



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Αριθμητική μοντελοποίηση εργαστηριακών δοκιμών κοπής
πετρωμάτων με κοπτικά δίσκου»**

Μαθιουδάκης Μιχαήλ

Επιβλέπων: Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος Ν.

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Αριθμητική μοντελοποίηση εργαστηριακών δοκιμών κοπής
πετρωμάτων με κοπτικά δίσκου»

Μαθιουδάκης Μιχαήλ

Επιβλέπων: Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος Ν.

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 31 Μαρτίου 2016:

Υπογραφή

.....
Θ. Μιχαλακόπουλος
Επίκ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Υπογραφή

.....
Γ. Παναγιώτου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Υπογραφή

.....
Π. Νομικός
Επίκ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την αριθμητική μοντελοποίηση εργαστηριακών δοκιμών κοπής πετρωμάτων με κοπτικά δίσκου, μέσω του λογισμικού PFC^{2D}, σε δισδιάστατο περιβάλλον. Η εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος «Μηχανική Όρυξη Σηράγγων» του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων», στο οποίο συμμετέχουν οι Σχολές Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών και Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Επίκουρο καθηγητή Θεόδωρο Μιχαλακόπουλο για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας και για την πολύτιμη βοήθειά του. Επιπλέον, ευχαριστίες εκφράζονται προς τον Επίκουρο Καθηγητή Παύλο Νομικό για τη βοήθειά του σχετικά με τη χρήση του λογισμικού PFC. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το συμφοιτητή Αντώνη Καλογερόπουλο για την άριστη συνεργασία κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, όπως και τον Μηχανολόγο Μηχανικό Παναγιώτη Βλαντή για τη βοήθειά του σχετικά με τη χρήση του Matlab. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω συγγενείς, φίλους και τους κοντινούς μου ανθρώπους για τη στήριξή τους όλο αυτό το διάστημα.

Αθήνα, 2016

Μιχαήλ Μαθιουδάκης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ : «Αριθμητική μοντελοποίηση εργαστηριακών δοκιμών κοπής πετρωμάτων με κοπτικά δίσκου».

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: Μαθιουδάκης Μιχαήλ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος Ν., Επίκουρος Καθηγητής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών

ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟ ΕΤΟΣ: 2015-2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αριθμητική μοντελοποίηση εργαστηριακών δοκιμών κοπής πετρωμάτων με κοπτικά δίσκου, με τη βοήθεια του λογισμικού PFC^{2D}. Το πέτρωμα που προσομοιώθηκε είναι ο σχιστώδης ορθογνέσιος που προέρχεται από το δυτικό τμήμα της Ικαρίας.

Σκοπός της εργασίας είναι:

- 1) Η χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων για τον προσδιορισμό ενός πλήθους μικροπαραμέτρων που εισάγονται στο λογισμικό και σχετίζονται με τις ιδιότητες του πετρώματος.
- 2) Η βαθμονόμηση των μικροπαραμέτρων αυτών πραγματοποιώντας προσομοιώσεις δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού.
- 3) Η χρήση των βαθμονομημένων μικροπαραμέτρων για την προσομοίωση κοπής με κοπτικά δίσκου.

Η πραγματοποίηση αυτών των σταδίων οδηγεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το λογισμικό PFC^{2D} και με τη χρήση των μεθόδων προσδιορισμού των μικροπαραμέτρων. Επιπλέον, κατανοείται η επίδραση κάθε μικροπαραμέτρου στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού.

Τέλος, σκοπός των προσομοιώσεων δοκιμών κοπής πετρωμάτων με κοπτικά δίσκου, είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών και η εξαγωγή παρατηρήσεων και συμπερασμάτων.

DIPLOMA THESIS : **«Numerical simulation of laboratory rock cutting tests using disc cutters».**

STUDENT: **Mathioudakis Michail**

SUPERVISOR: **Michalakopoulos Theodoros N., Assistant Professor,
School of Mining and Metallurgical Engineering**

ACADEMIC YEAR: **2015-2016**

ABSTRACT

The subject of this thesis is the numerical simulation of laboratory rock cutting tests using disc cutters, with the PFC^{2D} software. The simulated rock is schistose orthogneiss from the western part of Ikaria island.

Aim of this thesis is:

- 1) The use of two different methods for determining a number of microparameters, which are introduced in the software and are related to the properties of the rock.
- 2) Calibration of these microparameters by performing test simulations of uniaxial compressive strength and indirect tensile strength.
- 3) The use of calibrated microparameters for cutting test simulations with disc cutters.

Completion of these steps leads to conclusions about the use of the PFC^{2D} software and the microparameters. In addition, the effect each microparameter has on the results of uniaxial compressive strength and indirect tensile strength simulation tests is understood.

Finally, the purpose of rock cutting test simulations with disc cutters, is the comparison of the results of the simulations with the results of laboratory tests and the derivation of conclusions regarding the suitability of this modeling method in the empirical prediction of rock cutting.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Σκοπός της εργασίας	1
1.2. Οργάνωση της εργασίας.....	2
1.3. Περιεχόμενο της εργασίας	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΘΕΩΡΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΚΟΠΤΙΚΑ ΔΙΣΚΟΥ	4
2.1. Εισαγωγή.....	4
2.2. Θεωρία Paul – Sikarskie (1965).....	5
2.3. Θεωρία Roxborough – Phillips (1975).....	16
2.4. Θεωρία Ozdemir – Miller – Wang (1978)	19
2.5. Θεωρία Sanio (1985).....	24
2.6. Θεωρία Rostami – Ozdemir (1993)	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PFC ^{2D}	37
3.1. Εισαγωγή.....	37
3.2. Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων (Distinct Element Method)	37
3.3. PFC ^{2D}	38
3.3.1. Συστήματα Μονάδων	40
3.3.2. Μηχανική του PFC	43
3.3.3. Μηχανισμός Ρωγμάτωσης.....	43
3.3.4. Μοντέλο Συνδεδεμένων Σωματιδίων (BPM).....	44
3.3.5. Δεσμοί μεταξύ Σωματιδίων	45
3.3.6. Επαφές.....	49
3.3.7. Συμπεριφορά των δεσμών	49
3.3.8. Πορώδες.....	51
3.3.9. Γραμμικό Μοντέλο.....	51
3.3.10. Γραμμικό Μοντέλο Αντίστασης Κύλισης	52
3.3.11. Σύνοψη μικρομηχανικών ιδιοτήτων	52
3.3.12. Περιβάλλον εργασίας PFC ^{2D}	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΙΚΡΟΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	54
4.1. Εισαγωγή.....	54

4.2. Μακρομηχανικές παράμετροι	54
4.3. Προσδιορισμός μικρομηχανικών παραμέτρων	56
4.4. Μέθοδος Yoon (2007).....	56
4.4.1. Σχεδιασμός Πειράματος (Design of Experiment)	57
4.4.2. Διαδικασία βελτιστοποίησης.....	57
4.4.3. Ανάλυση ευαισθησίας των μικροπαραμέτρων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Plackett - Burman	58
4.4.4. Διαδικασία Βελτιστοποίησης	62
4.5. Μέθοδος Wang et al.....	64
4.5.1. Επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων	65
4.5.2. Επίδραση των παραμέτρων μικροκλίμακας	68
4.5.3. Πολυπαραμετρική ανάλυση	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ	
ΜΑΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΕ ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΚΑΙ	
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	
	74
5.1. Εισαγωγή.....	74
5.2. Προσδιορισμός μικροπαραμέτρων με τη μέθοδο Yoon.....	74
5.2.1. Χρήση της συνάρτησης fmincon.....	74
5.2.2. Προσομοίωση δοκιμών με συνδεδεμένο μοντέλο με σημειακούς δεσμούς (contact bonded)	77
5.2.2.1. Προσομοίωση δοκιμής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη	78
5.2.2.2. Προσομοίωση δοκιμής αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (δοκιμή Brazilian – αντιδιαμετρική θλίψη).....	79
5.2.3. Προσομοίωση δοκιμών με συνδεδεμένο μοντέλο με παράλληλους δεσμούς (parallel bonded).....	81
5.2.3.1. Προσομοίωση δοκιμής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη	81
5.2.3.2. Προσομοίωση δοκιμής αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (δοκιμή Brazilian).....	82
5.2.4. Διαδικασία βαθμονόμησης	83
5.2.4.1. Μονοπαραμετρική ανάλυση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη	83
5.2.4.2. Μονοπαραμετρική ανάλυση αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (δοκιμή Brazilian – αντιδιαμετρική θλίψη).....	92
5.2.4.3. Σύγκριση επίδρασης μεταβολής μικροπαραμέτρων σε UCS και BTS	100
5.2.4.4. Βαθμονόμηση μοντέλου	107

5.3. Προσδιορισμός μικροπαραμέτρων με τη μέθοδο Wang.....	110
5.3.1. Προσομοιώσεις βάσει της μεθόδου Uniform Design.....	112
5.3.2. Βαθμονόμηση μοντέλου.....	114
5.4. Σύνοψη μικροπαραμέτρων από τις βαθμονομήσεις.....	118
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΚΟΠΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΟΠΗΣ ΜΕ ΚΟΠΤΙΚΑ ΔΙΣΚΟΥ	120
6.1. Κοπτικά εργαλεία.....	120
6.2. Κοπή πετρωμάτων με κοπτικά τύπου δίσκου	122
6.2.1. Εργαστηριακός εξοπλισμός.....	122
6.2.2. Πειραματική διαδικασία.....	123
6.2.3. Γεωμετρία κοπής.....	125
6.3. Δοκιμή κοπής σε εργαστηριακό επίπεδο	126
6.4. Προσομοίωση κοπής σχιστώδους ορθογνευσίου.....	135
6.4.1. Χρήση επιπέδων διαφορετικού εύρους ακτινών σωματιδίων κατά την προσομοίωση.....	137
6.4.2. Προσομοίωση κοπής με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon	142
6.4.2.1. Χρήση διαφορετικών ταχυτήτων κοπής.....	142
6.4.2.2. Χρήση διαφορετικού βάθους κοπής.....	144
6.4.3. Προσομοίωση κοπής με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang	148
6.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα εργαστηριακά αποτελέσματα	152
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	160
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	163
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	165

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Δυνάμεις κατά την κοπή κοπτικού δίσκου και κύριες παράμετροι (Πηγή: Snowdon et al, 1982)	5
Σχήμα 2.2 Απεικόνιση διείδυσης κοπτικού σε πέτρωμα (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)	6
Σχήμα 2.3. Απεικόνιση γεωμετρικών χαρακτηριστικών κοπής (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)	6
Σχήμα 2.4. Γεωμετρική αναπαράσταση του κριτηρίου αστοχίας (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)	9
Σχήμα 2.5. Απεικόνιση παραμέτρων οι οποίες υπολογίζονται βάσει του κριτηρίου αστοχίας (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)	10
Σχήμα 2.6. Κριτήριο αστοχίας όπου φαίνεται η σχέση συνοχής, γωνίας τριβής και θλιπτικής αντοχής (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)	12
Σχήμα 2.7. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δίσκου που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μελέτη (Πηγή: Roxborough & Phillips, 1975).....	17
Σχήμα 2.8. Δυνάμεις και γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοπτικού δίσκου (Πηγή: Roxborough & Phillips, 1975).....	18
Σχήμα 2.9. Κοπτικό δίσκου και χαρακτηριστικά μεγέθη του (Πηγή: Ozdemir et al, 1978)	20
Σχήμα 2.10. Γεωμετρική απεικόνιση δυνάμεων κατά την κοπή με κοπτικό δίσκου για τον υπολογισμό της ορθής δύναμης (Πηγή: Ozdemir et al, 1978)	22
Σχήμα 2.11. Γεωμετρική απεικόνιση δυνάμεων κατά την κοπή με κοπτικό δίσκου για τον υπολογισμό της δύναμης κύλισης (Πηγή: Ozdemir et al, 1978).....	22
Σχήμα 2.12. Διαδικασία διείδυσης κοπτικού στο πέτρωμα (Πηγή: Sanio, 1985).....	25
Σχήμα 2.13. Κυκλική οπή υπό πίεση με ασυμπίεστες ακτινικές ρωγμές (Πηγή: Sanio, 1985)	26
Σχήμα 2.14. Κατάσταση ισοροπίας του κοπτικού δίσκου (Πηγή: Sanio, 1985)	27
Σχήμα 2.15. Δυνάμεις και μεγέθη κατά την κοπή με κοπτικά δίσκου (Πηγή: Sanio, 1985)	28
Σχήμα 2.16. Δημιουργία βολβού πίεσης κατά τη διείδυση κοπτικού (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993)	29
Σχήμα 2.17. Αλληλεπίδραση κοπτικών και εντατική κατάσταση πετρώματος κατά τη διείδυση (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993)	30
Σχήμα 2.18. Μη επαρκής απόσταση κοπτικών για δημιουργία θραύσματος (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993).....	31

Σχήμα 2.19. Πολύ μικρή απόσταση κοπτικών και δημιουργία υπερθρυμματισμού (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993)	31
Σχήμα 2.20. Βέλτιστη απόσταση κοπτικών για δημιουργία θραύσματος (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993).....	32
Σχήμα 2.21. Κατανομή πίεσης στην επαφή κοπτικού – πετρώματος με εκθέτη $\psi = 1$ (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993)	33
Σχήμα 2.22. Κατανομή πίεσης στην επαφή κοπτικού – πετρώματος με εκθέτη $0 \leq \psi < 1$ (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993)	34
Σχήμα 3.1. Συμβάσεις προσήμων για διατμητικές τάσεις στο PFC (Πηγή: Καρατζά, 2011)	41
Σχήμα 3.2. Συμβάσεις προσήμων για διατμητικές τροπές στο PFC (Πηγή: Καρατζά, 2011)	41
Σχήμα 3.3. Επαφή μεταξύ σωματιδίων στο PFC (Πηγή: Καρατζά, 2011).....	42
Σχήμα 3.4. Εφελκυστικές ρωγμές που προκαλούνται από θλιπτικές δυνάμεις (Πηγή: Καρατζά, 2011).....	44
Σχήμα 3.5. Απεικόνιση σημειακών και παράλληλων δεσμών (Πηγή: Cho, 2007)	45
Σχήμα 3.6. Προϋποθέσεις για θραύση του δεσμού όσον αφορά στην ορθή συνιστώσα της δύναμης επαφής (Πηγή: Καρατζά, 2011).....	46
Σχήμα 3.7. Προϋποθέσεις για θραύση του δεσμού όσον αφορά στην ορθή συνιστώσα της δύναμης επαφής (Πηγή: Καρατζά, 2011).....	46
Σχήμα 3.8. Μηχανικά χαρακτηριστικά του σημειακού δεσμού (Πηγή: PFC 5.0 Manual)	47
Σχήμα 3.9. Μηχανικά χαρακτηριστικά του παράλληλου δεσμού (Πηγή: PFC 5.0 Manual)	48
Σχήμα 3.10. Περιβάλλον εργασίας PFC ^{2D}	53
Σχήμα 5.1. Άποψη του optimization tool του Matlab.....	76
Σχήμα 5.2. Προσομοίωση δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε σχιστώδη ορθογώνιο με σημειακούς δεσμούς	79
Σχήμα 5.3. Προσομοίωση δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σε σχιστώδη ορθογώνιο με σημειακούς δεσμούς	80
Σχήμα 5.4. Προσομοίωση δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε σχιστώδη ορθογώνιο με παράλληλους δεσμούς	82
Σχήμα 5.5. Προσομοίωση δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σε σχιστώδη ορθογώνιο με παράλληλους δεσμούς.....	83
Σχήμα 5.6. Προσομοίωση δοκιμής μονοαξονικής θλίψης για το βαθμονομημένο μοντέλο με τη μέθοδο Yoon	109

Σχήμα 5.7. Προσομοίωση δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού για το βαθμονομημένο μοντέλο με τη μέθοδο Yoon	110
Σχήμα 5.8. Προσομοίωση δοκιμής μονοαξονικής θλίψης για το βαθμονομημένο μοντέλο με τη μέθοδο Wang.....	117
Σχήμα 5.9. Προσομοίωση δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού για το βαθμονομημένο μοντέλο με τη μέθοδο Wang.....	118
Σχήμα 6.1. Δοκιμή κοπής με κοπτικά δίσκου και κύριες δυνάμεις που αναπτύσσονται (Πηγή: Fowell, 1993).....	120
Σχήμα 6.2. α) Κοπτικά δίσκου τύπου V-shaped β) Κοπτικά δίσκου τύπου CCS.....	121
Σχήμα 6.3. Απεικόνιση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού δοκιμής κοπής (Πηγή: Πατσίδης, 2012).....	123
Σχήμα 6.4. Απεικόνιση του αποτελέσματος κοπής από δείγμα σχιστώδη ορθογενεσίου (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	125
Σχήμα 6.5. Απεικόνιση της Μηχανής Κοπής (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	126
Σχήμα 6.6. Κοπή σχιστώδους ορθογενεσίου σε βάθος 2 mm // της σχιστότητας του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	127
Σχήμα 6.7. Κοπή σχιστώδους ορθογενεσίου σε βάθος 2 mm \perp της σχιστότητας του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	127
Σχήμα 6.8. Κοπτικό δίσκου κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης κοπής του συνθετικού πετρώματος.....	135
Σχήμα 6.9. Απουσία πλευρικών τοίχων από το δοκίμιο	136
Σχήμα 6.10. Χρήση πλευρικής στήριξης τοίχου αντίθετα στη φορά της κοπής.....	136
Σχήμα 6.11. Απεικόνιση του μοντέλου του Su με 4 επίπεδα διαφορετικών ακτινών σωματιδίων (Πηγή: Su, 2011).....	139
Σχήμα 6.12. Περιοχή που αφορά στις δύο διαστάσεις, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.....	141
Σχήμα 6.13. Προσομοίωση κοπής με ταχύτητα 20 m/s χρησιμοποιώντας τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon	142
Σχήμα 6.14. Προσομοίωση κοπής με ταχύτητα 0,0583 m/s χρησιμοποιώντας τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon	143
Σχήμα 6.15. Προσομοίωση κοπής βάθους 1 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon	144
Σχήμα 6.16. Προσομοίωση κοπής βάθους 2 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon	145

Σχήμα 6.17. Προσομοίωση κοπής βάθους 2 mm με ταχύτητα 5 m/s, μεταβάλλοντας τα επίπεδα διαφορετικών ακτινών των σωματιδίων με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon.....	146
Σχήμα 6.18. Προσομοίωση κοπής βάθους 3 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon	147
Σχήμα 6.19. Προσομοίωση κοπής βάθους 5 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon	148
Σχήμα 6.20. Προσομοίωση κοπής βάθους 1 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang.....	149
Σχήμα 6.21. Προσομοίωση κοπής βάθους 2 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang.....	150
Σχήμα 6.22. Προσομοίωση κοπής βάθους 3 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang.....	151
Σχήμα 6.23. Προσομοίωση κοπής βάθους 5 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang.....	152
Σχήμα 6.24. Δημιουργία θραύσματος κατά την προσομοίωση δοκιμής κοπής.....	153

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1. Δοκιμές σταθερού φορτίου και σταθερού ρυθμού που πραγματοποιήθηκαν (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965).....	8
Διάγραμμα 2.2. Ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη δοκιμή σταθερού ρυθμού (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965).....	14
Διάγραμμα 2.3. Ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη δοκιμή σταθερού φορτίου (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965).....	14
Διάγραμμα 2.4. Δύναμη ώσης F_T , κατά τη στατική κατάσταση και κατά την κίνηση του δίσκου συναρτήσει της κατεύθυνσης κοπής (Πηγή: Roxborough & Phillips, 1975).....	18
Διάγραμμα 4.1. Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει ορθής και διατμητικής αντοχής των δεσμών (Πηγή: Yoon, 2007)	59
Διάγραμμα 4.2. Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας Young συναρτήσει του αντίστοιχου της επαφής μεταξύ των σωματιδίων (Πηγή: Yoon, 2007).....	59
Διάγραμμα 4.3. Μεταβολή λόγου του Poisson συναρτήσει του λόγου δυστροπίας των σωματιδίων (Πηγή: Yoon, 2007).....	60
Διάγραμμα 4.4. Μεταβολή της τυπικής απόκλισης προς τη μέση αντοχή των δεσμών συναρτήσει αξονικής τάσης (Πηγή: Yoon, 2007)	61
Διάγραμμα 4.5. Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας Young συναρτήσει της μέσης ακτίνας σφαιρών (Πηγή: Wang et al)	66
Διάγραμμα 4.6. Μεταβολή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει της μέσης ακτίνας σφαιρών (Πηγή: Wang et al)	67
Διάγραμμα 4.7. Μεταβολή του λόγου Poisson συναρτήσει της μέσης ακτίνας σφαιρών (Πηγή: Wang et al).....	67
Διάγραμμα 4.8. Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του Young συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας των σωματιδίων (Πηγή: Wang et al)	70
Διάγραμμα 4.9. Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του Young συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας των παράλληλων δεσμών (Πηγή: Wang et al).....	71
Διάγραμμα 4.10. Μεταβολή του λόγου του Poisson συναρτήσει του λόγου δυστροπίας των δεσμών (Πηγή: Wang et al).....	71
Διάγραμμα 4.11. Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει της αντοχής των δεσμών (Πηγή: Wang et al)	72
Διάγραμμα 5.1. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας για τη UCS85	
Διάγραμμα 5.2. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας για τη UCS	86
Διάγραμμα 5.3. Μονοπαραμετρική ανάλυση της ορθής και διατμητικής αντοχής των παράλληλων δεσμών για τη UCS	88

Διάγραμμα 5.4. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα για τη UCS	90
Διάγραμμα 5.5. Μονοπαραμετρική ανάλυση του συντελεστή τριβής για τη UCS	91
Διάγραμμα 5.6. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας για τη BTS	93
Διάγραμμα 5.7. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας για τη BTS.....	94
Διάγραμμα 5.8. Μονοπαραμετρική ανάλυση της ορθής και διατμητικής αντοχής των δεσμών για τη BTS	96
Διάγραμμα 5.9. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα για τη BTS.....	98
Διάγραμμα 5.10. Μονοπαραμετρική ανάλυση του συντελεστή τριβής για τη BTS..	100
Διάγραμμα 5.11. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας του αρχικού δείγματος.....	101
Διάγραμμα 5.12. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας των δεσμών που διέπονται από το γραμμικό μοντέλο	101
Διάγραμμα 5.13. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας των παράλληλων δεσμών.....	102
Διάγραμμα 5.14. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας του αρχικού δείγματος.....	102
Διάγραμμα 5.15. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας των δεσμών που διέπονται από το γραμμικό μοντέλο	103
Διάγραμμα 5.16. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας των παράλληλων δεσμών.....	103
Διάγραμμα 5.17. Μονοπαραμετρική ανάλυση της ορθής αντοχής των δεσμών	104
Διάγραμμα 5.18. Μονοπαραμετρική ανάλυση της διατμητικής αντοχής των δεσμών	104
Διάγραμμα 5.19. Μονοπαραμετρική ανάλυση για σταθερό λόγο μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα	105
Διάγραμμα 5.20. Μονοπαραμετρική ανάλυση για σταθερή ελάχιστη ακτίνα.....	106
Διάγραμμα 5.21. Μονοπαραμετρική ανάλυση του συντελεστή τριβής	106
Διάγραμμα 5.22. Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων προς εργαστηριακών για UCS και BTS	115
Διάγραμμα 6.1. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 1 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	128
Διάγραμμα 6.2. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 2 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	129

Διάγραμμα 6.3. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 3 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	130
Διάγραμμα 6.4. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 5 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	131
Διάγραμμα 6.5. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 2 mm \perp στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	132
Διάγραμμα 6.6. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 3 mm \perp στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	133
Διάγραμμα 6.7. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 5 mm \perp στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	134
Διάγραμμα 6.8. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών ορθής δύναμης // στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Yoon	154
Διάγραμμα 6.9. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών δύναμης κύλισης // στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Yoon	154
Διάγραμμα 6.10. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών ορθής δύναμης \perp στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Yoon	155
Διάγραμμα 6.11. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών δύναμης κύλισης \perp στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Yoon	156
Διάγραμμα 6.12. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών ορθής δύναμης // στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Wang	156
Διάγραμμα 6.13. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών δύναμης κύλισης // στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Wang	157
Διάγραμμα 6.14. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών ορθής δύναμης \perp στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Wang	158
Διάγραμμα 6.15. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών δύναμης κύλισης \perp στη σχιστότητα με τη μέθοδο Wang	158

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1. Συμβατά συστήματα χρησιμοποιούμενων μονάδων στο PFC	40
Πίνακας 4.1. Μετατροπή κωδικοποιημένων μικροπαραμέτρων σε μη κωδικοποιημένες (Πηγή: Yoon, 2007)	58
Πίνακας 4.2. Συνδυασμός κωδικοποιημένων τιμών των μικροπαραμέτρων που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μελέτη (Πηγή: Yoon, 2007)	62
Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα που προέκυψαν με τη μεταβολή της ακτίνας των σφαιρών (Πηγή: Wang et al).....	66
Πίνακας 4.4. Μικροπαραμέτροι που χρησιμοποιούνται και κατηγοριοποίησή τους (Πηγή: Wang et al).....	68
Πίνακας 4.5. Τα 12 επίπεδα μικροπαραμέτρων που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση (Πηγή: Wang et al)	69
Πίνακας 4.6. Συνδυασμοί των μικροπαραμέτρων που προέκυψαν βάσει του UD (Πηγή: Wang et al).....	69
Πίνακας 4.7. Αποτελέσματα προσομοιώσεων των συνδυασμών του πίνακα 4.6 (Πηγή: Wang et al).....	70
Πίνακας 5.1. Αρχικές τιμές και κωδικοποιημένες μικροπαραμέτροι που προέκυψαν από τη χρήση του Matlab.....	77
Πίνακας 5.2. Αρχικές τιμές και μικροπαραμέτροι μετά την αποκωδικοποίησή τους ..77	
Πίνακας 5.3. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας για τη UCS....	84
Πίνακας 5.4. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας για τη UCS.....	86
Πίνακας 5.5. Μονοπαραμετρική ανάλυση της ορθής αντοχής των παράλληλων δεσμών για τη UCS.....	87
Πίνακας 5.6. Μονοπαραμετρική ανάλυση της διατμητικής αντοχής των παράλληλων δεσμών για τη UCS	88
Πίνακας 5.7. Μονοπαραμετρική ανάλυση με σταθερό λόγο μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα για τη UCS	89
Πίνακας 5.8. Μονοπαραμετρική ανάλυση με σταθερή ελάχιστη ακτίνα για τη UCS.	90
Πίνακας 5.9. Μονοπαραμετρική ανάλυση του συντελεστή τριβής για τη UCS.....	91
Πίνακας 5.10. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας για τη BTS ..	92
Πίνακας 5.11. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας για τη BTS.....	94
Πίνακας 5.12. Μονοπαραμετρική ανάλυση της ορθής αντοχής των παράλληλων δεσμών για τη BTS	95
Πίνακας 5.13. Μονοπαραμετρική ανάλυση της διατμητικής αντοχής των δεσμών για τη BTS	96

Πίνακας 5.14. Μονοπαραμετρική ανάλυση με σταθερό λόγο μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα για τη BTS.....	97
Πίνακας 5.15. Μονοπαραμετρική ανάλυση με σταθερή ελάχιστη ακτίνα για τη BTS98	
Πίνακας 5.16. Μονοπαραμετρική ανάλυση του συντελεστή τριβής για τη BTS.....	99
Πίνακας 5.17. Μικροπαραμέτροι που προέκυψαν από το Matlab για την μέθοδο Yoon	107
Πίνακας 5.18. Μεταβολή λόγου δυστροπίας των παράλληλων δεσμών κατά τη βαθμονόμηση.....	108
Πίνακας 5.19. Μικροπαραμέτροι που προέκυψαν από το Matlab με τη μέθοδο Wang	112
Πίνακας 5.20. Τα 12 προσαρμοσμένα στην παρούσα εργασία επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέθοδο Wang	113
Πίνακας 5.21. Οι 12 συνδυασμοί μικροπαραμέτρων που προέκυψαν βάσει του UD για τη μέθοδο Wang.....	113
Πίνακας 5.22. Αποτελέσματα των 12 προσομοιώσεων για UCS και BTS	114
Πίνακας 5.23. Λόγοι αποτελεσμάτων προσομοιώσεων προς εργαστηριακά για UCS και BTS.....	114
Πίνακας 5.24. Μικροπαραμέτροι που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές για τη βαθμονόμηση του μοντέλου της μεθόδου Wang.....	115
Πίνακας 5.25. Μεταβολή της μέγιστης ακτίνας σωματιδίων κατά τη βαθμονόμηση	116
Πίνακας 5.26. Μικροπαραμέτροι που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου για τη μέθοδο Yoon	118
Πίνακας 5.27. Μικροπαραμέτροι που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου για τη μέθοδο Wang.....	119
Πίνακας 6.1. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 1 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	128
Πίνακας 6.2. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 2 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	129
Πίνακας 6.3. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 3 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	130
Πίνακας 6.4. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 5 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	131
Πίνακας 6.5. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 2 mm \perp στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	132
Πίνακας 6.6. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 3 mm \perp στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	133

Πίνακας 6.7. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 5 mm \perp στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)	134
Πίνακας 6.8. Μηχανικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που προσομοίωσε ο Su (Πηγή: Su, 2011).....	138
Πίνακας 6.9. Χαρακτηριστικά των μοντέλων του Su με επίπεδα διαφορετικών ακτινών των σφαιρών (Πηγή: Su, 2011)	139
Πίνακας 6.10. Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τα 4 επίπεδα διαφορετικών ακτινών των σφαιρών (Πηγή: Su, 2011)	140
Πίνακας 6.11. Μέγιστες και μέσες δυνάμεις για διαφορετικές ταχύτητες κοπής	143
Πίνακας 6.12. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 1 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon	144
Πίνακας 6.13. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 2 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon	146
Πίνακας 6.14. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 3 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon	147
Πίνακας 6.15. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 5 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon	148
Πίνακας 6.16. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 1 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang.....	149
Πίνακας 6.17. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 2 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang.....	150
Πίνακας 6.18. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 3 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang.....	151
Πίνακας 6.19. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 5 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang.....	152
Πίνακας 6.20. Μέγιστες και μέσες τιμές ορθής δύναμης κατά την κοπή στο εργαστήριο // με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Yoon.....	153
Πίνακας 6.21. Μέγιστες και μέσες τιμές δύναμης κύλισης κατά την κοπή στο εργαστήριο // με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Yoon.....	154
Πίνακας 6.22. Μέγιστες και μέσες τιμές ορθής δύναμης κατά την κοπή στο εργαστήριο \perp με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Yoon.....	155
Πίνακας 6.23. Μέγιστες και μέσες τιμές δύναμης κύλισης κατά την κοπή στο εργαστήριο \perp με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Yoon.....	155

Πίνακας 6.24. Μέγιστες και μέσες τιμές ορθής δύναμης κατά την κοπή στο εργαστήριο // με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Wang	156
Πίνακας 6.25. Μέγιστες και μέσες τιμές δύναμης κύλισης κατά την κοπή στο εργαστήριο // με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Wang	157
Πίνακας 6.26. Μέγιστες και μέσες τιμές ορθής δύναμης κατά την κοπή στο εργαστήριο \perp με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Wang	157
Πίνακας 6.27. Μέγιστες και μέσες τιμές δύναμης κύλισης κατά την κοπή στο εργαστήριο \perp με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Wang	158

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση κοπής πετρωμάτων με κοπτικά εργαλεία τύπου δίσκου, με τη βοήθεια του λογισμικού PFC^{2D} (Particle Flow Code) σε διδιάστατο περιβάλλον.

Το PFC^{2D} αποτελεί έναν αριθμητικό κώδικα, που κατατάσσεται στις μεθόδους άμεσης προσέγγισης της προσομοίωσης της κίνησης και της αλληλεπίδρασης σφαιρικών σωματιδίων. Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιεί τη μέθοδο διακριτών στοιχείων DEM (Distinct Element Method), η οποία αποτελεί μια αριθμητική μέθοδο επίλυσης προβλημάτων μηχανικής που είναι εφαρμόσιμη σε υλικά με ασυνεχή δομή.

Για τη διαδικασία της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από εργαστηριακά δεδομένα προερχόμενα από παλαιότερη διπλωματική εργασία. Βάσει αυτών έλαβαν χώρα προσομοιώσεις δοκιμών, καθώς και βαθμονομήσεις, ώστε να εξαχθούν σχετικά συμπεράσματα.

1.2. Οργάνωση της εργασίας

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής συναντώνται κατά κόρον σε έργα διάνοιξης σηράγγων. Τα κοπτικά εργαλεία τύπου δίσκου είναι πολύ συχνά χρησιμοποιούμενα κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε πετρώματα με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Λογικό επακόλουθο είναι η προσπάθεια πρόβλεψης της συμπεριφοράς και απόδοσης των κοπτικών αυτών εργαλείων. Κάτι τέτοιο είναι πιθανό να συμβεί με το χρησιμοποιούμενο, σε αυτή τη διπλωματική εργασία, λογισμικό, στο οποίο είναι δυνατή η εισαγωγή παραμέτρων, σχετικών με το πέτρωμα και η προσομοίωση δοκιμών σε αυτό.

Για να συμβεί κάτι τέτοιο, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι που βοηθούν στον προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών. Εφόσον τα αποτελέσματα των δοκιμών, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους αυτές απέχουν από τα εργαστηριακά δεδομένα, λαμβάνει χώρα ένα είδος βαθμονόμησης του μοντέλου, μέσω της μεθόδου «δοκιμών και σφαλμάτων» (trial and error), μέχρις ότου επιτευχθεί συμφωνία αυτών. Τέλος, πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις δοκιμών κοπής με σκοπό να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τα εργαστηριακά και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για μελλοντικές μελέτες επί του αντικειμένου.

1.3. Περιεχόμενο της εργασίας

Η μεταπτυχιακή αυτή διπλωματική εργασία περιλαμβάνει οκτώ κεφάλαια και παράρτημα στο οποίο παρατίθεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της εργασίας.

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται οι επικρατούσες θεωρίες κοπής των πετρωμάτων που σχετίζονται με τα κοπτικά εργαλεία τύπου δίσκου.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μία συνοπτική περιγραφή του λογισμικού PFC, των βασικών εννοιών, των μηχανισμών του και των εντολών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Επιπλέον περιγράφεται η μέθοδος των διακριτών σωματιδίων DEM, στην οποία βασίζεται η λογική του λογισμικού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι δύο μέθοδοι προσδιορισμού των μικρομηχανικών παραμέτρων, όπως τις διατύπωσαν οι εμπνευστές τους.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων σε προσομοιώσεις δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού, την παράθεση των αποτελεσμάτων και στη συνέχεια τη διαδικασία της βαθμονόμησης για όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των προσομοιώσεων στα εργαστηριακά δεδομένα του πετρώματος του σχιστώδους ορθογνευσίου.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφεται η εργαστηριακή δοκιμή της κοπής πετρωμάτων με κοπτικά τύπου δίσκου, παρατίθενται τα αποτελέσματα από την εργαστηριακή κοπή σχιστώδους ορθογνευσίου καθώς και τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις δοκιμών, χρησιμοποιώντας τις μικροπαραμέτρους που προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Το έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τη χρήση του PFC και πιθανά σημεία για περαιτέρω μελέτη σε μελλοντικές εργασίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΘΕΩΡΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΚΟΠΤΙΚΑ ΔΙΣΚΟΥ

2.1. Εισαγωγή

Η χρήση κοπτικών τύπου δίσκου είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη διάνοιξη σηράγγων με μηχανικά μέσα και ειδικότερα με τις Μηχανές Ολομέτωπης Κοπής, γνωστές και ως TBM (Tunnel Boring Machines), αλλά και με τις μηχανές Raise Boring, που χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη κατακόρυφων ανοιγμάτων μεγάλων διαμέτρων. Τα μηχανήματα αυτά είναι ιδιαίτερος διαδεδομένα, καθώς είναι σε θέση να επιτύχουν υψηλούς ρυθμούς προχώρησης. Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την επίδοση των μηχανημάτων είναι οι μηχανικές ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος, η εισροή νερού και όσον αφορά στο μηχάνημα, η διάμετρος, η ισχύς, η ροπή στρέψης και η δύναμη ώσης του, η ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής, ο τύπος και οι διαστάσεις των κοπτικών και τέλος η μεταξύ τους απόσταση.

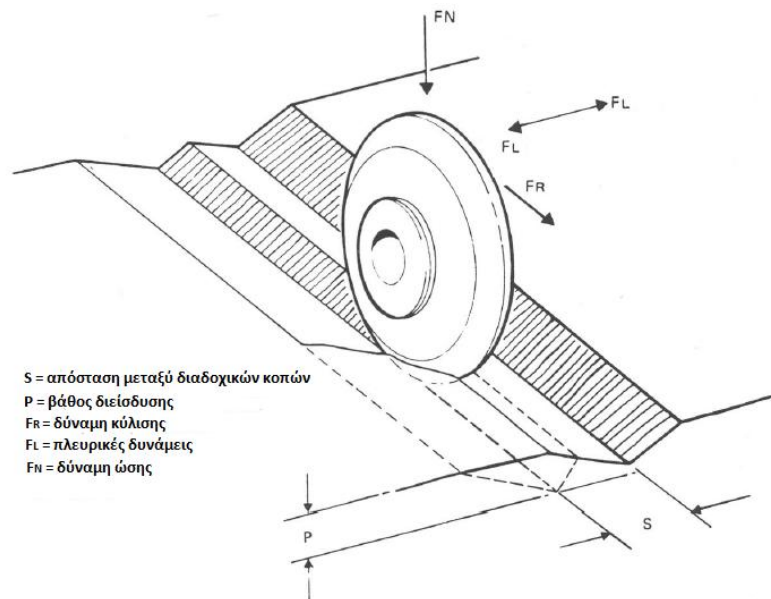
Υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης της επίδοσης ενός TBM, που εξορύσσει με κοπτικά δίσκου, μέσω διαφόρων μεθόδων. Συγκεκριμένα, οι μέθοδοι είναι θεωρητικές, εμπειρικές, εργαστηριακές είτε μέσω δοκιμών κοπής πλήρους κλίμακας (full-scale cutting tests), είτε μέσω δοκιμών κοπής μικρής κλίμακας (small-scale cutting tests) και τέλος δοκιμές στο πεδίο με τη χρήση πραγματικού μηχανήματος. Τα εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης βασίζονται κυρίως στην κεκτημένη εμπειρία καθώς και στην ερμηνεία προηγούμενων καταγεγραμμένων δεδομένων πεδίου.

Τα θεωρητικά μοντέλα βασίζονται στην ανάλυση των δυνάμεων που δρουν στο κοπτικό και στη συσχέτιση τους με τις μηχανικές ιδιότητες του άρρηκτου βράχου, όπως η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, η αντοχή σε εφελκυσμό και σε διάτμηση, με τις ιδιότητες της βραχομάζας, όπως ο δείκτης ποιότητας βράχου (RQD) και τέλος με τα χαρακτηριστικά του μηχανήματος.

Η πιο αξιόπιστη διαθέσιμη μέθοδος είναι οι δοκιμές κοπής σε πλήρη κλίμακα σε συνδυασμό με τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος, καθώς οι δυνάμεις κοπής μετρώνται με κοπτικούς δίσκους πραγματικού μεγέθους σε δείγματα πετρώματος με Μηχανή Γραμμικής Κοπής που είναι γνωστή και ως LCM (Linear Cutting Machine).

Στο σχήμα 2.1, απεικονίζονται οι δυνάμεις που ασκεί ένα κοπτικό τύπου δίσκου και τα σημεία στα οποία εφαρμόζονται, όπως φαίνονται κατά τη δοκιμή κοπής σε Μηχανή Γραμμικής Κοπής. Συγκεκριμένα, η δύναμη κύλισης F_R (rolling force) ασκείται προς την κατεύθυνση της κοπής του δίσκου, η δύναμη ώσης ή ορθή δύναμη F_N (thrust/normal force) ασκείται στο πέτρωμα κατακόρυφα και διέρχεται από το κέντρο του δίσκου και οι πλευρικές δυνάμεις F_L (lateral force) ασκούνται στο πέτρωμα σε διεύθυνση κάθετη με την κίνηση του κοπτικού. Επιπλέον φαίνονται δύο παράμετροι εξέχουσας σημασίας για την κοπή πετρωμάτων. Η πρώτη είναι το βάθος

διείσδυσης P του κοπτικού στο πέτρωμα, ενώ η δεύτερη είναι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπών S .

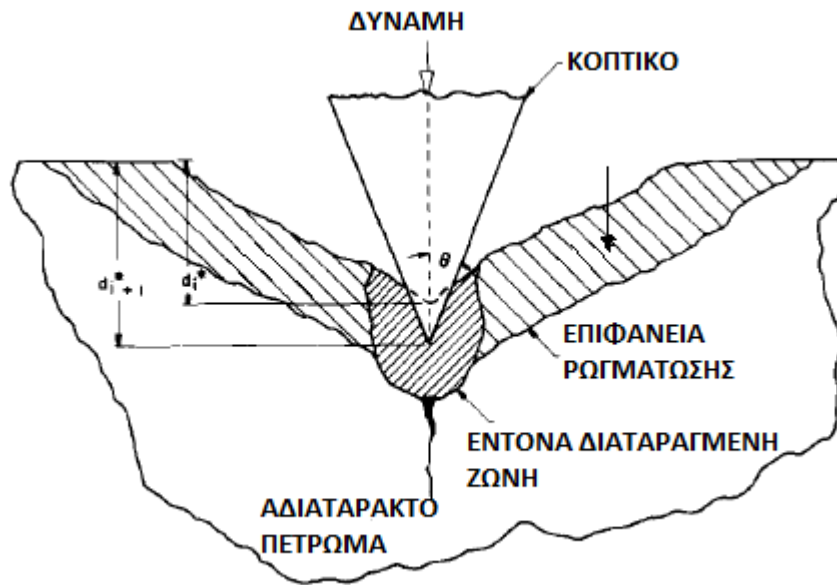


Σχήμα 2.1 Δυνάμεις κατά την κοπή κοπτικού δίσκου και κύριες παράμετροι (Πηγή: Snowdon et al, 1982)

Στη συνέχεια παρατίθενται οι πιο σημαντικές θεωρίες που έχουν παρουσιαστεί και σχετίζονται με το μηχανισμό αστοχίας πετρωμάτων κατά την κοπή τους με κοπτικά εργαλεία τύπου δίσκου. Οι κύριοι μηχανισμοί αστοχίας, όπως υποστηρίζουν οι παρατιθέμενες θεωρίες κοπής, είναι η αστοχία λόγω εφελκυσμού και η αστοχία λόγω διάτμησης. Οι θεωρίες αυτές αναπτύχθηκαν, με σκοπό τόσο την καλύτερη κατανόηση του τρόπου που αστοχεί το πέτρωμα κατά την εξόρυξη του όσο και την βελτιστοποίηση των συστημάτων κοπής.

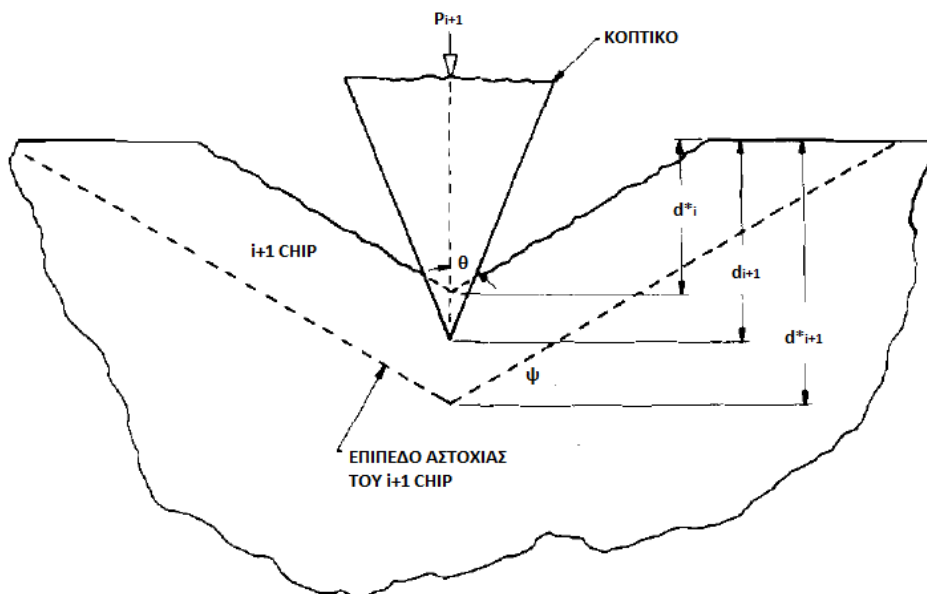
2.2. Θεωρία Paul – Sikarskie (1965)

Οι Paul και Sikarskie ασχολήθηκαν με την στατική διείσδυση ενός μόνο κοπτικού άκρου σε πέτρωμα. Θεωρήθηκε ότι το μήκος της ακμής είναι αρκετά μεγάλο ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί δισδιάστατη ανάλυση. Επίσης, έγιναν κάποιες απλοποιήσεις. Αρχικά, θεωρήθηκε ότι το δημιουργούμενο, από την κοπή, θραύσμα (“chip”) βρίσκεται σε ένα επίπεδο το οποίο ξεκινάει από την αιχμή του κοπτικού και φτάνει ως την επιφάνεια του πετρώματος με μία γωνία κλίσης ψ . Κατά μήκος του επιπέδου αυτού υπάρχει ισορροπία των δυνάμεων, καθώς και ισχύς του κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb σε όλα τα σημεία του επιπέδου.



Σχήμα 2.2 Απεικόνιση διείσδυσης κοπτικού σε πέτρωμα (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)

Οι βασικές υποθέσεις και παραδοχές όσον αφορά στην ανάλυση της διείσδυσης της αιχμής φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα. Οι όροι d_i^* και d_{i+1}^* , αναφέρονται στις διεισδύσεις από τις οποίες δημιουργούνται τα i και $i+1$ θραύσματα. Η διείσδυση από το d_i^* έως το d_{i+1}^* , αναφέρεται ως ο $i+1$ κύκλος και αντιπροσωπεύει κυρίως τη διαδικασία θραύσης. Θεωρείται ότι η εν λόγω διαδικασία μπορεί να περιγραφεί από μια γνωστή σχέση μεταξύ δύναμης και διείσδυσης. Υποτίθεται πως αυτή η σχέση είναι γνωστή είτε από πειραματικά δεδομένα είτε από αριθμητικές αναλύσεις, όμως παραλείπεται λόγω του ότι αποτελεί ένα ποιοτικά διαφορετικό πρόβλημα από την δημιουργία “chip”.



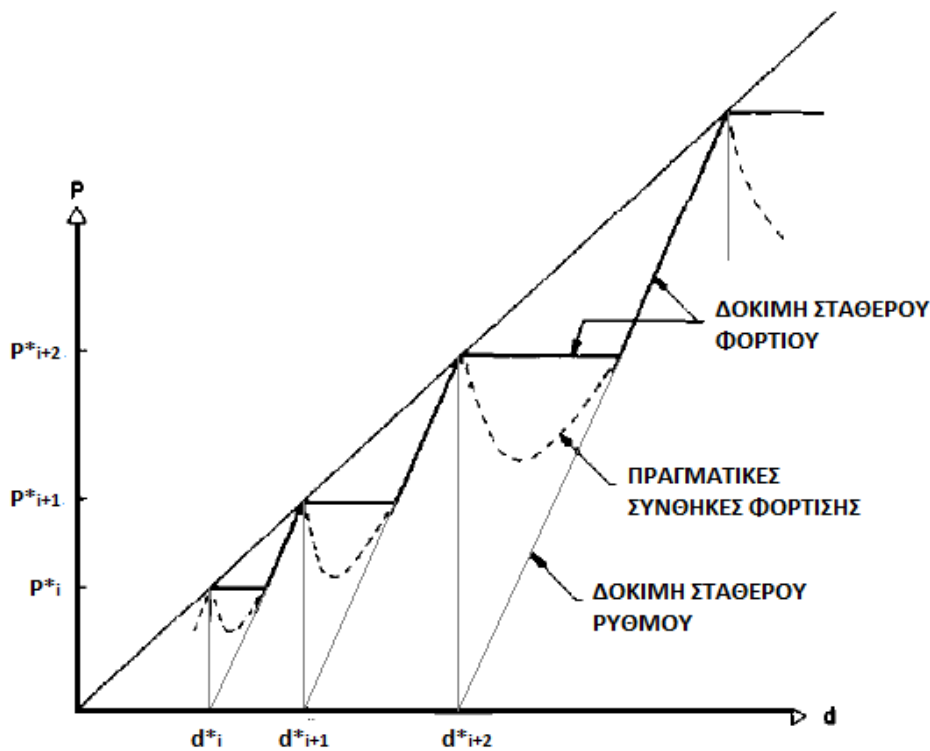
Σχήμα 2.3. Απεικόνιση γεωμετρικών χαρακτηριστικών κοπής (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)

Όταν η διείσδυση φτάνει στο επίπεδο d^*_{i+1} (που αποτελεί άγνωστο στο εν λόγω πρόβλημα), επιτυγχάνεται ένα εντατικό πεδίο που ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb και δημιουργούνται ρωγματώσεις υπό γωνία ψ (επίσης ένας άγνωστος). Ο τελευταίος άγνωστος που πρέπει να προσδιοριστεί είναι ο P^*_{i+1} , που αποτελεί το φορτίο ανά μονάδα μήκους της κοπτικής αιχμής. Μόλις σχηματιστεί αυτό το θραύσμα θεωρείται ότι έχει αποσπαστεί και ως εκ τούτου δεν επηρεάζει περαιτέρω το σύστημα. Στη συνέχεια ακολουθεί ο επόμενος κύκλος διείσδυσης $i + 2$. Επιβάλλεται να σημειωθεί ότι οι όροι που περιλαμβάνουν «*» αναφέρονται στο επίπεδο της δημιουργίας της ρωγμάτωσης, ενώ οι όροι που δεν περιλαμβάνουν αστερίσκο αναφέρονται στο επίπεδο διείσδυσης του κοπτικού.

Κάθε κύκλος διείσδυσης είναι χρονικά εξαρτώμενος από τον προηγούμενο, σε ότι αφορά στις δυνάμεις, τις διεισδύσεις κτλ. που συμμετείχαν στην δημιουργία ενός θραύσματος. Δεδομένου του ότι δεν υπάρχει χαρακτηριστικό μήκος στη σφήνα, εφόσον θεωρείται ότι εκτείνεται ως το άπειρο τόσο στην κατεύθυνση της ακμής κοπής όσο και στην κατεύθυνση της διείσδυσης, κάθε “chip” έχει ίδιο σχήμα με το προηγούμενο που συσχετίζεται όμως με αυτό με έναν συντελεστή κλίμακας. Αυτό σημαίνει ότι οι υπολογισμοί για κάθε κύκλο είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν γνωρίζοντας τα αποτελέσματα του προηγούμενου κύκλου και συνδυάζοντας τα με τον προαναφερθέντα συντελεστή.

Στη διαμόρφωση του μοντέλου πραγματοποιούνται δύο τύποι δοκιμών. Στην πραγματικότητα, σε μια κατάσταση φόρτισης, το φορτίο στην αιχμή του κοπτικού αυξάνεται μονοτονικά έως τη φάση της σύνθλιψης. Μετά τη δημιουργία ενός θραύσματος το φορτίο στην αιχμή πέφτει απότομα, χωρίς όμως να μηδενίζεται, αφού στο εξορυγμένο “chip” εξακολουθεί να ασκείται κάποια δύναμη και διότι το κοπτικό έχει τη δυνατότητα κάποιας ελαστικής ανάκτησης. Οι συγγραφείς, με τις δοκιμές που πραγματοποίησαν, προσπάθησαν να θέσουν κάποια όρια στις πραγματικές συνθήκες φόρτισης.

Η πρώτη δοκιμή είναι «σταθερού ρυθμού», στην οποία το κοπτικό κινείται εντός του πετρώματος με σταθερή ταχύτητα και προκύπτει μια καμπύλη δύναμης-διείσδυσης, όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η αιχμή δεν αλλάζει ταχύτητα μετά το σχηματισμό του θραύσματος, άρα δεν υπάρχει χρόνος για ελαστική ανάκτηση και συνεπώς το φορτίο μηδενίζεται. Η δεύτερη δοκιμή ονομάζεται «σταθερού φορτίου» και έχει ως σταθερά το ρυθμό αύξησης του φορτίου κατά τη διάρκεια της διείσδυσης. Ωστόσο, αντίθετα με την πρώτη δοκιμή, στην προκειμένη, η ακμή πέφτει απότομα με τέτοιο τρόπο ώστε το φορτίο παραμένει σταθερό μετά την δημιουργία κάθε θραύσματος. Μια πραγματική κατάσταση φόρτισης θα μπορούσε να απεικονίσει η διακεκομμένη καμπύλη του διαγράμματος 2.1., η οποία βρίσκεται μεταξύ των δύο εξιδανικευμένων δοκιμών.



Διάγραμμα 2.1. Δοκιμές σταθερού φορτίου και σταθερού ρυθμού που πραγματοποιήθηκαν (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)

Αρχικά, χρησιμοποιείται το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, εφόσον ισχύει όπως έχει προαναφερθεί:

$$|\tau| - \mu * \sigma = c \quad (2.1)$$

όπου: τ = διατμητική τάση στο επίπεδο αστοχίας

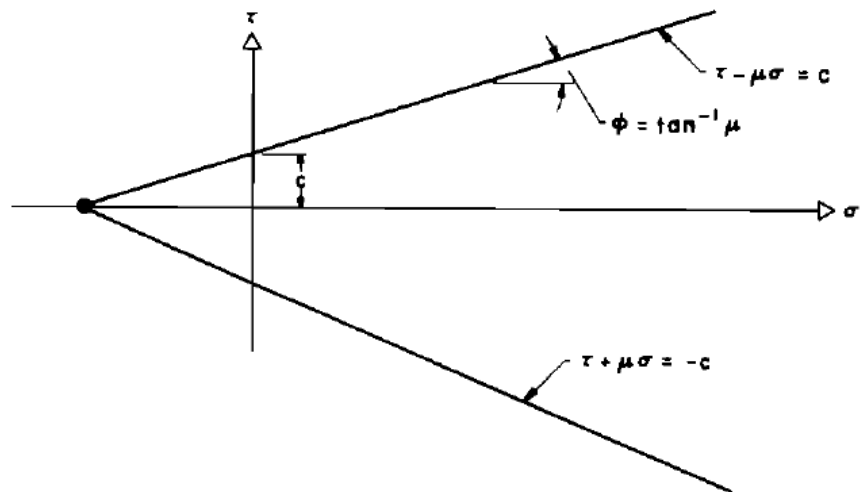
μ = συντελεστής εσωτερικής τριβής

σ = ορθή τάση στο επίπεδο αστοχίας

c = συνοχή

Η γεωμετρική αναπαράσταση του κριτηρίου αστοχίας παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4. Οι τάσεις που βρίσκονται εντός των γραμμών της εξίσωσης αντιστοιχούν στο συμπαγές πέτρωμα. Αντίθετα, οι τάσεις που βρίσκονται πάνω στις γραμμές ή ικανοποιούν την εξίσωση αναφέρονται σε συνθήκες αστοχίας. Τιμές εκτός των ορίων της εξίσωσης είναι ανέφικτο να ληφθούν.

Για να ικανοποιηθεί το κριτήριο αστοχίας, θα πρέπει να είναι γνωστό το εντατικό πεδίο σε όλη την περιοχή. Δεδομένου του ότι αυτό αποτελεί ένα δυσεπίλυτο πρόβλημα θεωρήθηκε ότι το κριτήριο αστοχίας ικανοποιείται κατά μήκος ολόκληρου του επιπέδου που ξεκινάει από την ακμή του κοπτικού και εκτείνεται έως την ελεύθερη επιφάνεια με γωνία κλίσης ψ , όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.



Σχήμα 2.4. Γεωμετρική αναπαράσταση του κριτηρίου αστοχίας (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)

Οι τάσεις τ και σ είναι τέτοιες ώστε να υφίσταται ισορροπία στο δημιουργούμενο θραύσμα. Για τις συνισταμένες δυνάμεις κατά μήκος του επιπέδου αστοχίας ισχύουν:

$$N = \int_0^L \sigma(\xi) d\xi \quad (2.2\alpha)$$

$$T = \int_0^L \tau(\xi) d\xi \quad (2.2\beta)$$

όπου: N = ορθή δύναμη ανά μονάδα μήκους του κοπτικού άκρου στο "chip"

T = διατμητική δύναμη ανά μονάδα μήκους του κοπτικού άκρου στο "chip"

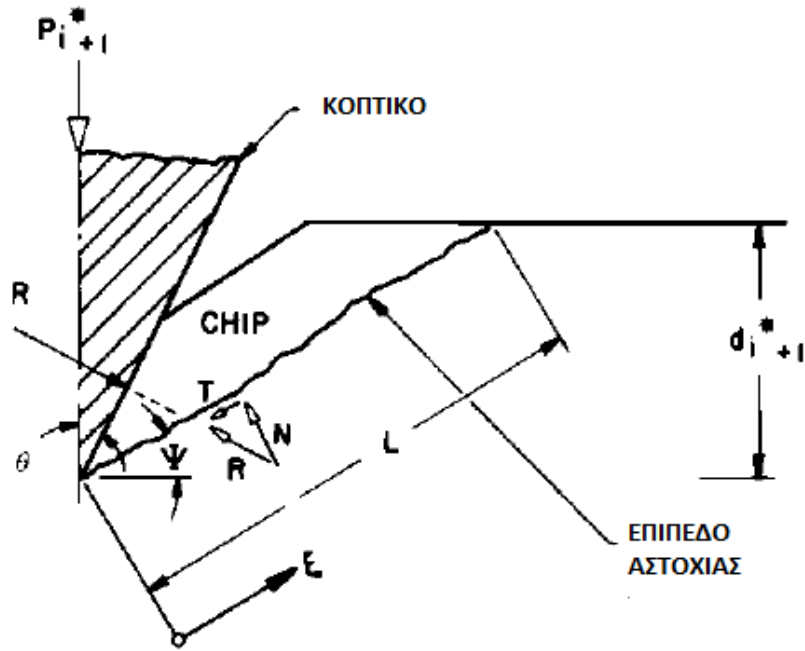
ξ = μεταβλητή που βρίσκεται κατά μήκος του επιπέδου αστοχίας

Οι παράμετροι αυτές φαίνονται στο σχήμα 2.5. που παρατίθεται στη συνέχεια. Εφόσον το κριτήριο ισχύει για όλα τα σημεία πάνω στο επίπεδο αστοχίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσες τιμές των τάσεων:

$$|\bar{\tau}| - \mu * \bar{\sigma} = c \quad (2.3)$$

όπου: $\bar{\tau} = T/L$

$\bar{\sigma} = N/L$



Σχήμα 2.5. Απεικόνιση παραμέτρων οι οποίες υπολογίζονται βάσει του κριτηρίου αστοχίας (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)

Από το σχήμα αυτό είναι δυνατό να προκύψουν οι ακόλουθες σχέσεις, θεωρώντας ότι η τριβή που εφαρμόζεται στο θραύσμα από την αιχμή είναι αμελητέα:

$$\bar{\sigma} = \frac{R}{L} * \sin(\psi + \theta) \quad (2.4\alpha)$$

$$\bar{\tau} = \frac{R}{L} * \cos(\psi + \theta) \quad (2.4\beta)$$

$$R = \frac{P_{i+1}^*}{2 * \sin\theta} \quad (2.5\alpha)$$

$$L = \frac{d_{i+1}^*}{\sin\psi} \quad (2.5\beta)$$

όπου: R = συνισταμένη δύναμη ανά μονάδα μήκους του κοπτικού άκρου

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 2.4 και 2.5 προκύπτουν στη συνέχεια:

$$\bar{\tau} - \mu * \bar{\sigma} = \frac{P_{i+1}^*}{d_{i+1}^* * 2 * \sin\theta} * [\sin\psi * \cos(\psi + \theta) - \mu * \sin\psi * \sin(\psi + \theta)] \quad (2.6)$$

και αντικαθιστώντας:

$$\mu = \tan\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi}$$

προκύπτει:

$$\begin{aligned} \bar{\tau} - \mu * \bar{\sigma} &= \frac{P *_{i+1}}{d *_{i+1}} * \frac{1}{2 * \sin\theta * \cos\varphi} * \\ &* [\sin\psi * \cos(\psi + \theta) * \cos\varphi - \sin\psi * \sin(\psi + \theta) * \sin\varphi] = \\ &= \frac{P *_{i+1}}{2 * d *_{i+1}} * \frac{\sin\psi * \cos(\psi + \theta + \varphi)}{\sin\theta * \cos\varphi} \quad (2.7) \end{aligned}$$

Η αστοχία θα συμβεί όταν η μέγιστη τιμή της εικονικής διατμητικής τάσης εξισορροπηθεί με της συνοχής c . Η μέγιστη τιμή του $(\bar{\tau} - \mu * \bar{\sigma})$ θα παρατηρηθεί στο επίπεδο αστοχίας με γωνία κλίσης ψ :

$$\begin{aligned} \frac{d(\bar{\tau} - \mu * \bar{\sigma})}{d\psi} &= \frac{P *_{i+1}}{2 * d *_{i+1}} * \frac{1}{\sin\theta * \cos\varphi} * \\ &* [\cos\psi * \cos(\psi + \theta + \varphi) - \sin\psi * \sin(\psi + \theta + \varphi)] = 0 \end{aligned}$$

και συνδυάζοντας τις ποσότητες εντός των αγκυλών ισχύει ότι:

$$\cos(2\psi + \theta + \varphi) = 0 \quad (2.8)$$

$$\psi = 45^\circ - \frac{\theta + \varphi}{2} \quad (2.9)$$

Εφόσον δεν θα έχει νόημα η ύπαρξη μιας αρνητικής γωνίας ψ είναι λογικό ότι:

$$\theta + \varphi \leq 90^\circ \quad (2.10)$$

Με βάση την ανισότητα αυτή, ουσιαστικά, γίνεται αντιληπτό ότι για να λάβει χώρα η δημιουργία ενός “chip”, θα πρέπει το άθροισμα της γωνίας εσωτερικής τριβής και η μισή γωνία της αιχμής του κοπτικού να είναι μικρότερο από 90° . Σε διαφορετική περίπτωση, λαμβάνει χώρα μόνο σύνθλιψη του πετρώματος.

Χρησιμοποιώντας το κριτήριο αστοχίας καθώς και τις εξισώσεις 2.7 και 2.9 προκύπτουν:

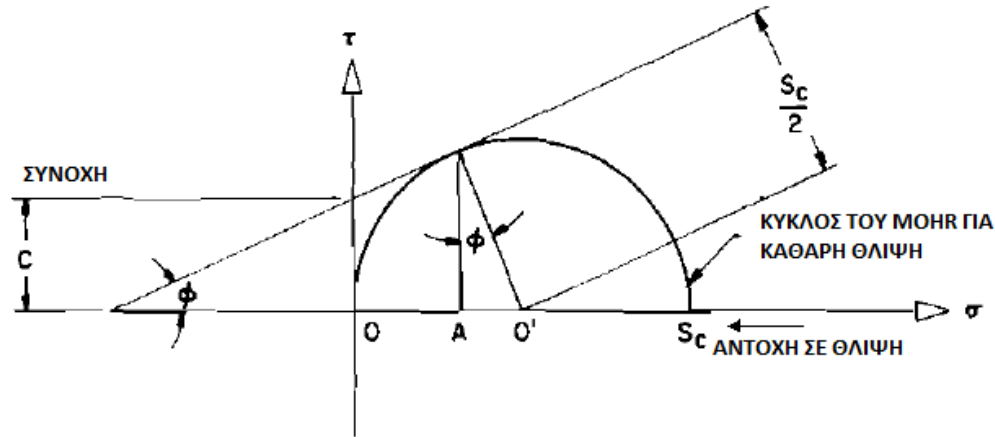
$$\frac{P *_{i+1}}{d *_{i+1}} * \frac{\sin 45^\circ - \frac{\theta + \varphi}{2} * \cos 45^\circ + \frac{\theta + \varphi}{2}}{2 * \sin\theta * \cos\varphi} = c \quad (2.11)$$

Απλοποιώντας και λύνοντας ως προς $P *_{i+1}/d *_{i+1}$:

$$\frac{P *_{i+1}}{d *_{i+1}} = \frac{4 * c * \sin\theta * \cos\varphi}{1 - \sin(\theta + \varphi)} = K \quad (2.12)$$

Από τη σχέση 12, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι για δεδομένα χαρακτηριστικά του υλικού και γωνία της κοπτικής αιχμής, ο λόγος του φορτίου προς

τη διείδυση είναι σταθερός για το σχηματισμό οποιουδήποτε θραύσματος, καθώς αυτό δημιουργείται. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και στο διάγραμμα 2.1., όπου οι κορυφαίες τιμές του φορτίου σε κάθε κύκλο βρίσκονται πάνω στην ευθεία $P^* = K \cdot d^*$.



Σχήμα 2.6. Κριτήριο αστοχίας όπου φαίνεται η σχέση συνοχής, γωνίας τριβής και θλιπτικής αντοχής (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)

Η συνοχή είναι δυνατό να εκφραστεί και μέσω της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Από το σχήμα 2.6. φαίνεται ότι ισχύει:

$$c = \frac{S_c}{2} * \cos\varphi - \tan\varphi * (\overline{O'A}) = \frac{S_c}{2} * \cos\varphi - \tan\varphi * (1 - \sin\varphi) \\ = \frac{S_c}{2} * \frac{1 - \sin\varphi}{\cos\varphi} \quad (2.13)$$

Ως εκ τούτου, η σχέση 12 μπορεί να μετασχηματιστεί ως εξής:

$$\frac{P^*_{i+1}}{d^*_{i+1}} = 2 * S_c * \frac{\sin\theta * (1 - \sin\varphi)}{1 - \sin(\theta + \varphi)} = K \quad (2.14)$$

Έτσι, ο λόγος του φορτίου προς τη διείδυση είναι εφικτό να υπολογιστεί είτε βάσει της σχέσης 2.12 είτε της 2.14. Για τον προσδιορισμό του μεγέθους του φορτίου χωριστά θεωρήθηκε ότι ισχύει γραμμικός νόμος σύνθλιψης του πετρώματος ώστε:

$$P^*_{i+1} = k_1 * [d_{i+1} - d^*_i] + k_2 * [d_{i+1} - d^*_i]^2 + \dots \\ P_{i+1} = k * [d_{i+1} - d^*_i] \quad (2.15)$$

όπου: k = σταθερά εξαρτώμενη τόσο από το υλικό όσο και από τη γεωμετρία

Η σχέση 2.15, για το επίπεδο του σχηματισμού του i+1 “chip”, γίνεται:

$$P^*_{i+1} = k * [d^*_{i+1} - d^*_i] \quad (2.16)$$

Στη συνέχεια είναι εφικτή η παράλληλη λύση τόσο του φορτίου όσο και της διείσδυσης:

$$P^*_{i+1} = \frac{k * K}{k - K} * d^*_i \quad , \quad d^*_{i+1} = \frac{k}{k - K} * d^*_i \quad (2.17)$$

Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν επαναληπτικές σχέσεις της δύναμης και της διείσδυσης κατά τη διάρκεια της δημιουργίας ενός θραύσματος, που όμως εξαρτώνται άμεσα από τη δημιουργία του προηγούμενου θραύσματος. Επιπλέον, όπως φαίνεται ο συντελεστής κλίμακας που έχει προαναφερθεί είναι ο λόγος $k/(k-K)$.

Οι εν λόγω επαναληπτικές σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ακόμη, για την εύρεση δυνάμεων και διεισδύσεων για διαδοχικά “chip” με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P^*_{i+n} = K * \left(\frac{k}{k - K}\right)^n * d^*_i \quad d^*_{i+n} = \left(\frac{k}{k - K}\right)^n * d^*_i \quad (2.18)$$

Στην περίπτωση που είναι γνωστό το επίπεδο διείσδυσης κατά τη δημιουργία του πρώτου θραύσματος, βάσει των εξισώσεων 2.9, 2.16 και 2.18, ορίζεται πλήρως η διείσδυση της κοπτικής αιχμής.

Ένας τυπικός κύκλος για την δοκιμή σταθερού ρυθμού ξεκινά με μηδενικό φορτίο και ένα ορισμένο βάθος διείσδυσης (d^*_i). Στη συνέχεια, το φορτίο αυξάνεται γραμμικά με τη διείσδυση, σύμφωνα με τη σχέση 2.15, έως ότου δημιουργηθεί το θραύσμα με συνθήκες που διέπονται από τις εξισώσεις 2.17. Στο σημείο αυτό, το φορτίο μηδενίζεται ξανά, ολοκληρώνοντας τον κύκλο.

Κατά τη δοκιμή σταθερού φορτίου, ο κύκλος είναι ίδιος εκτός από το ότι το φορτίο παραμένει σταθερό μετά τη δημιουργία του “chip” μέχρι την επίτευξη μιας νέας θέσης ισορροπίας. Αυτή η θέση ορίζεται από την τομή της γραμμής σταθερού φορτίου με το φορτίο που προσδιορίζεται από την εξίσωση 2.15.

Με βάση το σχήμα 2.3. είναι εύκολο να προσδιοριστεί ο συνολικός όγκος του εξορυγμένου πετρώματος ανά μονάδα μήκους της κοπτικής ακμής μετά τη δημιουργία του i θραύσματος, χάρη σε γεωμετρικούς υπολογισμούς, ως εξής:

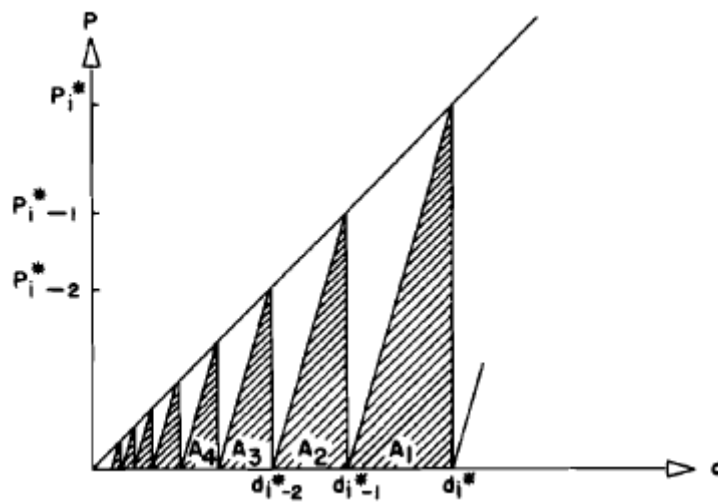
$$V_T = (d^*_i)^2 * \cot\psi \quad (2.19)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 2.18, είναι δυνατό να υπολογιστεί ο όγκος που παράγεται ανά μονάδα μήκους και ανά κύκλο:

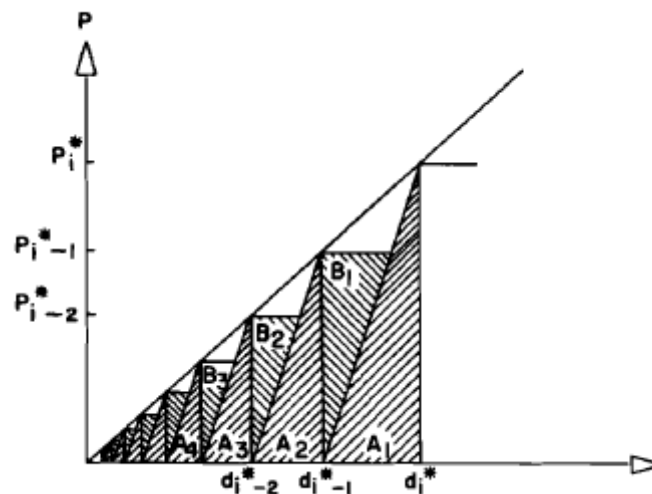
$$V_i = [(d^*_i)^2 - (d^*_{i-1})^2] * \cot\psi = \frac{2 * k * K - K^2}{k^2} * \cot\psi * (d^*_i)^2 \quad (2.20)$$

Όσον αφορά στις απαιτούμενες ενέργειες για να παραχθούν οι παραπάνω όγκοι, είναι αναγκαίο να οριστεί το είδος της χρησιμοποιούμενης δοκιμής, αφού οι υπολογισμοί διαφέρουν. Ακολουθούν τα διαγράμματα 2.2. και 2.3., εκ των οποίων το πρώτο

αντιστοιχεί στην ενέργεια για την κοπή έως ένα ορισμένο βάθος σε δοκιμή σταθερού ρυθμού και το δεύτερο στην ενέργεια σε δοκιμή σταθερού φορτίου.



Διάγραμμα 2.2. Ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη δοκιμή σταθερού ρυθμού (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)



Διάγραμμα 2.3. Ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη δοκιμή σταθερού φορτίου (Πηγή: Paul & Sikarskie, 1965)

Οι ενέργειες που φαίνονται είναι οι εξιδανικευμένες που απαιτούνται με αντίστοιχα εξιδανικευμένα ανώτερα και κατώτερα όρια. Στη δοκιμή σταθερού ρυθμού, η ενέργεια για δεδομένη διείσδυση d_i^* είναι:

$$E_a = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \quad (2.21)$$

όπου: A_n = η περιοχή του n τριγώνου που φαίνεται στις παραπάνω εικόνες και αντιστοιχεί στην ενέργεια ανά μονάδα μήκους της κοπτικής ακμής κατά τον n κύκλο.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 2.18, η επιφάνεια A_n μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$A_n = \frac{1}{2 * k} * \left(\frac{k - K}{k}\right)^{2*(n-1)} * (P^*_i)^2 \quad (2.22)$$

Ως εκ τούτου η εξίσωση 2.21 γίνεται:

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{(P^*_i)^2}{2 * k} * \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{k - K}{k}\right)^{2*(n-1)} = \\ &= \frac{(P^*_i)^2}{2 * k} * \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{k - K}{k}\right)^{2*n} = \\ &= \frac{(P^*_i)^2}{2 * k} * \frac{1}{1 - \left(\frac{k - K}{k}\right)^2} = \\ &= \frac{(P^*_i)^2}{2} * \frac{k}{2 * k * K - K^2} \quad (2.23) \end{aligned}$$

Σε περίπτωση που επιθυμείται να υπολογιστεί η ενέργεια συναρτήσει της διεύθυνσης, τότε βάσει της σχέσης 2.14 προκύπτει:

$$E_a = \frac{(d^*_i)^2}{2} * \frac{k * K}{2 * k - K} \quad (2.24)$$

Όσον αφορά στη δοκιμή σταθερού φορτίου, η ενέργεια που απαιτείται για τη διεύθυνση σε βάθος d^*_i είναι:

$$E_b = \sum_{n=1}^{\infty} A_n + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \quad (2.25)$$

όπου: $A_n + B_n =$ ενέργεια ανά μονάδα μήκους της κοπτικής ακμής κατά τον n κύκλο

Ωστόσο, ισχύει ότι $B_n = A_{n+1}$ και έτσι η σχέση 2.25 γίνεται:

$$\begin{aligned} E_b &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n + \sum_{n=2}^{\infty} A_n = \\ &= 2 * \sum_{n=1}^{\infty} A_n - A_1 = \\ &= (P^*_i)^2 * \frac{k}{2 * k * K - K^2} - \frac{(P^*_i)^2}{2 * k} = \end{aligned}$$

$$= \frac{(P^*_i)^2}{2} * \frac{(k - K)^2 + k^2}{k * K * (2 * k - K)} \quad (2.26)$$

Αντίστοιχα με τη δοκιμή σταθερού ρυθμού, υπάρχει η δυνατότητα έκφρασης της ενέργειας συναρτήσεως του βάθους διείδυσης και στη δοκιμή σταθερού φορτίου:

$$E_b = \frac{(d^*_i)^2}{2} * \frac{K * [(k - K)^2 + k^2]}{k * (2 * k - K)} \quad (2.27)$$

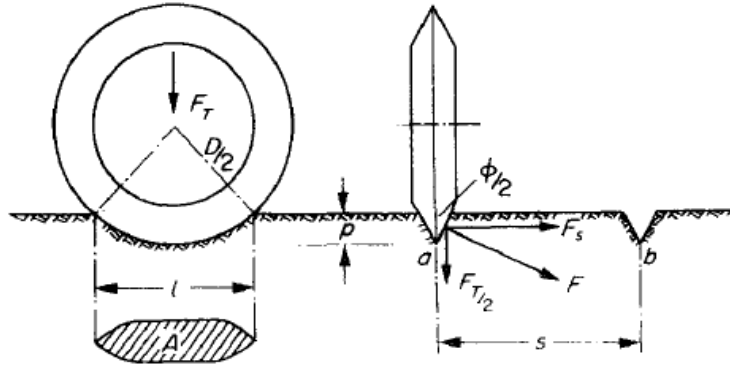
Έτσι, υπολογίζεται η ενέργεια για την κοπή ανά μονάδα όγκου του πετρώματος. Εάν διαιρεθούν οι σχέσεις 2.24 και 2.27 με την 2.19, τότε προκύπτουν οι ενεργειακές πυκνότητες για την κοπή του όγκου του πετρώματος που βρέθηκε προηγουμένως για τις δύο διαφορετικές δοκιμές. Αυτό που ουσιαστικά συμβαίνει είναι η διαίρεση της συνολικής ενέργειας που καταναλώθηκε με τον συνολικό όγκο που αποσπάστηκε. Δεδομένου ότι η θεωρία είναι γραμμική παρουσιάζοντας μία γεωμετρική ομοιότητα, αυτές οι ενεργειακές πυκνότητες που υπολογίζονται ισχύουν για κάθε κύκλο κοπής που πραγματοποιείται και είναι:

$$\bar{E}_a = \frac{k * K}{2 * (2 * k - K)} * \tan\psi \quad (2.28)$$

$$\bar{E}_b = \frac{K * [(k - K)^2 + k^2]}{2 * k * (2 * k - K)} \quad (2.29)$$

2.3. Θεωρία Roxborough – Phillips (1975)

Οι Roxborough και Phillips προσπάθησαν να προσδιορίσουν τις δυνάμεις που ασκούνται τα κοπτικά τύπου δίσκου σε πέτρωμα κατά την κοπή του. Σύμφωνα με τη μελέτη τους, η γεωμετρία του κοπτικού και η αντοχή του πετρώματος είναι παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα τις δυνάμεις. Χρησιμοποιήθηκαν υποθέσεις και προσεγγίσεις που δεν οδηγούν σε μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα. Η μορφή του κοπτικού που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της μελέτης φαίνεται στο σχήμα 2.7., με γωνία αιχμής ϕ , διάμετρο D και πλάτος αιχμής w . Διεισδύει σε επιφάνεια πετρώματος υπό τη δράση της δύναμης F_T , δηλαδή της δύναμης ώσης.



Σχήμα 2.7. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δίσκου που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μελέτη (Πηγή: Roxborough & Phillips, 1975)

Η επιφάνεια A αποτελεί την προβολή της διεπιφάνειας μεταξύ κοπτικού και πετρώματος και είναι δυνατό να υπολογιστεί, με τη βοήθεια απλοποιήσεων και χωρίς να απέχει από την πραγματική της τιμή, με την ακόλουθη σχέση:

$$A = 2 * p * l * \tan \frac{\varphi}{2} \quad (2.30)$$

όπου: p = διείσδυση κοπτικού

l = μήκος χορδής διεπιφάνειας μεταξύ κοπτικού – πετρώματος

φ = γωνία αιχμής δίσκου

Το μήκος l της διεπιφάνειας αυτής αυξάνεται με την ταυτόχρονη αύξηση του βάθους διείσδυσης και η σχέση των δύο αυτών παραμέτρων είναι:

$$l = 2\sqrt{D * p - p^2} \quad (2.31)$$

όπου: D = διάμετρος δίσκου

p = διείσδυση κοπτικού

Θεωρείται ότι η αντίσταση στη διείσδυση προκαλεί θλίψη και η δύναμη ώσης F_T ισοδυναμεί με μία θλιπτική τάση που δρα πάνω από την επιφάνεια A της επαφής πετρώματος – κοπτικού και σχετίζεται άμεσα με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος. Η δύναμη ώσης F_T , με βάση τα παραπάνω, μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

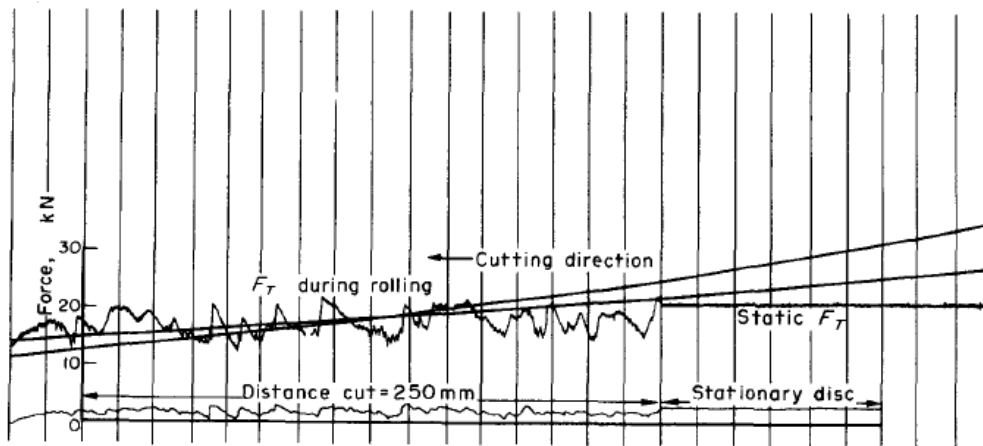
$$F_T = 4 * \sigma * \tan \frac{\varphi}{2} \sqrt{D * p^3 - p^4} \quad (2.32)$$

όπου: σ = αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος

Απαραίτητο κρίθηκε να γίνει η υπόθεση ότι η δύναμη ώσης F_T παραμένει σταθερή κατά την κύλιση του δίσκου επάνω στο πέτρωμα με σκοπό την κοπή αυτού. Η υπόθεση αυτή μπορεί να υποστηριχθεί από το διάγραμμα 2.4., που κατασκευάστηκε

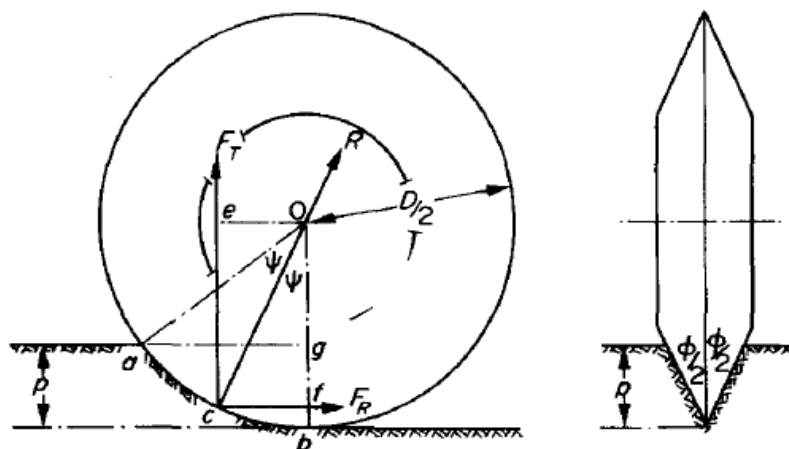
βάσει μετρήσεων που έλαβαν χώρα τόσο κατά την κύλιση του δίσκου όσο και σε στατική φάση κοπής. Το διάγραμμα παρουσιάζει τη διακύμανση της στατικής δύναμης ώσης F_T και της ίδιας δύναμης, μετρούμενης ενώ ο δίσκος βρίσκεται εν κινήσει σε συνάρτηση με την κατεύθυνση κοπής. Φαίνεται ότι οι υψηλότερες τιμές της F_T είναι ουσιαστικά ίδιες για συνθήκες στατικές και κύλισης.

Επιπρόσθετα, παρατηρείται στην πράξη ότι το πέτρωμα το οποίο θραύεται και εξορύσσεται, παραμένει στη θέση του, καθώς ο δίσκος απομακρύνεται από αυτό. Έτσι, είναι εύλογο να υποτεθεί ότι το τμήμα του δίσκου που έχει διεισδύσει, βρίσκεται σε συνεχή επαφή με τις επιφάνειες της αύλακος που δημιουργείται κατά την κύλιση του δίσκου και κοπή του πετρώματος.



Διάγραμμα 2.4. Δύναμη ώσης F_T , κατά τη στατική κατάσταση και κατά την κίνηση του δίσκου συναρτήσει της κατεύθυνσης κοπής (Πηγή: Roxborough & Phillips, 1975)

Στη συνέχεια παρατίθεται το σχήμα 2.8. στο οποίο απεικονίζεται ο δίσκος κατά την κοπή με τις κύριες δυνάμεις F_T και F_R που δρουν στο πέτρωμα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του.



Σχήμα 2.8. Δυνάμεις και γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοπτικού δίσκου (Πηγή: Roxborough & Phillips, 1975)

Όταν ο δίσκος περιστρέφεται ελεύθερα και εφόσον η τριβή θεωρηθεί αμελητέα, τότε η συνισταμένη δύναμη R θα πρέπει να διέρχεται από το κέντρο του δίσκου O , ώστε να ισορροπούν οι ροπές στο σύστημα. Εάν θεωρηθεί ότι η συνισταμένη R ασκείται στο μέσο του τόξου της επαφής κοπτικού – πετρώματος abc , όπως φαίνεται στο σχήμα, τότε ισχύουν τα ακόλουθα:

$$F_R * \overline{Of} = F_T * \overline{Oe} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{F_T}{F_R} = \cot\psi \quad (2.33)$$

Επίσης:

$$\frac{\overline{Og}}{\overline{Oa}} = \frac{\frac{D}{2} - p}{\frac{D}{2}} = \cos 2\psi = \frac{1 - \tan^2\psi}{1 + \tan^2\psi} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \tan^2\psi = \frac{p}{D - p} \quad (2.34)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 2.33 και 2.34 προκύπτει ότι:

$$\frac{F_T}{F_R} = \sqrt{\frac{D - p}{p}} \quad (2.35)$$

Βάσει της σχέσης αυτής και δεδομένου του ότι είναι γνωστή η σχέση υπολογισμού της F_T , ισχύει τελικά για την F_R :

$$F_R = 4 * \sigma * p^2 * \tan \frac{\varphi}{2} \quad (2.36)$$

Στην περίπτωση που είναι επιθυμητό να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς και ο συντελεστής τριβής, ακολουθείται η παρακάτω σχέση, χωρίς όμως να δίνει αποτελέσματα με σημαντικές διαφορές, ειδικά όταν ο συντελεστής μ είναι μικρότερος από 0,01:

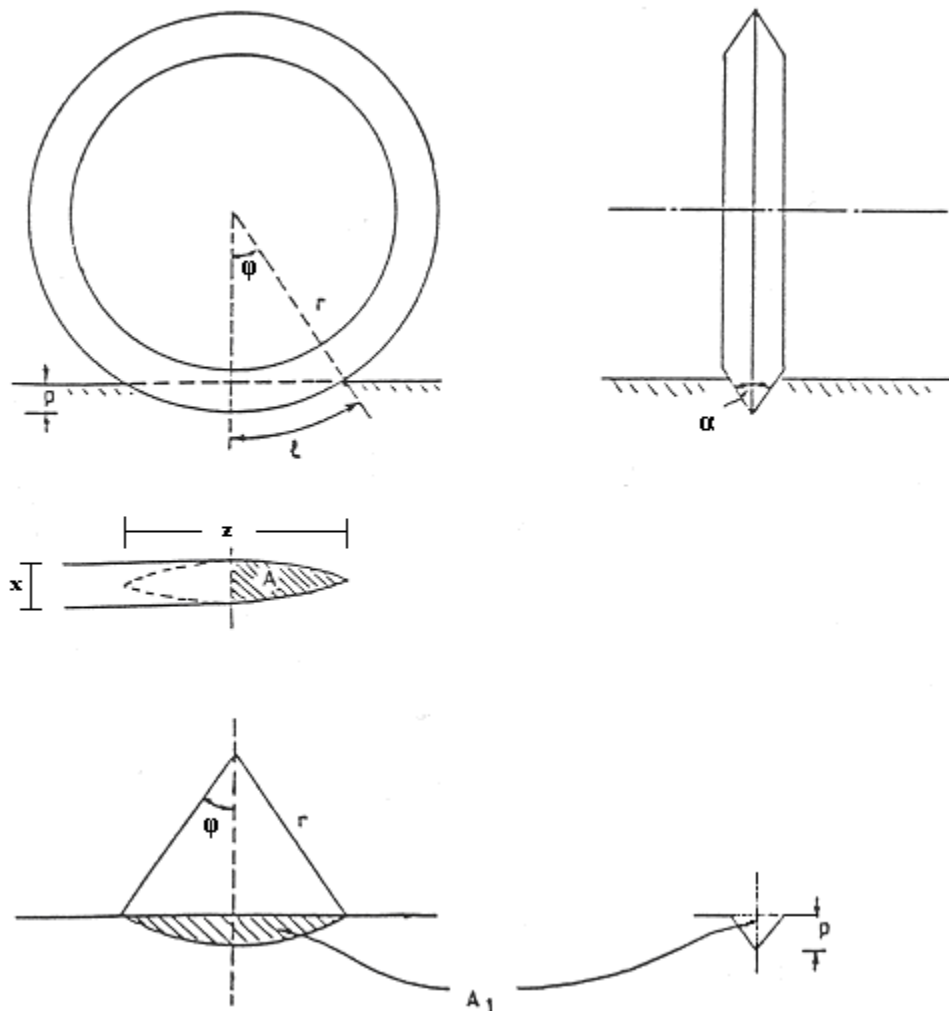
$$\frac{F_T}{F_R} = \frac{\sqrt{\frac{D - p}{p}}}{1 + \mu * \sqrt{\frac{D}{p}}} \quad (2.37)$$

2.4. Θεωρία Ozdemir – Miller – Wang (1978)

Οι Ozdemir, Miller και Wang παρατηρώντας τη θεωρία των Roxborough και Phillips σχετικά με την προβαλλόμενη στο οριζόντιο επίπεδο διεπιφάνεια μεταξύ κοπτικού και πετρώματος, κατέληξαν στο ότι αυτή λαμβάνει χώρα, ουσιαστικά, μόνο στην

περίπτωση που ο δίσκος διεισδύει στο πέτρωμα χωρίς ταυτόχρονη κύλιση του. Έτσι θεώρησαν πως κατά την κύλιση η διεπιφάνεια αυτή είναι η μισή. Επίσης θεώρησαν ότι το μέτρο της δύναμης ώσης F_N προέρχεται από δύο συνιστώσες. Την πρώτη συνιστώσα αποτελεί η αντοχή του πετρώματος σε διείσδυση ενώ η δεύτερη σχετίζεται με τη διάτμηση στην οποία υπόκειται το πέτρωμα και κατ' επέκταση τη διατμητική αστοχία που λαμβάνει χώρα μεταξύ διαδοχικών κοπών.

Στο σχήμα 2.9. απεικονίζεται το κοπτικό και κάποια χαρακτηριστικά του. Συγκεκριμένα, η ακτίνα του δίσκου r , το βάθος διείσδυσης του κοπτικού εντός του πετρώματος p , η γωνία αιχμής του δίσκου α , το ήμισυ της γωνίας που σχετίζεται με το βυθισμένο τμήμα του κοπτικού στο πέτρωμα φ και το ήμισυ του μήκους τόξου που βρίσκεται εντός του κοπτικού και αντιστοιχεί στο μήκος τόξου της γωνίας φ , το οποίο είναι το l . Τέλος, A_1 είναι η επιφάνεια του τμήματος του δίσκου που έχει διεισδύσει στο πέτρωμα και A η επιφάνεια που αντιστοιχεί κάτοψη του πετρώματος που έχει αποσπαστεί από τη διείσδυση του κοπτικού.



Σχήμα 2.9. Κοπτικό δίσκου και χαρακτηριστικά μεγέθη του (Πηγή: Ozdemir et al, 1978)

Η επιφάνεια A μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της γεωμετρίας ως εξής:

$$A = A_1 * \tan \frac{\alpha}{2} = r^2 * (\varphi - \cos \varphi * \sin \varphi) * \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2.38)$$

Η δύναμη ώσης F_N , θεωρείται ότι είναι άθροισμα δύο δυνάμεων:

$$F_N = F_1 + F_2 \quad (2.39)$$

όπου: F_1 = δύναμη που απαιτείται για τη διείδυση του δίσκου σε βάθος p

F_2 = δύναμη που παρέχει η οριζόντια συνιστώσα F_S , η οποία υποβάλλει σε διάτμηση το πέτρωμα μεταξύ γειτονικών κοπών

Η αντοχή του πετρώματος σε διείδυση, μπορεί να θεωρηθεί ίση με την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη σ_c και έτσι προκύπτει:

$$F_1 = \sigma_c * A = \sigma_c * r^2 * (\varphi - \cos \varphi * \sin \varphi) * \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2.40)$$

Κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας του πετρώματος, ισχύει η ακόλουθη σχέση για την οριζόντια δύναμη F_S :

$$F_S = \tau_S * A_S \quad (2.41)$$

όπου: τ_S = διατμητική αντοχή πετρώματος
 A_S = επιφάνεια διατμητικής αστοχίας

Η επιφάνεια της διατμητικής αστοχίας προκύπτει, επίσης, βάσει της γεωμετρίας:

$$A_S = l * \left(s - 2 * p * \tan \frac{\alpha}{2} \right) = r * \varphi * \left(s - 2 * p * \tan \frac{\alpha}{2} \right) \quad (2.42)$$

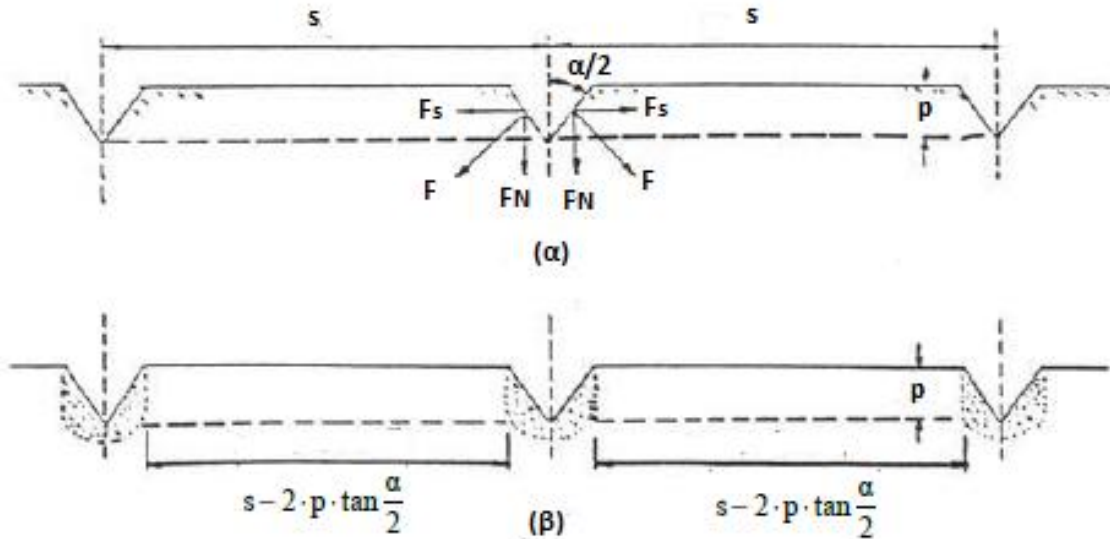
όπου: s = απόσταση μεταξύ γειτονικών κοπών

Οι δυνάμεις και τα μεγέθη που υπολογίζονται παραπάνω απεικονίζονται στο σχήμα 2.10. Επιπλέον, αντικαθιστώντας τη σχέση 2.42 στην 2.41, προκύπτει:

$$F_S = \tau_S * r * \varphi * \left(s - 2 * p * \tan \frac{\alpha}{2} \right) \quad (2.43)$$

Και ακολούθως ισχύει:

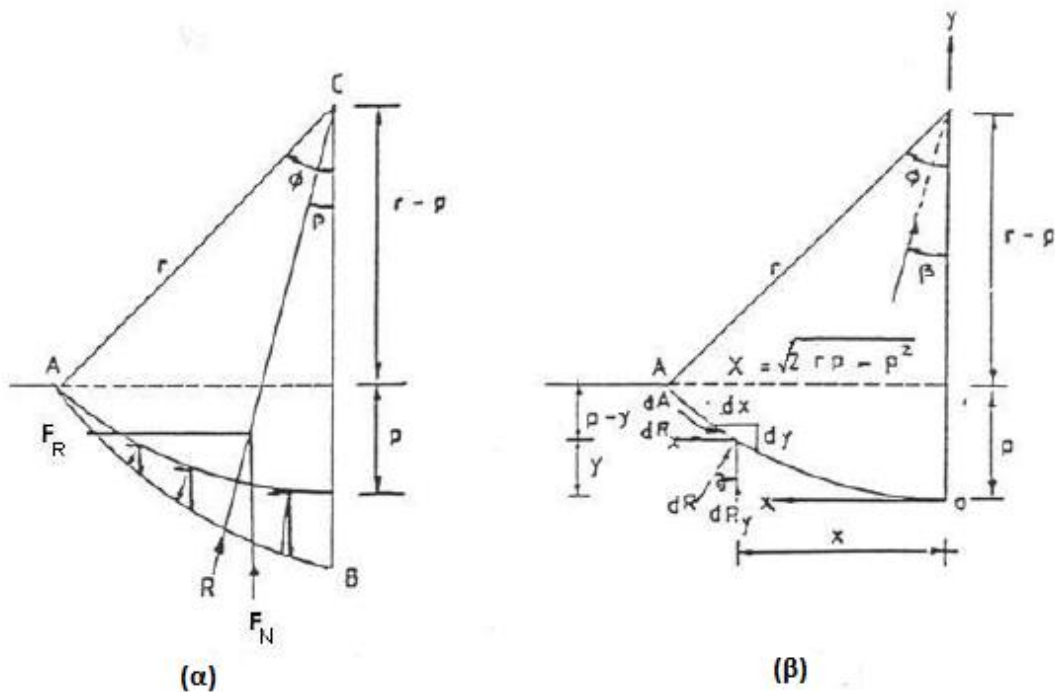
$$F_2 = 2 * F_S * \tan \frac{\alpha}{2} = 2 * \tau_S * r * \varphi * \left(s - 2 * p * \tan \frac{\alpha}{2} \right) * \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2.44)$$



Σχήμα 2.10. Γεωμετρική απεικόνιση δυνάμεων κατά την κοπή με κοπτικό δίσκου για τον υπολογισμό της ορθής δύναμης (Πηγή: Ozdemir et al, 1978)

Τελικά, αντικαθιστώντας τις συνιστώσες F_1 και F_2 στην εξίσωση 2.39, μπορεί να υπολογιστεί η δύναμη ώσης:

$$F_N = \left[\sigma_c * r^2 * (\varphi - \cos\varphi * \sin\varphi) + 2 * \tau_s * r * \varphi * \left(s - 2 * p * \tan\frac{\alpha}{2} \right) \right] * \tan\frac{\alpha}{2} \quad (2.45)$$



Σχήμα 2.11. Γεωμετρική απεικόνιση δυνάμεων κατά την κοπή με κοπτικό δίσκου για τον υπολογισμό της δύναμης κλίσης (Πηγή: Ozdemir et al, 1978)

Η δύναμη R που φαίνεται στο σχήμα 2.11. αποτελεί τη συνισταμένη και έχει διεύθυνση με κλίση β ως προς την κατακόρυφο. Η δύναμη κύλισης του δίσκου F_R δίνεται από την εξίσωση:

$$F_R = F_N * \tan\beta \quad (2.46)$$

Η τάση σε κάθε σημείο της αιχμής θεωρείται ότι είναι ανάλογη του βάθους διείσδυσης του δίσκου και εφαρμόζοντας ισορροπία είναι δυνατόν να υπολογιστεί η γωνία β με την ακόλουθη μέθοδο:

Έστω dR_x και dR_y οι στοιχειώδεις δυνάμεις που ασκούνται σε μία στοιχειώδη επιφάνεια dA κατά μήκος της αιχμής του δίσκου και οι συντεταγμένες αυτής σε σύστημα αξόνων Oxy είναι (x,y) . Τότε, βάσει της γεωμετρίας ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$x^2 + (r - y)^2 = r^2 \Leftrightarrow y = r - \sqrt{r^2 - x^2} \quad (2.47)$$

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η δύναμη είναι ανάλογη του βάθους διείσδυσης και ως εκ τούτου, η συνισταμένη στοιχειώδους δύναμη dR θεωρείται ότι είναι:

$$dR = k * (p - y)dA \quad (2.48)$$

όπου: k = σταθερά αναλογίας

Οι δύο συνιστώσες της συνισταμένης στοιχειώδους δύναμης είναι:

$$dR_x = k * (p - y)dA * \sin\theta \quad (2.49)$$

$$dR_y = k * (p - y)dA * \cos\theta \quad (2.50)$$

Υπό την προϋπόθεση ότι το πλάτος της αιχμής του δίσκου είναι μοναδιαίο, τότε ισχύουν τα ακόλουθα:

$$dA * \sin\theta = dy \quad (2.51)$$

$$dA * \cos\theta = dx \quad (2.52)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις 2.51 και 2.52 στις 2.49 και 2.50 αντίστοιχα, τότε προκύπτουν:

$$dR_x = k * (p - y)dy \quad (2.53)$$

$$dR_y = k * (p - y)dx \quad (2.54)$$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση 2.53 στο διάστημα από 0 έως A λαμβάνεται η δύναμη κύλισης F_R :

$$F_R = \int_0^A dR_x = \int_0^A k * (p - y)dy = \frac{k * p^2}{2} \quad (2.55)$$

Ακολουθώντας αντίστοιχη διαδικασία για την εξίσωση 2.54 και χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.47, λαμβάνεται η δύναμη ώσης F_N :

$$F_N = \int_0^A dR_y = \int_0^x k * (p - y) dx = k * \int_0^x (p - r + \sqrt{r^2 - x^2}) dx \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow F_N = k * \left[(p - r) * x + \frac{1}{2} * \left(x * \sqrt{r^2 - x^2} + r^2 \sin^{-1} \frac{x}{r} \right) \right] \quad (2.56)$$

Σύμφωνα με την εικόνα 2.11. ισχύουν:

$$r - p = \sqrt{r^2 - x^2} = r * \cos\varphi \quad (2.57)$$

$$x = r * \sin\varphi \quad (2.58)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 2.57 και 2.58 στην 2.56, προκύπτει τελικά:

$$F_N = \frac{1}{2} * k * r^2 * (\varphi - \sin\varphi * \cos\varphi) \quad (2.59)$$

Η εξίσωση 2.46 μετατρέπεται, βάσει των 2.55 και 2.59 σε:

$$\tan\beta = \frac{F_R}{F_N} = \frac{p^2}{r^2} * (\varphi - \sin\varphi * \cos\varphi) \quad (2.60)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις 2.45 και 2.60 στην 2.46, τελικά προκύπτει η δύναμη κύλισης F_R :

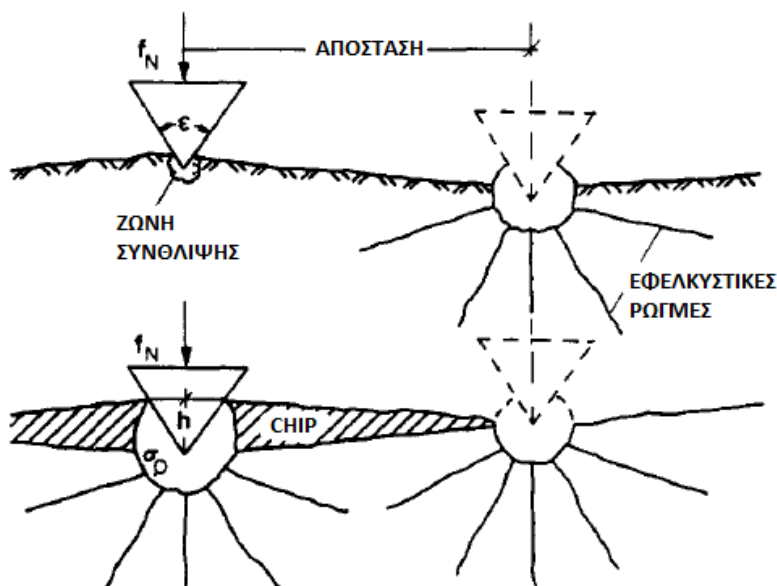
$$F_R = \left[\sigma_c * p^2 + \frac{2 * \tau_s * \varphi * p^2 * (s - \tan \frac{\alpha}{2})}{r * (\varphi - \sin\varphi * \cos\varphi)} \right] * \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2.61)$$

2.5. Θεωρία Sanio (1985)

Η θεωρία κοπής του Sanio βασίζεται στην υπόθεση ότι η αστοχία του πετρώματος οφείλεται σε εφελκυστικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα κατά την κοπή, σε αντίθεση με τις θεωρίες των Roxborough – Phillips, και Ozdemir – Miller – Wang, οι οποίες θεωρούν την αποσύνθεση του πετρώματος λόγω υπέρβασης της θλιπτικής ή διατμητικής του αντοχής. Αυτή η υπόθεση του Sanio ενισχύεται από παρατηρήσεις των θραυσμάτων κοπής, τα οποία παρουσιάζουν στις επιφάνειες τους χαρακτηριστικά εφελκυστικής αστοχίας. Το ίδιο συμβαίνει, επίσης, παρατηρώντας ότι η καλύτερη δυνατή συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων κοπής γίνεται με την εφελκυστική αντοχή. Ένα επιπλέον θετικό χαρακτηριστικό της παρούσας θεωρίας είναι το ότι λαμβάνει υπόψη και την ανισοτροπία του πετρώματος.

Η διαδικασία της διείδυσης του κοπτικού απεικονίζεται στο σχήμα 2.12. Σε πρώτη φάση, η υψηλή συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή αιχμής του κοπτικού, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ζώνης σύνθλιψης, όπου θεωρείται ότι αναπτύσσεται

υδροστατικό πεδίο τάσεων. Από τα όρια του υδροστατικού πεδίου τάσεων αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις εφαπτομενικά προς το άρρηκτο πέτρωμα. Όταν οι τάσεις αυτές φτάσουν την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος, δημιουργούνται ακτινικές εφελκυστικές ρωγμές που εκκινούν από την αιχμή του δίσκου. Όταν μία τέτοια ρωγμή φτάσει στην ελεύθερη επιφάνεια του πετρώματος, σχηματίζεται ένα θραύσμα μεταξύ των δύο γειτονικών κοπών.



Σχήμα 2.12. Διαδικασία διείσδυσης κοπτικού στο πέτρωμα (Πηγή: Sanio, 1985)

Στη θεωρία αυτή, η ζώνη σύνθλιψης, που προκαλείται από τη διείσδυση, έχει κυκλικό σχήμα και η ακτίνα της αποτελεί ένα σταθερό λόγο q του βάθους διείσδυσης h . Η κρίσιμη υδροστατική πίεση που υφίσταται εντός της ζώνης σύνθλιψης θεωρείται χαρακτηριστική ιδιότητα του πετρώματος και ως εκ τούτου δεν επηρεάζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δίσκου. Πολλαπλασιάζοντας την πίεση αυτή με την προβολή στο οριζόντιο επίπεδο της επαφής της αιχμής του κοπτικού με το πέτρωμα, είναι δυνατό να ληφθεί η δύναμη ώσης f_N (ανά μονάδα πλάτους της κοπτικής αιχμής):

$$f_N = 2 * h * \tan \frac{\epsilon}{2} * \sigma_0 \quad (2.62)$$

όπου: h = βάθος διείσδυσης

ϵ = γωνία αιχμής

σ_0 = υδροστατική πίεση στη ζώνη σύνθλιψης

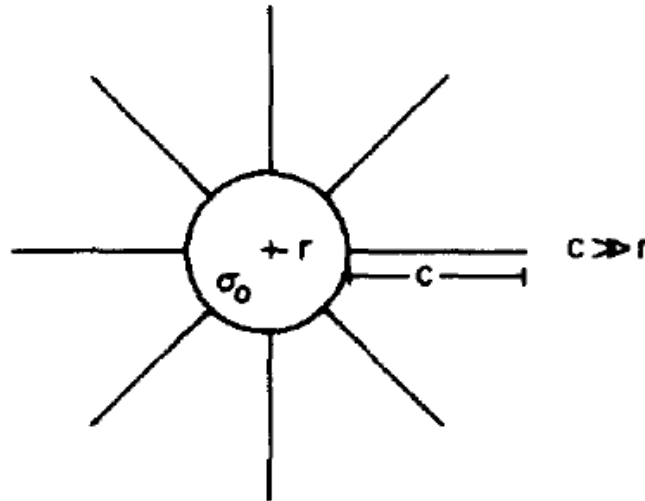
Το ζήτημα της εύρεσης της υδροστατικής πίεσης σ_0 μελέτησε ο Ouchterlony βασισμένος σε μία κυκλική οπή ευρισκόμενη υπό πίεση με ασυμπίεστες ακτινικές ρωγμές σε ένα επίπεδο άπειρων διαστάσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13. και πρότεινε τη σχέση:

$$2 * \sigma_0 * r = k * c^{0,5} \quad (2.63)$$

όπου: r = ακτίνα οπής

k = συντελεστής κατανομής τάσεων, εξαρτώμενος από το πέτρωμα και τον αριθμό των ρωγμών

c = μήκος των ρωγμών



Σχήμα 2.13. Κυκλική οπή υπό πίεση με ασυμπίεστες ακτινικές ρωγμές (Πηγή: Sanio, 1985)

Εάν η επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας του πετρώματος στην εντατική του κατάσταση, στα άκρα των ρωγμών θεωρηθεί αμελητέα, και εκφράζοντας την ακτίνα, βάσει του ότι αποτελεί ένα σταθερό λόγο q του βάθους διείσδυσης h , όπως προαναφέρθηκε, δηλαδή:

$$r = q * h \quad (2.64)$$

και σε συνδυασμό με τις σχέσεις 2.62 και 2.63 προκύπτει ότι:

$$f_N = \frac{k}{q} * \tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) * c^{0,5} \quad (2.65)$$

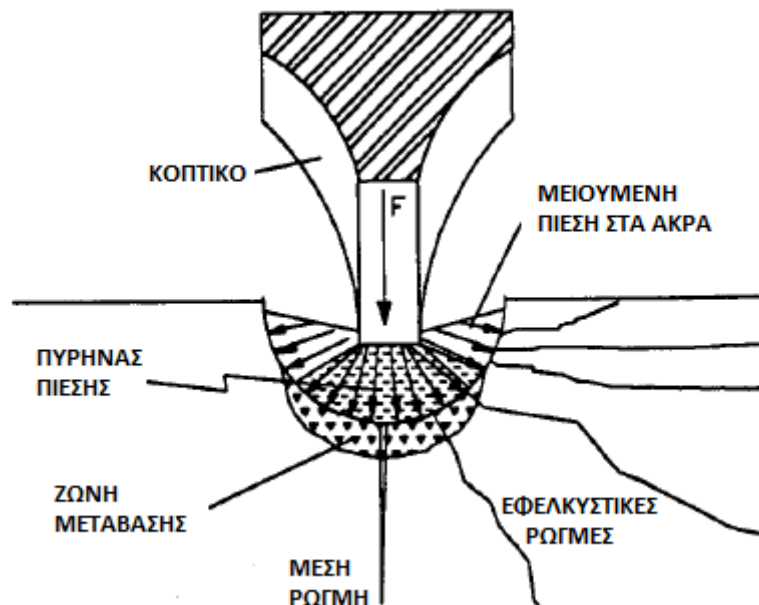
Με τη χρήση της εξίσωσης 2.65, μπορεί να συσταθεί η ισορροπία των δυνάμεων που δρουν στο κοπτικό δίσκου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.14. Προσεγγίζοντας την περιοχή επαφής μεταξύ του κοπτικού και του πετρώματος με λεπτά στοιχεία τύπου σφήνας διατεταγμένα σε βήματα με πλάτος dx , σύμφωνα με το σχήμα 2.15. τότε η δύναμη ώσης F_N είναι:

$$F_N = \int_0^{(d * p - p^2)^{0,5}} f_N(x) dx =$$

$$F_R = \frac{2}{5} * \frac{(d * p - p^2)^{0,5}}{\left(\frac{d}{2} - t\right)} * F_N \quad (2.71)$$

2.6. Θεωρία Rostami – Ozdemir (1993)

Με βάση τις προσπάθειες προσέγγισης από μεγάλο αριθμό ερευνητών, δημιουργείται ένας βολβός πίεσης (pressure bulb), που αποτελεί μία ζώνη έντονα ρωγματομένη και σχηματίζεται κάτω από το κοπτικό τύπου δίσκου, καθώς αυτό διεισδύει στο υπό κοπή πέτρωμα. Ο ακριβής σχηματισμός της ζώνης αυτής δεν είναι γνωστός, όμως μπορεί να προσομοιαστεί, για λόγους απλοποίησης του προβλήματος, με κυκλική επιφάνεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16.

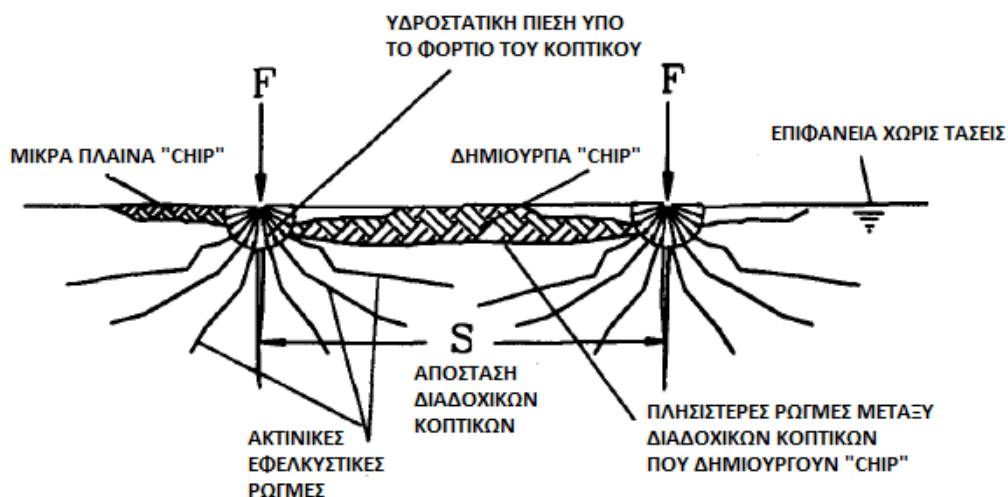


Σχήμα 2.16. Δημιουργία βολβού πίεσης κατά τη διείσδυση κοπτικού (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993)

Η ζώνη αυτή, ουσιαστικά, αποτελεί το μέσο διάδοσης των τάσεων στο πέτρωμα που πρόκειται να υποστεί τη δοκιμή της κοπής. Εντός της ζώνης, συναντάται λεπτόκοκκο θρυμματισμένο υλικό του πετρώματος. Το μέγεθος των κόκκων αυξάνεται προχωρώντας από το κέντρο κάτω από το σημείο διείσδυσης του κοπτικού προς το μέρος του πετρώματος που δεν έχει επηρεαστεί άμεσα από την κοπή.

Η έκταση της ζώνης σχετίζεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Ο περιορισμός της έκτασης της ζώνης αυτής αποτελεί ζητούμενο, καθώς με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να μειωθεί η παραγωγή σκόνης, όπως και η ειδική ενέργεια κοπής, αφού δεν θα παρουσιάζεται μεγάλος υπερθρυμματισμός του πετρώματος. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα και την μεγαλύτερη απόδοση της κοπής.

Η ακριβής κατανομή της πίεσης που δημιουργείται από τη διείδυση του κοπτικού στο πέτρωμα δεν είναι γνωστή και για αυτό το λόγο θεωρείται ότι ασκείται ομοιόμορφη υδροστατική πίεση εντός της ζώνης θρυμματισμού. Το σχήμα 2.17. απεικονίζει δύο διαδοχικά κοπτικά και την επικρατούσα εντατική κατάσταση εντός του πετρώματος μετά τη διείδυση.



Σχήμα 2.17. Αλληλεπίδραση κοπτικών και εντατική κατάσταση πετρώματος κατά τη διείδυση (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993)

Οι ακτινικές ρωγμές σχηματίζονται λόγω των επαγόμενων δυνάμεων εντός της ζώνης. Η έναρξη και διάδοση των εφελκυστικών ρωγμών αποτελεί τον κυρίαρχο τρόπο δημιουργίας των “chip” και ως εκ τούτου τον λόγο αστοχίας του πετρώματος. Αξίζει να αναφερθεί πως οι ρωγμές που διαδίδονται εκτός της ζώνης και κυρίως αυτές που φτάνουν ως την επιφάνεια του πετρώματος υπόκεινται και σε σημαντικές διατμητικές τάσεις. Ως εκ τούτου, το είδος της αστοχίας οφείλεται τόσο σε εφελκυστικά όσο και σε διατμητικά φαινόμενα στην πραγματικότητα.

Όταν ένας αριθμός ρωγμών φτάνει στην επιφάνεια, δημιουργούνται τα θραύσματα, τα οποία αποσπώνται από τη φυσική τους θέση. Το μήκος των ρωγμών εξαρτάται από την ασκούμενη πίεση, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από την κατακόρυφη πίεση του κοπτικού στο πέτρωμα. Η αλληλεπίδραση των κοπτικών εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπτικών άκρων, καθώς και την γωνία και την έκταση των δημιουργούμενων ρωγματώσεων.

Οι ρωγματώσεις μπορούν να κατευθυνθούν σε όποια διεύθυνση τους παρέχει τη μικρότερη δυνατή ενέργεια έως ότου η ένταση της τάσης παύει να είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη τάση του πετρώματος, ή διαφορετικά μέχρι να φτάσει η ρωγμή σε μία ελεύθερη επιφάνεια, είτε αυτή είναι η αρχική επιφάνεια είτε είναι δημιουργημένη από κάποια άλλη ρωγμή. Αυτό σημαίνει πως είναι λογικό να δημιουργούνται ρωγματώσεις με οποιαδήποτε γωνία.

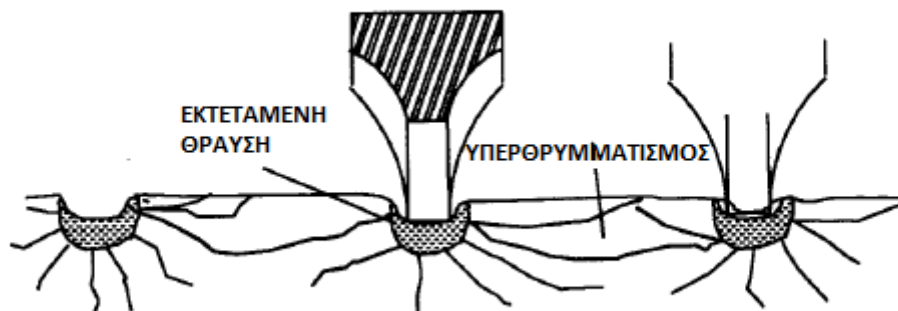
Με βάση τα παραπάνω, γίνεται κατανοητός ο λόγος που δημιουργούνται ράχες πετρώματος είτε υπερθρυμματισμός τους. Στην πρώτη περίπτωση, δημιουργούνται

ρωγμές, οι οποίες κατευθύνονται προς την επιφάνεια κοπής σχηματίζοντας μικρά “chip”. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης στη ζώνη ρωγμάτωσης και, συνεπώς, εμποδίζεται η διάδοση της ρωγμάτωσης προς τις γειτονικές κοπές και η συνάντηση με ρωγμές αυτών. Έτσι, το πέτρωμα μεταξύ δύο διαδοχικών κοπών παραμένει ουσιαστικά ανεπηρέαστο, δημιουργώντας μία ράχη.

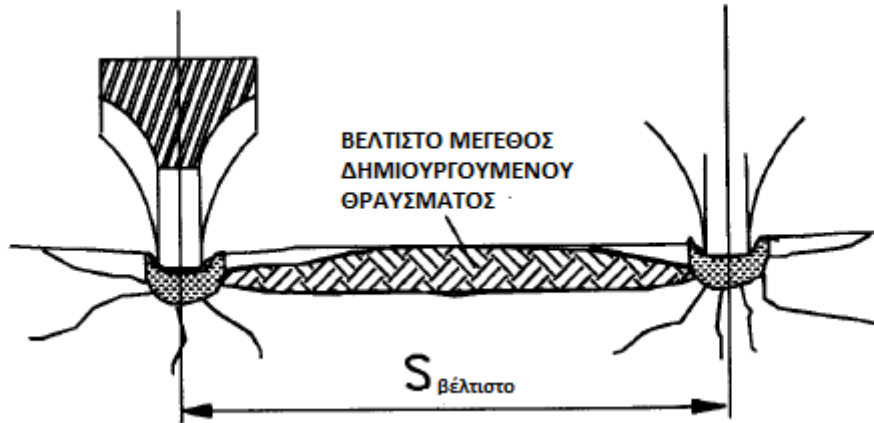
Στη δεύτερη περίπτωση, όπου τα κοπτικά βρίσκονται κοντά, ρωγμές συναντώνται σε διάφορες γωνίες, δημιουργώντας πολλά πιθανώς δημιουργούμενα “chip”, τα οποία τελικά, οδηγούν στον υπερθρυμματισμό του πετρώματος. Η βέλτιστη απόσταση είναι αυτή κατά την οποία συναντώνται δύο ρωγμές από διαδοχικά κοπτικά, οι οποίες ενώνονται με μία σχεδόν ευθεία οριζόντια γραμμή, σχηματίζοντας ένα μεγαλύτερο, από την προηγούμενη περίπτωση, θραύσμα. Τα παραπάνω φαίνονται στα σχήματα 2.18.-2.20.



Σχήμα 2.18. Μη επαρκής απόσταση κοπτικών για δημιουργία θραύσματος (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993)



Σχήμα 2.19. Πολύ μικρή απόσταση κοπτικών και δημιουργία υπερθρυμματισμού (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993)



Σχήμα 2.20. Βέλτιστη απόσταση κοπτικών για δημιουργία θραύσματος (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993)

Για τον προσδιορισμό των πιέσεων και δυνάμεων που παράγονται σε ένα κοπτικό τύπου δίσκου, είναι προτιμότερο να γίνεται ανάλυση σε τρεις διαστάσεις. Αρχικά, εφόσον η πίεση θεωρείται ομοιόμορφη στην ζώνη έντονης ρωγμάτωσης, είναι δυνατό να μην ληφθούν υπόψη οι πλευρικές δυνάμεις, καθώς η πίεση στις δύο πλευρές αλληλοεξουδετερώνονται. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί βάσιμο, αφού η πλευρική δύναμη από την μία πλευρά προκαλείται από το σχηματισμό του θραύσματος και από την άλλη από την μη εξισορροπούμενη πίεση. Κατά την κατεύθυνση της κοπής υπολογίζεται τόσο η δύναμη ώσης ή ορθή F_n (thrust/normal force) όσο και η δύναμη κύλισης F_r (rolling force). Για να συμβεί αυτό, θεωρείται ότι η πίεση κατανέμεται στην περίμετρο του κοπτικού δίσκου με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα 2.21. Η περιοχή του κοπτικού που αλληλεπιδρά με το πέτρωμα ορίζεται από την γωνία φ , η οποία είναι συνάρτηση της ακτίνας του δίσκου και της διείδυσης του στο πέτρωμα:

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{R - p}{p} \right) \quad (2.72)$$

όπου: φ = γωνία αλληλεπίδρασης δίσκου – πετρώματος

R = ακτίνα δίσκου

p = διείδυση κοπτικού

Το μέτρο της πίεσης είναι εύκολο να υπολογιστεί, εφόσον είναι συνάρτηση της γωνίας θ και της πίεσης βάσης:

$$P = P' * \left(1 - \frac{\theta}{\varphi} \right)^\psi \quad (2.73)$$

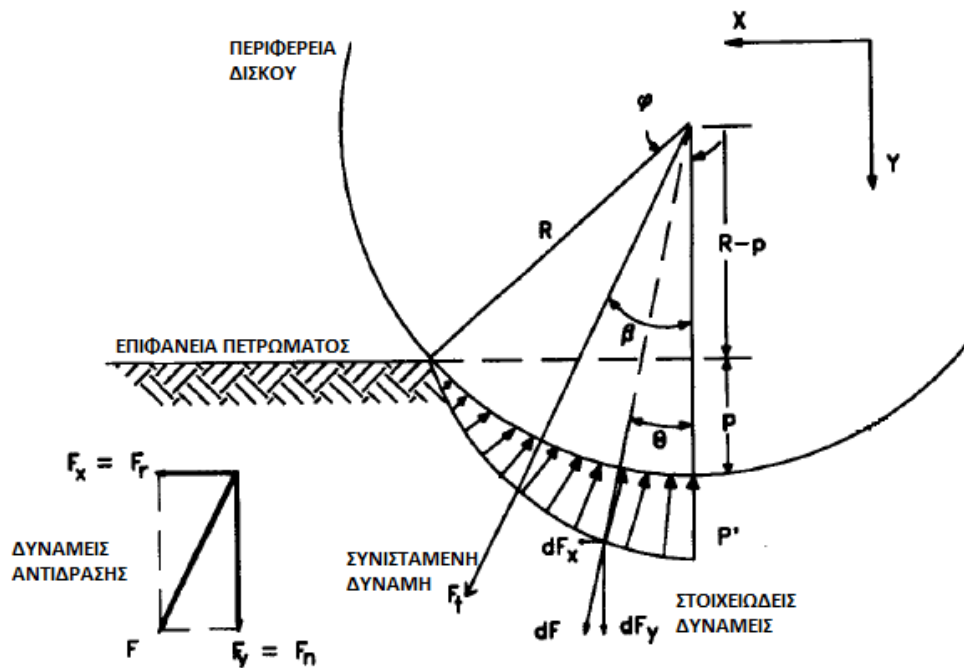
όπου: P' = πίεση βάσης

θ = εξεταζόμενη γωνία μεταξύ θ (επίπεδο ορθής δύναμης) και φ μοίρες

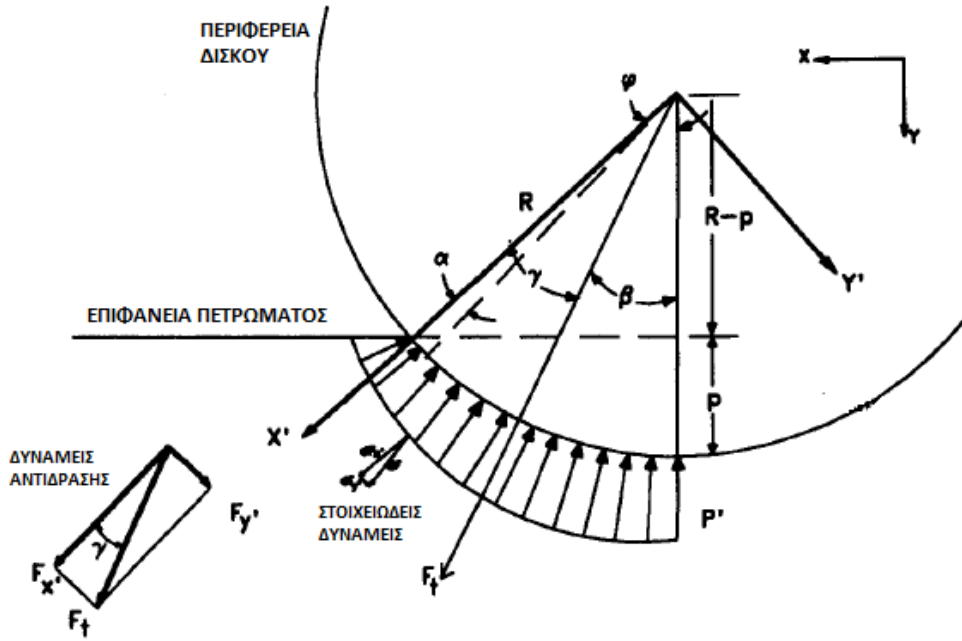
ψ = σχετιζόμενο με την κατανομή της ασκούμενης στο πέτρωμα πίεσης

Η παραπάνω εξίσωση είναι δυνατό να αντιστοιχεί σε διαφορετικά σενάρια κατανομής της πίεσης, αλλάζοντας τον εκθέτη ψ . Για γραμμική κατανομή της πίεσης με μέγιστη τιμή κάτω από το κοπτικό και μηδενική πίεση μπροστά από αυτό, σύμφωνα με τη διεύθυνση κοπής, χρησιμοποιείται $\psi = 1$. Αντίθετα, εάν χρησιμοποιηθεί μία σχετικά ομαλή κατανομή της πίεσης, τότε το ψ γίνεται 0. Σε γενικές γραμμές, η αύξηση του εκθέτη αυτού οδηγεί σε μετακίνηση των δυνάμεων προς τον κατακόρυφο άξονα που περνά από το κοπτικό, ενώ οι δυνάμεις μετακινούνται προς το εμπροσθεν μέρος του κοπτικού σε αντίθετη περίπτωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι αρνητικές τιμές του ψ οδηγούν σε αρκετά υψηλότερες τιμές μπροστά από το κοπτικό από αυτές που συναντώνται στην κατακόρυφο της ορθής δύναμης.

Αυτή η αλλαγή της κατανομής έχει ως αποτέλεσμα και την αλλαγή της γωνίας και θέσης της συνισταμένης δύναμης. Έτσι, με τη μείωση του εκθέτη ψ , αυξάνεται ο λόγος της δύναμης κύλισης προς την ορθή δύναμη, ενώ αύξηση του οδηγεί σε μείωση του λόγου. Ο λόγος αυτός είναι γνωστός ως Συντελεστής Κοπής CC (Cutting Coefficient) ή δύναμη ολίσθησης.



Σχήμα 2.21. Κατανομή πίεσης στην επαφή κοπτικού – πετρώματος με εκθέτη $\psi = 1$ (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993)



Σχήμα 2.22. Κατανομή πίεσης στην επαφή κοπτικού – πετρώματος με εκθέτη $0 \leq \psi < 1$ (Πηγή: Rostami & Ozdemir, 1993)

Ο Συντελεστής Κοπής CC είναι δυνατό να προσδιοριστεί με τη βοήθεια της γωνίας φ :

$$CC = \frac{\varphi - \sin\varphi}{1 - \cos\varphi} \quad (2.74)$$

Οι δυνάμεις F_n (normal force) και F_r (rolling force) αποτελούν τις συνιστώσες της συνισταμένης F_t , όπως φαίνεται και παραπάνω στους άξονες x και y . Η γωνία β , η οποία ξεκινά από την κατακόρυφη της ορθής δύναμης και αυξάνεται προς την επιφάνεια κοπής μπορεί να υπολογιστεί ως εξής για την περίπτωση της γραμμικής κατανομής της πίεσης:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{F_r}{F_n} \right) = \tan^{-1} CC \quad (2.75)$$

Σε ότι αφορά τον υπολογισμό των δυνάμεων F_n και F_r , προσδιορίζονται όπως φαίνεται στη συνέχεια, για την περίπτωση της γραμμικής κατανομής της πίεσης:

$$dF = T * P * R d\theta = T * R * P' \left(1 - \frac{\theta}{\varphi}\right) d\theta \quad (2.76)$$

$$F_n = F_y = \int_0^\varphi dF_y = \int_0^\varphi dF \cos\theta = \frac{T * R * P'}{\varphi} * (1 - \cos\varphi) \quad (2.78)$$

$$F_r = F_x = \int_0^\varphi dF_x = \int_0^\varphi dF \sin\theta = \frac{T * R * P'}{\varphi} * (\varphi - \sin\varphi) \quad (2.79)$$

όπου: T = πλάτος ακμής κοπτικού

Κατά την περίπτωση μη γραμμικής κατανομής της πίεσης, για τον προσδιορισμό των δυνάμεων και του Συντελεστή Κοπής χρησιμοποιούνται κάποιες διαφορετικές παράμετροι. Αρχικά, εισάγεται η γωνία α που φαίνεται στο σχήμα 2.22. και για την οποία ισχύει:

$$P = P' * \left(\frac{\alpha}{\varphi}\right)^\psi \quad (2.80)$$

Για τις συνιστώσες της συνισταμένης δύναμης ισχύουν τα ακόλουθα:

$$dF = T * P * R d\alpha = T * R * P' \left(\frac{\alpha}{\varphi}\right)^\psi d\alpha \quad (2.81)$$

$$F_{y'} = \int_0^\varphi dF_{y'} = \int_0^\varphi dF \sin\alpha \quad (2.82)$$

$$F_{x'} = \int_0^\varphi dF_{x'} = \int_0^\varphi dF \cos\alpha \quad (2.83)$$

Λόγω της μη ύπαρξης αναλυτικής λύσης για τα ολοκληρώματα αυτά, έγινε μετατροπή των \sin και \cos με βάση τις σειρές του Taylor, ώστε να προκύψει μία αριθμητική προσέγγιση.

$$F_{x'} = \sum_1^n (-1)^{i-1} \frac{\varphi^{2i+\psi}}{(2i+\psi)(2i-2)!} \quad (2.84)$$

$$F_{y'} = \sum_0^n (-1)^{i-1} \frac{\varphi^{2i-1+\psi}}{(2i-1+\psi)(2i-2)!} \quad (2.85)$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση το n αντιστοιχεί στον αριθμό των επαναλήψεων που χρειάζεται, ώστε να προκύψει η επιθυμητή ακρίβεια στην αριθμητική πρόβλεψη. Το σύνηθες είναι να μην χρειάζεται να υπερβαίνει τον αριθμό 5. Η συνισταμένη δύναμη που ασκείται ορίζεται από τη γωνία γ , για την οποία ισχύει:

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{F_{y'}}{F_{x'}} \right) \quad (2.86)$$

Επιπλέον, η γωνία γ είναι εφικτό να αντιστοιχηθεί με τη γωνία β , αλλά και με τον Συντελεστή Κοπής CC με την ακόλουθη σχέση:

$$CC = \tan\beta = \tan(\varphi - \gamma) \quad (2.87)$$

Το μέτρο του Συντελεστή Κοπής εξαρτάται από τη γωνία φ και την κατανομή της πίεσης στο υπό κοπή πέτρωμα. Με βάση δοκιμές που έχουν γίνει, φαίνεται πως η προσέγγιση με μία ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης βρίσκεται πιο κοντά στην πραγματικότητα. Ωστόσο, κάτι τέτοιο εξαρτάται από τη γεωμετρία του κοπτικού, η οποία με τη σειρά της καθορίζει την τιμή του εκθέτη ψ . Για παράδειγμα, κοπτικό

δίσκου με γεωμετρία τύπου V, δίνει ψ κοντά στο 1. Αντίθετα, για κοπτικά τύπου CCS, επίπεδα ή και κοπτικά που έχουν φθαρεί, η τιμή του ψ τείνει στο 0. Επιπρόσθετη αύξηση του πλάτους της ακμής, όπως είναι λογικό από τα προαναφερθέντα, μειώνει την τιμή του ψ .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PFC^{2D}

3.1. Εισαγωγή

Η προσομοίωση της παραμόρφωσης και αστοχίας ενός πετρώματος είναι δυνατή με δύο μεθόδους. Η πρώτη είναι η έμμεση και η δεύτερη είναι η άμεση. Το σημείο που διαχωρίζει τις δύο μεθόδους σχετίζεται με το εάν η αστοχία αντιπροσωπεύεται έμμεσα, μέσω της επίδρασής της στις καταστατικές εξισώσεις, ή άμεσα, με την ανάπτυξη μεγάλου αριθμού μικρορωγμών αντίστοιχα. Οι περισσότερες έμμεσες προσεγγίσεις εξιδανικεύουν το πέτρωμα, θεωρώντας το ένα συνεχές και ομοιογενές μέσο και η υποβάθμιση του πετρώματος λαμβάνει χώρα μέσω των καταστατικών εξισώσεων, ώστε να αντιπροσωπεύσουν τη θραύση στην κλίμακα της μικροδομής. Αντίθετα, οι άμεσες προσεγγίσεις αναπαριστούν το πέτρωμα ως σύνολο δομικών μονάδων (π.χ. ελατήρια, δοκοί, κτλ.) ή ως διακριτά, μεμονωμένα στοιχεία που συνδέονται μεταξύ τους στα σημεία επαφής τους με δεσμούς.

Το PFC (Particle Flow Code) ανήκει στη κατηγορία των μεθόδων άμεσης προσέγγισης της προσομοίωσης πετρωμάτων. Το PFC είναι ένας αριθμητικός κώδικας προσομοίωσης της κίνησης και της αλληλεπίδρασης σφαιρικών σωματιδίων με βάση τη μέθοδο διακριτών στοιχείων (Distinct Element Method, DEM), σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο περιβάλλον (Cundall & Hart, 1992). Η DEM είναι μια αριθμητική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων μηχανικής κι εφαρμόζεται σε υλικά με ασυνεχή δομή.

3.2. Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων (Distinct Element Method)

Η μέθοδος διακριτών στοιχείων (DEM) αποτελεί την κατηγορία των μεθόδων αριθμητικής προσομοίωσης, στις οποίες το υπό μελέτη υλικό αναπαρίσταται σαν ένα σύστημα αλληλεπιδρώντων διακριτών άκαμπτων στοιχείων, που υπόκεινται σε μακροσκοπική κίνηση. Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε από τον Cundall (1971) για την ανάλυση των προβλημάτων βραχομηχανικής. Μεταγενέστερα, εφαρμόστηκε και για τα εδάφη από τους Cundall και Strack (1979). Η DEM θεωρεί το μέσο ασυνεχές, δίνοντας έμφαση στις επαφές μεταξύ των στοιχείων και στην αλληλεπίδρασή τους. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα της μεθόδου έναντι των συμβατικών μεθόδων που βασίζονται στη συμπεριφορά του συνεχούς μέσου.

Στην DEM, οι υπολογισμοί κατά την αριθμητική επίλυση εναλλάσσονται μεταξύ του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα, που εφαρμόζεται στα διακριτά σωματίδια, και μιας καταστατικής σχέσης δύναμης – μετατόπισης που εφαρμόζεται στις επαφές των σωματιδίων. Κάθε σωματίδιο εκτελεί μεταθετική κίνηση, περιστροφική, ή και συνδυασμό των δύο, που οφείλεται στις δυνάμεις που ασκούνται στις επαφές του από τα γειτονικά σωματίδια, στις εφαρμοζόμενες εξωτερικές δυνάμεις καθώς και στις βαρυτικές δυνάμεις που του ασκούνται. Για τον προσδιορισμό των κινήσεων αυτών χρησιμοποιείται ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα. Αντίστοιχα, η καταστατική σχέση δύναμης – μετατόπισης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των δυνάμεων που

ασκούνται στις επαφές των σωματιδίων, οι οποίες είναι αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης των σωματιδίων που εφάπτονται.

Η αλληλεπίδραση των στοιχείων αποτελεί μια δυναμική διαδικασία που αντιμετωπίζεται αριθμητικά με υπολογισμούς σε χρονικά βήματα. Σε κάθε βήμα οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις των σωματιδίων θεωρούνται σταθερές, μιας και επικρατούν συνθήκες ισορροπίας. Επιπλέον, σε κάθε βήμα υπολογίζονται οι δυνάμεις στις επαφές και οι σχετικές μετατοπίσεις των σωματιδίων, οι οποίες προκύπτουν από τη διάδοση διαταραχών μέσω του συστήματος, έπειτα από την επιβολή εξωτερικών φορτίσεων. Το χρονικό βήμα θα πρέπει να είναι τόσο μικρό ώστε να είναι δυνατή η θεώρηση ότι οποιαδήποτε διαταραχή στο αριθμητικό μοντέλο δεν θα μπορεί να διαδοθεί πέρα από τον άμεσα γειτονικό της χώρο, κατά τη διάρκειά ενός χρονικού βήματος.

3.3. PFC^{2D}

Στο PFC^{2D} το πέτρωμα προσομοιώνεται σε δύο διαστάσεις ως σύνολο άκαμπτων σφαιρών, δίσκων πεπερασμένου πάχους ή και συσσωματωμάτων τους. Το σύνολο των σωματιδίων περιορίζεται εξωτερικά από άκαμπτα τοιχώματα. Τα σωματίδια μπορούν να κινούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους και να αλληλεπιδρούν στις επαφές τους. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ενός πετρώματος με αυτό τον τρόπο συναντάται συχνά στην βιβλιογραφία ως «Μοντέλο Συνδεδεμένων Σωματιδίων» (Bonded Particles Model, BPM) ή συνθετικό πέτρωμα. Οι μακροσκοπικές ιδιότητες του συνθετικού πετρώματος κατά την προσομοίωση σχετίζονται με τα σωματίδια, τα συσσωματώματα και τις επαφές τους.

Η μοντελοποίηση έχει ως αρχικό σκοπό τη δημιουργία ενός συνόλου σωματιδίων που θα αντιπροσωπεύουν όσο το δυνατόν ακριβέστερα ένα φυσικό πέτρωμα, και στη συνέχεια την υποβολή του συνθετικού πετρώματος σε πλήθος δοκιμών, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση των μικρομηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος στη μακροσκοπική του απόκριση.

Η FISH είναι μια γλώσσα προγραμματισμού που είναι ενσωματωμένη στο PFC^{2D}, η οποία επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει νέες μεταβλητές και λειτουργίες. Οι συναρτήσεις που είναι δυνατό να κατασκευαστούν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για επέκταση της λειτουργίας του κώδικα PFC^{2D} ή για προσθήκη ιδιοτήτων στο πέτρωμα που έχουν καθοριστεί από το χρήστη. Η Fishtank του PFC^{2D} αποτελεί σύνολο συναρτήσεων της FISH, που διευκολύνει στον ορισμό της εντατικής κατάστασης του συνθετικού πετρώματος ή των ορίων του, καθώς και να προσομοιωθούν ποικίλες εργαστηριακές δοκιμές.

Για την κατασκευή μίας προσομοίωσης που αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα, σημαντικό είναι να λαμβάνουν χώρα ορισμένα στάδια με συγκεκριμένη αλληλουχία. Το πρώτο στάδιο αποτελεί η δημιουργία των σωματιδίων. Αρχικά δίνονται οι συντεταγμένες σύμφωνα με τις οποίες θα σχηματισθούν οι τοίχοι του δοκιμίου. Μέσα σε αυτά τα όρια θα τοποθετηθούν οι σφαίρες ή οι δίσκοι, των οποίων το πλήθος

καθορίζεται από το χρήστη. Έπειτα, ορίζεται το είδος των δεσμών που θα υφίσταται μεταξύ των σωματιδίων, όπως επίσης και η ύπαρξη συσσωματωμάτων. Τέλος, αν απαιτείται, ορίζονται ομάδες, των οποίων τα σωματίδια θα έχουν κοινές ιδιότητες, καθώς και ασυνέχειες που μπορεί να υπάρχουν στο συνθετικό πέτρωμα.

Στο δεύτερο στάδιο, ορίζεται η αρχική κατάσταση στην οποία βρίσκεται το προσομοίωμα. Συγκεκριμένα, ορίζονται τα όρια του δοκιμίου που θα αποτελούνται είτε από τους τοίχους είτε από μια σειρά σφαιριδίων, σε περίπτωση απομάκρυνσης των τοίχων. Επίσης ορίζονται και οι ιδιότητες των ορίων (ταχύτητα, δυνάμεις επαφής). Στη συνέχεια οι ιδιότητες μπορούν να μεταβληθούν αν απαιτείται. Στο ίδιο στάδιο γίνεται και η ανάθεση τιμών της αρχικής εντατικής κατάστασης και του πορώδους.

Κατά το τρίτο στάδιο, επιλέγεται το είδος των επαφών που θα συναντάται μεταξύ των επιφανειών. Οι επαφές που αναφέρονται παραπάνω αντιστοιχούν ουσιαστικά στην αλληλεπίδραση των σωματιδίων που βρίσκονται σε επαφή. Ο τύπος της επαφής μπορεί να αφορά στην ελαστική σχέση μεταξύ της δύναμης της επαφής με την σχετική παραμόρφωση, συσχετίζοντάς τις μέσω της δυστροπίας τους (contact – stiffness models). Επίσης, μπορεί να αφορά στην ολίσθηση ή και απομάκρυνση των σωματιδίων ανάλογα το μέγεθος της εφελκυστικής δύναμης που εφαρμόζεται ανάμεσα στα σωματίδια που εφάπτονται (slip and separation model). Τέλος, μπορεί να αφορά σε σωματίδια που όχι μόνο βρίσκονται σε επαφή αλλά είναι κολλημένα μεταξύ τους με σημειακούς ή παράλληλους δεσμούς (bonding models).

Στη συνέχεια, ακολουθεί η επιλογή των ιδιοτήτων του προσομοιοζόμενου υλικού. Η ανάθεση ιδιοτήτων του υλικού αφορά τόσο στις ιδιότητες των σφαιρών ή δίσκων, όσο και τους δεσμούς ανάμεσά τους. Με το PFC^{2D} προσομοιώνεται η συμπεριφορά ενός υλικού με βάση τη συμπεριφορά των μικροστοιχείων, που αποτελούν τους κόκκους, και συνθέτουν το εκάστοτε υλικό. Σε αυτή τη φάση αν δεν είναι γνωστές οι ιδιότητές τους, είναι δύσκολο να επιλεγούν, αλλά εύκολο να ορισθούν στον κώδικα. Μιας και το πέτρωμα που αναπαρίσταται είναι ασυνεχές, κάνοντας δοκιμές στη μοντελοποίηση, με διάφορους συνδυασμούς μικρο-παραμέτρων, όπως είναι το μέτρο παραμόρφωσης των δεσμών ή ο συντελεστής τριβής των σφαιρών, είναι εφικτό να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός ώστε το συνθετικό πέτρωμα όταν υποβληθεί σε αριθμητικές δοκιμές να δίνει αποτελέσματα συγκρίσιμα με εκείνα ενός πραγματικού πετρώματος που υποβάλλεται σε εργαστηριακές δοκιμές.

Το πέμπτο στάδιο αποτελείται από τη φόρτιση του υλικού, την επίλυση και την προσομοίωση σε στάδια. Η φόρτιση μπορεί να είναι είτε παθητική είτε ενεργητική. Στην παθητική φόρτιση, οποιαδήποτε μεταβολή στο μοντέλο, οδηγεί σε μεταφορά του φορτίου σε αυτό. Αντίστοιχα, η ενεργητική φόρτιση επιβάλλεται εξωτερικά. Αξίζει να αναφερθεί ότι στους τοίχους δεν μπορούν να ασκηθούν δυνάμεις. Η μόνη δυνατότητα που παρέχεται είναι η εντολή για υποβολή τους σε κίνηση καθορίζοντας μη μηδενικές τιμές για την ταχύτητά τους. Η επίλυση αποτελείται από έναν αριθμό υπολογιστικών κύκλων και από τα βήματα που εκτελεί το λογισμικό έως ότου φτάσει

το μοντέλο σε κατάσταση ισορροπίας. Αυτή μπορεί να είναι στατική ή δυναμική. Η κύρια διαφορά μεταξύ τους είναι ο τρόπος απόσβεσης. Η DEM είναι μια πλήρως δυναμική μέθοδος, και ως εκ τούτου κάποια μορφή απόσβεσης είναι απαραίτητη για την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας. Στα πραγματικά υλικά, οι διάφορες μικροσκοπικές διαδικασίες όπως η εσωτερική τριβή και η διασπορά κυμάτων καταναλώνουν την κινητική ενέργεια. Στο μοντέλο BPM, εφαρμόζεται τοπική, μη ιξώδης απόσβεση, ορίζοντας ένα συντελεστή απόσβεσης, α . Στην στατική επίλυση ο συντελεστής είναι τέτοιος ώστε το σύστημα να ισορροπήσει στον ελάχιστο δυνατό αριθμό υπολογιστικών κύκλων. Αντίθετα στη δυναμική επίλυση η απόσβεση παίρνει μειωμένες και πιο ρεαλιστικές τιμές. Εξ' ορισμού η επίλυση είναι στατική. Η προσομοίωση σε στάδια αφορά σε αλλαγές στη γεωμετρία του μοντέλου ή στις παραμέτρους που έχει θέσει ο χρήστης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, αφού όμως έχει ολοκληρωθεί η επίλυση ενός προηγούμενου σταδίου.

Το τελευταίο στάδιο αφορά στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων που εξάγονται από το λογισμικό. Επειδή το PFC^{2D} προσομοιώνει ένα μη γραμμικό σύστημα διακριτών στοιχείων καθώς εξελίσσεται ο υπολογιστικός χρόνος, είναι σχετικά δύσκολη η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Συνεπώς, η ερμηνεία θα πρέπει να γίνει με την ανάλυση διαφόρων δεικτών, όπως η ισορροπία των δυνάμεων, ή διαγραμμάτων, την επισκόπηση των αρχείων καταγραφής του ιστορικού της επίλυσης, ή την παρακολούθηση βίντεο κάποιας δοκιμής που έχει προσομοιωθεί.

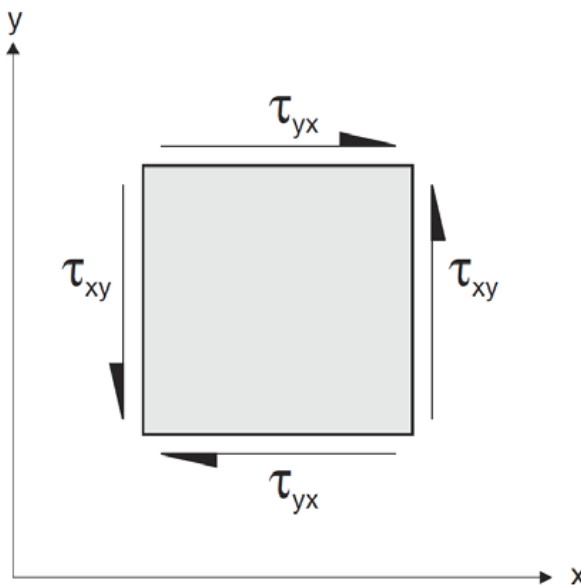
3.3.1. Συστήματα Μονάδων

Το PFC έχει τη δυνατότητα να διαχειριστεί διάφορα συστήματα μονάδων, ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Οι μονάδες δεν είναι δυνατό να μετατραπούν παρόλα αυτά μέσω του λογισμικού, όμως υπάρχουν συγκεκριμένοι συνδυασμοί σύμφωνα με τους οποίους πρέπει να πορευτεί ο χρήστης. Συμβατά συστήματα μονάδων δίνονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1. Συμβατά συστήματα χρησιμοποιούμενων μονάδων στο PFC

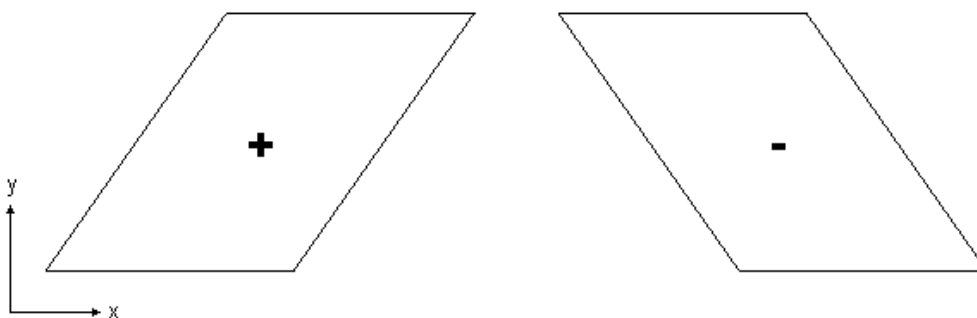
Μήκος	SI				Imperial	
	m	m	m	cm	ft	in
Πυκνότητα	kg/m ³	10 ³ kg/m ³	10 ⁶ kg/m ³	g/cm ³	slugs/ft ³	snails/in ³
Δύναμη	N	kN	MN	Mdynes	lbf	lbf
Τάση	Pa	kPa	MPa	bar	lbf/ft ²	psi
Βαρύτητα	m/sec ²	m/sec ²	m/sec ²	cm/sec ²	ft/sec ²	in/sec ²
Δυστροπία σφαίρας	N/m	kN/m	MN/m	Mdynes/cm	lbf/ft	lbf/in
Δυστροπία παράλληλου δεσμού	Pa/m	kPa/m	MPa/m	bar/cm	lbf/ft ³	lbf/in ³

Άλλο ένα ζήτημα με τις συμβάσεις του λογισμικού είναι σχετικά με τα πρόσημα, όπου δεν συνάδουν με τις συμβάσεις της βραχομηχανικής. Αναλυτικότερα, όσον αφορά στις ορθές τάσεις, αυτές που σημειώνονται με αρνητικό πρόσημο είναι οι θλιπτικές τάσεις. Για τις διατμητικές τάσεις, η θετική τους φορά θα είναι όμοια με τη φορά του θετικού ημιάξονα με τον οποίο είναι παράλληλες, αν το ίδιο ισχύει και για τη θετική ορθή τάση που ασκείται στο ίδιο επίπεδο με αυτή. Ειδιάλλως συμβαίνει το αντίθετο.



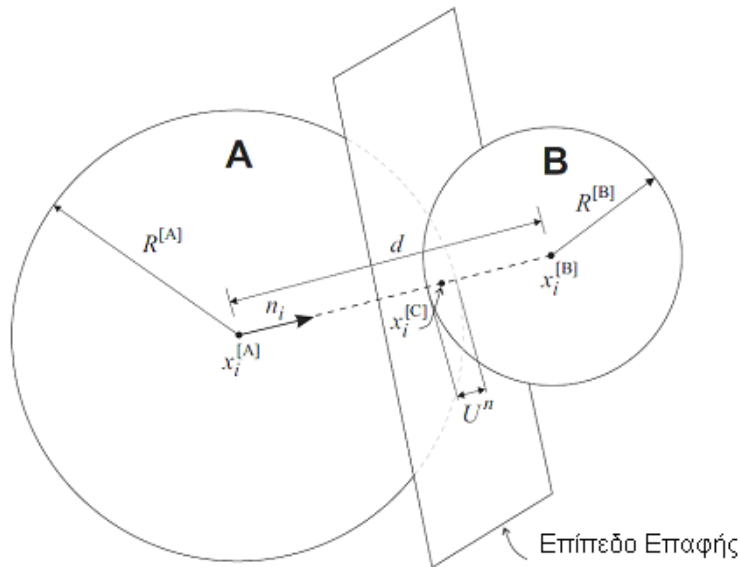
Σχήμα 3.1. Συμβάσεις προσημών για διατμητικές τάσεις στο PFC (Πηγή: Καρατζά, 2011)

Όσον αφορά στις τροπές, για την ορθή ισχύουν κανόνες ανάλογοι με την ορθή τάση, δηλαδή η βράχυνση θεωρείται αρνητική. Για τη διατμητική τροπή, παραμόρφωση με διεύθυνση που συνάδει με τη φορά του θετικού ημιάξονα των x , θεωρείται θετική.



Σχήμα 3.2. Συμβάσεις προσημών για διατμητικές τροπές στο PFC (Πηγή: Καρατζά, 2011)

Οι δυνάμεις επαφής αναλύονται σε μια ορθή και μια διατμητική συνιστώσα στο επίπεδο επαφής. Οι ορθές δυνάμεις επαφής δρουν κάθετα στο επίπεδο επαφής, ενώ οι διατμητικές δυνάμεις επαφής δρουν στο επίπεδο. Θετικές θεωρούνται οι ορθές δυνάμεις επαφής που προκαλούν θλίψη.



Σχήμα 3.3. Επαφή μεταξύ σωματιδίων στο PFC (Πηγή: Καρατζά, 2011)

Επιπλέον, τα διανύσματα όταν αναλύονται σε τετμημένες και τεταγμένες, αυτές παίρνουν θετικές τιμές όταν είναι ανάλογες με τους θετικούς ημίξονες x και y σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων xOy . Τέλος, η θετική φορά, τόσο κατά την περιστροφή όσο και για τη ροπή, είναι αντίθετη με τη φορά κίνησης των δεικτών του ρολογιού.

Στη συνέχεια, θεωρείται απαραίτητο να αναφερθούν κάποιες παραδοχές που γίνονται, λόγω του ότι η προσομοίωση λαμβάνει χώρα σε δισδιάστατο περιβάλλον. Σε ένα σύνολο σφαιρών ή δίσκων υπάρχουν μόνο δύο συνιστώσες για την ανάλυση των δυνάμεων και μια για τη ροπή και αυτές είναι οι μοναδικές που θα λαμβάνονται υπόψη στις εξισώσεις κίνησης και στις σχέσεις δυνάμεων –μετατοπίσεων. Επιπλέον, τα κέντρα βάρους όλων των σωματιδίων θα βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο κατά την προσομοίωση.

Η τάση και η τροπή, ως συνεχείς μεταβλητές, δεν είναι δυνατό να ορίζονται σε κάθε σημείο στο μοντέλο, καθώς το μέσο είναι ασυνεχές. Για την τάση υπολογίζεται μια μέση τάση, σε κάποια περιοχή οριζόμενη από το χρήστη (measurement circle), η οποία προκύπτει από τη συσχέτιση των δύο συνιστωσών της δύναμης σε κάθε σωματίδιο ανά μήκος περιφέρειας του σωματιδίου. Διαιρώντας την τελευταία με το πάχος του σωματιδίου, προκύπτει μια τιμή τάσης. Η μέση τάση στην περιοχή μέτρησης προκύπτει ως ο μέσος όρος της τάσης κάθε σωματιδίου.

Η τροπή υπολογίζεται λαμβάνοντας παραμορφώσεις μόνο κατά τη διεύθυνση των αξόνων x και y . Η ογκομετρική τροπή υπολογίζεται ως το άθροισμα της αξονικής με τη διαμετρική τροπή. Το πορώδες υπολογίζεται με βάση την επιφάνεια που καλύπτουν τα κενά προς την επιφάνεια που καλύπτουν οι σφαίρες, σε αντίθεση με την τρισδιάστατη προσέγγιση που αφορά στο λόγο των όγκων και όχι των επιφανειών. Ο Deresiewicz (1958) υπολόγισε ότι το μικρότερο πορώδες σε

ομοιόμορφη μέγεθος σφαιρών μπορεί να είναι 0,0931 σε δισδιάστατο χώρο ενώ στον τρισδιάστατο 0,2595. Τέλος, η μάζα υπολογίζεται βάσει του ειδικού βάρους, της ακτίνας και του πάχους κάθε σφαίρας.

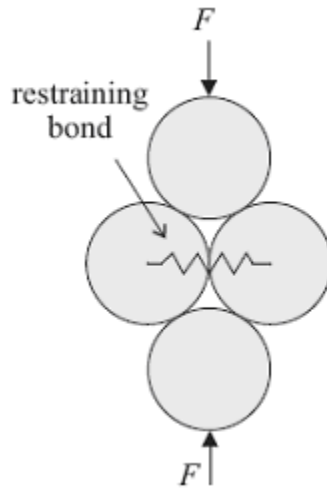
3.3.2. Μηχανική του PFC

Η αναπαράσταση του πετρώματος ως σύνολο σωματιδίων συγκολλημένων στις επαφές τους έχει ως στόχο την όσο το δυνατό πιο ικανοποιητική προσέγγιση της συμπεριφορά του φυσικού πετρώματος. Η τεχνική αυτή αναφέρεται από τους Potyondy & Cundall (2004) ως Μοντέλο Συνδεδεμένων Σωματιδίων (Bonded Particle Model, BPM). Το BPM μπορεί να λάβει διάφορες παραλλαγές ανάλογα με το σχήμα των σωματιδίων ή την αρχική αλληλοεπικάλυψή τους. Επιπλέον, επιλέγοντας κατάλληλες καταστατικές εξισώσεις για τις επαφές, μπορούν να προσομοιωθούν φαινόμενα όπως η διαστολή λόγω εκτενούς μικρορωγμάτωσης, αλλά και η χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το BPM αναφέρεται και ως συνθετικό πέτρωμα.

3.3.3. Μηχανισμός Ρωγμάτωσης

Στο PFC^{2D} τα σωματίδια θεωρούνται ως άκαμπτα στοιχεία, που παραμορφώνονται τοπικά στα σημεία επαφής τους. Οι επαφές θεωρούνται ότι έχουν πεπερασμένη ορθή και διατμητική δυστροπία, ανάλογα με την οποία εξελίσσεται και η παραμόρφωση. Τα σωματίδια μπορούν να βρίσκονται απλά σε επαφή ή να είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους αναπαριστώντας ένα στερεό υλικό. Σε αυτή την περίπτωση, η θραύση του υλικού εμφανίζεται μέσω της προοδευτικής θραύσης των δεσμών των σωματιδίων, όταν η φόρτιση ξεπεράσει την αντοχή των δεσμών.

Στο σχήμα 3.4. φαίνεται ο σχηματισμός εφελκυστικών ρωγμών που έχουν προκληθεί από θλιπτικές δυνάμεις. Συγκεκριμένα, η αξονική δύναμη F τείνει να απομακρύνει τις σφαίρες από το συσσωμάτωμα, με αποτέλεσμα ο δεσμός μεταξύ τους να υπόκειται σε εφελκυσμό. Τέτοιες αξονικές μικρορωγμές εμφανίζονται κυρίως κατά τα αρχικά στάδια φόρτισης σε δοκιμές θλίψης που εφαρμόζονται σε συνδεδεμένα σύνολα κυκλικών ή σφαιρικών σωματιδίων.



Σχήμα 3.4. Εφελκυστικές ρωγμές που προκαλούνται από θλιπτικές δυνάμεις (Πηγή: Καρατζά, 2011)

3.3.4. Μοντέλο Συνδεδεμένων Σωματιδίων (BPM)

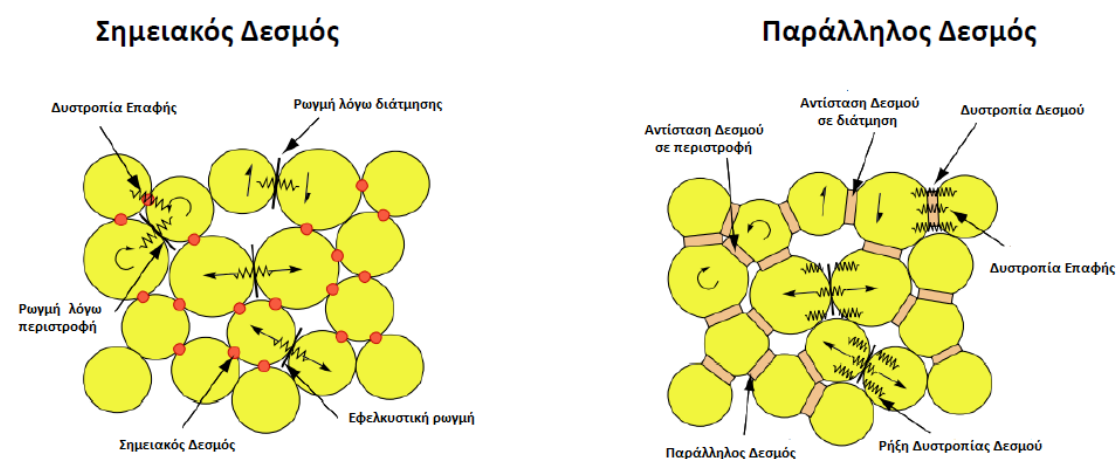
Ένα μοντέλο BPM απαιτεί την επιλογή κατάλληλων παραμέτρων για τις επαφές μεταξύ των σωματιδίων και των δεσμών, ώστε το συνθετικό πέτρωμα να παρουσιάζει παρόμοια μακροσκοπική συμπεριφορά με το φυσικό πέτρωμα. Η επιλογή γίνεται συνήθως με βάση τα αποτελέσματα τυπικών εργαστηριακών δοκιμών, που στη συνέχεια προσομοιώνονται αριθμητικά. Στη συνέχεια, το BPM βαθμονομείται ώστε να προσεγγίσει τη συμπεριφορά του πετρώματος σε αυτές. Παρόλα αυτά, είναι απαραίτητο να υιοθετηθούν κάποιες παραδοχές.

- Τα σωματίδια έχουν μορφή σφαιρών ή δίσκων πεπερασμένου πάχους, είναι άκαμπτα και έχουν πεπερασμένη μάζα.
- Τα σωματίδια κινούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους, μεταθετικά, περιστροφικά ή συνδυασμός των δύο κινήσεων.
- Τα σωματίδια αλληλεπιδρούν μόνο στις επαφές τους. Λόγω της γεωμετρίας τους, μεταξύ δύο σφαιριδίων ή δίσκων είναι δυνατό να υπάρχει μόνο μια επαφή.
- Πιθανές αλληλεπικαλύψεις μεταξύ των σωματιδίων θα πρέπει να είναι τόσο μικρές ώστε οι επαφές μεταξύ τους να θεωρούνται σημειακές
- Στις επαφές μπορούν να αντιστοιχηθούν δεσμοί. Οι δεσμοί θεωρούνται ότι έχουν πεπερασμένη ορθή και διατμητική δυστροπία και αντοχή. Οι δεσμοί μπορούν να φέρουν φορτία και όταν η φόρτιση υπερβεί την αντοχή τους, τότε αστοχούν.
- Για την επίλυση εφαρμόζονται οι νόμοι κίνησης του Νεύτωνα, οι οποίοι συσχετίζουν τη σχετική κίνηση των σωματιδίων με τη δύναμη και τη ροπή που αναπτύσσονται στις επαφές τους. Επίσης εφαρμόζονται οι επιλεχθείσες σχέσεις δύναμης – μετατόπισης στις επαφές.

3.3.5. Δεσμοί μεταξύ Σωματιδίων

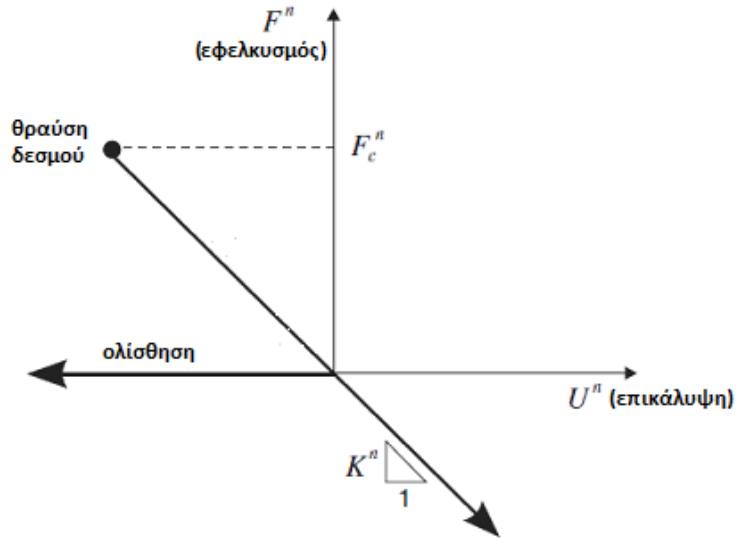
Σύμφωνα με τους Potyondy & Cundall (2004) οι δεσμοί των σωματιδίων στο PFC^{2D} δύναται να προσομοιαστούν με το συγκολλητικό υλικό των κόκκων των πετρωμάτων ή με τη νοητή συγκόλληση των κρυστάλλων των κρυσταλλικών πετρωμάτων. Το PFC έχει τη δυνατότητα επιλογής δύο διαφορετικών τύπων δεσμών. Ο πρώτος τύπος είναι οι σημειακοί δεσμοί (contact bond) και ο δεύτερος οι παράλληλοι (parallel bond).

Ο σημειακός δεσμός θεωρείται ότι αναπαριστάται από δύο ελατήρια κάθετα και παράλληλα στο επίπεδο της επαφής, τα οποία έχουν σταθερή ορθή και διατμητική δυστροπία. Αυτά τα ελατήρια έχουν διατμητική και εφελκυστική αντοχή. Η ύπαρξη ενός σημειακού δεσμού δεν επιτρέπει την ολίσθηση στα συνδεδεμένα σωματίδια. Επιπλέον, το μέγεθος της διατμητικής δύναμης επαφής περιορίζεται από τη διατμητική αντοχή του δεσμού. Ο σημειακός δεσμός επιτρέπει την ανάπτυξη εφελκυστικών δυνάμεων, όμως το μέγεθός τους καθορίζεται από την ορθή αντοχή του δεσμού.



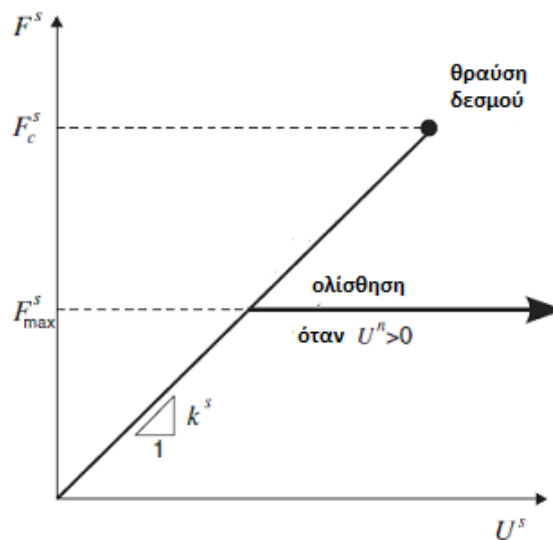
Σχήμα 3.5. Απεικόνιση σημειακών και παράλληλων δεσμών (Πηγή: Cho, 2007)

Ένας σημειακός δεσμός είναι δυνατό να δημιουργηθεί ορίζοντας τιμές για την ορθή και τη διατμητική του αντοχή. Σε περίπτωση κατά την οποία το μέγεθος της εφελκυστικής δύναμης επαφής ισούται ή υπερβαίνει την ορθή αντοχή του δεσμού, τότε αυτός σπάει και οι ορθές και διατμητικές δυνάμεις επαφής μηδενίζονται. Αντίθετα, αν η διατμητική δύναμη επαφής ισούται ή υπερβαίνει τη διατμητική αντοχή του δεσμού, ο δεσμός θα αστοχήσει, χωρίς όμως να μεταβληθεί η τιμή των δυνάμεων επαφής. Προϋπόθεση για να συμβεί το παραπάνω είναι οι διατμητικές δυνάμεις να μην υπερβαίνουν το όριο ολίσθησης και οι ορθές να είναι θλιπτικές, όπως φαίνεται στα σχήματα 3.6. και 3.7. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά ενός σημειακού δεσμού παρουσιάζονται στο σχήμα 3.8.



α) ορθή συνιστώσα της δύναμης επαφής

Σχήμα 3.6. Προϋποθέσεις για θραύση του δεσμού όσον αφορά στην ορθή συνιστώσα της δύναμης επαφής (Πηγή: Καρατζά, 2011)



β) διατμητική συνιστώσα της δύναμης επαφής

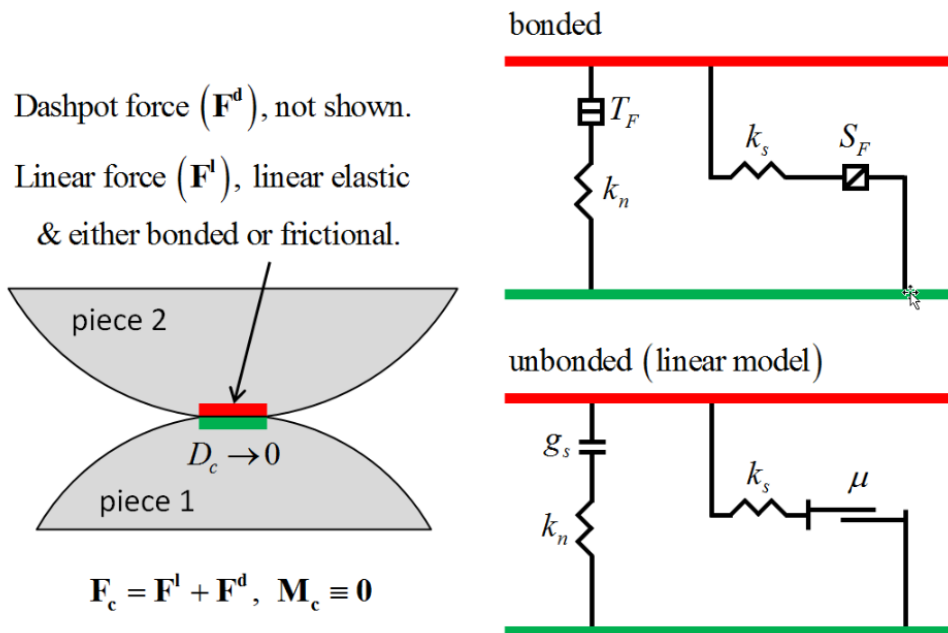
Σχήμα 3.7. Προϋποθέσεις για θραύση του δεσμού όσον αφορά στην ορθή συνιστώσα της δύναμης επαφής (Πηγή: Καρατζά, 2011)

όπου: F_n = ορθή δύναμη επαφής (θετική δύναμη θεωρείται η εφελκυστική)

U_n = σχετική ορθή μετατόπιση (θετική μετατόπιση θεωρείται η επικάλυψη)

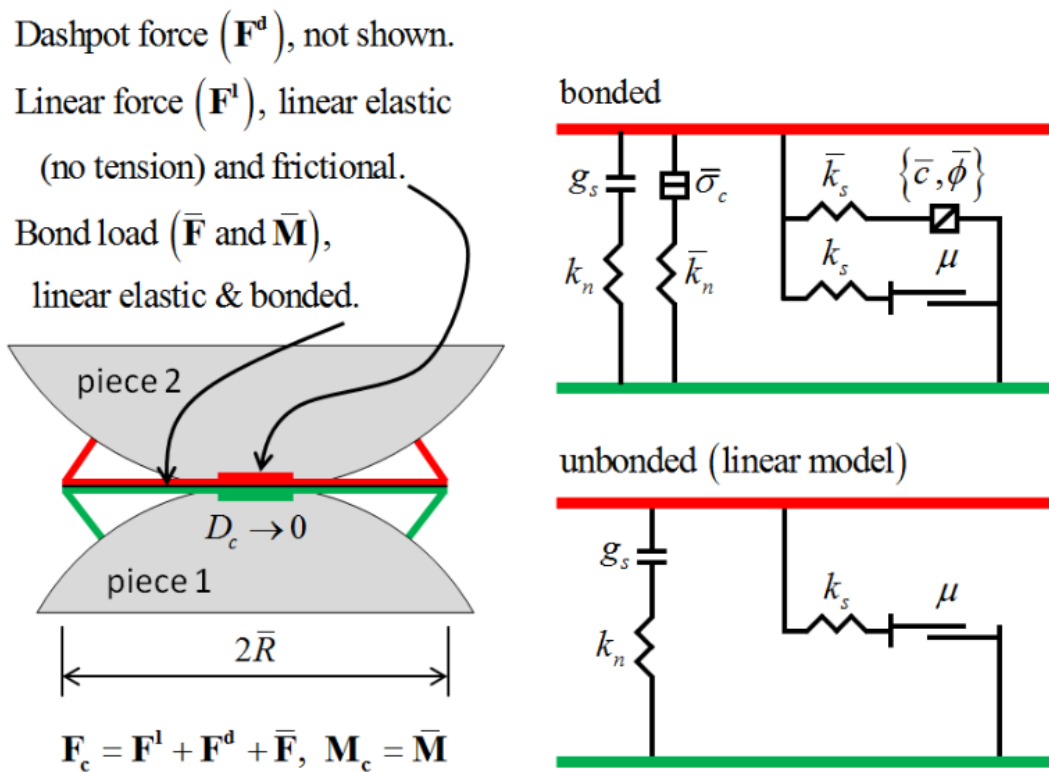
F_s = συνολική διατμητική δύναμη επαφής

U_s = συνολική διατμητική μετατόπιση υπολογισμένη σε σχέση με το σημείο όπου βρισκόταν ο σημειακός δεσμός όταν σχηματίστηκε



Σχήμα 3.8. Μηχανικά χαρακτηριστικά του σημειακού δεσμού (Πηγή: PFC 5.0 Manual)

Για να οριστεί ένας παράλληλος δεσμός αρκεί να δοθούν τιμές για την ορθή αντοχή του, την διατμητική αντοχή του και την ορθή και διατμητική δυστροπία του δεσμού. Ο παράλληλος δεσμός θεωρείται ότι αναπαριστάται από ελατήρια σταθερής ορθής και διατμητικής δυστροπίας, ομοιόμορφα κατανεμημένα σε μια ορθογωνική επιφάνεια παράλληλη με το επίπεδο του δεσμού. Τα ελατήρια δρουν παράλληλα με τα ελατήρια της επαφής (point contact springs), η χρήση των οποίων αφορά στην σημειακή ανάθεση της δυστροπίας των σωματιδίων. Η ελαστική αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων οφείλεται στους παράλληλους δεσμούς. Αυτή η αλληλεπίδραση λαμβάνει χώρα παράλληλα με την ολίσθηση ή τη συμπεριφορά των σημειακών δεσμών. Συνεπώς, η ύπαρξη ενός παράλληλου δεσμού δεν αποκλείει το ενδεχόμενο ολίσθησης. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά ενός παράλληλου δεσμού παρουσιάζονται στο σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9. Μηχανικά χαρακτηριστικά του παράλληλου δεσμού (Πηγή: PFC 5.0 Manual)

Οι παράλληλοι δεσμοί μπορούν να αντιστέκονται σε ροπές που δημιουργούνται από την περιστροφική κίνηση των σφαιριδίων, σε αντίθεση με τους σημειακούς. Μετά τη δημιουργία του δεσμού, οποιαδήποτε σχετική κίνηση του προκαλεί την ανάπτυξη δύναμης και ροπής στο συνδετικό υλικό του δεσμού, λόγω της δυστροπίας του. Η δύναμη και η ροπή που αναπτύσσονται, δρουν στα συνδεδεμένα σωματίδια και μπορούν να συσχετισθούν με τη μέγιστη ορθή και διατμητική τάση που ασκούνται στο συνδετικό υλικό του δεσμού, καθώς και στην περιφέρειά του. Αν κάποια από τις δύο μέγιστες τάσεις υπερβεί την αντίστοιχη αντοχή του δεσμού, τότε επέρχεται αστοχία.

Παρά τη θραύση ενός σημειακού δεσμού, η ορθή δυστροπία της επαφής εξακολουθεί να είναι ενεργή για τη διάρκεια κατά την οποία τα σωματίδια βρίσκονται σε επαφή. Αντίθετα, με τη θραύση ενός παράλληλου δεσμού, η δυστροπία του μηδενίζεται και μόνο η δυστροπία της επαφής παραμένει ενεργή. Έτσι, χρησιμοποιώντας σημειακούς δεσμούς η μακροσκοπική δυστροπία του συνθετικού πετρώματος δεν επηρεάζεται έντονα από τη θραύση των δεσμών. Διαφορετικά, χρησιμοποιώντας παράλληλους δεσμούς η θραύση των δεσμών οδηγεί σε μείωση της μακροσκοπικής δυστροπίας του συνθετικού πετρώματος. Από την άποψη αυτή, η χρήση παράλληλων δεσμών πλεονεκτεί, αφού προσεγγίζει ρεαλιστικότερα την συμπεριφορά του πετρώματος.

3.3.6. Επαφές

Όλες οι επαφές υπακούουν είτε στο γραμμικό μοντέλο ή στο μοντέλο του Hertz, ανάλογα με τις ιδιότητες των επαπτόμενων στοιχείων (σφαίρα – σφαίρα ή σφαίρα – τοίχος). Το γραμμικό μοντέλο εφαρμόζεται κατά την εφαρμογή ενός σημειακού δεσμού. Η συμπεριφορά του παράλληλου δεσμού περιγράφεται με την προσθήκη του συνδετικού στοιχείου σε μια επαφή σφαιριδίων. Αυτό το στοιχείο συμπεριφέρεται παράλληλα με τα άλλα στοιχεία που δρουν σε μια επαφή.

Οι δυστροπίες των επαφών συσχετίζουν τις ασκούμενες στις επαφές δυνάμεις με την σχετική παραμόρφωση κατά την ορθή και διατμητική διεύθυνση ως εξής:

$$F^n = K^n * U^n \quad (\text{ορθή δυστροπία})$$

$$\Delta F^s = -k^s * \Delta U^s \quad (\text{διατμητική δυστροπία})$$

όπου: F = δύναμη

K^n = ορθή δυστροπία

k^s = διατμητική δυστροπία

U^n = αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των σωματιδίων

ΔU^s = σχετική διατμητική μετατόπιση

Σε ό,τι αφορά την ολίσθηση χρησιμοποιούνται εξισώσεις που συσχετίζουν την ορθή και διατμητική δύναμη, έτσι ώστε να μπορούν τα δύο επαπτόμενα στοιχεία να ολισθαίνουν το ένα σε σχέση με το άλλο. Αυτό προϋποθέτει ότι δεν θα υπάρχει ορθή εφελκυστική αντοχή και η ολίσθηση θα επιτευχθεί μόνο υπό τον περιορισμό της διατμητικής δύναμης. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη των δύο σφαιριδίων. Σε περίπτωση που υπάρχει σημειακός δεσμός μεταξύ των σωματιδίων, δεν θα ισχύουν τα παραπάνω. Η ολίσθηση εξαρτάται από το συντελεστή τριβής μ . Στην περίπτωση επαφής δύο σφαιριδίων, λαμβάνεται ο μικρότερος εξ αυτών.

3.3.7. Συμπεριφορά των δεσμών

Στην ανάλυση της συμπεριφοράς των δεσμών, σκοπός είναι η συσχέτιση της συμπεριφοράς της επαφής δύο σωματιδίων με τη συμπεριφορά μιας ανελαστικής δοκού με άκρα που ταυτίζονται με τα κέντρα των δύο σφαιριδίων. Η υποθετική αυτή δοκός, έχει μήκος L , διατομή A , ροπή αδράνειας I , μέτρο ελαστικότητας E , λόγο του Poisson ν και παραμέτρους αντοχής σ_c (ορθή) και τ_c (διατμητική). Το μέτρο ελαστικότητας της επαφής δύο σωματιδίων συμβολίζεται με E_c και το αντίστοιχο ενός δεσμού με $\overline{E_c}$. Αν δύο σωματίδια A και B βρίσκονται σε επαφή, η ακτίνα της υποθετικής δοκού ορίζεται ως ο μέσος όρος της ακτίνας των σωματιδίων A και B , δηλαδή:

$$\bar{R} = \frac{R_{[A]} + R_{[B]}}{2}$$

Κατ' επέκταση, το μήκος της δοκού θα ισούται με το άθροισμα των δύο ακτίνων:

$$L = R_{[A]} + R_{[B]}$$

Ένας σημειακός δεσμός καθορίζεται από δύο παραμέτρους αντοχής, την ορθή φ_n και την διατμητική φ_s . Αυτές οι παράμετροι εκφράζονται σε μονάδες δύναμης και για να συσχετιστούν με μονάδες τάσης διαιρούνται με την επιφάνεια του δεσμού. Όταν η δύναμη επαφής ξεπεράσει ποσοτικά την τιμή της αντοχής του δεσμού, τότε αυτός σπάει και η συμπεριφορά της επαφής γίνεται παρόμοια με αυτή ενός κοκκώδους υλικού χωρίς δεσμούς. Αφού ο σημειακός δεσμός δεν μπορεί να φέρει καμπτικά φορτία, η συμπεριφορά του μπορεί να συγκριθεί με τη συμπεριφορά μιας υποθετικής δοκού που υποβάλλεται σε καθαρά αξονική και διατμητική φόρτιση. Η διατομή της υποτιθέμενης δοκού μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$A = 2 * \bar{R} * t$$

όπου: t = πάχος της υποτιθέμενης δοκού

Αντίστοιχα, η ροπή αδράνειας της δοκού θα είναι:

$$I = \frac{1}{12} * t * (2 * \bar{R})^3$$

Κατά την περίπτωση καθαρής αξονικής και καθαρής διατμητικής φόρτισης, η ορθή και διατμητική συμπεριφορά είναι ανεξάρτητες. Έτσι, η ορθή καθώς και η διατμητική δυστροπία μπορούν να εκφραστούν όπως φαίνεται ακολούθως:

$$k_n = \frac{A * \bar{E}_c}{L}$$

$$k_s = \frac{12 * I * \bar{E}_c}{L^3}$$

Όπως προαναφέρθηκε η συμπεριφορά των δεσμών παρομοιάζεται με αυτή των ελατηρίων, η διάταξη των οποίων διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του δεσμού. Η συμπεριφορά των ελατηρίων του παράλληλου δεσμού είναι παρόμοια με εκείνη μιας δοκού με μήκος L που προσεγγίζει το μηδέν. Η σχετική κίνηση σε μία επαφή παράλληλα συνδεδεμένη προκαλεί αξονικές δυνάμεις T , τέμνουσες δυνάμεις V καθώς και ροπή M . Οι μέγιστες ορθές και διατμητικές τάσεις $\bar{\sigma}$ και $\bar{\tau}$ που ασκούνται στο συνδετικό υλικό του δεσμού δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\bar{\sigma} = \frac{T}{A} + \frac{|M| * \bar{R}}{I}$$

$$\bar{\tau} = \frac{V}{A}$$

Ο παράλληλος δεσμός ακολουθεί τα ίδια κριτήρια αστοχίας όπως και ο σημειακός δεσμός. Στις παραπάνω σχέσεις η μεταβλητή που δίνει την ακτίνα, υπολογίζεται συναρτήσει ενός συντελεστή λ που καθορίζει το μήκος $2R$ του δεσμού παράλληλα με το επίπεδο της επαφής και των ακτινών των σφαιρών σε επαφή, ως εξής:

$$\bar{R} = \bar{\lambda} * \min\{R_{[A]}, R_{[B]}\}$$

3.3.8. Πορώδες

Έχοντας ήδη αναφέρει συνοπτικά τους νόμους που περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός μοντέλου στο PFC^{2D}, αξίζει να αναφέρουμε και τον τρόπο υπολογισμού του πορώδους, καθώς μικρές αλλαγές του πορώδους είναι δυνατό να προκαλέσουν μεγάλες διαφορές στην τάση. Το πορώδες n υπολογίζεται ως εξής:

$$n = 1 - \frac{A_p}{A}$$

όπου: A_p = επιφάνεια που καταλαμβάνουν τα σωματίδια

A = συνολική επιφάνεια του συνθετικού πετρώματος

Στην περίπτωση που πρέπει να κατασκευαστεί μια κατανομή με συγκεκριμένο πορώδες, η διαδικασία που ακολουθείται είναι ο πολλαπλασιασμός της ακτίνας των σφαιρών με ένα πολλαπλασιαστή m , ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$m = \sqrt{\frac{(1 - n)}{(1 - n_0)}}$$

όπου: n = επιθυμητό πορώδες

n_0 = αρχικό πορώδες

Το πορώδες δεν επηρεάζεται από τη μάζα των σφαιριδίων, επηρεάζει όμως την εντατική κατάσταση στην προσομοίωση. Η αρχική εντατική κατάσταση δεν μπορεί να ορισθεί στο PFC απευθείας, αλλά εξαρτάται από τις αρχικές παραμέτρους που επιλέγονται. Επομένως η κατασκευή αντιπροσωπευτικού πορώδους είναι σημαντική. Θα πρέπει όμως να δίνεται η απαραίτητη προσοχή στην αλληλοεπικάλυψη που μπορεί να λάβει χώρα, καθώς είναι πιθανό να προκληθούν μεγάλες τιμές προέντασης. Αποδεκτή τιμή στις αλληλεπικαλύψεις ορίζεται να είναι μικρότερη του 5% της ακτίνας των σφαιριδίων.

3.3.9. Γραμμικό Μοντέλο

Το γραμμικό μοντέλο, ουσιαστικά, περιλαμβάνει τις θεωρίες όσων αναφέρθηκαν παραπάνω. Το μοντέλο αυτό παρέχει μία γραμμική συνιστώσα και μία συνιστώσα απόσβεσης που δρουν παράλληλα μεταξύ τους. Η γραμμική συνιστώσα παρέχει γραμμικά ελαστική, μη εφελκυστική, συμπεριφορά σε συνδυασμό με τριβή, ενώ η

συνιστώσα απόσβεσης παρέχει ιξώδη συμπεριφορά. Και οι δύο συνιστώσες δρουν σε μια πολύ μικρή περιοχή, με αποτέλεσμα να αποτελούν μόνο μια δύναμη.

3.3.10. Γραμμικό Μοντέλο Αντίστασης Κύλισης

Στην παρούσα εργασία που πραγματεύεται την κοπή με κοπτικό τύπου δίσκου, είναι προφανές ότι στο σύστημα δίσκου – πετρώματος δρα η αντίσταση κύλισης. Το PFC^{2D} περιέχει το γραμμικό μοντέλο αντίστασης κύλισης, το οποίο χρησιμοποιείται σε τέτοιες περιπτώσεις.

Η επίδραση της αντίστασης κύλισης στις επαφές μεταξύ των σωματιδίων, και τη συσχετιζόμενη διάχυση της ενέργειας, μπορεί να είναι μείζονος σημασίας για πολλές εφαρμογές τόσο σε κοκκώδη πυκνά, ψευδοστατικά όσο και σε δυναμικά καθεστώτα. Σε πραγματικά κοκκώδη συστήματα, οι μηχανισμοί αυτοί μπορεί να έχουν διαφορετική μικρο-μηχανική προέλευση, όπως η προσκόλληση της περιοχής επαφής, ή η στερεοχημική επίδραση λόγω της επιφανειακής τραχύτητας ή της μη σφαιρικότητας γύρω από το σημείο επαφής. Το μοντέλο αυτό είναι απλό και βασίζεται στο γραμμικό μοντέλο, που ενσωματώνει μία ροπή στα τμήματα που συνδέονται ώστε να αντιτίθεται στην κύλιση.

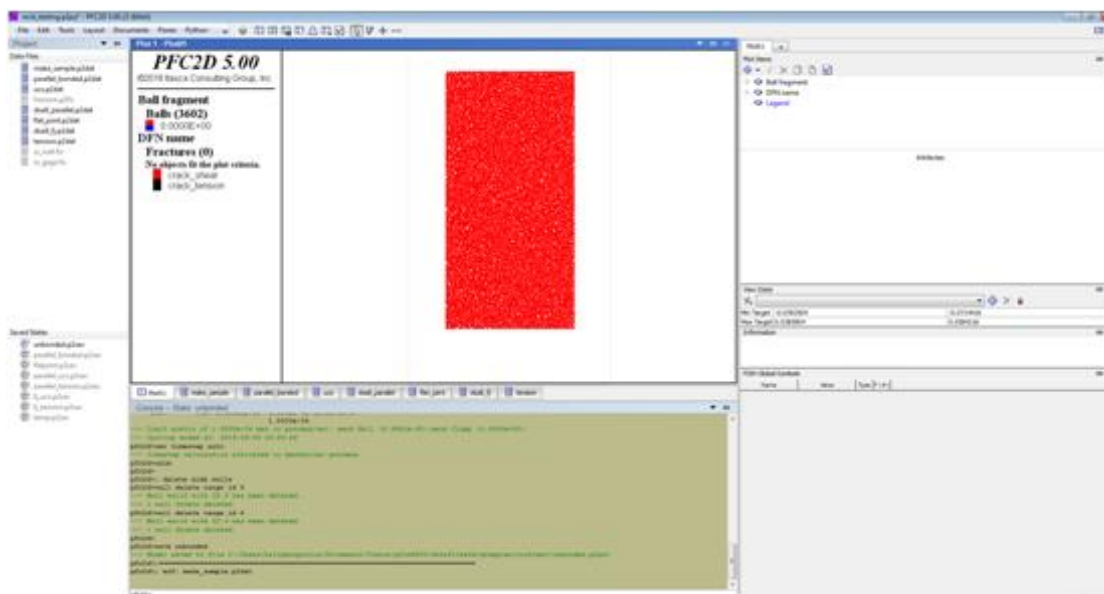
3.3.11. Σύνοψη μικρομηχανικών ιδιοτήτων

Ένα Μοντέλο Συνδεδεμένων Σωματιδίων BPM χαρακτηρίζεται από την πυκνότητα των σωματιδίων, το μέγεθός τους, την κατανομή του μεγέθους τους, την αρχική εντατική τους κατάσταση και τέλος τις μικρομηχανικές ιδιότητες της συνδετικής ύλης των κόκκων. Καθεμία από αυτές τις παραμέτρους επηρεάζει τη συμπεριφορά του μοντέλου. Η πυκνότητα των κόκκων δεν επηρεάζει την ψευδοστατική συμπεριφορά αλλά συμπεριλαμβάνεται για την πληρότητα του μοντέλου. Οι παράμετροι των οποίων ο καθορισμός είναι απαραίτητος για να εξασφαλιστεί η σωστή συμπεριφορά των σωματιδίων του υλικού είναι το μέτρο ελαστικότητας για τα σωματίδια E_c , ο λόγος ορθής προς διατμητική δυστροπία k_n/k_s και ο συντελεστής τριβής των σωματιδίων μ .

Οι ακτίνες των σωματιδίων ικανοποιούν μια ομοιόμορφη κατανομή μεγέθους των σωματιδίων που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών R_{max} και R_{min} και μια πυκνή συμπίεση διαμορφώνεται με τον καθορισμό των ιδιοτήτων γένεσης του υλικού κατά την αρχική διαμόρφωση του μοντέλου. Η δομή του συστήματος των σωματιδίων ελέγχεται από το λόγο R_{max}/R_{min} . Είναι καθοριστικό να διαμορφωθούν από την αρχή του σχηματισμού του μοντέλου όλες οι μικροσκοπικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά του μοντέλου. Μετά τον καθορισμό των σφαιριδίων ακολουθεί ο καθορισμός των ιδιοτήτων της συνδετικής ύλης. Οι ιδιότητες που πρέπει να καθοριστούν είναι το μέτρο ελαστικότητας του δεσμού \bar{E}_c , ο λόγος ορθής προς διατμητική δυστροπία \bar{k}_n/\bar{k}_s , η ορθή και διατμητική αντοχή $\bar{\sigma}$ και $\bar{\tau}$ αντίστοιχα και ο συντελεστής $\bar{\lambda}$.

3.3.12. Περιβάλλον εργασίας PFC^{2D}

Στο σχήμα 3.10. δίνεται μία άποψη του περιβάλλοντος εργασίας του PFC^{2D}. Αριστερά, στο επάνω μέρος της εικόνας φαίνονται τα αρχεία (data files) που έχουν εισαχθεί. Κάτω από αυτά διακρίνονται οι καταστάσεις που έχουν αποθηκευτεί, όπως έχουν οριστεί από το χρήστη.



Σχήμα 3.10. Περιβάλλον εργασίας PFC^{2D}

Στο κέντρο της εικόνας φαίνεται το συνθετικό υλικό (Plot), καθώς και όλες οι προσομοιώσεις που έχουν οριστεί να πραγματοποιηθούν από το χρήστη. Παρακάτω, φαίνεται το παράθυρο το οποίο ενημερώνει το χρήστη για τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης (Console).

Μεταξύ των δύο αυτών παραθύρων που περιγράφηκαν, παρατηρείται μία λίστα οριζοντίως, μέσω της οποίας εναλλάσσονται παράθυρα, αντί του Plot, και περιλαμβάνουν τα αρχεία που έχουν εισαχθεί και δύνανται να υποστούν επεξεργασία και έλεγχο από το χρήστη.

Τέλος, δεξιά στην εικόνα ορίζονται οι επιλογές που επιθυμεί ο χρήστης να φαίνονται στο παράθυρο του Plot, όπως οι τοίχοι, τα σωματίδια, οι επαφές των σωματιδίων κτλ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΙΚΡΟΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

4.1. Εισαγωγή

Το PFC^{2D}, όπως έχει ήδη αναφερθεί βασίζεται στην κατασκευή αριθμητικών μοντέλων με στόχο την προσομοίωση πετρωμάτων και άλλων υλικών. Για να συμβεί κάτι τέτοιο είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός ενός αριθμού μικροπαραμέτρων, ώστε να προσομοιάζεται πιο ρεαλιστικά το πέτρωμα.

Για την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων, είναι σύνηθες να εφαρμόζεται μια διαδικασία βαθμονόμησης, στην οποία η απόκριση του συνθετικού πετρώματος κατά την προσομοίωση μίας συγκεκριμένης κατάστασης φόρτισης συγκρίνεται με την αντίστοιχη απόκριση του πραγματικού πετρώματος. Η διαδικασία περιλαμβάνει πολυάριθμες επαναλήψεις των δοκιμών στο λογισμικό, σε συνδυασμό με μικρές αλλαγές τις τιμές των μικροπαραμέτρων και παρατήρηση του αποτελέσματος της απόκρισης, μέχρις ότου η τιμή της προσομοίωσης να προσεγγίσει σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματική τιμή.

Αυτή η σύγκριση μπορεί να γίνει είτε στη βάση των συνήθων εργαστηριακών δοκιμών, όπως δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, είτε στη βάση φορτίσεων κλίμακας πεδίου, όπως η έκταση ζημίας γύρω από υπόγειες εκσκαφές, ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το BPM του PFC^{2D}.

4.2. Μακρομηχανικές παράμετροι

Οι παράμετροι που, συνήθως, χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό ενός πετρώματος είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young E , ο λόγος του Poisson ν και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS. Άλλες παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό, μέσω της δοκιμής Brazilian και η δύναμη κοπής μέσω των εργαστηριακών δοκιμών γραμμικής κοπής LCM.

Κάθε μία από τις μακροπαραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω σχετίζονται με έναν αριθμό μικροπαραμέτρων που ορίζονται στο PFC. Για μοντέλα συνδεδεμένα με σημειακούς δεσμούς, το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας των επαφών (E_c) και το λόγο της ορθής προς τη διατμητική δυστροπία (k_n/k_s). Για τον καθορισμό του, πραγματοποιούνται θλιπτικές δοκιμές υπό την προϋπόθεση ότι η αντοχή των δεσμών θα είναι τόσο μεγάλη, ώστε να μην μπορούν να σπάσουν, άρα το υλικό θα συμπεριφέρεται ελαστικά. Αν η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων και ο λόγος των δυστροπιών είναι σταθερά, τότε η σχέση του μέτρου του Young με το μέτρο ελαστικότητας των δεσμών θα είναι γραμμική, οπότε μια δοκιμή πιθανώς επαρκεί ώστε να εξαχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Για μοντέλα με παράλληλους δεσμούς, το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από τις προαναφερθείσες παραμέτρους, καθώς και από το μέτρο ελαστικότητας του δεσμού

και το λόγο των δυστροπιών του δεσμού. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι όμοια με αυτή για τα μοντέλα με σημειακούς δεσμούς.

Στην περίπτωση κατά την οποία το υλικό δεν συνδέεται με δεσμούς, το μέτρο ελαστικότητας ελέγχεται από το μέτρο ελαστικότητας των επαφών των σωματιδίων και το λόγο της ορθής προς τη διατμητική δυστροπία, ενώ η αντοχή εξαρτάται από το συντελεστή τριβής μ των σωματιδίων. Η απόκριση επηρεάζεται επίσης από το αρχικό πορώδες n του συνθετικού υλικού. Καθώς φορτίζεται, οι επαφές των δεσμών μεταβάλλονται και τα σωματίδια αναδιοργανώνονται, λόγω της ολίσθησης στις επαφές. Έτσι παράγεται μια μη γραμμική απόκριση τάσης – παραμόρφωσης, κατά την οποία το μέτρο ελαστικότητας συνεχώς μειώνεται, έως ότου η φόρτιση φτάσει στο μέγιστο φορτίο. Για να αναπαραχθεί ένα δεδομένο τέμνον μέτρο ελαστικότητας κατά τη μέγιστη αντοχή, διατηρείται σταθερή η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων, οι τιμές του λόγου δυστροπιών, καθώς και του συντελεστή τριβής. Συγχρόνως, εκτελείται ένα σύνολο προσομοιώσεων τριαξονικών δοκιμών θέτοντας διαφορετικές τιμές στο μέτρο ελαστικότητας των επαφών, ώστε να ληφθεί ένα διάγραμμα μεταβολής του τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας προς το μέτρο ελαστικότητας των επαφών, η σχέση μεταξύ των οποίων αναμένεται να είναι μη γραμμική.

Ο λόγος του Poisson που υπολογίζεται από μια διαξονική δοκιμή σε ένα μοντέλο του PFC^{2D}, αντιπροσωπεύει την ειδική περίπτωση της επίπεδης τάσης (με $\sigma_z = 0$) και σταθερή πλευρική τάση ($\Delta\sigma_x = 0$). Υπολογίζεται ως εξής:

$$\nu' = -\frac{\Delta\epsilon_x}{\Delta\epsilon_y} \quad (4.1)$$

Ο λόγος του Poisson που αντιστοιχεί σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης, μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη γενική σχέση μεταξύ της επίπεδης τάσης και επίπεδης παραμόρφωσης όπως φαίνεται στη συνέχεια:

$$\nu = \frac{\nu'}{1 + \nu'} \quad (4.2)$$

Ο λόγος Poisson επηρεάζεται από το λόγο των δυστροπιών των επαφών για κάθε τύπου συνδεδεμένα ή μη σωματίδια, καθώς και από το λόγο των δυστροπιών των δεσμών στην περίπτωση των παράλληλων δεσμών και αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του λόγου αυτού.

Σε ένα Μοντέλο Συνδεδεμένων Σωματιδίων, η μέγιστη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για δεδομένες συνθήκες περιορισμού και σταθερό λόγο της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή της αντοχής των δεσμών, εξαρτάται από τις μέσες ορθές και διατμητικές τιμές της αντοχής του. Επιπλέον, ο λόγος της ορθής προς τη διατμητική αντοχή των δεσμών επηρεάζει τον μηχανισμό της αστοχίας, ελέγχοντας το πλήθος των διατμητικών και εφελκυστικών ρωγμών. Ένας μικρός λόγος τυπικής απόκλισης προς μέση τιμή αντοχής των δεσμών, οδηγεί σε αστοχία του μοντέλου σε εφελκυσμό κατά

κύριο λόγο, ενώ για μεγάλο λόγο, επέρχεται αστοχία σε διάτμηση. Για να αναπαραχθεί μια δεδομένη μέγιστη αντοχή σε συγκεκριμένες συνθήκες πλευρικού περιορισμού, αρχικά πρέπει να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας όπως περιγράφηκε παραπάνω και μετά να εκτελεστεί δοκιμή θλίψης, από την οποία λαμβάνεται η τιμή της μέγιστης αντοχής. Για σταθερό λόγο της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή της αντοχής και για σταθερό λόγο της ορθής προς την διατμητική αντοχή των δεσμών, η μέγιστη αντοχή του συνθετικού υλικού έχει γραμμική σχέση με τη μέση ορθή αντοχή των δεσμών.

Σε ένα ασύνδετο μοντέλο, ο συντελεστής τριβής των σωματιδίων επηρεάζει την αντοχή του υλικού. Μία τυχόν αύξηση του πλευρικού περιορισμού σε συνδυασμό με την αύξηση του συντελεστή τριβής, οδηγεί σε αύξηση της αντοχής του μοντέλου, έως ένα ανώτατο όριο. Για υψηλότερες τιμές, η αντοχή εξαρτάται από το σχήμα των σωματιδίων και την κατανομή του μεγέθους τους.

4.3. Προσδιορισμός μικρομηχανικών παραμέτρων

Όπως αναφέρθηκε, οι παραπάνω μακρομηχανικές παράμετροι, είναι οι πιο συχνά προσδιοριζόμενες σε εργαστηριακές δοκιμές. Εφόσον αυτές είναι γνωστές για την πλειοψηφία των πετρωμάτων που μελετώνται εργαστηριακά, έχουν προταθεί μέθοδοι που συνδέουν τις παραμέτρους αυτές με τις μικροπαραμέτρους του λογισμικού. Σκοπός των μεθόδων αυτών είναι η καλύτερη δυνατή ταύτιση του μέτρου ελαστικότητας E , του λόγου Poisson ν και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη UCS του λογισμικού με τις εργαστηριακά μετρούμενες τιμές. Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι μέθοδοι του Yoon και του Wang, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

4.4. Μέθοδος Yoon (2007)

Μέσω της μεθόδου αυτής, υπολογίζονται παράμετροι, και συγκεκριμένα το μέτρο ελαστικότητας της επαφής των σφαιρών BCM, ο λόγος ορθής προς τη διατμητική δυστροπία KNKS, η ορθή δύναμη του δεσμού NBS, που αντιστοιχεί στην εφελκυστική αντοχή του δεσμού, η διατμητική δύναμη του δεσμού SBS, που αντιστοιχεί στη συνοχή του δεσμού, ο συντελεστής τριβής FRIC, η ελάχιστη ακτίνα των σφαιρών BRAD και τέλος ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση αντοχή του δεσμού ROSD. Σε περίπτωση χρήσης παράλληλων δεσμών στο συνθετικό υλικό, απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός τριών επιπλέον παραμέτρων, ο πολλαπλασιαστής της ακτίνας του παράλληλου δεσμού, το μέτρο ελαστικότητας του παράλληλου δεσμού και ο λόγος ορθής προς διατμητική δυστροπία του παράλληλου δεσμού.

Ο υπολογισμός του Yoon εφαρμόστηκε σε μοντέλα με σημειακούς δεσμούς σφαιρών, που ορίστηκαν στο λογισμικό κατά τη διαδικασία γένεσης του μοντέλου. Με αυτό τον τρόπο, προσομοιώνοντας τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, τα αποτελέσματα της αντοχής του δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη UCS, του μέτρου ελαστικότητας E και του λόγου του Poisson ν θα συμβαδίζουν με τις αντίστοιχες τιμές ενός πραγματικού πετρώματος, με απόκλιση έως και 5%, σύμφωνα με τον Yoon. Οι τρεις αυτές

παράμετροι αποτελούν τη μακροσκοπική συμπεριφορά του δοκιμίου, ενώ είναι γνωστές και ως μακροσκοπική απόκριση του πετρώματος.

Κατά το πρώτο στάδιο, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Plackett - Burman (PB), με τη βοήθεια της οποίας καθορίστηκαν οι μικροπαράμετροι οι οποίες επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό την μακροσκοπική απόκριση του πετρώματος. Στη συνέχεια με τη βοήθεια της μεθόδου Central Composite Design (CCD) κατάφερε να προσδιορίσει μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των ήδη ταξινομημένων μικροπαραμέτρων. Τέλος, υπολόγισε τις βέλτιστες τιμές των ζητούμενων παραμέτρων ώστε να υπάρχει συσχέτιση με την πραγματικότητα.

4.4.1. Σχεδιασμός Πειράματος (Design of Experiment)

Ο σχεδιασμός πειράματος (Design of Experiment – DOE) είναι μια δομημένη και οργανωμένη μέθοδος για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ των παραμέτρων που επηρεάζουν μια διαδικασία και τα αποτελέσματά της. Ο εκτελών το πείραμα αλλάζει μία ή περισσότερες μεταβλητές (process variables), με σκοπό την παρατήρηση της επιρροής των αλλαγών αυτών σε μία ή περισσότερες μεταβλητές απόκρισης (response variables). Ο DOE αρχίζει με τον καθορισμό των στόχων του πειράματος και με την επιλογή των προς μελέτη μεταβλητών. Η εφαρμογή του DOE πραγματοποιείται στην ανάλυση ευαισθησίας των μικροπαραμέτρων σε μοντέλα συνδεδεμένων, με σημειακούς δεσμούς, σωματιδίων.

Κατά τον πειραματικό σχεδιασμό, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, χρησιμοποιείται η μέθοδος PB, η οποία οδηγεί με αξιοπιστία σε ένα μικρό πλήθος παραμέτρων προς βελτιστοποίηση και κάνει εκτιμήσεις της γραμμικής επιρροής όλων των παραμέτρων, για συγκεκριμένο πλήθος παρατηρήσεων, με μέγιστη ακρίβεια.

Η ακριβής εκτίμηση των αποκρίσεων, προϋποθέτει τα πειράματα να είναι σχεδιασμένα ώστε να επιτρέπουν την εκτίμηση της αλληλεπίδρασης και της επίδρασης των τετραγώνων της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται στη συνέχεια η μέθοδος CCD, που είναι μία μέθοδος ικανή για την εκτίμηση των αλληλεπιδράσεων και των επιδράσεων των τετραγώνων. Η CCD παρέχει υψηλής ποιότητας πρόβλεψη (γραμμική, δευτεροβάθμια και επίδραση αλληλεπιδράσεων) σε ολόκληρη την περιοχή σχεδίασης. Με τη βοήθειά της ο Youn μελέτησε την αλληλεπίδραση που έχουν ανεξάρτητες μεταβλητές που συμμετέχουν σε γραμμικές εξισώσεις, όπως είναι στην προκειμένη περίπτωση οι μικροπαράμετροι.

4.4.2. Διαδικασία βελτιστοποίησης

Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, γίνεται προσπάθεια για επιλογή του βέλτιστου συνόλου των μικροπαραμέτρων, ώστε να δημιουργηθεί ένα μοντέλο συνδεδεμένων σωματιδίων, για το οποίο τα αποτελέσματα προσομοιώσεων μονοαξονικών δοκιμών θλίψης θα είναι όσο το δυνατό πλησιέστερα σε αυτά των εργαστηριακών δοκιμών που έχουν γίνει σε πραγματικά πετρώματα. Στη συνέχεια, ορίζονται οι περιορισμοί που επηρεάζουν τον υπολογισμό της λύσης και οι σχέσεις

μεταξύ των μικροπαραμέτρων μετατρέπονται σε εξισώσεις, οι οποίες επιβάλλονται στην διαδικασία βελτιστοποίησης. Η βελτιστοποίηση έγινε με μη γραμμικούς περιορισμούς χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab.

4.4.3. Ανάλυση ευαισθησίας των μικροπαραμέτρων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Plackett - Burman

Αρχικά, ορίστηκαν ανώτερες και κατώτερες τιμές αυτών των παραμέτρων, οι οποίες κωδικοποιήθηκαν με σκοπό να κυμαίνονται από -1 έως 1. Στο επίπεδο 0, η τιμή αποτελεί τη μέση των δύο ακραίων τιμών. Οι τιμές αυτές ορίστηκαν βάσει της φυσικής έννοιας των παραμέτρων αυτών, ώστε να κυμαίνονται σε λογικά πλαίσια. Οι κωδικοποιημένες αυτές ακραίες τιμές χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση με τη μέθοδο PB για τους εκάστοτε υπολογισμούς.

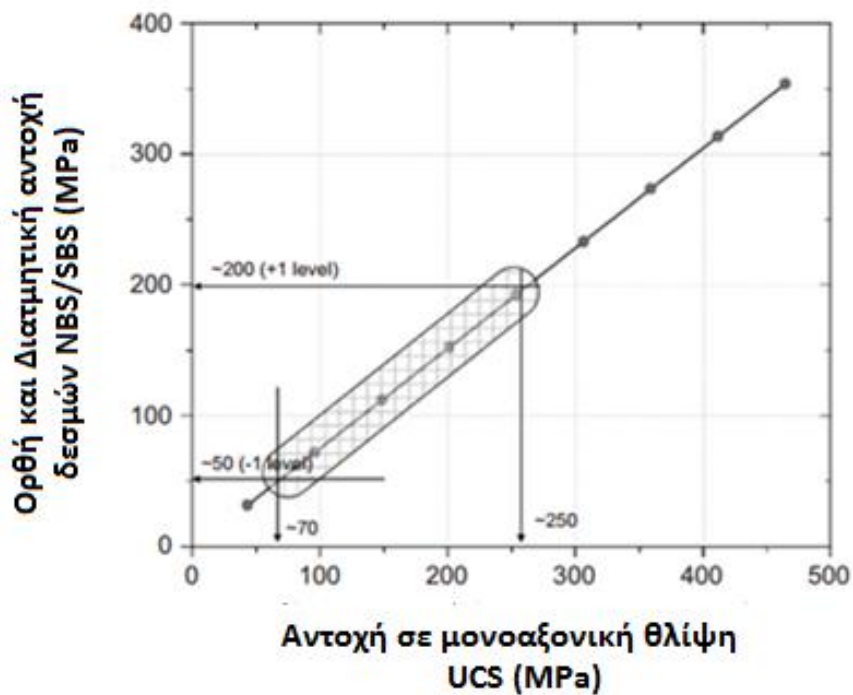
Πίνακας 4.1. Μετατροπή κωδικοποιημένων μικροπαραμέτρων σε μη κωδικοποιημένες (Πηγή: Yoon, 2007)

Μικροπαραμέτροι	Μη Κωδικοποιημένες Τιμές Επιπέδων			Μετατροπή σε Κωδικοποιημένες Τιμές
	-1	0	+1	
BCM (GPa)	40	70	100	Μη Κωδ. = $30 \cdot \text{Κωδ.} + 70$
KNKS	1	2,5	4	Μη Κωδ. = $1,5 \cdot \text{Κωδ.} + 2,5$
FRIC	0,25	0,5	0,75	Μη Κωδ. = $0,25 \cdot \text{Κωδ.} + 0,5$
NBS (MPa)	50	125	200	Μη Κωδ. = $75 \cdot \text{Κωδ.} + 125$
SBS (MPa)	50	125	200	Μη Κωδ. = $75 \cdot \text{Κωδ.} + 125$
ROSD	0,24	0,32	0,4	Μη Κωδ. = $0,08 \cdot \text{Κωδ.} + 0,32$
BRAD (mm)	0,24	0,36	0,48	Μη Κωδ. = $0,12 \cdot \text{Κωδ.} + 0,36$

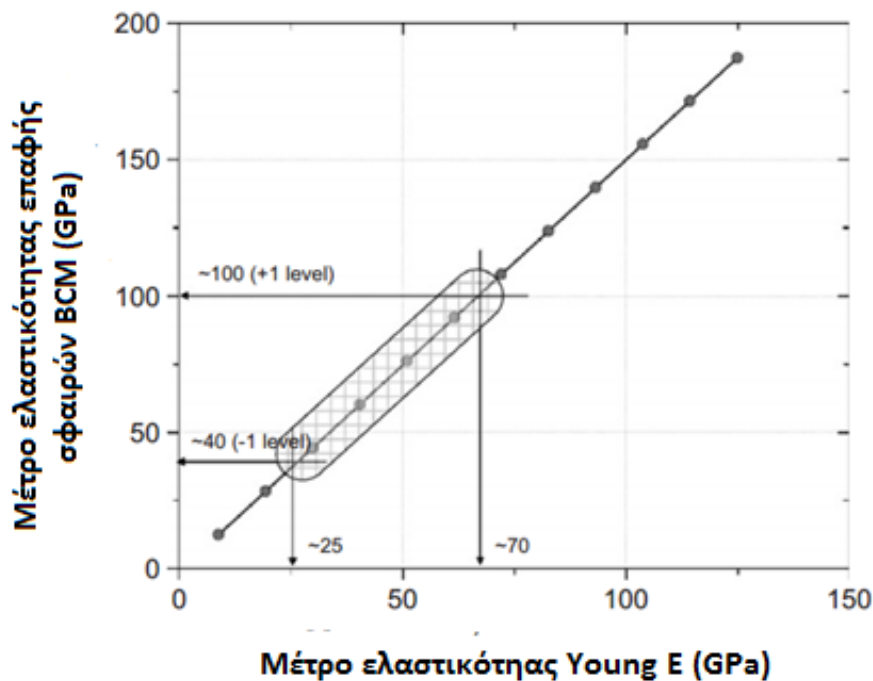
Με τη χρήση του PFC, γίνεται φανερό το γεγονός ότι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη εξαρτάται άμεσα από την αντοχή των δεσμών των σφαιρών του δοκιμίου. Στο διάγραμμα 4.1. παρατηρείται η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο παραπάνω. Σειρά δοκιμών προσομοίωσης μονοαξονικής θλίψης έλαβε χώρα, με τις παραμέτρους της ορθής και διατμητικής αντοχής των δεσμών να κυμαίνεται μεταξύ 40 και 320 MPa. Οι δοκιμές αυτές οδήγησαν στην εξαγωγή αυτών των αποτελεσμάτων, δίνοντας ένα εύρος τιμών στην αντοχή των δεσμών τέτοιο, ώστε να ξεπερνά τα συνήθη όρια της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των πετρωμάτων καλών μηχανικών χαρακτηριστικών (από 70 έως 250 MPa), που έχουν παρατηρηθεί από εργαστηριακές δοκιμές. Από αυτούς τους υπολογισμούς προέκυψαν και τα όρια που αναφέρονται στον πίνακα 4.1. Ομοίως έγινε συσχέτιση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας του Young και του μέτρου ελαστικότητας των επαφών των σφαιρών, καθώς και του λόγου δυστροπίας των σφαιρών με το λόγο του Poisson, σε δοκίμιο γρανίτη.

Στο διάγραμμα 4.2., φαίνεται επίσης η γραμμική σχέση του μέτρου ελαστικότητας του Young E με το μέτρο ελαστικότητας του δεσμού των σφαιρών E_c . Για την εξαγωγή του διαγράμματος αυτού έλαβαν χώρα δοκιμές προσομοίωσης μονοαξονικής θλίψης με το μέτρο ελαστικότητας των επαφών των σφαιρών να κυμαίνεται από 16

έως 250 GPa. Το αντίστοιχο πραγματικό μέτρο ελαστικότητας του Young από εργαστηριακές δοκιμές βρίσκεται μεταξύ 25 και 70 GPa, που αποτελούν τα όρια για τη μέθοδο του Yoon.

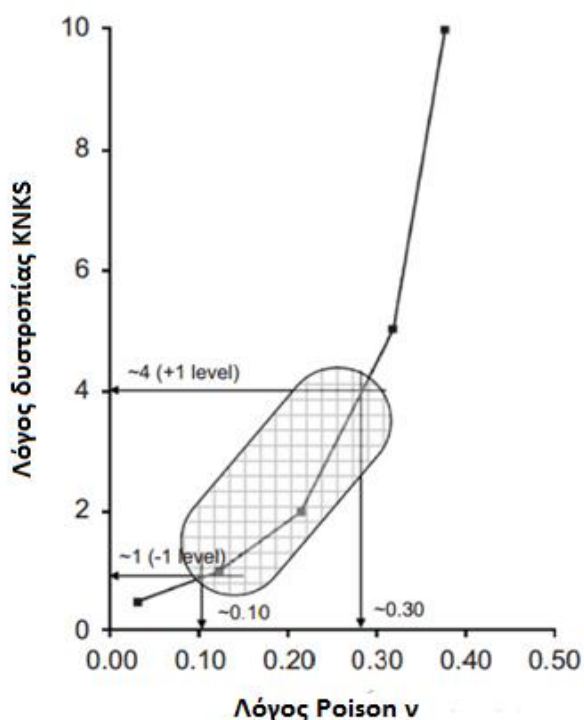


Διάγραμμα 4.1. Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει ορθής και διατμητικής αντοχής των δεσμών (Πηγή: Yoon, 2007)



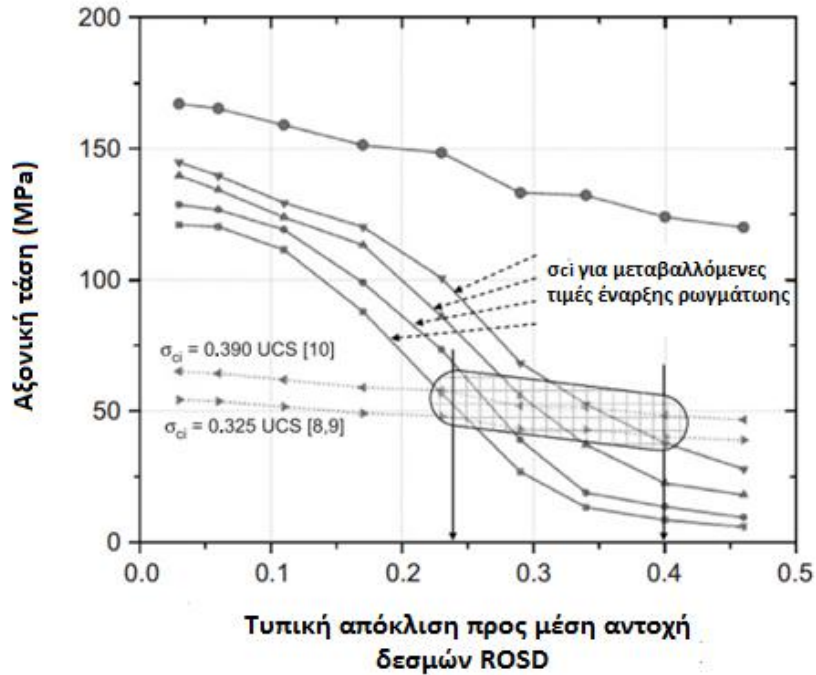
Διάγραμμα 4.2. Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας Young συναρτήσει του αντίστοιχου της επαφής μεταξύ των σωματιδίων (Πηγή: Yoon, 2007)

Όσον αφορά στο λόγο της ορθής προς τη διατμητική δυστροπία KNKS, συγκρίθηκε με το λόγο του Poisson, του οποίου τα όρια είναι 0,1 και 0,3 όπως προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές. Το διάγραμμα 4.3. συσχετίζει τις δύο αυτές παραμέτρους.



Διάγραμμα 4.3. Μεταβολή λόγου του Poisson συναρτήσει του λόγου δυστροπίας των σωματιδίων (Πηγή: Yoon, 2007)

Για την μελέτη της παραμέτρου ROSD ακολουθήθηκε διαφορετική προσέγγιση. Πειραματικά η τάση που συνοδεύει το σχηματισμό των πρώτων ρωγμών, ορίζεται ως η αξονική τάση κατά την οποία ξεκινά η μη ελαστική διαστολή και προσδιορίζεται ως το σημείο απόκλισης από τη γραμμικά ελαστική συμπεριφορά σε ένα διάγραμμα αξονικής τάσης συναρτήσει της ογκομετρικής τροπής. Αντίθετα, τάση έναρξης ρωγμάτωσης σε ένα μοντέλο συνδεδεμένων σωματιδίων θεωρείται η αξονική τάση κατά την οποία υπάρχει μία συγκεκριμένη ρωγή από τον συνολικό αριθμό ρωγματώσεων που συναντάται στο μοντέλο στο σημείο της υψηλότερης παρατηρούμενης τάσης. Μεταβάλλοντας την τιμή για την συγκεκριμένη ρωγή στην κατάλληλη εντολή κατά τη μοντελοποίηση, γίνεται προσπάθεια να συμβαδίζει υπολογιστικά η στιγμή εκκίνησης των ρωγμών όπως ορίζεται πειραματικά. Η εντολή αυτή ουσιαστικά ορίζει τη στιγμή κατά την οποία έχει επιτευχθεί συγκεκριμένο ποσοστό ρωγμάτωσης. Ο συντελεστής τριβής αρχίζει να επιδρά στο δοκίμιο αφότου σπάσουν οι δεσμοί μεταξύ των σφαιριδίων. Αυτό συμβαίνει καθώς τότε ξεκινά η ολίσθηση μεταξύ τους. Επειδή δεν είναι εύκολο να διερευνηθεί ποσοτικά η επιρροή που ασκεί η τριβή μετά τη διαρροή, οι επιλεγόμενες τιμές του συντελεστή έγιναν εμπειρικά.



Διάγραμμα 4.4. Μεταβολή της τυπικής απόκλισης προς τη μέση αντοχή των δεσμών συναρτήσει αξονικής τάσης (Πηγή: Youn, 2007)

Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης ακτίνας BRAD, θεωρήθηκε αρχικά σταθερός ο λόγος μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα $R_{max}/R_{min} = 1,66$ και ομοιόμορφη η κατανομή των μεγεθών. Επιπλέον, το πορώδες των προσομοιώσεων παρέμεινε αμετάβλητο και ίσο με 16%.

Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν 12 συνδυασμοί των ακραίων τιμών που τέθηκαν από τον Youn και εκτελέστηκαν δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη και σε έμμεσο εφελκυσμό (δοκιμή Brazilian). Οι συνδυασμοί που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 4.2. Στη προσομοίωσή του το μοντέλο που κατασκεύασε για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης είχε διαστάσεις 50 mm πλάτος και 100 mm ύψος, ενώ για τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού είχε 50 mm διάμετρο. Τέλος, τα αποτελέσματα μετατράπηκαν από κωδικοποιημένα σε μη κωδικοποιημένα και προσδιορίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων του μέτρου ελαστικότητας E , του λόγου του Poisson ν , της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη UCS και σε έμμεσο εφελκυσμό BTS.

Πίνακας 4.2. Συνδυασμός κωδικοποιημένων τιμών των μικροπαραμέτρων που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μελέτη (Πηγή: Yoon, 2007)

No.	BCM	KNKS	FRIC	NBS	SBS	ROSD	BRAD
1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1
5	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
6	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1
7	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1
8	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1
9	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1
10	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1
11	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
12	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1

4.4.4. Διαδικασία Βελτιστοποίησης

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών, ο Yoon κατέληξε σε έναν αριθμό εξισώσεων και περιορισμών, οι οποίες μπορούν να χρησιμεύσουν στη διαδικασία της εύρεσης των μικροπαραμέτρων, όταν είναι γνωστές οι μακρομηχανικές παράμετροι E, ν και UCS, μέσω μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Από τις εξισώσεις γραμμικού περιορισμού, προσδιορίστηκαν οι δύο παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο τη μακροσκοπική απόκριση, σύμφωνα με το μοντέλο Plackett – Burman.

Αρχικά, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη επηρεάζεται από την διατμητική κυρίως και από την ορθή δευτερευόντως αντοχή των δεσμών, το οποίο είναι κατανοητό καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή των δεσμών τόσο περισσότερο αντιστέκεται το δοκίμιο στη δημιουργία και διάδοση των ρωγμών. Η πλειοψηφία των μοντέλων που υποβάλλονται σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης αστοχεί λόγω της δημιουργίας μιας ζώνης διάτμησης. Στα αρχικά στάδια φόρτισης δημιουργούνται ρωγματώσεις, καθώς σπάνε οι δεσμοί ομοιόμορφα στο δοκίμιο, ενώ με περαιτέρω φόρτιση συγκεντρώνονται οι ρωγμές στη διατμητική ζώνη κι έτσι οδηγείται το δοκίμιο σε αστοχία. Κατά τη στιγμή που η τάση προσεγγίζει τη μέγιστη τάση αντοχής, δημιουργείται μια ευδιάκριτη ζώνη κατά την οποία αστοχεί το δοκίμιο σε διάτμηση. Η ολίσθηση που πραγματοποιείται οφείλεται στο σπάσιμο των διατμητικών δεσμών. Η συνέχιση της φόρτισης προκαλεί μεταβολή μόνο στην παραμένουσα αντοχή. Από το σημείο αυτό ο συντελεστής τριβής αντικαθιστά την αντοχή των δεσμών ως ο πιο σημαντικός παράγοντας, μιας και ελέγχει την ολίσθηση των δύο τεμαχίων που έχουν πλέον δημιουργηθεί.

Για την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό, σημαντικότερη φαίνεται να είναι η ορθή αντοχή του δεσμού. Η ορθή αντοχή του δεσμού και η αντοχή σε εφελκυσμό συσχετίζονται με την αντίσταση κατά των εξωτερικών δυνάμεων έλξης, στην

κλίμακα των σωματιδίων η πρώτη και στην κλίμακα του δείγματος η δεύτερη. Το μέτρο ελαστικότητας του Young εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέτρο ελαστικότητας των επαφών BCM και από το λόγο δυστροπίας KNKS. Επιπλέον, ο λόγος του Poisson σχετίζεται με το λόγο δυστροπίας των σφαιρών αλλά και από το μέγεθός τους. Αυτός ο λόγος επηρεάζει και το μηχανισμό αστοχίας, καθώς επηρεάζει το μέγεθος του φορτίου που μεταφέρεται στις επαφές είτε μέσω ορθών δυνάμεων είτε μέσω διατμητικών. Η τάση κατά την οποία αρχίζει η ρωγμάτωση, ελέγχεται από το συντελεστή ROSD και έχουν σχέση αντιστρόφως ανάλογη.

Μετά τον εντοπισμό των πιο καθοριστικών παραμέτρων, εφαρμόζεται η μέθοδος Central Composite Design, με την οποία γίνεται η εκτίμηση των μη γραμμικών σχέσεων που αναπτύσσονται μεταξύ αυτών και των μακροσκοπικών παραμέτρων. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίστηκαν οι μη γραμμικοί περιορισμοί. Τελικά, οι εξισώσεις και ανισώσεις που προσδιορίστηκαν από τον Yoon είναι οι ακόλουθες:

Γραμμικοί Περιορισμοί - Εξισώσεις

$$\text{➤ } 101,56 + 8,83x_1 + 9,18x_2 + 14,96x_3 + 33,84x_4 + 44,60x_5 + 1,85x_6 - 14,30x_7 - \text{UCS}^* = 0$$

$$\text{➤ } 49,54 + 21,28x_1 - 10,30x_2 - 1,31x_3 + 1,52x_4 + 2,00x_5 - 2,10x_6 - 2,20x_7 - \text{Young's modulus}^* = 0 \quad (4.3)$$

$$\text{➤ } 0,1848 + 0,0012x_1 + 0,0740x_2 - 0,0012x_3 - 0,0038x_4 + 0,0006x_5 + 0,0042x_6 + 0,0100x_7 - \text{Poisson's ratio}^* = 0 \quad (4.4)$$

Γραμμικοί Περιορισμοί - Ανισώσεις

$$\text{➤ } -30,721 + 0,839x_1 - 3,276x_2 - 4,295x_3 - 6,276x_4 - 17,996x_5 + 0,016x_6 + 10,700x_7 \leq 0 \quad (4.5)$$

$$\text{➤ } -134,57 - 23,40x_1 - 10,50x_2 - 20,59x_3 - 58,04x_4 - 44,08x_5 - 4,37x_6 - 2,30x_7 \leq 0 \quad (4.6)$$

$$\text{➤ } 0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 6x_4 - 3x_5 + 0x_6 + 0x_7 \leq -5 \quad (4.7)$$

$$\text{➤ } 0x_1 + 0x_2 + 0x_3 - 9x_4 + 3x_5 + 0x_6 + 0x_7 \leq 10 \quad (4.8)$$

Μη Γραμμικοί Περιορισμοί - Ανισώσεις

$$\text{➤ } -37,92 - 11,01x_4 - 12,20x_5 + 2,97x_4^2 + 6,66x_5^2 - 11,15x_4x_5 \leq 0 \quad (4.9)$$

$$\text{➤ } -174,11 - 60,98x_4 - 61,93x_5 + 23,91x_4^2 + 16,66x_5^2 - 33,81x_4x_5 \leq 0 \quad (4.10)$$

Επιπλέον περιορισμοί των μεταβλητών

$$\text{➤ } -1 \leq x_i \leq +1, i = 1, 2, \dots, 7 \quad (4.11)$$

όπου: $x_1=BCM$, $x_2=KNKS$, $x_3=FRIC$, $x_4=NBS$, $x_5=SBS$, $x_6=ROSD$, $x_7=BRAD$

UCS*, Young's modulus*, Poisson's ratio* = Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών

Η μέθοδος του Yoon ολοκληρώνεται με τη διαδικασία της βελτιστοποίησης των εξισώσεων που εξάχθηκαν. Μέσω αυτής κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός των τιμών των μικροπαραμέτρων που κατά την προσομοίωση δίνουν αποτελέσματα που προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματικότητα. Η βελτιστοποίηση έγινε με τη χρήση της συνάρτησης *fmincon* στο Matlab. Ο στόχος αυτής της βελτιστοποίησης μεταφράζεται σε μια γενική εξίσωση, στην οποία επιβάλλονται οι δοθέντες περιορισμοί. Αυτή η εξίσωση, ουσιαστικά, δίνει τη διαφορά μεταξύ εργαστηριακής δοκιμής και προσομοίωσης και, όπως είναι λογικό, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, οπότε:

Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\text{Min } |128.79 + 41.86x_4 + 43.97x_5 - 14.49x_4^2 - 16.66x_5^2 + 30.42x_4x_5 - \text{UCS*}| \quad (4.12)$$

Επιπρόσθετα, ο Yoon έθεσε κάποια όρια για τις μακρομηχανικές παραμέτρους των πετρωμάτων, καθώς για τιμές εκτός των ορίων η μέθοδος του είναι μη εφαρμόσιμη. Έτσι, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς που έχουν τεθεί, είναι εφικτός ο προσδιορισμός των μικρομηχανικών παραμέτρων.

Το εύρος των παραμέτρων των πετρωμάτων για να ισχύει η μέθοδος του Yoon είναι:

- $70 \leq UCS \leq 250 \text{ (MPa)}$
- $25 \leq E \leq 70 \text{ (GPa)}$
- $0,1 \leq \nu \leq 0,3$
- $3 \leq UCS/BTS \leq 10$
- $2 \leq SBS/NBS \leq 3$

4.5. Μέθοδος Wang et al

Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι, επίσης, η μετατροπή των γνωστών από εργαστηριακές δοκιμές μακρομηχανικών παραμέτρων, στις μικρομηχανικές παραμέτρους που απαιτούνται για την επιτυχή προσομοίωση δοκιμών στο PFC. Οι συγγραφείς επιθυμούσαν να συμβάλλουν σε αυτό τον τομέα, καθώς δεν είχε πραγματοποιηθεί εκτενής έρευνα, ώστε να γίνει εφικτή η προσομοίωση κοπής πετρωμάτων με αδαμαντοκορώνες. Για αυτό το λόγο έγινε μία προσπάθεια για δημιουργία εμπειρικών εξισώσεων, οι οποίες μπορούν να συσχετίσουν τις μακρο- με τις μικρο-μηχανικές παραμέτρους.

Για την πραγματοποίηση της μελέτης δημιουργήθηκε δοκίμιο αποτελούμενο από σφαίρες, οι οποίες αλληλεπιδρούσαν σύμφωνα με τις αρχές της Μεθόδου Διακριτών Στοιχείων DEM. Εφόσον οι σφαίρες έρχονται σε επαφή, δημιουργούν δυνάμεις επαφής, οι οποίες καθορίζουν τις κινήσεις των σφαιρών σε κάθε βήμα υπολογισμού.

Οι τιμές των δυνάμεων αυτών εξαρτώνται από τις παραμορφώσεις των σφαιρών, που διαμορφώνονται ανάλογα με την αλληλοεπικάλυψή τους. Στην προσομοίωση πετρωμάτων, το μέγεθος των σφαιρών αντιστοιχεί στο μέγεθος των κρυστάλλων των πραγματικών πετρωμάτων, ενώ η συγκόλληση των κρυστάλλων αντιπροσωπεύεται από παράλληλους, συνηθέστερα, δεσμούς.

Οι παράμετροι που προσομοιώνουν τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης των σφαιρών είναι η ορθή K_n και η διατμητική δυστροπία K_s . Οι παράμετροι που προσομοιώνουν τις μικρομηχανικές ιδιότητες των δεσμών είναι ο τύπος των δεσμών και η αντίστοιχη αντοχή τους S_B , η οποία αντιστοιχεί στο όριο θραύσης των δεσμών. Το παράλληλα συνδεδεμένο υλικό που μελετήθηκε, δημιουργήθηκε μέσω της διαδικασίας γένεσης υλικού (material genesis) των Potyondy & Cundall (2004), που υλοποιείται μέσω των παραμέτρων της FISH, η οποία ορίζεται στο εγχειρίδιο του PFC^{3D} 4.0 (Itasca 2007).

4.5.1. Επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων

Για να αξιολογηθεί η διακύμανση των μακρομηχανικών παραμέτρων των πετρωμάτων χρησιμοποιώντας διαφορετικές μικρομηχανικές παραμέτρους, χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση που υπολογίζει το εύρος της διακύμανσης:

$$K = \frac{(V_{max} - V_{min})}{V_{avg}} * 100\% \quad (4.13)$$

όπου: K = δείκτης διακύμανσης

V_{max} = μέγιστη τιμή

V_{min} = ελάχιστη τιμή

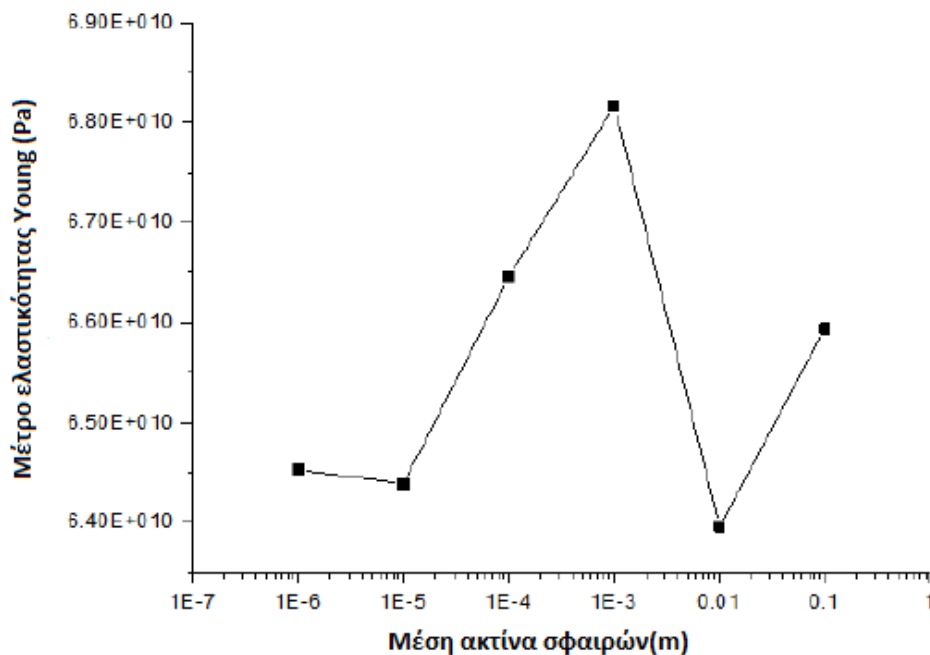
V_{avg} = μέση τιμή των εξεταζόμενων περιπτώσεων

Εξετάστηκαν έξι περιπτώσεις για την επίδραση του μεγέθους των σφαιρών, με τη μέση ακτίνα των σφαιρών να κυμαίνεται μεταξύ από 10^{-1} έως 10^{-6} m. Ο αριθμός των σφαιρών διατηρήθηκε σταθερός (2482 σφαίρες) το οποίο σημαίνει ότι αυτό που άλλαζε ανά περίπτωση ήταν το μέγεθος των δειγμάτων. Ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη ακτίνα των σφαιρών διατηρήθηκε, επίσης, σταθερός και ίσος με 1,5. Βάσει αυτών, προέκυψαν οι τιμές των μακρομηχανικών παραμέτρων E , ν και UCS, οι οποίες φαίνονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα που προέκυψαν με τη μεταβολή της ακτίνας των σφαιρών (Πηγή: Wang et al)

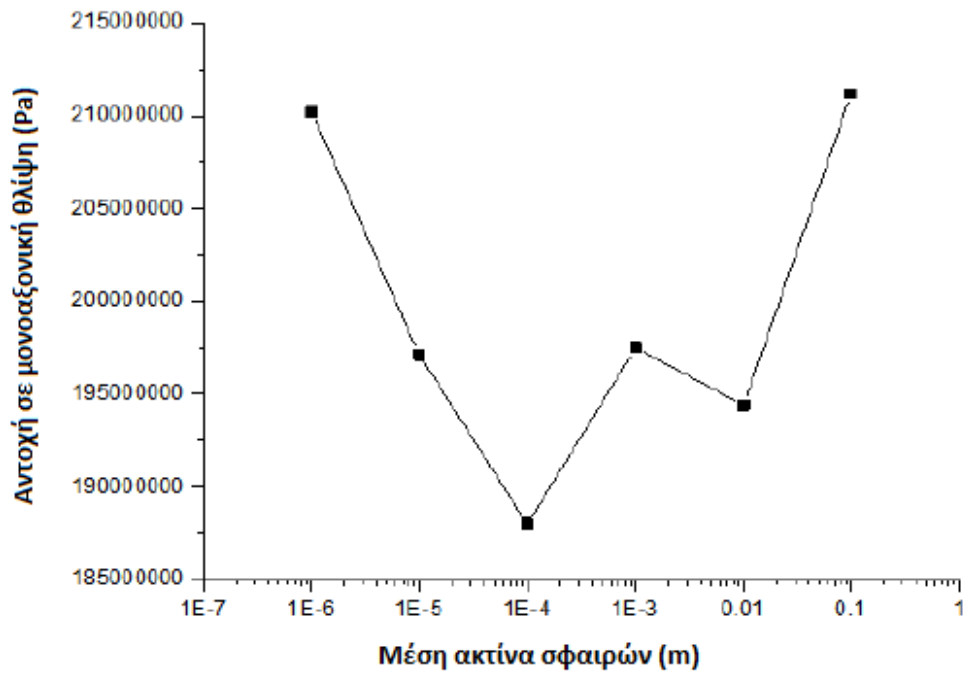
Περίπτωση	Ακτίνα σφαιρών (m)	Μέτρο ελαστικότητας Young, E (Pa)	Λόγος Poisson, ν	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (Pa)
1	0,1	6,594e+10	0,252	2,112e+8
2	0,01	6,396e+10	0,240	1,944 e+8
3	0,001	6,817e+10	0,289	1,975 e+8
4	0,0001	6,646e+10	0,283	1,880 e+8
5	0,00001	6,439e+10	0,277	1,971 e+8
6	0,000001	6,453e+10	0,277	2,102 e+8
Διακύμανση (%)		6,42	17,96	11,61

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα 4.5. – 4.7. όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τη μελέτη επίδρασης της ακτίνας των σφαιρών.



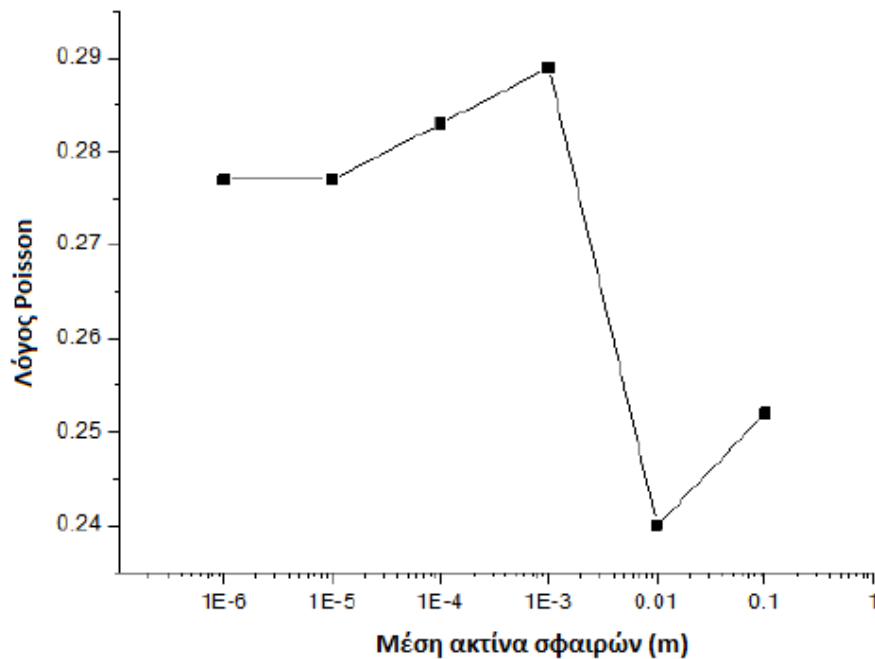
Διάγραμμα 4.5. Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας Young συναρτήσει της μέσης ακτίνας σφαιρών (Πηγή: Wang et al)

Στο διάγραμμα 4.5., δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια συστηματική τάση στο μέτρο ελαστικότητας του Young συναρτήσει των διαφορετικών μεγεθών σφαιρών. Υπάρχουν μικρές διαφορές στις τιμές, με εύρος διακύμανσης 6,42%.



Διάγραμμα 4.6. Μεταβολή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει της μέσης ακτίνας σφαιρών (Πηγή: Wang et al)

Το εύρος διακύμανσης της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με διαφορετικά μεγέθη σφαιρών είναι υψηλότερο από την προηγούμενη περίπτωση και ειδικότερα 11,6% και παρουσιάζεται μια ελάχιστη τιμή που αντιστοιχεί σε ακτίνα 10^{-4} m όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το διάγραμμα 4.6.



Διάγραμμα 4.7. Μεταβολή του λόγου Poisson συναρτήσει της μέσης ακτίνας σφαιρών (Πηγή: Wang et al)

Η επίδραση του μεγέθους των σφαιρών είναι μεγαλύτερη όσον αφορά στο λόγο του Poisson, καθώς η διακύμανση είναι 18%. Παρατηρώντας το διάγραμμα 4.7., γίνεται φανερό ότι υπάρχει η τάση για σημαντική μείωση του λόγου του Poisson για ακτίνες μεγαλύτερες από 10^{-3} m. Κάτι τέτοιο μπορεί να υποδηλώνει την αναγκαιότητα για καθορισμό ορίου στην ακτίνα των σωματιδίων κατά την προσομοίωση. Παρόλα αυτά, οι συγκεκριμένες τιμές δεν γενικεύονται για όλες τις εφαρμογές μηχανικής, καθώς εξετάστηκε ένα πολύ περιορισμένο σύνολο υποθέσεων, που αποσκοπούσαν στον καθορισμό κατάλληλου μεγέθους σφαιρών για προσομοίωση κοπής αδαμαντοκορώνας σε μικροκλίμακα.

4.5.2. Επίδραση των παραμέτρων μικροκλίμακας

Οι μικρομηχανικές παράμετροι είναι δυνατό να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες και συγκεκριμένα στις σχετικές με το μέγεθος των σωματιδίων, με τις ιδιότητες των σωματιδίων και με τις ιδιότητες των δεσμών. Στον πίνακα 4.4. παρουσιάζονται αναλυτικά οι προαναφερθείσες κατηγορίες. Στην ανάλυση λαμβάνουν μέρος δέκα παράμετροι. Κάθε μία αποτελείται από ένα εύρος τιμών που χωρίζεται σε δώδεκα επίπεδα, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.5. Οι παράμετροι που δεν αναφέρονται στους πίνακες αυτούς, διατηρούνται σταθερές κατά την ανάλυση.

Πίνακας 4.4. Μικροπαραμέτροι που χρησιμοποιούνται και κατηγοριοποίησή τους (Πηγή: Wang et al)

A/A	Κατηγορία	Παράμετρος	Σύμβολο
1	Μέγεθος Σωματιδίων	Ελάχιστη ακτίνα	X_1
2		R_{max}/R_{min}	X_2
3	Ιδιότητες Σωματιδίων	Μέτρο ελαστικότητας	X_3
4		Λόγος δυστροπίας	X_4
5		Συντελεστής τριβής	X_5
6	Ιδιότητες Παράλληλων Δεσμών	Μέτρο ελαστικότητας	X_6
7		Λόγος δυστροπίας	X_7
8		Ορθή αντοχή	X_8
9		Διατμητική αντοχή	X_9
10		Τυπική απόκλιση	X_{10}

Πίνακας 4.5. Τα 12 επίπεδα μικροπαραμέτρων που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση (Πηγή: Wang et al)

Επίπεδο	X ₁ (μm)	X ₂	X ₃ (GPa)	X ₄	X ₅	X ₆ (GPa)	X ₇	X ₈ (MPa)	X ₉ (MPa)	X ₁₀ (%)
1	1,0	1,1	10	2,0	0,1	10	2,0	50	50	3
2	1,25	1,2	20	2,5	0,2	20	2,5	100	100	6
3	1,5	1,3	30	3,0	0,3	30	3,0	150	150	9
4	1,75	1,4	40	3,5	0,4	40	3,5	200	200	12
5	2,0	1,5	50	4,0	0,5	50	4,0	250	250	15
6	2,25	1,6	60	4,5	0,6	60	4,5	300	300	18
7	2,5	1,7	70	5,0	0,7	70	5,0	350	350	21
8	2,75	1,8	80	5,5	0,8	80	5,5	400	400	24
9	3,0	1,9	90	6,0	0,9	90	6,0	450	450	27
10	3,25	2,0	100	6,5	1,0	100	6,5	500	500	30
11	3,5	2,1	110	7,0	1,1	110	7,0	550	550	33
12	3,75	2,2	120	7,5	1,2	120	7,5	600	600	36

Το Uniform Design UD του Fang (1994) είναι μία μέθοδος βελτιστοποίησης του πειραματικού σχεδιασμού, η οποία ελαχιστοποιεί τον αριθμό των περιπτώσεων που χρειάζεται να εξεταστούν, σε περίπτωση που υπάρχουν πολλές παράμετροι και πολλά επίπεδα αξιολόγησης σε κάθε παράμετρο. Η μέθοδος αυτή καταλήγει σε 12 συνδυασμούς των δέκα παραμέτρων, η προσομοίωση των οποίων θα δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στον πίνακα 4.6. παρουσιάζονται οι αριθμοί που αντιστοιχούν στις τιμές του πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.6. Συνδυασμοί των μικροπαραμέτρων που προέκυψαν βάσει του UD (Πηγή: Wang et al)

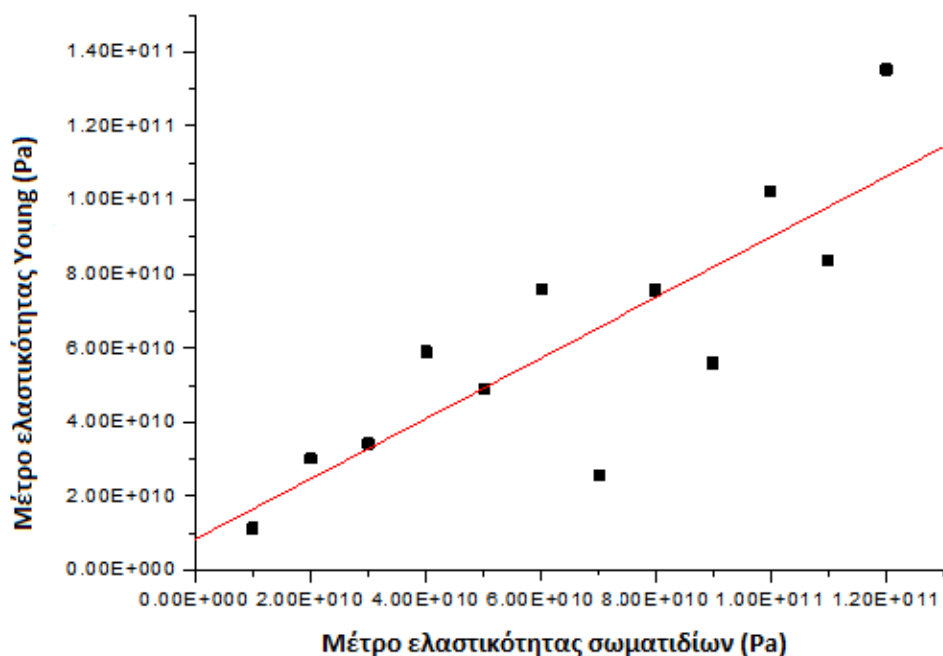
Συνδυασμός	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
1	1	2	3	4	5	6	8	9	10	12
2	2	4	6	8	10	12	3	5	7	11
3	3	6	9	12	2	5	11	1	4	10
4	4	8	12	3	7	11	6	10	1	9
5	5	10	2	7	12	4	1	6	11	8
6	6	12	5	11	4	10	9	2	8	7
7	7	1	8	2	9	3	4	11	5	6
8	8	3	11	6	1	9	12	7	2	5
9	9	5	1	10	6	2	7	3	12	4
10	10	7	4	1	11	8	2	12	9	3
11	11	9	7	5	3	1	10	8	6	2
12	12	11	10	9	8	7	5	4	3	1

Τα αποτελέσματα για κάθε συνδυασμό που προσομοιώθηκε δίνονται στον πίνακα 4.7.

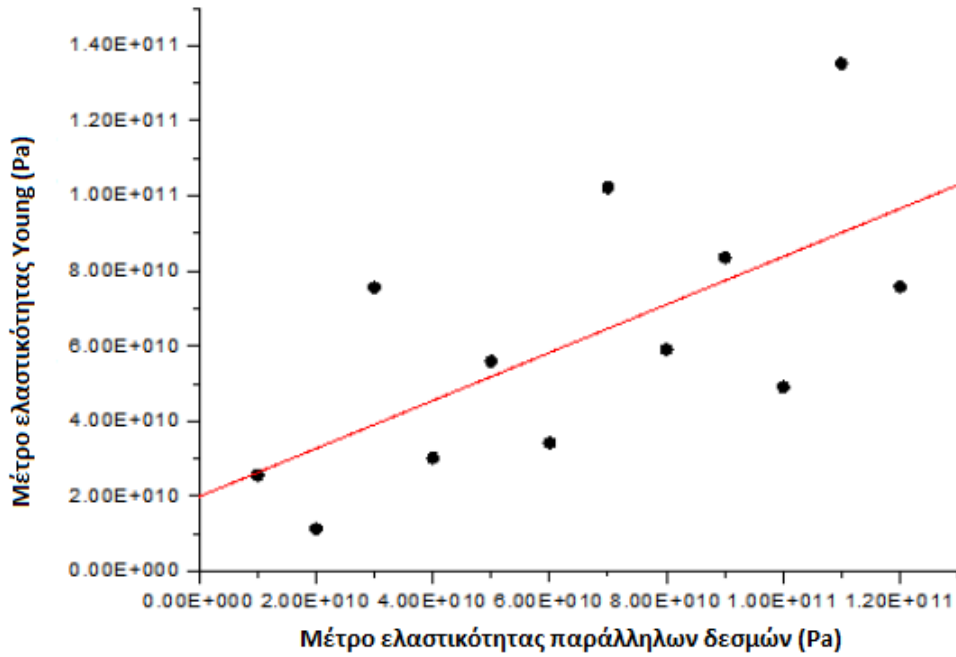
Πίνακας 4.7. Αποτελέσματα προσομοιώσεων των συνδυασμών του πίνακα 4.6 (Πηγή: Wang et al)

Συνδυασμός	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E (10 ¹⁰ Pa)	3,416	7,579	5,595	13,53	3,017	4,906	7,556	8,355	1,131	5,903	2,557	10,22
ν	0,296	0,237	0,299	0,248	0,169	0,267	0,263	0,352	0,31	0,209	0,471	0,264
UCS (10 ⁸ Pa)	4,735	2,34	1,081	1,872	3,707	0,923	13,66	3,392	1,61	5,73	10,42	5,059

Ακολουθούν τα διαγράμματα 4.8. και 4.9. που συσχετίζουν το μέτρο ελαστικότητας του Young συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας των σωματιδίων που αντιστοιχεί στη μικροκλίμακα και το μέτρο ελαστικότητας του Young συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας των παράλληλων δεσμών στη μικροκλίμακα αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται μία άμεσα αναλογική σχέση.

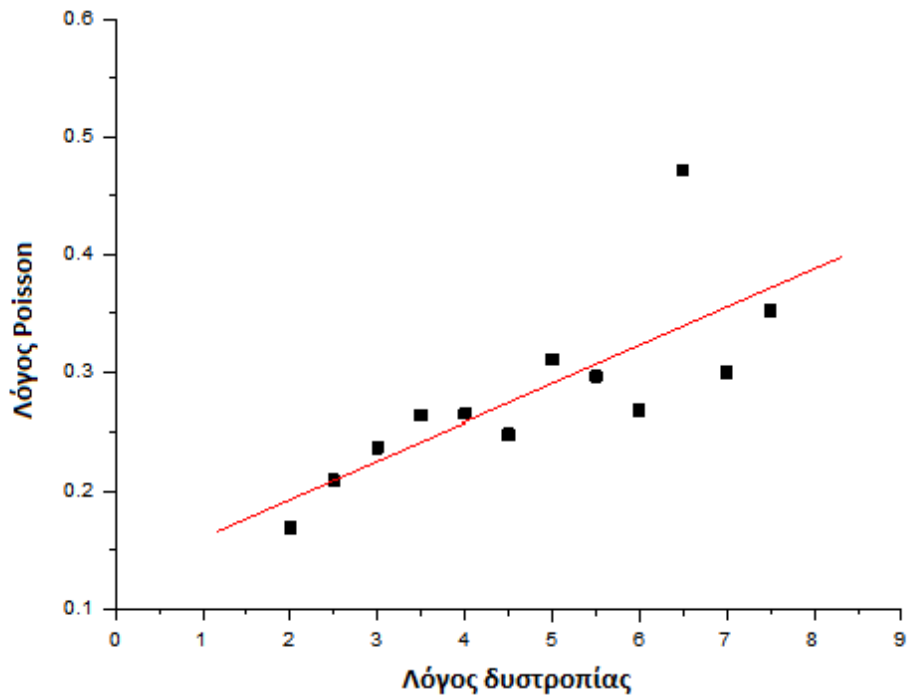


Διάγραμμα 4.8. Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του Young συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας των σωματιδίων (Πηγή: Wang et al)

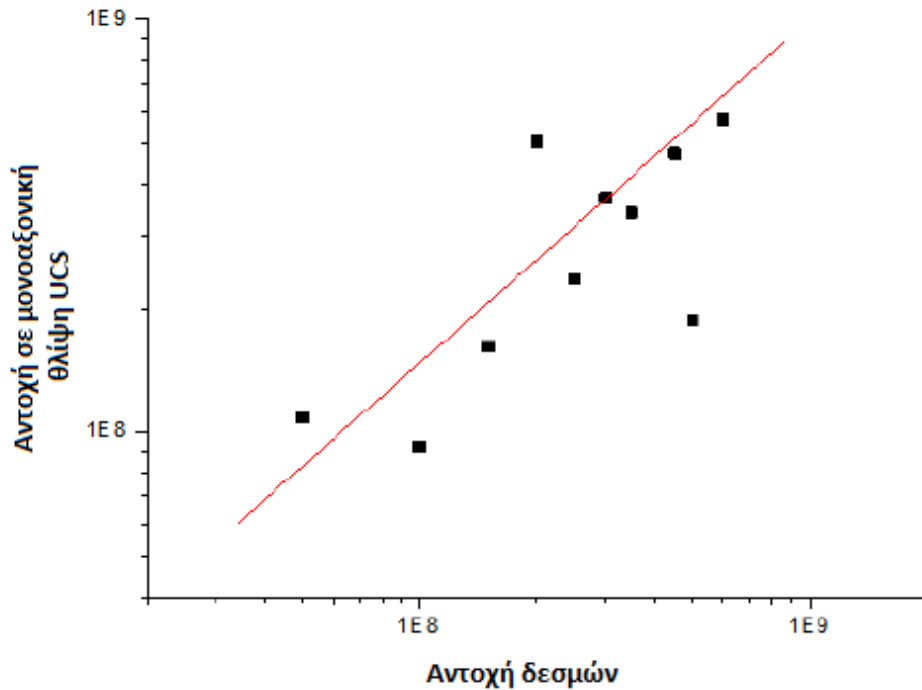


Διάγραμμα 4.9. Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του Young συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας των παράλληλων δεσμών (Πηγή: Wang et al)

Το διάγραμμα 4.10. δείχνει ότι ο λόγος του Poisson είναι στενά συνδεδεμένος με το λόγο ορθής προς διατμητική δυστροπία των δεσμών. Στο διάγραμμα 4.11. φαίνεται ότι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS έχει μια ανάλογη σχέση με την αντοχή των δεσμών.



Διάγραμμα 4.10. Μεταβολή του λόγου του Poisson συναρτήσει του λόγου δυστροπίας των δεσμών (Πηγή: Wang et al)



Διάγραμμα 4.11. Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει της αντοχής των δεσμών (Πηγή: Wang et al)

Από τις γραμμές τάσης και τη διασπορά των σημείων γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει μία πολυπαραμετρική σχέση που συνδέει τις μακρομηχανικές με τις μικρομηχανικές παραμέτρους.

4.5.3. Πολυπαραμετρική ανάλυση

Βάσει των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις που διεξήχθησαν, πραγματοποιήθηκε μία παλινδρόμηση πολυπαραμετρικής ανάλυσης, από την οποία προέκυψαν τρεις σχέσεις που συσχετίζουν το μέτρο ελαστικότητας E , το λόγο Poisson ν και την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS με τις αντίστοιχες μικροπαραμέτρους που ορίστηκαν αρχικά. Οι σχέσεις αυτές είναι:

Μέτρο ελαστικότητας του Young

$$\begin{aligned}
 E = & 6,7834 - 4,6525 * X_2 - 1,3044 * X_5 * X_7 + 0,1027 * X_1 * X_{10} \\
 & - 5,5898 * 10^{-2} * X_2 * X_7 - 1,5100 * 10^{-2} * X_7 * X_{10} + 1,3263 \\
 & * 10^{-2} * X_1 * X_6 + 5,8384 * 10^{-3} * X_4 * X_{10} + 2,7615 * 10^{-4} * X_3 \\
 & * X_9 - 2,0260 * 10^{-6} * X_6 * X_9 - 7,2925 * 10^{-7} * X_8^2 \quad (4.14)
 \end{aligned}$$

Λόγος του Poisson

$$\begin{aligned} \nu = & 0,3085 + 1,4394 * 10^{-3} * X_4^2 - 1,6556 * 10^{-3} * X_7^2 + 2,8444 \\ & * 10^{-4} * X_{10}^2 + 2,3271 * 10^{-3} * X_1 * X_4 - 2,2186 * 10^{-4} * X_1 * X_6 \\ & + 3,2799 * 10^{-2} * X_1 * X_7 - 1,8648 * 10^{-5} * X_2 * X_3 - 3,9220 \\ & * 10^{-4} * X_2 * X_4 + 1,9663 * 10^{-5} * X_2 * X_{10} + 4,2036 * 10^{-4} \\ & * X_5 * X_8 \quad (4.15) \end{aligned}$$

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

$$\begin{aligned} UCS = & 1,4712 - 0,6642 * X_2^2 - 3,1422 * 10^{-7} * X_9^2 + 0,2622 * X_1 * X_2 \\ & + 5,4664 * 10^{-2} * X_1 * X_3 - 5,0914 * 10^{-2} * X_1 * X_6 - 7,7426 \\ & * 10^{-3} * X_3 * X_4 - 6,3306 * 10^{-2} * X_5 * X_6 + 1,8929 * 10^{-2} \\ & * X_5 * X_8 + 3,0361 * 10^{-4} * X_6 * X_9 - 2,3362 * 10^{-5} \\ & * X_8 * X_9 \quad (4.16) \end{aligned}$$

Με τις παραπάνω εξισώσεις βρέθηκε, σύμφωνα με τους συγγραφείς, πολύ καλή συσχέτιση αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τις μικροπαράμετρους και εργαστηριακών αποτελεσμάτων. Έτσι, οι δοθείσες σχέσεις μπορούν να θεωρηθούν χρήσιμες, σχετικά με την παροχή προκαταρκτικών εκτιμήσεων των μικρομηχανικών παραμέτρων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα με τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων. Με τον τρόπο αυτό, ουσιαστικά μειώνεται ο αριθμός των επαναλήψεων της μεθόδου «δοκιμή – σφάλμα», κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, η οποία όμως δεν πρέπει να παραλείπεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΜΑΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΕ ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

5.1. Εισαγωγή

Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν για την μετατροπή της μακροσκοπικής απόκρισης των πετρωμάτων σε μικρομηχανικές παραμέτρους, οι οποίες εισάγονται στο PFC, εφαρμόστηκε στη συνέχεια. Για τη βελτιστοποίηση των μεθόδων χρησιμοποιήθηκε το Matlab. Για τη μέθοδο του Yoon εφαρμόστηκε η εντολή `fmincon`, ενώ για τη μέθοδο Wang et al, εντολή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η `fsolve`.

Στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν μοντέλα με χρησιμοποιούμενες μικροπαραμέτρους αυτές που υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του Matlab, τόσο με τη μέθοδο του Yoon όσο και με αυτή του Wang και βαθμονόμηση των τιμών των μικροπαραμέτρων των μοντέλων κάνοντας προσομοίωση δοκιμών. Έλαβαν χώρα δοκιμές τόσο σε αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS όσο και σε έμμεσο εφελκυσμό BTS και η βαθμονόμηση έγινε με τη μέθοδο δοκιμών και σφαλμάτων (trial and error) έως ότου επιτευχθεί συμφωνία μεταξύ τιμών από εργαστηριακές δοκιμές και από προσομοιώσεις.

Το πέτρωμα το οποίο προσομοιώθηκε είναι ένας σχιστώδης ορθογνέυσιος, που προέρχεται από τμήμα της δυτικής Ικαρίας. Εργαστηριακές δοκιμές που έλαβαν χώρα, έδωσαν την ακόλουθη μακροσκοπική απόκριση για το πέτρωμα:

- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS: 164,55 MPa
- Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό BTS: 19,6 MPa
- Μέτρο Ελαστικότητας του Young E: 48,2 GPa
- Λόγος του Poisson ν : 0,263
- Πυκνότητα ρ : 2628,4 kg/m³

5.2. Προσδιορισμός μικροπαραμέτρων με τη μέθοδο Yoon

5.2.1. Χρήση της συνάρτησης `fmincon`

Η συνάρτηση `fmincon` χρησιμοποιείται για διαδικασίες βελτιστοποίησης, όταν επιχειρείται να ελαχιστοποιηθεί μία μη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση (objective function) και στην προκειμένη περίπτωση:

- $\text{Min } |128.79 + 41.86x_4 + 43.97x_5 - 14.49x_4^2 - 16.66x_5^2 + 30.42x_4x_5 - \text{UCS}^*|$

Η συνάρτηση αυτή αποθηκεύτηκε υπό τη μορφή ενός m.file. Στη συνέχεια ορίστηκαν οι περιορισμοί υπό την μορφή γραμμικών εξισώσεων, μη γραμμικών και γραμμικών ανισώσεων εκφρασμένοι σε πίνακες, οι οποίες είναι, όπως προαναφέρθηκε:

Γραμμικοί Περιορισμοί - Εξισώσεις

- $101,56 + 8,83x_1 + 9,18x_2 + 14,96x_3 + 33,84x_4 + 44,60x_5 + 1,85x_6 - 14,30x_7 - \text{UCS}^* = 0$
- $49,54 + 21,28x_1 - 10,30x_2 - 1,31x_3 + 1,52x_4 + 2,00x_5 - 2,10x_6 - 2,20x_7 - \text{Young's modulus}^* = 0$
- $0,1848 + 0,0012x_1 + 0,0740x_2 - 0,0012x_3 - 0,0038x_4 + 0,0006x_5 + 0,0042x_6 + 0,0100x_7 - \text{Poisson's ratio}^* = 0$

Γραμμικοί Περιορισμοί - Ανισώσεις

- $-30,721 + 0,839x_1 - 3,276x_2 - 4,295x_3 - 6,276x_4 - 17,996x_5 + 0,016x_6 + 10,700x_7 \leq 0$
- $-134,57 - 23,40x_1 - 10,50x_2 - 20,59x_3 - 58,04x_4 - 44,08x_5 - 4,37x_6 - 2,30x_7 \leq 0$
- $0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 6x_4 - 3x_5 + 0x_6 + 0x_7 \leq -5$
- $0x_1 + 0x_2 + 0x_3 - 9x_4 + 3x_5 + 0x_6 + 0x_7 \leq 10$

Μη Γραμμικοί Περιορισμοί - Ανισώσεις

- $-37,92 - 11,01x_4 - 12,20x_5 + 2,97x_4^2 + 6,66x_5^2 - 11,15x_4x_5 \leq 0$
- $-174,11 - 60,98x_4 - 61,93x_5 + 23,91x_4^2 + 16,66x_5^2 - 33,81x_4x_5 \leq 0$

Επιπλέον, προστέθηκαν στο πρόγραμμα τα ανώτερα και κατώτερα όρια των εξαγόμενων παραμέτρων σαν upper bounds (ub) και lower bounds (lb) αντίστοιχα. Εφόσον οι ζητούμενες μικροπαραμέτροι είναι επτά και τα όρια τους κυμαίνονται από -1 έως 1, τότε εισήχθησαν τα όρια ως εξής:

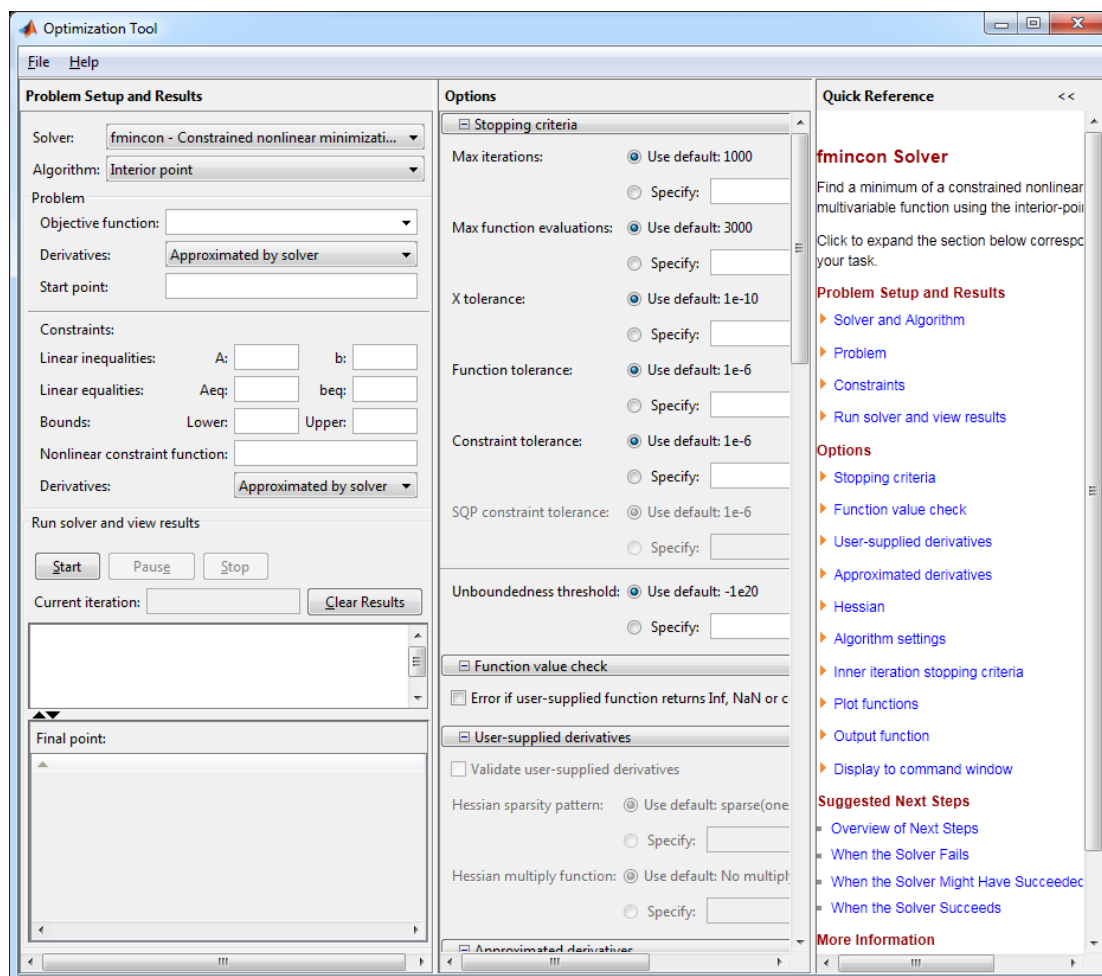
- $\text{ub} = [1,1,1,1,1,1,1]$
- $\text{lb} = [-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1]$

Τέλος, ορίστηκαν στο Matlab τυχαίες αρχικές τιμές, ώστε να ξεκινήσει τη διαδικασία βελτιστοποίησης από αυτό το σημείο. Σημαντικό είναι να δίνονται τιμές που είναι κοντά στις πραγματικές. Αρχικές τιμές οι οποίες απέχουν πολύ από την πραγματικότητα είναι πιθανό να δώσουν αποτελέσματα τα οποία δεν θα έχουν τα

επιθυμητά αποτελέσματα. Κάτι τέτοιο συμβαίνει λόγω του ότι μπορεί να υπάρχουν πολλοί δυνατοί συνδυασμοί οι οποίοι θα ικανοποιούν όλους του περιορισμούς.

Για την ταχύτερη και αυτοματοποιημένη εισαγωγή των στοιχείων προς βελτιστοποίηση, χρησιμοποιήθηκε το «optimization tool», το οποίο αποτελεί έναν πίνακα με συγκεκριμένες θέσεις όπου εισάγεται κάθε ένα από τα παραπάνω στοιχεία που αναφέρθηκαν, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.

Η επιλογή του αλγορίθμου «Interior point» είναι η προεπιλεγμένη και θα έπρεπε να αλλάξει σε περίπτωση μη εξαγωγής αποτελέσματος. Στη θέση που αναγράφεται το «Final point», δίνονται τυχόν ειδοποιήσεις σχετικά με τη διαδικασία και τις τελικές τιμές των μικροπαραμέτρων.



Σχήμα 5.1. Αποψη του optimization tool του Matlab

Δόθηκαν έξι ομάδες αρχικών τιμών. Τέθηκαν οι τιμές, -1 και 1, η τιμή 0, και οι ενδιάμεσες αυτών, δηλαδή -0,5 και 0,5, και τέλος τιμές που αποτελούν τις μέσες που προέκυψαν από τους προηγούμενους υπολογισμούς. Αναλυτικά παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1. Αρχικές τιμές και κωδικοποιημένες μικροπαράμετροι που προέκυψαν από τη χρήση του Matlab

Αρχικές τιμές	BCM	KNKS	FRIC	NBS	SBS	ROSD	BRAD
[1/1/1/1/1/1]	0,491	0,992	0,946	-0,333	1,000	0,895	-0,030
[-1/-1/-1/-1/-1/-1]	0,491	0,992	0,931	-0,333	1,000	0,926	-0,041
[0/0/0/0/0/0]	0,492	0,991	0,966	-0,333	1,000	0,882	-0,010
[0,5/0,5/0,5/0,5/0,5/0,5/0,5/0,5]	0,492	0,990	0,958	-0,333	1,000	0,903	-0,017
[-0,5/-0,5/-0,5/-0,5/-0,5/-0,5/-0,5/-0,5]	0,492	0,990	0,995	-0,333	1,000	0,847	0,015
[0,3/0,95/-0,3/-0,4/0,8/0,5/0,9]	0,488	0,994	0,996	-0,333	1,000	0,787	0,009

Το επόμενο στάδιο της διαδικασίας είναι η μετατροπή των κωδικοποιημένων τιμών σε μη κωδικοποιημένες τιμές, βάσει των σχέσεων που δόθηκαν στο κεφάλαιο 4.4.4 της θεωρίας της μεθόδου του Yoon και προέκυψαν οι τιμές του πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2. Αρχικές τιμές και μικροπαράμετροι μετά την αποκωδικοποίησή τους

Αρχικές τιμές	BCM (Gpa)	KNKS	FRIC	NBS (Mpa)	SBS (Mpa)	ROSD	BRAD (mm)
[1/1/1/1/1/1]	84,730	3,988	0,737	100,025	200,000	0,392	0,356
[-1/-1/-1/-1/-1/-1]	84,730	3,988	0,733	100,025	200,000	0,394	0,355
[0/0/0/0/0/0]	84,760	3,987	0,742	100,025	200,000	0,391	0,359
[0,5/0,5/0,5/0,5/0,5/0,5/0,5/0,5]	84,760	3,985	0,740	100,025	200,000	0,392	0,358
[-0,5/-0,5/-0,5/-0,5/-0,5/-0,5/-0,5/-0,5]	84,760	3,985	0,749	100,025	200,000	0,388	0,362
[0,3/0,95/-0,3/-0,4/0,8/0,5/0,9]	84,640	3,991	0,749	100,025	200,000	0,383	0,361

5.2.2. Προσομοίωση δοκιμών με συνδεδεμένο μοντέλο με σημειακούς δεσμούς (contact bonded)

Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος του Yoon είναι εφαρμόσιμη σε συνδεδεμένα μοντέλα των οποίων οι δεσμοί είναι σημειακοί. Για αυτό το λόγο, αρχικά, λαμβάνει χώρα προσομοίωση δοκιμών σε μονοαξονική θλίψη και σε έμμεσο εφελκυσμό. Εφόσον οι τιμές των μικροπαραμέτρων που προέκυψαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης διαφέρουν ανάλογα με τις χρησιμοποιούμενες αρχικές τιμές, για την

προσομοίωση επιλέγονται οι τιμές που προκύπτουν με αρχικές τιμές την τελευταία ομάδα, διότι αποτελεί ένα μέσο όρο τιμών.

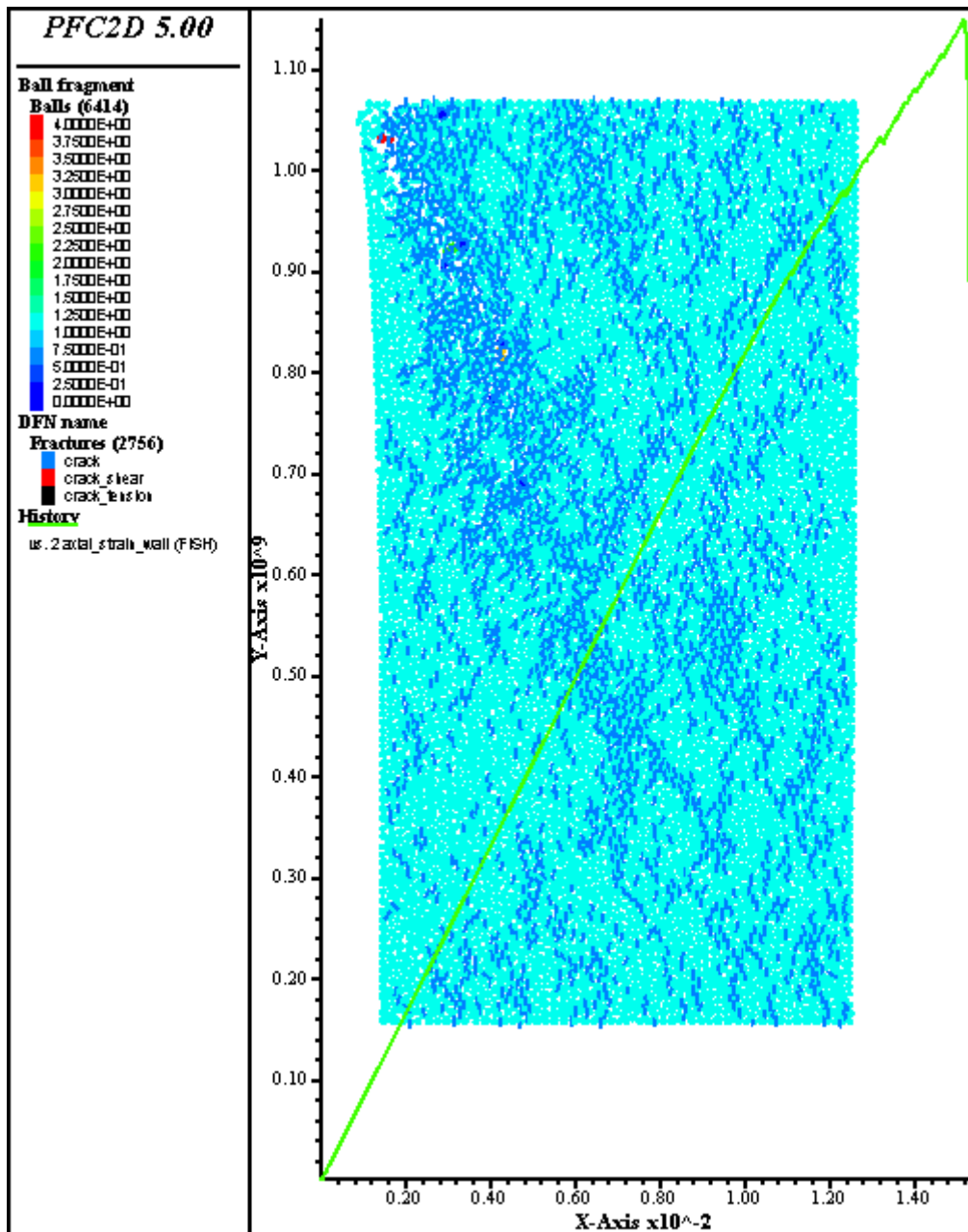
5.2.2.1. Προσομοίωση δοκιμής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο της ISRM, υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν τα δοκίμια, ώστε η δοκιμή να είναι επιτυχής. Τα δοκίμια πρέπει να είναι ορθού κυλινδρικού σχήματος με το λόγο ύψους προς διάμετρο να κυμαίνεται μεταξύ 2,5 και 3. Η διάμετρος του κυλίνδρου δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 54 mm και ταυτόχρονα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δεκαπλάσια του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου του πετρώματος. Επιπρόσθετα, η ταχύτητα των πλακών φόρτισης στο λογισμικό ορίζεται σε 1 m/s καθώς η τιμή αυτή δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και εξοικονομεί χρόνο.

Η προσομοίωση λαμβάνει χώρα στο περιβάλλον του PFC^{2D} σύμφωνα με τις παραπάνω αρχές. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την κατασκευή του δοκιμίου, με τον προσδιορισμό των σφαιρών και των τοίχων του. Στο δεύτερο στάδιο εισάγονται οι σημειακοί δεσμοί μεταξύ των σφαιρών, καθώς και οι ιδιότητές τους. Στο τρίτο στάδιο, κατασκευάζονται οι πλάκες και τους προσδίδεται κίνηση με συγκεκριμένη σταθερή ταχύτητα, ώστε να προκαλέσει θλίψη στο πέτρωμα.

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη που προέκυψε από την προσομοίωση της δοκιμής είναι 1149,39 MPa. Ο λόγος της τιμής αυτής προς την αντίστοιχη της εργαστηριακής δοκιμής δεν είναι ικανοποιητική καθώς απέχει πολύ από τη μονάδα και συγκεκριμένα ισούται με:

$$\frac{1149,39}{164,55} = 6,99$$



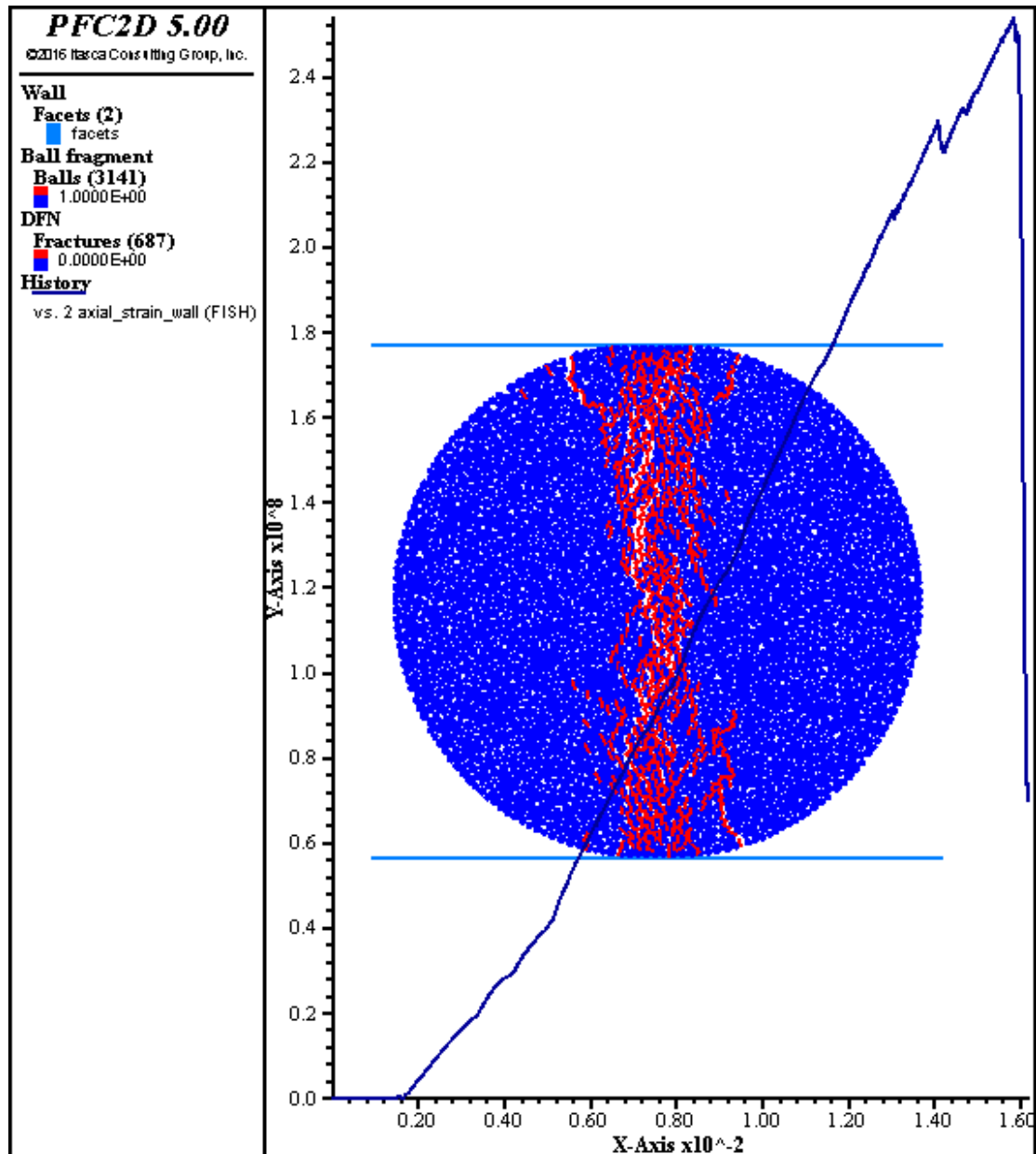
Σχήμα 5.2. Προσομοίωση δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε σχιστώδη ορθογώνιο με σημειακούς δεσμούς

5.2.2.2. Προσομοίωση δοκιμής αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (δοκιμή Brazilian – αντιδιαμετρική θλίψη)

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο της ISRM, υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν τα δοκίμια και σε αυτή τη δοκιμή, ώστε να επιτευχθούν να καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Το δοκίμιο πρέπει να έχει τη μορφή δίσκου, του οποίου η διάμετρος δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 54,7 mm. Η ταχύτητα των πλακών φόρτισης, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα και για λόγους εξοικονόμησης χρόνου ορίζεται ίση με 1 m/s.

Τα στάδια κατασκευής του μοντέλου είναι όμοια με την περίπτωση της δοκιμής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Η προσομοίωση έδωσε αντοχή έμμεσου εφελκυσμού 254,5 MPa. Η τιμή αυτή απέχει πολύ από την πραγματικότητα και ο λόγος της τιμής αυτής προς την αντίστοιχη της εργαστηριακής δοκιμής είναι:

$$\frac{254,5}{19,6} = 12,98$$



Σχήμα 5.3. Προσομοίωση δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σε σχιστώδη ορθογώνιο με σημειακούς δεσμούς

Όπως είναι εύκολο να παρατηρηθεί, τόσο η προσομοίωση δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη όσο και σε έμμεσο εφελκυσμό δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, διότι η αντοχή που προκύπτει από τις προσομοιώσεις απέχει πολύ από τη μακροσκοπική απόκριση του πραγματικού δοκιμίου.

5.2.3. Προσομοίωση δοκιμών με συνδεδεμένο μοντέλο με παράλληλους δεσμούς (parallel bonded)

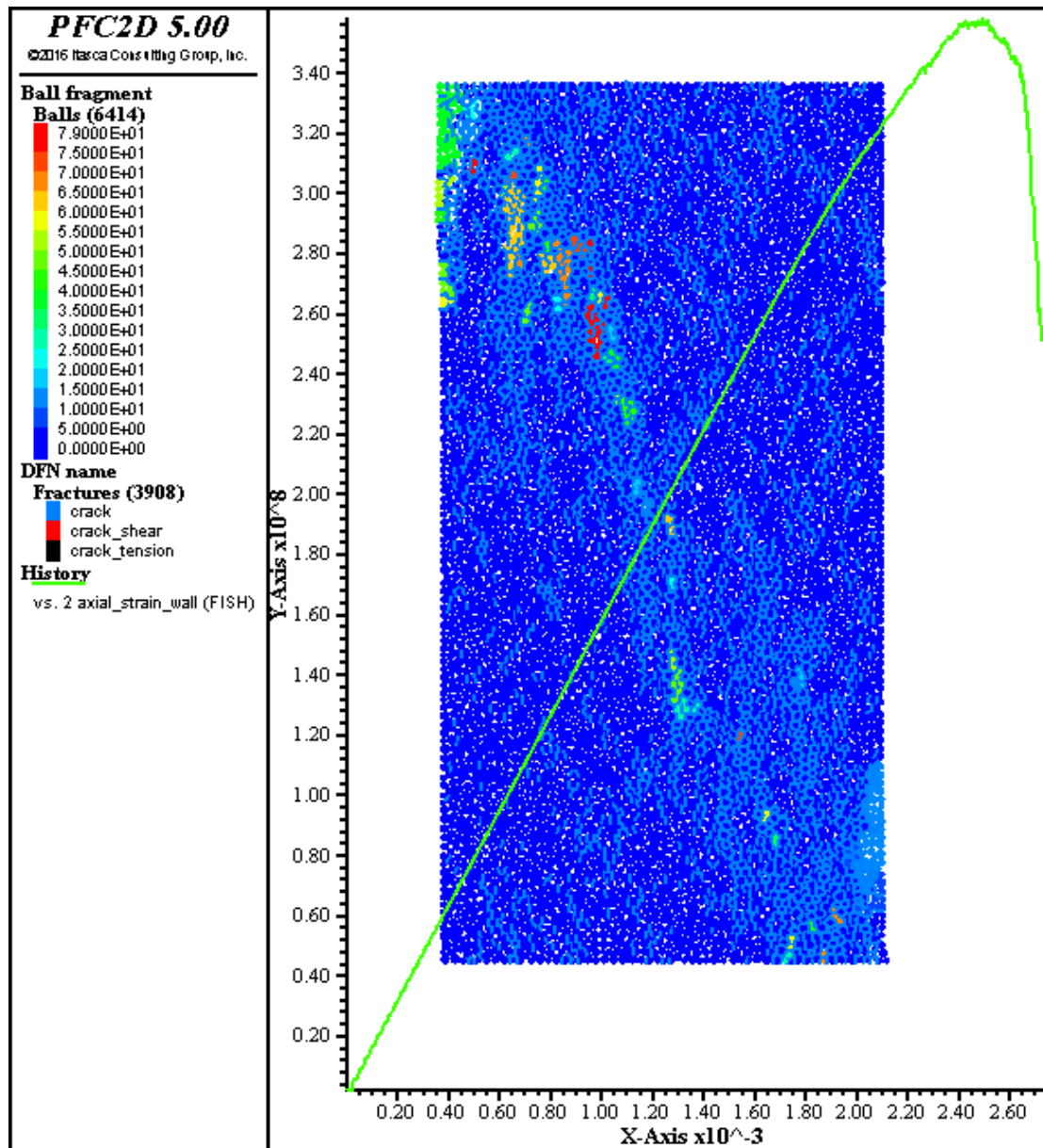
Λόγω της μη επιτυχημένης προσομοίωσης των μοντέλων με σημειακούς δεσμούς, η μέθοδος του Υοοη χρησιμοποιήθηκε και για μοντέλο συνδεδεμένο με παράλληλους δεσμούς. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στη θεωρία του Υοοη στο κεφάλαιο 4.4.1., η χρήση της μεθόδου για παράλληλη σύνδεση περιλαμβάνει τον καθορισμό τριών επιπλέον όρων και συγκεκριμένα, ο πολλαπλασιαστής της ακτίνας του παράλληλου δεσμού, το μέτρο ελαστικότητας του παράλληλου δεσμού και ο λόγος ορθής προς διατμητική δυστροπία του παράλληλου δεσμού. Σε πρώτη φάση, ο πρώτος όρος δεν ορίζεται ώστε να λάβει την προκαθορισμένη (default) εντός του λογισμικού τιμή. Οι δύο υπολειπόμενοι όροι διατηρούνται ίδιοι με τις τιμές που έχουν βρεθεί για το μοντέλο από τις εξισώσεις του Υοοη, που αντιστοιχούν στα BCM και KNKS αντίστοιχα.

Τα στάδια που ακολουθούνται σε αυτές τις προσομοιώσεις είναι όμοιες με την περίπτωση σύνδεσης με σημειακούς δεσμούς δηλαδή, αρχικά κατασκευάζεται το δείγμα, στη συνέχεια εισάγονται οι παράλληλοι δεσμοί και τέλος δημιουργούνται οι πλάκες της δοκιμής και τους προσδίδεται ταχύτητα. Οι μικροπαράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι, όπως και στη σύνδεση με σημειακούς δεσμούς, αυτές της τελευταίας ομάδας.

5.2.3.1. Προσομοίωση δοκιμής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη που προέκυψε από την προσομοίωση της δοκιμής είναι 357,99 MPa. Ο λόγος της τιμής αυτής προς την αντίστοιχη της εργαστηριακής δοκιμής δεν είναι ικανοποιητική και ισούται με:

$$\frac{357,99}{164,55} = 2,18$$

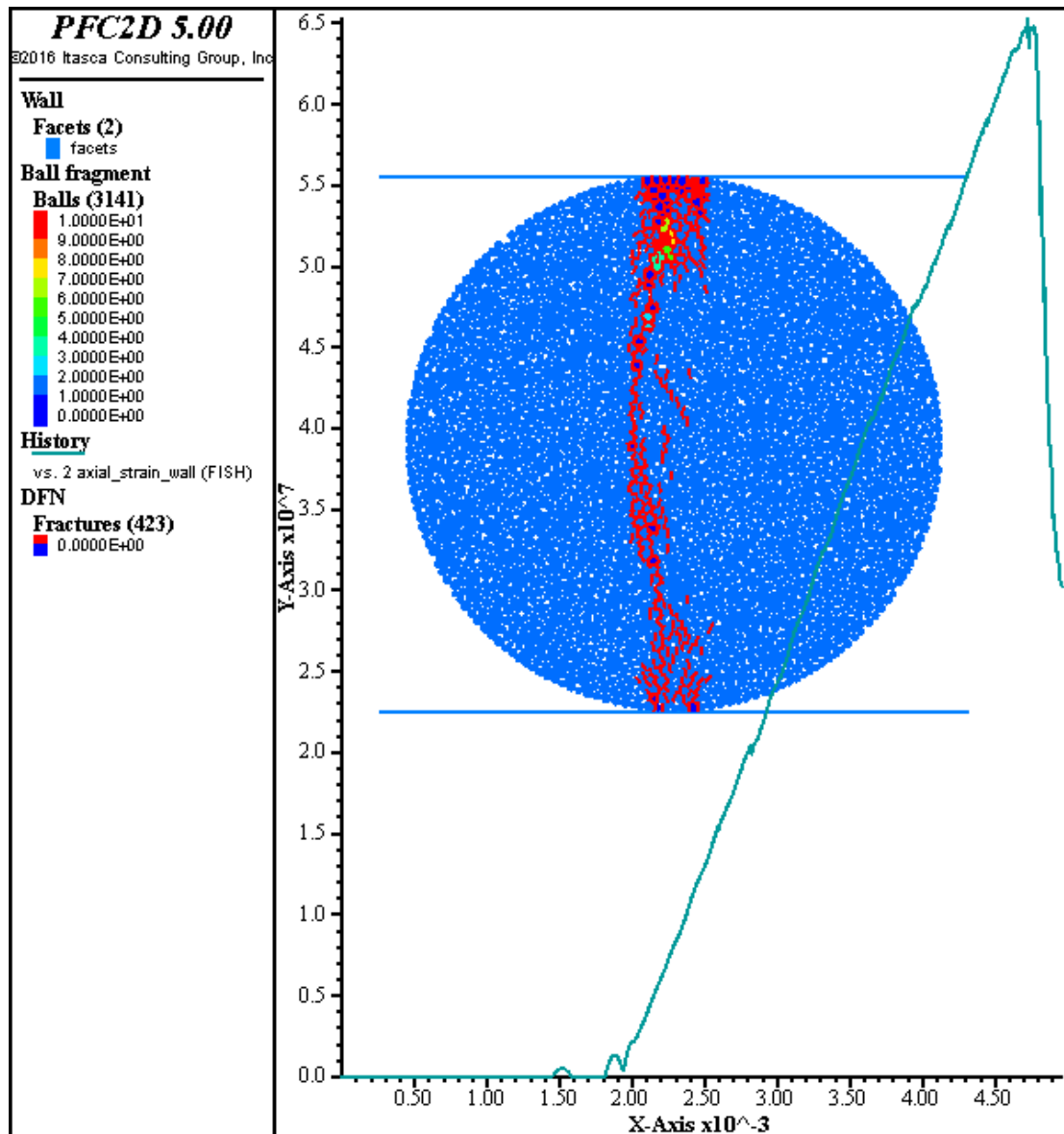


Σχήμα 5.4. Προσομοίωση δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε σχιστώδη ορθογώνιο με παράλληλους δεσμούς

5.2.3.2. Προσομοίωση δοκιμής αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (δοκιμή Brazilian)

Η προσομοίωση έδωσε αντοχή έμμεσου εφελκυσμού 65,4 MPa. Η τιμή αυτή απέχει πολύ από την πραγματικότητα, όπως και η αντίστοιχη της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Παρόλα αυτά είναι πιο ικανοποιητική η τιμή αυτή από την αντίστοιχη με σημειακούς δεσμούς και ο λόγος της τιμής αυτής προς την αντίστοιχη της εργαστηριακής δοκιμής είναι:

$$\frac{65,4}{19,6} = 3,34$$



Σχήμα 5.5. Προσομοίωση δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σε σχιστώδη ορθογέυσιο με παράλληλους δεσμούς

5.2.4. Διαδικασία βαθμονόμησης

Το γεγονός της μη συμφωνίας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα των εργαστηριακών δοκιμών, οδήγησε στην ανάγκη για βαθμονόμηση των μικροπαραμέτρων μέσω της μεθόδου «δοκιμών και σφαλμάτων» (trial and error). Αυτό που ουσιαστικά συμβαίνει, είναι η πραγματοποίηση επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων δοκιμών, με αλλαγή μίας παραμέτρου κάθε φορά, ή και συνδυασμού δύο ή περισσότερων παραμέτρων, με σκοπό την παρατήρηση της επίδρασης κάθε παραμέτρου στο αποτέλεσμα της δοκιμής.

5.2.4.1. Μονοπαραμετρική ανάλυση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

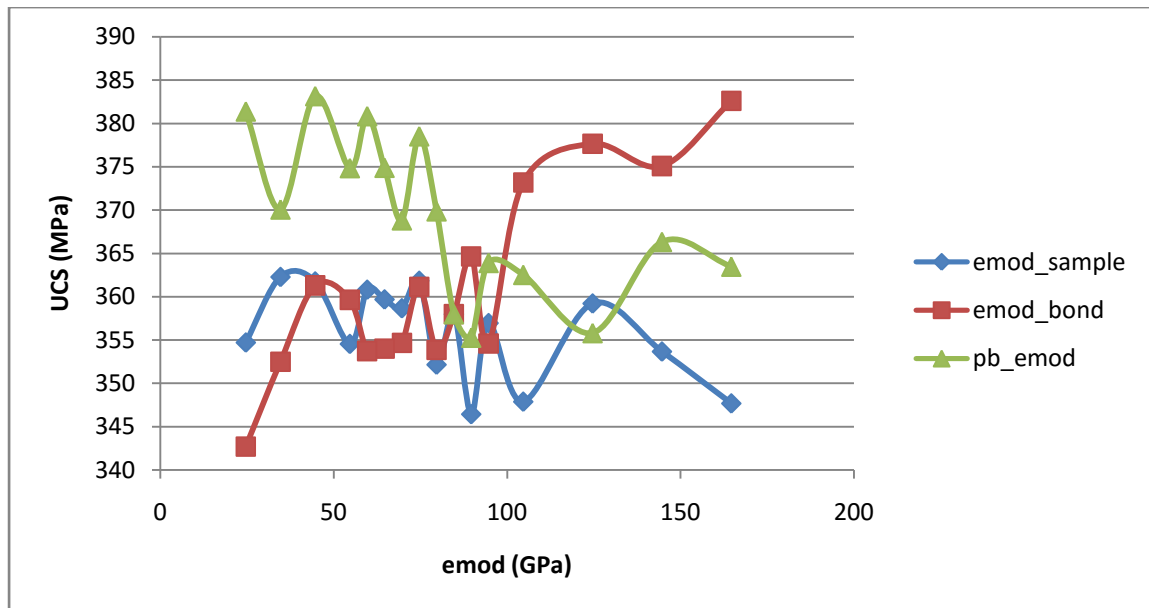
Η πρώτη μικροπαραμέτρος η οποία ελέγχεται ως προς την επίδρασή της είναι το μέτρο ελαστικότητας των δεσμών BCM, το οποίο ορίζεται ως $emod$ στο λογισμικό

PFC. Κατά την προσομοίωση, καθορίζονται τρία μέτρα ελαστικότητας, το πρώτο κατά την κατασκευή του δείγματος (sample), το δεύτερο για τους δεσμούς για τους οποίους ισχύει το γραμμικό μοντέλο (bond) και το τρίτο για τους παράλληλους δεσμούς (pb_bond). Ακολούθησε διαδικασία επαναλήψεων διατηρώντας σταθερές όλες τις μικροπαραμέτρους, αλλάζοντας μόνο το ένα μέτρο ελαστικότητας κάθε φορά. Στον πίνακα 5.3. παρουσιάζονται οι τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη UCS, για κάθε τιμή της παραμέτρου emod. Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί σε αυτό κατά την κατασκευή του δείγματος (sample), η δεύτερη σε αυτό των δεσμών για τους οποίους ισχύει το γραμμικό μοντέλο (bond) και η τρίτη σε αυτό για τους παράλληλους δεσμούς (pb_bond). Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η τιμή που εξήχθη από την αρχική προσομοίωση με τις τιμές που προέκυψαν από το Matlab.

Πίνακας 5.3. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας για τη UCS

emod (GPa)	UCS_sample (MPa)	UCS_bond (MPa)	UCS_pb_bond (MPa)
164,64	347,7	382,58	363,47
144,64	353,68	375,07	366,32
124,64	359,22	377,63	355,81
104,64	347,9	373,18	362,52
94,64	356,96	354,61	363,9
89,64	346,46	364,65	355,28
84,64	357,99	357,99	357,99
79,64	352,17	353,86	369,85
74,64	361,84	361,14	378,5
69,64	358,67	354,67	368,81
64,64	359,69	354,01	374,87
59,64	360,81	353,74	380,82
54,64	354,56	359,64	374,83
44,64	361,76	361,3	383,13
34,64	362,28	352,5	370,06
24,64	354,72	342,72	381,36

Οι τιμές αυτές φαίνονται στο διάγραμμα 5.1.



Διάγραμμα 5.1. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας για τη UCS

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι το μέτρο ελαστικότητας δεν έχει κάποια εμφανή τάση ως προς την επίδρασή του στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Οι τιμές δεν κυμαίνονται σε μεγάλο εύρος, εφόσον βρίσκονται μεταξύ 383,13 και 342,72 MPa και δεν προσεγγίζει σε καμία περίπτωση την πραγματική μακροσκοπική απόκριση του πετρώματος. Επιπλέον, αφού παρατηρείται μία μεγάλη διακύμανση στις τιμές της αντοχής, η μικροπαραμέτρος αυτή δεν παίζει σημαντικό ρόλο στη βαθμονόμηση που επιχειρείται.

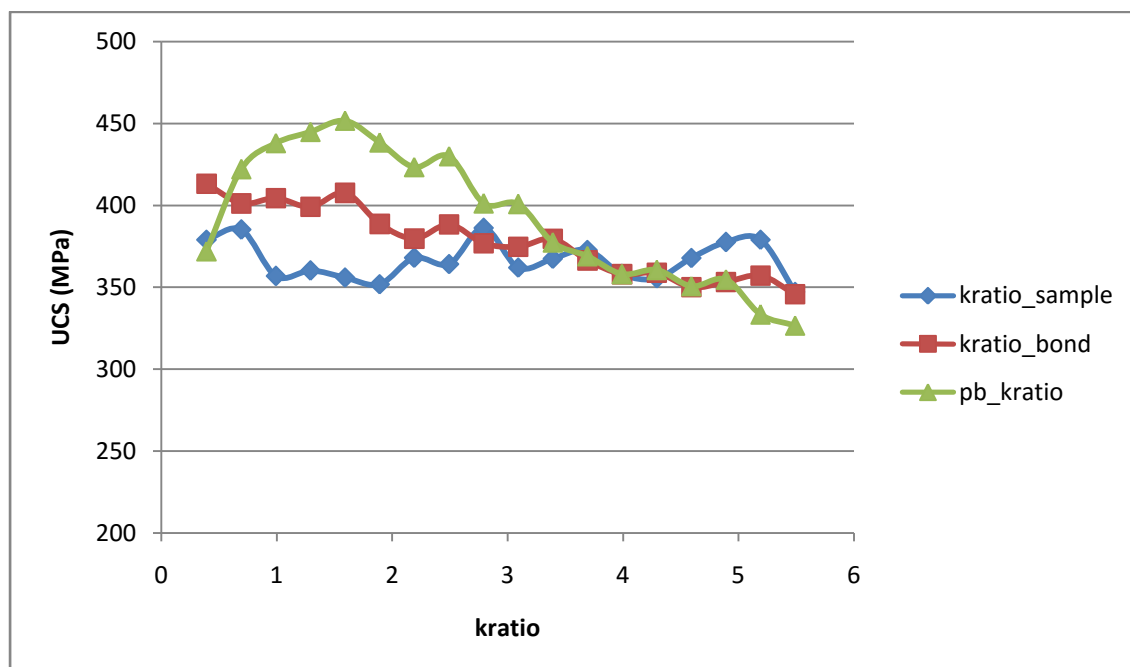
Σημαντικό στοιχείο που παρατηρείται είναι η αύξηση των τιμών του μέτρου ελαστικότητας των δεσμών που διέπονται από το γραμμικό μοντέλο για τιμές μεγαλύτερες των 90 GPa, με παράλληλη μείωση του μέτρου ελαστικότητας των παράλληλων δεσμών. Αντίστροφα, για τιμές μικρότερες του σημείου που αναφέρθηκε, όσον αφορά στο μέτρο ελαστικότητας των δεσμών που διέπονται από το γραμμικό μοντέλο, η αντοχή μειώνεται, ενώ όσον αφορά στους παράλληλους δεσμούς, η αντοχή αυξάνεται. Τα παραπάνω συμπεράσματα είναι σχετικά, παρόλα αυτά, καθώς δεν διακρίνεται ξεκάθαρα αυτή η τάση που περιγράφηκε.

Για τη δεύτερη μικροπαραμέτρο που εξετάζεται, δηλαδή το λόγο ορθής προς διατμητική δυστροπία KNKS, η οποία αναφέρεται στο PFC ως kratio, ισχύουν τα ίδια, καθώς είναι αναγκαίο να οριστούν τρεις λόγοι δυστροπίας για την προσομοίωση. Στον πίνακα 5.4, ο πρώτος είναι αυτός κατά την κατασκευή του δείγματος (sample) στον οποίο αντιστοιχεί η πρώτη στήλη δεδομένων, ο δεύτερος για τους δεσμούς για τους οποίους ισχύει το γραμμικό μοντέλο (bond) στον οποίο αντιστοιχούν τα δεδομένα της δεύτερης στήλης και ο τρίτος για τους παράλληλους δεσμούς (pb_bond), που αντιστοιχεί στα δεδομένα της τρίτης στήλης. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η τιμή που εξήχθη από την αρχική προσομοίωση με τις τιμές που προέκυψαν από το Matlab.

Πίνακας 5.4. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας για τη UCS

kratio	UCS_sample (MPa)	UCS_bond (MPa)	UCS_pb_bond (MPa)
5,491	347,08	345,8	326,64
5,191	378,93	357,08	333,35
4,891	377,49	353,23	354,61
4,591	367,87	350,02	350,61
4,291	355,42	358,78	360,5
3,991	357,99	357,99	357,99
3,691	372,76	366,34	368,93
3,391	367,35	379,55	377,31
3,091	361,92	374,65	400,79
2,791	386,09	376,8	401,15
2,491	364,16	388,29	430,01
2,191	367,93	379,64	423,39
1,891	351,82	388,66	438,38
1,591	355,95	407,57	451,62
1,291	360,11	399,04	444,86
0,991	356,77	404,31	437,97
0,691	385,1	401,12	422,07
0,391	378,99	413,22	371,94

Στη συνέχεια οι τιμές εισάγονται στο διάγραμμα 5.2., ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.



Διάγραμμα 5.2. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας για τη UCS

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι ο λόγος δυστροπίας του δοκιμίου δεν έχει κάποια εμφανή τάση ως προς την επίδρασή του στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Όσον αφορά στους δεσμούς που διέπονται από το γραμμικό μοντέλο μπορεί

να διακριθεί μία φθίνουσα πορεία της αντοχής με αύξηση του λόγου. Οι τιμές δεν κυμαίνονται σε μεγάλο εύρος και δεν προσεγγίζουν την πραγματική μακροσκοπική απόκριση του πετρώματος, άρα δεν αποτελεί καθοριστικό παράγοντα.

Όσον αφορά στο λόγο δυστροπίας των παράλληλων δεσμών, υπάρχει μία σχετικά διακριτή τάση ως προς την επίδρασή του στην αντοχή. Παρατηρείται μία σχετικά συνεχής αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη όσο μειώνεται ο λόγος δυστροπίας, δηλαδή όσο πιο κοντά είναι η ορθή με τη διατμητική δυστροπία. Επίσης, φαίνεται πως υπάρχει ένα ολικό μέγιστο κοντά στο 1,6, ενώ για λόγους μικρότερους από τη μονάδα, δηλαδή για μεγαλύτερη διατμητική από την ορθή δυστροπία η αντοχή μειώνεται εκ νέου. Παρόλα αυτά, η αντοχή δεν πέφτει κάτω από τα 326,6 MPa, πράγμα που δείχνει πως ούτε αυτή η μικροπαράμετρος παίζει καθοριστικό ρόλο, αφού δεν καλύπτει αρκετά μεγάλο εύρος τιμών ώστε να προσεγγίζει τα πραγματικά αποτελέσματα.

Οι δύο επόμενες μικροπαράμετροι που μελετώνται είναι η ορθή αντοχή του παράλληλου δεσμού, που θεωρείται ως εφελκυστική στον κώδικα του λογισμικού και καθορίζεται ως `pb_ten` και η διατμητική αντοχή του δεσμού, που θεωρείται ως συνοχή στον κώδικα του PFC και καθορίζεται ως `pb_coh`. Αυτές οι δύο παράμετροι ορίζονται από τον `Yoon` ως `NBS` και `SBS` αντίστοιχα. Τα ανώτερα και κατώτερα όρια που χρησιμοποιούνται στη βαθμονόμηση είναι παραπλήσια με αυτά που δίνει ο `Yoon`. Στους πίνακες 5.5. και 5.6. παρουσιάζονται οι τιμές της ορθής και της διατμητικής αντοχής των παράλληλων δεσμών και πώς επηρεάζουν την τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η τιμή που εξήχθη από την αρχική προσομοίωση με τις τιμές που προέκυψαν από το Matlab.

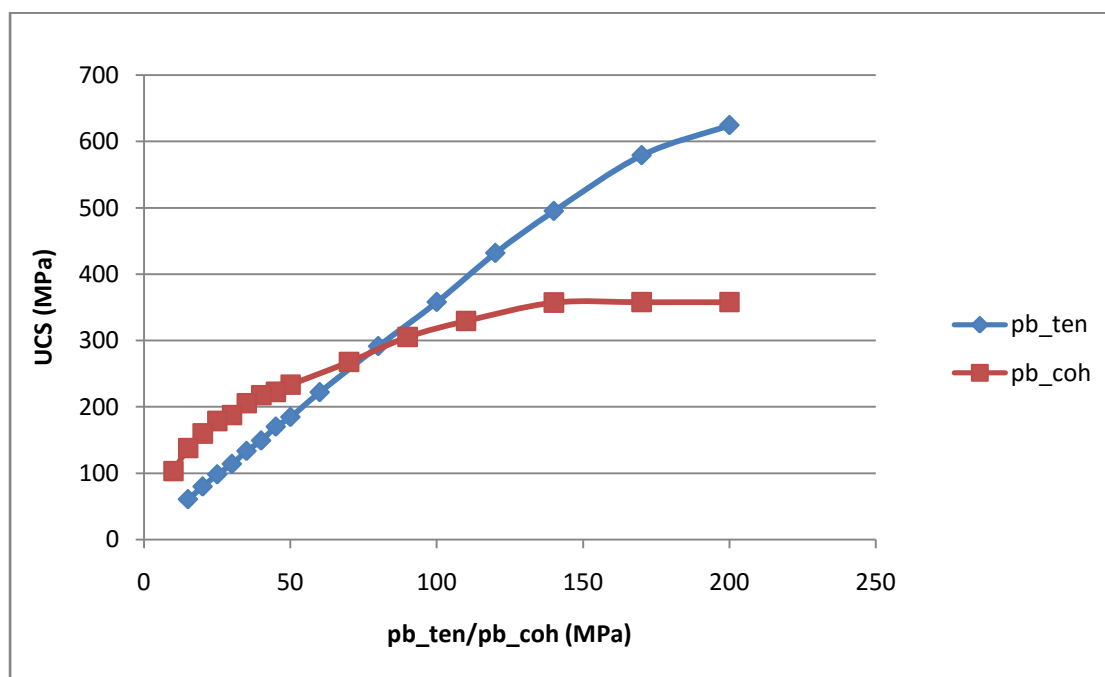
Πίνακας 5.5. Μονοπαραμετρική ανάλυση της ορθής αντοχής των παράλληλων δεσμών για τη UCS

pb_ten (MPa)	UCS (MPa)
200,025	624,62
170,025	579,22
140,025	495,14
120,025	431,92
100,025	357,99
80,025	291,51
60,025	222,11
50,025	184,66
45,025	170,16
40,025	149,24
35,025	133,48
30,025	113,96
25,025	98,2
20,025	79,87
15,025	60,74

Πίνακας 5.6. Μονοπαραμετρική ανάλυση της διατμητικής αντοχής των παράλληλων δεσμών για τη UCS

pb_coh (MPa)	UCS (MPa)
200	357,99
170	357,99
140	357,41
110	329,57
90	305,44
70	267,86
50	233,53
45	222,77
40	217,75
35	205,65
30	187,88
25	178,85
20	159,97
15	137,95
10	103,44

Στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα 5.3. που εξάγεται από τις παραπάνω τιμές, ώστε να φανεί καθαρά το πόσο επιδρούν στην αντοχή οι αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων και ποια από τις δύο επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό.



Διάγραμμα 5.3. Μονοπαραμετρική ανάλυση της ορθής και διατμητικής αντοχής των παράλληλων δεσμών για τη UCS

Όπως φαίνεται, και οι δύο παράμετροι έχουν συγκεκριμένη τάση ως προς την επίδρασή τους στην αντοχή του δοκιμίου. Είναι φανερό ότι αύξηση της τιμής των μικροπαραμέτρων αυτών οδηγούν σε αύξηση της αντοχής του συνθετικού

πετρώματος. Το εύρος των τιμών της αντοχής με αλλαγή της ορθής αντοχής των δεσμών είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο για αλλαγή της διατμητικής αντοχής των δεσμών, πράγμα από το οποίο συμπεραίνεται ότι θα αποτελέσει καθοριστικότερο παράγοντα κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Παρόλα αυτά, αξίζει να αναφερθεί ότι για χαμηλές τιμές και των δύο μικροπαραμέτρων, η αντοχή της προσομοίωσης πλησιάζει την πραγματική, οπότε και οι δύο παράμετροι αυτές είναι σημαντικές για την επίτευξη συμφωνίας μεταξύ αντοχής συνθετικού και πραγματικού δοκιμίου.

Ακολούθως μελετάται η επίδραση της ακτίνας των σωματιδίων στην αντοχή. Η μέθοδος του Youn, προϋποθέτει σταθερό λόγο μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα ίσο με 1,66. Έτσι, έλαβε χώρα, αρχικά, αριθμός προσομοιώσεων με αύξουσα ακτίνα σωματιδίων, που όμως διατηρούν σταθερό λόγο R_{max}/R_{min} και στη συνέχεια με σταθερή ελάχιστη ακτίνα και μεταβαλλόμενη μέγιστη. Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες 5.7. και 5.8. με τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις προσομοιώσεις. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η τιμή που εξήχθη από την αρχική προσομοίωση με τις τιμές που προέκυψαν από το Matlab.

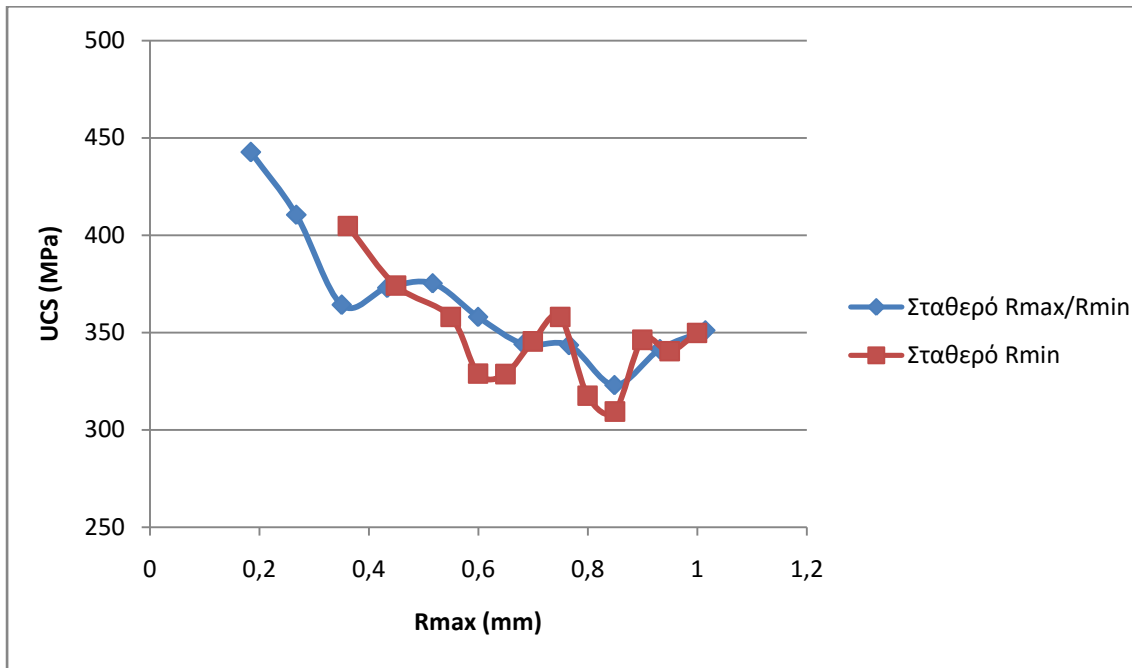
Πίνακας 5.7. Μονοπαραμετρική ανάλυση με σταθερό λόγο μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα για τη UCS

min_rad (mm)	max_rad (mm)	UCS (MPa)
0,111	0,18426	442,63
0,161	0,26726	410,53
0,211	0,35026	364,16
0,261	0,43326	372,93
0,311	0,51626	375,24
0,361	0,59926	357,99
0,411	0,68226	344,07
0,461	0,76526	343,47
0,511	0,84826	322,96
0,561	0,93126	341,32
0,611	1,01426	351,13

Πίνακας 5.8. Μονοπαραμετρική ανάλυση με σταθερή ελάχιστη ακτίνα για τη UCS

min_rad (mm)	max_rad (mm)	UCS (MPa)
0,361	0,361	399,99
0,361	0,44926	404,73
0,361	0,54926	374,12
0,361	0,59926	357,99
0,361	0,64926	328,91
0,361	0,69926	328,64
0,361	0,74926	345,46
0,361	0,79926	357,99
0,361	0,84926	317,6
0,361	0,89926	309,41
0,361	0,94926	346,27
0,361	0,99926	340,4
0,361	1,04926	349,83

Ακολουθεί το διάγραμμα 5.4. όπου φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και για τις δύο μονοπαραμετρικές αναλύσεις.



Διάγραμμα 5.4. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα για τη UCS

Σε γενικές γραμμές, φαίνεται πως υπάρχει μία τάση μείωσης της αντοχής με την αύξηση της μέγιστης ακτίνας και στις δύο περιπτώσεις, με κάποιες αποκλίσεις από τη φθίνουσα συμπεριφορά, καθώς φαίνεται πως υπάρχουν κάποιες διακυμάνσεις στην αντοχή. Άλλο ένα συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι και τα δύο είδη μονοπαραμετρικής ανάλυσης δεν επηρεάζουν σε τέτοιο βαθμό την αντοχή ώστε να φτάνει στα επιθυμητά επίπεδα, δηλαδή να προσεγγίζει τιμές των εργαστηριακών

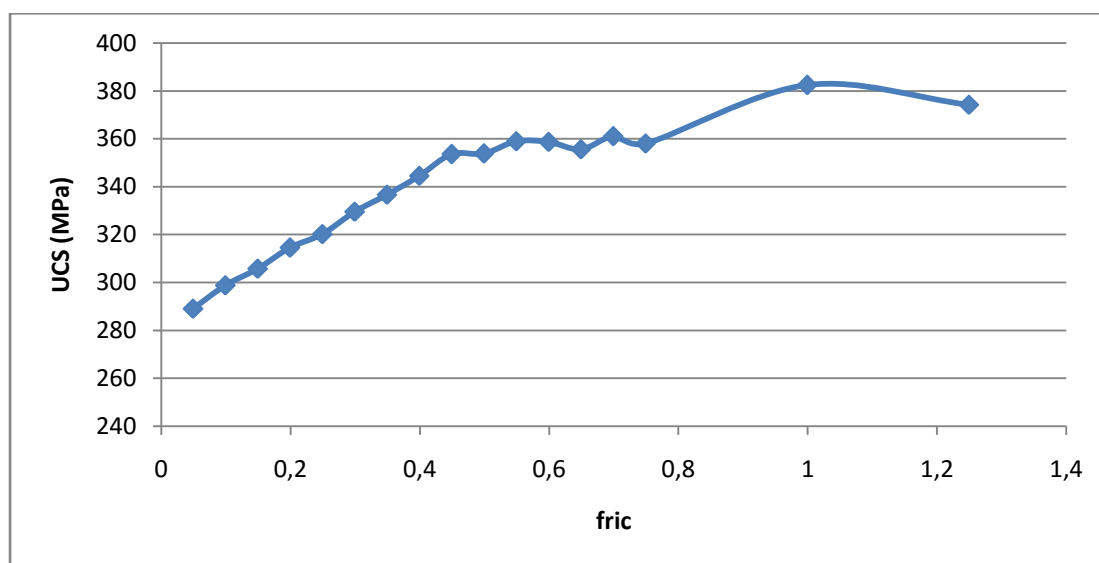
δοκιμών, πράγμα που σημαίνει ότι οι μικροπαράμετροι που σχετίζονται με την ακτίνα δεν είναι μείζονος σημασίας για τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Τελευταίος παράγοντας που εξετάζεται είναι ο συντελεστής τριβής που ορίζεται σαν FRIC στη μέθοδο του Yoon, όπως και στο PFC. Στον πίνακα 5.9. παρουσιάζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν και η αντοχή του συνθετικού πετρώματος για κάθε μία από αυτές. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η τιμή που εξήχθη από την αρχική προσομοίωση με τις τιμές που προέκυψαν από το Matlab.

Πίνακας 5.9. Μονοπαραμετρική ανάλυση του συντελεστή τριβής για τη UCS

fric	UCS (MPa)
1,249	374,13
0,999	382,38
0,749	357,99
0,699	361,1
0,649	355,57
0,599	358,7
0,549	358,91
0,499	353,8
0,449	353,51
0,399	344,49
0,349	336,66
0,299	329,55
0,249	320,23
0,199	314,51
0,149	305,75
0,099	298,83
0,049	289,07

Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.5.



Διάγραμμα 5.5. Μονοπαραμετρική ανάλυση του συντελεστή τριβής για τη UCS

Βάσει των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων φαίνεται πως η αύξηση του συντελεστή τριβής οδηγεί σε αύξηση της τιμής της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Βέβαια, όπως και στην περίπτωση της επίδρασης της ακτίνας των σωματιδίων, παρατηρείται σε ορισμένα σημεία μία μικρή σχετικά απόκλιση από την αύξουσα συμπεριφορά. Επιπρόσθετα, προδιαγράφεται μία πτώση της αντοχής για συντελεστές τριβής που ξεπερνούν τη μονάδα. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως η αντοχή και σε αυτή την περίπτωση δεν πλησιάζει τη μακροσκοπική απόκριση του πραγματικού πετρώματος.

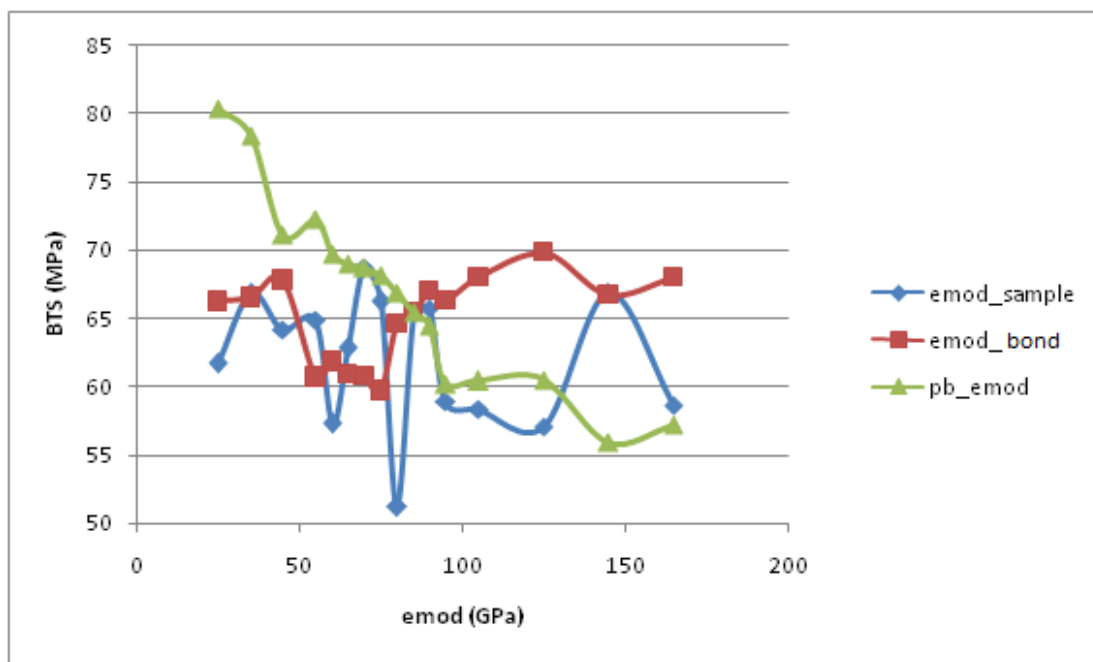
5.2.4.2. Μονοπαραμετρική ανάλυση αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (δοκιμή Brazilian – αντιδιαμετρική θλίψη)

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι όμοια με την αντίστοιχη για την παραμετρική ανάλυση στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Η πρώτη μικροπαράμετρος της οποίας η επίδρασή αναλύεται είναι το μέτρο ελαστικότητας των δεσμών BCM. Μελετήθηκε η επίδραση των τριών διαφορετικών μέτρων ελαστικότητας που πρέπει να καθοριστούν στο PFC. Στον πίνακα 5.10. απεικονίζονται οι τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη BTS, για κάθε τιμή της παραμέτρου emod. Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί σε αυτό κατά την κατασκευή του δείγματος (sample), η δεύτερη σε αυτό των δεσμών για τους οποίους ισχύει το γραμμικό μοντέλο (bond) και η τρίτη σε αυτό για τους παράλληλους δεσμούς (pb_bond). Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η τιμή που εξήχθη από την αρχική προσομοίωση με τις τιμές που προέκυψαν από το Matlab.

Πίνακας 5.10. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας για τη BTS

emod (GPa)	BTS_sample (MPa)	BTS_bond (MPa)	BTS_pb_bond (MPa)
164,64	58,6	68	57,2
144,64	66,8	66,7	55,9
124,64	57,1	69,8	60,5
104,64	58,3	68	60,4
94,64	58,9	66,3	60,2
89,64	65,7	67	64,4
84,64	65,4	65,4	65,4
79,64	51,2	64,6	66,9
74,64	66,2	59,7	68,1
69,64	68,7	60,8	68,7
64,64	62,8	60,9	69
59,64	57,3	61,8	69,7
54,64	64,9	60,7	72,2
44,64	64,2	67,8	71,1
34,64	66,8	66,5	78,3
24,64	61,7	66,2	80,3

Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.6.



Διάγραμμα 5.6. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας για τη BTS

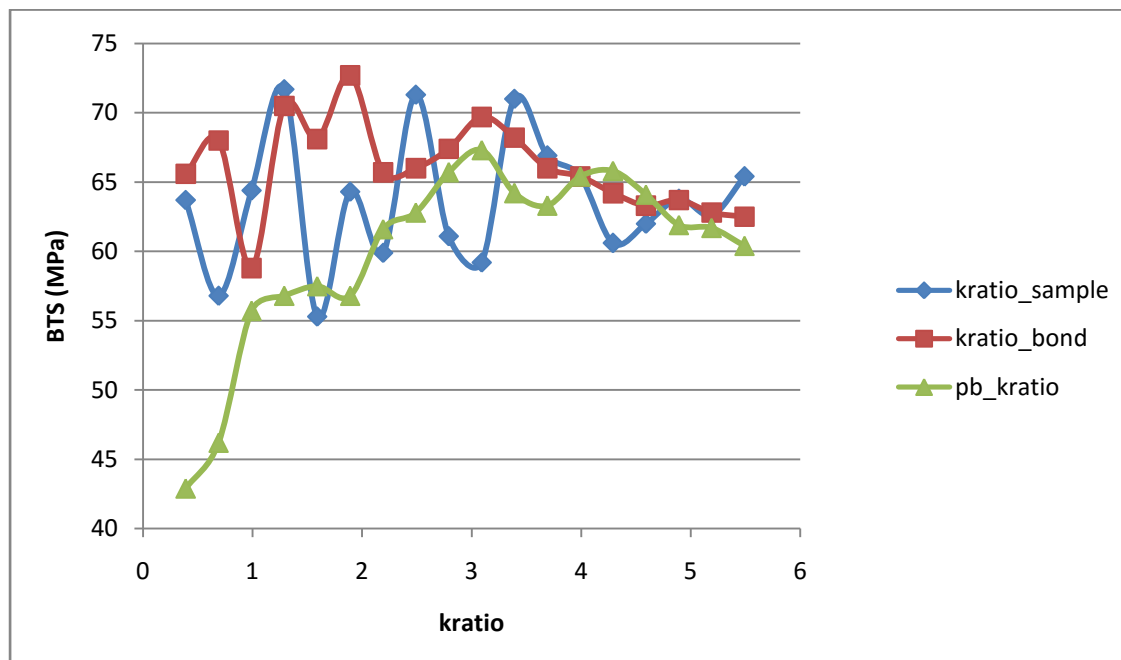
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας είναι παρόμοια με την περίπτωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Αυτό σημαίνει ότι το μέτρο ελαστικότητας δεν έχει κάποια εμφανή τάση ως προς την επίδρασή του στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό, εκτός αυτού των παράλληλων δεσμών. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το μέτρο ελαστικότητας του αρχικού δείγματος, έχει σχετικά μεγάλες διακυμάνσεις στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό, όπως και το μέτρο ελαστικότητας των δεσμών που διέπονται από το γραμμικό μοντέλο. Αντίθετα, η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των παράλληλων δεσμών φαίνεται να μειώνει την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό. Ακόμη, σε καμία περίπτωση δεν προσεγγίζεται η πραγματική τιμή αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό, έτσι η μικροπαραμέτρος αυτή δεν είναι σημαντική για τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Η δεύτερη εξεταζόμενη μικροπαραμέτρος, δηλαδή ο λόγος ορθής προς διατμητική δυστροπία KNKS, η οποία αναφέρεται στο PFC ως *kratio*, όπως και στις προσομοιώσεις αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, ορίζεται μέσω τριών εντολών στο λογισμικό καθώς είναι αναγκαίο να οριστούν τρεις λόγοι δυστροπίας για την προσομοίωση. Στον πίνακα 5.11., ο πρώτος είναι αυτός κατά την κατασκευή του δείγματος (*sample*) στον οποίο αντιστοιχεί η πρώτη στήλη δεδομένων, ο δεύτερος για τους δεσμούς για τους οποίους ισχύει το γραμμικό μοντέλο (*bond*) στον οποίο αντιστοιχούν τα δεδομένα της δεύτερης στήλης και ο τρίτος για τους παράλληλους δεσμούς (*pb_bond*), που αντιστοιχεί στα δεδομένα της τρίτης στήλης. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η τιμή που εξήχθη από την αρχική προσομοίωση με τις τιμές που προέκυψαν από το Matlab.

Πίνακας 5.11. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας για τη BTS

kratio	BTS_sample (MPa)	BTS_bond (MPa)	BTS_pb_bond (MPa)
5,491	65,4	62,5	60,4
5,191	62,6	62,8	61,7
4,891	63,8	63,7	61,9
4,591	62	63,3	64,1
4,291	60,6	64,2	65,8
3,991	65,4	65,4	65,4
3,691	66,9	66	63,3
3,391	71	68,2	64,2
3,091	59,2	69,7	67,3
2,791	61,1	67,4	65,7
2,491	71,3	66	62,8
2,191	59,9	65,7	61,6
1,891	64,3	72,7	56,8
1,591	55,3	68,1	57,5
1,291	71,7	70,5	56,8
0,991	64,4	58,8	55,7
0,691	56,8	68	46,2
0,391	63,7	65,6	42,9

Στη συνέχεια οι τιμές παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.7.



Διάγραμμα 5.7. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας για τη BTS

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι ο λόγος δυστροπίας του δοκιμίου, των δεσμών που διέπονται από το γραμμικό μοντέλο και των παράλληλων δεσμών δεν έχει κάποια εμφανή τάση ως προς την επίδρασή του στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό. Οι τιμές δεν κυμαίνονται σε μεγάλο εύρος και δεν προσεγγίζουν την

πραγματική μακροσκοπική απόκριση του πετρώματος. Επιπλέον, σημαντική παρατήρηση αποτελεί η αύξουσα συμπεριφορά της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό για τιμές του λόγου μικρότερες από 3 όπως και η φθίνουσα αντοχή για τιμές μεγαλύτερες του λόγου αυτού. Παρατηρούνται, παρόλα αυτά μικρές αποκλίσεις από τις συμπεριφορές που προαναφέρθηκαν.

Οι δύο επόμενες μικροπαράμετροι που μελετώνται είναι η ορθή αντοχή του παράλληλου δεσμού, που θεωρείται ως εφελκυστική στον κώδικα του λογισμικού και καθορίζεται ως *pb_ten* και ως *NBS* στη μέθοδο του *Yoon* και η διατμητική αντοχή του δεσμού, που θεωρείται ως συνοχή στον κώδικα του λογισμικού και καθορίζεται ως *pb_coh* και ως *SBS* στη μέθοδο του *Yoon*. Στους πίνακες 5.12. και 5.13. παρατίθενται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η τιμή που εξήχθη από την αρχική προσομοίωση με τις τιμές που προέκυψαν από το *Matlab*.

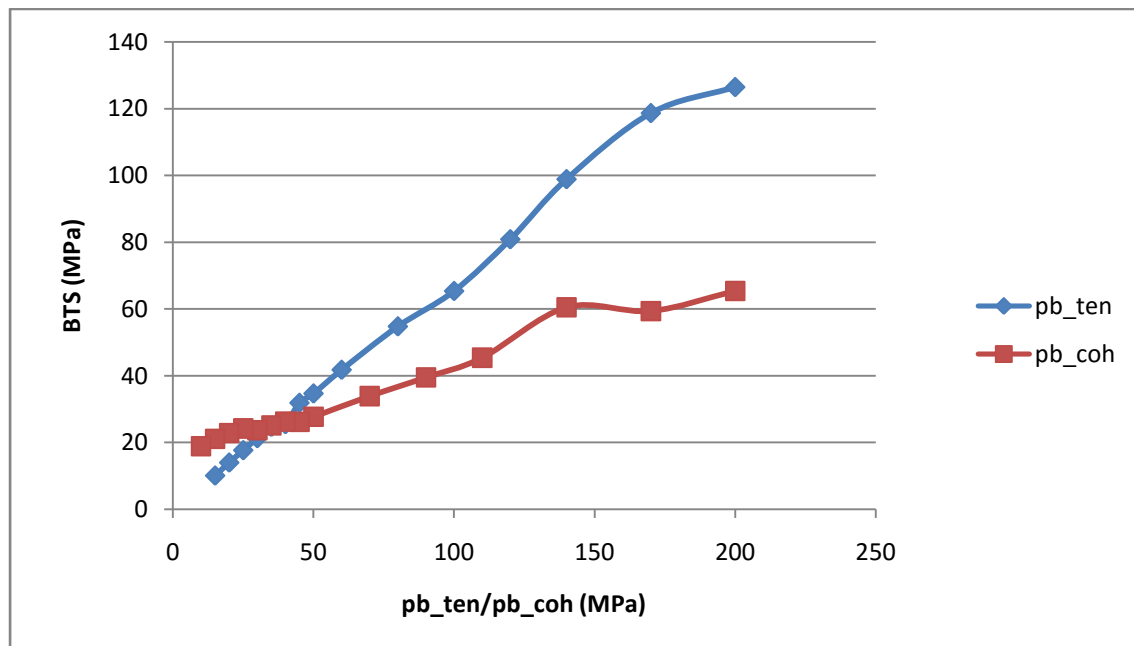
Πίνακας 5.12. Μονοπαραμετρική ανάλυση της ορθής αντοχής των παράλληλων δεσμών για τη BTS

pb_ten (MPa)	BTS (MPa)
200,025	126,5
170,025	118,7
140,025	98,9
120,025	80,9
100,025	65,4
80,025	54,8
60,025	41,8
50,025	34,7
45,025	31,9
40,025	25,5
35,025	24,7
30,025	21,3
25,025	17,7
20,025	14
15,025	10,1

Πίνακας 5.13. Μονοπαραμετρική ανάλυση της διατμητικής αντοχής των δεσμών για τη BTS

pb_coh (MPa)	BTS (MPa)
200	65,4
170	59,4
140	60,5
110	45,4
90	39,5
70	33,9
50	27,7
45	26,2
40	26,3
35	25,1
30	23,7
25	24,2
20	22,8
15	21,1
10	18,9

Στη συνέχεια δίνεται το διάγραμμα 5.8. που εξάγεται από τις παραπάνω τιμές, ώστε να φανεί καθαρά η επίδραση των αλλαγών της τιμής των μικροπαραμέτρων στην αντοχή.



Διάγραμμα 5.8. Μονοπαραμετρική ανάλυση της ορθής και διατμητικής αντοχής των δεσμών για τη BTS

Όπως φαίνεται, και οι δύο παράμετροι έχουν συγκεκριμένη τάση ως προς την επίδρασή τους στην αντοχή του δοκιμίου, αντίστοιχη με αυτή που παρατηρήθηκε στις προσομοιώσεις αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Οποιαδήποτε αύξηση της τιμής των μικροπαραμέτρων αυτών οδηγεί σε αύξηση της αντοχής του συνθετικού πετρώματος.

Παρόλα αυτά, μπορεί να παρατηρηθεί μία σχετική σταθεροποίηση της αντοχής για τιμές της διατμητικής αντοχής των δεσμών μεγαλύτερες των 140 MPa.

Το εύρος των τιμών της αντοχής με αλλαγή της ορθής αντοχής των δεσμών είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο για αλλαγή της διατμητικής αντοχής των δεσμών, πράγμα από το οποίο συμπεραίνεται ότι αποτελεί καθοριστικότερο παράγοντα κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Επιπλέον, για χαμηλές τιμές των μικροπαραμέτρων, η αντοχή της προσομοίωσης πλησιάζει την πραγματική, πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι και οι δύο παράμετροι αυτές είναι σημαντικές για την επίτευξη συμφωνίας μεταξύ αντοχής συνθετικού και πραγματικού δοκιμίου.

Η επόμενη μελετώμενη μικροπαραμέτρος είναι η ακτίνα των σωματιδίων. Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος του Youn προϋποθέτει σταθερό λόγο μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα ίσο με 1,66. Αρχικά, μελετήθηκε η επίδραση της αύξησης της ακτίνας των σωματιδίων με σταθερό λόγο R_{max}/R_{min} στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό και στη συνέχεια η αύξηση της μέγιστης ακτίνας των σωματιδίων με σταθερή την ελάχιστη ακτίνα. Ακολουθούν οι πίνακες 5.14. και 5.15. με τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις προσομοιώσεις. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η τιμή που εξήχθη από την αρχική προσομοίωση με τις τιμές που προέκυψαν από το Matlab.

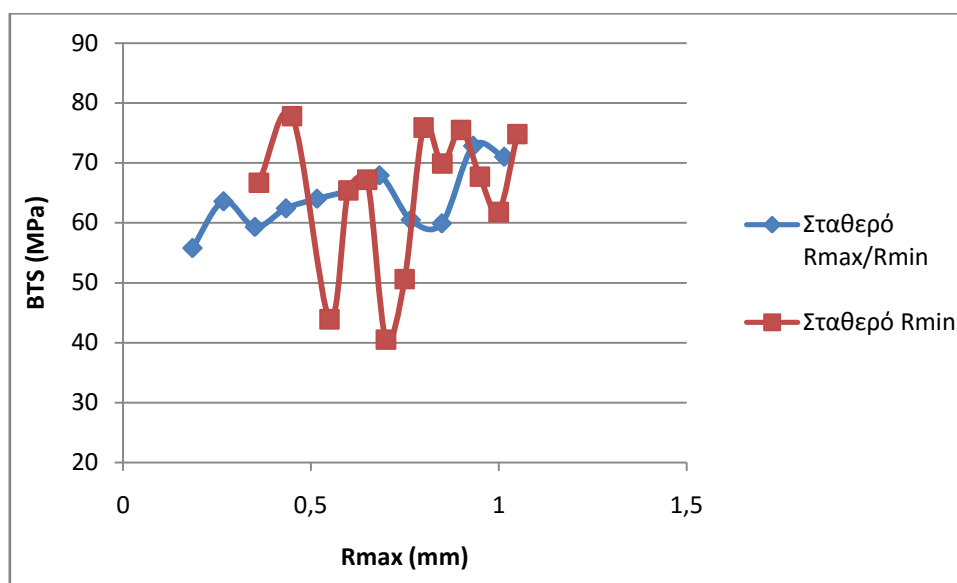
Πίνακας 5.14. Μονοπαραμετρική ανάλυση με σταθερό λόγο μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα για τη BTS

min_rad (mm)	max_rad (mm)	BTS (MPa)
0,111	0,18426	55,8
0,161	0,26726	63,6
0,211	0,35026	59,3
0,261	0,43326	62,4
0,311	0,51626	64
0,361	0,59926	65,4
0,411	0,68226	67,9
0,461	0,76526	60,5
0,511	0,84826	59,9
0,561	0,93126	72,8
0,611	1,01426	71
0,111	0,18426	55,8

Πίνακας 5.15. Μονοπαραμετρική ανάλυση με σταθερή ελάχιστη ακτίνα για τη BTS

min_rad (mm)	max_rad (mm)	BTS (MPa)
0,361	0,361	66,7
0,361	0,44926	77,8
0,361	0,54926	43,9
0,361	0,59926	65,4
0,361	0,64926	67,2
0,361	0,69926	40,5
0,361	0,74926	50,6
0,361	0,79926	75,9
0,361	0,84926	69,9
0,361	0,89926	75,5
0,361	0,94926	67,7
0,361	0,99926	61,8
0,361	1,04926	74,8

Ακολουθεί το διάγραμμα 5.9. όπου φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και για τις δύο μονοπαραμετρικές αναλύσεις.



Διάγραμμα 5.9. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα για τη BTS

Η αύξηση της μέγιστης ακτίνας δεν φαίνεται να επηρεάζει με συγκεκριμένο τρόπο την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό. Παρατηρείται σχετικά μεγάλη διακύμανση των τιμών, κυρίως όταν διατηρείται σταθερή η ελάχιστη ακτίνα. Όταν ο λόγος R_{max}/R_{min} είναι σταθερός, μπορεί να διακριθεί μία τάση αύξησης της αντοχής, σχεδόν γραμμική, με εξαίρεση το διάστημα όπου η μέγιστη ακτίνα κυμαίνεται μεταξύ 0,7 mm και 0,8 mm, στο οποίο συναντάται μείωση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό. Επίσης, και τα δύο είδη μονοπαραμετρικής ανάλυσης δεν επηρεάζουν σε τέτοιο βαθμό την αντοχή ώστε να φτάνει στα επιθυμητά επίπεδα, δηλαδή να προσεγγίζει τιμές των εργαστηριακών δοκιμών, πράγμα που σημαίνει ότι οι μικροπαραμέτροι που

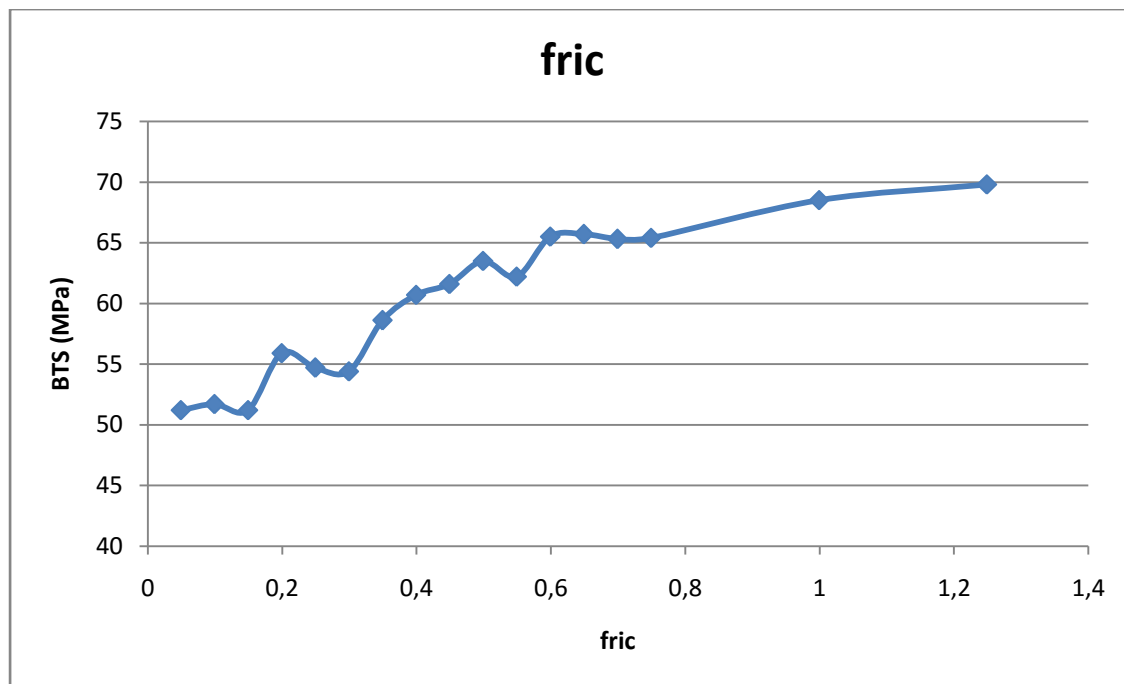
σχετίζονται με την ακτίνα δεν είναι μείζονος σημασίας για τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Τέλος, αναλύεται η επίδραση του συντελεστή τριβής που ορίζεται σαν FRIC στη μέθοδο του Yoon, όπως και στο PFC. Στον πίνακα 5.16. παρουσιάζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν και η αντοχή του συνθετικού πετρώματος για κάθε μία από αυτές. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η τιμή που εξήχθη από την αρχική προσομοίωση με τις τιμές που προέκυψαν από το Matlab.

Πίνακας 5.16. Μονοπαραμετρική ανάλυση του συντελεστή τριβής για τη BTS

fric	BTS (MPa)
1,249	69,8
0,999	68,5
0,749	65,4
0,699	65,3
0,649	65,7
0,599	65,5
0,549	62,2
0,499	63,5
0,449	61,6
0,399	60,7
0,349	58,6
0,299	54,4
0,249	54,7
0,199	55,9
0,149	51,2
0,099	51,7
0,049	51,2

Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.10.

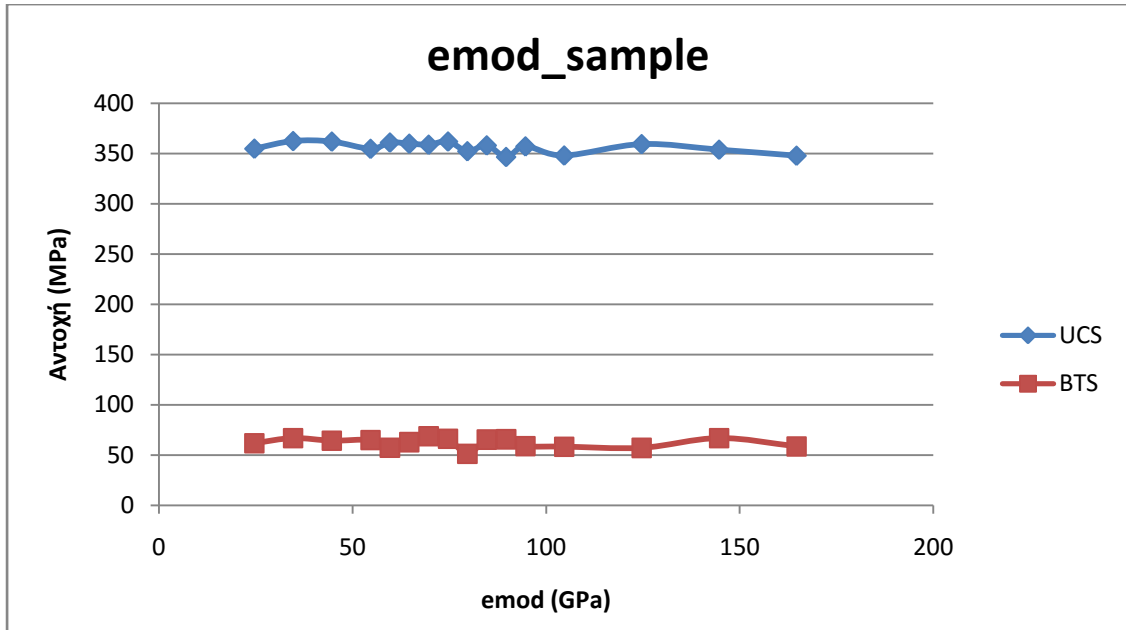


Διάγραμμα 5.10. Μονοπαραμετρική ανάλυση του συντελεστή τριβής για τη BTS

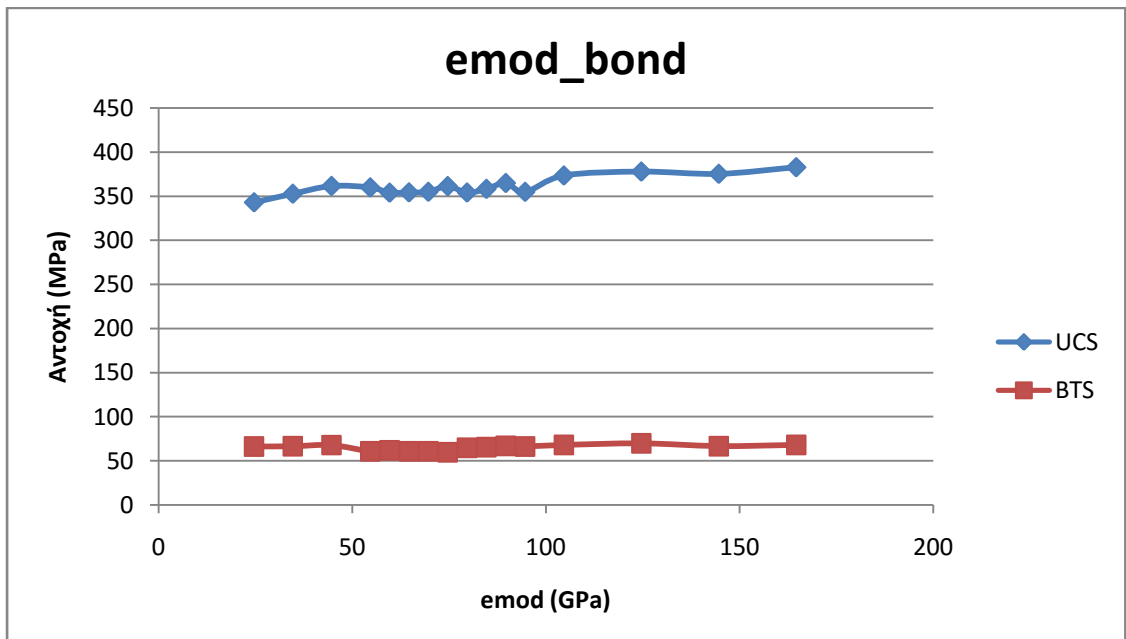
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι αύξηση του συντελεστή τριβής οδηγεί σε αύξηση της τιμής της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό. Παρόλα αυτά, παρατηρείται σε ορισμένα σημεία μία μικρή σχετικά απόκλιση από την αύξουσα συμπεριφορά. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να επισημανθεί πως η αντοχή και σε αυτή την περίπτωση δεν πλησιάζει τη μακροσκοπική απόκριση του πραγματικού πετρώματος.

5.2.4.3. Σύγκριση επίδρασης μεταβολής μικροπαραμέτρων σε UCS και BTS

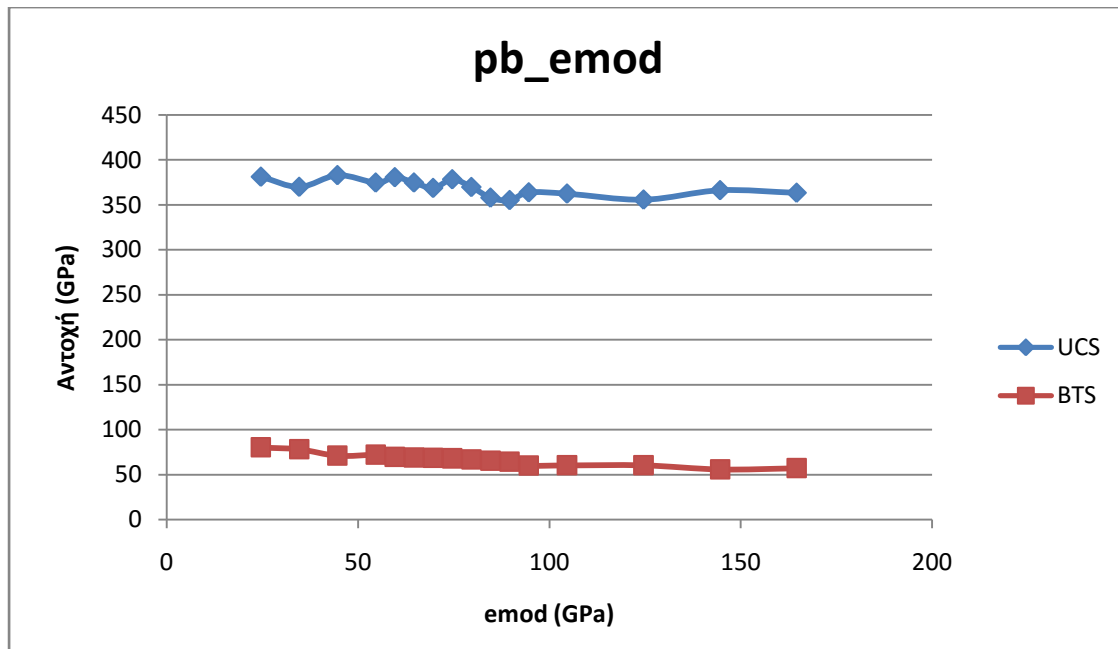
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται διαγράμματα τα οποία περιλαμβάνουν τις τιμές της αντοχής τόσο σε μονοαξονική θλίψη όσο και σε έμμεσο εφελκυσμό για μεταβολή κάθε μίας μικροπαραμέτρου. Κάτι τέτοιο μπορεί να φανεί χρήσιμο κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου, αφού με τη βοήθεια των διαγραμμάτων αυτών είναι δυνατός ο εντοπισμός εύρους τιμών στις οποίες μονοαξονική θλίψη και έμμεσος εφελκυσμός δεν έχουν την ίδια τάση.



Διάγραμμα 5.11. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας του αρχικού δείγματος

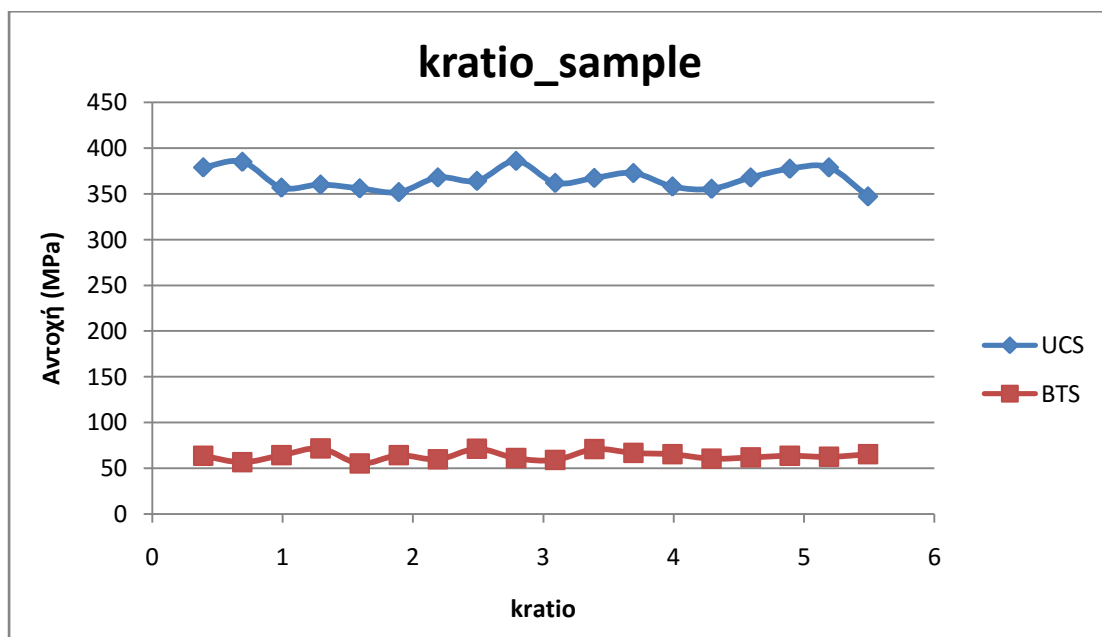


Διάγραμμα 5.12. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας των δεσμών που διέπονται από το γραμμικό μοντέλο

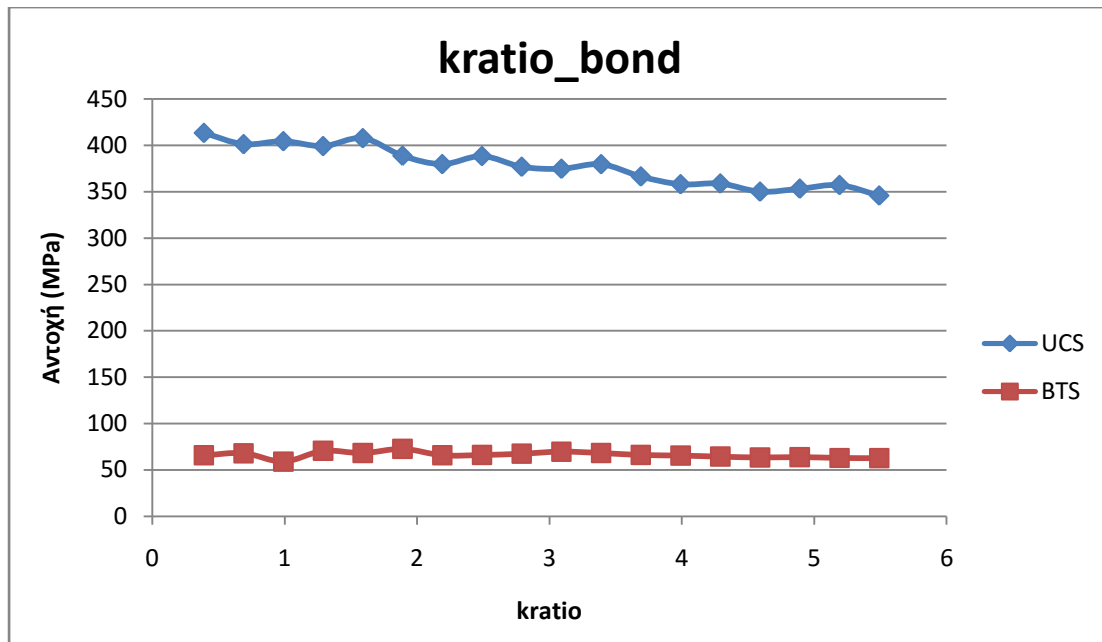


Διάγραμμα 5.13. Μονοπαραμετρική ανάλυση του μέτρου ελαστικότητας των παράλληλων δεσμών

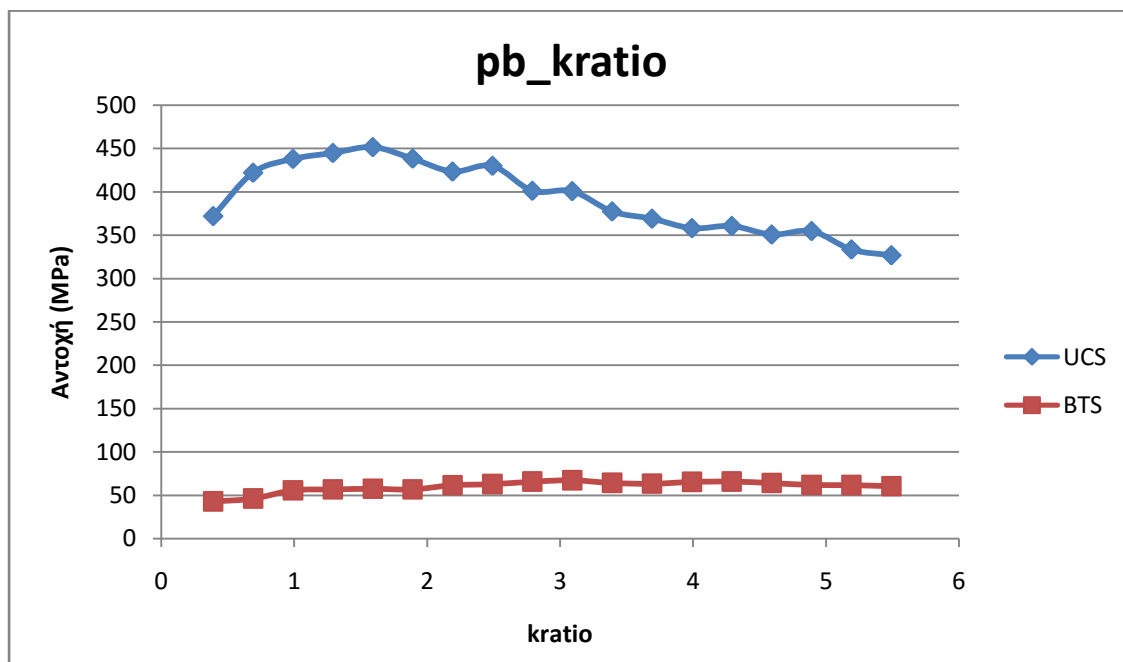
Όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα 5.11. – 5.13., το μέτρο ελαστικότητας της μικροκλίμακας emod ή αλλιώς BCM όπως ορίζεται από τον Youn δεν έχει κάποια συγκεκριμένη τάση, ώστε να φανεί χρήσιμο κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης.



Διάγραμμα 5.14. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας του αρχικού δείγματος



Διάγραμμα 5.15. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας των δεσμών που διέπονται από το γραμμικό μοντέλο

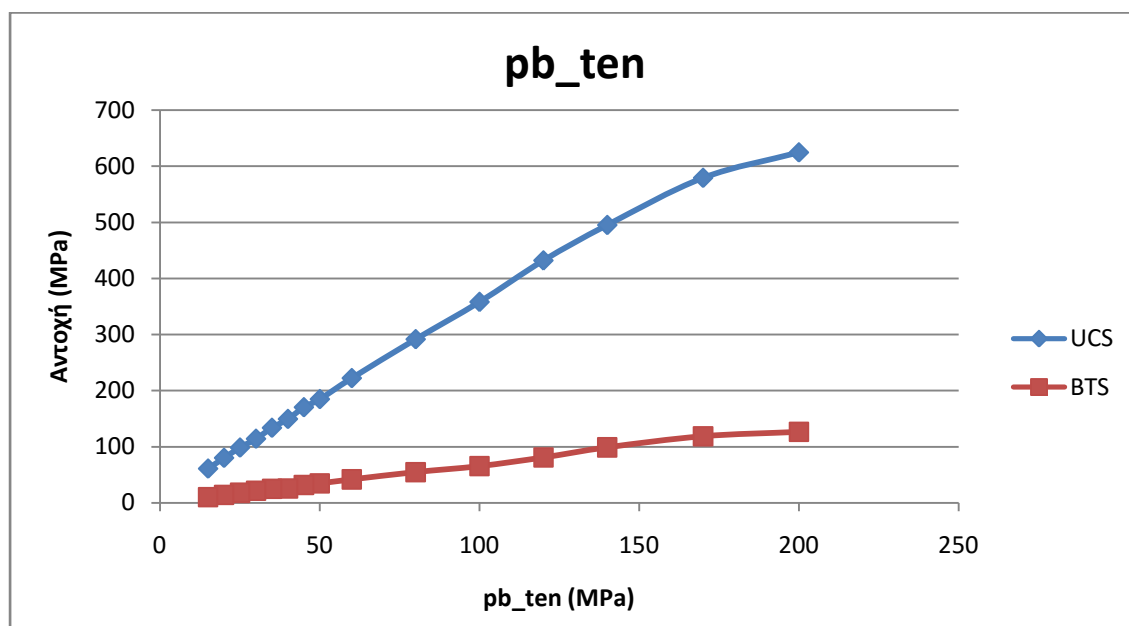


Διάγραμμα 5.16. Μονοπαραμετρική ανάλυση του λόγου δυστροπίας των παράλληλων δεσμών

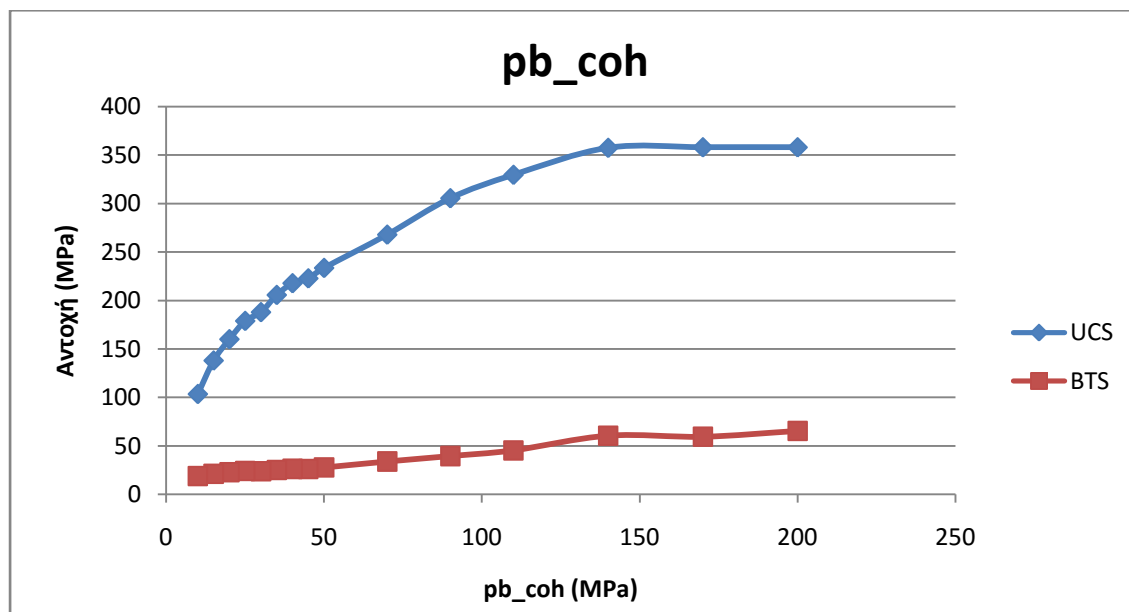
Όσον αφορά στους λόγους δυστροπίας, από τα διαγράμματα 5.14. – 5.16. φαίνεται πως είναι εφικτή η εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων. Αρχικά, ο λόγος δυστροπίας που καθορίζεται για το αρχικό δείγμα δεν μπορεί να αποτελέσει σημαντικό κομμάτι στη βαθμονόμηση καθώς τόσο η UCS όσο και η BTS αυξομειώνονται χωρίς να παρουσιάζουν κάποια συγκεκριμένη τάση. Η αύξηση του λόγου δυστροπίας για τους δεσμούς που διέπονται από το γραμμικό μοντέλο παρουσιάζει μία φθίνουσα, σε γενικές γραμμές, τάση για τη μονοαξονική θλίψη. Αυτό σε συνδυασμό με την

σταθερή, πρακτικά, τιμή της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό, είναι δυνατό να χρησιμεύσουν στη διαδικασία της βαθμονόμησης.

Ο λόγος δυστροπίας των παράλληλων δεσμών, φαίνεται, σύμφωνα με το διάγραμμα 5.16. πως μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό παρουσιάζει μία σταθερή συμπεριφορά, ανεξαρτήτως της μεταβολής του λόγου δυστροπίας. Η τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη παρουσιάζει αυξητική τάση μέχρι τιμή του λόγου δυστροπίας ίση με 1,6 και στη συνέχεια φθίνει, έως το πέρας των δοκιμών, με ελάχιστα σημεία απόκλισης από τη φθίνουσα συμπεριφορά.



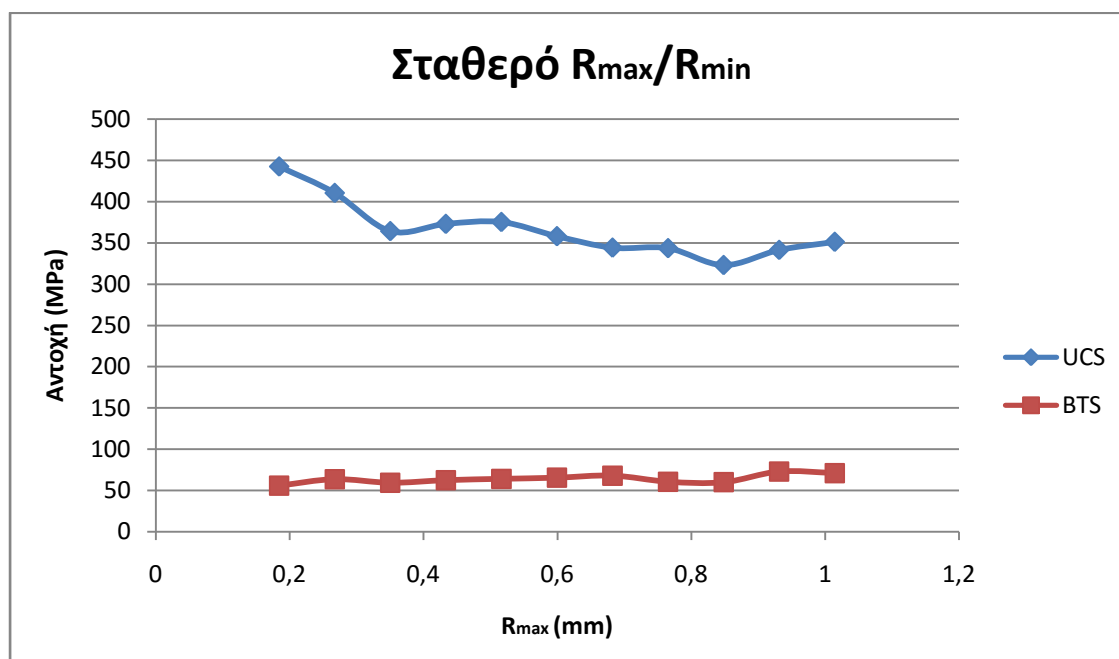
Διάγραμμα 5.17. Μονοπαραμετρική ανάλυση της ορθής αντοχής των δεσμών



Διάγραμμα 5.18. Μονοπαραμετρική ανάλυση της διατμητικής αντοχής των δεσμών

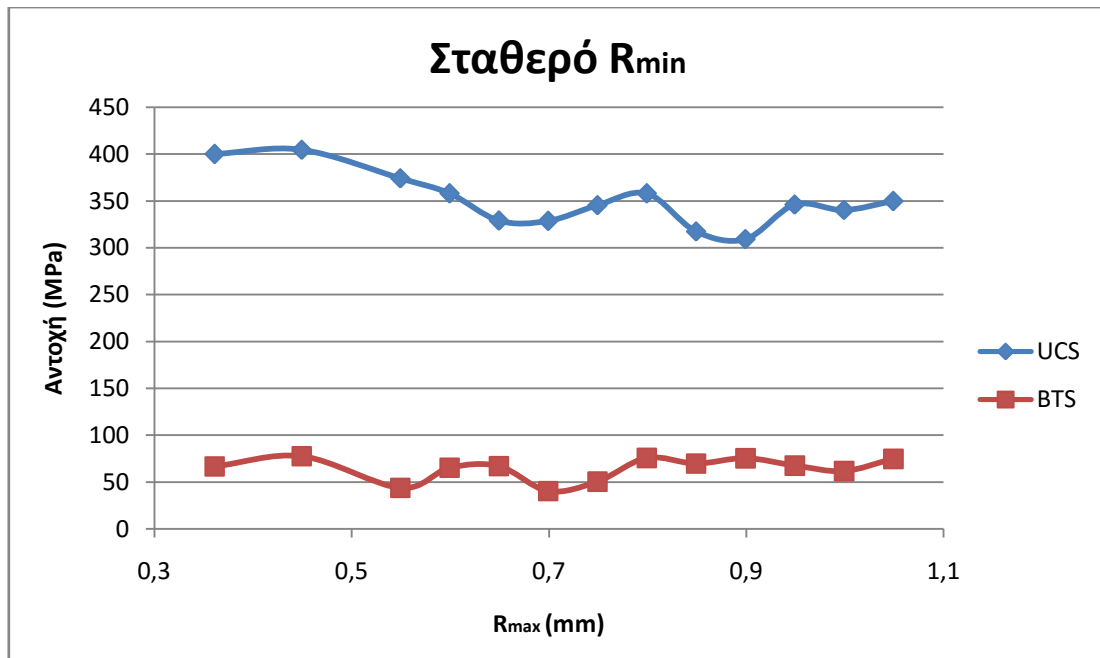
Οι μικροπαράμετροι που καθορίζουν την ορθή και τη διατμητική αντοχή των παράλληλων δεσμών, όπως έχει προαναφερθεί είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες κατά τη βαθμονόμηση, το οποίο επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα 5.17. και 5.18. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη αλλά και σε έμμεσο εφελκυσμό παρουσιάζουν μία σχεδόν γραμμική αύξηση έως τα 170 MPa ορθής αντοχής των παράλληλων δεσμών. Στη συνέχεια η αύξηση αποκλίνει από τη γραμμικότητα, όμως διατηρείται έως το πέρας των δοκιμών.

Η αύξηση της διατμητικής αντοχής των παράλληλων δεσμών οδηγεί επίσης σε αύξηση της αντοχής του συνθετικού πετρώματος. Για τη μονοαξονική θλίψη, κάτι τέτοιο φαίνεται να λαμβάνει χώρα μέχρι τα 140 MPa διατμητικής αντοχής των δεσμών, ενώ στη συνέχεια παρατηρείται σταθεροποίηση της τιμής της αντοχής σε κάθε νέα αύξηση της μικροπαραμέτρου. Αντίστοιχα είναι τα συμπεράσματα και για την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.



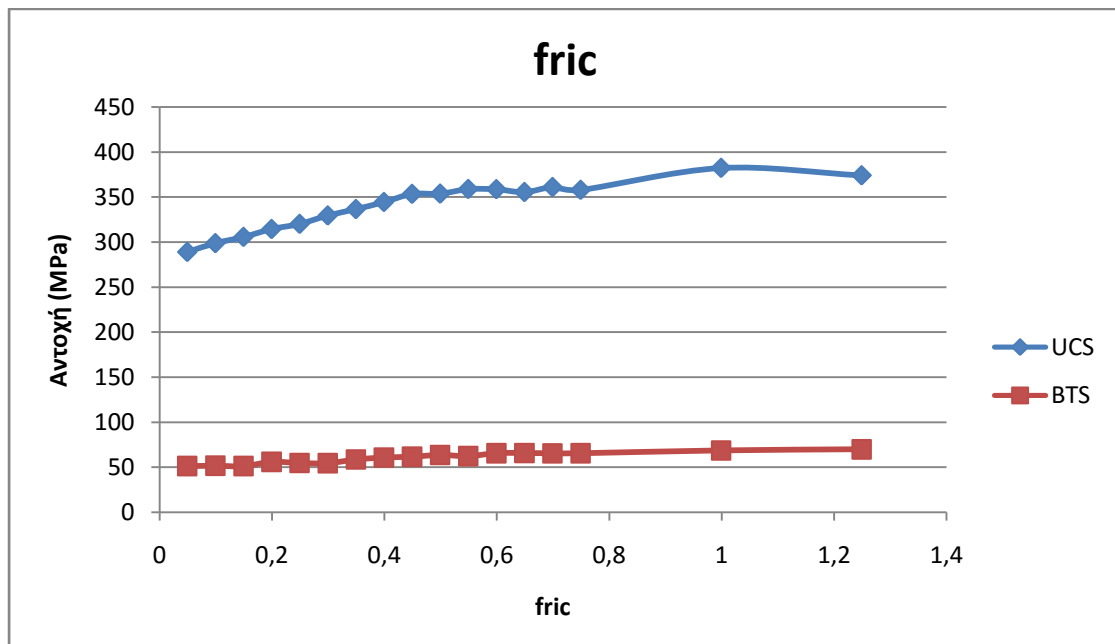
Διάγραμμα 5.19. Μονοπαραμετρική ανάλυση για σταθερό λόγο μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα

Σύμφωνα με το διάγραμμα 5.19., για σταθερό λόγο μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα των σφαιρών ίσο με 1,66, η τιμή της UCS παρουσιάζει μία τάση μείωσης της αντοχής για αύξηση της μέγιστης ακτίνας, έως τα 0,9 mm, μετά από τα οποία η καμπύλη διαγράφει μία αυξητική πορεία. Στην καμπύλη της BTS η τιμή της αντοχής φαίνεται να διατηρείται σταθερή, σε γενικές γραμμές, με διακριτές αυξομειώσεις στην τιμή της αντοχής.



Διάγραμμα 5.20. Μονοπαραμετρική ανάλυση για σταθερή ελάχιστη ακτίνα

Στην περίπτωση κατά την οποία η ελάχιστη ακτίνα διατηρείται σταθερή και ίση με 0,361 mm, η τιμή της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό δεν φαίνεται να έχει κάποια τάση, καθώς αυξομειώνεται σε όλο το εύρος ακτινών που εξετάστηκε, βάσει του διαγράμματος 5.20. Για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, μπορεί να παρατηρηθεί μία έντονα φθίνουσα πορεία της μέχρι η μέγιστη ακτίνα να φτάσει τα 0,7 mm. Στη συνέχεια, η θλιπτική αντοχή παρουσιάζει αυξομειώσεις με μορφή που προσομοιάζει ημιτονοειδή καμπύλη έως το τέλος των δοκιμών.



Διάγραμμα 5.21. Μονοπαραμετρική ανάλυση του συντελεστή τριβής

Τέλος, σε ό,τι αφορά το συντελεστή τριβής, η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό παραμένει πρακτικά αμετάβλητη, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο διάγραμμα 5.21. Αντίθετα, η τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη έχει μία αυξητική τάση, κατά κύριο λόγο, έως ότου η τιμή του συντελεστή να φτάσει το 0,5. Από εκείνο το σημείο και έπειτα, μπορεί να παρατηρηθεί μία σχετικά σταθερή τιμή αντοχής για το δοκίμιο, ενώ αυξητική τάση παρατηρείται εκ νέου όταν ο συντελεστής ξεπερνάει την τιμή 0,8.

Συμπερασματικά, οι μικροπαράμετροι που είναι πιθανότερο να βοηθήσουν στην ακόλουθη διαδικασία είναι, αρχικά η ορθή αντοχή των δεσμών πρωτίστως και η διατμητική δευτερευόντως, καθώς και ο λόγος δυστροπίας των παράλληλων δεσμών και ο συντελεστής τριβής. Οι υπόλοιπες μικροπαράμετροι είναι δυνατό να μεταβληθούν τυχαία για καλύτερη επίτευξη συμφωνίας, εφόσον δεν παρατηρείται κάποια συγκεκριμένη τάση.

5.2.4.4. Βαθμονόμηση μοντέλου

Η διαδικασία της βαθμονόμησης περιλαμβάνει τη λήψη της αρχικής τιμής από την προσομοίωση, όπου χρησιμοποιήθηκαν οι μικροπαράμετροι που προέκυψαν από το Matlab και στη συνέχεια τη μεταβολή μίας ή περισσότερων παραμέτρων και την καταγραφή των αποτελεσμάτων έως ότου επιτευχθεί συμφωνία μεταξύ αντοχής συνθετικού και πραγματικού πετρώματος. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως «δοκιμή και σφάλμα» (trial and error). Οι τιμές επιλέγονται με βάση την παραπάνω μονοπαραμετρική ανάλυση, όπου εντοπίστηκαν οι παράμετροι που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό την απόκριση του συνθετικού πετρώματος.

Οι αρχικές τιμές των μικροπαραμέτρων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αναγράφονται στον πίνακα 5.17.

Πίνακας 5.17. Μικροπαράμετροι που προέκυψαν από το Matlab για την μέθοδο Yoon

BCM (GPa)	KNKS	FRIC	NBS (MPa)	SBS (MPa)	ROSD	BRAD (mm)
84,640	3,991	0,749	100,025	200,000	0,383	0,361

Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές για τις ζητούμενες μικροπαραμέτρους, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη προέκυψε 357,99 MPa και η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό 65,4 MPa. Είναι φανερό ότι αυτές οι τιμές δεν είναι αποδεκτές καθώς απέχουν πολύ από την πραγματική μακροσκοπική απόκριση του πετρώματος. Οι κύριες μικροπαράμετροι που επηρεάζουν τόσο την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη όσο και σε εφελκυσμό είναι η ορθή αντοχή των δεσμών κατά κύριο λόγο και η διατμητική αντοχή τους δευτερευόντως. Έτσι, αρχικά δοκιμάζεται η σταδιακή μείωση της ορθής αντοχής των δεσμών.

Η μείωση της ορθής αντοχής από 100,025 MPa στα 70,025 MPa, μειώνει την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε 255,85 MPa και την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό σε 48,1 MPa. Είναι φανερό ότι πρέπει να πραγματοποιηθεί νέα μείωση της μικροπαραμέτρου

ώστε οι τιμές του συνθετικού να προσεγγίσουν τις τιμές του πραγματικού πετρώματος. Με την ορθή αντοχή των δεσμών να φτάνει τα 45,025 MPa, επιτυγχάνεται κάτι τέτοιο, καθώς η UCS γίνεται 170,16 MPa και η BTS 31,9 MPa.

Στη συνέχεια, μεταβάλλεται η διατμητική αντοχή των δεσμών από τα 200 MPa στα 70 MPa. Η νέα τιμή της αντοχής σε θλίψη είναι σχεδόν αμετάβλητη και συγκεκριμένα 169,77 MPa και της αντοχής σε εφελκυσμό 26,2 MPa. Περαιτέρω μείωση της μικροπαραμέτρου στα 55 MPa δίνει UCS 164,41 MPa και BTS 21,2 MPa.

Ακολούθως, μεταβάλλεται ο λόγος δυστροπίας των παράλληλων δεσμών από την αρχική τιμή 3,991, καθώς μείωση του είναι πιθανό να οδηγήσει σε μικρή μείωση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό και ταυτόχρονη αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, σύμφωνα με την μονοπαραμετρική ανάλυση που έχει προηγηθεί. Στον πίνακα 5.18. παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα για τις τιμές του λόγου δυστροπίας που χρησιμοποιήθηκαν οι οποίες κυμαίνονται από 2 έως 3,5.

Πίνακας 5.18. Μεταβολή λόγου δυστροπίας των παράλληλων δεσμών κατά τη βαθμονόμηση

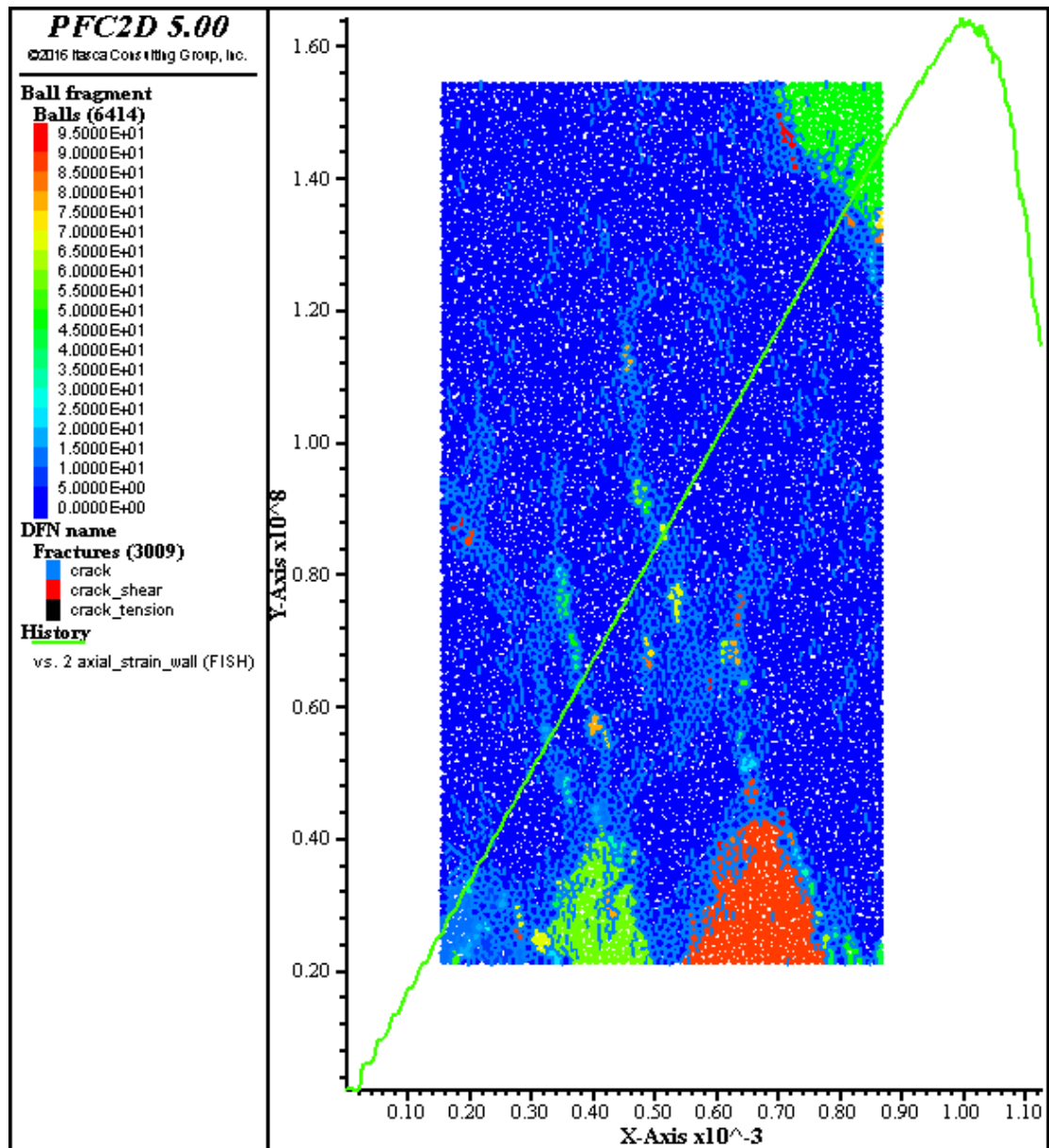
Λόγος δυστροπίας παράλληλων δεσμών	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (MPa)
3,5	161,76	22,3
3	163,81	21,5
2,5	164,23	19,7
2	159,3	19

Όπως φαίνεται, η καλύτερη δυνατή συμφωνία προκύπτει χρησιμοποιώντας την τιμή 2,5. Ο λόγος των τιμών αυτών προς τις αντίστοιχες των εργαστηριακών δοκιμών είναι:

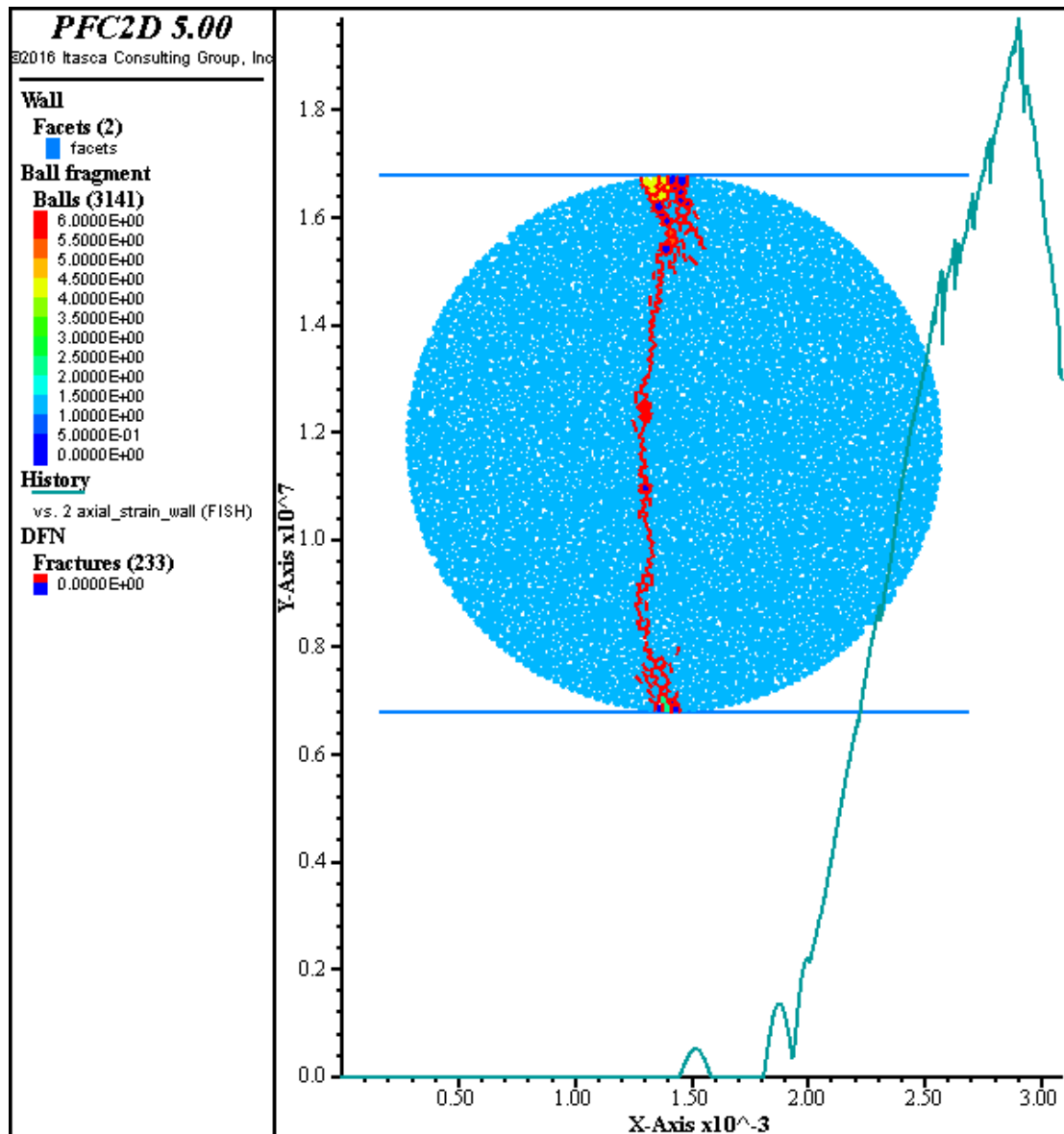
$$\text{Λόγος } \frac{UCS_{pfc}}{UCS_{εργαστ}} = \frac{164,23}{164,55} = 0,998$$

$$\text{Λόγος } \frac{BTS_{pfc}}{BTS_{εργαστ}} = \frac{19,7}{19,6} = 1,005$$

Τα βαθμονομημένα μοντέλα προσομοίωσης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε έμμεσο εφελκυσμό φαίνονται στα σχήματα 5.6 και 5.7.



Σχήμα 5.6. Προσομοίωση δοκιμής μονοαξονικής θλίψης για το βαθμονομημένο μοντέλο με τη μέθοδο Yoon



Σχήμα 5.7. Προσομοίωση δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού για το βαθμονομημένο μοντέλο με τη μέθοδο Yoon

5.3. Προσδιορισμός μικροπαραμέτρων με τη μέθοδο Wang

Για τον προσδιορισμό των μικροπαραμέτρων με τη μέθοδο Wang, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε αρχικά η εντολή `fsolve` στο Matlab. Αντίστοιχη διαδικασία με την `fmincon` ακολουθήθηκε και σε αυτή την περίπτωση, καθώς καταγράφηκαν οι εξισώσεις που προέκυψαν από τη μελέτη των Wang et al υπό την μορφή `m.file`.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που προέκυψε είναι το ότι στην εντολή `fsolve` δεν είναι δυνατό να υπεισέρχονται περιορισμοί. Ο κύριος περιορισμός που έπρεπε να εισαχθεί είναι να προκύψουν μη αρνητικές μικροπαραμέτροι. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε ως εξής. Τέθηκε όπου $X = Y^2$, με αποτέλεσμα να προκύψουν οι παράγοντες Y_1 έως Y_{10} που αποτελούν τις ρίζες των επιθυμούμενων μικροπαραμέτρων X_1 έως X_{10} . Στη συνέχεια οι παράγοντες Y υψώθηκαν στο

τετράγωνο, πράγμα που οδήγησε στην εξαγωγή των Y^2 δηλαδή των X μικροπαραμέτρων, οι οποίες είναι πάντα μη μηδενικές, εφόσον έχουν υψωθεί στο τετράγωνο. Ο δεύτερος περιορισμός που έπρεπε να εισαχθεί είναι η μικροπαραμέτρος X_2 να είναι μεγαλύτερη της μονάδας, καθώς αποτελεί το λόγο μέγιστης προς ελάχιστη ακτίνα των σφαιρών R_{\max}/R_{\min} .

Έτσι, οι τρεις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στη μέθοδο Wang, πήραν την ακόλουθη μορφή:

Μέτρο ελαστικότητας του Young

$$E = 6,7834 - 4,6525 * Y_2^2 - 1,3044 * Y_5^2 * Y_7^2 + 0,1027 * Y_1^2 * Y_{10}^2 - 5,5898 * 10^{-2} * Y_2^2 * Y_7^2 - 1,5100 * 10^{-2} * Y_7^2 * Y_{10}^2 + 1,3263 * 10^{-2} * Y_1^2 * Y_6^2 + 5,8384 * 10^{-3} * Y_4^2 * Y_{10}^2 + 2,7615 * 10^{-4} * Y_3^2 * Y_9^2 - 2,0260 * 10^{-6} * Y_6^2 * Y_9^2 - 7,2925 * 10^{-7} * Y_8^4$$

Λόγος του Poisson

$$\nu = 0,3085 + 1,4394 * 10^{-3} * Y_4^4 - 1,6556 * 10^{-3} * Y_7^4 + 2,8444 * 10^{-4} * Y_{10}^4 + 2,3271 * 10^{-3} * Y_1^2 * Y_4^2 - 2,2186 * 10^{-4} * Y_1^2 * Y_6^2 + 3,2799 * 10^{-2} * Y_1^2 * Y_7^2 - 1,8648 * 10^{-5} * Y_2^2 * Y_3^2 - 3,9220 * 10^{-4} * Y_2^2 * Y_4^2 + 1,9663 * 10^{-5} * Y_2^2 * Y_{10}^2 + 4,2036 * 10^{-4} * Y_5^2 * Y_8^2$$

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

$$UCS = 1,4712 - 0,6642 * Y_2^4 - 3,1422 * 10^{-7} * Y_9^4 + 0,2622 * Y_1^2 * Y_2^2 + 5,4664 * 10^{-2} * Y_1^2 * Y_3^2 - 5,0914 * 10^{-2} * Y_1^2 * Y_6^2 - 7,7426 * 10^{-3} * Y_3^2 * Y_4^2 - 6,3306 * 10^{-2} * Y_5^2 * Y_6^2 + 1,8929 * 10^{-2} * Y_5^2 * Y_8^2 + 3,0361 * 10^{-4} * Y_6^2 * Y_9^2 - 2,3362 * 10^{-5} * Y_8^2 * Y_9^2$$

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν τρεις ομάδες αρχικών τιμών, από τις οποίες προέκυψαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα, τα οποία παρατίθενται στον πίνακα 5.19. Οι αρχικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

1^η ομάδα τιμών [2/2/20/5/1,2/40/2/300/550/24]

2^η ομάδα τιμών [0/0/0/0/0/0/0/0/0]

3^η ομάδα τιμών [18/1,7/6/1,8/0,1/18/1,85/6,5/8/0]

Πίνακας 5.19. Μικροπαράμετροι που προέκυψαν από το Matlab με τη μέθοδο Wang

Μικροπαράμετροι		1 ^η Δοκιμή	2 ^η Δοκιμή	3 ^η Δοκιμή
X ₁	minRad(μm)	7,139	0	111,138
X ₂	Rmax/min	4,0048	0	16,8018
X ₃	BCM(Gpa)	88,5688	0	52,257
X ₄	kratio	15,0195	0	2,739
X ₅	fric	0	0	0,0137
X ₆	pb_BCM(Gpa)	6105,297	0	80,7338
X ₇	pb_kratio	3,4708	0	0,3457
X ₈	pb_ten(Mpa)	75132,7287	0	42,2474
X ₉	pb_coh(Mpa)	286888,46	0	64,0144
X ₁₀	st_dev(%)	170,5584	0	0

Όπως είναι εφικτό να παρατηρηθεί, οι τιμές διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με την επιλογή των μικροπαραμέτρων. Κάτι τέτοιο είναι λογικό, καθώς οι εξισώσεις που δίνει ο Wang είναι τρεις ενώ ο αριθμός των ζητούμενων μικροπαραμέτρων είναι δέκα, δηλαδή είναι βέβαιο ότι θα υπάρχει μεγάλος αριθμός συνδυασμών που μπορούν να ικανοποιούν τις εξισώσεις.

5.3.1. Προσομοιώσεις βάσει της μεθόδου Uniform Design

Οι Wang et al ακολούθησαν τη διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.5. και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Uniform Design κατέληξαν σε 12 συνδυασμούς των 10 μικροπαραμέτρων, που είναι εφικτό να δώσουν μία καλή εικόνα χωρίς να χρησιμοποιηθούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί, οι οποίοι είναι αδύνατο να εξεταστούν ιδιαίτερα στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Επιλέχθηκαν τιμές των μικροπαραμέτρων οι οποίες βρίσκονται πλησίον στο εύρος τιμών που επιλέχθηκε και στη μέθοδο του Yoon. Είναι αναγκαίο να επισημανθεί ότι η παράμετρος X₁₀ δεν χρησιμοποιείται στην ανάλυση, με αποτέλεσμα να λαμβάνει στις προσομοιώσεις την προκαθορισμένη (default) τιμή. Τα 12 επίπεδα που δημιουργήθηκαν παρατίθενται στον πίνακα 5.20.

Πίνακας 5.20. Τα 12 προσαρμοσμένα στην παρούσα εργασία επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέθοδο Wang

Επίπεδο	X ₁ (μm)	X ₂	X ₃ (GPa)	X ₄	X ₅	X ₆ (GPa)	X ₇	X ₈ (MPa)	X ₉ (MPa)
1	100	1,1	10	2	0,1	10	2	25	25
2	125	1,2	20	2,5	0,2	20	2,5	50	50
3	150	1,3	30	3	0,3	30	3	75	75
4	175	1,4	40	3,5	0,4	40	3,5	100	100
5	200	1,5	50	4	0,5	50	4	125	125
6	225	1,6	60	4,5	0,6	60	4,5	150	150
7	250	1,7	70	5	0,7	70	5	175	175
8	275	1,8	80	5,5	0,8	80	5,5	200	200
9	300	1,9	90	6	0,9	90	6	225	225
10	325	2	100	6,5	1	100	6,5	250	250
11	350	2,1	110	7	1,1	110	7	275	275
12	375	2,2	120	7,5	1,2	120	7,5	300	300

Ακολούθως, με τη βοήθεια του Uniform Design και τον πίνακα 4.6. προκύπτει ο πίνακας 5.21. Σε αυτόν παρουσιάζονται οι συνδυασμοί που χρησιμοποιήθηκαν τόσο σε προσομοιώσεις αντοχής σε μονοαξονική θλίψη όσο και σε αντοχής έμμεσου εφελκυσμού.

Πίνακας 5.21. Οι 12 συνδυασμοί μικροπαραμέτρων που προέκυψαν βάσει του UD για τη μέθοδο Wang

Συνδυασμός	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
1	100	1,2	30	3,5	0,5	60	5,5	225	250
2	125	1,4	60	5,5	1	120	3	125	175
3	150	1,6	90	7,5	0,2	50	7	25	100
4	175	1,8	120	3	0,7	110	4,5	250	25
5	200	2	20	5	1,2	40	2	150	275
6	225	2,2	50	7	0,4	100	6	50	200
7	250	1,1	80	2,5	0,9	30	3,5	275	125
8	275	1,3	110	4,5	0,1	90	7,5	175	50
9	300	1,5	10	6,5	0,6	20	5	75	300
10	325	1,7	40	2	1,1	80	2,5	300	225
11	350	1,9	70	4	0,3	10	6,5	200	150
12	375	2,1	100	6	0,8	70	4	100	75

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις με τους παραπάνω συνδυασμούς των μικροπαραμέτρων, προέκυψαν οι αντίστοιχες τιμές αντοχής UCS και BTS που δίνονται στον πίνακα 5.22.

Πίνακας 5.22. Αποτελέσματα των 12 προσομοιώσεων για UCS και BTS

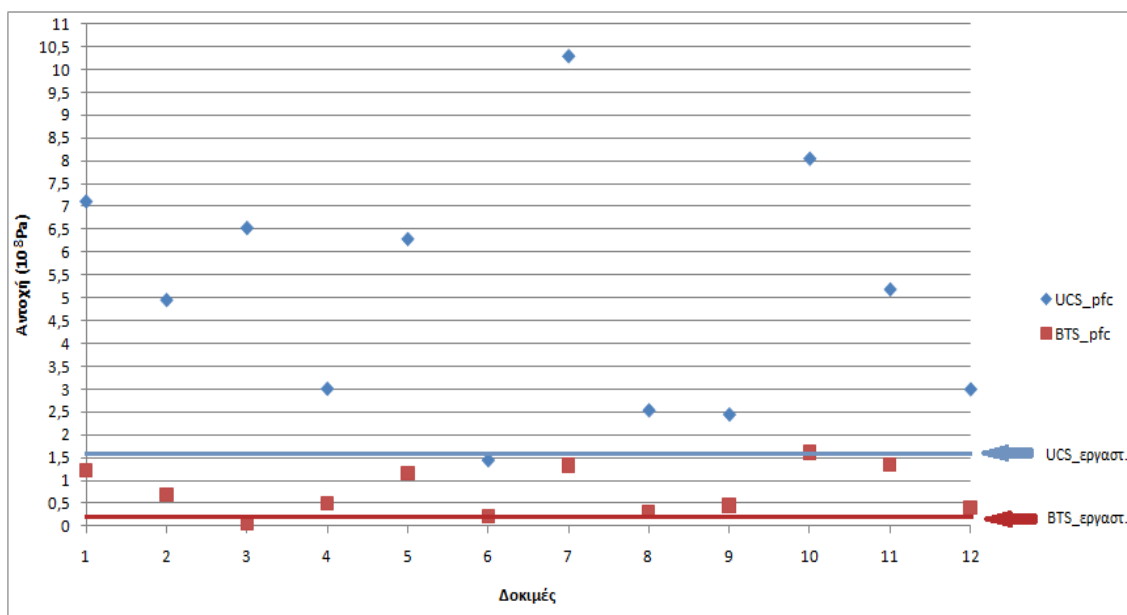
Δοκιμή	UCS (10^8 Pa)	BTS (10^8 Pa)
1	7,1056	1,222
2	4,9443	0,684
3	6,5234	0,076
4	2,9969	0,508
5	6,2806	1,169
6	1,4316	0,224
7	10,2919	1,328
8	2,5237	0,303
9	2,4324	0,451
10	8,044	1,613
11	5,1774	1,347
12	2,9859	0,396

5.3.2. Βαθμονόμηση μοντέλου

Βάσει των παραπάνω, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος «δοκιμών και σφαλμάτων», αν και η προσέγγιση της επίλυσης έγινε με διαφορετικό τρόπο σε αυτή την περίπτωση. Στην προκειμένη, η βαθμονόμηση γίνεται παράλληλα για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και σε έμμεσο εφελκυσμό. Αρχικά, υπολογίζονται οι λόγοι των αντοχών προσομοιώσεων προς τις εργαστηριακές τιμές. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.23., όπως και στο διάγραμμα 5.22. που περιλαμβάνει εργαστηριακές δοκιμές και προσομοιώσεις.

Πίνακας 5.23. Λόγοι αποτελεσμάτων προσομοιώσεων προς εργαστηριακά για UCS και BTS

Δοκιμή	UCS(pfc/εργ.)	BTS(pfc/εργ.)
1	4,318	6,235
2	3,005	3,49
3	3,964	0,388
4	1,821	2,592
5	3,817	5,964
6	0,871	1,143
7	6,255	6,776
8	1,534	1,546
9	1,478	2,301
10	4,888	8,23
11	3,146	6,872
12	1,815	2,02



Διάγραμμα 5.22. Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων προς εργαστηριακών για UCS και BTS

Τόσο από τον πίνακα 5.23. όσο και από το διάγραμμα 5.22. παρατηρείται ένα πολύ μεγάλο εύρος τιμών αντοχής. Για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, η δοκιμή που προσέγγισε πολύ καλά την πραγματική εργαστηριακή είναι η δοκιμή 6, για την οποία ο λόγος της τιμής αυτής προς την αντίστοιχη της εργαστηριακής δοκιμής είναι 0,871. Για την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό, η πλησιέστερη ήταν, επίσης, η δοκιμή 6 με λόγο 1,143.

Εφόσον η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε παράλληλα και για τις δύο δοκιμές, έπρεπε να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που έδωσαν παρόμοιες αποκλίσεις, ώστε να μεταβληθούν ανάλογα και να επιτευχθεί η συμφωνία τους με τις εργαστηριακές τιμές. Μία τέτοια δοκιμή φαίνεται πως είναι η 8, καθώς ο λόγος για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι 1,534 και ο αντίστοιχος της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό είναι 1,546. Οι αρχικές τιμές των μικροπαραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον πίνακα 5.24.

Πίνακας 5.24. Μικροπαραμέτροι που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές για τη βαθμονόμηση του μοντέλου της μεθόδου Wang

minRad (μm)	Rmax/min	BCM (Gpa)	kratio	fric	pb_BCM (Gpa)	pb_kratio	pb_ten (Mpa)	pb_coh (Mpa)	st_dev (%)
275	1,3	110	4,5	0,1	90	7,5	175	50	default

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δοκιμών της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και έμμεσο εφελκυσμό είναι 252,37 MPa και 30,3 MPa αντίστοιχα, όπως αναγράφεται και παραπάνω. Εφόσον η πιο καθοριστική μικροπαραμέτρος για τις αντοχές είναι η ορθή αντοχή των παράλληλων δεσμών, ή pb_ten όπως ορίζεται στο PFC και η δεύτερη σημαντικότερη είναι η διατμητική αντοχή των παράλληλων

δεσμών, είναι προφανές ότι αυτές θα μεταβληθούν κατάλληλα για την επίτευξη συμφωνίας, σε πρώτη φάση.

Η μεταβολή της ορθής αντοχής από 175 σε 120 MPa δίνει UCS = 194,8 MPa και BTS = 13,2 MPa. Είναι φανερό ότι χρειάζεται εκ νέου μείωση της τιμής της ορθής αντοχής, που ορίζεται στη συνέχεια στα 90 MPa και δίνει UCS = 167,52 MPa και BTS = 12,2 MPa. Βάσει των παραπάνω μετατροπών και αποτελεσμάτων, προσεγγίστηκε η εργαστηριακή τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Παρόλα αυτά, η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό, έπεσε σε επίπεδα χαμηλότερα από το ζητούμενο, πράγμα που σημαίνει ότι είναι απαραίτητη η μεταβολή κάποιας μικροπαραμέτρου εκτός των δύο κύριων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Αποφασίστηκε αυτή να είναι η μέγιστη ακτίνα των σφαιρών. Η μεταβολή της μέγιστης ακτίνας μεταβλήθηκε από 0,4 mm έως 0,55 mm, δίνοντας τα αποτελέσματα του πίνακα 5.25.

Πίνακας 5.25. Μεταβολή της μέγιστης ακτίνας σωματιδίων κατά τη βαθμονόμηση

Μέγιστη ακτίνα σωματιδίων (mm)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (MPa)
0,40	159,17	20,2
0,45	151,77	19,5
0,50	154,58	22,3
0,55	160,97	17,5

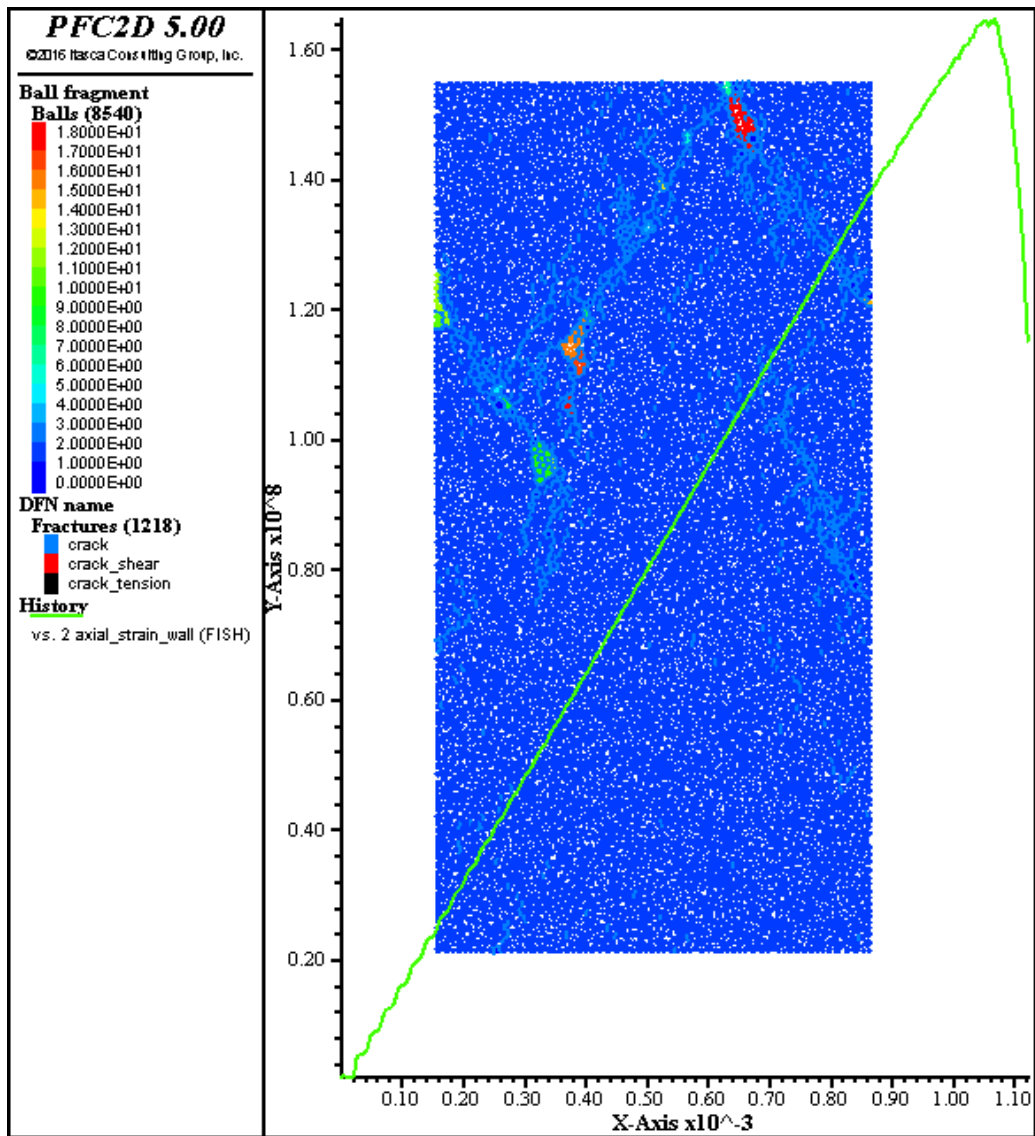
Από την ανάλυση εξάγεται η τιμή 0,55 της μέγιστης ακτίνας, καθώς τόσο η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη όσο και σε έμμεσο εφελκυσμό είναι λίγο χαμηλότερες από τις επιθυμητές. Μία μικρή αύξηση της ορθής αντοχής των δεσμών στα 92 MPa, οδηγεί σε αύξηση των δύο αντοχών σε 163,35 MPa και 19,5 MPa αντίστοιχα. Τέλος, για ορθή αντοχή 92,5 MPa, η UCS γίνεται 164,71 MPa ενώ η BTS παραμένει 19,5 MPa.

Οι τιμές αυτές βρίσκονται σε σχεδόν απόλυτη συμφωνία με τις εργαστηριακές τιμές. Ο λόγος των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων προς τα αντίστοιχα πραγματικά είναι:

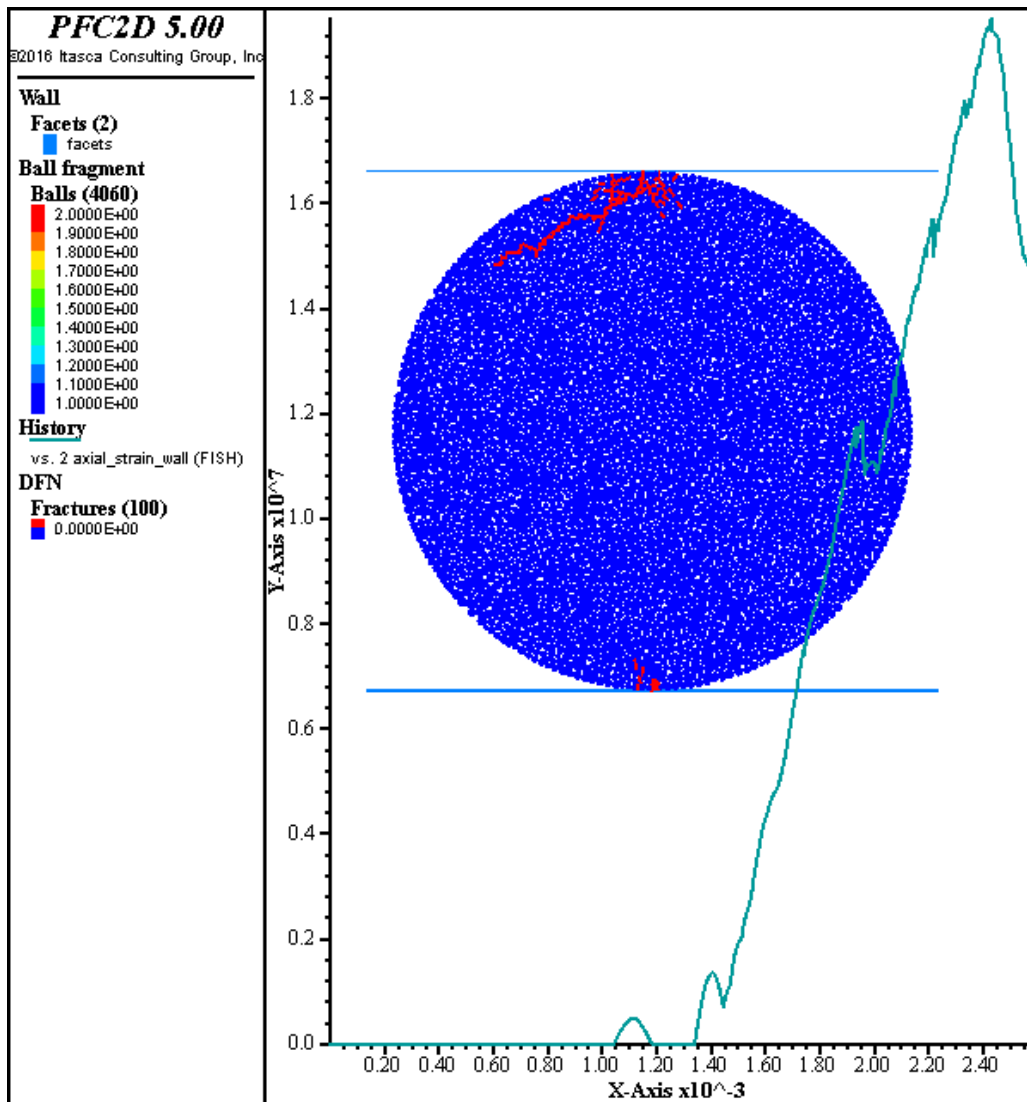
$$\text{Λόγος } \frac{UCS_{pfc}}{UCS_{εργαστ}} = \frac{164,71}{164,55} = 1,001$$

$$\text{Λόγος } \frac{BTS_{pfc}}{BTS_{εργαστ}} = \frac{19,5}{19,6} = 0,995$$

Τα βαθμονομημένα μοντέλα προσομοίωσης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε έμμεσο εφελκυσμό φαίνονται στα σχήματα 5.8 και 5.9.



Σχήμα 5.8. Προσομοίωση δοκιμής μονοαξονικής θλίψης για το βαθμονομημένο μοντέλο με τη μέθοδο Wang



Σχήμα 5.9. Προσομοίωση δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού για το βαθμονομημένο μοντέλο με τη μέθοδο Wang

5.4. Σύνοψη μικροπαραμέτρων από τις βαθμονομήσεις

Οι μικροπαραμέτροι που αποφασίστηκε ότι οδηγούν στην καλύτερη δυνατή προσέγγιση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων, με βάση τη μέθοδο Yoon, δίνονται στον πίνακα 5.26.

Πίνακας 5.26. Μικροπαραμέτροι που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου για τη μέθοδο Yoon

BCM (GPa)	KNKS	pb_kratio	FRIC	NBS (MPa)	SBS (MPa)	ROSD	RAD (mm)
84,64	3,991	2,5	0,749	38,875	45,3	default	0,361-0,59926

Και με τη μέθοδο Wang στον πίνακα 5.27.

Πίνακας 5.27. Μικροπαράμετροι που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου για τη μέθοδο Wang

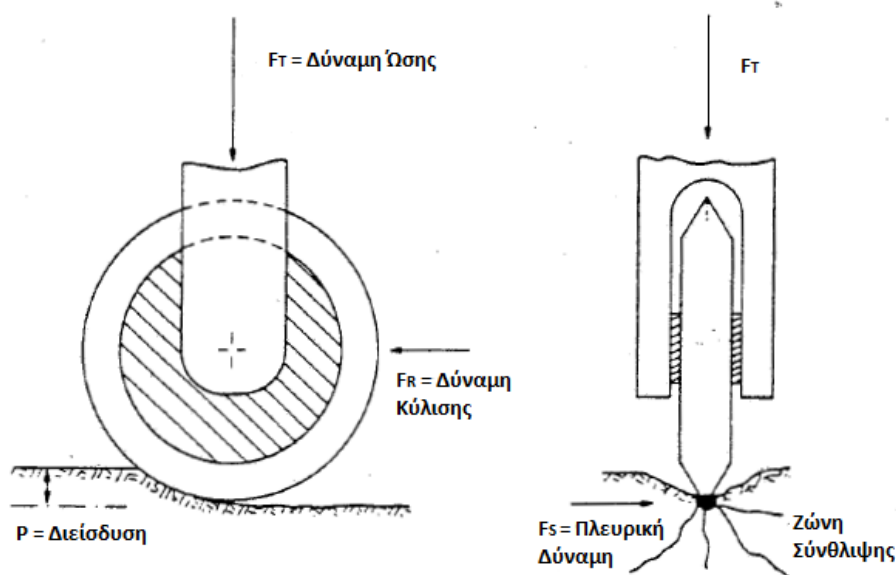
minRad (μm)	Rmax/min	BCM (Gpa)	kratio	fric	pb_BCM (Gpa)	pb_kratio	pb_ten (Mpa)	pb_coh (Mpa)	st_dev (%)
275	2	110	4,5	0,1	90	3	92,5	38	default

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΚΟΠΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΟΠΗΣ ΜΕ ΚΟΠΤΙΚΑ ΔΙΣΚΟΥ

6.1. Κοπτικά εργαλεία

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες κοπτικών εργαλείων για την μηχανική όρυξη των πετρωμάτων. Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από τα κοπτικά εργαλεία συρόμενου τύπου (drag picks) και η δεύτερη από τα κοπτικά εργαλεία τύπου δίσκου (disk cutters). Η κύρια διαφορά τους έγκειται στη γεωμετρία τους. Παρόλα αυτά, διαφορά συναντάται και στον τρόπο προσβολής του πετρώματος και συνεπώς στον μηχανισμό αστοχίας του. Ως εκ τούτου, διέπονται από διαφορετικές θεωρίες κοπής.

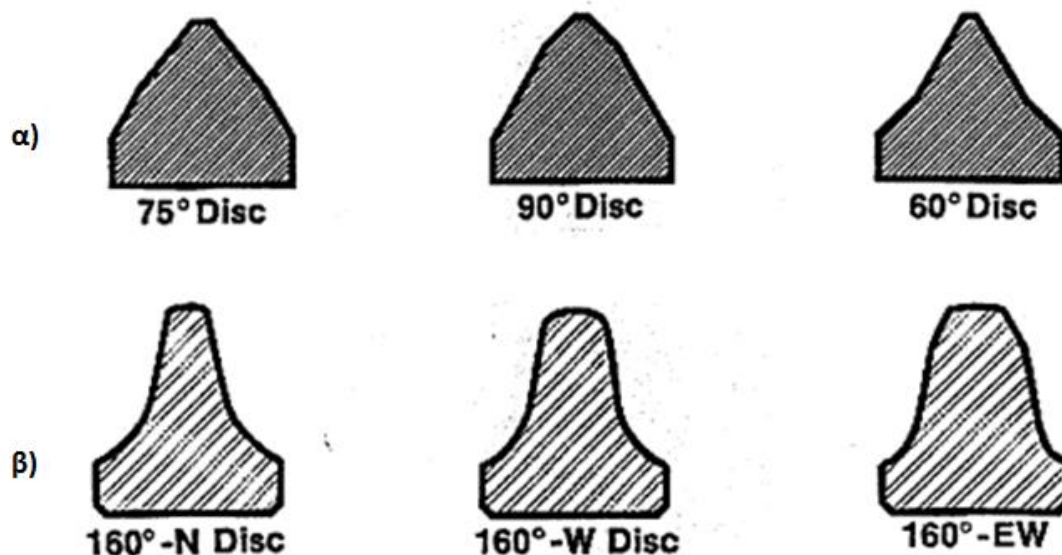
Τα κοπτικά εργαλεία συρόμενου τύπου θραύουν το πέτρωμα εφαρμόζοντας σε αυτό δύναμη, η οποία είναι παράλληλη στην επιφάνεια του (δύναμη κοπής). Η κάθετη δύναμη στην επιφάνεια του πετρώματος (ώθηση) διατηρεί το κοπτικό στο επιθυμητό βάθος κοπής. Αντίθετα στα κοπτικά εργαλεία τύπου δίσκου η κύρια δύναμη που προκαλεί την θραύση του πετρώματος είναι η δύναμη ώσης, όπως παρατηρείται στο σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1. Δοκιμή κοπής με κοπτικά δίσκου και κύριες δυνάμεις που αναπτύσσονται (Πηγή: Fowell, 1993)

Τα κοπτικά τύπου δίσκου είναι αυτά τα οποία χρησιμοποιούνται στην παρούσα προσομοίωση. Τα κοπτικά αυτού του τύπου επιλέγονται, συνήθως, για κοπή πετρωμάτων με υψηλή αντοχή και συνεκτικότητα, όπου δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν κοπτικά συρόμενου τύπου. Το κύριο ζητούμενο από ένα κοπτικό δίσκου είναι να αναπτύσσει την απαραίτητη δύναμη ώσης ώστε να μπορεί να διεισδύει στο πέτρωμα.

Τα πρώτα κατασκευασμένα κοπτικά δίσκου είχαν κωνική διατομή (V – shaped). Στη συνέχεια και μετά από τις απαραίτητες δοκιμές, βελτιστοποιήθηκε η γεωμετρία του δίσκου, καθώς προτάθηκαν τα κοπτικά σταθερής διατομής CCS (Constant Cross Section). Λόγω της γεωμετρίας τους, έχουν τη δυνατότητα να μην χάνουν την ικανότητα διείσδυσης και κοπής για μεγαλύτερο διάστημα, παρά τη φθορά τους. Τα κοπτικά των δύο αυτών τύπων απεικονίζονται στο σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2. α) Κοπτικά δίσκου τύπου V-shaped β) Κοπτικά δίσκου τύπου CCS

Οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα ενός κοπτικού τύπου δίσκου είναι:

- α) το βάθος διείσδυσης
- β) η γωνία της κοπτικής ακμής
- γ) η διάμετρος δίσκου
- δ) η απόσταση γειτονικών κοπτικών

Συγκεκριμένα, παρατηρούνται διαφορές ανάλογα με την αυξομείωση των παραμέτρων. Η αύξηση του βάθους διείσδυσης, οδηγεί σε μείωση της ειδικής ενέργειας κοπής του πετρώματος. Όσον αφορά στη γωνία της κοπτικής ακμής, οποιαδήποτε αύξησή της έχει σαν αποτέλεσμα ταυτόχρονη αύξηση και των ασκούμενων δυνάμεων στο υπό κοπή πέτρωμα.

Η επίδραση της διαμέτρου του δίσκου στη δύναμη κύλισης είναι σχετικά μικρή ενώ στην ειδική ενέργεια είναι μηδενική. Αντίθετα, η απαίτηση σε δύναμη ώσης αυξάνει με την αύξηση της διαμέτρου. Στην πράξη, σε φθοροποιά και πετρώματα υψηλής αντοχής, συνηθίζεται η χρήση δίσκων μεγάλων διαμέτρων, με σκοπό τη μείωση της φθοράς του δίσκου. Τέλος, η απόσταση των γειτονικών κοπτικών είναι μείζονος σημασίας. Η βέλτιστη απόσταση δύο γειτονικών κοπτικών είναι αυτή στην οποία

αλληλεπιδρούν οι αυλακώσεις που δημιουργούν οι δίσκοι. Ο αντίστοιχος λόγος διεύθυνσης προς απόσταση p/s που δίνει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα κυμαίνεται μεταξύ 10-17:1. (Fowell, 1993)

6.2. Κοπή πετρωμάτων με κοπτικά τύπου δίσκου

Η εργαστηριακή δοκιμή κοπής των πετρωμάτων με κοπτικά τύπου δίσκου εκτελείται για τον προσδιορισμό:

α) των δυνάμεων που δρουν επί του κοπτικού δίσκου. Οι δυνάμεις αυτές είναι οι δυνάμεις κύλισης (rolling force), οι δυνάμεις ώσης (thrust force) και οι πλευρικές δυνάμεις (sideway force).

β) της ειδικής ενέργειας κοπής τους (Specific Energy). Ως ειδική ενέργεια κοπής ορίζεται η ενέργεια που απαιτείται για την εξόρυξη μονάδας συμπαγούς όγκου πετρώματος. Στο σύστημα SI οι μονάδες της είναι J/m^3 .

γ) του βέλτιστου λόγου s/p (απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπών/βάθος κοπής), για τον οποίο λαμβάνεται η ελάχιστη ειδική ενέργεια κοπής.

6.2.1. Εργαστηριακός εξοπλισμός

Για τη δοκιμή της κοπής πετρωμάτων σε εργαστηριακό επίπεδο χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός:

1) Μηχανή δοκιμής κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου, η οποία περιλαμβάνει:

α) Κυψέλη μέτρησης φορτίου (δυναμόμετρο) (Load cell). Είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο, αποτελεί τη διάταξη έδρασης του κοπτικού δίσκου και παρεμβάλλεται μεταξύ αυτού και του πλαισίου της μηχανής. Αποτελείται από 4 σκέλη (legs), σε κάθε ένα από τα οποία είναι προσαρμοσμένη μια πλήρης γέφυρα Wheatstone, αποτελούμενη από 4 ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα (strain gages), με την οποία καταγράφεται συνεχώς η παραμόρφωση κάθε σκέλους υπό την επίδραση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων.

β) Τράπεζα τοποθέτησης δοκιμίου. Με τη βοήθεια δύο χειροτροχών και μέσω υδραυλικού εμβόλου είναι δυνατή η εντός ορίων γραμμική μετακίνηση της τράπεζας κατά την κατακόρυφο και κατά την οριζόντιο, κάθετα στη διεύθυνση κοπής. Έτσι είναι δυνατή η ρύθμιση της θέσης της τράπεζας ώστε η κοπή να γίνεται στο επιθυμητό βάθος (p) και στην επιθυμητή οριζόντια απόσταση (s) από την προηγούμενη κοπή.

γ) Κοπτικό δίσκο διαμέτρου 12cm.

2) Σύστημα συλλογής και καταγραφής των μετρήσεων (Data Acquisition System (DAQ)) του οίκου HBM, στο οποίο γίνεται η κατάλληλη προσαρμογή του σήματος της μέτρησης (excitation-signal conditioning).

3) Ηλεκτρονικό Υπολογιστή και λογισμικό καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων (CATMAN του οίκου HBM) το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του συστήματος συλλογής και καταγραφής των μετρήσεων.

Άποψη του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται κατά τη δοκιμή κοπής δίνεται στο σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3. Απεικόνιση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού δοκιμής κοπής (Πηγή: Πατσίδης, 2012)

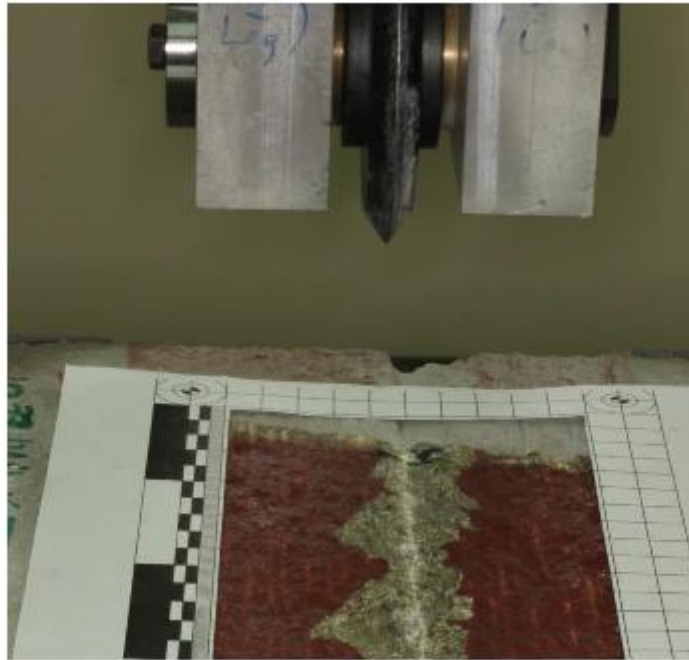
6.2.2. Πειραματική διαδικασία

Αρχικά, λαμβάνει χώρα ένα είδος προετοιμασίας που περιλαμβάνει τη διαμόρφωση (trimming) της ελεύθερης επιφάνειας των πετρωμάτων. Η προετοιμασία αυτή αποτελείται από διαδοχικές κοπές βάθους 1 mm και απόστασης 10 mm μεταξύ τους.

Στη συνέχεια ξεκινά το κύριο μέρος της πειραματικής διαδικασίας, απεικόνιση της οποίας δίνεται στο σχήμα 6.4. Ακολουθούν με χρονική σειρά τα παρακάτω στάδια:

- Το δοκίμιο τοποθετείται και συσφίγγεται στην τράπεζα.

- Ρυθμίζεται το βάθος κοπής στο επιθυμητό, με τη βοήθεια του χειροτροχού που επιτρέπει την κατακόρυφη μετακίνηση της τράπεζας. Ρυθμίζεται επίσης και η οριζόντια θέση του δοκιμίου στην επιθυμητή, με τη βοήθεια του δεύτερου χειροτροχού.
- Μετακινείται η τράπεζα στην αρχική θέση της διαδρομής.
- Στον ηλεκτρονικό υπολογιστή τίθεται σε λειτουργία το λογισμικό καταγραφής των μετρήσεων και γίνονται οι επιθυμητές ρυθμίσεις ώστε να είναι έτοιμο για καταγραφή. Γίνεται μηδενισμός του σήματος της μέτρησης των τεσσάρων σκελών του δυναμόμετρου και επιλέγεται ο ρυθμός δειγματοληψίας.
- Τίθεται σε λειτουργία ο κινητήρας της μηχανής.
- Ξεκινά η καταγραφή των μετρήσεων μέσω του λογισμικού.
- Εκτελείται η δοκιμή κοπής με συνεχή καταγραφή των μετρήσεων.
- Ολοκληρώνεται η δοκιμή, με το δοκίμιο στην τελική θέση της διαδρομής.
- Σταματά η καταγραφή των μετρήσεων μέσω του λογισμικού.
- Σημειώνεται και μετράται το μήκος κοπής του πετρώματος. Για την αποφυγή των μεταβατικών φαινομένων στις επαφές πετρώματος – κονιάματος, επιλέγεται το μήκος κοπής να απέχει τουλάχιστον 10mm από αυτές εκατέρωθεν.
- Συγκεντρώνονται σχολαστικά τα θραύσματα (chips) του πετρώματος που αντιστοιχούν στο μήκος κοπής, όπως αυτό σημειώθηκε προηγουμένως. Στη συνέχεια συλλέγονται σε διαφανές σακουλάκι γνωστής μάζας και μετράται η μάζα τους με ζυγαριά ακριβείας.
- Μετακινείται το δοκίμιο στην αρχική θέση της διαδρομής και καθαρίζεται με πεπιεσμένο αέρα.
- Μετακινείται το δοκίμιο οριζόντια (κάθετα στη διεύθυνση κοπής), ώστε η οριζόντια απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κοπών να είναι η επιθυμητή.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή για τη νέα κοπή.



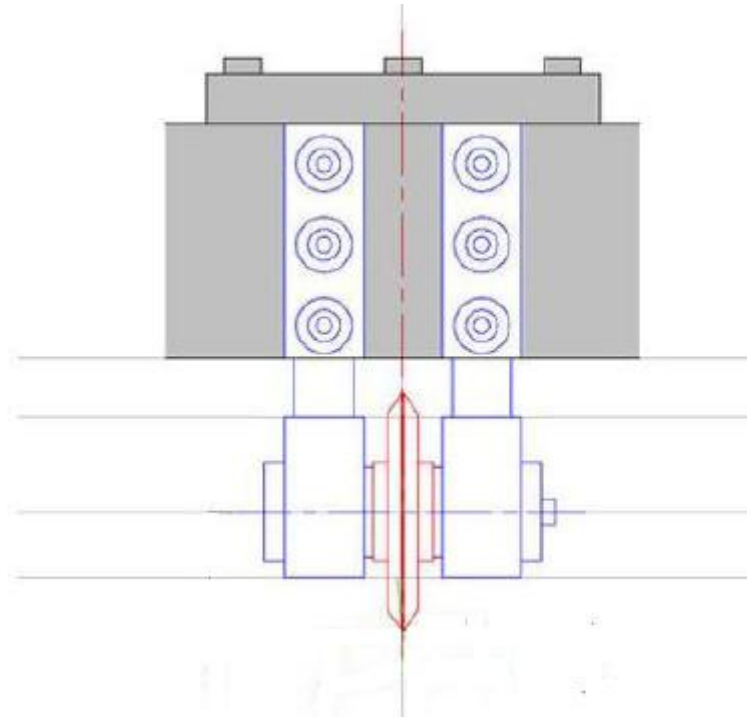
Σχήμα 6.4. Απεικόνιση του αποτελέσματος κοπής από δείγμα σχιστώδη ορθογενεσίου (Πηγή: Πατσίδης, 2012)

Την πειραματική διαδικασία διαδέχεται η καταγραφή των μέσων και μέγιστων δυνάμεων (δυνάμεις κύλισης (FR), ώσης (FN) και πλάγιες (FS) δυνάμεις) και της εξορυγμένης μάζας του πετρώματος.

6.2.3. Γεωμετρία κοπής

Η τράπεζα, όπου τοποθετείται το υπό κοπή δοκίμιο, είναι σε θέση να δεχθεί πετρώματα συγκεκριμένων διαστάσεων. Το μήκος των δοκιμίων πρέπει να είναι έως 200 mm, ενώ το ύψος τους έως 95 mm.

Το κοπτικό τύπου δίσκου είναι κατασκευασμένο από υλικό «Hot Work Tool Steel», το οποίο είναι ειδικά διαμορφωμένο για υψηλότερη αντοχή λόγω των συνθηκών στις οποίες επιβάλλεται να λειτουργεί. Η πυκνότητά του είναι 7800 gr/cm^3 . Όσον αφορά στις μηχανικές του παραμέτρους, έχει μέτρο ελαστικότητας $E 210 \text{ GPa}$, αντοχή σε εφελκυσμό 1650 MPa και λόγο του Poisson $0,3$.



Σχήμα 6.5. Απεικόνιση της Μηχανής Κοπής (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5., ο δίσκος αποτελείται από μία εξωτερική και μία εσωτερική διάμετρο. Η εξωτερική είναι 120 mm και η εσωτερική, η οποία συνδέεται με τη μηχανή, 40 mm. Το πάχος του δίσκου είναι 15 mm, το πλάτος της ακμής του κοπτικού είναι 1 mm, ενώ η γωνία ακμής του δίσκου είναι 70°. Τέλος, η ταχύτητα κοπής του δίσκου είναι 58,3 mm/s.

6.3. Δοκιμή κοπής σε εργαστηριακό επίπεδο

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5, το πέτρωμα που προσομοιώθηκε είναι ο σχιστώδης ορθογνεύσιος που προέρχεται από την περιοχή της δυτικής Ικαρίας. Οι εργαστηριακές δοκιμές τόσο της κοπής όσο και άλλων δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της μακροσκοπικής απόκρισης του πετρώματος έλαβαν χώρα κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μεταπτυχιακής εργασίας του Πατσιδής Γ., 2012.

Κατά την εκπόνηση της ανωτέρω εργασίας, πραγματοποιήθηκε μεγάλος αριθμός δοκιμών κοπής σχιστώδους ορθογνευσίου με κοπτικό εργαλείο τύπου δίσκου. Από αυτές τις δοκιμές επιλέχθηκε ένας μικρός αριθμός, ο οποίος μπορεί να συσχετιστεί με την προσομοίωση του μοντέλου, καθώς αφορά στην κοπή χωρίς αλληλεπίδραση κοπτικών. Οι κοπές που παρατίθενται στα σχήματα 6.6. και 6.7. αντιπροσωπεύουν τις δύο ομάδες δοκιμών που έλαβαν χώρα ανάλογα με το αν ο δίσκος κινείται παράλληλα ή κάθετα με τη σχιστότητα του ορθογνευσίου. Οι κοπές διαφέρουν επιπλέον στο βάθος κοπής το οποίο μεταβάλλεται σε κάθε δοκιμή.

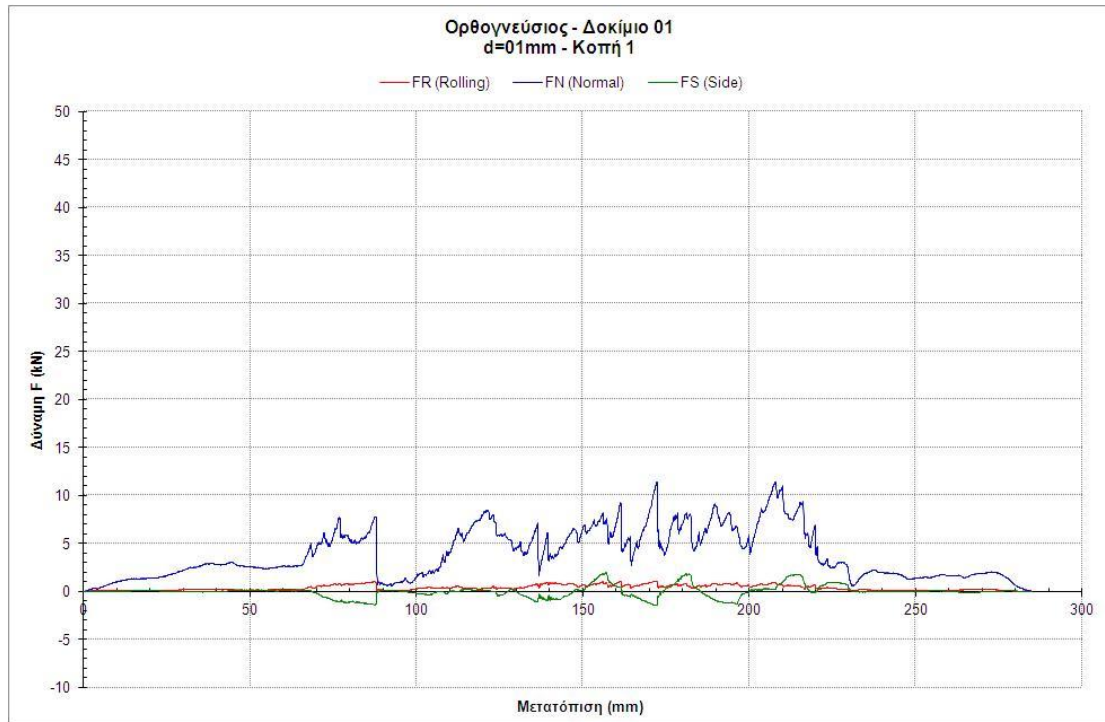


Σχήμα 6.6. Κοπή σχιστώδους ορθογενεσίου σε βάθος 2 mm // της σχιστότητας του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)



Σχήμα 6.7. Κοπή σχιστώδους ορθογενεσίου σε βάθος 2 mm \perp της σχιστότητας του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)

Η πρώτη ομάδα δοκιμών έγινε με την κίνηση του δίσκου να πραγματοποιείται παράλληλα στη σχιστότητα του πετρώματος. Η πρώτη δοκιμή κοπής της πρώτης ομάδας με δίσκο που δεν αλληλεπιδρά με γειτονικά κοπτικά έγινε σε βάθος διείσδυσης 1 mm. Στο διάγραμμα 6.1. παρουσιάζονται οι δυνάμεις κοπής που μετρήθηκαν.



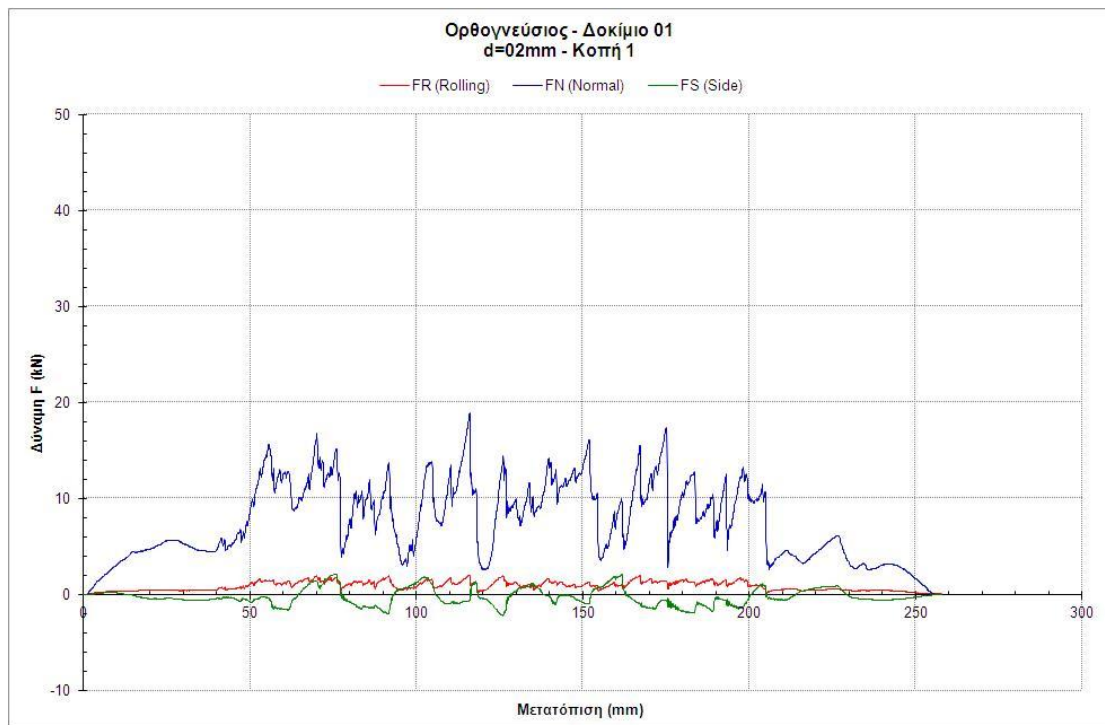
Διάγραμμα 6.1. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 1 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

Το καθαρό μήκος της κοπής είναι 0,145 m το οποίο ξεκινά στα 75 mm και καταλήγει στα 220 mm. Στο διάστημα αυτό παρατηρείται η ψαθυρή συμπεριφορά του πετρώματος, καθώς υπάρχουν σχετικά διακριτοί κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης και μεγάλη διακύμανση των τιμών της δύναμης. Παρόμοια συμπεριφορά αναμένεται και στις υπόλοιπες δοκιμές κοπής, λόγω του ότι εξετάζεται το ίδιο πέτρωμα. Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων δίνονται στον πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 1 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

	Ορθή δύναμη (kN)	Δύναμη κύλισης (kN)
Μέση δύναμη	5,666	0,575
Μέγιστη δύναμη	11,446	1,059

Η δεύτερη δοκιμή κοπής πραγματοποιήθηκε σε βάθος 2 mm και οι δυνάμεις που μετρήθηκαν φαίνονται στο διάγραμμα 6.2.



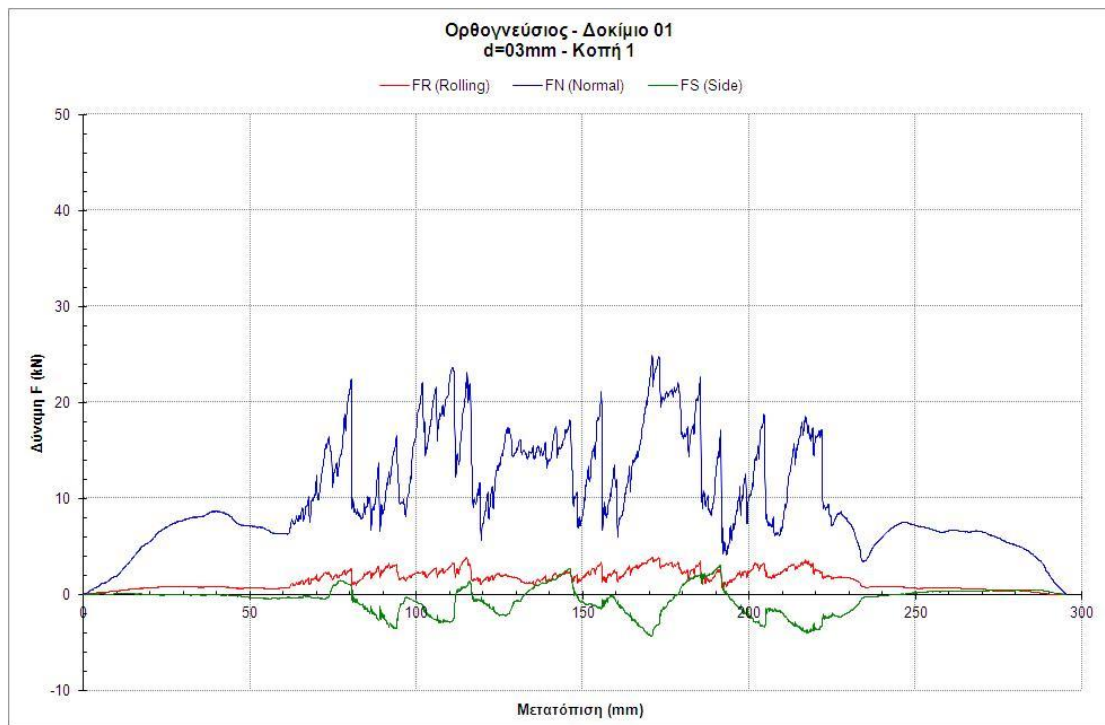
Διάγραμμα 6.2. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 2 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

Το καθαρό μήκος της κοπής είναι 0,144 m το οποίο ξεκινά στα 54 mm και καταλήγει στα 198 mm. Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων δίνονται στον πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 2 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

	Ορθή δύναμη (kN)	Δύναμη κύλισης (kN)
Μέση δύναμη	9,952	1,176
Μέγιστη δύναμη	18,954	2,004

Η τρίτη δοκιμή κοπής της πρώτης ομάδας έγινε σε βάθος 3 mm και οι δυνάμεις που μετρήθηκαν φαίνονται στο διάγραμμα 6.3.



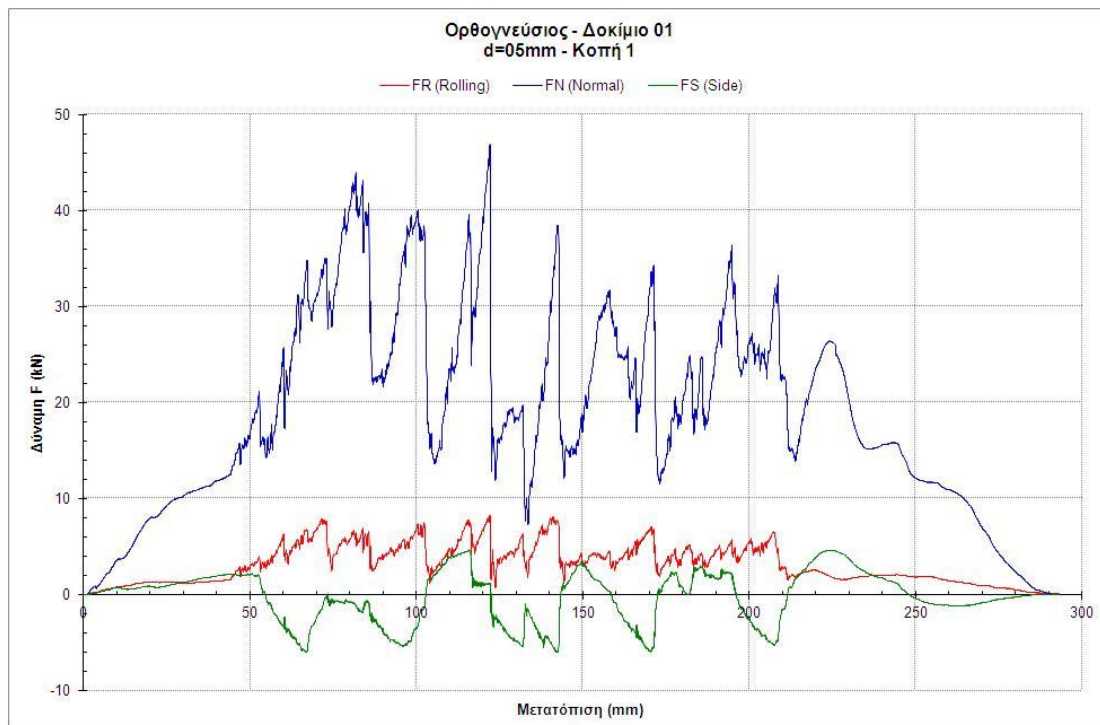
Διάγραμμα 6.3. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 3 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)

Το καθαρό μήκος της κοπής είναι 0,147 m το οποίο ξεκινά στα 77 mm και καταλήγει στα 224 mm. Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 3 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσίδης, 2012)

	Ορθή δύναμη (kN)	Δύναμη κύλισης (kN)
Μέση δύναμη	13,935	2,252
Μέγιστη δύναμη	24,952	3,899

Η τέταρτη δοκιμή κοπής πραγματοποιήθηκε σε βάθος 5 mm. Οι μετρούμενες δυνάμεις κοπής παρουσιάζονται στο διάγραμμα 6.4.



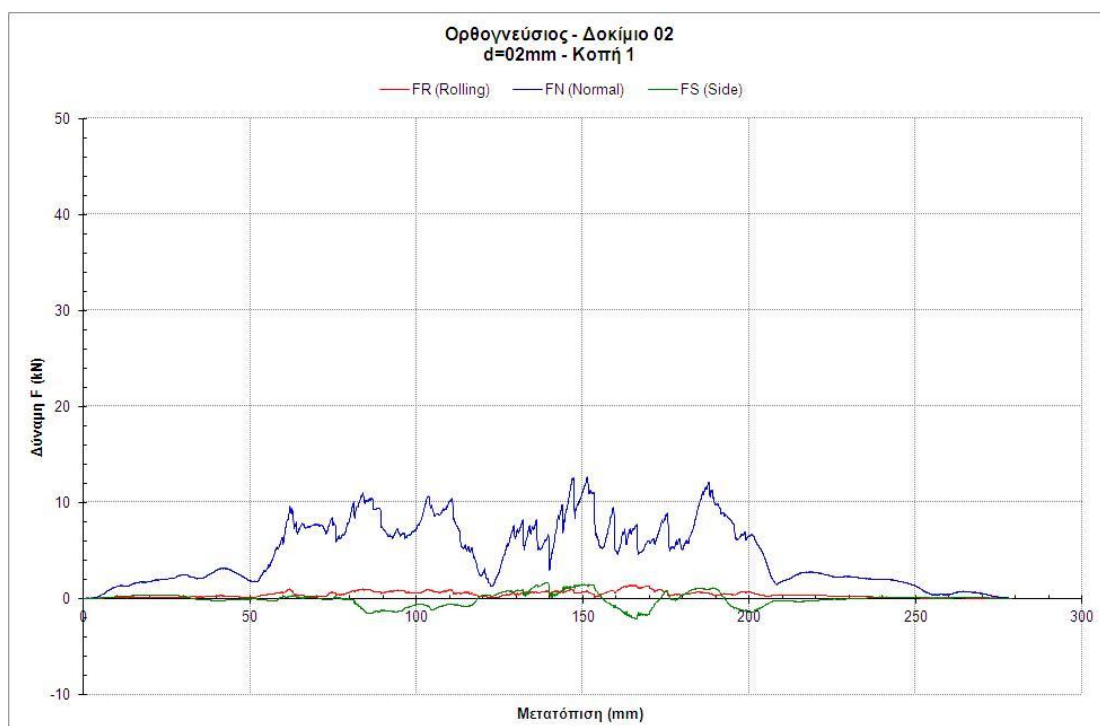
Διάγραμμα 6.4. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 5 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

Το καθαρό μήκος της κοπής είναι 0,140 m το οποίο ξεκινά στα 70 mm και καταλήγει στα 210 mm. Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων δίνονται στο διάγραμμα 6.4.

Πίνακας 6.4. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 5 mm // στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

	Ορθή δύναμη (kN)	Δύναμη κύλισης (kN)
Μέση δύναμη	25,516	4,644
Μέγιστη δύναμη	46,916	8,243

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις κοπές της δεύτερης ομάδας που πραγματοποιήθηκαν κάθετα στη σχιστότητα των πετρωμάτων. Η πρώτη δοκιμή κοπής της δεύτερης ομάδας με δίσκο που δεν αλληλεπιδρά με γειτονικά κοπτικά έγινε σε βάθος διείσδυσης 2 mm. Οι δυνάμεις κοπής παρουσιάζονται στο διάγραμμα 6.5.



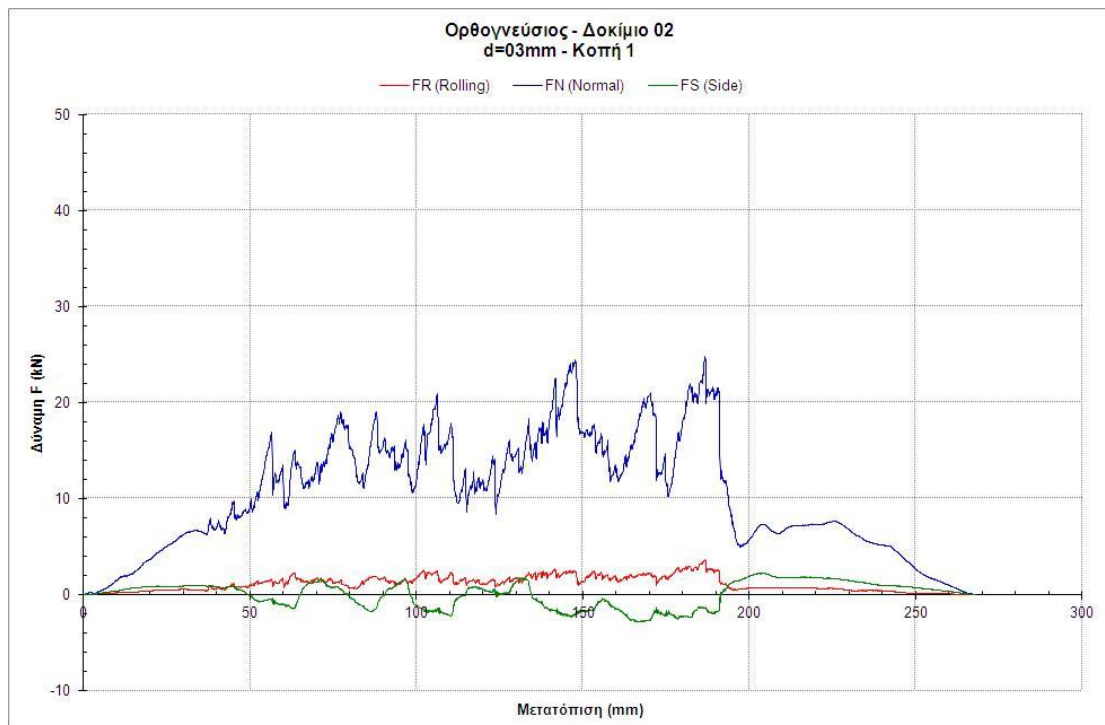
Διάγραμμα 6.5. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκίμηση σε βάθος 2 mm \perp στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

Το καθαρό μήκος της κοπής είναι 0,144 m το οποίο ξεκινά στα 59 mm και καταλήγει στα 203 mm. Στο διάστημα αυτό παρατηρείται η ψαθυρή συμπεριφορά του πετρώματος, καθώς υπάρχουν σχετικά διακριτοί κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης και μεγάλη διακύμανση των τιμών της δύναμης. Παρόμοια συμπεριφορά αναμένεται και στις υπόλοιπες δοκιμές κοπής, λόγω του ότι εξετάζεται το ίδιο πέτρωμα. Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων δίνονται στον πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.5. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκίμηση σε βάθος 2 mm \perp στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

	Ορθή δύναμη (kN)	Δύναμη κύλισης (kN)
Μέση δύναμη	7,294	0,613
Μέγιστη δύναμη	12,634	1,374

Η δεύτερη δοκιμή κοπής της δεύτερης ομάδας πραγματοποιήθηκε σε βάθος 3 mm και οι μετρούμενες δυνάμεις φαίνονται στο διάγραμμα 6.6.



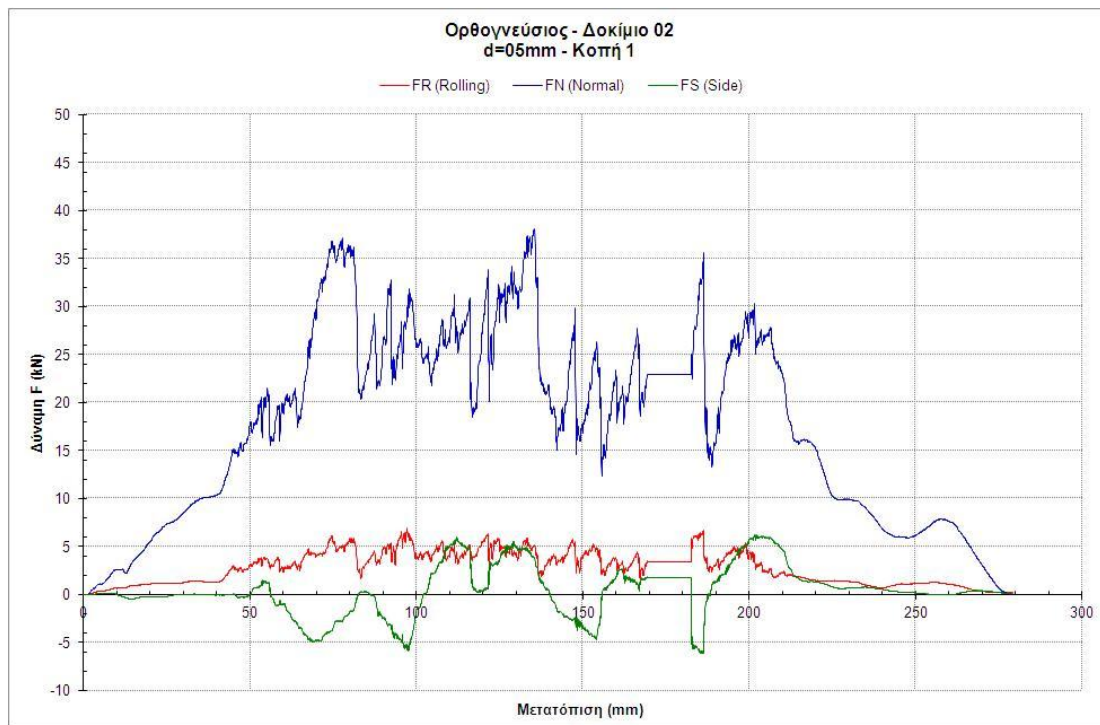
Διάγραμμα 6.6. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 3 mm \perp στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

Το καθαρό μήκος της κοπής είναι 0,148 m το οποίο ξεκινά στα 49 mm και καταλήγει στα 197 mm. Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 3 mm \perp στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

	Ορθή δύναμη (kN)	Δύναμη κύλισης (kN)
Μέση δύναμη	14,954	1,672
Μέγιστη δύναμη	24,810	3,632

Η τελευταία δοκιμή της δεύτερης ομάδας που σχετίζεται με την παρούσα εργασία έγινε σε βάθος κοπής 5 mm. Οι δυνάμεις κοπής που προέκυψαν παρουσιάζονται στο διάγραμμα 6.7.



Διάγραμμα 6.7. Δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 5 mm \perp στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

Το καθαρό μήκος της κοπής είναι 0,151 m το οποίο ξεκινά στα 59 mm και καταλήγει στα 210 mm. Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων φαίνονται στον πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για εργαστηριακή δοκιμή σε βάθος 5 mm \perp στη σχιστότητα του πετρώματος (Πηγή: Πατσιδής, 2012)

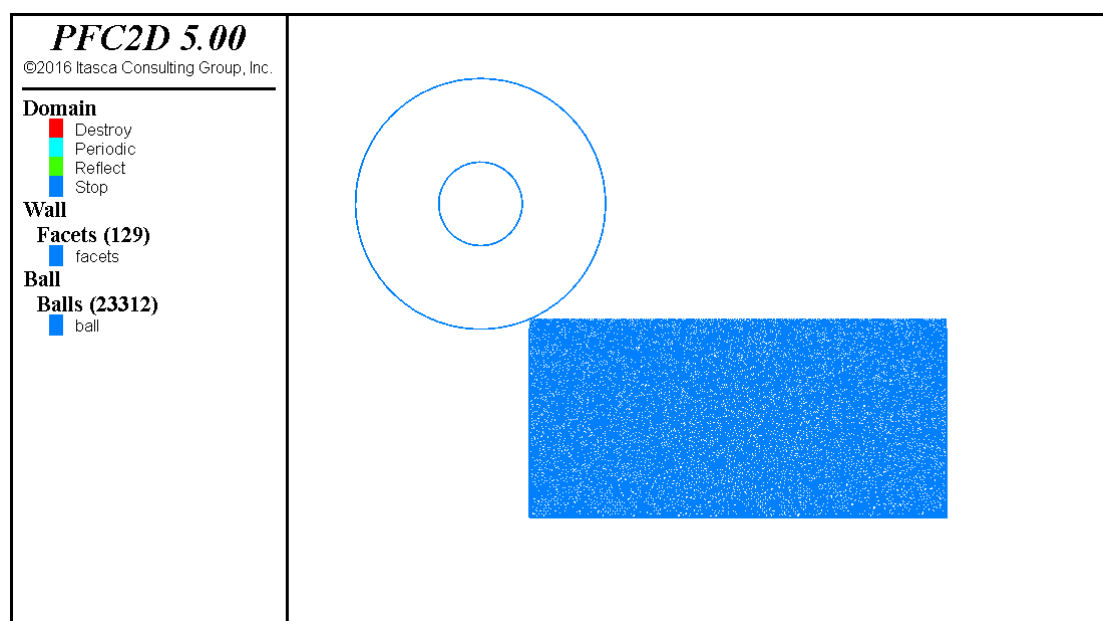
	Ορθή δύναμη (kN)	Δύναμη κύλισης (kN)
Μέση δύναμη	25,264	4,029
Μέγιστη δύναμη	38,105	6,954

Η μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος και στις δύο ομάδες φαίνεται να είναι παρόμοια, με ευδιάκριτους κύκλους φόρτισης – αποφόρτισης και μεγάλη διακύμανση στις μετρούμενες δυνάμεις. Επιπλέον, παρατηρείται η αύξηση των δυνάμεων, τόσο της ορθής όσο και της κύλισης, με την αύξηση του βάθους κοπής. Άλλη μία παρατήρηση που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι παρόλο που οι δυνάμεις είναι παρόμοιες για αντίστοιχα βάθη κοπής και για τις δύο ομάδες, η κοπή παράλληλα στη σχιστότητα του ορθογνευσίου δίνει κατά τι μεγαλύτερες δυνάμεις.

6.4. Προσομοίωση κοπής σχιστώδους ορθογενεσίου

Η προσομοίωση κοπής με κοπτικό δίσκου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα εργαστηριακά πρότυπα που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 6.2.3., σε συνδυασμό με τις μικροπαραμέτρους που προέκυψαν τόσο από τη μέθοδο Yoon όσο και από τη μέθοδο Wang και επιπλέον, με τη χρήση επιπέδων με διαφορετικό εύρος ακτίνας σωματιδίων.

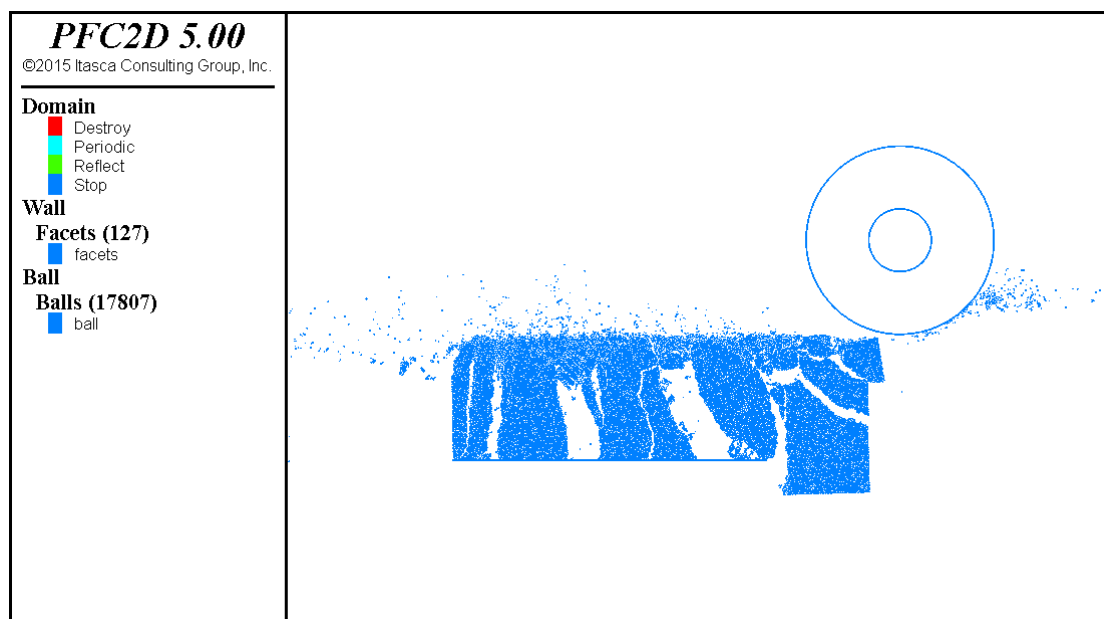
Η διαδικασία που ακολουθείται είναι παρόμοια με αυτή των προσομοιώσεων δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την εισαγωγή μικροπαραμέτρων που σχετίζονται με το αρχικό δοκίμιο, όπως τα όρια του δείγματος και οι ακτίνες των σωματιδίων. Επιρόσθετα, ορίζεται η πυκνότητα του πετρώματος, όπως έχει προκύψει από τις εργαστηριακές δοκιμές. Στο δεύτερο στάδιο εισάγονται στο δείγμα οι παράλληλοι δεσμοί, καθώς και οι μικροπαραμέτροι οι οποίες τους καθορίζουν. Κατά το τρίτο και τελευταίο στάδιο, δημιουργείται το κοπτικό δίσκου και του προσδίδεται μεταθετική ταχύτητα καθώς και γωνιακή. Χαρακτηριστική εικόνα του δείγματος μαζί με τον δίσκο φαίνεται στο σχήμα 6.8. Η φορά της κοπής είναι από αριστερά προς τα δεξιά. Ακολούθως, ξεκινάει η προσομοίωση κοπής, μέχρις ότου το κοπτικό να ολοκληρώσει την κοπή.



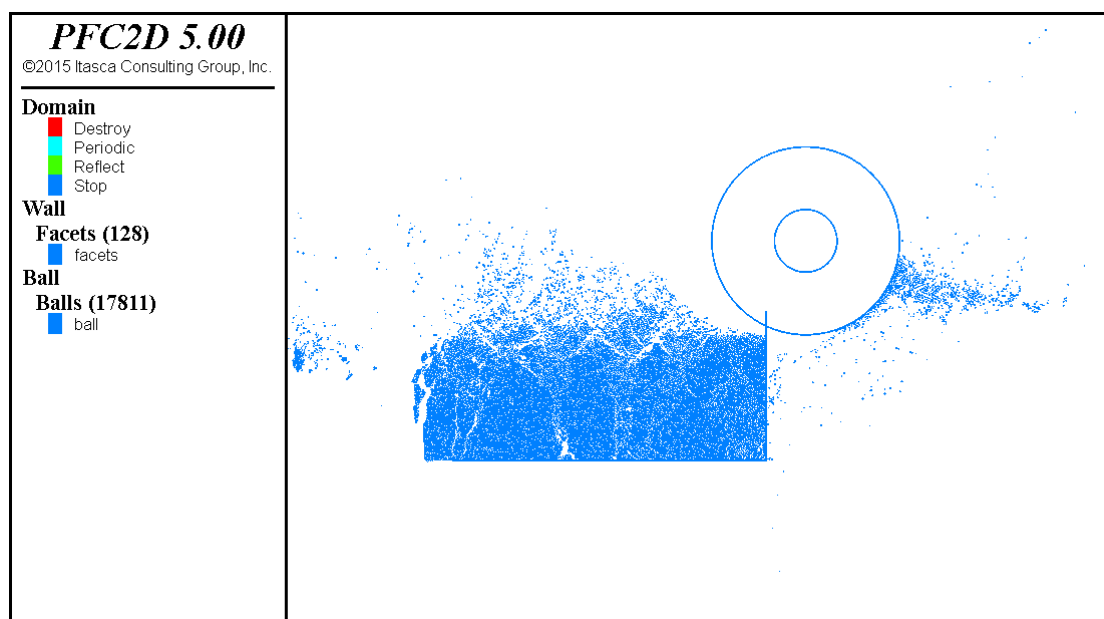
Σχήμα 6.8. Κοπτικό δίσκου κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης κοπής του συνθετικού πετρώματος

Σημαντικό ζήτημα αποτελεί η επιλογή κατάλληλου τοίχου, ώστε να υπάρχει η απαραίτητη πλευρική στήριξη στο δοκίμιο και να προσομοιάζεται ρεαλιστικά η εργαστηριακή δοκιμή. Για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε ένας αριθμός προσομοιώσεων με διαφορετική στήριξη ώστε να επιλεγθεί η καλύτερη δυνατή. Συγκεκριμένα, δοκιμάστηκε η απουσία πλαϊνών τοίχων, η στήριξη από τη δεξιά πλευρά αντίθετα στη φορά κοπής, η στήριξη και από τις δύο πλευρές με τοίχους ίσους με το ύψος του δοκιμίου και τέλος η στήριξη και από τις δύο πλευρές αφήνοντας κενό

το ύψος που αντιστοιχεί στο βάθος διείσδυσης του κοπτικού. Ενδεικτικά, παρατίθενται δύο παραδείγματα στα σχήματα 6.9. και 6.10.



Σχήμα 6.9. Απουσία πλευρικών τοίχων από το δοκίμιο



Σχήμα 6.10. Χρήση πλευρικής στήριξης τοίχου αντίθετα στη φορά της κοπής

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα σχήματα 6.9. και 6.10., σε περίπτωση που απουσιάζει μία πλευρική στήριξη ή και οι δύο, το συνθετικό πέτρωμα θραύεται δημιουργώντας μεγάλες κατακόρυφες ρωγμές (Hertzian cracks), με αποτέλεσμα οι δυνάμεις κοπής που προκύπτουν να μην ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Έτσι, οι προσομοιώσεις έλαβαν χώρα με πλευρική υποστήριξη και από τις δύο πλευρές αφήνοντας κενό το ύψος που αντιστοιχεί στο βάθος διείσδυσης του κοπτικού.

Ο απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωση μίας προσομοίωσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά που προσδίνονται στο μοντέλο. Ένα χαρακτηριστικό που επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό είναι η ταχύτητα κοπής του δίσκου. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.2.3. η εργαστηριακή ταχύτητα κοπής ισούται με 58,3 mm/s, χαρακτηριστικό το οποίο απαιτείται να χρησιμοποιηθεί κατά την προσομοίωση ώστε να αναπαρασταθεί ρεαλιστικά το μοντέλο.

Η πραγματοποίηση προσομοιώσεων δοκιμών κοπής με διαφορετικές ταχύτητες κοπής οδήγησε στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Αρχικά, παρατηρείται ότι αύξηση της ταχύτητας κοπής οδηγεί σε ελαφρώς αυξημένες δυνάμεις κοπής. Επιπλέον, μείωση της ταχύτητας κοπής έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του χρόνου προσομοίωσης, που γίνεται απαγορευτικός για μεγάλο αριθμό δοκιμών με ταχύτητα κοπής 58,3 mm/s.

Για αυτό το λόγο αποφασίστηκε η εκτέλεση προσομοιώσεων δοκιμών με διαφορετικές ταχύτητες, ώστε να εντοπιστούν οι διαφορές των διαγραμμάτων των δυνάμεων κοπής που προκύπτουν. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε προσομοίωση δοκιμών με σταθερή ταχύτητα, μεγαλύτερη της εργαστηριακής, σε διαφορετικά βάθη κοπής, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που παρουσιάζεται στην παράγραφο 6.4.2. για τη μείωση του χρόνου προσομοίωσης. Η μείωση που παρατηρείται κυμαίνεται μεταξύ 20 – 25 % του αρχικού χρόνου που απαιτείται για κάθε προσομοίωση.

6.4.1. Χρήση επιπέδων διαφορετικού εύρους ακτινών σωματιδίων κατά την προσομοίωση

Ο χρόνος περάτωσης της προσομοίωσης ενός μοντέλου με τα χαρακτηριστικά που προσδιορίστηκαν, καθίσταται απαγορευτικός για μία διπλωματική εργασία επιπέδου μεταπτυχιακού. Ο λόγος αυτός οδήγησε στην επιλογή χρήσης μίας μεθόδου που χρησιμοποίησε ο Su et al (2010) για τη μείωση του χρόνου προσομοίωσης του μοντέλου.

Σκοπός της μελέτης του Su ήταν η πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής που προέκυπταν με τη χρήση κοπτικών εργαλείων σε πετρώματα, μέσω προσομοιώσεων κοπής στο λογισμικό PFC^{3D}. Για την ανάλυσή του, επιλέχθηκαν δείγματα τριών ψαμμιτών και ενός ασβεστολίθου, που είχαν υποστεί δοκιμές σε εργαστηριακό επίπεδο και τα χαρακτηριστικά του δίνονται στον πίνακα 6.8.

Πίνακας 6.8. Μηχανικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που προσομοίωσε ο Su (Πηγή: Su, 2011)

Ιδιότητες	Ψαμμίτης – 1	Ψαμμίτης – 2	Ψαμμίτης – 3	Ασβεστόλιθος
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	113,6	173,7	87,4	121
Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (MPa)	6,6	11,6	8,3	7,8
Διατμητική αντοχή (MPa)	13,7	22,4	14	15,4
Μέτρο ελαστικότητας Young (GPa)	17	28	33,3	57
Λόγος Poisson	0,2	0,29	0,25	0,2
Πυκνότητα (kg/m ³)	2650	2670	2670	2720

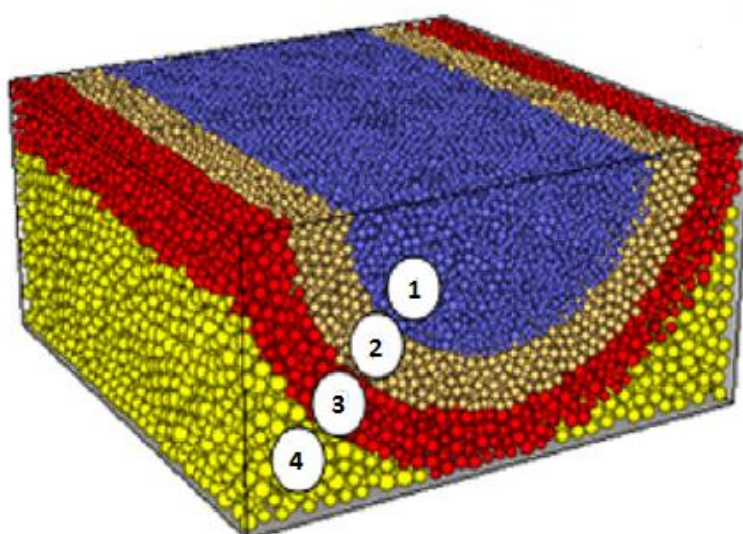
Αρχικά έλαβαν χώρα προσομοιώσεις δοκιμών αντοχής μονοαξονικής θλίψης για την εξαγωγή των κατάλληλων μικροπαραμέτρων μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης. με τη μέθοδο δοκιμών και σφαλμάτων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις κοπής με κοπτικό σημειακής προσβολής, σε μοντέλο που διεπόταν, αρχικά, από το γραμμικό μοντέλο επαφής του PFC^{3D}. Στόχος ήταν η δοκιμή προσομοίωσης τριών διαφορετικών βαθών διείσδυσης, για κάθε ένα από τα οποία θα χρησιμοποιούνταν διαφορετικές ακτίνες σωματιδίων, ώστε η αιχμή του κοπτικού να έρχεται σε επαφή με τουλάχιστον πέντε σφαιρίδια.

Παρόλα αυτά, προσομοιώσεις με μεγαλύτερα βάθη κοπής και μεγαλύτερα δείγματα ήταν δύσκολο να πραγματοποιηθούν λόγω προβλημάτων που παρουσιάζονταν από τον αυξημένο αριθμό σωματιδίων, επαφών άρα και χρόνου προσομοίωσης. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν περισσότερα επίπεδα σωματιδίων με διαφορετικό εύρος ακτινών

σε κάθε ένα από αυτά, τέτοια ώστε να μην επηρεάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά σε κάθε επίπεδο. Το δοκίμιο αποτελούταν από τέσσερις περιοχές που είχαν μορφή ημι-κυλίνδρων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.11. Το μέγιστο μέγεθος ακτίνας σωματιδίων κάθε εσωτερικού επιπέδου αποτελεί το ελάχιστο μέγεθος ακτίνας των σωματιδίων του αμέσως επόμενου επιπέδου, όπως φαίνεται στον πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.9. Χαρακτηριστικά των μοντέλων του Su με επίπεδα διαφορετικών ακτίνων των σφαιρών (Πηγή: Su, 2011)

Βάθος διείσδυσης	Διαστάσεις δοκιμίου	Παράμετροι	Περιοχή δείγματος			
			1	2	3	4
3	30x30x15	Ακτίνα ημι-κυλίνδρου (mm)	9	12	15	>15
		Εύρος ακτίνας σφαιρών (mm)	0,25-0,30	0,30-0,36	0,36-0,43	0,43-0,52
6	56x30x28	Ακτίνα ημι-κυλίνδρου (mm)	18	23	28	>28
		Εύρος ακτίνας σφαιρών (mm)	0,40-0,48	0,48-0,58	0,58-0,69	0,69-0,83
9	82x30x41	Ακτίνα ημι-κυλίνδρου (mm)	27	34	41	>41
		Εύρος ακτίνας σφαιρών (mm)	0,55-0,66	0,66-0,79	0,79-0,95	0,95-1,14



Σχήμα 6.11. Απεικόνιση του μοντέλου του Su με 4 επίπεδα διαφορετικών ακτίνων σωματιδίων (Πηγή: Su, 2011)

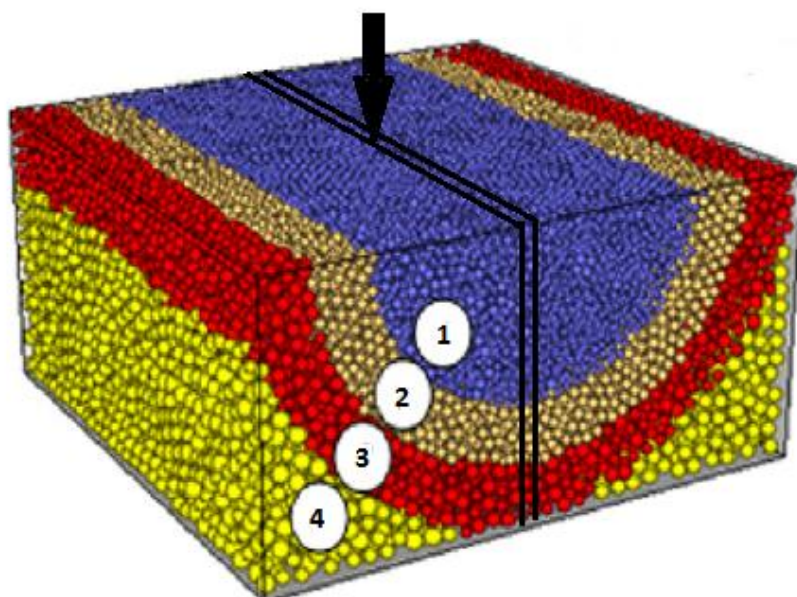
Η προσομοίωση κοπής των μοντέλων έδειξε ότι τα εξωτερικά ημι-κυλινδρικά επίπεδα που συγκροτούνται από τα σωματίδια μεγαλύτερων ακτινών, παρουσιάζουν την ίδια, σε γενικές γραμμές, μηχανική συμπεριφορά με την εσωτερική περιοχή του δοκιμίου. Έτσι, είναι δυνατό να ισχυριστεί ότι το μοντέλο που δημιουργήθηκε έχει την ίδια μηχανική συμπεριφορά σε όλα τα επίπεδα, παρόλο που κάθε ένα από αυτά απαρτίζεται από σωματίδια διαφορετικών ακτινών. Τα αποτελέσματα των μελετών μοντελοποίησης για 3, 6 και 9 χιλιοστά βάθους κοπής του ψαμμίτη – 1 παρουσιάζονται στον πίνακα 6.12.

Πίνακας 6.10. Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τα 4 επίπεδα διαφορετικών ακτινών των σφαιρών (Πηγή: Su, 2011)

Βάθος διείσδυσης	Διαστάσεις δοκιμίου	Παράμετροι	Περιοχή δείγματος			
			1	2	3	4
3	30x30x15	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	114,7	111,9	104,5	100,7
		Μέτρο ελαστικότητας Young (GPa)	17,04	16,74	16,33	15,87
		Λόγος Poisson	0,21	0,21	0,19	0,19
6	56x30x28	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	112,5	110,3	109,3	105
		Μέτρο ελαστικότητας Young (GPa)	17,08	16,9	16,6	16,49
		Λόγος Poisson	0,2	0,19	0,19	0,17
9	82x30x41	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	113,6	113,3	108	101,9
		Μέτρο ελαστικότητας Young (GPa)	17,11	16,53	16,53	16,44
		Λόγος Poisson	0,21	0,19	0,22	0,18

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την παρούσα εργασία είναι σε διδιάστατο περιβάλλον, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να δημιουργηθούν τρία επίπεδα με

διαφορετικές ακτίνες σωματιδίων, όπως μπορεί να φανεί και στο σχήμα 6.12., όπου σημειώνεται η περιοχή που θα απεικονίζεται στις προσομοιώσεις.



Σχήμα 6.12. Περιοχή που αφορά στις δύο διαστάσεις, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία

Παρατηρώντας τις ακτίνες των ημι-κυλίνδρων που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη του Su et al, και ανεξάρτητα από το μέγεθος του δείγματος, που μεταβαλλόταν ανάλογα με το βάθος διείσδυσης του κοπτικού, οι λόγοι των ακτινών των ημι-κυλίνδρων προς την ακτίνα του μεγαλύτερου εξ αυτών μπορούν να συσχετιστούν.

Συγκεκριμένα, για βάθος κοπής 3 mm, η ακτίνα 1 αποτελεί το $9/15 = 0,6$ της ακτίνας 3. Για βάθος κοπής 6 mm, ο αντίστοιχος λόγος είναι $18/28 = 0,64$ και για κοπή 9 mm ο λόγος είναι $27/41 = 0,66$.

Η ακτίνα 2 αποτελεί το $12/15 = 0,8$ της ακτίνας 3 για βάθος διείσδυσης 3 mm. Για βάθος 6 mm, ο αντίστοιχος λόγος είναι $23/28 = 0,82$ και για κοπή 9 mm ο λόγος είναι $34/41 = 0,83$.

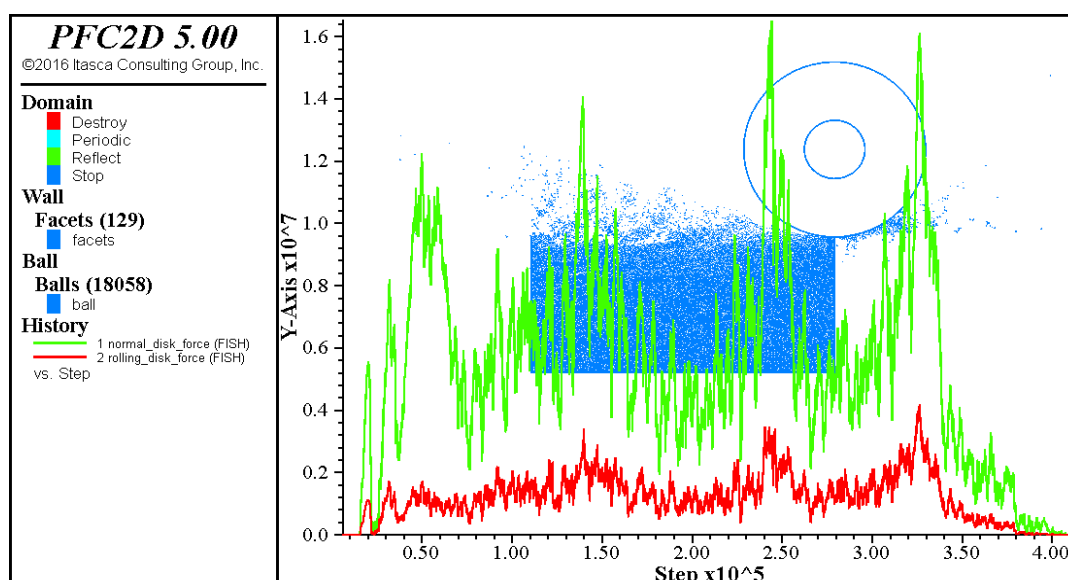
Το μοντέλο για το οποίο επιχειρείται η προσομοίωση κοπής στην παρούσα εργασία, έχει ύψος 95 mm. Για αυτό θεωρείται η περιοχή 1 με ύψος 55 mm και ο λόγος τους είναι $55/95 = 0,58$, το οποίο είναι αντίστοιχο με αυτά που επιλέχθηκαν στο μοντέλο του Su. Η περιοχή 2 επιλέγεται να έχει ύψος 75 mm, με λόγο $75/95 = 0,79$ ως προς το ύψος του δοκιμίου, που είναι παρόμοιο με τα παραπάνω στη μελέτη του Su.

6.4.2. Προσομοίωση κοπής με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon

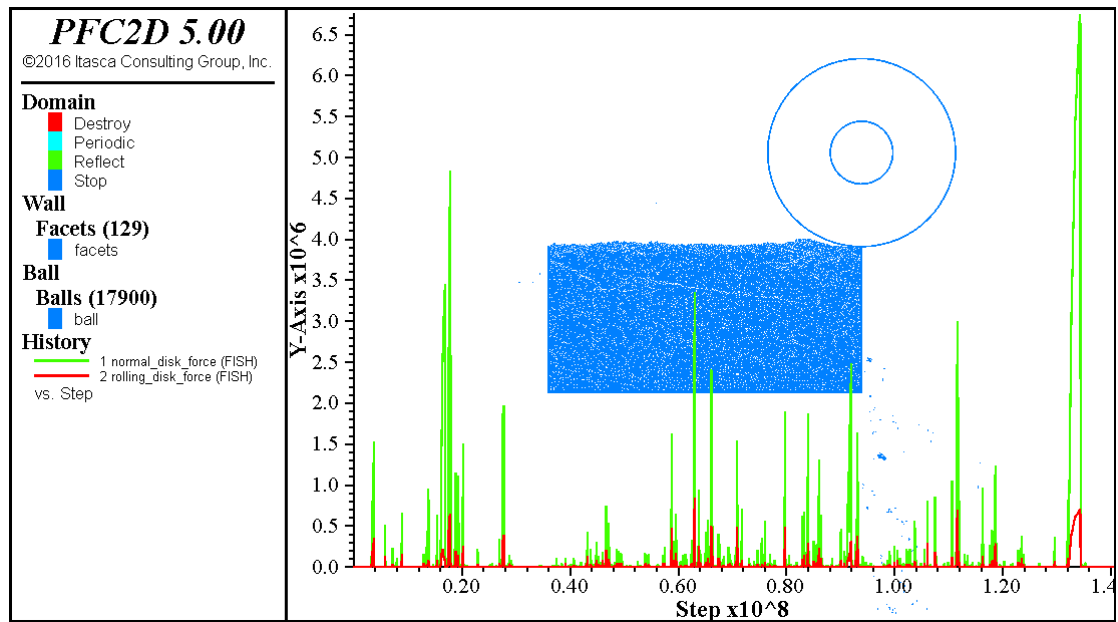
6.4.2.1. Χρήση διαφορετικών ταχυτήτων κοπής

Αρχικά έλαβαν χώρα προσομοιώσεις με διαφορετικές ταχύτητες κοπής, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.4.1., με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για το πώς επηρεάζονται τα διαγράμματα της δύναμης κοπής. Οι ταχύτητες που χρησιμοποιήθηκαν είναι 20 m/s, 5 m/s, 0,2 m/s και 0,0583 m/s. Η ταχύτητα κοπής της τελευταίας προσομοίωσης αντιστοιχεί σε αυτή της εργαστηριακής δοκιμής. Το βάθος κοπής σε όλες τις προσομοιώσεις ορίστηκε 2 mm.

Στη συνέχεια, παρατίθενται ενδεικτικά τα σχήματα 6.13. και 6.14., όπου απεικονίζονται τα δοκίμια μετά το πέρας της προσομοίωσης κοπής καθώς και τα διαγράμματα της ορθής και της δύναμης κύλισης για ταχύτητες κοπής 20 m/s και 0,0583 m/s.



Σχήμα 6.13. Προσομοίωση κοπής με ταχύτητα 20 m/s χρησιμοποιώντας τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon



Σχήμα 6.14. Προσομοίωση κοπής με ταχύτητα 0,0583 m/s χρησιμοποιώντας τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon

Πίνακας 6.11. Μέγιστες και μέσες δυνάμεις για διαφορετικές ταχύτητες κοπής

Ταχύτητα κοπής (m/s)	FN_Max (N)	FN_Mean (N)	FR_Max (N)	FR_Mean (N)
0,0583	6.75655E+06	1.58946E+05	8.47725E+05	2.21663E+04
0,2	5,98834E+06	1,44777E+05	7,19715E+05	2,49319E+04
5	4,93677E+06	6,26810E+05	8,21281E+05	1,05128E+05
20	1,63808E+07	5,49915E+06	4,20996E+06	1,22101E+06

Παρατηρώντας τον πίνακα 6.11. όπου απεικονίζονται οι μέγιστες και μέσες δυνάμεις, όπως προκύπτουν από τις προσομοιώσεις, γίνεται φανερή η επίδραση της ταχύτητας κοπής στις δυνάμεις. Παρατηρείται η αύξηση των δυνάμεων καθώς αυξάνει η ταχύτητα, χωρίς όμως να μεταβάλλεται σε τέτοιο βαθμό ώστε να αλλάξει η τάξη μεγέθους των δυνάμεων, σε μεγάλο βαθμό. Επιπλέον, φαίνεται ότι με μικρές ταχύτητες κοπής, τα διαγράμματα προσομοιάζουν λιγότερο τα αντίστοιχα διαγράμματα που προκύπτουν εργαστηριακά, τα οποία παρατίθενται στην παράγραφο 6.3. Οι κύκλοι φόρτισης δεν είναι ευδιάκριτοι και οι δυνάμεις μηδενίζονται σε μεγάλο τμήμα της κοπής.

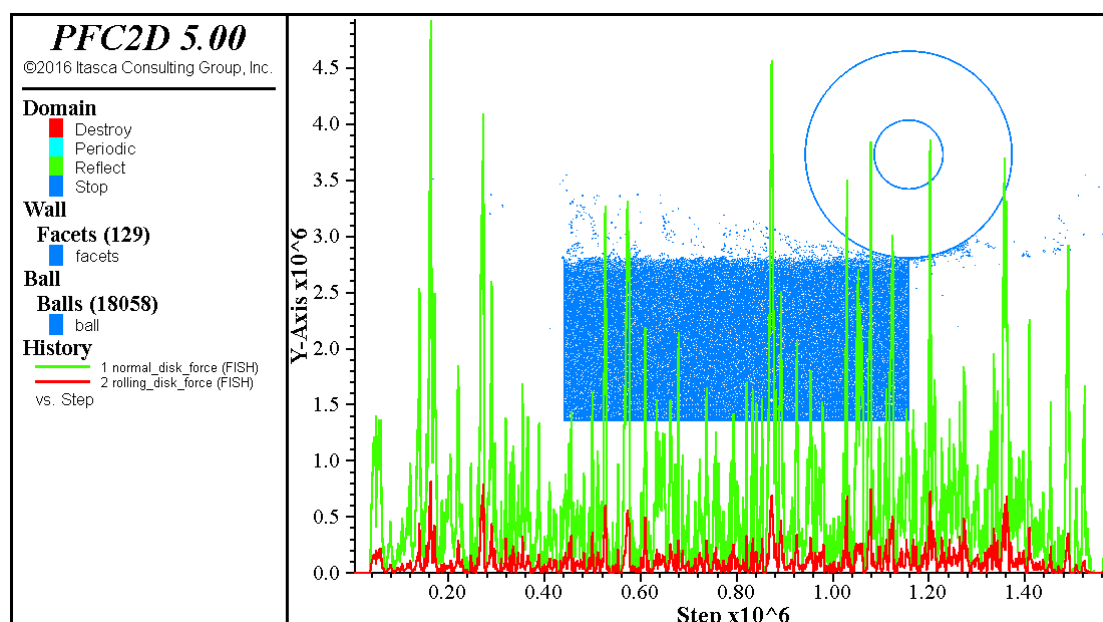
Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η παράθεση του χρόνου περάτωσης κάθε προσομοίωσης. Για ταχύτητα 20 m/s, ο χρόνος περάτωσης ήταν περί τη 1 ώρα. Όταν η ταχύτητα κοπής μεταβλήθηκε σε 5 m/s, η προσομοίωση ολοκληρώθηκε μετά από 3,5 περίπου ώρες. Για ταχύτητα 0,2 m/s, η προσομοίωση διήρκεσε 3 περίπου ημέρες.

Τέλος, με χρήση της εργαστηριακής ταχύτητας κοπής, η προσομοίωση ολοκληρώθηκε μετά από 10 ημέρες.

6.4.2.2. Χρήση διαφορετικού βάθους κοπής

Για τις προσομοιώσεις με διαφορετικά βάθη κοπής επιλέχθηκε ταχύτητα κοπής του δίσκου 5 m/s, καθώς ο χρόνος περάτωσης της δοκιμής είναι μικρός και επειδή τα διαγράμματα φαίνεται να προσομοιάζουν ικανοποιητικά με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές. Τα βάθη κοπής των προσομοιώσεων που έλαβαν χώρα είναι 1 mm, 2 mm, 3 mm και 5 mm, ώστε να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών.

Η πρώτη προσομοίωση δοκιμής κοπής έγινε σε βάθος 1 mm, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στο σχήμα 6.15. όπου παρατίθενται τα διαγράμματα ορθής δύναμης και δύναμης κύλισης, καθώς και η τελική εικόνα της προσομοίωσης.



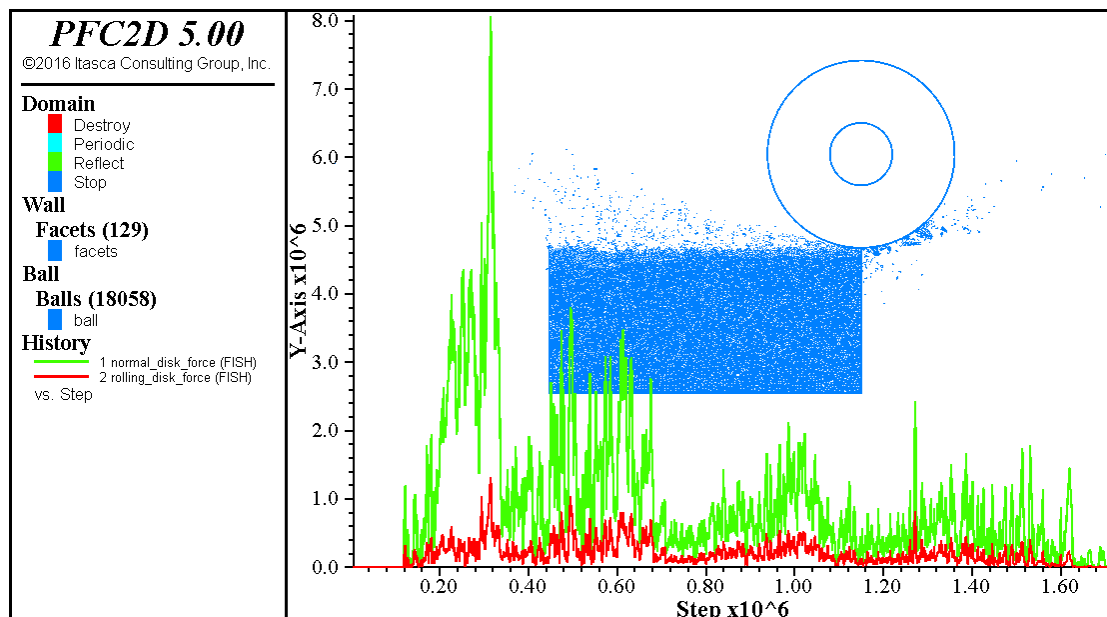
Σχήμα 6.15. Προσομοίωση κοπής βάθους 1 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon

Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.12.

Πίνακας 6.12. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 1 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon

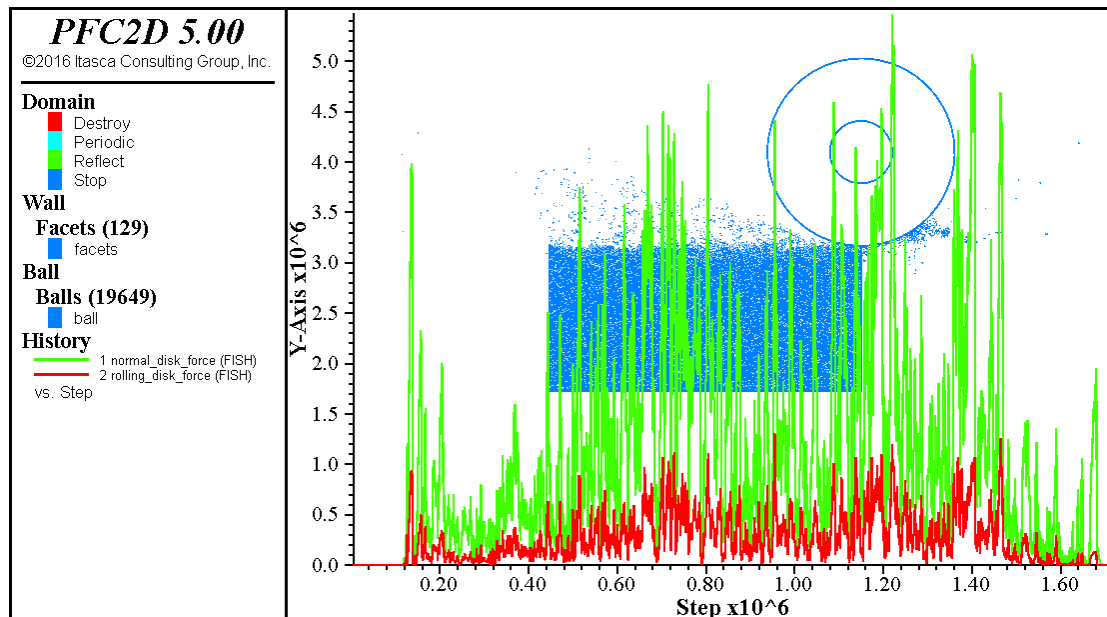
	Ορθή δύναμη (MN)	Δύναμη κύλισης (MN)
Μέση δύναμη	0,627	0,105
Μέγιστη δύναμη	4,937	0,821

Η δεύτερη προσομοίωση δοκιμής κοπής έγινε σε βάθος 2 mm, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στο σχήμα 6.16. όπου παρατίθενται τα διαγράμματα ορθής δύναμης και δύναμης κύλισης, καθώς και η τελική εικόνα της προσομοίωσης.



Σχήμα 6.16. Προσομοίωση κοπής βάθους 2 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι δυνάμεις κοπής μειώνονται αρκετά μετά το 1/3 περίπου, του μήκους του δοκιμίου. Κάτι τέτοιο είναι πιθανό να συμβαίνει λόγω του ότι χρησιμοποιούνται επίπεδα με διαφορετικές ακτίνες σωματιδίων, δημιουργώντας έτσι εφελκυστικές ρωγμές παράλληλα στην κοπή του πετρώματος, μειώνοντας την συνοχή του πετρώματος και κατ' επέκταση τις δυνάμεις κοπής. Μεταβολή του δεύτερου επιπέδου σφαιρών κατά 1 cm προς τα κάτω οδήγησε στα αποτελέσματα του σχήματος 6.17., τα οποία προσομοιάζουν ως προς τη μορφή τα αντίστοιχα εργαστηριακά.



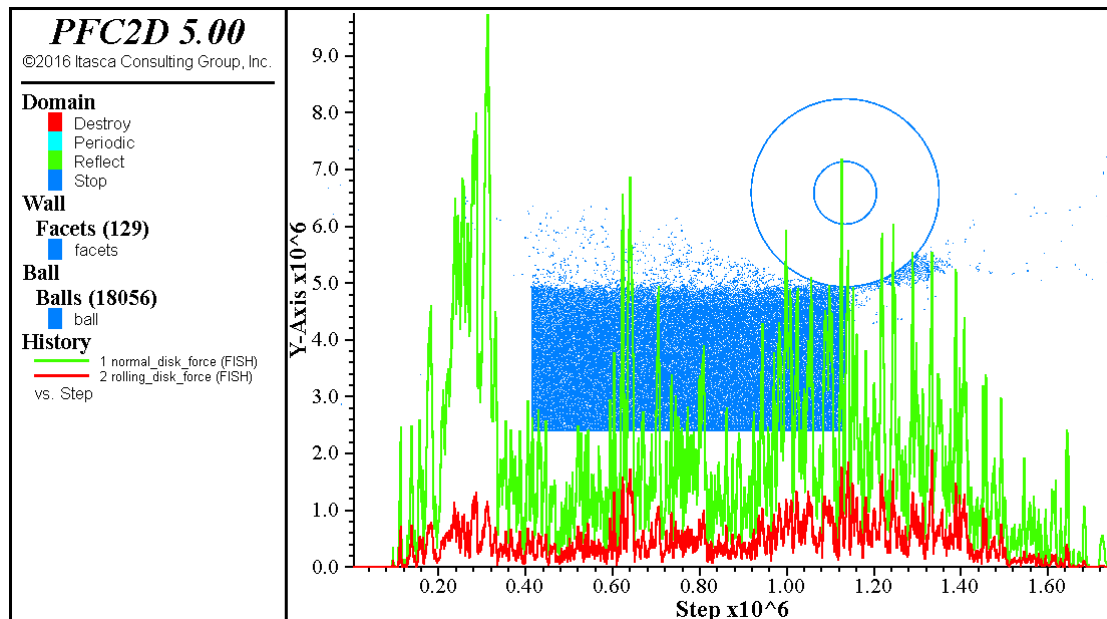
Σχήμα 6.17. Προσομοίωση κοπής βάθους 2 mm με ταχύτητα 5 m/s, μεταβάλλοντας τα επίπεδα διαφορετικών ακτινών των σωματιδίων με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon

Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.13.

Πίνακας 6.13. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 2 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon

	Ορθή δύναμη (MN)	Δύναμη κύλισης (MN)
Μέση δύναμη	1,199	0,277
Μέγιστη δύναμη	5,473	1,313

Η επόμενη προσομοίωση δοκιμής κοπής έγινε σε βάθος 3 mm και τα αποτελέσματά της φαίνονται στο σχήμα 6.18. όπου παρατίθενται τα διαγράμματα ορθής δύναμης και δύναμης κύλισης, καθώς και η τελική εικόνα της προσομοίωσης.



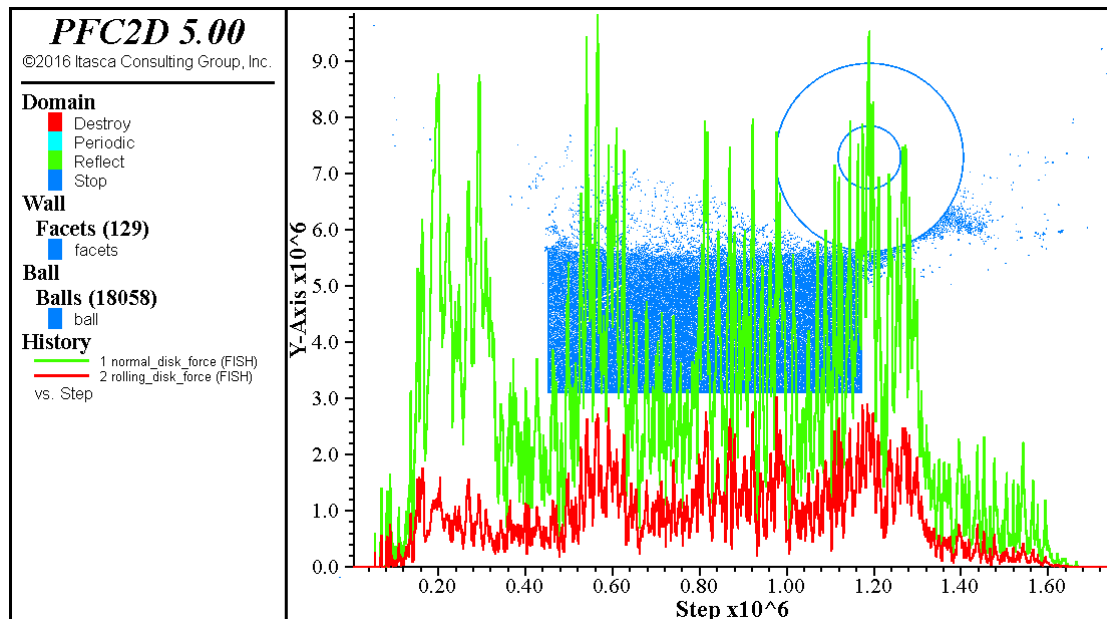
Σχήμα 6.18. Προσομοίωση κοπής βάθους 3 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon

Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.14.

Πίνακας 6.14. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 3 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon

	Ορθή δύναμη (MN)	Δύναμη κύλισης (MN)
Μέση δύναμη	1,878	0,436
Μέγιστη δύναμη	9,745	2,069

Η τελευταία προσομοίωση δοκιμής κοπής έγινε σε βάθος 5 mm και τα αποτελέσματά της φαίνονται στο σχήμα 6.19., όπου παρατίθενται τα διαγράμματα ορθής δύναμης και δύναμης κύλισης, καθώς και η τελική εικόνα της προσομοίωσης.



Σχήμα 6.19. Προσομοίωση κοπής βάθους 5 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon

Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.15.

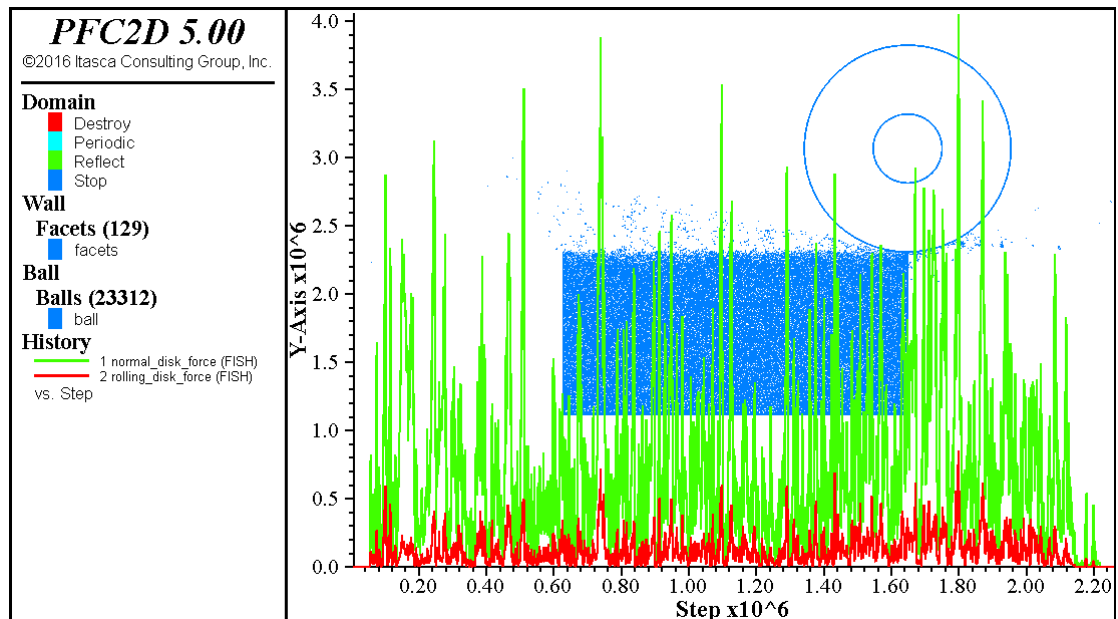
Πίνακας 6.15. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 5 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon

	Ορθή δύναμη (MN)	Δύναμη κύλισης (MN)
Μέση δύναμη	2,805	0,838
Μέγιστη δύναμη	9,891	3,031

6.4.3. Προσομοίωση κοπής με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang

Για τις προσομοιώσεις με διαφορετικά βάθη κοπής με τη μέθοδο Wang, επιλέχθηκε ταχύτητα κοπής του δίσκου 5 m/s όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Τα βάθη κοπής των προσομοιώσεων που έλαβαν χώρα είναι 1 mm, 2 mm, 3 mm και 5 mm, ώστε να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών.

Η πρώτη προσομοίωση δοκιμής κοπής έγινε σε βάθος 1 mm, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στο σχήμα 6.20. όπου παρατίθενται τα διαγράμματα ορθής δύναμης και δύναμης κύλισης, καθώς και η τελική εικόνα της προσομοίωσης.



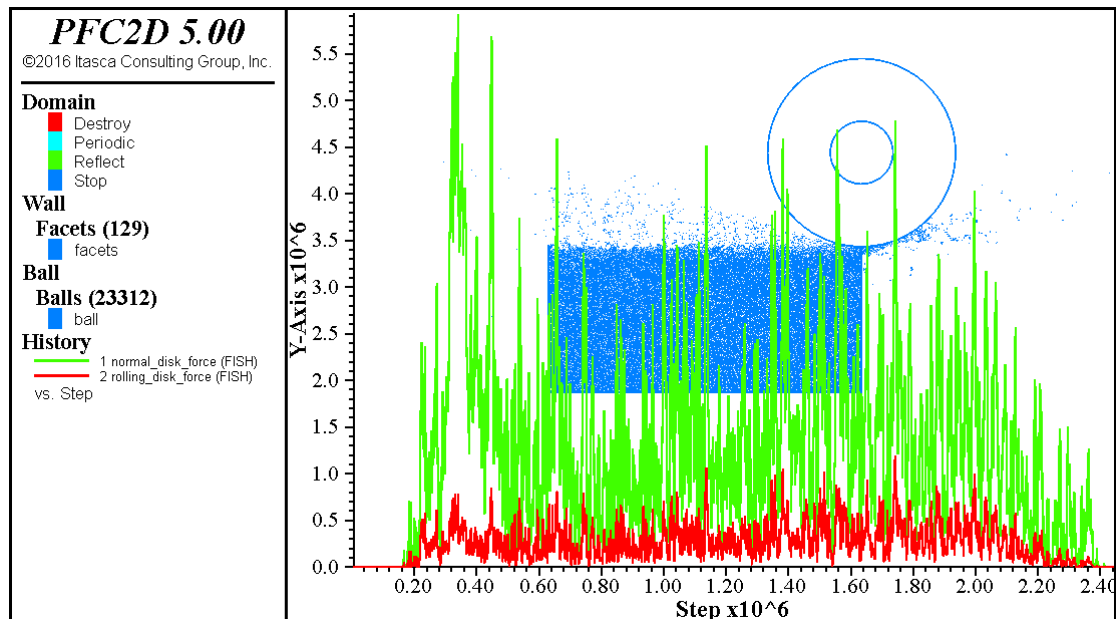
Σχήμα 6.20. Προσομοίωση κοπής βάθους 1 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang

Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.16.

Πίνακας 6.16. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 1 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang

	Ορθή δύναμη (MN)	Δύναμη κύλισης (MN)
Μέση δύναμη	0,767	0,125
Μέγιστη δύναμη	4,039	0,864

Η επόμενη προσομοίωση δοκιμής κοπής έγινε σε βάθος 2 mm, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στο σχήμα 6.21. όπου παρατίθενται τα διαγράμματα ορθής δύναμης και δύναμης κύλισης, καθώς και η τελική εικόνα της προσομοίωσης.



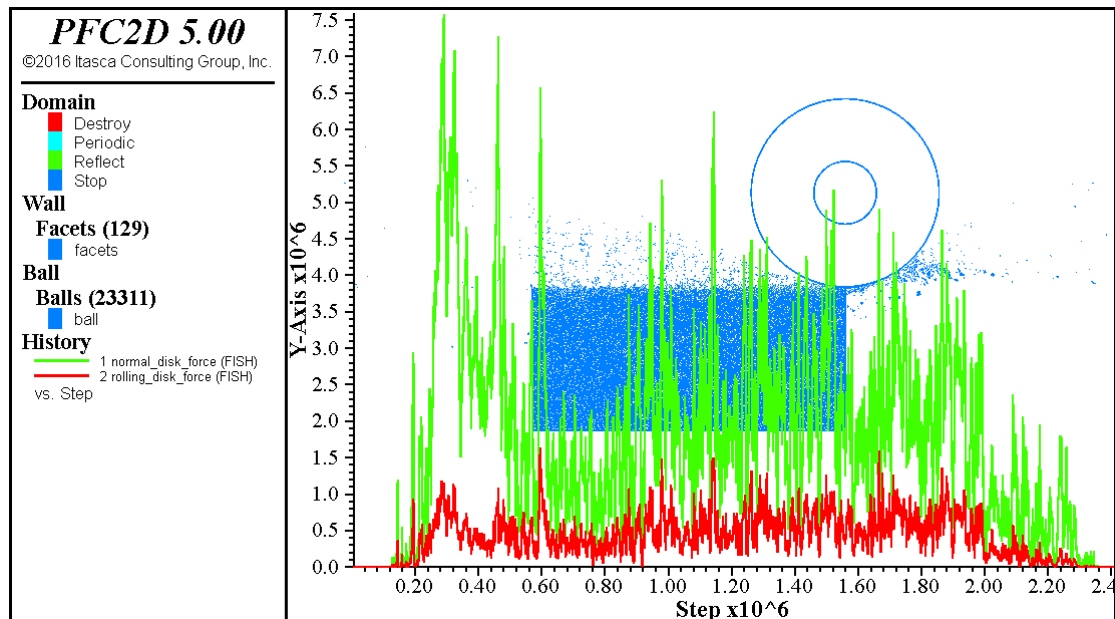
Σχήμα 6.21. Προσομοίωση κοπής βάθους 2 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang

Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.17.

Πίνακας 6.17. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 2 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang

	Ορθή δύναμη (MN)	Δύναμη κύλισης (MN)
Μέση δύναμη	1,357	0,274
Μέγιστη δύναμη	5,931	1,195

Η τρίτη προσομοίωση δοκιμής κοπής έγινε σε βάθος 3 mm και τα αποτελέσματά της φαίνονται στο σχήμα 6.22. όπου παρατίθενται τα διαγράμματα ορθής δύναμης και δύναμης κύλισης, καθώς και η τελική εικόνα της προσομοίωσης.



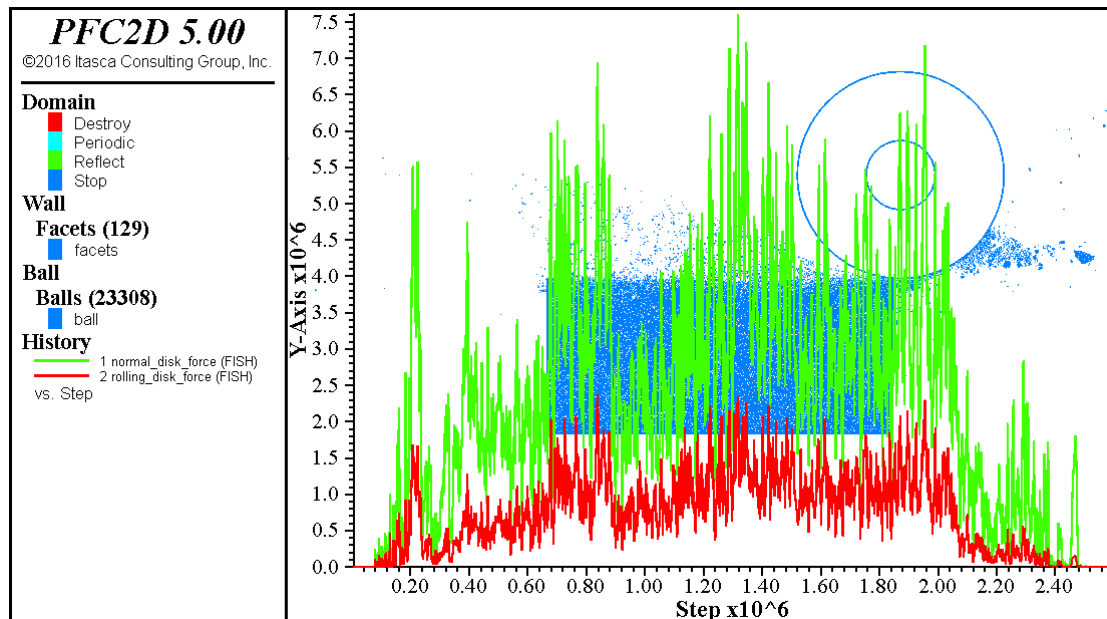
Σχήμα 6.22. Προσομοίωση κοπής βάθους 3 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang

Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.18.

Πίνακας 6.18. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 3 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang

	Ορθή δύναμη (MN)	Δύναμη κύλισης (MN)
Μέση δύναμη	1,864	0,436
Μέγιστη δύναμη	7,555	1,662

Η τελευταία προσομοίωση δοκιμής κοπής έγινε σε βάθος 5 mm και τα αποτελέσματά της φαίνονται στο σχήμα 6.23., όπου παρατίθενται τα διαγράμματα ορθής δύναμης και δύναμης κύλισης, καθώς και η τελική εικόνα της προσομοίωσης.



Σχήμα 6.23. Προσομοίωση κοπής βάθους 5 mm με ταχύτητα 5 m/s με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang

Οι μέσες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.19.

Πίνακας 6.19. Μέσες και μέγιστες δυνάμεις κοπής για προσομοίωση δοκιμής σε βάθος 5 mm με τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Wang

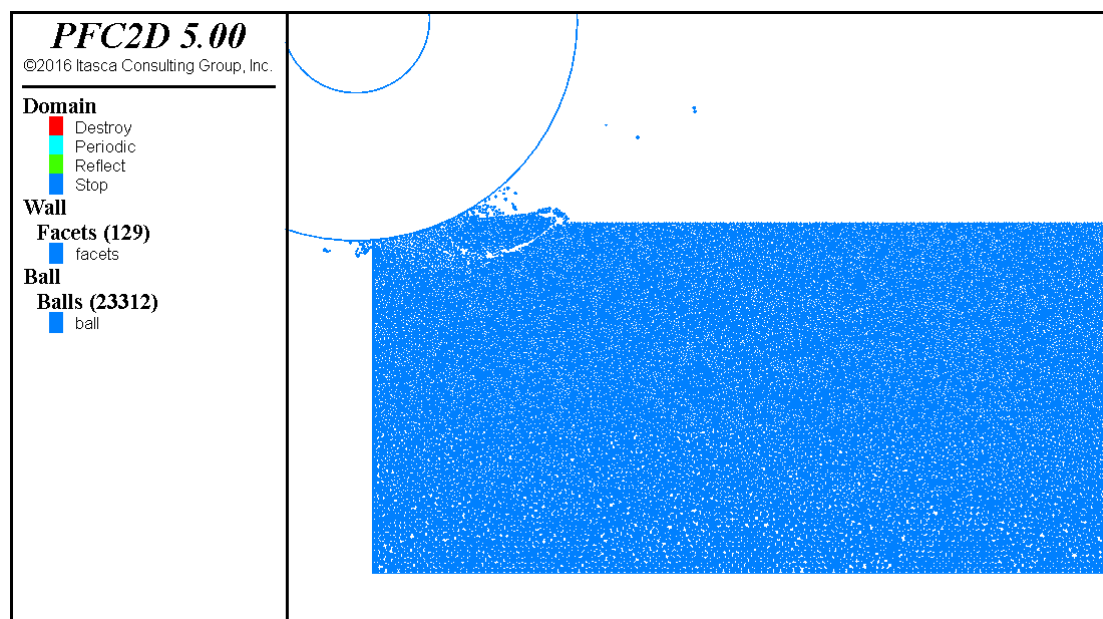
	Ορθή δύναμη (MN)	Δύναμη κύλισης (MN)
Μέση δύναμη	2,357	0,750
Μέγιστη δύναμη	7,616	2,373

6.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα εργαστηριακά αποτελέσματα

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τις παραγράφους 6.4.2. και 6.4.3., τα διαγράμματα των δυνάμεων κοπής που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις μοιάζουν μεταξύ τους τόσο στη μορφή όσο και στην τάξη μεγέθους των δυνάμεων. Αυτό συμβαίνει ανεξάρτητα από το βάθος κοπής και τις μικροπαραμέτρους που χρησιμοποιούνται σε κάθε προσομοίωση. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των προσομοιώσεων με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές, τα οποία παρατίθενται στην παράγραφο 6.3., μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα.

Η μορφή των διαγραμμάτων των δυνάμεων κοπής των εργαστηριακών δοκιμών αναπαριστώνται ικανοποιητικά από την αντίστοιχη των προσομοιώσεων, καθώς διακρίνονται οι κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης, οι οποίοι φανερώνουν την ψαθυρή συμπεριφορά του πετρώματος. Η ψαθυρότητα του συνθετικού πετρώματος φαίνεται, επιπλέον, από τη δημιουργία θραυσμάτων (chips) κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 6.24. Αντίθετα, σημειώνεται μεγάλη

απόκλιση στις τιμές των μετρούμενων δυνάμεων, καθώς οι δυνάμεις που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις είναι 2 έως και 3 τάξεις μεγαλύτερες από τις εργαστηριακά μετρούμενες.

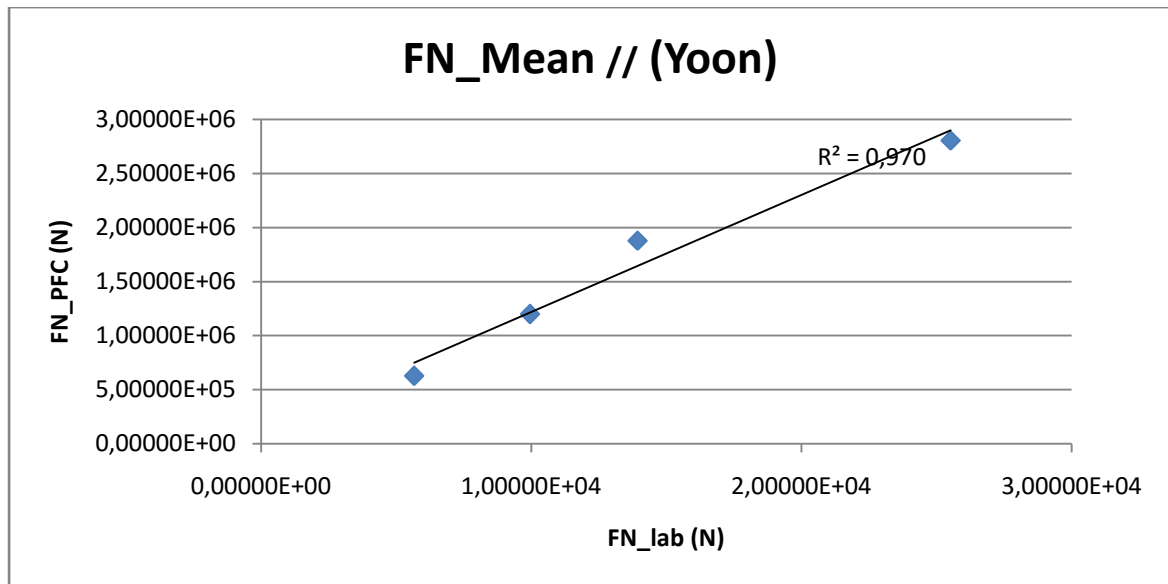


Σχήμα 6.24. Δημιουργία θραύσματος κατά την προσομοίωση δοκιμής κοπής

Για το λόγο αυτό, διερευνήθηκε η πιθανότητα κάποιας συσχέτισης των εργαστηριακών τιμών με τις αντίστοιχες των προσομοιώσεων. Έτσι, κατασκευάστηκαν οι πίνακες 6.20., 6.21., 6.22. και 6.23. για τις μικροπαραμέτρους της μεθόδου Yoon, στους οποίους παρατίθενται οι μέγιστες και μέσες μετρούμενες τιμές των προσομοιώσεων για τα διαφορετικά βάθη κοπής, σε σύγκριση με τις εργαστηριακές τιμές παράλληλα και κάθετα στη σχιστότητα του πετρώματος. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα 6.8., 6.9., 6.10. και 6.11. βάσει των οποίων βρέθηκαν οι συντελεστές R^2 , δηλαδή ο βαθμός συσχέτισης των εργαστηριακών τιμών με τις τιμές των προσομοιώσεων. Για τη μέθοδο Wang, παρατίθενται οι αντίστοιχοι πίνακες 6.24., 6.25., 6.26. και 6.27. και τα διαγράμματα 6.12., 6.13., 6.14. και 6.15.

Πίνακας 6.20. Μέγιστες και μέσες τιμές ορθής δύναμης κατά την κοπή στο εργαστήριο // με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Yoon

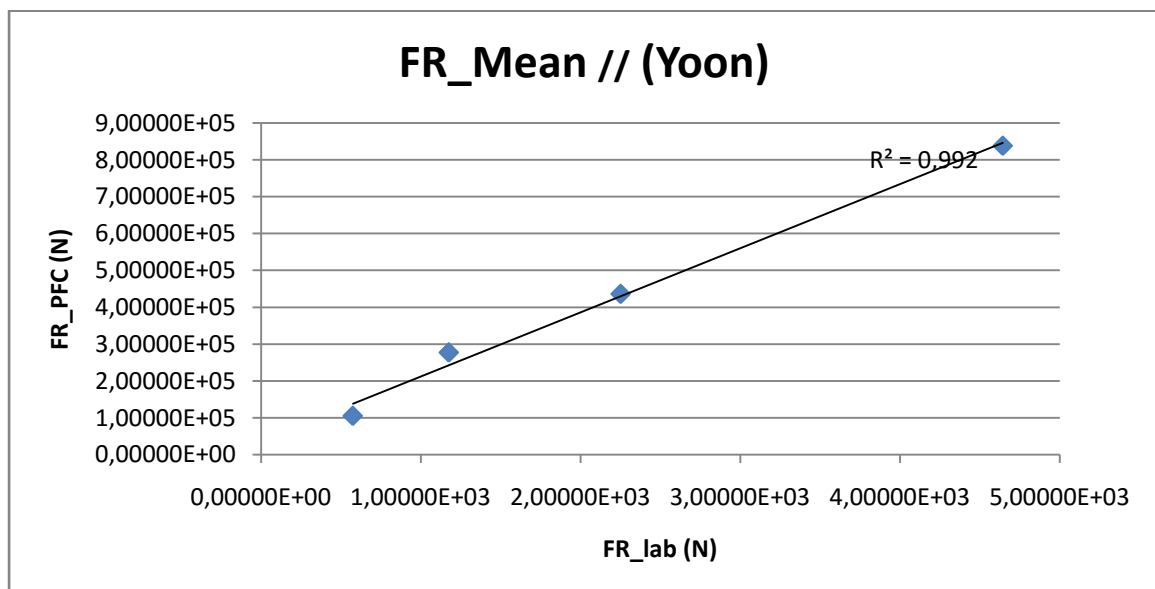
Βάθος (mm)	Εργαστηριακά		PFC	
	FN_Max (N)	FN_Mean (N)	FN_Max (N)	FN_Mean (N)
1	1,14460E+04	5,66554E+03	4,93677E+06	6,26810E+05
2	1,89540E+04	9,95223E+03	5,47284E+06	1,19869E+06
3	2,49520E+04	1,39349E+04	9,74508E+06	1,87818E+06
5	4,69160E+04	2,55161E+04	9,89121E+06	2,80505E+06



Διάγραμμα 6.8. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών ορθής δύναμης // στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Yoon

Πίνακας 6.21. Μέγιστες και μέσες τιμές δύναμης κύλισης κατά την κοπή στο εργαστήριο // με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Yoon

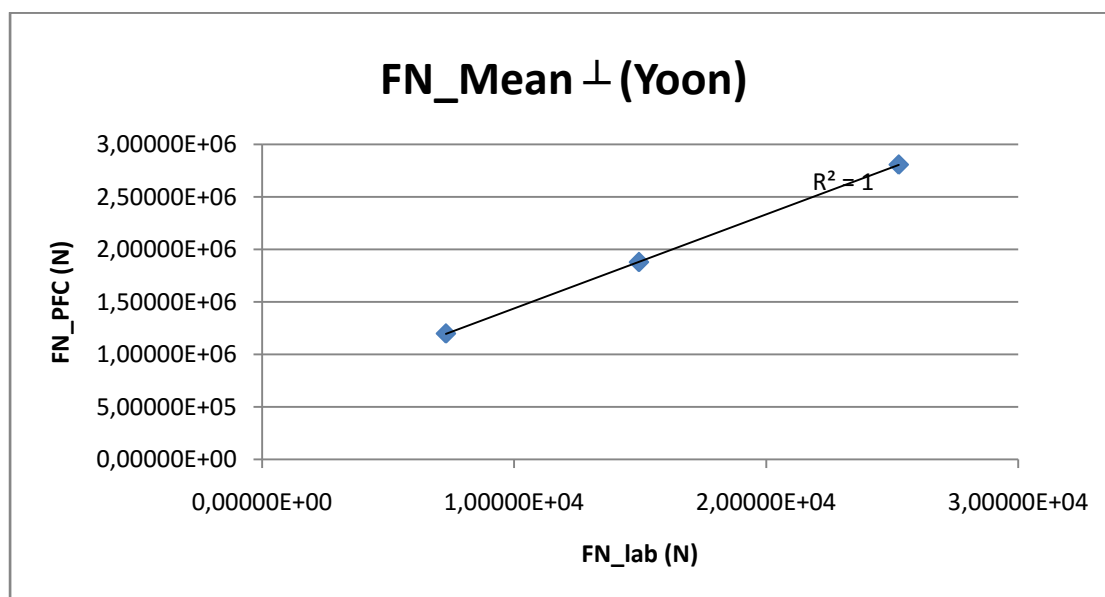
Βάθος (mm)	Εργαστηριακά		PFC	
	FR_Max (N)	FR_Mean (N)	FR_Max (N)	FR_Mean (N)
1	1,05900E+03	5,75096E+02	8,21281E+05	1,05128E+05
2	2,00400E+03	1,17625E+03	1,31336E+06	2,77025E+05
3	3,89900E+03	2,25216E+03	2,06849E+06	4,35946E+05
5	8,24300E+03	4,64426E+03	3,03054E+06	8,37941E+05



Διάγραμμα 6.9. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών δύναμης κύλισης // στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Yoon

Πίνακας 6.22. Μέγιστες και μέσες τιμές ορθής δύναμης κατά την κοπή στο εργαστήριο \perp με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Yoon

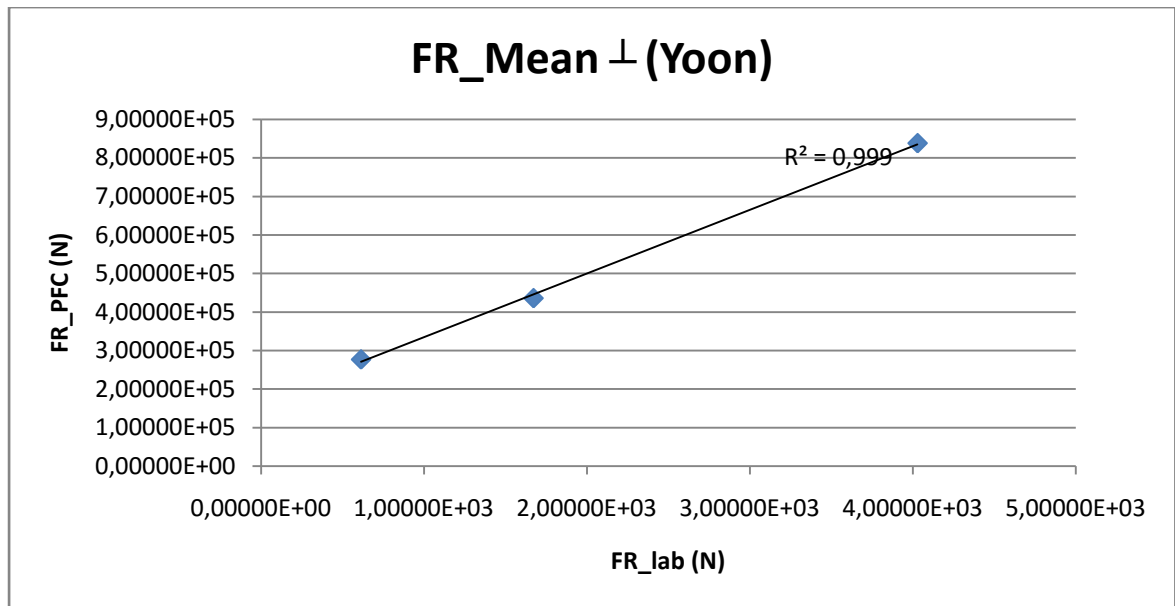
Βάθος (mm)	Εργαστηριακά		PFC	
	FN_Max (N)	FN_Mean (N)	FN_Max (N)	FN_Mean (N)
2	1,26340E+04	7,29443E+03	5,47284E+06	1,19869E+06
3	2,48096E+04	1,49539E+04	9,74508E+06	1,87818E+06
5	3,81050E+04	2,52639E+04	9,89121E+06	2,80505E+06



Διάγραμμα 6.10. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών ορθής δύναμης \perp στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Yoon

Πίνακας 6.23. Μέγιστες και μέσες τιμές δύναμης κύλισης κατά την κοπή στο εργαστήριο \perp με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Yoon

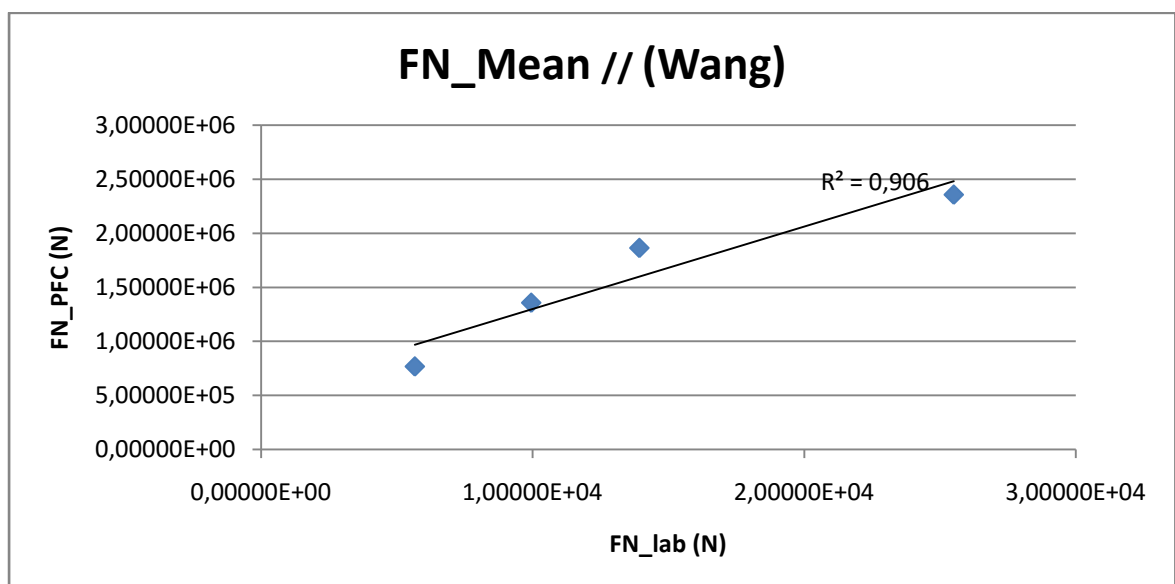
Βάθος (mm)	Εργαστηριακά		PFC	
	FR_Max (N)	FR_Mean (N)	FR_Max (N)	FR_Mean (N)
2	1,37400E+03	6,13427E+02	1,31336E+06	2,77025E+05
3	3,63246E+03	1,67191E+03	2,06849E+06	4,35946E+05
5	6,95400E+03	4,02904E+03	3,03054E+06	8,37941E+05



Διάγραμμα 6.11. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών δύναμης κύλισης \perp στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Yoon

Πίνακας 6.24. Μέγιστες και μέσες τιμές ορθής δύναμης κατά την κοπή στο εργαστήριο // με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Wang

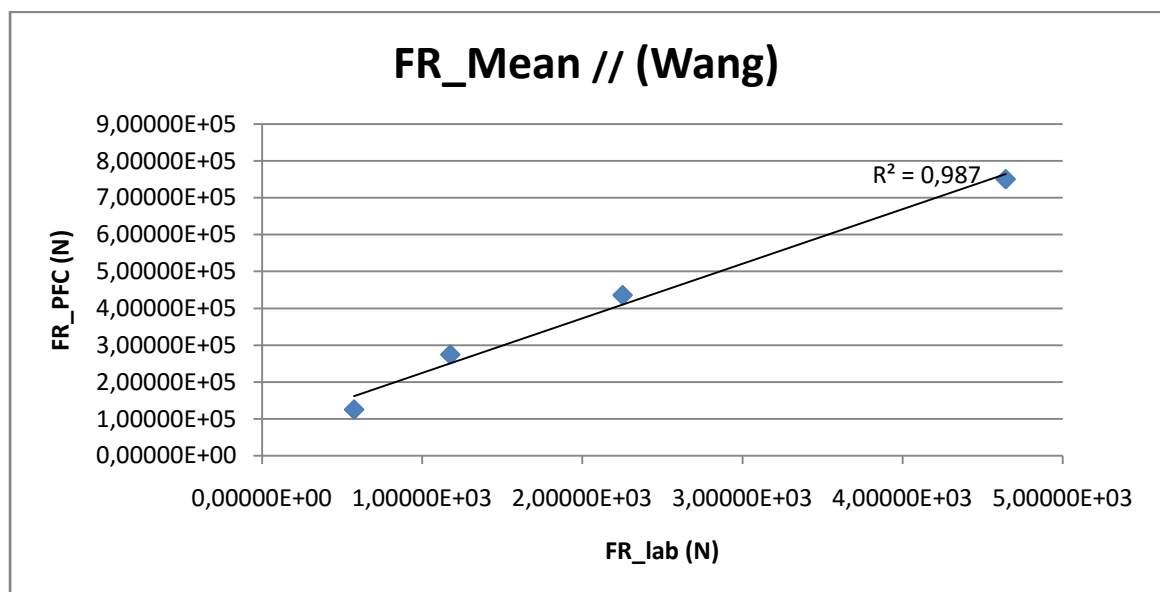
Βάθος (mm)	Εργαστηριακά		PFC	
	FN_Max (N)	FN_Mean (N)	FN_Max (N)	FN_Mean (N)
1	1,14460E+04	5,66554E+03	4,03892E+06	7,66889E+05
2	1,89540E+04	9,95223E+03	5,93090E+06	1,35678E+06
3	2,49520E+04	1,39349E+04	7,55513E+06	1,86401E+06
5	4,69160E+04	2,55161E+04	7,61589E+06	2,35728E+06



Διάγραμμα 6.12. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών ορθής δύναμης // στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Wang

Πίνακας 6.25. Μέγιστες και μέσες τιμές δύναμης κύλισης κατά την κοπή στο εργαστήριο // με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Wang

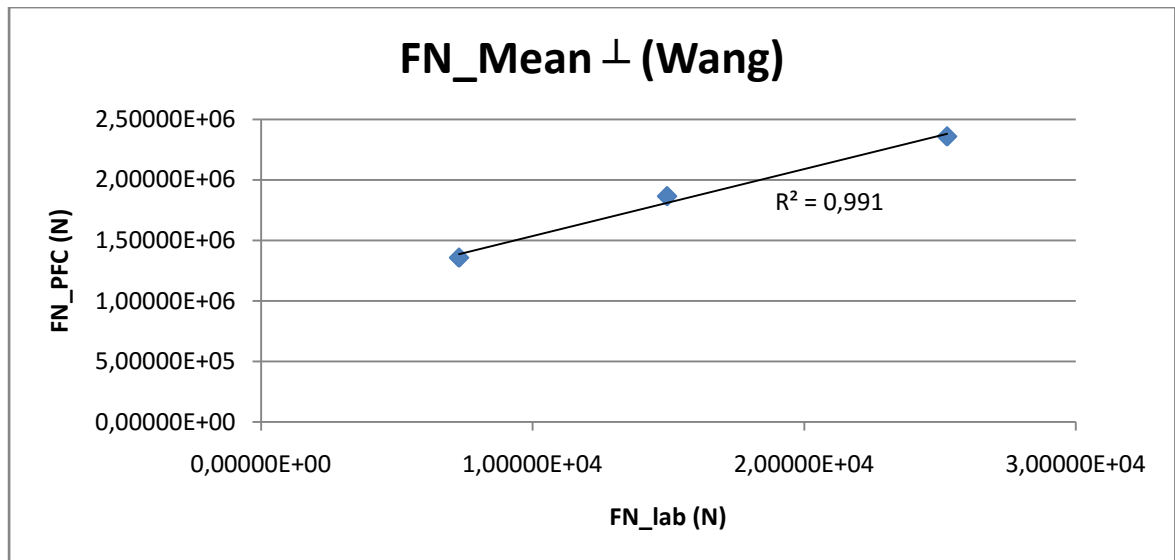
	Εργαστηριακά		PFC	
Βάθος (mm)	FR_Max (N)	FR_Mean (N)	FR_Max (N)	FR_Mean (N)
1	1,05900E+03	5,75096E+02	8,63940E+05	1,25289E+05
2	2,00400E+03	1,17625E+03	1,19457E+06	2,74364E+05
3	3,89900E+03	2,25216E+03	1,66181E+06	4,35724E+05
5	8,24300E+03	4,64426E+03	2,37246E+06	7,50311E+05



Διάγραμμα 6.13. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών δύναμης κύλισης // στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Wang

Πίνακας 6.26. Μέγιστες και μέσες τιμές ορθής δύναμης κατά την κοπή στο εργαστήριο \perp με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Wang

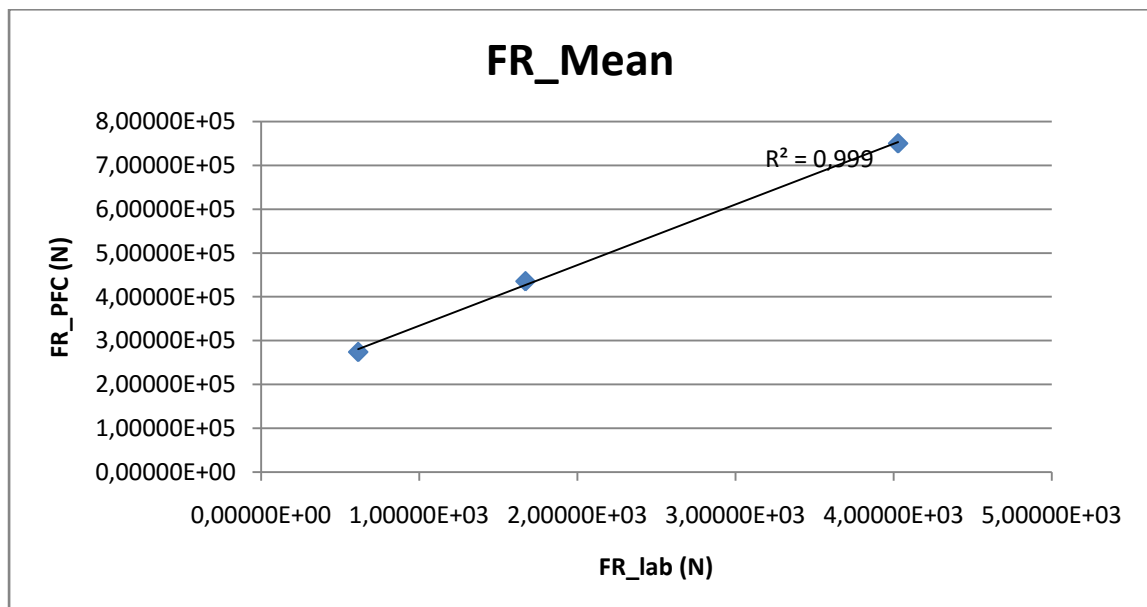
	Εργαστηριακά		PFC	
Βάθος (mm)	FN_Max (N)	FN_Mean (N)	FN_Max (N)	FN_Mean (N)
2	1,26340E+04	7,29443E+03	5,93090E+06	1,35678E+06
3	2,48096E+04	1,49539E+04	7,55513E+06	1,86401E+06
5	3,81050E+04	2,52639E+04	7,61589E+06	2,35728E+06



Διάγραμμα 6.14. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών ορθής δύναμης \perp στη σχιστότητα του πετρώματος και προσομοιώσεων με τη μέθοδο Wang

Πίνακας 6.27. Μέγιστες και μέσες τιμές δύναμης κύλισης κατά την κοπή στο εργαστήριο \perp με τη σχιστότητα του πετρώματος και στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Wang

Βάθος (mm)	Εργαστηριακά		PFC	
	FR_Max (N)	FR_Mean (N)	FR_Max (N)	FR_Mean (N)
2	1,37400E+03	6,13427E+02	1,19457E+06	2,74364E+05
3	3,63246E+03	1,67191E+03	1,66181E+06	4,35724E+05
5	6,95400E+03	4,02904E+03	2,37246E+06	7,50311E+05



Διάγραμμα 6.15. Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών δύναμης κύλισης \perp στη σχιστότητα με τη μέθοδο Wang

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι δυνατό να γίνουν ορισμένες παρατηρήσεις. Αρχικά, είναι φανερό ότι οι δυνάμεις των προσομοιώσεων είναι πολύ υψηλότερες από τις

πραγματικές. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι τόσο στις εργαστηριακές δοκιμές όσο και στις προσομοιώσεις, μεγαλύτερο βάθος κοπής οδηγεί σε μεγαλύτερες δυνάμεις κοπής.

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί η πολύ καλή συσχέτιση που προκύπτει από τα διαγράμματα, τόσο παράλληλα όσο και κάθετα στη σχιστότητα, ανεξάρτητα από τις μικροπαραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής R^2 κυμαίνεται μεταξύ 0,9 και 1, πράγμα που δείχνει ότι η συσχέτιση των τιμών που προκύπτουν από την προσομοίωση με τις εργαστηριακές είναι σε πολύ καλά επίπεδα. Πρέπει να αναφερθεί ότι κάθε διάγραμμα που αφορά σε κοπή παράλληλα στη σχιστότητα του πετρώματος κατασκευάστηκε βάσει τεσσάρων δοκιμών, ενώ για κοπή κάθετα στη σχιστότητα χρησιμοποιήθηκαν τρεις δοκιμές. Κάτι τέτοιο καθιστά το δείγμα εξαιρετικά περιορισμένο, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων με ακρίβεια. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό να υποστηριχθεί και από το ότι η ταχύτητα της κοπής κατά την προσομοίωση είναι 5 m/s σε αντίθεση με την πραγματική που είναι 0,0583 m/s. Παρόλα αυτά, ο πολύ καλός βαθμός συσχέτισης σε αυτό το πρώιμο στάδιο της μελέτης είναι στοιχείο ενθαρρυντικό για μελλοντικές έρευνες επί του θέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά τη διάρκεια της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας κατέστη δυνατή η εξαγωγή ιδιαίτερας χρήσιμων συμπερασμάτων για τη λειτουργία του λογισμικού, για τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και για το τι μπορεί να φανεί χρήσιμο σε μελλοντικές μελέτες, επί του αντικειμένου.

Αρχικά, είναι φανερό το γεγονός ότι οι μέθοδοι προσδιορισμού των μικροπαραμέτρων που πρόκειται να εισαχθούν στο PFC, δεν είναι, σε καμία περίπτωση, ακριβείς. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό λόγω των πολύ μεγάλων αποκλίσεων από τις εργαστηριακές τιμές, όταν χρησιμοποιούνται οι αρχικές μικροπαραμέτροι που προέκυψαν από το Matlab. Κάτι τέτοιο σημαίνει, ότι απαιτείται βαθμονόμηση, ώστε να βρεθούν οι παράμετροι που κάνουν το μοντέλο να προσεγγίσει την πραγματικότητα.

Αναφερόμενοι στη μέθοδο του Youn ως προς την εφαρμογή της σε μοντέλο συνδεδεμένο με παράλληλους δεσμούς, μπορεί να παρατηρηθεί η τάση να προκύπτουν διπλάσιες έως και τριπλάσιες τιμές των εργαστηριακών, τόσο στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης όσο και στη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.

Όσον αφορά στη μέθοδο των Wang et al, οι μικροπαραμέτροι που υπεισέρχονται είναι δέκα, ενώ οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό τους είναι τρεις. Κάτι τέτοιο οδηγεί σε μεγάλη διακύμανση αποτελεσμάτων των μικροπαραμέτρων, που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις αρχικές τιμές που εισάγονται στο Matlab. Κάτι τέτοιο σημαίνει πως αν δεν είναι γνωστό στο χρήστη το εύρος κάθε μικροπαραμέτρου που συνήθως οδηγεί σε συμφωνία των μοντέλων με τις εργαστηριακές τιμές, είναι πιθανό να προκύψουν αποτελέσματα που δεν σχετίζονται σε καμία περίπτωση με την πραγματικότητα. Σε περίπτωση που είναι γνωστό το εύρος τιμών των μικροπαραμέτρων, οι εξισώσεις της μεθόδου οδηγούν σε μία πολύ πρόωμη εκτίμηση των τελικών μικροπαραμέτρων.

Σημαντική, παρόλα αυτά, θεωρείται η μέθοδος του Uniform Design (UD), που χρησιμοποιήθηκε από τον Wang, καθώς είναι δυνατή η εύρεση κάποιας ομάδας μικροπαραμέτρων η οποία δίνει αποτελέσματα με παρόμοιες αποκλίσεις από τις εργαστηριακές τιμές. Κάτι τέτοιο διευκολύνει τη διαδικασία της βαθμονόμησης, μειώνοντας αρκετά τον απαιτούμενο χρόνο για την περάτωσή της.

Από τα παραπάνω, γίνεται φανερή η ανάγκη για βαθμονόμηση των μοντέλων σε κάθε περίπτωση, όπως φάνηκε από την παρούσα εργασία. Στη διαδικασία αυτή, κύριες παράμετροι για τη επίτευξη συμφωνίας πραγματικού και συνθετικού πετρώματος είναι η ορθή και η διατμητική αντοχή των δεσμών του δοκιμίου.

Όσον αφορά στις προσομοιώσεις κοπής, συμπεραίνεται ότι η χρήση πλευρικών τοίχων είναι απαραίτητη για τη στήριξη του συνθετικού πετρώματος και για να πραγματοποιείται θραύση του μόνο στην επιθυμητή περιοχή, δηλαδή σε εκείνη που κινείται το κοπτικό δίσκου. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως οι ιδιότητες

και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του κοπτικού δεν επηρεάζουν τις προσομοιώσεις, καθώς κοπές τέτοιας κλίμακας προκαλούν, πρακτικά, μηδενική φθορά στο δίσκο.

Τα βαθμονομημένα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν ακολούθως για προσομοίωση των εργαστηριακών δοκιμών κοπής. Οι μικροπαράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν δεν οδήγησαν σε ρεαλιστικά αποτελέσματα, διότι οι τιμές των δυνάμεων κοπής που προέκυψαν ήταν 2 έως και 3 τάξεις υψηλότερες από τη μακροσκοπική απόκριση του πετρώματος. Παρόλα αυτά, η μορφή των διαγραμμάτων των προσομοιώσεων, αναπαριστούσε ικανοποιητικά τα αντίστοιχα εργαστηριακά, για ταχύτητα κοπής 5 m/s, πράγμα που έδειξε την επιτυχή δημιουργία μοντέλου το οποίο προσομοιάζει την ψαθυρή συμπεριφορά του σχιστώδους ορθογενεσίου.

Σημαντικά προβλήματα προέκυψαν για προσομοιώσεις δοκιμών σε μικρές ταχύτητες που πλησιάζουν την εργαστηριακή. Ο χρόνος περάτωσής τους φτάνει σε απαγορευτικά επίπεδα, όπως για παράδειγμα με ταχύτητα αντίστοιχη της εργαστηριακής δοκιμής, που ξεπερνά τις 13 ημέρες. Επιπρόσθετα, το λογισμικό επεξεργάζεται πολύ μεγάλο αριθμό πληροφοριών, με αποτέλεσμα να διακόπτεται η προσομοίωση πριν ολοκληρωθεί, ή να αδυνατεί να εμφανίσει τα αποτελέσματα.

Η χρήση επιπέδων με αυξανόμενο εύρος ακτινών πηγαίνοντας προς τη βάση του δείγματος, σύμφωνα με τη διαδικασία που ακολούθησε ο Su, βοήθησε σε μεγάλο βαθμό, μειώνοντας το χρόνο περάτωσης των προσομοιώσεων κατά 25% περίπου. Έτσι, η δοκιμή κοπής με την εργαστηριακή ταχύτητα ολοκληρώθηκε σε 10 περίπου ημέρες.

Η πραγματοποίηση προσομοιώσεων δοκιμών κοπής οδήγησε στο συμπέρασμα ότι αύξηση της ταχύτητας κοπής έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των δυνάμεων. Αύξηση του βάθους κοπής οδηγεί, επίσης, σε μεγαλύτερες δυνάμεις κοπής.

Σημαντικό συμπέρασμα αποτελεί η πιθανή δυνατότητα συσχέτισης των μέσων δυνάμεων των προσομοιώσεων με τις εργαστηριακές, όπως προέκυψε στην παράγραφο 6.5. Οι υψηλοί βαθμοί συσχέτισης R^2 , είναι ένας θετικός παράγοντας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά με στόχο την πρόβλεψη των δυνάμεων σε συγκεκριμένες συνθήκες. Βέβαια, είναι απαραίτητη η περαιτέρω έρευνα επί του θέματος, καθώς ο αριθμός των δοκιμών και των προσομοιώσεων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πολύ μικρός, οδηγώντας σε συμπεράσματα με πολλές επιφυλάξεις. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να γίνει αντίστοιχη μελέτη με στόχο τη συσχέτιση των εργαστηριακών δυνάμεων με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από προσομοιώσεις με ταχύτητα κοπής ίδια με αυτή του εργαστηρίου.

Ακολουθούν κάποιες προτάσεις που είναι δυνατό να ληφθούν υπόψη σε μετέπειτα μελέτες επί του αντικειμένου. Αρχικά, πρέπει να αναφερθεί ότι οι προσομοιώσεις δοκιμών μονοαξονικής θλίψης, έμμεσου εφελκυσμού και κοπής πραγματοποιήθηκαν βάσει απλών παραδειγμάτων που περιέχονται στο Manual PFC 5.0. Κάτι τέτοιο, είναι πιθανό να σημαίνει τη μη ρεαλιστική προσομοίωση των δοκιμών ή των μηχανικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων. Σε μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να

χρησιμοποιηθούν πιο ρεαλιστικοί κώδικες, για μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση.

Κατά τη διαδικασία της επιλογής μικροπαραμέτρων, είναι πιθανό να μπορεί συμπεριληφθεί η δοκιμή δυσθραυστότητας, οδηγώντας σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Η διαδικασία της βαθμονόμησης, παρόλα αυτά, θα διαρκεί πολύ περισσότερο, εφόσον θα πρέπει να γίνει βαθμονόμηση ταυτόχρονα σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, έμμεσου εφελκυσμού και δυσθραυστότητας.

Επίσης, είναι πολύ σημαντικό να πραγματοποιηθεί παραμετρική ανάλυση στη δοκιμή της κοπής. Κάτι τέτοιο θα βοηθούσε στην κατανόηση του βαθμού επίδρασης κάθε μικροπαραμέτρου σε αυτή τη δοκιμή, κάνοντας πιο εύκολη την προσπάθεια για συμφωνία της προσομοίωσης με την εργαστηριακή δοκιμή.

Ακόμη, σε μελλοντικές μελέτες, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης συσσωματωμάτων σφαιρών (clumps ή clusters), τα οποία προσδίδουν ετερογένεια στο δείγμα, με αποτέλεσμα να προσομοιάζει ακριβέστερα τους κόκκους των πετρωμάτων. Η χρήση διαφορετικού τρόπου πακεταρίσματος των δοκιμίων, όπως για παράδειγμα η εισαγωγή κάποιου εντατικού πεδίου, είναι πιθανό να βοηθήσει στη ρεαλιστική προσομοίωση της κοπής, καθώς τα πετρώματα, ευρισκόμενα *in situ*, έχουν τάσεις στο εσωτερικό τους.

Τέλος, μείζονος σημασίας είναι η χρήση του PFC^{3D}, για τρισδιάστατη μεταφορά της δοκιμής στο λογισμικό, κάτι το οποίο είναι πιθανό να δώσει ρεαλιστικά αποτελέσματα, χάρη στον πλήρως δυναμικό χαρακτήρα του PFC.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Καρατζά Ζ. Τ. (2011). Προσομοίωση Εργαστηριακών Δοκιμών Αντοχής Άρρηκτου Πετρώματος με τη Μέθοδο Διακριτών Στοιχείων
2. Πατσίδης Γ. (2012). Εργαστηριακή διερεύνηση της εξόρυξης ορθογνευσίου Ικαρίας με μηχανικά μέσα
3. Benjumea R. Sikarskie D. L. (1969). A Note on the Penetration of a Rigid Wedge into a Nonisotropic Brittle Material. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 6, pp. 343-352
4. Cundall P., Potyondy D. (2009). PFC3D Example: Quiet Boundaries and Seismic Wave Input. PFC Development Files and Itasca Website
5. Choi S., Lee S. (2015). Three-Dimensional Numerical Analysis of the Rock-Cutting Behavior of a Disc Cutter using Particle Flow Code. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(4):1129-1138
6. Cho N., Martin C.D., Sego D.C. (2007). A clumped particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44, 997–1010
7. Choi S., Lee S. (2015). Numerical Study to Estimate the Cutting Power on a Disc Cutter in Jointed Rock Mass. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-12
8. Emam S., Potyondy D. (2010). PFC2D Rock-Cutting Procedures. PFC Development Files and Itasca Website
9. Fakhimi A., Villegas T. (2007). Application of Dimensional Analysis in Calibration of a Discrete Element Model for Rock Deformation and Fracture. *Rock Mech. Rock Engng.*, 40 (2), 193–211
10. Fang K., Lin D. K. J. (2003). Uniform Experimental Designs and their Applications in Industry
11. Fowell R. J. (1993). *The Mechanics of Rock Cutting*
12. Kazerani T., Zhao J. (2010). Micromechanical parameters in bonded particle method for modelling of brittle material failure. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 34, 1877–1895
13. Mak J., Chen Y., Sadek M. A. (2012). Determining parameters of a discrete element model for soil–tool interaction. *Soil & Tillage Research*, 118, 117–122
14. Mathworks. (2015). *Matlab, Optimization Toolbox, User's Guide*

15. Moon T., A Computational Methodology for Modeling Rock Cutting with a Discrete Element Method: Prediction of TBM Rock Cutting Performance
16. Obermayr M., Dressler K., Vrettos C., Eberhard P. (2011). Prediction of draft forces in cohesionless soil with the Discrete Element Method. *Journal of Terramechanics*, 48, 347–358
17. Obermayr M., Vrettos C., Eberhard P, Dauwel T. (2014). A discrete element model and its experimental validation for the prediction of draft forces in cohesive soil. *Journal of Terramechanics*, 53, 93–104
18. Paul B., Sikarskie S. L. (1965). A preliminary theory of static penetration by a rigid wedge into a brittle material
19. PFC 5.0 Manual
20. Potyondy D. (2010). Molecular Dynamics with PFC. PFC Development Files and Itasca Website
21. Potyondy D. (2012). PFC3D Pressure Boundary Condition. PFC Development Files and Itasca Website
22. Roxborough F. F., Phillips H. R. (1975). Rock Excavation by Disk Cutter. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 12. pp. 361-366
23. Sanio H. P. (1985). Prediction of the Performance of Disc Cutters in Anisotropic Rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 22, No 3, pp. 153-161
24. Snowdon R. A., Ryley M. D., Temporal J. (1982). A Study of Disc Cutting in Selected British Rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 19, pp. 107 to 121
25. Su O., Akcin N. A. (2011). Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48, 434–442
26. Wang H., Xu C., Li T., Liu S., Peng N. The relationships between macro- and micro-mechanical parameters for modeling diamond rock cutting using DEM
27. Yoon J. (2007). Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44, 871–889
28. Zhang Q., Zhu H., Zhang L, Ding X. (2011). Study of scale effect on intact rock strength using particle flow modeling. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48, 1320–1328

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των μικροπαραμέτρων στη μέθοδο Υoon.

Αντικειμενική Συνάρτηση

```
function f=objfun(x)
```

```
UCS=164.55;
```

```
f=abs(128.79+41.86*x(4)+43.97*x(5)-14.49*(x(4)^2)-  
16.66*(x(5)^2)+30.42*x(4)*x(5)-UCS);
```

Μη Γραμμικοί Περιορισμοί (Ανισώσεις-Εξισώσεις)

```
function[c,ceq]=confuneq(x)
```

```
c=[(-37.92-11.01*x(4)-12.2*x(5)+2.97*(x(4)^2)+6.66*(x(5)^2)-11.15*x(4)*x(5));
```

```
(-174.11-60.98*x(4)-61.93*x(5)+23.91*(x(4)^2)+16.66*(x(5)^2)-  
33.81*x(4)*x(5))];
```

```
ceq=[];
```

Γραμμικοί Περιορισμοί (Ανισώσεις)

```
A=[0.839,-3.276,-4.295,-6.276,-17.996,0.016,10.7;
```

```
-23.4,-10.5,-20.59,-58.04,-44.08,-4.37,-2.3;
```

```
0,0,0,6,-3,0,0;
```

```
0,0,0,-9,3,0,0];
```

```
b=[30.721;134.57;-5;10;];
```

Γραμμικοί Περιορισμοί (Εξισώσεις)

```
UCS=164.55;
```

```
Youngs_modulus=48.2;
```

```
Poissons_ratio=0.263;
```

```
Aeq=[8.83,9.18,14.96,33.84,44.6,1.85,-14.3;
```

```
21.28,-10.3,-1.31,1.52,2,-2.1,-2.2;
```

0.0012,0.074,-0.0012,-0.0038,0.0006,0.0042,0.01;];

beq=[UCS-101.56;Youngs_modulus-49.54;Poissons_ratio-0.1848;];

Αρχικές Τιμές - Ανώτερα και Κατώτερα όρια Αγνώστων

x0=[1,1,1,1,1,1,1];

lb=[-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1];

ub=[1,1,1,1,1,1,1];

Λύση με fmincon

nonlcon=@confuneq;

fun=@objfun;

fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon)

2.Αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των μικροπαραμέτρων στη μέθοδο Wang.

Εξισώσεις του Wang

function F=fbnd(x)

E=48.2;

v=0.263;

UCS=164.55;

F(1)=6.7834-4.6525*(x(2)^2)-1.3044*((x(5)*x(7))^2)+0.1027*((x(1)*x(10))^2)-
0.055898*((x(2)*x(7))^2)-
0.0151*((x(7)*x(10))^2)+0.013263*((x(1)*x(6))^2)+0.0058384*((x(4)*x(10))^2)+0.0
0027615*((x(3)*x(9))^2)-0.000002026*((x(6)*x(9))^2)-0.00000072925*(x(8)^4)-E;

F(2)=0.3085+0.0014394*(x(4)^4)-
0.0016556*(x(7)^4)+0.00028444*(x(10)^4)+0.0023271*((x(1)*x(4))^2)-
0.00022186*((x(1)*x(6))^2)+0.032799*((x(1)*x(7))^2)-
0.000018648*((x(2)*x(3))^2)-
0.0003922*((x(2)*x(4))^2)+0.000019663*((x(2)*x(10))^2)+0.00042036*((x(5)*x(8))
^2)-v;

F(3)=1.4712-0.6642*(x(2)^4)-
0.00000031422*(x(9)^4)+0.2622*((x(1)*x(2))^2)+0.054664*((x(1)*x(3))^2)-
0.050914*((x(1)*x(6))^2)-0.0077426*((x(3)*x(4))^2)-

$0.063306*((x(5)*x(6))^2)+0.018929*((x(5)*x(8))^2)+0.00030361*((x(6)*x(9))^2)-$
 $0.000023362*((x(8)*x(9))^2)-UCS;$

Αρχικές Τιμές και Λύση με fsolve

fun=@fbndsqr;

x0=[18,1.7,6,1.8,0.1,18,1.85,6.5,8,0];

x=fsolve(fun,x0)

3. UCS με παράλληλους δεσμούς

Κατασκευή Μοντέλου

new

title 'Testing Bonded Particle Model'

; ορισμός της έκτασης domain

domain extent -0.05 0.05 -0.1 0.1 condition destroy

; ορισμός των μοντέλων που ισχύουν στο αρχικό μοντέλο

cmat default model linear method deform emod 84.64e9 kratio 3.991

cmat default property dp_nratio 0.5

; δημιουργία τοίχων δοκιμίου

wall create vertices -0.03,0.05 0.03,0.05 id 1

wall create vertices -0.03,-0.05 0.03,-0.05 id 2

wall create vertices -0.025,-0.06 -0.025,0.06 id 3

wall create vertices 0.025,-0.06 0.025,0.06 id 4

; ορισμός δοκιμίου, σωματιδίων και χαρακτηριστικών τους

set random 10001

ball distribute porosity 0.05 radius 0.361e-3 0.59926e-3 box -0.025 0.025 -0.05 0.05

ball attribute density 2628.4 damp 0.7

; ηρεμία συστήματος

cycle 1000 calm 10

; λύση συστήματος έως συγκεκριμένο όριο υποβάθμισης της μέσης δύναμης

set timestep scale

solve aratio 1e-4

set timestep auto

calm

; διαγραφή πλευρικών τοιχωμάτων

wall delete range id 3

wall delete range id 4

save unbonded

Παράλληλοι Δεσμοί

rest unbonded

; ορισμός παράλληλων δεσμών σε επαφές σωματιδίων

contact model linearbond range contact type ball-ball

contact method bond gap 0.5e-4

; ορισμός γραμμικής δυσκαμψίας

contact method deform emod 84.64e9 kratio 3.991

; ορισμός δυσκαμψίας των παράλληλων δεσμών

contact method pb_deform emod 84.64e9 kratio 2.5

; ορισμός αντοχής παράλληλων δεσμών

contact property pb_ten 45.025e6 pb_coh 55e6 pb_fa 0.0

; ορισμός απόσβεσης στις επαφές

contact property dp_nratio 0.5

; ορισμός συντελεστή τριβής μεταξύ σωματιδίων

contact property fric 0.749 range contact type ball-ball

; μηδενισμός του πολλαπλασιαστή μετατόπισης των σωματιδίων

ball attribute displacement multiply 0.0

; ορισμός γραμμικής δύναμης σε 0 και επανεκκίνηση των δυνάμεων επαφής

contact property lin_force 0.0 0.0 lin_mode 1

ball attribute contactforce multiply 0.0 contactmoment multiply 0.0

cycle 1

solve aratio 1e-5

save parallel_bonded

Προσομοίωση UCS

; εισαγωγή των αρχείων fis

set echo off

call ss_wall.fis

```
call fracture.p2fis

set echo on

; ορισμός παραμέτρων για μέτρηση τάσεων και παραμορφώσεων
@setup_wall

; εφαρμογή φόρτισης με τη μετακίνηση των πάνω και κάτω τοίχων
wall attribute yvel -0.1 range id 1
wall attribute yvel 0.1 range id 2

; εφαρμογή μικρού συντελεστή απόσβεσης
ball attribute damp 0.1

; καταγραφή ιστορίας
history id 1 @axial_stress_wall
history id 2 @axial_strain_wall

; καταγραφή ρωγματώσεων
@track_init

history id 3 @crack_num

; τρέξιμο για να ξεπεραστούν αρχικές δονήσεις στο δείγμα
cyc 1000

; τρέξιμο της δοκιμής μέχρι η τάση να πέσει κάτω από το 70% της μέγιστης
καταγεγραμμένης
SET @peak_fraction = 0.7
```

```
solve fishhalt @loadhalt_wall
```

```
list @peak_stress
```

Ρωγμοτώσεις

```
define add_crack(entries)
```

```
    local contact = entries(1)
```

```
    local mode = entries(3)
```

```
    local frac_pos = contact.pos(contact)
```

```
    local norm = contact.normal(contact)
```

```
    local dfn_label = 'crack'
```

```
    local frac_size
```

```
    local bp1 = contact.end1(contact)
```

```
    local bp2 = contact.end2(contact)
```

```
    local ret = math.min(ball.radius(bp1),ball.radius(bp2));contact.method(contact,'pb_radius')
```

```
    frac_size = ret
```

```
    local inDir = vector(-comp.y(norm),comp.x(norm))
```

```
    local vert1 = frac_pos + inDir * frac_size
```

```
    local vert2 = frac_pos - inDir * frac_size
```

```
    local arg = array.create(4)
```

```
    arg(1) = 'vertices'
```

```
    arg(2) = 2
```

```
    arg(3) = vert1
```

```
    arg(4) = vert2
```

```
    crack_num = crack_num + 1
```

```

if mode = 1 then
    ; αστοχία σε εφελκυσμό
    dfn_label = dfn_label + '_tension'
else if mode = 2 then
    ; αστοχία σε διάτμηση
    dfn_label = dfn_label + '_shear'
endif

global dfn = dfn.find(dfn_label)
if dfn = null then
    dfn = dfn.add(0,dfn_label)
endif

local fnew = dfn.addfracture(dfn,arg)
dfn.fracture.prop(fnew,'age') = mech.age
dfn.fracture.extra(fnew,1) = bp1
dfn.fracture.extra(fnew,2) = bp2
crack_accum += 1
if crack_accum > 50
    if frag_time < mech.age
        frag_time = mech.age
        crack_accum = 0
        command
            fragment compute
        endcommand
    ; ενημέρωση των θέσεων ρωγματώσεων
    loop for (local i = 0, i < 2, i = i + 1)
        local name = 'crack_tension'

```



```

if i = 1
    name = 'crack_shear'
endif
dfn = dfn.find(name)
if dfn # null
    loop foreach local frac dfn.fracturelist(dfn)
        local ball1 = dfn.fracture.extra(frac,1)
        local ball2 = dfn.fracture.extra(frac,2)
        if ball1 # null
            if ball2 # null
                local len = dfn.fracture.len(frac)/2.0
                local pos = (ball.pos(ball1)+ball.pos(ball2))/2.0
                if comp.x(pos)-len > xmin
                    if comp.x(pos)+len < xmax
                        if comp.y(pos)-len > ymin
                            if comp.y(pos)+len < ymax
                                dfn.fracture.pos(frac) = pos
                            endif
                        endif
                    endif
                endif
            endif
        endif
    endif
endif
endloop
endif
endloop
endif

```

```

endif
end

define track_init
  command
    dfn delete
    ball result clear
    fragment clear
    fragment register ball-ball
  endcommand
; ενεργοποίηση των fishcalls
  command
    set fish callback bond_break remove @add_crack
    set fish callback bond_break @add_crack
  endcommand
; μηδενισμός των μεταβλητών
  global crack_accum = 0
  global crack_num = 0
  global track_time0 = mech.age
  global frag_time = mech.age
  global xmin = domain.min.x()
  global ymin = domain.min.y()
  global xmax = domain.max.x()
  global ymax = domain.max.y()

end

```

Δυνάμεις και Λίστα Πληροφοριών

```
def setup_wall

; εύρεση των τοίχων και υπολογισμός αρχικών διατάσεων δοκιμίου
global wp_top = wall.find(1) ; υποθέτοντας wall 1 τον πάνω τοίχο
global wp_bottom = wall.find(2) ; υποθέτοντας wall 2 τον κάτω τοίχο
global vertical_direction = global.dim

global sample_height = wall.pos(wp_top,vertical_direction) -
wall.pos(wp_bottom,vertical_direction)

; υπόθεση ότι x και y είναι κατά προσέγγιση ίδια σε 3D
local xmin = 1.0e12
local xmax = -1.0e12
loop foreach bp ball.list
local ball_xmin = ball.pos.x(bp) - ball.radius(bp)
xmin = math.min(xmin,ball_xmin)
local ball_xmax = ball.pos.x(bp) + ball.radius(bp)
xmax = math.max(xmax,ball_xmax)
end_loop

local diameter_ = xmax - xmin
if global.dim = 2
global cross_sectional_area = diameter_
else
; υπόθεση κυλινδρικού δοκιμίου σε 3D
cross_sectional_area = math.pi*0.25*diameter_*diameter_
```

```
end_if
```

```
end
```

```
=====
```

```
def axial_stress_wall
```

```
; υπολογισμός αξονικής τάσης χρησιμοποιώντας τους τοίχους
```

```
; υπόθεση ότι οι μεταβλητές sample_height και sample_width έχουν οριστεί
```

```
local force1 = -wall.force.contact(wp_top,vertical_direction)
```

```
local force2 = wall.force.contact(wp_bottom,vertical_direction)
```

```
axial_stress_wall = 0.5*(force1+force2)/cross_sectional_area
```

```
end
```

```
=====
```

```
def axial_strain_wall
```

```
; υπολογισμός αξονικής τάσης χρησιμοποιώντας τους τοίχους
```

```
; υπόθεση ότι η μεταβλητή sample_width έχει οριστεί
```

```
axial_strain_wall = 2.0*wall.disp(wp_top,vertical_direction)/sample_height
```

```
end
```

```
=====
```

```
def loadhalt_wall
```

```
; συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τη διακοπή μίας δοκιμής όταν η αξονική τάση  
μειώνεται σε ένα ποσοστό της μέγιστης
```

```
; υπόθεση ότι η axial_stress_wall είναι συνάρτηση που επιστρέφει αξονική τάση
```

```
; INPUT: peak_fraction - ρωγματώσεις της μέγιστης τάσης που καθορίζουν το πότε  
θα σταματήσει η δοκιμή
```

```
loadhalt_wall = 0
```

```
local abs_stress = math.abs(axial_stress_wall)
```

```
global peak_stress = math.max(abs_stress,peak_stress)
```

```
if abs_stress < peak_stress*peak_fraction
  loadhalt_wall = 1
end_if
end
```

4. BTS με παράλληλους δεσμούς

Κατασκευή Μοντέλου

```
new
title 'BTS test'

; ορισμός της έκτασης domain
domain condition destroy extent -0.05 0.05 -0.1 0.1

; ορισμός των μοντέλων που ισχύουν στο αρχικό μοντέλο
cmat default model linear method deformability emod 84.64e9 kratio 3.991

; δημιουργία κυκλικού τοίχου δοκιμίου
geometry set circle
geometry generate circle radius 27.42e-3
wall import geometry circle name circle

; ορισμός δοκιμίου, σωματιδίων και χαρακτηριστικών τους
set random 10001
ball distribute porosity 0.05 radius 0.361e-3 0.59926e-3 range geometry circle count 1
ball attribute density 2628.4 damp 0.7
```

```
; ηρεμία συστήματος
cycle 1000 calm 100

; λύση συστήματος έως συγκεκριμένο όριο υποβάθμισης της μέσης δύναμης
set timestep scale

solve aratio 1e-4

set timestep auto

calm

ball delete range geometry circle count 1 not

save unbonded
```

Παράλληλοι Δεσμοί

```
restore unbonded
```

```
; ορισμός παράλληλων δεσμών σε επαφές σωματιδίων
contact model linearpbond range contact type ball-ball

contact method bond gap 0.5e-4
```

```
; ορισμός γραμμικής δυσκαμψίας
contact method deform emod 84.64e9 kratio 3.991
```

```
; ορισμός δυσκαμψίας των παράλληλων δεσμών
contact method pb_deform emod 84.64e9 kratio 2.5
```

```
; ορισμός αντοχής παράλληλων δεσμών
contact property pb_ten 45.025e6 pb_coh 55e6 pb_fa 0.0
```

; ορισμός απόσβεσης στις επαφές

contact property dp_nratio 0.5

; ορισμός συντελεστή τριβής μεταξύ σωματιδίων

contact property fric 0.749 range contact type ball-ball

; μηδενισμός του πολλαπλασιαστή μετατόπισης των σωματιδίων

ball attribute displacement multiply 0.0

; ορισμός γραμμικής δύναμης σε 0 και επανεκκίνηση των δυνάμεων επαφής

contact property lin_force 0.0 0.0 lin_mode 1

ball attribute contactforce multiply 0.0 contactmoment multiply 0.0

cycle 1

solve aratio 1e-5

save parallel_bonded

Προσομοίωση BTS

; εισαγωγή των αρχείων fis

set echo off

call ss_wall.fis

call fracture.p2fis

set echo on

; ορισμός τοίχων δοκιμής εφελκυσμού

wall delete walls range name circle

wall create vertices (-30e-3,27.50e-3) (30e-3,27.50e-3) id 3

wall create vertices (-30e-3,-27.50e-3) (30e-3,-27.50e-3) id 4

; ορισμός παραμέτρων για μέτρηση τάσεων και παραμορφώσεων

@setup_wall

; εφαρμογή φόρτισης με τη μετακίνηση των πάνω και κάτω τοίχων

wall attribute yvel -0.1 range id 3

wall attribute yvel 0.1 range id 4

; εφαρμογή μικρού συντελεστή απόσβεσης

ball attribute damp 0.1

; καταγραφή ιστορίας

history id 1 @axial_stress_wall

history id 2 @axial_strain_wall

; καταγραφή ρωγματώσεων

@track_init

history id 3 @crack_num

; τρέξιμο της δοκιμής έως τη θραύση του δοκιμίου

cyc 300000

Ρωγματώσεις

define add_crack(entries)

 local contact = entries(1)


```

local mode    = entries(3)

local frac_pos = contact.pos(contact)

local norm    = contact.normal(contact)

local dfn_label = 'crack'

local frac_size

local bp1 = contact.end1(contact)

local bp2 = contact.end2(contact)

local          ret          =
math.min(ball.radius(bp1),ball.radius(bp2));contact.method(contact,'pb_radius')

frac_size = ret

local inDir = vector(-comp.y(norm),comp.x(norm))

local vert1 = frac_pos + inDir * frac_size

local vert2 = frac_pos - inDir * frac_size

local arg = array.create(4)

arg(1) = 'vertices'

arg(2) = 2

arg(3) = vert1

arg(4) = vert2

crack_num = crack_num + 1

if mode = 1 then
    ; αστοχία σε εφελκυσμό
    dfn_label = dfn_label + '_tension'
else if mode = 2 then
    ; αστοχία σε διάτμηση
    dfn_label = dfn_label + '_shear'
endif

```

```

global dfn = dfn.find(dfn_label)

if dfn = null then
    dfn = dfn.add(0,dfn_label)
endif

local fnew = dfn.addfracture(dfn,arg)

dfn.fracture.prop(fnew,'age') = mech.age

dfn.fracture.extra(fnew,1) = bp1
dfn.fracture.extra(fnew,2) = bp2

crack_accum += 1

if crack_accum > 50
    if frag_time < mech.age
        frag_time = mech.age
        crack_accum = 0
        command
            fragment compute
        endcommand
        ; ενημέρωση των θέσεων ρωγματώσεων
        loop for (local i = 0, i < 2, i = i + 1)
            local name = 'crack_tension'
            if i = 1
                name = 'crack_shear'
            endif
            dfn = dfn.find(name)
            if dfn # null
                loop foreach local frac dfn.fracturelist(dfn)
                    local ball1 = dfn.fracture.extra(frac,1)

```

```

local ball2 = dfn.fracture.extra(frac,2)
if ball1 # null
  if ball2 # null
    local len = dfn.fracture.len(frac)/2.0
    local pos = (ball.pos(ball1)+ball.pos(ball2))/2.0
    if comp.x(pos)-len > xmin
      if comp.x(pos)+len < xmax
        if comp.y(pos)-len > ymin
          if comp.y(pos)+len < ymax
            dfn.fracture.pos(frac) = pos
          endif
        endif
      endif
    endif
  endif
endif
endloop
endif
endloop
endif
end

```

```

define track_init
  command
    dfn delete
    ball result clear

```

```

    fragment clear

    fragment register ball-ball

endcommand

; ενεργοποίηση των fishcalls

command

    set fish callback bond_break remove @add_crack

    set fish callback bond_break @add_crack

endcommand

; μηδενισμός των μεταβλητών

global crack_accum = 0

global crack_num = 0

global track_time0 = mech.age

global frag_time = mech.age

global xmin = domain.min.x()

global ymin = domain.min.y()

global xmax = domain.max.x()

global ymax = domain.max.y()

end

```

Δυνάμεις και Λίστα Πληροφοριών

```

def setup_wall

; εύρεση των τοίχων και υπολογισμός αρχικών διατάσεων δοκιμίου

global wp_top = wall.find(3) ; υποθέτοντας wall 1 τον πάνω τοίχο

global wp_bottom = wall.find(4) ; υποθέτοντας wall 2 τον κάτω τοίχο

```

```

global vertical_direction = global.dim

global sample_height = wall.pos(wp_top,vertical_direction) -
wall.pos(wp_bottom,vertical_direction)

; υπόθεση ότι x και y είναι κατά προσέγγιση ίδια σε 3D

local xmin = 1.0e12

local xmax = -1.0e12

loop foreach bp ball.list

local ball_xmin = ball.pos.x(bp) - ball.radius(bp)

xmin = math.min(xmin,ball_xmin)

local ball_xmax = ball.pos.x(bp) + ball.radius(bp)

xmax = math.max(xmax,ball_xmax)

end_loop

local diameter_ = xmax - xmin

if global.dim = 2

global cross_sectional_area = diameter_

else

; υπόθεση κυλινδρικού δοκιμίου σε 3D

cross_sectional_area = math.pi*0.25*diameter_*diameter_

end_if

end

=====

def axial_stress_wall

; υπολογισμός αξονικής τάσης χρησιμοποιώντας τους τοίχους

```

; υπόθεση ότι οι μεταβλητές sample_height και sample_width έχουν οριστεί

local force1 = -wall.force.contact(wp_top,vertical_direction)

local force2 = wall.force.contact(wp_bottom,vertical_direction)

axial_stress_wall = 0.5*(force1+force2)/cross_sectional_area

end

=====

def axial_strain_wall

; υπολογισμός αξονικής τάσης χρησιμοποιώντας τους τοίχους

; υπόθεση ότι η μεταβλητή sample_width έχει οριστεί

axial_strain_wall = 2.0*wall.disp(wp_top,vertical_direction)/sample_height

end

5. UCS με σημειακούς δεσμούς

Κατασκευή Μοντέλου

new

title 'Testing Bonded Particle Model'

; ορισμός της έκτασης domain

domain extent -0.05 0.05 -0.1 0.1 condition destroy

; ορισμός των μοντέλων που ισχύουν στο αρχικό μοντέλο

cmat default model linear method deform emod 84.64e9 kratio 3.991

cmat default property dp_nratio 0.5

; δημιουργία τοίχων δοκιμίου

wall create vertices -0.03,0.05 0.03,0.05 id 1

wall create vertices -0.03,-0.05 0.03,-0.05 id 2

wall create vertices -0.025,-0.06 -0.025,0.06 id 3

wall create vertices 0.025,-0.06 0.025,0.06 id 4

; ορισμός δοκιμίου, σωματιδίων και χαρακτηριστικών τους

set random 10001

ball distribute porosity 0.05 radius 0.361e-3 0.59926e-3 box -0.025 0.025 -0.05 0.05

ball attribute density 2628.4 damp 0.7

; ηρεμία συστήματος

cycle 1000 calm 10

; λύση συστήματος έως συγκεκριμένο όριο υποβάθμισης της μέσης δύναμης

set timestep scale

solve aratio 1e-4

set timestep auto

calm

; διαγραφή πλευρικών τοιχωμάτων

wall delete range id 3

wall delete range id 4

save unbonded

Σημειακοί Δεσμοί

rest unbonded

; ορισμός σημειακών δεσμών σε επαφές σωματιδίων

contact model linearcbond range contact type ball-ball

contact method bond gap 0.5e-4

; ορισμός γραμμικής δυσκαμψίας

contact method deform emod 84.64e9 kratio 3.991

; ορισμός αντοχής των σημειακών δεσμών

contact property cb_tenf 0.2827e6 cb_shearf 0.5652e6 ;pb_fa 0.0

; ορισμός απόσβεσης στις επαφές

contact property dp_nratio 0.5

; ορισμός συντελεστή τριβής μεταξύ σωματιδίων

contact property fric 0.749 range contact type ball-ball

; μηδενισμός του πολλαπλασιαστή μετατόπισης των σωματιδίων

ball attribute displacement multiply 0.0

; ορισμός γραμμικής δύναμης σε 0 και επανεκκίνηση των δυνάμεων επαφής

contact property lin_force 0.0 0.0 lin_mode 1

ball attribute contactforce multiply 0.0 contactmoment multiply 0.0

cycle 1

solve aratio 1e-5

save parallel_bonded

Προσομοίωση UCS

; εισαγωγή των αρχείων fis

set echo off

call ss_wall.fis

call fracture.p2fis

set echo on

; ορισμός παραμέτρων για μέτρηση τάσεων και παραμορφώσεων

@setup_wall

; εφαρμογή φόρτισης με τη μετακίνηση των πάνω και κάτω τοίχων

wall attribute yvel -0.1 range id 1

wall attribute yvel 0.1 range id 2

; εφαρμογή μικρού συντελεστή απόσβεσης

ball attribute damp 0.1

; καταγραφή ιστορίας

history id 1 @axial_stress_wall

history id 2 @axial_strain_wall

; καταγραφή ρωγματώσεων

@track_init

history id 3 @crack_num

; τρέξιμο για να ξεπεραστούν αρχικές δονήσεις στο δείγμα

cyc 1000

; τρέξιμο της δοκιμής μέχρι η τάση να πέσει κάτω από το 70% της μέγιστης καταγεγραμμένης

SET @peak_fraction = 0.7

solve fishhalt @loadhalt_wall

list @peak_stress

Ρωγματώσεις

define add_crack(entries)

local contact = entries(1)

local mode = entries(3)

local frac_pos = contact.pos(contact)

local norm = contact.normal(contact)

local dfn_label = 'crack'

local frac_size

local bp1 = contact.end1(contact)

local bp2 = contact.end2(contact)

local $\text{ret} = \text{math.min}(\text{ball.radius}(\text{bp1}), \text{ball.radius}(\text{bp2})); \text{contact.method}(\text{contact}, 'pb_radius')$

frac_size = ret

local inDir = vector(-comp.y(norm), comp.x(norm))

local vert1 = frac_pos + inDir * frac_size

local vert2 = frac_pos - inDir * frac_size

local arg = array.create(4)

arg(1) = 'vertices'

arg(2) = 2

```

arg(3) = vert1
arg(4) = vert2
crack_num = crack_num + 1

if mode = 1 then
    ; αστοχία σε εφελκυσμό
    dfn_label = dfn_label + '_tension'
else if mode = 2 then
    ; αστοχία σε διάτμηση
    dfn_label = dfn_label + '_shear'
endif

global dfn = dfn.find(dfn_label)
if dfn = null then
    dfn = dfn.add(0,dfn_label)
endif

local fnew = dfn.addfracture(dfn,arg)
dfn.fracture.prop(fnew,'age') = mech.age
dfn.fracture.extra(fnew,1) = bp1
dfn.fracture.extra(fnew,2) = bp2
crack_accum += 1
if crack_accum > 50
    if frag_time < mech.age
        frag_time = mech.age
        crack_accum = 0
        command
            fragment compute

```

```

endcommand

; ενημέρωση των θέσεων ρωγματώσεων
loop for (local i = 0, i < 2, i = i + 1)

    local name = 'crack_tension'

    if i = 1

        name = 'crack_shear'

    endif

    dfn = dfn.find(name)

    if dfn # null

        loop foreach local frac dfn.fracturelist(dfn)

            local ball1 = dfn.fracture.extra(frac,1)

            local ball2 = dfn.fracture.extra(frac,2)

            if ball1 # null

                if ball2 # null

                    local len = dfn.fracture.len(frac)/2.0

                    local pos = (ball.pos(ball1)+ball.pos(ball2))/2.0

                    if comp.x(pos)-len > xmin

                        if comp.x(pos)+len < xmax

                            if comp.y(pos)-len > ymin

                                if comp.y(pos)+len < ymax

                                    dfn.fracture.pos(frac) = pos

                                endif

                            endif

                        endif

                    endif

                endif

            endif

        endif

    endif

endif

```

```

        endloop
    endif
endloop
endif
endif
end

define track_init
    command
        dfn delete
        ball result clear
        fragment clear
        fragment register ball-ball
    endcommand
; ενεργοποίηση των fishcalls
    command
        set fish callback bond_break remove @add_crack
        set fish callback bond_break @add_crack
    endcommand
; μηδενισμός των μεταβλητών
    global crack_accum = 0
    global crack_num = 0
    global track_time0 = mech.age
    global frag_time = mech.age
    global xmin = domain.min.x()
    global ymin = domain.min.y()
    global xmax = domain.max.x()

```

```

global ymax = domain.max.y()

end

Δυνάμεις και Λίστα Πληροφοριών

def setup_wall

; εύρεση των τοίχων και υπολογισμός αρχικών διατάσεων δοκιμίου
global wp_top = wall.find(1) ; υποθέτοντας wall 1 τον πάνω τοίχο
global wp_bottom = wall.find(2) ; υποθέτοντας wall 2 τον κάτω τοίχο
global vertical_direction = global.dim

global sample_height = wall.pos(wp_top,vertical_direction) -
wall.pos(wp_bottom,vertical_direction)

; υπόθεση ότι x και y είναι κατά προσέγγιση ίδια σε 3D
local xmin = 1.0e12
local xmax = -1.0e12
loop foreach bp ball.list
local ball_xmin = ball.pos.x(bp) - ball.radius(bp)
xmin = math.min(xmin,ball_xmin)
local ball_xmax = ball.pos.x(bp) + ball.radius(bp)
xmax = math.max(xmax,ball_xmax)
end_loop

local diameter_ = xmax - xmin
if global.dim = 2

```

```

    global cross_sectional_area = diameter_
else
    ; υπόθεση κυλινδρικού δοκιμίου σε 3D
    cross_sectional_area = math.pi*0.25*diameter_*diameter_
end_if

end

=====

def axial_stress_wall

; υπολογισμός αξονικής τάσης χρησιμοποιώντας τους τοίχους
; υπόθεση ότι οι μεταβλητές sample_height και sample_width έχουν οριστεί

local force1 = -wall.force.contact(wp_top,vertical_direction)
local force2 = wall.force.contact(wp_bottom,vertical_direction)
axial_stress_wall = 0.5*(force1+force2)/cross_sectional_area

end

=====

def axial_strain_wall

; υπολογισμός αξονικής τάσης χρησιμοποιώντας τους τοίχους
; υπόθεση ότι η μεταβλητή sample_width έχει οριστεί

axial_strain_wall = 2.0*wall.disp(wp_top,vertical_direction)/sample_height

end

=====

def loadhalt_wall

```

; συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τη διακοπή μίας δοκιμής όταν η αξονική τάση μειώνεται σε ένα ποσοστό της μέγιστης

; υπόθεση ότι η axial_stress_wall είναι συνάρτηση που επιστρέφει αξονική τάση

; INPUT: peak_fraction - ρωγματώσεις της μέγιστης τάσης που καθορίζουν το πότε θα σταματήσει η δοκιμή

```
loadhalt_wall = 0

local abs_stress = math.abs(axial_stress_wall)

global peak_stress = math.max(abs_stress,peak_stress)

if abs_stress < peak_stress*peak_fraction

    loadhalt_wall = 1

end_if

end
```

6. BTS με σημειακούς δεσμούς

Κατασκευή Μοντέλου

new

title 'BTS test'

; ορισμός της έκτασης domain

domain condition destroy extent -0.05 0.05 -0.1 0.1

; ορισμός των μοντέλων που ισχύουν στο αρχικό μοντέλο

cmat default model linear method deformability emod 84.64e9 kratio 3.991

; δημιουργία κυκλικού τοίχου δοκιμίου

geometry set circle

geometry generate circle radius 27.42e-3

wall import geometry circle name circle

; ορισμός δοκιμίου, σωματιδίων και χαρακτηριστικών τους

set random 10001

ball distribute porosity 0.05 radius 0.361e-3 0.59926e-3 range geometry circle count 1

ball attribute density 2628.4 damp 0.7

; ηρεμία συστήματος

cycle 1000 calm 100

; λύση συστήματος έως συγκεκριμένο όριο υποβάθμισης της μέσης δύναμης

set timestep scale

solve aratio 1e-3

set timestep auto

calm

ball delete range geometry circle count 1 not

save unbonded

Σημειακοί Δεσμοί

restore unbonded

; ορισμός παράλληλων δεσμών σε επαφές σωματιδίων

contact model linearcbond range contact type ball-ball

contact method bond gap 0.5e-4

; ορισμός γραμμικής δυσκαμψίας
contact method deform emod 84.64e9 kratio 3.991

; ορισμός αντοχής σημειακών δεσμών
contact property cb_tenf 0.2827e6 cb_shearf 0.5652e6

; ορισμός απόσβεσης στις επαφές
contact property dp_nratio 0.5

; ορισμός συντελεστή τριβής μεταξύ σωματιδίων
contact property fric 0.749 range contact type ball-ball

; μηδενισμός του πολλαπλασιαστή μετατόπισης των σωματιδίων
ball attribute displacement multiply 0.0

; ορισμός γραμμικής δύναμης σε 0 και επανεκκίνηση των δυνάμεων επαφής
contact property lin_force 0.0 0.0 lin_mode 1
ball attribute contactforce multiply 0.0 contactmoment multiply 0.0
cycle 1
solve aratio 1e-5
save parallel_bonded

Προσομοίωση BTS

; εισαγωγή των αρχείων fis
set echo off
call ss_wall.fis

call fracture.p2fis

set echo on

; ορισμός τοίχων δοκιμής εφελκυσμού

wall delete walls range name circle

wall create vertices (-30e-3,27.50e-3) (30e-3,27.50e-3) id 3

wall create vertices (-30e-3,-27.50e-3) (30e-3,-27.50e-3) id 4

; ορισμός παραμέτρων για μέτρηση τάσεων και παραμορφώσεων

@setup_wall

; εφαρμογή φόρτισης με τη μετακίνηση των πάνω και κάτω τοίχων

wall attribute yvel -0.1 range id 3

wall attribute yvel 0.1 range id 4

; εφαρμογή μικρού συντελεστή απόσβεσης

ball attribute damp 0.1

; καταγραφή ιστορίας

history id 1 @axial_stress_wall

history id 2 @axial_strain_wall

; καταγραφή ρωγματώσεων

@track_init

history id 3 @crack_num

; τρέξιμο της δοκιμής έως τη θραύση του δοκιμίου

cyc 180000

Ρωγματοώσεις

```
define add_crack(entries)
    local contact = entries(1)
    local mode = entries(3)
    local frac_pos = contact.pos(contact)
    local norm = contact.normal(contact)
    local dfn_label = 'crack'
    local frac_size
    local bp1 = contact.end1(contact)
    local bp2 = contact.end2(contact)
    local ret =
math.min(ball.radius(bp1),ball.radius(bp2));contact.method(contact,'pb_radius')
    frac_size = ret
    local inDir = vector(-comp.y(norm),comp.x(norm))
    local vert1 = frac_pos + inDir * frac_size
    local vert2 = frac_pos - inDir * frac_size
    local arg = array.create(4)
    arg(1) = 'vertices'
    arg(2) = 2
    arg(3) = vert1
    arg(4) = vert2
    crack_num = crack_num + 1

    if mode = 1 then
```

```

; αστοχία σε εφελκυσμό
dfn_label = dfn_label + '_tension'
else if mode = 2 then
; αστοχία σε διάτμηση
dfn_label = dfn_label + '_shear'
endif

global dfn = dfn.find(dfn_label)
if dfn = null then
dfn = dfn.add(0,dfn_label)
endif

local fnew = dfn.addfracture(dfn,arg)
dfn.fracture.prop(fnew,'age') = mech.age
dfn.fracture.extra(fnew,1) = bp1
dfn.fracture.extra(fnew,2) = bp2
crack_accum += 1
if crack_accum > 50
if frag_time < mech.age
frag_time = mech.age
crack_accum = 0
command
fragment compute
endcommand
; ενημέρωση των θέσεων ρωγματώσεων
loop for (local i = 0, i < 2, i = i + 1)
local name = 'crack_tension'
if i = 1

```

```

    name = 'crack_shear'
endif
dfn = dfn.find(name)
if dfn # null
    loop foreach local frac dfn.fracturelist(dfn)
        local ball1 = dfn.fracture.extra(frac,1)
        local ball2 = dfn.fracture.extra(frac,2)
        if ball1 # null
            if ball2 # null
                local len = dfn.fracture.len(frac)/2.0
                local pos = (ball.pos(ball1)+ball.pos(ball2))/2.0
                if comp.x(pos)-len > xmin
                    if comp.x(pos)+len < xmax
                        if comp.y(pos)-len > ymin
                            if comp.y(pos)+len < ymax
                                dfn.fracture.pos(frac) = pos
                            endif
                        endif
                    endif
                endif
            endif
        endif
    endif
endif
endloop
endif
endloop
endif
endif

```

end

define track_init

command

dfn delete

ball result clear

fragment clear

fragment register ball-ball

endcommand

; ενεργοποίηση των fishcalls

command

set fish callback bond_break remove @add_crack

set fish callback bond_break @add_crack

endcommand

; μηδενισμός των μεταβλητών

global crack_accum = 0

global crack_num = 0

global track_time0 = mech.age

global frag_time = mech.age

global xmin = domain.min.x()

global ymin = domain.min.y()

global xmax = domain.max.x()

global ymax = domain.max.y()

end

Δυνάμεις και Λίστα Πληροφοριών

```
def setup_wall

; εύρεση των τοίχων και υπολογισμός αρχικών διατάσεων δοκιμίου
global wp_top = wall.find(3) ; υποθέτοντας wall 1 τον πάνω τοίχο
global wp_bottom = wall.find(4) ; υποθέτοντας wall 2 τον κάτω τοίχο
global vertical_direction = global.dim

global sample_height = wall.pos(wp_top,vertical_direction) -
wall.pos(wp_bottom,vertical_direction)

; υπόθεση ότι x και y είναι κατά προσέγγιση ίδια σε 3D
local xmin = 1.0e12
local xmax = -1.0e12
loop foreach bp ball.list
local ball_xmin = ball.pos.x(bp) - ball.radius(bp)
xmin = math.min(xmin,ball_xmin)
local ball_xmax = ball.pos.x(bp) + ball.radius(bp)
xmax = math.max(xmax,ball_xmax)
end_loop

local diameter_ = xmax - xmin
if global.dim = 2
global cross_sectional_area = diameter_
else
; υπόθεση κυλινδρικού δοκιμίου σε 3D
cross_sectional_area = math.pi*0.25*diameter_*diameter_
```



```
end_if
```

```
end
```

```
=====
```

```
def axial_stress_wall
```

```
; υπολογισμός αξονικής τάσης χρησιμοποιώντας τους τοίχους
```

```
; υπόθεση ότι οι μεταβλητές sample_height και sample_width έχουν οριστεί
```

```
local force1 = -wall.force.contact(wp_top,vertical_direction)
```

```
local force2 = wall.force.contact(wp_bottom,vertical_direction)
```

```
axial_stress_wall = 0.5*(force1+force2)/cross_sectional_area
```

```
end
```

```
=====
```

```
def axial_strain_wall
```

```
; υπολογισμός αξονικής τάσης χρησιμοποιώντας τους τοίχους
```

```
; υπόθεση ότι η μεταβλητή sample_width έχει οριστεί
```

```
axial_strain_wall = 2.0*wall.disp(wp_top,vertical_direction)/sample_height
```

```
end
```

7. Κοπή με Κοπτικό Δίσκου

Κατασκευή Μοντέλου

```
new
```

; ορισμός της έκτασης domain

domain extent -1 1

domain condition destroy

; ορισμός των μοντέλων που ισχύουν στο αρχικό μοντέλο

cmat default model linear method deform emod 84.64e9 kratio 3.991

cmat default property dp_nratio 0.5

; δημιουργία τοίχων δοκιμίου

wall create vertices -0.1,-0.5 -0.1,-0.408 id 1

wall create vertices -0.1,-0.408 -0.1,-0.405 id 2

wall create vertices -0.1,-0.405 0.1,-0.405 id 3

wall create vertices 0.1,-0.405 0.1,-0.408 id 4

wall create vertices 0.1,-0.408 0.1,-0.5 id 5

wall create vertices 0.1,-0.5 -0.1,-0.5 id 6

; ορισμός δοκιμίου, σωματιδίων και χαρακτηριστικών τους

set random 10001

ball distribute porosity 0.05 radius 0.361e-3 0.59926e-3 box (-0.1 0.1) (-0.46 -0.405)

ball distribute porosity 0.05 radius 0.59926e-3 0.8e-3 box (-0.1 0.1) (-0.48 -0.46)

ball distribute porosity 0.05 radius 0.8e-3 1e-3 box (-0.1 0.1) (-0.5 -0.48)

ball attribute density 2628.4 damp 0.7

; ηρεμία συστήματος

cycle 1000 calm 10

; λύση συστήματος έως συγκεκριμένο όριο υποβάθμισης της μέσης δύναμης

set timestep scale

solve aratio 1e-4

set timestep auto

calm

; ορισμός βαρύτητας

set gravity 9.81

save unbonded

Παράλληλοι Δεσμοί

rest unbonded

; ορισμός παράλληλων δεσμών σε επαφές σωματιδίων

contact model linearpbond range contact type ball-ball

contact method bond gap 0.5e-4

; ορισμός γραμμικής δυσκαμψίας

contact method deform emod 84.64e9 kratio 3.991

; ορισμός δυσκαμψίας των παράλληλων δεσμών

contact method pb_deform emod 84.64e9 kratio 2.5

; ορισμός αντοχής παράλληλων δεσμών

contact property pb_ten 38.875e6 pb_coh 45.3e6 pb_fa 0.0

; ορισμός απόσβεσης στις επαφές

contact property dp_nratio 0.5

; ορισμός συντελεστή τριβής μεταξύ σωματιδίων

contact property fric 0.749 range contact type ball-ball

; μηδενισμός του πολλαπλασιαστή μετατόπισης των σωματιδίων

ball attribute displacement multiply 0.0

; ορισμός γραμμικής δύναμης σε 0 και επανεκκίνηση των δυνάμεων επαφής

contact property lin_force 0.0 0.0 lin_mode 1

ball attribute contactforce multiply 0.0 contactmoment multiply 0.0

cycle 1

solve aratio 1e-5

save parallel_bonded

Προσομοίωση Κοπή

rest parallel_bonded

; διαγραφή τοίχων δοκιμίου ώστε να είναι κατάλληλο για κοπή

wall delete range id 2

wall delete range id 3

wall delete range id 4

cycle 1

save deletewalls

; ορισμός κοπτικού δίσκου

wall generate circle position (-0.13 -0.348) radius 0.06

wall generate circle position (-0.13 -0.348) radius 0.02

save assembly

; εισαγωγή του αρχείου fis και ορισμός παραμέτρων για μέτρηση τάσεων

call ss_disk.fis

@setup_wall

; εφαρμογή ταχύτητας (γραμμικής και γωνιακής) στους τοίχους που αποτελούν το κοπτικό

wall attribute xvelocity 5 range id 7

wall attribute xvelocity 5 range id 8

wall attribute centrotation (-0.13 -0.348) range id 7

wall attribute spin -83.333 range id 7

; καταγραφή ιστορίας

history id 1 @normal_disk_force

history id 2 @rolling_disk_force

; διακοπής της κοπής όταν το κοπτικό φτάσει την άκρη του δοκιμίου

set @move_vel_zero 230e-3

solve fishhalt @vel_zero

καταγραφή ορθής και δύναμης κύλισης

list @normal_disk_force

list @rolling_disk_force

save disk

Δυνάμεις και Λίστα Πληροφοριών

```
def setup_wall
```

```
; εύρεση των τοίχων και υπολογισμός αρχικών διατάσεων δοκιμίου
```

```
global disk = wall.find(7) ; assume wall 5 is the disk
```

```
global vertical_direction = global.dim
```

```
; υπόθεση ότι x και y είναι κατά προσέγγιση ίδια σε 3D
```

```
local xmin = 1.0e12
```

```
local xmax = -1.0e12
```

```
loop foreach bp ball.list
```

```
local ball_xmin = ball.pos.x(bp) - ball.radius(bp)
```

```
xmin = math.min(xmin,ball_xmin)
```

```
local ball_xmax = ball.pos.x(bp) + ball.radius(bp)
```

```
xmax = math.max(xmax,ball_xmax)
```

```
end_loop
```

```
local diameter_ = xmax - xmin
```

```
if global.dim = 2
```

```
global cross_sectional_area = diameter_
```

```
else
```

```
; υπόθεση κυλινδρικού δοκιμίου σε 3D
```

```
cross_sectional_area = math.pi*0.25*diameter_*diameter_
```

```

    end_if
end

=====

def normal_disk_force

; υπολογισμός ορθής δύναμης χρησιμοποιώντας τους τοίχους
; υπόθεση ότι οι μεταβλητές sample_height και sample_width έχουν οριστεί

    local force = math.abs(wall.force.contact.y(disk))

    normal_disk_force = force

end

=====

def rolling_disk_force

; υπολογισμός δύναμης κύλισης χρησιμοποιώντας τους τοίχους

    local force = math.abs(wall.force.contact.x(disk))

    rolling_disk_force = force

end

=====

def vel_zero

; συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τη διακοπή της κίνησης του κοπτικού

    vel_zero = 0

    local move = wall.disp.x(disk)

    if move > 1*move_vel_zero

        vel_zero = 1

    endif

end

```