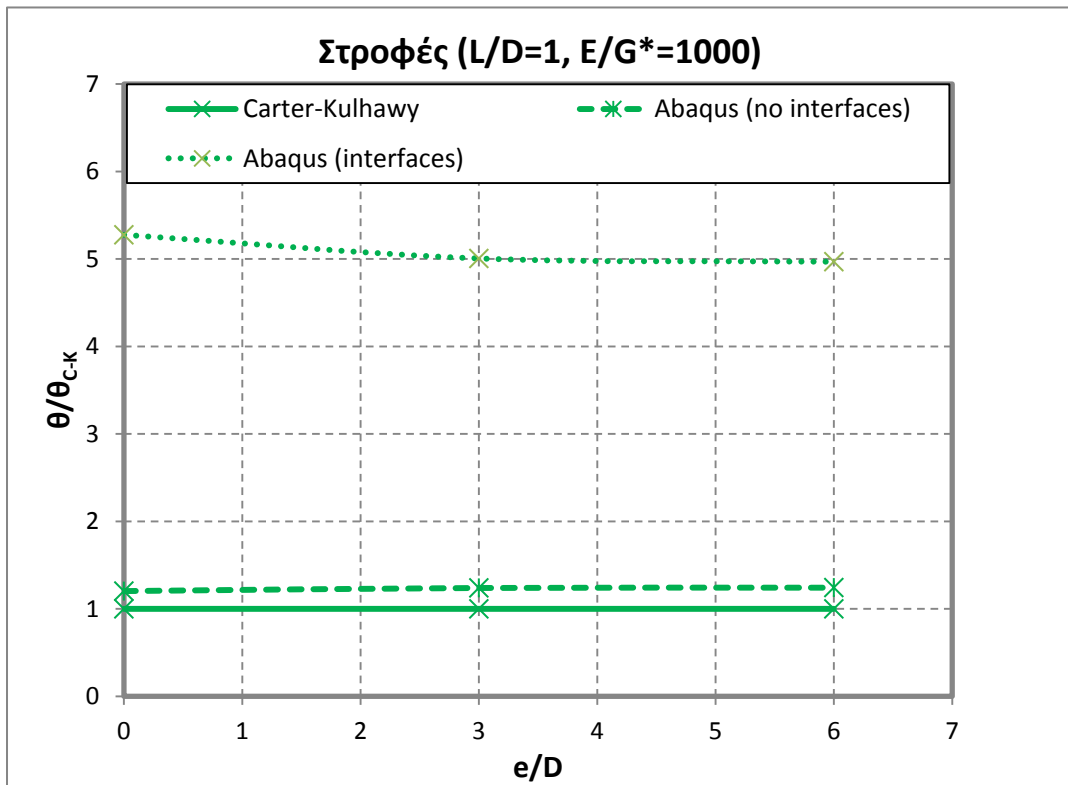


Σχήμα 3-7. Αδιαστατοποιημένες στροφές ( $\theta/\theta_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες

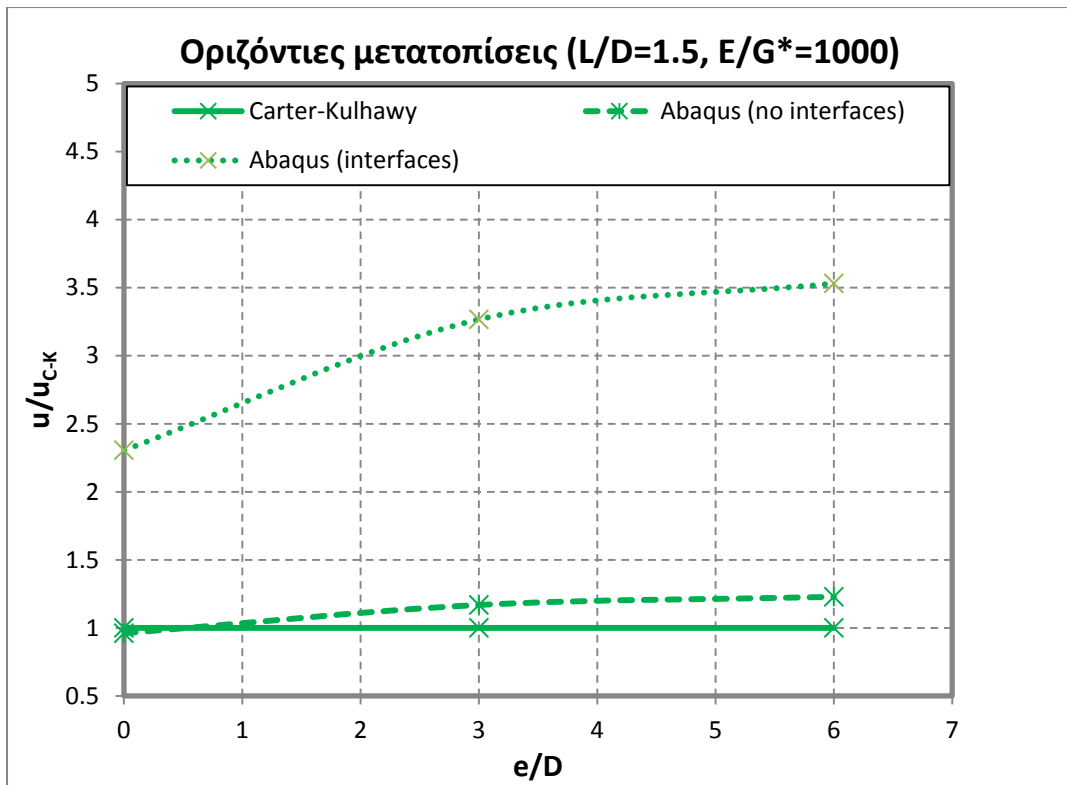




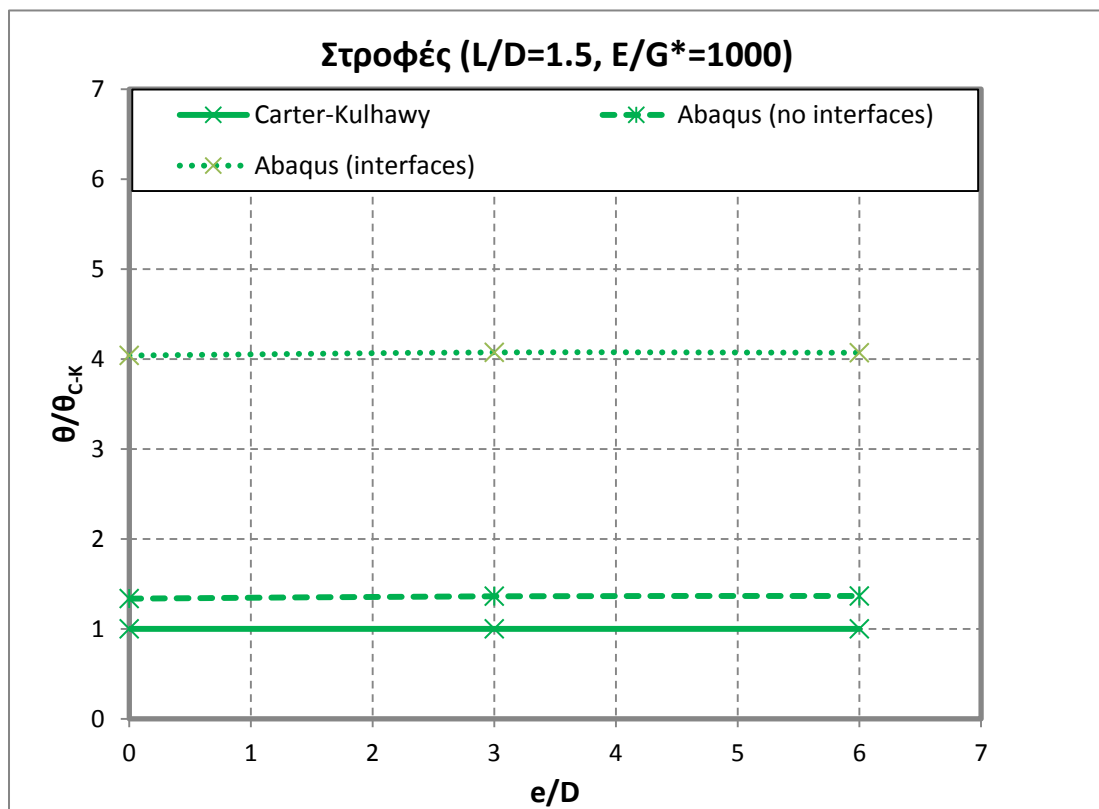
Σχήμα 3-8. Αδιαστατοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις ( $u/u_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες



Σχήμα 3-9. Αδιαστατοποιημένες στροφές ( $\theta/\theta_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες



Σχήμα 3-10. Αδιαστατοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις ( $u/u_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες



Σχήμα 3-11. Αδιαστατοποιημένες στροφές ( $\theta/\theta_{C-K}$ ) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter-Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό ότι οι διαφορές των αποτελεσμάτων των αναλύσεων του Abaqus παρουσιάζουν διαφορές σε σχέση με τα αποτελέσματα κατά τους Carter και Kulhawy. Οι διαφορές είναι εντονότερες, όταν οι αναλύσεις συνεκτιμούν την αποκόλληση και τη σχετική ολίσθηση των διεπιφανειών. Ακριβώς επειδή οι διαφορές των αναλύσεων χωρίς διεπιφάνεια δεν είναι ευκρινείς λόγω της κλίμακας των αξόνων, παρουσιάζονται και ποσοστιαία στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 3-5** Ποσοστιαίες διαφορές μετακινήσεων και στροφών αναλύσεων χωρίς διεπιφάνειες ως προς Carter και Kulhawy

Παράμετροι ανάλυσης	Εκκεντρότητα	Σφάλμα μετακίνησης	Σφάλμα στροφής
L/D=1, E/G*=500	0	-9.84%	20.82%
	15	8.78%	26.88%
	30	13.33%	27.48%
L/D=1, E/G*=750	0	-9.99%	20.49%
	15	8.52%	24.95%
	30	13.04%	25.39%
L/D=1, E/G*=1000	0	-10.08%	20.31%
	15	8.37%	23.85%
	30	12.88%	24.19%
L/D=1.5, E/G*=1000	0	-3.95%	33.61%
	15	16.85%	36.23%
	30	22.82%	36.57%

Παρατηρήσεις:

- Από τις παραπάνω συγκρίσεις γίνεται φανερό ότι οι διαφορές της μεθόδου Carter και Kulhawy για άκαμπτα φρέατα στην πλειονότητα των περιπτώσεων που μελετώνται ξεπερνούν το 8-10% ως προς τα αποτελέσματα των αναλύσεων χωρίς διεπιφάνειες (πλήρους συνάφειας φρέατος-βραχόμαζας).
- Ειδικότερα για τις διαφορές στις στροφές, το συγκεκριμένο ποσοστό είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερο του 20%.
- Για τις αναλύσεις με αποκόλληση και σχετική ολίσθηση στις διεπιφάνειες, οι μετακινήσεις και οι στροφές που μετρήθηκαν ήταν κατά 2.5 έως 5.5 φορές μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίζονται σύμφωνα με τους Carter και Kulhawy.
- Για φρέατα με μεγαλύτερο μήκος, αυξάνονται οι διαφορές των αναλύσεων χωρίς αποκολλήσεις διεπιφανειών για μεγάλες εκκεντρότητες, ενώ μειώνονται οι διαφορές των αναλύσεων με αποκολλήσεις διεπιφανειών.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις δικαιολογούνται από το γεγονός ότι οι σχέσεις των Carter και Kulhawy που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι αποτέλεσμα αναλύσεων

διδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων που με ολοκλήρωση περί κέντρου συμμετρίας ανέπτυξαν το τριδιάστατο προσομοίωμα, και όχι τριδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων.

Για τους παραπάνω λόγους, επιχειρείται στην παρούσα διπλωματική εργασία η βελτίωση των σχέσεων προσδιορισμού των μετακινήσεων και των στροφών της κεφαλής άκαμπτων φρεάτων, στα πρότυπα των Carter και Kulhawy. Σημαντικός παράγοντας στην προσπάθεια αυτή είναι το γεγονός ότι η θεώρηση άκαμπτων φρεάτων κατά Carter και Kulhawy περιορίζεται σε ελάχιστες περιπτώσεις, οι οποίες δεν αντικατοπτρίζουν τις συνθήκες πρακτικών προβλημάτων. Στην πορεία της εργασίας θα επαναπροσδιοριστεί η έννοια του «άκαμπτου» φρέατος ώστε οι νέες σχέσεις να εφαρμόζονται σε περισσότερα πρακτικά προβλήματα φρεάτων που συμπεριφέρονται ως άκαμπτα αλλά και σε περιπτώσεις όπου συνεκτιμάται η αποκόλληση και η σχετική ολίσθηση των διεπιφανειών φρέατος-βραχόμαζας.



# 4 Σχέσεις υπολογισμού μετατοπίσεων χωρίς διεπιφάνειες

## 4.1 Εισαγωγή – Χαρακτηριστικά αναλύσεων

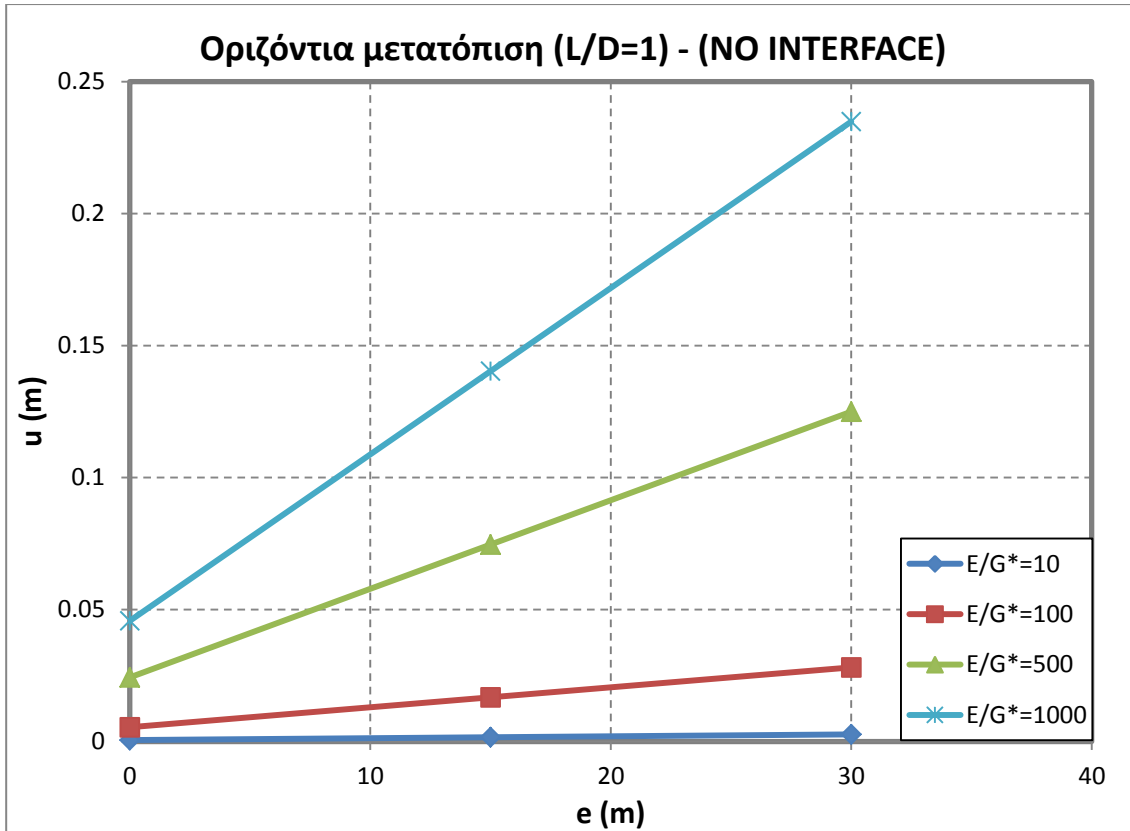
Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η εξαγωγή σχέσεων από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, από τις οποίες θα υπολογίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι μετατοπίσεις άκαμπτων φρέατων υπό εγκάρσια φόρτιση. Αρχικά, επαναπροσδιορίζεται η έννοια του «άκαμπτου» φρέατος, ώστε να συμπεριλαμβάνει περισσότερες περιπτώσεις πρακτικών προβλημάτων. Έπειτα, για τις περιπτώσεις άκαμπτων φρέατων προσδιορίζονται οι κατάλληλοι συντελεστές και συναρτήσεσι του λόγου μήκους προς διαμέτρου  $L/D$  εξάγονται οι σχέσεις υπολογισμού οριζόντιων μετακινήσεων και στροφών. Στη συνέχεια, συγκρίνονται οι διαφορές των μεγεθών που υπολογίζονται από τις παραγόμενες σχέσεις με εκείνα των αναλύσεων για φρέατα που δεν ήταν απολύτως άκαμπτα και ανάλογα με την απόκλισή τους από τη λύση, υπολογίζονται και αυτά ως άκαμπτα. Τοιουτοτρόπως προκύπτει και η τελική συνθήκη άκαμπτων φρέατων.

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν φρέατα διαμέτρου  $D = 5\text{m}$  με λόγο μήκους προς διάμετρο  $L/D = 1, 1.5, 2$  και  $3$ , σε βραχόμαζες/εδάφη με σχετική δυσκαμψία φρέατος-βραχόμαζας  $E/G^* = 10, 50, 100, 150, 500, 750$ , και  $1000$  για μέτρο ελαστικότητας του φρέατος (σκυροδέματος)  $E = 25\text{GPa}$ . Για καθεμία περίπτωση εκτελέστηκαν τρεις (3) αναλύσεις συγκεντρωμένου εγκάρσιου φορτίου κεφαλής  $H = 20\text{MN}$  και ροπής κεφαλής  $M = 0, 300$  και  $600\text{MNm}$  αντίστοιχα (εκκεντρότητα  $e = 0, 15, 30\text{m}$ ). Για τις ανωτέρω αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τα προσομοιώματα χωρίς διεπιφάνειες (βλ. Κεφάλαιο 3, Προσομοιώματα Α και Β). Επιπρόσθετα, ομαδοποιήθηκαν οι κεντρικοί κόμβοι ανά  $0.5\text{m}$  για τη λήψη αποτελεσμάτων μετατοπίσεων κατά μήκος του άξονα του φρέατος.

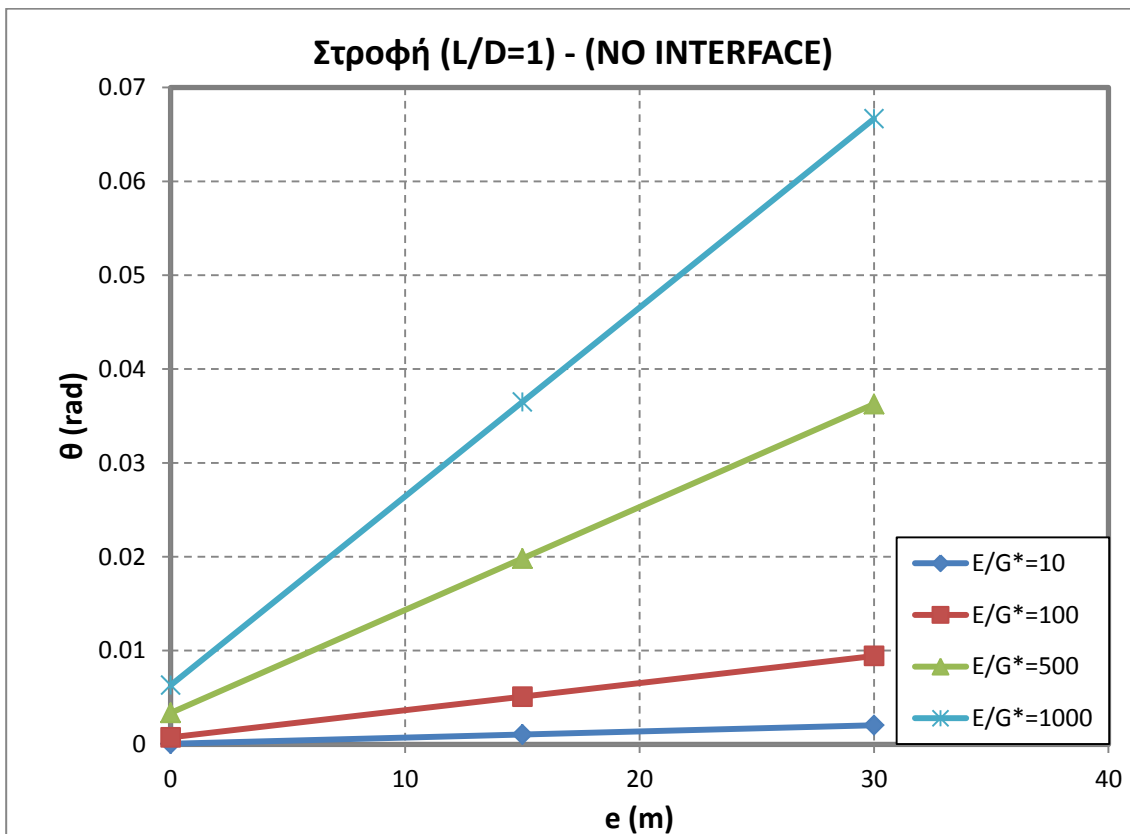
## 4.2 Ο ρόλος της εκκεντρότητας

Με τον όρο «εκκεντρότητα», όπως προαναφέρθηκε, ορίζεται ο λόγος της ροπής προς το εγκάρσιο φορτίο που εφαρμόζεται. Για παράδειγμα, εκκεντρότητα  $e=M/H=30\text{m}$  αναπαριστά την εφαρμογή εγκάρσιου φορτίου ( $H$ ) σε ύψος  $30\text{m}$  πάνω από την κεφαλή του φρέατος (ύψος βάθρου γέφυρας). Για το λόγο αυτό, κρίθηκε σκόπιμη η εισαγωγή της εκκεντρότητας ως παραμέτρου των αναλύσεων.

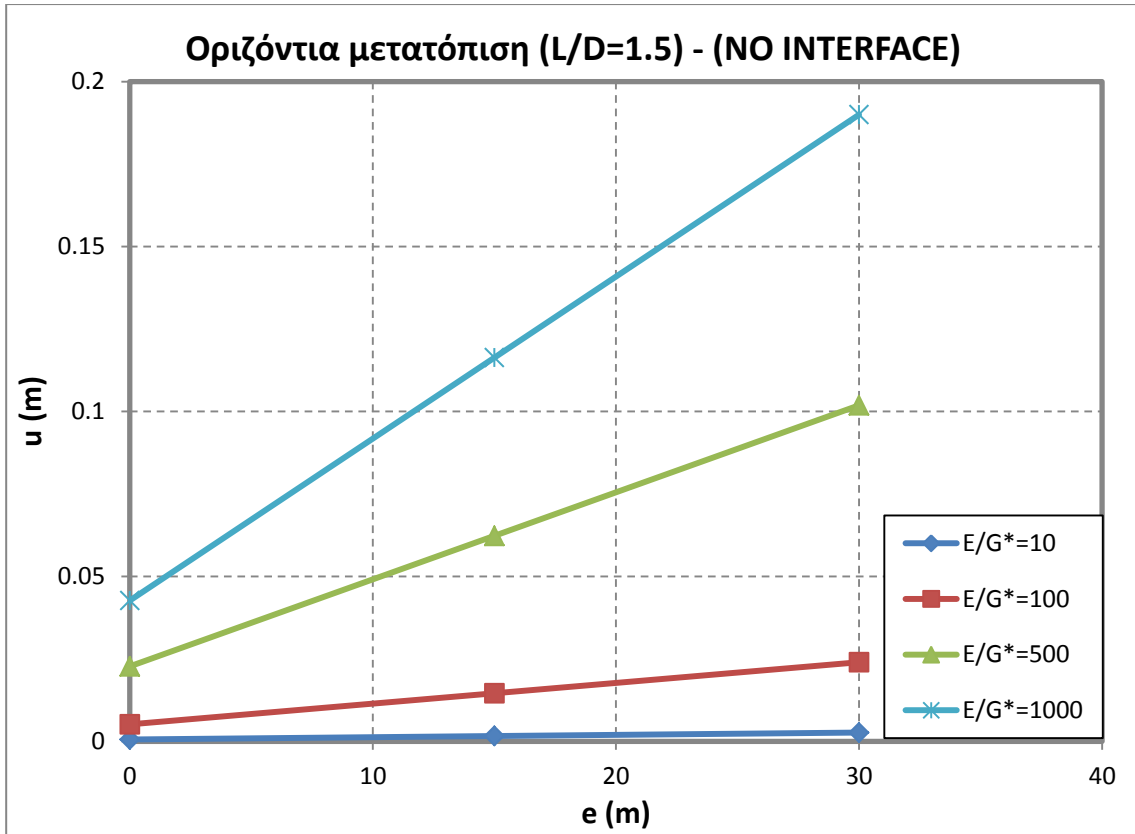
Για τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας, απεκονίστηκαν διαγραμματικά οι τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων και των στροφών συναρτήσεσι της εκκεντρότητας του φορτίου. Ακολουθούν οι κατανομές των οριζόντιων μετατοπίσεων και των στροφών κεφαλής ως προς την εκκεντρότητα, για όλα τα μήκη φρέατων που μελετήθηκαν, για ενδεικτικές τιμές σχετικής δυσκαμψίας ( $E/G^*=10, 100, 500, 1000$ ) (Σχήμα 4-1 έως Σχήμα 4-8):



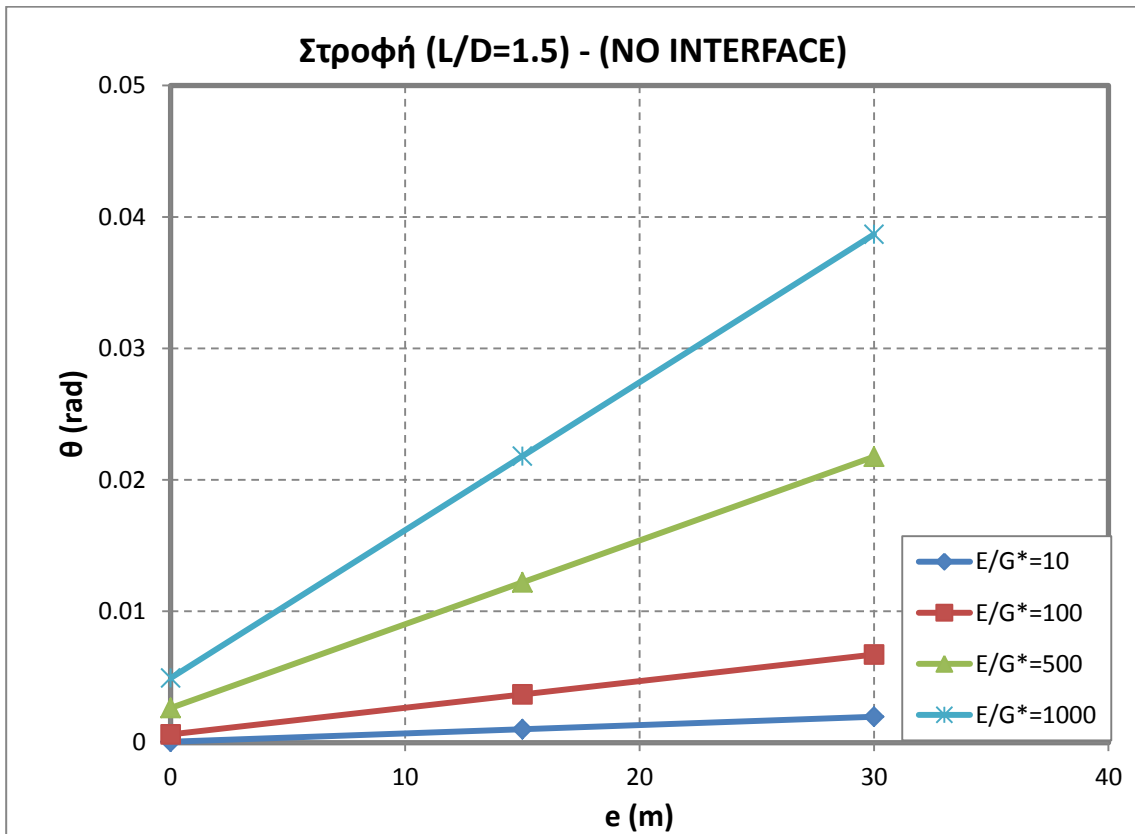
Σχήμα 4-1. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=1)



Σχήμα 4-2. Διάγραμμα στροφών κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=1)

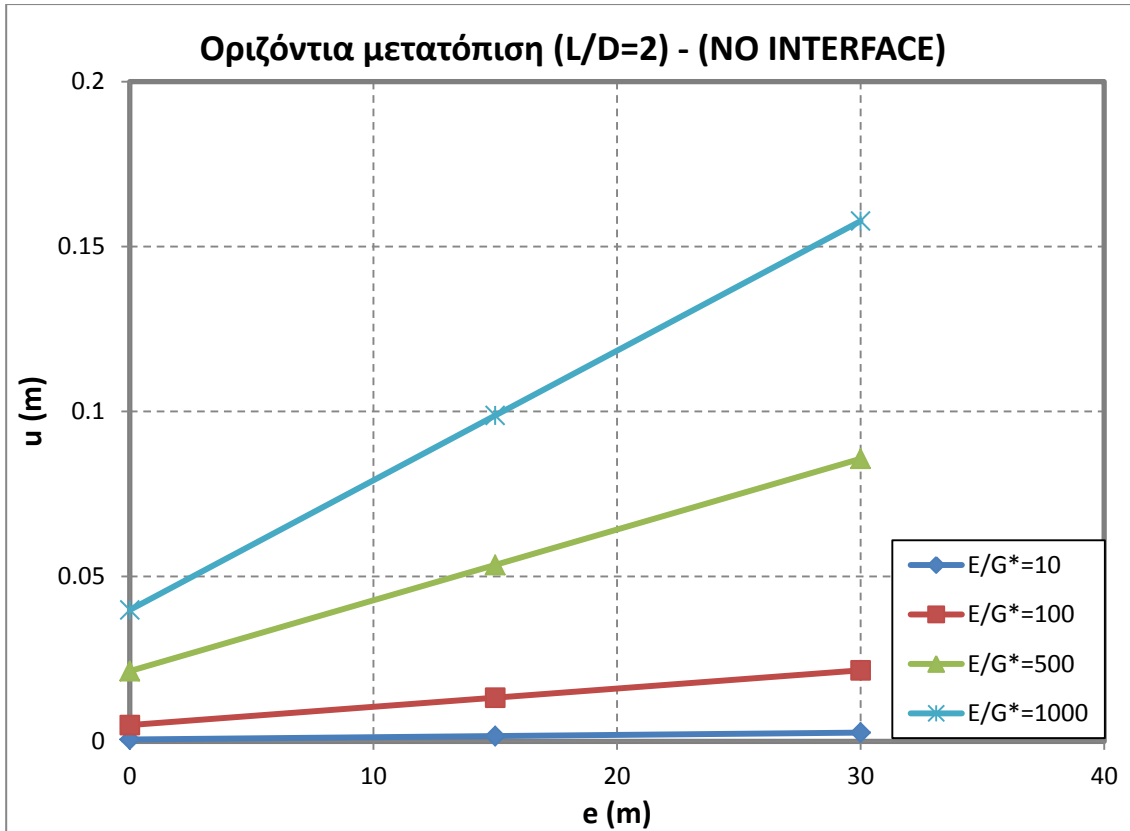


Σχήμα 4-3. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=1.5)

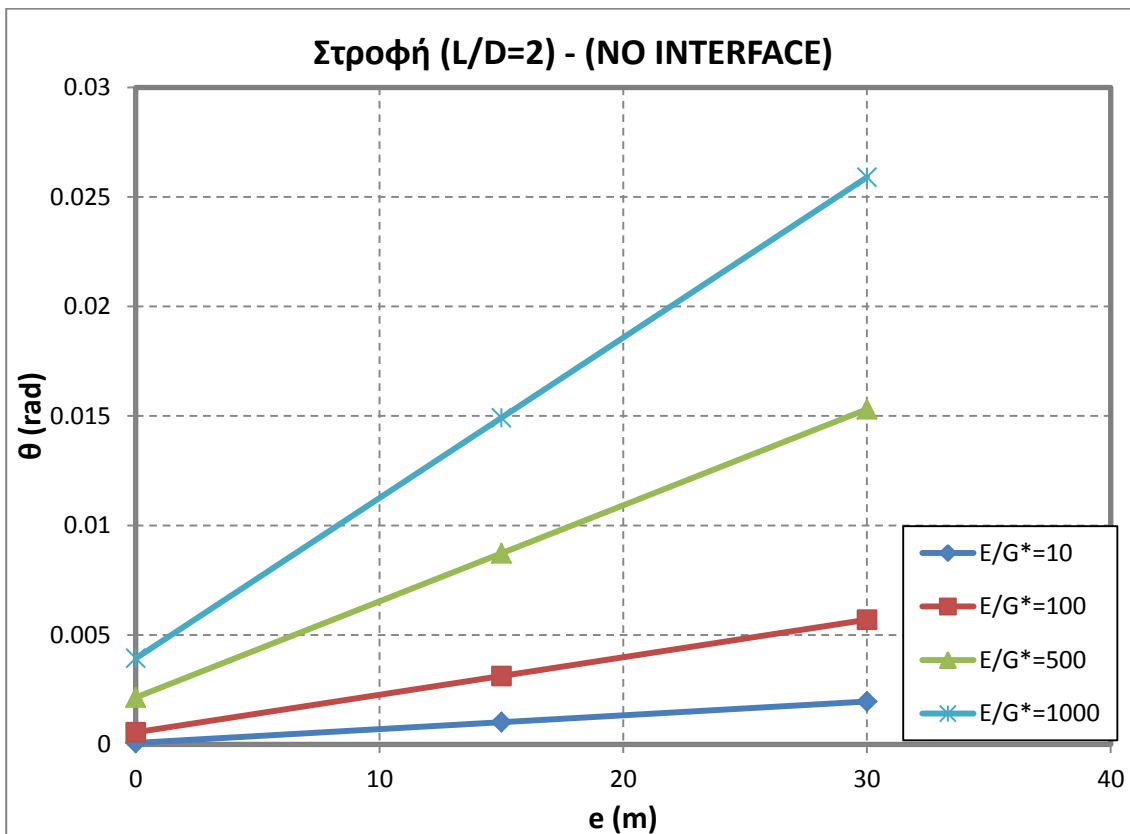


Σχήμα 4-4. Διάγραμμα στροφών κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=1.5)

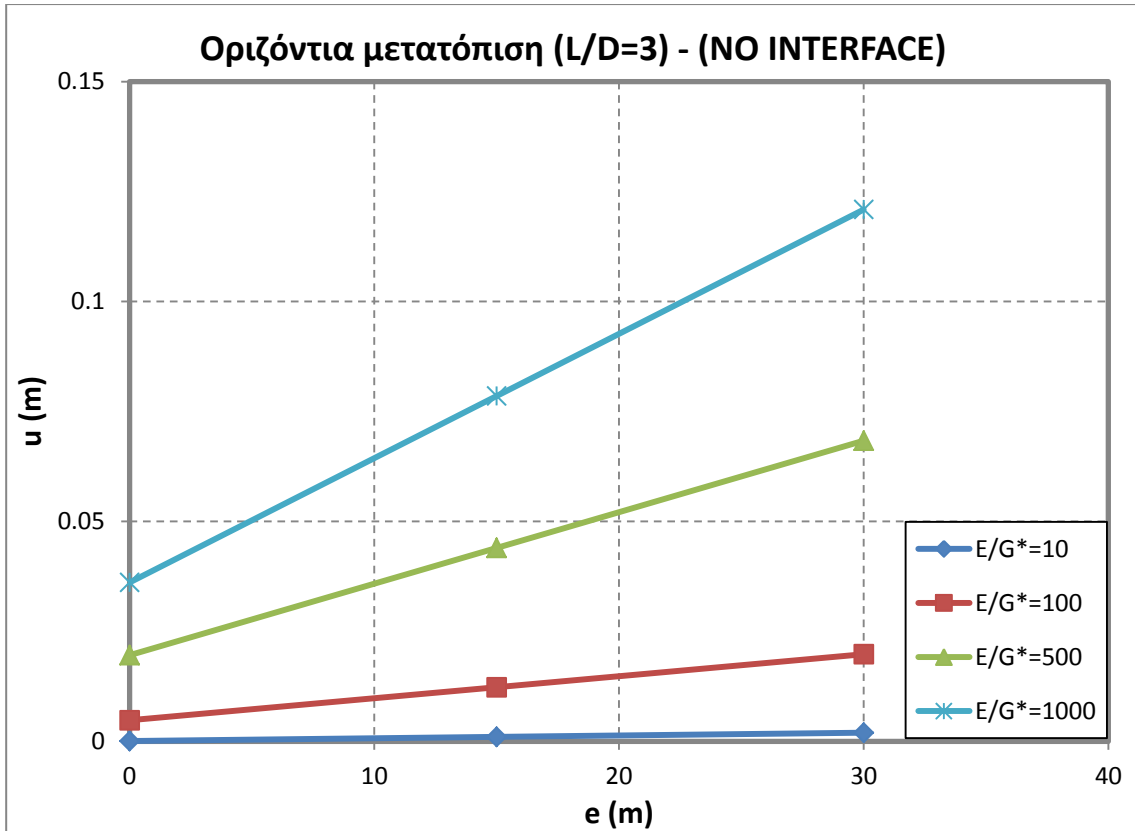




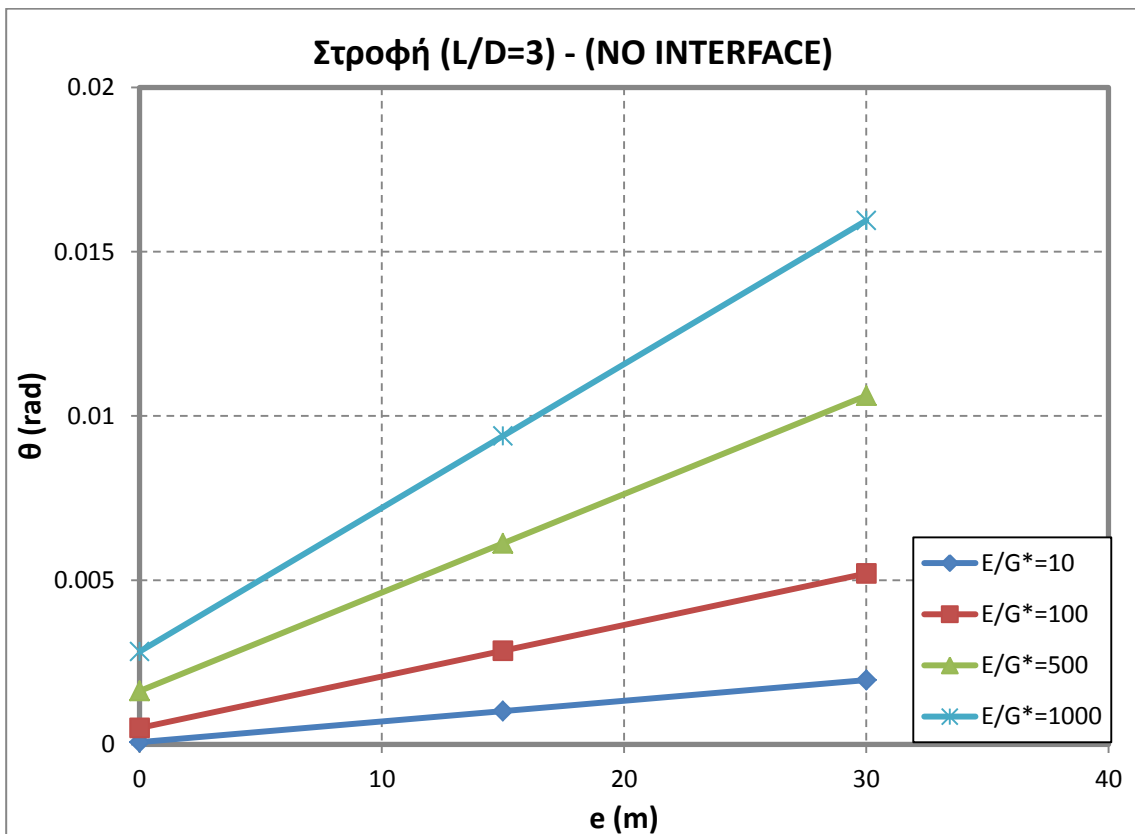
Σχήμα 4-5. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=2)



Σχήμα 4-6. Διάγραμμα στροφών κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=2)



Σχήμα 4-7. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=3)



Σχήμα 4-8. Διάγραμμα στροφών ως προς την εκκεντρότητα (L/D=3)

Παρατήρηση:

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η κατανομή των μετακινησιακών μεγεθών στην κεφαλή του φρέατος είναι γραμμική ως προς το επιβαλλόμενο φορτίο στα πλαίσια των ελαστικών αναλύσεων. Συνεπώς, αναφερόμαστε σε ελαστική απόκριση των φρεάτων και επομένως, οι σχέσεις που θα προκύψουν από τα αποτελέσματα των αναλύσεων – όπως και αυτές των Carter και Kulhawy – μπορούν να εφαρμοστούν ανεπιφύλακτα για οποιεσδήποτε τιμές οριζόντιου φορτίου μικρότερες του  $H=20MN$  και εκκεντρότητας μικρότερης από  $e=30m$ .

Σημειώνεται ότι στα διαγράμματα απεικονίστηκαν οι οριακές τιμές σχετικής δυσκαμψίας ( $E/G^*=10, 1000$ ) και ενδεικτικές ενδιάμεσες ( $E/G^*=100, 500$ ). Κατά συνέπεια, αντίστοιχη γραμμική κατανομή ισχύει και για όλες τις ενδιάμεσες τιμές που δε συμπεριλήφθηκαν.

### 4.3 Οριοθέτηση άκαμπτων φρεάτων

Στην παρούσα φάση εξετάζονται όλες οι περιπτώσεις γεωμετρίας φρεάτων και ιδιοτήτων βραχομαζών/εδαφών για τον προσδιορισμό αυτών που θα θεωρηθούν «απολύτως άκαμπτα». Χρησιμοποιούνται δύο μεθοδολογίες για τον έλεγχο της ακαμψίας:

- Διαγράμματα μετακινήσεων και στροφών ως προς τη σχετική δυσκαμψία, αντίστοιχα των Carter και Kulhawy (Σχήμα 2-2 έως Σχήμα 2-4) στα οποία προσδιορίζεται το κάτω όριο, έπειτα από το οποίο τα παραμορφωσιακά μεγέθη της κεφαλής είναι ανεξάρτητα του λόγου  $E/G^*$ .
- Χάραξη της παραμορφωμένης κατάστασης του φρέατος συναρτήσει των οριζόντιων μετακινήσεων και προσέγγιση αυτής με ευθεία γραμμή τάσης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ανάλογα με τις διαφορές που προέκυψαν στις μετατοπίσεις, προσδιορίστηκαν οι περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων.

Με τον όρο «απολύτως άκαμπτα» φρέατα θα χαρακτηρίζονται στο εξής εκείνα τα φρέατα, των οποίων οι μετακινήσεις ή οι στροφές ανήκουν στον οριζόντιο κλάδο των διαγραμμάτων αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων και στροφών συναρτήσει του λόγου  $E/G^*$  (βλ. Παράγραφο 4.3.1). Επιπλέον, ως «απολύτως άκαμπτα» θα θεωρούνται τα φρέατα των οποίων οι οριζόντιες μετακινήσεις κατά μήκος τους παρουσιάζουν αποκλίσεις από την ευθύγραμμη προσέγγιση μικρότερες από 5% στην κεφαλή του φρέατος.

#### 4.3.1 Καμπύλες μετατοπίσεων – σχετικής δυσκαμψίας

Οι ακόλουθες καμπύλες, όπως αναφέρθηκε ήδη, χαράσσονται κατά τα πρότυπα των Carter και Kulhawy. Στον άξονα  $x$  τοποθετούνται διάφορες τιμές σχετικών δυσκαμψιών φρέατος-βραχομάζας  $E/G^*$  ενώ στον άξονα  $y$  οι αδιαστατοποιημένες τιμές των μετατοπίσεων (οριζόντιων μετακινήσεων ή στροφών). Τα διαγράμματα αφορούν τιμές των μετατοπίσεων που υπολογίστηκαν από τις αναλύσεις για τη μέγιστη τιμή εκκεντρότητας ( $e=30m$ ). Η διαδικασία αδιαστατοποίησης των μετατοπίσεων βασίστηκε στις σχέσεις των Carter και Kulhawy (σχέσεις (2–8 και (2–9) και περιγράφεται ως εξής:

Οι σχέσεις (2–8) και (2–9) έχουν τη μορφή:

$$u = u_0 + u_M$$

(4–1)

$$\theta = \theta_0 + \theta_M \quad (4-2)$$

όπου οι όροι  $u_0$  και  $\theta_0$  αναφέρονται στη μετακίνηση και στη στροφή λόγω του εγκάρσιου φορτίου (H) που ασκείται στο φρέαρ, ενώ οι όροι  $u_M$  και  $\theta_M$  είναι οι συνιστώσες των μετακινήσεων που οφείλονται στη ροπή που προκαλεί το εγκάρσιο φορτίο.

Για μηδενική ροπή κεφαλής ( $e=0$ ) οι σχέσεις (2-8) και (2-9) γράφονται:

$$u = u_0 = 0,4 \left( \frac{H}{G^*D} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-1/3} \quad (4-3)$$

$$\theta = \theta_0 = 0,3 \left( \frac{H}{G^*D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} \quad (4-4)$$

Οι τιμές των  $u_0$  και  $\theta_0$  είναι γνωστές από τα αποτελέσματα των αναλύσεων μηδενικής ροπής ( $e=0$ ). Κατά συνέπεια:

$$u_M = u - u_0 = 0,3 \left( \frac{eH}{G^*D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} \quad (4-5)$$

ή

$$\left( \frac{u - u_0}{e} \right) \left( \frac{G^*D^2}{H} \right) = 0,3 \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} \quad (4-6)$$

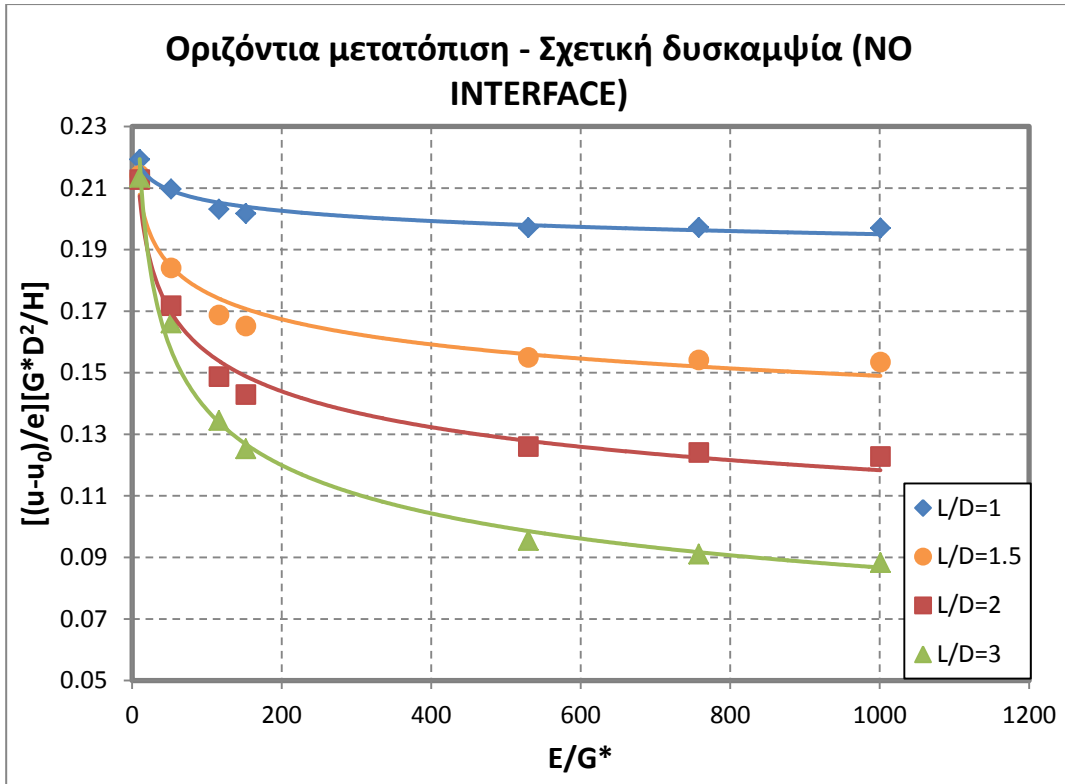
και

$$\theta_M = \theta - \theta_0 = 0,8 \left( \frac{eH}{G^*D^3} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-5/3} \quad (4-7)$$

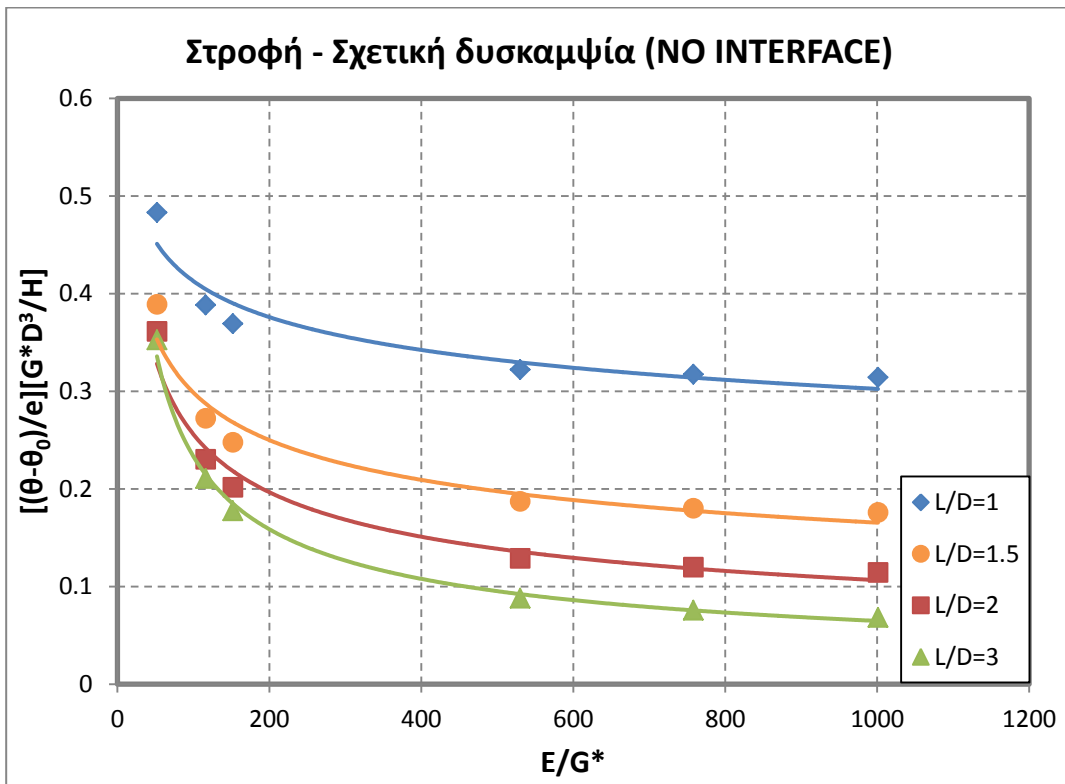
ή

$$\left( \frac{\theta - \theta_0}{e} \right) \left( \frac{G^*D^3}{H} \right) = 0,8 \left( \frac{2L}{D} \right)^{-5/3} \quad (4-8)$$

Συνεπώς μορφώθηκαν τα διαγράμματα του πρώτου μέλους των εξισώσεων (4-6) και (4-8) συναρτήσεως διαφόρων τιμών σχετικής δυσκαμψίας  $E/G^*$ . Τα σημεία των παραπάνω γραφημάτων προσεγγίστηκαν από καμπύλες υπερβολικού τύπου για κάθε φρέαρ. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα αυτά για τις μετακινήσεις και τις στροφές (Σχήμα 4-9 και Σχήμα 4-10):



Σχήμα 4-9. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων κεφαλής συναρτήσει της σχετικής δυσκαμψίας  $E/G^*$  για διάφορες τιμές του λόγου  $L/D$



Σχήμα 4-10. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένης στροφής κεφαλής συναρτήσει της σχετικής δυσκαμψίας  $E/G^*$  για διάφορες τιμές του λόγου  $L/D$

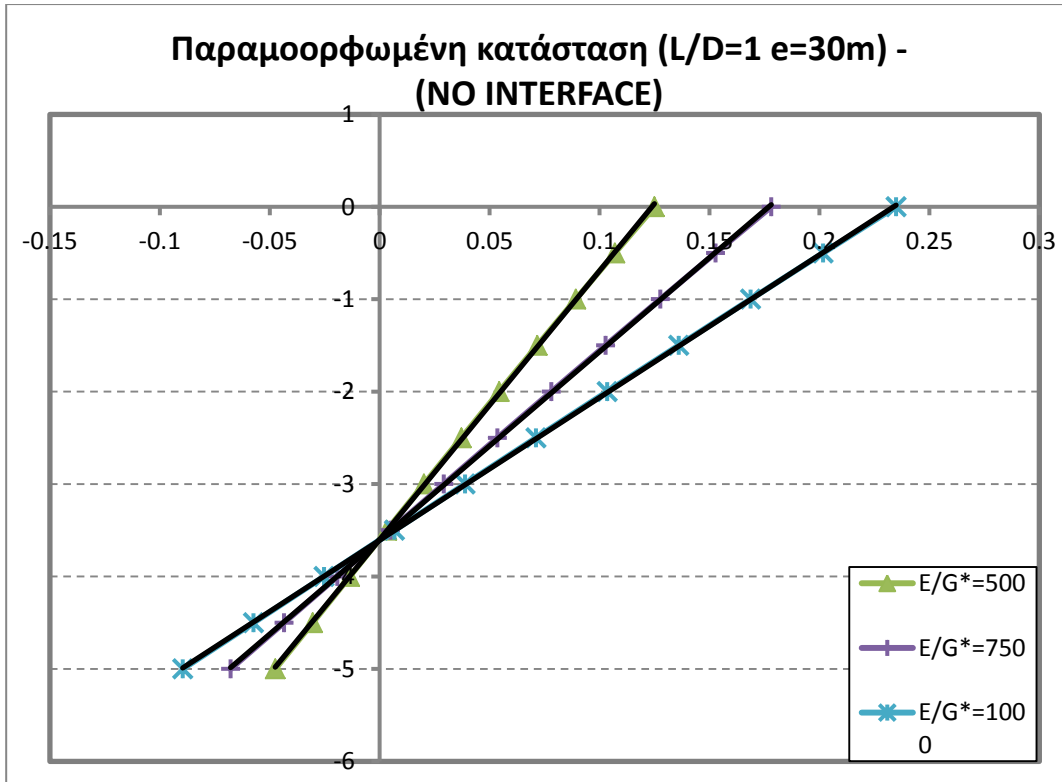
Από τη μορφή των παραπάνω διαγραμμάτων προκύπτει ότι ως «απολύτως άκαμπτα» φρέατα μπορούν να θεωρηθούν τα εξής:

- $L/D=1, E/G^* \geq 100$
- $L/D=1.5, E/G^* \geq 500$
- $L/D=2, E/G^* \geq 500$

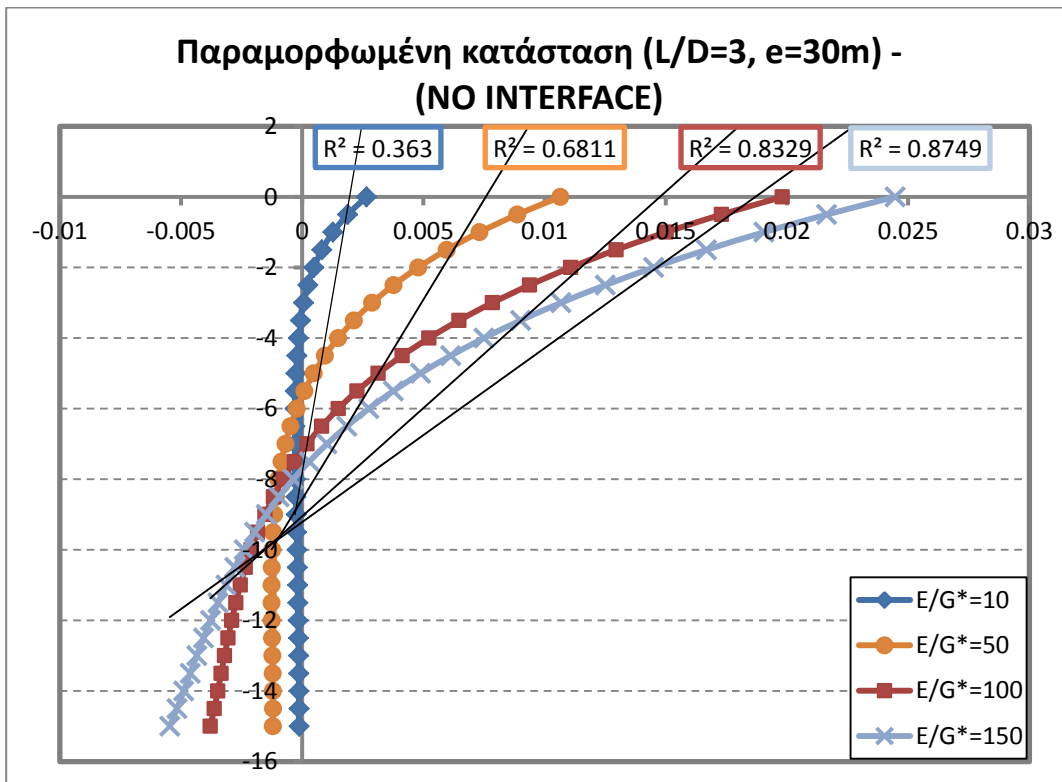
Σημειώνεται ότι κανένα από τα φρέατα με λόγο  $L/D=3$  δε θεωρήθηκε άκαμπτο στην παρούσα φάση της εργασίας, λόγω της αβεβαιότητας που προκύπτει από τη μεγάλη τιμή του λόγου αυτή. Θεωρήθηκε δηλαδή ότι τα φρέατα με διάμετρο  $D=5m$  και μήκος  $L=15m$  θα συμπεριφερθούν ως μάλλον εύκαμπτα. Αντίστοιχα, τα φρέατα με  $L/D=1$ , θεωρήθηκαν άκαμπτα ακόμα και στις περιπτώσεις με  $E/G^*=100, 150$  παρά το γεγονός ότι στο διάγραμμα στροφής δεν ανήκουν ευκρινώς στον οριζόντιο κλάδο. Στόχος της προαναφερθείσας διαδικασίας είναι η οριοθέτηση των περιπτώσεων άκαμπτων φρεάτων από τις οποίες θα προκύψουν οι σχέσεις υπολογισμού μετακινήσεων και στροφών και όχι η εξαγωγή συγκεκριμένου κριτηρίου δυσκαμψίας.

#### 4.3.2 Δυσκαμψία φρεάτων μέσω της παραμορφωμένης κατάστασης

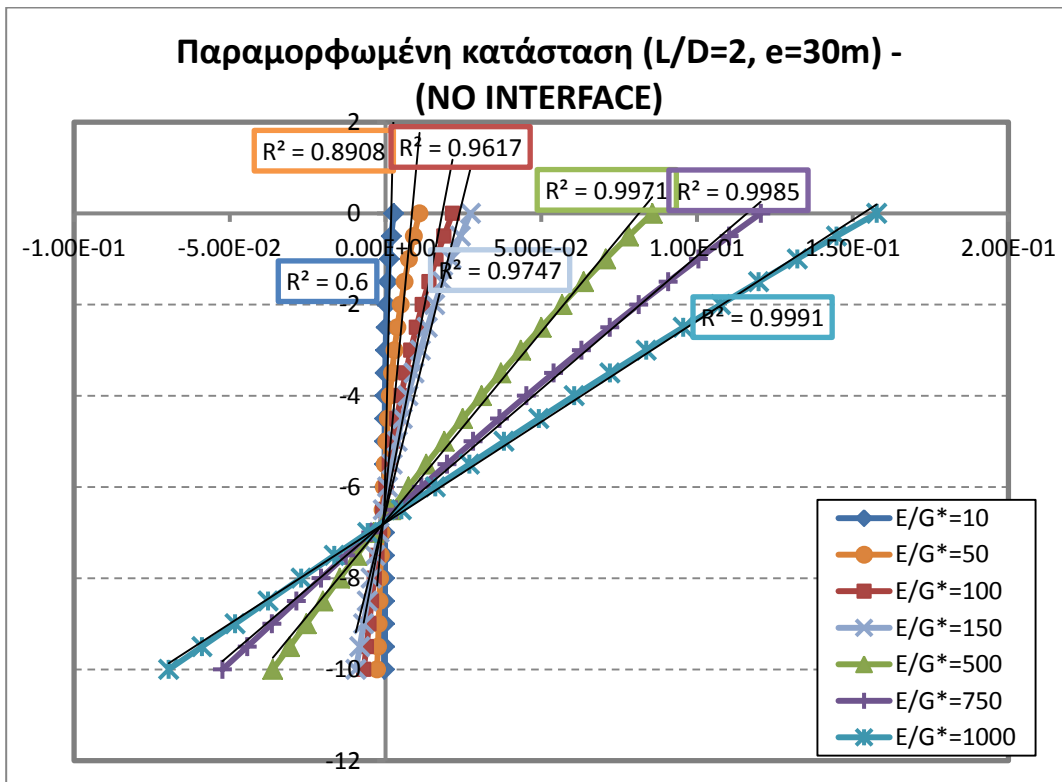
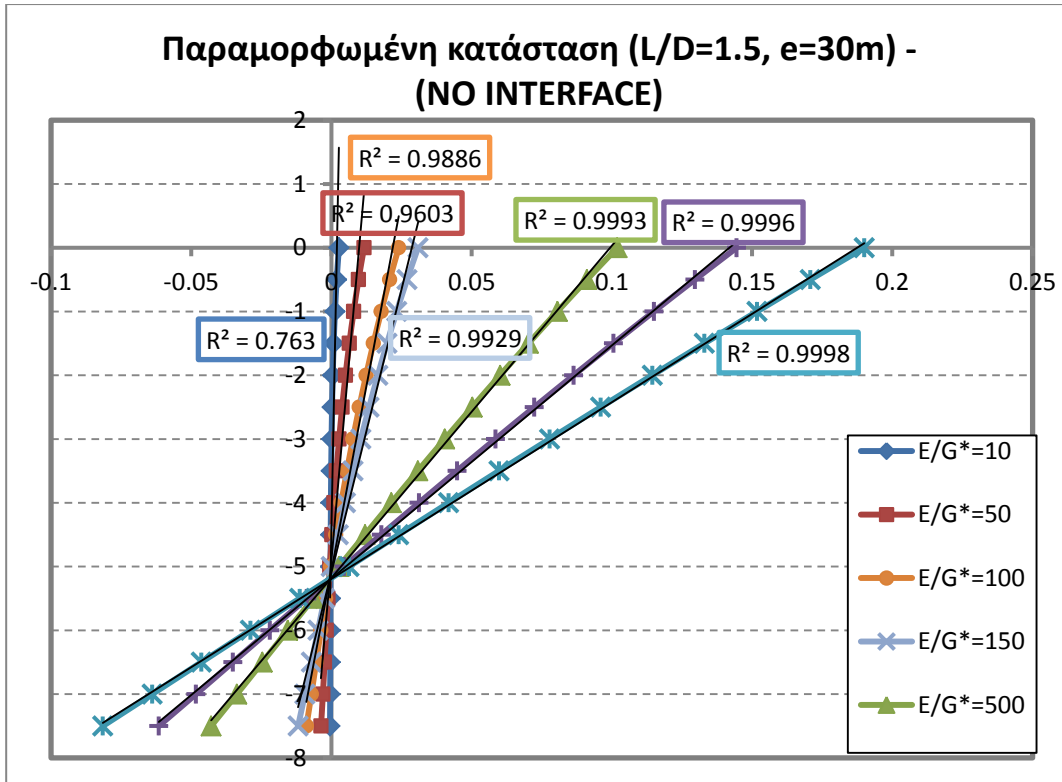
Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για όλους τους λόγους γεωμετρίας φρεάτων και σχετικών δυσκαμψιών φρεάτων-εδαφών/βραχομαζών λήφθηκαν αποτελέσματα μετακινήσεων των κόμβων του άξονα του φρέατος. Οι μετακινήσεις αυτές σχεδιάστηκαν σε διαγράμματα κατανομής τους συναρτήσει του βάθους για διάφορες τιμές του λόγου  $E/G^*$  και για δεδομένη τιμή εκκεντρότητας (Σχήμα 4-11 έως Σχήμα 4-15). Οι καμπύλες των διαγραμμάτων προσεγγίστηκαν με ευθεία γραμμή τάσης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Βάσει της εξίσωσης αυτής της ευθείας υπολογίστηκαν για κάθε βάθος οι μετακινήσεις του κάθε κόμβου του αντίστοιχου απολύτως άκαμπτου στοιχείου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ενδεικτικές περιπτώσεις δύο άκαμπτων φρεάτων ( $L/D=1, 1.5$  για  $e=30m$ ), ενός εύκαμπτου ( $L/D=3$  για  $e=30m$ ) και δύο ενδιάμεσων περιπτώσεων ( $L/D=2$  για  $e=30m$  και  $L/D=3$  για  $e=15m$ ). Οι θεωρήσεις αυτές έγιναν βάσει των διαγραμμάτων Σχήμα 4-9 Σχήμα 4-10 και ως «ενδιάμεσες περιπτώσεις» εννοούνται φρέατα, των οποίων η συμπεριφορά ποικίλλει ανάλογα με την τιμή της σχετικής δυσκαμψίας ( $E/G^*$ ).



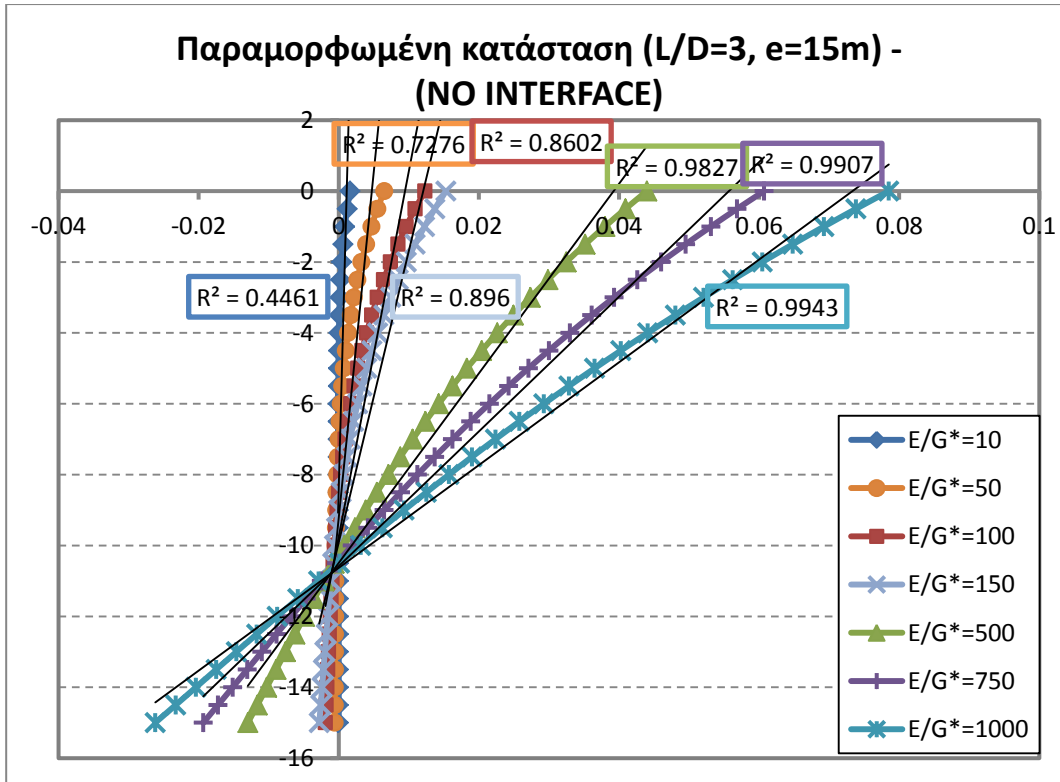
**Σχήμα 4-11.** Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος  $L/D=1$  για εκκεντρότητα  $e=30m$  και διάφορες τιμές του λόγου  $E/G^*$  (ΑΚΑΜΠΤΟ)



**Σχήμα 4-12.** Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος  $L/D=3$  για εκκεντρότητα  $e=30m$  και διάφορες τιμές του λόγου  $E/G^*$  (ΕΥΚΑΜΠΤΟ)







**Σχήμα 4-15.** Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος L/D=3 για εκκεντρότητα e=15m και διάφορες τιμές του λόγου E/G\* (ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ)

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι υπάρχουν περιπτώσεις φρεάτων που δεν παραμορφώνονται ως άκαμπτα για τις δεδομένες συνθήκες φόρτισης. Ως αποτέλεσμα καταγράφηκαν οι ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των οριζόντιων μετατοπίσεων του παραμορφωμένου φορέα και του θεωρητικά απόλυτα άκαμπτου. Στους σχετικούς πίνακες που παρατίθενται (Πίνακας 4-1 έως και Πίνακας 4-4), καταγράφονται οι διαφορές των οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής και αιχμής για τα φρέατα L/D=1, 1.5, 2 και 3.

**Πίνακας 4-1** Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς των αναλύσεων (L/D=1)

L/D	E/G*	e=M/H	(u <sub>rigid</sub> -u)/u (%) – κεφαλή	(u <sub>rigid</sub> -u)/u (%) – αιχμή
1	10	0	-5.82%	-26.07%
		15	-16.62%	83.54%
		30	-18.70%	63.60%
1	50	0	-2.08%	-6.84%
		15	-6.35%	18.28%

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Σχέσεις υπολογισμού μετατοπίσεων χωρίς διεπιφάνειες**

		30	-7.16%	14.27%
1	100	0	-1.06%	-3.21%
		15	-3.29%	8.42%
		30	-3.71%	6.58%
1	150	0	-0.83%	-2.46%
		15	-2.59%	6.45%
		30	-2.92%	5.04%
1	500	0	-0.25%	-0.72%
		15	-0.80%	1.88%
		30	-0.91%	1.47%
1	750	0	-0.18%	-0.51%
		15	-0.56%	1.32%
		30	-0.64%	1.03%
1	1000	0	-0.14%	-0.39%
		15	1.16%	-4.95%
		30	-0.49%	0.78%

**Πίνακας 4-2.** Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς των αναλύσεων (L/D=1.5)

L/D	E/G*	e=M/H	$(u_{\text{rigid}}-u)/u$ (%) – κεφαλή	$(u_{\text{rigid}}-u)/u$ (%) – αιχμή
1.5	10	0	-10.94%	-88.68%
		15	-24.45%	218.60%
		30	-26.60%	174.53%
1.5	50	0	-4.94%	-33.18%
		15	-13.35%	47.92%
		30	-15.02%	40.42%
1.5	100	0	-2.73%	-17.20%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

		15	-7.85%	21.49%
		30	-8.93%	18.28%
1.5	150	0	-2.18%	-13.52%
		15	-6.37%	16.34%
		30	-7.26%	13.91%
1.5	500	0	-0.71%	-4.18%
		15	-2.14%	4.65%
		30	-2.46%	3.97%
1.5	750	0	-0.50%	-2.95%
		15	-1.53%	3.25%
		30	-1.76%	2.78%
1.5	1000	0	-0.38%	-2.25%
		15	-1.17%	2.46%
		30	-1.35%	2.10%

**Πίνακας 4-3.** Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς των αναλύσεων (L/D=2)

L/D	E/G*	e=M/H	$(u_{\text{rigid}}-u)/u$ (%) – κεφαλή	$(u_{\text{rigid}}-u)/u$ (%) – αιχμή
2	10	0	-15.62%	-216.03%
		15	-28.19%	481.12%
		30	-29.15%	9.84%
2	50	0	-8.57%	-132.10%
		15	-19.99%	106.61%
		30	-22.16%	93.79%
2	100	0	-5.24%	-89.67%
		15	-13.53%	46.28%
		30	-15.33%	41.25%

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Σχέσεις υπολογισμού μετατοπίσεων χωρίς διεπιφάνειες**

2	150	0	-4.30%	-76.40%
		15	-11.42%	34.79%
		30	-13.01%	31.07%
2	500	0	-1.50%	-30.25%
		15	-4.32%	9.52%
		30	-5.01%	8.53%
2	750	0	-1.07%	-22.10%
		15	-3.14%	6.61%
		30	-3.65%	5.92%
2	1000	0	-0.83%	-17.20%
		15	-2.43%	4.98%
		30	-2.83%	4.46%

**Πίνακας 4-4.** Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς των αναλύσεων ( $L/D=3$ )

<b>L/D</b>	<b>E/G*</b>	<b>e=M/H</b>	<b>(<math>u_{rigid}-u</math>)/<math>u</math> (%) – κεφαλή</b>	<b>(<math>u_{rigid}-u</math>)/<math>u</math> (%) – αιχμή</b>
3	10	0	-22.68%	-647.97%
		15	-29.70%	-225.47%
		30	-26.45%	-210.96%
3	50	0	-15.60%	-1031.78%
		15	-27.47%	409.37%
		30	-28.90%	70.95%
3	100	0	-11.42%	1529.94%
		15	-23.20%	166.82%
		30	-25.49%	156.14%
3	150	0	-9.97%	596.41%
		15	-21.19%	122.11%
		30	-23.58%	114.86%

3	500	0	-4.32%	74.72%
		15	-10.78%	29.90%
		30	-12.55%	28.27%
3	750	0	-3.22%	48.34%
		15	-8.27%	20.28%
		30	-9.72%	19.17%
3	1000	0	-2.53%	35.01%
		15	-6.62%	15.08%
		30	-7.82%	14.23%

Παρατηρήσεις:

- Σε βάθη κυρίως περί του σημείου περιστροφής των φρεάτων παρατηρήθηκαν πολύ μεγάλα ποσοστά διαφορών μετατοπίσεων ως προς το θεωρητικά άκαμπτο στοιχείο (βλ. Παράρτημα). Οι συγκεκριμένες διαφορές οφείλονται στο γεγονός ότι τα απόλυτα μεγέθη είναι μικρά και για μικρές διαφορές τα ποσοστά φαίνονται αυξημένα. Για το λόγο αυτό οριζόντιες μετατοπίσεις των κόμβων μικρότερες του 1mm αμελήθηκαν. Επομένως, οι διαφορές που λαμβάνονται υπόψη είναι κυρίως της κεφαλής, των κόμβων που αντιστοιχούν σε μικρά βάθη και της αιχμής.
- Ακόμα και για απολύτως άκαμπτα φρέατα ( $L/D=1$ ) και για τις καλύτερης ποιότητας βραχώμαζες που μελετήθηκαν ( $E/G^*=10$ ) η μεγάλη δυσκαμψία της περιβάλλουσας βραχώμαζας παρέχει σημαντική αντίσταση στη μετακίνηση και τη στροφή της αιχμής. Ως εκ τούτου, οι διαφορές των μετατοπίσεων στην αιχμή δεν λαμβάνονται υπόψη με την ίδια βαρύτητα, όπως οι αντίστοιχες της κεφαλής.

**4.3.3 Θεώρηση περιπτώσεων άκαμπτων φρεάτων**

Σύμφωνα με τα παραπάνω, θεωρήθηκαν ως «απολύτως άκαμπτα» τα φρέατα των οποίων οι μετακινήσεις και οι στροφές ανήκουν στον οριζόντιο κλάδο των διαγραμμάτων της ενότητας 4.3.1 (Σχήμα 4-9 και Σχήμα 4-10). Οι περιπτώσεις αυτές επιβεβαιώθηκαν από τη μορφή της παραμορφωμένης τους κατάστασης. Συγκεκριμένα, ως «απολύτως άκαμπτα» θεωρήθηκαν τα φρέατα των οποίων οι οριζόντιες μετατοπίσεις παρουσιάζουν διαφορές από την προσεγγιστική ευθεία του θεωρητικά άκαμπτου στοιχείου μικρότερες του 5% στην κεφαλή και 10% στην αιχμή για όλες τις περιπτώσεις εκκεντρότητας.

Το σύνολο των περιπτώσεων που πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις και χαρακτηρίζονται ως «απολύτως άκαμπτα» για την παρούσα φάση της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 4-5** Απολύτως άκαμπτα φρέατα χωρίς διεπιφάνειες

L/D	E/G*
1	100
	150
	500
	750
	1000
1.5	500
	750
	1000
2	500
	750
	1000

#### 4.4 Σχέσεις υπολογισμού μετατοπίσεων άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες

Οι περιπτώσεις «απολύτως άκαμπτων» φρεάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω (Πίνακας 4-5) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των σχέσεων υπολογισμού των μετατοπίσεών τους. Οι σχέσεις αυτές ακολουθούν τα πρότυπα των σχέσεων Carter και Kulhawy, δηλαδή θα είναι της μορφής:

$$u = A \left( \frac{H}{G^* D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^a + B \left( \frac{M}{G^* D^2} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^b \quad (4-9)$$

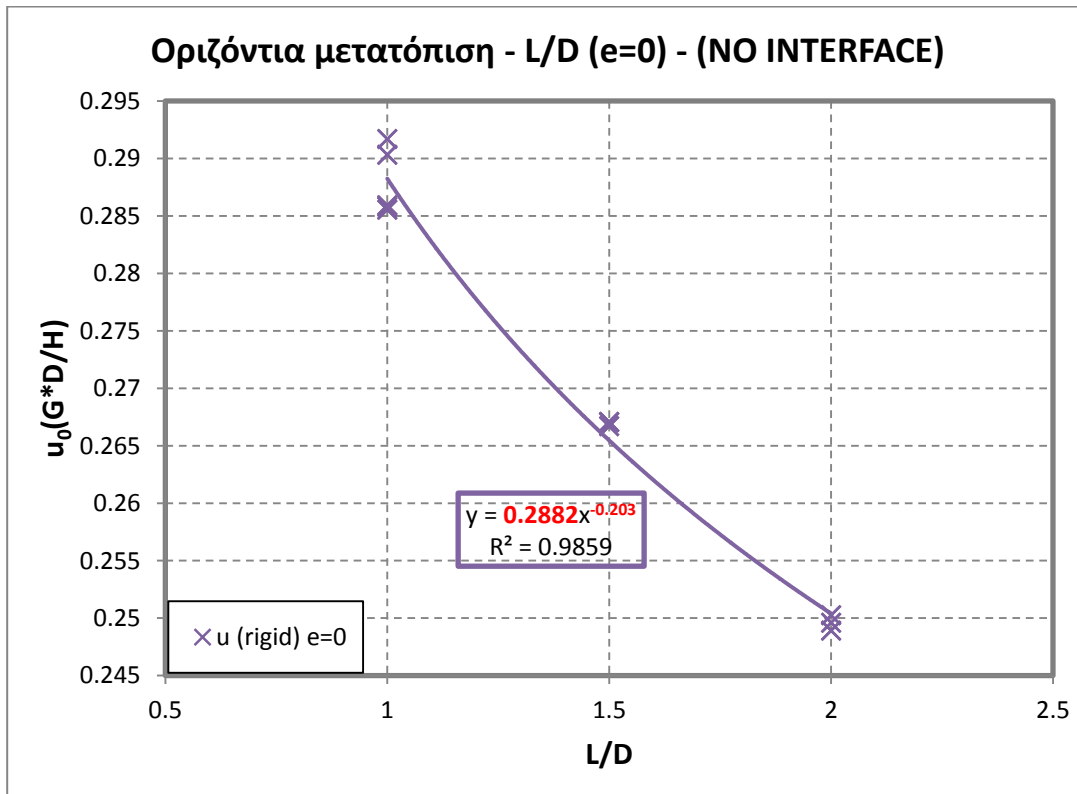
$$\theta = B \left( \frac{H}{G^* D^2} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^b + C \left( \frac{M}{G^* D^3} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^c \quad (4-10)$$

Απαιτείται λοιπόν ο προσδιορισμός των συντελεστών (A, B, C, a, b, c). Στον όρο της μετακίνησης εξαιτίας της επιβαλλόμενης ροπής (M) και στον όρο της στροφής εξαιτίας της επιβαλλόμενης τέμνουσας (H) οι συντελεστές (B, b) είναι κοινοί. Αυτό συμβαίνει επειδή προσομοιώνουν τη δυσκαμψία του συζευγμένου ελατηρίου.

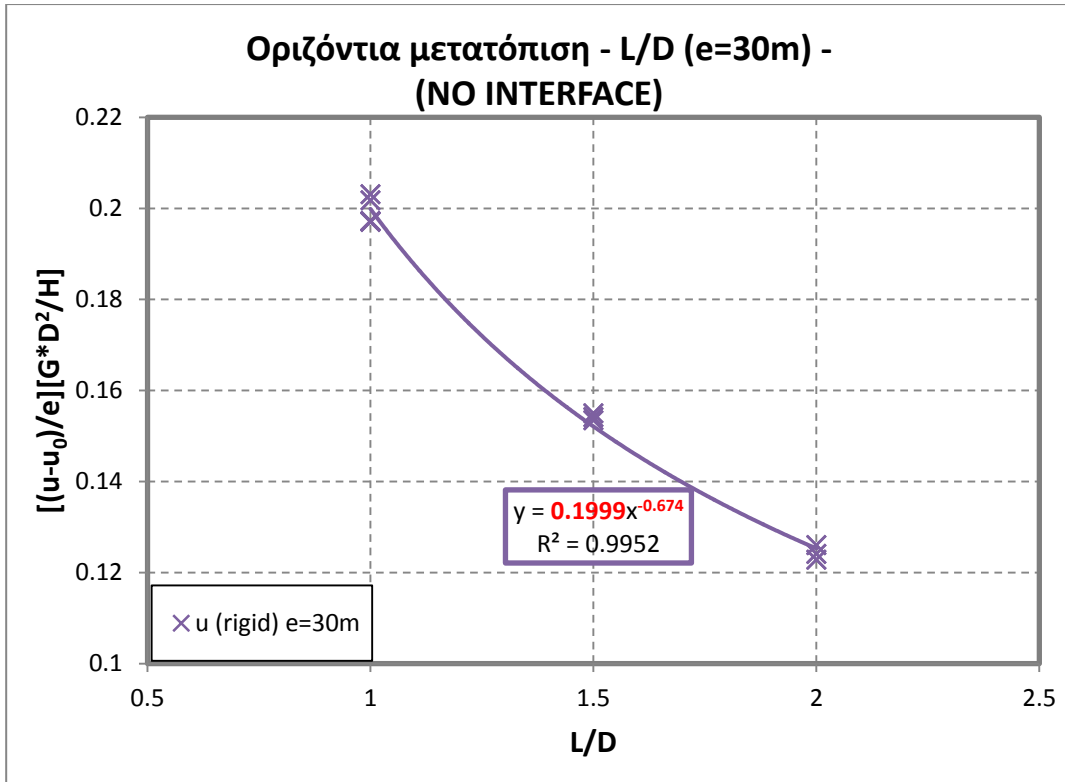
Σύμφωνα με την παραδοχή των Carter και Kulhawy, η οποία επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα μετατοπίσεων-σχετικών δυσκαμψιών (Σχήμα 4-9 και Σχήμα 4-10), οι μετατοπίσεις των άκαμπτων φρεάτων εξαρτώνται μόνο από το λόγο των διαστάσεών τους (L/D). Για το λόγο αυτό, μορφώθηκαν διαγράμματα αδιαστατοποιημένων μετατοπίσεων συναρτήσεως του λόγου L/D

ώστε να προσδιοριστούν οι συντελεστές που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των εξισώσεων. Συγκεκριμένα:

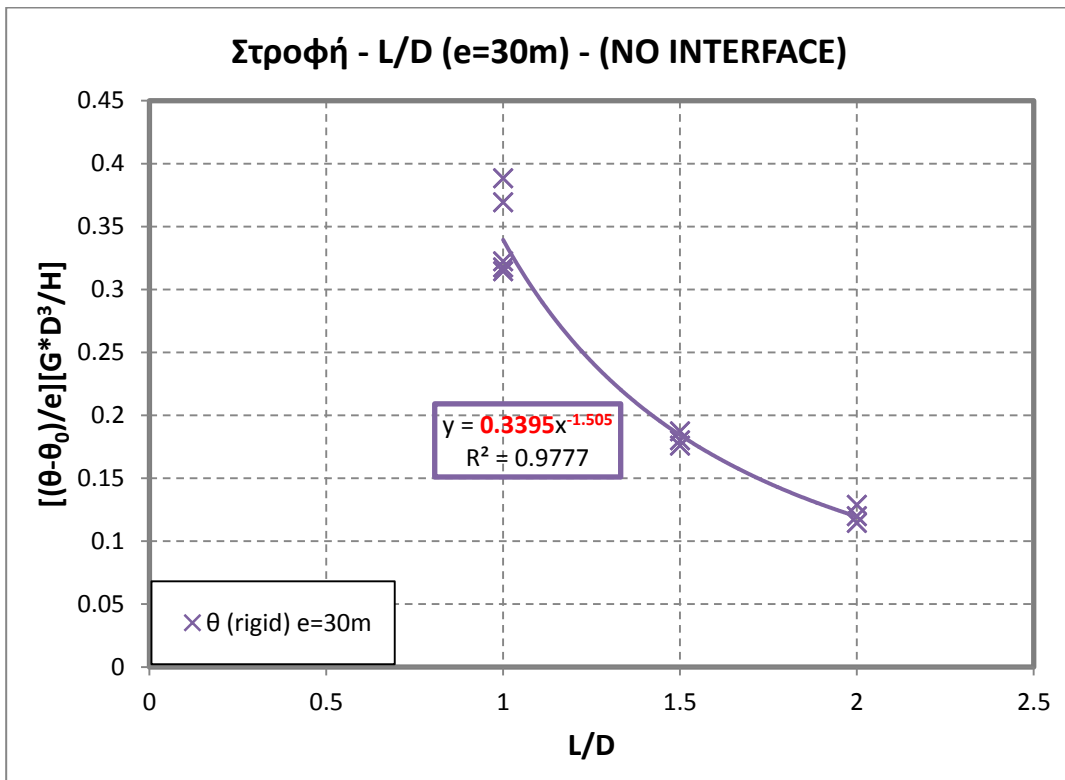
- Ο υπολογισμός των συντελεστών (A, a) του μετακινησιακού ελατηρίου έγινε μέσω του διαγράμματος αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων ( $u_0$ ) των άκαμπτων φρεάτων που υπόκεινται σε φόρτιση απουσία ροπής (Σχήμα 4-16). Η αδιαστατοποίηση έγινε διαιρώντας τη μετακίνηση  $u_0$  με το σταθερό όρο ( $H/(G*D)$ ).
- Ο υπολογισμός των συντελεστών (B, b) του συζευγμένου ελατηρίου έγινε μέσω του διαγράμματος αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων ( $u$ ) των άκαμπτων φρεάτων που υπόκεινται σε φόρτιση μέγιστης εκκεντρότητας  $e=30m$  (Σχήμα 4-17). Η αδιαστατοποίηση έγινε σύμφωνα με τη σχέση (4-6).
- Ο υπολογισμός των συντελεστών (C, c) του στροφικού ελατηρίου έγινε μέσω του διαγράμματος αδιαστατοποιημένων στροφών ( $\theta$ ) των άκαμπτων φρεάτων που υπόκεινται σε φόρτιση μέγιστης εκκεντρότητας  $e=30m$  (Σχήμα 4-18). Η αδιαστατοποίηση έγινε σύμφωνα με τη σχέση (4-8).



Σχήμα 4-16. Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης κεφαλής άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες συναρτήσει του λόγου L/D (e=0)



Σχήμα 4-17. Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες συναρτήσει του λόγου L/D (e=30m)



Σχήμα 4-18. Διάγραμμα στροφής άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες συναρτήσει του λόγου L/D (e=30m)



Όπως απεικονίζεται στα παραπάνω διαγράμματα, τα σημεία προσεγγίστηκαν μέσω γραμμής τάσης υπερβολικού τύπου, η οποία παρέχει τους αντίστοιχους συντελεστές για τη μόρφωση των σχέσεων. Οι συντελεστές φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

**Πίνακας 4-6.** Τιμές των συντελεστών των εξισώσεων μετακινήσεων

<b>A=</b>	0.2882≈ <b>0.29</b>	<b>a=</b>	-0.203≈ <b>-1/5</b>
<b>B=</b>	0.1999≈ <b>0.20</b>	<b>b=</b>	-0.674≈ <b>-2/3</b>
<b>C=</b>	0.3395≈ <b>0.34</b>	<b>c=</b>	-1.505≈ <b>-3/2</b>

Από όσα προηγήθηκαν προκύπτουν οι σχέσεις υπολογισμού των μετατοπίσεων άκαμπτων φρεάτων:

$$u = 0.29 \left( \frac{H}{G \cdot D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-1/5} + 0.20 \left( \frac{M}{G \cdot D^2} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-2/3} \quad (4-11)$$

$$\theta = 0.20 \left( \frac{H}{G \cdot D^2} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-2/3} + 0.34 \left( \frac{M}{G \cdot D^3} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-3/2} \quad (4-12)$$

Οι παραπάνω σχέσεις τροποποιήθηκαν αντικαθιστώντας τη ροπή με την εκκεντρότητα ώστε να έχουν την εξής τελική μορφή:

$$u = \left[ 0.29 \left( \frac{L}{D} \right)^{-1/5} + 0.20 \left( \frac{e}{D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-2/3} \right] \left( \frac{H}{G \cdot D} \right) \quad (4-13)$$

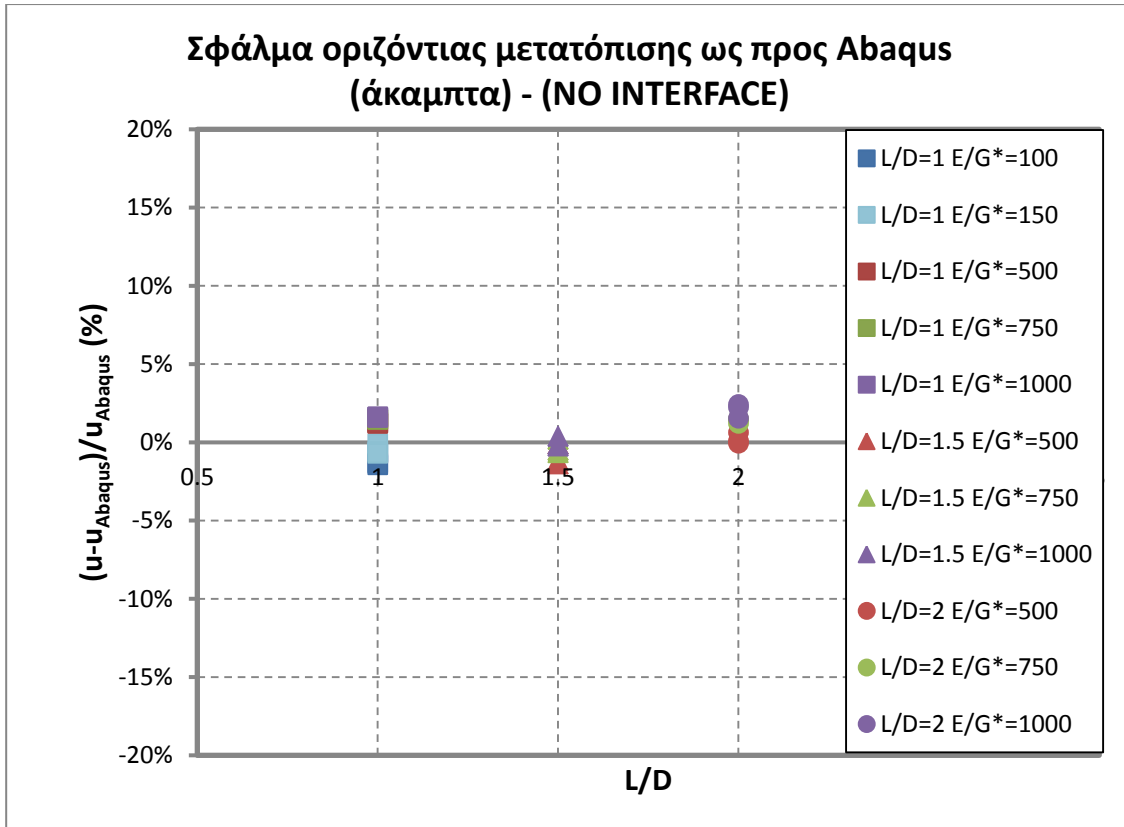
$$\theta = \left[ 0.20 \left( \frac{L}{D} \right)^{-2/3} + 0.34 \left( \frac{e}{D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-3/2} \right] \left( \frac{H}{G \cdot D^2} \right) \quad (4-14)$$

#### 4.5 Διερεύνηση σχέσεων - Προσδιορισμός συνθήκης ακαμψίας

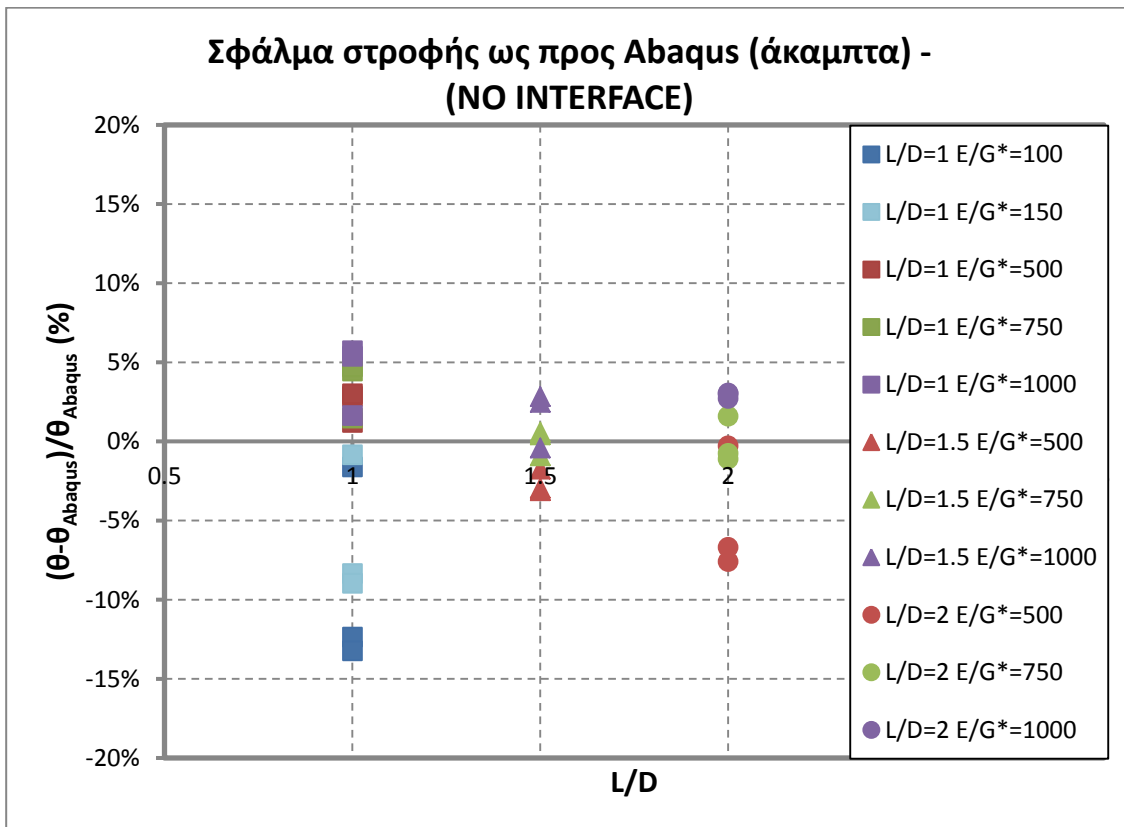
Αμέσως μετά τη μόρφωση των σχέσεων υπολογισμού των μετατοπίσεων άκαμπτων φρεάτων, ακολουθήθηκε διαδικασία σύγκρισης των αποτελεσμάτων εφαρμογής της για διάφορες περιπτώσεις φρεάτων με τα αποτελέσματα που εξάγονται από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων καθώς και από τις αντίστοιχες σχέσεις των Carter και Kulhawy. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων παρουσιάζονται κατά περίπτωση στην παρούσα ενότητα.

##### 4.5.1 Σύγκριση με τα αποτελέσματα του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus

Στην παράγραφο αυτή συγκρίνονται τα αποτελέσματα εφαρμογής των σχέσεων με τα αποτελέσματα των αναλύσεων από τις οποίες προέκυψαν. Σημειώνεται ότι μόνο τα «απολύτως άκαμπτα» φρέατα που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 4-5 συμμετείχαν στη σύγκριση. Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus και εκείνων που προκύπτουν εφαρμόζοντας τις σχέσεις (4-13) και (4-14) για απολύτως άκαμπτα φρέατα.



Σχήμα 4-19. Διαφορές (%) οριζόντιων μετατοπίσεων ως προς Abaqus (άκαμπτα φρέατα)



Σχήμα 4-20. Διαφορές (%) στροφών ως προς Abaqus (άκαμπτα φρέατα)

Παρατηρήσεις:

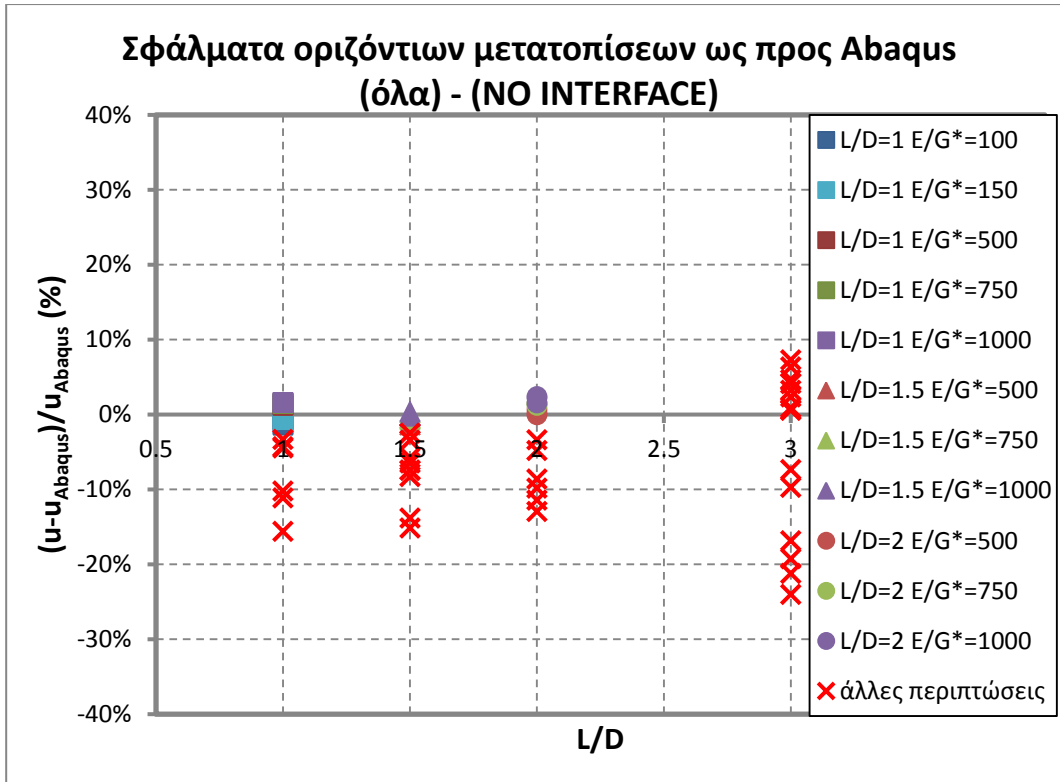
- Οι διαφορές των μετακινήσεων που προκύπτουν εφαρμόζοντας τη σχέση (4-13) παρουσιάζουν διαφορές μέχρι 2.5% για απολύτως άκαμπτα φρέατα σε σχέση με τα αποτελέσματα των αναλύσεων.
- Στην περίπτωση των στροφών το ποσοστό αυτό αυξάνει στο 12% για δύο περιπτώσεις αλλά γενικά κυμαίνεται περί το 5%. Αυτό συμβαίνει λόγω των μικρότερων απόλυτων τιμών των στροφών, για τις οποίες μικρές απόλυτες διαφορές οδηγούν σε μεγαλύτερα ποσοστά.
- Ποσοστά διαφορών κάτω του 10% κρίθηκαν ικανοποιητικά ώστε να μην οδηγήσουν σε αναθεώρηση της μεθόδου.

Στη συνέχεια προστέθηκαν στα διαγράμματα αυτά περιπτώσεις, οι οποίες είτε δεν ανήκουν ουσιαστικά στον οριζόντιο κλάδο των διαγραμμάτων προσδιορισμού ακαμψίας (Σχήμα 4-9 και Σχήμα 4-10), είτε οι διαφορές των μετακινήσεων ως προς το απολύτως άκαμπτο στοιχείο είναι της τάξης του (5-10)% για μικρές τιμές εκκεντρότητας (Παράγραφος 4.3.2). Συγκεκριμένα, οι περιπτώσεις που προστέθηκαν στη σύγκριση σε αυτό το στάδιο είναι οι εξής:

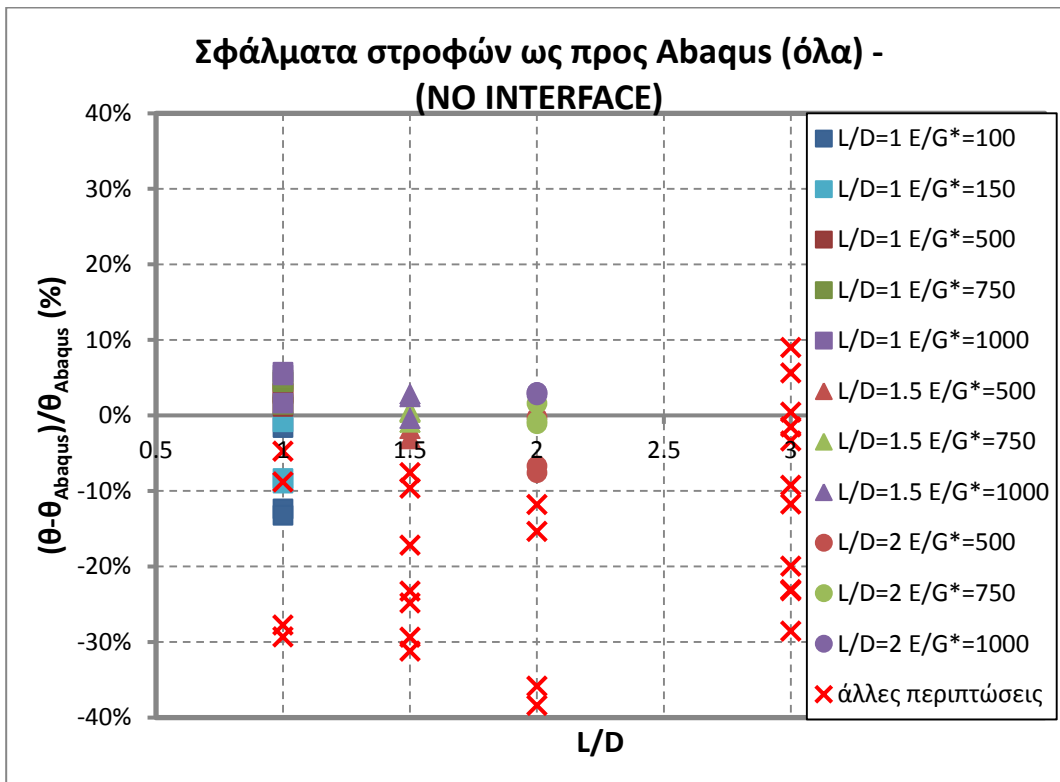
**Πίνακας 4-7.** Πιθανές περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων

L/D	E/G*
1	10
	50
1.5	50
	100
	150
2	100
	150
3	100
	150
	500
	750
	1000

Οι ποσοστιαίες διαφορές παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα:



Σχήμα 4-21. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων (%) ως προς Abaqus με προσθήκη των περιπτώσεων του πίνακα Πίνακας 4-7



Σχήμα 4-22. Διάγραμμα στροφών (%) ως προς Abaqus με προσθήκη των περιπτώσεων του πίνακα Πίνακας 4-7

#### 4.5.2 Πρόταση κριτηρίου ακαμψίας

Τα παραπάνω διαγράμματα αποδεικνύουν ότι οι σχέσεις (4–13) και (4–14) μπορούν να εφαρμοστούν για περισσότερες περιπτώσεις φρεάτων από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθούν. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα εξετάζεται για αποδεκτό σφάλμα 10%. Κατά συνέπεια, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη εξαγωγής μίας σχέσης που θα οριοθετεί το πεδίο εφαρμογής των προτεινόμενων σχέσεων, ως κριτήριο δυσκαμψίας φρεάτων προσαρμοσμένο στη μεθοδολογία.

Σύμφωνα με τους Carter και Kulhawy, η σχέση αυτή είναι ανισοτική και συνδέει το λόγο L/D με τη σχετική δυσκαμψία E/G\*. Η σχέση αυτή είναι της μορφής (κατά τη σχέση (2–7)):

$$\frac{L}{D} \leq \alpha \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^\beta \quad (4-15)$$

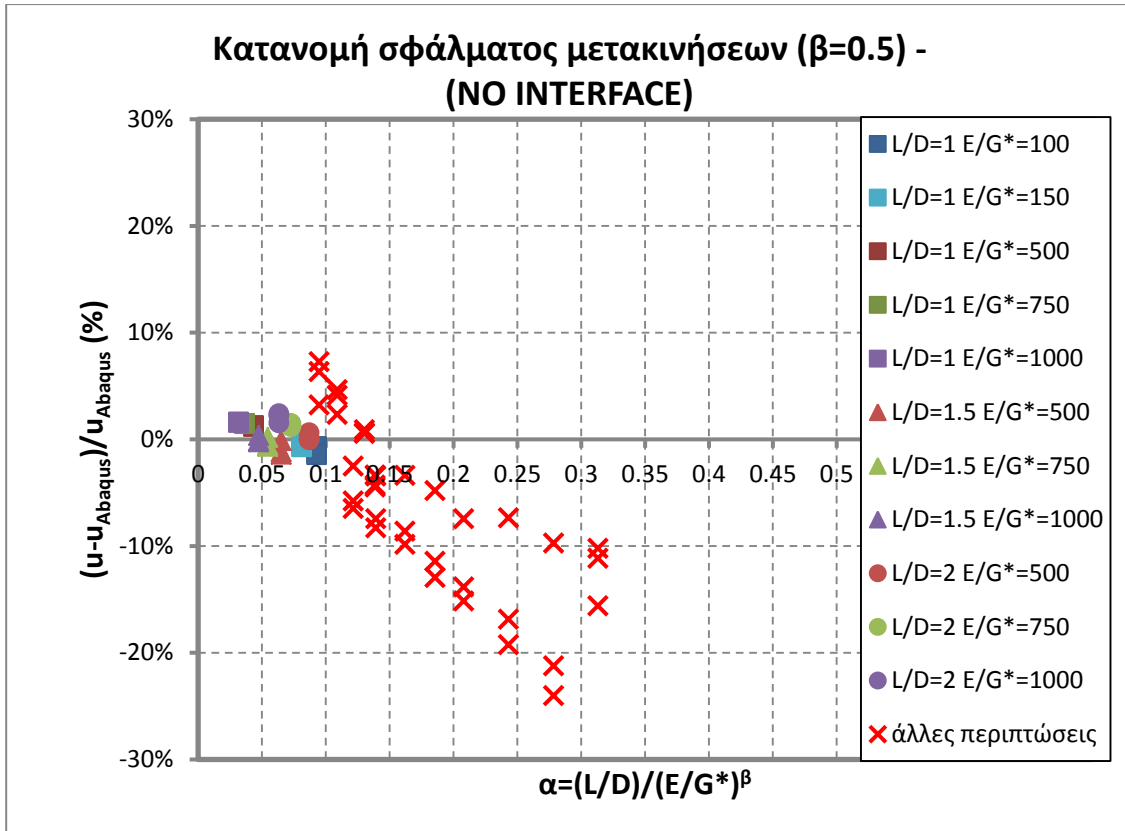
Συνεπώς, αρκεί να προσδιοριστούν οι νέοι συντελεστές (α,β) ώστε να προκύψει το νέο κριτήριο δυσκαμψίας. Οι συντελεστές αυτοί θα καθορίσουν το πεδίο εφαρμογής των σχέσεων υπολογισμού μετατοπίσεων συμπεριλαμβάνοντας ουσιαστικά και περιπτώσεις που παρατηρήθηκαν εντός των ορίων αποδεκτού σφάλματος (10%) στο Σχήμα 4-21 για τις οριζόντιες μετατοπίσεις. Η σχέση (4–15) λύθηκε ως προς το συντελεστή (α) και μορφώθηκε το διάγραμμα σφαλμάτων ως προς το συντελεστή αυτό:

$$\alpha = \frac{\left( \frac{L}{D} \right)}{\left( \frac{E_e}{G^*} \right)^\beta} \quad (4-16)$$

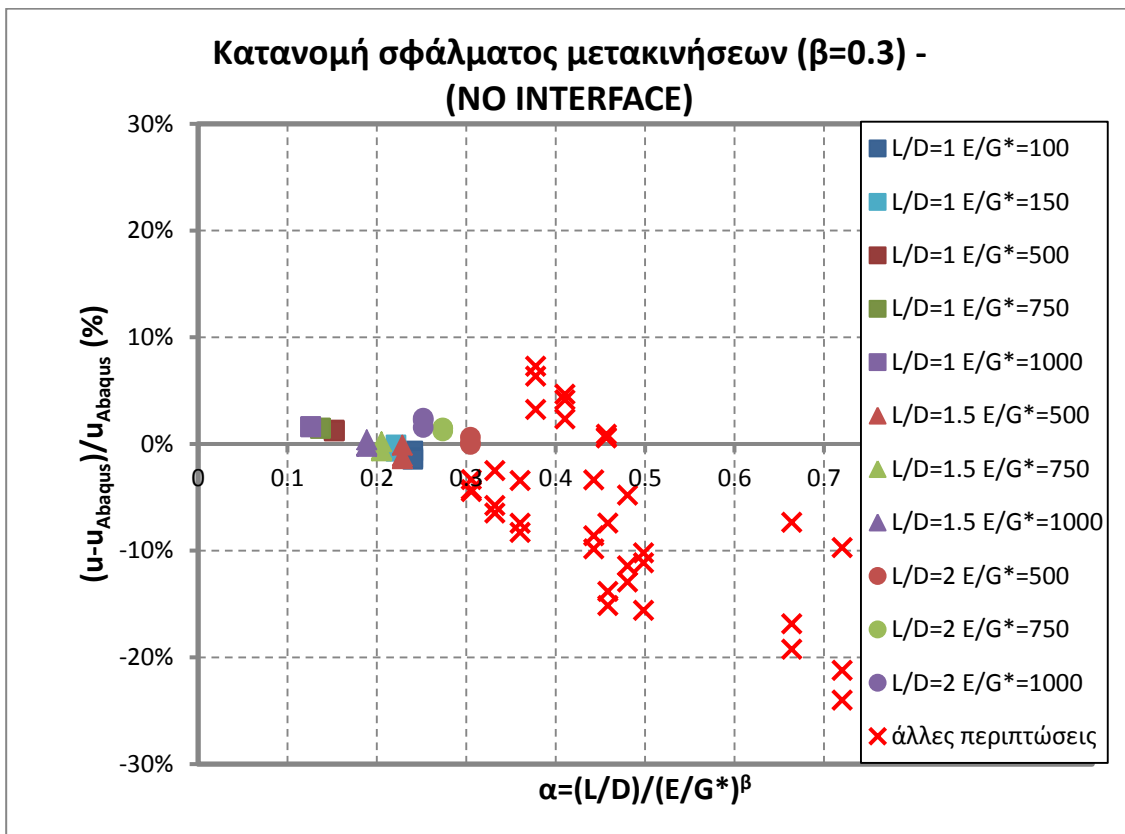
Στη συνέχεια, με δοκιμές τιμών του συντελεστή (β) προσδιορίστηκε το μέγιστο διάστημα συγκέντρωσης περιπτώσεων με σφάλμα μικρότερο του 10%. Το εύρος αυτού του διαστήματος, αποτελεί την τιμή του συντελεστή (α). Η διαδικασία παρουσιάζεται στα επόμενα:

Αρχικά, εκχωρήθηκε τιμή (β=0.5), λόγω ευχρηστίας της ως εκθέτης (τετραγωνική ρίζα). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-23. Παρατηρήθηκε μια καλή ταξινόμηση των περιπτώσεων αυξανόμενου του ποσοστού διαφοράς, ωστόσο ο συντελεστής (α) θεωρήθηκε μικρός (α≈0.17). Όπως προαναφέρθηκε, στόχος ήταν να αυξηθεί το πεδίο εφαρμογής των σχέσεων. Στη συνέχεια, εκχωρήθηκε τιμή (β=0.3), για την οποία παρατηρήθηκε μη ομοιόμορφη κατανομή των σφαλμάτων (υπήρξαν τιμές με σφάλμα μεγαλύτερο του 10% εντός του πεδίου εφαρμογής ή τιμές με σφάλμα μικρότερο του 10% εκτός αυτού - Σχήμα 4-24). Μια τρίτη δοκιμή με β=0.4 έδωσε το αποτέλεσμα που φαίνεται στο Σχήμα 4-25 και συνεπώς προσδιορίστηκε η τιμή του συντελεστή α (α=0.3). Τελικά το φρέαρ θεωρείται άκαμπτο στην προτεινόμενη μεθοδολογία όταν για αυτό ισχύει:

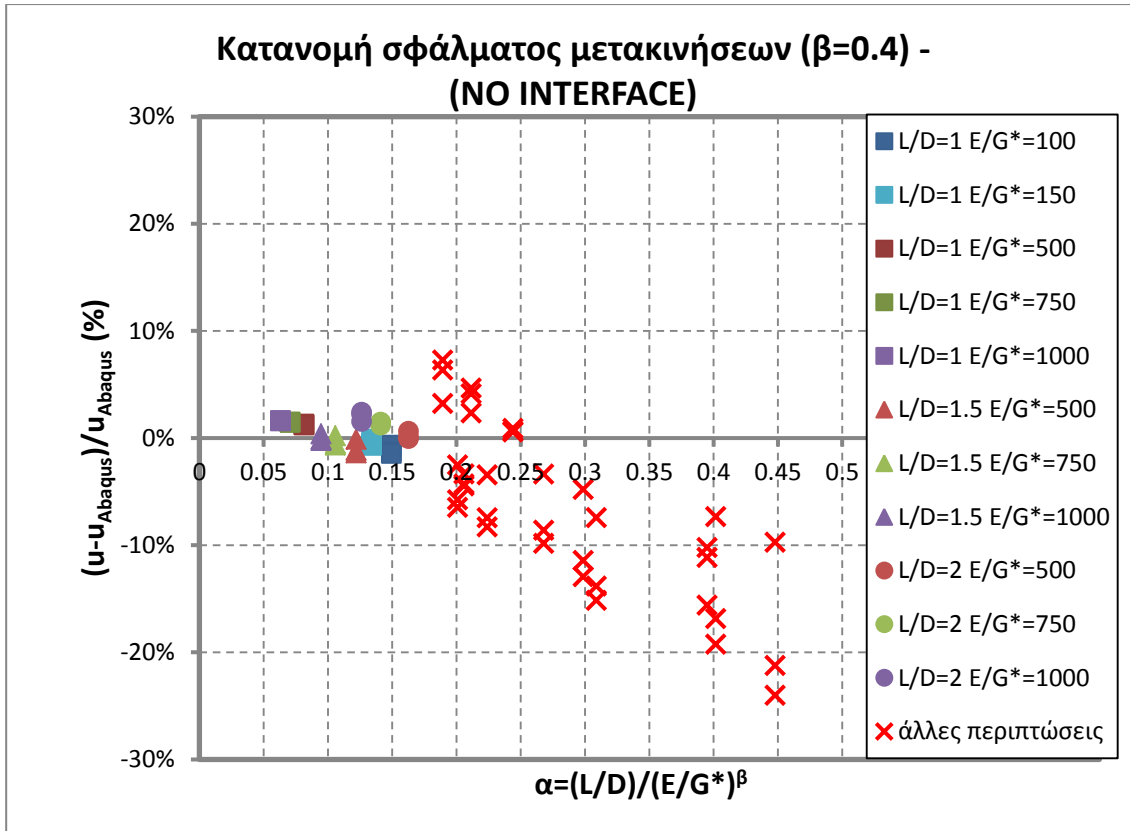
$$\frac{L}{D} \leq 0.25 \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{0.4} \quad (4-17)$$



Σχήμα 4-23. Κατανομή σφάλματος μετακινήσεων ( $\beta=0.5$ )



Σχήμα 4-24. Κατανομή σφάλματος μετακινήσεων ( $\beta=0.3$ )



Σχήμα 4-25. Κατανομή σφάλματος μετακινήσεων ( $\beta=0.4$ )

Σύμφωνα λοιπόν με το παραπάνω κριτήριο εντάσσονται και οι ακόλουθες περιπτώσεις στην κατηγορία των άκαμπτων φρεάτων:

Πίνακας 4-8. Περιπτώσεις φρεάτων που εντάσσονται στην κατηγορία των άκαμπτων

L/D	E/G*
1	50
1.5	150
3	500
	750
	1000

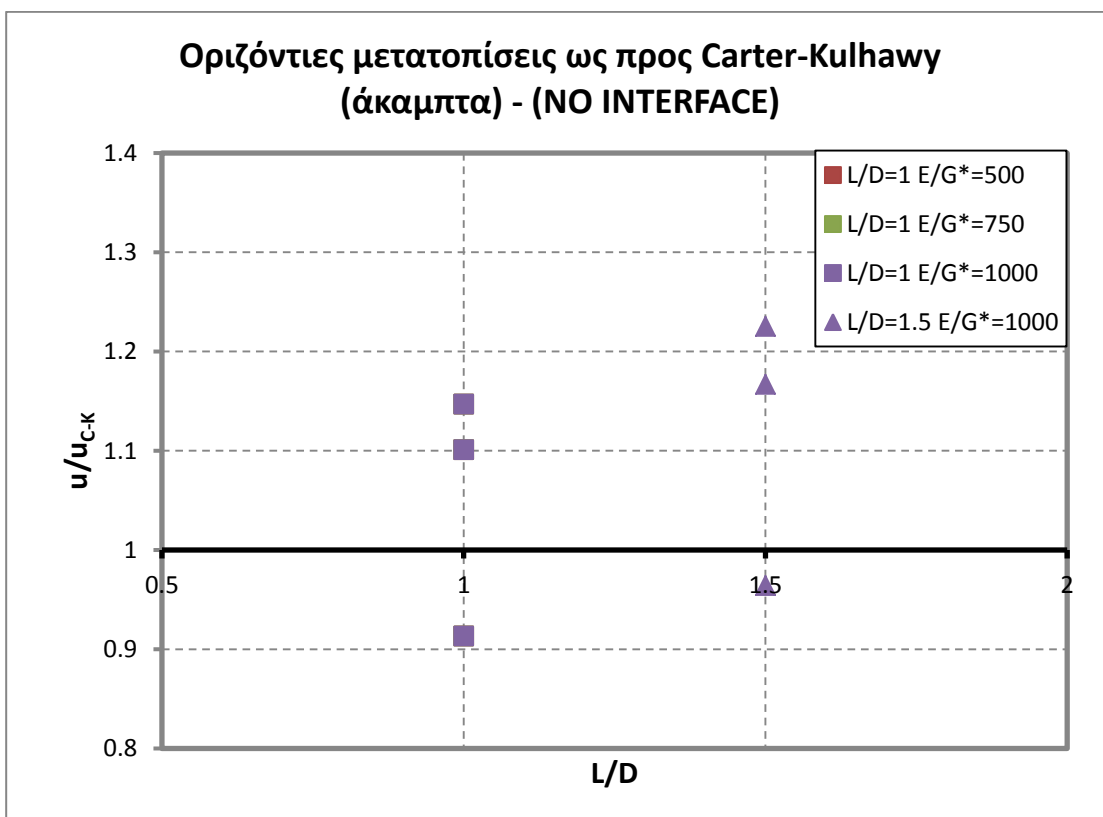
#### 4.5.3 Σύγκριση με τα αποτελέσματα των Carter και Kulhawy

Σε τελικό στάδιο, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των μετακινήσεων και στροφών που προκύπτουν από την εφαρμογή των σχέσεων(4-13) και(4-14) με τα αντίστοιχα από την εφαρμογή των σχέσεων Carter και Kulhawy (2-8) και (2-9) για άκαμπτα φρέατα. Αναλυτικότερα, οι περιπτώσεις που συγκρίθηκαν ήταν αυτές των οποίων τα φρέατα θεωρούνται άκαμπτα και στις δύο μεθοδολογίες (Πίνακας 4-9).

Πίνακας 4-9 Περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων κατά Carter και Kulhawy

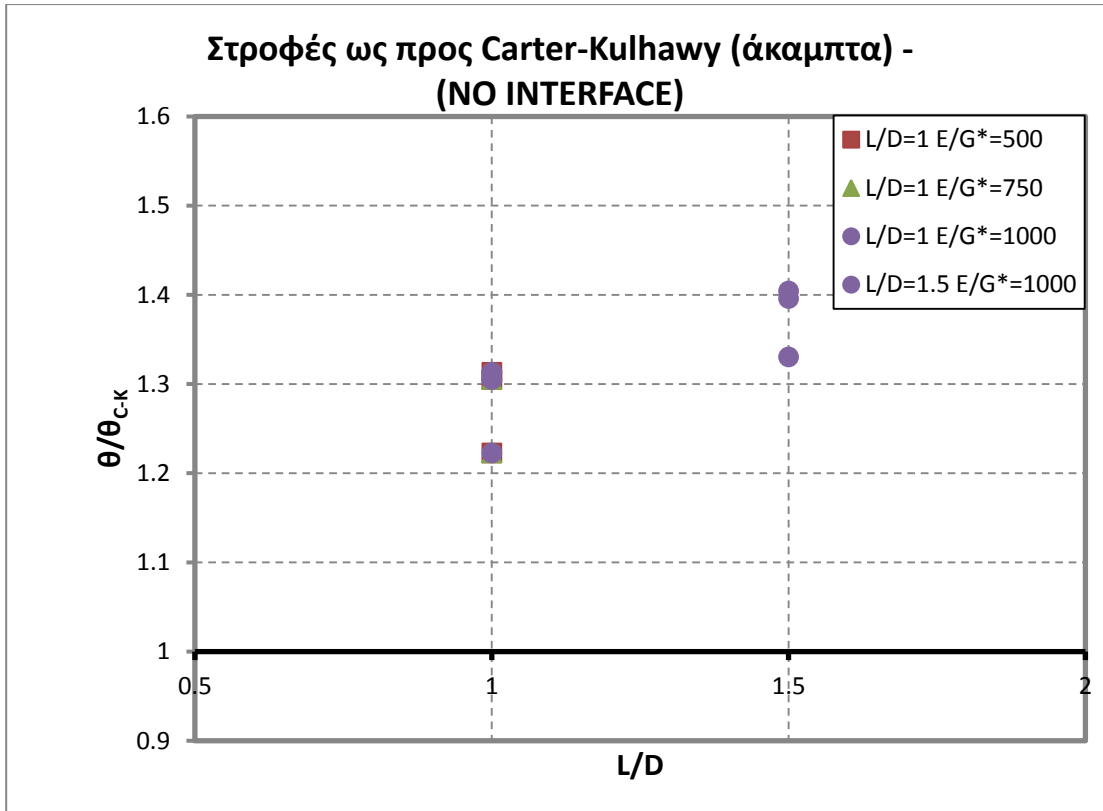
L/D	E/G*
1	500
	750
	1000
1.5	1000

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης μετακινήσεων και στροφών παρουσιάζονται διαγραμματικά στα επόμενα (Σχήμα 4-26 και Σχήμα 4-27):



Σχήμα 4-26. Οριζόντιες μετακινήσεις άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες ως προς Carter-Kulhawy





Σχήμα 4-27. Στροφές άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες ως προς Carter-Kulhawy

#### 4.6 Συμπεράσματα

- Για τον προσδιορισμό των σχέσεων υπολογισμού των μετακινήσεων και στροφών της κεφαλής θεωρήθηκαν ως άκαμπτα φρέατα με λόγο  $L/D=1, 1.5,$  και  $2$  για συγκεκριμένες σχετικές δυσκαμψίες  $E/G^*$  (Πίνακας 4-5). Δε συμπεριλήφθηκαν φρέατα με  $L/D=3$  λόγω ενδείξεων από την παραμορφωμένη τους κατάσταση ότι συμπεριφέρονται ως εύκαμπτα.
- Οι προτεινόμενες σχέσεις εφαρμόζονται και σε φρέατα που δε θεωρήθηκαν άκαμπτα εξ' αρχής, όπως διαπιστώθηκε στην παράγραφο 4.5.2.
- Στο εξής, φρέατα των οποίων ο λόγος  $L/D$  ικανοποιεί την ανισοτική σχέση (4-17):  $\frac{L}{D} \leq 0.25 \left(\frac{E}{G^*}\right)^{0.4}$  θα θεωρούνται άκαμπτα για την εφαρμογή των σχέσεων υπολογισμού μετακινήσεων και στροφών που προτείνονται στο παρόν κεφάλαιο. Η συγκεκριμένη σχέση αποτελεί το κριτήριο δυσκαμψίας φρεάτων πακτώσεως σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία.
- Συγκριτικά με τη μεθοδολογία των Carter και Kulhawy, τα αποτελέσματα των μετακινήσεων κεφαλής που προκύπτουν από την προτεινόμενη μεθοδολογία παρουσιάζουν διαφορές που αγγίζουν το 23%. Για τις στροφές, το ποσοστό των συγκεκριμένων διαφορών κυμαίνεται μεταξύ 20 και 40%.

# 5 Σχέσεις υπολογισμού μετατοπίσεων με διεπιφάνειες

## 5.1 Εισαγωγή – Χαρακτηριστικά αναλύσεων

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η εξαγωγή σχέσεων από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, από τις οποίες θα υπολογίζονται οι μετατοπίσεις και οι στροφές κεφαλής άκαμπτων φρέατων υπό εγκάρσια φόρτιση συνυπολογίζοντας την αλληλεπίδραση φρέατος-βραχόμαζας μέσω κατάλληλων διεπιφανειών. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3.3.3.2, οι διεπιφάνειες αναφέρονται στην επαφή της παράπλευρης επιφάνειας και της βάσης του φρέατος με την περιβάλλουσα βραχόμαζα. Αρχικά, αναφέρονται οι παραδοχές και οι νόμοι που διέπουν τη συμπεριφορά των διεπιφανειών (ολίσθηση και αποκόλληση). Στη συνέχεια, επαναπροσδιορίζεται η έννοια του «άκαμπτου» φρέατος από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων ώστε να διαπιστωθεί αν υπάρχουν διαφορές από τη θεώρηση δυσκαμψίας του Κεφαλαίου 4. Για τις περιπτώσεις απολύτως άκαμπτων φρέατων υπολογίζονται οι κατάλληλοι συντελεστές και συναρτήσεις του λόγου  $L/D$  εξάγονται οι σχέσεις υπολογισμού οριζόντιων μετακινήσεων και στροφών. Τέλος, συγκρίνονται οι τιμές της οριζόντιας μετατόπισης και στροφής κεφαλής εφαρμόζοντας τις νέες σχέσεις με τις αντίστοιχες τιμές των αναλύσεων ώστε να προσδιοριστεί το κριτήριο δυσκαμψίας των φρέατων.

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν όλο το φάσμα των περιπτώσεων που έχουν αναφερθεί, δηλαδή φρέατα διαμέτρου  $D = 5\text{m}$  με λόγο μήκους προς διάμετρο  $L/D = 1, 1.5, 2$  και  $3$  με τιμή, σε βραχόμαζες με σχετική δυσκαμψία  $E/G^* = 10, 50, 100, 150, 500, 750,$  και  $1000$  ως προς το μέτρο ελαστικότητας του φρέατος (σκυροδέματος)  $E = 25\text{GPa}$ . Για καθεμία περίπτωση πραγματοποιήθηκαν τρεις (3) αναλύσεις οριζόντιου φορτίου  $H = 20\text{MN}$  και ροπής  $M = 0, 300$  και  $600\text{MNm}$  αντίστοιχα (εκκεντρότητα  $e = 0, 15, 30\text{m}$ ). Για τις αναλύσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώματα με προσδιορισμό αποκόλλησης και σχετικής ολίσθησης διεπιφανειών. Επιπρόσθετα, για τη λήψη αποτελεσμάτων μετατοπίσεων σε όλο το μήκος του κεντρικού άξονα του φρέατος ομαδοποιήθηκαν οι κεντρικοί κόμβοι ανά  $0.5\text{m}$ .

## 5.2 Παραδοχές

Η μελέτη της συμπεριφοράς του προσομοιώματος φρέατος-βραχόμαζας εμπεριέχει τη θεώρηση παραδοχών που αφορούν τη διεπιφάνεια και την παραμορφωσιμότητα της διατομής του φρέατος. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε όμοια μετατόπιση βραχόμαζας και φρέατος στα σημεία επαφής τους. Ως αποτέλεσμα, η μετατόπιση της βραχόμαζας που βρίσκεται σε επαφή με το φρέαρ ισούται με εκείνη της παρειάς του φρέατος. Η θεώρηση αυτή αφορά την πλευρά του φρέατος που προκαλεί θλίψη της βραχόμαζας λόγω της εγκάρσιας φόρτισης και άρα ανάπτυξη αντιδράσεων από αυτήν. Φυσικά, στην πλευρά του φρέατος που αποκολλάται από τη βραχόμαζα δεν ισχύει η παραπάνω παραδοχή, καθώς η βραχόμαζα αδυνατεί να παραλάβει εφελκυσμό.

Μια ακόμα παραδοχή αφορά τη διατομή της κεφαλής του φρέατος. Θεωρήθηκε κοινή μετατόπιση για όλα τα σημεία της διατομής, ώστε να λαμβάνονται ρεαλιστικά αποτελέσματα για

τις μετακινήσεις και τις στροφές. Η συγκεκριμένη διαδικασία προσομοίωσης της παραδοχής έχει περιγραφεί στην ενότητα 3.3.3.1. Στις υπόλοιπες διατομές του φρέατος, λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας του, δεν υπήρξε ανάγκη προσομοίωσης της απαραμόρφωτης διατομής, αφού οι παραμορφώσεις της είναι ούτως ή άλλως πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες της βραχόμαζας.

### 5.3 Διεπιφάνεια φρέατος-βραχόμαζας

#### 5.3.1 Γενικά

Στα τελικά προσομοιώματα ορίστηκε ο νόμος τριβής και αποκόλλησης της διεπιφάνειας φρέατος-βραχόμαζας, με σκοπό τον προσδιορισμό της αντίστασης πλευρικής τριβής και των συνθηκών μετάδοσης ορθών τάσεων αντίστοιχα στην παράπλευρη επιφάνεια και τη βάση του φρέατος. Ακολουθεί περιγραφή της διαδικασίας για την επιλογή των κατάλληλων εξισώσεων υπολογισμού της πλευρικής τριβής που αναπτύσσεται στο φρέαρ και το καθεστώς αποκόλλησής του από την περιβάλλουσα βραχόμαζα κατά την επιβολή της εγκάρσιας φόρτισης.

#### 5.3.2 Νόμος τριβής διεπιφάνειας φρέατος-βραχόμαζας

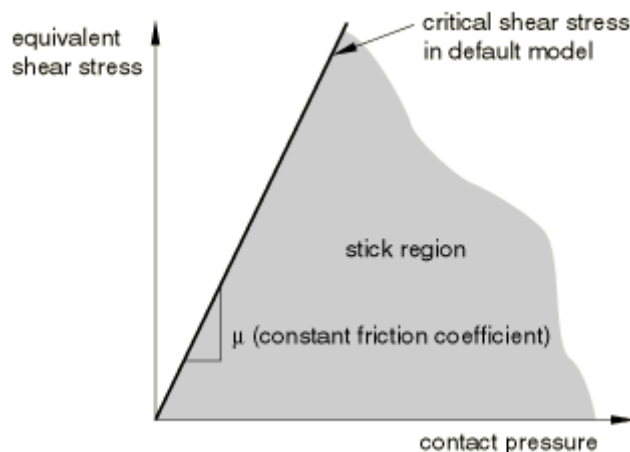
Ο υπολογισμός της οριακής αντίδρασης πλευρικής τριβής πραγματοποιείται με τον ορισμό συγκεκριμένου νόμου της τριβής στη διεπιφάνεια φρέατος-βραχόμαζας. Το προσομοίωμα σε άξονες ορθής-διατμητικής τάσης ( $p$ - $\tau$ ) αποτελείται από έναν κλάδο (Σχήμα 5-1), ο οποίος προσδιορίζεται από την εξίσωση (5-1):

$$\tau = \mu \sigma_h \quad (5-1)$$

όπου

$\mu$ : ο συντελεστής τριβής και

$\sigma_h$ : η εγκάρσια τάση επί της διατομής



Σχήμα 5-1. Περιοχή των τιμών τριβής της εξίσωσης (5-1 για σταθερό συντελεστή τριβής ( $\mu$ ))

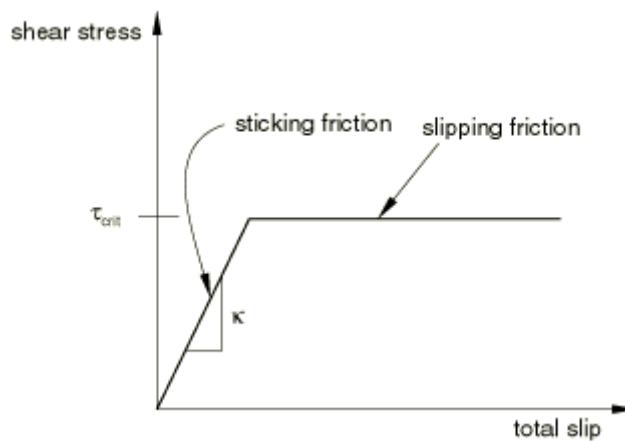
Επιπρόσθετα, προσδιορίστηκε ο νόμος ολίσθησης της διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια (Slip- $\tau$ ). Η τιμή της μετατόπισης, η οποία σηματοδοτεί τη μετάβαση από τον κλάδο

στατικής τριβής στον κλάδο τριβής ολίσθησης ορίζεται ως ελαστική ολίσθηση (Elastic Slip) στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων. Επειδή στην παρούσα εργασία η διερεύνηση των διεπιφανειών δεν αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης, αλλά εργαλείο για τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων, εκχωρήθηκε η τιμή του 1mm ως τιμή ελαστικής ολίσθησης. Η συγκεκριμένη τιμή ορίζει την κλίση της ελαστικής γραμμής του διαγράμματος τριβής-ολίσθησης άρα και τη δυσκαμψία της διεπιφάνειας φρέατος-βραχόμαζας. Ο συντελεστής τριβής ( $\mu$ ) πολλαπλασιαζόμενος με την οριζόντια ολική τάση ( $\sigma_n$ ) υπολογίζει τη ζητούμενη τιμή τριβής ολίσθησης και είναι συνάρτηση της γωνίας τριβής της βραχόμαζας. Συγκεκριμένα,

$$\mu = \tan \delta \quad (5-2)$$

όπου

$\delta = (2/3)\phi'$  σύμφωνα και με την εξίσωση (3-2)

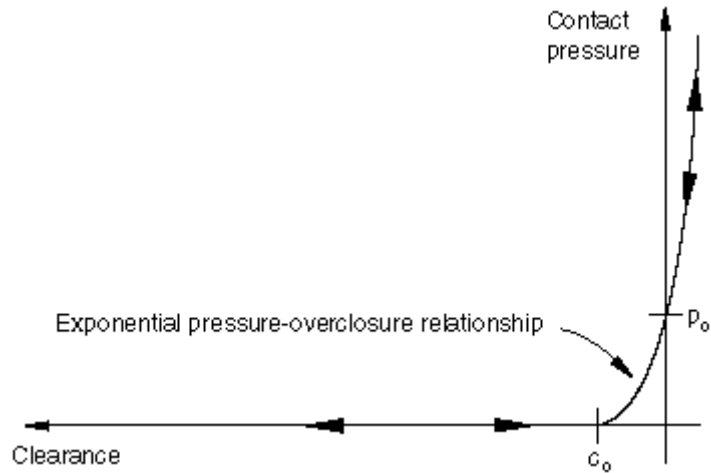


Σχήμα 5-2. Ελαστοπλαστικό διάγραμμα ολίσθησης-τριβής της διεπιφάνειας φρέατος-βραχόμαζας

### 5.3.3 Νόμος αποκόλλησης διεπιφάνειας φρέατος-βραχόμαζας

Στα δεδομένα του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων καθορίζεται μια αρχική απόσταση  $c_0$  στην οποία θεωρείται ότι η επιφάνεια του φρέατος έρχεται σε επαφή με αυτή της βραχόμαζας. Συνεπώς, η μετάδοση τάσεων μεταξύ των δύο επιφανειών ξεκινάει όταν η μεταξύ τους απόσταση λαμβάνει την τιμή  $h=c_0$ . Περαιτέρω μείωση της τιμής αυτής αυξάνει την τάση που μεταδίδεται μέσω της διεπιφάνειας. Η πίεση παίρνει την τιμή  $p_0$  όταν η απόσταση των δύο επιφανειών μηδενιστεί ( $h=0$ ) (Σχήμα 5-3). Στην παρούσα διπλωματική εργασία ορίστηκε τάση  $p_0=2\text{kPa}$  και απόσταση  $c_0=10^{-6}\text{m}$ .

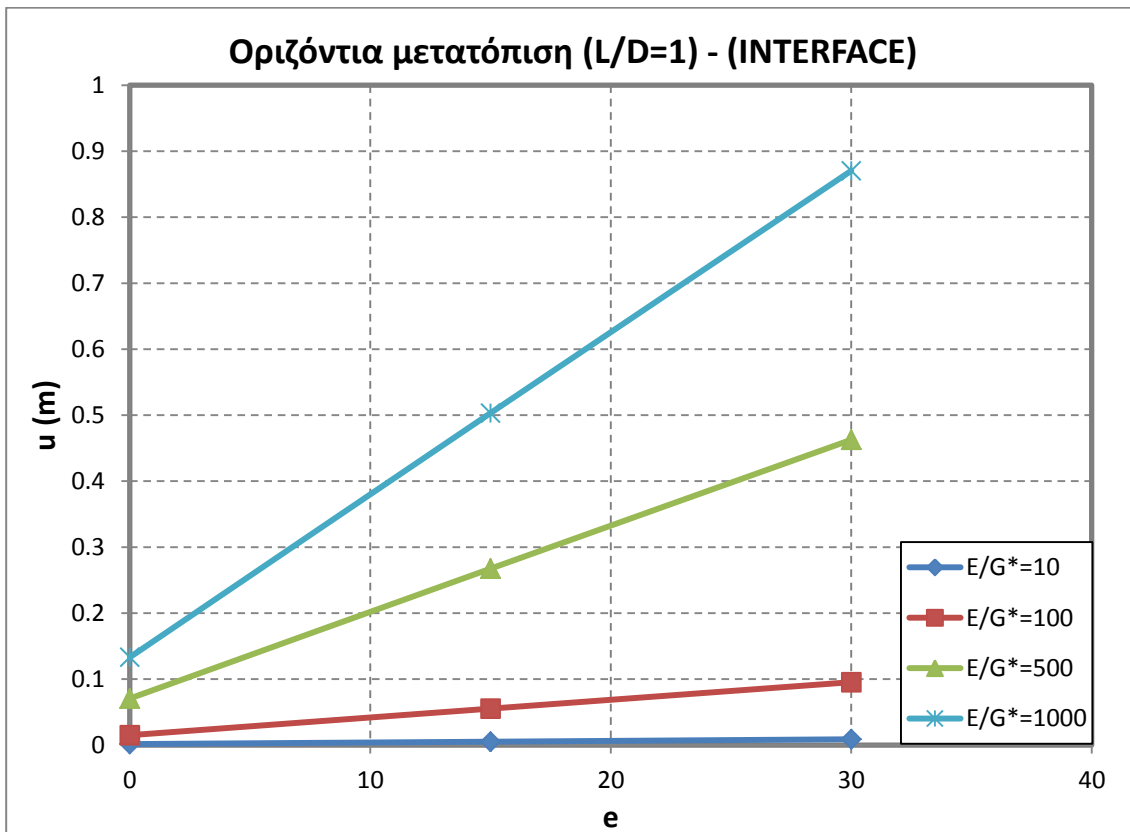
Στο Σχήμα 5-3 παρουσιάζεται η σχέση σύμφωνα με την οποία ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζει την ορθή τάση στη διεπιφάνεια για συγκεκριμένες τιμές της απόστασης των επιφανειών φρέατος-βραχόμαζας. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στην τάση που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια, ενώ ο οριζόντιος στην αποκόλληση για τιμές μεγαλύτερες του  $c_0$ . Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη σχέση πίεσης-αποκόλλησης είναι η αποφυγή της αριθμητικής αστάθειας που προκύπτει στις αναλύσεις για νόμο πίεσης-αποκόλλησης που μηδενίζει την πίεση επαφής ακριβώς τη στιγμή της αποκόλλησης.



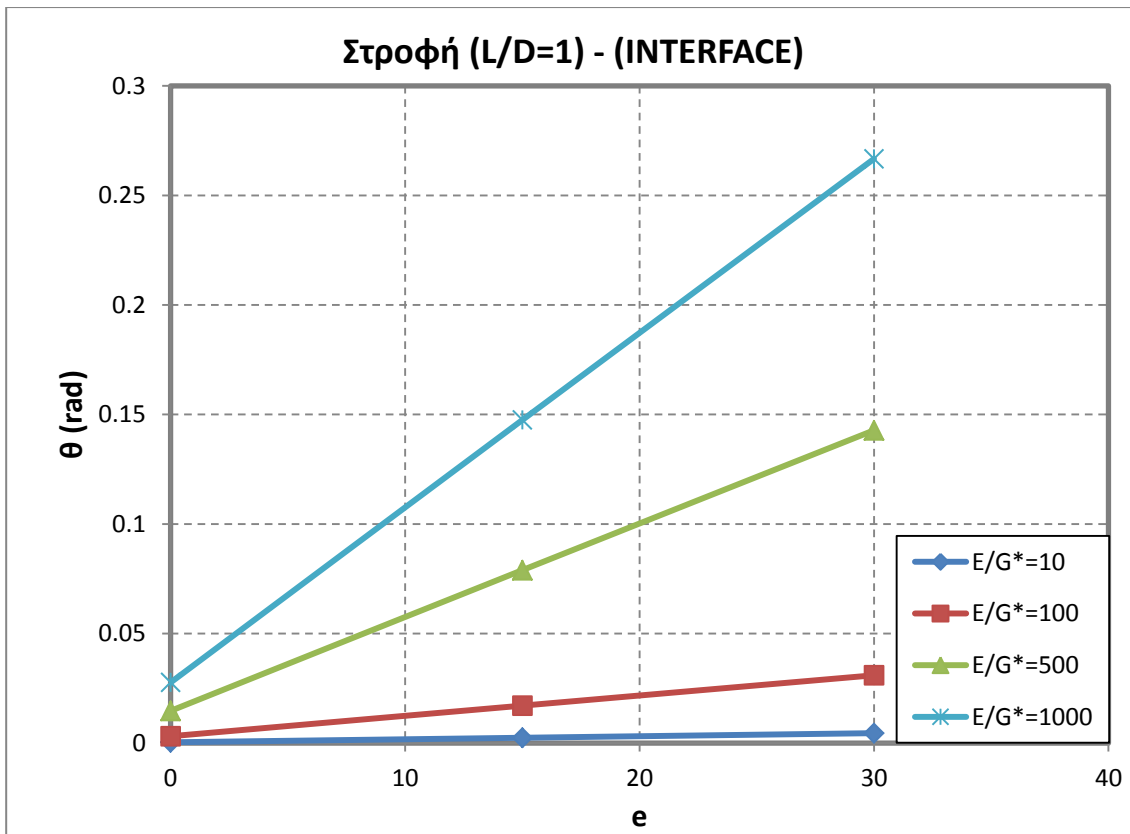
Σχήμα 5-3. Διάγραμμα υπερκάλυψης-πίεσης της διεπιφάνειας φρέατος-βραχόμαζας

#### 5.4 Ο ρόλος της εκκεντρότητας

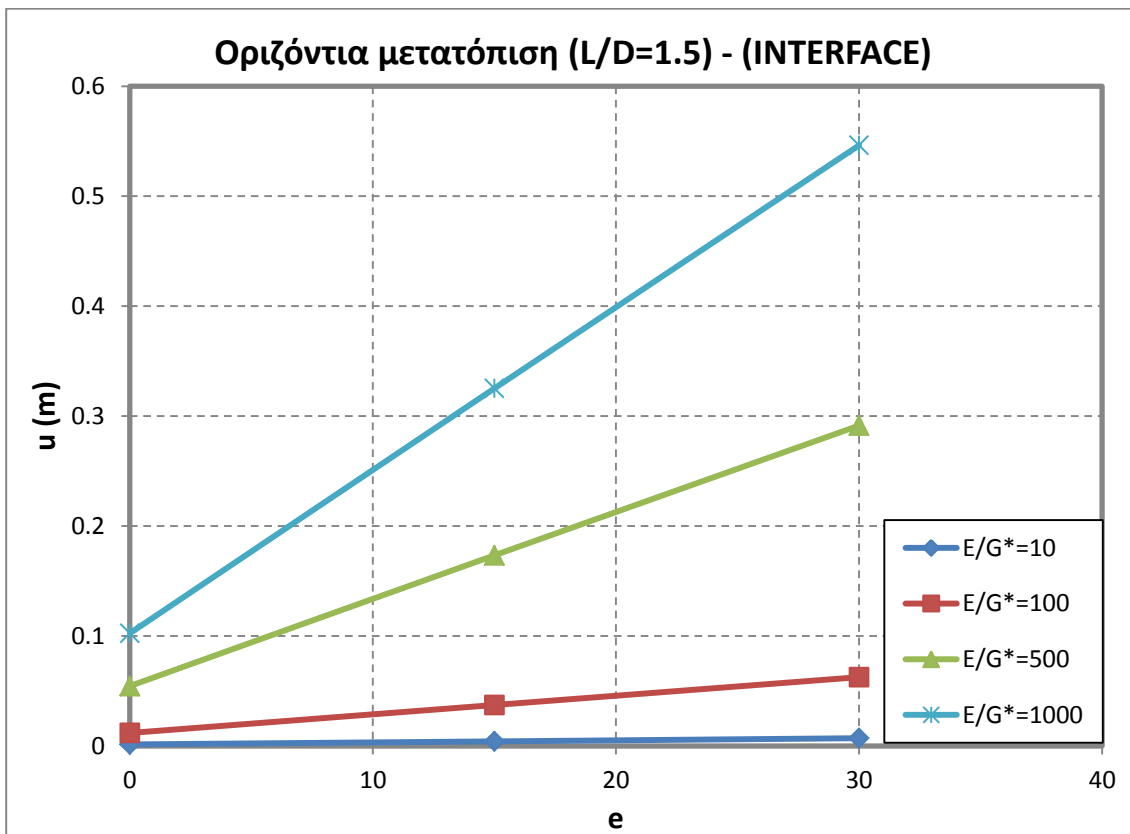
Για όλο το εύρος των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με διεπιφάνειες, σχεδιάστηκαν διαγραμματικά οι τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων και των στροφών κεφαλής του φρέατος συναρτήσει της εκκεντρότητας. Στα διαγράμματα Σχήμα 5-4 έως Σχήμα 5-11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής για ενδεικτικές τιμές σχετικής δυσκαμψίας  $E/G^* = 10, 100, 500, 1000$ :



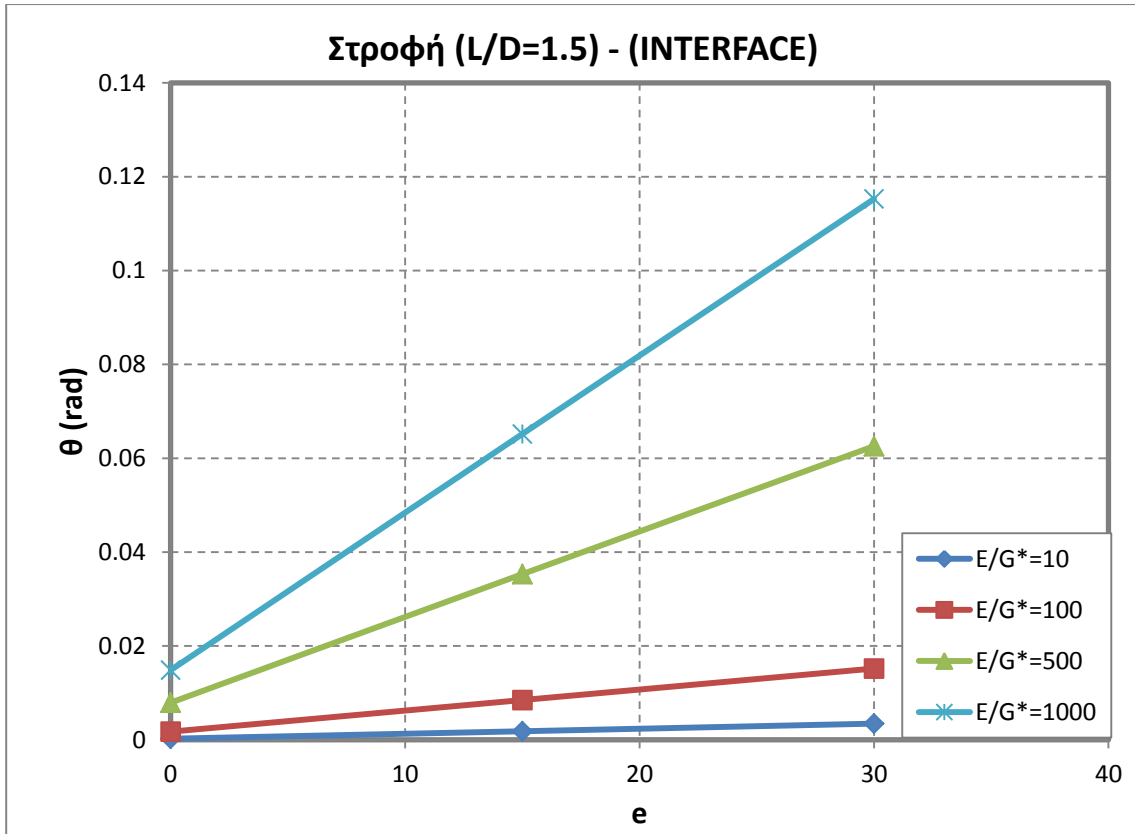
Σχήμα 5-4. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων συναρτήσει της εκκεντρότητας ( $L/D=1$ )



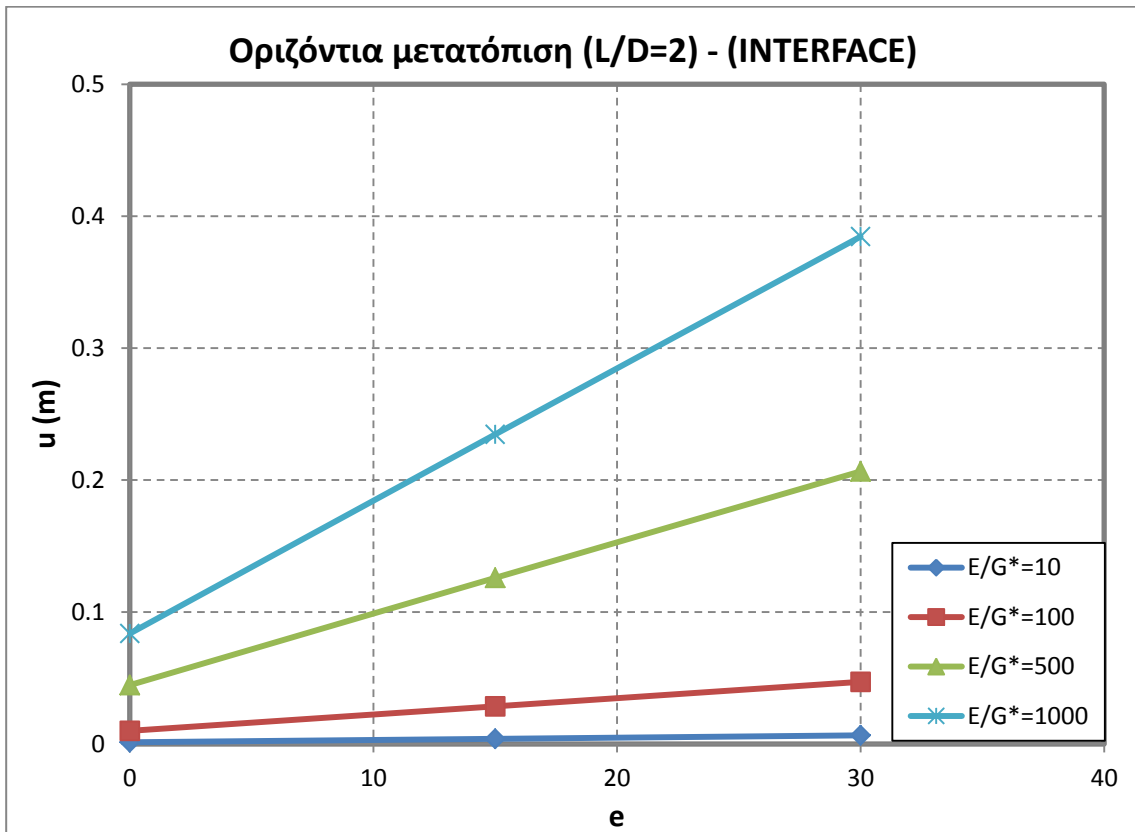
Σχήμα 5-5. Διάγραμμα στροφών συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=1)



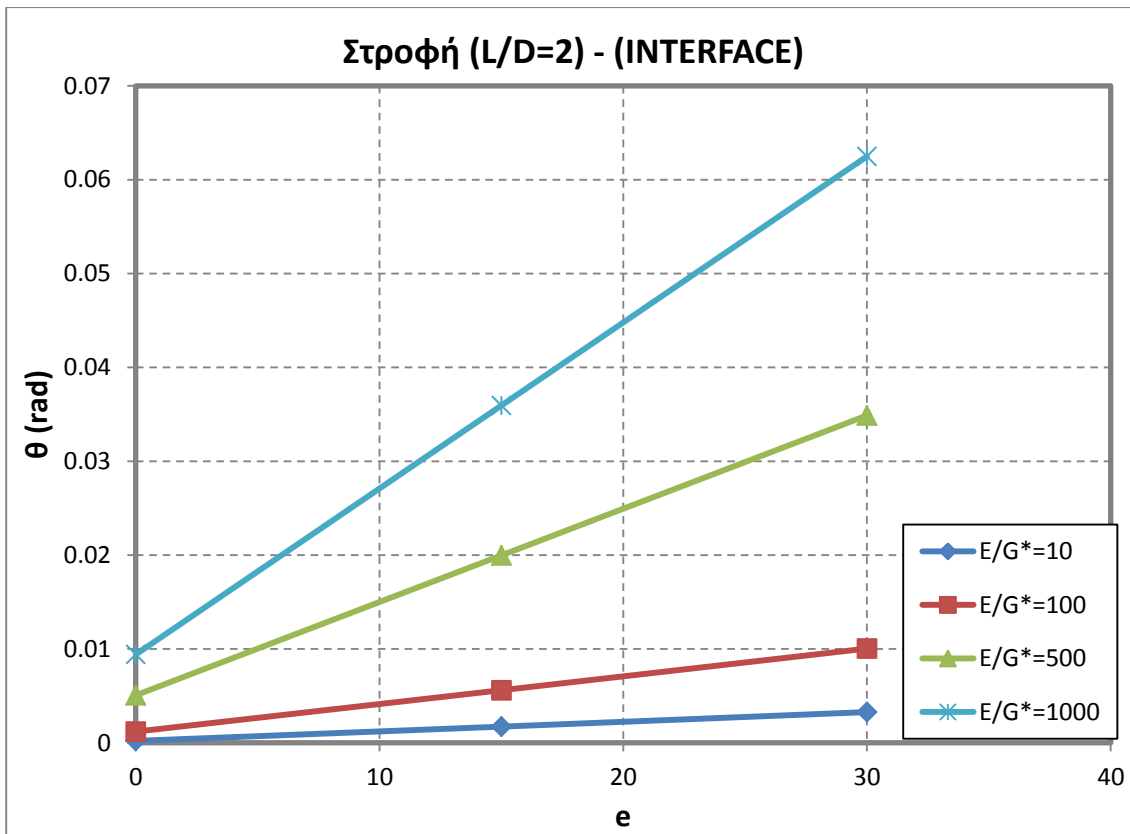
Σχήμα 5-6. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=1.5)



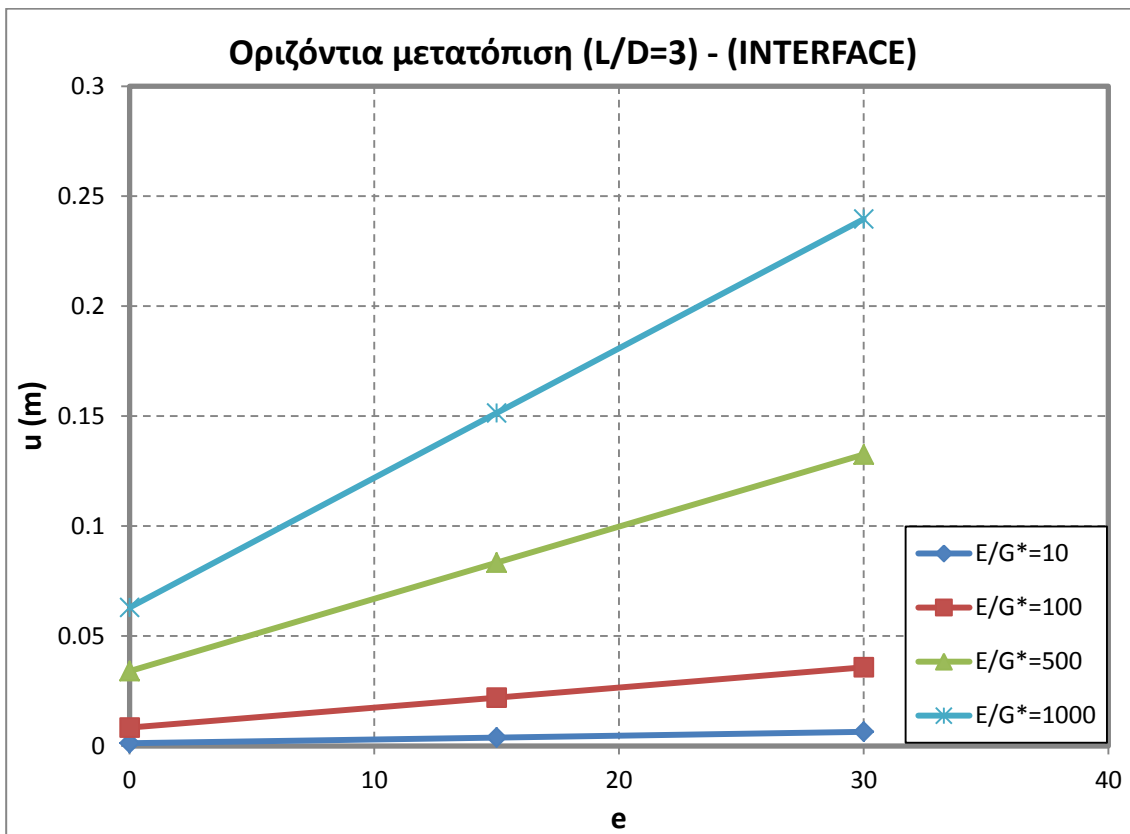
Σχήμα 5-7. Διάγραμμα στροφών συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=1.5)



Σχήμα 5-8. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=2)

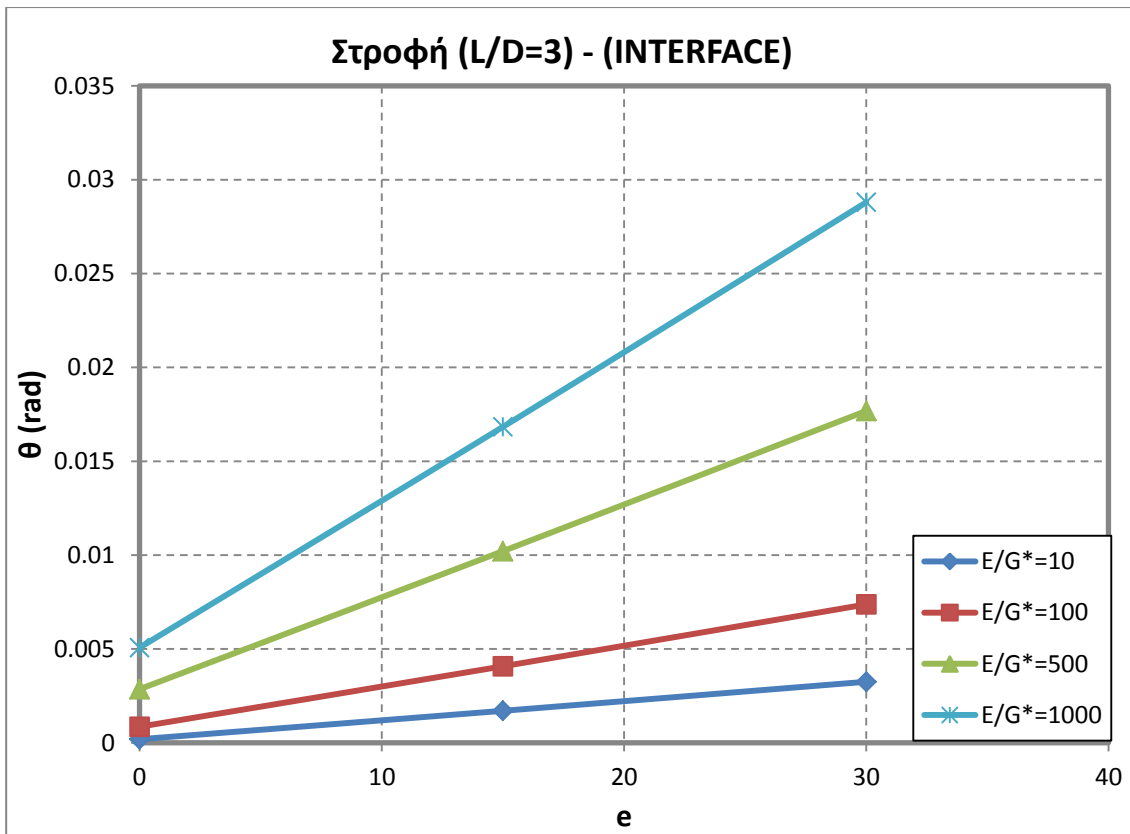


Σχήμα 5-9. Διάγραμμα στροφών συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=2)



Σχήμα 5-10. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων συναρτήσει της εκκεντρότητας (L/D=3)





Σχήμα 5-11. Διάγραμμα στροφών συναρτήσει της εκκεντρότητας ( $L/D=3$ )

#### Παρατήρηση:

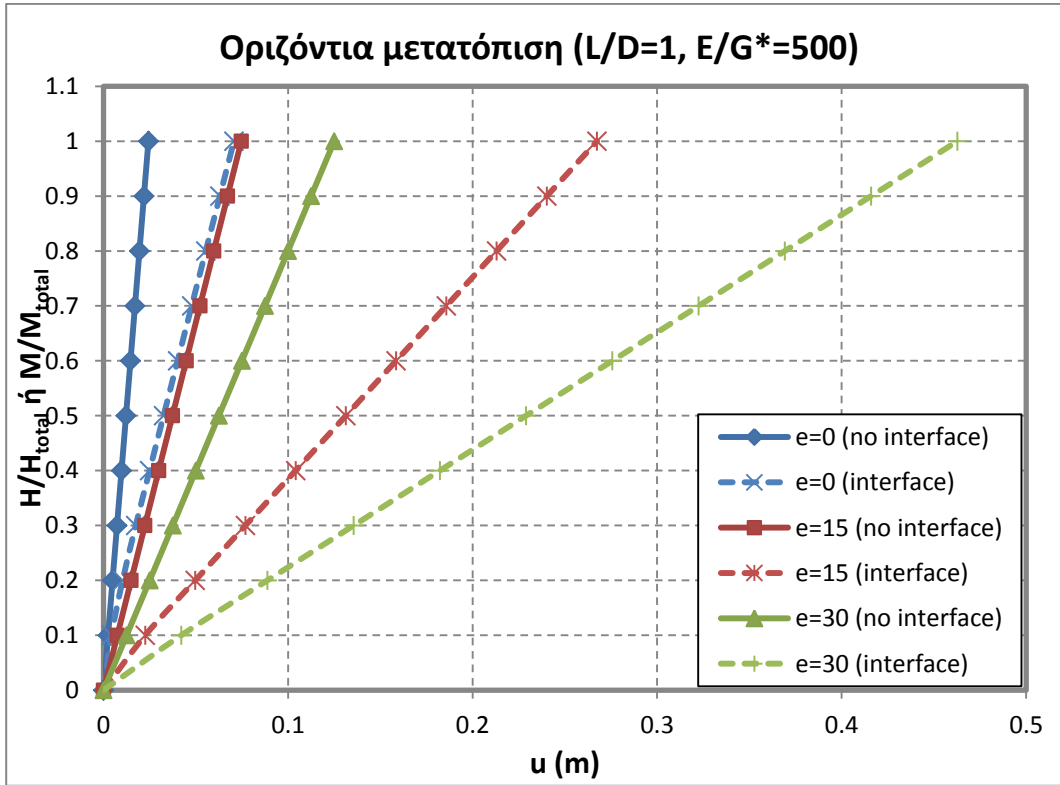
Η αύξηση των οριζόντιων μετατοπίσεων είναι γραμμική με την αύξηση της εκκεντρότητας, όπως και στις αναλύσεις χωρίς διεπιφάνειες. Συνεπώς, αναφερόμαστε σε ελαστική απόκριση των φρεάτων και οι σχέσεις που θα προκύψουν από τα αποτελέσματα των αναλύσεων μπορούν να εφαρμοστούν για οποιοσδήποτε τιμές οριζόντιου φορτίου μικρότερες του  $H=20MN$  και εκκεντρότητας μικρότερες από  $e=30m$ . Η αποκόλληση ή μη των διεπιφανειών δεν επηρεάζει πρακτικά τη γραμμικότητα της φόρτισης, δεδομένου ότι εξετάζεται ο ελαστικός κλάδος του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης.

Σημειώνεται, ότι στα διαγράμματα απεικονίστηκαν οι οριακές τιμές της σχετικής ακαμψίας ( $E/G^*=10, 1000$ ) και ενδεικτικές ενδιάμεσες ( $E/G^*=100, 500$ ). Κατά συνέπεια, αντίστοιχη γραμμική κατανομή ισχύει και για όλες τις ενδιάμεσες τιμές που δε συμπεριλήφθηκαν.

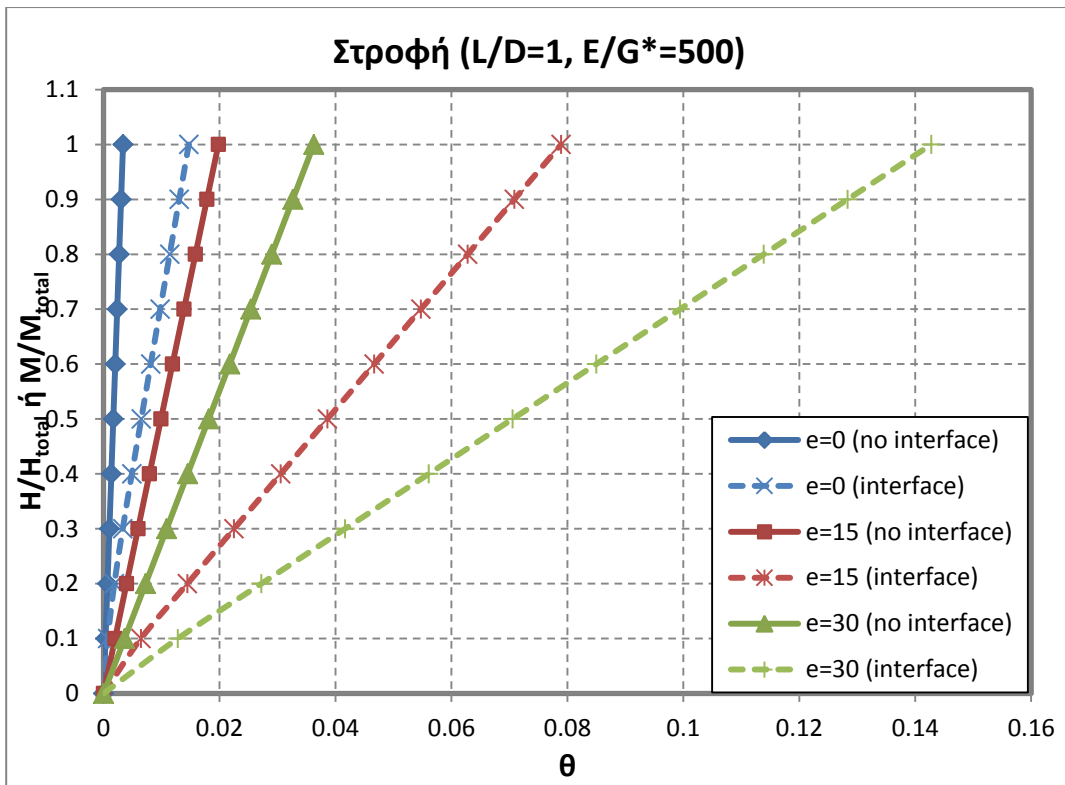
### 5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλύσεων με διεπιφάνεια και χωρίς

Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η συμπεριφορά των διεπιφανειών στη διάρκεια της φόρτισης. Μελετάται τόσο η έναρξη και το μέγεθος όσο και η εξέλιξη της σχετικής ολίσθησης και της αποκόλλησης των διεπιφανειών. Για το σκοπό αυτό, η διαδικασία της φόρτισης έχει επιμεριστεί σε δέκα (10) βήματα με ανάλογο ποσοστό εγκάρσιας φόρτισης ανά βήμα. Για κάθε βήμα της φόρτισης λαμβάνονται αποτελέσματα οριζόντιας μετακίνησης και στροφής στην κεφαλή. Τα αποτελέσματα αυτά, σχεδιάζονται στα επόμενα διαγράμματα συναρτήσει του οριζόντιου συγκεντρωμένου φορτίου για όλες τις τιμές της εκκεντρότητας. Στον κατακόρυφο άξονα

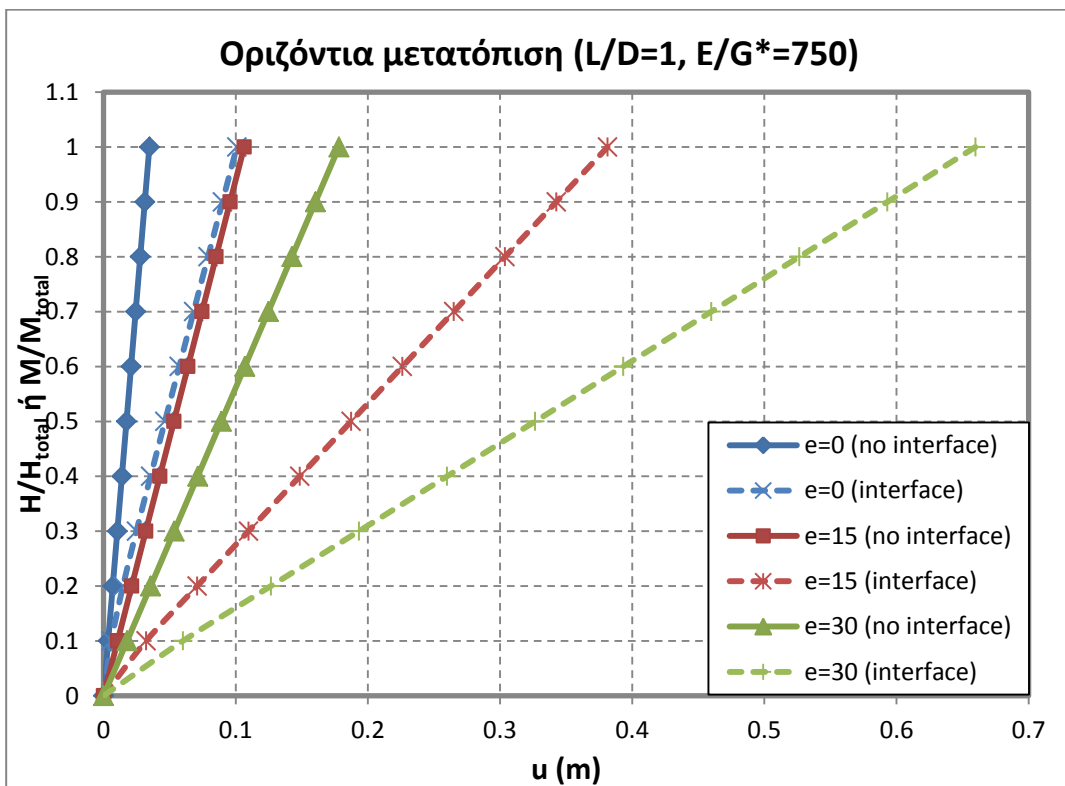
επιλέχθηκε να τοποθετηθεί το ποσοστό της φόρτισης, αφού όπως διαπιστώθηκε και στην ενότητα 5.4, η αύξηση των παραμορφώσεων είναι γραμμική με την αύξηση του φορτίου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα αυτά για τα φρέατα με  $L/D=1$  και 2 και για τιμές της σχετικής δυσκαμψίας  $E/G^*=500, 750, 1000$ .



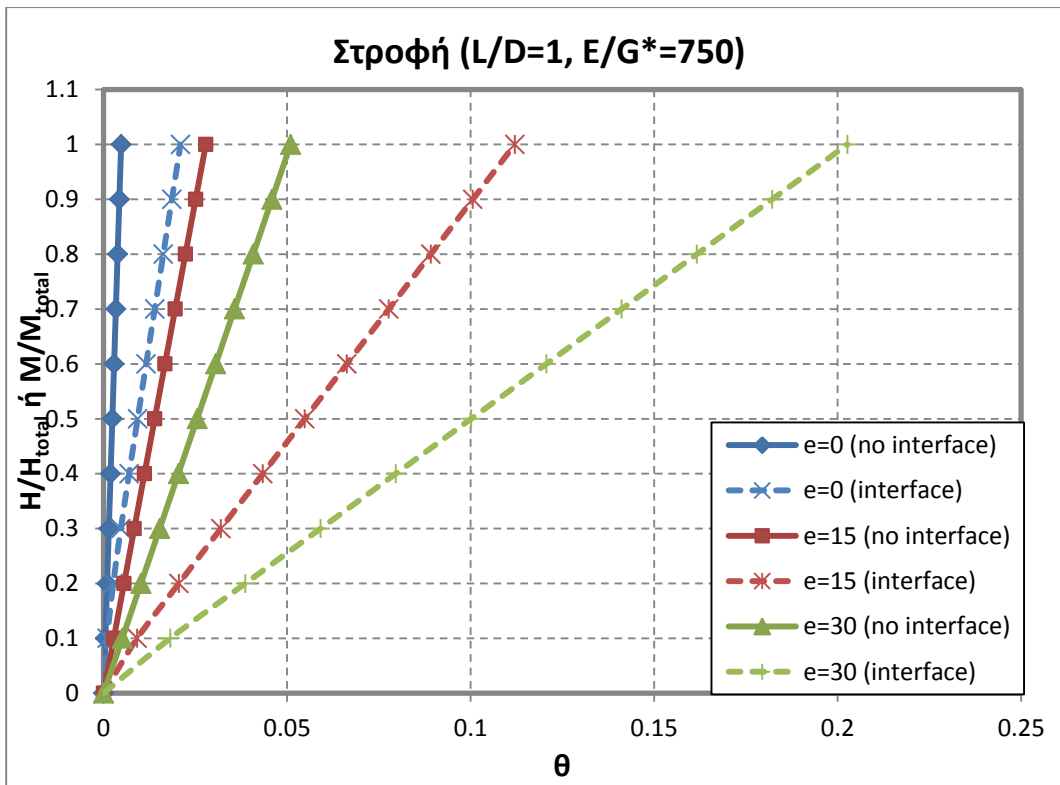
Σχήμα 5-12. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=1$ ,  $E/G^*=500$ )



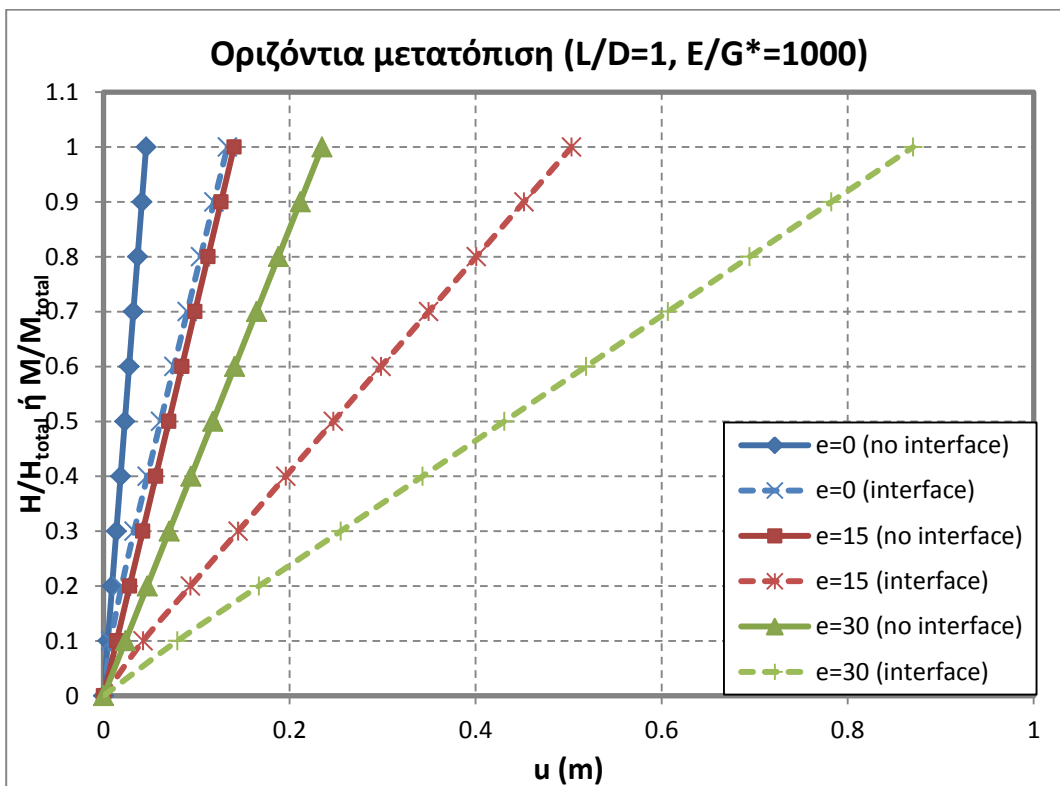
Σχήμα 5-13. Διάγραμμα στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες (L/D=1, E/G\*=500)



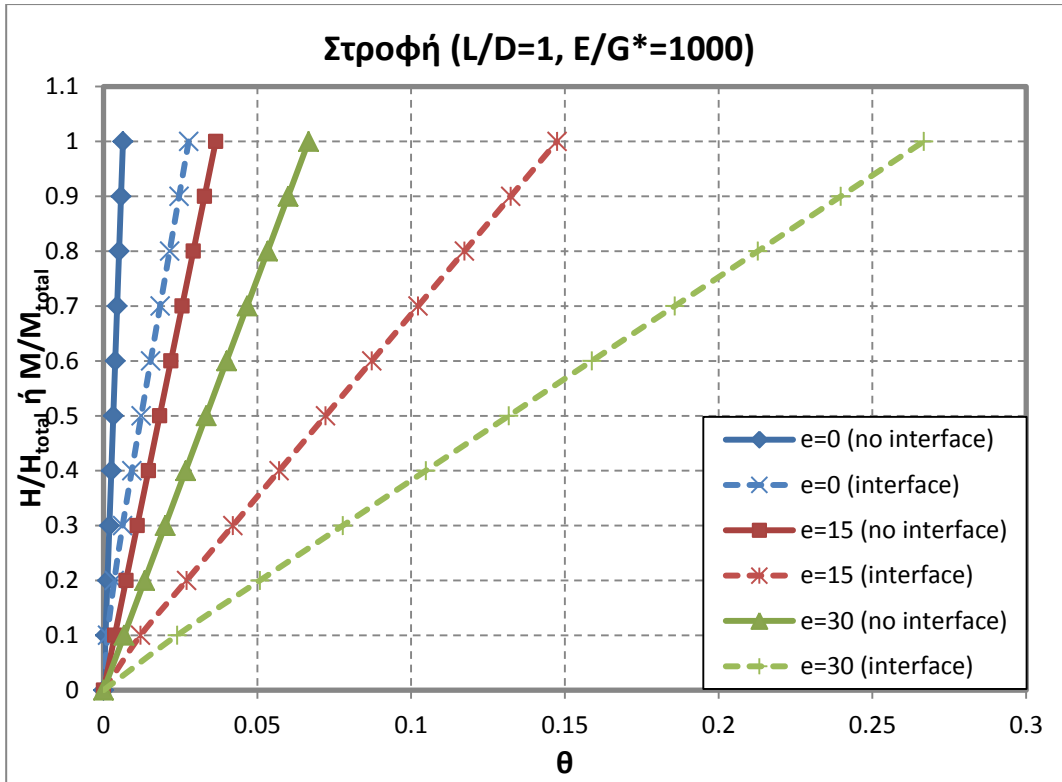
Σχήμα 5-14. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες (L/D=1, E/G\*=750)



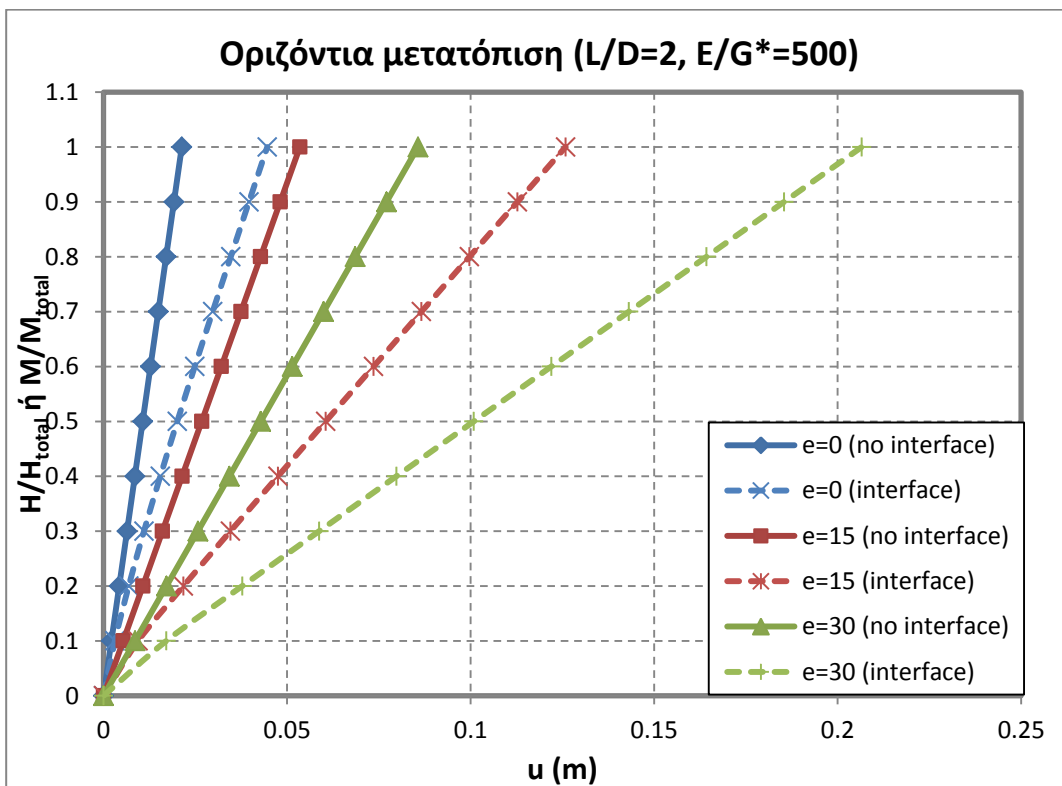
Σχήμα 5-15. Διάγραμμα στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=1, E/G^*=750$ )



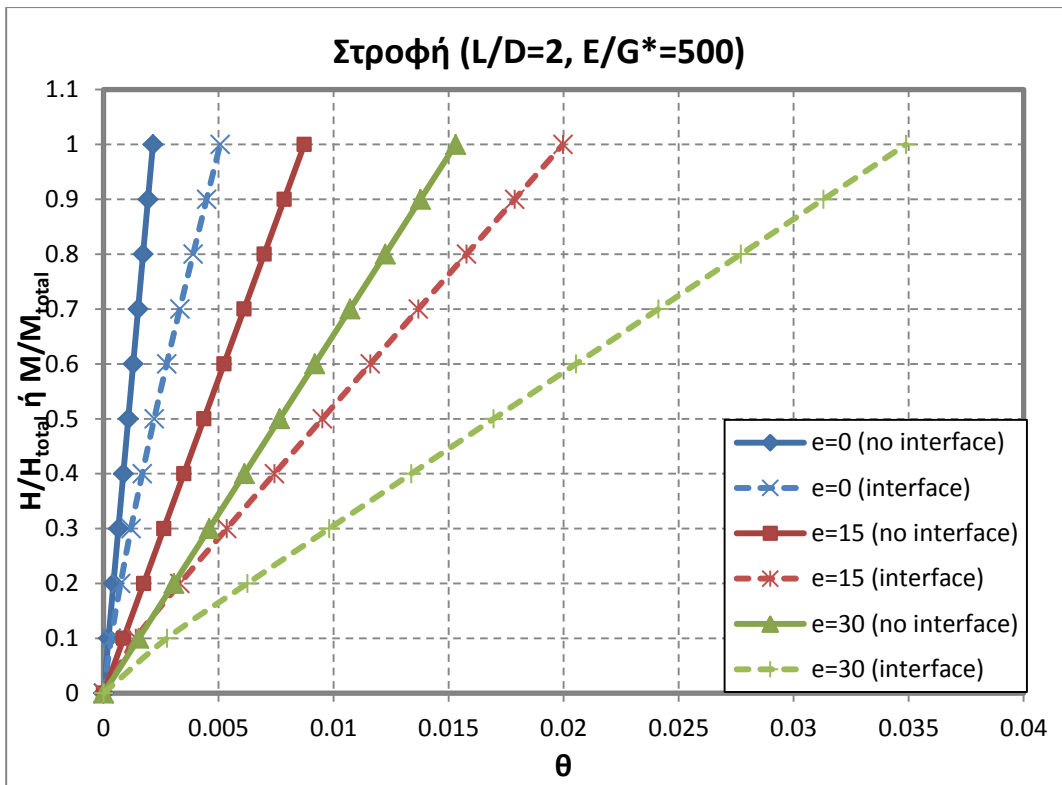
Σχήμα 5-16. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=1, E/G^*=1000$ )



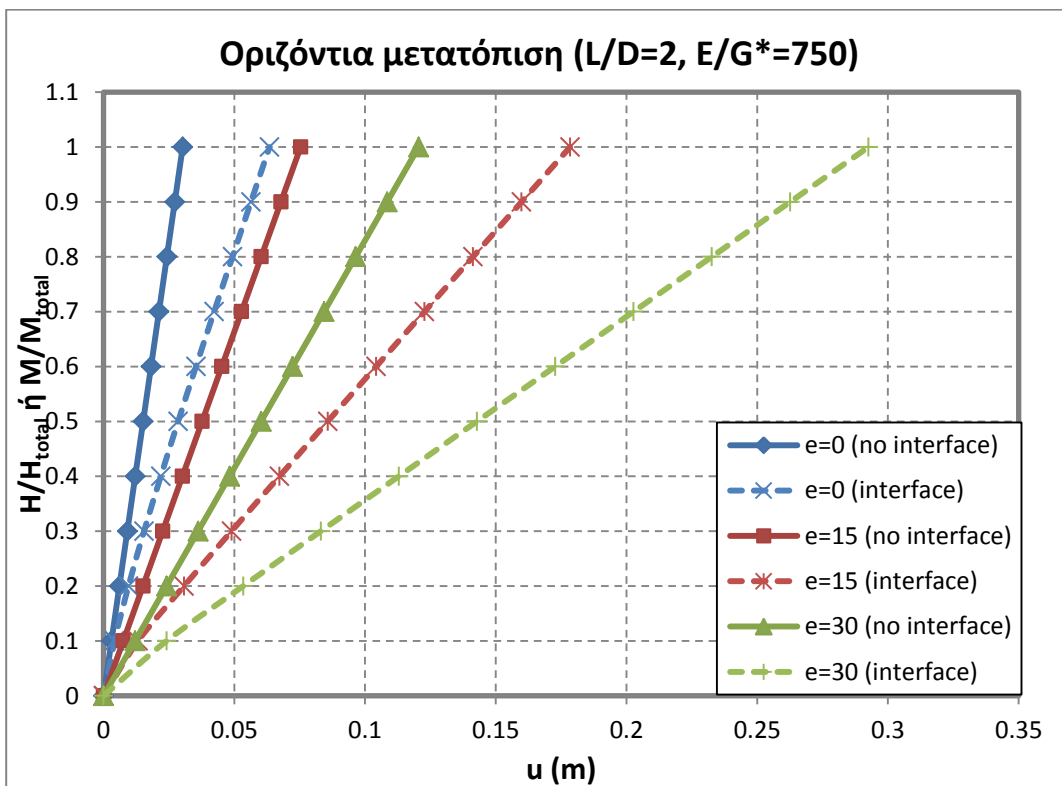
Σχήμα 5-17. Διάγραμμα στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες (L/D=1, E/G\*=1000)



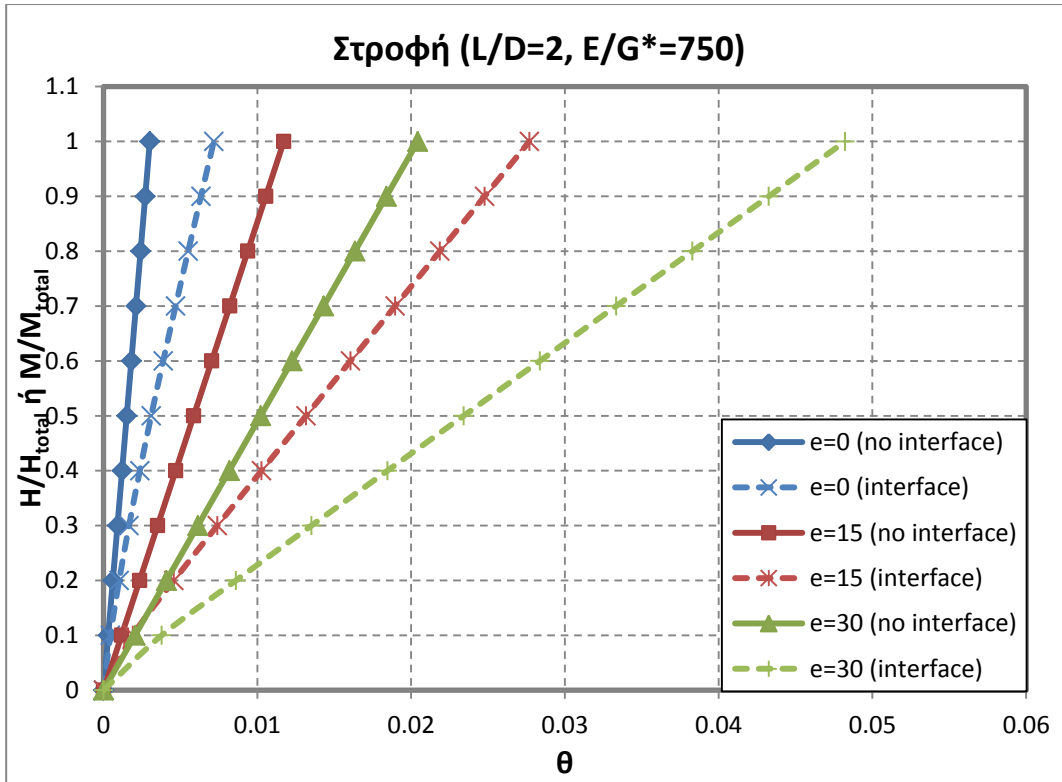
Σχήμα 5-18. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες (L/D=2, E/G\*=500)



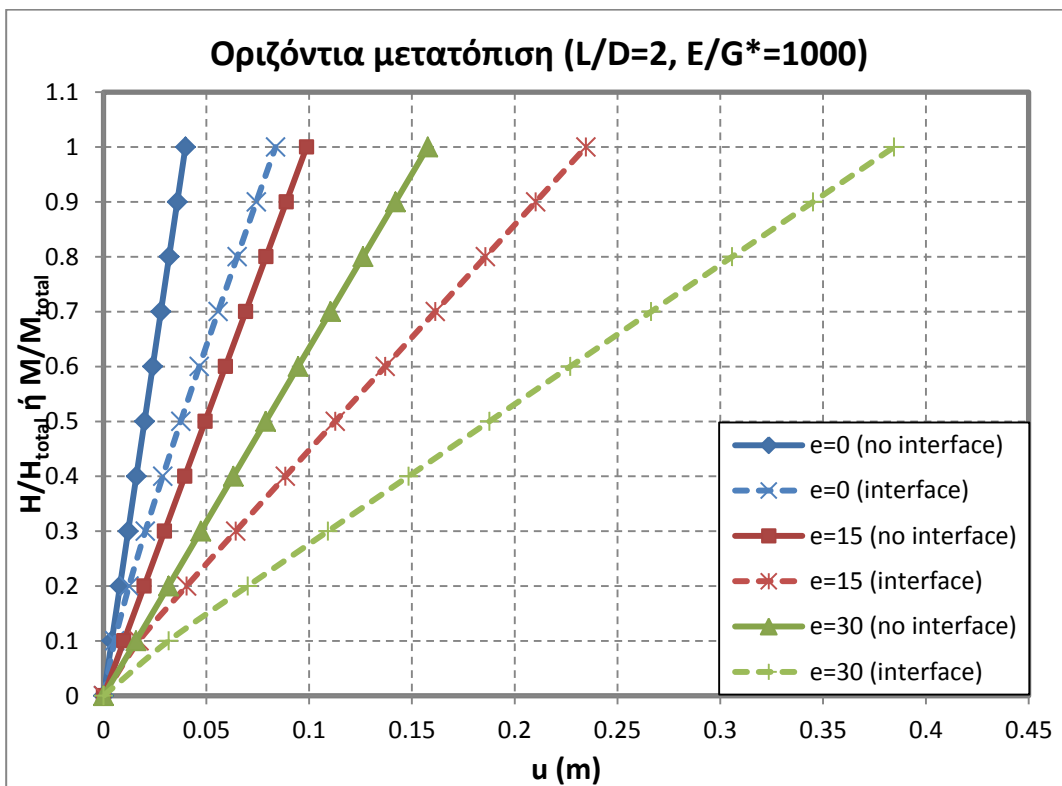
Σχήμα 5-19. Διάγραμμα στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες (L/D=2, E/G\*=500)



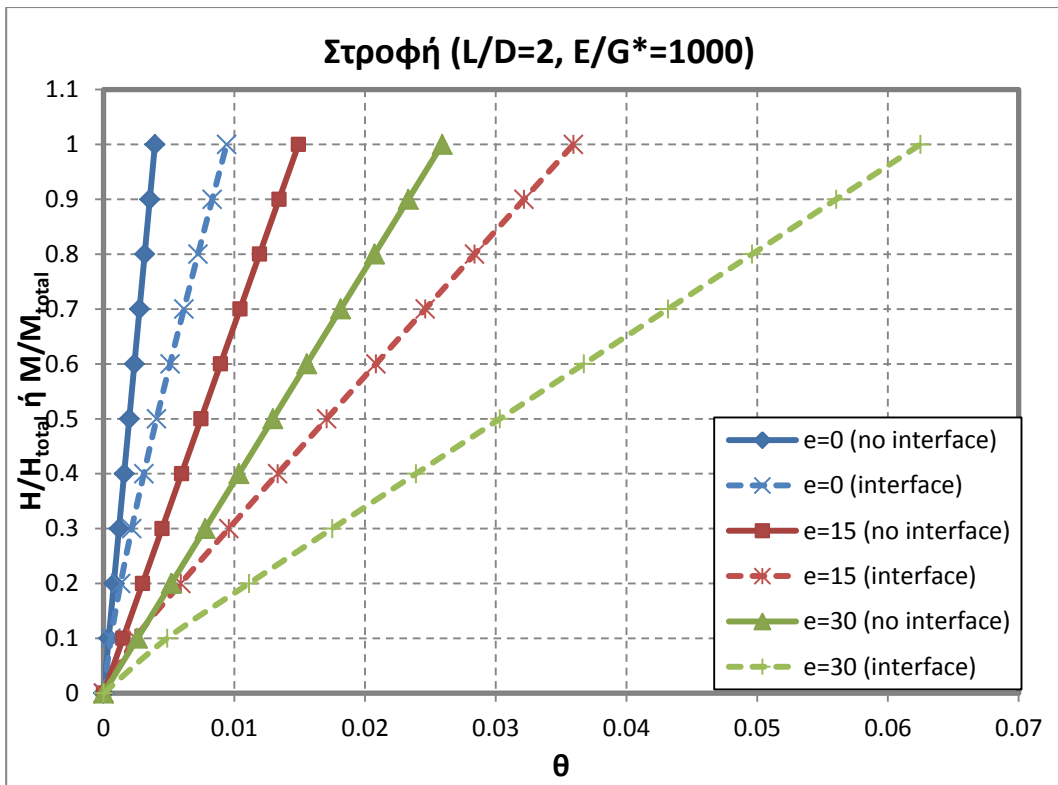
Σχήμα 5-20. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες (L/D=2, E/G\*=750)



Σχήμα 5-21. Διάγραμμα στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες (L/D=2, E/G\*=750)



Σχήμα 5-22. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες (L/D=2, E/G\*=1000)



Σχήμα 5-23. Διάγραμμα στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες ( $L/D=2$ ,  $E/G^*=1000$ )

Παρατηρήσεις:

- Σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης παρατηρείται διαφορά των οριζόντιων μετατοπίσεων και των στροφών κεφαλής του φρέατος από την έναρξη της φόρτισης. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η σχετική ολίσθηση και η αποκόλληση στις διεπιφάνειες λαμβάνουν χώρα ακόμα και για πολύ μικρά εγκάρσια φορτία.
- Ο λόγος οριζόντιων μετακινήσεων και στροφών κεφαλής με διεπιφάνεια παραμένει προς τις αντίστοιχες χωρίς διεπιφάνεια ανεπηρέαστος από τη σχετική δυσκαμψία  $E/G^*$ , γεγονός που επιβεβαιώνει την παραδοχή της μεγάλης δυσκαμψίας φρεάτων για μεγάλες τιμές  $E/G^*$ . Αντίθετα, οι απόλυτες διαφορές οριζόντιων μετατοπίσεων και στροφών μεταξύ των αναλύσεων με διεπιφάνεια και χωρίς μειώνονται με την αύξηση του μήκους του φρέατος.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι σχέσεις που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 4 δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε περιπτώσεις όπου λαμβάνεται υπόψη η σχετική ολίσθηση και η αποκόλληση στις διεπιφάνειες φρέατος-βραχόμαζας, ακόμα και για μικρές τιμές της επιβαλλόμενης φόρτισης. Για το λόγο αυτό, επιχειρείται η αντίστοιχη διαδικασία εξαγωγής σχέσεων υπολογισμού των μεγεθών αυτών με διεπιφάνειες.

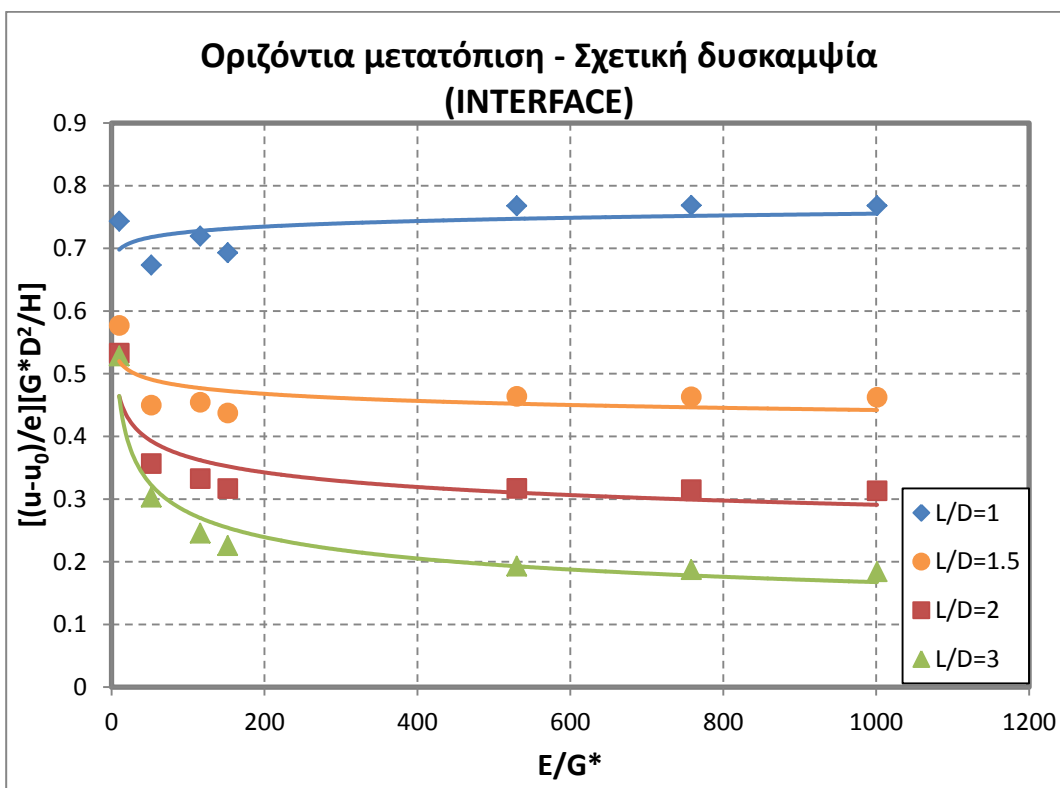
**5.6 Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων**

Στην ενότητα αυτή (κατά αντιστοιχία με την ενότητα 4.3), παρουσιάζεται η διαδικασία προσδιορισμού των άκαμπτων φρεάτων, εκείνων δηλαδή που θα καθορίσουν τη μορφή των σχέσεων υπολογισμού των οριζόντιων μετατοπίσεων και στροφών της κεφαλής. Για τον έλεγχο της δυσκαμψίας χρησιμοποιείται η ίδια μεθοδολογία με τις περιπτώσεις χωρίς διεπιφάνειες.

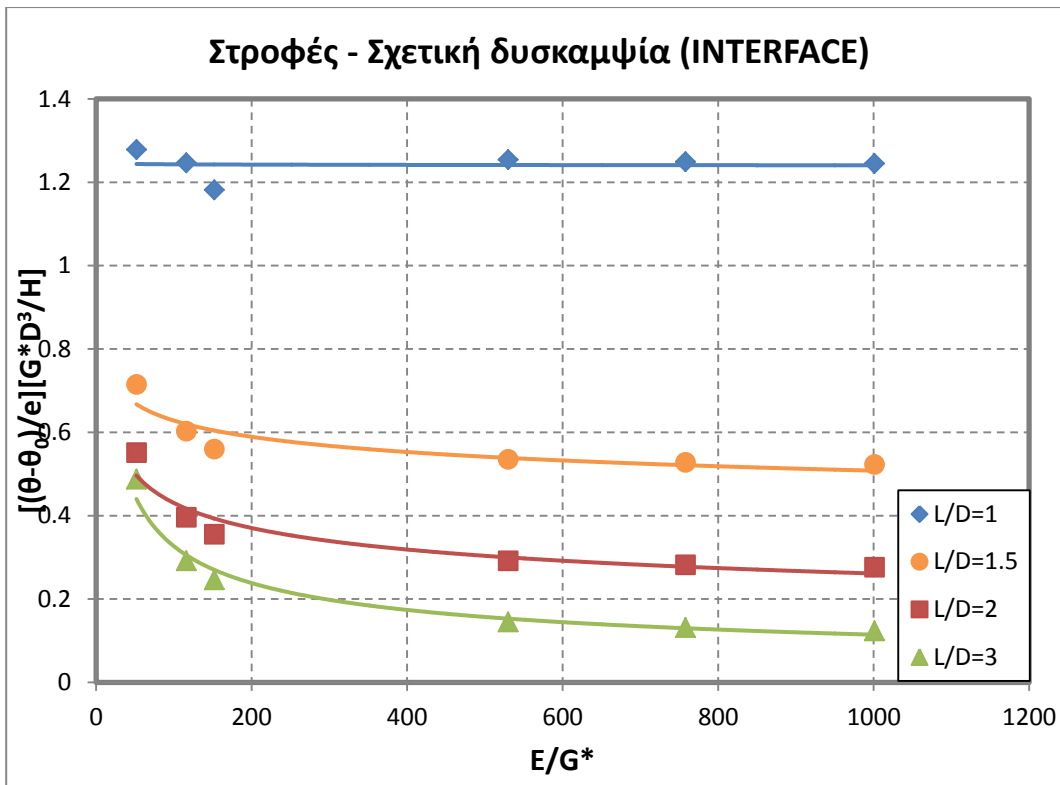


### 5.6.1 Καμπύλες μετατοπίσεων - σχετικής δυσκαμψίας

Οι καμπύλες αυτές κατασκευάζονται σύμφωνα με τις παραδοχές των Carter και Kulhawy. Στον άξονα x τοποθετούνται οι διάφορες τιμές των λόγων  $E/G^*$  ενώ στον άξονα y οι αδιαστατοποιημένες τιμές των οριζόντιων μετακινήσεων ή στροφών κεφαλής. Τα διαγράμματα αφορούν τιμές των μετατοπίσεων που εξήχθησαν από τις αναλύσεις για τη μέγιστη τιμή της εκκεντρότητας ( $e=30m$ ). Η αδιαστατοποίηση των οριζόντιων μετακινήσεων και στροφών έγινε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που περιγράφηκε στις εξισώσεις (4-3) έως (4-8). Ως αποτέλεσμα, τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν είχαν στον άξονα x τις διάφορες τιμές του λόγου  $E/G^*$  και στον άξονα y το πρώτο μέλος των εξισώσεων (4-6) και (4-8) αντίστοιχα, με τις τιμές των μετακινήσεων και στροφών που προκύπτουν από τις αναλύσεις με διεπιφάνειες. Οι τιμές αυτές προσεγγίστηκαν με γραμμή τάσης υπερβολικού τύπου για κάθε φρέαρ (Σχήματα Σχήμα 5-24 Σχήμα 5-25):



Σχήμα 5-24. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων της κεφαλής ως προς  $E/G^*$  για τις διάφορες τιμές του λόγου  $L/D$



Σχήμα 5-25. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένων στροφών της κεφαλής ως προς  $E/G^*$  για τις διάφορες τιμές του λόγου  $L/D$

Από τη μορφή των παραπάνω διαγραμμάτων, και κυρίως του διαγράμματος των οριζόντιων μετακινήσεων της κεφαλής, προκύπτει ότι ως «απολύτως άκαμπτα» φρέατα μπορούν να θεωρηθούν:

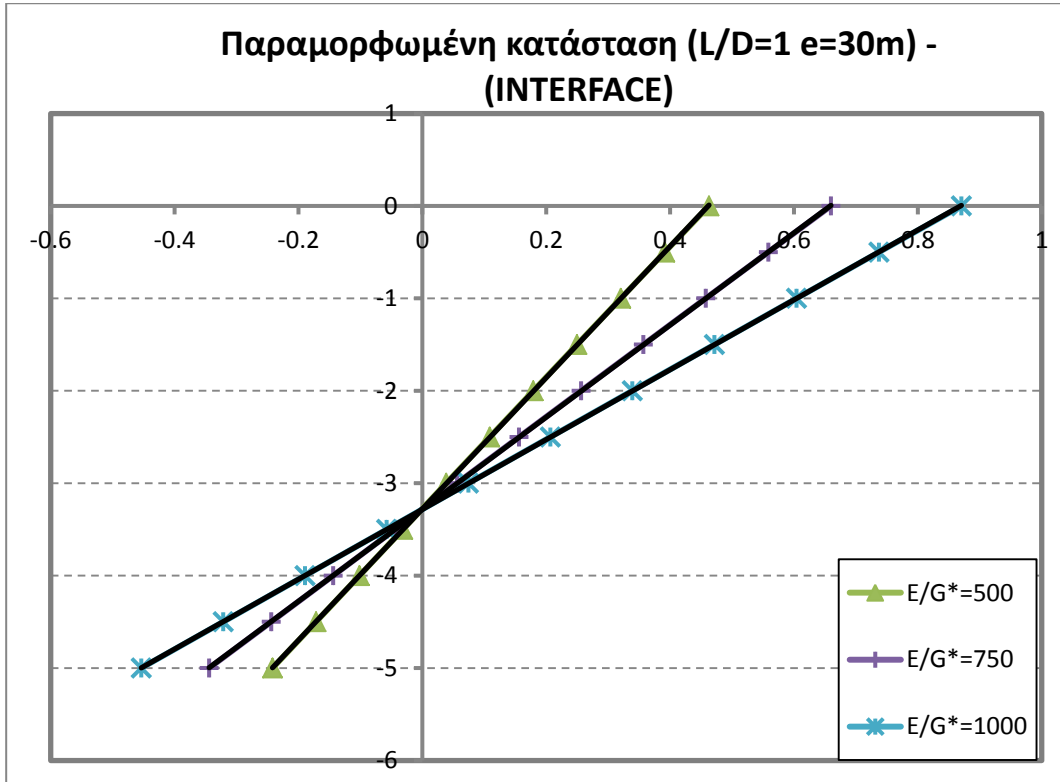
- $L/D=1, E/G^* \geq 50$
- $L/D=1.5, E/G^* \geq 50$
- $L/D=2, E/G^* \geq 150$

Σημειώνεται ότι κανένα από τα φρέατα με λόγο  $L/D=3$  δε θεωρήθηκε άκαμπτο στην παρούσα φάση, λόγω της αβεβαιότητας που προκύπτει από τη μεγάλη τιμή του λόγου αυτού. Αντίστοιχα, δε θεωρήθηκε άκαμπτο ούτε το φρέαρ με  $L/D=1$  για  $E/G^*=10$  λόγω της μικρής σχετικής δυσκαμψίας, παρόλο που ανήκει στον οριζόντιο κλάδο του διαγράμματος (Σχήματα Σχήμα 5-24 και Σχήμα 5-25). Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι ο προσδιορισμός των άκαμπτων περιπτώσεων από τις οποίες θα προκύψουν οι σχέσεις υπολογισμού μετακινήσεων και στροφών και όχι η εξαγωγή κάποιου κριτηρίου δυσκαμψίας.

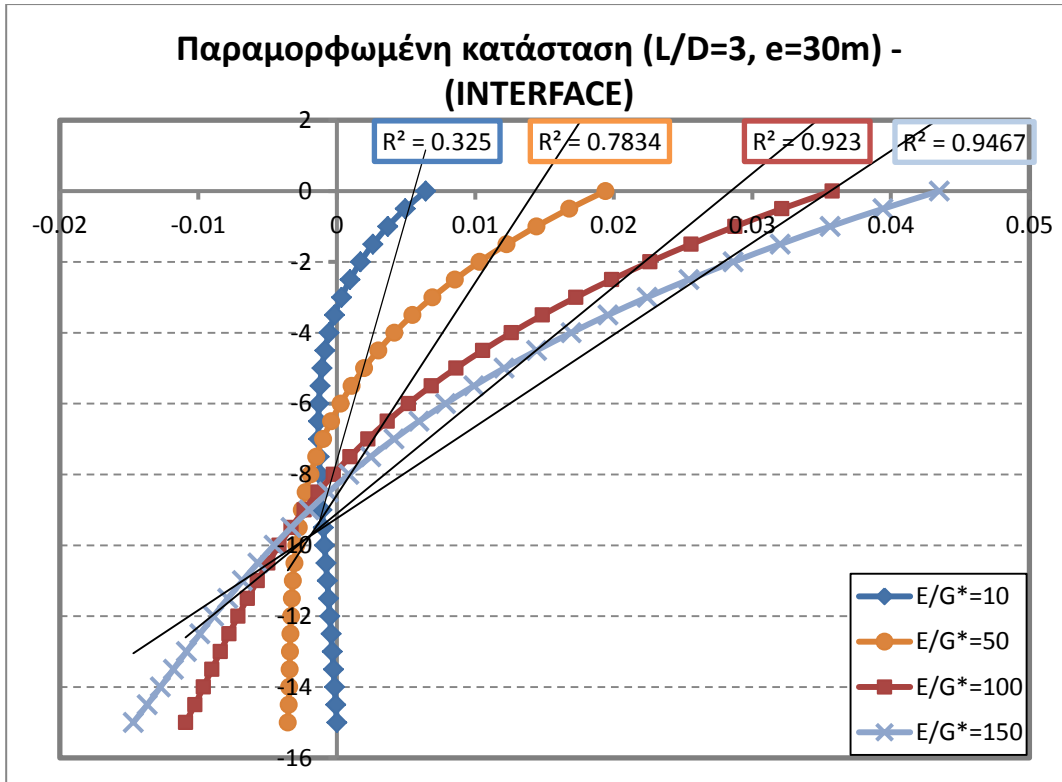
### 5.6.2 Δυσκαμψία φρεάτων μέσω της παραμορφωμένης κατάστασης

Από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με διεπιφάνειες απεικονίστηκαν αποτελέσματα μετακινήσεων των κόμβων του άξονα του φρέατος. Οι μετακινήσεις αυτές σχεδιάστηκαν σε διαγράμματα κατανομής συναρτήσεων του βάθους για τις διάφορες τιμές του λόγου  $E/G^*$  και για δεδομένη τιμή της εκκεντρότητας, όπως φαίνεται παρακάτω (Σχήματα Σχήμα 5-26 έως και Σχήμα

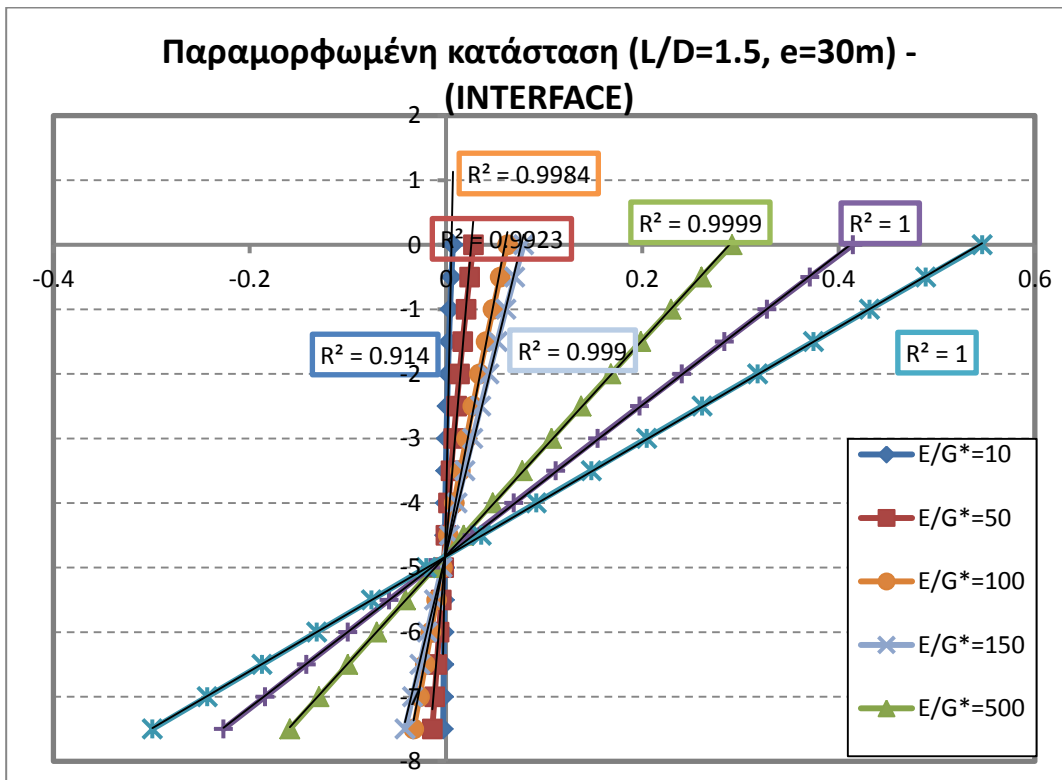
5-30). Οι καμπύλες των διαγραμμάτων προσεγγίστηκαν με μία ευθεία γραμμή τάσης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Βάσει της εξίσωσης αυτής της ευθείας υπολογίστηκαν για κάθε βάθος οι μετακινήσεις του κάθε κόμβου του αντίστοιχου απολύτως άκαμπτου στοιχείου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ενδεικτικές περιπτώσεις: δύο άκαμπτων φρεάτων ( $L/D=1$ , 1.5 για  $e=30m$ ), ενός εύκαμπτου ( $L/D=3$  για  $e=30m$ ) και δύο ενδιάμεσων περιπτώσεων ( $L/D=2$  για  $e=30m$  και  $L/D=3$  για  $e=15m$ ).



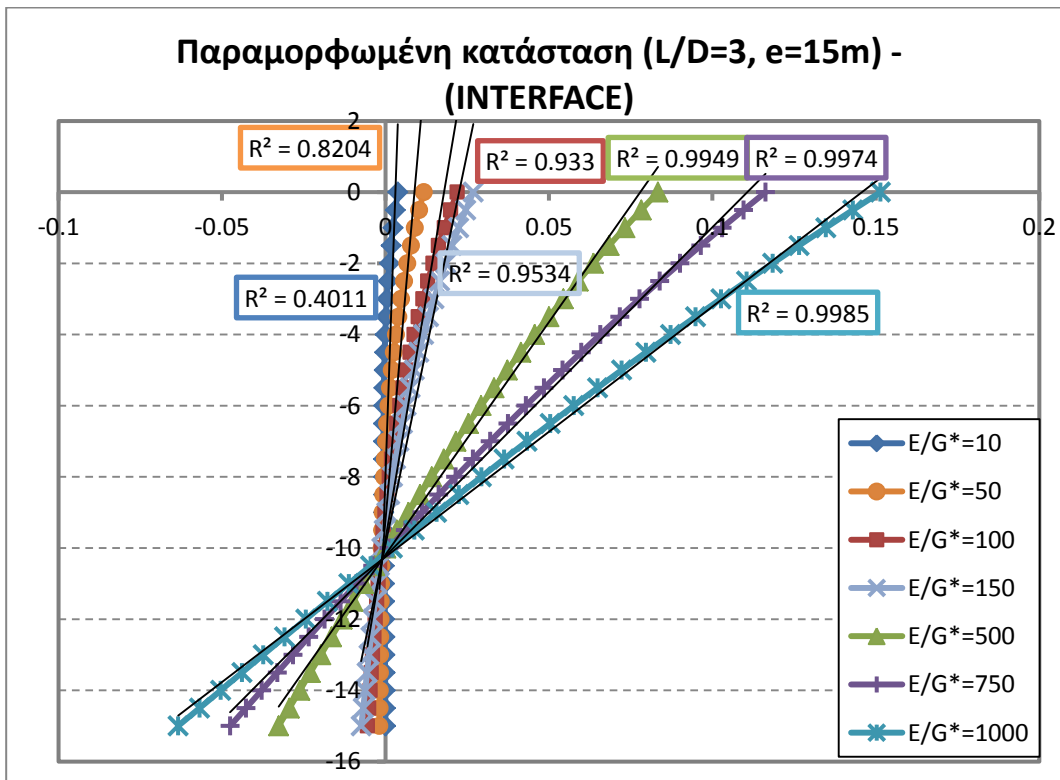
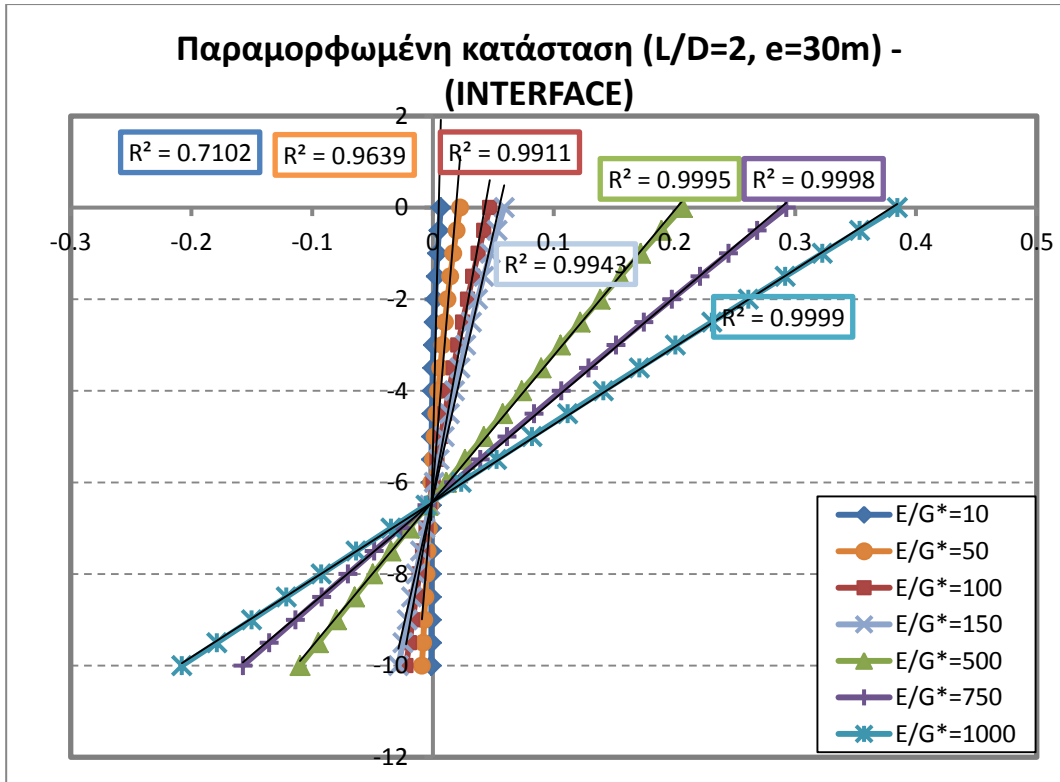
**Σχήμα 5-26.** Διάγραμμα κατανομής μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος  $L/D=1$  για εκκεντρότητα  $e=30m$  και διάφορες τιμές του λόγου  $E/G^*$  (ΑΚΑΜΠΤΟ)



Σχήμα 5-27. Διάγραμμα κατανομής μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος  $L/D=3$  για εκκεντρότητα  $e=30m$  και διάφορες τιμές του λόγου  $E/G^*$  (ΕΥΚΑΜΠΤΟ)



Σχήμα 5-28. Διάγραμμα κατανομής μετατοπίσεων του άξονα του φρέατος  $L/D=1.5$  για εκκεντρότητα  $e=30m$  και διάφορες τιμές του λόγου  $E/G^*$  (ΑΚΑΜΠΤΟ)



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Σχέσεις υπολογισμού μετατοπίσεων με διεπιφάνειες**

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται πως υπάρχουν περιπτώσεις φρεάτων για τα οποία δεν είναι σαφές αν συμπεριφέρονται ως άκαμπτα. Για το λόγο αυτό, καταγράφηκαν σε σχετικό πίνακα οι ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των μετατοπίσεων του παραμορφωμένου και του απόλυτα άκαμπτου φορέα. Στα επόμενα (Πίνακας 5-2) καταγράφονται οι διαφορές των οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής για τα φρέατα  $L/D=1.5, 2$  και  $3$  αφού αυτά με  $L/D=1$  θεωρούνται άκαμπτα σε κάθε περίπτωση (πλην εκείνων με σχετική δυσκαμψία  $E/G^*=10$ ), όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.6.1.

**Πίνακας 5-1** Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς την αντίστοιχη των αναλύσεων με διεπιφάνειες ( $L/D=1$ )

<b>L/D</b>	<b>E/G*</b>	<b>e=M/H</b>	<b>(<math>u_{rigid}-u</math>)/u (%) – κεφαλή</b>	<b>(<math>u_{rigid}-u</math>)/u (%) – αιχμή</b>
1	10	0	-3.27%	33.26%
		15	-8.69%	10.16%
		30	-9.73%	10.13%
1	50	0	-0.85%	19.43%
		15	-2.39%	2.86%
		30	-2.66%	2.77%
1	100	0	-0.39%	7.89%
		15	-1.07%	1.25%
		30	-1.19%	1.20%
1	150	0	-0.30%	7.40%
		15	-0.85%	1.01%
		30	-0.94%	0.97%
1	500	0	-0.09%	1.44%
		15	-0.23%	0.26%
		30	-0.26%	0.25%
1	750	0	-0.06%	1.04%
		15	-0.16%	0.18%
		30	-0.18%	0.17%
1	1000	0	-0.05%	0.78%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

		15	-0.12%	0.14%
		30	-0.13%	0.13%

**Πίνακας 5-2.** Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς την αντίστοιχη των αναλύσεων με διεπιφάνειες (L/D=1.5)

L/D	E/G*	e=M/H	$(u_{rigid}-u)/u$ (%) – κεφαλή	$(u_{rigid}-u)/u$ (%) – αιχμή
1.5	10	0	-8.30%	72.09%
		15	-19.54%	50.63%
		30	-21.56%	52.18%
1.5	50	0	-2.72%	30.51%
		15	-7.20%	12.23%
		30	-8.09%	11.96%
1.5	100	0	-1.34%	13.77%
		15	-3.52%	5.29%
		30	-3.96%	5.12%
1.5	150	0	-1.05%	11.60%
		15	-2.81%	4.19%
		30	-3.17%	4.06%
1.5	500	0	-0.30%	2.75%
		15	-0.81%	1.10%
		30	-0.90%	1.07%
1.5	750	0	-0.22%	1.95%
		15	-0.57%	0.78%
		30	-0.64%	0.74%
1.5	1000	0	-0.17%	1.49%
		15	-0.43%	0.59%
		30	-0.48%	0.56%

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Σχέσεις υπολογισμού μετατοπίσεων με διεπιφάνειες

**Πίνακας 5-3.** Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς την αντίστοιχη των αναλύσεων με διεπιφάνειες (L/D=2)

L/D	E/G*	e=M/H	$(u_{\text{rigid}}-u)/u$ (%) – κεφαλή	$(u_{\text{rigid}}-u)/u$ (%) – αιχμή
2	10	0	-14.09%	208.15%
		15	-25.71%	205.92%
		30	-26.72%	225.03%
2	50	0	-5.94%	66.76%
		15	-13.95%	35.31%
		30	-15.59%	34.57%
2	100	0	-3.22%	30.60%
		15	-7.76%	14.82%
		30	-8.75%	14.31%
2	150	0	-2.60%	25.22%
		15	-6.33%	11.62%
		30	-7.17%	11.19%
2	500	0	-0.79%	5.92%
		15	-1.97%	3.01%
		30	-2.23%	2.88%
2	750	0	-0.57%	4.15%
		15	-1.40%	2.10%
		30	-1.59%	2.01%
2	1000	0	-0.43%	3.15%
		15	-1.07%	1.59%
		30	-1.21%	1.53%



**Πίνακας 5-4.** Ποσοστιαία απόκλιση μετατόπισης κεφαλής του πλήρως άκαμπτου στοιχείου ως προς την αντίστοιχη των αναλύσεων με διεπιφάνειες (L/D=3)

L/D	E/G*	e=M/H	( $u_{rigid}-u$ )/ $u$ (%) – κεφαλή	( $u_{rigid}-u$ )/ $u$ (%) – αιχμή
3	10	0	-21.75%	6548.65%
		15	-19.31%	-136829.79%
		30	-13.22%	-70042.75%
3	50	0	-13.92%	283.83%
		15	-24.53%	196.55%
		30	-26.27%	202.28%
3	100	0	-10.47%	54.34%
		15	-18.45%	74.11%
		30	-20.45%	68.65%
3	150	0	-8.13%	95.14%
		15	-16.19%	55.74%
		30	-18.08%	51.29%
3	500	0	-3.12%	23.74%
		15	-6.52%	12.77%
		30	-7.42%	11.87%
3	750	0	-2.27%	16.17%
		15	-4.80%	8.78%
		30	-5.49%	8.15%
3	1000	0	-1.76%	12.01%
		15	-3.75%	6.57%
		30	-4.29%	6.10%

Παρατηρήσεις:

- Λόγω σχετικής ολίσθησης και αποκόλλησης στη διεπιφάνεια, το φρέαρ αποκτά μεγαλύτερη «ελευθερία» μετακίνησης και στροφής, αφού οι δυνάμεις συνάφειας στις διεπιφάνειες μειώνονται έως και μηδενίζονται. Συνεπώς, η παραμορφωμένη κατάσταση του φρέατος

προσεγγίζει πολύ περισσότερο την αντίστοιχη του απολύτως άκαμπτου στερεού σώματος συγκριτικά με την παραμορφωμένη κατάσταση χωρίς διεπιφάνειες. Αυτό αποτυπώνεται στα ποσοστά απόκλισης των μετατοπίσεων με το βάθος.

- Κατά αντιστοιχία με τις αναλύσεις χωρίς διεπιφάνεια, παρατηρήθηκαν πολύ μεγάλα ποσοστά διαφορών μετατοπίσεων ως προς το άκαμπτο στοιχείο σε βάθη περί του σημείου περιστροφής του φρέατος, λόγω της μικρής τάξης μεγέθους των απόλυτων μετατοπίσεων σε αυτά τα βάθη.

### 5.6.3 Θεώρηση περιπτώσεων άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες

Σύμφωνα με τα παραπάνω, θεωρήθηκαν ως «άκαμπτα» τα φρέατα των οποίων οι μετακινήσεις και οι στροφές ανήκουν στον οριζόντιο κλάδο των καμπυλών των διαγραμμάτων της ενότητας 5.6.1 (Σχήματα Σχήμα 5-24 και Σχήμα 5-25). Οι περιπτώσεις αυτές επιβεβαιώθηκαν από τη μορφή της παραμορφωμένης κατάστασης του φρέατος. Συγκεκριμένα, ως «άκαμπτα» θεωρήθηκαν τα φρέατα των οποίων οι οριζόντιες μετατοπίσεις της κεφαλής παρουσιάζουν απόκλιση από την ευθεία προσέγγισης του απολύτως άκαμπτου φρέατος μικρότερες του 8% για εκκενρότητα  $e=30m$ . Το όριο αυτό αυξήθηκε σε σχέση με τη θεώρηση για τα φρέατα χωρίς διεπιφάνεια, διότι παρατηρούνται περιπτώσεις που ανήκουν στον οριζόντιο κλάδο των διαγραμμάτων Σχήμα 5-24 και Σχήμα 5-25 και παρουσιάζουν αποκλίσεις λίγο μεγαλύτερες από 5% και μόνο για τις μέγιστες τιμές εκκενρότητας. Επιπλέον, η εκτέλεση της αντίστοιχης διαδικασίας για τα φρέατα χωρίς διεπιφάνειες έδειξε ότι τέτοιες περιπτώσεις εντάσσονται στο τελικό κριτήριο δυσκαμψίας. Επομένως, τα φρέατα που θεωρούνται άκαμπτα και συμβάλλουν στη διαμόρφωση των εξισώσεων υπολογισμού της εγκάρσιας μετατόπισης και της στροφής κεφαλής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 5-5** Άκαμπτα φρέατα με διεπιφάνειες

L/D	E/G*
1	50
	100
	150
	500
	750
	1000
1.5	50
	100
	150
	500

	750
	1000
2	150
	500
	750
	1000

### 5.7 Σχέσεις υπολογισμού μετατοπίσεων άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες

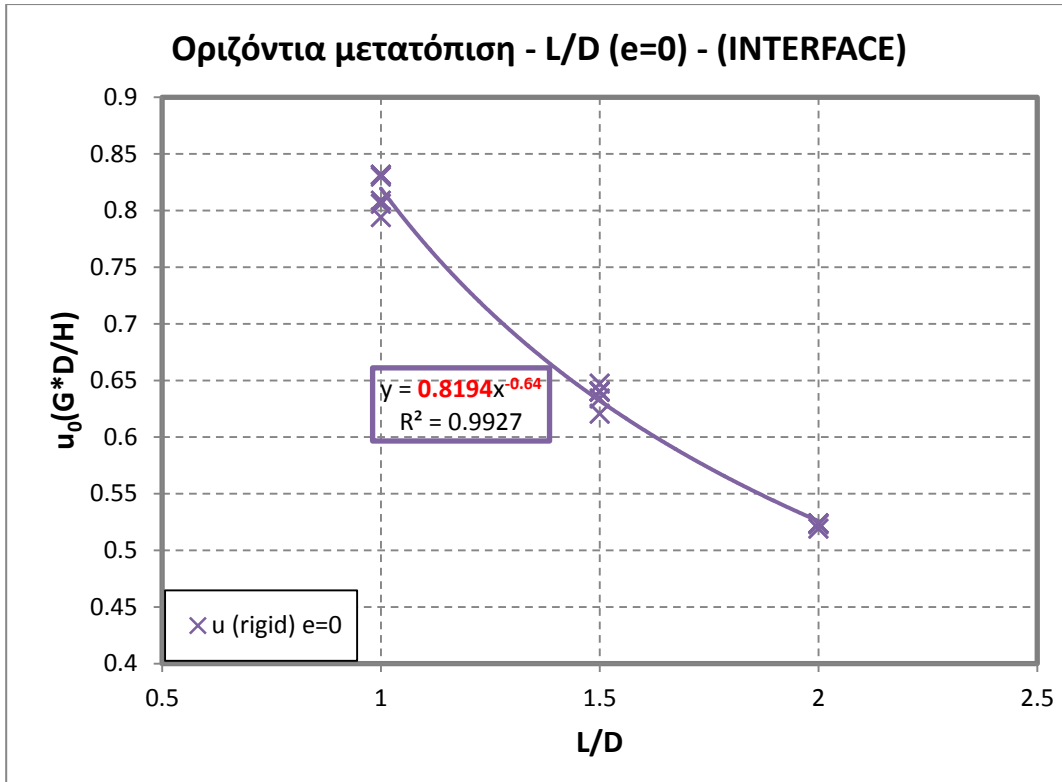
Με βάση τις περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 5-5 και σε αντιστοιχία με την ενότητα 4.4 αναπτύσσονται οι σχέσεις υπολογισμού των οριζόντιων μετατοπίσεων και στροφών της κεφαλής άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες. Οι σχέσεις αυτές, κατά τα πρότυπα των Carter και Kulhawy, έχουν τη μορφή:

$$u = A' \left( \frac{H}{G \cdot D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{a'} + B' \left( \frac{M}{G \cdot D^2} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{b'} \quad (5-3)$$

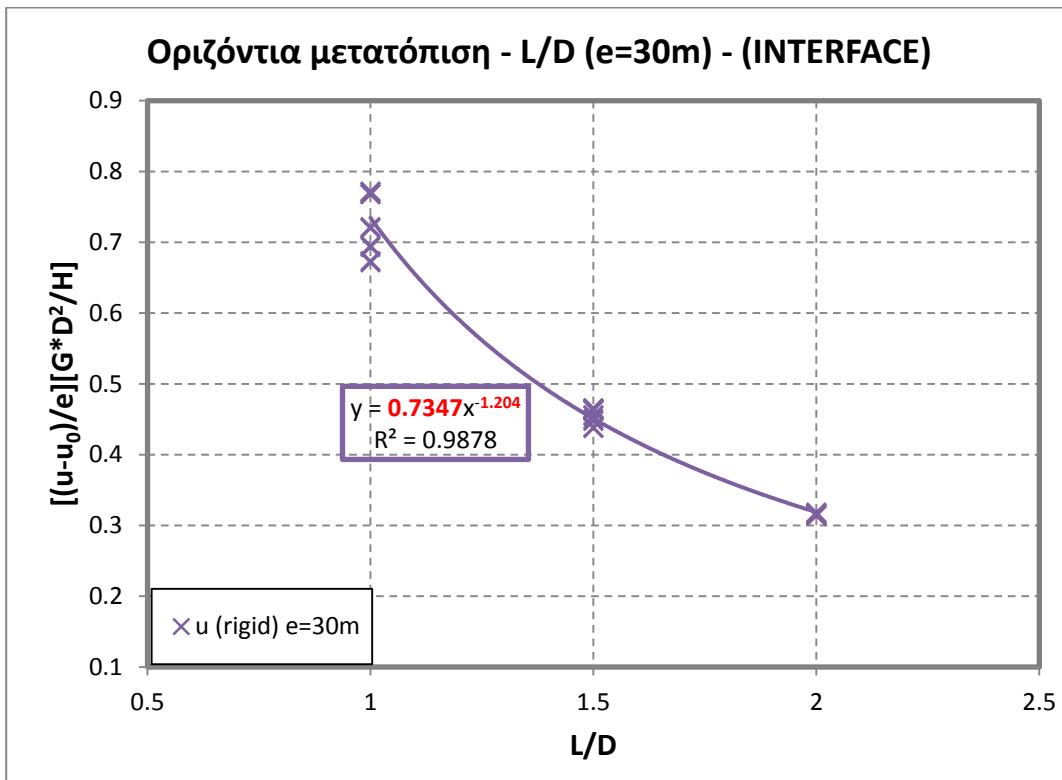
$$\theta = B' \left( \frac{H}{G \cdot D^2} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{b'} + C' \left( \frac{M}{G \cdot D^3} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{c'} \quad (5-4)$$

Απαιτείται λοιπόν ο προσδιορισμός των συντελεστών ( $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ ,  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ ). Στον όρο της μετακίνησης εξαιτίας της επιβαλλόμενης ροπής ( $M$ ) και στον όρο της στροφής εξαιτίας της επιβαλλόμενης τέμνουσας ( $H$ ) οι συντελεστές ( $B$ ,  $b$ ) είναι κοινοί. Αυτό συμβαίνει επειδή προσομοιώνουν τη δυσκαμψία του συζευγμένου ελατηρίου.

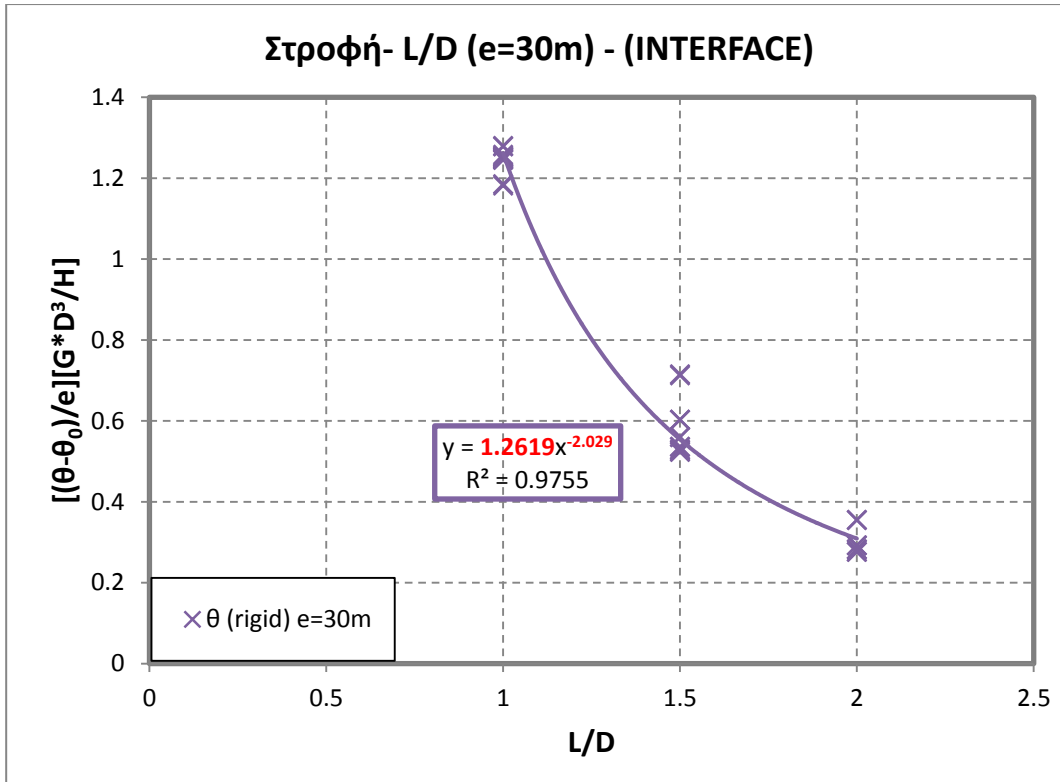
Όμοια με τις περιπτώσεις φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες, χαράσσονται και σε αυτή την περίπτωση διαγράμματα αδιαστατοποιημένων οριζόντιων μετατοπίσεων και στροφών κεφαλής ως προς το λόγο ( $L/D$ ). Οι τιμές των περιπτώσεων προσεγγίζονται με γραμμή τάσης υπερβολικού τύπου, ώστε να προκύψουν οι συντελεστές των εξισώσεων:



Σχήμα 5-31. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνεια συναρτήσεως του λόγου L/D (e=0)



Σχήμα 5-32. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες συναρτήσεως του λόγου L/D (e=30m)



Σχήμα 5-33. Διάγραμμα στροφών άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες συναρτήσεως του λόγου L/D (e=30m)

Επομένως, από τα διαγράμματα αυτά προκύπτουν οι τιμές των συντελεστών:

Πίνακας 5-6 Τιμές των συντελεστών των εξισώσεων μετατοπίσεων με διεπιφάνειες

<b>A'</b> =	0.8194≈ <b>0.82</b>	<b>a'</b> =	-0.64≈ <b>-2/3</b>
<b>B'</b> =	0.7347≈ <b>0.73</b>	<b>b'</b> =	-1.204≈ <b>-6/5</b>
<b>C'</b> =	1.2619≈ <b>1.25</b>	<b>c'</b> =	-2.029≈ <b>-2</b>

Από όσα προηγήθηκαν προκύπτουν οι σχέσεις υπολογισμού των μετατοπίσεων άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες, οι οποίες είναι:

$$u = 0.82 \left( \frac{H}{G \cdot D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-2/3} + 0.73 \left( \frac{M}{G \cdot D^2} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-6/5} \quad (5-5)$$

$$\theta = 0.73 \left( \frac{H}{G \cdot D^2} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-6/5} + 1.25 \left( \frac{M}{G \cdot D^3} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-2} \quad (5-6)$$

Οι παραπάνω σχέσεις τροποποιήθηκαν αντικαθιστώντας τη ροπή με την εκκεντρότητα ώστε να έχουν την εξής τελική μορφή:

$$\mathbf{u} = \left[ 0.82 \left(\frac{L}{D}\right)^{-\frac{2}{3}} + 0.73 \left(\frac{e}{D}\right) \left(\frac{L}{D}\right)^{-\frac{6}{5}} \right] \left(\frac{H}{G^*D}\right) \quad (5-7)$$

$$\theta = \left[ 0.73 \left(\frac{L}{D}\right)^{-\frac{6}{5}} + 1.25 \left(\frac{e}{D}\right) \left(\frac{L}{D}\right)^{-2} \right] \left(\frac{H}{G^*D^2}\right) \quad (5-8)$$

Οι σχέσεις υπολογισμού οριζόντιων μετακινήσεων και στροφών κεφαλής φρεάτων με διεπιφάνειες μπορούν να προκύψουν από τις αντίστοιχες χωρίς διεπιφάνειες πολλαπλασιάζοντας τους επιμέρους όρους ( $u_0$ ,  $u_M$ ,  $\theta_0$ ,  $\theta_M$ ) των σχέσεων (4-11) και (4-12) με τον αντίστοιχο συντελεστή  $\Lambda$  από τον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 5-7** Πολλαπλασιαστικοί συντελεστές  $\Lambda$  για σχέσεις φρεάτων με διεπιφάνειες

$\Lambda_{uH}$	$\Lambda_{uM}=\Lambda_{\theta H}$	$\Lambda_{\theta M}$
$2.8 \left(\frac{L}{D}\right)^{-1/2}$	$3.7 \left(\frac{L}{D}\right)^{-8/15}$	$3.7 \left(\frac{L}{D}\right)^{-1/2}$

Συνεπώς, όταν είναι γνωστοί οι επιμέρους όροι των μετακινήσεων και στροφών κεφαλής φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες, μπορούν να υπολογιστούν τα αντίστοιχα μεγέθη με διεπιφάνειες ως εξής:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \Lambda_{uH} + \mathbf{u}_M \Lambda_{uM} \quad (5-9)$$

$$\theta = \theta_0 \Lambda_{\theta H} + \theta_M \Lambda_{\theta M} \quad (5-10)$$

δηλαδή:

$$\mathbf{u} = \left[ 0.29 \left(\frac{H}{G^*D}\right) \left(\frac{L}{D}\right)^{-\frac{1}{5}} \right] \left[ 2.8 \left(\frac{L}{D}\right)^{-1/2} \right] + \left[ 0.20 \left(\frac{M}{G^*D^2}\right) \left(\frac{L}{D}\right)^{-\frac{2}{3}} \right] \left[ 3.7 \left(\frac{L}{D}\right)^{-8/15} \right] \quad (5-11)$$

$$\theta = \left[ 0.20 \left(\frac{H}{G^*D^2}\right) \left(\frac{L}{D}\right)^{-\frac{2}{3}} \right] \left[ 3.7 \left(\frac{L}{D}\right)^{-8/15} \right] + \left[ 0.34 \left(\frac{M}{G^*D^3}\right) \left(\frac{L}{D}\right)^{-\frac{3}{2}} \right] \left[ 3.7 \left(\frac{L}{D}\right)^{-1/2} \right] \quad (5-12)$$

Συνεπώς, αντικαθιστώντας τη ροπή με την εκκεντρότητα:

$$\mathbf{u} = \left[ 0.29 \left(\frac{L}{D}\right)^{-\frac{1}{5}} \Lambda_{uH} + 0.20 \left(\frac{e}{D}\right) \left(\frac{L}{D}\right)^{-\frac{2}{3}} \Lambda_{uM} \right] \left(\frac{H}{G^*D}\right) \quad (5-13)$$

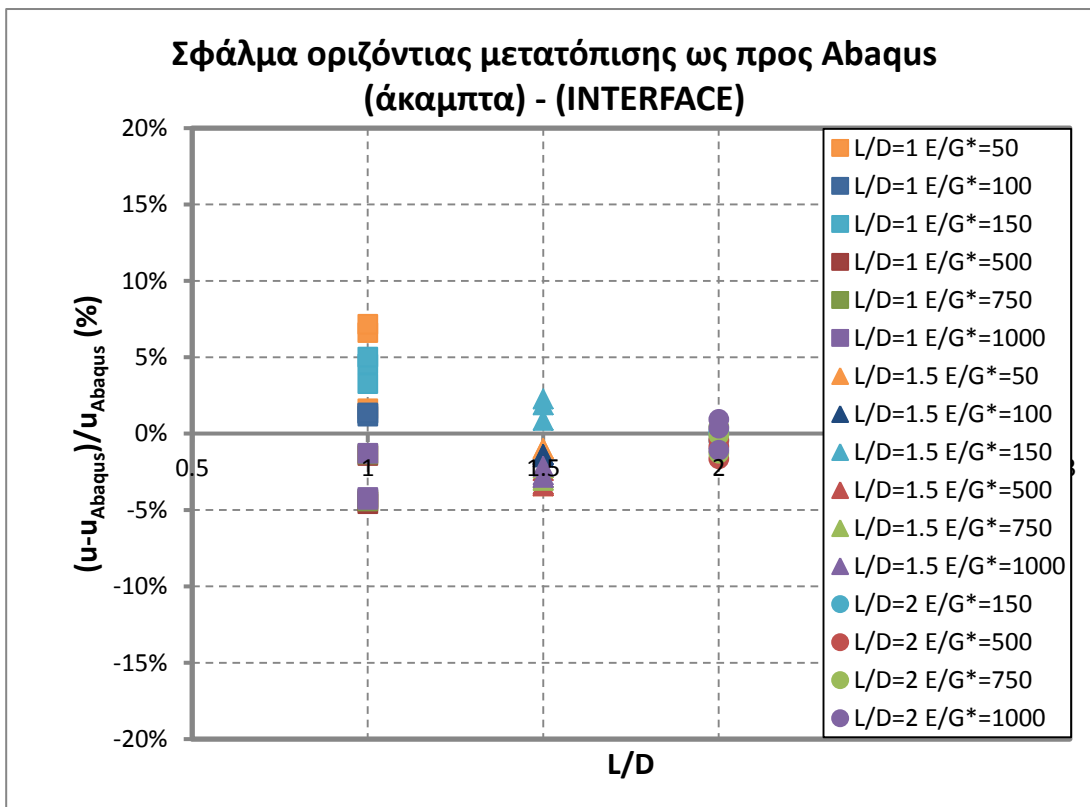
$$\theta = \left[ 0.20 \left(\frac{L}{D}\right)^{-\frac{2}{3}} \Lambda_{\theta H} + 0.34 \left(\frac{e}{D}\right) \left(\frac{L}{D}\right)^{-\frac{3}{2}} \Lambda_{\theta M} \right] \left(\frac{H}{G^*D^2}\right) \quad (5-14)$$

## 5.8 Διερεύνηση σχέσεων – Προσδιορισμός κριτηρίου ακαμψίας

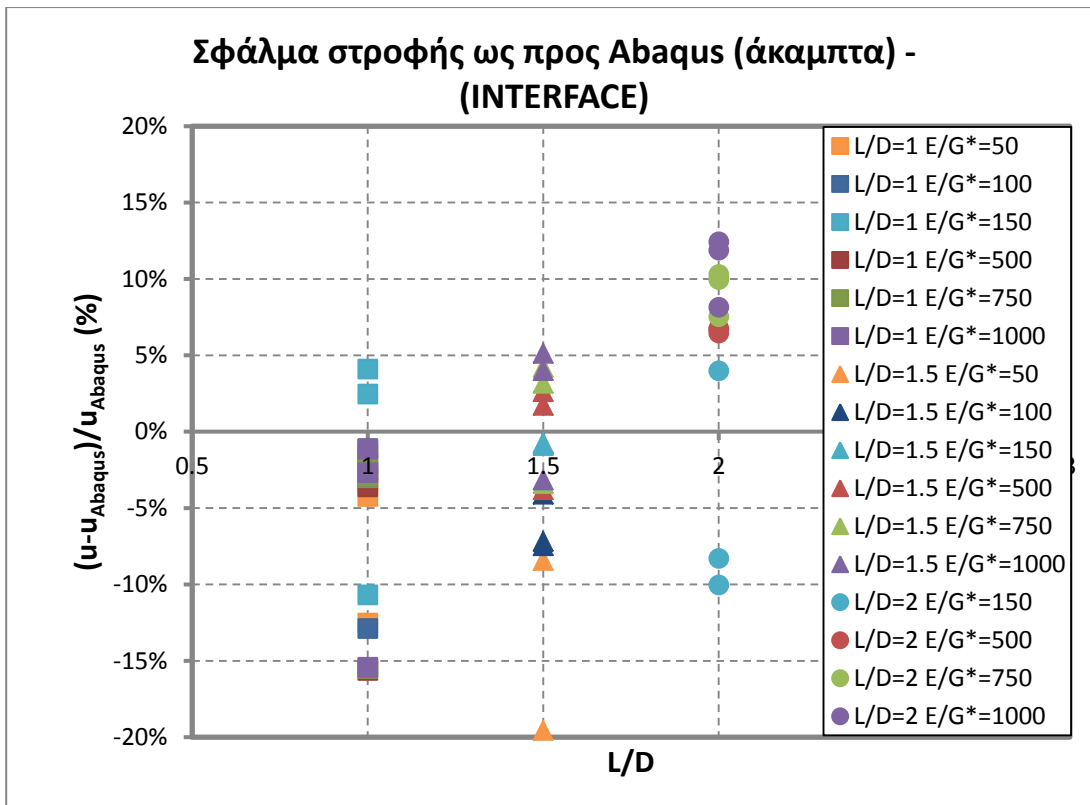
Σε αυτό το στάδιο, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα που εξάγονται από τις σχέσεις υπολογισμού οριζόντιων μετατοπίσεων και στροφών κεφαλής άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες, με τα αποτελέσματα των αναλύσεων που εκτελέστηκαν. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα σφάλματα των μετακινησιακών μεγεθών, όπως αυτά προκύπτουν από τις συγκρίσεις τους με εκείνα των αναλύσεων που προέκυψαν από το Abaqus, και προτείνεται το αντίστοιχο κριτήριο ακαμψίας φρεάτων με διεπιφάνειες. Τέλος, γίνεται ενδεικτικά και μια σύγκριση ως προς τα αποτελέσματα των Carter και Kulhawy.

### 5.8.1 Σύγκριση με τα αποτελέσματα του Abaqus

Όπως αναφέρθηκε, στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα σφάλματα των οριζόντιων μετατοπίσεων και των στροφών της κεφαλής των φρεάτων, εφαρμόζοντας τις σχέσεις (5–7) και (5–8) ως προς τα αποτελέσματα των αναλύσεων των φρεάτων με διεπιφάνειες. Στη σύγκριση αυτή μετείχαν οι περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων από τις οποίες εξήχθησαν οι σχέσεις, οι περιπτώσεις δηλαδή που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 5-5. Τα σφάλματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στα επόμενα διαγράμματα:



Σχήμα 5-34. Διαφορές (%) οριζόντιων μετατοπίσεων ως προς Abaqus (άκαμπτα φρέατα με διεπιφάνειες)



Σχήμα 5-35. Διαφορές (%) στροφών ως προς Abaqus (άκαμπτα φρέατα με διεπιφάνειες)

Παρατηρήσεις:

- Λόγω των μεγαλύτερων τιμών των οριζόντιων μετακινήσεων και στροφών σε σχέση με τις αντίστοιχες των φρεάτων χωρίς διεπιφάνεια, τα σφάλματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε ένα πιο ανεκτικό όριο αποδεκτού σφάλματος.
- Με εξαίρεση τις μεγάλες εκκεντρότητες του φρέατος  $L/D=1$  μόνο για σχετική δυσκαμψία  $E/G^*=50$ , τα σφάλματα των μετατοπίσεων δεν υπερβαίνουν το 5%.
- Σε ότι αφορά τις στροφές, επειδή η επιλογή των άκαμπτων φρεάτων βασίστηκε πιο πολύ στον οριζόντιο κλάδο του διαγράμματος Σχήμα 5-24 των οριζόντιων μετατοπίσεων, τα σφάλματα είναι μεγαλύτερα. Συγκεκριμένα, εξαιρώντας κάποιες περιπτώσεις μηδενικής εκκεντρότητας των οποίων οι τιμές αγγίζουν το 12-13%, οι υπόλοιπες είναι μικρότερες του 10%.

Αμέσως μετά προστέθηκαν στα διαγράμματα αυτά και οι περιπτώσεις οι οποίες είτε δεν ανήκουν ουσιαστικά στον οριζόντιο κλάδο των διαγραμμάτων προσδιορισμού ακαμψίας (Σχήμα 5-24 και Σχήμα 5-25), είτε οι διαφορές των μετακινήσεων ως προς το απολύτως άκαμπτο στοιχείο είναι της τάξεως του (5-10)% για μικρές τιμές εκκεντρότητας. Συγκεκριμένα, οι περιπτώσεις που προστέθηκαν στη σύγκριση σε αυτό το στάδιο είναι οι εξής (Πίνακας 5-8):

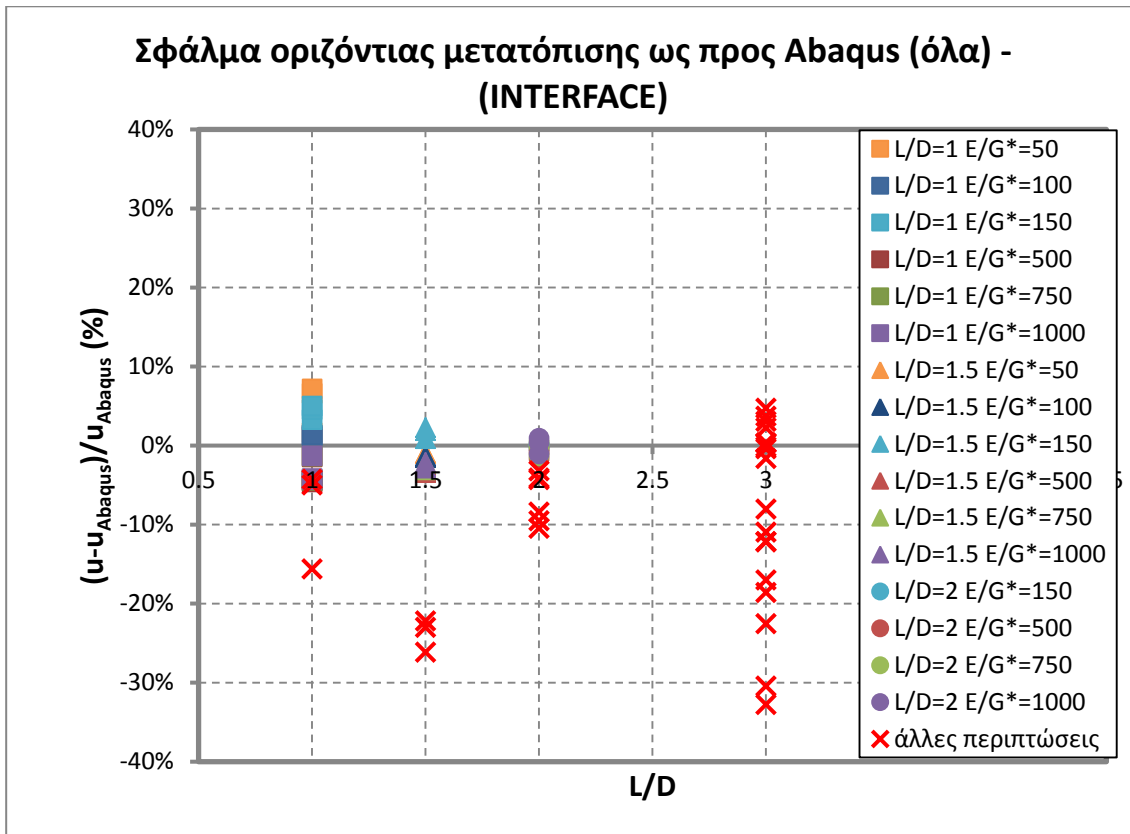
Πίνακας 5-8. Πιθανές περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων

L/D	E/G*
-----	------

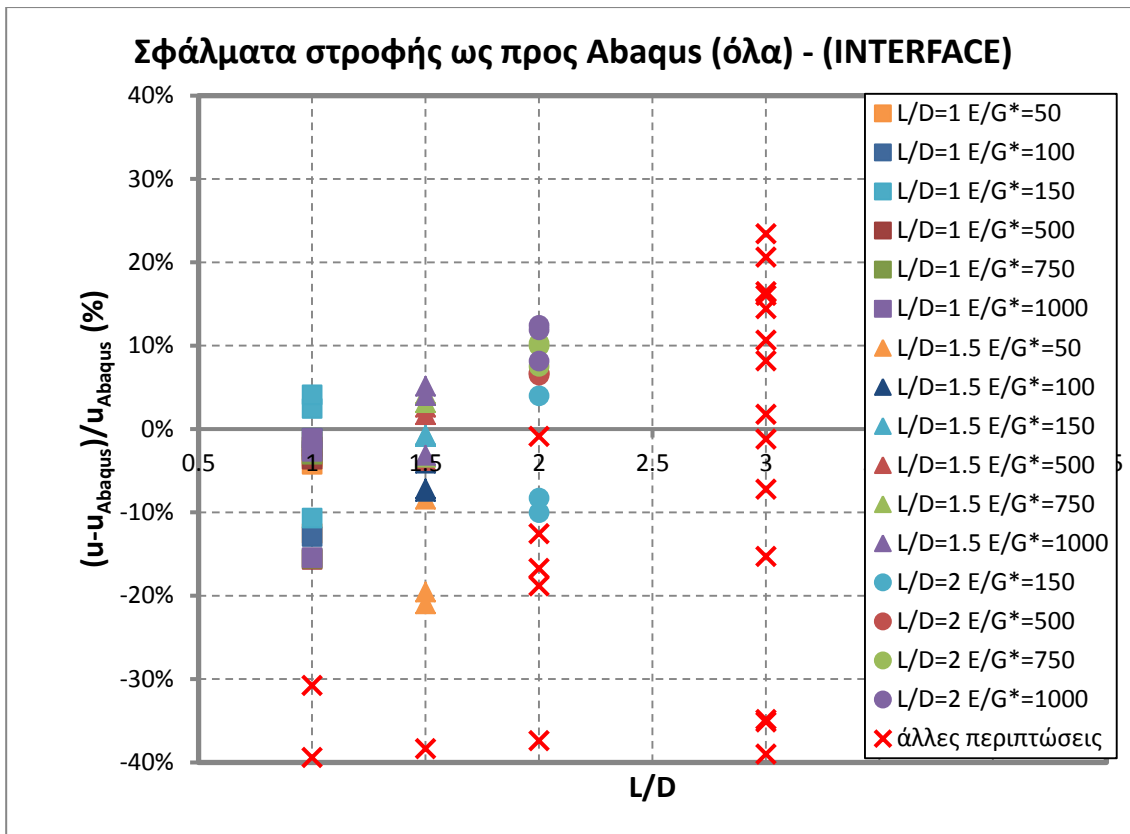


1	10
1.5	10
2	50
	100
3	50
	100
	150
	500
	750
	1000

Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Σχήμα 5-36. Διάγραμμα οριζόντιων μετατοπίσεων (%) ως προς Abaqus με προσθήκη των περιπτώσεων του Πίνακα 5-8)



Σχήμα 5-37. Διάγραμμα στροφών (%) ως προς Abaqus με προσθήκη των περιπτώσεων του Πίνακα 5-8)

### 5.8.2 Πρόταση κριτηρίου δυσκαμψίας για φρέατα με διεπιφάνειες

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό πως οι σχέσεις (5-7) και (5-8) μπορούν να εφαρμοστούν για περισσότερες περιπτώσεις φρεάτων από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθούν. Για την εξαγωγή αυτού του συμπεράσματος έγινε η παραδοχή θεώρησης αποδεκτής τιμής σφάλματος 10%. Κατά συνέπεια, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη εξαγωγής μιας σχέσης η οποία θα προσδιορίζει το πεδίο εφαρμογής των σχέσεων, ως κριτήριο δυσκαμψίας φρεάτων προσαρμοσμένο στη μεθοδολογία. Αντίστοιχα με τη σχέση (4-15) δημιουργήθηκε και για τις περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες μια ανισοτική σχέση προσδιορισμού του πεδίου εφαρμογής των σχέσεων (5-7) και (5-8). Η σχέση αυτή είναι της μορφής:

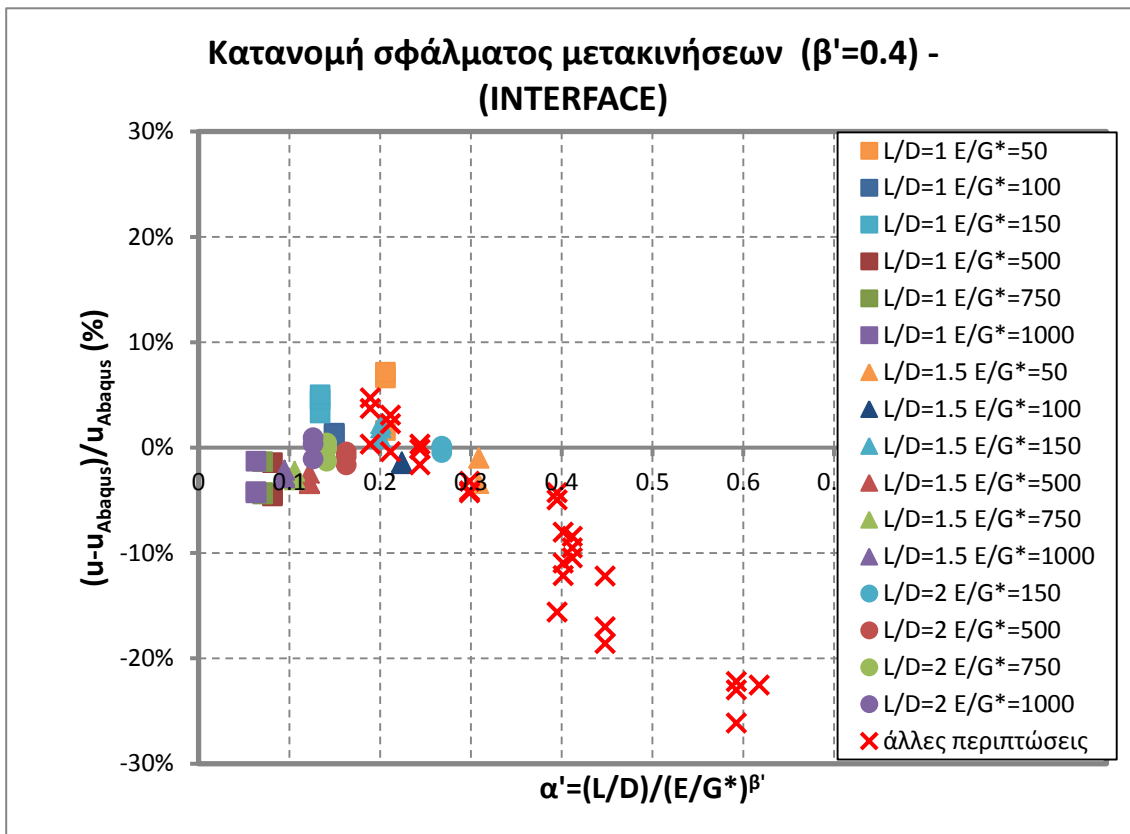
$$\frac{L}{D} \leq \alpha' \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{\beta'} \quad (5-15)$$

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών ( $\alpha'$ ,  $\beta'$ ) ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με την παράγραφο 4.5.2, δηλαδή κατασκευάστηκαν διαγράμματα σφάλματος ως προς το συντελεστή ( $\alpha'$ ), όπου:

$$\alpha' = \left(\frac{L}{D}\right) / \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{\beta'} \quad (5-16)$$

και με δοκιμές τιμών του συντελεστή (β') προσδιορίστηκε ο συντελεστής (α'). Για λόγους ευκολίας στην εφαρμογή της μεθόδου, προτιμήθηκε ο συντελεστής (β') να είναι ίσος με τον αντίστοιχο (β) για φρέατα χωρίς διεπιφάνειες. Η τιμή αυτή (β'=β=0.4) οδήγησε στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5-38). Το διάγραμμα παρουσιάζει αποδεκτή κατανομή των περιπτώσεων αυξανόμενου σφάλματος. Για θεώρηση αποδεκτής τιμής αυτού ίση με 10%, ο συντελεστής (α') προσδιορίζεται ίσος με (α'=0.4). Επειδή όμως υπάρχουν περιπτώσεις εκκεντρότητας που παρουσιάζουν λίγο μεγαλύτερο σφάλμα από το αποδεκτό στην περιοχή του ορίου του 0.4, ο συντελεστής (α') μειώνεται ώστε (α'=0.3). Συνεπώς το κριτήριο ακαμψίας θεωρείται ενιαίο για φρέατα με και χωρίς διεπιφάνειες:

$$\frac{L}{D} \leq 0.30 \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{0.4} \quad (5-17)$$



Σχήμα 5-38. Κατανομή σφάλματος μετακινήσεων (β'=0.4)

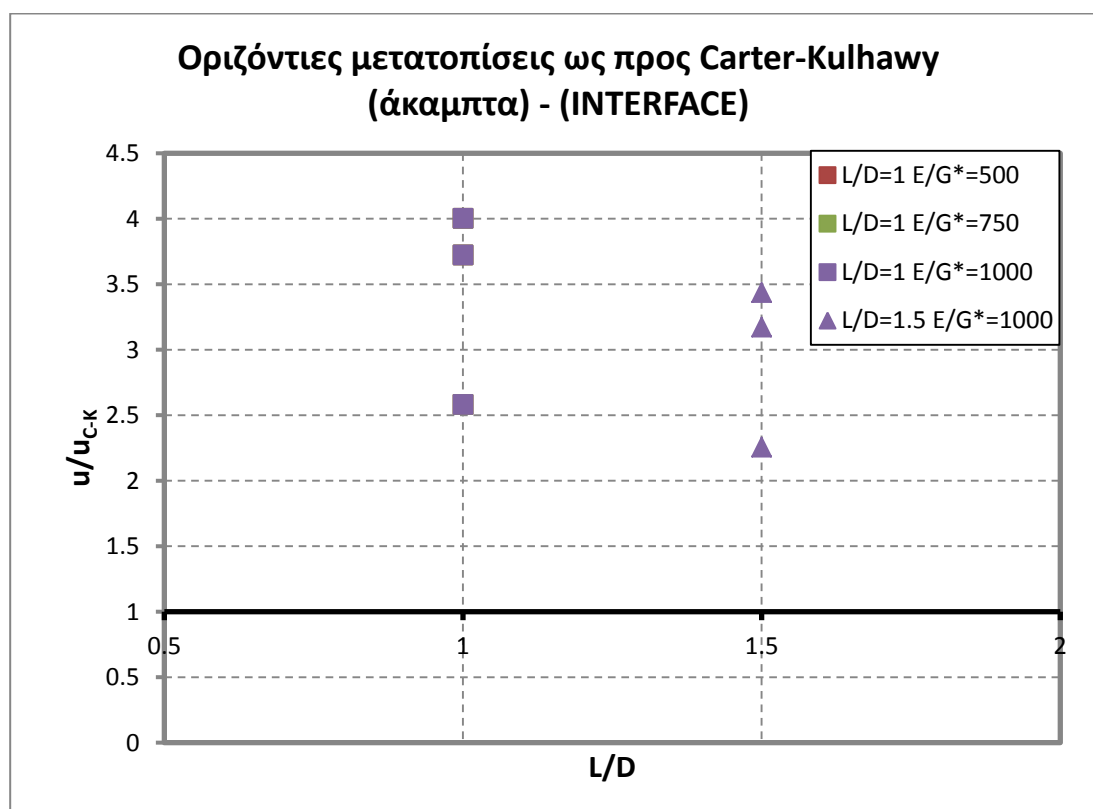
Σύμφωνα λοιπόν με το παραπάνω κριτήριο, εντάσσονται και οι παρακάτω περιπτώσεις στην κατηγορία των άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες:

Πίνακας 5-9. Περιπτώσεις φρεάτων με διεπιφάνειες που εντάσσονται στην κατηγορία των άκαμπτων

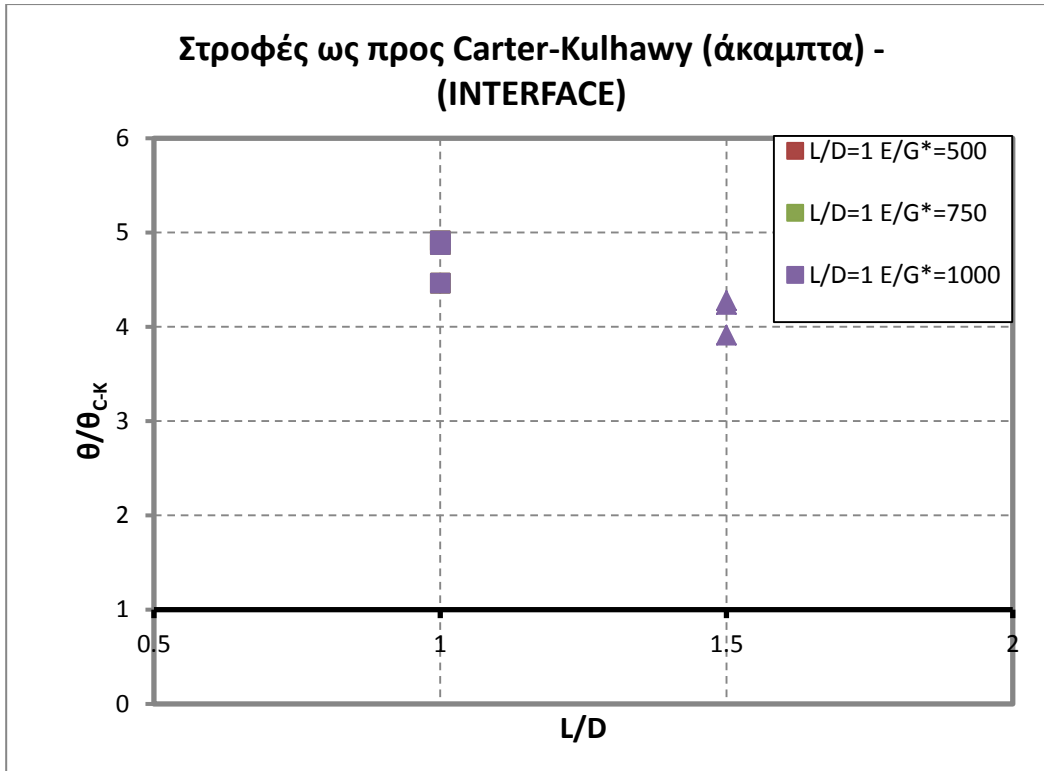
L/D	E/G*
3	500
	750
	1000

### 5.8.3 Σύγκριση με τα αποτελέσματα των Carter και Kulhawy

Στην παράγραφο αυτή, συγκρίνονται οι τιμές των οριζόντιων μετακινήσεων και στροφών της κεφαλής εφαρμόζοντας τις σχέσεις (5-7) και (5-8) για άκαμπτα φρέατα με διεπιφάνειες, και τις σχέσεις (2-8) και (2-9) των Carter και Kulhawy. Τα φρέατα που μετέχουν σε αυτή τη σύγκριση είναι αυτά που θεωρούνται άκαμπτα και στις δύο μεθοδολογίες και έχουν ήδη παρουσιαστεί στον Πίνακα 4-9. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Σχήμα 5-39. Οριζόντιες μετακινήσεις άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες ως προς Carter-Kulhawy



Σχήμα 5-40. Στροφές άκαμπτων φρεάτων με διεπιφάνειες ως προς Carter-Kulhawy

### 5.9 Συμπεράσματα

- Μεταξύ των περιπτώσεων φρεάτων με και χωρίς διεπιφάνειες, παρατηρήθηκαν αισθητές διαφορές στα μεγέθη των οριζόντιων μετακινήσεων και στροφών κεφαλής. Οι διαφορές αυτές γίνονται εντονότερες αυξανόμενης της εκκεντρότητας (e).
- Από τα διαγράμματα Σχήμα 5-39 και Σχήμα 5-40 γίνεται εμφανές ότι οι διαφορές των αποτελεσμάτων έπειτα από εφαρμογή της νέας μεθοδολογίας με διεπιφάνειες, σε σχέση με εκείνα των Carter Kulhawy παρουσιάζουν πολύ μεγάλες διαφορές. Συγκεκριμένα, για τις οριζόντιες μετατοπίσεις κεφαλής οι διαφορές αυτές για άκαμπτα φρέατα αγγίζουν το 300%, ενώ για τις στροφές το 400%. Συμπερασματικά, οι Carter και Kulhawy σίγουρα δεν είχαν λάβει υπόψη στη μεθοδολογία τους τις αποκολλήσεις φρέατος-περιβάλλουσας βραχώμαζας.
- Για φρέατα με διεπιφάνειες ισχύει παρεμφερές κριτήριο δυσκαμψίας, με τα αντίστοιχα χωρίς διεπιφάνειες (σχέση (5–17)).
- Οι οριζόντιες μετακινήσεις και στροφές κεφαλής φρεάτων με διεπιφάνειες προκύπτουν από τις αντίστοιχες σχέσεις για φρέατα χωρίς διεπιφάνειες (σχέσεις (4–13 και (4–14) πολλαπλασιάζοντας τους επιμέρους όρους που προσομοιώνουν τα ελατήρια με τους εξής συντελεστές:

$\Lambda_{uH}$	$\Lambda_{uM}=\Lambda_{\theta H}$	$\Lambda_{\theta M}$
$2.8 \left(\frac{L}{D}\right)^{-1/2}$	$3.7 \left(\frac{L}{D}\right)^{-8/15}$	$3.7 \left(\frac{L}{D}\right)^{-1/2}$

# 6 Σύνοψη και αποτίμηση της μεθοδολογίας – Συμπεράσματα - Προτάσεις

## 6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η πορεία υπολογισμού των οριζόντιων μετατοπίσεων και των στροφών κεφαλής άκαμπτων φρεάτων με και χωρίς διεπιφάνειες, όπως αυτή αναπτύχθηκε στα κεφάλαια 5 και 4 αντίστοιχα. Επιπλέον, παρουσιάζεται μια πρακτική εφαρμογή των συντελεστών  $\Lambda$ , οι οποίοι συνδέουν τις σχέσεις υπολογισμού των μετατοπίσεων των φρεάτων με διεπιφάνειες με τις αντίστοιχες των φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες. Στη συνέχεια, εξετάζονται τρεις περιπτώσεις φρεάτων που υπόκεινται σε εγκάρσια φόρτιση με διεπιφάνειες και χωρίς, και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με αυτά που υπολογίζονται βάσει της μεθοδολογίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος, γίνεται η καταγραφή των συμπερασμάτων της εργασίας και προτείνονται κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα.

## 6.2 Συνοπτική ανασκόπηση της μεθοδολογίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναλύθηκαν φρέατα πακτώσεως διαμέτρου  $D=5\text{m}$  και μήκους  $L=5, 7.5, 10$  και  $15\text{m}$ . Αρχικά, τα φρέατα προσομοιώθηκαν χωρίς διεπιφάνειες και εκτελέστηκαν ελαστικές αναλύσεις, από τις οποίες προέκυψαν διαφορές με τη μεθοδολογία των Carter και Kulhawy ως προς τα αποτελέσματα των μετακινήσεων και στροφών κεφαλής. Για το λόγο αυτό, ακολούθησε μια παραμετρική διερεύνηση για διάφορες τιμές σχετικής δυσκαμψίας φρέατος-βραχόμαζας  $E/G^*=10$  έως  $1000$  και για τρεις τιμές εκκεντρότητας  $e=M/H=0, 15$  και  $30\text{m}$ , όπου  $H=20\text{MN}$  το εγκάρσιο φορτίο στην κεφαλή, κοινό για όλες τις αναλύσεις, και  $M$  η αντίστοιχη ροπή. Οι τιμές των εγκάρσιων φορτίων επιλέχθηκαν τέτοιες ώστε τα μεγέθη που θα προκύψουν να είναι συγκρίσιμα, αφού διαπιστώθηκε αναλογική αύξηση των παραμορφώσεων με αύξηση του φορτίου. Από τις αναλύσεις αυτές οριοθετήθηκαν οι περιπτώσεις των άκαμπτων φρεάτων και προσδιορίστηκαν οι σχέσεις που συνθέτουν την πρόταση υπολογισμού των οριζόντιων μετατοπίσεων και στροφών κεφαλής φρεάτων χωρίς διεπιφάνεια:

$$u = \left[ 0.29 \left( \frac{L}{D} \right)^{-\frac{1}{5}} + 0.20 \left( \frac{e}{D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-\frac{2}{3}} \right] \left( \frac{H}{G^*D} \right) \quad (6-1)$$

$$\theta = \left[ 0.20 \left( \frac{L}{D} \right)^{-\frac{2}{3}} + 0.34 \left( \frac{e}{D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-\frac{3}{2}} \right] \left( \frac{H}{G^*D^2} \right) \quad (6-2)$$

Οι σχέσεις αυτές αποτελούν διόρθωση των αντίστοιχων σχέσεων των Carter και Kulhawy. Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας προέκυψε η θεώρηση άκαμπτων φρεάτων βάσει των σφαλμάτων των μετακινήσιμων μεγεθών σε σχέση με τα αντίστοιχα των αναλύσεων:

$$\frac{L}{D} \leq 0.25 \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{0.4} \quad (6-3)$$

Στη συνέχεια, εκτελέστηκαν οι αντίστοιχες αναλύσεις των φρεάτων με διεπιφάνειες. Οι αναλύσεις αυτές λάμβαναν υπόψη σχετική ολίσθηση και αποκόλληση των διεπιφανειών φρέατος βραχόμαζας προσομοιώνοντας πιο ρεαλιστικά τις συνθήκες εγκάρσιας φόρτισης. Παρατηρήθηκε αποκόλληση των φρεάτων από την περιβάλλουσα βραχόμαζα στο πίσω μέρος τους και στη βάση από τα πρώτα στάδια της φόρτισης. Το φαινόμενο της αποκόλλησης επιτρέπει στα φρέατα να συμπεριφέρονται με μεγαλύτερη ακαμψία, λόγω των μηδενικών εφελκυστικών τάσεων στην πίσω πλευρά τους. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε διεύρυνση του κριτηρίου δυσκαμψίας:

$$\frac{L}{D} \leq 0.30 \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{0.4} \quad (6-4)$$

Με ανάλογο τρόπο προέκυψαν και οι σχέσεις υπολογισμού των οριζόντιων μετακινήσεων και στροφών κεφαλής φρεάτων με διεπιφάνειες:

$$u = \left[ 0.82 \left( \frac{L}{D} \right)^{-\frac{2}{3}} + 0.73 \left( \frac{e}{D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-\frac{6}{5}} \right] \left( \frac{H}{G^*D} \right) \quad (6-5)$$

$$\theta = \left[ 0.73 \left( \frac{L}{D} \right)^{-\frac{6}{5}} + 1.25 \left( \frac{e}{D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-2} \right] \left( \frac{H}{G^*D^2} \right) \quad (6-6)$$

Οι μετατοπίσεις αυτές μπορούν να υπολογιστούν από τις αντίστοιχες χωρίς διεπιφάνειες, αν οι επιμέρους συνιστώσες τους ( $u_0$ ,  $u_M$ ,  $\theta_0$ ,  $\theta_M$ ) πολλαπλασιαστούν με τους συντελεστές  $\Lambda$  του πίνακα

**Πίνακας 6-1** Πολλαπλασιαστικοί συντελεστές  $\Lambda$  για σχέσεις φρεάτων με διεπιφάνειες

$\Lambda_{uH}$	$\Lambda_{uM}=\Lambda_{\theta H}$	$\Lambda_{\theta M}$
$2.8 \left( \frac{L}{D} \right)^{-1/2}$	$3.7 \left( \frac{L}{D} \right)^{-8/15}$	$3.7 \left( \frac{L}{D} \right)^{-1/2}$

σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$u = u_0 \Lambda_{uH} + u_M \Lambda_{uM} \quad (6-7)$$

$$\theta = \theta_0 \Lambda_{\theta H} + \theta_M \Lambda_{\theta M} \quad (6-8)$$

όπου:

$$u_0 = 0.29 \left( \frac{H}{G^*D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-1/5} \quad (6-9)$$

$$\theta_0 = 0,2 \left( \frac{H}{G^* D^2} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-2/3} \quad (6-10)$$

$$u_M = 0,2 \left( \frac{H}{G^* D^2} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-2/3} \quad (6-11)$$

$$\theta_M = 0,34 \left( \frac{H}{G^* D^3} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-3/2} \quad (6-12)$$

Η μεθοδολογία καταλήγει στον υπολογισμό των οριζόντιων μετατοπίσεων και στροφών της κεφαλής φρεάτων με διεπιφάνειες από τις σχέσεις:

$$u = \left[ 0,29 \left( \frac{L}{D} \right)^{-\frac{1}{5}} \Lambda_{uH} + 0,20 \left( \frac{e}{D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-\frac{2}{3}} \Lambda_{uM} \right] \left( \frac{H}{G^* D} \right) \quad (6-13)$$

$$\theta = \left[ 0,20 \left( \frac{L}{D} \right)^{-\frac{2}{3}} \Lambda_{\theta H} + 0,34 \left( \frac{e}{D} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^{-\frac{3}{2}} \Lambda_{\theta M} \right] \left( \frac{H}{G^* D^2} \right) \quad (6-14)$$

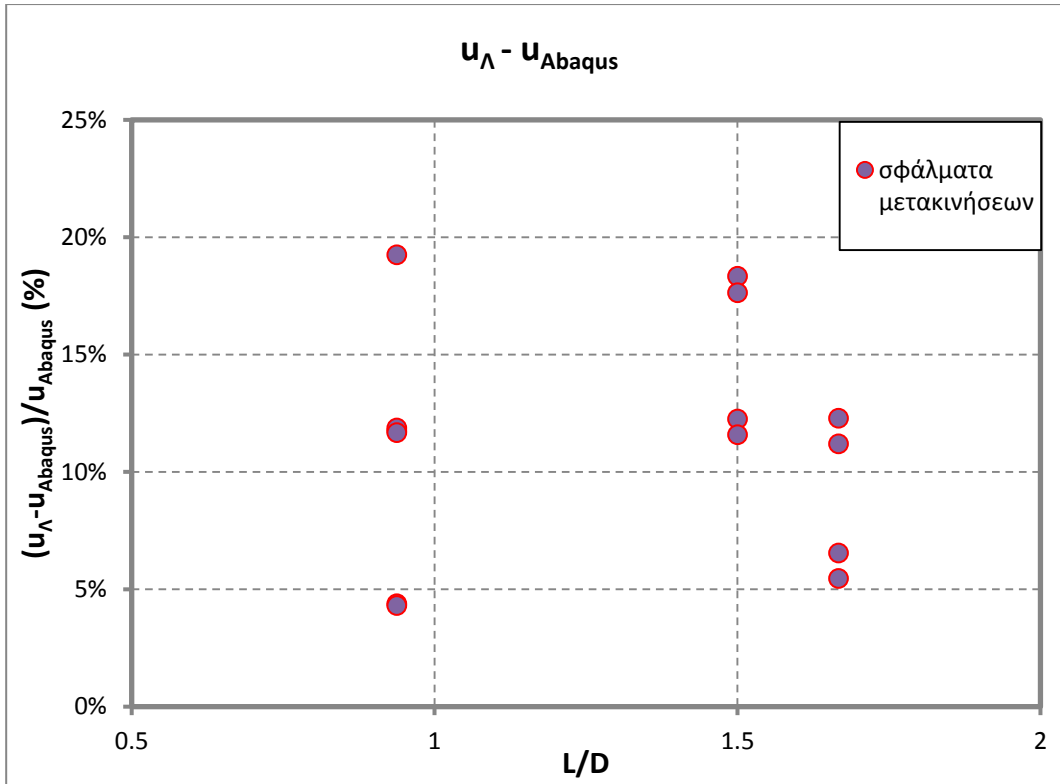
### 6.3 Εφαρμογή της μεθοδολογίας

Στην παρούσα παράγραφο, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στη διπλωματική εργασία εφαρμόζεται σε περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων, ώστε να επαληθευτεί το πεδίο εφαρμογής της και να διαπιστωθεί η χρησιμότητά της. Ακολουθούν δύο εφαρμογές από τις οποίες η πρώτη επαληθεύει τους συντελεστές  $\Lambda$  και η δεύτερη την προτεινόμενη μεθοδολογία στο σύνολό της καθώς και τα όρια δυσκαμψίας.

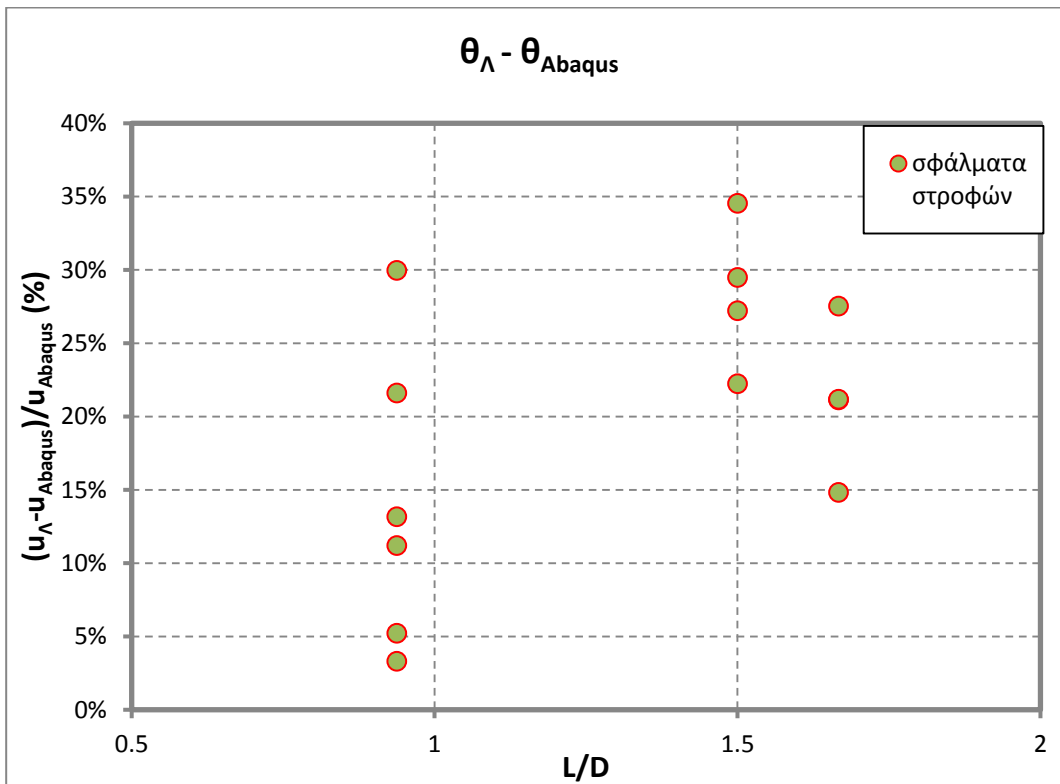
#### 6.3.1 Εφαρμογή 1

Η εφαρμογή αυτή στοχεύει στην επαλήθευση των αποτελεσμάτων μετακινήσεων και στροφών κεφαλής φρεάτων με διεπιφάνειες τα οποία προκύπτουν από τις σχέσεις (6-13 και (6-14 μέσω των μετακινήσεων και στροφών φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν τρία φρέατα με λόγο μήκους προς διάμετρο  $L/D=12/8$ ,  $5/3$  και  $7/8$  αντίστοιχα και τρεις περιπτώσεις βραχομαζών σχετικής δυσκαμψίας  $E/G^*=100$ ,  $300$  και  $500$ . Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά, εκτελέστηκαν οκτώ (8) αναλύσεις, αφού το φρέαρ  $L/D=5/3=1.67$  για  $E/G^*=100$  δεν είναι άκαμπτο. Οι αναλύσεις αφορούσαν φρέατα χωρίς διεπιφάνεια, με οριζόντιο φορτίο  $H=20MN$  και μηδενική ροπή, από τις οποίες υπολογίστηκαν οι επιμέρους μετακινήσεις και στροφές  $u_0$  και  $\theta_0$ , και με ροπή εκκεντρότητας  $e=30m$  από τις οποίες υπολογίστηκαν τα συνολικά μεγέθη  $u$  και  $\theta$  και μέσω αυτών οι επιμέρους μετακινήσεις και στροφές  $u_M=u-u_0$  και  $\theta_M=\theta-\theta_0$ . Τα μεγέθη αυτά ( $u_0$ ,  $\theta_0$ ,  $u_M$  και  $\theta_M$ ) πολλαπλασιάστηκαν με τους αντίστοιχους συντελεστές  $\Lambda$  ώστε να προκύψουν οι μετακινήσεις και οι στροφές με διεπιφάνειες. Στη συνέχεια εκτελέστηκαν οι αντίστοιχες αναλύσεις με διεπιφάνειες για δύο διαφορετικές τιμές της γωνίας τριβής της βραχώμαζας, μεγαλύτερες από εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των εξισώσεων. Οι τιμές των μετατοπίσεων που προέκυψαν από τους συντελεστές  $\Lambda$  συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων αναλύσεων με διεπιφάνειες. Τα ποσοστιαία σφάλματα που προέκυψαν από τη σύγκριση αυτή παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα:





Σχήμα 6-1. Ποσοστιαίες διαφορές οριζόντιων μετατοπίσεων κεφαλής υπολογισμένων με συντελεστές  $\Lambda$  ως προς Abaqus με διεπιφάνειες



Σχήμα 6-2. Ποσοστιαίες διαφορές στροφών κεφαλής υπολογισμένων με συντελεστές  $\Lambda$  ως προς Abaqus με διεπιφάνειες

### 6.3.2 Εφαρμογή 2

Η εφαρμογή αυτή στοχεύει στον προσδιορισμό των σφαλμάτων της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε περιπτώσεις φρεάτων που ικανοποιούν μεν το κριτήριο δυσκαμψίας, παρουσιάζουν δε αβεβαιότητες, αφού δε θεωρήθηκαν άκαμπτα εξ' αρχής, αλλά εντάχθηκαν στην κατηγορία αυτή κατά την ανάπτυξη του κριτηρίου δυσκαμψίας (παράγραφοι 4.5.2 και 0). Οι αναλύσεις αφορούν φρέατα με λόγο  $L/D$  όπως και στην Εφαρμογή 1 για τις ίδιες τιμές σχετικής δυσκαμψίας φρέατος-βραχόμαζας. Επιπλέον, σε αυτή την εφαρμογή εκτελέστηκαν και οι αναλύσεις για το φρέαρ με  $L/D=1.67$  για  $E/G^*=100$ , περίπτωση η οποία θεωρείται άκαμπτη για προσομοίωση με διεπιφάνειες, αλλά εύκαμπτη για προσομοίωση χωρίς (σχέσεις (6-3 και (6-4)). Τα χαρακτηριστικά των αναλύσεων και τα σφάλματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας τις προτεινόμενες σχέσεις ως προς τα αποτελέσματά τους παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 6-2- Ποσοστιαίες διαφορές μετακινήσεων και στροφών κεφαλής με και χωρίς διεπιφάνειες:

Περιοχή γραφημάτων  
 ρς αναλύσεις του Abaqus-11

A/A	L/D	E/G*	φ' (°)	Σφάλματα μετακίνησης χωρίς διεπιφάνειες	Σφάλματα στροφής χωρίς διεπιφάνειες	Σφάλματα μετακίνησης με διεπιφάνειες	Σφάλματα στροφής με διεπιφάνειες
1	12/8 = 1.5	300	35	-0.65%	-8.61%	11.00%	16.25%
2	12/8 = 1.5	300	40	-0.65%	-8.61%	17.01%	22.94%
3	5/3 = 1.67	300	35	-3.74%	-12.71%	2.57%	5.72%
4	5/3 = 1.67	300	40	-3.74%	-12.71%	8.10%	11.30%
5	7/8 = 0.94	300	35	4.05%	2.75%	8.38%	8.11%
6	7/8 = 0.94	300	40	4.05%	2.75%	16.03%	16.28%
7	12/8 = 1.5	100	40	-7.43%	-32.68%	10.66%	2.38%
8	12/8 = 1.5	100	45	-7.43%	-32.68%	15.96%	7.09%
9	5/3 = 1.67	100	40	-12.42%	-40.03%	1.12%	-11.09%
10	5/3 = 1.67	100	45	-12.42%	-40.03%	6.22%	-7.30%
11	7/8 = 0.94	100	40	1.26%	-11.28%	13.02%	7.90%
12	7/8 = 0.94	100	45	1.26%	-11.28%	20.47%	15.32%
13	12/8 = 1.5	500	35	0.34%	-1.70%	11.51%	20.15%
14	12/8 = 1.5	500	40	0.34%	-1.70%	17.55%	27.29%
15	5/3 = 1.67	500	35	-2.14%	-3.82%	3.27%	10.44%
16	5/3 = 1.67	500	40	-2.14%	-3.82%	8.88%	16.55%
17	7/8 = 0.94	500	35	3.95%	5.49%	8.20%	8.99%
18	7/8 = 0.94	500	40	3.95%	5.49%	15.84%	17.30%

## 6.4 Συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

### 6.4.1 Συμπεράσματα

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Από τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας Carter και Kulhawy παρατηρήθηκε γραμμική σχέση των οριζόντιων μετατοπίσεων και στροφών κεφαλής με την εκκεντρότητα  $e=M/H$ . Η συγκεκριμένη παρατήρηση αφορά φρέατα με  $L/D=1 \div 3$  και τιμές σχετικής δυσκαμψίας  $E/G^*=10 \div 1000$ .
- Διαπιστώθηκαν διαφορές της τάξεως του  $10 \div 30\%$  μεταξύ των αποτελεσμάτων στροφών και μετακινήσεων από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων ως προς τις αντίστοιχες που υπολογίζονται από τη μεθοδολογία των Carter και Kulhawy για συνθήκες πλήρους συνάφειας φρέατος-βραχόμαζας. Οι διαφορές αυτές αυξάνονται δραματικά όταν λαμβάνεται υπόψη η σχετική ολίσθηση και η αποκόλληση στις διεπιφάνειες της εν λόγω θεμελίωσης με το περιβάλλον εδαφικό υλικό.
- Η συσχέτιση στροφών και μετακινήσεων που προκύπτουν από την προτεινόμενη μεθοδολογία με τις αντίστοιχες που υπολογίστηκαν από τις ελαστικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων κρίθηκε ικανοποιητική. Το σχετικό σφάλμα των προτεινόμενων σχέσεων δεν ξεπερνάει γενικά το 10% για προσομοίωση του συστήματος φρέατος-βραχόμαζας με και χωρίς διεπιφάνειες.
- Προτείνονται συγκεκριμένα ανισοτικά κριτήρια συναρτήσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του φρέατος και της σχετικής δυσκαμψίας φρέατος-βραχόμαζας, βάσει των οποίων διαπιστώνεται αν ένα φρέαρ συμπεριφέρεται ως άκαμπτο. Φρέατα που δε μετείχαν στη διαδικασία εξαγωγής των προτεινόμενων σχέσεων δύναται να θεωρούνται άκαμπτα σύμφωνα με τις κατανομές σφάλματος των μετακινήσεών τους με εφαρμογή των προαναφερθέντων κριτηρίων.
- Συστήνεται η χρήση πολλαπλασιαστικών συντελεστών  $\Lambda$  επί των μετακινήσεων και στροφών κεφαλής που υπολογίζονται από αναλύσεις άκαμπτων φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες. Συνεπώς, μειώνεται το υπολογιστικό κόστος των αριθμητικών αναλύσεων. Η συγκεκριμένη πρόταση προϋποθέτει αποδοχή υπερεκτίμησης των τελικών αποτελεσμάτων μετακινήσεων κατά 20% και στροφών κατά 30%. Σημειώνεται ότι η εν λόγω απόκλιση των στροφών που υπολογίζονται από τη μεθοδολογία οφείλεται στα μικρά απόλυτα μεγέθη αυτών, εξαιτίας της ελαστικής απόκρισης των φρεάτων που μελετήθηκαν.

### 6.4.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Οι προτεινόμενες σχέσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορούν άκαμπτα φρέατα πακτώσεως υπό εγκάρσια φόρτιση και συγκεντρωμένη ροπή κεφαλής. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία μπορεί να επεκταθεί σε εύκαμπτα φρέατα, ώστε να καταστεί δυνατή η πλήρης αξιολόγηση των σχέσεων κατά Carter και Kulhawy.
- Στην παρούσα εργασία παρατηρήθηκε επίδραση του συντελεστή τριβής στα αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τη μελέτη της ελαστικής απόκρισης των φρεάτων. Για το λόγο αυτό προτείνεται παραμετρική διερεύνηση του συντελεστή τριβής φρέατος-βραχόμαζας και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα των προτεινόμενων σχέσεων.

- Τέλος, συνίσταται η κατεύθυνση των μη-γραμμικών αναλύσεων για τα συγκεκριμένα φρέατα με ανάλογα καταστατικά προσομοιώματα (Hoek-Brown, Drucker-Prager) για τον υπολογισμό του οριακού φορτίου, των αντίστοιχων μετακινήσεων και στροφών κεφαλής και τον προσδιορισμό της οριακής τιμής του φορτίου, για το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί η προτεινόμενη μεθοδολογία (όριο ελαστικής απόκρισης).

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

Πίνακες μετατοπίσεων κατά μήκος του άξονα των φρεάτων (παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα), των απολύτως άκαμπτων στερεών και οι σχετικές διαφορές για περιπτώσεις με και χωρίς διεπιφάνειες:

Πίνακας 0-1 Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=1, e=0

L/D=1							
M/H=0				interface			
E/G*=10	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	5.61E-04	5.28E-04	-5.82%	27432	1.59E-03	1.53E-03	-3.27%
506	4.97E-04	4.87E-04	-2.18%	27453	1.38E-03	1.37E-03	-1.31%
505	4.38E-04	4.45E-04	1.59%	27454	1.19E-03	1.20E-03	0.74%
504	3.84E-04	4.03E-04	5.03%	27455	1.00E-03	1.03E-03	2.68%
503	3.36E-04	3.61E-04	7.57%	27456	8.24E-04	8.60E-04	4.29%
502	2.94E-04	3.19E-04	8.68%	27457	6.56E-04	6.91E-04	5.28%
501	2.57E-04	2.77E-04	7.80%	27458	4.96E-04	5.22E-04	5.23%
500	2.26E-04	2.36E-04	4.40%	27459	3.42E-04	3.53E-04	3.18%
499	1.98E-04	1.94E-04	-2.06%	27460	1.92E-04	1.84E-04	-4.12%
498	1.73E-04	1.52E-04	-12.04%	27461	4.20E-05	1.57E-05	-62.67%
497	1.49E-04	1.10E-04	-26.07%	27321	-1.15E-04	-1.53E-04	33.26%
L/D=1							
M/H=0				interface			
E/G*=50	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	2.50E-03	2.45E-03	-2.08%	27432	6.72E-03	0.006658983	-0.85%
506	2.29E-03	2.27E-03	-0.90%	27453	5.99E-03	0.005968804	-0.35%
505	2.09E-03	2.09E-03	0.27%	27454	5.27E-03	0.005278625	0.14%
504	1.89E-03	1.92E-03	1.30%	27455	4.56E-03	0.004588446	0.60%
503	1.71E-03	1.74E-03	2.08%	27456	3.86E-03	0.003898268	0.97%
502	1.53E-03	1.57E-03	2.47%	27457	3.17E-03	0.003208089	1.18%
501	1.36E-03	1.39E-03	2.32%	27458	2.49E-03	0.00251791	1.16%
500	1.20E-03	1.22E-03	1.46%	27459	1.81E-03	0.001827731	0.72%
499	1.05E-03	1.04E-03	-0.27%	27460	1.14E-03	0.001137553	-0.61%
498	8.94E-04	8.67E-04	-3.02%	27461	4.74E-04	0.000447374	-5.63%
497	7.42E-04	6.91E-04	-6.84%	27321	-2.03E-04	0.000242805	19.43%
L/D=1							
M/H=0				interface			
E/G*=100	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	5.43E-03	5.37E-03	-1.06%	27432	1.50E-02	1.50E-02	-0.39%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

506	5.02E-03	4.99E-03	-0.47%	27453	1.35E-02	1.34E-02	-0.16%
505	4.61E-03	4.62E-03	0.10%	27454	1.19E-02	1.19E-02	0.06%
504	4.21E-03	4.24E-03	0.61%	27455	1.03E-02	1.03E-02	0.27%
503	3.82E-03	3.86E-03	0.99%	27456	8.74E-03	8.78E-03	0.43%
502	3.44E-03	3.48E-03	1.19%	27457	7.18E-03	7.22E-03	0.53%
501	3.07E-03	3.11E-03	1.13%	27458	5.64E-03	5.67E-03	0.52%
500	2.71E-03	2.73E-03	0.73%	27459	4.10E-03	4.12E-03	0.32%
499	2.36E-03	2.35E-03	-0.10%	27460	2.57E-03	2.56E-03	-0.28%
498	2.00E-03	1.98E-03	-1.41%	27461	1.04E-03	1.01E-03	-2.60%
497	1.65E-03	1.60E-03	-3.21%	27321	-5.02E-04	-5.41E-04	7.89%
L/D=1							
M/H=0				interface			
E/G*=150	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	7.08E-03	7.02E-03	-0.83%	27432	1.94E-02	0.019311401	-0.30%
506	6.56E-03	6.53E-03	-0.37%	27453	1.73E-02	0.01732238	-0.13%
505	6.04E-03	6.04E-03	0.08%	27454	1.53E-02	0.01533336	0.05%
504	5.52E-03	5.55E-03	0.47%	27455	1.33E-02	0.013344339	0.21%
503	5.02E-03	5.06E-03	0.77%	27456	1.13E-02	0.011355319	0.34%
502	4.53E-03	4.57E-03	0.92%	27457	9.33E-03	0.009366298	0.41%
501	4.04E-03	4.08E-03	0.88%	27458	7.35E-03	0.007377277	0.40%
500	3.57E-03	3.59E-03	0.57%	27459	5.38E-03	0.005388257	0.25%
499	3.10E-03	3.10E-03	-0.07%	27460	3.41E-03	0.003399236	-0.21%
498	2.63E-03	2.60E-03	-1.08%	27461	1.44E-03	0.001410216	-1.88%
497	2.17E-03	2.11E-03	-2.46%	27321	-5.39E-04	0.000578805	7.40%
L/D=1							
M/H=0				interface			
E/G*=500	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	2.43E-02	2.42E-02	-0.25%	27432	7.06E-02	7.06E-02	-0.09%
506	2.26E-02	2.26E-02	-0.11%	27453	6.33E-02	6.32E-02	-0.04%
505	2.09E-02	2.09E-02	0.02%	27454	5.59E-02	5.59E-02	0.02%
504	1.92E-02	1.92E-02	0.14%	27455	4.85E-02	4.85E-02	0.06%
503	1.75E-02	1.75E-02	0.23%	27456	4.12E-02	4.12E-02	0.10%
502	1.58E-02	1.59E-02	0.27%	27457	3.38E-02	3.39E-02	0.12%
501	1.41E-02	1.42E-02	0.26%	27458	2.65E-02	2.65E-02	0.12%
500	1.25E-02	1.25E-02	0.17%	27459	1.92E-02	1.92E-02	0.08%
499	1.08E-02	1.08E-02	-0.02%	27460	1.19E-02	1.19E-02	-0.06%
498	9.19E-03	9.16E-03	-0.32%	27461	4.54E-03	4.51E-03	-0.60%
497	7.54E-03	7.48E-03	-0.72%	27321	-2.79E-03	-2.83E-03	1.44%
L/D=1							
M/H=0				interface			
E/G*=750	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%

Παράρτημα

487	3.47E-02	3.46E-02	-0.18%	27432	1.01E-01	1.01E-01	-0.06%
506	3.22E-02	3.22E-02	-0.08%	27453	9.03E-02	9.03E-02	-0.03%
505	2.98E-02	2.98E-02	0.01%	27454	7.98E-02	7.98E-02	0.01%
504	2.74E-02	2.74E-02	0.10%	27455	6.93E-02	6.93E-02	0.04%
503	2.50E-02	2.50E-02	0.16%	27456	5.88E-02	5.89E-02	0.07%
502	2.26E-02	2.27E-02	0.19%	27457	4.83E-02	4.84E-02	0.08%
501	2.02E-02	2.03E-02	0.18%	27458	3.79E-02	3.79E-02	0.08%
500	1.79E-02	1.79E-02	0.12%	27459	2.74E-02	2.74E-02	0.05%
499	1.55E-02	1.55E-02	-0.01%	27460	1.70E-02	1.70E-02	-0.05%
498	1.31E-02	1.31E-02	-0.22%	27461	6.53E-03	6.50E-03	-0.43%
497	1.08E-02	1.07E-02	-0.51%	27321	-3.93E-03	-3.97E-03	1.04%
L/D=1							
M/H=0				interface			
E/G*=1000	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	4.57E-02	4.57E-02	-0.14%	27432	1.33E-01	1.33E-01	-0.05%
506	4.25E-02	4.25E-02	-0.06%	27453	1.19E-01	1.19E-01	-0.02%
505	3.94E-02	3.94E-02	0.01%	27454	1.05E-01	1.05E-01	0.01%
504	3.62E-02	3.62E-02	0.07%	27455	9.15E-02	9.15E-02	0.03%
503	3.30E-02	3.31E-02	0.12%	27456	7.77E-02	7.77E-02	0.05%
502	2.99E-02	2.99E-02	0.14%	27457	6.39E-02	6.39E-02	0.06%
501	2.67E-02	2.68E-02	0.14%	27458	5.01E-02	5.01E-02	0.06%
500	2.36E-02	2.36E-02	0.09%	27459	3.63E-02	3.63E-02	0.04%
499	2.05E-02	2.05E-02	-0.01%	27460	2.25E-02	2.24E-02	-0.03%
498	1.73E-02	1.73E-02	-0.17%	27461	8.65E-03	8.63E-03	-0.32%
497	1.42E-02	1.42E-02	-0.39%	27321	-5.15E-03	-5.19E-03	0.78%

**Πίνακας 0-2** Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=1, e=15m

L/D=1							
M/H=15				interface			
E/G*=10	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.64E-03	1.36E-03	-16.62%	27432	5.17E-03	4.72E-03	-8.69%
506	1.20E-03	1.17E-03	-2.53%	27453	4.06E-03	3.94E-03	-2.79%
505	8.48E-04	9.72E-04	14.62%	27454	3.04E-03	3.16E-03	3.86%
504	5.76E-04	7.76E-04	34.69%	27455	2.13E-03	2.38E-03	11.73%
503	3.67E-04	5.80E-04	57.87%	27456	1.30E-03	1.60E-03	22.85%
502	2.06E-04	3.84E-04	86.68%	27457	5.48E-04	8.23E-04	50.03%
501	7.77E-05	1.88E-04	141.83%	27458	-1.47E-04	4.26E-05	-128.96%
500	-2.74E-05	-8.03E-06	-70.63%	27459	-7.94E-04	-7.37E-04	-7.13%
499	-1.20E-04	-2.04E-04	70.02%	27460	-1.42E-03	-1.52E-03	7.15%
498	-2.13E-04	-4.00E-04	87.68%	27461	-2.06E-03	-2.30E-03	11.56%
497	-3.25E-04	-5.96E-04	83.54%	27321	-2.79E-03	-3.08E-03	10.16%



Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

L/D=1							
M/H=15				interface			
E/G*=50	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	7.74E-03	7.25E-03	-6.35%	27432	2.35E-02	0.022938557	-2.39%
506	6.43E-03	6.29E-03	-2.05%	27453	1.97E-02	0.019513665	-0.85%
505	5.22E-03	5.34E-03	2.26%	27454	1.60E-02	0.016088773	0.70%
504	4.12E-03	4.39E-03	6.41%	27455	1.24E-02	0.012663881	2.25%
503	3.11E-03	3.43E-03	10.27%	27456	8.89E-03	0.009238989	3.92%
502	2.18E-03	2.48E-03	13.71%	27457	5.48E-03	0.005814097	6.07%
501	1.31E-03	1.52E-03	16.43%	27458	2.15E-03	0.002389205	11.25%
500	4.87E-04	5.69E-04	16.95%	27459	-1.12E-03	-0.001035687	-7.88%
499	-3.05E-04	-3.85E-04	26.08%	27460	-4.36E-03	-0.004460579	2.27%
498	-1.10E-03	-1.34E-03	21.92%	27461	-7.62E-03	-0.007885472	3.45%
497	-1.94E-03	-2.29E-03	18.28%	27321	-1.10E-02	-0.011310364	2.86%
L/D=1							
M/H=15				interface			
E/G*=100	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.68E-02	1.62E-02	-3.29%	27432	5.53E-02	5.47E-02	-1.07%
506	1.43E-02	1.41E-02	-1.14%	27453	4.68E-02	4.67E-02	-0.39%
505	1.19E-02	1.20E-02	0.93%	27454	3.85E-02	3.86E-02	0.29%
504	9.65E-03	9.93E-03	2.86%	27455	3.03E-02	3.05E-02	0.96%
503	7.49E-03	7.83E-03	4.59%	27456	2.21E-02	2.25E-02	1.65%
502	5.41E-03	5.74E-03	6.08%	27457	1.41E-02	1.44E-02	2.48%
501	3.40E-03	3.64E-03	7.16%	27458	6.12E-03	6.37E-03	4.15%
500	1.45E-03	1.55E-03	7.03%	27459	-1.78E-03	-1.69E-03	-5.29%
499	-4.73E-04	-5.47E-04	15.80%	27460	-9.64E-03	-9.74E-03	1.04%
498	-2.39E-03	-2.64E-03	10.44%	27461	-1.75E-02	-1.78E-02	1.54%
497	-4.37E-03	-4.74E-03	8.42%	27321	-2.55E-02	-2.59E-02	1.25%
L/D=1							
M/H=15				interface			
E/G*=150	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
4.87E+02	2.18E-02	2.13E-02	-2.59%	27432	7.02E-02	0.069635875	-0.85%
5.06E+02	1.87E-02	1.85E-02	-0.91%	27453	5.96E-02	0.059453405	-0.31%
5.05E+02	1.57E-02	1.58E-02	0.69%	27454	4.92E-02	0.049270935	0.22%
5.04E+02	1.28E-02	1.31E-02	2.17%	27455	3.88E-02	0.039088465	0.74%
5.03E+02	9.97E-03	1.03E-02	3.50%	27456	2.85E-02	0.028905995	1.27%
5.02E+02	7.25E-03	7.59E-03	4.63%	27457	1.84E-02	0.018723526	1.90%
5.01E+02	4.60E-03	4.85E-03	5.43%	27458	8.29E-03	0.008541056	3.08%
5.00E+02	2.00E-03	2.11E-03	5.30%	27459	-1.74E-03	-0.001641414	-5.50%
4.99E+02	-5.58E-04	-6.31E-04	13.14%	27460	-1.17E-02	-0.011823884	0.86%
4.98E+02	-3.12E-03	-3.37E-03	8.06%	27461	-2.17E-02	-0.022006354	1.24%
4.97E+02	-5.74E-03	-6.11E-03	6.45%	27321	-3.19E-02	-0.032188824	1.01%

Παράρτημα

L/D=1							
M/H=15				interface			
E/G*=500	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	7.46E-02	7.40E-02	-0.80%	27432	2.67E-01	2.67E-01	-0.23%
506	6.48E-02	6.46E-02	-0.29%	27453	2.28E-01	2.28E-01	-0.08%
505	5.51E-02	5.52E-02	0.19%	27454	1.89E-01	1.89E-01	0.06%
504	4.54E-02	4.57E-02	0.63%	27455	1.50E-01	1.50E-01	0.20%
503	3.59E-02	3.63E-02	1.01%	27456	1.11E-01	1.11E-01	0.34%
502	2.65E-02	2.69E-02	1.33%	27457	7.16E-02	7.20E-02	0.50%
501	1.71E-02	1.74E-02	1.55%	27458	3.28E-02	3.30E-02	0.79%
500	7.86E-03	7.97E-03	1.50%	27459	-6.03E-03	-5.94E-03	-1.56%
499	-1.40E-03	-1.46E-03	4.92%	27460	-4.48E-02	-4.49E-02	0.24%
498	-1.06E-02	-1.09E-02	2.38%	27461	-8.36E-02	-8.39E-02	0.33%
497	-2.00E-02	-2.03E-02	1.88%	27321	-1.23E-01	-1.23E-01	0.26%
L/D=1							
M/H=15				interface			
E/G*=750	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.06E-01	1.06E-01	-0.56%	27432	3.81E-01	3.81E-01	-0.16%
506	9.25E-02	9.23E-02	-0.20%	27453	3.25E-01	3.25E-01	-0.06%
505	7.87E-02	7.88E-02	0.13%	27454	2.70E-01	2.70E-01	0.04%
504	6.51E-02	6.54E-02	0.44%	27455	2.14E-01	2.14E-01	0.14%
503	5.15E-02	5.19E-02	0.71%	27456	1.58E-01	1.59E-01	0.24%
502	3.81E-02	3.84E-02	0.93%	27457	1.03E-01	1.03E-01	0.35%
501	2.47E-02	2.50E-02	1.09%	27458	4.73E-02	4.76E-02	0.56%
500	1.14E-02	1.15E-02	1.06%	27459	-8.05E-03	-7.95E-03	-1.24%
499	-1.89E-03	-1.96E-03	3.58%	27460	-6.34E-02	-6.35E-02	0.16%
498	-1.52E-02	-1.54E-02	1.67%	27461	-1.19E-01	-1.19E-01	0.23%
497	-2.85E-02	-2.89E-02	1.32%	27321	-1.74E-01	-1.75E-01	0.18%
L/D=1							
M/H=15				interface			
E/G*=1000	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.40E-01	1.42E-01	1.16%	27432	5.03E-01	5.03E-01	-0.12%
506	1.22E-01	1.24E-01	1.68%	27453	4.30E-01	4.29E-01	-0.04%
505	1.04E-01	1.06E-01	2.25%	27454	3.56E-01	3.56E-01	0.03%
504	8.61E-02	8.86E-02	2.93%	27455	2.83E-01	2.83E-01	0.11%
503	6.82E-02	7.08E-02	3.82%	27456	2.09E-01	2.10E-01	0.18%
502	5.05E-02	5.31E-02	5.14%	27457	1.36E-01	1.36E-01	0.27%
501	3.28E-02	3.53E-02	7.65%	27458	6.29E-02	6.31E-02	0.43%
500	1.52E-02	1.75E-02	15.56%	27459	-1.02E-02	-1.01E-02	-1.01%
499	-2.42E-03	-2.52E-04	-89.59%	27460	-8.32E-02	-8.33E-02	0.12%
498	-2.00E-02	-1.80E-02	-9.92%	27461	-1.56E-01	-1.57E-01	0.17%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

497	-3.77E-02	-3.58E-02	-4.95%	27321	-2.30E-01	-2.30E-01	0.14%
-----	-----------	-----------	--------	-------	-----------	-----------	-------

**Πίνακας 0-3** Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=1, e=30m

L/D=1							
M/H=30				interface			
E/G*=10	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	2.71E-03	2.20E-03	-18.70%	27432	8.87E-03	8.01E-03	-9.73%
506	1.90E-03	1.85E-03	-2.45%	27453	6.82E-03	6.61E-03	-3.13%
505	1.26E-03	1.50E-03	19.36%	27454	4.98E-03	5.21E-03	4.64%
504	7.68E-04	1.15E-03	49.72%	27455	3.32E-03	3.81E-03	14.61%
503	3.99E-04	7.99E-04	100.42%	27456	1.83E-03	2.41E-03	31.48%
502	1.17E-04	4.48E-04	281.77%	27457	4.79E-04	1.01E-03	110.60%
501	-1.02E-04	9.75E-05	-195.67%	27458	-7.56E-04	-3.92E-04	-48.18%
500	-2.80E-04	-2.53E-04	-9.65%	27459	-1.90E-03	-1.79E-03	-5.58%
499	-4.38E-04	-6.04E-04	38.01%	27460	-2.99E-03	-3.19E-03	6.69%
498	-5.99E-04	-9.55E-04	59.46%	27461	-4.13E-03	-4.59E-03	11.26%
497	-7.98E-04	-1.31E-03	63.60%	27321	-5.44E-03	-5.99E-03	10.13%
L/D=1							
M/H=30				interface			
E/G*=50	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.30E-02	1.21E-02	-7.16%	27432	4.04E-02	0.039315493	-2.66%
506	1.06E-02	1.03E-02	-2.29%	27453	3.35E-02	0.03316649	-0.94%
505	8.36E-03	8.59E-03	2.76%	27454	2.68E-02	0.027017488	0.81%
504	6.35E-03	6.85E-03	7.93%	27455	2.03E-02	0.020868485	2.63%
503	4.52E-03	5.12E-03	13.37%	27456	1.41E-02	0.014719482	4.75%
502	2.83E-03	3.39E-03	19.79%	27457	7.93E-03	0.00857048	8.02%
501	1.26E-03	1.65E-03	31.71%	27458	1.96E-03	0.002421477	23.58%
500	-2.27E-04	-8.01E-05	-64.70%	27459	-3.90E-03	-0.003727525	-4.32%
499	-1.66E-03	-1.81E-03	9.50%	27460	-9.69E-03	-0.009876528	1.97%
498	-3.09E-03	-3.55E-03	14.74%	27461	-1.55E-02	-0.016025531	3.24%
497	-4.62E-03	-5.28E-03	14.27%	27321	-2.16E-02	-0.022174533	2.77%
L/D=1							
M/H=30				interface			
E/G*=100	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	2.81E-02	2.71E-02	-3.71%	27432	9.54E-02	9.42E-02	-1.19%
506	2.35E-02	2.32E-02	-1.28%	27453	8.01E-02	7.97E-02	-0.43%
505	1.92E-02	1.94E-02	1.13%	27454	6.50E-02	6.52E-02	0.33%
504	1.51E-02	1.56E-02	3.49%	27455	5.02E-02	5.07E-02	1.11%
503	1.12E-02	1.18E-02	5.83%	27456	3.55E-02	3.62E-02	1.96%
502	7.37E-03	7.99E-03	8.37%	27457	2.10E-02	2.17E-02	3.16%
501	3.73E-03	4.18E-03	12.14%	27458	6.72E-03	7.20E-03	7.20%
500	1.82E-04	3.65E-04	101.23%	27459	-7.48E-03	-7.30E-03	-2.38%

Παράρτημα

499	-3.30E-03	-3.45E-03	4.46%	27460	-2.16E-02	-2.18E-02	0.90%
498	-6.79E-03	-7.26E-03	6.94%	27461	-3.58E-02	-3.63E-02	1.44%
497	-1.04E-02	-1.11E-02	6.58%	27321	-5.02E-02	-5.08E-02	1.20%
L/D=1							
M/H=30				interface			
E/G*=150	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	3.66E-02	3.55E-02	-2.92%	27432	1.21E-01	0.119664321	-0.94%
506	3.09E-02	3.05E-02	-1.02%	27453	1.02E-01	0.101341249	-0.34%
505	2.53E-02	2.56E-02	0.84%	27454	8.28E-02	0.083018176	0.26%
504	2.00E-02	2.06E-02	2.64%	27455	6.41E-02	0.064695104	0.86%
503	1.49E-02	1.56E-02	4.42%	27456	4.57E-02	0.046372032	1.52%
502	9.97E-03	1.06E-02	6.31%	27457	2.74E-02	0.028048959	2.43%
501	5.15E-03	5.62E-03	9.01%	27458	9.24E-03	0.009725887	5.27%
500	4.37E-04	6.29E-04	44.05%	27459	-8.78E-03	-0.008597186	-2.06%
499	-4.21E-03	-4.36E-03	3.42%	27460	-2.67E-02	-0.026920258	0.72%
498	-8.87E-03	-9.34E-03	5.34%	27461	-4.47E-02	-0.04524333	1.16%
497	-1.36E-02	-1.43E-02	5.04%	27321	-6.30E-02	-0.063566403	0.97%
L/D=1							
M/H=30				interface			
E/G*=500	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.25E-01	1.24E-01	-0.91%	27432	4.63E-01	4.62E-01	-0.26%
506	1.07E-01	1.07E-01	-0.33%	27453	3.91E-01	3.91E-01	-0.09%
505	8.92E-02	8.94E-02	0.23%	27454	3.20E-01	3.21E-01	0.07%
504	7.17E-02	7.22E-02	0.75%	27455	2.50E-01	2.50E-01	0.23%
503	5.44E-02	5.50E-02	1.26%	27456	1.79E-01	1.80E-01	0.40%
502	3.72E-02	3.78E-02	1.78%	27457	1.09E-01	1.10E-01	0.63%
501	2.01E-02	2.06E-02	2.46%	27458	3.86E-02	3.91E-02	1.27%
500	3.22E-03	3.44E-03	6.65%	27459	-3.15E-02	-3.13E-02	-0.56%
499	-1.36E-02	-1.38E-02	1.00%	27460	-1.02E-01	-1.02E-01	0.20%
498	-3.05E-02	-3.10E-02	1.57%	27461	-1.72E-01	-1.72E-01	0.31%
497	-4.75E-02	-4.82E-02	1.47%	27321	-2.42E-01	-2.43E-01	0.25%
L/D=1							
M/H=30				interface			
E/G*=750	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.78E-01	1.77E-01	-0.64%	27432	6.60E-01	6.59E-01	-0.18%
506	1.53E-01	1.52E-01	-0.23%	27453	5.59E-01	5.58E-01	-0.06%
505	1.28E-01	1.28E-01	0.16%	27454	4.58E-01	4.58E-01	0.05%
504	1.03E-01	1.03E-01	0.53%	27455	3.57E-01	3.58E-01	0.16%
503	7.81E-02	7.88E-02	0.88%	27456	2.56E-01	2.57E-01	0.28%
502	5.36E-02	5.42E-02	1.25%	27457	1.56E-01	1.57E-01	0.44%
501	2.92E-02	2.97E-02	1.72%	27458	5.60E-02	5.65E-02	0.90%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

500	4.92E-03	5.13E-03	4.44%	27459	-4.41E-02	-4.39E-02	-0.43%
499	-1.93E-02	-1.94E-02	0.70%	27460	-1.44E-01	-1.44E-01	0.14%
498	-4.35E-02	-4.40E-02	1.10%	27461	-2.44E-01	-2.45E-01	0.21%
497	-6.78E-02	-6.85E-02	1.03%	27321	-3.44E-01	-3.45E-01	0.17%
L/D=1							
M/H=30				interface			
E/G*=1000	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	2.35E-01	2.34E-01	-0.49%	27432	8.70E-01	8.69E-01	-0.13%
506	2.02E-01	2.01E-01	-0.18%	27453	7.37E-01	7.37E-01	-0.05%
505	1.69E-01	1.69E-01	0.12%	27454	6.04E-01	6.04E-01	0.04%
504	1.36E-01	1.37E-01	0.40%	27455	4.72E-01	4.72E-01	0.12%
503	1.03E-01	1.04E-01	0.66%	27456	3.39E-01	3.40E-01	0.21%
502	7.11E-02	7.17E-02	0.94%	27457	2.07E-01	2.07E-01	0.33%
501	3.88E-02	3.93E-02	1.28%	27458	7.45E-02	7.50E-02	0.67%
500	6.73E-03	6.95E-03	3.21%	27459	-5.75E-02	-5.73E-02	-0.32%
499	-2.53E-02	-2.55E-02	0.54%	27460	-1.90E-01	-1.90E-01	0.10%
498	-5.74E-02	-5.78E-02	0.84%	27461	-3.22E-01	-3.22E-01	0.16%
497	-8.95E-02	-9.02E-02	0.78%	27321	-4.54E-01	-4.54E-01	0.13%

**Πίνακας 0-4** Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=1.5, e=0

L/D=1.5							
M/H=0				interface			
E/G*=10	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	5.57E-04	0.000496	-10.94%	27432	1.38E-03	0.001268	-8.30%
506	4.94E-04	0.000464	-6.13%	27453	1.23E-03	0.001168	-5.07%
505	4.35E-04	0.000431	-0.85%	27454	1.08E-03	0.001067	-1.53%
504	3.81E-04	0.000399	4.57%	27455	9.46E-04	0.000966	2.17%
503	3.34E-04	0.000366	9.72%	27456	8.18E-04	0.000866	5.89%
502	2.92E-04	0.000334	14.15%	27457	6.99E-04	0.000765	9.42%
501	2.56E-04	0.000301	17.46%	27458	5.90E-04	0.000664	12.59%
500	2.25E-04	0.000269	19.25%	27459	4.90E-04	0.000564	15.15%
499	1.98E-04	0.000236	19.08%	27460	3.97E-04	0.000463	16.80%
498	1.75E-04	0.000204	16.47%	27461	3.10E-04	0.000363	16.94%
497	1.55E-04	0.000171	10.86%	27321	2.29E-04	0.000262	14.34%
496	1.37E-04	0.000139	1.64%	28467	1.53E-04	0.000161	5.52%
495	1.21E-04	0.000106	-11.92%	28466	8.03E-05	6.05E-05	-24.60%
494	1.07E-04	7.4E-05	-30.63%	28465	9.78E-06	-4E-05	-510.52%
493	9.35E-05	4.16E-05	-55.54%	28464	-6.20E-05	-0.00014	126.94%
492	8.03E-05	9.09E-06	-88.68%	28434	-1.40E-04	-0.00024	72.09%
L/D=1.5							
M/H=0				interface			
E/G*=50	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%

Παράρτημα

487	2.40E-03	0.002286	-4.94%	27432	5.39E-03	0.005246	-2.72%
506	2.22E-03	0.002149	-3.08%	27453	4.95E-03	0.004863	-1.74%
505	2.04E-03	0.002012	-1.15%	27454	4.51E-03	0.004479	-0.71%
504	1.86E-03	0.001876	0.78%	27455	4.08E-03	0.004096	0.32%
503	1.70E-03	0.001739	2.60%	27456	3.66E-03	0.003712	1.33%
502	1.54E-03	0.001603	4.21%	27457	3.26E-03	0.003329	2.26%
501	1.39E-03	0.001466	5.50%	27458	2.86E-03	0.002945	3.06%
500	1.25E-03	0.001329	6.35%	27459	2.47E-03	0.002561	3.69%
499	1.12E-03	0.001193	6.63%	27460	2.09E-03	0.002178	4.09%
498	9.94E-04	0.001056	6.19%	27461	1.72E-03	0.001794	4.13%
497	8.77E-04	0.000919	4.81%	27321	1.36E-03	0.001411	3.60%
496	7.66E-04	0.000783	2.19%	28467	1.01E-03	0.001027	1.99%
495	6.60E-04	0.000646	-2.09%	28466	6.59E-04	0.000644	-2.24%
494	5.58E-04	0.00051	-8.63%	28465	3.13E-04	0.00026	-16.91%
493	4.57E-04	0.000373	-18.36%	28464	-3.32E-05	-0.00012	271.05%
492	3.54E-04	0.000236	-33.18%	28434	-3.88E-04	-0.00051	30.51%
L/D=1.5							
M/H=0				interface			
E/G*=100	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	5.15E-03	0.005007	-2.73%	27432	1.18E-02	0.011637	-1.34%
506	4.80E-03	0.004715	-1.74%	27453	1.09E-02	0.010794	-0.86%
505	4.46E-03	0.004423	-0.73%	27454	9.99E-03	0.009951	-0.36%
504	4.12E-03	0.004131	0.27%	27455	9.10E-03	0.009108	0.13%
503	3.79E-03	0.003838	1.21%	27456	8.22E-03	0.008265	0.61%
502	3.48E-03	0.003546	2.04%	27457	7.35E-03	0.007422	1.04%
501	3.17E-03	0.003254	2.71%	27458	6.49E-03	0.006579	1.42%
500	2.87E-03	0.002962	3.17%	27459	5.64E-03	0.005736	1.71%
499	2.58E-03	0.00267	3.35%	27460	4.80E-03	0.004893	1.89%
498	2.30E-03	0.002378	3.18%	27461	3.97E-03	0.00405	1.91%
497	2.03E-03	0.002085	2.56%	27321	3.15E-03	0.003207	1.67%
496	1.77E-03	0.001793	1.32%	28467	2.34E-03	0.002364	0.95%
495	1.51E-03	0.001501	-0.76%	28466	1.54E-03	0.001521	-0.92%
494	1.26E-03	0.001209	-4.05%	28465	7.33E-04	0.000678	-7.40%
493	1.01E-03	0.000917	-9.13%	28464	-7.19E-05	-0.00016	128.88%
492	7.54E-04	0.000624	-17.20%	28434	-8.86E-04	-0.00101	13.77%
L/D=1.5							
M/H=0				interface			
E/G*=150	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	6.69E-03	0.006546	-2.18%	27432	1.51E-02	0.014976	-1.05%
506	6.25E-03	0.006166	-1.40%	27453	1.40E-02	0.013898	-0.68%
505	5.82E-03	0.005786	-0.60%	27454	1.29E-02	0.012821	-0.29%
504	5.40E-03	0.005406	0.19%	27455	1.17E-02	0.011744	0.10%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

503	4.98E-03	0.005026	0.93%	27456	1.06E-02	0.010666	0.47%
502	4.57E-03	0.004646	1.58%	27457	9.51E-03	0.009589	0.81%
501	4.18E-03	0.004266	2.11%	27458	8.42E-03	0.008511	1.11%
500	3.79E-03	0.003886	2.47%	27459	7.34E-03	0.007434	1.34%
499	3.42E-03	0.003506	2.62%	27460	6.26E-03	0.006356	1.47%
498	3.05E-03	0.003126	2.50%	27461	5.20E-03	0.005279	1.49%
497	2.69E-03	0.002746	2.02%	27321	4.15E-03	0.004201	1.30%
496	2.34E-03	0.002366	1.07%	28467	3.10E-03	0.003124	0.75%
495	2.00E-03	0.001987	-0.54%	28466	2.06E-03	0.002047	-0.66%
494	1.66E-03	0.001607	-3.11%	28465	1.02E-03	0.000969	-5.30%
493	1.32E-03	0.001227	-7.10%	28464	-1.50E-05	-0.00011	622.78%
492	9.79E-04	0.000847	-13.52%	28434	-1.06E-03	-0.00119	11.60%
L/D=1.5							
M/H=0				interface			
E/G*=500	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	2.27E-02	0.02257	-0.71%	27432	5.44E-02	0.054283	-0.30%
506	2.14E-02	0.021277	-0.46%	27453	5.05E-02	0.050352	-0.19%
505	2.00E-02	0.019984	-0.21%	27454	4.65E-02	0.046421	-0.08%
504	1.87E-02	0.018691	0.04%	27455	4.25E-02	0.04249	0.03%
503	1.74E-02	0.017399	0.27%	27456	3.85E-02	0.038559	0.14%
502	1.60E-02	0.016106	0.47%	27457	3.45E-02	0.034628	0.23%
501	1.47E-02	0.014813	0.64%	27458	3.06E-02	0.030697	0.32%
500	1.34E-02	0.01352	0.75%	27459	2.67E-02	0.026765	0.38%
499	1.21E-02	0.012227	0.80%	27460	2.27E-02	0.022834	0.43%
498	1.09E-02	0.010934	0.77%	27461	1.88E-02	0.018903	0.43%
497	9.58E-03	0.009642	0.64%	27321	1.49E-02	0.014972	0.38%
496	8.32E-03	0.008349	0.36%	28467	1.10E-02	0.011041	0.23%
495	7.06E-03	0.007056	-0.12%	28466	7.12E-03	0.00711	-0.18%
494	5.82E-03	0.005763	-0.90%	28465	3.23E-03	0.003179	-1.70%
493	4.57E-03	0.00447	-2.14%	28464	-6.57E-04	-0.00075	14.45%
492	3.32E-03	0.003178	-4.18%	28434	-4.56E-03	-0.00468	2.75%
L/D=1.5							
M/H=0				interface			
E/G*=750	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	3.24E-02	0.032207	-0.50%	27432	7.76E-02	0.077468	-0.22%
506	3.05E-02	0.030365	-0.32%	27453	7.20E-02	0.071864	-0.14%
505	2.86E-02	0.028523	-0.15%	27454	6.63E-02	0.06626	-0.06%
504	2.67E-02	0.026682	0.03%	27455	6.06E-02	0.060655	0.02%
503	2.48E-02	0.02484	0.19%	27456	5.50E-02	0.055051	0.09%
502	2.29E-02	0.022998	0.33%	27457	4.94E-02	0.049447	0.16%
501	2.11E-02	0.021157	0.45%	27458	4.37E-02	0.043843	0.22%
500	1.92E-02	0.019315	0.53%	27459	3.81E-02	0.038238	0.27%

Παράρτημα

499	1.74E-02	0.017473	0.57%	27460	3.25E-02	0.032634	0.29%
498	1.55E-02	0.015632	0.55%	27461	2.69E-02	0.02703	0.30%
497	1.37E-02	0.01379	0.45%	27321	2.14E-02	0.021425	0.26%
496	1.19E-02	0.011948	0.26%	28467	1.58E-02	0.015821	0.16%
495	1.01E-02	0.010106	-0.08%	28466	1.02E-02	0.010217	-0.13%
494	8.32E-03	0.008265	-0.63%	28465	4.67E-03	0.004612	-1.19%
493	6.52E-03	0.006423	-1.50%	28464	-8.96E-04	-0.00099	10.70%
492	4.72E-03	0.004581	-2.95%	28434	-6.47E-03	-0.0066	1.95%
L/D=1.5							
M/H=0				interface			
E/G*=1000	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	4.27E-02	0.04251	-0.38%	27432	1.02E-01	0.102259	-0.17%
506	4.02E-02	0.040081	-0.25%	27453	9.50E-02	0.094866	-0.11%
505	3.77E-02	0.037653	-0.11%	27454	8.75E-02	0.087473	-0.05%
504	3.52E-02	0.035224	0.02%	27455	8.01E-02	0.08008	0.01%
503	3.27E-02	0.032796	0.14%	27456	7.26E-02	0.072686	0.07%
502	3.03E-02	0.030367	0.25%	27457	6.52E-02	0.065293	0.12%
501	2.78E-02	0.027939	0.34%	27458	5.78E-02	0.0579	0.17%
500	2.54E-02	0.02551	0.40%	27459	5.04E-02	0.050506	0.20%
499	2.30E-02	0.023082	0.43%	27460	4.30E-02	0.043113	0.22%
498	2.06E-02	0.020653	0.42%	27461	3.56E-02	0.03572	0.23%
497	1.82E-02	0.018225	0.34%	27321	2.83E-02	0.028327	0.20%
496	1.58E-02	0.015796	0.20%	28467	2.09E-02	0.020933	0.12%
495	1.34E-02	0.013368	-0.06%	28466	1.36E-02	0.01354	-0.10%
494	1.10E-02	0.010939	-0.48%	28465	6.20E-03	0.006147	-0.90%
493	8.61E-03	0.008511	-1.14%	28464	-1.15E-03	-0.00125	8.37%
492	6.22E-03	0.006082	-2.25%	28434	-8.51E-03	-0.00864	1.49%

**Πίνακας 0-5** Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=1.5, e=15m

L/D=1.5							
M/H=15				interface			
E/G*=10	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.61E-03	0.00121315	-24.45%	27432	4.14E-03	0.00333	-19.54%
506	1.18E-03	0.00108571	-8.18%	27453	3.30E-03	0.002951	-10.49%
505	8.47E-04	0.00095828	13.18%	27454	2.56E-03	0.002571	0.34%
504	5.90E-04	0.00083084	40.91%	27455	1.93E-03	0.002192	13.68%
503	3.96E-04	0.00070341	77.57%	27456	1.38E-03	0.001812	31.26%
502	2.51E-04	0.00057598	129.56%	27457	9.08E-04	0.001433	57.85%
501	1.42E-04	0.00044854	216.76%	27458	4.99E-04	0.001053	111.18%
500	5.91E-05	0.00032111	443.02%	27459	1.46E-04	0.000674	361.60%
499	-3.11E-06	0.00019367	-6324.04%	27460	-1.57E-04	0.000294	-287.26%
498	-5.02E-05	6.624E-05	-231.98%	27461	-4.16E-04	-8.5E-05	-79.49%



Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

497	-8.61E-05	-6.119E-05	-28.94%	27321	-6.38E-04	-0.00046	-27.16%
496	-1.14E-04	-0.0001886	65.16%	28467	-8.30E-04	-0.00084	1.75%
495	-1.38E-04	-0.0003161	129.84%	28466	-1.00E-03	-0.00122	22.32%
494	-1.59E-04	-0.0004435	178.21%	28465	-1.16E-03	-0.0016	37.75%
493	-1.84E-04	-0.0005709	209.50%	28464	-1.34E-03	-0.00198	47.72%
492	-2.19E-04	-0.0006984	218.60%	28434	-1.57E-03	-0.00236	50.63%
L/D=1.5							
M/H=15				interface			
E/G*=50	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	7.01E-03	0.00607069	-13.35%	27432	1.66E-02	0.015385	-7.20%
506	5.93E-03	0.00549969	-7.30%	27453	1.44E-02	0.01382	-4.25%
505	4.97E-03	0.00492868	-0.88%	27454	1.24E-02	0.012255	-1.22%
504	4.12E-03	0.00435768	5.85%	27455	1.05E-02	0.01069	1.88%
503	3.35E-03	0.00378667	12.91%	27456	8.68E-03	0.009125	5.12%
502	2.67E-03	0.00321567	20.33%	27457	6.96E-03	0.00756	8.63%
501	2.06E-03	0.00264466	28.25%	27458	5.32E-03	0.005996	12.68%
500	1.51E-03	0.00207366	37.03%	27459	3.75E-03	0.004431	18.03%
499	1.02E-03	0.00150266	47.70%	27460	2.25E-03	0.002866	27.28%
498	5.66E-04	0.00093165	64.50%	27461	8.07E-04	0.001301	61.21%
497	1.52E-04	0.00036065	136.58%	27321	-5.85E-04	-0.00026	-54.92%
496	-2.32E-04	-0.0002104	-9.16%	28467	-1.93E-03	-0.00183	-5.27%
495	-5.94E-04	-0.0007814	31.64%	28466	-3.24E-03	-0.00339	4.83%
494	-9.44E-04	-0.0013524	43.24%	28465	-4.52E-03	-0.00496	9.60%
493	-1.30E-03	-0.0019234	47.96%	28464	-5.83E-03	-0.00652	11.92%
492	-1.69E-03	-0.0024944	47.92%	28434	-7.21E-03	-0.00809	12.23%
L/D=1.5							
M/H=15				interface			
E/G*=100	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.46E-02	0.01342275	-7.85%	27432	3.72E-02	0.03592	-3.52%
506	1.28E-02	0.01219675	-4.52%	27453	3.30E-02	0.032336	-2.09%
505	1.11E-02	0.01097075	-1.17%	27454	2.89E-02	0.028752	-0.68%
504	9.54E-03	0.00974475	2.18%	27455	2.50E-02	0.025168	0.72%
503	8.07E-03	0.00851875	5.53%	27456	2.11E-02	0.021585	2.14%
502	6.70E-03	0.00729274	8.87%	27457	1.74E-02	0.018001	3.60%
501	5.41E-03	0.00606674	12.22%	27458	1.37E-02	0.014417	5.20%
500	4.19E-03	0.00484074	15.65%	27459	1.01E-02	0.010834	7.13%
499	3.03E-03	0.00361474	19.32%	27460	6.59E-03	0.00725	10.02%
498	1.93E-03	0.00238874	23.88%	27461	3.13E-03	0.003666	17.19%
497	8.74E-04	0.00116274	33.03%	27321	-2.77E-04	8.24E-05	-129.76%
496	-1.42E-04	-6.326E-05	-55.30%	28467	-3.63E-03	-0.0035	-3.59%
495	-1.13E-03	-0.0012893	14.33%	28466	-6.95E-03	-0.00709	2.02%
494	-2.10E-03	-0.0025153	19.90%	28465	-1.02E-02	-0.01067	4.22%

Παράρτημα

493	-3.07E-03	-0.0037413	21.72%	28464	-1.35E-02	-0.01425	5.20%
492	-4.09E-03	-0.0049673	21.49%	28434	-1.69E-02	-0.01784	5.29%
L/D=1.5							
M/H=15				interface			
E/G*=150	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.88E-02	0.01758297	-6.37%	27432	4.72E-02	0.045896	-2.81%
506	1.66E-02	0.01598736	-3.70%	27453	4.21E-02	0.041347	-1.68%
505	1.45E-02	0.01439175	-1.05%	27454	3.70E-02	0.036799	-0.56%
504	1.26E-02	0.01279615	1.57%	27455	3.21E-02	0.032251	0.54%
503	1.08E-02	0.01120054	4.16%	27456	2.73E-02	0.027702	1.64%
502	9.00E-03	0.00960493	6.72%	27457	2.25E-02	0.023154	2.77%
501	7.33E-03	0.00800932	9.25%	27458	1.79E-02	0.018605	4.00%
500	5.74E-03	0.00641371	11.80%	27459	1.33E-02	0.014057	5.45%
499	4.21E-03	0.0048181	14.47%	27460	8.84E-03	0.009509	7.56%
498	2.74E-03	0.00322249	17.66%	27461	4.41E-03	0.00496	12.38%
497	1.32E-03	0.00162688	23.46%	27321	4.36E-05	0.000412	845.58%
496	-6.24E-05	3.1274E-05	-150.14%	28467	-4.28E-03	-0.00414	-3.25%
495	-1.41E-03	-0.0015643	10.85%	28466	-8.55E-03	-0.00868	1.56%
494	-2.74E-03	-0.0031599	15.21%	28465	-1.28E-02	-0.01323	3.35%
493	-4.08E-03	-0.0047556	16.55%	28464	-1.71E-02	-0.01778	4.12%
492	-5.46E-03	-0.0063512	16.34%	28434	-2.14E-02	-0.02233	4.19%
L/D=1.5							
M/H=15				interface			
E/G*=500	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	6.23E-02	0.06096408	-2.14%	27432	1.73E-01	0.171966	-0.81%
506	5.62E-02	0.05551853	-1.27%	27453	1.56E-01	0.154985	-0.48%
505	5.03E-02	0.05007297	-0.43%	27454	1.38E-01	0.138005	-0.17%
504	4.45E-02	0.04462742	0.38%	27455	1.21E-01	0.121025	0.14%
503	3.87E-02	0.03918186	1.15%	27456	1.04E-01	0.104045	0.44%
502	3.31E-02	0.0337363	1.90%	27457	8.64E-02	0.087064	0.74%
501	2.76E-02	0.02829075	2.62%	27458	6.93E-02	0.070084	1.06%
500	2.21E-02	0.02284519	3.31%	27459	5.24E-02	0.053104	1.44%
499	1.67E-02	0.01739964	4.01%	27460	3.54E-02	0.036124	1.95%
498	1.14E-02	0.01195408	4.78%	27461	1.86E-02	0.019144	3.06%
497	6.14E-03	0.00650853	5.93%	27321	1.78E-03	0.002163	21.65%
496	9.27E-04	0.00106297	14.72%	28467	-1.50E-02	-0.01482	-1.00%
495	-4.26E-03	-0.0043826	2.99%	28466	-3.17E-02	-0.0318	0.41%
494	-9.42E-03	-0.0098281	4.37%	28465	-4.83E-02	-0.04878	0.89%
493	-1.46E-02	-0.0152737	4.73%	28464	-6.50E-02	-0.06576	1.09%
492	-1.98E-02	-0.0207192	4.65%	28434	-8.18E-02	-0.08274	1.10%
L/D=1.5							

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

M/H=15				interface			
E/G*=750	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	8.84E-02	0.08706072	-1.53%	27432	2.47E-01	0.24535	-0.57%
506	8.00E-02	0.07929964	-0.91%	27453	2.22E-01	0.221156	-0.34%
505	7.18E-02	0.07153856	-0.31%	27454	1.97E-01	0.196961	-0.12%
504	6.36E-02	0.06377747	0.26%	27455	1.73E-01	0.172767	0.10%
503	5.56E-02	0.05601639	0.80%	27456	1.48E-01	0.148573	0.31%
502	4.76E-02	0.04825531	1.33%	27457	1.24E-01	0.124378	0.52%
501	3.98E-02	0.04049423	1.83%	27458	9.94E-02	0.100184	0.75%
500	3.20E-02	0.03273314	2.31%	27459	7.52E-02	0.07599	1.00%
499	2.43E-02	0.02497206	2.79%	27460	5.11E-02	0.051795	1.36%
498	1.67E-02	0.01721098	3.32%	27461	2.70E-02	0.027601	2.12%
497	9.08E-03	0.00944989	4.09%	27321	3.02E-03	0.003407	12.86%
496	1.55E-03	0.00168881	9.17%	28467	-2.09E-02	-0.02079	-0.72%
495	-5.95E-03	-0.0060723	2.09%	28466	-4.49E-02	-0.04498	0.29%
494	-1.34E-02	-0.0138334	3.06%	28465	-6.87E-02	-0.06918	0.63%
493	-2.09E-02	-0.0215944	3.31%	28464	-9.27E-02	-0.09337	0.77%
492	-2.84E-02	-0.0293555	3.25%	28434	-1.17E-01	-0.11757	0.78%
L/D=1.5							
M/H=15				interface			
E/G*=1000	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.16E-01	0.11496632	-1.17%	27432	3.25E-01	0.323796	-0.43%
506	1.05E-01	0.10472944	-0.70%	27453	2.93E-01	0.291889	-0.26%
505	9.47E-02	0.09449256	-0.24%	27454	2.60E-01	0.259983	-0.09%
504	8.41E-02	0.08425568	0.19%	27455	2.28E-01	0.228077	0.07%
503	7.36E-02	0.07401879	0.61%	27456	1.96E-01	0.196171	0.23%
502	6.31E-02	0.06378191	1.00%	27457	1.64E-01	0.164265	0.39%
501	5.28E-02	0.05354503	1.38%	27458	1.32E-01	0.132359	0.56%
500	4.26E-02	0.04330815	1.75%	27459	9.97E-02	0.100453	0.76%
499	3.24E-02	0.03307127	2.11%	27460	6.79E-02	0.068547	1.02%
498	2.23E-02	0.02283439	2.51%	27461	3.61E-02	0.036641	1.58%
497	1.22E-02	0.01259751	3.08%	27321	4.35E-03	0.004735	8.95%
496	2.21E-03	0.00236062	6.62%	28467	-2.73E-02	-0.02717	-0.56%
495	-7.76E-03	-0.0078763	1.55%	28466	-5.90E-02	-0.05908	0.21%
494	-1.77E-02	-0.0181131	2.31%	28465	-9.06E-02	-0.09098	0.47%
493	-2.77E-02	-0.02835	2.50%	28464	-1.22E-01	-0.12289	0.58%
492	-3.77E-02	-0.0385869	2.46%	28434	-1.54E-01	-0.1548	0.59%

**Πίνακας 0-6** Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=1.5, e=30m

L/D=1.5							
M/H=30				interface			
E/G*=10	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%

Παράρτημα

487	2.65E-03	0.001948	-26.60%	27432	7.04E-03	0.005519	-21.56%
506	1.87E-03	0.001724	-7.88%	27453	5.48E-03	0.004849	-11.47%
505	1.26E-03	0.001499	19.08%	27454	4.13E-03	0.004179	1.19%
504	7.98E-04	0.001274	59.64%	27455	2.97E-03	0.003508	17.92%
503	4.58E-04	0.001049	128.82%	27456	1.99E-03	0.002838	42.75%
502	2.09E-04	0.000824	293.58%	27457	1.14E-03	0.002168	89.50%
501	2.67E-05	0.000599	2144.37%	27458	4.23E-04	0.001497	253.87%
500	-1.07E-04	0.000375	-449.61%	27459	-1.89E-04	0.000827	-537.98%
499	-2.05E-04	0.00015	-173.17%	27460	-7.04E-04	0.000157	-122.24%
498	-2.75E-04	-7.5E-05	-72.75%	27461	-1.14E-03	-0.00051	-54.76%
497	-3.27E-04	-0.0003	-8.25%	27321	-1.50E-03	-0.00118	-20.88%
496	-3.65E-04	-0.00052	43.71%	28467	-1.80E-03	-0.00185	2.94%
495	-3.96E-04	-0.00075	89.31%	28466	-2.07E-03	-0.00252	22.07%
494	-4.26E-04	-0.00097	128.98%	28465	-2.32E-03	-0.0032	37.54%
493	-4.62E-04	-0.0012	159.33%	28464	-2.61E-03	-0.00387	48.29%
492	-5.19E-04	-0.00142	174.53%	28434	-2.98E-03	-0.00454	52.18%
L/D=1.5							
M/H=30				interface			
E/G*=50	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.16E-02	0.009862	-15.04%	27432	2.79E-02	0.025639	-8.09%
506	9.65E-03	0.008856	-8.22%	27453	2.40E-02	0.022884	-4.78%
505	7.91E-03	0.007849	-0.76%	27454	2.04E-02	0.020128	-1.34%
504	6.37E-03	0.006843	7.39%	27455	1.70E-02	0.017373	2.26%
503	5.01E-03	0.005837	16.44%	27456	1.38E-02	0.014618	6.16%
502	3.81E-03	0.004831	26.88%	27457	1.07E-02	0.011863	10.64%
501	2.73E-03	0.003824	39.85%	27458	7.83E-03	0.009108	16.34%
500	1.78E-03	0.002818	58.62%	27459	5.07E-03	0.006353	25.26%
499	9.16E-04	0.001812	97.71%	27460	2.44E-03	0.003598	47.66%
498	1.38E-04	0.000805	482.75%	27461	-8.90E-05	0.000843	#####
497	-5.72E-04	-0.0002	-64.87%	27321	-2.52E-03	-0.00191	-23.95%
496	-1.23E-03	-0.00121	-1.78%	28467	-4.85E-03	-0.00467	-3.80%
495	-1.85E-03	-0.00221	19.84%	28466	-7.12E-03	-0.00742	4.29%
494	-2.45E-03	-0.00322	31.64%	28465	-9.35E-03	-0.01018	8.90%
493	-3.06E-03	-0.00423	38.26%	28464	-1.16E-02	-0.01293	11.40%
492	-3.73E-03	-0.00523	40.42%	28434	-1.40E-02	-0.01569	11.96%
L/D=1.5							
M/H=30				interface			
E/G*=100	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	2.40E-02	0.021843	-8.93%	27432	6.25E-02	0.060067	-3.96%
506	2.08E-02	0.019683	-5.15%	27453	5.51E-02	0.053751	-2.36%
505	1.77E-02	0.017522	-1.26%	27454	4.78E-02	0.047436	-0.76%
504	1.50E-02	0.015362	2.73%	27455	4.08E-02	0.04112	0.85%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

503	1.24E-02	0.013201	6.87%	27456	3.40E-02	0.034805	2.52%
502	9.92E-03	0.011041	11.27%	27457	2.73E-02	0.028489	4.32%
501	7.64E-03	0.00888	16.17%	27458	2.08E-02	0.022174	6.44%
500	5.50E-03	0.00672	22.16%	27459	1.45E-02	0.015858	9.36%
499	3.48E-03	0.004559	31.18%	27460	8.30E-03	0.009543	14.97%
498	1.55E-03	0.002399	54.53%	27461	2.22E-03	0.003227	45.59%
497	-2.85E-04	0.000239	-183.62%	27321	-3.76E-03	-0.00309	-17.90%
496	-2.05E-03	-0.00192	-6.37%	28467	-9.64E-03	-0.0094	-2.50%
495	-3.77E-03	-0.00408	8.35%	28466	-1.55E-02	-0.01572	1.74%
494	-5.46E-03	-0.00624	14.44%	28465	-2.12E-02	-0.02203	3.86%
493	-7.16E-03	-0.0084	17.44%	28464	-2.70E-02	-0.02835	4.92%
492	-8.93E-03	-0.01056	18.28%	28434	-3.30E-02	-0.03467	5.12%
L/D=1.5							
M/H=30				interface			
E/G*=150	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	3.09E-02	0.028624	-7.26%	27432	7.92E-02	0.076651	-3.17%
506	2.70E-02	0.025813	-4.22%	27453	7.00E-02	0.068643	-1.89%
505	2.33E-02	0.023001	-1.15%	27454	6.10E-02	0.060635	-0.63%
504	1.98E-02	0.020189	1.96%	27455	5.23E-02	0.052627	0.64%
503	1.65E-02	0.017377	5.15%	27456	4.38E-02	0.04462	1.94%
502	1.34E-02	0.014565	8.48%	27457	3.54E-02	0.036612	3.34%
501	1.05E-02	0.011753	12.10%	27458	2.73E-02	0.028604	4.95%
500	7.68E-03	0.008942	16.41%	27459	1.92E-02	0.020596	7.12%
499	5.00E-03	0.00613	22.57%	27460	1.13E-02	0.012588	11.10%
498	2.43E-03	0.003318	36.69%	27461	3.55E-03	0.00458	28.95%
497	-5.64E-05	0.000506	-996.75%	27321	-4.12E-03	-0.00343	-16.79%
496	-2.47E-03	-0.00231	-6.51%	28467	-1.17E-02	-0.01144	-2.20%
495	-4.82E-03	-0.00512	6.17%	28466	-1.92E-02	-0.01944	1.34%
494	-7.14E-03	-0.00793	10.99%	28465	-2.66E-02	-0.02745	3.05%
493	-9.48E-03	-0.01074	13.29%	28464	-3.41E-02	-0.03546	3.90%
492	-1.19E-02	-0.01355	13.91%	28434	-4.18E-02	-0.04347	4.06%
L/D=1.5							
M/H=30				interface			
E/G*=500	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.02E-01	0.099359	-2.46%	27432	2.91E-01	0.288744	-0.90%
506	9.11E-02	0.08976	-1.46%	27453	2.60E-01	0.258775	-0.54%
505	8.06E-02	0.080162	-0.49%	27454	2.29E-01	0.228806	-0.19%
504	7.02E-02	0.070564	0.47%	27455	1.99E-01	0.198837	0.16%
503	6.01E-02	0.060965	1.41%	27456	1.68E-01	0.168868	0.51%
502	5.02E-02	0.051367	2.35%	27457	1.38E-01	0.1389	0.88%
501	4.04E-02	0.041768	3.34%	27458	1.08E-01	0.108931	1.29%
500	3.08E-02	0.03217	4.43%	27459	7.76E-02	0.078962	1.82%

Παράρτημα

499	2.13E-02	0.022572	5.84%	27460	4.77E-02	0.048993	2.72%
498	1.20E-02	0.012973	8.41%	27461	1.80E-02	0.019024	5.91%
497	2.71E-03	0.003375	24.62%	27321	-1.17E-02	-0.01094	-6.15%
496	-6.47E-03	-0.00622	-3.75%	28467	-4.12E-02	-0.04091	-0.67%
495	-1.56E-02	-0.01582	1.58%	28466	-7.06E-02	-0.07088	0.35%
494	-2.46E-02	-0.02542	3.13%	28465	-1.00E-01	-0.10085	0.81%
493	-3.37E-02	-0.03502	3.80%	28464	-1.29E-01	-0.13082	1.03%
492	-4.29E-02	-0.04462	3.97%	28434	-1.59E-01	-0.16079	1.07%
L/D=1.5							
M/H=30				interface			
E/G*=750	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.44E-01	0.141917	-1.76%	27432	4.15E-01	0.41192	-0.64%
506	1.30E-01	0.128237	-1.05%	27453	3.71E-01	0.369226	-0.38%
505	1.15E-01	0.114556	-0.35%	27454	3.27E-01	0.326531	-0.13%
504	1.01E-01	0.100876	0.32%	27455	2.84E-01	0.283836	0.11%
503	8.63E-02	0.087195	0.98%	27456	2.40E-01	0.241141	0.36%
502	7.23E-02	0.073514	1.64%	27457	1.97E-01	0.198446	0.61%
501	5.85E-02	0.059834	2.33%	27458	1.54E-01	0.155751	0.90%
500	4.48E-02	0.046153	3.08%	27459	1.12E-01	0.113056	1.27%
499	3.12E-02	0.032472	4.04%	27460	6.91E-02	0.070361	1.89%
498	1.78E-02	0.018792	5.75%	27461	2.66E-02	0.027666	4.03%
497	4.43E-03	0.005111	15.38%	27321	-1.58E-02	-0.01503	-4.62%
496	-8.82E-03	-0.00857	-2.88%	28467	-5.80E-02	-0.05772	-0.49%
495	-2.20E-02	-0.02225	1.09%	28466	-1.00E-01	-0.10042	0.24%
494	-3.52E-02	-0.03593	2.19%	28465	-1.42E-01	-0.14311	0.56%
493	-4.83E-02	-0.04961	2.66%	28464	-1.84E-01	-0.18581	0.72%
492	-6.16E-02	-0.06329	2.78%	28434	-2.27E-01	-0.2285	0.74%
L/D=1.5							
M/H=30				interface			
E/G*=1000	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.90E-01	0.187422	-1.35%	27432	5.46E-01	0.543617	-0.48%
506	1.71E-01	0.169377	-0.80%	27453	4.89E-01	0.487315	-0.29%
505	1.52E-01	0.151332	-0.27%	27454	4.31E-01	0.431013	-0.10%
504	1.33E-01	0.133286	0.24%	27455	3.74E-01	0.374711	0.08%
503	1.14E-01	0.115241	0.74%	27456	3.18E-01	0.31841	0.27%
502	9.60E-02	0.097196	1.24%	27457	2.61E-01	0.262108	0.46%
501	7.78E-02	0.07915	1.76%	27458	2.04E-01	0.205806	0.68%
500	5.97E-02	0.061105	2.32%	27459	1.48E-01	0.149504	0.96%
499	4.18E-02	0.04306	3.04%	27460	9.19E-02	0.093202	1.42%
498	2.40E-02	0.025014	4.30%	27461	3.58E-02	0.0369	3.00%
497	6.28E-03	0.006969	10.99%	27321	-2.01E-02	-0.0194	-3.62%
496	-1.13E-02	-0.01108	-2.30%	28467	-7.60E-02	-0.0757	-0.38%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

495	-2.89E-02	-0.02912	0.81%	28466	-1.32E-01	-0.13201	0.18%
494	-4.64E-02	-0.04717	1.65%	28465	-1.88E-01	-0.18831	0.43%
493	-6.39E-02	-0.06521	2.01%	28464	-2.43E-01	-0.24461	0.55%
492	-8.15E-02	-0.08326	2.10%	28434	-2.99E-01	-0.30091	0.56%

Πίνακας 0-7 Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=2, e=0

L/D=2							
M/H=0				interface			
E/G*=10	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	0.000556	0.000469	-15.62%	29354	0.0012822	0.0011015	-14.09%
506	0.000493	0.000443	-10.15%	29396	0.0011448	0.0010319	-9.87%
505	0.000434	0.000417	-3.97%	29395	0.0010141	0.0009623	-5.11%
504	0.00038	0.00039	2.66%	29394	0.0008916	0.0008927	0.12%
503	0.000333	0.000364	9.40%	29393	0.0007785	0.0008231	5.74%
502	0.000292	0.000338	15.92%	29392	0.0006751	0.0007536	11.62%
501	0.000256	0.000312	21.90%	29391	0.0005814	0.000684	17.65%
500	0.000225	0.000286	27.02%	29390	0.0004967	0.0006144	23.69%
499	0.000198	0.00026	30.98%	29389	0.0004206	0.0005448	29.55%
498	0.000175	0.000234	33.39%	29388	0.0003522	0.0004753	34.94%
497	0.000155	0.000207	33.84%	29387	0.0002909	0.0004057	39.44%
496	0.000137	0.000181	31.89%	29386	0.0002361	0.0003361	42.37%
495	0.000122	0.000155	27.00%	29385	0.0001869	0.0002665	42.57%
494	0.000109	0.000129	18.62%	29384	0.0001428	0.0001969	37.90%
493	9.69E-05	0.000103	6.10%	29383	0.000103	0.0001274	23.64%
492	8.65E-05	7.67E-05	-11.31%	29382	6.685E-05	5.779E-05	-13.55%
491	7.72E-05	5.06E-05	-34.50%	29381	3.362E-05	-1.179E-05	-135.06%
490	6.88E-05	2.44E-05	-64.52%	29380	2.498E-06	-8.136E-05	-3356.88%
489	6.12E-05	-1.7E-06	-102.79%	29379	-2.77E-05	-0.0001509	445.01%
488	5.39E-05	-2.8E-05	-151.64%	29378	-5.884E-05	-0.0002205	274.80%
195	4.65E-05	-5.4E-05	-216.03%	29330	-9.414E-05	-0.0002901	208.15%
L/D=2							
M/H=0				interface			
E/G*=50	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	2.34E-03	0.002143	-8.57%	29354	4.70E-03	0.0044162	-5.94%
506	2.17E-03	0.002033	-6.14%	29396	4.35E-03	0.0041626	-4.39%
505	1.99E-03	0.001924	-3.53%	29395	4.02E-03	0.003909	-2.74%
504	1.83E-03	0.001814	-0.82%	29394	3.69E-03	0.0036554	-1.00%
503	1.67E-03	0.001704	1.92%	29393	3.38E-03	0.0034019	0.79%
502	1.52E-03	0.001595	4.60%	29392	3.07E-03	0.0031483	2.58%
501	1.39E-03	0.001485	7.12%	29391	2.77E-03	0.0028947	4.33%
500	1.26E-03	0.001375	9.40%	29390	2.49E-03	0.0026411	6.00%
499	1.14E-03	0.001266	11.33%	29389	2.22E-03	0.0023876	7.54%

Παράρτημα

498	1.02E-03	0.001156	12.79%	29388	1.96E-03	0.002134	8.89%
497	9.21E-04	0.001046	13.65%	29387	1.71E-03	0.0018804	9.98%
496	8.24E-04	0.000937	13.74%	29386	1.47E-03	0.0016268	10.69%
495	7.33E-04	0.000827	12.83%	29385	1.24E-03	0.0013733	10.85%
494	6.48E-04	0.000717	10.66%	29384	1.02E-03	0.0011197	10.15%
493	5.69E-04	0.000608	6.85%	29383	8.02E-04	0.0008661	8.03%
492	4.94E-04	0.000498	0.85%	29382	5.94E-04	0.0006125	3.13%
491	4.23E-04	0.000388	-8.17%	29381	3.92E-04	0.000359	-8.52%
490	3.55E-04	0.000279	-21.55%	29380	1.96E-04	0.0001054	-46.26%
489	2.90E-04	0.000169	-41.68%	29379	3.01E-06	-0.0001482	-5022.70%
488	2.25E-04	5.92E-05	-73.62%	29378	-1.91E-04	-0.0004018	110.34%
195	1.57E-04	-5E-05	-132.10%	29330	-3.93E-04	-0.0006553	66.76%
L/D=2							
M/H=0				interface			
E/G*=100	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	4.93E-03	0.004672	-5.24%	29354	9.92E-03	9.60E-03	-3.22%
506	4.62E-03	0.00444	-3.83%	29396	9.28E-03	9.06E-03	-2.40%
505	4.31E-03	0.004207	-2.36%	29395	8.65E-03	8.52E-03	-1.54%
504	4.01E-03	0.003975	-0.84%	29394	8.03E-03	7.98E-03	-0.64%
503	3.72E-03	0.003743	0.67%	29393	7.42E-03	7.44E-03	0.27%
502	3.44E-03	0.003511	2.14%	29392	6.82E-03	6.90E-03	1.16%
501	3.17E-03	0.003279	3.53%	29391	6.24E-03	6.36E-03	2.03%
500	2.91E-03	0.003047	4.78%	29390	5.66E-03	5.82E-03	2.85%
499	2.66E-03	0.002814	5.85%	29389	5.10E-03	5.28E-03	3.59%
498	2.42E-03	0.002582	6.68%	29388	4.55E-03	4.74E-03	4.24%
497	2.19E-03	0.00235	7.22%	29387	4.01E-03	4.20E-03	4.75%
496	1.97E-03	0.002118	7.38%	29386	3.49E-03	3.66E-03	5.09%
495	1.76E-03	0.001886	7.05%	29385	2.97E-03	3.12E-03	5.17%
494	1.56E-03	0.001654	6.11%	29384	2.46E-03	2.58E-03	4.87%
493	1.36E-03	0.001421	4.34%	29383	1.97E-03	2.04E-03	3.97%
492	1.17E-03	0.001189	1.44%	29382	1.48E-03	1.50E-03	1.90%
491	9.88E-04	0.000957	-3.13%	29381	9.94E-04	9.65E-04	-2.93%
490	8.08E-04	0.000725	-10.29%	29380	5.18E-04	4.25E-04	-17.80%
489	6.31E-04	0.000493	-21.93%	29379	4.44E-05	-1.14E-04	-357.38%
488	4.55E-04	0.00026	-42.69%	29378	-4.30E-04	-6.54E-04	52.08%
195	2.74E-04	2.83E-05	-89.67%	29330	-9.14E-04	-1.19E-03	30.60%
L/D=2							
M/H=0				interface			
E/G*=150	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	6.37E-03	0.0061	-4.30%	29354	1.27E-02	1.23E-02	-2.60%
506	5.99E-03	0.005799	-3.17%	29396	1.19E-02	1.16E-02	-1.94%
505	5.61E-03	0.005498	-1.98%	29395	1.11E-02	1.10E-02	-1.25%



Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

504	5.24E-03	0.005197	-0.76%	29394	1.03E-02	1.03E-02	-0.54%
503	4.87E-03	0.004896	0.45%	29393	9.57E-03	9.58E-03	0.19%
502	4.52E-03	0.004594	1.63%	29392	8.82E-03	8.90E-03	0.90%
501	4.18E-03	0.004293	2.73%	29391	8.08E-03	8.21E-03	1.59%
500	3.85E-03	0.003992	3.73%	29390	7.36E-03	7.52E-03	2.23%
499	3.53E-03	0.003691	4.58%	29389	6.65E-03	6.83E-03	2.82%
498	3.22E-03	0.00339	5.25%	29388	5.95E-03	6.15E-03	3.32%
497	2.92E-03	0.003089	5.69%	29387	5.26E-03	5.46E-03	3.72%
496	2.63E-03	0.002788	5.83%	29386	4.59E-03	4.77E-03	3.98%
495	2.36E-03	0.002487	5.60%	29385	3.92E-03	4.08E-03	4.04%
494	2.08E-03	0.002186	4.89%	29384	3.27E-03	3.40E-03	3.81%
493	1.82E-03	0.001885	3.54%	29383	2.63E-03	2.71E-03	3.12%
492	1.56E-03	0.001584	1.30%	29382	1.99E-03	2.02E-03	1.54%
491	1.31E-03	0.001283	-2.26%	29381	1.36E-03	1.33E-03	-2.04%
490	1.07E-03	0.000982	-7.93%	29380	7.39E-04	6.46E-04	-12.52%
489	8.24E-04	0.000681	-17.32%	29379	1.20E-04	-4.14E-05	-134.62%
488	5.81E-04	0.00038	-34.60%	29378	-5.01E-04	-7.29E-04	45.52%
195	3.34E-04	7.89E-05	-76.40%	29330	-1.13E-03	-1.42E-03	25.22%
L/D=2							
M/H=0				interface			
E/G*=500	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	2.13E-02	0.020978	-1.50%	29354	4.46E-02	0.0442361	-0.79%
506	2.02E-02	0.019961	-1.12%	29396	4.20E-02	0.0417646	-0.59%
505	1.91E-02	0.018944	-0.72%	29395	3.94E-02	0.0392932	-0.38%
504	1.80E-02	0.017928	-0.32%	29394	3.69E-02	0.0368217	-0.17%
503	1.69E-02	0.016911	0.08%	29393	3.43E-02	0.0343503	0.04%
502	1.58E-02	0.015894	0.46%	29392	3.18E-02	0.0318788	0.25%
501	1.48E-02	0.014877	0.82%	29391	2.93E-02	0.0294073	0.45%
500	1.37E-02	0.01386	1.14%	29390	2.68E-02	0.0269359	0.64%
499	1.27E-02	0.012843	1.42%	29389	2.43E-02	0.0244644	0.80%
498	1.16E-02	0.011826	1.64%	29388	2.18E-02	0.021993	0.95%
497	1.06E-02	0.010809	1.78%	29387	1.93E-02	0.0195215	1.07%
496	9.62E-03	0.009793	1.85%	29386	1.69E-02	0.0170501	1.14%
495	8.62E-03	0.008776	1.80%	29385	1.44E-02	0.0145786	1.17%
494	7.64E-03	0.007759	1.60%	29384	1.20E-02	0.0121072	1.12%
493	6.66E-03	0.006742	1.22%	29383	9.55E-03	0.0096357	0.94%
492	5.69E-03	0.005725	0.57%	29382	7.13E-03	0.0071643	0.51%
491	4.73E-03	0.004708	-0.50%	29381	4.72E-03	0.0046928	-0.51%
490	3.78E-03	0.003691	-2.26%	29380	2.31E-03	0.0022213	-3.95%
489	2.83E-03	0.002674	-5.35%	29379	-8.78E-05	-0.0002501	184.81%
488	1.87E-03	0.001658	-11.58%	29378	-2.49E-03	-0.0027216	9.30%
195	9.19E-04	0.000641	-30.25%	29330	-4.90E-03	-0.005193	5.92%

Παράρτημα

L/D=2							
M/H=0				interface			
E/G*=750	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	3.03E-02	0.029929	-1.07%	29354	6.35E-02	0.0631082	-0.57%
506	2.87E-02	0.028481	-0.80%	29396	5.98E-02	0.0595874	-0.42%
505	2.72E-02	0.027034	-0.52%	29395	5.62E-02	0.0560665	-0.28%
504	2.56E-02	0.025587	-0.23%	29394	5.26E-02	0.0525456	-0.13%
503	2.41E-02	0.02414	0.06%	29393	4.90E-02	0.0490247	0.02%
502	2.26E-02	0.022692	0.33%	29392	4.54E-02	0.0455038	0.17%
501	2.11E-02	0.021245	0.58%	29391	4.19E-02	0.041983	0.31%
500	1.96E-02	0.019798	0.81%	29390	3.83E-02	0.0384621	0.44%
499	1.82E-02	0.018351	1.01%	29389	3.47E-02	0.0349412	0.56%
498	1.67E-02	0.016904	1.17%	29388	3.12E-02	0.0314203	0.66%
497	1.53E-02	0.015456	1.27%	29387	2.77E-02	0.0278994	0.75%
496	1.38E-02	0.014009	1.32%	29386	2.42E-02	0.0243786	0.80%
495	1.24E-02	0.012562	1.29%	29385	2.07E-02	0.0208577	0.82%
494	1.10E-02	0.011115	1.16%	29384	1.72E-02	0.0173368	0.78%
493	9.58E-03	0.009667	0.89%	29383	1.37E-02	0.0138159	0.66%
492	8.18E-03	0.00822	0.44%	29382	1.03E-02	0.010295	0.36%
491	6.79E-03	0.006773	-0.31%	29381	6.80E-03	0.0067742	-0.35%
490	5.41E-03	0.005326	-1.55%	29380	3.34E-03	0.0032533	-2.73%
489	4.03E-03	0.003879	-3.74%	29379	-1.05E-04	-0.0002676	154.64%
488	2.65E-03	0.002431	-8.21%	29378	-3.56E-03	-0.0037885	6.53%
195	1.26E-03	0.000984	-22.10%	29330	-7.02E-03	-0.0073093	4.15%
L/D=2							
M/H=0				interface			
E/G*=1000	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	3.98E-02	0.039496	-0.83%	29354	8.36E-02	0.0832909	-0.43%
506	3.78E-02	0.037589	-0.62%	29396	7.89E-02	0.078648	-0.32%
505	3.58E-02	0.035682	-0.40%	29395	7.42E-02	0.074005	-0.21%
504	3.38E-02	0.033775	-0.18%	29394	6.94E-02	0.0693621	-0.09%
503	3.19E-02	0.031867	0.04%	29393	6.47E-02	0.0647191	0.02%
502	2.99E-02	0.02996	0.25%	29392	6.00E-02	0.0600761	0.13%
501	2.79E-02	0.028053	0.44%	29391	5.53E-02	0.0554332	0.24%
500	2.60E-02	0.026145	0.62%	29390	5.06E-02	0.0507902	0.34%
499	2.41E-02	0.024238	0.77%	29389	4.60E-02	0.0461473	0.43%
498	2.21E-02	0.022331	0.89%	29388	4.13E-02	0.0415043	0.51%
497	2.02E-02	0.020423	0.97%	29387	3.67E-02	0.0368614	0.57%
496	1.83E-02	0.018516	1.01%	29386	3.20E-02	0.0322184	0.61%
495	1.64E-02	0.016609	0.98%	29385	2.74E-02	0.0275754	0.62%
494	1.46E-02	0.014702	0.89%	29384	2.28E-02	0.0229325	0.60%
493	1.27E-02	0.012794	0.69%	29383	1.82E-02	0.0182895	0.50%
492	1.08E-02	0.010887	0.34%	29382	1.36E-02	0.0136466	0.28%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

491	9.00E-03	0.00898	-0.22%	29381	9.03E-03	0.0090036	-0.26%
490	7.16E-03	0.007072	-1.17%	29380	4.45E-03	0.0043607	-2.05%
489	5.32E-03	0.005165	-2.84%	29379	-1.19E-04	-0.0002823	136.73%
488	3.48E-03	0.003258	-6.28%	29378	-4.69E-03	-0.0049252	4.97%
195	1.63E-03	0.00135	-17.20%	29330	-9.28E-03	-0.0095682	3.15%

**Πίνακας 0-8** Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=2, e=15m

L/D=2							
M/H=15				interface			
E/G*=10	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.60E-03	0.001147	-28.19%	29354	0.003867	0.0028729	-25.71%
506	1.18E-03	0.001051	-10.68%	29396	0.003065	0.0026174	-14.60%
505	8.43E-04	0.000955	13.19%	29395	0.002372	0.0023619	-0.42%
504	5.89E-04	0.000858	45.77%	29394	0.00178	0.0021064	18.37%
503	3.98E-04	0.000762	91.56%	29393	0.001276	0.0018509	45.08%
502	2.55E-04	0.000666	160.91%	29392	0.000849	0.0015955	87.86%
501	1.49E-04	0.00057	282.94%	29391	0.000491	0.00134	173.08%
500	6.95E-05	0.000473	580.75%	29390	0.000193	0.0010845	461.71%
499	1.12E-05	0.000377	3282.31%	29389	-4.92E-05	0.000829	-1784.40%
498	-3.12E-05	0.000281	-998.85%	29388	-0.00024	0.0005735	-337.49%
497	-6.14E-05	0.000185	-400.62%	29387	-0.00039	0.000318	-181.68%
496	-8.23E-05	8.84E-05	-207.36%	29386	-0.0005	6.249E-05	-112.53%
495	-9.63E-05	-7.9E-06	-91.80%	29385	-0.00058	-0.000193	-66.52%
494	-1.05E-04	-0.0001	-1.05%	29384	-0.00063	-0.000448	-28.63%
493	-1.11E-04	-0.0002	81.05%	29383	-0.00066	-0.000704	6.57%
492	-1.14E-04	-0.0003	160.60%	29382	-0.00068	-0.000959	41.49%
491	-1.16E-04	-0.00039	239.55%	29381	-0.00069	-0.001215	77.22%
490	-1.17E-04	-0.00049	317.07%	29380	-0.00069	-0.00147	113.92%
489	-1.20E-04	-0.00059	389.18%	29379	-0.00069	-0.001726	150.44%
488	-1.24E-04	-0.00068	447.76%	29378	-0.0007	-0.001981	183.27%
195	-1.34E-04	-0.00078	481.12%	29330	-0.00073	-0.002237	205.92%
L/D=2							
M/H=15				interface			
E/G*=50	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	6.64E-03	0.005312	-19.99%	29354	1.35E-02	0.0116361	-13.95%
506	5.64E-03	0.004915	-12.84%	29396	1.19E-02	0.010734	-9.66%
505	4.75E-03	0.004519	-4.93%	29395	1.04E-02	0.0098318	-5.12%
504	3.97E-03	0.004123	3.80%	29394	8.96E-03	0.0089297	-0.28%
503	3.28E-03	0.003726	13.48%	29393	7.65E-03	0.0080276	4.92%
502	2.68E-03	0.00333	24.33%	29392	6.44E-03	0.0071254	10.62%
501	2.15E-03	0.002934	36.66%	29391	5.32E-03	0.0062233	16.99%
500	1.68E-03	0.002537	51.00%	29390	4.28E-03	0.0053212	24.38%

Παράρτημα

499	1.27E-03	0.002141	68.29%	29389	3.31E-03	0.004419	33.45%
498	9.15E-04	0.001745	90.62%	29388	2.41E-03	0.0035169	45.79%
497	6.03E-04	0.001348	123.63%	29387	1.58E-03	0.0026148	66.00%
496	3.29E-04	0.000952	189.25%	29386	7.94E-04	0.0017126	115.71%
495	8.81E-05	0.000556	530.74%	29385	6.34E-05	0.0008105	1177.60%
494	-1.26E-04	0.000159	-227.01%	29384	-6.22E-04	-9.17E-05	-85.26%
493	-3.17E-04	-0.00024	-25.17%	29383	-1.27E-03	-0.000994	-21.53%
492	-4.90E-04	-0.00063	29.32%	29382	-1.88E-03	-0.001896	1.03%
491	-6.49E-04	-0.00103	58.66%	29381	-2.46E-03	-0.002798	13.88%
490	-7.99E-04	-0.00143	78.54%	29380	-3.01E-03	-0.0037	22.73%
489	-9.45E-04	-0.00182	92.90%	29379	-3.56E-03	-0.004602	29.16%
488	-1.10E-03	-0.00222	102.46%	29378	-4.12E-03	-0.005504	33.44%
195	-1.27E-03	-0.00261	106.61%	29330	-4.73E-03	-0.006407	35.31%
L/D=2							
M/H=15				interface			
E/G*=100	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.32E-02	0.011441	-13.53%	29354	0.028497	0.0262863	-7.76%
506	1.17E-02	0.010623	-9.22%	29396	0.025713	0.0243092	-5.46%
505	1.03E-02	0.009806	-4.72%	29395	0.023053	0.0223321	-3.13%
504	8.99E-03	0.008988	-0.02%	29394	0.02051	0.0203551	-0.75%
503	7.79E-03	0.00817	4.88%	29393	0.018074	0.018378	1.68%
502	6.68E-03	0.007353	10.02%	29392	0.015739	0.0164009	4.21%
501	5.66E-03	0.006535	15.44%	29391	0.013498	0.0144239	6.86%
500	4.72E-03	0.005718	21.17%	29390	0.011347	0.0124468	9.70%
499	3.85E-03	0.0049	27.33%	29389	0.009278	0.0104698	12.85%
498	3.04E-03	0.004082	34.13%	29388	0.007284	0.0084927	16.59%
497	2.30E-03	0.003265	42.08%	29387	0.00536	0.0065156	21.56%
496	1.60E-03	0.002447	52.54%	29386	0.003498	0.0045386	29.73%
495	9.56E-04	0.001629	70.36%	29385	0.001693	0.0025615	51.28%
494	3.48E-04	0.000812	133.30%	29384	-6.12E-05	0.0005844	-1055.55%
493	-2.27E-04	-5.9E-06	-97.41%	29383	-0.00177	-0.001393	-21.33%
492	-7.75E-04	-0.00082	6.23%	29382	-0.00344	-0.00337	-2.01%
491	-1.30E-03	-0.00164	26.13%	29381	-0.00507	-0.005347	5.41%
490	-1.81E-03	-0.00246	35.75%	29380	-0.00668	-0.007324	9.67%
489	-2.31E-03	-0.00328	41.61%	29379	-0.00827	-0.009301	12.45%
488	-2.82E-03	-0.00409	45.06%	29378	-0.00988	-0.011278	14.16%
195	-3.36E-03	-0.00491	46.28%	29330	-0.01154	-0.013255	14.82%
L/D=2							
M/H=15				interface			
E/G*=150	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.68E-02	0.014908	-11.42%	29354	3.59E-02	0.0335925	-6.33%
506	1.50E-02	0.013854	-7.86%	29396	3.25E-02	0.0310876	-4.47%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

505	1.34E-02	0.0128	-4.20%	29395	2.93E-02	0.0285827	-2.59%
504	1.18E-02	0.011745	-0.44%	29394	2.63E-02	0.0260779	-0.70%
503	1.03E-02	0.010691	3.43%	29393	2.33E-02	0.023573	1.22%
502	8.97E-03	0.009636	7.43%	29392	2.04E-02	0.0210681	3.19%
501	7.69E-03	0.008582	11.57%	29391	1.76E-02	0.0185632	5.24%
500	6.50E-03	0.007528	15.86%	29390	1.50E-02	0.0160583	7.40%
499	5.38E-03	0.006473	20.38%	29389	1.23E-02	0.0135534	9.76%
498	4.33E-03	0.005419	25.22%	29388	9.82E-03	0.0110485	12.49%
497	3.34E-03	0.004365	30.67%	29387	7.37E-03	0.0085437	15.98%
496	2.41E-03	0.00331	37.43%	29386	4.97E-03	0.0060388	21.40%
495	1.53E-03	0.002256	47.81%	29385	2.64E-03	0.0035339	33.87%
494	6.86E-04	0.001201	75.06%	29384	3.57E-04	0.001029	187.93%
493	-1.18E-04	0.000147	-225.02%	29383	-1.88E-03	-0.001476	-21.43%
492	-8.91E-04	-0.00091	1.80%	29382	-4.07E-03	-0.003981	-2.25%
491	-1.64E-03	-0.00196	19.55%	29381	-6.23E-03	-0.006486	4.11%
490	-2.37E-03	-0.00302	27.11%	29380	-8.36E-03	-0.008991	7.57%
489	-3.10E-03	-0.00407	31.47%	29379	-1.05E-02	-0.011495	9.78%
488	-3.83E-03	-0.00512	33.96%	29378	-1.26E-02	-0.014	11.11%
195	-4.58E-03	-0.00618	34.79%	29330	-1.48E-02	-0.016505	11.62%
L/D=2							
M/H=15				interface			
E/G*=500	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	5.35E-02	0.051169	-4.32%	29354	1.26E-01	0.1233839	-1.97%
506	4.91E-02	0.047644	-3.03%	29396	1.16E-01	0.1142688	-1.39%
505	4.49E-02	0.04412	-1.77%	29395	1.06E-01	0.1051537	-0.83%
504	4.08E-02	0.040596	-0.52%	29394	9.63E-02	0.0960386	-0.28%
503	3.68E-02	0.037071	0.72%	29393	8.67E-02	0.0869235	0.27%
502	3.29E-02	0.033547	1.95%	29392	7.72E-02	0.0778084	0.82%
501	2.91E-02	0.030023	3.16%	29391	6.78E-02	0.0686933	1.38%
500	2.54E-02	0.026498	4.36%	29390	5.84E-02	0.0595782	1.95%
499	2.18E-02	0.022974	5.56%	29389	4.92E-02	0.050463	2.55%
498	1.82E-02	0.019449	6.77%	29388	4.01E-02	0.0413479	3.22%
497	1.47E-02	0.015925	8.03%	29387	3.10E-02	0.0322328	4.02%
496	1.13E-02	0.012401	9.42%	29386	2.20E-02	0.0231177	5.17%
495	7.98E-03	0.008876	11.19%	29385	1.30E-02	0.0140026	7.41%
494	4.68E-03	0.005352	14.25%	29384	4.15E-03	0.0048875	17.82%
493	1.43E-03	0.001828	27.81%	29383	-4.69E-03	-0.004228	-9.89%
492	-1.79E-03	-0.0017	-5.05%	29382	-1.35E-02	-0.013343	-1.07%
491	-4.97E-03	-0.00522	4.99%	29381	-2.22E-02	-0.022458	0.96%
490	-8.14E-03	-0.00875	7.49%	29380	-3.10E-02	-0.031573	1.95%
489	-1.13E-02	-0.01227	8.70%	29379	-3.97E-02	-0.040688	2.54%
488	-1.44E-02	-0.01579	9.34%	29378	-4.84E-02	-0.049803	2.88%
195	-1.76E-02	-0.01932	9.52%	29330	-5.72E-02	-0.058918	3.01%

Παράρτημα

L/D=2							
M/H=15				interface			
E/G*=750	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	7.54E-02	0.073011	-3.14%	29354	1.78E-01	0.1759203	-1.40%
506	6.95E-02	0.067999	-2.21%	29396	1.65E-01	0.1629491	-0.99%
505	6.38E-02	0.062988	-1.30%	29395	1.51E-01	0.1499779	-0.59%
504	5.82E-02	0.057976	-0.41%	29394	1.37E-01	0.1370068	-0.20%
503	5.27E-02	0.052964	0.47%	29393	1.24E-01	0.1240356	0.19%
502	4.73E-02	0.047953	1.34%	29392	1.10E-01	0.1110644	0.57%
501	4.20E-02	0.042941	2.19%	29391	9.72E-02	0.0980932	0.96%
500	3.68E-02	0.037929	3.03%	29390	8.40E-02	0.0851221	1.36%
499	3.17E-02	0.032918	3.86%	29389	7.09E-02	0.0721509	1.78%
498	2.67E-02	0.027906	4.70%	29388	5.79E-02	0.0591797	2.24%
497	2.17E-02	0.022894	5.56%	29387	4.50E-02	0.0462085	2.79%
496	1.68E-02	0.017883	6.50%	29386	3.21E-02	0.0332373	3.57%
495	1.20E-02	0.012871	7.68%	29385	1.93E-02	0.0202662	5.05%
494	7.17E-03	0.007859	9.64%	29384	6.55E-03	0.007295	11.44%
493	2.43E-03	0.002848	17.23%	29383	-6.15E-03	-0.005676	-7.69%
492	-2.27E-03	-0.00216	-4.74%	29382	-1.88E-02	-0.018647	-0.81%
491	-6.94E-03	-0.00718	3.38%	29381	-3.14E-02	-0.031619	0.66%
490	-1.16E-02	-0.01219	5.19%	29380	-4.40E-02	-0.04459	1.36%
489	-1.62E-02	-0.0172	6.04%	29379	-5.66E-02	-0.057561	1.78%
488	-2.09E-02	-0.02221	6.48%	29378	-6.91E-02	-0.070532	2.02%
195	-2.55E-02	-0.02722	6.61%	29330	-8.18E-02	-0.083503	2.10%
L/D=2							
M/H=15				interface			
E/G*=1000	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	9.88E-02	0.096371	-2.43%	29354	2.35E-01	0.2320923	-1.07%
506	9.13E-02	0.089769	-1.71%	29396	2.17E-01	0.2149983	-0.76%
505	8.40E-02	0.083167	-1.01%	29395	1.99E-01	0.1979043	-0.46%
504	7.68E-02	0.076564	-0.33%	29394	1.81E-01	0.1808103	-0.16%
503	6.97E-02	0.069962	0.34%	29393	1.63E-01	0.1637162	0.14%
502	6.27E-02	0.063359	1.00%	29392	1.46E-01	0.1466222	0.43%
501	5.58E-02	0.056757	1.65%	29391	1.29E-01	0.1295282	0.73%
500	4.90E-02	0.050154	2.29%	29390	1.11E-01	0.1124342	1.03%
499	4.23E-02	0.043552	2.91%	29389	9.41E-02	0.0953402	1.34%
498	3.57E-02	0.03695	3.54%	29388	7.69E-02	0.0782462	1.69%
497	2.91E-02	0.030347	4.18%	29387	5.99E-02	0.0611521	2.10%
496	2.26E-02	0.023745	4.88%	29386	4.29E-02	0.0440581	2.68%
495	1.62E-02	0.017142	5.74%	29385	2.60E-02	0.0269641	3.76%
494	9.84E-03	0.01054	7.15%	29384	9.12E-03	0.0098701	8.25%
493	3.51E-03	0.003938	12.25%	29383	-7.70E-03	-0.007224	-6.18%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

492	-2.78E-03	-0.00266	-4.21%	29382	-2.45E-02	-0.024318	-0.63%
491	-9.04E-03	-0.00927	2.52%	29381	-4.12E-02	-0.041412	0.50%
490	-1.53E-02	-0.01587	3.91%	29380	-5.79E-02	-0.058506	1.03%
489	-2.15E-02	-0.02247	4.56%	29379	-7.46E-02	-0.0756	1.35%
488	-2.77E-02	-0.02907	4.89%	29378	-9.13E-02	-0.092694	1.53%
195	-3.40E-02	-0.03568	4.98%	29330	-1.08E-01	-0.109788	1.59%

**Πίνακας 0-9** Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=2, e=30m

L/D=2							
M/H=30				interface			
E/G*=10	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	2.64E-03	0.00187	-29.15%	29354	0.006503	0.0047658	-26.72%
506	1.86E-03	0.001699	-8.68%	29396	0.005019	0.0043133	-14.06%
505	1.25E-03	0.001528	21.96%	29395	0.003748	0.0038607	3.00%
504	7.98E-04	0.001358	70.23%	29394	0.002672	0.0034081	27.56%
503	4.63E-04	0.001187	156.42%	29393	0.001765	0.0029556	67.44%
502	2.19E-04	0.001016	364.32%	29392	0.001006	0.002503	148.89%
501	4.16E-05	0.000845	1931.13%	29391	0.000376	0.0020504	445.08%
500	-8.59E-05	0.000674	-884.83%	29390	-0.00014	0.0015978	-1273.91%
499	-1.76E-04	0.000504	-386.15%	29389	-0.00054	0.0011453	-311.28%
498	-2.38E-04	0.000333	-240.02%	29388	-0.00085	0.0006927	-181.23%
497	-2.78E-04	0.000162	-158.26%	29387	-0.00108	0.0002401	-122.23%
489	-3.01E-04	-0.0012	300.84%	29386	-0.00124	-0.000212	-82.83%
496	-3.02E-04	-9E-06	-97.03%	29385	-0.00134	-0.000665	-50.26%
488	-3.03E-04	-0.00138	354.24%	29384	-0.00139	-0.001118	-19.64%
490	-3.03E-04	-0.00103	240.75%	29383	-0.00141	-0.00157	11.37%
491	-3.09E-04	-0.00086	179.65%	29382	-0.0014	-0.002023	44.12%
492	-3.14E-04	-0.00069	120.35%	29381	-0.00138	-0.002475	79.38%
195	-3.14E-04	-0.00155	392.06%	29380	-0.00135	-0.002928	117.37%
495	-3.15E-04	-0.00018	-42.87%	29379	-0.00131	-0.00338	157.19%
493	-3.18E-04	-0.00052	63.82%	29378	-0.0013	-0.003833	195.45%
494	-3.19E-04	-0.00035	9.84%	29330	-0.00132	-0.004286	225.03%
L/D=2							
M/H=30				interface			
E/G*=50	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.09E-02	0.00851	-22.16%	29354	2.25E-02	0.0190152	-15.59%
506	9.11E-03	0.007824	-14.14%	29396	1.96E-02	0.017448	-10.81%
505	7.51E-03	0.007138	-4.98%	29395	1.68E-02	0.0158808	-5.66%
504	6.11E-03	0.006452	5.52%	29394	1.43E-02	0.0143136	-0.05%
503	4.89E-03	0.005766	17.80%	29393	1.20E-02	0.0127464	6.19%
502	3.83E-03	0.00508	32.57%	29392	9.87E-03	0.0111792	13.30%
501	2.91E-03	0.004394	51.16%	29391	7.89E-03	0.009612	21.76%

Παράρτημα

500	2.10E-03	0.003708	76.28%	29390	6.07E-03	0.0080448	32.48%
499	1.41E-03	0.003022	114.72%	29389	4.39E-03	0.0064776	47.57%
498	8.06E-04	0.002336	190.00%	29388	2.83E-03	0.0049104	73.28%
497	2.85E-04	0.00165	478.58%	29387	1.39E-03	0.0033432	139.81%
496	-1.65E-04	0.000964	-683.43%	29386	6.02E-05	0.001776	2851.66%
495	-5.57E-04	0.000278	-149.98%	29385	-1.18E-03	0.0002088	-117.72%
494	-8.99E-04	-0.00041	-54.65%	29384	-2.33E-03	-0.001358	-41.73%
493	-1.20E-03	-0.00109	-9.00%	29383	-3.41E-03	-0.002926	-14.20%
492	-1.47E-03	-0.00178	20.81%	29382	-4.42E-03	-0.004493	1.54%
491	-1.72E-03	-0.00247	43.30%	29381	-5.39E-03	-0.00606	12.52%
490	-1.95E-03	-0.00315	61.42%	29380	-6.31E-03	-0.007627	20.93%
489	-2.18E-03	-0.00384	76.13%	29379	-7.21E-03	-0.009194	27.49%
488	-2.42E-03	-0.00452	87.23%	29378	-8.14E-03	-0.010762	32.17%
195	-2.69E-03	-0.00521	93.79%	29330	-9.16E-03	-0.012329	34.57%
L/D=2							
M/H=30				interface			
E/G*=100	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	2.15E-02	0.018231	-15.33%	29354	0.047068	0.0429491	-8.75%
506	1.88E-02	0.016826	-10.44%	29396	0.042125	0.0395271	-6.17%
505	1.63E-02	0.015421	-5.24%	29395	0.037422	0.036105	-3.52%
504	1.40E-02	0.014016	0.32%	29394	0.032943	0.0326829	-0.79%
503	1.19E-02	0.012611	6.31%	29393	0.028669	0.0292608	2.06%
502	9.93E-03	0.011205	12.86%	29392	0.024585	0.0258388	5.10%
501	8.16E-03	0.0098	20.16%	29391	0.020679	0.0224167	8.40%
500	6.53E-03	0.008395	28.57%	29390	0.016938	0.0189946	12.14%
499	5.04E-03	0.00699	38.76%	29389	0.013349	0.0155725	16.65%
498	3.67E-03	0.005585	52.32%	29388	0.009901	0.0121504	22.72%
497	2.40E-03	0.004179	73.88%	29387	0.006581	0.0087284	32.63%
496	1.24E-03	0.002774	124.44%	29386	0.003377	0.0053063	57.12%
495	1.51E-04	0.001369	804.13%	29385	0.000278	0.0018842	577.08%
494	-8.62E-04	-3.6E-05	-95.80%	29384	-0.00273	-0.001538	-43.59%
493	-1.82E-03	-0.00144	-20.66%	29383	-0.00565	-0.00496	-12.15%
492	-2.72E-03	-0.00285	4.55%	29382	-0.00849	-0.008382	-1.30%
491	-3.59E-03	-0.00425	18.43%	29381	-0.01127	-0.011804	4.70%
490	-4.43E-03	-0.00566	27.69%	29380	-0.01401	-0.015226	8.70%
489	-5.26E-03	-0.00706	34.30%	29379	-0.01672	-0.018648	11.55%
488	-6.10E-03	-0.00847	38.83%	29378	-0.01946	-0.02207	13.43%
195	-6.99E-03	-0.00987	41.25%	29330	-0.0223	-0.025492	14.31%
L/D=2							
M/H=30				interface			
E/G*=150	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	2.73E-02	0.023734	-13.01%	29354	5.90E-02	0.0547995	-7.17%



Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

506	2.41E-02	0.021925	-8.96%	29396	5.32E-02	0.0504686	-5.06%
505	2.11E-02	0.020115	-4.72%	29395	4.75E-02	0.0461377	-2.93%
504	1.84E-02	0.018306	-0.28%	29394	4.21E-02	0.0418068	-0.75%
503	1.58E-02	0.016496	4.42%	29393	3.69E-02	0.037476	1.50%
502	1.34E-02	0.014687	9.45%	29392	3.19E-02	0.0331451	3.87%
501	1.12E-02	0.012877	14.92%	29391	2.71E-02	0.0288142	6.40%
500	9.15E-03	0.011068	21.03%	29390	2.24E-02	0.0244833	9.22%
499	7.23E-03	0.009258	28.14%	29389	1.79E-02	0.0201524	12.54%
498	5.43E-03	0.007449	37.08%	29388	1.35E-02	0.0158216	16.84%
497	3.76E-03	0.005639	50.10%	29387	9.30E-03	0.0114907	23.50%
496	2.18E-03	0.00383	75.48%	29386	5.19E-03	0.0071598	38.06%
495	6.97E-04	0.00202	189.85%	29385	1.18E-03	0.0028289	140.70%
494	-7.12E-04	0.000211	-129.65%	29384	-2.74E-03	-0.001502	-45.16%
493	-2.06E-03	-0.0016	-22.24%	29383	-6.57E-03	-0.005833	-11.17%
492	-3.35E-03	-0.00341	1.84%	29382	-1.03E-02	-0.010164	-1.49%
491	-4.59E-03	-0.00522	13.55%	29381	-1.40E-02	-0.014495	3.53%
490	-5.81E-03	-0.00703	20.90%	29380	-1.76E-02	-0.018825	6.77%
489	-7.02E-03	-0.00884	25.95%	29379	-2.12E-02	-0.023156	9.03%
488	-8.23E-03	-0.01065	29.32%	29378	-2.49E-02	-0.027487	10.51%
195	-9.50E-03	-0.01246	31.07%	29330	-2.86E-02	-0.031818	11.19%
L/D=2							
M/H=30				interface			
E/G*=500	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	8.57E-02	0.081364	-5.01%	29354	2.07E-01	0.2019449	-2.23%
506	7.81E-02	0.075331	-3.52%	29396	1.89E-01	0.186184	-1.58%
505	7.07E-02	0.069299	-2.04%	29395	1.72E-01	0.170423	-0.94%
504	6.36E-02	0.063266	-0.57%	29394	1.55E-01	0.1546621	-0.31%
503	5.67E-02	0.057234	0.92%	29393	1.38E-01	0.1389011	0.33%
502	5.00E-02	0.051202	2.42%	29392	1.22E-01	0.1231402	0.98%
501	4.35E-02	0.045169	3.96%	29391	1.06E-01	0.1073793	1.65%
500	3.71E-02	0.039137	5.55%	29390	8.95E-02	0.0916183	2.36%
499	3.09E-02	0.033105	7.26%	29389	7.35E-02	0.0758574	3.16%
498	2.48E-02	0.027072	9.17%	29388	5.77E-02	0.0600965	4.12%
497	1.89E-02	0.02104	11.53%	29387	4.20E-02	0.0443355	5.47%
496	1.31E-02	0.015007	14.99%	29386	2.65E-02	0.0285746	7.91%
495	7.35E-03	0.008975	22.19%	29385	1.10E-02	0.0128136	16.09%
494	1.73E-03	0.002943	69.85%	29384	-4.30E-03	-0.002947	-31.51%
493	-3.80E-03	-0.00309	-18.70%	29383	-1.96E-02	-0.018708	-4.32%
492	-9.27E-03	-0.00912	-1.56%	29382	-3.47E-02	-0.034469	-0.73%
491	-1.47E-02	-0.01515	3.25%	29381	-4.98E-02	-0.05023	0.82%
490	-2.00E-02	-0.02119	5.68%	29380	-6.49E-02	-0.065991	1.74%
489	-2.54E-02	-0.02722	7.16%	29379	-7.99E-02	-0.081752	2.34%
488	-3.08E-02	-0.03325	8.08%	29378	-9.49E-02	-0.097513	2.72%

Παράρτημα

195	-3.62E-02	-0.03928	8.53%	29330	-1.10E-01	-0.113274	2.88%
L/D=2							
M/H=30				interface			
E/G*=750	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.21E-01	0.1161	-3.65%	29354	2.93E-01	0.2879177	-1.59%
506	1.10E-01	0.107523	-2.57%	29396	2.69E-01	0.2654931	-1.13%
505	1.00E-01	0.098947	-1.51%	29395	2.45E-01	0.2430686	-0.67%
504	9.08E-02	0.09037	-0.45%	29394	2.21E-01	0.220644	-0.22%
503	8.13E-02	0.081794	0.60%	29393	1.98E-01	0.1982195	0.23%
502	7.20E-02	0.073217	1.66%	29392	1.75E-01	0.1757949	0.68%
501	6.29E-02	0.06464	2.74%	29391	1.52E-01	0.1533704	1.15%
500	5.40E-02	0.056064	3.85%	29390	1.29E-01	0.1309459	1.65%
499	4.52E-02	0.047487	5.02%	29389	1.06E-01	0.1085213	2.20%
498	3.66E-02	0.03891	6.32%	29388	8.37E-02	0.0860968	2.86%
497	2.81E-02	0.030334	7.89%	29387	6.14E-02	0.0636722	3.77%
496	1.98E-02	0.021757	10.13%	29386	3.91E-02	0.0412477	5.40%
495	1.15E-02	0.013181	14.57%	29385	1.70E-02	0.0188232	10.54%
494	3.35E-03	0.004604	37.44%	29384	-4.98E-03	-0.003601	-27.63%
493	-4.72E-03	-0.00397	-15.89%	29383	-2.69E-02	-0.026026	-3.21%
492	-1.27E-02	-0.01255	-1.40%	29382	-4.87E-02	-0.04845	-0.56%
491	-2.07E-02	-0.02113	2.18%	29381	-7.05E-02	-0.070875	0.56%
490	-2.86E-02	-0.0297	3.92%	29380	-9.22E-02	-0.0933	1.21%
489	-3.65E-02	-0.03828	4.97%	29379	-1.14E-01	-0.115724	1.63%
488	-4.44E-02	-0.04686	5.61%	29378	-1.36E-01	-0.138149	1.90%
195	-5.23E-02	-0.05543	5.92%	29330	-1.57E-01	-0.160573	2.01%
L/D=2							
M/H=30				interface			
E/G*=1000	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
487	1.58E-01	0.153254	-2.83%	29354	3.85E-01	0.3798582	-1.21%
506	1.45E-01	0.141956	-2.00%	29396	3.53E-01	0.3503073	-0.86%
505	1.32E-01	0.130658	-1.18%	29395	3.22E-01	0.3207565	-0.51%
504	1.20E-01	0.11936	-0.37%	29394	2.92E-01	0.2912057	-0.17%
503	1.08E-01	0.108062	0.44%	29393	2.61E-01	0.2616548	0.17%
502	9.56E-02	0.096764	1.25%	29392	2.31E-01	0.232104	0.52%
501	8.37E-02	0.085466	2.06%	29391	2.01E-01	0.2025532	0.87%
500	7.21E-02	0.074168	2.89%	29390	1.71E-01	0.1730024	1.24%
499	6.06E-02	0.062871	3.77%	29389	1.41E-01	0.1434515	1.66%
498	4.92E-02	0.051573	4.74%	29388	1.11E-01	0.1139007	2.15%
497	3.80E-02	0.040275	5.90%	29387	8.20E-02	0.0843499	2.83%
496	2.69E-02	0.028977	7.53%	29386	5.27E-02	0.0547991	4.02%
495	1.60E-02	0.017679	10.66%	29385	2.34E-02	0.0252482	7.69%
494	5.10E-03	0.006381	25.10%	29384	-5.68E-03	-0.004303	-24.30%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

493	-5.69E-03	-0.00492	-13.61%	29383	-3.47E-02	-0.033853	-2.50%
492	-1.64E-02	-0.01621	-1.21%	29382	-6.37E-02	-0.063404	-0.43%
491	-2.71E-02	-0.02751	1.60%	29381	-9.26E-02	-0.092955	0.42%
490	-3.77E-02	-0.03881	2.94%	29380	-1.21E-01	-0.122506	0.92%
489	-4.83E-02	-0.05011	3.74%	29379	-1.50E-01	-0.152057	1.24%
488	-5.89E-02	-0.06141	4.23%	29378	-1.79E-01	-0.181608	1.44%
195	-6.96E-02	-0.0727	4.46%	29330	-2.08E-01	-0.211158	1.53%

**Πίνακας 0-10** Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=3, e=0

L/D=3							
M/H=0				interface			
E/G*=10	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	5.64E-04	0.000436	-22.68%	38844	0.00124043	0.000970652	-21.75%
646	5.01E-04	0.000418	-16.65%	38896	0.00110824	0.000925223	-16.51%
645	4.42E-04	0.000399	-9.72%	38895	0.000982489	0.000879793	-10.45%
644	3.88E-04	0.00038	-2.04%	38894	0.000864658	0.000834363	-3.50%
643	3.41E-04	0.000362	6.15%	38893	0.000755905	0.000788933	4.37%
642	3.00E-04	0.000343	14.62%	38892	0.000656731	0.000743504	13.21%
641	2.64E-04	0.000325	23.16%	38891	0.000567056	0.000698074	23.10%
640	2.33E-04	0.000306	31.59%	38890	0.000486508	0.000652644	34.15%
639	2.06E-04	0.000288	39.72%	38889	0.000414587	0.000607214	46.46%
638	1.83E-04	0.000269	47.33%	38888	0.000350773	0.000561784	60.16%
637	1.63E-04	0.000251	54.18%	38887	0.000294541	0.000516355	75.31%
636	1.45E-04	0.000232	60.01%	38886	0.00024537	0.000470925	91.92%
635	1.30E-04	0.000213	64.53%	38885	0.000202746	0.000425495	109.87%
634	1.16E-04	0.000195	67.43%	38884	0.000166162	0.000380065	128.73%
633	1.05E-04	0.000176	68.38%	38883	0.000135112	0.000334636	147.67%
632	9.45E-05	0.000158	67.03%	38882	0.000109082	0.000289206	165.13%
631	8.54E-05	0.000139	63.00%	38881	8.75E-05	0.000243776	178.49%
630	7.74E-05	0.000121	55.89%	38880	6.99E-05	0.000198346	183.71%
629	7.03E-05	0.000102	45.27%	38879	5.56E-05	0.000152917	174.83%
628	6.39E-05	8.35E-05	30.68%	38878	4.42E-05	0.000107487	143.38%
627	5.82E-05	6.5E-05	11.59%	38877	3.50E-05	6.20571E-05	77.44%
626	5.31E-05	4.64E-05	-12.58%	38876	2.76E-05	1.66273E-05	-39.79%
625	4.85E-05	2.79E-05	-42.50%	38875	2.17E-05	-2.8802E-05	-232.73%
624	4.43E-05	9.32E-06	-78.95%	38874	1.69E-05	-7.4232E-05	-539.22%
623	4.04E-05	-9.2E-06	-122.87%	38873	1.29E-05	-0.00011966	-1024.95%
622	3.69E-05	-2.8E-05	-175.41%	38872	9.57E-06	-0.00016509	-1824.97%
621	3.36E-05	-4.6E-05	-238.00%	38871	6.59E-06	-0.00021052	-3293.28%
620	3.05E-05	-6.5E-05	-312.52%	38870	3.81E-06	-0.00025595	-6813.39%
619	2.77E-05	-8.3E-05	-401.69%	38869	1.02E-06	-0.00030138	-29708.12%
618	2.49E-05	-0.0001	-510.28%	38868	-2.07E-06	-0.00034681	16641.04%
195	2.20E-05	-0.00012	-647.97%	38820	-5.90E-06	-0.00039224	6548.65%

Παράρτημα

L/D=3							
M/H=0				interface			
E/G*=50	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	2.34E-03	0.001977	-15.60%	38844	4.24E-03	0.003646648	-13.92%
646	2.17E-03	0.001898	-12.46%	38896	3.94E-03	0.003493363	-11.45%
645	2.00E-03	0.00182	-9.03%	38895	3.66E-03	0.003340078	-8.74%
644	1.84E-03	0.001742	-5.32%	38894	3.38E-03	0.003186793	-5.80%
643	1.69E-03	0.001663	-1.40%	38893	3.12E-03	0.003033508	-2.63%
642	1.54E-03	0.001585	2.69%	38892	2.86E-03	0.002880223	0.76%
641	1.41E-03	0.001507	6.89%	38891	2.61E-03	0.002726938	4.34%
640	1.28E-03	0.001428	11.15%	38890	2.38E-03	0.002573653	8.09%
639	1.17E-03	0.00135	15.41%	38889	2.16E-03	0.002420368	12.01%
638	1.06E-03	0.001271	19.61%	38888	1.95E-03	0.002267084	16.06%
637	9.65E-04	0.001193	23.66%	38887	1.76E-03	0.002113799	20.22%
636	8.74E-04	0.001115	27.48%	38886	1.58E-03	0.001960514	24.43%
635	7.92E-04	0.001036	30.93%	38885	1.40E-03	0.001807229	28.64%
634	7.15E-04	0.000958	33.89%	38884	1.25E-03	0.001653944	32.75%
633	6.46E-04	0.00088	36.19%	38883	1.10E-03	0.001500659	36.64%
632	5.82E-04	0.000801	37.63%	38882	9.62E-04	0.001347374	40.13%
631	5.24E-04	0.000723	37.98%	38881	8.35E-04	0.001194089	42.99%
630	4.71E-04	0.000645	36.95%	38880	7.18E-04	0.001040804	44.87%
629	4.22E-04	0.000566	34.22%	38879	6.11E-04	0.00088752	45.25%
628	3.77E-04	0.000488	29.36%	38878	5.12E-04	0.000734235	43.37%
627	3.36E-04	0.000409	21.87%	38877	4.21E-04	0.00058095	37.98%
626	2.98E-04	0.000331	11.06%	38876	3.37E-04	0.000427665	26.91%
625	2.63E-04	0.000253	-3.93%	38875	2.59E-04	0.00027438	5.89%
624	2.30E-04	0.000174	-24.36%	38874	1.87E-04	0.000121095	-35.08%
623	2.00E-04	9.59E-05	-52.03%	38873	1.18E-04	-3.219E-05	-127.18%
622	1.71E-04	1.76E-05	-89.75%	38872	5.39E-05	-0.00018547	-443.86%
621	1.44E-04	-6.1E-05	-142.21%	38871	-7.68E-06	-0.00033876	4313.14%
620	1.18E-04	-0.00014	-217.93%	38870	-6.73E-05	-0.00049204	631.65%
619	9.26E-05	-0.00022	-334.85%	38869	-1.26E-04	-0.00064533	412.70%
618	6.71E-05	-0.0003	-541.05%	38868	-1.85E-04	-0.00079861	331.13%
195	4.02E-05	-0.00037	- 1031.78%	38820	-2.48E-04	-0.0009519	283.83%
L/D=3							
M/H=0				interface			
E/G*=100	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	4.79E-03	0.004246	-11.42%	38844	0.00834537	0.007554582	-10.47%
646	4.51E-03	0.004084	-9.36%	38896	0.00787371	0.007250502	-8.60%
645	4.22E-03	0.003922	-7.14%	38895	0.00740883	0.006946421	-6.66%
644	3.95E-03	0.00376	-4.78%	38894	0.0069519	0.00664234	-4.66%
643	3.68E-03	0.003598	-2.31%	38893	0.00650479	0.006338259	-2.63%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

642	3.43E-03	0.003435	0.24%	38892	0.00606924	0.006034179	-0.58%
641	3.18E-03	0.003273	2.84%	38891	0.00564658	0.005730098	1.46%
640	2.95E-03	0.003111	5.46%	38890	0.00523772	0.005426017	3.47%
639	2.73E-03	0.002949	8.07%	38889	0.00484326	0.005121936	5.44%
638	2.52E-03	0.002787	10.64%	38888	0.00446356	0.004817856	7.35%
637	2.32E-03	0.002625	13.12%	38887	0.00409882	0.004513775	9.19%
636	2.13E-03	0.002463	15.47%	38886	0.00374907	0.004209694	10.94%
635	1.96E-03	0.002301	17.63%	38885	0.00341423	0.003905613	12.58%
634	1.79E-03	0.002139	19.53%	38884	0.00309407	0.003601533	14.09%
633	1.63E-03	0.001976	21.10%	38883	0.00278829	0.003297452	15.44%
632	1.48E-03	0.001814	22.24%	38882	0.00249648	0.002993371	16.60%
631	1.35E-03	0.001652	22.84%	38881	0.00221814	0.00268929	17.52%
630	1.21E-03	0.00149	22.76%	38880	0.00195271	0.00238521	18.13%
629	1.09E-03	0.001328	21.81%	38879	0.00169954	0.002081129	18.34%
628	9.73E-04	0.001166	19.78%	38878	0.00145793	0.001777048	17.96%
627	8.63E-04	0.001004	16.34%	38877	0.00122711	0.001472967	16.69%
626	7.58E-04	0.000842	11.06%	38876	0.00100621	0.001168886	13.92%
625	6.58E-04	0.00068	3.29%	38875	0.000794304	0.000864806	8.15%
624	5.62E-04	0.000517	-7.99%	38874	0.000590365	0.000560725	-5.29%
623	4.71E-04	0.000355	-24.50%	38873	0.000393336	0.000256644	-53.26%
622	3.82E-04	0.000193	-49.45%	38872	0.000202161	-4.7437E-05	526.17%
621	2.97E-04	3.11E-05	-89.50%	38871	1.58054E-05	-0.00035152	104.50%
620	2.13E-04	-0.00013	-161.53%	38870	-0.0001669	-0.0006556	74.54%
619	1.30E-04	-0.00029	-324.70%	38869	-0.00034762	-0.00095968	63.78%
618	4.76E-05	-0.00046	-	38868	-0.00052918	-0.00126376	58.13%
195	-3.79E-05	-0.00062	1055.35%	38820	-0.00071593	-0.00156784	54.34%
L/D=3							
M/H=0				interface			
E/G*=150	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	6.13E-03	0.005519	-9.97%	38844	1.05E-02	0.009608023	-8.13%
646	5.79E-03	0.00531	-8.21%	38896	9.90E-03	0.009226722	-6.81%
645	5.45E-03	0.005102	-6.34%	38895	9.35E-03	0.008845421	-5.41%
644	5.12E-03	0.004894	-4.36%	38894	8.81E-03	0.00846412	-3.91%
643	4.80E-03	0.004685	-2.29%	38893	8.28E-03	0.008082819	-2.34%
642	4.48E-03	0.004477	-0.16%	38892	7.76E-03	0.007701518	-0.70%
641	4.18E-03	0.004268	2.00%	38891	7.25E-03	0.007320217	1.00%
640	3.90E-03	0.00406	4.17%	38890	6.75E-03	0.006938916	2.73%
639	3.62E-03	0.003852	6.33%	38889	6.28E-03	0.006557615	4.49%
638	3.36E-03	0.003643	8.45%	38888	5.81E-03	0.006176314	6.26%
637	3.11E-03	0.003435	10.49%	38887	5.36E-03	0.005795013	8.02%
636	2.87E-03	0.003227	12.42%	38886	4.93E-03	0.005413712	9.75%
635	2.64E-03	0.003018	14.19%	38885	4.52E-03	0.005032411	11.42%
634	2.43E-03	0.00281	15.77%	38884	4.12E-03	0.00465111	13.01%

Παράρτημα

633	2.22E-03	0.002602	17.07%	38883	3.73E-03	0.004269809	14.46%
632	2.03E-03	0.002393	18.05%	38882	3.36E-03	0.003888508	15.74%
631	1.84E-03	0.002185	18.61%	38881	3.00E-03	0.003507207	16.78%
630	1.67E-03	0.001976	18.64%	38880	2.66E-03	0.003125906	17.48%
629	1.50E-03	0.001768	18.01%	38879	2.33E-03	0.002744605	17.72%
628	1.34E-03	0.00156	16.54%	38878	2.01E-03	0.002363304	17.30%
627	1.19E-03	0.001351	13.98%	38877	1.71E-03	0.001982003	15.94%
626	1.04E-03	0.001143	9.97%	38876	1.42E-03	0.001600702	13.11%
625	8.99E-04	0.000935	3.98%	38875	1.13E-03	0.001219401	7.86%
624	7.64E-04	0.000726	-4.87%	38874	8.55E-04	0.0008381	-1.95%
623	6.33E-04	0.000518	-18.11%	38873	5.87E-04	0.000456799	-22.14%
622	5.05E-04	0.00031	-38.73%	38872	3.25E-04	7.54976E-05	-76.78%
621	3.81E-04	0.000101	-73.44%	38871	6.92E-05	-0.0003058	-542.15%
620	2.60E-04	-0.00011	-141.25%	38870	-1.83E-04	-0.0006871	276.20%
619	1.39E-04	-0.00032	-326.31%	38869	-4.32E-04	-0.00106841	147.27%
618	1.87E-05	-0.00052	- 2896.40%	38868	-6.82E-04	-0.00144971	112.47%
195	-1.05E-04	-0.00073	596.41%	38820	-9.38E-04	-0.00183101	95.14%
L/D=3							
M/H=0				interface			
E/G*=500	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	1.96E-02	0.018742	-4.32%	38844	3.40E-02	0.032964102	-3.12%
646	1.87E-02	0.018058	-3.61%	38896	3.26E-02	0.031693809	-2.63%
645	1.79E-02	0.017373	-2.87%	38895	3.11E-02	0.030423516	-2.12%
644	1.70E-02	0.016689	-2.10%	38894	2.96E-02	0.029153223	-1.59%
643	1.62E-02	0.016004	-1.30%	38893	2.82E-02	0.02788293	-1.04%
642	1.54E-02	0.01532	-0.50%	38892	2.67E-02	0.026612637	-0.47%
641	1.46E-02	0.014635	0.30%	38891	2.53E-02	0.025342344	0.10%
640	1.38E-02	0.013951	1.10%	38890	2.39E-02	0.024072051	0.68%
639	1.30E-02	0.013266	1.88%	38889	2.25E-02	0.022801758	1.26%
638	1.23E-02	0.012582	2.64%	38888	2.11E-02	0.021531465	1.83%
637	1.15E-02	0.011897	3.37%	38887	1.98E-02	0.020261172	2.38%
636	1.08E-02	0.011213	4.05%	38886	1.85E-02	0.018990879	2.92%
635	1.01E-02	0.010529	4.67%	38885	1.71E-02	0.017720586	3.43%
634	9.35E-03	0.009844	5.23%	38884	1.58E-02	0.016450293	3.90%
633	8.67E-03	0.00916	5.70%	38883	1.45E-02	0.015180001	4.34%
632	7.99E-03	0.008475	6.07%	38882	1.33E-02	0.013909708	4.71%
631	7.33E-03	0.007791	6.32%	38881	1.20E-02	0.012639415	5.02%
630	6.68E-03	0.007106	6.42%	38880	1.08E-02	0.011369122	5.23%
629	6.04E-03	0.006422	6.33%	38879	9.59E-03	0.010098829	5.33%
628	5.41E-03	0.005737	6.00%	38878	8.39E-03	0.008828536	5.26%
627	4.80E-03	0.005053	5.36%	38877	7.20E-03	0.007558243	4.96%
626	4.19E-03	0.004368	4.30%	38876	6.03E-03	0.00628795	4.32%
625	3.59E-03	0.003684	2.64%	38875	4.87E-03	0.005017657	3.10%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

624	3.00E-03	0.002999	0.06%	38874	3.72E-03	0.003747364	0.83%
623	2.41E-03	0.002315	-4.05%	38873	2.58E-03	0.002477071	-3.85%
622	1.83E-03	0.00163	-11.06%	38872	1.44E-03	0.001206778	-16.43%
621	1.26E-03	0.000946	-24.83%	38871	3.19E-04	-6.3515E-05	-119.91%
620	6.87E-04	0.000261	-61.96%	38870	-8.00E-04	-0.00133381	66.64%
619	1.18E-04	-0.00042	-457.12%	38869	-1.92E-03	-0.0026041	35.87%
618	-4.51E-04	-0.00111	145.49%	38868	-3.03E-03	-0.00387439	27.72%
195	-1.03E-03	-0.00179	74.72%	38820	-4.16E-03	-0.00514469	23.74%
L/D=3							
M/H=0				interface			
E/G*=750	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	2.76E-02	0.0267	-3.22%	38844	4.80E-02	0.046911489	-2.27%
646	2.64E-02	0.02573	-2.69%	38896	4.60E-02	0.045109557	-1.92%
645	2.53E-02	0.024759	-2.15%	38895	4.40E-02	0.043307626	-1.55%
644	2.42E-02	0.023789	-1.58%	38894	4.20E-02	0.041505694	-1.17%
643	2.30E-02	0.022819	-1.00%	38893	4.00E-02	0.039703762	-0.77%
642	2.19E-02	0.021848	-0.41%	38892	3.80E-02	0.037901831	-0.36%
641	2.08E-02	0.020878	0.17%	38891	3.61E-02	0.036099899	0.05%
640	1.98E-02	0.019908	0.75%	38890	3.41E-02	0.034297967	0.46%
639	1.87E-02	0.018937	1.32%	38889	3.22E-02	0.032496036	0.87%
638	1.76E-02	0.017967	1.87%	38888	3.03E-02	0.030694104	1.27%
637	1.66E-02	0.016997	2.39%	38887	2.84E-02	0.028892172	1.66%
636	1.56E-02	0.016026	2.88%	38886	2.65E-02	0.027090241	2.04%
635	1.46E-02	0.015056	3.33%	38885	2.47E-02	0.025288309	2.40%
634	1.36E-02	0.014086	3.73%	38884	2.29E-02	0.023486377	2.74%
633	1.26E-02	0.013115	4.08%	38883	2.10E-02	0.021684446	3.04%
632	1.16E-02	0.012145	4.35%	38882	1.92E-02	0.019882514	3.30%
631	1.07E-02	0.011175	4.53%	38881	1.75E-02	0.018080582	3.52%
630	9.75E-03	0.010204	4.61%	38880	1.57E-02	0.016278651	3.67%
629	8.83E-03	0.009234	4.56%	38879	1.40E-02	0.014476719	3.74%
628	7.92E-03	0.008263	4.35%	38878	1.22E-02	0.012674787	3.70%
627	7.02E-03	0.007293	3.91%	38877	1.05E-02	0.010872856	3.50%
626	6.13E-03	0.006323	3.19%	38876	8.80E-03	0.009070924	3.06%
625	5.25E-03	0.005352	2.05%	38875	7.11E-03	0.007268992	2.24%
624	4.37E-03	0.004382	0.26%	38874	5.43E-03	0.005467061	0.69%
623	3.50E-03	0.003412	-2.62%	38873	3.76E-03	0.003665129	-2.50%
622	2.64E-03	0.002441	-7.59%	38872	2.10E-03	0.001863197	-11.16%
621	1.79E-03	0.001471	-17.61%	38871	4.43E-04	6.12657E-05	-86.16%
620	9.33E-04	0.000501	-46.32%	38870	-1.21E-03	-0.00174067	44.32%
619	8.24E-05	-0.00047	-669.83%	38869	-2.85E-03	-0.0035426	24.23%
618	-7.69E-04	-0.00144	87.34%	38868	-4.50E-03	-0.00534453	18.82%
195	-1.62E-03	-0.00241	48.34%	38820	-6.15E-03	-0.00714646	16.17%

Παράρτημα

L/D=3							
M/H=0				interface			
E/G*=1000	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	3.61E-02	0.035211	-2.53%	38844	6.29E-02	0.061842667	-1.76%
646	3.47E-02	0.033935	-2.12%	38896	6.04E-02	0.059471763	-1.48%
645	3.32E-02	0.032659	-1.69%	38895	5.78E-02	0.057100858	-1.20%
644	3.18E-02	0.031383	-1.25%	38894	5.52E-02	0.054729954	-0.90%
643	3.03E-02	0.030107	-0.80%	38893	5.27E-02	0.05235905	-0.60%
642	2.89E-02	0.028831	-0.34%	38892	5.01E-02	0.049988145	-0.28%
641	2.75E-02	0.027555	0.11%	38891	4.76E-02	0.047617241	0.03%
640	2.61E-02	0.026279	0.56%	38890	4.51E-02	0.045246337	0.35%
639	2.48E-02	0.025003	1.00%	38889	4.26E-02	0.042875433	0.66%
638	2.34E-02	0.023727	1.42%	38888	4.01E-02	0.040504528	0.97%
637	2.20E-02	0.02245	1.83%	38887	3.77E-02	0.038133624	1.27%
636	2.07E-02	0.021174	2.21%	38886	3.52E-02	0.03576272	1.56%
635	1.94E-02	0.019898	2.55%	38885	3.28E-02	0.033391816	1.83%
634	1.81E-02	0.018622	2.86%	38884	3.04E-02	0.031020911	2.08%
633	1.68E-02	0.017346	3.13%	38883	2.80E-02	0.028650007	2.32%
632	1.56E-02	0.01607	3.34%	38882	2.56E-02	0.026279103	2.52%
631	1.43E-02	0.014794	3.48%	38881	2.33E-02	0.023908199	2.68%
630	1.31E-02	0.013518	3.55%	38880	2.10E-02	0.021537294	2.80%
629	1.18E-02	0.012242	3.51%	38879	1.86E-02	0.01916639	2.85%
628	1.06E-02	0.010966	3.36%	38878	1.63E-02	0.016795486	2.83%
627	9.40E-03	0.00969	3.04%	38877	1.40E-02	0.014424582	2.68%
626	8.21E-03	0.008414	2.50%	38876	1.18E-02	0.012053677	2.36%
625	7.02E-03	0.007138	1.64%	38875	9.52E-03	0.009682773	1.76%
624	5.84E-03	0.005862	0.30%	38874	7.27E-03	0.007311869	0.62%
623	4.67E-03	0.004586	-1.87%	38873	5.03E-03	0.004940964	-1.74%
622	3.51E-03	0.00331	-5.66%	38872	2.80E-03	0.00257006	-8.17%
621	2.35E-03	0.002034	-13.40%	38871	5.76E-04	0.000199156	-65.44%
620	1.19E-03	0.000758	-36.47%	38870	-1.64E-03	-0.00217175	32.41%
619	3.97E-05	-0.00052	1404.68%	38869	-3.85E-03	-0.00454265	17.89%
618	-1.11E-03	-0.00179	60.99%	38868	-6.07E-03	-0.00691356	13.95%
195	-2.27E-03	-0.00307	35.01%	38820	-8.29E-03	-0.00928446	12.01%

**Πίνακας 0-11** Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=3, e=15m

L/D=3							
M/H=15				interface			
E/G*=10	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	1.61E-03	0.001132	-29.70%	38844	0.00378854	0.003057076	-19.31%
646	1.19E-03	0.001064	-10.49%	38896	0.00299514	0.002865674	-4.32%
645	8.55E-04	0.000997	16.49%	38895	0.00231076	0.002674272	15.73%
644	6.01E-04	0.000929	54.63%	38894	0.0017267	0.00248287	43.79%



Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

643	4.10E-04	0.000861	110.28%	38893	0.00123102	0.002291467	86.14%
642	2.67E-04	0.000794	197.43%	38892	0.000812362	0.002100065	158.51%
641	1.60E-04	0.000726	352.89%	38891	0.000461844	0.001908663	313.27%
640	8.12E-05	0.000659	711.67%	38890	0.000172821	0.001717261	893.66%
639	2.29E-05	0.000591	2484.31%	38889	-6.00E-05	0.001525858	-2641.33%
638	-1.93E-05	0.000524	-2816.16%	38888	-0.00024184	0.001334456	-651.78%
637	-4.90E-05	0.000456	-1030.46%	38887	-0.00037802	0.001143054	-402.38%
618	-5.21E-05	-0.00083	1487.44%	38886	-0.00047448	0.000951652	-300.57%
195	-5.24E-05	-0.0009	1608.70%	38885	-0.00053738	0.00076025	-241.47%
619	-5.29E-05	-0.00076	1337.05%	38884	-0.00057269	0.000568847	-199.33%
620	-5.44E-05	-0.00069	1172.13%	38883	-0.00058589	0.000377445	-164.42%
621	-5.66E-05	-0.00062	1003.80%	38882	-0.00058176	0.000186043	-131.98%
622	-5.93E-05	-0.00056	839.47%	38881	-0.00056433	-5.3593E-06	-99.05%
623	-6.25E-05	-0.00049	683.69%	38880	-0.00053696	-0.00019676	-63.36%
624	-6.61E-05	-0.00042	539.06%	38879	-0.0005024	-0.00038816	-22.74%
636	-6.92E-05	0.000388	-661.04%	38878	-0.00046285	-0.00057957	25.22%
625	-7.00E-05	-0.00035	406.83%	38877	-0.00042011	-0.00077097	83.52%
626	-7.41E-05	-0.00029	287.27%	38876	-0.00037557	-0.00096237	156.24%
627	-7.84E-05	-0.00022	179.91%	38875	-0.00033035	-0.00115377	249.26%
635	-8.23E-05	0.000321	-490.11%	38874	-0.00028526	-0.00134517	371.57%
628	-8.27E-05	-0.00015	83.73%	38873	-0.00024091	-0.00153658	537.83%
629	-8.68E-05	-8.4E-05	-2.73%	38872	-0.00019771	-0.00172798	774.01%
634	-8.99E-05	0.000253	-381.89%	38871	-0.00015589	-0.00191938	1131.27%
630	-9.03E-05	-1.7E-05	-81.36%	38870	-0.00011545	-0.00211078	1728.37%
631	-9.30E-05	5.07E-05	-154.55%	38869	-7.61E-05	-0.00230219	2925.15%
633	-9.35E-05	0.000186	-298.70%	38868	-3.72E-05	-0.00249359	6597.54%
632	-9.43E-05	0.000118	-225.47%	38820	1.96E-06	-0.00268499	-136829.79%
L/D=3							
M/H=15				interface			
E/G*=50	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	6.50E-03	0.004712	-27.47%	38844	1.17E-02	0.008853179	-24.53%
646	5.52E-03	0.004455	-19.30%	38896	1.03E-02	0.008371484	-18.72%
645	4.66E-03	0.004199	-9.86%	38895	8.99E-03	0.007889788	-12.23%
644	3.90E-03	0.003943	1.09%	38894	7.79E-03	0.007408092	-4.90%
643	3.24E-03	0.003687	13.94%	38893	6.69E-03	0.006926397	3.48%
642	2.65E-03	0.003431	29.24%	38892	5.69E-03	0.006444701	13.21%
641	2.15E-03	0.003175	47.83%	38891	4.78E-03	0.005963006	24.68%
640	1.71E-03	0.002919	70.95%	38890	3.96E-03	0.00548131	38.50%
639	1.33E-03	0.002663	100.65%	38889	3.21E-03	0.004999615	55.62%
638	1.00E-03	0.002407	140.62%	38888	2.54E-03	0.004517919	77.65%
637	7.21E-04	0.002151	198.29%	38887	1.94E-03	0.004036224	107.62%
636	4.84E-04	0.001894	291.46%	38886	1.41E-03	0.003554528	151.99%
635	2.84E-04	0.001638	476.80%	38885	9.38E-04	0.003072832	227.42%

Παράρτημα

634	1.17E-04	0.001382	1084.86%	38884	5.23E-04	0.002591137	395.05%
633	-2.24E-05	0.001126	-5126.95%	38883	1.61E-04	0.002109441	1208.95%
632	-1.37E-04	0.00087	-735.37%	38882	-1.53E-04	0.001627746	-1167.02%
631	-2.30E-04	0.000614	-366.51%	38881	-4.22E-04	0.00114605	-371.49%
630	-3.06E-04	0.000358	-217.04%	38880	-6.52E-04	0.000664355	-201.87%
629	-3.66E-04	0.000102	-127.82%	38879	-8.47E-04	0.000182659	-121.56%
628	-4.13E-04	-0.00015	-62.67%	38878	-1.01E-03	-0.00029904	-70.44%
627	-4.50E-04	-0.00041	-8.81%	38877	-1.15E-03	-0.00078073	-32.12%
626	-4.78E-04	-0.00067	39.40%	38876	-1.27E-03	-0.00126243	-0.33%
625	-4.99E-04	-0.00092	84.78%	38875	-1.36E-03	-0.00174412	27.79%
624	-5.15E-04	-0.00118	128.81%	38874	-1.45E-03	-0.00222582	53.68%
623	-5.27E-04	-0.00143	172.27%	38873	-1.52E-03	-0.00270751	78.06%
622	-5.36E-04	-0.00169	215.44%	38872	-1.58E-03	-0.00318921	101.31%
621	-5.43E-04	-0.00195	258.29%	38871	-1.64E-03	-0.00367091	123.57%
620	-5.50E-04	-0.0022	300.45%	38870	-1.70E-03	-0.0041526	144.79%
619	-5.58E-04	-0.00246	341.04%	38869	-1.75E-03	-0.0046343	164.63%
618	-5.68E-04	-0.00272	378.31%	38868	-1.81E-03	-0.00511599	182.28%
195	-5.83E-04	-0.00297	409.37%	38820	-1.89E-03	-0.00559769	196.55%
L/D=3							
M/H=15				interface			
E/G*=100	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	1.23E-02	0.009447	-23.20%	38844	0.0219569	0.017906938	-18.45%
646	1.09E-02	0.008962	-17.79%	38896	0.0199248	0.016989894	-14.73%
645	9.62E-03	0.008477	-11.89%	38895	0.0180166	0.01607285	-10.79%
644	8.45E-03	0.007991	-5.43%	38894	0.0162231	0.015155806	-6.58%
643	7.38E-03	0.007506	1.71%	38893	0.0145369	0.014238762	-2.05%
642	6.40E-03	0.007021	9.64%	38892	0.0129529	0.013321717	2.85%
641	5.52E-03	0.006536	18.51%	38891	0.0114676	0.012404673	8.17%
640	4.71E-03	0.006051	28.50%	38890	0.0100777	0.011487629	13.99%
639	3.98E-03	0.005566	39.88%	38889	0.00877946	0.010570585	20.40%
638	3.32E-03	0.005081	52.99%	38888	0.00756906	0.009653541	27.54%
637	2.73E-03	0.004596	68.41%	38887	0.00644219	0.008736497	35.61%
636	2.20E-03	0.004111	87.03%	38886	0.00539436	0.007819452	44.96%
635	1.72E-03	0.003625	110.49%	38885	0.00442093	0.006902408	56.13%
634	1.30E-03	0.00314	141.98%	38884	0.00351725	0.005985364	70.17%
633	9.19E-04	0.002655	188.86%	38883	0.00267869	0.00506832	89.21%
632	5.82E-04	0.00217	272.75%	38882	0.00190069	0.004151276	118.41%
631	2.82E-04	0.001685	496.65%	38881	0.00117884	0.003234231	174.36%
630	1.58E-05	0.0012	7483.03%	38880	0.000508788	0.002317187	355.43%
629	-2.21E-04	0.000715	-422.84%	38879	-0.00011384	0.001400143	-1329.93%
628	-4.33E-04	0.00023	-153.07%	38878	-0.0006935	0.000483099	-169.66%
627	-6.22E-04	-0.00026	-58.95%	38877	-0.00123475	-0.00043395	-64.86%
626	-7.92E-04	-0.00074	-6.53%	38876	-0.00174216	-0.00135099	-22.45%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

625	-9.46E-04	-0.00123	29.54%	38875	-0.00222025	-0.00226803	2.15%
624	-1.09E-03	-0.00171	57.43%	38874	-0.00267337	-0.00318508	19.14%
623	-1.22E-03	-0.0022	80.51%	38873	-0.00310561	-0.00410212	32.09%
622	-1.34E-03	-0.00268	100.40%	38872	-0.00352073	-0.00501917	42.56%
621	-1.45E-03	-0.00317	117.91%	38871	-0.00392222	-0.00593621	51.35%
620	-1.56E-03	-0.00365	133.43%	38870	-0.00431408	-0.00685325	58.86%
619	-1.67E-03	-0.00414	147.03%	38869	-0.00470256	-0.0077703	65.24%
618	-1.79E-03	-0.00462	158.38%	38868	-0.00509826	-0.00868734	70.40%
195	-1.91E-03	-0.00511	166.82%	38820	-0.00551614	-0.00960439	74.11%
L/D=3							
M/H=15				interface			
E/G*=150	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	1.53E-02	0.012055	-21.19%	38844	2.69E-02	0.022508915	-16.19%
646	1.37E-02	0.011447	-16.52%	38896	2.46E-02	0.021373248	-13.01%
645	1.22E-02	0.010839	-11.51%	38895	2.24E-02	0.020237581	-9.69%
644	1.09E-02	0.010231	-6.11%	38894	2.04E-02	0.019101915	-6.18%
643	9.65E-03	0.009623	-0.25%	38893	1.84E-02	0.017966248	-2.46%
642	8.49E-03	0.009015	6.13%	38892	1.66E-02	0.016830581	1.50%
641	7.43E-03	0.008407	13.13%	38891	1.48E-02	0.015694914	5.73%
640	6.46E-03	0.007799	20.82%	38890	1.32E-02	0.014559248	10.27%
639	5.56E-03	0.007191	29.32%	38889	1.17E-02	0.013423581	15.16%
638	4.74E-03	0.006583	38.82%	38888	1.02E-02	0.012287914	20.47%
637	4.00E-03	0.005975	49.54%	38887	8.83E-03	0.011152247	26.30%
636	3.32E-03	0.005367	61.89%	38886	7.54E-03	0.010016581	32.82%
635	2.70E-03	0.00476	76.49%	38885	6.33E-03	0.008880914	40.30%
634	2.13E-03	0.004152	94.51%	38884	5.19E-03	0.007745247	49.18%
633	1.62E-03	0.003544	118.25%	38883	4.12E-03	0.00660958	60.36%
632	1.16E-03	0.002936	153.07%	38882	3.12E-03	0.005473914	75.73%
631	7.39E-04	0.002328	215.00%	38881	2.17E-03	0.004338247	100.15%
630	3.56E-04	0.00172	382.82%	38880	1.27E-03	0.00320258	151.28%
629	7.60E-06	0.001112	14531.91%	38879	4.32E-04	0.002066913	378.76%
628	-3.11E-04	0.000504	-262.17%	38878	-3.65E-04	0.000931247	-354.94%
627	-6.03E-04	-0.0001	-82.75%	38877	-1.12E-03	-0.00020442	-81.77%
626	-8.72E-04	-0.00071	-18.32%	38876	-1.84E-03	-0.00134009	-27.17%
625	-1.12E-03	-0.00132	17.74%	38875	-2.53E-03	-0.00247575	-2.03%
624	-1.35E-03	-0.00193	42.37%	38874	-3.19E-03	-0.00361142	13.33%
623	-1.57E-03	-0.00254	61.12%	38873	-3.82E-03	-0.00474709	24.18%
622	-1.78E-03	-0.00314	76.33%	38872	-4.44E-03	-0.00588275	32.51%
621	-1.98E-03	-0.00375	89.10%	38871	-5.04E-03	-0.00701842	39.25%
620	-2.18E-03	-0.00436	100.01%	38870	-5.63E-03	-0.00815409	44.84%
619	-2.37E-03	-0.00497	109.26%	38869	-6.21E-03	-0.00928975	49.49%
618	-2.57E-03	-0.00558	116.75%	38868	-6.81E-03	-0.01042542	53.17%
195	-2.78E-03	-0.00618	122.11%	38820	-7.42E-03	-0.01156109	55.74%

Παράρτημα

L/D=3							
M/H=15				interface			
E/G*=500	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	4.40E-02	0.039234	-10.78%	38844	8.34E-02	0.077918898	-6.52%
646	4.09E-02	0.037364	-8.69%	38896	7.82E-02	0.074093344	-5.30%
645	3.80E-02	0.035495	-6.56%	38895	7.33E-02	0.070267789	-4.08%
644	3.52E-02	0.033625	-4.40%	38894	6.84E-02	0.066442234	-2.85%
643	3.25E-02	0.031755	-2.18%	38893	6.36E-02	0.062616679	-1.60%
642	2.99E-02	0.029886	0.10%	38892	5.90E-02	0.058791125	-0.32%
641	2.73E-02	0.028016	2.44%	38891	5.44E-02	0.05496557	0.97%
640	2.49E-02	0.026146	4.83%	38890	5.00E-02	0.051140015	2.29%
639	2.26E-02	0.024276	7.28%	38889	4.57E-02	0.047314461	3.63%
638	2.04E-02	0.022407	9.79%	38888	4.14E-02	0.043488906	5.01%
637	1.83E-02	0.020537	12.38%	38887	3.73E-02	0.039663351	6.43%
636	1.62E-02	0.018667	15.04%	38886	3.32E-02	0.035837796	7.90%
635	1.43E-02	0.016798	17.81%	38885	2.92E-02	0.032012242	9.45%
634	1.24E-02	0.014928	20.73%	38884	2.54E-02	0.028186687	11.12%
633	1.05E-02	0.013058	23.88%	38883	2.16E-02	0.024361132	12.99%
632	8.78E-03	0.011188	27.39%	38882	1.78E-02	0.020535578	15.17%
631	7.09E-03	0.009319	31.51%	38881	1.42E-02	0.016710023	17.94%
630	5.44E-03	0.007449	36.82%	38880	1.06E-02	0.012884468	21.89%
629	3.85E-03	0.005579	44.76%	38879	7.03E-03	0.009058914	28.84%
628	2.31E-03	0.00371	60.59%	38878	3.55E-03	0.005233359	47.57%
627	8.07E-04	0.00184	127.97%	38877	1.10E-04	0.001407804	1174.13%
626	-6.59E-04	-3E-05	-95.46%	38876	-3.28E-03	-0.00241775	-26.31%
625	-2.09E-03	-0.0019	-9.26%	38875	-6.63E-03	-0.00624331	-5.88%
624	-3.50E-03	-0.00377	7.68%	38874	-9.95E-03	-0.01006886	1.19%
623	-4.88E-03	-0.00564	15.45%	38873	-1.32E-02	-0.01389441	4.95%
622	-6.25E-03	-0.00751	20.15%	38872	-1.65E-02	-0.01771997	7.38%
621	-7.60E-03	-0.00938	23.41%	38871	-1.97E-02	-0.02154552	9.13%
620	-8.94E-03	-0.01125	25.83%	38870	-2.30E-02	-0.02537108	10.46%
619	-1.03E-02	-0.01312	27.67%	38869	-2.62E-02	-0.02919663	11.49%
618	-1.16E-02	-0.01499	29.03%	38868	-2.94E-02	-0.03302219	12.27%
195	-1.30E-02	-0.01686	29.90%	38820	-3.27E-02	-0.03684774	12.77%
L/D=3							
M/H=15				interface			
E/G*=750	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	6.07E-02	0.05569	-8.27%	38844	1.16E-01	0.110672108	-4.80%
646	5.69E-02	0.053058	-6.68%	38896	1.10E-01	0.10525974	-3.91%
645	5.31E-02	0.050426	-5.09%	38895	1.03E-01	0.099847371	-3.02%
644	4.95E-02	0.047795	-3.48%	38894	9.65E-02	0.094435003	-2.12%
643	4.60E-02	0.045163	-1.84%	38893	9.01E-02	0.089022635	-1.22%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

642	4.26E-02	0.042531	-0.18%	38892	8.39E-02	0.083610266	-0.31%
641	3.93E-02	0.039899	1.51%	38891	7.77E-02	0.078197898	0.61%
640	3.61E-02	0.037267	3.22%	38890	7.17E-02	0.072785529	1.55%
639	3.30E-02	0.034635	4.95%	38889	6.57E-02	0.067373161	2.49%
638	3.00E-02	0.032003	6.70%	38888	5.99E-02	0.061960793	3.45%
637	2.71E-02	0.029372	8.48%	38887	5.42E-02	0.056548424	4.43%
636	2.42E-02	0.02674	10.30%	38886	4.85E-02	0.051136056	5.44%
635	2.15E-02	0.024108	12.16%	38885	4.29E-02	0.045723688	6.49%
634	1.88E-02	0.021476	14.09%	38884	3.75E-02	0.040311319	7.62%
633	1.62E-02	0.018844	16.13%	38883	3.21E-02	0.034898951	8.85%
632	1.37E-02	0.016212	18.35%	38882	2.67E-02	0.029486583	10.28%
631	1.12E-02	0.01358	20.89%	38881	2.15E-02	0.024074214	12.06%
630	8.83E-03	0.010949	24.02%	38880	1.63E-02	0.018661846	14.52%
629	6.48E-03	0.008317	28.42%	38879	1.12E-02	0.013249478	18.63%
628	4.17E-03	0.005685	36.23%	38878	6.10E-03	0.007837109	28.55%
627	1.91E-03	0.003053	59.52%	38877	1.07E-03	0.002424741	125.69%
626	-3.06E-04	0.000421	-237.46%	38876	-3.90E-03	-0.00298763	-23.44%
625	-2.49E-03	-0.00221	-11.30%	38875	-8.84E-03	-0.0084	-4.96%
624	-4.65E-03	-0.00484	4.16%	38874	-1.37E-02	-0.01381236	0.53%
623	-6.78E-03	-0.00747	10.23%	38873	-1.86E-02	-0.01922473	3.30%
622	-8.89E-03	-0.01011	13.65%	38872	-2.35E-02	-0.0246371	5.04%
621	-1.10E-02	-0.01274	15.93%	38871	-2.83E-02	-0.03004947	6.27%
620	-1.31E-02	-0.01537	17.58%	38870	-3.31E-02	-0.03546184	7.19%
619	-1.52E-02	-0.018	18.82%	38869	-3.79E-02	-0.04087421	7.91%
618	-1.72E-02	-0.02063	19.72%	38868	-4.27E-02	-0.04628657	8.43%
195	-1.93E-02	-0.02327	20.28%	38820	-4.75E-02	-0.05169894	8.78%
L/D=3							
M/H=15				interface			
E/G*=1000	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	7.85E-02	0.073315	-6.62%	38844	1.51E-01	0.145725785	-3.75%
646	7.38E-02	0.069867	-5.36%	38896	1.43E-01	0.138615129	-3.05%
645	6.93E-02	0.066418	-4.10%	38895	1.35E-01	0.131504473	-2.36%
644	6.48E-02	0.06297	-2.83%	38894	1.27E-01	0.124393817	-1.67%
643	6.05E-02	0.059521	-1.55%	38893	1.18E-01	0.117283161	-0.97%
642	5.62E-02	0.056073	-0.26%	38892	1.10E-01	0.110172505	-0.27%
641	5.21E-02	0.052624	1.04%	38891	1.03E-01	0.103061848	0.43%
640	4.80E-02	0.049176	2.35%	38890	9.49E-02	0.095951192	1.14%
639	4.41E-02	0.045727	3.67%	38889	8.72E-02	0.088840536	1.86%
638	4.03E-02	0.042279	4.99%	38888	7.97E-02	0.08172988	2.58%
637	3.65E-02	0.03883	6.33%	38887	7.22E-02	0.074619224	3.32%
636	3.29E-02	0.035382	7.68%	38886	6.49E-02	0.067508568	4.08%
635	2.93E-02	0.031933	9.05%	38885	5.76E-02	0.060397912	4.86%
634	2.58E-02	0.028485	10.47%	38884	5.04E-02	0.053287256	5.69%

Παράρτημα

633	2.24E-02	0.025036	11.95%	38883	4.33E-02	0.0461766	6.60%
632	1.90E-02	0.021588	13.54%	38882	3.63E-02	0.039065944	7.65%
631	1.57E-02	0.018139	15.33%	38881	2.93E-02	0.031955288	8.92%
630	1.25E-02	0.014691	17.49%	38880	2.24E-02	0.024844632	10.67%
629	9.34E-03	0.011242	20.42%	38879	1.56E-02	0.017733976	13.52%
628	6.22E-03	0.007794	25.35%	38878	8.85E-03	0.01062332	20.02%
627	3.14E-03	0.004345	38.17%	38877	2.13E-03	0.003512664	64.86%
626	1.13E-04	0.000897	696.58%	38876	-4.54E-03	-0.00359799	-20.81%
625	-2.88E-03	-0.00255	-11.52%	38875	-1.12E-02	-0.01070865	-4.19%
624	-5.85E-03	-0.006	2.56%	38874	-1.78E-02	-0.0178193	0.25%
623	-8.79E-03	-0.00945	7.49%	38873	-2.43E-02	-0.02492996	2.42%
622	-1.17E-02	-0.0129	10.14%	38872	-3.09E-02	-0.03204062	3.76%
621	-1.46E-02	-0.01635	11.86%	38871	-3.74E-02	-0.03915127	4.69%
620	-1.75E-02	-0.01979	13.10%	38870	-4.39E-02	-0.04626193	5.39%
619	-2.04E-02	-0.02324	14.01%	38869	-5.04E-02	-0.05337258	5.92%
618	-2.33E-02	-0.02669	14.67%	38868	-5.69E-02	-0.06048324	6.32%
195	-2.62E-02	-0.03014	15.08%	38820	-6.34E-02	-0.0675939	6.57%

**Πίνακας 0-12** Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=3, e=30m

L/D=3							
M/H=30				interface			
E/G*=10	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	2.66E-03	0.001953	-26.45%	38844	0.0064168	0.00556852	-13.22%
646	1.88E-03	0.001828	-2.58%	38896	0.00494039	0.00520268	5.31%
645	1.27E-03	0.001703	34.22%	38895	0.00367723	0.00483683	31.53%
644	8.13E-04	0.001578	94.09%	38894	0.00260833	0.00447099	71.41%
643	4.78E-04	0.001453	203.82%	38893	0.00170917	0.00410514	140.18%
642	2.34E-04	0.001328	467.11%	38892	0.000957482	0.0037393	290.53%
641	5.70E-05	0.001203	2010.98%	38891	0.000336588	0.00337345	902.25%
640	-7.04E-05	0.001078	-1631.35%	38890	-0.00016593	0.00300761	-1912.56%
195	-1.27E-04	-0.0018	1316.27%	38889	-0.00056065	0.00264176	-571.20%
618	-1.29E-04	-0.00167	1193.69%	38888	-0.00085845	0.00227592	-365.12%
619	-1.33E-04	-0.00155	1058.28%	38887	-0.00107117	0.00191008	-278.32%
620	-1.39E-04	-0.00142	919.06%	38886	-0.00121135	0.00154423	-227.48%
621	-1.47E-04	-0.0013	782.55%	38885	-0.00129141	0.00117839	-191.25%
622	-1.56E-04	-0.00117	652.85%	38884	-0.00132294	0.00081254	-161.42%
639	-1.60E-04	0.000953	-695.28%	38883	-0.00131627	0.0004467	-133.94%
623	-1.65E-04	-0.00105	532.32%	38882	-0.00128032	8.0852E-05	-106.31%
624	-1.76E-04	-0.00092	422.05%	38881	-0.00122262	-0.000285	-76.69%
625	-1.88E-04	-0.0008	322.40%	38880	-0.00114932	-0.0006508	-43.37%
626	-2.01E-04	-0.00067	233.18%	38879	-0.00106536	-0.0010167	-4.57%
627	-2.15E-04	-0.00055	153.84%	38878	-0.00097463	-0.0013825	41.85%
638	-2.21E-04	0.000828	-474.47%	38877	-0.00088011	-0.0017484	98.65%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

628	-2.29E-04	-0.00042	83.58%	38876	-0.00078407	-0.0021142	169.65%
629	-2.44E-04	-0.0003	21.44%	38875	-0.00068819	-0.0024801	260.38%
630	-2.58E-04	-0.00017	-33.68%	38874	-0.00059366	-0.0028459	379.38%
637	-2.61E-04	0.000704	-370.00%	38873	-0.00050128	-0.0032118	540.71%
631	-2.71E-04	-4.6E-05	-82.98%	38872	-0.00041153	-0.0035776	769.34%
632	-2.83E-04	7.88E-05	-127.83%	38871	-0.00032455	-0.0039434	1115.04%
636	-2.83E-04	0.000579	-304.08%	38870	-0.00024014	-0.0043093	1694.46%
633	-2.92E-04	0.000204	-169.82%	38869	-0.00015759	-0.0046751	2866.68%
635	-2.94E-04	0.000454	-254.14%	38868	-7.55E-05	-0.005041	6572.72%
634	-2.96E-04	0.000329	-210.96%	38820	7.73E-06	-0.0054068	-70042.75%
L/D=3							
M/H=30				interface			
E/G*=50	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	1.07E-02	0.007573	-28.90%	38844	1.94E-02	0.01429964	-26.27%
646	8.87E-03	0.00713	-19.64%	38896	1.68E-02	0.01346657	-19.77%
645	7.32E-03	0.006688	-8.59%	38895	1.44E-02	0.0126335	-12.35%
644	5.96E-03	0.006246	4.77%	38894	1.23E-02	0.01180043	-3.72%
643	4.79E-03	0.005804	21.28%	38893	1.03E-02	0.01096736	6.52%
642	3.77E-03	0.005361	42.36%	38892	8.52E-03	0.01013429	18.99%
641	2.89E-03	0.004919	70.44%	38891	6.91E-03	0.00930122	34.64%
640	2.13E-03	0.004477	110.19%	38890	5.46E-03	0.00846815	55.14%
639	1.48E-03	0.004035	171.78%	38889	4.16E-03	0.00763508	83.63%
638	9.37E-04	0.003592	283.25%	38888	3.00E-03	0.00680201	126.89%
637	4.77E-04	0.00315	560.17%	38887	1.97E-03	0.00596894	203.04%
636	9.35E-05	0.002708	2797.68%	38886	1.06E-03	0.00513587	382.39%
635	-2.23E-04	0.002266	-1114.11%	38885	2.75E-04	0.0043028	1465.74%
634	-4.82E-04	0.001823	-478.18%	38884	-4.08E-04	0.00346973	-950.33%
633	-6.91E-04	0.001381	-299.98%	38883	-9.92E-04	0.00263667	-365.70%
632	-8.56E-04	0.000939	-209.68%	38882	-1.49E-03	0.0018036	-221.30%
631	-9.85E-04	0.000497	-150.45%	38881	-1.90E-03	0.00097053	-151.06%
630	-1.08E-03	5.45E-05	-105.03%	38880	-2.24E-03	0.00013746	-106.13%
629	-1.15E-03	-0.00039	-66.39%	38879	-2.52E-03	-0.0006956	-72.41%
618	-1.20E-03	-0.00525	336.81%	38878	-2.75E-03	-0.0015287	-44.33%
628	-1.20E-03	-0.00083	-31.04%	38877	-2.92E-03	-0.0023618	-19.21%
195	-1.21E-03	-0.00569	371.87%	38876	-3.06E-03	-0.0031948	4.37%
619	-1.21E-03	-0.00481	298.27%	38875	-3.17E-03	-0.0040279	27.20%
620	-1.22E-03	-0.00437	258.53%	38874	-3.25E-03	-0.004861	49.76%
621	-1.23E-03	-0.00393	218.94%	38873	-3.30E-03	-0.005694	72.30%
627	-1.24E-03	-0.00127	2.93%	38872	-3.35E-03	-0.0065271	94.94%
622	-1.24E-03	-0.00348	180.17%	38871	-3.38E-03	-0.0073602	117.71%
623	-1.25E-03	-0.00304	142.54%	38870	-3.41E-03	-0.0081932	140.47%
626	-1.25E-03	-0.00171	36.69%	38869	-3.43E-03	-0.0090263	162.85%
624	-1.26E-03	-0.0026	106.16%	38868	-3.47E-03	-0.0098594	183.96%

Παράρτημα

625	-1.26E-03	-0.00216	70.95%	38820	-3.54E-03	-0.0106924	202.28%
L/D=3							
M/H=30				interface			
E/G*=100	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	1.98E-02	0.01476	-25.49%	38844	0.035764	0.0284508	-20.45%
646	1.73E-02	0.013944	-19.39%	38896	0.0321333	0.02688878	-16.32%
645	1.50E-02	0.013128	-12.58%	38895	0.0287435	0.02532677	-11.89%
644	1.30E-02	0.012313	-4.93%	38894	0.0255751	0.02376476	-7.08%
643	1.11E-02	0.011497	3.79%	38893	0.0226115	0.02220275	-1.81%
642	9.38E-03	0.010682	13.87%	38892	0.0198409	0.02064074	4.03%
641	7.85E-03	0.009866	25.72%	38891	0.0172547	0.01907873	10.57%
640	6.47E-03	0.009051	39.94%	38890	0.0148455	0.01751671	17.99%
639	5.23E-03	0.008235	57.48%	38889	0.0126055	0.0159547	26.57%
638	4.12E-03	0.00742	79.96%	38888	0.0105266	0.01439269	36.73%
637	3.14E-03	0.006604	110.49%	38887	0.00860021	0.01283068	49.19%
636	2.26E-03	0.005788	155.82%	38886	0.00681738	0.01126867	65.29%
635	1.49E-03	0.004973	234.02%	38885	0.0051693	0.00970665	87.78%
634	8.06E-04	0.004157	415.57%	38884	0.00364735	0.00814464	123.30%
633	2.06E-04	0.003342	1519.94%	38883	0.00224321	0.00658263	193.45%
632	-3.20E-04	0.002526	-889.73%	38882	0.000948789	0.00502062	429.16%
631	-7.80E-04	0.001711	-319.26%	38881	-0.00024395	0.00345861	-1517.76%
630	-1.18E-03	0.000895	-175.72%	38880	-0.00134317	0.00189659	-241.20%
629	-1.53E-03	7.96E-05	-105.19%	38879	-0.00235728	0.00033458	-114.19%
628	-1.84E-03	-0.00074	-59.99%	38878	-0.00329487	-0.0012274	-62.75%
627	-2.11E-03	-0.00155	-26.37%	38877	-0.00416455	-0.0027894	-33.02%
626	-2.34E-03	-0.00237	1.06%	38876	-0.00497485	-0.0043515	-12.53%
625	-2.55E-03	-0.00318	24.80%	38875	-0.00573401	-0.0059135	3.13%
624	-2.74E-03	-0.004	46.15%	38874	-0.0064499	-0.0074755	15.90%
623	-2.90E-03	-0.00481	65.79%	38873	-0.00712987	-0.0090375	26.76%
622	-3.06E-03	-0.00563	84.10%	38872	-0.0077806	-0.0105995	36.23%
621	-3.20E-03	-0.00644	101.26%	38871	-0.00840829	-0.0121615	44.64%
620	-3.34E-03	-0.00726	117.31%	38870	-0.00902011	-0.0137235	52.14%
619	-3.48E-03	-0.00808	132.12%	38869	-0.00962733	-0.0152855	58.77%
618	-3.62E-03	-0.00889	145.30%	38868	-0.0102494	-0.0168475	64.38%
195	-3.79E-03	-0.00971	156.14%	38820	-0.0109156	-0.0184096	68.65%
L/D=3							
M/H=30				interface			
E/G*=150	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	2.45E-02	0.018693	-23.58%	38844	4.35E-02	0.03563257	-18.08%
646	2.16E-02	0.017679	-18.30%	38896	3.94E-02	0.033704	-14.53%
645	1.91E-02	0.016665	-12.53%	38895	3.56E-02	0.03177544	-10.78%
644	1.67E-02	0.01565	-6.16%	38894	3.20E-02	0.02984687	-6.77%



Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

643	1.45E-02	0.014636	0.94%	38893	2.86E-02	0.02791831	-2.46%
642	1.25E-02	0.013622	8.94%	38892	2.54E-02	0.02598974	2.23%
641	1.07E-02	0.012607	18.06%	38891	2.24E-02	0.02406117	7.37%
640	9.01E-03	0.011593	28.62%	38890	1.96E-02	0.02213261	13.05%
639	7.50E-03	0.010579	41.07%	38889	1.69E-02	0.02020404	19.42%
638	6.13E-03	0.009564	56.14%	38888	1.44E-02	0.01827548	26.71%
637	4.88E-03	0.00855	75.11%	38887	1.21E-02	0.01634691	35.25%
636	3.76E-03	0.007536	100.37%	38886	9.90E-03	0.01441834	45.68%
635	2.75E-03	0.006521	137.11%	38885	7.85E-03	0.01248978	59.15%
634	1.84E-03	0.005507	199.05%	38884	5.93E-03	0.01056121	78.11%
633	1.03E-03	0.004493	338.21%	38883	4.13E-03	0.00863265	108.84%
632	2.93E-04	0.003478	1087.87%	38882	2.45E-03	0.00670408	173.44%
631	-3.64E-04	0.002464	-776.67%	38881	8.76E-04	0.00477551	445.02%
630	-9.54E-04	0.001449	-252.01%	38880	-6.01E-04	0.00284695	-573.52%
629	-1.48E-03	0.000435	-129.34%	38879	-1.99E-03	0.00091838	-146.18%
628	-1.96E-03	-0.00058	-70.45%	38878	-3.29E-03	-0.0010102	-69.34%
627	-2.39E-03	-0.00159	-33.35%	38877	-4.53E-03	-0.0029387	-35.09%
626	-2.78E-03	-0.00261	-6.28%	38876	-5.70E-03	-0.0048673	-14.54%
625	-3.14E-03	-0.00362	15.32%	38875	-6.81E-03	-0.0067959	-0.18%
624	-3.47E-03	-0.00464	33.56%	38874	-7.87E-03	-0.0087244	10.82%
623	-3.78E-03	-0.00565	49.49%	38873	-8.90E-03	-0.010653	19.74%
622	-4.07E-03	-0.00667	63.72%	38872	-9.89E-03	-0.0125816	27.25%
621	-4.35E-03	-0.00768	76.58%	38871	-1.09E-02	-0.0145101	33.72%
620	-4.62E-03	-0.00869	88.22%	38870	-1.18E-02	-0.0164387	39.36%
619	-4.89E-03	-0.00971	98.65%	38869	-1.27E-02	-0.0183673	44.23%
618	-5.16E-03	-0.01072	107.67%	38868	-1.37E-02	-0.0202958	48.28%
195	-5.46E-03	-0.01174	114.86%	38820	-1.47E-02	-0.0222244	51.29%
L/D=3							
M/H=30				interface			
E/G*=500	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	6.84E-02	0.059779	-12.55%	38844	1.33E-01	0.12270539	-7.42%
646	6.31E-02	0.056721	-10.12%	38896	1.24E-01	0.11627072	-6.03%
645	5.81E-02	0.053662	-7.62%	38895	1.15E-01	0.10983604	-4.63%
644	5.33E-02	0.050604	-5.05%	38894	1.07E-01	0.10340137	-3.21%
643	4.87E-02	0.047545	-2.39%	38893	9.87E-02	0.09696669	-1.77%
642	4.43E-02	0.044487	0.39%	38892	9.08E-02	0.09053202	-0.28%
641	4.01E-02	0.041428	3.29%	38891	8.31E-02	0.08409734	1.25%
640	3.61E-02	0.03837	6.34%	38890	7.55E-02	0.07766267	2.83%
639	3.22E-02	0.035311	9.54%	38889	6.82E-02	0.07122799	4.48%
638	2.86E-02	0.032253	12.94%	38888	6.10E-02	0.06479332	6.21%
637	2.50E-02	0.029194	16.59%	38887	5.40E-02	0.05835864	8.05%
636	2.17E-02	0.026136	20.57%	38886	4.72E-02	0.05192397	10.05%
635	1.85E-02	0.023077	25.03%	38885	4.05E-02	0.04548929	12.30%

Παράρτημα

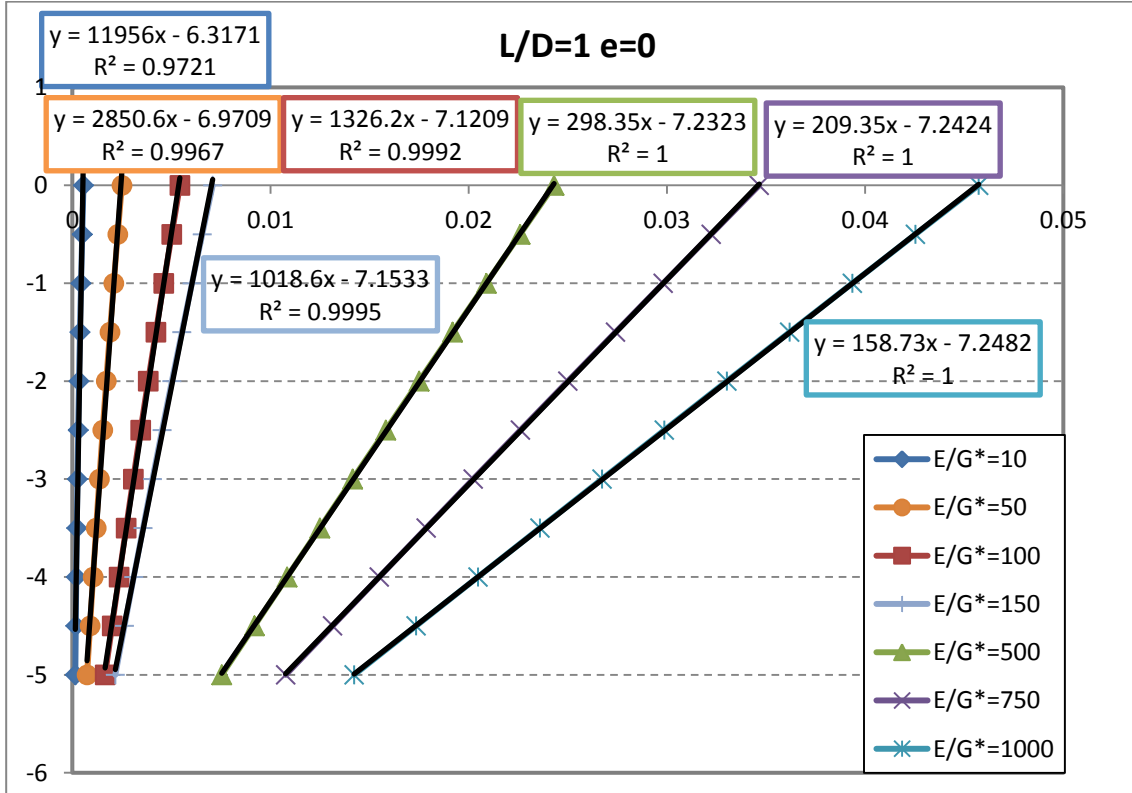
634	1.54E-02	0.020019	30.22%	38884	3.40E-02	0.03905462	14.92%
633	1.24E-02	0.01696	36.60%	38883	2.76E-02	0.03261994	18.18%
632	9.58E-03	0.013902	45.18%	38882	2.13E-02	0.02618527	22.66%
631	6.84E-03	0.010844	58.44%	38881	1.52E-02	0.01975059	29.80%
630	4.21E-03	0.007785	84.86%	38880	9.20E-03	0.01331592	44.78%
629	1.67E-03	0.004727	183.25%	38879	3.28E-03	0.00688124	109.61%
628	-7.93E-04	0.001668	-310.44%	38878	-2.54E-03	0.00044657	-117.61%
627	-3.18E-03	-0.00139	-56.30%	38877	-8.27E-03	-0.0059881	-27.58%
626	-5.51E-03	-0.00445	-19.21%	38876	-1.39E-02	-0.0124228	-10.78%
625	-7.78E-03	-0.00751	-3.46%	38875	-1.95E-02	-0.0188575	-3.34%
624	-1.00E-02	-0.01057	5.67%	38874	-2.50E-02	-0.0252921	1.02%
623	-1.22E-02	-0.01362	11.85%	38873	-3.05E-02	-0.0317268	3.99%
622	-1.43E-02	-0.01668	16.40%	38872	-3.59E-02	-0.0381615	6.18%
621	-1.65E-02	-0.01974	19.95%	38871	-4.13E-02	-0.0445962	7.89%
620	-1.86E-02	-0.0228	22.80%	38870	-4.67E-02	-0.0510308	9.27%
619	-2.07E-02	-0.02586	25.12%	38869	-5.21E-02	-0.0574655	10.38%
618	-2.28E-02	-0.02892	26.94%	38868	-5.74E-02	-0.0639002	11.26%
195	-2.49E-02	-0.03198	28.27%	38820	-6.29E-02	-0.0703349	11.87%
L/D=3							
M/H=30				interface			
E/G*=750	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	9.38E-02	0.084713	-9.72%	38844	1.84E-01	0.17419678	-5.49%
646	8.73E-02	0.080417	-7.86%	38896	1.73E-01	0.16510024	-4.46%
645	8.10E-02	0.076121	-5.97%	38895	1.62E-01	0.15600371	-3.44%
644	7.49E-02	0.071825	-4.05%	38894	1.51E-01	0.14690718	-2.41%
643	6.90E-02	0.067529	-2.09%	38893	1.40E-01	0.13781065	-1.36%
642	6.33E-02	0.063233	-0.06%	38892	1.29E-01	0.12871411	-0.30%
641	5.78E-02	0.058937	2.02%	38891	1.19E-01	0.11961758	0.79%
640	5.25E-02	0.054641	4.18%	38890	1.08E-01	0.11052105	1.91%
639	4.73E-02	0.050345	6.41%	38889	9.84E-02	0.10142452	3.06%
638	4.23E-02	0.046049	8.74%	38888	8.86E-02	0.09232798	4.25%
637	3.75E-02	0.041754	11.20%	38887	7.89E-02	0.08323145	5.51%
636	3.29E-02	0.037458	13.82%	38886	6.94E-02	0.07413492	6.87%
635	2.84E-02	0.033162	16.69%	38885	6.00E-02	0.06503839	8.36%
634	2.41E-02	0.028866	19.93%	38884	5.08E-02	0.05594185	10.08%
633	1.99E-02	0.02457	23.76%	38883	4.18E-02	0.04684532	12.18%
632	1.58E-02	0.020274	28.66%	38882	3.28E-02	0.03774879	14.97%
631	1.18E-02	0.015978	35.67%	38881	2.40E-02	0.02865226	19.22%
630	7.90E-03	0.011682	47.85%	38880	1.53E-02	0.01955573	27.44%
629	4.12E-03	0.007386	79.24%	38879	6.76E-03	0.01045919	54.63%
628	4.26E-04	0.00309	624.67%	38878	-1.72E-03	0.00136266	-179.24%
627	-3.19E-03	-0.00121	-62.22%	38877	-1.01E-02	-0.0077339	-23.54%
626	-6.74E-03	-0.0055	-18.38%	38876	-1.84E-02	-0.0168304	-8.68%

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

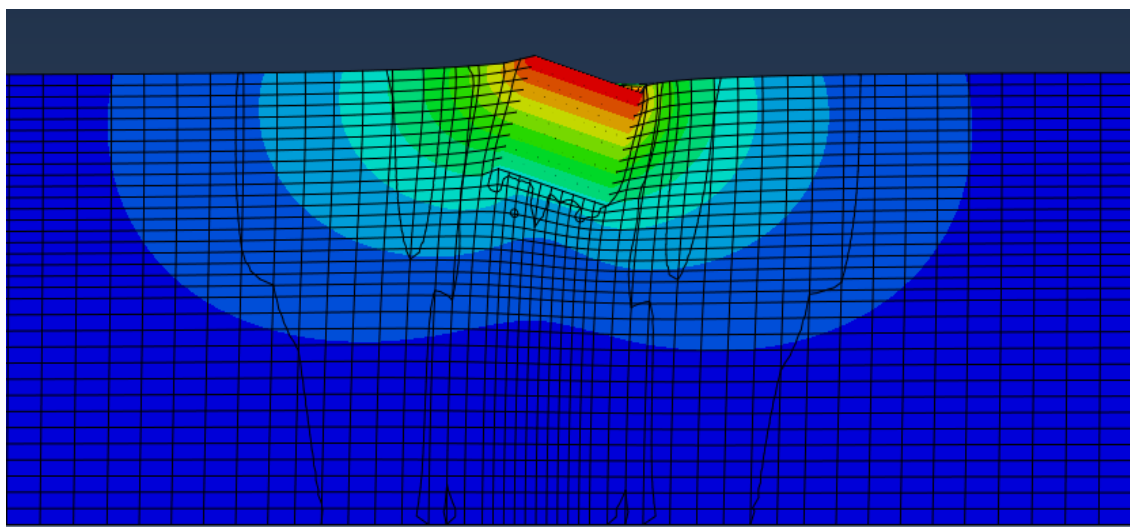
625	-1.02E-02	-0.0098	-4.23%	38875	-2.67E-02	-0.0259269	-2.81%
624	-1.37E-02	-0.01409	3.10%	38874	-3.49E-02	-0.0350235	0.47%
623	-1.71E-02	-0.01839	7.76%	38873	-4.30E-02	-0.04412	2.63%
622	-2.04E-02	-0.02268	11.05%	38872	-5.11E-02	-0.0532165	4.19%
621	-2.38E-02	-0.02698	13.55%	38871	-5.91E-02	-0.0623131	5.40%
620	-2.71E-02	-0.03128	15.51%	38870	-6.71E-02	-0.0714096	6.36%
619	-3.04E-02	-0.03557	17.08%	38869	-7.51E-02	-0.0805061	7.13%
618	-3.37E-02	-0.03987	18.30%	38868	-8.32E-02	-0.0896027	7.73%
195	-3.71E-02	-0.04416	19.17%	38820	-9.13E-02	-0.0986992	8.15%
L/D=3							
M/H=30				interface			
E/G*=1000	u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%		u	u (rigid)	[u(rigid)-u]%
617	1.21E-01	0.111453	-7.82%	38844	2.40E-01	0.22932027	-4.29%
646	1.13E-01	0.10583	-6.33%	38896	2.25E-01	0.21737427	-3.49%
645	1.05E-01	0.100207	-4.83%	38895	2.11E-01	0.20542826	-2.69%
644	9.78E-02	0.094584	-3.32%	38894	1.97E-01	0.19348226	-1.89%
643	9.06E-02	0.088961	-1.78%	38893	1.84E-01	0.18153626	-1.09%
642	8.35E-02	0.083338	-0.21%	38892	1.70E-01	0.16959025	-0.27%
641	7.66E-02	0.077715	1.40%	38891	1.57E-01	0.15764425	0.56%
640	7.00E-02	0.072092	3.04%	38890	1.44E-01	0.14569824	1.41%
639	6.35E-02	0.066469	4.73%	38889	1.31E-01	0.13375224	2.28%
638	5.71E-02	0.060846	6.48%	38888	1.18E-01	0.12180624	3.18%
637	5.10E-02	0.055223	8.30%	38887	1.06E-01	0.10986023	4.12%
636	4.50E-02	0.0496	10.22%	38886	9.31E-02	0.09791423	5.13%
635	3.92E-02	0.043977	12.30%	38885	8.09E-02	0.08596822	6.23%
634	3.35E-02	0.038354	14.60%	38884	6.89E-02	0.07402222	7.49%
633	2.79E-02	0.032731	17.28%	38883	5.70E-02	0.06207622	9.00%
632	2.25E-02	0.027108	20.61%	38882	4.52E-02	0.05013021	10.98%
631	1.72E-02	0.021484	25.20%	38881	3.35E-02	0.03818421	13.94%
630	1.20E-02	0.015861	32.70%	38880	2.20E-02	0.0262382	19.41%
629	6.84E-03	0.010238	49.59%	38879	1.05E-02	0.0142922	35.61%
628	1.82E-03	0.004615	152.95%	38878	-7.95E-04	0.0023462	-394.94%
627	-3.12E-03	-0.00101	-67.65%	38877	-1.20E-02	-0.0095998	-20.27%
626	-7.98E-03	-0.00663	-16.95%	38876	-2.32E-02	-0.0215458	-7.15%
625	-1.28E-02	-0.01225	-4.20%	38875	-3.43E-02	-0.0334918	-2.35%
624	-1.75E-02	-0.01788	1.89%	38874	-4.53E-02	-0.0454378	0.24%
623	-2.23E-02	-0.0235	5.59%	38873	-5.63E-02	-0.0573838	1.92%
622	-2.69E-02	-0.02912	8.15%	38872	-6.72E-02	-0.0693298	3.12%
621	-3.16E-02	-0.03475	10.05%	38871	-7.81E-02	-0.0812758	4.03%
620	-3.62E-02	-0.04037	11.52%	38870	-8.90E-02	-0.0932218	4.76%
619	-4.08E-02	-0.04599	12.69%	38869	-9.98E-02	-0.1051678	5.34%
618	-4.54E-02	-0.05161	13.59%	38868	-1.11E-01	-0.1171138	5.79%
195	-5.01E-02	-0.05724	14.23%	38820	-1.22E-01	-0.1290598	6.10%

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.**

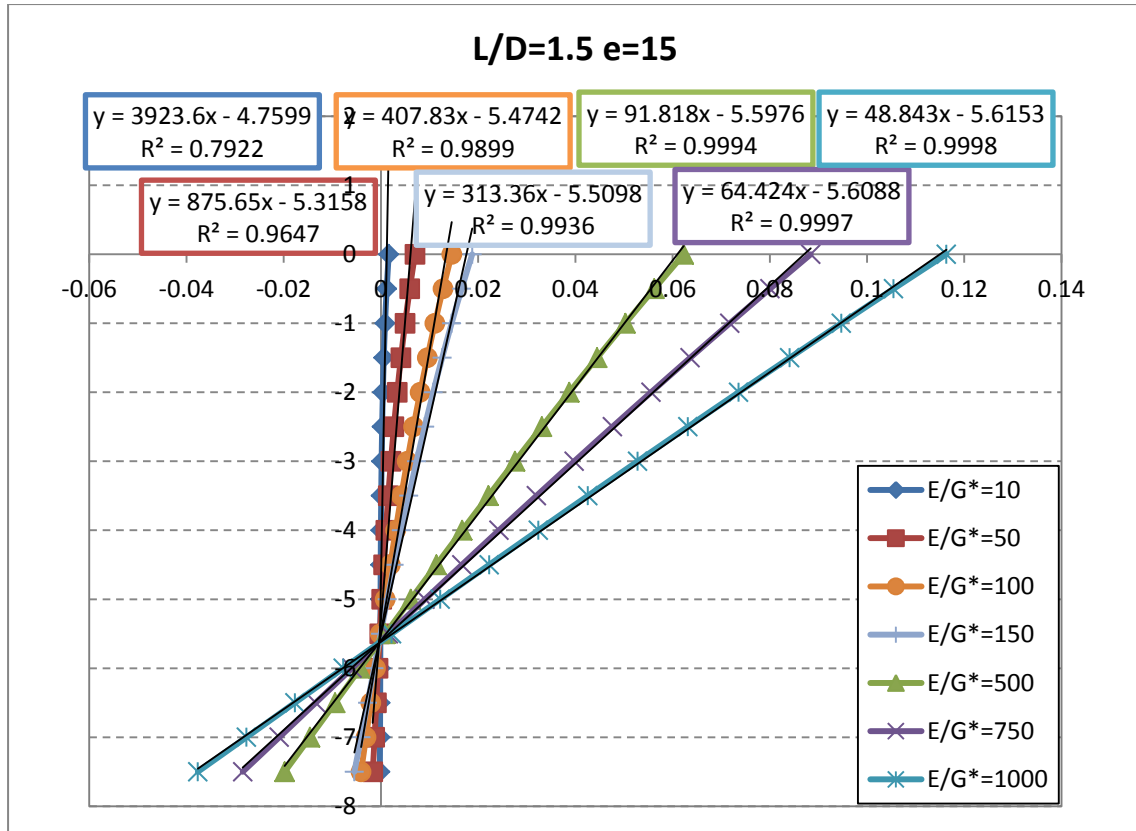
Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται τα διαγράμματα της παραμορφωμένης κατάστασης των φρεάτων χωρίς διεπιφάνειες (Κεφάλαιο 4) και αντίστοιχες εικόνες από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10.



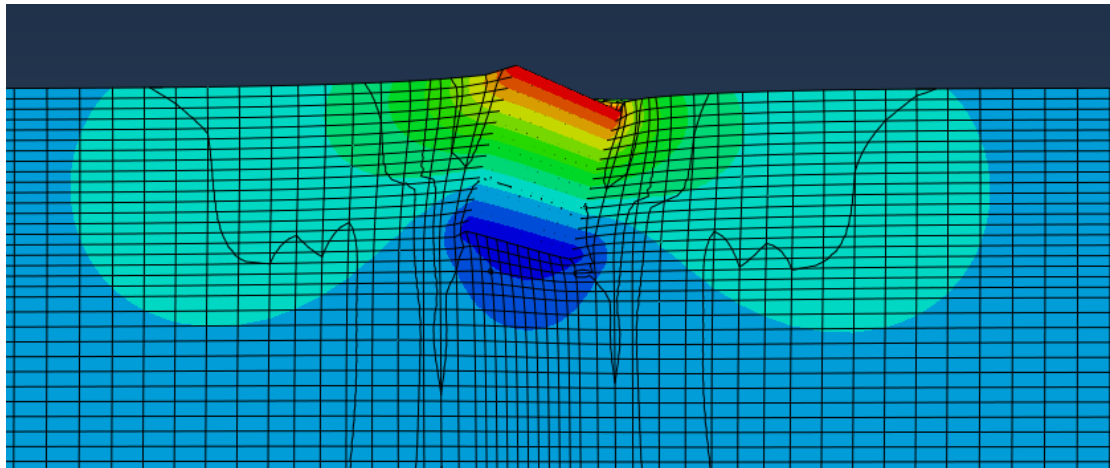
**Σχήμα 0-1.** Παραμορφωμένη κατάσταση  $L/D=1$   $e=0$  χωρίς διεπιφάνειες



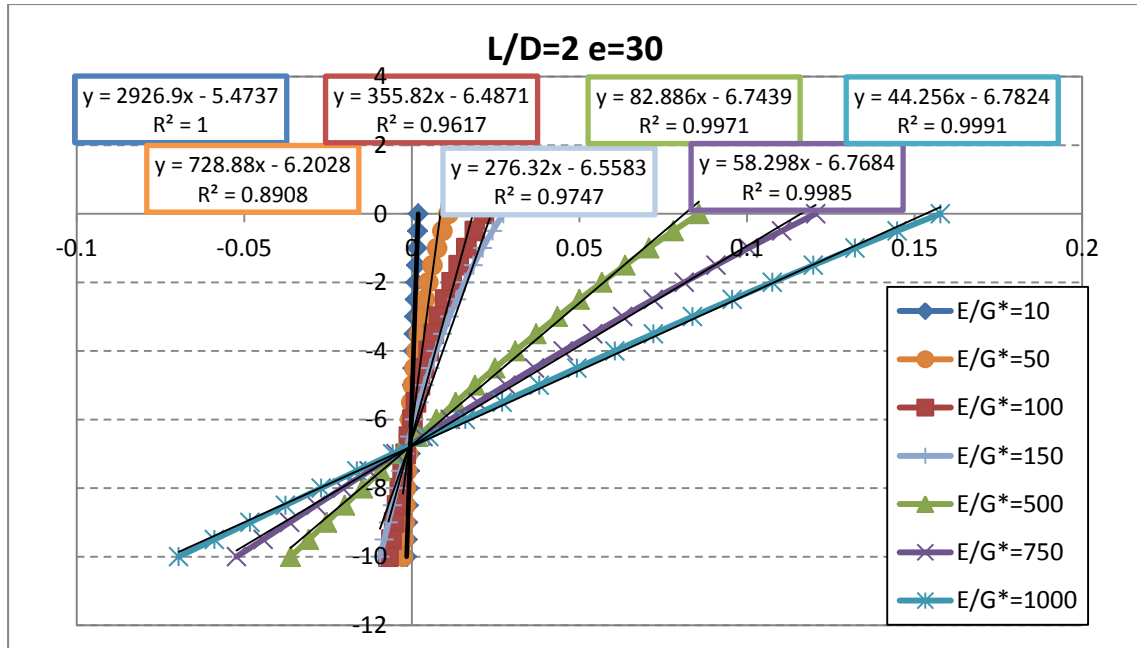
**Σχήμα 0-2.** Ισοκαμπύλες οριζόντιων μετατοπίσεων  $L/D=1$   $e=0$   $E/G^*=500$  (άκαμπτο)



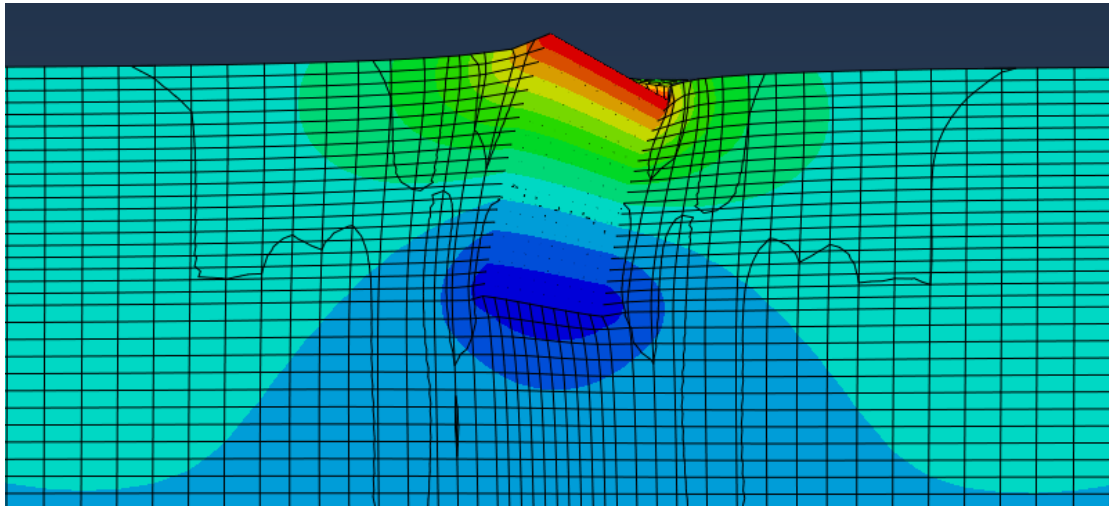
Σχήμα 0-3. Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=1.5 e=15m χωρίς διεπιφάνειες



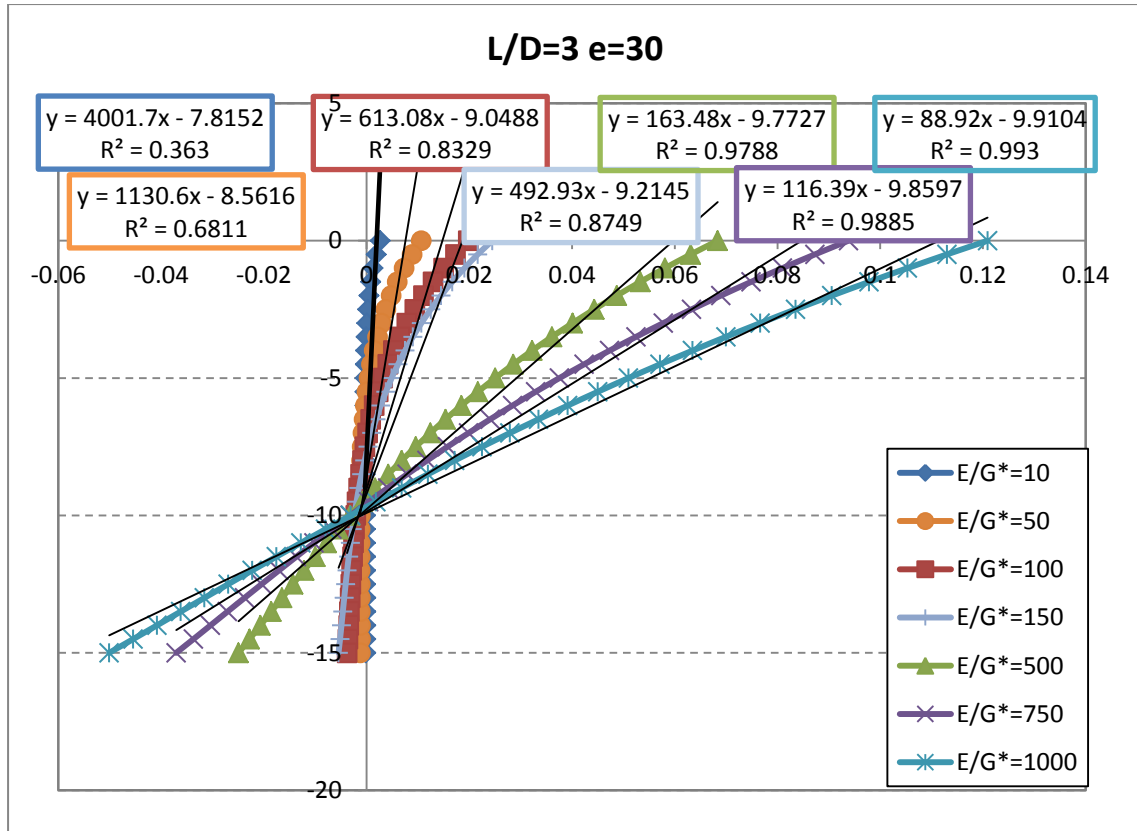
Σχήμα 0-4. Ισοκαμπύλες οριζόντιων μετατοπίσεων L/D=1.5 e=15m E/G\*=150 (άκαμπτο)



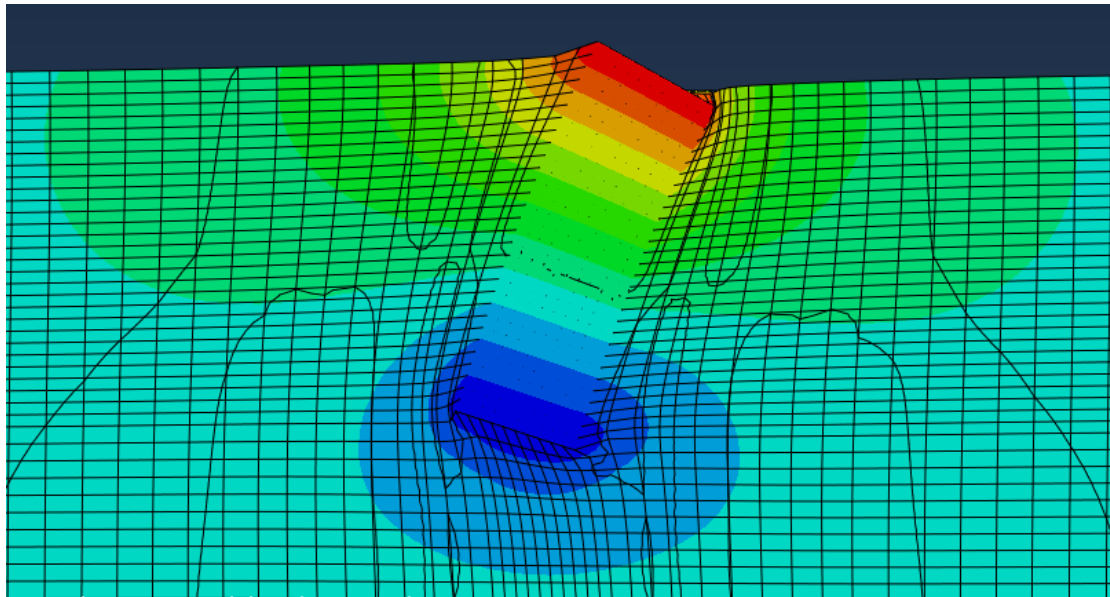
Σχήμα 0-5. Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=2 e=30m χωρίς διεπιφάνειες



Σχήμα 0-6. Ισοκαμπύλες οριζόντιων μετατοπίσεων L/D=2 e=30m E/G\*=100 (εύκαμπτο)



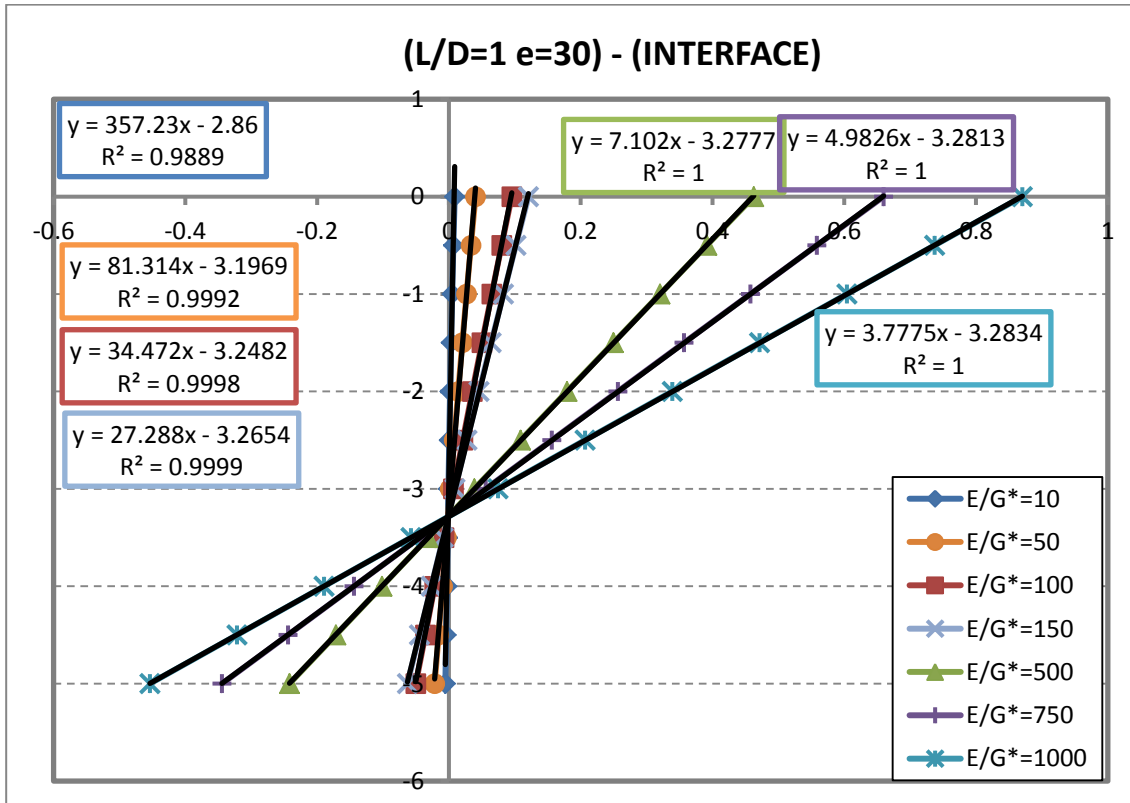
Σχήμα 0-7. Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=3 e=30m χωρίς διεπιφάνειες



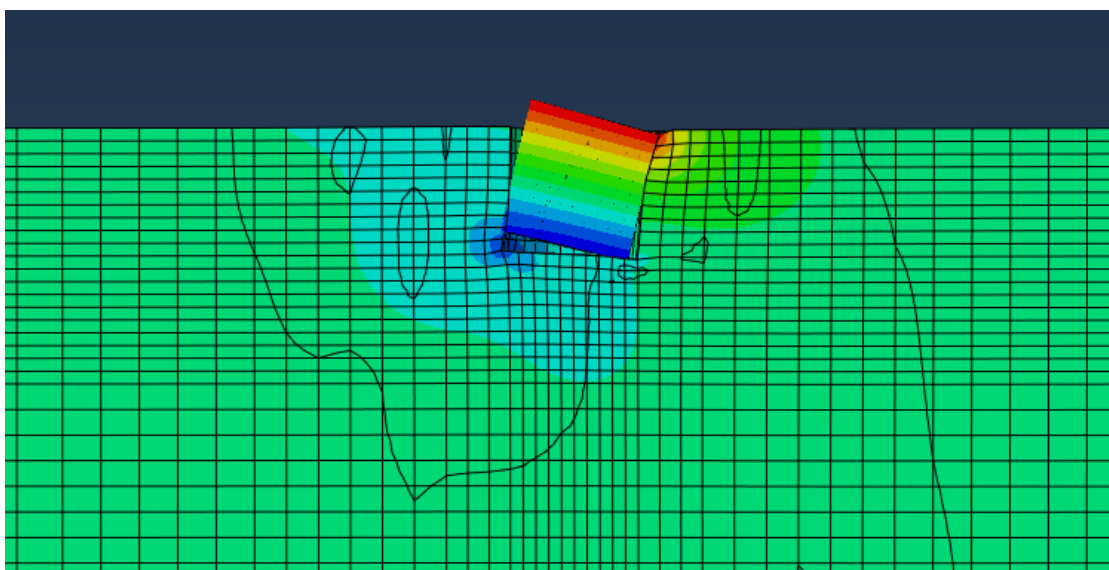
Σχήμα 0-8. Ισοκαμπύλες οριζόντιων μετατοπίσεων L/D=3 e=30m E/G\*=1000 (άκαμπτο)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται τα διαγράμματα της παραμορφωμένης κατάστασης των φρεάτων με διεπιφάνειες (Κεφάλαιο 5) και αντίστοιχες εικόνες από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10.

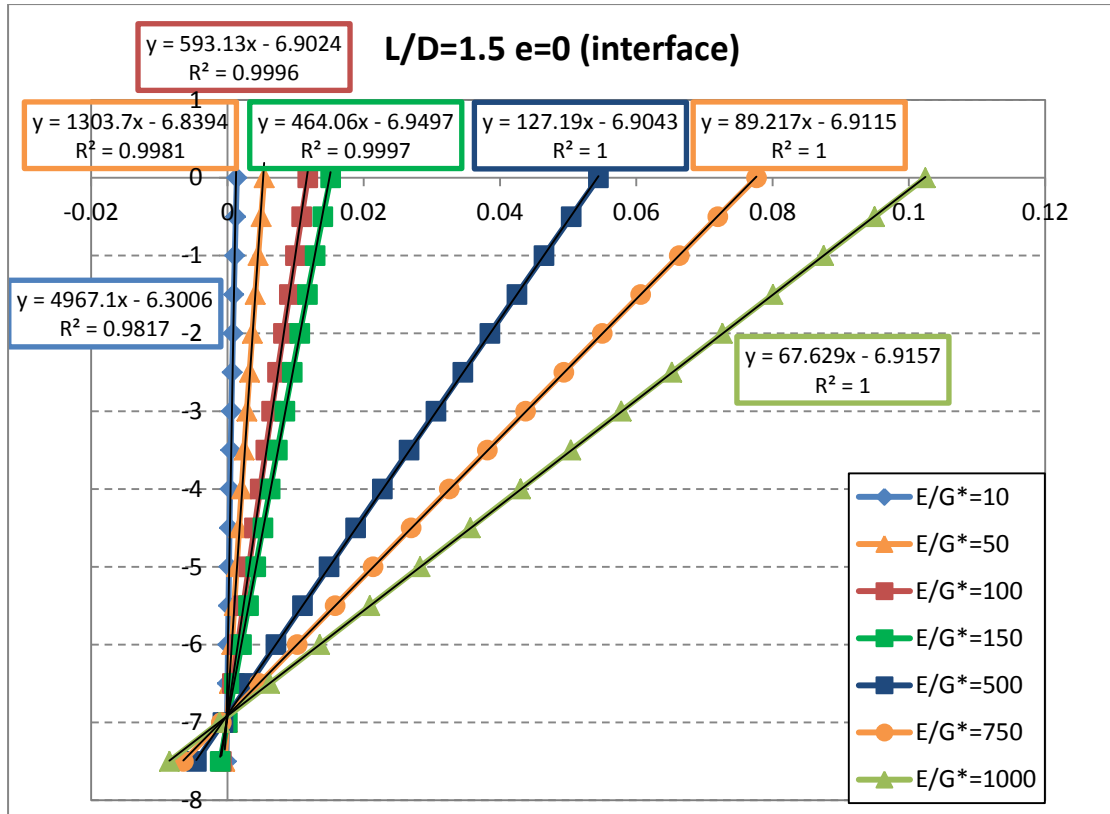


Σχήμα 0-9. Παραμορφωμένη κατάσταση  $L/D=1$   $e=30m$  με διεπιφάνειες

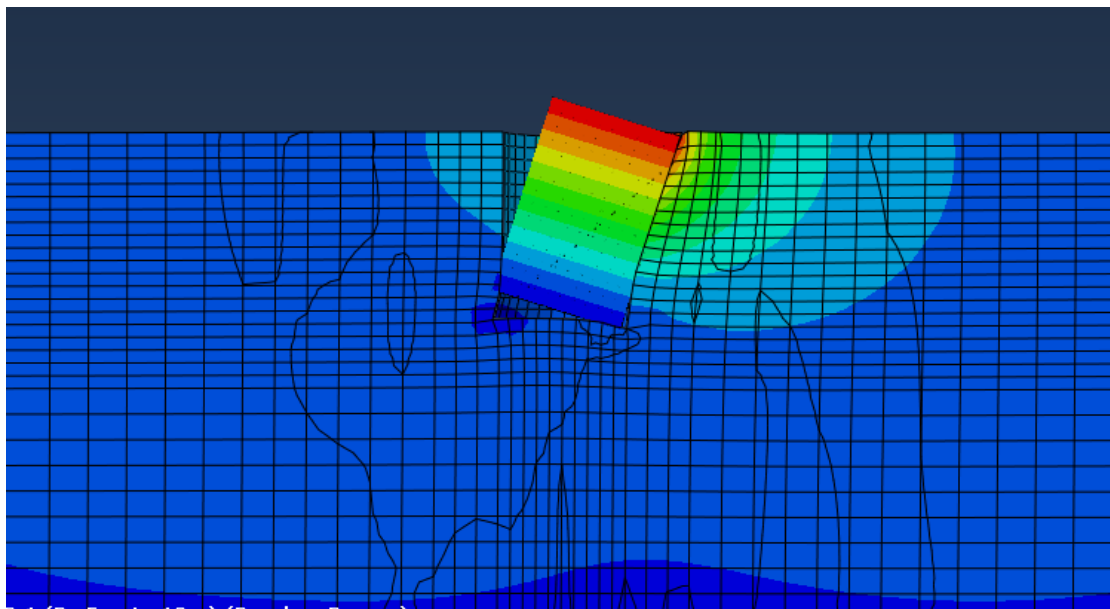


Σχήμα 0-10. Ισοκαμπύλες οριζόντιων μετατοπίσεων  $L/D=1$   $e=30m$   $E/G^*=750$  (άκαμπτο)

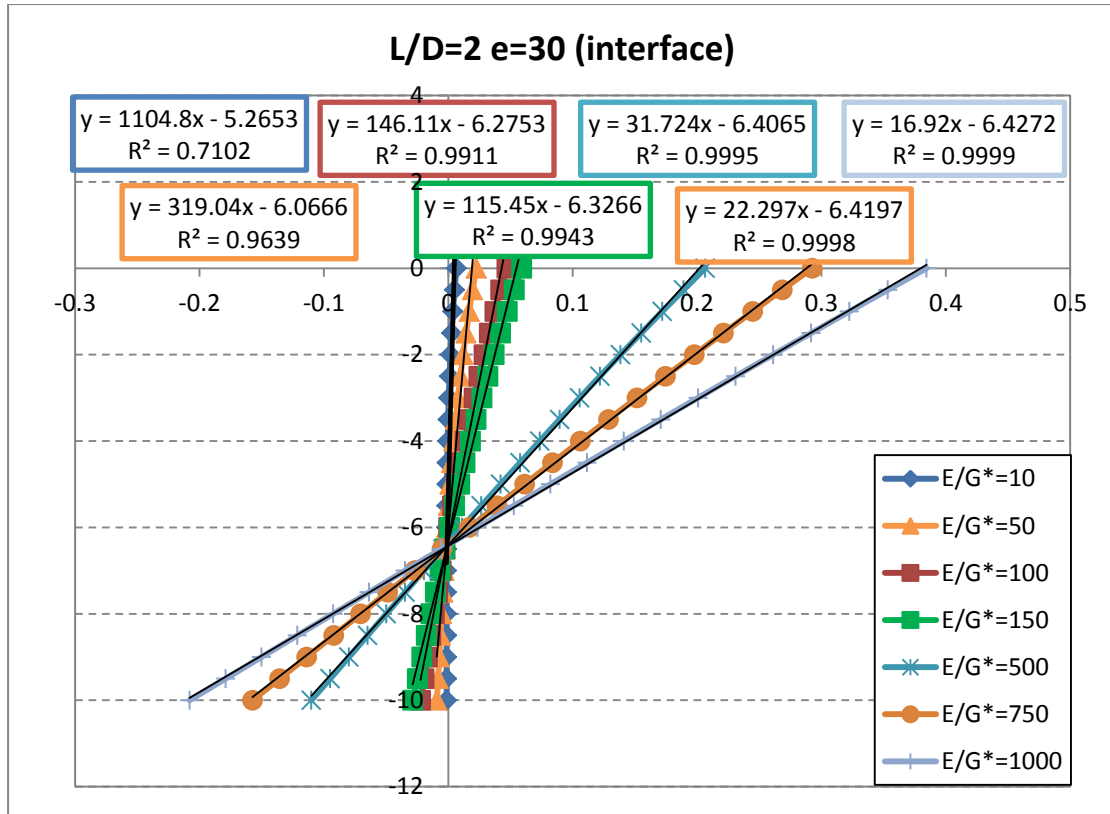




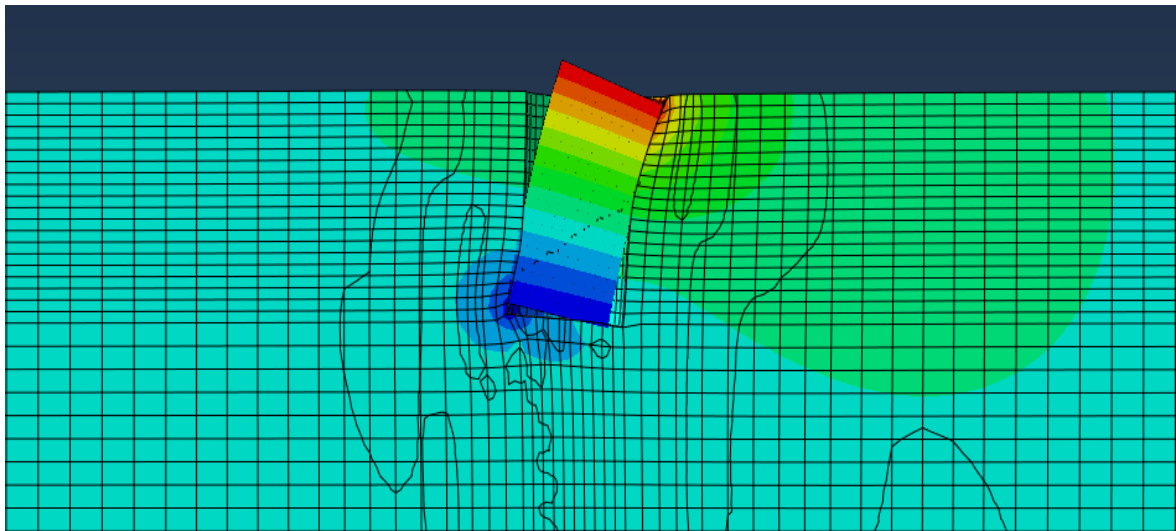
Σχήμα 0-11. Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=1.5 e=0 με διεπιφάνειες



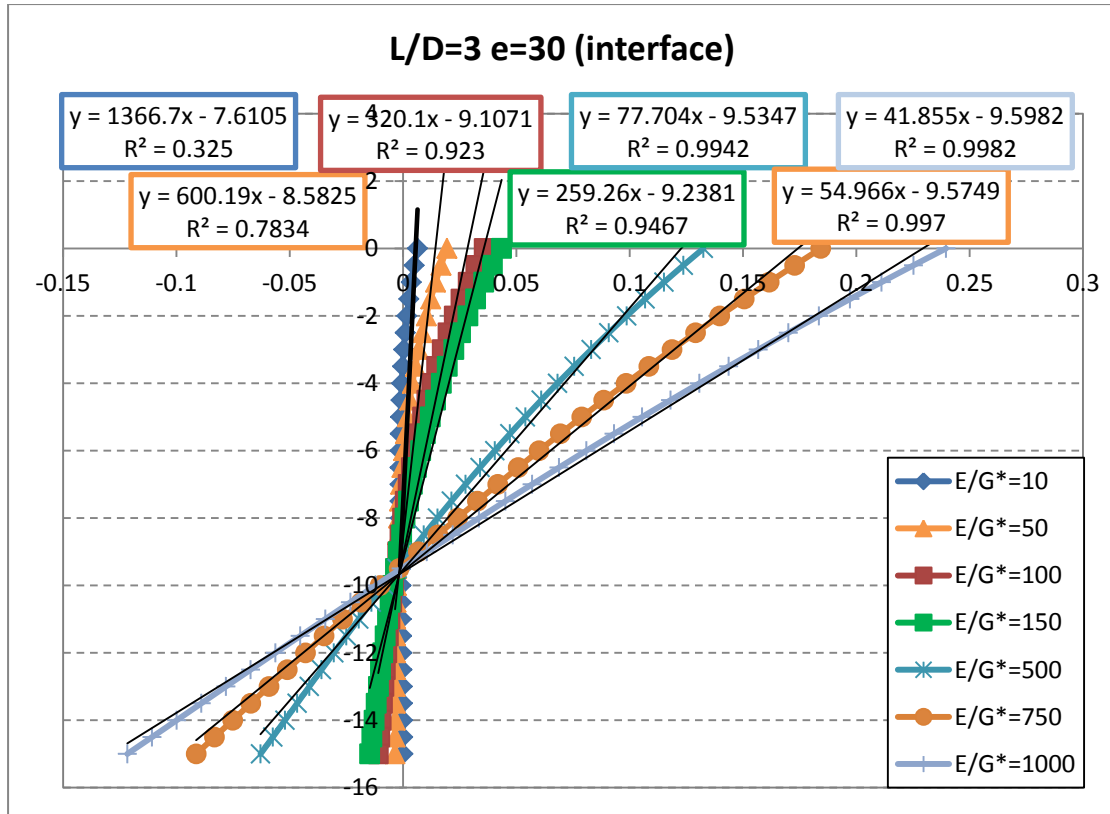
Σχήμα 0-12. Ισοκαμπύλες οριζόντιων μετατοπίσεων L/D=1.5 e=0 E/G\*=500 (άκαμπτο)



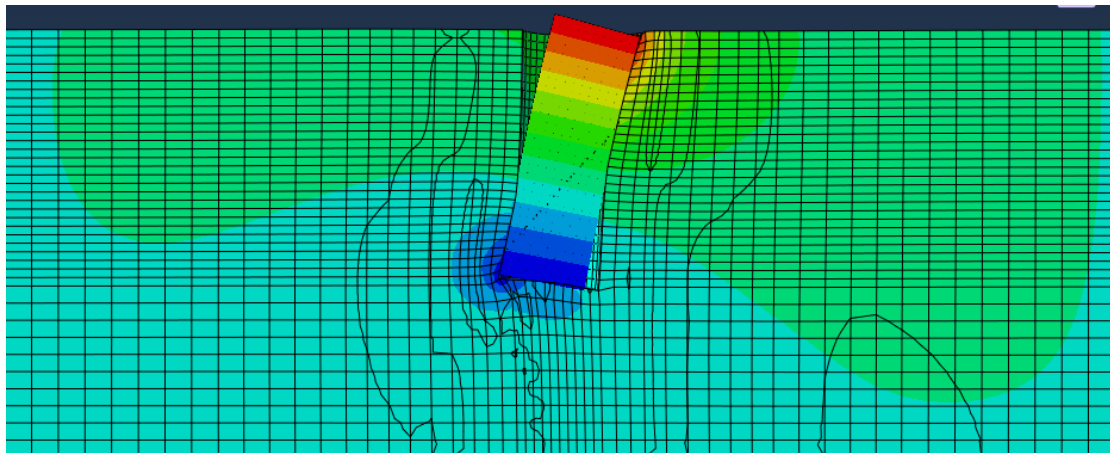
**Σχήμα 0-13.** Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=2 e=30m με διεπιφάνειες



**Σχήμα 0-14.** Ισοκαμπύλες οριζόντιων μετατοπίσεων L/D=2 e=30m E/G\*=100 (εύκαμπτο)



Σχήμα 0-15. Παραμορφωμένη κατάσταση L/D=3 e=30m με διεπιφάνειες



Σχήμα 0-16. Ισοκαμπύλες οριζόντιων μετατοπίσεων L/D=3 e=30m E/G\*=750 (άκαμπτο)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.

Στο παράρτημα αυτό, παρουσιάζεται ένα τμήμα του αρχείου εισαγωγής δεδομένων του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.10. Συγκεκριμένα, στο απόσπασμα αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων για τις διεπιφάνειες, τις ιδιότητες των υλικών της βραχόμαζας και του σκυροδέματος καθώς και τα βήματα της φόρτισης (Κεφάλαιο 3) για φρέαρ με λόγο  $L/D=3$ , σχετική δυσκαμψία φρέατος-βραχόμαζας  $E/G^*=500$  και εκκεντρότητα  $e=15m$ :

Δ1) Χαρακτηριστικά διεπιφανειών φρέατος-βραχόμαζας

```
***CONTACT PAIR, INTERACTION=TIED_SOIL, TYPE=SURFACE TO SURFACE, SMOOTH=0.45, ADJUST=0.001, TIED
***MORE FLEXIBLE_SLAVE, LESS FLEXIBLE_MASTER**
** SOIL_20_25_INNER, SOIL_20_25_EXTER
***SURFACE INTERACTION, NAME=TIED_SOIL
**
**
**
***** AROUND SOIL & SOCKET *****
**
*CONTACT PAIR, INTERACTION=AROUND_ROCK, TYPE=SURFACE TO SURFACE, ADJUST=AROUND_SHAFT, SMALL SLIDING
INNER_ROCK_SHAFT, ROCK_AROUND
**
*SURFACE INTERACTION, NAME=AROUND_ROCK
*SURFACE BEHAVIOR, NO SEPARATION
**
*FRICTION, ROUGH
**
**
*CONTACT PAIR, INTERACTION=AROUND_SOCKET, TYPE=SURFACE TO SURFACE, ADJUST=AROUND_SHAFT, SMALL
SLIDING
INNER_SOCKET_SHAFT, ROCK_AROUND
**
*SURFACE INTERACTION, NAME=AROUND_SOCKET
*SURFACE BEHAVIOR, PRESSURE-OVERCLOSURE=exponential
0.000001, 2.0
**
```

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

\*FRICTION, ELASTIC SLIP=0.001

0.364

\*\*

\*\*

\*\*

\*\*\*\*\* BELOW SOIL & SOCKET \*\*\*\*\*

\*\*

\*\*

\*CONTACT PAIR, INTERACTION=BELOW\_ROCK, TYPE=SURFACE TO SURFACE, ADJUST=BASE\_SHAFT, SMALL SLIDING

INNER\_BASE\_ROCK\_SHAFT, OUTER\_BASE\_ROCK\_SHAFT

\*\*

\*SURFACE INTERACTION, NAME=BELOW\_ROCK

\*SURFACE BEHAVIOR, NO SEPARATION

\*\*

\*FRICTION, ROUGH

\*\*

\*\*

\*CONTACT PAIR, INTERACTION=BELOW\_SOCKET, TYPE=SURFACE TO SURFACE, ADJUST=BASE\_SHAFT, SMALL SLIDING

INNER\_BASE\_SOCKET\_SHAFT, OUTER\_BASE\_ROCK\_SHAFT

\*\*

\*SURFACE INTERACTION, NAME=BELOW\_SOCKET

\*SURFACE BEHAVIOR, PRESSURE-OVERCLOSURE=exponential

0.000001, 2.0

\*\*

\*FRICTION, ELASTIC SLIP=0.001

0.364

Δ2) Ιδιότητες βραχώμαζας και σκυροδέματος του φρέατος

\*\*\*\*\* MATERIALS \*\*\*\*\*

\*\*

\*\*

\*\*\*\*\*

\*\*

\*\* @@@@

## Βιβλιογραφία

```
**          ROCKMASS

** @@@@

*SOLID SECTION, ELSET=ROCKMASS, MATERIAL=MARGA3

    1.,

*Material, Name=MARGA3

*Density

** Mgr/m^3 **

    2.0,

*Elastic

** E (kPa),ν (-âh/âv) **

    100000, 0.3

**

**

** @@@@

**          SHAFT

** @@@@

*SOLID SECTION, ELSET=SHAFT, MATERIAL=MARGA3_FILL

    1.,

*Material, Name=MARGA3_FILL

*Density

** Mgr/m^3 **

    2.0,

*Elastic

** E (kPa),ν (-âh/âv) **

    100000, 0.3

**

** @@@@

**          DOUBLE_SHAFT

** @@@@

*SOLID SECTION, ELSET=DOUBLE, MATERIAL=CONC

    1.,

*MATERIAL, Name=CONC
```

Αριθμητική διερεύνηση της εγκάρσιας ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

\*Density

\*\* Mgr/m<sup>3</sup> \*\*

2.5,

\*Elastic

\*\* E (kPa),ν (=âh/âv) \*\*

25000000, 0.2

Δ3) Συνοριακές συνθήκες, αρχικές γεωστατικές τάσεις και βήματα φόρτισης

\*\*

@@  
@@@@@@

\*\* BOUNDARY CONDITIONS

\*\*

@@  
@@@@@@

\*\*

\*BOUNDARY, OP=NEW

\*\* NSET NAME, FIRST DIRECTION, LAST DIRECTION, DEFLECTION \*\*

SIDESX, 1,1, 0.

SIDESY, 2,2, 0.

BOTTOM, 1,1, 0.

BOTTOM, 2,2, 0.

BOTTOM, 3,3, 0.

\*\*

\*\*

\*\*

@@  
@@@@@@

\*\* INITIAL CONDITIONS

\*\*

@@  
@@@@@@

\*\*

\*INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS, GEOSTATIC

\*\*ELSET NAME, STRESS FOR NEXT Z, Z, STRESS FOR NEXT Z(=Z\*ã, ã= 20 kN/m<sup>3</sup>), Z, kox, koy \*\*

\*\* kox=koy=0.5 \*\*

## Βιβλιογραφία

ALL,-0.001,0,-500,-25, 0.5, 0.5

\*\*

\*\*

\*\*

\*\*

@@  
@@@@@@

\*\* STEPS

\*\*

@@  
@@@@@@

\*\*

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*

\*\*\*\*STEP 1: GEOSTATIC

\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

\*STEP

\*GEOSTATIC

\*\* DISTRIBUTED LOAD \*\*

\*DLOAD

\*\* ELSET NAME, GRAV, ACCELERATION, X, Y, Z \*\*

ALL,GRAV,10.0, 0.,0.,-1.

\*MODEL CHANGE, TYPE=CONTACT PAIR, REMOVE

INNER\_SOCKET\_SHAFT, ROCK\_AROUND

INNER\_BASE\_SOCKET\_SHAFT, OUTER\_BASE\_ROCK\_SHAFT

\*MODEL CHANGE, TYPE=ELEMENT, REMOVE

DOUBLE

\*OUTPUT, FIELD, FREQ=1

\*NODE OUTPUT

\*\*U=DEFLECTION\*\*

U,

\*ELEMENT OUTPUT

\*\* S=STRESS, E=STRAIN, PRESS, MISES, PE=PLASTIC STRAIN COMPONENTS, PEMAG=PLASTIC STRAIN MAGNITUDE \*\*



```
S,E,PRESS,MISES,PE,PEMAG

*CONTACT OUTPUT

** CSTRESS= CPRESS,CSHEAR **

** CDISP= CONTACT DISPLACEMENTS **

CSTRESS,CDISP,CFORCE

*END STEP

**

*****

**

**STEP 2: REMOVE ROCK_SURFACE + ADD SOCKET_SURFACE

**

*****

*STEP

*STATIC

****

**

*MODEL CHANGE, TYPE=CONTACT PAIR, REMOVE

INNER_ROCK_SHAFT, ROCK_AROUND

INNER_BASE_ROCK_SHAFT, OUTER_BASE_ROCK_SHAFT

**

*MODEL CHANGE, TYPE=ELEMENT, REMOVE

SHAFT

**

*MODEL CHANGE, TYPE=CONTACT PAIR, ADD

INNER_SOCKET_SHAFT, ROCK_AROUND

INNER_BASE_SOCKET_SHAFT, OUTER_BASE_ROCK_SHAFT

**

*MODEL CHANGE, TYPE=ELEMENT, ADD

DOUBLE

**

*OUTPUT, FIELD, FREQ=1

*NODE OUTPUT
```

## Βιβλιογραφία

```
U,  
  
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS  
  
**  
  
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1  
  
*ELEMENT OUTPUT  
  
S,SF,E,PRESS,MISES,PE,PEMAG  
  
**  
  
*CONTACT OUTPUT  
  
CSTRESS,CDISP,CFORCE  
  
*END STEP  
  
**  
  
**  
  
**  
  
*****  
  
**  
  
**STEP 3: ADD GRAVITY LOADS  
  
**  
  
*****  
  
*STEP, UNSYMM=YES, INC=10000000000  
  
*STATIC  
  
****  
  
**  
  
*DLOAD  
  
DOUBLE,GRAV,10.0, 0.,0.,-1.  
  
**  
  
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1  
  
*NODE OUTPUT  
  
U,  
  
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS  
  
**  
  
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1  
  
*ELEMENT OUTPUT
```

S,SF,E,PRESS,MISES,PE,PEMAG

\*\*

\*CONTACT OUTPUT

CSTRESS,CDISP,CFORCE

\*END STEP

\*\*

\*\*\*\*\*

\*\*

\*\*STEP 4: LATERAL PILE LOAD

\*\*

\*\*\*\*\*

\*STEP, UNSYMM=YES, INC=1000000000

\*STATIC

0.1,1,0.000000001,0.1

\*\*\*\*

\*\*

\*NSET, NSET=HORZ, GENERATE

\*\*NUMBER OF CENTRAL NODE,Z=0\*\*

38844, 38844, 1

\*\*CONCENTRATED LOAD \*\*

\*CLOAD, OP=NEW

\*\*NSET NAME,DIRECTION,MAGNITUDE OF LOAD \*\*

HORZ, 1, 20000.

HORZ, 5, 300000.

\*\*

\*\*

\*OUTPUT, FIELD, FREQ=1

\*NODE OUTPUT

U,

\*\* ELEMENT OUTPUT REQUESTS

\*\*

\*OUTPUT, FIELD, FREQ=1

## Βιβλιογραφία

\*ELEMENT OUTPUT

S,SF,E,PRESS,MISES,PE,PEMAG

\*\*

\*CONTACT OUTPUT

CSTRESS,CDISP,CFORCE

\*END STEP

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Αναγνωστόπουλος Α., Παπαδόπουλος Β., «Θεμελιώσεις με Πασσάλους», Εκδόσεις Συμμεών, (2004)
2. Καββαδάς Μ., «Σχεδιασμός Φρεάτων Πακτώσεως» Βιβλιογραφική Ανασκόπηση
3. Καββαδάς Μ., «Θεμελιώσεις Τεχνικών Έργων», Έκδοση Ε.Μ.Πολυτεχνείου (2008)
4. Λιακοπούλου Ν., «Αριθμητική Διερεύνηση της Εγκάρσιας Φόρτισης Φρεάτων Πακτώσεως», Διπλωματική Εργασία, (2010)
5. Μανουσέλη Ε., «Ανάλυση της Εγκάρσιας Φόρτισης Πασσάλου σε Συνεκτικά Εδάφη με Αριθμητικές Μεθόδους», Διπλωματική Εργασία, (2012)
6. Carter J.P., Kulhawy F.H., «Analysis and Design of Drilled Shaft Foundations Socketed into Rock» Report EL-5918, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif (1988)
7. Carter J.P., Kulhawy F.H., «Analysis of Laterally Loaded Shafts in Rock» Journal of Geotechnical Engineering Vol.118 No.6 (1992)
8. Cho K.H., «P-y Curves for Laterally Loaded Drilled Shafts Embedded in Soft Weathered Rock» PhD Thesis, N.Carolina State University, Raleigh NC, (2002)
9. Cho K.H., Clark S.C., Keaney B.D., Gabr M.A., Borden R.H., «Laterally Loaded Drilled Shafts Embedded in Soft Rock», Transportation Research Record 1772, Paper No. 01-2998, 3-11 (2001)
10. Gabr M.A., Borden R.H., Cho K.H., Clark S.C., Nixon J.B., «P-y Curves for Laterally Loaded Drilled Shafts Embedded in Weathered Rock», (2002)
11. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., «Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 edition»
12. Hoek E., Dietrichs M.S., «Empirical Estimation of Rock Mass Modulus», International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43. 203-215 (2006)
13. NCHRP Synthesis 360, «Rock-Socketed Shafts for Highway Structure Foundations» (2006)
14. Nixon J.B. Thesis, «Verification of the Weathered Rock Model for p-y Curves» (2002)
15. Nusairat J., Liang R.Y., Engel R.L., «Design of Rock Socketed Drilled Shafts», FHWA/011-2006/21 (2006)
16. Poulos H.G. (1971a), «Behaviour of Laterally Loaded Piles I – Single Piles», J. Soil Mech. Found. Div. ASCE 97(5) 711-731
17. Poulos H.G. (1972), «Behaviour of Laterally Loaded Piles IH – Socketed Piles», J. Soil Mech. Found. Div. ASCE 97(4) 341-360
18. Poulos H.G., Davis E.H., «Pile Foundation Analysis and Design», (1980)
19. Randolph M.F., «A Theoretical Study of the Performance of Piles», PhD Thesis, University of Cambridge (1977)
20. Randolph M.F., «The Response of Flexible Piles to Lateral Loading», Geotechnique, 31(2), 247-259 (1981)
21. Reese L.C., «Analysis of Laterally Loaded Piles in Weak Rock», Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 101(7), 633-649 (1997)
22. Simulia Abaqus 6.10. Documentation
23. Wilson E.L., «Structural Analysis of Axisymmetric Solids», J. Am. Inst. Astronaut. Astronaut., 3, 2269-2274 (1965)
24. Yang Ke, «Analysis of Laterally Loaded Drilled Shafts in Rock» (2006)
25. Zhang L., «Drilled Shafts in Rock: Analysis and Design» (2004)

## Βιβλιογραφία

26. Zhang L., Ahmari S., «Non-Linear Analysis of Laterally Loaded Rigid Piles in Cohesive Soils» (2011)