



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ  
ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΒΑΘΩΝ ΦΡΕΑΤΩΝ**

ΛΕΠΙΔΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΑΘΗΝΑ 2021

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Μιχάλη Καββαδά για τη καθοδήγηση και τη βοήθεια που παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της. Επιπλέον ευχαριστώ ιδιαίτερα τον διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Καλό για την αμέριστη βοήθεια και την καταλυτικότερη συνεισφορά του και τον χρόνο που διέθεσε για την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής. Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την διαρκή στήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Λεπίδας Αθανάσιος Χρήστος

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η δυσκαμψία αβαθών φρέατων υπό εγκάρσια φόρτιση. Αρχικά συλλέγονται και περιγράφονται συνοπτικά οι πιο ευρέως διαδεδομένες μεθοδολογίες προσδιορισμού της δυσκαμψίας του συστήματος φρέατος-βραχόμαζας.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Simulia ABAQUS 6.12. Οι διαφορετικές παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η συνοχή και το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας και το βάθος του φρέατος. Στη συνέχεια συλλέγονται και παρουσιάζονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Τέλος προτείνονται οι σχέσεις που συσχετίζουν την αδιαστατικοποιημένη εγκάρσια μετακίνηση με το αδιαστατικοποιημένο φορτίο και την στροφή της κεφαλής με τον λόγο της ροπής ως προς την ακαμψία του φρέατος για να διερευνηθεί η επιρροή των εξωτερικών φορτίων, της περιβάλλουσας βραχόμαζας και της γεωμετρίας του φρέατος στην απόκριση του. Οι προτεινόμενες εξισώσεις εφαρμόζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα τους με αυτά των αριθμητικών αναλύσεων για να ελεγχθεί η ακρίβεια προσέγγισης τους.

# ABSTRACT

The present diploma thesis studies the stiffness of shallow socket foundations under lateral loading. First, the most widely used methodologies for determining the stiffness of the well-rock mass system are collected and briefly described.

In the context of this paper, parametric numerical analyzes were performed with the finite element program Simulia ABAQUS 6.12. The different parameters examined were the cohesion and the elastic modulus of the rock mass and the depth of the shaft. Then the results of the analyzes are collected and presented with diagrams.

Finally, the equations that correlate the dimensionless lateral displacement with the dimensionless lateral load and the rotation of the head with the ratio of the overturning moment to the rigidity of the shaft are proposed, to investigate the influence of external loads, the surrounding rock mass and the shaft's geometry in the response of the shaft. The proposed equations are applied and their results are compared with those of numerical analyzes to check the accuracy of their approach.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	16
1.1 Γενικά Στοιχεία .....	16
1.2 Θεμελίωση Γεφυρών .....	19
1.3 Φρέατα Πακτώσεως .....	21
1.4 Σκοπός.....	23
2. Εγκάρσια Ενδοσιμότητα Φρέατος.....	24
2.1 Εισαγωγή.....	24
2.2 Μέθοδοι Εδαφικής Αντίδρασης.....	24
2.2.1 Γραμμικά Ελατήρια Winkler.....	26
2.2.2 Reese (1997).....	26
2.2.3 Καμπύλες $p$ - $y$ Υπερβολικής Μορφής.....	28
2.2.3.1 Gabr et al. (2002).....	29
2.2.3.2 Liang & Yang (2006).....	30
2.2.4 Cho (2002) .....	32
2.2.5 Carter (1984).....	34
2.2.6 Zhang & Ahmari (2009).....	34
2.2.7 Παρατηρήσεις.....	36
2.3 Θεωρία Συνεχούς Ελαστικού Μέσου.....	36
2.3.1 Στροφικό Ελατήριο στη Βάση του Φρέατος.....	38
2.3.2 Μέθοδος Douglas and Davis (1964).....	39
2.3.3 Μέθοδος Carter and Kulhawy (1992).....	40
2.3.3.1 Δυσκαμψία Φρεάτων κατά τους Carter & Kulhawy.....	43
3. Προσομοίωση του Προβλήματος.....	48
3.1 Εισαγωγή.....	48
3.2 Σχεδιασμός του Προσομοιώματος.....	48
3.2.1 Διακριτοποίηση του Προσομοιώματος.....	48
3.2.2 Συνοριακές Συνθήκες.....	49

3.3 Βραχόμαζα.....	49
3.4 Φρέαρ.....	50
3.4.1 Λεπτομέρειες Προσομοίωσης του Φρέατος.....	51
3.4.2 Νόμος Τριβής Διεπιφάνειας Φρέατος-Βραχόμαζας.....	52
3.4.3 Νόμος Αποκόλλησης Διεπιφάνειας Φρέατος-Βραχόμαζας.....	53
3.5 Φόρτιση του προσομοιώματος.....	54
3.5.1 Αρχικές Συνθήκες.....	54
3.5.2 Δυνάμεις στο φρέαρ.....	54
3.6 Βήματα Αριθμητικών Αναλύσεων.....	55
3.7 Αναλύσεις.....	55
4. Αποτελέσματα Αναλύσεων.....	58
4.1 Εισαγωγή.....	58
4.2 Διαγράμματα για βάθος φρέατος $D = 6 \text{ m}$ .....	58
4.2.1 Σχολιασμός των διαγραμμάτων.....	68
4.3 Διαγράμματα για βάθος φρέατος $D = 4 \text{ m}$ .....	68
4.3.1 Σχολιασμός των διαγραμμάτων.....	78
4.4 Διαγράμματα για βάθος φρέατος $D = 12 \text{ m}$ .....	79
4.4.1 Σχολιασμός των διαγραμμάτων.....	88
4.5 Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας.....	89
4.5.1 Σχολιασμός των διαγραμμάτων.....	93
4.6 Επιρροή της συνοχής της βραχόμαζας.....	94
4.6.1 Σχολιασμός των διαγραμμάτων.....	95
4.7 Επιρροή του βάθους του φρέατος.....	95
4.7.1 Σχολιασμός διαγραμμάτων.....	97
5. Δυσκαμψία του Φρέατος.....	99
5.1 Εισαγωγή.....	99
5.2 Οι λόγοι $(Hx/V)/(Ux/L)$ και $\theta/(M/EI)$ .....	99
5.2.1 Ο λόγος $(Hx/V)/(Ux/L)$ .....	99
5.2.2 Ο λόγος $\theta/(M/EI)$ .....	101
5.3 Προτεινόμενες σχέσεις.....	102

5.3.1 Αναλυτικός τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων A, B, C.....	103
5.4 Εφαρμογή των σχέσεων.....	106
5.4.1 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	107
5.5 Σύγκριση με τη μέθοδο των Carter και Kulhawy .....	109
5.5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	111
5.5.2 Σχολιασμός της σύγκρισης των αποτελεσμάτων.....	118
6. Συμπεράσματα .....	119
6.1 Συνοπτική ανασκόπηση της μεθοδολογίας.....	119
6.2 Συμπεράσματα.....	120
6.3 Επίλογος και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	122
7.Βιβλιογραφία.....	123
Παραρτήματα.....	125
Παράρτημα Α.....	125
Παράρτημα Β.....	143

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 : Κατηγορίες Επιφανειακών Θεμελιώσεων.....	17
Σχήμα 1.2 : Μέθοδοι Εγκατάστασης Πασσάλων.....	18
Σχήμα 1.3 : Μηχανισμός Μεταφοράς Φορτίων.....	19
Σχήμα 1.4 : Φρέατα Θεμελίωσης.....	19
Σχήμα 1.5 : Τύποι Θεμελίωση Βάθρων Γεφυρών.....	20
Σχήμα 1.6 : Διάγραμμα επιρροής Τύπου διατομής-Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων.....	22
Σχήμα 2.1 : Στοιχείο δοκού, κατά HETENYI (1946).....	25
Σχήμα 2.2 : Εξιδανικευμένο προσομοίωμα εδαφικής αντίδρασης εγκάρσια φορτισμένου φρέατος πακτώσεως και καμπύλες $p - y$ .....	25
Σχήμα 2.3 : Καμπύλη $p-y$ , κατά REESE (1997).....	26
Σχήμα 2.4 : Καμπύλη $p-y$ υπερβολικής μορφής.....	28
Σχήμα 2.5 : Κατανομές δείκτη $kh_0$ από εργαστηριακές δοκιμές και δοκιμές πεδίου....	33
Σχήμα 2.6 : Μεθοδολογία Zhang & Ahmari (2009).....	35
Σχήμα 2.7 : Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου των Poulos & Davis (1980).....	37
Σχήμα 2.8 : Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστών επιρροής κατά Douglas & Davis ( $B^*=L, D^*=B$ ).....	40
Σχήμα 2.9 : Εγκάρσια φόρτιση φρέατος πακτώσεως σε βραχόμαζα.....	41
Σχήμα 2.10 : Διάγραμμα αδιαστατοποιήμενης μετακίνησης – οριζοντίου φορτίου συναρτήσεσι : (a) τον λόγο( $Ee/G^*$ ) και (b) τον λόγο ( $L/D=D^*/B^*$ ).....	42
Σχήμα 2.11 : Διάγραμμα αδιαστατοποιήμενης στροφής – ροπής συναρτήσεσι : (a) τον λόγο( $Ee/G^*$ ) και (b) τον λόγο ( $L/D=D^*/B^*$ ).....	42
Σχήμα 2.12 : Διάγραμμα αδιαστατοποιήμενης μετακίνησης – οριζοντίου φορτίου και αδιαστατοποιήμενης στροφής – ροπής συναρτήσεσι : (a) τον λόγο( $Ee/G^*$ ) και (b) τον λόγο ( $L/D=D^*/B^*$ ).....	43
Σχήμα 3.1 : Κάνναβος προσομοιώματος.....	48
Σχήμα 3.2 : Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων .....	49
Σχήμα 3.3 : Διαστάσεις φρεάτων που χρησιμοποιήθηκαν ( $Y^*X^*Z$ ).....	50
Σχήμα 3.4 : Διάγραμμα ορθής – διατμητικής τάσης ( $\sigma-\tau$ ).....	52
Σχήμα 3.5 : Ελαστοπλαστικό διάγραμμα ολίσθησης – τάσης (slip- $\tau$ ) της διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας.....	53
Σχήμα 3.6 : Διάγραμμα υπερκάλυψης – πίεσης της διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας.....	53



Σχήμα 3.7 : Φορτία που ασκούνται στο φρέαρ.....	54
Σχήμα 4.1 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=500 MPa.....	59
Σχήμα 4.2 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=500 MPa.....	59
Σχήμα 4.3 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=330 MPa.....	60
Σχήμα 4.4 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=330 MPa.....	60
Σχήμα 4.5 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=220 MPa.....	61
Σχήμα 4.6 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=220 MPa.....	61
Σχήμα 4.7 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=145 MPa.....	62
Σχήμα 4.8 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=145 MPa.....	62
Σχήμα 4.9 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=97.5 MPa.....	63
Σχήμα 4.10 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=97.5 MPa .....	63
Σχήμα 4.11 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=65 MPa.....	64
Σχήμα 4.12 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=65 MPa.....	64
Σχήμα 4.13 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με E=500 MPa.....	65





Σχήμα 4.42 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=220 \text{ MPa}$ .....	81
Σχήμα 4.43 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=145 \text{ MPa}$ .....	82
Σχήμα 4.44 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=145 \text{ MPa}$ .....	82
Σχήμα 4.45 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=97.5 \text{ MPa}$ .....	83
Σχήμα 4.46 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=97.5 \text{ MPa}$ .....	83
Σχήμα 4.47 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=65 \text{ MPa}$ .....	84
Σχήμα 4.48 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=65 \text{ MPa}$ .....	84
Σχήμα 4.49 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=500 \text{ MPa}$ .....	85
Σχήμα 4.50 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=500 \text{ MPa}$ .....	85
Σχήμα 4.51 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=145 \text{ MPa}$ .....	86
Σχήμα 4.52 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=145 \text{ MPa}$ .....	86
Σχήμα 4.53 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος L του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=65 \text{ MPa}$ .....	87
Σχήμα 4.54 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία (EI) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E=65 \text{ MPa}$ .....	87
Σχήμα 4.55 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο $H=1500 \text{ kN}$ και $c=150 \text{ kPa}$ .....	89

Σχήμα 4.56 : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο $H=1500$ kN και $c=150$ kPa.....	90
Σχήμα 4.57 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο $H=1500$ kN και $c=20$ kPa.....	90
Σχήμα 4.58 : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο $H=1500$ kN και $c=20$ kPa.....	91
Σχήμα 4.59 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο $H=750$ kN και $c=150$ kPa.....	91
Σχήμα 4.60 : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο $H=750$ kN και $c=150$ kPa.....	92
Σχήμα 4.61 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο $H=750$ kN και $c=20$ kPa.....	92
Σχήμα 4.62 : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο $H=750$ kN και $c=20$ kPa.....	93
Σχήμα 4.63 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσει της συνοχής της βραχόμαζας για τις διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας.....	94
Σχήμα 4.64 : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσει της συνοχής της βραχόμαζας για τις διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας.....	94
Σχήμα 4.65 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσει του βάθους του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας.....	96
Σχήμα 4.66 : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσει του βάθους του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας.....	96
Σχήμα 4.67 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσει του βάθους του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής της βραχόμαζας.....	97
Σχήμα 4.68 : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσει του βάθους του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής της βραχόμαζας.....	97
Σχήμα 5.1 : Διάγραμμα συσχέτισης των λόγων $(Hx/V)/(Ux/L)$ και $(E/\sigma'_{vd})$ με εξίσωση της μορφής $y=A*x$ .....	103
Σχήμα 5.2 : Διάγραμμα συσχέτισης των συντελεστών $A$ με το σχετικό βάθος $D/L$ με εξίσωση της μορφής $A=a_1*e^{b_1}$ .....	104
Σχήμα 5.3 : Διάγραμμα συσχέτισης των λόγων $\theta/(M/EI)$ και $(E/\sigma'_{vd})$ με εξίσωση της μορφής $y=B*x^C$ .....	104
Σχήμα 5.4 : Διάγραμμα συσχέτισης του συντελεστή $B$ με το σχετικό βάθος $D/L$ με εξίσωση της μορφής $B=a_2*e^{b_2}$ .....	105

Σχήμα 5.5 : Διάγραμμα συσχέτισης του συντελεστή C με το σχετικό βάθος D/L με εξίσωση της μορφής $C=a_3 \cdot x+b_3$ .....	105
Σχήμα 5.6 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος βάθους 6 m συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τις διαφορετικές μεθοδολογίες που θεωρήθηκαν.....	115
Σχήμα 5.7 : Στροφές κεφαλής φρέατος βάθους 6 m συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τις διαφορετικές μεθοδολογίες που θεωρήθηκαν.....	115
Σχήμα 5.8 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος βάθους 4 m συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τις διαφορετικές μεθοδολογίες που θεωρήθηκαν.....	116
Σχήμα 5.9 : Στροφές κεφαλής φρέατος βάθους 4 m συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τις διαφορετικές μεθοδολογίες που θεωρήθηκαν.....	116
Σχήμα 5.10 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος βάθους 12 m συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τις διαφορετικές μεθοδολογίες που θεωρήθηκαν.....	117
Σχήμα 5.11 : Στροφές κεφαλής φρέατος βάθους 12 m συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τις διαφορετικές μεθοδολογίες που θεωρήθηκαν.....	117

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 : Συντελεστές για τον υπολογισμό οριακής αντοχής.....	31
Πίνακας 2.2 : Τιμές της παραμέτρου ( $\xi$ ) για διάφορα σχετικά βάθη ( $c/D$ ).....	39
Πίνακας 2.3 : Τυπικές τιμές των συντελεστών $I_{ij}$ .....	40
Πίνακας 2.4 : Τυπικές τιμές των συντελεστών $I_{ij}$ για άκαμπτο φρέαρ.....	45
Πίνακας 3.1 : Τιμές του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τις αναλύσεις.....	50
Πίνακας 3.2 : Τιμές της συνοχής για τις αναλύσεις.....	50
Πίνακας 3.3 : Φορτία που ασκούνται στο φρέαρ.....	55
Πίνακας 3.4 : Αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για βάθος φρέατος $D=6m$ .....	56
Πίνακας 3.5 : Αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για βάθη φρέατος $D=4 m$ και $D=12 m$ .....	57
Πίνακας 4.1 : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για $E=500MPa$ και $H=1500 (kN)$ .....	59
Πίνακας 4.2 : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για $E=330MPa$ και $H=1500 (kN)$ .....	60
Πίνακας 4.3 : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για $E=220MPa$ και $H=1500 (kN)$ .....	61
Πίνακας 4.4 : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για $E=145MPa$ και $H=1500 (kN)$ .....	62
Πίνακας 4.5 : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για $E=97.5MPa$ και $H=1500 (kN)$ .....	63
Πίνακας 4.6 : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για $E=65MPa$ και $H=1500 (kN)$ .....	64
Πίνακας 4.7 : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για $E=500MPa$ και $H=750 (kN)$ .....	65
Πίνακας 4.8 : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για $E=145MPa$ και $H=750 (kN)$ .....	66
Πίνακας 4.9 : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για $E=65MPa$ και $H=750 (kN)$ .....	67
Πίνακας 4.10 : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για φρέαρ βάθους $D=4 m$ .....	78
Πίνακας 4.11 : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για φρέαρ βάθους $D=12 m$ .....	88
Πίνακας 5.1 : τιμές του λόγου $(U_x/L)/(H_x/V)$ και $(H_x/V)/(U_x/L)$ για τις εκτελεσμένες αριθμητικές αναλύσεις.....	100

Πίνακας 5.2 : τιμές του λόγου $\theta/(M/EI)$ για τις εκτελεσμένες αριθμητικές αναλύσεις.....	101
Πίνακας 5.3 : Αποτελέσματα από την εφαρμογή της σχέσης για τον υπολογισμό της αδιαστατικοποιημένης εγκάρσιας μετακίνησης.....	106
Πίνακας 5.4 : Αποτελέσματα από την εφαρμογή της σχέσης για τον υπολογισμό του λόγου της ροπής δια την ακαμψία ως προς την στροφή.....	107
Πίνακας 5.5 : Κατάταξη των φρεάτων που εξετάστηκαν με βάση τη δυσκαμψία τους κατά Carter και Kulhawy.....	112
Πίνακας 5.6 : Σύγκριση μετακινήσεων και στροφών μεταξύ των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, των προτεινόμενων σχέσεων με τις προβλέψεις κατά Carter και Kulhawy για βάθη φρέατος 6 m και 4 m.....	113
Πίνακας 5.7 : Σύγκριση μετακινήσεων και στροφών μεταξύ των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, των προτεινόμενων σχέσεων με τις προβλέψεις κατά Carter και Kulhawy για βάθος φρέατος 12 m.....	114
Πίνακας 6.1 : Τιμές του μέτρου ελαστικότητας και της συνοχής της βραχώμαζας.....	119



# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά Στοιχεία

Με τον όρο “θεμελίωση” εννοείται το υψομετρικά χαμηλότερο σημείο μιας κατασκευής, το οποίο αποτελεί αφενός τη βάση πάνω στην οποία εδράζεται η κατασκευή και αφετέρου το τμήμα της κατασκευής που βρίσκεται σε άμεση επαφή με το έδαφος και μεταφέρει τα φορτία σε αυτό και συνιστά την απαρχή των κατασκευαστικών εργασιών κάθε δομικού έργου. Οι θεμελιώσεις απαιτούν σωστή μελέτη, δηλαδή ακριβή επιλογή κάθε είδους θεμελίωσης και διατάξεων, καθώς και ορθή κατασκευή, δηλαδή έντεχνη και λειτουργικά σωστή κατασκευαστική διαμόρφωση. Το έδαφος θεμελίωσης, η θεμελίωση και η ανωδομή αποτελούν ένα ενιαίο, αναπόσπαστο σύνολο. Η ισορροπία διατηρείται με τις αντιδράσεις που αναπτύσσει το έδαφος. Οι αντιδράσεις αυτές μέσω της αντίστασης του εδαφικού σκελετού στις δράσεις, προκαλούν την παραμόρφωση αυτού. Οι παραμορφώσεις στην αρχή είναι μικρές και ελαστικές, καθώς όμως αυξάνεται η καταπόνηση γίνονται πλαστικές μέχρι την αστοχία. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποχώρηση της επιφάνειας του εδάφους ή του θεμελίου (καθιζήσεις), η οποία αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι τάσεις και φτάνει τη μέγιστη τιμή της κατά την αστοχία. Σκοπός της μελέτης και διαστασιολόγησης των θεμελιώσεων αποτελεί:

- ο περιορισμός των καθιζήσεων, οριζοντίων μετακινήσεων και στροφών σε αποδεκτά για την ανωδομή όρια,
- η διατήρησή τους σε κατά το δυνατόν ίσες τιμές για όλα τα θεμέλια του έργου (αποφυγή διαφορικών καθιζήσεων),
- ο αποκλεισμός παραμορφώσεων θραύσης.

Προκειμένου μια θεμελίωση να χαρακτηριστεί ως κατασκευαστικά ασφαλής και λειτουργική, προϋποθέτει:

1. να είναι ασφαλής έναντι πιθανής αστοχίας ή θραύσης του εδάφους πάνω στο οποίο εδράζεται.
2. να μη δεχθεί υπερβολικές ή καταστροφικές δράσεις.
3. να σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντικούς(παγετός, ανέμος , υπόγεια νερά, σεισμούς κ.α.) και άλλους παράγοντες (χαλαρά εδάφη, παρακείμενα κτίρια, εκσκαφές, ιδιοκτησίες κ.α.).
4. να είναι οικονομικά εφικτή σε σχέση με τη λειτουργία και το κόστος της συνολικής κατασκευής.

Οι περισσότερες θεμελιώσεις συνήθως κατασκευάζονται από σκυρόδεμα, εις τρόπον ώστε να εξασφαλίζεται το σχετικά χαμηλό κόστος, η υψηλή αντοχή και η αντίσταση στη φθορά.

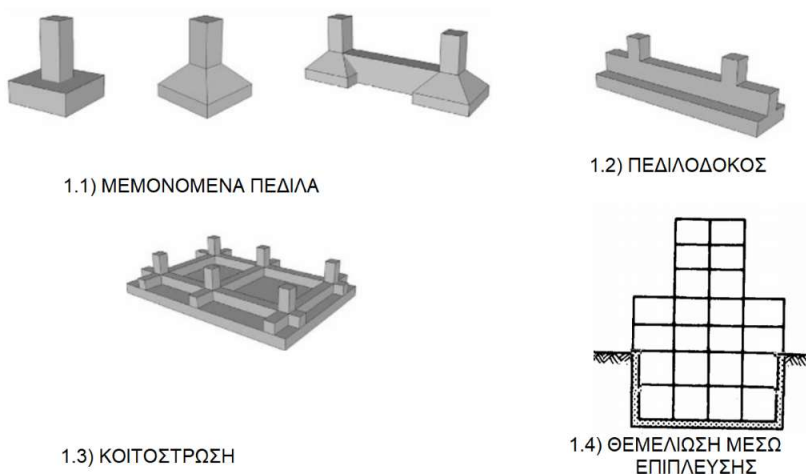
Οι θεμελιώσεις δύνανται όπως κατηγοριοποιηθούν σε : 1) επιφανειακές θεμελιώσεις και 2) βαθιές θεμελιώσεις.

### 1. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ

Οι επιφανειακές θεμελιώσεις συνήθως εδράζονται σε μικρά βάθη  $D$ , μικρότερου από ένα πλάτος θεμελίου ( $D < B$ ) ή εναλλακτικά στα όρια μιας κανονικής εκσκαφής, δηλαδή για  $D < 3m$  και  $D/B$  έως 3. Οι επιφανειακές θεμελιώσεις μετατρέπουν τα φορτία της ανωδομής σε πίεση, κατανέμοντάς τη στο έδαφος. Ο Ευρωκώδικας 8 (EC8) για να συμπεριλάβει και τη δυσκαμψία στην αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής επιτρέπει μεθόδους που προσομοιώνουν το έδαφος είτε με ένα παραμορφούμενο συνεχές μέσο, ή με μία σειρά ελατηρίων, ή με ένα μοντέλο που λαμβάνει υπόψιν το μέτρο αντίδρασης του εδάφους. Για ακριβέστερες εκτιμήσεις όμως χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι επιφανειακές θεμελιώσεις χωρίζονται συνήθως σε τέσσερις κατηγορίες (Σχήμα 1.1):

- 1.1. **Μεμονωμένα πέδιλα** : τα πέδιλα είναι συνήθως τετραγωνικής διατομής, ώστε να διευκολύνεται η τοποθέτηση οπλισμού, ενώ σε περίπτωση έκκεντρης ή λοξής φόρτισης είναι αποτελεσματικότερα τα ορθογωνικά πέδιλα με τη μεγάλη πλευρά παράλληλη προς την εκκεντρότητα.
- 1.2. **Πεδιλοδοκοί** : σχεδιάζονται με στόχο να εξασφαλίσουν μεγάλο πλάτος. Συνήθως διασχίζουν ανομοιογενές έδαφος ή αδύναμα σημεία, ενώ για την αποφυγή διαφορικών καθιζήσεων και ρηγμάτωσης της ανωδομής τοποθετείται διαμήκης οπλισμός. Τοποθετείται επίσης εγκάρσιος οπλισμός στη βάση, ο οποίος αναλαμβάνει τις τάσεις λόγω κάμψης.
- 1.3. **Κοιτοστρώσεις** : αποτελούνται από μία συνεχή πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος κάτω από το σύνολο του κτιρίου με δοκούς κάτω από φέροντα τοιχώματα ή τις σειρές υποστυλωμάτων, με σκοπό να διατηρηθούν οι διαφορικές καθιζήσεις μέσα στα αποδεκτά όρια.
- 1.4. Θεμελίωση μέσω **επίπλευσης**.



Σχήμα 1.1 : Κατηγορίες Επιφανειακών Θεμελιώσεων

## 2. ΒΑΘΙΕΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ

Στην περίπτωση που μία κατασκευή δεν μπορεί να εδρασθεί στη γεώμαζα με αβαθείς (επιφανειακές) θεμελιώσεις για λόγους ακαταλληλότητας του εδάφους ή λόγω ύπαρξης υδροφόρου ορίζοντα, γίνονται βαθιές θεμελιώσεις, που έχουν στόχο τη μεταφορά των φορτίων που εφαρμόζονται στη στέψη σε υψομετρικά κατώτερα στρώματα (όπου και συναντάμε εδάφη υψηλότερης αντοχής). Η μεταφορά των φορτίων επιτυγχάνεται μέσω δύο κυρίαρχων μηχανισμών :

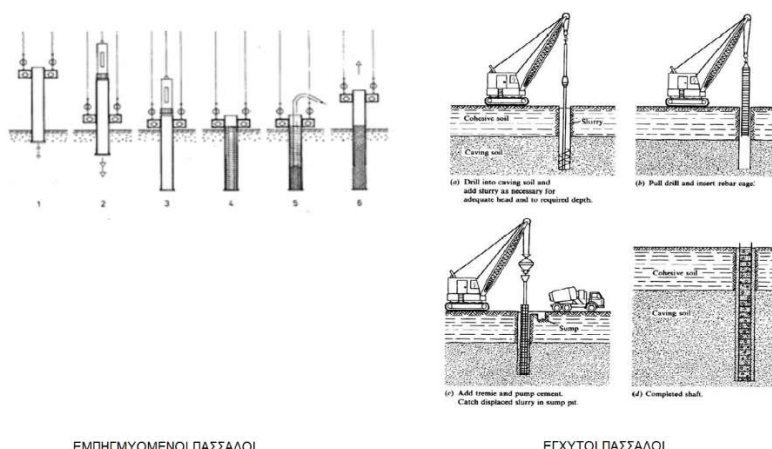
- Την κινητοποίηση διατμητικών τάσεων στις πλευρικές διεπιφάνειες επαφής του στοιχείου με το έδαφος. Οι τάσεις αυτές συνθέτουν την πλευρική τριβή ή την λεγόμενη συνάφεια για τα αργιλικά εδάφη.
- Την ανάπτυξη αντίστασης στην βάση του στοιχείου (όμοια με τις αβαθείς θεμελιώσεις), γνωστή ως αντίσταση αιχμής

Οι συνήθεις μορφές των βαθιών θεμελιώσεων είναι :

2.1. **με πασσάλους** : επιμήκη δομοστατικά στοιχεία, των οποίων η διάμετρος (συνήθως 0.40-1.20 m) είναι πολύ μικρότερη του μήκους των, κατά τον λόγο 1:20-1:40.

Οι πάσσαλοι κατατάσσονται σε κατηγορίες με βάση τα ακόλουθα κριτήρια :

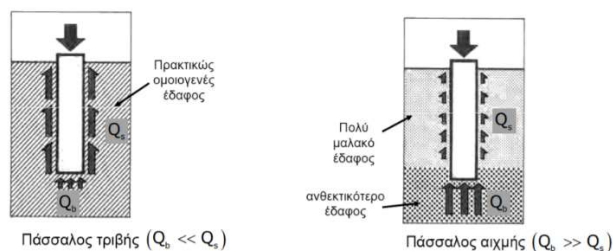
- I. Το υλικό κατασκευής
  - Ξύλινοι
  - Χαλύβδινοι
  - Από σκυρόδεμα
- II. Την μέθοδο εγκατάστασης (Σχήμα 1.2)
  - Εμπηγνύομενοι : η έμπηξη του πασσάλου γίνεται με την χρήση γερανών κι μηχανικών σφυρών. Το βάρος της σφύρας πρέπει να είναι 1/3 έως 2 φορές το βάρος του πασσάλου, ώστε να μην προκληθούν φθορές ή θραύση κατά την έμπηξή του.
  - Έγχυτοι : οι έγχυτοι πάσσαλοι υλοποιούνται με την διάνοιξη μιας οπής, την αφαίρεση του εδαφικού υλικού κι την αντικατάστασή του από σκυρόδεμα. Σε περίπτωση ύπαρξης υπογείου νερού, η εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάζει δυσχέρειες.
- III. Τον μηχανισμό μεταφοράς του εξωτερικού φορτίου στο έδαφος (Σχήμα 1.3)
  - Πάσσαλοι τριβής
  - Πάσσαλοι αιχμής



ΕΜΠΗΓΜΥΟΜΕΝΟΙ ΠΑΣΣΑΛΟΙ

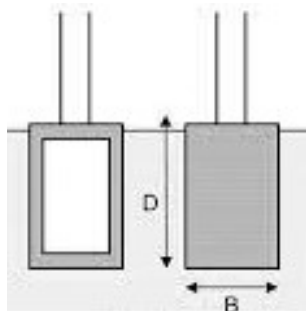
ΕΓΧΥΤΟΙ ΠΑΣΣΑΛΟΙ

Σχήμα 1.2 : Μέθοδοι Εγκατάστασης Πασσάλων



Σχήμα 1.3 : Μηχανισμός Μεταφοράς Φορτίων

2.2. **Φρέατα** : Ένα φρέαρ θεμελίωσης αποτελεί συνήθως ένα κατακόρυφο στοιχείο μεγάλων διαστάσεων, που κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Συνήθως έχει κυλινδρική μορφή, που χαρακτηρίζεται από μεγάλη διάμετρο, η οποία κατά κανόνα ξεπερνά το 1.50m, ενώ το μήκος του δεν ξεπερνά τα 12m (ο λόγος L/D (ή D/B) κυμαίνεται από 1-5) (Σχήμα 1.4). Τα φρέατα αναλύονται περαιτέρω στην παράγραφο 1.3.



Σχήμα 1.4 : Φρέατα Θεμελίωσης

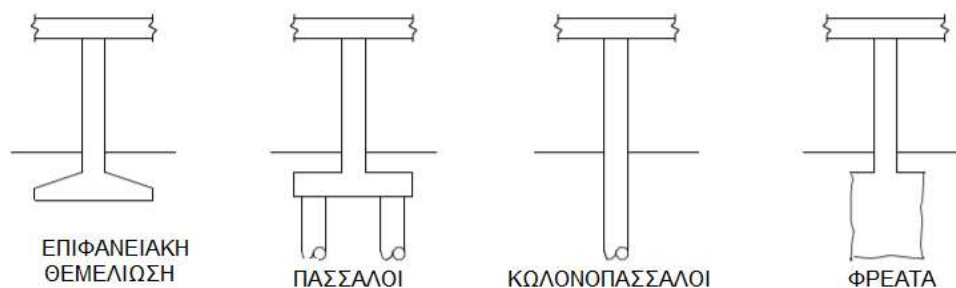
## 1.2 Θεμελίωση Γεφυρών

Η θεμελίωση των γεφυρών αποτελεί μείζον ζήτημα, επειδή κατασκευάζονται σε δυσχερείς θέσεις (π.χ. ποτάμια, χαράδρες, θάλασσα), ακόμη και πάνω από τεκτονικά ρήγματα. Η επιλογή του τρόπου θεμελίωσης εξαρτάται κυρίως από τις εδαφικές συνθήκες και βασίζεται τόσο σε γεωτεχνικά κριτήρια όσο και σε άλλους παράγοντες, όπως στην πιθανότητα ρευστοποίησης του εδάφους, στην πιθανότητα κατολισθήσεων, στην πιθανότητα συντονισμού (για μαλακά εδάφη) κλπ. Οι συνηθέστεροι τρόποι θεμελίωσης βάθρων γεφυρών είναι (Σχήμα 1.5):

- **Επιφανειακή θεμελίωση**: εφαρμόζεται σε ισχυρούς εδαφικούς σχηματισμούς, δεδομένου ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις εδάφους για τους συνδυασμούς με σεισμό προκύπτουν ιδιαίτερα σημαντικές. Κρίσιμα σημεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην επιλογή επιφανειακής θεμελίωσης είναι αφενός οι πιθανές διαφορικές καθιζήσεις μεταξύ γειτονικών βάθρων, οι οποίες είναι μεγαλύτερες απ' ό,τι για θεμελίωση με πασσάλους και μπορούν να επιβαρύνουν σημαντικά τους συνεχείς φορείς και αφετέρου ο σημαντικός όγκος των απαιτούμενων εκσκαφών, καθόσον οι διαστάσεις των πεδίων προκύπτουν αρκετά μεγάλες. Σε περιπτώσεις περιορισμένου χώρου θεμελίωσης (π.χ. γεινίαση με σιδηροδρομική γραμμή) μπορεί να απαιτηθούν αντιστηρίξεις για τον περιορισμό της εκσκαφής. Από στατική και δυναμική

άποψη, η επιφανειακή θεμελίωση σε σκληρά εδάφη λειτουργεί σχεδόν ως πάκτωση. Για μαλακά εδάφη, συνιστάται να λαμβάνεται υπόψη και η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής.

- **Πάσσαλοι:** χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε γέφυρες, επειδή παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια έναντι αστοχίας, σε σύγκριση με την επιφανειακή θεμελίωση και μικρότερες διαφορικές καθιζήσεις. Σε περιπτώσεις μαλακών και χαλαρών εδαφών, η θεμελίωση με πασσάλους είναι συνήθως η μόνη πρόσφορη λύση. Έχει το πλεονέκτημα της ταχύτητας κατασκευής και των μικρών απαιτούμενων εκσκαφών. Οι πάσσαλοι στην κεφαλή τους συνδέονται με κεφαλόδεσμο, πάνω στον οποίο θεμελιώνεται το βάθρο. Από άποψη δυναμικής συμπεριφοράς, ο τρόπος αυτός θεμελίωσης οδηγεί σε αρκετά άκαμπτες συνθήκες στήριξης, χωρίς όμως να εξασφαλίζει συνθήκες πλήρους πάκτωσης. Για το λόγο αυτό, συνιστάται να λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο υπολογισμού η ενδοσιμότητα του συστήματος θεμελίωσης στη βάση του βάρου, τόσο σε οριζόντιες μετακινήσεις όσο και σε στροφές, ιδιαίτερα για μαλακά εδάφη. Στα μοντέλα υπολογισμού, αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλα οριζόντια ελατήρια που τοποθετούνται κατά μήκος των πασσάλων και κατακόρυφα ελατήρια που τοποθετούνται στην αιχμή τους.
- **Κολωνοπάσσαλοι:** ονομάζονται οι κυκλικοί στύλοι βάρων, οι οποίοι συνεχίζουν εντός του εδάφους ως πάσσαλοι, χωρίς την παρεμβολή κεφαλόδεσμου. Η λύση αυτή προσφέρει το πλεονέκτημα της εύκολης κατασκευής, ενώ η απουσία κεφαλόδεσμου οδηγεί σε σημαντική οικονομία. Επίσης, αποφεύγονται οι εκσκαφές που απαιτούνται για την κατασκευή του κεφαλόδεσμου. Από δυναμική άποψη, η ευκαμψία των πασσάλων δημιουργεί συνθήκες ελαστικής πάκτωσης στη βάση των στύλων των βάρων. Η ελαστικότητα αυτή της θεμελίωσης πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο υπολογισμού, ιδιαίτερα για μαλακά εδάφη.
- **Φρέατα:** χρησιμοποιείται σε σκληρά ή βραχώδη εδάφη, όπου η κατασκευή πασσάλων δεν είναι δυνατή. Η παραλαβή των φορτίων γίνεται μερικώς μέσω της επιφάνειας έδρασης και μερικώς από τις πλευρικές τριβές που αναπτύσσονται. Σε σύγκριση με την επιφανειακή θεμελίωση, απαιτούνται μικρότερες εκσκαφές σε έκταση, αλλά μεγαλύτερες σε βάθος. Επομένως η επιλογή αυτού του τρόπου θεμελίωσης θα πρέπει να γίνεται με τεχνοοικονομικά κριτήρια. Ως μειονέκτημα της μεθόδου πρέπει να αναφερθεί η ασάφεια που υπάρχει στον τρόπο παραλαβής των κατακόρυφων και σεισμικών φορτίων, καθώς και οι κατασκευαστικές δυσκολίες που παρουσιάζει η μέθοδος. Γι' αυτό και αυτός ο τρόπος θεμελίωσης χρησιμοποιείται σε ειδικές μόνον περιπτώσεις. Για τη δυναμική ανάλυση, η θεμελίωση αυτή μπορεί να λαμβάνεται ως πάκτωση.



Σχήμα 1.5 : Τύποι Θεμελίωση Βάρων Γεφυρών

### 1.3 Φρέατα Πακτώσεως

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 διάμετρός του). Οι μικρές τιμές της λυγηρότητας εξασφαλίζουν ότι το φρέαρ συμπεριφέρεται ταυτόχρονα ως πρακτικά άκαμπτο στοιχείο και ως βαθιά θεμελίωση (βραχύς πάσσαλος). Λειτουργεί κατ' ουσίαν ως απαραμόρφωτο στερεό κατά την ανάληψη των φορτίων της ανωδομής την οποία φέρει.

Τα φρέατα, ως τρόπος θεμελίωσης, χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά για τη θεμελίωση βάθρων γεφυρών μεγάλων ανοιγμάτων και σπανιότερα σε θεμελιώσεις ανεμογεννητριών και λοιπών κατασκευών μορφής προβόλου, όπου και προτιμώνται στιβαροί μονοπάσσαλοι. Κατασκευάζονται από σπλισμένο σκυρόδεμα, έχουν τη δυνατότητα αξιόπιστης παραλαβής τεραστίων φορτίων από την ανωδομή και είναι κατάλληλα για χρήση σε μαλακά ή/και επικλινή εδάφη. Έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και είναι εύκολα προσαρμόσιμα στις ανάγκες κάθε έργου. Παρόλα αυτά η χρήση τους δεν μπορεί να θεωρηθεί ευρεία, γεγονός που οφείλεται, κυρίως, στην περιορισμένη βιβλιογραφία και τεχνική εμπειρία γύρω από τον τρόπο λειτουργίας τους. Η εκτίμηση της απόκρισης ενός φρέατος θεμελίωσης υπό τη δράση οριζόντιων φορτίων και ροπών αποτελεί μείζον ζήτημα, δεδομένου ότι τα φρέατα δέχονται μεγάλου μεγέθους εξαιτίσεις τέτοιου τύπου που προέρχονται από την ανωδομή. Υπό σταδιακή επιβολή αυτών των φορτίσεων, το φρέαρ θα μετατεθεί και θα στραφεί ως απαραμόρφωτο σώμα περί ένα κέντρο περιστροφής επί του κεντροβαρικού του άξονα. 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 πάκτωσης του βάθρου με τις συνήθεις απλοποιητικές μεθόδους (π.χ. μέθοδος Broms). Ο ακριβής προσδιορισμός του θεωρητικού σημείου πάκτωσης είναι σημαντικός, επειδή επηρεάζει τόσο τη δυσκαμψία των φρεάτων όσο και την ιδιοπερίοδο της κατασκευής σε περίπτωση σεισμικής φόρτισης. Το σημείο πάκτωσης 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 απόκρισή της σε περίπτωση δυναμικής φόρτισης. Η θεώρηση πλήρους πάκτωσης σε συγκεκριμένο βάθος δεν είναι αποδεκτή παραδοχή επειδή:

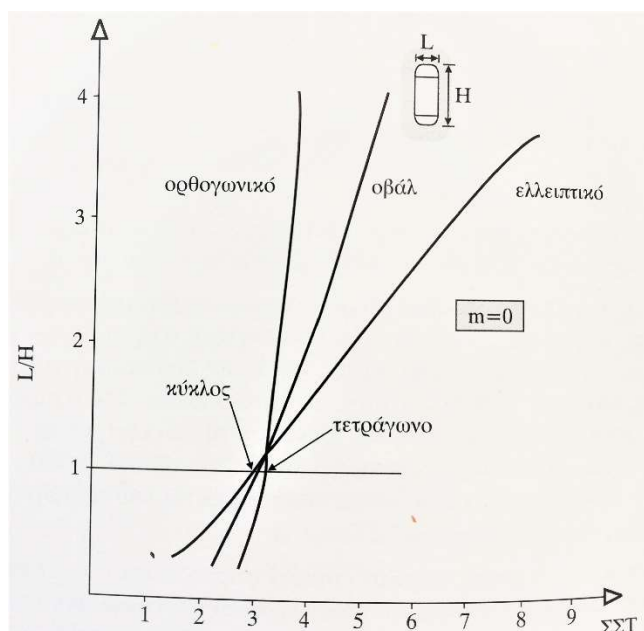
- Το θεωρητικό βάθος πάκτωσης δεν είναι σταθερό, αλλά εξαρτάται από το μέγεθος της εγκάρσιας δύναμης H και της καμπτικής ροπής M, επομένως δεν υπολογίζεται μονοσήμαντα.
- Η ισοδύναμη δυσκαμψία του φρέατος στο τμήμα μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του σημείου πάκτωσης είναι σύνθετη, δηλαδή δεν μπορεί να αναλυθεί σε ένα οριζόντιο γραμμικό και ένα στροφικό ελατήριο επί του θεωρητικού σημείου πάκτωσης.

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 σύζευξης των ελατηρίων. Αυτός ο πολύπλοκος μηχανισμός απόκρισής τους και η πρακτική δυσκολία εκτέλεσης

δοκιμών σε φρέατα, έχει αποτρέψει τους μελετητές στην ενασχόληση με τέτοιους τύπους θεμελιώσεων.

Οι τυπικές διαστάσεις φρεάτων είναι  $L = 8 \sim 15\text{m}$  και  $D = 4 \sim 8\text{m}$ . 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 κάμψεως. 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 καμπτοαστονικής αντοχής.

Τα φρέατα μπορεί να έχουν είτε ορθογωνική είτε κυκλική διατομή ή ακόμα κι ελλειπτικό σχήμα διατομής. Η κυκλική διατομή αποτελεί βέλτιστη λύση για την αντιμετώπιση πιέσεων λόγω της παραμόρφωσης της περιβάλλουσας γεώμαζας ή υπογείου νερού. Όταν το μέγεθος των οριζόντιων τάσεων μεταβάλλεται με την διεύθυνση, τα φρέατα πρέπει να έχουν ελλειπτικό σχήμα, με τον μεγάλο άξονα στην κατεύθυνση της οριζόντιας δύναμης. Στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζεται η επιρροή της γεωμετρίας της διατομής στον Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων (ΣΣΤ).



**Σχήμα 1.6 :** Διάγραμμα επιρροής Τύπου διατομής-Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων

#### **1.4 Σκοπός**

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τα φρέατα χαρακτηρίζονται από ένα πολύπλοκο μηχανισμό απόκρισης όταν ασκείται σε αυτά εγκάρσιο φορτίο και ροπή. Σκοπό της παρούσας διπλωματικής αποτέλεσε η διερεύνηση της μετακινησιακής και στροφικής δυσκαμψίας των φρεάτων, συναρτήσει των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών, της σχετικής δυσκαμψίας φρέατος-βραχόμαζας και των επιβαλλόμενων εντατικών μεγεθών.



# 2 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΕΝΔΟΣΙΜΟΤΗΤΑ ΦΡΕΑΤΟΣ

## 2.1 Εισαγωγή

Επιβάλλοντας στην κεφαλή του φρέατος εγκάρσιο φορτίο (τέμνουσα) και ροπή αναμένεται να εμφανιστούν οριζόντιες μετακινήσεις και στροφές, λόγω της ενδοσιμότητας ή της παραμορφωσιμότητας του εδάφους ή της βραχόμαζας στο οποίο εγκιβωτίζεται. Ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα παραμόρφωσης, είναι με την παραδοχή ελαστικής έδρασης των δομικών στοιχείων που βρίσκονται σε επαφή με τη βραχόμαζα. Αντίστοιχα η αντίδραση της βραχόμαζας εξαρτάται από την μετακίνηση της θεμελίωσης, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την απόκριση της βραχόμαζας και τη δυσκαμψία της θεμελίωσης.

Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι ανάλυσης της μηχανικής συμπεριφοράς φρεάτων πακτώσεως εντάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

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

## 2.2 Μέθοδοι Εδαφικής Αντίδρασης

Οι μέθοδοι εδαφικής αντίδρασης διακρίνουν τη βραχόμαζα σε ένα σύνολο μη γραμμικών ελατηρίων. 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 διατυπώθηκε από τον Hetenyi το 1946 (Σχήμα 2.1):

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + P_z \frac{d^2 y}{dz^2} - p - w = 0 \quad (2.1)$$

όπου

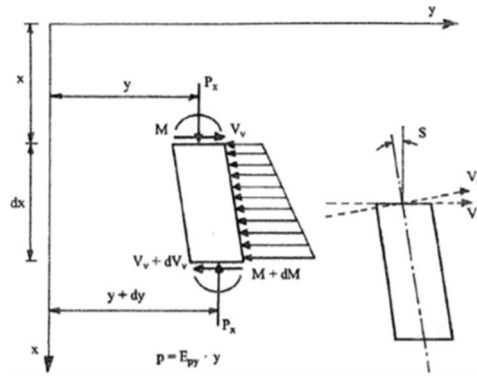
(EI): η καμπτική δυσκαμψία του φρέατος,

Y: η οριζόντια μετατόπιση σε βάθος z,

Pz : το αξονικό φορτίο στην κεφαλή του φρέατος,

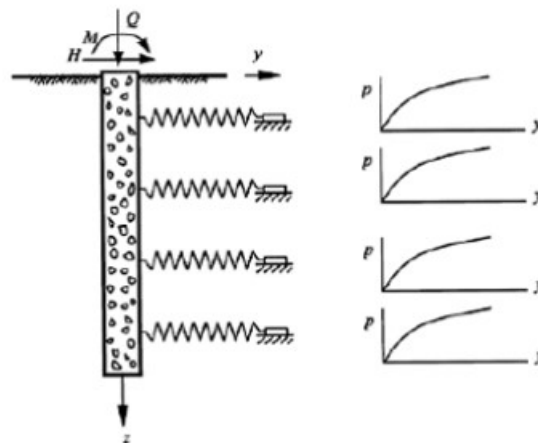
p: η οριζόντια αντίδραση του εδάφους ανά μέτρο μήκους και

w: το κατανεμημένο φορτίο κατά μήκος του φρέατος



**Σχήμα 2.1 :** Στοιχείο δοκού, κατά HETENYI (1946)

Στην ανωτέρω εξίσωση (2.1) βασίστηκαν οι ακόλουθες μέθοδοι, οι οποίες αποτυπώνουν τα ανεξάρτητα μη γραμμικά ελατήρια με καμπύλες εδαφικής αντίδρασης ( $p$ ) συναρτήσει της οριζόντιας μετακίνησης ( $y$ ) κατά μήκος του φρέατος (καμπύλες  $p - y$ , Reese 1984) (Σχήμα 2.2). Το έδαφος ή η βραχώμαζα 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  $y$ .



**Σχήμα 2.2 :** Εξιδανικευμένο προσομοίωμα εδαφικής αντίδρασης εγκάρσια φορτισμένου φρέατος πακτώσεως και καμπύλες  $p - y$

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 οποιουδήποτε άλλου παράγοντα καθορίζει την ανωτέρω συμπεριφορά.

Οι καμπύλες  $p-y$  έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως και με επιτυχία και στο παρελθόν για εγκάρσια φορτισμένα φρέατα, διότι θεωρείται ότι η μη γραμμική προσέγγιση  $p-y$  είναι ένας καλός τρόπος ανάλυσης και σχεδιασμού τους, αρκεί να επιλεγθεί το κατάλληλο κριτήριο  $p-y$ .

Παρουσιάζονται ακολούθως οι πιο βασικές μέθοδοι εκτίμησης της κλίσης του αρχικού ελαστικού κλάδου των καμπυλών  $p - y$ , δηλαδή του δείκτη αρχικής δυσκαμψίας 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.

### 2.2.1 Γραμμικά Ελατήρια Winkler

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

Η σταθερά των ελατηρίων δίνεται από τη σχέση:

$$K_h = \frac{E}{D} \quad (2.2)$$

όπου

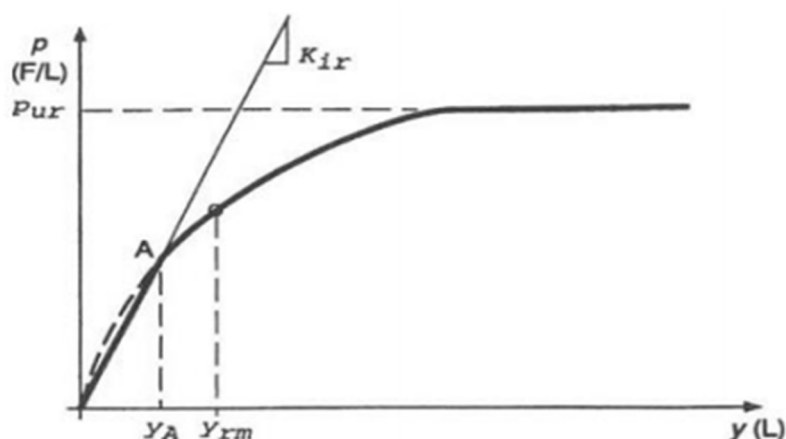
E: το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους/βραχώμαζας, και

D: η διάμετρος του φρέατος

Η μέθοδος ελατηριωτού εδάφους Winkler υποθέτει ότι τα κατανεμημένα ελατήρια δρουν ανεξάρτητα μεταξύ τους, δηλαδή ότι δεν υφίσταται 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 θεμελιωμένα σε βραχώμαζα με υψηλό μέτρο ελαστικότητας).

### 2.2.2 Reese (1997)

Ο Reese (1997) πρότεινε μια μέθοδο για την εκτίμηση των καμπυλών  $p - y$ . Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε από δύο δοκιμές φορτίου 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» με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη  $\sigma_{ci} = 0,5 \sim 5 \text{ MPa}$  οι καμπύλες  $p - y$  έχουν την ακόλουθη μορφή (Σχήμα 2.3):



Σχήμα 2.3 : Καμπύλη  $p-y$ , κατά REESE (1997)

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

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

$$\mathbf{p} = \mathbf{K}_{ir} \mathbf{y} \quad (2.3)$$

II. Ενδιάμεσος, μη γραμμικός κλάδος ( $y \geq y_A$  και  $p \leq p_{ur}$ ):

$$\mathbf{p} = \frac{\mathbf{p}_{ur}}{2} \left( \frac{\mathbf{y}}{\mathbf{y}_{rm}} \right)^{0.25} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{y}_{rm} = \mathbf{k}_{rm} \mathbf{B} \quad (2.5)$$

III. Τελικός κλάδος ( $p = p_{ur}$ ):

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_{ur} \quad (2.6)$$

όπου

$\mathbf{K}_{ir}$ : η αρχική κλίση της καμπύλης

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

$\mathbf{B}$ : 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:

$$y_A = \left[ \frac{\mathbf{p}_{ur}}{2 \mathbf{y}_{rm}^{0.25} \mathbf{K}_{ir}} \right]^{1.333} \quad (2.7)$$

Η αρχική κλίση της καμπύλης  $p - y$ ,  $\mathbf{K}_{ir}$ , που ταυτίζεται με το δείκτη αρχικής δυσκαμψίας της βραχόμαζας κατά την οριζόντια διεύθυνση, προσδιορίζεται συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας (υποθέτοντας ελαστικό, ομοιογενές και ιστροπικό υλικό) από τη σχέση:

$$\mathbf{K}_{ir} = \mathbf{k}_{ir} \mathbf{E}_{ir} \quad (2.8)$$

όπου

$\mathbf{E}_{ir}$ : το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας και

$k_{ir}$ : αδιάστατος συντελεστής που υπολογίζεται ακολούθως:

$$\mathbf{k}_{ir} = \left( 100 + \frac{400 \mathbf{x}_r}{3 \mathbf{B}} \right), \quad 0 \leq \mathbf{x}_r \leq 3 \mathbf{B} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{k}_{ir} = 500, \quad \mathbf{x}_r > 3 \mathbf{B} \quad (2.10)$$

όπου

$x_r$ : το βάθος από την επιφάνεια

Ο Reese (1997) πρότεινε ότι ο αδιάστατος συντελεστής,  $k_{ir}$ , διαφέρει ανάλογα με το βάθος. Οι παραπάνω σχέσεις για το  $k_{ir}$  προέκυψαν προσαρμόζοντας αναλύσεις με χρήση καμπυλών  $p - y$  σε αποτελέσματα δοκιμών φόρτισης πεδίου (ανάστροφες

αναλύσεις), στις οποίες το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας εκτιμήθηκε από δοκιμές πρεσσιομέτρου PMT.

Η οριακή τιμή αντίστασης που αναπτύχθηκε,  $p_{ur}$ , υπολογίζεται βάσει της οριακής ισορροπίας και λαμβάνοντας υπόψιν το βάθος της βραχόμαζας:

$$p_{ur} = a_r q_{ur} b \left( 1 + \frac{1.4 x_r}{b} \right), \quad 0 \leq x_r \leq 3B \quad (2.11)$$

$$p_{ur} = 5.2 a_r q_{ur} b, \quad x_r > 3B \quad (2.12)$$

όπου

$q_{ur}$  : δύναμη συμπίεσης της βραχόμαζας (συνήθως το κατώτερο όριο ως συνάρτηση βάθους),

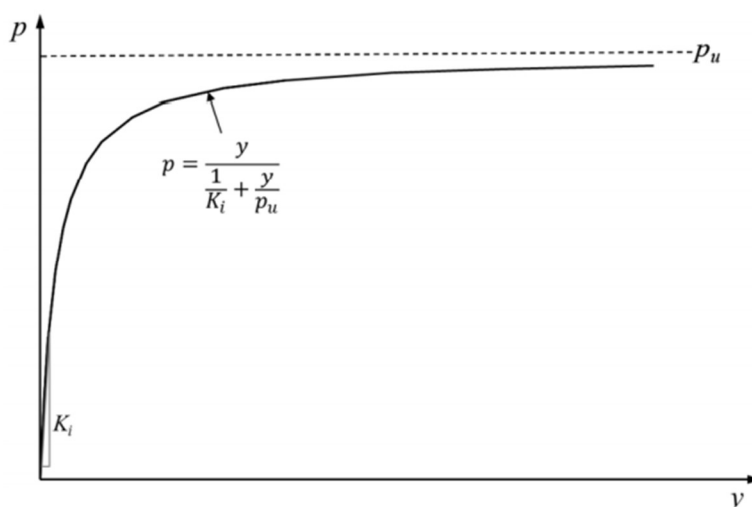
$a_r$  : μειωτικός συντελεστής και

$b$  : πλάτος ή διάμετρος του φρέατος

### 2.2.3 Καμπύλες $p$ - $y$ Υπερβολικής Μορφής

Με στόχο την βελτίωση της μεθοδολογίας χάραξης των καμπύλων  $p$ - $y$  (που προτάθηκαν από τον Reese) σε μαλακούς βραχώδεις σχηματισμούς, διενεργήθηκαν έρευνες από τις πολιτείες της Βόρειας Καρολίνας και του Οχάιο και παρουσιάστηκαν από τους Gabr et al. (2002) και Liang & Yang (2006) αντίστοιχα. Οι καμπύλες που προτάθηκαν βασίζονται στην παρακάτω υπερβολική σχέση (σχέση 2.13) μεταξύ της εγκάρσιας εδαφικής αντίδρασης ( $p$ ) και της εγκάρσιας μετατόπισης ( $y$ ) και έχουν τη μορφή που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 2.4):

$$p = \frac{y}{\frac{1}{K_h} + \frac{y}{p_u}} \quad (2.13)$$



Σχήμα 2.4 : Καμπύλη  $p$ - $y$  υπερβολικής μορφής

### 2.2.3.1 Gabr et al. (2002)

Οι Gabr et al. (2002) πρότειναν μια υπερβολικής μορφής καμπύλη  $p-y$  για φρέατα μικρής διαμέτρου σε μαλακό βράχο, βασιζόμενοι σε εργαστηριακές μελέτες (με Μ.Π.Σ.) και σε δοκιμές πεδίου. Οι δοκιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη και την επαλήθευση του μοντέλου καμπύλης  $p-y$ . Πραγματοποιήθηκαν έξι (6) δοκιμές σε τρεις διαφορετικές θέσεις (Nash-Halifax County, Caldwell County, Wilson County στη Β. Καρολίνα). Οι περιβάλλουσες βραχόμαζες ήταν διαβρωμένος ψαμμίτης, μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος και κρυσταλλικά πετρώματα αντίστοιχα. Επιπλέον, τέσσερις (4) δοκιμές πραγματοποιήθηκαν (County Durham) ως μέρος της μελέτης επαλήθευσης. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων για την βαθμονόμηση των καμπυλών  $p-y$ , χρησιμοποιώντας τιμές του συντελεστή  $k_h$  που προσδιορίστηκαν από δοκιμές πρεσσιομέτρου 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 επιπλέον θέσεις, επίσης μαλακών σχηματισμών, διαφορετικών από αυτούς που προαναφέρθηκαν.

Για τον προσδιορισμό του δείκτη αρχικής δυσκαμψίας 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 αρχικής δυσκαμψίας της βραχόμαζας υπολογίζεται ως εξής:

$$k_h = \frac{0.65 E_m}{B(1 - \nu_r^2)} \left( \frac{B^4 E_m}{E_s I_s} \right)^{\frac{1}{12}} \quad (2.14)$$

όπου:

B: η διάμετρος του φρέατος

$E_m$ : το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας (Hoek – Brown 1997)

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{(GSI-10)}{40}} \text{ (GPa)} \quad (2.15)$$

$\nu_r$ : ο λόγος Poisson της βραχόμαζας

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

Για βάθη μεγαλύτερα από το σημείο περιστροφής η σχέση πολλαπλασιάζεται με έναν εμπειρικό συντελεστή  $I_T$ :

$$I_T = -28 - 383 \log \left( \frac{T_0}{L} \right) \quad (2.16)$$

όπου:

L: το μήκος του φρέατος

$T_0$ : το βάθος περιστροφής

Έτσι η σχέση 2.14 γίνεται:

$$k_h = I_T \frac{0.65 E_m}{B(1 - \nu_T^2)} \left( \frac{B^4 E_m}{E_s I_s} \right)^{\frac{1}{12}} \quad (2.17)$$

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

$$K_h = k_h B \quad (2.18)$$

Η οριακή τιμή αντοχής του βράχου υπολογίζεται από τη σχέση των Zhang et al. (2000):

$$p_u = (p_L + \tau_{\max}) \quad (2.19)$$

όπου:

$p_L$ : υπολογίζεται με βάση το κριτήριο Hoek & Brown (1997) και

$$\tau_{\max} = 0.2 \sigma_{ci}^{0.5} \text{ (MPa)}$$

Με βάση τα ανωτέρω μορφώνεται η εξίσωση (2.13) της υπερβολικής καμπύλης p-y.

Παρατήρηση:

Οι αναλύσεις που συμπεριέλαβαν τιμές από δοκιμές πρεσσιομέτρου PMT παρείχαν αποτελέσματα που συμφωνούσαν με τα εκείνα των δοκιμών φόρτισης πεδίου. Εντούτοις, δε συνεκτιμήθηκε η μη-γραμμική συμπεριφορά του σκυροδέματος του φρέατος, η οποία μειώνει τις παραμορφώσεις περισσότερο από τα κριτήρια p-y. Κατά συνέπεια, ένας περιορισμός για την εφαρμογή του κριτηρίου αυτού από τους Gabr et al. (2002) 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.

### 2.2.3.2 Liang & Yang (2006)

Στο Οχάιο οι Liang and Yang (2006) πρότειναν ένα υπερβολικό κριτήριο ανάπτυξης καμπύλων p-y με βάση τόσο τα θεωρητικά παράγωγα όσο και τα αριθμητικά (πεπερασμένα στοιχεία) αποτελέσματα ανάλυσης. Για την επικύρωση των αποτελεσμάτων τους πραγματοποίησαν δύο (2) δοκιμές πλευρικού φορτίου πλήρους κλίμακας στο πεδίο.

Αν και το προτεινόμενο κριτήριο p-y έχει την ίδια μαθηματική εξίσωση με εκείνη των Gabr et al. (2002) (σχέση 2.13), οι εξισώσεις για τον υπολογισμό του δείκτη αρχικής δυσκαμψίας, του μέτρου ελαστικότητας και της οριακής αντοχής της βραχόμαζας είναι διαφορετικές.

Με βάση σχετική παραμετρική μελέτη, χρησιμοποιώντας τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων κατέληξαν στην ακόλουθη εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό του δείκτη αρχικής δυσκαμψίας (εφαπτομένη του αρχικού κλάδου της καμπύλης p-y) :

$$K_h = E_m \left( \frac{B}{B_{\text{ref}}} \right) e^{-2\nu_T} \left( \frac{E_s I_s}{E_m B^4} \right)^{0.284} \quad (2.20)$$

όπου:

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

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποίησαν την παρακάτω εξίσωση, που αναπτύχθηκε με βάση τα δεδομένα δοκιμής διατόμετρου των Iron-ton Russell και ιστορικά δεδομένα από τους Bieniawski (1978) και Serafin & Pereira (1983):

$$E_m = \frac{E_r}{100} e^{GSI/21.7} \quad (2.21)$$

όπου:

$E_r$ : μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου βράχου

Τέλος για τον υπολογισμό της οριακής αντοχής κοντά στην επιφάνεια:

$$p_u = 2C_1 \cos\theta \sin\beta + C_2 \sin\beta + C_3 \cos\beta - 2C_4 \sin\theta - C_5 \quad (2.22)$$

και σε μεγάλο βάθος:

$$p_u = \left( \frac{\pi}{4} p_L + \frac{2}{3} \tau_{max} - p_a \right) B \quad (2.23)$$

όπου

$p_L$ : υπολογίζεται με βάση το κριτήριο Hoek & Brown (1997) και

$\tau_{max}$  βασίζεται στην εξίσωση των Kulhawy and Phoon (1993)

Ο πίνακας 2.1 περιέχει τις σχέσεις για τον υπολογισμό των συντελεστών της οριακής αντοχής.

**Πίνακας 2.1** : Συντελεστές για τον υπολογισμό οριακής αντοχής

$C_1$	$H \tan \beta \sec \theta (c' + K_0 \sigma'_{v0} \tan \varphi' + \frac{H}{2} K_0 \gamma' \tan \varphi')$
$C_2$	$C_3 \tan \varphi' (D \sec \beta + 2H \tan \beta \sec \beta \tan \theta)$
$C_3$	$\frac{D \tan \beta (\sigma'_{v0} + H\gamma') + H \tan^2 \beta \tan \theta (2\sigma'_{v0} + H\gamma') + c'(D + 2H \tan \beta \tan \theta) + 2C_1 \cos \beta \cos \theta}{\sin \beta - \tan \varphi' \cos \beta}$
$C_4$	$K_0 H \tan \beta \sec \theta (\sigma'_{v0} + 0.5\gamma' H)$
$C_5$	$\gamma' K_a (H - z_0) \geq 0$
$K_a$	$\tan^2(45 - \varphi'/2)$
$K_0$	$1 - \sin \varphi'$
$z_0$	$\frac{2c'}{\gamma' \sqrt{K_a}} - \frac{\sigma'_{v0}}{\gamma'}$
$\theta$	$\varphi'/2$
$\beta$	$45 + \varphi'/2$
$p_a$	$K_a \sigma'_v - 2c' \sqrt{K_a}$
$\tau_{max}$	$0.45 \sigma_{ci}^{0.5}$ (MPa)



### Παρατήρηση:

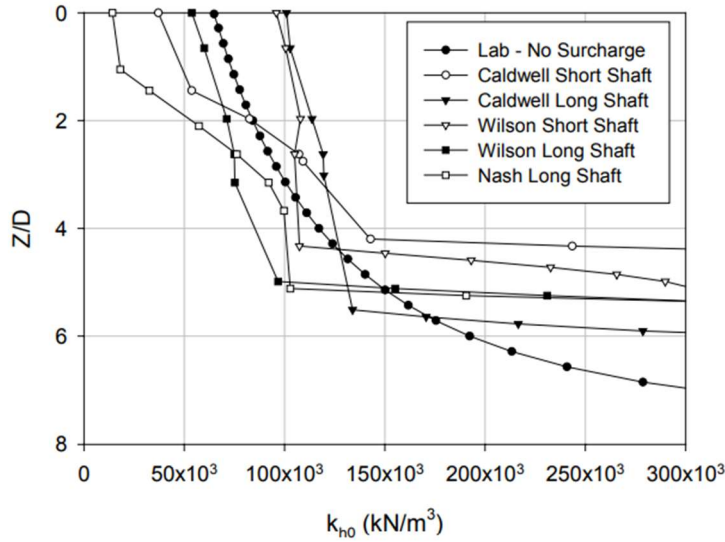
Η επιλογή της μεθόδου για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας αποτελεί σημαντική αστάθμητη παράμετρο στην εφαρμογή της εκάστοτε μεθοδολογίας καμπυλών  $p - y$ . Σε κάποιες περιπτώσεις, η πραγματική απόκριση του φρέατος προσεγγίζεται καλύτερα από τις καμπύλες που συμπεριλαμβάνουν μέτρο ελαστικότητας μετρούμενο από τα όργανα PMT, ενώ σε άλλες προσεγγίζεται καλύτερα μέσω καμπυλών 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  $p - y$  για την ανάλυση βασίζονται σε αυτό.

#### **2.2.4 Cho (2002)**

Ο Cho (2002) δημοσίευσε τα αποτελέσματα ενός εκτεταμένου ερευνητικού προγράμματος, χρηματοδοτούμενο από το Τμήμα Μεταφορών της Βόρειας Καρολίνας που διενεργήθηκε στο Πανεπιστήμιο της Β. Καρολίνας, με στόχο να μελετήσει το μοντέλο καμπύλης  $p-y$  σε μαλακό βράχο κατά Gabr et al. Το ερευνητικό πρόγραμμα αποτελούνταν από τρία συμπληρωματικά μέρη, την προσομοίωση με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, εργαστηριακές δοκιμές στο προσομοιωμένο υλικό για να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά των καμπυλών  $p-y$  και τέλος δοκιμές στο πεδίο με φρέατα πλήρους κλίμακας. Ο Cho πραγματοποίησε κι αυτός έξι (6) δοκιμές πεδίου πλήρους φόρτισης. Επιπρόσθετα, συστάθηκαν συντηρητικές αλλά ακριβείς διαδικασίες σχεδιασμού για το προσομοίωμα ασθενούς βραχόμαζας. Οι δοκιμές έγιναν σε βραχόμαζα διαφορετική από εκείνη στην οποία είχαν γίνει οι δοκιμές για την ανάπτυξη του προσομοιώματος και συγκεκριμένα σε ασθενή βραχόμαζα τριαδικής περιόδου (Triassic Weathered Rock). Επίσης συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών με προβλέψεις που έγιναν βάσει προγενέστερων μεθοδολογιών σχεδιασμού.

Ο Cho χρησιμοποίησε και αυτός την υπερβολικής μορφής καμπύλη  $p-y$  (σχέση 2.13). Για τον υπολογισμό του δείκτη δυσκαμψίας της βραχόμαζας πρότεινε δύο μεθόδους, μία πρώτη που βασίζεται σε εμπειρικές εξισώσεις χρησιμοποιώντας γεωλογικές παραμέτρους και μια δεύτερη με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής διλατομέτρου.

Ο Cho διαπίστωσε ότι ο δείκτης  $k_{ho}$  δεν αυξανόταν γραμμικά με το βάθος, αλλά ακολουθούσε περισσότερο μια εκθετικής μορφή συνάρτησης (σχήμα 2.5). Για το λόγο αυτό πρότεινε, προκειμένου να εξαχθούν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, ο δείκτης της βραχόμαζας να υπολογίζεται σε δύο ξεχωριστές περιοχές, πάνω και κάτω από το σημείο περιστροφής του φρέατος.



Σχήμα 2.5 : Κατανομές δείκτη  $k_{h0}$  από εργαστηριακές δοκιμές και δοκιμές πεδίου

Το βάθος του σημείου περιστροφής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{T}_0 = \mathbf{L}(1 + 0.18 \log \mathbf{K}_R) \quad (2.24)$$

όπου:

ο συντελεστής σχετικής δυσκαμψίας κατά Poulos & Davis (1980) είναι

$$\mathbf{K}_R = \frac{E_p I_p}{E_s L^4}$$

$L$  : μήκος φρέατος

$E_s$  : μέτρο ελαστικότητας βραχόμαζας κατά Hoek & Brown (σχέση 2.15)

$E_p, I_p$  : μέτρο ελαστικότητας κι ροπή αδρανείας του φρέατος

I. Υπολογισμός του δείκτη της βραχόμαζας με εμπειρικές εξισώσεις

$$\mathbf{k}_h = (\mathbf{k}_{h0} + \mathbf{n}_h \mathbf{z}) \mathbf{B}, \quad \mathbf{0} \leq \mathbf{z} < \mathbf{T}_0 \quad (2.25)$$

$$\mathbf{k}_h = [(\mathbf{k}_{h0} + \mathbf{n}_h \mathbf{T}_0) + \mathbf{n}_h (\mathbf{z} - \mathbf{T}_0)] \mathbf{I}_T \mathbf{B}, \quad \mathbf{T}_0 \leq \mathbf{z} \leq \mathbf{L} \quad (2.26)$$

όπου  $k_{h0}$  η τιμή του δείκτη βραχόμαζας στην επιφάνεια, με

$$k_{h0} = \sqrt{\sigma_{ci} 10^3} 10^{GSI-10/40} \quad (\text{kN/m}^4)$$

$n_h$  ο συντελεστής κατανομής με το βάθος, με

$$n_h = \left( \frac{2E_p I_p}{k_{h0} L^4} \right) 10^5 \quad (\text{kN/m}^4)$$

Και  $B$  η διάμετρος του φρέατος

II. Υπολογισμός του δείκτη της βραχόμαζας με βάση τη δοκιμή διατομέτρου

$$\mathbf{k}_h = \mathbf{k}_{h0} \mathbf{B}, \quad \mathbf{0} \leq \mathbf{z} < \mathbf{T}_0 \quad (2.27)$$

$$\mathbf{k}_h = \mathbf{k}_{h0} \mathbf{I}_T \mathbf{B}, \quad \mathbf{T}_0 \leq \mathbf{z} \leq \mathbf{L} \quad (2.28)$$

όπου  $k_{h0}$  τιμή του δείκτη βραχόμαζας στην επιφάνεια, με

$$k_{h0} = 2(1 + \nu_r)(\nu_0 + \nu_m) \frac{1}{\frac{\Delta v}{\Delta p - \Delta p_i} - c}$$

Τέλος, ο εμπειρικός συντελεστής προσαύξησης του  $k_h$  είναι ίδιος με την σχέση (2.16) για βάθη μεγαλύτερα από το σημείο στροφής :

$$I_T = -28 - 383 \log\left(\frac{T_0}{L}\right) \quad (2.29)$$

Όμως, στην περίπτωση βραχόμαζας της τριαδικής εποχής όπου δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη αύξηση, ο συντελεστής γίνεται :

$$I_T = 1.5 - 8 \log\left(\frac{T_0}{L}\right) \quad (2.30)$$

### 2.2.5 Carter (1984)

Ο Carter (1984) τροποποίησε τη σχέση υπολογισμού του Vesic που προαναφέρθηκε (σχέση 2.14), έπειτα από αποτελέσματα δοκιμών που λάμβαναν υπόψη την αποκόλληση του εδάφους από τα τοιχώματα του φρέατος, λόγω του εγκάρσιου φορτίου. Αρχικά η εξίσωση τροποποιήθηκε για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της διαμέτρου του φρέατος ( $D/D_{ref}$ ), ενώ ο αρχικός συντελεστής του Vesic (0.65) διπλασιάστηκε επειδή το έδαφος βρίσκεται και στις δύο πλευρές του. Ο Carter πρότεινε την απομείωση του συντελεστή από 1.30 σε 1.00, καθόσον παρατηρήθηκε αποκόλληση. Άρα η σχέση γίνεται τελικώς :

$$k_h = \frac{1.00 E_m}{(1 - \nu_r^2)} \left( \frac{E_m D^4}{E_p I_p} \right)^{1/12} \frac{D}{D_{ref}} \quad (2.31)$$

όπου:

E: το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας

$\nu$ : ο λόγος Poisson

D: η διάμετρος του φρέατος

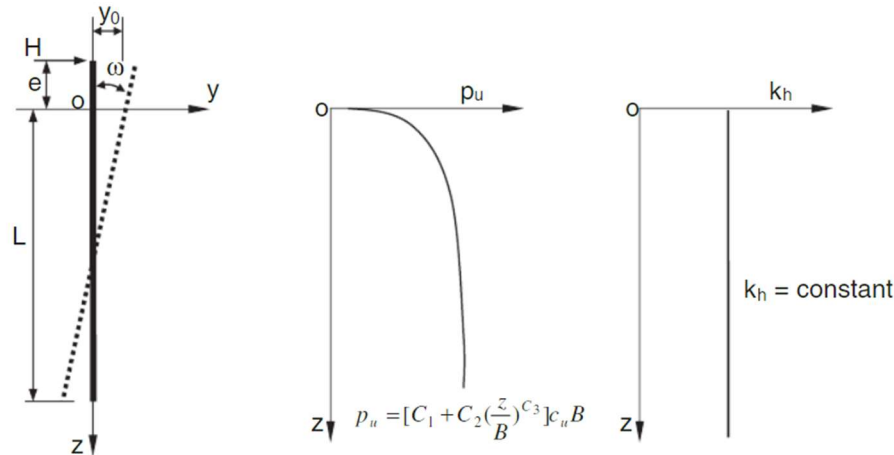
$D_{ref}$ : τιμή για τον συσχετισμό της διαμέτρου (=1m)

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

### 2.2.6 Zhang & Ahmari (2009)

Οι Zhang και Ahmari ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για τη μη γραμμική ανάλυση των πλευρικά φορτισμένων άκαμπτων πασσάλων σε συνεκτικό έδαφος (υπερστερεοποιημένη άργιλος υπό εγκάρσια φόρτιση). Η μέθοδος βασίζεται σε καμπύλες  $p - \gamma$  ανεξάρτητων μη γραμμικών ελατηρίων. Για να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος που περιγράφηκε ανωτέρω για την ανάλυση ενός πλευρικά φορτισμένου άκαμπτου

φρέατος σε συνεκτικό έδαφος, πρέπει να προσδιοριστεί τόσο η οριακή πλευρική αντίσταση ( $p_u$ ) όσο και ο δείκτης της βραχώμαζας ( $k_h$ ).



Σχήμα 2.6 : Μεθοδολογία Zhang & Ahmari (2009)

Ο δείκτης  $k_h$  θεωρείται σταθερός με το βάθος (σχήμα 2.6) στις υπερστερεοποιημένες αργίλους, ακριβώς όπως συμβαίνει και για τις μαλακές βραχώμαζες. Επίσης, συσχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας  $E_s$  και εξαρτάται από τη σχετική δυσκαμψία του συστήματος εδάφους – φρέατος. Η σχέση που προσδιορίζει το δείκτη  $k_h$  είναι η σχέση του Glick, η οποία συνεκτιμά και την επιρροή της γεωμετρίας της θεμελίωσης:

$$k_h = \frac{22.4 E_s (1 - \nu)}{(1 + \nu)(3 - 4\nu) \left[ 2 \ln \left( \frac{2L}{B} \right) - 0.443 \right]} \quad (2.32)$$

όπου:

$L, B$  : μήκος κι διάμετρος φρέατος αντίστοιχα

$E_s, \nu$  : μέτρο ελαστικότητας κι δείκτης βραχώμαζας

Η οριακή πλευρική αντίσταση του εδάφους ( $p_u$ ) μεταβάλλεται μη γραμμικά σε σχέση με το βάθος (σχήμα 2.6) και περιγράφεται από την παρακάτω έκφραση κλειστής μορφής :

$$p_u = \left[ C_1 + C_2 \left( \frac{z}{B} \right)^{C_3} \right] c_u B \quad (2.33)$$

όπου:

$$C_1 = 2.5$$

$$C_2 = \frac{\gamma' B}{c_u} + 5.5$$

$$C_3 = 0.1$$

### 2.2.7 Παρατηρήσεις

Οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν τις καμπύλες  $p - \gamma$  εφαρμόζονται εκτενώς μέχρι σήμερα. Ωστόσο υπάρχουν δύο βασικοί περιορισμοί στην εφαρμογή των μεθόδων εδαφικής αντίδρασης, που 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 σχετική θεωρία συστήνουν την καθιέρωση αυτών των καμπυλών σε διαφόρους τύπους εδαφών. Και αυτό γιατί έχουν πολλά πλεονεκτήματα για την εφαρμογή τους.

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 σπλισμένο 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 απαιτούνται για το δομικό σχεδιασμό του φρέατος συναρτήσει του βάθους,
- 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  $p - \gamma$  ώστε να επιτευχθεί ταύτιση με τις μετρούμενες μετακινήσεις (Brown et al. 1994).

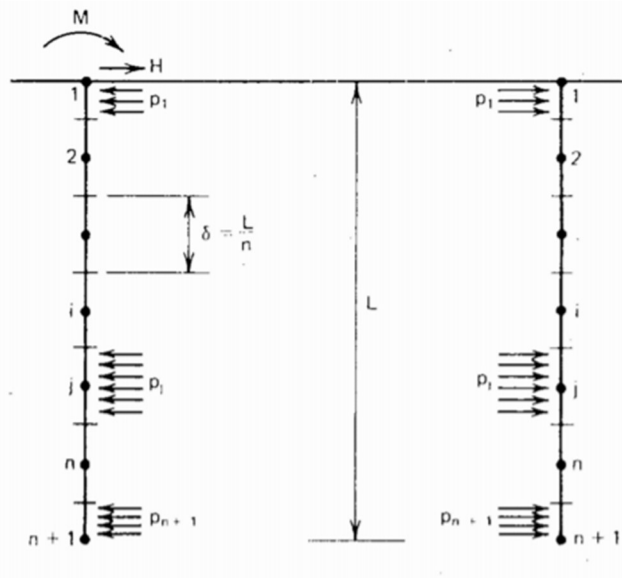
### 2.3 Θεωρία Συνεχούς Ελαστικού Μέσου

Μια δεύτερη ομάδα μεθόδων υπολογισμού της ενδοσιμότητας βασίζεται στη θεωρία του συνεχούς ελαστικού μέσου. Οι απαρχές της προσέγγισης αυτής αποδίδονται στον Roulos (1971-1972), ο οποίος πρότεινε μια αριθμητική λύση βασιζόμενη στη μέθοδο των συνοριακών στοιχείων, με έναν πάσσαλο να προσομοιώνεται ως μια λεπτή ελαστική λωρίδα και το έδαφος ως ομοιογενές, ισότροπο, ελαστικό υλικό. Η μέθοδος αυτή είχε ως σκοπό να προσομοιώσει πακτωμένους πασσάλους με δύο διαφορετικές συνοριακές συνθήκες στην κεφαλή τους (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).

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.

Η μέθοδος αναπτύχθηκε περαιτέρω από τουςoulos and Davis (1980). Όπως φαίνεται στο σχήμα (2.7), ο πάσσαλος χωρίστηκε σε τμήματα ίσου μήκους τμήματος, εκτός από το πάνω και το κάτω μέρος του. Η απόκριση του συστήματος αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλου υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη ένα ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο σε κάθε τμήμα, ενώ η διατμητική τάση στη διεπαφή των πλευρών του παραμελήθηκε. Περαιτέρω, η οριζόντια μετατόπιση σε κάθε τμήμα μπορεί να υπολογιστεί εξισώνοντας τις μετατοπίσεις πασσάλου – εδάφους στο μέσο κάθε τμήματος.



Σχήμα 2.7 : Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου των Poulos & Davis (1980)

Στη συνέχεια παρουσίασαν μια σειρά μαθηματικών εξισώσεων για τον υπολογισμό της μετατόπισης ( $\delta$ ) κι στροφής ( $\theta$ ) της κεφαλής του πασσάλου στην επιφάνεια του εδάφους :

$$\delta = \frac{\frac{P}{N_h L^2} \left( I'_{\delta P} + \frac{e}{L} I'_{\theta M} \right)}{F'_{\delta}} \quad (2.34)$$

$$\theta = \frac{\frac{P}{N_h L^3} \left( I'_{\theta P} + \frac{e}{L} I'_{\theta M} \right)}{F'_{\theta}} \quad (2.35)$$

όπου:

$N_h$  ο ρυθμός μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το βάθος, με

$$N_h = \frac{\Delta E_s}{\Delta z}$$

e η εκκεντρότητα της φόρτισης, με

$$e = M/P$$

$I'_{\delta P}$ ,  $I'_{\delta M}$ ,  $I'_{\theta P}$ ,  $I'_{\theta M}$  : συντελεστές επιρροής μετακίνησης κι στροφής αντίστοιχα

$F'_{\delta}$ ,  $F'_{\theta}$  : παράγοντες απόδοσης μετακίνησης κι στροφής αντίστοιχα

L: μήκος του πασσάλου

### 2.3.1 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 αρχικής δυσκαμψίας βραχόμαζας, ανάλογος του δείκτη εδάφους) δίνεται από τη σχέση:

$$k_v = \frac{2\xi}{\pi(1+\nu)} \frac{E}{D} \quad (2.36)$$

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

$$K_{\varphi} = \frac{1}{12} k_v \pi^2 R^4 \quad (2.37)$$

ή ισοδύναμα:

$$K_{\varphi} = \frac{\pi\xi}{12(1+\nu)} ER^3 \quad (2.38)$$

Όπου:

R: η ακτίνα του φρέατος,

E: το μέτρο ελαστικότητας του βραχόμαζας,

$\nu$ : ο λόγος Poisson της βραχόμαζας, και

$\xi$ : μία παράμετρος που εξαρτάται από το βάθος (c) της βάσης του φρέατος και δίνεται από τον ακόλουθο πίνακα (2.2):

**Πίνακας 2.2 :** Τιμές της παραμέτρου ( $\xi$ ) για διάφορα σχετικά βάθη ( $c/D$ )

$c/D$	$\xi$
0	2.9
1	4.3
2	5.0
3	5.4
4	5.7
5	6.0

### 2.3.2 Μέθοδος Douglas and Davis (1964)

Η μέθοδος των “Douglas and Davis” (1964) αναφέρεται στην περίπτωση ενός άκαμπτου φρέατος, πλάτους ( $B$ ) και μήκους ( $L$ ), το οποίο είναι εγκλιβωτισμένο σε έναν ελαστικό ημίχωρο με μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ) και λόγο Poisson ( $\nu$ ) ίσο με 0.50. Αν και μέθοδος αναφέρεται στην περίπτωση όπου λόγος Poisson είναι ίσος με 0.50, μπορεί να εφαρμοσθεί και για άλλες τιμές του λόγου Poisson χωρίς σημαντικά σφάλματα.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου, μετά το πέρας των σχετικών αναλύσεων, καταλήγουν στην έκφραση της μετακίνησης ( $u$ ) και της στροφής ( $\theta$ ) της κεφαλής του φρέατος πακτώσεως, μέσω των ακόλουθων σχέσεων :

$$u = I_{hM} \frac{M}{EBL} + I_{hH} \frac{H}{EB} \quad (2.39)$$

$$\theta = I_{\theta M} \frac{M}{EBL^2} + I_{\theta H} \frac{H}{EBL} \quad (2.40)$$

όπου:

$I_{ij}$  : είναι συντελεστής επιρροής για την μετατόπιση  $i$  υπό την φόρτιση στον βαθμό ελευθερίας  $j$ . Οι τιμές αυτών των συντελεστών εξαρτώνται από τον λόγο  $L/B$  του φρέατος, και κατά προσέγγιση δίνονται από τις παρακάτω αναλυτικές σχέσεις :

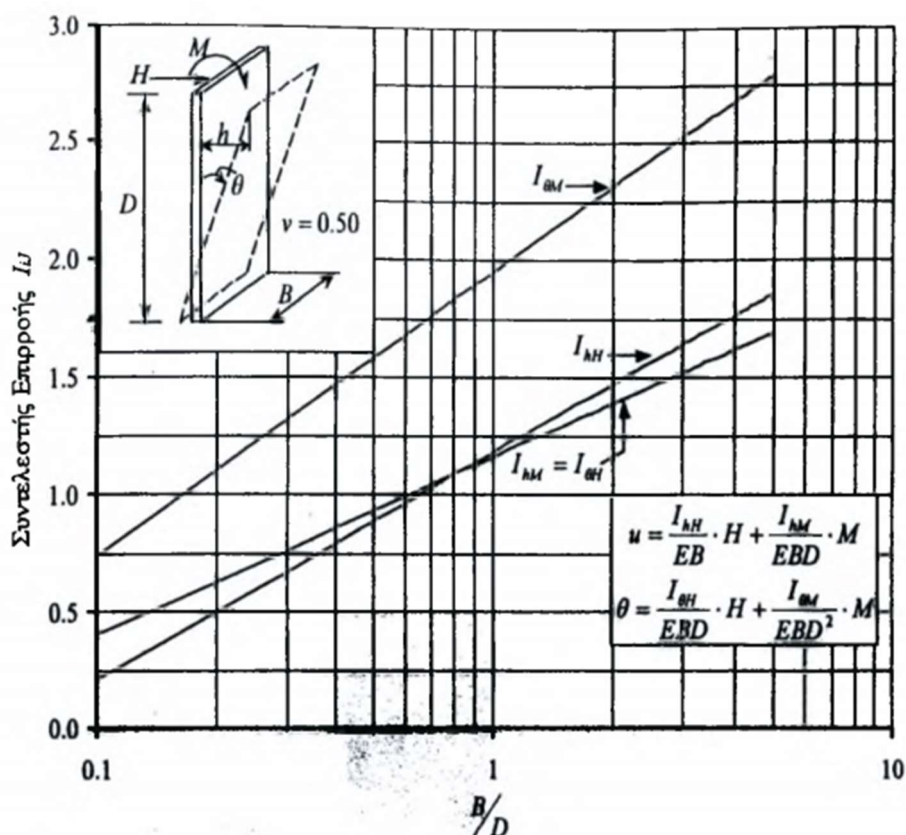
$$I_{hH} = 1.18 - 0.97 \log\left(\frac{L}{B}\right) \quad (2.41. a)$$

$$I_{\theta M} = 1.95 - 1.21 \log\left(\frac{L}{B}\right) \quad (2.41. b)$$

$$I_{\theta H} = I_{hM} = 1.16 - 0.76 \log\left(\frac{L}{B}\right) \quad (2.41. c)$$



Οι συντελεστές επιρροής μπορούν να υπολογιστούν από το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 2.8) που πρότειναν οι Douglas & Davis (1964) :



Σχήμα 2.8 : Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστών επιρροής κατά Douglas & Davis ( $B^*=L, D^*=B$ )

Ακολουθεί ένας πίνακας (2.3) που περιλαμβάνει τυπικές τιμές των συντελεστών επιρροής :

Πίνακας 2.3 : Τυπικές τιμές των συντελεστών  $I_{ij}$

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

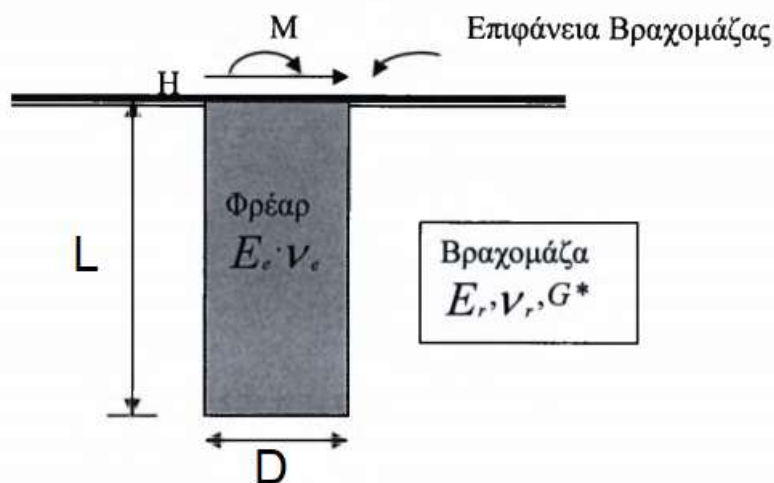
### 2.3.3 Μέθοδος Carter and Kulhawy (1992)

Ο Randolph (1981) ανέπτυξε περαιτέρω την προσέγγιση συνεχούς ελαστικού μέσου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αν και οι λύσεις που παρουσίασε καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συνθηκών για εύκαμπτα φρέατα και παρουσιάζονται σε εξισώσεις κλειστής μορφής, οι λύσεις δεν καλύπτουν επαρκώς το πλήρες φάσμα των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των φρεάτων στην

πράξη. Οι Carter και Kulhawy (1992) επέκτειναν αυτήν την προσέγγιση σε άκαμπτα και φρέατα ενδιάμεσης δυσκαμψίας, που οδήγησε σε πρακτικά αναλυτικά εργαλεία για προσδιορισμό της μετακίνησης και στροφής του φρέατος.

Η απεικονιστική θεώρηση του εξεταζόμενου προβλήματος παρουσιάζεται στο σχήμα (2.9), όπου αναπαρίστανται οι συνθήκες όπου το φρέαρ είναι στην επιφάνεια του εδάφους και φορτίζεται εγκάρσιως με τέμνουσα και ροπή. Για το φρέαρ γίνεται η παραδοχή ότι είναι ένα κυλινδρικό ελαστικό δομικό στοιχείο με μέτρο ελαστικότητας Young  $E_e$ , λόγο Poisson  $\nu_e$ , ύψος  $L$  και διάμετρο  $D$ .

Γίνεται παραδοχή ότι το φρέαρ, το οποίο θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ως απολύτως ελαστικό υλικό, κατασκευάζεται σε μία ομογενή, ισότροπη, ελαστική βραχομάζα με παραμέτρους αντοχής  $E_r$ ,  $G^*$  και  $\nu_r$ . Στην επιφάνεια της βραχομάζας το φρέαρ πακτώσεως φορτίζεται με μία γνωστή εγκάρσια (οριζόντια) δύναμη ( $H$ ) και με μία ροπή ανατροπής ( $M$ ). Θα πρέπει να τονισθεί ότι παρούσα μέθοδος εφαρμόζεται σε βραχομάζες οι οποίες δεν έχουν κλίση ως προς την οριζόντια διεύθυνση.



Σχήμα 2.9 : Εγκάρσια φόρτιση φρέατος πακτώσεως σε βραχομάζα

Για ένα συμπαγές φρέαρ, το οποίο έχει μία πραγματική καμπτική δυσκαμψία ίση με  $(EI)_e$ , το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του Young δίνεται από την σχέση :

$$E_e = \frac{(EI)_e}{\frac{\pi D^4}{64}} \quad (2.42)$$

Μία εκτενής παραμετρική μελέτη υλοποιήθηκε για φρέατα πακτώσεως με μεγάλο εύρος σχετικής δυσκαμψίας, απ' όπου προέκυψε ότι οι συνέπειες των μεταβολών του λόγου του Poisson στην διατμητική ακαμψία της βραχομάζας  $G^*$  εκφράζεται ως εξής :

$$G^* = G_r \left( 1 + \frac{3\nu_r}{4} \right) \quad (2.43)$$

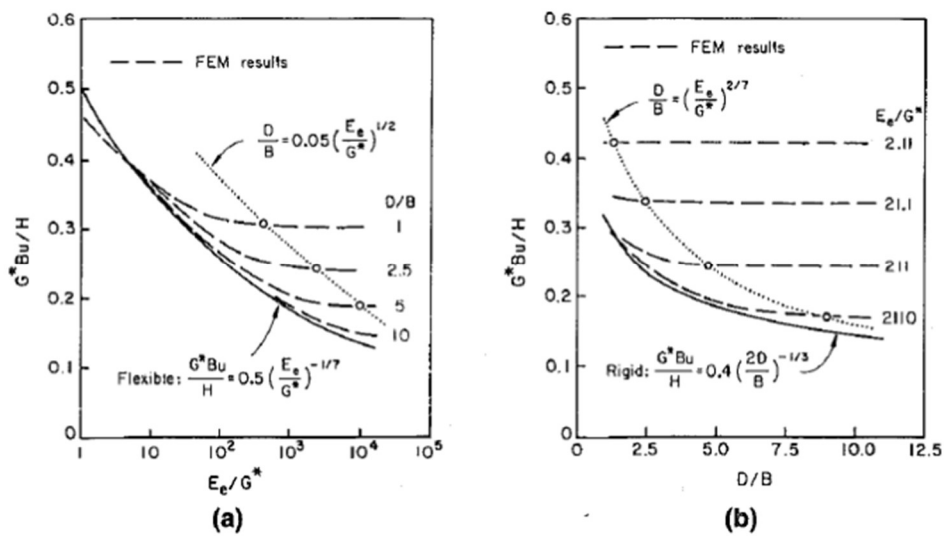
όπου

$G_r$ : το μέτρο διάτμησης της ελαστικής βραχομάζας.

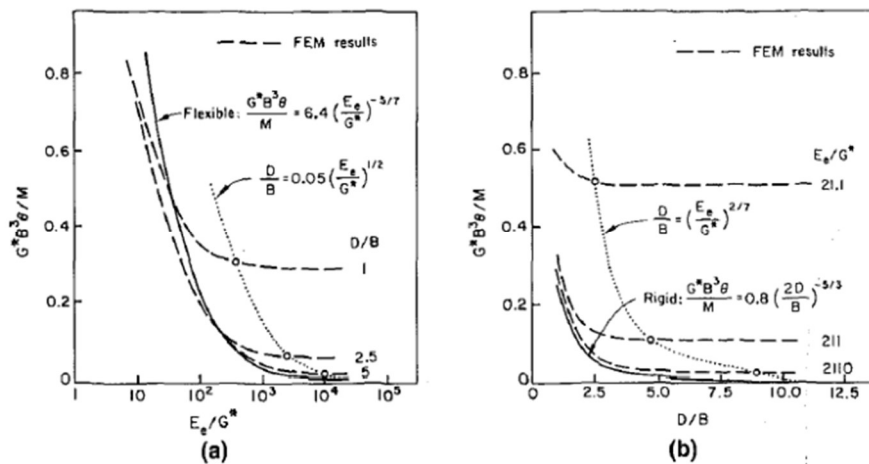
Σε μία ισότροπη βραχομάζα το μέτρο διάτμησης συσχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας ( $E_r$ ) και τον λόγο Poisson ( $\nu_r$ ) σύμφωνα με την σχέση :

$$G_r = \frac{E_r}{2(1 + \nu_r)} \quad (2.44)$$

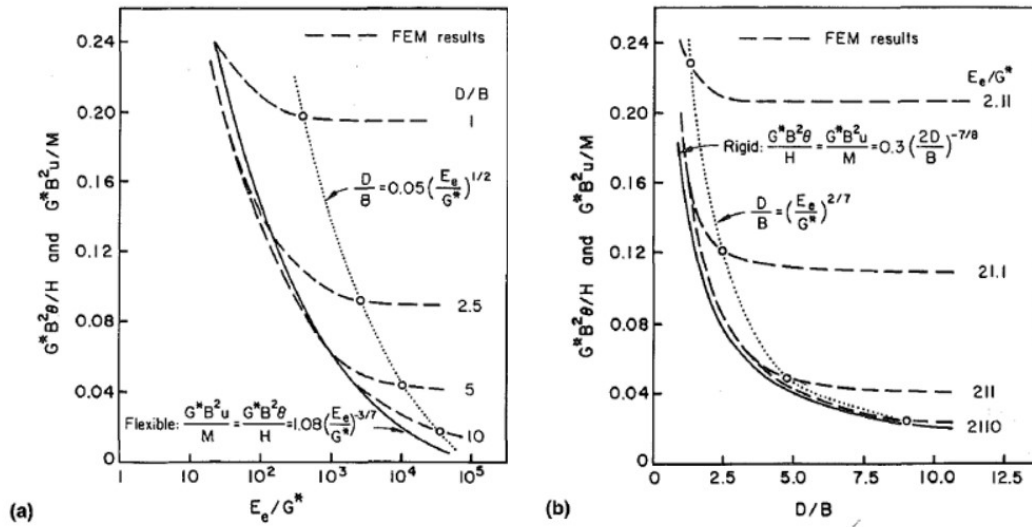
Οι Carter και Kulhawy έπειτα από τις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία χάραξαν διαγράμματα αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων κι στροφών συναρτήσει των λόγων ( $E_e/G^*$ ) και ( $L/D$ ) (σχήματα 2.10, 2.11, 2.12). Στα διαγράμματα αυτά προσδιόρισαν τα κάτω όρια ανεξαρτητοποίησης των παραμορφώσεων από αυτούς τους λόγους (οριζοντίωση των καμπύλων) και καθόρισαν τα κριτήρια δυσκαμψίας των φρεάτων (εστιγμένες καμπύλες).



Σχήμα 2.10 : Διάγραμμα αδιαστατοποιήμενης μετακίνησης – οριζοντίου φορτίου συναρτήσει : (α) του λόγου ( $E_e/G^*$ ) και (β) του λόγου ( $L/D=D^*/B^*$ )



Σχήμα 2.11 : Διάγραμμα αδιαστατοποιήμενης στροφής – ροπής συναρτήσει : (α) του λόγου ( $E_e/G^*$ ) και (β) του λόγου ( $L/D=D^*/B^*$ )



Σχήμα 2.12 : Διάγραμμα αδιαστατοποιήμενης μετακίνησης – οριζοντίου φορτίου και αδιαστατοποιήμενης στροφής – ροπής συναρτήσεσι : (α) του λόγου  $(E_e/G^*)$  και (β) του λόγου  $(L/D=D^*/B^*)$

### 2.3.3.1 Δυσκαμψία Φρεάτων κατά τους Carter & Kulhawy

- ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΦΡΕΑΤΑ

Σύμφωνα με τον Randolph (1981) ένα φρέαρ μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα εύκαμπτο όταν :

$$\frac{L}{D} \geq \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{2/7} \quad (2.45)$$

Σε αυτή την περίπτωση η απόκριση του φρέατος εξαρτάται μόνο από τον λόγο των δεικτών  $(E_e/G^*)$  και τον λόγο Poisson ( $\nu_r$ ) κι όχι από τις διαστάσεις του φρέατος. Η παραπάνω διαπίστωση γίνεται αντιληπτή και στα διαγράμματα των Carter και Kulhawy, όπου παρατηρείται οριζοντίωση των καμπυλών στις περιοχές που ισχύει η παραπάνω ανίσωση (σχέση 2.45).

Οι εξισώσεις που προτάθηκαν από τον Randolph είναι :

$$u = 0.5 \left(\frac{H}{G^*D}\right) \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{-1/7} + 1.08 \left(\frac{M}{G^*D^2}\right) \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{-3/7} \quad (2.46)$$

$$\theta = 1.08 \left(\frac{H}{G^*D^2}\right) \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{-3/7} + 6.40 \left(\frac{M}{G^*D^3}\right) \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{-5/7} \quad (2.47)$$

Αυτές οι σχέσεις παρέχουν ακριβή υπολογισμό των μετακινήσεων και των στροφών αντίστοιχα για το εξής εύρος των παραμέτρων (Randolph):

$$10^2 \leq E_e/E_r \leq 10^6 \text{ και } L/D \geq 10$$

Οι Carter & Kulhawy παρατήρησαν ότι η εφαρμογή των σχέσεων μπορεί να επεκταθεί σε :

$$1 \leq E_e/E_r \leq 10^6 \text{ και } L/D \geq 1$$

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να γραφτούν και με την μορφή των Douglas & Davis (σχέσεις 2.39, 2.40) θεωρώντας ως συντελεστές επιρροής :

$$I_{hH} = 0.5 \left( \frac{E_r}{G^*} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-1/7} \quad (2.48. a)$$

$$I_{\theta M} = 6.4 \left( \frac{E_r}{G^*} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^2 \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-5/7} \quad (2.48. b)$$

$$I_{\theta H} = I_{hM} = 1.08 \left( \frac{E_r}{G^*} \right) \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-3/7} \quad (2.48. c)$$

- ΑΚΑΜΠΤΑ ΦΡΕΑΤΑ

Το φρέαρ θεωρείται πλήρως άκαμπτο όταν:

$$\frac{L}{D} \leq 0.05 \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{1/2} \quad (2.49)$$

Σε αυτή την περίπτωση η απόκριση του φρέατος εξαρτάται μόνο από τις διαστάσεις του φρέατος και τον λόγο Poisson ( $\nu_r$ ) κι όχι από την σχετική δυσκαμψία φρέατος-βραχόμαζας ( $E_e/G^*$ )

Οι σχέσεις που υπολογίζουν με ακρίβεια τις παραμορφώσεις είναι οι εξής :

$$u = 0.4 \left( \frac{H}{G^* D} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-1/3} + 0.3 \left( \frac{M}{G^* D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} \quad (2.50)$$

$$\theta = 0.3 \left( \frac{H}{G^* D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} + 0.8 \left( \frac{M}{G^* D^3} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-5/3} \quad (2.51)$$

Επειδή το φρέαρ μετατοπίζεται ως άκαμπτο σώμα σε ελαστικό μέσο, το βάθος του κέντρου στροφής υπολογίζεται από την σχέση :

$$\frac{z_c}{B} = \frac{0.4 \left(\frac{2L}{D}\right)^{-1/3} + 0.3 \left(\frac{e}{D}\right) \left(\frac{2L}{D}\right)^{-7/8}}{0.3 \left(\frac{2L}{D}\right)^{-7/8} + 0.8 \left(\frac{e}{D}\right) \left(\frac{2L}{D}\right)^{-5/3}} \quad (2.52)$$

Η αξιοπιστία των παραπάνω παραμέτρων ισχύει για εύρος τιμών:

$$1 \leq L/D \leq 10 \quad \text{και} \quad E_e/E_r \geq 1$$

Όπως και για τα εύκαμπτα οι εξισώσεις γράφονται και με την μορφή των Douglas & Davis (σχέσεις 2.39, 2.40) θεωρώντας ως συντελεστές επιρροής :

$$I_{hH} = 0.4 \left(\frac{E_r}{G^*}\right) \left(\frac{2L}{D}\right)^{-1/3} \quad (2.53. a)$$

$$I_{\theta M} = 0.8 \left(\frac{E_r}{G^*}\right) \left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{2L}{D}\right)^{-5/3} \quad (2.53. b)$$

$$I_{\theta H} = I_{hM} = 0.3 \left(\frac{E_r}{G^*}\right) \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{2L}{D}\right)^{-7/8} \quad (2.53. c)$$

Ακολουθεί ένας πίνακας (2.4) που περιλαμβάνει τυπικές τιμές των συντελεστών επιρροής.

**Πίνακας 2.4 :** Τυπικές τιμές των συντελεστών  $I_{ij}$  για άκαμπτο φρέαρ

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

όπου:

$$\left(\frac{E_r}{G^*}\right) = \frac{2(1+\nu)}{1 + \frac{3\nu}{4}} \approx 2.12 \quad (\nu = 0,3)$$

- ΦΡΕΑΤΑ ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

Ως φρέατα ενδιάμεσης δυσκαμψίας κατατάσσονται εκείνα για τα οποία ισχύει :

$$0.05 \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{1/2} < \frac{L}{D} < \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{2/7} \quad (2.54)$$

Οι αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία προβλέπουν μετακινήσεις και στροφές σχεδόν πάντα μεγαλύτερες από τις προβλέψεις για εύκαμπτα και για άκαμπτα φρέατα. Συνήθως, οι μετατοπίσεις για ένα ενδιάμεσης δυσκαμψίας φρέαρ υπερβαίνουν τις μέγιστες τιμές των προβλέψεων για άκαμπτα και εύκαμπτα, σε ποσοστό όχι μεγαλύτερο από περίπου 25%, και συχνά πολύ λιγότερο. Για απλότητα, χωρίς απώλεια ουσιαστικής ακρίβειας, προτείνεται να ληφθούν τόσο οι μετατοπίσεις όσο και οι αντίστοιχες στροφές στο ενδιάμεσης δυσκαμψίας φρέαρ, 1,25 φορές το μέγιστο της προβλεπόμενης μετακίνησης ενός άκαμπτου ή ευκάμπτου φρέατος. Οι τιμές που υπολογίζονται με αυτόν τον τρόπο θα πρέπει, στις περισσότερες περιπτώσεις, να είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτά που προβλέπονται από την πιο αυστηρή ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για ένα φρέαρ ενδιάμεσης δυσκαμψίας.

Άρα οι σχέσεις που προσδιορίζουν τις μετακινήσεις και τις στροφές είναι :

$$u = 1.25 \max \left[ \begin{array}{l} 0.5 \left( \frac{H}{G^*D} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-1/7} + 1.08 \left( \frac{M}{G^*D^2} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-3/7} \\ 0.4 \left( \frac{H}{G^*D} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-1/3} + 0.3 \left( \frac{M}{G^*D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} \end{array} \right] \quad (2.55)$$

$$\theta = 1.25 \max \left[ \begin{array}{l} 1.08 \left( \frac{H}{G^*D^2} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-3/7} + 6.40 \left( \frac{M}{G^*D^3} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-5/7} \\ 0.3 \left( \frac{H}{G^*D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} + 0.8 \left( \frac{M}{G^*D^3} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-5/3} \end{array} \right] \quad (2.56)$$

Το βάθος του σημείου σημείου πακτώσεως (κέντρο στροφής) υπολογίζεται ως ο λόγος της μετακίνησης προς τη στροφή :

$$z_c = \frac{u}{\theta} \quad (2.57)$$

Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές ότι το βάθος πακτώσεως δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται από τις διαστάσεις του φρέατος (L,D), τις παραμέτρους της βραχόμαζας ( $E_r, \nu_r$ ) και τα εντατικά φορτία που ασκούνται στην κεφαλή του (H,M).

Σημειώνεται ότι η μεθοδολογία των Carter και Kulhawy αναφέρεται σε φρέατα κυκλικής διατομής διαμέτρου (D) και ενεργού μήκους (L). Εν τούτοις, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για φρέαρ ορθογωνικής διατομής υπολογίζοντας την γεωμετρικά ισοδύναμη διάμετρο.



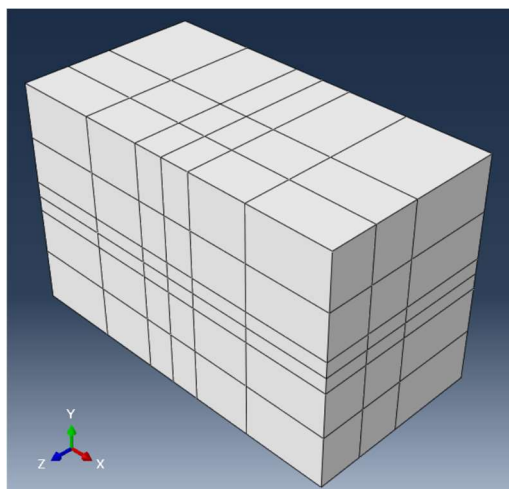
# 3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

## 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία μόρφωσης του προσομοιώματος φρέατος – βραχόμαζας και η διακριτοποίηση αυτού. Τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραμετρικές αναλύσεις σχεδιάστηκαν και διακριτοποιήθηκαν στο περιβάλλον του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS 6.12. Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων φρέατος – βραχόμαζας και η διακριτοποίησή τους.

## 3.2 Σχεδιασμός του Προσομοιώματος

Επιλέχθηκε φρέαρ ορθογωνικής διατομής πλάτους  $b=4\text{m}$  και μήκους  $l=8\text{m}$ . Εξετάστηκαν τρία διαφορετικού βάρους φρέατα, ένα των  $6\text{m}$ , ένα των  $4\text{m}$  και ένα των  $12\text{m}$ . Ο κάρναβος που δημιουργήθηκε (σχήμα 3.1) είχε διαστάσεις  $X=46\text{m}$  ( $X=5.75 \cdot l$ )  $Y=30\text{m}$  ( $Y=7.5 \cdot b$ ) και  $Z=24\text{m}$ .

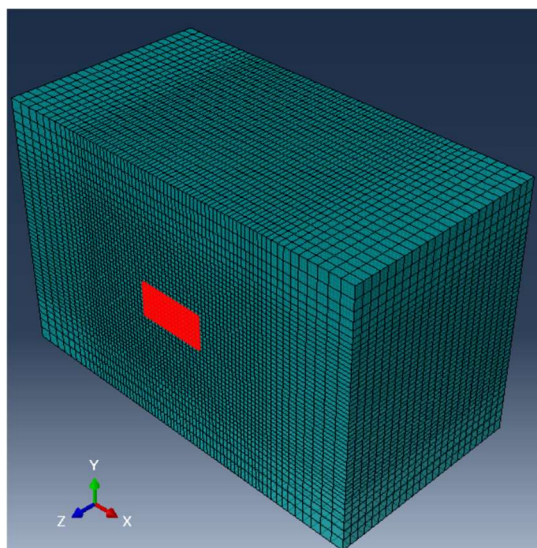


Σχήμα 3.1 : Κάρναβος προσομοιώματος

### 3.2.1 Διακριτοποίηση του Προσομοιώματος

Όπως αναφέρθηκε, η διακριτοποίηση του προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Χρησιμοποιήθηκαν τριδιάστατα, οκτακομβικά, εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία συνεχούς μέσου τύπου C3D8R. Όπως φαίνεται κι στο ακόλουθο σχήμα (σχήμα 3.2) ο κάρναβος είναι πιο πυκνός περιμετρικά του φρέατος με τετραγωνικά στοιχεία μήκους  $0.5\text{m}$  και πιο αραιός προς τα εξωτερικά όρια του προσομοιώματος, με στοιχεία μεταβλητών διαστάσεων από  $0.5\text{m}$  έως  $1.5\text{m}$ , για μεγαλύτερη ακρίβεια στις αναλύσεις. Η διακριτοποίηση κατά τη διεύθυνση του

βάθους πραγματοποιείται ανά 1m. Ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκαν τελικά είναι 82.944 στοιχεία.



Σχήμα 3.2 : Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων

### 3.2.2 Συνοριακές Συνθήκες

Στο αρχείο που δημιουργήθηκε για την εισαγωγή των δεδομένων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (αρχείο με κατάληξη .inp) ορίστηκαν οι ακόλουθες συνοριακές συνθήκες για το προσομοίωμα :

- Οι κόμβοι της βάσης του προσομοιώματος είναι πλήρως πακτωμένοι καθώς δεσμεύονται οι μετακινήσεις και στις 3 διευθύνσεις
- Οι πλευρικοί κόμβοι στην διεύθυνση Y, δεσμεύονται από μετακινήσεις στην διεύθυνση X
- Αντίστοιχα, οι πλευρικοί κόμβοι στην διεύθυνση X, δεσμεύονται από μετακινήσεις στην διεύθυνση Y

### 3.3 Βραχόμαζα

Η περιβάλλουσα βραχόμαζα στην οποία είναι εγκιβωτισμένο το φρέαρ θεωρήθηκε ως ελαστικό-απολύτως πλαστικό υλικό, με ιδιότητες  $E_r$  και  $\nu_r$ . Θεωρήθηκαν διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας για κάθε ανάλυση, με εύρος τιμών που παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 3.1), ενώ ο λόγος Poisson και το ειδικό βάρος της βραχόμαζας θεωρήθηκαν σταθερά σε όλες τις αναλύσεις, με τιμές  $\nu_r=0.333$  και  $\gamma=20\text{kN/m}^3$  αντίστοιχα.

Το οριζόντιο (σεισμικό) φορτίο του φρέατος εφαρμόστηκε σε ύψος  $h=75\text{m}$  και μεταφέρθηκε ως εγκάρσια δύναμη (τέμνουσα)  $H$  στην κεφαλή του φρέατος μαζί με την αντίστοιχη ροπή  $M=H*h$ . Στο προσομοίωμα εφαρμόστηκαν δύο μεγέθη εγκαρσίων δυνάμεων  $H_1=1500\text{kN}$  και  $H_2=750\text{kN}$ , με αντίστοιχες ροπές στην κεφαλή του φρέατος:  $M_1=H_1*h=112500\text{ kNm}$  και  $M_2=H_2*h = 56250\text{ kNm}$ . Για κάθε φορτίο ( $H$ ), εξετάστηκαν διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας ( $E_r$ ) της βραχόμαζας, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 3.1 :** Τιμές του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας για τις αναλύσεις

H= 1500 (kN) και M=112500 (kNm)	H=750 (kN) και M=56250 (kNm)
Er (MPa)	Er (MPa)
500	500
330	
220	145
145	
97.5	65
65	

Ως κριτήριο αστοχίας υιοθετήθηκε το κριτήριο Mohr-Coulomb με γωνία τριβής  $\phi=35^\circ$  και γωνία διαστολικότητας  $\delta=5^\circ$  ενώ η συνοχή (c) θεωρήθηκε μεταβλητή με τις τιμές του πίνακα 3.2.

**Πίνακας 3.2 :** Τιμές της συνοχής για τις αναλύσεις

c (kPa)	20	50	100	150	200
---------	----	----	-----	-----	-----

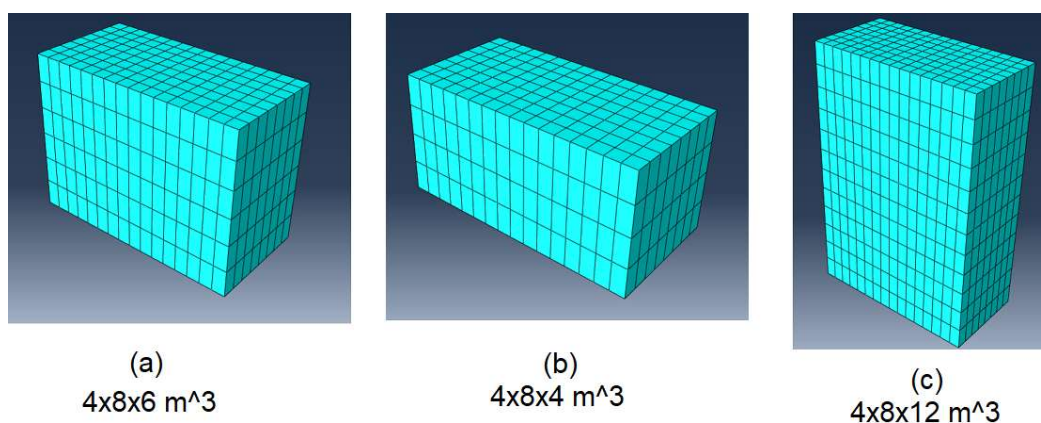
Η συμπεριφορά της βραχώμαζας είναι γραμμικώς ελαστική μέχρι το όριο διαρροής, και στη συνέχεια είναι απολύτως πλαστική.

Συνεπώς, οι παραμετρικές αναλύσεις εξέτασαν την μεταβολή των εξής παραμέτρων:

1. Φόρτιση (δύο τιμές του οριζόντιου φορτίου H)
2. Διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας
3. Διάφορες τιμές της συνοχής της βραχώμαζας
4. Διάφορες τιμές του βάθους του φρέατος (βλέπε κατωτέρω).

### 3.4 Φρέαρ

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής μελετήθηκαν τρία (3) φρέατα κοινής ορθογωνικής διατομής με βάθη 4m, 6m και 12m. Τα φρέατα θεωρήθηκαν γραμμικά, ισότροπα και ελαστικά, κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα, με μέτρο ελαστικότητας  $E=25 \text{ GPa}$ , λόγο Poisson  $\nu=0.25$  και ειδικό βάρος  $\gamma_b=25 \text{ kN/m}^3$ .



**Σχήμα 3.3 :** Διαστάσεις φρεάτων που χρησιμοποιήθηκαν (Υ\*Χ\*Ζ)

Για να καταχωρηθούν οι παραπάνω ιδιότητες στα στοιχεία του φρέατος, διπλοορίστηκαν οι κόμβοι και τα στοιχεία του κάθε φρέατος, αφαιρέθηκαν από το προσομοίωμα και στη συνέχεια επανατοποθετήθηκαν σε αυτό με τις νέες ιδιότητες, αυτές του σκυροδέματος.

### 3.4.1 Λεπτομέρειες Προσομοίωσης του Φρέατος

- ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΦΡΕΑΤΟΣ :

Για να προσομοιωθεί το υλικό του φρέατος (οπλισμένο σκυρόδεμα) δημιουργήθηκαν επί της ουσίας δύο (2) διαφορετικά υλικά. Στο ένα δόθηκε ειδικό βάρος  $\gamma_1=1$  (kN/m<sup>3</sup>) και ένα ελάχιστο μέτρο ελαστικότητας και στο άλλο ειδικό βάρος  $\gamma_2=24$  (kN/m<sup>3</sup>) και μέτρο ελαστικότητας  $E=25$  (GPa), με σκοπό να συνθέσουν το επιθυμητό υλικό ( $\gamma=\gamma_1+\gamma_2=25$  kN/m<sup>3</sup>,  $E=25$  GPa).

- ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΕΦΑΛΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΒΑΛΟΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ :

Έπειτα από τη διαδικασία ομαδοποίησης των στοιχείων που συνθέτουν το φρέαρ και την περιβάλλουσα βραχώμαζα, ορίστηκε μία ομάδα άκαμπτων συνδέσμων (MPC), η οποία συνέδεε όλους τους κόμβους της κεφαλής του φρέατος με τον κεντρικό κόμβο, όπου εφαρμόστηκαν τα εκάστοτε φορτία. Ομάδες άκαμπτων συνδέσμων ορίστηκαν περαιτέρω για όλες τις υπόλοιπες στάθμες του φρέατος. Η συγκεκριμένη διαδικασία εξυπηρετεί στην ακριβέστερη προσομοίωση των συνθηκών φόρτισης και παραμορφωσιμότητας της κεφαλής. Αναλυτικότερα, επιτρέπεται η επιβολή συγκεντρωμένων ροπών και η καταγραφή αποτελεσμάτων στρωφών στην κεφαλή με την προσθήκη στρωφικών βαθμών ελευθερίας. Ως αποτέλεσμα, προσομοιώνεται ακριβέστερα η πραγματική κατάσταση και εξασφαλίζεται η επιπεδότητα της διατομής της κεφαλής του φρέατος.

- ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ :

Για να προσομοιωθεί η δυνατότητα αποκόλλησης του φρέατος από την περιβάλλουσα βραχώμαζα ορίστηκαν οι εξής τέσσερις (4) επιφάνειες που συνθέτουν τις δύο (2) διεπιφάνειες που έρχονται σε επαφή :

1. Επιφάνεια της βάσης του φρέατος
2. Πλευρικές επιφάνειες του φρέατος
3. Επιφάνεια του εδάφους που βρίσκεται σε επαφή με την βάση του φρέατος
4. Επιφάνειες του εδάφους που βρίσκονται σε επαφή με τις πλευρικές του φρέατος

Στα αρχείο που εισάγονται τα δεδομένα των αριθμητικών αναλύσεων ορίστηκε ο νόμος τριβής και αποκόλλησης της διεπιφάνειας φρέατος – βραχώμαζας. 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 βραχώμαζα, κατά την επιβολή της εγκάρσιας φόρτισης (παράγραφοι 3.4.2,3.4.3).

### 3.4.2 Νόμος Τριβής Διεπιφάνειας Φρέατος-Βραχόμαζας

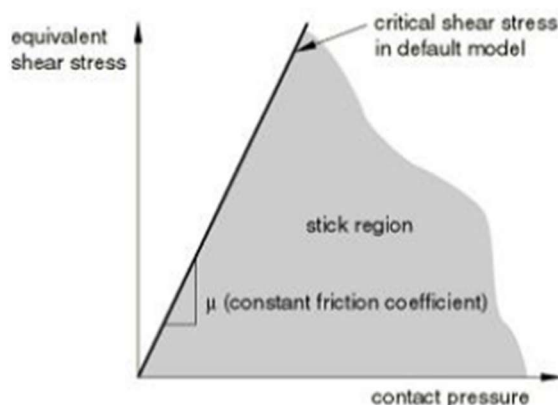
Ο υπολογισμός της οριακής αντίδρασης πλευρικής τριβής πραγματοποιείται με τον ορισμό του νόμου τριβής στη διεπιφάνεια φρέατος – βραχόμαζας. Το διάγραμμα ορθής - διατμητικής τάσης ( $\sigma - \tau$ ) (σχήμα 3.4) αποτελείται από έναν κλάδο ο οποίος προσδιορίζεται από την εξίσωση (3.1):

$$\tau = \mu\sigma_h \quad (3.1)$$

όπου:

$\mu$ : ο συντελεστής τριβής και

$\sigma$ : η εγκάρσια τάση της διατομής



Σχήμα 3.4 : Διάγραμμα ορθής – διατμητικής τάσης ( $\sigma$ - $\tau$ )

Ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται ως η εφαπτομένη της γωνίας τριβής ( $\delta$ ) :

$$\mu = \tan \delta \quad (3.2)$$

Η γωνιά τριβής της διεπιφάνειας στην βάση είναι :

$$\delta = \varphi \quad (3.3. a)$$

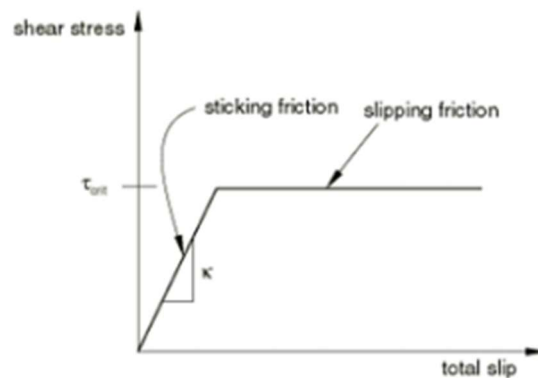
ενώ στις πλευρικές επιφάνειες :

$$\delta = \frac{\varphi}{2} \quad (3.3. b)$$

Συνεπώς ως συντελεστής τριβής της διεπιφάνειας στη βάση ισούται με  $\mu = \tan(35^\circ) = 0.700207538$ , ενώ στην πλευρικά περιμετρική είναι  $\mu = \tan(35/2)^\circ = 0.315298788$ .

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

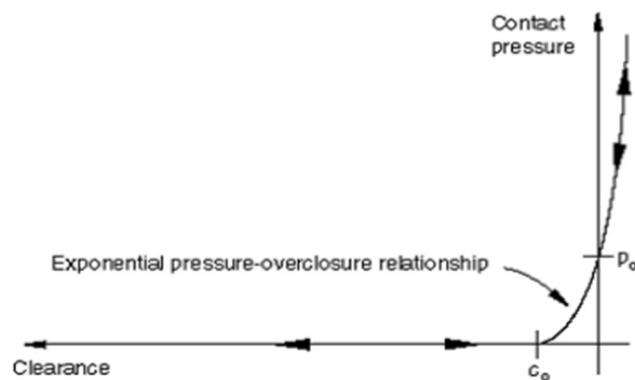
ως τιμή ελαστικής ολίσθησης. Η συγκεκριμένη τιμή ορίζει την κλίση της ελαστικής γραμμής του διαγράμματος τριβής – ολίσθησης άρα και τη δυσκαμψία της διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας (σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5 : Ελαστοπλαστικό διάγραμμα ολίσθησης – τάσης (slip- $\tau$ ) της διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας

### 3.4.3 Νόμος Αποκόλλησης Διεπιφάνειας Φρέατος - Βραχόμαζας

Στα αρχείο που εισάγονται τα δεδομένα των αριθμητικών αναλύσεων, καθορίστηκε 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 ( $h = 0$ ). Στην παρούσα διπλωματική ορίστηκε εργασία τάση  $p_0 = 1 \text{ kPa}$  και απόσταση  $C_0 = 10^{-6} \text{ m}$ . Στο σχήμα 3.6 αποτυπώνεται η συσχέτιση 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 είναι δυνατό να προκύψει για νόμο πίεσης – αποκόλλησης που μηδενίζει την πίεση επαφής ακριβώς τη στιγμή της αποκόλλησης.



Σχήμα 3.6 : Διάγραμμα υπερκάλυψης – πίεσης της διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας

### 3.5 Φόρτιση του προσομοιώματος

#### 3.5.1 Αρχικές Συνθήκες

Αρχικά στο προσομοίωμα εφαρμόζονται μόνο οι γεωστατικές τάσεις. Το ειδικό βάρος της βραχώμαζας θεωρείται ίσο με  $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ . Ο συντελεστής για τις οριζόντιες τάσεις είναι ίδιος για την διεύθυνση X και Y, και ίσος με  $K_0=0.5$ .

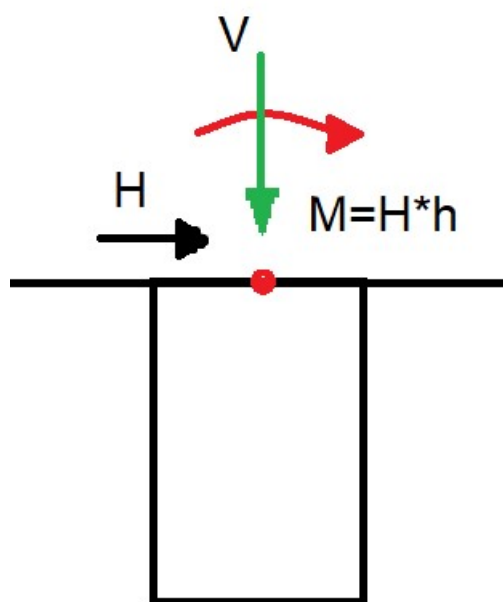
$$\sigma_v = \gamma * z \quad (3.4)$$

$$\sigma_h = \sigma_v * K_0 \quad (3.5)$$

#### 3.5.2 Δυνάμεις στο φρέαρ

Το φρέαρ θεωρήθηκε ως θεμελίωση βάθρου γέφυρας, ύψους 75m στην κεφαλή του οποίου ασκείται τέμνουσα (H) που προσομοιώνει τη σεισμική δράση από την ανωδομή της γέφυρας. Τα φορτία μεταφέρονται στην κεφαλή του φρέατος ως εγκάρσια φόρτιση κεφαλής (H), ροπή (M) και κατακόρυφη δύναμη ( $V=15000 \text{ kN}$ ) η οποία οφείλεται στο ίδιο βάρος της ανωδομής και του βάθρου. Τα φορτία ασκούνται στο κέντρο της διατομής του φρέατος (σχήμα 3.4). Για την εγκάρσια φόρτιση θεωρήθηκαν δύο τιμές, η πρώτη αντιστοιχεί στο 10% της κατακόρυφης δύναμης (V) και η δεύτερη στο 5%. Η ροπή στην κεφαλή του φρέατος υπολογίζεται από τη σχέση :

$$M = H * h_{\text{βάθρου}} = H * 75 \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.7 : Φορτία που ασκούνται στο φρέαρ

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά οι περιπτώσεις φόρτισης του φρέατος:

**Πίνακας 3.3 :** Φορτία που ασκούνται στο φρέαρ

1 <sup>η</sup> περίπτωση			2 <sup>η</sup> περίπτωση		
V ( kN )	H ( kN )	M ( kNm )	V ( kN )	H ( kN )	M ( kNm )
15000	1500	112500	15000	750	56250

### 3.6 Βήματα Αριθμητικών Αναλύσεων

Στις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας εφαρμόστηκε συγκεντρωμένο εγκάρσιο φορτίο (H) κατά X και ροπή ανατροπής (M) περί του άξονα (Y). Η διαδικασία φόρτισης που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τα ακόλουθα τέσσερα (4) βήματα:

- I. Αρχικά, μέσω του αρχείου εισαγωγής δεδομένων εφαρμόζονται οι γεωστατικές τάσεις με τιμές μεταξύ των  $\sigma_v = 1\text{Pa}$  για  $z = 0\text{m}$  – για λόγους αριθμητικής συμβατότητας – και  $\sigma_v = 480\text{ kPa}$  για  $z = 24\text{m}$ . Ο συντελεστής οριζόντων γεωστατικών τάσεων ορίζεται και για τις δύο διευθύνσεις X και Y ίσος με  $K_0 = 0,5$ . Στο βήμα αυτό «συμμετέχουν» οι διεπιφάνειες βραχώμαζας – βραχώμαζας με συνθήκες πλήρους συνάφειας.
- II. Στο δεύτερο βήμα, αφαιρούνται τα στερεά στοιχεία βραχώμαζας που αντιστοιχούν στον όγκο του φρέατος και αντικαθίστανται από όμοια στοιχεία με τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Τα δομικά στοιχεία του φρέατος έχουν ήδη οριστεί δύο φορές στον κώδικα, μία με τις ιδιότητες του εκάστοτε εδάφους/βραχώμαζας και μία με τις ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.
- III. Το τρίτο βήμα περιλαμβάνει την εφαρμογή κατακόρυφων φορτίων ( $V=15000\text{ kN}$ ) επί του όγκου του φρέατος. Ορίζεται το μέτρο και η φορά της επιτάχυνσης της βαρύτητας, εφαρμόζονται τα εντατικά μεγέθη και υπολογίζονται οι παραμορφώσεις του φρέατος που οφείλονται αποκλειστικά στο ίδιο βάρος ανωδομής και βάρους.
- IV. Στο τέταρτο και τελευταίο βήμα, εφαρμόζονται σταδιακά η εγκάρσια φόρτιση και η ροπή ανατροπής στην κεφαλή του φρέατος. Η εφαρμογή γίνεται σταδιακά έως την τελική τιμή της φόρτισης, λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας και της σταδιακής πλαστικοποίησης τμημάτων αυτής,

### 3.7 Αναλύσεις

Εισάγοντας τα παραπάνω δεδομένα του προσομοιώματος στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, εκτελέστηκαν αναλύσεις, με σκοπό να υπολογιστεί η οριζόντια μετακίνηση και η στροφή της κεφαλής του φρέατος.

Ο υπολογισμός της στροφής ( $\theta$ ) γίνεται από τη σχέση

$$\theta \cong \tan \theta = \frac{dU_z}{L} = \frac{(U_{z1} - U_{z2})}{L} \quad (3.7)$$

όπου:

$U_{1z}$ ,  $U_{2z}$ : οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των ακραίων κόμβων στον κεντροβαρικό άξονα του φρέατος (στην διεύθυνση που ασκείται το οριζόντιο φορτίο – άξονας X)

L: το πλάτος του φρέατος,  $L=8\text{m}$



Ακολουθούν οι πίνακες με τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά έγιναν αναλύσεις για βάθος φρέατος  $D=6$  m.

**Πίνακας 3.4** : Αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για βάθος φρέατος  $D=6$ m

H (kN) c (kPa)	750	1500
	E (MPa)	E (MPa)
20	500	500
		330
	145	220
		145
65	97.5	
	65	
50	500	500
		330
	145	220
		145
65	97.5	
	65	
100	500	500
		330
	145	220
		145
65	97.5	
	65	
150	500	500
		330
	145	220
		145
65	97.5	
	65	
200	500	500
		330
	145	220
		145
65	97.5	
	65	

Ακολούθησαν αναλύσεις για φρέαρ βάθους D=4 m και D=12 m.

**Πίνακας 3.5** : Αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για βάθη φρέατος D=4m και D=12m

H (kN) c (kPa)	750	1500
	E (MPa)	E (MPa)
20	500	500
		330
	145	220
		145
	65	97.5
		65
150	500	500
		330
	145	220
		145
	65	97.5
		65

Ο συνολικός αριθμός των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι 81 αναλύσεις.

# 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

## 4.1 Εισαγωγή

Μετά το πέρας των αριθμητικών αναλύσεων, συλλέγονται τα αποτελέσματα τα οποία αφορούν το φορτίο ( $H_x$ ), την ροπή ( $M$ ), την μετακίνηση ( $U_x$ ) και τη στροφή ( $\theta$ ) της κεφαλής του φρέατος. Λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους-βραχόμαζας και της σταδιακής πλαστικοποίησης περιοχών με αυξημένη ένταση, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα για βαθμιαία αυξανόμενο φορτίο έως την τελική προκαθορισμένη τιμή. Στο παρόν κεφάλαιο ακολουθούν τα διαγράμματα της εξέλιξης των αδιαστατικοποιημένων μετατοπίσεων ( $U_x$ ) -ως προς το μήκος του φρέατος  $L=8m$ - συναρτήσει της αυξανόμενης αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας δύναμης ( $H_x$ ) -ως προς το κατακόρυφο φορτίο ( $V$ )- και αντίστοιχα των στροφών ( $\theta$ ) συναρτήσει του λόγου της ροπής ( $M$ ) προς την ακαμψία ( $EI$ ) του φρέατος, για διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας ( $E$ ) και της συνοχής της βραχόμαζας ( $c$ ) που εξετάστηκαν. Κατά τους υπολογισμούς η οριζόντια δύναμη αυξάνει διαδοχικά από μηδενική τιμή έως τη μέγιστη των 1500 kN ή των 750 kN, ανάλογα με την περίπτωση ανάλυσης.

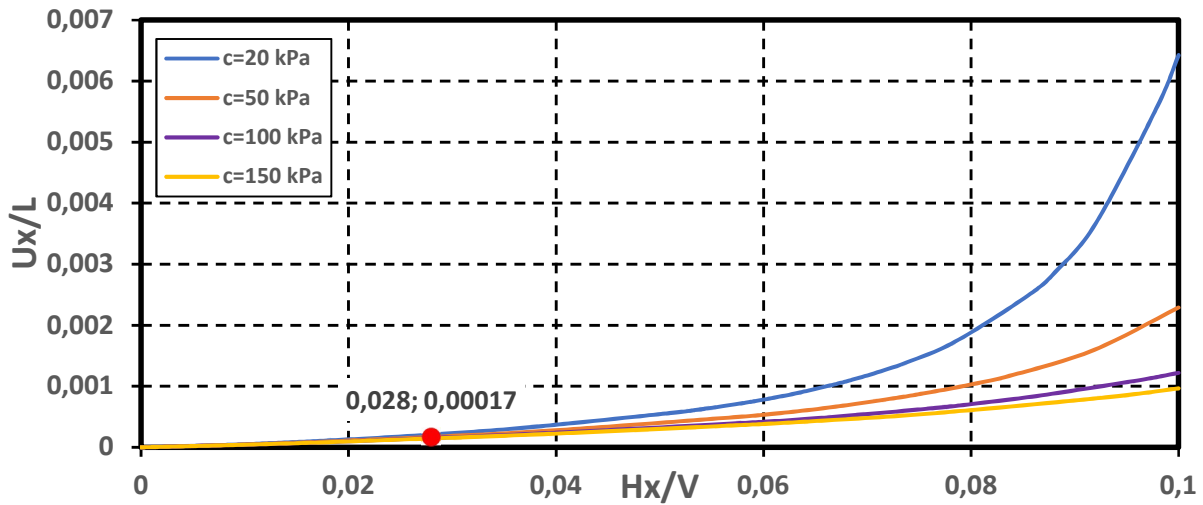
Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν, σημειώνεται η θέση έως όπου από την αρχή των αξόνων, τα γραφήματα των ανωτέρω μεγεθών ταυτίζονται για όλες τις εξεταζόμενες τιμές συνοχής (κόκκινο σημείο στα διαγράμματα). Περαιτέρω σχετική αναφορά γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

## 4.2 Διαγράμματα για βάθος φρέατος $D = 6 m$

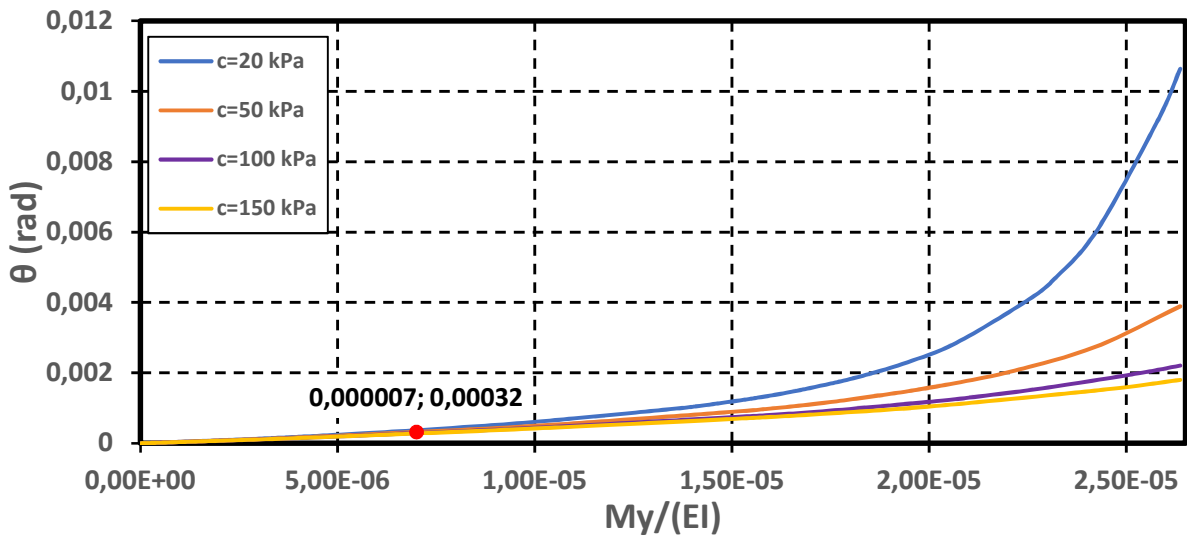
Στα σχήματα 4.1 έως 4.12 παρουσιάζονται τα αδιαστατικοποιημένα διαγράμματα μετατοπίσεων και τα αντίστοιχα των στροφών για βάθος φρέατος  $D=6m$ , οριζόντια δύναμη  $H=1500 kN$  και διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας  $E$  και της συνοχής  $c$ . Στα σχήματα 4.13 έως 4.18 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για οριζόντια δύναμη  $H=750 kN$ .

Ακολουθούν για κάθε τιμή του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας  $E$ , τα ανωτέρω αναφερθέντα διαγράμματα :

### 1. $E = 500 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )



**Σχήμα 4.1 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=500 \text{ MPa}$



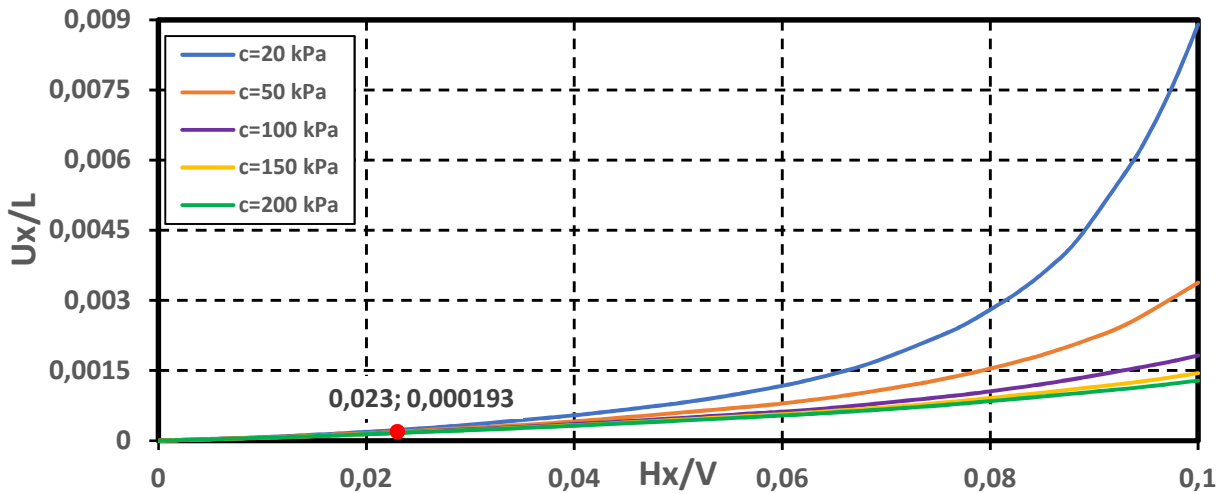
**Σχήμα 4.2 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=500 \text{ MPa}$

Συντάσσεται ο αντίστοιχος πίνακας με τις μέγιστες τιμές των μετακινήσεων και των στροφών της κεφαλής του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής :

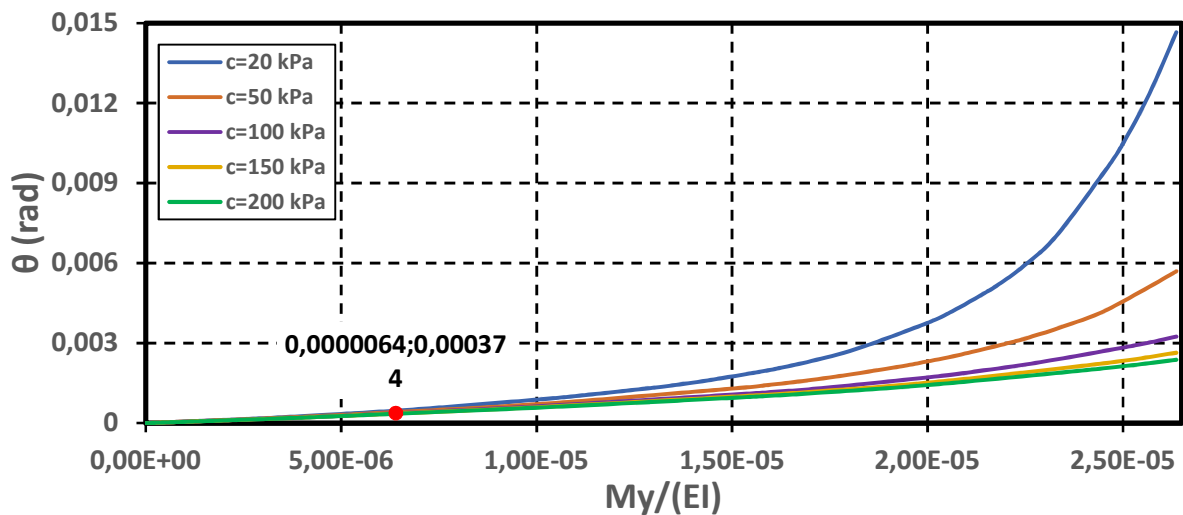
**Πίνακας 4.1 :** Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για  $E=500\text{MPa}$  και  $H=1500 \text{ (kN)}$

$c \text{ (kPa)}$	$U_x \text{ (m)}$	$U_x/L$	$\theta \text{ (rad)}$
20	0.051407	0.006426	0.010637
50	0.018326	0.002291	0.003891
100	0.009764	0.001220	0.002207
150	0.007721	0.000965	0.001800

## 2. $E = 330 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )



**Σχήμα 4.3 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=330 \text{ MPa}$



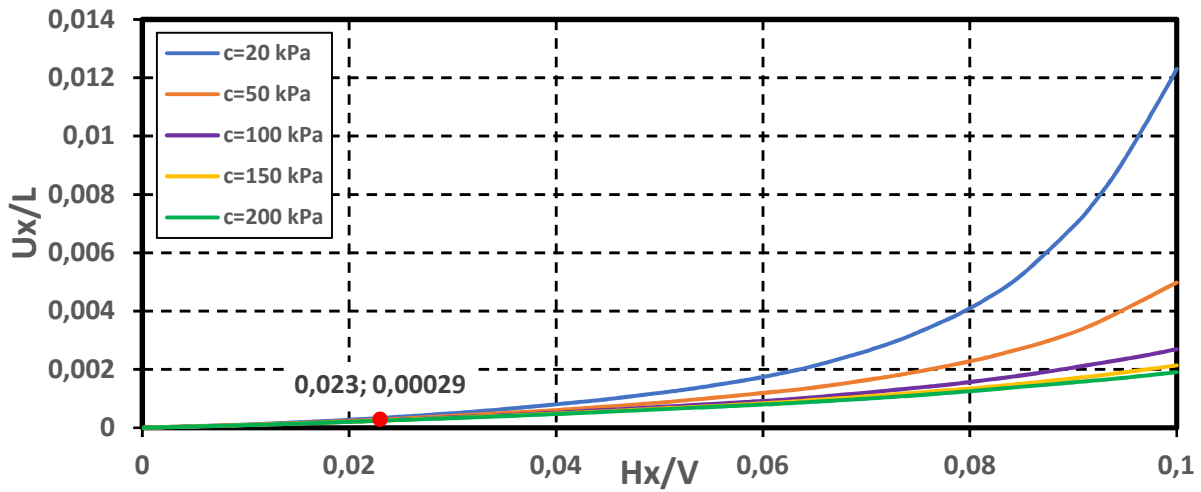
**Σχήμα 4.4 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=330 \text{ MPa}$

Συντάσσεται ο αντίστοιχος πίνακας με τις μέγιστες τιμές των μετακινήσεων και των στροφών της κεφαλής του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής :

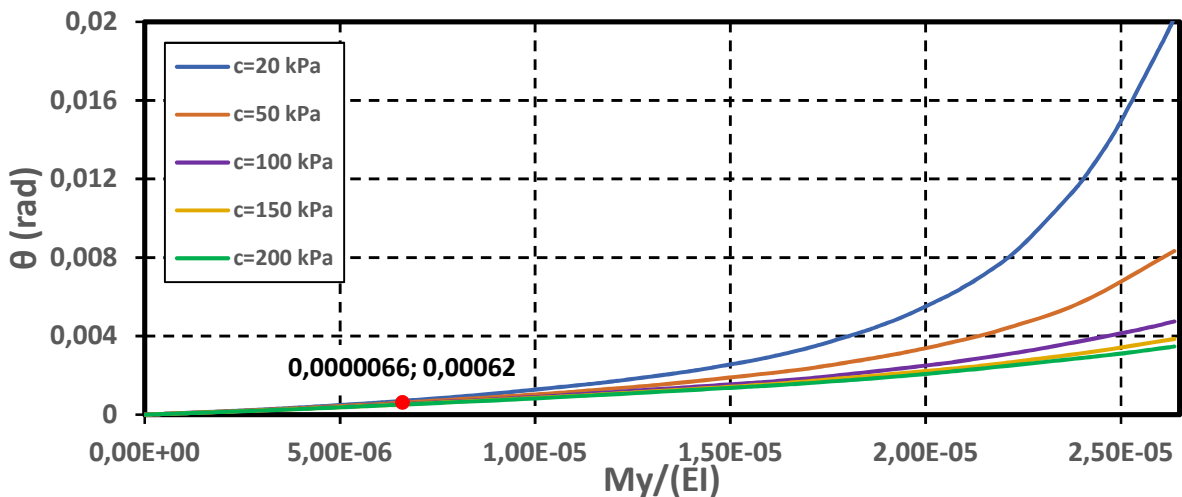
**Πίνακας 4.2 :** Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $Ux$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για  $E=330 \text{ MPa}$  και  $H=1500 \text{ (kN)}$

$c$ (kPa)	$Ux$ (m)	$Ux/L$	$\theta$ (rad)
20	0.07119	0.00890	0.01466
50	0.02704	0.00338	0.00569
100	0.01456	0.00182	0.00324
150	0.01154	0.00144	0.00264
200	0.01028	0.00128	0.00237

### 3. $E = 220 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )



**Σχήμα 4.5 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=220 \text{ MPa}$



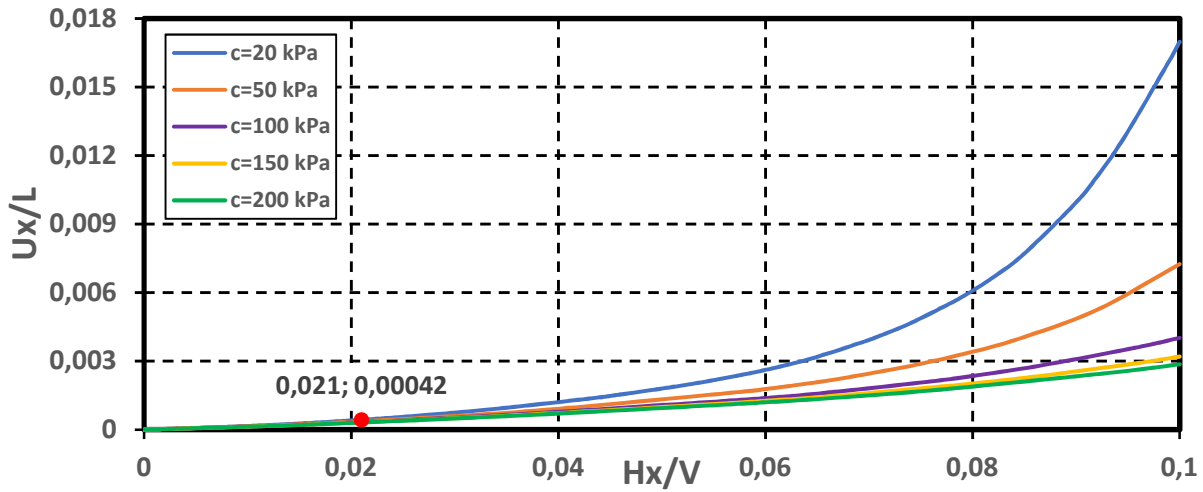
**Σχήμα 4.6 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=220 \text{ MPa}$

Συντάσσεται ο αντίστοιχος πίνακας με τις μέγιστες τιμές των μετακινήσεων και των στροφών της κεφαλής του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής :

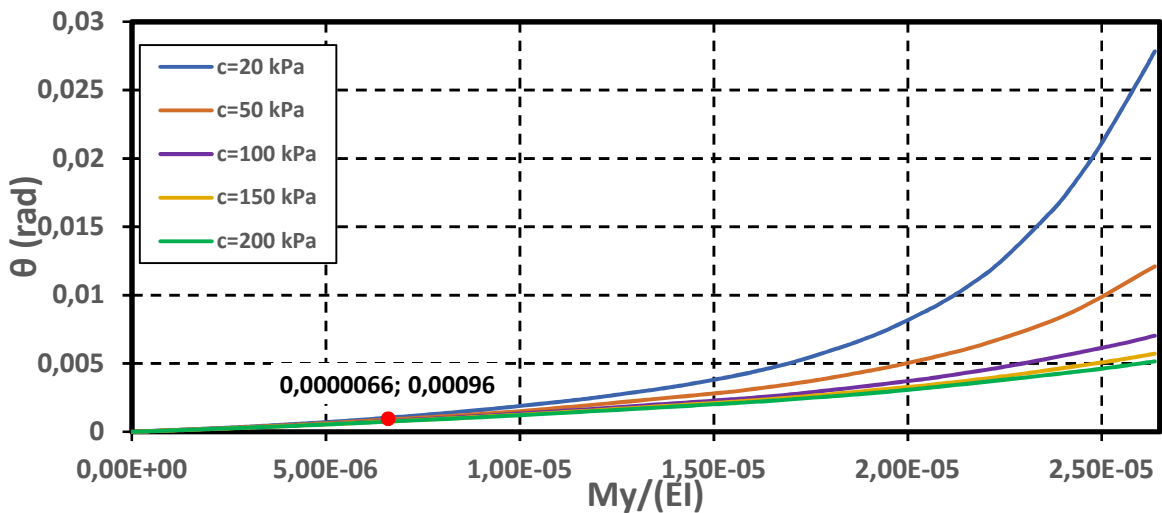
**Πίνακας 4.3 :** Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για  $E=220 \text{ MPa}$  και  $H=1500 \text{ (kN)}$

$c$ (kPa)	$U_x$ (m)	$U_x/L$	$\theta$ (rad)
20	0.09845	0.012306	0.020206
50	0.03981	0.004976	0.008330
100	0.02155	0.002693	0.004744
150	0.01711	0.002138	0.003855
200	0.01525	0.001906	0.003470

#### 4. $E = 145 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )



Σχήμα 4.7 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=145 \text{ MPa}$



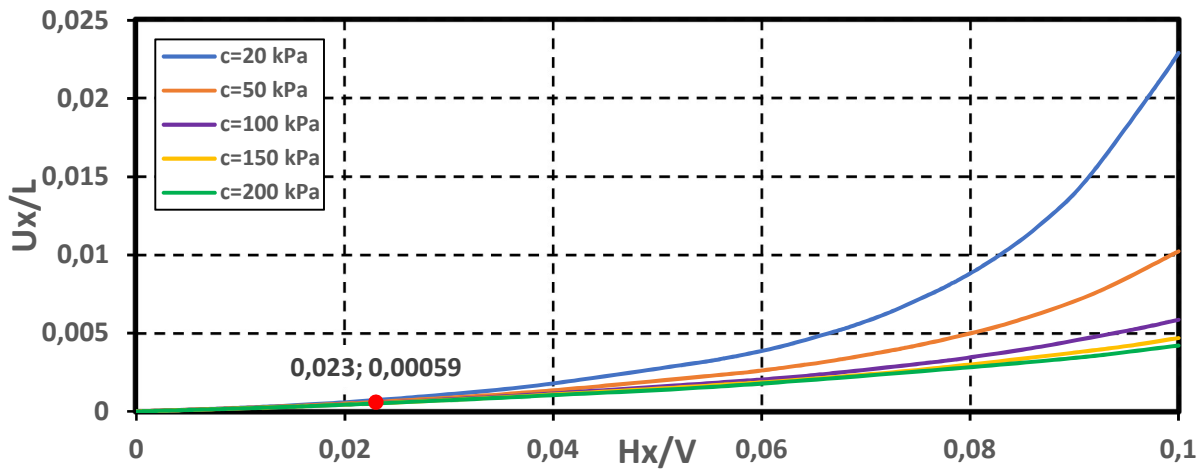
Σχήμα 4.8 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=145 \text{ MPa}$

Συντάσσεται ο αντίστοιχος πίνακας με τις μέγιστες τιμές των μετακινήσεων και των στροφών της κεφαλής του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής :

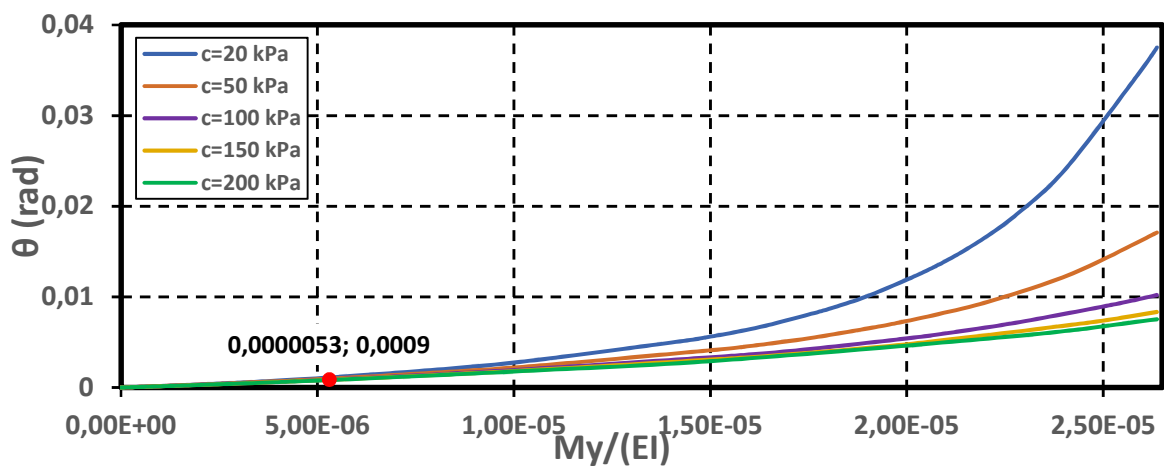
**Πίνακας 4.4** : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για  $E=145 \text{ MPa}$  και  $H=1500 \text{ (kN)}$

$c$ (kPa)	$U_x$ (m)	$U_x/L$	$\theta$ (rad)
20	0.135873	0.016984	0.027837
50	0.057986	0.007248	0.012108
100	0.032156	0.004020	0.007029
150	0.025603	0.003200	0.005717
200	0.022888	0.002861	0.005153

## 5. $E = 97.5 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )



Σχήμα 4.9 : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=97.5 \text{ MPa}$



Σχήμα 4.10 : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=97.5 \text{ MPa}$

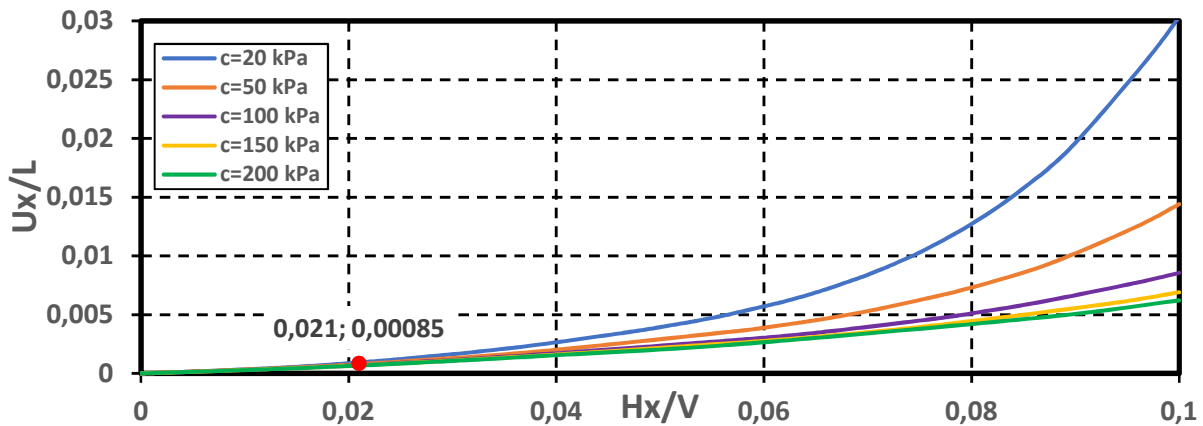
Συντάσσεται ο αντίστοιχος πίνακας με τις μέγιστες τιμές των μετακινήσεων και των στροφών της κεφαλής του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής :

**Πίνακας 4.5** : Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για  $E=97.5 \text{ MPa}$  και  $H=1500 \text{ (kN)}$

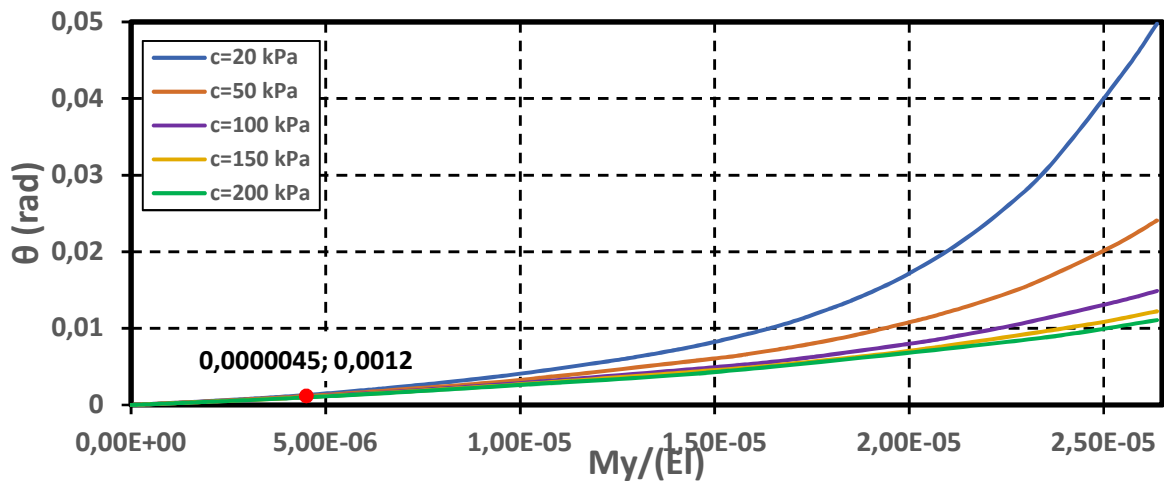
$c$ (kPa)	$U_x$ (m)	$U_x/L$	$\theta$ (rad)
20	0.18328	0.022910	0.03750
50	0.08185	0.010232	0.01709
100	0.04688	0.005860	0.01021
150	0.03754	0.004692	0.00834
200	0.03366	0.004207	0.00753



## 6. $E = 65 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )



**Σχήμα 4.11 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=65 \text{ MPa}$



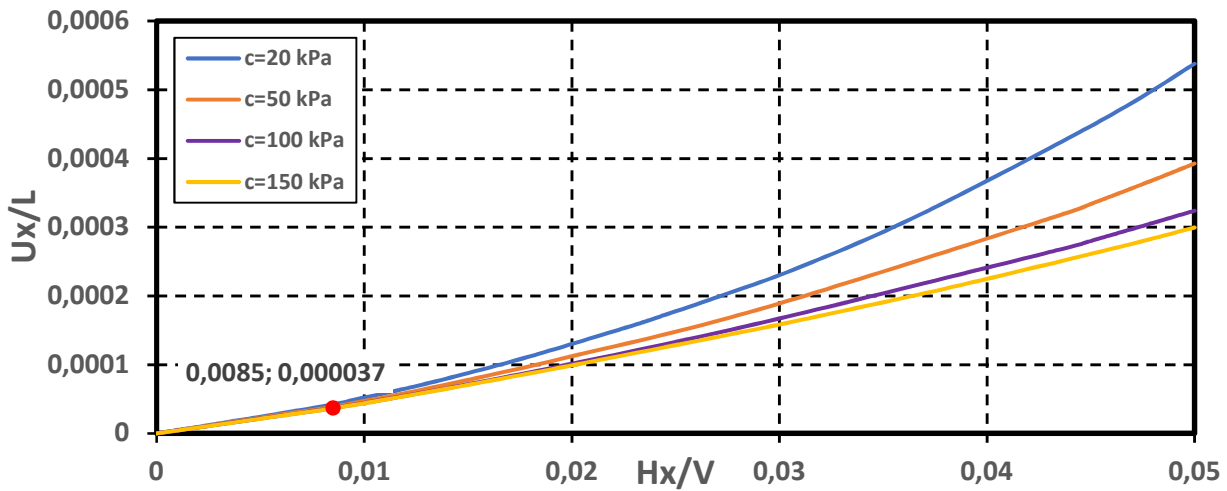
**Σχήμα 4.12 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=65 \text{ MPa}$

Συντάσσεται ο αντίστοιχος πίνακας με τις μέγιστες τιμές των μετακινήσεων και των στροφών της κεφαλής του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής :

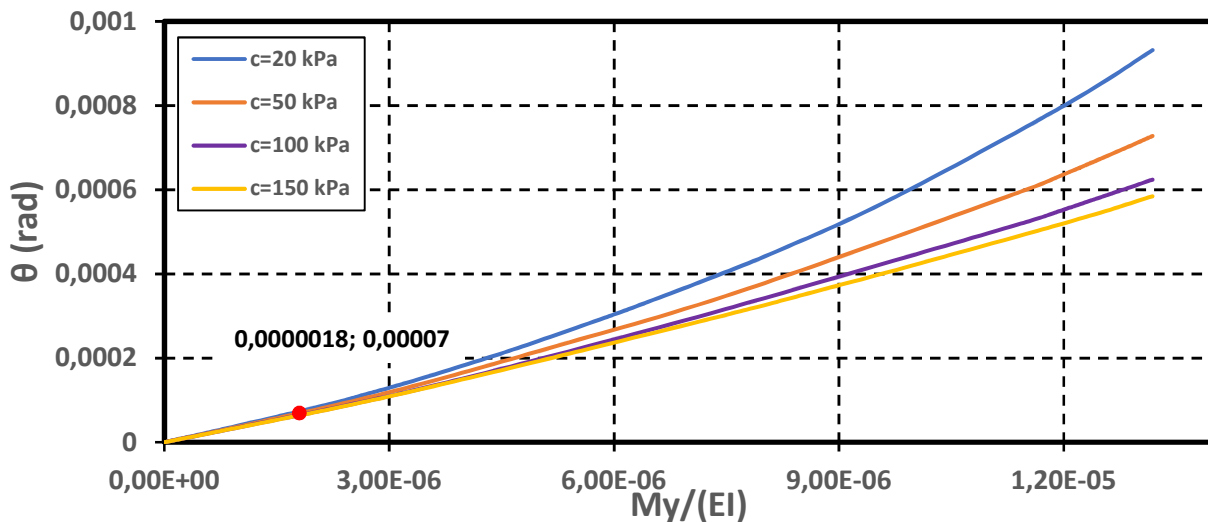
**Πίνακας 4.6 :** Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για  $E=65 \text{ MPa}$  και  $H=1500 \text{ (kN)}$

$c$ (kPa)	$U_x$ (m)	$U_x/L$	$\theta$ (rad)
20	0.242877	0.030360	0.049479
50	0.115239	0.014405	0.024081
100	0.068513	0.008564	0.014884
150	0.055230	0.006904	0.012226
200	0.049725	0.006216	0.011074

## 7. $E = 500 \text{ MPa}$ ( $H = 750 \text{ kN}$ )



**Σχήμα 4.13 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=500 \text{ MPa}$



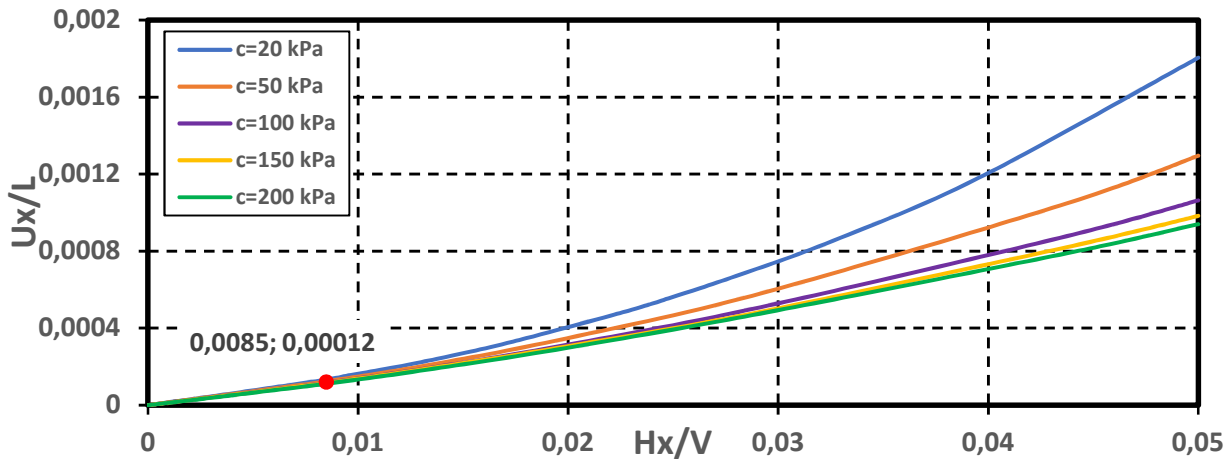
**Σχήμα 4.14 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=500 \text{ MPa}$

Συντάσσεται ο αντίστοιχος πίνακας με τις μέγιστες τιμές των μετακινήσεων και των στροφών της κεφαλής του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής :

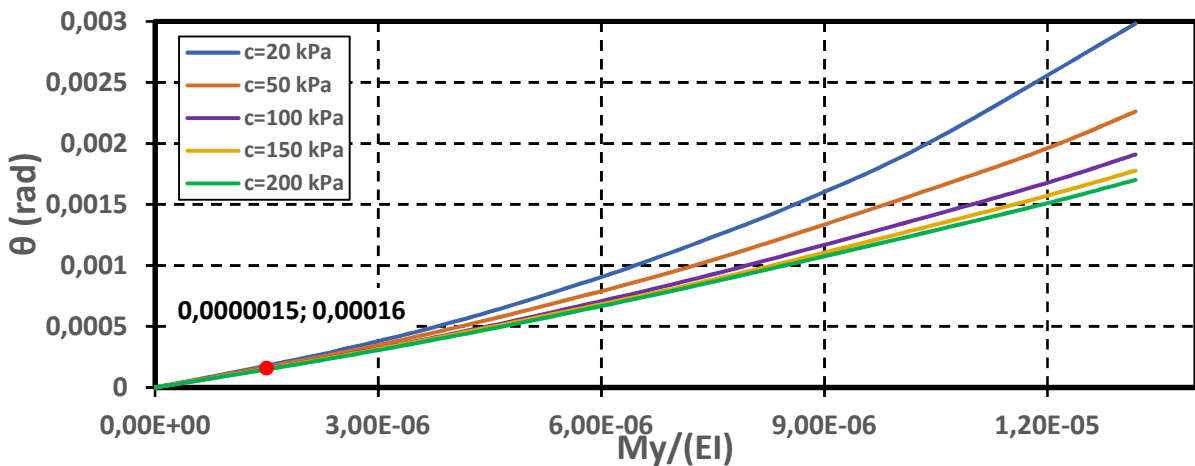
**Πίνακας 4.7 :** Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για  $E=500 \text{ MPa}$  και  $H=750 \text{ (kN)}$

$c$ (kPa)	$U_x$ (m)	$U_x/L$	$\theta$ (rad)
20	0.004303	0.000538	0.000932
50	0.003142	0.000393	0.000728
100	0.002592	0.000324	0.000624
150	0.002397	0.000300	0.000585

### 8. $E = 145 \text{ MPa}$ ( $H = 750 \text{ kN}$ )



**Σχήμα 4.15 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=145 \text{ MPa}$



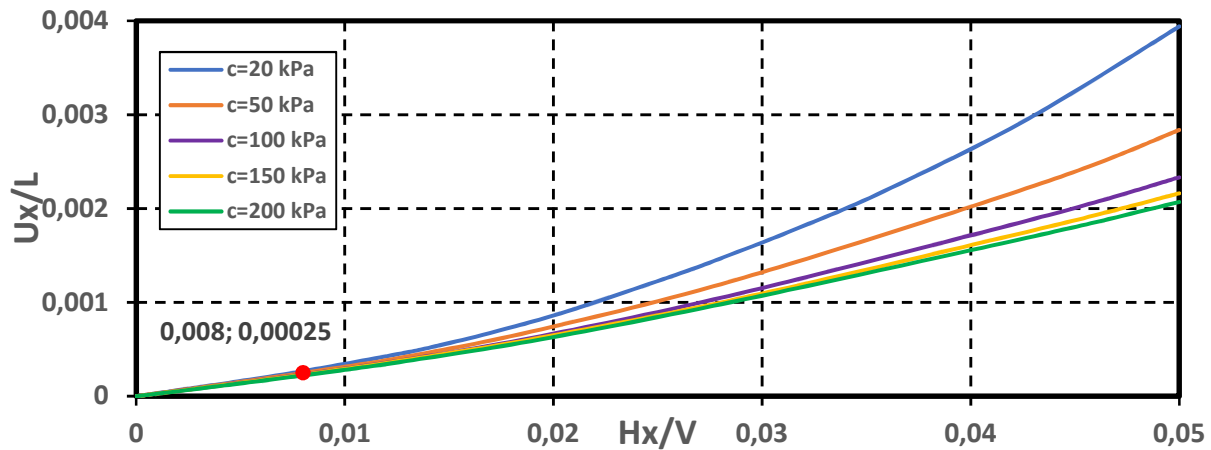
**Σχήμα 4.16 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=145 \text{ MPa}$

Συντάσσεται ο αντίστοιχος πίνακας με τις μέγιστες τιμές των μετακινήσεων και των στροφών της κεφαλής του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής :

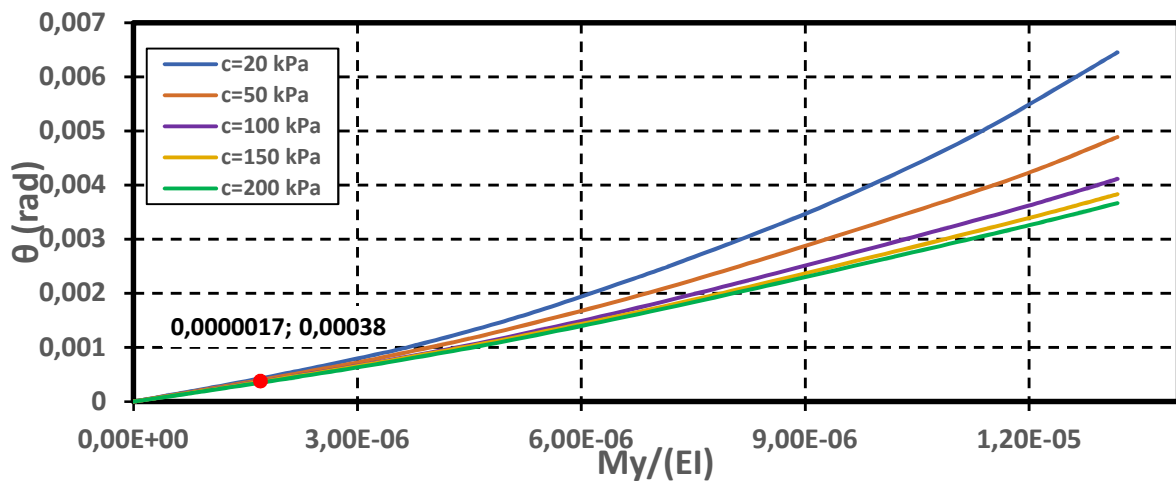
**Πίνακας 4.8 :** Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για  $E=145\text{MPa}$  και  $H=750 \text{ (kN)}$

c (kPa)	$U_x$ (m)	$U_x/L$	$\theta$ (rad)
20	0.01444	0.00180	0.00298
50	0.01036	0.00130	0.00226
100	0.00851	0.00106	0.00191
150	0.00787	0.00098	0.00178
200	0.00752	0.00094	0.00170

### 9. $E = 65 \text{ MPa}$ ( $H = 750 \text{ kN}$ )



**Σχήμα 4.17 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=65 \text{ MPa}$



**Σχήμα 4.18 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=65 \text{ MPa}$

Συντάσσεται ο αντίστοιχος πίνακας με τις μέγιστες τιμές των μετακινήσεων και των στροφών της κεφαλής του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής :

**Πίνακας 4.9 :** Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για  $E=65\text{MPa}$  και  $H=750 \text{ (kN)}$

$c \text{ (kPa)}$	$U_x \text{ (m)}$	$U_x/L$	$\theta \text{ (rad)}$
20	0.03152	0.00394	0.00645
50	0.02270	0.00284	0.00489
100	0.01866	0.00233	0.00411
150	0.01729	0.00216	0.00383
200	0.01656	0.00207	0.00367

#### 4.2.1 Σχολιασμός των διαγραμμάτων

Από την σύγκριση των ανωτέρω αποτελεσμάτων των αντιστοίχων αναλύσεων, διαπιστώνεται ότι:

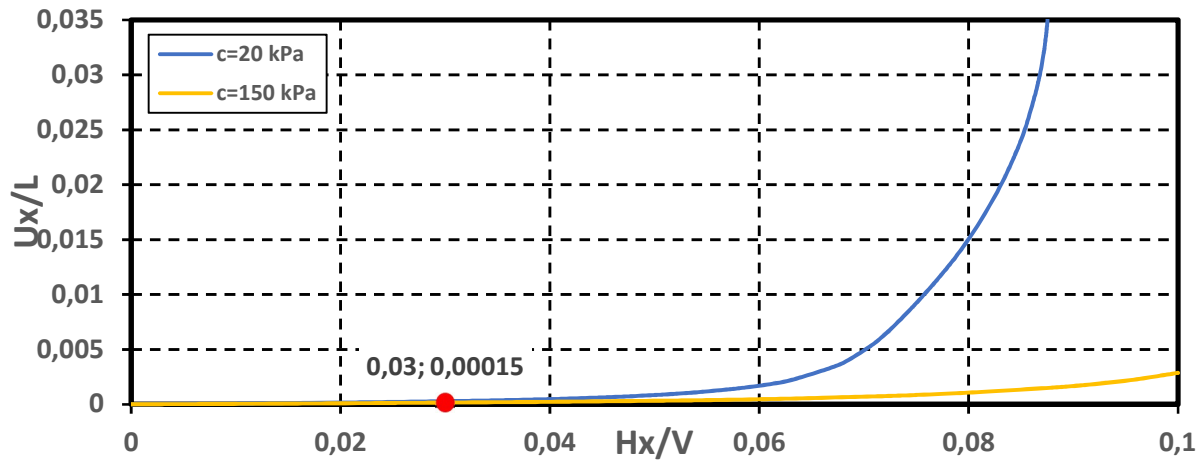
- Σε καμία από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν δεν παρουσιάστηκε αστοχία της βραχόμαζας. Βεβαίως, στην περίπτωση της βραχόμαζας με χαμηλή συνοχή ( $c = 20 \text{ kPa}$ ) και για υψηλό οριζόντιο φορτίο ( $H=1500 \text{ kN}$ ), η καμπύλη της μετακίνησης και στροφής αυξάνει σημαντικά, λόγω έντονης πλαστικοποίησης της βραχομάζας.
- Τα διαγράμματα εξέλιξης των αδιαστατικοποιημένων μετατοπίσεων και στροφών συναρτήσει της σταδιακής αύξησης του εγκάρσιου φορτίου έως τη μέγιστη τιμή  $H=1500\text{kN}$ . παρουσιάζονται ομοιόμορφα. Διαπιστώνεται ένα αρχικό τμήμα χωρίς ουσιαστικές διαφοροποιήσεις των ανωτέρω μεγεθών για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής, το οποίο ακολουθείται από ένα τμήμα με έντονες διαφοροποιήσεις (δηλαδή σημαντική μείωση της δυσκαμψίας) έως τη στάθμη του τελικού φορτίου.
- Όσο μειώνεται η συνοχή τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση της αδιαστατικοποιημένης μετατόπισης και στροφής, η οποία για μικρές τιμές συνοχής τείνει να παρουσιάζει εκθετική μορφή.
- Στην περίπτωση οριζόντιου φορτίου  $H=750\text{kN}$  τα διαγράμματα εξακολουθούν να παρουσιάζονται ομοιόμορφα μεταξύ τους, αλλά με πιο περιορισμένες διαφοροποιήσεις των μεγεθών αδιαστατικοποιημένης μετατόπισης και στροφής, για τις αντίστοιχες μεταβολές της συνοχής όσο το φορτίο πλησιάζει την τελική του τιμή.
- Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας οδηγεί σε αύξηση των τιμών της αδιαστατικοποιημένης μετατόπισης και στροφής. Οι μεταβολές των μεγεθών αυτών τείνουν να παρουσιάζονται εκθετικά αντιστρόφως ανάλογες με τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας.

#### 4.3 Διαγράμματα για βάθος φρέατος $D = 4 \text{ m}$

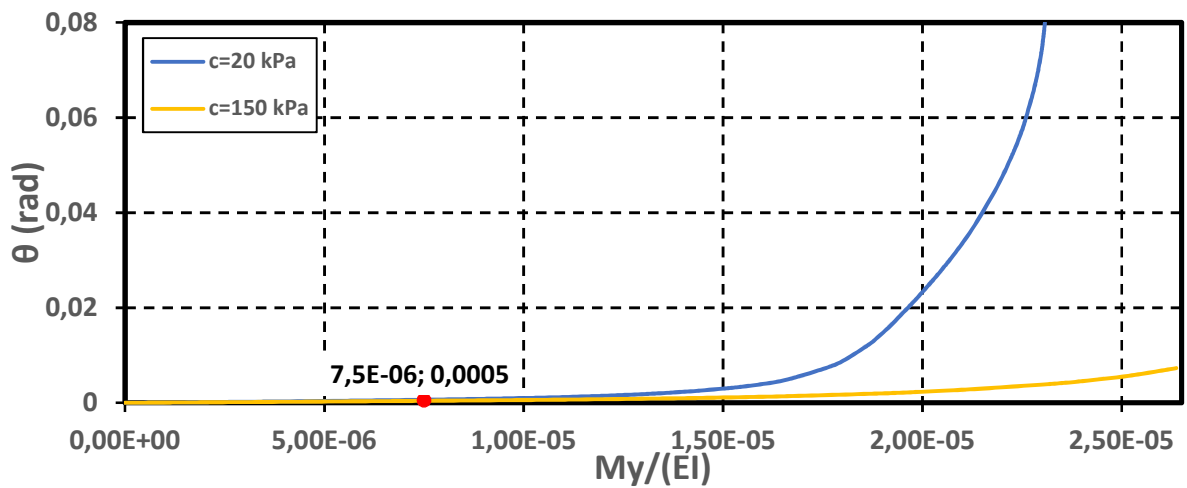
Στα σχήματα 4.19 έως 4.30 παρουσιάζονται τα αδιαστατικοποιημένα διαγράμματα μετατοπίσεων και τα αντίστοιχα των στροφών για βάθος φρέατος  $D=4\text{m}$ , οριζόντια δύναμη  $H=1500 \text{ kN}$  και διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας  $E$  και για δύο (ακραίες) τιμές της συνοχής  $c$ . Στα σχήματα 4.31 έως 4.36 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για οριζόντια δύναμη  $H=750 \text{ kN}$ .

Ακολουθούν για κάθε τιμή του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας  $E$ , τα ανωτέρω αναφερθέντα διαγράμματα :

**1.  $E = 500 \text{ MPa}$  ( $H = 1500 \text{ kN}$ )**

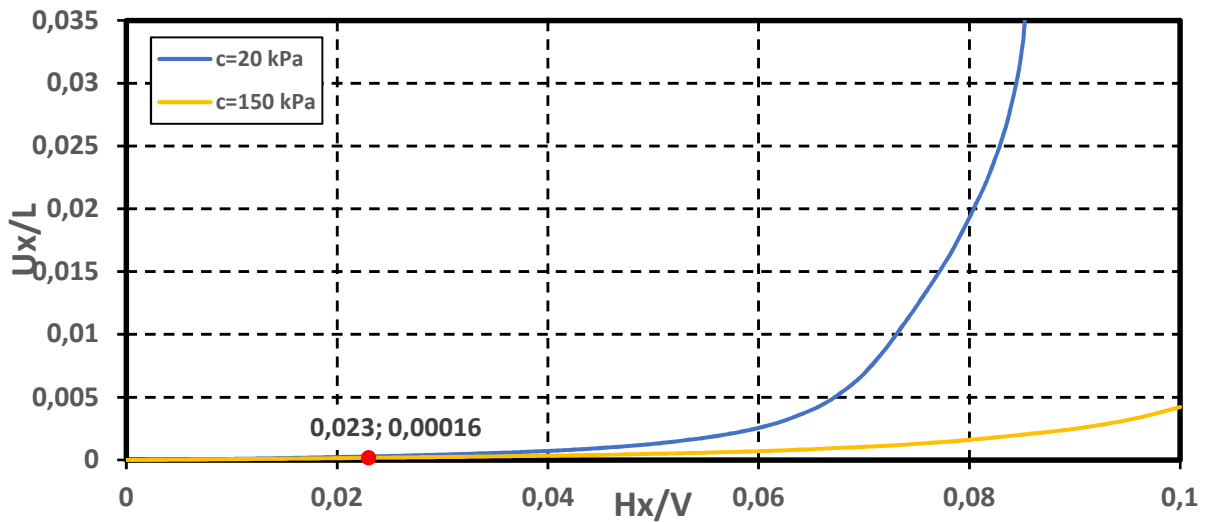


**Σχήμα 4.19 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=500 \text{ MPa}$

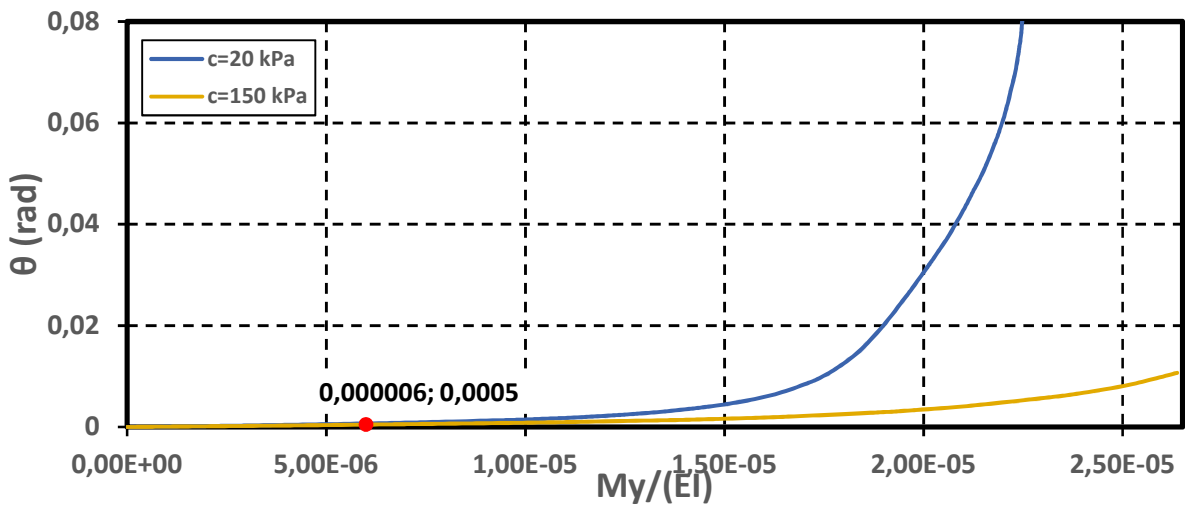


**Σχήμα 4.20 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=500 \text{ MPa}$

## 2. $E = 330 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )

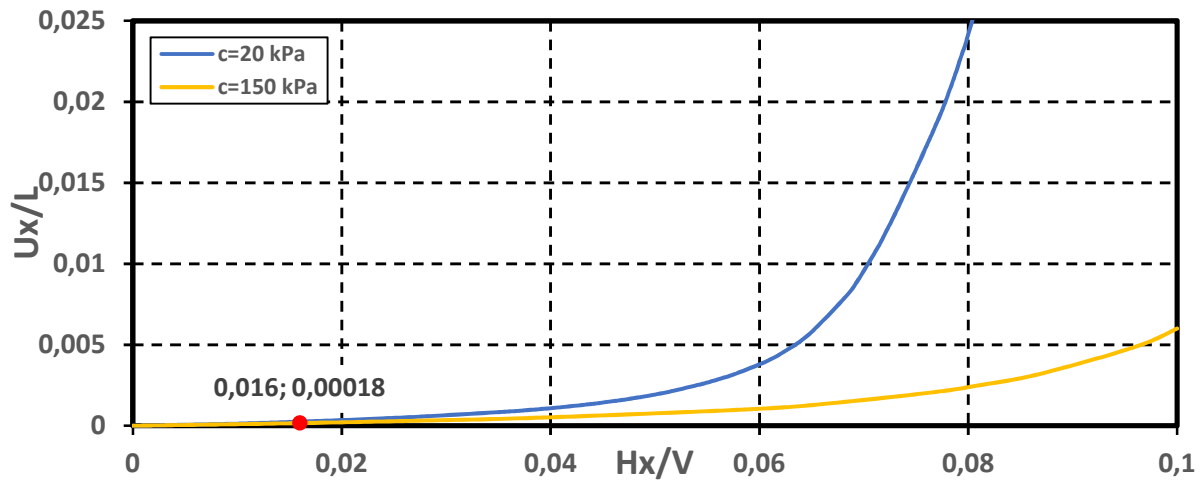


**Σχήμα 4.21 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=330 \text{ MPa}$

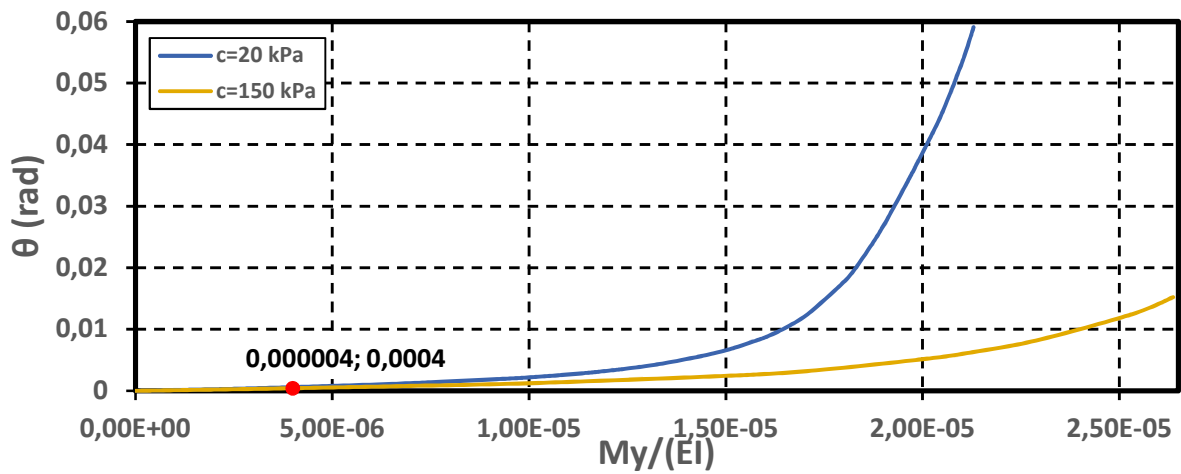


**Σχήμα 4.22 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=330 \text{ MPa}$

### 3. $E = 220 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )



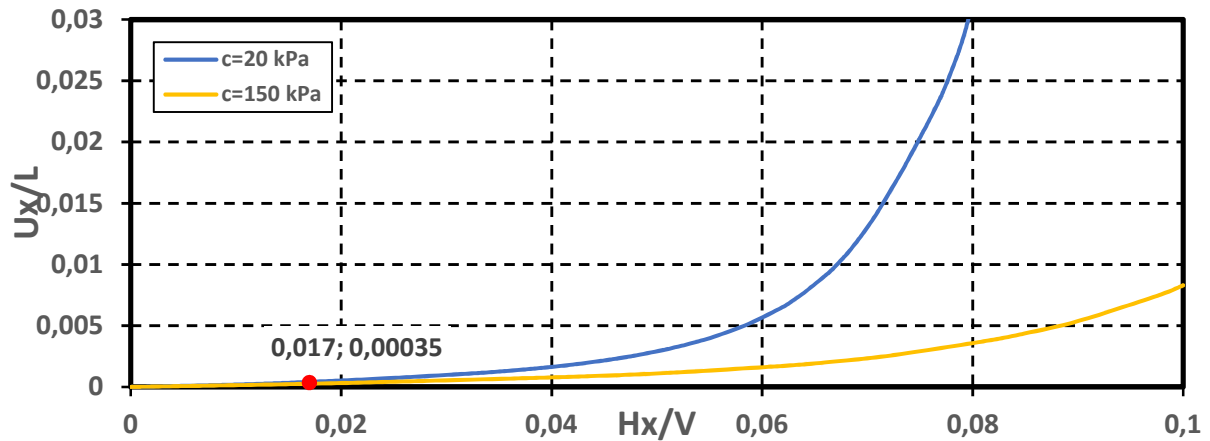
**Σχήμα 4.23 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=220 \text{ MPa}$



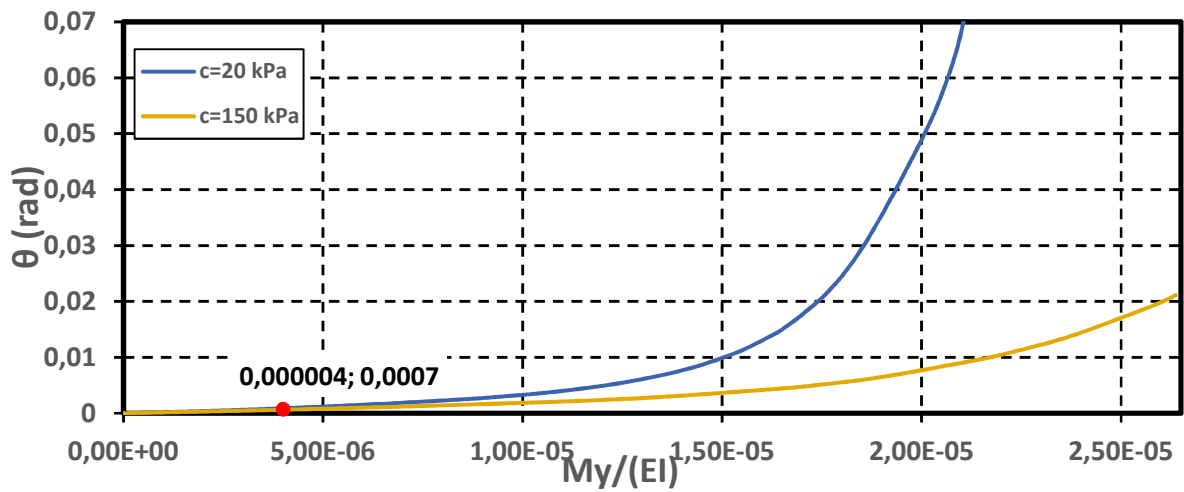
**Σχήμα 4.24 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=220 \text{ MPa}$



#### 4. $E = 145 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )

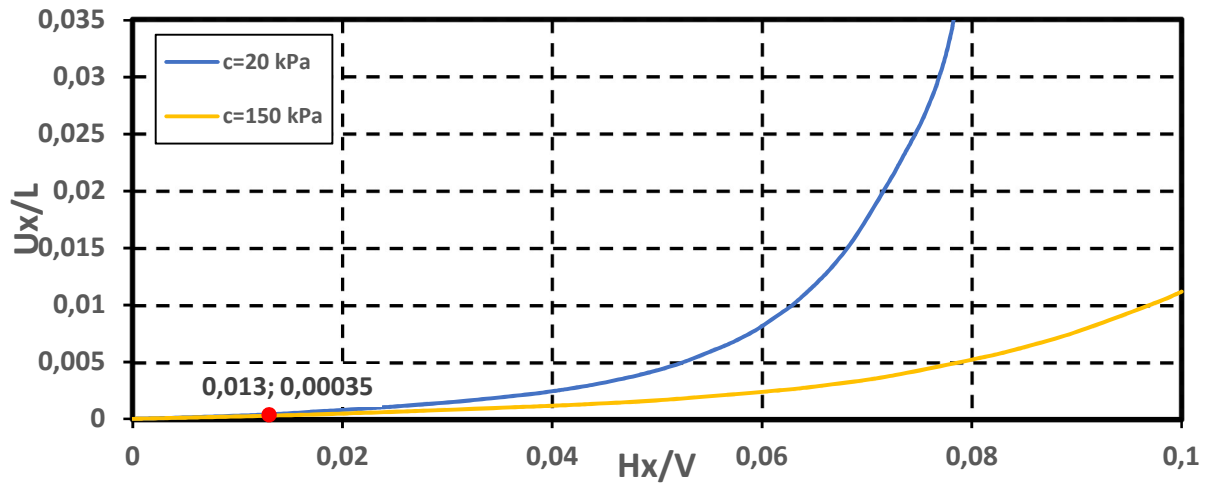


**Σχήμα 4.25 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=145 \text{ MPa}$

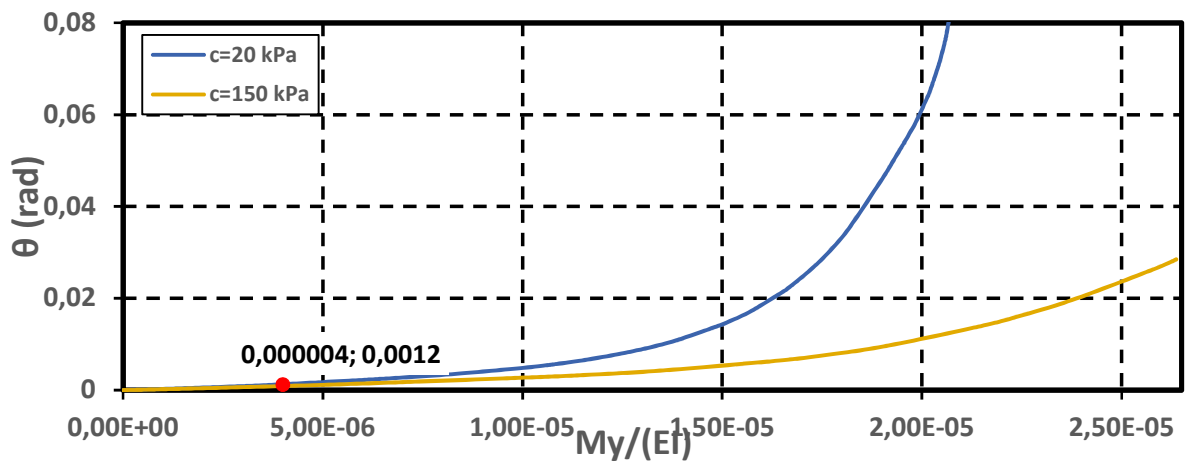


**Σχήμα 4.26 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=145 \text{ MPa}$

**5.  $E = 97.5 \text{ MPa}$  ( $H = 1500 \text{ kN}$ )**

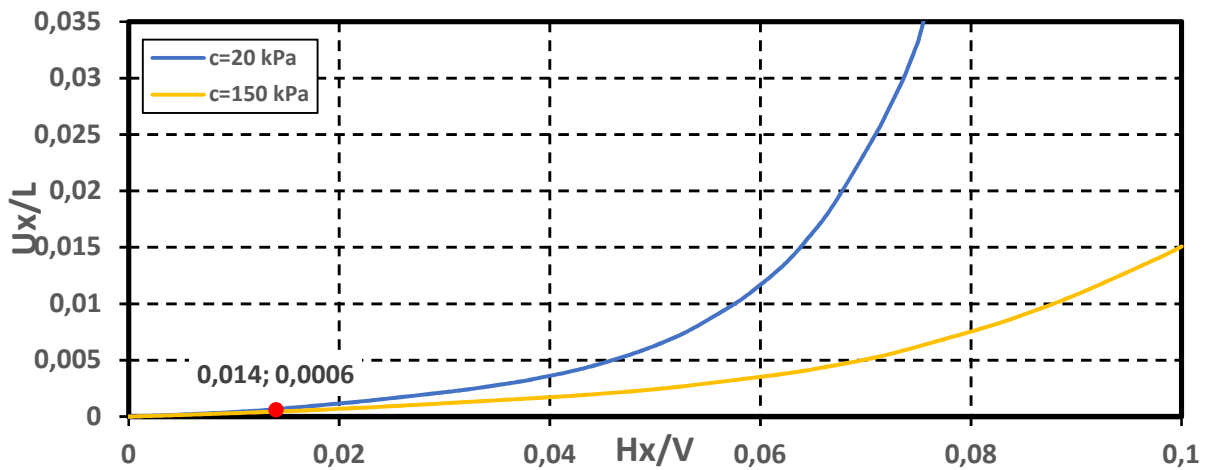


**Σχήμα 4.27 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=97.5 \text{ MPa}$

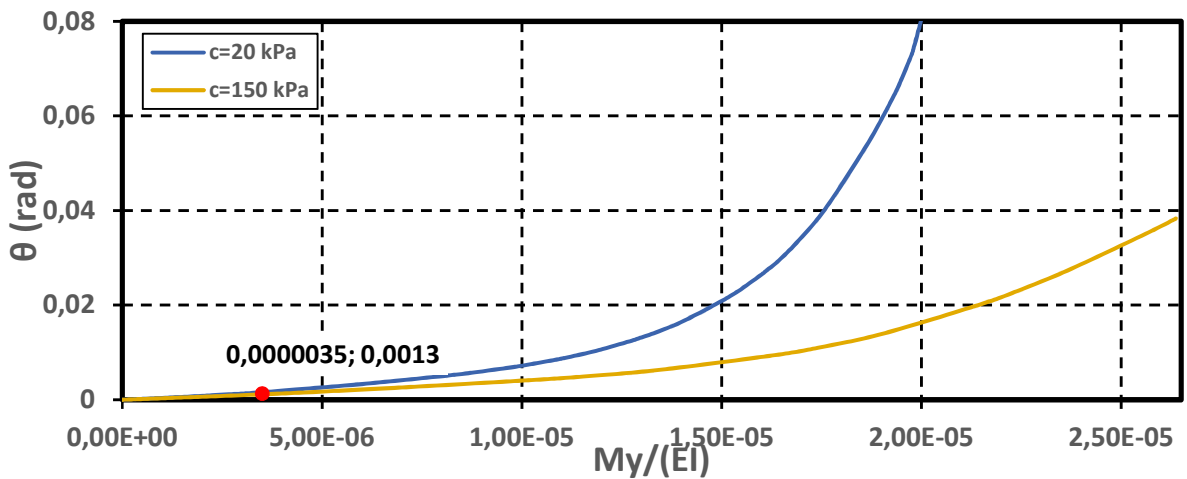


**Σχήμα 4.28 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=97.5 \text{ MPa}$

**6.  $E = 65 \text{ MPa}$  ( $H = 1500 \text{ kN}$ )**

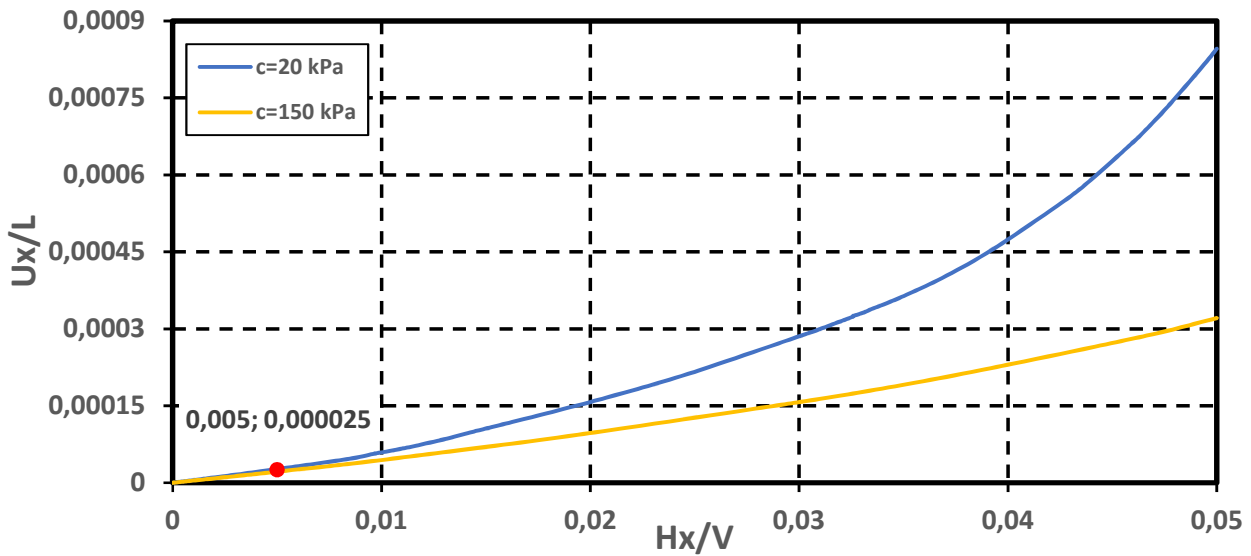


**Σχήμα 4.29 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=65 \text{ MPa}$

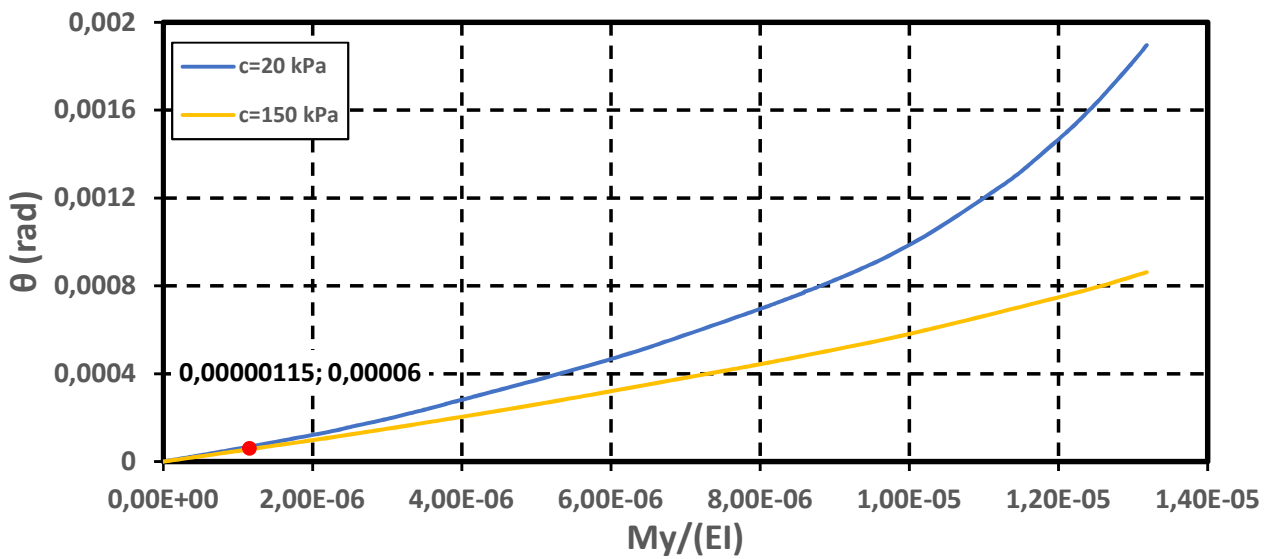


**Σχήμα 4.30 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία  $(EI)$  για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=65 \text{ MPa}$

**7.  $E = 500 \text{ MPa}$  ( $H = 750 \text{ kN}$ )**

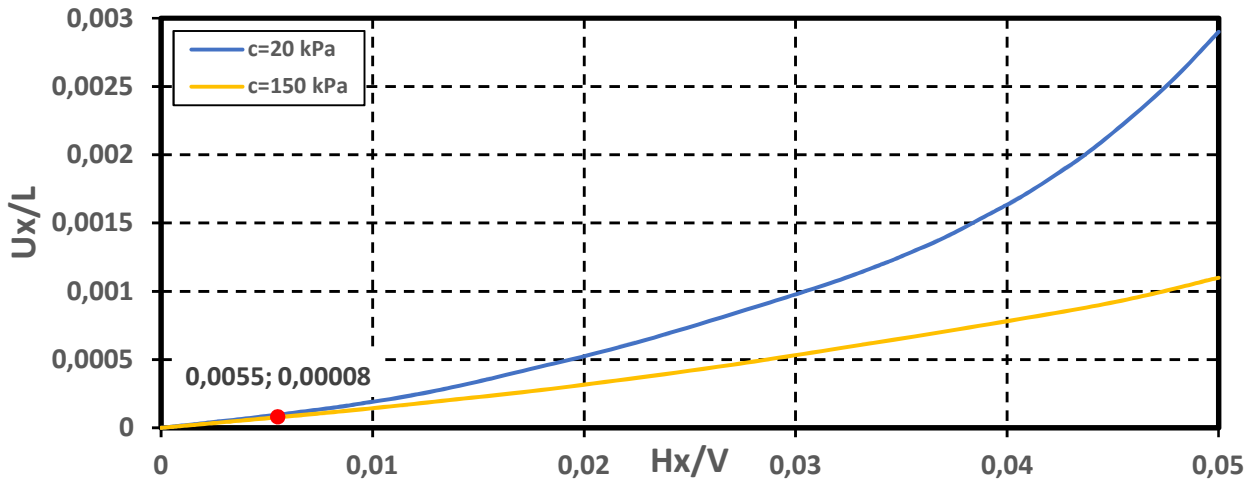


**Σχήμα 4.31 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=500 \text{ MPa}$

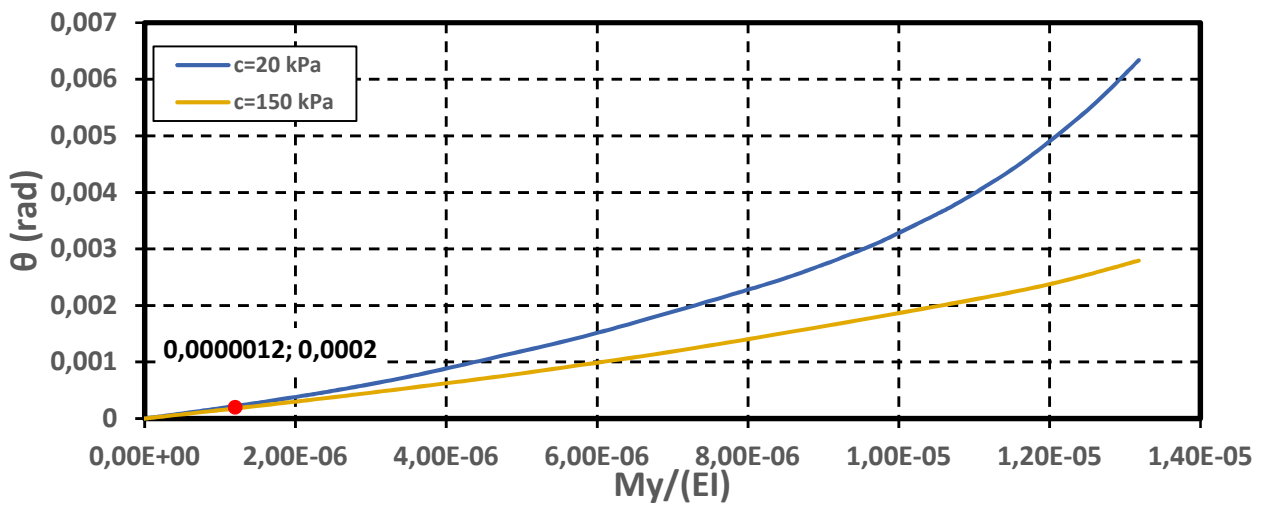


**Σχήμα 4.32 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία  $(EI)$  για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=500 \text{ MPa}$

**8.  $E = 145 \text{ MPa}$  ( $H = 750 \text{ kN}$ )**

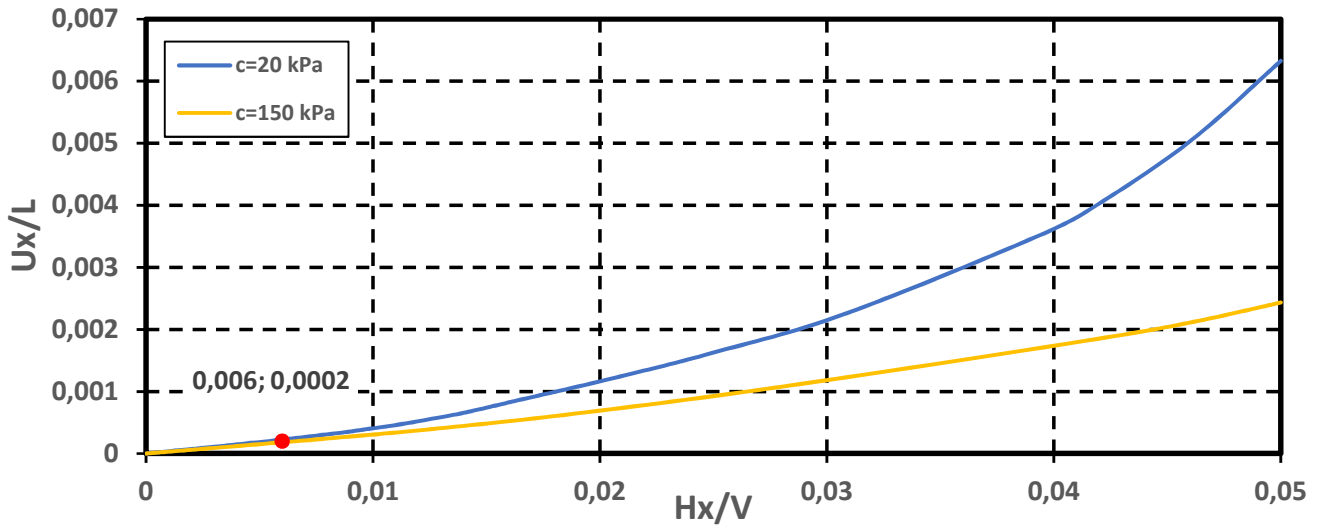


**Σχήμα 4.33 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=145 \text{ MPa}$

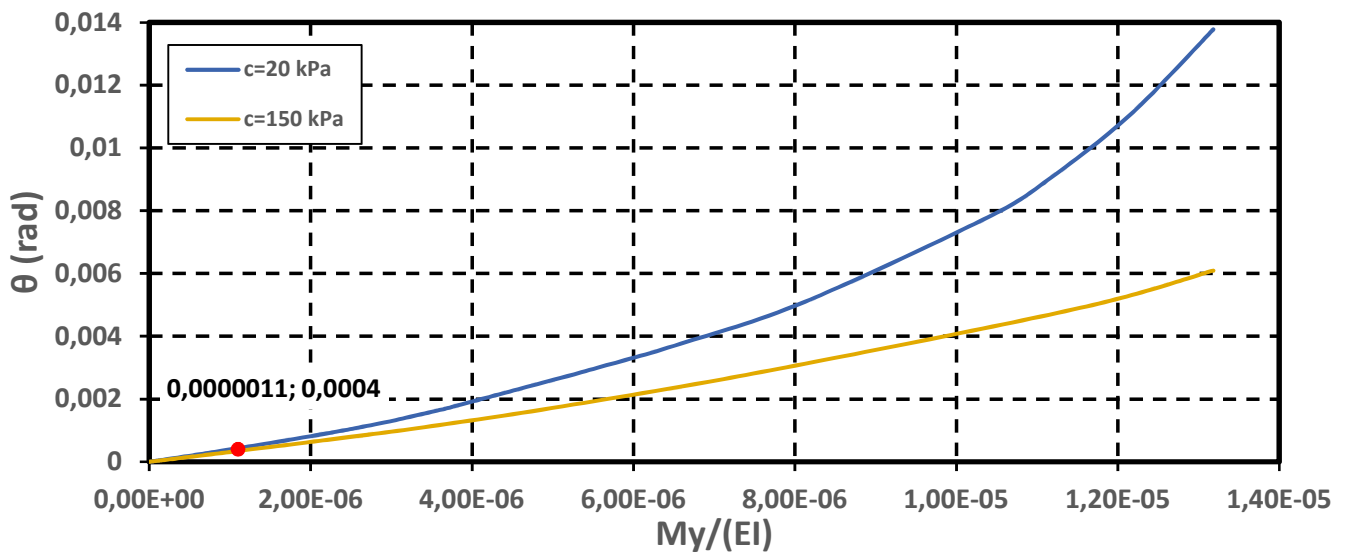


**Σχήμα 4.34 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=145 \text{ MPa}$

**9.  $E = 65 \text{ MPa}$  ( $H = 750 \text{ kN}$ )**



**Σχήμα 4.35 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=65 \text{ MPa}$



**Σχήμα 4.36 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=65 \text{ MPa}$

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται οι μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για τις αναλύσεις που έγιναν για φρέαρ βάθους  $D=4 \text{ m}$ .

**Πίνακας 4.10 :** Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για φρέαρ βάθους  $D=4$  m

c=20 kPa				
H (kN)	E (MPa)	$U_x$ (m)	$U_x/L$	$\theta$ (rad)
750	500	0.00677	0.00085	0.00190
	145	0.02320	0.00290	0.00634
	65	0.05063	0.00633	0.01378
c=150 kPa				
H (kN)	E (MPa)	$U_x$ (m)	$U_x/L$	$\theta$ (rad)
1500	500	0.02291	0.00286	0.00729
	330	0.03367	0.00421	0.01068
	220	0.04802	0.00600	0.01522
	145	0.06641	0.00830	0.02112
	97.5	0.08938	0.01117	0.02848
	65	0.12059	0.01507	0.03833
750	500	0.00257	0.00032	0.00086
	145	0.00879	0.00110	0.00279
	65	0.01947	0.00243	0.00609

#### 4.3.1 Σχολιασμός διαγραμμάτων

Από την σύγκριση των ανωτέρω αποτελεσμάτων των αντιστοίχων αναλύσεων, διαπιστώνεται ότι:

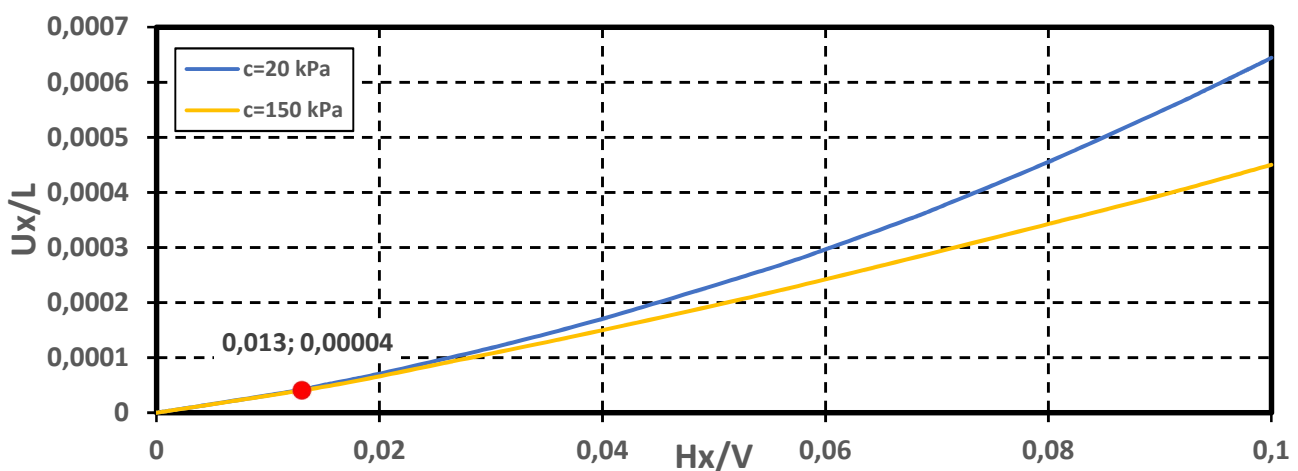
- Η τιμή συνοχής  $c=20$  kPa οδήγησε σε αστοχία της βραχόμαζας για οριζόντια δύναμη 1500 kN, ενώ όταν το επίπεδο της δύναμης μειώθηκε στο μισό, δεν παρουσιάστηκε αστοχία.
- Για την ανωτέρω τιμή συνοχής, όταν το φορτίο πλησιάζει τη μέγιστη τιμή, η αύξηση αδιαστατικοποιημένων μετατοπίσεων και στροφών αυξάνει εκθετικά έως την αστοχία.
- Όπως και για βάθος φρέατος 6m τα διαγράμματα για οριζόντιο φορτίο  $H=1500$  kN παρουσιάζουν ένα αρχικό τμήμα χωρίς ουσιαστικές διαφοροποιήσεις, το οποίο ακολουθείται από ένα τμήμα με έντονες διαφοροποιήσεις για τις διαφορετικές τιμές συνοχής, ενώ στην περίπτωση του φορτίου  $H=750$  kN το εύρος των διαφοροποιήσεων είναι πιο περιορισμένο.
- Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές της αδιαστατικοποιημένης μετατόπισης και στροφής. Οι μεταβολές των μεγεθών αυτών τείνουν να παρουσιάζονται εκθετικά αντιστρόφως ανάλογες με τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας.

#### 4.4 Διαγράμματα για βάθος φρέατος $D = 12 \text{ m}$

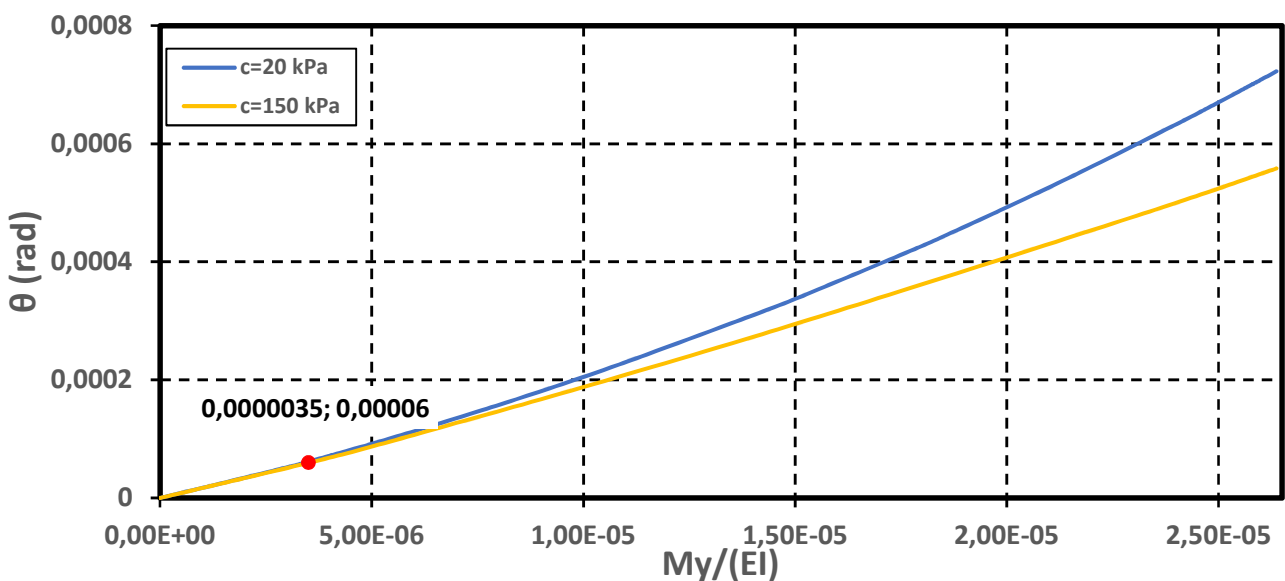
Στα σχήματα 4.37 έως 4.48 παρουσιάζονται τα αδιαστατικοποιημένα διαγράμματα μετατοπίσεων και τα αντίστοιχα των στροφών για βάθος φρέατος  $D=12\text{m}$ , οριζόντια δύναμη  $H=1500 \text{ kN}$  και διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας  $E$  και για δύο (ακραίες) τιμές της συνοχής  $c$ . Στα σχήματα 4.49 έως 4.54 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για οριζόντια δύναμη  $H=750 \text{ kN}$ .

Ακολουθούν για κάθε τιμή του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας  $E$ , τα ανωτέρω αναφερθέντα διαγράμματα :

##### 1. $E = 500 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )



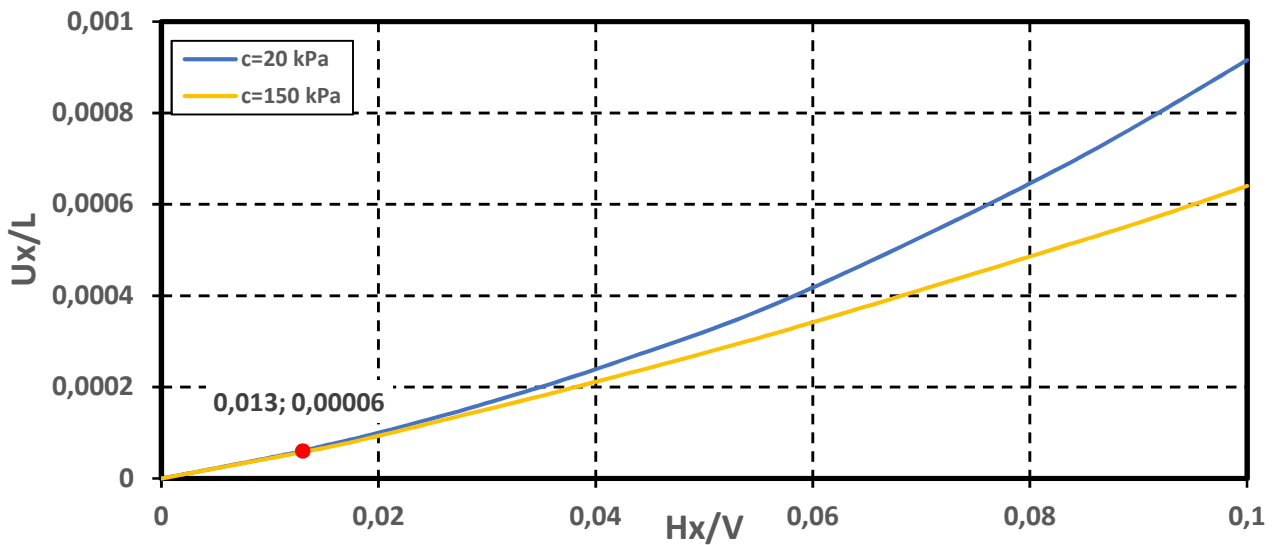
**Σχήμα 4.37** : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=500 \text{ MPa}$



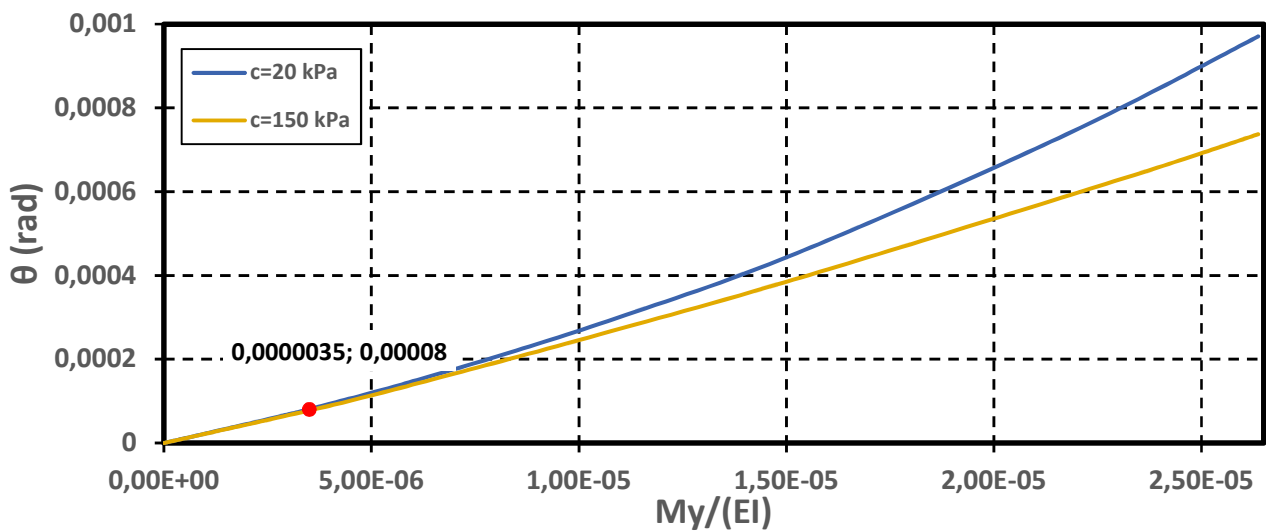
**Σχήμα 4.38** : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=500 \text{ MPa}$



## 2. $E = 330 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )

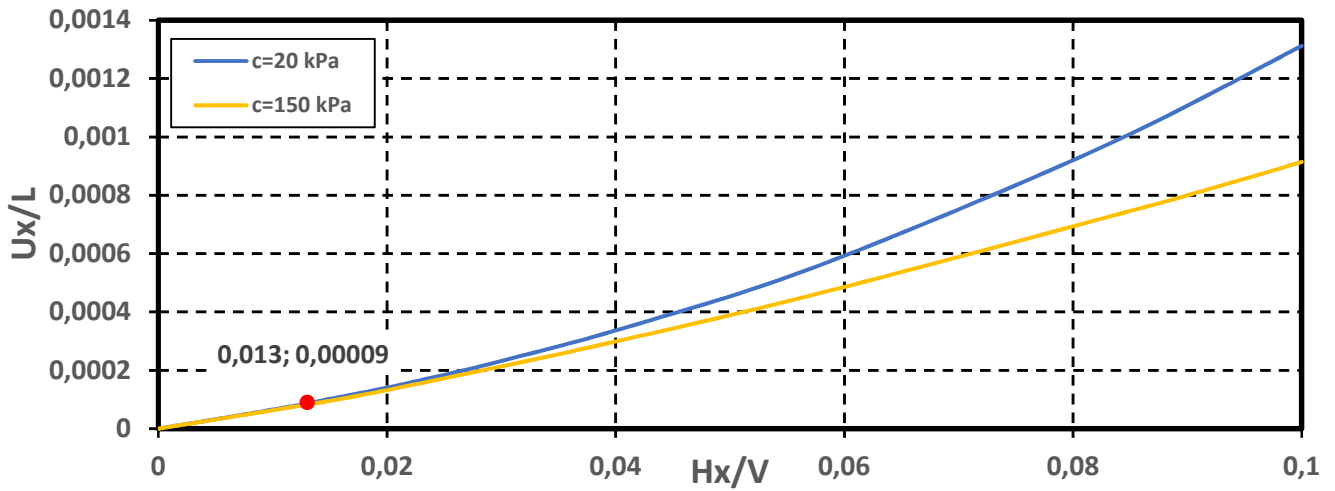


**Σχήμα 4.39 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=330 \text{ MPa}$

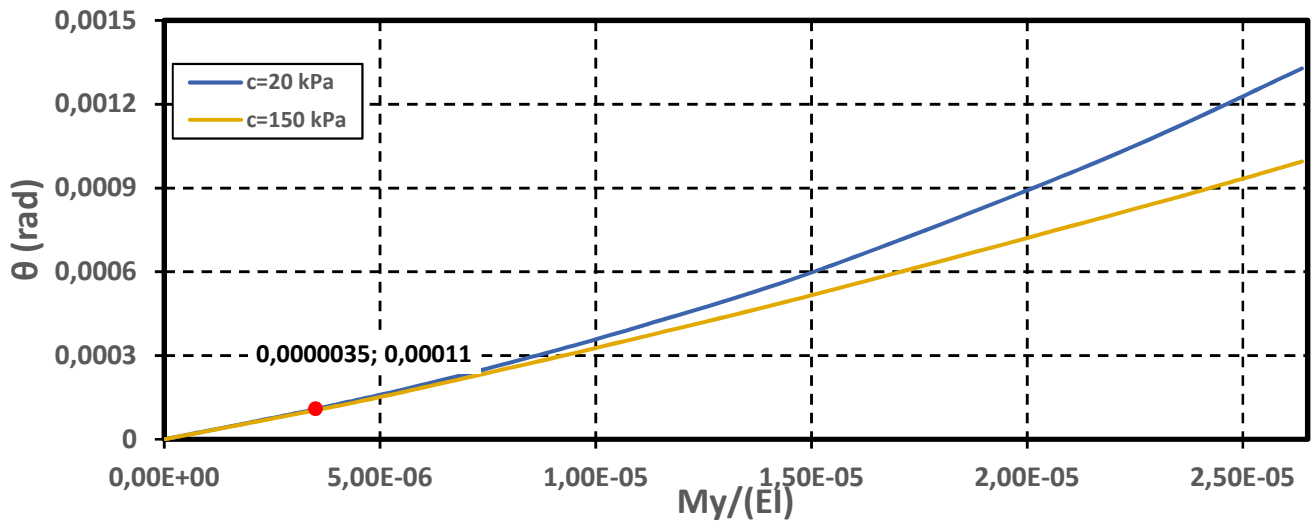


**Σχήμα 4.40 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία  $(EI)$  για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=330 \text{ MPa}$

### 3. $E = 220 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )

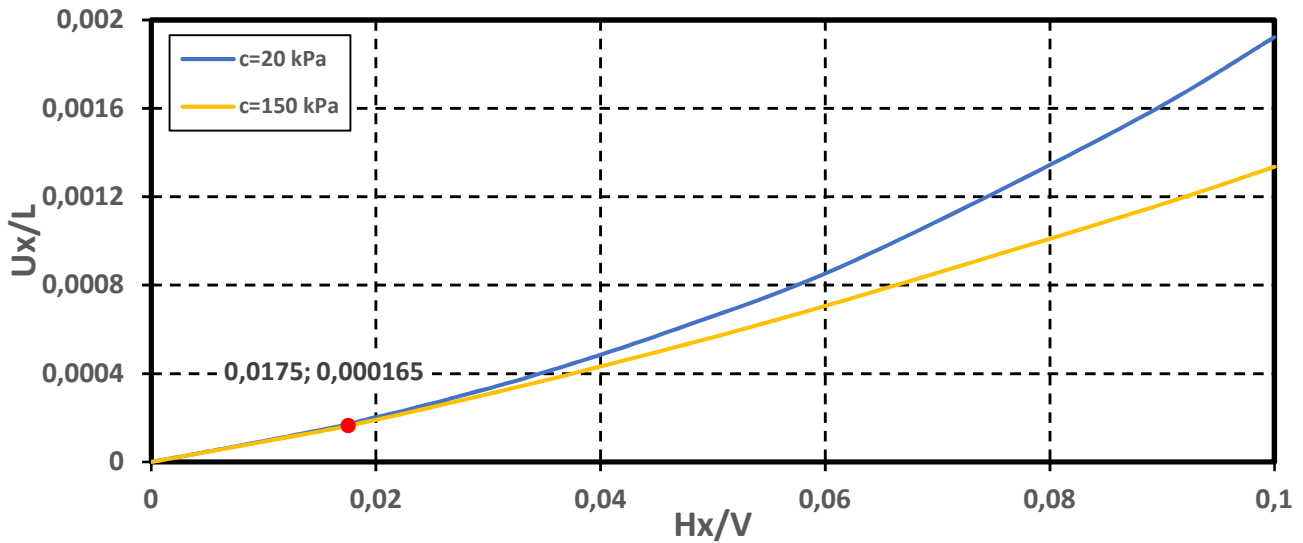


**Σχήμα 4.41 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=220 \text{ MPa}$

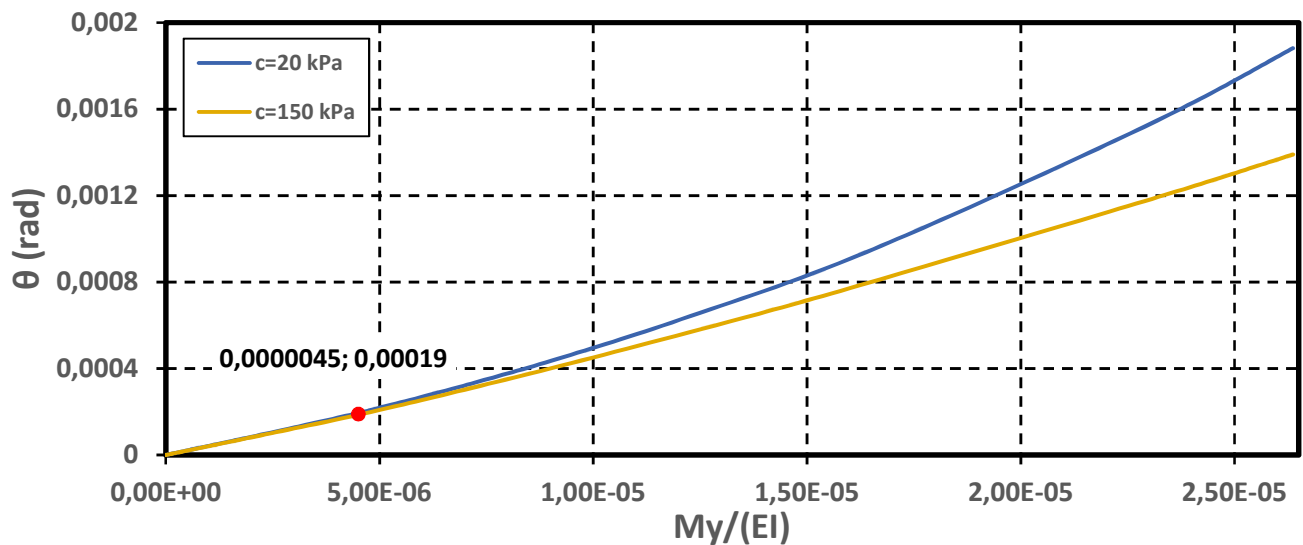


**Σχήμα 4.42 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=220 \text{ MPa}$

#### 4. $E = 145 \text{ MPa}$ ( $H = 1500 \text{ kN}$ )

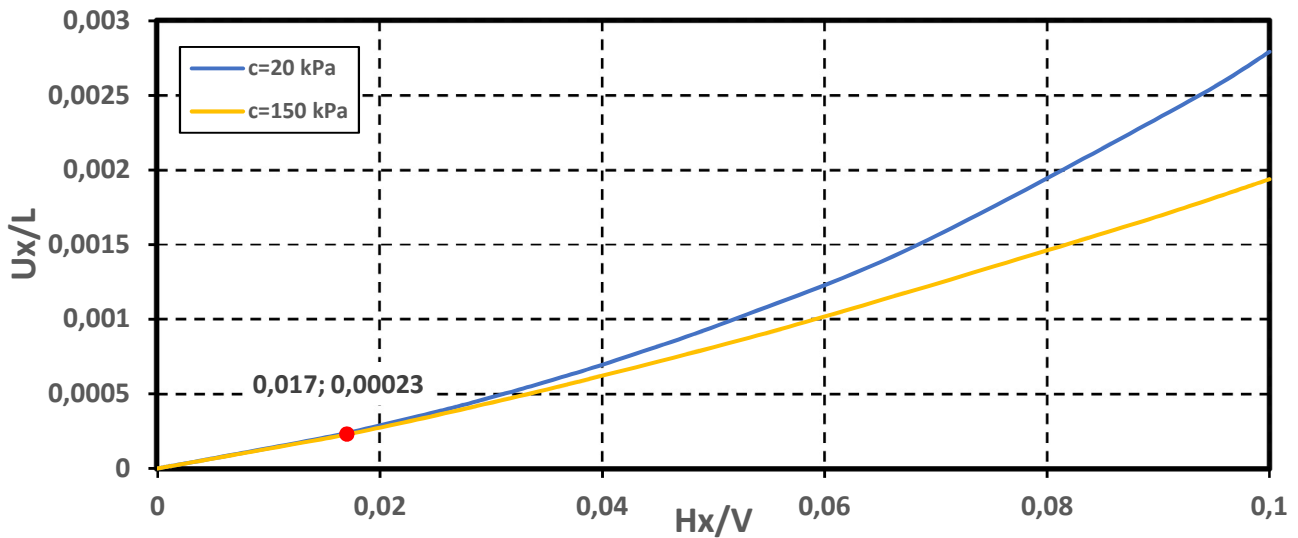


**Σχήμα 4.43 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=145 \text{ MPa}$

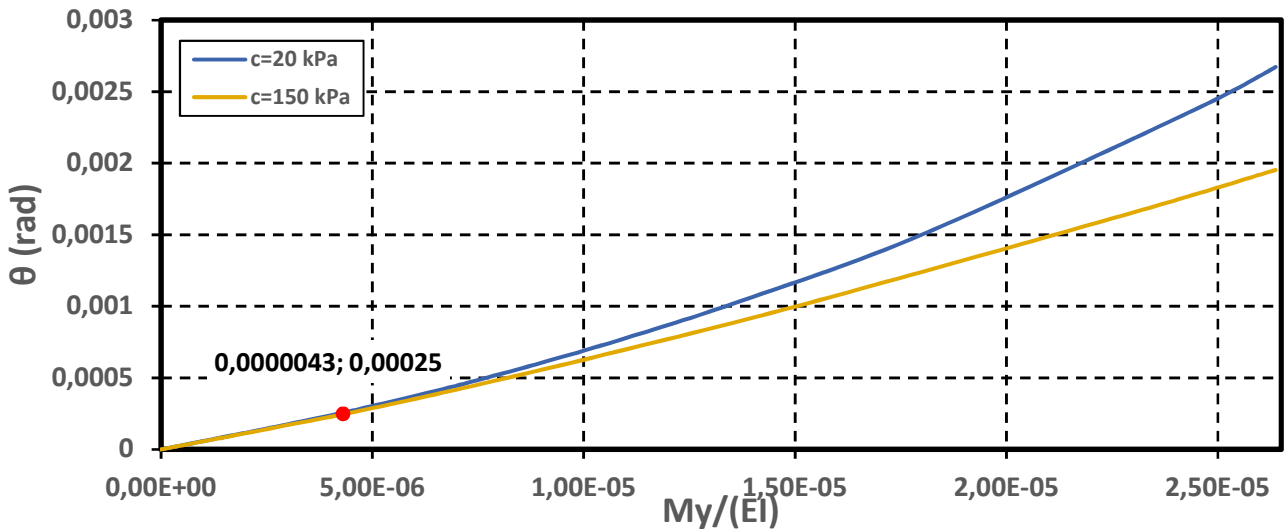


**Σχήμα 4.44 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=145 \text{ MPa}$

**5.  $E = 97.5 \text{ MPa}$  ( $H = 1500 \text{ kN}$ )**

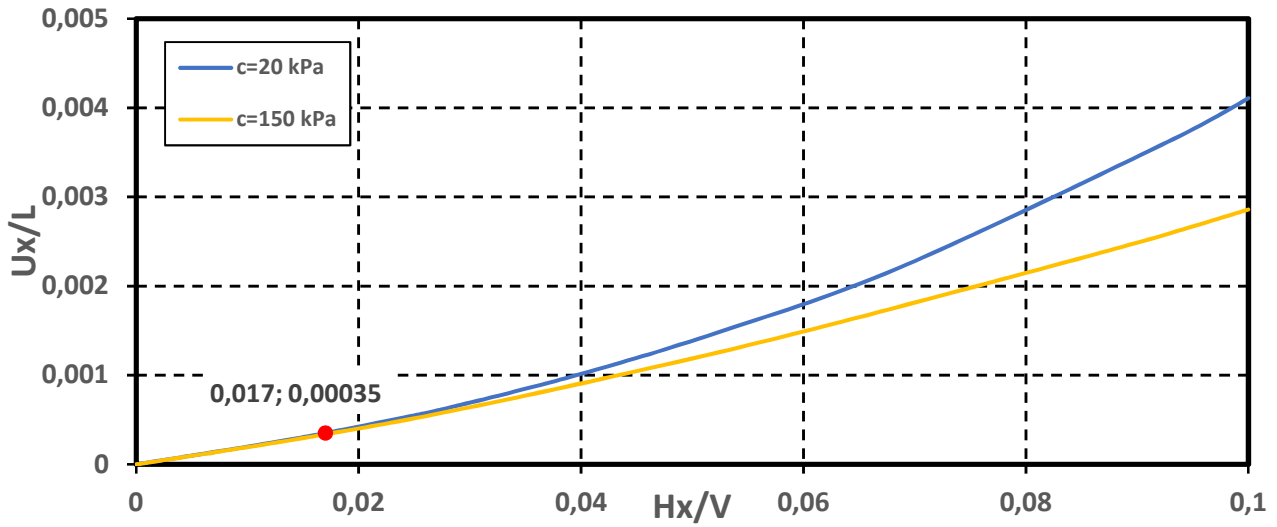


**Σχήμα 4.45 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=97.5 \text{ MPa}$

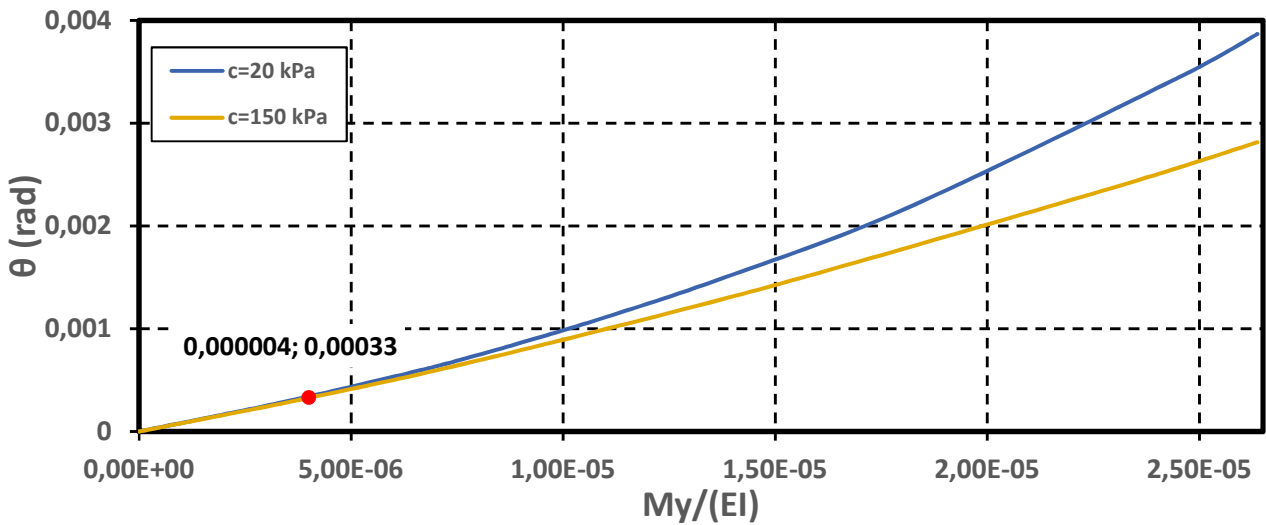


**Σχήμα 4.46 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=97.5 \text{ MPa}$

**6.  $E = 65 \text{ MPa}$  ( $H = 1500 \text{ kN}$ )**

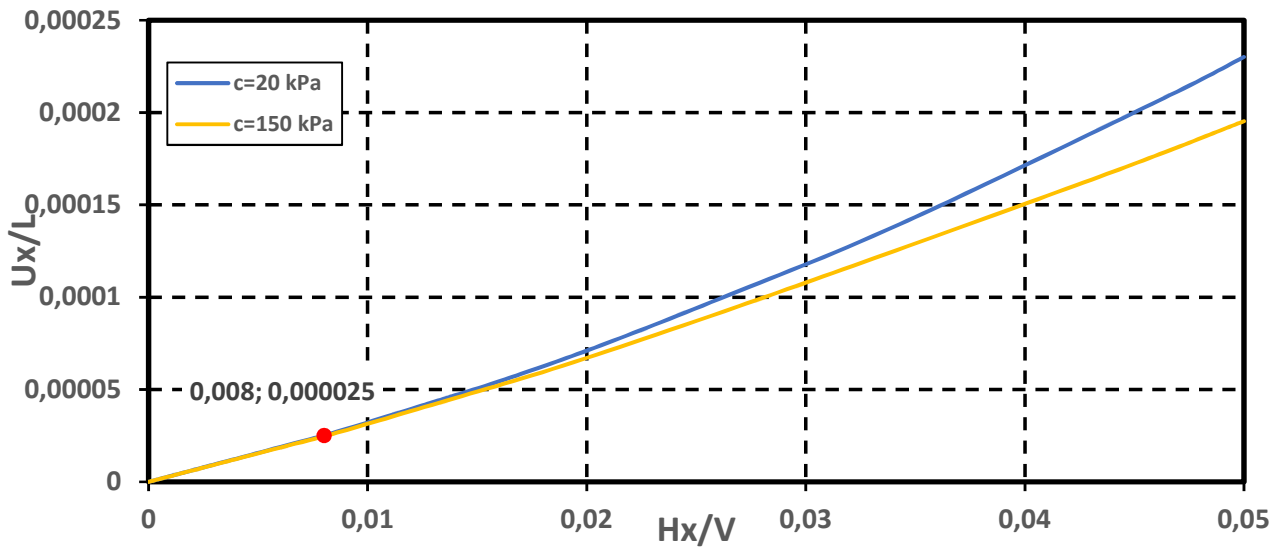


**Σχήμα 4.47** : Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=65 \text{ MPa}$

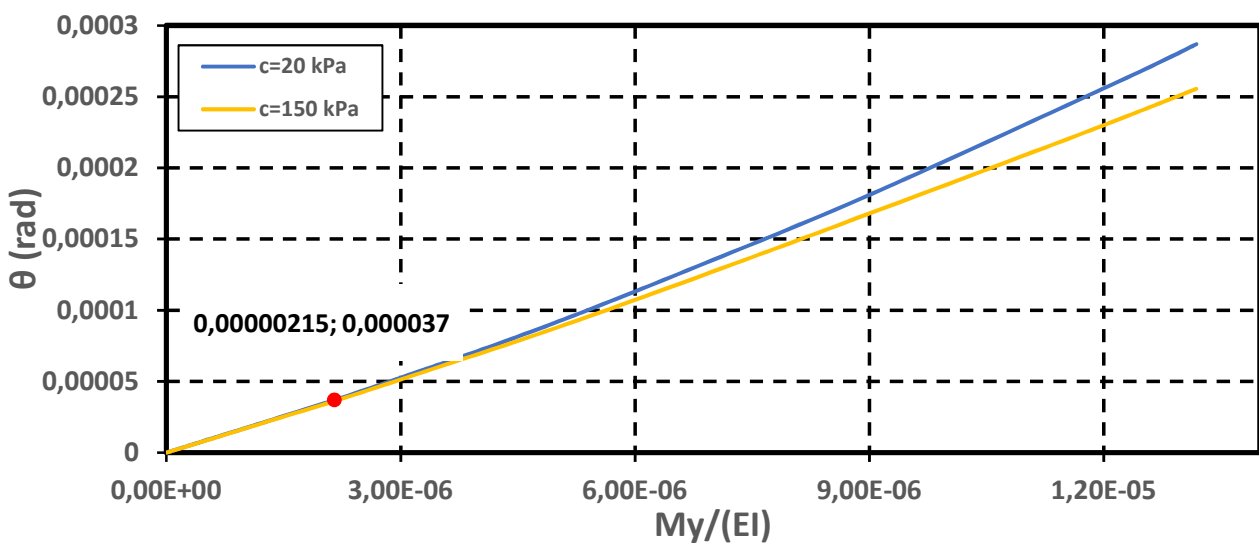


**Σχήμα 4.48** : Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία  $(EI)$  για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=65 \text{ MPa}$

**7.  $E = 500 \text{ MPa}$  ( $H = 750 \text{ kN}$ )**

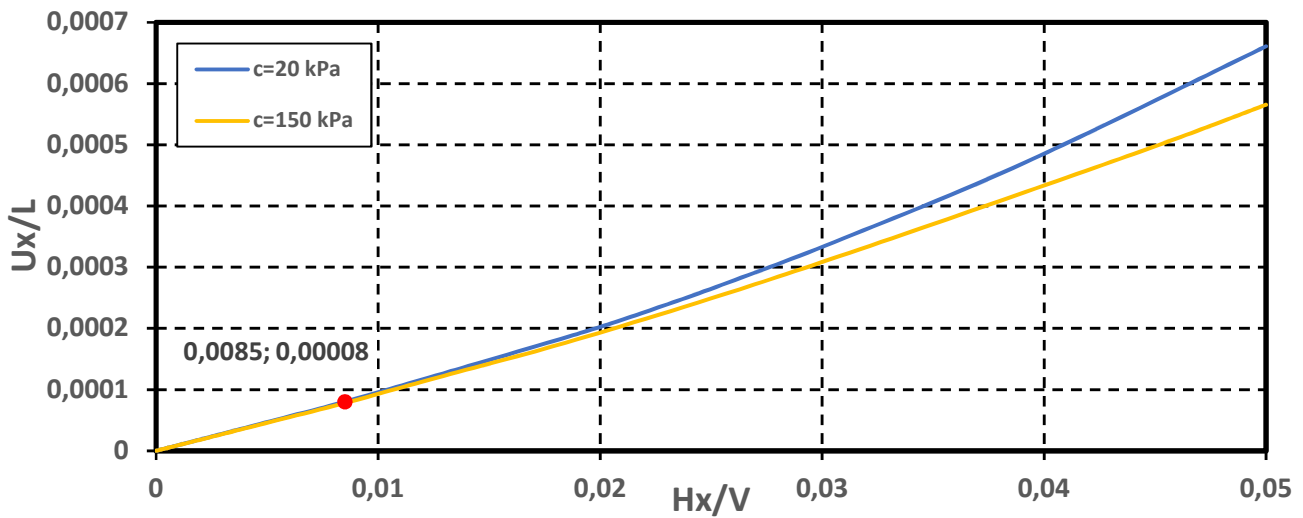


**Σχήμα 4.49 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=500 \text{ MPa}$

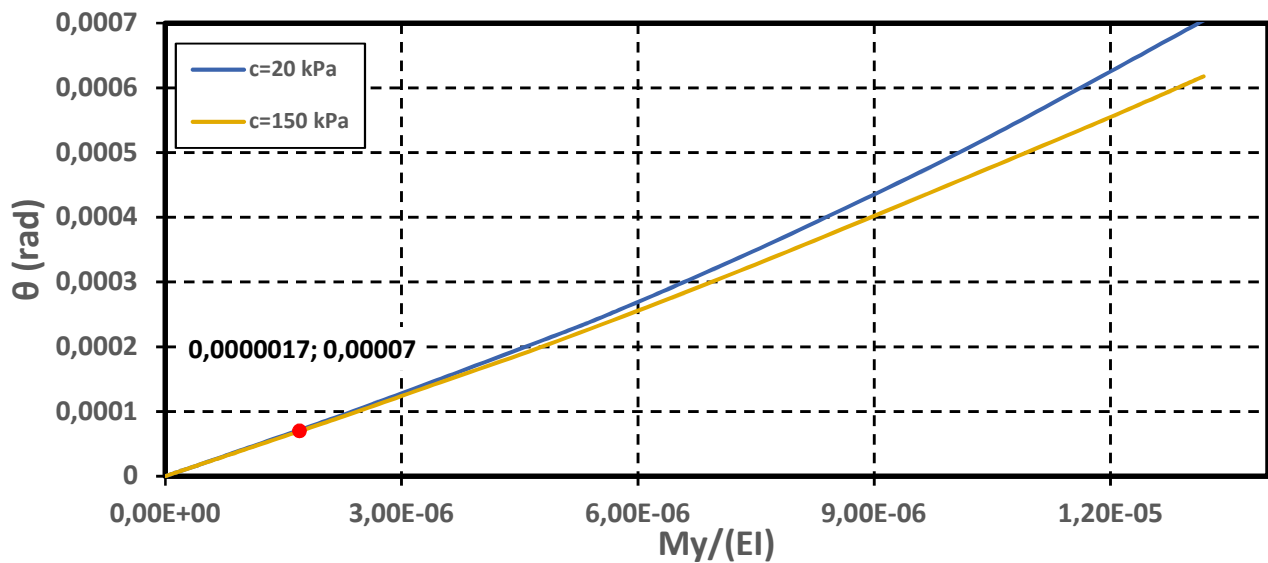


**Σχήμα 4.50 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=500 \text{ MPa}$

**8.  $E = 145 \text{ MPa}$  ( $H = 750 \text{ kN}$ )**

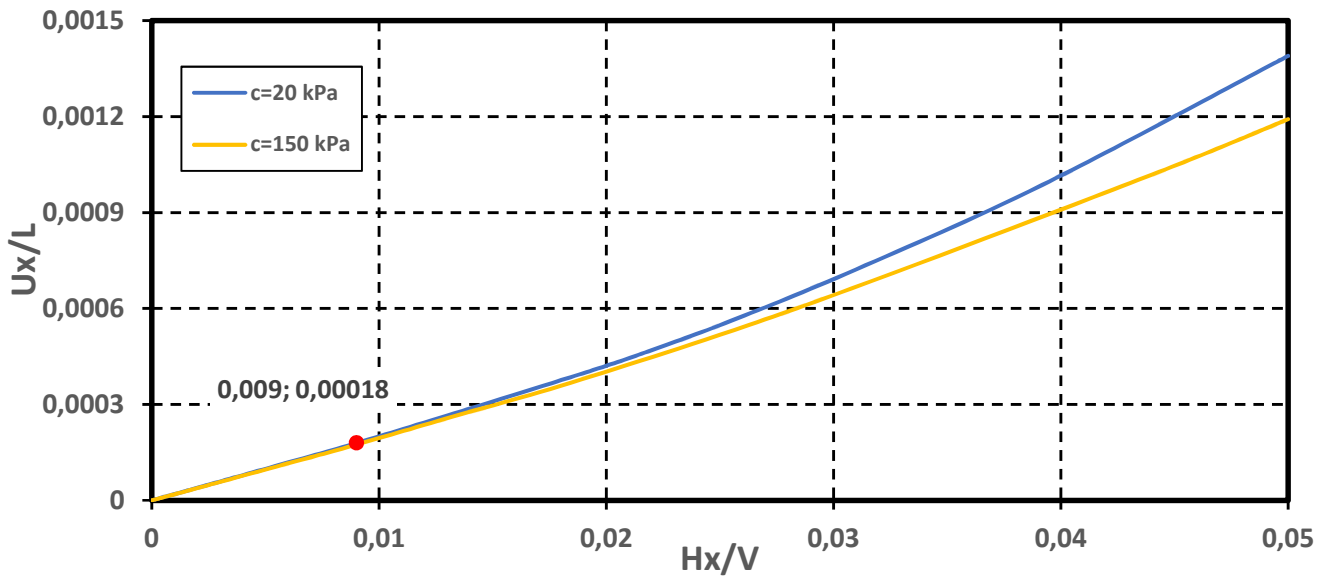


**Σχήμα 4.51 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=145 \text{ MPa}$

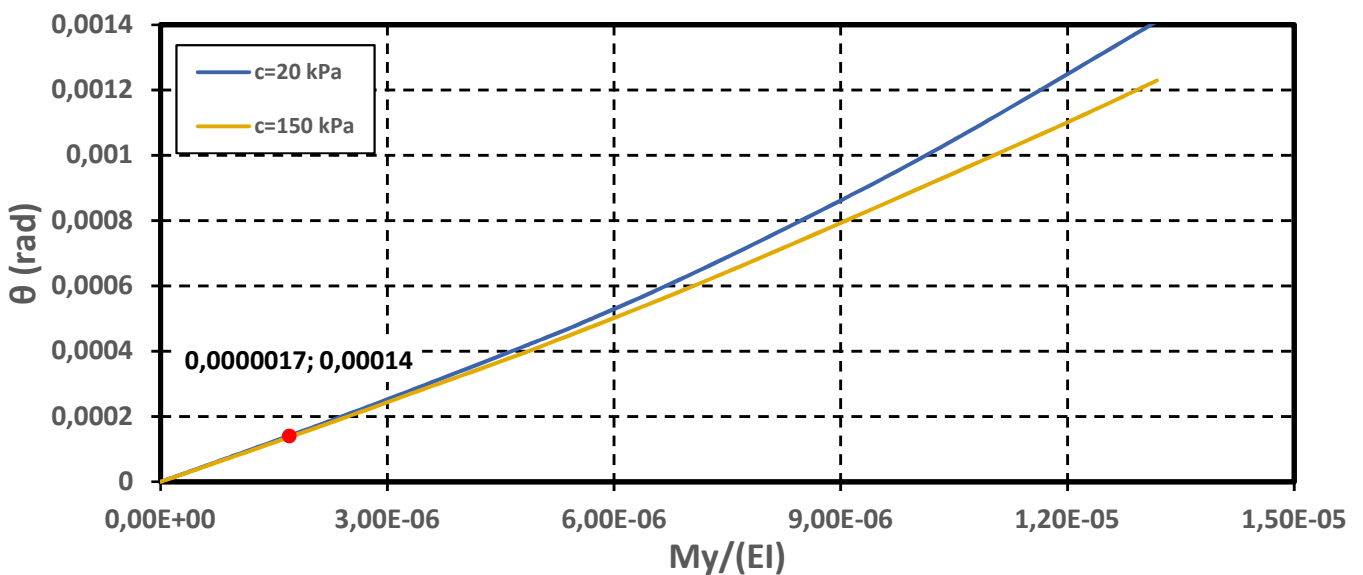


**Σχήμα 4.52 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=145 \text{ MPa}$

**9.  $E = 65 \text{ MPa}$  ( $H = 750 \text{ kN}$ )**



**Σχήμα 4.53 :** Διάγραμμα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=65 \text{ MPa}$



**Σχήμα 4.54 :** Διάγραμμα στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ) για μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E=65 \text{ MPa}$

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται οι μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για τις αναλύσεις που έγιναν για φρέαρ βάθους  $D=12 \text{ m}$ .



**Πίνακας 4.11 :** Μέγιστες τιμές οριζόντιας μετακίνησης ( $U_x$ ) και στροφής ( $\theta$ ) για φρέαρ βάθους  $D=12$  m

c=20 kPa				
H (kN)	E (MPa)	$U_x$ (m)	$U_x/L$	$\theta$ (rad)
1500	500	0.005160	0.00064	0.00072
	330	0.007330	0.00092	0.00097
	220	0.010497	0.00131	0.00133
	145	0.015381	0.00192	0.00188
	97.5	0.022340	0.00279	0.00267
	65	0.032860	0.00411	0.00387
750	500	0.001840	0.00023	0.00029
	145	0.005287	0.00066	0.00070
	65	0.011120	0.00139	0.00141
c=150 kPa				
H (kN)	E (MPa)	$U_x$ (m)	$U_x/L$	$\theta$ (rad)
1500	500	0.00360	0.00045	0.00056
	330	0.00512	0.00064	0.00074
	220	0.00734	0.00091	0.00099
	145	0.01068	0.00134	0.00139
	97.5	0.01551	0.00194	0.00195
	65	0.00229	0.00286	0.00281
750	500	0.00156	0.00020	0.00026
	145	0.00452	0.00057	0.00062
	65	0.00953	0.00119	0.00123

#### 4.4.1 Σχολιασμός διαγραμμάτων

Από την σύγκριση των ανωτέρω αποτελεσμάτων των αντιστοίχων αναλύσεων, διαπιστώνεται ότι:

- Σε καμία από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν δεν παρουσιάστηκε αστοχία της βραχόμαζας για όλες τις τιμές της συνοχής.

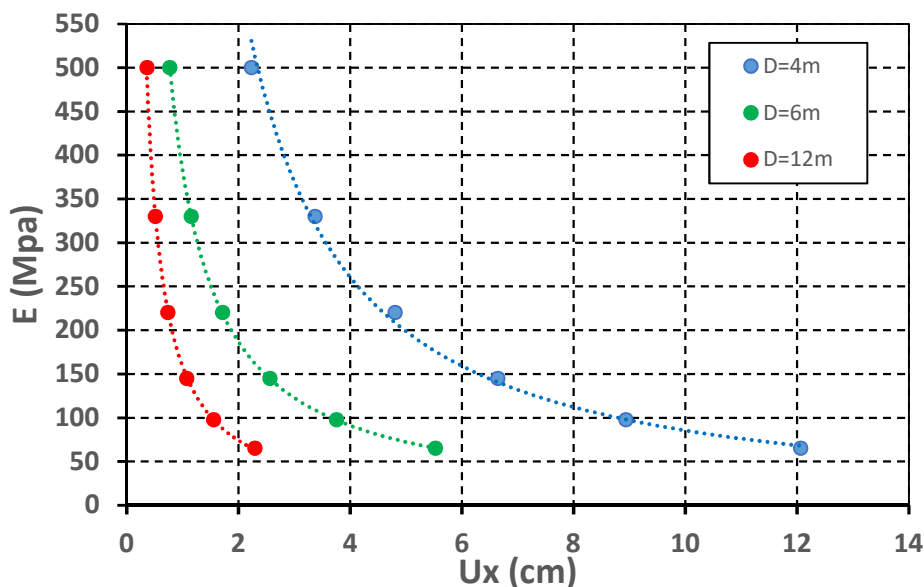
- Τα διαγράμματα για οριζόντιο φορτίο  $H=1500\text{kN}$  και  $H=750\text{kN}$  παρουσιάζονται ομοιόμορφα μεταξύ τους, με περιορισμένο εύρος διαφοροποιήσεων των αδιαστατικοποιημένων μετατοπίσεων και στροφών για τις αντίστοιχες μεταβολές της συνοχής.
- Και για τα δύο επίπεδα φορτίων που εξετάστηκαν τα διαγράμματα τείνουν να έχουν γραμμική μορφή, χωρίς τις εκθετικές διαφοροποιήσεις στην περιοχή του μέγιστου φορτίου, που παρατηρήθηκε για μικρότερα βάθη φρέατος.
- Για το ανωτέρω βάθος φρέατος  $D=12\text{m}$  διαπιστώθηκε, (όπως και για λοιπά βάθη που εξετάστηκαν) ότι μείωση του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας οδηγεί σε εκθετικά αντιστρόφως μεγαλύτερες τιμές της αδιαστατικοποιημένης μετατόπισης και στροφής.

#### 4.5 Επιρροή του μέτρου ελαστικότητας

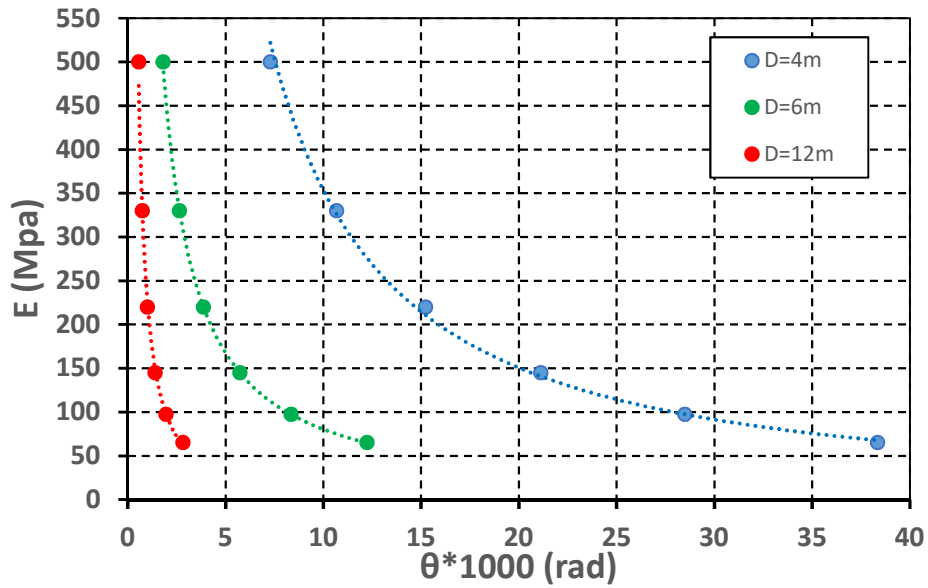
Για τη διερεύνηση της επιρροής του μέτρου ελαστικότητας ( $E$ ) στις μετακινήσεις και στροφές της κεφαλής αυτού, για διαφορετικά βάθη φρέατος ( $D$ ) και δεδομένη τιμή της συνοχής της βραχώμαζας ( $c$ ), και συντάχθηκαν τα διαγράμματα που ακολουθούν, τα οποία παριστούν τις ανωτέρω τελικές μετακινήσεις και στροφές, όταν το φορτίο έχει λάβει τη μέγιστη τιμή του, για τις διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας. Συντάχθηκαν χωριστά διαγράμματα για τις δύο ακραίες τιμές της συνοχής  $c=20\text{kPa}$  και  $c=150\text{kPa}$  και για τιμές του φορτίου  $H=1500\text{kN}$ .

Για λόγους πληρότητας και δεδομένου ότι για  $c=20\text{kPa}$  και  $D=4\text{m}$  στη μέγιστη τιμή του φορτίου  $H=1500\text{kN}$  επέρχεται αστοχία του φρέατος, λόγω πλαστικοποίησης της βραχώμαζας, παρουσιάζονται επιπρόσθετα τα αντίστοιχα διαγράμματα για φορτίο  $H=750\text{kN}$ .

#### 1. $H=1500\text{kN}$ , $c=150\text{kPa}$

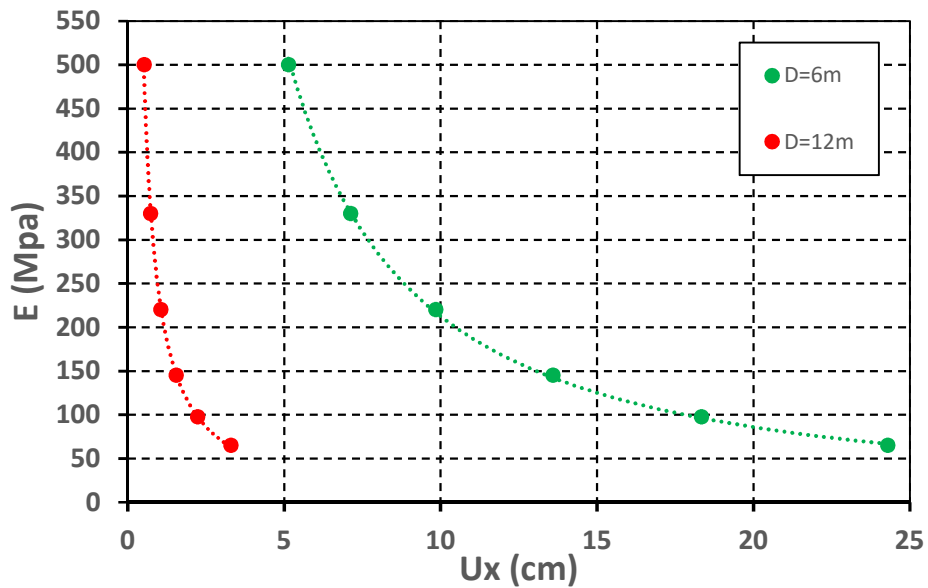


**Σχήμα 4.55 :** Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσεως του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο  $H=1500\text{ kN}$  και  $c=150\text{ kPa}$

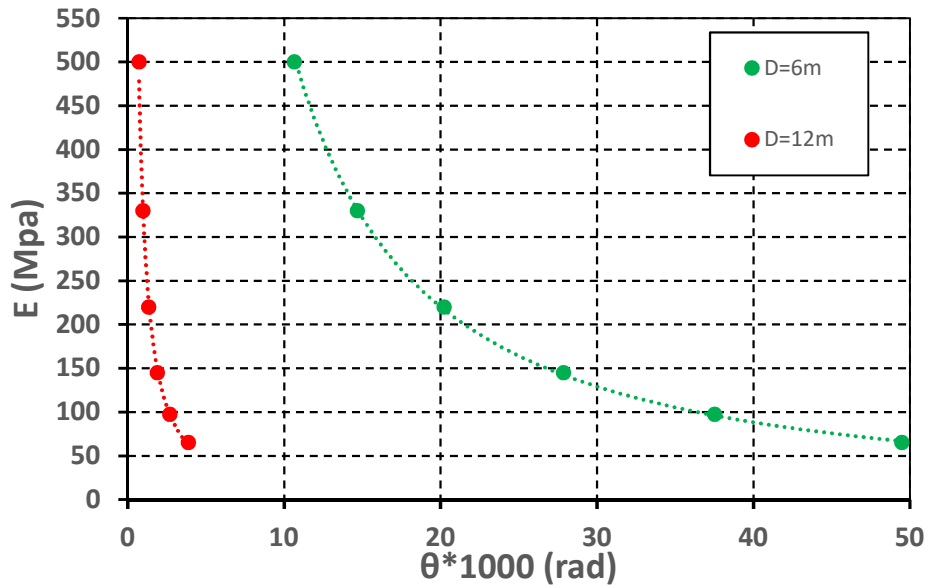


Σχήμα 4.56 : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο  $H=1500$  kN και  $c=150$  kPa

## 2. $H=1500$ kN, $c=20$ kPa

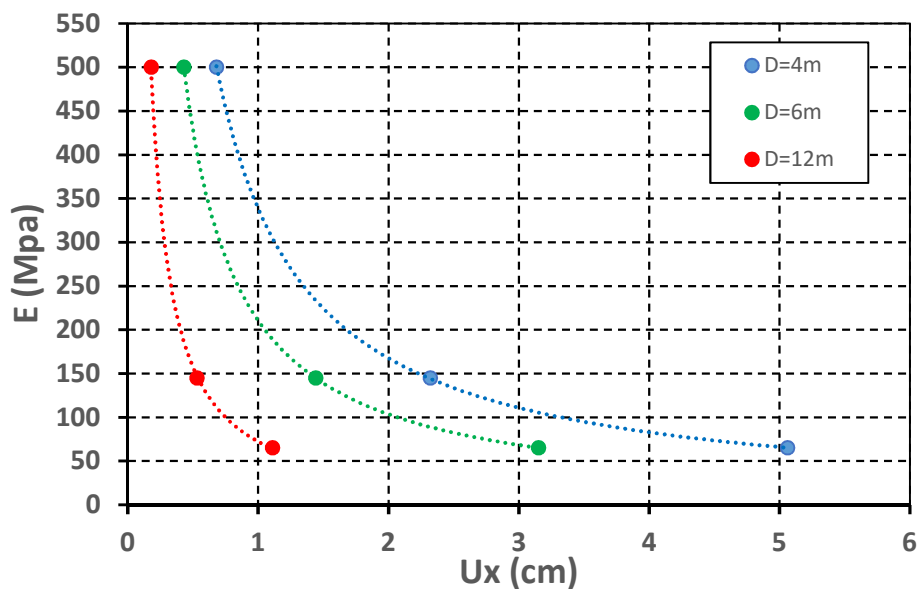


Σχήμα 4.57 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο  $H=1500$  kN και  $c=20$  kPa

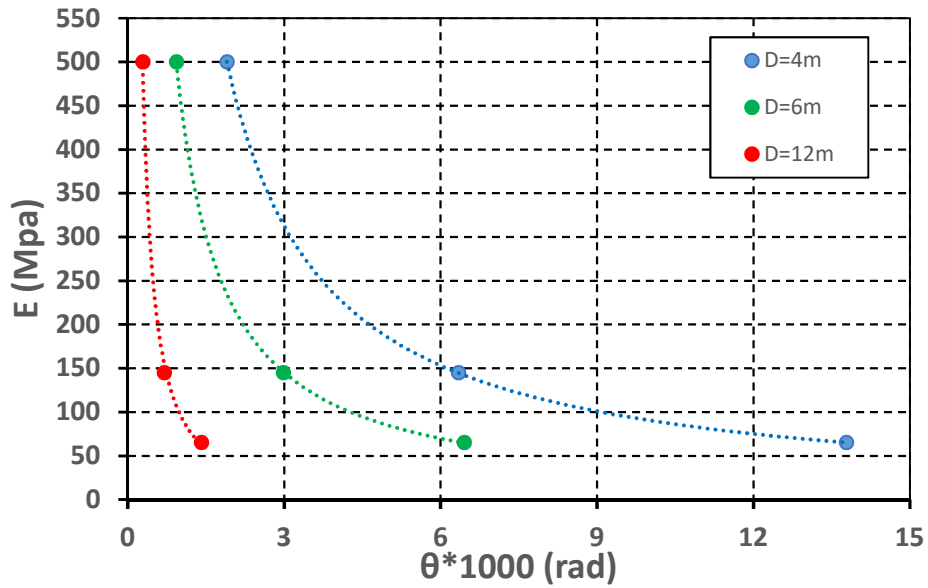


Σχήμα 4.58 : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσεως του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο  $H=1500$  kN και  $c=20$  kPa

### 3. $H=750$ kN, $c=150$ kPa

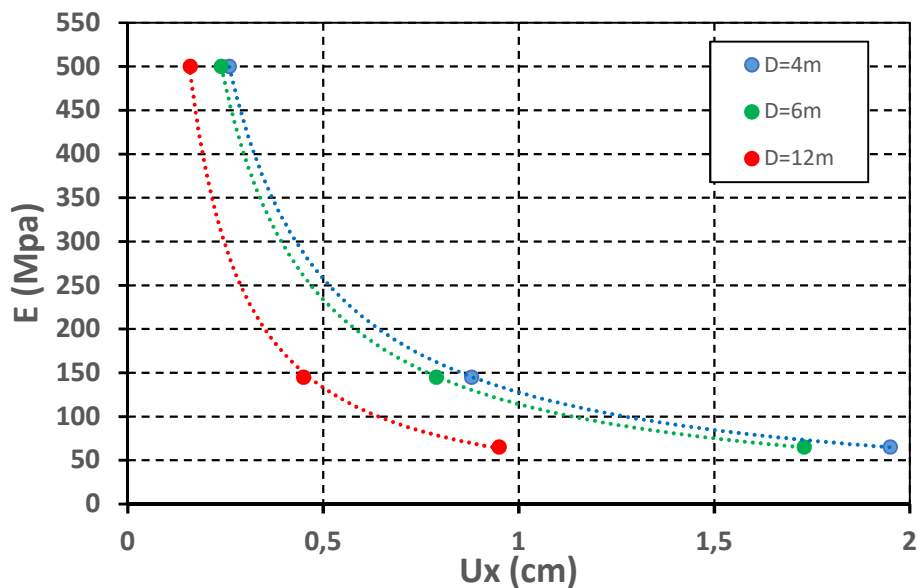


Σχήμα 4.59 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσεως του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο  $H=750$  kN και  $c=150$  kPa

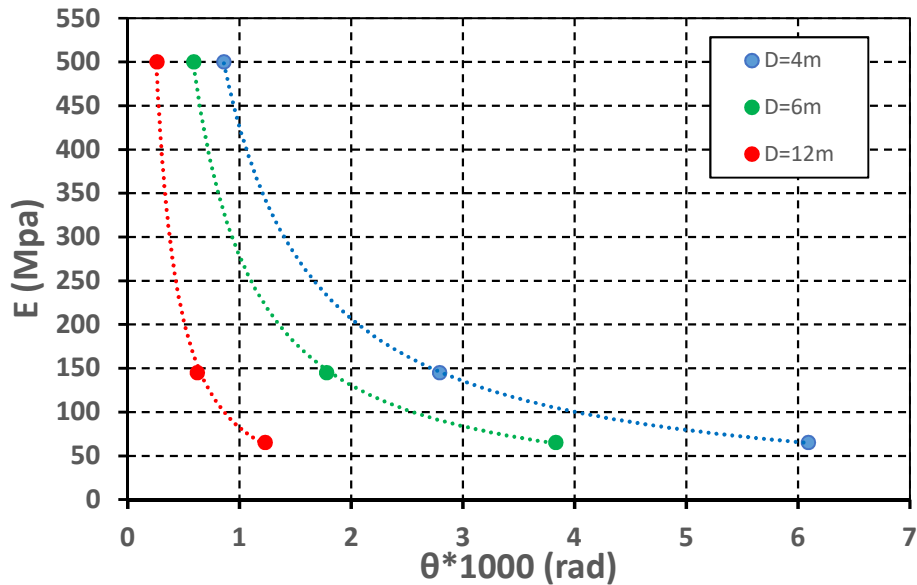


Σχήμα 4.60 : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσεως του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο  $H=750 \text{ kN}$  και  $c=150 \text{ kPa}$

#### 4. $H=750 \text{ kN}$ , $c=20 \text{ kPa}$



Σχήμα 4.61 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσεως του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο  $H=750 \text{ kN}$  και  $c=20 \text{ kPa}$



**Σχήμα 4.62** : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τα διάφορα βάθη φρέατος, με οριζόντιο φορτίο  $H=750 \text{ kN}$  και  $c=20 \text{ kPa}$

#### 4.5.1 Σχολιασμός διαγραμμάτων

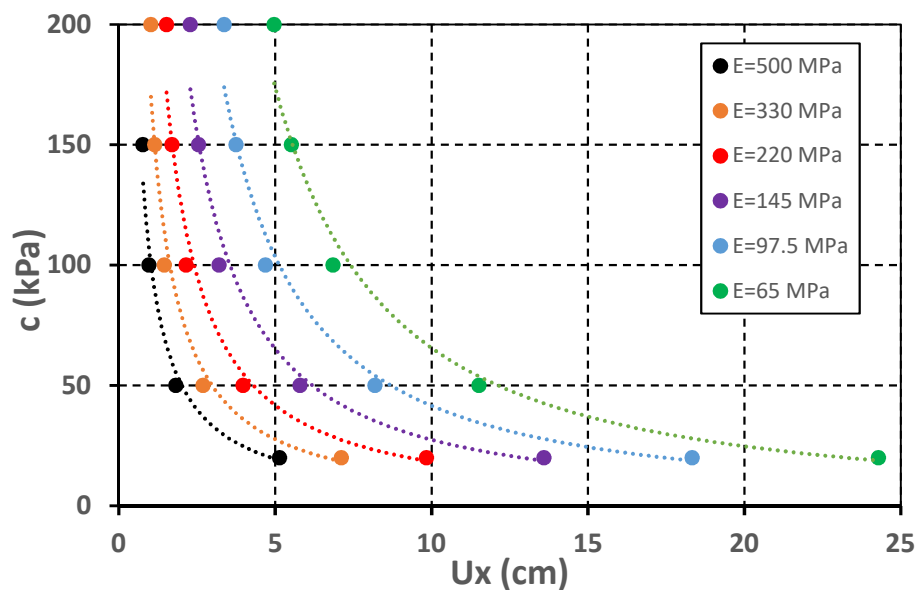
Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στα ανωτέρω διαγράμματα, διαπιστώνεται ότι:

- Αύξηση του βάθους του φρέατος οδηγεί σε μείωση των μετατοπίσεων και των στροφών κεφαλής, για συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης. Η μείωση είναι πολύ σημαντικότερη για μικρές τιμές της συνοχής.
- Μείωση του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές μετατοπίσεων και στροφών. Η αύξηση των μετατοπίσεων / στροφών είναι πολύ σημαντικότερη για μικρά βάθη φρέατος.
- Για μεγάλα βάθη φρέατος η αύξηση των μετατοπίσεων και στροφών είναι αρχικά γραμμική συναρτήσει της μείωσης του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας. Σε ιδιαίτερα μικρές τιμές συνοχής η αύξηση των μετατοπίσεων / στροφών είναι μη γραμμική.
- Για μικρά βάθη φρέατος η αύξηση μετατοπίσεων και στροφών συναρτήσει της μείωσης του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας είναι μη γραμμική και παρουσιάζει μορφή υπερβολής.
- Η υπερβολικής μορφής αύξηση μετατοπίσεων και στροφών, τόσο λόγω μείωσης του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας όσο και λόγω μείωσης του βάθους του φρέατος, οφείλεται στην προοδευτικά αυξανόμενη περιοχή της βραχόμαζας γύρω από το φρέαρ που πλαστικοποιείται.
- Η μορφή των διαγραμμάτων μετακινήσεων και στροφών είναι όμοια για τα δύο διαφορετικά επίπεδα φορτίου που εξετάστηκαν ( $H=1500\text{kN}$  &  $H=750\text{kN}$ ) αλλά, όπως ήταν αναμενόμενο, με αντίστοιχα μικρότερες τιμές των υπόψη μεγεθών.

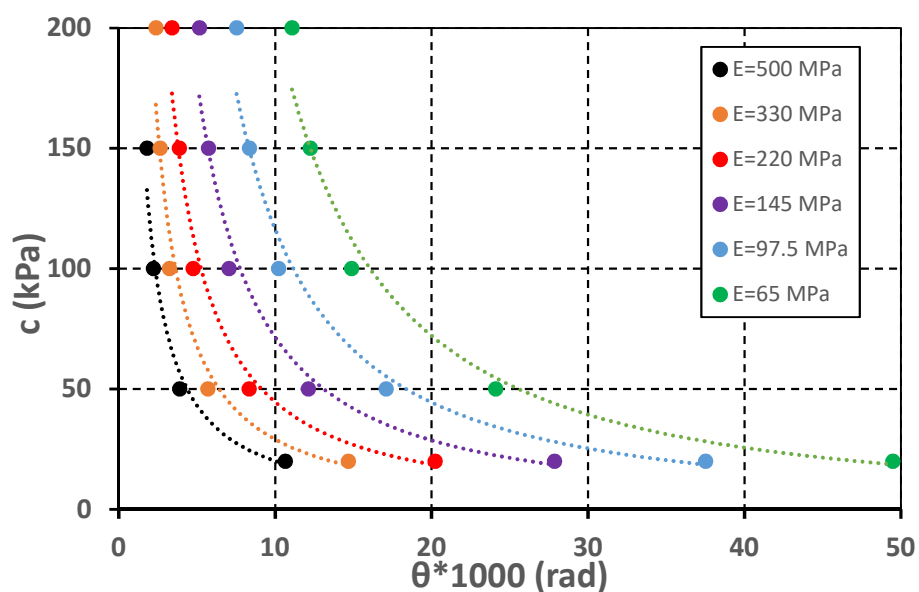
#### 4.6 Επιρροή της συνοχής της βραχώμαζας

Για τη διερεύνηση της επιρροής της συνοχής ( $c$ ) της βραχώμαζας στις μετακινήσεις και στροφές της κεφαλής του φρέατος, για τα διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας της βραχώμαζας ( $E$ ) και για δεδομένο βάθος φρέατος, συντάχθηκαν τα διαγράμματα που ακολουθούν, τα οποία παριστούν τις ανωτέρω τελικές μετακινήσεις και στροφές, όταν το φορτίο έχει λάβει τη μέγιστη τιμή του, για τις διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας. Συντάχθηκαν διαγράμματα για βάθος φρέατος  $D=6\text{m}$  και τελικό φορτίο  $H=1500\text{kN}$ , για τα οποία είχαν πραγματοποιηθεί περισσότεροι σχετικοί υπολογισμοί.

- **D=6 m, H=1500kN**



Σχήμα 4.63 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσει της συνοχής της βραχώμαζας για τις διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας



Σχήμα 4.64 : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσει της συνοχής της βραχώμαζας για τις διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας

#### 4.6.1 Σχολιασμός διαγραμμάτων

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στα ανωτέρω διαγράμματα, διαπιστώνεται ότι:

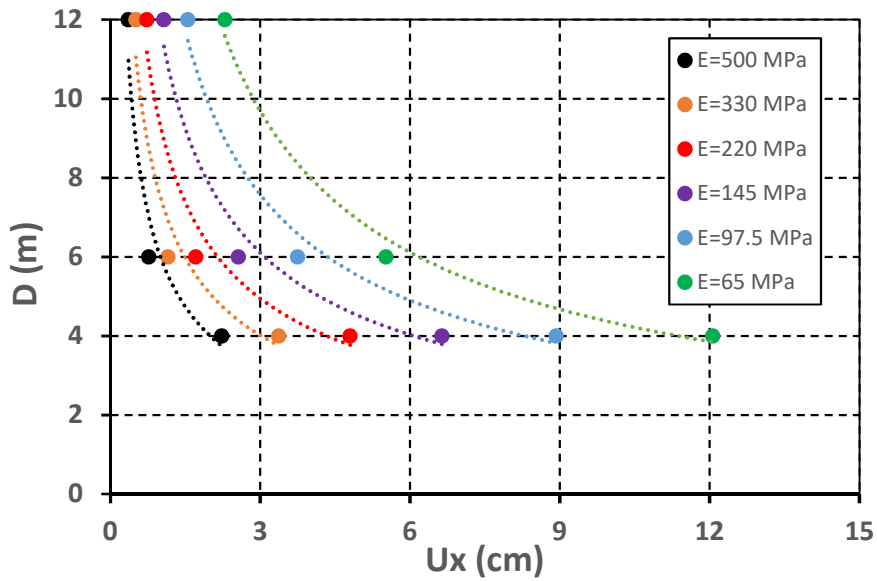
- Μείωση της συνοχής της βραχώμαζας οδηγεί σε αύξηση των μετατοπίσεων και των στροφών κεφαλής, για συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης και βάθος φρέατος. Η αύξηση είναι πολύ σημαντικότερη για μικρές τιμές της συνοχής.
- Μείωση του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας οδηγεί σε αύξηση των μετατοπίσεων και των στροφών κεφαλής, για συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης και βάθος φρέατος. Η αύξηση είναι πολύ σημαντικότερη για μικρές τιμές της συνοχής.
- Για μεγάλες τιμές του μέτρου ελαστικότητας η αύξηση των μετατοπίσεων και στροφών είναι αρχικά γραμμική συναρτήσει της μείωσης της συνοχής της βραχώμαζας. Σε ιδιαίτερα μικρές τιμές συνοχής η αύξηση των μετατοπίσεων / στροφών είναι μη γραμμική.
- Για μικρές τιμές του μέτρου ελαστικότητας η αύξηση μετατοπίσεων και στροφών συναρτήσει της μείωσης της συνοχής της βραχώμαζας είναι μη γραμμική και παρουσιάζει μορφή υπερβολής.
- Η υπερβολικής μορφής αύξηση μετατοπίσεων και στροφών, τόσο λόγω μείωσης της συνοχής όσο και λόγω μείωσης του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας, οφείλεται στην προοδευτικά αυξανόμενη περιοχή της βραχώμαζας γύρω από το φρέαρ που πλαστικοποιείται.

#### 4.7 Επιρροή του βάθους του φρέατος

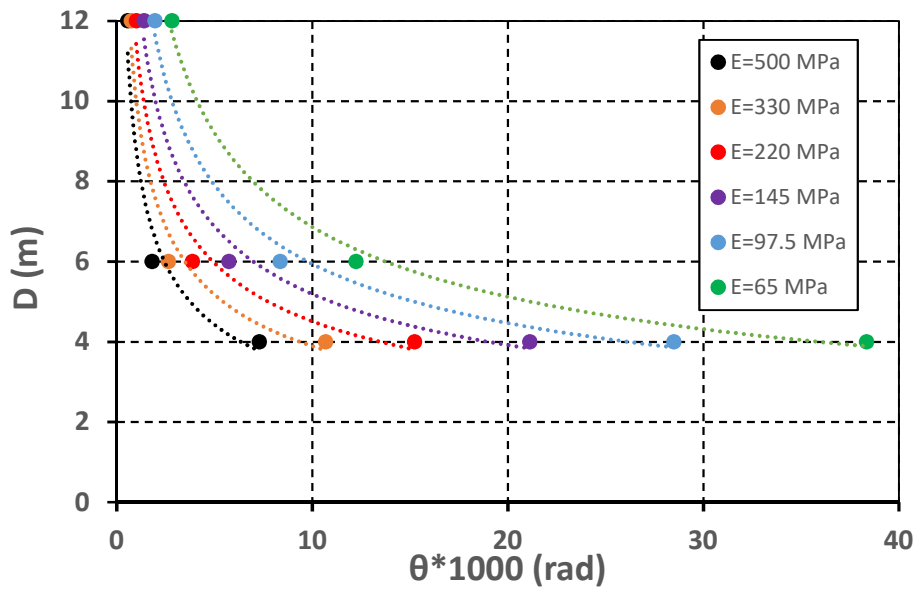
Για τη διερεύνηση της επιρροής του βάθους του φρέατος (D) στις μετακινήσεις και στροφές της κεφαλής αυτού, για τα διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας της βραχώμαζας (E) και για σταθερή τιμή της συνοχής, συντάχθηκαν τα διαγράμματα που ακολουθούν, τα οποία παριστούν τις ανωτέρω τελικές μετακινήσεις και στροφές, όταν το φορτίο έχει λάβει τη μέγιστη τιμή του, για τις διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας. Συντάχθηκαν διαγράμματα για συνοχή  $c=150\text{kPa}$  και τελικό φορτίο  $H=1500\text{kN}$ . Αντίστοιχα διαγράμματα προκύπτουν για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής που εξετάστηκαν. Για χαμηλές τιμές της συνοχής θα πρέπει να ληφθεί υπόψη μικρότερο τελικό φορτίο, καθόσον για το φορτίο των  $H=1500\text{kN}$  επέρχεται αστοχία του φρέατος βάθους 4m .



- **H=1500kN, c=150kPa**



**Σχήμα 4.65 :** Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσει του βάθους του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας

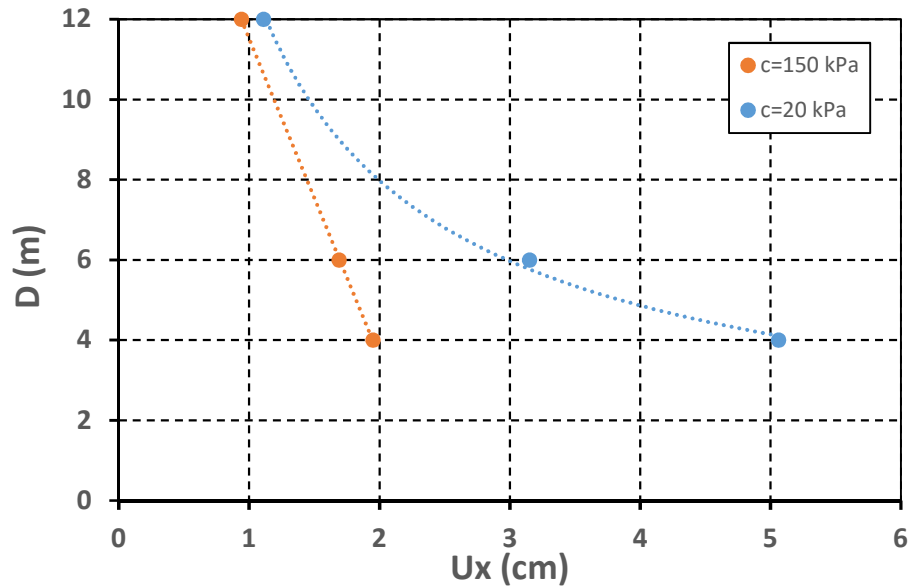


**Σχήμα 4.66 :** Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσει του βάθους του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας

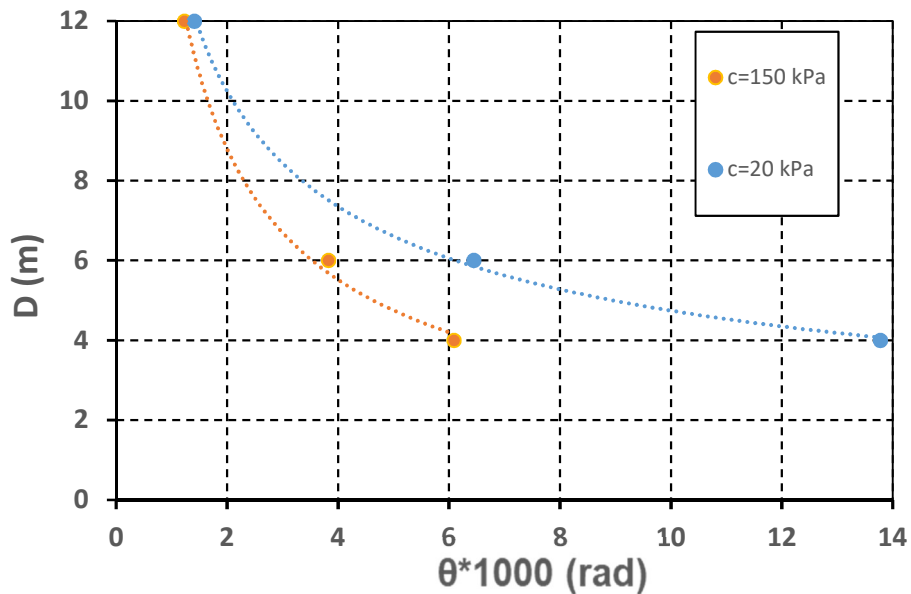
Αντίστοιχα διαγράμματα προκύπτουν για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής που εξετάστηκαν, για σταθερή τιμή του μέτρου ελαστικότητας. Για χαμηλές τιμές της συνοχής θα πρέπει να ληφθεί υπόψη μικρότερο τελικό φορτίο, καθόσον για το φορτίο των H=1500kN επέρχεται αστοχία του φρέατος βάθους 4,00μ. Για το λόγο αυτό

παρουσιάζονται τα ως άνω διαγράμματα για τελικό φορτίο  $H=750\text{kN}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=65\text{MPa}$ .

- **$H=750\text{kN}$ ,  $E=65\text{MPa}$**



**Σχήμα 4.67** : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος συναρτήσει του βάθους του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής της βραχώμαζας



**Σχήμα 4.68** : Στροφές κεφαλής φρέατος συναρτήσει του βάθους του φρέατος για τις διαφορετικές τιμές της συνοχής της βραχώμαζας

#### 4.7.1 Σχολιασμός διαγραμμάτων

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στα ανωτέρω διαγράμματα, διαπιστώνεται ότι:

- Μείωση του βάθους του φρέατος οδηγεί σε αύξηση των μετατοπίσεων και των στροφών κεφαλής, για συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης, μέτρο ελαστικότητας και συνοχή της βραχώμαζας. Η αύξηση των υπόψη μεγεθών έχει εκθετική μορφή για μικρά βάθη φρέατος.
- Για μεγάλες τιμές του μέτρου ελαστικότητας η αύξηση των μετατοπίσεων και στροφών είναι αρχικά γραμμική συναρτήσει της μείωσης του βάθους του φρέατος, η οποία γίνεται μη γραμμική για μικρές τιμές του βάθους του φρέατος.
- Για μικρές τιμές του μέτρου ελαστικότητας η αύξηση μετατοπίσεων και στροφών συναρτήσει της μείωσης του βάθους του φρέατος είναι απ' αρχής μη γραμμική και παρουσιάζει μορφή υπερβολής.
- Αντίστοιχη μορφή παρουσιάζει η αύξηση μετατοπίσεων και στροφών συναρτήσει του βάθους του φρέατος για μεταβλητές τιμές της συνοχής, υπό σταθερό μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας και συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης.
- Για μικρές τιμές της συνοχής η ανωτέρω αύξηση παρουσιάζει μορφή υπερβολής, ενώ για υψηλές τιμές της συνοχής, η αύξηση των μετατοπίσεων τείνει σε γραμμική μορφή, δεδομένου ότι η βραχώμαζα δεν εισέρχεται σε πλαστική περιοχή.

# 5

## ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΤΟΥ ΦΡΕΑΤΟΣ

### 5.1 Εισαγωγή

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου ήταν ο προσδιορισμός αναλυτικών σχέσεων που συσχετίζουν αφ' ενός την αδιαστατικοποιημένη εγκάρσια μετακίνηση της κεφαλής του φρέατος με το αδιαστατικοποιημένο φορτίο και αφ' ετέρου τη στροφή της κεφαλής με το λόγο της ροπής ως προς την ακαμψία του φρέατος αντίστοιχα. Οι σχέσεις προέκυψαν από επεξεργασία των αποτελεσμάτων των διαφορετικών αναλύσεων, που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Με τις αναλυτικές αυτές σχέσεις μπορεί να διερευνηθεί η επιρροή της γεωμετρίας του φρέατος και των παραμέτρων της περιβάλλουσας βραχώμαζας στην δυσκαμψία του. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε.

### 5.2 Οι λόγοι $(Hx/V)/(Ux/L)$ και $\theta/(M/EI)$

Αρχικό βήμα είναι ο προσδιορισμός των λόγων της αδιαστατικοποιημένης εγκάρσιας μετακίνησης προς το αδιαστατικοποιημένο φορτίο και της αντίστοιχης ροπής προς την στροφή.

#### 5.2.1 Ο λόγος $(Hx/V)/(Ux/L)$

Στα διαγράμματα αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης ως προς το μήκος  $L$  του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο, εντοπίστηκε το σημείο μέχρι το οποίο οι γραφικές παραστάσεις για τις διαφορετικές περιπτώσεις της συνοχής ( $c$ ) έχουν κοινές τιμές, με συντεταγμένες  $(Hx/V, Ux/L)$ . Το τμήμα των διαγραμμάτων από την αρχή των αξόνων έως το ανωτέρω σημείο είναι ευθύγραμμο και η κλίση ταυτίζεται με τον λόγο  $(Ux/L)/(Hx/V)$ . Στη συνέχεια υπολογίζονται οι αντίστροφες τιμές του, δηλαδή ο λόγος  $(Hx/V)/(Ux/L)$ . Στον πίνακα 5.1 συγκεντρώνονται οι τιμές των λόγων αυτών.

Η κλίση προσδιορίστηκε από την εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζει με τον οριζόντιο άξονα, σύμφωνα με τη σχέση :

$$\lambda = \tan \varphi = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (5.1)$$

όπου

$x_i, y_i$  : οι συντεταγμένες του σημείου  $i$

**Πίνακας 5.1** : τιμές των λόγων  $(U_x/L)/(H_x/V)$  και  $(H_x/V)/(U_x/L)$  για τις εκτελεσμένες αριθμητικές αναλύσεις

D=6 m						
Hx (kN)	E (Mpa)	E/σ'vD	Hx/V	Ux/L	(Ux/L)/(Hx/V)	(Hx/V)/(Ux/L)
H=1500	500	4166.667	0.0280	0.00017	0.00607	164.70588
	330	2750	0.0230	0.00019	0.00839	119.17098
	220	1833.333	0.0230	0.00029	0.01261	79.31034
	145	1208.333	0.0210	0.00042	0.02000	50.00000
	97.5	812.5	0.0230	0.00059	0.02565	38.98305
	65	541.6667	0.0210	0.00085	0.04048	24.70588
H=750	500	4166.667	0.0085	0.00004	0.00435	229.72973
	145	1208.333	0.0085	0.00012	0.01412	70.83333
	65	541.6667	0.0080	0.00025	0.03125	32.00000
D=4 m						
Hx (kN)	E (Mpa)	E/σ'vD	Hx/V	Ux/L	(Ux/L)/(Hx/V)	(Hx/V)/(Ux/L)
H=1500	500	6250	0.0300	0.000150	0.005000	200.0000
	330	4125	0.0230	0.000160	0.006957	143.7500
	220	2750	0.0160	0.000180	0.011250	88.8889
	145	1812.5	0.0170	0.000350	0.020588	48.5714
	97.5	1218.75	0.0130	0.000350	0.026923	37.1429
	65	812.5	0.0140	0.000600	0.042857	23.3333
H=750	500	6250	0.0050	0.000025	0.005000	200.0000
	145	1812.5	0.0055	0.000080	0.014545	68.7500
	65	812.5	0.0060	0.000200	0.033333	30.0000
D=12 m						
Hx (kN)	E (Mpa)	E/σ'vD	Hx/V	Ux/L	(Ux/L)/(Hx/V)	(Hx/V)/(Ux/L)
H=1500	500	2083.333	0.0130	0.000040	0.003077	325.0000
	330	1375	0.0130	0.000060	0.004615	216.6667
	220	916.6667	0.0130	0.000090	0.006923	144.4444
	145	604.1667	0.0175	0.000165	0.009429	106.0606
	97.5	406.25	0.0170	0.000230	0.013529	73.9130
	65	270.8333	0.0170	0.000350	0.020588	48.5714
H=750	500	2083.333	0.0080	0.000025	0.003125	320.0000
	145	604.1667	0.0085	0.000080	0.009412	106.2500
	65	270.8333	0.0090	0.000180	0.020000	50.0000

όπου:

$$\sigma'_{vD} = \gamma \cdot D = 20 \cdot D$$

L : το μήκος του φρέατος, L=8 m

D : το βάθος του φρέατος

V : το κατακόρυφο φορτίο, V=15000 kN

### 5.2.2 Ο λόγος $\theta/(M/EI)$

Κατ' αναλογία με τα ανωτέρω, προσδιορίζεται το αντίστοιχο σημείο μέχρι το οποίο οι γραφικές παραστάσεις για τις διαφορετικές περιπτώσεις της συνοχής ( $c$ ) έχουν κοινές τιμές και στα διαγράμματα της στροφής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία ( $EI$ ). Ακολούθως υπολογίζεται ο λόγος  $\theta/(M/EI)$ , που ταυτίζεται με την τιμή της εφαπτομένης του ευθύγραμμου τμήματος που σχηματίζεται με την αρχή των αξόνων. Οι τιμές του λόγου συγκεντρώνονται στον κατωτέρω πίνακα 5.2.

**Πίνακας 5.2 :** τιμές του λόγου  $\theta/(M/EI)$  για τις εκτελεσμένες αριθμητικές αναλύσεις

D=6 m						
M=75*Hx (kNm)	E (Mpa)	E/ $\sigma$ 'vD	M/EI	$\theta$ (rad)	$\theta/(M/EI)$	Average $\theta/(M/EI)$
M=112500	500	4166.667	0.0000070	0.000320	45.7142857	42.3016
	330	2750	0.0000064	0.000374	58.4375000	58.4375
	220	1833.333	0.0000066	0.000620	93.9393939	93.9394
	145	1208.333	0.0000066	0.000960	145.4545455	126.0606
	97.5	812.5	0.0000053	0.000900	169.8113208	169.8113
	65	541.6667	0.0000045	0.001200	266.6666667	245.0980
M=56250	500	4166.667	0.0000018	0.000070	38.8888889	
	145	1208.333	0.0000015	0.000160	106.6666667	
	65	541.6667	0.0000017	0.000380	223.5294118	
D=4 m						
M=75*Hx (kNm)	E (Mpa)	E/ $\sigma$ 'vD	M/EI	$\theta$ (rad)	$\theta/(M/EI)$	Average $\theta/(M/EI)$
M=112500	500	6250	0.0000075	0.00050	66.66667	59.4203
	330	4125	0.0000060	0.00050	83.33333	83.3333
	220	2750	0.0000040	0.00040	100.00000	100.0000
	145	1812.5	0.0000040	0.00070	175.00000	170.8333
	97.5	1218.75	0.0000040	0.00120	300.00000	300.0000
	65	812.5	0.0000035	0.00130	371.42857	367.5325
M=56250	500	6250	0.0000012	0.00006	52.17391	
	145	1812.5	0.0000012	0.00020	166.66667	
	65	812.5	0.0000011	0.00040	363.63636	
D=12 m						
M=75*Hx (kNm)	E (Mpa)	E/ $\sigma$ 'vD	M/EI	$\theta$ (rad)	$\theta/(M/EI)$	Average $\theta/(M/EI)$
M=112500	500	2083.333	0.0000035	0.000060	17.142857	17.1761
	330	1375	0.0000035	0.000080	22.857143	22.8571
	220	916.6667	0.0000035	0.000110	31.428571	31.4286
	145	604.1667	0.0000045	0.000190	42.222222	41.6993
	97.5	406.25	0.0000043	0.000250	58.139535	58.1395
	65	270.8333	0.0000040	0.000330	82.500000	82.4265
M=56250	500	2083.333	0.0000022	0.000037	17.209302	
	145	604.1667	0.0000017	0.000070	41.176471	
	65	270.8333	0.0000017	0.000140	82.352941	

### 5.3 Προτεινόμενες σχέσεις

Με τις κατωτέρω εξισώσεις, οι οποίες προέκυψαν επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων, περιγράφεται η επιρροή στην απόκριση του φρέατος από τα ασκούμενα εξωτερικά φορτία (οριζόντια δύναμη και ροπή), τη γεωμετρία του φρέατος και τις παραμέτρους της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Συγκεκριμένα προέκυψε ότι, η αδιαστατικοποιημένη εγκάρσια μετακίνηση και η στροφή της κεφαλής του φρέατος, συσχετίζονται με το εγκάρσιο φορτίο και ροπή αντίστοιχα, και τον λόγο του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας προς την ορθή τάση με τις παρακάτω σχέσεις :

$$\frac{U_x}{L} = \frac{1}{A} \left( \frac{\sigma'_{vD}}{E} \right) \left( \frac{H_x}{V} \right) \quad (5.2)$$

$$\frac{\theta}{(M/EI)} = B \left( \frac{E}{\sigma'_{vD}} \right)^C \quad (5.3)$$

όπου οι τιμές των παραμέτρων A, B και C δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$A = 0.014182e^{[1.5875(\frac{D}{L})]} \quad (5.4)$$

$$B = 820150e^{[-3.303(\frac{D}{L})]} \quad (5.5)$$

$$C = 0.16 \left( \frac{D}{L} \right) - 1 \quad (5.6)$$

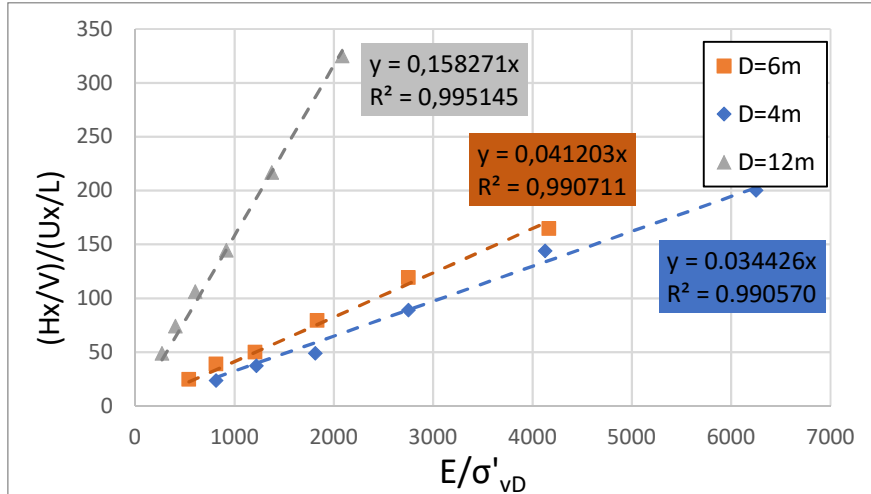
Οι εξισώσεις (5.2) και (5.3) αντικαθιστώντας τους συντελεστές σύμφωνα με τις ανωτέρω σχέσεις (5.4 ~ 5.6) μπορούν να γραφτούν ισοδύναμα :

$$\frac{U_x}{L} = \frac{1}{0.014182e^{[1.5875(\frac{D}{L})]}} \left( \frac{\sigma'_{vD}}{E} \right) \left( \frac{H_x}{V} \right) \quad (5.7)$$

$$\frac{\theta}{M/EI} = 820150e^{[-3.303(\frac{D}{L})]} \left( \frac{E}{\sigma'_{vD}} \right)^{0.16(\frac{D}{L})-1} \quad (5.8)$$

### 5.3.1 Αναλυτικός τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων A, B, C

Ο λόγος  $(H_x/V)/(U_x/L)$  συσχετίστηκε με τον λόγο  $(E/\sigma'_{vD})$  με γραμμική παλινδρόμηση και σχέση γραμμικής μορφής ( $y=A*x$ ) για κάθε βάθος φρέατος, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1. Στη συνέχεια οι συντελεστές (A) συσχετίστηκαν με εκθετικής μορφής καμπύλη με το σχετικά βάθος D/L. Επομένως η εξίσωση που περιγράφει τον συντελεστή A είναι της μορφής  $A=a_1*e^{b_1}$  όπου  $a_1=0.014182$  και  $b_1=1.5875$  (σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.1 : Διάγραμμα συσχέτισης των λόγων  $(H_x/V)/(U_x/L)$  και  $(E/\sigma'_{vD})$  με εξίσωση της μορφής  $y=A*x$

Άρα η ανωτέρω γραμμικής μορφής σχέση γράφεται :

$$\frac{H_x}{V} = A \frac{E}{\sigma'_{vD}} \left( \frac{U_x}{L} \right) \quad (5.9)$$

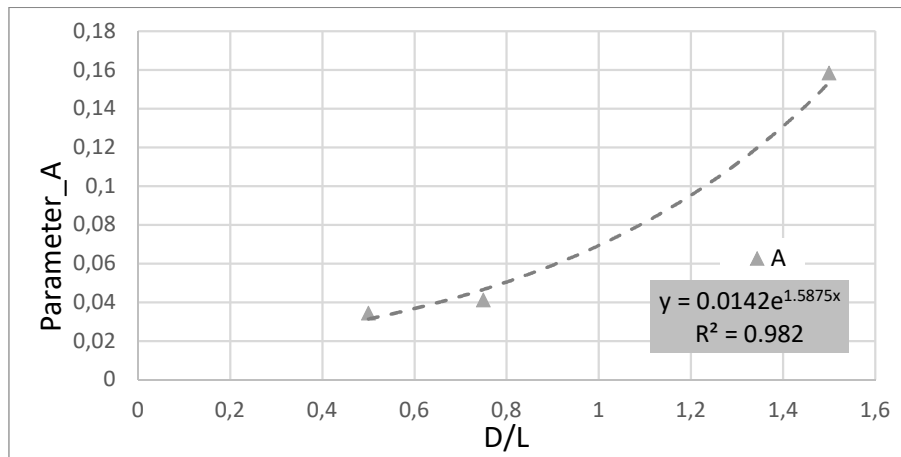
ή ισοδύναμα :

$$\frac{H_x}{V} = A \left( \frac{E}{\sigma'_{vD}} \right) \left( \frac{U_x}{L} \right) \quad (5.10)$$

Η σχέση 5.9 τελικά ως προς την αδιαστατικοποιημένη μετακίνηση γράφεται :

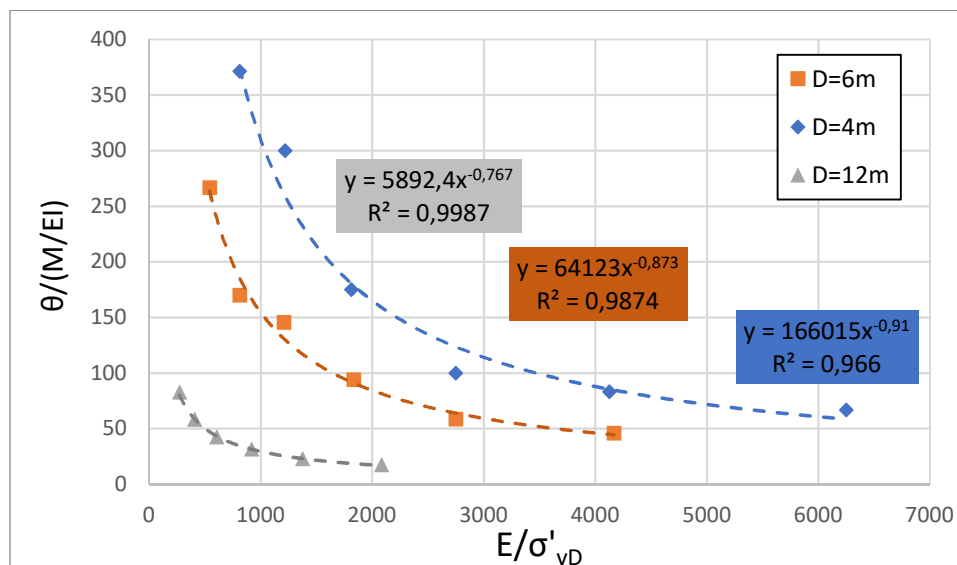
$$\frac{U_x}{L} = \frac{1}{A} \left( \frac{\sigma'_{vD}}{E} \right) \left( \frac{H_x}{V} \right) \quad (5.11)$$





Σχήμα 5.2 : Διάγραμμα συσχέτισης των συντελεστών A με το σχετικό βάθος D/L με εξίσωση της μορφής  $A=a_1 \cdot e^{b_1 D/L}$

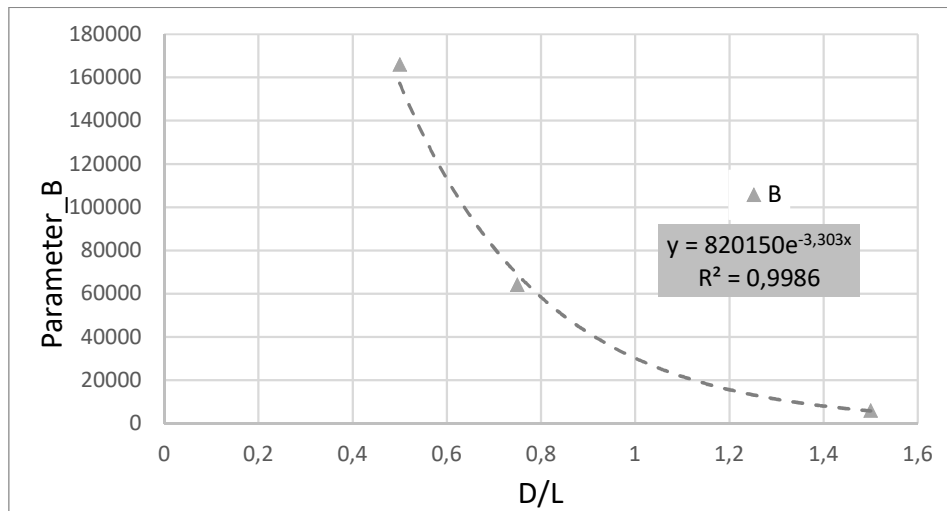
Με παρόμοιο τρόπο, ο λόγος  $\theta/(M/EI)$  συσχετίστηκε με τον λόγο  $(E/\sigma'_{vD})$  με γραμμική παλινδρόμηση και σχέση εκθετικής μορφής  $y=B \cdot x^C$ , για κάθε βάθος (σχήμα 5.3). Στη συνέχεια οι συντελεστές B και C συσχετίστηκαν με το σχετικό βάθος D/L με εκθετικής μορφής ( $B=a_2 \cdot e^{b_2 D/L}$ ) εξίσωση (σχήμα 5.4) και γραμμικής ( $C=a_3 \cdot x + b_3$ ) αντίστοιχα (σχήμα 5.5). Οι τιμές των συντελεστών είναι  $a_2=820150$ ,  $b_2=-3.303$  και  $a_3=0.1599$ ,  $b_3=-1$ .



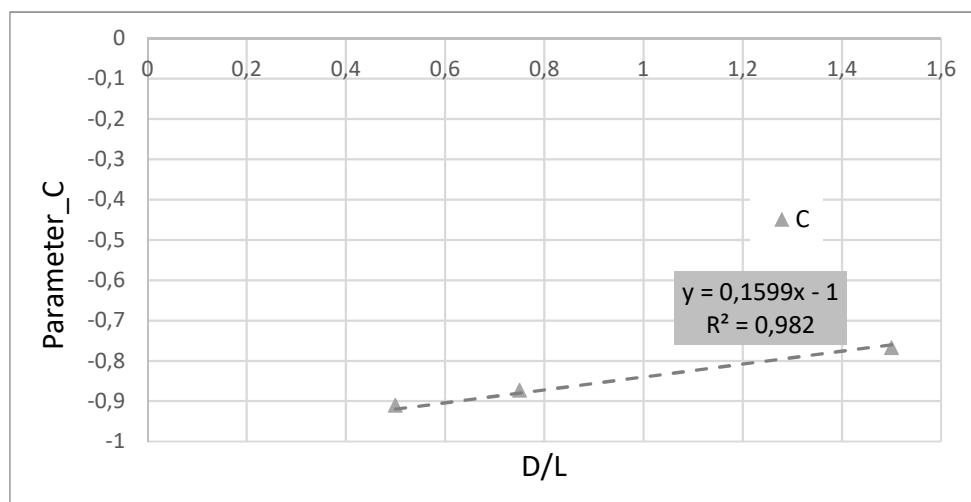
Σχήμα 5.3 : Διάγραμμα συσχέτισης των λόγων  $\theta/(M/EI)$  και  $(E/\sigma'_{vD})$  με εξίσωση της μορφής  $y=B \cdot x^C$

Άρα η ανωτέρω εκθετικής μορφής σχέση γράφεται

$$\frac{\theta}{M/EI} = B \left( \frac{E}{\sigma'_{vD}} \right)^C \quad (5.12)$$



Σχήμα 5.4 : Διάγραμμα συσχέτισης του συντελεστή B με το σχετικό βάθος D/L με εξίσωση της μορφής  $B=a_2 \cdot e^{b_2}$



Σχήμα 5.5 : Διάγραμμα συσχέτισης του συντελεστή C με το σχετικό βάθος D/L με εξίσωση της μορφής  $C=a_3 \cdot x+b_3$

Στις επόμενες παραγράφους εφαρμόζονται οι ανωτέρω προταθείσες σχέσεις στα δεδομένα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και συγκρίνονται οι προβλέψεις που προκύπτουν από αυτές με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αναλύσεων.

#### 5.4 Εφαρμογή των σχέσεων

Στην παράγραφο αυτή εφαρμόζονται οι προτεινόμενες σχέσεις (5.2, 5.3) και υπολογίζεται επί πλέον η ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων και των εξισώσεων που προτάθηκαν.

Η σχέση που υπολογίζει την ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ δύο (2) τιμών, a και b, είναι:

$$\text{Απόκλιση} = \frac{|b - a|}{b} (\%) \quad (5.13)$$

**Πίνακας 5.3 :** Αποτελέσματα από την εφαρμογή της σχέσης για τον υπολογισμό της αδιαστατικοποιημένης εγκάρσιας μετακίνησης

D=6 m					
Hx (kN)	E (Mpa)	E/σ'vD	Ux/L	Ux/L proposed	Απόκλιση
H=1500	500	4166.667	0.000170	0.000144	15.26%
	330	2750	0.000193	0.000179	7.10%
	220	1833.333	0.000290	0.000269	7.26%
	145	1208.333	0.000420	0.000373	11.29%
	97.5	812.5	0.000590	0.000607	2.86%
	65	541.6667	0.000850	0.000831	2.22%
H=750	500	4166.667	0.000037	0.000044	18.20%
	145	1208.333	0.000120	0.000151	25.67%
	65	541.6667	0.000250	0.000317	26.65%
D=4m					
Hx (kN)	E (Mpa)	E/σ'vD	Ux/L	Ux/L proposed	Απόκλιση
H=1500	500	6250	0.000150	0.000153	2.02%
	330	4125	0.000160	0.000178	11.10%
	220	2750	0.000180	0.000185	3.05%
	145	1812.5	0.000350	0.000299	14.56%
	97.5	1218.75	0.000350	0.000340	2.84%
	65	812.5	0.000600	0.000549	8.44%
H=750	500	6250	0.000025	0.000026	2.02%
	145	1812.5	0.000080	0.000097	20.93%
	65	812.5	0.000200	0.000235	17.72%
D=12 m					
Hx (kN)	E (Mpa)	E/σ'vD	Ux/L	Ux/L proposed	Απόκλιση
H=1500	500	2083.333	0.000040	0.000041	1.68%
	330	1375	0.000060	0.000062	2.70%
	220	916.6667	0.000090	0.000092	2.70%
	145	604.1667	0.000165	0.000189	14.42%
	97.5	406.25	0.000230	0.000273	18.58%
	65	270.8333	0.000350	0.000409	16.89%
H=750	500	2083.333	0.000025	0.000025	0.11%
	145	604.1667	0.000080	0.000092	14.62%
	65	270.8333	0.000180	0.000217	20.33%

**Πίνακας 5.4 :** Αποτελέσματα από την εφαρμογή της σχέσης για τον υπολογισμό του λόγου της ροπής δια την ακαμψία ως προς την στροφή

D=6 m						
M=75*Hx (kNm)	E (Mpa)	E/σ'vD	θ/(M/EI)	Average θ/(M/EI)	θ/(M/EI) proposed	Απόκλιση
M=112500	500	4166.667	45.7142857	42.3016	44.911	6.17%
	330	2750	58.4375000	58.4375	64.739	10.78%
	220	1833.333	93.9393939	93.9394	92.500	1.53%
	145	1208.333	145.4545455	126.0606	133.500	5.90%
	97.5	812.5	169.8113208	169.8113	189.310	11.48%
	65	541.6667	266.6666667	245.0980	270.488	10.36%
M=56250	500	4166.667	38.8888889			
	145	1208.333	106.6666667			
	65	541.6667	223.5294118			
D=4 m						
M=75*Hx (kNm)	E (Mpa)	E/σ'vD	θ/(M/EI)	Average θ/(M/EI)	θ/(M/EI) proposed	Απόκλιση
M=112500	500	6250	66.66667	59.4203	50.612	14.82%
	330	4125	83.33333	83.3333	74.180	10.98%
	220	2750	100.00000	100.0000	107.720	7.72%
	145	1812.5	175.00000	170.8333	158.080	7.47%
	97.5	1218.75	300.00000	300.0000	227.751	24.08%
	65	812.5	371.42857	367.5325	330.730	10.01%
M=56250	500	6250	52.17391			
	145	1812.5	166.66667			
	65	812.5	363.63636			
D=12 m						
M=75*Hx (kNm)	E (Mpa)	E/σ'vD	θ/(M/EI)	Average θ/(M/EI)	θ/(M/EI) proposed	Απόκλιση
M=112500	500	2083.333	17.142857	17.1761	17.355	1.04%
	330	1375	22.857143	22.8571	23.801	4.13%
	220	916.6667	31.428571	31.4286	32.393	3.07%
	145	604.1667	42.222222	41.6993	44.472	6.65%
	97.5	406.25	58.139535	58.1395	60.132	3.43%
	65	270.8333	82.500000	82.4265	81.839	0.71%
M=56250	500	2083.333	17.209302			
	145	604.1667	41.176471			
	65	270.8333	82.352941			

#### 5.4.1 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Όπως διαπιστώνεται από τον πίνακα 5.3, η προτεινόμενη σχέση 5.2 για τον υπολογισμό της αδιαστατικοποιημένης μετακίνησης προς το πλάτος του φρέατος, προσεγγίζει καλύτερα τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για εγκάρσιο φορτίο ίσο με  $H=1500\text{kN}$  παρά για  $H=750\text{kN}$ . Αναλυτικότερα :

##### Για φρέαρ βάθους $D=6\text{ m}$ :

- η σχέση προσεγγίζει ακριβέστερα τα αποτελέσματα για εγκάρσιο φορτίο  $H_x=1500\text{ kN}$ , παρά για  $H_x=750\text{ kN}$ ,
- η σχέση ανταποκρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητικά για εγκάρσιο φορτίο  $H_x=1500\text{ kN}$ , ενώ για όλες σχεδόν τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας η απόκλιση είναι μικρότερη από 10%,
- για εγκάρσιο φορτίο  $H_x=750\text{ kN}$ , η σχέση παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις από τις αριθμητικές τιμές και είναι λιγότερο ακριβής,
- σε δύο περιπτώσεις η τιμή της απόκλισης ξεπερνάει το 20% (έχουν σημειωθεί με κόκκινο χρώμα στον πίνακα),
- η μέγιστη τιμή της απόκλισης που παρατηρείται είναι 26.65%.

##### Για φρέαρ βάθους $D=4\text{ m}$ :

- η σχέση προσεγγίζει ακριβέστερα τα αποτελέσματα για εγκάρσιο φορτίο  $H_x=1500\text{ kN}$ , παρά για  $H_x=750\text{ kN}$ ,
- η σχέση ανταποκρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητικά για εγκάρσιο φορτίο  $H_x=1500\text{ kN}$ , ενώ για όλες σχεδόν τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας η απόκλιση είναι μικρότερη από 10%,
- για το φορτίο των  $1500\text{kN}$  η απόκλιση είναι μικρότερη από 15%, για όλες τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας.
- για το φορτίο των  $750\text{kN}$  η απόκλιση κυμαίνεται από 18%~21%
- σε μία μόνο περίπτωση η τιμή της απόκλισης ξεπερνάει το 20% (έχει σημειωθεί με κόκκινο χρώμα στον πίνακα),
- η μέγιστη τιμή της απόκλισης που παρατηρείται είναι 20.93%,

##### Για φρέαρ βάθους $D=12\text{ m}$ :

- η σχέση προσεγγίζει ακριβέστερα τα αποτελέσματα για εγκάρσιο φορτίο  $H_x=1500\text{ kN}$ , παρά για  $H_x=750\text{ kN}$ ,
- η σχέση ανταποκρίνεται ικανοποιητικά για εγκάρσιο φορτίο  $H_x=1500\text{ kN}$ , ενώ για όλες σχεδόν τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας η απόκλιση είναι μικρότερη από 17%,
- για το φορτίο των  $750\text{kN}$  η απόκλιση κυμαίνεται από 15%~20%,
- αύξηση της απόκλισης παρουσιάζει για μικρές τιμές του μέτρου ελαστικότητας,
- σε μία μόνο περίπτωση η τιμή της απόκλισης ξεπερνάει το 20% (έχει σημειωθεί με κόκκινο χρώμα στον πίνακα)
- η μέγιστη τιμή της απόκλισης που παρατηρείται είναι 20.33%

Από τον πίνακα 5.4 διαπιστώνεται ότι η προτεινόμενη σχέση 5.3 για τον λόγο  $\theta/(M/EI)$  προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά τις τιμές των αριθμητικών αναλύσεων. Σημειώνεται ότι συγκρίθηκαν με τον μέσο όρο των λόγων για τα διαφορετικά εγκάρσια φορτία. Αναλυτικότερα :

Για φρέαρ βάθους D=6 m :

- η σχέση προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά τις τιμές των αριθμητικών αναλύσεων,
- σε καμία περίπτωση δεν παρατηρείται απόκλιση μεγαλύτερη του 11,5%, για όλες τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας,
- η μέγιστη τιμή της απόκλισης που παρατηρείται είναι 11.48%

Για φρέαρ βάθους D=4 m :

- τα αποτελέσματα παρουσιάζουν την μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις ύψους φρεάτων που εξετάστηκαν,
- σε μία μόνο περίπτωση η τιμή της απόκλισης ξεπερνάει το 20% (έχει σημειωθεί με κόκκινο χρώμα στον πίνακα), ενώ σε όλες τις υπόλοιπες η απόκλιση είναι μικρότερη από 15%,
- η μέγιστη τιμή της απόκλισης που παρατηρείται είναι 24.08%,

Για φρέαρ βάθους D=12 m :

- η σχέση προσεγγίζει ιδιαίτερα ικανοποιητικά τις τιμές των αριθμητικών αναλύσεων,
- η προτεινόμενη σχέση προσεγγίζει τα αποτελέσματα των αναλύσεων καλύτερα για αυτό το βάθος φρέατος, σε σχέση με τα μικρότερα βάθη που εξετάστηκαν,
- όλες οι τιμές των αποκλίσεων είναι μικρότερες από 7%,
- η μέγιστη τιμή της απόκλισης που παρατηρείται είναι 6.65%

## 5.5 Σύγκριση με τη μέθοδο των Carter και Kulhawy

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκαν συνοπτικά οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι υπολογισμού της ενδοσιμότητας του φρέατος, που απαντώνται στη βιβλιογραφία. Θεωρήθηκε σκόπιμο να συγκριθούν τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και οι προβλέψεις των προτεινόμενων εξισώσεων με αυτά μιας εκ των ανωτέρω μεθόδων. Επιλέχθηκε η μέθοδος Carter- Kulhawy, καθώς θεωρείται η πιο σύγχρονη και ακριβής εξ αυτών.

Σημειώνεται ότι η μεθοδολογία των Carter και Kulhawy αναφέρεται σε φρέατα κυκλικής διατομής. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για φρέαρ ορθογωνικής διατομής, μήκους L και πλάτους B, υπολογίζοντας την γεωμετρικά ισοδύναμη διάμετρο, η οποία προκύπτει εξισώνοντας τα εμβαδό της κυκλικής και της ορθογωνικής διατομής. Άρα για τα φρέατα που εξετάστηκαν η ισοδύναμη διάμετρος είναι ίση με :

$$D_{\text{ισοδύναμη}} = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}} \approx 6.38 \text{ m} \quad (5.14)$$

Σημειώνεται ότι η ισοδύναμη διάμετρος συμβολίζεται (D) και το βάθος του φρέατος (L).

Η μεθοδολογία των Carter και Kulhawy κατατάσσει τα φρέατα ανάλογα με τη δυσκαμψία τους σε *εύκαμπτα*, *άκαμπτα* και φρέατα *ενδιάμεσης δυσκαμψίας* και προτείνει σχέσεις που υπολογίζουν τις αντίστοιχες μετακινήσεις και στροφές τους. Αναλυτικά :

- ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΦΡΕΑΤΑ

Το φρέαρ θεωρείται εύκαμπτο όταν ισχύει :

$$\frac{L}{D} \geq \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{2/7} \quad (5.15)$$

Οι εξισώσεις που προτάθηκαν είναι :

$$u = 0.5 \left( \frac{H}{G^* D} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-1/7} + 1.08 \left( \frac{M}{G^* D^2} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-3/7} \quad (5.16)$$

$$\theta = 1.08 \left( \frac{H}{G^* D^2} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-3/7} + 6.40 \left( \frac{M}{G^* D^3} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-5/7} \quad (5.17)$$

- ΑΚΑΜΠΤΑ ΦΡΕΑΤΑ

Το φρέαρ θεωρείται πλήρως άκαμπτο όταν:

$$\frac{L}{D} \leq 0.05 \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{1/2} \quad (5.18)$$

Οι εξισώσεις που προτάθηκαν είναι :

$$u = 0.4 \left( \frac{H}{G^* D} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-1/3} + 0.3 \left( \frac{M}{G^* D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} \quad (5.19)$$

$$\theta = 0.3 \left( \frac{H}{G^* D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} + 0.8 \left( \frac{M}{G^* D^3} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-5/3} \quad (5.20)$$

- ΦΡΕΑΤΑ ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

Ως φρέατα ενδιάμεσης δυσκαμψίας κατατάσσονται εκείνα για τα οποία ισχύει :

$$0.05 \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{1/2} < \frac{L}{D} < \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{2/7} \quad (5.21)$$

Οι σχέσεις που προσδιορίζουν τις μετακινήσεις και τις στροφές είναι :

$$u = 1.25 \max \left[ \begin{array}{l} 0.5 \left( \frac{H}{G^* D} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-1/7} + 1.08 \left( \frac{M}{G^* D^2} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-3/7} \\ 0.4 \left( \frac{H}{G^* D} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-1/3} + 0.3 \left( \frac{M}{G^* D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} \end{array} \right] \quad (5.22)$$

$$\theta = 1.25 \max \left[ \begin{array}{l} 1.08 \left( \frac{H}{G^* D^2} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-3/7} + 6.40 \left( \frac{M}{G^* D^3} \right) \left( \frac{E_e}{G^*} \right)^{-5/7} \\ 0.3 \left( \frac{H}{G^* D^2} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-7/8} + 0.8 \left( \frac{M}{G^* D^3} \right) \left( \frac{2L}{D} \right)^{-5/3} \end{array} \right] \quad (5.23)$$

Η διατμητική ακαμψία της βραχομάζας ( $G^*$ ) εκφράζεται ως εξής :

$$G^* = \left( \frac{E_r}{2(1 + \nu_r)} \right) \left( 1 + \frac{3\nu_r}{4} \right) \quad (5.24)$$

όπου:

$\nu_r$  : ο λόγος Poisson της βραχομάζας

$E_r$  : το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας

### 5.5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Ακολουθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων μετατοπίσεων και στροφών κεφαλής του φρέατος, για τα διαφορετικά ύψη φρεάτων που εξετάστηκαν, μεταξύ των αναλύσεων, των προβλέψεων από τις προταθείσες σχέσεις και των αντιστοιχών με τη μεθοδολογία των Carter και Kulhawy.

Η κατάταξη των φρεάτων που αναλύθηκαν κατά τη μεθοδολογία των Carter και Kulhawy (εύκαμπτα, άκαμπτα και φρέατα ενδιάμεσης δυσκαμψίας) γίνεται με βάση τις σχέσεις 5.15, 5.18 και 5.21 και παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα:



**Πίνακας 5.5 :** Κατάταξη των φρεάτων που εξετάστηκαν με βάση τη δυσκαμψία τους κατά Carter και Kulhawy.

L=6 m				
E (MPa)	L/D	$(E_e/G^*)^{2/7}$	$0.05(E_e/G^*)^{1/2}$	Δυσκαμψία
500	0.94	3.79	0.52	Ενδιάμεσο
330	0.94	4.22	0.63	Ενδιάμεσο
220	0.94	4.80	0.77	Ενδιάμεσο
145	0.94	5.40	0.96	Άκαμπτο
97.5	0.94	6.06	1.17	Άκαμπτο
65	0.94	6.80	1.43	Άκαμπτο
L=4 m				
E (MPa)	L/D	$(E_e/G^*)^{2/7}$	$0.05(E_e/G^*)^{1/2}$	Δυσκαμψία
500	0.63	3.79	0.52	Ενδιάμεσο
330	0.63	4.22	0.63	Άκαμπτο
220	0.63	4.80	0.77	Άκαμπτο
145	0.63	5.40	0.96	Άκαμπτο
97.5	0.63	6.06	1.17	Άκαμπτο
65	0.63	6.80	1.43	Άκαμπτο
L=12 m				
E (MPa)	L/D	$(E_e/G^*)^{2/7}$	$0.05(E_e/G^*)^{1/2}$	Δυσκαμψία
500	1.88	3.79	0.52	Ενδιάμεσο
330	1.88	4.22	0.63	Ενδιάμεσο
220	1.88	4.80	0.77	Ενδιάμεσο
145	1.88	5.40	0.96	Ενδιάμεσο
97.5	1.88	6.06	1.17	Ενδιάμεσο
65	1.88	6.80	1.43	Ενδιάμεσο

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων συντάχθηκαν οι ακόλουθοι πίνακες 5.6 και 5.7, όπου αναγράφονται οι υπολογιζόμενες τιμές μετακινήσεων και στροφών, καθώς και η ποσοστιαία απόκλιση των τιμών που προέκυψαν από τις αναλύσεις και τις προτεινόμενες σχέσεις από τις αντίστοιχες κατά Carter και Kulhawy.

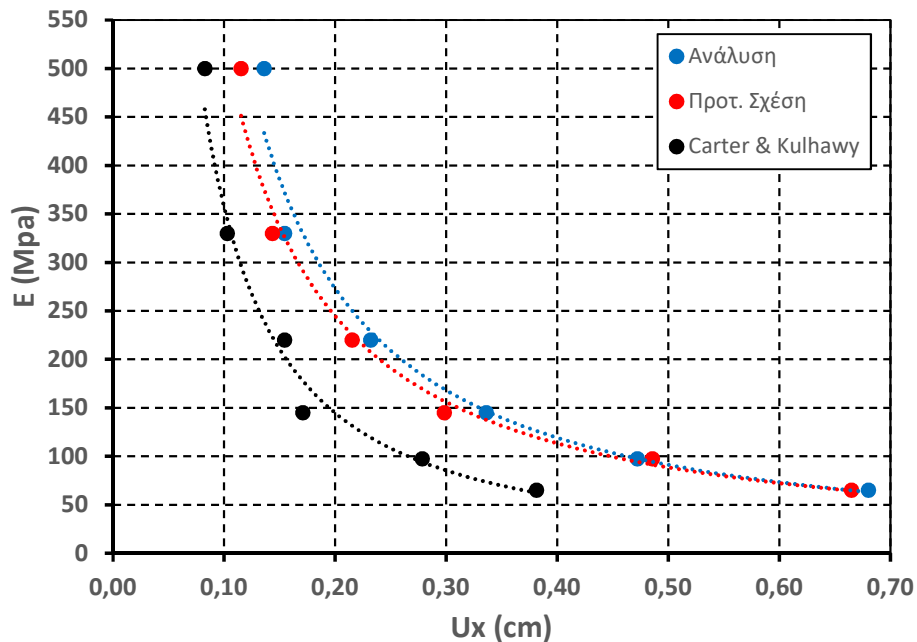
**Πίνακας 5.6 :** Σύγκριση μετακινήσεων και στροφών μεταξύ των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, των προτεινόμενων σχέσεων με τις προβλέψεις κατά Carter και Kulhawy για βάθη φρέατος 6 m και 4 m.

D=6 m										
E (Mpa)	U <sub>x</sub> (cm)	U <sub>x</sub> proposed (cm)	U <sub>x</sub> κατά C&K (cm)	Απόκλιση C&K από Αναλύσεις	Απόκλιση C&K από προτειν. σχέση	θ*1000 (rad)	θ*1000 proposed (rad)	θ*1000 (rad) κατά C&K	Απόκλιση C&K από Αναλύσεις	Απόκλιση C&K από προτειν. σχέση
H=1500kN						H=1500kN				
500	0.136000	0.115250	0.082617	39.25%	28.32%	0.320	0.314	0.180	43.68%	42.67%
330	0.154400	0.143439	0.102824	33.40%	28.32%	0.374	0.414	0.250	33.25%	39.74%
220	0.232000	0.215158	0.154236	33.52%	28.32%	0.620	0.610	0.386	37.71%	36.74%
145	0.336000	0.298060	0.170931	49.13%	42.65%	0.960	0.881	0.469	51.17%	46.80%
97.5	0.472000	0.485484	0.278415	41.01%	42.65%	0.900	1.003	0.560	37.80%	44.20%
65	0.680000	0.664902	0.381308	43.93%	42.65%	1.200	1.217	0.713	40.59%	41.42%
H=750kN						H=750kN				
500	0.029600	0.034987	0.025080	15.27%	28.32%	0.070	0.081	0.046	33.79%	42.67%
145	0.096000	0.120643	0.069186	27.93%	42.65%	0.160	0.200	0.133	16.77%	33.50%
65	0.200000	0.253296	0.145260	27.37%	42.65%	0.380	0.460	0.337	11.40%	26.78%
D=4 m										
E (Mpa)	U <sub>x</sub> (cm)	U <sub>x</sub> proposed (cm)	U <sub>x</sub> κατά C&K (cm)	Απόκλιση C&K από Αναλύσεις	Απόκλιση C&K από προτειν. σχέση	θ*1000 (rad)	θ*1000 proposed (rad)	θ*1000 (rad) κατά C&K	Απόκλιση C&K από Αναλύσεις	Απόκλιση C&K από προτειν. σχέση
H=1500kN						H=1500kN				
500	0.120000	0.122426	0.122788	2.32%	0.30%	0.500	0.380	0.374	25.13%	1.38%
330	0.128000	0.142212	0.114106	10.85%	19.76%	0.500	0.445	0.363	27.40%	18.44%
220	0.144000	0.148395	0.119067	17.31%	19.76%	0.400	0.431	0.363	9.25%	15.76%
145	0.280000	0.239223	0.191944	31.45%	19.76%	0.700	0.632	0.551	21.32%	12.90%
97.5	0.280000	0.272057	0.218289	22.04%	19.76%	1.200	0.911	0.819	31.74%	10.09%
65	0.480000	0.439477	0.352621	26.54%	19.76%	1.300	1.158	1.075	17.31%	7.13%
H=750kN						H=750kN				
500	0.020000	0.020404	0.020465	2.32%	0.30%	0.060	0.058	0.057	4.34%	1.38%
145	0.064000	0.077396	0.062100	2.97%	19.76%	0.200	0.190	0.165	17.39%	12.90%
65	0.160000	0.188347	0.151123	5.55%	19.76%	0.400	0.364	0.338	15.53%	7.13%

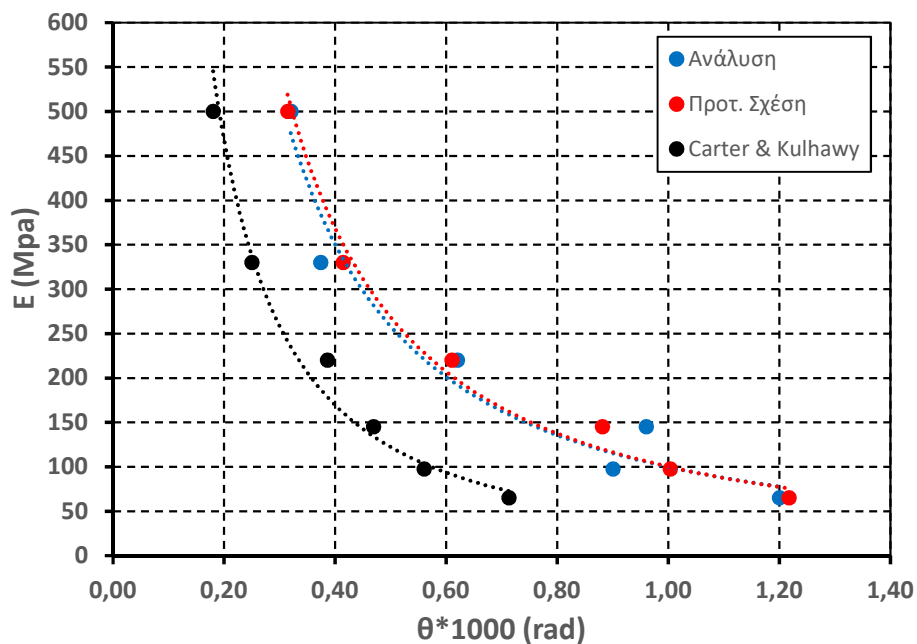
**Πίνακας 5.7 :** Σύγκριση μετακινήσεων και στροφών μεταξύ των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, των προτεινόμενων σχέσεων με τις προβλέψεις κατά Carter και Kulhawy για βάθος φρέατος 12 m.

D=12 m											
E (Mpa)	U <sub>x</sub> (cm)	U <sub>x</sub> proposed (cm)	U <sub>x</sub> κατά C&K (cm)	Απόκλιση C&K από Αναλύσεις	Απόκλιση C&K από προτειν. σχέση	θ*1000 (rad)	θ*1000 proposed (rad)	θ*1000 (rad) κατά C&K	Απόκλιση C&K από Αναλύσεις	Απόκλιση C&K από προτειν. σχέση	
H=1500kN						H=1500kN					
500	0.032000	0.032537	0.032155	0.48%	1.17%	0.060	0.061	0.074	22.80%	21.30%	
330	0.048000	0.049298	0.041440	13.67%	15.94%	0.080	0.083	0.084	4.38%	0.24%	
220	0.072000	0.073947	0.053170	26.15%	28.10%	0.110	0.113	0.094	14.16%	16.71%	
145	0.132000	0.151032	0.103176	21.84%	31.69%	0.190	0.200	0.138	27.43%	31.10%	
97.5	0.184000	0.218195	0.149057	18.99%	31.69%	0.250	0.259	0.185	25.86%	28.31%	
65	0.280000	0.327292	0.223586	20.15%	31.69%	0.330	0.327	0.259	21.62%	20.99%	
H=750kN						H=750kN					
500	0.020000	0.020023	0.019787	1.06%	1.17%	0.037	0.037	0.045	22.32%	21.30%	
145	0.064000	0.073359	0.050114	21.70%	31.69%	0.070	0.076	0.052	25.59%	31.10%	
65	0.144000	0.173272	0.118369	17.80%	31.69%	0.140	0.139	0.110	21.48%	20.99%	

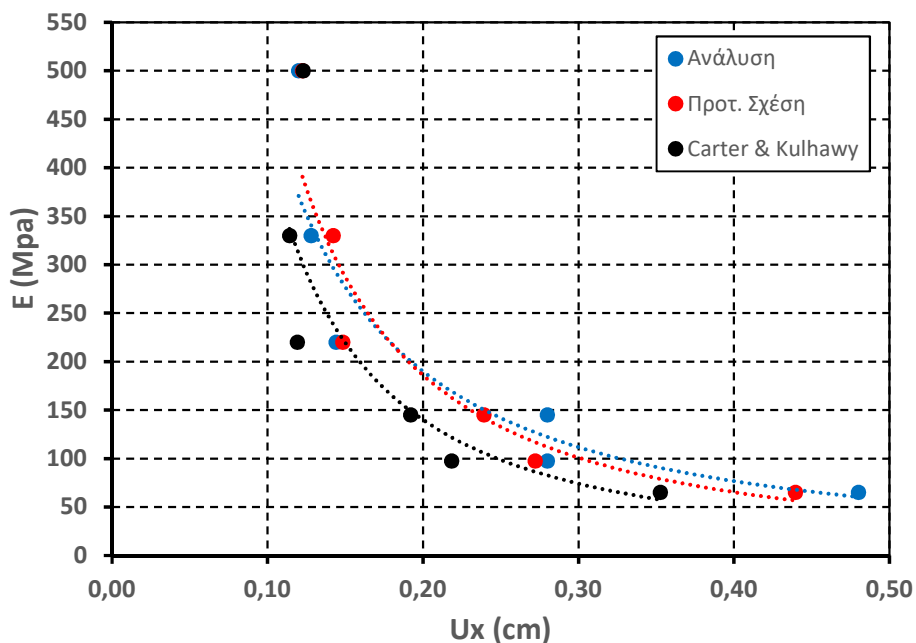
Για την εποπτική σύγκριση των ανωτέρω αποτελεσμάτων, συντάχθηκαν τα ακόλουθα γραφήματα, όπου παρουσιάζονται οι μετακινήσεις και στροφές της κεφαλής των φρεάτων συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας, που προέκυψαν από τις τρεις προαναφερθείσες μεθοδολογίες.



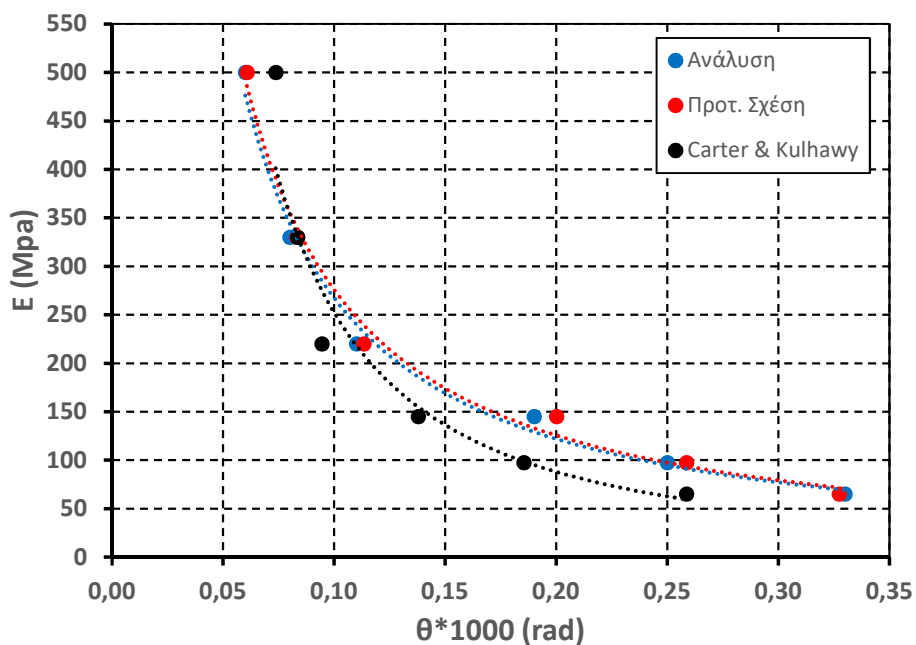
**Σχήμα 5.6** : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος βάθους 6 m συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τις διαφορετικές μεθοδολογίες που θεωρήθηκαν



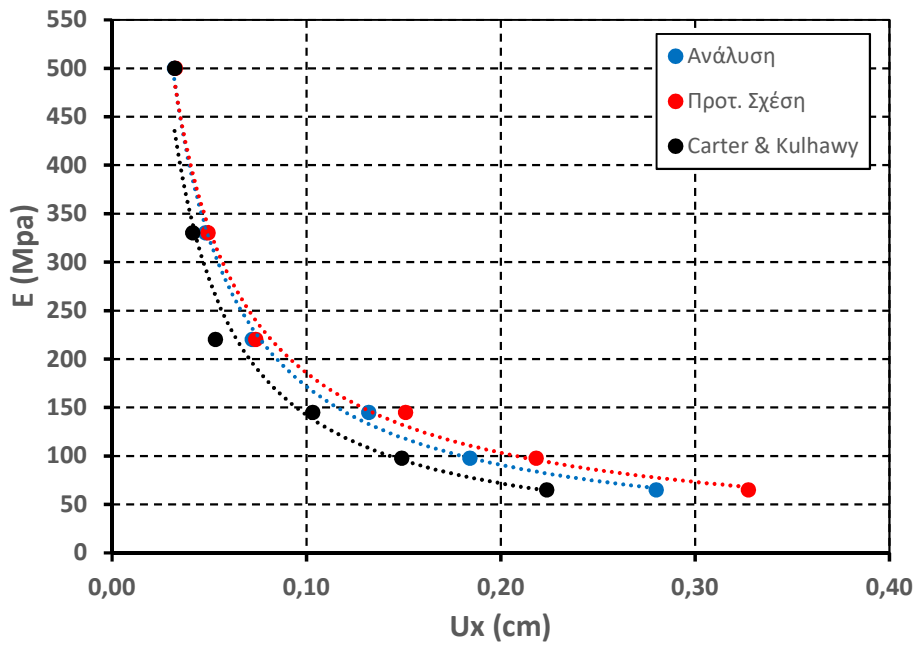
**Σχήμα 5.7** : Στροφές κεφαλής φρέατος βάθους 6 m συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας για τις διαφορετικές μεθοδολογίες που θεωρήθηκαν



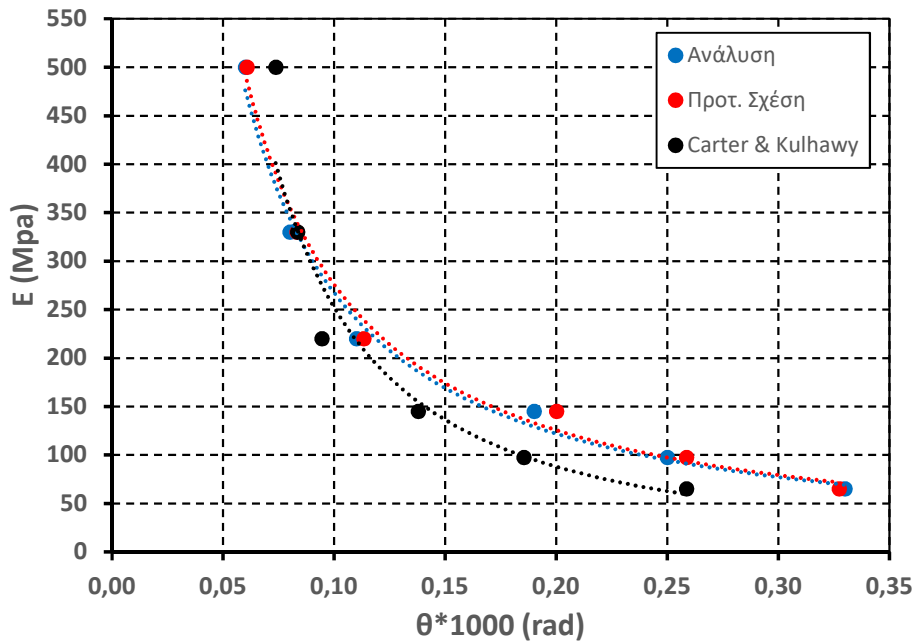
**Σχήμα 5.8** : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος βάθους 4 m συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας για τις διαφορετικές μεθοδολογίες που θεωρήθηκαν



**Σχήμα 5.9** : Στροφές κεφαλής φρέατος βάθους 4 m συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας για τις διαφορετικές μεθοδολογίες που θεωρήθηκαν



Σχήμα 5.10 : Μετακινήσεις κεφαλής φρέατος βάθους 12 m συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας για τις διαφορετικές μεθοδολογίες που θεωρήθηκαν



Σχήμα 5.11 : Στροφές κεφαλής φρέατος βάθους 12 m συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας για τις διαφορετικές μεθοδολογίες που θεωρήθηκαν

### 5.5.2 Σχολιασμός της σύγκρισης των αποτελεσμάτων

Εξετάζοντας τα συγκριτικά αποτελέσματα των ανωτέρω πινάκων και γραφημάτων, μπορεί να διατυπωθεί ότι:

- η μορφή της αύξησης μετατοπίσεων και στροφών συναρτήσει της μείωσης του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας είναι εκθετική και όμοια για όλες τις μεθοδολογίες που εξετάστηκαν,
- υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση μετακινήσεων και στροφών μεταξύ των τιμών που προκύπτουν από τις αναλύσεις και τις προβλέψεις των προτεινόμενων σχέσεων,
- η ανωτέρω ταύτιση είναι πιο ικανοποιητική για τις μετατοπίσεις από ότι στις στροφές, όπου διαπιστώνεται σχετικά περιορισμένη διασπορά,
- οι προβλέψεις της μεθοδολογίας Carter και Kulhawy υπολείπονται των αναλύσεων και των προτεινόμενων σχέσεων, τόσο στις μετατοπίσεις όσο και στις στροφές,
- η απόκλιση είναι πιο σημαντική για το φρέαρ βάθους 6m ενώ είναι μειωμένη για τα φρέατα βάθους 4m και 12m.
- η απόκλιση μειώνεται με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, για όλα τα βάθη Carter και Kulhawy

# 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

## 6.1 Συνοπτική ανασκόπηση της μεθοδολογίας

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής αποτέλεσε η διερεύνηση της δυσκαμψίας (μετακινησιακής και στροφικής) των φρέατων και το πως αυτή επηρεάζεται από την γεωμετρία τους, το μέτρο ελαστικότητας, τη συνοχή της βραχόμαζας που τα περιβάλλει και από τα εξωτερικά φορτία που ασκούνται στην κεφαλή τους.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.12. Το προσομοίωμα που δημιουργήθηκε είχε εξωτερικές διαστάσεις  $X=46\text{m}$ ,  $Y=30\text{m}$  και  $Z=24\text{m}$ . Τα φρέατα που εξετάστηκαν ήταν ορθογωνικής διατομής, με μήκος  $L=8\text{m}$  και πλάτος  $B=4\text{m}$ . Για το βάθος του φρέατος επιλέχθηκαν τρεις (3) διαφορετικές περιπτώσεις με  $D=4, 6$  και  $12\text{m}$  αντίστοιχα.

Τα φρέατα θεωρήθηκαν κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 με μέτρο ελαστικότητας  $E=25$  (GPa) και λόγο Poisson ίσο με  $\nu=0.25$ . Το ειδικό βάρος του σκυροδέματος θεωρήθηκε ίσο προς  $\gamma_b=25$  (kN/m<sup>3</sup>).

Ο λόγος Poisson της περιβάλλουσας βραχόμαζας ήταν  $\nu_r=0.333$  ενώ το ειδικό βάρος  $\gamma_r=20$  (kN/m<sup>3</sup>). Το μέτρο ελαστικότητας  $E_r$  διερευνήθηκε παραμετρικά, λαμβάνοντας τιμές από 65 έως 500 (MPa).

Το κριτήριο Mohr – Coulomb υιοθετήθηκε ως κριτήριο αστοχίας της βραχόμαζας, με γωνία τριβής  $\phi=35^\circ$ , γωνία διαστολικότητας  $\delta=5^\circ$ , ενώ η συνοχή  $c$  διερευνήθηκε παραμετρικά λαμβάνοντας τιμές από 20 έως 200 (kPa).

Στον πίνακα 6.1 αναγράφονται οι τιμές των παραμέτρων  $E_r$  και  $c$ , για τις πραγματοποιημένες αριθμητικές αναλύσεις.

**Πίνακας 6.1:** Τιμές του μέτρου ελαστικότητας και της συνοχής της βραχόμαζας

<b><math>E_r</math> (MPa)</b>	65	97.5	145	220	330	500
<b><math>c</math> (kPa)</b>	20	50	100	150	200	

Για να εξασφαλιστεί ότι το φρέαρ θα λειτουργήσει ως απαραμόρφωτο στερεό σώμα, ορίστηκε μια ομάδα άκαμπτων συνδέσμων (MPCs), η οποία συνέδεε όλους τους κόμβους της εκάστοτε στάθμης με τον αντίστοιχο κεντρικό κόμβο.

Ορίστηκαν επίσης διεπιφάνειες στην περιμετρική επιφάνεια και στη βάση του φρέατος, με προσομοίωση δυνητικής αποκόλλησης του φρέατος από την περιβάλλουσα βραχόμαζα. Η γωνία τριβής στην βάση θεωρήθηκε  $\delta = \phi = 35^\circ$  ενώ στις παρειές  $\delta = \phi/2 = 17.5^\circ$ .



Το φρέαρ θεωρήθηκε ως θεμελίωση βάθρου γέφυρας με ύψος  $h_{\text{βάθρου}}=75\text{m}$ . Στην κεφαλή του φρέατος ασκήθηκε κατακόρυφο φορτίο  $V=15000$  (kN) οφειλόμενο στο ίδιο βάρος ανωδομής και βάθρου, καθώς και εγκάρσιο φορτίο  $H$  και ροπή ανατροπής  $M$ , λόγω της εκκεντρότητας  $e=M/H=75$ . Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις εγκάρσιου φορτίου (κατά συνέπεια και αντίστοιχης ροπής) μεγέθους  $H=750$  kN (άρα  $M=750 \times 75=56250$  kNm) και  $H=1500$  kN (άρα  $M=1500 \times 75=112500$  kNm) αντίστοιχα.

Η ανάλυση έγινε σε τέσσερα (4) διαδοχικά βήματα: αρχικά στο προσομοίωμα ασκούσαν μόνο οι γεωστατικές τάσεις. Στο δεύτερο βήμα αφαιρέθηκε η βραχόμαζα που αντιστοιχεί στον όγκο του φρέατος και τοποθετήθηκε το φρέαρ από σκυρόδεμα και στο τρίτο εφαρμόστηκε η κατακόρυφη δύναμη. Τέλος ασκήθηκαν προοδευτικά έως την τελική τιμή τους το εγκάρσιο φορτίο και η ροπή στην κεφαλή του φρέατος.

Ακολούθως, με βάση τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, μορφώθηκαν τα διαγράμματα της αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης της κεφαλής του φρέατος ως προς το μήκος  $L$  ( $U_x/L$ ) του φρέατος συναρτήσει της αδιαστατικοποιημένης επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης ως προς το κατακόρυφο φορτίο ( $H_x/V$ ), καθώς και τα διαγράμματα της στροφής ( $\theta$ ) της κεφαλής του φρέατος συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής ως προς την καμπτική ακαμψία του φρέατος ( $M/EI$ ). Συντάχθηκαν επίσης γραφήματα που διερευνούν την επιρροή του μέτρου ελαστικότητας, της συνοχής και του βάθους του φρέατος στις μετακινήσεις και τις στροφές του φρέατος.

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων, μορφώθηκαν και προτάθηκαν προς εφαρμογή αναλυτικές σχέσεις, που συσχετίζουν αφενός την αδιαστατικοποιημένη εγκάρσια μετακίνηση στην κεφαλή του φρέατος με το αδιαστατικοποιημένο οριζόντιο φορτίο και αφετέρου τη στροφή της κεφαλής του φρέατος με τον λόγο της ροπής ως προς την ακαμψία του φρέατος αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των σχέσεων αυτών συγκρίθηκαν με εκείνα των αριθμητικών αναλύσεων. Τέλος εφαρμόστηκαν οι ελαστικές σχέσεις των Carter και Kulhawy, και συγκρίθηκαν οι μετακινήσεις και στροφές με αυτές των αριθμητικών αναλύσεων και με τις προβλέψεις των προτεινόμενων σχέσεων.

## 6.2 Συμπεράσματα

Η παραμορφωσιμότητα (ενδοτικότητα) της περιβάλλουσας βραχόμαζας λαμβάνεται υπόψη με τη θεώρηση ισοδύναμων ελατηρίων στη διεπιφάνεια θεμελίου - εδάφους. Οι τιμές της μετακινησιακής και της στροφικής δυσκαμψίας εξαρτώνται από τόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας όσο και από την γεωμετρία του φρέατος. Στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκαν η οριζόντια μετακίνηση αδιαστατικοποιημένη προς το μήκος του φρέατος και η στροφή της κεφαλής σε ορθογωνικά φρέατα.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εξήχθησαν τα κατωτέρω συμπεράσματα, που αφορούν στην επιρροή της εξωτερικής φόρτισης ( $H$  και  $M$ ), της συνοχής ( $c$ ) και του μέτρου ελαστικότητας ( $E$ ) της βραχόμαζας και του βάθους του φρέατος ( $D$ ) στην αδιαστατικοποιημένη εγκάρσια μετακίνηση ως προς το μήκος του φρέατος ( $U_x/L$ ) και την στροφή ( $\theta$ ) της κεφαλής :

- Αύξηση των εξωτερικών φορτίων  $H$  και  $M$ , για σταθερές τιμές της συνοχής και του μέτρου ελαστικότητας και για δεδομένο βάθος φρέατος, οδηγεί σε αύξηση των μεγεθών  $U_x/L$  και  $\theta$ . Η μορφή της αύξησης είναι όμοια για τα δύο υπόψη μεγέθη. Κατά την προοδευτική αύξηση των εξωτερικών φορτίων από μηδενική έως τη μέγιστη επιβαλλόμενη τιμή, διαπιστώνεται αρχικά μια γραμμικά μεταβαλλόμενη περιοχή για περιορισμένες τιμές των φορτίων, που ακολουθείται από μη γραμμική αύξηση, η οποία λαμβάνει εκθετική μορφή πλησιάζοντας τη περιοχή αστοχίας, λόγω έντονης πλαστικοποίησης της βραχόμαζας πέριξ του θεμελίου.
- Μείωση της συνοχής, για σταθερές τιμές των εξωτερικών φορτίων και του μέτρου ελαστικότητας και δεδομένο βάθος φρέατος οδηγεί σε αύξηση των μεγεθών  $U_x/L$  και  $\theta$ . Η μορφή της αύξησης εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ) της βραχόμαζας: για μεγάλες τιμές του  $E$ , η αύξηση είναι αρχικά γραμμική για μεγάλες τιμές της συνοχής, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί μη γραμμική αύξηση, ενώ για μικρές τιμές του  $E$  η αύξηση των μεγεθών ακολουθεί απ' αρχής μορφή υπερβολής. Η ως άνω συμπεριφορά οφείλεται στην προοδευτικά αυξανόμενη πλαστικοποίηση της περιβάλλουσας βραχόμαζας, η οποία είναι πιο έντονη για μικρές τιμές του μέτρου ελαστικότητας.
- Μείωση του μέτρου ελαστικότητας ( $E$ ) της βραχόμαζας, για σταθερές τιμές των εξωτερικών φορτίων και της συνοχής και για δεδομένο βάθος φρέατος οδηγεί σε αύξηση των μεγεθών  $U_x/L$  και  $\theta$ . Η μορφή της αύξησης εξαρτάται από το βάθος ( $D$ ) του φρέατος: για μεγάλες τιμές του  $D$ , η αύξηση είναι αρχικά γραμμική για μεγάλες τιμές του  $E$ , ενώ στη συνέχεια ακολουθεί μη γραμμική αύξηση, ενώ για μικρές τιμές του  $D$  η αύξηση των μεγεθών ακολουθεί απ' αρχής μορφή υπερβολής. Η ως άνω συμπεριφορά οφείλεται στην πλαστικοποίηση της περιβάλλουσας βραχόμαζας, η οποία επέρχεται πιο νωρίς σε μικρά βάθη φρέατος.
- Μείωση του βάθους του φρέατος ( $D$ ) για σταθερές τιμές των εξωτερικών φορτίων, του μέτρου ελαστικότητας ( $E$ ) και της συνοχής ( $c$ ) της βραχόμαζας οδηγεί σε αύξηση των μεγεθών  $U_x/L$  και  $\theta$ . Η μορφή της αύξησης εξαρτάται τόσο από το μέτρο ελαστικότητας όσο και από τη συνοχή:
  - για σταθερή τιμή της συνοχής η αύξηση των υπόψη μεγεθών είναι αρχικά γραμμική για μεγάλες τιμές του  $E$ , ενώ για μικρές τιμές του  $E$  η αύξηση των μεγεθών ακολουθεί απ' αρχής μορφή υπερβολής.
  - για σταθερή τιμή του μέτρου ελαστικότητας η αύξηση των μεγεθών παρουσιάζει μορφή υπερβολής, η οποία -ιδιαίτερα για τις μετακινήσεις της κεφαλής του φρέατος- προοδευτικά τείνει να γίνει γραμμική για υψηλές τιμές της συνοχής, καθόσον η βραχομάζα δεν εισέρχεται σε πλαστική περιοχή.
- Οι προταθείσες ανωτέρω αναλυτικές σχέσεις προσδιορισμού της αδιαστατικοποιημένης οριζόντιας μετατόπισης και στροφής της κεφαλής του φρέατος προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για σχετικό βάθος  $D/L=1.5$  (δηλαδή βάθος φρέατος  $D=12$  m) απ' ότι για σχετικά βάθη  $D/L=0.5$  και  $0.75$ .
- Η μέθοδος των Carter και Kulhawy δίνει πιο συντηρητικά (μικρότερα) αποτελέσματα τόσο για τις μετακινήσεις όσο και για τις στροφές από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και τις προβλέψεις των σχέσεων που προτάθηκαν στην παρούσα εργασία. Η απόκλιση αυτή είναι σημαντικότερη για μικρά και μεγάλα βάθη φρέατος όσο μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας.

### 6.3 Επίλογος και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Ο προσδιορισμός της δυσκαμψίας των φρεάτων αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση για την σωστή και ασφαλή μελέτη θεμελίωσης μεγάλων τεχνικών έργων και ιδιαίτερα γεφυρών με σημαντικά ανοίγματα, όπου η θεμελίωση με φρέατα υπερτερεί ή επιβάλλεται τεχνο-οικονομικά έναντι άλλων μορφών θεμελίωσης (με φρεατοπασσάλους ή με επιφανειακά θεμέλια). Η παρούσα διπλωματική στοχεύει στην καλύτερη κατανόηση της επιρροής της γεωμετρίας του φρέατος και των παραμέτρων της περιβάλλουσας βραχώμαζας στην μετακινησιακή και στροφική δυσκαμψία του.

Σε επόμενο στάδιο, η εξέλιξη της εργασίας αυτής καλείται να διερευνήσει επιπρόσθετα:

1. την επιρροή στη δυσκαμψία των φρεάτων των διαφορετικών τιμών της γωνίας εσωτερικής τριβής  $\phi$  της βραχώμαζας,
2. τη μηχανική συμπεριφορά των φρεάτων υπό εγκάρσια φόρτιση με χρήση σοφιστευμένων καταστατικών προσομοιώματων, και
3. την επιρροή του υδραυλικού προβλήματος στην μηχανική απόκριση των φρεάτων υπό εγκάρσια φόρτιση.

# 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αναγνωστόπουλος Α., Παπαδόπουλος Β., «Θεμελιώσεις με Πασσάλους», Εκδόσεις Συμεών, (2004)
2. Καββαδάς Μ., «Σχεδιασμός Φρεάτων Πακτώσεως» Βιβλιογραφική Ανασκόπηση
3. Καββαδάς Μ., «Θεμελιώσεις Τεχνικών Έργων», Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου (2008)
4. Κωστόπουλος Δ.Σ., «Γεωτεχνικές Κατασκευές (1<sup>ος</sup> Τόμος) Ανάλυση των Αρχών Σχεδιασμού και Κατασκευής», Εκδόσεις Ιών, (2008)
5. Λιακοπούλου Ν., «Αριθμητική Διερεύνηση της Εγκάρσιας Φόρτισης Φρεάτων Πακτώσεως», Διπλωματική Εργασία, (2010)
6. Μανουσέλη Ε., «Ανάλυση της Εγκάρσιας Φόρτισης Πασσάλου σε Συνεκτικά Εδάφη με Αριθμητικές Μεθόδους», Διπλωματική Εργασία, (2012)
7. Μπουκοβάλας Δ., «Συμπεριφορά Φρεάτων Πακτώσεως Έναντι Εγκάρσιας Φόρτισης και Τέμνουσας στην Κεφαλή τους ως Θεμελίωση Μεγάλων Τεχνικών Έργων», Διπλωματική Εργασία, (2007)
8. Καλτσάς Δ., «Αριθμητική Διερεύνηση της Εγκάρσιας Ακαμψίας Φρεάτων Πακτώσεως», Διπλωματική Εργασία, (2012)
9. Σπυροπούλου Σ., «Αριθμητική Διερεύνηση Μηχανικής Συμπεριφοράς Φρεάτων Πακτώσεως», Διπλωματική Εργασία, (2016)
10. Ψυχάρης Ι.Ν., «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Γεφυρών», Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου (2016)
11. Bajaz A.S., Thesis, «Finite Element Modeling of a Model-Scale, Rock-Socketed Pile under Cyclic Lateral Loading», (2018)
12. 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)
13. Carter J.P., Kulhawy F.H., «Analysis of Laterally Loaded Shafts in Rock» Journal of Geotechnical Engineering Vol. 118 No. 6 (1992)
14. 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)
15. 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)
16. 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)
17. Hoek E., Carranza – Torres C., Corkum B., «Hoek – Brown Failure Criterion – 2002 edition»
18. Hoek E., Dietrichs M.S., «Empirical Estimation of Rock Mass Modulus», International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43. 203-215 (2006)
19. Moussa A., Christou P., «The Evolution of Analysis Methods for Laterally Loaded Piles Through Time», (2018)

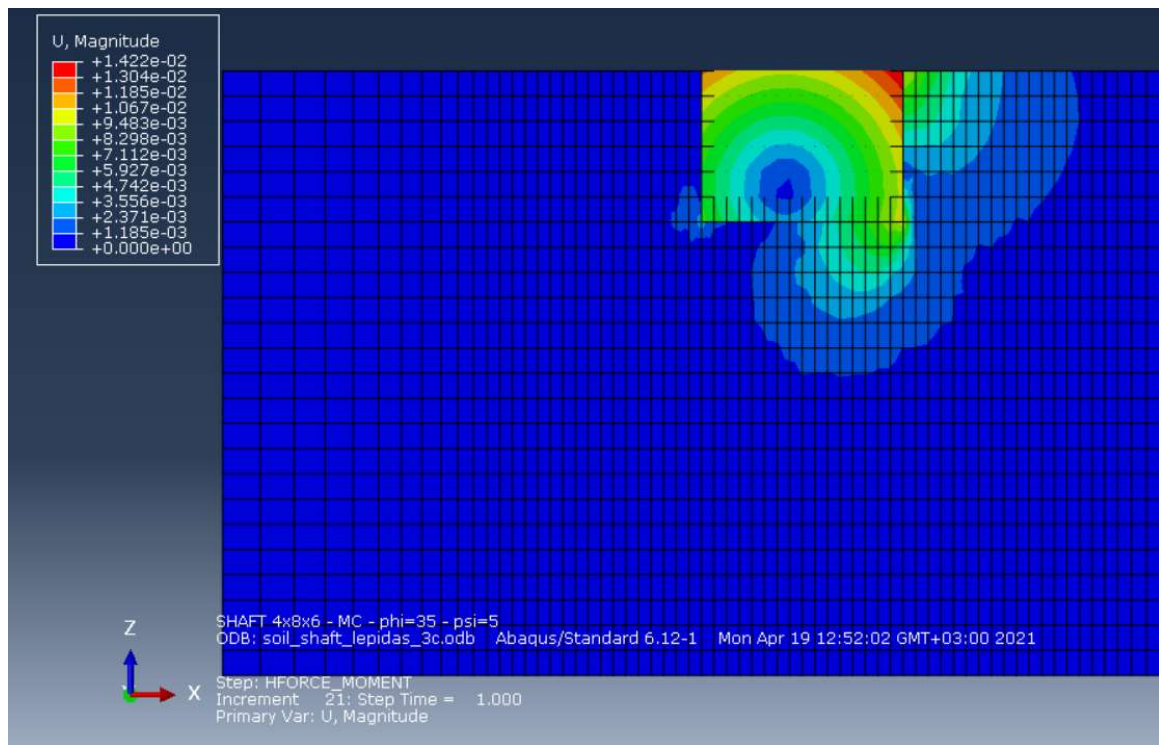
20. NCHRP Synthesis 360, «Rock – Socketed Shafts for Highway Structure Foundations» (2006)
21. Nixon J.B. Thesis, «Verification of the Weathered Rock Model for p-y Curves» (2002)
22. Nusairat J., Liang R.Y., Engel R.L., «Design of Rock Socketed Drilled Shafts», FHWA/011-(2006)
23. Poulos H.G. (1971a), «Behaviour of Laterally Loaded Piles I – Single Piles», J. Soil Mech. Found Div. ASCE 97(5) 711-731
24. Poulos H.G. (1971a), «Behaviour of Laterally Loaded Piles I – Single Piles», J. Soil Mech. Found Div. ASCE 97(4) 341-360
25. Poulos H.G. Davis E.H., «Pile Foundation Analysis and Design», (1980)
26. Randolph M.F., «A Theoretical Study of the Performance of Piles», PhD Thesis, University of Cambridge (1977)
27. Randolph M.F., «The Response of Flexible Piles to Lateral Loading», Geotechnique, 31(2), 247-259 (1981)
28. Reese L.C., «Analysis of Laterally Loaded Piles in Weak Rock», Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 101(7), 633-649 (1997)
29. Rockscience «Laterally Loaded Piles», (2018)
30. Simulia Abaqus 6.10. Documentantion
31. Wilson E.L., «Structural Analysis of Axisymmetric Solids», J. Am. Inst. Astronaut. Astronaut, 3, 2269-2274 (1965)
32. Yang Ke, «Analysis of Laterally Loaded Drilled Shafts in Rock» (2006)
33. Zhang L., «Drilled Shafts in Rock: Analysis and Design» (2004)
34. Zhang L., Ahmari S., «Non-Linear Analysis of Laterally Loaded Rigid Piles in Cohesive Soils» (2011)

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

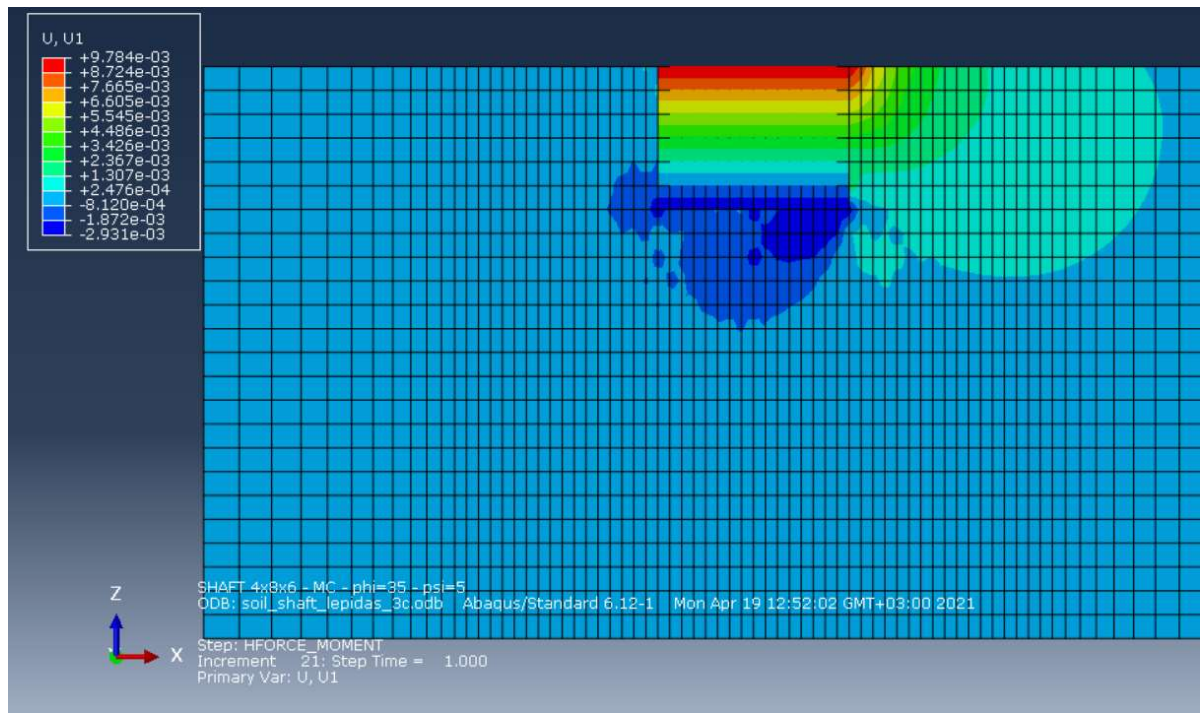
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται ενδεικτικά οι οριζόντιες μετακινήσεις και στροφές της κεφαλής του φρέατος από τις σχετικές εικόνες του προγράμματος Abaqus και την αριθμητική ανάλυση για φρέαρ βάθους  $D=6$  m και συνοχής  $c=100$  kPa.

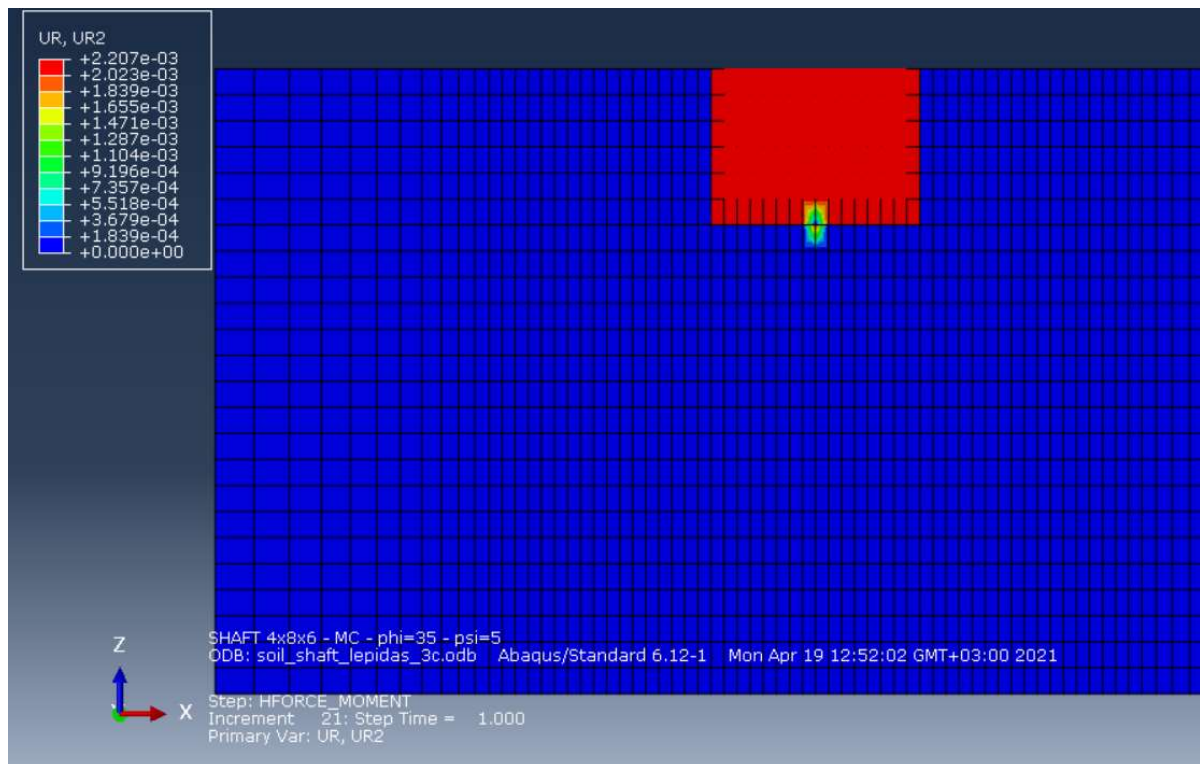
### 1. $H=1500$ kN – $E=500$ MPa



**Σχήμα Α.1 :** Μετατόπιση και στροφή φρέατος για βραχόμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=500$  MPa και φορτία  $H=1500$  kN και  $M=112500$  kNm



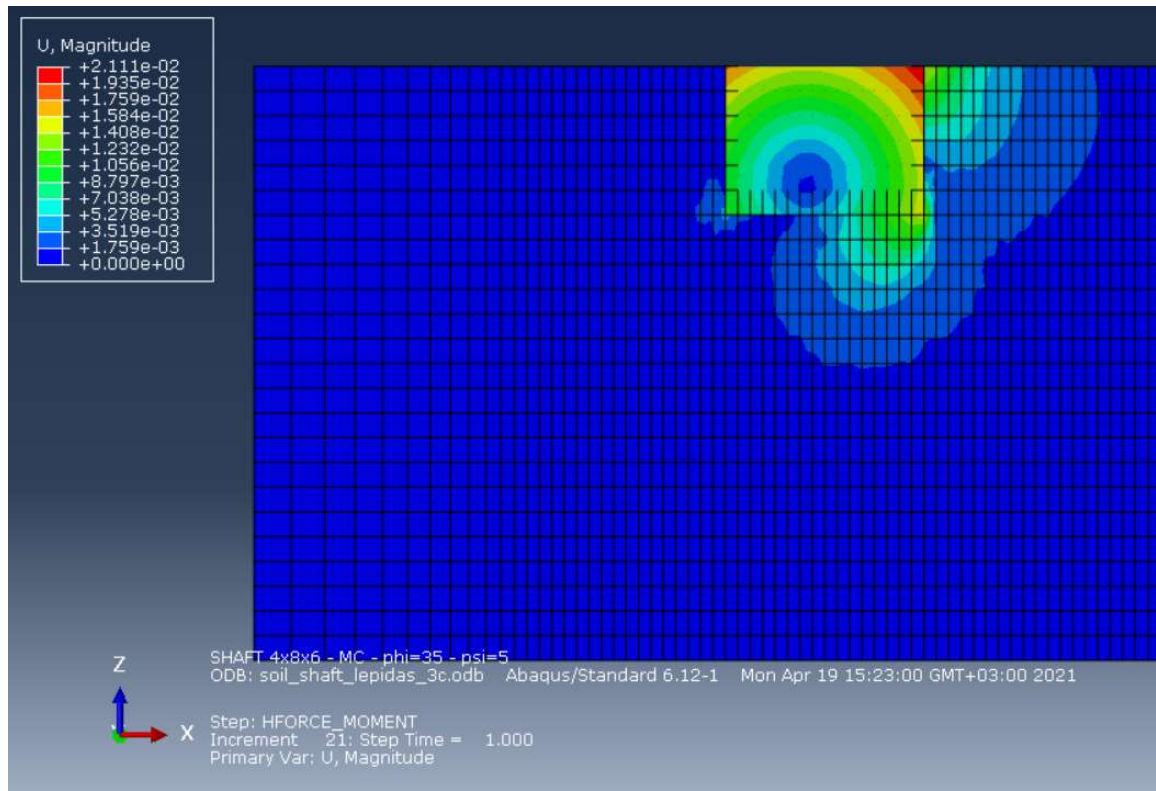
**Σχήμα A.2 :** Οριζόντια μετακίνηση του φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=500 \text{ MPa}$  και φορτίο  $H=1500 \text{ kN}$



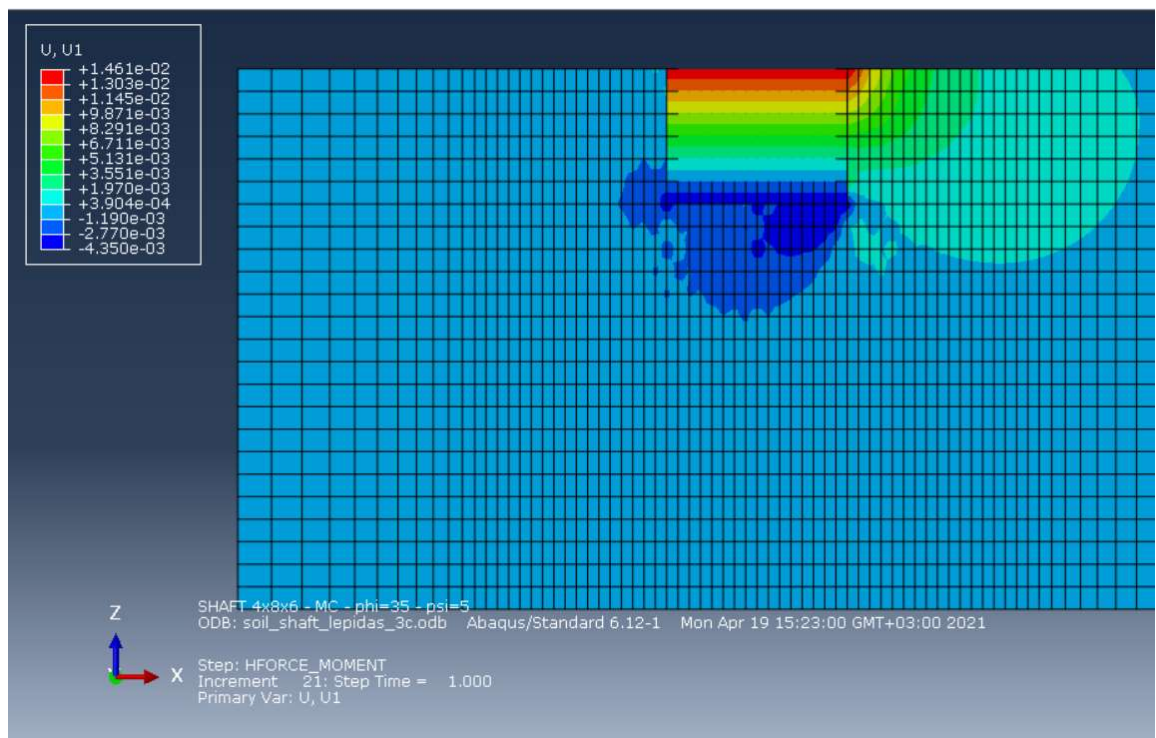
**Σχήμα A.3 :** Στροφή κεφαλής φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=500 \text{ MPa}$  και ροπή  $M=112500 \text{ kNm}$



## 2. $H=1500\text{ kN} - E=330\text{ MPa}$

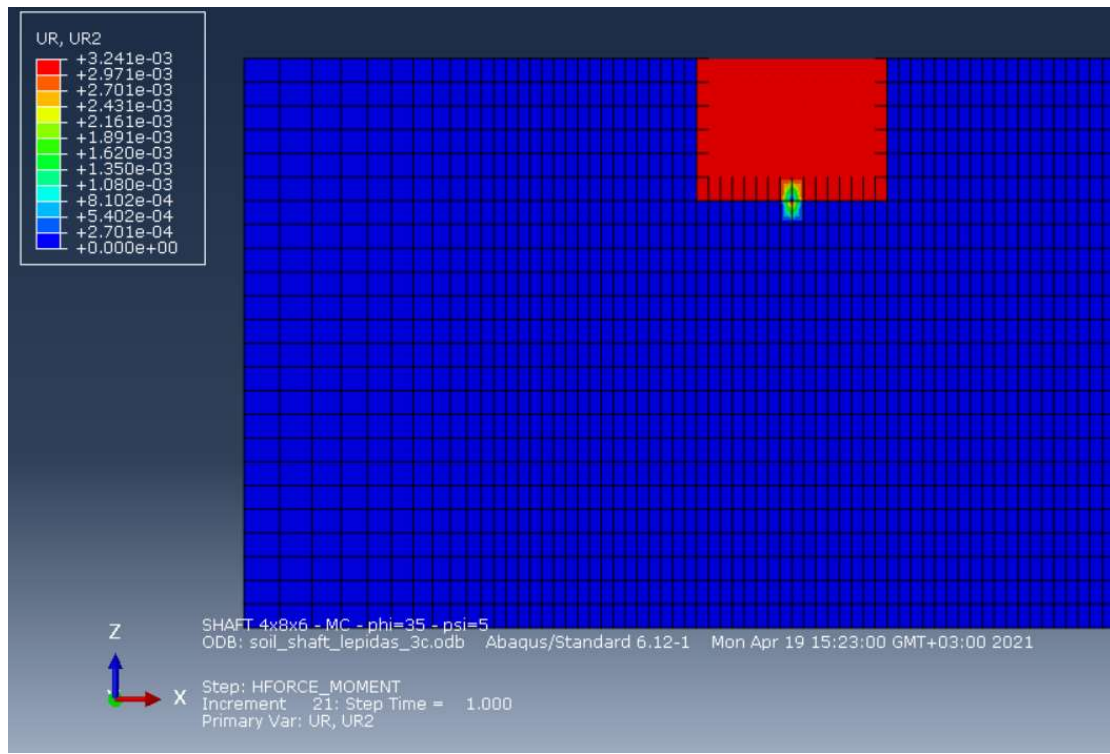


**Σχήμα A.4 :** Μετατόπιση και στροφή φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=330\text{ MPa}$  και φορτία  $H=1500\text{ kN}$  και  $M=112500\text{ kNm}$



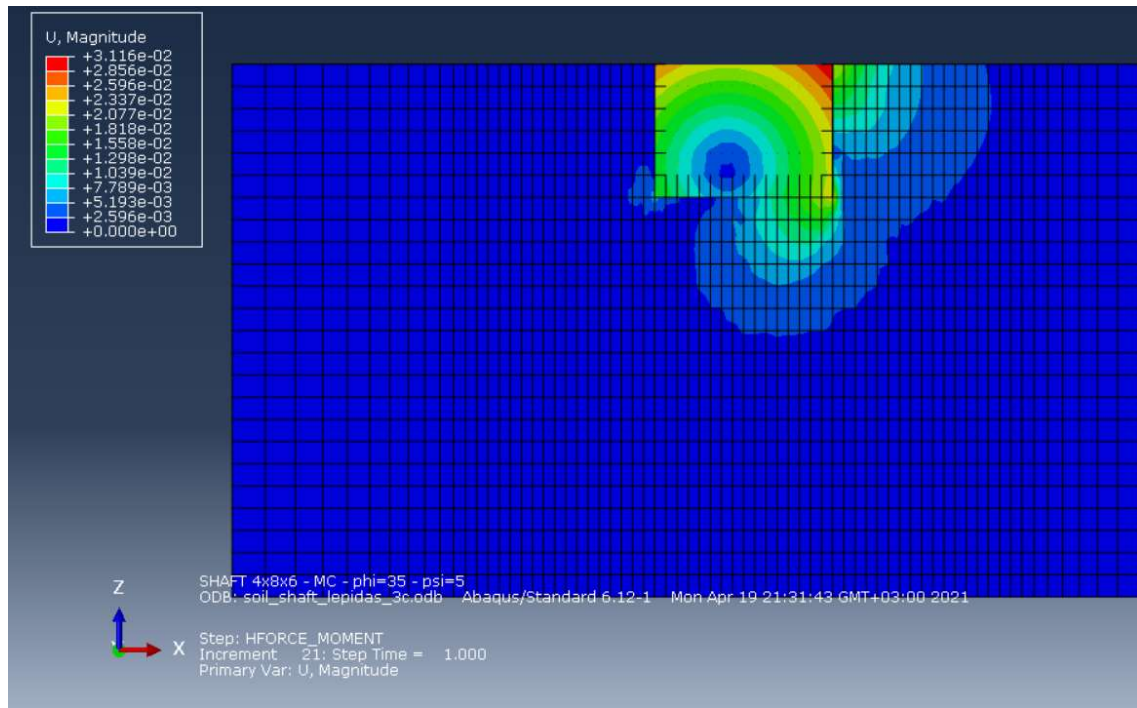
**Σχήμα A.5 :** Οριζόντια μετακίνηση του φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=330\text{ MPa}$  και φορτία  $H=1500\text{ kN}$



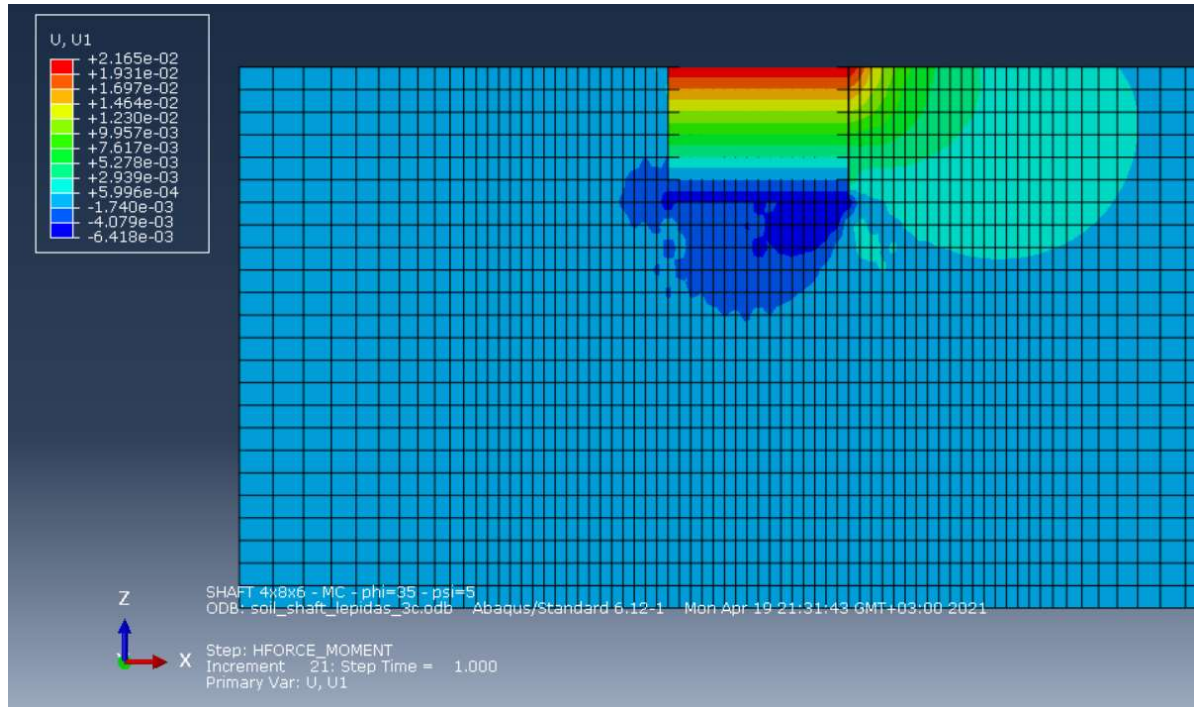


**Σχήμα Α.6** : Στροφή κεφαλής φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=330 \text{ MPa}$  και ροπή  $M=112500 \text{ kNm}$

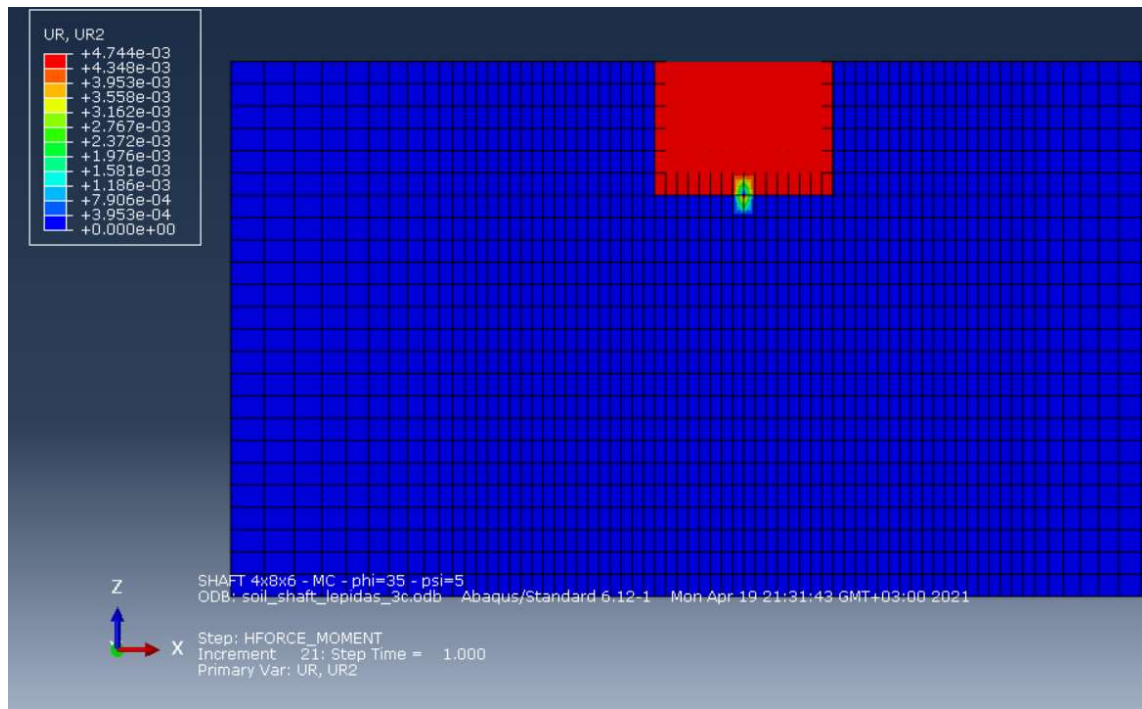
### 3. $H=1500\text{ kN} - E=220\text{ MPa}$



**Σχήμα Α.7 :** Μετατόπιση και στροφή φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=220\text{ MPa}$  και φορτία  $H=1500\text{ kN}$  και  $M=112500\text{ kNm}$



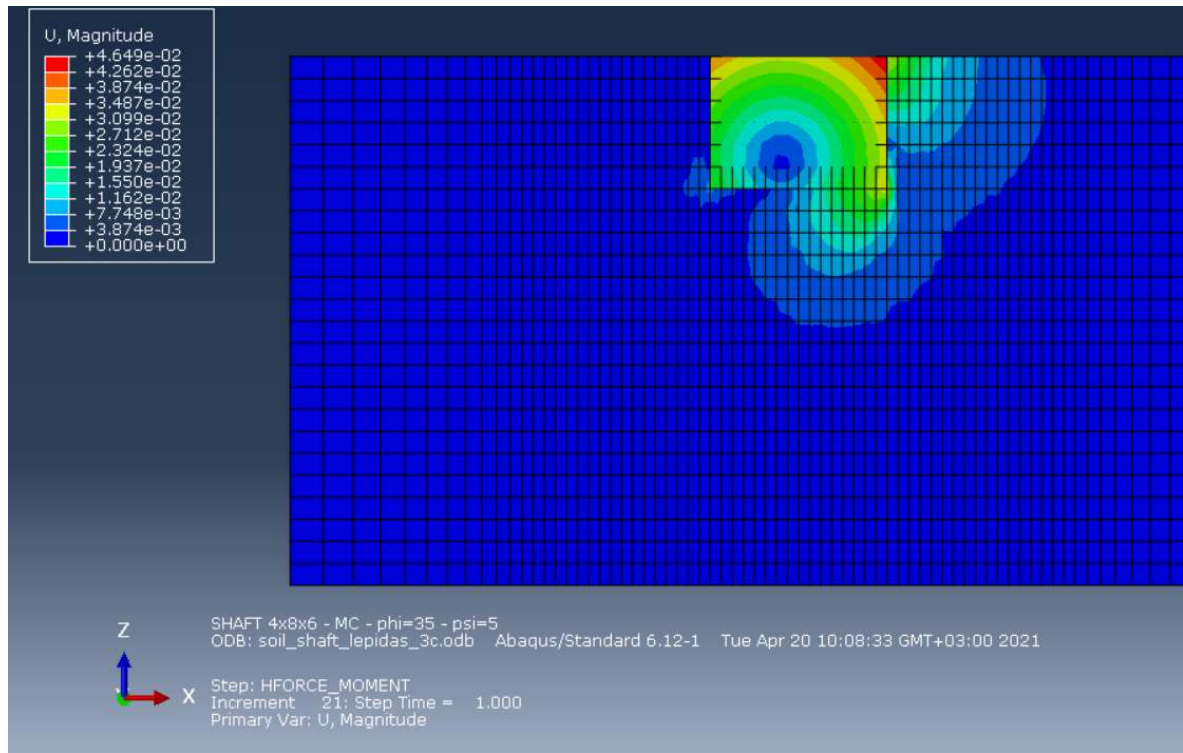
**Σχήμα Α.8 :** Οριζόντια μετακίνηση του φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=220\text{ MPa}$  και φορτία  $H=1500\text{ kN}$



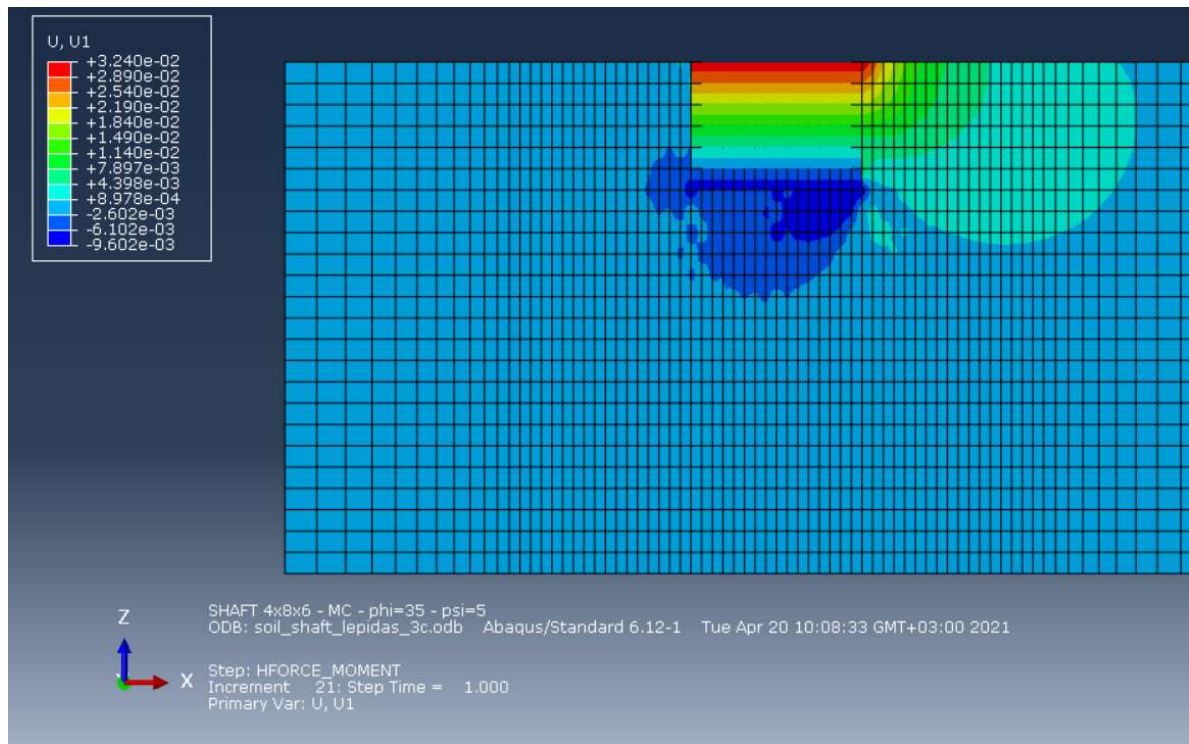
**Σχήμα Α.9 :** Στροφή κεφαλής φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=220 \text{ MPa}$  και ροπή  $M=112500 \text{ kNm}$



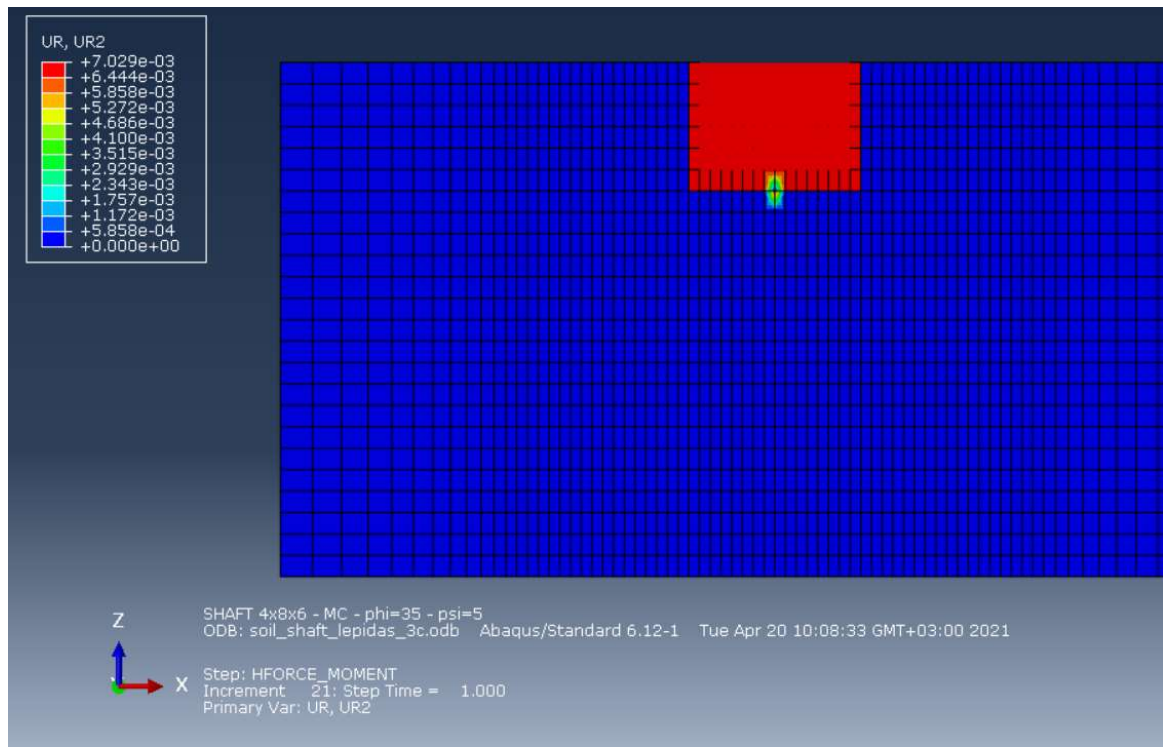
#### 4. $H=1500\text{ kN} - E=145\text{ MPa}$



**Σχήμα A.10 :** Μετατόπιση και στροφή φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=145\text{ MPa}$  και φορτία  $H=1500\text{ kN}$  και  $M=112500\text{ kNm}$

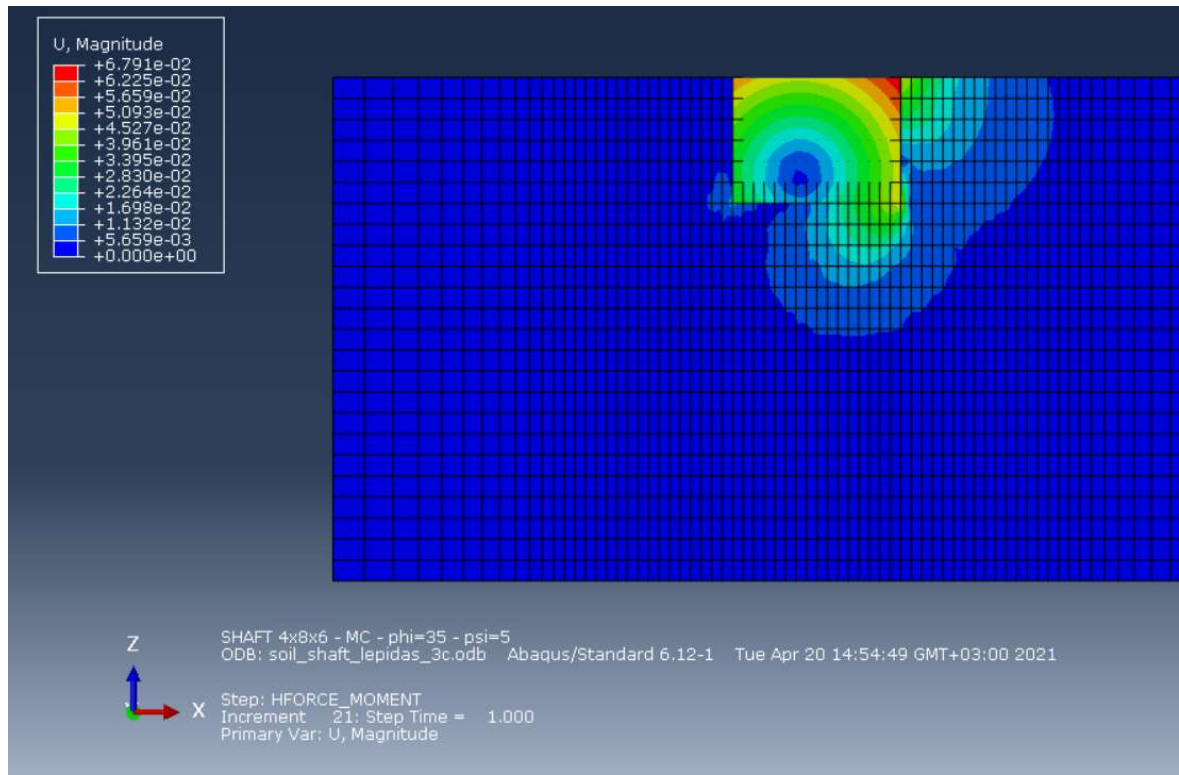


**Σχήμα A.11 :** Οριζόντια μετακίνηση του φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=145\text{ MPa}$  και φορτίο  $H=1500\text{ kN}$

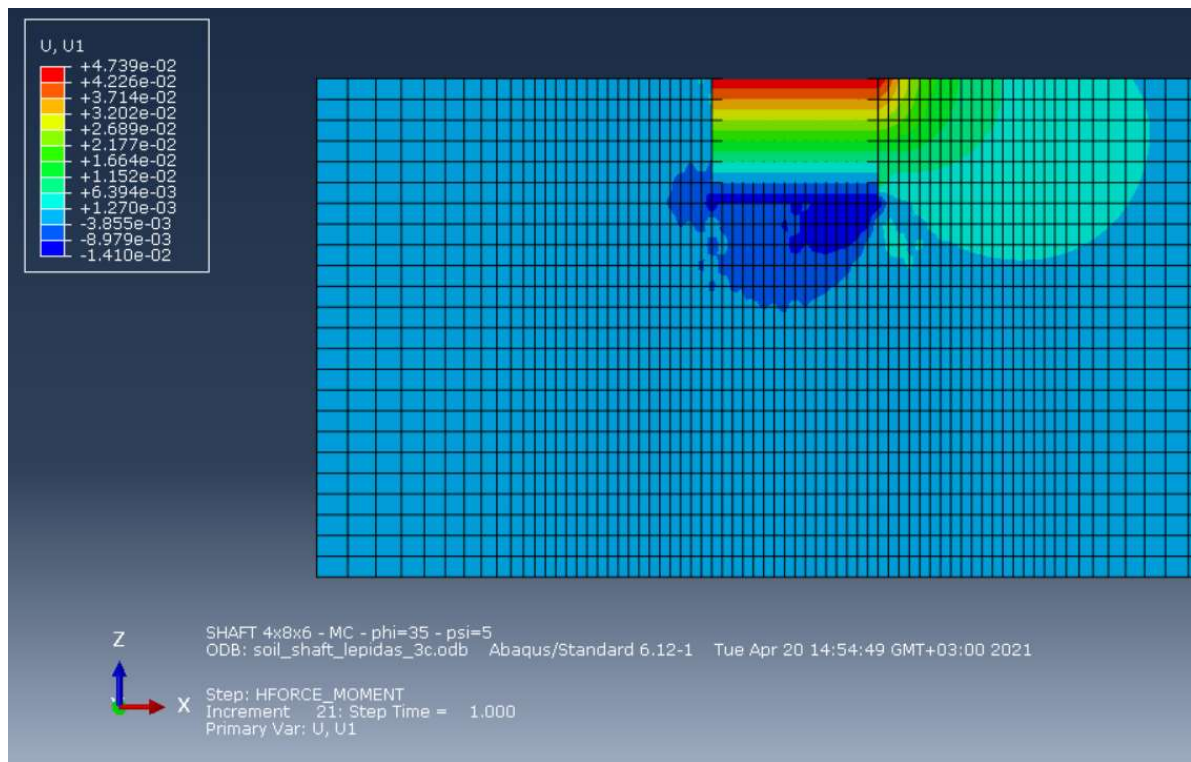


**Σχήμα A.12 :** Στροφή κεφαλής φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=145 \text{ MPa}$  και ροπή  $M=112500 \text{ kNm}$

5. H=1500 kN – E=97.5 MPa

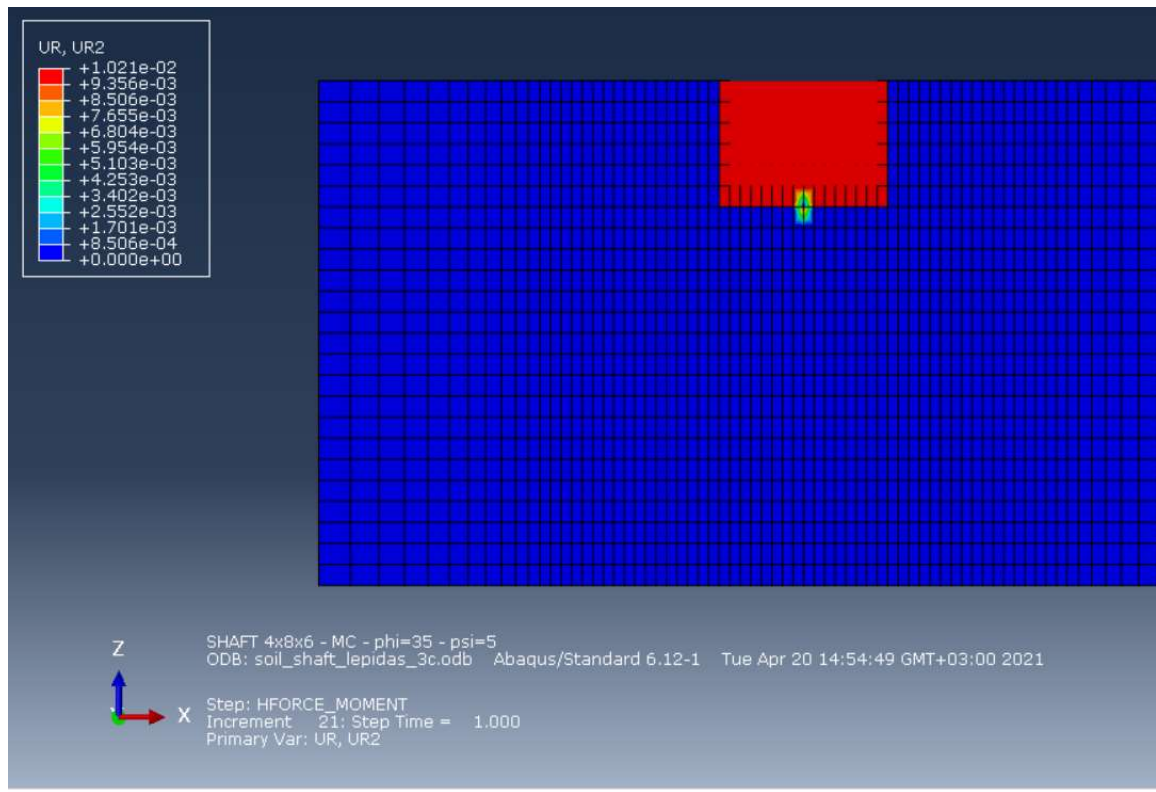


**Σχήμα A.13 :** Μετατόπιση και στροφή φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=97.5 \text{ MPa}$  και φορτία  $H=1500 \text{ kN}$  και  $M=112500 \text{ kNm}$



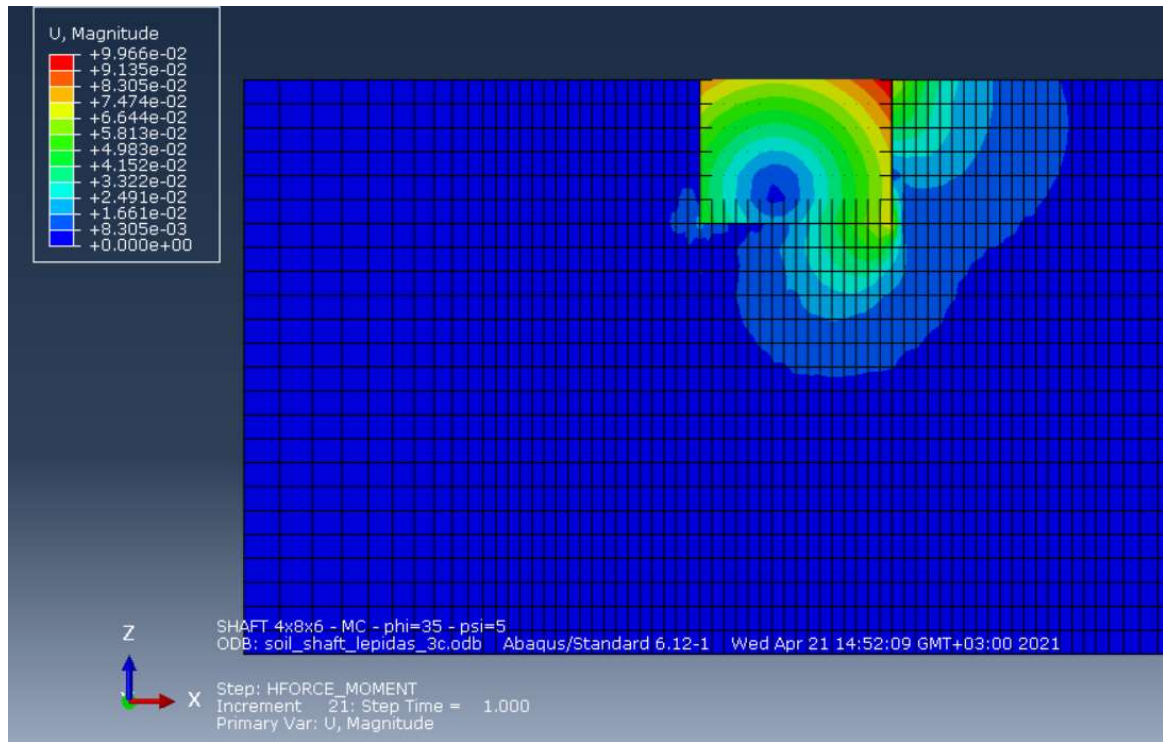
**Σχήμα A.14 :** Οριζόντια μετακίνηση του φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=97.5 \text{ MPa}$  και φορτίο  $H=1500 \text{ kN}$



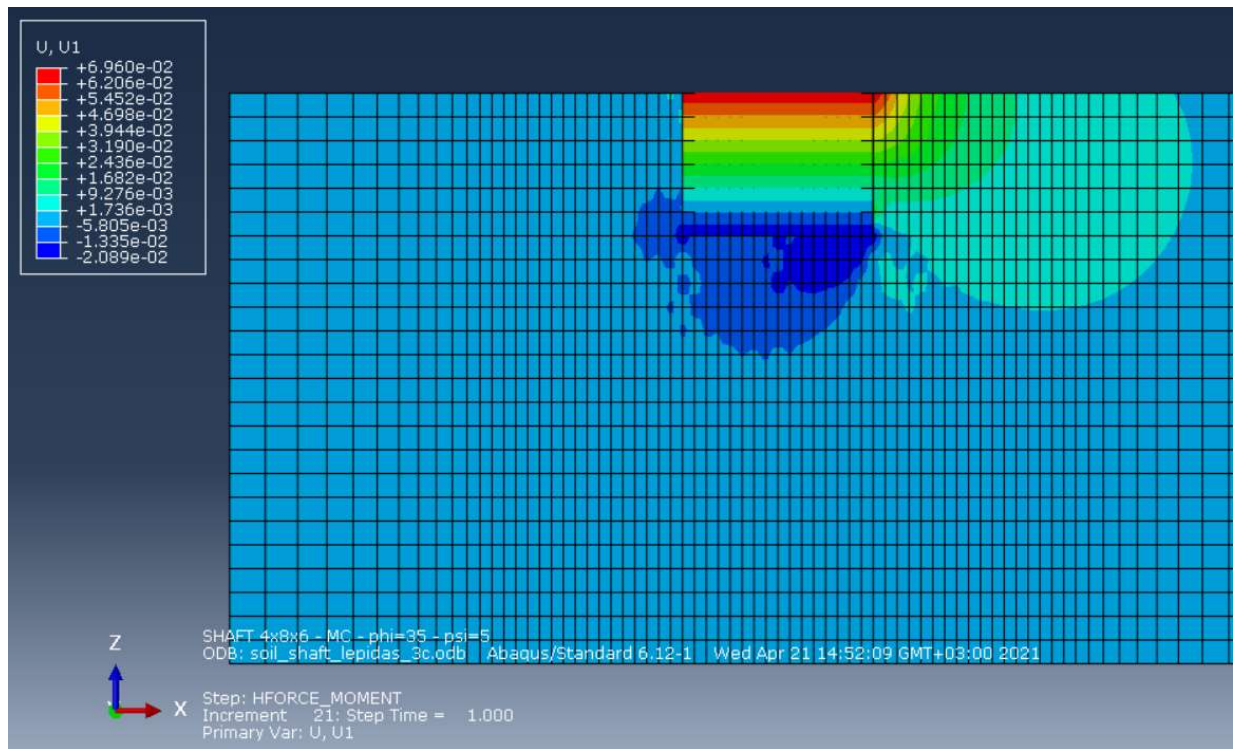


**Σχήμα A.15 :** Στροφή κεφαλής φρέατος για βραχόμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=97.5 \text{ MPa}$  και ροπή  $M=112500 \text{ kNm}$

## 6. $H=1500\text{ kN} - E=65\text{ MPa}$

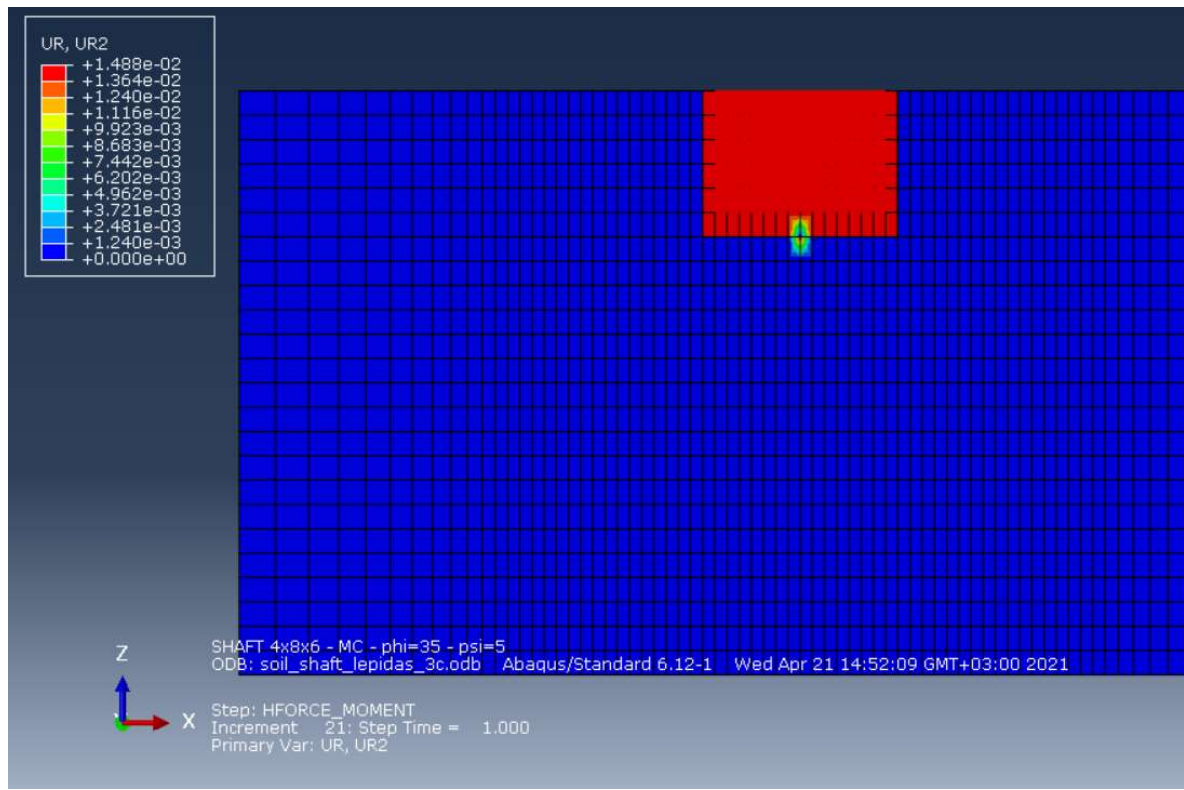


**Σχήμα A.16 :** Μετατόπιση και στροφή φρέατος για βραχόμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=65\text{ MPa}$  και φορτία  $H=1500\text{ kN}$  και  $M=112500\text{ kNm}$



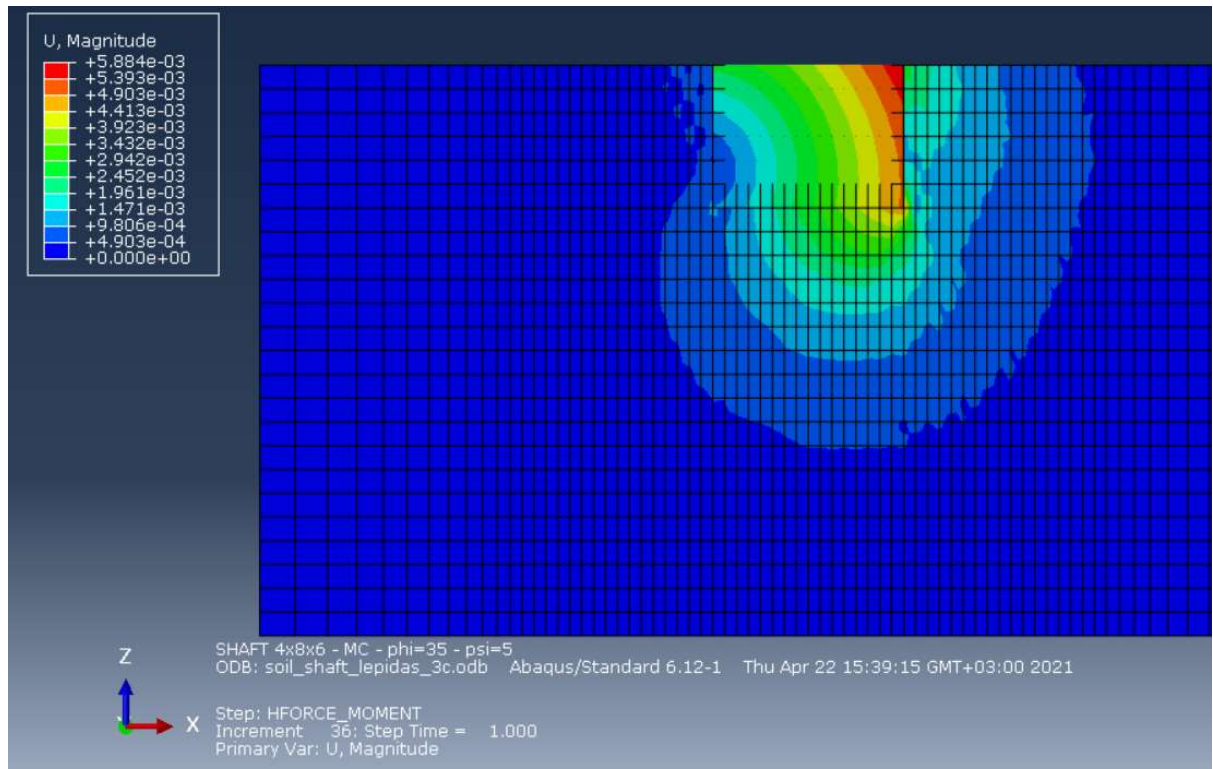
**Σχήμα A.17 :** Οριζόντια μετακίνηση του φρέατος για βραχόμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=65\text{ MPa}$  και φορτία  $H=1500\text{ kN}$



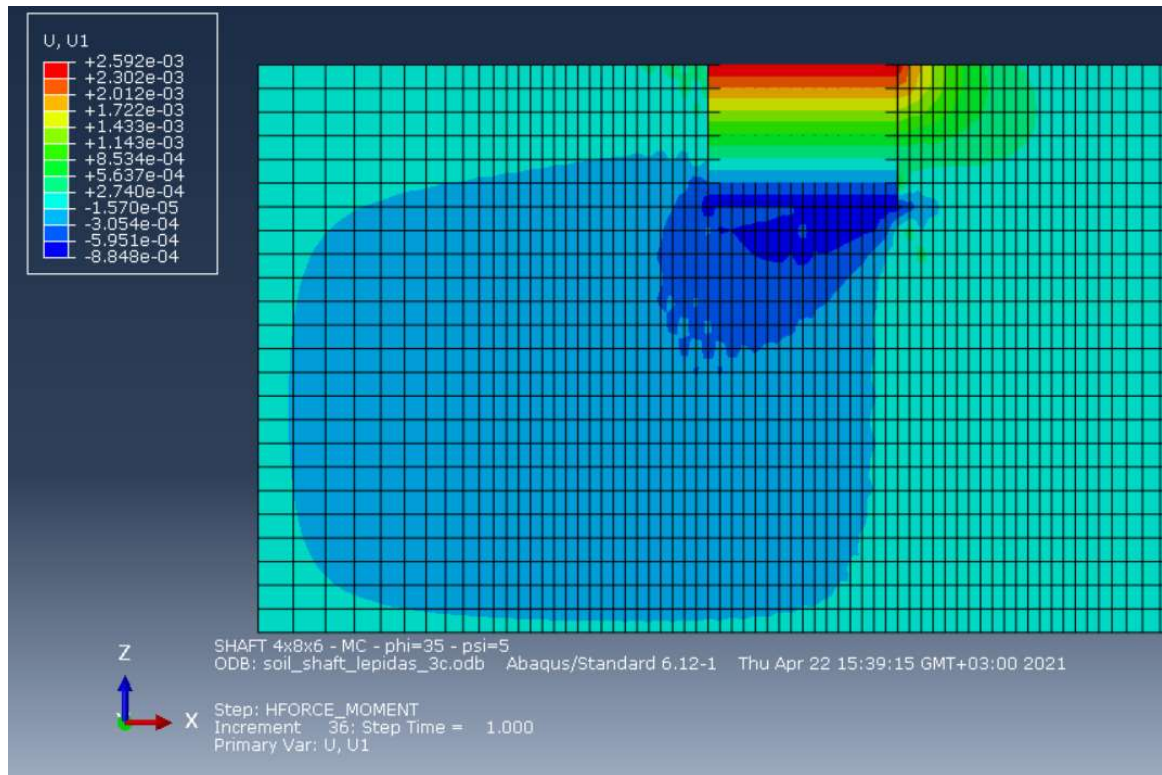


**Σχήμα Α.18 :** Στροφή κεφαλής φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=65 \text{ MPa}$  και ροπή  $M=112500 \text{ kNm}$

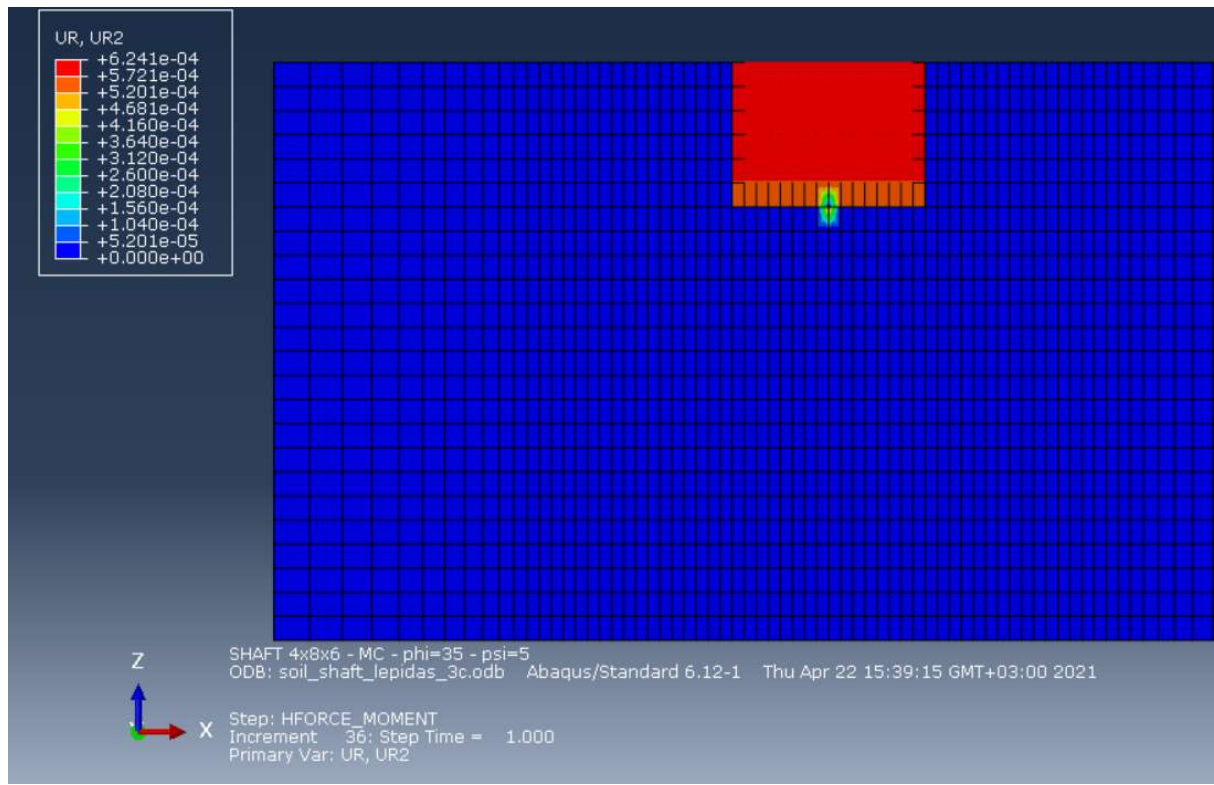
7. H=750 kN – E=500 MPa



**Σχήμα Α.19 :** Μετατόπιση και στροφή φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=500 \text{ MPa}$  και φορτία  $H=750 \text{ kN}$  και  $M=56250 \text{ kNm}$



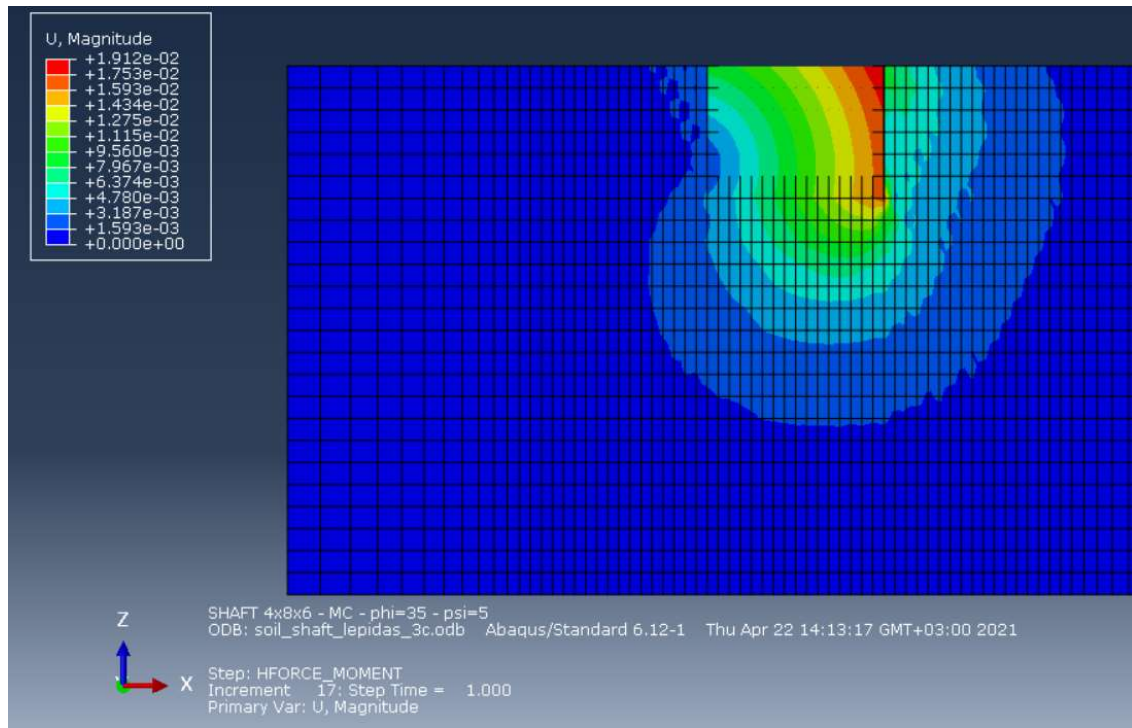
**Σχήμα Α.20 :** Οριζόντια μετακίνηση του φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=500 \text{ MPa}$  και φορτία  $H=750 \text{ kN}$



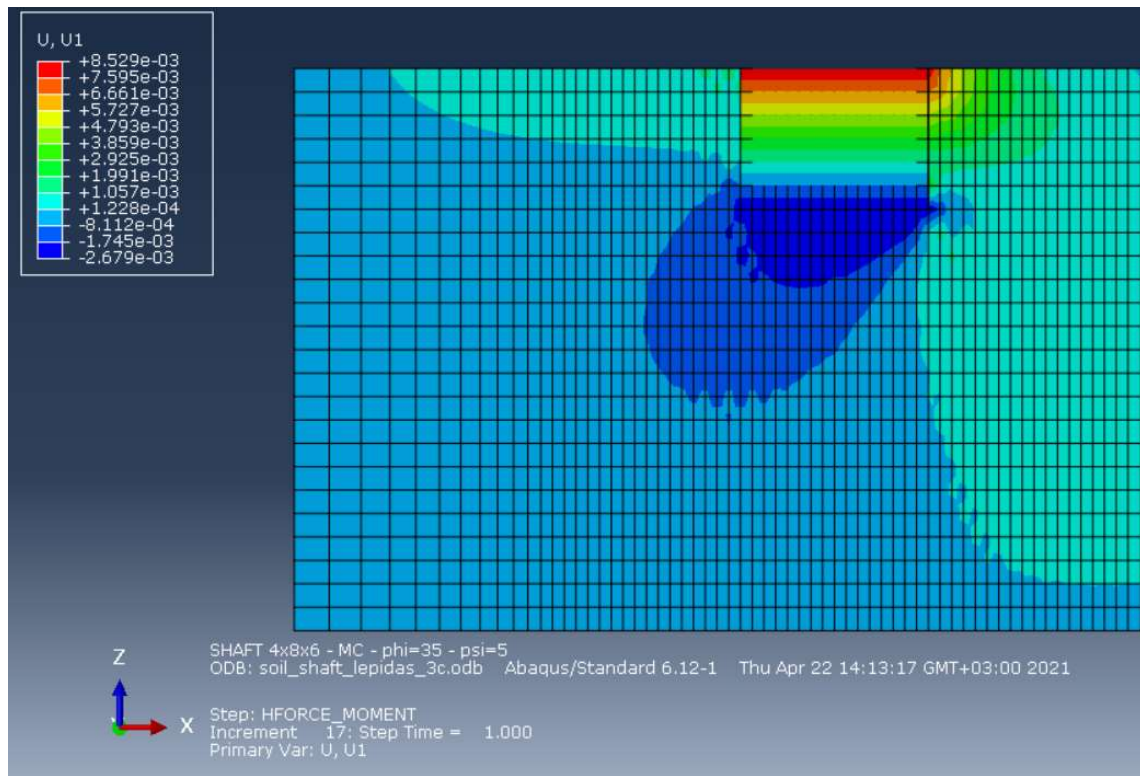
**Σχήμα A.21** : Στροφή κεφαλής φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=500 \text{ MPa}$  και ροπή  $M=56250 \text{ kNm}$



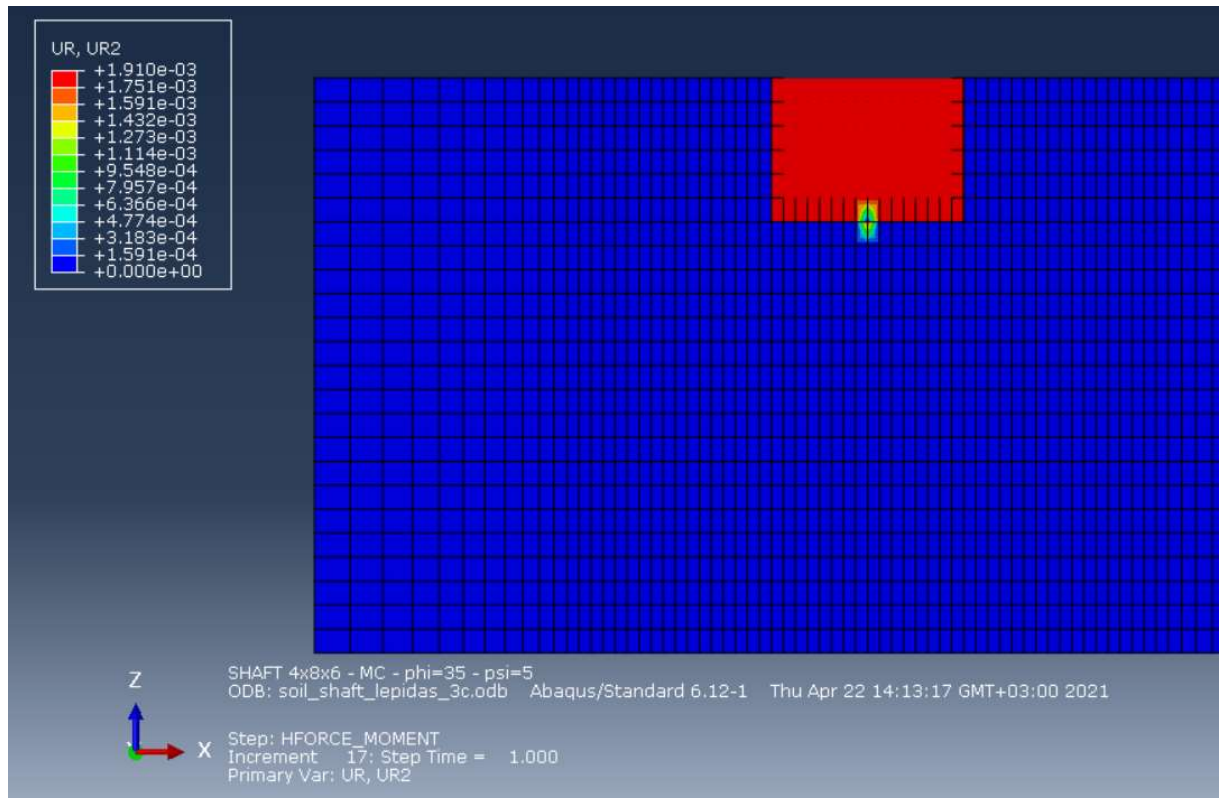
8. H=750 kN – E=145 MPa



**Σχήμα A.22 :** Μετατόπιση και στροφή φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=145 \text{ MPa}$  και φορτία  $H=750 \text{ kN}$  και  $M=56250 \text{ kNm}$

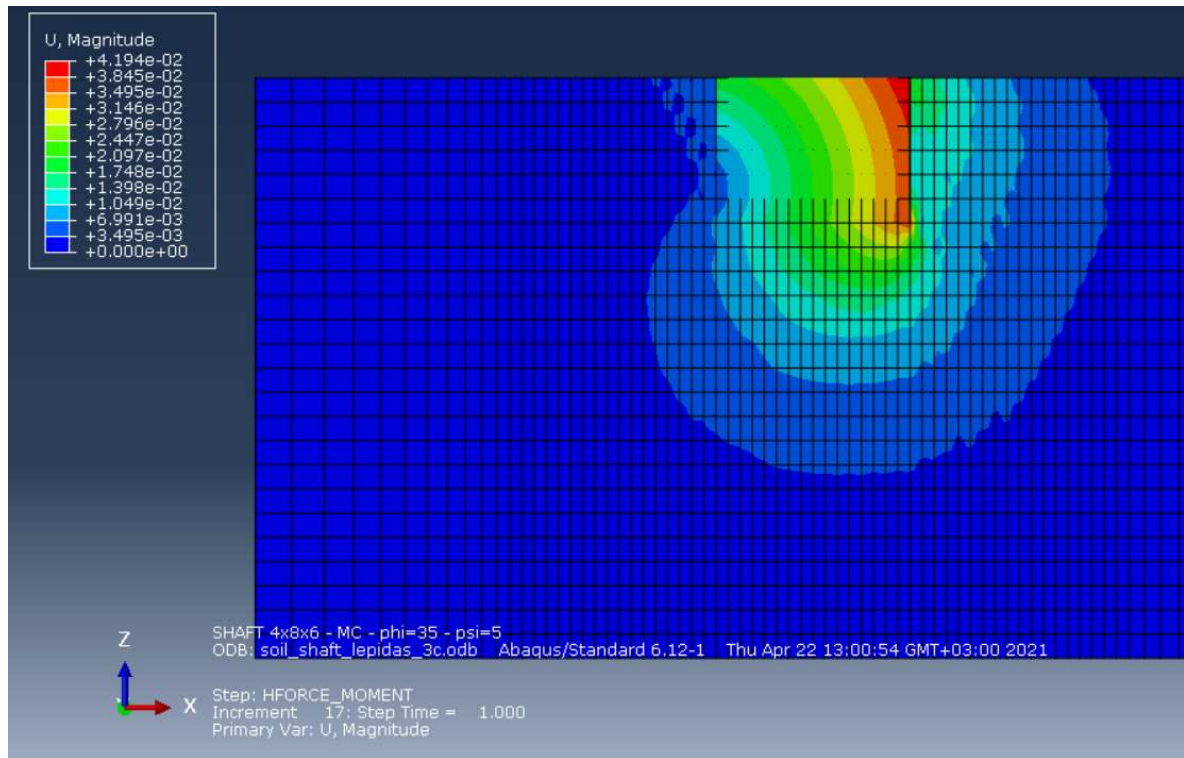


**Σχήμα A.23 :** Οριζόντια μετακίνηση του φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=145 \text{ MPa}$  και φορτίο  $H=750 \text{ kN}$

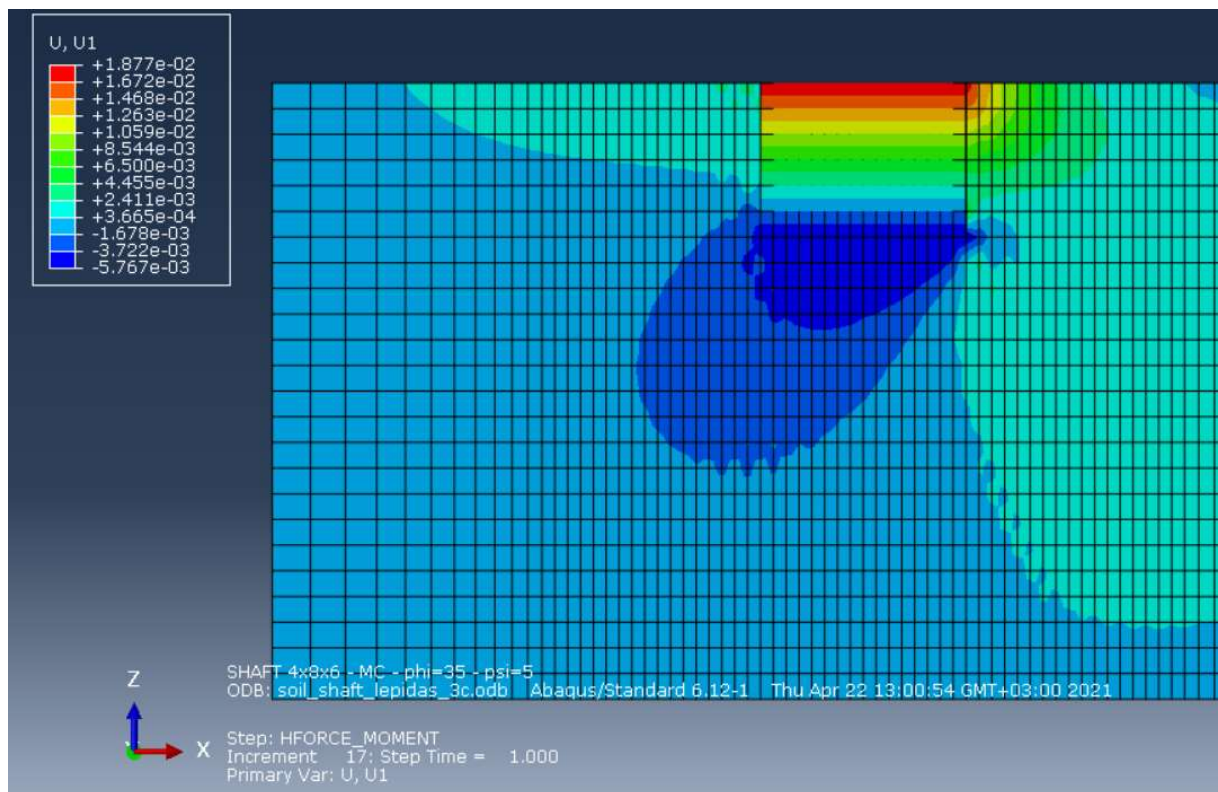


**Σχήμα A.24 :** Στροφή κεφαλής φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=145 \text{ MPa}$  και ροπή  $M=56250 \text{ kNm}$

9. H=750 kN – E=65 MPa

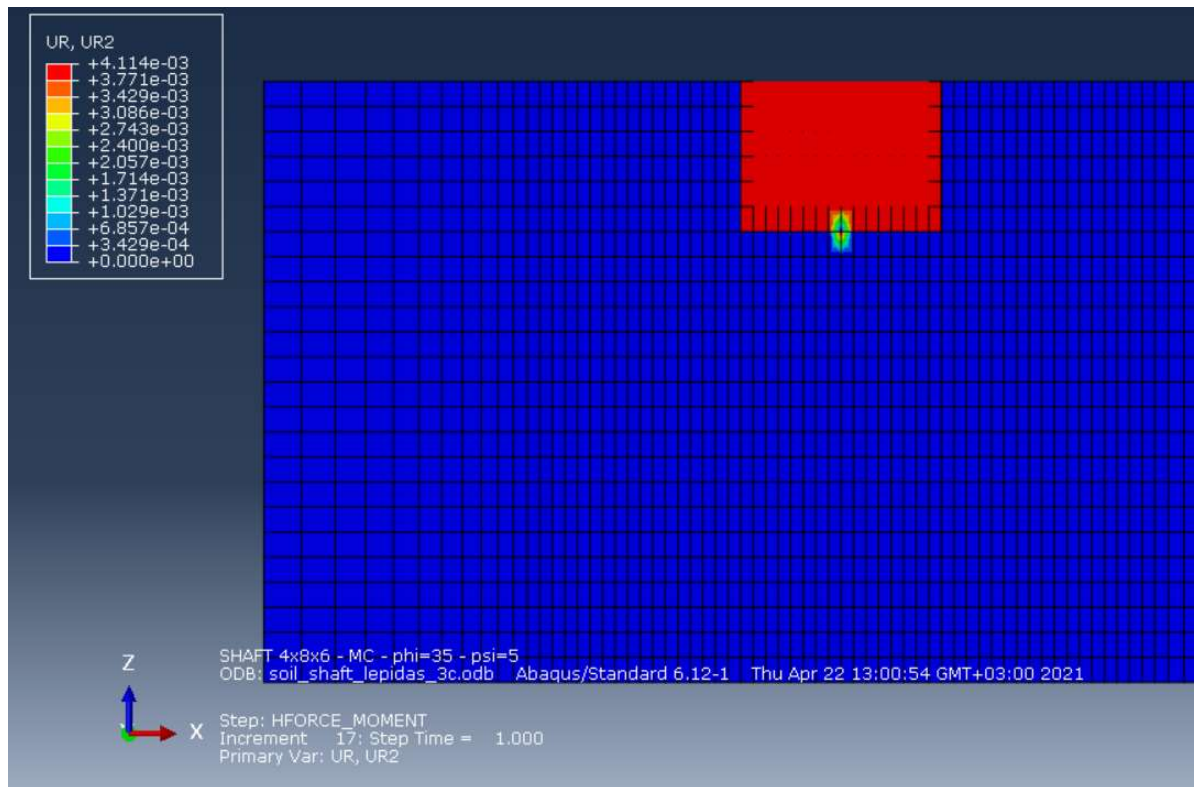


**Σχήμα A.25 :** Μετατόπιση και στροφή φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=65 \text{ MPa}$  και φορτία  $H=750 \text{ kN}$  και  $M=56250 \text{ kNm}$



**Σχήμα A.26 :** Οριζόντια μετακίνηση του φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=65 \text{ MPa}$  και φορτίο  $H=750 \text{ kN}$





**Σχήμα A.27** : Στροφή κεφαλής φρέατος για βραχώμαζα με μέτρο ελαστικότητας  $E=65 \text{ MPa}$  και ροπή  $M=56250 \text{ kNm}$

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται μερικά τμήματα του αρχείου εισαγωγής δεδομένων (αρχείο .inp) του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.12. Τα αποσπάσματα προέρχονται από την αριθμητική ανάλυση για φρέαρ βάθους 6m, βραχόμαζα μέτρου ελαστικότητας  $E=330 \text{ MPa}$  και συνοχής  $c=100 \text{ kPa}$  και εξωτερικού εγκάρσιου φορτίου  $H=1500 \text{ kN}$ .

Σημειώνεται ότι οι εντολές στον κώδικα ορίζονται με το σύμβολο (\*) ενώ με χρήση του συμβόλου από 2 φορές και πάνω (\*\*, \*\*@, \*\*@@) εισάγονται σχόλια τα οποία αγνοεί το πρόγραμμα. Στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων τα σχόλια χρησιμοποιήθηκαν για καλύτερη οργάνωση και ευκολότερη ανάγνωση του κώδικα.

## B1 Ιδιότητες Υλικών

```
** MATERIALS
** @@@@
**      SOIL
** @@@@
*SOLID SECTION, ELSET=all_elements, MATERIAL=SOIL
  1.,
*Material, name=SOIL
*Density
  2,
**
*Elastic
  330000., 0.333
*MOHR COULOMB
  35., 5.
**
*MOHR COULOMB HARDENING
  100., 0.0
**
** @@@@
**      SLAB
** @@@@
*SOLID SECTION, ELSET=concrete_shaft, MATERIAL=SLAB
  1.,
*Material, name=SLAB
*Density
  0.1,
**
*Elastic
  25000., 0.25
**
** @@@@
**      SHAFT_BEAM
** @@@@
**
*BEAM SECTION, ELSET=SHAFT_BEAMS, MATERIAL=STEEL, SECTION=RECT
**
  8., 4.
```



```

1., 0., 0.
**
*MATERIAL,NAME=STEEL
**
*DENSITY
**
2.4,
**
*ELASTIC
**
25000000.,0.25

```

## **B2 Διεπιφάνειες**

```

**
*CONTACT PAIR, INTERACTION=FRICT_1, ADJUST=0.001
PERIPHERAL_INSIDE, PERIPHERAL_OUTSIDE
*SURFACE INTERACTION, NAME=FRICT_1
**
*SURFACE BEHAVIOR, PRESSURE-OVERCLOSURE=exponential
0.000001, 2.0
**
**THE FRICTION PARAMETER BELOW CORRESPONDS TO AN ANGLE OF 35o
*FRICTION, ELASTIC SLIP=0.001
0.315298788
**
*CONTACT PAIR, INTERACTION=FRICT_2, ADJUST=0.001
BOTTOM_INSIDE, BOTTOM_OUTSIDE
*SURFACE INTERACTION, NAME=FRICT_2
**
*SURFACE BEHAVIOR, PRESSURE-OVERCLOSURE=exponential
0.000001, 2.0
**
**THE FRICTION PARAMETER BELOW CORRESPONDS TO AN ANGLE OF 35o
*FRICTION, ELASTIC SLIP=0.001
0.700207538
**

```

## **B3 Ορισμός Άκαμπτων Συνδέσμων**

Όλοι οι κόμβοι της διατομής του φρέατος συνδέονται με τον κεντρικό της κόμβο στην εκάστοτε στάθμη. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα τμήμα της στάθμης που βρίσκεται στην επιφάνεια ( $z=0$ ).

```

*MPC
BEAM , 100001 , 83
BEAM , 100002 , 83
BEAM , 100005 , 83
BEAM , 100007 , 83
BEAM , 100010 , 83
BEAM , 100011 , 83
BEAM , 100013 , 83
BEAM , 100014 , 83
BEAM , 100017 , 83
BEAM , 100018 , 83

```

```

BEAM ,      100019 ,      83
BEAM ,      100033 ,      83
BEAM ,      100034 ,      83
BEAM ,      100035 ,      83
BEAM ,      1635 ,      83
BEAM ,      1636 ,      83
BEAM ,      1637 ,      83
BEAM ,      1638 ,      83
BEAM ,      1639 ,      83
BEAM ,      1640 ,      83
BEAM ,      1641 ,      83
BEAM ,      1642 ,      83
BEAM ,      1643 ,      83
BEAM ,      1644 ,      83
BEAM ,      100051 ,      83
BEAM ,      100052 ,      83
BEAM ,      100053 ,      83

```

#### B4 Συνοριακές Συνθήκες

```

** Setting Boundaries
**
*Boundary
bottom_nodes, 1, 3
x_sides, 1, 1
y_sides, 2, 2
**
**

```

#### B5 Αρχικές Συνθήκες

```

** Setting Initial Conditions
**
*INITIAL CONDITIONS,TYPE=STRESS,GEOSTATIC
all_elements,0.,24.,-480.,0.,0.5,0.5
**
**

```

#### B6 Βήματα Ανάλυσης

```

**** STEP 1: GEOSTATIC
**$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$**
*STEP, NAME="GEOSTATIC CONDITIONS", UNSYMM=YES, INC=1000000000
*GEOSTATIC
**
**
*DLOAD
all_elements,GRAV,10.0, 0.,0.,-1.
concrete_shaft,GRAV,10.0, 0.,0.,-1.
SHAFT_BEAMS,GRAV,10.0, 0.,0.,-1.
**
*MODEL CHANGE,REMOVE,TYPE=ELEMENT
concrete_shaft
SHAFT_BEAMS
**

```



```

CSTRESS,CFORCE
*End Step
**
**
**$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$**
**$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$**
*****
**$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$**
*** STEP 3: STATIC
**$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$**
*STEP, NAME="VFORCE=15MN", INC=1000000000
**
*STATIC
0.001,1,1.E-6,1
**
**
**
*CLOAD
83, 3, -15000.
**
**
** OUTPUT REQUESTS
**
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*CONTROLS,ANALYSIS=DISCONTINUOUS
*Controls, parameters=time incrementation
20,30,,12,,,15,,
**0.25,0.50,,0.85,,0.25,,,
** ,2,,4,,,,
*Output, field, FREQ=1
*Node Output
U,RF
*Element Output
S,E,PRESS,MISES, PE, PEMAG,SF,SM
*CONTACT OUTPUT
CSTRESS,CFORCE
*End Step
**
**
**$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$**
**$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$**
*****
**$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$**
*** STEP 4: STATIC
**$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$**
*STEP, NAME="HFORCE_MOMENT", INC=1000000000
**
*STATIC
0.001,1,1.E-6,1
**
**
**
*CLOAD,OP=MOD

```

