



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Αριθμητική προσομοίωση δοκών πετρώματος στην οροφή υπόγειων
εκσκαφών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Πριμέτης

Επιβλέπων καθηγητής: Π. Νομικός

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Αριθμητική προσομοίωση δοκών πετρώματος στην οροφή υπόγειων
εκσκαφών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Πριμέτης

Επιβλέπων καθηγητής: Π. Νομικός

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις .../10/2018:

Π. Νομικός, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. Λουπασάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. Μπενάρδος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο « Αριθμητική προσομοίωση δοκών πετρώματος στην οροφή υπόγειων εκσκαφών» πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ.

Η διάνοιξη ενός υπόγειου ανοίγματος στο πέτρωμα διαταράσσει την ισορροπία ενός φυσικού συστήματος. Έτσι, στο χώρο της εκσκαφής μπορεί να εκδηλωθούν φαινόμενα μηχανικών διαταραχών του περιβάλλοντος σε αυτή πετρώματος. Ανάμεσα σε αυτές, φυσικά περιλαμβάνονται και η κάμψη της οροφής, η οποία σε συνδυασμό και με άλλες μορφές μηχανικών διαταραχών, μπορεί να οδηγήσει και σε πλήρη αστοχία του ανοίγματος εκδηλούμενη με βαθμιαίο ή βίαιο τρόπο.

Έτσι, στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια προσομοίωσης, στο πρόγραμμα διακριτών στοιχείων PFC^{2D}, εργαστηριακών δοκιμών που είχαν γίνει το 1977 από τον Sterling. Τα πειράματα, και συνεπώς και οι προσομοιώσεις, αφορούσαν δοκούς, οι οποίες αντιστοιχούν στην οροφή των υπογείων ανοιγμάτων. Σκοπός τους ήταν να γίνει όσο το δυνατόν περισσότερο κατανοητή η συμπεριφορά τους, ώστε τα αποτελέσματα να αναχθούν σε πραγματικές οροφές και να προβλεφθούν μελλοντικά πιθανές αστοχίες.

Για την ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή Π. Νομικό για την ουσιαστική συμβολή και καθοδήγησή του.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, με τίτλο «Αριθμητική προσομοίωση δοκών πετρώματος στην οροφή υπόγειων εκσκαφών», έγινε προσπάθεια προσομοίωσης των εργαστηριακών δοκιμών κάμψης δοκών ασβεστολίθου Indiana του Sterling, με τη μέθοδο διακριτών στοιχείων. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τον αριθμητικό κώδικα PFC^{2D}.

Στόχος της εργασίας αποτέλεσε η επίτευξη παρεμφερών αποτελεσμάτων μεταξύ των προσομοιώσεων και των πειραμάτων του Sterling. Για να συμβεί αυτό, αρχικά, κατασκευάστηκαν αριθμητικά μοντέλα, τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian). Τα αποτελέσματα για τη μακροσκοπική απόκριση του συνθετικού πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε μονοαξονική θλίψη) συγκρίνονται με αυτά του πραγματικού πετρώματος. Με τον όρο «συνθετικό πέτρωμα», εννοείται το προσομοίωμα ενός πετρώματος που αποτελείται από ένα σύνολο δομικών μονάδων (π.χ. άκαμπτων κυκλικών σφαιρών, δίσκων πεπερασμένου πάχους ή και συσσωματωμάτων τους. Εναλλακτικά, καλείται και ως «μοντέλο συνδεδεμένων σωματιδίων» (Bonded Particles Model, BPM).

Στη συνέχεια, κι έχοντας πετύχει μέσα από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης μακροσκοπική απόκριση για το συνθετικό πέτρωμα, παρόμοια με τον ασβεστόλιθο του Sterling, διεξάγονται οι προσομοιώσεις των δοκιμών κάμψης. Αυτές αφορούν τα πειράματα του Sterling, στα οποία χρησιμοποίησε δοκούς ασβεστολίθου Indiana, διαστάσεων 3" x 3" x 26", 1 σημείο φόρτισης σε τέσσερις περιπτώσεις. Χωρίς αρχική προφόρτιση και με αρχική προφόρτιση των δοκών 500, 1000 και 1500 psi. Έπειτα, κατασκευάζονται τα απαιτούμενα διαγράμματα και γίνεται σχολιασμός μεταξύ των ομοιοτήτων και των διαφορών που υπάρχουν στις δύο περιπτώσεις. Στα εισαγωγικά κεφάλαια γίνεται μία σύντομη περιγραφή της θεωρίας των δοκών οροφής υπόγειων ανοιγμάτων και του προγράμματος PFC^{2D}. Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη διπλωματική εργασία.

ABSTRACT

In the present thesis, entitled “Numerical simulation of an underground rock beam roof”, there has been an attempt to simulate laboratory bending tests on beams, using the Discrete Element Method. The simulation was completed using the two dimensional discontinuum program PFC^{2D}.

The aim of this effort was to achieve similar results between our simulations and Sterling’s tests. First of all, a set of numerical models were developed, in order to be submitted to unconfined compression tests and Brazilian tests. The results of the macroscopic response (unconfined compression strength, Young’s Modulus, etc.) of the synthetic rock will be compared to the macroscopic response of the real rock, used by Sterling. The term “Synthetic Rock” refers to a simulation of a rock that consists of a set of rigid circular or spherical particles or even clumps. Alternatively, it is called Bonded Particles Model, BPM.

After that, having eventually reached to a macroscopic response for our synthetic rock, similar to that of Indiana Limestone used by Sterling, bending test simulations are carried out. They are corresponding to four tests of Sterling. The beams used in these tests, were made of Indiana Limestone, had dimensions 3” x 3” x 26”, and the load applied to them was by 1 point. In each of these four occasions, Sterling used a slack beam and a beam with initial prestress of 500, 1000 and 1500 psi respectively. Furthermore, required diagrams were constructed and similarities and differences between the two types of testing were commented. At the initial chapters a brief description of the theory of beam roofs and the program PFC^{2D} is implemented. Finally, in the last chapter the conclusions reached during the whole thesis are outlined.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή.....	1
1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος.....	1
1.2 Αντικείμενο της παρούσας.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Θεωρητικό υπόβαθρο.....	4
2.1 Δοκοί οροφής υπόγειων ανοιγμάτων.....	4
2.2 Θεωρητική ανάλυση των δοκών οροφής.....	6
2.3 Μετάβαση από το τόξο <i>voussoir</i> στη δοκό <i>voussoir</i>	8
2.4 Μορφές αστοχίας της ρωγματωμένης δοκού.....	12
2.5 Θεωρία γραμμικού τόξου.....	15
2.6 Τα πειράματα του Sterling.....	16
2.6.1 Διαδικασία των πειραμάτων.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Εισαγωγή στο πρόγραμμα PFC ^{2D}	20
3.1 Εισαγωγή.....	20
3.2 Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων.....	21
3.3 Το πρόγραμμα PFC ^{2D}	22
3.4 Μηχανική στο PFC ^{2D}	28
3.4.1. Μηχανισμός Ρωγμάτωσης στο PFC ^{2D}	28
3.4.2 Μοντέλο Συνδεδεμένων Σωματιδίων – BPM.....	29
3.4.3 Δεσμοί μεταξύ των σωματιδίων.....	31
3.4.4 Επαφές.....	35
3.4.5 Πορώδες.....	37
3.4.6 Σύνοψη Μικρομηχανικών Ιδιοτήτων.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Μέθοδοι προσδιορισμού μικροπαραμέτρων.....	41
4.1 Εισαγωγή.....	41
4.2 Μεθοδολογία PFC ^{2D}	41
4.2.1 Μέτρο ελαστικότητας – Λόγος του Poisson.....	43
4.2.2 Μέγιστη αντοχή.....	45
4.3 Προσδιορισμός μικρομηχανικών παραμέτρων.....	45
4.3.1 Μέθοδος Yoon (2007).....	46
4.3.2 Σχεδιασμός πειράματος και βελτιστοποίηση.....	46
4.3.3 Ανάλυση ευαισθησίας των μικροπαραμέτρων χρησιμοποιώντας τον PB σχεδιασμό.....	48
4.3.4 Αποτελέσματα – προτεινόμενες εξισώσεις προς βελτιστοποίηση.....	55
4.4 Πρόταση συσχέτισης μικρομηχανικών παραμέτρων με μακροσκοπική απόκριση.....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Αριθμητικά μοντέλα βαθμονόμησης.....	64
5.1 Εισαγωγή.....	64
5.2 Διαδικασία κατασκευής αριθμητικού μοντέλου βαθμονόμησης.....	64

5.3 Υποβολή αριθμητικών μοντέλων βαθμονόμησης σε δοκιμές.....	66
5.3.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	66
5.3.2 Δοκιμή Brazilian.....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Κατασκευή αριθμητικών μοντέλων δοκών.....	70
6.1 Εισαγωγή.....	70
6.2 Προσομοιώσεις δοκιμών κάμψης δίχως παρουσία πλευρικών τοίχων.....	71
6.3 Προσομοιώσεις δοκιμών κάμψης με παρουσία πλευρικών τοίχων.....	78
6.3.1 Προσομοίωση δοκιμής κάμψης χωρίς αρχική προφόρτιση	79
6.3.2 Προσομοίωση δοκιμής κάμψης με αρχική προφόρτιση 3.45 MPa (500psi)	88
6.3.3 Προσομοίωση δοκιμής κάμψης με αρχική προφόρτιση 6.9 MPa (1000psi)	98
6.3.4 Προσομοίωση δοκιμής κάμψης με αρχική προφόρτιση 10.35 MPa (1500psi).....	107
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - Συμπεράσματα.....	116
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	119

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ. 2.1: Τόξο voussoir (Sterling, 1977)	6
Σχ. 2.2: Καμπύλη πιέσεων στο τόξο voussoir με κατασκευή σχοινοπολυγώνου (Kooharian,1952).....	7
Σχ. 2.3: Η μετάβαση από το τόξο voussoir στη δοκό voussoir (Evans, 1941).....	9
Σχ. 2.4: Ελαστική δοκός στηριζόμενη (α) σε πακτωμένα άκρα και (β) με απλή έδραση.....	11
Σχ. 2.5: Πιθανές μορφές αστοχίας της δοκού voussoir: (α) μηχανική αστάθεια της δοκού, (β) σύνθλιψη του πετρώματος στο μέσο και στις στηρίξεις της δοκού, (γ) ολίσθηση στις στηρίξεις (δ) διαγώνια ρωγμάτωση. (Diederichs και Kaiser, 1999).....	13
Σχ. 3.1: Θετική διατμητική τάση.....	25
Σχ. 3.2: Θετική και αρνητική διατμητική τροπή.....	25
Σχ. 3.3: Δυνάμεις επαφής.....	26
Σχ. 3.4: Μηχανισμός ρωγμάτωσης σε συσσωμάτωμα σφαιριδίων στο PFC ^{2D}	29
Σχ. 3.5: Αναπαράσταση σημειακού δεσμού και παράλληλου δεσμού.....	31
Σχ. 3.6: Δυνάμεις επαφής.....	33
Σχ. 3.7: Αναπαράσταση παράλληλου δεσμού.....	34
Σχ. 3.8: Σύνοψη νόμων που ισχύουν στις επαφές των σωματιδίων.....	37
Σχ. 4.1(α): Διάγραμμα συσχέτισης της UCS και των NBS και SBS (Yoon 2007).....	51
Σχ. 4.1(β): Διάγραμμα συσχέτισης του μέτρου ελαστικότητας και της παραμέτρου BCM (Yoon 2007).....	51
Σχ. 4.1(γ): Διάγραμμα συσχέτισης του λόγου του Poisson και της παραμέτρου KNKS (Yoon 2007).....	52
Σχ. 4.1(δ): Διάγραμμα συσχέτισης της τάσης έναρξης ρωγμάτωσης και της παραμέτρου ROSD (Yoon 2007).....	52
Σχ.4.2: Διάγραμμα συσχέτισης μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου με το μέτρο ελαστικότητας των επαφών των δίσκων της κατανομής (Καράτζα,2011).....	61
Σχ. 4.3: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου του Poisson με το λόγο της ορθής προς τη διατμητική δυστροπία (Καράτζα,2011).....	61
Σχ. 4.4: Διάγραμμα συσχέτισης του λόγου των μέτρων ελαστικότητας του δοκιμίου και των επαφών με το λόγο της ορθής προς τη διατμητική δυστροπία(Καράτζα,2011).....	62
Σχ. 4.5: Διάγραμμα συσχέτισης της μέγιστης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με τη μέση τιμή της αντοχής των δεσμών (Καράτζα,2011).....	62
Σχ. 5.1: Διάγραμμα αξονικής τροπής – τάσης στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	67
Σχ. 5.2: Διάγραμμα αξονικής τροπής – τάσης στη δοκιμή Brazilian.....	69

Σχ. 6.1(α): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) PFC (χωρίς παρουσία πλευρικών τοίχων).....	76
Σχ. 6.1(β): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) ανηγμένο στις διαστάσεις της δοκού του Sterling (χωρίς παρουσία πλευρικών τοίχων).....	76
Σχ. 6.1(γ): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (kN-mm) PFC (χωρίς παρουσία πλευρικών τοίχων).....	77
Σχ. 6.2: Καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης Sterling (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση).....	84
Σχ. 6.3(α): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) PFC (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση).....	85
Σχ. 6.3(β): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) ανηγμένο στις διαστάσεις της δοκού του Sterling (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση).....	85
Σχ. 6.3(γ): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (kN-mm) PFC (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση).....	86
Σχ. 6.4: Διάγραμμα οριζόντιας δύναμης (N) – κύκλου φόρτισης μετά την επιβολή αρχικής προφόρτισης 500 psi.....	90
Σχ. 6.5: Καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης Sterling (αρχική προφόρτιση 500 psi).....	95
Σχ. 6.6(α): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) PFC (αρχική προφόρτιση 500 psi).....	95
Σχ. 6.6(β): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) ανηγμένο στις διαστάσεις της δοκού του Sterling (αρχική προφόρτιση 500 psi).....	96
Σχ. 6.6(γ): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (kN-mm) PFC (αρχική προφόρτιση 500 psi).....	96
Σχ. 6.7: Διάγραμμα οριζόντιας δύναμης (N) – κύκλου φόρτισης μετά την επιβολή αρχικής προφόρτισης 1000 psi.....	99
Σχ. 6.8: Καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης Sterling (αρχική προφόρτιση 1000 psi).....	104
Σχ. 6.9(α): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) PFC (αρχική προφόρτιση 1000 psi).....	104
Σχ. 6.9(β): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) ανηγμένο στις διαστάσεις της δοκού του Sterling (αρχική προφόρτιση 1000 psi).....	105
Σχ. 6.9(γ): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (kN-cm) PFC (αρχική προφόρτιση 1000 psi).....	105
Σχ. 6.10: Διάγραμμα οριζόντιας δύναμης (N) – κύκλου φόρτισης μετά την επιβολή αρχικής προφόρτισης 1500 psi.....	108
Σχ. 6.11: Καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης Sterling (αρχική προφόρτιση 1500 psi).....	112
Σχ. 6.12(α): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) PFC (αρχική προφόρτιση 1500 psi).....	112
Σχ. 6.12(β): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) ανηγμένο στις διαστάσεις της δοκού του Sterling (αρχική προφόρτιση 1500 psi).....	113

Σχ. 6.12(γ): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (kN-mm) PFC (αρχική προφόρτιση 1500 psi).....113

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικ. 2.1: Διαγράμματα Sterling (α) φορτίου – βέλους κάμψης, (β) κάθετου φορτίου – πλευρικής ώθησης (Brady and Brown,2004).....	17
Εικ. 2.2: Η διάταξη που χρησιμοποίησε ο Sterling στα πειράματά του.....	18
Εικ. 3.1: Κατανομή δυνάμεων στο μοντέλο μετά την απομάκρυνση της κυψέλης (material - genesis vessel). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές δυνάμεις των επαφών και με μπλε αντίστοιχα των σφαιριδίων.....	40
Εικ. 5.1: Μικρομηχανικές ιδιότητες του συνθετικού υλικού.....	65
Εικ. 5.2: Αρχείο για την κατασκευή του συνθετικού πετρώματος.....	66
Εικ. 5.3: Αρχείο για την εκτέλεση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.....	66
Εικ. 5.4 Συνθετικό πέτρωμα μετά την υποβολή του σε αντοχή μονοαξονικής θλίψης.....	67
Εικ. 5.5: Αρχείο για την εκτέλεση της δοκιμής Brazilian.....	68
Εικ. 5.6: Συνθετικό πέτρωμα μετά την υποβολή του σε δοκιμή Brazilian.....	69
Εικ. 6.1: Αρχείο δημιουργίας δοκού διαστάσεων 66.04cm x 7.62cm.....	71
Εικ. 6.2: Δοκός στο πρόγραμμα PFC (66.04cm x 7.62cm).....	71
Εικ. 6.3: Δοκός που στηρίζεται και φορτίζεται από μπάλες (δεν επέρχεται αστοχία).....	72
Εικ. 6.4(α): Δοκός που στηρίζεται και φορτίζεται από τοίχους (δεν επέρχεται η αναμενόμενη αστοχία).....	73
Εικ. 6.4(β): Δοκός που στηρίζεται και φορτίζεται από τοίχους (αστοχία μόνο στο πάνω μέρος της δοκού).....	73
Εικ. 6.5(α): Δοκός που στηρίζεται και φορτίζεται από μπάλες – τοίχους (αστοχία σε μη αναμενόμενη θέση).....	74
Εικ. 6.5(β): Δοκός που στηρίζεται και φορτίζεται από μπάλες – τοίχους (αστοχία σε αναμενόμενη θέση).....	75
Εικ. 6.6: Αρχείο δημιουργίας της διάταξης εκτέλεσης της δοκιμής κάμψης στο PFC.....	78
Εικ. 6.7: Δοκός πριν την έναρξη της δοκιμής κάμψης.....	79
Εικ. 6.8(α): Εμφάνιση πρώτων ρωγμών (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση).....	80
Εικ. 6.8(β) Διάδοση των ρωγμών στο μέσο της δοκού (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση).....	81
Εικ. 6.8(γ): Εμφάνιση ρωγμών κοντά στις στηρίξεις (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση).....	82
Εικ. 6.9(α): Σκαρίφημα αστοχίας δοκού Sterling (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση).....	83
Εικ. 6.9(β): Δοκός μετά το πέρας της προσομοίωσης στο PFC (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση).....	83
Εικ. 6.10: Μπάλες που δεν είναι σε επαφή με τον τοίχο στο τέλος της δοκιμής (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση).....	87

Εικ. 6.11: Αρχείο επιβολής αρχικής προφόρτισης 500 psi.....	89
Εικ. 6.12(α): Εμφάνιση πρώτων ρωγμών (αρχική προφόρτιση 500 psi).....	91
Εικ. 6.12(β): Διάδοση των ρωγμών στο μέσο της δοκού (αρχική προφόρτιση 500 psi).....	92
Εικ. 6.12(γ): Εμφάνιση ρωγμών κοντά στις στηρίξεις (αρχική προφόρτιση 500 psi).....	93
Εικ. 6.13(α): Σκαρίφημα αστοχίας δοκού Sterling (αρχική προφόρτιση 500 psi).....	94
Εικ. 6.13(β) Δοκός μετά το πέρας της προσομοίωσης στο PFC (αρχική προφόρτιση 500 psi).....	94
Εικ. 6.14: Μπάλες που δεν είναι σε επαφή με τον τοίχο στο τέλος της δοκιμής (αρχική προφόρτιση 500 psi).....	98
Εικ. 6.15: Αρχείο επιβολής αρχικής προφόρτισης 1000 psi.....	99
Εικ. 6.16(α): Εμφάνιση πρώτων ρωγμών (αρχική προφόρτιση 1000 psi).....	100
Εικ. 6.16(β): Διάδοση των ρωγμών στο μέσο της δοκού (αρχική προφόρτιση 1000 psi).....	101
Εικ. 6.16(γ): Εμφάνιση πρώτων ρωγμών κοντά στις στηρίξεις (αρχική προφόρτιση 1000 psi).....	102
Εικ. 6.17(α): Σκαρίφημα αστοχίας δοκού Sterling (αρχική προφόρτιση 1000 psi).....	102
Εικ. 6.17(β): Δοκός μετά το πέρας της προσομοίωσης στο PFC (αρχική προφόρτιση 1000 psi).....	103
Εικ.6.18: Μπάλες που δεν είναι σε επαφή με τον τοίχο στο τέλος της δοκιμής (αρχική προφόρτιση 1000 psi).....	106
Εικ. 6.19: Αρχείο επιβολής αρχικής προφόρτισης 1500 psi.....	107
Εικ. 6.20(α): Εμφάνιση πρώτων ρωγμών (αρχική προφόρτιση 1500 psi).....	109
Εικ. 6.20(β): Εμφάνιση ρωγμών στο κάτω μέρος της δοκού (αρχική προφόρτιση 1500 psi).....	109
Εικ. 6.20(γ): Εμφάνιση ξαφνικής διαγώνιας ρωγμάτωσης (αρχική προφόρτιση 1500 psi).....	110
Εικ. 6.21: Δοκός μετά το πέρας της προσομοίωσης στο PFC (αρχική προφόρτιση 1500 psi).....	111
Εικ.6.22: Μπάλες που δεν είναι σε επαφή με τον τοίχο στο τέλος της δοκιμής (αρχική προφόρτιση 1500 psi).....	114

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Συμβατά συστήματα μονάδων.....	27
Πίνακας 4.1: Προς διερεύνηση μικρομηχανικές παράμετροι.....	48
Πίνακας 4.2: Διακύμανση τιμών μικροπαραμέτρων.....	49
Πίνακας 4.3: Συνδυασμοί μικρομηχανικών παραμέτρων κατά το σχεδιασμό πειράματος με τη μέθοδο PB (Yoon 2007).....	53
Πίνακας 4.4: Περιορισμοί της μακροσκοπικής απόκρισης του μοντέλου.....	59
Πίνακας 4.5: Εύρος τιμών αναζητούμενων παραμέτρων.....	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Η οροφή ενός υπόγειου ανοίγματος που αποτελείται από στρωματοποιημένα, ρωγματωμένα ή άρρηκτα πετρώματα, συναντάται συχνά στη μεταλλευτική τεχνολογία και τη γεωτεχνολογία. Μία τέτοια δομή οροφής μπορεί να καταρρεύσει αμέσως ή να διατηρηθεί στη θέση της για μικρό ή και μεγάλο χρονικό διάστημα. Η συμπεριφορά μίας τέτοιας οροφής στη μεταλλευτική ή γενικότερα σε υπόγεια ανοίγματα είναι ιδιαίτερα περίπλοκη και προς το παρόν απέχει πολύ από το να προβλεφθεί. Ο Fayol θεώρησε τη μηχανική συμπεριφορά τέτοιων βραχωδών οροφών παρόμοια με μίας συστοιχίας απλά στηριζόμενων δοκών. Κάνοντας πειράματα σε τέτοιες συστοιχίες δοκών, παρατήρησε ότι η κατώτερη δοκός δε φορτίζεται από αυτές που βρίσκονται από πάνω της. Το φορτίο που ασκείται από το βάρος των υπερκείμενων δοκών μεταφέρεται κατά κύριο λόγο πλευρικά στις στηρίξεις και όχι κάθετα στο κατώτερο μέλος της συστοιχίας. Η διαδικασία αυτή κινητοποιεί την τριβή μεταξύ των επιφανειών των ανώτερων δοκών και δημιουργεί μία δομή τόξου πάνω από το υπόγειο άνοιγμα. Έτσι, τα στρώματα των πετρωμάτων πάνω από την οροφή του υπόγειου ανοίγματος και κάτω από το τόξο αποχωρίζονται και το κατώτερο στρώμα θεωρείται ότι φορτίζεται μόνο από το ίδιο βάρος του. Παρ' όλα αυτά, όταν η ακαμψία των στρωμάτων ποικίλει, το κατώτερο στρώμα μπορεί να φορτίζεται από το υπερκείμενο του.

Οι αρχικές προσπάθειες για να αναλύσουν τη συμπεριφορά ενός τέτοιου κατώτερου στρώματος περιλαμβάνουν την ανάλυση του σε κάμψη, θεωρώντας το ως μία γραμμική ελαστική δοκό ή πλάκα με μία επιτρεπόμενη εφελκυστική αντοχή. Τέτοιες δοκοί μπορεί να έχουν αντοχή σε κάμψη τόση, ώστε να συνδέσουν ένα άνοιγμα μεγαλύτερο των τριάντα μέτρων. Παρ' όλα αυτά, ο Dinsdale παρατήρησε ότι λυγίζουν ελάχιστα πριν από το σημείο αστοχίας τους, κάτι που υποδεικνύει ότι η τροπή λόγω κάμψης στο σημείο αστοχίας είναι μικρή συγκριτικά με την ελαστική τροπή που απαιτείται, για να δημιουργήσει ροπή αντίστασης σε μία απλή δοκό. Ο Briggs ανέφερε την περίπτωση μίας οροφής πάχους 21 μέτρων, σε άνοιγμα 40 μέτρων, η οποία δεν είχε σημάδια κατάρρευσης παρά το γεγονός ότι είχε ξεπεραστεί η εφελκυστική της αντοχή. Οι Jones και Llewellyn – Davies κατέγραψαν τη μορφολογία αστοχιών οροφών. Ο Bucky συμπέρανε ότι οι νόμοι της μηχανικής μπορούν να εφαρμοστούν στην επιστημονική έρευνα και στο σχεδιασμό οριζοντίως κειμένων στρωμάτων

οροφής υπόγειων μεταλλείων. Οι Bucky και Taborelli υποστήριξαν ότι η θραύση στο κέντρο είναι η βασική εγκάρσια ασυνέχεια στο στρώμα της οροφής. Αυτές οι παρατηρήσεις και το γεγονός ότι σχεδόν πάντα τέτοιου είδους στρώματα οροφών περιέχουν ασυνέχειες, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η οροφή στο πρώτο στάδιο της κατάρρευσης δε συμπεριφέρεται σαν απλή δοκός. Αυτού του τύπου η οροφή θεωρείται ότι αποτελείται από βραχώδη τεμάχια που όλα μαζί σχηματίζουν ένα ασυνεχές σώμα. Αυτά τα τεμάχια ονομάζονται voussoir.

Δύο ακόμη σημαντικοί ερευνητές που ασχολήθηκαν με το ζήτημα των οροφών υπογείων ανοιγμάτων ήταν ο Evans και ο Sterling. Ο πρώτος έδωσε σημαντικά στοιχεία για την ευστάθεια των στρωμάτων οροφής. Ο Sterling, του οποίου τα πειράματα θα αναλυθούν περαιτέρω στην παρούσα εργασία, χρησιμοποίησε πολλά από τα αποτελέσματα των ερευνών προγενέστερων ερευνητών και εκτέλεσε τα δικά του πειράματα, εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα.

1.2 Αντικείμενο της παρούσας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών και το θέμα της αφορά στην αριθμητική προσομοίωση δοκών πετρώματος στην οροφή υπόγειων ανοιγμάτων σε πρόγραμμα διακριτών στοιχείων. Με τον όρο «μέθοδος διακριτών στοιχείων» εννοούμε κάθε μέθοδο αριθμητικής προσομοίωσης, όπου το υπό εξέταση υλικό αναπαρίσταται σαν ένα σύστημα αλληλεπιδρώντων διακριτών άκαμπτων στοιχείων, που υπόκεινται σε μακροσκοπική κίνηση. Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το PFC^{2D} (Particle Flow Code), με το οποίο προσομοιώθηκε η κίνηση και την αλληλεπίδρασης σφαιρικών σωματιδίων με βάση τη μέθοδο διακριτών στοιχείων.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η προσομοίωση έγινε σε δοκούς, διαστάσεων 660mm μήκος και 76,2mm ύψος. Το πέτρωμα από το οποίο αποτελούνταν οι δοκοί στα φυσικά πειράματα ήταν ασβεστόλιθος τύπου Indiana. Τέτοια πειράματα είχε εκτελέσει ο Sterling στη διδακτορική του διατριβή (1977)

Αρχικά γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της λειτουργίας του προγράμματος PFC^{2D}, των σταδίων της μοντελοποίησης, καθώς και της FISH, της γλώσσας προγραμματισμού που είναι ενσωματωμένη σε αυτό. Η προσομοίωση γίνεται σε δύο διαστάσεις και το πέτρωμα προσομοιώνεται ως σύνολο άκαμπτων κυκλικών σφαιρών, δίσκων πεπερασμένου πάχους ή και συσσωματωμάτων τους. Στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφονται οι μηχανισμοί ρωγμάτωσης στον κώδικα και η κατασκευή και οι ιδιότητες ενός συνθετικού πετρώματος.

Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε και του στόχου της μοντελοποίησης. Ο στόχος μας ήταν να προσομοιώσουμε τη μικροδομή του συνθετικού πετρώματος όσο το δυνατόν πλησιέστερα σε αυτή του πετρώματος και να βρούμε το βέλτιστο τρόπο επιλογής των μικροπαραμέτρων του δοκιμίου, ώστε τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης να είναι συγκρίσιμα με τα πειραματικά αποτελέσματα του Sterling. Αρχικά, βασιζόμενοι σε διαγράμματα συσχέτισης μικρομηχανικών ιδιοτήτων με μακροσκοπική απόκριση (Καράτζα,2011), κατασκευάστηκαν μοντέλα με σκοπό την επίτευξη παρόμοιας απόκρισης των μοντέλων αυτών με το φυσικό πέτρωμα.

Τα μοντέλα υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian). Έπειτα, έγινε μια προσπάθεια συσχέτισης της μακροσκοπικής απόκρισης με κάποιες μικρομηχανικές παραμέτρους, ώστε ανάλογα το βαθμό που επηρεάζουν οι πρώτες τις δεύτερες, να επιλεγούν πιο κατάλληλες τιμές των μικροπαραμέτρων. Μετά από την αξιολόγηση του εκάστοτε μοντέλου γινόταν βελτιστοποίηση και επανάληψη των δοκιμών μέχρι που καταλήξαμε σε ένα μοντέλο συνδεδεμένων σωματιδίων συγκρίσιμο με τον ασβεστόλιθο Indiana.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες στις οποίες καταλήξαμε, κατασκευάστηκαν τα μοντέλα των δοκών. Αυτά αρχικά υποβλήθηκαν σε δοκιμές κάμψης, χωρίς τον περιορισμό πλευρικών τοίχων, έως ότου να προσομοιωθεί ο πραγματικός τρόπος αστοχίας τους. Ακολούθως, προστέθηκαν και πλευρικοί τοίχοι και έγιναν δοκιμές που συγκρίθηκαν με τα πειράματα του Sterling. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν τα πειράματα με δοκούς ασβεστόλιθου Indiana, διαστάσεων 66cm x 7.62cm σε τέσσερις περιπτώσεις. Χωρίς αρχική προφόρτιση, και με αρχική προφόρτιση 3.45 MPa, 6.9 MPa και 10.35 MPa.

Τέλος, ακολουθεί ένα κεφάλαιο που συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Δοκοί οροφής υπόγειων ανοιγμάτων

Στη διεθνή βιβλιογραφία, ο πρώτος που ασχολήθηκε και έδωσε κάποια τεκμηριωμένα αποτελέσματα σχετικά με τη συμπεριφορά στρωματοειδούς δομής πετρωμάτων στην οροφή υπόγειων εκσκαφών ήταν ο Fayol (1885). Κατά τον Sterling (1977), ο Fayol στα πρώτα του πειράματα ασχολήθηκε με τη μέτρηση του βέλους κάμψης μίας δοκού πακτωμένης στα δύο άκρα της. Στη συνέχεια, το πείραμα επαναλήφθηκε, αυτή τη φορά όμως, τοποθετώντας μία δεύτερη δοκό πάνω από την πρώτη. Το αποτέλεσμα ήταν το βέλος κάμψης της κάτω δοκού να είναι μεγαλύτερο από εκείνο της μίας μόνο δοκού, ενώ της δεύτερης μικρότερο εκείνου της πρώτης. Συνεχίζοντας αυτή τη διαδικασία, προέκυψε πως όσο αυξανόταν ο αριθμός των δοκών, συνέχιζε να αυξάνεται και το βέλος κάμψης της κατώτερης δοκού, μέχρι όμως κάποιο σημείο, πέραν του οποίου η επιπλέον προσθήκη δοκών δεν το επηρέαζε πλέον, ενώ οι ανώτερες δοκοί δεν κάμπτονταν καθόλου.

Αναλύοντας τις παρατηρήσεις του, οδηγήθηκε στο συμπέρασμα ότι η κάμψη των στρωμάτων της άμεσης οροφής των υπόγειων εκσκαφών προκαλεί τη μερική αποχώρηση τους από τα υπερκείμενα στρώματα, με αποτέλεσμα τα κατακόρυφα φορτία που υπάρχουν λόγω των υπερκειμένων να μεταβιβάζονται προς τα πλευρικά τοιχώματα της εκσκαφής και όχι αμέσως στο κατώτερο μέλος της σειράς. Ο Fayol έδωσε το έναυσμα και σε άλλους μελετητές να διερευνήσουν τη συμπεριφορά και την αστοχία της οροφής υπόγειων ανοιγμάτων, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται οι Jones και Davis (1928) και ο Bucky (1934).

Ο Bucky ασχολήθηκε ιδιαίτερα με τη διερεύνηση της επίδρασης που έχει η απόσταση και το υλικό πλήρωσης κατακόρυφων ασυνεχειών, που διασχίζουν μία δοκό. Μέσα από τα πειράματά του, παρατήρησε ότι η αντοχή της δοκού δεν επηρεάζεται σημαντικά από τον αριθμό και τη θέση των ασυνεχειών της, όταν το άνοιγμα μεταξύ των τοιχωμάτων τους είναι αμελητέο. Ωστόσο, συμπέρανε πως το μέγεθος του ανοίγματος των ασυνεχειών και το υλικό πλήρωσής τους έχουν σημαντική επίδραση στην αντοχή της δοκού.

Σε εργασία των Bucky και Taborelli που ακολούθησε κάποια χρόνια μετά (1938), οι ερευνητές προσομοίωσαν 5 διαδοχικά στρώματα οροφής με διάφορα πάχη και διεύρυναν σταδιακά το μέγεθος του ανοίγματος, προσπαθώντας έτσι να προσομοιάσουν την εξόρυξη σε επιμήκη ευθύγραμμο υπόγειο μέτωπο. Σύμφωνα, λοιπόν, με τα πειράματά τους η πρώτη αστοχία εμφανιζόταν στο μέσο του κατώτερου στρώματος και συνοδεύονταν από τη δημιουργία ρωγμής, η οποία όμως δεν επιδρούσε σημαντικά στην ευστάθεια του ανοίγματος.

Ένα σημαντικό βήμα στη μελέτη των δοκών οροφής υπογείων ανοιγμάτων έκανε ο Evans (1941), ο οποίος τις μελέτησε ως ασυνεχείς δοκούς μορφής *voussoir*. Μέσα από την εργασία του κατάφερε να εξηγήσει σε έναν μεγάλο βαθμό την υψηλή αντοχή που παρουσίαζαν ενίοτε τα στρώματα της αμέσου οροφής των υπογείων ανοιγμάτων.

Τα επόμενα χρόνια οι Wright και Bucky (1949) και Merill (1954), ασχολήθηκαν με το θέμα της ευστάθειας της οροφής υπόγειων ανοιγμάτων, εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα.

Το 1956 ο Corlett, χρησιμοποιώντας τη θεωρία του Evans (1941), συσχέτισε τη θεωρία της δοκού *voussoir* με την αποτελεσματικότητα της κοχλίωσης της οροφής, δείχνοντας ότι ο σχηματισμός ενός τόξου μεταφοράς δυνάμεων στην οροφή καθιστούσε ανενεργούς τους κοχλίες, των οποίων το μήκος ήταν μικρότερο από το ύψος του τόξου. Λίγα χρόνια αργότερα οι Corlett και Emery (1959) έδειξαν ότι μία δοκός αρχίζει να συμπεριφέρεται ως δοκός *voussoir* εάν η πλευρική πίεση δεν επαρκεί, ώστε να αποτρέψει το άνοιγμα των διεπιφανειών.

Το 1956 ο Mohr, μέσα από δοκιμές που πραγματοποίησε, έδειξε ότι μία μεγάλου πάχους δοκός αποτελούμενη από ασύνδετα τεμάχια κάμπτεται περισσότερο από μία αντίστοιχη δοκό μικρότερου πάχους (σε αντίθεση με τη συμπεριφορά ελαστικών δοκών). Επιπλέον, ο περιορισμός του βέλους κάμψης της δοκού απαιτεί πολύ μεγαλύτερη δύναμη για τη μικρού πάχους δοκό απ' ό,τι για τη μεγάλου πάχους. Ο Sterling αργότερα (1977) επεσήμανε πως το συμπέρασμα αυτό είναι αναμενόμενο, αλλά δεν είναι πάντοτε αληθές.

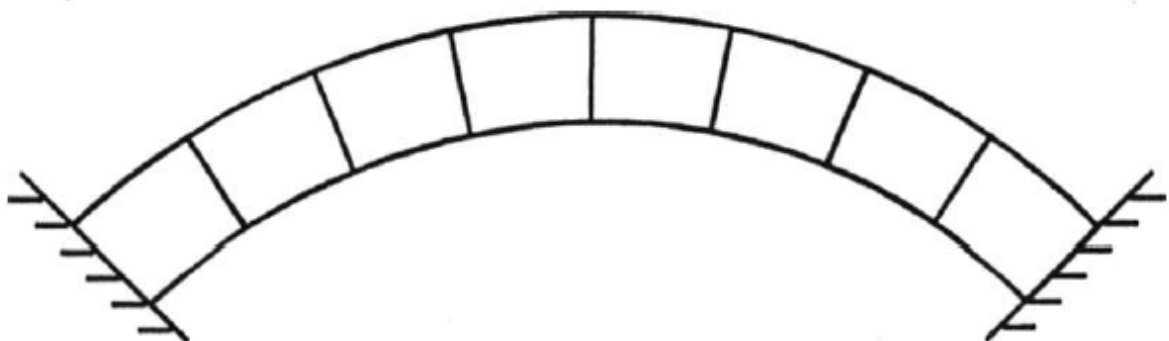
Ανάμεσα στους ερευνητές που ασχολήθηκαν με το θέμα τα επόμενα χρόνια ανήκουν οι Panek (1956-1962), ο Lang (1961) και Trollope (1969). Μέχρι και σήμερα, το ενδιαφέρον

για τη μελέτη της συμπεριφοράς των δοκών πετρώματος της οροφής υπόγειων ανοιγμάτων είναι έντονο. Οι κυριότερες από τις θεωρίες που έχουν διατυπωθεί περιγράφονται παρακάτω.

2.2 Θεωρητική ανάλυση των δοκών οροφής

Οι πρώτες προσπάθειες για τη θεωρητική προσέγγιση των δοκών οροφής υπογείων ανοιγμάτων, την αντιμετώπιζαν ως μία ελαστική δοκό ή πλάκα, η οποία αστοχεί όταν οι εφελκυστικές τάσεις, που αναπτύσσονται σε αυτή υπερβαίνουν την αντοχή της σε εφελκυσμό. Το 1937 ο Dinsdale παρατήρησε ότι τέτοιας μορφής δοκοί παρουσιάζουν ψαθυρή συμπεριφορά κατά την κάμψη τους, με αποτέλεσμα η μέγιστη επιτρεπόμενη εφελκυστική τάση να αναπτύσσεται πριν από την πλήρη εξέλιξη της καμπτικής τους παραμόρφωσης. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως η δοκός δεν αστοχεί αμέσως μετά τη ρωγμάτωσή της λόγω εφελκυσμού, διατηρεί τη φέρουσα ικανότητά της, η οποία ίσως και να αυξάνεται. Μετά από τα παραπάνω και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι πάντα υπάρχουν ασυνέχεις στις δοκούς οροφής, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η δοκός τη στιγμή της αστοχίας της δε λειτουργεί ως απλή ελαστική δοκός. Αυτό επαληθεύεται και από το ότι η ύπαρξη των ασυνεχειών στο σώμα της δοκού σχηματίζει μία ασυνεχή δομή, που συντίθεται από εξωτερικά ογκοτεμάχια πετρώματος.

Συνήθως, οι δοκοί της μορφής αυτής καλούνται δοκοί voussoir και τα ογκοτεμάχια πετρώματος που συνθέτουν τη δοκό, τεμάχια voussoir. Ο όρος voussoir προκύπτει από τα αντίστοιχα τόξα και ασπίδες που αποτελούν μία τεχνική γεφύρωσης ανοιγμάτων που έχει τις ρίζες της στα αρχαία χρόνια.

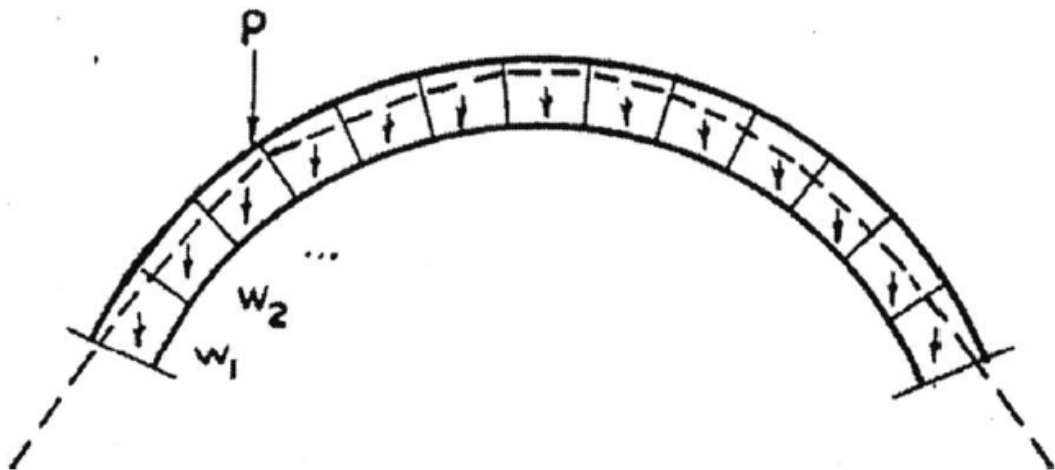


Σχ. 2.1: Τόξο voussoir (Νομικός, 2004)

Η αντοχή των τόξων voussoir οφείλεται κυρίως στο γεωμετρικό τους σχήμα και το πάχος της διατομής τους, σχηματίζοντας φορέα που μεταβιβάζει τα φορτία που ασκούνται σε αυτόν στις στηρίξεις του, μέσω των τεμαχίων voussoir. Στο μεγαλύτερο μέρος των περιπτώσεων η αστοχία αυτών των τόξων οφείλεται σε μηχανική αστάθεια του φορέα.

Το μέγεθος του φορτίου που απαιτείται για να προκληθεί μηχανική αστοχία σε ένα τόξο voussoir δεν εξαρτάται από την αντοχή του υλικού των τεμαχίων του, αλλά από το σχήμα του, το ίδιο βάρος του, τη θέση και το μέγεθος της εξωτερικής φόρτισης. Το γεγονός ότι η αντοχή του τόξου εξαρτάται από το σχήμα του είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των φορέων αυτής της μορφής, αφού δίνει τη δυνατότητα να μελετηθεί η αστοχία τους με μικρής κλίμακας φυσικά μοντέλα.

Η μεταφορά των εξωτερικών φορτίσεων στο τόξο voussoir πραγματοποιείται μέσω των τεμαχίων προς τις στηρίξεις. Η εντατική κατάσταση σε όλες τις διατομές του τόξου μπορεί να παρασταθεί από μία καμπύλη πιέσεων, η οποία θα διέρχεται από τα σημεία εφαρμογής των συνισταμένων δυνάμεων σε κάθε διατομή του τόξου.



Σχ. 2.2: Καμπύλη πιέσεων στο τόξο voussoir με κατασκευή σχοινοπολυγώνου (Κοοharian, 1952).

Για ένα τόξο που φορτίζεται μόνο από το ίδιο βάρος του, η ευστάθεια του διατηρείται όταν η καμπύλη πιέσεων του τόξου διατηρείται στο εσωτερικό του. Αν ασκηθούν στο τόξο επιπλέον εξωτερικά φορτία, τότε η εντατική κατάσταση και η θέση της καμπύλης πίεσης μεταβάλλονται. Και σε αυτή την περίπτωση, η ευστάθεια του τόξου θα εξαρτάται από το εάν στη νέα θέση της η καμπύλη πιέσεων εξακολουθεί να δρα στο εσωτερικό του τόξου.

Για κάθε τόξο υπάρχει ένας άπειρος αριθμός πιθανών θέσεων της καμπύλης πιέσεων και έτσι για να σχεδιαστεί η πραγματική καμπύλη θα πρέπει να είναι γνωστές οι αντιδράσεις στις στηρίξεις του τόξου.

Ο έλεγχος, λοιπόν, της ευστάθειας των τόξων *voussoir* δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με απλή στατική θεώρηση του φορέα τους. Ο έλεγχος αυτός συνήθως πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τα δύο θεωρήματα οριακής ανάλυσης της θεωρίας της πλαστικότητας:

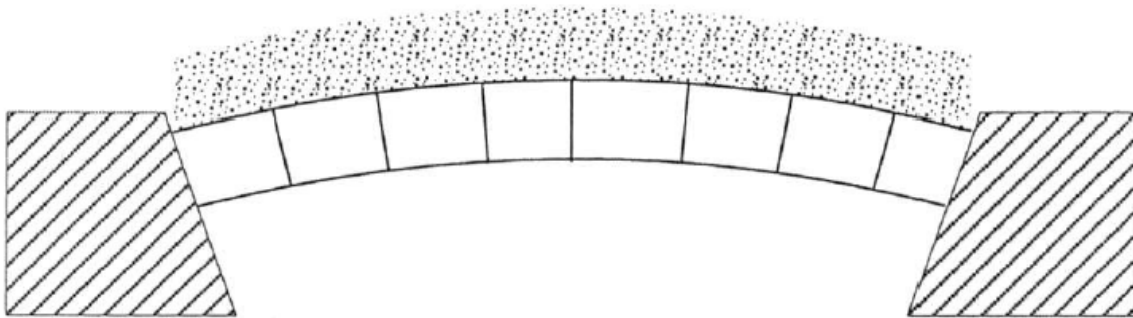
α) Το Θεώρημα κάτω ορίου.

β) Το Θεώρημα άνω ορίου.

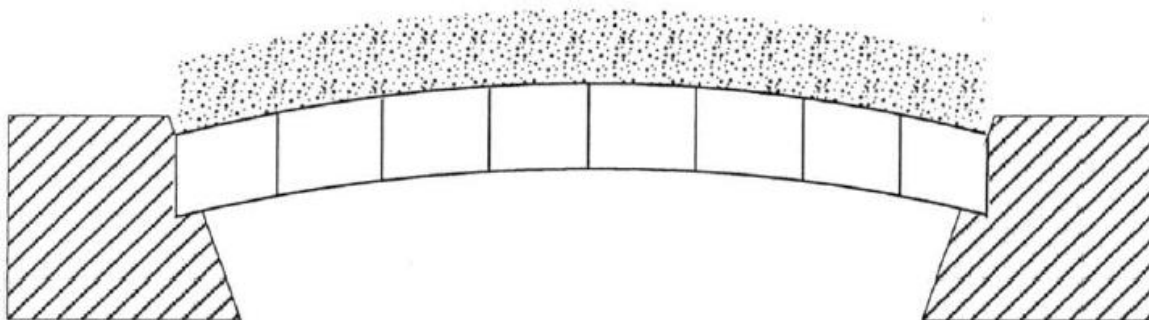
Η παραπάνω μέθοδος είναι κατάλληλη μόνο όταν το υλικό των τεμαχίων *voussoir* θεωρηθεί ότι έχει την απαραίτητη αντοχή, ώστε να μεταφέρει με ασφάλεια τα φορτία που ασκούνται στο τόξο.

2.3 Μετάβαση από το τόξο *voussoir* στη δοκό *voussoir*

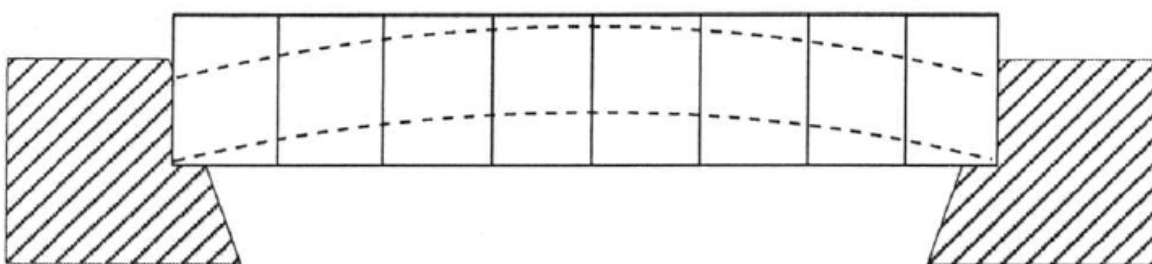
Η μετάβαση από το τόξο στη δοκό *voussoir*, εξηγείται με βάση τη θεώρηση του Evans (1941). Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα 3 στάδια της μετάβασης.



(α) Τόξο voussoir με χαμηλή κάλυψη υπερκειμένων



(β) Παρόμοια περίπτωση με την (α), αλλά οι πλευρές των τεμαχίων voussoir είναι κατακόρυφες



(γ) Παρόμοια περίπτωση με την (β), με το ίδιο ασκούμενο φορτίο, όμως τώρα πρόκειται για δοκό που εμπεριέχει το τόξο

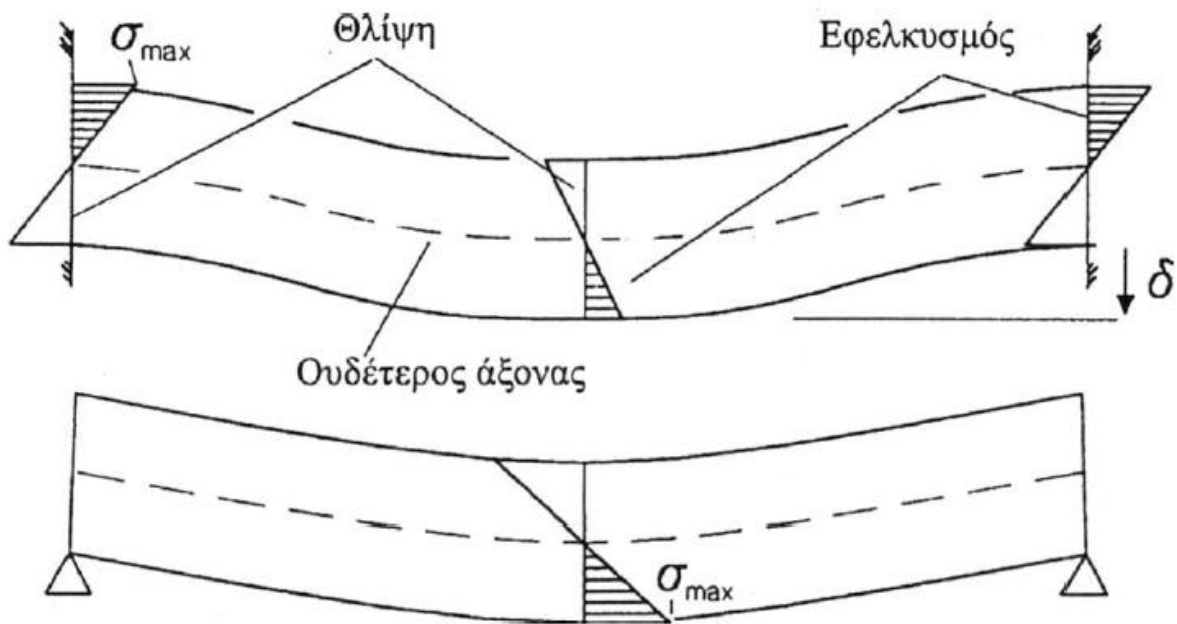
Σχ. 2.3: Η μετάβαση από το τόξο voussoir στη δοκό voussoir (Evans, 1941)

Στο σχήμα 2.3(α) απεικονίζεται ένα κλασικό τόξο voussoir. Στο σχήμα 2.3(β) παρουσιάζεται το ενδιάμεσο στάδιο της μετάβασης προς τη δοκό. Εδώ, το τόξο έχει την ίδια με πριν μορφή, όμως τα τεμάχια voussoir έχουν τις πλευρές τους, μέσω των οποίων εφάπτονται μεταξύ τους, κατακόρυφες. Τέλος, στο σχήμα 2.3(γ) μία δοκός έχει αντικαταστήσει το προηγούμενο τόξο. Αυτή η δοκός έχει τέτοιο πάχος, ώστε να διατηρεί το συνολικό φορτίο σταθερό αλλά και να περιλαμβάνει το προηγούμενο τόξο ολοκληρωτικά στο εσωτερικό του σχήματος της.

Μέσα από την περιγραφή του Evans αιτιολογείται η μετάβαση μίας δοκού πετρώματος, που έχει ασυνέχειες στη δομή της, σε δοκό voussoir. Ωστόσο, η θεώρηση αυτή μπορεί να γίνει ακόμη και στην περίπτωση που η δοκός δεν περιέχει ασυνέχειες.

Σε μία αμφίπακτη συνεχή ελαστική δοκό σταθερής διατομής υπό ομοιόμορφη κατανομημένη φόρτιση, η ένταση λόγω κάμψης που αναπτύσσεται στις διατομές της δοκού, προκαλεί εφελκυσμό του άνω τμήματος της διατομής στις στηρίξεις και του κάτω τμήματος της διατομής στο μέσο της δοκού. Η μέγιστη εφελκυστική τάση αναπτύσσεται στην ακραία ίνα της διατομής των στηρίξεων και είναι περίπου διπλάσια από τη μέγιστη εφελκυστική τάση στο μέσο της δοκού. Έτσι λοιπόν, για μία τέτοιου είδους δοκό η πρώτη αστοχία σε εφελκυσμό θα εμφανισθεί στις στηρίξεις, όταν η μέγιστη εφελκυστική τάση υπερβεί την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών και άρα τη διακοπή της συνέχειας των στηρίξεων.

Η δοκός δεν είναι πια αμφίπακτη και η στατική της λειτουργία μπορεί να περιγραφεί με αυτή της αμφιέρειστης δοκού (σχ. 2.4β), αν δεχθούμε πως δε συμβαίνει ολίσθηση στις στηρίξεις. Η μέγιστη ένταση σε αμφιέρειστη δοκό αναπτύσσεται στη μεσαία διατομή της. Στην ακραία ίνα της μεσαίας διατομής παρουσιάζεται μέγιστη εφελκυστική τάση μεγαλύτερη από την εφελκυστική τάση στις στηρίξεις της αμφίπακτης δοκού (για ίδιες συνθήκες γεωμετρίας και φόρτισης). Επομένως, η δοκός αστοχεί σε εφελκυσμό στη μεσαία διατομή της.



Σχ. 2.4: Ελαστική δοκός στηριζόμενη (α) σε πακτωμένα άκρα και (β) με απλή έδραση

Στη διαδοχική αυτή θραύση των διατομών στήριξης και μέσω της δοκού μπορεί να αποδοθεί η μετάβαση μίας δοκού πετρώματος στην οροφή μίας υπόγειας εκσκαφής σε δοκό voussoir, καθώς είναι κοινώς αποδεκτό πως για μεγάλα πλάτη εκσκαφών τα στρώματα της άμεσης οροφής συχνά ρωγματώνονται λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του άρρηκτου πετρώματος στο μέσο και στις στηρίξεις (Diederichs και Kaiser, 1999).

Με πρωτοπόρο τον Evans αλλά και άλλους ερευνητές στην πορεία, η θεωρητική μελέτη των δοκών voussoir βασίζεται στις εξής παραδοχές:

α) Στην παραδοχή ότι η παρουσία των ασυνεχειών στη δοκό, που είτε υπάρχουν λόγω της δομής του πετρώματος είτε δημιουργήθηκαν λόγω εφελκυστικής αστοχίας της δοκού, δεν επιτρέπει τη μετάδοση εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος της δοκού,

β) Στην υπόθεση ότι η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών της είναι αρκετή, έτσι ώστε να μην επιτρέπει τη διατμητική ολίσθηση κατά μήκος των επιπέδων της.

Στη συνέχεια γίνεται η παραδοχή μίας περιοχής της δοκού, που θα φέρει το σύνολο των φορτίων, ενώ η υπόλοιπη δοκός θα θεωρείται αφόρτιστη. Οι απόψεις των ερευνητών για το σχήμα και το μέγεθος της περιοχής αυτής διαφέρουν. Το πέτρωμα της δοκού θεωρείται

ελαστικό μέχρι την αστοχία, η οποία συμβαίνει είτε λόγω σύνθλιψης του πετρώματος, είτε λόγω αδυναμίας της δοκού να μεταφέρει τα επιβαλλόμενα φορτία που εκδηλώνεται με μηχανική αστάθεια κατά την κάμψη της. Παρά το γεγονός, όμως, ότι η θεωρία του Evans ήταν καθοριστική και πρωτοποριακή για την εποχή, ένα λάθος στη στατική θεώρηση του προβλήματος (επισημαίνεται πρώτη φορά από τον Sterling, 1977) και η παραδοχή του μεγέθους της θλιβόμενης περιοχής της δοκού καθιστούν τα αποτελέσματά του μη εφαρμόσιμα για πρακτικό σχεδιασμό.

Σύμφωνα με τα πειράματα και τις προσομοιώσεις των Wright και Mirza (1963) και Wright και Kelly (1970), το ύψος της θλιβόμενης περιοχής κατά μήκος των ασυνεχειών στήριξης και μέσου της δοκού είναι μικρότερο από το μισό του πάχους της δοκού, όπως και ότι το μέγεθος της μέγιστης αξονικής θλιπτικής τάσης που αναπτύσσεται στη δοκό, είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από εκείνο που προέβλεπε η θεωρία του Evans.

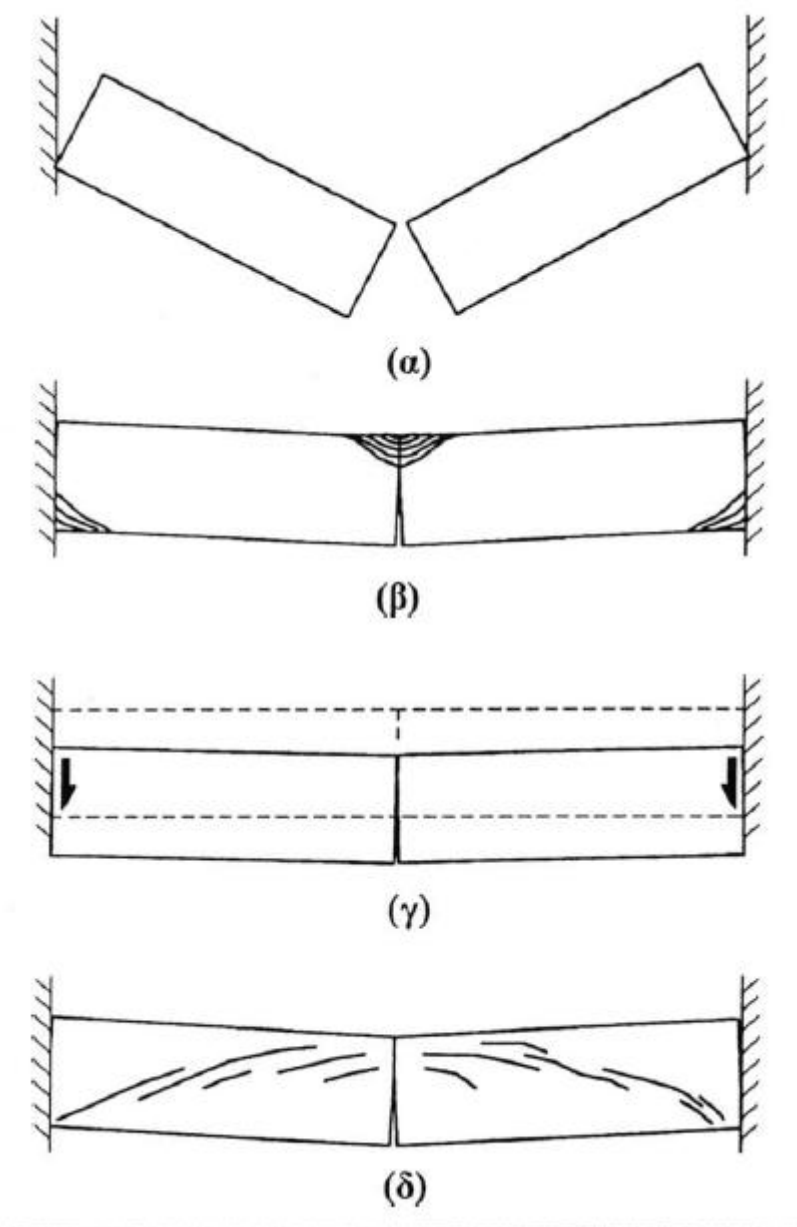
Ο Sterling, το 1977, λαμβάνοντας υπόψη του τη δουλειά προγενέστερων ερευνητών πραγματοποίησε πειράματα φόρτισης δοκών *voussoir* στο εργαστήριο, τα οποία και επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα του Wright. Έπειτα, σε συνεργασία με άλλους ερευνητές (Sterling και Nelson 1978, Sterling 1980, Sterling, Nelson και Peterson, 1995) διατύπωσε τη θεωρία της τεχνικής του γραμμικού τόξου ως μία μεθοδολογία για το σχεδιασμό δοκών *voussoir*.

Τα χρόνια που ακολούθησαν την προσφορά του Sterling στο θέμα, νεότεροι ερευνητές ασχολήθηκαν με αυτό παρουσιάζοντας πολλές φορές διαφορετικές απόψεις όσον αφορά στο μέγεθος της θλιβόμενης περιοχής της δοκού. Οι σημαντικότεροι από αυτούς ήταν: Οι Beer και Meek (1982), Brady και Brown (1993), Sofianos (1996), Sofianos και Karpenis (1998), Hatzor και Benary (1998), Diderichts και Kaiser (1999), Nomikos et al. (2002) και Nomikos (2004).

2.4 Μορφές αστοχίας της ρωγματομένης δοκού

Αρχικά ο Evans απέδιδε την αστοχία της δοκού σε δύο βασικές αιτίες: τη σύνθλιψη του πετρώματος λόγω υπέρβασης της θλιπτικής του αντοχής και τη μηχανική αστάθεια της δοκού

κατά την κάμψη της. Με τη συμβολή και των μεταγενέστερων ερευνητών που ασχολήθηκαν με το θέμα, έχουμε καταλήξει στο ότι η δοκός voussoir μπορεί να αστοχήσει με έναν από τους τέσσερις τρόπους που φαίνονται στο σχήμα 2.5.



Σχ. 2.5: Πιθανές μορφές αστοχίας της δοκού voussoir: (α) μηχανική αστάθεια της δοκού, (β) σύνθλιψη του πετρώματος στο μέσο και στις στηρίξεις της δοκού, (γ) ολίσθηση στις στηρίξεις (δ) διαγώνια ρωγμάτωση. (Diederichs και Kaiser, 1999)

Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι παραπάνω τέσσερις μορφές αστοχίας:

α) Μηχανική αστάθεια της δοκού

Η μηχανική αστάθεια της δοκού (σχ. 2.5α) συμβαίνει όταν η ροπή του ζεύγους των οριζόντιων δυνάμεων H είναι μικρότερη από τη ροπή ανατροπής στη στήριξη της δοκού, δηλαδή:

Συνισταμένη ροπή ανατροπής > Συνισταμένη ροπή ευστάθειας

Η ροπή ανατροπής προκαλείται λόγω ιδίου βάρους της δοκού και πιθανής εξωτερικής φόρτισης, π.χ. λόγω φόρτισης από υπερκείμενες δοκούς.

β) Σύνθλιψη του πετρώματος της δοκού λόγω υπέρβασης της θλιπτικής του αντοχής

Αυτή η μορφή αστοχίας (σχ. 2.5β) προκαλείται λόγω θραύσης του πετρώματος στο άνω τμήμα της μεσαίας διατομής της δοκού και στο κάτω τμήμα των ακριανών διατομών, που είναι και οι θέσεις στήριξης της δοκού.

Το πέτρωμα αστοχεί όταν η αξονική ανηγμένη παραμόρφωση της κάτω ακραίας ίνας της διατομής στήριξης της δοκού υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη αξονική παραμόρφωση που μπορεί να αναλάβει το πέτρωμα, δηλαδή:

$$\epsilon_{ax} > \epsilon_{all}$$

γ) Διατμητική ολίσθηση σε επίπεδο ασυνέχειας

Αυτής της μορφής η αστοχία (σχ. 2.5γ) λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που η μέγιστη διατμητική δύναμη υπερβαίνει τη διατμητική αντοχή του επιπέδου της ασυνέχειας.

δ) Διαγώνια ρωγμάτωση

Η τελευταία μορφή αστοχίας (σχ. 2.5δ) προκαλείται λόγω λοξού εφελκυσμού κοντά στην περιοχή των στηρίξεων της δοκού και συμβαίνει όταν οι λοξές εφελκυστικές τάσεις, που δρουν κάθετα προς την καμπύλη πίεσεων της δοκού, υπερβούν την αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει είτε το πέτρωμα να έχει πολύ μικρή αντοχή σε εφελκυσμό είτε η δοκός να φορτίζεται εξωτερικά σε σημαντικό βαθμό.

2.5 Θεωρία γραμμικού τόξου

Ο πρώτος που ανέπτυξε τη θεωρία του γραμμικού τόξου ήταν ο Sterling (1977, 1980), ενώ μαζί με τον Nelson (1978) τη βελτίωσαν. Η νεότερη μορφή της μεθόδου παρουσιάστηκε το 1995 από τους Sterling et al.

Σύμφωνα λοιπόν, με αυτούς, κατά τη θεωρία του γραμμικού τόξου η δοκός λειτουργεί ως τοξωτός φορέας δυνάμεων στο εσωτερικό της, καθώς και στον περιορισμό των άκρων της έναντι πλευρικών μετατοπίσεων. Η καμπύλη πιέσεων στο εσωτερικό της δοκού θεωρείται ευθεία.

Κάποια χρόνια αργότερα (Sofianos, 1996), ωστόσο, αποδείχθηκε πως η καμπύλη πιέσεων στο εσωτερικό της δοκού δεν είναι ευθεία, αλλά έχει τη μορφή παραβολής, όπως είχε θεωρήσει αρχικά ο Evans. Επομένως, η θεωρία του γραμμικού τόξου μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστική. Παρ' όλα αυτά, περιλαμβάνει ιδιαίτερα σημαντικά στοιχεία, όπως το γεγονός πως λαμβάνει υπόψη της πιθανή υποχώρηση των στηρίξεων της δοκού υπό την επίδραση θλιπτικών φορτίων καθώς και την περαιτέρω αύξηση της κατακόρυφης μετατόπισης λόγω στροφής των ογκοτεμαχίων της δοκού *voussoir*.

2.6 Τα πειράματα του Sterling

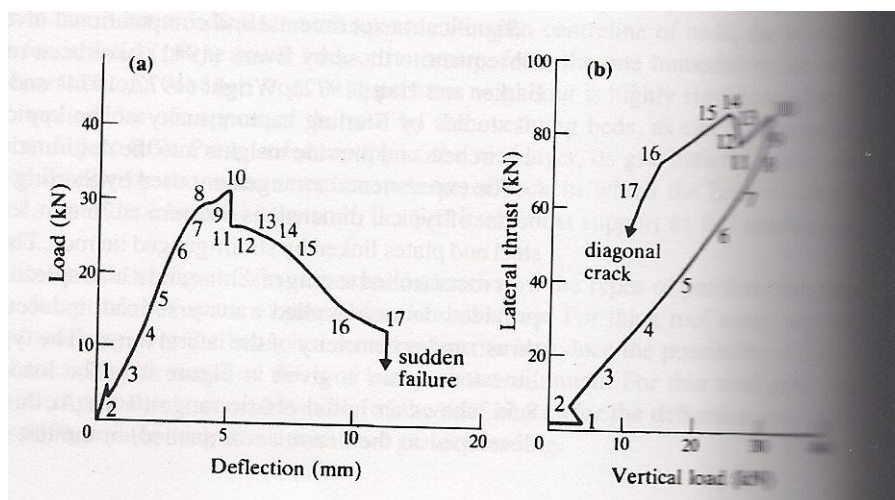
Ο R. Sterling στη διδακτορική του διατριβή με τίτλο “ Roof design for underground openings in near – surface bedded rock formations” (1977), διεξήγαγε πειράματα σε 63 δοκούς, κάνοντας τροποποιήσεις στο είδος του πετρώματος από το οποίο αποτελούνταν κάθε δοκός, στο μέγεθος, το σχήμα τους, στην αρχική προφόρτιση που τους είχε επιβάλλει, στις συνθήκες φόρτισης και υποστήριξης τους κλπ.

Οι πειραματικές μελέτες του Sterling περιλαμβάνουν πολλά από τα συμπεράσματα της δουλειάς άλλων ερευνητών και παρέχουν πληροφορίες για την παραμόρφωση και τους τρόπους αστοχίας βραχωδών οροφών.

Καθώς στα περισσότερα από τα πειράματά του, ο Sterling, χρησιμοποίησε δοκούς ασβεστολίθου Ιντιάνα (Indiana Limestone, συναντάται κυρίως στην κεντρική και νότια Ιντιάνα των ΗΠΑ), αυτό το υλικό επιλέχθηκε για να γίνει η προσομοίωσή του και στο PFC, στην παρούσα εργασία. Ο Sterling, στα δεδομένα που παρουσίασε για τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που χρησιμοποίησε, έδωσε για τον Indiana Limestone την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη $\sigma_c = 40\text{MPa}$ και το μέτρο ελαστικότητάς του $E = 9.3\text{ GPa}$.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε ο Sterling απεικονίζεται στην εικόνα 2.1 . Μία δοκός πετρώματος, τυπικών διαστάσεων 660mm x 75mm x 75mm περιορίστηκε μεταξύ χαλύβδινων πλευρικών πλακών. Η δοκός φορτίστηκε εγκάρσια από μία σερβοελεγχόμενη μηχανή κι ένα σύστημα κατανομής του φορτίου. Ο σχεδιασμός του πειράματος παρείχε δεδομένα για την εγκάρσια εφαρμογή του φορτίου, το βέλος κάμψης στη δοκό, την πλευρική πίεση και την εκκεντρότητα της πλευρικής πίεσης. Η τυπική απόκριση μίας αρχικά άρρηκτης δοκού ασβεστολίθου δίνεται στην εικόνα 2.1. Το διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης που φαίνεται στην εικόνα 2.1(α), απεικονίζει μία αρχική ελαστική περιοχή (0-1). Σε αυτό το στάδιο, μία εγκάρσια, κεντρική ρωγμή δημιουργήθηκε στη δοκό, συνοδευόμενη από μία χαλάρωση στο επιβαλλόμενο φορτίο. Αύξηση στο φορτίο οδήγησε σε μία γραμμική καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης (2-7). Η φόρτιση κι η αποφόρτιση στην περιοχή 2-7 ήταν αντιστρεπτή, ενώ στην καθοδική συνέχεια της καμπύλης παρατηρείται ότι ξεφεύγουμε από την αρχική κατάσταση. Η αύξηση του φορτίου (7-10) είχε ως αποτέλεσμα μία μη γραμμική απόκριση, συνοδευόμενη από τοπική αστοχία είτε στο κέντρο της πάνω διατομής της δοκού

είτε στα κάτω άκρα της. Περαιτέρω αύξηση του φορτίου έδωσε μειωμένες τιμές φόρτισης για υψηλότερες τιμές βέλους κάμψης (10-17), συνοδευόμενες από αστοχία στο κέντρο της πάνω διατομής ή στα κάτω άκρα του δοκιμίου και τελικά τοπική διάλυσή του.



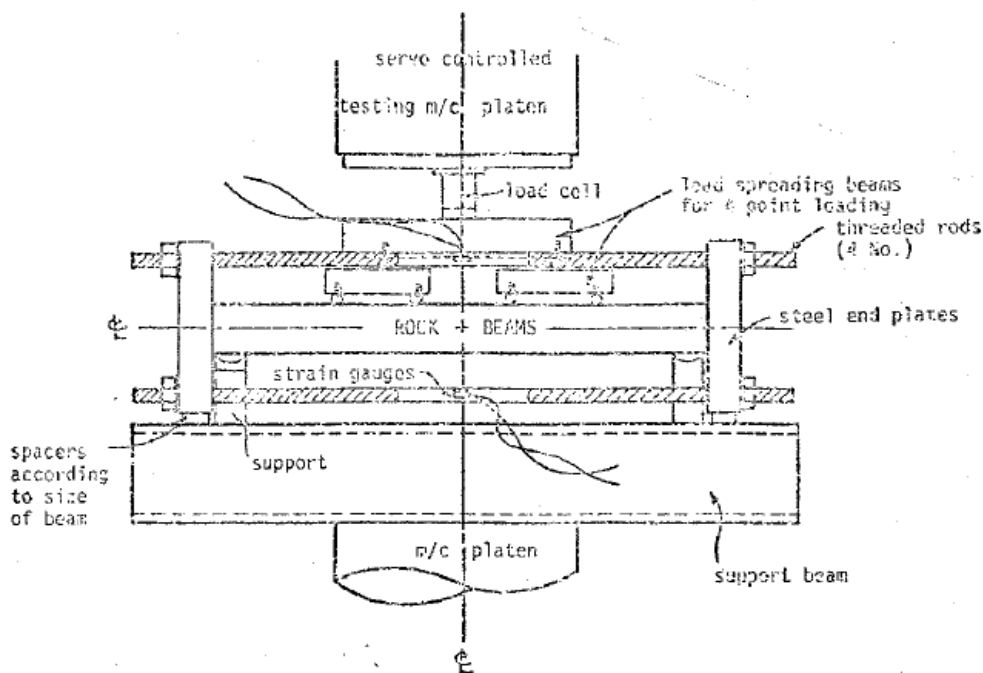
Εικ. 2.1: Διαγράμματα Sterling (α) φορτίου – βέλους κάμψης, (β) κάθετου φορτίου – πλευρικής ώθησης (Brady and Brown, 2004)

Τα κύρια στοιχεία της καμπύλης φορτίου – βέλους κάμψης επιβεβαιώνονται από το διάγραμμα πλευρικής – κάθετου φορτίου (εικόνα 2.1(β)). Από τη μικρή αρχική πίεση που αντιστοιχεί στην πλευρική προφόρτιση, η πρώτη απόκριση (0-1) είναι μία οριζόντιος που αντιστοιχεί στη συνεχή, ελαστική συμπεριφορά της δοκού. Η κεντρική κάθετη ρωγμάτωση της δοκού (1-2) με αύξηση της πλευρικής πίεσης, αντικατοπτρίζει την σημασία της ασκούμενης ώσης στην ακόλουθη συμπεριφορά της δοκού voussoir. Η γραμμική περιοχή (2-7) αντιστοιχεί σε αντιστρεπτή κατάσταση. Μετά τη μέγιστη αντοχή της δοκού (10), η μειούμενη πλευρική πίεση που προκλήθηκε λόγω τοπικών θραύσεων, έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη αντοχή σε κάθετη φόρτιση για τη δοκό.

Αυτό αλλά και άλλα πειράματα που έγιναν από τον Sterling οδήγησαν στις ακόλουθες αρχές σχετικά με τη συμπεριφορά δοκών πετρώματος πάνω από υπόγεια ανοίγματα:

- i. Τα στρώματα οροφής δεν μπορούν να προσομοιωθούν ως συνεχείς ελαστικές δοκοί ή πλάκες, καθώς η συμπεριφορά τους καθορίζεται από τα τεμάχια (voussoirs) που έχουν δημιουργηθεί από φυσικές διακλάσεις ή από προκαλούμενες θραύσεις.
- ii. Η συμπεριφορά στρωμάτων οροφής καθορίζεται από τις πλευρικές πιέσεις που προκαλούνται λόγω βέλους κάμψης, λόγω του φορτίου της βαρύτητας και λόγω του περιορισμού των πετρωμάτων στα οποία στηρίζεται η δοκός.

- iii. Μία δοκός voussoir συμπεριφέρεται ελαστικά δηλ., το διάγραμμα πλευρικής πίεσης – φορτίου είναι ευθεία, στο εύρος της ικανοποιητικής απόδοσης, στο τέλος της οποίας φτάνει το μέγιστο φορτίο αντοχής της δοκού.
- iv. Για μία δοκό voussoir με μικρό λόγο ανοίγματος/πάχους, η πιο πιθανή μορφή αστοχίας είναι διατμητική αστοχία στις στηρίξεις
- v. Για μία οροφή με μεγάλο λόγο ανοίγματος/πάχους, η ευστάθεια του ανοίγματος της οροφής περιορίζεται από την πιθανότητα λυγισμού της δοκού, χωρίς σημάδια αστοχίας των κεντρικών τεμαχίων ή των τεμαχίων στις στηρίξεις.
- vi. Μία οροφή που αποτελείται από πέτρωμα χαμηλής αντοχής ή έχει μέτριο μέγεθος λόγο ανοίγματος/πάχους μπορεί να αστοχήσει λόγω της θραύσης των κεντρικών τεμαχίων ή των τεμαχίων στις στηρίξεις.



Εικ. 2.2: Η διάταξη που χρησιμοποίησε ο Sterling στα πειράματά του (Sterling, 1977)

2.6.1 Διαδικασία των πειραμάτων

Πριν από την έναρξη των πειραμάτων του, ο Sterling βαθμονόμησε το κελί φόρτισης, τις πλάκες που περιόριζαν τη δοκό και τα strain gauges. Στη συνέχεια έκανε προσομοιωτικές μετρήσεις, για να βεβαιωθεί πως η διάταξη λειτουργεί σωστά.

Η βασική διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τη στήριξη της δοκού σε κάθετες στηρίξεις στα άκρα της κάτω διατομής της. Πειράματα με τροποποιήσεις, όπως η διαφοροποίηση στις συνθήκες αρχικής προφόρτισης, οι οποίες προσομοιώθηκαν και στην παρούσα εργασία, ακολούθησαν την ίδια διαδικασία. Αυτή είχε ως εξής:

- Οι πλευρικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν απόσταση μόλις μεγαλύτερη από το μήκος της εκάστοτε δοκού.
- Οι πλευρικές πλάκες τοποθετήθηκαν έτσι ώστε η ευθεία που περνάει από το μέσο τους να συμπίπτει με τον άξονα της δοκού.
- Η δοκός κεντραρίστηκε πάνω στις στηρίξεις και στην πλάκα στήριξης που υπήρχε κάτω από αυτές.
- Ανά τακτά χρονικά διαστήματα, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, σημειώνονταν με στυλό οι ρωγμές στα στάδια της δημιουργίας τους αλλά και της εξέλιξής τους. Στη συνέχεια, αυτά μεταφέρθηκαν σε χαρτί.
- Η φόρτιση συνεχίστηκε αρκετά μετά το μέγιστο φορτίο, εν γένει μέχρι που το φορτίο έφτασε στο ένα τέταρτο του μέγιστου φορτίου που ασκήθηκε στη δοκό.
- Τέλος, η δοκός αφαιρούνταν από τη μηχανή δοκιμής, έτσι ώστε να ελεγχθεί για ύπαρξη ή εξέλιξη ρωγμών στα άκρα της ή άλλων λεπτομερειών αστοχίας που δεν ήταν εφικτό να παρατηρηθούν όσο βρίσκονταν στη συσκευή δοκιμής.

Στα πειράματα που έγινε τροποποίηση των αρχικών συνθηκών προφόρτισης στις δοκούς, οι πλευρικές πλάκες έσφιζαν μέχρι το προκαθορισμένο φορτίο, ώστε να φθάσει την καθορισμένη αρχική προφόρτιση. Αυτό μπορούσε να επιτευχθεί με ευκολία και αξιοπιστία, ακόμα και στις περιπτώσεις που εφαρμόστηκε φόρτιση δύο και τεσσάρων σημείων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Εισαγωγή στο πρόγραμμα PFC^{2D}

3.1 Εισαγωγή

Τα σκληρά κρυσταλλικά πετρώματα είναι ψαθυρά ετερογενή υλικά, τα οποία επιδεικνύουν ανελαστική παραμόρφωση κατά τη φόρτισή τους. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται κυρίως στο σχηματισμό, στην ανάπτυξη, στη διεύρυνση και στην αλληλεπίδραση ενός πλήθους μικρορωγμών στο σώμα του πετρώματος.

Η προσέγγιση για την προσομοίωση της ανελαστικής παραμόρφωσης και θραύσης, μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο κατηγορίες, την έμμεση και την άμεση. Ο διαχωρισμός γίνεται ανάλογα με το εάν η αστοχία αντιπροσωπεύεται έμμεσα μέσω της επίδρασής της στις καταστατικές σχέσεις, ή άμεσα με την ανάπτυξη μεγάλου αριθμού μικρορωγμών αντίστοιχα. Οι περισσότερες έμμεσες προσεγγίσεις εξιδανικεύουν το πέτρωμα ως ένα συνεχές και ομοιογενές μέσο και χρησιμοποιούν κριτήρια υποβάθμισης του πετρώματος στις καταστατικές σχέσεις, ώστε να αντιπροσωπεύσουν τη θραύση στην κλίμακα της μικροδομής. Από την άλλη, οι άμεσες προσεγγίσεις αναπαριστούν το πέτρωμα ως σύνολο δομικών μονάδων (π.χ. ελατήρια, δοκοί, κλπ.) ή ως διακριτά, μεμονωμένα στοιχεία που συνδέονται μεταξύ τους στα σημεία επαφής τους με δεσμούς.

Το PFC^{2D} (Particle Flow Code 2D) ανήκει στη κατηγορία των μεθόδων άμεσης προσέγγισης. Το PFC^{2D} είναι ένας αριθμητικός κώδικας προσομοίωσης της κίνησης και της αλληλεπίδρασης σφαιρικών σωματιδίων με βάση τη μέθοδο διακριτών στοιχείων (Distinct Element Method, DEM), σε διδιάστατο 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

Ο κώδικας PFC^{2D} μοντελοποιεί την κίνηση και την αλληλεπίδραση των υπό πίεση συσσωματωμάτων που αποτελούνται από άκαμπτα κυκλικά στοιχεία, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο διακριτών στοιχείων (DEM). Την DEM παρουσίασε ο Cundall (1971) για την ανάλυση των προβλημάτων βραχομηχανικής και στη συνέχεια εφαρμόστηκε και για τα εδάφη από τους Cundall και Strack (1979). Η DEM θεωρεί το μέσο ασυνεχές, δίνοντας έμφαση στις επαφές και στην αλληλεπίδραση των στοιχείων του μέσου μεταξύ τους. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα της μεθόδου έναντι των συμβατικών μεθόδων που βασίζονται στη συμπεριφορά του συνεχούς μέσου.

Στην DEM η αλληλεπίδραση των στοιχείων είναι μια δυναμική διαδικασία, με καταστάσεις ισορροπίας να δημιουργούνται, όταν οι εσωτερικές δυνάμεις ισορροπούν. Οι κινήσεις των σωματιδίων προκύπτουν από τη διάδοση των διαταραχών μέσα στο σύστημα, που προκαλούνται από την κίνηση καθορισμένων τοίχων ή στοιχείων. Αυτή είναι μία δυναμική διαδικασία, στην οποία η ταχύτητα της διάδοσης εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος.

Η αλληλεπίδραση των στοιχείων όπως περιγράφηκε, 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 βρισκόμαστε σε 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 επιβολή εξωτερικών φορτίσεων. Το χρονικό βήμα θα πρέπει να είναι τόσο μικρό, ώστε να δύναται να θεωρηθεί ότι οποιαδήποτε διαταραχή στο αριθμητικό μοντέλο δεν θα μπορεί να διαδοθεί πέρα από την άμεση γειτονία της, κατά τη διάρκειά ενός χρονικού βήματος.

3.3 Το πρόγραμμα PFC^{2D}

Στο PFC^{2D} το πέτρωμα προσομοιώνεται σε δύο διαστάσεις ως σύνολο άκαμπτων κυκλικών 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 προσομοίωμα αυτό του πετρώματος καλείται συχνά στη 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, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια.

Σκοπό της μοντελοποίησης αποτελεί η γένεση ενός συνόλου σωματιδίων που θα αντιπροσωπεύει όσο το δυνατόν καλύτερα ένα φυσικό πέτρωμα κι έπειτα η υποβολή του συνθετικού πετρώματος σε πλήθος δοκιμών, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση των μικρομηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος στη μακροσκοπική του απόκριση. Η φόρτιση της κατανομής προσομοιώνεται δίνοντας τιμές για την ταχύτητα των τοίχων, των σφαιρών, εφαρμόζοντας εξωτερικές δυνάμεις και δυνάμεις βαρύτητας.

Στο PFC^{2D} είναι ενσωματωμένη και η γλώσσα προγραμματισμού FISH, η οποία δίνει τη δυνατότητα να καθοριστούν νέες μεταβλητές και λειτουργίες. Αυτές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για επέκταση της λειτουργίας του κώδικα PFC^{2D} ή για προσθήκη ιδιοτήτων του πετρώματος. Η Fishtank του PFC^{2D} αποτελεί σύνολο συναρτήσεων της FISH, που διευκολύνει το χρήστη να ορίσει την εντατική κατάσταση του συνθετικού πετρώματος ή των ορίων του, καθώς και να προσομοιώσει εργαστηριακές δοκιμές.

Για να είναι επιτυχημένη μια προσομοίωση, θα πρέπει να ακολουθούνται κάποια βασικά βήματα. Αυτά αφορούν στην αλληλουχία των εργασιών από την κατασκευή του συνόλου των σωματιδίων έως και το πέρας των δοκιμών που θα την υποβάλλουμε. Τα στάδια της μοντελοποίησης φαίνονται παρακάτω:

1. Δημιουργία σωματιδίων

Αρχικά δίνονται οι συντεταγμένες κατά τις οποίες θα σχηματισθούν οι τοίχοι – όρια του δοκιμίου. Μέσα σε αυτά τα όρια θα τοποθετηθούν οι σφαίρες – δίσκοι, των οποίων το πλήθος είναι καθορισμένο από το χρήστη. Μετά ορίζεται το είδος των δεσμών που θα υπάρχει μεταξύ των σωματιδίων, όπως επίσης και η ύπαρξη συσσωματωμάτων. Τέλος, αν απαιτείται, θα ορισθούν περιοχές – ομάδες, των οποίων τα σωματίδια θα έχουν κοινές ιδιότητες, καθώς και ασυνέχειες που μπορεί να υπάρχουν στο συνθετικό πέτρωμα.

2. Αρχική κατάσταση

Σε αυτό το στάδιο θα ορισθεί αν τα όρια του δοκιμίου θα αποτελούνται από τους τοίχους ή από μια σειρά σφαιριδίων έπειτα από την απομάκρυνση 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 της αρχικής εντατικής κατάστασης και του πορώδους.

3. Επιλογή τύπου επαφής

Με τον όρο επαφή εννοείται η 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).

4. Επιλογή ιδιοτήτων του υλικού

Η ανάθεση ιδιοτήτων του υλικού αφορά τόσο τις 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 (κόκκων) που συνθέτουν το εκάστοτε υλικό. Σε αυτή τη φάση αν δεν είναι γνωστές οι ιδιοτητές 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, θα μπορέσει να βρεθεί ο καλύτερος συνδυασμός, ώστε το συνθετικό πέτρωμα όταν

υποβληθεί σε αριθμητικές δοκιμές να δίνει αποτελέσματα συγκρίσιμα με εκείνα ενός πραγματικού πετρώματος που υποβάλλεται σε εργαστηριακές δοκιμές.

5. Φόρτιση – Επίλυση – Προσομοίωση σε στάδια

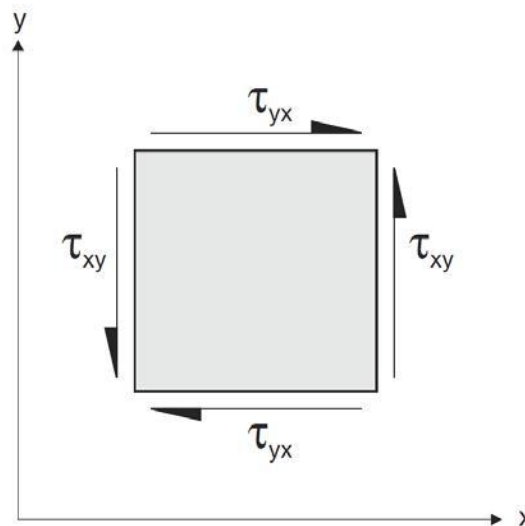
Η φόρτιση μπορεί να είναι είτε παθητική ή ενεργητική. Στην παθητική φόρτιση, οποιαδήποτε μεταβολή στο μοντέλο, προκαλεί μεταφορά του φορτίου σε αυτό. Αντίστοιχα, η ενεργητική φόρτιση επιβάλλεται εξωτερικά. Αξίζει να αναφερθεί ότι στους τοίχους δεν μπορούν να ασκηθούν δυνάμεις, μπορούμε μόνο να τους υποβάλλουμε σε κίνηση καθορίζοντας μη μηδενικές τιμές για την ταχύτητά τους. Με τον όρο επίλυση αναφερόμαστε στους υπολογιστικούς κύκλους και στα βήματα που εκτελεί το πρόγραμμα έως ότου φτάσει το μοντέλο σε κατάσταση ισορροπίας. Αυτή μπορεί να είναι στατική ή δυναμική. Η κύρια διαφορά μεταξύ τους είναι ο τρόπος απόσβεσης. Επειδή η DEM είναι μια πλήρως δυναμική μέθοδος, κάποια μορφή απόσβεσης είναι απαραίτητη για 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 ιζώδης απόσβεση, ορίζοντας ένα συντελεστή απόσβεσης, α . Στη στατική επίλυση 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. Εξορισμού η επίλυση είναι στατική. Η προσομοίωση σε στάδια αφορά σε αλλαγές στη γεωμετρία του μοντέλου ή/και στις παραμέτρους που έχει θέσει ο χρήστης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και αφού έχει ολοκληρωθεί η επίλυση ενός προηγούμενου σταδίου.

6. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

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 διάφορων δεικτών (π.χ. η ισορροπία των δυνάμεων) ή διαγραμμάτων, την επισκόπηση των αρχείων καταγραφής του ιστορικού της επίλυσης, ή την παρακολούθηση βίντεο κάποιας δοκιμής που έχουμε προσομοιώσει.

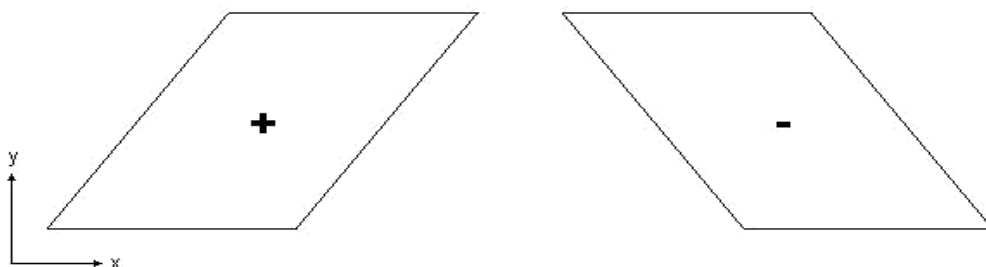
Σχετικά με τη σύμβαση που υιοθετεί ο κώδικας PFC^{2D} για τα πρόσημα και τις μονάδες, σημειώνεται ότι αυτή δε συμπίπτει με τη σύμβαση της βραχομηχανικής σε ό,τι αφορά τα πρόσημα. Συγκεκριμένα:

- Ορθή τάση: Με αρνητικό πρόσημο ορίζονται οι θλιπτικές τάσεις.
- Διατμητική τάση: Η θετική φορά της διατμητικής τάσης θα είναι όμοια με τη φορά του θετικού ημιάξονα με τον οποίο είναι παράλληλη, αν το ίδιο ισχύει και για τη θετική ορθή τάση που ασκείται στο ίδιο επίπεδο με αυτή. Ειδιάλλως συμβαίνει το αντίθετο.



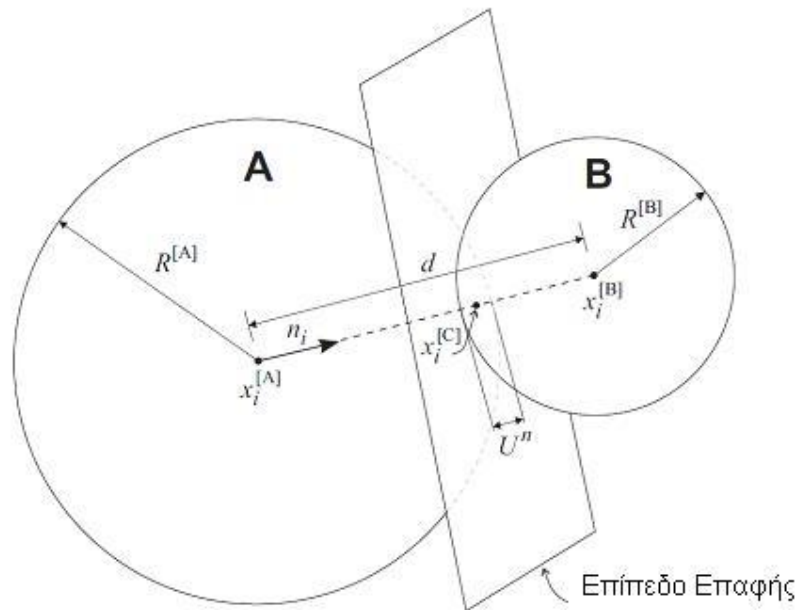
Σχ. 3.1: Θετική διατμητική τάση.

- Τροπή: Για την ορθή τροπή ισχύουν κανόνες ανάλογοι με την ορθή τάση (η βράχυνση θεωρείται αρνητική). Για τη διατμητική τροπή, παραμόρφωση με διεύθυνση που συνάδει με τη φορά του θετικού ημιάξονα των x, θεωρείται θετική.



Σχ. 3.2: Θετική και αρνητική διατμητική τροπή.

– Δυνάμεις επαφής: Τα διανύσματα των δυνάμεων 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.



Σχ. 3.3: Δυνάμεις επαφής.

– Διανυσματικά μεγέθη: Τα διανύσματα όταν αναλύονται σε τετμημένες και τεταγμένες, αυτές θα παίρνουν θετικές τιμές όταν είναι ανάλογες με τους θετικούς ημιάξονες x και y σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων xOy .

– Περιστροφές: Η θετική φορά περιστροφής είναι αντίθετη με τη φορά κίνησης των δεικτών του ρολογιού. Το ίδιο ισχύει και για τις ροπές.

Οι μονάδες μπορεί είναι όλες στο SI και δεν γίνεται καμία μετατροπή μέσω του προγράμματος. Συμβατά συστήματα μονάδων δίνονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.1: Συμβατά συστήματα μονάδων.

	SI				Imperial	
Μήκος	m	m	m	cm	ft	in
Πυκνότητα	kg/m ³	10 ³ kg/m ³	10 ⁶ kg/m ³	10 ⁶ 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/s ²	ft/sec ²	in/sec ²
Δυστροπία Μπάλας	N/m	kN/m	MN/m	Mdynes/cm	lbf/ft	lbf/in

Πριν προχωρήσουμε στη μηχανική προσέγγιση του PFC^{2D}, θα αναφέρουμε κάποιες παραδοχές που κάνει ο κώδικας μιας και λειτουργεί σε διδιάστατο περιβάλλον. Σε ένα σύνολο σφαιρών ή δίσκων θα υπάρχουν μόνο δύο συνιστώσες για την ανάλυση των δυνάμεων και μια για τη ροπή και μόνο αυτές 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 ορίζονται σε κάθε σημείο στο μοντέλο, επειδή 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 τριδιάστατη προσέγγιση που αφορά στο λόγο των όγκων και όχι των επιφανειών.

Ο Deresiewicz (1958) υπολόγισε ότι το μικρότερο πορώδες σε ομοιόμορφο μέγεθος σφαιρών μπορεί να είναι 0,0931 σε διδιάστατο χώρο ενώ στον τριδιάστατο 0,2595. Τέλος, η μάζα υπολογίζεται βάσει του ειδικού βάρους, της ακτίνας και του πάχους της κάθε σφαίρας.

3.4 Μηχανική στο PFC^{2D}

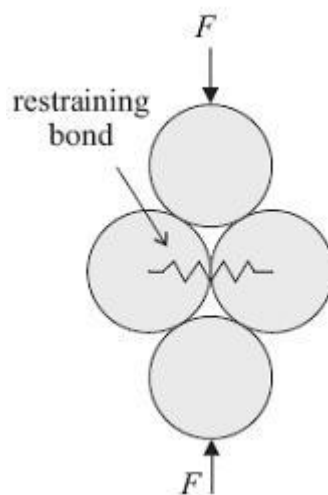
Η αναπαράσταση του πετρώματος ως σύνολο σωματιδίων συγκολλημένων στις επαφές τους επιχειρεί να προσεγγίσει όσο το δυνατόν πιο ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του φυσικού πετρώματος. Η τεχνική αυτή αναφέρεται από τους Potyondy & Cundall (2004) ως μοντέλο συνδεδεμένων σωματιδίων (bonded particle model, BPM). Το BPM μπορεί να λάβει διάφορες παραλλαγές (π.χ. Cho et al., 2009), ανάλογα με το σχήμα των σωματιδίων ή την αρχική αλληλοεπικάλυψή τους. Επιπλέον, επιλέγοντας κατάλληλες καταστατικές σχέσεις για τις επαφές μπορούν να προσομοιωθούν φαινόμενα όπως η διαστολή λόγω εκτενούς μικρορωγμάτωσης ή η χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το BPM αναφέρεται και ως συνθετικό πέτρωμα.

3.4.1. Μηχανισμός Ρωγμάτωσης στο PFC^{2D}

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, έτσι ο δεσμός μεταξύ τους 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: Μηχανισμός ρωγμάτωσης σε συσσωμάτωμα σφαιριδίων στο PFC^{2D}.

3.4.2 Μοντέλο Συνδεδεμένων Σωματιδίων – BPM

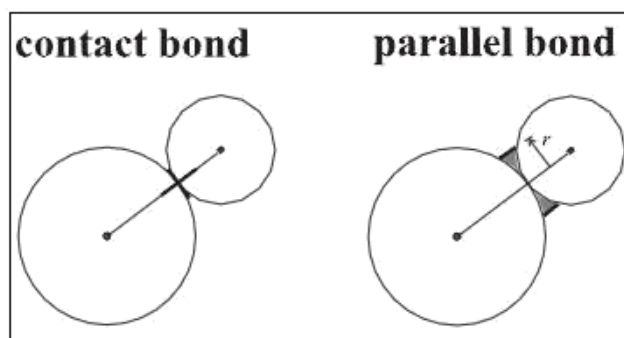
Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με την προσομοίωση βραχυδών δοκιμών, με την τεχνική του BPM. Μια από τις απαιτήσεις για τη δημιουργία ενός BPM είναι η επιλογή κατάλληλων παραμέτρων των επαφών μεταξύ των σωματιδίων και των δεσμών, ώστε το συνθετικό πέτρωμα να παρουσιάζει παρόμοια μακροσκοπική συμπεριφορά

με το φυσικό πέτρωμα. Η επιλογή γίνεται συνήθως με βάση τα αποτελέσματα τυπικών εργαστηριακών δοκιμών, που στη συνέχεια προσομοιώνονται αριθμητικά και το BPM βαθμονομείται, ώστε να προσεγγίσει τη συμπεριφορά του πετρώματος σε αυτές. Οι παραδοχές που υιοθετούνται για τη δημιουργία του BPM είναι οι εξής:

1. Τα σωματίδια να έχουν μορφή σφαιρών ή δίσκων πεπερασμένου πάχους, να είναι άκαμπτα και να έχουν πεπερασμένη μάζα.
2. Τα σωματίδια θα κινούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους, μεταθετικά ή και περιστροφικά.
3. Τα σωματίδια θα αλληλεπιδρούν μόνο στις επαφές τους. Λόγω της γεωμετρίας τους, μεταξύ δύο σφαιριδίων ή δίσκων θα μπορεί να υπάρχει μόνο μια επαφή.
4. Πιθανές αλληλεπικαλύψεις μεταξύ των σωματιδίων θα πρέπει να είναι τόσο μικρές, ώστε οι επαφές μεταξύ τους να θεωρούνται σημειακές.
5. Στις επαφές μπορούν να αντιστοιχισθούν δεσμοί. Οι δεσμοί θεωρούνται ότι έχουν πεπερασμένη ορθή και διατμητική δυστροπία και αντοχή. Οι δεσμοί μπορούν να φέρουν φορτία κι όταν η φόρτιση υπερβεί την αντοχή τους, τότε θραύονται.
6. 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.

3.4.3 Δεσμοί μεταξύ των σωματιδίων

Οι Potyondy & Cundall (2004) παρομοιάζουν τους δεσμούς των σωματιδίων στο PFC^{2D} με το συγκολλητικό υλικό των κόκκων των κλαστικών ιζηματογενών πετρωμάτων ή με τη νοητή συγκόλληση των κρυστάλλων των κρυσταλλικών πετρωμάτων. Στο PFC^{2D} μπορούμε να ορίσουμε δύο διαφορετικούς τύπους δεσμών, τους σημειακούς (contact bond) και τους παράλληλους (parallel bond).



Σχ. 3.5: Αναπαράσταση σημειακού δεσμού και παράλληλου δεσμού.

Ο σημειακός δεσμός μπορεί να θεωρηθεί ως δύο ελατήρια κάθετα και παράλληλα στο επίπεδο της επαφής, με σταθερή ορθή και διατμητική δυστροπία. Αυτά τα ελατήρια έχουν διατμητική και εφελκυστική αντοχή. Η ύπαρξη ενός σημειακού δεσμού δεν επιτρέπει την ολίσθηση των συνδεδεμένων σωματιδίων. 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.

Για να ορίσουμε ένα σημειακό δεσμό αρκεί να δώσουμε τιμές για την ορθή αντοχή του, καθώς και την διατμητική αντοχή του. Αυτές οι παράμετροι ορίζονται στο πρόγραμμα με την εντολή PROPERTY – nbond και sbond για την ορθή και διατμητική αντοχή αντίστοιχα. Αν 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 αλλά δεν μεταβάλλεται η τιμή των δυνάμεων επαφής, με

την προϋπόθεση ότι οι διατμητικές δυνάμεις δεν υπερβαίνουν το όριο ολίσθησης και οι ορθές είναι θλιπτικές.

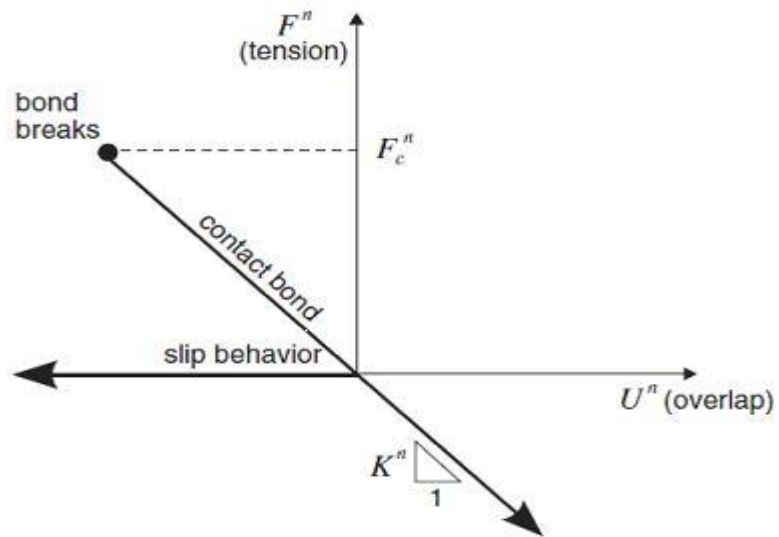
Στο σχήμα 3.6 φαίνεται η σχέση της ορθής και διατμητικής συνιστώσας και της σχετικής μετατόπισης της επαφής των σωματιδίων, που ασκούνται σε ένα σημείο, με τις σχέσεις δυνάμεων μετατοπίσεων. Οι συμβολισμοί στο σχήμα είναι οι εξής:

F_n: ορθή δύναμη επαφής (θετική δύναμη θεωρείται εφελκυστική)

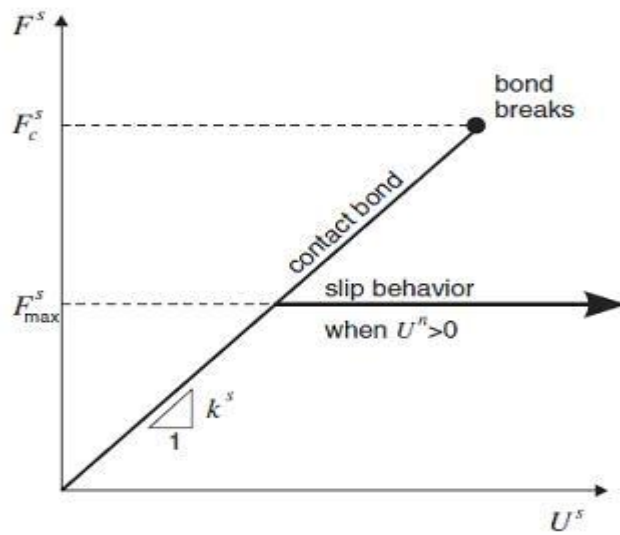
U_n: σχετική ορθή μετατόπιση (θετική μετατόπιση θεωρείται η επικάλυψη)

F_s: συνολική διατμητική δύναμη επαφής

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



(a) normal component of contact force



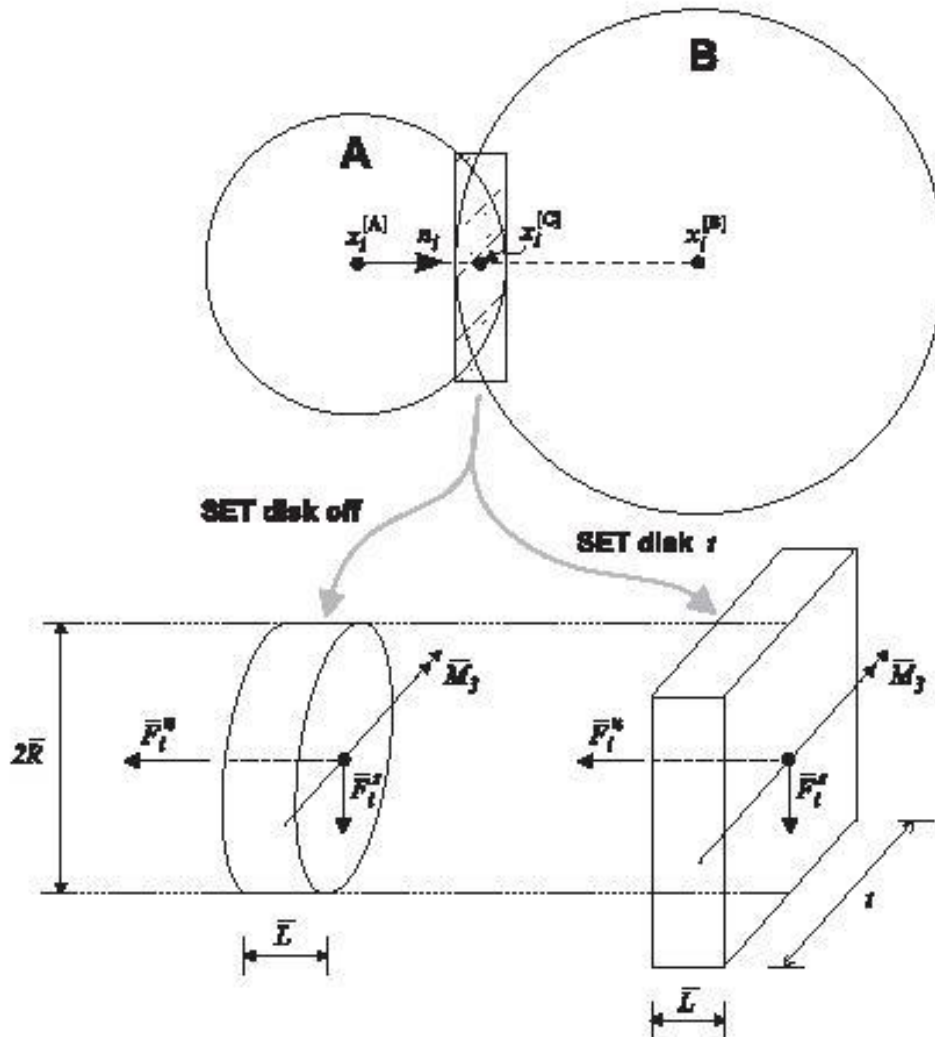
(b) shear component of contact force

Σχ. 3.6: Δυνάμεις επαφής.

α) Ορθές συνιστώσες.

β) Διατμητικές συνιστώσες.

Ο παράλληλος δεσμός μπορεί να θεωρηθεί ως 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. Οι σχέσεις δυνάμεων – μετατοπίσεων φαίνονται στο σχήμα 3.7. Στους παράλληλους δεσμούς οφείλεται η ελαστική αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων. Αυτή η αλληλεπίδραση θα γίνεται παράλληλα με την ολίσθηση ή τη συμπεριφορά των σημειακών δεσμών, όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Συνεπώς, η ύπαρξη ενός παράλληλου δεσμού δεν αποκλείει το ενδεχόμενο ολίσθησης.



Σχ. 3.7: Αναπαράσταση παράλληλου δεσμού.

Οι παράλληλοι δεσμοί μπορούν να αντιστέκονται σε ροπές που δημιουργούνται από την περιστροφική κίνηση των σφαιριδίων, σε αντίθεση με τους σημειακούς. Σχετική κίνηση στο δεσμό, που συμβαίνει μετά τη δημιουργία του, προκαλεί την ανάπτυξη δύναμης και ροπής στο συνδετικό υλικό του δεσμού, λόγω της δυστροπίας του. Η δύναμη και η ροπή που προκαλούνται 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 αυτός αστοχεί.

Μετά τη θραύση ενός σημειακού δεσμού, η ορθή δυστροπία του δεσμού εξακολουθεί να είναι ενεργή για όσο τα σωματίδια βρίσκονται σε επαφή. Με τη θραύση ενός παράλληλου δεσμού η δυστροπία του δεσμού 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. Αντίθετα, 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.

Τέλος, για να ορίσουμε ένα παράλληλο δεσμό αρκεί να δώσουμε τιμές για την ορθή αντοχή του (σ_c), την διατμητική αντοχή του (τ_c), την ορθή και διατμητική δυστροπία του ($k_n - k_s$ αντίστοιχα) και την ακτίνα R του δεσμού. Αυτές οι παράμετροι ορίζονται στο πρόγραμμα με την εντολή PROPERTY – pb nstrength, pb sstrength, pb kn, pb ks και pb radius.

3.4.4 Επαφές

Όλες οι επαφές υπακούν είτε στο γραμμικό μοντέλο ή στο μοντέλο του Hertz, ανάλογα τις ιδιότητες των επαπτόμενων στοιχείων (μπάλα - μπάλα ή μπάλα - τοίχο). Το γραμμικό μοντέλο εφαρμόζεται κατά την ύπαρξη του 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.

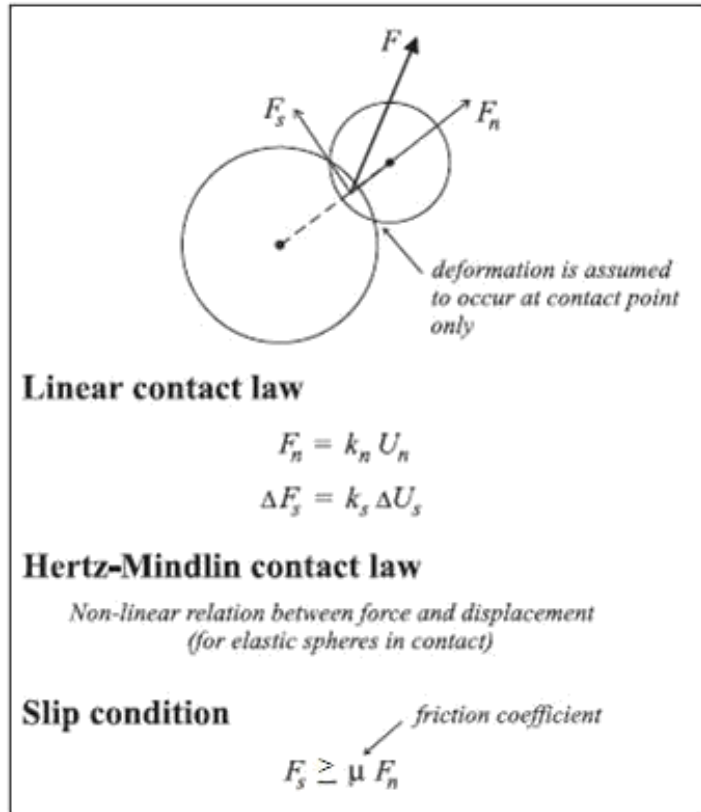
Οι δυστροπίες των επαφών συσχετίζουν τις ασκούμενες στις επαφές δυνάμεις με την σχετική παραμόρφωση κατά την ορθή και διατμητική διεύθυνση ως εξής:

$$F^n = K^n U^n \rightarrow \text{ορθή δυστροπία}$$

$$F^s = -k^s \Delta U^s \rightarrow \text{διατμητική δυστροπία}$$

Όπου με F συμβολίζονται οι δυνάμεις, με K^n η ορθή δυστροπία, με k^s η διατμητική δυστροπία, U^n η αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των σωματιδίων και U^s η σχετική διατμητική μετατόπιση.

Σε ό,τι αφορά την ολίσθηση διατυπώνονται κάποιες εξισώσεις που συσχετίζουν την ορθή και διατμητική δύναμη, έτσι ώστε να μπορούν τα δύο επαπτόμενα στοιχεία να ολισθαίνουν σχετικά το ένα με το άλλο. Αυτό προϋποθέτει ότι δεν θα υπάρχει ορθή αντοχή σε εφελκυσμό και η ολίσθηση θα επιτευχθεί με τον περιορισμό της διατμητικής δύναμης. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη των δύο σφαιριδίων. Δεν θα ισχύουν τα παραπάνω αν υπάρχει σημειακός δεσμός μεταξύ των σωματιδίων. Είναι προφανές ότι η ολίσθηση θα εξαρτάται από το συντελεστή τριβής μ , ο οποίος στην περίπτωση επαφής δύο σφαιριδίων, θα λαμβάνεται ο μικρότερος εξ αυτών και ορίζεται στο πρόγραμμα με την εντολή PROPERTY - friction.



Σχ. 3.8: Σύνοψη νόμων που ισχύουν στις επαφές των σωματιδίων.

3.4.5 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, μιας και μικρές αλλαγές του πορώδους προκαλούν μεγάλες διαφορές στην τάση, κάτι που ενδεχομένως να μας προβληματίσει στη συνέχεια. Το πορώδες n υπολογίζεται ως εξής:

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

Όπου A_p είναι η επιφάνεια που καταλαμβάνουν τα σωματίδια και A η συνολική επιφάνεια του χώρου. Αν θελήσουμε να φτιάξουμε μια κατανομή με συγκεκριμένο πορώδες, θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την ακτίνα των σφαιρών με ένα πολλαπλασιαστή m . Αυτός υπολογίζεται ως εξής:

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

Όπου με n_o συμβολίζεται το αρχικό πορώδες και με n το επιθυμητό. Το πορώδες δεν επηρεάζεται από τη μάζα των σφαιριδίων, επηρεάζει όμως την εντατική κατάσταση στην κατανομή. Η αρχική εντατική κατάσταση της κατανομής δεν μπορεί να ορισθεί στο πρόγραμμα απευθείας, αλλά εξαρτάται από τις αρχικές παραμέτρους που θέτουμε. Επομένως η κατασκευή αντιπροσωπευτικού πορώδους είναι σημαντική. Θα πρέπει όμως να προσέχουμε και την αλληλοεπικάλυψη που μπορεί να συμβεί, μιας και μπορεί να προκαλέσει μεγάλες τιμές προέντασης. Αποδεχτή τιμή στις αλληλεπικαλύψεις ορίζεται από το πρόγραμμα να είναι μικρότερη του 5% της ακτίνας των σφαιριδίων.

3.4.6 Σύνοψη Μικρομηχανικών Ιδιοτήτων

Γενικά, ένα μοντέλο BPM χαρακτηρίζεται από την πυκνότητα των σωματιδίων, το μέγεθός τους, την κατανομή του μεγέθους τους, την αρχική συμπίεση τους 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 που χρειάζεται να καθοριστούν για να εξασφαλιστεί η σωστή συμπεριφορά των σωματιδίων του υλικού είναι οι ακόλουθες:

$$\{E_c, (k_n / k_s), \mu\}$$

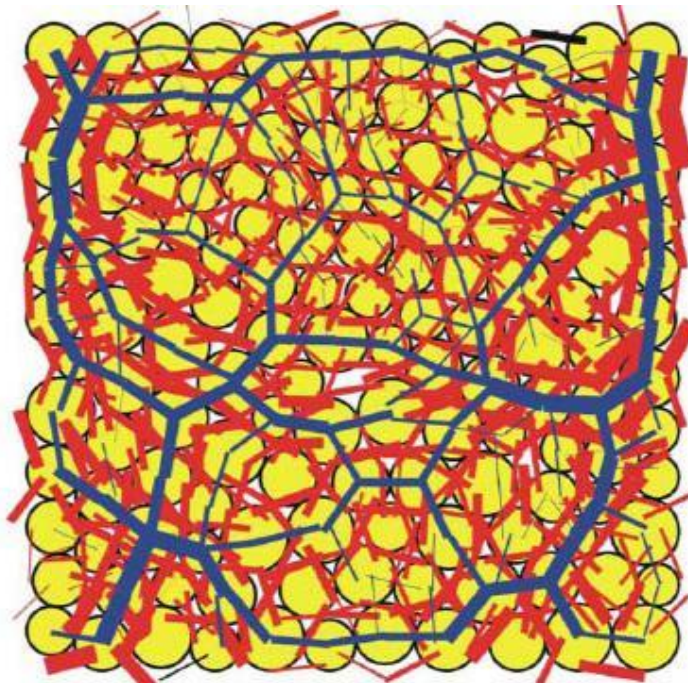
E_c είναι το μέτρο ελαστικότητας για τα σωματίδια, k_n/k_s ο λόγος των ακαμψιών και μ ο συντελεστής τριβής των σωματιδίων. Οι διάμετροι των σωματιδίων ικανοποιούν μια ομοιόμορφη κατανομή μεγέθους των σωματιδίων που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών D_{\min} και D_{\max} και μια πυκνή συμπίεση διαμορφώνεται με τον καθορισμό των ιδιοτήτων γένεσης του υλικού κατά την αρχική διαμόρφωση του μοντέλου. Η δομή του συστήματος των σωματιδίων ελέγχεται από το λόγο D_{\max}/D_{\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 χρειάζεται να καθοριστούν είναι οι εξής:

$$\{\bar{\lambda}, \bar{E}_c, \bar{k}_n/\bar{k}_s, \bar{\sigma}_c, \bar{\tau}_c\}$$

Όπου, \bar{E}_c το μέτρο ελαστικότητας του δεσμού, \bar{k}_n/\bar{k}_s ο λόγος των ακαμψιών του, $\bar{\sigma}_c$ και $\bar{\tau}_c$ η ορθή και διατμητική αντοχή του αντίστοιχα. Τα στάδια έχουν ως εξής:

1. Συμπύκνωση αρχικού συσσωματώματος.
2. Τοποθέτηση και εφαρμογή καθορισμένων υδροστατικών τάσεων.

3. Μείωση του αριθμού των σωματιδίων του μοντέλου που σε κάποια υπολογιστική φάση έχουν λιγότερες από 3 επαφές με άλλα σωματίδια (αυτά αναφέρονται ως floating particles στο εγχειρίδιο του PFC^{2D}).
4. Τοποθέτηση παράλληλων δεσμών.
5. Απομάκρυνση του δείγματος από την κυψέλη (vessel) και χαλάρωση συσσωματώματος.



Εικ. 3.1: Κατανομή δυνάμεων στο μοντέλο μετά την απομάκρυνση της κυψέλης (material - genesis vessel). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές δυνάμεις των επαφών και με μπλε αντίστοιχα των σφαιριδίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μέθοδοι προσδιορισμού μικροπαραμέτρων

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 προσομοιώνεται πιο ρεαλιστικά το πέτρωμα.

Για την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων, εφαρμόζεται συνήθως 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 στις 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 (π.χ. δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού κλπ.) ή στη βάση φορτίσεων κλίμακας πεδίου (π.χ. έκταση ζημίας γύρω από υπόγειες εκσκαφές) ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το BPM του PFC^{2D}.

4.2 Μεθοδολογία PFC^{2D}

Για να πετύχει ένα μοντέλο να αναπαράγει την επιθυμητή φυσική συμπεριφορά, είναι αναγκαία η αντιστοιχία κάθε παραμέτρου του μοντέλου, με ένα σύνολο ιδιοτήτων του υλικού που προσομοιώνεται. Για παράδειγμα, σε ένα γραμμικά ελαστικό μοντέλο ενός στερεού υλικού, το οποίο επιτρέπεται να αστοχήσει μόνο μέσω της δημιουργίας μιας

εφελκυστικής ρωγμής, η παραμορφωσιμότητα αποτελεί συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας (E) και του λόγου του Poisson (ν), ενώ η αντοχή του εξαρτάται από τη δυσθραυστότητα (fracture toughness K_{Ic}).

Για την μοντελοποίηση στο PFC^{2D}, δεν μπορεί να γίνει απευθείας αντιστοίχιση των παραμέτρων του μοντέλου με κάποιο σύνολο ιδιοτήτων του φυσικού υλικού, διότι η συμπεριφορά του μοντέλου επηρεάζεται επίσης από το μέγεθος των σωματιδίων και τη διάταξή τους στο μοντέλο. Η σχέση μεταξύ των παραμέτρων του μοντέλου στο PFC^{2D} και των ιδιοτήτων των υλικών που συνήθως μετρούνται, είναι γνωστή εκ των προτέρων μόνο για ορισμένες απλές διατάξεις. Για τυχαίες διατάξεις με τυχαίου μεγέθους σωματίδια, η αντιστοιχία γίνεται μέσα από μια διαδικασία βαθμονόμησης, όπου κάθε ξεχωριστό μοντέλο, με συγκεκριμένη διάταξη σωματιδίων και σύνολο παραμέτρων, χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει ένα σύνολο δοκιμών (π.χ. δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, δοκιμή Brazilian κλπ). Έπειτα, επιλέγονται οι παράμετροι του μοντέλου για την αναπαράσταση των ιδιοτήτων των υλικών, όπως αυτές μετρούνται στις αντίστοιχες δοκιμές.

Σε εργαστηριακή κλίμακα, οι ιδιότητες που συνήθως επιλέγονται για το χαρακτηρισμό της βραχυπρόθεσμης μακροσκοπικής απόκρισης των πετρωμάτων, είναι το μέτρο ελαστικότητας (E), ο λόγος του Poisson (ν) και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Για την επίτευξη των επιθυμητών ελαστικών παραμέτρων, σε όσο το δυνατόν λιγότερες επαναλήψεις, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία βαθμονόμησης:

1. Αρχικά, θέτοντας μεγάλες τιμές για την αντοχή των δεσμών και μεταβάλλοντας το μέτρο ελαστικότητας των επαφών, αντιστοιχίζεται το μέτρο του Young. Αντίστοιχα για την εύρεση του λόγου του Poisson μεταβάλλεται ο λόγος της ορθής προς τη διατμητική δυστροπία. Υπάρχει πιθανότητα να απαιτούνται αρκετές επαναλήψεις για την εύρεση και των δύο παραμέτρων.

2. Μόλις επιτευχθεί το πρώτο βήμα, θα προσεγγισθεί η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, θέτοντας την τυπική απόκλιση των αντοχών των δεσμών να είναι μηδενική και μεταβάλλοντας τη μέση αντοχή τους. Η αναλογία της ορθής προς τη διατμητική αντοχή του

δεσμού θα επηρεάσει τη συμπεριφορά του μοντέλου, ως εκ τούτου, η αναλογία αυτή θα πρέπει να διατηρείται σταθερή.

3. Έπειτα γίνεται η αντιστοίχιση της τάσης έναρξης ρωγμάτωσης, αυξάνοντας την τυπική απόκλιση των αντοχών των δεσμών. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του συνθετικού υλικού κι επομένως μπορεί να απαιτούνται κάποιες επαναλήψεις μεταξύ αυτού και του προηγούμενου βήματος.

4. Αν επιθυμείται ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς του συνθετικού υλικού μετά την μέγιστη αντοχή (post - peak), τότε αρκεί να μεταβληθεί η τιμή του συντελεστή τριβής των σωματιδίων.

5. Πλέον, με την πραγματοποίηση τριαξονικών δοκιμών με διαφορετικές τιμές για τον πλευρικό περιορισμό, είναι πιθανή η λήψη στοιχείων για την περιβάλλουσα αντοχής. Επίσης με την πραγματοποίηση δοκιμών αντιδιαμετρικής θλίψης μπορεί κανείς να λάβει πληροφορίες για την εφελκυστική αντοχή του συνθετικού υλικού.

4.2.1 Μέτρο ελαστικότητας – Λόγος του Poisson

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 (kn/ks). 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 είναι ικανή να δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Για μοντέλα με παράλληλους δεσμούς, το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από τις προαναφερθείσες παραμέτρους, καθώς και από το μέτρο ελαστικότητας του δεσμού, το λόγο των δυστροπιών του δεσμού και το συντελεστή $\bar{\lambda}$. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι όμοια με προηγουμένως.

Στην περίπτωση όπου το υλικό δε συνδέεται με δεσμούς, το μέτρο ελαστικότητας, ελέγχεται από το μέτρο ελαστικότητας των επαφών των σωματιδίων και το λόγο της ορθής προς τη διατμητική δυστροπία και η αντοχή εξαρτάται από το συντελεστή τριβής των σωματιδίων. Η απόκριση επηρεάζεται επίσης από το αρχικό πορώδες του συνθετικού υλικού. Καθώς φορτίζεται, οι επαφές των δεσμών μειώνονται 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 φτάσει στο μέγιστο φορτίο η φόρτιση. 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 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 ($\Delta\sigma_x = 0$).

Γενικά, 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.

4.2.2 Μέγιστη αντοχή

Σε ένα BPM, η μέγιστη αντοχή 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 θα επηρεάσει το μηχανισμό της αστοχίας, ελέγχοντας το πλήθος των διατμητικών και εφελκυστικών ρωγμών.

Για μικρό λόγο, το μοντέλο θα αστοχήσει κυρίως σε εφελκυσμό, ενώ για μεγάλο θα αστοχήσει κυρίως σε διάτμηση. Για να αναπαραχθεί μια δεδομένη μέγιστη αντοχή σε συγκεκριμένες συνθήκες πλευρικού περιορισμού, αρχικά θα βρεθεί το μέτρο ελαστικότητας όπως περιγράφηκε προηγουμένως και μετά θα εκτελεσθεί δοκιμή θλίψης, από την οποία θα ληφθεί και 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.

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, σε ένα ασύνδετο μοντέλο η αντοχή επηρεάζεται από το συντελεστή τριβής των σωματιδίων. Ανάλογα το μέγεθος του πλευρικού περιορισμού και της αύξησης του συντελεστή τριβής, αυξάνεται και η αντοχή του μοντέλου. Αυτό συμβαίνει μέχρι ένα όριο, από εκεί και πέρα η αντοχή εξαρτάται και από το σχήμα των σωματιδίων και την κατανομή του μεγέθους τους.

4.3 Προσδιορισμός μικρομηχανικών παραμέτρων

Όπως αναφέρθηκε, οι παραπάνω μακροσκοπικές ιδιότητες είναι οι πιο συχνά προσδιοριζόμενες σε εργαστηριακές δοκιμές. Εφόσον αυτές είναι γνωστές για την πλειοψηφία των πετρωμάτων που μελετούνται 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 του λογισμικού με τις εργαστηριακά μετρούμενες τιμές. Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι μέθοδοι του Yoon, αλλά και η πρόταση

της Καράτζα, που βασίστηκε στη μέθοδο του Yoon και εξήγαγε διαγράμματα συσχέτισης μακροσκοπικών με μικρομηχανικές ιδιότητες.

4.3.1 Μέθοδος Yoon (2007)

Ο Yoon (2007) εισήγαγε μια μέθοδο βελτιστοποίησης, ώστε να μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις παρατηρούμενες από την πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών. Με τη μέθοδο αυτή, υπολογίζονται παράμετροι, όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας της επαφής των σφαιρών και η ελάχιστη ακτίνα τους, σε μοντέλα με σημειακούς δεσμούς σφαιρών, κατά τη διαδικασία γένεσης του μοντέλου. Με αυτό τον τρόπο όταν γίνει προσομοίωση δοκιμής 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 και θα αναφέρονται ως μακροσκοπική απόκριση.

Αρχικά επινόησε έναν εναλλακτικό τρόπο πειραματικού σχεδιασμού χρησιμοποιώντας την μέθοδο Plackett - Bruman (PB) σε συνδυασμό με την Central Composite Design (CCD). Με την πρώτη καθόρισε ποιες μικροπαράμετροι ασκούν μεγαλύτερη επιρροή στη μακροσκοπική απόκριση του πετρώματος. Με τη δεύτερη έθεσε μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των ήδη ταξινομημένων μικροπαραμέτρων. Τέλος, υπολόγισε τις βέλτιστες τιμές των ζητούμενων παραμέτρων ώστε να υπάρχει συσχέτιση με την πραγματικότητα.

4.3.2 Σχεδιασμός πειράματος και βελτιστοποίηση

Ο σχεδιασμός πειράματος (Design of Experiment – DOE) είναι μια δομημένη και οργανωμένη μέθοδος για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν μια διαδικασία και το αποτέλεσμα αυτής. Αυτός που εκτελεί το πείραμα αλλάζει μία ή περισσότερες μεταβλητές - παράγοντες (process variables) προκειμένου να

παρατηρήσει την επιρροή που ασκούν οι αλλαγές σε μία ή περισσότερες μεταβλητές απόκρισης (response variables). Η DOE είναι μια αποτελεσματική διαδικασία για τον σχεδιασμό πειραμάτων, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που εξήχθησαν να μπορούν να αναλυθούν για να αποφέρουν έγκυρα και αντικειμενικά συμπεράσματα. Η DOE αρχίζει με τον καθορισμό των στόχων του πειράματος και με την επιλογή των προς μελέτη μεταβλητών (process variable). Εδώ, η DOE εφαρμόζεται στην ανάλυση ευαισθησίας των μικροπαραμέτρων σε μοντέλα συνδεδεμένων, με σημειακούς δεσμούς σωματιδίων. Αρχικά, εφαρμόζεται η μέθοδος σχεδιασμού PB.

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

Ωστόσο, για την ακριβή εκτίμηση των αποκρίσεων, τα πειράματα πρέπει να είναι σχεδιασμένα να επιτρέπουν την εκτίμηση της αλληλεπίδρασης και της επίδρασης των τετραγώνων της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται 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 μέθοδο CCD μπόρεσε να εκτιμήσει ο Υοοη την αλληλεπίδραση που θα έχουν ανεξάρτητες μεταβλητές που συμμετέχουν σε γραμμικές εξισώσεις, όπως στην περίπτωση μας αποτελούν οι μικροσκοπικές παράμετροι.

Η στρατηγική που υιοθετείται στη βελτιστοποίηση είναι ότι προσπαθούμε να επιλέξουμε το βέλτιστο σύνολο των μικροπαραμέτρων για τη δημιουργία ενός μοντέλου συνδεδεμένων σωματιδίων, για το οποίο τα αποτελέσματα προσομοιώσεων μονοαξονικών δοκιμών θλίψης θα είναι όσο το δυνατό πλησιέστερα σε αυτά δοκιμών που έχουν γίνει σε πραγματικά πετρώματα. Επιβάλλονται περιορισμοί που επηρεάζουν τον υπολογισμό της λύσης. Σχέσεις μεταξύ των μικρο-παραμέτρων μετατρέπονται σε εξισώσεις, που επιβάλλονται στην διαδικασία βελτιστοποίησης. Οι περιορισμοί αυτοί επηρεάζουν τη λύση του προβλήματος. Η βελτιστοποίηση έχει γίνει από το Υοοη με μη γραμμικούς περιορισμούς χρησιμοποιώντας

το πρόγραμμα Matlab. Με τη βελτιστοποίηση θα επιλεγεί το καταλληλότερο σύνολο τιμών των μικρο-παραμέτρων που επηρεάζουν τη δημιουργία ενός μοντέλου.

4.3.3 Ανάλυση ευαισθησίας των μικροπαραμέτρων χρησιμοποιώντας τον PB σχεδιασμό

Για να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο με σημειακούς δεσμούς στο PFC^{2D} αρκεί να ορίσουμε τις τιμές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Παράμετρος	Συμβολισμός FISH	Συμβολισμός Yoon
Μέτρο ελαστικότητας επαφής σφαιρών	ba_Ec	BCM
Λόγος δυστροπίας σφαιρών	ba_krat	KNKS
Συντελεστής τριβής σφαιρών	ba_fric	FRIC
Μέση τιμή αντοχής δεσμών	cb_sn_mean	NBS
Τυπική απόκλιση αντοχής δεσμών	cb_sn_sdev	NBS * ROSD
Μέση τιμή διατμητικής αντοχής δεσμών	cb_ss_mean	SBS
Τυπική απόκλιση διατμητικής αντοχής δεσμών	cb_ss_sdev	SBS * ROSD
Ελάχιστη ακτίνα σφαιρών	mg_Rmin	BRAD
Λόγος τυπικής απόκλισης προς μέση αντοχή δεσμών (κοινός για την ορθή και διατμητική αντοχή)	-	ROSD

Πίνακας 4.1: Προς διερεύνηση μικρομηχανικές παράμετροι.

Στον πίνακα που φαίνεται παρακάτω παρουσιάζονται τρεις τιμές για τις παραμέτρους που θα μελετηθούν. Αυτές αποτελούν το κάτω όριο (επίπεδο -1), τη μέση τιμή και το άνω όριο

(επίπεδο +1) και στην ανάλυση με τη μέθοδο PB, θα χρησιμοποιηθούν οι ακραίες τιμές για τους εκάστοτε υπολογισμούς.

Παράμετρος	-1 επίπεδο	Μέση Τιμή	+1 επίπεδο
BCM (GPa)	40	70	100
KNKS	1	2,5	4
FRIC	0,25	0,50	0,75
NBS (MPa)	50	125	200
SBS (MPa)	50	125	200
ROSD	0,24	0,32	0,40
BRAD (mm)	0,24	0,36	0,48

Πίνακας 4.2: Διακύμανση τιμών μικροπαραμέτρων.

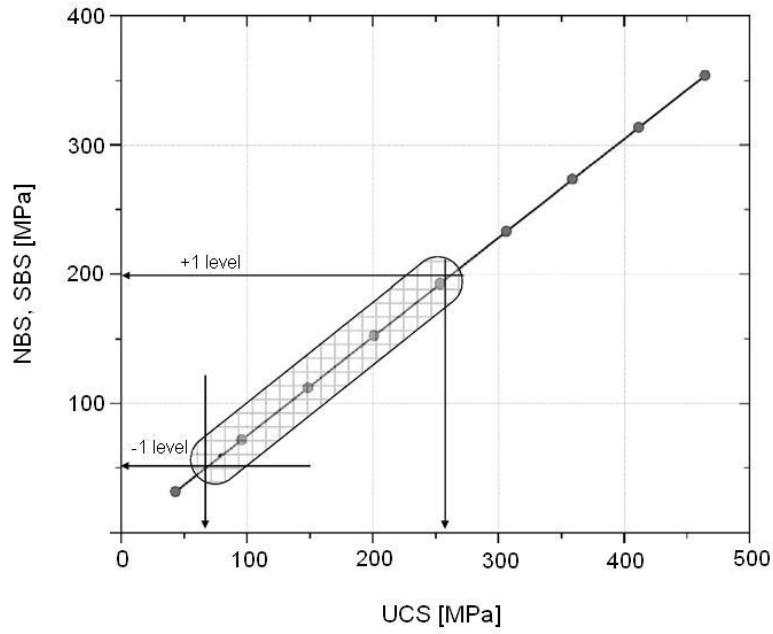
Για την επιλογή των παραμέτρων που θα διερευνηθούν καθώς και για τις διδόμενες τιμές τους, ο Υοοη βασίστηκε στη συμπεριφορά του προγράμματος PFC^{2D}.

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη εξαρτάται άμεσα από την αντοχή των δεσμών των σφαιρών του δοκιμίου, όπως παρατηρείται και στο σχήμα 4.1(α). Η γραμμική συσχέτιση μεταξύ τους έχει εξαχθεί έπειτα από την προσομοίωση σειράς δοκιμών μονοαξονικής

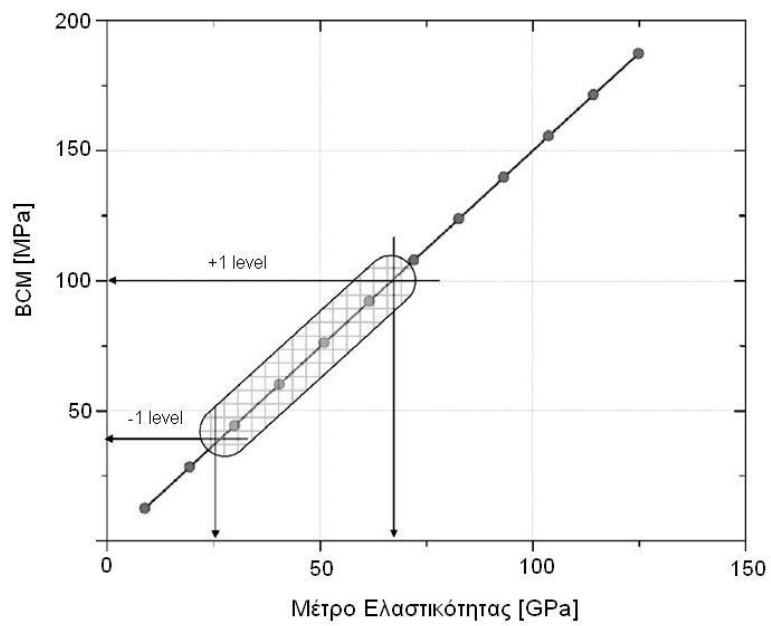
θλίψης, δίνοντας ένα εύρος τιμών στην αντοχή των δεσμών τέτοιο, ώστε να ξεπερνά τα συνήθη όρια της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των σκληρών βράχων (70 – 250 MPa), που έχουν παρατηρηθεί από εργαστηριακές δοκιμές. Από αυτούς τους υπολογισμούς προέκυψαν και τα όρια που αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα. Ομοίως, έγινε συσχέτιση μεταξύ του μέτρου 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.

Για το λόγο 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 γραμμική ελαστική συμπεριφορά σε ένα διάγραμμα αξονικής τάσης – ογκομετρικής τροπής. Μεταβάλλοντας την τιμή στην εντολή `pk_ci_fac` κατά τη μοντελοποίηση, για να συμβαδίζει η στιγμή εκκίνησης των ρωγμών όπως ορίζεται πειραματικά με υπολογιστικά, ορίστηκαν και τα όρια του συντελεστή ROSD. Η εντολή αυτή ουσιαστικά ορίζει τη στιγμή κατά την οποία έχει επιτευχθεί συγκεκριμένο ποσοστό ρωγμάτωσης. Ο συντελεστής τριβής επηρεάζει το δοκίμιο αφού σπάσουν οι δεσμοί μεταξύ των σφαιριδίων, εφόσον τότε ξεκινά η ολίσθηση μεταξύ τους. Επειδή δεν είναι εύκολο να διερευνηθεί τι επιρροή ασκεί η τριβή ποσοτικά μετά τη διαρροή, έχουν επιλεγεί οι τιμές του συντελεστή εμπειρικά.

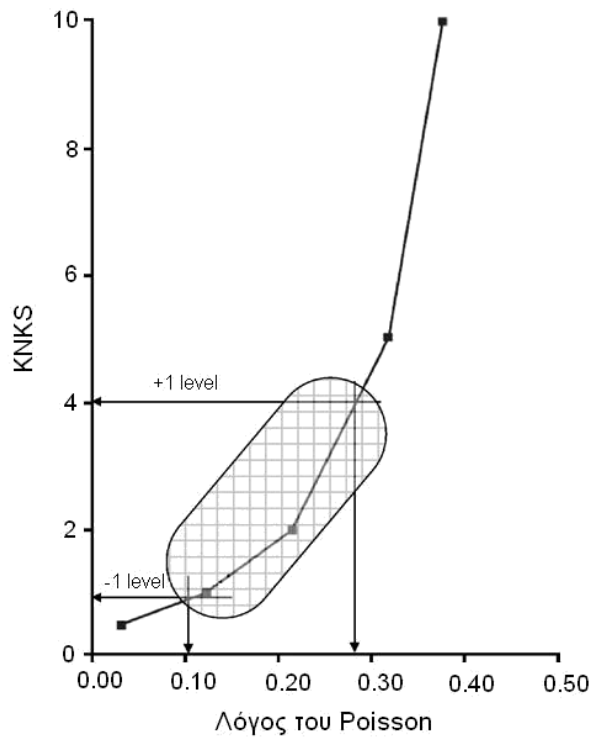
Τέλος, για την επιλογή της ελάχιστης ακτίνας (R_{min}) των σφαιρών έχουν ορισθεί οι τιμές που αναγράφονται στον πίνακα, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο λόγος της μέγιστης (R_{max}) προς την ελάχιστη ακτίνα είναι 1.66, η κατανομή του μεγέθους των στοιχείων είναι ομοιόμορφη στο διάστημα (R_{min} , R_{max}) και το πορώδες περί το 16%.



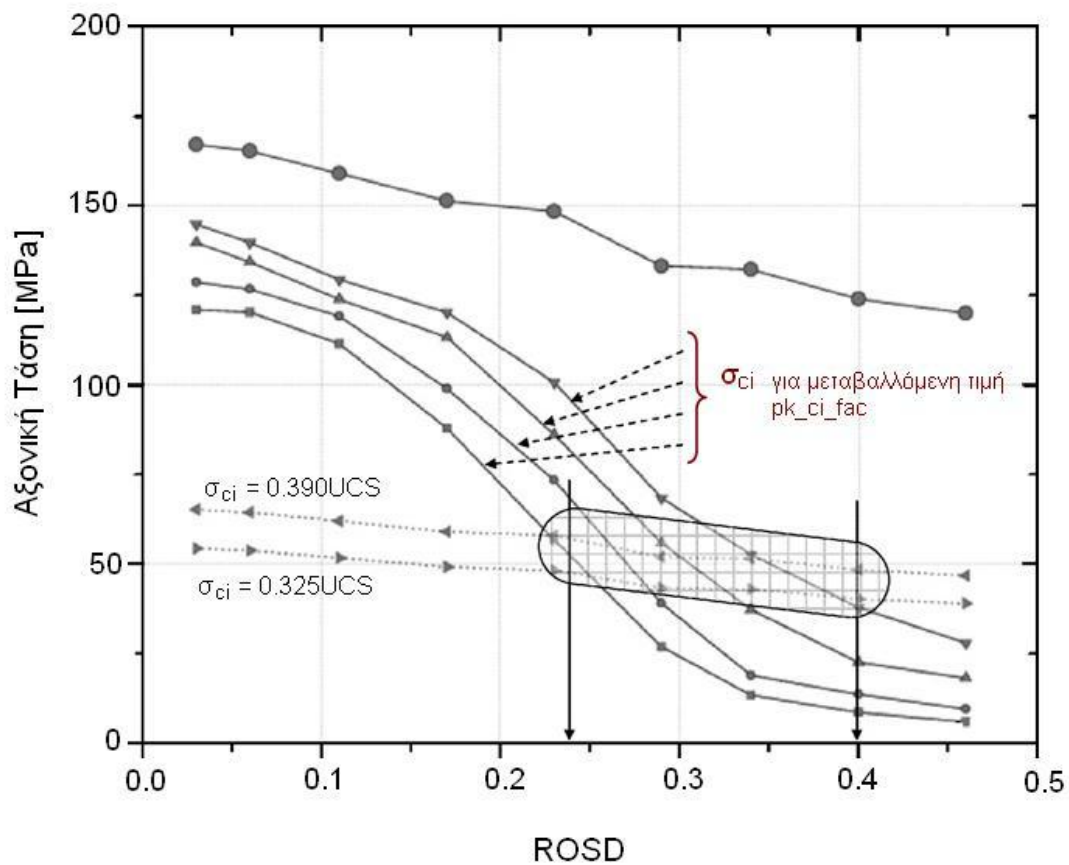
Σχ. 4.1(α): Διάγραμμα συσχέτισης της UCS και των NBS και SBS (Yoon 2007).



Σχ. 4.1(β): Διάγραμμα συσχέτισης του μέτρου ελαστικότητας και της παραμέτρου BCM (Yoon 2007).



Σχ. 4.1(γ): Διάγραμμα συσχέτισης του λόγου του Poisson και της παραμέτρου KNKS (Yoon 2007).



Σχ. 4.1(δ): Διάγραμμα συσχέτισης της τάσης έναρξης ρωγμάτωσης και της παραμέτρου ROSD (Yoon 2007).

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι συνδυασμοί με τους οποίους ο Υoon εκτέλεσε τους υπολογισμούς του. Οι εξισώσεις που χρησιμοποίησε ακολουθούν τον πίνακα και θα αναλυθούν στη συνέχεια.

No.	BCM	KN KS	FRI C	NBS	SBS	ROS D	BRA D
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

Πίνακας 4.3: Συνδυασμοί μικρομηχανικών παραμέτρων κατά το σχεδιασμό πειράματος με τη μέθοδο PB (Υoon 2007).

Για το σχεδιασμό της πρώτης μεθόδου που εφάρμοσε, αποφάσισε να ελέγξει την επιρροή των παραπάνω παραμέτρων στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας

και το λόγο του Poisson. Στη προσομοίωσή του το μοντέλο που κατασκεύασε για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης είχε διαστάσεις 50mm πλάτος και 100mm ύψος, ενώ για τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian) είχε 50mm διάμετρο. Τα αποτελέσματα είναι κωδικοποιημένα και για τη μετατροπή τους σε πραγματικές (μη κωδικοποιημένες) τιμές θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω εξισώσεις.

$$\text{BCM} = 30 * \text{BCM}_{(\text{κωδικοποιημένο})} + 70$$

$$\text{KNKS} = 1,5 * \text{KNKS}_{(\text{κωδικοποιημένο})} + 2,5$$

$$\text{FRIC} = 0,25 * \text{FRIC}_{(\text{κωδικοποιημένο})} + 0,5$$

$$\text{NBS} = 75 * \text{NBS}_{(\text{κωδικοποιημένο})} + 125$$

$$\text{SBS} = 75 * \text{SBS}_{(\text{κωδικοποιημένο})} + 125$$

$$\text{ROSD} = 0,08 * \text{ROSD}_{(\text{κωδικοποιημένο})} + 0,32$$

$$\text{BRAD} = 0,12 * \text{BRAD}_{(\text{κωδικοποιημένο})} + 0,36$$

4.3.4 Αποτελέσματα – προτεινόμενες εξισώσεις προς βελτιστοποίηση

Από τα αποτελέσματα και για τις δύο δοκιμές για τους προαναφερθέντες συνδυασμούς, κατέληξε στις παρακάτω εξισώσεις οι οποίες θα αποτελέσουν τους περιορισμούς κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

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 περιορισμοί των μεταβλητών

$$-1 \leq x_i \leq +1, i = 1, 2, \dots, 7$$

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

Από τις εξισώσεις του γραμμικού περιορισμού βρήκε ποιες δύο παράμετροι επηρεάζουν περισσότερο τη μακροσκοπική απόκριση. Κατέληξε στο ότι η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη επηρεάζεται από τις αντοχές των δεσμών, κάτι που ήταν αναμενόμενο μιας και όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή των δεσμών τόσο περισσότερο αντιστέκεται το δοκίμιο στη δημιουργία και διάδοση των ρωγμών. Στα περισσότερα μοντέλα που έχουν υποβληθεί σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης η αστοχία συγκεντρώνεται σε μια ζώνη διάτμησης. Στα αρχικά στάδια φόρτισης σπάνε δεσμοί ομοιόμορφα στο δοκίμιο, με περαιτέρω φόρτιση συγκεντρώνονται οι ρωγμές στη διατμητική ζώνη κι έτσι οδηγείται το δοκίμιο σε αστοχία.

Μόλις η τάση πλησιάσει τη μέγιστη τάση αντοχής, δημιουργείται μια ευδιάκριτη πλέον ζώνη κατά την οποία θα αστοχήσει το δοκίμιο σε διάτμηση και η ολίσθηση που θα πραγματοποιηθεί θα οφείλεται στο σπάσιμο των διατμητικών δεσμών. Η συνέχιση της φόρτισης θα προκαλέσει μεταβολή στην παραμένουσα αντοχή. Τότε, ο συντελεστής τριβής παίρνει τη θέση της αντοχής των δεσμών ως ο πιο σημαντικός παράγοντας, μιας και

ελέγχει την ολίσθηση των δύο τεμαχίων που έχουν πλέον δημιουργηθεί. Το μέτρο του Young είναι άμεσα συνυφασμένο με τους συντελεστές BCM και KNKS. Επιπλέον, ο λόγος του Poisson σχετίζεται με το λόγο δυστροπίας των σφαιρών. Αυτός ο λόγος επηρεάζει και το μηχανισμό αστοχίας. 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, όπως έχει ήδη περιγραφεί, εφαρμόζεται η μέθοδος Central Composite Design, με την οποία θα γίνει εκτίμηση των μη γραμμικών σχέσεων που αναπτύσσονται μεταξύ αυτών και των μακροσκοπικών παραμέτρων. Με αυτό τον τρόπο γράφτηκαν οι μη γραμμικοί περιορισμοί. Σε αυτή την ανάλυση, τοποθετώντας τους δύο υπό συσχέτιση παράγοντες σε ένα κύκλο, υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ τους, θεωρώντας κάθε φορά ότι κινούνται πάνω σε ένα εγγεγραμμένο στον κύκλο τετράγωνο.

Το τελικό στάδιο της μελέτης του Yoon είναι η βελτιστοποίηση των προαναφερθεισών εξισώσεων. Με αυτή κατάφερε να εντοπίσει ποιες τιμές των μικροπαραμέτρων που θα ορίσει κατά την προσομοίωση, θα δώσουν αποτελέσματα που να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματικότητα. Η βελτιστοποίηση έγινε με τη χρήση της εξίσωσης `fmincon` στο υπολογιστικό πρόγραμμα Matlab. Ο στόχος αυτής της βελτιστοποίησης μεταφράζεται σε μια γενική εξίσωση, στην οποία θα επιβληθούν οι περιορισμοί που ορίστηκαν με τις δύο προηγούμενες μεθόδους. Η εξίσωση είναι η εξής:

Βασική εξίσωση

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

Σε ό,τι αφορά τους επιπλέον περιορισμούς των μεταβλητών, οι τιμές που ενδέχεται να πάρει η κάθε μεταβλητή θα πρέπει να ανήκουν στα όρια που έχουν τεθεί εξ αρχής στο πρόβλημα. Έτσι, οι υπολογισμοί θα μπορέσουν να δώσουν αποδεκτά ή εφικτά αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο Yoon στην ανάλυσή του θεώρησε ότι οι τιμές

της μακροσκοπικής απόκρισης των δοκιμίων ανήκουν σε συγκεκριμένο εύρος, ειδάλλως η μέθοδος του καθίσταται μη εφαρμόσιμη. Ανακεφαλαιώνοντας, παρουσιάζεται η γενική μορφή της βασικής εξίσωσης και των εξισώσεων που την περιορίζουν και το εύρος των ιδιοτήτων των υλικών.

Γενική Μορφή Εξίσωσης:

- $\text{Min} | \text{UCS (προσομοίωση)} - \text{UCS (εργαστηριακή δοκιμή)} |$

Περιορισμοί:

- $\text{Μέτρο ελαστικότητας (προσομοίωση)} = \text{Μέτρο ελαστικότητας (εργαστηριακή δοκιμή)}$

- $\text{Λόγος του Poisson (προσομοίωση)} = \text{Λόγος του Poisson (εργαστηριακή δοκιμή)}$

- $3 \leq \text{Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη} / \text{Εφελκυστική Αντοχή} \leq 10$

- $2 \leq \text{Διατμητική Αντοχή Δεσμού} / \text{Ορθή Αντοχή Δεσμού} \leq 3$

Ιδιότητα	Εύρος Τιμών
UCS	70 – 250 MPa
Μέτρο του Young	25 – 70 GPa
Λόγος του Poisson	0,1 – 0,3

Πίνακας 4.4: Περιορισμοί της μακροσκοπικής απόκρισης του μοντέλου.

4.4 Πρόταση συσχέτισης μικρομηχανικών παραμέτρων με μακροσκοπική απόκριση

Στην προηγούμενη παράγραφο, έγινε αναφορά στη μεθοδολογία που παρουσίασε ο Youn (2007) για τη βέλτιστη επιλογή μικρομηχανικών ιδιοτήτων ενός μοντέλου συνδεδεμένων σωματιδίων του PFC^{2D} κατά την προσομοίωση βραχώδους δοκιμίου, που υποβάλλεται σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αυτή που έχει χρησιμοποιηθεί ως επί το πλείστον από ερευνητές που χρησιμοποίησαν το πρόγραμμα PFC, για να προσδιορίσουν τις μικρομηχανικές ιδιότητες του συνθετικού πετρώματος. Στην πλειοψηφία όμως των περιπτώσεων, η μέθοδος του Youn δίνει απόκλιση έως και αρκετά μεγαλύτερη από το 5% που πρότεινε ο ίδιος, κατά την εισήγηση της μεθόδου του.

Η Καρατζά (2011), στη διπλωματική εργασία της με θέμα «Προσομοίωση εργαστηριακών δοκιμών αντοχής άρρηκτου πετρώματος με τη μέθοδο διακριτών στοιχείων», έχοντας και αυτή καταλήξει σε απόκλιση άνω του 20% εφαρμόζοντας τη μέθοδο του Youn σε δοκίμια μαρμάρου, επιχείρησε να δώσει μία νέα πρόταση για τη συσχέτιση των μικρομηχανικών παραμέτρων του συνθετικού πετρώματος με τη μακροσκοπική του απόκριση, η οποία είχε ελεγχθεί μέσω πειραμάτων μονοαξονικής

θλίψης που είχαν εκτελεσθεί στο εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων του Ε.Μ.Π.

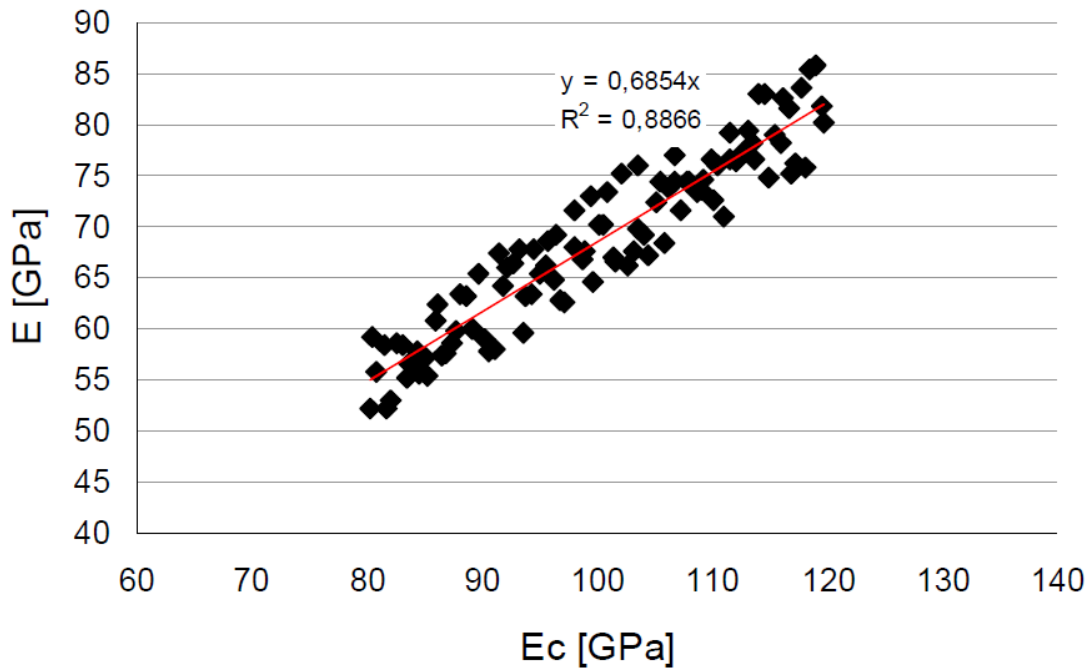
Έτσι λοιπόν, κατασκεύασε 100 μοντέλα, δίνοντας ένα εύρος τιμών στις προς βελτιστοποίηση μικρομηχανικές παραμέτρους. Έθεσε ελάχιστη ακτίνα (R_{min}) ίση με 0,25mm, λόγο της μέγιστης προς την ελάχιστη ακτίνα (mg_Rrat) 1,8, πυκνότητα του δοκιμίου (ba_rho) ίση με 2700kg/m^3 και συντελεστή τριβής μεταξύ των δίσκων 0,577 (ba_fric). Οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι 5cm πλάτος και 10cm ύψος. Το εύρος και οι παράμετροι παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Παράμετρος	Συμβολισμός Παραμέτρου	Εύρος Τιμών
Μέτρο ελαστικότητας επαφών	E_c [GPa]	80 – 120
Λόγος ορθής προς τη διατμητική δυστροπία	k_n/k_s	2 – 3
Ορθή αντοχή δεσμών	NBS [MPa]	10 – 50
Λόγος διατμητικής προς την ορθή αντοχή	SBS/NBS	2 – 3
Λόγος τυπικής απόκλισης προς μέση αντοχή δεσμών	ROSD	0,1 – 0,5

Πίνακας 4.5: Εύρος τιμών αναζητούμενων παραμέτρων

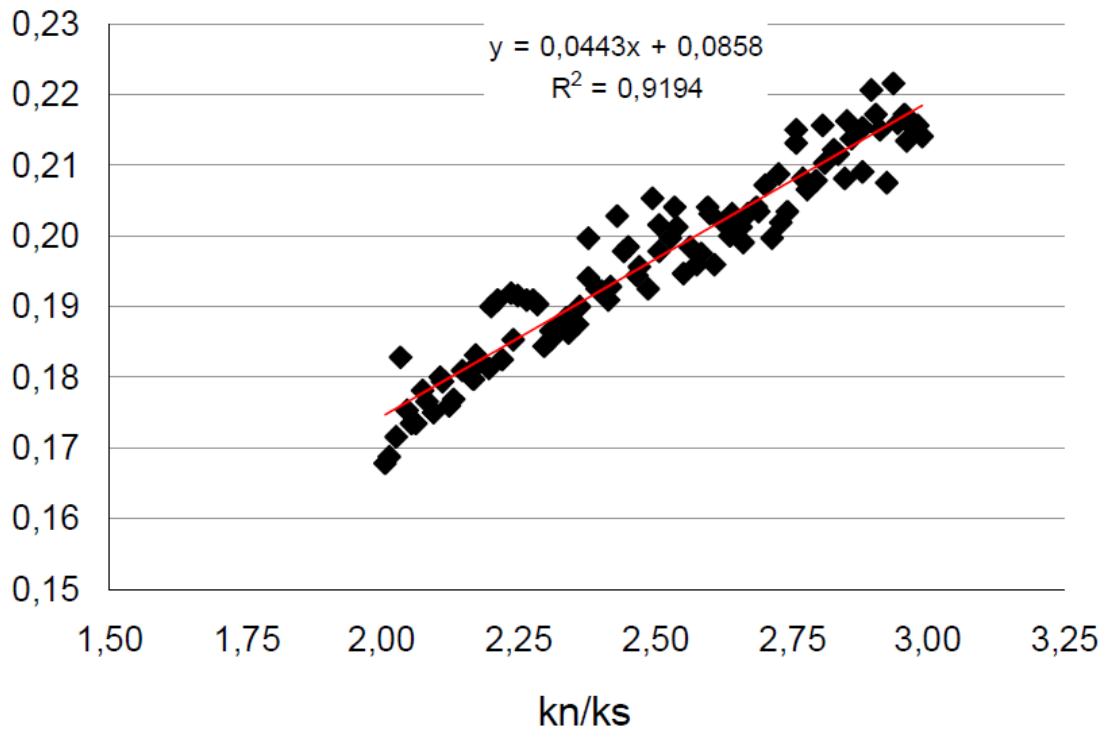
Έπειτα, υπολόγισε 100 ομάδες τιμών για τις παραμέτρους, θεωρώντας κάθε παράμετρο ως ομοιόμορφη τυχαία μεταβλητή. Ο υπολογισμός των παραμέτρων έγινε με τη βοήθεια του Matlab με τη μέθοδο Latin Hypercube. Στη συνέχεια, κατασκεύασε διαγράμματα συνδυάζοντας τις μικρομηχανικές ιδιότητες του δοκιμίου με τη μακροσκοπική του απόκριση, έπειτα από την υποβολή τους σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Από αυτά τα διαγράμματα, επέλεξε τις βέλτιστες τιμές για τις ζητούμενες παραμέτρους και κατασκεύασε το τελικό μοντέλο, που απαιτούνται για την περίπτωση της. Στο τελικό μοντέλο προσομοίωσε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, άμεσου εφελκυσμού, Brazilian και τριαξονικές και με βάση τα αποτελέσματά τους, συμπέρανε πως τα διαγράμματα που είχε εξάγει είχαν επιτυχία.

Διάγραμμα E - E_c

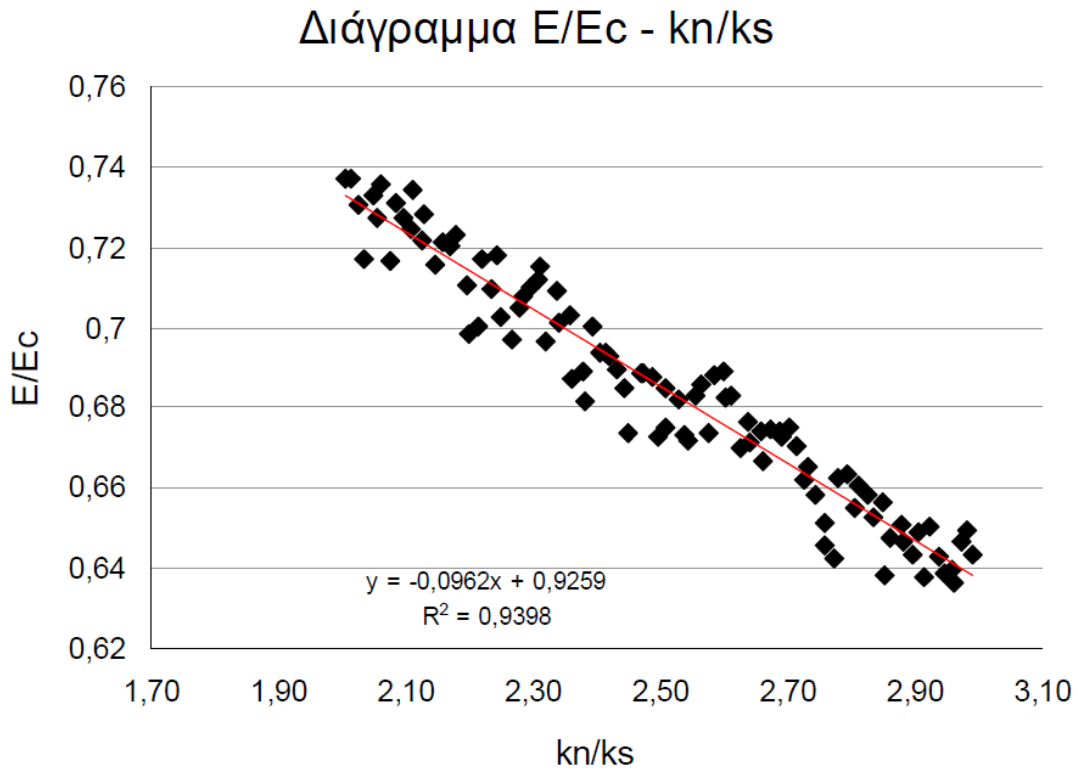


Σχ.4.2: Διάγραμμα συσχέτισης μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου με το μέτρο ελαστικότητας των επαφών των δίσκων της κατανομής. (Καράτζα,2011)

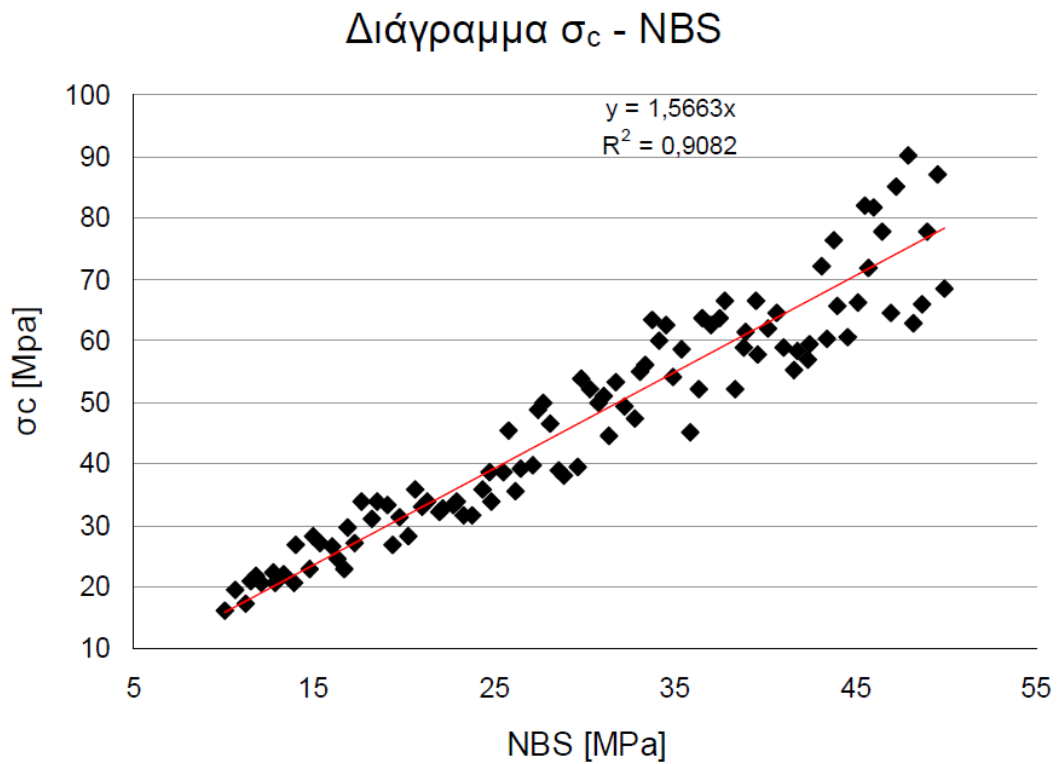
Διάγραμμα ν - kn/ks



Σχ. 4.3: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου του Poisson με το λόγο της ορθής προς τη διατμητική δυστροπία. (Καράτζα, 2011)



Σχ. 4.4: Διάγραμμα συσχέτισης του λόγου των μέτρων ελαστικότητας του δοκιμίου και των επαφών με το λόγο της ορθής προς τη διατμητική δυστροπία. (Καράτζα, 2011)



Σχ. 4.5: Διάγραμμα συσχέτισης της μέγιστης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με τη μέση τιμή της αντοχής των δεσμών. (Καράτζα, 2011)

Τα διαγράμματα της Καρατζα (2011) χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα εργασία για τον προσδιορισμό των μικρομηχανικών παραμέτρων των μοντέλων, που κατασκευάστηκαν και όπως θα φανεί και στη συνέχεια, έδωσαν εξ' αρχής μια ικανοποιητική προσέγγιση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αριθμητικά μοντέλα βαθμονόμησης

5.1 Εισαγωγή

Σε πρώτο στάδιο, έγινε προσπάθεια προσδιορισμού των μικρομηχανικών παραμέτρων του συνθετικού πετρώματος, ώστε μετά από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test), να δίνει αποκρίσεις αντίστοιχες με αυτές που παρουσίασε ο Sterling για τον Indiana Limestone.

Η πρώτη προσέγγιση για τον προσδιορισμό των μικρομηχανικών παραμέτρων έγινε, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, με βάση τα διαγράμματα της Καράτζα (2011). Για να φτάσουμε στο μοντέλο που θα ικανοποιούσε τις απαιτήσεις μας, η ιδιότητα που μεταβάλλαμε κατά κύριο λόγο από μοντέλο σε μοντέλο ήταν η αντοχή των δεσμών. Μετά από την κατασκευή 5 μοντέλων και υποβολή τους σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού καταλήξαμε σε αυτό που παρουσίαζε την πιο σχετική απόκριση με το πραγματικό πέτρωμα.

5.2 Διαδικασία κατασκευής αριθμητικού μοντέλου βαθμονόμησης

Η διαδικασία για την κατασκευή των μοντέλων και την υποβολή τους στις δοκιμές, είχε ως εξής: Πρώτα πρώτα σε ένα αρχείο προσδιορίζονται οι μικρομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος, στις οποίες περιλαμβάνονται και οι ιδιότητες που αφορούν τους δεσμούς μεταξύ των σωματιδίων στο πρόγραμμα PFC. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.1 το μέτρο ελαστικότητας επαφής των σφαιρών, E_c , προσδιορίστηκε στα 13,7 GPa, ο λόγος δυστροπίας των σφαιρών, $k_n/k_s = 2.5$, ενώ επιλέχθηκαν σημειακοί δεσμοί με εφελκυστική αντοχή 22.4 MPa και διατμητική 56 MPa. Το παραπάνω αρχείο κατασκευάζεται κατ' αντιστοιχία με το αρχείο παραδείγματος "mL-param.dat" της εργαλειοθήκης του PFC.

```
il-param5 - Notepad
File Edit Format View Help
;-----
def mg_set
mg_Rrat=1.66
mg_ts0=-0.1e6
end
;-----
def mp_set
; ba_bulk(1)=1
; ba_rho(1) = 2605.
ba_Ec(1) = 13.7e9
ba_krat(1)= 2.5
ba_fric(1) = 0.52
; -----
cb_add = 1
cb_sn_mean(1) = 22.4e6
cb_sn_sdev(1) = 0
cb_ss_mean(1) = 56.00e6
cb_ss_sdev(1) = 0
end
;-----
```

Εικόνα 5.1: Μικρομηχανικές ιδιότητες του συνθετικού υλικού

Το αρχείο που θα δώσει την εντολή στο πρόγραμμα για την κατασκευή του μοντέλου, και είναι αντίστοιχο με το παράδειγμα του αρχείου “sW_mL-spc.dvr” που δίνεται στο εγχειρίδιο χρήσης του PFC, περιλαμβάνει ιδιότητες, όπως οι διαστάσεις του κελιού και η ελάχιστη ακτίνα των σωματιδίων και απεικονίζεται παρακάτω στην εικόνα 5.2 για το μοντέλο στο οποίο καταλήξαμε. Στο αρχείο αυτό, εκτός από το αρχείο με τις παραμέτρους του υλικού που δημιουργήσαμε προηγουμένως, καλούνται από την εργαλειοθήκη του PFC και αρχεία εγκατάστασης της γλώσσας FISH, καθώς η εντολή με την οποία θα ξεκινήσει η γένεση του μοντέλου (`mg_matgen`), ανήκει σε αυτή. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.2, το μοντέλο που υποβλήθηκε στη συνέχεια σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian), είχε διαστάσεις 10 εκατοστά ύψος και 5 εκατοστά πλάτος, ενώ η ελάχιστη ακτίνα των σωματιδίων (1 χιλιοστό), επιλέχθηκε με σκοπό το μοντέλο να είναι αδρόκοκκο, ώστε να είναι πιο εύχρηστο κατά τις δοκιμές και κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησής του, μέσω της μεταβολής των μικροπαραμέτρων.


```

iL-model5-spc - Notepad
File Edit Format View Help
*****
* Log File Started 19:33:01 Wed Jun 20 2018
* Using PFC2D 4.00-123 (64-bit)
* Serial Number: 261-000-0000-00000
* By:
*
*****
PFC2D> -----
PFC2D> new
----- * All model specific information has been cleared *
-----
PFC2D> set safe_conversion on
PFC2D> SET disk on ; model unit-thickness cylinders
PFC2D> SET echo off ; load support functions
call %fist%\fist_new.dvr
call %fist%\2d_3d\md_setup.fis
call mL-param.dat
call %fist%\2d_3d\md.fis
call %fist%\2d\et2.fis
call %fist%\2d_3d\Flt.fisj
PFC2D> SET md_run_name='iL-model5'
PFC2D> title 'iL-model5'
PFC2D> SET random 10001
PFC2D> SET mg_Rmin=1.0e-3
PFC2D> SET mv_H=100e-3 mv_W=50e-3
PFC2D> mg_matgen

```

Εικόνα 5.2: Αρχείο για την κατασκευή του συνθετικού πετρώματος

5.3 Υποβολή αριθμητικών μοντέλων βαθμονόμησης σε δοκιμές

5.3.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Για την προετοιμασία της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης, αρχικά κατασκευάζεται ένα αρχείο με τις ιδιότητες της δοκιμής. Στη συνέχεια, το αρχείο αυτό καλείται και ακολουθεί η εκτέλεση της δοκιμής με την κλήση των 2 αρχείων “_btw1.dvr” (για την προετοιμασία) και το “_btw2.dvr” (για την εκτέλεση), που δίνονται έτοιμα στο εγχειρίδιο του προγράμματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3.

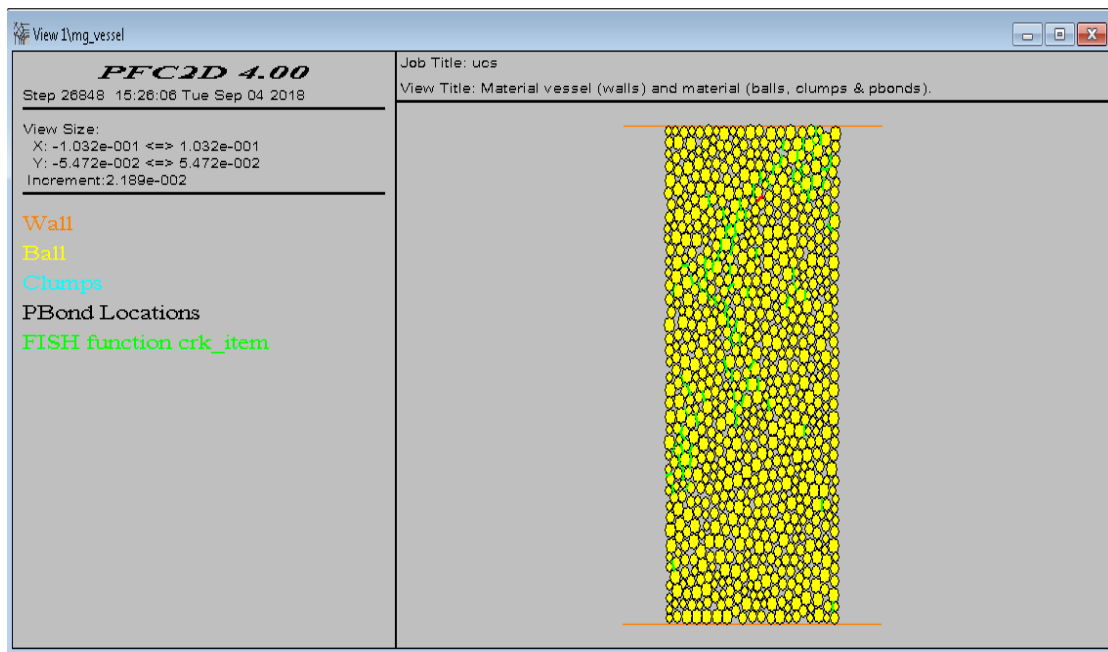
```

iL-model5_ucs - Notepad
File Edit Format View Help
; sw_ML_tAtt-{tt0,tt1} ; sw_ML_tAtt-1.avi
; sw_ML_tA{ucs,10}-{tw0,tw1} ; sw_ML_tA{ucs,10}-1.avi
; sw_ML_tAbt-{bt0,bt1} ; sw_ML_tAbt-1.avi
;
=====
set logfile iL-model5_ucs.log
set log on
restore iL-model5-spc.SAV
set safe_conversion on
SET md_run_name='ucs'
title 'ucs'
call ucs-param.dat
call %fist%\2d\_btw1.dvr
SET avi_Ns=50 avi_S=40e-3
call %fist%\2d\_btw2_avi1.dvr
;
=====
set log off
return
;EOF: sw_ML_tA-tw.dvr

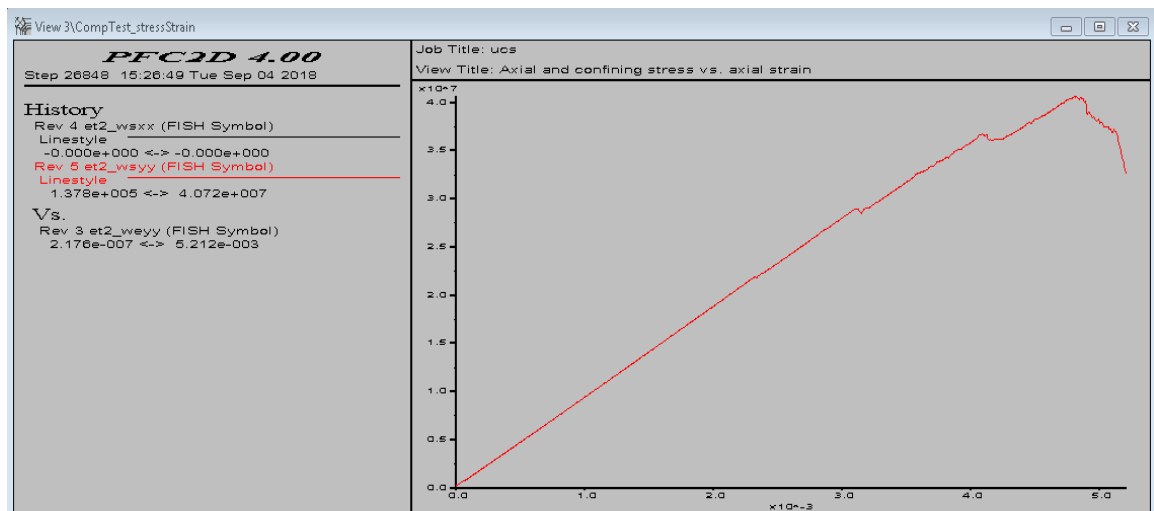
```

Εικ. 5.3: Αρχείο για την εκτέλεση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης

Με την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης δοκιμής λάβαμε την τιμή για αντοχή του συνθετικού πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη ίση με $\sigma_c=40.72$ MPa και το μέτρο ελαστικότητας $E=9,37$ GPa που είναι οι πλησιέστερες, σε αυτές του Sterling (40 MPa και 9,37 GPa αντίστοιχα), που καταφέραμε να πετύχουμε μετά από δοκιμές σε διάφορα μοντέλα. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι εφελκυστικές (με πράσινο) και διατμητικές (με κόκκινο) ρωγμές που προέκυψαν στο μοντέλο κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καθώς και το διάγραμμα της τροπής σε συνάρτηση με την τάση.



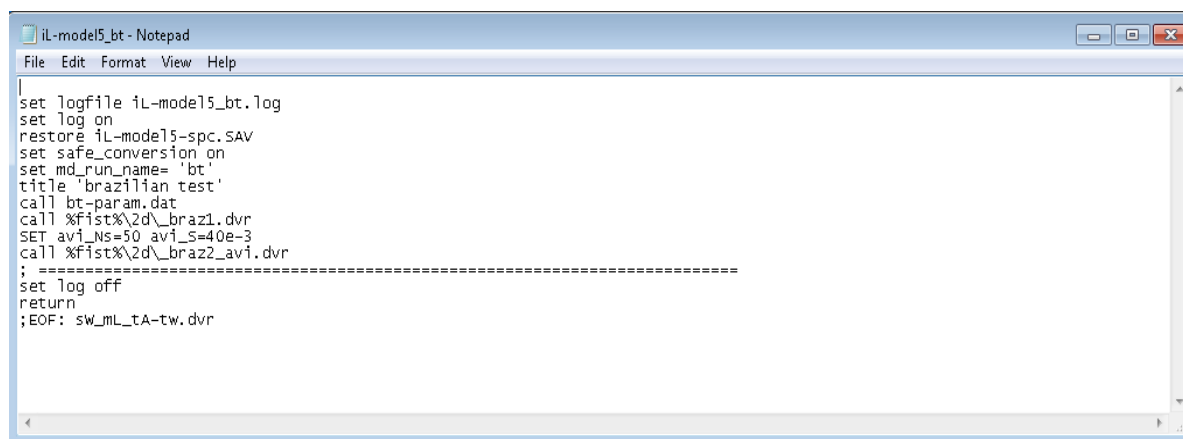
Εικ. 5.4 Συνθετικό πέτρωμα μετά την υποβολή του σε αντοχή μονοαξονικής θλίψης



Σχ. 5.1: Διάγραμμα τάσης - αξονικής τροπής στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

5.3.2 Δοκιμή Brazilian

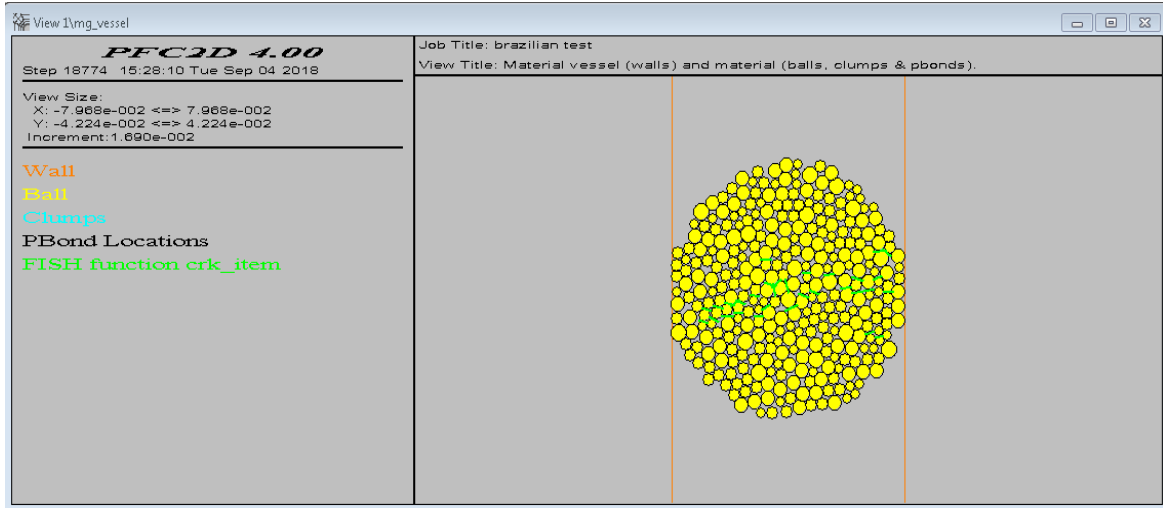
Με αντίστοιχο τρόπο εκτελέστηκε και η δοκιμή Brazilian, με τη διαφορά ότι αυτή τη φορά τα αρχεία που κλήθηκαν από την εργαλειοθήκη του PFC ήταν τα “_braz1.dvr” (για την προετοιμασία) και “_braz2.dvr” (για την εκτέλεση της δοκιμής).



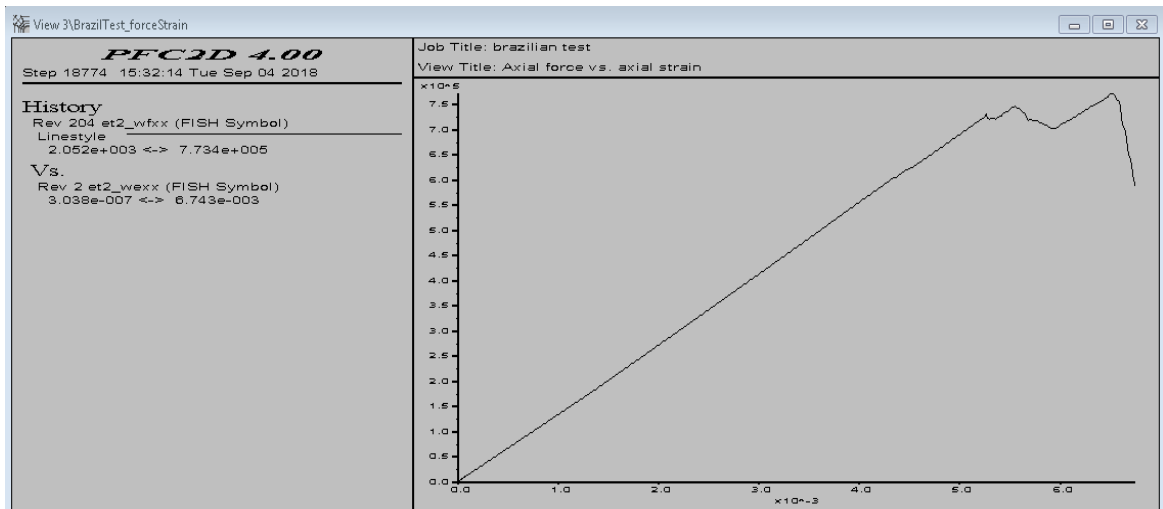
```
set logfile iL-model5_bt.log
set log on
restore iL-model5-spc.SAV
set safe_conversion on
set md_run_name= 'bt'
title 'brazilian test'
call bt-param.dat
call %fist%\2d\_braz1.dvr
set avi_ns=50 avi_s=40e-3
call %fist%\2d\_braz2.avi.dvr
; =====
set log off
return
;EOF: sw_mL_tA-tw.dvr
```

Εικ. 5.5: Αρχείο για την εκτέλεση της δοκιμής Brazilian

Τα αποτελέσματα της δοκιμής Brazilian, είχαν μικρή απόκλιση από τα αναμενόμενα. Ο Sterling στη διδακτορική του διατριβή δεν παρουσίασε την τιμή της εφελκυστικής αντοχής του ασβεστόλιθου τύπου Indiana. Ωστόσο, από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό πως στα περισσότερα πετρώματα η τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι περίπου από το 1/5 έως το 1/20 της θλιπτικής. Μετά τη δοκιμή Brazilian, προέκυψε ότι η εφελκυστική αντοχή του δοκιμίου μας είναι 9,84 MPa, δηλαδή περίπου το 1/4 της θλιπτικής του αντοχής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον τύπο των δεσμών που χρησιμοποιήθηκε, καθώς με τη χρήση σημειακών δεσμών δεν μπορούμε να πετύχουμε με ακρίβεια το λόγο της εφελκυστικής προς τη θλιπτική αντοχή.



Εικ. 5.6: Συνθετικό πέτρωμα μετά την υποβολή του σε δοκιμή Brazilian



Σχ. 5.2: Διάγραμμα αξονικής τροπής – τάσης στη δοκιμή Brazilian

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Κατασκευή αριθμητικών μοντέλων δοκών

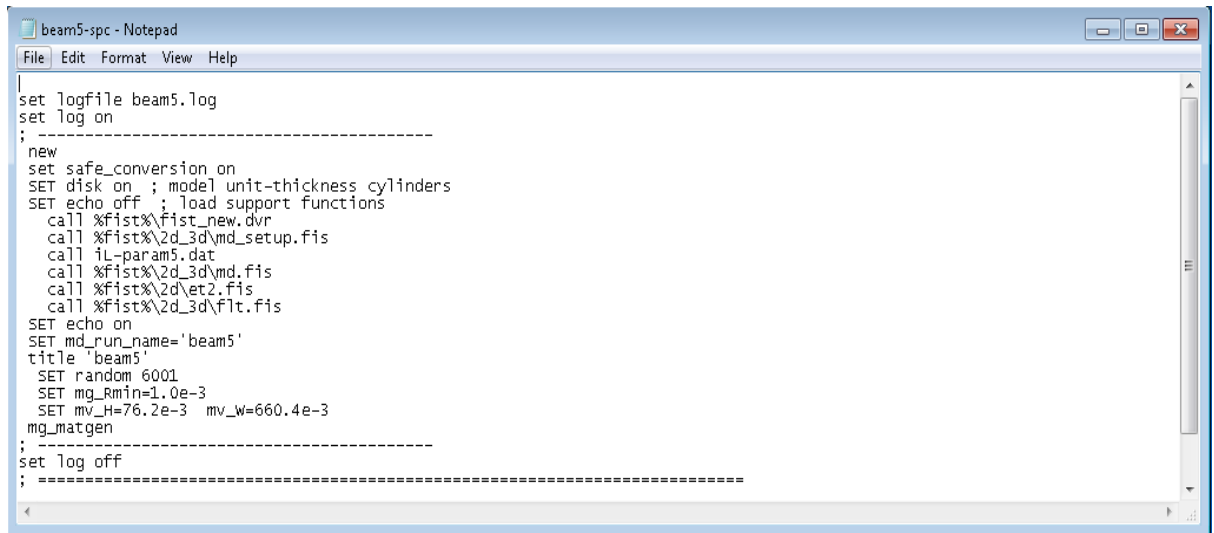
6.1 Εισαγωγή

Έχοντας πλέον κατασκευάσει ένα συνθετικό πέτρωμα που μακροσκοπικά αποκρίνεται, όπως και τα δοκίμια Indiana Limestone που υπέβαλε σε δοκιμές στο εργαστήριο του, ο Sterling, προχωρούμε στην κατασκευή μοντέλων δοκών. Σκοπός της διαδικασίας είναι η προσομοίωση δοκών πετρώματος στην οροφή υπόγειων ανοιγμάτων. Ωστόσο, σε πρώτο στάδιο έγιναν προσομοιώσεις χωρίς την παρουσία πλευρικών τοίχων που θα περιόριζαν τη δοκό, όπως και σε μία πραγματική κατάσταση, ώστε να ελεγχθεί αν η αστοχία των δοκών ποιοτικά, θα είναι αντίστοιχη με την πραγματικότητα (π.χ. θέσεις εμφάνισης ρωγμών, τύπος ρωγμών).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο Sterling, στα 63 πειράματα που εκτέλεσε, χρησιμοποίησε δοκούς διαφορετικών πετρωμάτων, μεγεθών, αρχικών συνθηκών στήριξης και προφόρτισης. Ο κύριος όγκος τους όμως, περιλάμβανε δοκούς ασβεστολίθου τύπου Indiana, διαστάσεων 26in x 3in x 3in (δηλ. 66.04cm x 7.62cm x 7.62cm), φόρτιση ενός σημείου και χαλύβδινες στηρίξεις.

Έτσι, λοιπόν, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες μικρομηχανικές παραμέτρους, κατασκευάστηκαν στο PFC δοκοί μήκους 66.04 εκατοστών και ύψους 7.62 εκατοστών. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε γι' αυτό είναι αντίστοιχη με αυτή της κατασκευής των δοκιμίων της προηγούμενης παραγράφου, που υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και Brazilian και έγινε και πάλι χρήση της FISH. Με αυτό τον τρόπο, κατασκευάστηκε σε πρώτο στάδιο ένα κελί το οποίο στο εσωτερικό του περιλάμβανε τη δοκό (δοκός με 4 τοίχους σε επαφή).

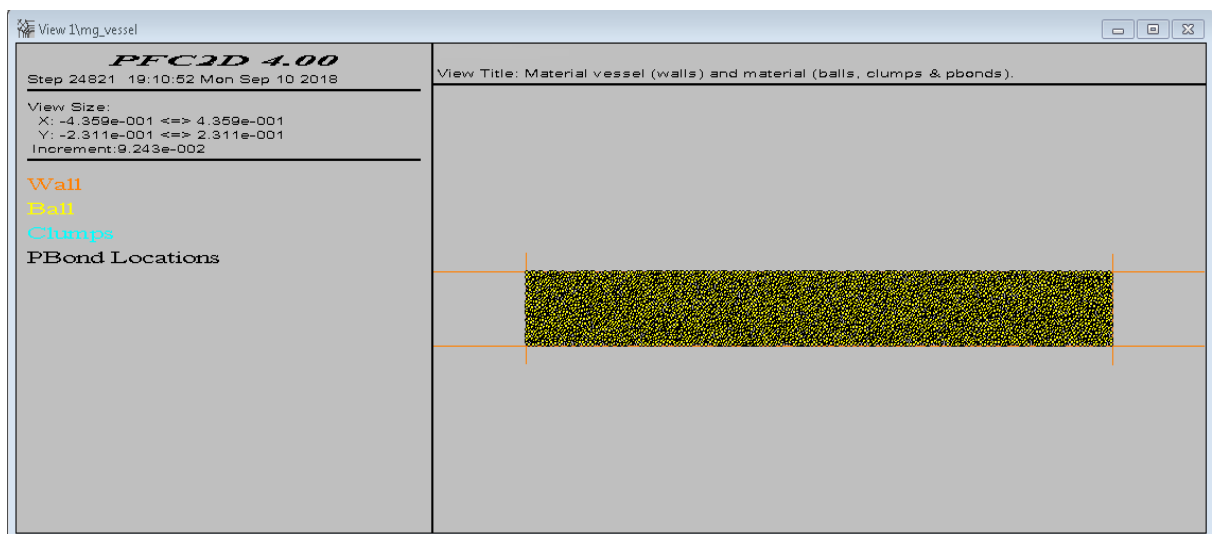
6.2 Προσομοιώσεις δοκμών κάμψης δίχως παρουσία πλευρικών τοίχων



```
beam5-spc - Notepad
File Edit Format View Help

set logfile beam5.log
set log on
;-----
new
set safe_conversion on
SET disk on ; model unit-thickness cylinders
SET echo off ; load support functions
call %Fist%\fist_new.dvr
call %Fist%\2d_3d\md_setup.fis
call il-param5.dat
call %Fist%\2d_3d\md.fis
call %Fist%\2d\et2.fis
call %Fist%\2d_3d\flt.fis
SET echo on
SET md_run_name='beam5'
title 'beam5'
SET random 6001
SET mg_rmin=1.0e-3
SET mv_H=76.2e-3 mv_w=660.4e-3
mg_matgen
;-----
set log off
;-----
```

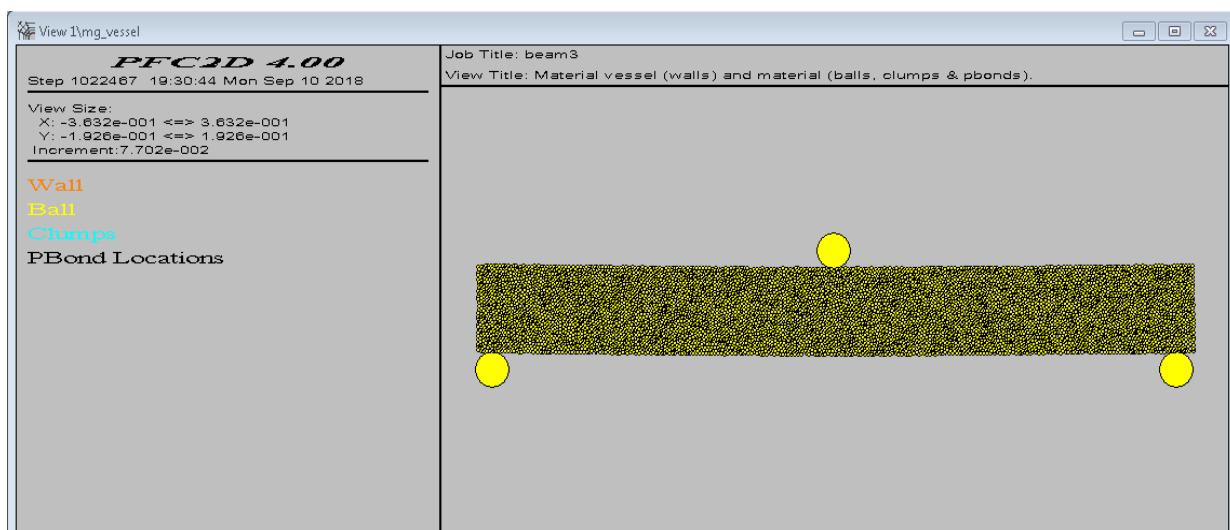
Εικ. 6.1: Αρχείο δημιουργίας δοκού διαστάσεων 66.04cm x 7.62cm



Εικ. 6.2: Δοκός στο πρόγραμμα PFC (66.04cm x 7.62cm)

Σκοπός μας σε αυτή τη φάση είναι η παραπάνω δοκός να υποβληθεί σε κάμψη, με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που το έκανε και ο Sterling. Για να επιτευχθεί αντίστοιχη διάταξη στο PFC, η οποία θα οδηγεί σε αστοχία των δοκών, όπως και στην

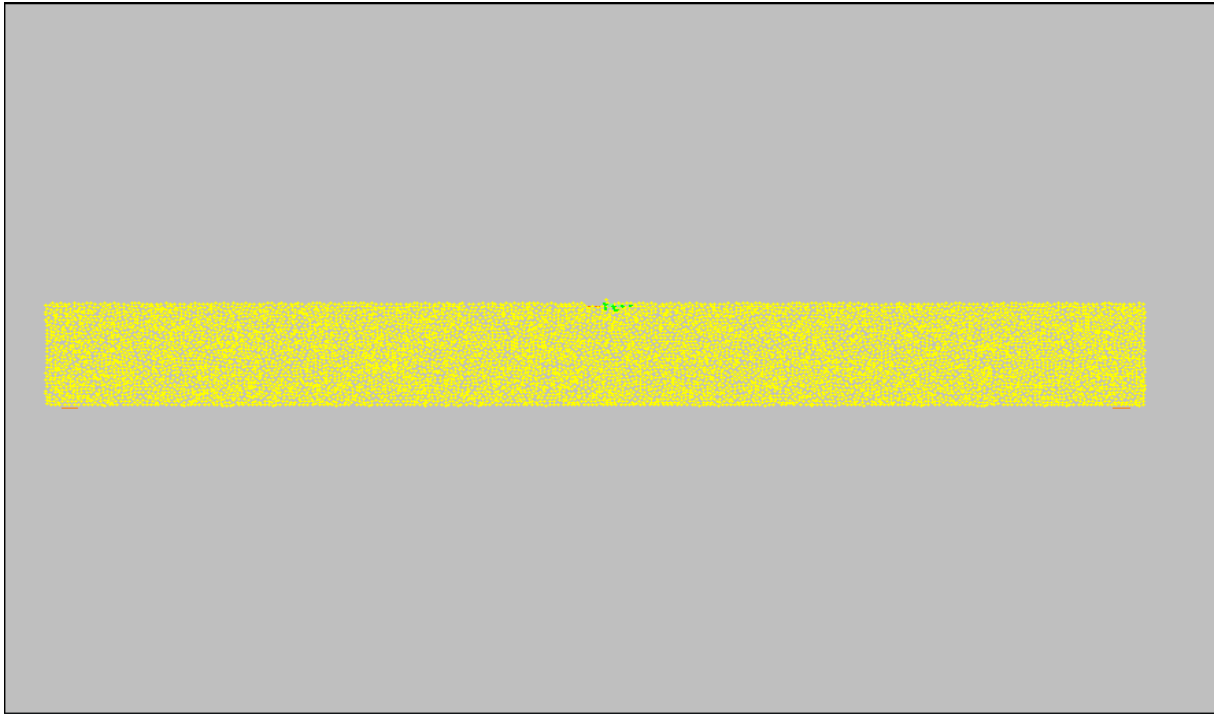
πραγματικότητα, αρχικά αφαιρέθηκαν οι τοίχοι γύρω από τη δοκό και έγιναν διάφορες δοκιμές ως προς τον τρόπο φόρτισης και στήριξής της. Αρχικά, επιχειρήθηκε να τοποθετηθούν στα 2 κάτω άκρα της δοκού από μία μπάλα – σωματίδιο, διαμέτρου 3 εκατοστών η καθεμία και άλλη μία στο κέντρο της άνω διατομής της δοκού, η οποία θα είχε κάποια ταχύτητα και θα ήταν αυτή που θα τη φόρτιζε. Η δυστροπία, τόσο η ορθή όσο και η διατμητική, των μπαλών αυτών σίγουρα θα ήταν μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των σωματιδίων που συνέθεταν τη δοκό. Συγκεκριμένα, έγιναν δοκιμές κατά τις οποίες η δυστροπία ήταν από μία έως έξι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη και δοκιμές στις οποίες η ταχύτητα της μπάλας που είχε το ρόλο να φορτίσει τη δοκό κυμαίνονταν από 10^{-6} έως 10^{-2} m/s. Ωστόσο, παρά τις όποιες μεταβολές, σε καμία περίπτωση δεν κατέστη εφικτή η αστοχία της δοκού και πάντα, ύστερα από πολλούς κύκλους που εκτελούσε το πρόγραμμα, το αποτέλεσμα ήταν αυτό φαίνεται που στην εικόνα 6.3.



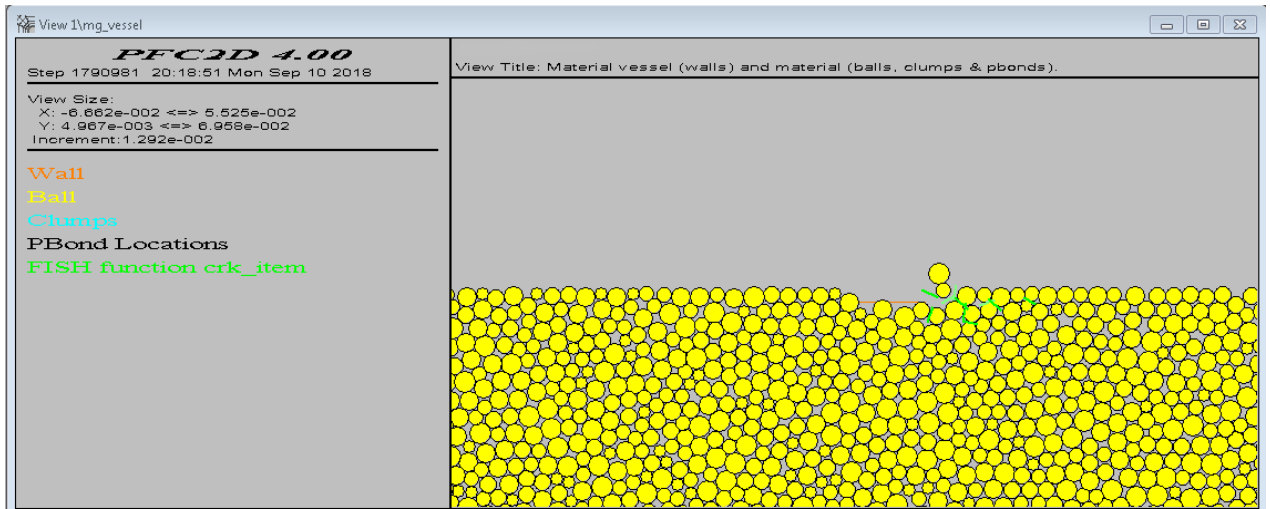
Εικ. 6.3: Δοκός που στηρίζεται και φορτίζεται από μπάλες (δεν επέρχεται αστοχία)

Η επόμενη προσπάθεια που έγινε, με σκοπό τη δημιουργία μιας διάταξης που θα κάμψει τη δοκό περιλάμβανε τη χρήση τοίχων στις θέσεις, όπου προηγουμένως υπήρχαν οι μπάλες. Οι τοίχοι αυτή είχαν και πάλι δυστροπίες μεγαλύτερες κατά τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους από τις μπάλες του συνθετικού πετρώματος και μήκος 3 εκατοστά ο καθένας. Στις δοκιμές που έγιναν δόθηκαν στον τοίχο της άνω διατομής ταχύτητες 10^{-3}

και 10^{-2} m/s. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.3(α), σε αυτή την περίπτωση, η δοκός φαίνεται αρχικά να αστοχεί στην άνω διατομή, με τη δημιουργία κάποιων εφελκυστικών ρωγμών. Όμως, η διαδικασία σταματά σύντομα και σίγουρα δε συνάδει με τον τρόπο αστοχίας των δοκών σε κάμψη, αφού η πρώτη αστοχία θα ήταν αναμενόμενο να συμβεί στην κάτω ακραία ίνα της μεσαίας διατομής.

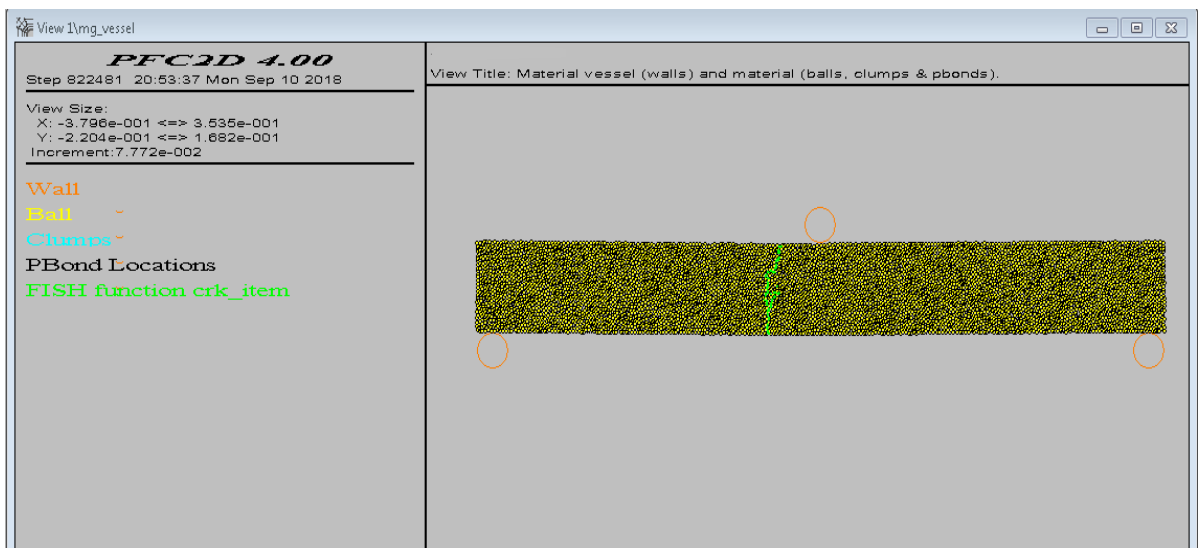


Εικ. 6.4(α): Δοκός που στηρίζεται και φορτίζεται από τοίχους (δεν επέρχεται η αναμενόμενη αστοχία)



Εικ. 6.4(β): Δοκός που στηρίζεται και φορτίζεται από τοίχους (αστοχία μόνο στο πάνω μέρος της δοκού)

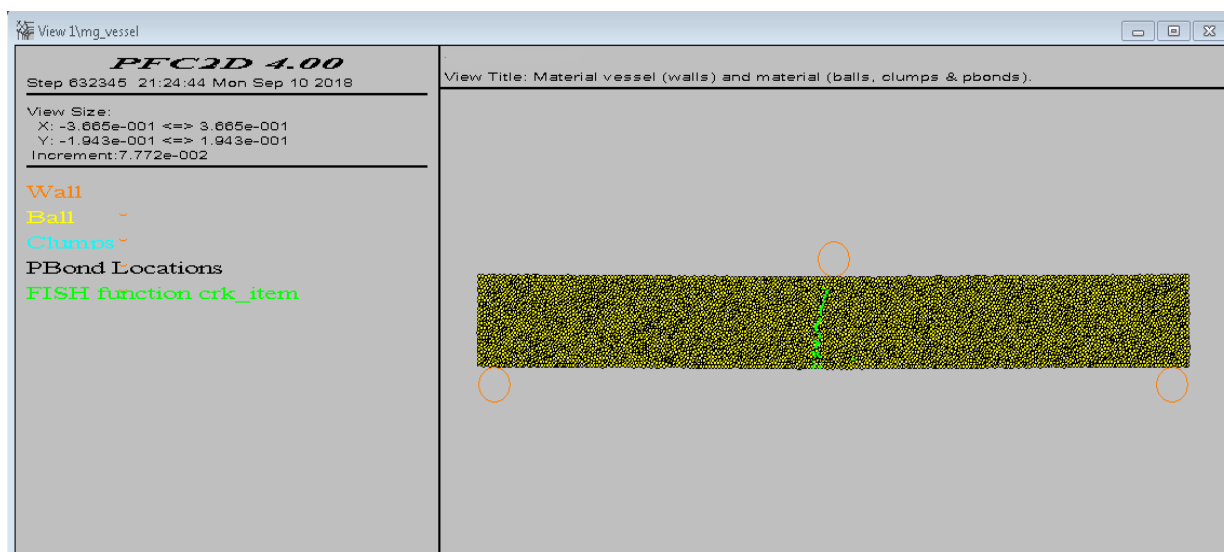
Η 3^η προσπάθεια προσομοίωσης της διάταξης του Sterling έγινε με τη χρήση τοίχων κυκλικής διατομής. Το PFC δίνει τη δυνατότητα χρήσης τοίχων κυκλικού σχήματος, και οι οποίοι μάλιστα είναι ενεργοί και αλληλεπιδρούν με τα περιβάλλοντα στοιχεία και από τις δύο πλευρές τους, σε αντίθεση με τους κανονικούς τοίχους που έχουν μόνο μία ενεργή πλευρά. Οι κυκλικοί τοίχοι τοποθετήθηκαν στις ίδιες θέσεις που είχαν τοποθετηθεί και οι δύο προηγούμενοι τύποι στηρίξεων/φόρτισης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.5(α).



Εικ. 6.5(α): Δοκός που στηρίζεται και φορτίζεται από μπάλες – τοίχους (αστοχία σε μη αναμενόμενη θέση)

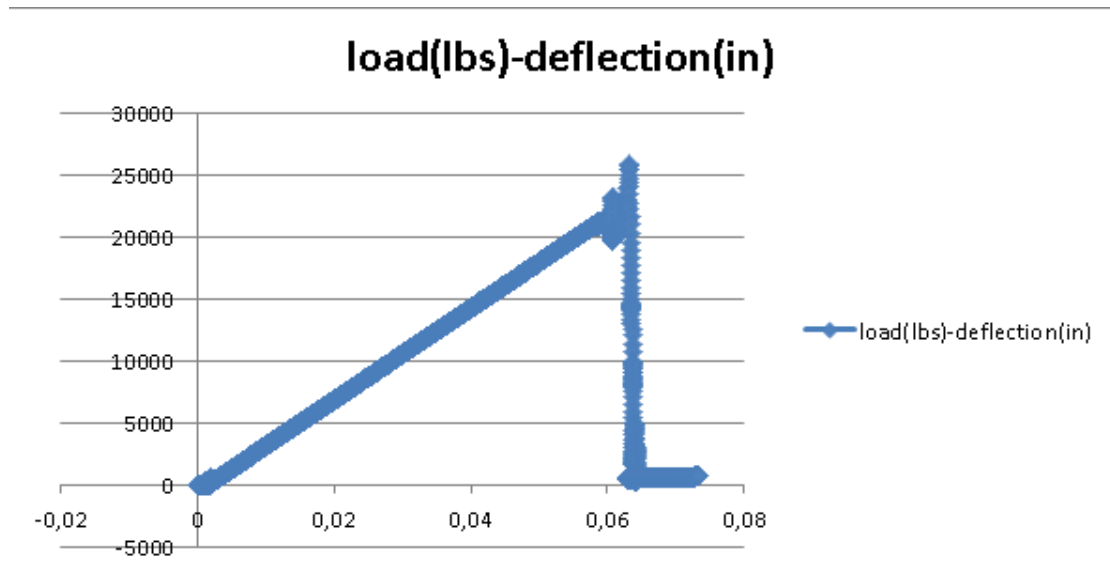
Αυτή τη φορά, το αποτέλεσμα ήταν επιτυχές. Οι τιμές δυστροπίας που δόθηκαν στους τοίχους – μπάλες ήταν $k_n = 2.74 * 10^{11}$ N/m για την ορθή και $k_s = 1.096 * 10^{11}$ N/m για τη διατμητική, μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη δηλαδή από τις αντίστοιχες των σωματιδίων του συνδεδεμένου μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο, προσομοιώνεται η σχέση χάλυβα – πετρώματος (στηρίξεων – δοκού) που υπάρχει στην πειραματική διάταξη του Sterling. Ο συντελεστής τριβής μεταξύ τοίχων και σωματιδίων της δοκού που δίνεται, αντιστοιχεί σε γωνία τριβής 20° , δηλαδή $fric = 0.363970$.

Παρά το γεγονός ,όμως ότι η αστοχία επήλθε με τον αναμενόμενο τρόπο ποιοτικά, δεν ίσχυε το ίδιο και για τη θέση πάνω στη δοκό, όπου δημιουργήθηκαν οι ρωγμές. Αφού φορτίζεται στο μέσο της άνω διατομής από τη μπάλα – τοίχο, θα ήταν λογικό, οι ρωγμές να προκύψουν σε θέσεις κάτω από αυτή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο παράγεται το συνθετικό υλικό και ελέγχεται από την εντολή “set random” που δίνεται κατά τη διαδικασία της δημιουργίας του. Έτσι, αλλάζοντας την τιμή που δίνεται από τη συγκεκριμένη εντολή, άρα και δημιουργώντας μία νέα δοκό ως προς τον αριθμό και τη θέση των σωματιδίων, αλλά με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, επιτυγχάνουμε στο επόμενο στάδιο την αστοχία της στην αναμενόμενη θέση.

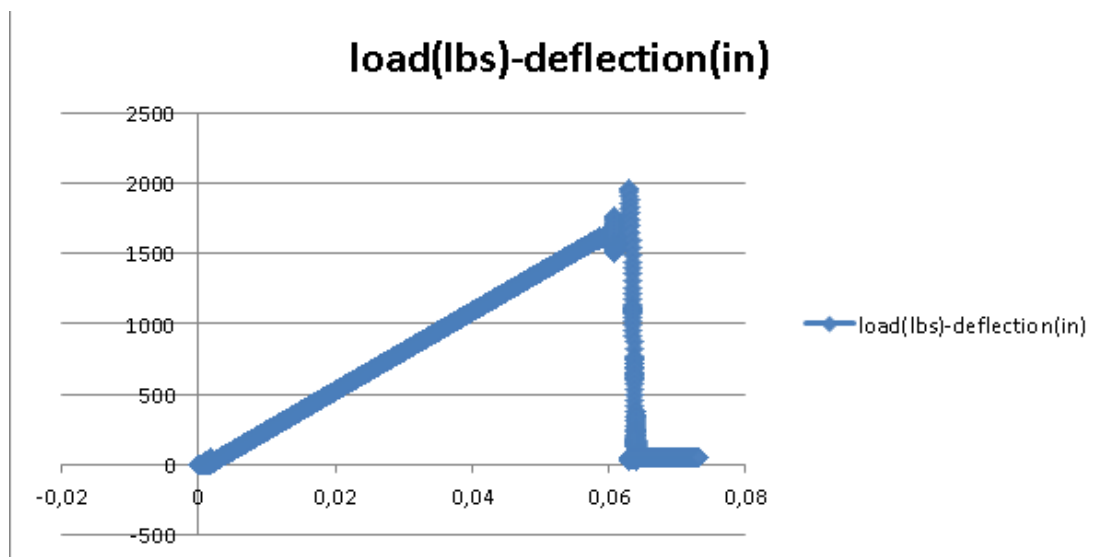


Εικ. 6.5(β): Δοκός που στηρίζεται και φορτίζεται από μπάλες – τοίχους (αστοχία σε αναμενόμενη θέση)

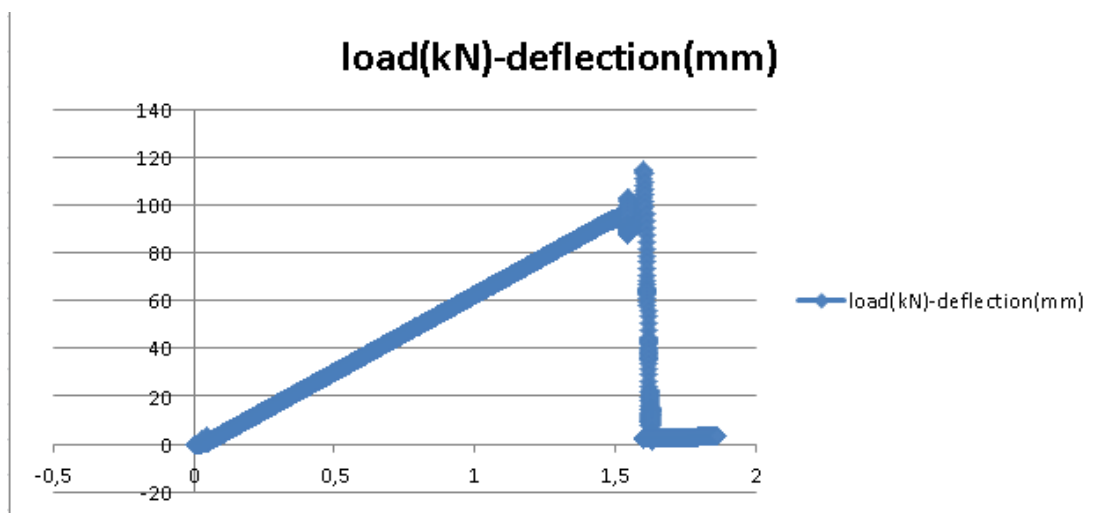
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα φορτίου – βέλους κάμψης που προέκυψαν από την παραπάνω δοκιμή



Σχ. 6.1(α): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) PFC (χωρίς παρουσία πλευρικών τοίχων)



Σχ. 6.1(β): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) ανηγμένο στις διαστάσεις της δοκού του Sterling (χωρίς παρουσία πλευρικών τοίχων)



Σχ. 6.1(γ): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (kN-mm) PFC (χωρίς παρουσία πλευρικών τοίχων)

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως ανάμεσα στις ιδιότητες που επιλέχθηκαν, ώστε να δημιουργηθεί μία διάταξη που θα μπορούσε να πραγματοποιήσει μία επιτυχή δοκιμή κάμψης δοκού, περιλαμβάνεται και η ταχύτητα που δίνεται στη μπάλα – τοίχο που βρίσκεται στο μέσο της άνω διατομής της δοκού. Η ταχύτητα που θα δοθεί σίγουρα δεν μπορεί να είναι μεγάλη, αφού στην πραγματικότητα προσομοιώνει το φορτίο που ασκούν τα υπερκείμενα φορτία στη δοκό οροφής ενός υπογείου ανοίγματος. Έτσι, μετά από δοκιμές που έγιναν με ταχύτητες 10^{-3} m/s και 10^{-2} m/s επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί και στο επόμενο στάδιο, όπου θα είναι παρόντες πλευρικοί τοίχοι, η ταχύτητα 10^{-2} m/s, καθώς δεν υπήρχαν διαφορές στην καμπύλη του βέλους κάμψης (προέκυψε από τη μέτρηση της μεταβολής της θέσης των κεντρικών σωματιδίων της κάτω διατομής της δοκού).

```

beam5csw - Notepad
File Edit Format View Help
!restore beam5-spc.sav
;-----
wall id=5 type circle c 0,53.1e-3 rad=0.015
wall id=6 type circle c -315.2e-3,-53.1e-3 rad=0.015
wall id=7 type circle c 315.2e-3,-53.1e-3 rad=0.015
;-----
wall id=5 kn=2.74e11 ks=1.096e11
wall id=6 kn=2.74e11 ks=1.096e11
wall id=7 kn=2.74e11 ks=1.096e11
;-----
wall prop yvel=-1.0e3 id=5
wall prop fri=0.363970 id=5
wall prop fri=0.363970 id=6
wall prop fri=0.363970 id=7
;-----
delete wall 1
delete wall 2
delete wall 3
delete wall 4
set hist_rep=50
set grav 0 -10
;-----
prop xdis 0
prop ydis 0
prop xvel 0
prop yvel 0
;-----
history wall yforce id=5
history wall yforce id=6
history wall yforce id=7
history ball ypos id=5878
history ball ypos id=7957
history ball ypos id=4201
history ball ypos id=7823
;-----
set echo off
call %fst%\2d_3d\crk.f1s
set echo on
crk_init

```

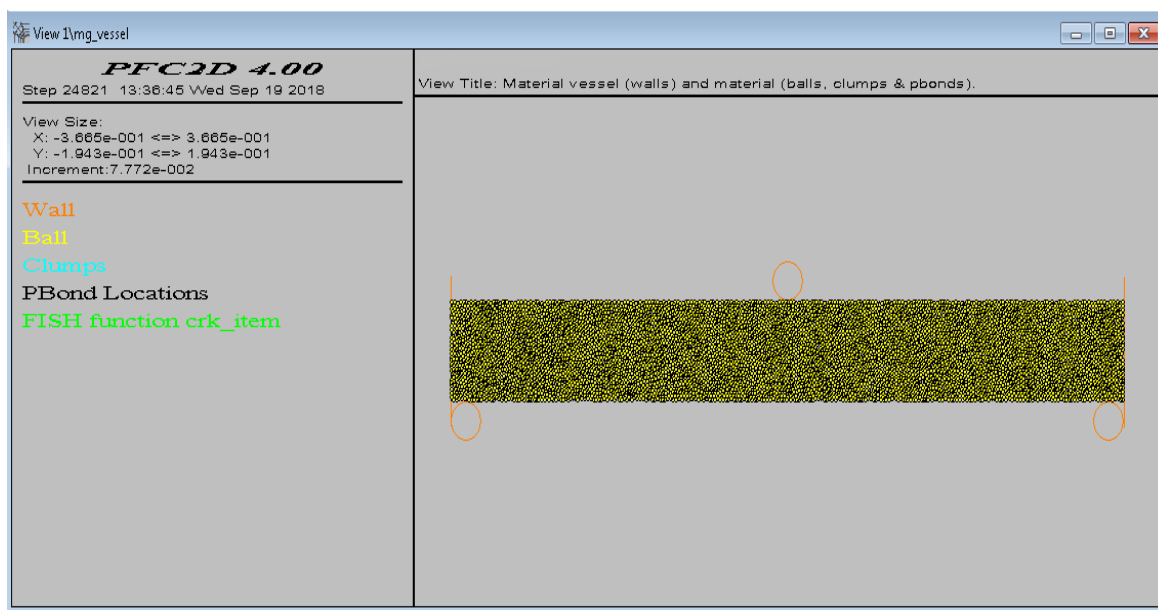
Εικ. 6.6: Αρχείο δημιουργίας της διάταξης εκτέλεσης της δοκιμής κάμψης στο PFC

6.3 Προσομοιώσεις δοκιμών κάμψης με παρουσία πλευρικών τοίχων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να γίνει ακριβέστερη προσομοίωση της δοκού οροφής ενός υπόγειου ανοίγματος στο PFC, είναι απαραίτητη και η παρουσία πλευρικών τοίχων. Τα πειράματα που προσομοιώθηκαν και τα οποία είχαν γίνει στο εργαστήριο από τον Sterling είναι οι δοκιμές κάμψης δοκών ασβεστολίθου τύπου Indiana, διαστάσεων 660mm x 76.2mm, με φόρτιση σε ένα σημείο, σε τέσσερις περιπτώσεις. Χωρίς αρχική προφόρτιση και με αρχική προφόρτιση 3.45 MPa, 6.9 MPa και 10.35 MPa (αντιστοιχούν σε 500, 1000 και 1500 psi όπως είχαν παρουσιαστεί από τον Sterling). Η ορθή και διατμητική δυστροπία των πλευρικών τοίχων ορίστηκαν και πάλι κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των σωματιδίων του συνθετικού πετρώματος, δηλαδή $kn = 2.74 \cdot 10^{11}$ N/m και $ks = 1.096 \cdot 10^{11}$ N/m.

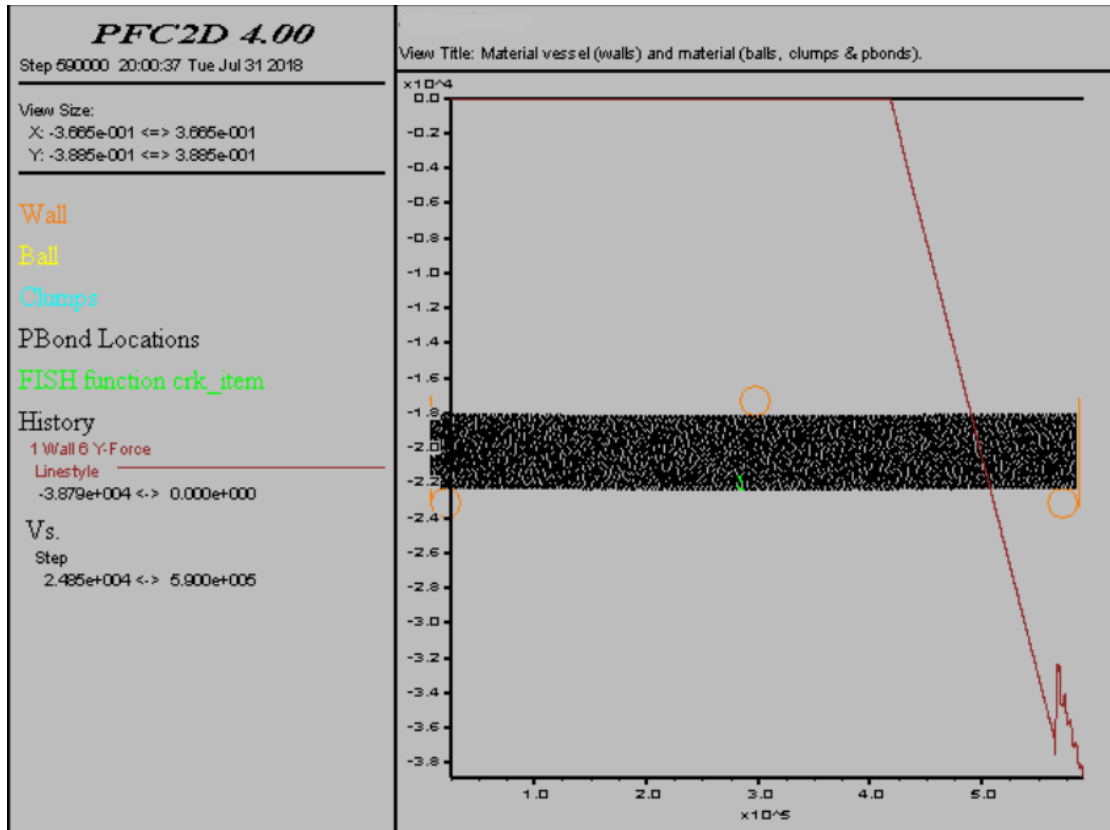
6.3.1 Προσομοίωση δοκιμής κάμψης χωρίς αρχική προφόρτιση

Η δοκιμή ξεκινάει με την άνω μπάλα – τοίχο να φορτίζει τη δοκό με ταχύτητα 10^{-2} m/s, σύμφωνα με τη διάταξη της εικόνας 6.7.

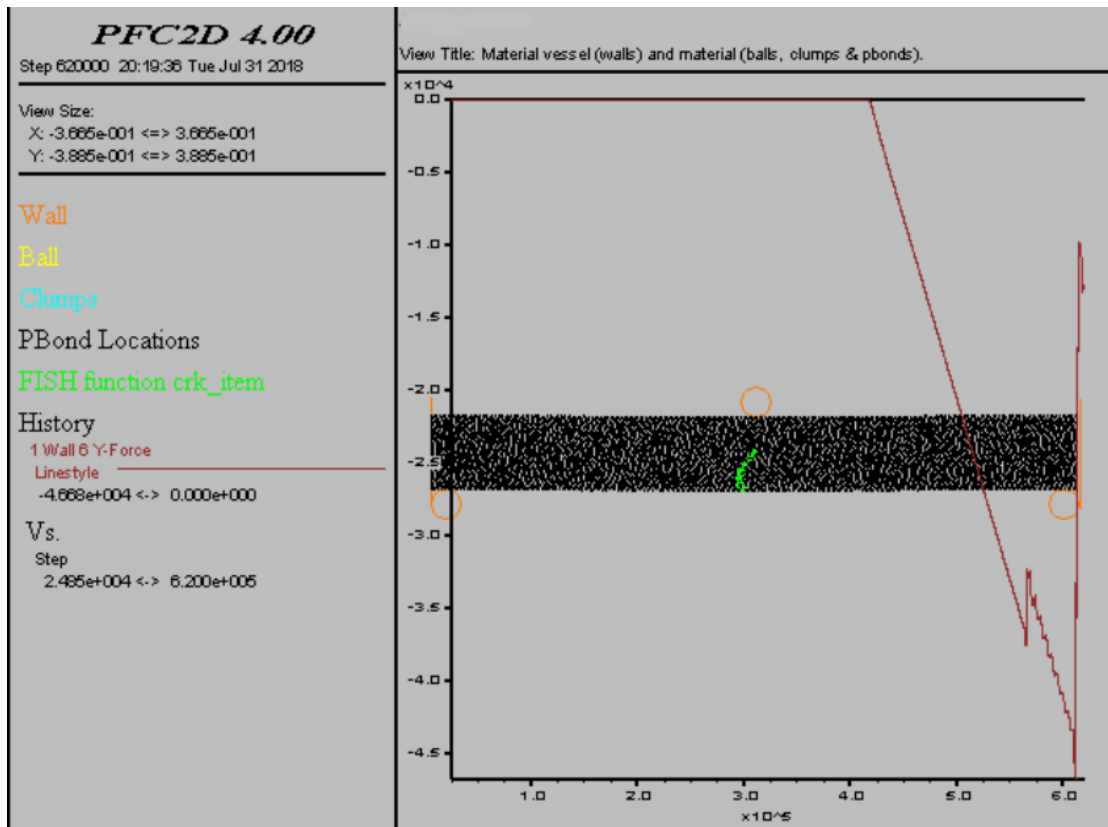


Εικ. 6.7: Δοκός πριν την έναρξη της δοκιμής κάμψης

Το συνθετικό μοντέλο φαίνεται να φτάνει στη μέγιστη αντοχή του μετά από 560 χιλιάδες κύκλους. Στο σημείο αυτό, κάνουν την εμφάνιση τους οι πρώτες εφελκυστικές (απεικονίζονται με πράσινο χρώμα) ρωγμές, στο μέσο της κάτω διατομής της δοκού (εικόνα 6.8(α)). Πολύ γρήγορα, μετά από μόλις 50 χιλιάδες κύκλους, οι ρωγμές αυτές διαδίδονται και καλύπτουν μεγάλο τμήμα του μέσου της δοκού (εικόνα 6.8(β)).

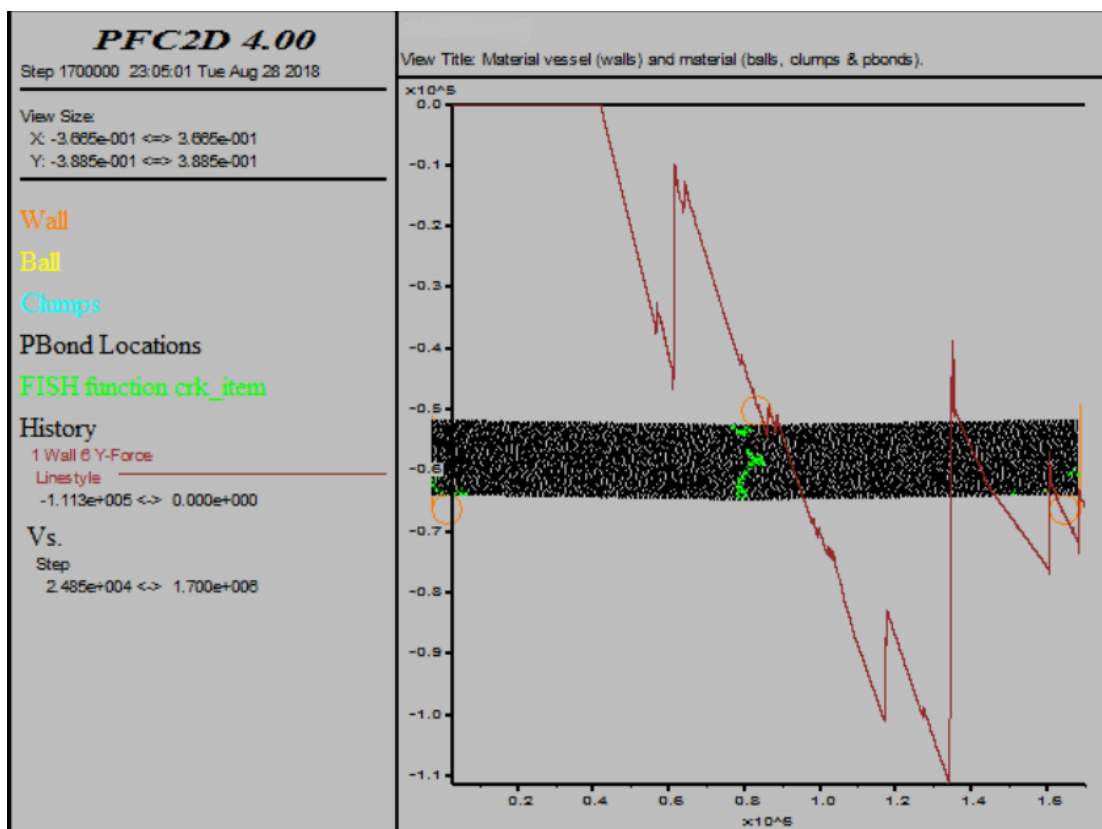


Εικ. 6.8(α): Εμφάνιση πρώτων ρωγμών (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση)



Εικ. 6.8(β) Διάδοση των ρωγμών στο μέσο της δοκού (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση)

Σε αμέσως επόμενο στάδιο, ακολουθεί η αστοχία της δοκού στο πάνω μέρος της, σε σημείο που βρίσκεται κοντά στην μπάλα – τοίχο που φορτίζεται. Μετά από αρκετή ώρα, κι ενώ η διάδοση των ρωγμών στο μέσο της δοκού συνεχίζεται, κάνουν την εμφάνιση τους οι πρώτες ρωγμές κοντά στις στηρίξεις της δοκού (εικόνα 6.8(γ)). Ξεκινώντας από την αριστερή στήριξη, όπου και τελικά παρουσιάζεται μεγαλύτερη αστοχία από τη δεξιά, με τη συνεχή φόρτιση, καταλήγουμε σε μία μορφή αστοχίας της δοκού, παρόμοια με αυτή που είχε δώσει ο Sterling.

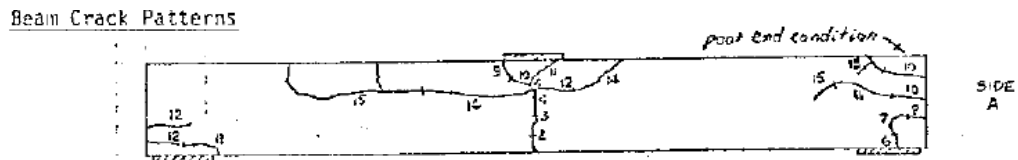


Εικ. 6.8(γ): Εμφάνιση ρωγμών κοντά στις στηρίξεις (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση)

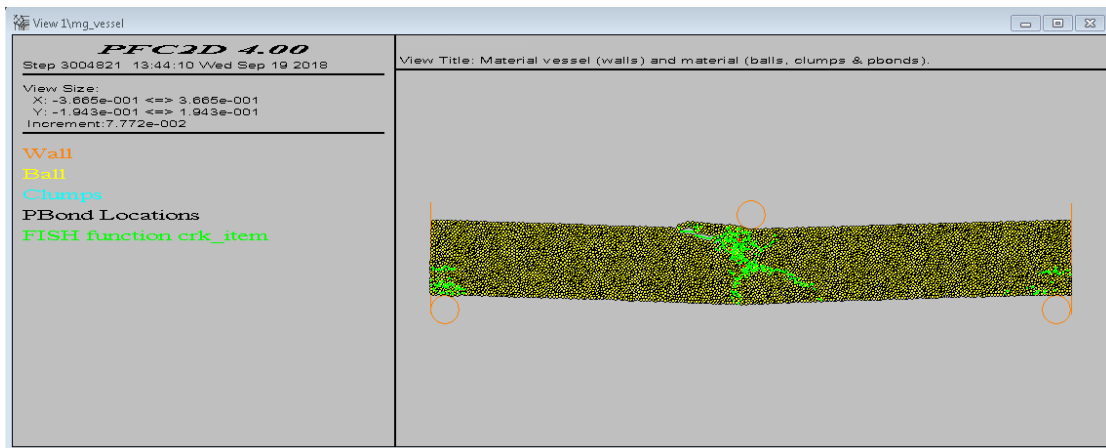
Η σύγκριση των προσομοιώσεων με τα πειράματα του Sterling γίνεται σε δύο στάδια. Πρώτα γίνεται σύγκριση μεταξύ των σκαριφημάτων αστοχίας των δοκών που δίνει ο Sterling και του τρόπου αστοχίας που προκύπτει από το PFC. Σε δεύτερο στάδιο, γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων φορτίου – βέλους κάμψης που προέκυψαν από τις δύο περιπτώσεις και αξιολογούνται στοιχεία, όπως το μέγιστο φορτίο αντοχής της δοκού, το βέλος κάμψης κλπ.

Όσον αφορά στο κομμάτι των σκαριφημάτων, στην εικόνα 6.9(α) φαίνεται το σκαρίφημα που έδωσε ο Sterling για το πείραμα, στο οποίο δεν είχε εφαρμοστεί αρχική προφόρτιση. Με αριθμούς σημειώνει τη σειρά κατά την οποία δημιουργήθηκαν οι ρωγμές. Φαίνεται πως οι πρώτες ρωγμές δημιουργήθηκαν στη μεσαία διατομή της δοκού, όπως συνέβη και στην περίπτωση της προσομοίωσης στο PFC. Οι επόμενες ρωγμές που δημιουργήθηκαν στη δοκό του Sterling ήταν αυτές κοντά στη δεξιά στήριξη της δοκού, σε αντίθεση με τη δική μας προσομοίωση. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός πως η δοκός του Sterling στη δεξιά πλευρά της

παρουσιάζει φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως αναφέρει ο ίδιος στο σκαρίφημα του. Έπειτα, η σειρά πρόκλησης των ρωγμών, αλλά και η θέση τους, συμπίπτει σε μεγάλο βαθμό με αυτές του συνθετικού πετρώματος. Διαδόθηκαν περαιτέρω οι ρωγμές στις στηρίξεις και εν συνεχεία αυτές στο πάνω μέρος της δοκού, μέχρι την τελική αστοχία της.

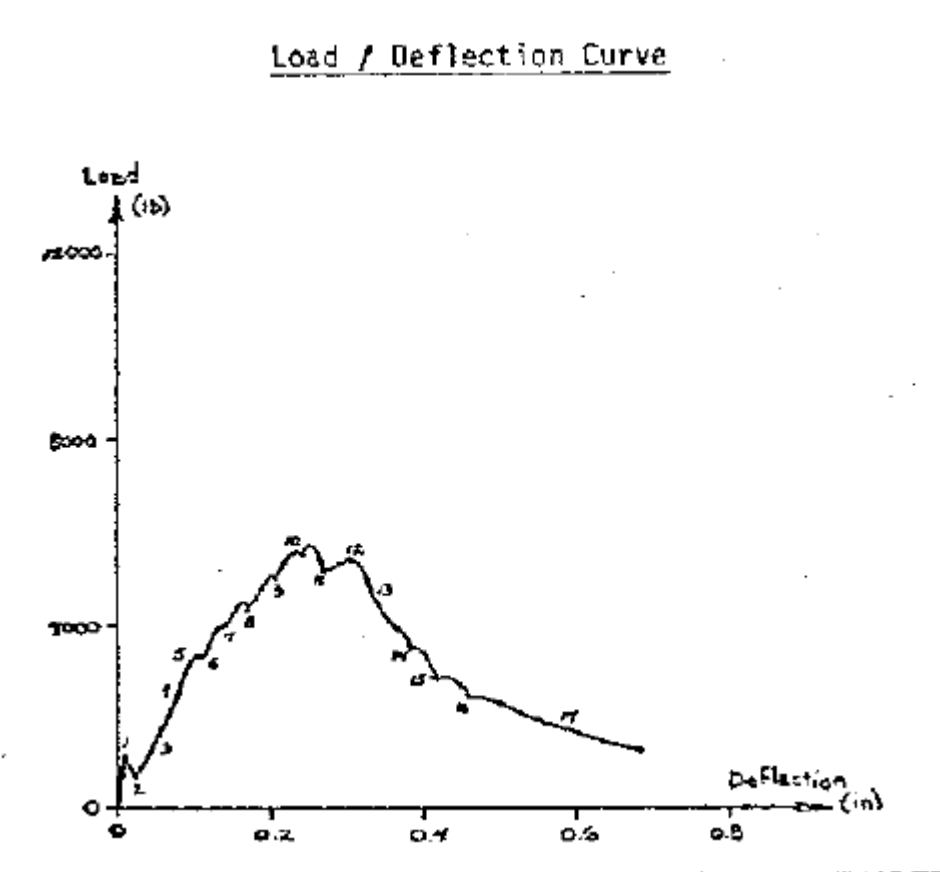


Εικ. 6.9(α): Σκαρίφημα αστοχίας δοκού Sterling (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση)



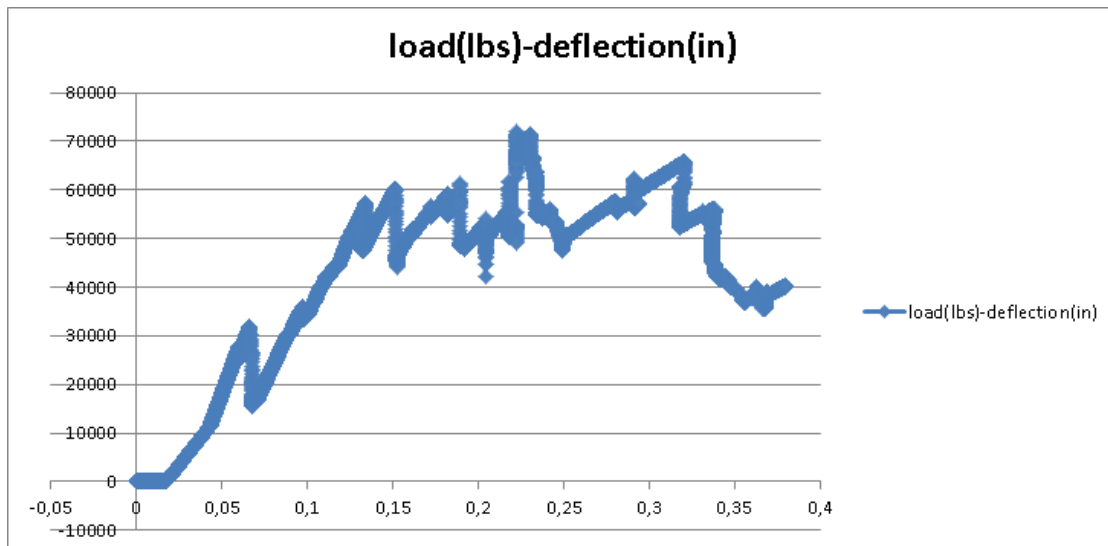
Εικ. 6.9(β): Δοκός μετά το πέρας της προσομοίωσης στο PFC (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση)

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης που δίνει ο Sterling για το συγκεκριμένο πείραμα.

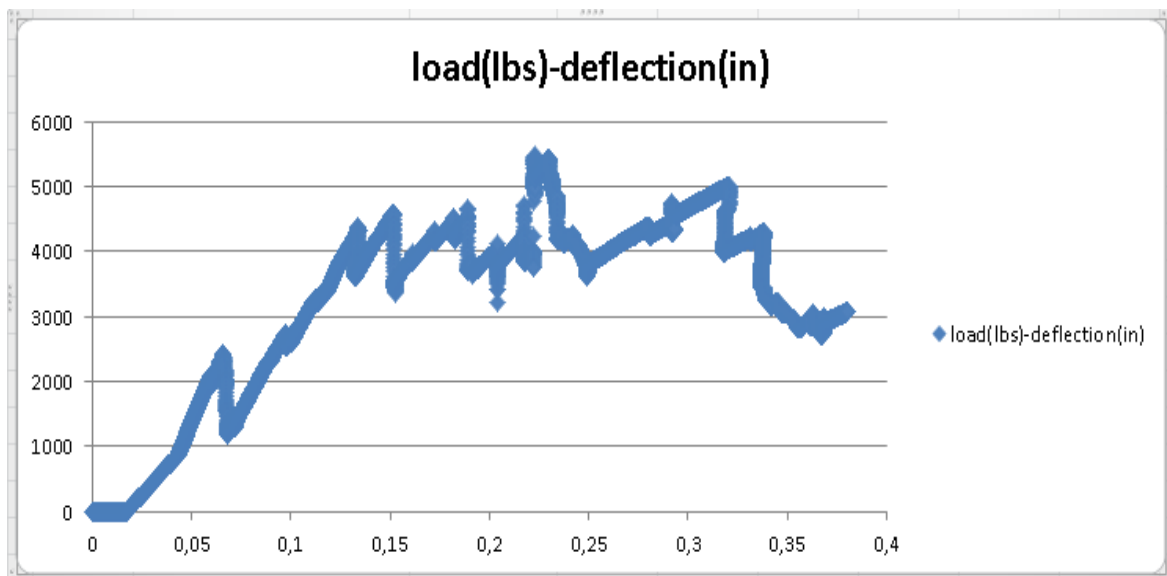


Σχ. 6.2: Καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης Sterling (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση)

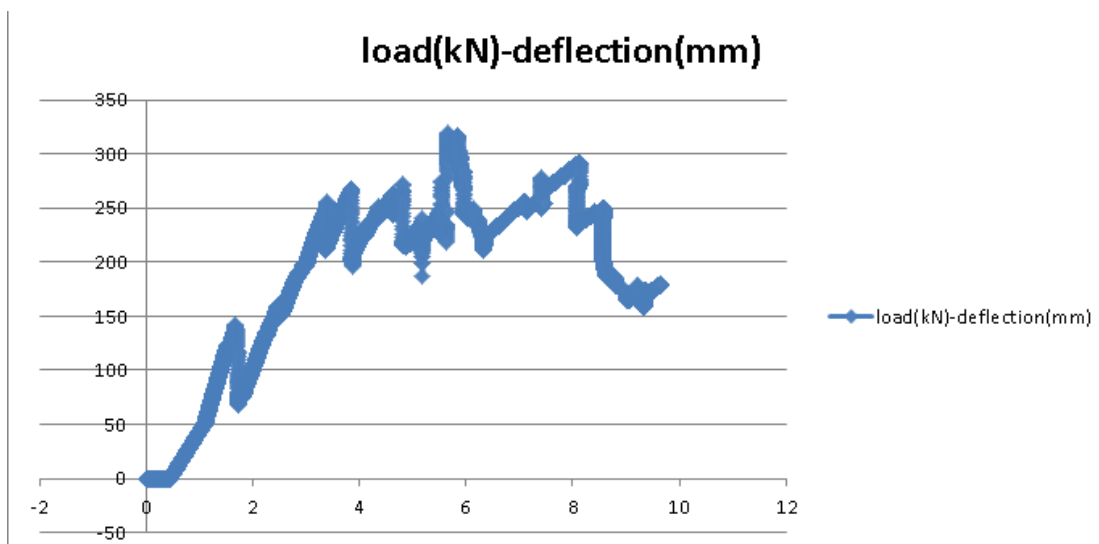
Για να κατασκευαστεί αντίστοιχο διάγραμμα και να γίνουν οι απαιτούμενες συγκρίσεις, έπρεπε να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις, καθώς δεν ήταν δυνατό να ληφθούν από το PFC απ' ευθείας στοιχεία για το φορτίο και το βέλος κάμψης. Για τον υπολογισμό του φορτίου λήφθηκαν οι χρονοϊστορίες της δύναμης που δέχονταν οι μπάλες – τοίχοι στήριξης της δοκού. Καθώς το PFC δε δίνει τη δυνατότητα λήψης χρονοϊστορίας μετατόπισης μπάλας – τοίχου, ο υπολογισμός του βέλους κάμψης έγινε μέσω της μεταβολής της θέσης των σωματιδίων που βρίσκονταν στο μέσο της κάτω διατομής της δοκού, κάτω δηλαδή από τη μπάλα – τοίχο που τη φόρτιζε. Μέσω της αρχικής και τελικής θέσης των προαναφερθέντων σωματιδίων, αλλά και της θέσης τους κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης λήφθηκαν τα δεδομένα για την κατασκευή της καμπύλης φορτίου – βέλους κάμψης. Κατασκευάστηκε το ίδιο διάγραμμα σε kN-mm, αλλά και σε lbs-inches, ώστε να γίνει ευκολότερα η σύγκριση με το αντίστοιχο του Sterling.



Σχ. 6.3(α): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) PFC (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση)



Σχ. 6.3(β): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) ανηγμένο στις διαστάσεις της δοκού του Sterling (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση)



Σχ. 6.3(γ): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (kN-mm) PFC (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση)

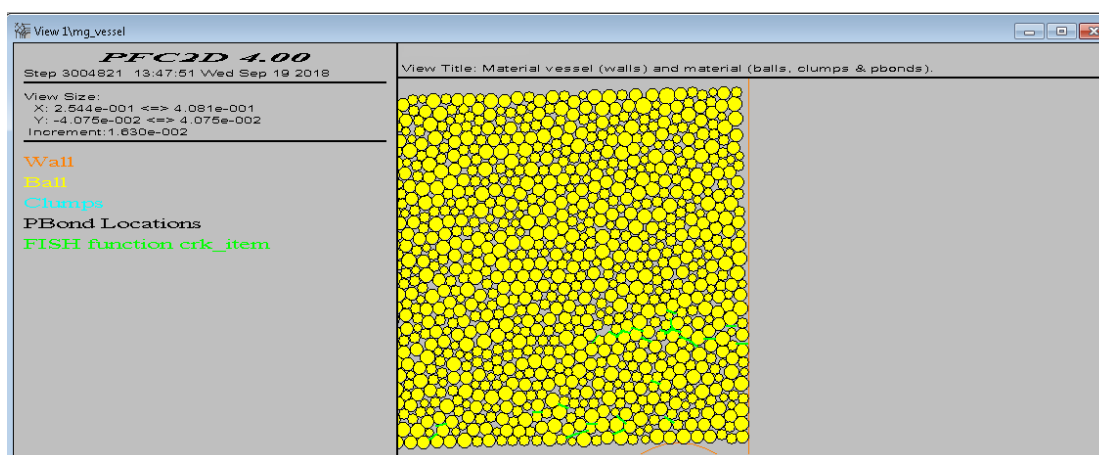
Αρχικά, συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα φαίνεται μια μεγάλη διαφορά στις τιμές του άξονα των φορτίων. Το διάγραμμα του Sterling παρουσιάζει ως μέγιστο φορτίο που ασκείται στη δοκό τις περίπου 5800 lbs, ενώ στο διάγραμμα που προέκυψε μέσω του PFC η αντίστοιχη τιμή είναι 71905,14 lbs. Η διαφορά αυτή εξηγείται εύκολα, αν αναλογιστεί κανείς ότι η έκδοση του PFC που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της απεικόνισης και επεξεργασίας σε δύο διαστάσεις. Οι δοκοί που χρησιμοποίησε ο Sterling στα πειράματά του, είχαν διαστάσεις 660mm x 76.2mm x 76.2mm. Η διάσταση 76.2mm είναι αυτή που δεν μπορεί να απεικονιστεί στο PFC. Έτσι, το πρόγραμμα εξάγει τα αποτελέσματα του ανά μονάδα μήκους και συνεπώς, θεωρείται ότι η διάσταση του πάχους στην περίπτωσή μας είναι 100cm (39.37 in). Συγκρίνοντας, λοιπόν τους αντίστοιχους λόγους για τα μέγιστα φορτία και τα πάχη στις δύο περιπτώσεις προκύπτει το εξής:

- $(71905,14 / 5800) \text{ lbs} = 12.4$
- $(39.37 / 3) \text{ in} = 13.1$

Οι δύο λόγοι έχουν μεταξύ τους μικρή απόκλιση και συνεπώς φαίνεται πως η προσομοίωση συμφωνεί με το πείραμα του Sterling, όσον αφορά στο κομμάτι μέγιστου φορτίου που δέχεται η δοκός.

Η μορφολογία της καμπύλης του Sterling, φαίνεται να παρουσιάζει ίδια μορφή και για τιμές βέλους κάμψης μεγαλύτερες από αυτή που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο. Ωστόσο, η καμπύλη του σχήματος 6.3(β) διακόπτεται όταν το βέλος κάμψης προσεγγίσει τις 0,4 inches. Είναι το σημείο στο οποίο η καμπύλη του Sterling έχει για τελευταία φορά ανοδική κατεύθυνση (όπως έχει και αυτή που προέκυψε από το PFC). Για να επιβεβαιωθεί μέχρι τέλους η ταύτιση των δύο καμπυλών θα έπρεπε το πρόγραμμα να είχε τρέξει κάποιους παραπάνω κύκλους φόρτισης, έως ότου το βέλος κάμψης φτάσει τις 0.7 inches.

Μετά το τέλος της προσομοίωσης ήταν αναμενόμενο, η δοκός να έχει καμφθεί. Η κάμψη της αυτή έχει ως αποτέλεσμα το ανώτερο τμήμα των δύο πλευρών της να μη βρίσκεται πλέον σε επαφή με τους πλευρικούς τοίχους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, παρατηρείται ότι εκ των σωματιδίων που αρχικά βρίσκονταν σε επαφή με τους πλευρικούς τοίχους, μόνο το 33,3% εξ'αυτών συνεχίζει και μετά το πέρας της δοκιμής.



Εικ. 6.10: Μπάλες που δεν είναι σε επαφή με τον τοίχο στο τέλος της δοκιμής (δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση)

6.3.2 Προσομοίωση δοκιμής κάμψης με αρχική προφόρτιση 3.45 MPa (500psi)

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις με αρχική προφόρτιση της δοκού ήταν η ίδια με αυτή της προσομοίωσης χωρίς αρχική προφόρτιση. Ίδιες ήταν και οι ιδιότητες που δόθηκε σε καθένα από τα στοιχεία της διάταξης (π.χ. δυστροπία μπαλών – τοίχων, δυστροπία πλευρικών τοίχων, ταχύτητα φόρτισης της άνω μπάλας – τοίχου).

Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση θα έπρεπε η δοκός με κάποιο τρόπο να αποκτήσει μία αρχική προφόρτιση. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε, για να επιτευχθεί αυτό ήταν να δοθεί μία ταχύτητα στους πλευρικούς τοίχους, πριν από την τοποθέτηση της διάταξης της δοκιμής κάμψης, οι οποίοι έτσι θα φόρτιζαν τη δοκό (αντίστοιχα και ο Sterling πίεζε τις δοκούς του με τις πλευρικές πλάκες). Οι οριζόντιες ταχύτητες που δόθηκαν στους πλευρικούς τοίχους, ώστε να πετύχουν την εκάστοτε αρχική προφόρτιση ήταν 10^{-3} m/s. Η μοναδική διαφορά στις ιδιότητες της διάταξης με την προσομοίωση της δοκού χωρίς αρχική προφόρτιση ήταν ο συντελεστής τριβής που επιλέχθηκε ανάμεσα στους τοίχους και τα σωματίδια του συνθετικού πετρώματος. Σε αυτή την περίπτωση δόθηκε συντελεστής τριβής 0, ώστε να μην αναλαμβάνουν οι πλευρικοί τοίχοι κάθετα φορτία κατά τη διαδικασία της προφόρτισης και να αναληφθούν όλα από τους τοίχους στήριξης κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης. Λόγω της τοποθέτησης μηδενικού συντελεστή τριβής, κατά τη διαδικασία προφόρτισης της δοκού αφαιρέθηκε και ο συντελεστής βαρύτητας, ώστε να μην ολισθαίνει η δοκός κατά μήκος των πλευρικών τοίχων. Στην εικόνα 6.11 φαίνεται το αρχείο με τις εντολές για την προετοιμασία της δοκιμής προφόρτισης των 3.45 MPa.

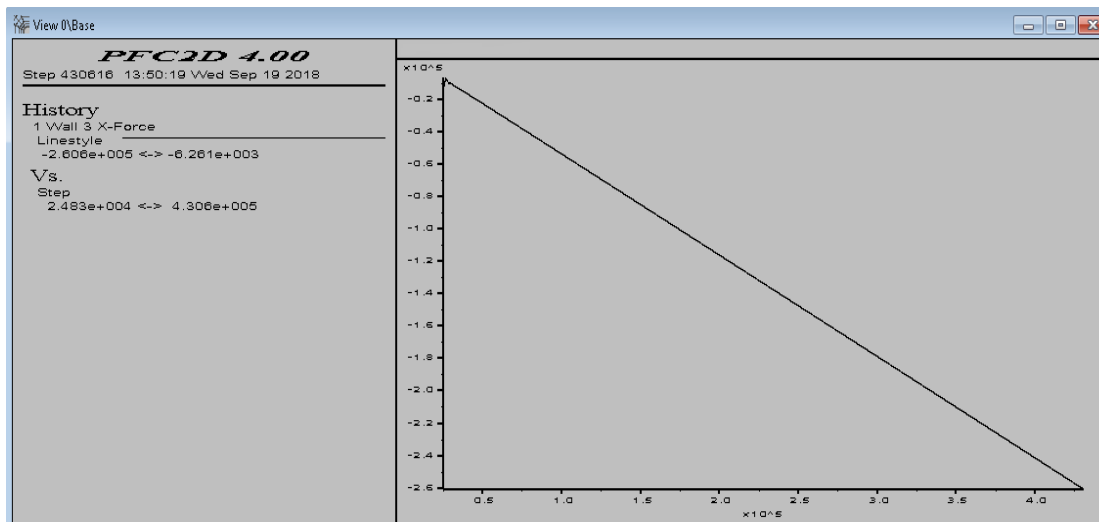
```

prestress_3.45_fr0 - Notepad
File Edit Format View Help
rrestore beam5-spc.sav
;=====
;=====
set logfile prestress_3.45.log
set log on
;-----
wall id=3 kn=2.74e11 ks=1.096e11
wall id=4 kn=2.74e11 ks=1.096e11
;-----
wall prop xvel=1.0e-3 id=3
wall prop xvel=-1.0e-3 id=4
wall prop fri=0 id=3
wall prop fri=0 id=4
;=====
delete wall 1
delete wall 2
set hist_rep=25
set grav 0 0
;-----
prop xdis 0
prop ydis 0
prop xvel 0
prop yvel 0
;-----
history wall xforce id=3
history wall xforce id=4
history wall yforce id=3
history wall yforce id=4
;=====
set echo off
call %fist%\2d_3d\crk.fis
set echo on
crk_init
;=====
plot add fish crk_item
crk_ctype=0
;-----
hist crk_num
hist crk_num_cnf
hist crk_num_csf

```

Εικ. 6.11: Αρχείο επιβολής αρχικής προφόρτισης 500 psi

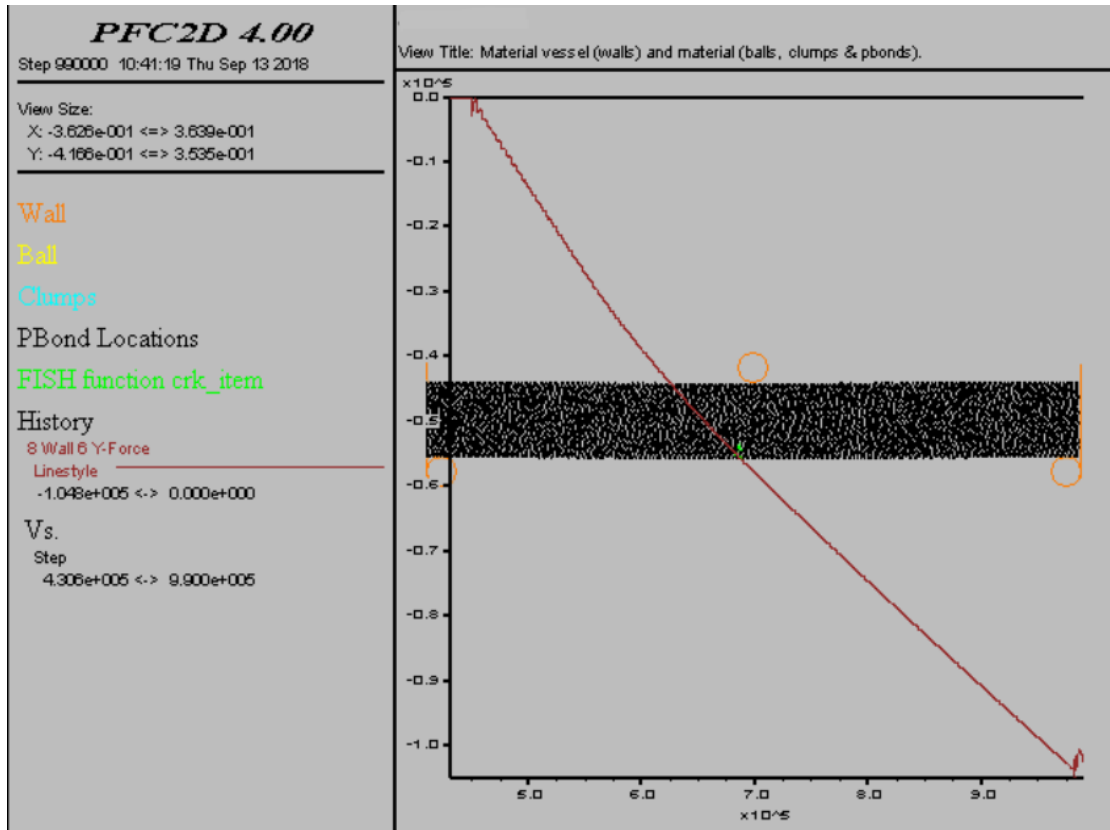
Η αρχική προφόρτιση που θα έπρεπε να επιτευχθεί σε κάθε περίπτωση ήταν συγκεκριμένη, βάσει αυτών που είχε χρησιμοποιήσει στα πειράματά του ο Sterling. Για να συμβεί αυτό, αρχικά το πρόγραμμα αφέθηκε να τρέχει για πολλούς κύκλους, ώστε στη συνέχεια, μέσα από το διάγραμμα της οριζόντιας δύναμης που θα ασκούσαν στους πλευρικούς τοίχους σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης, να βρεθεί πόσοι κύκλοι φόρτισης απαιτούνταν για την επίτευξη των συγκεκριμένων τιμών προφόρτισης. Για επιφάνεια φόρτισης $0,0762\text{m}^2$ ($0.0762\text{m} \times 1\text{m}$ στο PFC^{2D}) και σύμφωνα με τον τύπο $\sigma = F/A$, υπολογίστηκε η δύναμη που απαιτείται για την επίτευξη της εκάστοτε τιμής προφόρτισης και έπειτα αντιστοιχίζονταν με τους κύκλους φόρτισης που απαιτούνταν για να φτάσει ως αυτή. Όπως γίνεται αντιληπτό, ανάμεσα σε εκατομμύρια κύκλους που τρέχει το πρόγραμμα, δεν ήταν δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός του αριθμού των κύκλων που απαιτούνταν για την επίτευξη συγκεκριμένης αρχικής προφόρτισης, με αποτέλεσμα η αρχική προφόρτιση που επιτεύχθηκε να έχει μικρές αποκλίσεις από αυτές που έδωσε ο Sterling, γεγονός που θα προκαλέσει και ποσοτικές διαφορές στα τελικά συγκρινόμενα διαγράμματα.



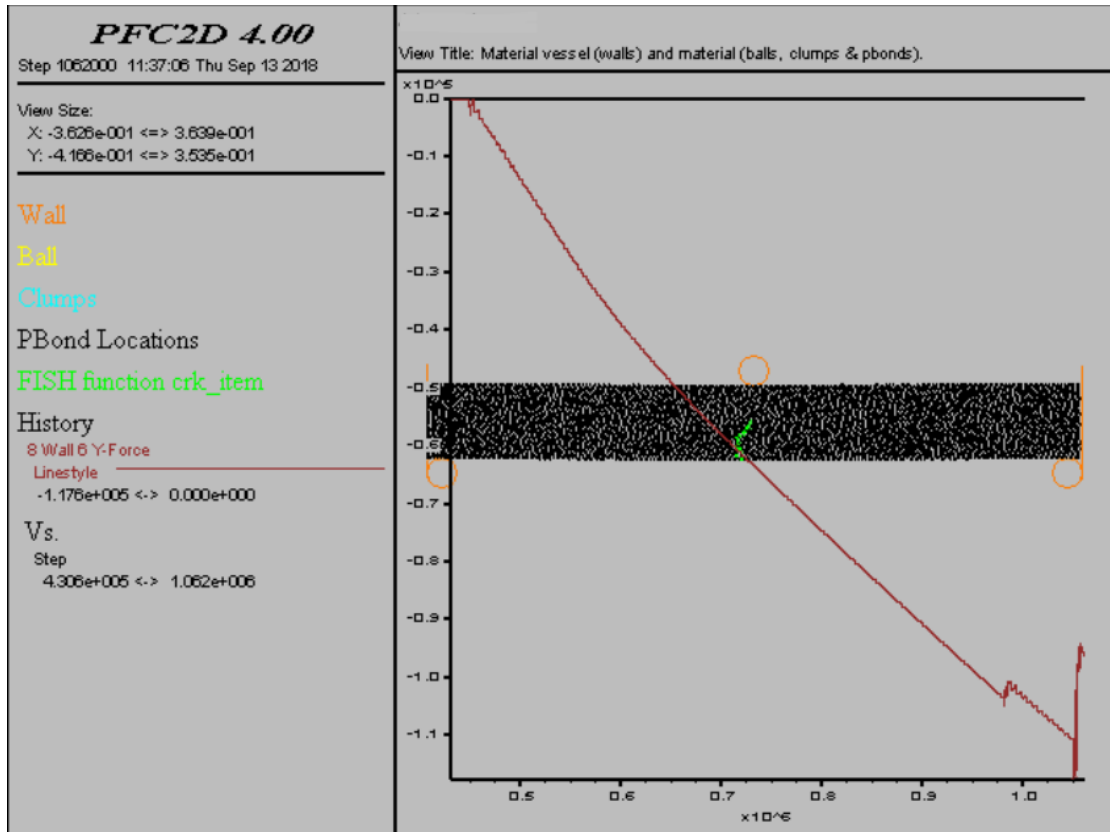
Σχ. 6.4: Διάγραμμα οριζόντιας δύναμης (N) – κύκλου φόρτισης μετά την επιβολή αρχικής προφόρτισης 500 psi

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4, όπου απεικονίζεται το διάγραμμα της οριζόντιας δύναμης που ασκείται στον πλευρικό τοίχο σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης, στο τέλος της προφόρτισης ο τοίχος δέχεται δύναμη ίση με 260,6 kN. Θεωρώντας ως επιφάνεια δράσης της δύναμης τα $0,0762\text{m}^2$, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η αρχική προφόρτιση που έχει επιβληθεί τελικά στη δοκό είναι $\sigma = 260,6 \text{ kN} / 0.0762\text{m}^2 = 3,42 \text{ MPa}$, που αντιστοιχούν σε 496 psi (ο Sterling είχε θέσει 500 psi) .

Ξεκινώντας λοιπόν τη διαδικασία της κάμψης της δοκού, η πρώτη αστοχία επέρχεται ύστερα από περίπου 570 χιλιάδες κύκλους (λίγο αργότερα από ότι στη δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση). Οι πρώτες εφελκυστικές ρωγμές εμφανίζονται και πάλι στο μέσο περίπου της κάτω διατομής της δοκού (εικόνα 6.12(α)). Συνεχίζοντας τη δοκιμή, το φαινόμενο εξελίσσεται και οι ρωγμές διαδίδονται και πάλι προς το άνω μέρος της δοκού (εικόνα 6.12(β)).

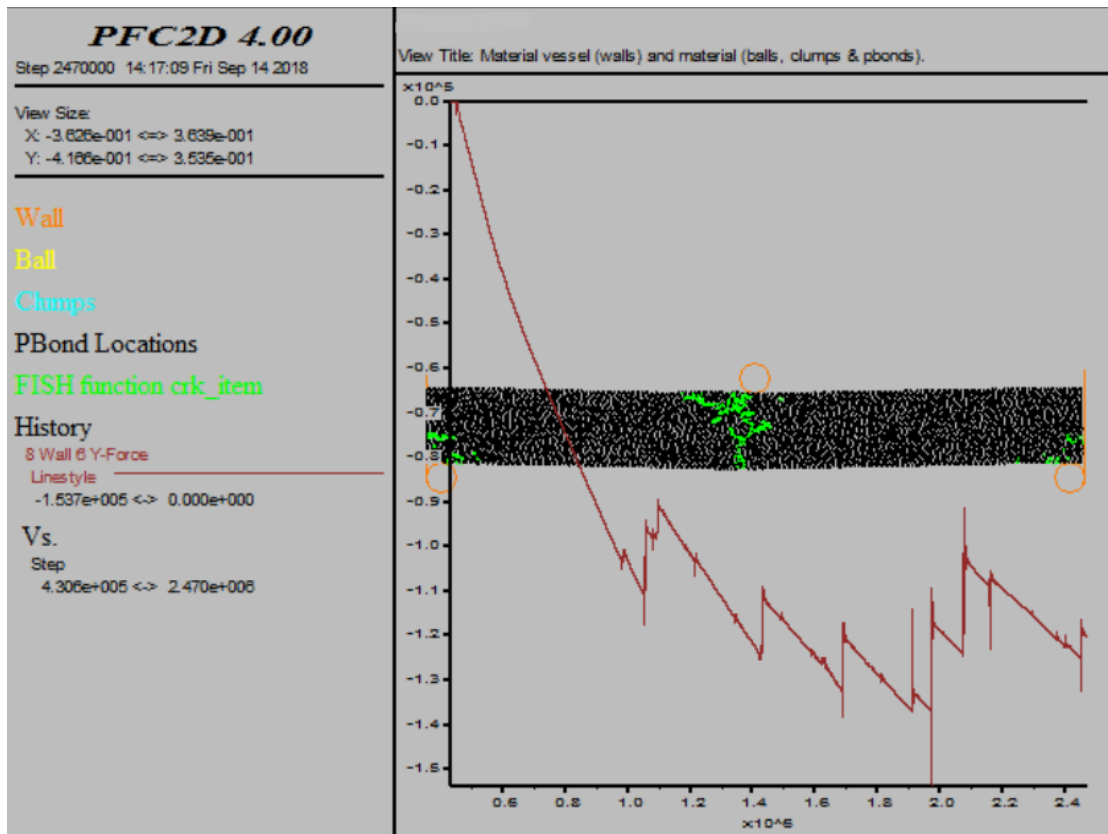


Εικ. 6.12(α): Εμφάνιση πρώτων ρωγμών (αρχική προφόρτιση 500 psi)



Εικ. 6.12(β): Διάδοση των ρωγμών στο μέσο της δοκού (αρχική προφόρτιση 500 psi)

Στο στάδιο που ακολουθεί οι ρωγμές στο μέσο της δοκού συνεχίζουν να διαδίδονται, ενώ μετά από αρκετή ώρα η δοκός ξεκινά να αστοχεί και στις στηρίξεις.



Εικ. 6.12(γ): Εμφάνιση ρωγμών κοντά στις στηρίξεις (αρχική προφόρτιση 500 psi)

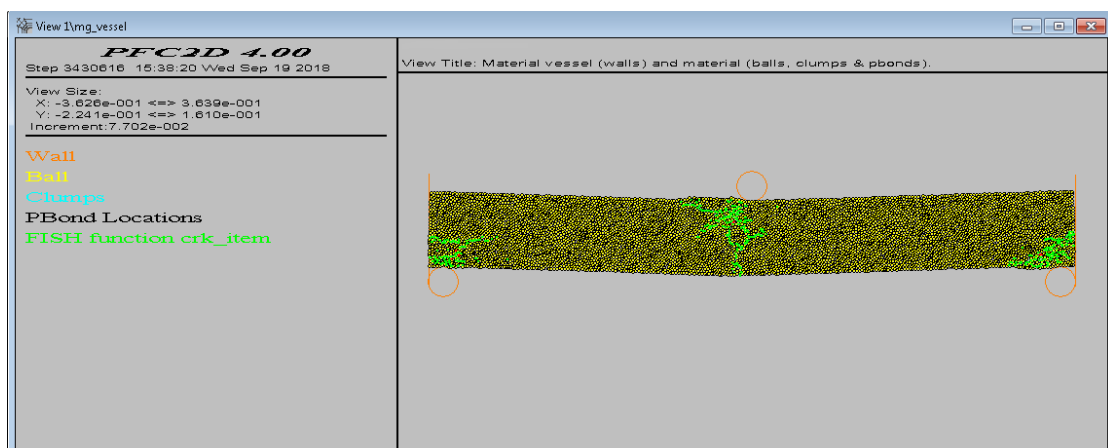
Σ' αυτή την περίπτωση, παρατηρείται πως ο τρόπος αστοχίας στις δύο περιπτώσεις, μεταξύ δηλαδή του φυσικού πειράματος του Sterling και της προσομοίωσης στο PFC, δεν ταυτίζεται απόλυτα. Παρά το γεγονός ότι η θραύση της δοκού ξεκινά από το κέντρο της και στις δύο περιπτώσεις, όπως τονίζει ο Sterling στις σημειώσεις του και ότι υπάρχει ομοιότητα και στον τρόπο θραύσης στις στηρίξεις της δοκού και του συνθετικού μοντέλου, το ενδιάμεσο στάδιο διαφέρει. Στην περίπτωση της δοκού του Sterling, αμέσως μετά τη στιγμή που το φορτίο φτάσει στη μέγιστη τιμή του, συμβαίνει μία ξαφνική διαγώνια αστοχία, όπως επισημαίνει. Η διαφορά αυτή, μπορεί να οφείλεται είτε στον τρόπο με τον οποίο "γεννήθηκε" η δοκός στο PFC και τη θέση των σωματιδίων (εντολή set random) είτε στο γεγονός ότι η δοκός στο PFC δεν έχει φτάσει την αρχική προφόρτιση (έστω και για λίγο) που είχε η πραγματική δοκός του Sterling είτε στο συνδυασμό των δύο, δηλαδή η συνθετική δοκός, με τις συγκεκριμένες θέσεις των σωματιδίων, να απαιτεί μεγαλύτερες τιμές αρχικής προφόρτισης ώστε να παρουσιάσει την ξαφνική διαγώνια ρωγμή. Τα δύο τελευταία σενάρια επιβεβαιώνονται ως πιθανά, καθώς η ξαφνική διαγώνια ρωγμάτωση

προέκυψε σε προσομοίωση με μεγαλύτερη τιμή αρχικής προφόρτισης. Επιπλέον, υπάρχει και το ενδεχόμενο, οι τιμές της αρχικής προφόρτισης που δίνει ο Sterling να μην είναι απόλυτα ακριβείς.

Beam Crack Patterns

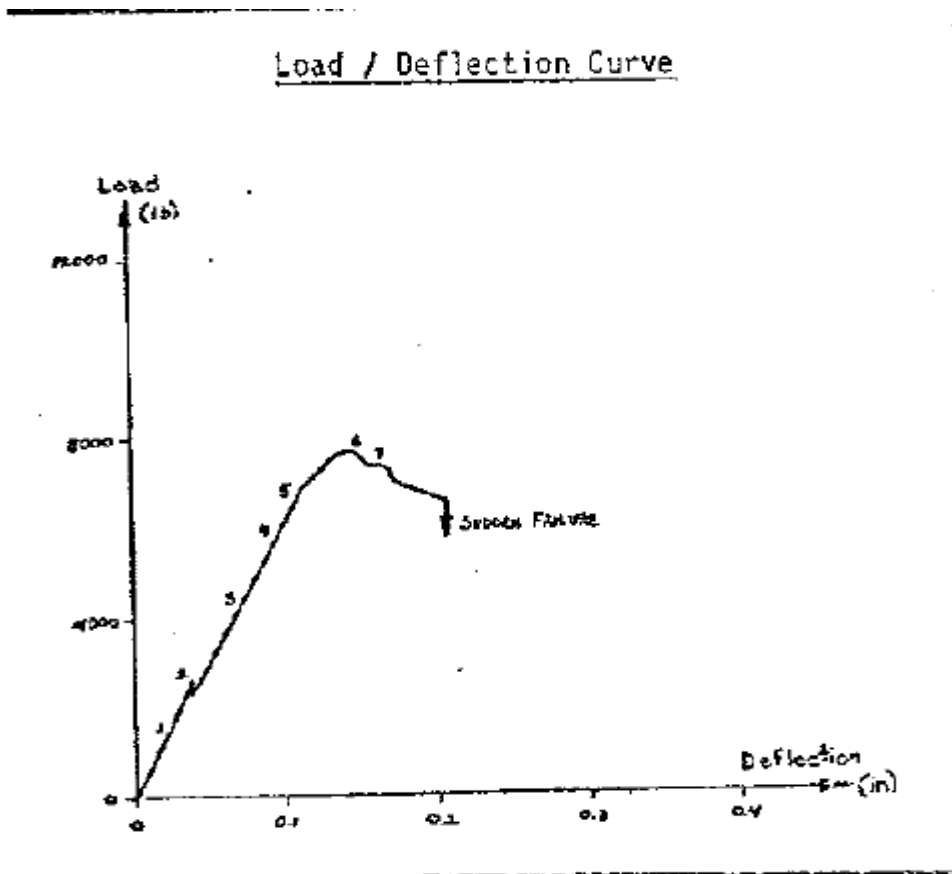


Εικ. 6.13(α): Σκαρίφημα αστοχίας δοκού Sterling (αρχική προφόρτιση 500 psi)



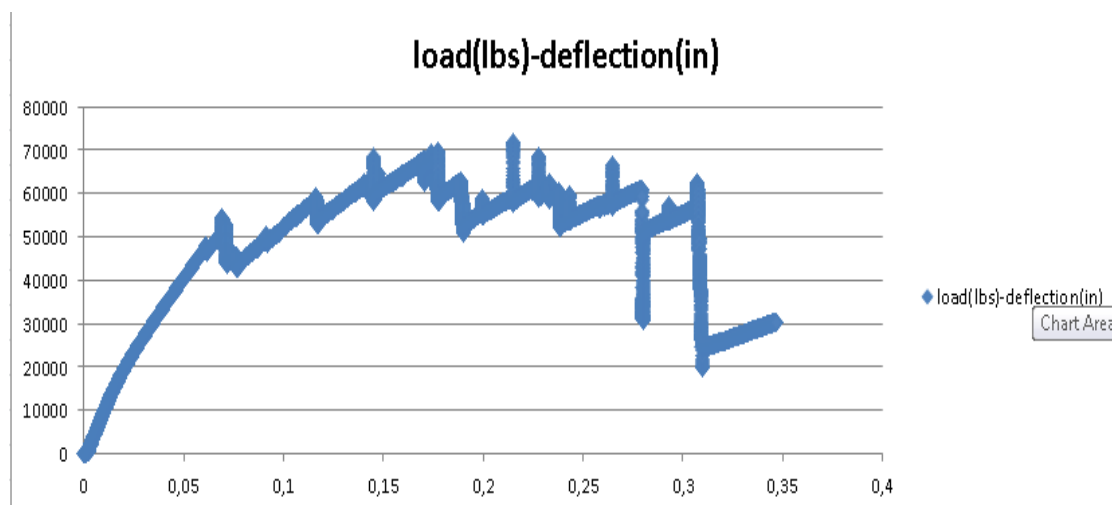
Εικ. 6.13(β) Δοκός μετά το πέρας της προσομοίωσης στο PFC (αρχική προφόρτιση 500 psi)

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης που δίνει ο Sterling για το συγκεκριμένο πείραμα.

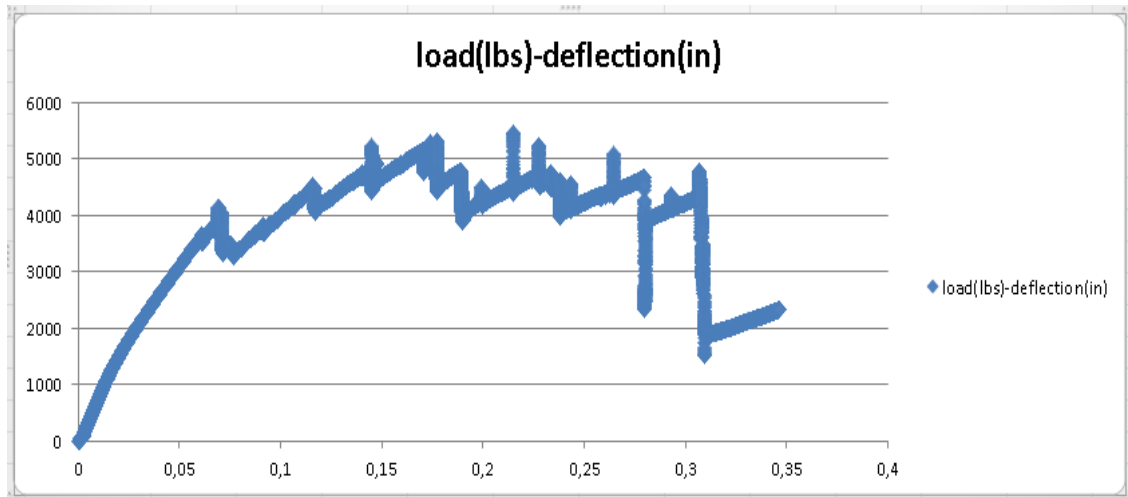


Σχ. 6.5: Καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης Sterling (αρχική προφόρτιση 500 psi)

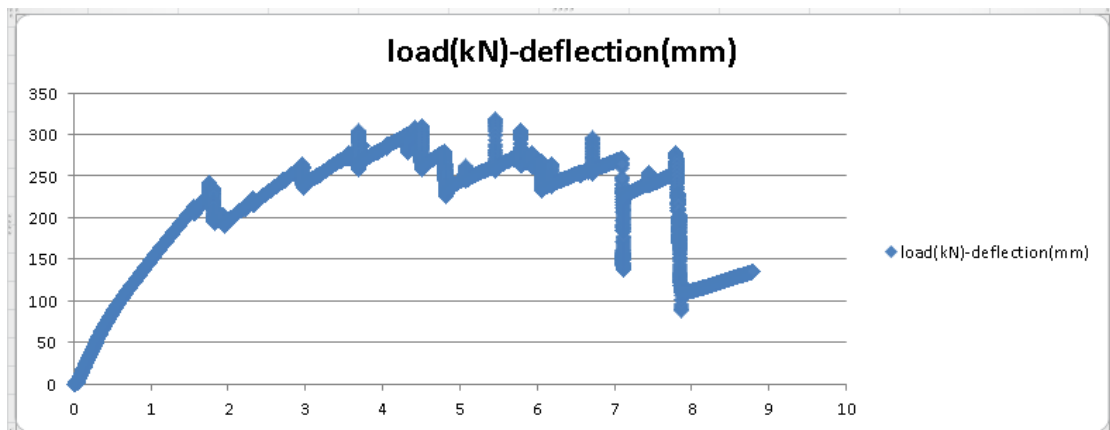
Διαφορές στις δύο περιπτώσεις συναντώνται και στο επίπεδο της σύγκρισης μεταξύ των διαγραμμάτων φορτίου – βέλους κάμψης.



Σχ. 6.6(α): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) PFC (αρχική προφόρτιση 500 psi)



Σχ. 6.6(β): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) ανηγμένο στις διαστάσεις της δοκού του Sterling (αρχική προφόρτιση 500 psi)



Σχ. 6.6(γ): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (kN-mm) PFC (αρχική προφόρτιση 500 psi)

Ο Sterling στις σημειώσεις του για το συγκεκριμένο πείραμα επισημαίνει την ύπαρξη ενός μικρού σκαμπανεβάσματος στην καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης. Αυτό το «βήμα» φαίνεται περίπου να αντιστοιχεί σε βέλος κάμψης 0,05 inches. Αντίστοιχο «βήμα» παρατηρείται και στην καμπύλη που προέκυψε από το PFC. Όσον αφορά στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να δεχθεί η δοκός, υπάρχει απόκλιση μεταξύ των δύο διαγραμμάτων. Σύμφωνα με την αντιστοιχία που θα έπρεπε να

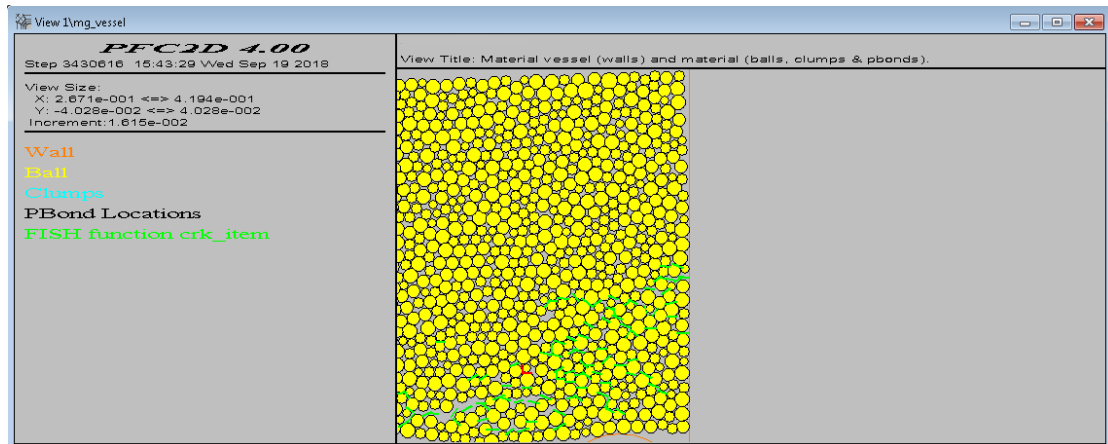
υπάρχει για την εφαρμογή στις διαστάσεις του μοντέλου του PFC, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη προσομοίωση προκύπτουν οι παρακάτω λόγοι:

- $(71705 / 7800) \text{ lbs} = 9.2$
- $(39.37 / 3) \text{ in} = 13.1$

Το μέγιστο φορτίο που δίνεται από τον Sterling είναι 7800 lbs. Για να υπήρχε ταύτιση μεταξύ των περιπτώσεων θα έπρεπε σύμφωνα με τον παραπάνω λόγο η μέγιστη τιμή που θα προέκυπτε από το PFC να ήταν περίπου $7800 * 13.1 = 102180$ lbs. Όμως, ως ένα σημείο η απόκλιση αυτή ήταν αναμενόμενη, καθώς οι δύο δοκοί δεν είχαν την ίδια ακριβώς αρχική προφόρτιση. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στη διαφοροποίηση, έπαιξε και ο τύπος των δεσμών που χρησιμοποιήθηκε.

Επιπλέον, παρά το γεγονός ότι η μέγιστη τιμή των φορτίων και στα δύο διαγράμματα παρατηρείται για παρεμφερή τιμή του βέλους κάμψης, η συνέχεια της καμπύλης παρουσιάζει διαφορές. Στις 0.2 inches, ο Sterling παρουσιάζει την ξαφνική διαγώνια αστοχία που προέκυψε ως κατακόρυφη πτώση του διαγράμματός του. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η αστοχία αυτή δεν παρουσιάστηκε στην προσομοίωσή μας, επομένως και η καμπύλη μας δεν είχε την ανάλογη συνέχεια.

Λόγω της κάμψης, στο τέλος της δοκιμής, ένα τμήμα της δοκού δε βρίσκεται σε επαφή με τους πλευρικούς τοίχους. Έτσι, λοιπόν, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.14, ύστερα από 3 εκατομμύρια κύκλους φόρτισης μόνο το 37.5% των σωματιδίων του συνθετικού μοντέλου βρίσκεται ακόμα σε επαφή με τους πλευρικούς τοίχους.



Εικ. 6.14: Μπάλες που δεν είναι σε επαφή με τον τοίχο στο τέλος της δοκιμής (αρχική προφόρτιση 500 psi)

6.3.3 Προσομοίωση δοκιμής κάμψης με αρχική προφόρτιση 6.9 MPa (1000psi)

Για να επιτευχθεί αρχική προφόρτιση 6.9 MPa χρειάστηκαν διπλάσιοι κύκλοι φόρτισης από τους πλευρικούς τοίχους σε σχέση με την περίπτωση των 3.45 MPa. Οι ιδιότητες και ο τρόπος προετοιμασίας της διάταξης για τη συγκεκριμένη προσομοίωση ήταν ίδια με αυτή της προηγούμενης περίπτωσης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.15.

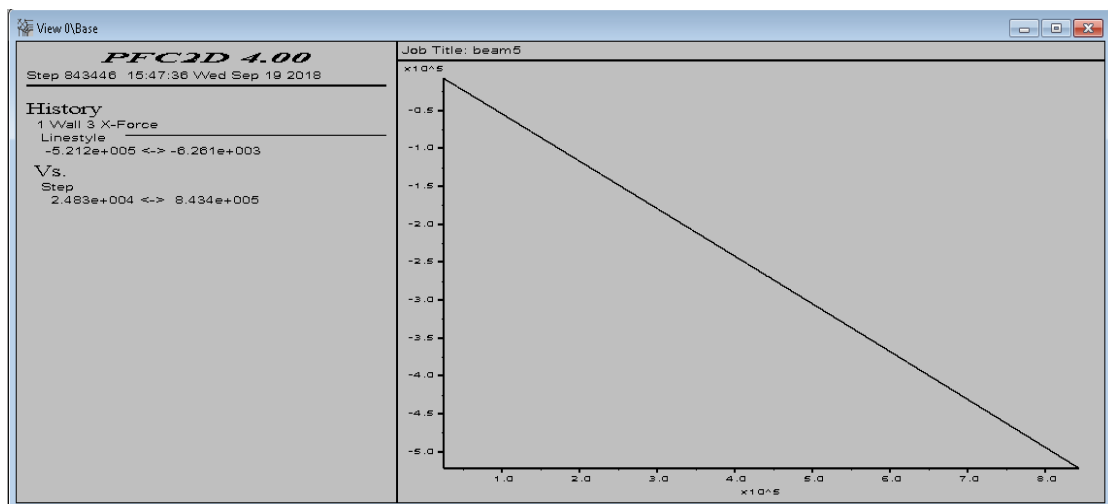
```

prestress_6.9_fr0 - Notepad
File Edit Format View Help
restore prestress_3.45.sav
;=====
;=====
set logfile prestress_6.9.log
set log on
;-----
wall id=3 kn=2.74e11 ks=1.096e11
wall id=4 kn=2.74e11 ks=1.096e11
;-----
wall prop xvel=1.0e-3 id=3
wall prop xvel=-1.0e-3 id=4
wall prop fri=0 id=3
wall prop fri=0 id=4
;=====
delete wall 1
delete wall 2
set hist_rep=25
set grav 0 0
;-----
prop xdis 0
prop ydis 0
prop xvel 0
prop yvel 0
;-----
history wall xforce id=3
history wall xforce id=4
history wall yforce id=3
history wall yforce id=4
;=====
hist crk_num
hist crk_num_cnf
hist crk_num_csf

```

Εικ. 6.15: Αρχείο επιβολής αρχικής προφόρτισης 1000 psi

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι δύσκολος ο προσδιορισμός του ακριβούς αριθμού των κύκλων, ώστε να φτάσουμε σε αρχική προφόρτιση 6.9 MPa.

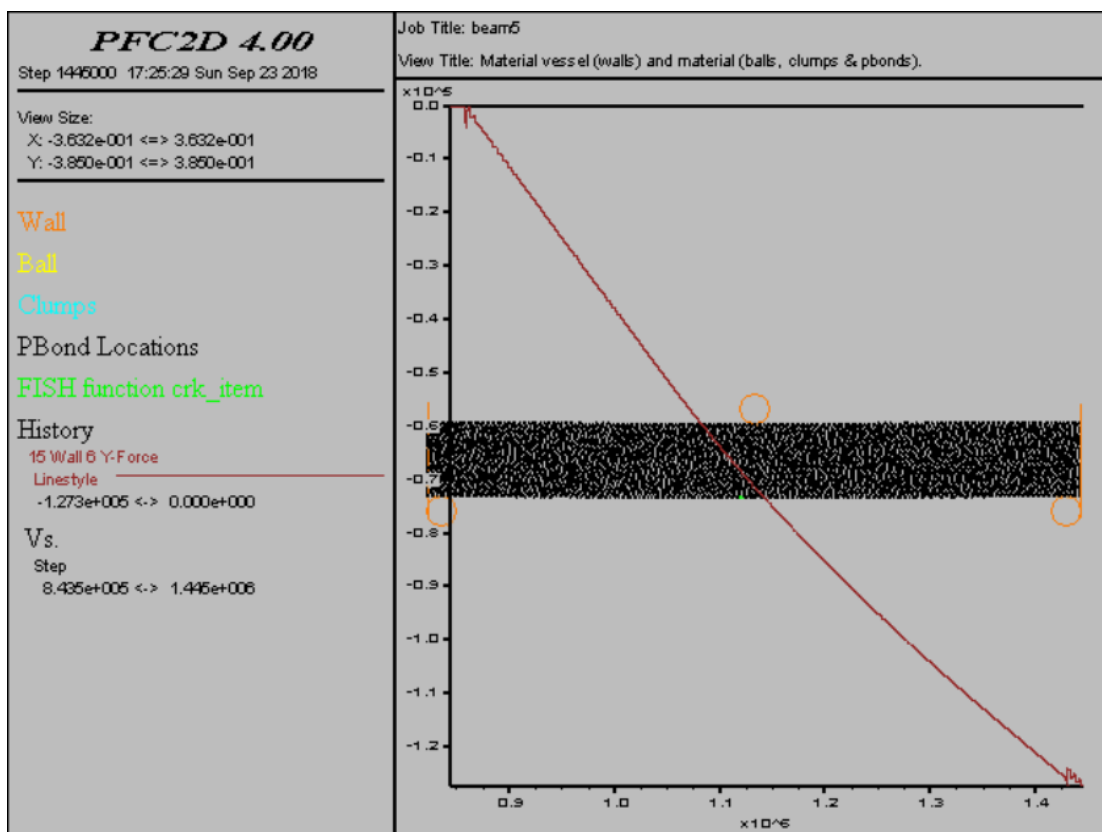


Σχ. 6.7: Διάγραμμα οριζόντιας δύναμης (N) – κύκλου φόρτισης μετά την επιβολή αρχικής προφόρτισης 1000 psi

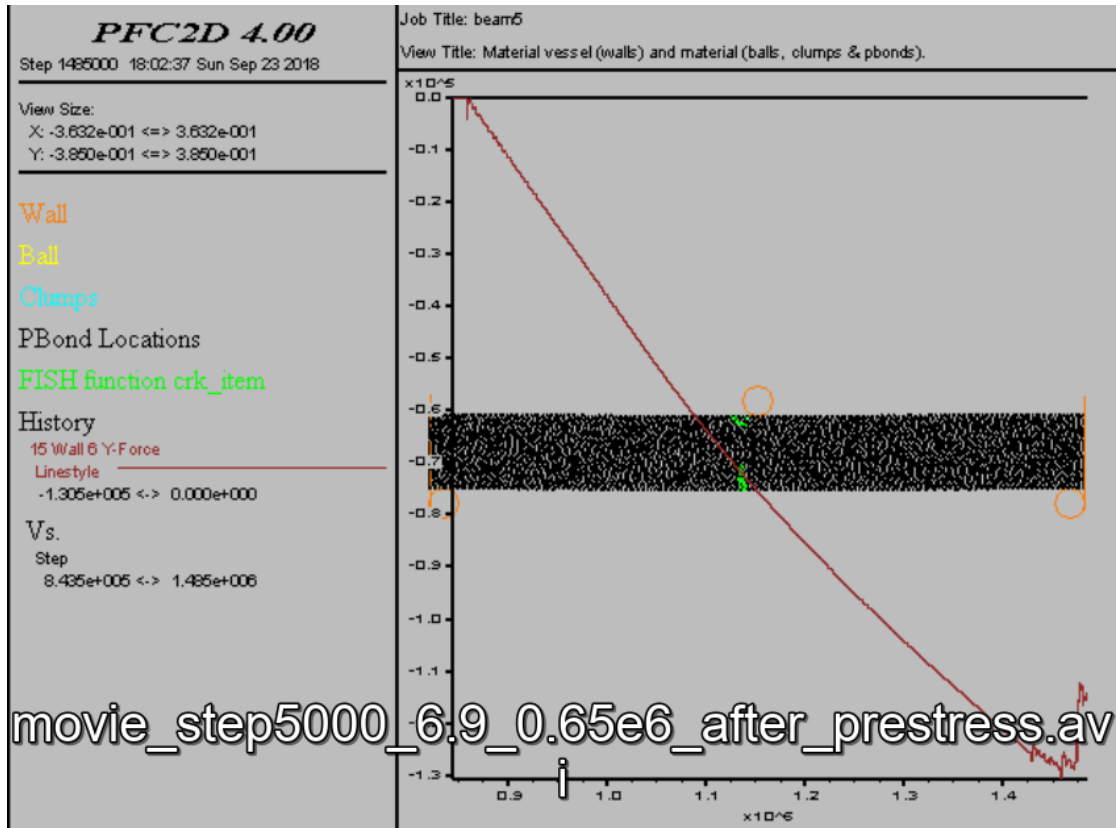
Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.7, όπου απεικονίζεται το διάγραμμα της οριζόντιας δύναμης που ασκείται στον πλευρικό τοίχο σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης, στο τέλος της προφόρτισης ο τοίχος δέχεται δύναμη ίση με 260,6 kN. Θεωρώντας ως επιφάνεια δράσης της δύναμης τα $0,0762\text{m}^2$, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η

αρχική προφόρτιση που έχει επιβληθεί τελικά στη δοκό είναι $\sigma = 521.2 \text{ kN} / 0.0762\text{m}^2 = 6,83 \text{ MPa}$, που αντιστοιχούν σε 990 psi (ο Sterling είχε θέσει 1000 psi) .

Με την έναρξη της δοκιμής κάμψης και για ένα χρονικό διάστημα, η δοκός δεν παρουσιάζει κάποια μορφή αστοχίας. Οι πρώτες εφελκυστικές ρωγμές φαίνεται να παρουσιάζονται ύστερα από περίπου 605 χιλιάδες κύκλους. Αυτό δείχνει ότι η πρώτη αστοχία στη δοκό με αρχική προφόρτιση τα 1000 psi συμβαίνει αργότερα απ' ότι στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Στην εξέλιξη της δοκιμής, εμφανίζονται ρωγμές και στο μέσο της άνω διατομής της δοκού καθώς επίσης και συνεχίζουν να διαδίδονται οι αρχικές στο κάτω μέρος της.

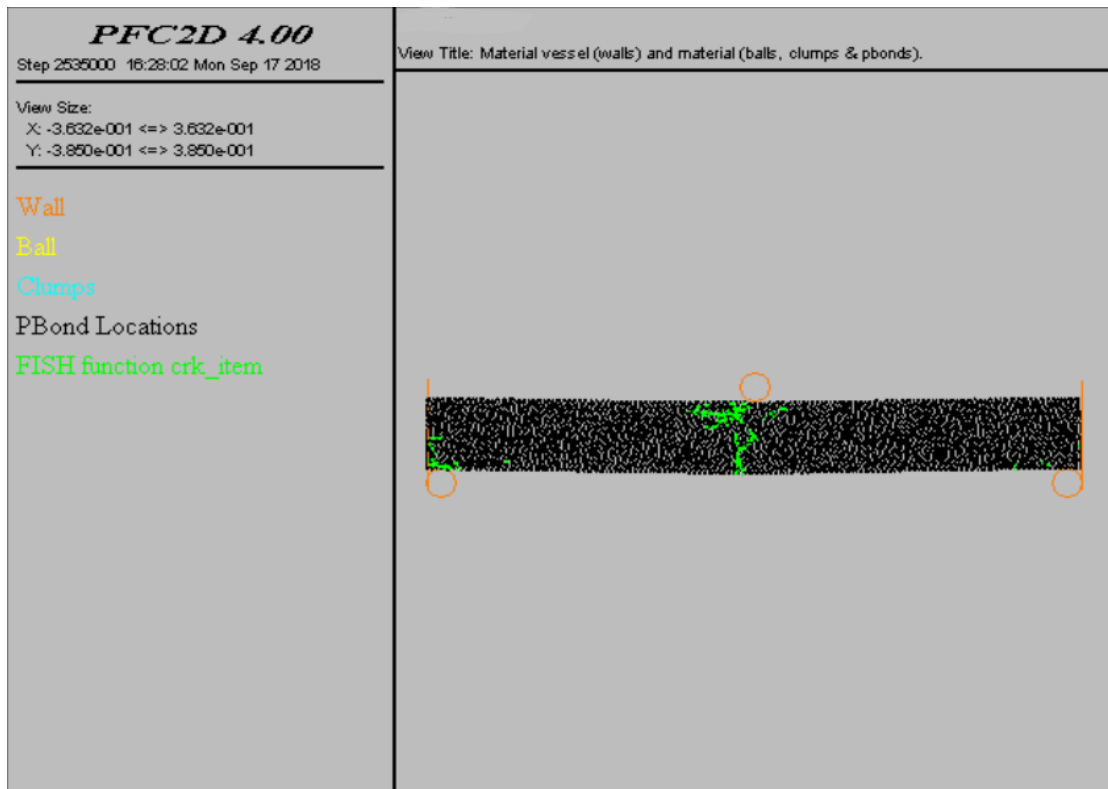


Εικ. 6.16(α): Εμφάνιση πρώτων ρωγμών (αρχική προφόρτιση 1000 psi)



Εικ. 6.16(β): Διάδοση των ρωγμών στο μέσο της δοκού (αρχική προφόρτιση 1000 psi)

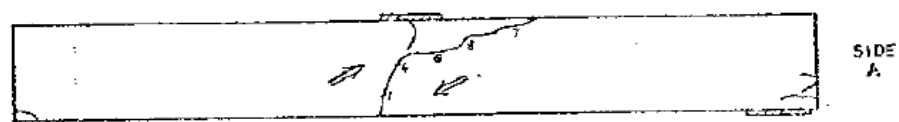
Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, το φαινόμενο που ακολουθεί είναι η δημιουργία ρωγμών κοντά στις στηρίξεις της δοκού.



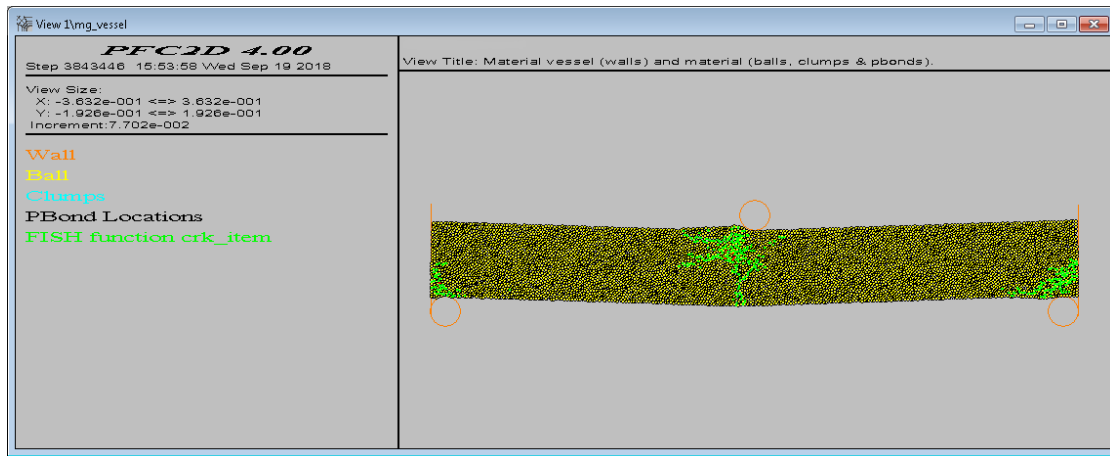
Εικ. 6.16(γ): Εμφάνιση πρώτων ρωγμών κοντά στις στηρίξεις (αρχική προφόρτιση 1000 psi)

Όσον αφορά στη σύγκριση μεταξύ των σχημάτων της αστοχίας των δοκών του Sterling και της προσομοίωσης του PFC, είναι φανερό ότι οι δύο εικόνες βρίσκονται κοντά. Τόσο στις ρωγμές στις στηρίξεις, όσο και ακόμη περισσότερο στις αντίστοιχες στο μέσο της δοκού φαίνεται πως ο τρόπος αστοχίας είναι παρόμοιος. Ωστόσο, ο Sterling στη συγκεκριμένη δοκιμή επισημαίνει πως η αστοχία στις στηρίξεις της δοκού είναι μικρή, κάτι που φαίνεται και από το σκαρίφημα του. Αυτή είναι η μόνη διαφορά μεταξύ των εικόνων 6.17(α) και 6.17(β). Ωστόσο, παρά το γεγονός αυτό, ο τύπος της αστοχίας εξακολουθεί να είναι ίδιος.

Beam Crack Patterns

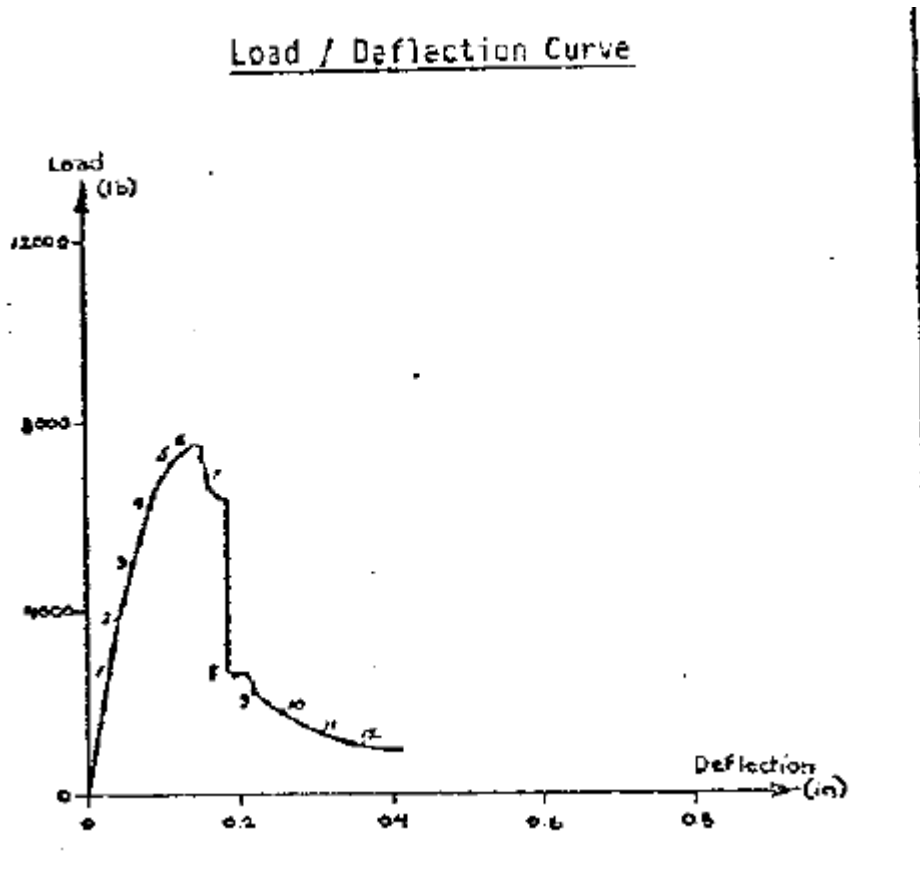


Εικ. 6.17(α): Σκαρίφημα αστοχίας δοκού Sterling (αρχική προφόρτιση 1000 psi)



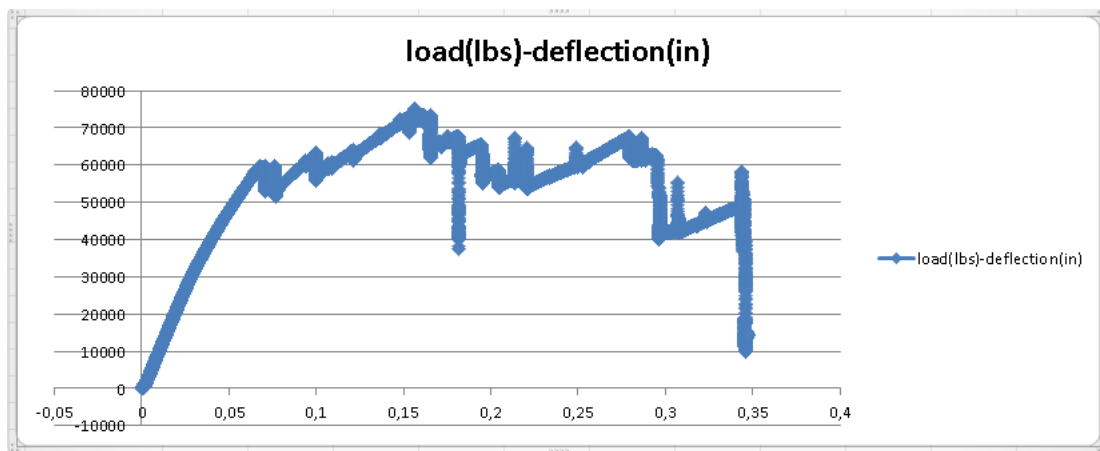
Εικ. 6.17(β): Δοκός μετά το πέρας της προσομοίωσης στο PFC (αρχική προφόρτιση 1000 psi)

Στη συνέχεια απεικονίζεται το διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης που δίνει ο Sterling για το συγκεκριμένο πείραμα.

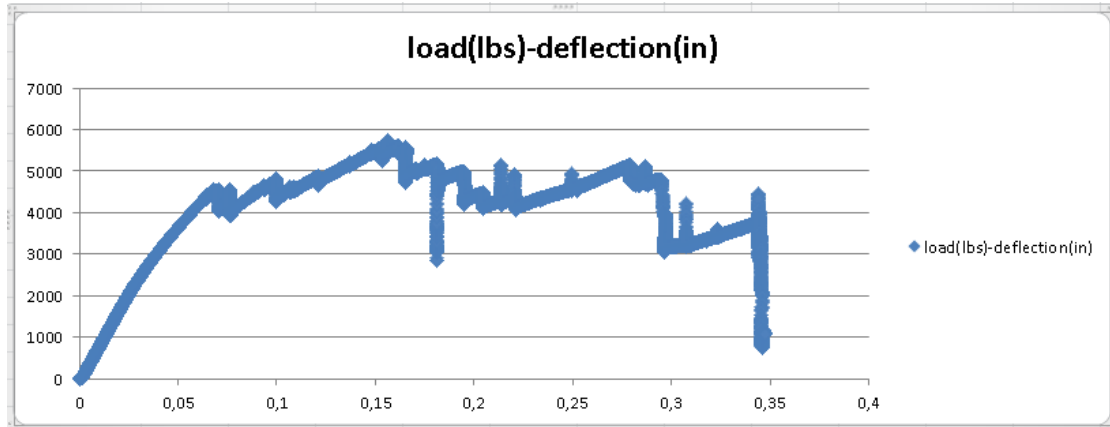


Σχ. 6.8: Καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης Sterling (αρχική προφόρτιση 1000 psi)

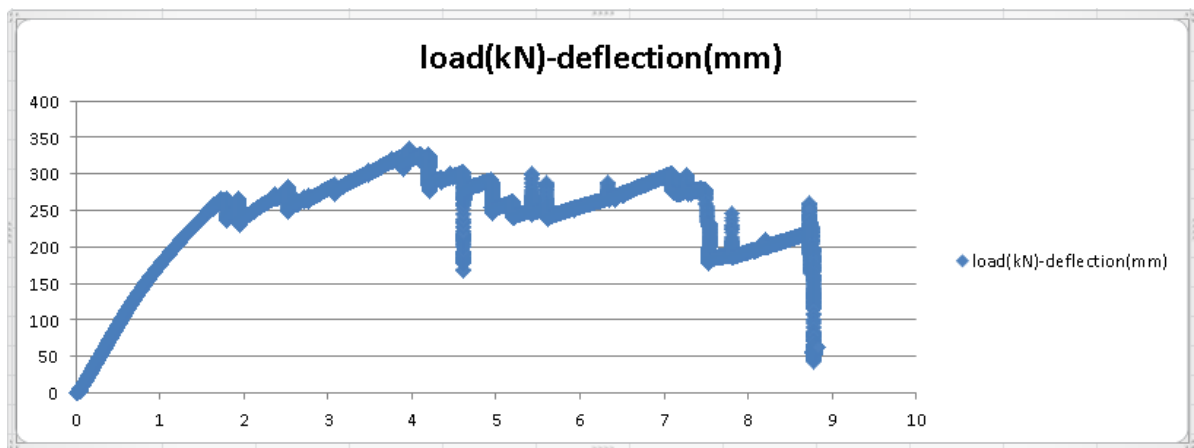
Έπειτα ακολουθούν οι ομοιότητες και οι διαφορές μεταξύ των διαγραμμάτων φορτίου – βέλους κάμψης που προέκυψαν μεταξύ των δύο περιπτώσεων.



Σχ. 6.9(α): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) PFC (αρχική προφόρτιση 1000 psi)



Σχ. 6.9(β): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) ανηγμένο στις διαστάσεις της δοκού του Sterling (αρχική προφόρτιση 1000 psi)



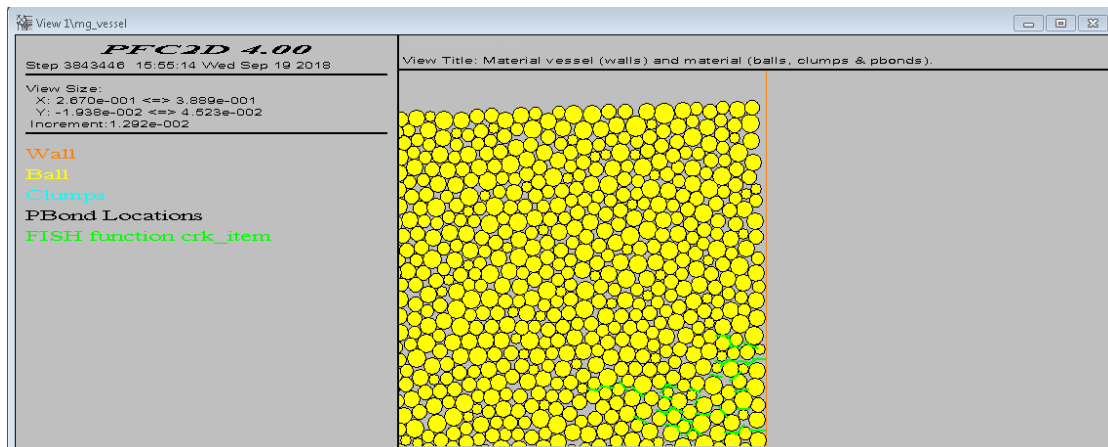
Σχ. 6.9(γ): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (kN-cm) PFC (αρχική προφόρτιση 1000 psi)

Τα δύο διαγράμματα παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες μεταξύ τους μέχρι το σημείο της μέγιστης αντοχής της δοκού. Παρά το γεγονός πως και πάλι υπάρχει διαφορά στην τιμή του μέγιστου φορτίου που επιβάλλεται στη δοκό, λόγω της μικρής απόκλισης στην αρχική προφόρτιση, αυτή επιτυγχάνεται για παρόμοια τιμή βέλους κάμψης και γενικότερα η καμπύλη ποιοτικά παρουσιάζεται ίδιας μορφής. Όσον αφορά στη μέγιστη αντοχή της δοκού, από την προσομοίωση προκύπτει η τιμή 75250 lbs, που για τις διαστάσεις του δοκιμίου του Sterling αντιστοιχεί σε $75250 / 13 = 5800$ περίπου lbs.

Όμως, η αντίστοιχη τιμή που δίνει ο Sterling είναι περίπου 7800 lbs. Η διαφορά αυτή πιθανόν και πάλι να οφείλεται στη μικρή απόκλιση που υπήρχε στην αρχική προφόρτιση και στον τύπο των δεσμών που χρησιμοποιήθηκε.

Η καμπύλη, ύστερα από το σημείο της μέγιστης αντοχής και στις δύο περιπτώσεις έχει μία απότομη ξαφνική κάθοδο. Στην καμπύλη που προέκυψε όμως από την προσομοίωση δε φθίνει διαρκώς, όπως αυτή του Sterling, αλλά κάνει μικρές αυξομειώσεις. Για αυτό ευθύνεται πιθανώς ο τύπος των δεσμών που έχει χρησιμοποιηθεί. Η χρήση παράλληλων δεσμών ή συσσωματωμάτων θα μπορούσε να αποτρέψει αυτό το φαινόμενο και προτείνεται να δοκιμασθεί σε επόμενη διπλωματική εργασία.

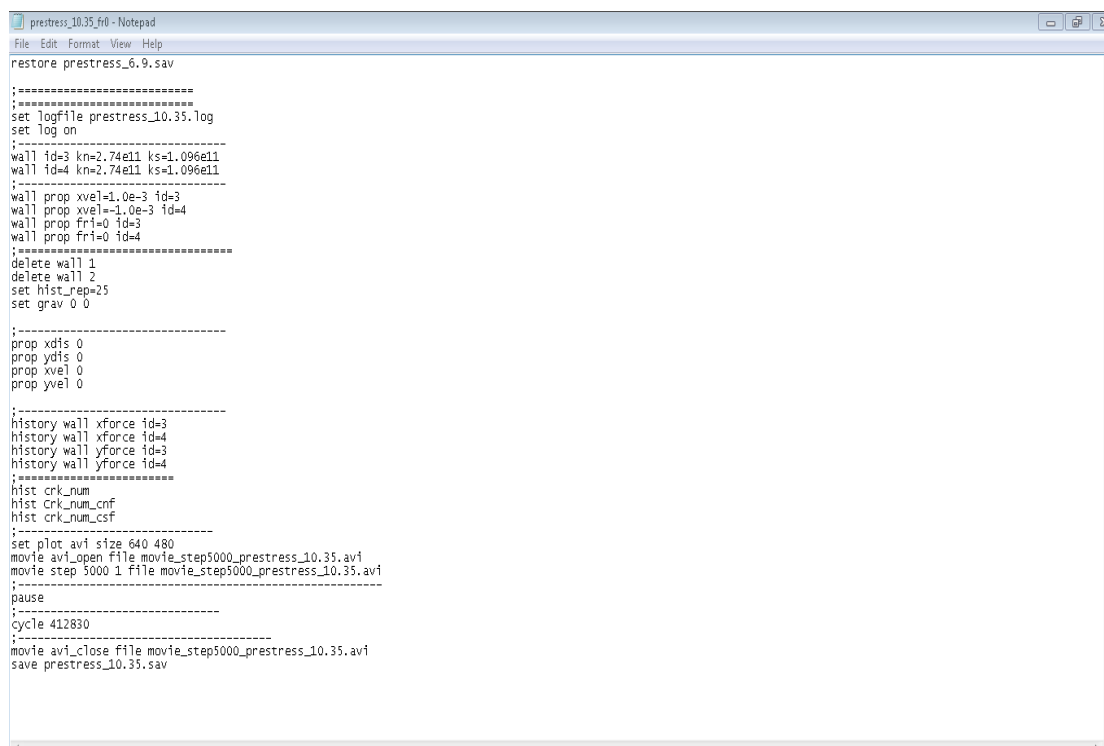
Λόγω της κάμψης, στο τέλος της δοκιμής, όπως είναι φυσικό, ένα τμήμα της δοκού δε βρίσκεται σε επαφή με τους πλευρικούς τοίχους. Έτσι, λοιπόν, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.18, ύστερα από 3 εκατομμύρια κύκλους φόρτισης μόλις το 46% των σωματιδίων του συνθετικού μοντέλου βρίσκεται ακόμα σε επαφή μαζί τους.



Εικ.6.18: Μπάλες που δεν είναι σε επαφή με τον τοίχο στο τέλος της δοκιμής (αρχική προφόρτιση 1000 psi)

6.3.4 Προσομοίωση δοκιμής κάμψης με αρχική προφόρτιση 10.35 MPa (1500psi)

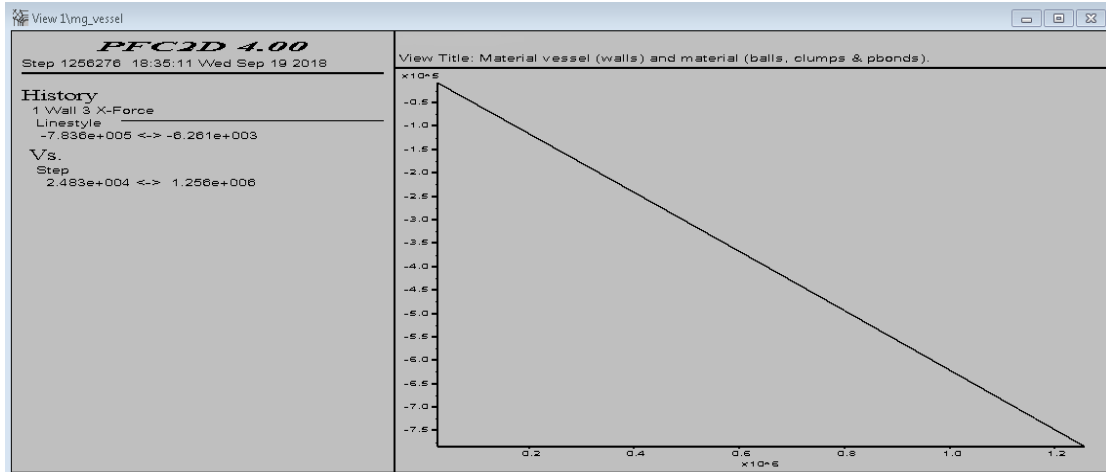
Τελευταίο προσομοιώθηκε το πείραμα του Sterling, κατά το οποίο επέβαλε στη δοκό του αρχική προφόρτιση 1500 psi. Για μία ακόμα φορά δεν άλλαξε κάτι στη διάταξη εκτέλεσης του πειράματος. Το μόνο που άλλαξε ήταν ο αριθμός των κύκλων φόρτισης από τους πλευρικούς τοίχους ώστε να επιτευχθεί η ζητούμενη αρχική προφόρτιση. Οι εντολές για το σχεδιασμό της διάταξης του πειράματος φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



```
prestress_10.35_fr0 - Notepad
File Edit Format View Help
restore prestress_6.9.sav
;=====
;
set logfile prestress_10.35.log
set log on
;-----
wall id=3 kn=2.74e11 ks=1.096e11
wall id=4 kn=2.74e11 ks=1.096e11
;-----
wall prop xve1=1.0e-3 id=3
wall prop xve1=-1.0e-3 id=4
wall prop fr1=0 id=3
wall prop fr1=0 id=4
;=====
delete wall 1
delete wall 2
set hist_rep=25
set grav 0 0
;-----
prop xdis 0
prop ydis 0
prop xve1 0
prop yve1 0
;-----
history wall yforce id=3
history wall yforce id=4
history wall yforce id=3
history wall yforce id=4
;=====
hist crk_num
hist crk_num_cnf
hist crk_num_csf
;-----
set plot avi size 640 480
movie avi_open file movie_step5000_prestress_10.35.avi
movie step 5000 1 file movie_step5000_prestress_10.35.avi
;-----
pause
;-----
cycle 412830
;-----
movie avi_close file movie_step5000_prestress_10.35.avi
save prestress_10.35.sav
```

Εικ. 6.19: Αρχείο επιβολής αρχικής προφόρτισης 1500 psi

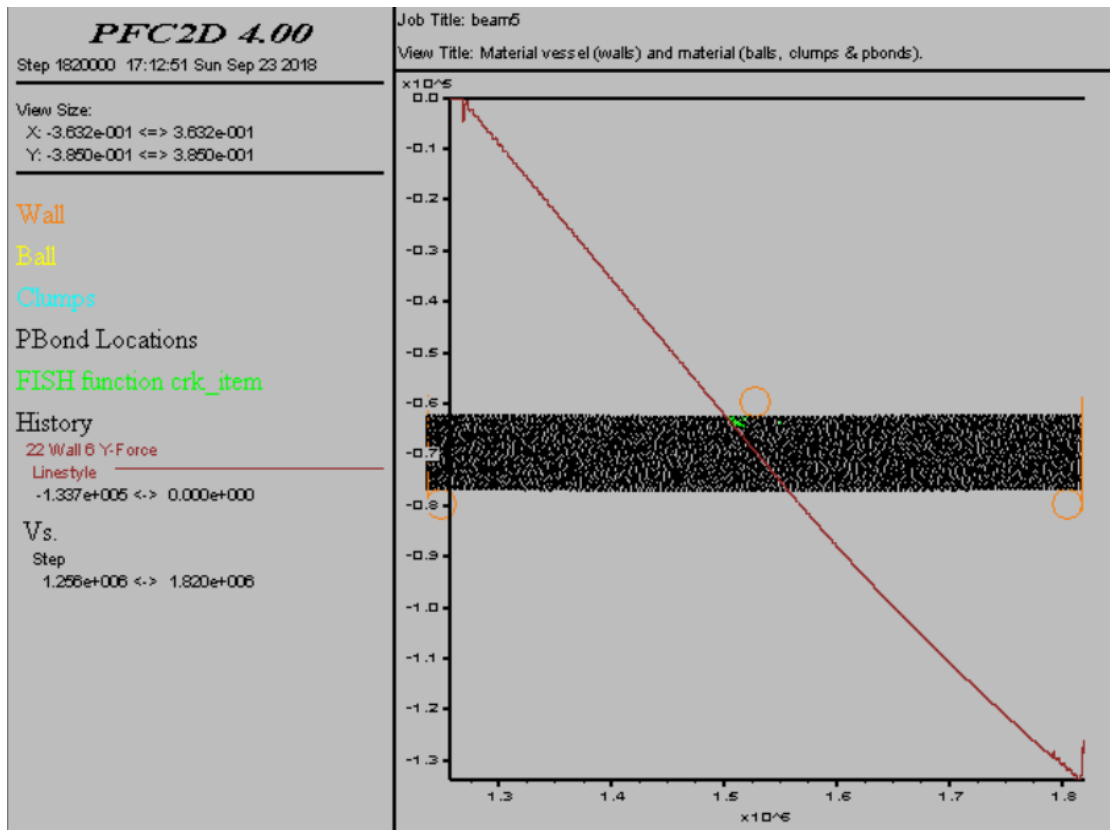
Όπως είναι λογικό, χρειάστηκαν οι τριπλάσιοι κύκλοι σε σχέση με το πείραμα της αρχικής προφόρτισης των 500 psi, για να φτάσει η δοκός στα 1500 psi.



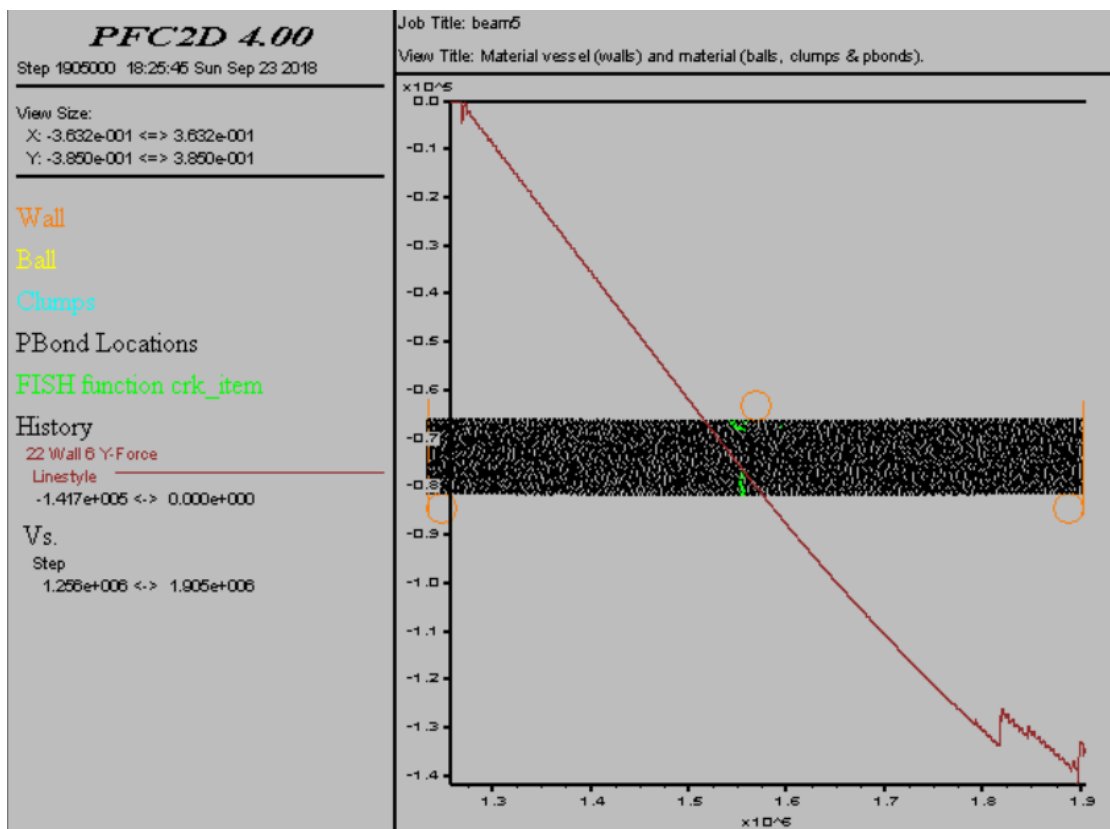
Σχ. 6.10: Διάγραμμα οριζόντιας δύναμης (N) – κύκλου φόρτισης μετά την επιβολή αρχικής προφόρτισης 1500 psi

Από το παραπάνω σχήμα, γίνεται φανερό ότι κατά το πέρας της διαδικασίας της αρχικής προφόρτισης, σε καθέναν από τους πλευρικούς τοίχους ασκείται δύναμη ίση με 783,6 kN. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, έτσι και εδώ, υπάρχει η αδυναμία να πετύχουμε ακριβώς την τιμή των 1500 psi. Θεωρώντας ως επιφάνεια άσκησης της παραπάνω δύναμης τα $0,0762\text{m}^2$, υπολογίζουμε ότι η τάση που ασκείται είναι $783,6\text{ kN} / 0,0762\text{m}^2 = 10.28\text{ MPa}$, που αντιστοιχούν σε 1490 psi.

Η δοκιμή κάμψης ξεκίνησε και έπειτα από ένα διάστημα δημιουργήθηκαν οι πρώτες ρωγμές στο μοντέλο. Αυτή τη φορά, η δοκός αστόχησε πρώτα στο μέσο της άνω διατομής της και σε περίπου 605 χιλιάδες κύκλους από την έναρξη της δοκιμής. Ύστερα από λίγο, ρωγμές δημιουργήθηκαν και στο μέσο της κάτω διατομής της δοκού. Η έναρξη τους μάλιστα, συνέβη ύστερα από 630 χιλιάδες κύκλους, ακόμη πιο μετά δηλαδή από τις αντίστοιχες της προηγούμενης προσομοίωσης.

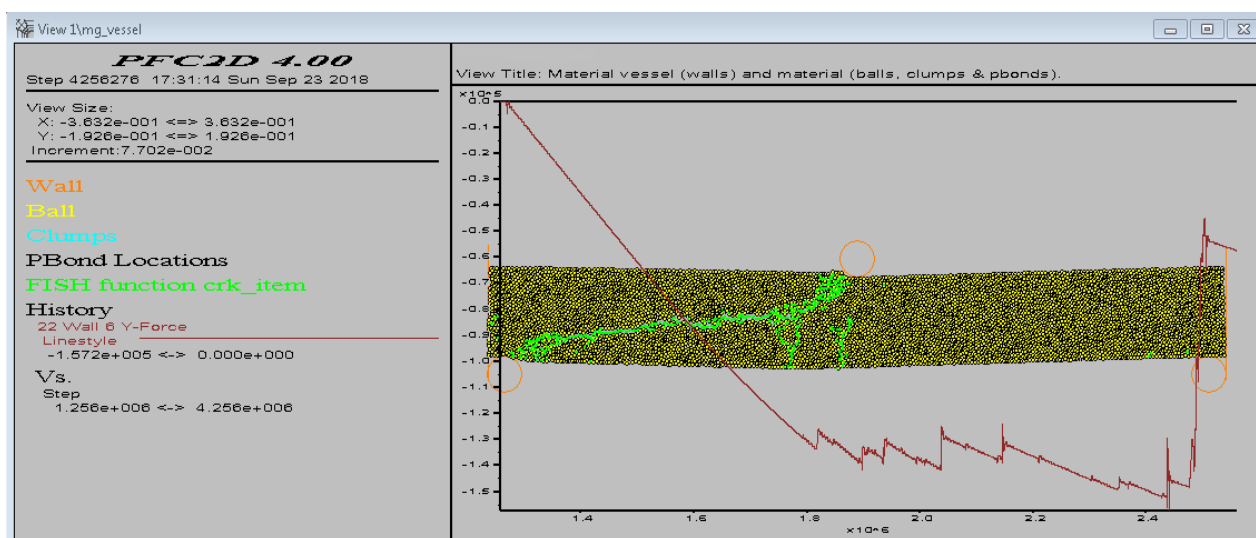


Εκ. 6.20(α): Εμφάνιση πρώτων ρωγμών (αρχική προφόρτιση 1500 psi)



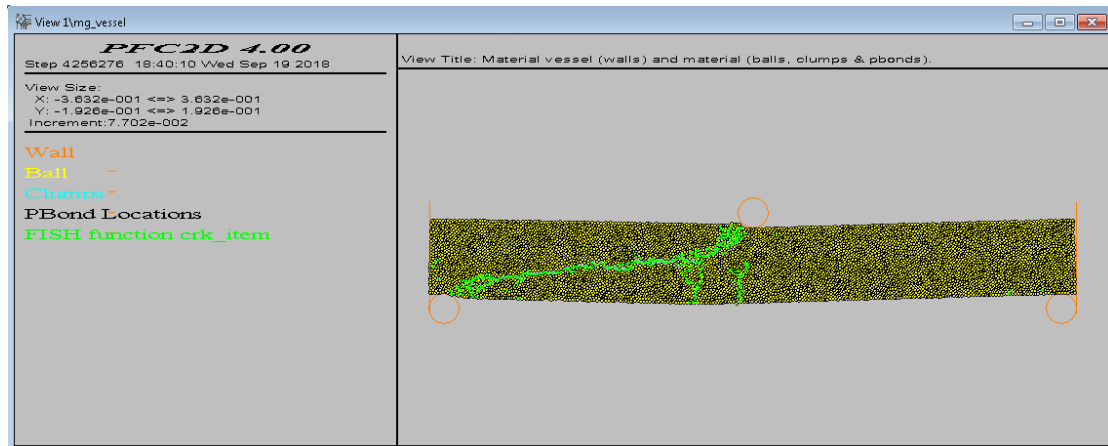
Εκ. 6.20(β): Εμφάνιση ρωγμών στο κάτω μέρος της δοκού (αρχική προφόρτιση 1500 psi)

Η εξέλιξη του φαινομένου στην περίπτωση αυτή, δεν ήταν ανάλογη των προηγούμενων. Έπειτα από κάποιους κύκλους δημιουργήθηκαν ρωγμές στις στηρίξεις της δοκού, οι οποίες όμως εξαπλώνονταν σε πολύ μικρό εύρος. Επιπλέον, τη δημιουργία ρωγμών στις στηρίξεις ακολούθησε μία ξαφνική διαγώνια θραύση της δοκού, η οποία ξεκινούσε από το μέσο της άνω διατομής και κατέληγε στην αριστερή στήριξη.



Εικ. 6.20(γ): Εμφάνιση ξαφνικής διαγώνιας ρωγμάτωσης (αρχική προφόρτιση 1500 psi)

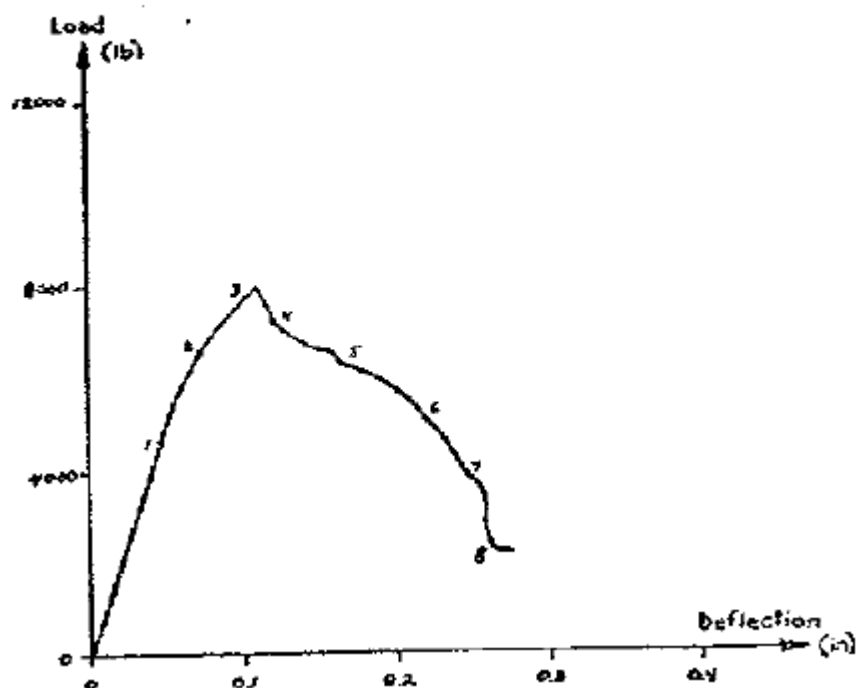
Ο Sterling στη διατριβή του σημειώνει πως στις περιπτώσεις που δεν παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στο τρόπο αστοχίας των δοκών του σε σχέση με αυτή του προηγούμενου πειράματος, δε δίνει τα αντίστοιχα σκαριφήματα. Μία από αυτές τις περιπτώσεις είναι και αυτή. Έτσι, λοιπόν η σύγκριση μπορεί να γίνει μόνο με βάση τις παρατηρήσεις που έδωσε ο Sterling για το συγκεκριμένο πείραμα. Σ' αυτές αναφέρει ότι η πρώτη αστοχία συμβαίνει στο μέσο της δοκού, κάτι που συμφωνεί και με το αποτέλεσμα της προσομοίωσης.



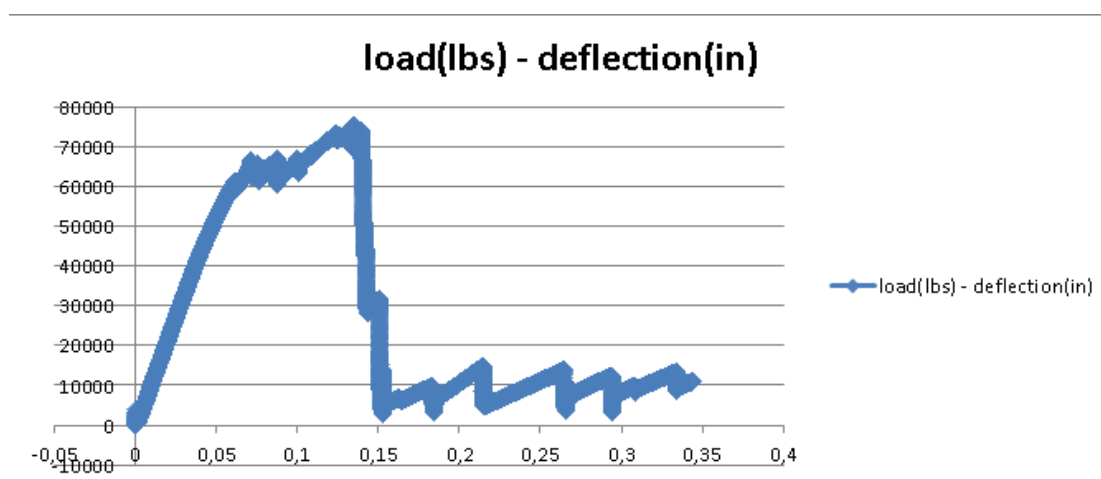
Εικ. 6.21: Δοκός μετά το πέρας της προσομοίωσης στο PFC (αρχική προφόρτιση 1500 psi)

Όσον αφορά στη σύγκριση των διαγραμμάτων φορτίου – βέλου κάμψης, αυτά παρουσιάζουν ομοιότητες ποιοτικά έως το σημείο της μέγιστης αντοχής της δοκού. Ο Sterling την υπολογίζει στις περίπου 8000 lbs. Από την προσομοίωση και βάση του διαγράμματος η μέγιστη τιμή του φορτίου που λαμβάνεται είναι περίπου 75000 lbs και με βάση την αναλογία της διάστασης του πάχους των 2 δοκιμίων, η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε $75000 / 13,12 = 5716$ lbs. Η απόκλιση αυτή είναι σημαντική και όπως έχει ήδη προαναφερθεί στις προηγούμενες περιπτώσεις, είναι πιθανό να οφείλεται τόσο στον τύπο των δεσμών που χρησιμοποιήθηκε όσο και στη μικρή απόκλιση στην αρχική προφόρτιση. Στη συνέχεια, η καμπύλη της προσομοίωσης έχει μία απότομη κάθοδο, κάτι που φυσικά δε συμβαίνει στην αντίστοιχη του Sterling καθώς δεν υπήρξε ξαφνική διαγώνια ρωγμάτωση της δοκού.

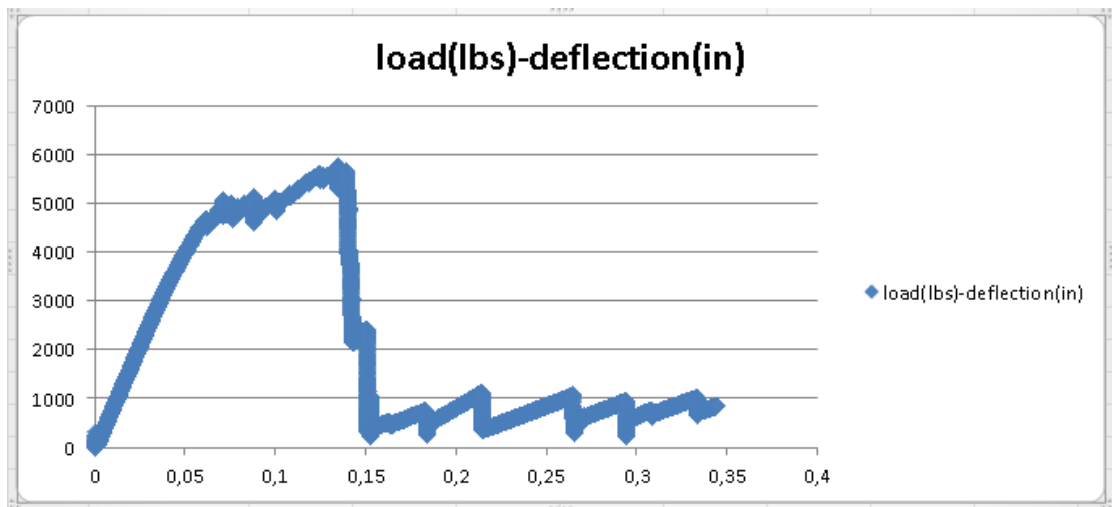
Load / Deflection Curve



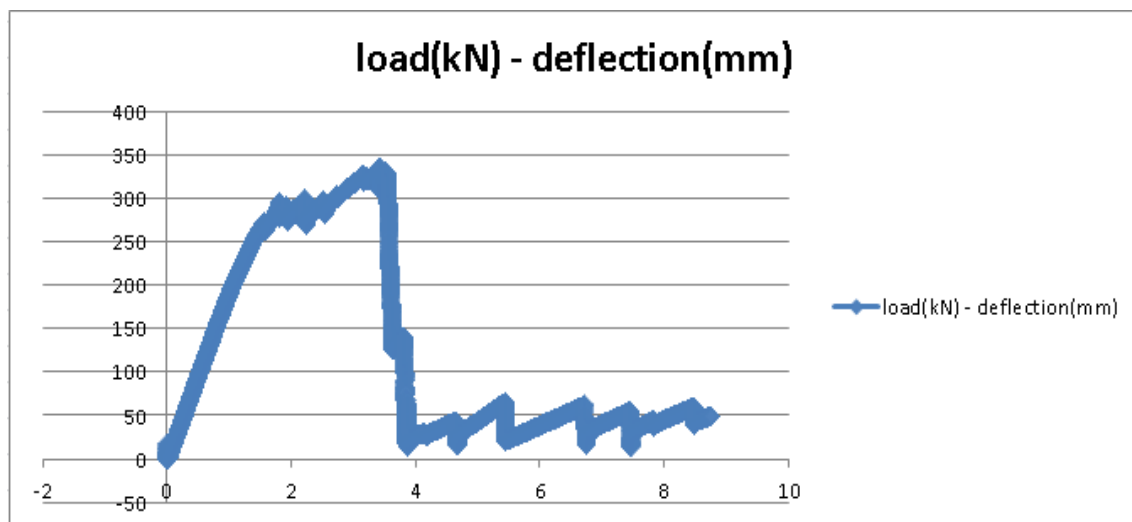
Σχ. 6.11: Καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης Sterling (αρχική προφόρτιση 1500 psi)



Σχ. 6.12(α): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) PFC (αρχική προφόρτιση 1500 psi)



Σχ. 6.12(β): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (lbs-in) ανηγμένο στις διαστάσεις της δοκού του Sterling (αρχική προφόρτιση 1500 psi)

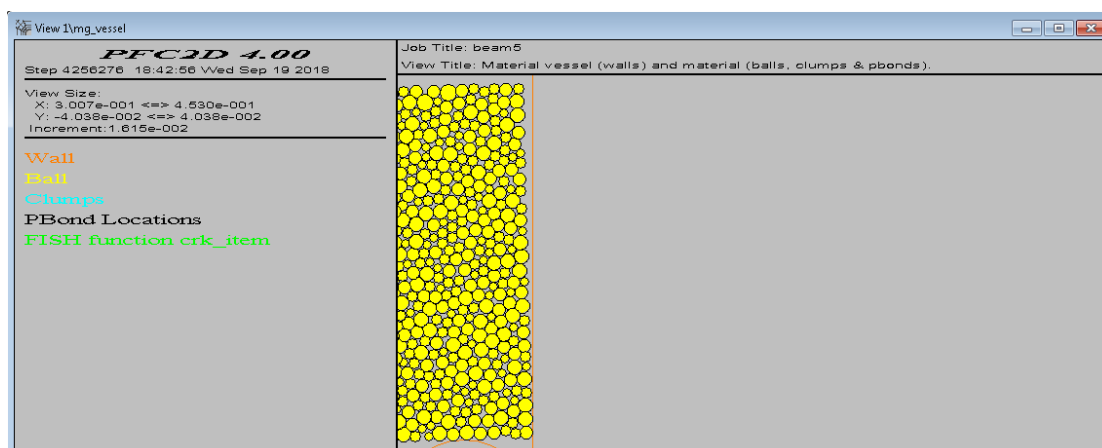


Σχ. 6.12(γ): Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης (kN-mm) PFC (αρχική προφόρτιση 1500 psi)

Αξίζει σε αυτό το σημείο να επισημανθεί πως ο τρόπος αστοχίας της δοκού και το διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης που έδωσε το PFC για αρχική προφόρτιση

10.35 MPa (1500 psi), ήταν ακριβώς ίδια με τα αντίστοιχα που έδωσε ο Sterling για τη δοκιμή με αρχική προφόρτιση 3.45 MPa (500 psi). Έτσι, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι το γεγονός να προκύψει μία τέτοιου είδους ξαφνική ρωγμή είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης προφόρτισης της δοκού, αλλά δεν είναι άμεση συνάρτηση του βαθμού με τον οποίο έχει προφορτιστεί.

Προχωρώντας είναι σημαντικό να φανεί και κατά πόσο έχει καμφθεί η δοκός, σ' αυτή την περίπτωση που υπήρξε η διαγώνια ρωγμάτωση και λίγες ρωγμές στις στηρίξεις, με κριτήριο το ποσοστό των σωματιδίων που δε βρίσκονται σε επαφή με τους πλευρικούς τοίχους κατά το πέρας της δοκιμής. Εδώ λοιπόν, παρατηρείται το μεγαλύτερο ποσοστό και με διαφορά, σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές, το οποίο φτάνει το 91% των αρχικών σωματιδίων που βρίσκονταν σε επαφή με τους τοίχους (μόνο 9% παραμένει σε επαφή).



Εικ.6.22: Μπάλες που δεν είναι σε επαφή με τον τοίχο στο τέλος της δοκιμής (αρχική προφόρτιση 1500 psi)

Τέλος, να σημειωθεί πως στα πειράματα του Sterling που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία οι διαστάσεις 3”x 3” x 26”, ήταν οι ονομαστικές διαστάσεις καθώς σε κάθε πείραμα οι πραγματικές διαστάσεις είχαν μία μικρή απόκλιση. Καθώς στο

PFC ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες διαστάσεις δοκού σε όλα τα πειράματα, πράγμα που συνέβη, αυτός είναι ένας πιθανός λόγος που υπήρξαν διαφορές στις συγκρίσεις που έγιναν. Εξαίρεση αποτελεί το πείραμα χωρίς αρχική προφόρτιση, στο οποίο οι πραγματικές διαστάσεις της δοκού του Sterling ταυτίζονταν με τις ονομαστικές και ήταν αυτό στο οποίο υπήρχε απόλυτη ομοιότητα στη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το PFC και του Sterling. Επιπλέον, σημαντικό είναι και το γεγονός ότι ο Sterling στα πειράματά του χρησιμοποίησε 63 διαφορετικές δοκούς, για να εκτελέσει τις δοκιμές του. Αυτό σημαίνει ότι οι δοκοί του σε κάθε πείραμα είχαν διαφοροποιήσεις (ως προς τις αρχικές ατέλειες, την ακμή κλπ.), καθώς μπορεί να προέρχονταν κατά βάση από το ίδιο πέτρωμα, όμως κάθε κομμάτι πετρώματος είναι ξεχωριστό. Αντίθετα, εμείς στην προσομοίωση στο πρόγραμμα PFC είχαμε τη δυνατότητα να χρησιμοποιούμε την ίδια δοκό για όλες τις δοκιμές μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάστηκε η δυνατότητα προσομοίωσης δοκών ασβεστολίθου τύπου Indiana με το πρόγραμμα PFC^{2D}. Οι δοκοί αυτές, υποβλήθηκαν μέσω του προγράμματος σε δοκιμές κάμψης, αντίστοιχες με τα πειράματα του Sterling (1977) και τελικά έγιναν συγκρίσεις μεταξύ του τρόπου αστοχίας τους στις δύο περιπτώσεις, αλλά και μεταξύ μεγεθών όπως η μέγιστη αντοχή και το βέλος κάμψης.

Το πρώτο ζήτημα που απασχόλησε στην πορεία προς την εκτέλεση των δοκιμών ήταν η κατασκευή ενός συνθετικού πετρώματος που μακροσκοπικά θα είχε παρόμοια απόκριση με το πέτρωμα που χρησιμοποίησε ο Sterling (Indiana Limestone). Για να επιτευχθεί αυτό, έγινε χρήση των διαγραμμάτων που πρότεινε η Καράτζα (2011). Καθώς σε παρόμοιες περιπτώσεις κατασκευής συνθετικών μοντέλων η μεθοδολογία του Youn έδινε μεγάλες αποκλίσεις από την πραγματική απόκριση, έγινε προσπάθεια απ' ευθείας χρήσης των διαγραμμάτων της Καράτζα, η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί ως επιτυχής. Έτσι λοιπόν, με την ακριβή χρήση των τιμών που προέκυψαν από τα διαγράμματα και τις αντίστοιχες εξισώσεις δημιουργήθηκε το πρώτο μοντέλο. Η τιμή για την αντοχή μονοαξονικής θλίψης που προέκυψε από την αντίστοιχη δοκιμή, σε δοκίμιο διαστάσεων 10 cm x 5 cm, ήταν 47,3 MPa, ενώ για το μέτρο ελαστικότητας 9,44 GPa. Οι τιμές αυτές προσέγγιζαν σε μεγάλο βαθμό τις αντίστοιχες 40 MPa και 9,3 GPa, που έδινε ο Sterling για τον ασβεστόλιθο τύπου Ιντιάνα. Ύστερα από 4 προσπάθειες βελτιστοποίησης, στις οποίες μεταβάλλονταν κατά κύριο λόγο οι τιμές για την αντοχή των σημειακών δεσμών που χρησιμοποιήθηκαν, επιτεύχθηκαν ακριβώς οι τιμές που έδινε ο Sterling.

Σε επόμενο στάδιο, και αφού κατασκευάστηκε η δοκός που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές κατ' αντιστοιχία με τις δοκούς του Sterling, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάμψης, χωρίς την παρουσία πλευρικών τοίχων αρχικά. Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να επαληθευτεί πως η δοκός θα αστοχήσει με αναμενόμενο τρόπο. Μέσα από αυτή, εξήχθη το συμπέρασμα ότι η θέση αστοχίας της δοκού εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάστηκε στο PFC^{2D}. Η συνθετική δοκός κατασκευάστηκε με τη χρήση της γλώσσας FISH μέσα σε ένα «δοχείο» τοίχων. Έτσι λοιπόν, η θέση από την οποία ξεκίνησε η γένεση της δοκού και κατά συνέπεια η τελική διάταξη των σωματιδίων της

(που ελέγχεται από την εντολή “set random”), επηρεάζει και τη θέση δημιουργίας των ρωγμών. Στην περίπτωσή μας, για τη δοκό διαστάσεων 66,04cm x 7,62cm δόθηκε η εντολή “set random 6001”.

Ένα άλλο συμπέρασμα που εξήχθη από την παρούσα εργασία αφορά στη διάταξη που χρησιμοποιείται για να προσομοιωθεί μία δοκιμή κάμψης. Έγιναν προσπάθειες εκτέλεσης της δοκιμής, όπου οι στηρίξεις και το μέσο φόρτισης ήταν πρώτα μπάλες – σωματίδια και στη συνέχεια τοίχοι, όμως η δοκιμή κάμψης δεν εξελίσσονταν όπως θα ήταν αναμενόμενο. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και φαίνεται πως ήταν η κατάλληλη λύση, ήταν στηρίξεις και φόρτιση από κυκλικούς τοίχους. Ο Sterling αναφέρει πως οι στηρίξεις που χρησιμοποίησε ήταν τετραγωνικές επιφάνειες, κάτι που σίγουρα συνέβαλε στις όποιες διαφοροποιήσεις υπήρξαν μεταξύ των αποτελεσμάτων των πειραμάτων του και αυτών των προσομοιώσεων στο PFC^{2D}. Το γεγονός ωστόσο, ότι η προσομοίωση γίνονταν σε δύο διαστάσεις μετρίασε τη συμβολή του τύπου των στηρίξεων στις αποκλίσεις των αποτελεσμάτων.

Το τελευταίο στάδιο της εργασίας ήταν η προσομοίωση των τεσσάρων δοκιμών κάμψης (χωρίς αρχική προφόρτιση και με αρχική προφόρτιση 500, 1000, 1500 psi), με την παρουσία πλευρικών τοίχων. Όσον αφορά στους τύπους αστοχίας των συνθετικών δοκών που προέκυψαν, αυτοί ήταν παρόμοιοι με αυτούς που παρουσίασε ο Sterling. Βέβαια, στις δοκιμές με αρχική προφόρτιση δεν προέκυψαν κατ’ αντιστοιχία οι ίδιες μορφές αστοχίας, δηλαδή η διαγώνια ρωγμάτωση της δοκού που προέκυψε στον Sterling για αρχική προφόρτιση 500 psi, στο PFC προέκυψε για αρχική προφόρτιση 1500 psi. Θα μπορούσε κανείς να συμπεράνει πως αυτός ο τύπος της αστοχίας συνδέεται με την ύπαρξη αρχικής προφόρτισης και όχι τόσο με το βαθμό της, αν αναλογιστεί μάλιστα πως κάθε κομμάτι πετρώματος είναι μοναδικό και ο Sterling δεν είχε τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει την ίδια δοκό σε όλα του τα πειράματα, όπως γίνεται στο PFC.

Στο αριθμητικό κομμάτι, για να γίνει η σύγκριση, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η προσομοίωση έγινε σε δύο διαστάσεις, οπότε και τα αποτελέσματα που προέκυψαν ανάχθηκαν στις διαστάσεις 66,04cm x 7,62cm x 7,62cm που είχαν οι δοκοί του Sterling από 66,04cm x 7,62cm x 100cm που θεωρήσαμε στο PFC^{2D}. Στη δοκιμή χωρίς αρχική προφόρτιση υπήρξε ταύτιση στην τιμή για το μέγιστο φορτίο που ασκήθηκε στη δοκό, που ήταν δηλαδή περίπου στις 5800 lbs. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, όπου υπήρξε αρχική προφόρτιση, υπήρξαν διαφοροποιήσεις. Πιθανοί λόγοι που μπορεί να οδήγησαν

σε αυτές ήταν οι μικρές αποκλίσεις των πραγματικών από τις ονομαστικές διαστάσεις των δοκών που χρησιμοποίησε ο Sterling, η διαφορά στον τύπο των στηρίξεων όπως προαναφέρθηκε αλλά και η μοναδικότητα του κάθε δοκιμίου πετρώματος σε συνδυασμό με την αδυναμία χρήσης της ίδιας δοκού στα φυσικά πειράματα. Τέλος, ρόλο έπαιξε και η χρήση σημειακών δεσμών στο BPM. Μετά τη θραύση ενός σημειακού δεσμού, η ορθή δυστροπία της επαφής εξακολουθεί να είναι ενεργή για όσο τα σωματίδια βρίσκονται σε επαφή. Με τη θραύση ενός παράλληλου δεσμού η δυστροπία του δεσμού 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. Αντίθετα, 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.

Μετά απ' όλα αυτά, λοιπόν, μπορούμε να πούμε πως πετύχαμε να έχουμε ένα βαθμονομημένο με τα πειράματα του Sterling μοντέλο στο PFC, το οποίο μεταγενέστερα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογή σε δοκούς μεγαλύτερων διαστάσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Brady, B.H.G. and Brown, E.T. (2004), *Rock Mechanics for Underground Mining*. 3rd Edition, Kluwer Academic Publishers, p 224-241.

Itasca Cons. (2010). PFC2D: User's manual. Minneapolis, Minnesota, USA

Potyondy, D. O., Cundall, P. A. (2004). "A Bonded-Particle Model for Rock". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41, 1329-1364.

R. D. (1993). "Numerical Modeling of Discontinua". *Engr. Comp.*, 9, 101-113 (1992); in *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. 2, pp. 231-243. J. A. Hudson, Ed. Oxford: Pergamon Press.

Sofianos A.I., Analysis and design of an underground hard rock voussoir beam roof. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech. Abstr*, 33(2): 153-166, 1996.

Sterling R.L., *Roof Design for Underground Openings in Near-Surface Bedded Rock Formations*. Ph.D Thesis, Un. of Minnesota, 1977.

Yoon, J. (2007). "Application of Experimental Design and Optimization to PFC Model Calibration in Uniaxial Compression Simulation". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 44, 871-889.

Καράτζα Τ. Ζεννέπ (2011). *Προσομοίωση Εργαστηριακών Δοκιμών Αντοχής Άρρηκτου Πετρώματος με τη μέθοδο Διακριτών Στοιχείων*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.

Νομικός Π.Π. (2004). *Μηχανική αστάθεια και αστοχία μεγάλων υπόγειων ανοιγμάτων σε ογκοτεμαχισμένες δομές πετρώματος*. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.

Νομικός Π.Π. (2015), *Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων*. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, www.kallipos.gr.

Σοφιανός Α. (2015), *Υποστήριξη Υπογείων Έργων*. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, www.kallipos.gr

119