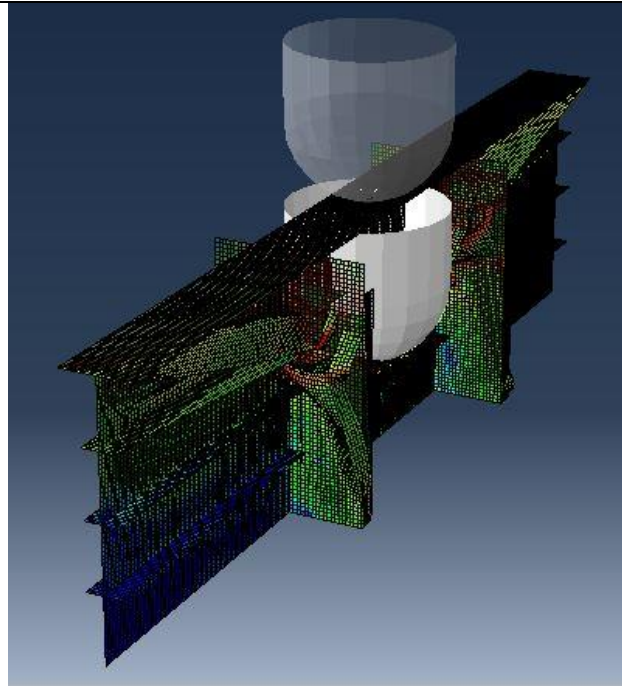




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΝΑΥΤΙΚΗ & ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ»



Μεταπτυχιακή εργασία

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ
ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ
ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ ΑΚΡΑΙΑ ΦΟΡΤΙΑ**

Δήμα Ασημίνα
Μηχανολόγος & Αεροναυπηγός Μηχανικός

Επιβλέπων:
Μανώλης Σαμουηλίδης
Καθηγητής

Αθήνα 2014

Υπάρχει κι ένας άλλος κόσμος.

Αλλά είναι μέσα σ' αυτόν εδώ.

Paul Eluard

Ευχαριστίες:

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Μανώλη Σαμουηλίδη για την καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας, οι υποδείξεις και οι συμβουλές του υπήρξαν ουσιαστικές και καθοριστικές με στόχο όχι μόνο το αποτέλεσμα αλλά και την ίδια τη διδακτική διαδικασία.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Γιάννη Μαρινάτο για τη βοήθεια του με το λογισμικό και για τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσε όποτε τον χρειάστηκα.

Ευχαριστώ τους γονείς μου Νίκο και Γεωργία που χωρίς αυτούς δε θα είχα τη δυνατότητα να προχωρήσω στις σπουδές μου και τέλος ευχαριστώ τον αδερφό μου Παναγιώτη που με προέτρεψε να ασχοληθώ με το αντικείμενο της ναυτικής τεχνολογίας.

Περιεχόμενα:

1	Εισαγωγή	1
2	Θεωρία	5
2.1	Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	5
2.2	Η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στην ανάλυση ναυπηγικών κατασκευών στη γραμμική και μη-γραμμική περιοχή	7
2.3	Η διακριτοποίηση της κατασκευής - το μέγεθος των στοιχείων	8
2.4	Η επιλογή του μοντέλου του υλικού.....	15
2.4.1	Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης / Μετατροπή της engineering καμπύλης σε true	15
2.4.2	Η καμπύλη του υλικού σε μεγάλες παραμορφώσεις	17
2.4.3	Strain Hardening - η επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης στην καμπύλη τάσης παραμόρφωσης	19
2.4.4	Η εξίσωση Cowper Symonds'	21
2.5	Τα φαινόμενα hourglassing, shear locking και volumetric locking	22
3	Το πείραμα	24
3.1	Το σενάριο της σύγκρουσης.....	24
3.2	Το μοντέλο του διπλού τοιχώματος του πλοίου.....	25
3.2.1	Σχηματική εικόνα του μοντέλου	25
3.2.2	Λεπτομέρειες του μοντέλου	25
3.2.3	Το μοντέλο του βολβού.....	28
3.3	Static Test	28
3.3.1	Η πειραματική διάταξη	28
3.3.2	Η πειραματική διαδικασία	30
3.4	Dynamic Test	30
3.4.1	Η πειραματική διάταξη	30
3.4.2	Η πειραματική διαδικασία	30
3.5	Οι ιδιότητες του υλικού	32
4	Το μοντέλο.....	37
4.1	Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε (Simulia Abaqus).....	37
4.2	Η κατασκευή του μοντέλου – Το μέγεθος των στοιχείων	38
5	Οι προσομοιώσεις	44
5.1	Static.....	44
5.1.1	Η επιλογή του μοντέλου του υλικού (καμπύλες) και οι διάφορες παράμετροι που εισήχθησαν	44
5.2	Dynamic.....	46

5.2.1	Η επιλογή του μοντέλου υλικού (καμπύλες – εξίσωση Cowper-Symonds') και οι διάφορες παράμετροι που εισήχθησαν	46
6	Τα αποτελέσματα (διαγράμματα – σύγκριση με τα πειραματικά).....	55
6.1	Static	55
6.1.1	Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για την προσομοίωση του Static Test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού πεπερασμένου στοιχείου κελύφους (S4R) 25mm58	
6.1.2	Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για την προσομοίωση του Static Test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού πεπερασμένου στοιχείου κελύφους (S4R) 12.5mm. 64	
6.2	Dynamic.....	69
6.2.1	Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα	80
6.2.2	Διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης για τις προσομοιώσεις των Dynamic tests. 94	
6.3	Ενεργειακός ισολογισμός.....	126
6.3.1	Ψευδοστατικές διεργασίες	126
6.3.2	Δυναμικές διεργασίες	128
7	Συμπεράσματα	137
7.1	Static Test	137
7.2	Dynamic Test	138
8	Βιβλιογραφία.....	148

Διαγράμματα:

Διάγραμμα 1: Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης χάλυβα για διάφορες ταχύτητες παραμόρφωσης (Jones 1989).....	20
Διάγραμμα 2: Οι engineering καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμια χάλυβα σε διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης. Το μήκος του δοκιμίου είναι 42 mm (Yu & Jones, 1989).....	21
Διάγραμμα 3: Τάση-παραμόρφωση εφελκυσμού.....	35
Διάγραμμα 4: Τάση-Παραμόρφωση για ταχύτητα παραμόρφωσης 0.7~1.2 sec ⁻¹	35
Διάγραμμα 5: Τάση-Παραμόρφωση για ταχύτητα παραμόρφωσης 4.8~7.8 sec ⁻¹	35
Διάγραμμα 6: Τάση-Παραμόρφωση για ταχύτητα παραμόρφωσης 86.4~90.4 sec ⁻¹	36
Διάγραμμα 7: Μηχανικές (engineering) καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης	44
Διάγραμμα 8: Πραγματικές (true) καμπύλες τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης.....	45
Διάγραμμα 9: Τάση–παραμόρφωση για ταχύτητα παραμόρφωσης 0.7~1.2sec ⁻¹	47
Διάγραμμα 10: Τάση – παραμόρφωση για ταχύτητα παραμόρφωσης 4.8~7.8sec ⁻¹	47
Διάγραμμα 11: Τάση – παραμόρφωση για ταχύτητα παραμόρφωσης 86.4~90.4sec ⁻¹	48
Διάγραμμα 12: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 7 mm.....	48
Διάγραμμα 13: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 8 mm.....	49
Διάγραμμα 14: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 10 mm.....	49

Διάγραμμα 15: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 7 mm και ταχύτητα παραμόρφωσης 0 και 7,6 sec ⁻¹	50
Διάγραμμα 16: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 8 mm και ταχύτητα παραμόρφωσης 0 και 7,6 sec ⁻¹	51
Διάγραμμα 17: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 10 mm και ταχύτητα παραμόρφωσης 0 και 7,6 sec ⁻¹	51
Διάγραμμα 18: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 7mm και ταχύτητα παραμόρφωσης 7.6 sec ⁻¹	52
Διάγραμμα 19: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 8 mm και ταχύτητα παραμόρφωσης 7.6 sec ⁻¹	52
Διάγραμμα 20: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 10 mm και ταχύτητα παραμόρφωσης 7.6 sec ⁻¹	53
Διάγραμμα 21: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Static test.....	55
Διάγραμμα 22: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Static test, προσομοιώσεις και πειραματική καμπύλη.....	58
Διάγραμμα 23: S _{mises} – PEEQ, Element: 222893, Static 25 mm.....	59
Διάγραμμα 24: S _{mises} – PEEQ, Element: 22739, Static 25 mm.....	59
Διάγραμμα 25: S _{mises} – PEEQ, Element: 25441, Static 25 mm.....	60
Διάγραμμα 26: S _{mises} – PEEQ, Element: 1457, Static 25 mm.....	60
Διάγραμμα 27: S _{mises} – PEEQ, Element: 19488, Static 25 mm.....	61
Διάγραμμα 28: S _{mises} – PEEQ, Element: 5927, Static 25 mm.....	61
Διάγραμμα 29: S _{mises} – PEEQ, Element: 91790, Static 12.5 mm.....	64
Διάγραμμα 30: S _{mises} – PEEQ, Element: 91193, Static 12.5 mm.....	65
Διάγραμμα 31: S _{mises} – PEEQ, Element: 5377, Static 12.5 mm.....	65
Διάγραμμα 32: S _{mises} – PEEQ, Element: 4756, Static 12.5 mm.....	66
Διάγραμμα 33: S _{mises} – PEEQ, Element: 78204, Static 12.5 mm.....	66
Διάγραμμα 34: S _{mises} – PEEQ, Element: 23881, Static 12.5 mm.....	67
Διάγραμμα 35: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test.....	71
Διάγραμμα 36: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις και πειραματική καμπύλη.....	78
Διάγραμμα 37: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις και πειραματική καμπύλη με πεπερασμένα στοιχεία πλευράς ~25 mm.....	79
Διάγραμμα 38: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις και πειραματική καμπύλη με πεπερασμένα στοιχεία πλευράς ~12.5 mm.....	82
Διάγραμμα 39: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις και πειραματική καμπύλη με πεπερασμένα στοιχεία πλευράς ~6.25 mm.....	85
Διάγραμμα 40: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης (0 sec ⁻¹ , 1 sec ⁻¹ , 7.6 sec ⁻¹ και 88.4 sec ⁻¹) και πειραματική καμπύλη.....	88
Διάγραμμα 41: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για δύο διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης (0 sec ⁻¹ και 7.6 sec ⁻¹) και πειραματική καμπύλη.....	90
Διάγραμμα 42: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μίας καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6 sec ⁻¹) χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το strain rate effect και πειραματική καμπύλη.....	91
Διάγραμμα 43: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις με μοντελοποίηση του υλικού σύμφωνα με την σχέση Cowper-Symonds' και πειραματική καμπύλη.....	93
Διάγραμμα 44: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 22893, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 25 mm.....	96
Διάγραμμα 45: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 22739, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 25 mm.....	98

Διάγραμμα 46: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 23271, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 25 mm.....	100
Διάγραμμα 47: Πάχος στοιχείου 8 mm, Element 25518, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 25 mm.....	102
Διάγραμμα 48: Πάχος στοιχείου 7 mm, Element 19488, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 25 mm.....	104
Διάγραμμα 49: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 91772, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 12.5 mm.....	107
Διάγραμμα 50: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 91193, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 12.5 mm.....	109
Διάγραμμα 51: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 93265, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 12.5 mm.....	111
Διάγραμμα 52: Πάχος στοιχείου 8 mm, Element 90319, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 12.5 mm.....	113
Διάγραμμα 53: Πάχος στοιχείου 7 mm, Element 78204, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 12.5 mm.....	116
Διάγραμμα 54: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 469821, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm.....	118
Διάγραμμα 55: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 370941, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm.....	119
Διάγραμμα 56: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 379154, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm.....	120
Διάγραμμα 57: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 379009, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm.....	121
Διάγραμμα 58: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 379009, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm.....	122
Διάγραμμα 59: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 367432, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm.....	124
Διάγραμμα 60: Πάχος στοιχείου 7 mm, Element 319888, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm.....	125
Διάγραμμα 61: Ενέργειες για την προσομοίωση Static 25.....	127
Διάγραμμα 62: Ενέργειες για την προσομοίωση Static 12.5 mm.....	127
Διάγραμμα 63: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 25 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης (0sec^{-1} , 1sec^{-1} , 7.6sec^{-1} και 88.4sec^{-1})....	130
Διάγραμμα 64: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 25 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για δύο ταχύτητες παραμόρφωσης (0sec^{-1} και 7.6sec^{-1}).....	130
Διάγραμμα 65: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 25 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6sec^{-1}).....	131
Διάγραμμα 66: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 25 mm με μοντελοποίηση του υλικού σύμφωνα με την σχέση Cowper-Symonds'.....	131
Διάγραμμα 67: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης (0sec^{-1} , 1sec^{-1} , 7.6sec^{-1} και 88.4sec^{-1}).....	132
Διάγραμμα 68: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για δύο ταχύτητες παραμόρφωσης (0sec^{-1} και 7.6sec^{-1}).....	132
Διάγραμμα 69: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6sec^{-1}).....	133

Διάγραμμα 70: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του <i>Dynamic test</i> με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm με μοντελοποίηση του υλικού σύμφωνα με την σχέση Cowper-Symonds'	133
Διάγραμμα 71: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του <i>Dynamic test</i> με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 6.25 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για δύο ταχύτητες παραμόρφωσης (0sec^{-1} και 7.6sec^{-1}).....	134
Διάγραμμα 72: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του <i>Dynamic test</i> με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6sec^{-1})	134
Διάγραμμα 73: Το ποσοστό της τεχνητής ενέργειας παραμόρφωσης ως προς την συνολική εσωτερική ενέργεια για όλες τις προσομοιώσεις του <i>Dynamic test</i>	135
Διάγραμμα 74: Η συνολική ενέργεια ETOTAL για όλες τις προσομοιώσεις του <i>Dynamic test</i>	136

Πίνακες:

Πίνακας 1: Αποτελέσματα εφελκυσμού, σημ. Gauge length = 50 mm.....	32
Πίνακας 2: Τα αποτελέσματα της δυναμικής καταπόνησης, σημ. Gauge length = 50 mm	34
Πίνακας 3: Οι θέσεις των elements για την προσομοίωση Static 25.....	62
Πίνακας 4: Οι θέσεις των elements για την προσομοίωση Static 12.5.....	68
Πίνακας 5: Maximum Artificial Strain Energy/Internal Energy %.....	135
Πίνακας 6: Οι δέκα διαφορετικές προσομοιώσεις του <i>Dynamic test</i> (με κόκκινο σημειώνονται οι μοντελοποιήσεις με σειρά στοιχείων που παρουσιάζουν υπερβολική παραμόρφωση και περιγράφεται παρακάτω)	139
Πίνακας 7: Λόγος μήκους πλευράς προς πάχος ελάσματος για κάθε ένα από τα τρία διαφορετικά μεγέθη πλευράς τετρακομβικού στοιχείου S4R.....	145

Εικόνες:

Εικόνα 1: Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες «οικογένειες» πεπερασμένων στοιχείων (Simulia, 2010).....	9
Εικόνα 2: Γραμμικό κυβικό στοιχείο, τετραγωνικό κυβικό στοιχείο και τροποποιημένο τετραεδρικό στοιχείο (Simulia, 2010).	10
Εικόνα 3: Η παραμόρφωση υλικού σε κάμψη.....	23
Εικόνα 4: Η παραμόρφωση ενός γραμμικού στοιχείου πλήρους ολοκλήρωσης σε κάμψη, το φαινόμενο shear locking	23
Εικόνα 5: Το σενάριο της σύγκρουσης	24
Εικόνα 6: Η σχηματική εικόνα του μοντέλου	25
Εικόνα 7(α): Το μοντέλο διπλού τοιχώματος πλοίου.....	26
Εικόνα 8: Το μοντέλο βολβού.....	28
Εικόνα 9: Η πειραματική διάταξη του Static Test.....	29
Εικόνα 10: Η πειραματική διάταξη του Dynamic Test.....	31
Εικόνα 11: Το δοκίμιο εφελκυσμού.....	32
Εικόνα 12: Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δυναμική καταπόνηση.	33
Εικόνα 13: Part-1	38
Εικόνα 14: Part 5-2.....	39
Εικόνα 15: Part 5-3.....	39
Εικόνα 16: Part 5-4.....	39
Εικόνα 17: Part-5.....	40
Εικόνα 18: bulbous bow.....	40
Εικόνα 19: Περιορισμοί βαθμών ελευθερίας	41
Εικόνα 20: Time Points, Static and Dynamic Test.....	41

Εικόνα 21: Mesh size 25 mm.....	42
Εικόνα 22: Mesh size 12.5 mm.....	43
Εικόνα 23: Mesh size 6.25 mm.....	43
Εικόνα 24: Δοκίμιο του πειράματος εφελκυσμού.....	44
Εικόνα 25: Δοκίμιο δυναμικής καταπόνησης.....	46
Εικόνα 26: το μοντέλου του βολβού.....	56
Εικόνα 27: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Static test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 25 mm.....	57
Εικόνα 28: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Static test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 12.5 mm.....	57
Εικόνα 29: Η πειραματική διάταξη του Dynamic test.....	70
Εικόνα 30: Τελικό παραμορφωμένο σχήμα της πειραματικής κατασκευής για διεύθυνση 900 mm (ASIS 1993).....	72
Εικόνα 31: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 25 mm (εισαγωγή και των τεσσάρων πραγματικών καμπύλων τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\varepsilon = 0\text{sec} - 1$, $\varepsilon = 1\text{sec} - 1$, $\varepsilon = 7.6\text{sec} - 1$ και $\varepsilon = 88.4\text{sec} - 1$).....	72
Εικόνα 32: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 12.5 mm (εισαγωγή και των τεσσάρων πραγματικών καμπύλων τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\varepsilon = 0\text{sec} - 1$, $\varepsilon = 1\text{sec} - 1$, $\varepsilon = 7.6\text{sec} - 1$ και $\varepsilon = 88.4\text{sec} - 1$).....	73
Εικόνα 33: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 25 mm (εισαγωγή των δύο πραγματικών καμπύλων τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\varepsilon = 0\text{sec} - 1$ και $\varepsilon = 7.6\text{sec} - 1$).....	73
Εικόνα 34: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 12.5 mm (εισαγωγή των δύο πραγματικών καμπύλων τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\varepsilon = 0\text{sec} - 1$ και $\varepsilon = 7.6\text{sec} - 1$).....	74
Εικόνα 35: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 6.25 mm (εισαγωγή των δύο πραγματικών καμπύλων τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\varepsilon = 0\text{sec} - 1$ και $\varepsilon = 7.6\text{sec} - 1$).....	74
Εικόνα 36: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 25 mm (εισαγωγή μίας πραγματικής καμπύλης τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\varepsilon = 7.6\text{sec} - 1$).....	75
Εικόνα 37: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 12.5 mm (εισαγωγή μίας πραγματικής καμπύλης τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\varepsilon = 7.6\text{sec} - 1$).....	75
Εικόνα 38: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 6.25 mm (εισαγωγή μίας πραγματικής καμπύλης τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\varepsilon = 7.6\text{sec} - 1$).....	76
Εικόνα 39: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 25 mm (Cowper-Symonds').....	76
Εικόνα 40: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 12.5 mm (Cowper-Symonds').....	77
Εικόνα 41: Βλ. Εικόνα 42.....	81
Εικόνα 42: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα της προσομοίωσης για το Dynamic test (πλευρά τετρακομβικού στοιχείου 25 mm) με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μίας καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6 sec^{-1} χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το strain rate effect).....	81
Εικόνα 43: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα της προσομοίωσης για το Dynamic test (πλευρά τετρακομβικού στοιχείου 12.5 mm) με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή δύο καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για δύο ταχύτητες παραμόρφωσης (0 και 7.6 sec^{-1}).....	84
Εικόνα 44: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα της προσομοίωσης για το Dynamic test (πλευρά τετρακομβικού στοιχείου 12.5 mm) με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μίας καμπύλης	

τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6 sec^{-1} χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το <i>strain rate effect</i>).....	84
Εικόνα 45: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα της προσομοίωσης για το <i>Dynamic test</i> (πλευρά τετρακομβικού στοιχείου 6.25 mm) με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή δύο καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για δύο ταχύτητες παραμόρφωσης (0 και 7.6 sec^{-1}).....	86
Εικόνα 46: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα της προσομοίωσης για το <i>Dynamic test</i> (πλευρά τετρακομβικού στοιχείου 6.25 mm) με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μίας καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6 sec^{-1} χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το <i>strain rate effect</i>).....	87
Εικόνα 47: TOMH A-A.....	144
Εικόνα 48: TOMH A-A του παραμορφωμένου σχήματος για μέγεθος πλευράς στοιχείου 25mm	144
Εικόνα 49: TOMH A-A του παραμορφωμένου σχήματος για μέγεθος πλευράς στοιχείου 12.5mm ...	145
Εικόνα 50: TOMH A-A του παραμορφωμένου σχήματος για μέγεθος πλευράς στοιχείου 6.25mm ...	145

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων έχει επεκταθεί και στην ανάλυση των ναυπηγικών κατασκευών. Το κυριότερο ζητούμενο σήμερα σε μία ανάλυση είναι οι επιλογές του μελετητή ώστε να οδηγηθεί σε ασφαλή συμπεράσματα. Οι ναυπηγικές κατασκευές έχουν συνήθως μεγάλο μέγεθος και ιδιαίτερη πολυπλοκότητα. Υπόκεινται σε ακραίες και συχνά τυχαίες φορτίσεις και χαρακτηρίζονται από μη-γραμμικές αποκρίσεις. Έτσι ο σύγχρονος μελετητής καλείται να μοντελοποιήσει με σαφήνεια ένα έντονα ασαφές πρόβλημα, να καθορίσει τις παραμέτρους που θα εισάγει και να αξιολογήσει τα αποτελέσματα.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση της επίδρασης του μοντέλου του επιλεχθέντος υλικού σε αποτελέσματα προσομοιώσεων και της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων αυτών σε παραμέτρους που αφορούν τη διακριτοποίηση της κατασκευής, δηλαδή το είδος, το μέγεθος των στοιχείων καθώς σε συνδυασμό με το μοντέλο του υλικού.

Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Simulia-Abaqus στο οποίο έγινε μοντελοποίηση ενισχυμένης λεπτότοιχης κατασκευής. Η κατασκευή αυτή φέρει εγκάρσια και διαμήκη ενισχυτικά και έχει κατάλληλες συνοριακές συνθήκες ώστε να προσομοιάζει πλευρική κατασκευή διπλότοιχου δεξαμενόπλοιου (double-hull tanker). Επίσης μοντελοποιήθηκε ημισφαιρικό άκαμπτο σώμα (rigid body) το οποίο κατά την προσομοίωση διεισδύει ψευδοστατικά, δηλαδή με χαμηλή σταθερή ταχύτητα και χωρίς την επίδραση σημαντικών αδρανειακών δυνάμεων, και κρουστικά στην λεπτότοιχη κατασκευή. Πρακτικά η προσομοίωση αναπαράγει τις συνθήκες σύγκρουσης δύο πλοίων σε κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις όταν ο βολβός τους ενός προσκρούει στα πλαϊνά του άλλου. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα που προέρχονται από διάταξη ίδιων διαστάσεων με αυτή του μοντέλου.

Τα αποτελέσματα προέρχονται από το Static test, όπου ημισφαιρικό μοντέλο βολβού πιέστηκε υδραυλικά στην λεπτότοιχη κατασκευή με χαμηλή ταχύτητα ώστε να θεωρείται αμελητέα η επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων και το

Dynamic test, όπου το μοντέλο βολβού αφέθηκε σε διαδοχικές ελεύθερες πτώσεις ώστε να προσκρούσει με ταχύτητα $9,7\text{ m/sec}$ και να επιτευχθεί η επιθυμητή μετατόπιση.

Αντίστοιχα και οι προσομοιώσεις που έγιναν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε αυτές που αναπαράγουν το ψευδοστατικό test και σε αυτές που αναπαράγουν το δυναμικό.

Οι διάφορες παράμετροι που διαφοροποιήθηκαν κατά την μοντελοποίηση της κατασκευής είναι το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων και το μοντέλο του υλικού. Το λογισμικό επιτρέπει κατά την μοντελοποίηση του υλικού την εισαγωγή καμπυλών τάσης παραμόρφωσης στη μη-γραμμική περιοχή του υλικού.

Για να ανακτηθούν οι ιδιότητες του υλικού, συμπεριλαμβανομένου και του φαινομένου της ευαισθησίας στην ταχύτητα παραμόρφωσης (strain rate effect), διεξήχθησαν πειράματα στατικής και δυναμικής καταπόνησης με δοκίμια όλων των χρησιμοποιούμενων παχών της κατασκευής. Οι «μηχανικές» καμπύλες που προέκυψαν (engineering) μετατράπηκαν σε «πραγματικές» (true).

Το λογισμικό επιτρέπει την εισαγωγή δεδομένων εξαρτημένων από την ταχύτητα παραμόρφωσης με στόχο την προσέγγιση του φαινομένου της δυναμικής σκλήρυνσης (strain rate effect). Συχνά όμως ο μελετητής δεν έχει στη διάθεση του πειραματικές καμπύλες τάσης παραμόρφωσης. Εναλλακτικά το φαινόμενο της σκλήρυνσης του υλικού όταν υπόκειται σε δυναμική φόρτιση μπορεί να προσεγγισθεί με την σχέση Cowper-Symonds' όπου το όριο διαρροής προσαυξάνεται με τον παράγοντα που φαίνεται:

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{P}}$$

Όπου σ_D = το όριο διαρροής δυναμικής καταπόνηση, σ_y = το όριο διαρροής, $\dot{\epsilon}$ = ρυθμός παραμόρφωσης και D, P = σταθερές του υλικού.

Οι δύο παράμετροι μοντελοποίησης αναλυτικότερα είναι:

- Το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων με διαφορετικά μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι με μέγεθος πλευράς $\sim 25 \text{ mm}$, $\sim 12,5 \text{ mm}$ και $\sim 6,25 \text{ mm}$, με λόγο μήκους πλευράς πεπερασμένου στοιχείου κελύφους προς πάχος $l_b/t_p = 2.5 \sim 3.6$, $1.3 \sim 1.8$, $0.6 \sim 0.9$ αντίστοιχα.
- Η μοντελοποίηση του υλικού (ναυπηγικού χάλυβα)
 Στις προσομοιώσεις των Static tests κατά την μοντελοποίηση του υλικού εισήχθησαν στο Abaqus καμπύλες τάσης παραμόρφωσης προερχόμενες από πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού, όπου τα δοκίμια ναυπηγικού χάλυβα ήταν ίδιου πάχους με αυτό των διαφόρων ελασμάτων της κατασκευής (7 mm , 8 mm και 10 mm).
 Αντίστοιχα στις προσομοιώσεις των Dynamic tests χρησιμοποιήθηκαν οι προηγούμενες καμπύλες (static) καθώς και οι πειραματικές καμπύλες δυναμικής καταπόνησης ώστε να ληφθεί σαν παράμετρος το φαινόμενο της δυναμικής σκλήρυνσης.
 Συνολικά οι καμπύλες για τα διάφορα πάχη ελασμάτων είναι τέσσερις ($\dot{\epsilon} = 0 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7,6 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 88,4 \text{ sec}^{-1}$).

Στο Static test η μοντελοποίηση του υλικού ήταν μονοσήμαντη σε αντίθεση με το Dynamic test όπου έγιναν οι ακόλουθες μοντελοποιήσεις υλικού:

- Μοντελοποίηση (1): εισήχθησαν τέσσερις καμπύλες ($\dot{\epsilon} = 0 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7,6 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 88,4 \text{ sec}^{-1}$) για τα διάφορα πάχη ελασμάτων της κατασκευής (7 mm , 8 mm και 10 mm).
- Μοντελοποίηση (2): εισήχθησαν δύο καμπύλες ($\dot{\epsilon} = 0 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7,6 \text{ sec}^{-1}$).
- Μοντελοποίηση (3): εισήχθη μία μόνο καμπύλη σαν να ήταν καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού και χωρίς τα δεδομένα να εξαρτώνται από την ταχύτητα παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7,6 \text{ sec}^{-1}$).
- Μοντελοποίηση (4): η επίδραση του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης στο όριο διαρροής προσεγγίστηκε με την εξίσωση των Cowper-Symonds'.

Η καμπύλη για την τιμή της ταχύτητας παραμόρφωσης ίση με 7.6 sec^{-1} , χρησιμοποιήθηκε γιατί μετά την πρώτη προσομοίωση, παρατηρήθηκε ότι η μέση ταχύτητα παραμόρφωσης είναι πιο κοντά σε αυτήν.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται εκτενώς στην παράγραφο 6 και γίνεται σύγκριση με τα πειραματικά όπου υπάρχουν. Οι καμπύλες που προέκυψαν σε διάφορα σημεία της κατασκευής παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα για όμοιες διακριτοποιήσεις και χωρίζονται σε:

- Καμπύλες συνολικής δύναμης – μετατόπισης
- Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης και ταχύτητας παραμόρφωσης - σε κοινό διάγραμμα
- Καμπύλες ενέργειας

Οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα συνοψίζονται στην παράγραφο 7.

2 ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μέθοδος προσεγγιστικής και αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων συνεχούς μέσου (μηχανικής στερεού, προβλημάτων πεδίου, μηχανικής ρευστών κ.λπ.) τυχαίας γεωμετρίας, οριακών συνθηκών και φορτίων. Βασίζεται στο συνδυασμό μεταβλητών μεθόδων και τοπικών προσεγγίσεων που ισχύουν σε περιορισμένη περιοχή του μέσου (πεπερασμένο στοιχείο) για τη διακριτοποίηση του προβλήματος. Επανάληψη της τοπικής διακριτοποίησης στον υπόλοιπο χώρο του μέσου καταλήγει στη διακριτοποίηση του προβλήματος και στην προσεγγιστική λύση με τεχνικές γραμμικής άλγεβρας. (Σαραβάνος, 2001)

Διακριτά και συνεχή συστήματα

Τα περισσότερα μηχανικά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε διακριτά και συνεχή. Τα διακριτά συστήματα είναι απλοποιήσεις συνεχών συστημάτων οπότε έχουν αρκετές ομοιότητες εκτός από διαφορές με τα συνεχή συστήματα.

Τα διακριτά συστήματα αποτελούν απλοποιήσεις συστημάτων συνεχούς μέσου. Η μορφολογία και η μακροσκοπική συμπεριφορά τους διευκολύνουν τη χρήση απλών στοιχείων για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς τους. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους είναι τα εξής:

- Τα στοιχεία του συστήματος έχουν διακριτή μορφή.
- Οι καταστατικές εξισώσεις που εκφράζουν τη συμπεριφορά κάθε στοιχείου είναι εκπεφρασμένες στους βαθμούς ελευθερίας και στις μηχανικές ιδιότητες του στοιχείου.
- Οι εξισώσεις ισορροπίας είναι διακριτές εξισώσεις με άγνωστες μεταβλητές τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος.
- Τα φορτία είναι διακριτά και εφαρμόζονται στους κόμβους των στοιχείων.
- Οι οριακές συνθήκες ή άλλοι περιορισμοί κίνησης έχουν διακριτή μορφή και εφαρμόζονται στους βαθμούς ελευθερίας.

Τα συνεχή συστήματα αποτελούν ακριβέστερη παρουσίαση του προβλήματος, εφόσον έχουν λιγότερες απλουστεύσεις/παραδοχές σε σχέση με την κατανομή και τη μακροσκοπική συμπεριφορά του μέσου. Τα κυριότερα σημεία όπου διαφέρουν με τα διακριτά ακολουθούν:

- Έχουν συνεχή κατανομή του μέσου στον όγκο του προβλήματος.
- Περιλαμβάνουν σειρά μεταβλητών οι οποίες είναι συνεχείς συναρτήσεις στο πεδίο του προβλήματος. Για παράδειγμα σε προβλήματα ελαστικών στερεών τέτοιες μεταβλητές είναι οι μετατοπίσεις u , οι τάσεις σ και οι παραμορφώσεις ε . για θερμικά προβλήματα οι μεταβλητές είναι η θερμοκρασία T , η ροή θερμότητας q και η κλίση στις θερμοκρασίας $\nabla(T)$.
- Οι καταστατικές εξισώσεις εκφράζονται τοπικά σε γραμμικές σχέσεις μεταξύ τάσεων-παραμορφώσεων (ελαστικό στερεό), θερμικής ροής – κλίσης παραμόρφωσης (θερμικό μέσο) κ.λπ.
- Υπάρχει συνεχής εφαρμογή οριακών συνθηκών ή εξωτερικών φορτίων στην επιφάνεια που περικλείει το συνεχές μέσο.

Τα προβλήματα αυτά εκφράζονται μαθηματικά σαν συστήματα πεπλεγμένων διαφορικών εξισώσεων που υπόκεινται στις οριακές συνθήκες του προβλήματος. Ακριβής λύση μπορεί να υπάρξει μόνο για απλές γεωμετρίες και συνοριακές συνθήκες.

Δυστυχώς τα περισσότερα προβλήματα πρακτικού ενδιαφέροντος περιλαμβάνουν πολύπλοκες γεωμετρίες, φορτίσεις και οριακές συνθήκες, συνεπώς δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής επίλυση και οι μελετητές καταφεύγουν σε προσεγγιστικές αριθμητικές μεθόδους. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method) είναι μία τέτοια μέθοδος.

2.2 Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Τη δεκαετία του 1950 έγινε εκτενής χρήση των αριθμητικών μεθόδων κυρίως στην αεροναυπηγική χωρίς να απουσιάζουν όμως και κάποιες μελέτες ναυπηγικών προβλημάτων. Πρώτοι οι Yuille και Wilson (1960) εξέτασαν την εγκάρσια αντοχή ενός πολεμικού πλοίου με τη μέθοδο της μητρικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα εξετάσθηκε η συμπεριφορά τμήματος της κατασκευής μεταξύ εγκάρσιων φρακτών σε τρεις διαστάσεις με σκοπό τον προσδιορισμό των εντατικών πεδίων και τελικά τη διαστασιολόγηση της κατασκευής. Παράλληλα με τη μελέτη έγινε και μια σειρά πειραμάτων με πρότυπο κλίμακας 1:3.

Μία αξιοσημείωτη πρώτη μελέτη με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έγινε το 1970 από τον Kendrick, ο οποίος μελέτησε την αντοχή των νέων τότε υπερδεξαμενόπλοιων. Επειδή στα πλοία αυτά, που είχαν κατασκευασθεί με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς των νηογνωμόνων, παρατηρήθηκαν προβλήματα αστοχιών στους εγκάρσιους νομείς έγιναν μελέτες της κατασκευής με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι οι ισχύουσες διαστάσεις για μικρότερα πλοία, προερχόμενες από ημι-εμπειρικές σχέσεις, ήταν ανεπαρκείς. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πειραματικά.

Από τις πρώτες αυτές μελέτες μέχρι τη σημερινή εκτενή χρήση της μεθόδου σε ναυπηγικά προβλήματα έχει σημειωθεί τεράστια πρόοδος η οποία οφείλεται στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η καθυστέρηση της εφαρμογής της μεθόδου στις ναυπηγικές κατασκευές οφείλεται κυρίως στο μέγεθος και την πολυπλοκότητά τους, στην αβεβαιότητα των εξωτερικών φορτίσεων και στη μη-γραμμικότητα της απόκρισης της μεταλλικής κατασκευής (Καρύδης, 2000).

Το βασικότερο λοιπόν ζητούμενο είναι η σωστή διακριτοποίηση της κατασκευής, η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Στην ανάλυση των συνεχών στερεών μπορούν να υπάρξουν δύο πηγές μη-γραμμικότητας, η μη-γραμμικότητα του υλικού και η γεωμετρική. Η πρώτη

προκύπτει όταν, για οποιοδήποτε λόγο, η σχέση τάσης-παραμόρφωσης που δίδεται από την καταστατική εξίσωση είναι μη-γραμμική, ενώ η δεύτερη προκύπτει όταν αλλαγές στη γεωμετρία (μεγάλες ή μικρές) έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην σχέση φορτίου-παραμόρφωσης. Η μη-γραμμικότητα του υλικού μπορεί να θεωρηθεί ότι περιλαμβάνει την τριβή επαφής, ενώ η γεωμετρική μη-γραμμικότητα περιλαμβάνει παραμορφώσεις εξαρτώμενες από συνοριακές συνθήκες και εξωτερικές φορτίσεις (Bonet & Wood, 1997).

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν ένα πλοίο σε ακραίες καταπόνησες, όπως μία θαλασσοταραχή ή μία σύγκρουση με άλλο πλοίο παρουσιάζει έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά και ο μελετητής καλείται να μοντελοποιήσει τις μη-γραμμικότητες τόσο του υλικού όσο και της γεωμετρίας και να αξιολογήσει τα αποτελέσματα.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση της επίδρασης του μοντέλου του επιλεχθέντος υλικού σε αποτελέσματα προσομοιώσεων και της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων αυτών σε παραμέτρους που αφορούν τη διακριτοποίηση της κατασκευής, δηλαδή το είδος, το μέγεθος των στοιχείων καθώς και το επιλεχθέν μοντέλο του υλικού.

2.3 Η ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ - ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το λογισμικό στο οποίο μοντελοποιήθηκε η κατασκευή και έγινε η προσομοίωση είναι το Simulia Abaqus. Το πακέτο προσφέρει πληθώρα πεπερασμένων στοιχείων ανάμεσα στα οποία καλείται ο χρήστης να επιλέξει αυτό που κρίνει κατάλληλο.

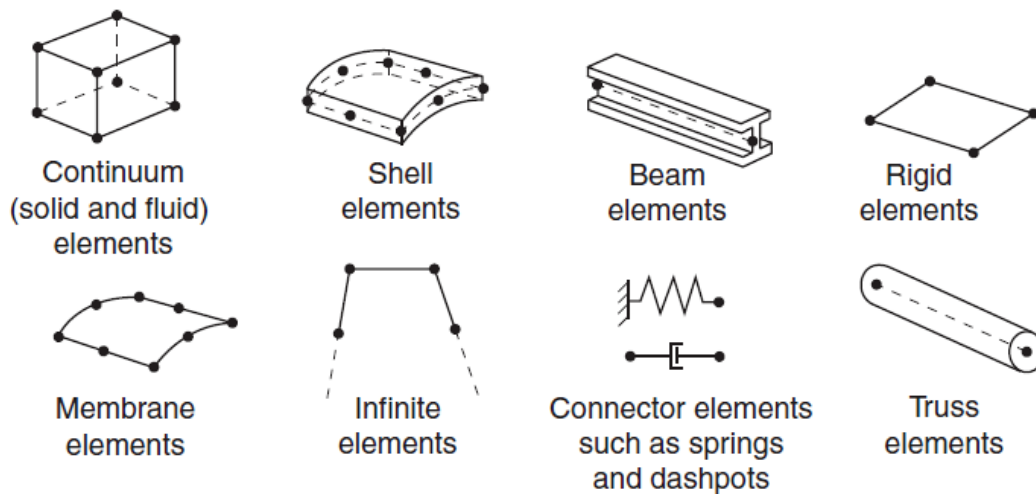
Υπάρχουν πέντε βασικά στοιχεία τα οποία μπορούν να χαρακτηρίσουν πλήρως ένα πεπερασμένο στοιχείο:

- Η «οικογένεια» στοιχείων στην οποία ανήκει
- Οι βαθμοί ελευθερίας (παράμετρος άμεσα συσχετισμένη με την «οικογένεια»)
- Ο αριθμός των κόμβων
- Η διαμόρφωση
- Η ολοκλήρωση

Κάθε στοιχείο στο Abaqus έχει ένα μοναδικό όνομα, όπως T2D2, S4R, C3D8I ή C3D8R. Το όνομα του στοιχείου αντιπροσωπεύει κάθε μία από τις πέντε παραμέτρους που προαναφέρθηκαν.

Η «οικογένεια»:

Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει τις «οικογένειες» στοιχείων που ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται στην ανάλυση τάσεων, επιπλέον τα συνεχή (ρευστά) στοιχεία χρησιμοποιούνται σε ανάλυση ρευστοδυναμικής. Μία από τις πιο σημαντικές διαφοροποιήσεις, μεταξύ των διαφορετικών «οικογενειών» στοιχείων είναι η γεωμετρία.



Εικόνα 1: Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες «οικογένειες» πεπερασμένων στοιχείων (Simulia, 2010)

Το πρώτο γράμμα από τα γράμματα του ονόματος ενός στοιχείου υποδεικνύει σε ποια «οικογένεια» στοιχείων ανήκει. Για παράδειγμα το S4R είναι ένα στοιχείο κελύφους (Shell element), το C3D8I είναι ένα συνεχές στοιχείο (continuum element).

Οι βαθμοί ελευθερίας:

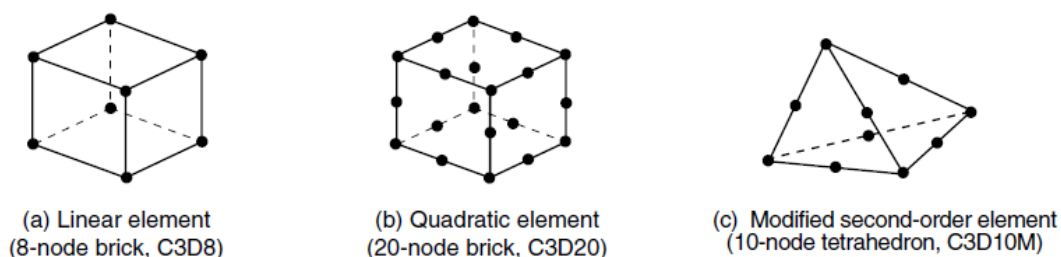
Οι βαθμοί ελευθερίας είναι οι θεμελιώδεις μεταβλητές που υπολογίζονται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Για μία προσομοίωση τάσης/παραμόρφωσης οι βαθμοί ελευθερίας είναι οι μετατοπίσεις και - για στοιχεία κελύφους, σωλήνες και στοιχεία δοκού - οι περιστροφές σε κάθε κόμβο.

Για ένα πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας οι βαθμοί ελευθερίας είναι η θερμοκρασία σε κάθε κόμβο. Η θερμική ανάλυση και η συνδυασμένη θερμική ανάλυση-ανάλυση τάσεων απαιτεί τη χρήση διαφορετικών στοιχείων σε σχέση με μία ανάλυση τάσεων απ' τη στιγμή που οι βαθμοί ελευθερίας διαφέρουν.

Ο αριθμός των κόμβων και η τάξη παρεμβολής:

Οι μετατοπίσεις και οι άλλοι βαθμοί ελευθερίας υπολογίζονται στους κόμβους των στοιχείων. Σε οποιοδήποτε άλλο σημείο μέσα στο στοιχείο, οι μετατοπίσεις υπολογίζονται με παρεμβολή στις αντίστοιχες κομβικές μετατοπίσεις. Συνήθως η τάξη της παρεμβολής καθορίζεται από τον αριθμό των κόμβων του στοιχείου.

- Σε στοιχεία με κόμβους τοποθετημένους μόνο στις γωνίες τους, όπως το 8-κομβικό κυβικό στοιχείο που φαίνεται στην Εικόνα 2 (a), γίνεται γραμμική παρεμβολή ή αλλιώς 1^{ης} τάξης.
- Στα στοιχεία Abaqus/Standard με κόμβους στο μέσον της πλευράς, όπως το 20-κομβικό κυβικό στοιχείο που φαίνεται στην Εικόνα 2 (b), χρησιμοποιείται τετραγωνική παρεμβολή ή παρεμβολή 2^{ης} τάξης.
- Σε τροποποιημένα τριγωνικά ή τετραεδρικά στοιχεία, όπως το 10-κομβικό τετραεδρικό στοιχείο που φαίνεται στην Εικόνα 2 (c), χρησιμοποιείται τροποποιημένη παρεμβολή 2^{ης} τάξης.



Εικόνα 2: Γραμμικό κυβικό στοιχείο, τετραγωνικό κυβικό στοιχείο και τροποποιημένο τετραεδρικό στοιχείο (Simulia, 2010).

Τυπικά ο αριθμός των κόμβων ενός στοιχείου εντοπίζεται στο όνομα του. Το 8-κομβικό κυβικό στοιχείο καλείται C3D8 και το 4-κομβικό στοιχείο κελύφους καλείται S4R.

Τα στοιχεία δοκού παίρνουν το όνομά τους με μία ελαφρώς διαφορετική σύμβαση: η τάξη της παρεμβολής αναγνωρίζεται στο όνομα. Τοιουτοτρόπως,

ένα στοιχείο δοκού τριών διαστάσεων 1^{ης} τάξεως καλείται B31, ενώ ένα 2^{ης} τάξης B32. Μία παρόμοια σύμβαση χρησιμοποιείται και στα αξονοσυμμετρικά στοιχεία κελύφους και μεμβράνης.

Η διαμόρφωση:

Η διαμόρφωση ενός στοιχείου αναφέρεται στο μαθηματικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για να καθοριστεί η συμπεριφορά του. Στην συμπεριφορά του υλικού κατά Lagrange το στοιχείο παραμορφώνεται καθώς παραμορφώνεται το υλικό, ενώ στη συμπεριφορά κατά Euler τα στοιχεία είναι σταθερά στο χώρο και το υλικό ρέει διαμέσου αυτών. Οι μέθοδοι κατά Euler χρησιμοποιούνται σε προσομοιώσεις ρευστομηχανικών προβλημάτων. Το Abaqus/Standard χρησιμοποιεί στοιχεία κατά Euler για προβλήματα μεταφοράς θερμότητας. Το Abaqus/Explicit επίσης προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης στοιχείων κατά Euler σε προβλήματα τάσης/παραμόρφωσης. Η δυνατότητα προσαρμοζόμενης διακριτοποίησης (adaptive mesh) στο Abaqus/Explicit συνδυάζει τα χαρακτηριστικά της αμιγώς κατά Lagrange ανάλυσης με αυτά της κατά Euler και επιτρέπει την κίνηση του στοιχείου ανεξάρτητα από την κίνηση του υλικού.

Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία τάσης/παραμόρφωσης βασίζονται στην ανάλυση κατά Lagrange. Στο Abaqus/Explicit τα κατά Euler διαμορφωμένα στοιχεία μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με τα κατά Lagrange στοιχεία μέσω επαφής.

Για να ενσωματώσει διαφορετικούς τύπους συμπεριφορών των διαφόρων «οικογενειών» στοιχείων το Abaqus περιλαμβάνει στοιχεία διαφόρων διαμορφώσεων. Για παράδειγμα, η «οικογένεια» συμβατικών στοιχείων κελύφους περιλαμβάνει τρία είδη: ένα κατάλληλο για ανάλυση κελύφους γενικά, ένα άλλο για λεπτά κελύφη και ένα άλλο για παχιά. Συμπληρωματικά, το Abaqus επίσης προσφέρει συνεχή στοιχεία κελύφους, τα οποία έχουν κομβικές συνδέσεις σαν τα συνεχή στοιχεία αλλά είναι διαμορφωμένα ώστε να μοντελοποιήσουν τη συμπεριφορά του κελύφους ακόμη και με τη χρήση ενός μόνο στοιχείου κατά πάχος.

Μερικές «οικογένειες» στοιχείων του Abaqus/Standard έχουν και κάποιες εναλλακτικές διαμορφώσεις εκτός των καθορισμένων. Τα στοιχεία αυτά αναγνωρίζονται από έναν επιπλέον χαρακτήρα στο τέλος του ονόματός τους. Για παράδειγμα οι «οικογένειες» συνεχών στοιχείων, δοκού και δικτυώματος

έχουν «μέλη» με υβριδική διαμόρφωση (ώστε να ανταποκριθούν σε μη συμπίεστές ή μη εκτατές συμπεριφορές), αυτά στα στοιχεία αναγνωρίζονται από το λατινικό H στο τέλος του ονόματός τους (C3D8H or B31H).

Το Abaqus/Standard χρησιμοποιεί το συγκεντρωτικό μοντέλο μάζας για στοιχεία χαμηλής τάξης, ενώ το Abaqus/Explicit χρησιμοποιεί το συγκεντρωτικό μοντέλο μάζας για όλα τα στοιχεία. Σαν συμπέρασμα οι δεύτερες ροπές αδράνειας μπορούν να εξαχθούν από τις θεωρητικές τιμές, ειδικά για αραιά πλέγματα.

Το Abaqus/CFD χρησιμοποιεί υβριδικά στοιχεία για να παρακάμψει προβλήματα αστάθειας για ασυμπίεστη ροή. Το Abaqus/CFD επίσης επιτρέπει την προσθήκη βαθμών ελευθερίας με βάση διαδικαστικές ρυθμίσεις όπως η προαιρετική εξίσωση ενέργειας και μοντέλα τύρβης.

Η ολοκλήρωση:

Το Abaqus χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για την ολοκλήρωση διαφόρων ποσοτήτων μέσα στον όγκο του εκάστοτε στοιχείου, ώστε να επιτρέπει την γενικευμένη συμπεριφορά του υλικού.

Χρησιμοποιώντας την ολοκλήρωση κατά Gauss σε τέσσερα σημεία για τα περισσότερα στοιχεία, αξιολογείται η απόκριση του υλικού σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης σε όλα τα στοιχεία. Κάποια συνεχή στοιχεία επιδέχονται πλήρη ή μειωμένη ολοκλήρωση, μια επιλογή που μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ακρίβεια του στοιχείου για δεδομένο πρόβλημα.

Το Abaqus χρησιμοποιεί το γράμμα R στο τέλος του στοιχείου για να υποδείξει τα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης. Για παράδειγμα, το CAX4R είναι ένα 4-κομβικό, μειωμένης ολοκλήρωσης, αξονοσυμμετρικό, στερεό στοιχείο.

Οι ιδιότητες των στοιχείων κελύφους, σωλήνα και δοκού μπορούν να καθοριστούν σαν ιδιότητες γενικού πεδίου ή σε κάθε διατομή του στοιχείου μπορεί να γίνει αριθμητική ολοκλήρωση ώστε μη-γραμμικές αποκρίσεις να παρακολουθούνται με ακρίβεια εάν κριθεί απαραίτητο.

Επιπλέον, μπορεί να καθοριστεί ένα σύνθετο τμήμα με διαστρωμάτωση για κελύφη και τρισδιάστατα κυβικά στοιχεία, στο Abaqus/Standard, με διαφορετικά υλικά για κάθε στρώμα μέσα στο τμήμα (Simulia, 2010).

Η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων απαιτεί κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής αλλά και των ιδιοτήτων των στοιχείων που προαναφέρθηκαν. Η επιλογή μεταξύ στοιχείου-ελάσματος και στοιχείου-κελύφους για εκτεταμένες κατασκευές δεν είναι πάντοτε ξεκάθαρη, ειδικά σε περιπτώσεις που προκύπτει κάμψη. Στα μεμβρανικά στοιχεία-ελάσματα δε λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της τάσης κατά το πάχος του ελάσματος. Η παραδοχή αυτή ισχύει εφόσον το πάχος είναι μικρότερο των άλλων διαστάσεων. Στην περίπτωση των δοχείων και των κυλινδρικών διατομών, απαιτούνται στοιχεία-κελύφη όταν $r_o/t > 10$, όπου r_o είναι η εξωτερική ακτίνα και t είναι το πάχος. Εάν $r_o/t \leq 10$, πρέπει να χρησιμοποιούνται στοιχεία κελύφη μεγάλου πάχους ή τρισδιάστατα στοιχεία. Γενικά, τα στοιχεία-ελάσματα χρησιμοποιούνται όταν $b/t > 10$, όπου b είναι η μικρότερη διάσταση του στοιχείου.

Εκτός όμως της μορφής των στοιχείων ανακύπτουν και άλλα εξ' ίσου σημαντικά θέματα όπως ο αριθμός και οι θέσεις των κόμβων σε κάθε στοιχείο, καθώς επίσης και οι τρόποι παραμόρφωσης των στοιχείων, που καθορίζονται από τα πεδία μετατοπίσεων στα οποία θεμελιώνεται η συμπεριφορά τους. Το τελευταίο ζήτημα έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς ορίζει το πως μπορεί και πως δεν μπορεί να συμπεριφερθεί ένα συγκεκριμένο στοιχείο. Όσον αφορά τις θέσεις των κόμβων, γενικά μπορούμε να πούμε ότι για εκτεταμένα στοιχεία, (ελάσματα, κελύφη), όταν υπάρχουν κόμβοι στα σημεία που διχοτομούν τις πλευρές καθώς επίσης και στο εσωτερικό, βελτιώνεται η συμπεριφορά τους και δεν επηρεάζονται από μεγάλους λόγους πλευρών ή οξείες (αμβλείες) γωνίες.

Μετά την επιλογή της «οικογένειας» στοιχείων θα πρέπει να καθοριστεί η διάταξη των κόμβων που ταιριάζει με τα στοιχεία που επιλέχθηκαν.

Τα βασικότερα σημεία που ελήφθησαν υπ' όψη στην παρούσα εργασία ακολουθούν:

- Κατά κανόνα, απαιτείται πιο πυκνό πλέγμα κατά την ανάλυση των τάσεων απ' ότι για την ανάλυση των πεδίων των μετατοπίσεων.

- Θέτουμε κόμβους στα σημεία στήριξης, στα σημεία επιβολής φορτίου και σε άλλα σημεία όπου απαιτούνται αποτελέσματα όπως π.χ. μετατοπίσεις, θερμοκρασία κ.λπ.
- Όπου είναι εφικτό, χρησιμοποιούμε πλέγμα σταθερών ισαποστάσεων μεταξύ των κόμβων. Κατά τη μεταβολή των ισαποστάσεων δεν θα πρέπει να υπερδιπλασιάζονται ή να υποδιπλασιάζονται οι αποστάσεις των κόμβων.
- Όταν χρησιμοποιούνται στοιχεία-ελάσματα ή στοιχεία-κελύφη, προτιμώνται τα αντίστοιχα τετράπλευρα, διότι έχουν περισσότερη ακρίβεια από τα τριγωνικά, η χρήση των οποίων πρέπει να περιορίζεται σε μεταβατικές περιοχές του πλέγματος.
- Στα τριγωνικά και τετράπλευρα στοιχεία, ο λόγος πλευρών θα πρέπει να πλησιάζει τη μονάδα, όσο αυτό είναι εφικτό. Γενικά επιτρέπονται λόγοι πλευρών μικρότεροι του 3.
- Κατά την αναπαράσταση καμπύλων επιφανειών επιτρέπεται η χρήση επίπεδων στοιχείων, η γωνία όμως μεταξύ γειτονικών στοιχείων δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τις 15° . Στα στοιχεία-ελάσματα οι κόμβοι θα πρέπει να είναι στο ίδιο επίπεδο.
- Τα στοιχεία δεν θα πρέπει να εκτείνονται εκατέρωθεν των ασυνεχειών ή μεταβολών πάχους. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτούνται περισσότεροι κόμβοι και μικρότερα στοιχεία.
- Τα επίπεδα στοιχεία-ελάσματα δεν διαθέτουν στρεπτική ακαμψία στο επίπεδο του ελάσματος. Για να ληφθεί υπόψη η στρέψη στο επίπεδο ενός επίπεδου ελάσματος θα πρέπει να περιορισθούν οι βαθμοί ελευθερίας περιστροφής στο επίπεδο του ελάσματος (Καρύδης, 2000).

Η διακριτοποίηση και η μοντελοποίηση μιας κατασκευής αποτελούν πρόκληση για το μελετητή. Μια σημαντική απόφαση είναι η επιλογή του μεγέθους των στοιχείων. Η διακριτοποίηση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο αραιή με στόχο τη μείωση του υπολογιστικού κόστους, ωστόσο, μία διακριτοποίηση με λίγα στοιχεία θα επηρεάσει τον τρόπο αναδίπλωσης και την ορθή πρόβλεψη αστοχίας. Η χρήση εξαιρετικά πυκνού πλέγματος θα πρέπει να αποφεύγεται εάν η επίδραση στην ανοχή και στην κατανομή της ενέργειας είναι οριακή. Ο Paik (2007) πρότεινε μία πρακτική τεχνική καθορισμού του μεγέθους στοιχείων,

η οποία βασίζεται στο μήκος αναδίπλωσης και είναι η χρήση οχτώ στοιχείων ανά μισό μήκος δίπλωσης. Οι Törnqvist και Simonsen (2004) πρότειναν μία προσέγγιση του λόγου μήκους στοιχείου προς πάχος (l_e/t_p) γύρω στο 5 για ακρίβεια στο πεδίο τάσεων και παραμορφώσεων. Οι Alsos και Amdahl (2007) χρησιμοποίησαν ένα λόγο μεγέθους στοιχείου προς πάχος $l_e/t_p = 10$ με στόχο την πρόβλεψη της αστοχίας, ο οποίος είχε ως αποτέλεσμα σταθερή εσωτερική ενέργεια (Sabril, 2013).

2.4 Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Η παρούσα διπλωματική στοχεύει στη διερεύνηση της επίδρασης του μοντέλου του επιλεγθέντος υλικού σε αποτελέσματα προσομοιώσεων και της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων αυτών σε παραμέτρους που αφορούν τη διακριτοποίηση της κατασκευής, δηλαδή το είδος, το μέγεθος των στοιχείων καθώς και το μοντέλο του υλικού.

Για να επιτευχθεί μία προσομοίωση με ρεαλιστικά αποτελέσματα στη μη-γραμμική περιοχή του υλικού, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο ναυπηγικός χάλυβας, απαιτείται σωστή μοντελοποίηση του υλικού.

2.4.1 Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης / Μετατροπή της engineering καμπύλης σε true

Η παραμόρφωση e περιγράφει ποσοτικά το βαθμό παραμόρφωσης ενός σώματος. Μετρείται συνήθως με εξτενσιόμετρα. Για μονοαξονική καταπόνηση,

δίδεται από τον τύπο: $\varepsilon_{eng} = \frac{L_f - L_0}{L_0}$

Όπου: $L_0 =$ το αρχικό μήκος του παραμορφωμένου δοκιμίου

$L_f =$ το μήκος του παραμορφωμένου δοκιμίου

Αυτή η παραμόρφωση χαρακτηρίζεται ως μηχανική (engineering) ή συμβατική. Με βάση αυτό τον ορισμό, αν ένα δείγμα επιμηκυνθεί μέχρις ότου το $L_f = 2L_0$, η εφελκυστική μηχανική παραμόρφωση θα ήταν 100%. Απ' την άλλη, αν ένα δοκίμιο συμπιεστεί μέχρις ότου το $L_f = 0$, η μηχανική παραμόρφωση συμπίεσης

θα είναι πάλι 100%. Αυτά τα ακραία παραδείγματα δείχνουν ότι για υψηλές παραμορφώσεις ο παραπάνω ορισμός δεν έχει νόημα.

Στην ελαστική περιοχή, οι τάσεις ορίζονται μονοσήμαντα από την τελική παραμόρφωση του υλικού, άσχετα από το πώς έχει επιτευχθεί αυτή. Στην πράξη, η παραμόρφωση περιέχει μη-αντιστρεπτές διαδικασίες και η πλαστική ανάλυση πρέπει να εξετάζει τις διαδοχικές καταστάσεις μέχρι την τελική. Για να επιτευχθεί αυτό, η συνολική παραμόρφωση χωρίζεται σε μικρά διαστήματα. Στην περίπτωση της μονοαξονικής καταπόνησης, dL είναι η στοιχειώδης προσαύξηση στο μήκος του δοκιμίου και L το μήκος μέτρησης κατά την έναρξη της εν λόγω προσαύξησης. Εν συνεχεία η αντίστοιχη παραμόρφωση γίνεται:

$d\varepsilon = \frac{dL}{L}$ και η συνολική παραμόρφωση για αλλαγή του μήκους από L_0 σε L_f :

$$\varepsilon_{true} = \int_0^\varepsilon d\varepsilon = \int_{L_0}^{L_f} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_f}{L_0}$$

Η παραμόρφωση που ορίζεται από την παραπάνω εξίσωση είναι η πραγματική παραμόρφωση (true). Αποτελεί έναν καταλληλότερο ορισμό της παραμόρφωσης και χρησιμοποιείται για αναλύσεις μεγάλων παραμορφώσεων. Στην περίπτωση συμπίεσης ενός δοκιμίου σε πάχος σχεδόν μηδενικό προκύπτει:

$$\varepsilon_{L_f \rightarrow 0} = \lim_{L_f \rightarrow 0} \left(\ln \frac{L_f}{L_0} \right) \rightarrow -\infty$$

Αποτέλεσμα πιο κοντά στην πραγματικότητα από αυτό που εξάγεται απ' την εξίσωση του ορισμού.

Η true παραμόρφωση με την engineering συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng})$$

Ένα στερεό παραμορφώνεται υπό την επίδραση εφαρμοζόμενου φορτίου. Εκπεφρασμένο σε δύναμη ανά μονάδα επιφανείας της διατομής προκύπτει η τάση s . Για ομοιόμορφη παραμόρφωση μπορεί να οριστεί σαν:

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0}$$

Όπου: F = η εφαρμοζόμενη δύναμη κάθετα στη διατομή

A_0 = η αρχική επιφάνεια διατομής

Η τάση αυτή, κατ' αναλογία ονομάζεται μηχανική (engineering). Εάν η μείωση της διατομής, λόγω παραμόρφωσης, είναι μεγάλη, η τάση engineering δεν είναι η κατάλληλη. Για παράδειγμα αποτυγχάνει να προβλέψει την σκλήρυνση λόγω ταχύτητας παραμόρφωσης, απλά λόγω της χρήσης της αρχικής σταθερής επιφάνειας διατομής A_0 . Ένας πιο ρεαλιστικός ορισμός της τάσης οφείλει να ενσωματώνει τη στιγμιαία επιφάνεια διατομής A .

$$\sigma_{true} = \frac{F}{A}$$

Ο ορισμός της engineering τάσης σ , βασίζεται στη στιγμιαία παραμόρφωση του υλικού και καλείται πραγματική τάση (true). Αν κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης ο όγκος του δοκιμίου διατηρείται, δηλαδή εάν: $AL = A_0F_0 = A_fF_f$, η true τάση μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της engineering με τη σχέση:

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon_{eng})$$

(Ling, 1996)

2.4.2 Η καμπύλη του υλικού σε μεγάλες παραμορφώσεις

Οι engineering καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης είναι κατάλληλες μόνο για μικρές παραμορφώσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι engineering και οι true καμπύλες συμπίπτουν λογικών ορίων. Για μεγάλες παραμορφώσεις, δηλαδή μεγαλύτερες του 1%, είναι ορθότερο να χρησιμοποιούνται οι true τάσεις-παραμορφώσεις. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η εξίσωση $\sigma = \frac{F}{A}$, ισχύει μόνο για ομοιόμορφη παραμόρφωση, δηλαδή η τάση σε κάθε σημείο της διατομής είναι ίδια. Για την περίπτωση της ανομοιόμορφης παραμόρφωσης η τάση ορίζεται ως: $\sigma_{true} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta F}{\Delta A} \right)$

Λόγω της δυσκολίας μέτρησης των ΔF και ΔA ανεξάρτητα, η παραπάνω εξίσωση χρησιμεύει μόνο ως ορισμός και έχει θεωρητική αξία. Αυτό συνεπάγεται ότι η τάση σ μπορεί να εξαχθεί απευθείας για ομοιόμορφη παραμόρφωση μετρώντας τη δύναμη και την αντίστοιχη επιφάνεια διατομής. Όταν η παραμόρφωση παύει να είναι ομοιόμορφη μπορεί να μετρηθεί μόνο η μέση τάση και δεν μπορεί να καθοριστεί η κατανομή της τάσης πειραματικά. Αυτή είναι και η βασική αιτία των προβλημάτων που ανακύπτουν στην προσπάθεια υπολογισμού της true τάσης μετά τη διαρροή (Ling, 1996).

Σε όλες τις εναλλακτικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν, το υλικό που μοντελοποιήθηκε είναι ο ναυπηγικός χάλυβας με ιστροπικές πλαστικές ιδιότητες. Οι μηχανικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης (engineering) για τα δοκίμια αντίστοιχου πάχους με αυτά της πειραματικής κατασκευής (διαγράμματα 7, 9, 10 και 11 ενότητες 5.1.1 και 5.2.1), προήλθαν από πειράματα εφελκυσμού και δυναμικής καταπόνησης.

Οι true καμπύλες καθορίστηκαν σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία. Μέχρι το σημείο όπου ξεκινά ο λαιμός, το οποίο υποθετικά προκύπτει στο μέγιστο φορτίο ή στη μέγιστη τάση των engineering καμπύλων, εξήχθησαν οι ισοδύναμες true καμπύλες με την απλή μετατροπή των engineering καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης σε true-λογαριθμικές, υιοθετώντας την έννοια του αμετάβλητου όγκου. Έτσι προκύπτουν οι σχέσεις που προαναφέρθηκαν:

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon_{eng})$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng})$$

Όπου σ_{eng} και ε_{eng} είναι οι engineering μεταβλητές της τάσης και της συνολικής παραμόρφωσης όπως προκύπτουν από τα πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού. Η συνεισφορά των ελαστικών παραμορφώσεων δεν είναι σημαντική στην παρούσα ανάλυση, οπότε αγνοούνται. Ωστόσο, οι true πλαστικές παραμορφώσεις ε_{pl} υπολογίζονται αν απ' τη συνολική true παραμόρφωση αφαιρεθεί η true πλαστική παραμόρφωση, η οποία είναι:

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E}$$

Όπου $E =$ το μέτρο ελαστικότητας κάθε δοκιμίου.

Μετά τη δημιουργία λαιμού το υλικό θεωρείται πλήρως πλαστικό. Όπου:

$$\sigma_{eq} = \sigma_u \text{ για } \varepsilon_{eq} \geq \varepsilon_u$$

Όπου οι σ_{eq} και η ε_{eq} είναι οι true ισοδύναμες τάσεις κατά Von Misses, ενώ οι σ_u και ε_u είναι οι true τιμές της τάσης και της πλαστικής παραμόρφωσης μετά τη δημιουργία λαιμού (Samuelides & Marinatos, 2013).

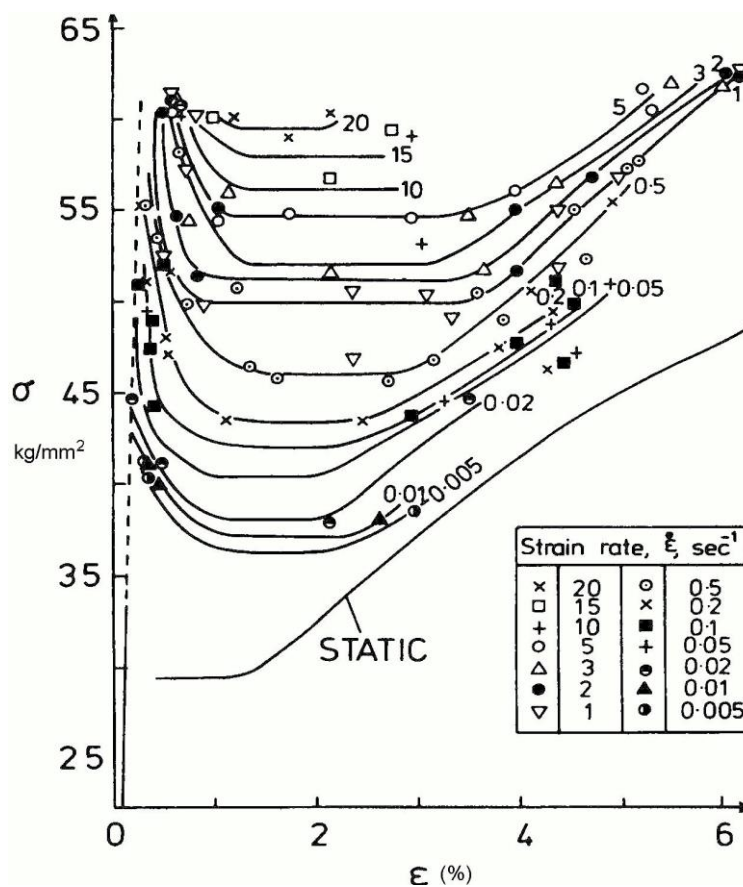
2.4.3 Strain Hardening - η επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης στην καμπύλη τάσης παραμόρφωσης

Όταν ένα μέταλλο παραμορφώνεται πλαστικά, η αντίσταση του σε περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται strain hardening effect ή σκλήρυνση λόγω επίδρασης της ταχύτητας παραμόρφωσης. Κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης μεταβάλλονται τόσο η πυκνότητα όσο και η κατανομή των αταξιών (του υλικού). Η πυκνότητα των αταξιών αυξάνεται ραγδαία με την ενεργοποίηση πηγών αταξιών ενώ η αλληλεπίδραση και οι αντιδράσεις μεταξύ των αταξιών, που προκύπτουν από την πολλαπλή ολίσθηση, οδηγούν σε εμπόδιο της πλαστικής παραμόρφωσης και μείωση της πυκνότητας των κινητών αταξιών, δηλαδή αυτών που μπορεί να συνεισφέρουν στην πλαστική παραμόρφωση. Για τη συνέχιση της παραμόρφωσης απαιτείται η εφαρμογή μεγαλύτερης μηχανικής τάσεως και έτσι προκύπτει η σκλήρυνση. Η πυκνότητα και η κατανομή των αταξιών εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως η κρυσταλλική δομή, η θερμοκρασία και η ταχύτητα παραμόρφωσης. Το φαινόμενο είναι σύνθετο και είναι φυσικό να μην υπάρχει ενιαία θεωρία (Χαϊδεμενόπουλος, 2007).

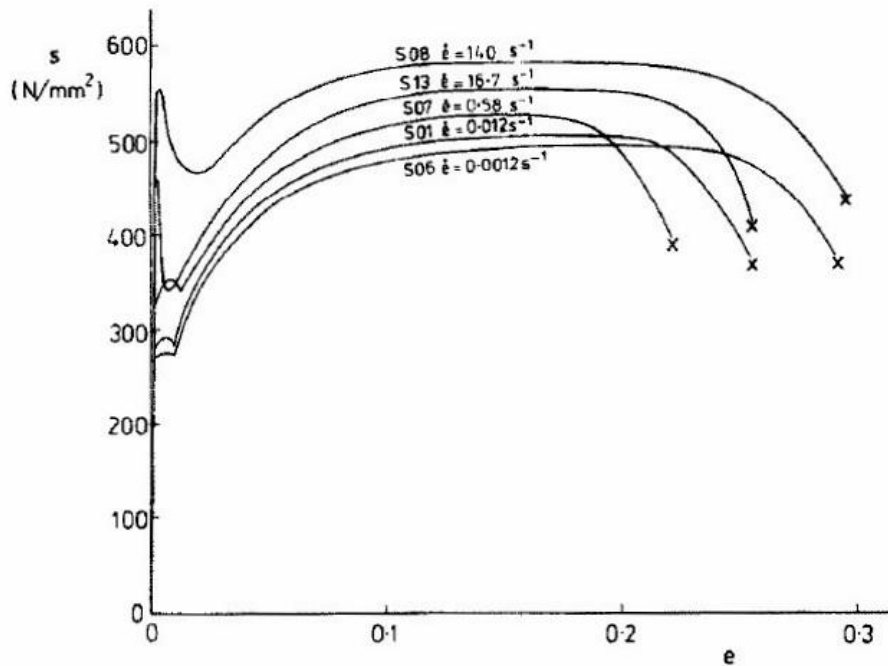
Όταν ένα υλικό υπόκειται σε πολυαξονικό εφελκυσμό μέχρι τη διαρροή και μετά αποφορτίζεται και ξαναφορτίζεται σε θλίψη, η τάση διαρροής σε θλίψη είναι μικρότερη από την ισοδύναμη τάση σε εφελκυσμό. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *φαινόμενο Bauschinger* και συμβαίνει λόγω παραμενουσών τάσεων μετά το άνω όριο διαρροής. Αυτές οι παραμενουσες τάσεις προστίθενται στις θλιπτικές τάσεις ούτως ώστε το κάτω όριο διαρροής να γίνει πιο χαμηλό (Becker, 1992). Ωστόσο, η επίδραση του φαινομένου Bauschinger συνήθως

αγνοείται στη θεωρία πλαστικότητας και έτσι γίνεται η παραδοχή ότι το όριο ροής είναι το ίδιο σε εφελκυσμό και θλίψη.

Είναι γνωστό ότι το όριο διαρροής του χάλυβα είναι πολύ ευαίσθητο στην ταχύτητα παραμόρφωσης. Η εικόνα δείχνει ένα παράδειγμα καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα θερμής εξέλασης για διάφορες ταχύτητες παραμόρφωσης (Jones 1989). Στα διαγράμματα 1 και 2 φαίνεται ότι το όριο διαρροής αυξάνει για αυξανόμενες ταχύτητες παραμόρφωσης. Το αλουμίνιο, σε αντίθεση με τον χάλυβα, όπως αναφέρει ο Jones, είναι πρακτικά ανεπηρέαστο στις μεταβολές της ταχύτητας παραμόρφωσης (Zhang, 1999).



Διάγραμμα 1: Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης χάλυβα για διάφορες ταχύτητες παραμόρφωσης (Jones 1989)



Διάγραμμα 2: Οι engineering καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμια χάλυβα σε διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης. Το μήκος του δοκιμίου είναι 42 mm (Yu & Jones, 1989)

2.4.4 Η εξίσωση Cowper Symonds'

Υπάρχουν πολλά εμπειρικά μοντέλα που μπορούν να περιγράψουν τη συμπεριφορά ενός υλικού σε υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης όπως για παράδειγμα το μοντέλο Johnson Cook, Cowper-Symonds', Krupkowsky και άλλα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Cowper-Symonds' ως ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα δεδομένου ότι υπάρχει ως συνάρτηση σε αρκετούς κώδικες πεπερασμένων στοιχείων δυναμικής ανάλυσης.

Το μοντέλο των Cowper-Symonds' περιγράφει την μεταβολή του ορίου διαρροής σε σχέση με τον ρυθμό παραμόρφωσης όπως φαίνεται στην εξίσωση που ακολουθεί, όπου σ_n είναι το μεταβαλλόμενο όριο διαρροής σε σχέση με την ταχύτητα παραμόρφωσης $\dot{\epsilon}$ και σ_y το όριο διαρροής σε ψευδοστατική φόρτιση. Τέλος P και D είναι σταθερές του υλικού:

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{P}}$$

2.5 ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ HOURGLASSING, SHEAR LOCKING ΚΑΙ VOLUMETRIC LOCKING

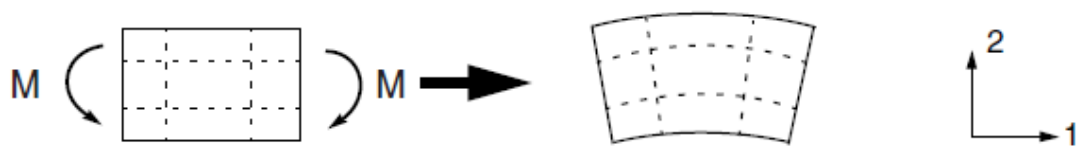
Το φαινόμενο hourglassing αποτελεί πρόβλημα σε πεπερασμένα στοιχεία πρώτης τάξης, μειωμένης ολοκλήρωσης (CPS4R, CAX4R, C3D8R, κ.λπ.) σε αναλύσεις τάσεων/μετατοπίσεων. Τα συγκεκριμένα στοιχεία, αφού έχουν ένα σημείο ολοκλήρωσης, είναι πιθανό να παραμορφωθούν με τέτοιο τρόπο ώστε οι υπολογισμένες παραμορφώσεις στο σημείο ολοκλήρωσης να είναι μηδενικές.

Τα στοιχεία πρώτης τάξης μειωμένης ολοκλήρωσης στο Abaqus περιλαμβάνουν έλεγχο του φαινομένου, αλλά πρέπει να χρησιμοποιούνται σε, μέσα σε λογικά πλαίσια, «πυκνά» πλέγματα. Το φαινόμενο hourglassing μπορεί να περιορισθεί με κατανομή των σημειακών φορτίων και των συνοριακών συνθηκών σε έναν αριθμό γειτονικών κόμβων (Simulia, 2010).

Τα στοιχεία πλήρους ολοκλήρωσης στο Abaqus/Standard και στο Abaqus/Explicit δεν υπόκεινται σε hourglassing αλλά μπορεί να εμφανίσουν «κλείδωμα», είτε «διατμητικό κλείδωμα» (shear locking) είτε «ογκομετρικό κλείδωμα» (volumetric locking). Το φαινόμενο shear locking προκύπτει σε στοιχεία πρώτης τάξης, πλήρους ολοκλήρωσης (CPS4, CPE4, C3D8, κ.λπ.) που υπόκεινται σε κάμψη. Η αριθμητική ολοκλήρωση των στοιχείων δημιουργεί διατμητικές τάσεις οι οποίες στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν και έτσι καλούνται παρασιτική διάτμηση. Οπότε αυτά τα στοιχεία είναι δύσκαμπτα και συγκεκριμένα εάν το μήκος του στοιχείου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους ή μεγαλύτερης με αυτό του πάχους τοιχώματος.

Το «ογκομετρικό κλείδωμα» προκύπτει σε στοιχεία πλήρους ολοκλήρωσης όταν το υλικό συμπεριφέρεται σαν ασυμπίεστο. Οι παρασιτικές τάσεις πίεσης αναπτύσσονται στα σημεία ολοκλήρωσης, κάνοντας το στοιχείο ανεπηρέαστο σε μεταβολές που θα έπρεπε να επηρεάσουν τον όγκο του. Αν τα υλικά συμπεριφέρονται σαν σχεδόν ασυμπίεστα (ελαστοπλαστικά υλικά για τα οποία οι πλαστικές παραμορφώσεις είναι ασυμπίεστες), τα δεύτερης τάξης, πλήρους ολοκλήρωσης στοιχεία αρχίζουν να αναπτύσσουν «ογκομετρικό κλείδωμα» όταν οι πλαστικές παραμορφώσεις είναι της τάξης των ελαστικών παραμορφώσεων. Ωστόσο, τα στοιχεία πρώτης τάξης, πλήρους ολοκλήρωσης

τετράπλευρα και εξάεδρα χρησιμοποιούν επιλεκτικά μειωμένη ολοκλήρωση (μειωμένη ολοκλήρωση σε ογκομετρικούς όρους). Οπότε, αυτά τα στοιχεία δεν «κλειδώνουν» με σχεδόν ασυμπίεστα υλικά. Τα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης, δεύτερης τάξης, εμφανίζουν «ογκομετρικό κλείδωμα» για σχεδόν ασυμπίεστα υλικά μόνο αν προκύψουν σημαντικές παραμορφώσεις. Σε αυτή την περίπτωση το «ογκομετρικό κλείδωμα» συχνά συνοδεύεται από μία κατάσταση που μοιάζει με το φαινόμενο hourglassing. Συχνά αυτό το πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί με πύκνωση του πλέγματος σε περιοχές μεγάλης πλαστικής παραμόρφωσης.



Εικόνα 3: Η παραμόρφωση υλικού σε κάμψη

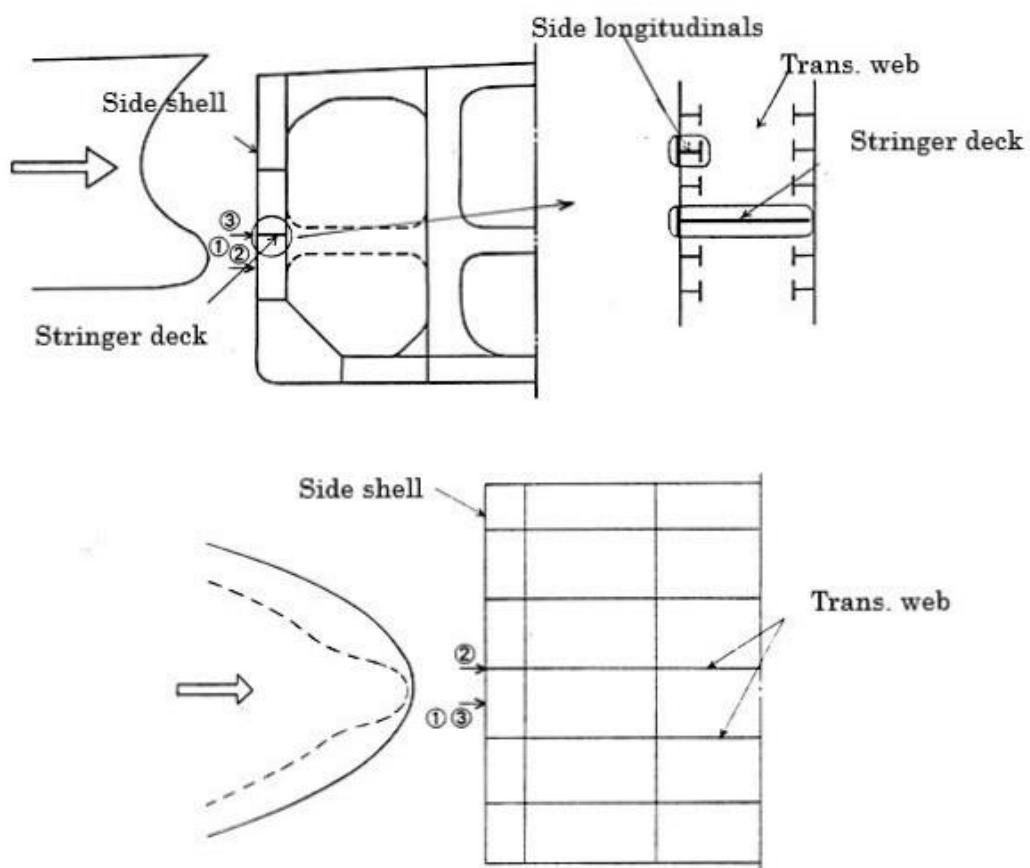


Εικόνα 4: Η παραμόρφωση ενός γραμμικού στοιχείου πλήρους ολοκλήρωσης σε κάμψη, το φαινόμενο shear locking

3 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ

3.1 ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΤΗΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ

Το αρχικό σενάριο πάνω στο οποίο βασίστηκε η πειραματική διάταξη απ' την οποία προέρχονται τα πειραματικά δεδομένα είναι ένα σενάριο σύγκρουσης δύο πλοίων κατά την οποία ο βολβός του ενός συγκρούεται με ενισχυτικό δεξαμενόπλοιου διπλού τοιχώματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.

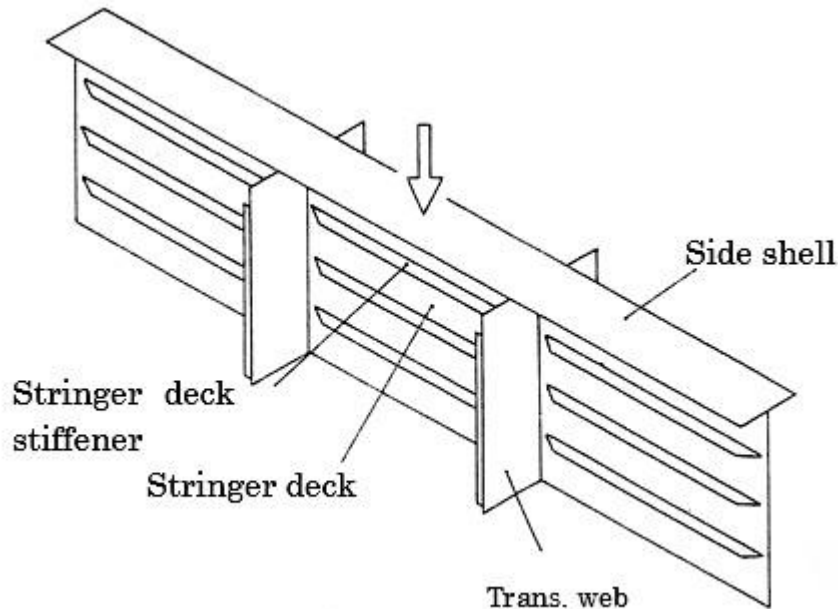


Εικόνα 5: Το σενάριο της σύγκρουσης

3.2 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

3.2.1 Σχηματική εικόνα του μοντέλου

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν τόσο στα Static όσο και στα Dynamic Tests είναι ίδια και η σχηματική τους διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 6.



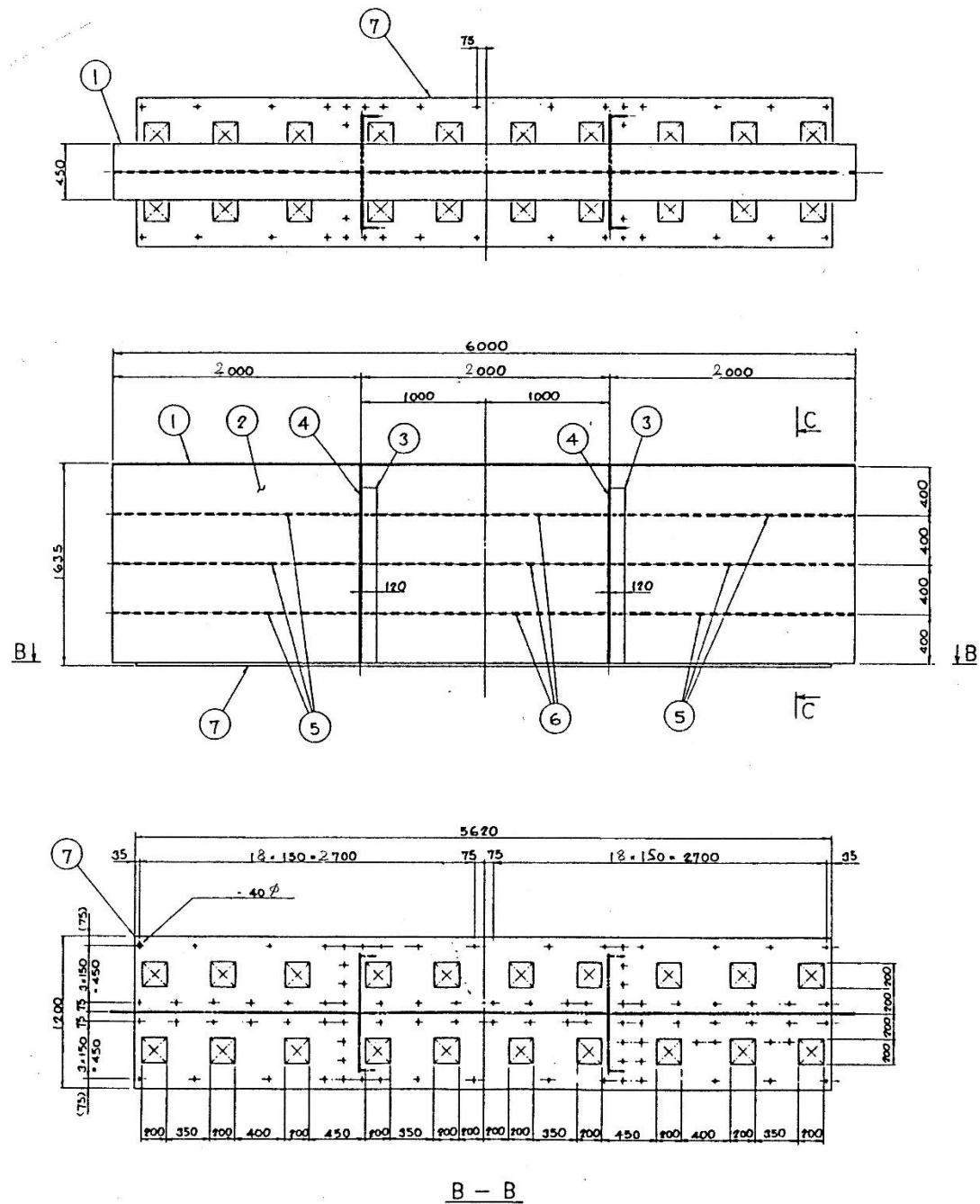
Εικόνα 6: Η σχηματική εικόνα του μοντέλου

3.2.2 Λεπτομέρειες του μοντέλου

Οι λεπτομέρειες του διπύθμενου μοντέλου φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.

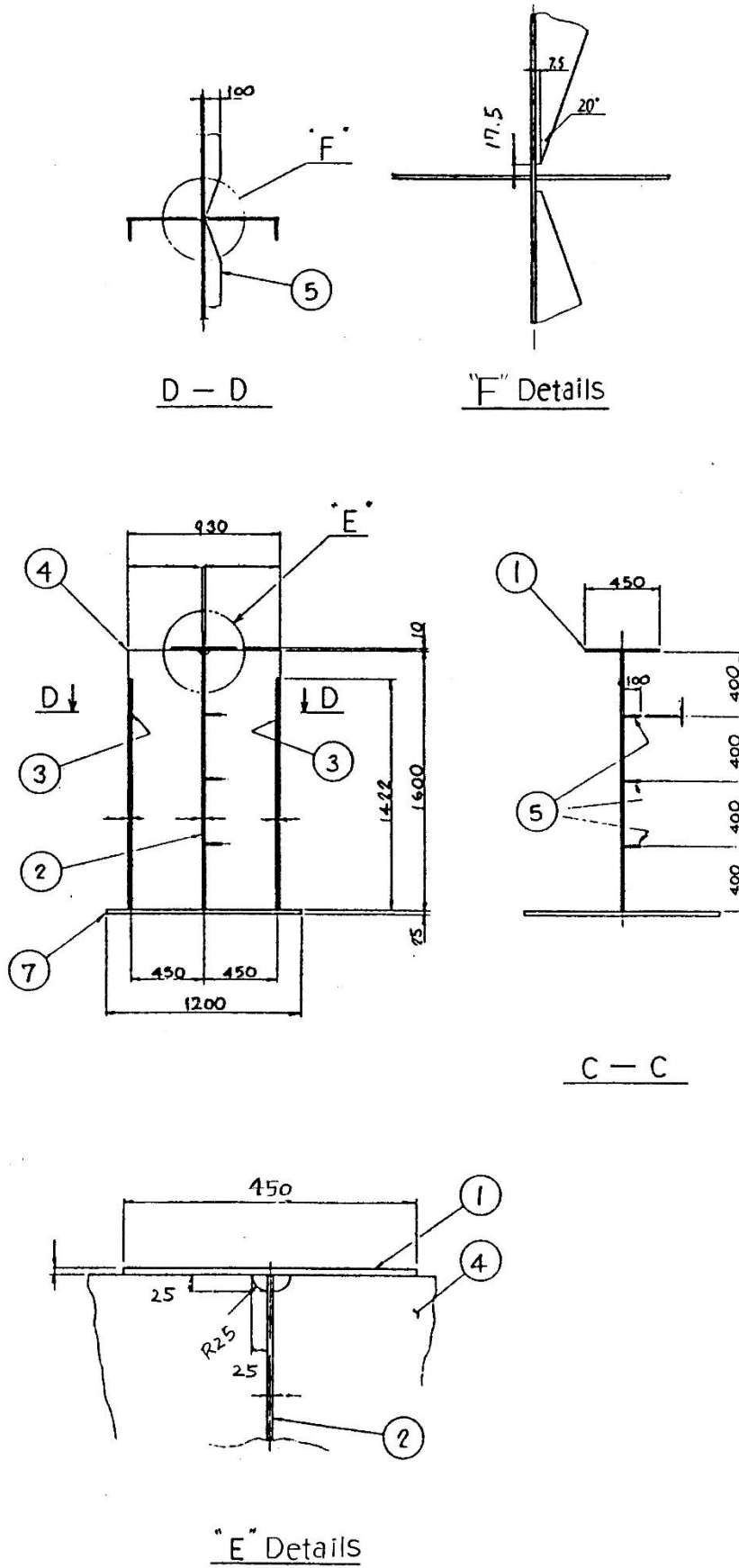
- Κλίμακα μοντέλου: $\sim 1/2$
- Συγκολλήσεις: Γωνιακές συγκολλήσεις ή εξωραφές με πλάτος ραφής $4mm$ παντού εκτός από εκεί που σημειώνεται.

Τα αριστερά και δεξιά άκρα του μοντέλου είχαν συγκολληθεί σε πολύ στιβαρές υποστηρικτικές κατασκευές, και το έλασμα της βάσης είχε στερεωθεί στην κλίση δοκιμών με κοχλίες και περικόχλια.



	Πάχος ελάσματος (mm)	Διαστάσεις (mm*mm)
1	10	450x6000
2	7	1600x6000
3	7	120x1422
4	8	461.5x1600
5	7	100x1996
6	7	100x1992
7	25	1200x5620

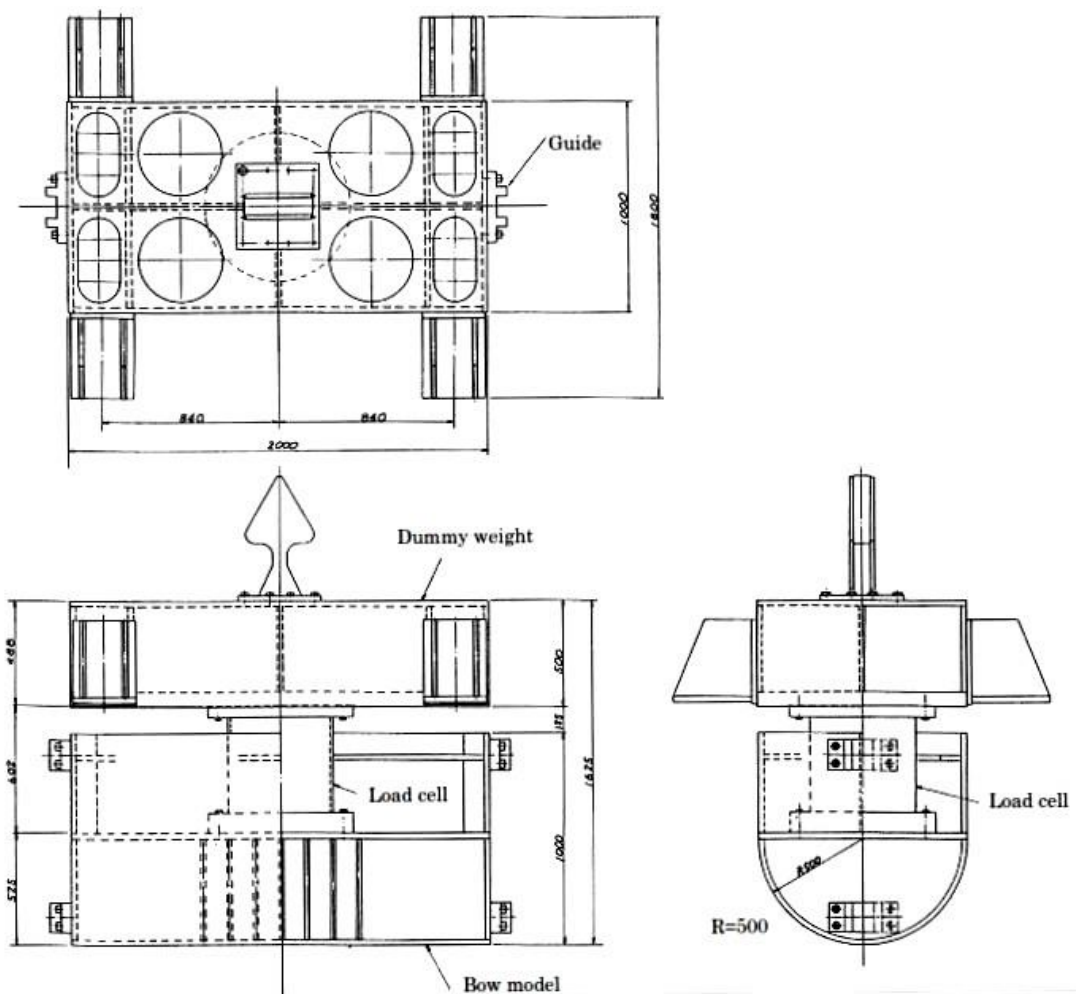
Εικόνα 7(α): Το μοντέλο διπλού τοιχώματος πλοίου



Εικόνα 7(β): Το μοντέλο διπλού τοιχώματος πλοίου

3.2.3 Το μοντέλο του βολβού

Η Εικόνα 8 δείχνει το μοντέλο του βολβού. Το μοντέλο του βολβού είναι τόσο στιβαρό σε σχέση με το μοντέλο διπλού τοιχώματος που θεωρείται άκαμπτο σώμα. Η ακτίνα του βολβού είναι 500 mm . Το συνολικό βάρος του μοντέλου βολβού ήταν περί τους 8.4 tonf .

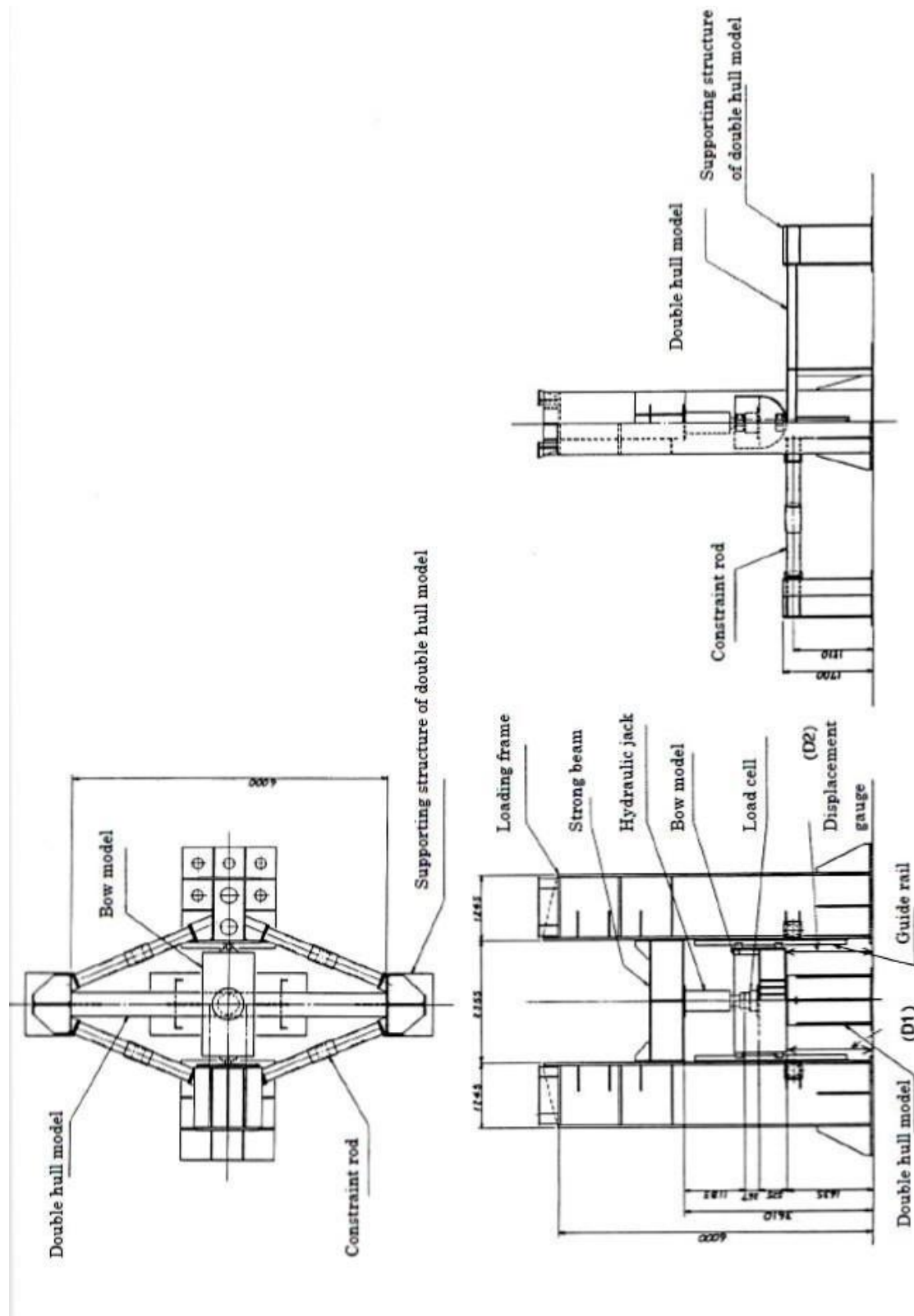


Εικόνα 8: Το μοντέλο βολβού

3.3 STATIC TEST

3.3.1 Η πειραματική διάταξη

Η Εικόνα 9 μας δείχνει την πειραματική διάταξη.



Εικόνα 9: Η πειραματική διάταξη του Static Test

3.3.2 Η πειραματική διαδικασία

Το μοντέλο του βολβού πιέστηκε υδραυλικά κατά μήκος οδηγών για να εξασφαλιστεί η επιθυμητή κατεύθυνση. Ο στόχος του βάρους διείσδυσης ήταν περί τα 900 mm . Η διαδρομή του υδραυλικού μοχλού ήταν 500 mm , οπότε αρχικά ο βολβός πιέστηκε μέχρι τα 450 mm και μετά επαναλήφθηκε η διαδικασία μέχρι τα 900 mm . Η ταχύτητα δεν ήταν ξεκάθαρη, αλλά πρακτικά πολύ μικρή.

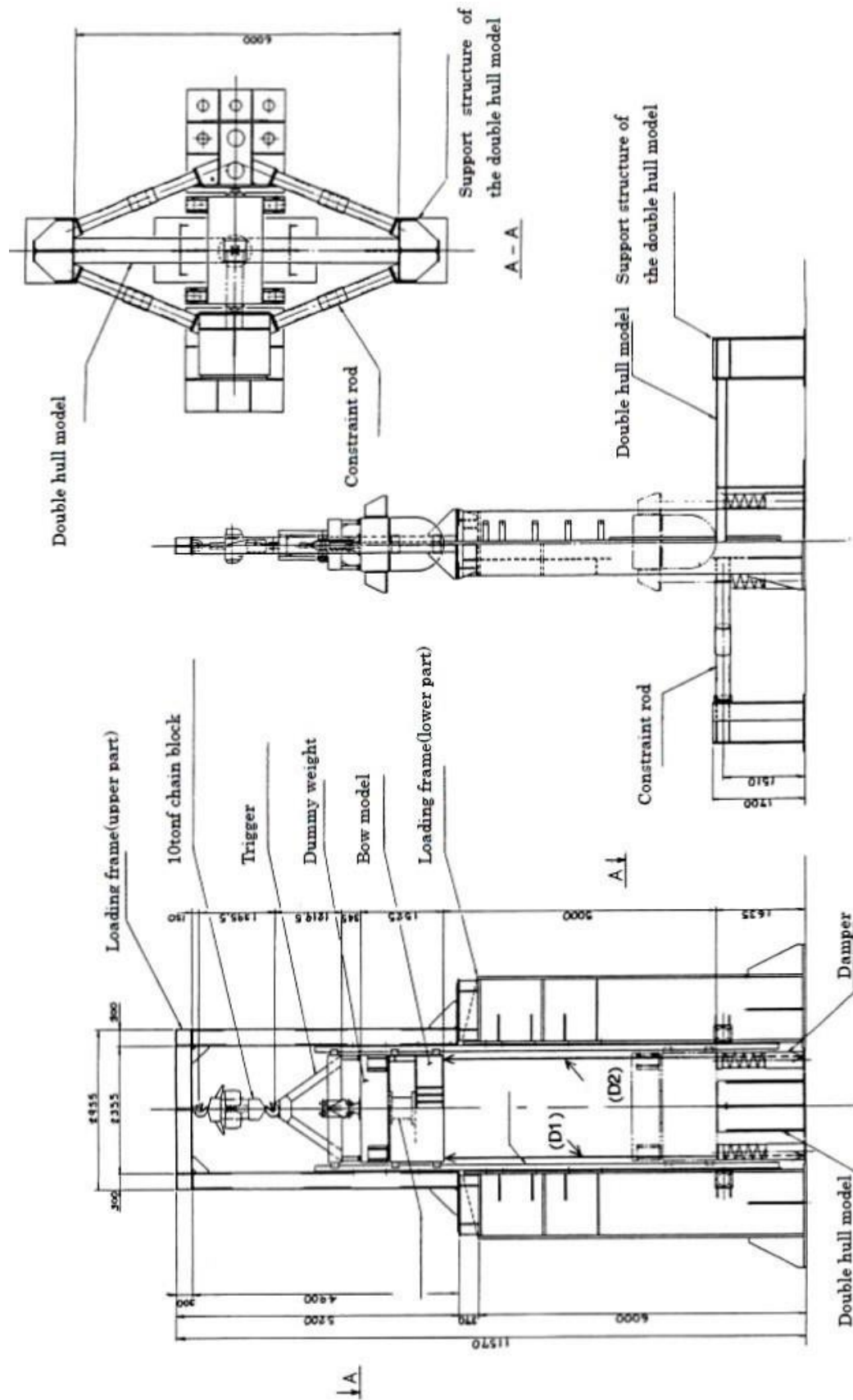
3.4 DYNAMIC TEST

3.4.1 Η πειραματική διάταξη

Στην Εικόνα 10 φαίνεται η πειραματική διάταξη του Dynamic Test.

3.4.2 Η πειραματική διαδικασία

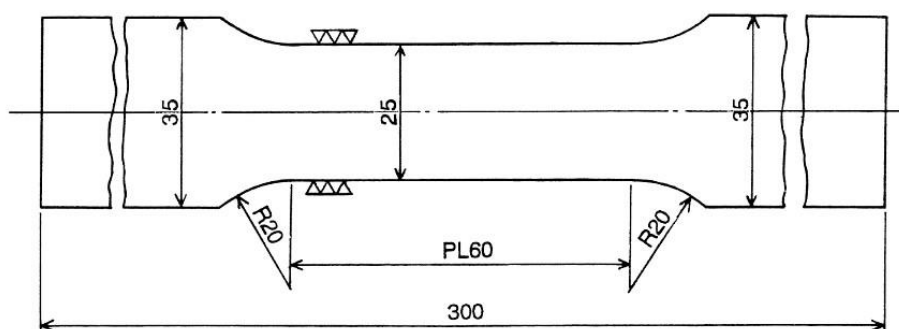
Το μοντέλο του βολβού αφέθηκε σε ελεύθερη πτώση από ύψος 4.8 m ώστε να επιτευχθεί ταχύτητα σύγκρουσης 9.7 m/sec . Οι αποσβεστήρες σχεδιάστηκαν ώστε να λειτουργούν όταν η διείσδυση φτάσει τα 1000 mm και εισήχθησαν για την προστασία της κλίνης δοκιμών. Η διόρθωση από την επίδραση των αποσβεστήρων δεν ελήφθη υπόψη στην μετρούμενη σχέση φορτίου-διείσδυσης και ενέργειας-διείσδυσης.



Εικόνα 10: Η πειραματική διάταξη του Dynamic Test

3.5 ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Για να ανακτηθούν οι ιδιότητες του υλικού, συμπεριλαμβανομένου και του φαινομένου της ευαισθησίας στην ταχύτητα παραμόρφωσης (strain rate effect), διεξήχθησαν πειράματα στατικής και δυναμικής καταπόνησης με δοκίμια όλων των χρησιμοποιούμενων παχών της κατασκευής. Στην Εικόνα 11 φαίνεται το δοκίμιο που χρησιμοποιείται στο πείραμα εφελκυσμού. Τα πειράματα εφελκυσμού έγιναν στην κατεύθυνση έλασης (“R”) και κάθετα προς αυτήν (“C”) σε θερμοκρασία δωματίου.

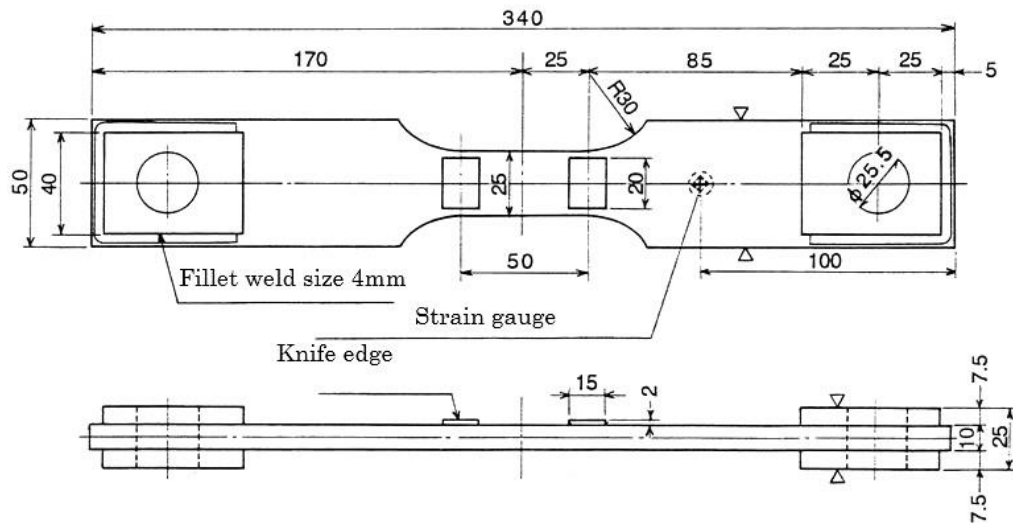


Εικόνα 11: Το δοκίμιο εφελκυσμού

ονομαστικό πάχος: t (mm)	T.P. No.	μετρούμενο πάχος: t_m (mm)	Όριο διαρροής: σ_y (kgf/mm ²)	Όριο θραύσης: σ_B (kgf/mm ²)	Μέτρο ελαστικότητας: E (kgf/mm ²)	Επιμήκυνση: δB (mm)	Παραμόρφωση: ϵ_B (%)	
6	6R-1	5.6	-	(27.3)	44.8	21000	21.5	43.0
	6R-2	5.6	-	(27.6)	44.8	21600	21.5	43.0
	6C-1	5.7	-	(26.6)	45.2	21200	18.9	37.8
	6C-2	5.6	27.5	(27.5)	45.0	21600	19.2	38.4
7	7R-1	6.7	36.0	(32.5)	45.2	21600	22.1	44.2
	7R-2	6.7	31.6	(30.8)	45.7	21300	22.1	44.2
	7C-1	6.6	32.3	(31.9)	45.7	21600	21.3	42.6
	7C-2	6.7	31.4	(31.1)	46.2	21300	21.0	42.0
8	8R-1	7.8	32.6	(31.3)	46.1	21600	21.8	43.6
	8R-2	7.8	36.8	(33.2)	46.1	21400	22.7	45.4
	8C-1	7.8	32.7	(31.9)	46.4	21600	19.9	39.8
	8C-2	7.8	32.5	(32.5)	46.1	21200	20.8	41.6
10	10R-1	10.0	31.8	(28.8)	44.1	21400	23.7	47.4
	10R-2	10.0	31.6	(28.9)	43.9	21600	23.5	47.0
	10C-1	10.1	19.3	(28.5)	44.4	21200	21.9	43.8
	10C-2	10.1	-	(28.0)	44.4	21400	21.7	43.4

Πίνακας 1: Αποτελέσματα εφελκυσμού, σημ. Gauge length = 50 mm

Η Εικόνα 12 δείχνει τα δοκίμια δυναμικής καταπόνησης, τα οποία σχεδιάστηκαν για να καλύψουν ένα εύρος ταχυτήτων παραμόρφωσης από 1 sec^{-1} έως 100 sec^{-1} . Τα πειράματα δυναμικού εφελκυσμού έγιναν μόνο στην R κατεύθυνση έλασης και συνοψίζονται στον Πίνακα 2.

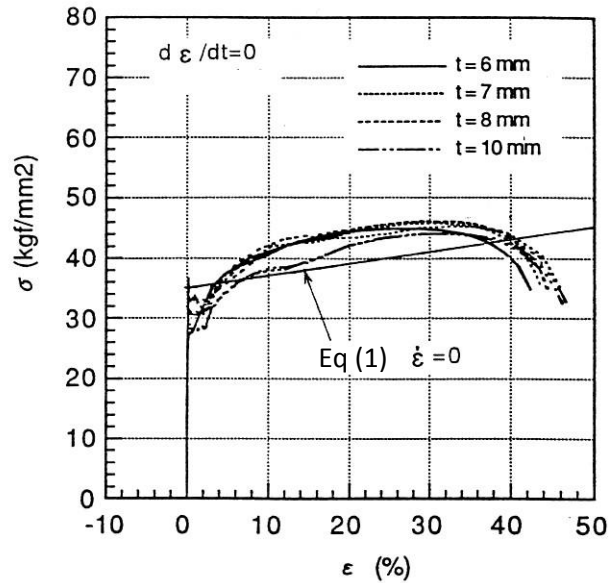


Εικόνα 12: Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δυναμική καταπόνηση.

ονομαστικό πάχος: t (mm)	T.P. No.	Ταχύτητα παραμόρφωσης σχεδίασης: V (m/sec)	Ταχύτητα παραμόρφωσης μετρούμενη: V (m/sec)	Μετρούμενο πάχος: t_m (mm)	Όριο διαρροής: σ_y (kgf/mm ²)	Όριο θραύσης σ_B : (kgf/mm ²)	Μέτρο ελαστικότητας: E (kgf/mm ²)	Επιμήκυνση: δB (mm)	Παραμόρφωση: ϵ_B (%)
6	6-1	0.05	0.037	5.65	38.00	49.90	21622	17.78	36.56
	6-2	0.05	0.037	5.68	39.30	50.10	21109	17.92	35.84
	6-3	0.50	0.378	5.68	44.20	52.40	22424	17.62	35.24
	6-4	0.50	-	5.69	-	-	-	18.24	36.48
	6-5	5.00	4.473	5.60	55.40	57.10	21414	20.17	40.34
	6-6	5.00	4.494	5.61	52.90	54.70	21117	20.32	40.64
7	7-1	0.05	0.059	6.68	50.00	50.00	21845	19.81	39.62
	7-2	0.05	0.037	6.64	50.70	50.20	20767	20.31	40.62
	7-3	0.50	0.245	6.63	55.10	52.10	19298	19.58	39.16
	7-4	0.50	0.390	6.64	55.00	52.30	20946	20.19	40.38
	7-5	5.00	4.315	6.65	69.10	57.70	21006	22.01	44.02
	7-6	5.00	4.386	6.64	72.50	56.80	21529	22.73	45.46
8	8-1	0.05	0.037	7.79	50.00	50.70	21665	22.57	45.14
	8-2	0.05	0.060	7.79	50.20	51.00	21647	19.90	39.80
	8-3	0.50	0.242	7.84	56.60	52.00	-	20.86	41.72
	8-4	0.50	0.378	7.77	58.01	52.90	21722	20.40	40.80
	8-5	5.00	4.578	7.82	70.00	58.00	21930	21.82	43.64
	8-6	5.00	4.496	7.79	70.00	58.90	21602	20.07	40.14
10	10-1	0.05	0.060	9.99	46.40	49.40	22109	21.67	43.34
	10-2	0.05	0.060	10.01	46.10	49.00	21746	21.67	43.14
	10-3	0.50	0.378	10.00	51.50	51.70	21939	22.92	45.84
	10-4	0.50	0.367	10.00	52.20	51.30	21875	22.24	44.48
	10-5	5.00	4.520	9.98	67.00	55.20	21906	23.85	47.70
	10-6	5.00	4.452	9.95	68.00	56.30	21765	23.59	47.18

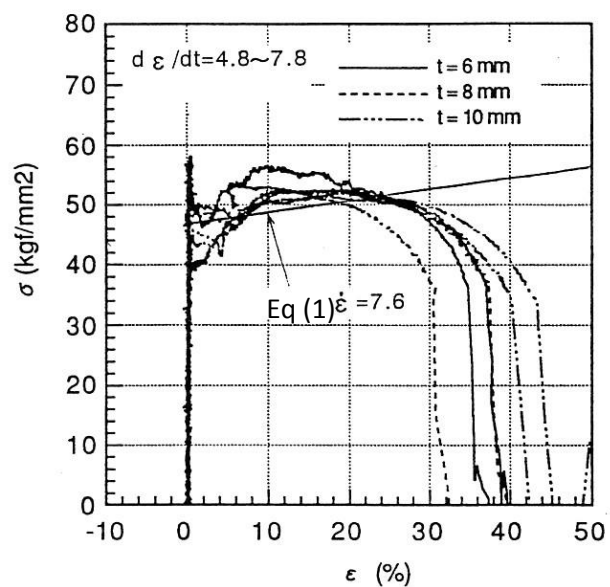
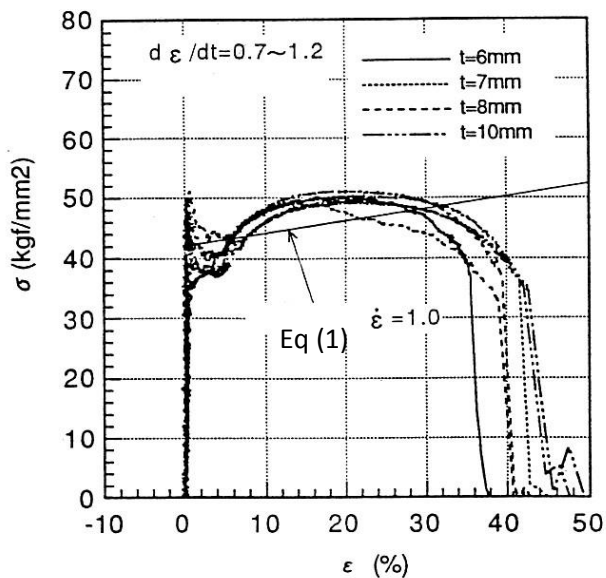
Πίνακας 2: Τα αποτελέσματα της δυναμικής καταπόνησης, σημ. Gauge length = 50 mm

Τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης που προέκυψαν από το Static Test φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (κατεύθυνση R). Οι παραμορφώσεις μέχρι 3% μετρήθηκαν, ενώ οι παραμορφώσεις άνω του 3% εκτιμήθηκαν από την μετατόπιση στα έδρανα ολίσθησης. Η Eq(1) που φαίνεται στο Διάγραμμα 3 που ακολουθεί προέκυψε από την σχέση Cowper-Symonds'.



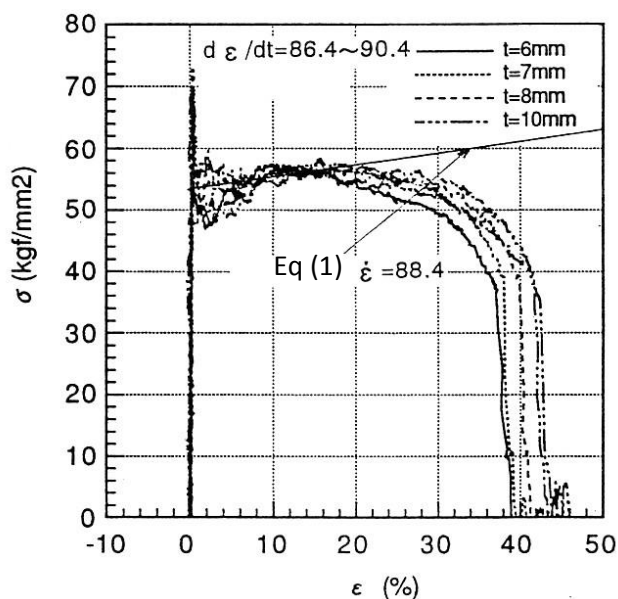
Διάγραμμα 3: Τάση-παραμόρφωση εφελκυσμού

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης που προέκυψαν από τα πειράματα δυναμικής καταπόνησης φαίνονται στα διαγράμματα 4, 5 και 6 που ακολουθούν. Χωρίζονται σε τρεις ομάδες, ανάλογα με το εύρος ταχύτητας καταπόνησης. Οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν με οπτικό αισθητήρα μετατόπισης.



Διάγραμμα 4: Τάση-Παραμόρφωση για ταχύτητα παραμόρφωσης $0.7\sim 1.2 \text{ sec}^{-1}$

Διάγραμμα 5: Τάση-Παραμόρφωση για ταχύτητα παραμόρφωσης $4.8\sim 7.8 \text{ sec}^{-1}$



Διάγραμμα 6: Τάση-Παραμόρφωση για ταχύτητα παραμόρφωσης $86.4 \sim 90.4 \text{ sec}^{-1}$

Οι Eq(1) που φαίνονται στα παραπάνω διαγράμματα προέκυψαν από την εμπειρική σχέση Cowper-Symonds':

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{P}}$$

Όπου: σ_D = όριο διαρροής
 σ_y = στατικό όριο διαρροής
 $\dot{\epsilon}$ = ταχύτητα παραμόρφωσης (sec^{-1})
 D και P = σταθερές του υλικού

Στα διαγράμματα 3, 4, 5 και 6 χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες τιμές:

$$D = 2,560 \text{ sec}^{-1}$$

$$P = 5 \text{ για } \dot{\epsilon} = 0.1$$

$$\sigma_y = 32 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{Strain hardening coefficient: } H = 20 (\text{kgf/mm}^2)$$

4 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

4.1 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ (SIMULIA ABAQUS)

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την αναπαραγωγή των Static και των Dynamic Tests είναι το Simulia Abaqus.

Το Abaqus προσφέρει αλληπάλληλες μεθόδους για δυναμική ανάλυση προβλημάτων όπου εμπλέκονται και αδρανειακές δυνάμεις. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το Abaqus/Explicit.

Η τεχνική Explicit Dynamics αποτελεί τεχνική ολοκλήρωσης, στο χρόνο, των εξισώσεων κίνησης. Η ολοκλήρωση Explicit Dynamic είναι επίσης γνωστή σαν προς τα εμπρός ολοκλήρωση κατά Euler ή σαν αλγόριθμος των κεντρικών διαφορών. Οι ζητούμενες μεταβλητές ανακτώνται απ' τις ήδη γνωστές και συγκεκριμένα με συνδυασμό της ολοκλήρωσης κατά Euler με στοιχεία που χρησιμοποιούν ένα συγκεντρωτικό μητρώο μάζας. Το συγκεντρωτικό μητρώο μάζας M , επιτρέπει στο πρόγραμμα να υπολογίζει τις κομβικές επιταχύνσεις εύκολα, οποιαδήποτε χρονική στιγμή, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\ddot{u}|_{(t)} = M^{-1} \cdot (P - I)|_{(t)}$$

Όπου P είναι το διάνυσμα εξωτερικών φορτίων και I το διάνυσμα εσωτερικών φορτίων.

Το Abaqus/Standard είναι κατάλληλο για τους ακόλουθους τύπους ανάλυσης:

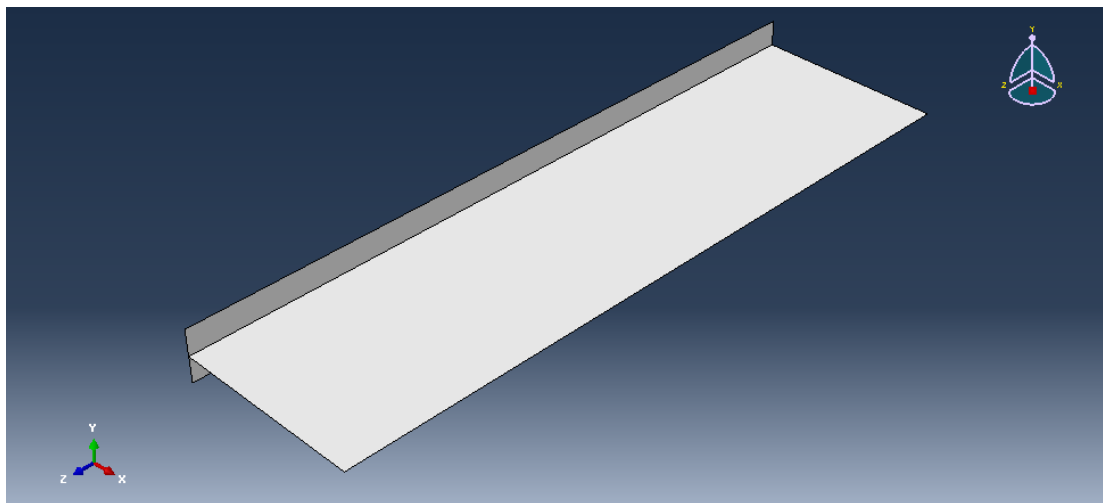
- Γραμμικά και μη-γραμμικά στατικά προβλήματα
- Γραμμικά δυναμικά προβλήματα
- Χαμηλής ταχύτητας (χαμηλής συχνότητας απόκρισης) μη-γραμμικά δυναμικά
- Μη-γραμμική μεταφορά θερμότητας
- Συνδυασμένα προβλήματα θερμοκρασίας-μετατόπισης (ψευδοστατικά)
- Συνδυασμένα προβλήματα θερμότητας-ηλεκτρισμού
- Προβλήματα διάχυσης μάζας
- Προβλήματα ακουστικής σε κατασκευές

Το Abaqus/Explicit είναι κατάλληλο για:

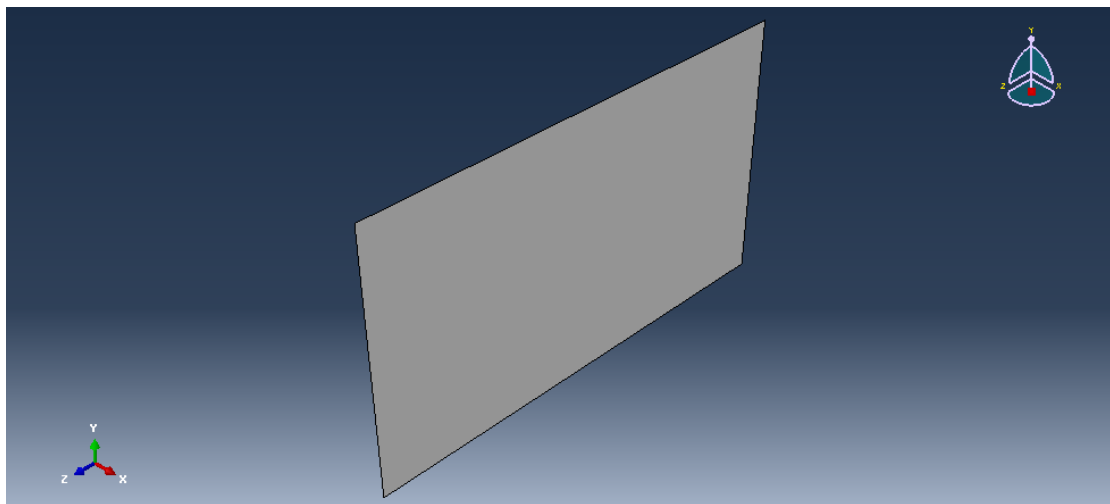
- Υψηλής ταχύτητας (μικρής διάρκειας) ανάλυση κατασκευαστικών στοιχείων
- Μεγάλης κλίμακας, μη-γραμμικές, ψευδοστατικές αναλύσεις
- Για προσομοιώσεις μετά από λυγισμό με μεγάλες ασυνέχειες και προσομοιώσεις κατάρρευσης
- Συνδυασμένα προβλήματα θερμοκρασίας-μετατόπισης (Δυναμικά) (Simulia, 2010).

4.2 Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

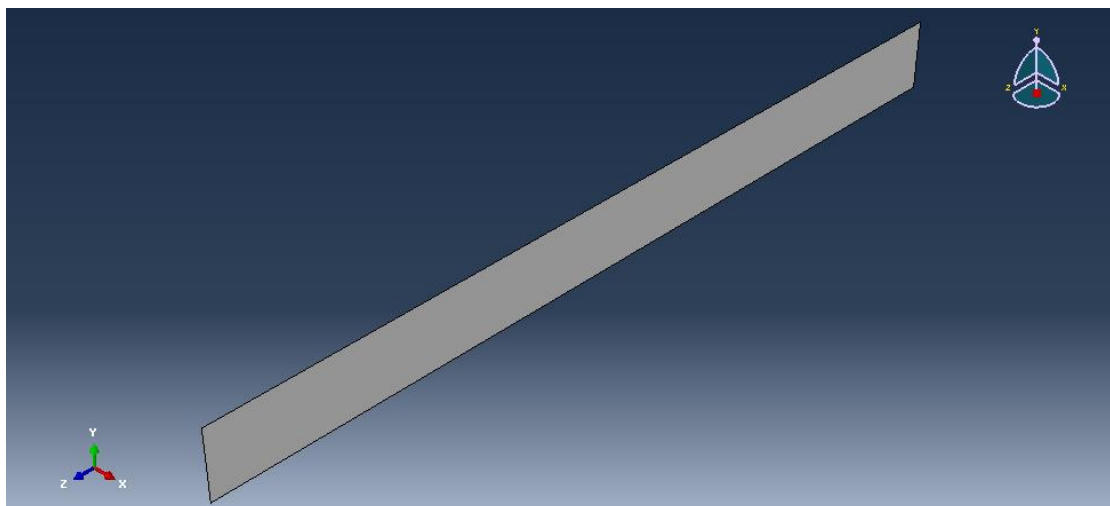
- Στο σχεδιαστικό περιβάλλον του Abaqus σχεδιάστηκαν τέσσερα επιμέρους ελάσματα (Εικόνες 13, 14, 15 και 16) τα οποία συνέθεσαν το τελικό κομμάτι (Εικόνα 17). Το μοντέλο του βολβού σχεδιάστηκε σαν άκαμπτο σώμα, εκ περιστροφής, με σημείο αναφοράς το RP που φαίνεται στην Εικόνα 18.



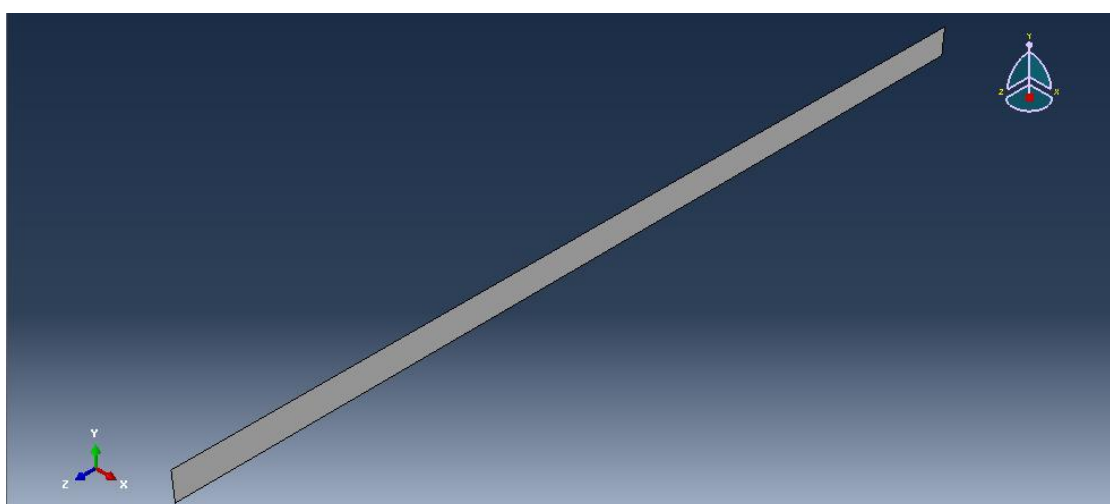
Εικόνα 13: Part-1



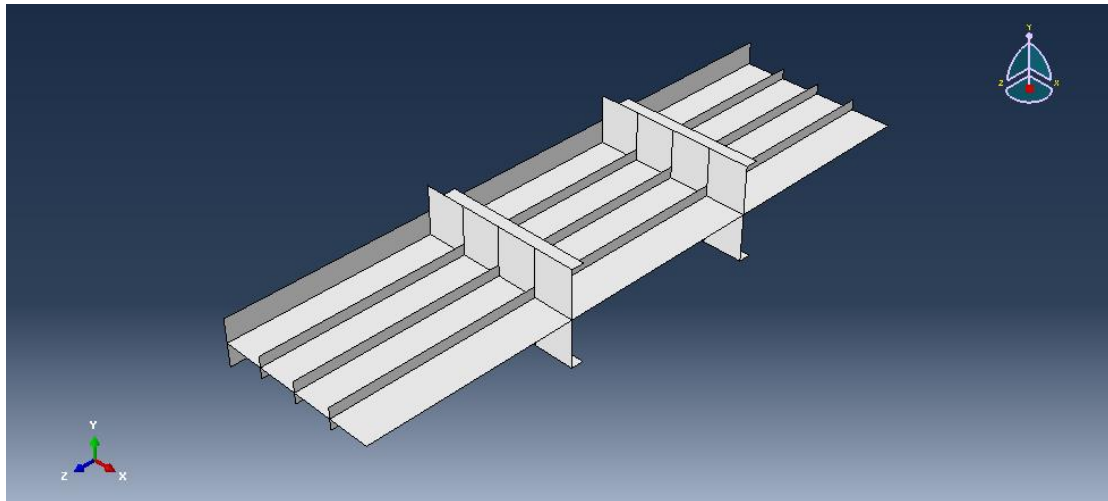
Εικόνα 14: Part 5-2



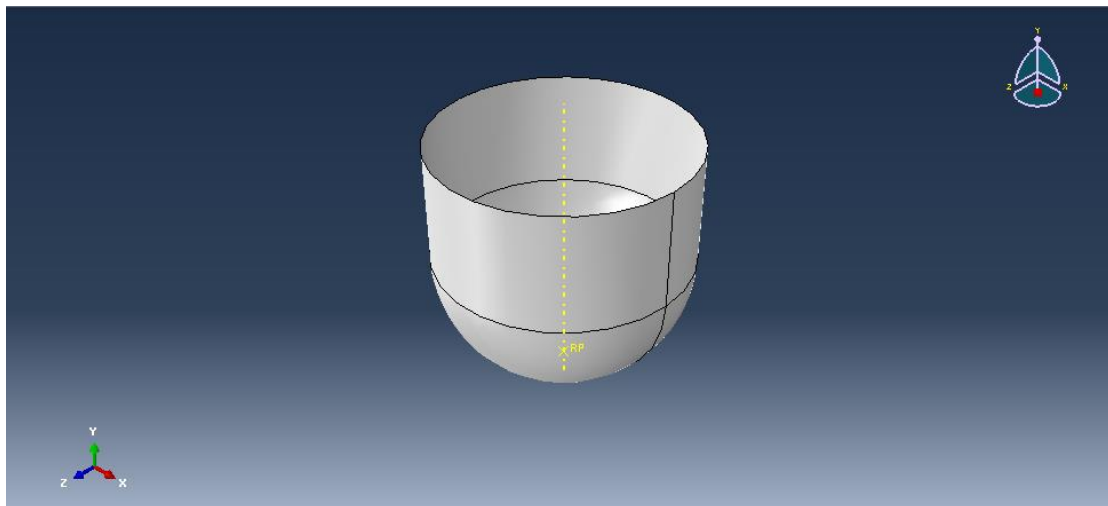
Εικόνα 15: Part 5-3



Εικόνα 16: Part 5-4



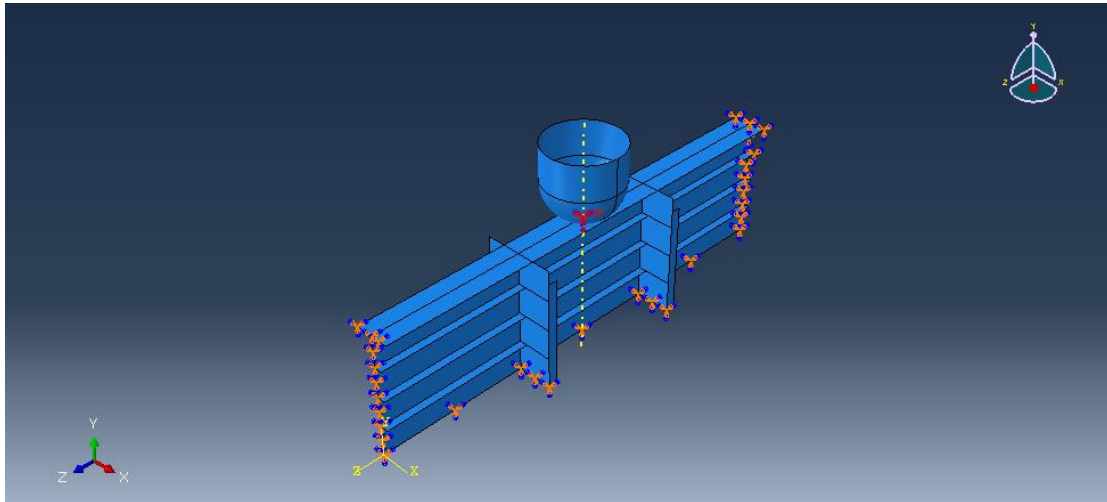
Εικόνα 17: Part-5



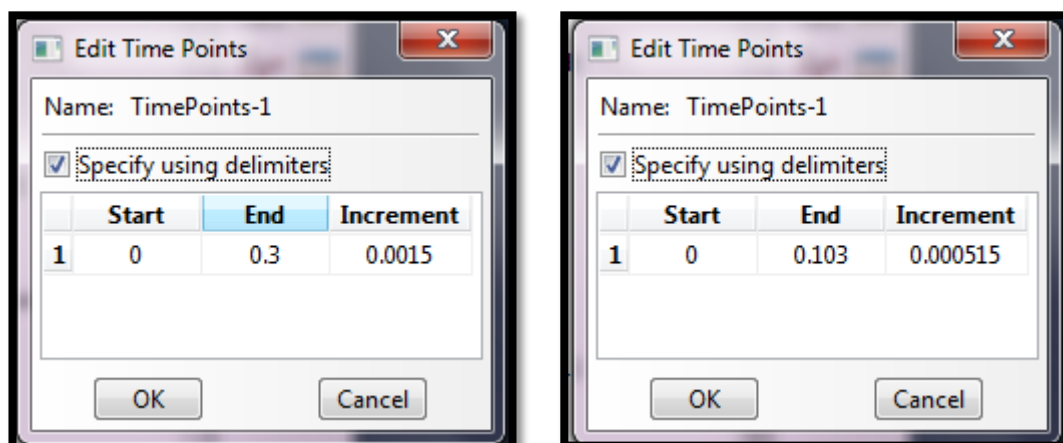
Εικόνα 18: bulbous bow

- Κατά τη συναρμολόγηση του μοντέλου, ο βολβός τοποθετήθηκε 2mm πάνω από το ήμισυ του πάχους ελάσματος (δηλαδή $(\frac{10}{2} + 2) mm = 7mm$)
- Στο μοντέλο τέθηκε περιορισμός σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας, σε όλες τις εξωτερικές ακμές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19. Ενώ στον βολβό περιορίστηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας εκτός της μετατόπισης κατά *y-axis*.
- τα αποτελέσματα εξήχθησαν σε 200 σημεία του συνολικού χρόνου, ο οποίος είναι 0.3 sec για το Static Test και 0.103 sec για το Dynamic Test, έτσι ώστε στο Static Test να επιτευχθεί πολύ αργή ταχύτητα βολβού

ενώ στο Dynamic Test να επιτευχθεί ταχύτητα σύγκρουσης 9.7 m/sec (Εικόνα 20).



Εικόνα 19: Περιορισμοί βαθμών ελευθερίας



Εικόνα 20: Time Points, Static and Dynamic Test

- Στο σχεδιαστικό περιβάλλον του Abaqus ορίστηκαν 3 υλικά, με μόνη διαφορά το πάχος ελάσματος, δηλαδή 7 mm , 8 mm και 10 mm . Για το κάθε ένα από αυτά στην ελαστική περιοχή ορίστηκαν οι παρακάτω τιμές για το υλικό:

Μέτρο ελαστικότητας: $E = 210000 \text{ MPA}$

Σταθερά Poisson: $\nu = 0.3$

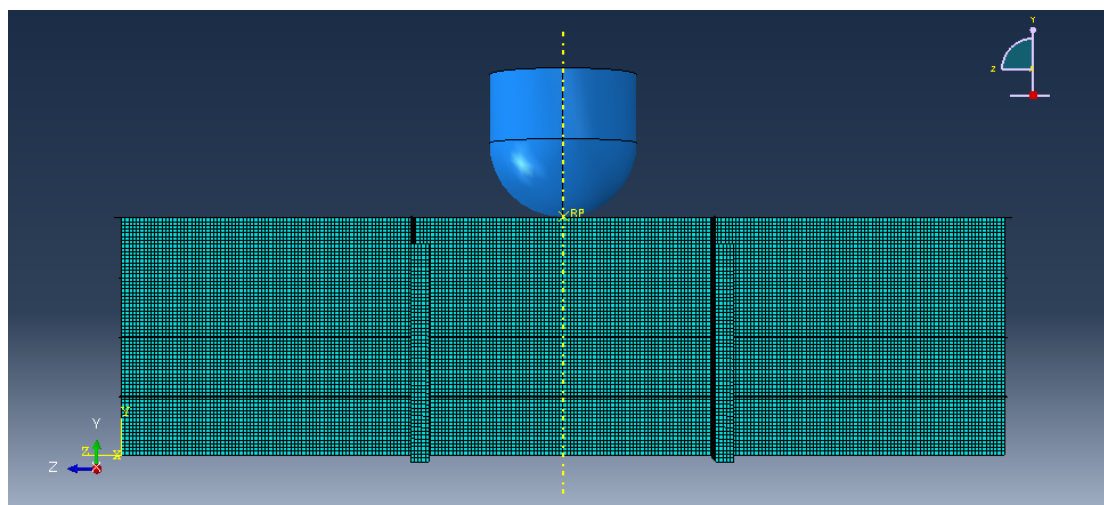
Πυκνότητα κατά βάρος: $\text{Mass Density} = 7.8 \cdot 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$

Στη μη-γραμμική περιοχή, η μοντελοποίηση του υλικού αναφέρεται αναλυτικά στις παραγράφους 5.1 και 5.2.

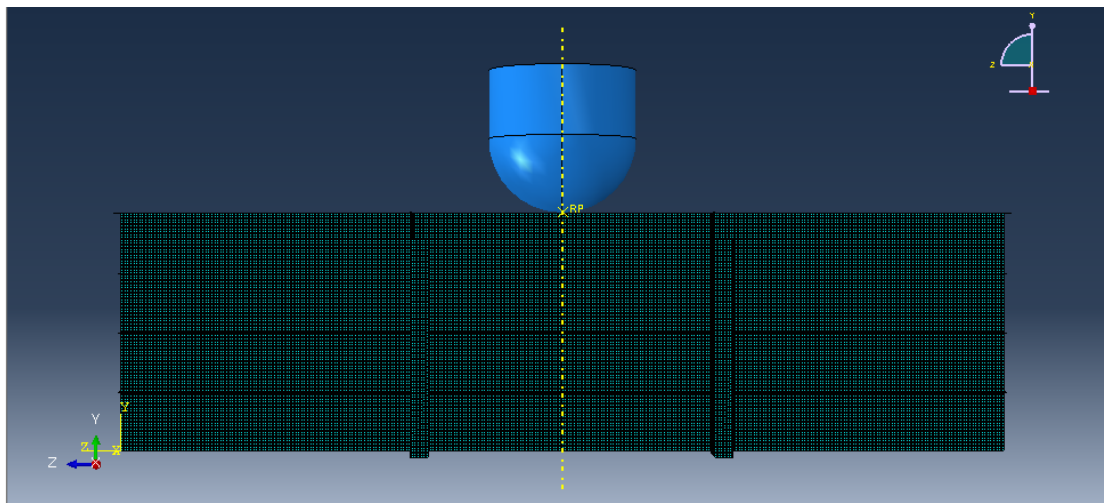
- Η κατασκευή διακριτοποιήθηκε με τετρακομβικά στοιχεία ελάσματος (S4R) με πλέγμα σταθερών αποστάσεων μεταξύ των κόμβων. Σε κάποιες μεταβατικές περιοχές του πλέγματος (πολύ μικρές σε σχέση με το συνολικό μέγεθος της κατασκευής) χρησιμοποιήθηκαν τρικομβικά στοιχεία ελάσματος (S3). Ο λόγος των πλευρών του τετρακομβικού στοιχείου ήταν αρκετά κοντά στη μονάδα. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά μεγέθη στοιχείων κελύφους τα οποία επίσης αναφέρονται αναλυτικά στις παραγράφους 5.1 και 5.2 και συνοψίζονται παρακάτω:

	Μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους (S4R):
Static Test	<ul style="list-style-type: none"> • 25 mm • 12.5mm
Dynamic Test	<ul style="list-style-type: none"> • 25 mm • 12.5 mm • 6.25 mm

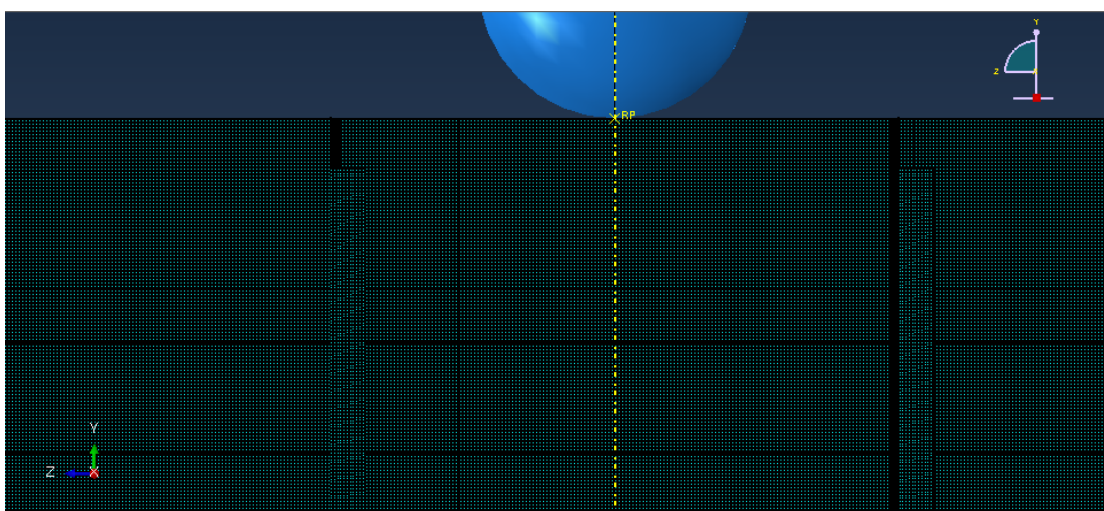
Παρόλο που η διακριτοποίηση με μέγεθος πλευράς 6.25 mm είναι μικρότερη από το πάχος ελάσματος της κατασκευής σε διάφορα σημεία, επιλέχθηκε για να μελετηθεί η συμπεριφορά της κατασκευής στη μοντελοποίηση του strain rate effect σε εναλλακτικές μοντελοποιήσεις του υλικού (αναλυτικά παράγραφος 6.2).



Εικόνα 21: Mesh size 25 mm



Εικόνα 22: Mesh size 12.5 mm

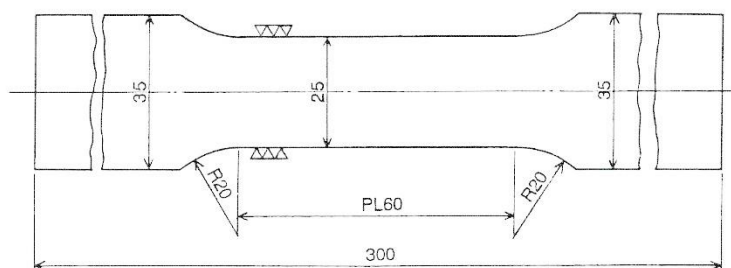


Εικόνα 23: Mesh size 6.25 mm

5 ΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

5.1 STATIC

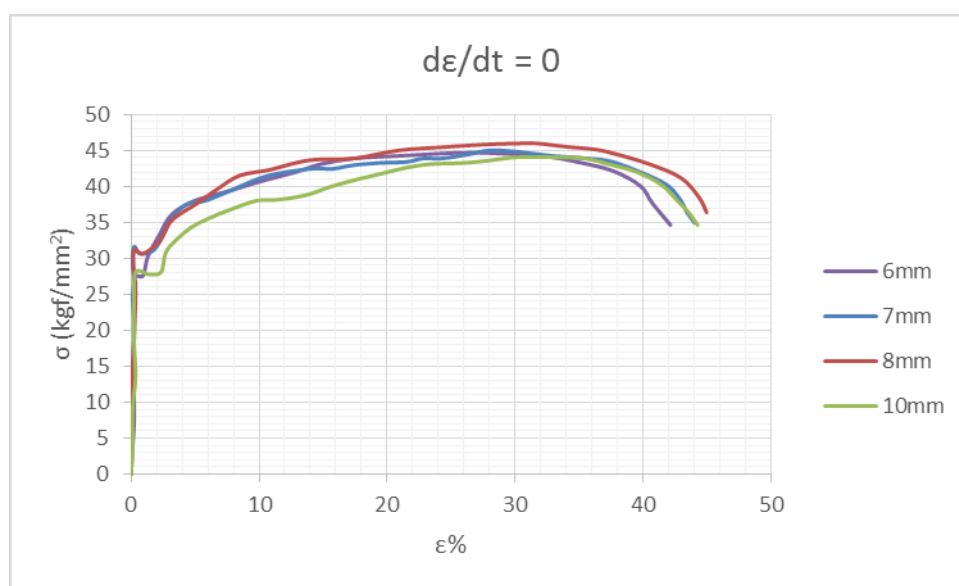
Από τα πειραματικά δεδομένα εφελκυσμού προέκυψαν οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τα τρία διαφορετικά πάχη ελασμάτων της λεπτότοιχης κατασκευής. Στο Εικόνα 24 φαίνεται το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα του εφελκυσμού. Τα πειράματα εφελκυσμού έγιναν στην κατεύθυνση έλασης ("R") και κάθετα προς αυτήν ("C") σε θερμοκρασία δωματίου.



Εικόνα 24: Δοκίμιο του πειράματος εφελκυσμού

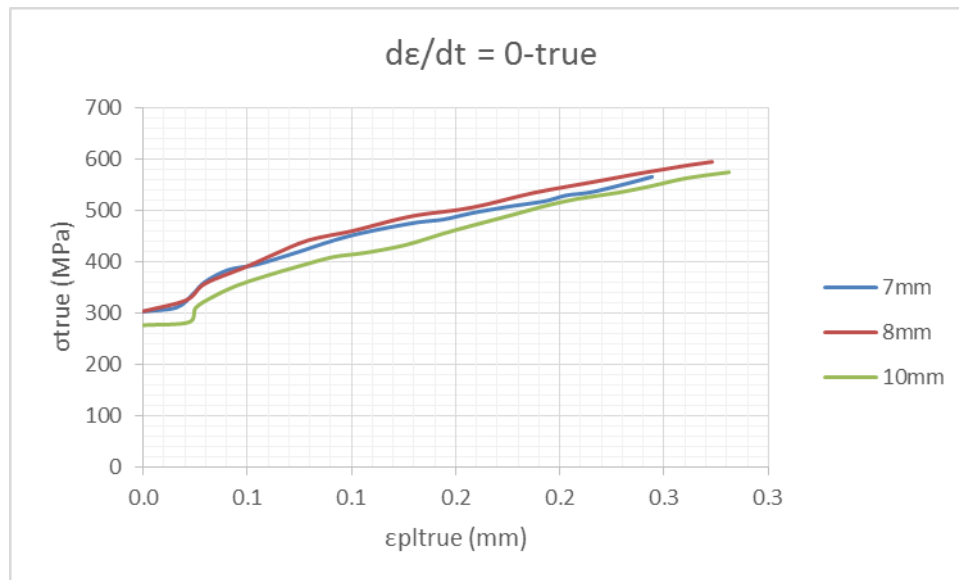
5.1.1 Η επιλογή του μοντέλου του υλικού (καμπύλες) και οι διάφορες παράμετροι που εισήχθησαν

Οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων που μετρήθηκαν στις στατικές δοκιμές φαίνονται στο Διάγραμμα 7 (μόνο στην κατεύθυνση "R").



Διάγραμμα 7: Μηχανικές (engineering) καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης

Οι παραπάνω μηχανικές (engineering) καμπύλες μετατράπηκαν σε πραγματικές (true), κατόπιν αφαιρέθηκε απ' την τιμή των συνολικών παραμορφώσεων η ελαστική παραμόρφωση και προέκυψαν οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης που φαίνονται στο Διάγραμμα 8.



Διάγραμμα 8: Πραγματικές (true) καμπύλες τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης

Η ελαστική περιοχή του υλικού ακολουθεί τον νόμο του Hooke και για την περιγραφή λοιπόν της συμπεριφοράς του υλικού στην ελαστική περιοχή το πρόγραμμα απαιτεί την εισαγωγή του μέτρου ελαστικότητας E και του λόγου Poisson ν τα οποία ισούνται με $E = 210000 \text{ MPa}$ και $\nu = 0.3$.

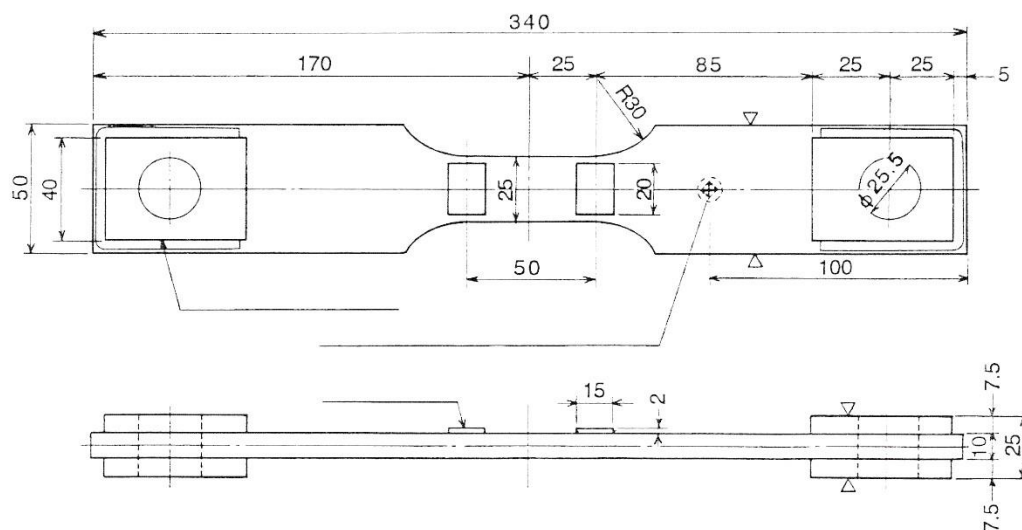
Οι τιμές, με την μορφή πίνακα, απ' τις οποίες προέκυψαν τα παραπάνω διαγράμματα εισήχθησαν στο Abaqus στην περιοχή εισαγωγής δεδομένων για την πλαστική συμπεριφορά του υλικού.

Επίσης η πυκνότητα του υλικού τέθηκε ίση με $7.8 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^3$.

- Για το Static test έγιναν δύο διαφορετικές μοντελοποιήσεις με μόνη διαφορά το μέγεθος του στοιχείου που ήταν 25 mm και 12.5 mm , κατά τις οποίες το υλικό μοντελοποιήθηκε όπως περιγράφεται παραπάνω.

5.2 DYNAMIC

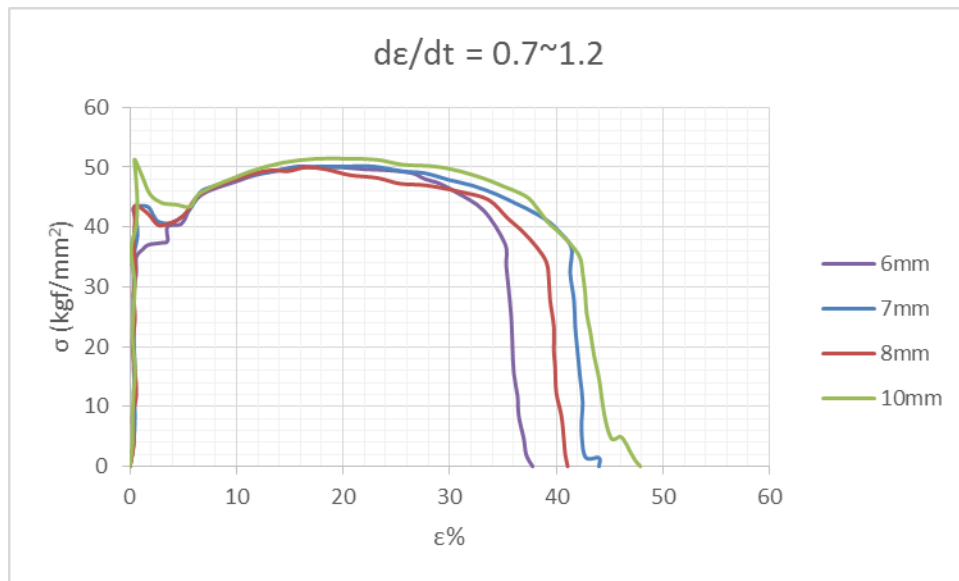
Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα δυναμικής καταπόνησης ήταν διαφορετικά από αυτά του εφελκυσμού (Εικόνα 25). Το πείραμα σχεδιάστηκε έτσι ώστε να καλύψει ταχύτητες παραμόρφωσης από 1 sec^{-1} έως 100 sec^{-1} .



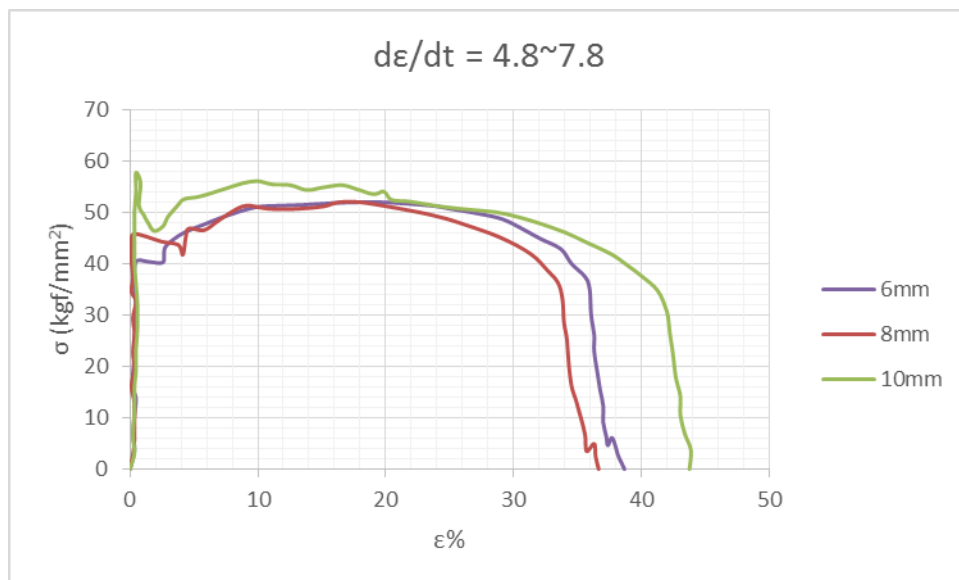
Εικόνα 25: Δοκίμιο δυναμικής καταπόνησης

5.2.1 Η επιλογή του μοντέλου υλικού (καμπύλες – εξίσωση Cowper-Symonds') και οι διάφορες παράμετροι που εισήχθησαν

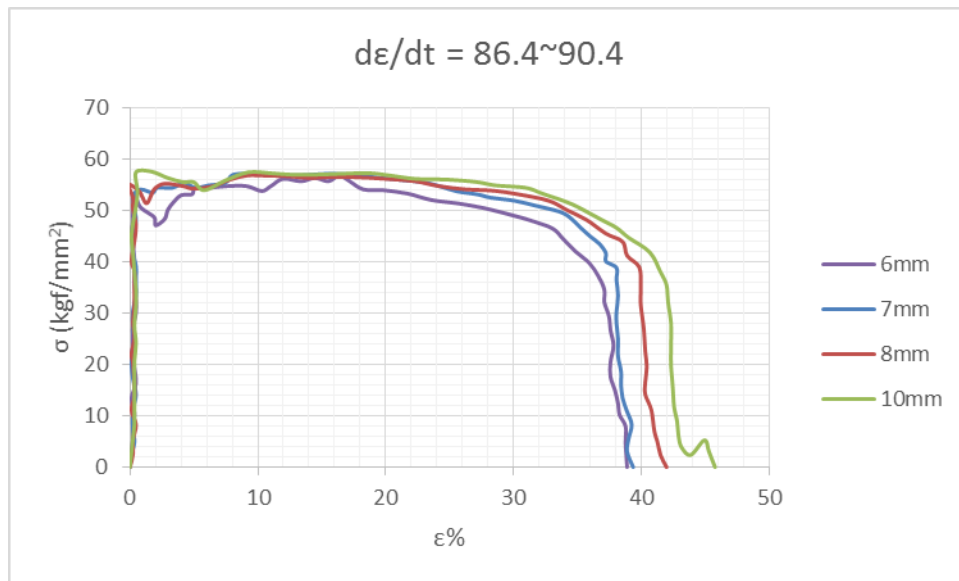
Από τα πειράματα δυναμικής καταπόνησης προέκυψαν οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για τα τρία διαφορετικά πάχη ελασμάτων της κατασκευής 7mm , 8mm και 10mm ομαδοποιημένα σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το εύρος της ταχύτητας παραμόρφωσης όπως φαίνεται στα διαγράμματα 9, 10 και 11.



Διάγραμμα 9: Τάση–παραμόρφωση για ταχύτητα παραμόρφωσης $0.7 \sim 1.2 \text{ sec}^{-1}$

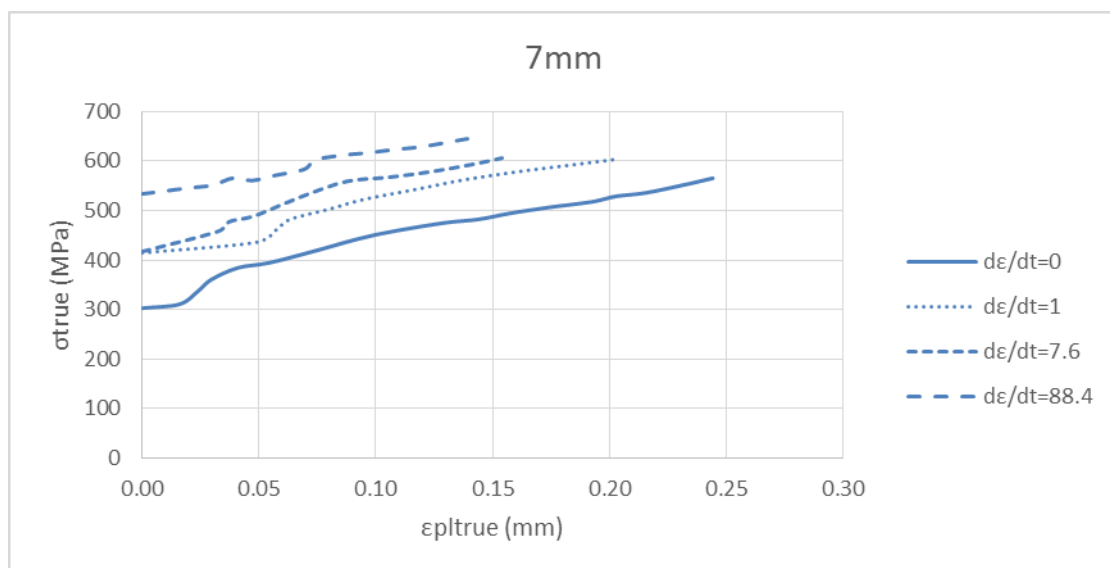


Διάγραμμα 10: Τάση – παραμόρφωση για ταχύτητα παραμόρφωσης $4.8 \sim 7.8 \text{ sec}^{-1}$

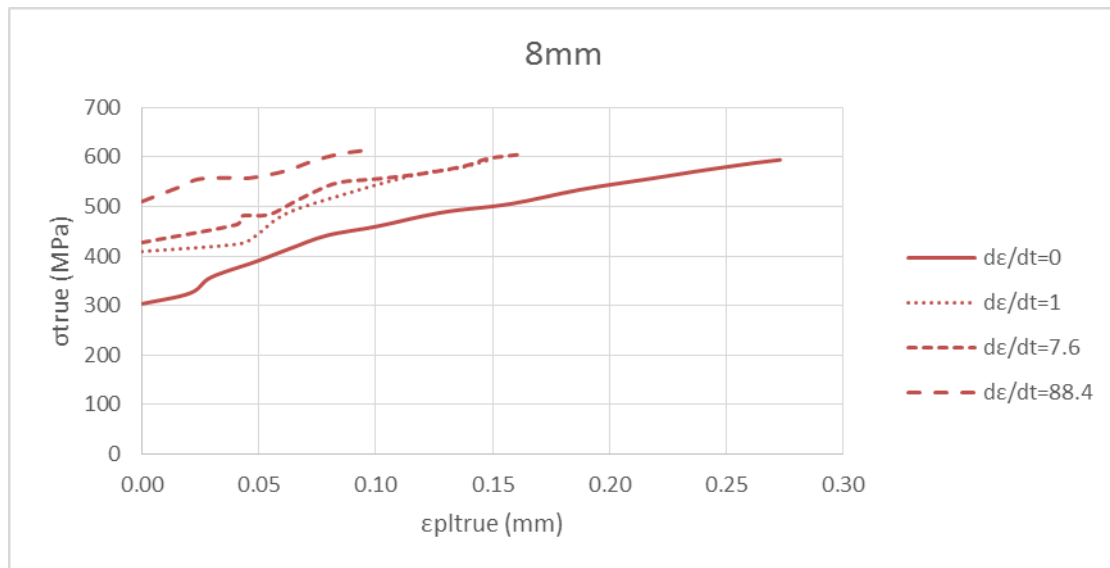


Διάγραμμα 11: Τάση – παραμόρφωση για ταχύτητα παραμόρφωσης $86.4 \sim 90.4 \text{ sec}^{-1}$

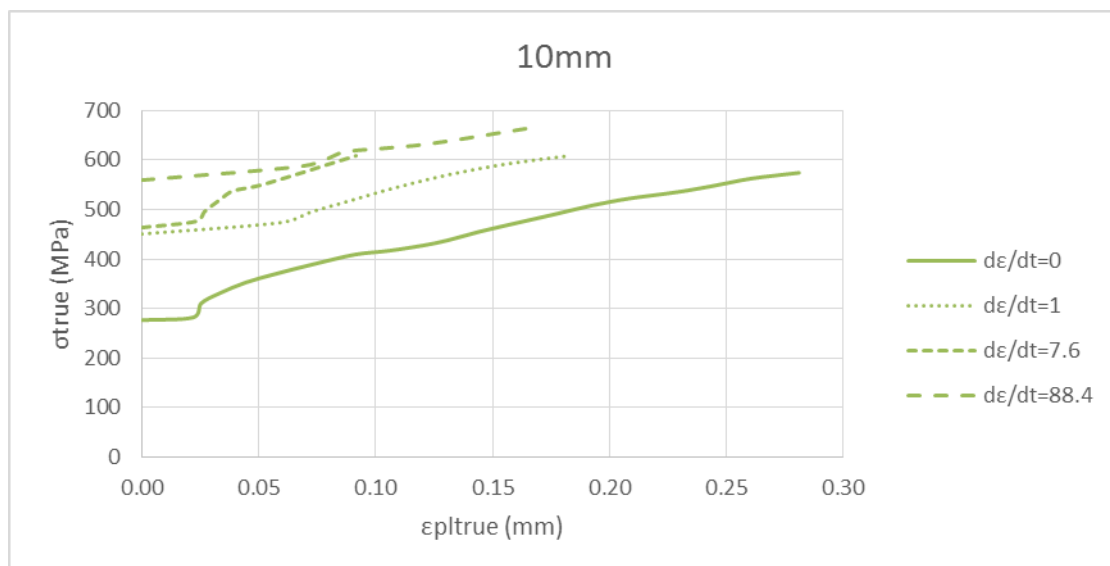
Οι παραπάνω καμπύλες μετατράπηκαν σε πραγματικές (true) και ομαδοποιήθηκαν ανάλογα με το πάχος του ελάσματος όπως φαίνεται στα διαγράμματα 12, 13 και 14. Λόγω έλλειψης δεδομένων για το πείραμα με εύρος ταχύτητας παραμόρφωσης $4.8 \sim 7.8 \text{ sec}^{-1}$ για τα 7 mm η πραγματική καμπύλη (true) προέκυψε με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των αντίστοιχων καμπύλων, για το ίδιο εύρος ταχυτήτων παραμόρφωσης, για τα 6 mm και τα 8 mm .



Διάγραμμα 12: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 7 mm



Διάγραμμα 13: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 8 mm



Διάγραμμα 14: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 10 mm

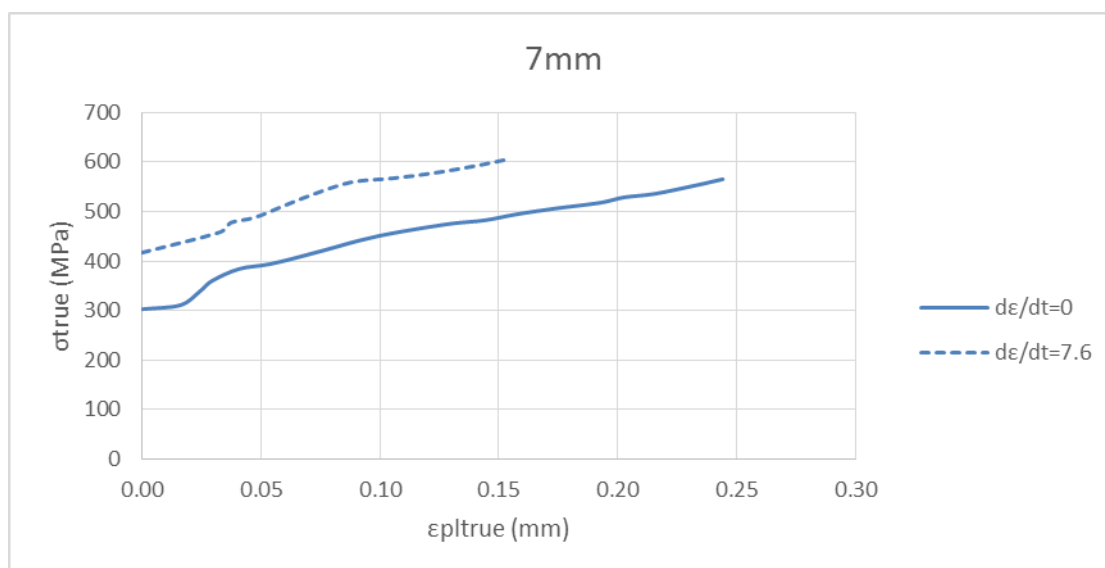
Για την αναπαραγωγή των Dynamic tests και σύμφωνα με το μοντέλο του υλικού έγιναν οι παρακάτω μοντελοποιήσεις:

1. Στο πεδίο μοντελοποίησης του υλικού έγινε εισαγωγή και των τεσσάρων πραγματικών καμπύλων τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης καθώς και της ταχύτητας παραμόρφωσης στην οποία αντιστοιχεί η κάθε καμπύλη (strain rate dependent data). Το Abaqus επιτρέπει την εισαγωγή

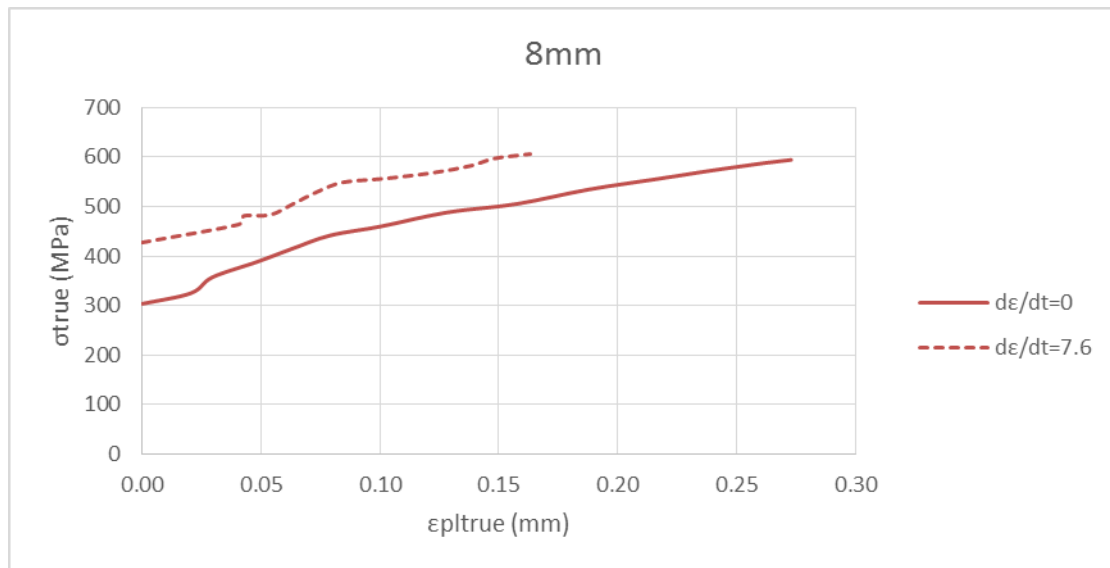
δεδομένων με την μορφή πίνακα και με αυξανόμενη ταχύτητα παραμόρφωσης, δηλαδή πρώτα την καμπύλη που αντιστοιχεί σε ταχύτητα παραμόρφωσης 0 sec^{-1} μετά την 1 sec^{-1} κοκ.

Χρησιμοποιήθηκαν για κάθε πάχος ελάσματος (7 mm , 8 mm και 10 mm) και οι τέσσερις καμπύλες που φαίνονται στα διαγράμματα 12, 13 και 14. Η προσομοίωση με την συγκεκριμένη μοντελοποίηση του υλικού έγινε για δύο διαφορετικά μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων, για στοιχεία πλευράς 25 mm και 12.5 mm .

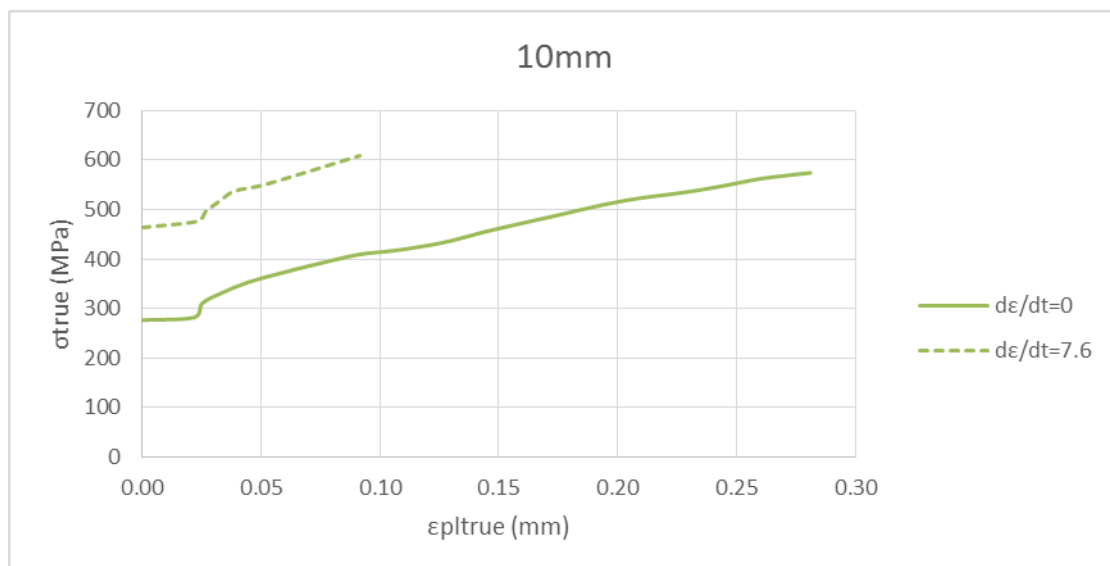
- Μετά τις προσομοιώσεις που περιγράφονται παραπάνω παρατηρήθηκε ότι οι ταχύτητες παραμόρφωσης που προέκυψαν ήταν πιο κοντά στο εύρος $4.8\text{--}7.8 \text{ sec}^{-1}$, οπότε τέθηκε το ερώτημα κατά πόσο χρειάζεται η εισαγωγή όλων των καμπυλών, ειδικά εάν ο μελετητής δεν μπορεί ελλείψει μέσων ή χρόνου να έχει τόσα πειραματικά αποτελέσματα, και επιπλέον εάν κατά την προσομοίωση γίνεται υπερεκτίμηση των μέγιστων τάσεων που προκύπτουν. Τελικά έγινε μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μόνο των δύο καμπυλών, της static όπου $\dot{\epsilon} = 0 \text{ sec}^{-1}$ και της $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{ sec}^{-1}$ όπως φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν, με τρία διαφορετικά μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων πλευράς 25mm , 12.5mm και 6.25mm :



Διάγραμμα 15: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 7 mm και ταχύτητα παραμόρφωσης 0 και $7,6 \text{ sec}^{-1}$



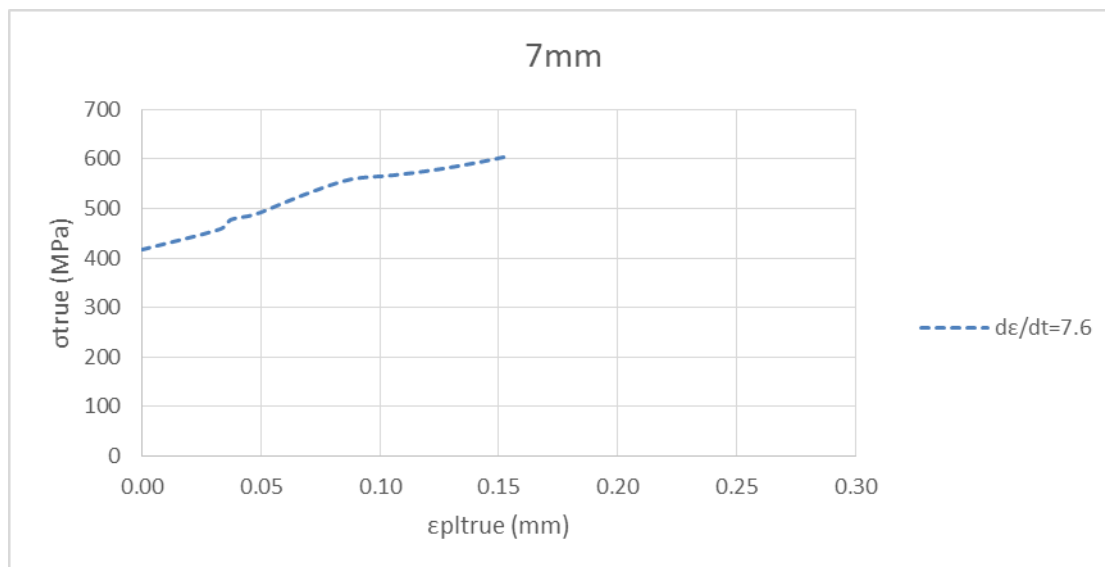
Διάγραμμα 16: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 8 mm και ταχύτητα παραμόρφωσης 0 και 7,6 sec^{-1}



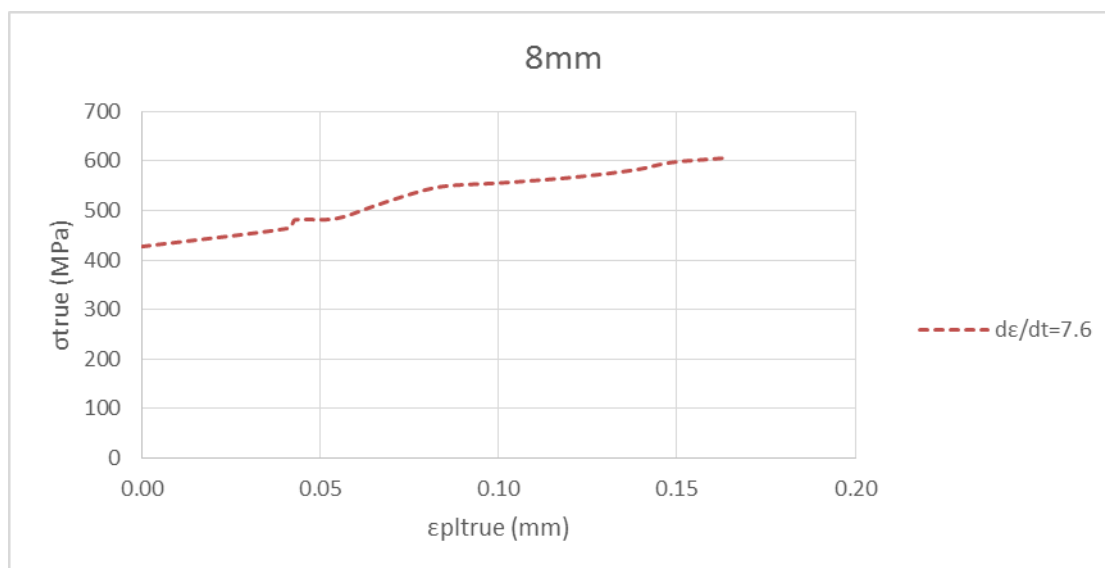
Διάγραμμα 17: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 10 mm και ταχύτητα παραμόρφωσης 0 και 7,6 sec^{-1}

3. Σαν εναλλακτική της προηγούμενης μοντελοποίησης και για να εκτιμηθεί κατά πόσο διαφοροποιούνται τα αποτελέσματα με την χρήση δεδομένων εξαρτημένων από την ταχύτητα παραμόρφωσης έγινε μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μόνο της καμπύλης τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{ sec}^{-1}$, χωρίς να χρησιμοποιηθεί η ταχύτητα παραμόρφωσης σαν

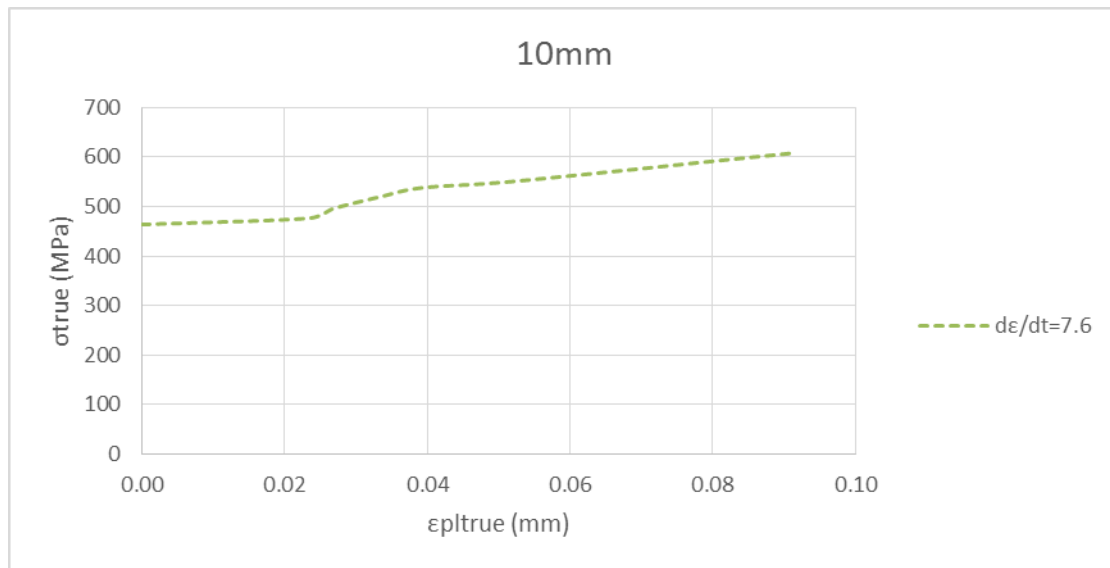
παράμετρος (σαν να ήταν static), όπως φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν, επίσης για τρία διαφορετικά μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων πλευράς 25 mm, 12.5 mm και 6.25 mm:



Διάγραμμα 18: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 7mm και ταχύτητα παραμόρφωσης 7.6 sec^{-1}



Διάγραμμα 19: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 8 mm και ταχύτητα παραμόρφωσης 7.6 sec^{-1}



Διάγραμμα 20: Οι πραγματικές (true) καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για πάχος δοκιμίου 10 mm και ταχύτητα παραμόρφωσης 7.6 sec⁻¹

4. Το λογισμικό επιτρέπει την εισαγωγή δεδομένων εξαρτημένων από την ταχύτητα παραμόρφωσης με στόχο την προσέγγιση του φαινομένου της δυναμικής σκλήρυνσης. Συχνά όμως ο μελετητής δεν έχει στη διάθεση του πειραματικές καμπύλες τάσης παραμόρφωσης. Εναλλακτικά το φαινόμενο της σκλήρυνσης του υλικού όταν υπόκειται σε δυναμική φόρτιση μπορεί να προσεγγισθεί με την σχέση Cowper-Symonds' όπου το όριο διαρροής προσαυξάνεται με τον παράγοντα που φαίνεται κάτωθι:

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{P}}$$

Όπου: σ_D = το όριο διαρροής δυναμικής καταπόνησης

σ_y = το όριο διαρροής

$\dot{\epsilon}$ = ρυθμός παραμόρφωσης

D, P = σταθερές του υλικού

Οι σταθερές του υλικού είναι ίσες με $D = 2560 \text{ sec}^{-1}$ και $P = 5$. Υπολογίστηκε ο λόγος σ_y/σ_D για $\dot{\epsilon} = 1 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7,6 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 88,4 \text{ sec}^{-1}$ και κατόπιν οι τρεις τιμές που προέκυψαν εισήχθησαν στο λογισμικό ως εξαρτημένες μεταβλητές από την ταχύτητα παραμόρφωσης. Η συγκεκριμένη μοντελοποίηση του υλικού έγινε για

δύο διαφορετικά μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων πλευράς 25 mm και 12.5 mm.

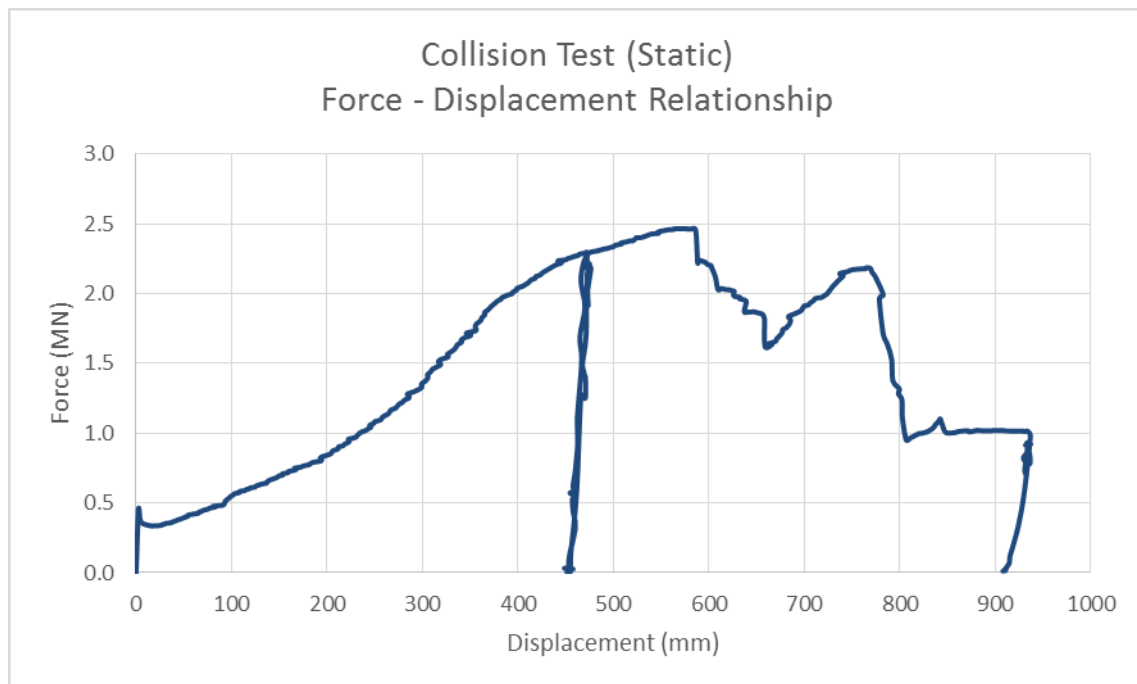
* Να σημειωθεί ότι οι προσομοιώσεις που έγιναν με μέγεθος πλευράς πεπερασμένου στοιχείου 6.25 mm απαιτούν υψηλό υπολογιστικό κόστος και είναι πολύωρες χωρίς να αποτελούν την βέλτιστη λύση για τον μελετητή, αλλά έγιναν λόγω των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με τις προσομοιώσεις με τα μεγέθη πλευράς στοιχείου 25 mm και 12.5 mm. Τα αποτελέσματα που οδήγησαν στην συγκεκριμένη μοντελοποίηση παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 6.2.

6 ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ)

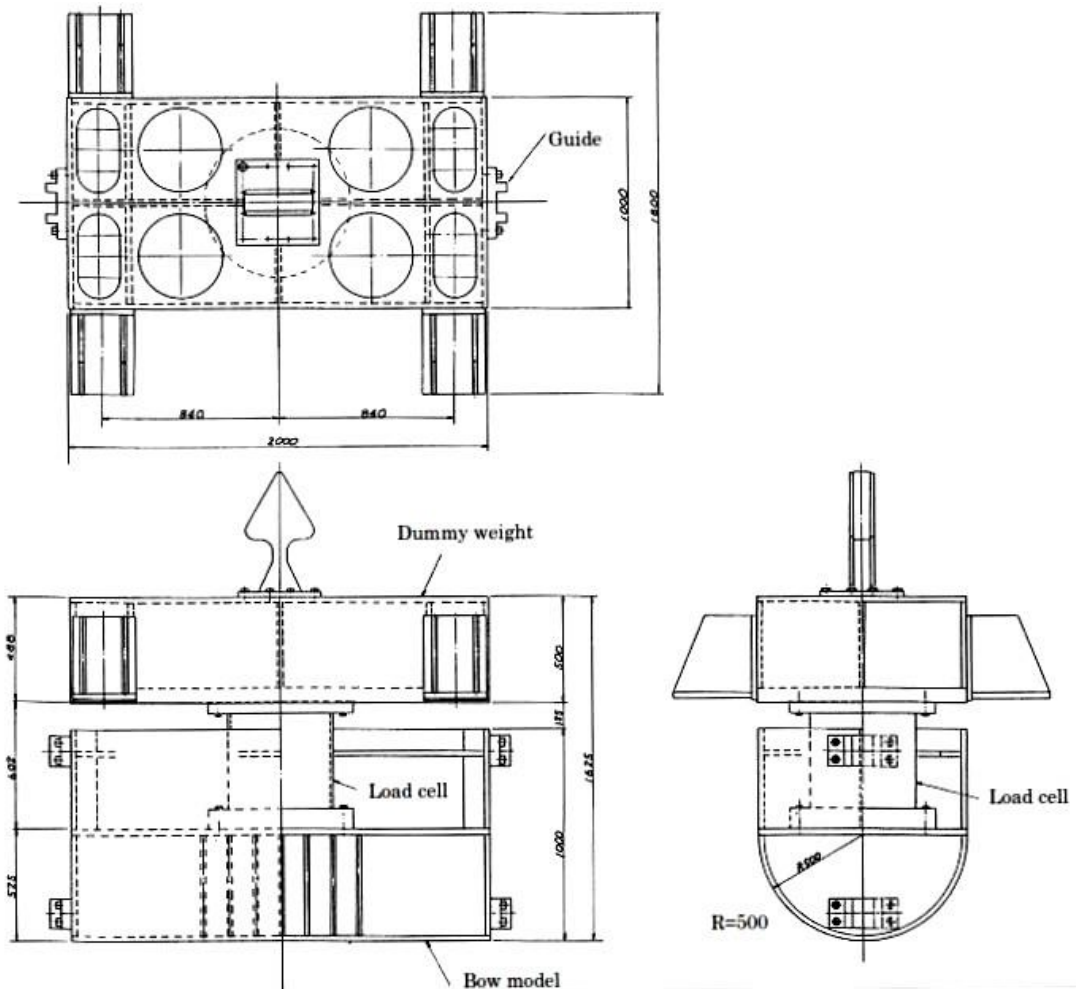
6.1 STATIC

Κατά την πειραματική διαδικασία το μοντέλο του βολβού πιέστηκε υδραυλικά πάνω σε ράγες ώστε να έχει την κατάλληλη διεύθυνση. Ο στόχος ήταν να διεισδύσει περί τα 900 mm . Η διαδρομή του υδραυλικού εμβόλου ήταν 500 mm , οπότε το μοντέλο του βολβού πιέστηκε πρώτα μέχρι τα 450 mm και μετά ξαναπιέστηκε μέχρι να φτάσει στο τελικό μήκος. Η ταχύτητα δεν ήταν ξεκάθαρη, αλλά ήταν πολύ αργή.

Το πειραματικό διάγραμμα της συνολικής δύναμης συναρτήσει της μετατόπισης του μοντέλου βολβού ακολουθεί.



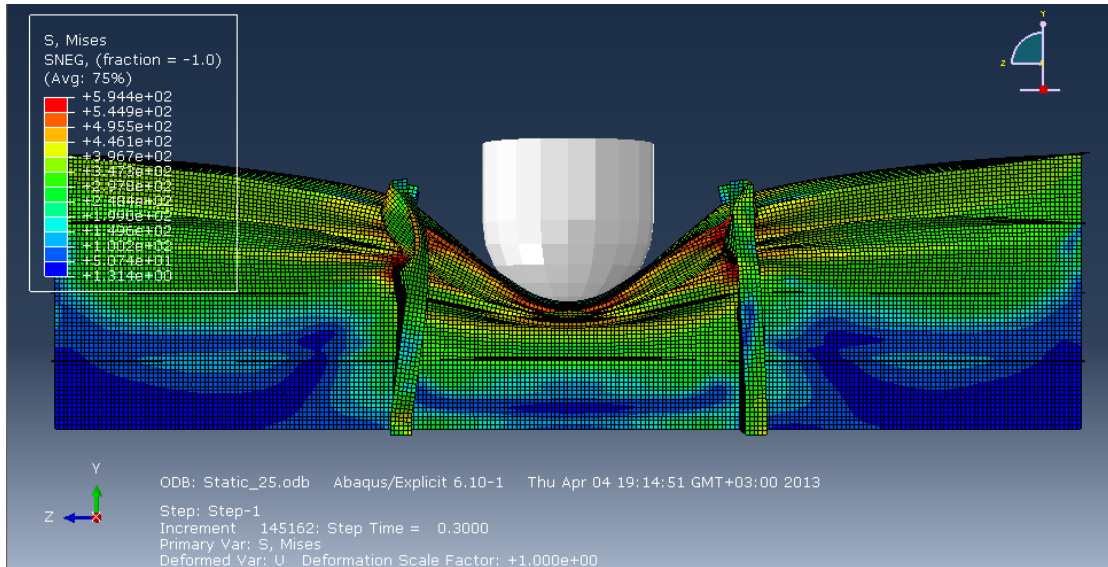
Διάγραμμα 21: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Static test



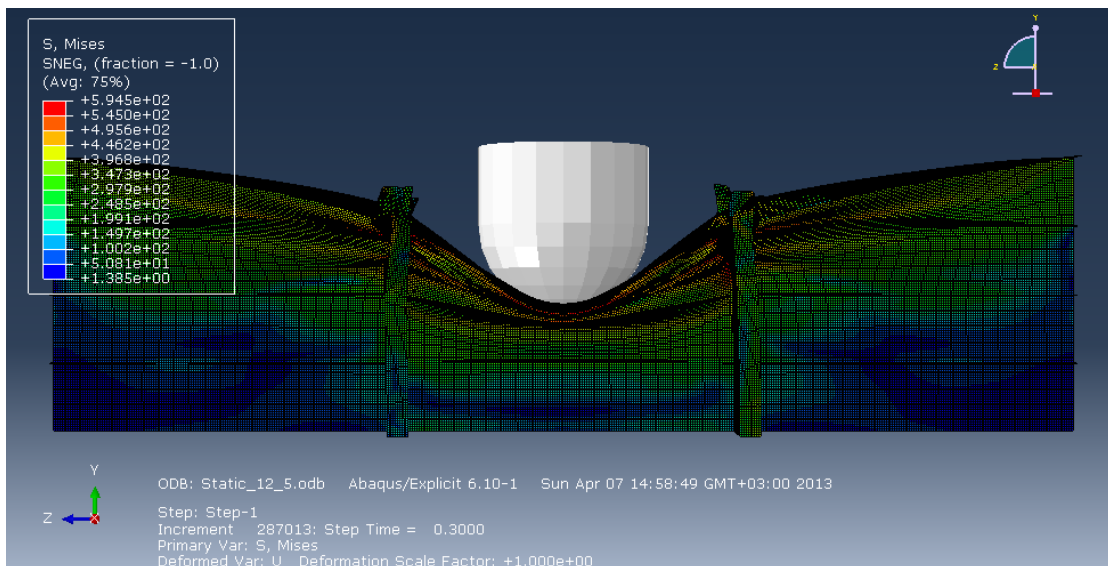
Εικόνα 26: το μοντέλο του βολβού

Η προσομοίωση του Static test στο λογισμικό Simulia Abaqus έγινε με μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων με πλευρά 25 mm, 12.5 mm.

Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου με την ισοδύναμη τάση κατά Von Mises φαίνεται στα παρακάτω στιγμιότυπα.

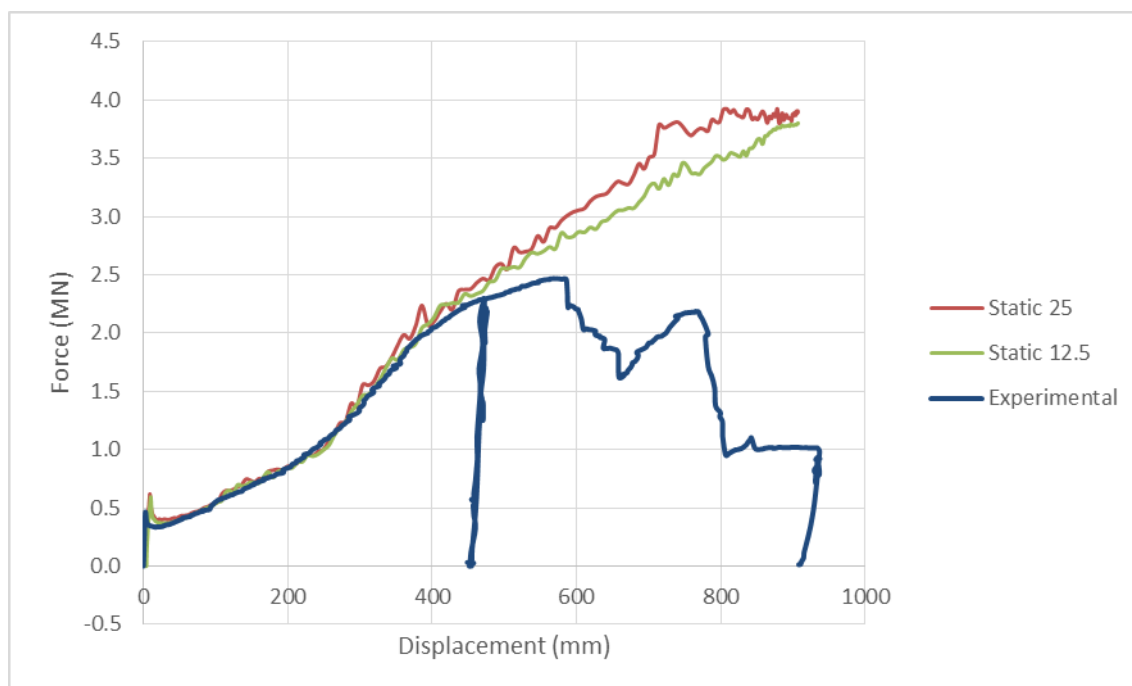


Εικόνα 27: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Static test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 25 mm



Εικόνα 28: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Static test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 12.5 mm

Τα διαγράμματα της συνολικής δύναμης συναρτήσει της μετατόπισης απ' τις δύο προσομοιώσεις καθώς και η πειραματική καμπύλη, για λόγους εποπτείας, παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα.

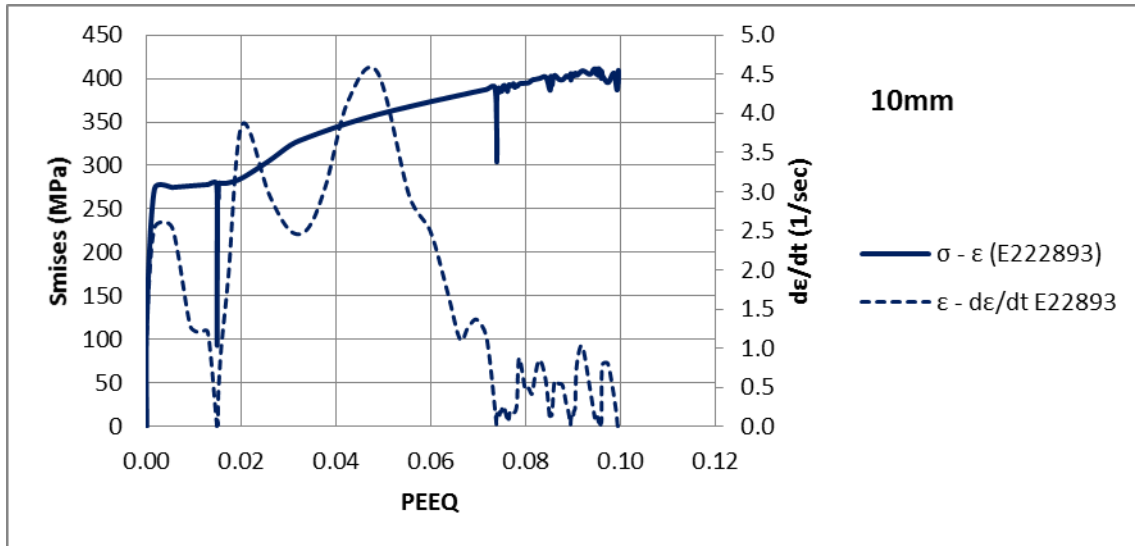


Διάγραμμα 22: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Static test, προσομοιώσεις και πειραματική καμπύλη

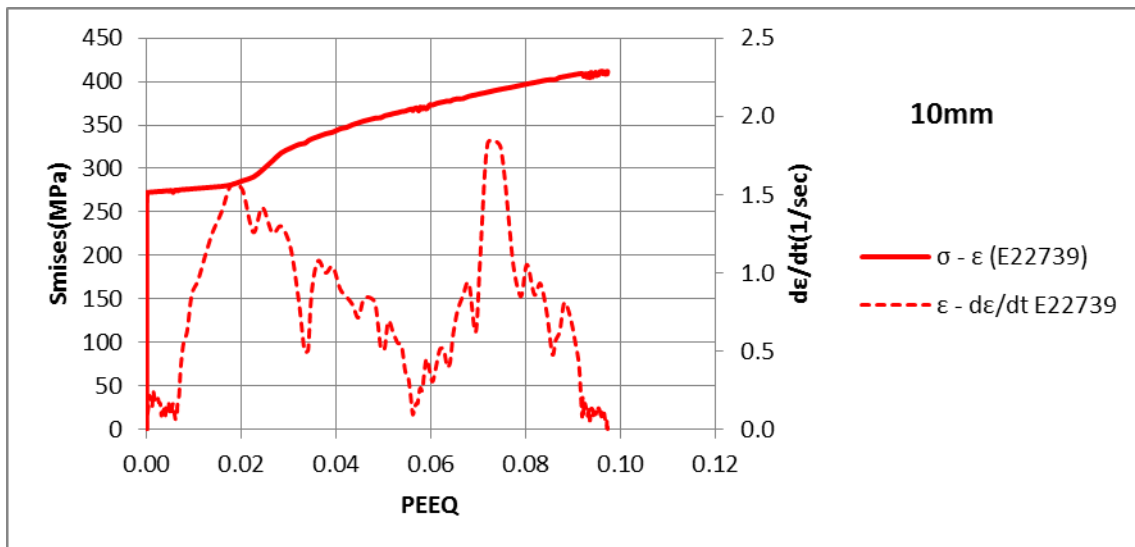
Και οι δύο διακριτοποιήσεις ακολουθούν την πειραματική καμπύλη μέχρι τα 470mm και κατόπιν αποκλίνουν καθώς οι προσομοιώσεις δεν περιλαμβάνουν κριτήριο αστοχίας. Η επιλογή πεπερασμένου στοιχείου πλευράς $12,5\text{mm}$ δίνει αποτελέσματα πιο κοντά στα πειραματικά και με μικρότερες διακυμάνσεις.

6.1.1 Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για την προσομοίωση του Static Test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού πεπερασμένου στοιχείου κελύφους (S4R) 25mm

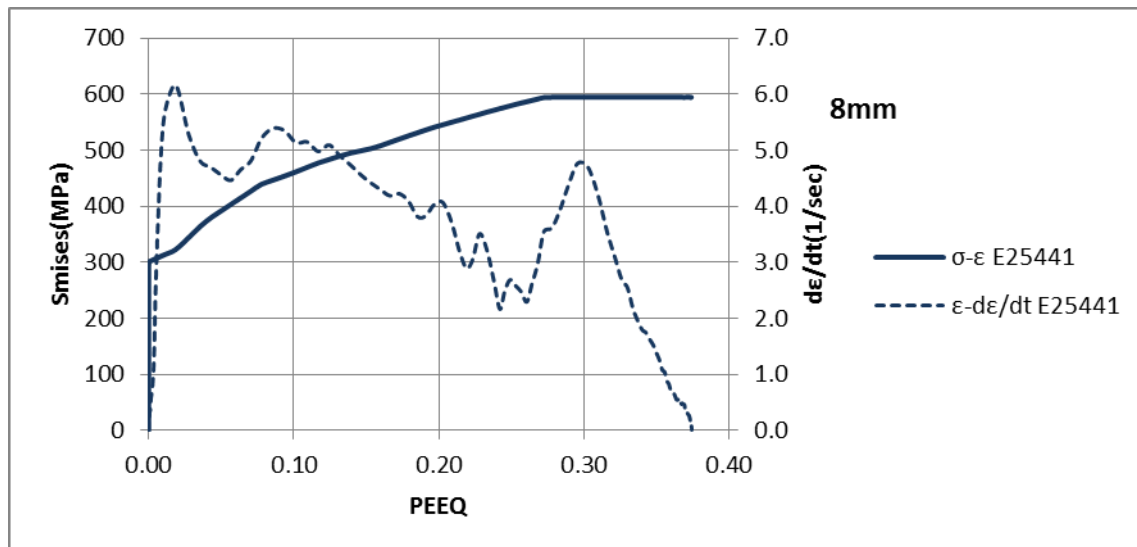
Παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης σε κάποια χαρακτηριστικά σημεία του μοντέλου για τα τρία διαφορετικά πάχη ελάσματος, 10mm , 8mm και 7mm . Επίσης σε δευτερεύων άξονα φαίνεται και η ταχύτητα παραμόρφωσης σε κάθε σημείο. Επειδή στην Static προσομοίωση είναι χαμηλή η ταχύτητα του μοντέλου του βολβού, δεν έγινε μοντελοποίηση του υλικού με δεδομένα εξαρτημένα από την ταχύτητα παραμόρφωσης.



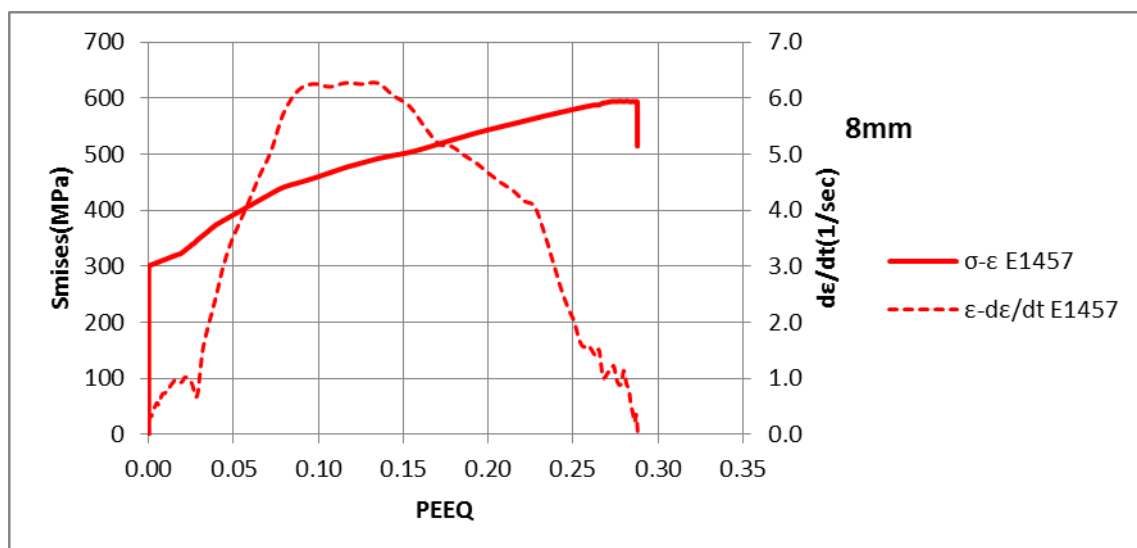
Διάγραμμα 23: S_{mises} – PEEQ, Element: 222893, Static 25 mm



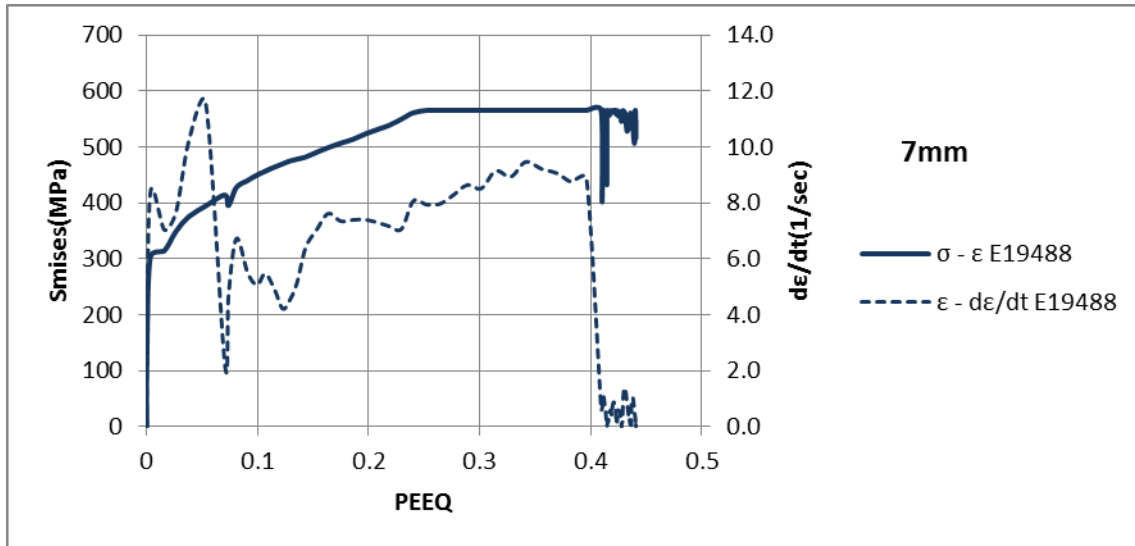
Διάγραμμα 24: S_{mises} – PEEQ, Element: 22739, Static 25 mm



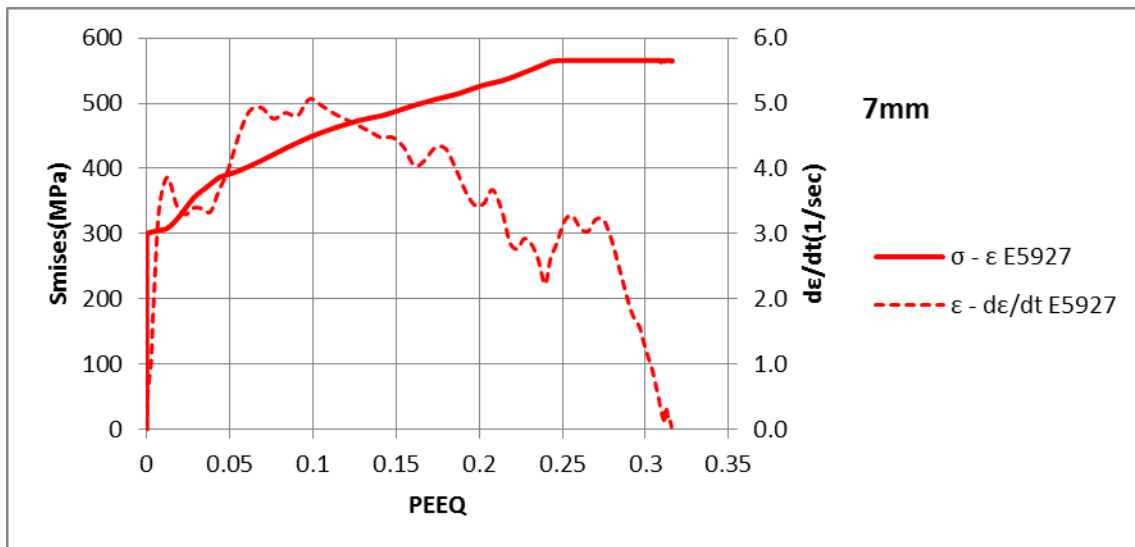
Διάγραμμα 25: Smises – PEEQ, Element: 25441, Static 25 mm



Διάγραμμα 26: Smises – PEEQ, Element: 1457, Static 25 mm



Διάγραμμα 27: Smises – PEEQ, Element: 19488, Static 25 mm

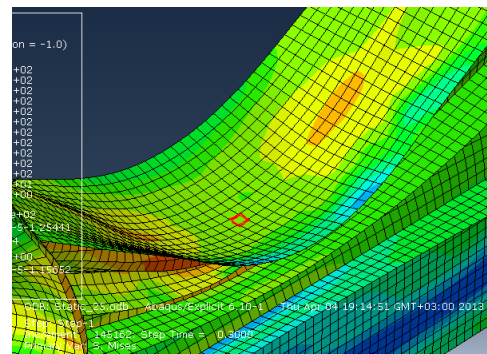
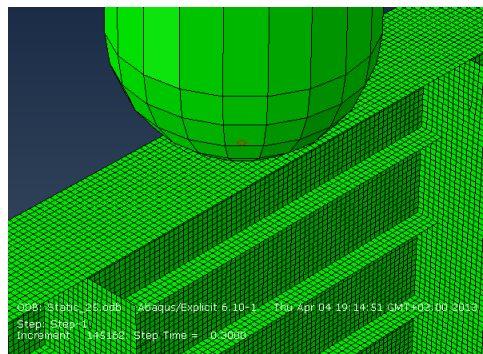


Διάγραμμα 28: Smises – PEEQ, Element: 5927, Static 25 mm

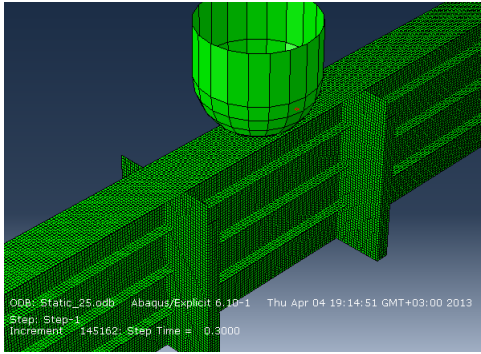
Στον πίνακα και στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται τα στοιχεία από τα οποία προέρχονται τα διαγράμματα και οι θέσεις τους.

Element: PART-5-1.22893 (U=Umax)
Type: S4R Material: STATIC_10MM Connect: 24078, 3075, 3074, 24086 S, Mises (Not averaged): 406.272
Element: PART-5-1.22739
Type: S4R Material: STATIC_10MM Connect: 23941, 23942, 23950, 23949 S, Mises (Not averaged): 411.012
Element: PART-5-1.25441 (Smises=Smises,max)
Type: S4R Material: STATIC_8MM Connect: 26376, 26377, 26394, 26393 S, Mises (Not averaged): 594.441
Element: PART-5-1.1457
Type: S4R Material: STATIC_8MM Connect: 115, 5587, 336, 5 S, Mises (Not averaged): 514.861
Element: PART-5-1.19488 (κάτω από impactor)
Type: S4R Material: STATIC_7MM Connect: 21127, 21128, 3075, 3076 S, Mises (Not averaged): 542.707
Element: PART-5-1.5927
Type: S4R Material: STATIC_7MM Connect: 9237, 9238, 9317, 9316 S, Mises (Not averaged): 564.793

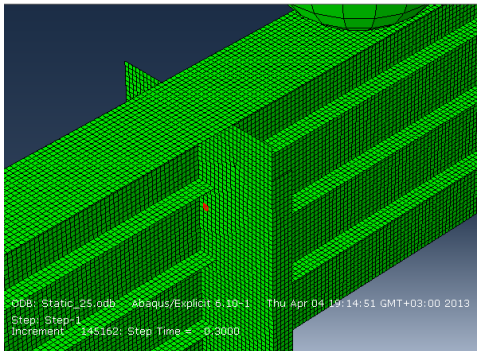
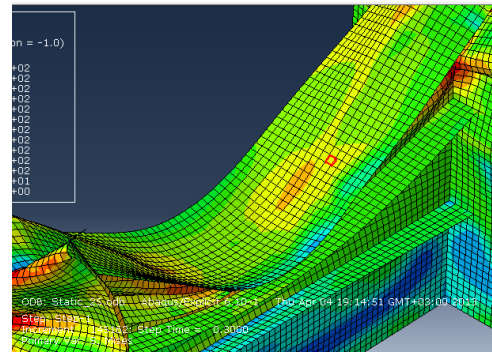
Πίνακας 3: Οι θέσεις των elements για την προσομοίωση Static 25



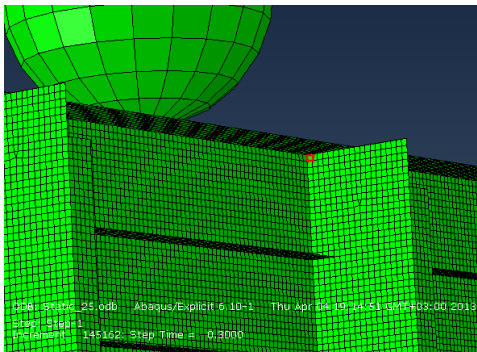
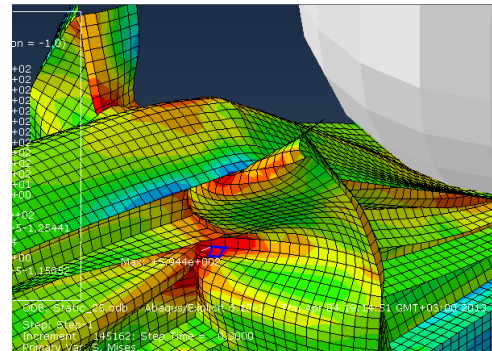
Element: PART-5-1.22893 (U=Umax)



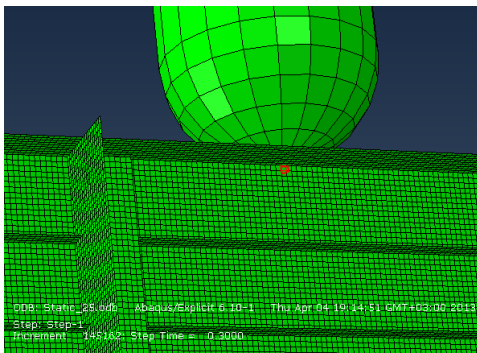
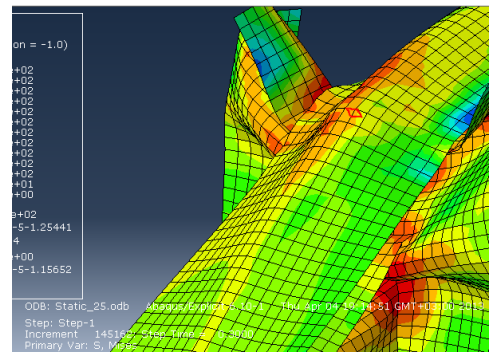
Element: PART-5-1.22739



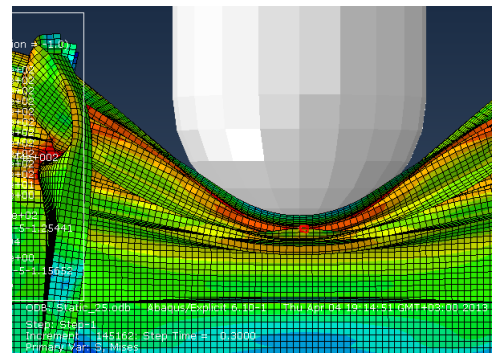
Element: PART-5-1.25441 (Smises,max)

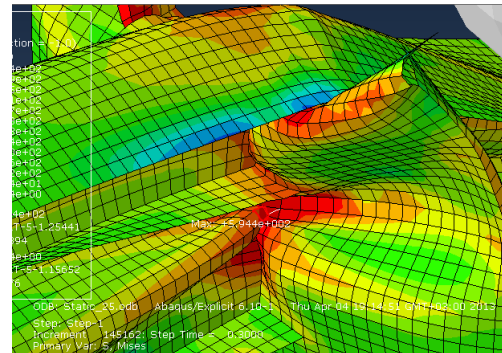
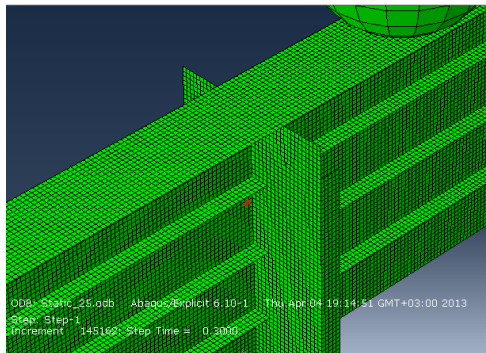


Element: PART-5-1.1457



Element: PART-5-1.19488

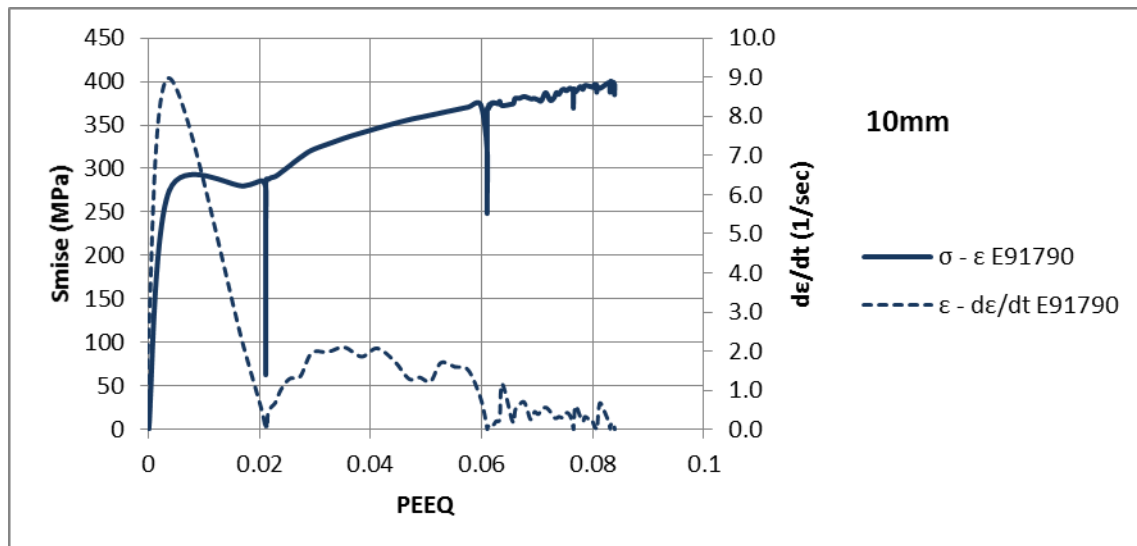




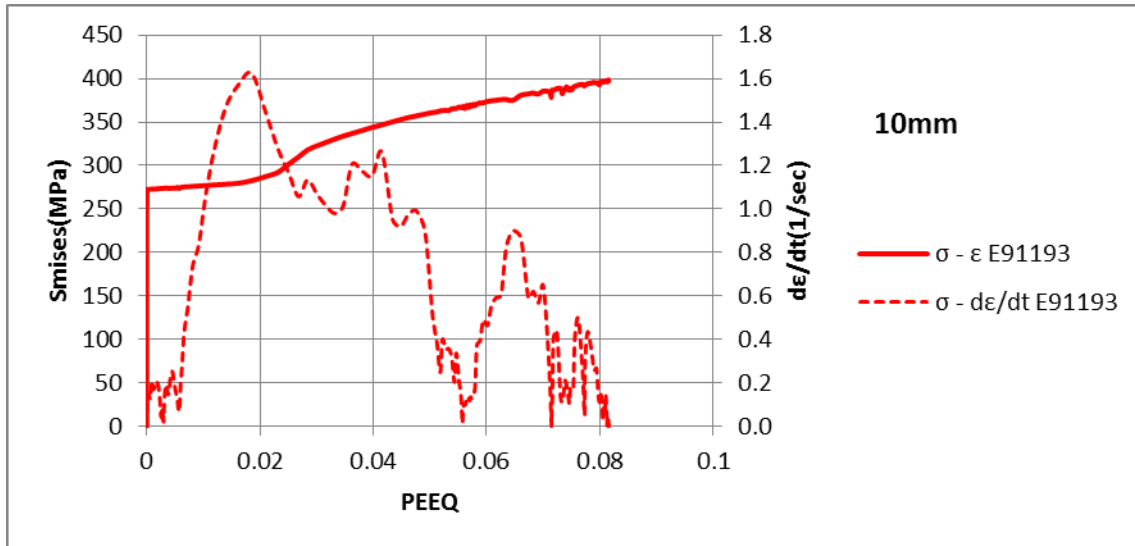
Element: PART-5-1.5927

6.1.2 Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για την προσομοίωση του Static Test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού πεπερασμένου στοιχείου κελύφους (S4R) 12.5mm.

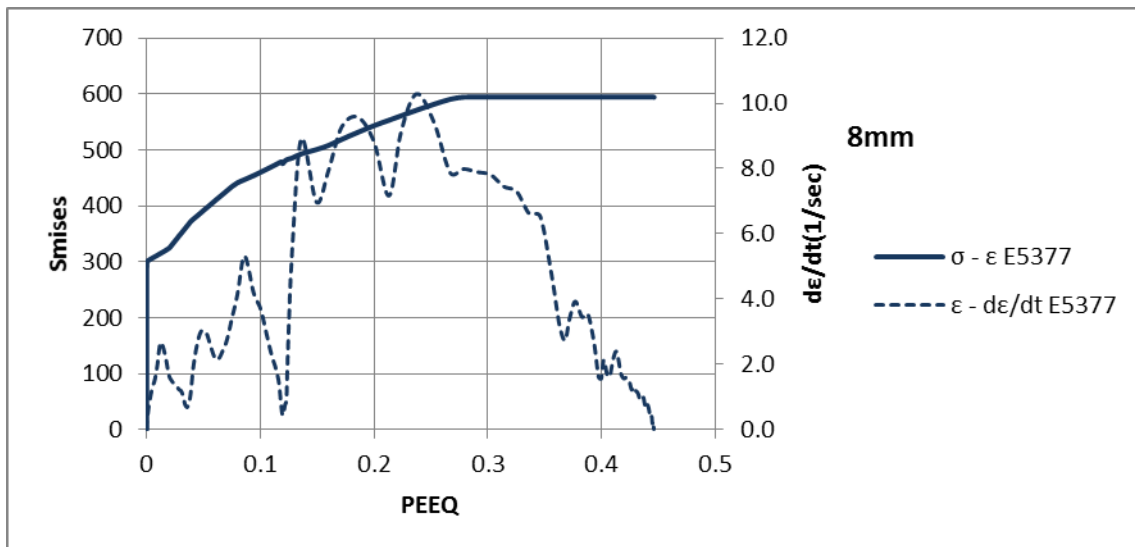
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης σε κάποια χαρακτηριστικά σημεία του μοντέλου για τα τρία διαφορετικά πάχη ελάσματος, 10 mm, 8 mm και 7 mm.



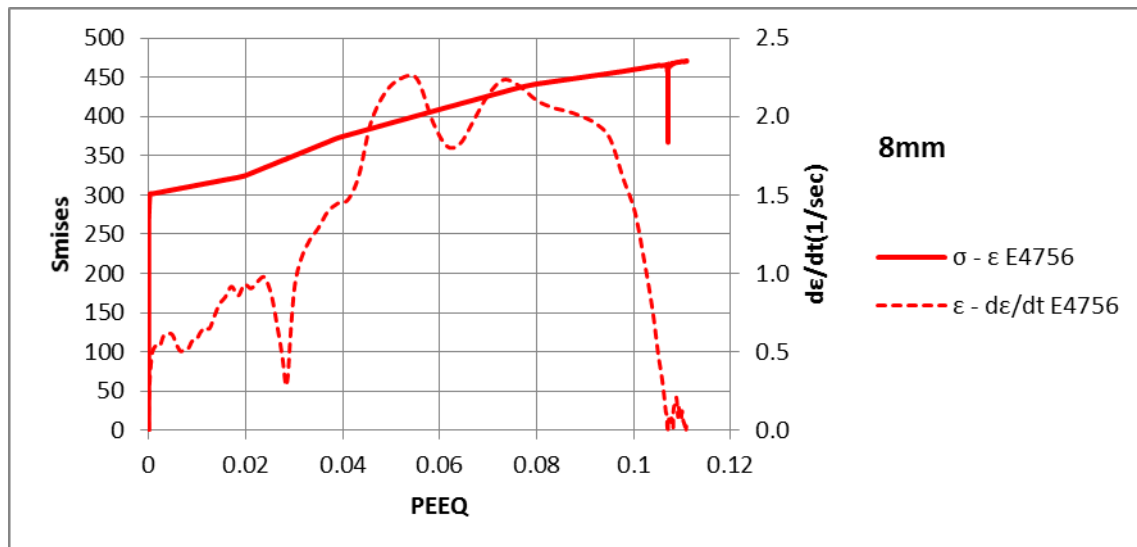
Διάγραμμα 29: Smises – PEEQ, Element: 91790, Static 12.5 mm



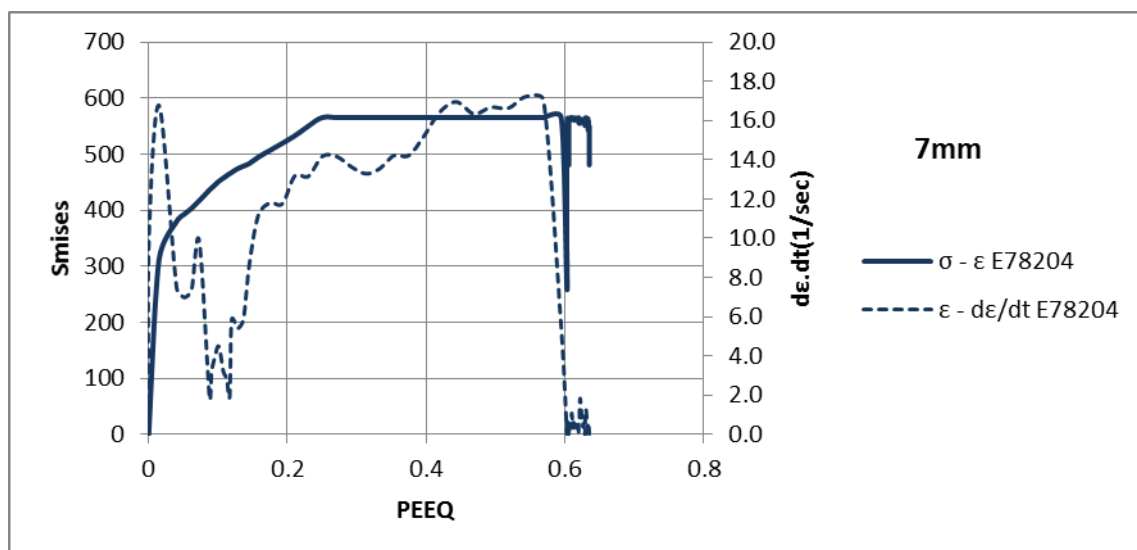
Διάγραμμα 30: Smises – PEEQ, Element: 91193, Static 12.5 mm



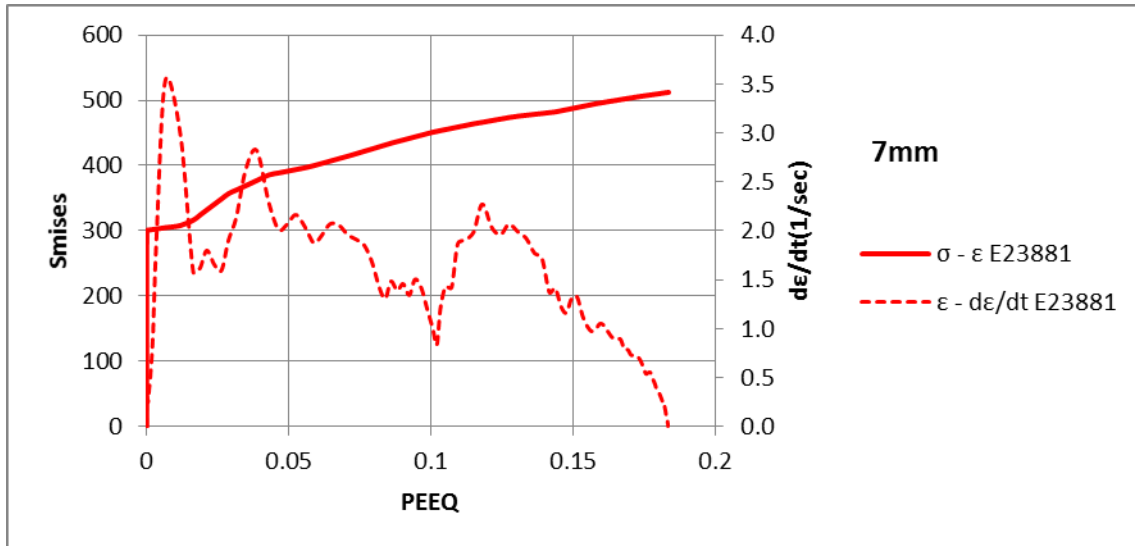
Διάγραμμα 31: Smises – PEEQ, Element: 5377, Static 12.5 mm



Διάγραμμα 32: Smises – PEEQ, Element: 4756, Static 12.5 mm



Διάγραμμα 33: Smises – PEEQ, Element: 78204, Static 12.5 mm



Διάγραμμα 34: Smises – PEEQ, Element: 23881, Static 12.5 mm

Στον πίνακα και στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται τα στοιχεία από τα οποία προέρχονται τα διαγράμματα και οι θέσεις τους.

Element: PART-5-1.91790 (U=Umax)
Type: S4R Material: STATIC_10MM Connect: 94176, 6179, 6178, 94193 S, Mises (Not averaged): 392.681
Element: PART-5-1.91193
Type: S4R Material: STATIC_10MM Connect: 93612, 93613, 93630, 93629 S, Mises (Not averaged): 397.966
Element: PART-5-1.5377 (S=Smises, max)
Type: S4R Material: STATIC_8MM Connect: 13710, 13711, 13743, 13742 S, Mises (Not averaged): 594.45
Element: PART-5-1.4756
Type: S4R Material: STATIC_8MM Connect: 5, 150, 13140, 614 S, Mises (Not averaged): 471.112

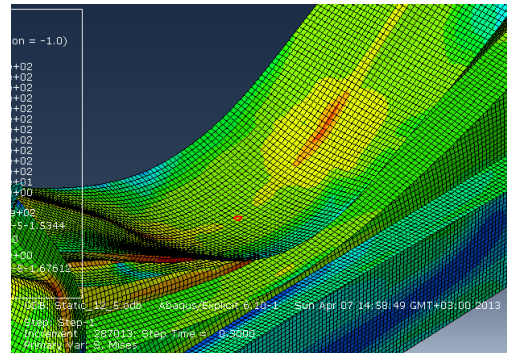
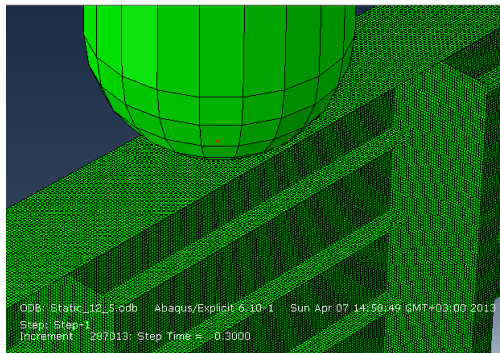
Element: PART-5-1.78204 (Κάτω από impactor)

Type: S4R
 Material: STATIC_7MM
 Connect: 81507, 81508, 6179, 6180
 S, Mises (Not averaged): 523.316

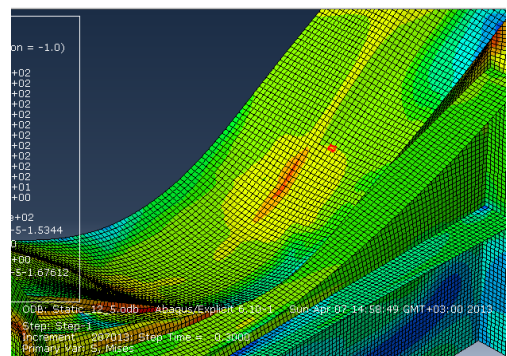
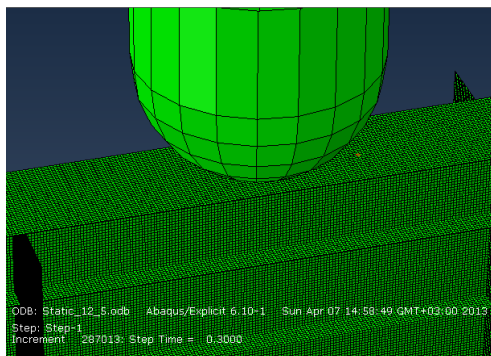
Element: PART-5-1.23881

Type: S4R
 Material: STATIC_7MM
 Connect: 30545, 30546, 30705, 30704
 S, Mises (Not averaged): 512.076

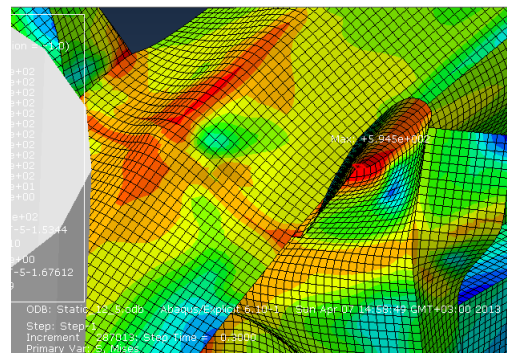
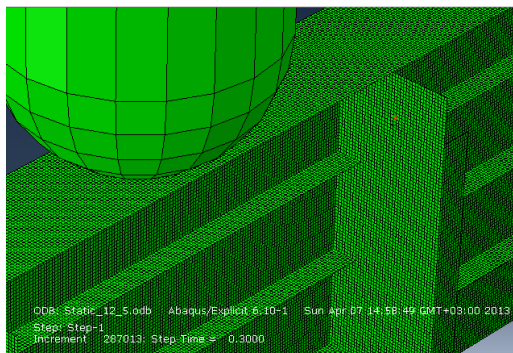
Πίνακας 4: Οι θέσεις των elements για την προσομοίωση Static 12.5



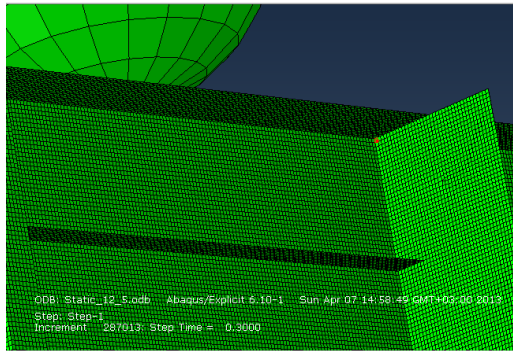
Element: PART-5-1.91790 (U=Umax)



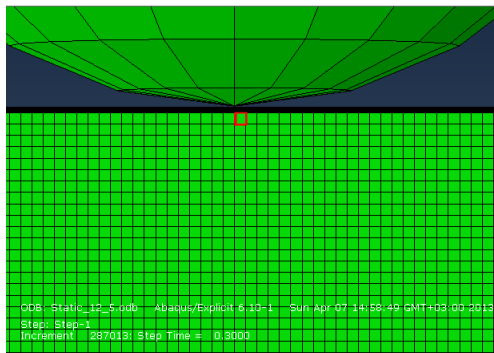
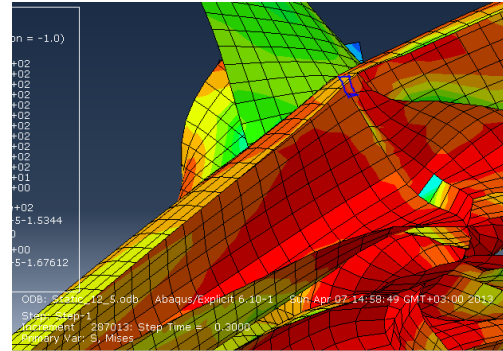
Element: PART-5-1.91193



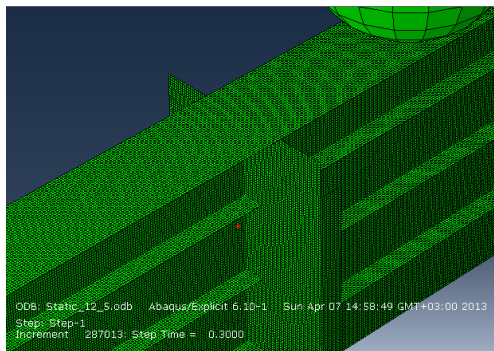
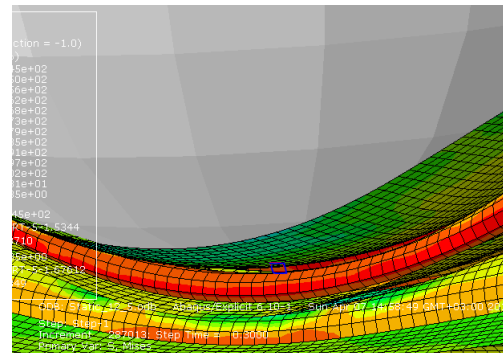
Element: PART-5-1.5377 (S=Smises, max)



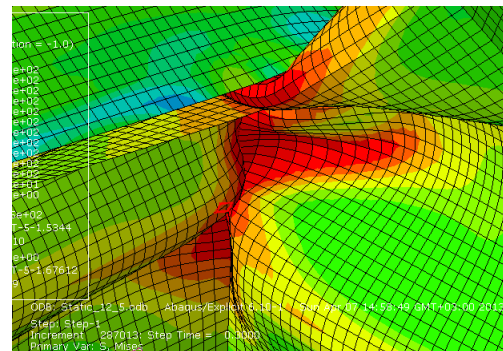
Element: PART-5-1.4756



Element: PART-5-1.78204



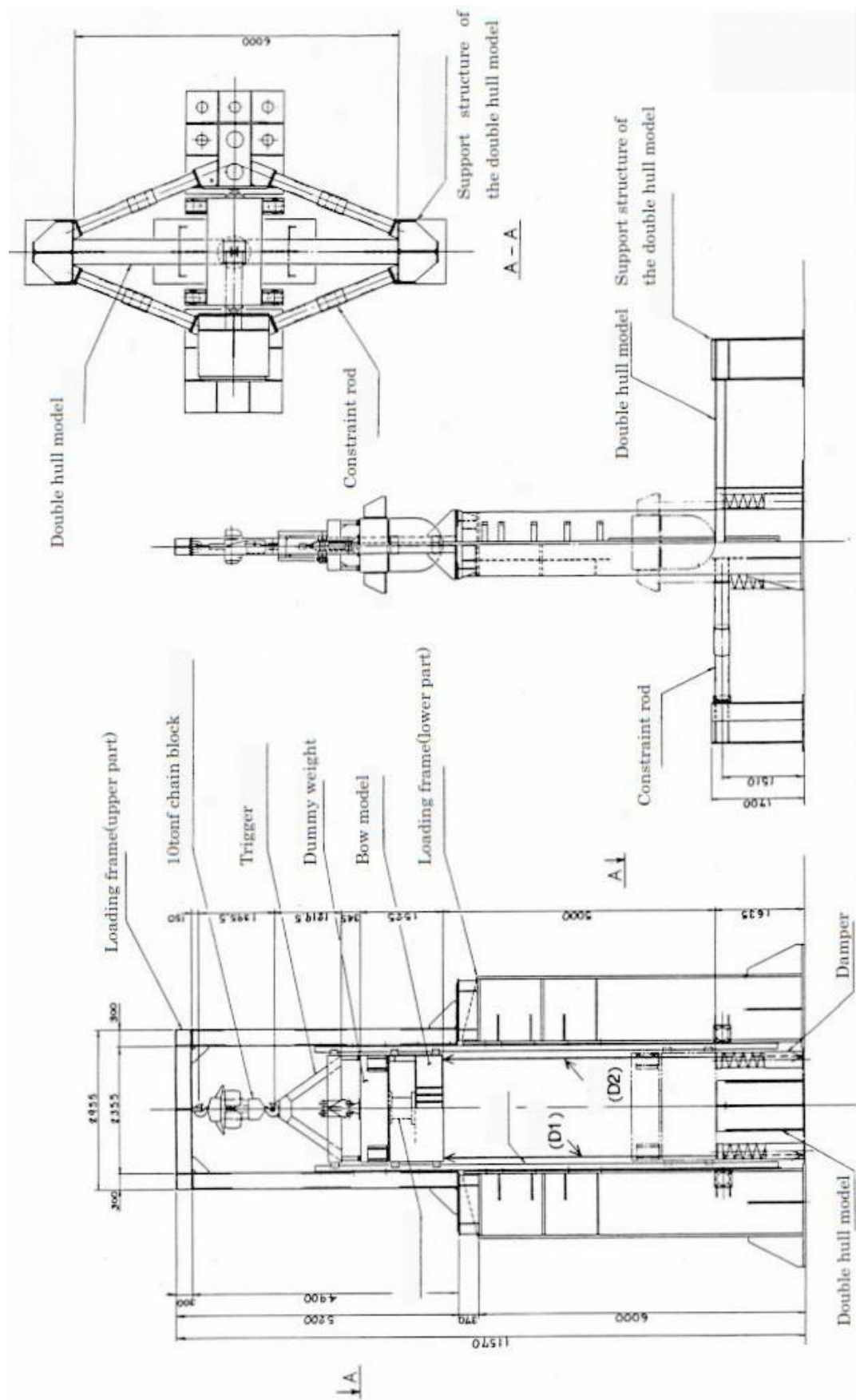
Element: PART-5-1.23881



6.2 DYNAMIC

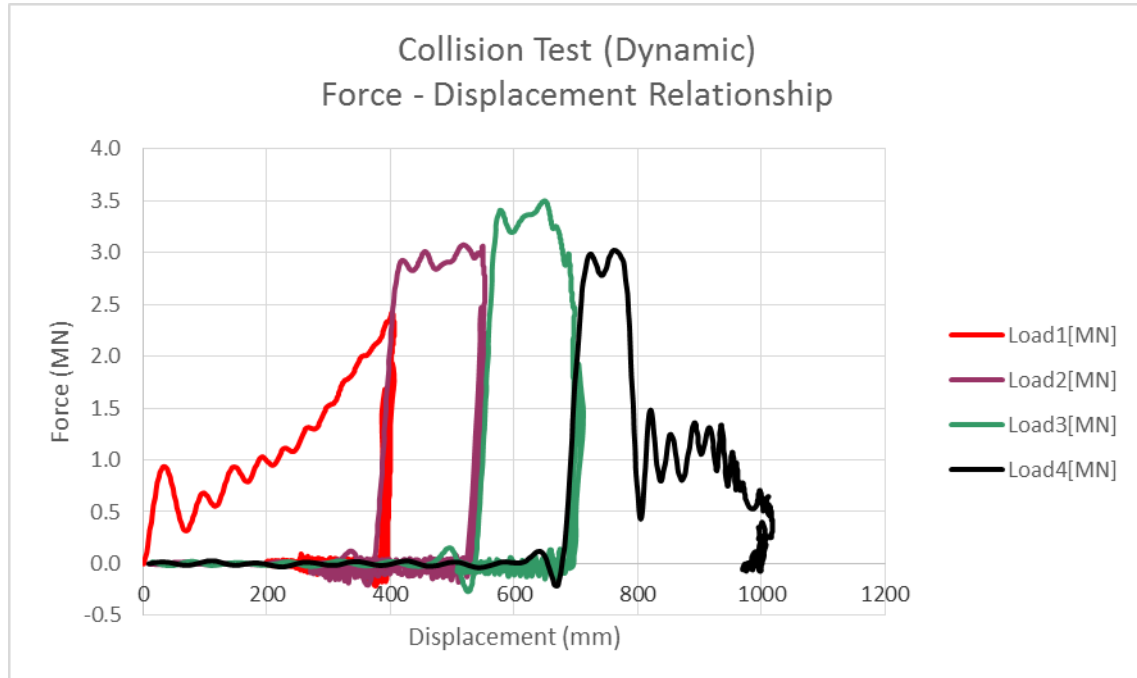
Κατά την διεξαγωγή του Dynamic Test το μοντέλο του βολβού με κατάλληλο βάρος αφήθηκε σε ελεύθερη πτώση από τα 4,8 m έτσι ώστε η ταχύτητα σύγκρουσης να είναι περί τα 9.7 m/sec. Οι αποσβεστήρες που φαίνονται στο σχήμα είναι έτσι σχεδιασμένοι ώστε η μέγιστη διείσδυση να φτάνει τα 1000 mm.

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 29: Η πειραματική διάταξη του Dynamic test

Το πειραματικό διάγραμμα της συνολικής δύναμης συναρτήσει της μετατόπισης του μοντέλου βολβού ακολουθεί.

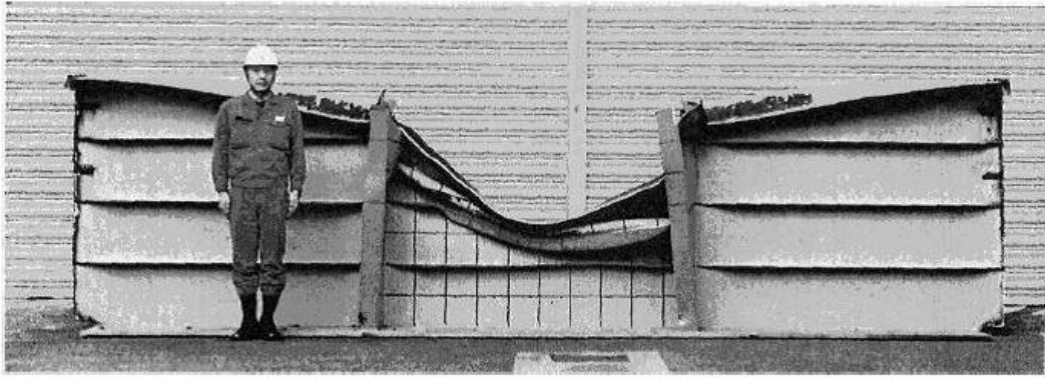


Διάγραμμα 35: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test

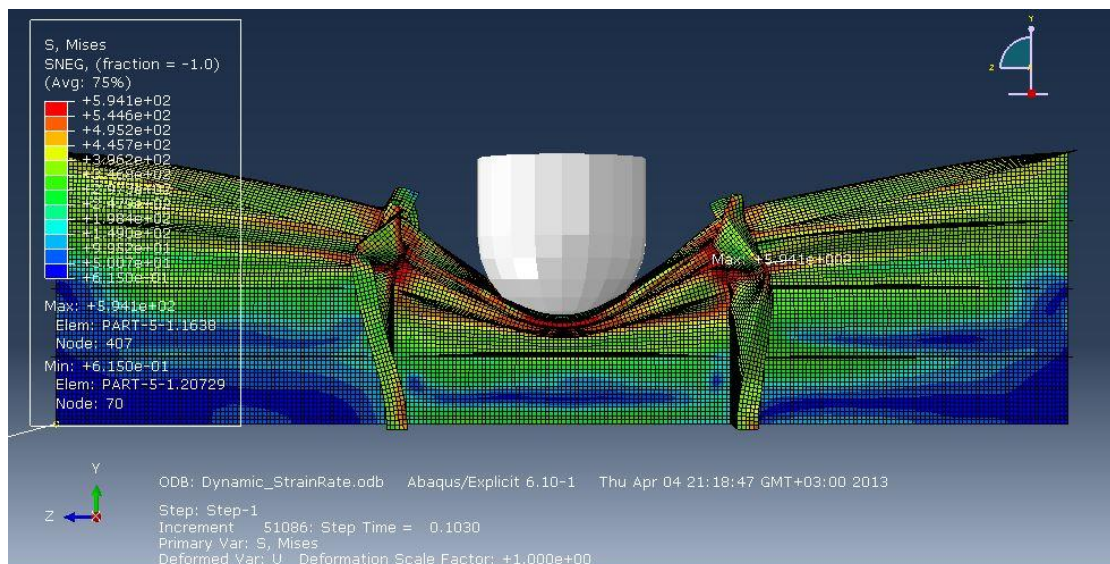
Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου με την ισοδύναμη τάση κατά Von Mises φαίνεται στα παρακάτω στιγμιότυπα για κάθε μία από τις δέκα διαφορετικές προσομοιώσεις που περιγράφονται στην παράγραφο 4.2.

Στα παρακάτω σχήματα στο πεδίο μοντελοποίησης του υλικού έγινε εισαγωγή και των τεσσάρων πραγματικών καμπύλων τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης καθώς και της ταχύτητας παραμόρφωσης στην οποία αντιστοιχεί η κάθε καμπύλη (strain rate dependent data). Δηλαδή χρησιμοποιήθηκαν για το κάθε πάχος ελάσματος (7 mm, 8 mm και 10 mm) και οι τέσσερις καμπύλες που φαίνονται στα διαγράμματα 12, 13 και 14.

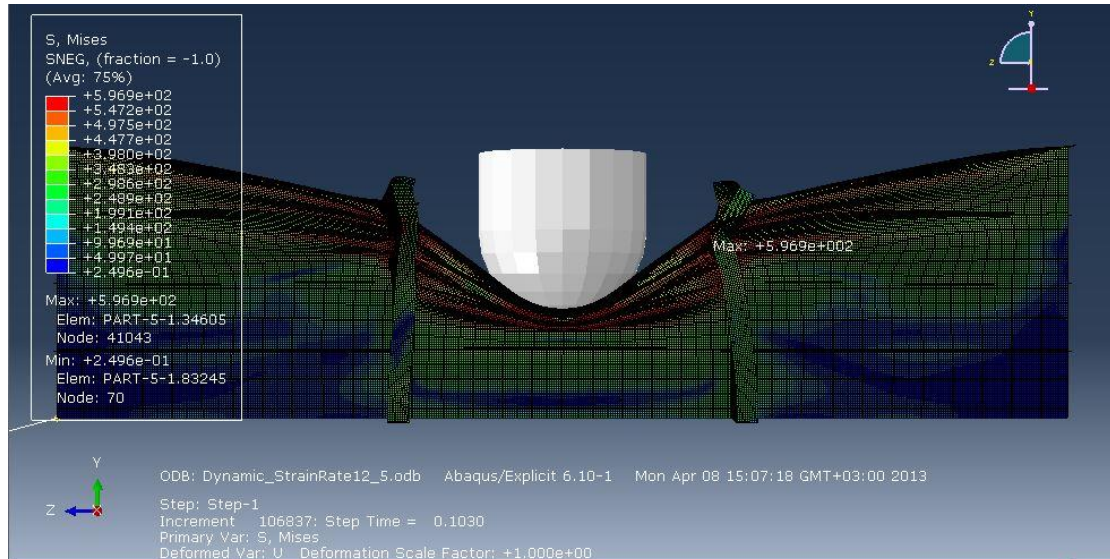
Στις εικόνες 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 και 40 φαίνεται το τελικό παραμορφωμένο σχήμα που προέκυψε για τις δέκα διαφορετικές μοντελοποιήσεις ενώ στην Εικόνα 30 παρουσιάζεται και η παραμορφωμένη κατασκευή για διείσδυση 800 mm.



Εικόνα 30: Τελικό παραμορφωμένο σχήμα της πειραματικής κατασκευής για διείδυση 900 mm (ASIS 1993)

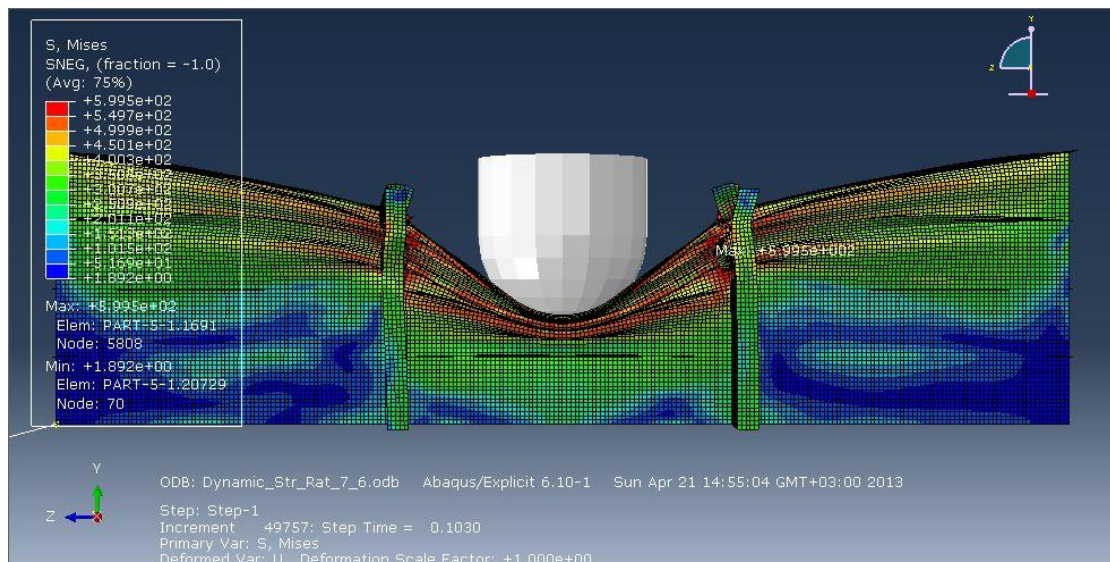


Εικόνα 31: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 25 mm (εισαγωγή και των τεσσάρων πραγματικών καμπύλων τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 0\text{sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1\text{sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6\text{sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4\text{sec}^{-1}$)

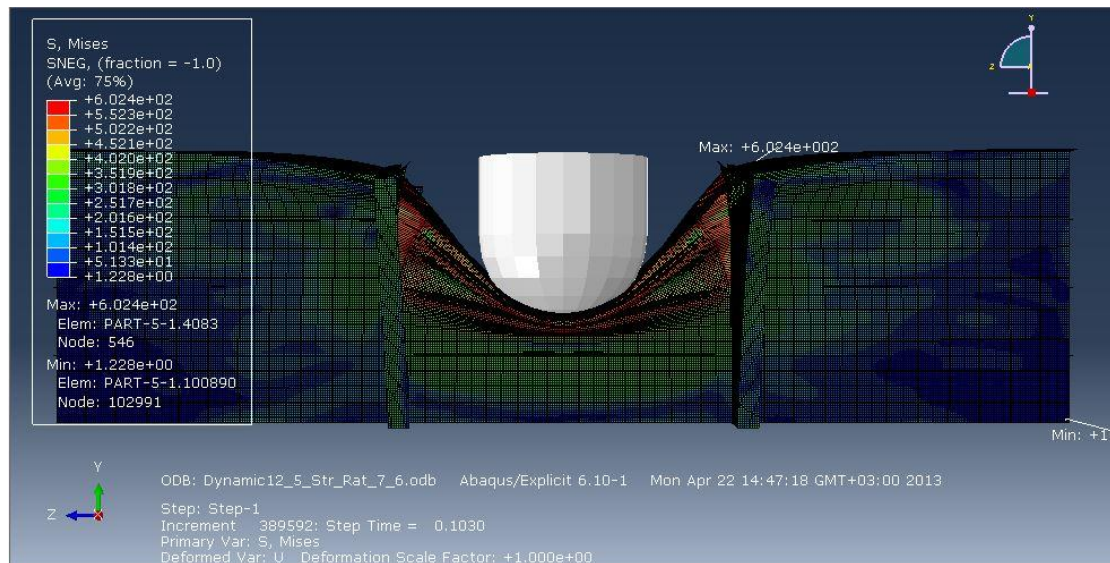


Εικόνα 32: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 12.5 mm (εισαγωγή και των τεσσάρων πραγματικών καμπύλων τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4sec^{-1}$)

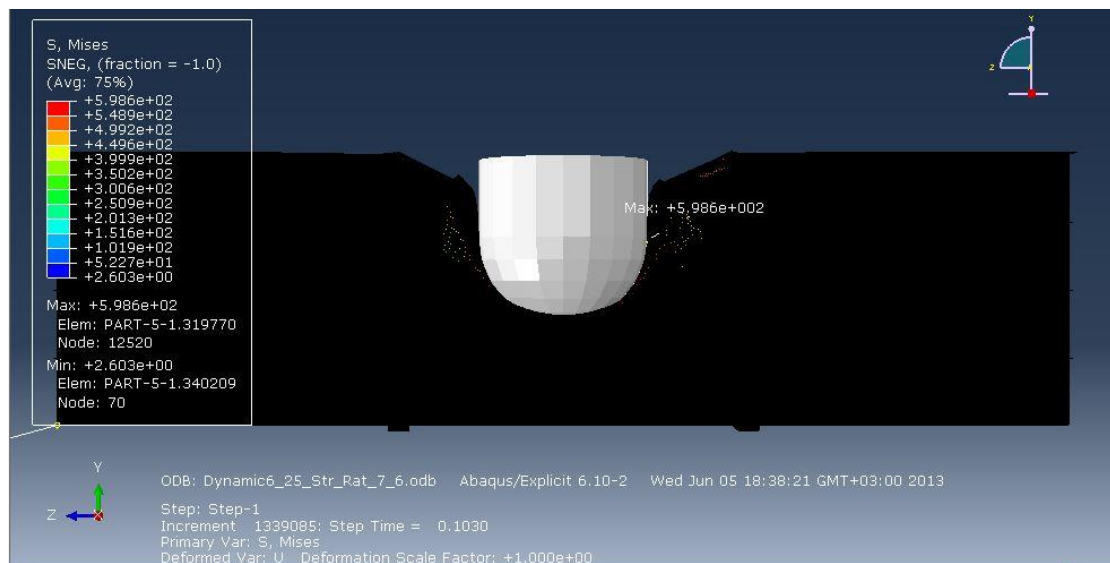
Στα σχήματα που ακολουθούν έγινε μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μόνο των δύο καμπυλών, της static όπου $\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και της $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$ με τρία διαφορετικά μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων πλευράς 25mm, 12.5mm και 6.25mm.



Εικόνα 33: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 25 mm (εισαγωγή των δύο πραγματικών καμπύλων τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$)

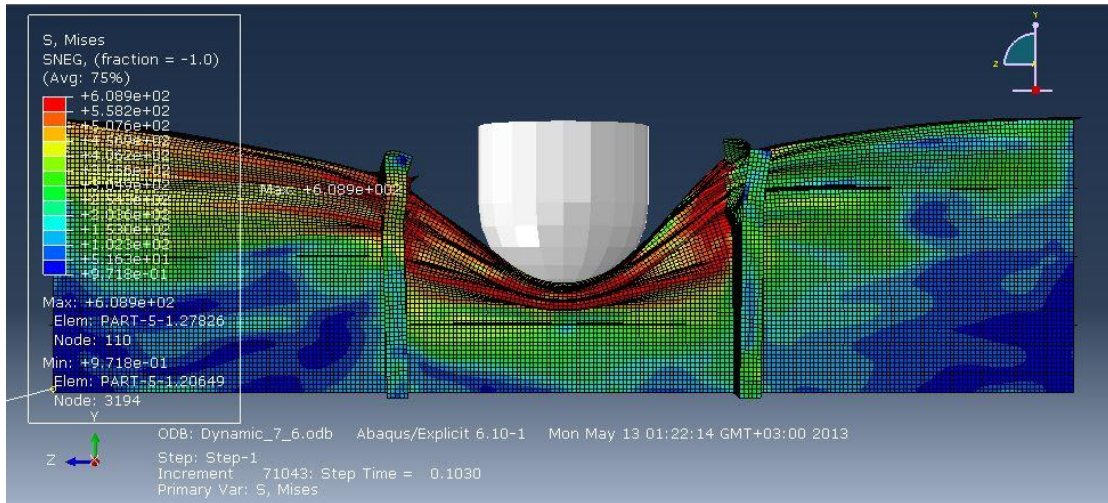


Εικόνα 34: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 12.5 mm (εισαγωγή των δύο πραγματικών καμπύλων τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 0 \text{sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$)

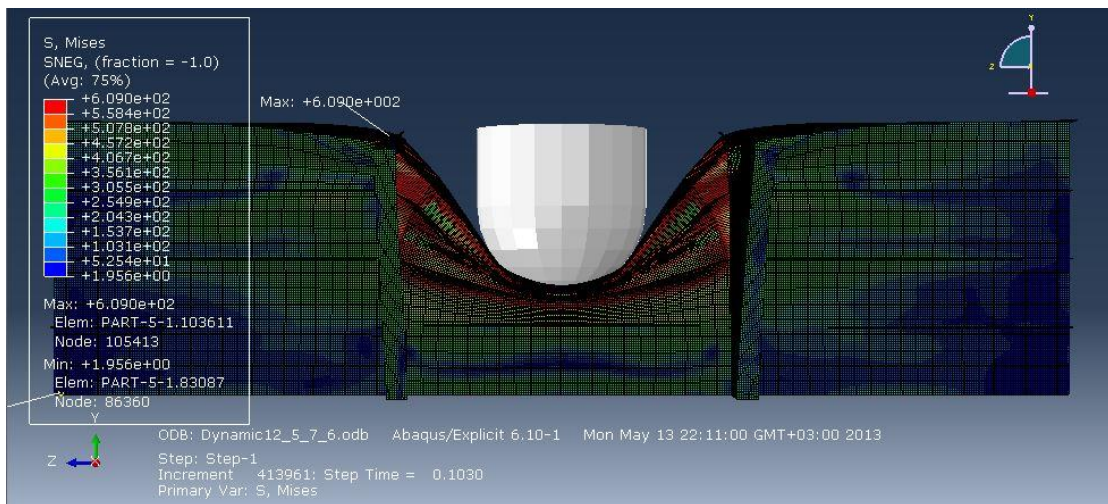


Εικόνα 35: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 6.25 mm (εισαγωγή των δύο πραγματικών καμπύλων τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 0 \text{sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$)

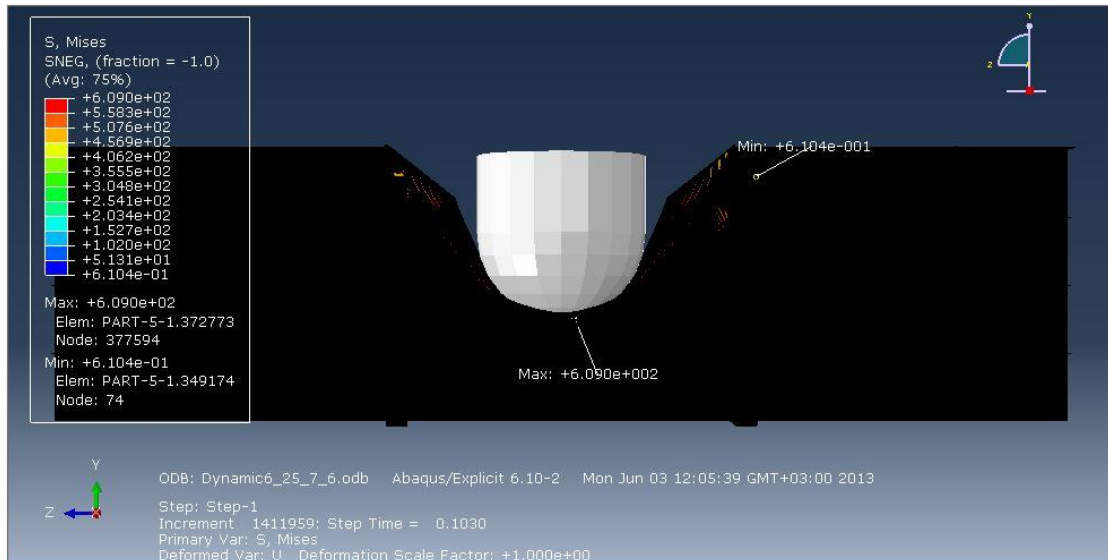
Στα παρακάτω σχήματα έγινε μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μόνο της καμπύλης τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$, χωρίς να χρησιμοποιηθεί η ταχύτητα παραμόρφωσης σαν παράμετρος (σαν να ήταν static).



Εικόνα 36: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 25 mm (εισαγωγή μίας πραγματικής καμπύλης τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 7.6\text{sec}^{-1}$)

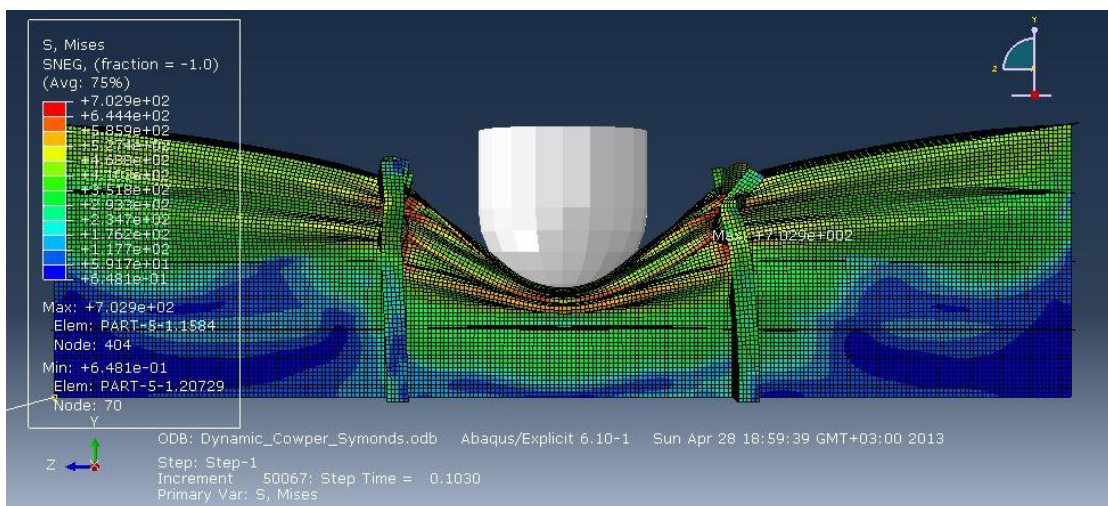


Εικόνα 37: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του Dynamic test με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 12.5 mm (εισαγωγή μίας πραγματικής καμπύλης τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 7.6\text{sec}^{-1}$)

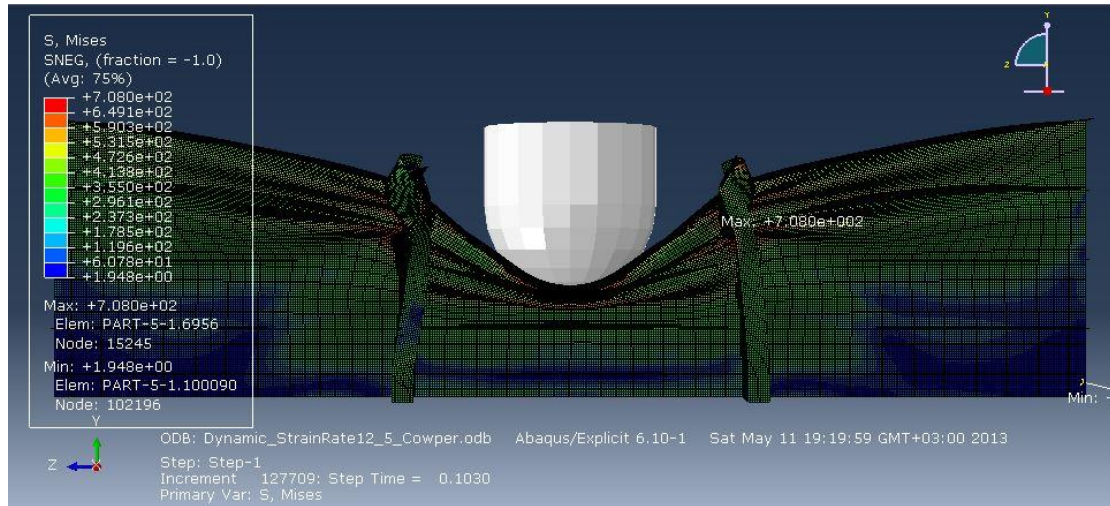


Εικόνα 38: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του *Dynamic test* με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 6.25 mm (εισαγωγή μίας πραγματικής καμπύλης τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$)

Τέλος το φαινόμενο της σκλήρυνσης του υλικού όταν υπόκειται σε δυναμική φόρτιση στις παρακάτω εικόνες έχει προσεγγισθεί με την σχέση Cowper-Symonds’.

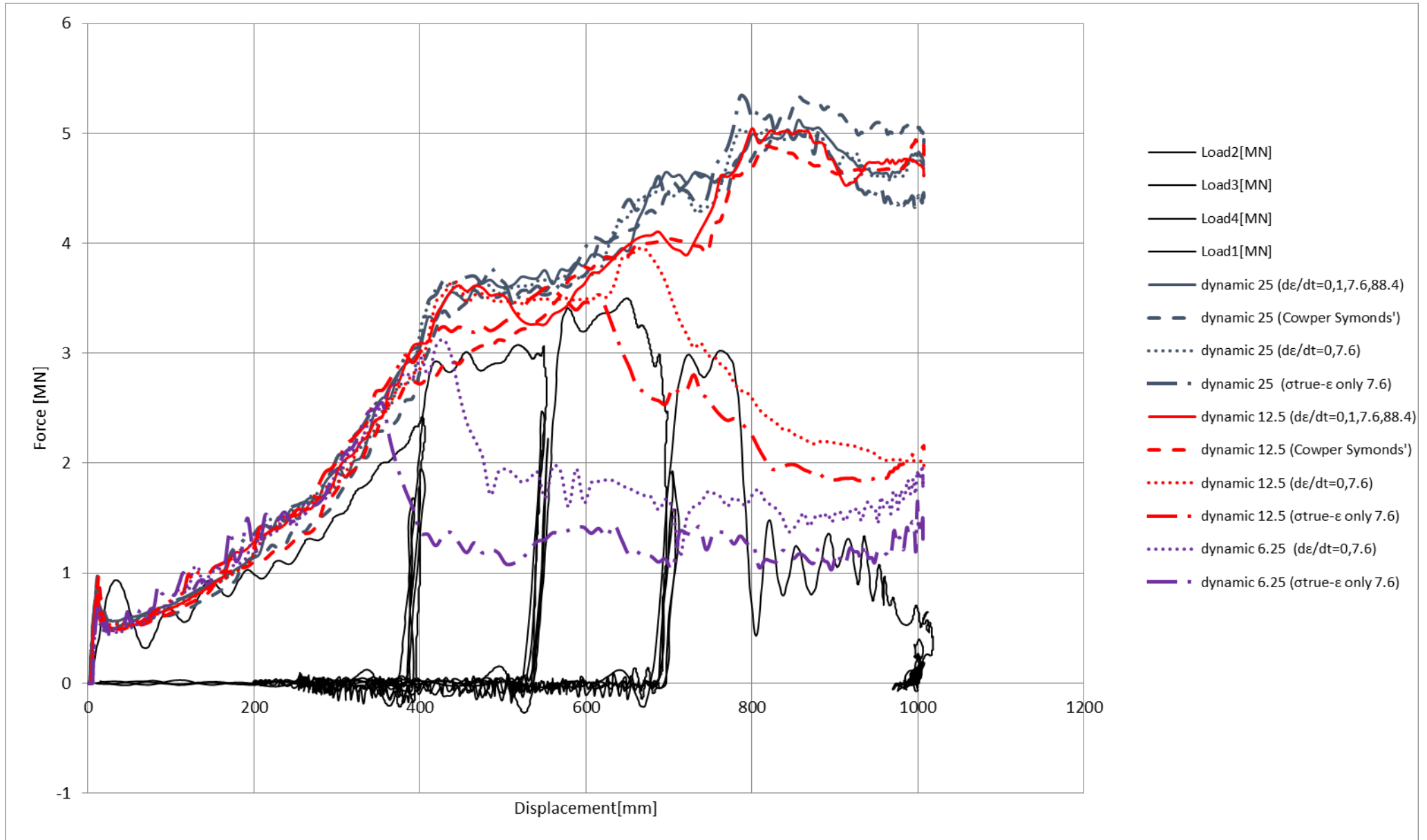


Εικόνα 39: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του *Dynamic test* με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 25 mm (Cowper-Symonds’)

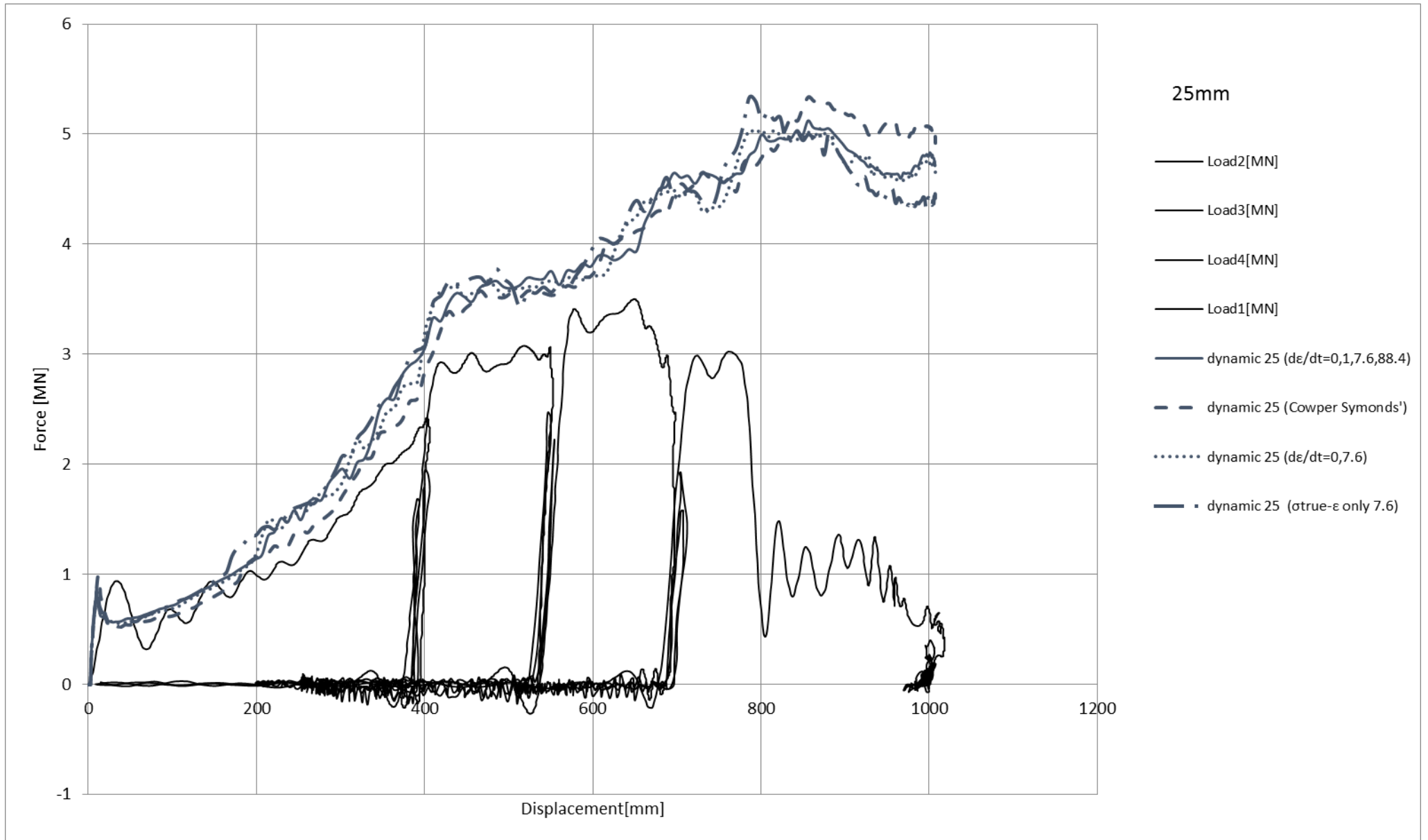


Εικόνα 40: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου κατά την αναπαραγωγή του *Dynamic test* με πλευρά πεπερασμένων στοιχείων 12.5 mm (*Cowper-Symonds*)

Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η πειραματική καμπύλη δύναμης-μετατόπισης καθώς και οι καμπύλες που προέκυψαν απ' τις εναλλακτικές προσομοιώσεις. Αρχικά παρουσιάζονται όλες σε ένα κοινό διάγραμμα - Διάγραμμα 36 αλλά μετά παρουσιάζονται ομαδοποιημένες κατ' αρχήν ανάλογα με το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων (Διαγράμματα 37, 38 και 39) και έπειτα ανάλογα με την μοντελοποίηση του υλικού.



Διάγραμμα 36: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις και πειραματική καμπύλη.



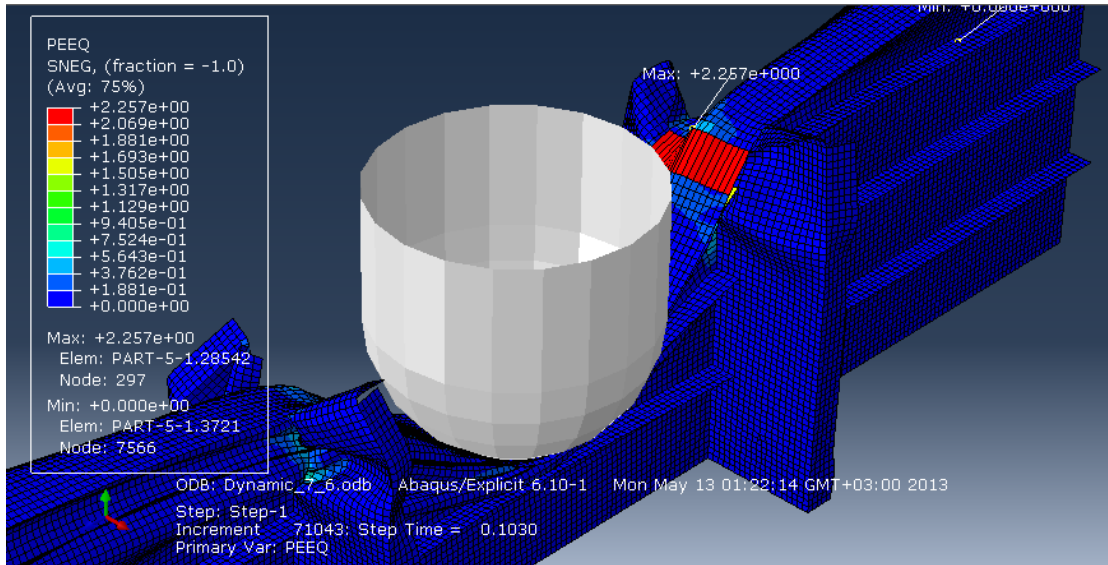
Διάγραμμα 37: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις και πειραματική καμπύλη με πεπερασμένα στοιχεία πλευράς ~25 mm

6.2.1 Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

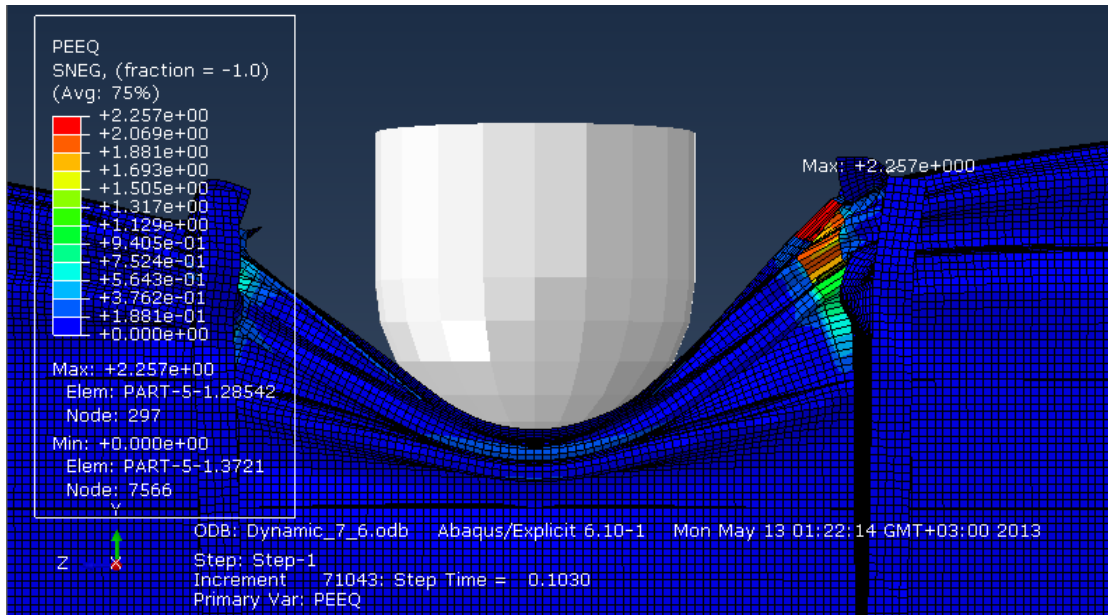
6.2.1.1 Ως προς το μέγεθος πλευράς των τετρακομβικών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (S4R)

a) 25 mm: Διάγραμμα 37

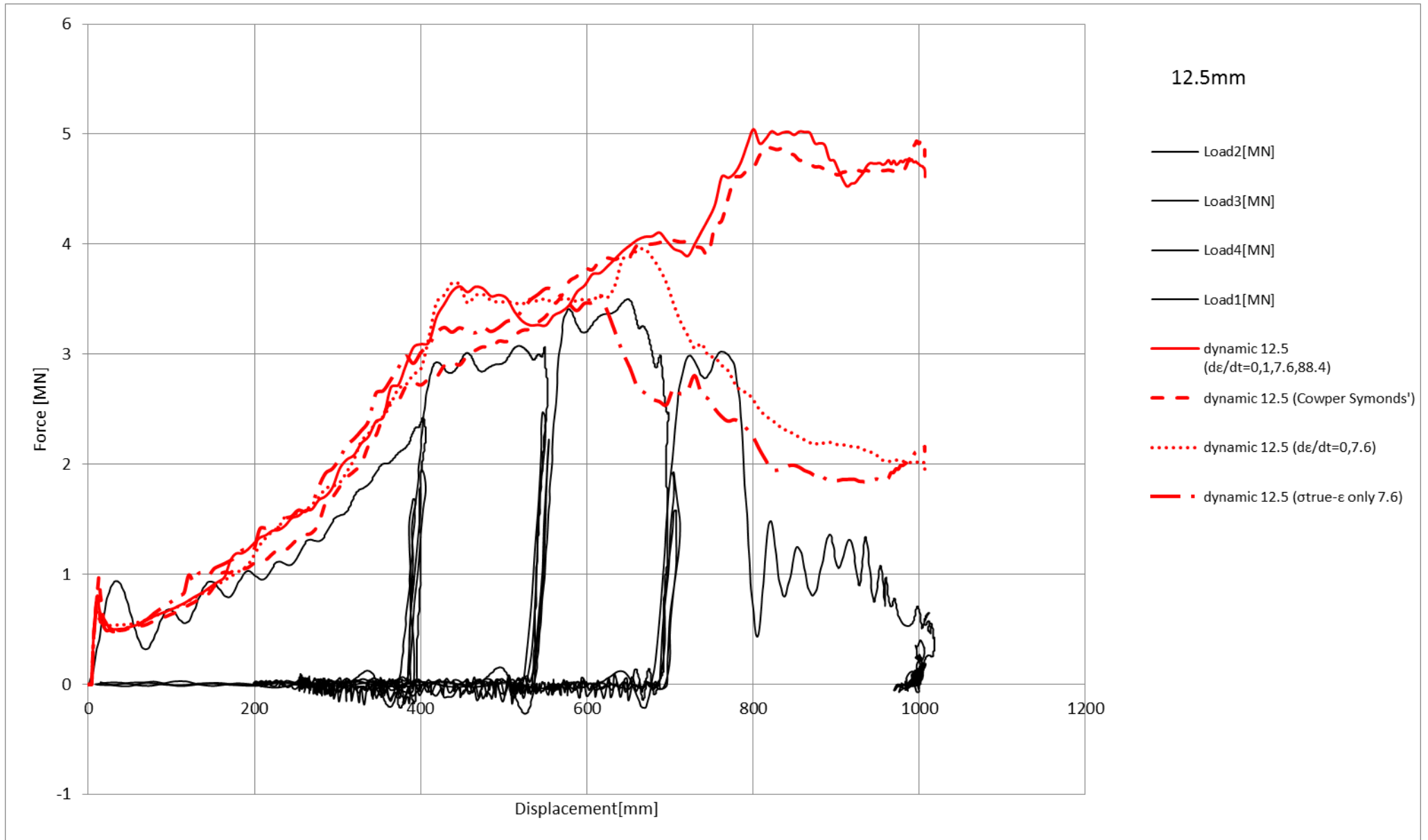
- Όλες οι καμπύλες ακολουθούν την πειραματική με πιο κοντινή αυτήν στην οποία το υλικό έχει μοντελοποιηθεί με την εξίσωση Cowper Symonds'.
- Οι τρεις εναλλακτικές μοντελοποιήσεις του υλικού, με εισαγωγή καμπύλων (εκτός της Cowper Symonds' δηλαδή), προσεγγίζουν συντηρητικά την ελαστική περιοχή του υλικού, δηλαδή η πλαστική περιοχή ξεκινάει για μετατόπιση $U \sim 12\text{ mm}$ και $F \sim 0.86\text{ MN}$, ενώ στην πειραματική καμπύλη οι αντίστοιχες τιμές είναι $U = 35.91\text{ mm}$ και $F = 9.93\text{ MN}$. Η μοντελοποίηση του υλικού με την εξίσωση Cowper Symonds' έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο εύρος ελαστικής περιοχής από τις υπόλοιπες τρεις μοντελοποιήσεις $U \sim 13\text{ mm}$, αλλά υπερβαίνει την τιμή της δύναμης δηλαδή $F \sim 0.98\text{ MN}$.
- Η μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή των καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης για τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0\text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1\text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6\text{ sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4\text{ sec}^{-1}$) σε σχέση με μοντελοποίηση με δύο καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0\text{ sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6\text{ sec}^{-1}$) μας δίνουν σχεδόν ταυτόσημες καμπύλες δύναμης – μετατόπισης.
- Τέλος η καμπύλη που προέκυψε με μοντελοποίηση του υλικού αγνοώντας την επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης και εισάγοντας μόνο μία καμπύλη υλικού ($\dot{\epsilon} = 7.6\text{ sec}^{-1}$) παρουσιάζει μία έντονη πτώση για χρόνο $t = 0.06901\text{ sec}$, δύναμη $F \approx 5\text{ MN}$ και μετατόπιση $U \approx 800\text{ mm}$, η οποία οφείλεται σε υπερβολική παραμόρφωση δύο σειρών στοιχείων κατά μήκος των δύο κάθετων κύριων ενισχυτικών (Εικόνες 41 και 42).



Εικόνα 41: Βλ. Εικόνα 42



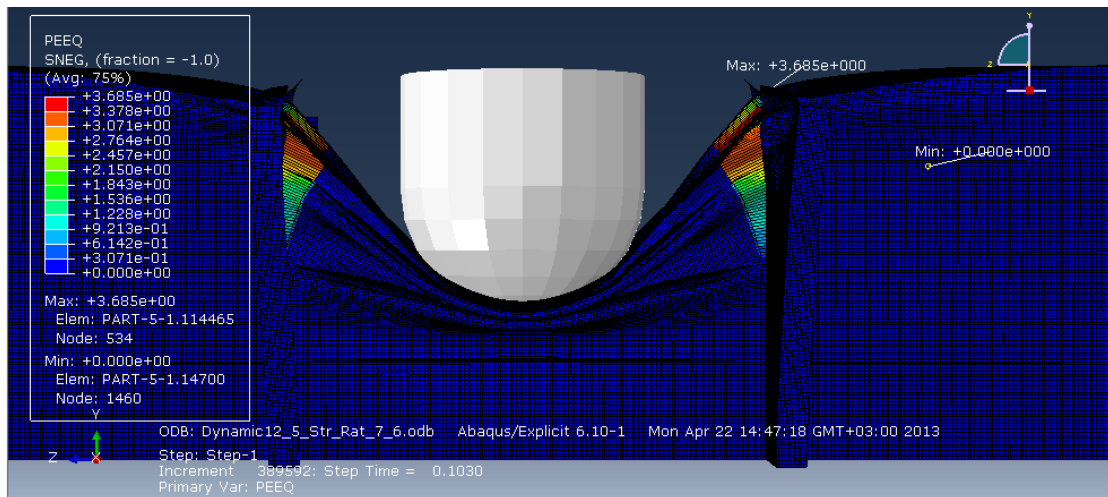
Εικόνα 42: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα της προσομοίωσης για το Dynamic test (πλευρά τετρακομβικού στοιχείου 25 mm) με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μίας καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6 sec^{-1} χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το strain rate effect)



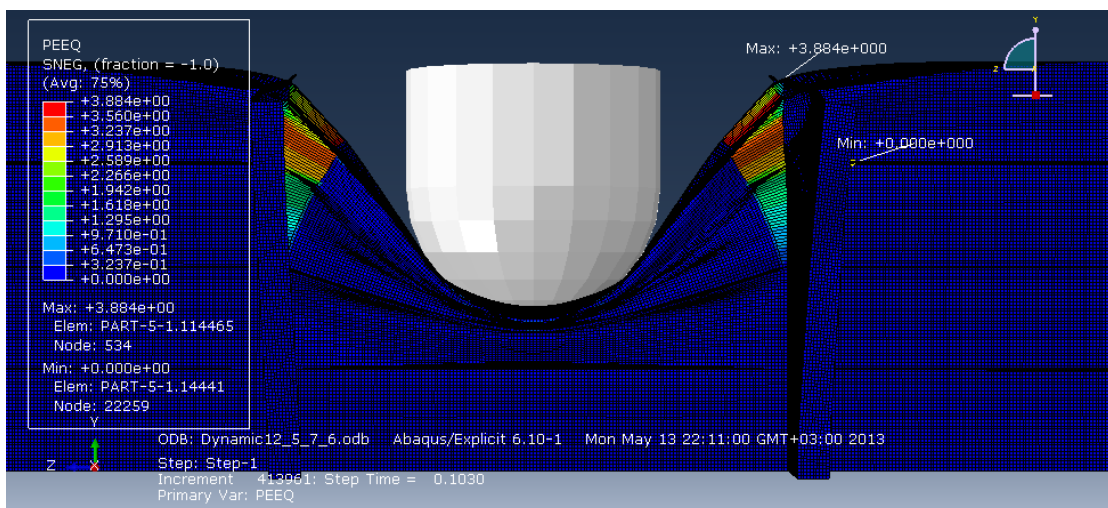
Διάγραμμα 38: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις και πειραματική καμπύλη με πεπερασμένα στοιχεία πλευράς ~12.5 mm.

b) 12.5mm: Διάγραμμα 38

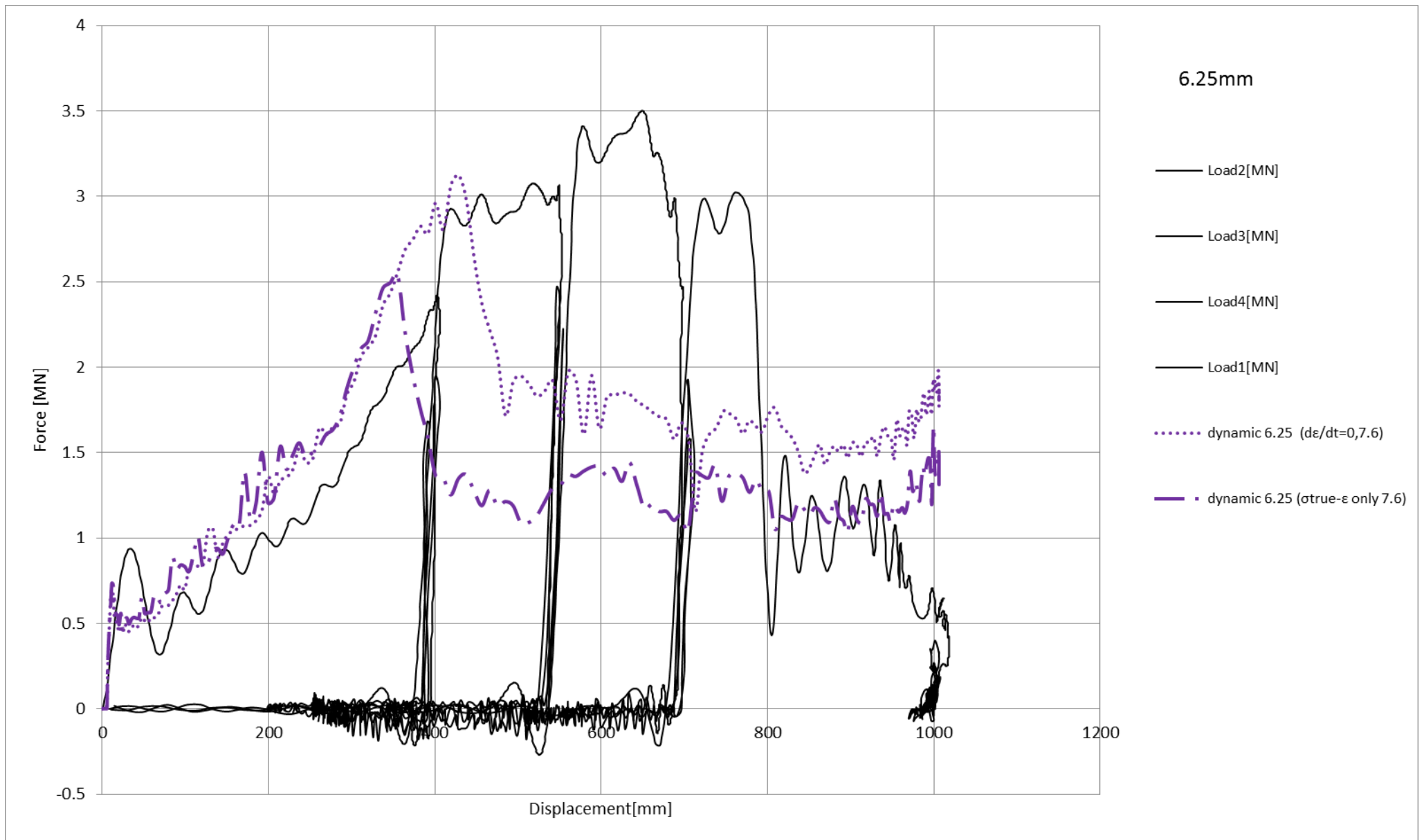
- Όλες οι καμπύλες ακολουθούν την πειραματική με πιο κοντινή αυτήν στην οποία το υλικό έχει μοντελοποιηθεί με την εξίσωση Cowper Symonds'.
- Οι τρεις εναλλακτικές μοντελοποιήσεις του υλικού, με εισαγωγή καμπύλων (εκτός της Cowper Symonds' δηλαδή), προσεγγίζουν συντηρητικά την ελαστική περιοχή του υλικού, δηλαδή η πλαστική περιοχή ξεκινάει για μετατόπιση $U \sim 11mm$ και $F \sim 0.78MN$, ενώ στην πειραματική καμπύλη οι αντίστοιχες τιμές είναι $U = 35.91mm$ και $F = 9.93MN$. Η μοντελοποίηση του υλικού με την εξίσωση Cowper Symonds' έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο εύρος ελαστικής περιοχής από τις υπόλοιπες τρεις μοντελοποιήσεις $U \sim 13mm$, αλλά υπερβαίνει την τιμή της δύναμης δηλαδή $F \sim 0.98MN$.
- Η καμπύλη όπου η μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή των διαγραμμάτων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης για δύο ταχύτητες παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) παρουσιάζει μία έντονη πτώση για χρόνο $t = 0.059sec$, $F = 3.88MN$ και $U = 652mm$, αντίστοιχα το διάγραμμα όπου εισήχθη μία καμπύλη υλικού, για μία ταχύτητα παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$), παρουσιάζει έντονη πτώση για χρόνο $t = 0.057sec$, $F = 3.46MN$ και $U = 605mm$. Η πτώση αυτή οφείλεται σε υπερβολική παραμόρφωση δύο σειρών στοιχείων κατά μήκος των δύο κάθετων κύριων ενισχυτικών (Εικόνες 43 και 44).



Εικόνα 43: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα της προσομοίωσης για το Dynamic test (πλευρά τετρακομβικού στοιχείου 12.5 mm) με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή δύο καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για δύο ταχύτητες παραμόρφωσης (0 και 7.6 sec^{-1})



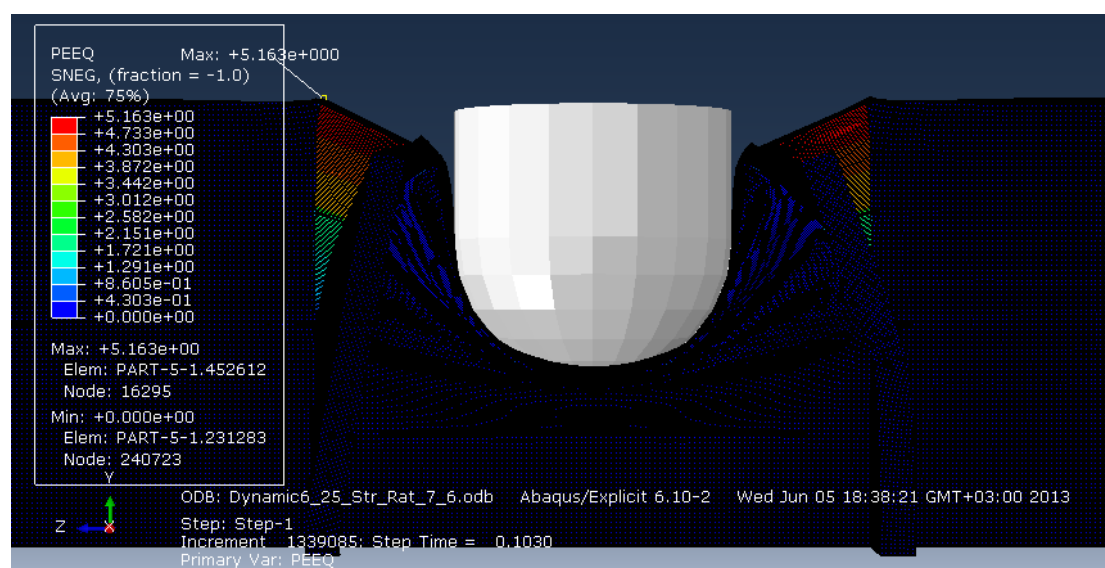
Εικόνα 44: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα της προσομοίωσης για το Dynamic test (πλευρά τετρακομβικού στοιχείου 12.5 mm) με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μίας καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6 sec^{-1} χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το strain rate effect)



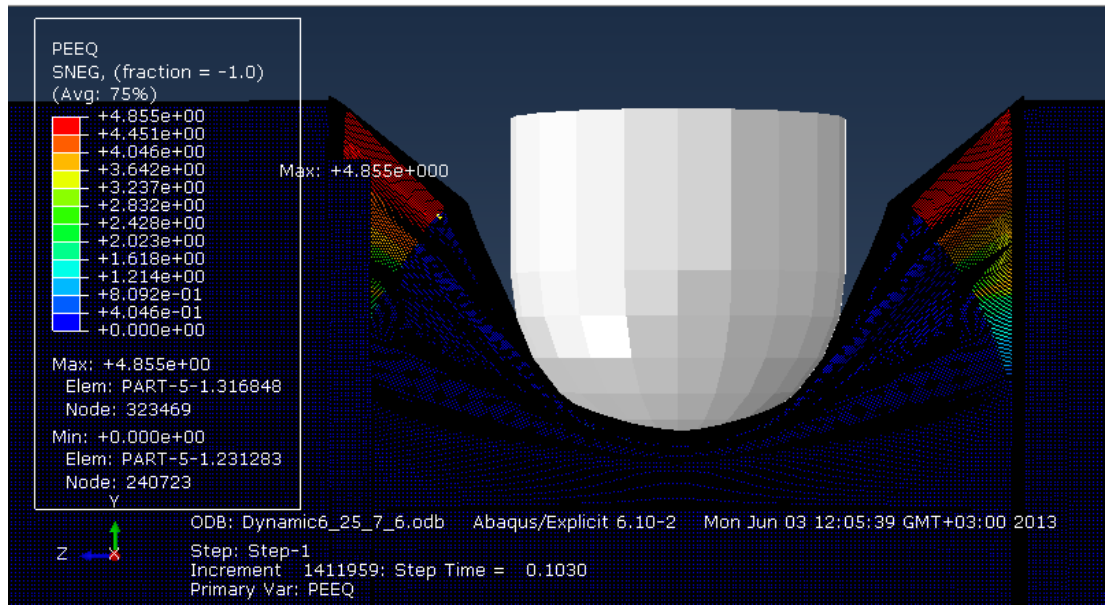
Διάγραμμα 39: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις και πειραματική καμπύλη με πεπερασμένα στοιχεία πλευράς ~6.25 mm.

c) 6.25mm: Διάγραμμα 39

- Η καμπύλη που αντιστοιχεί στην μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή δύο καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης για δύο ταχύτητες παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0 \text{sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$) ακολουθεί την πειραματική μέχρι την μετατόπιση των 400mm περίπου, ενώ η καμπύλη με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μίας καμπύλης πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$), ακολουθεί την πειραματική μέχρι την μετατόπιση των 300mm περίπου.
- Η μοντελοποίηση με τόσο μικρό μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων δεν περιγράφει την συμπεριφορά της κατασκευής και έχει ως αποτέλεσμα υπερβολικά δύσκαμπτη κατασκευή.
- Τέλος η έντονη πτώση και στις δύο καμπύλες οφείλεται σε υπερβολική παραμόρφωση δύο σειρών στοιχείων κατά μήκος των δύο κάθετων κύριων ενισχυτικών (Εικόνες 45 και 46), για την μοντελοποίηση του υλικού με δύο καμπύλες ($\dot{\epsilon} = 0 \text{sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$) ξεκινάει για χρόνο $t=0.047 \text{sec}$ όπου η δύναμη είναι $F=3.12 \text{MN}$ και η μετατόπιση $U=428 \text{mm}$, ενώ για την μοντελοποίηση με μία καμπύλη ($\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$) ξεκινάει για $t=0.042 \text{sec}$, δύναμη $F=2.49 \text{MN}$ και μετατόπιση $U=364 \text{mm}$.



Εικόνα 45: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα της προσομοίωσης για το Dynamic test (πλευρά τετρακομβικού στοιχείου 6.25 mm) με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή δύο καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για δύο ταχύτητες παραμόρφωσης (0 και 7.6 sec⁻¹)

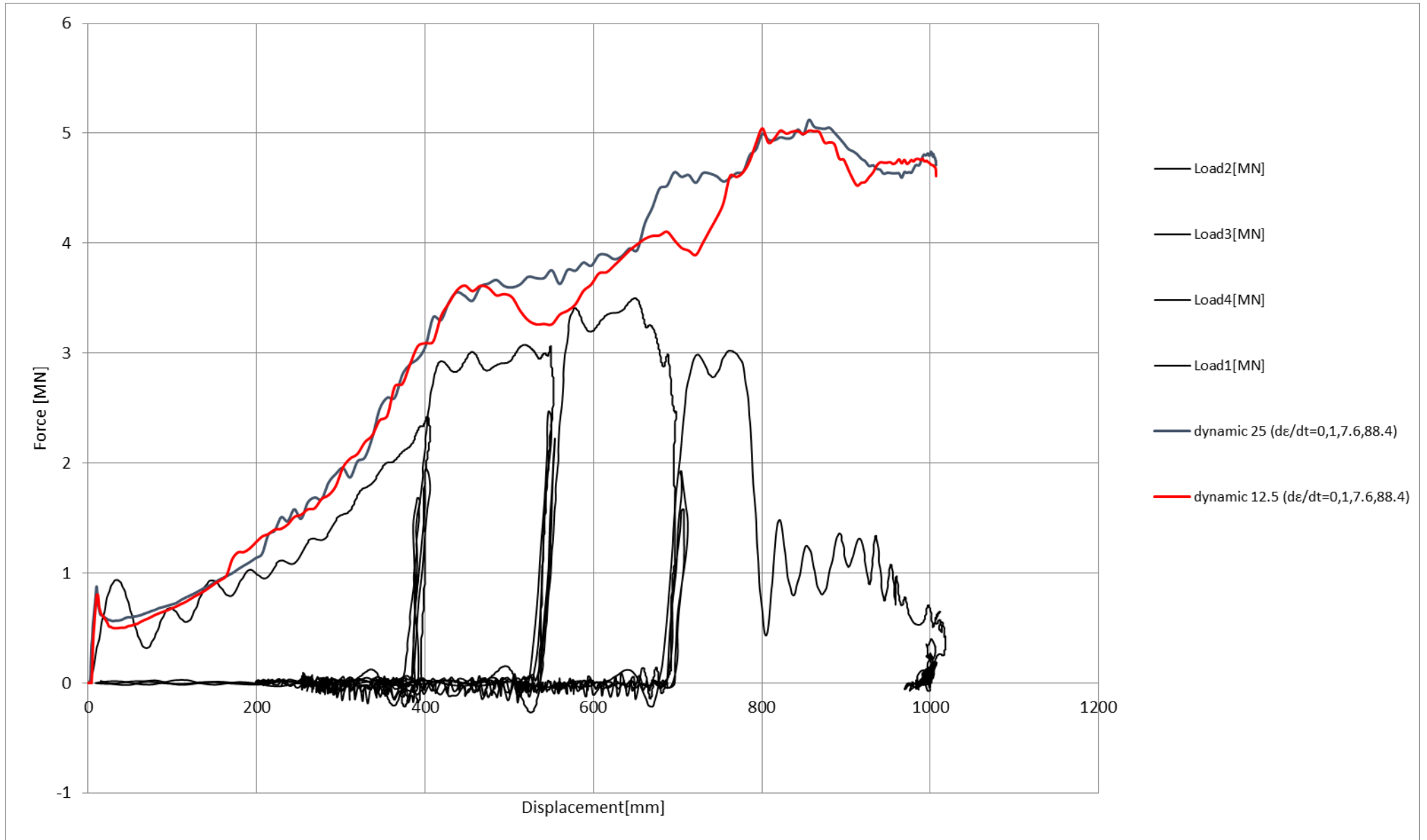


Εικόνα 46: Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα της προσομοίωσης για το Dynamic test (πλευρά τετρακομβικού στοιχείου 6.25 mm) με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μίας καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6 sec^{-1} χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το strain rate effect)

6.2.1.2 Ως προς την μοντελοποίηση του υλικού

α) Προσομοιώσεις με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης για τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{ sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4 \text{ sec}^{-1}$): Διάγραμμα 40

- Παρατηρείται ότι και οι δύο καμπύλες από τις διακριτοποιήσεις, με μέγεθος πλευράς του τετρακομβικού στοιχείου 25 mm και 12.5 mm, ακολουθούν την πειραματική. Μεγαλύτερη σύγκλιση με την πειραματική έχει η καμπύλη που προέκυψε με μέγεθος πλευράς στοιχείου 12.5 mm ειδικά μετά την μετατόπιση $U=500 \text{ mm}$.



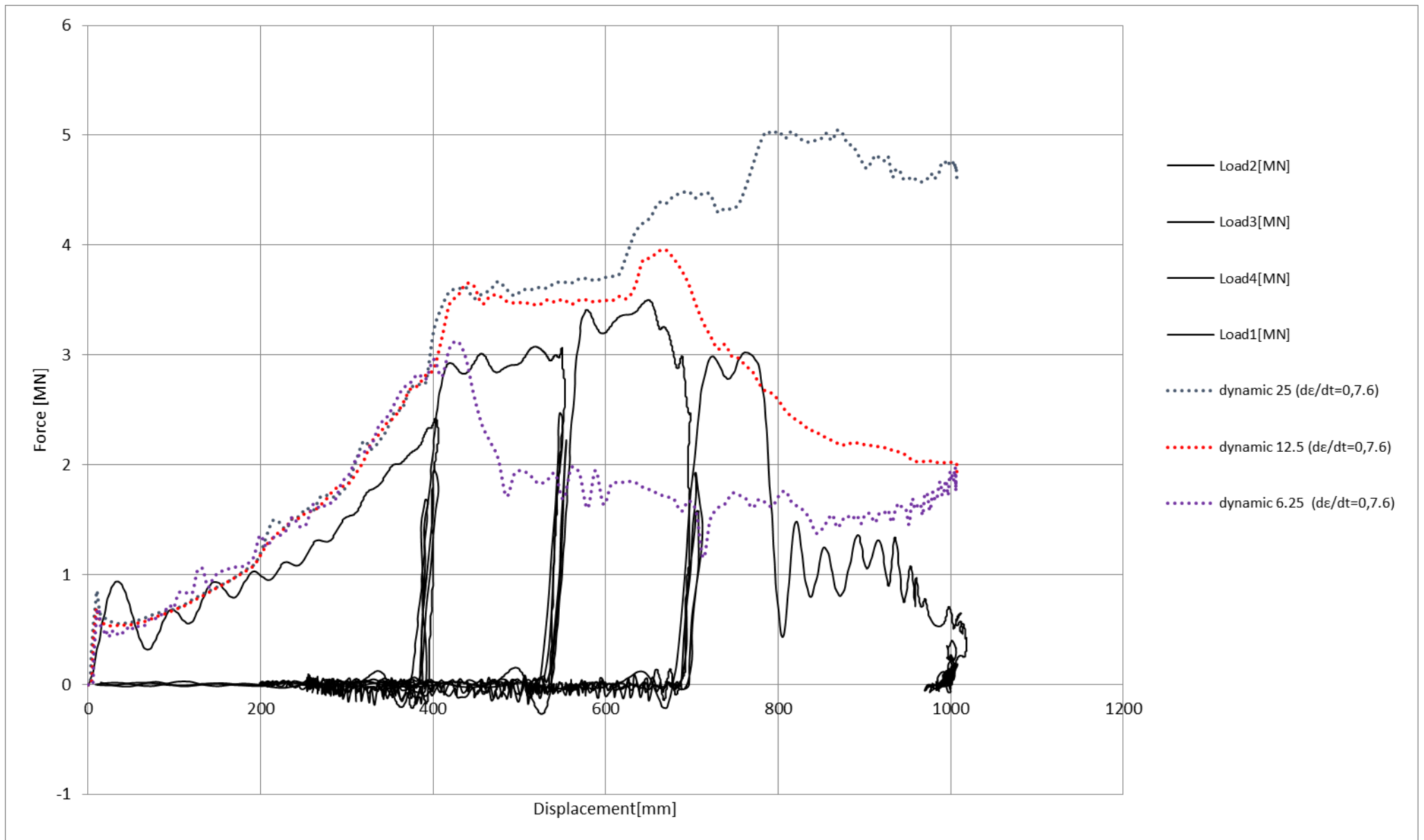
Διάγραμμα 40: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης (0 sec^{-1} , 1 sec^{-1} , 7.6 sec^{-1} και 88.4 sec^{-1}) και πειραματική καμπύλη.

b) Προσομοιώσεις με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης για δύο διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0 \text{sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$): Διάγραμμα 41

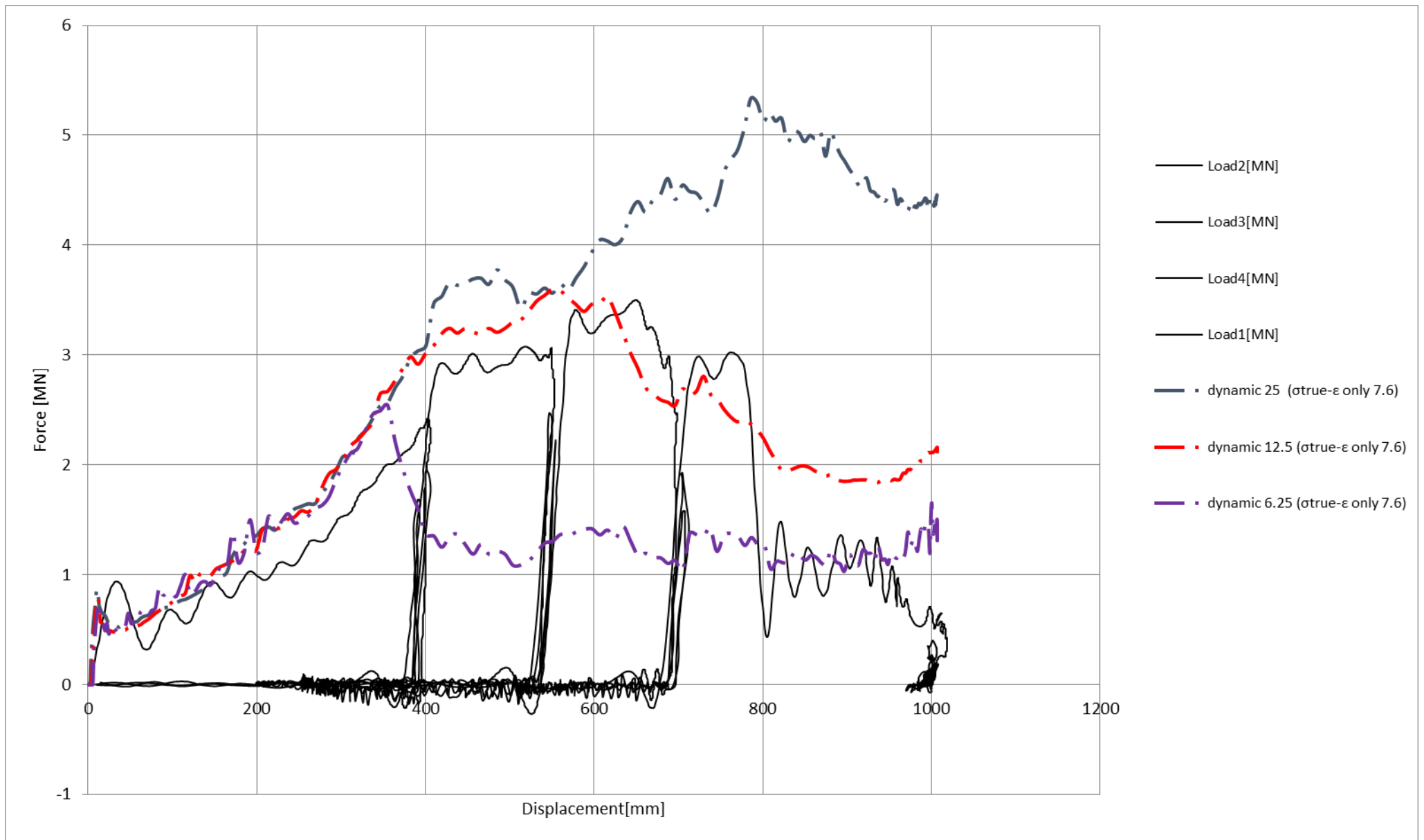
- Η καμπύλες που προέκυψαν από μοντελοποίηση με μέγεθος πλευράς στοιχείων 25 mm και 12.5 mm συμβαδίζουν μέχρι την μετατόπιση των 400 mm .
- Έντονη πτώση λόγω παραμόρφωσης των στοιχείων που αναφέρθηκαν παραπάνω (Εικόνα 45) παρουσιάζει η καμπύλη που προέκυψε για πλευρά $6,25 \text{ mm}$ μετά την μετατόπιση των 400 mm . Στην Εικόνα 45 βλέπουμε παραμόρφωση μιας σειράς στοιχείων εκατέρωθεν των κάθετων ενισχυτικών, αλλά στην εξωτερική τους πλευρά, εικόνα που δεν προκύπτει σε καμία άλλη προσομοίωση και απέχει πολύ απ' την παραμορφωμένη εικόνα της πειραματικής διάταξης (Εικόνα 30)
- Επίσης για τους ίδιους λόγους πτώση παρουσιάζει η καμπύλη δύναμης – μετατόπισης για πλευρά 12.5 mm (Εικόνα 43), η παραμόρφωση των στοιχείων ξεκινάει περίπου για μετατόπιση $U=650 \text{ mm}$ γεγονός που συμβαδίζει με την πειραματική καμπύλη, παρόλα αυτά το παραμορφωμένο σχήμα του μοντέλου της Εικόνα 43 δεν είναι κοντά στο παραμορφωμένο σχήμα της πειραματικής κατασκευής.

c) Προσομοιώσεις με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μίας καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$ χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το strain rate effect): Διάγραμμα 42

- Παρατηρούμε ότι και στις τρεις καμπύλες παρουσιάζεται πτώση η οποία οφείλεται στην υπερβολική παραμόρφωση κάποιων στοιχείων, όπως φαίνεται στις εικόνες 41, 42, 43 και 44. Όσο μειώνεται το μέγεθος των τετρακομβικών στοιχείων κελύφους κατά την διακριτοποίηση της κατασκευής τόσο πιο έντονο γίνεται το φαινόμενο.
- Χαρακτηριστικό είναι επίσης ότι όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος της πλευράς των στοιχείων έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες τοπικές παραμορφώσεις κάτω απ' το μοντέλου βολβού καθώς και πιο έντονη παραμόρφωση στην σειρά στοιχείων που συνορεύουν με τα κάθετα ενισχυτικά ελάσματα της κατασκευής.



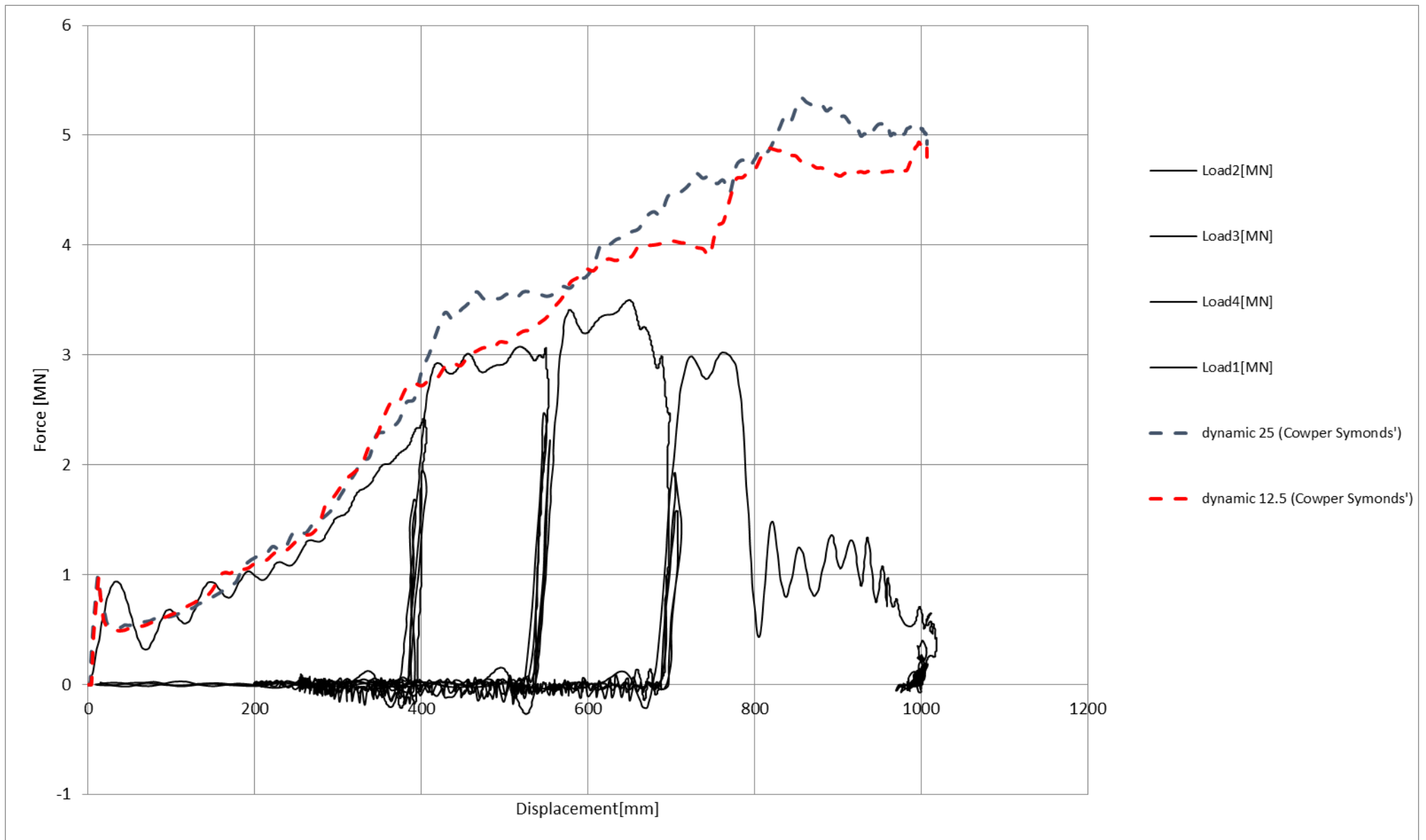
Διάγραμμα 41: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για δύο διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης (0 sec^{-1} και 7.6 sec^{-1}) και πειραματική καμπύλη.



Διάγραμμα 42: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις με μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή μίας καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6 sec^{-1}) χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το strain rate effect και πειραματική καμπύλη.

d) Προσομοιώσεις με μοντελοποίηση του υλικού με την εξίσωση Cowper Symonds': Διάγραμμα 43

- Οι δύο καμπύλες, δηλαδή αυτή με διακριτοποίηση στοιχείου πλευράς 25 mm και αυτή πλευράς 12.5 mm ταυτίζονται για μετατόπιση έως 400 mm .
- Οι δύο καμπύλες ακολουθούν την πειραματική, αλλά η καμπύλη που αντιστοιχεί σε πλευρά τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm είναι πιο κοντά στην πειραματική.
- Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα των δύο προσομοιώσεων φαίνεται στις εικόνες 39 και 40.



Διάγραμμα 43: Δύναμη (MN) – Μετατόπιση (mm) για το Dynamic test προσομοιώσεις με μοντελοποίηση του υλικού σύμφωνα με την σχέση Cowper-Symonds' και πειραματική καμπύλη.

6.2.2 Διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης για τις προσομοιώσεις των Dynamic tests.

Παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης σε κάποια χαρακτηριστικά σημεία του μοντέλου για τα τρία διαφορετικά πάχη ελάσματος, 10mm, 8mm και 7mm για κάθε μία διαφορετική μοντελοποίηση υλικού, στον πρωτεύοντα άξονα φαίνονται η ισοδύναμη τάση Von Mises συναρτήσεως της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για τις τέσσερις διαφορετικές μοντελοποιήσεις καθώς και οι καμπύλες πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης (πειραματικές). Στον δευτερεύοντα άξονα φαίνονται με διακεκομμένη γραμμή οι ταχύτητες παραμόρφωσης σε κάθε σημείο για τις τέσσερις διαφορετικές μοντελοποιήσεις (Παράγραφος 5.2.1: διαγράμματα 12, 13 και 14).

6.2.2.1 Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για την προσομοίωση του Dynamic Test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού πεπερασμένου στοιχείου κελύφους (S4R) 25mm

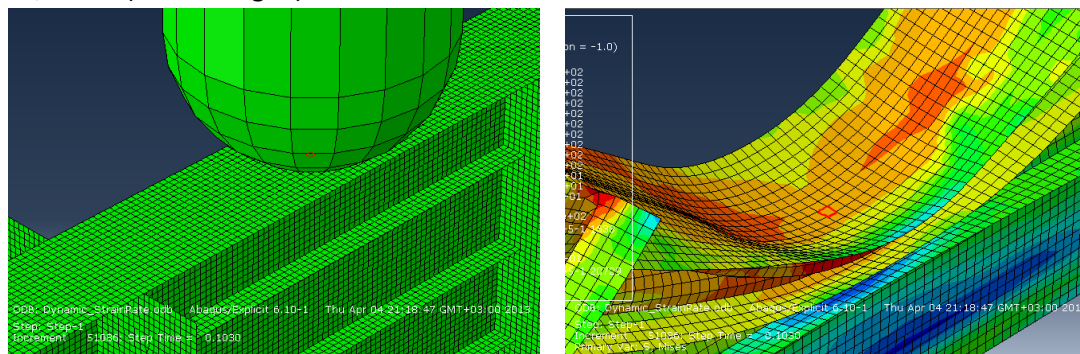
Element: PART-5-1.22893 (U=Umax) Διάγραμμα 44

Type: S4R

Material: DYNAMIC_10MM

Connect: 24078, 3075, 3074, 24086

S, Mises (Not averaged): 459.693

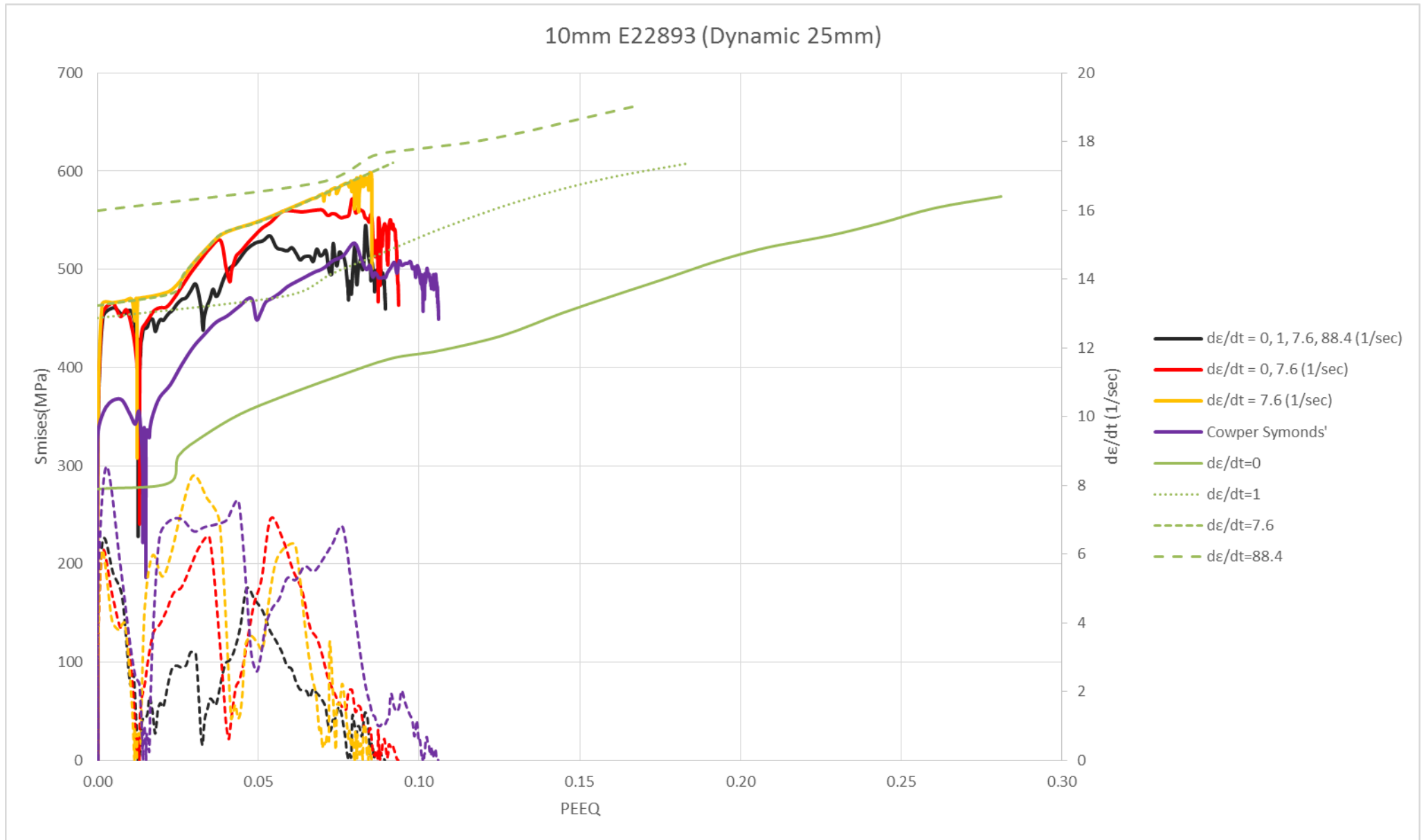


Διάγραμμα 44:

- Η καμπύλη S_{mises} – PEEQ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή τεσσάρων καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4sec^{-1}$) βρίσκεται μεταξύ των πειραματικών που αντιστοιχούν σε ταχύτητες παραμόρφωσης $0 sec^{-1}$ και $7.6 sec^{-1}$, γεγονός που συμβαδίζει

με το εύρος ταχυτήτων παραμόρφωσης που προκύπτει για την ίδια καμπύλη.

- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή δύο καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) βρίσκεται μεταξύ των πειραματικών που αντιστοιχούν σε ταχύτητες παραμόρφωσης $1 sec^{-1}$ και $7.6 sec^{-1}$, όταν οι ταχύτητες παραμόρφωσης είναι πιο υψηλές ακολουθεί την πειραματική καμπύλη δυναμικής καταπόνησης για ταχύτητα παραμόρφωσης $7.6 sec^{-1}$. Παρατηρούνται υψηλότερες τάσεις, παραμορφώσεις και ταχύτητες παραμόρφωσης.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή μίας καμπύλης πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) ακολουθεί πλήρως την πειραματική καμπύλη για $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με την εξίσωση Cowper Symonds' παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές τάσης και υψηλότερες παραμορφώσεις.
- Η αρχική μοντελοποίηση (4 καμπύλες) παρουσιάζει μικρότερες ταχύτητες παραμόρφωσης στο συγκεκριμένο στοιχείο.
- Η απότομη πτώση στις καμπύλες για $PEEQ \sim 0.015$ όπου και η ταχύτητα παραμόρφωσης μηδενίζεται οφείλεται σε στιγμιαία αποφόρτιση τοπικά. Συγκεκριμένα εδώ ο βολβός χάνει τοπικά επαφή με το στοιχείο.



Διάγραμμα 44: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 22893, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 25 mm.

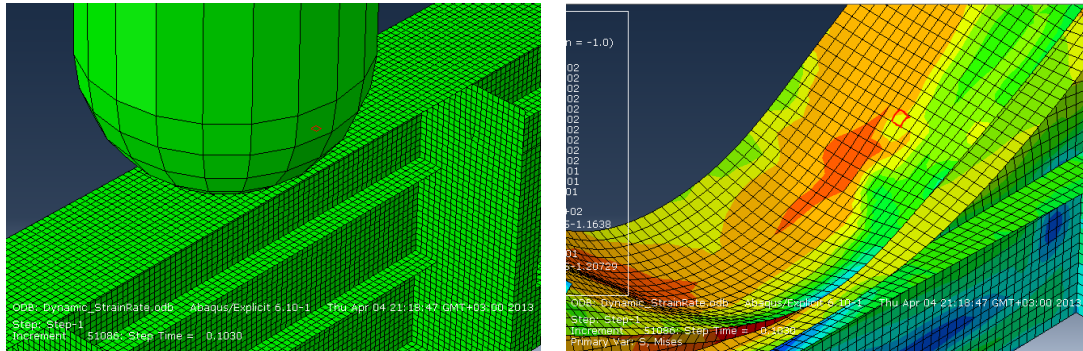
Element: PART-5-1.22739 Διάγραμμα 45

Type: S4R

Material: DYNAMIC_10MM

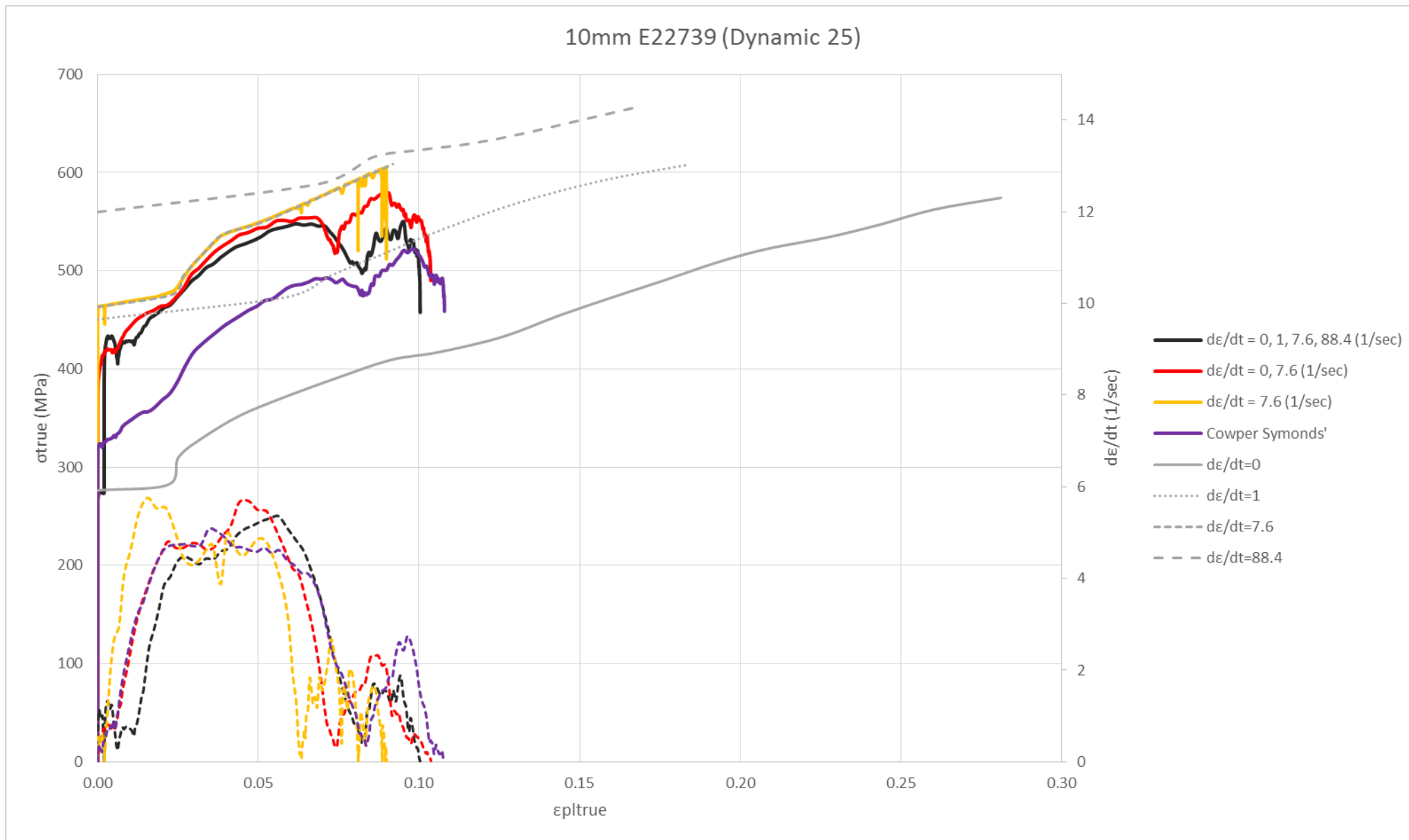
Connect: 23941, 23942, 23950, 23949

S, Mises (Not averaged): 458.485



Διάγραμμα 45:

- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή τεσσάρων καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4sec^{-1}$) καθώς και η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ με εισαγωγή δύο καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά γεγονός που οφείλεται στις ταχύτητες παραμόρφωσης που αναπτύσσονται οι οποίες δεν ξεπερνούν τα $7.6 sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή μίας καμπύλης πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) ακολουθεί πλήρως την πειραματική καμπύλη για $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με την εξίσωση Cowper Symonds' παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές τάσης και υψηλότερες παραμορφώσεις.
- Οι ταχύτητες παραμόρφωσης είναι παρόμοιες και στις 4 διαφορετικές μοντελοποιήσεις του υλικού και δεν ξεπερνούν τα $7 sec^{-1}$.



Διάγραμμα 45: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 22739, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 25 mm.

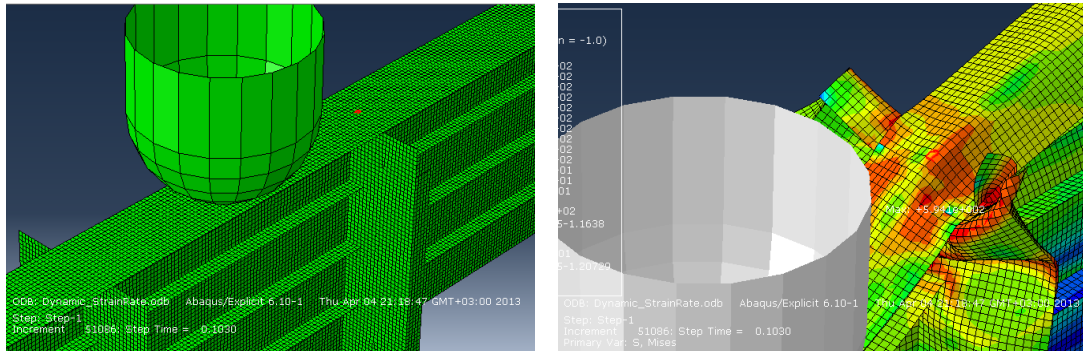
Element: PART-5-1.23271 Διάγραμμα 46

Type: S4R

Material: DYNAMIC_10MM

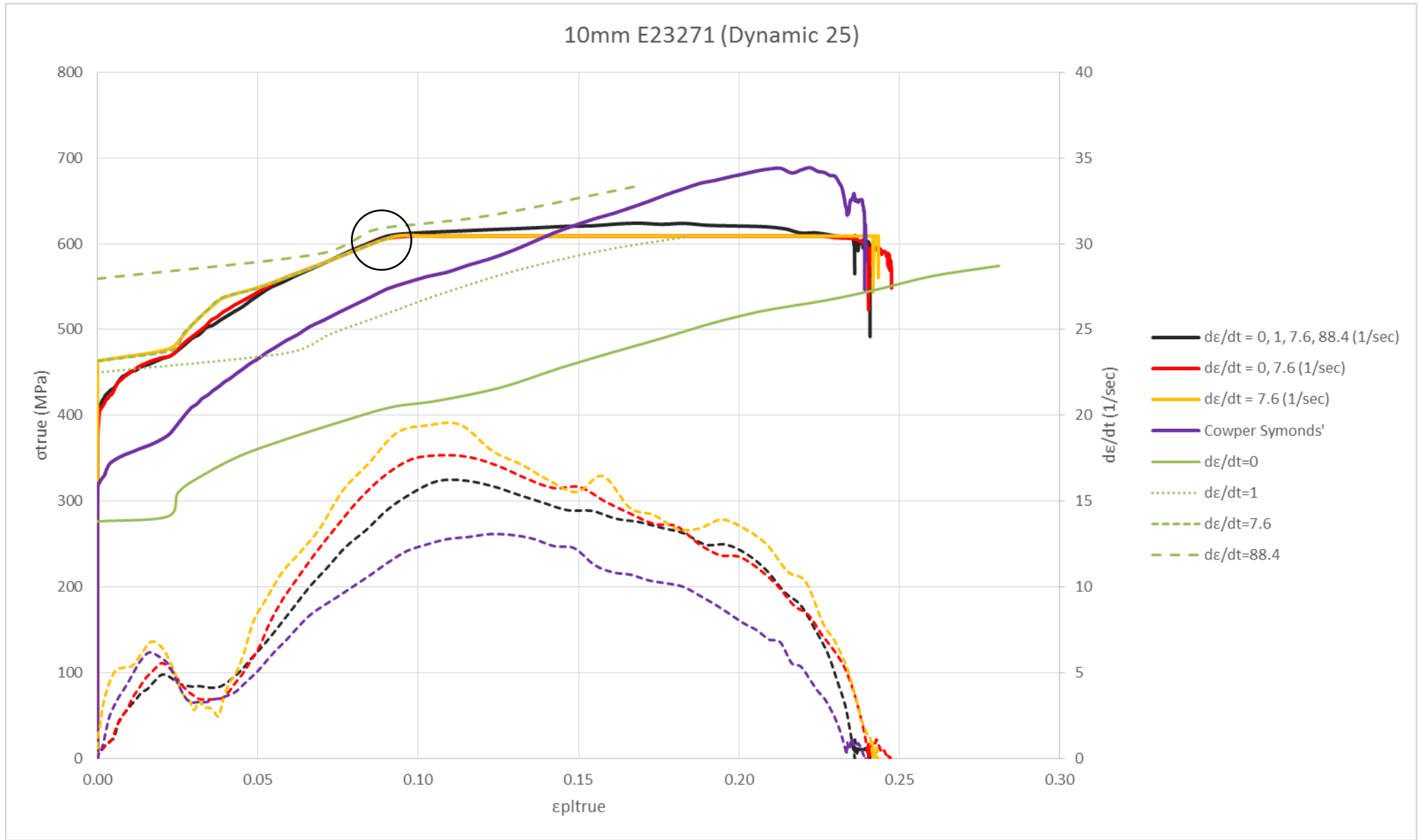
Connect: 24406, 2943, 2944, 24414

S, Mises (Not averaged): 491.845



Διάγραμμα 46:

- Η καμπύλη $S_{\text{mises}} - \text{PEEQ}$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή τεσσάρων καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0 \text{sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1 \text{sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4 \text{sec}^{-1}$) καθώς και η καμπύλη $S_{\text{mises}} - \text{PEEQ}$ με εισαγωγή δύο καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0 \text{sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$) παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά λόγω των κοντινών ταχυτήτων παραμόρφωσης που εμφανίζονται. Παρόλα αυτά με την εισαγωγή και των τεσσάρων καμπύλων τάσης – παραμόρφωσης προσεγγίζεται καλύτερα το φαινόμενο της δυναμικής σκλήρυνσης του υλικού αφού μας δίνει υψηλότερες τάσεις για μεγαλύτερες ταχύτητες παραμόρφωσης. Στην περίπτωση της εισαγωγής λιγότερων καμπυλών ($\dot{\epsilon} = 0 \text{sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$) και ($\dot{\epsilon} = 7.6 \text{sec}^{-1}$) όταν αναπτύσσονται ταχύτητες παραμόρφωσης μεγαλύτερες των 7.6sec^{-1} απλά οι καμπύλες ακολουθούν την πειραματική $d\epsilon/dt = 7.6 \text{sec}^{-1}$ και μετά την τελευταία τιμή συνεχίζουν παράλληλα.
- Η καμπύλη $S_{\text{mises}} - \text{PEEQ}$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με την εξίσωση Cowper Symonds' έχει ως αποτέλεσμα χαμηλές τάσεις για μικρές παραμορφώσεις και υψηλές τάσεις για υψηλές παραμορφώσεις. Επίσης έχουμε μικρότερες ταχύτητες παραμόρφωσης σε σχέση με τις άλλες μοντελοποιήσεις.



Διάγραμμα 46: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 23271, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 25 mm

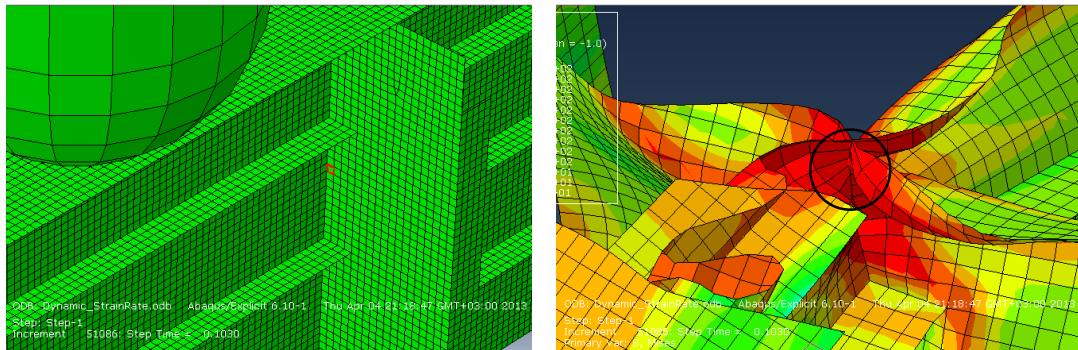
Element: PART-5-1.22518 Διάγραμμα 47

Type: S4R

Material: DYNAMIC_8MM

Connect: 23752, 23753, 408, 407

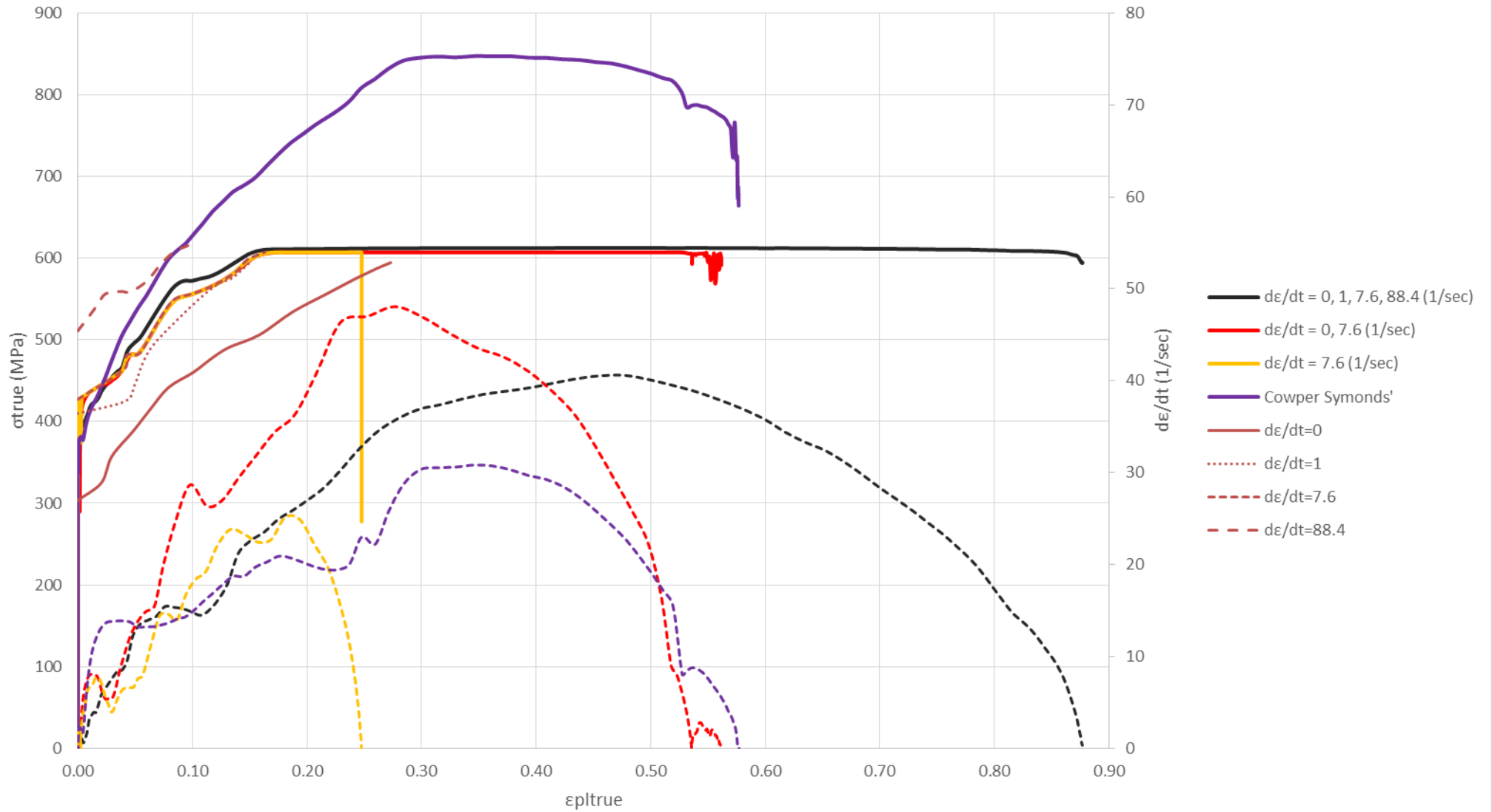
S, Mises (Not averaged): 594.463



Διάγραμμα 47:

- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή τεσσάρων καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4sec^{-1}$) βρίσκεται μεταξύ των πειραματικών που αντιστοιχούν σε ταχύτητες παραμόρφωσης $7.6 sec^{-1}$ και $88.4 sec^{-1}$, αφού οι ταχύτητες παραμόρφωσης ξεπερνούν τα $7.6 sec^{-1}$. Επίσης στο σημείο αυτό, για την συγκεκριμένη μοντελοποίηση, εμφανίζεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή δύο καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) ακολουθεί την πειραματική που αντιστοιχεί σε ταχύτητες παραμόρφωσης $7.6 sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή μίας καμπύλης πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) ακολουθεί πλήρως την πειραματική καμπύλη για $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με την εξίσωση Cowper Symonds' παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλες τάσεις στην περιοχή αυτή και το στοιχείο 22518 βρίσκεται κοντά στο στοιχείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση κατά Von Mises.

8mm E25518 (Dynamic 25)



Διάγραμμα 47: Πάχος στοιχείου 8 mm, Element 25518, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 25 mm

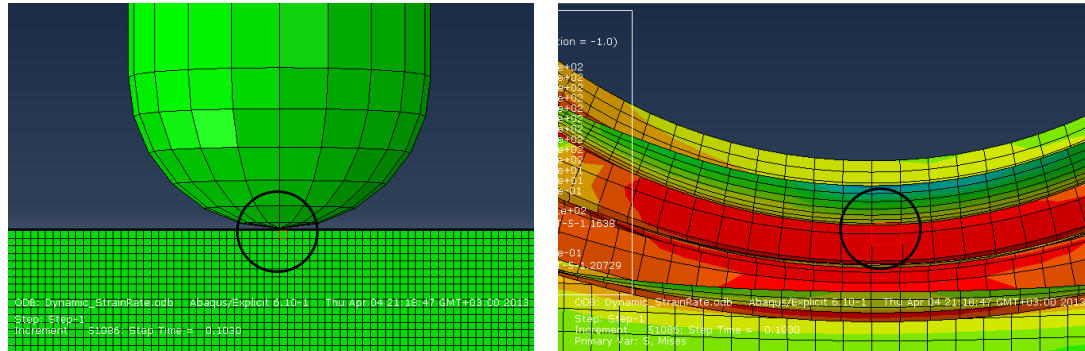
Element: PART-5-1.19488 Διάγραμμα 48

Type: S4R

Material: DYNAMIC_7MM

Connect: 21127, 21128, 3075, 3076

S, Mises (Not averaged): 579.664

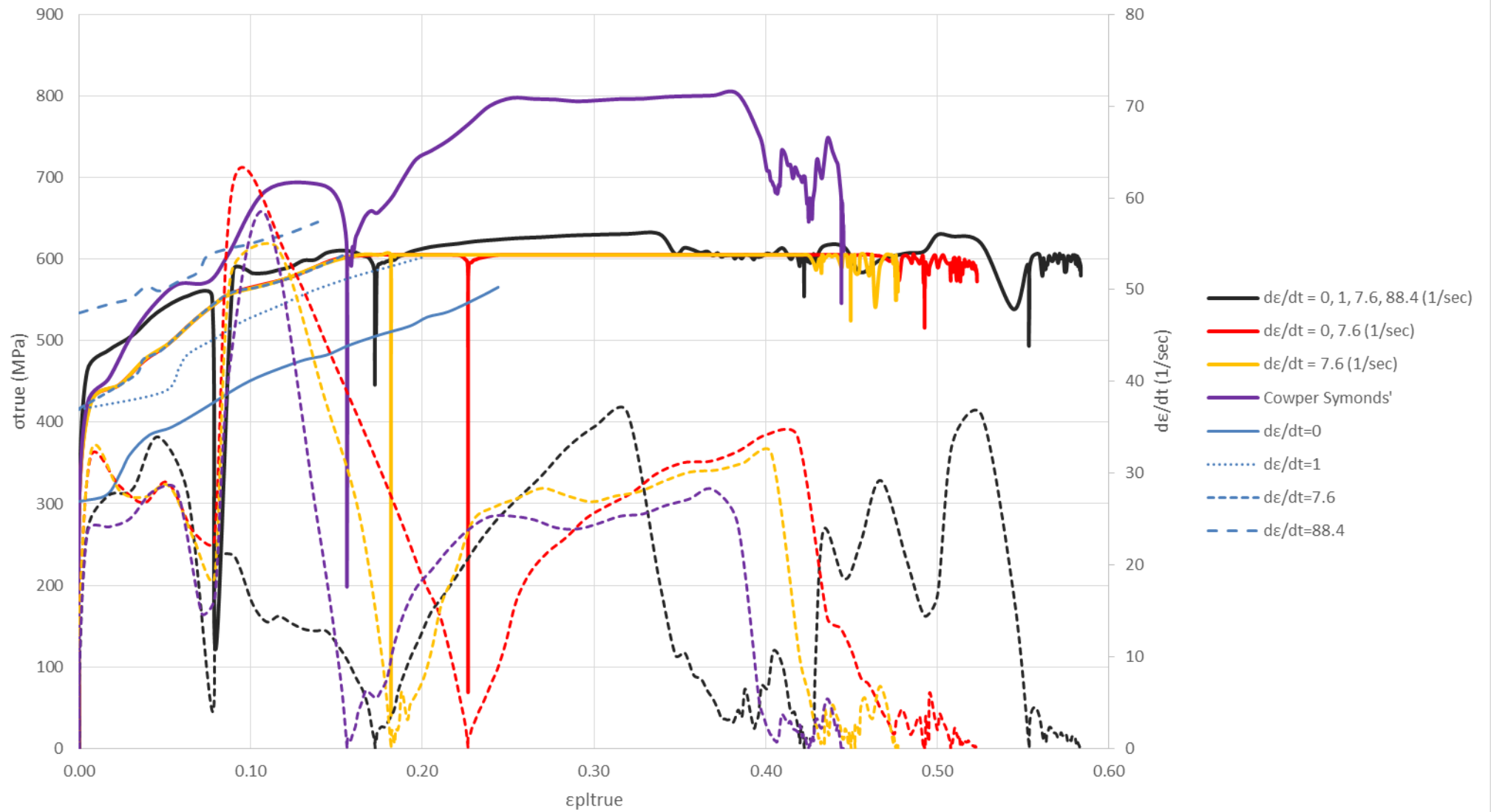


Διάγραμμα 48:

- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή τεσσάρων καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4sec^{-1}$) βρίσκεται μεταξύ των πειραματικών που αντιστοιχούν σε ταχύτητες παραμόρφωσης $7,6 sec^{-1}$ και $88.4 sec^{-1}$, αφού οι ταχύτητες παραμόρφωσης ξεπερνούν τα $7.6 sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή δύο καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) ακολουθεί την πειραματική που αντιστοιχεί σε ταχύτητες παραμόρφωσης $7.6 sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή μίας καμπύλης πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) ακολουθεί πλήρως την πειραματική καμπύλη για $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με την εξίσωση Cowper Symonds' παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλες τάσεις.

Όλες οι μοντελοποιήσεις παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης η μοντελοποίηση με εισαγωγή 4 καμπύλων υλικού έχει ένα εύρος από $0 sec^{-1}$ έως $30 sec^{-1}$ ενώ οι υπόλοιπες έως περίπου $65 sec^{-1}$.

7mm E19488 (Dynamic 25)



Διάγραμμα 48: Πάχος στοιχείου 7 mm, Element 19488, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 25 mm.

6.2.2.2 Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για την προσομοίωση του *Dynamic Test* με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού πεπερασμένου στοιχείου κελύφους (S4R) 12.5mm

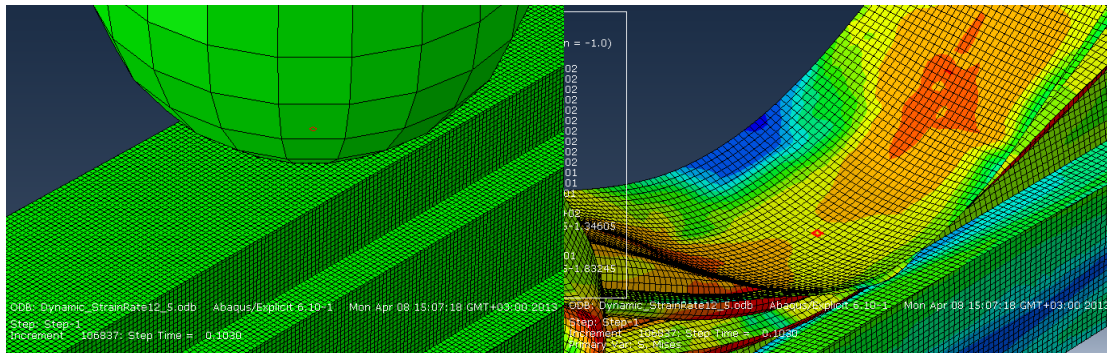
Element: PART-5-1.91772 Διάγραμμα 49

Type: S4R

Material: DYNAMIC_10MM

Connect: 94158, 94159, 94176, 94175

S, Mises (Not averaged): 429.501

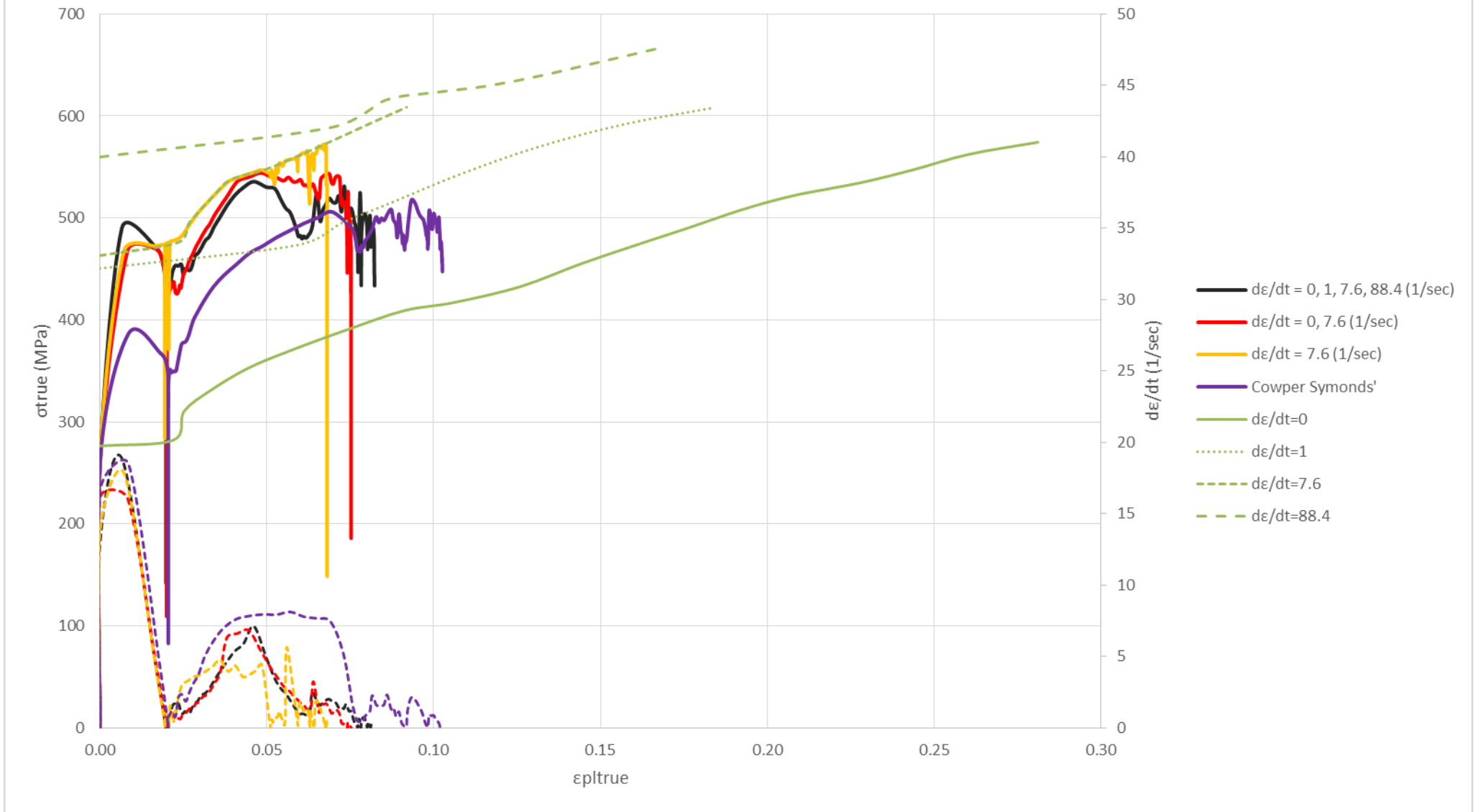


Διάγραμμα 49:

- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή τεσσάρων καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4sec^{-1}$) βρίσκεται μεταξύ των πειραματικών που αντιστοιχούν σε ταχύτητες παραμόρφωσης $1 sec^{-1}$ και $88.4 sec^{-1}$ για παραμορφώσεις από 0 έως 0.02 και μεταξύ των πειραματικών που αντιστοιχούν σε ταχύτητες παραμόρφωσης $1 sec^{-1}$ και $7.6 sec^{-1}$ για παραμορφώσεις μεγαλύτερες από 0.02 γεγονός που συμβαδίζει με το εύρος ταχυτήτων παραμόρφωσης που προκύπτει σε αυτές τις περιοχές.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή δύο καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) βρίσκεται μεταξύ των πειραματικών που αντιστοιχούν σε ταχύτητες παραμόρφωσης $0 sec^{-1}$ και $7.6 sec^{-1}$, όταν οι ταχύτητες παραμόρφωσης είναι πιο υψηλές ακολουθεί την πειραματική καμπύλη δυναμικής καταπόνησης για ταχύτητα παραμόρφωσης $7.6 sec^{-1}$. Παρατηρούνται υψηλότερες τάσεις, παραμορφώσεις και ταχύτητες παραμόρφωσης.

- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή μίας καμπύλης πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) ακολουθεί πλήρως την πειραματική καμπύλη για $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με την εξίσωση Cowper Symonds' παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές τάσης και υψηλότερες παραμορφώσεις.
- Η απότομη πτώση στις καμπύλες για $PEEQ \sim 0.02$ όπου και η ταχύτητα παραμόρφωσης μηδενίζεται οφείλεται σε στιγμιαία αποφόρτιση τοπικά.

10mm E91772 (Dynamic 12.5)



Διάγραμμα 49: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 91772, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 12.5 mm

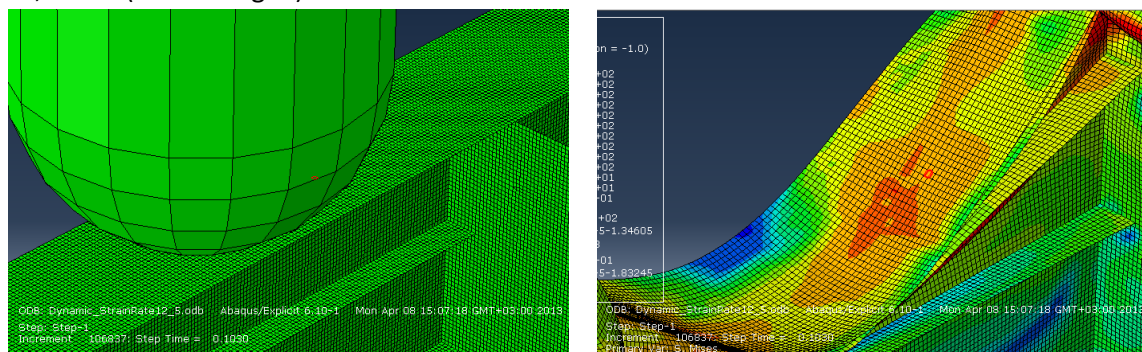
Element: PART-5-1.91193 Διάγραμμα 50

Type: S4R

Material: DYNAMIC_10MM

Connect: 93612, 93613, 93630, 93629

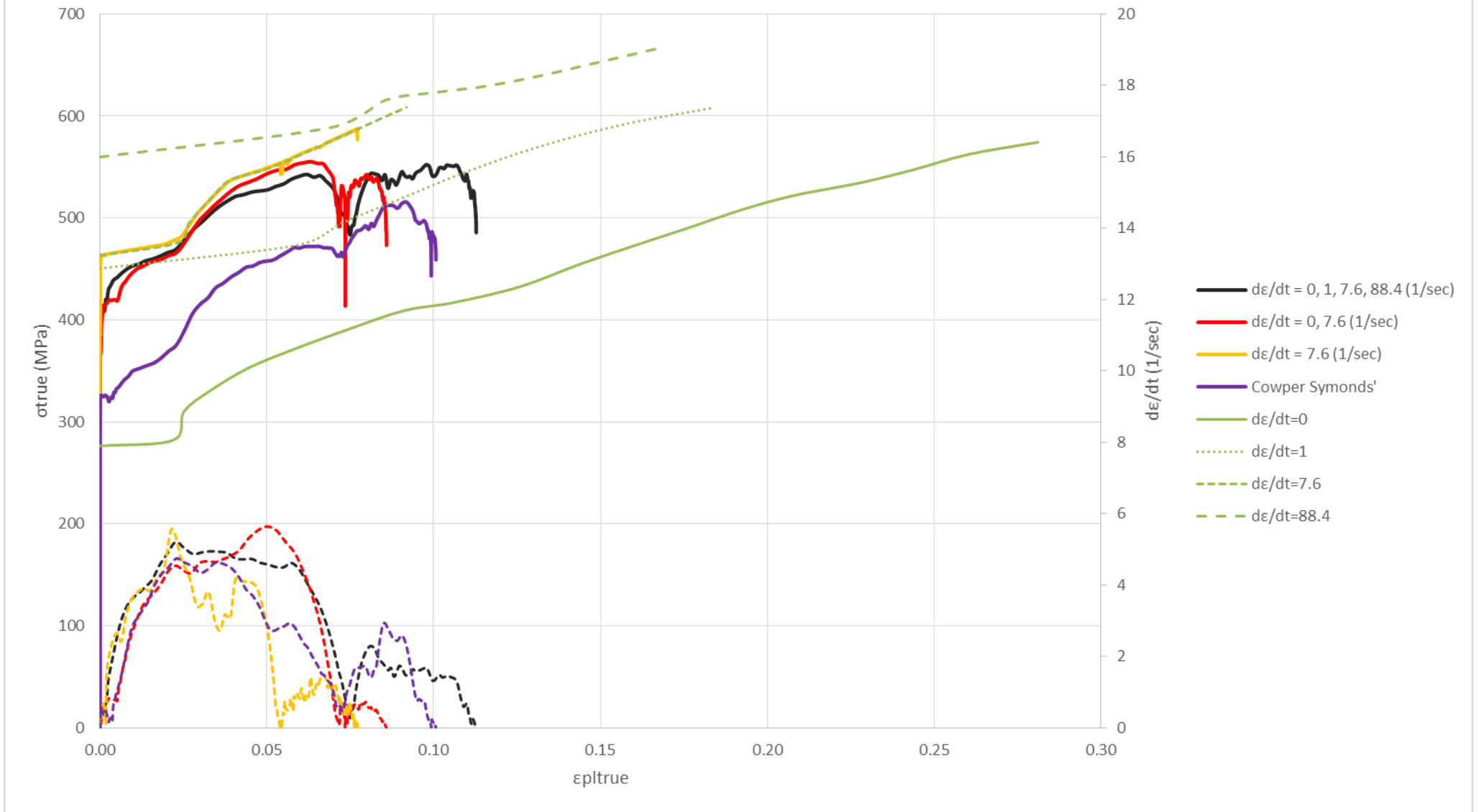
S, Mises (Not averaged): 485.709



Διάγραμμα 50:

- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή τεσσάρων καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4sec^{-1}$) καθώς και η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ με εισαγωγή δύο καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά γεγονός που οφείλεται στις ταχύτητες παραμόρφωσης που αναπτύσσονται οι οποίες δεν ξεπερνούν τα $7.6 sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή μίας καμπύλης πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) ακολουθεί πλήρως την πειραματική καμπύλη για $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με την εξίσωση Cowper Symonds' παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές τάσης.
- Οι ταχύτητες παραμόρφωσης είναι παρόμοιες και στις 4 διαφορετικές μοντελοποιήσεις του υλικού και δεν ξεπερνούν τα $6 sec^{-1}$.

10mm E91193 (Dynamic 12.5)



Διάγραμμα 50: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 91193, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 12.5 mm

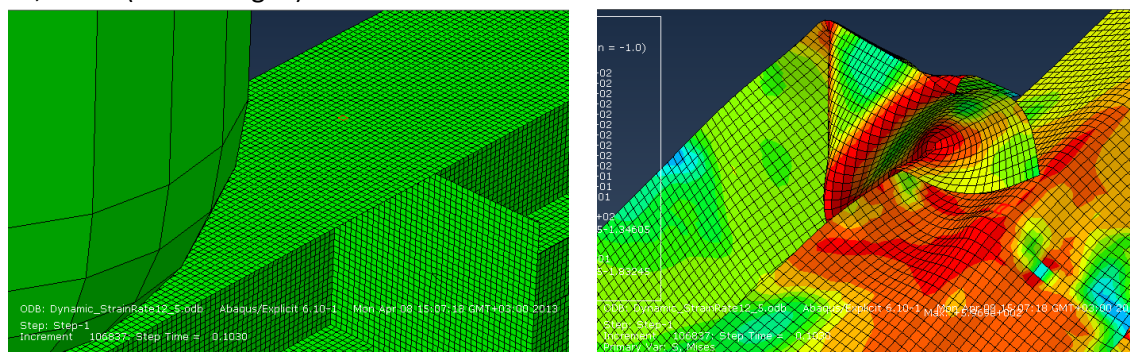
Element: PART-5-1.93265 Διάγραμμα 51

Type: S4R

Material: DYNAMIC_10MM

Connect: 95552, 95553, 95570, 95569

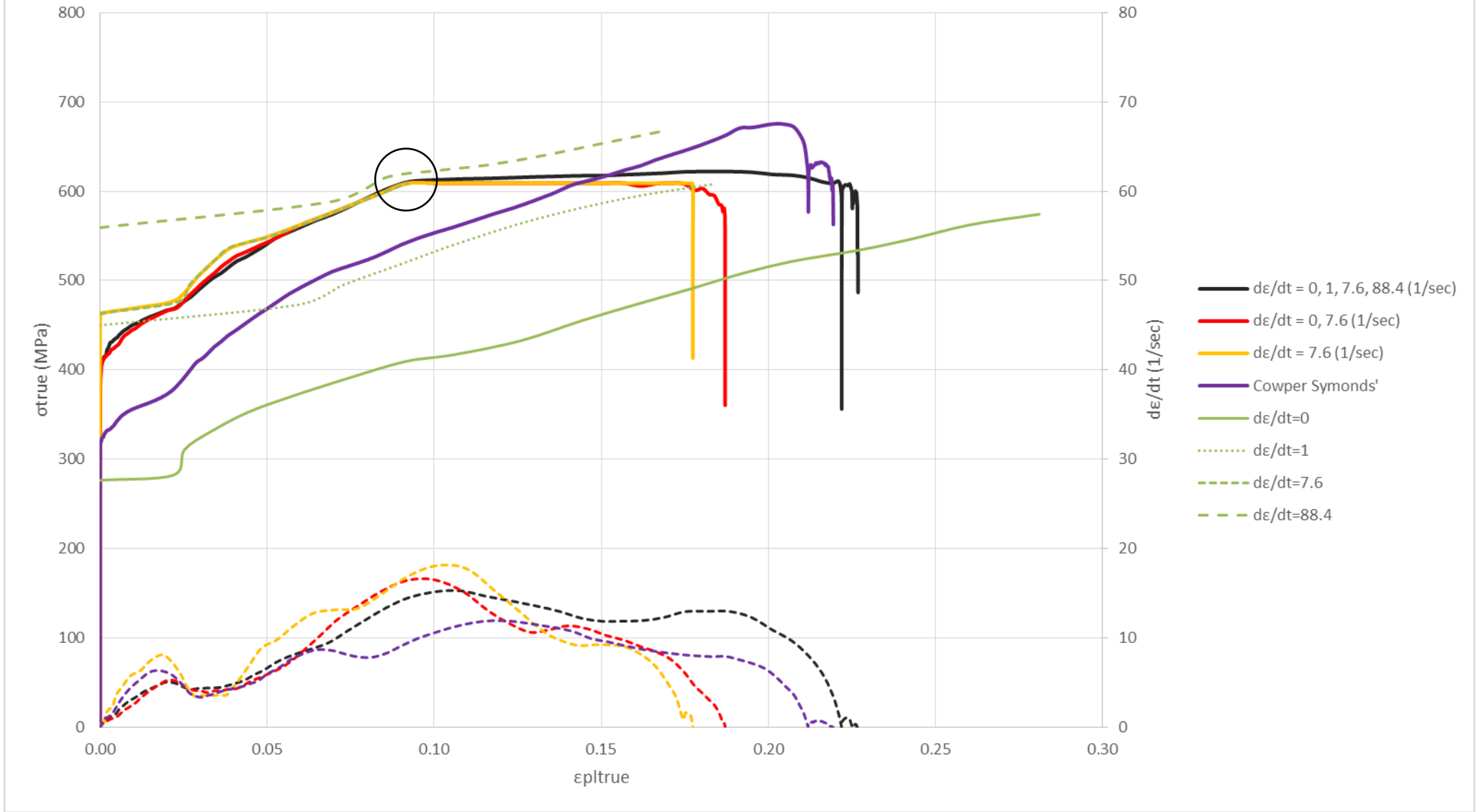
S, Mises (Not averaged): 487.654



Διάγραμμα 51:

- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή τεσσάρων καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4sec^{-1}$) καθώς και η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ με εισαγωγή δύο καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά λόγω των κοντινών ταχυτήτων παραμόρφωσης που εμφανίζονται. Παρόλα αυτά με την εισαγωγή και των τεσσάρων καμπύλων τάσης – παραμόρφωσης προσεγγίζεται καλύτερα το φαινόμενο της δυναμικής σκλήρυνσης του υλικού αφού μας δίνει υψηλότερες τάσεις για μεγαλύτερες ταχύτητες παραμόρφωσης. Στην περίπτωση της εισαγωγής λιγότερων καμπυλών ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) και ($\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) όταν αναπτύσσονται ταχύτητες παραμόρφωσης μεγαλύτερες των $7.6 sec^{-1}$ απλά οι καμπύλες ακολουθούν την πειραματική $d\epsilon/dt=7.6 sec^{-1}$ και μετά την τελευταία τιμή συνεχίζουν παράλληλα.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με την εξίσωση Cowper Symonds' έχει ως αποτέλεσμα χαμηλές τάσεις για παραμορφώσεις έως 0.13 και υψηλές τάσεις πριν την κατάρρευση του υλικού. Επίσης έχουμε μικρότερες ταχύτητες παραμόρφωσης σε σχέση με τις άλλες μοντελοποιήσεις.

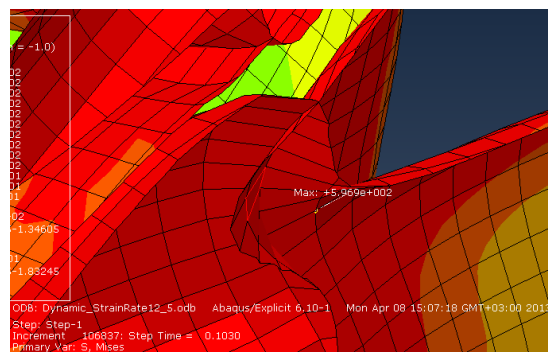
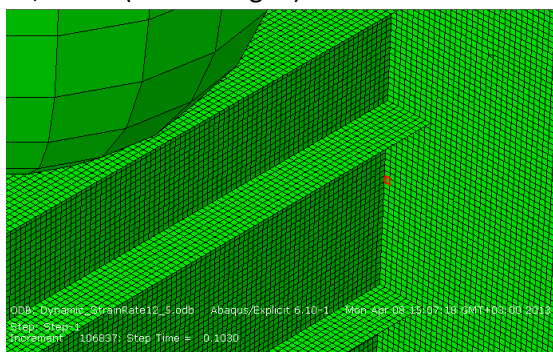
10mm E93265 (Dynamic 12.5)



Διάγραμμα 51: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 93265, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 12.5 mm

Element: PART-5-1.90319 Διάγραμμα 52

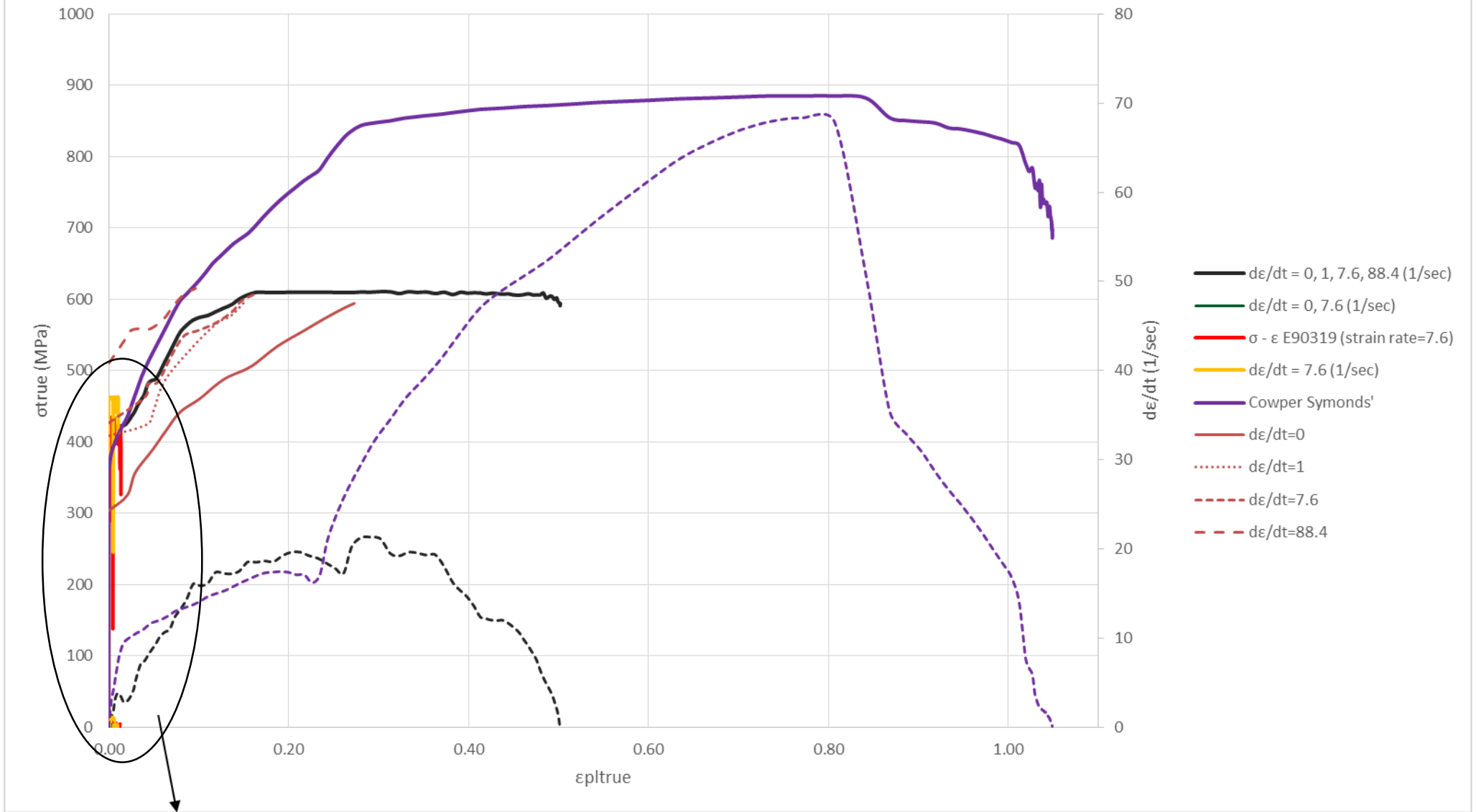
Type: S4R
 Material: DYNAMIC_8MM
 Connect: 92803, 92804, 765, 764
 S, Mises (Not averaged): 593.65



Διάγραμμα 52:

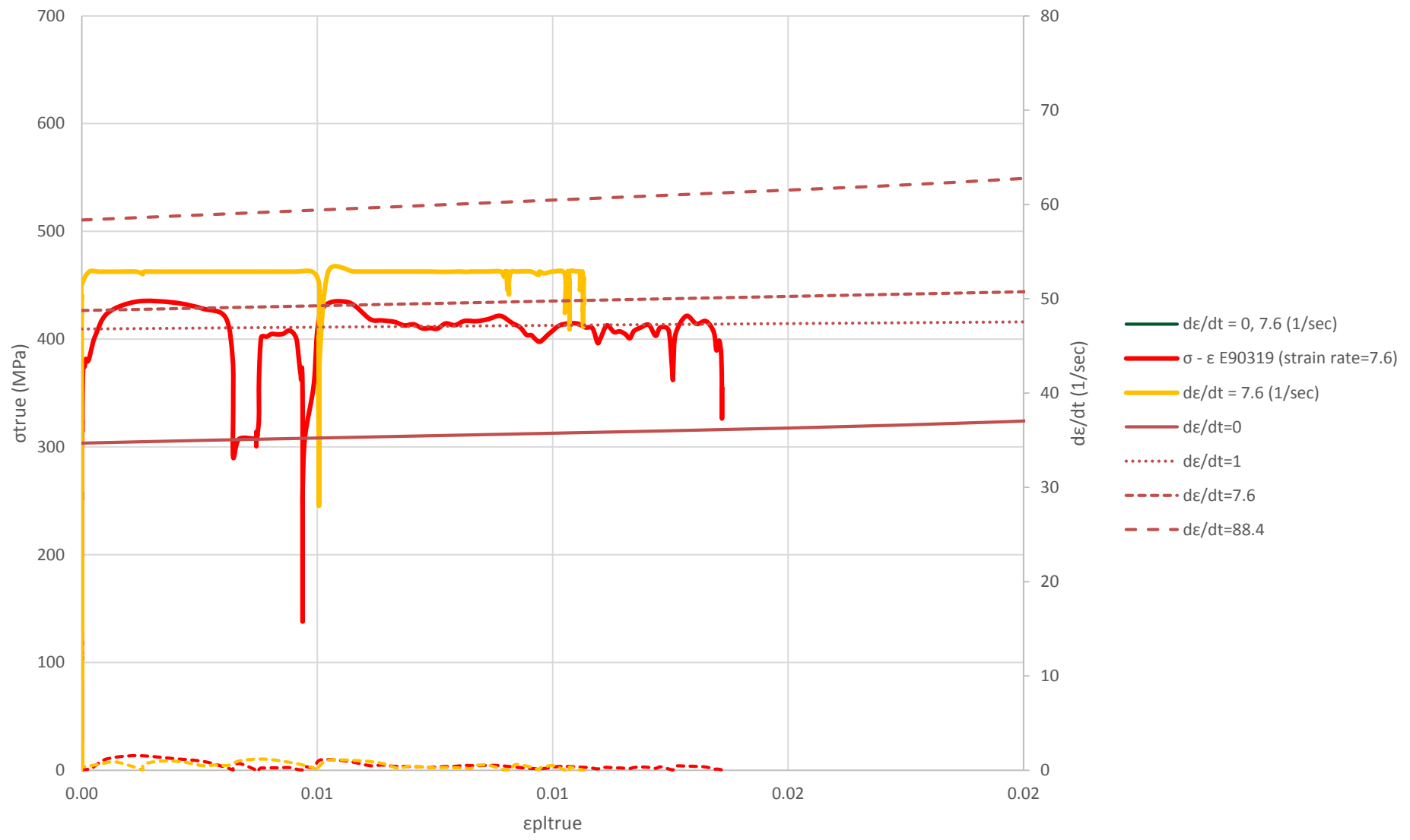
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή τεσσάρων καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4sec^{-1}$) βρίσκεται μεταξύ των πειραματικών που αντιστοιχούν σε ταχύτητες παραμόρφωσης $7.6 sec^{-1}$ και $88.4 sec^{-1}$, όπου αντίστοιχα οι ταχύτητες παραμόρφωσης είναι πάνω από $7.6 sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή δύο καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) και η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ με εισαγωγή μίας καμπύλης πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) παρουσιάζουν πολύ μικρές παραμορφώσεις σε αυτή την περιοχή.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με την εξίσωση Cowper Symonds' παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλες τάσεις και παραμορφώσεις στην περιοχή αυτή. Επίσης οι ταχύτητες παραμόρφωσης που προκύπτουν από αυτή την μοντελοποίηση είναι ιδιαίτερα υψηλές στο συγκεκριμένο στοιχείο.

8mm E90319 (Dynamic 12.5)



Διάγραμμα 52: Πάχος στοιχείου 8 mm, Element 90319, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 12.5 mm

8mm E90319 (Dynamic 12.5)



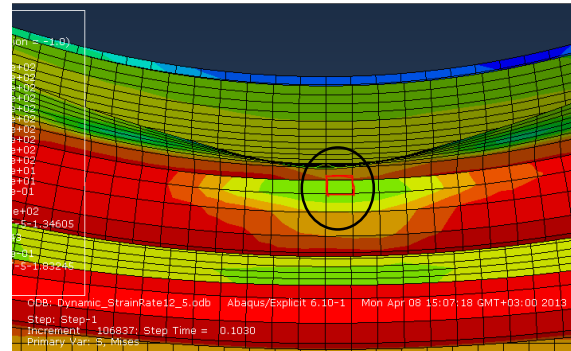
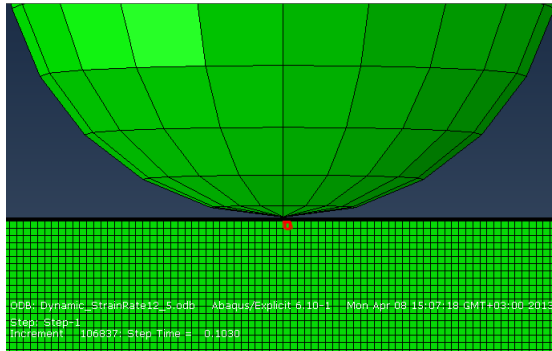
Element: PART-5-1.78204 Διάγραμμα 53

Type: S4R

Material: DYNAMIC_7MM

Connect: 81507, 81508, 6179, 6180

S, Mises (Not averaged): 584.79

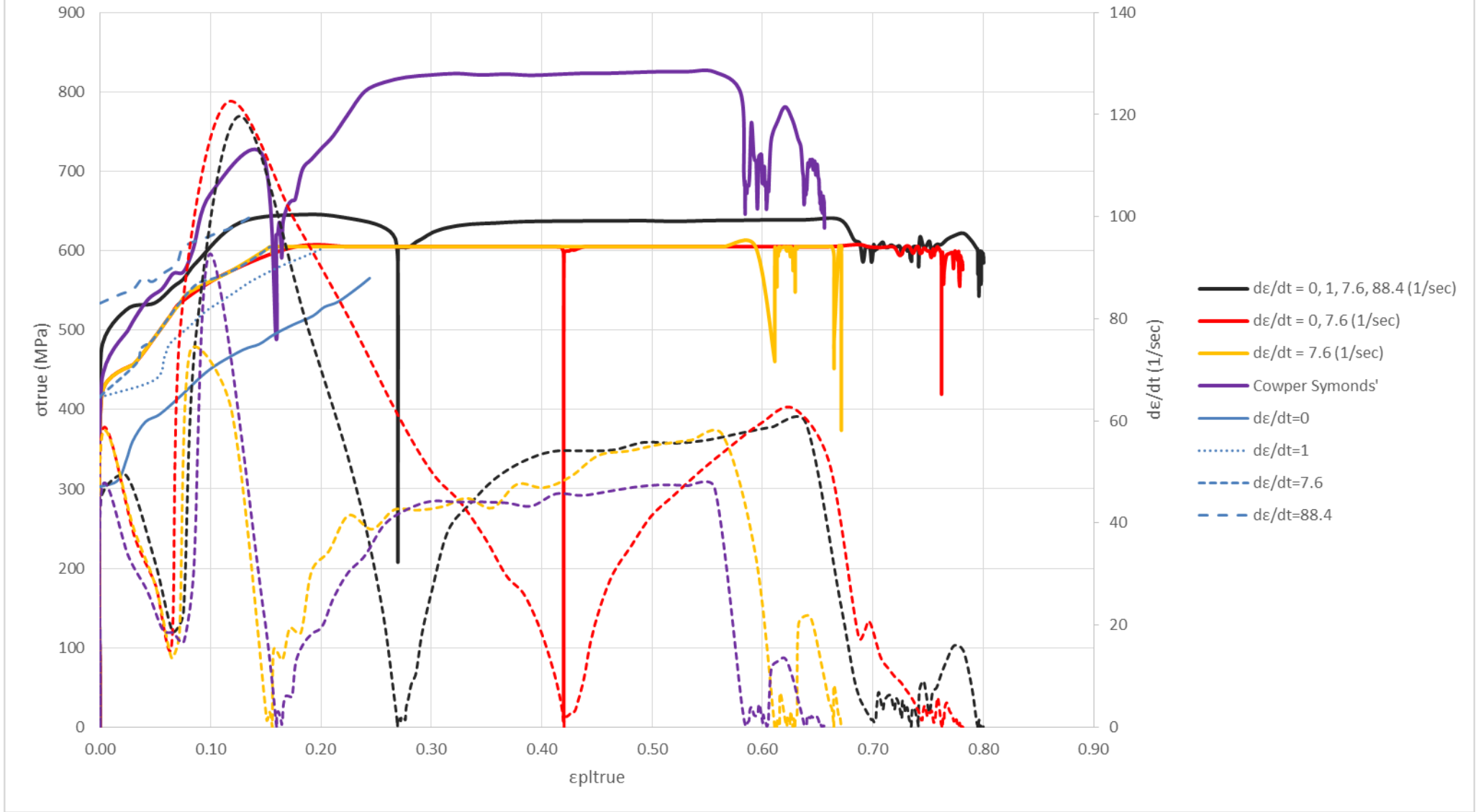


Διάγραμμα 53:

- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή τεσσάρων καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1sec^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 88.4sec^{-1}$) βρίσκεται μεταξύ των πειραματικών που αντιστοιχούν σε ταχύτητες παραμόρφωσης $7.6 sec^{-1}$ και $88.4 sec^{-1}$, αφού οι ταχύτητες παραμόρφωσης ξεπερνούν τα $7.6 sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή δύο καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) ακολουθεί την πειραματική που αντιστοιχεί σε ταχύτητες παραμόρφωσης $7.6 sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με εισαγωγή μίας καμπύλης πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) ακολουθεί πλήρως την πειραματική καμπύλη για $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$.
- Η καμπύλη $S_{mises} - PEEQ$ στην οποία η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με την εξίσωση Cowper Symonds' παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλες τάσεις.

Όλες οι μοντελοποιήσεις παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης, η διακριτοποίηση με μικρότερα στοιχεία έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες ταχύτητες παραμόρφωσης και παρατηρείται αυτό στο διάγραμμα 47 όπου γεωμετρικά το στοιχείο του διαγράμματος (E19488) βρίσκεται στο ίδιο σημείο με αυτό του διαγράμματος 53 (E78204) δηλαδή κάτω από τον impactor.

7mm E78204 (Dynamic 12.5)



Διάγραμμα 53: Πάχος στοιχείου 7 mm, Element 78204, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 12.5 mm

6.2.2.3 Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για την προσομοίωση του *Dynamic Test* με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού πεπερασμένου στοιχείου κελύφους (S4R) 6.25mm

Διαγράμματα 54, 55, 56, 57, 58 και 59:

Τόσο η μοντελοποίηση με εισαγωγή δύο καμπύλων πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0sec^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) όσο και η μοντελοποίηση με εισαγωγή μίας καμπύλης πραγματικής τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6sec^{-1}$) έχουν μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Οι παραμορφώσεις καθώς και οι ταχύτητες παραμορφώσεων που προκύπτουν είναι πολύ μικρές συνολικά στην κατασκευή, εκτός από την περιοχή που φαίνεται στις Εικόνες 45 και 46 όπου μία σειρά στοιχείων που συνορεύουν με τα ενισχυτικά παρουσιάζουν υπερβολικά μεγάλες παραμορφώσεις και ταχύτητες παραμορφώσεων. Τα στοιχεία αυτά δεν συμπίπτουν στις δύο προσομοιώσεις.

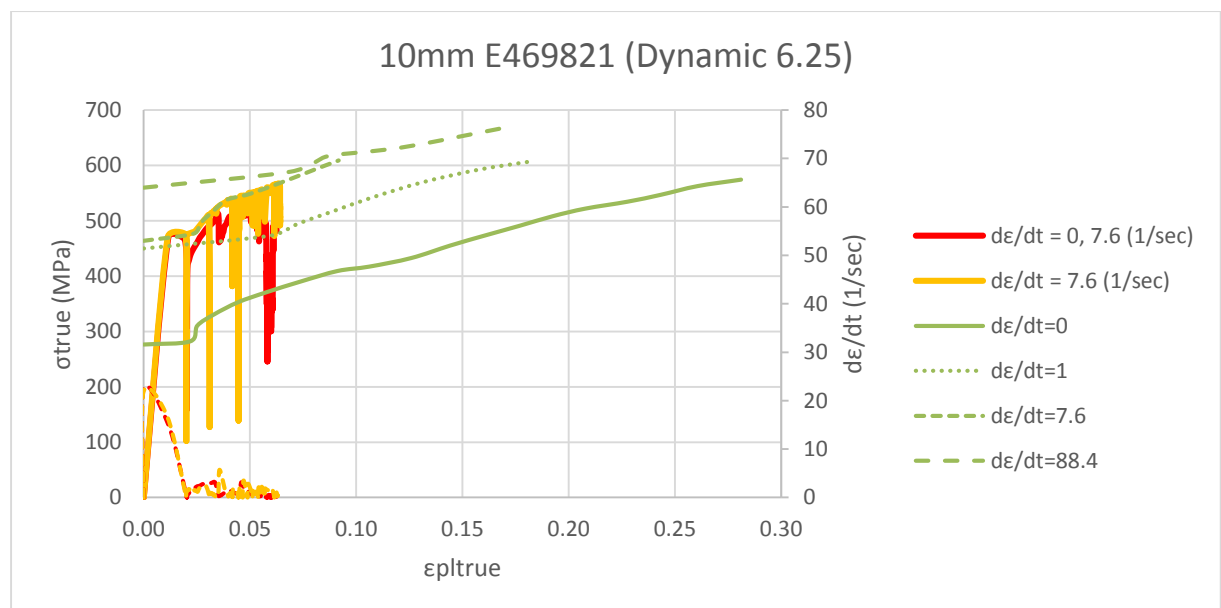
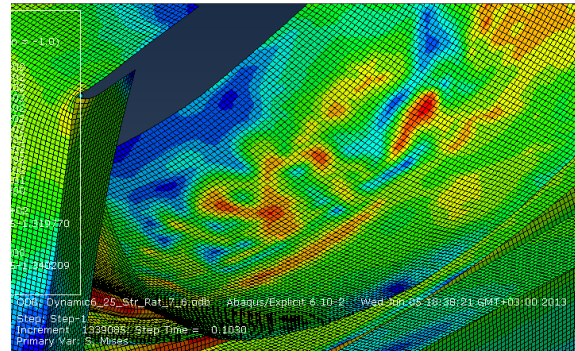
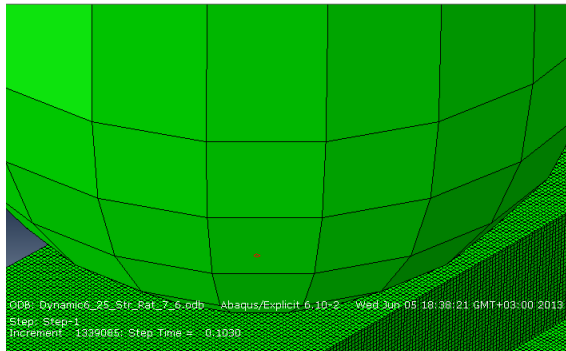
Element: PART-5-1.469821 Διάγραμμα 54

Type: S4R

Material: DYNAMIC_10MM

Connect: 12403, 472133, 472168, 12402

S, Mises (Not averaged): 481.327



Διάγραμμα 54: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 469821, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm

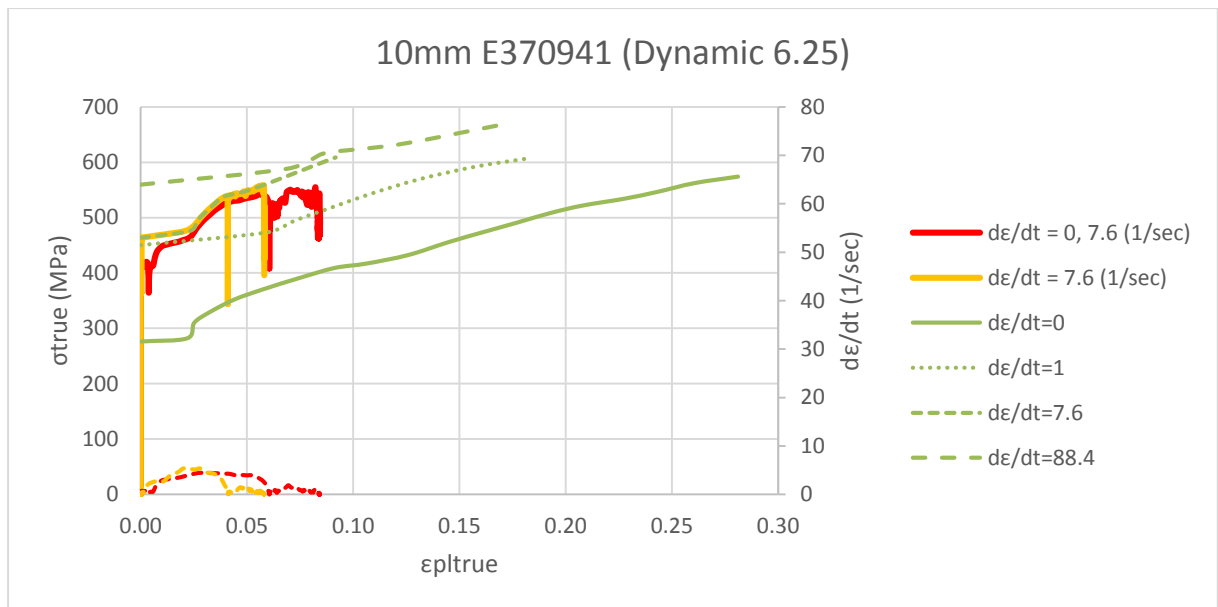
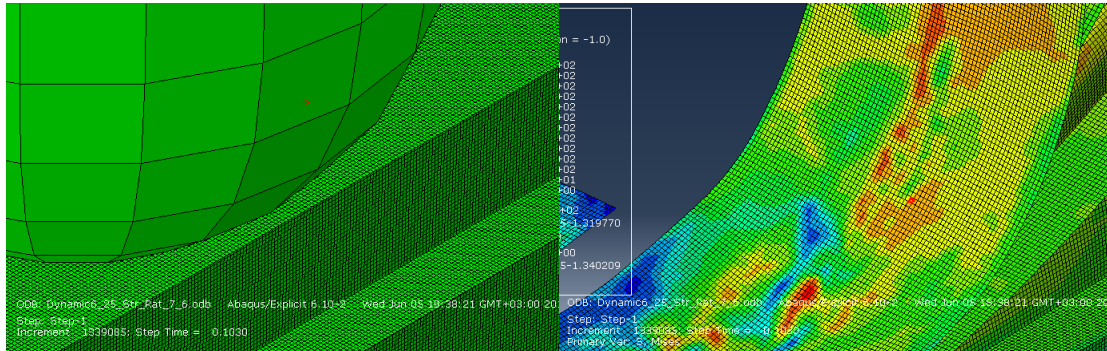
Element: PART-5-1.370941 Διάγραμμα 55

Type: S4R

Material: DYNAMIC_10MM

Connect: 375777, 375778, 375813, 375812

S, Mises (Not averaged): 476.442



Διάγραμμα 55: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 370941, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm

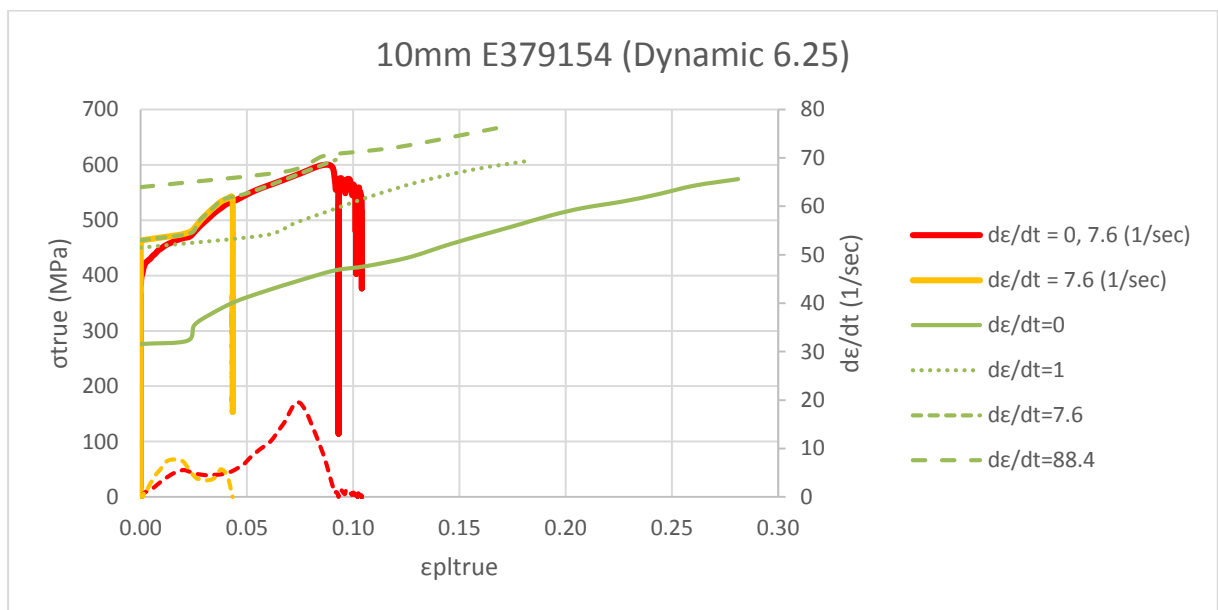
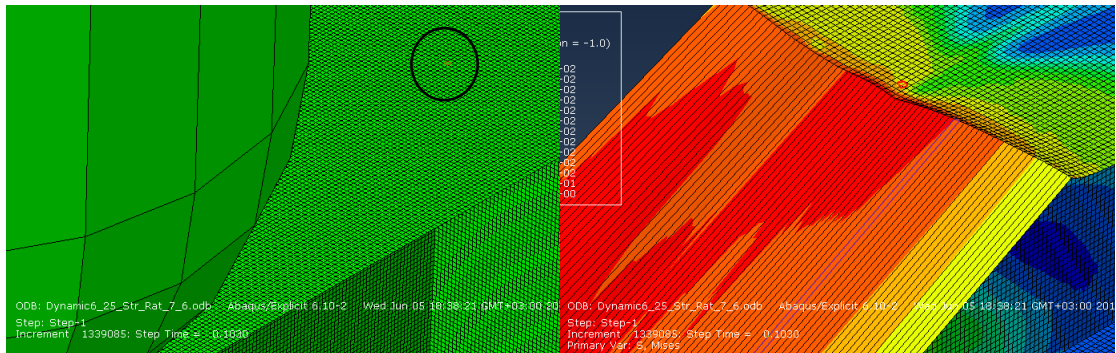
Element: PART-5-1.379154 Διάγραμμα 56

Type: S4R

Material: DYNAMIC_10MM

Connect: 383727, 383728, 383763, 383762

S, Mises (Not averaged): 432.453



Διάγραμμα 56: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 379154, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm

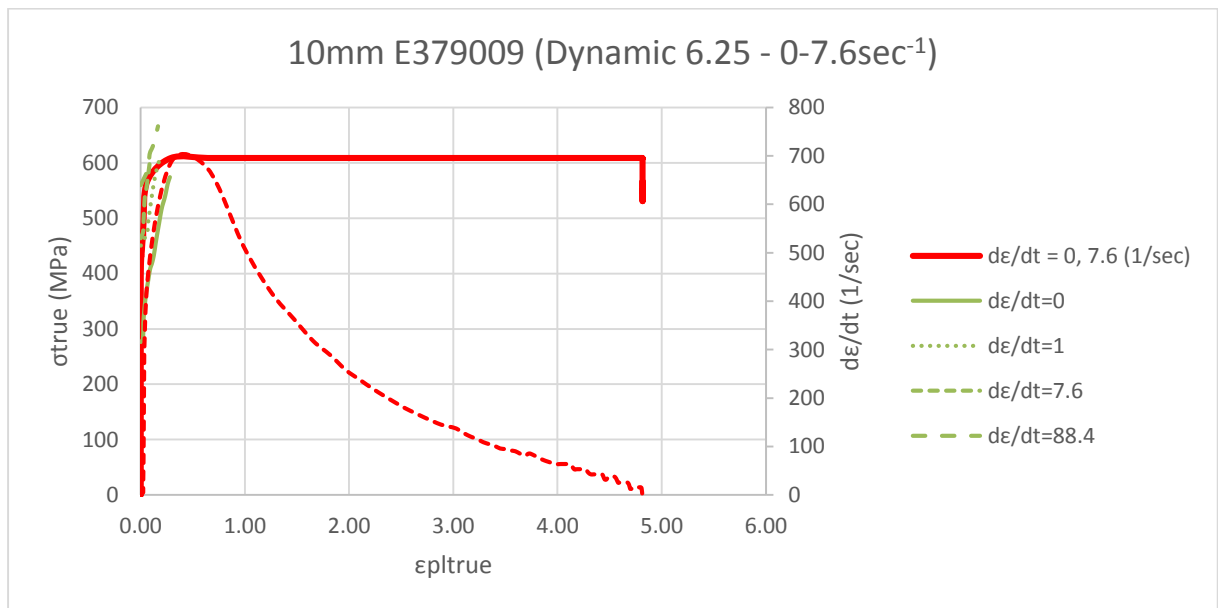
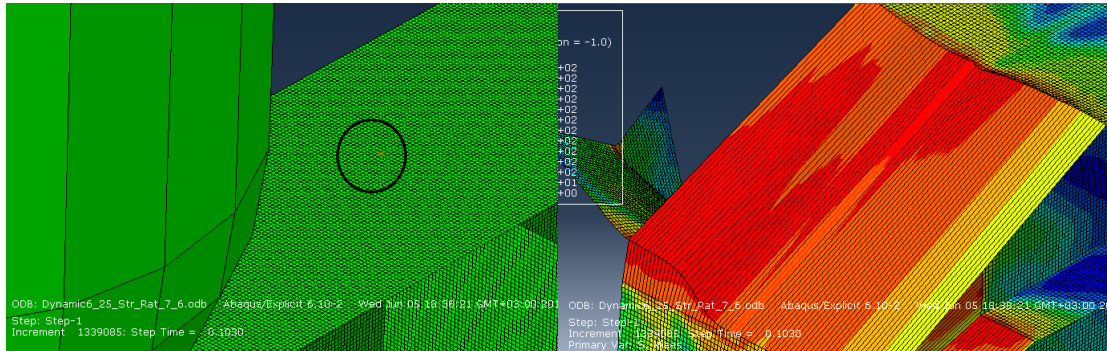
Element: PART-5-1.379009 Διάγραμμα 57

Type: S4R

Material: DYNAMIC_10MM

Connect: 1005, 1004, 383622, 383621

S, Mises (Not averaged): 566.826



Διάγραμμα 57: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 379009, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm

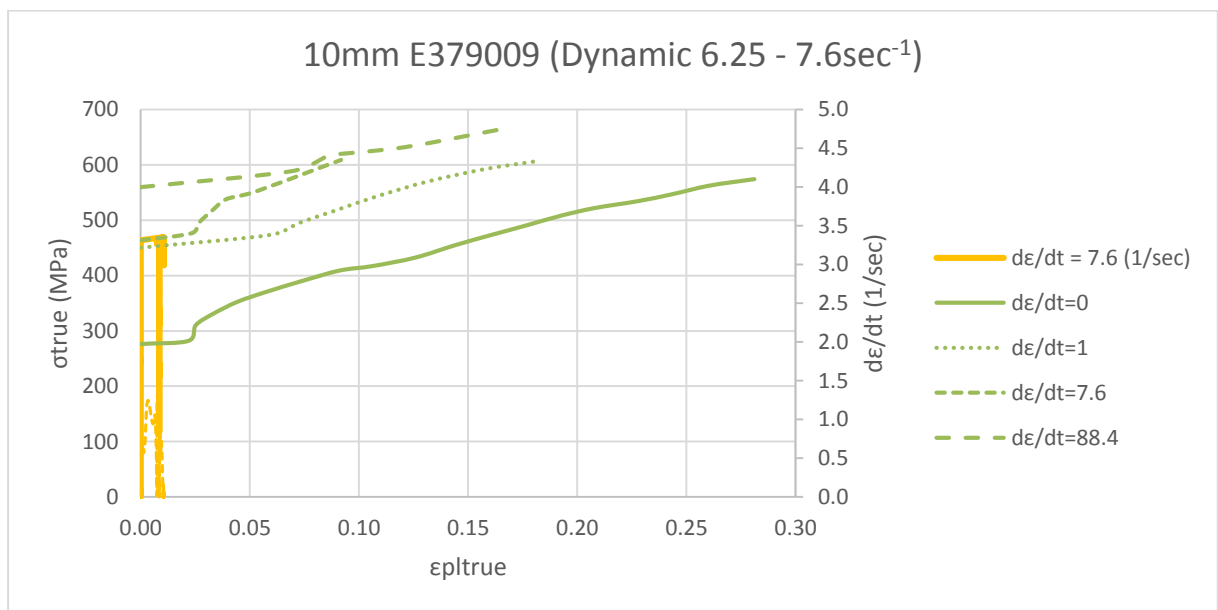
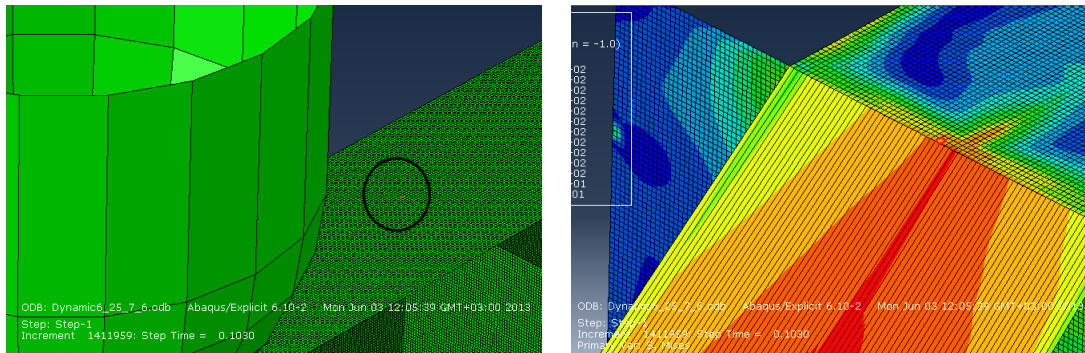
Element: PART-5-1.379009 Διάγραμμα 58

Type: S4R

Material: DYNAMIC_10MM

Connect: 1005, 1004, 383622, 383621

S, Mises (Not averaged): 438.37



Διάγραμμα 58: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 379009, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm

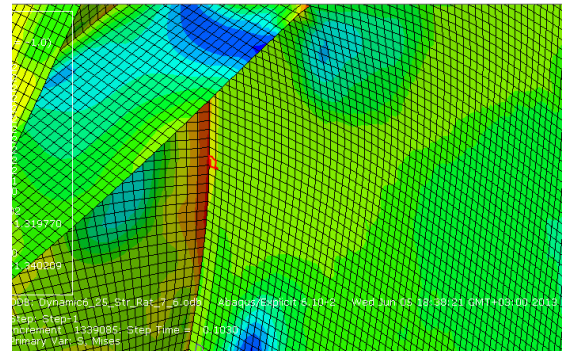
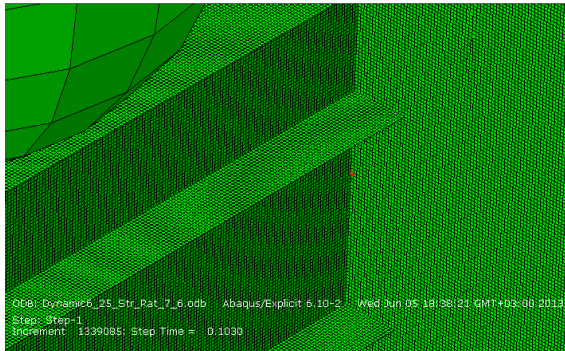
Element: PART-5-1.367432 Διάγραμμα 59

Type: S4R

Material: DYNAMIC_8MM

Connect: 372400, 372401, 1484, 1483

S, Mises (Not averaged): 436.419



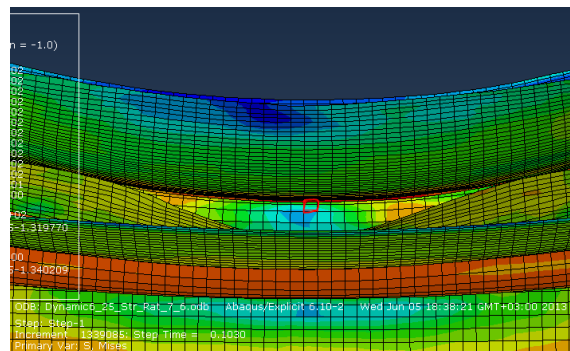
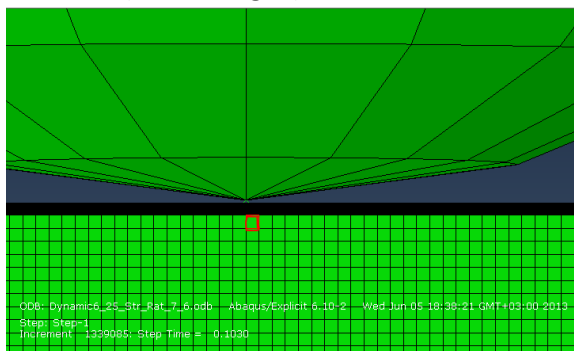
Element: PART-5-1.319888 Διάγραμμα 60

Type: S4R

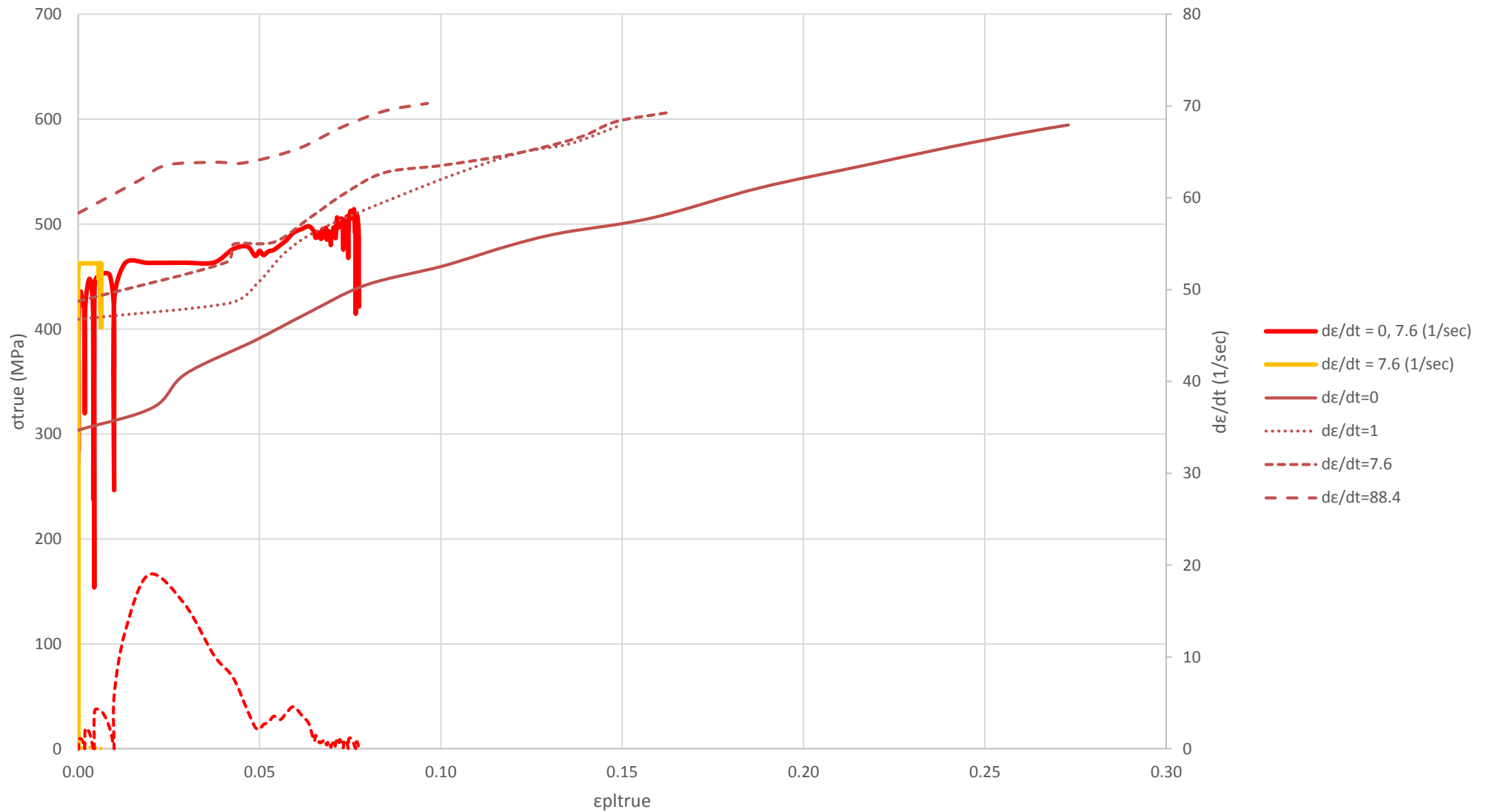
Material: DYNAMIC_7MM

Connect: 326499, 326500, 12402, 12403

S, Mises (Not averaged): 560.233

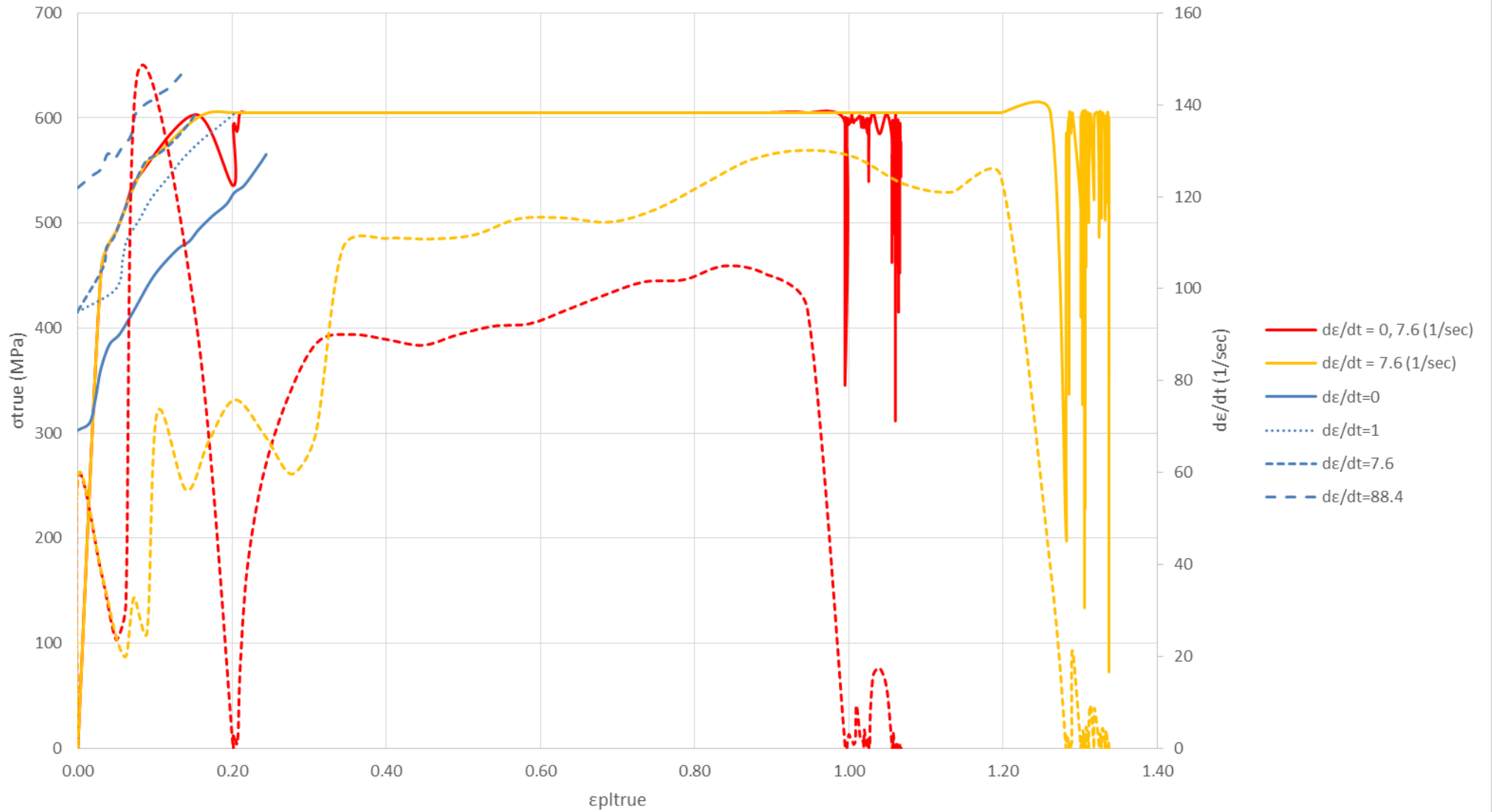


8mm E367432 (Dynamic 6.25)



Διάγραμμα 59: Πάχος στοιχείου 10 mm, Element 367432, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm

7mm E319888 (Dynamic 6.25)



Διάγραμμα 60: Πάχος στοιχείου 7 mm, Element 319888, Προσομοίωση Dynamic test με μέγεθος πλευράς, τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R, 6.25 mm

6.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

6.3.1 Ψευδοστατικές διεργασίες

Το πιο γενικό μέσο αξιολόγησης του κατά πόσο μία προσομοίωση έχει ως αποτέλεσμα ψευδοστατική απόκριση είναι η μελέτη των διαφόρων μορφών ενέργειας.

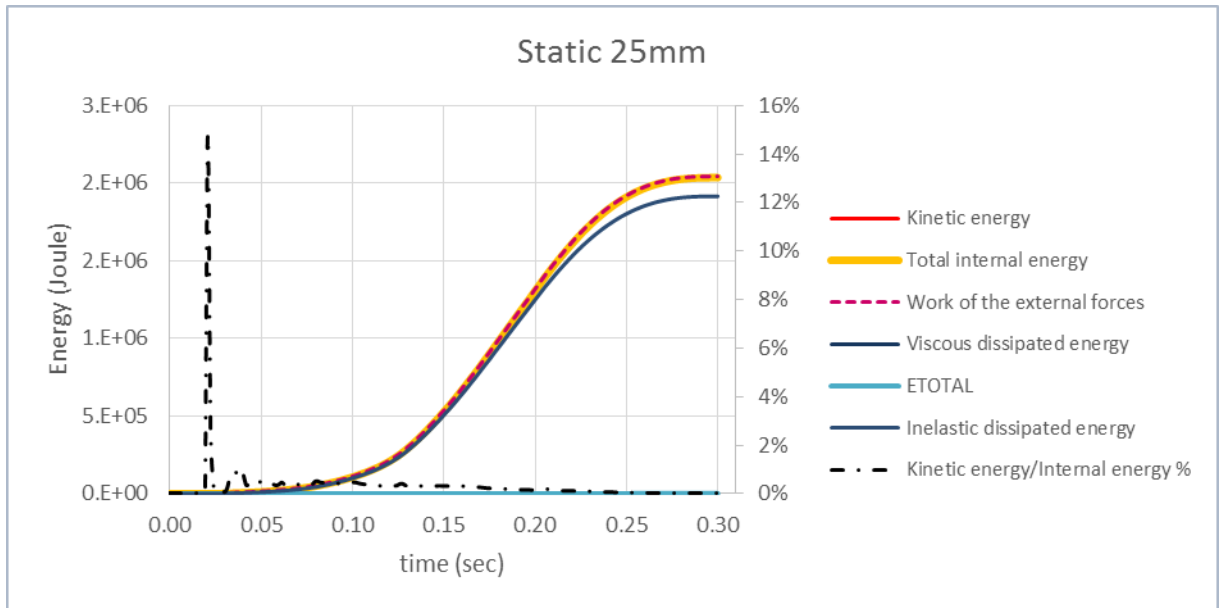
Ακολουθεί το ισοζύγιο ενέργειας για προσομοιώσεις Abaqus/Explicit:

$$E_I + E_V + E_{FD} + E_{KE} + E_{THE} - E_W - E_{PW} - E_{CW} - E_{MW} - E_{HF} = E_{total} = constant$$

Όπου E_I είναι η εσωτερική ενέργεια, E_V είναι η ενέργεια ιξώδους, E_{FD} η ενέργεια τριβών, E_{KE} η κινητική ενέργεια, E_{THE} η εσωτερική θερμική ενέργεια, E_W είναι το έργο των εξωτερικών φορτίων και E_{PW} , E_{CW} , E_{MW} είναι το έργο λόγω επαφής, περιορισμών ή πρόσθετης μάζας πρόωσης αντίστοιχα. E_{HF} είναι η εξωτερική θερμική ενέργεια μέσω εξωτερικών ροών. Το άθροισμα των επιμέρους ενεργειών είναι η E_{TOTAL} η οποία θα πρέπει να είναι σταθερή. Κατά τις αριθμητικές επιλύσεις προκύπτει περίπου σταθερή με σφάλμα μικρότερο του 1%.

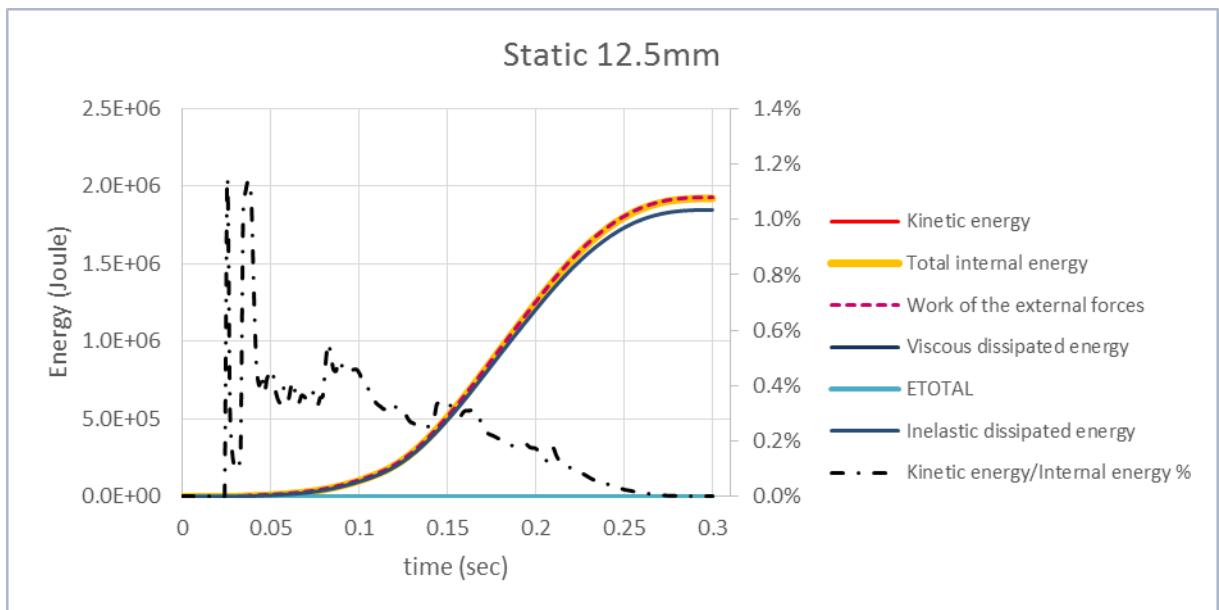
Αν μία προσομοίωση είναι ψευδοστατική, το έργο που δίδεται από τις εξωτερικές δυνάμεις είναι περίπου ίσο με την εσωτερική ενέργεια του συστήματος. Η ενέργεια ιξώδους είναι γενικά μικρή, εκτός αν υπάρχουν βισκοελαστικά υλικά ή αποσβεστήρες. Σε μια ψευδοστατική ανάλυση οι δυνάμεις αδράνειας είναι αμελητέες επειδή η ταχύτητα είναι μικρή. Το αποτέλεσμα είναι πολύ μικρή κινητική ενέργεια. Γενικά η κινητική ενέργεια δεν πρέπει να ξεπερνά το 5 με 10% της εσωτερικής ενέργειας, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

6.3.1.1 Διαγράμματα ενέργειας για την προσομοίωση του Static Test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού πεπερασμένου στοιχείου κελύφους (S4R) 25mm



Διάγραμμα 61: Ενέργειες για την προσομοίωση Static 25

6.3.1.2 Διαγράμματα ενέργειας για την προσομοίωση του Static Test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού πεπερασμένου στοιχείου κελύφους (S4R) 12.5mm



Διάγραμμα 62: Ενέργειες για την προσομοίωση Static 12.5 mm

Παρατηρήσεις:

Τόσο στην προσομοίωση με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους (S4R) 25 mm όσο και σε αυτήν με 12.5 mm η συνολική ενέργεια είναι περίπου σταθερή σε σχέση με τις άλλες ενέργειες.

Επίσης η ολική εσωτερική ενέργεια είναι περίπου ίση με το έργο των εξωτερικών δυνάμεων.

Στην προσομοίωση με μέγεθος πλευράς στοιχείου 25 mm το ποσοστό της κινητικής ενέργειας προς την εσωτερική ενέργεια είναι μικρότερο του 1%, εκτός από δύο τιμές, 14.78% και 2.68%, αρχικά όταν οι ενέργειες αρχίζουν να παίρνουν μη μηδενικές τιμές. Αντίστοιχα για την προσομοίωση με πλευρά στοιχείου 12.5 mm το ποσοστό της κινητικής ενέργειας προς την εσωτερική ενέργεια είναι μικρότερο του 0.5%, εκτός από την αρχική μη μηδενική τιμή που είναι 1.15%.

Ενεργειακά λοιπόν παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα η διακριτοποίηση με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm.

6.3.2 Δυναμικές διεργασίες

Το ενεργειακό ισοζύγιο για δυναμικές προσομοιώσεις Abaqus/Explicit είναι:

$$E_I + E_V + E_{FD} + E_{KE} + E_{THE} - E_W - E_{PW} - E_{CW} - E_{MW} - E_{HF} = E_{total} = constant$$

Όπου E_I είναι η εσωτερική ενέργεια, E_V είναι η ενέργεια ιξώδους, E_{FD} η ενέργεια τριβών, E_{KE} η κινητική ενέργεια, E_{THE} η εσωτερική θερμική ενέργεια, E_W είναι το έργο των εξωτερικών φορτίων και E_{PW} , E_{CW} , E_{MW} είναι το έργο λόγω επαφής, περιορισμών ή πρόσθετης μάζας πρόωσης αντίστοιχα. E_{HF} είναι η εξωτερική θερμική ενέργεια μέσω εξωτερικών ροών. Το άθροισμα των επιμέρους ενεργειών είναι η E_{total} η οποία κατά την αριθμητική επίλυση θα πρέπει να είναι σταθερή με σφάλμα περίπου 1%.

- Εσωτερική ενέργεια E_I .

Η εσωτερική ενέργεια είναι το άθροισμα της ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης E_E που μπορεί να ανακτηθεί και των μη ανακτήσιμων

ενεργειών, δηλαδή της ενέργειας λόγω πλαστικών παραμορφώσεων E_P , της ενέργειας ιξωδοελαστικότητας ή ερπυσμού E_{CD} , της τεχνητής ενέργειας παραμόρφωσης E_A , της ενέργειας φθοράς E_{DMD} , της ενέργειας ελέγχου στρέβλωσης E_{CD} και της ενέργειας σπηλαίωσης E_{FD} :

$$E_I = E_E + E_P + E_{CD} + E_A + E_{DMD} + E_{DC} + E_{FC}$$

Η τεχνητή ενέργεια παραμόρφωσης E_A περιλαμβάνει την ενέργεια που οφείλεται στο φαινόμενο hourglassing και την ενέργεια λόγω εγκάρσιας διάτμησης σε στοιχεία κελύφους ή δοκού. Υψηλές τιμές στην τεχνητή ενέργεια παραμόρφωσης καταδεικνύουν προβληματική διακριτοποίηση και χρήση αραιού πλέγματος. Το ποσοστό της τεχνητής ενέργειας παραμόρφωσης σε σχέση με την εσωτερική ενέργεια δεν πρέπει να ξεπερνάει το 2%.

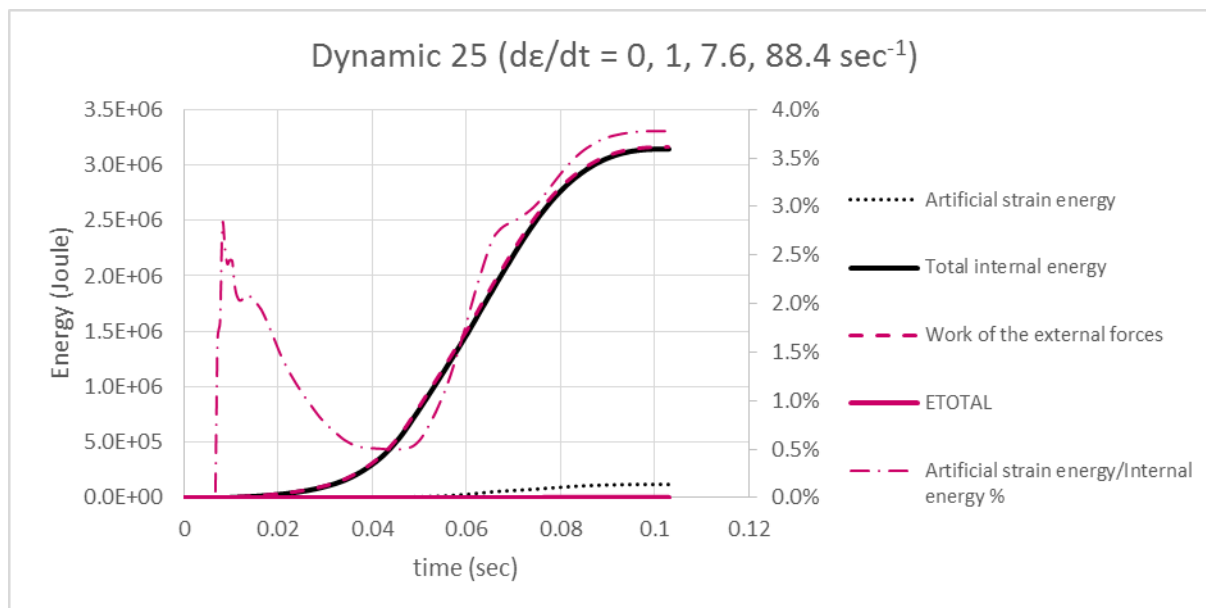
- Ενέργεια ιξώδους E_V :

Η ενέργεια ιξώδους είναι η ενέργεια που χάνεται λόγω απόσβεσης. Η ενέργεια ιξώδους δεν αποτελεί μέρος της ενέργειας ιξωδοελαστικότητας ή της ενέργειας λόγω πλαστικότητας.

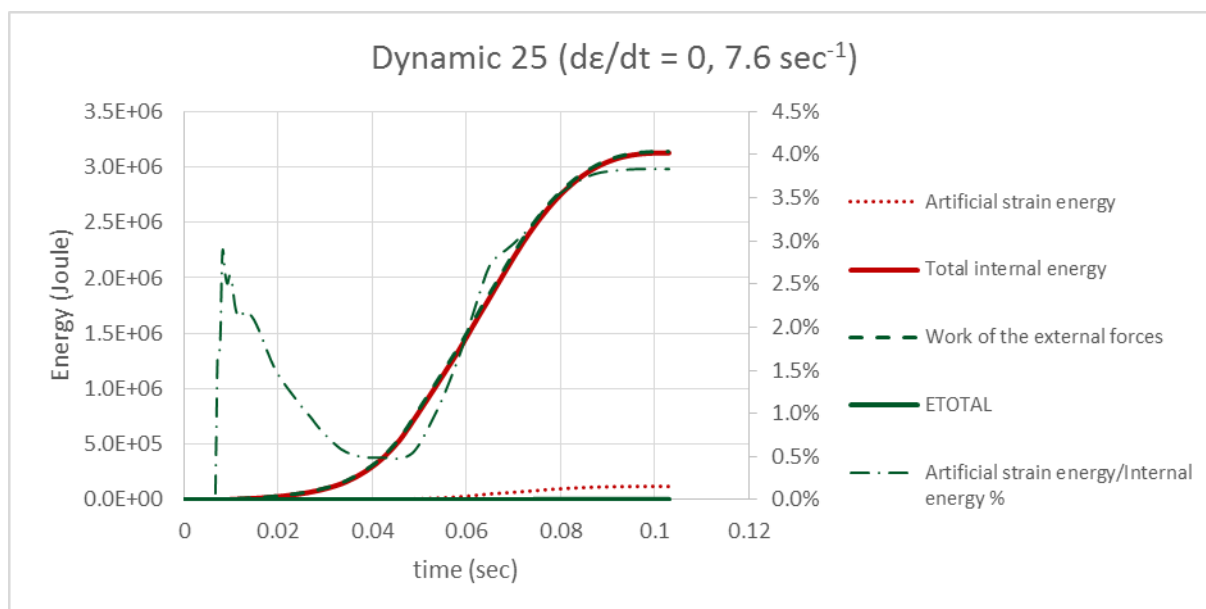
- Έργο εξωτερικών δυνάμεων E_W :

Το έργο των εξωτερικών δυνάμεων υπολογίζεται με προς τα εμπρός ολοκλήρωση και καθορίζεται πλήρως από τις δυνάμεις (ροπές) και τις μετατοπίσεις (περιστροφές) στους κόμβους. Οι προκαθορισμένες συνοριακές συνθήκες συμβάλλουν επίσης στο έργο των εξωτερικών δυνάμεων (Simulia, 2010).

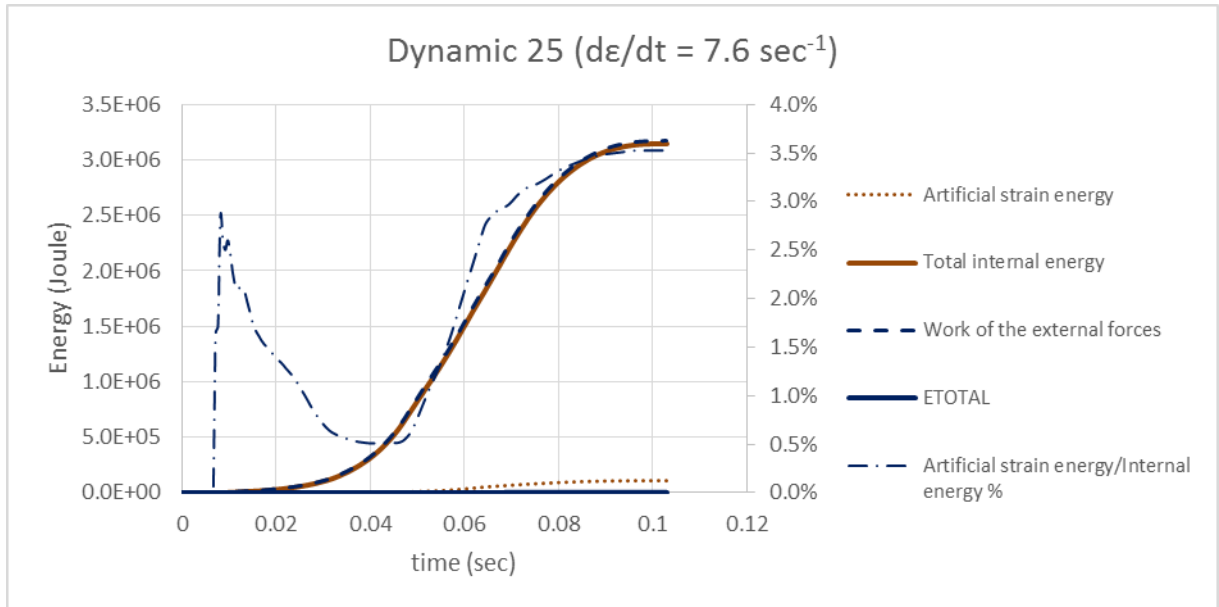
6.3.2.1 Διαγράμματα ενέργειας για την προσομοίωση του Dynamic Test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού πεπερασμένου στοιχείου κελύφους (S4R) 25mm



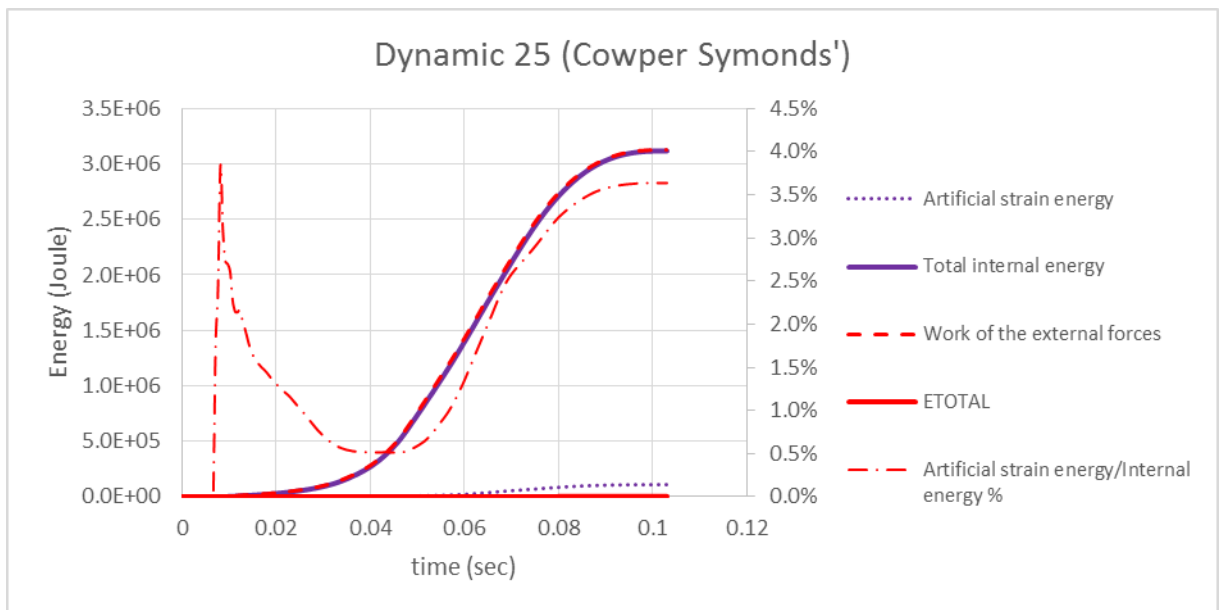
Διάγραμμα 63: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 25 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης (0sec^{-1} , 1sec^{-1} , 7.6sec^{-1} και 88.4sec^{-1})



Διάγραμμα 64: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 25 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για δύο ταχύτητες παραμόρφωσης (0sec^{-1} και 7.6sec^{-1})

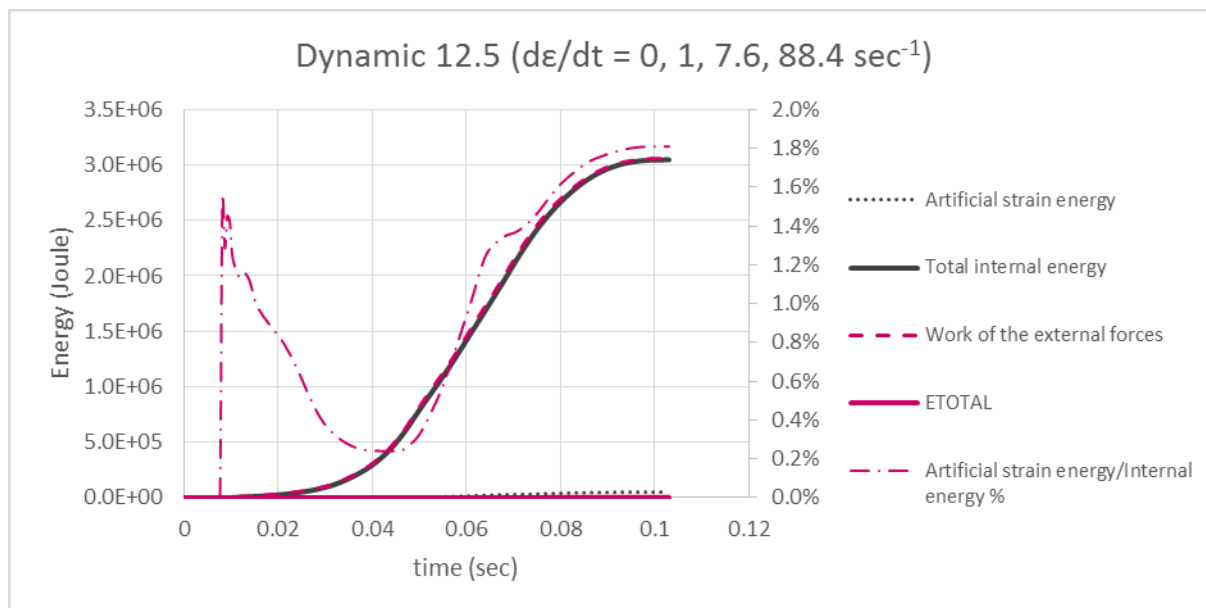


Διάγραμμα 65: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του *Dynamic test* με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 25 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6 sec^{-1})

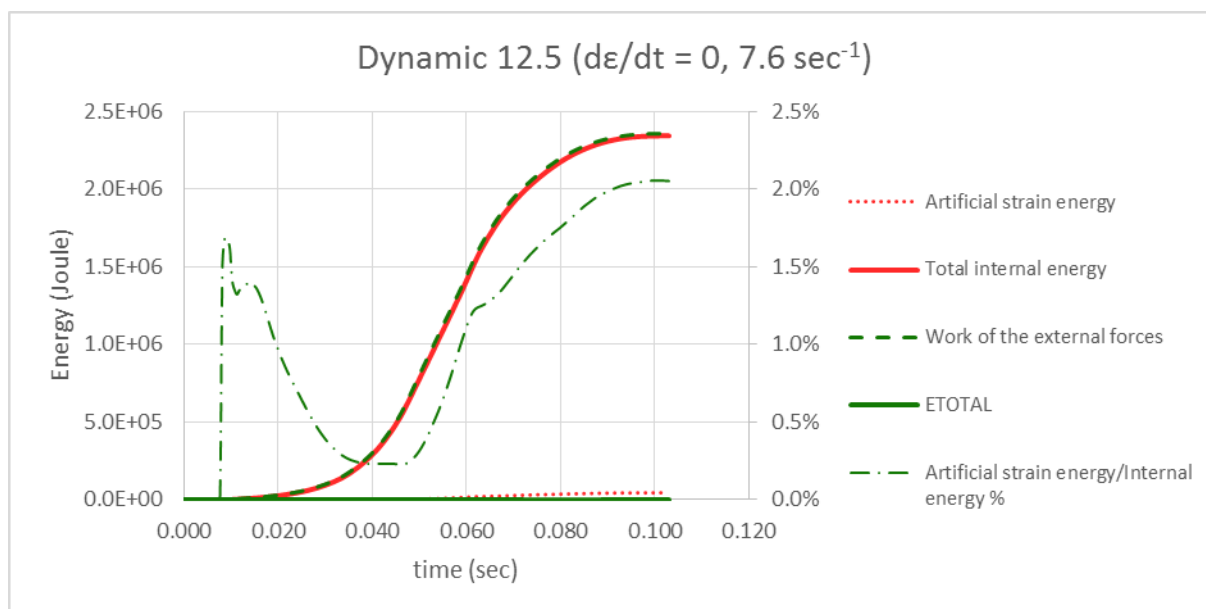


Διάγραμμα 66: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του *Dynamic test* με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 25 mm με μοντελοποίηση του υλικού σύμφωνα με την σχέση *Cowper-Symonds'*

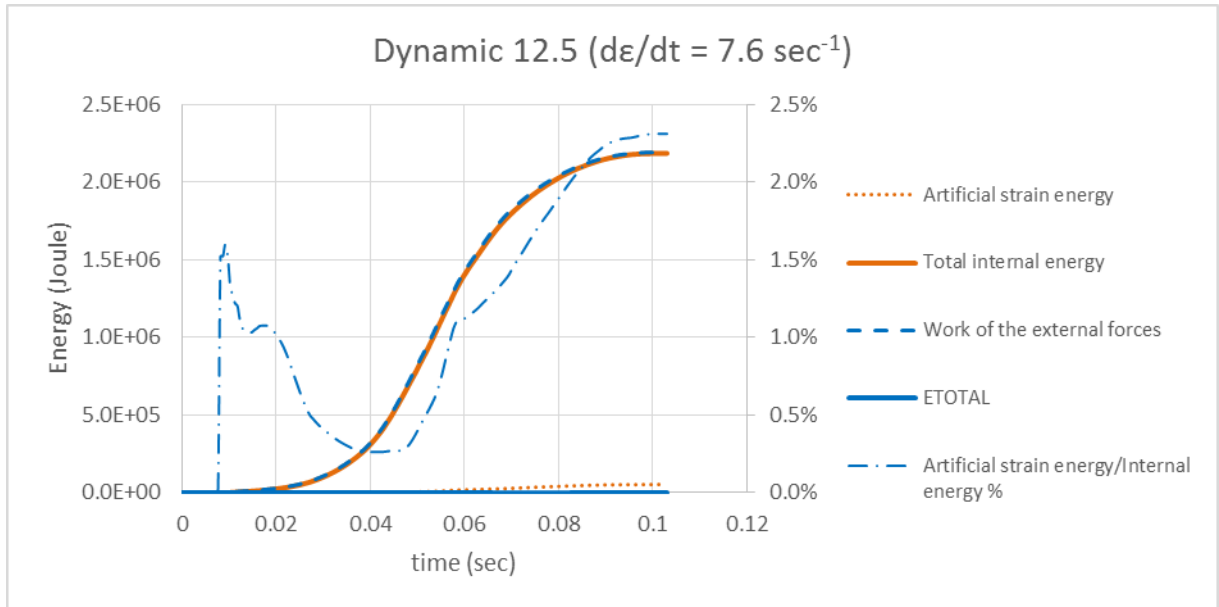
6.3.2.2 Διαγράμματα ενέργειας για την προσομοίωση του Dynamic Test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού πεπερασμένου στοιχείου κελύφους (S4R) 12.5mm



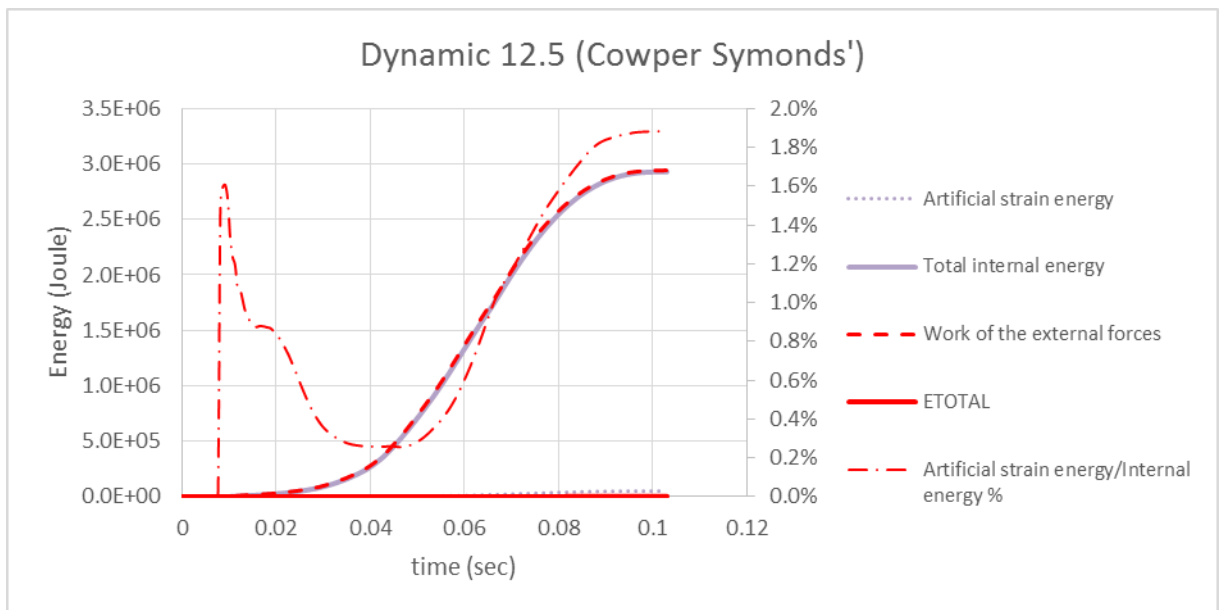
Διάγραμμα 67: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης (0 sec^{-1} , 1 sec^{-1} , 7.6 sec^{-1} και 88.4 sec^{-1})



Διάγραμμα 68: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για δύο ταχύτητες παραμόρφωσης (0 sec^{-1} και 7.6 sec^{-1})

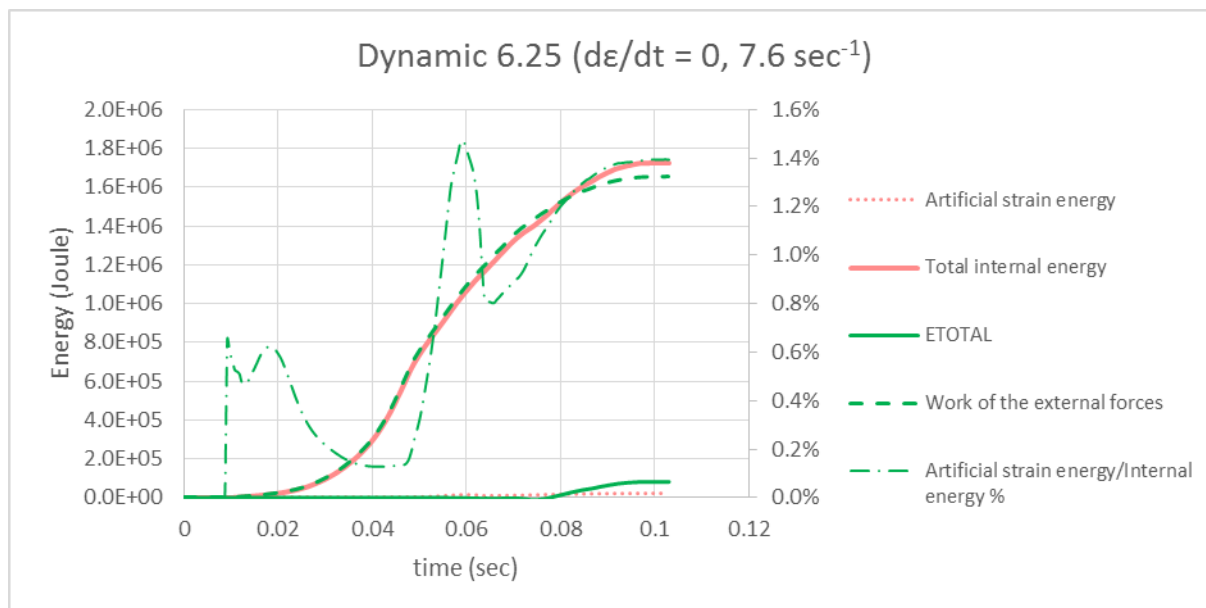


Διάγραμμα 69: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του *Dynamic test* με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6 sec^{-1})

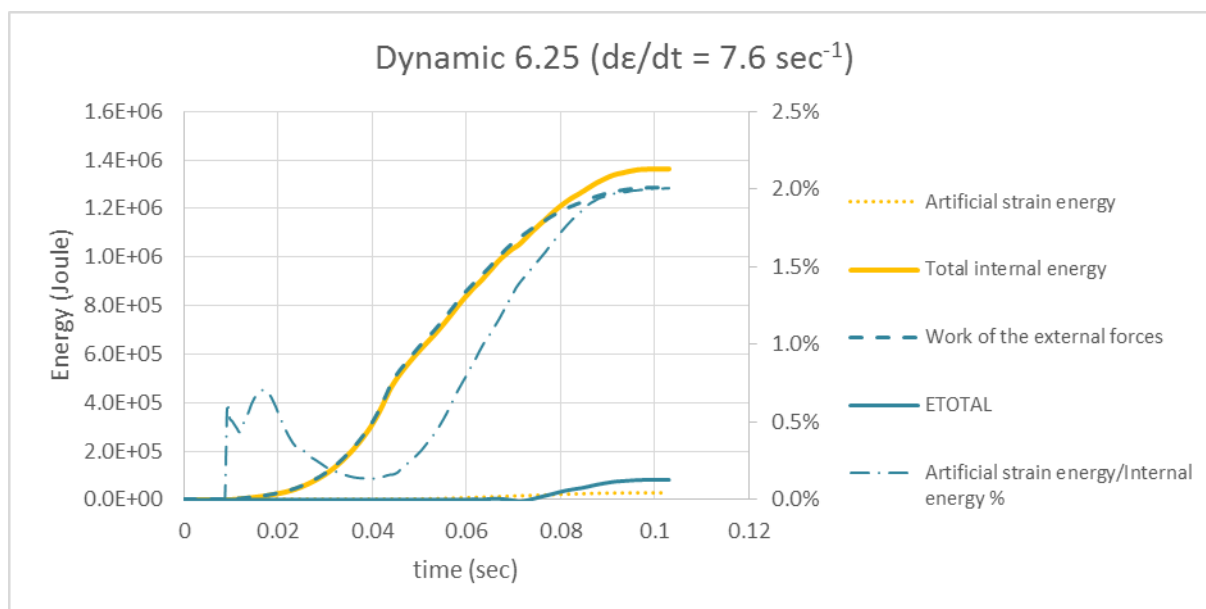


Διάγραμμα 70: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του *Dynamic test* με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm με μοντελοποίηση του υλικού σύμφωνα με την σχέση *Cowper-Symonds'*

6.3.2.3 Διαγράμματα ενέργειας για την προσομοίωση του Dynamic Test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού πεπερασμένου στοιχείου κελύφους (S4R) 6.25mm



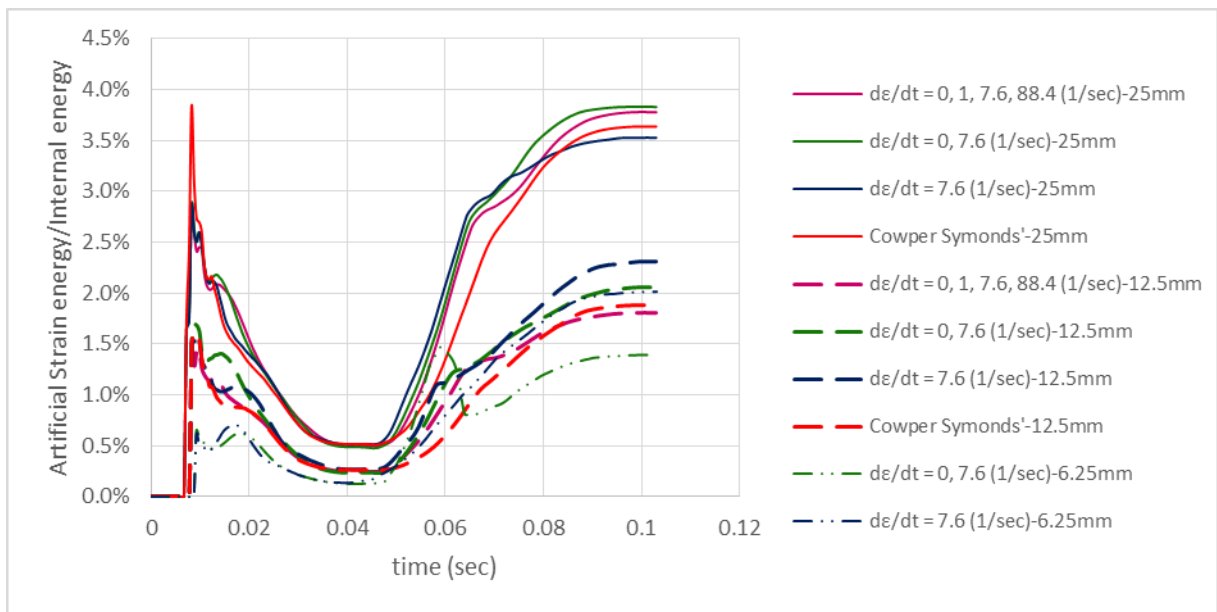
Διάγραμμα 71: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 6.25 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για δύο ταχύτητες παραμόρφωσης (0 sec^{-1} και 7.6 sec^{-1})



Διάγραμμα 72: Οι ενέργειες για την προσομοίωση του Dynamic test με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm με εισαγωγή καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για μία ταχύτητα παραμόρφωσης (7.6 sec^{-1})

Παρατηρήσεις:

- Το ποσοστό της τεχνητής ενέργειας παραμόρφωσης ως προς την συνολική εσωτερική ενέργεια κυμαίνεται σε ένα εύρος από 0 έως 4% για μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R 25 mm, 0 έως 2.5% για μέγεθος πλευράς 12.5 mm και 0 έως 2% για μέγεθος πλευράς 6.25 mm.



Διάγραμμα 73: Το ποσοστό της τεχνητής ενέργειας παραμόρφωσης ως προς την συνολική εσωτερική ενέργεια για όλες τις προσομοιώσεις του Dynamic test

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι μέγιστες τιμές του ποσοστού Artificial Strain Energy/Internal Energy % για κάθε προσομοίωση του Dynamic test.

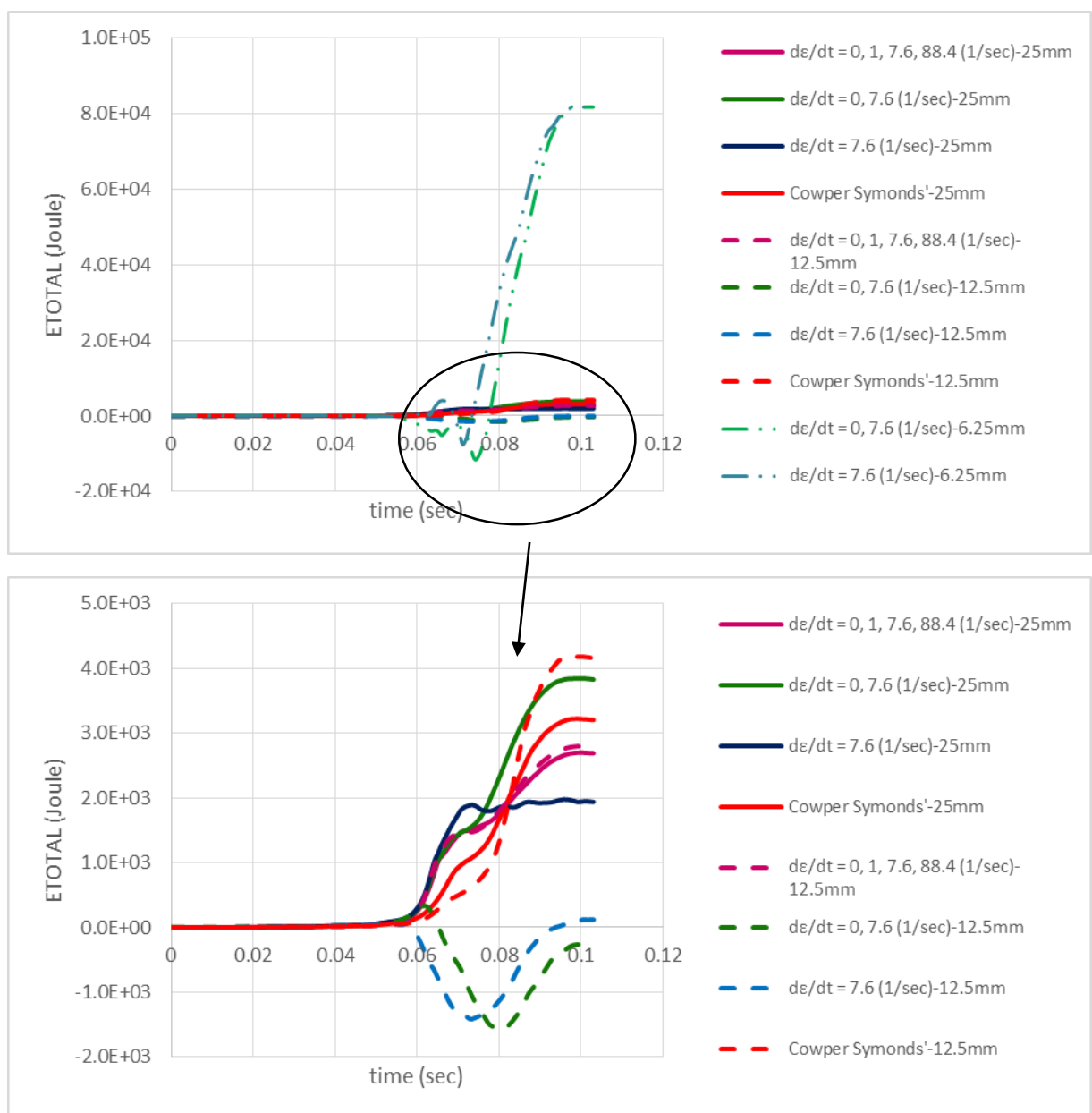
	• 0sec ⁻¹ • 1sec ⁻¹ • 7.6sec ⁻¹ • 88.4sec ⁻¹	• 0sec ⁻¹ • 7.6sec ⁻¹	• 7.6sec ⁻¹	Cowper Symonds'
25mm	3.78%	3.83%	3.53%	3.84%
12.5mm	1.81%	2.06%	2.31%	1.88%
6.25mm		1.47%	2.01%	

Πίνακας 5: Maximum Artificial Strain Energy/Internal Energy %

- Η συνολική ενέργεια παραμένει χαμηλή στις προσομοιώσεις με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R 25 mm και στις

τέσσερις εναλλακτικές μοντελοποιήσεις καθώς και στις μοντελοποιήσεις με εισαγωγή των τεσσάρων καμπύλων τάσης – παραμόρφωσης (0 sec^{-1} , 1 sec^{-1} , 7.6 sec^{-1} και 88.4 sec^{-1}) και με την χρήση της εξίσωσης Cowper Symonds' για μέγεθος πλευράς 12.5 mm .

Αντίθετα στις υπόλοιπες μοντελοποιήσεις που έγινε εισαγωγή λιγότερων καμπύλων (0 sec^{-1} και 7.6 sec^{-1} , 7.6 sec^{-1}) για μέγεθος πλευράς 12.5 mm η συνολική ενέργεια παρουσιάζει αρνητικές τιμές ενώ για μέγεθος πλευράς 6.25 mm εκτός από αρνητικές τιμές παρουσιάζει έντονη αύξηση για $t > 0.06 \text{ sec}$.



Διάγραμμα 74: Η συνολική ενέργεια ETOTAL για όλες τις προσομοιώσεις του Dynamic test

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 STATIC TEST

Για την αναπαραγωγή του Static Test έγιναν δύο προσομοιώσεις, μία με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R 25 mm και μία με 12.5 mm. Για την μοντελοποίηση του υλικού στη μη-γραμμική περιοχή, εισήχθησαν στο λογισμικό, σε πινακοποιημένη μορφή οι καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης (true) προερχόμενες από πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού, όπου τα δοκίμια ναυπηγικού χάλυβα ήταν ίδιου πάχους με αυτό των διαφόρων ελασμάτων της κατασκευής (7 mm, 8 mm και 10 mm).

Ως προς τη σύγκριση με το πειραματικό διάγραμμα συνολικής δύναμης – παραμόρφωσης και οι δύο διακριτοποιήσεις ακολουθούν την πειραματική καμπύλη μέχρι τα 470 mm και κατόπιν αποκλίνουν καθώς οι προσομοιώσεις δεν περιλαμβάνουν κριτήριο αστοχίας. Ωστόσο η χρήση του τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R με μέγεθος πλευράς 12.5 mm έχει ως αποτέλεσμα τιμές πιο κοντά στις πειραματικές και μικρότερες διακυμάνσεις.

Από τα διαγράμματα ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises - Ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης σε διάφορα σημεία του μοντέλου και για διάφορα πάχη ελάσματος προέκυψαν τα εξής:

- Όλα τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης, ανάλογα με το πάχος του ελάσματος της κατασκευής, ακολουθούν πιστά τις καμπύλες που έχουν εισαχθεί κατά τη μοντελοποίηση του υλικού όπως ήταν αναμενόμενο.
- Στις περιοχές κοντά στη εισχώρηση του άκαμπτου σώματος (μοντέλο βολβού) και στις συνοριακές συνθήκες η διακριτοποίηση με μέγεθος πλευράς στοιχείου 12.5 mm έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες παραμορφώσεις και υψηλότερες ταχύτητες παραμόρφωσης. Επίσης οι τιμές που προκύπτουν για τις ταχύτητες παραμόρφωσης παρουσιάζουν πιο έντονες διακυμάνσεις για μικρότερο μέγεθος στοιχείου.
- Στις περιοχές «μακριά» από το σημείο εισχώρησης και τις συνοριακές συνθήκες, δηλαδή σε περιοχές με αναμενόμενα «χαμηλή» καταπόνηση, η διακριτοποίηση με μικρότερο μέγεθος στοιχείου - 12.5 mm -

παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές παραμορφώσεων και ταχυτήτων παραμόρφωσης.

- Η χρήση πυκνότερου πλέγματος (12.5 mm) έχει ως αποτέλεσμα πιο στιβαρά, σε σχέση με την υπόλοιπη κατασκευή, κάθετα ενισχυτικά με μικρότερες παραμορφώσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω της τοπικής προσέγγισης του φαινομένου, δηλαδή αυξάνουν οι παραμορφώσεις σε περιοχές υψηλότερης καταπόνησης και μειώνονται στα ενισχυτικά.

Από τα διαγράμματα ενέργειας, τόσο στην προσομοίωση με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους (S4R) 25 mm όσο και σε αυτήν με 12.5 mm , η συνολική ενέργεια είναι περίπου σταθερή σε σχέση με τις άλλες ενέργειες.

Επίσης η ολική εσωτερική ενέργεια είναι περίπου ίση με το έργο των εξωτερικών δυνάμεων.

Σε μία ψευδοστατική διεργασία η κινητική ενέργεια δεν πρέπει να ξεπερνά το 5 με 10% της εσωτερικής ενέργειας. Στην προσομοίωση με μέγεθος πλευράς στοιχείου 25 mm το ποσοστό της κινητικής ενέργειας προς την εσωτερική ενέργεια είναι μικρότερο του 1% (εκτός από δύο τιμές -14.78% και 2.68%-αρχικά). Αντίστοιχα για την προσομοίωση με πλευρά στοιχείου 12.5 mm το ποσοστό της κινητικής ενέργειας προς την εσωτερική ενέργεια είναι μικρότερο του 0.5% (εκτός από την αρχική μη μηδενική τιμή που είναι 1.15%).

Ενεργειακά λοιπόν παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα η διακριτοποίηση με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm .

7.2 DYNAMIC TEST

Για την αναπαραγωγή του Dynamic Test έγιναν δέκα διαφορετικές προσομοιώσεις, τρεις προσομοιώσεις με διαφορετική πυκνότητα πλέγματος (25 mm , 12.5 mm και 6.25 mm) και τέσσερις διαφορετικές μοντελοποιήσεις του υλικού (Πίνακας 6). Στις προσομοιώσεις των Dynamic tests χρησιμοποιήθηκαν οι προηγούμενες καμπύλες (static) καθώς και οι πειραματικές καμπύλες δυναμικής καταπόνησης ώστε να ληφθεί σαν παράμετρος το φαινόμενο της

δυναμικής σκλήρυνσης. Συνολικά οι καμπύλες για τα διάφορα πάχη ελασμάτων είναι τέσσερις ($\dot{\epsilon} = 0 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7,6 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 88,4 \text{ sec}^{-1}$).

Στο Static test η μοντελοποίηση του υλικού ήταν μονοσήμαντη σε αντίθεση με το Dynamic test όπου έγιναν οι ακόλουθες μοντελοποιήσεις υλικού:

- (a) εισήχθησαν τέσσερις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7,6 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 88,4 \text{ sec}^{-1}$) για τα διάφορα πάχη ελασμάτων της κατασκευής (7 mm, 8 mm και 10 mm). Στη συνέχεια έγιναν τρεις εναλλακτικές μοντελοποιήσεις.
- (b) εισήχθησαν οι δύο καμπύλες ($\dot{\epsilon} = 0 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7,6 \text{ sec}^{-1}$)
- (c) εισήχθη μία μόνο καμπύλη σαν να ήταν καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού και χωρίς τα δεδομένα να εξαρτώνται από την ταχύτητα παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7,6 \text{ sec}^{-1}$) και
- (d) η επίδραση του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης στο όριο διαρροής προσεγγίστηκε με την εξίσωση των Cowper-Symonds'.

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{P}}$$

Στο Abaqus έγινε εισαγωγή του λόγου σ_D/σ_y για κάθε μία από τις τρεις ταχύτητες παραμόρφωσης.

	25mm	12.5mm	6.25mm
$\dot{\epsilon} = 0, 1, 7.6, 88.4 \text{ sec}^{-1}$	X	X	
$\dot{\epsilon} = 0, 7.6 \text{ sec}^{-1}$	X	X	X
$\dot{\epsilon} = 7.6 \text{ sec}^{-1}$	X	X	X
Cowper Symonds'	X	X	

Πίνακας 6: Οι δέκα διαφορετικές προσομοιώσεις του Dynamic test (με κόκκινο σημειώνονται οι μοντελοποιήσεις με σειρά στοιχείων που παρουσιάζουν υπερβολική παραμόρφωση και περιγράφεται παρακάτω)

Οι μοντελοποιήσεις με μέγεθος πλευράς του τετρακομβικού στοιχείου ελάσματος (S4R) 25 mm και 12.5 mm με εισαγωγή

(a) των τεσσάρων καμπυλών τάσης – παραμόρφωσης (για ταχύτητες παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 0 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7,6$ και $\dot{\epsilon} = 88,4 \text{ sec}^{-1}$) και

(b) με τη χρήση της εξίσωσης Cowper Symonds'

παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα:

- Τα διαγράμματα συνολικής δύναμης – μετατόπισης ακολουθούν την πειραματική καμπύλη (Διάγραμμα 36)
- Οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης για τις δύο παραπάνω μοντελοποιήσεις συγκλίνουν με τις πειραματικές. Η διακριτοποίηση με μέγεθος πλευράς στοιχείων 12.5 mm παρουσιάζει τη μικρότερη απόκλιση απ' την πειραματική.
- Η χρήση της εξίσωσης Cowper Symonds' προσεγγίζει καλύτερα την περιοχή του υλικού κοντά στο όριο διαρροής και εμφανίζει τιμές αρκετά κοντά στις πειραματικές στο διάγραμμα συνολικής δύναμης – μετατόπισης
- Η μοντελοποίηση του υλικού με εισαγωγή τάσης – παραμόρφωσης για τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 0 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 1 \text{ sec}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 7,6$ και $\dot{\epsilon} = 88,4 \text{ sec}^{-1}$) ακολουθεί πιο πιστά την διακύμανση των τιμών της πειραματικής απ' ότι η μοντελοποίηση με την χρήση της εξίσωσης Cowper Symonds'.

Οι μοντελοποιήσεις με μέγεθος πλευράς του τετρακομβικού στοιχείου ελάσματος (S4R) 25 mm και 12.5 mm με εισαγωγή:

(c) των δύο καμπυλών τάσης – παραμόρφωσης (για ταχύτητες παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 0 \text{ sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{ sec}^{-1}$) και

(d) μίας καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon} = 7.6 \text{ sec}^{-1}$ σαν να ήταν Static χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης), παρουσιάζουν καμπύλες συνολικής δύναμης – μετατόπισης με έντονη πτώση, χωρίς να έχει εισαχθεί κριτήριο αστοχίας.

Το φαινόμενο παρατηρείται πιο έντονα για πύκνωση του πλέγματος και για μοντελοποίηση με εισαγωγή μίας καμπύλης υλικού ($\dot{\epsilon} = 7.6 \text{ sec}^{-1}$ σαν να ήταν Static χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης).

Στις ίδιες μοντελοποιήσεις παρατηρείται υπερβολική παραμόρφωση σε μία στήλη στοιχείων εκατέρωθεν των κάθετων ενισχυτικών (Εικόνες 41, 42, 43, 44, 45 και 46). Τα συγκεκριμένα στοιχεία δεν παρουσιάζουν σκλήρυνση και κατ' επέκταση το διάγραμμα συνολικής δύναμης παρουσιάζει την ανάλογη πτώση από τη χρονική στιγμή που παρατηρείται η υπερβολική παραμόρφωση.

Η αδυναμία παραλαβής του κρουστικού φορτίου θεωρείται ότι οφείλεται στην μη-προσέγγιση του φαινομένου της σκλήρυνσης λόγω της επίδρασης της ταχύτητας παραμόρφωσης στη μη-γραμμική περιοχή του μοντέλου. Τα στοιχεία τα οποία καταλήγουν να παραμορφωθούν υπερβολικά, είναι στοιχεία τα οποία σε όλες τις μοντελοποιήσεις εμφανίζουν υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης σε σχέση με τα γειτονικά τους. Καθώς λοιπόν αυξάνει η ταχύτητα παραμόρφωσης το υλικό θα έπρεπε τοπικά να εμφανίσει σκλήρυνση.

- Στην μοντελοποίηση στην οποία έχουν εισαχθεί δύο καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης (για ταχύτητες παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 0 \text{ sec}^{-1}$ και $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{ sec}^{-1}$) για ταχύτητες μικρότερες των 7.6 sec^{-1} το λογισμικό με παρεμβολή υπολογίζει την τιμή της τάσης – παραμόρφωσης την κάθε χρονική στιγμή, όταν όμως η ταχύτητα παραμόρφωσης υπερβεί τα 7.6 sec^{-1} τότε το μοντέλο του υλικού δεν μπορεί να ακολουθήσει την περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης.
- Στην μοντελοποίηση του υλικού με μία καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (για $\dot{\epsilon} = 7.6 \text{ sec}^{-1}$) το φαινόμενο είναι ακόμη πιο έντονο γιατί τα στοιχεία με χαμηλές ταχύτητες παραμόρφωσης (μικρότερες των 7.6 sec^{-1}) παρουσιάζουν ήδη υψηλότερο όριο διαρροής κάνοντας έτσι την κατασκευή δύσκαμπτη απ' την αρχή της προσομοίωσης. Έτσι οι περιοχές χαμηλής, αρχικά καταπόνησης, μένουν ανεπηρέαστες και εμφανίζουν χαμηλές ταχύτητες παραμόρφωσης ενώ οι ισχυρά καταπονούμενες παρουσιάζουν

υπερβολικά μεγάλες ταχύτητες παραμόρφωσης χωρίς να μπορούν να εμφανίσουν περαιτέρω σκλήρυνση.

- Στις μοντελοποιήσεις με μέγεθος πλευράς στοιχείων 6.25 mm είναι πιο έντονο το φαινόμενο γιατί όσο μειώνεται το μέγεθος του πλέγματος, προσεγγίζεται καλύτερα η τοπική συμπεριφορά του υλικού και εμφανίζονται μεγαλύτερες ταχύτητες παραμόρφωσης στα στοιχεία που καταπονούνται περισσότερο (Διάγραμμα 57).

Από τα διαγράμματα ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises – πλαστικής παραμόρφωσης PEEQ παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Η χρήση αραιού πλέγματος (25 mm) έχει ως αποτέλεσμα ομοιόμορφη κατανομή παραμορφώσεων στην κατασκευή ενώ η πύκνωση του πλέγματος εμφανίζει περιοχές μεγαλύτερης παραμόρφωσης και συγκέντρωσης τάσεων.
- Η χρήση πυκνότερου πλέγματος παρουσιάζει μεγαλύτερες παραμορφώσεις στην περιοχή πλησίον της σύγκρουσης και μικρότερες στην υπόλοιπη κατασκευή. Τα κάθετα ενισχυτικά είναι πιο δύσκαμπτα συγκριτικά με τα άλλα στοιχεία του μοντέλου όσο πυκνώνει το πλέγμα.
- Η πύκνωση του πλέγματος επιφέρει υψηλότερες ταχύτητες παραμόρφωσης τοπικά, δηλαδή στις περιοχές έντονης καταπόνησης (κοντά στη σύγκρουση, συνοριακές συνθήκες κ.λπ.) και εντονότερες διακυμάνσεις.
- Η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης με την χρήση της εξίσωσης Cowper Symonds' έχει ως αποτέλεσμα ένα μοντέλο υλικού το οποίο είναι αρκετά «μαλακό» για χαμηλές ταχύτητες παραμόρφωσης και «σκληρό» για υψηλές, δηλαδή με μεγάλη ευαισθησία στο φαινόμενο Strain Rate Effect.

Από τα διαγράμματα ενέργειας των προσομοιώσεων των Dynamic Tests προέκυψαν τα εξής:

- Το ποσοστό της τεχνητής ενέργειας παραμόρφωσης ως προς την συνολική εσωτερική ενέργεια κυμαίνεται σε ένα εύρος από 0 έως 4% για μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R 25 mm , 0 έως

2.5% για μέγεθος πλευράς 12.5 mm και 0 έως 2% για μέγεθος πλευράς 6.25 mm.

Η τεχνητή ενέργεια παραμόρφωσης περιλαμβάνει την ενέργεια που οφείλεται στο φαινόμενο hourglassing και την ενέργεια λόγω εγκάρσιας διάτμησης σε στοιχεία κελύφους ή δοκού. Υψηλές τιμές στην τεχνητή ενέργεια παραμόρφωσης καταδεικνύουν προβληματική διακριτοποίηση και χρήση αραιού πλέγματος. Το ποσοστό της τεχνητής ενέργειας παραμόρφωσης σε σχέση με την εσωτερική ενέργεια δεν πρέπει να ξεπερνάει το 2%.

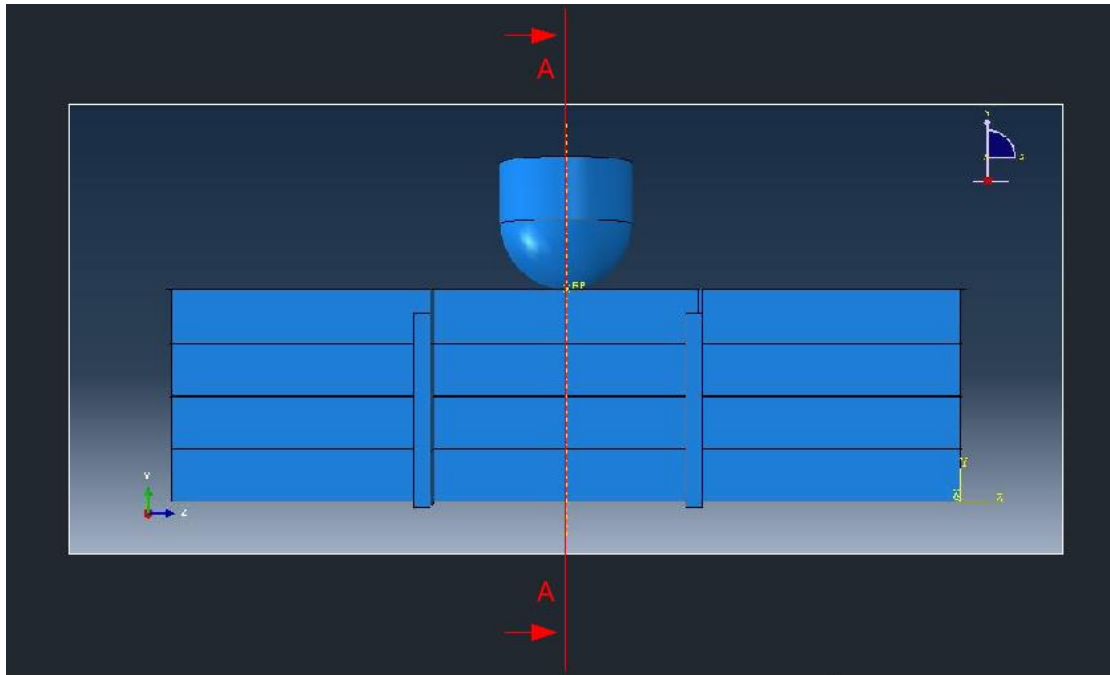
Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι μέγιστες τιμές του ποσοστού Artificial Strain Energy/Internal Energy % για κάθε προσομοίωση του Dynamic test.

	• 0sec ⁻¹ • 1sec ⁻¹ • 7.6sec ⁻¹ • 88.4sec ⁻¹	• 0sec ⁻¹ • 7.6sec ⁻¹	• 7.6sec ⁻¹	Cowper Symonds'
25mm	3.78%	3.83%	3.53%	3.84%
12.5mm	1.81%	2.06%	2.31%	1.88%
6.25mm		1.47%	2.01%	

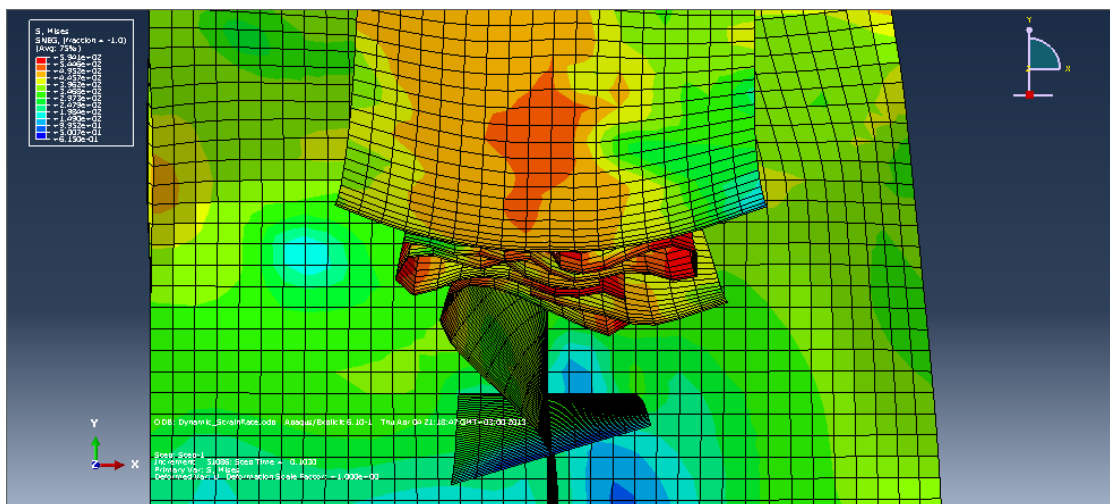
Πίνακας 5: Maximum Artificial Strain Energy/Internal Energy %

- Η συνολική ενέργεια παραμένει χαμηλή στις προσομοιώσεις με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους S4R 25 mm και στις τέσσερις εναλλακτικές μοντελοποιήσεις καθώς και στις μοντελοποιήσεις με εισαγωγή των τεσσάρων καμπύλων τάσης–παραμόρφωσης (0 sec⁻¹, 1 sec⁻¹, 7.6 sec⁻¹ και 88.4 sec⁻¹) και με την χρήση της εξίσωσης Cowper Symonds' για μέγεθος πλευράς 12.5 mm.

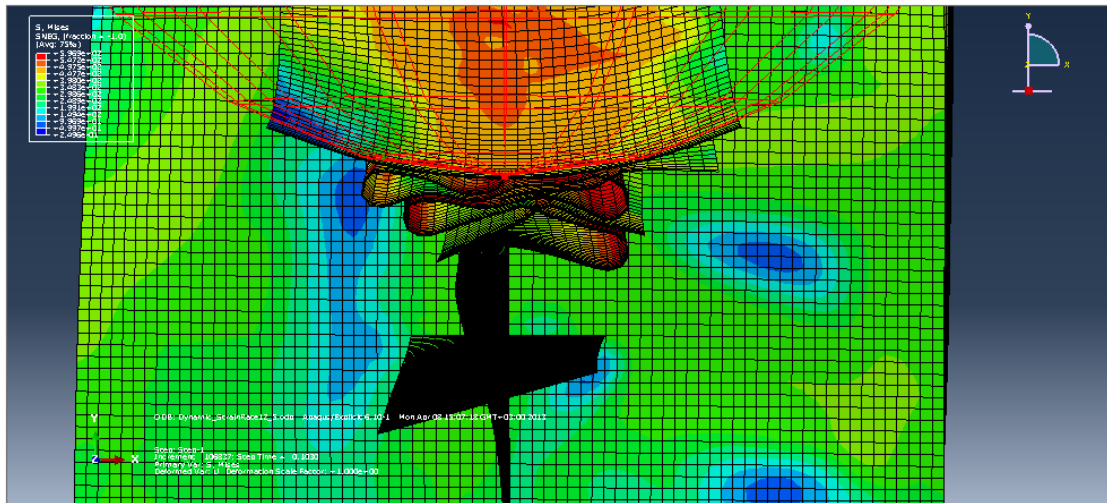
Στις υπόλοιπες μοντελοποιήσεις με εισαγωγή λιγότερων καμπύλων (0sec⁻¹ και 7.6sec⁻¹, 7.6sec⁻¹ μόνο) για μέγεθος πλευράς 12.5 mm η συνολική ενέργεια παρουσιάζει αρνητικές τιμές ενώ για μέγεθος πλευράς 6.25 mm εκτός από αρνητικές τιμές παρουσιάζει έντονη αύξηση για $t > 0.06 \text{ sec}$.



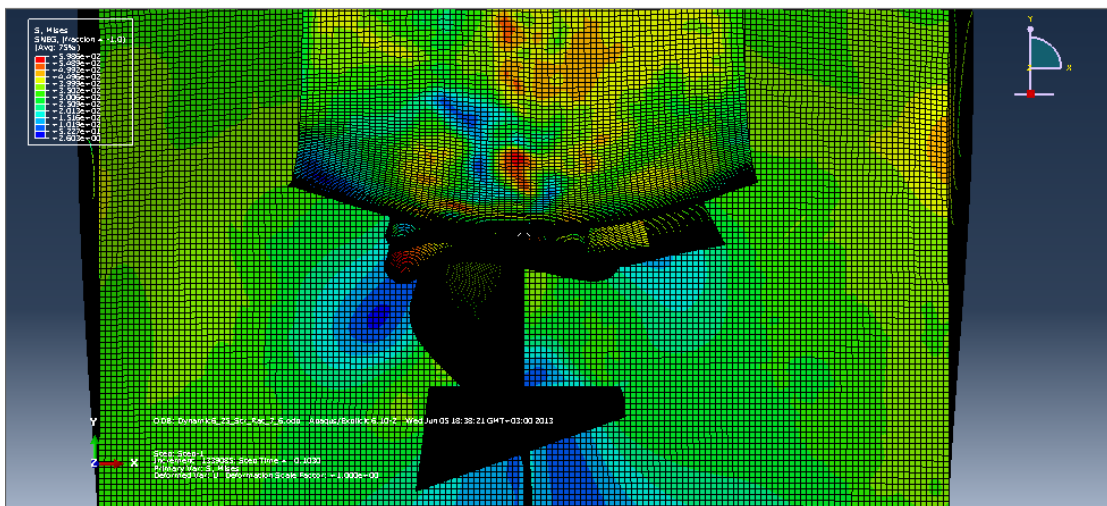
Εικόνα 47: ΤΟΜΗ A-A



Εικόνα 48: ΤΟΜΗ A-A του παραμορφωμένου σχήματος για μέγεθος πλευράς στοιχείου 25mm



Εικόνα 49: ΤΟΜΗ Α-Α του παραμορφωμένου σχήματος για μέγεθος πλευράς στοιχείου 12.5mm



Εικόνα 50: ΤΟΜΗ Α-Α του παραμορφωμένου σχήματος για μέγεθος πλευράς στοιχείου 6.25mm

Μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου ελάσματος:	Λόγος μήκους πλευράς πεπερασμένου στοιχείου προς πάχος l_b/t_p :
25 mm	2.5 ~ 3.6
12.5 mm	1.3 ~ 1.8
6.25 mm	0.6 ~ 0.9

Πίνακας 7: Λόγος μήκους πλευράς προς πάχος ελάσματος για κάθε ένα από τα τρία διαφορετικά μεγέθη πλευράς τετρακομβικού στοιχείου S4R

Όπως προαναφέρθηκε στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη της επίδρασης του μοντέλου του επιλεχθέντος υλικού καθώς και της διακριτοποίησης της κατασκευής, στη μη-γραμμική περιοχή του υλικού. Τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για περαιτέρω μελέτη του συγκεκριμένου μοντέλου αλλά και άλλων ανάλογων προβλημάτων συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Η συμπεριφορά του υλικού προσεγγίζεται καλύτερα με την εισαγωγή καμπυλών τάσης – παραμόρφωσης, για ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων παραμόρφωσης. Με την εισαγωγή αρκετών καμπύλων ουσιαστικά το λογισμό έχει τη δυνατότητα υπολογισμού του πεδίου τάσεων – παραμορφώσεων ανάλογα με την ταχύτητα παραμόρφωσης κάθε χρονική στιγμή και έτσι μοντελοποιείται το φαινόμενο strain rate effect.
- Όταν απουσιάζουν τα δεδομένα δυναμικής καταπόνησης είναι προτιμότερη η χρήση της προσεγγιστικής εξίσωσης των Cowper-Symonds': $\frac{\sigma_D}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{P}}$ ώστε να προσδιοριστεί το όριο διαρροής για διαφορετικού εύρους ταχύτητες παραμόρφωσης και κατόπιν να εισαχθούν τα δεδομένα στο λογισμικό. Η χρήση λιγότερων καμπύλων οδηγεί σε υλικό που δεν παρουσιάζει σκλήρυνση στις περιοχές που αυξάνεται η ταχύτητα παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα τα στοιχεία στις περιοχές αυτές να παραμορφώνονται υπερβολικά και να εμφανίζουν συνεχώς αυξανόμενη παραμόρφωση και ταχύτητα παραμόρφωσης αφήνοντας το υπόλοιπο μοντέλο ανεπηρέαστο.
- Οι Mentel, Green και Symonds, με πειράματα που διεξήγαγαν σε δοκούς που υπόκεινται σε κρουστικό φορτίο, παρατήρησαν ότι η πλαστική διαρροή προκύπτει σε περιοχή παρακείμενη στην πάκτωση της δοκού και ότι το μήκος της πλαστικής περιοχής είναι μικρό σε σχέση με το συνολικό μήκος δοκού (Cowper & Symonds, 1957). Σε όλες τις προσομοιώσεις Static και Dynamic οι διακριτοποιήσεις με μέγεθος πλευράς τετρακομβικού στοιχείου κελύφους 12.5 mm εμφανίζουν αποτελέσματα πιο κοντά στα πειραματικά και ακολουθούν τις διακυμάνσεις των πειραματικών δεδομένων. Οι ταχύτητες παραμόρφωσης εμφανίζουν υψηλές τιμές σε μικρότερης έκτασης

περιοχές, υψηλής καταπόνησης, οι οποίες σε συνδυασμό με τη σωστή μοντελοποίηση του υλικού, εμφανίζουν σκλήρυνση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, οφείλει η προσέγγιση να είναι τοπική στα πλαίσια των υπολογιστικών δυνατοτήτων.

- Η διακριτοποιήσεις με μέγεθος στοιχείων κελύφους μικρότερου του πάχους της κατασκευής (δηλαδή για μέγεθος πλευράς στοιχείου 6.25 mm) και λόγο πλευράς στοιχείου προς πάχος ελάσματος $0.6 \sim 0.9$ (Πίνακας 7) δεν δίνει ορθά αποτελέσματα και οδηγεί σε υπερβολικά υψηλές παραμορφώσεις τοπικά, σε περιοχές που καταπονούνται, και σχεδόν μηδενικές στο υπόλοιπο υπό μελέτη μοντέλο.
- Παρατηρήθηκε ότι οι μοντελοποιήσεις με λόγο μήκους στοιχείου προς πάχος ελάσματος σε ένα εύρος $1.3 \sim 1.8$ (Πίνακας 7) και περίπου 20 στοιχεία ανά μισό μήκος αναδίπλωσης, Εικόνες 47, 48, 49 και 50 (δηλαδή διακριτοποίηση με μέγεθος πλευράς στοιχείου 12.5 mm) παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά στην τάξη μεγέθους του μοντέλου, το οποίο έχει διαστάσεις $6\text{m} \times 1.6\text{m}$.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Becker, A. A. (1992). Στο A. A. Becker, *The Boundary Element Method in Engineering* (σ. 201). Nottingham: McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
- Bonet, J., & Wood, R. D. (1997). *NONLINEAR CONTINUUM MECHANICS FOR FINITE ELEMENT ANALYSIS*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cowper, G. R., & Symonds, P. S. (1957). *STRAIN-HARDENING AND STRAIN-RATE EFFECTS IN THE IMPACT LOADING OF CANTILEVER BEAMS*. PROVIDENCE: BROWN UNIVERSITY.
- Ling, Y. (1996). Uniaxial True Stress-Strain after Necking. *AMP Journal of Technology Vol. 5*.
- Sabril, H. (2013). *Damage interaction analysis of ship collisions*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Samuelides, M. S., & Marinatos, J. N. (2013). Material characterization and implementation of the RTCL, BWH and SHEAR failure criteria to finite element codes for the simulation of impacts on ship structures. *6th International Conference of Collision and Grounding of Ships (ICCGS)*. Trondheim, Norway.
- Simulia. (2010). Analysis User's Manual Volume IV. Στο Simulia, *Analysis User's Manual Volume IV* (σ. 1103). Providence: Dassault Systèmes.
- Yu, J., & Jones, N. (1989). FURTHER EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE FAILURE OF CLAMPED BEAMS UNDER IMPACT LOADS. *International Journal of Solids and Structures*.
- Zhang, S. (1999). Internal Mechanics of Ship Collisions. Στο S. Zhang, *The Mechanics of Ships Collisions* (σσ. 59-60). Lyngby: DTU.
- Καρύδης, Π. Α. (2000). *Η Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου*. Αθήνα.
- Σαραβάνος, Δ. Α. (2001). *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ*. Πάτρα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
- Χαϊδεμενόπουλος, Γ. Ν. (2007). Παρ. 8.5 Εργοσκλήρυνση. Στο Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Φυσική ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ* (σσ. 440-441). Θεσσαλονίκη: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.