



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –  
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επίδραση του μεγέθους στην αντοχή του πετρώματος**



Όνοματεπώνυμο: Κωνσταντίνος Σβουράκης

Επιβλέπων Καθηγητής : Πάυλος Νομικός, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2021





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –  
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επίδραση του μεγέθους στην αντοχή του πετρώματος**

Όνοματεπώνυμο: Κωνσταντίνος Σβουράκης

Επιβλέπων Καθηγητής : Παύλος Νομικός, Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις .....

Παύλος Νομικός, Καθηγητής .....

Θεόδωρος Μιχαλακόπουλος, Καθηγητής .....

Ιωάννης Ζευγώλης, Επικ. Καθηγητής .....

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2021

# Πρόλογος

Προτού ξεκινήσει η παρουσίαση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Παύλο Νομικό για την υποστήριξη, τη καθοδήγηση και τη πολύτιμη βοήθεια του για την εκπόνηση και ολοκλήρωση του θεωρητικού και πειραματικού μέρους της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου πρόσφεραν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Κωνσταντίνος Σβουράκης



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη παρουσίαση του φαινομένου κλίμακας. Το φαινόμενο κλίμακας είναι η διαφοροποίηση της αντοχής των πετρωμάτων ανάλογα με το μέγεθος του δοκιμίου που εξετάζεται. Αρχικά γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο και χαρακτηριστικά της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης άρρηκτου πετρώματος. Στη συνέχεια περιγράφεται η σημασία του φαινομένου κλίμακας και γίνεται μία θεωρητική προσέγγισή του. Ακόμα αναφέρονται από τη βιβλιογραφία πειραματικές μελέτες του μαρμάρου Διονύσου, του κογχυλιόλιθου, του πωρόλιθου Κεγχρεών και του πωρόλιθου Κύπρου, στις οποίες το φαινόμενο κλίμακας είναι εμφανές. Ακολουθεί η περιγραφή λειτουργίας του προγράμματος PFC2D με μοντέλα συνδεδεμένων σωματιδίων και της διαδικασίας βαθμονόμησης του. Στο πειραματικό μέρος της εργασίας, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα προσομοίωσης PFC2D για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς διαφόρων μεγεθών δοκιμίων μαρμάρου Διονύσου και τη μεταβολή της αντοχής του σε μονοαξονική θλίψη και του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του μεγέθους. Γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα και εικόνες και καταγραφή τους σε πίνακες. Από αυτά τα αποτελέσματα εξάγονται συμπεράσματα για τη δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου πετρώματος με την επίδραση του μεγέθους.

## **Abstract**

The purpose of this diploma thesis is to showcase the size effect phenomenon, which is the variation of a rock's strength, depending on its size. First, the theoretical background and the characteristics of the uniaxial compressive test of unfractured rocks are described. Then, the meaning and the theory of the size effect are discussed. Experiments on Dionyssos marble, "Conchyliates" shellstone, Kefalonia porous stone (Kenchreae stone) and Cyprus porous stone are presented, on which the size effect is visible. In addition, detail is provided on how the PFC2D simulation program works and on the calibration process. In the experimental part of the thesis, the PFC2D simulation program is used to research the behavior of several sizes of cylindrical specimens of Dionyssos Marble, along with the variation of the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity, according to the size. The data and results are exhibited through graphs and pictures and are recorded on tables. From all the results, conclusions on the behavior of such material are drawn.

# Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή .....	1
2	Μονοαξονική θλίψη άρρηκτου πετρώματος .....	3
2.1	Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	3
2.2	Ελαστικές σταθερές ισότροπου πετρώματος.....	4
2.3	Μικρορωγμάτωση και παραμόρφωση του πετρώματος.....	5
2.4	Εντατικό πεδίο στο δοκίμιο .....	8
2.5	Επίδραση του λόγου ύψους προς διάμετρο .....	9
2.6	Άλλοι παράγοντες επιρροής της αντοχής του πετρώματος .....	9
3	Φαινόμενο κλίμακας (Size effect).....	12
3.1	Σημασία φαινομένου κλίμακας .....	12
3.2	Θεωρητική προσέγγιση φαινομένου κλίμακας.....	13
3.3	Πειραματικές μελέτες του φαινομένου κλίμακας.....	14
3.3.1	Το μάρμαρο Διονύσου.....	15
3.3.2	Ο κογχυλιόλιθος στο ναό του Δία στην Ολυμπία.....	16
3.3.3	Ο πωρόλιθος Κεγγρεών στο Ασκληπιείο της Επιδαύρου.....	17
3.3.4	Ο πωρόλιθος Κύπρου .....	20
4	Πρόγραμμα προσομοίωσης PFC2D .....	22
4.1	Μοντέλο επαφής (Contact model).....	22
4.2	Βαθμονόμηση BPM.....	23
5	Προσομοίωση εργαστηριακής δοκιμής προσδιορισμού της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμών με χρήση του PFC2D .....	26
5.1	Προετοιμασία και βαθμονόμηση BPM .....	26
5.2	Διαδικασία προσομοιώσεων.....	27
5.3	Χρησιμοποιούμενος κώδικας .....	28
6	Αποτελέσματα προσομοιώσεων με SBS/NBS=1 .....	34
6.1	Προσομοιώσεις με ταχύτητα πλακών θλίψης 50mm/s και seed=2563 .....	35
6.2	Προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενη ταχύτητα.....	38
6.3	Προσομοιώσεις με κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 10MPa.....	52
6.4	Προσομοιώσεις με κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 20MPa.....	64
6.5	Αποτελέσματα UCS σειράς δοκιμών .....	76
6.6	Αποτελέσματα μέτρου ελαστικότητας E σειράς δοκιμών.....	77
7	Αποτελέσματα προσομοιώσεων με SBS/NBS=2.....	79

7.1	Προσομοιώσεις με ταχύτητα πλακών θλίψης 50mm/s και seed=2563 .....	79
7.2	Προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενη ταχύτητα.....	82
7.3	Προσομοιώσεις με κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 10MPa.....	100
7.4	Προσομοιώσεις με κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 20MPa.....	112
7.5	Αποτελέσματα UCS σειράς δοκιμών .....	124
7.6	Αποτελέσματα μέτρου ελαστικότητας E σειράς δοκιμών.....	125
8	Συμπεράσματα.....	127
9	Βιβλιογραφικές αναφορές .....	129

## Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2.1	Μονοαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος <sup>[1]</sup> .....	3
Σχήμα 2.2	Γραφικός προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης <sup>[1]</sup> .....	5
Σχήμα 2.3	Μακροσκοπικοί τύποι θραύσης του πετρώματος σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης <sup>[1]</sup> .....	6
Σχήμα 2.4	Εξέλιξη της παραμόρφωσης και της μικρορωγμάτωσης πετρώματος κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης <sup>[1,2,3]</sup> .....	6
Σχήμα 2.5	Επίδραση του περιορισμού στα άκρα στην παραμόρφωση του δοκιμίου: (α) μερική ανάσχεση της πλευρικής διαστολής στα άκρα λόγω περιορισμού, (β) ενδεικτικές καμπύλες ίσων τιμών της μέγιστης κύριας τάσης στο εσωτερικό του δοκιμίου <sup>[1]</sup> .....	8
Σχήμα 2.6	Επίδραση της λυγηρότητας στις καμπύλες σ-ε για φόρτιση μέσω συμπαγών χαλύβδινων πλακών <sup>[1]</sup> .....	9
Σχήμα 2.7	Επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου στην αντοχή <sup>[1]</sup> .....	11
Σχήμα 3.1	Η εξάρτηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του μαρμάρου Διονύσου από το μέγεθος του δοκιμίου <sup>[5]</sup> .....	16
Σχήμα 3.2	Η επίδραση του ύψους στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του κογχυλιόλιθου <sup>[5]</sup> .....	17
Σχήμα 3.3	Η μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με το μέγεθος του δοκιμίου <sup>[5]</sup> ..	19
Σχήμα 3.4	Η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας με το μέγεθος του δοκιμίου <sup>[5]</sup> .....	20
Σχήμα 3.5	Η επιρροή του λόγου r (ύψος προς διάμετρο) στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πωρόλιθου της Κύπρου <sup>[5]</sup> .....	21
Σχήμα 4.1	Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βαθμονόμησης του μοντέλου BPM <sup>[6]</sup> .....	25
Σχήμα 6.1	Διάγραμμα αποτελεσμάτων UCS σειράς μοντέλων με SBS/NBS=1.....	76
Σχήμα 6.2	Διάγραμμα αποτελεσμάτων UCS σειράς αριθμητικών μοντέλων με SBS/NBS=1 .	77
Σχήμα 6.3	Διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας E σειράς αριθμητικών μοντέλων με SBS/NBS=1 .....	78

Σχήμα 7.1 Διάγραμμα αποτελεσμάτων UCS σειράς μοντέλων με SBS/NBS=2.....	124
Σχήμα 7.2 Διάγραμμα αποτελεσμάτων UCS σειράς αριθμητικών μοντέλων με SBS/NBS=2	125
Σχήμα 7.3 Διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας E σειράς αριθμητικών μοντέλων με SBS/NBS=2 .....	126

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3.1 Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ο αριθμός των δοκιμών, τα αποτελέσματα για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και η τυπική απόκλιση για τα κυλινδρικά δοκίμια <sup>[5]</sup> .....	18
Πίνακας 3.2 Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ο αριθμός των δοκιμών, τα αποτελέσματα για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και η τυπική απόκλιση για τα κυβικά δοκίμια <sup>[5]</sup> .....	18
Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με ταχύτητα $v=50\text{mm/s}$ , $\text{seed}=2563$ και SBS/NBS=1 .....	37
Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, $\text{seed}=2563$ και SBS/NBS=1 .....	40
Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, $\text{seed}=2146$ και SBS/NBS=1 .....	44
Πίνακας 6.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, $\text{seed}=4244$ και SBS/NBS=1 .....	47
Πίνακας 6.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, $\text{seed}=1038$ και SBS/NBS=1 .....	52
Πίνακας 6.6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 10MPa, SBS/NBS=1 και $\text{seed}=2563$ .....	55
Πίνακας 6.7 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 10MPa, SBS/NBS=1 και $\text{seed}=2146$ .....	58
Πίνακας 6.8 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 10MPa, SBS/NBS=1 και $\text{seed}=4244$ .....	61
Πίνακας 6.9 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 10 MPa, SBS/NBS=1 και $\text{seed}=1038$ .....	64
Πίνακας 6.10 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 20MPa, SBS/NBS=1 και $\text{seed}=2563$ .....	67
Πίνακας 6.11 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 20MPa, SBS/NBS=1 και $\text{seed}=2146$ .....	70
Πίνακας 6.12 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 20MPa, SBS/NBS=1 και $\text{seed}=4244$ .....	73
Πίνακας 6.13 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 20MPa, SBS/NBS=1 και $\text{seed}=1038$ .....	76
Πίνακας 6.14 Συγκεντρωτικός πίνακας UCS δεδομένων σειράς δοκιμών με SBS/NBS=1 .....	76
Πίνακας 6.15 Συγκεντρωτικός πίνακας μέτρου ελαστικότητας E σειράς δοκιμών με SBS/NBS=1 .....	77

Πίνακας 7.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και seed=2563 .....	82
Πίνακας 7.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, SBS/NBS=2 και seed=2563 .....	85
Πίνακας 7.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, SBS/NBS=2 και seed=2146 .....	89
Πίνακας 7.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, SBS/NBS=2 και seed=4244 .....	94
Πίνακας 7.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, SBS/NBS=2 και seed=1038 .....	99
Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 10MPa, SBS/NBS=2 και seed=2563 .....	102
Πίνακας 7.7 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 10MPa, SBS/NBS=2 και seed=2146 .....	105
Πίνακας 7.8 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 10MPa, SBS/NBS=2 και seed=4244 .....	108
Πίνακας 7.9 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 10MPa, SBS/NBS=2 και seed=1038 .....	111
Πίνακας 7.10 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 20MPa, SBS/NBS=2 και seed=2563 .....	114
Πίνακας 7.11 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 20MPa, SBS/NBS=2 και seed=2146 .....	117
Πίνακας 7.12 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 20MPa, SBS/NBS=2 και seed=4244 .....	120
Πίνακας 7.13 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 20MPa, SBS/NBS=2 και seed=1038 .....	123
Πίνακας 7.14 Συγκεντρωτικός πίνακας UCS δεδομένων σειράς δοκιμών με SBS/NBS=2 ....	124
Πίνακας 7.15 Συγκεντρωτικός πίνακας μέτρου ελαστικότητας E σειράς δοκιμών με SBS/NBS=2 .....	125

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 5.1 Ρυθμίσεις για δημιουργία δοκιμίου H60W30 με seed=2563 .....	29
Εικόνα 5.2 Ρυθμίσεις για δημιουργία δοκιμίου H100W50, με seed=2563 .....	29
Εικόνα 5.3 Ρυθμίσεις για δημιουργία δοκιμίου H120W60, με seed=2563 .....	29
Εικόνα 5.4 Ρυθμίσεις για δημιουργία δοκιμίου H300W150, με seed=2146 .....	30
Εικόνα 5.5 Ρυθμίσεις για δημιουργία δοκιμίου H400W200, με seed=4244 .....	30
Εικόνα 5.6 Ρύθμιση ταχύτητας των πλακών θλίψης του δοκιμίου .....	30
Εικόνα 5.7 Ρυθμίσεις για τα μοντέλα με λόγο SBS/NBS=1 .....	31
Εικόνα 5.8 Ρυθμίσεις για τα μοντέλα με λόγο SBS/NBS=2 .....	31
Εικόνα 5.9 Ρυθμίσεις για μοντέλα με λόγο SBS/NBS=1 και κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 10MPa .....	32
Εικόνα 5.10 Συνέχεια: Ρυθμίσεις για μοντέλα με λόγο SBS/NBS=1 και κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 10MPa .....	32
Εικόνα 5.11 Ρυθμίσεις για μοντέλα με λόγο SBS/NBS=2 και κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 20MPa .....	33
Εικόνα 5.12 Συνέχεια: Ρυθμίσεις για μοντέλα με λόγο SBS/NBN=2 και κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 20MPa .....	33
Εικόνα 6.1 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=50\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 .....	35
Εικόνα 6.2 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=50\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 .....	35
Εικόνα 6.3 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 .....	36
Εικόνα 6.4 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=50\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 .....	36
Εικόνα 6.5 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=50\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 .....	37
Εικόνα 6.6 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=2563.....	38
Εικόνα 6.7 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=2563	38
Εικόνα 6.8 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=2563	39
Εικόνα 6.9 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=2563 .....	39
Εικόνα 6.10 α),β),γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και τελικό διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με ταχύτητα $v=25\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=2146 .....	41
Εικόνα 6.11 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=214642	42
Εικόνα 6.12 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=2146..	42
Εικόνα 6.13 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=2146 .....	43
Εικόνα 6.14 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=2146 .....	43
Εικόνα 6.15 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=4244....	44
Εικόνα 6.16 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=4244 .....	45
Εικόνα 6.17 Διάγραμμα δοκιμίου 120W60 με $v=50\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=4244 ....	46
Εικόνα 6.18 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ και SBS/NBS=1 για seed=4244 .....	46

Εικόνα 6.19 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ και $\text{SBS/NBS}=1$ για $\text{seed}=4244$	47
Εικόνα 6.20 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ και $\text{SBS/NBS}=1$ για $\text{seed}=1038$ ...	48
Εικόνα 6.21 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ και $\text{SBS/NBS}=1$ για $\text{seed}=103848$	
Εικόνα 6.22 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ και $\text{SBS/NBS}=1$ για $\text{seed}=1038$	50
Εικόνα 6.23 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ και $\text{SBS/NBS}=1$ για $\text{seed}=1038$	51
Εικόνα 6.24 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ και $\text{SBS/NBS}=1$ για $\text{seed}=1038$	51
Εικόνα 6.25 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=2563$	52
Εικόνα 6.26 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=2563$	53
Εικόνα 6.27 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=2563$	53
Εικόνα 6.28 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=2563$	54
Εικόνα 6.29 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=2563$	54
Εικόνα 6.30 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=2146$	55
Εικόνα 6.31 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=2146$	56
Εικόνα 6.32 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=2146$	56
Εικόνα 6.33 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=2146$	57
Εικόνα 6.34 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=2146$	57
Εικόνα 6.35 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=4244$	58
Εικόνα 6.36 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=4244$	59
Εικόνα 6.37 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=4244$	59
Εικόνα 6.38 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=4244$	60
Εικόνα 6.39 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=4244$	60
Εικόνα 6.40 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=1038$	61
Εικόνα 6.41 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $\text{SBS/NBS}=1$ και $\text{seed}=1038$	62



Εικόνα 6.42 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=1038$ .....	62
Εικόνα 6.43 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=1038$ .....	63
Εικόνα 6.44 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=1038$ .....	63
Εικόνα 6.45 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=2563$ .....	64
Εικόνα 6.46 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=2563$ .....	65
Εικόνα 6.47 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=2563$ .....	65
Εικόνα 6.48 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=2563$ .....	66
Εικόνα 6.49 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=2563$ .....	66
Εικόνα 6.50 Διάγραμμα δοκιμίου 60 H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=2146$ .....	67
Εικόνα 6.51 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=2146$ .....	68
Εικόνα 6.52 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=2146$ .....	68
Εικόνα 6.53 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $SDEV=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=2146$ .....	69
Εικόνα 6.54 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{MPa}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=2146$ .....	69
Εικόνα 6.55 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=4244$ .....	70
Εικόνα 6.56 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=4244$ .....	71
Εικόνα 6.57 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=4244$ .....	71
Εικόνα 6.58 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=4244$ .....	72
Εικόνα 6.59 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=4244$ .....	72
Εικόνα 6.60 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=1038$ .....	73
Εικόνα 6.61 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=1038$ .....	74
Εικόνα 6.62 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=1038$ .....	74
Εικόνα 6.63 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=1$ και $seed=1038$ .....	75

Εικόνα 6.64 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=1 και $seed=1038$ .....	75
Εικόνα 7.1 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	79
Εικόνα 7.2 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	80
Εικόνα 7.3 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	80
Εικόνα 7.4 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	81
Εικόνα 7.5 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	81
Εικόνα 7.6 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	82
Εικόνα 7.7 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	83
Εικόνα 7.8 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και τελικό διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	84
Εικόνα 7.9 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .	85
Εικόνα 7.10 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2146$ .....	86
Εικόνα 7.11 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2146$ ....	86
Εικόνα 7.12 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2146$ .....	87
Εικόνα 7.13 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2146$ ...	87
Εικόνα 7.14 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και τελικό διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2146$ .....	89
Εικόνα 7.15 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30, με $v=25\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=4244$ .....	90
Εικόνα 7.16 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=4244$ ....	90
Εικόνα 7.17 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και τελικό διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=4244$ .....	92
Εικόνα 7.18 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=4244$ ...	93
Εικόνα 7.19 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=4244$	93
Εικόνα 7.20 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=1038$ .....	94
Εικόνα 7.21 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και τελικό διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=1038$ .....	96
Εικόνα 7.22 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=1038$ .....	97
Εικόνα 7.23 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και τελικό διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=1038$ .....	98
Εικόνα 7.24 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και $seed=1038$	99
Εικόνα 7.25 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	100
Εικόνα 7.26 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	100
Εικόνα 7.27 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	101
Εικόνα 7.28 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	101
Εικόνα 7.29 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2563$ .....	102
Εικόνα 7.30 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2146$ .....	103
Εικόνα 7.31 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και $seed=2146$ .....	103

Εικόνα 7.32 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=2146$ .....	104
Εικόνα 7.33 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=2146$ .....	104
Εικόνα 7.34 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=2146$ .....	105
Εικόνα 7.35 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=4244$ .....	106
Εικόνα 7.36 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=4244$ .....	106
Εικόνα 7.37 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=4244$ .....	107
Εικόνα 7.38 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=4244$ .....	107
Εικόνα 7.39 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=4244$ .....	108
Εικόνα 7.40 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=1038$ .....	109
Εικόνα 7.41 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=1038$ .....	109
Εικόνα 7.42 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=1038$ .....	110
Εικόνα 7.43 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=1038$ .....	110
Εικόνα 7.44 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{MPa}$ , $sdev=10\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=1038$ .....	111
Εικόνα 7.45 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=2563$ .....	112
Εικόνα 7.46 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=2563$ .....	112
Εικόνα 7.47 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=2563$ .....	113
Εικόνα 7.48 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=2563$ .....	113
Εικόνα 7.49 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=2563$ .....	114
Εικόνα 7.50 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=2146$ .....	115
Εικόνα 7.51 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=2146$ .....	115
Εικόνα 7.52 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=2146$ .....	116
Εικόνα 7.53 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , $SBS/NBS=2$ και $seed=2146$ .....	116

Εικόνα 7.54 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{MPa}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και seed=2146 .....	117
Εικόνα 7.55 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και seed=4244 .....	118
Εικόνα 7.56 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και seed=4244 .....	118
Εικόνα 7.57 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και seed=4244 .....	119
Εικόνα 7.58 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και seed=4244 .....	119
Εικόνα 7.59 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και seed=4244 .....	120
Εικόνα 7.60 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με $v=25\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και seed=1038 .....	121
Εικόνα 7.61 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με $v=41.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και seed=1038 .....	121
Εικόνα 7.62 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με $v=50\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και seed=1038 .....	122
Εικόνα 7.63 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με $v=125\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και seed=1038 .....	122
Εικόνα 7.64 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με $v=166.7\text{mm/s}$ , $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=2 και seed=1038 .....	123

# 1 Εισαγωγή

Για τα περισσότερα πετρώματα που χρησιμοποιούνται ως τεχνικά υλικά είναι απαραίτητη η γνώση της αντοχής τους. Ωστόσο η αντοχή των πετρωμάτων διαφοροποιείται ανάλογα με τη φόρτιση που ασκείται κάθε φορά αλλά και με το μέγεθος τους. Η εξάρτηση της αντοχής από το μέγεθος του πετρώματος, δηλαδή από τον όγκο του, μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι τα μεγαλύτερου μεγέθους πετρώματα έχουν αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης ατελειών στη δομή τους. Όμως και τα άρρηκτα πετρώματα παρουσιάζουν διαφοροποίηση της αντοχής τους, χωρίς να μπορεί να εξηγηθεί το φαινόμενο αυτό με τον ίδιο τρόπο. Η επίδραση του μεγέθους στην αντοχή των πετρωμάτων ονομάζεται φαινόμενο κλίμακας.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση του φαινομένου κλίμακας, πειραματικών ερευνών ορισμένων πετρωμάτων που είναι εμφανές και η διερεύνηση του με κατάλληλο πρόγραμμα προσομοιώσεων σε μάρμαρο Διονύσου, ώστε να βγουν αποτελέσματα και συμπεράσματα για το συγκεκριμένο πέτρωμα.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια περιγραφή της δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη πετρωμάτων, καθώς και των σημαντικότερων μηχανικών παραμέτρων που προκύπτουν από αυτή. Επίσης γίνεται ανάλυση του τρόπου αστοχίας των πετρωμάτων σε μονοαξονική θλίψη και των συνηθέστερων μορφών θραύσης. Ακόμα αναφέρονται διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή των πετρωμάτων σε θλίψη. Πρέπει να αναφερθεί πως γίνεται επιλογή της παρουσίασης της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης καθώς τα πετρώματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε σύγκριση με άλλου είδους δοκιμών.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η σημασία του φαινομένου κλίμακας και γίνεται μια θεωρητική προσέγγιση του. Επιπρόσθετα αναφέρονται παραδείγματα άλλων πειραματικών μελετών του φαινομένου κλίμακας του Διονυσιακού μαρμάρου, του κογχυλιόλιθου, του παρόλιθου Κεγχρεών και του παρόλιθου Κύπρου.

Το 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αφορά το πρόγραμμα προσομοίωσης PFC2D και την επεξήγηση του τρόπου λειτουργίας του με μοντέλα συνδεδεμένων σωματιδίων και της διαδικασίας βαθμονόμησης του αριθμητικού προσομοιώματος.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η προετοιμασία και η βαθμονόμηση των χρησιμοποιούμενων αριθμητικών μοντέλων, η διαδικασία προσομοιώσεων και ο χρησιμοποιούμενος κώδικας.

Τα κεφάλαια 6 και 7 αποτελούν το πειραματικό-υπολογιστικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Γίνονται προσομοιώσεις σε διάφορα μεγέθη δοκιμίων του πετρώματος και υπολογίζονται οι μηχανικές παράμετροι ενδιαφέροντος. Επιπλέον παρατίθενται οι πίνακες αποτελεσμάτων και τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων μαζί με τις εικόνες θραύσης των πετρωμάτων σε κάθε μέγεθος δοκιμίου.

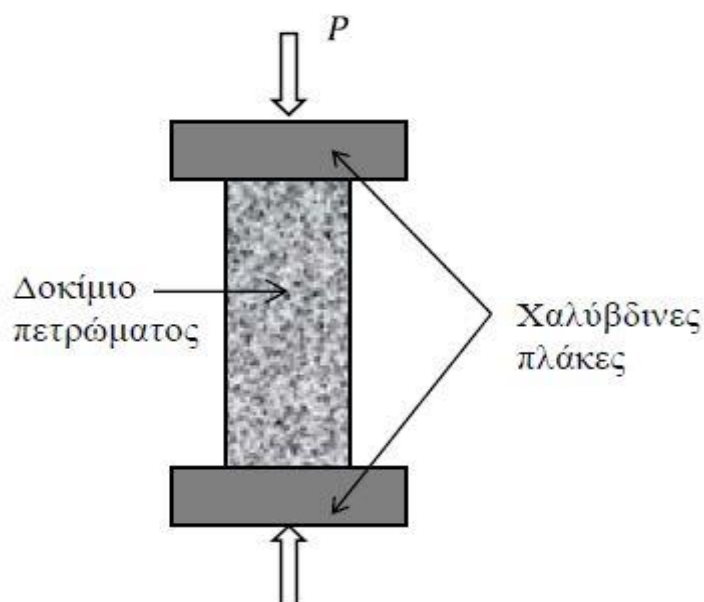
Στο 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα από τη μελέτη-προσομοίωση του πετρώματος σχετικά με τη συμπεριφορά του και το φαινόμενο κλίμακας.

Το 9<sup>ο</sup> κεφάλαιο αποτελεί τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.

## 2 Μονοαξονική θλίψη άρρηκτου πετρώματος

### 2.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (uniaxial compression test) ένας ορθός κυκλικός κύλινδρος πετρώματος συμπιέζεται μεταξύ δύο παράλληλων χαλύβδινων πλάκων. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μονοαξονικής ή ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής (uniaxial compressive strength, UCS), του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson του άρρηκτου πετρώματος.



Σχήμα 2.1 Μονοαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος<sup>[1]</sup>

Με τη δοκιμή επιδιώκεται η επιβολή μονοαξονικής εντατικής κατάστασης στο δοκίμιο. Το φορτίο ασκείται συνεχώς στο δοκίμιο, παράλληλα με τον άξονα αυτού, και αυξάνεται βαθμιαία με σταθερό ρυθμό μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Η αξονική τάση στο δοκίμιο υπολογίζεται από τον λόγο του ασκούμενου φορτίου προς τη διατομή του κυλινδρικού δοκιμίου και θεωρείται ομοιόμορφη. Ανεμπόδιστη ή μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος ονομάζεται η αξονική τάση στην οποία το πέτρωμα αστοχεί.

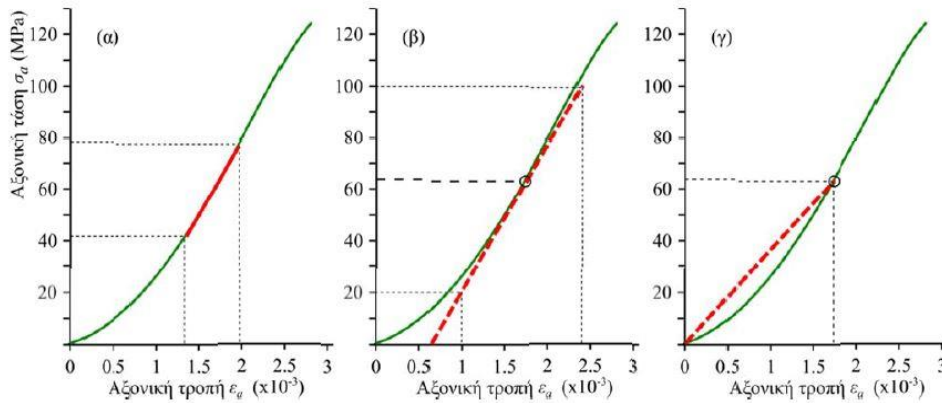
Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης απαιτεί ελάχιστη πολυπλοκότητα του εξοπλισμού εκτέλεσης και βασίζεται σε απλές αρχές. Επίσης, πραγματοποιούνται ευκολότερα από άλλες δοκιμές θλίψης, βοηθητικές μετρήσεις, όπως της αξονικής και πλευρικής τροπής, της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κυμάτων και της ακουστικής εκπομπής του πετρώματος.

Για τον προσδιορισμό των διαγραμμάτων τάσης-τροπής, του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson δοκιμίου ισότροπου πετρώματος, τόσο το ασκούμενο αξονικό φορτίο όσο και η παραμόρφωση του δοκιμίου μετρώνται και καταγράφονται σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Με τη συγκόλληση τροπόμετρων (strain gauges, SG) στην επιφάνεια του δοκιμίου πραγματοποιείται συνήθως η μέτρηση της παραμόρφωσης. Δύο οριζόντια και δύο κατακόρυφα τροπόμετρα απαιτούνται σύμφωνα με την προτεινόμενη πειραματική διαδικασία της ISRM (International Society for Rock Mechanics). Από τα κατακόρυφα υπολογίζεται η αξονική τροπή, ενώ από τα οριζόντια η περιμετρική τροπή.<sup>[1]</sup>

## 2.2 Ελαστικές σταθερές ισότροπου πετρώματος

Από τα διαγράμματα τάσης-τροπής μπορούν να υπολογιστούν το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson του πετρώματος. Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας  $E_t$  υπολογίζεται από την κλίση της εφαπτομένης στην καμπύλη αξονικής τάσης-αξονικής τροπής σε σημείο που αντιστοιχεί σε ποσοστό 50% της μέγιστης τάσης (Σχήμα 2.2β). Το μέσο μέτρο ελαστικότητας  $E_{av}$  υπολογίζεται από τη μέση κλίση του ευθύγραμμου χονδρικά τμήματος της ίδιας καμπύλης (Σχήμα 2.2α). Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας  $E_s$  υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που χαράσσεται στην ίδια καμπύλη, για τιμές τάσης μεταξύ 0 και 50% της μέγιστης τάσης (Σχήμα 2.2γ). Ο λόγος Poisson υπολογίζεται ως ο λόγος της κλίσης της καμπύλης αξονικής τάσης-αξονικής τροπής προς την κλίση της καμπύλης αξονικής τάσης-διαμετρικής τροπής.<sup>[1]</sup>



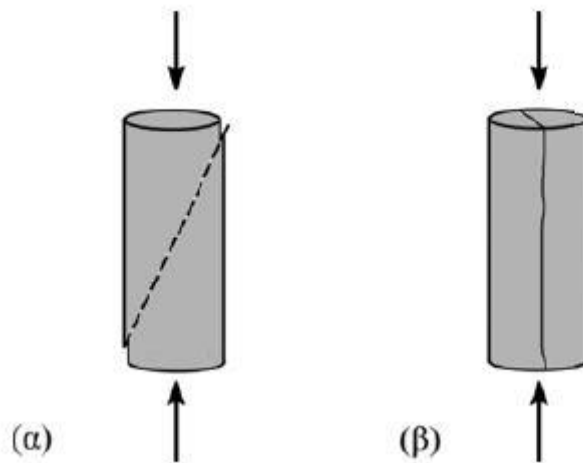


**Σχήμα 2.2** Γραφικός προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης<sup>[1]</sup>

### 2.3 Μικρορωγμάτωση και παραμόρφωση του πετρώματος

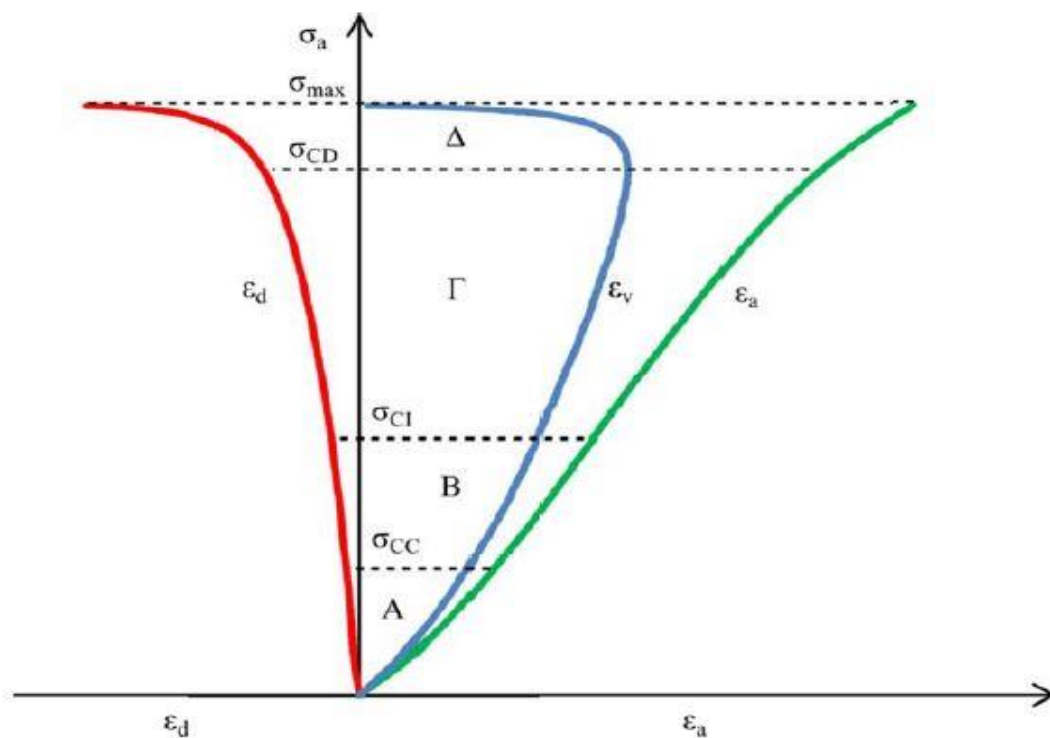
Σε μονοαξονική θλίψη η συμπεριφορά των περισσότερων πετρωμάτων χαρακτηρίζεται κυρίως ως ψαθυρή. Η ψαθυρή θραύση του πετρώματος θεωρείται ως ένα διακριτό φαινόμενο της διαδικασίας καταστροφής του, κατά το οποίο λαμβάνει χώρα αστοχία του πετρώματος με θραύση χωρίς να έχει εκδηλωθεί σημαντική παραμόρφωση και χωρίς προηγούμενη προειδοποίηση.

Δύο μορφές ψαθυρής θραύσης παρατηρούνται σε εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης: (α) διατμητική θραύση (Σχήμα 2.3α), κατά την οποία η επιφάνεια της θραύσης σχηματίζεται υπό γωνία μικρότερη των 45° ως προς τη θλιπτική αξονική τάση, ενώ η σχετική μετακίνηση είναι παράλληλη στην επιφάνεια της θραύσης, (β) εφελκυστική θραύση (Σχήμα 2.3β), η οποία χαρακτηρίζεται από διαχωρισμό κάθετα στην επιφάνεια θραύσης.



Σχήμα 2.3 Μακροσκοπικοί τύποι θραύσης του πετρώματος σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης<sup>[1]</sup>

Η εξέλιξη της παραμόρφωσης και της μικρορωγμάτωσης, από την έναρξη της μέχρι και τη μακροσκοπική θραύση του πετρώματος, ακολουθεί τέσσερα στάδια ή φάσεις, που δείχνονται ως περιοχές Α ως Δ στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Εξέλιξη της παραμόρφωσης και της μικρορωγμάτωσης πετρώματος κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης<sup>[1,2,3]</sup>

Στην αρχή η καμπύλη αξονικής τάσης – αξονικής τροπής έχει στραμμένα τα κοίλα προς τα άνω (περιοχή Α στο Σχήμα 2.4), καθώς ορισμένοι πόροι και προϋπάρχουσες μικρορωγμές του πετρώματος κλείνουν. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι αναστρέψιμη και συνεπώς η συμπεριφορά να είναι μη-γραμμικά ελαστική ή μερικώς ανελαστική. Το τέλος αυτού του σταδίου αντιστοιχεί σε τάση  $\sigma_{cc}$ , η οποία αναφέρεται ως τάση κλεισίματος μικρορωγμών (crack closure).

Στις περισσότερες περιπτώσεις ακολουθεί μια γραμμική σχέση τάσης – τροπής (περιοχή Β στο Σχήμα 2.4), όπου πραγματοποιείται κυρίως συμπίεση των κρυστάλλων και των κόκκων του πετρώματος. Τα στάδια Α και Β αποτελούν την άρρηκτη φάση του πετρώματος και είναι συνήθως το 30% έως 70% της διαδρομής της φόρτισης.

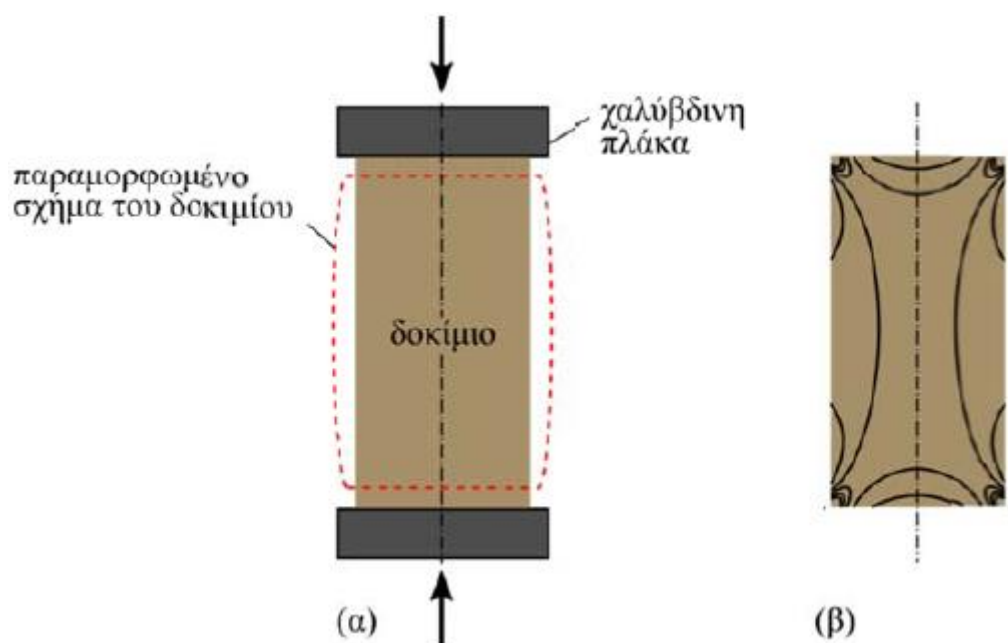
Η έναρξη της εσωτερικής μικρορωγμάτωσης του πετρώματος σηματοδοτεί την έναρξη της κατακλαστικής ευσταθούς φάσης (περιοχή Γ στο Σχήμα 2.4), όταν επιτευχθεί η τάση έναρξης ρωγμάτωσης (crack initiation stress)  $\sigma_{ci}$ . Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, ο ρυθμός αύξησης της διαμετρικής τροπής γίνεται μεγαλύτερος εκείνου της αξονικής, καθώς επεκτείνονται οι προϋπάρχουσες μικρορωγμές και σχηματίζονται νέες στις πιο κρίσιμα φορτισμένες περιοχές του πετρώματος. Η ανάπτυξη της μικρορωγμάτωσης στο στάδιο αυτό θεωρείται ευσταθής, εφόσον οποιαδήποτε επέκταση ή δημιουργία νέας ρωγμής απαιτεί την αύξηση της επιβαλλόμενης φόρτισης.

Το σημείο όπου παρατηρείται μείωση της ογκομετρικής τροπής σηματοδοτεί την έναρξη της κατακλαστικής ασταθούς φάσης (περιοχή Δ στο Σχήμα 2.4) σε τάση  $\sigma_{cd}$ , η οποία καλείται συχνά ως όριο ζημιάς ρωγμάτωσης (crack damage threshold). Ως διασταλτικότητα του πετρώματος χαρακτηρίζεται η παρατηρούμενη αύξηση του όγκου του δοκιμίου λόγω της ρωγμάτωσης. Στο στάδιο αυτό η διασταλτική συμπεριφορά του πετρώματος, λόγω σχηματισμού και ανάπτυξης μικρορωγμών, υπερισχύει της συμπίεσης λόγω της αυξανόμενης φόρτισης. Οι σχηματιζόμενες μικρορωγμές επεκτείνονται αναπτύσσοντας ένα σύστημα τεμνόμενων και συνεννοούμενων μικρορωγμών που τελικά σχηματίζουν μια συνεχή ή ημι-συνεχή διάρρηξη στο πέτρωμα. Φόρτιση του πετρώματος πέραν της  $\sigma_{cd}$  προκαλεί χρονικά εξαρτώμενη αύξηση της ζημιάς στο πέτρωμα και οδηγεί το δοκίμιο σε αστοχία ακόμη και υπό σταθερή φόρτιση.

Το στάδιο Δ ακολουθείται από τη φάση αστοχίας του πετρώματος, όπου επιτυγχάνεται το μέγιστο φορτίο. Το δοκίμιο είναι δυνατόν να εξακολουθήσει να βραχύνεται αξονικά με ταυτόχρονη όμως μείωση του εφαρμοζόμενου φορτίου.<sup>[1]</sup>

## 2.4 Εντατικό πεδίο στο δοκίμιο

Το δοκίμιο του Σχήματος 2.1 θα διαστέλλεται πλευρικά και ομοιόμορφα σε όλο το ύψος του, αν η εντατική κατάσταση του είναι ομοιόμορφη και μονοαξονική. Στην πραγματικότητα όμως στη συνήθη διάταξη μονοαξονικής θλίψης, λόγω τριβής και διαφορετικών ελαστικών ιδιοτήτων πετρώματος και χάλυβα, αναπτύσσονται διαμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια του δοκιμίου με τη πλάκα φόρτισης, οι οποίες δρουν προς τα μέσα και έτσι προκαλούν την ανάσχεση της πλευρικής διαστολής των άκρων του δοκιμίου. Η παρουσιαζόμενη παραμόρφωση του δοκιμίου λόγω της μερικής ανάσχεσης της πλευρικής διαστολής στα άκρα του δοκιμίου φαίνεται στο Σχήμα 2.5α. Οι ενδεικτικές καμπύλες ίσων τιμών της μέγιστης κύριας τάσης στο δοκίμιο παρουσιάζουν την πραγματική εντατική κατάσταση που επικρατεί.<sup>[1]</sup>

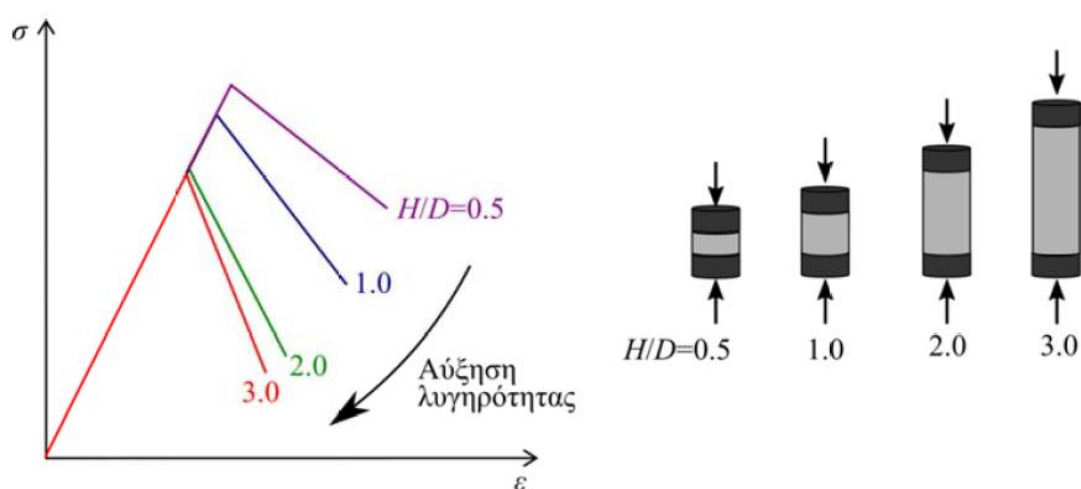


Σχήμα 2.5 Επίδραση του περιορισμού στα άκρα στην παραμόρφωση του δοκιμίου: (α) μερική ανάσχεση της πλευρικής διαστολής στα άκρα λόγω περιορισμού, (β) ενδεικτικές καμπύλες ίσων τιμών της μέγιστης κύριας τάσης στο εσωτερικό του δοκιμίου<sup>[1]</sup>

Ο περιορισμός της διαστολής των άκρων τείνει να αυξήσει τη μετρούμενη αντοχή, ωστόσο η συγκέντρωση τάσης, που προκύπτει λόγω της απότομης μεταβολής της διατμητικής τάσης στην άκρη της διεπιφάνειας χάλυβα – πετρώματος, τείνει να την μειώσει.<sup>[4]</sup>

## 2.5 Επίδραση του λόγου ύψους προς διάμετρο

Η μετρούμενη αντοχή σε κοντά δοκίμια προκύπτει μεγαλύτερη, λόγω του εξαναγκασμού των άκρων. Με την αύξηση της λυγηρότητας  $H/D$  του δοκιμίου, ένα μεγαλύτερο ποσοστό του όγκου του υποβάλλεται σε ομοιόμορφη μονοαξονική εντατική κατάσταση. Συνεπώς η επίδραση του καταναγκασμού μειώνεται σταδιακά και πέρα από μία τιμή της λυγηρότητας, η αντοχή παραμένει σταθερή και αντιπροσωπεύει τη πραγματική αντοχή υπό ομοιόμορφη μονοαξονική θλίψη. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων πετρώματος, με την αύξηση της λυγηρότητας τους.<sup>[1]</sup>



Σχήμα 2.6 Επίδραση της λυγηρότητας στις καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  για φόρτιση μέσω συμπαγών χαλύβδινων πλακών<sup>[1]</sup>

## 2.6 Άλλοι παράγοντες επιρροής της αντοχής του πετρώματος

Η επιπεδότητα και παραλληλότητα των άκρων του δοκιμίου ασκούν σημαντική επίδραση στη μετρούμενη αντοχή, στην μορφή της καμπύλης  $\sigma$ - $\epsilon$  και στην επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον για παρόμοιο σχήμα του δοκιμίου, η μονοαξονική θλιπτική αντοχή και η ψαθυρότητα του μειώνονται με την αύξηση του όγκου του. Συνήθως η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στις προϋπάρχουσες μικρορωγμές του πετρώματος, καθώς σε ένα μεγαλύτερο δοκίμιο θα υπάρχουν περισσότερες μικρορωγμές και στατιστικά αυξάνεται η πιθανότητα παρουσίας μίας ασθενέστερης μικρορωγμής που να προκαλέσει εκκίνηση της αστοχίας του δοκιμίου νωρίτερα. Για την εξήγηση του φαινομένου έχουν αναπτυχθεί διάφορες θεωρίες.

Οι Hoek & Brown, με βάση τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια διαμέτρου από 10mm έως 200mm, δίνουν τη παρακάτω προσεγγιστική σχέση για την επίδραση του όγκου στη μετρούμενη αντοχή:

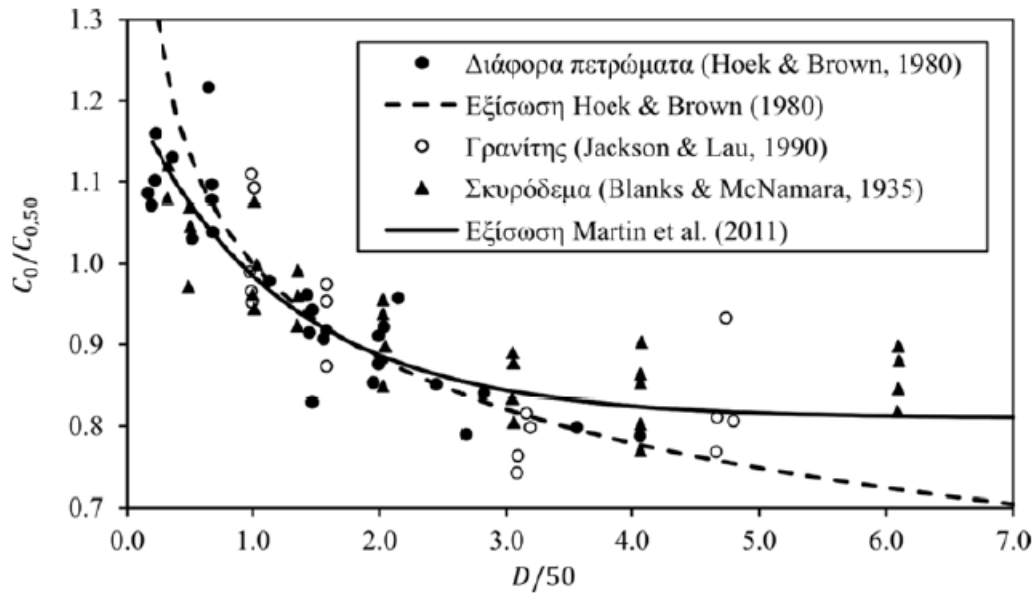
$$C_0 = C_{0,50} \left( \frac{50}{D} \right)^{0.18}$$

όπου D η διάμετρος σε mm, και  $C_{0,50}$  η μονοαξονική θλιπτική αντοχή δοκιμίου διαμέτρου 50mm. Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, η αντοχή δοκιμίου 350mm θα είναι κατά 70% μειωμένη σε σχέση με την αντοχή δοκιμίου διαμέτρου 50mm.<sup>[1,22]</sup>

Οι Martin et al., λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα των Hoek & Brown, δοκιμές σε γρανίτη με διάμετρο δοκιμίων έως 294mm και δοκιμές σε σκυρόδεμα με δοκίμια διαμέτρου έως 914mm και λόγο ύψους προς διάμετρο 2, συμπεραίνουν ότι η επίδραση του μεγέθους του άρρηκτου πετρώματος στην αντοχή περιορίζεται στο 80% της τυποποιημένης εργαστηριακής μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη.<sup>[1,23-25]</sup> Έτσι προτείνουν τη παρακάτω σχέση:

$$\frac{C_0}{C_{0,50}} = 0.81 + \frac{0.4}{\exp(D/60.5)}$$

Οι παραπάνω σχέσεις δίνονται σε διάγραμμα μαζί με τα πειραματικά δεδομένα στο παρακάτω Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου στην αντοχή<sup>[1]</sup>

Με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης αυξάνεται και η αντοχή του δοκιμίου. Για πολύ υψηλούς ή χαμηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης οι διαφορές που παρατηρούνται στη καμπύλη τάσης – τροπής μπορεί να είναι σημαντικές.<sup>[1]</sup>

## 3 Φαινόμενο κλίμακας (Size effect)

### 3.1 Σημασία φαινομένου κλίμακας

Το φαινόμενο κλίμακας αποτελεί την διαφοροποίηση της μηχανικής αντοχής των πετρωμάτων συναρτήσει του μεγέθους τους. Για τη κατανόηση της σημασίας του φαινομένου κλίμακας (size effect) κρίνεται σκόπιμη η παράθεση ενός παραδείγματος. Αρκετά συχνά σε αρχαιολογικές ανασκαφές ή αρχαιολογικούς χώρους είναι απαραίτητη η αναστύλωση και αποκατάσταση μνημείων. Αυτή η αποκατάσταση αποτελεί περίπλοκο και πολυδιάστατο επιστημονικό έργο. Σημαντικά στοιχεία που πρέπει να ληφθούν κάθε φορά υπόψη είναι η αντοχή και η παραμόρφωση των υλικών που επιλέγονται, καθώς και η συμπεριφορά τους σε περιβαλλοντικές συνθήκες, μηχανική καταπόνηση και φυσική διάβρωση.

Η δομική σταθερότητα του μνημείου αποτελεί το πιο σημαντικό από όλα τα στοιχεία που εξετάζονται κάθε φορά. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι διαθέσιμο το αρχικό πέτρωμα σε ικανοποιητική ποσότητα ή καθόλου για την αποκατάσταση των μνημείων, καθώς είτε το ορυχείο εξόρυξης του δεν λειτουργεί πλέον, είτε έχει καλυφθεί και κτιστεί. Συνεπώς πρέπει να βρεθεί ένα πέτρωμα αντικατάστασης, το οποίο να συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο με το αρχικό στις περιβαλλοντικές επιρροές, στη φυσική φθορά και τις μηχανικές καταπονήσεις.

Για ευνόητους λόγους δεν είναι δυνατή η προετοιμασία μεγάλων μεγεθών των αρχικών πετρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για εργαστηριακές δοκιμές, συνεπώς κρίνεται σκόπιμο οι δοκιμές αυτές να πραγματοποιούνται σε μικρότερα μεγέθη. Ωστόσο είναι γνωστό πως οι μηχανικές ιδιότητες και οι τιμές των μηχανικών σταθερών εξαρτώνται από το μέγεθος και το σχήμα των εξεταζόμενων δοκιμίων.

Σε εργαστηριακές δοκιμές και προγράμματα προσομοιώσεων γίνονται προσπάθειες προσδιορισμού και σύγκρισης των μηχανικών ιδιοτήτων και σταθερών των πιθανών πετρωμάτων αντικατάστασης με τα αρχικά. Είναι προφανώς ευκολότερες οι δοκιμές προσδιορισμού των ιδιοτήτων των πετρωμάτων σε μικρότερα μεγέθη μέχρι ένα ορισμένο σημείο και στη συνέχεια τα αποτελέσματα για μεγαλύτερα δοκίμια υπολογίζονται με βάση τις τάσεις των υπολογισμένων καμπυλών. Σημαντική είναι και η συμβολή των διάφορων προγραμμάτων



προσομοίωσης δοκιμών που έχουν αναπτυχθεί, για το προσδιορισμό των ιδιοτήτων των μεγάλων σε διαστάσεις δοκιμίων πετρωμάτων ή στις περιπτώσεις που δεν είναι διαθέσιμη ποσότητα πετρώματος οποιουδήποτε μεγέθους για τη διενέργεια δοκιμών. Επίσης μεγάλης σημασίας κρίνεται η διενέργεια προσομοιώσεων για διάφορα πετρώματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά, με στόχο τη μοντελοποίηση και την ορθή εκτίμηση της αντοχής τους, και των μηχανικών σταθερών, από τα εργαστηριακά μεγέθη, σε μεγέθη μεγαλύτερης τάξης κλίμακας που χρησιμοποιούνται στη πράξη (αποκατάσταση μνημείων, μεταλλευτικά και γεωτεχνικά έργα κ.α.)<sup>[5,6]</sup>

### 3.2 Θεωρητική προσέγγιση φαινομένου κλίμακας

Το φαινόμενο κλίμακας είναι ένα θέμα αυξανόμενου ενδιαφέροντος, καθώς πολλές εφαρμογές της μηχανικής πετρωμάτων περιλαμβάνουν μια ποικιλία μεγεθών τα οποία έχουν εύρος από μερικά μικρά (μέγεθος κόκκου) σε εκατοστά (μέγεθος εργαστηριακών δοκιμών) μέχρι αρκετά μέτρα (μέγεθος διακριτοποίησης στοιχείων). Η σύνδεση των διαστάσεων των μεγεθών των πετρωμάτων με την αντίδραση τους σε μηχανικές καταπονήσεις είναι αρκετά εμφανής για δοκίμια με πανομοιότυπα σχήματα και λόγους διαστάσεων.<sup>[7]</sup> Το φαινόμενο κλίμακας άρρηκτων ψαθυρών πετρωμάτων μπορεί να οφείλεται:

- i. Στην αστοχία πετρωμάτων σε μονοαξονική θλίψη με τη μορφή μικρών διακριτών ρωγμών με επακόλουθη κάμψη των εκάστοτε λεπτών στηλών του πετρώματος, το οποίο τελικά αστοχεί λόγω κάμψης.<sup>[8]</sup>
- ii. Στη μετατροπή της αποθηκευμένης ενέργειας παραμόρφωσης όγκου σε ενέργεια θραύσης επιφάνειας για τη δημιουργία νέων ρωγμών.<sup>[9]</sup>
- iii. Στο «φράκταλ» χαρακτήρα των επιφανειακών ρωγμών που παράγονται με την αστοχία των πετρωμάτων.<sup>[9]</sup>
- iv. Στην επίδραση της βαθμίδας της τάσης ή της τροπής.<sup>[10-15]</sup>
- v. Στην επίδραση της ενέργειας θραύσης και της αντοχής σε εφελκυσμό.<sup>[16,17]</sup>

Για τη περίπτωση **v.**, από αναλύσεις έχει βγει το συμπέρασμα ότι τέτοιου είδους υλικά έχουν ένα χαρακτηριστικό μήκος, το οποίο εξαρτάται από τη ζώνη θραύσης τους κάθε φορά. Επιπλέον οι θεωρίες **iii.** και **v.** αρχικά αναπτύχθηκαν για εφελκυστικές φορτίσεις υλικών με προϋπάρχουσες ρωγμές ή εγκοπές, στα οποία ο

εντοπισμός της τροπής σε συγκεκριμένα σημεία προκαλούσε την αστοχία του, η οποία προκαλούσε μια πεπερασμένου μεγέθους ζώνη θραύσης. Ωστόσο σήμερα πιστεύεται ότι ο εντοπισμός της τροπής σε συγκεκριμένα σημεία οφείλεται και σε αστοχία υλικών υπό μονοαξονική θλίψη με τη διαφορά ότι η ζώνη θραύσης θα είναι μεγαλύτερη.

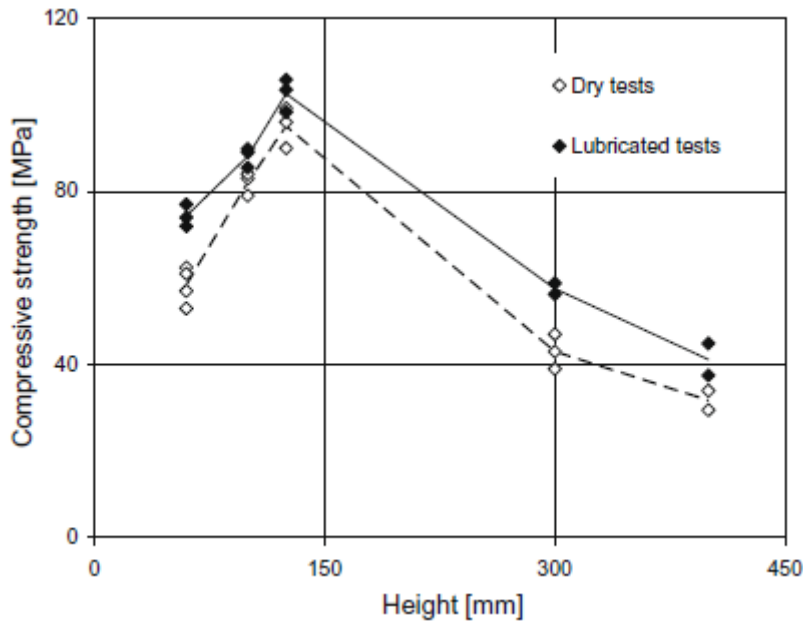
Η κατανόηση του φαινομένου κλίμακας είναι πολύ μεγάλης σημασίας, καθώς η πλειονότητα των εργαστηριακών πειραμάτων γίνονται σε δοκίμια μεγέθους μερικών εκατοστών, της τάξης 10-40cm. Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων, αφού τοποθετηθούν σε διαγράμματα, στη συνέχεια προεκτείνονται για την εύρεση των τιμών της αντοχής ή άλλων μηχανικών σταθερών για μεγαλύτερες διαστάσεις. Ωστόσο μέχρι στιγμής δεν έχει βρεθεί ο «κανόνας» της μετάβασης από τις διαστάσεις των εργαστηριακών πειραμάτων στις πιο συχνές διαστάσεις που συναντώνται στη πραγματικότητα. Έτσι ακόμα χρησιμοποιούνται εμπειρικές ή ημι-εμπειρικές σχέσεις για την επέκταση των αποτελεσμάτων σε μεγαλύτερες διαστάσεις. Το φαινόμενο κλίμακας έχει εξεταστεί περισσότερο, θεωρητικά και πειραματικά, για τη περίπτωση του τσιμέντου, καθώς αποτελεί το πλέον χρησιμοποιούμενο υλικό στις μοντέρνες κατασκευές. Τα πειραματικά δεδομένα για άλλα υλικά είναι αρκετά περιορισμένα και καθίσταται σημαντική η εξέταση άλλων δομικών υλικών για περαιτέρω ανάλυση και συμπεράσματα.<sup>[5]</sup>

### **3.3 Πειραματικές μελέτες του φαινομένου κλίμακας**

Οι πειραματικές μελέτες που θα παρουσιαστούν παρακάτω είχαν σκοπό να προσδιορίσουν τις αντοχές των πετρωμάτων σε μονοαξονική θλίψη, καθώς κατά κανόνα η αντοχή σε θλίψη των πετρωμάτων είναι μέχρι και 10 φορές μεγαλύτερη από ότι σε εφελκυσμό.

### 3.3.1 Το μάρμαρο Διονύσου

Το μάρμαρο Διονύσου αποτελείται κατά 98% από ασβεστίτη, έχει πυκνότητα  $2730\text{kg/m}^3$  και φαινόμενη πυκνότητα  $2717\text{kg/m}^3$ . Το πορώδες κυμαίνεται μεταξύ 0.3% και 0.7%, μετά την επίδραση διαφόρων φυσικών ή και τεχνητών διαβρωτικών παραγόντων. Το χρώμα του είναι εν γένει λευκό με λίγες στακτόχρωμες φλέβες κατά τη διεύθυνση της σχιστότητας του υλικού. Τοπικά εντοπίζονται ασημόχρωμες περιοχές λόγω της παρουσίας μικρών ποσοτήτων μοσχοβίτη και χλωρίτη. Η μηχανική συμπεριφορά του χαρακτηρίζεται από ανισοτροπία. Υπάρχουν τρεις διευθύνσεις ανισοτροπίας, μία κάθετη στις στρώσεις και δύο εντός του επιπέδου των στρώσεων. Ευρέως αποδεκτή άποψη αποτελεί πως το μάρμαρο Διονύσου μπορεί να αντιμετωπίζεται ως εγκαρσίως ισότροπο υλικό με έναν άξονα ελαστικής συμμετρίας απείρου τάξεως (τον κάθετο στις στρώσεις). Εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν από τους Ι. Βαρδουλάκης, Σ. Κουρκουλής, Γ. Εξαδάκτυλος, Α. Ροζάκης, σε κυλινδρικά δοκίμια μαρμάρου Διονύσου παρουσιάζουν, σε διάγραμμα αντοχής σε μονοαξονική θλίψη – ύψους δοκιμίου, μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού. Όλα τα δοκίμια της δοκιμής είχαν λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο με 2 ( $H/D=2$ ). Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές δοκιμών, μία στην οποία είχε τοποθετηθεί κατάλληλο λιπαντικό (στρώσεις στερεού στεαρικού οξέος και φύλλων πολυτετραφλουροαιθυλενίου PTFE) μεταξύ των πλακών θλίψεως και του δοκιμίου για την ελάττωση της τριβής και μία «εν ξηρώ», δηλαδή με απευθείας επαφή των πλακών θλίψεως και των εδρών των δοκιμίων. Το εύρος τιμών της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων ήταν από 31.4MPa έως 94.3MPa. Η μέγιστη αντοχή επιτεύχθηκε για ύψος δοκιμίου 120mm. Ωστόσο έχει αποδειχθεί ότι πειράματα με τριβή παρέχουν ελάχιστα αξιόπιστες πληροφορίες, σχετικά με τη καταστατική συμπεριφορά των γεωυλικών. Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται τα παραπάνω αποτελέσματα και η σχέση του μεγέθους με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.<sup>[5,18]</sup>

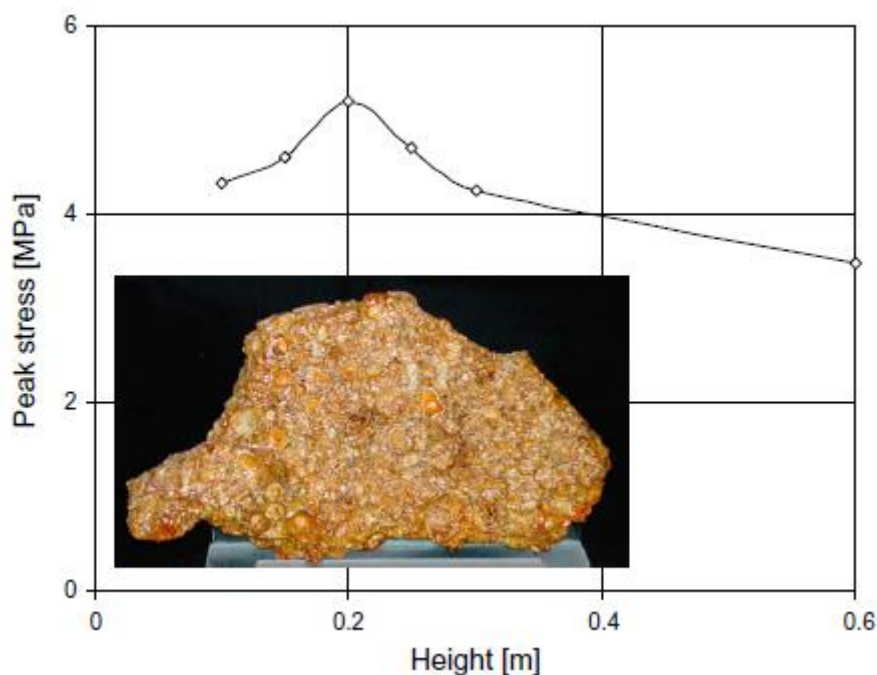


Σχήμα 3.1 Η εξάρτηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του μαρμάρου Διονύσου από το μέγεθος του δοκιμίου<sup>[5]</sup>

### 3.3.2 Ο κογχυλιόλιθος στο ναό του Δία στην Ολυμπία

Παρόμοια μη γραμμική συμπεριφορά για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη παρουσίασε σε πειράματα των Ι. Βαρδουλάκης, Σ. Κουρκουλής, Γ. Εξαδάκτυλος, Α. Ροζάκης, ο κογχυλιόλιθος, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την αναστήλωση του ναού του Δία στην Ολυμπία. Ο κογχυλιόλιθος είναι ένα έντονα ανομοιογενές υλικό, αποτελούμενο από επάλληλες στρώσεις αυθαίρετα τοποθετημένων κοχυλιών, οι οποίες συνδέονται χαλαρά μεταξύ τους με τη βοήθεια στρώσεων ασβέστου. Το μέγεθος των κοχυλιών ποικίλλει μεταξύ λίγων χιλιοστών και αρκετών εκατοστών. Η στρωσιγενής αυτή δομή επιβάλλει στο κογχυλιόλιθο μια ισχυρή εγκάρσια ανισοτροπία, δηλαδή το υλικό χαρακτηρίζεται από δύο διευθύνσεις ανισοτροπίας, μια κάθετη στις στρώσεις των κοχυλιών και μια εντός των στρώσεων, με μηχανικές ιδιότητες τελείως διαφορετικές μεταξύ τους. Για την ελαχιστοποίηση της τριβής μεταξύ πλακών και δοκιμίου, στα πειράματα μονοαξονικής θλίψης χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σύστημα λίπανσης με του μαρμάρου Διονύσου παραπάνω. Στην εργαστηριακή δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν 6 διαφορετικά μεγέθη κυλινδρικών δοκιμίων με λόγο ύψους προς διάμετρο  $H/D=2$ , για τη διατήρηση της ομοιότητας ως προς το παράγοντα του σχήματος μεταξύ τους. Το ύψος των δοκιμίων ήταν ίσο με 100mm, 150mm,

200mm, 250mm, 300mm και 600mm. Η μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει του ύψους φαίνεται στο Σχήμα 3.2, μαζί με μία φωτογραφία όπου φαίνεται η έντονη ανομοιογένεια του συγκεκριμένου υλικού. Η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται για ύψος δοκιμίου ίσο με 200mm<sup>[5,18,19]</sup>



Σχήμα 3.2 Η επίδραση του ύψους στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του κογχυλιόλιθου<sup>[5]</sup>

### 3.3.3 Ο πωρόλιθος Κεγχρεών στο Ασκληπιείο της Επιδαύρου

Εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν από τους Ι. Βαρδουλάκης, Σ. Κουρκουλής, Γ. Εξαδάκτυλος, Α. Ροζάκης, για τη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων του πωρόλιθου Κεγχρεών για τη πιθανή χρησιμοποίησή του στην αναστήλωση του Ασκληπιείου της Επιδαύρου. Ο πωρόλιθος Κεγχρεών είναι ένα υψηλού πορώδους (35%-40%) πέτρωμα, με αμμώδη εμφάνιση, ομογενή, στρωσιγενή με περίπλοκα δίκτυα μακροσκοπικώς ορατών εσωτερικών πόρων, οι οποίοι συχνά διαπερνούν τη δομή ολόκληρων δοκιμίων. Περιέχει περίπου 55% CaO και 0.3% MgO, η πυκνότητα του είναι  $2.4\text{g/cm}^3$ , η ξηρή του πυκνότητα είναι  $1.47\text{g/cm}^3$  και ο λόγος των κενών ισούται με 0.61. Το χρώμα του είναι λευκό-μπεζ. Η στρωσιγενής

δομή του υλικού του προδίδει ελαφρώς ανισότροπα μηχανικά χαρακτηριστικά, παρόμοια ποιοτικώς με αυτά του κογγυλιόλιθου αλλά σαφώς πιο ασθενή.

Για τον προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη διενεργήθηκαν από τους S.K. Kourkoulis, E. Ganniari-Papageorgiou et al, εργαστηριακές δοκιμές σε κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια του πετρώματος. Για τα κυλινδρικά δοκίμια η διάμετρος διατηρήθηκε σταθερή και ίση με 80mm, ενώ το ύψος είχε εύρος από 40 έως 160mm με λόγους ύψους προς διάμετρο 0.54, 0.75, 1.04, 1.25, 1.54, 1.75 και 2.00. Στα κυβικά δοκίμια οι ακμές τους είχαν μήκος 50, 60, 73, 93 και 120mm. Δέκα με είκοσι δοκίμια για κάθε γεωμετρική τάξη χρησιμοποιήθηκαν, ανάλογα με τα αποτελέσματα της δοκιμής. Στην πλειοψηφία των δοκιμών δεν τοποθετήθηκε σύστημα λίπανσης ανάμεσα στις πλάκες θλίψης και των εδρών των δοκιμίων, καθώς εξετάζόταν η χρήση τους για απευθείας επαφή με τα υπάρχοντα δομικά υλικά του μνημείου και οι τιμές των πειραμάτων θα θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικές σε αυτή τη περίπτωση. Ωστόσο για λόγους σύγκρισης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και με χρήση του ίδιου συστήματος λίπανσης όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων, ο αριθμός των δοκιμίων, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και η τυπική απόκλιση για κάθε τάξη δοκιμίων φαίνονται στους πίνακες 3.1 και 3.2.

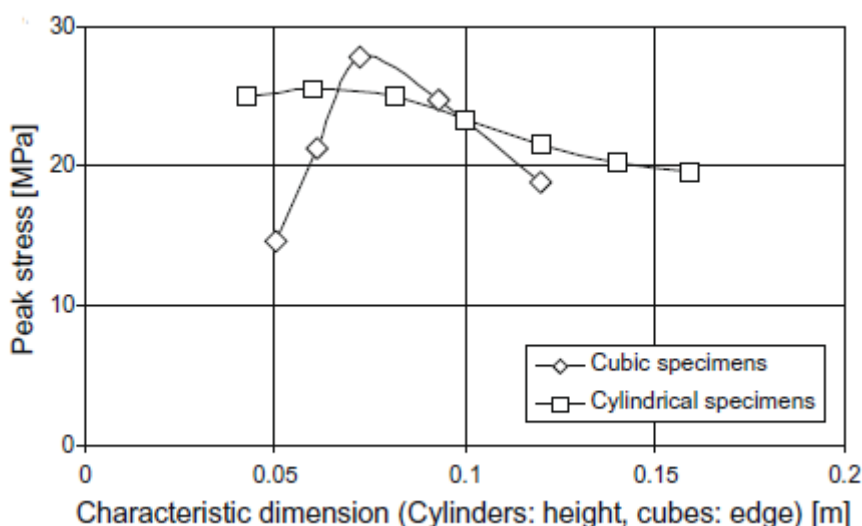
**Πίνακας 3.1 Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ο αριθμός των δοκιμίων, τα αποτελέσματα για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και η τυπική απόκλιση για τα κυλινδρικά δοκίμια<sup>[5]</sup>**

Diameter (mm)	Height (mm)	Height/diameter (-)	Number of specimens	Peak compressive stress, $\sigma_p$ (MPa)	Standard deviation (MPa)	"Load" rate (m/s)
80	43	0.54	10	25.0	±2.3	$2.5 \times 10^{-6}$
80	60	0.75	10	25.5	±2.7	
80	80	1.00	14	24.9	±3.1	
80	100	1.25	10	23.3	±2.8	
80	120	1.50	12	21.5	±2.4	
80	140	1.75	12	20.2	±1.9	
80	160	2.00	10	19.6	±1.8	

**Πίνακας 3.2 Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ο αριθμός των δοκιμίων, τα αποτελέσματα για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και η τυπική απόκλιση για τα κυβικά δοκίμια<sup>[5]</sup>**

Edge (mm)	Number of tests	Peak compressive stress, $\sigma_p$ (MPa)	Standard deviation (MPa)	"Load" rate (m/s)
50	15	14.7	±1.2	$2.5 \times 10^{-6}$
60	14	21.2	±2.1	
73	19	27.9	±4.4	
93	13	24.7	±2.7	
120	14	18.9	±1.8	

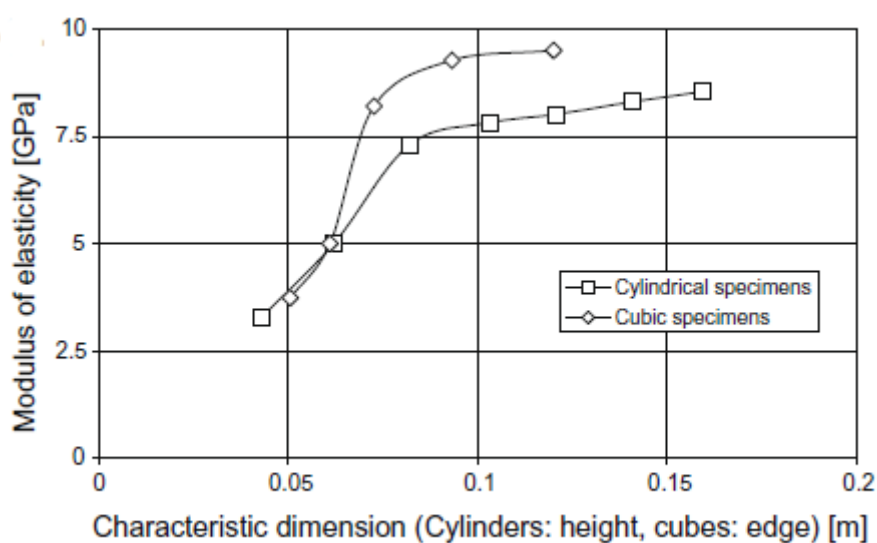
Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη για τα κυλινδρικά και τα κυβικά δοκίμια συναρτήσει του ύψους και του μήκους της ακμής τους αντίστοιχα. Γίνεται αντιληπτό πως η μεταβολή της αντοχής συναρτήσει του μεγέθους είναι διαφορετική για τα κυλινδρικά και τα κυβικά δοκίμια. Για τα κυλινδρικά δοκίμια φαίνεται πως η μεταβολή είναι σχεδόν γραμμική, αυξάνοντας το ύψος των δοκιμίων η αντοχή μειώνεται ακολουθώντας σιγμοειδή μείωση. Για τα μικρότερα δοκίμια ( $h=40\text{mm}$ ) η τιμή της αντοχής είναι ίση με  $25\text{MPa}$ , ενώ για τα μεγαλύτερα ( $h=160\text{mm}$ ) η τιμή της αντοχής είναι μικρότερη από  $20\text{MPa}$ , δηλαδή παρατηρείται μεταβολή περίπου 20%. Για τα κυβικά δοκίμια, η αντοχή αυξάνεται με την αύξηση των διαστάσεων, φτάνει την μέγιστη τιμή των  $28\text{MPa}$  για τιμή ακμής  $75\text{mm}$  και στη συνέχεια μειώνεται. Η μεταβολή των τιμών των αποτελεσμάτων για τα κυβικά δοκίμια είναι μεγαλύτερη από 45%.



Σχήμα 3.3 Η μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με το μέγεθος του δοκιμίου<sup>[5]</sup>

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του μεγέθους για τα κυλινδρικά και τα κυβικά δοκίμια. Τα αποτελέσματα ήταν απρόσμενα καθώς επικρατούσε η άποψη ότι το μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάζεται από το μέγεθος των δοκιμίων. Για τα κυλινδρικά δοκίμια οι τιμές έχουν εύρος από  $3\text{GPa}$  έως λίγο περισσότερο από  $8\text{GPa}$ , ενώ για τα κυβικά οι τιμές έχουν εύρος από  $3.5\text{GPa}$  έως  $9\text{GPa}$ . Παρατηρείται μεταβολή των τιμών μεγαλύτερη του 200% και για τις δύο περιπτώσεις. Επιπλέον είναι εμφανές πως η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας είναι πανομοιότυπη και στις δύο περιπτώσεις, οι τιμές

αυξάνονται βαθμιαία καθώς αυξάνεται το μέγεθος των δοκιμίων και στη συνέχεια είναι περίπου σταθερές γύρω στα 9GPa.<sup>[5,18]</sup>

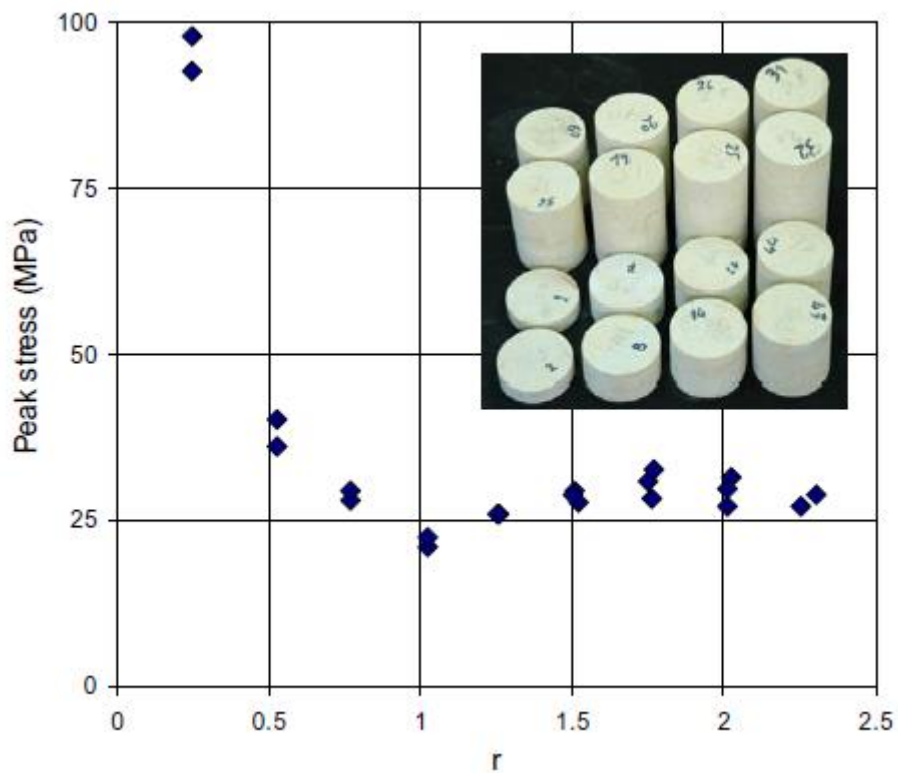


Σχήμα 3.4 Η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας με το μέγεθος του δοκιμίου<sup>[5]</sup>

### 3.3.4 Ο πωρόλιθος Κύπρου

Ως εναλλακτική λύση του πωρόλιθου Κεγχρεών εξετάστηκε από τους Ι. Βαρδουλάκης, Σ. Κουρκουλής, Γ. Εξαδάκτυλος, Α. Ροζάκης, ο πωρόλιθος Κύπρου, ο οποίος έχει εξαιρετικά ομογενή δομή. Προετοιμάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια σταθερής διαμέτρου 10cm με λόγους ύψους προς διάμετρο,  $r$ , από 0.25 έως σχεδόν 2.5 και υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη. Για τις δοκιμές δεν χρησιμοποιήθηκε σύστημα λίπανσης για την ελάττωση της τριβής μεταξύ των πλακών θλίψης και των εδρών των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών, η μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με το λόγο  $r$  φαίνονται στο Σχήμα 3.5. Για πολύ μικρά δοκίμια ( $r < 0.5$ ) η αντοχή αυξάνεται με μειούμενο  $r$ , ενώ για σχετικά ενδιάμεσου μεγέθους δοκίμια παρατηρείται μη γραμμική συμπεριφορά.<sup>[5,18]</sup>





Σχήμα 3.5 Η επιρροή του λόγου  $r$  (ύψος προς διάμετρο) στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πορόλιθου της Κόπρου<sup>[5]</sup>

## 4 Πρόγραμμα προσομοίωσης PFC2D

Το πρόγραμμα προσομοιώσεων PFC2D (Particle Flow Code 2D, δισδιάστατος κώδικας ροής σωματιδίων) δίνει τη δυνατότητα, κατασκευάζοντας μοντέλα συνδεδεμένων σωματιδίων (bonded particle model, BPM), για το προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων, των μικρορωγμών και της αστοχίας των πετρωμάτων χωρίς καμία προηγούμενη υπόθεση για τη συμπεριφορά των υλικών. Η αποδοτικότητα του BPM για την ρεαλιστική αναπαραγωγή της μικροσκοπικής και μακροσκοπικής συμπεριφοράς του πετρώματος στις εργαστηριακές δοκιμές είναι γνωστή, ακόμα και για περίπλοκα δοκίμια και διατάξεις.<sup>[6]</sup>

### 4.1 Μοντέλο επαφής (Contact model)

Το γραμμικό μοντέλο παράλληλων δεσμών (linear parallel bond model, LPBM) είναι ένα είδος μοντέλου επαφής μεταξύ δισκοειδών σωματιδίων. Το LPBM προσομοιώνει τη μηχανική συμπεριφορά πεπερασμένου μεγέθους, παρόμοιων τσιμέντου, συνδεδεμένων υλικών μεταξύ δύο παρακείμενων σωματιδίων σε επαφή. Δύο σειρές επιμηκών ελαστικών ελατηρίων, ορθό και παράλληλο στο επίπεδο επαφής, χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της ορθής και διατμητικής δυσκαμψίας των επαφών και των δεσμών. Ορθές και διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται με τη σχετική κίνηση των σωματιδίων σε επαφή. Η αντοχή των δεσμών παρέχεται από έναν όρο για την ορθή και τη διατμητική αντοχή. Ο δεσμός σπάει όταν η ορθή ή η διατμητική τάση υπερβεί την αντίστοιχη αντοχή. Τότε το υλικό του δεσμού απομακρύνεται από το μοντέλο και ολίσθηση μεταξύ των σε επαφή σωματιδίων επιτρέπεται σύμφωνα με νόμο ολίσθησης-τριβής.<sup>[6]</sup>

## 4.2 Βαθμονόμηση BPM

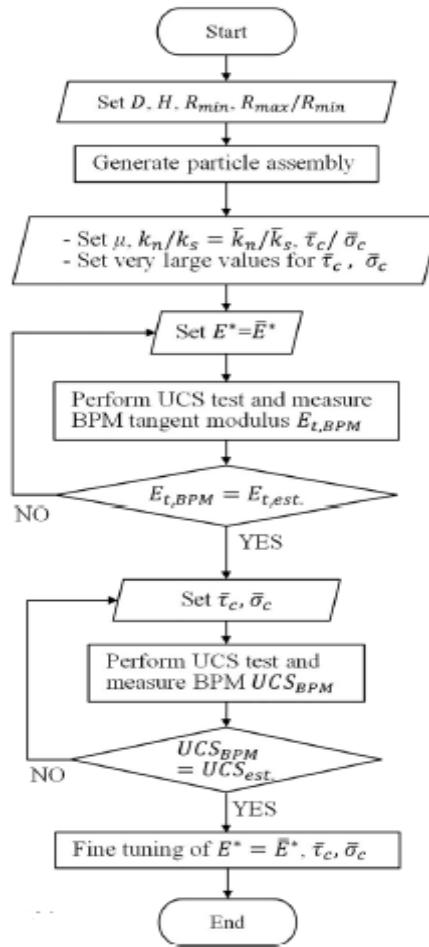
Οι μικροπαράμετροι του LPBM υλικού περιγράφονται από τις ιδιότητες της δυσκαμψίας και αντοχής των σωματιδίων και των δεσμών τους. Για το καθορισμό του παράλληλου δεσμού, είναι αναγκαίος ο καθορισμός των τιμών της ορθής και της διατμητικής δυσκαμψίας των επαφών ( $k_n, k_s$ ) και των δεσμών ( $\bar{k}_n, \bar{k}_s$ ), οι οποίες σχετίζονται με τα αντίστοιχα μέτρα τους,  $E^*$  για τις επαφές και  $\bar{E}^*$  για τους δεσμούς και με τους αντίστοιχους λόγους ορθής προς διατμητικής δυσκαμψίας,  $\kappa^* = k_n/k_s$  για τις επαφές και  $\bar{\kappa}^* = \bar{k}_n/\bar{k}_s$  για τους δεσμούς. Η αντοχή των δεσμών εξαρτάται από την εφελκυστική ( $\bar{\sigma}_c$ ) και διατμητική ( $\bar{\tau}_c$ ) αντοχή του συνδετικού υλικού. Ο συντελεστής τριβής ( $\mu$ ) μεταξύ των σωματιδίων καθορίζει το όριο ολίσθησης μετά τη διάρρηξη του δεσμού. Επιπρόσθετα για την ανάπτυξη της συνδεσμολογίας των σωματιδίων, η ελάχιστη ακτίνα των δισκοειδών σωματιδίων  $R_{\min}$  και ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη ακτίνα των σωματιδίων  $R_{\max}/R_{\min}$  πρέπει να καθοριστούν.

Η επιλογή των μικροπαραμέτρων του BPM δεν επηρεάζει μόνο τις μακροσκοπικές μηχανικές ιδιότητες του συνθετικού υλικού, όταν υπόκειται υπό αριθμητική δοκιμή φόρτισης, αλλά και τη μορφή αστοχίας του αριθμητικού δοκιμίου. Τα μέτρα των επαφών και των δεσμών, τα οποία καθορίζουν τη δυσκαμψία των ελατηρίων των επαφών και των δεσμών, μπορούν να συσχετιστούν με το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Επιπλέον ο λόγος της ορθής προς τη διατμητική δυσκαμψία μπορεί να συσχετιστεί με το λόγο Poisson του υλικού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αρχικά, ορίζοντας πολύ μεγάλες τιμές για την αντοχή των δεσμών του υλικού, ώστε να συμπεριφέρεται ελαστικά. Ωστόσο περισσότερη μελέτη απαιτείται για τη μετέπειτα επιλογή της αντοχής των δεσμών.

Ο λόγος  $\bar{\tau}_c / \bar{\sigma}_c$  της διατμητικής αντοχής των δεσμών (shear bond strength, SBS) προς την εφελκυστική αντοχή των δεσμών (normal bond strength, NBS) επηρεάζει την ανάπτυξη των διατμητικών και εφελκυστικών μικρορωγμών, δηλαδή τον τρόπο διάρρηξης του δεσμού. Έχει παρατηρηθεί ότι με τον ορισμό του λόγου  $SBS/NBS=2$ , το BPM επαφής προσομοιώνει πιο ρεαλιστικά τον τρόπο αστοχίας<sup>[20]</sup>, ενώ για ίσες τιμές των SBS και NBS είναι πιο εύκολα αντιληπτοί οι μηχανισμοί

ρωγμάτωσης που ενεργοποιούνται από τη διατμητική μικρορωγμάτωση και την επακόλουθη διατμητική παραμόρφωση κατά μήκος της διαδρομής ρωγμάτωσης.<sup>[21]</sup>

Αρχικά για τη βαθμονόμηση του BPM ορίζονται το ύψος  $H$  και η διάμετρος  $D$  του αριθμητικού δοκιμίου, η ελάχιστη ακτίνα των δισκοειδών σωματιδίων  $R_{\min}$  και ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη ακτίνα των δισκοειδών σωματιδίων  $R_{\max}/R_{\min}$ . Στη συνέχεια δημιουργείται η συνδεσμολογία των σωματιδίων. Ορίζονται ο συντελεστής τριβής μεταξύ των σωματιδίων  $\mu$ , ο λόγος της διατμητικής αντοχής των δεσμών προς την εφελκυστική αντοχή των δεσμών SBS/NBS με μεγάλες τιμές αρχικά και ο λόγος της ορθής προς την διατμητική δυσκαμψία ίσος ( $\kappa^* = \bar{\kappa}^*$ ) για τις επαφές και τους δεσμούς. Με τις μεγάλες τιμές του λόγου SBS/NBS και τη διαφοροποίηση των τιμών των  $E^* = \bar{E}^*$ , διενεργείται δοκιμαστική δοκιμή μονοαξονικής θλίψης μέχρι την επίτευξη του εκτιμώμενου μέτρου ελαστικότητας  $E_{t,est}$ , ώστε να επιτευχθεί η βαθμονόμηση του μέτρου ελαστικότητας των επαφών και των δεσμών ( $E_{t,BPM}$ ). Έπειτα, διατηρώντας τις τιμές  $E^* = \bar{E}^*$ , οι τιμές των SBS και NBS βαθμονομούνται με αντίστοιχο τρόπο μέχρι το μοντέλο BPM να πετύχει την εκτιμώμενη τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη ( $UCS_{est}$ ), δηλαδή να ισχύει  $UCS_{BPM} = UCS_{est}$ .<sup>[6]</sup> Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας βαθμονόμησης του μοντέλου BPM.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βαθμονόμησης του μοντέλου BPM<sup>[6]</sup>

## 5 Προσομοίωση εργαστηριακής δοκιμής προσδιορισμού της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων με χρήση του PFC2D

### 5.1 Προετοιμασία και βαθμονόμηση BPM

Με το πρόγραμμα προσομοίωσης PFC2D πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια μαρμάρου Διονύσου με λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο με 2 ( $H/D=2$ ). Οι διαστάσεις τους ήταν για ύψη ίσα με 60mm, 100mm, 120mm, 300mm και 400mm, με αντίστοιχες διαμέτρους 30mm, 50mm, 60mm, 150mm και 200mm. Η ελάχιστη ακτίνα των δισκοειδών σωματιδίων  $R_{\min}$  είναι ίση με 0,5mm, ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη ακτίνα των δισκοειδών σωματιδίων  $R_{\max}/R_{\min}$  είναι ίσος με 1.5 και ο συντελεστής τριβής μεταξύ των σωματιδίων μ ορίστηκε ίσος με 0.577. Επίσης ο λόγος της ορθής προς τη διατμητική δυσκαμψία για τις επαφές και τους δεσμούς ορίστηκε ίσος με 2 ( $\kappa^* = \bar{\kappa}^* = 2$ , όπου  $\kappa^* = k_n/k_s$  για τις επαφές και  $\bar{\kappa}^* = \bar{k}_n/\bar{k}_s$  για τους δεσμούς). Το εκτιμώμενο μέτρο ελαστικότητας  $E_{t,est} = 72.3\text{GPa}$  και η εκτιμώμενη τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη  $UCS_{est} = 103\text{MPa}$  ορίστηκαν με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών των Ι. Βαρδουλάκης, Σ. Κουρκουλής, Γ. Εξαδάκτυλος, Α. Ροζάκης, για το μάρμαρο Διονύσου που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Θεωρήθηκε ότι μεταξύ των πλακών φόρτισης και του δοκιμίου είναι ελαττωμένη η τριβή με τη χρήση λιπαντικού.

Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές δοκιμών για κάθε δοκίμιο, μία με λόγο διατμητικής προς εφελκυστικής αντοχής των δεσμών ίσο με 1 και η άλλη ίσο με 2, δηλαδή για  $SBS/NBS=1$  και  $SBS/NBS=2$  αντίστοιχα. Σε κάθε σειρά δοκιμών έγινε διαφορετική βαθμονόμηση για καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων. Έτσι σε δοκιμαστικές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης για  $SBS/NBS=1$ , οι τιμές των  $E^* = \bar{E}^*$  ορίστηκαν ίσες με 37,85GPa και οι  $SBS=NBS=39.47\text{MPa}$ , ενώ για  $SBS/NBS=2$ , οι τιμές των  $E^* = \bar{E}^*$  ορίστηκαν ίσες με 37,87GPa και οι  $SBS=62.8\text{MPa}$  και  $NBS=31.4\text{MPa}$ , έτσι ώστε να υπάρχει η καλύτερη δυνατή προσέγγιση των εκτιμώμενων τιμών του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής σε μονοαξονική

θλίψη. Η βαθμονόμηση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε και για τις δύο σειρές δοκιμών στις διαστάσεις για ύψος (H) 120mm και διάμετρο (D) 60mm, ή H120W60.

## 5.2 Διαδικασία προσομοιώσεων

Για κάθε σειρά δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές προσομοιώσεις για κάθε μέγεθος δοκιμών ως εξής:

- i. Ταχύτητα πλακών θλίψης δοκιμίου ίση με  $v=50\text{mm/s}$ , για seed = 2563.
- ii. Μεταβαλλόμενη ταχύτητα πλακών θλίψης δοκιμίου, ώστε να διατηρείται ο ίδιος ρυθμός παραμόρφωσης, για seed = 2563.
- iii. Μεταβαλλόμενη ταχύτητα πλακών θλίψης δοκιμίου, ώστε να διατηρείται ο ίδιος ρυθμός παραμόρφωσης, για seed ίσο με 2146, 4244 και 1038.
- iv. Εισαγωγή τυχαιότητας στις μικροπαραμέτρους της βαθμονόμησης, με χρήση της κανονικής κατανομής για τυπικές αποκλίσεις 10MPa και 20MPa για τα SBS και NBS, για seed ίσο με 2563, 2146, 4244 και 1038.

Το seed αποτελεί τιμή που αντιστοιχεί στη μοναδικότητα του μοντέλου. Έτσι μπορούν να γίνουν διάφορες προσομοιώσεις για μοντέλα με ίδιες παραμέτρους αλλά ταυτόχρονα να διατηρείται η μοναδικότητά τους. Σε περίπτωση που επαναληφθεί δοκιμή με ίδιο seed θα βγουν τα ίδια αποτελέσματα.

Για την εύρεση της ταχύτητας των πλακών θλίψης κάθε διάστασης δοκιμίου, ώστε να διατηρείται ο ίδιος ρυθμός παραμόρφωσης (με τη περίπτωση i) χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση:

$$v(H) = \left( \frac{50\text{mm/s}}{120\text{mm}} \right) \times H(\text{mm})$$

Έτσι οι τιμές της ταχύτητας για τις διάφορες διαστάσεις των δοκιμίων προέκυψαν ως εξής:

- ❖ Για H60W30 →  $v = 25\text{mm/s}$
- ❖ Για H100W50 →  $v = 41.7\text{mm/s}$
- ❖ Για H120W60 →  $v = 50\text{mm/s}$
- ❖ Για H300W150 →  $v = 125\text{mm/s}$
- ❖ Για H400W200 →  $v = 166.7\text{mm/s}$

Σε κάθε προσομοίωση των δοκιμίων προσδιοριζόταν η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS σε MPa και το μέσο μέτρο ελαστικότητας E σε GPa.

Στο τέλος έγιναν επίσης υπολογισμοί της αντοχής UCS με τη χρήση των σχέσεων των Hoek & Brown και Martin et al, για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων.

### 5.3 Χρησιμοποιούμενος κώδικας

Για τη δημιουργία των διαστάσεων των δοκιμίων στο πρόγραμμα PFC2D χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας που φαίνεται στις εικόνες παρακάτω (wall create vertices). Επιπλέον είναι εμφανείς και άλλες ρυθμίσεις του μοντέλου όπως, το seed (set random), ο λόγος της ορθής προς τη διατμητική δυσκαμψία (kratio), οι τιμές των μέτρων  $E^* = \bar{E}^*$  (deform emod και pb\_deform emod), οι ακτίνες των δισκοειδών σωματιδίων (radius), η πυκνότητα του υλικού (density), η διατμητική αντοχή των δεσμών SBS (pb\_coh), η εφελκυστική αντοχή των δεσμών NBS (pb\_ten), η ταχύτητα των πλακών θλίψης του δοκιμίου (yvel) και η τιμή της τυπικής απόκλισης για την διατμητική και εφελκυστική αντοχή των δεσμών ( pb\_coh\_sdev και pb\_sn\_sdev αντίστοιχα). Ακολουθούν τα στιγμιότυπα εικόνων που περιέχουν τα παραπάνω στοιχεία:



```

2 ;
3 ; Create unbonded sample
4 ;=====
5 new
6 title 'Testing Bonded Particle Model'
7
8 ; Set the domain extent
9 domain extent -0.05 0.05 -0.1 0.1 condition destroy
10
11 cmat default model linear method deform emod 37.85e9 kratio 2.0
12 cmat default property dp_nratio 0.5
13
14 ; create walls that extend past the edges of the sample
15 wall create vertices -0.025,0.03 0.025,0.03 id 1
16 wall create vertices -0.025,-0.03 0.025,-0.03 id 2
17 wall create vertices -0.015,-0.04 -0.015,0.04 id 3
18 wall create vertices 0.015,-0.04 0.015,0.04 id 4
19
20 set random 2563
21 ball distribute porosity 0.1 radius 0.5e-3 0.75e-3 box -0.015 0.015 -0.03 0.03 ;group hard
22 ball attribute density 2700 damp 0.7
23

```

**Εικόνα 5.1 Ρυθμίσεις για δημιουργία δοκιμίου H60W30 με seed=2563**

```

5 new
6 title 'Testing Bonded Particle Model'
7
8 ; Set the domain extent
9 domain extent -0.05 0.05 -0.1 0.1 condition destroy
10
11 cmat default model linear method deform emod 37.85e9 kratio 2.0
12 cmat default property dp_nratio 0.5
13
14 ; create walls that extend past the edges of the sample
15 wall create vertices -0.035,0.05 0.035,0.05 id 1
16 wall create vertices -0.035,-0.05 0.035,-0.05 id 2
17 wall create vertices -0.025,-0.07 -0.025,0.07 id 3
18 wall create vertices 0.025,-0.07 0.025,0.07 id 4
19
20 set random 2563
21 ball distribute porosity 0.1 radius 0.5e-3 0.75e-3 box -0.025 0.025 -0.05 0.05 ;group hard
22 ball attribute density 2700 damp 0.7
23

```

**Εικόνα 5.2 Ρυθμίσεις για δημιουργία δοκιμίου H100W50, με seed=2563**

```

3 ; Create unbonded sample
4 ;=====
5 new
6 title 'Testing Bonded Particle Model'
7
8 ; Set the domain extent
9 domain extent -0.05 0.05 -0.1 0.1 condition destroy
10
11 cmat default model linear method deform emod 37.85e9 kratio 2.0
12 cmat default property dp_nratio 0.5
13
14 ; create walls that extend past the edges of the sample
15 wall create vertices -0.05,0.06 0.05,0.06 id 1
16 wall create vertices -0.05,-0.06 0.05,-0.06 id 2
17 wall create vertices -0.03,-0.07 -0.03,0.07 id 3
18 wall create vertices 0.03,-0.07 0.03,0.07 id 4
19
20 set random 2563
21 ball distribute porosity 0.1 radius 0.5e-3 0.75e-3 box -0.03 0.03 -0.06 0.06 ;group hard
22 ball attribute density 2700 damp 0.7
23

```

**Εικόνα 5.3 Ρυθμίσεις για δημιουργία δοκιμίου H120W60, με seed=2563**

```

3 ; Create unbonded sample
4 ;=====
5 new
6 title 'Testing Bonded Particle Model'
7
8 ; Set the domain extent
9 domain extent -0.1 0.1 -0.2 0.2 condition destroy
10
11 cmat default model linear method deform emod 37.85e9 kratio 2.0
12 cmat default property dp_nratio 0.5
13
14 ; create walls that extend past the edges of the sample
15 wall create vertices -0.08,0.15 0.08,0.15 id 1
16 wall create vertices -0.08,-0.15 0.08,-0.15 id 2
17 wall create vertices -0.075,-0.17 -0.075,0.17 id 3
18 wall create vertices 0.075,-0.17 0.075,0.17 id 4
19
20 set random 2146
21 ball distribute porosity 0.1 radius 0.5e-3 0.75e-3 box -0.075 0.075 -0.15 0.15 ;group hard
22 ball attribute density 2700 damp 0.7
23

```

**Εικόνα 5.4 Ρυθμίσεις για δημιουργία δοκιμίου H300W150, με seed=2146**

```

3 ; Create unbonded sample
4 ;=====
5 new
6 title 'Testing Bonded Particle Model'
7
8 ; Set the domain extent
9 domain extent -0.15 0.15 -0.25 0.25 condition destroy
10
11 cmat default model linear method deform emod 37.85e9 kratio 2.0
12 cmat default property dp_nratio 0.5
13
14 ; create walls that extend past the edges of the sample
15 wall create vertices -0.12,0.2 0.12,0.2 id 1
16 wall create vertices -0.12,-0.2 0.12,-0.2 id 2
17 wall create vertices -0.1,-0.22 -0.1,0.22 id 3
18 wall create vertices 0.1,-0.22 0.1,0.22 id 4
19
20 set random 4244
21 ball distribute porosity 0.1 radius 0.5e-3 0.75e-3 box -0.1 0.1 -0.2 0.2 ;group hard
22 ball attribute density 2700 damp 0.7
23

```

**Εικόνα 5.5 Ρυθμίσεις για δημιουργία δοκιμίου H400W200, με seed=4244**

```

12
13 ; apply loading by fixing top wall and moving bottom wall
14 wall attribute yvel -0.125 range id 1
15 wall attribute yvel 0.125 range id 2
16
17 ; apply a small amount of damping
18 ball attribute damp 0.1

```

**Εικόνα 5.6 Ρύθμιση ταχύτητας των πλακών θλίψης του δοκιμίου**

```

6
7 contact model linearpbond range contact type ball-ball
8 contact method bond gap 0.5e-4
9
10 ; set linear stiffness
11 contact method deform emod 37.85e9 krat 2.0
12
13 ; set stiffness of bond material
14 contact method pb_deform emod 37.85e9 krat 2.0
15
16 ; set bond strengths
17 contact property pb_ten 39.47e6 pb_coh 39.47e6 pb_fa 0.0
18

```

**Εικόνα 5.7 Ρυθμίσεις για τα μοντέλα με λόγο SBS/NBS=1**

```

6
7 contact model linearpbond range contact type ball-ball
8 contact method bond gap 0.5e-4
9
10 ; set linear stiffness
11 contact method deform emod 37.87e9 krat 2.0
12
13 ; set stiffness of bond material
14 contact method pb_deform emod 37.87e9 krat 2.0
15
16 ; set bond strengths
17 contact property pb_ten 31.4e6 pb_coh 62.8e6 pb_fa 0.0
18
19

```

**Εικόνα 5.8 Ρυθμίσεις για τα μοντέλα με λόγο SBS/NBS=2**

```

7 contact model linearpbond range contact type ball-ball
8 contact method bond gap 0.5e-4
9
10 ; set linear stiffness
11 contact method deform emod 37.85e9 krat 2.0
12
13 ; set stiffness of bond material
14 contact method pb_deform emod 37.85e9 krat 2.0
15
16 ; set bond strengths
17 ;contact property pb_ten 39.47e6 pb_coh 39.47e6 pb_fa 0.0
18
19 def mp_set
20     global pb_sn_mean = 39.47e6
21     global pb_sn_sdev = 10.0e6
22     global pb_coh_mean = 39.47e6
23     global pb_coh_sdev = 10.0e6
24 end
25
26 @mp_set

```

Εικόνα 5.9 Ρυθμίσεις για μοντέλα με λόγο SBS/NBS=1 και κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 10MPa

```

28 define pb_strength
29 ;
30 ; ----- Set parallel-bond strength properties
31 ;
32 ; INPUT:
33 ;     The parallel-bond microparameters:
34 ;     pb_sn_mean - mean value of normal strength (stress units)
35 ;     pb_sn_sdev - std. deviation of normal strength (stress units)
36 ;     pb_coh_mean - mean value of cohesion (stress units)
37 ;     pb_coh_sdev - std. deviation of cohesion (stress units)
38
39 loop foreach local cp contact.list
40 if contact.model(cp) = 'linearpbond' then
41     global random1=math.random.gauss
42     global random2=math.random.gauss
43     _pb_ten=random1*pb_sn_sdev+pb_sn_mean
44     _pb_coh=random2*pb_coh_sdev+pb_coh_mean
45     if _pb_ten<0.0
46         _pb_ten=0.0
47     endif
48     if _pb_coh<0.0
49         _pb_coh=0.0
50     endif
51     contact.prop(cp,'pb_ten') = _pb_ten ;md_val_normdist(pb_sn_mean,pb_sn_sdev)
52     contact.prop(cp,'pb_coh') = _pb_coh ;md_val_normdist(pb_coh_mean,pb_coh_sdev)
53     endif
54 end_loop
55 end
56
57
58 @pb_strength

```

Εικόνα 5.10 Συνέχεια: Ρυθμίσεις για μοντέλα με λόγο SBS/NBS=1 και κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 10MPa

```

5 rest unbonded
6
7 contact model linearpbond range contact type ball-ball
8 contact method bond gap 0.5e-4
9
10 ; set linear stiffness
11 contact method deform emod 37.87e9 krat 2.0
12
13 ; set stiffness of bond material
14 contact method pb_deform emod 37.87e9 krat 2.0
15
16 ; set bond strengths
17 ;contact property pb_ten 39.47e6 pb_coh 39.47e6 pb_fa 0.0
18
19 def mp_set
20     global pb_sn_mean = 31.4e6
21     global pb_sn_sdev = 20.0e6
22     global pb_coh_mean = 62.8e6
23     global pb_coh_sdev = 20.0e6
24 end
25
26 @mp_set
27

```

Εικόνα 5.11 Ρυθμίσεις για μοντέλα με λόγο SBS/NBS=2 και κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 20MPa

```

28 define pb_strength
29 ;
30 ; ----- Set parallel-bond strength properties
31 ;
32 ; INPUT:
33 ;     The parallel-bond microparameters:
34 ;     pb_sn_mean - mean value of normal strength (stress units)
35 ;     pb_sn_sdev - std. deviation of normal strength (stress units)
36 ;     pb_coh_mean - mean value of cohesion (stress units)
37 ;     pb_coh_sdev - std. deviation of cohesion (stress units)
38 ;
39 loop foreach local cp contact.list
40 if contact.model(cp) = 'linearpbond' then
41     global random1=math.random.gauss
42     global random2=math.random.gauss
43     _pb_ten=random1*pb_sn_sdev+pb_sn_mean
44     _pb_coh=random2*pb_coh_sdev+pb_coh_mean
45 if _pb_ten<0.0
46     _pb_ten=0.0
47 endif
48 if _pb_coh<0.0
49     _pb_coh=0.0
50 endif
51 contact.prop(cp,'pb_ten') = _pb_ten ;md_val_normdist(pb_sn_mean,pb_sn_sdev)
52 contact.prop(cp,'pb_coh') = _pb_coh ;md_val_normdist(pb_coh_mean,pb_coh_sdev)
53 endif
54 end_loop
55 end
56
57
58 @pb_strength

```

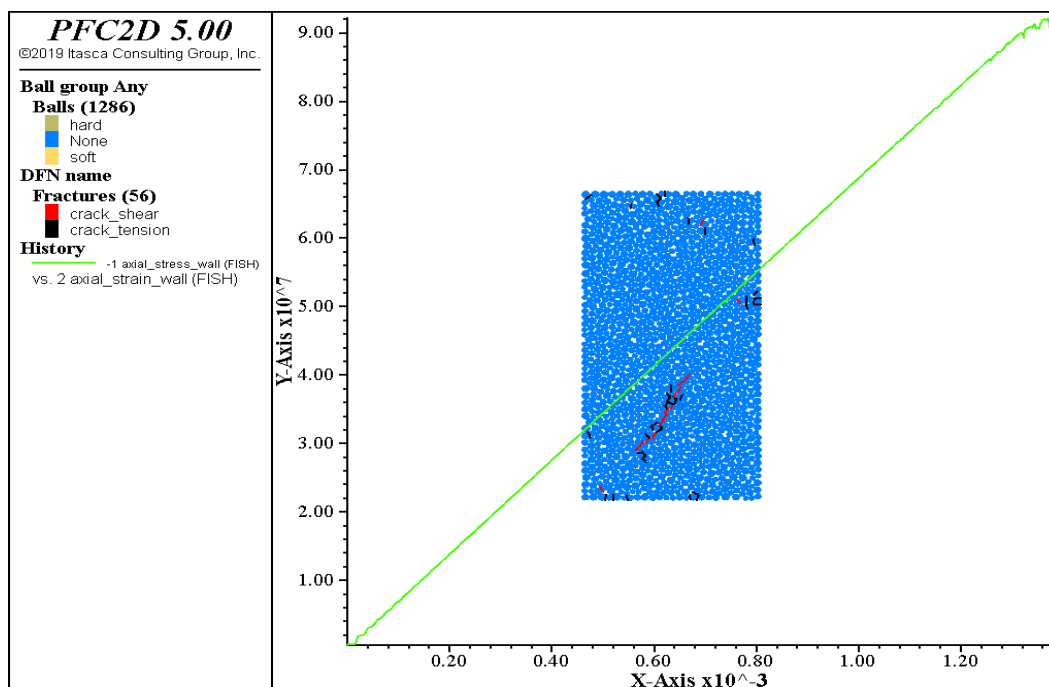
Εικόνα 5.12 Συνέχεια: Ρυθμίσεις για μοντέλα με λόγο SBS/NBN=2 και κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 20MPa

## **6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με SBS/NBS=1**

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με λόγο διατμητικής προς εφελκυστικής αντοχής δεσμών ίσο με 1, SBS/NBS=1, με εικόνες των δοκιμίων με των μορφών θραύσης τους και των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων κάθε περίπτωσης. Στο τέλος κάθε υποομάδας προσομοιώσεων παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων. Σε κάποιες περιπτώσεις δοκιμίων γίνεται ανάλυση της πορείας της δοκιμής μαζί με στιγμιότυπα για την ανάλυση της μορφής θραύσης τους.

## 6.1 Προσομοιώσεις με ταχύτητα πλακών θλίψης 50mm/s και seed=2563

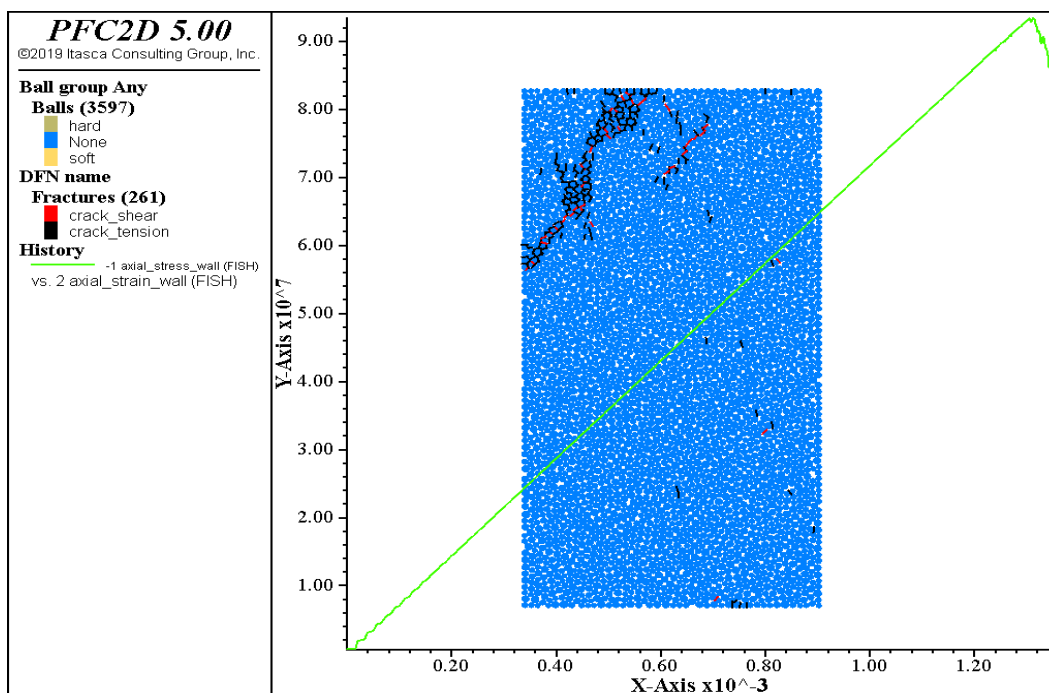
### ▪ H60W30



Εικόνα 6.1 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=50\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$

➤ Αντοχή  $\text{UCS}=92.1\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=68.5\text{GPa}$

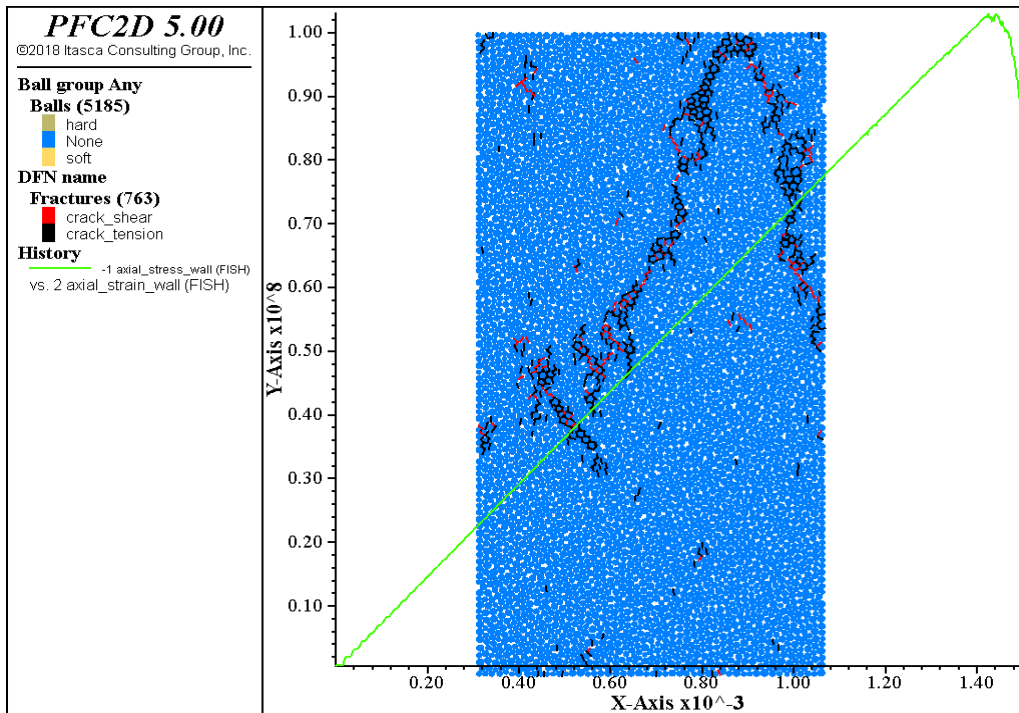
### ▪ H100W50



Εικόνα 6.2 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=50\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$

➤ Αντοχή  $\text{UCS}=93.4\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=73.1\text{GPa}$

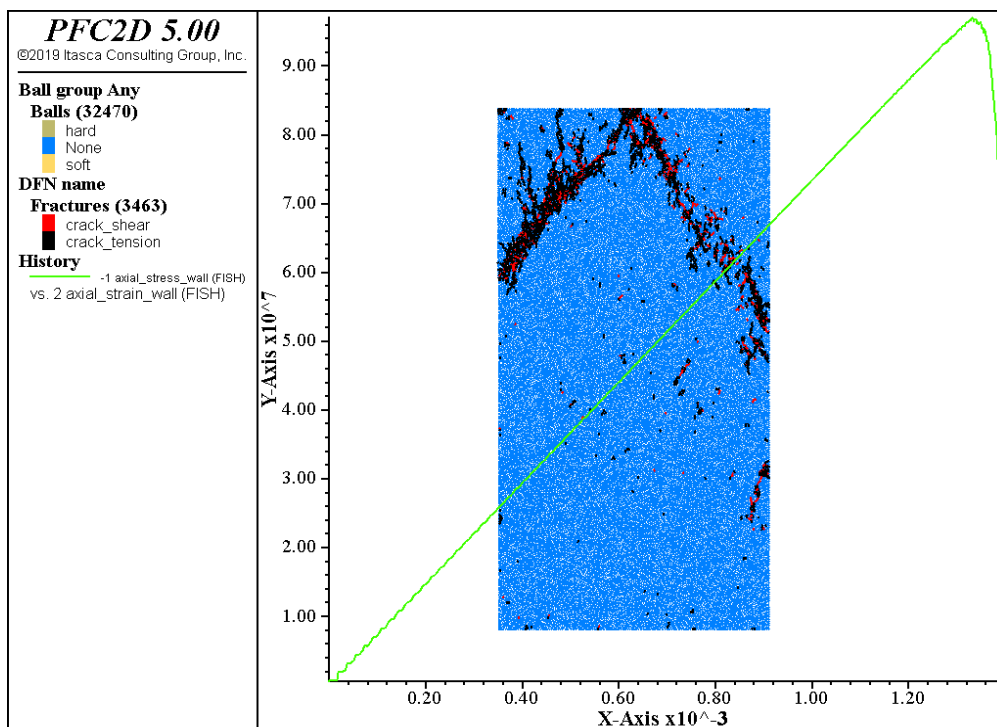
- **H120W60**



**Εικόνα 6.3** Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$

- Αντοχή  $\text{UCS}=103\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=72,3\text{GPa}$

- **H300W150**

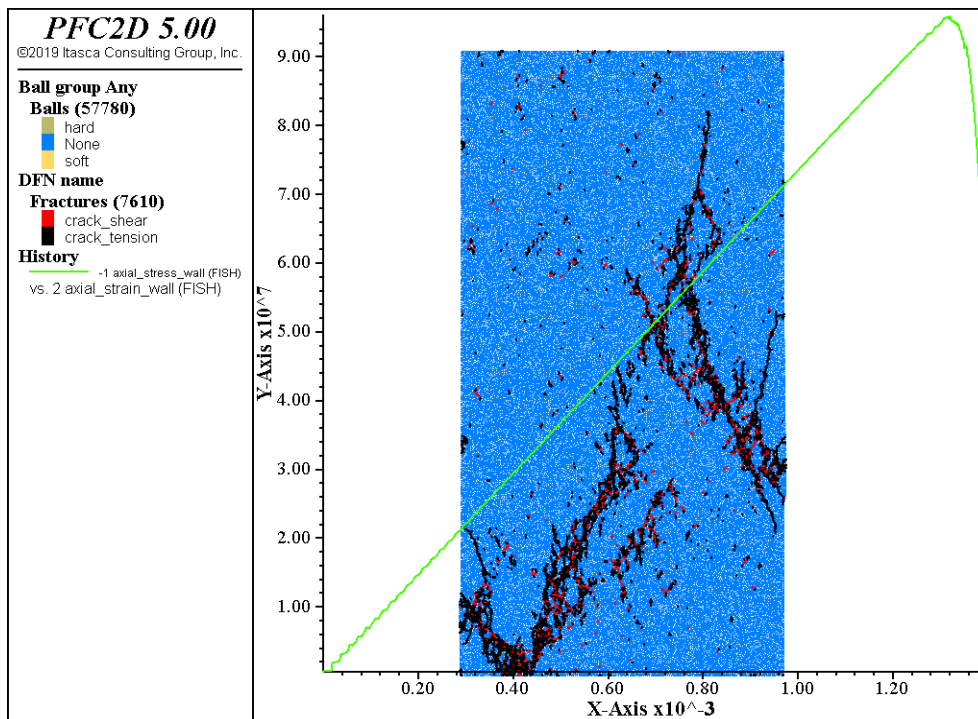


**Εικόνα 6.4** Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=50\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$

- Αντοχή  $\text{UCS}=97\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=75,3\text{GPa}$



▪ **H400W200**



**Εικόνα 6.5** Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=50\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$

- Αντοχή  $\text{UCS}=96\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=74,1\text{GPa}$

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

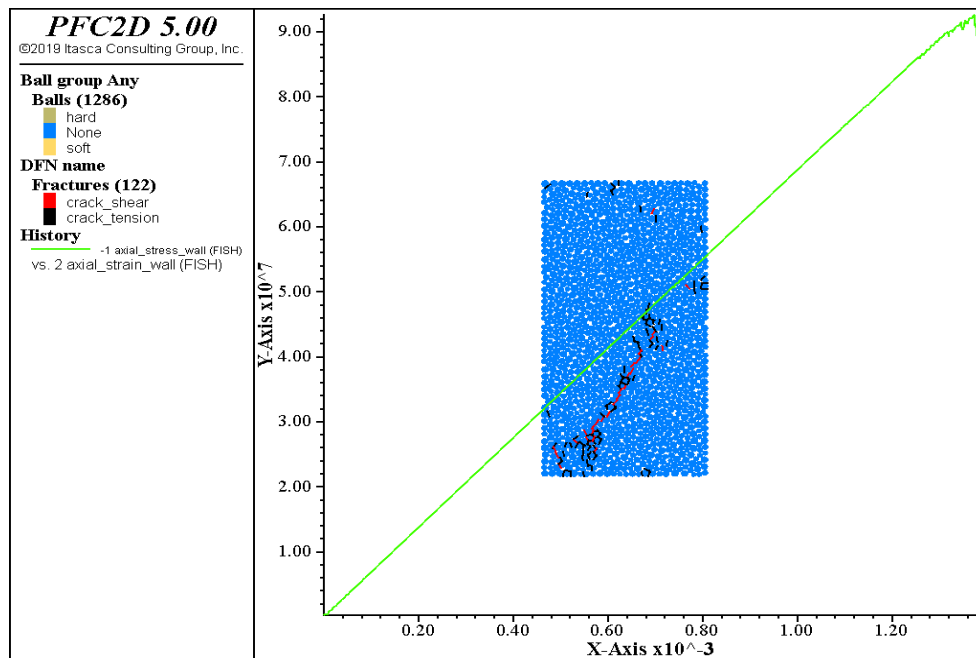
**Πίνακας 6.1** Αποτελέσματα προσομοιώσεων με ταχύτητα  $v=50\text{mm/s}$ ,  $\text{seed}=2563$  και  $\text{SBS/NBS}=1$

$v = 50\text{mm/s}$	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200	seed = 2563
<b>E (Gpa)</b>	68.5	73.1	72.5	75.3	74.1	
<b>UCS (MPa)</b>	92.1	93.4	103	97	96	

## 6.2 Προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενη ταχύτητα

❖ Seed=2563

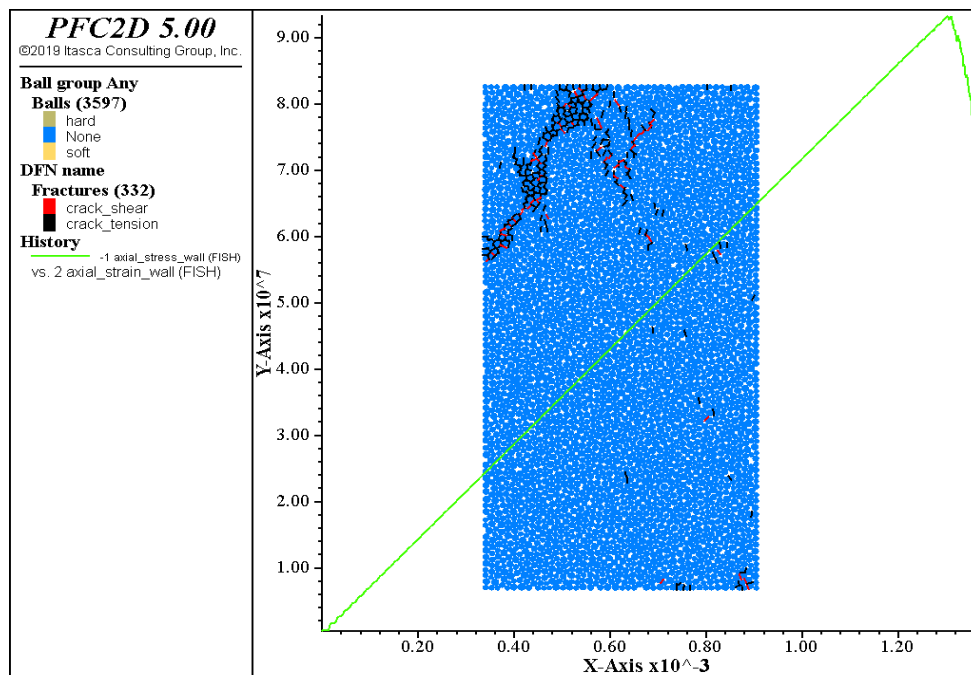
▪ H60W30



Εικόνα 6.6 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=2563$

➤ Αντοχή  $\text{UCS}=92.6\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=71,9\text{GPa}$

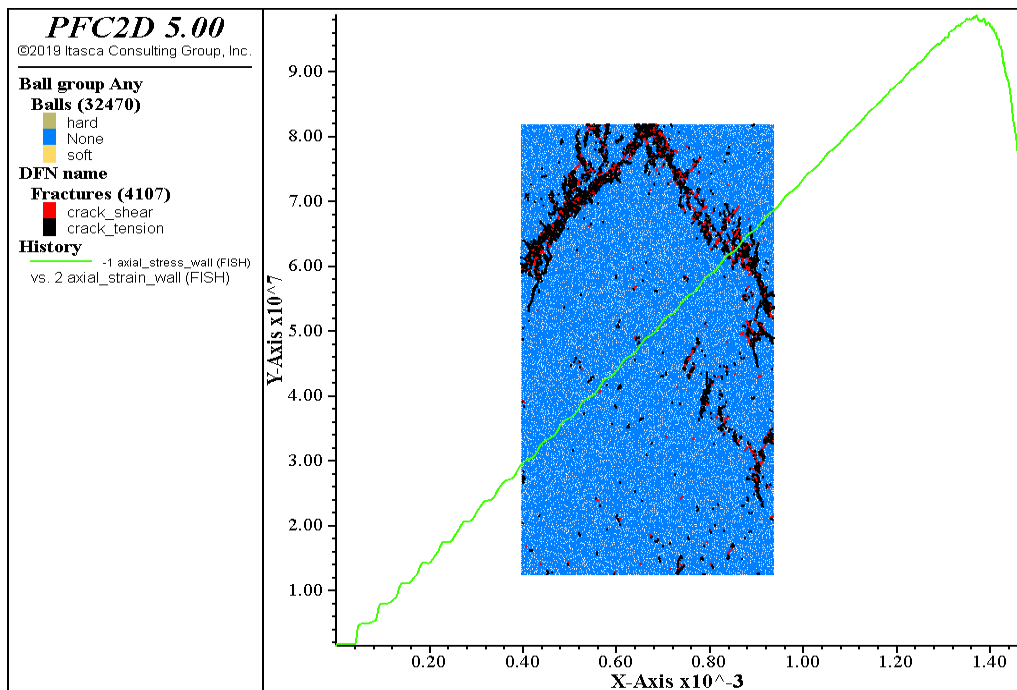
▪ H100W50



Εικόνα 6.7 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=2563$

➤ Αντοχή  $\text{UCS}=93.2\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=69,6\text{GPa}$

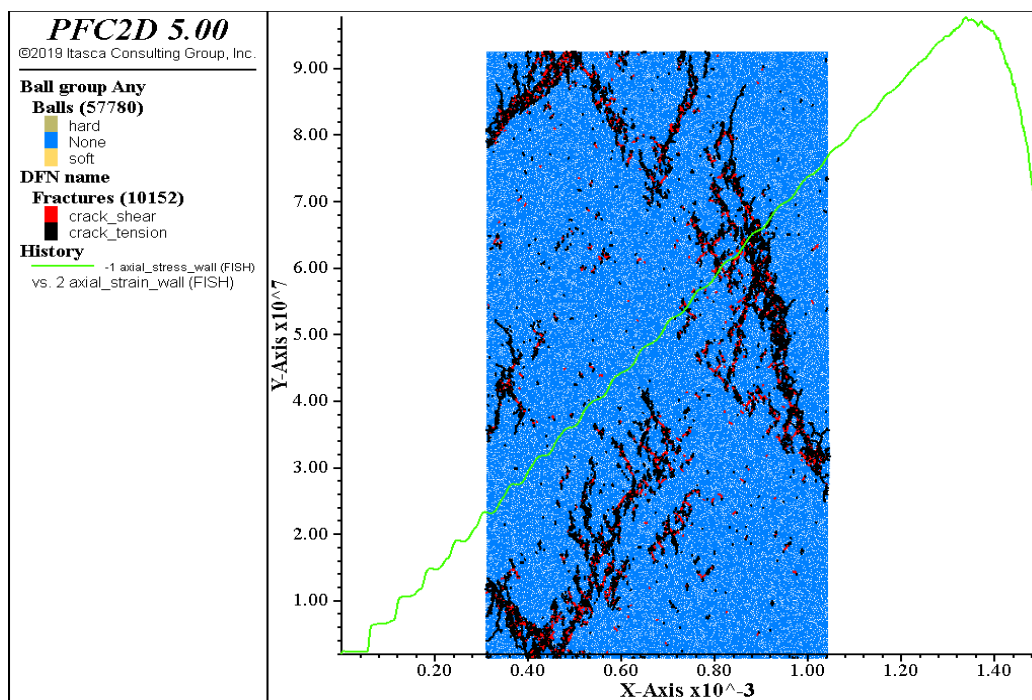
- **H300W150**



Εικόνα 6.8 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=2563$

- Αντοχή  $\text{UCS}=98.7\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=72,6\text{GPa}$

- **H400W200**



Εικόνα 6.9 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=2563$

- Αντοχή  $\text{UCS}=97.7\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=73,5\text{GPa}$

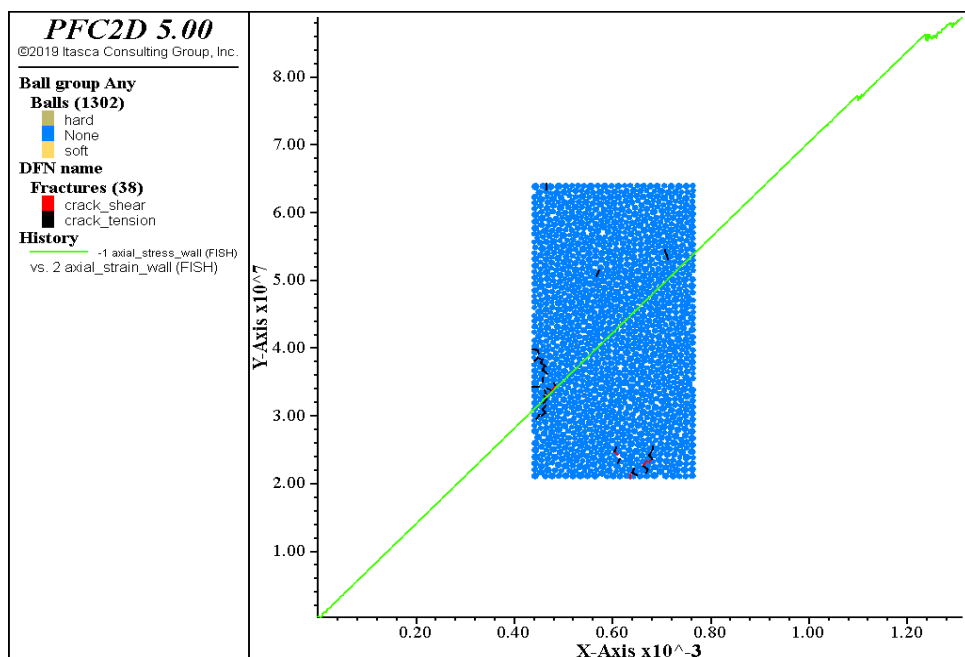
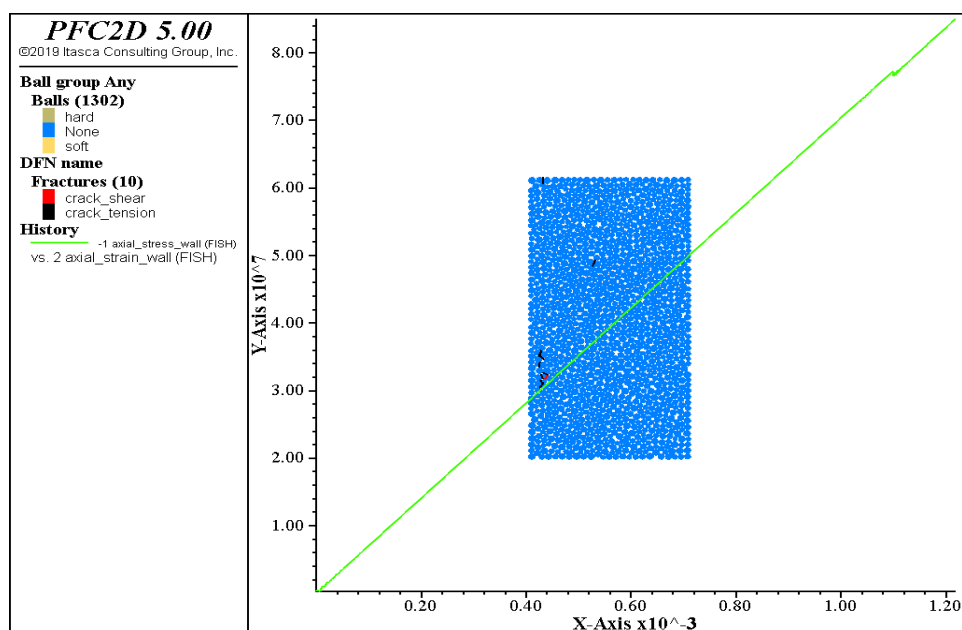
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

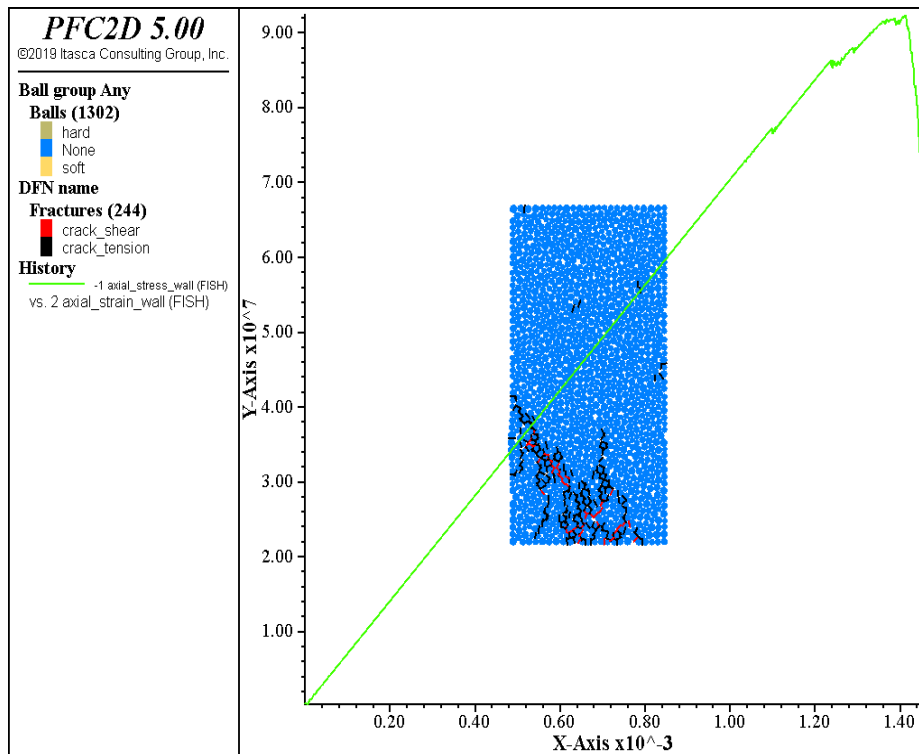
**Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, seed=2563 και SBS/NBS=1**

seed = 2563	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	71.9	69.6	72.5	72.6	73.5
UCS (MPa)	92.6	93.2	103	98.7	97.7

❖ **Seed=2146**

▪ **H60W30**



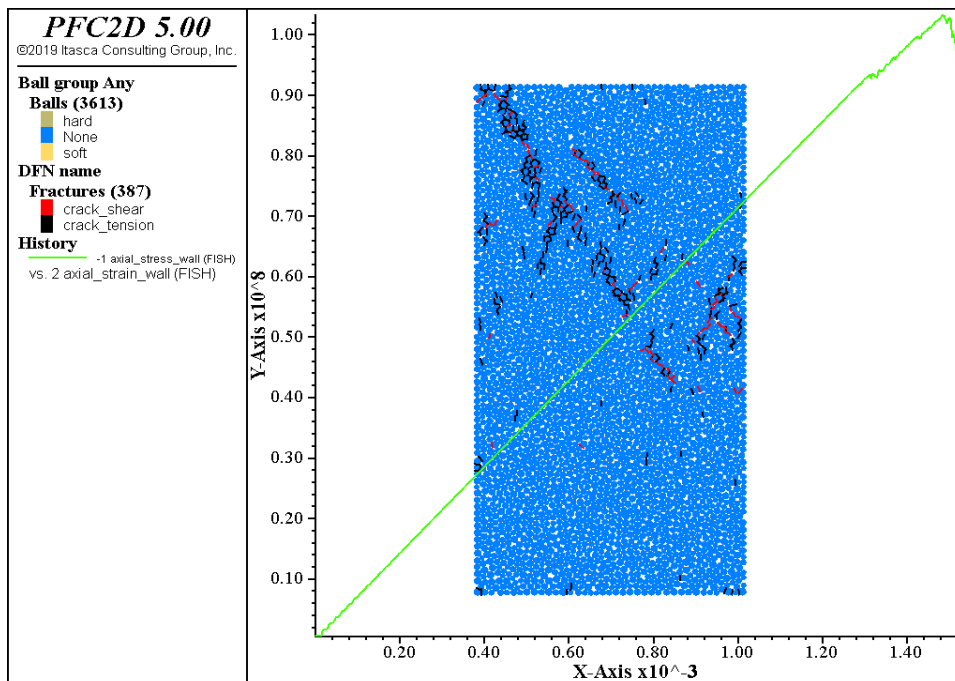


**Εικόνα 6.10 α),β),γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και τελικό διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με ταχύτητα  $v=25\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=2146$**

- Αντοχή  $\text{UCS}=92.4\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=70.1\text{GPa}$

Αρχικά παρατηρείται η ανάπτυξη κυρίως εφελκυστικών ρωγμών λίγο κάτω από το μέσο του δοκιμίου. Στη συνέχεια, αυξάνεται ο αριθμός τους στο αριστερό κομμάτι του, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη εφελκυστικών και διατμητικών ρωγμών στη βάση του δοκιμίου. Τέλος, οι ρωγμές αυτές ενώνονται, όπου κυριαρχούν οι εφελκυστικές ρωγμές με ταυτόχρονη όμως ανάπτυξη και των διατμητικών, με αποτέλεσμα την αστοχία του.

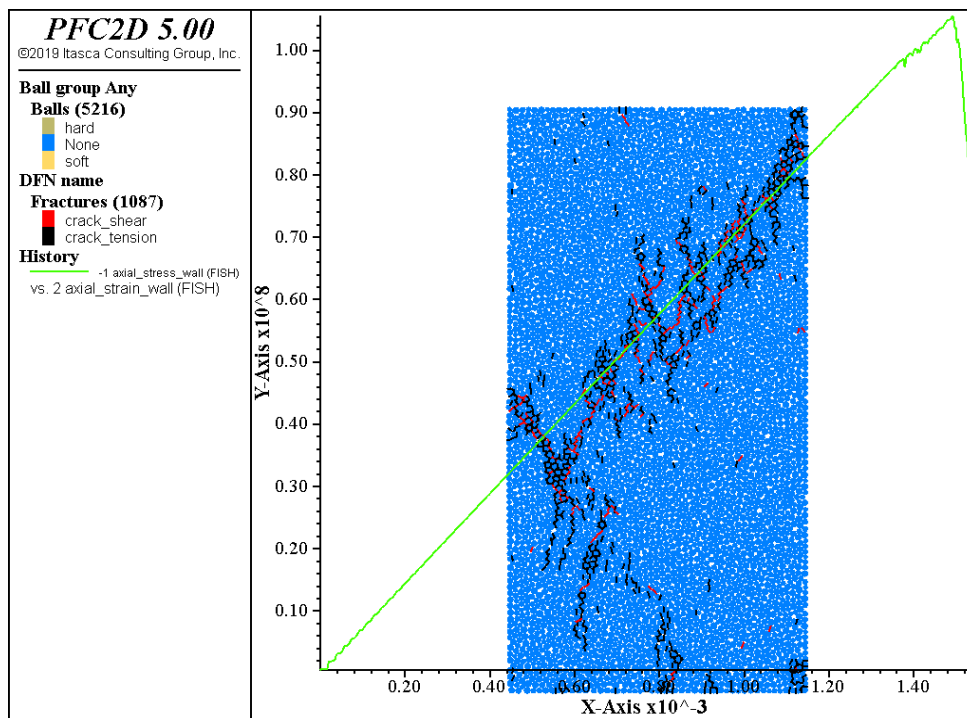
- **H100W50**



Εικόνα 6.11 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=2146$

- Αντοχή  $\text{UCS}=103.2\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=73,1\text{GPa}$

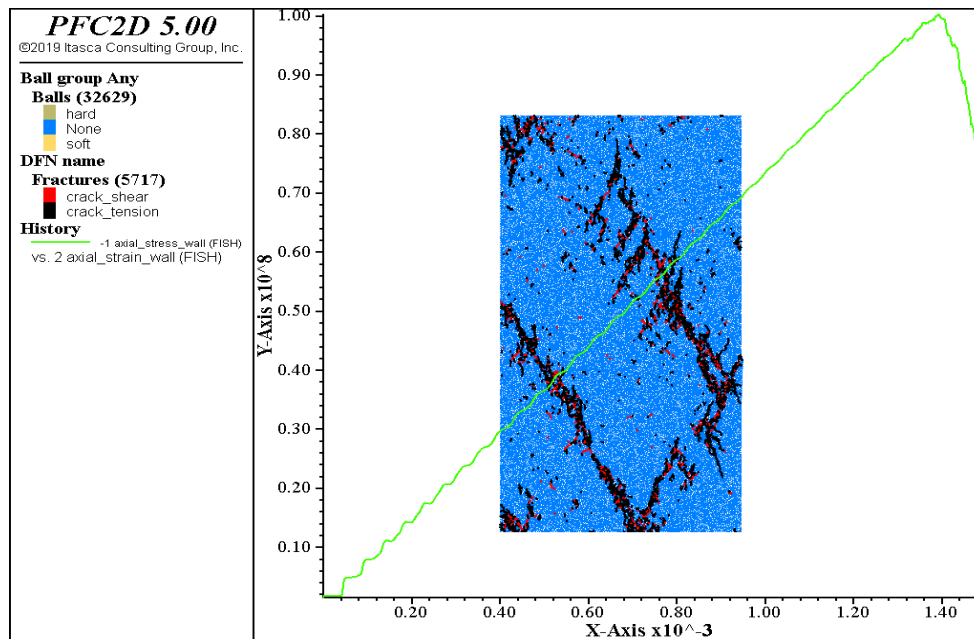
- **H120W60**



Εικόνα 6.12 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=2146$

- Αντοχή  $\text{UCS}=105.4\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=70,3\text{GPa}$

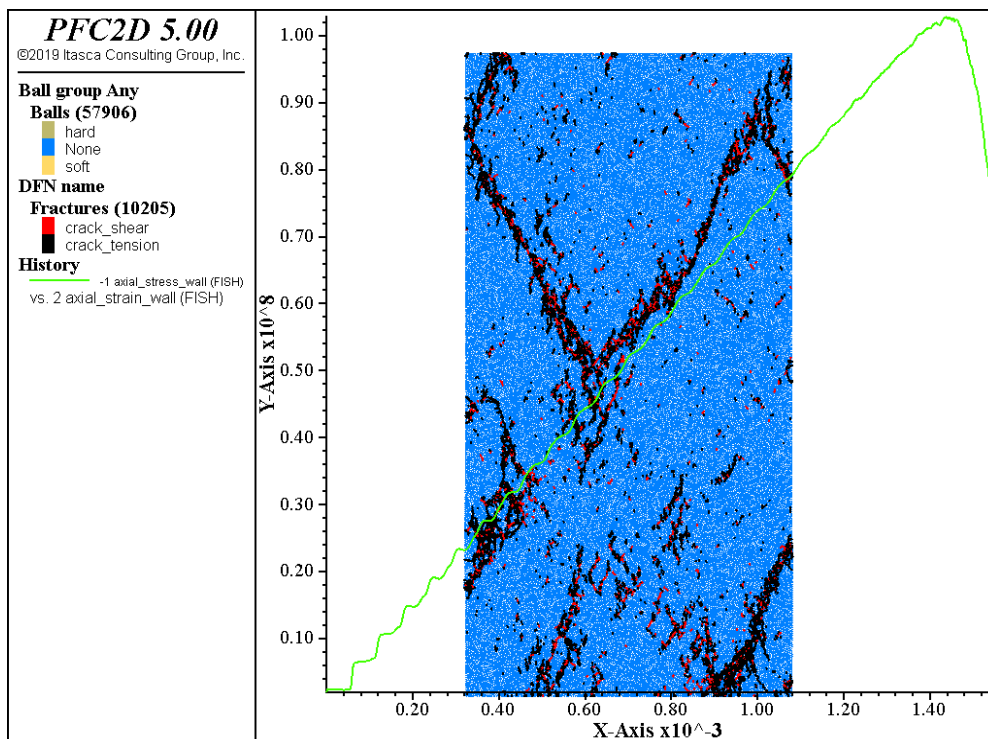
- **H300W150**



Εικόνα 6.13 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=2146$

➤ Αντοχή  $\text{UCS}=100.2\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=74,6\text{GPa}$

- **H400W200**



Εικόνα 6.14 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=2146$

➤ Αντοχή  $\text{UCS}=102.8\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=72.3\text{GPa}$



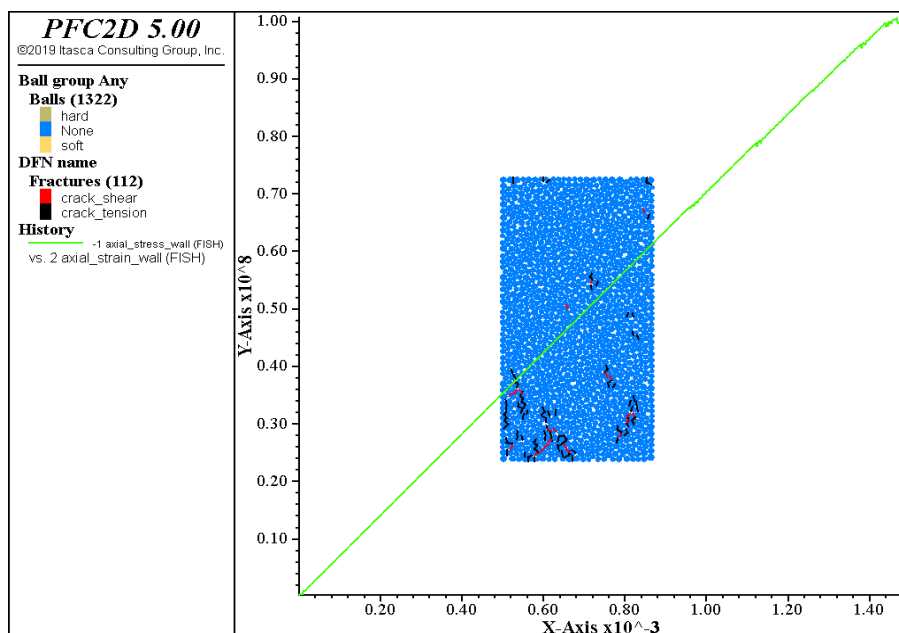
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, seed=2146 και SBS/NBS=1**

seed = 2146	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	70.1	73.1	70.3	74.6	72.3
UCS (MPa)	92.4	103.2	105.4	100.2	102.8

❖ **Seed=4244**

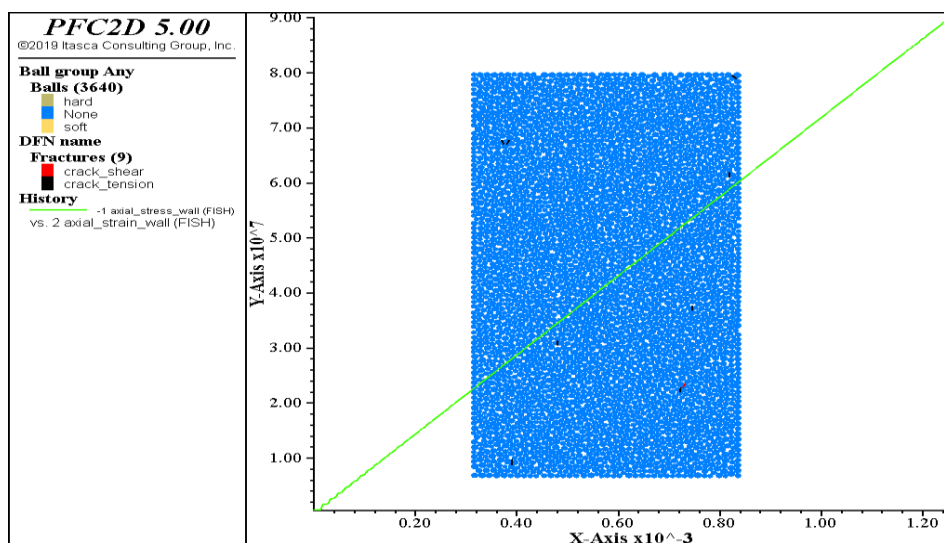
▪ **H60W30**



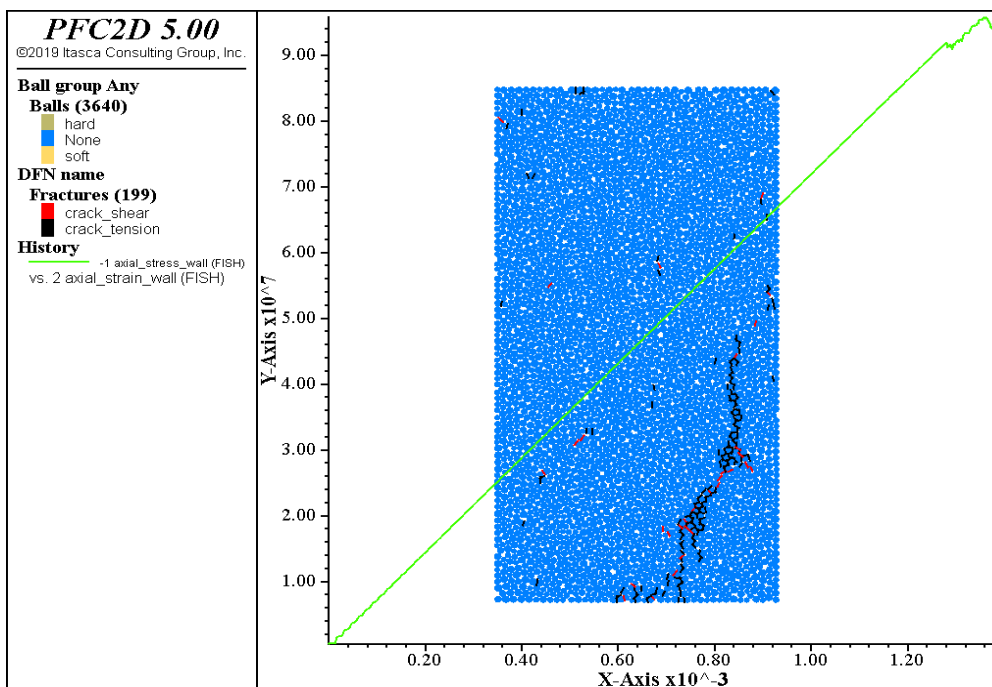
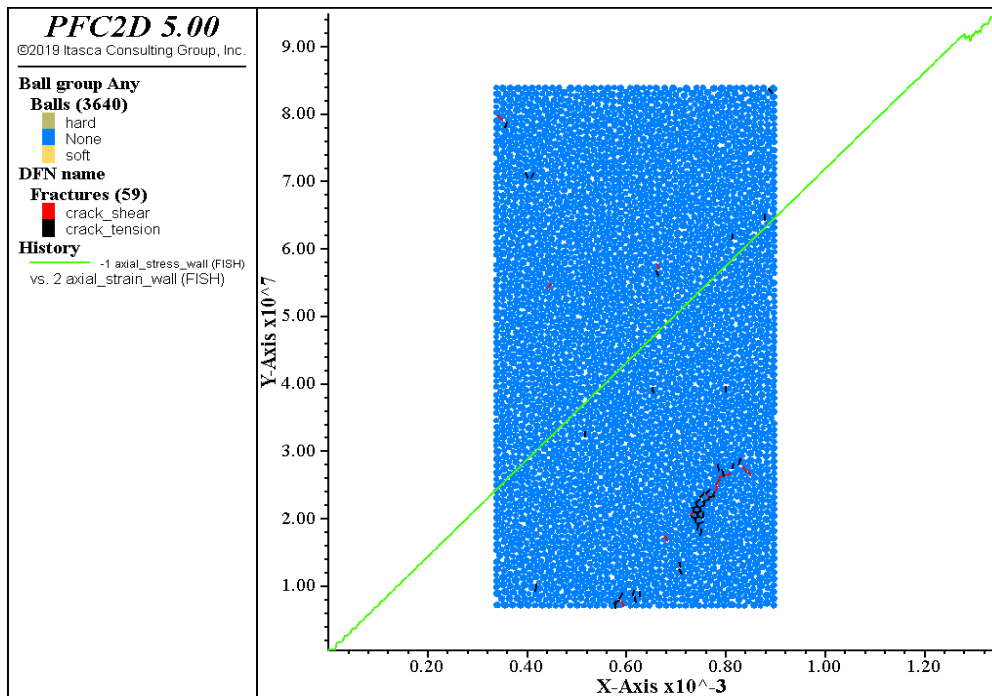
**Εικόνα 6.15 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με v=25mm/s και SBS/NBS=1 για seed=4244**

➤ Αντοχή UCS=100.6MPa και μέτρο ελαστικότητας E=71,9GPa

▪ **H100W50**





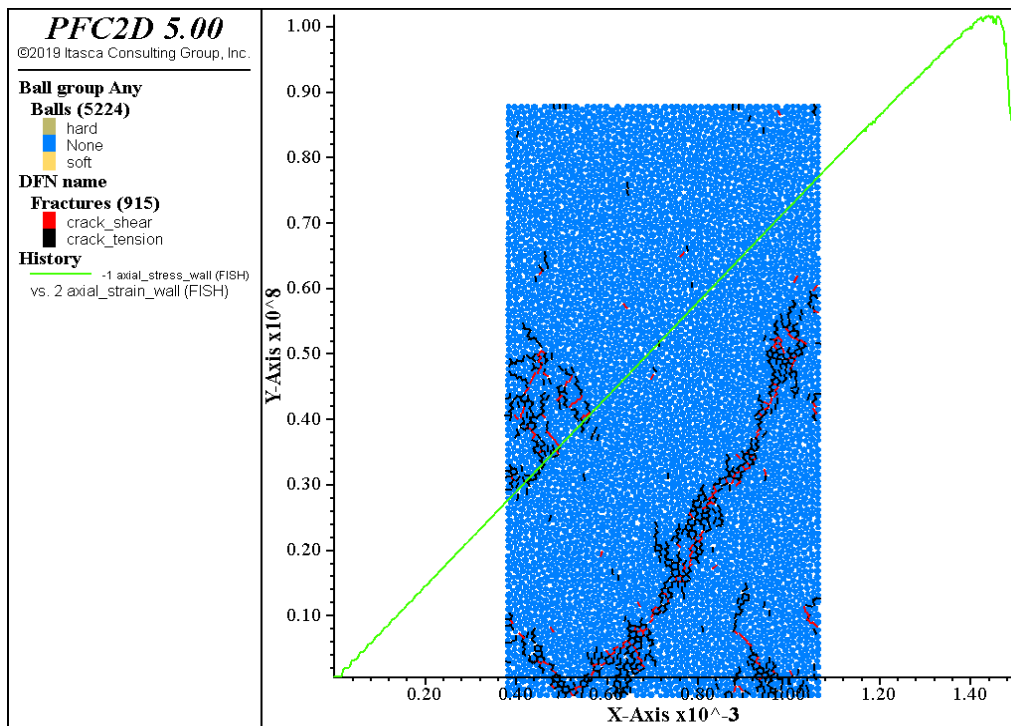


**Εικόνα 6.16 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$  και  $SBS/NBS=1$  για  $seed=4244$**

- Αντοχή  $UCS=95.8\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=72,6\text{GPa}$

Αρχικά παρατηρείται η ανάπτυξη λίγων εφελκυστικών ρωγμών σε διάφορα σημεία του δοκιμίου. Ύστερα αρχίζει να αναπτύσσεται μία μεγαλύτερη εφελκυστική ρωγή κάτω από το μέσο του δοκιμίου. Τέλος, το δοκίμιο οδηγείται σε αστοχία με τη προέκταση των εφελκυστικών ρωγμών μέχρι τη βάση του. Σημειώνεται πως υπάρχει και μια μικρή ανάπτυξη διατμητικών ρωγμών μαζί με τις εφελκυστικές.

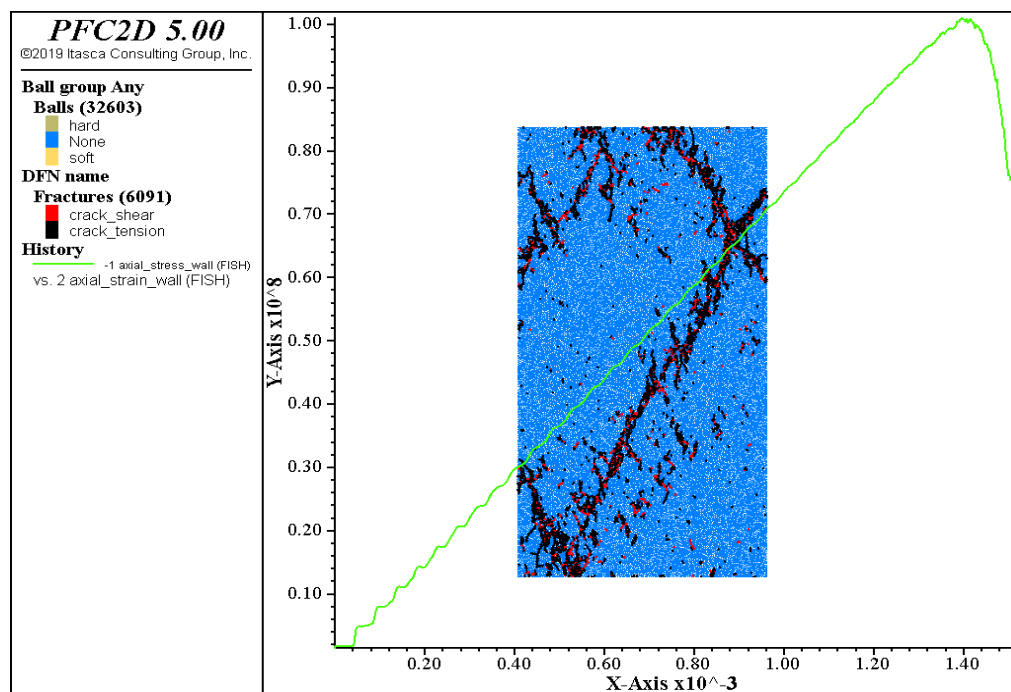
- **H120W60**



Εικόνα 6.17 Διάγραμμα δοκιμίου 120W60 με  $v=50\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=4244$

➤ Αντοχή  $\text{UCS}=101.7\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=74,5\text{GPa}$

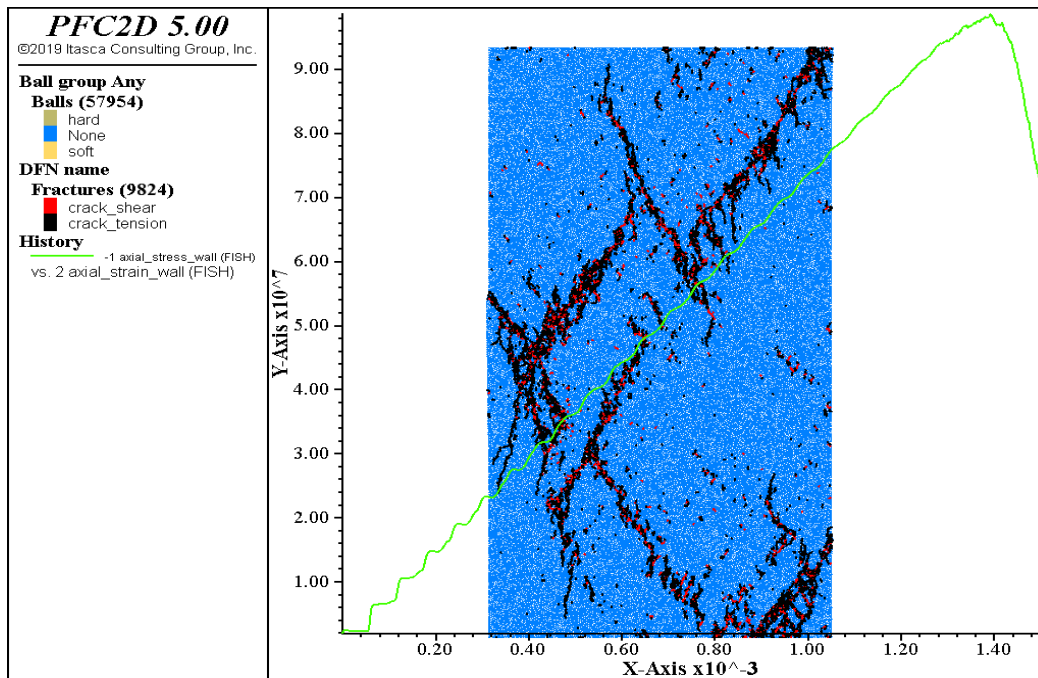
- **H300W150**



Εικόνα 6.18 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=4244$

➤ Αντοχή  $\text{UCS}=100.9\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=75,6\text{GPa}$

▪ **H400W200**



**Εικόνα 6.19** Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=4244$

- Αντοχή  $\text{UCS}=98.6\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=69,8\text{GPa}$

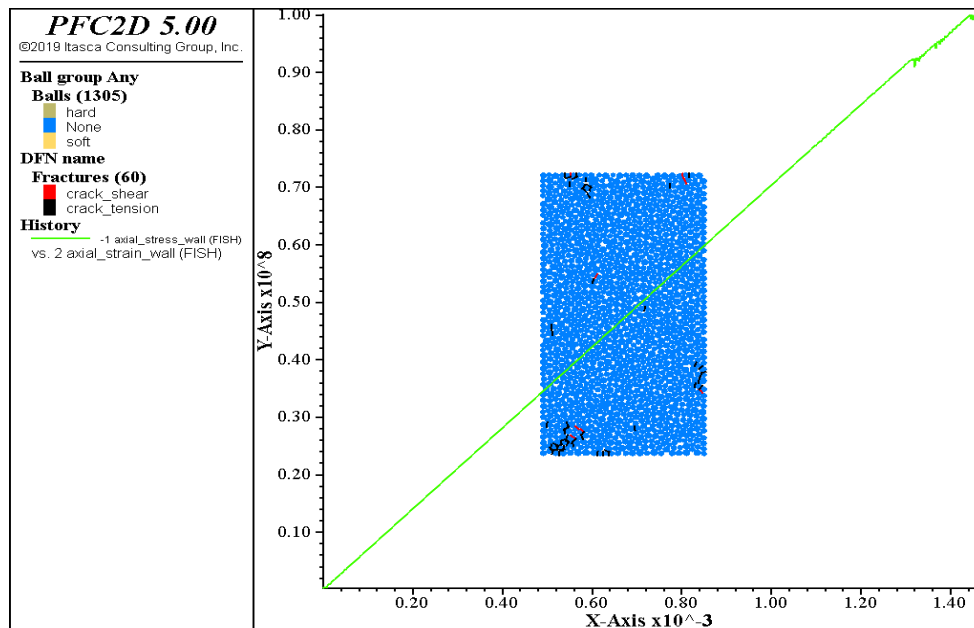
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 6.4** Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα,  $\text{seed}=4244$  και  $\text{SBS/NBS}=1$

<b>seed = 4244</b>	<b>H60W30</b>	<b>H100W50</b>	<b>H120W60</b>	<b>H300W150</b>	<b>H400W200</b>
<b>v (mm/s)</b>	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
<b>E (Gpa)</b>	71.9	72.6	74.5	75.6	69.8
<b>UCS (MPa)</b>	100.6	95.8	101.7	100.9	98.6

❖ Seed=1038

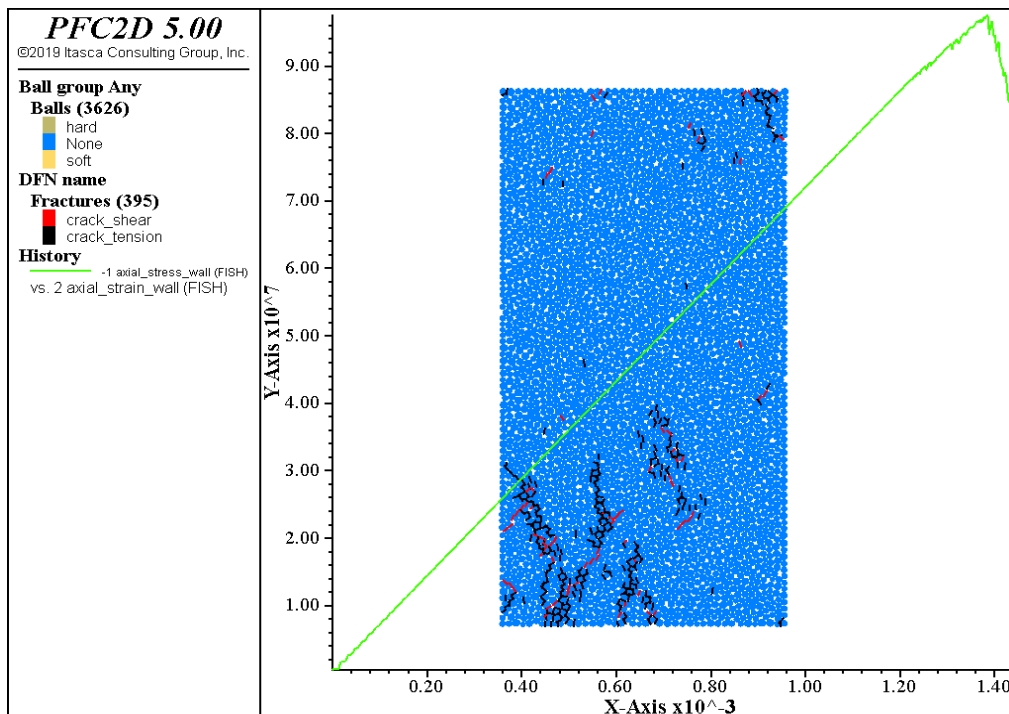
▪ H60W30



Εικόνα 6.20 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=1038$

➤ Αντοχή  $\text{UCS}=100.1\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=71.6\text{GPa}$

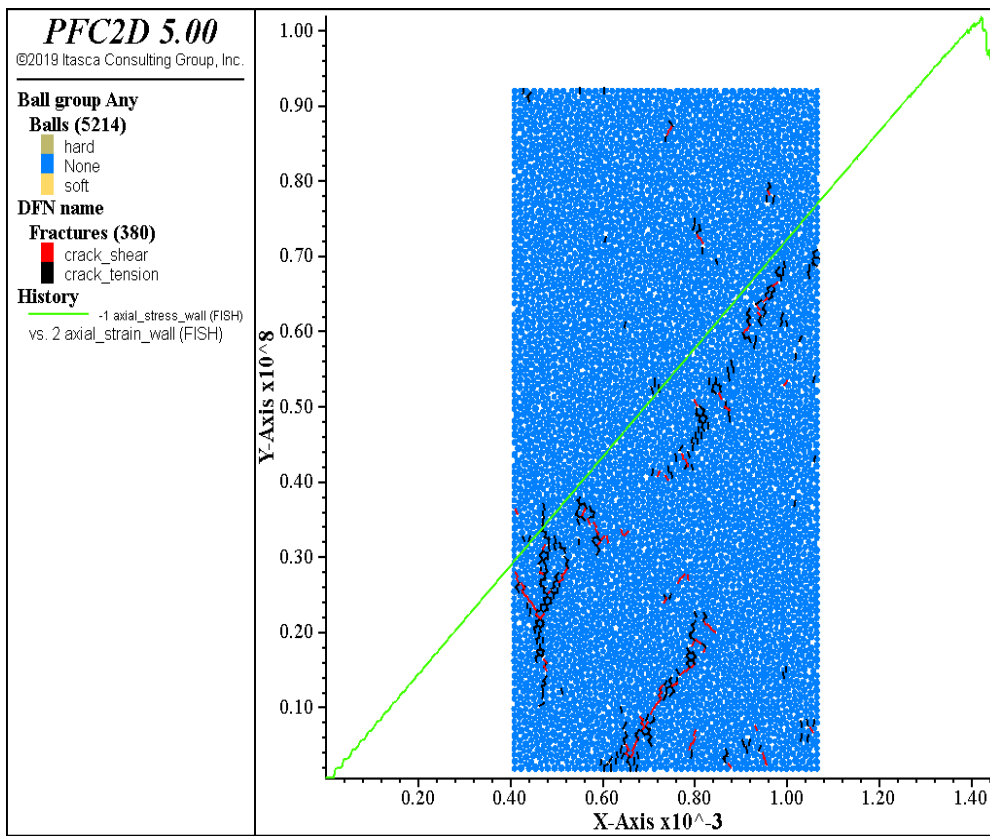
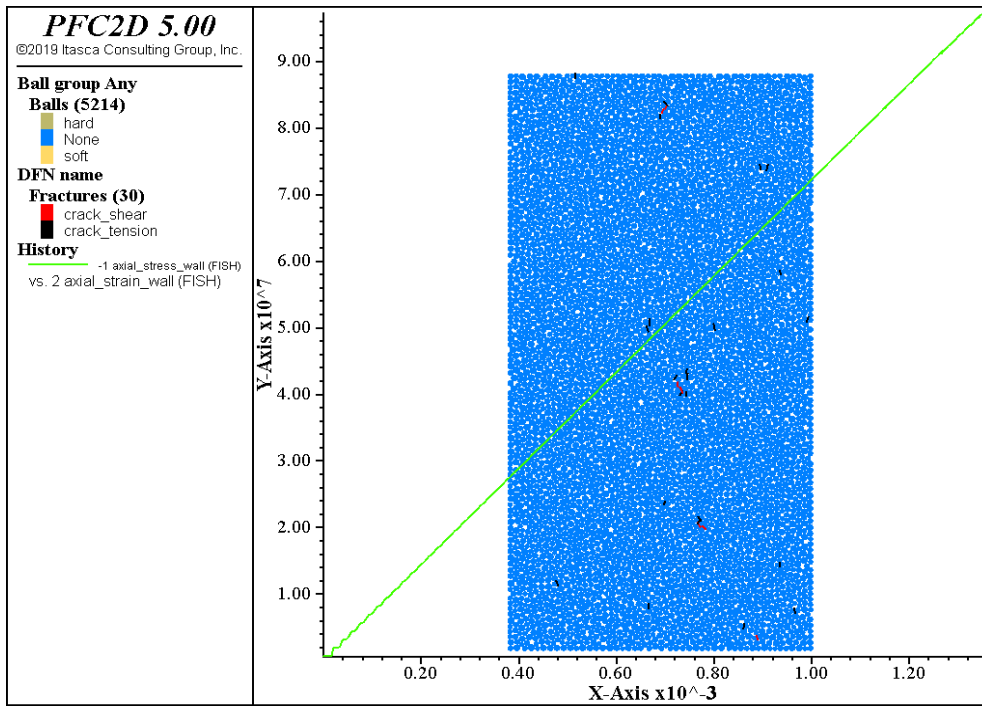
▪ H100W50

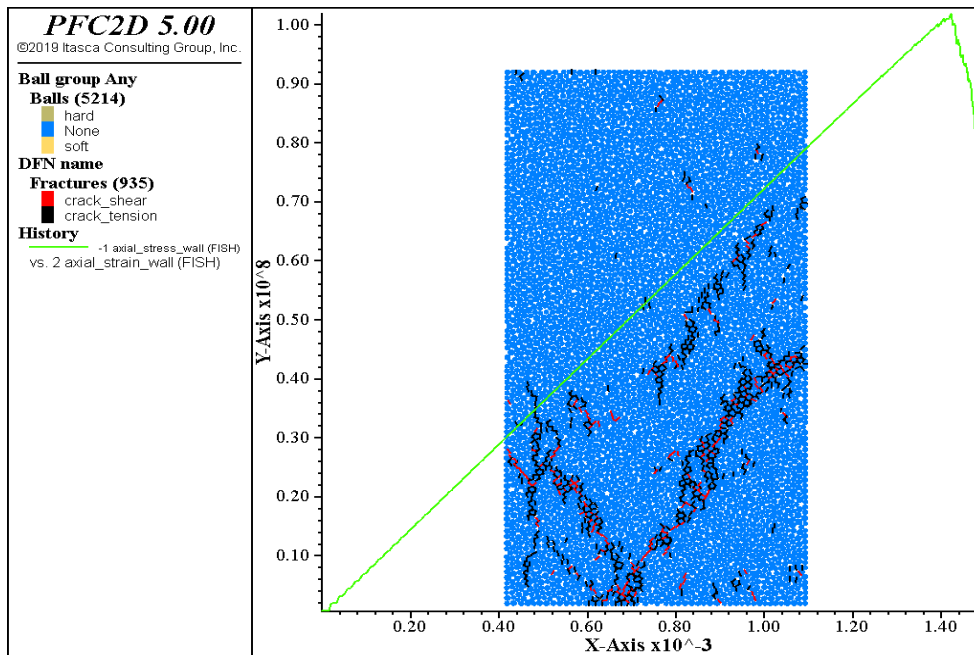


Εικόνα 6.21 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=1038$

➤ Αντοχή  $\text{UCS}=97.5\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=69.9\text{GPa}$

▪ **H120W60**



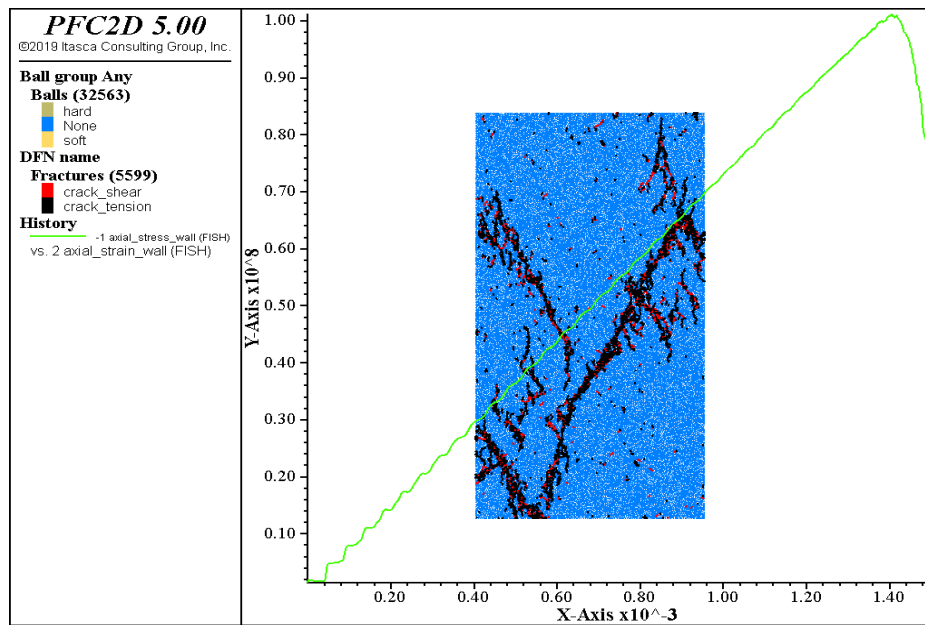


**Εικόνα 6.22 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$  και  $SBS/NBS=1$  για  $\text{seed}=1038$**

- Αντοχή  $UCS=101.9\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=71,6\text{GPa}$

Αρχικά παρατηρείται η ανάπτυξη εφελκυστικών ρωγμών σε διάφορα σημεία του δοκιμίου. Στη συνέχεια, κυρίως εφελκυστικές αλλά και διατμητικές ρωγμές αναπτύσσονται στο μέσο διαγώνια, κάτω από το μέσο και στη βάση του δοκιμίου. Το δοκίμιο οδηγείται σε αστοχία ύστερα από την προέκταση και ένωση των ρωγμών που μάλιστα εκτείνονται από τα δύο άκρα στο ύψος του μέσου, έως τη βάση του δοκιμίου.

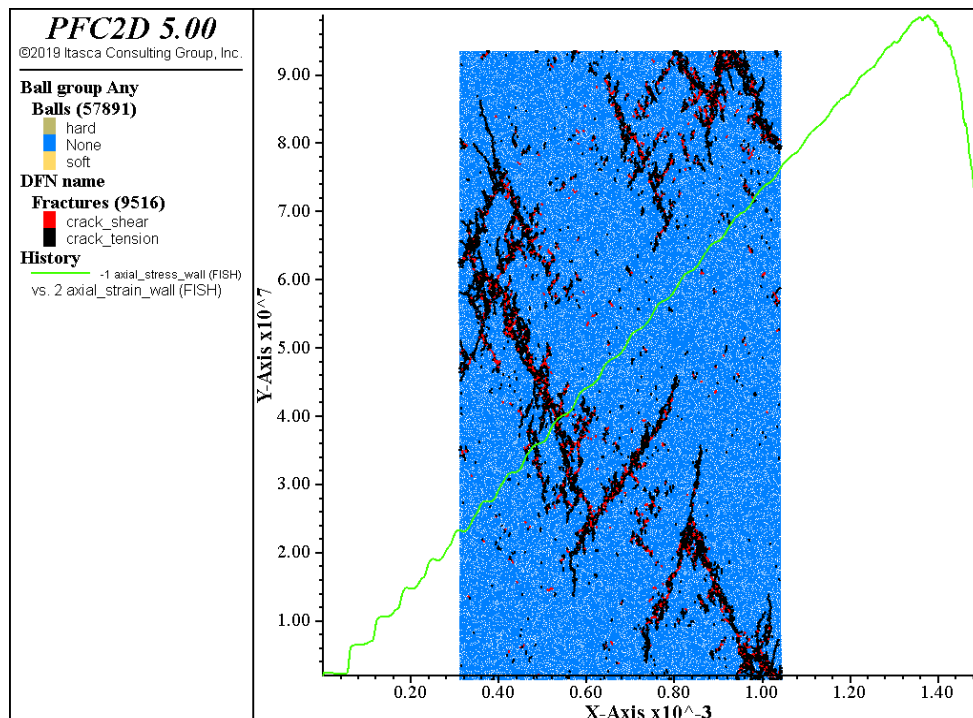
- **H300W150**



Εικόνα 6.23 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=1038$

- Αντοχή  $\text{UCS}=101.1\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=74,7\text{GPa}$

- **H400W200**



Εικόνα 6.24 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$  και  $\text{SBS/NBS}=1$  για  $\text{seed}=1038$

- Αντοχή  $\text{UCS}=98.7\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=70,1\text{GPa}$



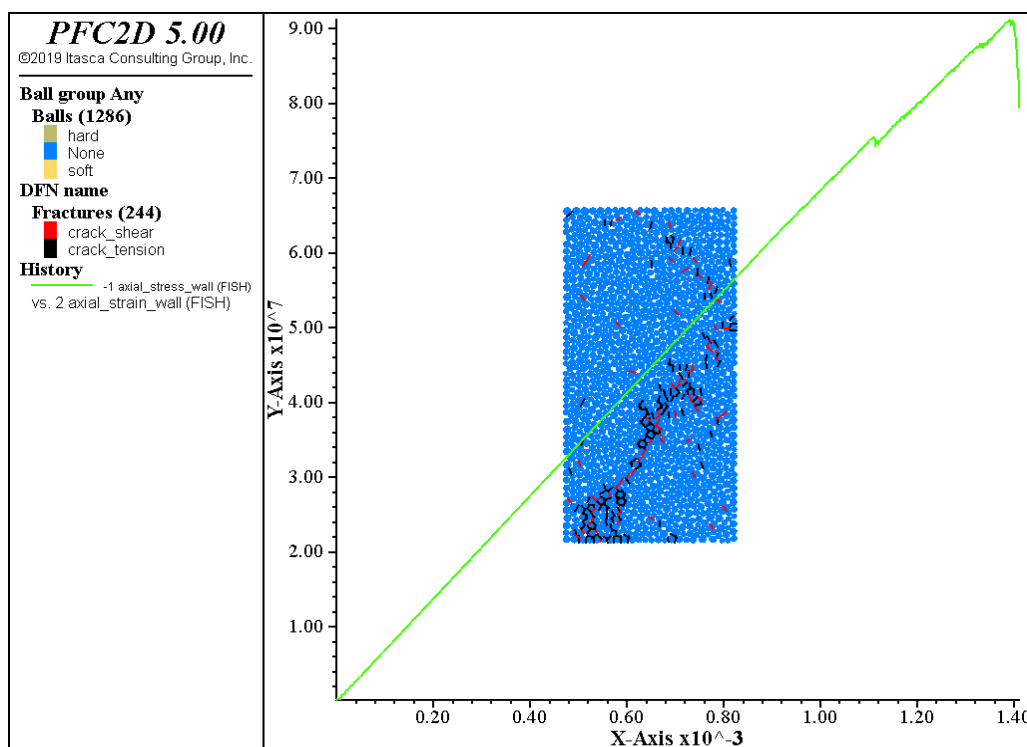
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 6.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, seed=1038 και SBS/NBS=1**

seed = 1038	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	71.6	69.9	71.6	74.7	70.1
UCS (MPa)	100.1	97.5	101.9	101.1	98.7

### 6.3 Προσομοιώσεις με κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 10MPa

- ❖ Seed=2563
- H60W30

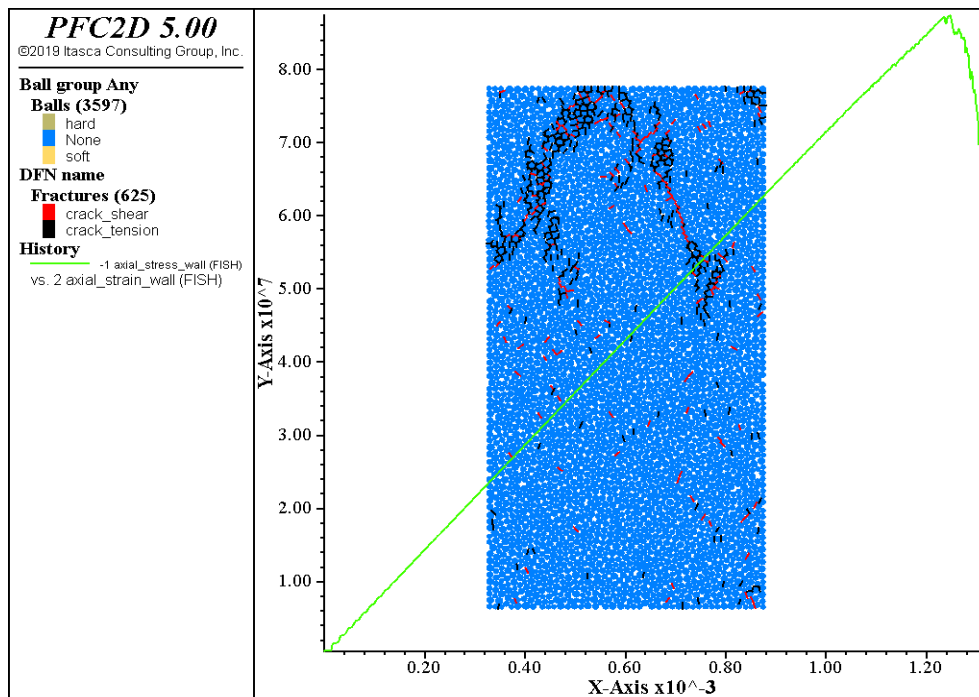


**Εικόνα 6.25 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με v=25mm/s, sdev=10MPa, SBS/NBS=1 και seed=2563**

- Αντοχή UCS=91.2MPa και μέτρο ελαστικότητας E=72,3GPa



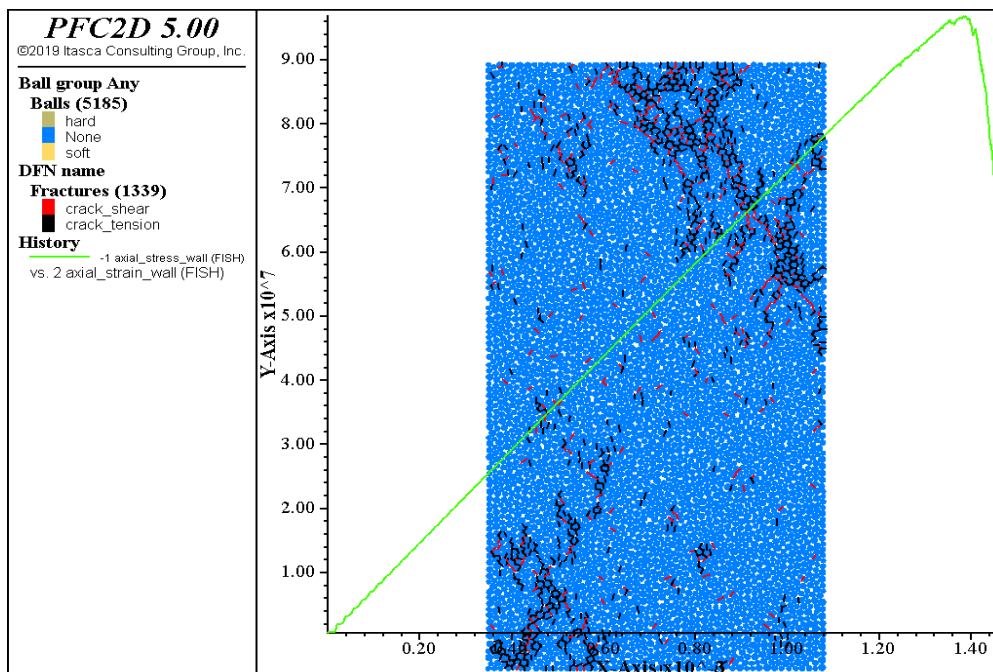
- **H100W50**



Εικόνα 6.26 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2563$

- Αντοχή  $UCS=87.4\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=71.5\text{GPa}$

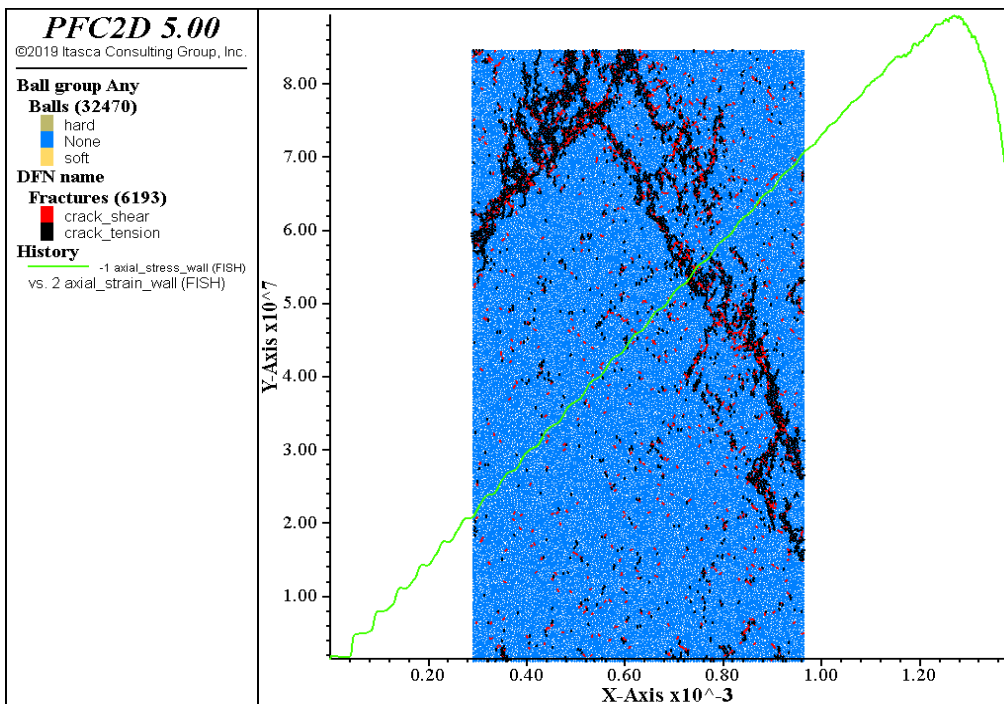
- **H120W60**



Εικόνα 6.27 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2563$

- Αντοχή  $UCS=96.8\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=71,6\text{GPa}$

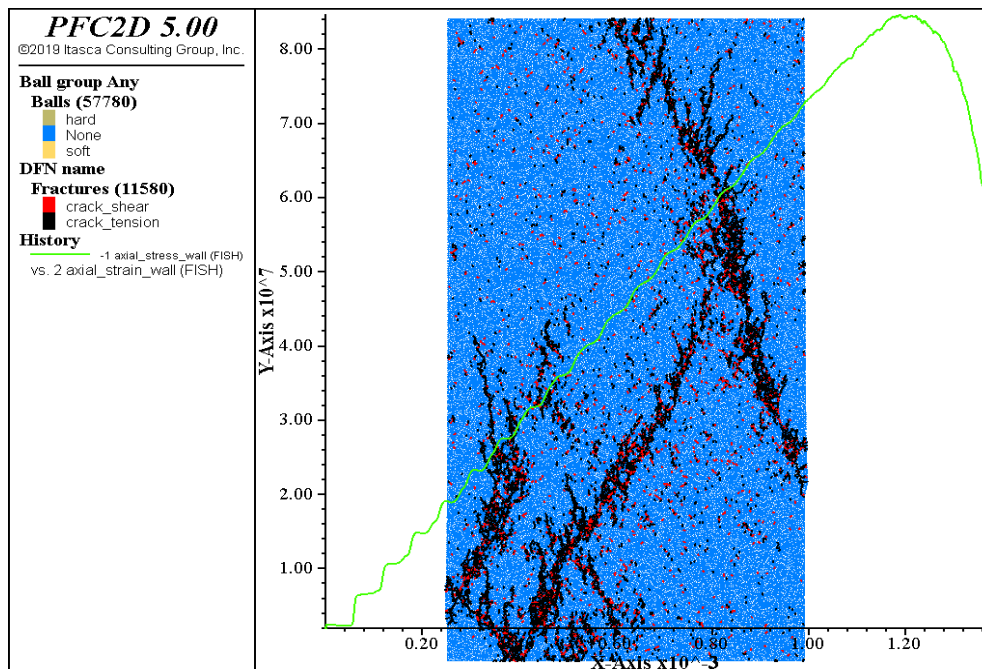
- **H300W150**



Εικόνα 6.28 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2563$

- Αντοχή  $UCS=89.4\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=64.7\text{GPa}$

- **H400W200**



Εικόνα 6.29 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2563$

- Αντοχή  $UCS=84.6\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=56\text{GPa}$

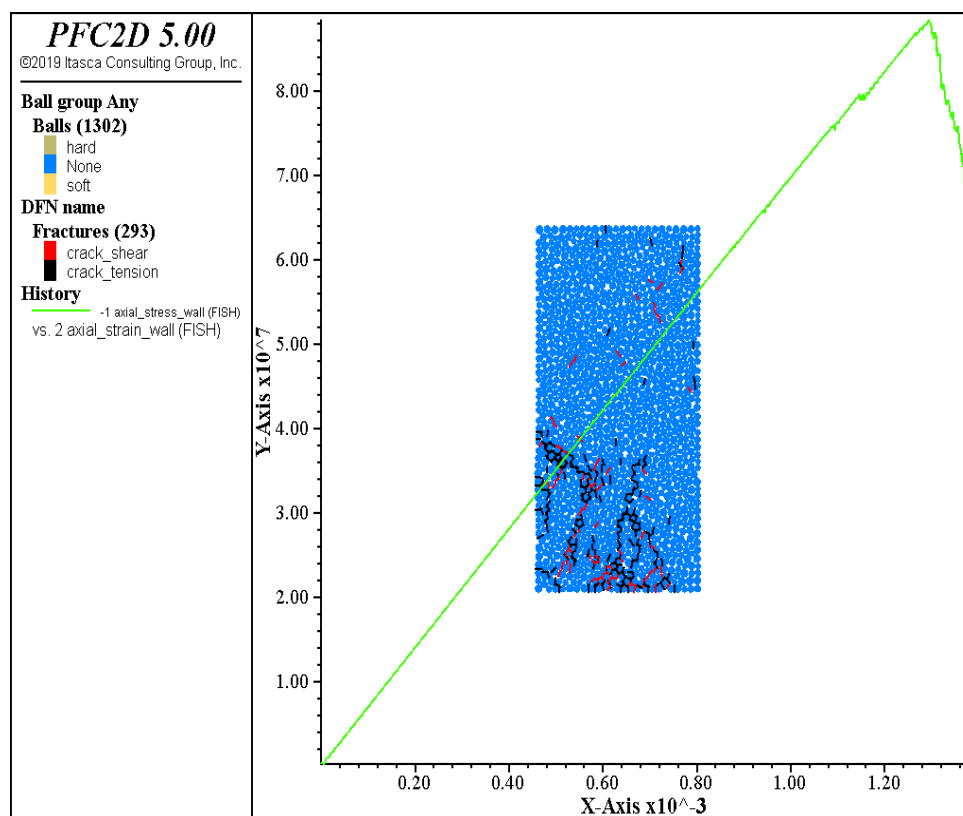
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 6.6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 10MPa, SBS/NBS=1 και seed=2563**

Ndis_sdev10					
seed = 2563	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	72.3	71.5	71.6	64.7	56
UCS (MPa)	91.2	87.4	96.8	89.4	84.6

❖ Seed=2146

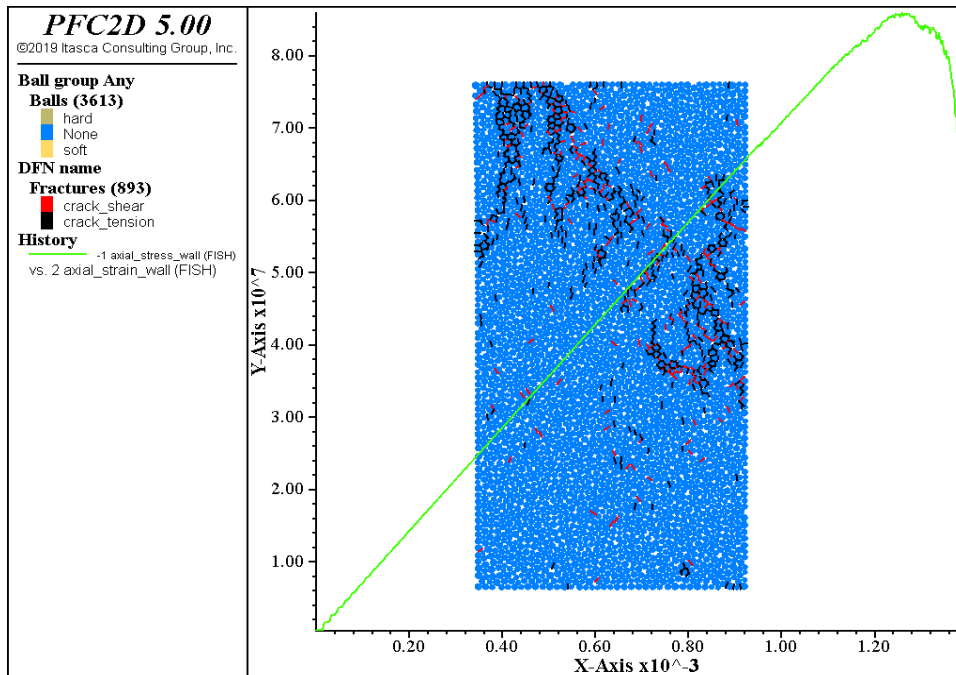
▪ H60W30



**Εικόνα 6.30 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με v=25mm/s, sdev=10MPa, SBS/NBS=1 και seed=2146**

➤ Αντοχή UCS=88,4MPa και μέτρο ελαστικότητας E=68,3GPa

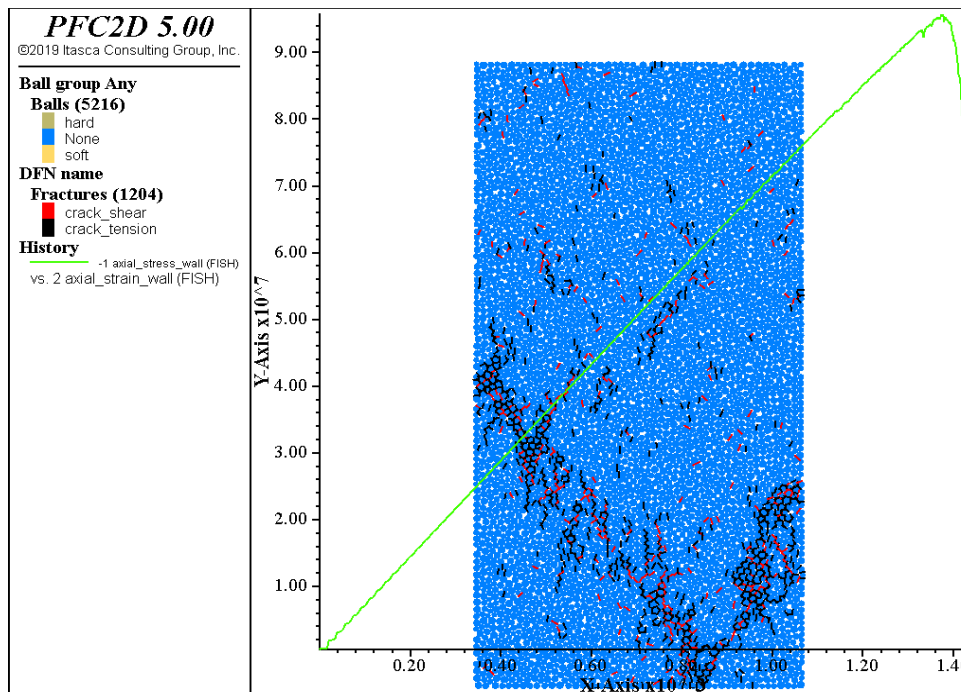
- **H100W50**



Εικόνα 6.31 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2146$

- Αντοχή  $UCS=85.9\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=72\text{GPa}$

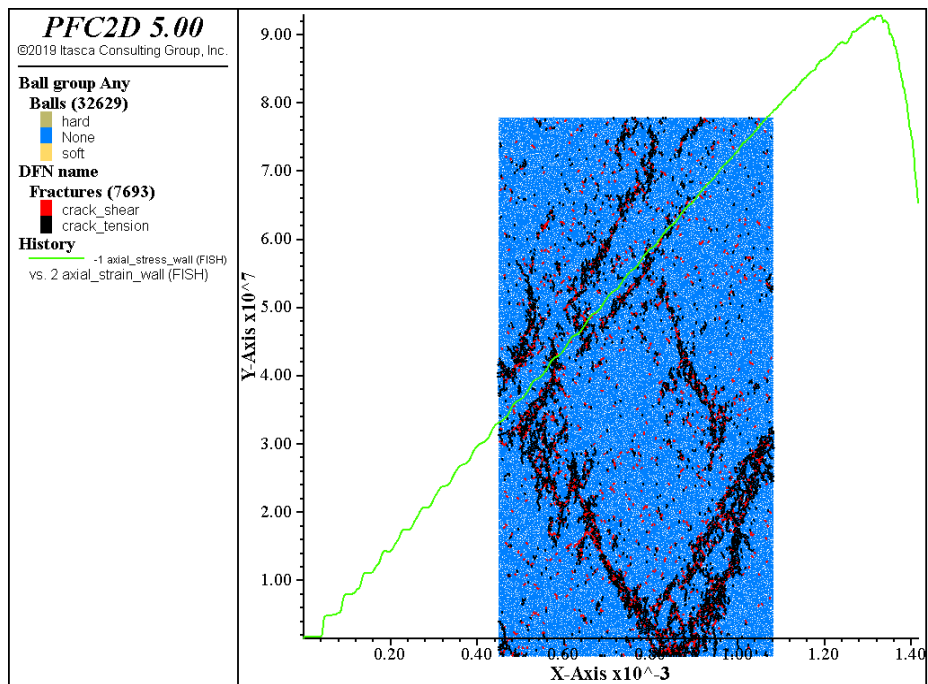
- **H120W60**



Εικόνα 6.32 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2146$

- Αντοχή  $UCS=95.7\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=72.9\text{GPa}$

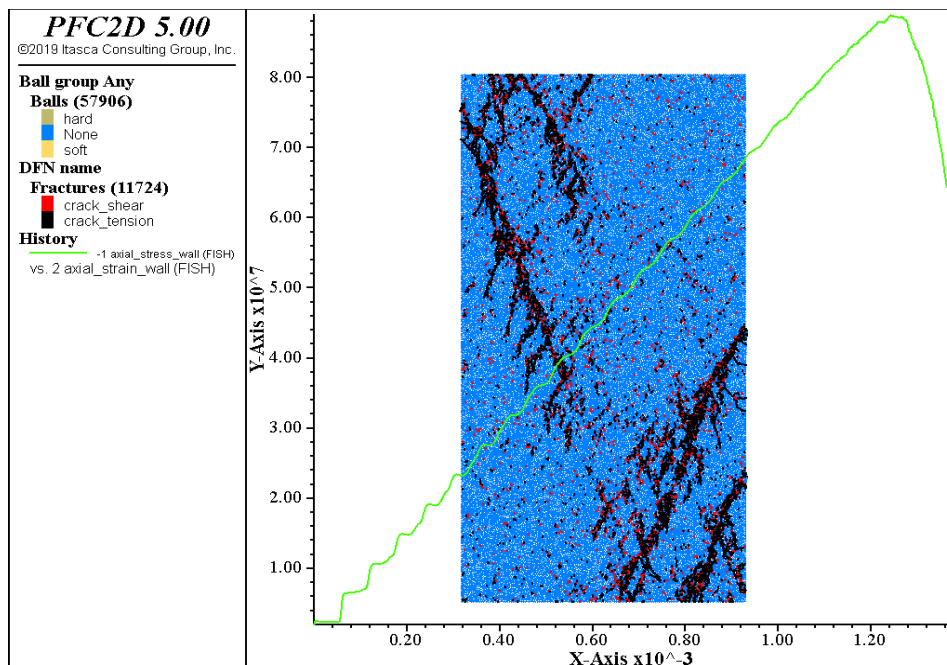
- **H300W150**



Εικόνα 6.33 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2146$

- Αντοχή  $UCS=92.8\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=69,3\text{GPa}$

- **H400W200**



Εικόνα 6.34 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2146$

- Αντοχή  $UCS=88.9\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=65,7\text{GPa}$

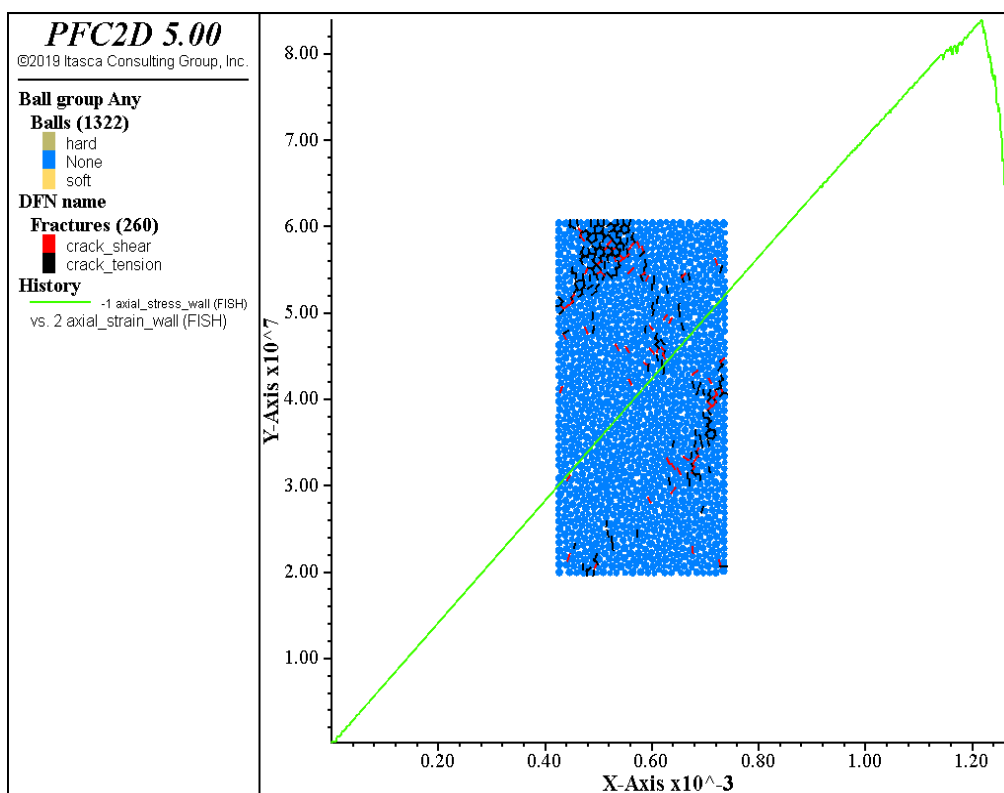
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 6.7 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 10MPa, SBS/NBS=1 και seed=2146**

Ndis_sdev10					
seed = 2146	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	68.3	72	72.9	69.3	65.7
UCS (MPa)	88.4	85.9	95.7	92.8	88.9

❖ Seed=4244

▪ H60W30

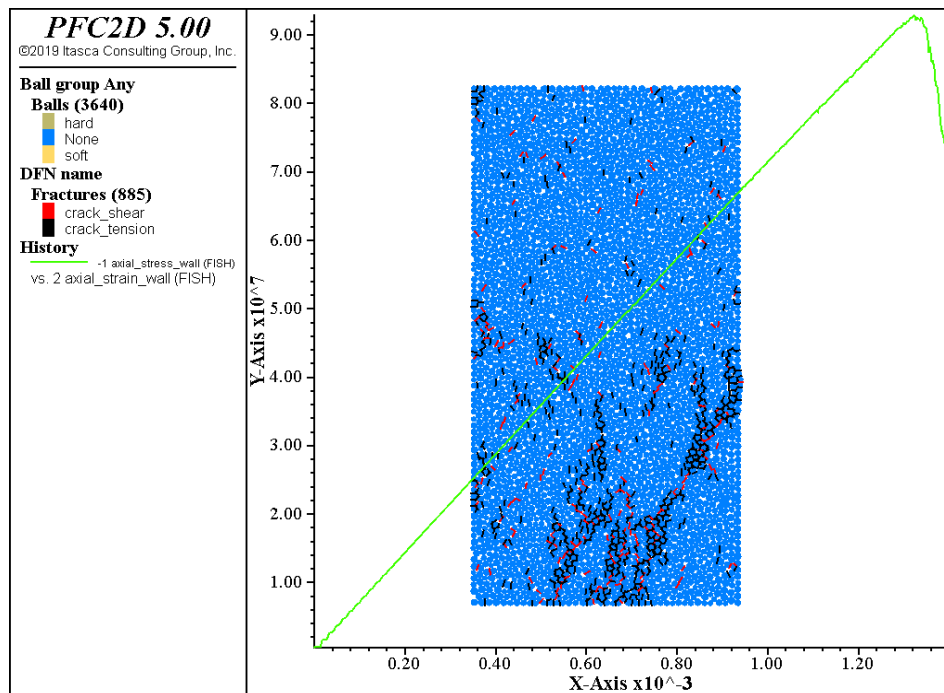


**Εικόνα 6.35 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με v=25mm/s, sdev=10MPa, SBS/NBS=1 και see=4244**

➤ Αντοχή UCS=83.9MPa και μέτρο ελαστικότητας E=70,8GPa



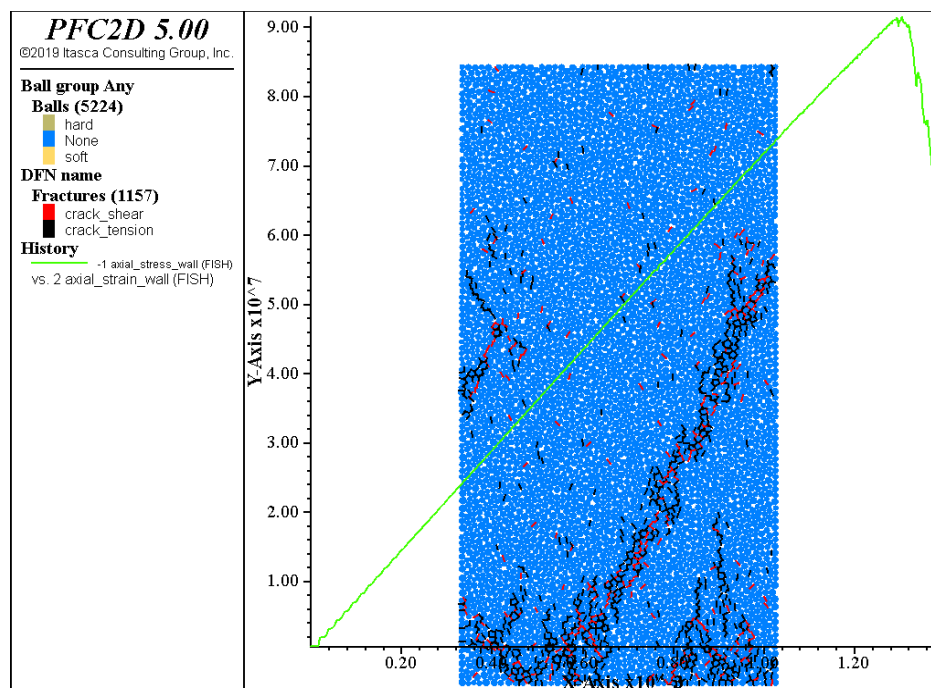
- **H100W50**



Εικόνα 6.36 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=4244$

- Αντοχή  $UCS=92.9\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=70,8\text{GPa}$

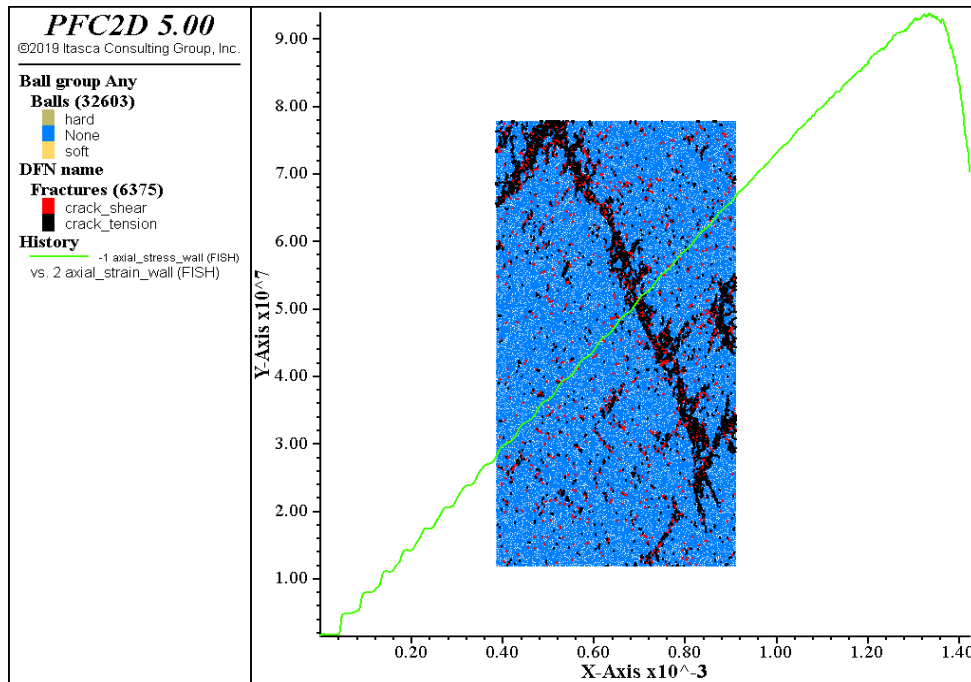
- **H120W60**



Εικόνα 6.37 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MP}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=4244$

- Αντοχή  $UCS=91.5\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=73.6\text{GPa}$

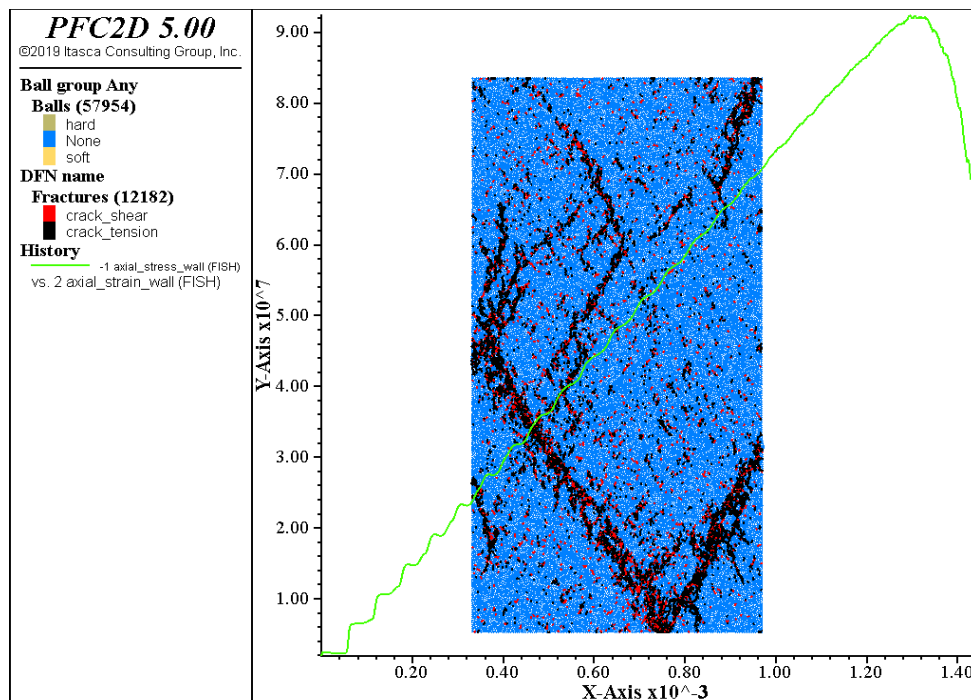
- **H300W150**



Εικόνα 6.38 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=4244$

➤ Αντοχή  $UCS=93.8\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=67.9\text{GPa}$

- **H400W200**



Εικόνα 6.39 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=4244$

➤ Αντοχή  $UCS=92.4\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=65,9\text{GPa}$



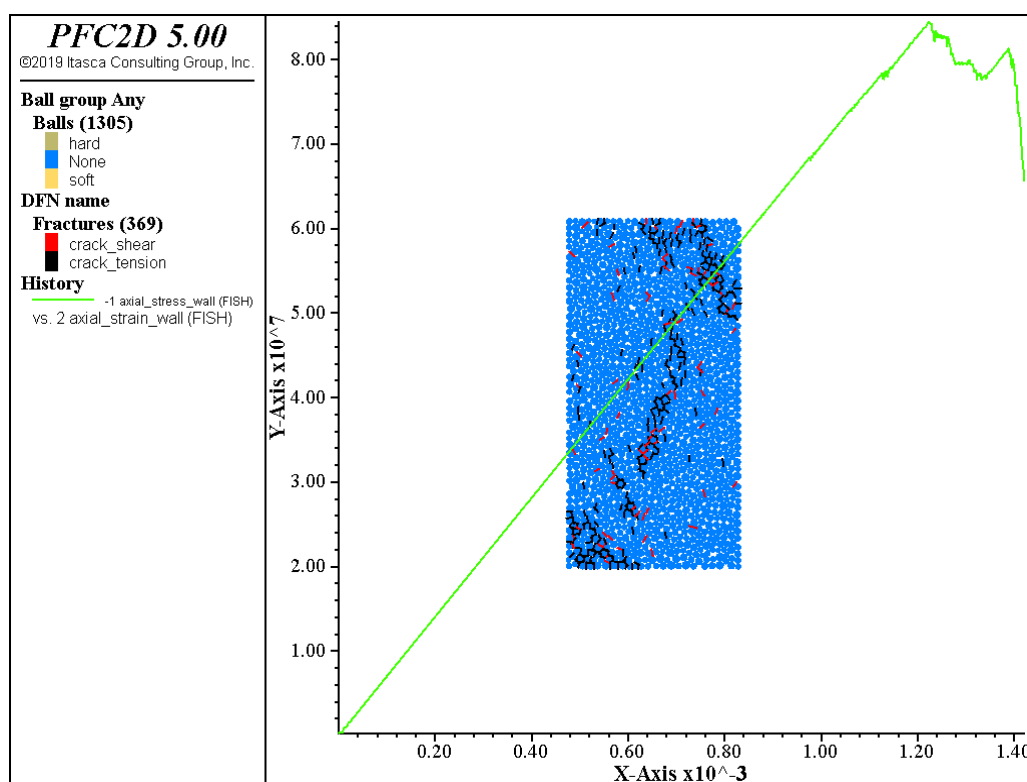
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 6.8 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 10MPa, SBS/NBS=1 και seed=4244**

Ndis_sdev10					
seed = 4244	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	70.8	70.8	73.6	67.9	65.9
UCS (MPa)	83.9	92.9	91.5	93.8	92.4

❖ Seed=1038

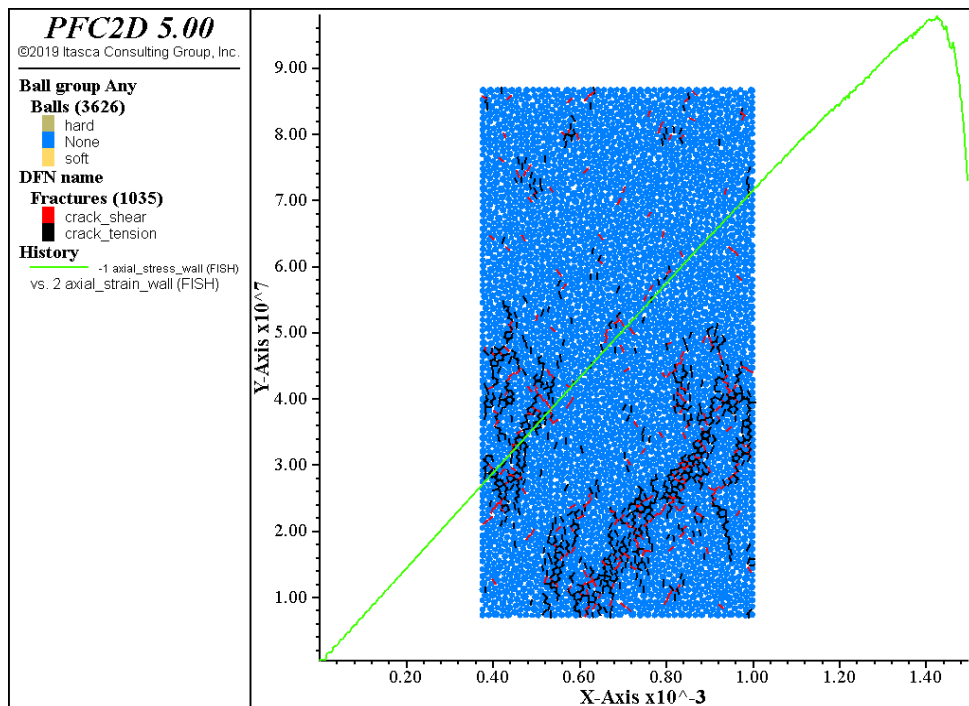
▪ H60W30



**Εικόνα 6.40 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με v=25mm/s, sdev=10MPa, SBS/NBS=1 και seed=1038**

➤ Αντοχή UCS=84.4MPa και μέτρο ελαστικότητας E=68.7GPa

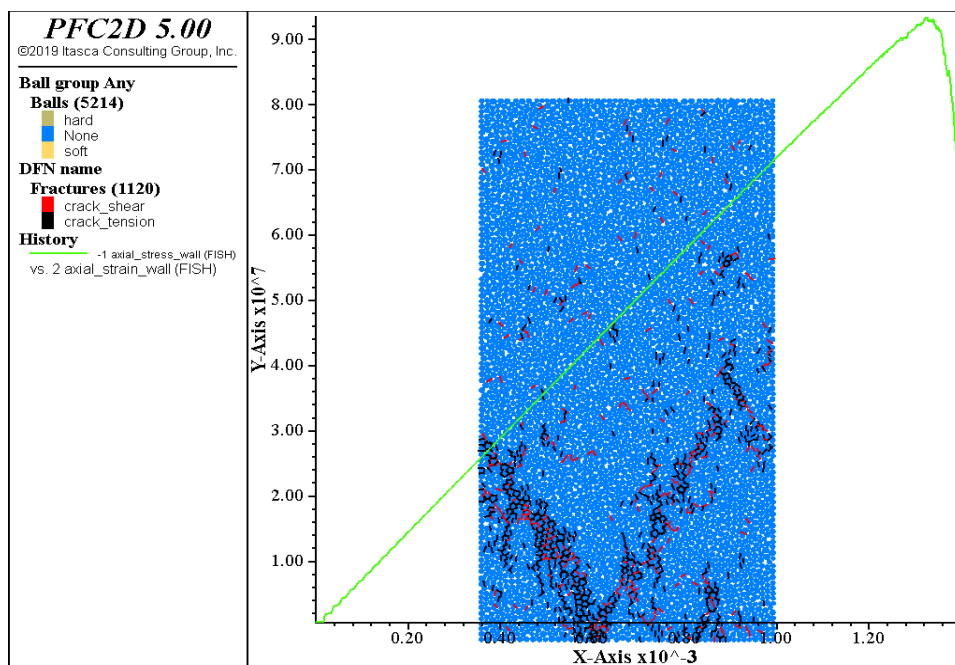
- **H100W50**



Εικόνα 6.41 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=98\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=74,1\text{GPa}$

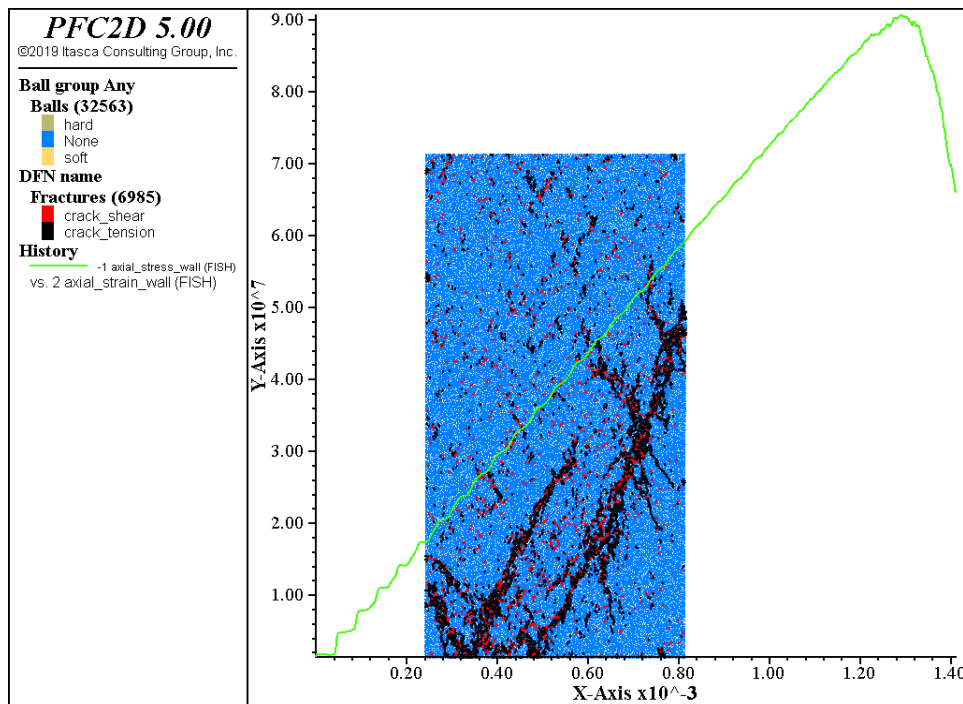
- **H120W60**



Εικόνα 6.42 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=93.4\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=72.4\text{GPa}$

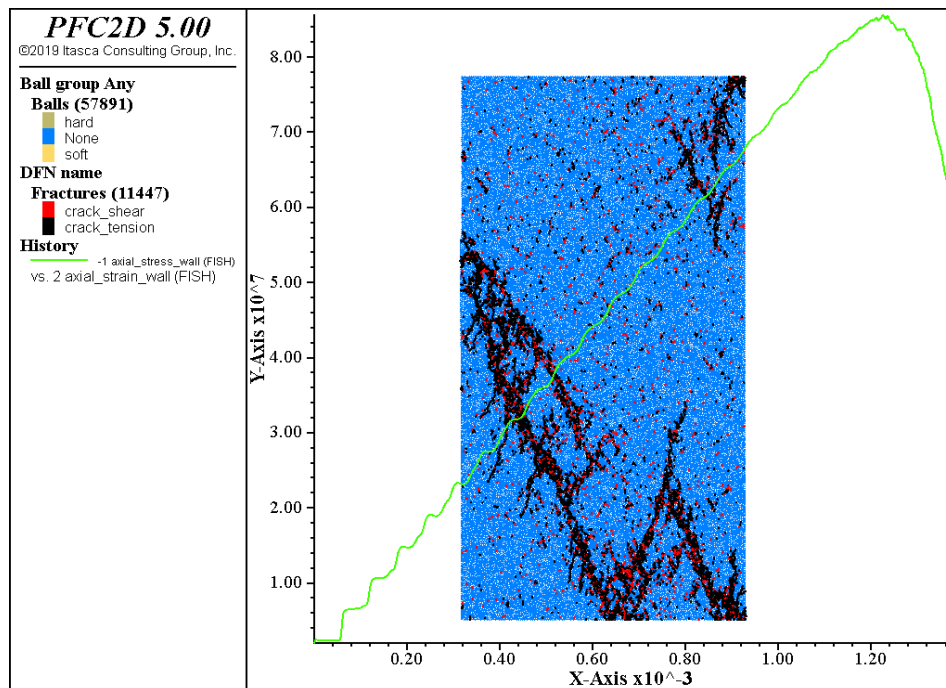
- **H300W150**



Εικόνα 6.43 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=90.6\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=69.5\text{GPa}$

- **H400W200**



Εικόνα 6.44 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=85.6\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=61.6\text{GPa}$

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

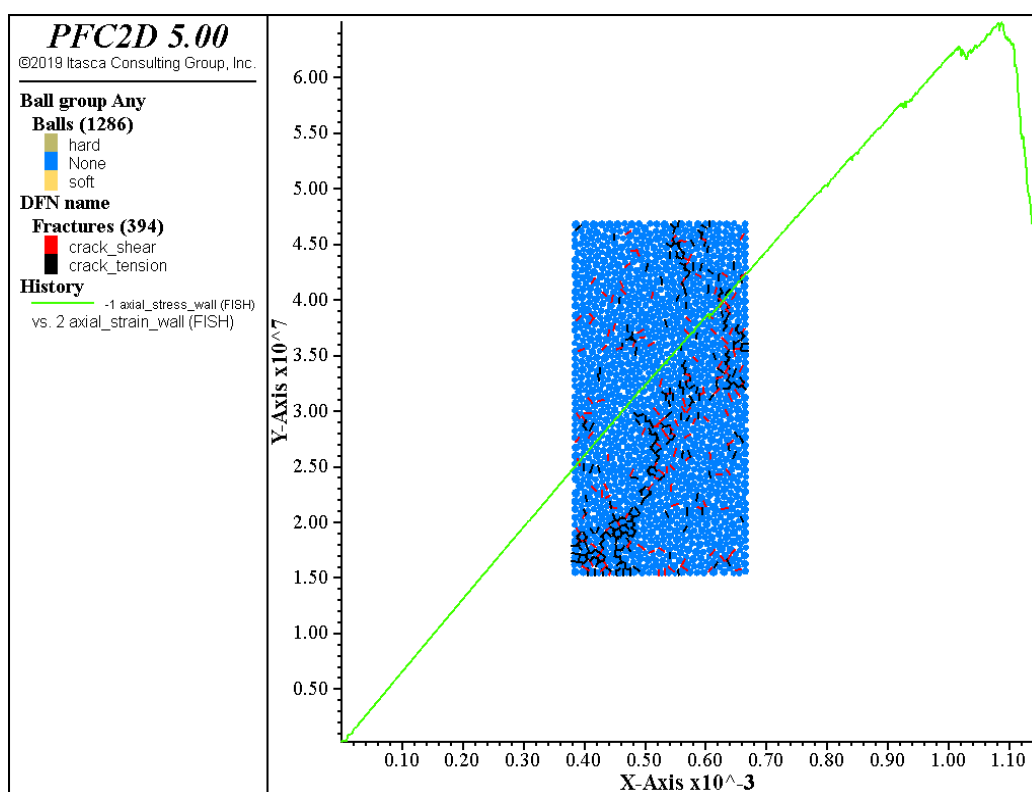
**Πίνακας 6.9 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 10 MPa, SBS/NBS=1 και seed=1038**

Ndis_sdev10					
seed = 1038	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	68.7	74.1	72.4	69.5	61.6
UCS (MPa)	84.4	98	93.4	90.6	85.6

## 6.4 Προσομοιώσεις με κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 20MPa

❖ Seed2563

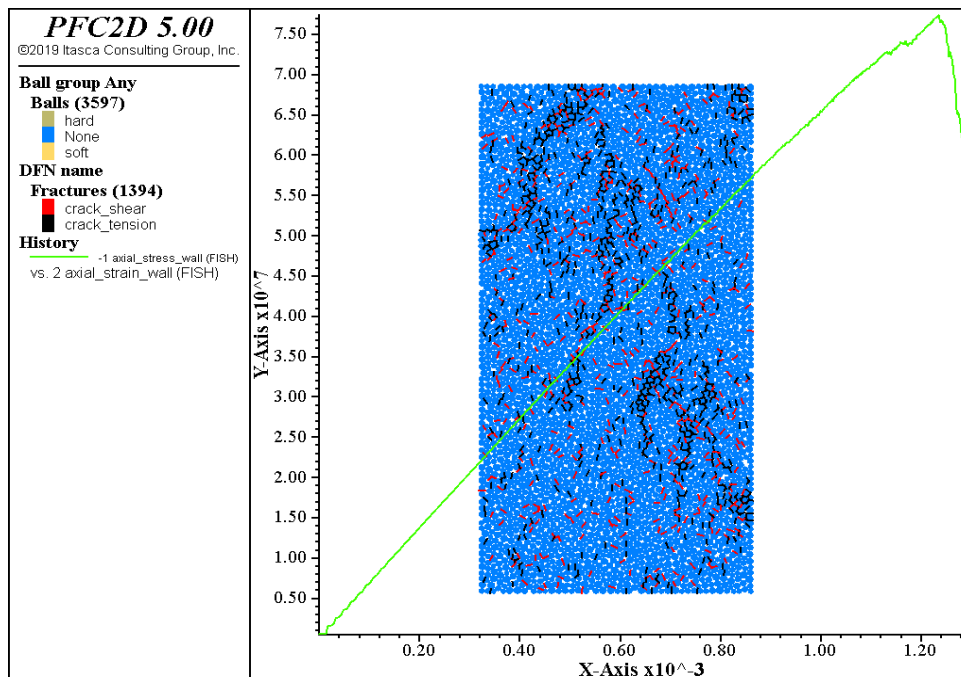
▪ H60W30



**Εικόνα 6.45 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ , SBS/NBS=1 και  $seed=2563$**

➤ Αντοχή UCS=65MPa και μέτρο ελαστικότητας E=61.7GPa

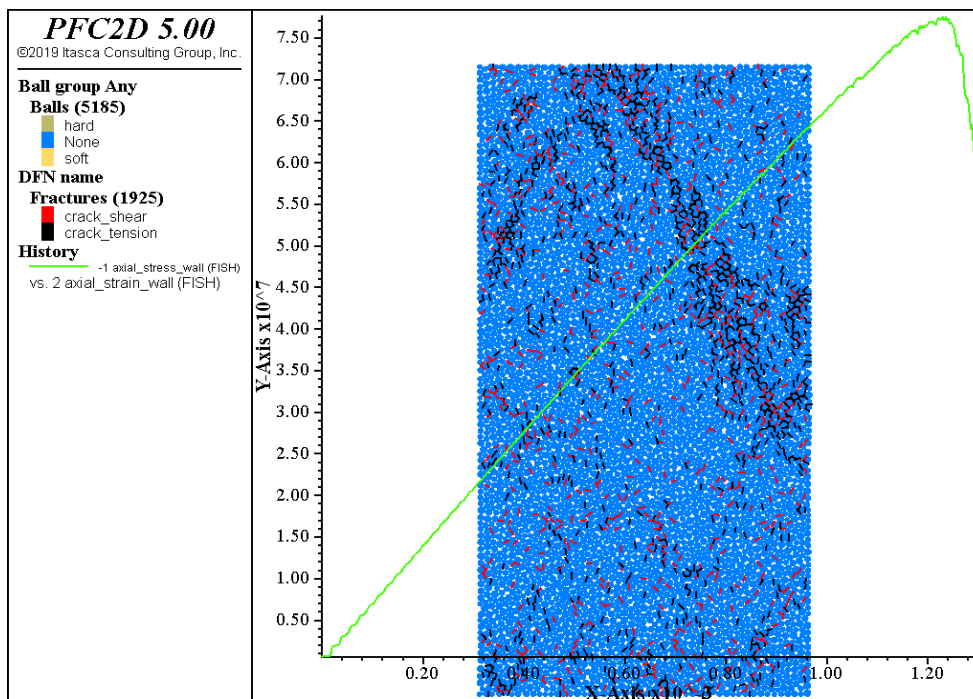
- **H100W50**



Εικόνα 6.46 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2563$

- Αντοχή  $UCS=77.4\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=66,2\text{GPa}$

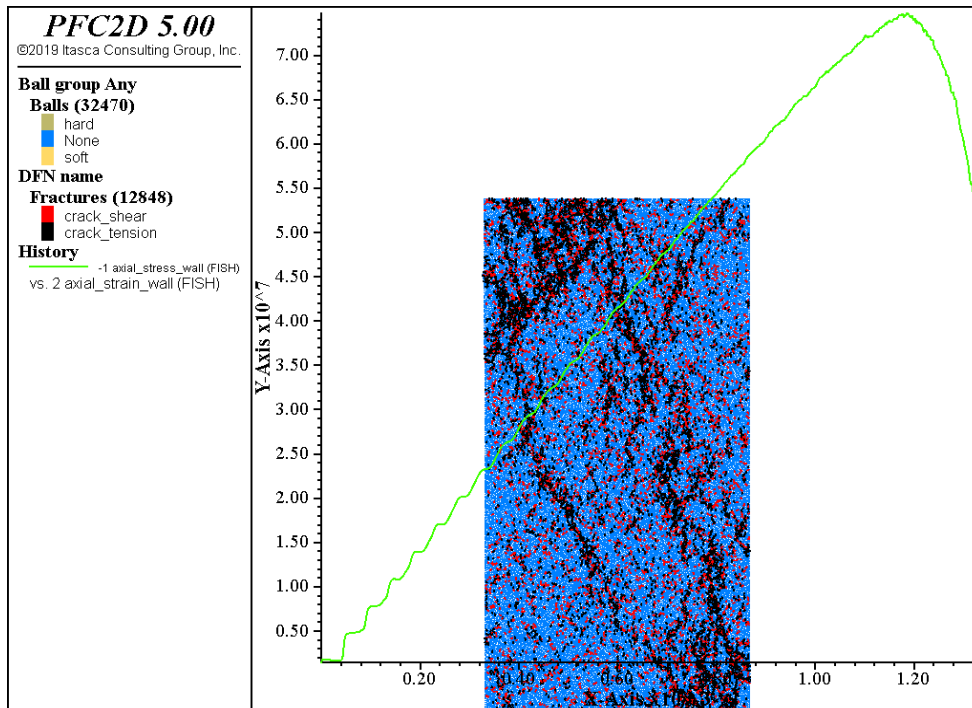
- **H120W60**



Εικόνα 6.47 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2563$

- Αντοχή  $UCS=77.6\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=67.6\text{GPa}$

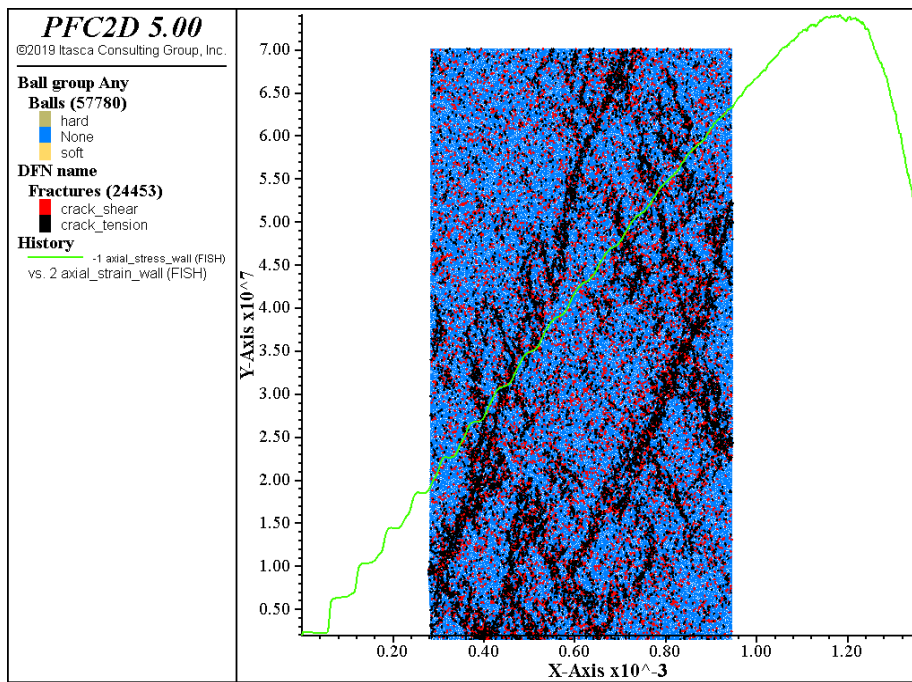
- **H300W150**



Εικόνα 6.48 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2563$

- Αντοχή  $UCS=74.7\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=59.9\text{GPa}$

- **H400W200**



Εικόνα 6.49 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2563$

- Αντοχή  $UCS=74\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=57.5\text{GPa}$



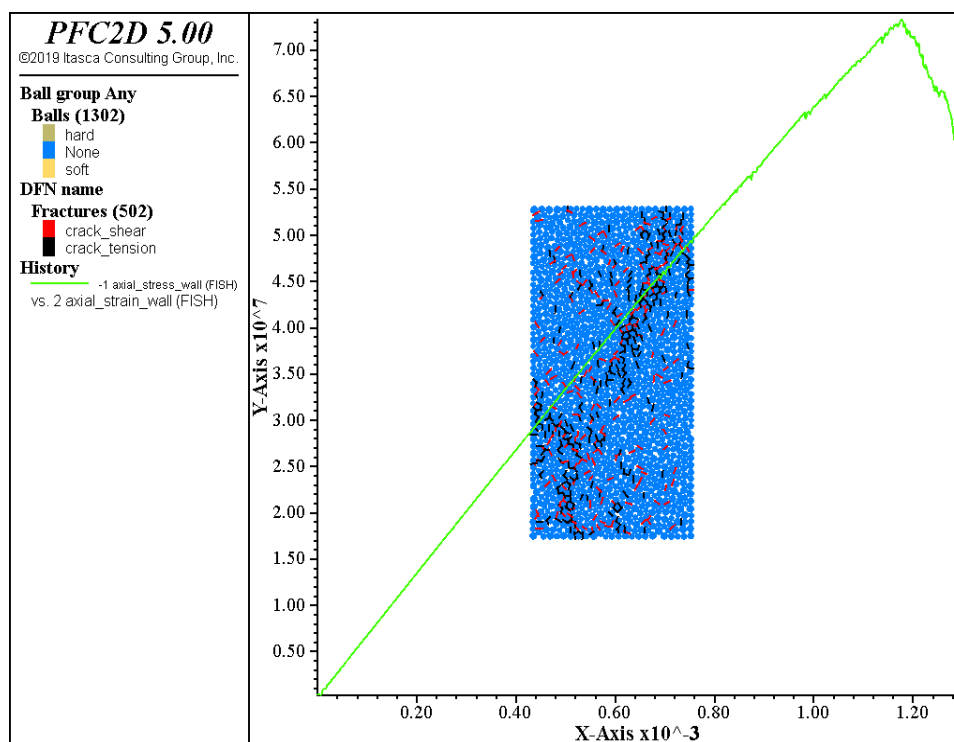
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 6.10 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 20MPa, SBS/NBS=1 και seed=2563**

Ndis_sdev20					
seed = 2563	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	61.7	66.2	67.6	59.9	57.5
UCS (MPa)	65	77.4	77.6	74.7	74

❖ **Seed=2146**

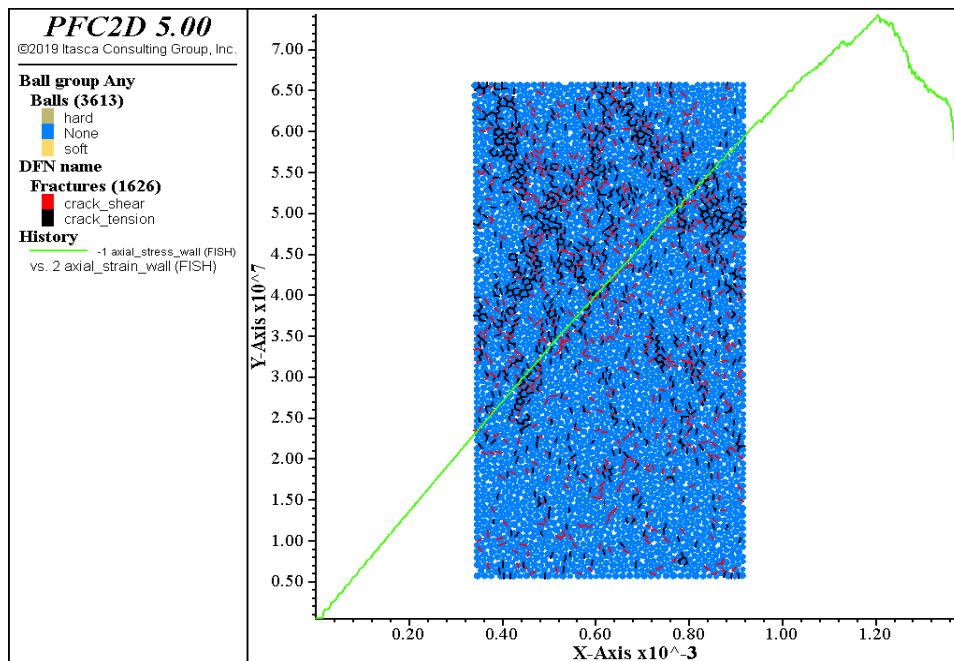
▪ **H60W30**



**Εικόνα 6.50 Διάγραμμα δοκιμίου 60 H60W30 με v=25mm/s, sdev=20MPa, SBS/NBS=1 και seed=2146**

➤ Αντοχή UCS=73.3MPa και μέτρο ελαστικότητας E=66.6GPa

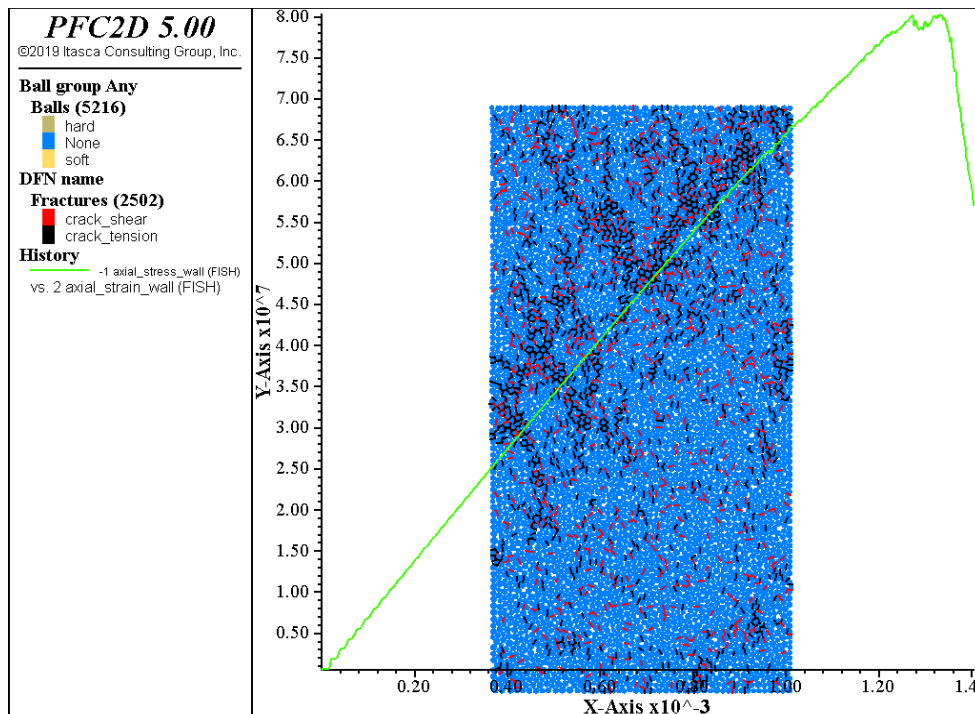
- **H100W50**



**Εικόνα 6.51 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ .  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2146$**

- Αντοχή UCS=74.2MPa και μέτρο ελαστικότητας E=65.3GPa

- **H120W60**

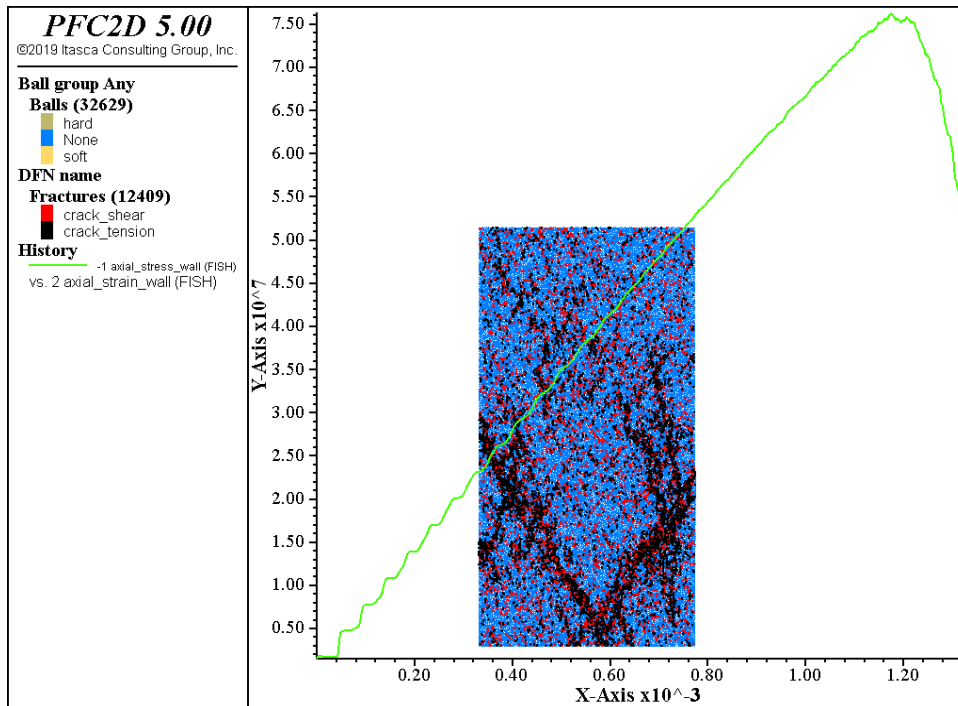


**Εικόνα 6.52 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2146$**

- Αντοχή UCS=80.3MPa και μέτρο ελαστικότητας E=68.8GPa



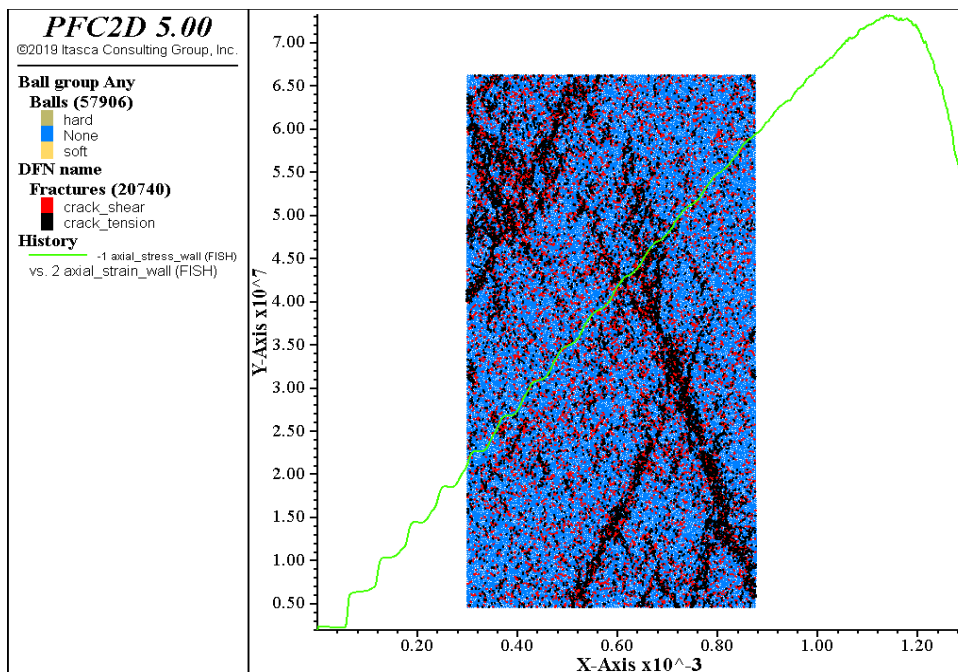
- **H300W150**



Εικόνα 6.53 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $SDEV=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2146$

- Αντοχή  $UCS=76.2\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=60.7\text{GPa}$

- **H400W200**



Εικόνα 6.54 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{MPa}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=2146$

- Αντοχή  $UCS=73.2\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=61\text{GPa}$

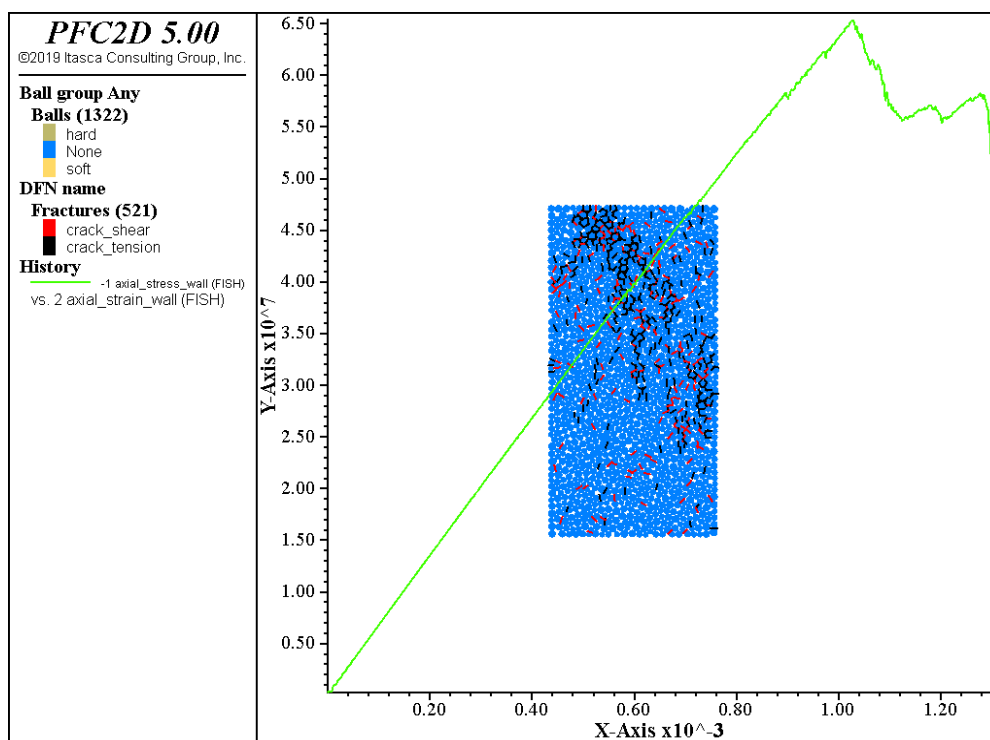
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 6.11 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 20MPa, SBS/NBS=1 και seed=2146**

Ndis_sdev20					
seed = 2146	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	66.6	65.3	68.8	60.7	61
UCS (MPa)	73.3	74.2	80.3	76.2	73.2

❖ **Seed=4244**

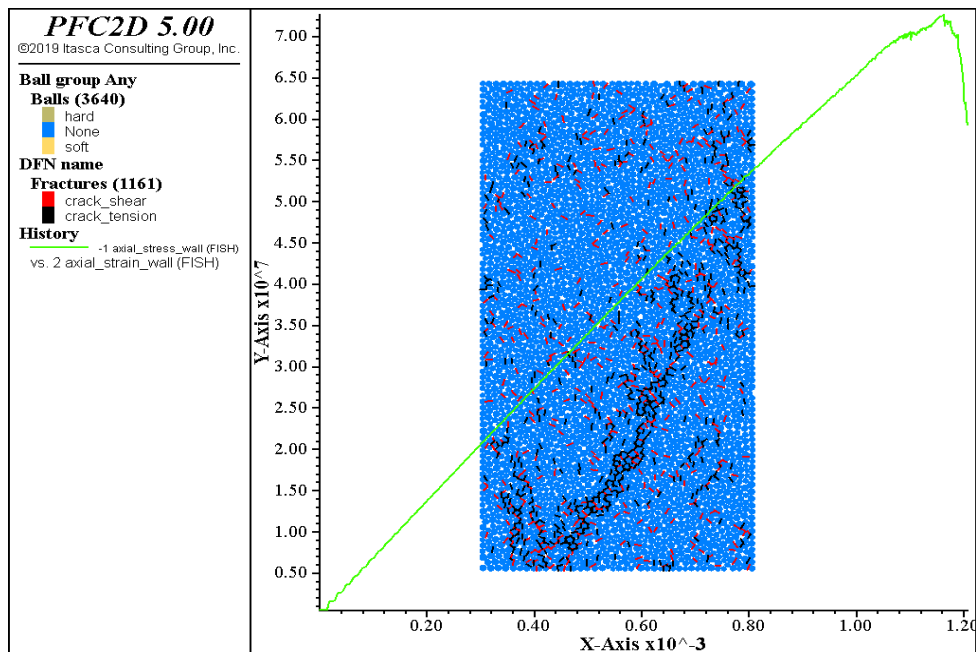
▪ **H60W30**



**Εικόνα 6.55 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με v=25mm/s, sdev=20MPa, SBS/NBS=1 και seed=4244**

- Αντοχή UCS=65.4MPa και μέτρο ελαστικότητας E=66.6GPa

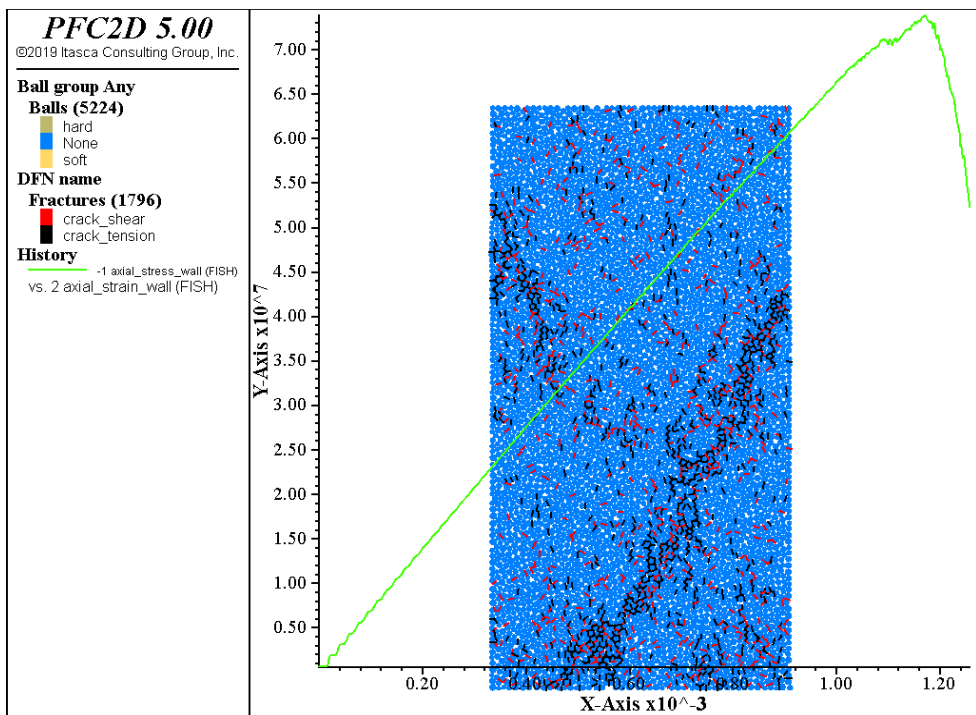
- **H100W50**



Εικόνα 6.56 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=4244$

➤ Αντοχή  $UCS=72.6\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=69\text{GPa}$

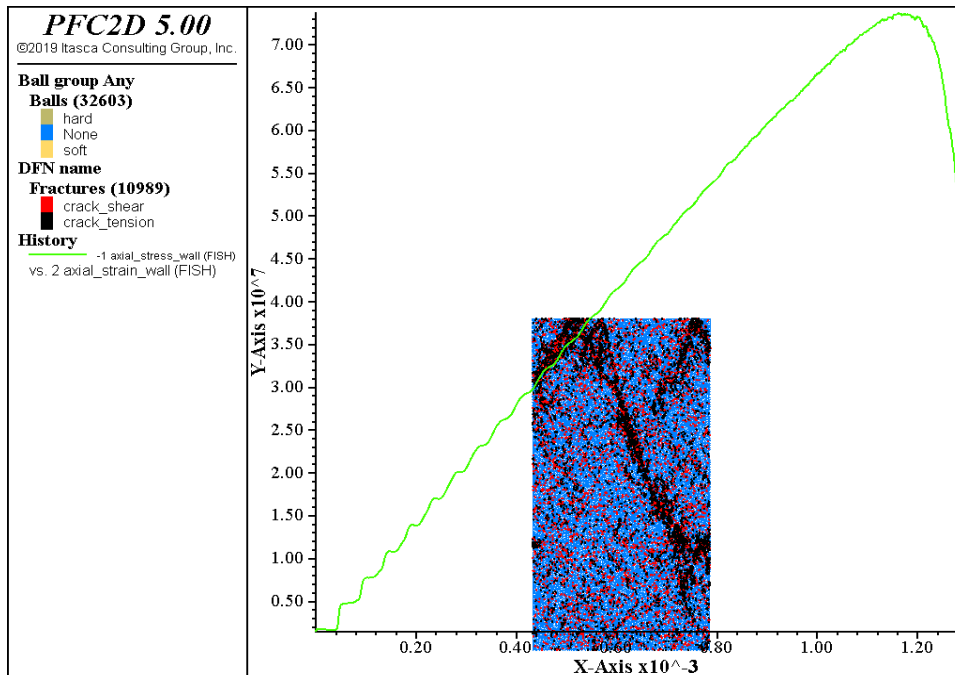
- **H120W60**



Εικόνα 6.57 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=4244$

➤ Αντοχή  $UCS=73.8\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=67.1\text{GPa}$

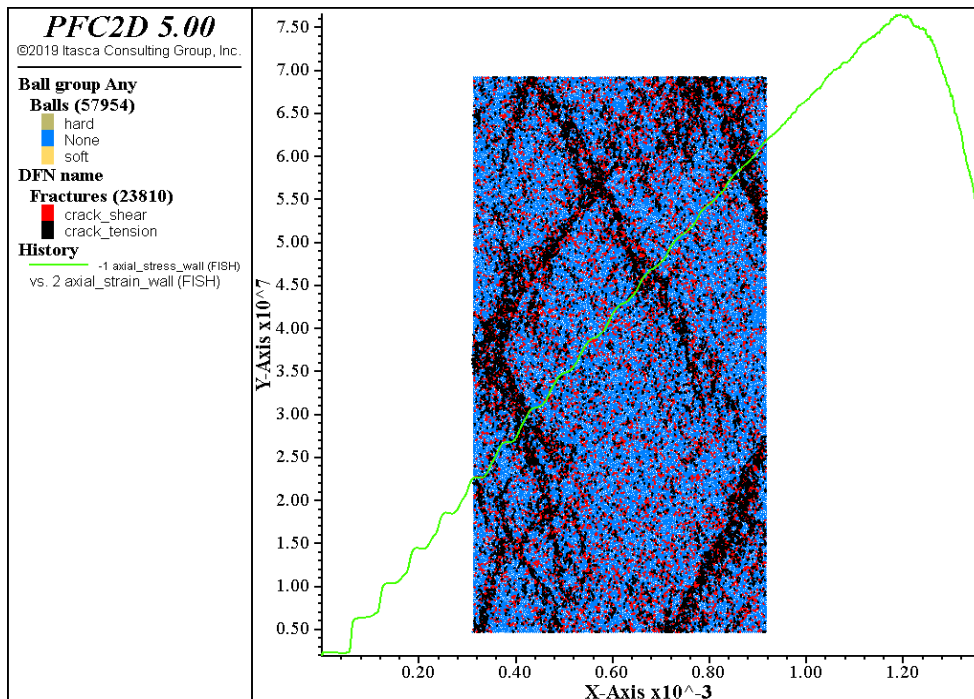
- **300W150**



Εικόνα 6.58 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=4244$

- Αντοχή  $UCS=73.7\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=63.3\text{GPa}$

- **H400W200**



Εικόνα 6.59 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=4244$

- Αντοχή  $UCS=76.5\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=61.4\text{GPa}$

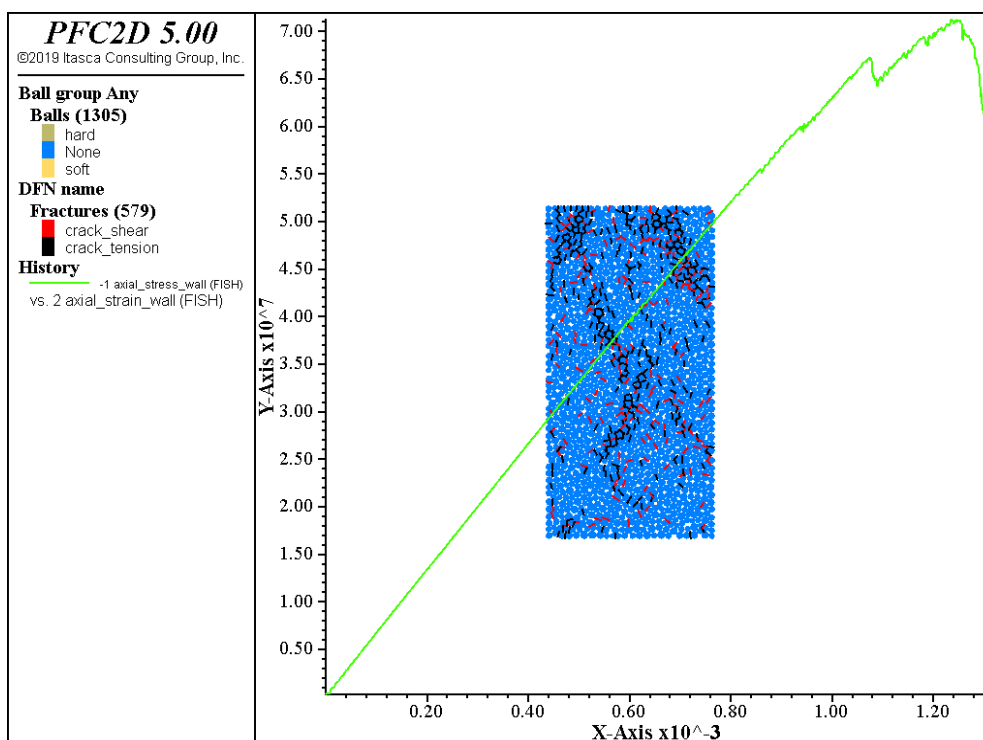
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 6.12 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 20MPa, SBS/NBS=1 και seed=4244**

Ndis_sdev20					
seed = 4244	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	66.6	69	67.1	63.3	61.4
UCS (MPa)	65.4	72.6	73.8	73.7	76.5

❖ **Seed=1038**

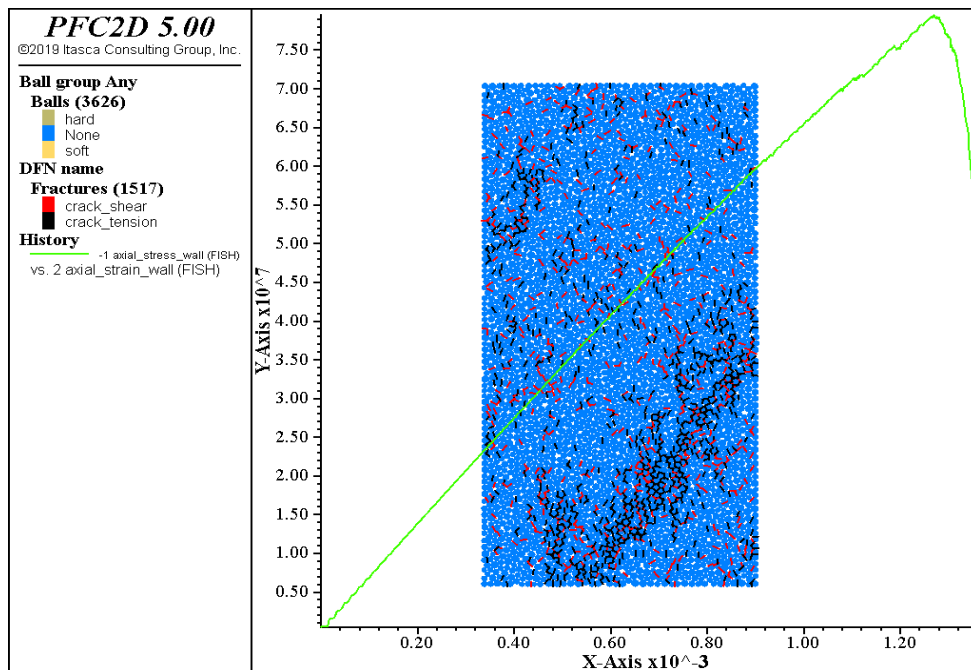
▪ **H60W30**



**Εικόνα 6.60 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με v=25mm/s, sdev=20MPa, SBS/NBS=1 και seed=1038**

➤ Αντοχή UCS=71.2MPa και μέτρο ελαστικότητας E=67GPa

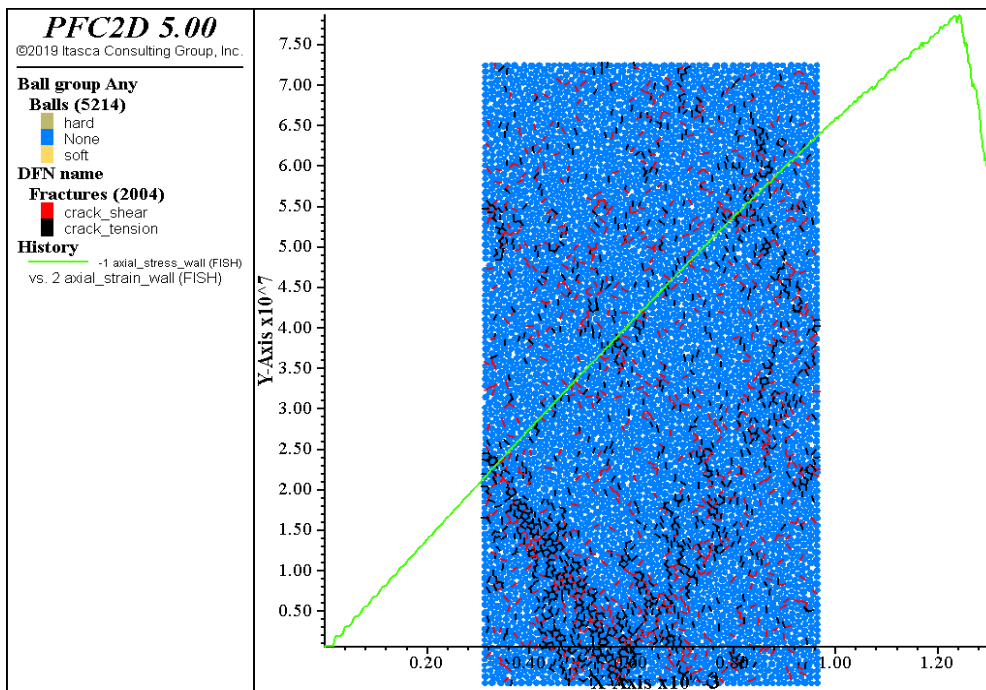
- **H100W50**



Εικόνα 6.61 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ .  $SBS/NBS=1$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=79.5\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=66.8\text{GPa}$

- **H120W60**

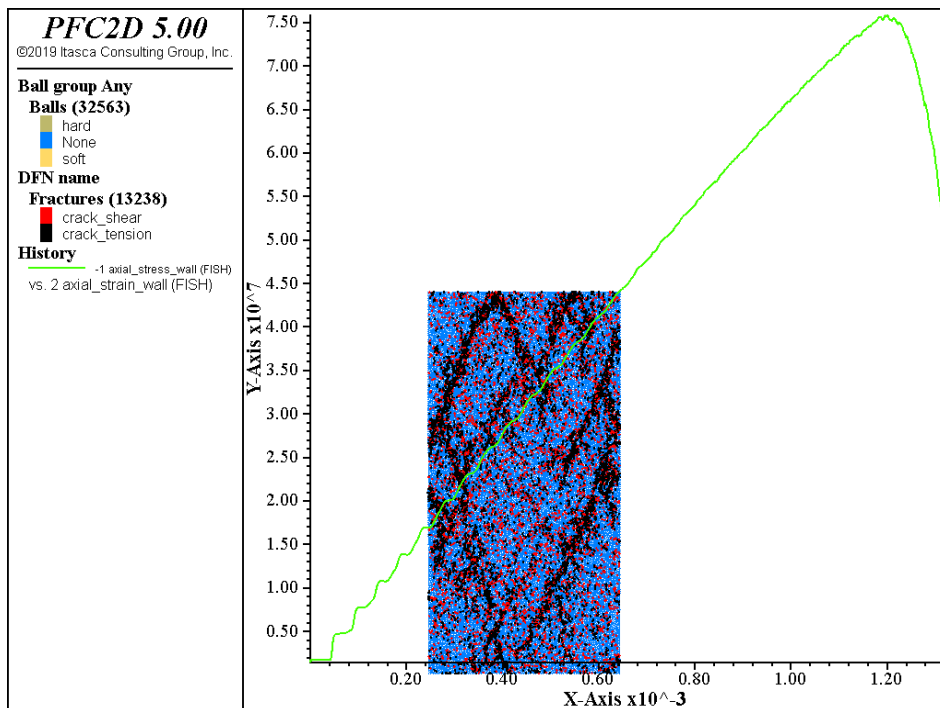


Εικόνα 6.62 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=78.6\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=66.5\text{GPa}$



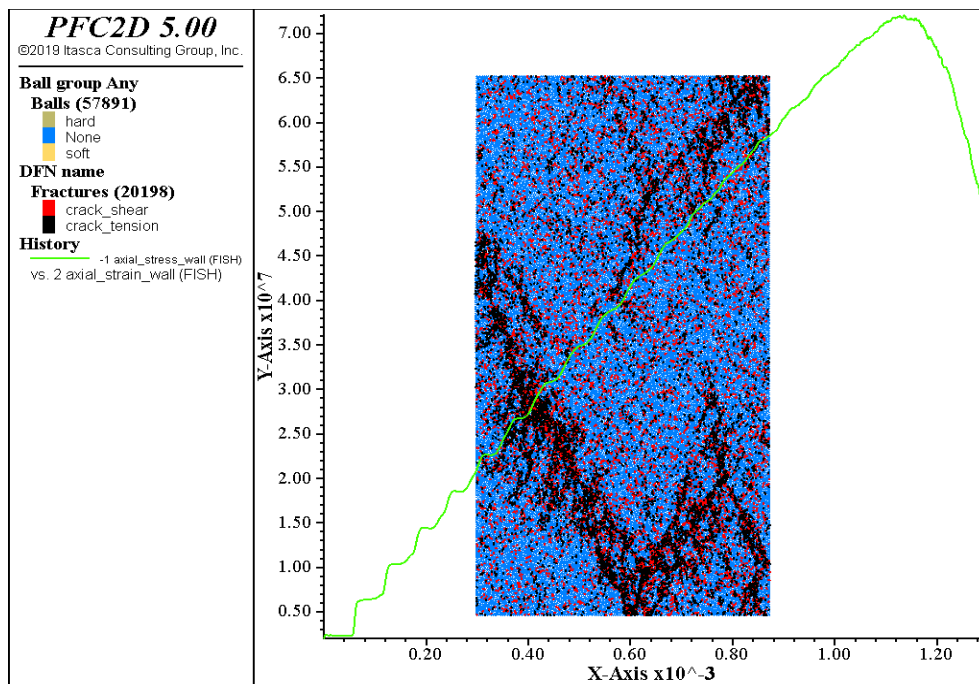
- **H300W150**



Εικόνα 6.63 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=1038$

➤ Αντοχή  $UCS=75.8\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=59.6\text{GPa}$

- **H400W200**



Εικόνα 6.64 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=1$  και  $seed=1038$

➤ Αντοχή  $UCS=72.1\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=56.8\text{GPa}$

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 6.13 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση 20MPa, SBS/NBS=1 και seed=1038**

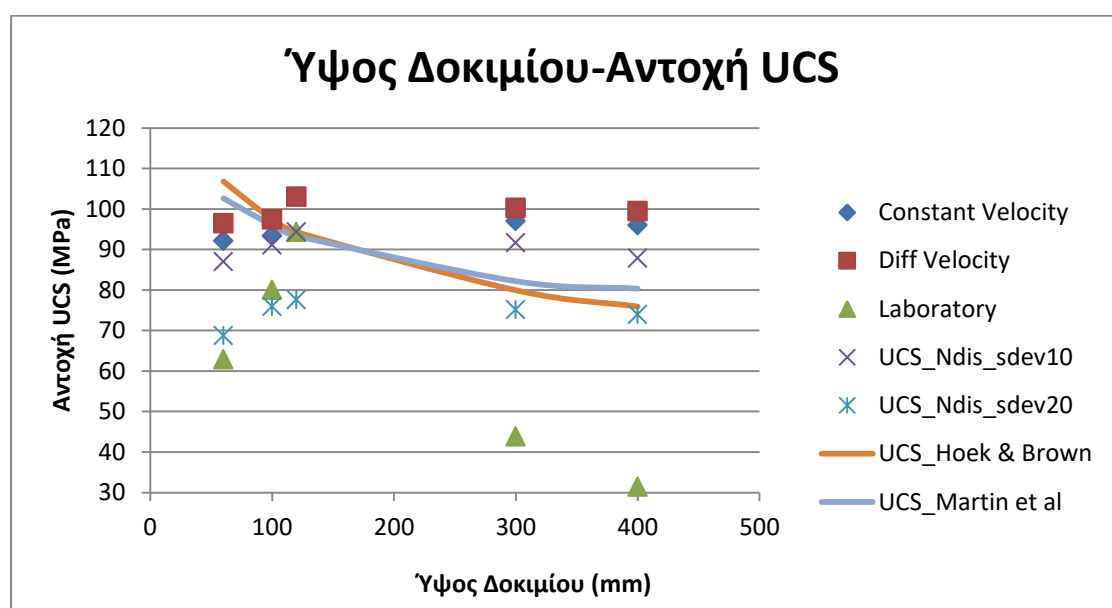
Ndis_sdev20					
seed = 1038	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	67	66.8	66.5	59.6	56.8
UCS (MPa)	71.2	79.5	78.6	75.8	72.1

## 6.5 Αποτελέσματα UCS σειράς δοκιμών

Παρακάτω παρατίθενται πίνακας και διαγράμματα με όλα τα δεδομένα της σειράς δοκιμών, όπου για κάθε κατηγορία μοντέλου έχει υπολογιστεί η μέση τιμή. Επιπλέον, εμφανίζονται τα πειραματικά δεδομένα από τις δοκιμές που περιγράφηκαν παραπάνω<sup>[5,18]</sup> και υπολογίστηκαν οι τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη μέσω των σχέσεων των Hoek & Brown και Martin et al για τη σύγκριση των δεδομένων.

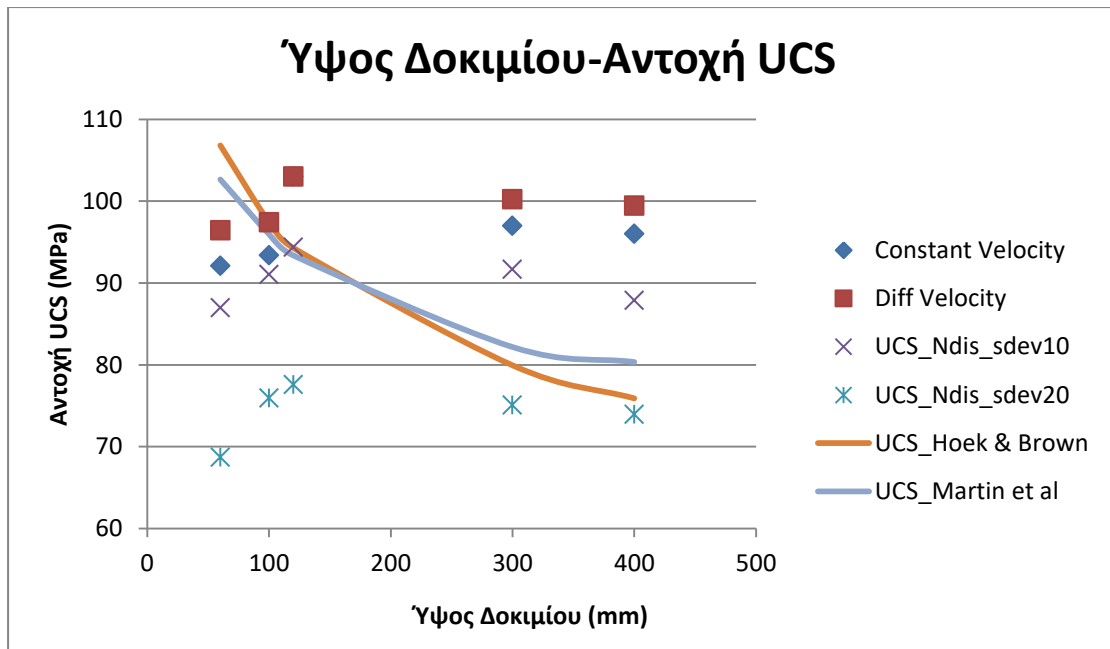
**Πίνακας 6.14 Συγκεντρωτικός πίνακας UCS δεδομένων σειράς δοκιμών με SBS/NBS=1**

		Diff Vel	Diff Vel	Diff Vel	Diff Vel	Diff Vel
H(mm)	Laboratory UCS (Mpa)	Avg UCS (Mpa)	Avg UCS_Ndis_sdev10 (Mpa)	Avg UCS_Ndis_sdev20 (Mpa)	Avg UCS Hoek & Brown	Avg Ucs Martin et al
60	62.9	96.4	87.0	68.7	106.8	102.6
100	80	97.4	91.1	75.9	97.4	96.0
120	94.3	103.0	94.4	77.6	94.3	93.4
300	43.8	100.2	91.7	75.1	79.9	82.2
400	31.4	99.5	87.9	74.0	75.9	80.3



**Σχήμα 6.1 Διάγραμμα αποτελεσμάτων UCS σειράς μοντέλων με SBS/NBS=1**





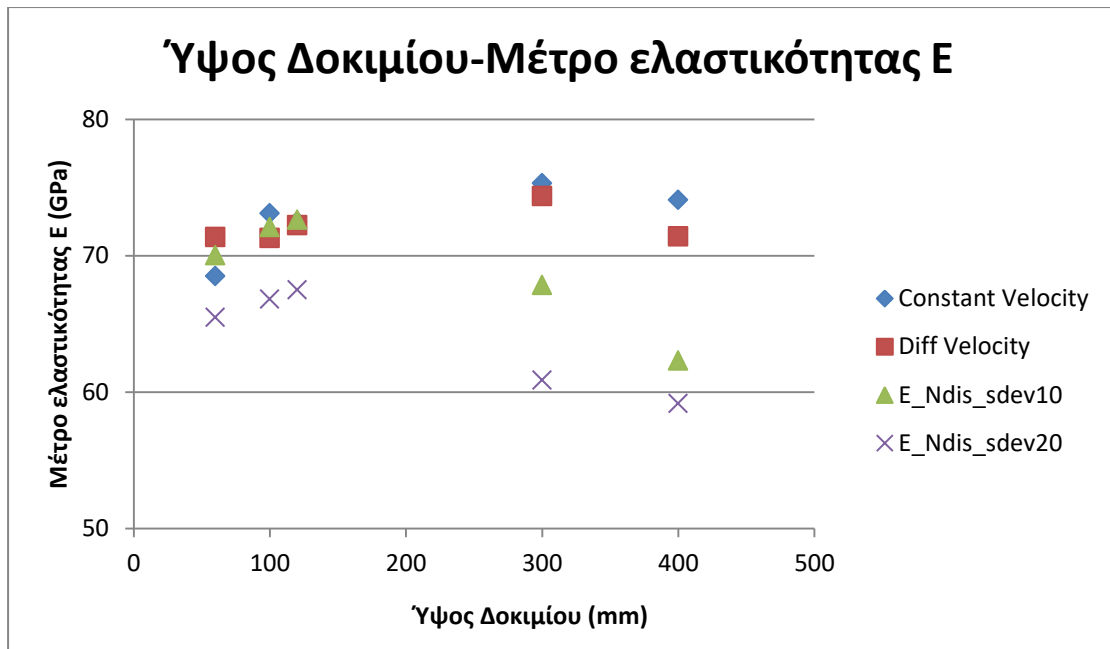
Σχήμα 6.2 Διάγραμμα αποτελεσμάτων UCS σειράς αριθμητικών μοντέλων με SBS/NBS=1

## 6.6 Αποτελέσματα μέτρου ελαστικότητας E σειράς δοκιμών

Παρακάτω παρατίθενται πίνακας και διάγραμμα με όλα τα δεδομένα της σειράς δοκιμών, όπου για κάθε κατηγορία μοντέλου έχει υπολογιστεί η μέση τιμή.

Πίνακας 6.15 Συγκεντρωτικός πίνακας μέτρου ελαστικότητας E σειράς δοκιμών με SBS/NBS=1

	Diff Vel	Diff Vel	Diff Vel
H(mm)	Avg E (Gpa)	Avg E_Ndis_sdev10 (Gpa)	Avg E_Ndis_sdev20 (Gpa)
60	71.4	70.0	65.5
100	71.3	72.1	66.8
120	72.2	72.6	67.5
300	74.4	67.9	60.9
400	71.4	62.3	59.2



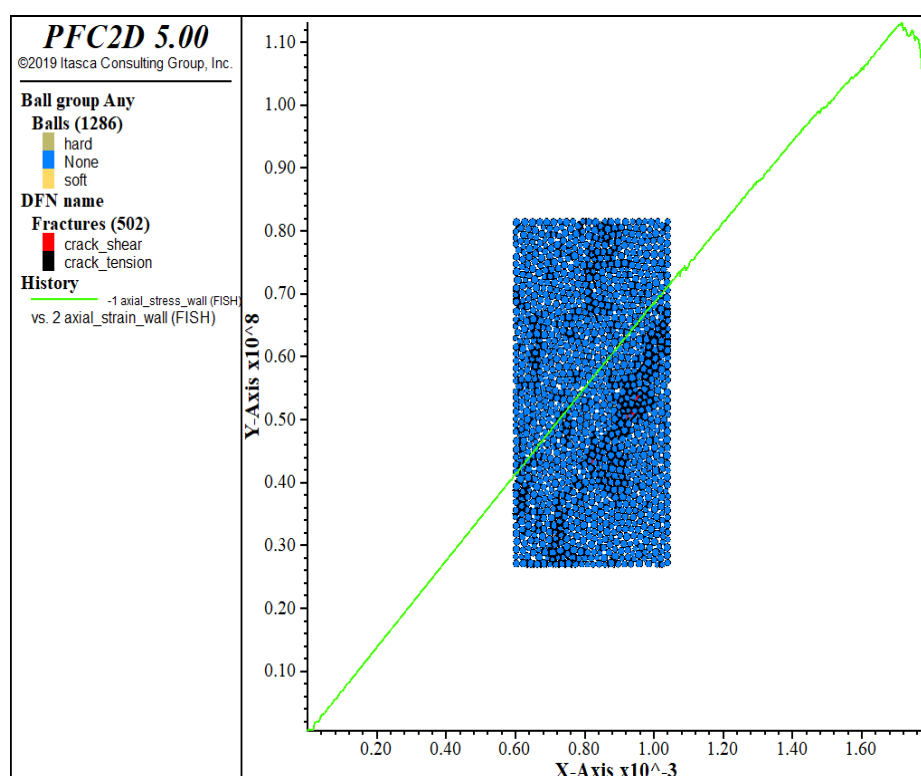
Σχήμα 6.3 Διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας E σειράς αριθμητικών μοντέλων με SBS/NBS=1

## 7 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με SBS/NBS=2

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με λόγο διατμητικής προς εφελκυστικής αντοχής δεσμών ίσο με 2, SBS/NBS=2, με εικόνες των δοκιμίων με των μορφών θραύσης τους και των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων κάθε περίπτωσης. Στο τέλος κάθε υποομάδας προσομοιώσεων παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων. Σε κάποιες περιπτώσεις δοκιμίων γίνεται ανάλυση της πορείας της δοκιμής μαζί με στιγμιότυπα για την ανάλυση της μορφής θραύσης τους.

### 7.1 Προσομοιώσεις με ταχύτητα πλακών θλίψης 50mm/s και seed=2563

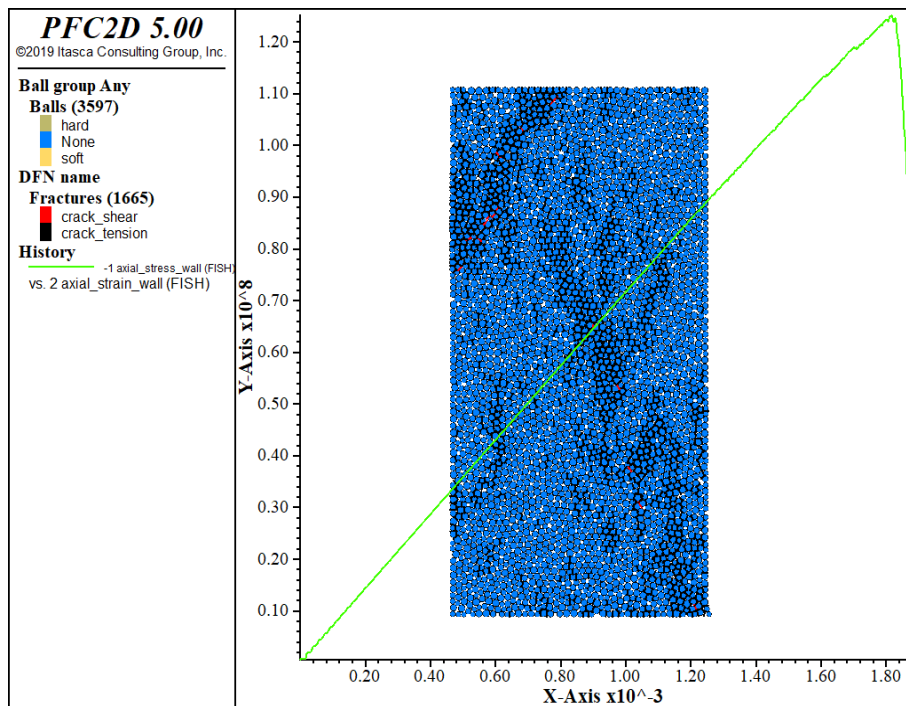
- **H60W30**



Εικόνα 7.1 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και seed=2563

- Αντοχή UCS=113MPa και μέτρο ελαστικότητας E=71GPa

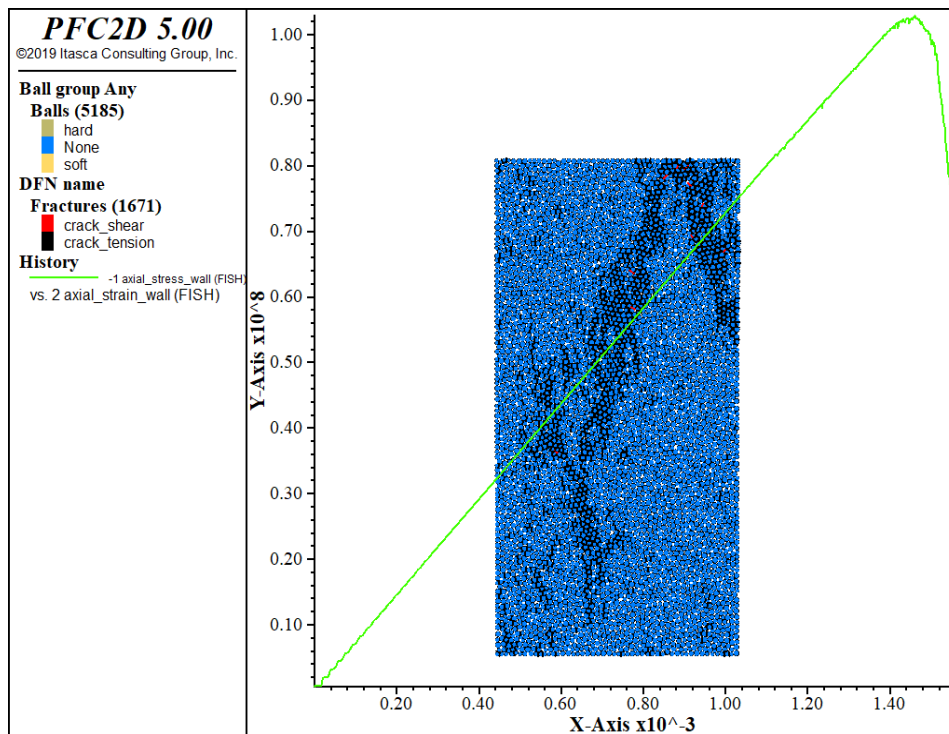
- **H100W50**



Εικόνα 7.2 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και seed=2563

➤ Αντοχή UCS=125.1MPa και μέτρο ελαστικότητας E=67.3GPa

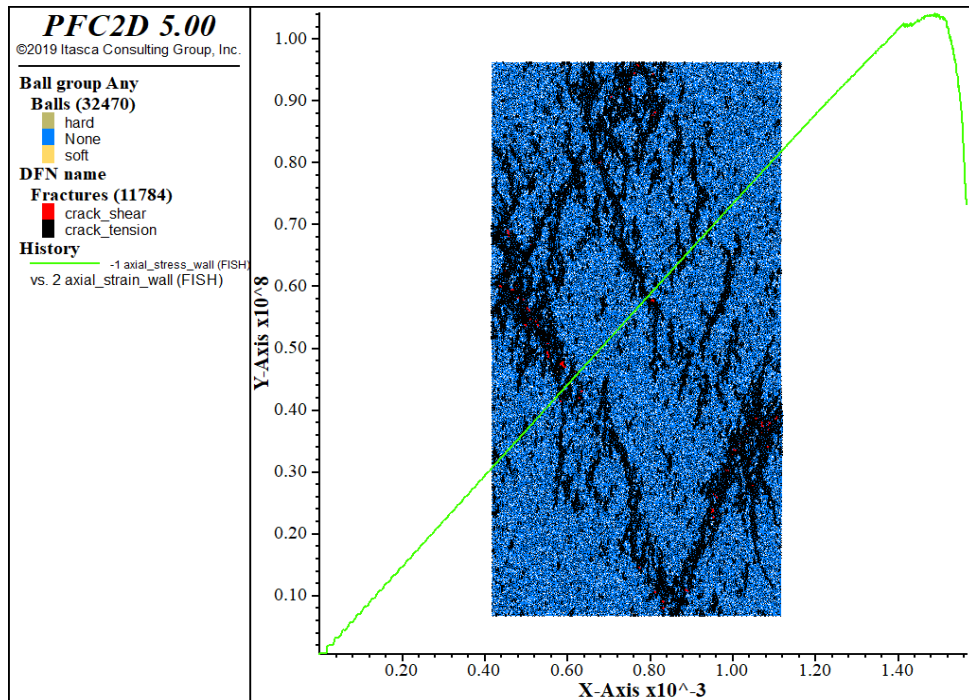
- **H120W60**



Εικόνα 7.3 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και seed=2563

➤ Αντοχή UCS=103MPa και μέτρο ελαστικότητας E=72.3GPa

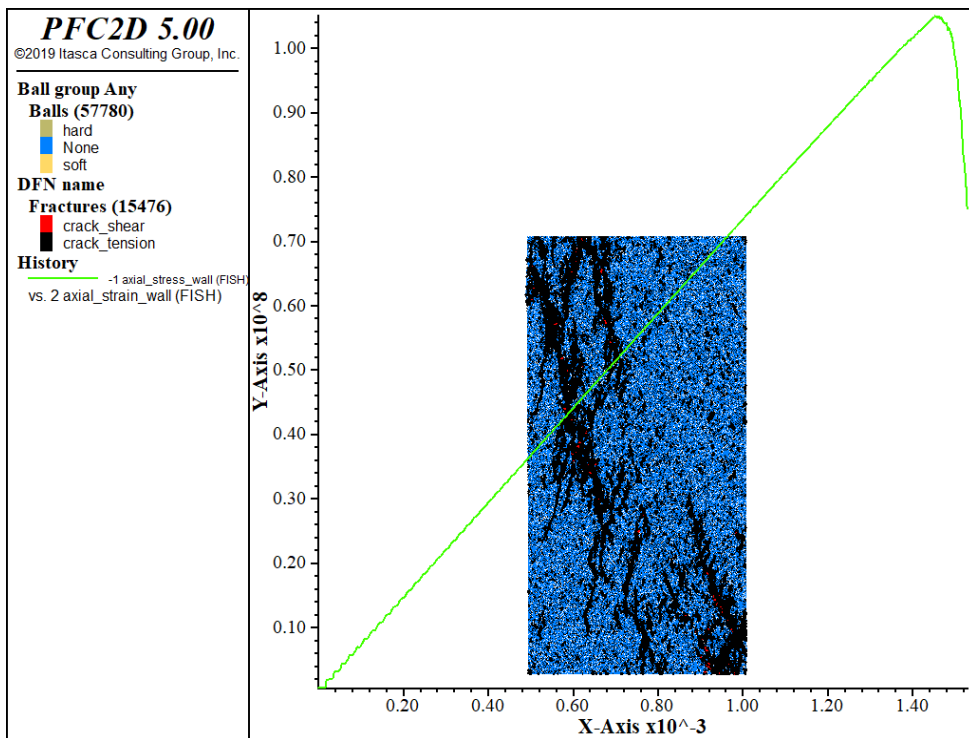
- **H300W150**



Εικόνα 7.4 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και seed=2563

- Αντοχή UCS=104.1MPa και μέτρο ελαστικότητας E=70.9GPa

- **H400W200**



Εικόνα 7.5 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=50\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και seed=2563

- Αντοχή UCS=105MPa και μέτρο ελαστικότητας E=74.9GPa

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

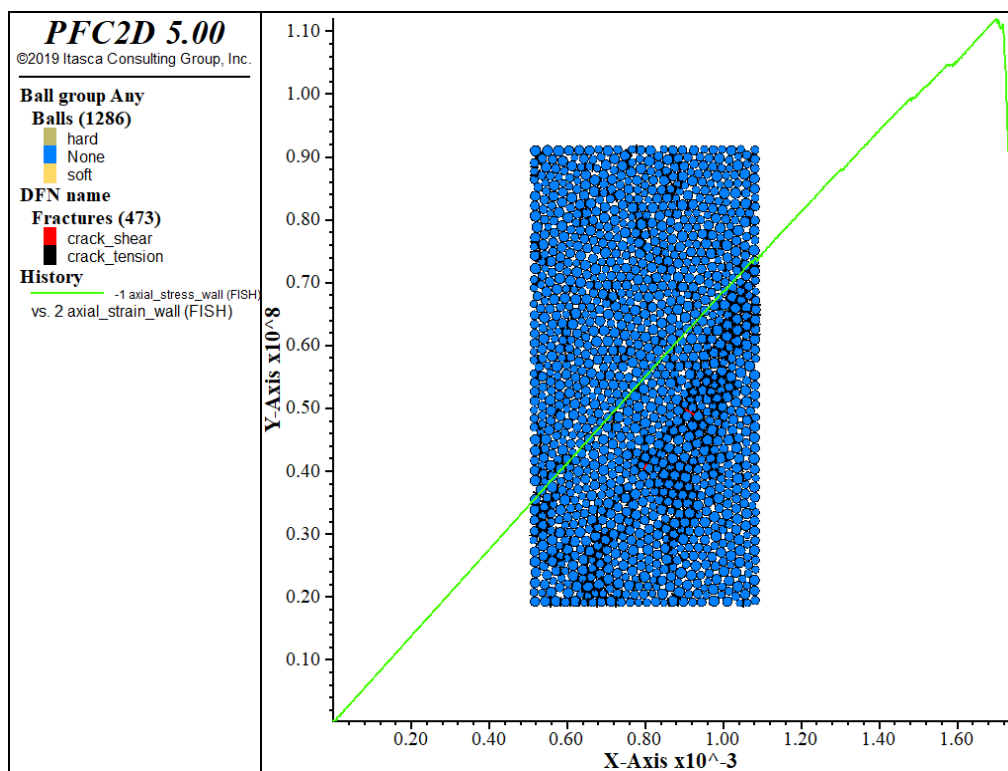
Πίνακας 7.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=2563$

$v = 50\text{mm/s}$	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200	seed = 2563
E (Gpa)	71	67.3	72.3	70.9	74.9	
UCS (MPa)	113	125.1	103	104.1	105	

## 7.2 Προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενη ταχύτητα

❖ Seed=2563

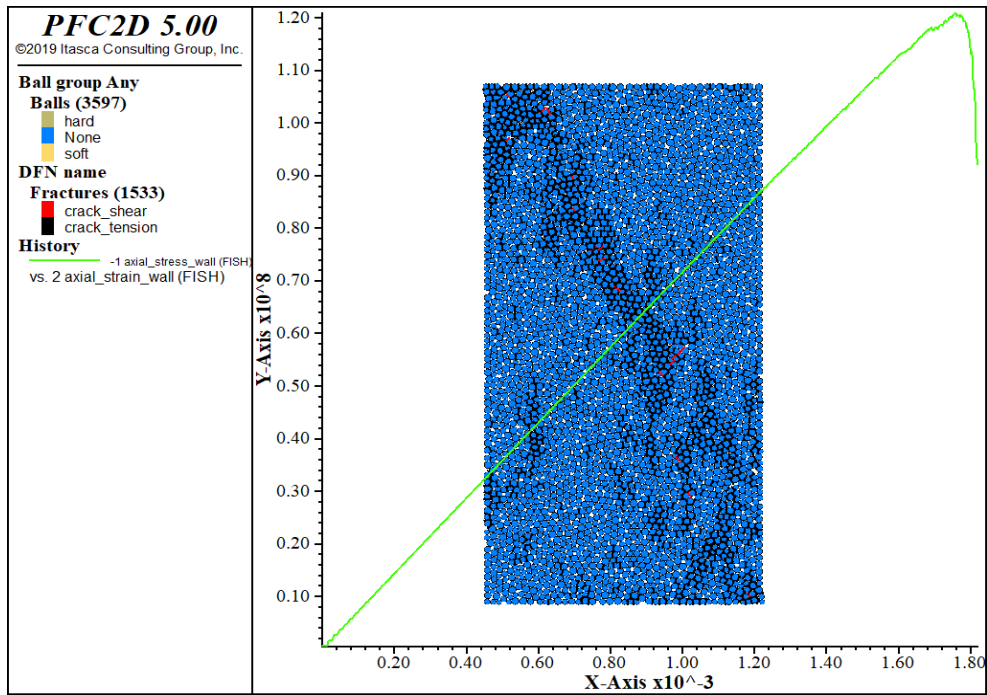
▪ H60W30



Εικόνα 7.6 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=2563$

➤ Αντοχή  $\text{UCS}=111.9\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=68\text{GPa}$

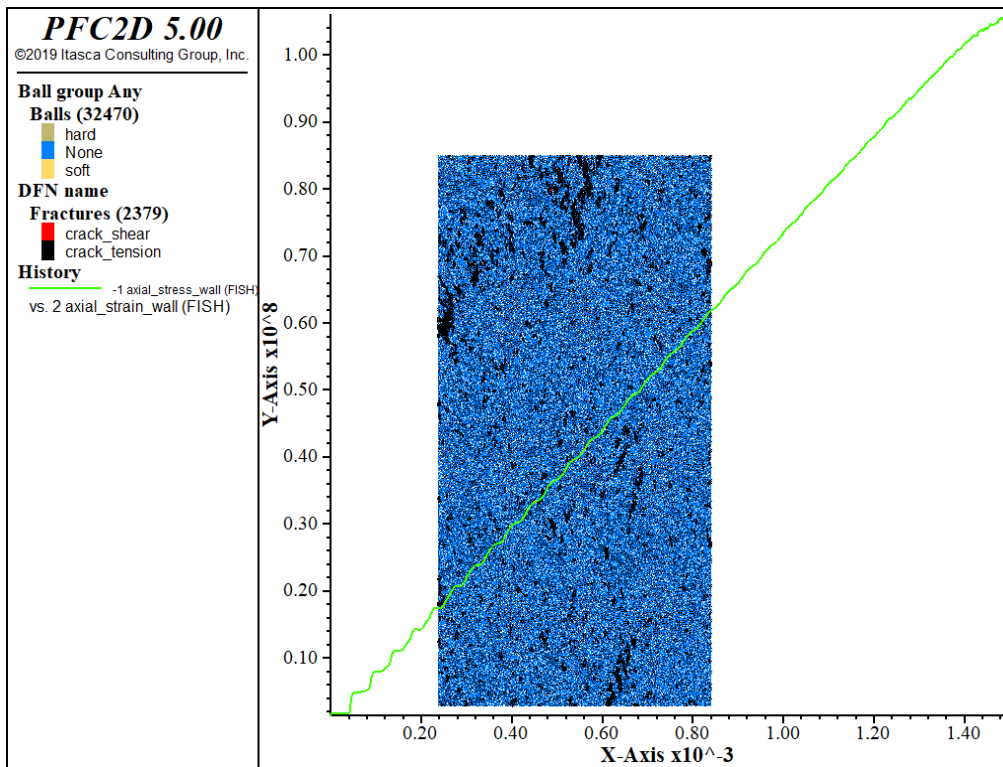
- **H100W50**



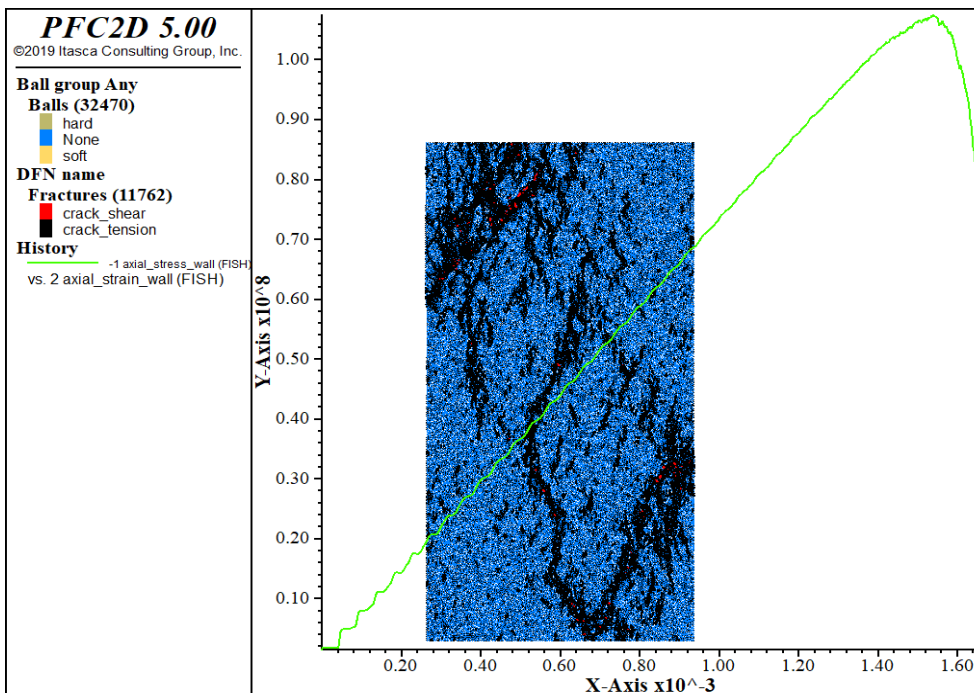
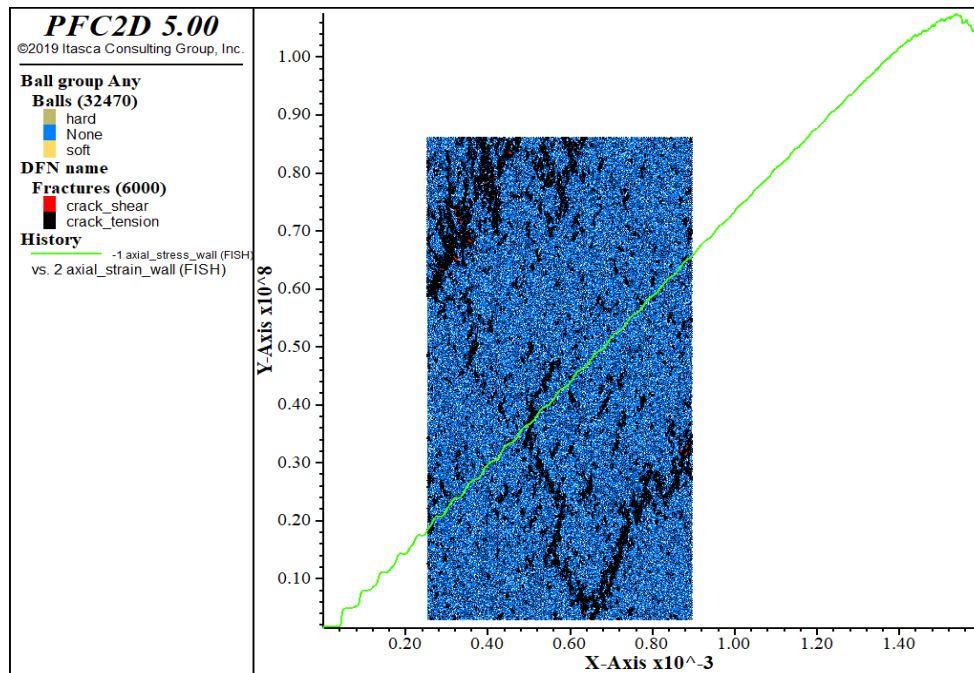
Εικόνα 7.7 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=2563$

- Αντοχή UCS=120.9MPa και μέτρο ελαστικότητας E=69.6GPa

- **H300W150**







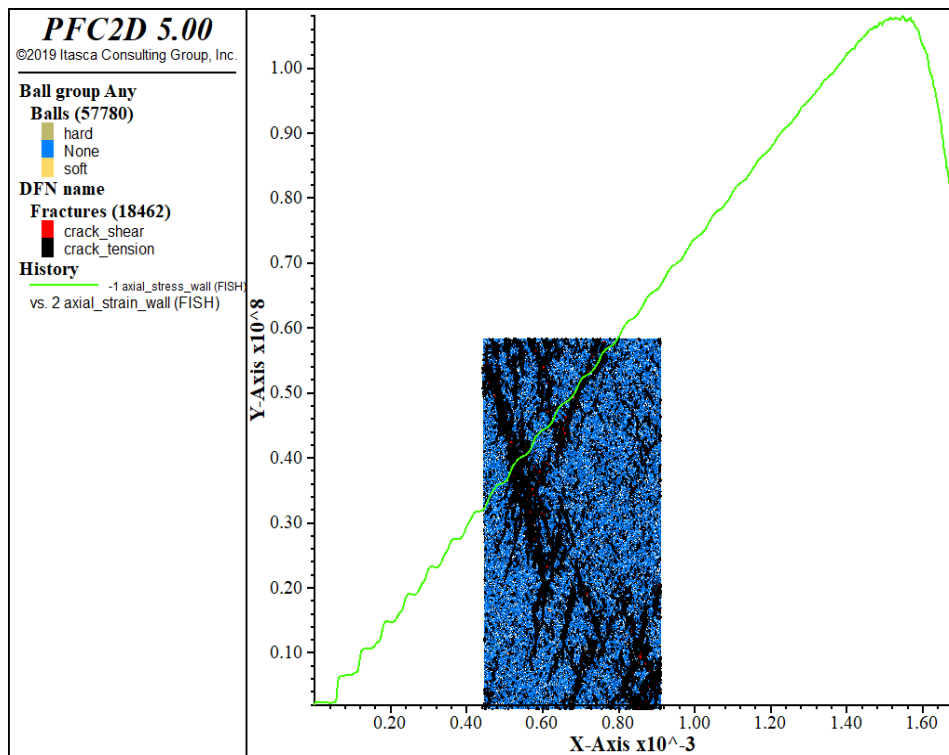
Εικόνα 7.8 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και τελικό διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και seed=2563

- Αντοχή UCS=107.4MPa και μέτρο ελαστικότητας E=72.6GPa

Αρχικά παρατηρείται ανάπτυξη εφελκυστικών ρωγμών στην άνω και κάτω ακμή του δοκιμίου. Στη συνέχεια, οι ρωγμές αυτές προεκτείνονται προς το μέσο και τη δεξιά άκρη του δοκιμίου. Τέλος, οι εφελκυστικές ρωγμές ενώνονται στο μέσο με τη ταυτόχρονη εμφάνιση και λίγων διατμητικών ρωγμών, με αποτέλεσμα την αστοχία του δοκιμίου



▪ **H400W200**



**Εικόνα 7.9** Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=2563$

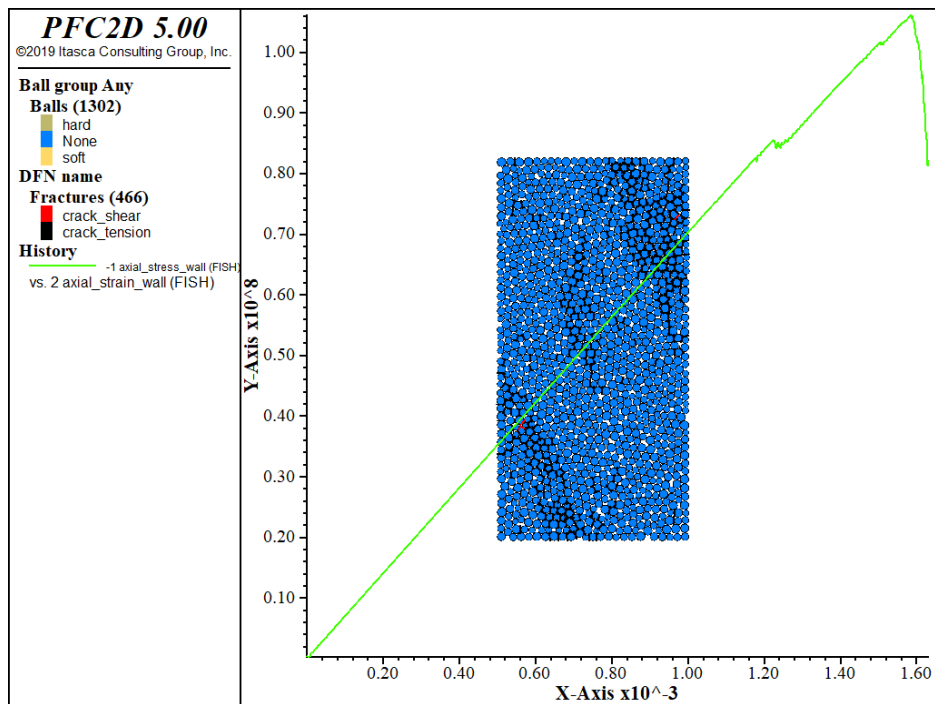
- Αντοχή  $\text{UCS}=108\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=69.9\text{GPa}$

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 7.2** Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=2563$

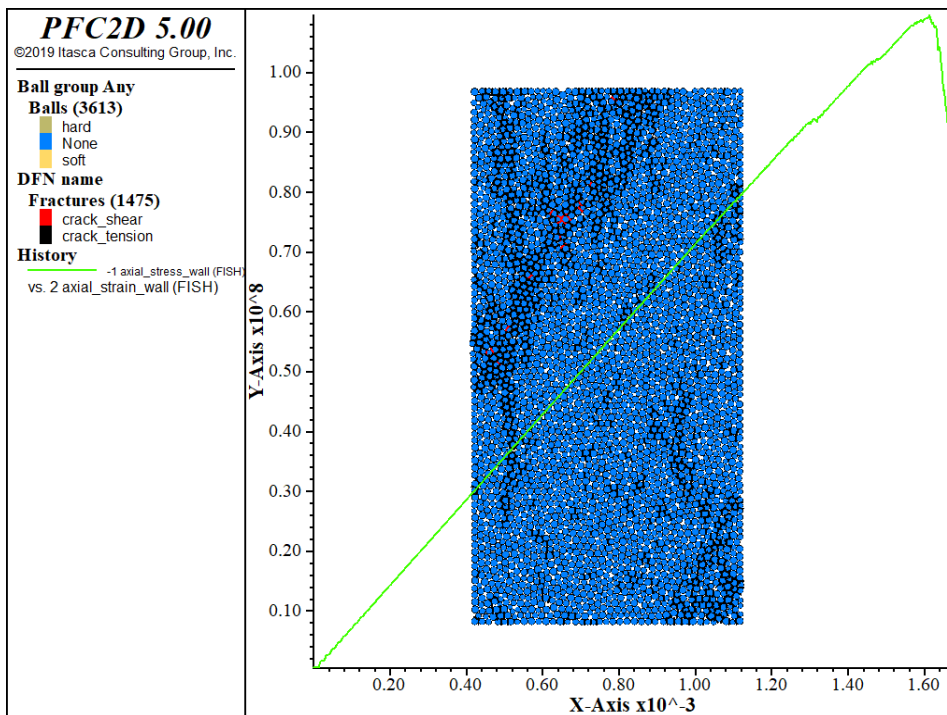
seed = 2563	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
<b>v (mm/s)</b>	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
<b>E (Gpa)</b>	68	69.6	72.3	72.6	69.9
<b>UCS (MPa)</b>	111.9	120.9	103	107.4	108

- ❖ Seed=2146
- H60W30



Εικόνα 7.10 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=2146$

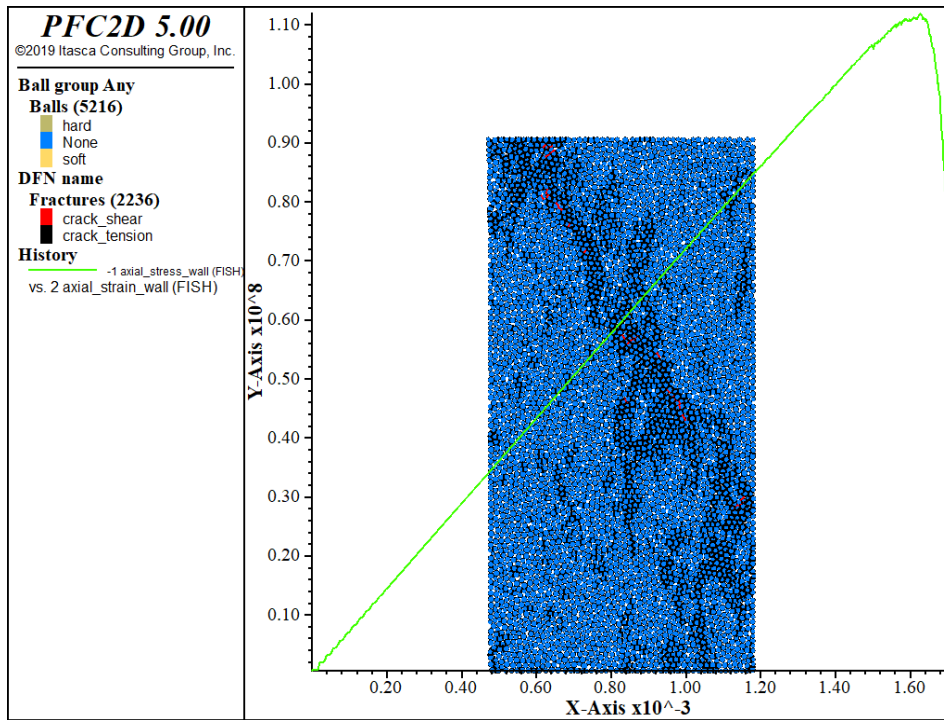
- Αντοχή  $\text{UCS}=106.1\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=71.2\text{GPa}$
- H100W50



Εικόνα 7.11 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=2146$

- Αντοχή  $\text{UCS}=109.5\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=75.1\text{GPa}$

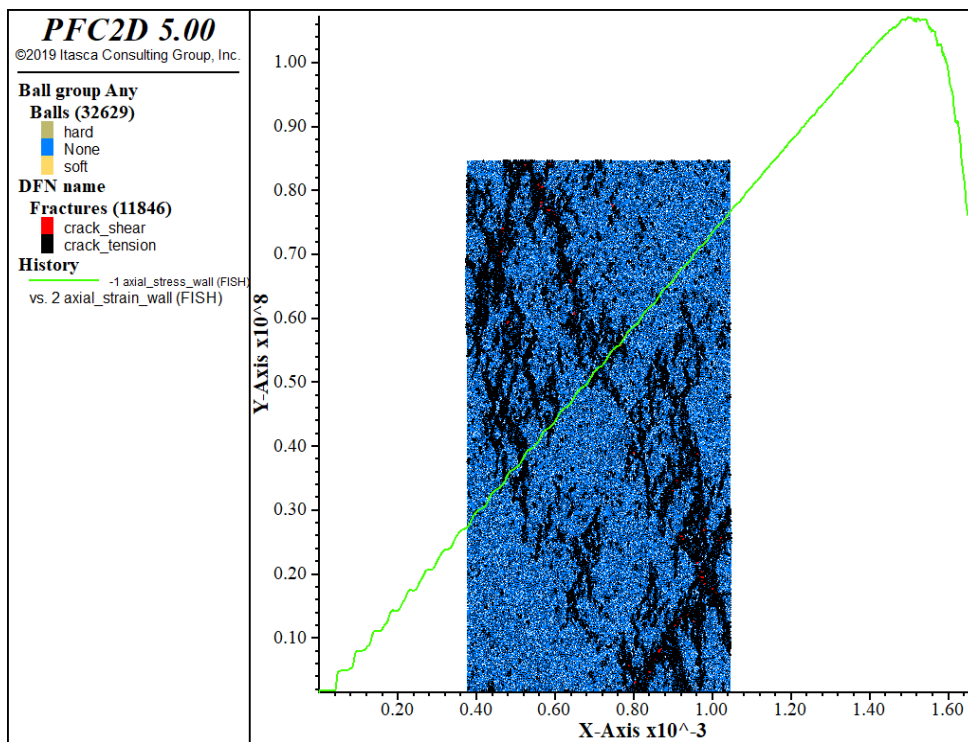
- **H120W60**



Εικόνα 7.12 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=2146$

➤ Αντοχή UCS=111.9MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=72.3\text{GPa}$

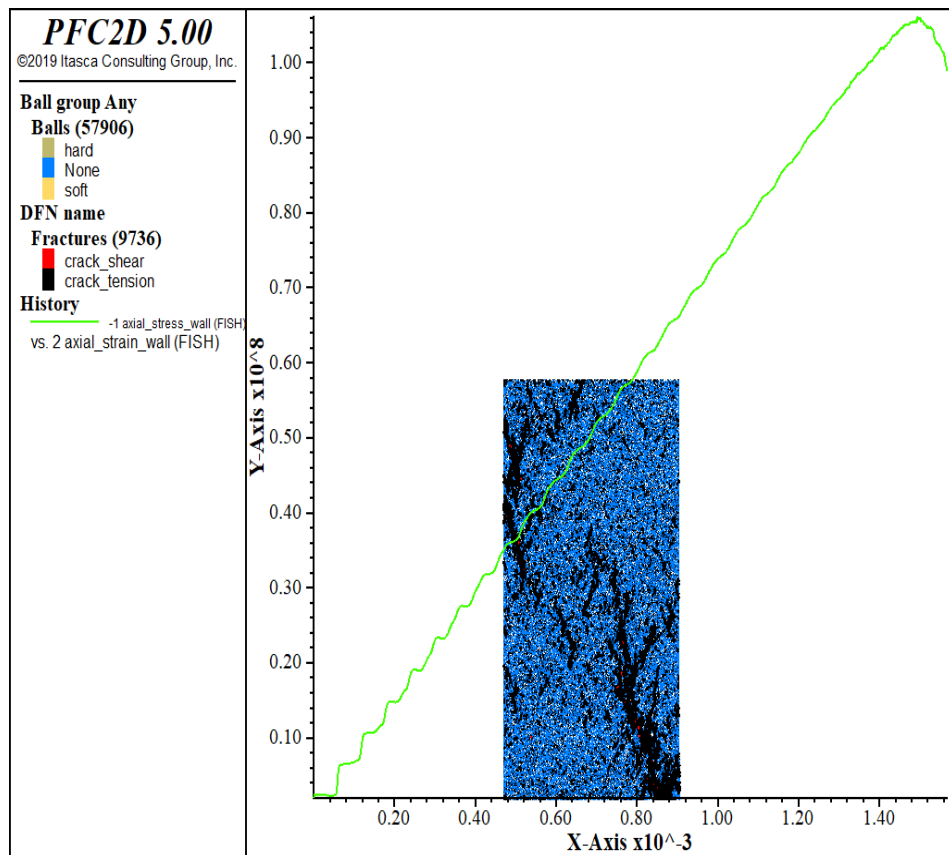
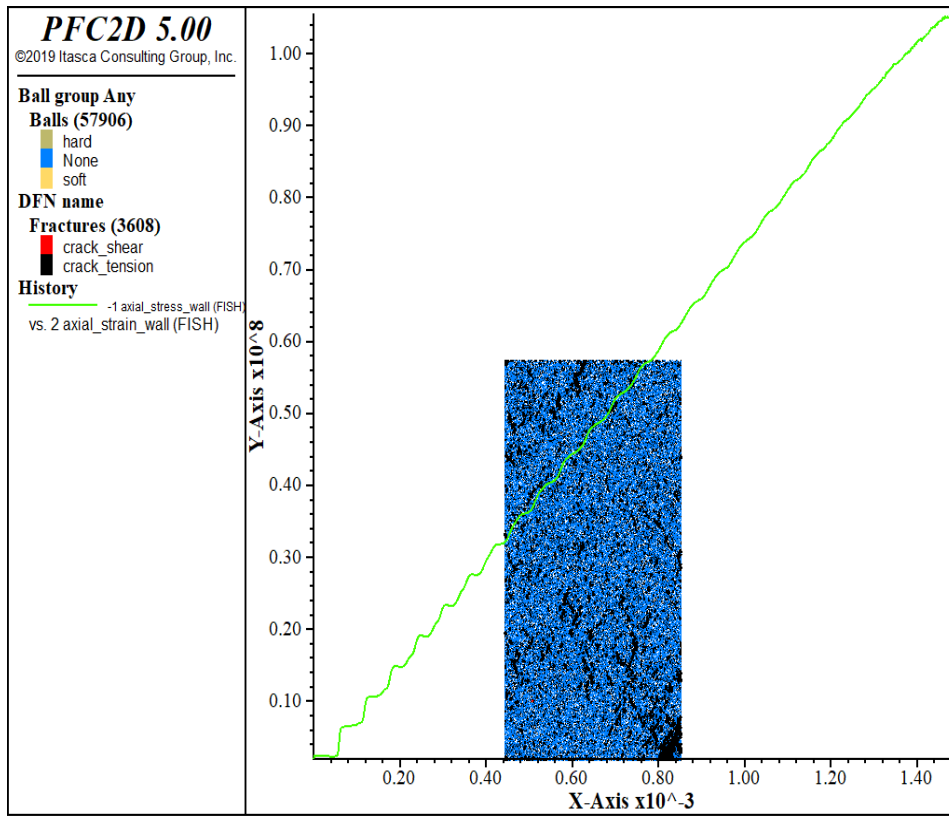
- **H300W150**

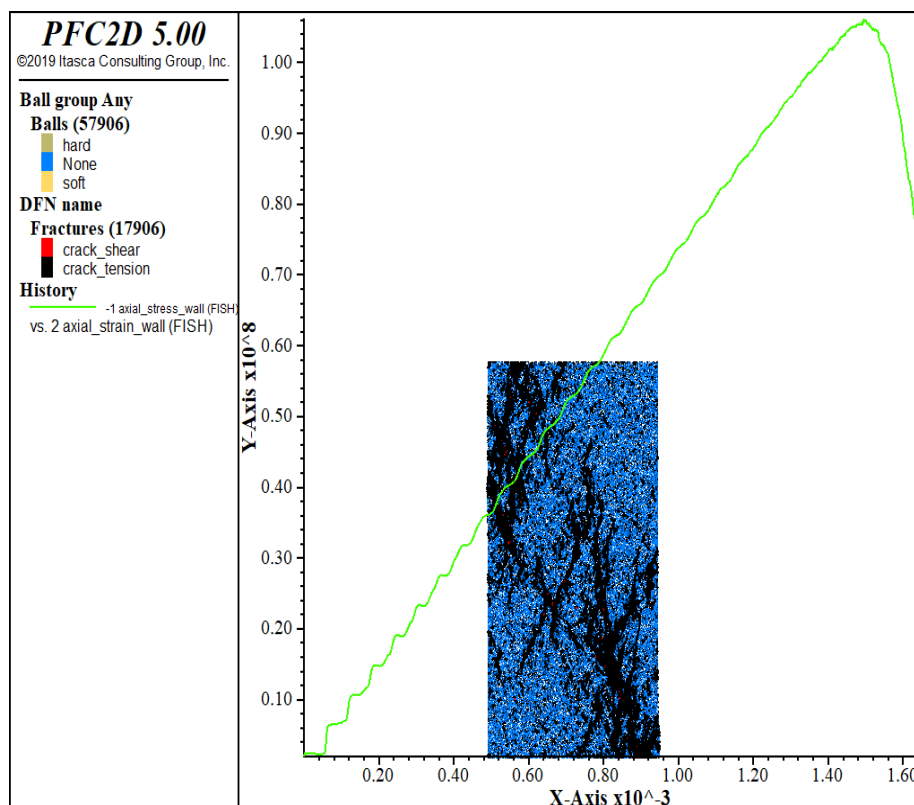


Εικόνα 7.13 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=2146$

➤ Αντοχή UCS=107.1MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=72.1\text{GPa}$

▪ **H400W200**





Εικόνα 7.14 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και τελικό διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και seed=2146

- Αντοχή UCS=106.1MPa και μέτρο ελαστικότητας E=71.8GPa

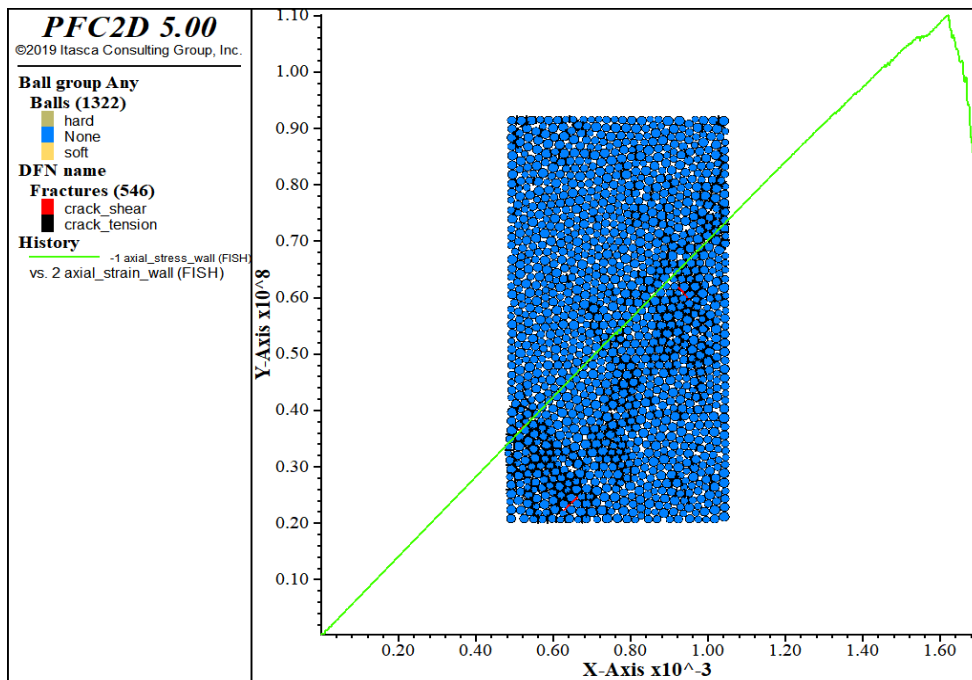
Στην αρχή παρατηρούνται σε πολλά σημεία διάσπαρτες εφελκυστικές ρωγμές, με πιο έντονη την εμφάνιση τους στη κάτω δεξιά κορυφή του δοκιμίου. Στη συνέχεια οι εφελκυστικές ρωγμές από την κάτω δεξιά κορυφή επεκτείνονται προς το μέσο, σε συνδυασμό με την εμφάνιση εφελκυστικών ρωγμών πλησίον της αριστερής ακμής του. Τέλος, το δοκίμιο αστοχεί καθώς οι παραπάνω εφελκυστικές ρωγμές επεκτείνονται προς το κέντρο σε πολλές κατευθύνσεις.

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

Πίνακας 7.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, SBS/NBS=2 και seed=2146

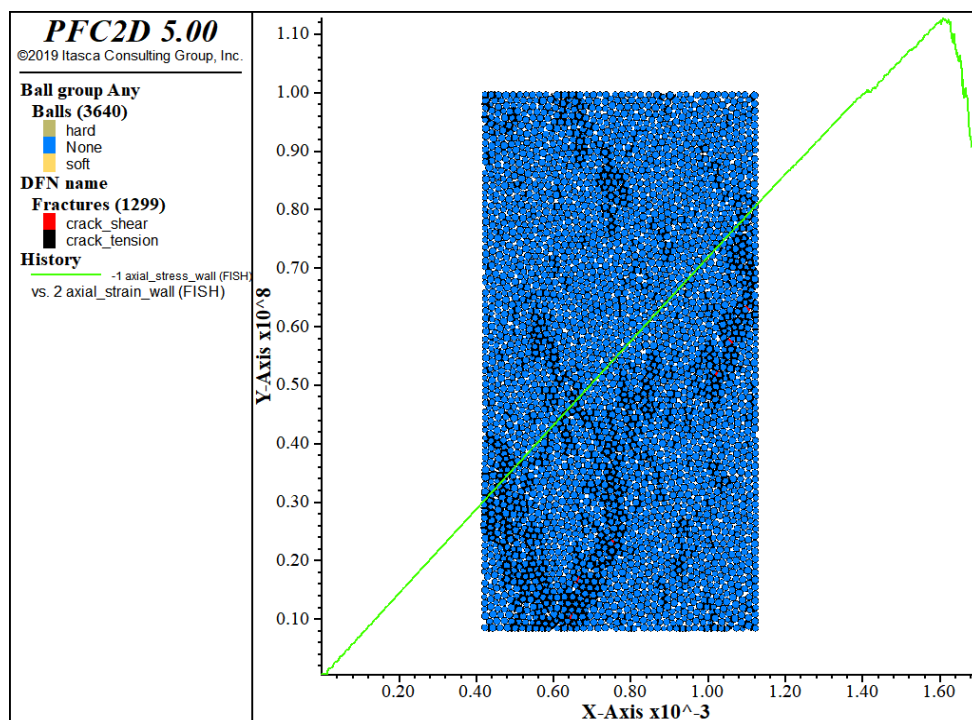
seed = 2146	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
<b>v (mm/s)</b>	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
<b>E (Gpa)</b>	71.2	75.1	72.3	72.1	71.8
<b>UCS (MPa)</b>	106.1	109.5	111.9	107.1	106.1

- ❖ Seed=4244
- H60W30



Εικόνα 7.15 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30, με  $v=25\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=4244$

- Αντοχή  $\text{UCS}=110.1\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=72.6\text{GPa}$
- H100W50

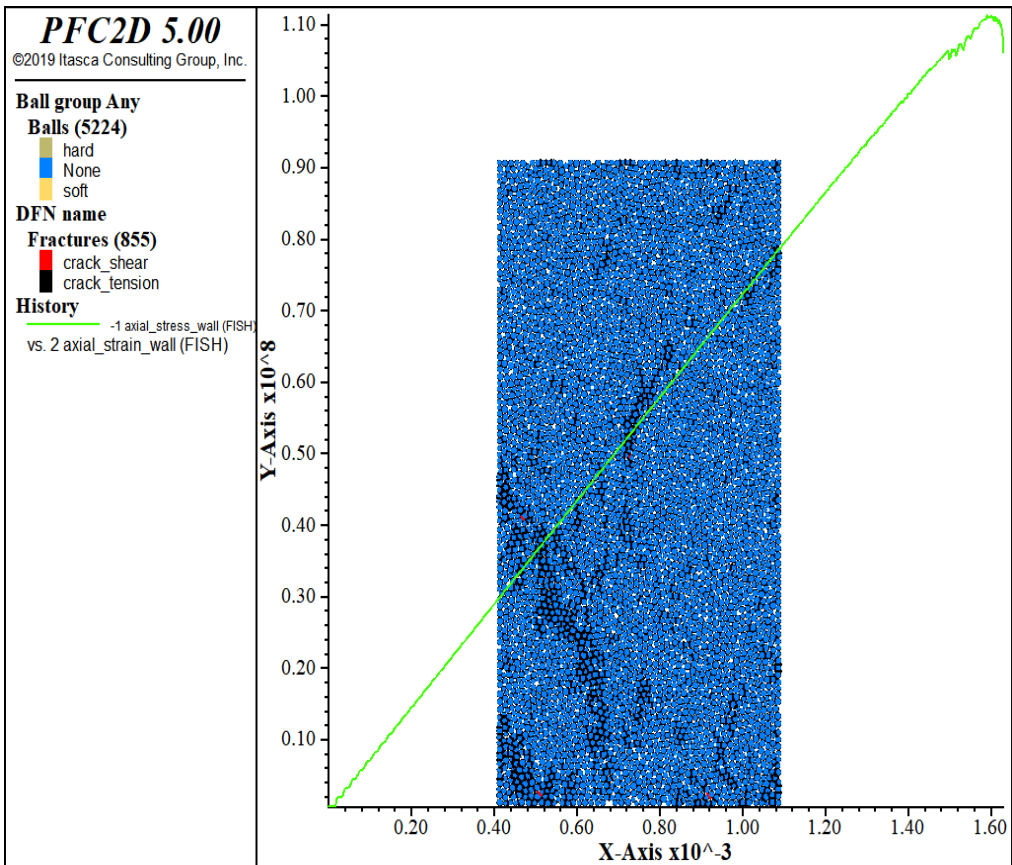
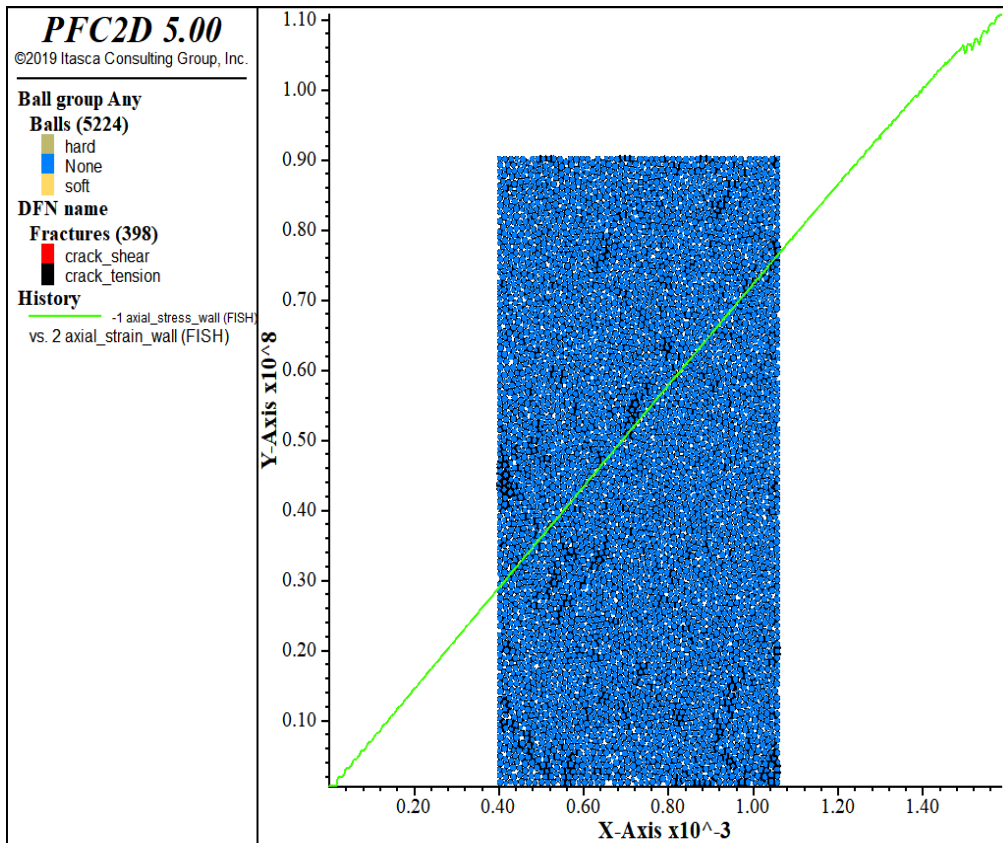


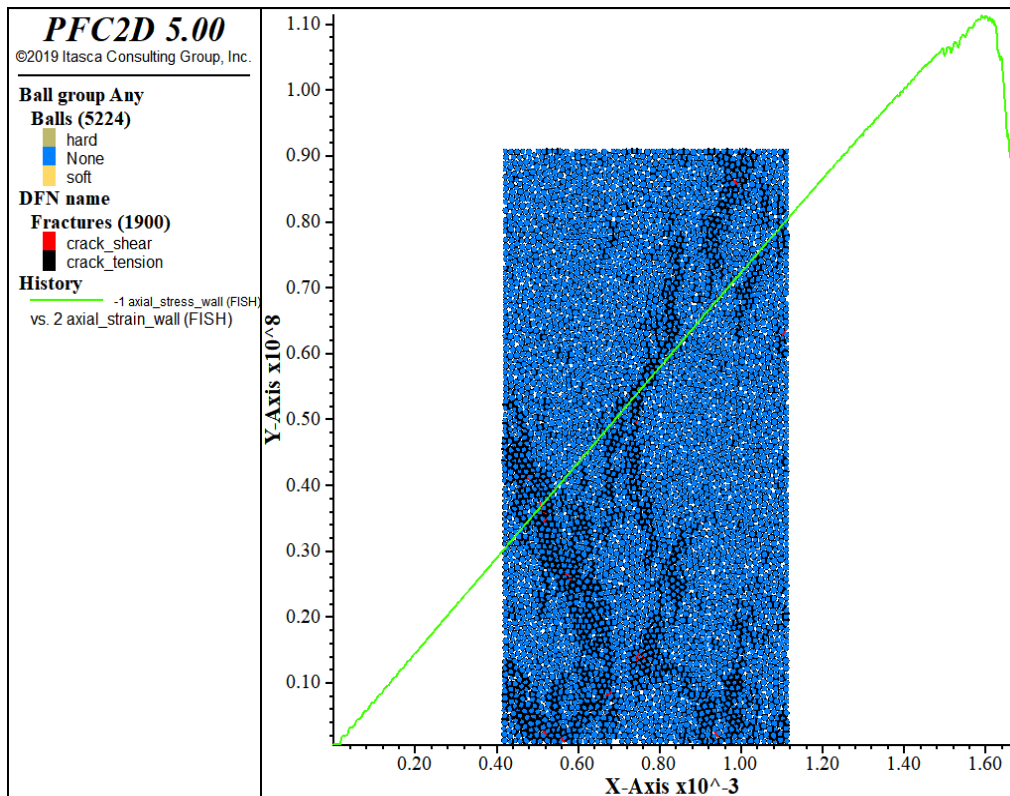
Εικόνα 7.16 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=4244$

- Αντοχή  $\text{UCS}=112.7\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=74.8\text{GPa}$



▪ H120W60





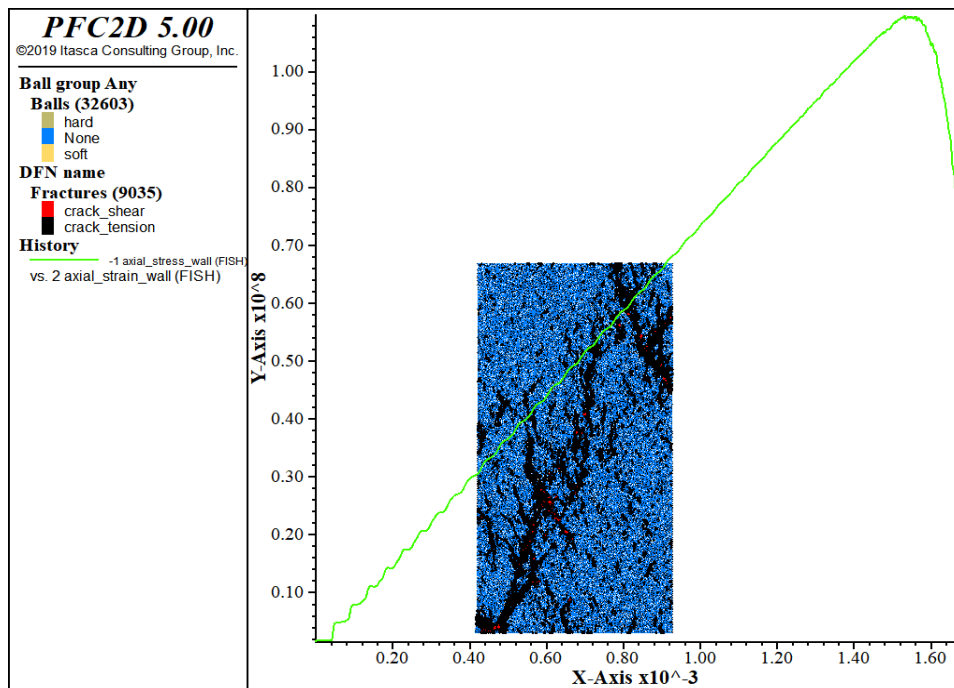
**Εικόνα 7.17 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και τελικό διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $\nu=50\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=4244$**

- Αντοχή  $\text{UCS}=111.3\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=72.8\text{GPa}$

Αρχικά παρατηρούνται εφελκυστικές ρωγμές κυρίως κοντά στα άκρα του δοκιμίου. Έπειτα αναπτύσσονται από το μέσο του περίπου μέχρι τη βάση του, με τη συνεχόμενη ανάπτυξη τους στα άκρα. Το δοκίμιο αστοχεί καθώς οι εφελκυστικές ρωγμές επεκτείνονται σε όλο το μήκος του έως την άνω άκρη του.



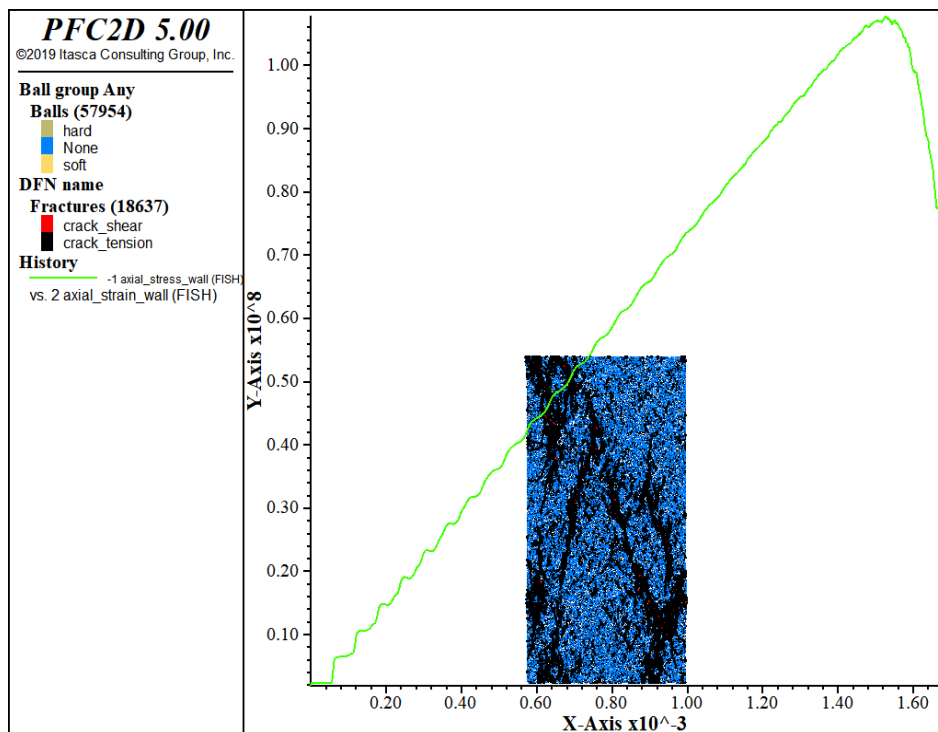
- **H300W150**



Εικόνα 7.18 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=4244$

➤ Αντοχή UCS=109.8MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=72.5\text{GPa}$

- **H400W200**



Εικόνα 7.19 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=4244$

➤ Αντοχή UCS=107.7MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=73.3\text{GPa}$

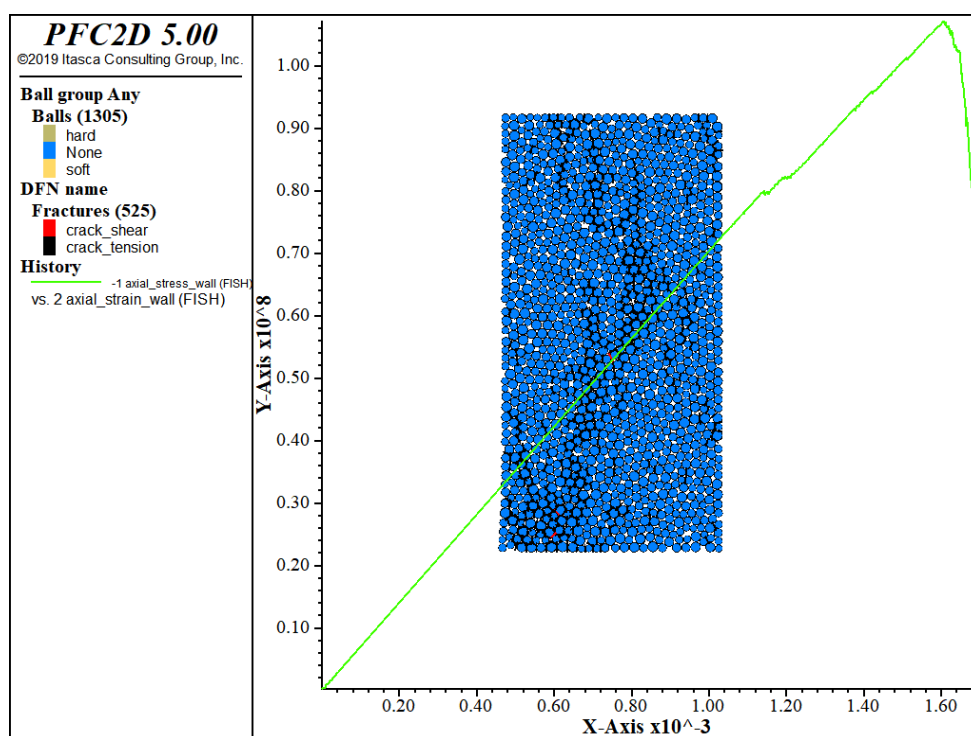
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 7.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, SBS/NBS=2 και seed=4244**

seed = 4244	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	72.6	74.8	72.8	72.5	73.3
UCS (MPa)	110.1	112.7	111.3	109.8	107.7

❖ **Seed=1038**

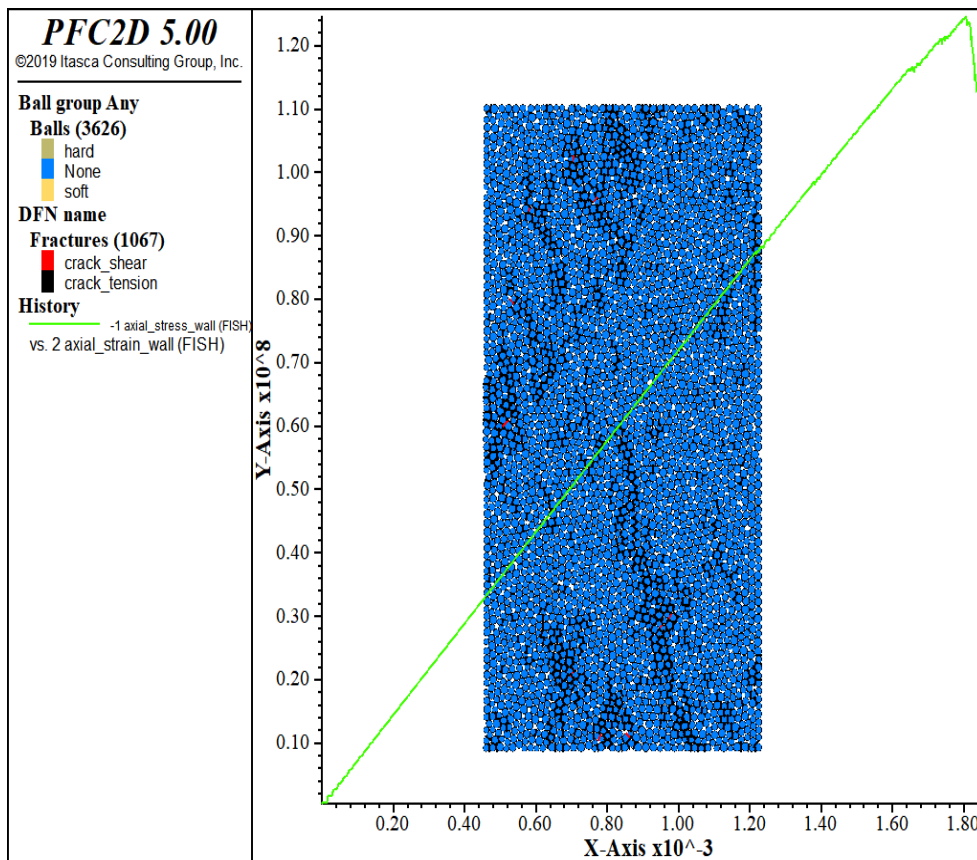
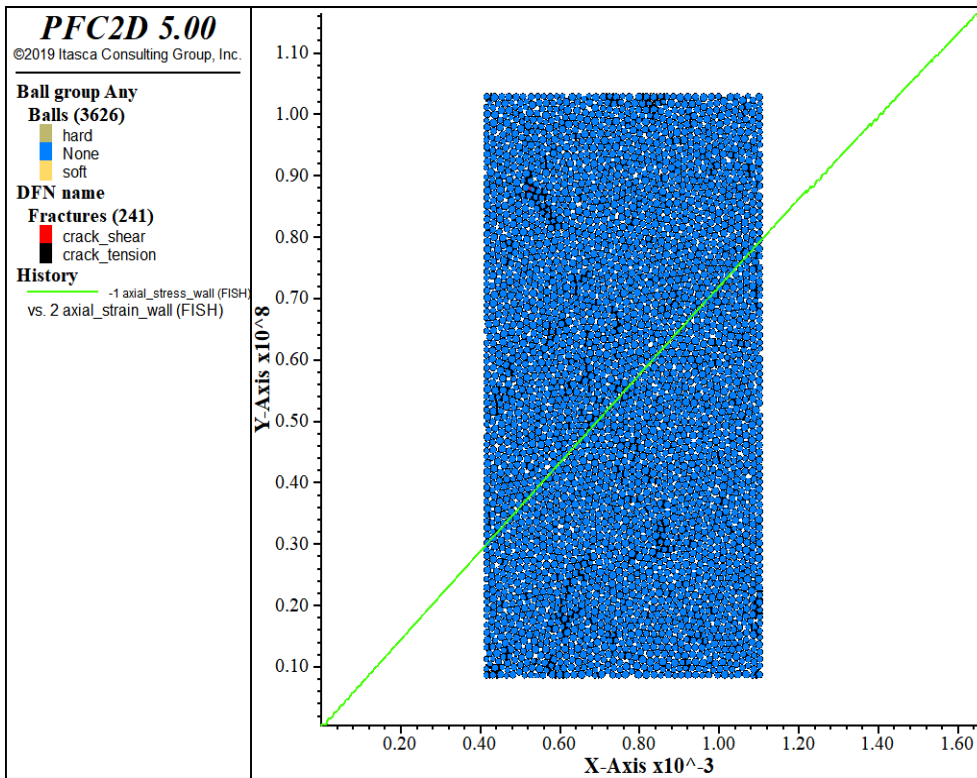
▪ **H60W30**

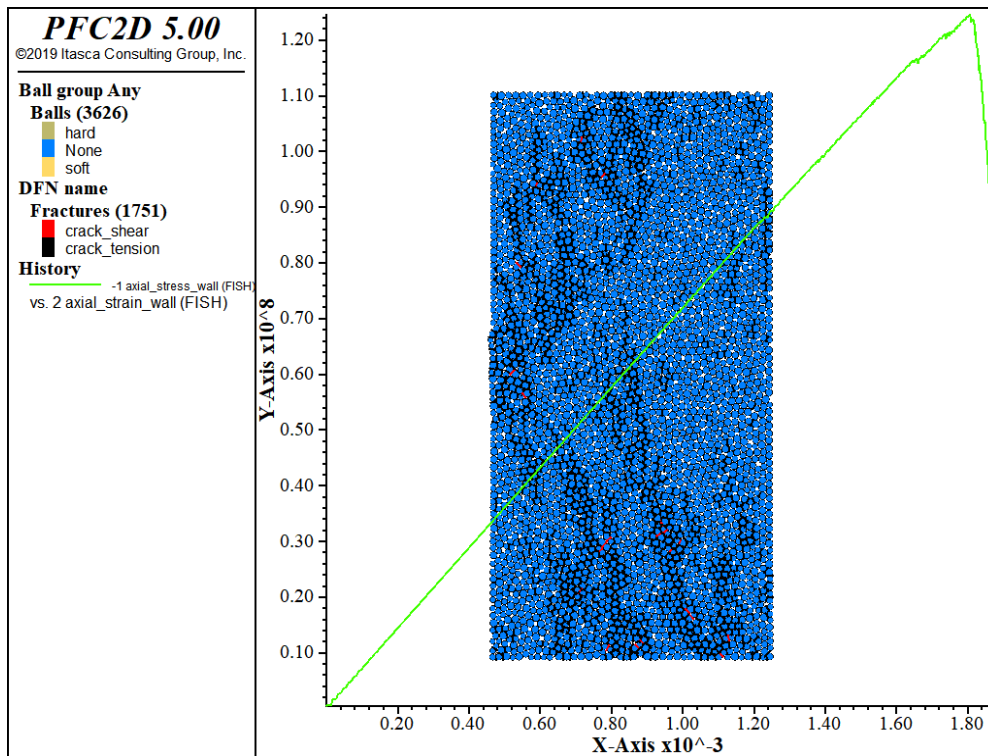


**Εικόνα 7.20 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με v=25mm/s, SBS/NBS=2 και seed=1038**

- Αντοχή UCS=107MPa και μέτρο ελαστικότητας E=72.9GPa

▪ **H100W50**



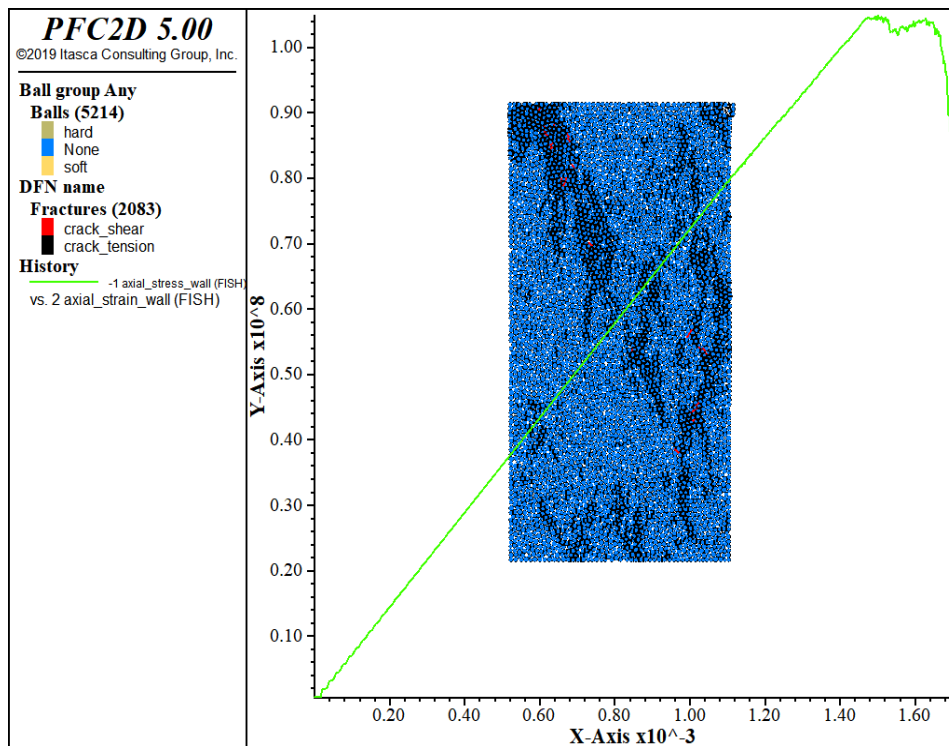


**Εικόνα 7.21 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και τελικό διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$**

- Αντοχή  $UCS=124.5\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=71.2\text{GPa}$

Στην αρχή παρατηρούνται εφελκυστικές ρωγμές σε όλο το μήκος του δοκιμίου. Στη συνέχεια επεκτείνονται από το άνω και το κάτω άκρο του εφελκυστικές ρωγμές έως το μέσο του, ενώ υπάρχει ταυτόχρονη ανάπτυξη και στην αριστερή ακμή στο ύψος του μέσου. Το δοκίμιο αστοχεί με την προέκταση των παραπάνω ρωγμών κατά μήκος σχεδόν ολόκληρου του μήκους του.

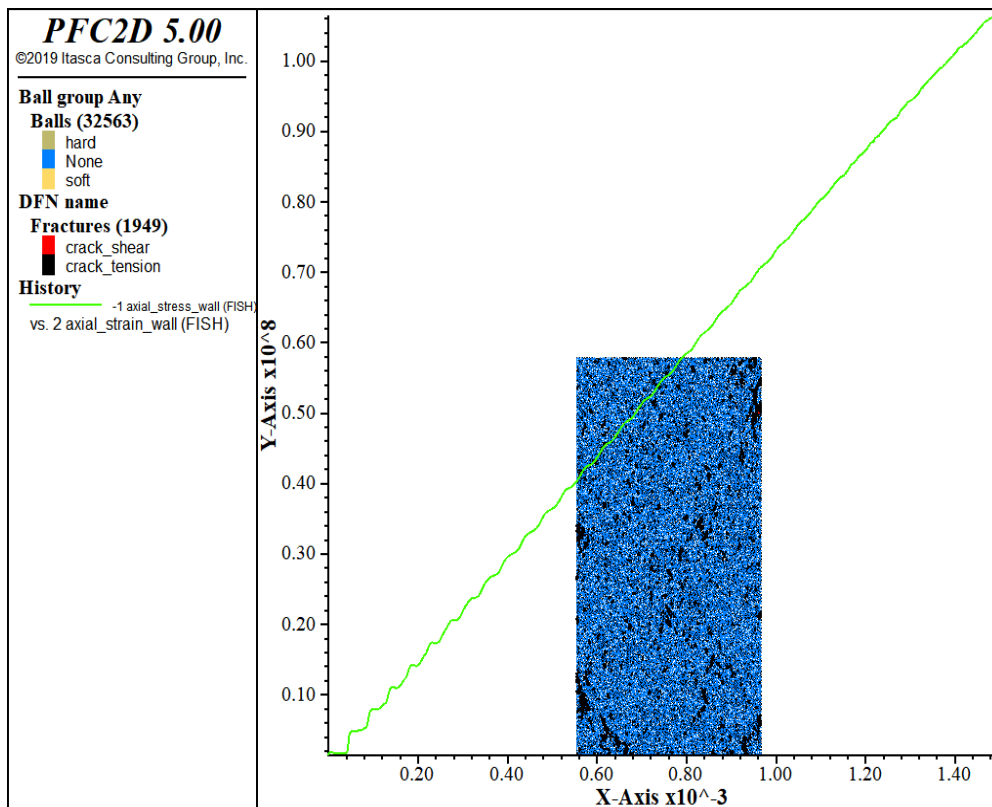
- **H120W60**

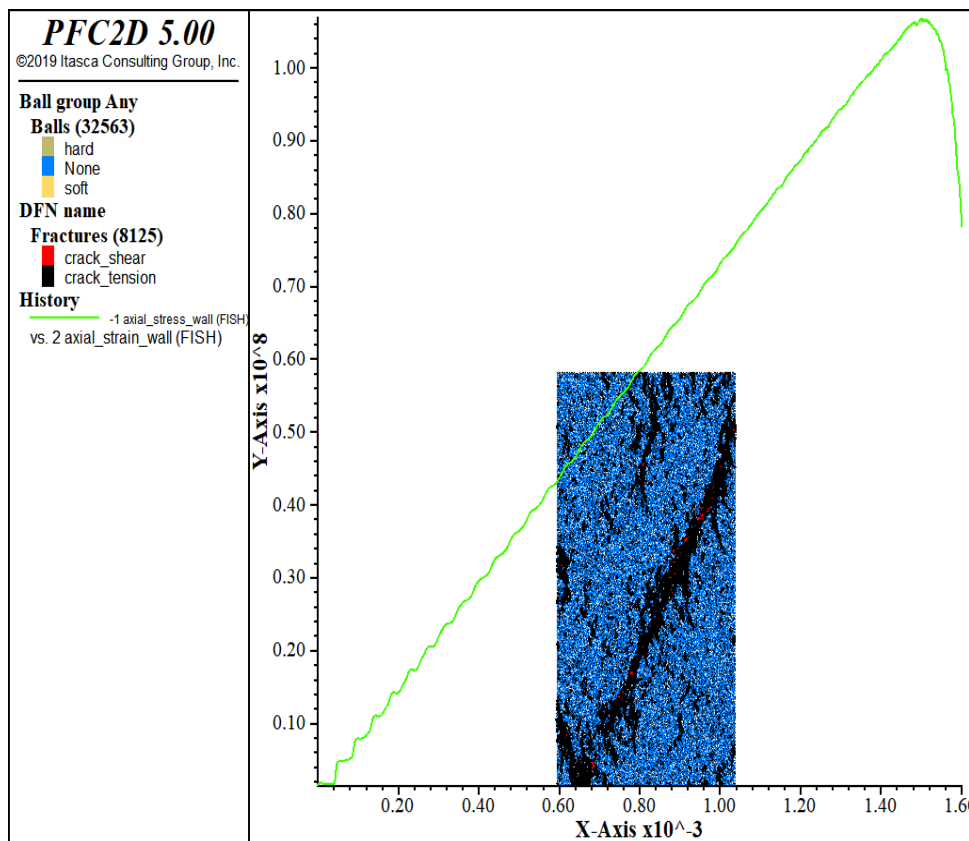
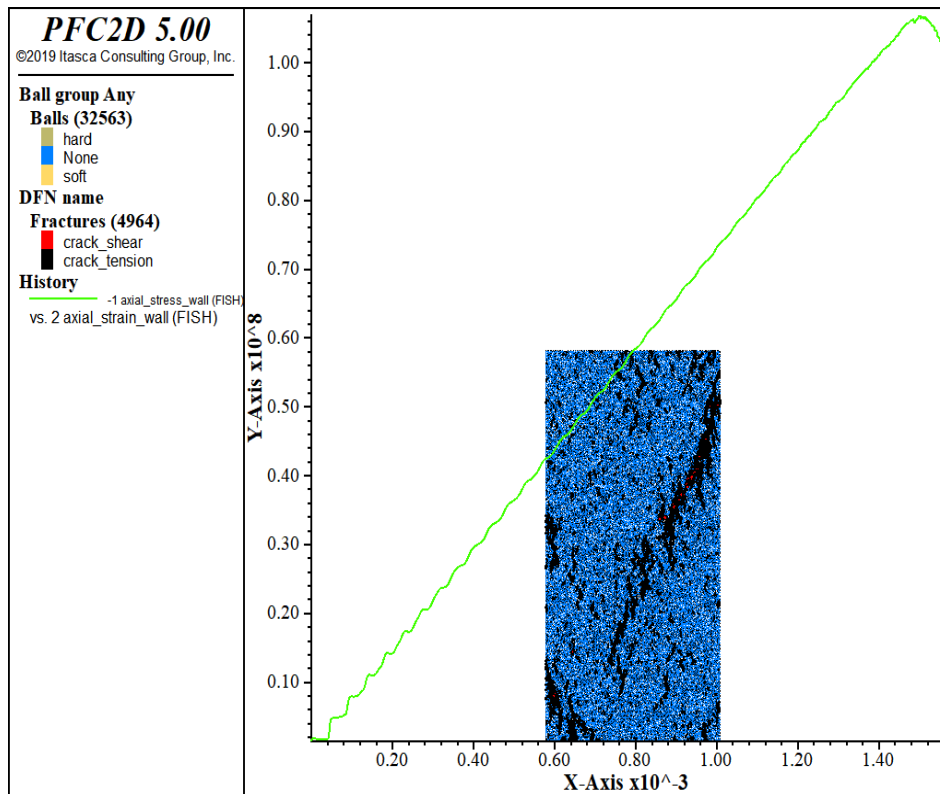


Εικόνα 7.22 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $\text{SBS/NBS}=2$  και  $\text{seed}=1038$

➤ Αντοχή  $\text{UCS}=104.8\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=74.1\text{GPa}$

- **H300W150**





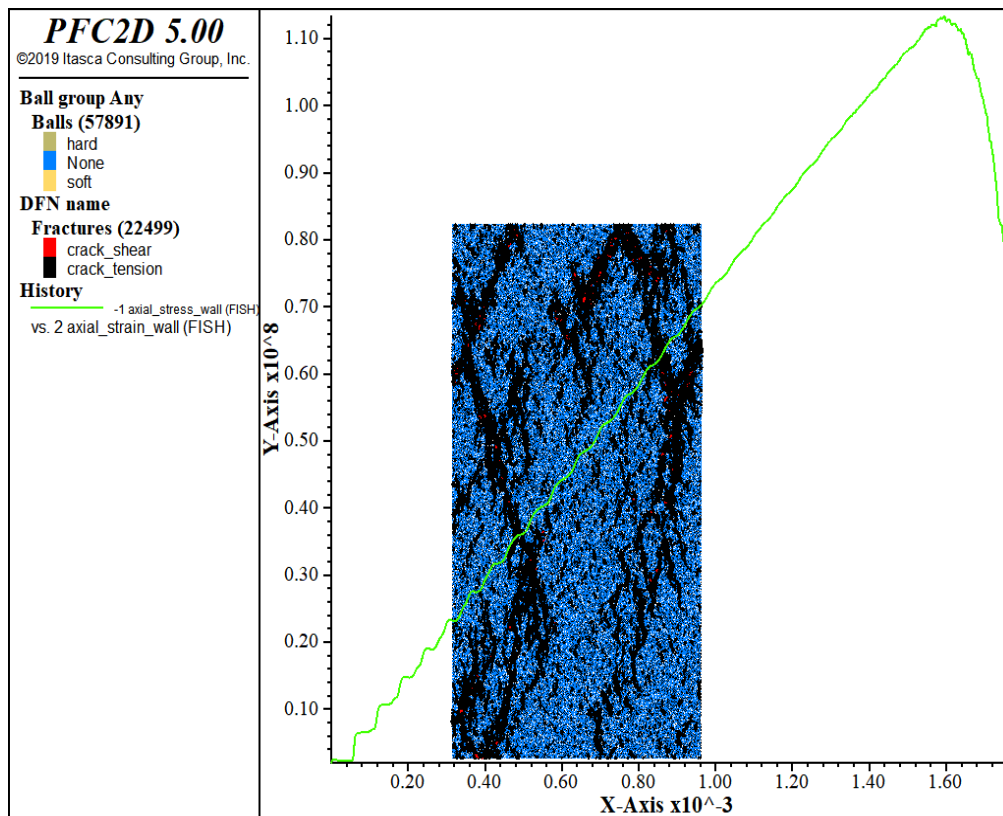
Εικόνα 7.23 α), β), γ) Πορεία ρωγμάτωσης μέχρι την αστοχία και τελικό διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ , SBS/NBS=2 και seed=1038

- Αντοχή UCS=106.9MPa και μέτρο ελαστικότητας E=75.9GPa



Στην αρχή παρατηρούνται εφελκυστικές ρωγμές κυρίως πλησίον των κορυφών του δοκιμίου. Έπειτα από την άνω δεξιά ακμή του , αρχίζει να αναπτύσσεται εφελκυστική ρωγμή, μαζί με λίγες διατμητικές, και να διασχίζει διαγώνια το δοκίμιο. Αυτό οδηγείται σε αστοχία μετά τη προέκταση της παραπάνω ρωγμής μέχρι τη κάτω αριστερή κορυφή του.

▪ **H400W200**



Εικόνα 7.24 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=113.3\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=70.4\text{GPa}$

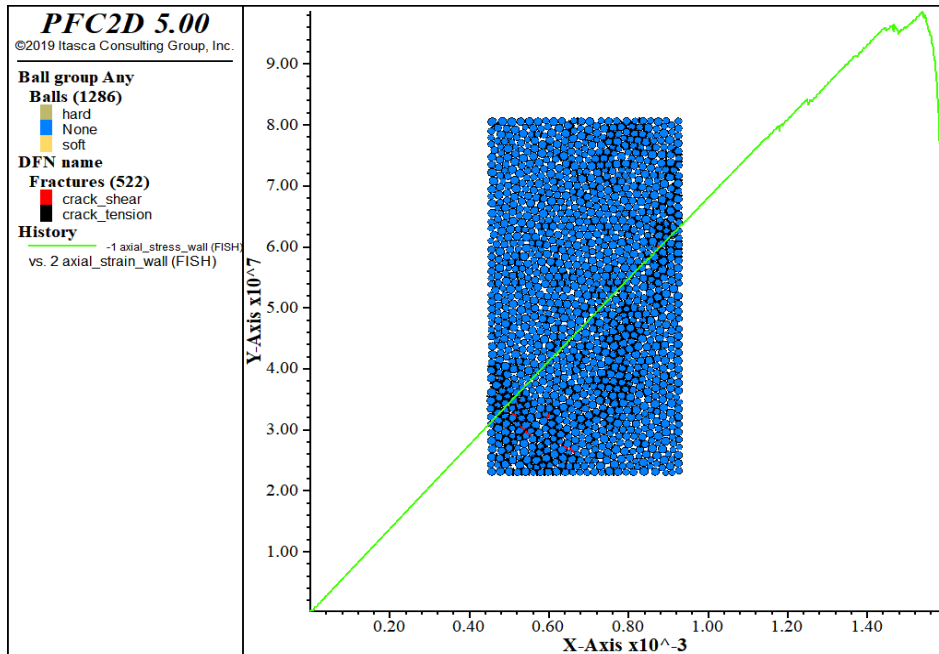
Ακολουθεί ο πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων:

Πίνακας 7.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης με μεταβαλλόμενη ταχύτητα,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

seed = 1038	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
<b>v (mm/s)</b>	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
<b>E (Gpa)</b>	72.9	71.2	74.1	75.9	70.4
<b>UCS (MPa)</b>	107	124.5	104.8	106.9	113.3

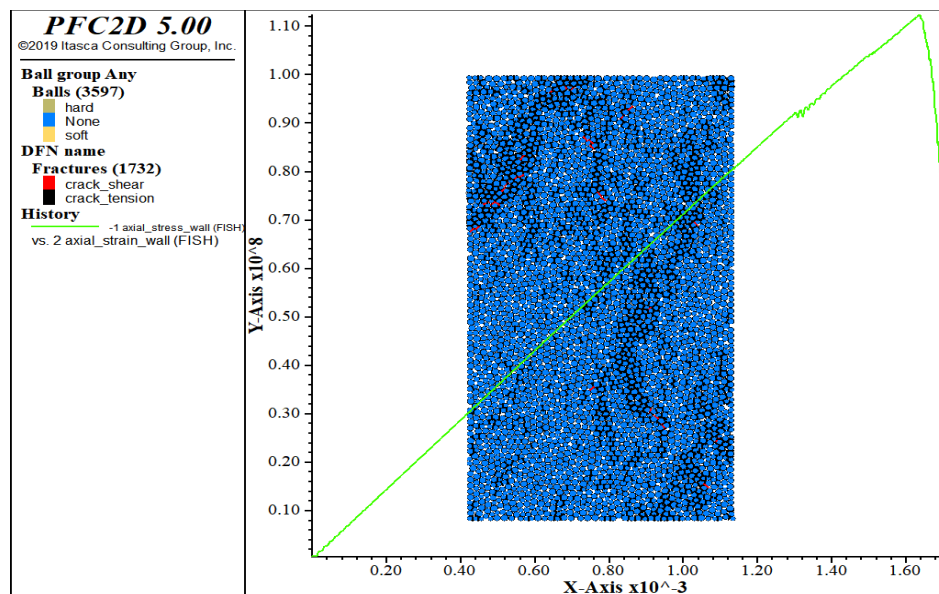
### 7.3 Προσομοιώσεις με κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 10MPa

- ❖ Seed=2563
- H60W30



Εικόνα 7.25 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2563$

- Αντοχή UCS=98.5MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=69.6\text{GPa}$
- H100W50

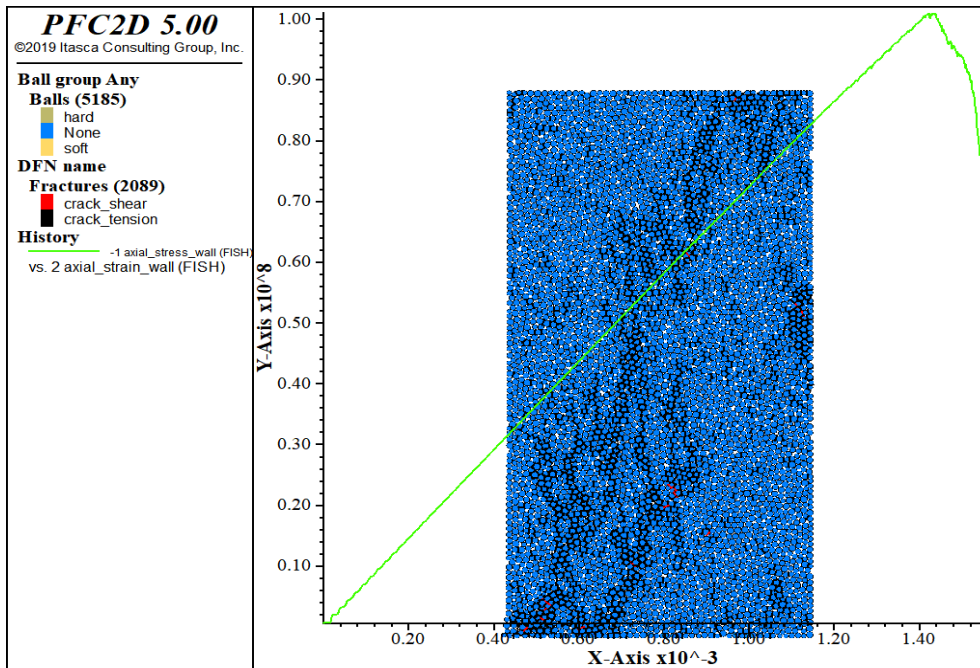


Εικόνα 7.26 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2563$

- Αντοχή UCS=112.2MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=72.6\text{GPa}$



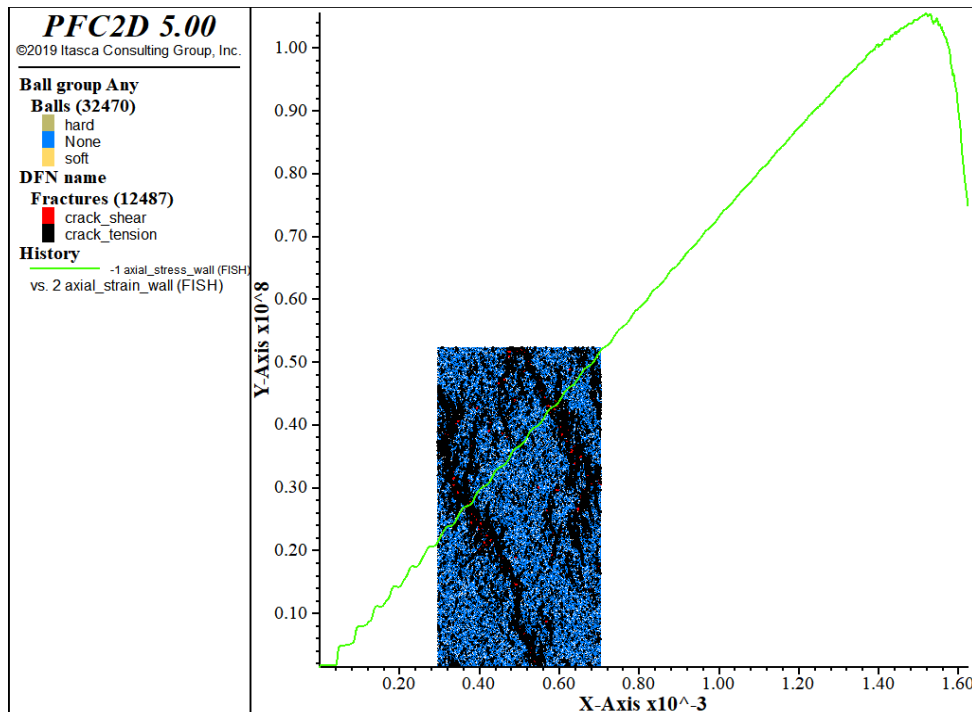
- **H120W60**



Εικόνα 7.27 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2563$

- Αντοχή UCS=101MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=74.2\text{GPa}$

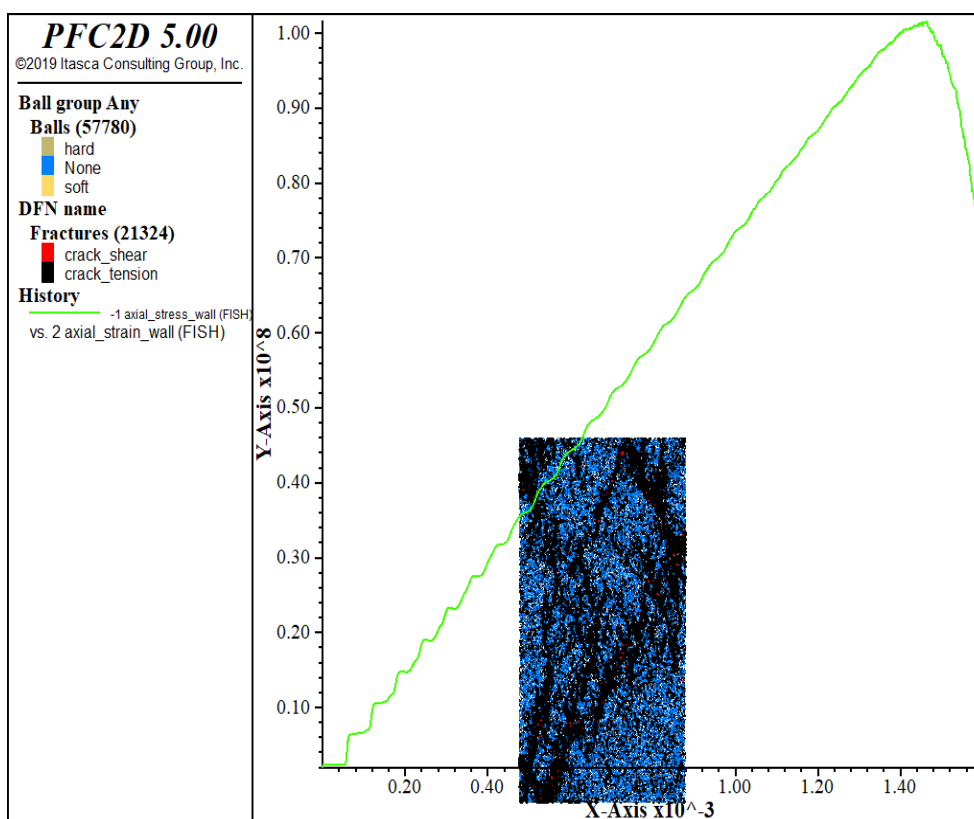
- **H300W150**



Εικόνα 7.28 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2563$

- Αντοχή UCS=105.5MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=70.5\text{GPa}$

▪ **H400W200**



Εικόνα 7.29 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $\nu=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2563$

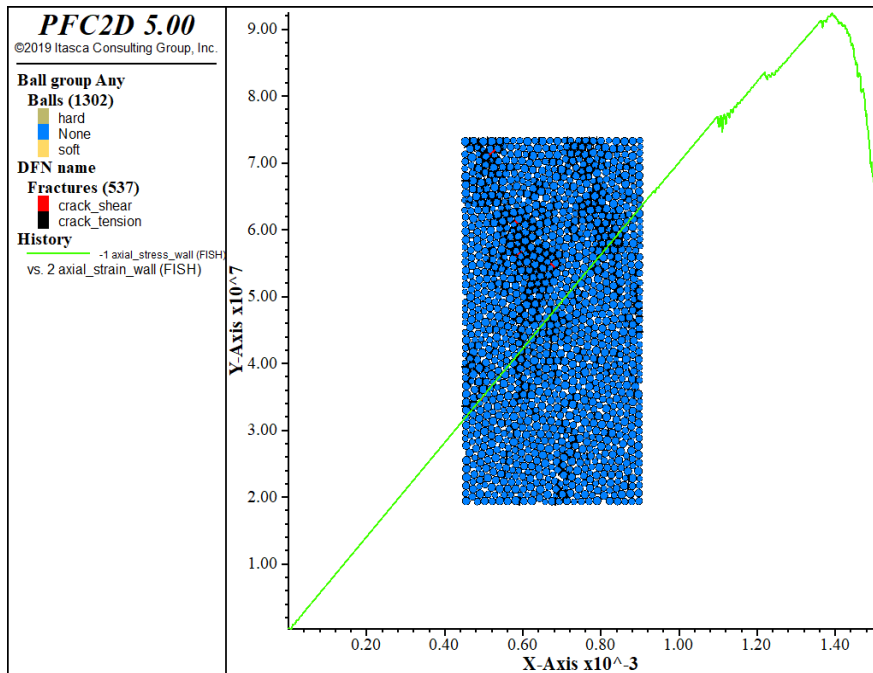
- Αντοχή  $UCS=101.6\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=69.1\text{GPa}$

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση  $10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2563$

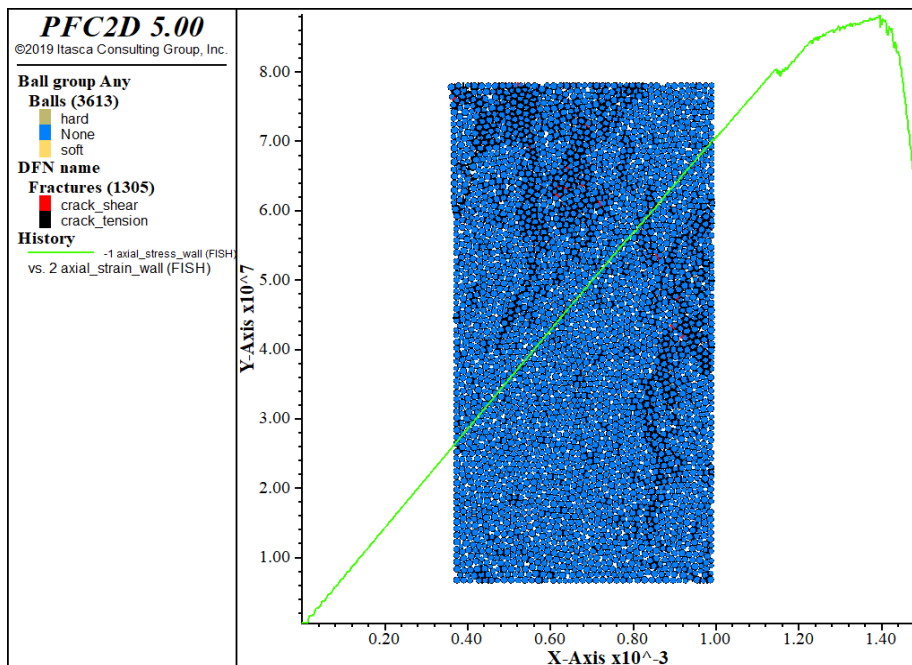
Ndis_sdev10					
seed = 2563	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
$\nu$ (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	69.6	72.6	74.2	70.5	69.1
UCS (MPa)	98.5	112.2	101	105.5	101.6

- ❖ Seed=2146
- H60W30



Εικόνα 7.30 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2146$

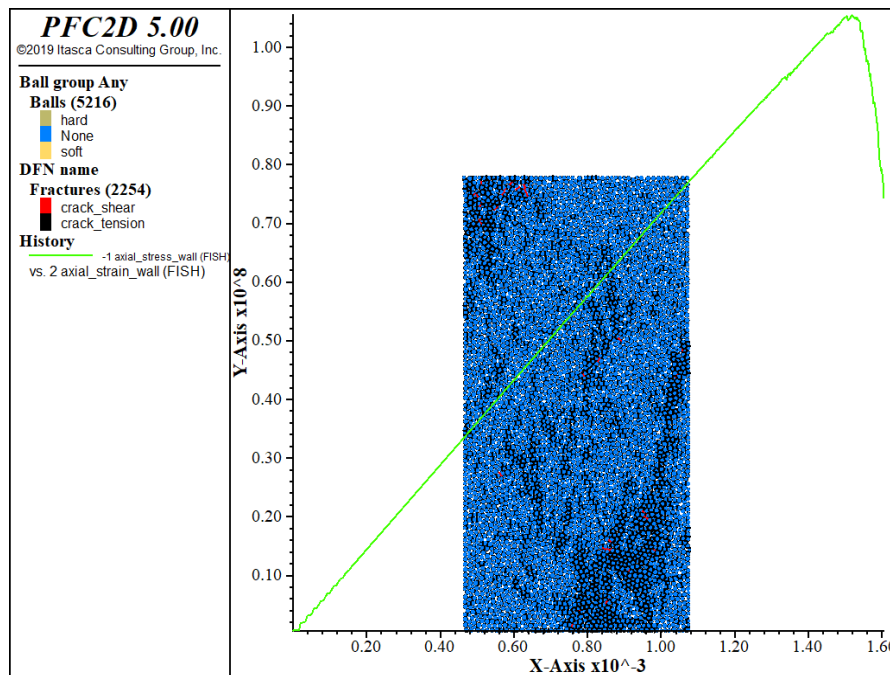
- Αντοχή  $UCS=92.4\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=73.7\text{GPa}$
- H100W50



Εικόνα 7.31 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2146$

- Αντοχή  $UCS=88.2\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=71.9\text{GPa}$

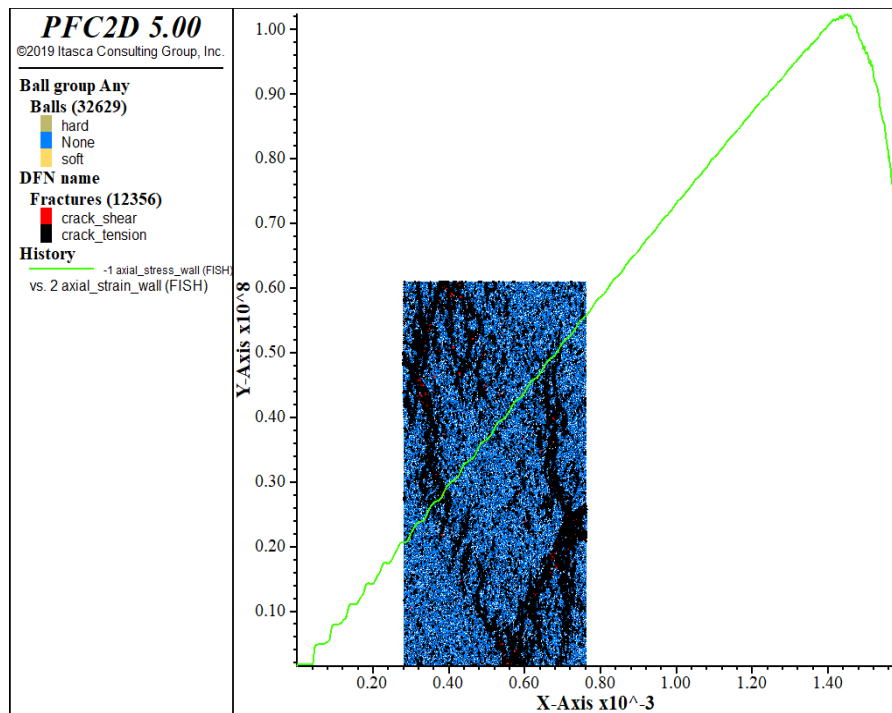
- **H120W60**



Εικόνα 7.32 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2146$

- Αντοχή  $UCS=105.5\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=71.8\text{GPa}$

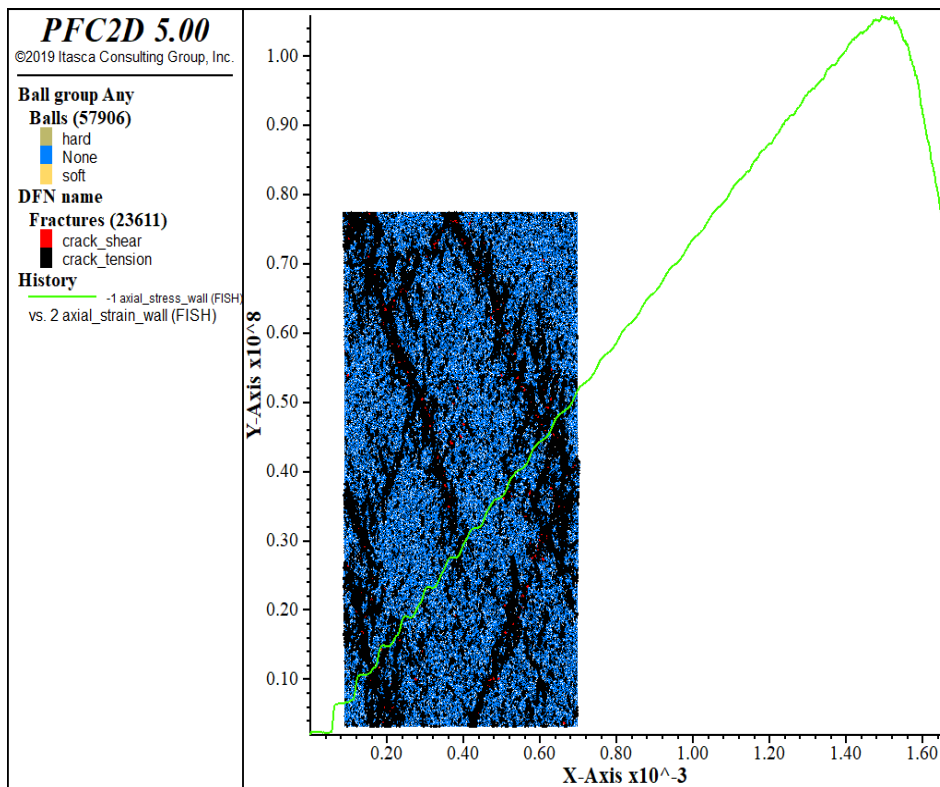
- **H300W150**



Εικόνα 7.33 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2146$

- Αντοχή  $UCS=102.3\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=67.6\text{GPa}$

▪ **H400W200**



**Εικόνα 7.34** Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $\nu=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2146$

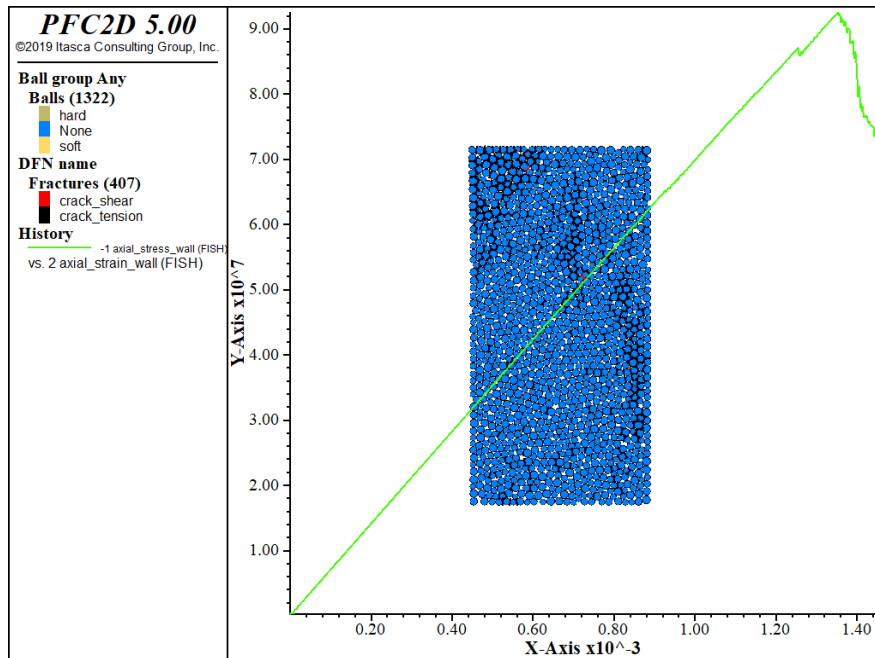
- Αντοχή  $UCS=105.7\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=70\text{GPa}$

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 7.7** Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση  $10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2146$

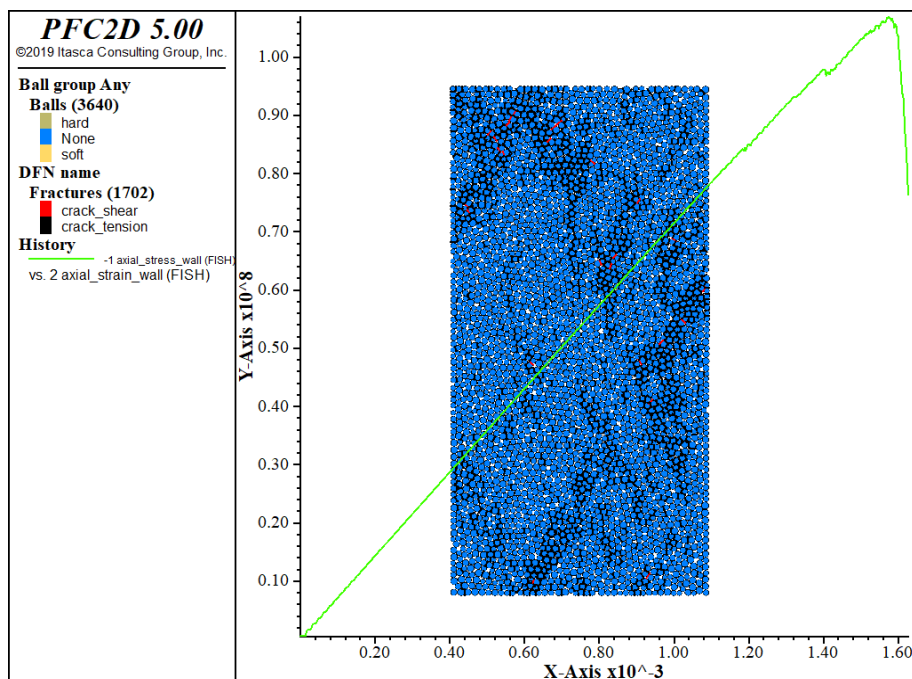
Ndis_sdev10					
seed = 2146	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
$\nu$ (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	73.7	71.9	71.8	67.6	70
UCS (MPa)	92.4	88.2	105.5	102.3	105.7

- ❖ Seed=4244
- H60W30



Εικόνα 7.35 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=4244$

- Αντοχή  $UCS=92.5\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=70\text{GPa}$
- H100W50

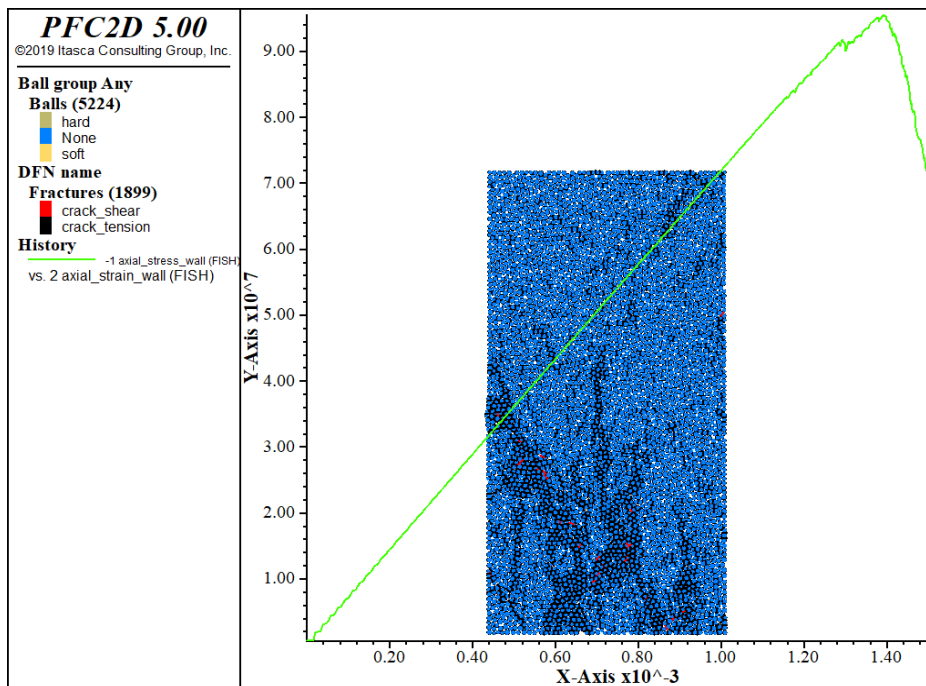


Εικόνα 7.36 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=4244$

- Αντοχή  $UCS=106.9\text{GPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=71.2\text{GPa}$



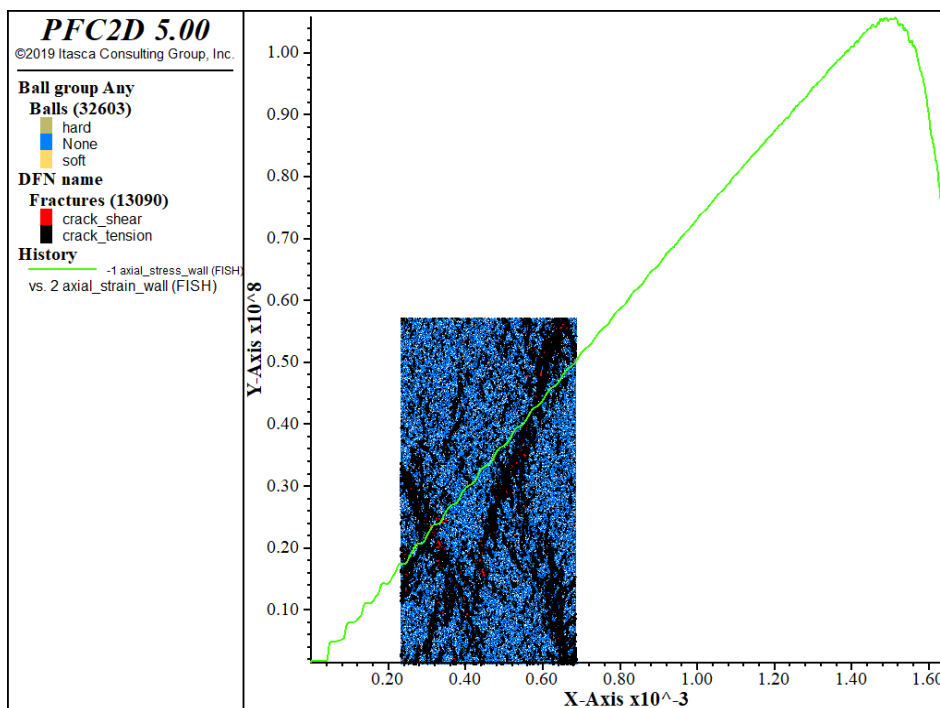
- **H120W60**



Εικόνα 7.37 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=4244$

- Αντοχή  $UCS=95.5\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=73.3\text{GPa}$

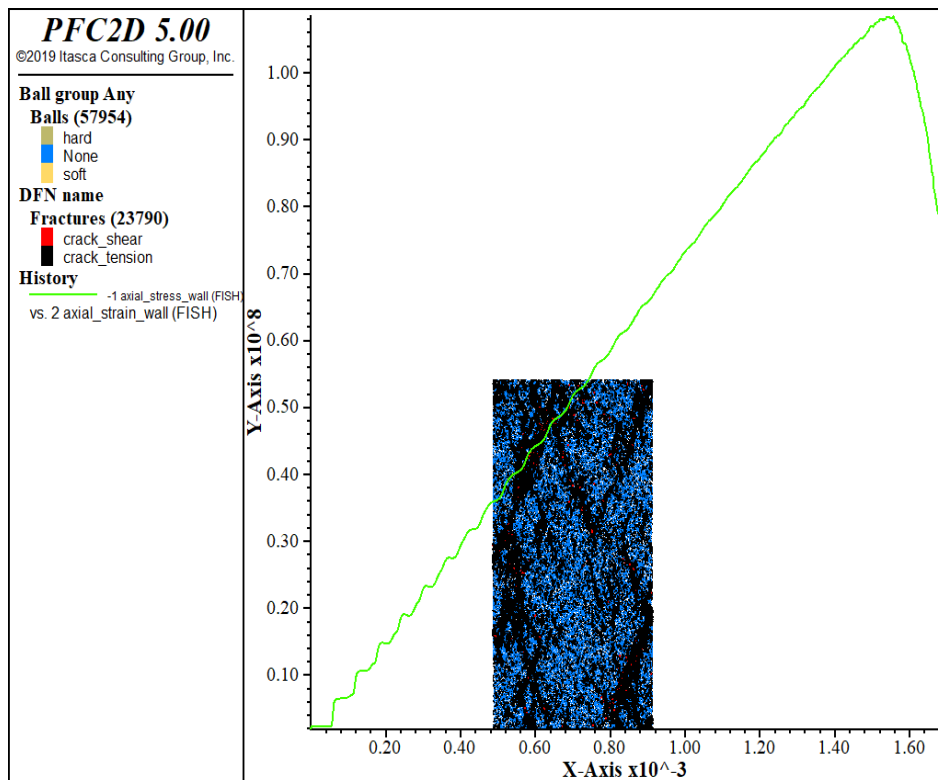
- **H300W150**



Εικόνα 7.38 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=4244$

- Αντοχή  $UCS=105.7\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=70\text{GPa}$

▪ **H400W200**



**Εικόνα 7.39** Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=4244$

- Αντοχή  $UCS=108.5\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=70.2\text{GPa}$

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

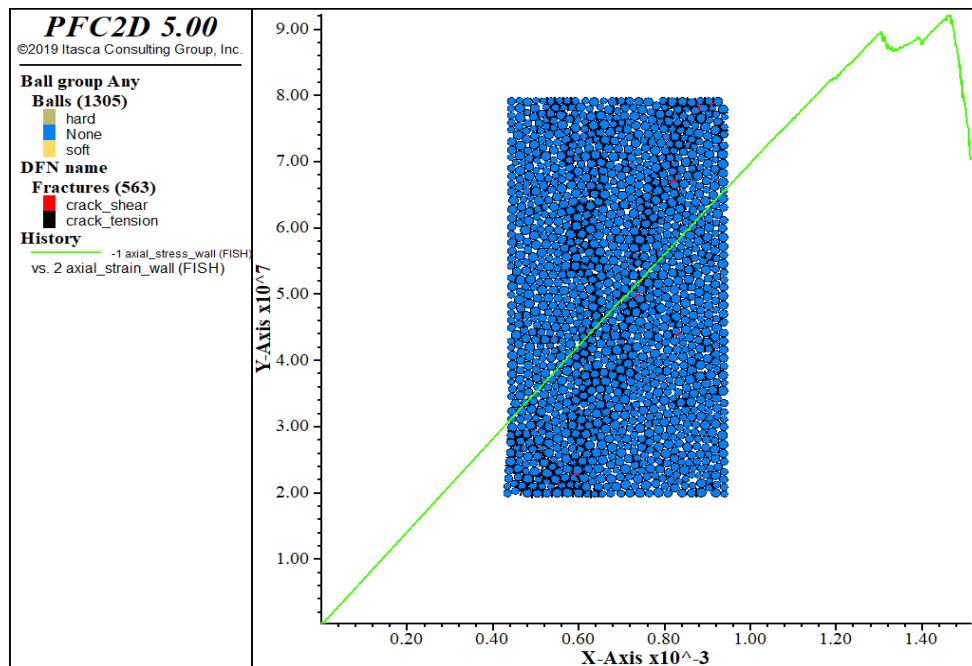
**Πίνακας 7.8** Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση  $10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=4244$

Ndis_sdev10					
seed = 4244	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	70	71.2	73.3	70	70.2
UCS (MPa)	92.5	106.9	95.5	105.7	108.5



❖ Seed=1038

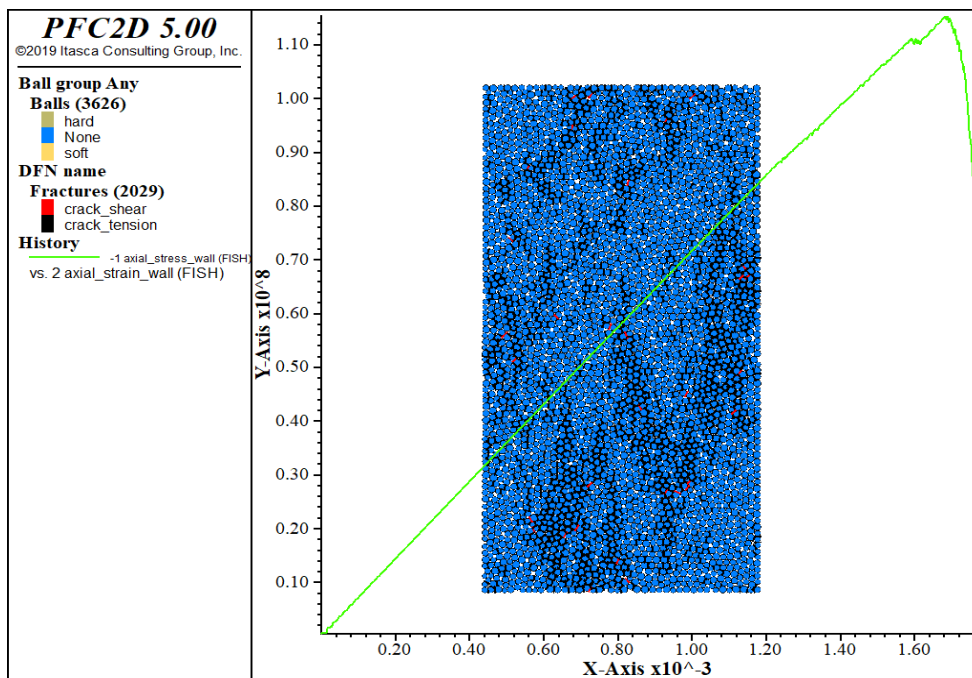
▪ H60W30



Εικόνα 7.40 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

➤ Αντοχή  $UCS=92.2\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=68.8\text{GPa}$

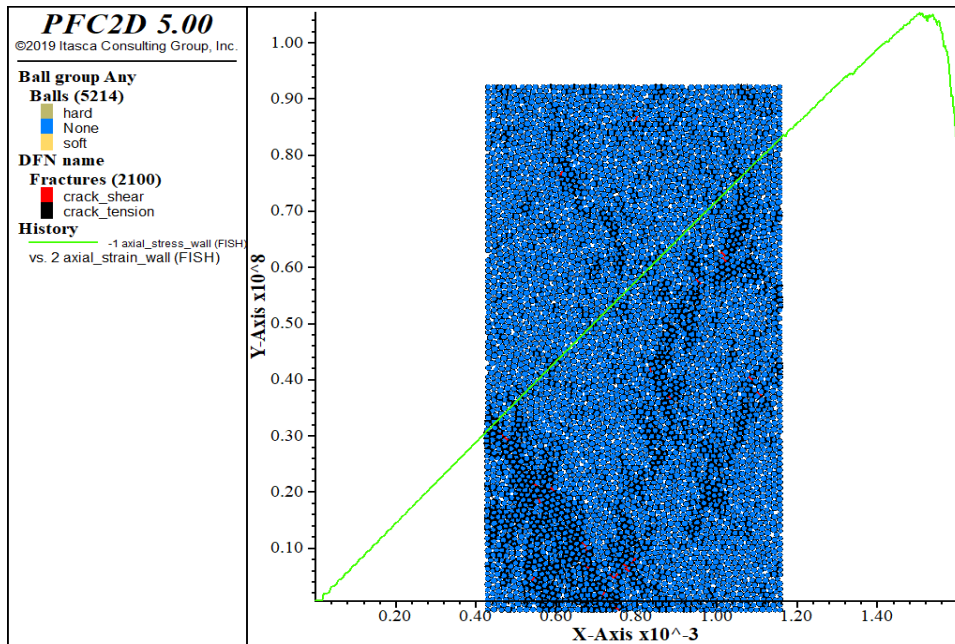
▪ H100W50



Εικόνα 7.41 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

➤ Αντοχή  $UCS=115.3\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=72.2\text{GPa}$

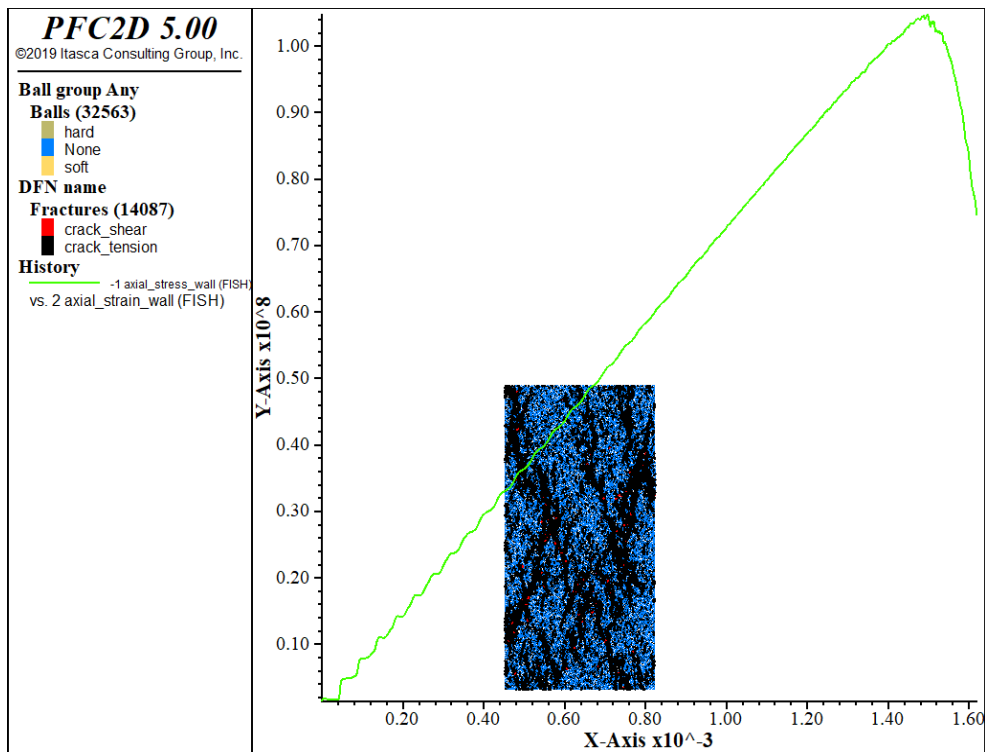
- **H120W60**



Εικόνα 7.42 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=105.3\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=72.8\text{GPa}$

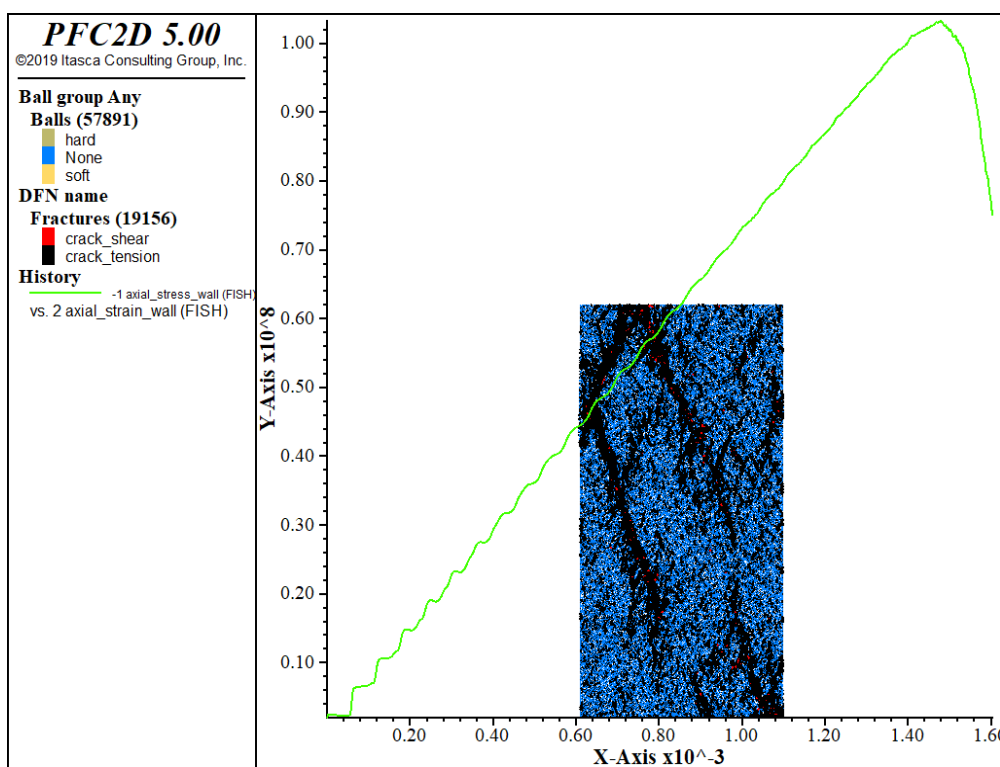
- **H300W150**



Εικόνα 7.43 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=104.7\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=71.5\text{GPa}$

▪ **H400W200**



Εικόνα 7.44 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $\nu=166.7\text{MPa}$ ,  $sdev=10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=103.2\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=68.7\text{GPa}$

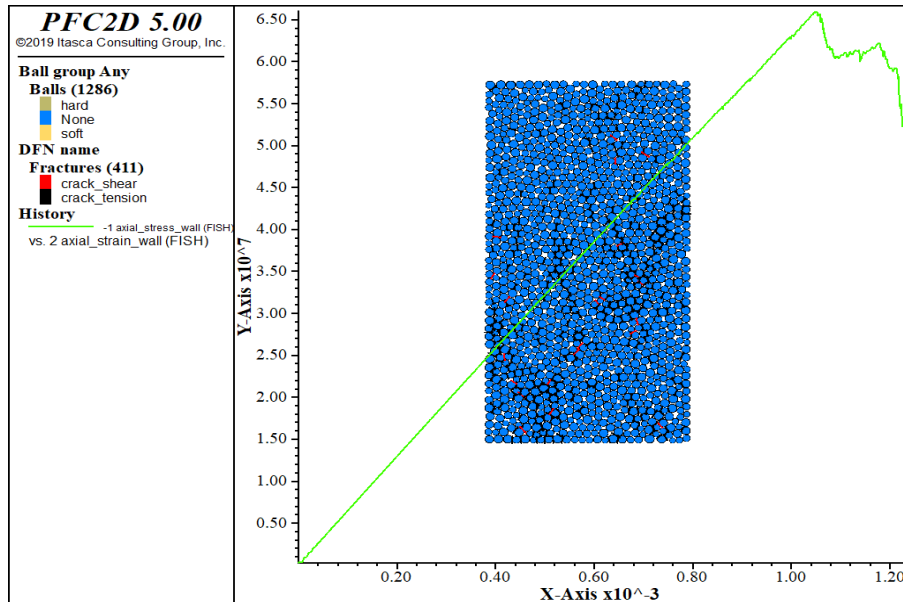
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

Πίνακας 7.9 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση  $10\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

Ndis_sdev10					
seed = 1038	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
$\nu$ (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	68.8	72.2	72.8	71.5	68.7
UCS (MPa)	92.2	115.3	105.3	104.7	103.2

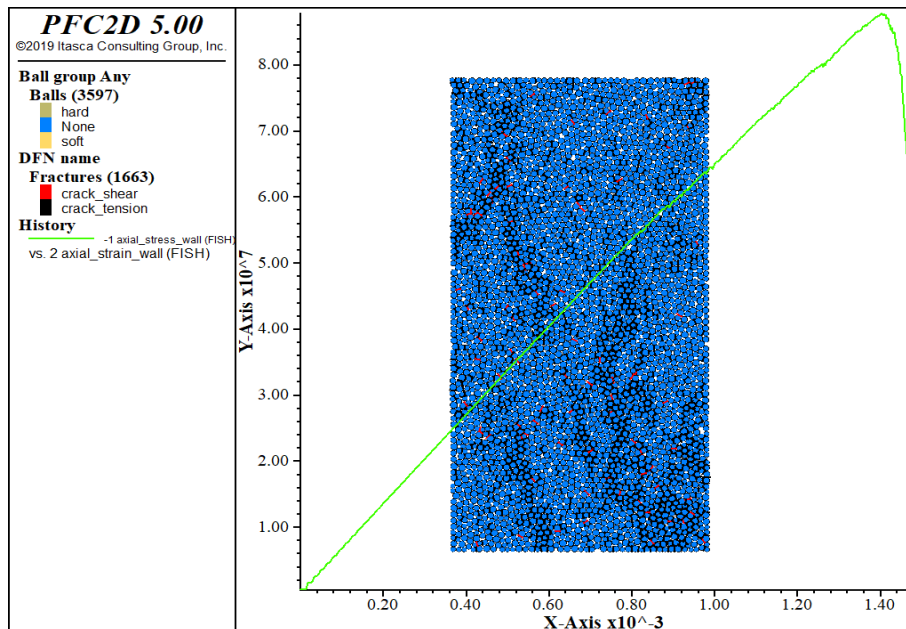
## 7.4 Προσομοιώσεις με κανονική κατανομή για τυπική απόκλιση 20MPa

- ❖ Seed=2563
- H60W30



Εικόνα 7.45 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2563$

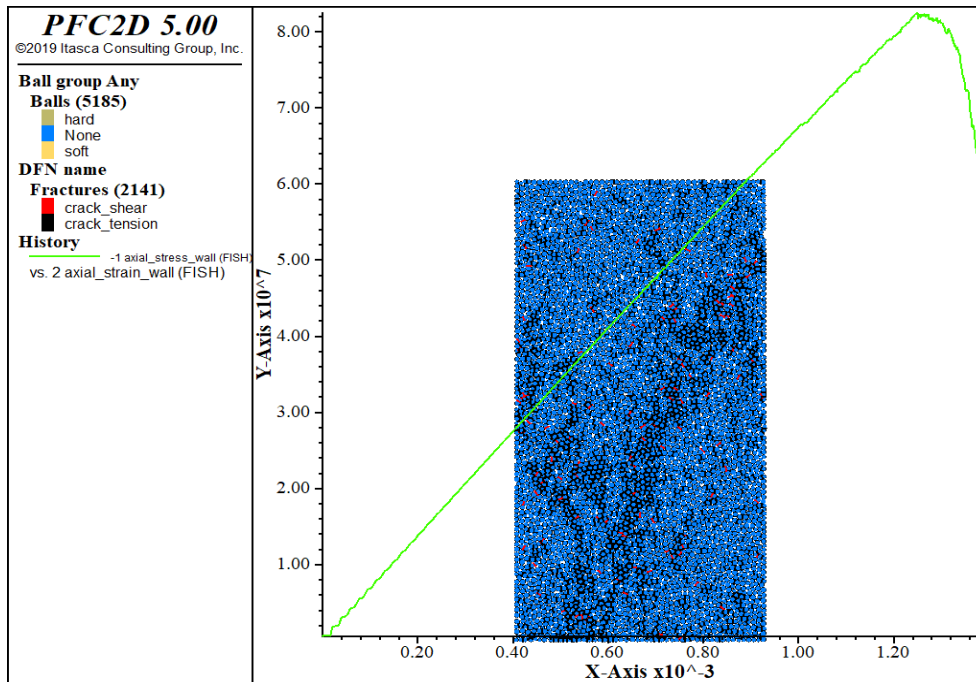
- Αντοχή  $UCS=66\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=64.2\text{GPa}$
- H100W50



Εικόνα 7.46 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2563$

- Αντοχή  $UCS=87.8\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=67.3\text{GPa}$

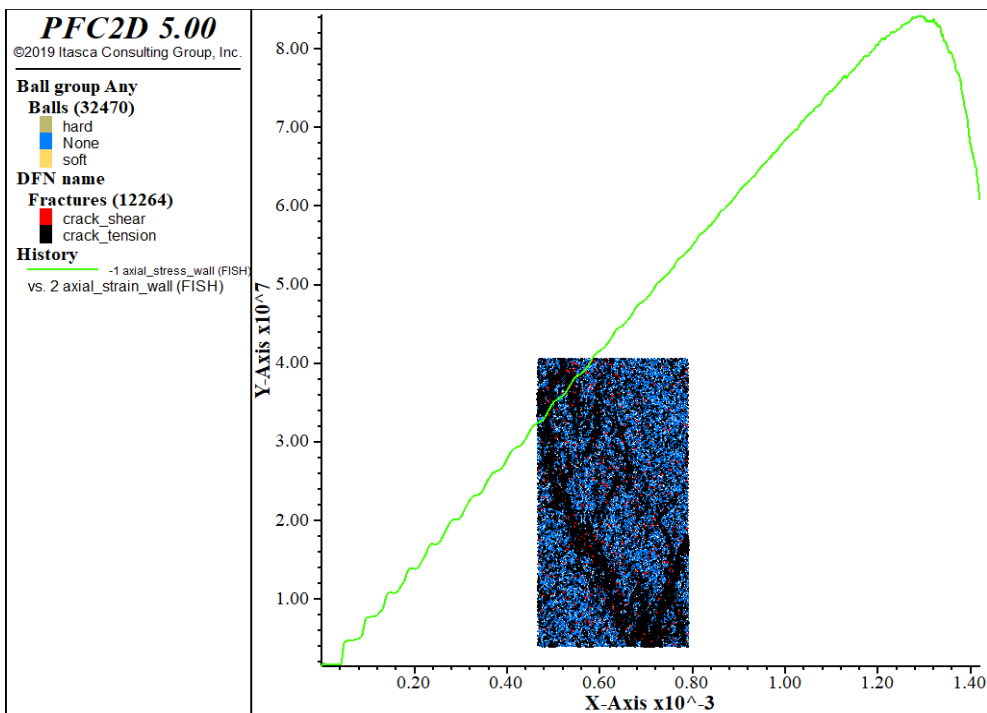
- **H120W60**



Εικόνα 7.47 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2563$

➤ Αντοχή  $UCS=82.4\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=66.9\text{GPa}$

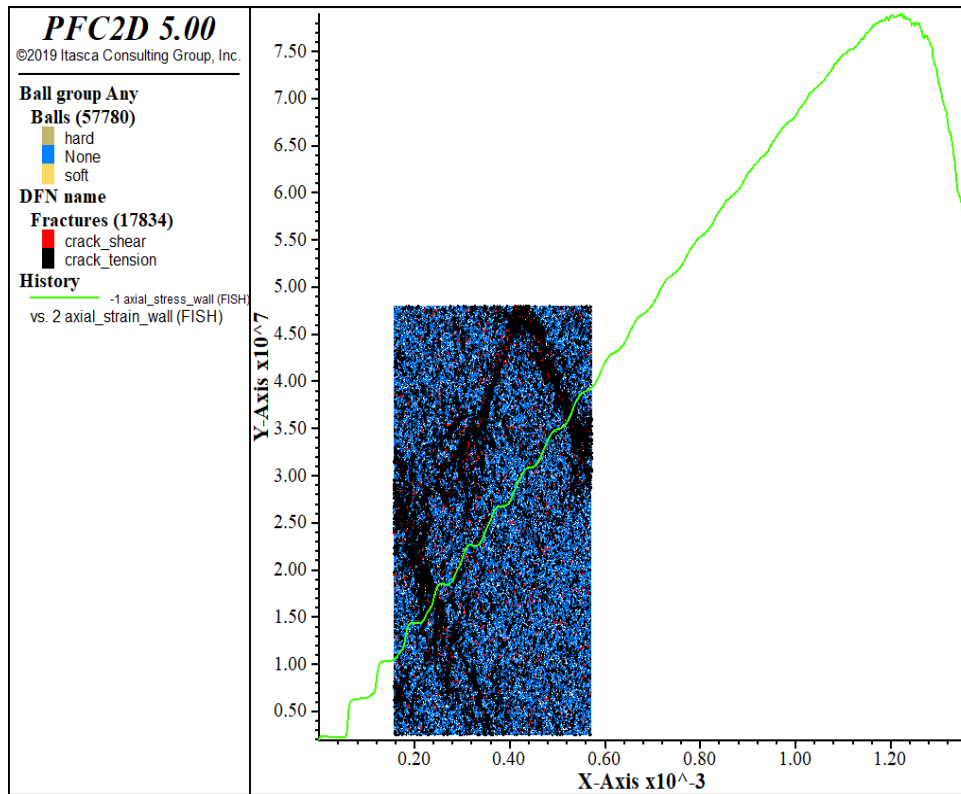
- **H300W150**



Εικόνα 7.48 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2563$

➤ Αντοχή  $UCS=84.2\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=63.4\text{GPa}$

▪ **H400W200**



Εικόνα 7.49 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2563$

- Αντοχή  $UCS=78.9\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=52.8\text{GPa}$

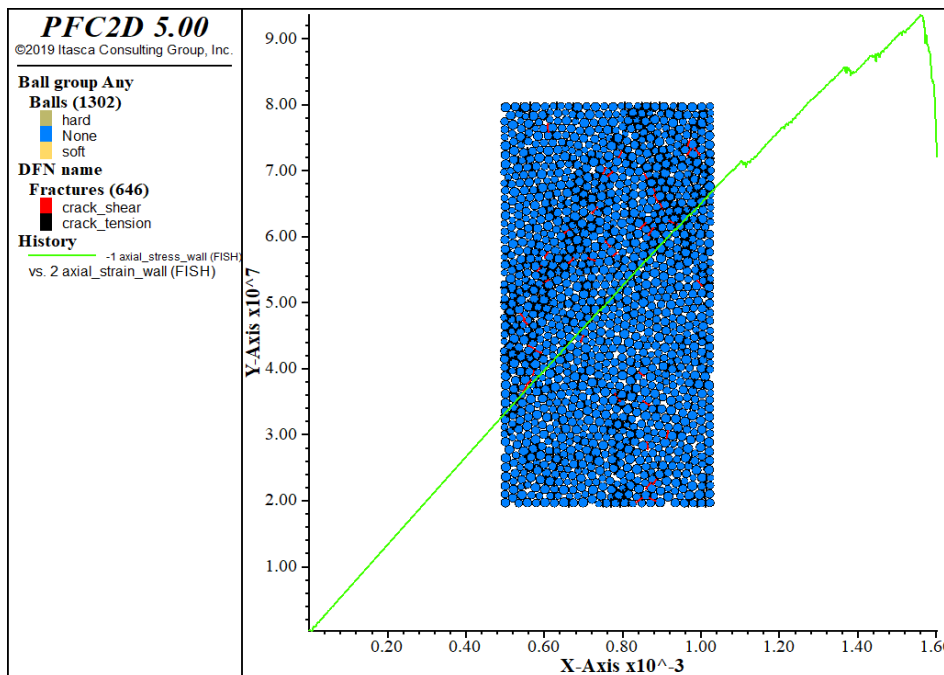
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

Πίνακας 7.10 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση  $20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2563$

Ndis_sdev20					
seed = 2563	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	64.2	67.3	66.9	63.4	52.8
UCS (MPa)	66	87.8	82.4	84.2	78.9

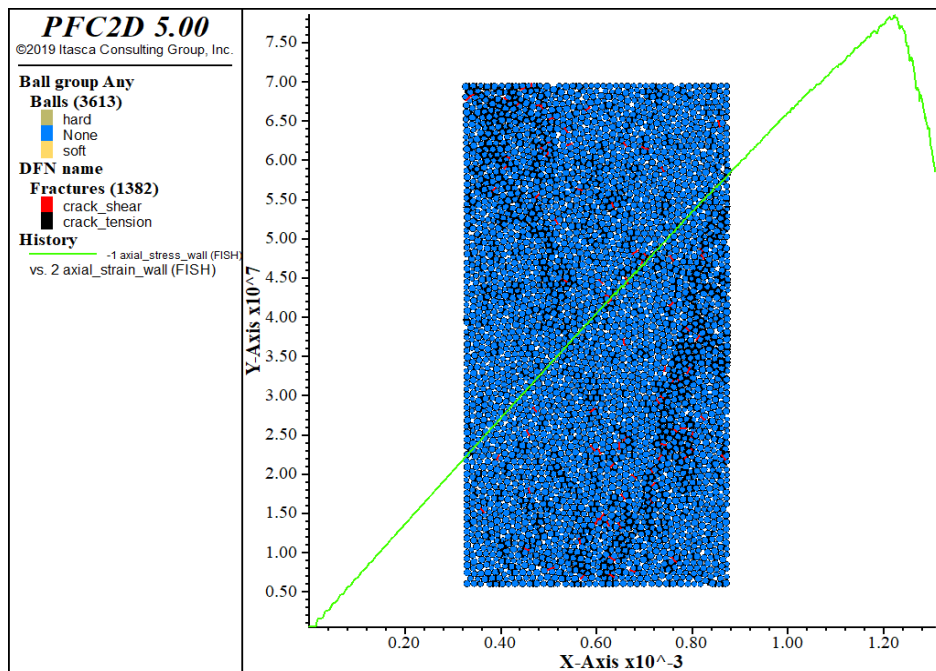


- ❖ Seed=2146
- H60W30



Εικόνα 7.50 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2146$

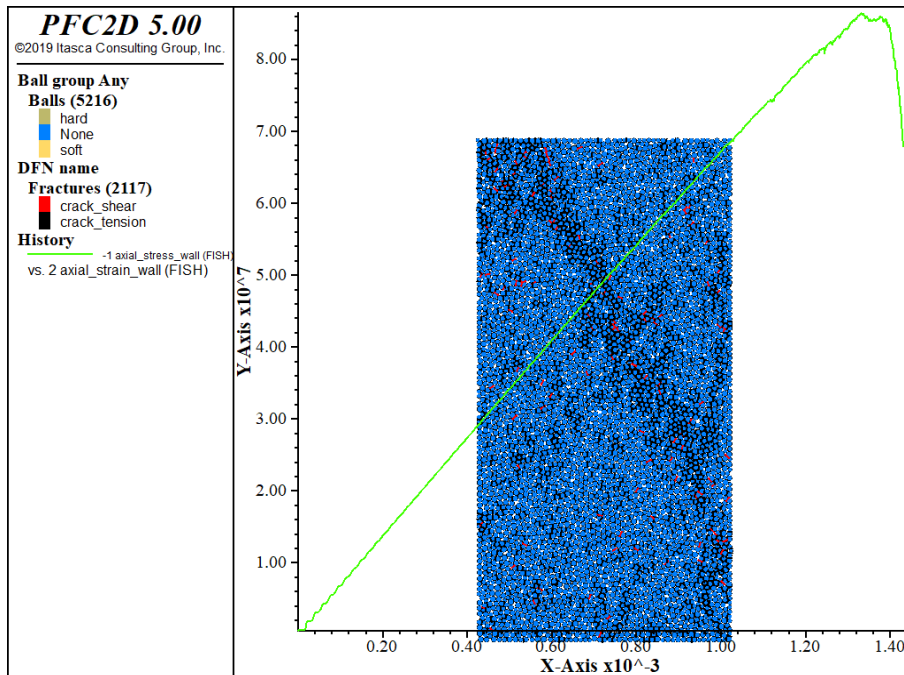
- Αντοχή  $UCS=93.6\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=66.6\text{GPa}$
- H100W50



Εικόνα 7.51 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2146$

- Αντοχή  $UCS=78.5\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=68.7\text{GPa}$

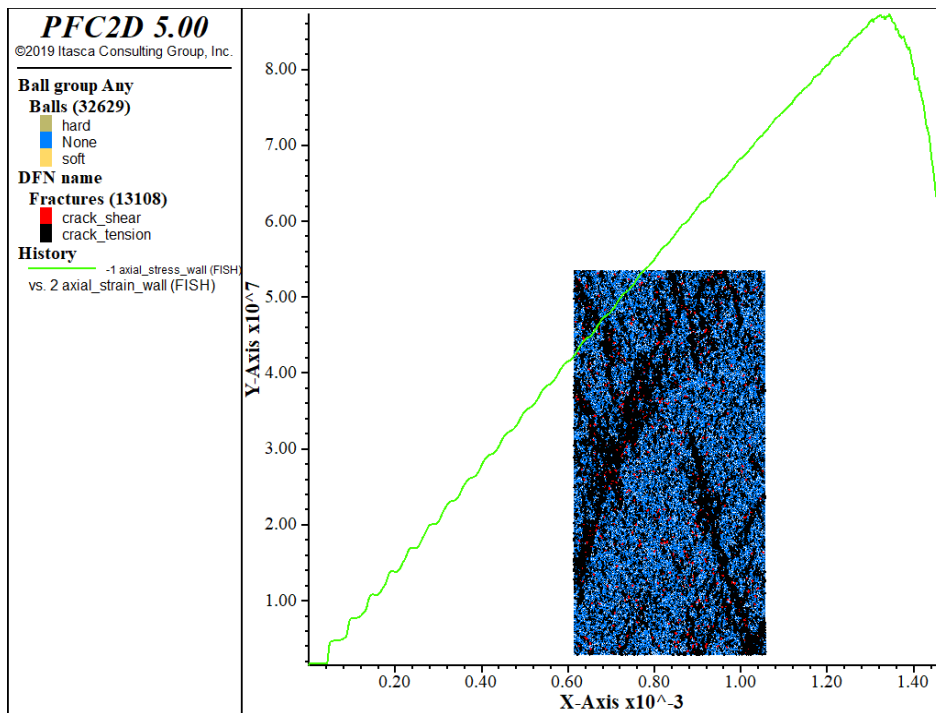
- **H120W60**



Εικόνα 7.52 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2146$

- Αντοχή  $UCS=86.4\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=69.5\text{GPa}$

- **H300W150**

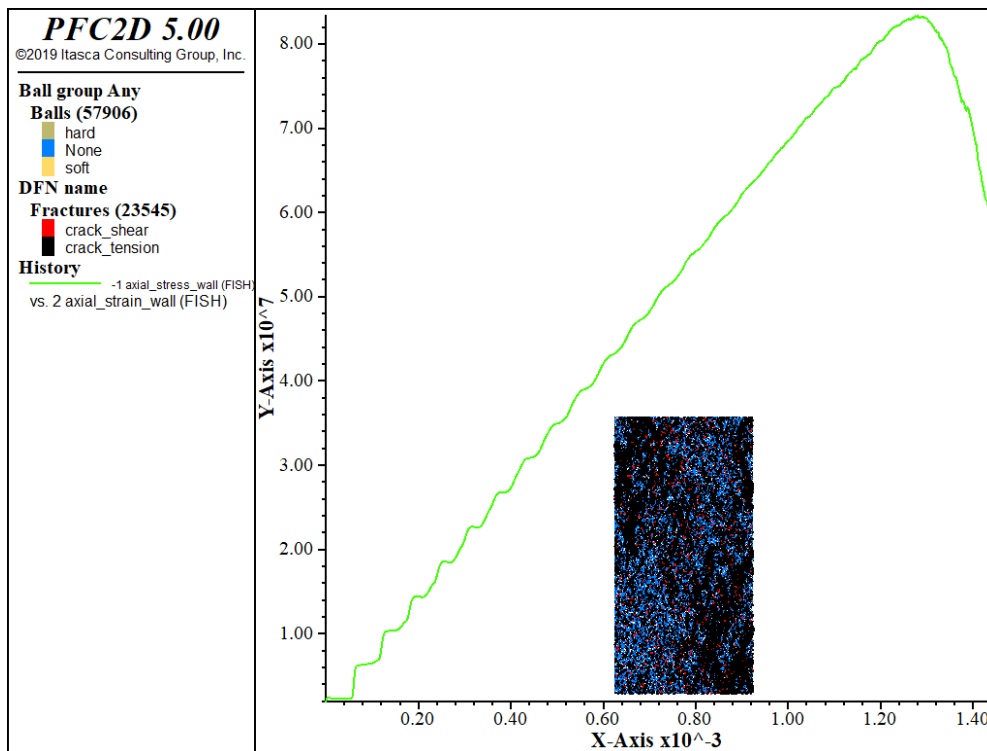


Εικόνα 7.53 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2146$

- Αντοχή  $UCS=87.2\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=61.5\text{GPa}$



▪ **H400W200**



**Εικόνα 7.54** Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $\nu=166.7\text{MPa}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2146$

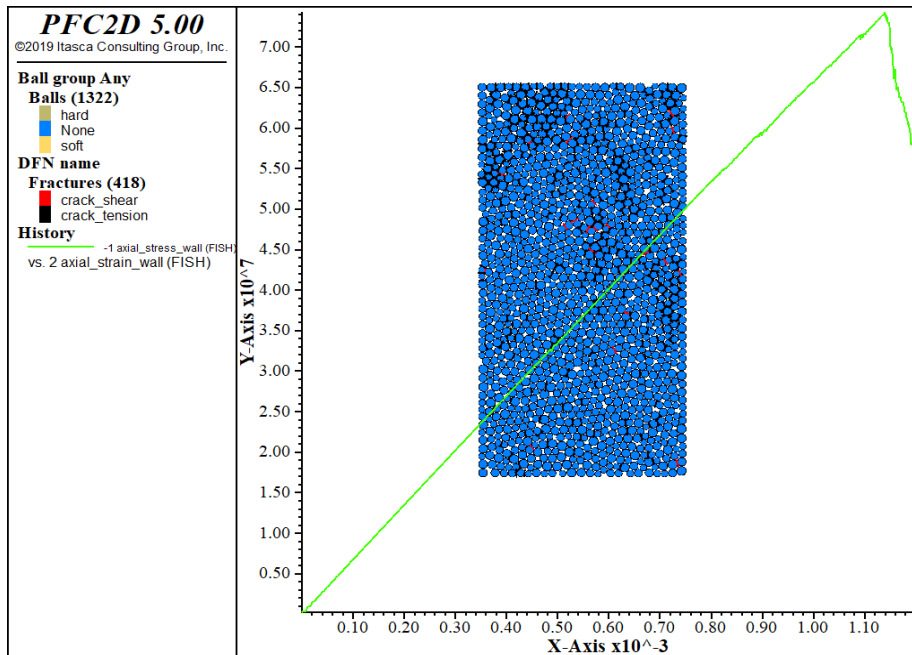
- Αντοχή  $UCS=83.3\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=58\text{GPa}$

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 7.11** Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση  $20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=2146$

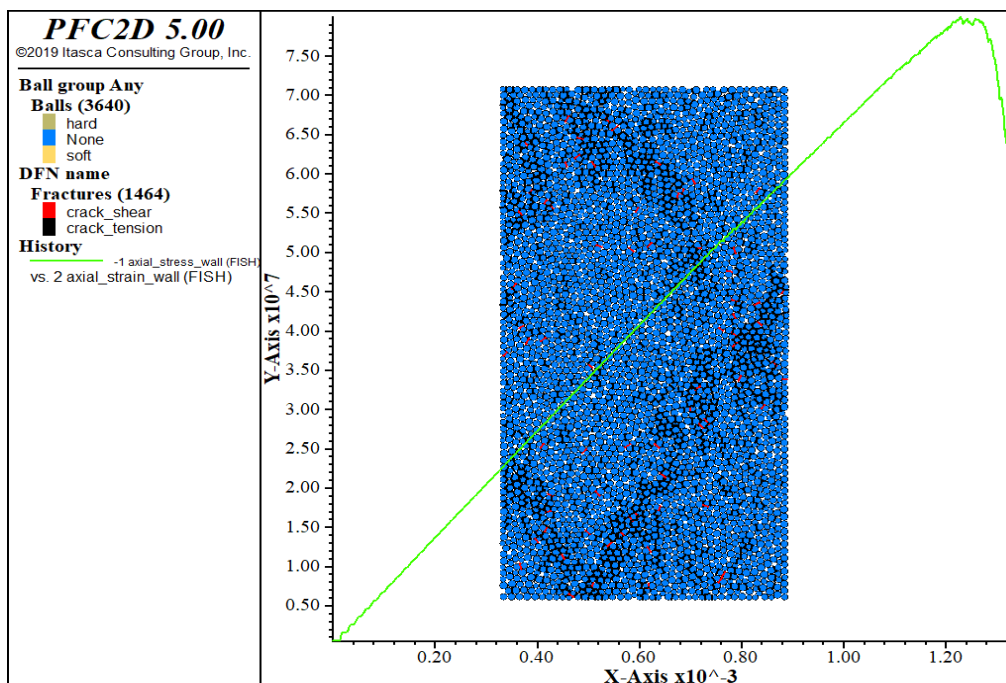
Ndis_sdev20					
seed = 2146	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
$\nu$ (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	66.6	68.7	69.5	61.5	58
UCS (MPa)	93.6	78.5	86.4	87.2	83.3

- ❖ Seed=4244
- H60W30



Εικόνα 7.55 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=4244$

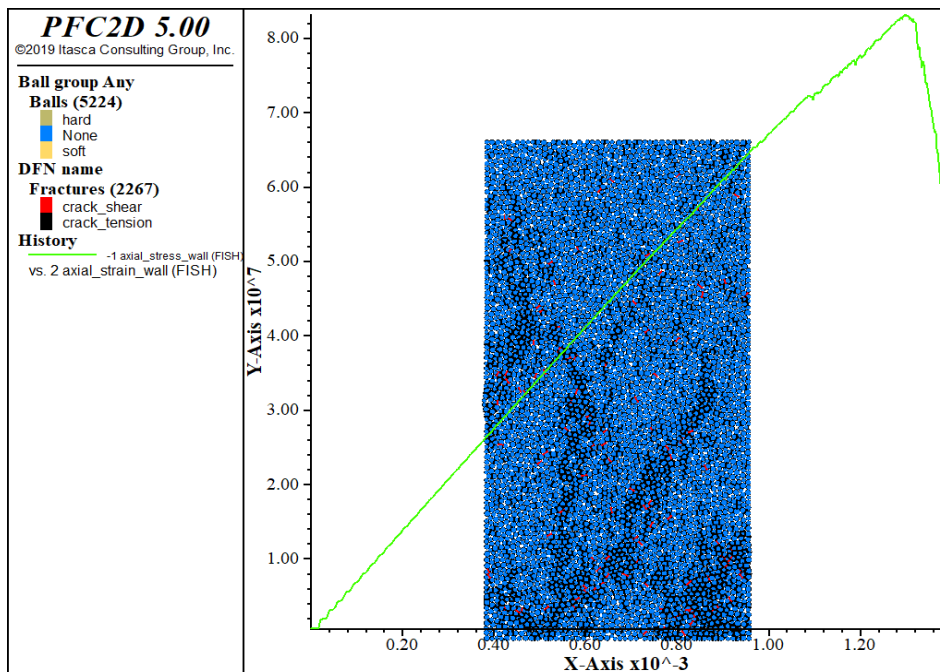
- Αντοχή UCS=74.2MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=66.9\text{GPa}$
- H100W50



Εικόνα 7.56 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=4244$

- Αντοχή UCS=80MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=69.4\text{GPa}$

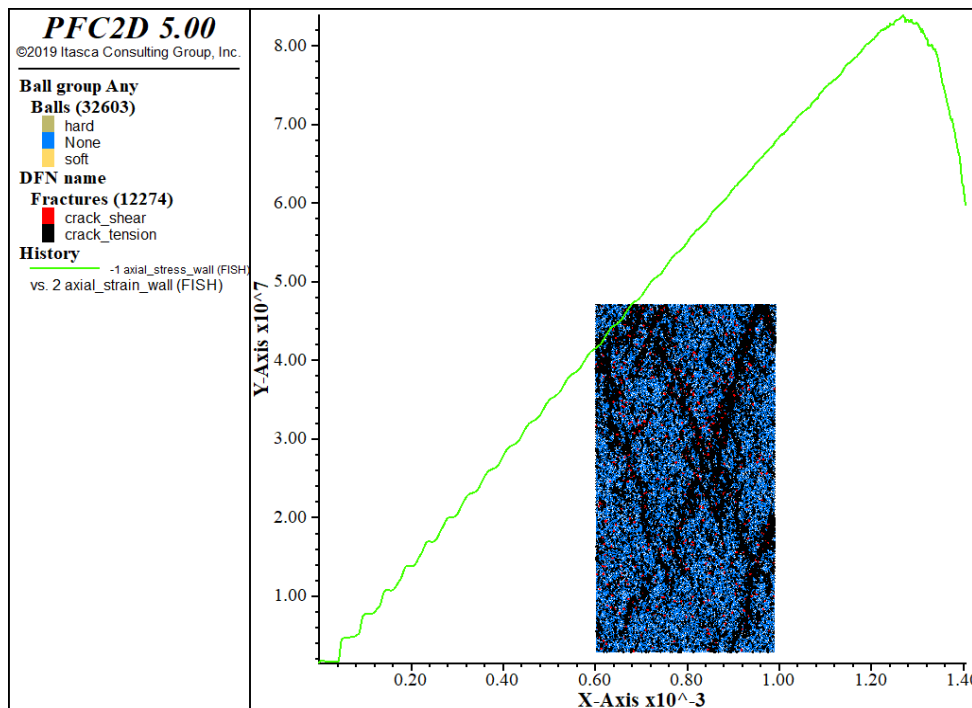
- **H120W60**



Εικόνα 7.57 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=4244$

- Αντοχή UCS=83.1MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=69.5\text{GPa}$

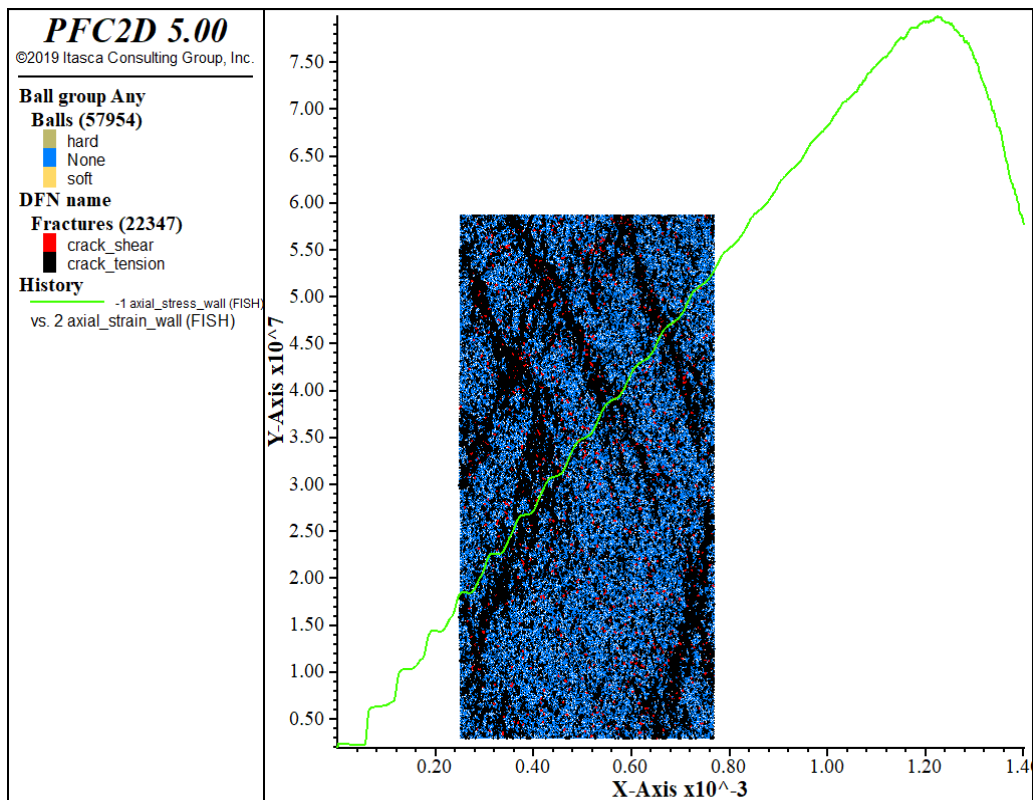
- **H300W150**



Εικόνα 7.58 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=4244$

- Αντοχή UCS=83.9MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=60.6\text{GPa}$

▪ **H400W200**



**Εικόνα 7.59** Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=4244$

- Αντοχή  $UCS=79.9\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=56.4\text{GPa}$

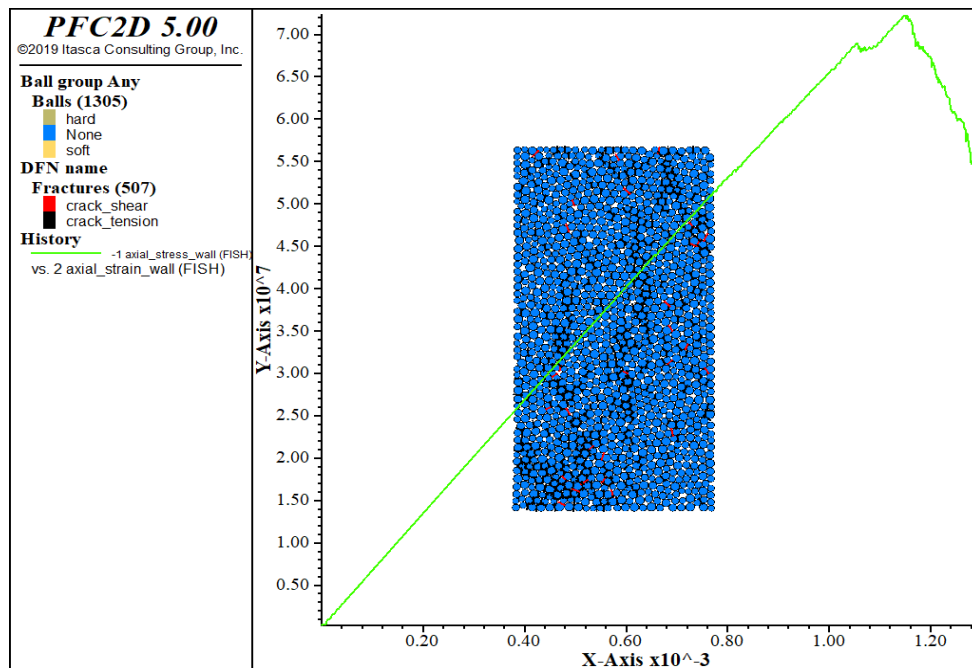
Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

**Πίνακας 7.12** Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση  $20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=4244$

Ndis_sdev20					
seed = 4244	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	66.9	69.4	69.5	60.6	56.4
UCS (MPa)	74.2	80	83.1	83.9	79.9

❖ Seed=1038

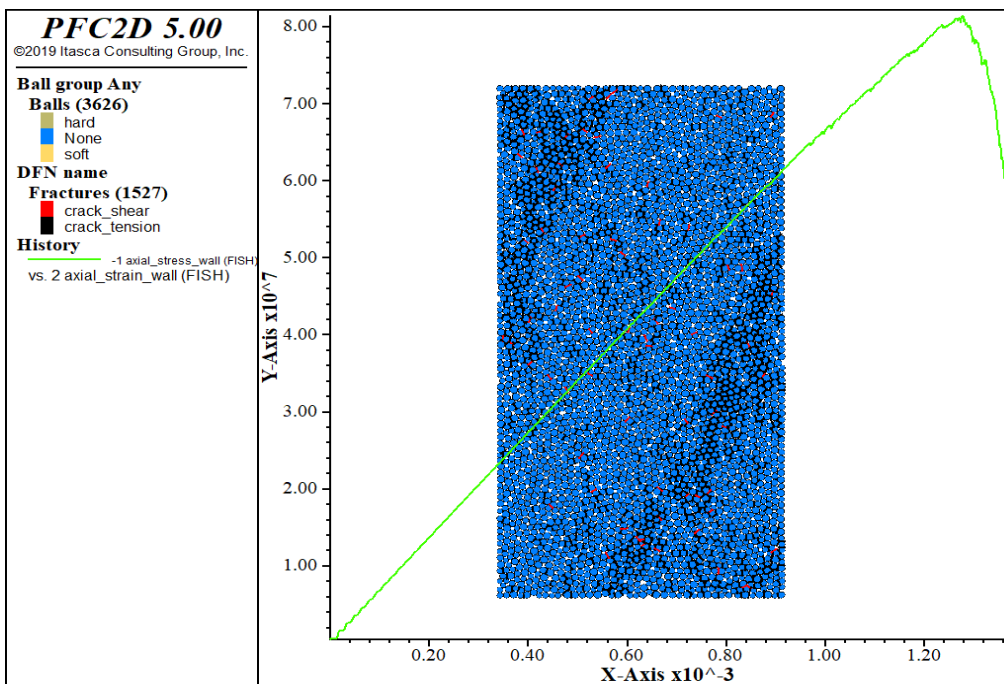
▪ H60W30



Εικόνα 7.60 Διάγραμμα δοκιμίου H60W30 με  $v=25\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

➤ Αντοχή  $UCS=72.3\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=67.4\text{GPa}$

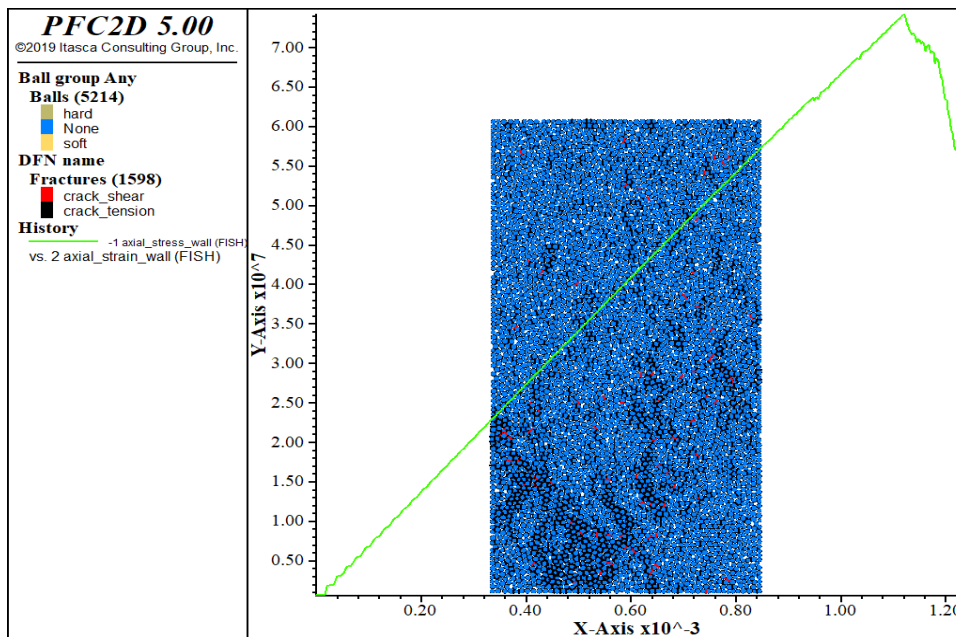
▪ H100W50



Εικόνα 7.61 Διάγραμμα δοκιμίου H100W50 με  $v=41.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

➤ Αντοχή  $UCS=81.4\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=68.9\text{GPa}$

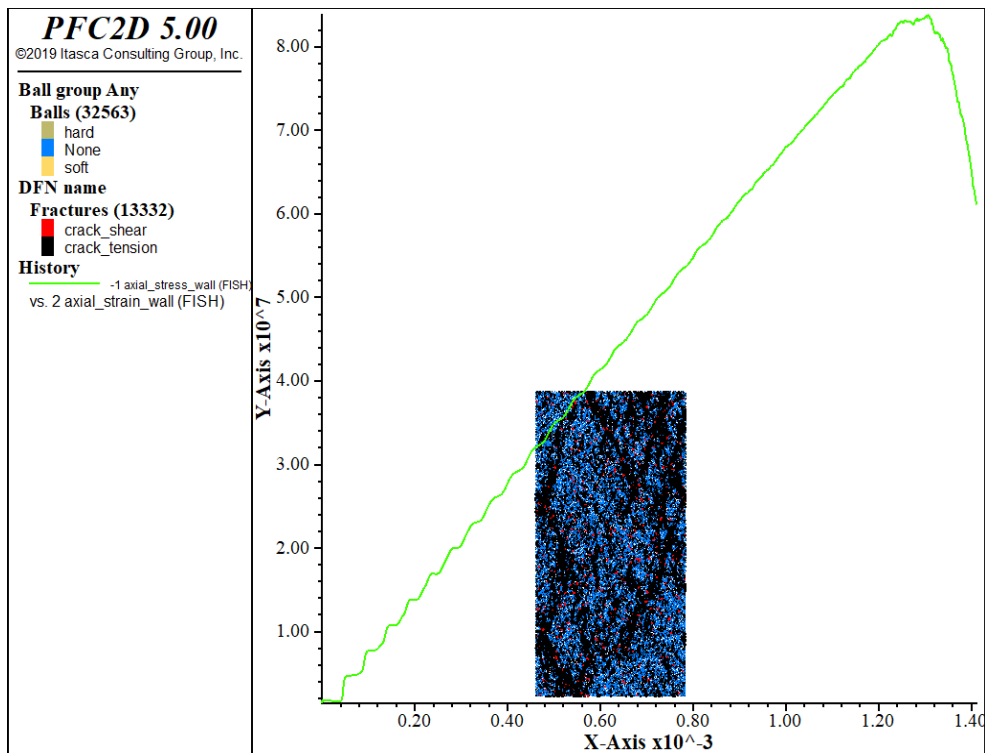
- **H120W60**



Εικόνα 7.62 Διάγραμμα δοκιμίου H120W60 με  $v=50\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=74.2\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=68.5\text{GPa}$

- **H300W150**

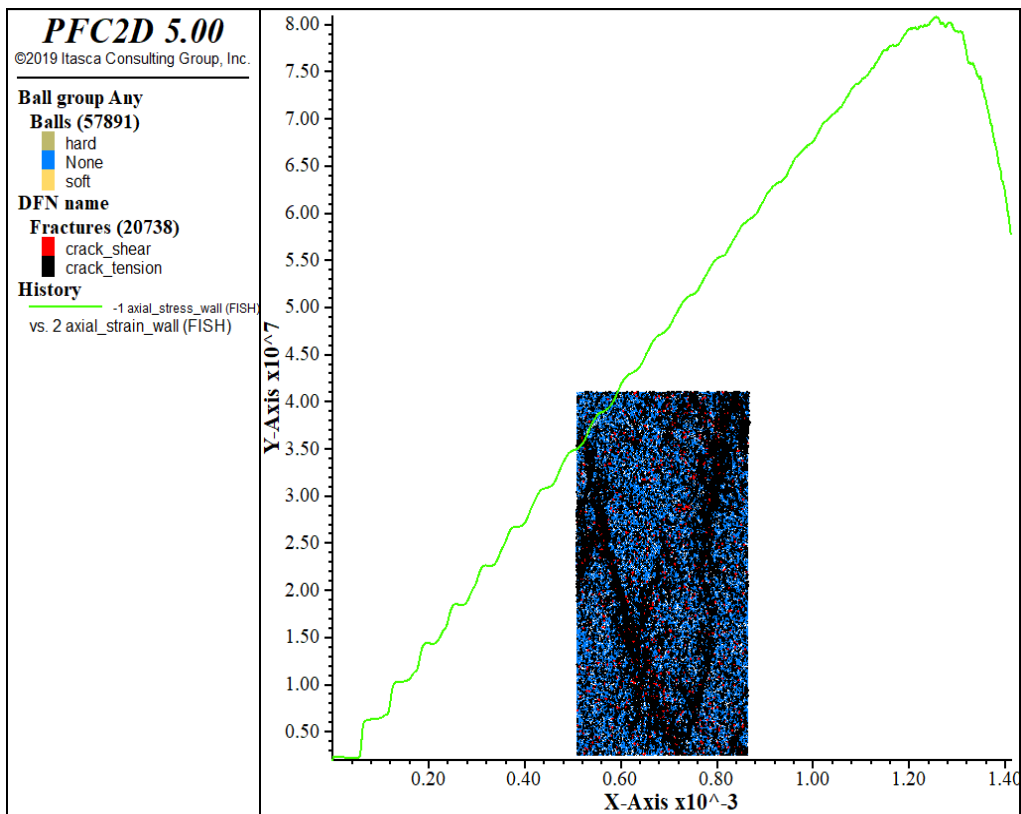


Εικόνα 7.63 Διάγραμμα δοκιμίου H300W150 με  $v=125\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=83.8\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=62.9\text{GPa}$



▪ **H400W200**



Εικόνα 7.64 Διάγραμμα δοκιμίου H400W200 με  $v=166.7\text{mm/s}$ ,  $sdev=20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

- Αντοχή  $UCS=80.8\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=59.1\text{GPa}$

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων:

Πίνακας 7.13 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με τυπική απόκλιση  $20\text{MPa}$ ,  $SBS/NBS=2$  και  $seed=1038$

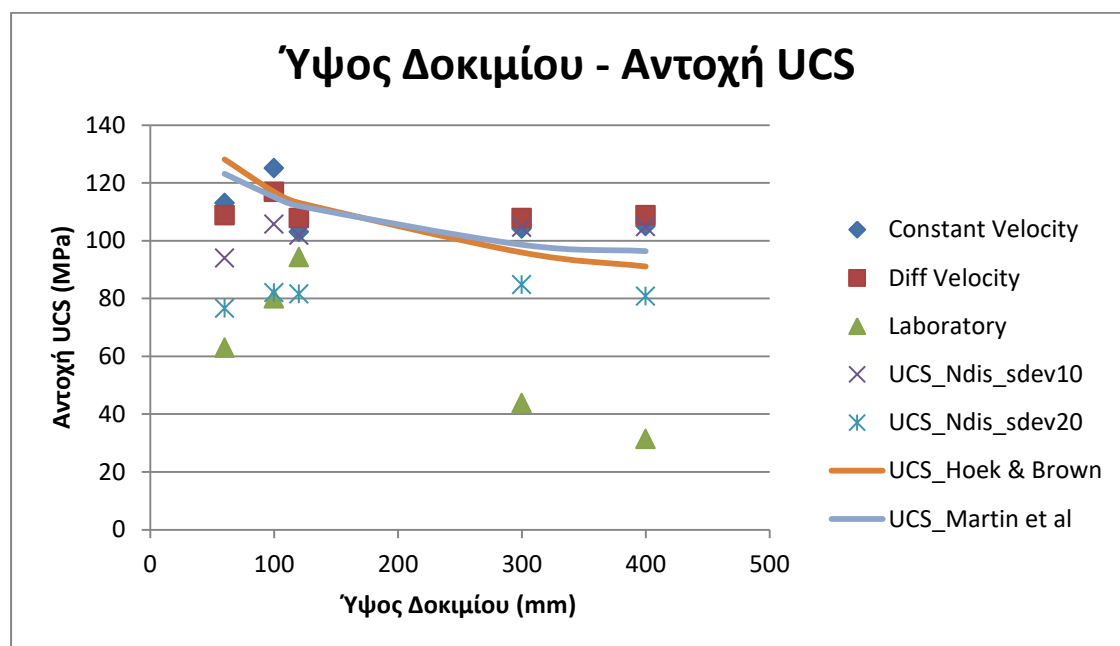
Ndis_sdev20					
seed = 1038	H60W30	H100W50	H120W60	H300W150	H400W200
v (mm/s)	25.0	41.7	50.0	125.0	166.7
E (Gpa)	67.4	68.9	68.5	62.9	59.1
UCS (MPa)	72.3	81.4	74.2	83.8	80.8

## 7.5 Αποτελέσματα UCS σειράς δοκιμών

Παρακάτω παρατίθενται πίνακας και διαγράμματα με όλα τα δεδομένα της σειράς δοκιμών, όπου για κάθε κατηγορία μοντέλου έχει υπολογιστεί η μέση τιμή. Επιπλέον, εμφανίζονται τα πειραματικά δεδομένα από τις δοκιμές που περιγράφηκαν παραπάνω<sup>[5,18]</sup> και υπολογίστηκαν οι τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη μέσω των σχέσεων των Hoek & Brown και Martin et al για τη σύγκριση των δεδομένων.

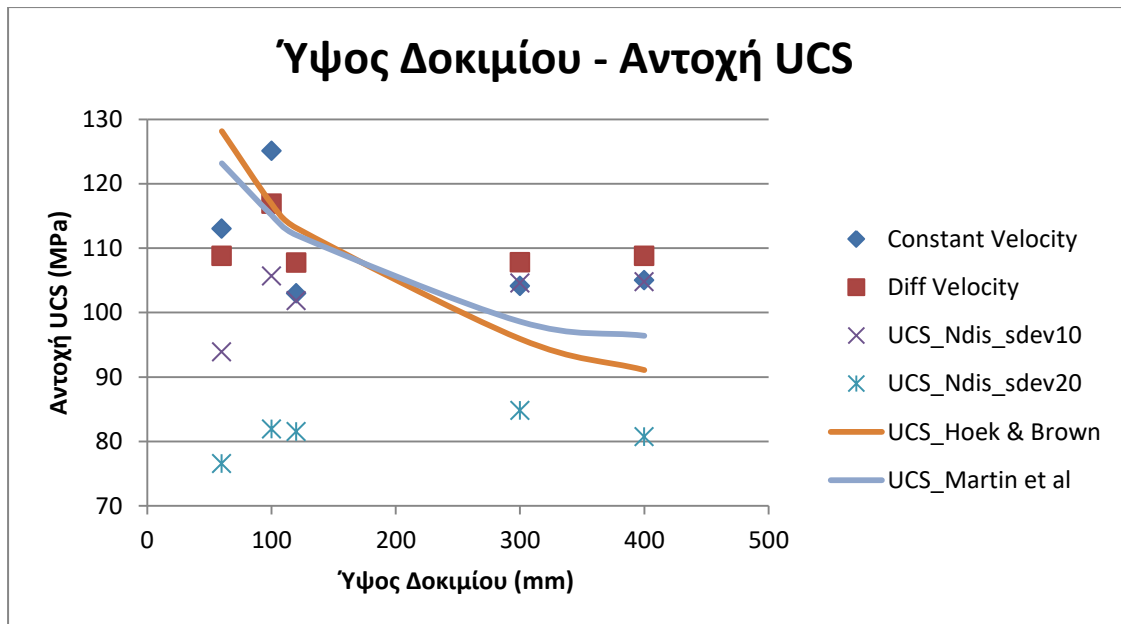
**Πίνακας 7.14 Συγκεντρωτικός πίνακας UCS δεδομένων σειράς δοκιμών με SBS/NBS=2**

H(mm)	Diff Vel	Diff Vel	Diff Vel		Diff Vel	Dif Vel
	Avg UCS (Mpa)	Avg UCS_Ndis_sdev10 (Mpa)	Avg UCS_Ndis_sdev20 (Mpa)	Laboratory UCS (Mpa)	Avg UCS Hoek & Brown	Avg UCS Martin et al
60	108.8	93.9	76.5	62.9	128.2	123.2
100	116.9	105.7	81.9	80	116.9	115.2
120	107.8	101.8	81.5	94.3	113.1	112.0
300	107.8	104.6	84.8	43.8	95.9	98.6
400	108.8	104.8	80.7	31.4	91.1	96.4



**Σχήμα 7.1 Διάγραμμα αποτελεσμάτων UCS σειράς μοντέλων με SBS/NBS=2**





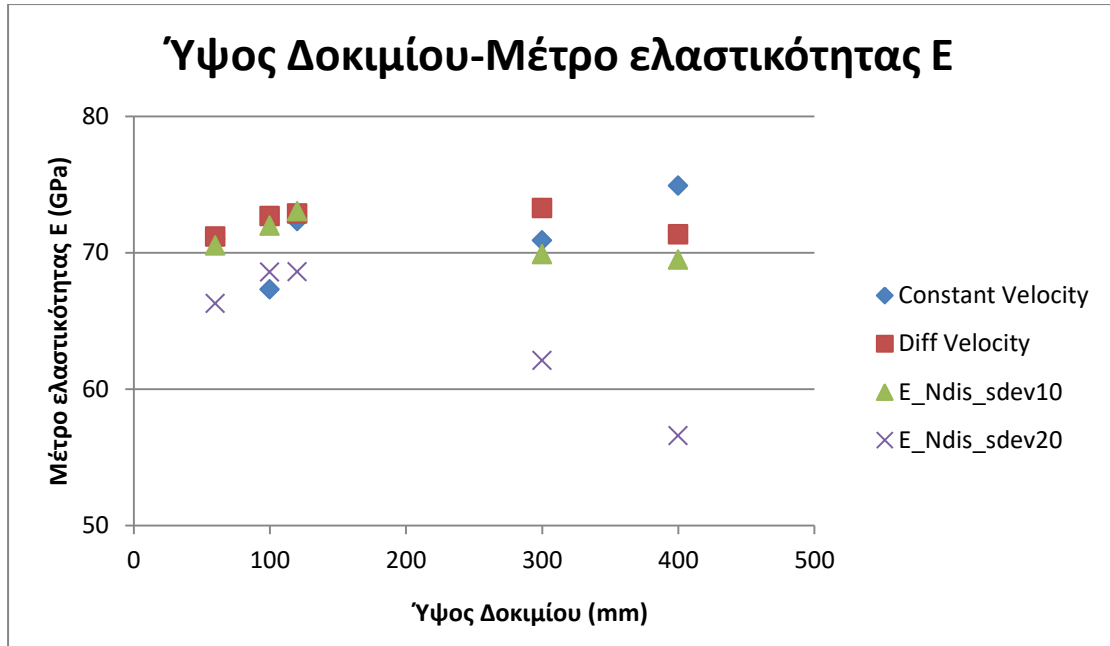
Σχήμα 7.2 Διάγραμμα αποτελεσμάτων UCS σειράς αριθμητικών μοντέλων με SBS/NBS=2

## 7.6 Αποτελέσματα μέτρου ελαστικότητας E σειράς δοκιμών

Παρακάτω παρατίθενται πίνακας και διάγραμμα με όλα τα δεδομένα της σειράς δοκιμών, όπου για κάθε κατηγορία μοντέλου έχει υπολογιστεί η μέση τιμή.

Πίνακας 7.15 Συγκεντρωτικός πίνακας μέτρου ελαστικότητας E σειράς δοκιμών με SBS/NBS=2

H(mm)	Diff Vel	Diff Vel	Diff Vel
	Avg E (Gpa)	Avg E_Ndis_sdev10 (Gpa)	Avg E_Ndis_sdev20 (Gpa)
60	71.2	70.5	66.3
100	72.7	72.0	68.6
120	72.9	73.0	68.6
300	73.3	69.9	62.1
400	71.4	69.5	56.6



Σχήμα 7.3 Διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας E σειράς αριθμητικών μοντέλων με SBS/NBS=2

## 8 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση του φαινομένου κλίμακας (size effect) και της επίδρασης του στην αντοχή των πετρωμάτων. Με την θεωρητική επεξήγηση του φαινομένου και τη παράθεση των παραδειγμάτων διαφόρων πειραματικών μελετών πετρωμάτων έγινε πιο κατανοητή η έννοια του.

Στο πειραματικό μέρος παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών-προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα PFC2D, μεμονωμένα αλλά και σε συγκεντρωτικούς πίνακες και διαγράμματα. Στους τελικούς πίνακες και διαγράμματα που περιέχουν όλα τα αποτελέσματα, γίνεται σύγκριση με τα πειραματικά από άλλη μελέτη<sup>[5,18]</sup> και τις προτεινόμενες σχέσεις των Hoek & Brown και Martin et al.

Εξετάζοντας τα δύο διαγράμματα αποτελεσμάτων των μοντέλων με SBS/NBS=1 και SBS/NBS=2, παρατηρούμε πως όλα τα δοκίμια των προσομοιώσεων παρουσιάζουν μία μείωση στην αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη, ωστόσο αυτή δεν είναι η αναμενόμενη σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση για το μάρμαρο Διονύσου, δεν θεωρείται το φαινόμενο κλίμακας έντονο με βάση τα αποτελέσματα από το PFC2D.

Πιο συγκεκριμένα, για τα μοντέλα με SBS/NBS=1 με μεταβαλλόμενη ταχύτητα για όλα τα seed, στις πιο μεγάλες διαστάσεις που εξετάστηκαν, H300W150 και H400W200, παρατηρείται διαφορά της τάξης του 129% και 217% αντίστοιχα, σε σχέση με τα πειραματικά. Οι πιο μικρές διαφορές παρατηρήθηκαν για τα μοντέλα με SBS/NBS=1 με τυπική απόκλιση 20MPa, που για τα παραπάνω μεγέθη οι διαφορές ήταν της τάξης του 72% και 136% αντίστοιχα, με τα πειραματικά.

Για τα μοντέλα με SBS/NBS=2 με μεταβαλλόμενη ταχύτητα για όλα τα seed, πάλι στις μεγαλύτερες διαστάσεις, H300W150 και H400W200, παρατηρείται η μεγαλύτερη διαφορά αποτελεσμάτων, που είναι της τάξης του 146% και 247% αντίστοιχα, σε σχέση με τα πειραματικά. Οι πιο μικρές διαφορές παρατηρήθηκαν για τα μοντέλα με SBS/NBS=2 με τυπική απόκλιση 20MPa, που για τα παραπάνω μεγέθη οι διαφορές ήταν της τάξης του 94% και 157% αντίστοιχα, με τα πειραματικά.

Από τα διαγράμματα επίσης φαίνεται πως δεν υπάρχουν αντίστοιχες διαφορές στα αποτελέσματα των σχέσεων των Hoek & Brown και Martin et al με αυτά των προσομοιώσεων. Ωστόσο και στις δύο σειρές μοντέλων, οι υπολογισμένες τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με τις παραπάνω σχέσεις, με την αύξηση του μεγέθους των δοκιμίων, μειώνονται συνέχεια, κάτι το οποίο δεν παρατηρείται στο σύνολο των προσομοιώσεων με το πρόγραμμα PFC2D.

Τέλος, προτείνεται η διενέργεια επιπλέον προσομοιώσεων και εργαστηριακών δοκιμών σε δοκίμια μαρμάρου Διονύσου με επιπλέον παραμέτρους και σε περισσότερα μεγέθη, για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση του φαινομένου κλίμακας στο συγκεκριμένο υλικό.

## 9 Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Π. Π. Νομικός. *Εισαγωγή στη Μηχανική Πετρωμάτων*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015
2. B.H.F Brady, E. T. Brown. *Rock mechanics for underground mining*, 3<sup>rd</sup> edition. Springer, 2006
3. C. Tang, J.A. Hudson. *Rock Failure Mechanisms: Illustrated and Explained*. CRC Press, 2010
4. K. Mogi . *Experimental Rock Mechanics*. CRC Press, 2006
5. S.K. Kourkoulis, E. Ganniari-Papageorgiou. *Experimental study of the size- and shape-effects of natural building stones*. Athens: Elsevier Ltd, 2009
6. P. Nomikos, K. Kaklis, Z. Agioutantis, S. Mavrigiannakis. *Experimental characterization and numerical modeling of the fracture process in banded Alfas porous stone*. Mat Design Process Comm, 2020
7. G. Exadaktylos, M. Stavropoulou. *A specific upscaling theory of rocks mass parameters exhibiting spatial variability: Analytical relations and computational scheme*. Elsevier Ltd, 2008
8. ZP. Bazant, F-B. Lin, H. Lippman. *Fracture energy release and size effect in borehole breakout*. Int J Fract, 1999
9. ZP. Bazant, E-P. Chen. *Scaling of structural failure*. Appl Mech Rev, 1997
10. EC. Aifantis. *Strain gradient interpretation of size effects*. Int J Fract, 1999
11. GE. Exadaktylos, I. Vardoulakis. *Microstructure in linear elasticity and scale effects: a reconsideration of basic rock mechanics and rock fracture mechanics*. Tectonophysics, 2001
12. EC. Aifantis. *Higher order gradients and size effect*. In: A. Carpinteri. *Size-scale effects in the failure mechanisms of materials and structures*. New York: Chapman & Hall, 1995
13. GT. Efremidis, EC. Aifantis. *The coefficient of geostatic stress: gradient elasticity vs classical elasticity*. J Mech Behav Mater, 2007
14. I Tsagrakis, A. Konstantinidis, EC. Aifantis. *Strain gradient and wavelet interpretation of size effects in yield and strength*. Mech Mater, 2003
15. G. Frantziskonis, A. Konstantinidis, EC. Aifantis. *Scale-dependent constitutive relations and the role of scale on nominal properties*. Eur J Mech A/Solids, 2001
16. ZP. Bazant. *Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal*. J Eng Mech, 1984
17. ZP. Bazant, A. Yavari. *Is the cause of size effect on structural strength fractal or energetic-statistical?*. Eng Fract Mech, 2005
18. Ι. Βαρδουλάκης, Σ. Κουρκουλής, Γ. Εξαδάκτυλος, Α. Ροζάκης. *Μηχανικές ιδιότητες και συμβατότητα φυσικών δομικών λίθων στα αρχαία μνημεία: το Διονυσιακό μάρμαρο. Στο Ο δομικός λίθος στα μνημεία*, Αθήνα-Μυτιλήνη, 9,10 Νοεμβρίου. Αθήνα: Υπουργείο Αιγαίου, 2002

19. S.K. Kourkoulis. An experimental study of the mechanical behavior of the “Conchylites” shell-stone: some irregularities of the size effect. *Strain*, 2011, 47
20. J. Yoon. *Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation*. Int J Rock Mech Min Sci, 2007
21. D.O. Potyondy, P.A Cundall. *A bonded-particle model for rock*. In J Rock Mech Min Sci, 2004
22. E. Hoek, E.T. Brown. *Underground Excavations in Rock*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980
23. C.D. Martin, Y. Lu, H. Lan. *Scale effects in a synthetic rock mass*. *Harmonising Rock Engineering and the Environment*. Qian & Zhou, 2011
24. R. Jackson, J. S. O. Lau. The effect of specimen size on the mechanical properties of Lac du Bonnet grey granite. In *1<sup>st</sup> Int Workshop on Scale Effects in Rock Masses*. Norway, 1990
25. R. Blanks, C. McNamara. *Mass concrete tests in large cylinders*. ACI Journal Proceedings, 1935