

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΦΡΕΑΤΩΝ ΠΑΚΤΩΣΕΩΣ

ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΥ ΣΩΤΗΡΙΑ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ

AΘHNA, 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΦΡΕΑΤΩΝ ΠΑΚΤΩΣΕΩΣ

ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΥ ΣΩΤΗΡΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ

AOHNA, 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μιχάλη Καββαδά για τη συνεχή καθοδήγηση που παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της. Επιπλέον ευχαριστώ τον διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Καλό και τον οσονούπω διδάκτορα κ. Παναγιώτη Σιταρένιο για την καταλυτικότατη συνεισφορά τους στην ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής, καθως και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κωσταντίνο Τζιβάκο για τη βοήθειά του σε κομβικά σημεία αυτής. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου αλλα και τους φίλους μου που βρίσκονται διαρκώς δίπλα μου, πιστεύουν σε εμένα και υποστηρίζουν κάθε βήμα μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η μηχανική συμπεριφορά φρεάτων πακτώσεως. Στα πλαίσια αυτής, συλλέχθηκαν και παρουσιάζονται συνοπτικά οι πιο ευρέως διαδεδομένες μεθοδολογίες υπολογισμού της αρχικής δυσκαμψίας του συστήματος φρέατος – βραχόμαζας.

Η επιρροή της μη γραμμικότητας που απορρέει από τη μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας αλλά και τυχούσες αποκολλήσεις-ολισθήσεις στη διεπαφή φρέατος – βραχόμαζας αποτιμώνται μέσω της αρχικής και μέσης δυσκαμψίας φρεάτων πακτώσεως υποβαλλόμενων σε συγκεντρωμένο εγκάρσιο φορτίο και ροπή κεφαλής. Η παραμετρική διερεύνηση εστιάζει σε τριδιάστατες [AK1]αριθμητικές αναλύσεις που εκπονήθηκαν με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Simulia Abaqus. Η μετακινησιακή και στροφική δυσκαμψία φρεάτων πακτώσεων αποτιμάται και συγκρίνεται με τις ελαστικές σχέσεις υπολογισμού της οριζόντιας μετατόπισης και της στροφής κεφαλής του φρέατος υπό εγκάρσια φόρτιση της μεθοδολογίας Carter & Kullhawy.

Η σημαντική απόκλιση από τις ελαστικές σχέσεις της μεθοδολογίας Carter & Kulhawy αποδίδονται στην έντονη μη γραμμικότητα που απορρέει από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εδάφους. Επιπλέον, εξετάζεται η οριακή αντοχή φρεάτων πακτώσεως και πως αυτή επηρεάζεται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος υλικού, τη γεωμετρία του φρέατος και την εκκεντρότητα της φόρτισης. Τέλος, οριοθετείται η παραμορφωσιακή συμπεριφορά των εξεταζόμενων φρεάτων μέσω της μηχανικής τους συμπεριφοράς.

ABSTRACT

The present diploma thesis studies the mechanical behavior of rock sockets. To this end, the thesis summarizes the most widely used methods for calculating the subgrade reaction moduli of the socket-rock mass foundation systems.

The non-linear mechanical rock mass response accompanied with potential detachments-slips along the shaft – rock mass interfaces govern the initial and intermediate stiffness of shafts subjected to concentrated lateral loading and head moment. The parametric investigation focuses on an ensemble of three-dimensional numerical analyses performed in the Finite Element Code Simulia Abaqus. The study compares the lateral and the rotational stiffness of rock sockets to Carter & Kullhawy's elastic relations, as to the lateral deflection and head rotation of the shaft.

Numerical results deviate substantially from their elastic counterparts (through the Carter & Kullhawy methodology), stemming from the strong non-linearity of the foundation medium. The thesis further investigates the ultimate strength of rock sockets associated with the mechanical characteristics of the surrounding rock mass, the geometry of the shaft and the load eccentricity. Finally, the thesis proposes a classification method of rock sockets as to their stiffness, based on their mechanical response.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
	1.1 Γενικά στοιχεία	1
	1.2 Σκοπός	2
2	Ενδοσιμότητα φρέατος σε εγκάρσια φόρτιση – Μέθοδοι υπολογισμού	3
	2.1 Μέθοδοι εδαφικής αντίδρασης	3
	2.1.1 Γραμμικά ελατήρια Winkler	4
	2.1.3 Καμπύλες p-y υπερβολικής μορφής (Gabr et al. 2002, Liang and Yang 2006) 7
	2.1.4 Cho (2002)	10
	2.1.5 Σχέση Carter (1984)	12
	2.1.6 Zhang and Ahmari (2009)	13
	2.1.6.1 Παρατηρήσεις	13
	2.2 Θεωρία συνεχούς ελαστικού μέσου	14
	2.2.1 Στροφικό ελατήριο στη βάση του φρέατος	15
	2.2.2 Ζεύγος ισοδύναμων ελατηρίων κατά Douglas and Davis (1964)	16
	2.2.3 Ζεύγος ισοδύναμων ελατηρίων κατά Carter and Kullawy (1992)	17
	2.3 Περιγραφή αντικειμένου παλαιότερης σχετικής διπλωματικής εργασίας	19
3.	. Αριθμητική Διερεύνηση	22
	3.1 Το Γεωυλικό	22
	3.1.1 Εισαγωγή	22
	3.1.2 Αρχική εντατική κατάσταση	22
	3.1.3 Ποιότητα Βραχόμαζας – Κριτήριο Hoek-Brown	23
	3.2 Γεωμετρίες φρεάτων και φόρτιση	28
	3.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	28
	3.2.2 Φόρτιση	29
	3.3 Προσομοίωση και προσδιορισμός του προβλήματος	30
	3.3.1 Εισαγωγή	30
	3.3.2 Σχεδίαση προσομοιώματος φρέατος βραχόμαζας	30
	3.3.3 Διακριτοποίηση του προσομοιώματος	30
	3.3.4 Συνοριακές συνθήκες	31
	3.3.5 Αριθμητικό Προσομοίωμα	31
	3.3.6 Παραμορφωσιμότητα κεφαλής και επιβαλλόμενα φορτία	33
	3.3.7 Ισοδύναμες ιδιότητες Mohr – Coulomb	33
	3.3.8 Διεπιφάνειες	36

	3.3	8.8.1	Νόμος τριβής διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας	37
	3.3	8.8.2	Νόμος αποκόλλησης διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας	38
	3.3	.9	Βήματα αριθμητικών αναλύσεων	39
4	Απ	οτελέ	σματα αριθμητικών αναλύσεων	40
	4.1 E	ισαγω	γή	40
	4.2	Απο	οτελέσματα για φρέαρ διαμέτρου D=5m, μήκους L=10m (L/D=2)	45
	4.3	Απο	οτελέσματα για φρέαρ διαμέτρου D=5m, μήκους L=15m (L/D=3)	52
	4.4	Σχο	λιασμός αποτελεσμάτων	60
	4.4	.1	Η επιρροή της βραχόμαζας	60
	4.4	.2	Η επιρροή του λόγου L/D	63
	4.4	.3	Η επιρροή της εκκεντρότητας	65
5	Συ	γκριτι	κή Διερεύνηση Δυσκαμψίας Φρεάτων Πακτώσεως	68
	5.1	Εισο	χγωγή	68
	5.2	Hμ	έθοδος Carter- Kulhawy	68
	5.2	2.1 Γεν	νικά στοιχεία	68
	5.2	2.2	Σχέσεις υπολογισμού μετακινήσεων και στροφών	71
	5.3 Kulha	Σύγ awy γι	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα	74
	5.3 Kulha 5.4	Σύγ awy γι Ορι	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα οθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως	
	5.3 Kulha 5.4 5.4	Σύγ awy γι Ορι l.1 Εισ	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα οθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως αγωγή	74 79 79
	5.3 Kulha 5.4 5.4 5.4	Σύγ awy γι Ορι I.1 Εισ	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα οθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως αγωγή Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων	74 79 79 79
	5.3 Kulha 5.4 5.4 5.4 5.4 5.4 5.4 τοι	Σύγ awy γι Ορι J.1 Εισ J.2 J.3 J Rand	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα οθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως αγωγή Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων Προσδιορισμός των απολύτως εύκαμπτων φρεάτων με βάση τους τ lolph	74 79
	5.3 Kulha 5.4 5.4 5.4 5.4 5.4 tot	Σύγ awy γι Oρι J.1 Εισ J.2 J.3 J Rand	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα οθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως αγωγή Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων Προσδιορισμός των απολύτως εύκαμπτων φρεάτων με βάση τους τ lolph Διερεύνηση φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας	74 79
6	5.3 Kulha 5.4 5.4 5.4 5.4 τοι 5.4 τοι 5.4	Σύγ awy γι Opι J.1 Εισ J.2 J.3 J Rand J.4 μπερό	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα οθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως αγωγή Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων Προσδιορισμός των απολύτως εύκαμπτων φρεάτων με βάση τους τ lolph Διερεύνηση φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας	74 79
6	5.3 Kulha 5.4 5.4 5.4 5.4 τοι 5.4 τοι 5.4 δυ	Σύγ awy γι Opι J.1 Εισ J.2 J.3 J Rand J.4 μπερό Συν	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα οθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως αγωγή Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων Προσδιορισμός των απολύτως εύκαμπτων φρεάτων με βάση τους τ lolph Διερεύνηση φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας οπτική ανασκόπηση μεθοδολογίας	74 79 79 79 85 92 97
6	5.3 Kulha 5.4 5.4 5.4 5.4 τοι 5.4 τοι 6.1 6.2	Σύγ awy γι Ορι .1 Εισ .2 .3 υ Rand .4 μπερό Συν Σχο	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα οθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως αγωγή Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων Προσδιορισμός των απολύτως εύκαμπτων φρεάτων με βάση τους τ dolph Διερεύνηση φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας σπτική ανασκόπηση μεθοδολογίας	74 79 79 79 85 92 97 97
6	5.3 Kulha 5.4 5.4 5.4 5.4 τοι 5.4 τοι 6.1 6.2 6.2	Σύγ awy γι Ορι .1 Εισ .2 .3 υ Rand .4 μπερά Συν Σχο ²	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα οθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως αγωγή Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων Προσδιορισμός των απολύτως εύκαμπτων φρεάτων με βάση τους τ dolph Διερεύνηση φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας σπτική ανασκόπηση μεθοδολογίας λιασμός Αποτελεσμάτων Επιρροή των παραμέτρων σχεδιασμού στην αντοχή των φρεάτων	
6	5.3 Kulha 5.4 5.4 5.4 5.4 τοι 5.4 τοι 6.1 6.2 6.2 6.2	Σύγ awy γι Ορι .1 Εισ .2 .3 υ Rand .4 μπερά Συν Σχο 2.1	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα οθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως αγωγή Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων Προσδιορισμός των απολύτως εύκαμπτων φρεάτων με βάση τους τ lolph Διερεύνηση φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας Διερεύνηση φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας ασματα οπτική ανασκόπηση μεθοδολογίας Επιρροή των παραμέτρων σχεδιασμού στην αντοχή των φρεάτων Οριοθέτηση άκαμπτων φρεάτων	
6	5.3 Kulha 5.4 5.4 5.4 5.4 τοι 5.4 τοι 6.1 6.2 6.2 6.2 6.2	Σύγ awy γι Ορι .1 Εισ .2 .3 υ Rand .4 μπερά Συν Σχο 2.1	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα οθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως αγωγή Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων Προσδιορισμός των απολύτως εύκαμπτων φρεάτων με βάση τους τ dolph Διερεύνηση φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας Διερεύνηση φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας ασματα Διασμός Αποτελεσμάτων Επιρροή των παραμέτρων σχεδιασμού στην αντοχή των φρεάτων Οριοθέτηση άκαμπτων φρεάτων	
6	5.3 Kulha 5.4 5.4 5.4 5.4 τοι 5.4 τοι 6.1 6.2 6.2 6.2 6.2 διε	Σύγ awy γι Ορι .1 Εισ .2 .3 υ Rand .4 μπερό .4 Συν Σχο 2.1 2.2 .3 πιφα	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter α άκαμπτα φρέατα οθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως αγωγή Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων Προσδιορισμός των απολύτως εύκαμπτων φρεάτων με βάση τους τ dolph Διερεύνηση φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας ασματα οπτική ανασκόπηση μεθοδολογίας τσματα οπτική ανασκόπηση μεθοδολογίας Οριοθέτηση άκαμπτων φρεάτων Επιρροή της μη-γραμμικότητας της περιβάλλουσας βραχόμαζας κα νειών στη δυσκαμψία των φρεάτων.	
6	5.3 Kulha 5.4 5.4 5.4 5.4 τοι 5.4 τοι 5.4 τοι 6.1 6.2 6.2 6.2 διε 6.2	Σύγ awy γι Ορι .1 Εισ .2 .3 υ Rand .4 μπερά Συν Σχο 2.1 2.2 .3 πιφα	κριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter- α άκαμπτα φρέατα	74 79 79 79 85 92 97 97 97 98 98 98 98 98 98 99

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά στοιχεία

Ως φρέατα πακτώσεως χαρακτηρίζονται στοιχεία θεμελίωσης με σχετικά μικρή λυγηρότητα, δηλαδή με τιμές του λόγου (L/D) μεταξύ 1,5 και 3 (όπου L το μήκος του φρέατος και D η διάμετρός του). Τα φρέατα πακτώσεως βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στη θεμελίωση βάθρων γεφυρών. Οι μικρές τιμές της λυγηρότητας εξασφαλίζουν ότι το φρέαρ συμπεριφέρεται ταυτόχρονα ως πρακτικά άκαμπτο στοιχείο και ως βαθιά θεμελίωση (βραχύς πάσσαλος). Οι τυπικές διαστάσεις φρεάτων είναι L = 8 - 15m και D = 4 - 8m. Οι διαστάσεις αυτές προσδίδουν στο φρέαρ τη δυνατότητα ανάληψης των κατακόρυφων φορτίων της ανωδομής καθώς και την ασφαλή μεταφορά των σημαντικών οριζόντιων δυνάμεων και ροπών στο έδαφος. Στο τελευταίο συμβάλλει και η σημαντική ποσότητα οπλισμένου σκυροδέματος που παρέχει αντοχή σε μεγάλες ροπές 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 βραχόμαζας. Η αστοχία συντελείται όταν η θεμελίωση φτάνει σε οριακή δομική κατάσταση, και προσδιορίζεται καθώς η φόρτιση λαμβάνει την τιμή της ονομαστικής συνδυασμένης καμπτοαξονικής αντοχής.

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

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

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

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

1.2 Σκοπός

Παρά τη γενικότερη αρχή πως τα φρέατα πακτώσεως συμπεριφέρονται άκαμπτα κατά την ενεργοποίηση των μηχανικών αντοχών τους λόγω της μικρής λυγηρότητας που διαθέτουν, εντούτοις σε αρκετές περιπτώσεις η θεώρηση αυτή δεν είναι αντιπροσωπευτική, ιδιαίτερα όταν συνυπολογίζεται η μη γραμμικότητα του προβλήματος.

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας, θα διερευνηθεί η συμπεριφορά των φρεάτων πακτώσεως λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα της βραχόμαζας αλλά και των αποκολλήσεων – ολισθήσεων περιμετρικά αυτών. Θα εξεταστεί η οριακή αντοχή τους και πως αυτή επηρεάζεται όταν μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος υλικού, η γεωμετρία του φρέατος και η εκκεντρότητα της φόρτισης. Θα επιχειρηθεί έτσι, ο προσδιορισμός της δυσκαμψίας (μετακινησιακής και στροφικής) των φρεάτων.

Εν συνεχεία, θα πραγματοποιηθεί διαχωρισμός των φρεάτων πακτώσεως ως προς την ακαμψία τους με βάση τη μηχανική τους συμπεριφορά. Ακολούθως, θα συγκριθούν οι παραγόμενες δυσκαμψίες (παραμορφωσιακές και στροφικές) με θεωρητικά αναμενόμενες από μεθόδους υπολογισμού της ενδοσιμότητας του φρέατος σε εγκάρσια φόρτιση με σκοπό να αξιολογηθεί η ακρίβεια αυτών (των μεθόδων).

2 Ενδοσιμότητα φρέατος σε εγκάρσια φόρτιση – Μέθοδοι υπολογισμού

Ως εγκάρσια ενδοσιμότητα του φρέατος ορίζεται η μετακίνηση και η στροφή της κεφαλής του λόγω επιβολής εγκάρσιας φόρτισης (τέμνουσας) και ροπής στην κεφαλή του. Η αντίδραση της βραχόμαζας εξαρτάται από 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 ελαστικού συνεχούς μέσου (elastic continuum theory)

2.1 Μέθοδοι εδαφικής αντίδρασης

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

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

όπου

(ΕΙ): η καμπτική δυσκαμψία του φρέατος,

Υ: η οριζόντια μετατόπιση σε βάθος z,

 P_z : 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

Στην εξίσωση (2-1) βασίστηκαν οι μέθοδοι, σύμφωνα με τις οποίες η αλληλεπίδραση εδάφους – φρέατος αναπαρίσταται μέσω μιας σειράς ανεξάρτητων μη γραμμικών ελατηρίων (Σχήμα 2-1). Τα ελατήρια αυτά αποτυπώνονται με καμπύλες εδαφικής αντίδρασης (p) συναρτήσει της οριζόντιας μετακίνησης (y) κατά μήκος του φρέατος (καμπύλες p – y, Reese 1984). Το έδαφος ή ο βράχος αντικαθίσταται από μία σειρά διακριτών μηχανισμών (μη γραμμικά ελατήρια) ώστε σε κάθε βάθος z η εδαφική ή βραχώδης αντίδραση p να είναι μη γραμμική συνάρτηση της εγκάρσιας μετατόπισης y. Στην ιδανική περίπτωση κάθε καμπύλη py θα μπορούσε να αναπαριστά την εδαφική συμπεριφορά ως συνάρτηση της φόρτισης που ασκείται, των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της θεμελίωσης, της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και οποιουδήποτε άλλου παράγοντα καθορίζει την ανωτέρω συμπεριφορά.



Σχήμα 2-1. Εξιδανικευμένο προσομοίωμα εδαφικής αντίδρασης εγκάρσια φορτισμένου φρέατος πακτώσεως και καμπύλες p — y.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πιο βασικές μέθοδοι εκτίμησης της κλίσης του αρχικού ελαστικού κλάδου των καμπυλών p - y, δηλαδή του δείκτη αρχικής δυσκαμψίας βραχόμαζας 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.

2.1.1 Γραμμικά ελατήρια Winkler

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

Η σταθερά των ελατηρίων δίνεται από τη σχέση:

$$K_{h} = \frac{E}{D}$$
(2-2)

όπου

Ε: το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους/βραχόμαζας, 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 βραχέα φρέατα θεμελιωμένα σε βραχόμαζα με υψηλό μέτρο ελαστικότητας).

2.1.2 Reese (1997)

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



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

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

• Αρχικός, γραμμικός κλάδος $(y \le y_A)$:

$$\mathbf{p} = \mathbf{K}_{ir}\mathbf{y} \tag{2-3}$$

• Ενδιάμεσος, μη γραμμικός κλάδος ($y \ge y_A$ και $p \le p_{ur}$):

$$p = \frac{P_{ur}}{2} \left(\frac{y}{y_{rm}}\right)^{0.25}$$
(2-4)

 $\mathbf{y}_{\mathrm{rm}} = \mathbf{k}_{\mathrm{rm}}\mathbf{B} \tag{2-5}$

• Τελικός κλάδος ($p = p_{ur}$):

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_{ur} \tag{2-6}$$

όπου

K_{ir}: η αρχική κλίση της καμπύλης

 p_{ur} : η οριακή αντίσταση της βραχόμαζας

Β: η διάμετρος του φρέατος

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

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

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

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

$$\mathbf{K}_{ir} = \mathbf{k}_{ir}\mathbf{E}_{ir} \tag{2-8}$$

όπου

 E_{ir} : το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας και

 k_{ir} : αδιάστατος συντελεστής που υπολογίζεται ακολούθως:

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

$$(2 - 9)$$

$$k_{ir} = 500, \quad x_r > 3B$$

$$(2 - 10)$$

όπου

 x_r : το βάθος από την επιφάνεια

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.

<u>Παρατηρήσεις:</u>

 Οι βιβλιογραφικές αναφορές στις οποίες βασίστηκε η ανάπτυξη των συγκεκριμένων καμπυλών p — y περιλαμβάνουν μόνο δύο δοκιμές πεδίου.

- Οι συστάσεις για την επιλογή των παραμέτρων στις καμπύλες p y είναι ασαφείς και <u>χωρίς θεωρητικό υπόβαθρο</u>αβάσιμες εμπειρικά[Ακ2].
- Παρά της αβεβαιότητες, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται εκτενώς.

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

Η ακόλουθη μέθοδος βασίστηκε σε έρευνες που διενεργήθηκαν από τις πολιτείες της Βόρειας Καρολίνας και του Οχάιο και παρουσιάστηκαν από τους Gabr et al. (2006). Στόχος των ερευνών ήταν η βελτίωση της μεθοδολογίας χάραξης καμπυλών p – y σε μαλακούς βραχώδεις σχηματισμούς. Οι καμπύλες που προτείνονται βασίζονται στην παρακάτω υπερβολική σχέση μεταξύ της εγκάρσιας εδαφικής αντίδρασης (p) και της εγκάρσιας μετατόπισης (y) και έχουν τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2-3:

$$\mathbf{p} = \frac{\mathbf{y}}{\frac{1}{\mathbf{k}_{h}} + \frac{\mathbf{y}}{\mathbf{p}_{ult}}} \tag{2-11}$$



Σχήμα 2-3. Καμπύλη p — y υπερβολικού τύπου

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

Στη Β. Καρολίνα διενεργήθηκαν έξι in-situ δοκιμές φρεάτων σε τρεις διαφορετικές θέσεις. βραχόμαζες ήταν Οι περιβάλλουσας διαβρωμένος ψαμμίτης, μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος και κρυσταλλικά πετρώματα αντίστοιχα. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων την για βαθμονόμηση των καμπυλών p - y, χρησιμοποιώντας τιμές του συντελεστή $k_{\rm h}$ 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:

$$k_{h} = \frac{0.65E_{m}}{(B1 - v_{r}^{2})} \left(\frac{E_{m}B^{4}}{E_{s}I_{s}}\right)^{1/12}$$
(2-12)

όπου:

Β: η διάμετρος του φρέατος

 E_m : το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας

 v_r : ο λόγος Poisson της βραχόμαζας

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

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

 $K_h = k_h B \tag{2-13}$

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

<u>Παρατήρηση:</u>

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. είναι ότι η δυσκαμψία (EI) λαμβάνεται σταθερή. Μία ακόμη πιο ρεαλιστική ανάλυση της αλληλεπίδρασης φρέατος – βραχόμαζας κατά την εγκάρσια φόρτιση οφείλει να λαμβάνει υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά του σκυροδέματος.

B. Liang and Yang (Ohio, 2006)

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

$$K_{h} = E_{m} \frac{B}{B_{ref}} e^{-2v_{r}} \left(\frac{E_{s}I_{s}}{E_{m}B^{4}}\right)^{0,284}$$
(2-14)

όπου

 $B_{ref} = 0,305m$

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

$$E_{\rm m} = \frac{E_{\rm r}}{100} \, {\rm e}^{\rm GSI/_{21,7}} \tag{2-15}$$

όπου

 $\mathbf{E}_{\mathbf{r}}$: το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου

<u>Παρατήρηση:</u>

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 καμπυλλες που συμπεριλαμβάνουν μέτρο ελαστικότητας μετρούμενο από τα όργανα PMT, ενώ σε άλλες προσεγγίζεται καλύτερα μέσω καμπυλών για τις οποίες το μέτρο ελαστικότητας της προσεικότητας δ.

επιλογής του κατάλληλου μέτρου ελαστικότητας για το σχεδιασμό των φρεάτων πακτώσεως, καθώς οι καμπύλες p — y για την ανάλυση βασίζονται σε αυτό.

2.1.4 Cho (2002)

Ο Cho πραγματοποίησε έξι δοκιμές πεδίου πλήρους φόρτισης με στόχο να διερευνήσει το προσομοίωμα του μαλακού βράχου κατά Gabr et al (2002). Συγκεκριμένα, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών με προβλέψεις που έγιναν βάσει προγενέστερων μεθοδολογιών σχεδιασμού. Επιπρόσθετα, συστάθηκαν συντηρητικές αλλά ακριβείς διαδικασίες σχεδιασμού για το προσομοίωμα ασθενούς βραχόμαζας. Οι δοκιμές για την ανάπτυξη του προσομοιώματος, και συγκεκριμένα σε ασθενή βραχόμαζα τριαδικής περιόδου (Triassic Weathered Rock). Η συμπεριφορά της βραχόμαζας διερευνήθηκε και το προσομοίωμα συμπεριλήφθηκε στο λογισμικό LTBASE για την ανάλυση φρεάτων.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε λαμβάνει υπόψη τις εξής βασικές παραδοχές:

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

Ακολουθήθηκαν οι παρακάτω διαδικασίες: εργαστηριακές δοκιμές προσομοίωσης των χαρακτηριστικών των καμπυλών p – y σε ασθενή βραχόμαζα, αριθμητικές αναλύσεις στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Simulia ABAQUS τόσο σε επίπεδο εργαστηριακών δοκιμών όσο και τρισδιάστατων αναλύσεων του πλήρους συστήματος θεμελίωσης, και, τέλος, δοκιμές πεδίου σε πραγματικά φρέατα για την επαλήθευση του προσομοιώματος με μέτρηση φορτίου και παραμορφώσεων και ανάστροφες αναλύσεις.

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

$$\mathbf{k}_h = (\mathbf{k}_{ho} + \mathbf{n}_h z) \mathbf{B}, \quad \mathbf{0} \le z \le T_o \tag{2-16}$$

$$\mathbf{k}_h = [(\mathbf{k}_{ho} + n_h T_o) + n_h (z - T_o)] \mathbf{I}_T \mathbf{B}, \quad T_o \leq z \leq L \tag{2-17}$$

όπου:

 $k_{ho} = \sqrt{\sigma_{ci} 10^3} \left(10^{\frac{GSI-10}{40}} \right)$: η τιμή του δείκτη αρχικής δυσκαμψίας της βραχόμαζας στην επιφάνεια (kN/m³),

$$n_{h} = \left(\frac{2E_{p}L_{p}}{k_{ho}L^{4}}\right)10^{5}$$
: ο συντελεστής κατανομής με το βάθος (kN/m⁴),
 $I_{T} = -28 - 383 \log\left(\frac{T_{0}}{L}\right)$:

συντελεστής προσαύξησης του k_h για βάθη κάτω από το σημείο στροφής,

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

ο ίδιος συντελεστής για την περίπτωση της βραχόμαζας τριαδικής εποχής όπου δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη πρακτικά αύξηση,

 $T_0 = L(1 + 0.18 \log K_R)$: το βάθος του σημείου στροφής,

$$K_{R} = \frac{E_{p}I_{p}}{E_{s}L^{4}}: o \text{ συντελεστής σχετικής δυσκαμψίας κατά Poulos and Davis (1980),}$$
$$E_{s} = \frac{\sigma_{ci}}{100} 10^{\frac{GSI-10}{40}}:$$

το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας κατά Hoek – Brown (GPa),

 $E_{\rm p}, I_{\rm p}$: το μέτρο ελαστικότητας και η ροπή αδράνειας τους φρέατος,

L: το μήκος του φρέατος, και

 σ_{ci} : η αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη

Στο Σχήμα 2-4 παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές κατανομές του δείκτη αρχικής δυσκαμψίας βραχόμαζας από μετρήσεις πεδίου (Cho 2002):



Σχήμα 2-4. Τιμές του k_{h0} από μετρήσεις δοκιμών πεδίου (Cho, 2002).

2.1.5 Σχέση Carter (1984)

Ο Carter (1984) τροποποίησε τη σχέση υπολογισμού του Vesic που προαναφέρθηκε (2-12), έπειτα από αποτελέσματα δοκιμών που λάμβαναν υπόψη την αποκόλληση του εδάφους από τα τοιχώματα του φρέατος λόγω του εγκάρσιου φορτίου. Η σχέση υπολογισμού του δείκτη αρχικής δυσκαμψίας της βραχόμαζας είναι σύμφωνα με τον Carter:

$$K_{h} = \frac{1,9ED}{1 - v^{2}D_{ref}} \left(\frac{ED^{4}}{E_{p}I_{p}}\right)^{1/12}$$
(2 - 18)

όπου:

Ε: το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας,

u : ο λόγος Poisson

D: η διάμετρος του φρέατος,

D_{ref} = 1, om: η τιμή για το συσχετισμό της διαμέτρου[Ακ3]

 $E_{\rm p}, I_{\rm p}$: το μέτρο ελαστικότητας και η ροπή αδράνειας του φρέατος

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

2.1.6 Zhang and Ahmari (2009)

Οι Zhang και Ahmari ανέπτυξαν μια μεθοδολογία ανάλυσης άκαμπτων πασσάλων σε υπερστερεοποιημένη άργιλο υπό εγκάρσια φόρτιση. Η μέθοδος βασίζεται σε καμπύλες p – y ανεξάρτητων μη γραμμικών ελατηρίων. Ο δείκτης K_h θεωρείται σταθερός με το βάθος στις υπερστερεοποιημένες αργίλους, ακριβώς όπως συμβαίνει και για τις μαλακές βραχόμαζες. Επίσης, συσχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας E_s (εδώ E_m) και εξαρτάται από τη σχετική δυσκαμψία του συστήματος εδάφους – φρέατος. Η σχέση που προσδιορίζει το δείκτη k_h είναι η σχέση του Glick, διότι συνεκτιμά και την επιρροή της γεωμετρίας της θεμελίωσης:

$$k_{h} = \frac{22, 4E_{s}(1-v)}{(1+v)(3-4v)\left[2ln\left(\frac{2L}{D}\right) - 0, 443\right]}$$
(2-19)

όπου:

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

 $\mathbf{E}_{\mathrm{s}},~\nu$: το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson της βραχόμαζας αντίστοιχα.

2.1.6.1 Παρατηρήσεις

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

- Αγνοείται η αλληλεπίδραση εδάφους-βράχου μεταξύ γειτονικών ελατηρίων.
- Οι καμπύλες p y δεν αντιστοιχούν ευθέως σε μετρήσιμες ιδιότητες του εδαφικού υλικού, της βραχόμαζας ή της θεμελίωσης.

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

Ως πλεονεκτήματα μπορούν να αναφερθούν:

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

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

Πρακτικά, η κατανομή της καμπτικής ροπής κατά μήκος του φρέατος προσδιορίζεται μέσω μετρητών έντασης που εγκαθίστανται σε διάφορα σημεία κατά μήκος του φρέατος. Με διπλή παραγώγιση της συνάρτησης καμπτικών ροπών κατά μήκος του φρέατος προσδιορίζεται η εδαφική αντίδραση p ενώ με διπλή ολοκλήρωση αυτής προσδιορίζεται η μετακίνηση y.[AK4] Εναλλακτικά, για τη χάραξη των καμπυλών p – y μπορεί να αποτυπωθεί η μορφή της παραμορφωμένης θεμελίωσης από μετρήσεις κλισιομέτρων και προσαρμόζοντας τις καμπύλες p – y ώστε να επιτευχθεί ταύτιση με τις μετρούμενες μετακινήσεις (Brown et al. 1994).

2.2 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 Poulos (1971-1972), ο οποίος πρότεινε μια αριθμητική λύση βασιζόμενη στη μέθοδο των συνοριακών στοιχείων, με τον πάσσαλο να προσομοιώνεται ως μια λεπτή ελαστική λωρίδα και το έδαφος ως ομοιογενές, ισότροπο, ελαστικό υλικό. Η προσέγγιση αυτή είχε ως σκοπό να προσομοιώσει πακτωμένους πασσάλους δύο διαφορετικών συνοριακών συνθηκών στην κεφαλή (επιφάνεια του βράχου):

πλήρως πακτωμένος πάσσαλος έναντι μετακίνησης και στροφής στην κεφαλή
 του (επιφάνεια βράχου) και

 ελεύθερος πάσσαλος να στραφεί αλλά όχι να μετακινηθεί (αρθρωμένος) στην κεφαλή του (επιφάνεια βράχου).

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

2.2.1 Στροφικό ελατήριο στη βάση του φρέατος

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

$$\mathbf{k}_{\mathbf{v}} = \frac{2\xi}{\pi(1+\mathbf{v})} \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{D}}$$
(2-20)

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

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

ή ισοδύναμα:

$$K_{\varphi} = \frac{\pi\xi}{12(1+v)} ER^3$$
 (2-22)

όπου

R: η ακτίνα του φρέατος,

Ε: το μέτρο ελαστικότητας του βραχόμαζας,

ν: ο λόγος Poisson της βραχόμαζας, και

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

c/D	Ę
0	2.9
1	4.3
2	5.0
3	5.4
4	5.7
10	6.0

Πίνακας 2-1. Τιμές της παραμέτρου (ξ) για διάφορα σχετικά βάθη της αιχμής

2.2.2 Ζεύγος ισοδύναμων ελατηρίων κατά Douglas and Davis (1964)

Η μέθοδος αναφέρεται στην περίπτωση ενός άκαμπτου φρέατος πλάτους (D) και μήκους (L) ο οποίος είναι εγκιβωτισμένος σε ελαστικό ημίχωρο με μέτρο ελαστικότητας (E) και λόγο Poisson (v = 0,50). Η ανάλυση, αν και θεωρητικά αναφέρεται στην περίπτωση που ο λόγος του Poisson είναι ίσος με 0,50, μπορεί να εφαρμοστεί και για άλλες τιμές του λόγου αυτού χωρίς σημαντικό σφάλμα. Η μέθοδος συμπεραίνει ότι η μετακίνηση (u) και η στροφή (θ) της κεφαλής του φρέατος πακτώσεως δίνονται από τις σχέσεις:

$$u = I_{hM} \frac{M}{EDL} + I_{hH} \frac{H}{ED}$$
(2-23)

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

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

$$I_{\Theta H} = I_{hM} = 1, 16 = 0, 76 \log\left(\frac{L}{D}\right)$$
 (2 - 25)

$$I_{hH} = 1,18 - 0,97 \log\left(\frac{L}{D}\right)$$
 (2 - 26)

$$I_{\theta M} = 1,95 - 1,21 \log\left(\frac{L}{D}\right)$$
 (2-27)

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

L/D	I _{θH} =I _{hM}	I _{hH}	I _{em}
1	1.16	1.18	1.95
1.5	1.03	1.01	1.74
2	0.93	0.89	1.59
3	0.80	0.72	1.37
4	0.70	0.60	1.22

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

2.2.3 Ζεύγος ισοδύναμων ελατηρίων κατά Carter and Kullawy (1992)

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

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

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

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

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

Όπου οι τιμές Ε, G* αναφέρονται στη βραχόμαζα και (για τιμές του v = 0,3):

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

Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος αναφέρεται σε φρέατα πακτώσεως κυκλικής διατομής διαμέτρου (D) και ενεργού μήκους (L). Στην περίπτωση φρέατος ορθογωνικής διατομής χρησιμοποιείται η ίδια μεθοδολογία με τη γεωμετρικά ισοδύναμη διάμετρο του φρέατος. Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τυπικές τιμές των συντελεστών επιρροής κατά τη μέθοδο των Carter and Kulhawy (1992):

L/D	I _{Øh} =I _{hM}	I _{hH}	I _{eM}
1	0.347	0.673	0.534
2	0.378	0.534	0.673
3	0.398	0.467	0.770
4	0.412	0.424	0.848

Πίνακας 2-3. Συντελεστές επιρροής κατά τη μέθοδο Carter and Kulhawy

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

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

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

$$I_{\Theta H} = I_{hM} = 1.08 \left(\frac{E}{G^*}\right) \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{E_p}{G^*}\right)^{-3/7}$$
(2-33)

$$I_{hH} = 0.4 \left(\frac{E}{G^*}\right) \left(\frac{E_p}{G^*}\right)^{-1/7}$$
(2-34)

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

Οι προηγούμενες αναλύσεις κατέληξαν στον προσδιορισμό των μετακινήσεων (u, θ) της κεφαλής του φρέατος συναρτήσει των εντατικών μεγεθών (M, H). Οι ανωτέρω σχέσεις είναι πεπλεγμένες, δηλαδή η μετακίνηση (u) εξαρτάται τόσο από την οριζόντια δύναμη (H) όσο και από τη ροπή (M) στην κεφαλή του φρέατος. Έτσι, δεν είναι δυνατή η αντικατάσταση του συστήματος φρέαρ-έδαφος με ένα στροφικό και ένα μετακινησιακό ελατήριο, αλλά με ένα ισοδύναμο άκαμπτο κατακόρυφο στοιχείο που στηρίζεται σε δύο οριζόντια ελατήρια με δυσκαμψίες k₁, k₂. Το μήκος του άκαμπτου στοιχείου μπορεί να είναι διαφορετικό από το μήκος του φρέατος πακτώσεως δεδομένου ότι το άκαμπτο στοιχείο είναι ιδεατό και έχει σκοπό να προσομοιάσει τη συμπεριφορά του φρέατος από πλευράς μετακινήσεων και στροφών.

Η ισορροπία του ισοδύναμου συστήματος δίνει:

$$H = k_1 u_1 + k_2 u_2$$
(2-36)
$$M + H d_1 = -k_2 u_2 d_2$$
(2-37)

οπότε επειδή:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_1 \tag{2-38}$$

$$\theta = \frac{\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2}{\mathbf{d}_2} \tag{2-39}$$

προκύπτει:

$$u = \frac{1}{k_1}H + \frac{1}{k_1d_2}(M + Hd_1)$$
(2-40)

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

Τονίζεται ότι στις παραπάνω σχέσεις το μεγέθη (H) και (M + Hd₁) είναι η εγκάρσια δύναμη και η καμπτική ροπή στο σημείο του φρέατος όπου αρχίζει το ενεργό του τμήμα (κάτω από τον αποσαθρωμένο μανδύα της βραχόμαζας).

Από τις σχέσεις (2-23)(2-24) και (2-40)(2-41) προκύπτουν οι τιμές των σταθερών (k_1, k_2) του ισοδύναμου ζεύγους ελατηρίων, καθώς και το μήκος d_2 της μεταξύ τους απόστασης (d_1 είναι το μήκος του ανωτέρω τμήματος του φρέατος που αμελείται, δηλαδή το βάθος του αποσαθρωμένου μανδύα της βραχόμαζας):

$$k_1 = \frac{ED}{I_{hH}}$$
(2-42)

$$k_{2} = \frac{1}{\left\{I_{\Theta M} \left(\frac{I_{hH}}{I_{hM}}\right)^{2} - I_{hH}\right\}}$$

$$d_{2} = L \left(\frac{I_{hH}}{I_{hM}}\right)$$

$$(2 - 43)$$

2.3 Περιγραφή αντικειμένου παλαιότερης σχετικής διπλωματικής εργασίας

Σε παλαιότερη διπλωματική εργασία (Καλτσάς, 2010) μελετήθηκε η ελαστική απόκριση των άκαμπτων φρεάτων πακτώσεως με τη μεθοδολογία των Carter και Kullhawy, η οποία παρέχει ελαστικές σχέσεις υπολογισμού της οριζόντιας μετατόπισης και της στροφής κεφαλής του φρέατος υπό εγκάρσια φόρτιση μέσω συντελεστών δυσκαμψίας των ελατηρίων που προσομοιώνουν το σύστημα φρέατος – βραχόμαζας. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της ανωτέρω μεθοδολογίας και η πρόταση βελτιωμένων σχέσεων υπολογισμού ελαστικών μετακινήσεων και στροφών κεφαλής για άκαμπτα φρέατα.

Αρχικά, διερευνήθηκαν οι περιπτώσεις άκαμπτων φρεάτων κατά Carter και Kullhawy. Έπειτα, σχεδιάστηκαν κατάλληλα προσομοιώματα τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων για τη μελέτη του προβλήματος. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, εκτελέστηκαν ελαστικές αναλύσεις φρεάτων υποβαλλόμενων σε συγκεντρωμένο εγκάρσιο φορτίο και ροπή κεφαλής. Διερευνήθηκαν περιπτώσεις πλήρους συνάφειας στις διεπιφάνειες φρέατος – βραχόμαζας, καθώς και συνθήκες σχετικής ολίσθησης και αποκόλλησης των συγκεκριμένων διεπιφανειών.



Σχήμα 2-5. Αδιαστατοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις (u/u_{c-k}) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter και Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες.



Σχήμα 2-6. Αδιαστατοποιημένες στροφές (θ/θ_{c-k}) άκαμπτου φρέατος ως προς Carter και Kulhawy για διάφορες εκκεντρότητες.

Παρατηρήθηκε ότι για θεώρηση πλήρους συνάφειας των διεπιφανειών, τα αποτελέσματα εμφανίζουν α____ μετατοπίσεις συγκριτικά με τις θεωρητικές τιμές των Carter και Kullhawy (Σχήμα 2-5), (Σχήμα 2-6). Αντίθετα, στην περίπτωση που θεωρήθηκε η δυνατότητα ολίσθησης και αποκόλλησης των διεπιφανειών από το έδαφος εντοπίστηκε σημαντική απόκλιση.

Από τις διαφορές που διαπιστώθηκαν στις μετακινήσεις και τις στροφές ως προς τα αποτελέσματα των Carter και Kullhawy – μεγαλύτερες για φρέατα με διεπιφάνειες – επιχειρήθηκε η ανάπτυξη μίας νέας μεθοδολογίας υπολογισμού των μεγεθών αυτών για άκαμπτα φρέατα με και χωρίς διεπιφάνειες. Εξετάστηκε παραμετρικά η επίδραση της γεωμετρίας των φρεάτων, τις σχετικής δυσκαμψίας φρέατος – βραχόμαζας, και της εκκεντρότητας της φόρτισης στα αποτελέσματα των αναλύσεων.

3. Αριθμητική Διερεύνηση

3.1 Το Γεωυλικό

3.1.1 Εισαγωγή

Η εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και υποστήριξης υπογείων έργων. Η κυριότερη δυσχέρεια στην επίλυση του προβλήματος είναι ότι οι εργαστηριακές δοκιμές γίνονται σε δείγματα αρραγούς βράχου (χωρίς ασυνέχειες) και συνεπώς δεν είναι αντιπροσωπευτικές της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας (που περιλαμβάνει και ασυνέχειες). Σημειώνεται ότι για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών συνήθως επιλέγονται τα υγιέστερα δείγματα βράχου (επειδή σ' αυτά είναι ευχερέστερη η μόρφωση δοκιμίων), πράγμα που επιτείνει τη μη-αντιπροσωπευτικότητα των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών. Τέλος, ακόμη και οι επιτόπου δοκιμές γίνονται σε περιορισμένου όγκου δείγματα και συνεπώς δεν είναι αντιπροσωπευτικές των επιτόπου συνθηκών και δεν παρέχουν αντιπροσωπευτικές τιμές των μηχανικών παραμέτρων της βραχόμαζας. Ως εκ τούτου οι μηχανικές παράμετροι της βραχόμαζας συνήθως εκτιμώνται με έμμεσο τρόπο επί τη βάσει εμπειρικών συσχετίσεων με δείκτες ποιότητας της βραχόμαζας που προκύπτουν από τις μεθόδους ταξινόμησης της βραχόμαζας.

3.1.2 Αρχική εντατική κατάσταση

Η εντατική κατάσταση της βραχόμαζας πριν από την κατασκευή υπογείων έργων συνήθως είναι η γεωστατική, δηλαδή περιγράφεται από κατακόρυφες και οριζόντιες κύριες ενεργές τάσεις (σ' και σ' αντιστοίχως) με τιμές:

$$\sigma'_{\nu} = \gamma h - u_0, \qquad \qquad \sigma'_h = K_{0\sigma'_{\nu}}$$

όπου: h = το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

 $\gamma =$ το ειδικό βάρος της βραχόμαζας

 $u_0 = η$ υδατική πίεση πόρων

 $K_0 = o$ συντελεστής οριζόντιας πίεσης

Το ειδικό βάρος της βραχόμαζας κυμαίνεται μεταξύ $23 - 26 \text{ kM/m}^3$. Στην περίπτωση υδροστατικής πίεσης πόρων: $u_0 = \gamma_w d$ όπου (γ_w) είναι το ειδικό βάρος του νερού (10 kM/m^3) και (d) είναι το πιεζομετρικό ύψος. Τέλος, ο συντελεστής (K_0) συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.4 - 0.1 χωρίς να αποκλείονται και μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα, σε υγιείς βραχόμαζες χωρίς επιρροή από τεκτονικές πιέσεις: $K_0 = 0.6 - 1.0$. Σε αποσαθρωμένες βραχόμαζες: $K_0 = 0.4 - 0.7$. Στην περίπτωση όπου η βραχόμαζα επηρεάζεται από τεκτονικές πιέσεις ο συντελεστής μπορεί να υπερβαίνει σημαντικά τη μονάδα (έχουν μετρηθεί τιμές έως και 4 στην
περίπτωση έντονου θλιπτικού τεκτονικού καθεστώτος) αλλά και να έχει πολύ μικρές τιμές (0 – 0.3 στην περίπτωση έντονου εφελκυστικού τεκτονικού καθεστώτος). Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι σε μεγάλα βάθη (άνω των 400-500 μέτρων) η γεωστατική εντατική κατάσταση είναι πρακτικώς ισόρροπη ($K_0 = 1$), ενώ αντίθετα, σε μικρά βάθη (100 – 400m) συνήθως μετρώνται τιμές του K_0 αρκετά μεγαλύτερες από τη μονάδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές του K_0 που υπερβαίνουν τη μονάδα έχουν μετρηθεί σε χώρες που τελούν υπό έντονο θλιπτικό τεκτονικό καθεστώς (Νότιος Αφρική, Σκανδιναβικές χώρες, Καναδάς) και δεν είναι βέβαιο ότι μπορούν να εφαρμοσθούν στην Ελλάδα (όπου οι τεκτονικές τάσεις) στον παρόντα γεωλογικό χρόνο είναι εφελκυστικές). Σημειώνεται ότι η αξιόπιστη μέτρηση του συντελεστή (K_0) είναι δυσχερής και τα αποτελέσματα δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμα. Οι μέθοδοι που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του K_0 είναι:

- 1. Η δοκιμή πρεσσιομέτρου ή ντιλατομέτρου.
- 2. Η μέθοδος της υδραυλικής θραύσης.
- 3. Η μέθοδος της δειγματοληπτικής αποτόνωσης των τάσεων (overcoring).

3.1.3 Ποιότητα Βραχόμαζας – Κριτήριο Hoek-Brown

Η ρηγματωμένη βραχόμαζα συνήθως εμφανίζει καμπύλη περιβάλλουσα των κύκλων Mohr στην κατάσταση αστοχίας και συνεπώς, η συμπεριφορά της δεν μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά μέσω του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb (το οποίο διαθέτει ευθύγραμμη περιβάλλουσα αστοχίας). Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown περιγράφεται από τη σχέση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$
(3-1)

Όπου :

 σ_{ci} : η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου βράχου,

 σ_1, σ_3 : η μέγιστη και ελάχιστη (ενεργός) τάση αντίστοιχα, και

m_b, *s*, *a*: παράμετροι (σταθερές) της **βραχόμαζας** συναρτήσει του δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI.

Πιο συγκεκριμένα, οι παραπάνω παράμετροι υπολογίζονται από τους εξής τύπους:

$$m_b = m_i \cdot \left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \tag{3-2}$$

όπου:

*m*_i : σταθερά του **άρρηκτου βράχου**.

Η σταθερά *m*_i προσδιορίζεται είτε πειραματικά είτε με χρήση πινάκων. Λαμβάνει τιμές (συνήθως) μεταξύ του 5 και του 35. Ο γεωλογικής δείκτης αντοχής GSI δύναται ως υπολογιστεί από τον Πίνακα 3.1.

Ανάλογα της τιμής του GSI τροποποιούνται οι τύποι υπολογισμού των σταθερών *s* και *a*. Όταν GSI > 25 (πολύ καλή ποιότητα βραχόμαζας) κάνουμε χρήση του αρχικού κριτηρίου Hoek-Brown:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \tag{3-3}$$

$$a = \frac{1}{2} \tag{3-4}$$

Για τιμή του GSI < 25 (κακή ποιότητα βραχόμαζας)

$$s = 0$$
 – (3 – 5)

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} - (\mathbf{3} - \mathbf{6})$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι στις παραπάνω σχέσεις το GSI μπορεί να αντικατασταθεί με το RMR.Τα αποτελέσματα θα είναι παρόμοια.

Πίνακας 3-12. Πίνακας υπολογισμός του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI.



Οι Hoek et al. (2006) πρότειναν κάποιες βελτιώσεις στις σχέσεις υπολογισμού των παραμέτρων της βραχόμαζας. Η πιο σημαντική αλλαγή έγκειται στην προσθήκη μιας ακόμα παραμέτρου D, η οποία παίρνει τιμές μεταξύ του 0 και 1 και υποδηλώνει τον βαθμό διατάραξης της βραχόμαζας κατά την εκσκαφή. Ειδικότερα, η τιμή 1 αντιστοιχεί σε διαταραγμένη βραχόμαζα ενώ η τιμή 0 σε αδιατάρακτη. Πρέπει να τονιστεί ότι η θεώρηση D=0 κρίνεται ως εξαιρετικά αισιόδοξη και ενδέχεται να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα. Οι επαναδιατυπωμένες σχέσεις είναι:

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \tag{3-7}$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \tag{3-8}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left\{ \exp\left[-\left(\frac{GSI}{15}\right) \right] - \exp\left(\frac{20}{3}\right) \right\}$$
(3 - 9)

Πίνακας 3-23. Πίνακας υπολογισμού του δείκτη m_i.

Τύπος		Ομάδα		٧ф	'n	
			Αδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή
ENH	Κλαστικά	149	Κροκαλοπαγή • Λατυποπαγή •	Ψαμμίτες 17 ± 4	Ιλυάλιθοι 7 ± 2 Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργιλόλιθοι 4 ± 2 Αργ.σχιστόλιθο (6 ± 2) Μάργες (7 ± 2)
MATOL		Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαριτικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικριτικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
HZI	Μη κλαστικά	Εβαπορίτες	St. Sand	Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
		Οργανικά		14		Κρητίς 7 ± 2
MENA	Μη πτυχωμένα	1	Μάρμαρο 9 ± 3	Χαλαζίτες 20 ± 3 Μεταψαμμίτες (19 ± 3)	Κερατόλιθοι (19 ± 4)	
OPΦD	Ελαφρά πτυχω	ονέψο	Μιγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσιοι 28 ± 5	
METAM	Πτυχωμένα**			Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχίστες 7 ± 4
		Ανοικτόχρωμα	Γρανίτης 32 ± 3 Γρανοδ (29 s	Διορίτης 25 ± 5 ιορίτης : 3)		-
HNE	Πλουτώνια	Σκοτεινόχρωμα	Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)		
пури	Υποαβυσσικά		Πορφὒρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοτίτης (25 ± 5)
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
		Πυροκλαστικά	Ηφ.Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ.Λατυποπαγή (19 ± 5)	Τόφφοι (13 ± 5)	

Θέτοντας στο κριτήριο Hoek-Brown την τάση σ₃=0 και λύνοντας ως προς την κ ύ ρ ι α τ άση σ₁ προκύπτει ότι:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \sqrt{s} \tag{3}$$

όπου σ_c η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχόμαζας.

Αντιστοίχως, θέτοντας την τάση σ₁=0 και λύνοντας ως προς την τάση σ₃ η αρχική εξίσωση δύναται όπως αναδιατυπωθεί ως εξής:

$$-\left(\frac{\sigma_{3}}{\sigma_{ci}}\right) = \sqrt{\left(m_{b}\frac{\sigma_{3}}{\sigma_{ci}} + s\right)} \Rightarrow$$

$$\left(\frac{\sigma_{3}}{\sigma_{ci}}\right)^{2} - m_{b}\frac{\sigma_{3}}{\sigma_{ci}} - s = 0 \Rightarrow$$

$$\sigma_{3}^{2} - m_{b}\sigma_{ci}(\sigma_{3}) - s = 0$$
(3 - 11)

η οποία είναι μια δευτεροβάθμια εξίσωση με άγνωστο την τάση σ₃. Λύνοντας κατά τα γνωστά προκύπτει ότι:

$$\sigma_{3} = \frac{m_{b}\sigma_{ci}}{2} - \sqrt{m_{b}^{2}\sigma_{ci}^{2} + 4s\sigma_{ci}^{2}} \Rightarrow$$

$$\sigma_{3} = \sigma_{ci} \left(\frac{m_{b}}{2} - \sqrt{m_{b}^{2} + 4s}\right) = \sigma_{t}$$
(3 - 12)

όπου σ_t η αντοχή της βραχόμαζας σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Τέλος, θέτοντας σ₁=σ₃ προκύπτει:

$$\sigma_3 = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} = \sigma_{t,b} \tag{3-13}$$

όπου σ_{t,b} η αντοχή της βραχόμαζας σε εφελκυσμό. Είναι εμφανές ότι σύμφωνα με το κριτήριο Hoek-Brown η βραχόμαζα δεν αστοχεί σε ισότροπη θλίψη (για σ₁=σ₃).

Η μη-μηδενική τιμή της εφελκυστικής αντοχής της βραχόμαζας οφείλεται στην αλληλεμπλοκή των κόκκων λόγω διασταλτικότητας (η οποία δημιουργεί μια φαινόμενη συνοχή σε βραχόμαζες με RMR > 25). Αργότερα, βασισμένοι σε σύνολο δεδομένων από την Κίνα και την Ταιβάν, οι Hoek and Diederichs (2006) πρότειναν μια νέα σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας E_m και του GSI.

Έτσι, το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας μπορεί να εκτιμηθεί από την εμπειρική σχέση:

$$E_m = E_i (0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{(\frac{75 + 25D - GSI}{11})}})$$
(3 - 13)

όπου:

E_i (MPa) είναι το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος.

Στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκαν 7 τύποι βραχόμαζας, οι ιδιότητες των οποίων κυμαίνονται από ασθενείς έως μέτριας ποιότητας και παρατίθενται παρακάτω:

GSI	σ _{ci}	mi	σ _{cm}	Em	mb
	(MPa)		(MPa)	(MPa)	
20	10	9	0.767263	159.8506	0.516894
20	20	9	1.534526	319.7011	0.516894
30	10	9	1.038455	284.8409	0.738765
30	20	9	2.076911	569.6818	0.738765
40	10	9	1.325842	558.7826	1.055872
40	20	9	2.651685	1117.565	1.055872
40	40	9	5.303369	2235.131	1.055872

Πίνακας 3-3. Παράμετροι βράχου και αντίστοιχης βραχόμαζας.

3.2 Γεωμετρίες φρεάτων και φόρτιση

3.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην εξέταση της μηχανικής συμπεριφοράς φρεάτων πακτώσεως ως προς την ακαμψία που εμφανίζουν όταν θεμελιώνονται σε διαφορετικής ποιότητας βραχόμαζες αλλά και την αντοχή τους σε εγκάρσια φόρτιση. Τα φρέατα που εξετάζονται είναι κοίλης διατομής και διαφέρουν ως προς το βάθος θεμελίωσης.

Αρχικά, επιλέγεται διατομή φρέατος D=5m με πάχος τοιχώματος d=0,5m. Στη συνέχεια, υπολογίζονται το εμβαδόν διατομής και οι ροπές αδράνειας αυτού και παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Ως υλικό κατασκευής του θεωρείται οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 μέτρου ελαστικότητας E = 25GPa, λόγου Poisson v = 0,20, και ειδικού βάρους $\gamma_b = 25$ kN/m³.

Πίνακας 3-4. Ισοδύναμα γεωμετρικά και παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά κοίλης διατομής φρεάτων.

D	d	Dint	Α	I 11	I 12	122	J
(m)	(m)	(m)	(m²)	(m⁴)	(m⁴)	(m⁴)	(m⁴)
5	0.5	4.5	3.730641	10.55072	0	10.55072	2.487094

Επιπλέον, ορίζονται δύο χαρακτηριστικοί λόγοι βάθους θεμελίωσης-ακτίνας διατομής φρέατος L/D=2 και 3 από τους οποίους προκύπτουν τα αντίστοιχα βάθη θεμελίωσης L=10 και 15m αντίστοιχα.

3.2.2 Φόρτιση

Η σύνθετη δυσκαμψία του φρέατος υπολογίζεται μέσω της ανάλυσης της συμπεριφοράς του εντός μη ελαστικού ημιχώρου (Σχήμα 3-1). Με τον όρο σύνθετη δυσκαμψία νοείται ο προσδιορισμός της μετακίνησης και στροφής της κεφαλής του φρέατος συναρτήσει των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών, της σχετικής δυσκαμψίας υλικού φρέατος-βραχόμαζας και των εντατικών μεγεθών (M, H) που επιβάλλονται στην κεφαλή του.



Σχήμα 3-13. Εγκάρσια φόρτιση φρέατος πακτώσεως.

Αποφασίζεται να εξεταστούν δύο συνδυασμοί εντατικών μεγεθών με εκκεντρότητα e=25 και 100 m αντίστοιχα. Τα προβλήματα αυτά θα μπορούσαν να είναι αντιπροσωπευτικά κοιλαδογέφυρας με ύψος πυλώνων 25 και 100 m αντίστοιχα. Με τη θεώρηση συγκεντρωμένης μάζας, η εγκάρσια (πιθανώς σεισμική) δύναμη επιβάλλεται στην κορυφή του πυλώνα και μεταφράζεται σε συνδυασμό μιας ίσου μεγέθους δύναμη Η και μίας ροπής M= H*e στη βάση του φρέατος. Εξετάζεται επίσης η περίπτωση μηδενικής εκκεντρότητας (e=0) ως αποτελέσματα αναφοράς και χωρίς ρεαλιστική υπόσταση.

3.3 Προσομοίωση και προσδιορισμός του προβλήματος

3.3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία μόρφωσης του προσομοιώματος των 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.

3.3.2 Σχεδίαση προσομοιώματος φρέατος βραχόμαζας

Αρχικά, επιλέχθηκε διατομή φρέατος D=5m. Σχεδιάστηκαν δύο διαφορετικοί κάναβοι πεπερασμένων στοιχείων με κοινές διαστάσεις κατά τις διευθύνσεις X (=40D) και Y (= 5D) αλλά με διαφοροποίηση κατά τη διεύθυνση Z για τις περιπτώσεις λόγου L/D= 2 και 3 αντίστοιχα. Θεωρήθηκε απαραίτητο να διακριτοποιούνται κατά L/2 επιπλέον κάτω από την αιχμή του φρέατος. Κατασκευάστηκαν λοιπόν προσομοιώματα με τις εξής διαστάσεις:

Πίνακας 3-5. Εξωτερικές διαστάσεις προσομοιωμάτων φρέατος – βραχόμαζας.

Προσομα	οίωμα Α (L/D	=2)	Προσομα	οίωμα Β (L/C)=3)
X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
200	25	15	200	25	22.5

3.3.3 Διακριτοποίηση του προσομοιώματος

Όπως αναφέρθηκε, η διακριτοποίηση του προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον τουςπρογράμματος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) SIMULIA ABAQUS 6.12.1. Χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα, οκτακομβικά, εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου C3D8. Επιλέχθηκε πυκνό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων για τη διακριτοποίηση των όγκων του φρέατος και της βραχόμαζας που το περιβάλλει. Η διακριτοποίηση του προσομοιώματος κατά τη διεύθυνση του βάθους πραγματοποιήθηκε ανά 0.5m.

Για την επίτευξη ταχύτερων και μικρότερων σε όγκο αναλύσεων, μορφώθηκε η μισή διατομή λόγω συμμετρίας κατά την διεύθυνση της φόρτισης(Σχήμα 3.<u>2</u>).





3.3.4 Συνοριακές συνθήκες

Στο αρχείο που δημιουργήθηκε για την εισαγωγή των δεδομένων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων SIMULIA ABAQUS 6.12.1 προσδιορίστηκαν οι παρακάτω συνοριακές συνθήκες:

- Οι κόμβοι της βάσης του προσομοιώματος στο επίπεδο x y (z = 15m και z=22.5m αντίστοιχα) είναι πακτωμένοι, καθώς δεσμεύονται οι μετατοπίσεις τους κατά τις τρεις διευθύνσεις.
- Οι μετατοπίσεις των συνοριακών επιπέδων x y και z δεσμεύονται κατά y και x αντίστοιχα (κυλίσεις).
- Οι κόμβοι του επιπέδου x y στην επιφάνεια του εδάφους (z = 0m) είναι ελεύθεροι να παραμορφωθούν.

3.3.5 Αριθμητικό Προσομοίωμα

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι προσομοιωμάτων με σκοπό να προσομοιωθεί στον μεν η συμπεριφορά των φρεάτων υπό συνθήκες ελεύθερης παραμόρφωσης και στο δε η ίδια συμπεριφορά υπό συνθήκες επιβαλλόμενης ακαμψίας με τη χρήση ομάδας άκαμπτων συνδέσμων MPCs.

• Περίπτωση μοντέλου ελεύθερης παραμόρφωσης:

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

• Περίπτωση μοντέλου επιβαλλόμενης ακαμψίας:

Στο μοντέλο αυτό η διαδικασία ομαδοποίησης επεκτάθηκε στο σύνολο των στρωμάτων διακριτοποίησης ώστε να εξασφαλισθεί η άκαμπτη συμπεριφορά του φρέατος.

Υπολογίζονται δε εκ νέου τα ισοδύναμα γεωμετρικά και παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά της μισής διατομής ώστε να συμφωνούν με το προσομοίωμα. Έτσι έχουμε:

Πίνακας 3-<u>6</u>7. Ισοδύναμα γεωμετρικά και παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά ημιδιατομής φρέατος

D	d	Dint	Α'	 11'	 12'	 22'	J
(m)	(m)	(m)	(m²	m⁴	m⁴	m⁴	m ⁴
5	0.5	4.5	1.865321	5.27536	0	5.27536	2.487094

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

$$\mathbf{E}_{\mathbf{e}} = \frac{(\mathbf{EI})_{\mathbf{e}}}{\frac{\pi \mathbf{D}^4}{\mathbf{64}}} \tag{3-14}$$

Το ελαστικό φρέαρ είναι εγκιβωτισμένο σε ομοιογενή, ισότροπο, ελαστικό βραχώδη ή εδαφικό ημιχώρο με ιδιότητες E_r και v_r . Το φρέαρ υπόκειται σε δεδομένη εγκάρσια φόρτιση κεφαλής (Η) και ροπή (Μ).

Αντίστοιχα το μέτρο ελαστικότητας Young του φρέατος υπολογίζεται E_e =10,317 GPa.

Οι παραπάνω ιδιότητες εκχωρήθηκαν στα διπλό-ορισμένα στοιχεία του φρέατος μέσω του αρχείου εισαγωγής δεδομένων του Abaqus. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία με ιδιότητες βραχόμαζας που απαρτίζουν τον όγκο του φρέατος απομακρύνονταιαφαιρούνται από το προσομοίωμα και στη συνέχεια επανατοποθετούνται σε αυτό με τις αναθεωρημένες ιδιότητες (αυτές του σκυροδέματος).

3.3.6 Παραμορφωσιμότητα κεφαλής και επιβαλλόμενα φορτία

Ορίστηκε μία ομάδα κατακόρυφων άκαμπτων συνδέσμων (MPC) οι οποίοι συνθέτουν ένα στύλο με μήκος ίσο με την εκάστοτε εκκεντρότητα (e=25m και e=100m) στην κορυφή του οποίου επιβάλλεται το οριζόντιο φορτίο. Ο στύλος συνδέεται με τον κεντρικό κόμβο της κεφαλής του φρέατος και μεταφέρει σε αυτή μία οριζόντια δύναμη κατά Χ και μία ροπή περί τον άξονα Ψ.

Στην περίπτωση μηδενικής εκκεντρότητας το φορτίο επιβάλλεται στον κεντρικό κόμβο της κεφαλής του φρέατος.

3.3.7 Ισοδύναμες ιδιότητες Mohr – Coulomb

Το καταστατικό προσομοίωμα Mohr – Coulomb αποτελεί το πιο διαδεδομένο κριτήριο αστοχίας της γεωτεχνικής μηχανικής. Στις εξισώσεις (3-15) και (3-16) παρουσιάζονται οι εκφράσεις του κριτηρίου διαρροής. Γραφικά, στην περίπτωση επίπεδης έντασης απεικονίζεται με μια ευθεία γραμμή, ενώ στο χώρο των κύριων τάσεων έχει σχήμα μη κανονικής εξαγωνικής πυραμίδας (Σχήματα 3-<u>3</u>7 και 3-<u>4)</u>8)

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi \qquad -(3 - 15)$$

$$\sigma'_{1} = \sigma'_{3} \tan^{2}(45 + \varphi/2) + 2c \tan(45 + \varphi/2)$$
(3 - 16)

όπου:

```
τ: διατμητική τάση
```

c: ενεργός συνοχή

φ: ενεργός γωνία εσωτερικής τριβής



Σχήμα 3-37. Γραφική απεικόνιση κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb για επίπεδη ένταση.



Σχήμα 3-<u>4</u>7. Γραφική απεικόνιση κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb στο χώρο των κύριων τάσεων.

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Simulia Abaqus 6.12.1 δεν περιλαμβάνει το κριτήριο Hoek-Brown, αλλά το κριτήριο Mohr-Coulomb. Στις περιπτώσεις αυτές είναι χρήσιμη η συσχέτιση μεταξύ των δυο κριτηρίων, δηλαδή ο υπολογισμός των παραμέτρων αντοχής (c, φ) του κριτηρίου Hoek-Brown. Είναι προφανές ότι λόγω της διαφορετικής μορφής της περιβάλλουσας αστοχίας (καμπύλη περιβάλλουσα στο κριτήριο Hoek-Brown και ευθύγραμμη στο κριτήριο Mohr-Coulomb) η αντιστοιχία μεταξύ των δύο κριτηρίων αναφέρεται σε συγκεκριμένη περιοχή τάσεων όπου η καμπύλη περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek-Brown προσεγγίζεται με μια ευθεία. Η μέθοδος υπολογισμού των ισοδύναμων παραμέτρων (c, φ) από τις

παραμέτρους του κριτηρίου Hoek-Brown περιγράφεται παρακάτω (για δεδομένη τιμή της ελάχιστης κύριας τάσης σ₃):

1. Από τη σχέση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{\alpha}$$
(3-17)

υπολογίζεται η τάση (σ_1).

2. Από τη σχέση:

$$k = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} = 1 + \alpha m_b \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{\alpha - 1}$$
(3 - 18)

υπολογίζεται η ποσότητα $\mathbf{k} = (\partial \sigma_1 / \partial \sigma_3).$

3. Από τις σχέσεις:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 k}{1 + k} \quad \kappa \alpha \iota \quad \tau_{\alpha} = (\sigma_{\alpha} - \sigma_3) \sqrt{k} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \sqrt{k}}{1 + k}$$
(3 - 19)

υπολογίζεται η ορθή τάση (σ_{α}) και η διατμητική τάση (τ_{α}) στο επίπεδο αστοχίας.

4. Η ισοδύναμη γωνία τριβής (ϕ) και συνοχή (c) υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\tan \varphi = \frac{1}{\tau_{\alpha}} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \sigma_{\alpha} \right) \qquad \acute{\eta} \qquad \sin \varphi = \frac{k - 1}{k + 1} \tag{3-20}$$

5. Τέλος, η γωνία (α) που σχηματίζει το επίπεδο αστοχίας με το επίπεδο επί του οποίου ασκείται η τάση (σ₁) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tan \alpha = \frac{\tau_{\alpha}}{\sigma_{\alpha} - \sigma_{3}} = \sqrt{k}$$
 (3 - 21)

Στο πίνακα 3-8 καταγράφονται αναλυτικά όλες οι παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb c, φ, ψ για τους τύπους βραχόμαζας

σ _{cm}	С	ф	ψ
(MPa)	(MPa)	(deg)	(deg)
0.767263	0.035567	42.82115	10.70529
1.534526	0.046335	47.94935	11.98734
1.038455	0.049247	47.26375	11.81594
2.076911	0.068292	52.23772	13.05943
1.325842	0.0676	50.50976	12.62744
2.651685	0.102535	55.07418	13.76855
5.303369	0.171052	58.85181	14.71295

Πίνακας 3-<u>7</u>8. Ισοδύναμες παράμετροι Mohr-Coulomb που θεωρήθηκαν.

3.3.8 Διεπιφάνειες

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

- Επαφή της βραχόμαζας εντός της κυλινδρικής κοιλότητας με την περιβάλλουσα βραχόμαζα (πριν την εκσκαφή του φρέατος).
- Επαφή της βραχόμαζας εντός της κυλινδρικής κοιλότητας με την υποκείμενη βραχόμαζα (πριν την εκσκαφή του φρέατος).
- Επαφή του φρέατος με την περιβάλλουσα βραχόμαζα.
- Επαφή του φρέατος με την υποκείμενη βραχόμαζα.

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

$$\delta = \frac{2}{3}\phi' \tag{3-22}$$

με τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής της βραχόμαζας/εδάφους ανάλογα με την ποιότητα.

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

3.3.8.1 Νόμος τριβής διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας

Ο υπολογισμός της οριακής αντίδρασης πλευρικής τριβής πραγματοποιείται με τον ορισμό του νόμου τριβής στη διεπιφάνεια φρέατος – βραχόμαζας. Το προσομοίωμα σε άξονες ορθής – διατμητικής τάσης (σ – τ) αποτελείται από έναν κλάδο (Σχήμα 3-9), ο οποίος προσδιορίζεται από την εξίσωση (3-23):

$$\tau = \mu \sigma_h$$

(3 - 23)

όπου

μ: ο συντελεστής τριβής και

 σ_h : η εγκάρσια τάση επί της διατομής



Σχήμα 3-<u>5</u>9. Περιοχή των τιμών τριβής της εξίσωσης (3-23 για σταθερό συντελεστή τριβής μ).

Επιπρόσθετα, προσδιορίστηκε ο νόμος ολίσθησης της διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια (Slip – τ). 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. Ο συντελεστής τριβής (μ) πολλαπλασιαζόμενος με την οριζόντια ολική τάση (σ_h) αποδίδει την επιθυμητή

τιμή ολίσθησης και είναι συνάρτηση της γωνίας τριβής της βραχόμαζας. Συγκεκριμένα,

 $\mu = tan\delta$

(3 - 24)



Σχήμα 3-<u>6</u>10. Ελαστοπλαστικό διάγραμμα ολίσθησης – τριβής της διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας.

3.3.8.2 Νόμος αποκόλλησης διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας

Στα αρχείο που εισάγονται τα δεδομένα των αριθμητικών αναλύσεων, που ολοκληρώνεται εντός του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, καθορίζεται μια αρχική απόσταση c_0 στην οποία θεωρείται ότι η επιφάνεια του φρέατος έρχεται σε επαφή με αυτή της βραχόμαζας. Συνεπώς, η μετάδοση τάσεων μεταξύ των δύο επιφανειών ξεκινάει όταν η μεταξύ τους απόσταση λαμβάνει την τιμή $h = c_0$. Περαιτέρω μείωση της τιμής αυτής αυξάνει την τάση που μεταδίδεται μέσω της διεπιφάνειας. Η πίεση παίρνει την τιμή p_0 όταν η απόσταση των δύο επιφανειών μηδενιστεί (h = 0) (Σχήμα 3-11). Στην παρούσα διπλωματική εργασία ορίστηκε τάση $p_0 = 1$ kPa και απόσταση $c_0 = 10^{-6}$ m.

Στο Σχήμα 3-11 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_o. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη σχέση πίεσης – αποκόλλησης είναι η αποφυγή της αριθμητικής αστάθειας που δύναται όπως προκύψει για νόμο πίεσης – αποκόλλησης που μηδενίζει την πίεση επαφής ακριβώς τη στιγμή της αποκόλλησης.



Σχήμα 3<u>-7</u>-11. Διάγραμμα υπερκάλυψης – πίεσης της διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας.

3.3.9 Βήματα αριθμητικών αναλύσεων

Στις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας εφαρμόστηκε συγκεντρωμένο εγκάρσιο φορτίο Η κατά Χ και με εκκεντρότητα e = 25m και 100 m μέχρι την αστοχία. Η διαδικασία φόρτισης που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τα ακόλουθα τέσσερα (4) βήματα:

- Αρχικά, μέσω του αρχείου εισαγωγής δεδομένων του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.12 εφαρμόζονται οι γεωστατικές τάσεις με τιμές μεταξύ των $\sigma_v = 1$ Pa για z = 0 για λόγους αριθμητικής συμβατότητας και $\sigma_v = 750$ MPa για z = 30m (προσομοίωμα Γ). 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 βραχόμαζας βραχόμαζας με συνθήκες πλήρους συνάφειας.
- Στο δεύτερο βήμα, αφαιρούνται τα στερεά στοιχεία βραχόμαζας εντός της κυλινδρικής κοιλότητας και αντικαθίστανται από όμοια στοιχεία με ιδιότητες σκυροδέματος. Τα δομικά στοιχεία του φρέατος έχουν ήδη οριστεί δύο φορές στον κώδικα, μία με τις ιδιότητες του εκάστοτε εδάφους/βραχόμαζας και μία με τις ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.3.4.
- Το τρίτο βήμα περιλαμβάνει την εφαρμογή φορτίων βαρύτητας 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.
- Στο τέταρτο και τελευταίο βήμα, εφαρμόζεται σταδιακά μέχρι την αστοχία η εγκάρσια φόρτιση.

4 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

4.1 Εισαγωγή

Μετά το πέρας των αριθμητικών αναλύσεων, συλλέγονται τα αποτελέσματα τα οποία αφορούν το φορτίο (Η), την ροπή(Μ), την μετακίνηση(u) και την στροφή (θ). Από αυτά και με τη βοήθεια υπολογιστικού φύλλου Excel προκύπτουν τα οριακά μεγέθη των παραπάνω (H_{ult}, M_{ult}, u_{ult}, θ_{ult}) καθώς και η αρχική και μέση μετακινησιακή και στροφική δυσκαμψία (K_{ini}, K₅₀, Cini, C₅₀). Στους πίνακες που ακολουθούν (4-1 και 4-2) παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για ελεύθερη μετατόπιση αλλά και για επιβαλλόμενη δυσκαμψία.

3 _{ci} L/D e Pult	./D e Pult	e Pult	Pult		δ (end)	P.50	δ (P.50)	K50	Kavg	Mult	θ (end)	M.50	C50	Cavg
1Pa) (m) (KN) (m) (KN)	(m) (KN) (m) (KN)	(m) (KN) (m) (KN)	(KN) (m) (KN)	(m) (KN)	(KN)		(m)	(KN/m)	(KN/m)	(KNm)	(rad)	(KNm)	(KNm/rad)	(KNm/rad)
10 2 100 6769.82 0.88198 3384.9	2 100 6769.82 0.88198 3384.9	100 6769.82 0.88198 3384.5	6769.82 0.88198 3384.9	0.88198 3384.9	3384.9	•	0.03522	96110.6	195429.1	167553	0.16617	83777	15282128	25209347.4
10 2 25 1784.96 0.35076 892.48	2 25 1784.96 0.35076 892.48	25 1784.96 0.35076 892.48	1784.96 0.35076 892.48	0.35076 892.48	892.48		0.02514	35498.5	71585.58	178050	0.07304	89025	17639817	31039368.9
10 2 0 33812 2.92627 16906	2 0 33812 2.92627 16906	0 33812 2.92627 16906	33812 2.92627 16906	2.92627 16906	16906		0.06715	251784	792266.1					
20 2 100 7206.92 0.07502 3603.5	2 100 7206.92 0.07502 3603.5	100 7206.92 0.07502 3603.5	7206.92 0.07502 3603.5	0.07502 3603.5	3603.5		0.01608	224155	329240.9	180517	0.01594	90259	26030562	35503795.1
20 2 25 2126.68 0.09163 1063.3	2 25 2126.68 0.09163 1063.3	25 2126.68 0.09163 1063.3	2126.68 0.09163 1063.3	0.09163 1063.3	1063.3		0.01482	71775.5	114091.7	212270	0.02138	106135	29840722	42009754.8
20 2 0 47086 1.20948 23543	2 0 47086 1.20948 23543	0 47086 1.20948 23543	47086 1.20948 23543	1.20948 23543	23543		0.04849	485493	1319250		0.13817			
10 2 100 9013.34 0.54031 4506.7	2 100 9013.34 0.54031 4506.7	100 9013.34 0.54031 4506.7	9013.34 0.54031 4506.7	0.54031 4506.7	4506.7		0.02795	161237	317050	223080	0.1136	111540	19721028	34870240.5
10 2 25 2361.1 0.25242 1180.6	2 25 2361.1 0.25242 1180.6	25 2361.1 0.25242 1180.6	2361.1 0.25242 1180.6	0.25242 1180.6	1180.6		0.01955	60389.4	111737.3	236084	0.06482	118042	26234166	41454657
10 2 0 43670 0.8272 21835	2 0 43670 0.8272 21835	0 43670 0.8272 21835	43670 0.8272 21835	0.8272 21835	21835		0.04446	491156	1187358		0.09547			
20 2 100 11345.8 0.10472 5672.9	2 100 11345.8 0.10472 5672.9	100 11345.8 0.10472 5672.9	11345.8 0.10472 5672.9	0.10472 5672.9	5672.9		0.0164	345941	541454	280808	0.02465	140404	34611341	47698785.3
20 2 25 2833.48 0.04711 1416.7	2 25 2833.48 0.04711 1416.7	25 2833.48 0.04711 1416.7	2833.48 0.04711 1416.7	0.04711 1416.7	1416.7		0.01214	116709	183171.1	282640	0.01245	141320	40668509	54862267.7
20 2 0 62204 0.32714 31102	2 0 62204 0.32714 31102	0 62204 0.32714 31102	62204 0.32714 31102	0.32714 31102	31102		0.03275	949809	2235556		0.03787			
10 2 100 9775.56 0.06185 4887.8	2 100 9775.56 0.06185 4887.8	100 9775.56 0.06185 4887.8	9775.56 0.06185 4887.8	0.06185 4887.8	4887.8		0.00823	594268	783698.1	241946	0.01376	120973	92359717	126019049
10 2 25 2878.32 0.07162 1439.2	2 25 2878.32 0.07162 1439.2	25 2878.32 0.07162 1439.2	2878.32 0.07162 1439.2	0.07162 1439.2	1439.2		0.00739	194733	264789.7	287112	0.01834	143556	1.08E+08	147144017
10 2 0 59058 0.32204 29529	2 0 59058 0.32204 29529	0 59058 0.32204 29529	59058 0.32204 29529	0.32204 29529	29529		0.02258	1307932	2513233		0.05826			
20 2 100 15200.9 0.05539 7600.5	2 100 15200.9 0.05539 7600.5	100 15200.9 0.05539 7600.5	15200.9 0.05539 7600.5	0.05539 7600.5	7600.5		0.01271	598071	940859.5	376222	0.01529	188111	47952989	64194395.1
20 2 25 4018.64 0.03772 2009.3	2 25 4018.64 0.03772 2009.3	25 4018.64 0.03772 2009.3	4018.64 0.03772 2009.3	0.03772 2009.3	2009.3		0.01044	192497	284926.1	400860	0.01207	200430	53699009	68124184.3
20 2 0 71354 0.05107 35677	2 0 71354 0.05107 35677	0 71354 0.05107 35677	71354 0.05107 35677	0.05107 35677	35677		0.0121	2948880	5314562		0.00627			
40 2 100	2 100	100							1354373					73855459.8
t0 2 25	2 25	25							400967.7					77970117.6
40 2 0 121070 0.04246 60535	2 0 121070 0.04246 60535	0 121070 0.04246 60535	121070 0.04246 60535	0.04246 60535	60535		0.01074	5634343	11537605		0.00634			

Πίνακας 4-1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανάλυσης προσομοιωμάτων χωρίς τη χρήση MPC.

GSI	σ _{ci}	r/D	e	Pult	δ (end)	P.50	δ (P.50)	K50	Kavg	Mult	θ (end)	M.50	C50	Cavg
	(MPa)		(m)	(KN)	(m)	(KN)	(m)	(KN/m)	(KN/m)	(KNm)	(rad)	(KNm)	(KNm/rad)	(KNm/rad)
20	10	ŝ	100	16265.6	0.62675	8132.8	0.05878	138368	344558.4	402574	0.07539	201287	21717712	39436478.9
20	10	ŝ	25	4843.24	0.3839	2421.6	0.05312	45588	101939.4	485954	0.05449	242977	25570862	40978889.6
20	10	ŝ	0	63560	6.43502	31780	0.08871	358253	972686.4		0.53132			
20	20	ŝ	100	21517.8	0.30941	10759	0.04684	229707	503012.7	537268	0.04715	268634	30022081	47419579.7
20	20	ŝ	25	6126.14	0.17077	3063.1	0.04028	76045.9	153691.9	611082	0.0292	305541	35141360	50780678.4
20	20	ŝ	0	80474	0.93171	40237	0.05494	732433	1749567		0.08031			
30	10	ŝ	100	20954.8	0.30776	10477	0.04919	212990	470612.1	518960	0.04393	259480	28698032	45907457.7
30	10	ŝ	25	6188.16	0.23515	3094.1	0.04461	69357.2	137664.5	617268	0.03774	308634	33344554	47989160.8
30	10	ŝ	0	84360	1.66241	42180	0.06824	618135	1588124		0.1405			
30	20	ŝ	100	29222.4	0.17593	14611	0.0425	343806	692610.3	724954	0.03239	362477	37563459	55254861.7
30	20	ŝ	25	8156.9	0.12175	4078.5	0.03607	113081	198421.8	815364	0.02635	407682	43219694	57443266.6
30	20	ŝ	0	130540	0.97632	65270	0.0647	1008823	2601786		0.08168			
40	10	ŝ	100	28438.8	0.19474	14219	0.0425	334551	692677.8	703858	0.03295	351929	36974554	55274708.6
40	10	ŝ	25	8184.48	0.1463	4092.2	0.03921	104380	191314.4	818326	0.03037	409163	41500685	56480541.7
40	10	ŝ	0	120686	0.92919	60343	0.0595	1014166	3332173		0.07782			
40	20	ŝ	100	43368	0.16121	21684	0.0421	515011	1265210	1073356	0.03436	536678	45737386	73872522.2
40	20	ŝ	25	12338.9	0.14153	6169.4	0.03894	158429	273342.2	1230802	0.03508	615401	50440423	66362582.9
40	20	ŝ	0	185028	0.43451	92514	0.05569	1661241	5820180		0.03994			
40	40	ŝ	100						1488768					77919254.1
40	40	ŝ	25						448151.3					82398392.4
40	40	ŝ	0						17910501					

		1	1		1				1	1										1		-
Cavg	(KNm/rad)	24361737.7	37792985.5		64718862.4	82750019.5		37632152.6	66764165.8		118613562	148949784		125581099	158115369		258056608	322070520		400663124	392940723	
C50	(KNm/rad)	20580367	29391783		51702296	62343696		44810596	54743534		87427573	1.14E+08		85219874	1.04E+08		1.92E+08	2.31E+08				
0 (M.50)	(rad)	0.0038	0.00309		0.0018	0.00176		0.00213	0.00199		0.00148	0.00119		0.00168	0.00157		0.00078	0.00071				
M.50	(KNm)	77490.1	90572		86388	109588		94573.8	108558		128408	135981		141687	162420		147657	163550				
0 (end)	(rad)	0.09487	0.08904		0.01336	0.03285	0.06362	0.0386	0.03138	0.08775	0.01679	0.01008	0.02076	0.02253	0.0223	0.03002	0.00485	0.00344	0.02314			0.00833
Mult	(KNm)	154980	181144		172776	219176		189148	217116		256816	271962		283374	324840		295314	327100				
Kavg	(KN/m)	154423	67568.05	928529.4	405698.8	148909.5	1875166	240908.7	120578.5	1674298	743854.4	268159.5	3415971	780871.1	283757.8	3360877	1597748	576969.1	6883264	2522469	712900.4	13788788
K50	(KN/m)	133587	52266.1	340722	332978	111777	757547	288935	98323.4	665531	570230	205325	1388544	549324	185459	1338868	1223807	413636	2655949			5606484
δ (P.50)	(m)	0.02344	0.01737	0.04814	0.01119	0.00983	0.02809	0.01323	0.01107	0.03198	0.0091	0.00664	0.02093	0.01042	0.00878	0.02136	0.00488	0.00398	0.01725			0.01093
P.50	(KN)	3130.9	907.99	16403	3726.1	1098.7	21276	3821.2	1088.3	21285	5188.2	1363.2	29063	5723.5	1628.3	28599	5966	1645.9	45820			61278
δ (end)	(m)	0.47034	0.40567	1.88239	0.11079	0.13435	0.46288	0.17582	0.13262	0.63787	0.07056	0.04079	0.15556	0.104	0.09392	0.20194	0.02201	0.01542	0.10744			0.04613
Pult	(KN)	6261.82	1815.97	32806	7452.12	2197.3	42552	7642.32	2176.6	42570	10376.4	2726.38	58126	11446.9	3256.54	57198	11931.9	3291.7	91640			122556
e	(m)	100	25	0	100	25	0	100	25	0	100	25	0	100	25	0	100	25	0	100	25	0
L/D		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
σ _{ci}	(MPa)	10	10	10	20	20	20	10	10	10	20	20	20	10	10	10	20	20	20	40	40	40
GSI		20	20	20	20	20	20	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	40	40

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΦΡΕΑΤΩΝ ΠΑΚΤΩΣΕΩΣ

Πίνακας 4-2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανάλυσης προσομοιωμάτων με τη χρήση MPC.

214436 0.00385 55737430 266871 0.00386 69168736 255290 0.00199 1.28E+08 340104 0.00232 1.47E+08	214436 0.00385 55737430 266871 0.00386 69168736 9 255290 0.00199 1.28E+08 3 340104 0.00232 1.47E+08 2 266169 0.00227 1.12E+08 3 338453 0.00263 1.29E+08 3	214436 0.00385 55737430 113 266871 0.00386 69168736 992 255290 0.00199 1.28E+08 241 340104 0.001322 1.47E+08 242 340104 0.00232 1.47E+08 242 340104 0.00232 1.47E+08 242 318745 0.00263 1.29E+08 213 318744 0.00135 2.39E+08 447	214436 0.00385 55737430 1139 266871 0.00386 69168736 9921 255290 0.00199 1.28E+08 2417 340104 0.001322 1.47E+08 2405 340104 0.00232 1.47E+08 2405 340104 0.00232 1.47E+08 2405 338453 0.00227 1.12E+08 2150 338453 0.00263 1.29E+08 2130 318744 0.00135 2.39E+08 4475 318748 0.00134 2.98E+08 4734	214436 0.00385 55737430 11395 266871 0.00386 69168736 99214 255290 0.00199 1.28E+08 24170 340104 0.00232 1.47E+08 24057 340104 0.00232 1.47E+08 24057 340104 0.00232 1.12E+08 21502 38453 0.00263 1.29E+08 21302 318744 0.00135 2.39E+08 47752 318744 0.00134 2.98E+08 47349 318744 0.00134 2.98E+08 47010	214436 0.00385 55737430 113996 266871 0.00386 69168736 992142 255290 0.00199 1.28E+08 241704 340104 0.00232 1.47E+08 240575 340104 0.00232 1.47E+08 240575 340104 0.00232 1.12E+08 215022 338453 0.00263 1.29E+08 215022 338453 0.00263 1.29E+08 213022 338453 0.00263 1.29E+08 213022 318744 0.00135 2.39E+08 447522 318744 0.00134 2.98E+08 473495 318744 0.00134 2.98E+08 470105 395764 0.00138 2.15E+08 440105	214436 0.00385 55737430 113998 266871 0.00386 69168736 992142 255290 0.00199 1.28E+08 241704 340104 0.00232 1.47E+08 240575 340104 0.00232 1.12E+08 215024 338453 0.00263 1.12E+08 215024 338453 0.00263 1.29E+08 213021 338453 0.00263 1.29E+08 213021 338453 0.00263 1.29E+08 213021 318744 0.00135 2.39E+08 477523 318744 0.00135 2.39E+08 4773493 318744 0.00134 2.98E+08 473493 318744 0.00135 2.15E+08 4773493 318744 0.00134 2.98E+08 465404	214436 0.00385 55737430 113998 266871 0.00386 69168736 9921428 255290 0.00199 1.28E+08 241704 255290 0.00132 1.47E+08 240575 340104 0.00232 1.47E+08 240575 340104 0.00232 1.12E+08 215024 38453 0.00263 1.29E+08 215024 338453 0.00263 1.29E+08 213021 318744 0.00135 2.39E+08 477523 399468 0.00134 2.98E+08 473493 318744 0.00134 2.98E+08 473493 318744 0.00134 2.98E+08 470103 395764 0.00138 2.38E+08 465404 462986 0.00108 4.31E+08 903988	214436 0.00385 55737430 1139985 266871 0.00386 69168736 9921428 255290 0.00199 1.28E+08 2417041 340104 0.00232 1.47E+08 2405755 340104 0.00232 1.47E+08 2405755 340104 0.00232 1.28E+08 2405755 338453 0.00232 1.29E+08 2150247 338453 0.00263 1.29E+08 2130215 318744 0.00135 2.39E+08 4734938 318744 0.00134 2.98E+08 4734938 318744 0.00134 2.98E+08 4734938 318744 0.00134 2.98E+08 4701035 318744 0.00134 2.98E+08 4654047 35764 0.00138 2.88E+08 4654047 462986 0.00108 4.31E+08 9039884 462986 0.00102 5.54E+08 9039884	214436 0.00385 55737430 1139989 266871 0.00386 69168736 9921428 255290 0.00199 1.28E+08 2417041 255290 0.001322 1.47E+08 2405759 340104 0.00232 1.47E+08 2405759 340104 0.00232 1.47E+08 2405759 340104 0.00232 1.28E+08 2405759 338453 0.002237 1.12E+08 2130215 338453 0.00263 1.29E+08 4475238 338453 0.00134 2.39E+08 4734938 318744 0.00134 2.98E+08 4734938 338453 0.00134 2.98E+08 4701035 399468 0.00138 2.38E+08 4654047 318744 0.00138 2.88E+08 4654047 395764 0.00138 2.88E+08 4654047 462986 0.00108 4.31E+08 9039884 566180 0.00102 5.54E+08 9039884	214436 0.00385 55737430 11399891 266871 0.00386 69168736 99214289 255290 0.00199 1.28E+08 24170418 340104 0.00232 1.47E+08 24057595 340104 0.00232 1.47E+08 24057595 340104 0.00232 1.12E+08 21502472 338453 0.00263 1.12E+08 21302157 338453 0.00263 1.29E+08 4775383 338453 0.00263 1.29E+08 4775383 318744 0.00134 2.98E+08 47349383 318744 0.00134 2.98E+08 47349383 318744 0.00134 2.98E+08 47349383 318744 0.00134 2.98E+08 47010357 318744 0.00138 2.88E+08 46540477 318744 0.00138 2.38E+08 46540477 395764 0.00138 2.38E+08 46540477 462986 0.00103 2.36E+08 99398847 566180 0.00102 5.54E+08 90398847 5	214436 0.00385 55737430 11399891 266871 0.00386 69168736 99214289 255290 0.00199 1.28E+08 24170418 340104 0.00232 1.47E+08 24057595 340104 0.00232 1.47E+08 24057595 340104 0.00232 1.47E+08 24057595 318744 0.00233 1.25E+08 21302157 318744 0.00135 2.39E+08 47752383 318744 0.00135 2.39E+08 47752383 318744 0.00134 2.98E+08 47752383 318744 0.00134 2.98E+08 47752383 318744 0.00134 2.98E+08 47752383 318744 0.00134 2.98E+08 47752383 318748 0.00138 2.15E+08 47752383 318744 0.00138 2.38E+08 47752383 318748 0.00138 2.15E+08 47752383 318748 0.00138 2.15E+08 46540477 462986 0.00108 4.31E+08 90398847 <td< th=""></td<>
0.1004/ 2.144.56 0.00 0.08505 266871 0.00 0.56624 255290 0.00 0.0222 255290 0.00 0.04923 340104 0.00 0.12405 0.12405 0.00	0.1004/ 2.144.56 0.00 0.08505 266871 0.00 0.56624 255290 0.00 0.0222 255290 0.00 0.04923 340104 0.00 0.12405 266169 0.00 0.04458 266169 0.00 0.04458 266169 0.00 0.05001 338453 0.00	0.1004/ 214456 0.00 0.08505 266871 0.00 0.56624 255290 0.00 0.00222 255290 0.00 0.04923 340104 0.00 0.12405 266169 0.00 0.12405 266169 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13444 318744 0.00 0.0068 318744 0.00	0.1004/ 2.144.56 0.000 0.08505 266871 0.000 0.56624 255290 0.000 0.00222 255290 0.000 0.04923 340104 0.000 0.04458 266169 0.00 0.12405 266169 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13444 318744 0.00 0.13443 318744 0.00 0.0068 318744 0.00 0.00142 399468 0.00	0.1004/ 214456 0.00 0.08505 266871 0.00 0.56624 255290 0.00 0.0222 255290 0.00 0.04923 340104 0.00 0.04458 266169 0.00 0.12405 338453 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13443 318744 0.00 0.01142 399468 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00	0.1004/ 214456 0.00 0.08505 266871 0.00 0.56624 255290 0.00 0.0222 255290 0.00 0.04923 340104 0.00 0.12405 256169 0.00 0.12405 340104 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13444 318744 0.00 0.1142 399468 0.00 0.03533 318744 0.00 0.00899 318744 0.00 0.00553 395764 0.00	0.1004/ 21445b 0.00 0.08505 266871 0.00 0.56624 255290 0.00 0.0222 255290 0.00 0.04923 340104 0.00 0.04458 266169 0.00 0.12405 256169 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13443 348744 0.00 0.13443 318744 0.00 0.0068 318744 0.00 0.1343 349468 0.00 0.0068 318744 0.00 0.03533 399468 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03553 395764 0.00 0.03486 305764 0.00	0.1004/ 214456 0.00 0.08505 266871 0.00 0.56624 255290 0.00 0.00222 255290 0.00 0.04923 340104 0.00 0.04458 266169 0.00 0.12405 338453 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13443 338453 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13444 338744 0.00 0.00589 318744 0.00 0.03533 305764 0.00 0.033486 0.00 0.002 0.00549 462986 0.00	0.1004/ 214456 0.00 0.08505 266871 0.00 0.56624 255290 0.00 0.0222 255290 0.00 0.04923 340104 0.00 0.04458 266169 0.00 0.12405 338453 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13443 346169 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13443 349744 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13444 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03389 318744 0.00 0.00555 395764 0.00 0.00549 462986 0.00 0.00549 566180	0.1004/ 2.144.56 0.00 0.08505 266871 0.00 0.56624 255290 0.00 0.56624 340104 0.00 0.04923 340104 0.00 0.04458 266169 0.00 0.12405 266169 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13434 349744 0.00 0.0068 318744 0.00 0.13434 399468 0.00 0.03533 395764 0.00 0.03533 395764 0.00 0.00555 395764 0.00 0.00556 395764 0.00 0.00555 395764 0.00 0.00549 462986 0.00 0.00549 462986 0.00 0.00549 462986 0.00 0.001106 0.01106 0.00	0.1004/ 2.144.56 0.00 0.08505 266871 0.00 0.56624 255290 0.00 0.0222 255290 0.00 0.04923 340104 0.00 0.04458 266169 0.00 0.12405 266169 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13444 338453 0.00 0.13444 338453 0.00 0.0068 318744 0.00 0.13444 338453 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03486 0.00 0.00 0.03486 0.00 0.00 0.00549 462986 0.00 0.00106 0.01106 <	0.1004/ 214456 0.00 0.08505 266871 0.00 0.56624 255290 0.00 0.0222 255290 0.00 0.04923 340104 0.00 0.04458 266169 0.00 0.12405 38453 0.00 0.13444 388453 0.00 0.13444 399468 0.00 0.13444 318744 0.00 0.13443 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03533 318744 0.00 0.03333 318744 0.00 0.03486 318744 0.00 0.03486 318744 0.00 0.00549 345764 0.00 0.00549 305764 0.00 0.00549 462986 0.00 0.001106 0.01 <
33742 0.08505 266 0.56624 0.56624 555 510580 0.0222 255 580208 0.04923 340 0.12405 0.12405 340	:33742 0.08505 266 :10580 0.56624 255 :10580 0.0222 255 :20208 0.0222 255 :80208 0.04923 340 :822338 0.12405 266 :575906 0.0601 335 :013444 0.13444	33742 0.08505 266 0.56624 0.56624 360 10580 0.56624 340 380208 0.0222 255 380208 0.04923 340 0.12405 0.12405 266 332338 0.04458 266 576906 0.0601 335 57488 0.0068 315	33742 0.08505 266 0.56624 0.56624 340 10580 0.0222 255 80208 0.04923 340 932338 0.12405 266 932338 0.04458 266 932338 0.04458 266 937488 0.0601 338 98936 0.01142 395	33742 0.08505 266 0.56624 0.56624 10580 10580 0.0222 255 80208 0.04923 340 0.12405 0.12405 266 0.12405 0.12405 38 0.12405 0.12405 365 0.12405 0.12405 365 0.12405 0.12405 365 0.12405 0.13444 378 0.13448 0.0601 338 037488 0.01442 395 037488 0.00583 315 037488 0.03533 315 037488 0.03533 315	33742 0.08505 266 0.56624 0.56624 340 10580 0.0222 255 80208 0.04923 340 0.12405 266 0.12405 382 0.12405 266 0.12405 266 0.13444 338 0.13448 0.0601 338 0.13448 0.01442 395 037488 0.01142 395 038936 0.01142 395 037488 0.00533 315 937488 0.00553 395 03738 0.03533 315 03728 0.00555 395	33742 0.08505 266 0.56624 0.56624 340 10580 0.0222 255 80208 0.04923 340 9012405 0.12405 366 9012405 0.12405 366 9012405 0.12405 366 9012405 0.12405 338 937488 0.04458 266 937488 0.0601 338 93936 0.11442 395 93936 0.01142 395 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 93758 0.03533 318 93758 0.03533 318	33742 0.08505 266 0.56624 255 0.56624 340 0.0222 255 0.0223 340 0.12405 266 0.12405 266 0.12405 266 0.12405 266 0.12405 266 0.12405 266 0.13444 318 0.37488 0.0068 318 98936 0.01142 395 937488 0.0058 318 93937488 0.003533 318 93937488 0.03333 318 93937488 0.03533 318 93937488 0.03533 318 93937488 0.03533 318 931528 0.033486 318 931528 0.03486 318 931533 0.03486 318 931533 0.03486 318 931533 0.03486 318 931533 0.03486 318 <td>33742 0.08505 266 0.56624 0.56624 340 10580 0.0222 255 80208 0.04923 340 80208 0.04458 266 9.56906 0.04458 266 932338 0.04458 266 937488 0.0601 338 98936 0.01142 399 98936 0.01142 399 937488 0.00583 318 937488 0.003533 395 937488 0.03486 318 937488 0.03486 318 937488 0.00555 395 91528 0.00356 395 925972 0.03486 462 32360 0.00475 566</td> <td>33742 0.08505 266 0.56624 0.56624 340 10580 0.0222 255 80208 0.04923 340 0.12405 266 323 0.12405 0.12405 386 0.32338 0.04458 266 0.13444 338 318 0.32488 0.0601 338 0.337488 0.01142 395 98936 0.01142 395 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937538 0.03486 318 9375360 0.03486 463 9325972 0.00549 463 9325973 0.001106 463</td> <td>33742 0.08505 266 0.56624 0.56624 340 10580 0.0222 255 80208 0.02423 340 0.12405 266 340 0.12405 0.12405 340 0.12405 0.13444 38 0.32338 0.04458 266 0.32488 0.0063 318 98936 0.01442 399 937488 0.0068 318 93937488 0.00353 316 93937488 0.00353 315 93937488 0.00353 316 93937488 0.00353 316 93937488 0.00353 316 93937488 0.00353 316 931528 0.00355 395 91528 0.003496 462 925972 0.00475 566 132360 0.01106 162</td> <td>33742 0.08505 266 33742 0.56624 255 10580 0.0222 255 80208 0.04923 340 932338 0.04458 266 132338 0.04458 266 132338 0.04458 266 132338 0.04458 266 132348 0.0601 338 132488 0.0068 318 98936 0.01142 395 132488 0.00353 318 98936 0.01142 395 132360 0.00355 395 132360 0.00475 566 132360 0.001106 462 0.01106 0.01106 100</td>	33742 0.08505 266 0.56624 0.56624 340 10580 0.0222 255 80208 0.04923 340 80208 0.04458 266 9.56906 0.04458 266 932338 0.04458 266 937488 0.0601 338 98936 0.01142 399 98936 0.01142 399 937488 0.00583 318 937488 0.003533 395 937488 0.03486 318 937488 0.03486 318 937488 0.00555 395 91528 0.00356 395 925972 0.03486 462 32360 0.00475 566	33742 0.08505 266 0.56624 0.56624 340 10580 0.0222 255 80208 0.04923 340 0.12405 266 323 0.12405 0.12405 386 0.32338 0.04458 266 0.13444 338 318 0.32488 0.0601 338 0.337488 0.01142 395 98936 0.01142 395 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937488 0.03533 318 937538 0.03486 318 9375360 0.03486 463 9325972 0.00549 463 9325973 0.001106 463	33742 0.08505 266 0.56624 0.56624 340 10580 0.0222 255 80208 0.02423 340 0.12405 266 340 0.12405 0.12405 340 0.12405 0.13444 38 0.32338 0.04458 266 0.32488 0.0063 318 98936 0.01442 399 937488 0.0068 318 93937488 0.00353 316 93937488 0.00353 315 93937488 0.00353 316 93937488 0.00353 316 93937488 0.00353 316 93937488 0.00353 316 931528 0.00355 395 91528 0.003496 462 925972 0.00475 566 132360 0.01106 162	33742 0.08505 266 33742 0.56624 255 10580 0.0222 255 80208 0.04923 340 932338 0.04458 266 132338 0.04458 266 132338 0.04458 266 132338 0.04458 266 132348 0.0601 338 132488 0.0068 318 98936 0.01142 395 132488 0.00353 318 98936 0.01142 395 132360 0.00355 395 132360 0.00475 566 132360 0.001106 462 0.01106 0.01106 100
39850 39850 510580 680208 680208 48420 48420	39850 39850 817.1 510580 658.2 680208 658.2 680208 4040 532338 5741.1 676906	39850 817.1 510580 6817.1 510580 658.2 680208 48420 532338 4040 532338 5741.1 676906 54496 537488 31961 637488	9850 817.1 510580 817.1 510580 658.2 680208 4040 532338 4040 532338 54496 537488 31961 637488 31961 637488	39850 817.1 510580 6817.1 510580 658.2 680208 1440 532338 4040 532338 4040 532338 53496 53438 54496 798936 31961 637488 32500 637488	39850 817.1 510580 817.1 510580 817.1 510580 1658.2 680208 18420 532338 4040 532338 4040 532338 53496 53438 54496 798936 31961 637488 31961 637488 38625 791528 8845.3 791528	9850 817.1 510580 817.1 510580 658.2 680208 18420 532338 4040 532338 4040 532338 54496 532348 54496 798936 54496 798936 31961 637488 31961 637488 38625 798936 3845.3 791528 38983 791528	9850 510580 817.1 510580 658.2 680208 18420 532338 4040 532338 741.1 676906 54496 798936 31961 637488 31961 637488 31961 637488 31961 637488 38625 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 38410 925972	9850 817.1 510580 817.1 510580 658.2 680208 48420 532338 4040 532338 4040 532338 54496 537488 51961 637488 31961 637488 31961 637488 38625 791528 3845.3 791528 38983 791528 38440 925972 515200 1132360	9850 817.1 510580 817.1 510580 658.2 680208 18420 532338 4040 532338 741.1 676906 54496 798936 54496 798936 31961 637488 31961 637488 38625 798936 3845.3 791528 3845.3 791528 38983 791528 38410 925972 515203 1132360	9850 817.1 510580 658.2 680208 658.2 680208 18420 532338 4040 532338 741.1 676906 54496 798936 31961 637488 31961 637488 31961 637488 38625 798936 38625 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 38410 925972 38203 1132360 25203 15203 30002 132360	9850 817.1 510580 817.1 510580 658.2 680208 144.0 532338 1741.1 676906 54496 798936 31961 637488 31961 637488 31961 637488 31961 637488 31961 637488 38825 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 3845.3 791528 38000 90002 15200 1132360 25203 74509 90002 74509
559 12398! 532 946817 400 276658 1343 25484:	559 12398 532 946817 532 946817 400 276658 4333 25484 1343 25484 031 84404 128 24574 128 24574 537 27644	559 12398 532 946817 532 946817 400 27665 433 25484 1343 25484 1343 25484 128 25484 031 84404 128 245741 632 22644 794 17319	559 12398 532 946817 532 946817 400 276658 433 25484; 433 25484; 4343 25484; 1343 25484; 128 245741 632 22644; 632 22644; 794 17319; 791 53242; 291 53242;	559 12398 532 946817 532 946817 400 276658 433 25484. 1343 25484. 1343 25484. 1343 25484. 128 245741 128 245741 128 245741 128 22644. 632 22644. 794 17319. 791 53242. 251 45986. 721 17036.	559 12398 532 946817 532 946817 400 276658 1343 25484. 1343 25484. 1343 25484. 128 245741 128 245741 128 22644. 632 22644. 632 22644. 794 17319. 794 17319. 2521 45986. 721 17036. 721 17036. 722 52384.	559 12398 532 946817 532 946817 400 276658 1343 25484: 1343 25484: 1343 25484: 1343 25484: 1343 25484: 128 245741 632 22644! 632 22644! 632 22644! 632 22644! 632 22644! 532 52544! 794 17319! 7521 45986: 7521 45986: 721 17036! 2822 52384! 8682 41389!	559 12398 532 946817 532 946817 400 276658 4333 25484. 1343 25484. 1343 25484. 1343 25484. 1343 25484. 128 245741 632 22644. 632 22644. 632 22644. 632 22644. 532 22644. 532 22644. 53242. 23242. 5521 45986. 552345 523845. 8682 41389. 8265 34984.	559 12398 532 946817 532 946817 400 276658 433 25484; 1343 25484; 1343 25484; 1343 25484; 1319 84404 128 245741 128 245741 632 22644; 632 22644; 632 22644; 794 17319; 794 17319; 794 17319; 794 17319; 794 17319; 794 17319; 794 17319; 794 17319; 794 17036; 721 17036; 722 52384; 8682 41389; 8683 11152! 083 11152!	559 12398 532 946817 532 946817 400 276658 1343 25484: 1343 25484: 031 84404 031 84404 031 84404 128 245741 128 245741 632 226449 632 226449 632 225444 632 225449 794 173196 794 173196 7521 459865 5521 459865 721 170366 721 170366 723 523845 8682 413899 8682 413893 8265 34984 083 11152 8851 84252	559 12398 532 946817 532 946817 400 276658 1343 25484. 1343 25484. 031 84404 128 245741 128 245741 128 245741 632 22644 632 22644 632 22644 632 22644 632 22644 794 17319 794 17319 794 17319 794 17319 794 17319 794 17319 794 17319 791 17036 721 17036 723 523845 8682 41389 8682 41389 8851 84252 8851 84252 5851 71900	559 12398 532 946817 532 946817 400 276658 1343 254843 1343 254844 031 84404 128 245741 128 245741 632 256449 632 226449 632 226449 532 226449 532 226449 532 226449 532 226449 5324 173196 5721 173196 5723 459865 3862 413899 3862 413899 3855 349845 5851 842520 5851 842520 5851 111520 5851 1137745 173745 173745
.01887 538532 .01955 174400 .03994 108434	01887 538532 01855 174400 01955 174400 01955 174400 01955 174400 01955 174400 023994 108434 02216 153128 014006 955633	01887 538532 01955 174400 01955 174400 03994 108434 033954 108434 02139 475031 02216 153128 02216 955632 01304 987794	01887 538532 01955 174400 01955 174400 03994 108434 033994 108434 033994 108434 02139 475031 02216 153128 021304 955633 01304 987794 01161 344293	01887 538532 01955 174400 01955 174400 03994 108434 023195 475031 02216 153128 02216 153128 01304 955632 01406 955632 01304 987794 01161 344291 01147 896722 01447 896722	01887 538532 01955 174400 01955 174401 03994 108434 023195 475031 02216 153128 02216 153128 01304 955632 01406 955632 01304 987794 01161 344291 01161 344291 01147 896722 01194 332283 01194 332283	01887 538532 01955 174400 01955 174400 03994 108434 023195 475031 02216 153128 02216 955632 04406 955632 01161 344291 01161 344291 011447 896721 01194 332282 01194 332282 01194 332282 01194 332282 01317 179368	01887 538532 01955 17440C 01955 17440C 03994 108434 02305 475031 02216 153128 02216 955632 04406 955632 011304 987794 011304 38052 011447 896721 01194 332282 01194 332282 01195 179368 01195 179368 01035 180826	01887 538532 01955 17440C 01955 17440C 03994 108434 03994 108434 02139 475031 02216 153128 02139 475031 021304 987794 01304 987794 01304 987794 01304 987794 01304 987794 01304 987794 01304 987794 01304 38052 01101 344291 01104 332285 01194 332285 011035 180826 00881 64408	01887 538532 01955 174400 01955 174400 03994 108434 023195 475031 02139 475031 02216 153128 01406 955632 01161 344291 01164 38052 011447 896721 01194 332282 01194 332282 01195 179368 011035 180826 010317 179368 010317 179368 010317 179368 01035 180826 01035 180826 01035 180826 02148 378685	01887 538532 01955 17440C 01955 17440C 03994 108434 023916 475031 02216 153128 02216 955632 014406 955632 01161 344291 01161 344291 011447 896721 01194 332282 01194 332282 01194 332282 01194 332282 01195 188052 011035 180826 010381 64408 .02148 378685	01887 538532 01955 17440C 01955 17440C 03994 108434 03994 108434 02139 475031 02216 153128 02216 153128 02139 475031 021406 955632 01304 987794 01161 344291 01164 332282 01194 332282 01194 332282 011035 180652 011035 180826 010317 179368 010317 179368 01135 180826 010351 64408 02148 378685 02148 378685
3409.6 0.015 43312 0.035	10103 0.0103 3409.6 0.012 43312 0.035 10163 0.021 3393 0.022 42104 0.042	10103 0.010 3409.6 0.019 43312 0.039 10163 0.021 3393 0.022 42104 0.044 12879 0.015	3409.6 0.019 3409.6 0.019 43312 0.035 10163 0.021 3393 0.022 3393 0.022 12879 0.015 12879 0.015 3997.2 0.011	3409.6 0.019 3409.6 0.019 43312 0.039 10163 0.021 3393 0.022 3393 0.022 3393 0.021 3397.2 0.011 58339 0.031 58339 0.031 12978 0.012	10103 0.010 3409.6 0.019 43312 0.035 10163 0.021 3393 0.022 3393 0.022 3393 0.022 3393 0.013 12879 0.013 3997.2 0.011 58339 0.031 3967.6 0.011	10103 0.0103 3409.6 0.019 43312 0.035 10163 0.021 3393 0.022 3393 0.022 3393 0.021 3393 0.013 12879 0.013 3997.2 0.011 58339 0.031 12978 0.012 3967.6 0.011 56850 0.033	10103 0.0103 3409.6 0.013 43312 0.035 10163 0.021 3393 0.022 3393 0.022 3393 0.021 3393 0.013 12879 0.013 3997.2 0.011 3967.6 0.011 12978 0.012 12978 0.012 12978 0.011 12978 0.011 12978 0.011 12978 0.011 12978 0.011 12978 0.011 12978 0.011 12978 0.011 12978 0.011 56850 0.011 56850 0.011	10103 0.010 3409.6 0.019 43312 0.035 10163 0.021 3393 0.022 3393 0.022 3393 0.022 3393 0.013 12879 0.013 3997.2 0.011 58339 0.012 3967.6 0.011 56850 0.03 18707 0.016 5676 0.005	10103 0.0103 3409.6 0.019 43312 0.033 10163 0.021 3393 0.022 3393 0.022 3393 0.013 3393 0.013 12879 0.011 3997.2 0.011 3997.2 0.011 3997.2 0.012 3997.2 0.011 3997.2 0.011 58339 0.012 3967.6 0.012 12978 0.012 3967.6 0.012 56850 0.03 18707 0.012 56350 0.012 3967.6 0.012 3967.6 0.012 81350 0.021	10103 0.010 3409.6 0.019 43312 0.032 10163 0.021 3393 0.021 3393 0.022 3397.2 0.013 12879 0.013 3997.2 0.014 12879 0.013 3967.6 0.014 12978 0.014 12978 0.014 12978 0.013 3967.6 0.014 12978 0.014 12978 0.014 12978 0.014 3967.6 0.014 12978 0.014 3967.6 0.014 12978 0.014 31570 0.012 5676 0.002 81350 0.021	10103 0.010 3409.6 0.019 43312 0.039 10163 0.021 3393 0.022 3393 0.022 3397.2 0.011 3997.2 0.011 58339 0.014 12879 0.011 3967.6 0.014 12978 0.014 12879 0.014 12879 0.014 3967.6 0.014 18707 0.016 5676 0.002 81350 0.021
0.34539 34 1.33896 45	0.34539 34 1.33896 45 0.19422 10 0.42888 3 1.48675 45	0.34539 34 1.33896 45 0.19422 10 0.42888 3 1.48625 47 0.05922 17	0.34539 34 1.33896 43 0.19422 10 0.42888 3 1.48625 42 0.05922 12 0.07917 39	0.34539 34 1.33896 43 1.33895 43 0.19422 10 0.42888 3 1.48625 47 0.05922 12 0.07917 39 0.3818 56 0.38286 12	0.34539 34 1.33896 43 0.19422 10 0.19422 11 0.42888 3 1.48625 42 1.48625 12 0.05922 12 0.07917 39 0.3818 56 0.3818 56 0.08286 17 0.07204 39	0.34539 34 1.33896 43 0.19422 10 0.19422 10 0.19422 10 0.19422 11 0.19425 42 1.48625 42 0.05922 12 0.07917 39 0.03818 56 0.08286 12 0.08286 12 0.07204 35 0.038154 56	0.34539 34 1.33896 43 0.19422 10 0.19422 10 0.19422 10 0.19422 11 0.19422 12 0.19422 12 0.42888 3 1.48625 42 1.48625 12 0.05922 12 0.07917 39 0.07204 39 0.08286 12 0.07204 39 0.38154 56 0.38154 56 0.038154 56 0.045155 18	0.34539 34 1.33896 43 0.19422 10 0.19422 11 0.19422 12 0.19422 12 0.19422 12 0.42888 3 1.48625 42 1.48625 12 0.05922 12 0.07917 39 0.07917 39 0.07204 39 0.3818 55 0.38156 12 0.08286 12 0.035154 56 0.03572 5 0.03572 5	0.34539 34 1.33896 43 1.33896 43 0.19422 10 0.19422 11 0.19425 42 1.48625 42 1.48625 42 0.05922 12 0.07917 39 0.03818 58 0.3818 58 0.38154 56 0.38154 56 0.03515 12 0.03572 5 0.03572 5 0.03572 5 0.03572 5 0.03572 5 0.03572 5 0.03572 5 0.12492 8:	0.34539 34 1.33896 43 0.19422 10 0.19422 12 0.19422 12 0.19422 12 0.19422 12 0.3818 3 0.05922 12 0.05922 12 0.07204 39 0.3818 56 0.38154 56 0.08286 12 0.08286 12 0.07204 39 0.03572 5 0.03572 5 0.12492 82 0.12492 82	0.34539 34 1.33896 43 1.33895 43 0.19422 10 0.19422 12 0.19422 12 0.42888 3 1.48625 42 1.48625 42 0.05922 12 0.05922 12 0.08286 12 0.3818 56 0.3818 56 0.3818 56 0.3818 56 0.3818 56 0.08286 12 0.08286 12 0.03572 5 0.03572 5 0.12492 8: 0.12492 8:
86624	86624 20325.8 6786.04 84208	86624 20325.8 6786.04 84208 25757.2	86624 20325.8 6786.04 84208 25757.2 7994.36	86624 20325.8 6786.04 84208 25757.2 7994.36 116678 116678	86624 20325.8 6786.04 84208 25757.2 7994.36 77994.36 116678 25955.2 25955.2 7935.12	86624 20325.8 6786.04 84208 25757.2 7994.36 77994.36 77935.12 7935.12 7935.12 113700	86624 20325.8 6786.04 84208 25757.2 7994.36 116678 116678 116678 116678 116678 116578 25955.2 7935.12 113700 113700 37413	86624 20325.8 6786.04 84208 25757.2 7994.36 116678 116678 25955.2 7935.12 113700 11352 11352	86624 86624 20325.8 2 20325.8 6 6786.04 6 84208 3 7994.36 7 7994.36 1 7994.36 1 7935.12 7 7935.12 1 113700 1 37413 1 11352 1 162700 1	86624 20325.8 6786.04 84208 84208 25757.2 7994.36 116678 116678 116678 116678 116678 113700 37413 11352 11352 11352 11352 11352	86624 20325.8 20325.8 6786.04 84208 84208 25757.2 7994.36 116678 116678 7935.12 113700 37413 11352 11352 11352
0	0 100 25	0 100 25 0 100	0 100 25 25 100 25	0 100 25 25 100 100 25 25 0 0	0 100 25 25 100 100 25 25 25	0 100 25 25 100 100 25 25 25 25 25 0 0	0 100 25 25 100 100 100 25 25 25 0 100	0 100 25 25 100 100 25 25 25 25 25 25 25	0 100 25 25 100 100 100 100 25 25 25 25 25 0 0	0 100 25 25 100 100 100 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 100 100	0 100 25 25 100 100 100 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25
ļ	m m m	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>
ł	10 10	10 10 20	10 10 20 20 20	10 10 20 20 20 10	10 10 20 20 20 10 10	10 10 20 20 20 10 10 10	10 10 10 10 20 20 20 20 10 10 20 20	10 10 10 10 10 10 10 10 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20	10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 1	10 10<	10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 1
00	30 20	3 30 30		4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	4 40 33 30 30 30 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40	4 4 4 3	4 4	30 30<	30 30<	30 30 30 40 40 30 30	30 30<

Έπειτα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται και απεικονίζονται διαγραμματικά για την ορθότερη εξαγωγή συμπερασμάτων. Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν παρατίθενται τα αποτελέσματα σχηματικά και στη συνέχεια σχολιάζονται ως προς το πως επηρεάζονται από τις διάφορες παραμέτρους του προβλήματος.

4.2 Αποτελέσματα για φρέαρ διαμέτρου D=5m, μήκους L=10m (L/D=2)[AK5]

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα διαγράμματα φόρτισης μετατόπισης προσομοιωμάτων με λόγο L/D=2 και εκκεντρότητα e=25 και e=100. Τα φρέατα εξετάστηκαν για τις διάφορες περιπτώσεις βραχόμαζας που αναφέρθηκαν παραπάνω (υποκεφάλαιο 3.2.1). Σε κάθε διάγραμμα απεικονίζονται ομαδοποιημένα οι αποκρίσεις φρεάτων με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ίδιο περιβάλλον υλικό, με διαφοροποίηση στην ύπαρξη ή μη ομάδων άκαμπτων συνδέσμων για τη δέσμευση της ευκαμψίας τους. Σημειώνονται η αρχική και μέση δυσκαμψία (μετακινησιακή ή στροφική ανάλογα το διάγραμμα) καθώς και το οριακό φορτίο.



Σχήμα 4-[Ακ6]**1.** Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=10MPa, GSI=20. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω)



Σχήμα 4-2. Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=20MPa, GSI=20. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).



Σχήμα 4-3. Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=10MPa, GSI=30. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).



Σχήμα 4-4. Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=20MPa, GSI=30. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).



Σχήμα 4-5 Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=10MPa, GSI=40. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).



Σχήμα 4-6. Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=20MPa, GSI=40. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).



Σχήμα 4-7. Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=40MPa, GSI=40. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).

4.3 Αποτελέσματα για φρέαρ διαμέτρου D=5m, μήκους L=15m (L/D=3)

Κατά αντιστοιχία, στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα διαγράμματα φόρτισης μετατόπισης προσομοιωμάτων με λόγο L/D=3 και εκκεντρότητα e=25 και e=100. Τα φρέατα εξετάστηκαν για τις διάφορες περιπτώσεις βραχόμαζας που αναφέρθηκαν παραπάνω (υποκεφάλαιο 3.2.1). Σε κάθε διάγραμμα απεικονίζονται ομαδοποιημένα οι αποκρίσεις φρεάτων με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ίδιο περιβάλλον υλικό, με διαφοροποίηση στην ύπαρξη ή μη ομάδων άκαμπτων συνδέσμων για τη δέσμευση της ευκαμψίας τους. Σημειώνονται η αρχική και μέση δυσκαμψία (μετακινησιακή ή στροφική ανάλογα το διάγραμμα) καθώς και το οριακό φορτίο.



Σχήμα 4-8. Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=10MPa, GSI=20. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).



Σχήμα 4-9. Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=20MPa, GSI=20. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).



Σχήμα 4-10. Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=10MPa, GSI=30. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).



Σχήμα 4-11. Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=20MPa, GSI=30. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).



Σχήμα 4-12. Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=10MPa, GSI=40. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).



Σχήμα 4-13. Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=20MPa, GSI=40. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).


Σχήμα 4-14. Καμπύλες Οριζόντιου φορτίου – Οριζόντιας μετακίνησης (αριστερά) και Ροπής – Στροφής κεφαλής (δεξιά) για βραχόμαζα με χαρακτηριστικά σ_{ci}=40MPa, GSI=40. Εκκεντρότητα φόρτισης e=25m (πάνω) και e=100m (κάτω).

4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Για την εγκυρότερη διαπίστωση της επίδρασης του περιβάλλοντος υλικού, της γεωμετρίας των φρεάτων και της εκκεντρότητας της φόρτισης, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων φρεάτων απεικονίζονται εκ νέου, συναρτίσει της εκάστοτε εξεταζόμενης παράμετρου. Στο τέλος κάθε υποκεφαλαίου συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα της μελέτης.

4.4.1 Η επιρροή της βραχόμαζας

Αρχικά, συντάχθηκαν διαγράμματα οριακού φορτίου – αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και μετακινησιακής και στροφικής δυσκαμψίας (αρχικής και μέσης) – Μέτρου ελαστικότητας βραχόμαζας. Τα αποτελέσματα διαχωρίστηκαν ανα περίπτωση με βάση την εκκεντρότητα της φόρτισης.



Σχήμα 4-15. Διαγράμματα Οριζόντιου φορτίου αστοχίας – Αντοχής βραχόμαζας σε μονοαξονική θλίψη για εκκεντρότητα e=25m (αριστερά) e=100m (δεξιά).



Σχήμα 4-16. Διαγράμματα Αρχικής δυσκαμψίας – Μέτρου ελαστικότητας για εκκεντρότητα e=25m (αριστερά) e=100m (δεξιά).



Σχήμα 4-17. Διαγράμματα Μέσης δυσκαμψίας – Μέτρου ελαστικότητας για εκκεντρότητα e=25m (αριστερά) e=100m (δεξιά).



Σχήμα 4-18. Διαγράμματα Αρχικής στροφής – Μέτρου ελαστικότητας για εκκεντρότητα e=25m (αριστερά) e=100m (δεξιά).



Σχήμα 4-19. Διαγράμματα Μέσης στροφής – Μέτρου ελαστικότητας για εκκεντρότητα e=25m (αριστερά) e=100m (δεξιά).

Σχολιασμός επιρροής βραχόμαζας

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων που παρατίθενται για λόγο L/D=2 και 3 και για εκκεντρότητα e=25m [AK7] και 100m παρατηρούνται τα εξής:

- Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με και χωρίς επιβαλλόμενη δυσκαμψία (MPC noMPC) για σταθερό λόγο L/D και σταθερή εκκεντρότητα ε παρατηρείται πως ενώ για ασθενείς βραχόμαζες παρουσιάζεται παρόμοια αρχική και μέση μετακινησιακή, αλλά και στροφική δυσκαμψία. Όσο η ποιότητα της βραχόμαζας αυξάνει, τα προσομοιώματα με χρήση MPC παρουσιάζουν σημαντικά πιο δύσκαμπτη συμπεριφορά σε σύγκριση με τα συμβατικά όπου ερευνάται η σχετική δυσκαμψία φρέατος–βραχόμαζας.
- Επεκτείνοντας τη σύγκριση στο οριακό φορτίο, παρατηρείται αντίστοιχη τάση με τις διαφορές των δύο μοντέλων να συγκεντρώνονται και πάλι στις καλύτερες ποιοτικά βραχόμαζες.
- Η τάση αυτή δεν παρουσιάζει διαφορές για διαφορετικές τιμές λόγου L/D και εκκεντρότητας e.
- Για τα (ρεαλιστικότερα) μοντέλα χωρίς MPC με σταθερό λόγο L/D και σταθερή εκκεντρότητα e παρατηρείται σταθερή γραμμική αύξηση του οριακού φορτίου Hult καθώς η ποιότητα της βραχόμαζας βελτιώνεται.
- Για σταθερό λόγο L/D σταθερή εκκεντρότητα ε παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση στην αρχική αλλά και τη μέση δυσκαμψία του φρέατος καθώς η ποιότητα της βραχόμαζας βελτιώνεται.
- Για σταθερό λόγο L/D σταθερή εκκεντρότητα e παρατηρείται επίσης, αύξηση στην αρχική αλλά και τη μέση δυσκαμψία του φρέατος.
- Η αυξητική τάση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής του φρέατος δεν παρουσιάζει διαφορές για τις διάφορες τιμές λόγου L/D ή εκκεντρότητας e.

4.4.2 Η επιρροή του λόγου L/D

Έπειτα, συντάχθηκαν διαγράμματα οριακού φορτίου αλλά και μετακινησιακής και στροφικής δυσκαμψίας (αρχικής και μέσης) – Λόγου L/D. Τα αποτελέσματα διαχωρίστηκαν και πάλι ανα περίπτωση με βάση την εκκεντρότητα της φόρτισης.



Σχήμα 4-20. Διαγράμματα Οριζόντιου φορτίου αστοχίας – Λόγου L/D για εκκεντρότητα e=25m (αριστερά) e=100m (δεξιά).



Σχήμα 4-21. Διαγράμματα Αρχικής δυσκαμψίας – Λόγου L/D για εκκεντρότητα e=25m (αριστερά) e=100m (δεξιά).



Σχήμα 4-22. Διαγράμματα Μέσης δυσκαμψίας – Λόγου L/D για εκκεντρότητα e=25m (αριστερά) e=100m (δεξιά).



Σχήμα 4-23. Διαγράμματα Αρχικής στροφής- Λόγου L/D για εκκεντρότητα e=25m (αριστερά) e=100m (δεξιά).



Σχήμα 4-24. Διαγράμματα Μέσης στροφής- Λόγου L/D για εκκεντρότητα e=25m (αριστερά) e=100m (δεξιά).

Σχολιασμός της επιρροής του λόγου L/D

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων που παρατίθενται για ασθενή βραχόμαζα σ_{cm}=1.04 και καλή βραχόμαζα σcm=2.65 και για εκκεντρότητα e=25 και 100 παρατηρούνται τα εξής:

- Για σταθερό σ_{cm} και σταθερή εκκεντρότητα ε παρατηρείται πως αυξάνεται το οριακό φορτίο του φρέατος καθώς αυξάνει ο λόγος L/D.
- Για σταθερό σ_{cm} και σταθερή εκκεντρότητα ε παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση στην αρχική αλλά και τη μέση μετακινησιακή δυσκαμψία του φρέατος καθώς αυξάνει ο λόγος L/D.
- Για σταθερό σ_{cm} και σταθερή εκκεντρότητα ε παρατηρείται επίσης αύξηση στην αρχική αλλά και τη μέση στροφική δυσκαμψία του φρέατος.
- Παρατηρείται επίσης αύξηση στην επιρροή της ποιότητας της βραχόμαζας επί της αντοχή του φρέατος για αύξηση του λόγου L/D. Για μεγαλύτερο λόγο L/D και σταθερή εκκεντρότητα έχουμε μεγαλύτερη διακύμανση οριακού φορτίου όσο καλυτερεύει η ποιότητα της βραχόμαζας.
- Αντίθετα η επιρροή της εκκεντρότητας παρουσιάζει σταθερότητα, μειώνοντας σε κάθε περίπτωση το οριακό φορτίο με τον ίδιο ρυθμό καθώς αυξάνει το e.
 Ισχύει Hult(L/D=2)= 0,35Hult(L/D=3) περίπου

 $K_{ini}(L/D=2)=0,9 K_{ini}(L/D=3)$ $K_{50}(L/D=2)=0,8K_{50}(L/D=3)$ $C_{ini}(L/D=2)=0,9Ci_{ni}(L/D=3)$ $C_{50}(L/D=2)=0,85C_{50}(L/D=3)$

4.4.24.4.3 Η επιρροή της εκκεντρότητας

Τέλος, εξετάστηκε η επίδραση της εκκεντρότητας της φόρτισης μέσω των αντίστοιχων διαγραμμάτων. Τα αποτελέσματα διαχωρίστηκαν ανα περίπτωση με βάση το λόγο των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των φρεάτων (L/D)





Σχήμα 4-26. Διαγράμματα Αρχικής δυσκαμψίας – Εκκεντρότητας <u>για</u>λόγο L/D=2 (αριστερά) L/D=3 (δεξιά).



<u>(αριστερά) </u>L/D=3<u>(δεξιά).</u>



<u>(αριστερά) L/D=3 (δεξιά).</u>





[AK8]

Σχολιασμός της επιρροής της εκκεντρότητας

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων που παρατίθενται για σταθερό λόγο L/D και σταθερό σ_{cm} παρατηρούνται τα εξής:

- Για σταθερό λόγο L/D και σταθερό σ_{cm} παρατηρείται πως μειώνεται το οριακό φορτίο του φρέατος καθώς αυξάνει η εκκεντρότητα e. Αυτό συμβαίνει επειδή καθώς αυξάνει η εκκεντρότητα αυξάνεται η επιρροή της ροπής M στην αντοχή της βραχόμαζας, επιτρέποντας έτσι μικρότερο οριακό φορτίο.
- Για σταθερό σ_{cm} και σταθερή εκκεντρότητα ε παρατηρείται αντίστοιχη μείωση στην αρχική αλλά και τη μέση μετακινησιακή δυσκαμψία του φρέατος καθώς αυξάνει η εκκεντρότητα e.

- Για σταθερό σ_{cm} και σταθερή εκκεντρότητα e παρατηρείται αύξηση στην αρχική αλλά και τη μέση στροφική δυσκαμψία του φρέατος.
- Παρατηρείται επίσης αύξηση στην διακύμανση οριακού φορτίου όσο μειώνεται η εκκεντρότητα e.

Ισχύει e₁=e₂/4

 $H_{ult}(e_1) = 0,35H_{ult}(e_2) περίπου$ $M_{ult}(e_1) = 0,9M_{ult}(e_2)$ $K_{ini}(e_1) = 3K_{ini}(e_2)$ $K_{50}(e_1) = 3K_{50}(e_2)$ $C_{ini}(e_1) = 0,9C_{ini}(e_2)$ $C_{50}(e_1) = 0,9C_{50}(e_2)$

 Η τάση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής του φρέατος δεν παρουσιάζει διαφορές για τις διάφορες τιμές λόγου L/D ή ποιότητας βραχόμαζας.

5 Συγκριτική Διερεύνηση Δυσκαμψίας Φρεάτων Πακτώσεως

5.1 Εισαγωγή

Ύστερα από την αριθμητική διερεύνηση των φρεάτων θεωρείται σκόπιμο να συγκριθούν τα αποτελέσματα με βιβλιογραφικές μεθόδους ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια των τύπων που προτείνουν. Στο κεφάλαιο 2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέθοδοι αυτές. Επιλέγεται η μέθοδος Carter- Kulhawy καθώς θεωρείται η πιο σύγχρονη και ακριβής εξ αυτών. Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν αρχικά αναλύεται διεξοδικά η λογική της μεθόδου και στη συνέχεια συγκρίνεται διαγραμματικά με τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 4.

5.2 Η μέθοδος Carter- Kulhawy

5.2.1 Γενικά στοιχεία

Σύμφωνα με τους Carter- Kulhawy το φρέαρ προσομοιώνεται με ελαστικό κυλινδρικό κέλυφος ενεργού μέτρου ελαστικότητας Young (E_e), λόγου Poisson (v_e), μήκους (L) και διαμέτρου (D). Για άκαμπτο φρέαρ με καμπτική δυσκαμψία ίση με (EI)e, το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του Young υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{E}_{\mathbf{e}} = \frac{(\mathbf{EI})_{\mathbf{e}}}{\frac{\pi \mathbf{D}^4}{\mathbf{64}}} \tag{5-1}$$

Το ελαστικό φρέαρ θεωρείται εγκιβωτισμένο σε ομοιογενή, ισότροπο, ελαστικό βραχώδη ή ελαστικό ημιχώρο με ιδιότητες E_r και v_r . Το φρέαρ υπόκειται σε δεδομένη εγκάρσια φόρτιση κεφαλής (Η) και ροπή (Μ).

Ως προς την παραμορφωμένη κατάστασή του, έχουν προταθεί συγκεκριμένες εκφράσεις κλειστού τύπου για εύκαμπτα και άκαμπτα φρέατα. Οι εξισώσεις έχουν εξαχθεί από τα αποτελέσματα αναλύσεων με αξονοσυμμετρικά πεπερασμένα στοιχεία υποβαλλόμενα σε μη συμμετρική φόρτιση. Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάστηκε από τον Wilson (1965) και είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση εύκαμπτων πασσάλων από τον Randolph (1977, 1981). Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οκτακομβικά, τετραπλευρικά και ισοπαραμετρικά, και μέσω της ολοκλήρωσης κατά Gauss προσομοίωσαν το τρισδιάστατο πρόβλημα.

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

$$\mathbf{G}^* = \mathbf{G}_r \left(\mathbf{1} + \frac{3\mathbf{v}_r}{4} \right) \tag{5-2}$$

όπου

 G_r : το μέτρο διάτμησης της βραχόμαζας.

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

$$G_r = \frac{E_r}{2(1+v_r)}$$
(5-3)

Για ομοιογενή βραχόμαζα διαπιστώθηκε ότι η οριζόντια μετακίνηση (u) και η στροφή (θ) του φρέατος στο επίπεδο της επιφάνειας του βράχου εξαρτάται από τη σχετική δυσκαμψία (E_e/G^*) και από τη γεωμετρία του φρέατος (L/D). Συγκεκριμένα, για να προσδιοριστεί η δυκαμψία των φρεάτων, οι Carter και Kulhawy χάραξαν διαγράμματα αδιαστατοποιημένων μετακινήσεων και στροφών συναρτήσει των λόγων E_e/G^* και L/D (Σχήμα 5-1, Σχήμα 5-2, Σχήμα 5-3). Στα διαγράμματα αυτά προσδιορίστηκαν τα κάτω όρια ανεξαρτητοποίησης παραμορφώσεων από τους λόγους L/D και E/G* αντίστοιχα (οριζοντίωση και καμπυλών) και προέκυψαν τα κριτήρια δυσκαμψίας των φρεάτων– (εστιγμένες καμπύλες στα διαγράμματα). Οι μετακινήσεις και οι στροφές υπολογίστηκαν από ελαστικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Σημειώνεται πως στο εξής ο λόγος (E_e/G^*) θα συμβολίζεται με (E/G*) όπου (E): το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του φρέατος (οπλισμένο σκυρόδεμα).



Σχήμα 5-1. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής συναρτήσει των λόγων: (a) E/G* και (b) L/D.



Σχήμα 5-2. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής συναρτήσει των λόγων (a) E/G* και (b) L/D.



Σχήμα 5-3. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα και στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής συναρτήσει των λόγων (a) E/G* και (b) L/D.

5.2.2 Σχέσεις υπολογισμού μετακινήσεων και στροφών

ο Εύκαμπτα φρέατα

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

$$\frac{L}{D} \ge \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{2/7} \tag{5-4}$$

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

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

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

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

$$L/D \ge 10$$

 $10^2 \leq \mathrm{E_e/E_r} \leq 10^6$

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

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

 $L/D \ge 1$

ο Άκαμπτα φρέατα

Σε πολλές περιπτώσεις συναντώνται φρέατα πακτώσεως σε μαλακό βράχο ή έδαφος, τα οποία συμπεριφέρονται ως πλήρως άκαμπτα στοιχεία. Σε αυτές τις περιπτώσεις η απόκριση του φρέατος εξαρτάται μόνο από το λόγο των διαστάσεών του (L/D) και το λόγο Poisson (v_r) και όχι από τη σχετική δυσκαμψία φρέατος βραχόμαζας (E/G^{*}). Το φρέαρ θεωρείται πλήρως άκαμπτο όταν:

$$\frac{L}{D} \le 0.05 \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{1/2}$$
(5 - 7)

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

$$u = 0, 4 \left(\frac{H}{G^*D}\right) \left(\frac{2L}{G^*}\right)^{-1/3} + 0, 3 \left(\frac{M}{G^*D^2}\right) \left(\frac{2L}{G^*}\right)^{-7/8}$$
(5-8)

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

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

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

όπου

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

Η αξιοπιστία των παρακάτω σχέσεων αυξάνεται στο εξής εύρος παραμέτρων:

$$1 \le L/D \le 10$$

 $E_e/E_r \ge 1$

Ο Φρέατα ενδιάμεσης δυσκαμψίας

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

$$0, 5\left(\frac{E_{e}}{G^{*}}\right)^{1/2} < \frac{L}{D} < \left(\frac{E_{e}}{G^{*}}\right)^{2/7}$$
(5 - 11)

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

$$u = 1,25max \begin{bmatrix} 0,50 \frac{H}{G^*D} \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{-1/7} + 1,08 \left(\frac{M}{G^*D^2}\right) \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{-3/7}; \\ 0,40 \frac{H}{G^*D} \left(\frac{2L}{D}\right)^{-1/3} + 0,30 \left(\frac{M}{G^*D^2}\right) \left(\frac{2L}{D}\right)^{-7/8} \end{bmatrix}$$
(5 - 12)
$$\theta = 1,25max \begin{bmatrix} 1,08 \frac{H}{G^*D} \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{-3/7} + 6,40 \left(\frac{M}{G^*D^3}\right) \left(\frac{E_e}{G^*}\right)^{-5/7}; \\ 0,30 \frac{H}{G^*D^2} \left(\frac{2L}{D}\right)^{-7/8} + 0,80 \left(\frac{M}{G^*D^3}\right) \left(\frac{2L}{D}\right)^{-5/3} \end{bmatrix}$$
(5 - 13)

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

$$z_{c} = \frac{u}{\theta}$$
(5 - 14)

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

5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με καμπύλες Carter-Kulhawy για άκαμπτα φρέατα

Οι θεμελιώσεις φρεάτων πακτώσεως λογίζονται εν γένει δύσκαμπτες, καθώς οι κύριες διαστάσεις τους (διάμετρος D και μήκος L) αποτελούν συγκρίσιμα μεγέθη, ασχέτως δυσκαμψίας φρέατος-βραχόμαζας. Λαμβάνοντας υπόψη τη θεώρηση αυτή αρχικά συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων του κεφαλαίου 4 με τις θεωρητικές καμπύλες των Carter και Kulhawy. Θεωρείται σκόπιμο να εξεταστούν μόνο τα αποτελέσματα που αφορούν τη φόρτιση φρέατος πεπερασμένης σχετικής δυσκαμψίας, καθώς αντιπροσωπεύουν το φυσικό πρόβλημα. Παρακάτω παρατίθενται σχηματικά τα αδιαστατοποιημένα –ως προς τα αποτελέσματα.



Σχήμα 5-4. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=2 (αριστερά) και L/D=3 (δεξιά).



Σχήμα 5-5. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση τη μέση δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=2 (αριστερά) και L/D=3 (δεξιά).



Σχήμα 5-6. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία– Λόγου e/D για λόγο L/D=2 (αριστερά) και L/D=3 (δεξιά).



Σχήμα 5-7. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση τη μέση δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=2 (αριστερά) και L/D=3 (δεξιά).



Σχήμα 5-8. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου L/D για λόγο e/D=0 (πάνω αριστερά) e/D=5 (πάνω δεξιά) και e/D=20 (κάτω αριστερά).



Σχήμα 5-9. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση την μέση δυσκαμψία – Λόγου L/D για λόγο e/D=0 (πάνω αριστερά) e/D=5 (πάνω δεξιά) και e/D=20 (κάτω αριστερά).



Σχήμα 5-10. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου L/D για λόγο e/D=5 (αριστερά) και e/D=20 (δεξιά).



Σχήμα 5-11. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση τη μέση – Λόγου L/D για λόγο e/D=5 (αριστερά) και e/D=20 (δεξιά).

ο Συμπεράσματα

- Για άκαμπτα φρέατα, οι Carter και Kulhawy προτείνουν μία θεωρητική καμπύλη οριακών παραμορφώσεων, ανεξάρτητη της σχετικής δυσκαμψίας φρέατος – βραχόμαζας E/G*.
- Η θεωρητική καμπύλη κατά Carter και Kulhawy είναι γραμμικά αυξανόμενη όταν εξετάζονται οι οριακές μετακινήσεις συναρτήσει του λόγου e/D ενώ σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις παρουσιάζει παραβολικά πτωτική τάση λόγω των μειωτικών συντελεστών στον τύπο.
- Είναι προφανές ότι για φρέατα με εκκεντρότητα φορτίου e=0 και επομένως μηδενική ροπή απουσιάζουν αποτελέσματα που αφορούν τη στροφή.

 Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι οι θεωρητικές μέγιστες μετατοπίσεις κατά Carter και Kulhawy εμφανίζουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, η αδιαστατοποίηση με βάση τις μέσες στιβαρότητες παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σύγκριση με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Γεννώνται έτσι ερωτήματα κατά πόσο είναι εύλογο να θεωρείται δύσκαμπτη η συμπεριφορά των φρεάτων που εξετάζονται ως προς τις δεδομένες βραχόμαζες.

5.4 Οριοθέτηση ακαμψίας φρεάτων πακτώσεως

5.4.1 Εισαγωγή

Η θεώρηση δύσκαμπτης συμπεριφοράς του φρέατος στο υποκεφάλαιο 5.3 έγινε μη λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική δυσκαμψία φρέατος-βραχόμαζας (E/G*). Στο παρόν υποκεφάλαιο επιχειρείται ένας ακριβέστερος χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς των φρεάτων χρησιμοποιώντας τόσο τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 4 (προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων) όσο και των εμπειρικών σχέσεων του Randololph (προσδιορισμός απόλυτα εύκαμπτων φρεάτων).

5.4.2 Προσδιορισμός άκαμπτων φρεάτων

Τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 4 περιλαμβάνουν διαγράμματα φόρτισης – παραμόρφωσης των φρεάτων με και χωρίς επιβαλλόμενη δυσκαμψία. Αντιπαραβάλλοντας και τα διαγράμματα αυτά χαρακτηρίζονται ως άκαμπτα εκείνα στα οποία η συμπεριφορά είναι πρακτικά ίδια. Παρατηρείται πως η άκαμπτη συμπεριφορά των φρεάτων εντοπίζεται αποκλειστικά σε αυτά με λόγο L/D=2 και ασθενή σχετικά ποιότητα βραχόμαζας. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα φρέατα τα οποία ανταποκρίνονται στο παραπάνω κριτήριο:

Πίνακας 5-1. Συγκεντρωτικός πίνακας άκαμπτων φρεάτων σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αριθμητικής διερεύνησης.

L/D	GSI	σci	е
		(MPa)	
2	20	10	100
2	20	10	25
2	20	20	100
2	20	20	25
2	30	10	100
2	30	10	25
2	40	10	100
2	40	10	25

Στα επόμενα διαγράμματα αντιπαραβάλλονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus με τα αποτελέσματα των θεωρητικών σχέσεων των Carter και Kulhawy για άκαμπτα φρέατα.



Σχήμα 5-12. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=2.



Σχήμα 5-13. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση μέση δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=2.



Σχήμα 5-14. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία– Λόγου e/D για λόγο L/D=2.



Σχήμα 5-15. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση τη μέση δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=2.



Σχήμα 5-16. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου L/D για λόγο e/D=0 (πάνω αριστερά) e/D=5 (πάνω δεξιά) και e/D=20 (κάτω αριστερά).



Σχήμα 5-17. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση τη μέση δυσκαμψία – Λόγου L/D για λόγο e/D=0 (πάνω αριστερά) e/D=5 (πάνω δεξιά) και e/D=20 (κάτω αριστερά).



Σχήμα 5-18. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου L/D για λόγο e/D=5 (αριστερά) και e/D=20 (δεξιά).



Σχήμα 5-19 Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση τη μέση δυσκαμψία – Λόγου L/D για λόγο e/D=5 (αριστερά) και e/D=20 (δεξιά)

Συμπεράσματα

- Το σύνολο των φρεάτων που χαρακτηρίζονται ως άκαμπτα ύστερα από σύγκρισή τους με προσομοιώματα επιβαλλόμενης δυσκαμψίας συγκεντρώνεται σε τιμές λόγου L/D=2 και θεμελίωση σε χαμηλής σχετικά ποιότητας βραχόμαζα.
- Η θεωρητική καμπύλη κατά Carter και Kulhawy είναι γραμμικά αυξανόμενη όταν εξετάζονται οι οριακές μετακινήσεις συναρτήσει του λόγου e/D ενώ σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις παρουσιάζει παραβολικά πτωτική τάση λόγω των μειωτικών συντελεστών στον τύπο.
- Είναι προφανές ότι για φρέατα με εκκεντρότητα φορτίου e=0 και επομένως, μηδενική ροπή απουσιάζουν αποτελέσματα που αφορούν τη στροφή.
- Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι οι θεωρητικές μέγιστες μετατοπίσεις κατά Carter και Kulhawy εμφανίζουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα αποτελέσματα των αναλύσεων ακόμα και για άκαμπτα φρέατα τόσο ως προς την επιρροή του λόγου e/D όσο και ως προς την επιρροή του λόγου L/D. Πιο συγκεκριμένα, η αδιαστατοποίηση με βάση τις μέσες δυσκαμψίες παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σύγκριση με τα θεωρητικά αποτελέσματα.
- Μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται στα αποτελέσματα που αφορούν την επιρροή του λόγου e/D. Το σφάλμα αυξάνεται με την αύξηση του λόγου.
- Κρίνεται σκόπιμη η τροποποίηση των θεωρητικών καμπύλων κατά Carter και Kulhawy ώστε να προσδιορίζουν ακριβέστερα τη συμπεριφορά των άκαμπτων φρεάτων.

5.4.3 Προσδιορισμός των απολύτως εύκαμπτων φρεάτων με βάση τους τύπους του Randolph

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω (Σχέση 5-4), σύμφωνα με τον Randolph απολύτως εύκαμπτα χαρακτηρίζονται τα φρέατα των οποίων ο λόγος L/D ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση:

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

Εφαρμόζοντας τη σχέση αυτή στα προσομοιώματα που μελετώνται στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής έχουμε:

GSI	σ _{ci}	Rigidity
	(MPa)	
20	10	intermediate
20	20	intermediate
30	10	intermediate
30	20	intermediate
40	10	intermediate
40	20	intermediate
40	40	flexible
20	10	intermediate
20	20	intermediate
30	10	intermediate
30	20	flexible
40	10	flexible
40	20	flexible
40	40	flexible

Σχήμα 5.2 Προσδιορισμός δυσκαμψίας προσομοιωμάτων κατά Randolph.

Με βάση τα παραπάνω, ως απολύτως εύκαμπτα χαρακτηρίζονται φρέατα με λόγο L/D=3 θεμελιωμένα σε μέτρια έως καλή ποιότητα βραχόμαζα.

Συγκρίνονται εκ νέου τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης του 4^{ου} κεφαλαίου για τους εν λόγω συνδυασμούς με τις θεωρητικές καμπύλες των Carter και Kulhawy για εύκαμπτα αυτή τη φορά φρέατα. Προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:



Σχήμα 5-19. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=3.



Σχήμα 5-20. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση μέση δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=3.



Σχήμα 5-21. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=3.



Σχήμα 5-22. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση τη μέση δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=3.



Σχήμα 5-23. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου Ee/G* για λόγο e/D=0 (πάνω αριστερά) e/D=5 (πάνω δεξιά) και e/D=20 (κάτω αριστερά).



Σχήμα 5-24. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση τη μέση δυσκαμψία – Λόγου Ee/G* για λόγο e/D=0 (πάνω αριστερά) e/D=5 (πάνω δεξιά) και e/D=20 (κάτω αριστερά).



Σχήμα 5-25. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου Ee/G* για λόγο e/D=5 (αριστερά) και e/D=20 (δεξιά).



Σχήμα 5-26. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση τη μέση δυσκαμψία – Λόγου Ee/G* για λόγο e/D=5 (αριστερά) και e/D=20 (δεξιά).

Συμπεράσματα

<u>5.2.1.1</u>

- Για απολύτως εύκαμπτα φρέατα οι Carter και Kulhawy προτείνουν καμπύλες οριακού φορτίου που σχετίζονται με τη σχετική δυσκαμψία φρέατος – βραχόμαζας και επομένως διαφοροποιούνται για τους διάφορους τύπους βραχόμαζας.
- Οι θεωρητική καμπύλη κατά Carter και Kulhawy είναι γραμμικά αυξανόμενες όταν εξετάζονται οι οριακές μετακινήσεις συναρτήσει της εκκεντρότητας (μέσω του λόγου (e/D) ενώ σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις παρουσιάζουν παραβολικά πτωτική τάση λόγω των μειωτικών συντελεστών στον τύπο.
- Το σύνολο των φρεάτων που χαρακτηρίζονται ως εύκαμπτα ύστερα από σύγκρισή τους με τον θεωρητικό τύπο του Randolph συγκεντρώνεται σε τιμές λόγου L/D=3 και θεμελίωση σε μέτριας ως υψηλής ποιότητας βραχόμαζα.
- Είναι προφανές ότι για φρέατα με εκκεντρότητα φορτίου e=0 και επομένως μηδενική ροπή απουσιάζουν αποτελέσματα που αφορούν τη στροφή.
- Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι οι θεωρητικές μέγιστες μετατοπίσεις κατά Carter και Kulhawy εμφανίζουν διαφορές σε σχέση με τα αποτελέσματα των αναλύσεων ως προς την επιρροή της εκκεντρότητας e στη μετατόπιση του φρέατος και την επιρροή της σχετικής δυσκαμψίας φρέατος βραχόμαζας (Ee/G*) στη μετακίνηση. Πιο συγκεκριμένα, η αδιαστατοποίηση με βάση τις μέσες δυσκαμψίες παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σύγκριση με τα θεωρητικά αποτελέσματα.
- Το μέγεθος του σφάλματος αυξάνεται όσο αυξάνει η εκκεντρότητα e αλλά και όσο μειώνεται η σχετική δυσκαμψία φρέατος – βραχόμαζας (E/G*)
- Όσον αφορά την επιρροή της σχετικής δυσκαμψίας στο οριακό φορτίο, οι θεωρητικές τιμές των Carter και Kulhawy προσεγγίζουν τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων ως προς τις οριακές στροφές του φρέατος.
- Κρίνεται σκόπιμη η τροποποίηση των θεωρητικών καμπύλων κατά Carter και Kulhawy ώστε να προσδιορίζουν ακριβέστερα την επιρροή του λόγου e/D και της σχετικής δυσκαμψίας φρέατος – βραχόμαζας (E/G*) στη συμπεριφορά των εύκαμπτων φρεάτων

5.4.4.1<u>5.4.4</u> Διερεύνηση φρέατος ενδιάμεσης δυσκαμψίας

Όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 5.2 στην περίπτωση φρεάτων ενδιάμεσης δυσκαμψίας λαμβάνονται υπόψη οι θεωρητικές καμπύλες μετατόπισης των Carter και Kulhawy είτε για εύκαμπτο είτε για άκαμπτο φρέαρ προσαυξημένες με ένα συντελεστή. Κριτήριο για την επιλογή καμπύλης αποτελεί η μέγιστη εκάστοτε μετατόπιση.

Από τα εναπομείναντα προσομοιώματα τα οποία θεωρούνται ενδιάμεσης δυσκαμψίας δια της εις άτοπον απαγωγής επιλέγεται εκείνο με GSI=40, σ_{ci}=10MPa και λόγο L/D=3.



Σχήμα 5-27. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=3.



Σχήμα 5-28. Διάγραμμα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση τη μέση δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=2.



Σχήμα 5-29. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=3.



Σχήμα 5-30. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση τη μέση δυσκαμψία – Λόγου e/D για λόγο L/D=2.



Σχήμα 5-31. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου L/D για λόγο e/D=0 (πάνω αριστερά) e/D=5 (πάνω δεξιά) και e/D=20 (κάτω αριστερά).
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΦΡΕΑΤΩΝ ΠΑΚΤΩΣΕΩΣ



Σχήμα 5-32. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης μετακίνησης ως προς την τέμνουσα κεφαλής με βάση τη μέση δυσκαμψία – Λόγου L/D για λόγο e/D=0 (πάνω αριστερά) e/D=5 (πάνω δεξιά) και e/D=20 (κάτω αριστερά).



Σχήμα 5-33. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου L/D για λόγο e/D=5 (αριστερά) και e/D=20 (δεξιά).



Σχήμα 5-34. Διαγράμματα αδιαστατοποιημένης στροφής ως προς τη ροπή κεφαλής με βάση την αρχική δυσκαμψία – Λόγου L/D για λόγο e/D=5 (αριστερά) και e/D=20 (δεξιά).

ο Συμπεράσματα

- Το φρέαρ που επιλέχθηκε συγκρίθηκε με βάση τις επαυξημένες καμπύλες των Carter και Kulhawy σύμφωνα με το κριτήριο.
- Η θεωρητική καμπύλη κατά Carter και Kulhawy είναι γραμμικά αυξανόμενη όταν εξετάζονται οι οριακές μετακινήσεις συναρτήσει του λόγου e/D ενώ σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις παρουσιάζει παραβολικά πτωτική τάση λόγω των μειωτικών συντελεστών στον τύπο.
- Είναι προφανές ότι για φρέατα με εκκεντρότητα φορτίου e=0 και επομένως μηδενική ροπή απουσιάζουν αποτελέσματα που αφορούν τη στροφή.
- Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι οι θεωρητικές μέγιστες μετατοπίσεις κατά Carter και Kulhawy εμφανίζουν διαφορές σε σχέση με τα αποτελέσματα των αναλύσεων ως προς την επιρροή του λόγου e/D
- Το μέγεθος του σφάλματος αυξάνεται όσο αυξάνει ο λόγος e/D ενώ για λόγο e/D=0 οι θεωρητικές καμπύλες συναρτήσει του L/D προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά τις πραγματικές μετακινήσεις του φρέατος.
- Ασχέτως εάν για μηδενική εκκεντρότητα οι θεωρητικές καμπύλες των Carter και Kulhawy προσεγγίζουν τα αποτελέσματα, εντούτοις εντοπίζεται μια συστηματική απόκλιση σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

6 Συμπεράσματα

6.1 Συνοπτική ανασκόπηση μεθοδολογίας

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας αποτέλεσε:

- η διερεύνηση της συμπεριφοράς των φρεάτων πακτώσεως λαμβάνοντας
 υπόψη τη μη γραμμικότητα του υλικού της βραχόμαζας και των
 αποκολλήσεων-ολισθήσεων στις διεπιφάνειες περιμετρικά αυτών,
- ο προσδιορισμός της_δυσκαμψίας (μετακινησιακής και στροφικής) των εν θέματι φρεάτων λόγω των φαινομένων μη γραμμικότητας και
- η παραμετρική διερεύνηση της μεταβολής της αντοχής των φρεάτων συναρτήσει i) της επίδρασης της ποιότητας της περιβάλλουσας βραχόμαζας, ii) της γεωμετρίας των φρεάτων και iii) της εκκεντρότητας φόρτισης.

Για τις ανάγκες της εργασίας εξετάστηκαν φρέατα διαμέτρου D=5,0m με πάχος τοιχώματος d=0,5m.

Ως υλικό κατασκευής τους θεωρήθηκε οπλισμένο σκυρόδεμα ονμαστικής αντοχής C25/30, μέτρου ελαστικότητας E = 25GPa, λόγου Poisson v = 0,20, και ειδικού βάρους $\gamma_b = 25$ kN/m³.

Ορίστηκαν δύο χαρακτηριστικοί λόγοι βάθους θεμελίωσης-διαμέτρου διατομής φρέατος, ήτοι L/D=2 και L/D=3 από τους οποίους προκύπτουν τα αντίστοιχα βάθη θεμελίωσης ως L=10,0 και L=15,0m.

Τέλος, αποφασίστηκε να εξεταστούν δύο συνδυασμοί εντατικών μεγεθών με εκκεντρότητα e=25m και e=100m αντίστοιχα.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι προσομοιωμάτων με σκοπό να προσομοιωθεί στον μεν η συμπεριφορά των φρεάτων πεπερασμένης σχετικής δυσκαμψίας φρέατοςβραχόμαζας και στον δε η ίδια συμπεριφορά υπό συνθήκες επιβαλλόμενης ακαμψίας με τη χρήση ομάδας άκαμπτων συνδέσμων (MPCs).

Για την επίτευξη ταχύτερων και μικρότερων σε όγκο αναλύσεων, μορφώθηκε η μισή διατομή, λόγω συμμετρίας κατά την διεύθυνση της φόρτισης. Υπολογίστηκαν δε τα ισοδύναμα γεωμετρικά και παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά της μισής διατομής, ώστε να συμφωνούν με το προσομοίωμα.

Ως προς τα εδαφικά χαρακτηριστικά, επιλέχθηκαν παράμετροι γεωυλικού GSI=20-40 και αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci}=10-40 με βάση το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown. Οι βραχόμαζες που εξετάστηκαν χαρακτηρίζονται ασθενείς έως μέτριας ποιότητας.

Για τη διεξαγωγή των αριθμητικών αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Simulia Abaqus 6.12. Επειδή στον κώδικα αυτό δεν

υπαρχει δυνατότητα περιγραφής της συμπεριφοράς υλικού σε όρους παραμέτρων Hoek – Brown, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο Mohr – Coulomb με ισοδύναμες παραμέτρους οι οποίες εκτιμήθηκαν με τη μεθοδολογία των Hoek et al (2006).

Στα σημεία επαφής των φρεάτων με την εκάστοτε βραχόμαζα θεωρήθηκαν διεπιφάνειες στις οποίες εφαρμόστηκαν ο νόμος τριβής διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας και ο νόμος αποκόλλησης διεπιφάνειας φρέατος – βραχόμαζας ώστε να αποτυπωθεί η μη γραμμική συμπεριφορά αυτών.

6.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

6.2.1 Επιρροή των παραμέτρων σχεδιασμού στην αντοχή των φρεάτων

Εξετάστηκε παραμετρικά η επίδραση της ποιότητας της περιβάλλουσας βραχόμαζας, της γεωμετρίας των φρεάτων και της εκκεντρότητας φόρτισης στην αντοχή των φρεάτων πακτώσεως. Παρατηρήθηκε ότι:

- Αύξηση στην ποιότητα της βραχόμαζας για σταθερό λόγο L/D και σταθερή εκκεντρότητα e οδηγεί σε σταθερή γραμμική αύξηση των μηχανικών αντοχών των φρεάτων.
- Αύξηση στο λόγο L/D για σταθερό σ_{cm} και σταθερή εκκεντρότητα e οδηγεί επίσης σε σταθερή γραμμική αύξηση των μηχανικών αντοχών των φρεάτων.
- Για αύξηση του λόγου L/D και σταθερή εκκεντρότητα παρατηρείται μεγαλύτερη διακύμανση οριακού φορτίου όσο βελτιώνεται η ποιότητα της βραχόμαζας.
- Αύξηση στην εκκεντρότητα e για σταθερό λόγο L/D και σταθερό σ_{cm} επιφέρει μείωση τόσο στο οριακό φορτίο του φρέατος όσο και στη μετακινησιακή δυσκαμψία του. Αντίθετα η στροφική δυσκαμψία παρουσιάζει αυξητική τάση. (Αυτό συμβαίνει επειδή καθώς αυξάνει η εκκεντρότητα αυξάνεται η επιρροή της ροπής M στην αντοχή της βραχόμαζας, επιτρέποντας έτσι μικρότερο οριακό φορτίο).
- Μείωση της εκκεντρότητας e επιφέρει αύξηση στην διακύμανση οριακού φορτίου.

6.2.2 Οριοθέτηση άκαμπτων φρεάτων

Τα διαγράμματα φόρτισης – παραμόρφωσης των προσομοιωμένων φρεάτων πακτώσεως συγκρίνονται με αντίστοιχα επιβαλλόμενης δυσκαμψίας. Για σταθερό λόγο L/D και σταθερή εκκεντρότητα ε παρατηρείται πως για ασθενείς βραχόμαζες παρουσιάζεται παρόμοια μετακινησιακή αλλά και στροφική δυσκαμψία. Αντίθετα, όσο αυξάνει η ποιότητα της βραχόμαζας τα φρέατα με επιβαλλόμενη δυσκαμψία συμπεριφέρονται σημαντικά πιο άκαμπτα από τα όμοια τους. Με βάση τα παραπάνω, χαρακτηρίζονται ως άκαμπτα τα φρέατα των οποίων η συμπεριφορά σε εγκάρσια φόρτιση είναι παρόμοια με αυτή των ομοίων τους με επιβαλλόμενα άκαμπτη συμπεριφορά. Παρατηρείται πως η άκαμπτη συμπεριφορά των φρεάτων εντοπίζεται αποκλειστικά σε αυτά με λόγο L/D=2 και ασθενή σχετικά ποιότητα βραχόμαζας.

Συγκρίνοντας τη θεώρηση ακαμψίας των φρεάτων που προέκυψε από τη συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων με και χωρίς επιβαλλόμενη δυσκαμψία με τον θεωρητικό προσδιορισμό αυτής κατά Randolph, προέκυψαν αποκλίσεις. Πιο συγκεκριμένα, το φάσμα των φρεάτων που μπορούν να χαρακτηριστούν άκαμπτα σύμφωνα με την προσέγγιση του Randolph είναι αρκετά περιορισμένο σε σχέση με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

6.2.3 Επιρροή της μη-γραμμικότητας της περιβάλλουσας βραχόμαζας και των διεπιφανειών στη δυσκαμψία των φρεάτων.

Για να διαπιστωθεί η επιρροή της μη-γραμμικότητας του προβλήματος στη δυσκαμψία των φρεάτων, ελέγχθηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων με τις θεωρητικές καμπύλες των Carter και Kulhawy που αφορούν απολύτως ελαστική φόρτιση. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Όσον αφορά φρέατα που θεωρούνται άκαμπτα οι Carter και Kulhawy προτείνουν θεωρητικές καμπύλες παραμετρικές ως προς την εκκεντρότητα της φόρτισης αλλά και το λόγο L/D. Παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις στη θεωρητική προσέγγιση των μετατοπίσεων σε σχέση με τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων. Το σφάλμα εμφανιζόταν μεγαλύτερο όταν υπεισέρχετο η επιρροή της εκκεντρότητας και συγκεκριμένα με την αύξηση της.
- Η προσέγγιση των Carter και Kulhawy στις μετατοπίσεις των φρεάτων που θεωρήθηκαν εύκαμπτα εμφάνισε και πάλι αποκλίσεις, σημαντικά μικρότερες όμως από αυτές των άκαμπτων.
- Στην περίπτωση των εύκαμπτων φρεάτων οι καμπύλες των Carter και Kulhawy είναι παραμετρικές ως προς την εκκεντρότητα της φόρτισης και τη σχετική δυσκαμψία φρέατος βραχόμαζας (E/G*). Παρατηρήθηκε και πάλι αυξητική τάση του σφάλματος με την αύξηση της εκκεντρότητας. Αντίθετα διαπιστώθηκε ότι για αύξηση της σχετικής δυσκαμψίας φρέατος βραχόμαζας (E/G*) (για μείωση δηλαδή ποιότητας βραχόμαζας) το σφάλμα μειωνόταν.
- Η απόκλιση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων από τις ελαστικές σχέσεις της μεθοδολογίας των Carter και Kulhawy αποδίδεται στην έντονη μη γραμμικότητα του περιβάλλοντος γεωυλικού – βραχόμαζας. Η μη γραμμικότητα αυτή δυνητικά απορρέει είτε από την μηχανική συμπεριφορά της μάζας του μέσου θεμελίωσης αυτής καθεαυτής, είτε από την αδυναμία του

εδάφους να ακολουθήσει την κίνηση του φρέατος πακτώσεως ολισθαίνοντας ή αποκολλώντας από την περιφέρεια αυτού.

<u>6.2.4</u> Επίλογος και προτάσεις για περεταίρω έρευνα

Η ανα χείρας εργασία συμβάλλει στην κατανόηση της συμμετοχής των επιμέρους παραμέτρων στην οριακή αντοχή και τη δυσκαμψία των φρεάτων πακτώσεως. Επίσης, καταδεικνύεται η απόκλιση της μέχρι σήμερα εφαρμοζόμενης μεθόδου των Carter και Kulhawy από τις αριθμητικές προσομοιώσεις.

Σε επόμενο στάδιο, προτείνεται να ποσοτικοποιηθεί η επιρροή της γεωμετρίας των φρεάτων, της εκκεντρότητας των φρεάτων και της σχετικής δυσκαμψίας φρέατος – βραχόμαζας όπως αυτή διαφαίνεται μέσα από τα εντατικά μεγέθη των φρεάτων αλλά και την παραμορφωσιακή κατάσταση του εδάφους πέριξ αυτών. Η διερεύνηση αυτή καλείται να προσομοιώσει την πλαστικοποίηση εντός της βραχόμαζας καθώς και τυχόν αποκολλήσεις ή ολισθήσεις μέσω κατάλληλων διεπιφανειών γύρω και κάτω από τα φρέατα. Η διγραμμικοποίηση των εντατικών ως προς τα παραμορφωσιακά μεγέθη θα προσεγγίσει τόσο την οριακή αντοχή όσο και τον αρχικό εφαπτομενικό κλάδο.

7 Βιβλιογραφία

- **1.** Αναγνωστόπουλος Α., Παπαδόπουλος Β., «Θεμελιώσεις με Πασσάλους», Εκδόσεις Συμεών, (2004)
- 2. Καββαδάς Μ., «Σχεδιασμός Φρεάτων Πακτώσεως» Βιβλιογραφική Ανασκόπηση
- Καββαδάς Μ., «Θεμελιώσεις Τεχνικών Έργων», Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου (2008)
- Αιακοπούλου Ν., «Αριθμητική Διερεύνηση της Εγκάρσιας Φόρτισης Φρεάτων Πακτώσεως», Διπλωματική Εργασία, (2010)
- **5.** Μανουσέλη Ε., «Ανάλυση της Εγκάρσιας Φόρτισης Πασσάλου σε Συνεκτικά Εδάφη με Αριθμητικές Μεθόδους», Διπλωματική Εργασία, (2012)
- **6.** Καλτσάς Δ., «Αριθμητική Διερεύνηση της Εγκάρσιας Ακαμψίας Φρεάτων Πακτώσεως», Διπλωματική Εργασία, (2012)
- 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)
- **8.** Carter J.P., Kulhawy F.H., «Analysis of Laterally Loaded Shafts in Rock» Journal of Geotechnical Engineering Vol. 118 No. 6 (1992)
- **9.** 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)
- 10. 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)
- **11.** 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)
- **12.** Hoek E., Carranza Torres C., Corkum B., «Hoek Brown Failure Criterion 2002 edition»
- Hoek E., Dietrichs M.S., «Empirical Estimation of Rock Mass Modulus», International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43. 203-215 (2006)
- **14.** NCHRP Synthesis 360, «Rock Shocketed Shafts for Highway Structure Foundations» (2006)
- Nixon J.B. Thesis, «Verification of the Weathered Rock Model for p-y Curves» (2002)
- 16. Nusairat J., Liang R.Y., Engel R.L., «Design of Rock Socketed Drilled Shafts», FHWA/011-(2006)
- Poulos H.G. (1971a), «Behaviour of Laterally Loaded Piles I Single Piles», J. Soil Mech. Found Div. ASCE 97(5) 711-731
- Poulos H.G. (1971a), «Behaviour of Laterally Loaded Piles I Single Piles», J. Soil Mech. Found Div. ASCE 97(4) 341-360
- 19. Poulos H.G. Davis E.H., «Pile Foundation Analysis and Design», (1980)

- **20.** Randolf M.F., «A Theoretical Study of the Performance of Piles», PhD Thesis, University of Cambridge (1977)
- **21.** Randolph M.F., «The Response of Flexible Piles to Lateral Loading», Geotechnique, 31(2), 247-259 (1981)
- **22.** Reese L.C., «Analysis of Laterally Loaded Piles in Weak Rock», Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 101(7), 633-649 (1997)
- **23.** Simulia Abaqus 6.10. Documantation
- **24.** Wilson E.L., «Structural Analysis of Axisymmetric Solids», J. Am. Inst. Astronaut. Astronaut, 3, 2269-2274 (1965)
- 25. Yang Ke, «Analysis of Laterally Loaded Drilles Shafts in Rock» (2006)
- 26. Zhang L., «Drilled Shafts in Rock: Analysis and Design» (2004)
- **27.** Zhang L., Ahmari S., «Non-Linear Analysis of Laterally Loaded Rigid Piles in Cohesive Soils» (2011)