



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη της συμπεριφοράς έναντι κρούσεων
κελυφών λεπτού πάχους με φλάντζα και
ενισχυμένων με πολυμερικό αφρό:

Πειραματική και αριθμητική προσομοίωση

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΠΟΥΛΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. το χρονικό διάστημα Ιανουάριος έως Οκτώβριος του 2010 για την απόκτηση του διπλώματος.

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς μεταλλικών κελυφών λεπτού πάχους με φλάντζα που υπόκεινται σε αξονική στατική καταπόνηση όταν μεταβάλλεται το σχήμα της διατομής. Επιπλέον, ελέγχθηκε η επιρροή στην πλαστική ενέργεια παραμόρφωσης και τον τρόπο κατάρρευσης λόγω ενίσχυσης των δοκιμίων με πολυουρεθανικό αφρό μεγάλης πυκνότητας στο εσωτερικό τους.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε υπολογιστική προσομοίωση με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA και αξιολογήθηκε η δυνατότητα επιτυχής μοντελοποίησης σε σχέση με την ενέργεια που απορρόφησε το μοντέλο, το μέγιστο φορτίο που αναπτύχθηκε αλλά και την ικανότητα πρόβλεψης της μορφής κατάρρευσης ως προς τα πειραματικά δοκίμια.

Επίσης, παρουσιάστηκε βάσει θεωρητικών μοντέλων, ο τρόπος κατάρρευσης διαφορετικών διατομών όπως τετραγωνικών, κυκλικών, top-hat, double-hat καθώς και θεωρητικές σχέσεις υπολογισμού βασικών μεγεθών και παραμέτρων σχεδιασμού για την αξιολόγηση κάθε δοκιμίου, ώστε να γίνει μια βαθύτερη κατανόηση του μηχανισμού κατάρρευσης που αναπτύσσουν οι κατασκευές λεπτότοιχων διατομών.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται στον Καθηγητή και Διευθυντή του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη του στην ανάθεση της διπλωματικής και τη βοήθειά του κατά τη διάρκεια αυτής. Επίσης, στον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Κιτσέλη για την καθοδήγηση και τις υποδείξεις του, στο μέλος ΕΕΔΙΠ – ΕΤΕΠ κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για την εκμάθηση του κώδικα LS-DYNA και την υποστήριξη επαυτού, στο μέλος προσωπικού ΙΔΑΧ κ. Δημήτριο Σπηλιώπουλο για την κατασκευή των πειραματικών δοκιμίων.

Τέλος, θερμές ευχαριστίες απευθύνονται στην οικογένειά μου για την ηθική συμπαράσταση, βοήθεια και υπομονή τους καθ' όλο το διάστημα των σπουδών μου.

Χαραλαμπόπουλος Χρήστος

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη της συμπεριφοράς έναντι κρούσεων διαφορετικών κατασκευών, με εφαρμογή κυρίως στα οχήματα, έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια με την προσοχή να στρέφεται στη μείωση των συνεπειών στον άνθρωπο. Σε ερευνητικό επίπεδο γίνεται προσπάθεια καθορισμού θεωρητικών κριτηρίων για το μηχανισμό κατάρρευσης, παρέχοντας στους μηχανικούς την ικανότητα σχεδιασμού κατασκευών ώστε το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας πρόσκρουσης να διαχέεται ενώ ταυτόχρονα γίνεται ομοιόμορφη παραμόρφωση του υλικού.

Τα ανωτέρω πρέπει να επιτευχθούν εντός ορισμένων περιορισμών όπως η μείωση του μέγιστου φορτίου, της μάζας της κατασκευής και η αποφυγή αστοχίας αυτής. Μια υλοποιήσιμη και διαδεδομένη μέθοδος είναι η χρήση λεπτότοιχων στοιχείων σε στρατηγικά σημεία πάνω στο σύνολο της κατασκευής που θα λειτουργήσουν ως συσκευές απορρόφησης ενέργειας. Ωστόσο, η πρόβλεψη της κρούσης είναι πολύπλοκη διαδικασία όπου ταυτόχρονα πολλές κατασκευαστικές οντότητες αλληλεπιδρούν και προκαλούν έντονα μη γραμμικά φαινόμενα, δυσκολεύοντας τη λεπτομερή ανάλυση και μοντελοποίηση.

Στο πρώτο κεφάλαιο ορίζεται η συμπεριφορά έναντι κρούσεων (crashworthiness) και αναλύονται οι μέθοδοι επίτευξης κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος. Προβάλλονται στατιστικά στοιχεία αναφορικά με την ανάγκη προστασίας των επιβατών ενός οχήματος και τον τρόπο που εφαρμόζονται οι αρχές του σε τέτοιες κατασκευές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι λεπτότοιχες κατασκευές ως συστήματα απορρόφησης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα κατηγοριοποιούνται οι συνηθέστερες ατέλειες που εμφανίζονται και προβάλλονται οι βασικές αρχές που τις διέπουν. Δίνεται έμφαση στον τρόπο κατάρρευσης κατασκευών με φλάντζα και διαφορετικό σχήμα διατομής. Τέλος, παρατίθενται βασικά στοιχεία που αφορούν τις κατασκευές σημειακών συγκολλήσεων.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίδονται στοιχεία για τον πολυμερικό αφρό ως προς τη δομή του, τον τρόπο σχηματισμού, της ιδιότητες, την εφαρμογή του στη βιομηχανία. Εκτενής αναφορά γίνεται για τον πολυουρεθανικό αφρό και τα χαρακτηριστικά του, καθώς αποτελεί το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία για την πλήρωση των δοκιμίων.

Η θεωρητική ανάλυση της κατάρρευσης των λεπτότοιχων δοκιμίων γίνεται στο τέταρτο κεφάλαιο. Αναλύεται η μέθοδος των superfolding elements η οποία αξιοποιείται στη συνέχεια για τον προσδιορισμό του μέσου φορτίου κατάρρευσης και της ενέργειας παραμόρφωσης των δοκιμίων με φλάντζα. Επίσης, δίδονται στοιχεία για ορισμένες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας μιας λεπτότοιχης κατασκευής.

Στο πέμπτο και στο έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα βήματα και ο εξοπλισμός για την πραγματοποίηση του πειραματικού σκέλους της διπλωματικής και της υπολογιστικής προσομοίωσης στο LS-DYNA αντίστοιχα. Στο πέμπτο κεφάλαιο προβάλλεται επίσης η μορφή και οι διαστάσεις κάθε ενός από τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν και ελέγχθηκε η συμπεριφορά τους κατά την κατάρρευση.

Η έκθεση των αποτελεσμάτων από το πείραμα και την προσομοίωση γίνεται στο έβδομο κεφάλαιο. Περιλαμβάνονται στοιχεία για τα βασικά μεγέθη της ανάλυσης κάθε δοκιμίου, η διαδικασία κατάρρευσης σε βήματα και εκτενής σχολιασμός πάνω στα αποτελέσματα που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνολικά από το πειραματικό και το υπολογιστικό σκέλος της διπλωματικής καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και βελτιώσεις επί του αντικειμένου.

ABSTRACT

Crashworthiness study over different structures, which applies mainly in vehicles, has been developed in recent years focused in reducing the consequences to human. In experimental research, attempts are made to define theoretical design on the mechanics of collapse, providing to the engineers the ability of designing structures, in which the main part of collision energy is diffused while the structure itself deforms uniformly.

This improvement must be achieved within certain constraints, such as reducing maximum load and structure mass while evading its failures. A feasible and widely known method is using thin-walled structures in strategic points over the total structure which will work as energy absorbing devices. However, forecasting collisions is a very complicated procedure where simultaneously many structural elements interact, causing severe nonlinear effects, thus making the detailed analysis and modeling extremely difficult.

In Chapter 1 crashworthiness is defined and various methods of achieving it in the design level of a system are analyzed. Some statistical data are projected concerning the need for passengers' protection and the way those principals apply in such structures.

Chapter 2 deals with thin-walled structures as absorbing energy devices. Specifically the most common defects that appear are categorized and the basic principles that govern them are presented, emphasizing to collapse behavior of structures with flange and varying the shape of section. To conclude, basic data concerning spot welded structures are quoted.

In Chapter 3 data is provided on polymer foam's structure, formation, properties and industrial appliance. Extensive reference is made to polyurethane foam and its features, corresponding to the one being used in experiment process for the fill of specimens.

Theoretical analysis of the collapse of thin-walled structures is dealt in Chapter 4. Method of superfolding elements is analyzed and later used in determining the mean collapse load and absorption energy of structures with flange. Moreover, data around specific parameters used in the evaluation of thin-walled structures efficiency is provided.

In Chapters 5 and 6 are included the necessary for this essay, steps and equipment to fulfill the experimental part and the computer simulation using LS-DYNA correspondingly. Furthermore in Chapter 5, is presented the shape and size of structures that were tested and had their collapse behavior inspected.

Report of experimental and simulation results is in Chapter 7. Data is included over the basic size of each specimen, its collapse process in steps and extensive comments over the results that arose in each occasion.

Finally, in Chapter 8 are listed the conclusions over the combined experimental and simulation results. Some proposals for further study, future research and improvements of the subject are also included.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος	ii
Περίληψη.....	iii
Abstract	v
Λίστα Σχημάτων	x
Λίστα Πινάκων	xiii
Πίνακας Συμβόλων.....	xv
1. STRUCTURAL CRASHWORTHINESS: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	1
1.1. Εισαγωγή	1
1.2. Στάδια βέλτιστου σχεδιασμού συστήματος πρόσκρουσης.....	2
1.3. Ατυχήματα οχημάτων και συνέπειες.....	4
1.3.1. Στατιστικά στοιχεία	4
1.3.2. Αντοχή ανθρώπινου σώματος κατά τη σύγκρουση	6
1.4. Εφαρμογές στις κατασκευές.....	8
1.4.1. Αυτοκίνηση.....	8
1.4.2. Εναέριες μεταφορές	11
2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ	13
2.1. Εισαγωγή	13
2.2. Ατέλειες λεπτότοιχων κατασκευών	14
2.3. Κατηγοριοποίηση ατελειών.....	15
2.3.1. Με κριτήριο τη διαδικασία φόρτισης	15
2.3.2. Με κριτήριο την κατανομή των ατελειών στο χώρο	15
2.3.3. Με κριτήριο εγγενής και γεωμετρικές ατέλειες.....	16
2.4. Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πρόσκρουσης.....	17
2.4.1. Στοιχεία θεωρίας.....	17
2.4.2. Βασικές αρχές κατασκευών απορρόφησης ενέργειας	17
2.4.3. Συντελεστής απόδοσης ενέργειας απορρόφησης	20
2.5. Μηχανισμός κατάρρευσης λεπτότοιχων κατασκευών	22
2.5.1. Κατάρρευση κυκλικών διατομών	22

2.5.2.	Κατάρρευση τετραγωνικών διατομών	24
2.5.3.	Κατάρρευση top-hat διατομών	27
2.5.4.	Κατάρρευση double-hat διατομών.....	31
2.6.	Σημειακές συγκολλήσεις κατασκευών	32
2.6.1.	Εισαγωγή	32
2.6.2.	Ποιοτικός έλεγχος.....	33
2.6.3.	Αστοχία συγκολλήσεων.....	33
3.	ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΑΦΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ.....	35
3.1.	Εισαγωγή.....	35
3.2.	Δομή αφρού.....	36
3.3.	Ανοιχτές και κλειστές κυψελίδες	37
3.4.	Ιδιότητες αφρού.....	38
3.4.1.	Παραμόρφωση	38
3.4.2.	Απορρόφηση ενέργειας.....	39
3.4.3.	Θερμικές ιδιότητες.....	39
3.5.	Εφαρμογές και χρήση.....	40
3.6.	Αφρός πολυουρεθάνης (PU).....	40
3.6.1.	Τύποι PU αφρών	41
3.6.2.	Αντιδρόντα υλικά.....	42
3.6.3.	Παραγωγή	46
3.6.4.	Φυσική σχηματισμού PU αφρού	47
3.6.5.	Ιδιότητες.....	48
3.6.6.	Γήρανση	49
3.6.7.	Εφαρμογή ως σύστημα απορρόφησης ενέργειας	50
4.	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ..	51
4.1.	Κατάρρευση με τη μέθοδο των Superfolding Elements (SE)	51
4.2.	Υπολογισμός βασικών μεγεθών της ανάλυσης	53
4.2.1.	Top – hat διατομή	53
4.2.2.	Double – hat διατομή	55

4.3.	Υπολογισμός παραμέτρων της ανάλυσης	56
4.3.1.	Παράμετροι crashworthiness	57
4.3.2.	Παράμετροι σχεδιασμού	58
5.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	60
5.1.	Εισαγωγή	60
5.2.	Εξοπλισμός και συνθήκες πειράματος	60
5.2.1.	Υλικό δοκιμίων και διαμόρφωση	60
5.2.2.	Συνθήκες πειράματος.....	62
5.3.	Παραγωγή πολυουρεθανικού αφρού	63
5.3.1.	Τεχνικά χαρακτηριστικά αφρού	63
5.3.2.	Διαδικασία πλήρωσης δοκιμίου με αφρό	65
5.4.	Πειραματικά δοκίμια και διαστάσεις.....	65
5.4.1.	Δοκίμια 1 – 1F	65
5.4.2.	Δοκίμια 2 – 2F	66
5.4.3.	Δοκίμια 3 – 3F	66
5.4.4.	Δοκίμια 4 – 4F	67
5.4.5.	Δοκίμια 5 – 5F	67
5.4.6.	Δοκίμια 6 – 6F	68
5.4.7.	Δοκίμια 7 – 7F	68
5.4.8.	Δοκίμια 8 – 8F	69
5.4.9.	Δοκίμια 9 – 9F	69
6.	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	70
6.1.	Εισαγωγή	70
6.2.	Ο κώδικας LS – DYNA.....	70
6.3.	Διαδικασία μοντελοποίησης στο LS – DYNA.....	71
6.3.1.	Ορισμός γεωμετρίας και φυσικών ιδιοτήτων	71
6.3.2.	Μοντελοποίηση σημειακών συγκολλήσεων.....	73
6.3.3.	Ορισμός διεπιφανειών	74
6.3.4.	Προσδιορισμός συνθηκών συμπίεσης	74

6.3.5. Μοντελοποίηση πολυουρεθανικού αφρού.....	75
7. ΕΚΘΕΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	76
7.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος – προσομοίωσης.....	77
7.1.1. Δοκίμιο 1.....	77
7.1.2. Δοκίμιο 2.....	81
7.1.3. Δοκίμιο 3.....	85
7.1.4. Δοκίμιο 4.....	89
7.1.5. Δοκίμιο 5.....	93
7.1.6. Δοκίμιο 6.....	97
7.1.7. Δοκίμιο 7.....	101
7.1.8. Δοκίμιο 8.....	105
7.1.9. Δοκίμιο 9.....	109
7.1.10. Δοκίμιο 1F	113
7.1.11. Δοκίμιο 2F	117
7.1.12. Δοκίμιο 3F	121
7.1.13. Δοκίμιο 4F	125
7.1.14. Δοκίμιο 5F	129
7.1.15. Δοκίμιο 6F	133
7.1.16. Δοκίμιο 7F	137
7.1.17. Δοκίμιο 8F	141
7.1.18. Δοκίμιο 9F	145
7.2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανάλυσης.....	149
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	150
Βιβλιογραφία.....	158

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1. STRUCTURAL CRASHWORTHINESS: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	1
Σχήμα 1.1: Διάγραμμα ροής διαδικασίας βέλτιστου σχεδιασμού συστήματος απορρόφησης ενέργειας	3
Σχήμα 1.2: Θάνατοι στις Η.Π.Α. το έτος 2000 κατά είδος ατυχήματος (%).....	5
Σχήμα 1.3: Τάση σε θανατηφόρα περιστατικά ανά 10.000 οχήματα	5
Σχήμα 1.4: Κατανομή είδους ατυχήματος στο δρόμο από σύνολο 15.000 για το έτος 2009 στην Ελλάδα.....	6
Σχήμα 1.5: Κατανομή τραυματισμών από σύνολο 1500 επιβατών για το έτος 2009 στην Ελλάδα.....	6
Σχήμα 1.6: Τυπική unit-body κατασκευή	8
Σχήμα 1.7: Πλαίσιο αυτοκινήτου τύπου S πριν και μετά τη σύγκρουση	10
Σχήμα 1.8: Διαχωρισμός αυτοκινήτου σε ζώνες	10
Σχήμα 1.9: Μέθοδος ενίσχυσης του ρύγχους για τη μείωση της παραμόρφωσης.....	11
2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ	13
Σχήμα 2.1: Top-hat και Double-hat διατομές	14
Σχήμα 2.2: Ατέλειες με βάση την κατανομή τους στο χώρο	16
Σχήμα 2.3: Σύγκρουση αυτοκινήτου με ελαστικό ελατήριο.....	18
Σχήμα 2.4: Αξονοσυμμετρική συμπίεση λεπτότοιχου κυλινδρικού σωλήνα	22
Σχήμα 2.5: Μορφή κατάρρευσης κυκλικών διατομών	23
Σχήμα 2.6: Μικτή παραμόρφωση λόγω δυναμικής φόρτισης με πίπτουσα μάζα.....	23
Σχήμα 2.7: Μοντέλο αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης κυλινδρικού δοκιμίου	24
Σχήμα 2.8: Αξονική συμπίεση λεπτότοιχου τετραγωνικού σωλήνα	25
Σχήμα 2.9: Βασικά στοιχεία κατάρρευσης σωλήνα τετραγωνικής διατομής.....	25
Σχήμα 2.10: Μοντέλο συμμετρικής κατάρρευσης τετραγωνικού σωλήνα.....	26
Σχήμα 2.11: Ασύμμετρη μεικτή κατάρρευση τύπου A.....	26
Σχήμα 2.12: Ασύμμετρη μεικτή κατάρρευση τύπου B.....	27
Σχήμα 2.13: Ακανόνιστη παραμόρφωση τετραγωνικών δοκιμίων.....	27
Σχήμα 2.14: Μοντέλο κατάρρευσης top-hat διατομών.....	28
Σχήμα 2.15: Σχηματική αναπαράσταση κατάρρευσης top-hat διατομών.....	29
Σχήμα 2.16: Προοδευτική μετατόπιση λοβών ανά επίπεδο σχηματισμού	30
Σχήμα 2.17: Ακανόνιστη σταδιακή κατάρρευση top-hat διατομής.....	30
Σχήμα 2.18: Μορφή κατάρρευσης τύπου I double-hat διατομής	31

Σχήμα 2.19:	Βασικό στοιχείο κατάρρευσης double-hat διατομής.....	31
Σχήμα 2.20:	Κατανομή συγκολλήσεων σε δοκίμιο top-hat διατομής	32
Σχήμα 2.21:	Δοκιμή αποκόλλησης συγκολλητών μετάλλων (<i>peel test</i>).....	34
Σχήμα 2.22:	Μερική και ολική αποκόλληση υλικού γύρω από τη συγκόλληση.....	34
3.	ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΑΦΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ.....	35
Σχήμα 3.1:	Φωτογραφία κυψελίδων αφρού από scanning electron microscope	37
Σχήμα 3.2:	Τυπικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων πολυμερούς αφρού.....	38
Σχήμα 3.3:	Διάταξη maxfoam για την παραγωγή πλακών PU αφρού.....	47
Σχήμα 3.4:	Χρήση PU αφρού στο πάνελ του αυτοκινήτου	50
Σχήμα 3.5:	Εφαρμογή PU αφρού για την ενίσχυση του αμαξώματος.....	50
4.	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ..	51
Σχήμα 4.1:	Βασικά χαρακτηριστικά διατομής SE	51
Σχήμα 4.2:	Μηχανισμός παραμόρφωσης του superfolding element	52
Σχήμα 4.3:	Βασικές μορφές κατάρρευσης τυπικού SE	52
Σχήμα 4.4:	Δομικά στοιχεία improved SE.....	53
Σχήμα 4.5:	Διατομή top-hat δοκιμίου	54
Σχήμα 4.6:	Διατομή double-hat δοκιμίου	55
5.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	60
Σχήμα 5.1:	Διαστάσεις πλακιδίου δοκιμής εφελκυσμού	61
Σχήμα 5.2:	Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης πλακιδίου	61
Σχήμα 5.3:	Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων υλικού.....	62
Σχήμα 5.4:	Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 1 και 1F	65
Σχήμα 5.5:	Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 2 και 2F	66
Σχήμα 5.6:	Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 3 και 3F	66
Σχήμα 5.7:	Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 4 και 4F	67
Σχήμα 5.8:	Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 5 και 5F	67
Σχήμα 5.9:	Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 6 και 6F	68
Σχήμα 5.10:	Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 7 και 7F	68
Σχήμα 5.11:	Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 8 και 8F	69
Σχήμα 5.12:	Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 9 και 9F	69
6.	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	70
Σχήμα 6.1:	Διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης σημειακών συγκολλήσεων.....	73

Σχήμα 6.2:	Μορφή δοκιμίου 7 στο περιβάλλον ETA Femb Pre-processor.....	74
Σχήμα 6.3:	Μορφή καμπύλης τάσης – ογκομετρικής παραμόρφωσης PU αφρού.....	75
Σχήμα 6.4:	Πλεγματοποίηση πολυουρεθανικού αφρού δοκιμίων 6F, 7F.....	75
7.	ΕΚΘΕΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	76
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	150
Σχήμα 8.1:	Διάγραμμα απορροφόμενης ενέργειας.....	152
Σχήμα 8.2:	Διάγραμμα ειδικής ενέργειας ανά μάζα	153
Σχήμα 8.3:	Διάγραμμα μέγιστου φορτίου κατάρρευσης	154
Σχήμα 8.4:	Διάγραμμα μέσου φορτίου κατάρρευσης.....	155

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

1. STRUCTURAL CRASHWORTHINESS: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	1
2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ	13
3. ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΑΦΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ.....	35
Πίνακας 3.1: Λειτουργικότητα συνηθέστερων πολυολών	43
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά πολυολών για διάφορα είδη PU αφρών.....	44
Πίνακας 3.3: Φυσικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες των HCs.....	45
4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ..	51
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	60
Πίνακας 5.1: Τεχνικές προδιαγραφές αφρού BD-100	63
Πίνακας 5.2: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες αφρού BD-100.....	64
Πίνακας 5.3: Υπολογισμός βάρους πολυόλης – ισοκυανάτης	64
6. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	70
Πίνακας 6.1: Ζεύγη τιμών για τον προσδιορισμό της καμπύλης $\sigma - \epsilon$ υλικού.....	72
7. ΕΚΘΕΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	76
Πίνακας 7.1: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 1.....	77
Πίνακας 7.2: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 2.....	81
Πίνακας 7.3: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 3.....	85
Πίνακας 7.4: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 4.....	89
Πίνακας 7.5: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 5.....	93
Πίνακας 7.6: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 6.....	97
Πίνακας 7.7: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 7.....	101
Πίνακας 7.8: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 8.....	105
Πίνακας 7.9: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 9.....	109
Πίνακας 7.10: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 1F	113
Πίνακας 7.11: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 2F	117
Πίνακας 7.12: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 3F	121
Πίνακας 7.13: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 4F	125

Πίνακας 7.14: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 5F	129
Πίνακας 7.15: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 6F	133
Πίνακας 7.16: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 7F	137
Πίνακας 7.17: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 8F	141
Πίνακας 7.18: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 9F	145
Πίνακας 7.19: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανάλυσης	149
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	150

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

2H	Ύψος superfolding element
A	Εμβαδό διατομής
a, b	Διαστάσεις ορθογωνικής διατομής δοκιμίου
C	Ολικό μήκος ενός improved superfolding element
E	Μέτρο ελαστικότητας υλικού
e	Συμβατική παραμόρφωση
E _a	Συνολική απορροφόμενη ενέργεια κατασκευής
e _I	Πραγματική παραμόρφωση
E _{int}	Απορροφόμενη ενέργεια ενός superfolding element
e _o	Αποδοτικότητα σύγκρουσης
E _{pl}	Απορροφόμενη ενέργεια επίπεδου ελάσματος συγκολλητής κατασκευής
E _T	Απορροφόμενη ενέργεια κατάρρευσης top και double-hat διατομής
f	Μήκος φλάντζας δοκιμίου
G	Μάζα πρόσκρουσης
HIC	Δείκτης τραυματισμού στο κεφάλι
k	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητα (W/mK)
l	Ύψος δοκιμίου
L	Περίμετρος top-hat διατομής
m	Μάζα δοκιμίου
M _o	Ροπή πλήρως πλαστικής κάμψης
P _m	Μέσο αξονικό φορτίο κατάρρευσης
P _{max}	Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης
s	Συμβατική τάση
SEA	Ειδική ενέργεια απορρόφησης ανά μάζα (specific energy absorption), J/gr
s _I	Πραγματική τάση
t	Πάχος ελάσματος
u	Ταχύτητα κεφαλής πρέσσας
v _o	Αρχική ταχύτητα πρόσκρουσης

w_{p1}	Βήμα σημειακών συγκολλήσεων
w_{p2}	Απόσταση πρώτης συγκόλλησης από το άκρο του δοκιμίου
α_{σ}	Λόγος σταθερότητας
β_{σ}	Λόγος διατομής
δ_e	ενεργή απόσταση κατάρρευσης
δ_f	Αξονική συμπίεση
ϵ_r	Παραμόρφωση θραύσης
η	Αποτελεσματικότητα κατασκευής
ν	Λόγος Poisson υλικού
ρ	πυκνότητα εκάστοτε υλικού
$\sigma_o^{(i)}$	Ισοδύναμη τάση διαρροής του i στοιχείου ενός improved SE
σ_u	Όριο αντοχής υλικού
σ_{γ}	Τάση διαρροής υλικού
ϕ_{σ}	Λόγος πυκνότητας κατασκευής
ψ, ψ'	Συντελεστής απόδοσης ενέργειας απορρόφησης

1. STRUCTURAL CRASHWORTHINESS: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1. Εισαγωγή

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να παρέχουν προστασία στους επιβάτες ενός οχήματος, σχετίζονται άμεσα με την δυνατότητα του πλαισίου αυτού να αποτρέψει τη βλάβη κατά τη σύγκρουση. Η προσοχή των κατασκευαστών, ερευνητών και σχεδιαστών έχει οδηγηθεί προς αυτή την κατεύθυνση τα τελευταία 40 χρόνια. Μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων σε ετήσια συνέδρια σχετικά με τις συγκρούσεις αυτοκινήτων και την ασφάλεια των επιβατών αναφέρονται σε αυτή την τάση, ενώ παράλληλα οι κατασκευαστές οχημάτων καταβάλλουν προσπάθεια για να βελτιώσουν τη συμπεριφορά έναντι κρούσεων (*crashworthiness*).

Ο όρος ‘structural crashworthiness’ χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον αντίκτυπο της σύγκρουσης μιας κατασκευής με μια άλλη. Η μελέτη των χαρακτηριστικών του συστήματος απαιτούνται με σκοπό να υπολογιστούν οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη σύγκρουση ώστε να εκτιμηθεί η ζημιά της κατασκευής και η επιβιωσιμότητα των επιβατών. Ο κλάδος αυτός εξετάζει κυρίως συγκρούσεις οχημάτων όπως αυτοκίνητα, αεροπλάνα, πλοία, τρένα, πλατφόρμες μεταφοράς, διαστημόπλοια. Όμως, άμεση εξάρτηση υπάρχει και από τη δυνατότητα του οχήματος να απορροφήσει την ενέργεια πρόσκρουσης.

Η προστασία από συγκρούσεις μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους ανάλογα

- την ελάχιστη παραμόρφωση της εκτιθέμενης επιφάνειας, ή
- τη μέγιστη παραμόρφωση του πλαισίου μέχρι ένα ανώτατο επιτρεπτό όριο.

Στην πρώτη περίπτωση, το πλαίσιο υποβάλλεται σε υψηλές θλιπτικές δυνάμεις, ενώ στη δεύτερη μετατοπίζεται ένα τμήμα ή ολόκληρο το πλαίσιο χωρίς να μεταφέρονται μεγάλα φορτία στην καμπίνα του οχήματος και τους επιβάτες. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση σε στρατηγικά σημεία, συστημάτων που απορροφούν την αναπτυσσόμενη ενέργεια. Αυτές οι συσκευές είναι κυρίως μιας χρήσεως οπότε μετά από τη σύγκρουση καταστρέφονται και αντικαθίστανται. Άλλωστε, σκοπός είναι να διοχετευτεί η κινητική ενέργεια σε επιμέρους τμήματα του αμαξώματος παρά να επικρατήσουν συνθήκες ελαστικής παραμόρφωσης.

Η μελέτη της συμπεριφοράς της κατασκευής ως προς τον τρόπο απορρόφησης της ενέργειας, παρέχει το μηχανισμό κατά τον οποίο ένα ποσοστό της ενέργειας πρόσκρουσης απορροφάται από την κατασκευή και ένα ποσοστό μεταβιβάζεται στον επιβάτη. Για να επιτύχουμε την ζητούμενη συμπεριφορά, η μελέτη σε καταστροφική καταπόνηση θα πρέπει να πραγματοποιηθεί στα πρώτα στάδια του σχεδιασμού.

Οι μέθοδοι για την εκπόνηση της άνω μελέτης είναι είτε με δοκιμή και αστοχία σε πρωτότυπα της κατασκευής, είτε με μαθηματικά μοντέλα μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης όπως είναι η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Η ενσωμάτωση όμως αυτής της αμιγώς θεωρητικής ανάλυσης στα πρωταρχικά στάδια του σχεδιασμού όπου δεν υπάρχουν αναλυτικά δεδομένα της κατασκευής και των υλικών είναι αρκετά δύσκολη [9]. Αντιθέτως, η δοκιμή και αστοχία πρωτοτύπων μοντέλων είναι χρονοβόρα διαδικασία και με υψηλό κόστος. Για αυτούς τους λόγους, απαιτείται ο μηχανικός να διαθέτει ένα σύστημα, ικανό για τη μελέτη εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων που ικανοποιούν τις απαιτούμενες συνθήκες φόρτισης.

1.2. Στάδια βέλτιστου σχεδιασμού συστήματος πρόσκρουσης

Η τεχνική της ανάλυσης για το βέλτιστο σχεδιασμό μιας κατασκευής συνοψίζεται ακολούθως [37]:

1. Βάση δεδομένων των στοιχείων της κατασκευής:

Συνιστά την αρχή της διαδικασίας σχεδιασμού. Τα δεδομένα συλλέγονται μέσω δοκιμών ή ανάλυσης.

2. Απόκτηση δεδομένων μέσω δοκιμών ή ανάλυσης:

Αν για ένα δομικό στοιχείο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βάση δεδομένων, τότε αυτό κατασκευάζεται και υπόκειται σε δοκιμές. Ο μηχανισμός κατάρρευσης αναλύεται ώστε η αστοχία να αποφευχθεί με ανάλογη ενίσχυση.

3. Συνολική ανάλυση του μηχανισμού κατάρρευσης:

Μόλις προσδιορισθούν οι απαιτούμενες μη γραμμικές ιδιότητες της κατασκευής που σχετίζονται με την αντοχή και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, πραγματοποιείται στατική ανάλυση για να καθοριστεί η συνολική ικανότητα μεταφοράς φορτίου. Σε αυτό το στάδιο γίνεται η θεώρηση ότι

- η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την πίπτουσα μάζα
- η κατεύθυνση των φορτίων που αναπτύσσονται κατά τη δοκιμή μπορεί να παραληφθεί.

4. Βελτιστοποίηση κατασκευής:

Αξιολογείται η αντοχή και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μέσω του ολικού φορτίου που φέρει η κατασκευή. Αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν τον επανασχεδιασμό μη αποδεκτών στοιχείων. Τα κριτήρια που εξετάζονται είναι κατά πόσο κάθε στοιχείο της κατασκευής μπορεί να μεταβιβάσει τα ασκούμενα φορτία, αποφεύγοντας μεγάλες τοπικές παραμορφώσεις.

υπολογισμού μετατρέπεται σε σύνθετη διεργασία οπότε χρειάζεται επανέλεγχος μέσω της συνολικής ανάλυσης του μηχανισμού.

7. Δυναμική ανάλυση:

Τα πιθανά σενάρια που συνδέονται με τη δυναμική ανάλυση είναι:

- Η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την επιβραδύνουσα μάζα και η ταχύτητα πρόσκρουσης είναι μικρή, όπως κατά την πλευρική πρόσκρουσης του οχήματος ή την ανατροπή. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη δύναμης – παραμόρφωσης από το στάδιο 3.
- Εντός της κατασκευής υπάρχουν μεγάλες μάζες οπότε γίνεται απευθείας χρήση των αποτελεσμάτων από τα στάδια 1, 2, 5, 6.

8. Προσομοίωση επιβάτη:

Σε αυτό το στάδιο είναι γνωστή η ταχύτητα και η μέθοδος κατάρρευσης, οπότε απαιτείται να ληφθεί υπόψη η ασφάλεια των επιβατών ή του περιεχομένου γενικότερα κατά την πρόσκρουση. Τα αποτελέσματα είναι πρωταρχικής σημασίας και αναλύονται σε βάθος.

9. Δυναμική βελτιστοποίηση:

Αν τα αποτελέσματα από την προσομοίωση των επιβατών δεν είναι αποδεκτά ως προς την ασφάλειά τους, επαναλαμβάνεται ολόκληρη η διαδικασία μέχρι να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

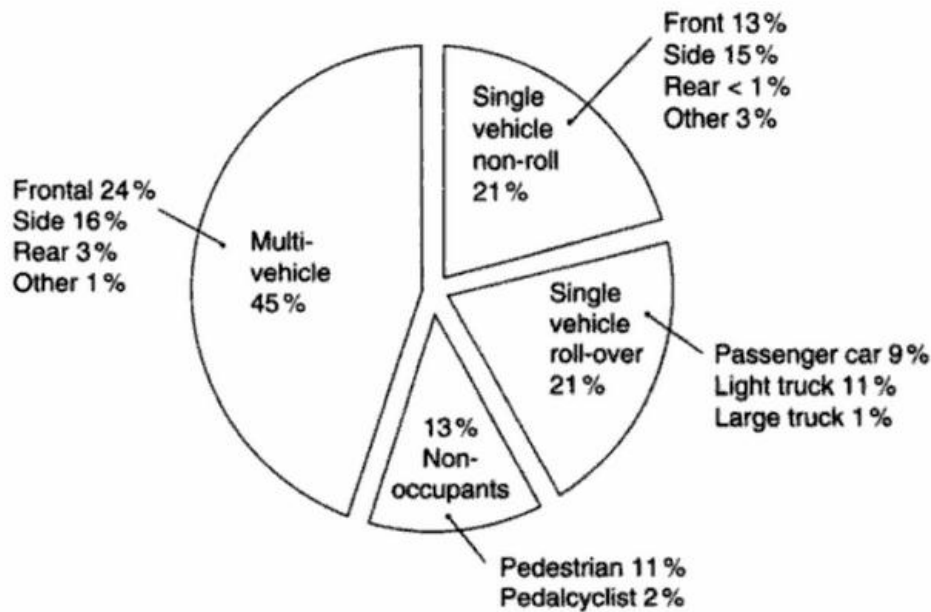
1.3. Ατυχήματα οχημάτων και συνέπειες

1.3.1. Στατιστικά στοιχεία

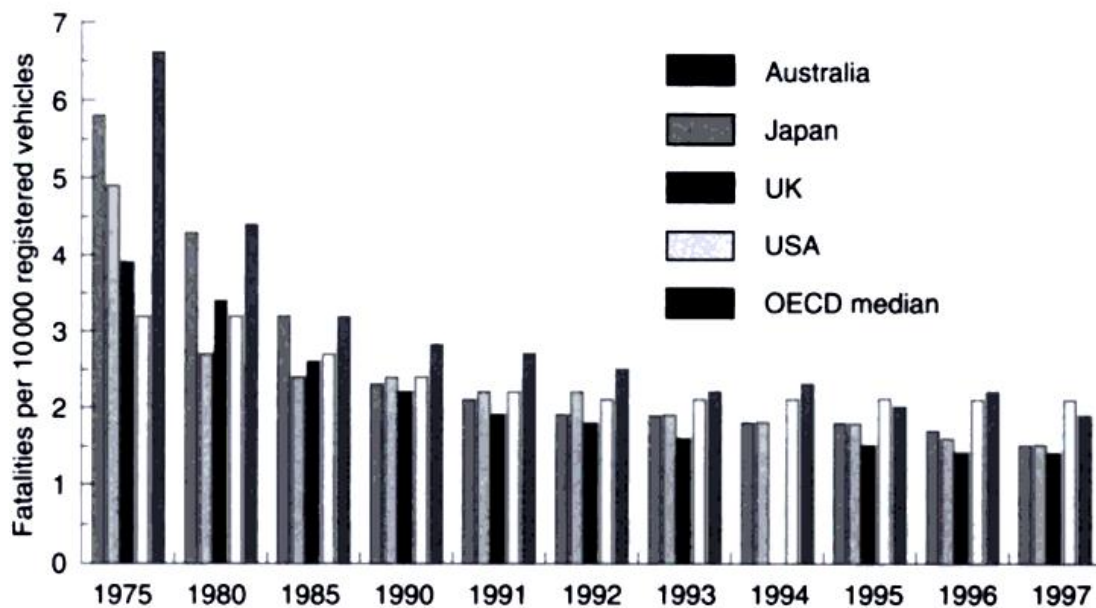
Ο σύγχρονος κόσμος βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα διάφορα μεταφορικά μέσα, ενώ ο αριθμός των οχημάτων αυξάνεται συνεχώς. Τα τροχαία ατυχήματα είναι ένα από τα κύρια αίτια θανάτου. Σύμφωνα με το Αμερικάνικο Εθνικό Κέντρο Στατιστικών και Ανάλυσης (NCSA – National Centre of Statistics & Analysis), το 2000 καταχωρήθηκαν περίπου 217 εκατ. οχήματα παρουσιάζοντας αύξηση 18% σε σχέση με το 1990, ενώ ο πληθυσμός υπολογίζεται σε 278 εκατ. κάτοικοι [34]. Η πρόοδος της τεχνολογίας έχει οδηγήσει σε αύξηση του αριθμού και του είδους-όγκου των οχημάτων (φορτηγά, πλοία, αεροπλάνα) ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η ταχύτητά τους. Κατά συνέπεια, οι ζημιές σε περίπτωση ατυχήματος είναι πολύ σοβαρές για τους ανθρώπους και το περιβάλλον.

Σύμφωνα με τα ενημερωτικά δελτία ασφαλής κυκλοφορίας που δημοσιεύθηκαν από το NCSA, το 1999 υπήρξαν 6,2 εκατ. τροχαία δυστυχήματα στις Η.Π.Α. Στο σχ.1.2 παρίστανται ποσοστιαίως τα είδη των ατυχημάτων για αυτό το έτος. Στατιστικές μελέτες του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης ΟΟΣΑ ή αντίστοιχα

Organization for Economic Co-Operation and Development OECD παρουσιάζουν την τάση σε θανατηφόρα περιστατικά ανά 10.000 οχήματα για επιλεγμένες χώρες (σχ.1.3).

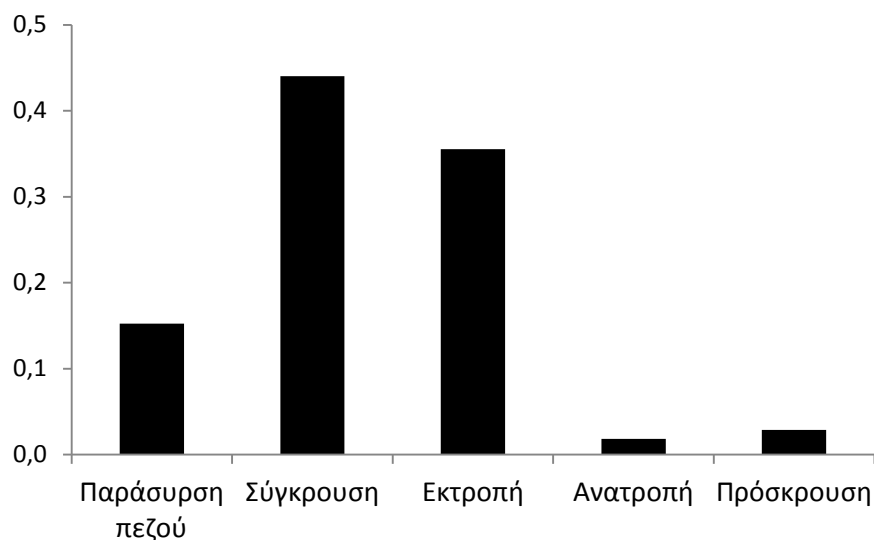


Σχήμα 1.2: Θάνατοι στις Η.Π.Α. το έτος 2000 κατά είδος ατυχήματος (%)

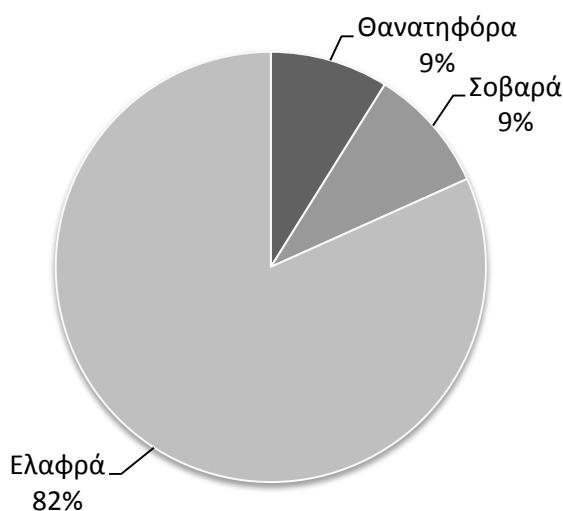


Σχήμα 1.3: Τάση σε θανατηφόρα περιστατικά ανά 10.000 οχήματα

Όσον αφορά την Ελλάδα, κατέχει την πρώτη θέση στον αριθμό των θανάτων από τροχαία ατυχήματα, σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για το 2009, με 130 νεκρούς ανά εκατομμύριο κατοίκων. Στα κράτη-μέλη της ΕΕ το 2009 ο αριθμός των θανάτων από τροχαία ατυχήματα ήταν 69 νεκροί ανά εκατομμύριο κατοίκους και από τα στοιχεία προκύπτει ότι παρατηρείται μείωση 36% σε σχέση με το 2001, όταν το αντίστοιχο ποσοστό μείωσης για την Ελλάδα είναι 23% σύμφωνα με στοιχεία της Διεύθυνσης Τροχαίας του κλάδου Ασφάλειας και Τάξης της Αστυνομίας.



Σχήμα 1.4: Κατανομή είδους ατυχήματος στο δρόμο από σύνολο 15.000 για το έτος 2009 στην Ελλάδα



Σχήμα 1.5: Κατανομή τραυματισμών από σύνολο 1500 επιβατών για το έτος 2009 στην Ελλάδα

1.3.2. Αντοχή ανθρώπινου σώματος κατά τη σύγκρουση

Έρευνες πάνω στη μηχανική των τραυματισμών προσπαθούν να καθορίσουν την κρισιμότητα των συγκρούσεων και την επίδραση στην υγεία του ανθρώπου. Κατά τη σύγκρουση ενός οχήματος, είναι δυνατόν να τραυματιστούν οι επιβάτες, ως συνέπεια των παρακάτω γεγονότων [34]:

- υπερβολικά μεγάλη επιβράδυνση
- σύγκρουση του θαλάμου επιβάτη
- πρόσκρουση επιβάτη σε τμήμα του οχήματος
- εκτίναξη

Κριτήριο τραυματισμού στο κεφάλι (*Head injury criteria ή HIC*)

Οι τραυματισμοί στο κεφάλι έχει αποδειχθεί ότι αποτελούν τον πιο θανατηφόρο τραυματισμό στα ατυχήματα. Ο λόγος είναι ότι δύσκολα θεραπεύονται και σε πολλές περιπτώσεις οδηγούν σε μόνιμες δυσλειτουργίες. Επιπλέον, επιβαρύνουν οικονομικά την κοινωνία, είτε λόγο της πρόωρης απώλειας του ανθρώπου είτε λόγω της μακράς θεραπείας. Στις Η.Π.Α. εκτιμάται ότι 135.000 άτομα νοσηλεύονται κάθε χρόνο με εγκεφαλικές κακώσεις ως αποτέλεσμα ατυχημάτων με μηχανές. Το κόστος νοσηλείας σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται σε 350 εκατ. δολάρια.

Η σχέση που θεωρείται ότι αποτελεί τον καλύτερο δείκτη για αυτούς τους τραυματισμούς, οι οποίοι μπορεί να αναφέρονται γενικότερα σε ατυχήματα, είναι:

$$HIC = \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1) \right\}_{max} \quad (1.1)$$

όπου

- t_2, t_1 είναι ο αρχικός και τελικός χρόνος για τον οποίο το μέγεθος HIC λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του. Ο όρος t_2-t_1 περιορίζεται συνήθως σε ένα εύρος τιμών μέχρι 15ms.
- $a(t)$ η προκύπτουσα επιβράδυνση σε συνάρτηση με το χρόνο

Προκύπτει ότι για $HIC > 1000$ υπάρχει πιθανότητα ο επιβάτης να έχει υποστεί ανεπανόρθωτη βλάβη. Ποιο συγκεκριμένα, υπάρχει πιθανότητα κατά 18% να έχει υποστεί θανάσιμο τραυματισμό, 55% να έχει υποστεί σοβαρό τραυματισμό και 90% ελαφρύ τραυματισμό [35].

Για τους τραυματισμούς στο κεφάλι, χρησιμοποιείται ο όρος HIC αλλά το επιτρεπτό εύρος αναζήτησης της μέγιστης τιμής έχει αυξηθεί σε 36ms. Διαφωνίες υπάρχουν ως προς τη χρήση αυτής της σχέσης όσον αφορά τους τραυματισμούς λόγω περιστροφικής επιτάχυνσης, δεδομένα που δεν λαμβάνει υπόψη ο όρος. Το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση όπου από τη σύγκρουση προσβάλλεται ο εγκέφαλος του επιβάτη αλλά όχι το κρανίο. Παρά τις αδυναμίες όμως που αναφέρθηκαν, αυτή τη σχέση συμβουλευεται ο οργανισμός Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) για την απόδοση του συστήματος αστεριών ως προς την ασφάλεια των αυτοκινήτων. Το υψηλότερο αποδεκτό όριο για αυτό τον οργανισμό, είναι το 700, ώστε το αυτοκίνητο να είναι αποδεκτό και αντιπροσωπεύει 5% πιθανότητα θανάσιμου τραυματισμού σε ατύχημα.

1.4. Εφαρμογές στις κατασκευές

1.4.1. Αυτοκίνηση

Στη βιομηχανία αυτοκινήτων ο σκοπός του μηχανικού ασφαλείας είναι τέτοιος ώστε να εξασφαλίζει τον ελάχιστο δυνατό κίνδυνο από τραυματισμούς των επιβατών. Γι' αυτό χρηματοδοτήθηκαν ερευνητικά προγράμματα για το σχεδιασμό συστημάτων που θα έδιναν στο όχημα εργαλεία παθητικής ασφάλειας. Η συμπεριφορά έναντι κρούσεων αναφέρεται στην ικανότητα της πλαστικής παραμόρφωσης του οχήματος χωρίς να επηρεαστεί η καμπίνα των επιβατών ενώ παράλληλα δεν αναπτύσσονται μεγάλες θλιπτικές δυνάμεις. Οι υπάρχουσες τεχνολογίες κατασκευής του αμαξώματος είναι οι εξής [11]:

- body-over-frame κατασκευή
- unit-body κατασκευή



Σχήμα 1.6: Τυπική unit-body κατασκευή

Η πρώτη κατηγορία εμπεριέχει τα αυτοκίνητα με τμηματική κατασκευή του αμαξώματος. Το αμάξωμα παρέχει το μεγαλύτερο μέρος της αντοχής σε κάμψη και στρέψη. Επιπλέον, αποτελείται από ειδικά σχεδιασμένη καμπίνα επιβατών για την ελαχιστοποίηση των τραυματισμών κατά τη σύγκρουση. Το πλαίσιο συγκρατεί τον κινητήρα, το σύστημα αναρτήσεων, το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Σε περίπτωση πρόσθιας πρόσκρουσης το πλαίσιο και το εμπρός μέρος του οχήματος απορροφά μεγάλο μέρος της ενέργειας πρόσκρουσης μέσω πλαστικής παραμόρφωσης. Τα τμήματα του πλαισίου συνδέονται με βίδες και εξαρτήματα απορρόφησης κραδασμών για να αποτελέσουν το αμάξωμα του αυτοκινήτου.

Η τεχνολογία κατασκευής unit-body (ή *unit-frame-and-body* ή *frame-less-body*), χρησιμοποιείται από την πλειοψηφία των κατασκευαστών επιβατικών οχημάτων. Σε αυτή την περίπτωση όλα τα τμήματα του αμαξώματος συνδέονται σε ένα ενιαίο μέσω συγκολλήσεων και άλλων ενώσεων. Η κατασκευή γίνεται κυρίως με χρήση λεπτότοιχων εξαρτημάτων, που ενισχύουν τη στιβαρότητα και μειώνουν δραστικά το βάρος του αμαξώματος.

Η κατασκευή του πλαισίου του οχήματος πρέπει να εξασφαλίζει:

- Παραμορφωσιμότητα του εμπρός τμήματος του οχήματος αλλά ικανοποιητική αντοχή της καμπίνας επιβατών μέσω πλαστικής παραμόρφωσης. Προσοχή δίνεται στις δοκιμές σύγκρουσης με αντικείμενα μικρής επιφάνειας όπως δέντρα.
- Αντοχή του πίσω τμήματος του οχήματος για να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα των επιβατών και κυρίως της δεξαμενής καυσίμου.
- Ορθός μελετημένα και σχεδιασμένα πλαϊνά προστατευτικά και θύρες ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν θα ανοίξουν κατά την πρόσκρουση.
- Ισχυρή οροφή για την προστασία από ανατροπή.
- Σχεδιασμός περιοριστικών συστημάτων που λειτουργούν σε αρμονία με την υπόλοιπη κατασκευή ώστε να παρέχουν ασφάλεια στον επιβάτη.
- Έλεγχο διαφορετικών σχεδιασμών για τη θέση του συστήματος μετάδοσης κίνησης.

Η νέα φιλοσοφία σχεδιασμού των αυτοκινήτων επιβάλλει τη μέγιστη προστασία των επιβατών κατά τη σύγκρουση, το οποίο επιτυγχάνεται όταν το πλαίσιο απορροφά την πλειοψηφία της ενέργειας πρόσκρουσης. Επίσης, έχουν προστεθεί μηχανισμοί και εξαρτήματα που αυξάνουν την ασφάλεια και αναλύονται ακολούθως [37].

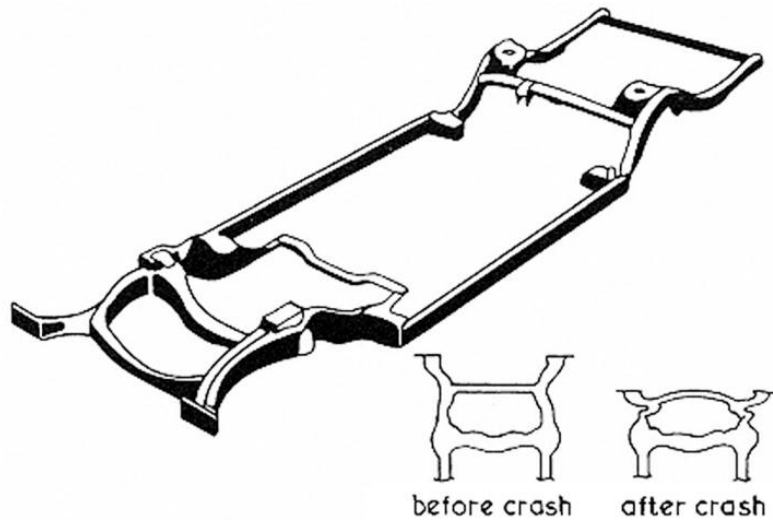
Πλαίσιο απορρόφησης ενέργειας σύγκρουσης

Το πλαίσιο είναι η κύρια κατασκευή του αυτοκινήτου πάνω στην οποία συναρμολογούνται τα μηχανικά μέρη. Η συνήθης μέθοδος κατασκευής είναι η τύπου S, όπου δύο ευθεία τμήματα χάλυβα, διαμορφώνονται και σχηματίζουν μια σελινοειδή μορφή στο εμπρός τμήμα ώστε κατά την εμπρόσθια πρόσκρουση να παραμορφωθεί το πλαίσιο ομαλά (σχ.1.7).

Ζώνες παραμόρφωσης (Crumple Zones)

Η ζώνη παραμόρφωσης είναι ιδιότητα της κατασκευής να παραμορφώνεται κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης ώστε να απορροφά την αναπτυσσόμενη ενέργεια. Τυπικά, βρίσκεται στο εμπρός και πίσω μέρος του αμαξώματος και αποτρέπει τη μεταφορά ενέργειας στην καμπίνα των επιβατών. Επιτυγχάνεται αποδυναμώνοντας συγκεκριμένες περιοχές οι οποίες καταρρέουν πρώτες, ενώ ενισχύονται ταυτόχρονα εσωτερικές περιοχές του αμαξώματος που δεν θέλουμε να παραμορφωθούν.

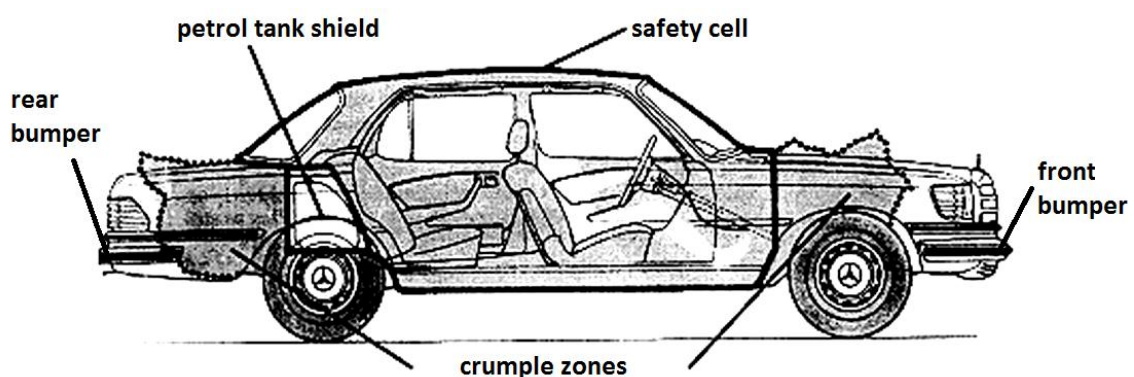
Ενδεικτικά αναφέρεται ότι κατά τις πειραματικές δοκιμές σε εμπρόσθιες ή πίσω συγκρούσεις, το 90% της ενέργειας πρόσκρουσης μετατρέπεται σε ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης, ενώ το υπόλοιπο 10% αποτελεί ελαστική παραμόρφωση [21] και μεταβιβάζεται στην καμπίνα και ακολούθως στους επιβάτες. Πλέον, η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των φορτίων και του μηχανισμού παραμόρφωσης.



Σχήμα 1.7: Πλαίσιο αυτοκινήτου τύπου S πριν και μετά τη σύγκρουση

Καμπίνα επιβατών

Ο ελάχιστος επιβιώσιμος χώρος μετά τη σύγκρουση, που περιλαμβάνει το μέγεθος και τη στάση των επιβατών καθώς και τα καθίσματα παραμένει σχεδόν σταθερός ανεξάρτητα από το μοντέλο του αυτοκινήτου. Αναφέρεται ότι ο επιβιώσιμος χώρος για ταχύτητα πρόσκρουσης μέχρι 48km/h μπορεί να παραμείνει ακέραιος [14].



Σχήμα 1.8: Διαχωρισμός αυτοκινήτου σε ζώνες

Προφυλακτήρες

Τοποθετείται εξωτερικώς στο εμπρός και πίσω τμήμα του οχήματος, κυρίως για να μειώσουν το μέγεθος του τραυματισμού των πεζών κατά την πρόσκρουση. Δεν παρέχουν

ουσιαστική ασφάλεια στους επιβάτες για υψηλές ταχύτητες πρόσκρουσης. Συνήθως καλύπτονται από στρώσεις ελαστικού υλικού.

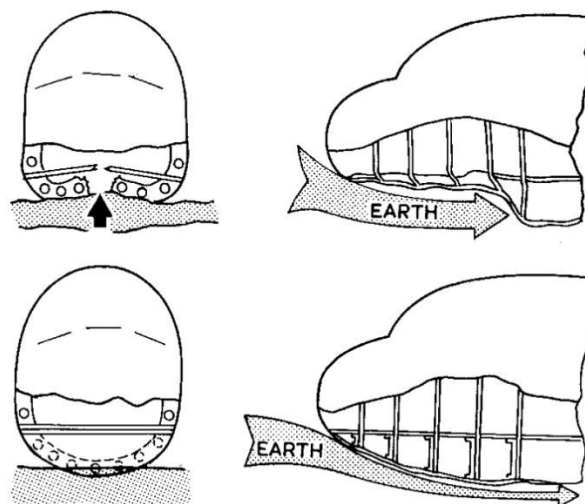
1.4.2. Εναέριες μεταφορές

Αεροπλάνο

Η εφαρμογή της θεωρίας crashworthiness αναφέρεται στη δυνατότητα της ατράκτου να διατηρήσει ασφαλή το χώρο των επιβατών κατά τη σύγκρουση στο έδαφος και την ικανότητα μέτρησης των φορτίων επιβράδυνσης που δέχεται ο άνθρωπος [21]. Σημαντικοί παράγοντας για την επίτευξη είναι:

- Ο σχεδιασμός της κατασκευής με τρόπο ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία μεγάλων κοιλοτήτων αλλά και η εισχώρηση του ρύγχους του αεροπλάνου στο έδαφος.
- Η εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας των εξωτερικών συστημάτων της εξόδου διαφυγής.
- Η ενίσχυση του πιλοτηρίου και της καμπίνας των επιβατών για την αύξηση της αντοχής σε μεγάλα φορτία με ελάχιστη ή καθόλου πλαστική παραμόρφωση.

Ο κατάλληλος σχεδιασμός της κατασκευής επιτρέπει στο αεροπλάνο να μην αναπτύσσονται μεγάλα φορτία επιβράδυνσης κατά την πρόσπτωση στο έδαφος. Αυτό γίνεται εμφανές σε περίπτωση της πρόσπτωσης υπό κλίση. Ενίσχυση του ρύγχους γίνεται με την προσθήκη μεταλλικών κατασκευών για τη μείωση της παραμόρφωσης και την αντίσταση σε κάθετα φορτία.



Σχήμα 1.9: Μέθοδος ενίσχυσης του ρύγχους για τη μείωση της παραμόρφωσης

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που εξετάζονται όσον αφορά τους επιβάτες και τη διαδικασία της πρόσκρουσης είναι κυρίως η αντίδραση του επιβάτη, που περιλαμβάνει την ένταση και τη διάρκεια του φαινομένου της επιβράδυνσης. Επίσης σημαντικοί είναι οι

περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η αποκοπή τμήματος της κατασκευής προκαλώντας τραυματισμό ή παράγοντες μετά τη σύγκρουση που απειλούν την επιβίωση του επιβάτη όπως ο πνιγμός, η φωτιά.

Ελικόπτερο

Στην περίπτωση των ελικοπτέρων ένας πρόσθετος παράγοντας του crashworthiness είναι η συμπεριφορά της έλικας κατά την πρόσκρουση. Η εισχώρηση της έλικας στο θάλαμο του ελικοπτέρου έχει θανάσιμες επιπτώσεις για τον πιλότο. Ένας τρόπος αντιμετώπισης είναι η αποκοπή τους κατά τη σύγκρουση του ελικοπτέρου στο έδαφος αντί να παραμορφωθούν ελαστικά και να διατηρηθούν στη θέση τους [49].

2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

2.1. Εισαγωγή

Τα κυριότερα δομικά στοιχεία στην πλειοψηφία των οχημάτων μεταφοράς κατασκευάζονται ως λεπτότοιχα (*thin-walled*). Κατά την εξέλιξη της βιομηχανίας μεταφορών, μεγάλο πλήθος περιορισμών και προτροπών έχουν καθιερωθεί βοηθώντας τους μηχανικούς στο σχεδιασμό στιβαρών κατασκευών [4]. Γενικά, στις πρώτες σχεδιαστικές μελέτες προσέγγιζαν το μοντέλο σε σταθερές συνθήκες φόρτισης με φυσιολογική λειτουργία του οχήματος. Οπότε το υπολογιστικό μοντέλο περιοριζόταν στην ελαστική ανάλυση προκαλώντας μικρές παραμορφώσεις (*infinitesimal deformations*).

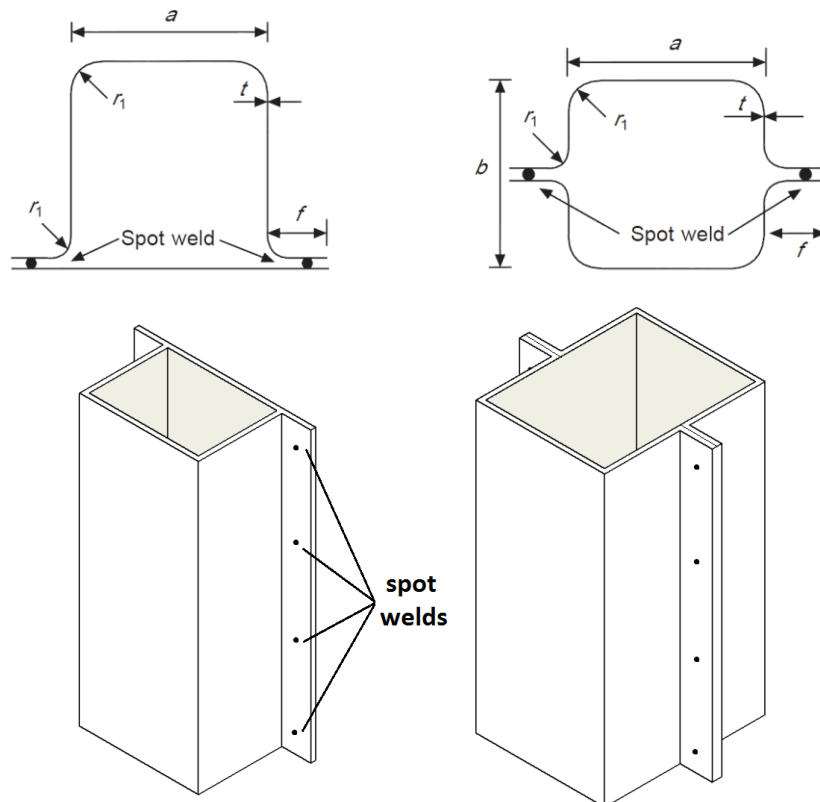
Στα τέλη του 1960, οι κανονισμοί ασφαλείας προκάλεσαν μια νέα, πιο απαιτητική προσέγγιση για τους μηχανικούς σχεδιασμού οχημάτων. Εκτός από τις απαιτήσεις των προδιαγραφών ασφαλείας, οι λεπτότοιχες κατασκευές πλέον σχεδιάζονταν να αντέχουν φορτία που προκύπτουν σε μη φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας κατά τη διάρκεια διαφορετικών ατυχημάτων. Τυπικά, ένα όχημα σχεδιασμένο για προστασία από ατυχήματα πρέπει να διατηρεί κατά τόπους την ακεραιότητα και/ή να διαχειρίζεται την ενέργεια πρόσκρουσης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση αεροπλάνου, αυτοκινήτου, τραίνου ή καμπίνα των επιβατών πρέπει να αντέξει τα φορτία ενώ άλλα στοιχεία της κατασκευής πρέπει να μετατρέψουν την κινητική ενέργεια διατηρώντας την παραμόρφωση κάτω από ένα καθορισμένο όριο. Επίσης, σε περίπτωση πλαϊνής πρόσκρουσης ενός επιβατικού αυτοκινήτου, το πλαίσιο πρέπει να πληρεί και τις δύο προϋποθέσεις ταυτόχρονα.

Τα συστήματα απορρόφησης ενέργειας διαφόρων ειδών παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για πολλές μηχανολογικές κατασκευές. Αυτά τα συστήματα όπου απορροφάνε ενέργεια μέσω πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού τους έχουν αποκτήσει ευρεία χρήση. Πιο συγκεκριμένα, λεπτότοιχες κατασκευές διαφορετικών διατομών μελετώνται λόγω της μεγάλης απορρόφησης ενέργειας υπό στατικό και δυναμικό φορτίο.

Η κατάρρευση διατομών τύπου top-hat, double-hat και άλλων σχημάτων, υπό στατικό φορτίο, εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική. Οι κατασκευές τέτοιας μορφής αποτελούνται από δύο μεταλλικά ελάσματα με διαμορφωμένη φλάντζα στην οποία γίνονται σημειακές συγκολλήσεις (*spot welds*) για τη συγκράτηση. Αυτές οι διατομές χρησιμοποιούνται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή του αμαξώματος (*unit-body* κατασκευή). Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των λεπτότοιχων κατασκευών [50] είναι η προοδευτική κατάρρευση όταν δέχονται αξονικό φορτίο (*static axial crushing*).

Η ανάλυση των λεπτότοιχων κατασκευών πολλές φορές μπορεί να αποδειχθεί πιο πολύπλοκη από την ανάλυση στερεών σωμάτων, παρουσιάζοντας διαφοροποίηση με τη

μεταβολή του υλικού ή της γεωμετρίας [15] ή άλλων παραμέτρων του πειράματος όπως της ταχύτητας πρόσκρουσης [10]. Η μαθηματική μοντελοποίηση των κελυφών παρουσιάζει αρκετά προβλήματα στη μηχανική στερεού σώματος. Οι βασικές αρχές που διέπουν τη μηχανική συμπεριφορά των κελυφών διατυπώθηκαν από τον Love [31] στο τέλος του προηγούμενου αιώνα. Έκτοτε, οι ερευνητές επικεντρώθηκαν στην μελέτη των εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο, σε αριθμητικές και αναλυτικές τεχνικές, νέες εφαρμογές σε προβλήματα σχεδιασμού, βελτιστοποίηση προβλήματος, ευαισθησία σε ατέλειες.



Σχήμα 2.1: Top-hat και Double-hat διατομές

Τα τελευταία 40 χρόνια υπάρχει η τάση για κατασκευή ακόμα πιο λεπτών κατασκευών. Αυτή η τάση προέκυψε από την ανάγκη για πιο ελαφριές κατασκευές που μπορούν ευκολότερα να συναρμολογηθούν, μεταφερθούν και αποθηκευτούν ενώ παράλληλα εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε φορτία.

2.2. Ατέλειες λεπτότοιχων κατασκευών

Ο σχεδιασμός της κατασκευής αποτελεί μια εξιδανίκευση τι πρέπει να κατασκευαστεί και συνεπώς αντικατοπτρίζεται στις προδιαγραφές της γεωμετρίας, του υλικού, της μεθόδου παραγωγής. Αυτό είναι το ιδανικό μοντέλο, όμως το πραγματικό έχει κάποιες ατέλειες με συνέπεια να αποκλίνει. Υπάρχουν δύο κατηγορίες που προκαλούν αυτή την απόκλιση, τα σφάλματα (*errors*) και οι βλάβες (*damages*). Ο γενικότερος όρος για αυτές τις ατέλειες είναι structural imperfections, defects, flaws, degeneracies.

Τα σφάλματα μπορεί να οφείλονται σε

- ατέλειες κατά την παραγωγή
- σφάλματα στην κατασκευή
- ελαττώματα του υλικού κατασκευής
- αλλαγές κατά τη διάρκεια της παραγωγής,

ενώ οι βλάβες προκαλούνται

- στη συναρμολόγηση της κατασκευής
- κατά τη διάρκεια ζωής της
- λόγω παραγόντων που δεν είχαν ληφθεί αρχικά υπόψη.

2.3. Κατηγοριοποίηση ατελειών

Παρόλο που οι ατέλειες των κατασκευών διαφέρουν μεταξύ τους, για διευκόλυνση προτείνεται η κατηγοριοποίηση σε 3 κατηγορίες [16] βασιζόμενη στις ιδιότητές τους παρά στα αποτελέσματά τους στη συμπεριφορά της κατασκευής.

2.3.1. Με κριτήριο τη διαδικασία φόρτισης

- *Ατέλειες που επέρχονται πριν τη φόρτιση* και προκαλούνται κατά την κατασκευή, συναρμολόγηση και γενικότερα πριν ασκηθεί το κύριο φορτίο. Μπορεί να προκληθούν σε τυχαία διαστήματα, γι' αυτό και δεν μπορούν να προσδιοριστούν εξαρχής.
- *Ατέλειες που επέρχονται από φορτίο εξωτερικής πηγής*, άρα είναι ανεξάρτητος παράγοντας από την κατασκευή. Συνδέονται πολλές φορές με συγκρούσεις, εκρήξεις ή αποπροσανατολισμό τμήματος λόγω χημικής αντίδρασης, διάβρωσης.
- *Ατέλειες που επέρχονται από το κύριο σύστημα φόρτισης* προκαλώντας ρωγμές, σπάσιμο, πλαστικότητα της κατασκευής. Αυτό είναι το αντικείμενο της μηχανικής θραύσεως και καταστροφικών καταπονήσεων.

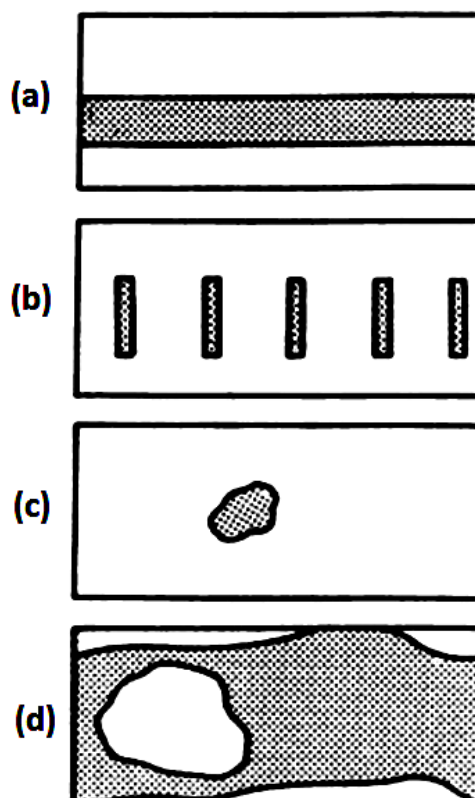
2.3.2. Με κριτήριο την κατανομή των ατελειών στο χώρο

Μια κατασκευή ονομάζεται πρισματική όταν οι ιδιότητες της γεωμετρίας και του υλικού διατηρούνται προς μια κατεύθυνση τουλάχιστον.

- *Ατέλειες των πρισματικών ιδιοτήτων*. Στις λεπτότοιχες, κατασκευές, μια ατέλεια μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες προς μια κατεύθυνση αλλά να διατηρήσει τα πρισματικά χαρακτηριστικά. Παράδειγμα είναι η στρέψη των κελυφών δημιουργώντας πρισματικές ατέλειες.
- *Ατέλειες επαναλαμβανόμενου μοτίβου (pattern)*, που καταστρέφουν τις πρισματικές ιδιότητες αλλά διατηρούν μια επαναλαμβανόμενη συμμετρία.

Μπορεί να ερευνηθεί απομονώνοντας το στοιχείο κελύφους όπου βρίσκεται το μοτίβο.

- *Εντοπισμένες ατέλειες*, απομονωμένες σε μια περιοχή. Εν γένει, ολόκληρη η κατασκευή με τις εντοπισμένες ατέλειες θα πρέπει να μοντελοποιηθεί. Ωστόσο, αν η μεταβολή της τάσης περιορίζεται μόνο στη συγκεκριμένη περιοχή της ατέλειας, μπορούν να γίνουν παραδοχές για την απλούστευση.
- *Συνολικές ατέλειες*, όπου ολόκληρη η επιφάνεια της κατασκευής ή εξαρτήματος αυτής έχει επηρεαστεί.



Σχήμα 2.2: Ατέλειες με βάση την κατανομή τους στο χώρο

- (a) ατέλειες των πρισματικών ιδιοτήτων
- (b) ατέλειες επαναλαμβανόμενου μοτίβου
- (c) εντοπισμένες ατέλειες
- (d) συνολικές ατέλειες

2.3.3. Με κριτήριο εγγενής και γεωμετρικές ατέλειες

- *Εγγενής παράμετροι*, όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson, ορθοτροπικοί παράγοντες, τάση διαρροής. Στις λεπτότοιχες κατασκευές περιλαμβάνεται και η μεταβολή του πάχους του ελάσματος.
- *Γεωμετρικές παράμετροι*, που καθορίζουν το μέσο επίπεδο και το σύνορο των λεπτότοιχων κατασκευών. Μπορεί να επηρεάσουν το μέγεθος, το σχήμα, τη θέση του μέσου επιπέδου. Αν η ανάλυση προκύψει με τη μέθοδο των

πεπερασμένων στοιχείων, οι γεωμετρικές ατέλειες επηρεάζουν το διάγραμμα τάσεων- μετατοπίσεων. Μεταβολές μπορεί να προκύψουν και στον όγκο όλης της κατασκευής.

2.4. Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πρόσκρουσης

2.4.1. Στοιχεία θεωρίας

Σε μια δοκιμή αξονικής καταπόνησης, το δοκίμιο παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό μέχρι μια μέγιστη τιμή P_{max} , το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Ύστερα από την P_{max} , το φορτίο μειώνεται αισθητά και συνήθως αποκτά ένα σταθερό εύρος τιμών κατά τη διάρκεια της υπόλοιπης παραμόρφωσης. Η μορφή της καμπύλης, μετά το μέγιστο φορτίο, εξαρτάται από τις συνθήκες φόρτισης, τον τρόπο στερέωσης και τον μηχανισμό κατάρρευσης του δοκιμίου.

Η ενέργεια που απορροφάται από το δοκίμιο κατά την κατάρρευσή του μπορεί να υπολογιστεί από εμβαδομέτρηση του χωρίου που περικλείεται κάτω από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης.

Οι συνήθεις κατασκευές όπως ο μηχανολογικός εξοπλισμός, έχουν αντοχή μικρών φορτίων που δημιουργούν ελαστική παραμόρφωση. Η αστοχία προκαλείται κυρίως από κόπωση, διάβρωση, υποβάθμιση του υλικού μετά από κάποιο χρονικό διάστημα.

Αντιθέτως, οι κατασκευές που σχεδιάζονται με σκοπό την απορρόφηση ενέργειας διαφέρουν εξαιρετικά καθότι θα πρέπει να αντέξουν μεγάλη φορτία, ώστε κατά την παραμόρφωση και αστοχία να προκύψουν μεγάλες μεταβολές της γεωμετρίας. Γι' αυτό το λόγω κατασκευάζονται από όλκιμα υλικά, με τον ανθρακούχο χάλυβα και το αλουμίνιο να χρησιμοποιούνται ευρέως [51].

Έρευνες έχουν καταλήξει ότι ορισμένες μέθοδοι παραμόρφωσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε δυναμικά φορτία, που οδηγεί στην εκτίμηση της παραμόρφωσης και αστοχίας μέσω μοντέλων μικρότερης κλίμακας.

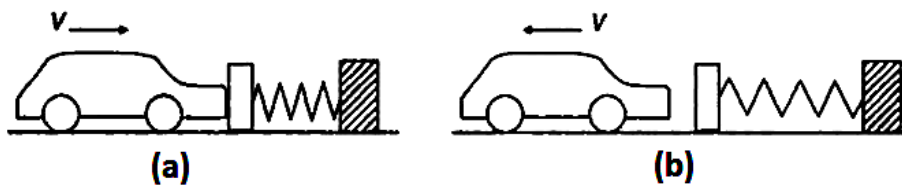
2.4.2. Βασικές αρχές κατασκευών απορρόφησης ενέργειας

Ο σχεδιασμός των κατασκευών και η επιλογή των κατάλληλων υλικών θα πρέπει να ταιριάζει με τις συνθήκες υπό τις οποίες θα λειτουργήσει. Παρόλο που ο σχεδιασμός και η επιλογή θα διαφέρει ανάλογα την εφαρμογή, σε κάθε περίπτωση πρέπει η κινητική ενέργεια να διαχέεται ελεγχόμενα ή με ένα προδιαγεγραμμένο τρόπο. Επομένως, υπάρχουν ορισμένες βασικές αρχές που διέπουν τις κατασκευές αυτές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν κατευθυντήριες γραμμές [34].

Μη αντιστρεπτή μεταβολή ενέργειας

Η ενέργεια της πρόσκρουσης θα πρέπει να μπορεί να μεταβληθεί από κινητική σε ανελαστική μέσω πλαστικής παραμόρφωσης των τοιχωμάτων ή άλλη μέθοδο διάχυσης ενέργειας. Σε περίπτωση που η αρχική κινητική ενέργεια ή γενικότερα η ενέργεια λόγω δυναμικής φόρτισης, προκαλέσει ελαστική παραμόρφωση της κατασκευής, τότε μετά τη μέγιστη τιμή της και κατά την επαναφορά η ενέργεια θα μεταφερθεί σε όλη την υπόλοιπη κατασκευή και τους επιβάτες εντός. Τέτοιο παράδειγμα είναι η σύγκρουση με ένα ελατήριο οπότε κατά την επαναφορά του ελατηρίου στην αρχική θέση, το αντικείμενο της σύγκρουσης θα αποκτήσει πάλι κινητική ενέργεια.

Διάφορα είδη μη αντιστρεπτής ενέργειας μπορούν να επικρατήσουν κατά τη διαδικασία της παραμόρφωσης της κατασκευής όπως είναι η πλαστική διάχυση, ιξώδης παραμόρφωση, διαχέουσα ενέργεια λόγω τριβής ή θραύσης. Η πλαστική παραμόρφωση είναι ο επικρατέστερος μηχανισμός καθώς λειτουργεί αποτελεσματικά σε όλκιμα υλικά όπως τα μέταλλα και τα πολυμερή και έχει την πιο ευρεία εφαρμογή.



Σχήμα 2.3: Σύγκρουση αυτοκινήτου με ελαστικό ελατήριο

- (a) επιβράδυνση λόγω συμπίεσης ελατηρίου
- (b) επιτάχυνση λόγω επαναφοράς του ελατηρίου

Περιορισμένο και σταθερό φορτίο αντίδρασης

Το μέγιστο φορτίο αντίδρασης ενός συστήματος απορρόφησης ενέργειας πρέπει να διατηρείται κάτω από ένα όριο και ιδανικώς να παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης πέρα από την ελαστική περιοχή ώστε να αποφευχθεί ο μεγάλος ρυθμός ανάδρασης. Το μέγιστο όριο καθορίζεται από το επίπεδο της δύναμης που δεν θα προκαλέσει τραυματισμό των επιβατών ή καταστροφή της κατασκευής.

Όταν ο επιβάτης ενός οχήματος είναι προσδεμένος με τη ζώνη ασφαλείας, η επιτάχυνση που θα δεχτεί το σώμα του κατά τη σύγκρουση είναι σχεδόν παρόμοια με την επιβράδυνση του οχήματος. Σύμφωνα με την εξ. 1.1, ο δείκτης τραυματισμού των επιβατών (*HIC*) αποκτά την ελάχιστη τιμή του όταν δοθείς της αρχικής ταχύτητας του οχήματος, η επιτάχυνση $a(t)$ παραμένει σταθερή. Με άλλα λόγια, όταν η αντίδραση από τη σύγκρουση παραμένει σταθερή, μειώνονται οι προκαλούμενοι τραυματισμοί των επιβατών. Άρα, για το ιδανικό σύστημα απορρόφησης ενέργειας, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης είναι σχεδόν παραλληλόγραμμο με περιορισμένη μέγιστη τιμή.

Μεγάλη μετατόπιση κατασκευής (stroke)

Εκτός από την τιμή του ασκούμενου φορτίου, η κατασκευή απαιτείται να αναλυθεί ως προς τη διάχυση της κινητικής ενέργειας. Αφού καθοριστεί η αρχική κινητική ενέργεια υπολογίζεται η χρονική διάρκεια του φαινομένου. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια της πρόσκρουσης, τόσο μικρότερη είναι η τιμή της δύναμης επί της κατασκευής. Οπότε είναι θεμιτή η αύξηση της διάρκειας αυτής. Εν τέλει, όταν η δύναμη υπερिशύει για μεγαλύτερο διάστημα προκύπτει πιο ομαλή δύναμη αντίδρασης οπότε μικρότερου μεγέθους τραυματισμοί.

Βάση των ανωτέρω, ο λόγος της τελικής μετατόπισης της κατασκευής κατά την κατεύθυνση της φόρτισης (*stroke*) προς μια χαρακτηριστική διάσταση αποτελεί μια σημαντική ένδειξη της αποτελεσματικής απορρόφησης ενέργειας. Για παράδειγμα, κατά τη φόρτιση ενός σωλήνα, η τελική μετατόπιση περιορίζεται από τη διάμετρο με τρόπο ώστε όταν απαιτείται μεγάλο *stroke*, ο σχεδιαστής είτε αυξάνει τη διάμετρο του σωλήνα είτε προσθέτει επάλληλες στρώσεις. Αντιθέτως, όταν ένας σωλήνας φορτίζεται αξονικά, η αποδεκτή τελική μετατόπιση μπορεί να συγκριθεί με το ολικό μήκος της κατασκευής. Παρόλα αυτά, έχει παρατηρηθεί ότι στην περίπτωση εγκάρσιας φόρτισης γίνεται προσπάθεια ικανοποίησης της απαίτησης του *stroke*, ενώ στην περίπτωση της αξονικής ο περιορισμός της αντίδρασης φόρτισης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως η συσκευασία εύθραυστων προϊόντων, για την επιλογή του υλικού του συστήματος απορρόφησης ενέργειας ελέγχεται η λόγος του *stroke* με την διάσταση του υλικού.

Ομοιόμορφος και επαναλαμβανόμενος μηχανισμός κατάρρευσης

Τα δυναμικά φορτία που ασκούνται στην κατασκευή καθώς και το υλικό, παρουσιάζουν αρκετές φορές ανομοιομορφίες στο μέγεθος, την κατεύθυνση, την κατανομή. Ως εκ τούτου, σε αυτές τις κατασκευές πρέπει να προκαλείται ομοιόμορφη παραμόρφωση και μικρή ευαισθησία στις ατέλειες της φόρτισης.

Παραδείγματος χάριν, στα προστατευτικά της εθνικής οδού μορφής W, το αυτοκίνητο προσκρούει με διάφορες ταχύτητες και σε διαφορετικές γωνίες. Στο σχεδιασμό και δοκιμή του συστήματος λαμβάνονται υπόψη όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί παραμέτρων.

Ελαφριά κατασκευή και αυστηρά καθορισμένη χωρητικότητα

Τα εξαρτήματα ενός συστήματος απορρόφησης ενέργειας πρέπει να έχουν μικρό ίδιον βάρος, να περιέχουν συγκεκριμένο όγκο το οποίο είναι ζωτικής σημασίας για τα οχήματα (κυρίως τα αεροπλάνα) και τις συσκευές προσωπικής ασφαλείας.

Όταν ο σχεδιαστής ενός αυτοκινήτου καλείται να μετατρέψει τη μορφή του με σκοπό τη βελτίωση της συμπεριφοράς έναντι κρούσεων, πρέπει να αποφύγει την αύξηση του βάρους του οχήματος, καθώς οποιαδήποτε αύξηση συνεπάγεται μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου και μόλυνση του περιβάλλοντος.

Σημαντικός παράγοντας είναι και οι βοηθητικές προστατευτικές συσκευές. Προσπάθεια έχει καταβληθεί για τη μείωση κατά το δυνατόν του βάρους τους. Για παράδειγμα, το κράνος ενός ποδηλάτη ζυγίζει συνήθως 250-300 gr, αλλά επιθυμείται μείωση κάτω από τα 200 gr.

Από το σύνολο των διαθέσιμων υλικών για εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν αυτά που αποτελούνται από ένα βασικό υλικό (πολυμερές ή αλουμίνιο) και κυψέλες αέρα. Λόγω του πορώδους, το υλικό παραμένει ελαφρύ ενώ η αντοχή, η σκληρότητα και άλλες μηχανικές ιδιότητες μπορεί να παρουσιάζουν πλεονεκτήματα λόγω της πυκνότητας του υλικού. Δηλαδή, σε σύγκριση με το βασικό μέταλλο, η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων είναι μικρότερη από τη μείωση του βάρους. Στην περίπτωση της απορρόφησης ενέργειας κατά την παραμόρφωση του υλικού, το πορώδες είναι επιθυμητή ιδιότητα καθώς προκαλεί μεγάλο, σχεδόν σταθερό επίπεδο φορτίου.

Χαμηλό κόστος και εύκολη συναρμολόγηση

Τη σημερινή εποχή, όπου ο ανταγωνισμός είναι μεγάλος ο σχεδιασμός μιας κατασκευής ικανής να απορροφήσει ενέργεια περιορίζεται από το κόστος. Το κόστος παίζει σημαντικό ρόλο αν σκεφτούμε ότι αυτά τα συστήματα είναι μιας χρήσεως, οπότε μετά την παραμόρφωση απομακρύνονται και αντικαθίστανται.

2.4.3. Συντελεστής απόδοσης ενέργειας απορρόφησης

Έρευνες γίνονται για τα πλεονεκτήματα χρήσης και άλλων υλικών πέρα του συνήθη χάλυβα για τα συστήματα απορρόφησης ενέργειας όπως είναι τα κράματα αλουμινίου [27] και ο χάλυβας υψηλής αντοχής [46]. Παρόλα αυτά, οι συγκρίσεις ανάμεσα στα χαρακτηριστικά του συστήματος που κατασκευάζονται από διαφορετικά υλικά είναι δύσκολη επειδή πολλοί παράγοντες, όπως ο μηχανισμός κατάρρευσης, επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Άλλος εναλλακτικός παράγοντας είναι η έλλειψη πειραματικών δεδομένων για την παραμόρφωση των υλικών. Για παράδειγμα, κάποια από τα υλικά υψηλότερης αντοχής έχουν πλεονέκτημα σε σχέση με το μαλακό χάλυβα όταν φορτίζονται στατικά, αλλά κατά τη δυναμική καταπόνηση, το ποσοστό παραμόρφωσης του σκληρυνόμενου χάλυβα είναι μικρότερο από του μαλακού. Ομοίως και το φορτίο αστοχίας οπότε το πλεονέκτημα έναντι του μαλακού χάλυβα στη στατική φόρτιση, εξασθενεί σε δυναμική φόρτιση. Αντιθέτως, η χρήση υλικών μεγαλύτερης αντοχής σε σωλίνες διαφορετικής διατομής [46] δεν επέδειξε θεαματική βελτίωση.

Αρκετές παράμετροι έχουν κατά καιρούς παρουσιαστεί που εκτιμούν τα χαρακτηριστικά του συστήματος [13], [24] χωρίς όμως να περιλαμβάνουν ταυτόχρονα περισσότερες μεταβλητές του συστήματος όπως το υλικό, το σχήμα της διατομής, τη μάζα. Πρόσφατη μελέτη [19] αναφέρεται στο συντελεστή απόδοσης ενέργειας απορρόφησης ψ (*Energy absorbing effectiveness factor - EAEF*) για δυναμική και στατική καταπόνηση

κυλινδρικών λεπτότοιχων κατασκευών από κράμα αλουμινίου, ανοξείδωτο χάλυβα ή μαλακό χάλυβα.

$$\psi = \frac{\text{συνολική ελαστική και πλαστική ενέργεια}}{\text{παραμόρφωσης που απορροφά η κατασκευή}} \quad (2.1)$$

μέχρι την τάση αστοχίας

Οι διαφορετικές μορφές αυτής της αδιάστατης παραμέτρου αναλύονται από τον Norman Jones [23] όπου ελέγχεται η χρήση της ως οδηγός για τους σχεδιαστές, στην επιλογή του υλικού και της γεωμετρίας της κατασκευής.

Ύστερα από πειραματικά αποτελέσματα και παραδοχές που έγιναν [23], [22] προέκυψε η τελική μορφή της εξ. 2.1 για στατικό και δυναμικό φορτίο.

Στατικό φορτίο

$$\psi = \frac{3 P_m}{4 A \sigma_i \varepsilon_r} \quad (2.2)$$

Δυναμικό φορτίο

$$\psi' = \frac{3 G V_0^2}{8 \sigma_i' A \delta_f \varepsilon_r} \quad (2.3)$$

όπου ο όρος σ_i αποτελεί χαρακτηριστική τάση και ισούται με

$$\sigma_i = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \quad (2.4)$$

με A το εμβαδό της διατομής, ε_r την παραμόρφωση θραύσης, G τη μάζα πρόσκρουσης, v_0 την αρχική ταχύτητα πρόσκρουσης, σ_y την τάση διαρροής και σ_u το όριο θραύσης του υλικού.

Κατά την έρευνα του Jones, ελέγχθηκε ο επηρεασμός του συντελεστή απόδοσης ενέργειας απορρόφησης από τις ιδιότητες του υλικού, τη γεωμετρία της διατομής, την ύπαρξη stiffener και την ενίσχυση με αφρό. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκε ότι η κυκλική διατομή ήταν η πιο αποτελεσματική γεωμετρία, με υλικό το κράμα αλουμινίου έναντι του ανοξείδωτου χάλυβα, επειδή η μεγαλύτερη τιμή της παραμόρφωσης θραύσης του χάλυβα οδηγεί σε ανεπαρκή χρήση του υλικού, ενώ η παραμόρφωση θραύσης του αλουμινίου ήταν αποδοτική στην απορρόφηση ενέργειας του στατικού και δυναμικού φορτίου. Επίσης, οι multi-cell διατομές καθώς και οι διατομές με stiffener εμφανίζουν μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή. Είναι σημαντικό να εκτιμηθεί αν οι μεταβολές της γεωμετρίας της διατομής οδηγούν σε σημαντικές μεταβολές στη συμπεριφορά της κατασκευής κατά τη σύγκρουση. Για παράδειγμα, υπερβολική χρήση stiffeners μπορεί να προκαλέσει αστάθεια της κατασκευής αντί για σταδιακή παραμόρφωση και δημιουργία λοβών.

2.5. Μηχανισμός κατάρρευσης λεπτότοιχων κατασκευών

Για να αυξηθεί η χρησιμότητα του χάλυβα και να διατηρηθεί σε ανταγωνιστικό επίπεδο ως προς άλλα υλικά στις κατασκευαστικές εφαρμογές, κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία, απαιτείται η βαθύτερη κατανόηση του μηχανισμού κατάρρευσης των συγκολλητών λεπτότοιχων κατασκευών. Η κατανόηση της κατάρρευσης θα επεκτείνει τα υπάρχοντα μαθηματικά μοντέλα που προσεγγίζουν αυτό το φαινόμενο. Χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη είναι η επιρροή από το πλάτος των φλαντζών και το ύψος του δοκιμίου.

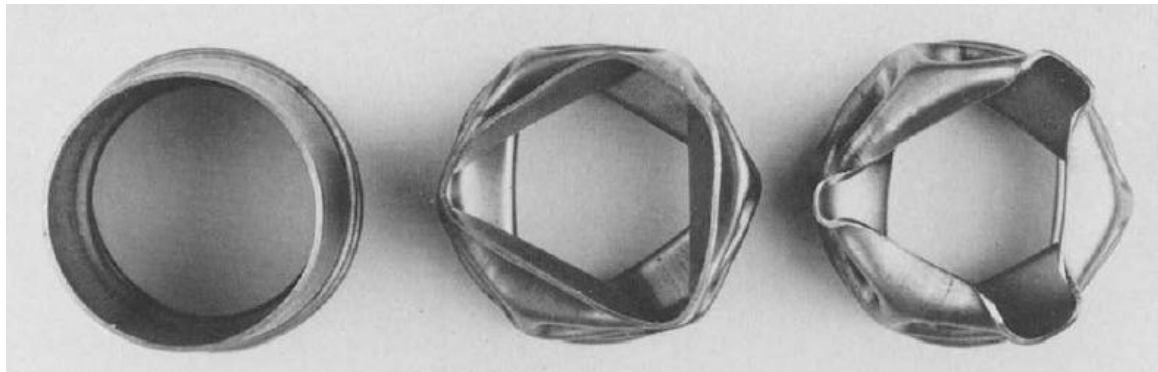
Η εξέλιξη στην τεχνολογία των οχημάτων κινητοποιείται από την ανάγκη για μείωση του βάρους των κατασκευών με αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και του κόστους παραγωγής. Το πλαίσιο του αυτοκινήτου περιλαμβάνει λεπτότοιχα μεταλλικά μέρη με top-hat διατομή. Στην περίπτωση των τετράγωνων και κυκλικών διατομών, είναι πιθανό να προκληθεί ανεπιθύμητη μορφή κατά την παραμόρφωση αν η γεωμετρία είναι λανθασμένη, με τελική κατάσταση τον λυγισμό της κατασκευής.

2.5.1. Κατάρρευση κυκλικών διατομών

Ένας λεπτότοιχος κυκλικός σωλήνας όταν φορτιστεί αξονικά με στατικό φορτίο [24] μπορεί να αποκτήσει είτε αξονοσυμμετρικούς λοβούς όπως στο σχ. 2.4, είτε μη-αξονοσυμμετρικό μοτίβο (*diamond*) όπως στο σχ. 2.5. Θεωρητικά μοντέλα προβλέπουν ότι για λόγο ακτίνας προς πάχος σωλήνα μικρότερο από 40-45 η παραμόρφωση είναι αξονοσυμμετρική, ενώ για ποιο λεπτούς σωλήνες με μεγαλύτερη τιμή του λόγου έχουμε μη-αξονοσυμμετρική παραμόρφωση.



Σχήμα 2.4: Αξονοσυμμετρική συμπίεση λεπτότοιχου κυλινδρικού σωλήνα



Σχήμα 2.5: Μορφή κατάρρευσης κυκλικών διατομών

Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις όπου κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, η παραμόρφωση μπορεί να αλλάξει μοτίβο. Τα δοκίμια του σχ. 2.6 έχουν παραμορφωθεί λόγω δυναμικής φόρτισης μέσω πίπτουσας μάζας. Σε κάθε περίπτωση ο πρώτος λοβός που σχηματίζεται είναι αξονοσυμμετρικός. Στο δοκίμιο (α) η αξονοσυμμετρική παραμόρφωση παραμένει σε όλη τη διάρκεια, στο δοκίμιο (β) εμφανίστηκαν δύο αξονοσυμμετρικοί λοβοί, ενώ στο (γ) έχουμε πλήρη μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση.



(a)

(b)

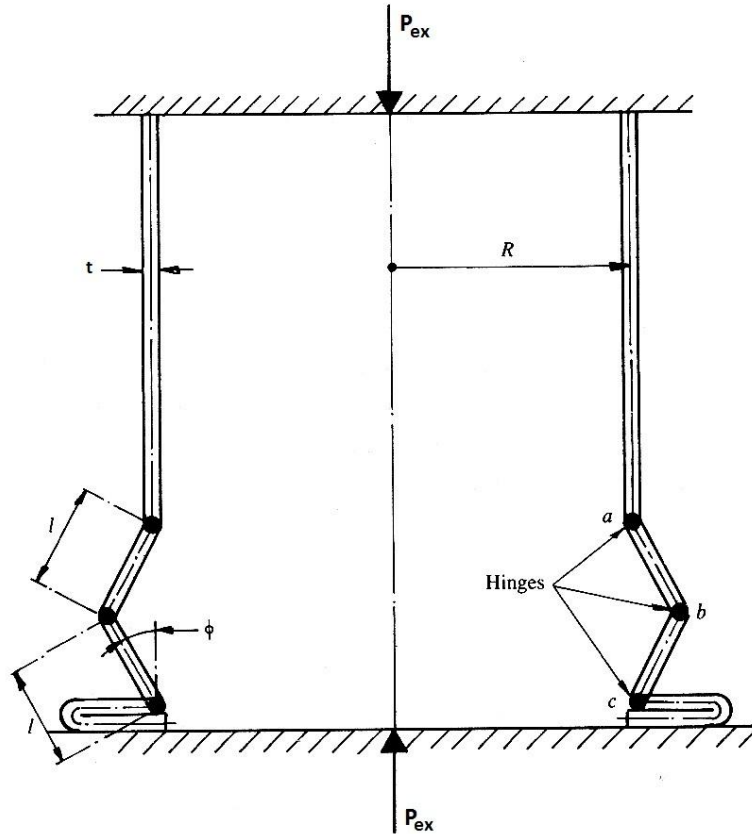
(c)

Σχήμα 2.6: Μικτή παραμόρφωση λόγω δυναμικής φόρτισης με πίπτουσα μάζα

Αξονοσυμμετρική κατάρρευση

Κατά την έρευνα του Alexander [5], ο σωλήνας θεωρείται ότι κατασκευάζεται από απαραμόρφωτο, πλήρως πλαστικό υλικό και κατά την παραμόρφωση δημιουργούνται πλαστικοί λοβοί (σχ. 2.7). Αυτό το μοντέλο αποτελεί μια εξιδανίκευση της πραγματικής συμπεριφοράς καθώς έχει αποδειχθεί ότι η μορφή των διπλωμάτων του υλικού είναι καμπύλη και όχι ευθεία γραμμή. Παρόλα αυτά, οι θεωρητικοί υπολογισμοί [1] έχουν μια βάση για σχεδιαστικούς σκοπούς και έχουν επεκταθεί για να καλύψουν διαφορετικά

χαρακτηριστικά, δίνοντας βελτιωμένα αποτελέσματα σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Επιπλέον, η ανάλυση αναπαριστά τη γενική προσέγγιση για την αντιμετώπιση της προοδευτικής δυναμικής κατάρρευσης των δοκιμίων. Εναλλακτική διατύπωση έχει αναπτυχθεί από τον Johnson [20].



Σχήμα 2.7: Μοντέλο αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης κυλινδρικού δοκιμίου

Από το μοντέλο του Alexander [5] προκύπτει το μήκος l ή l_h ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς λοβούς και το ολικό εξωτερικό φορτίο P_{ex}

$$l_h = \left(\frac{\pi t H}{\sqrt{3}} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

$$P_{ex} = \frac{2 (\pi H)^{3/2} t^{1/2} \sigma_0}{3^{1/4}} \quad (2.6)$$

όπου τα μεγέθη R , t , $l=l_h$, διακρίνονται στο σχ. 2.7.

2.5.2. Κατάρρευση τετραγωνικών διατομών

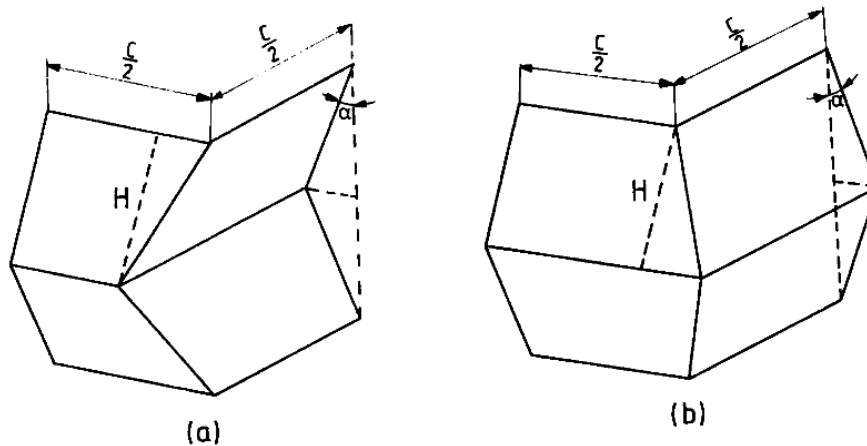
Η θεωρητική ανάλυση για τη στατική και δυναμική προοδευτική παραμόρφωση των λεπτότοιγων τετραγωνικών διατομών ακολουθεί τις βασικές αρχές της προηγούμενης θεωρίας. Η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την παραμόρφωση και ως εκ τούτου, οι λεπτομέρειες της ανάλυσης είναι πολύπλοκότερες όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από το σχ. 2.8.



Σχήμα 2.8: Αξονική συμπίεση λεπτότοιχου τετραγωνικού σωλήνα

Συμμετρική κατάρρευση

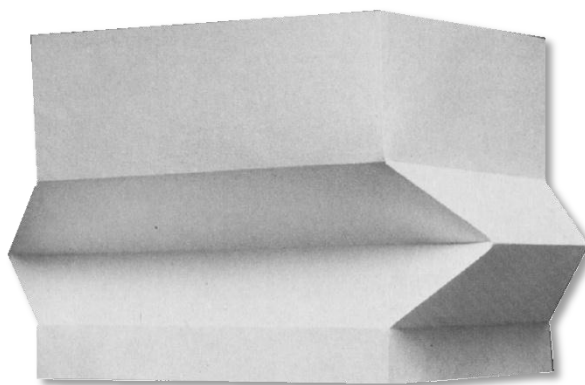
Επικρατούν δύο βασικά στοιχεία κατάρρευσης (τύπου I, II) που χρησιμοποιούνται για την εξέταση τόσο του στατικού όσο και του δυναμικού φαινομένου [2]. Τα στοιχεία έχουν μέση τιμή πλάτους C και μέσο πάχος τοιχώματος H .



Σχήμα 2.9: Βασικά στοιχεία κατάρρευσης σωλήνα τετραγωνικής διατομής

- (a) τύπου I
- (b) τύπου II

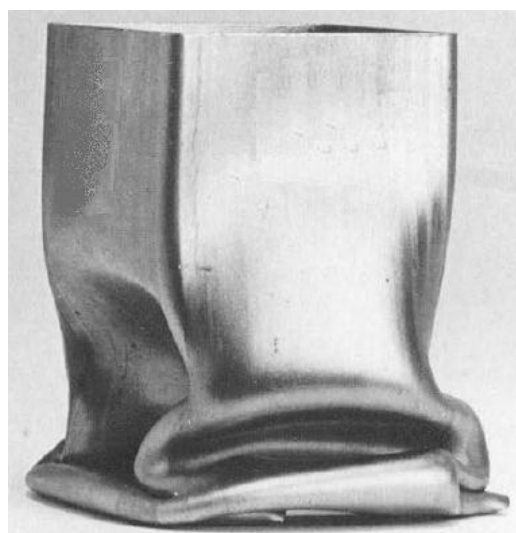
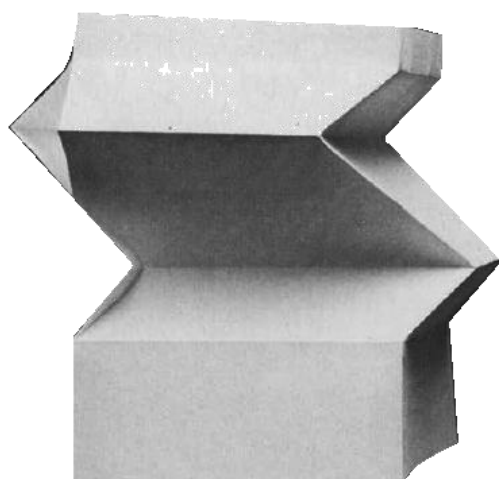
Η συμμετρική κατάρρευση που παρουσιάζεται στο σχ. 2.8 είναι αποτέλεσμα συνδυασμού 4^{ων} βασικών στοιχείων τύπου I για κάθε δίπλωμα του δοκιμίου όπως διακρίνεται στο παρακάτω χάρτινο μοντέλο.



Σχήμα 2.10: Μοντέλο συμμετρικής κατάρρευσης τετραγωνικού σωλήνα

Ασύμμετρη μεικτή κατάρρευση τύπου A

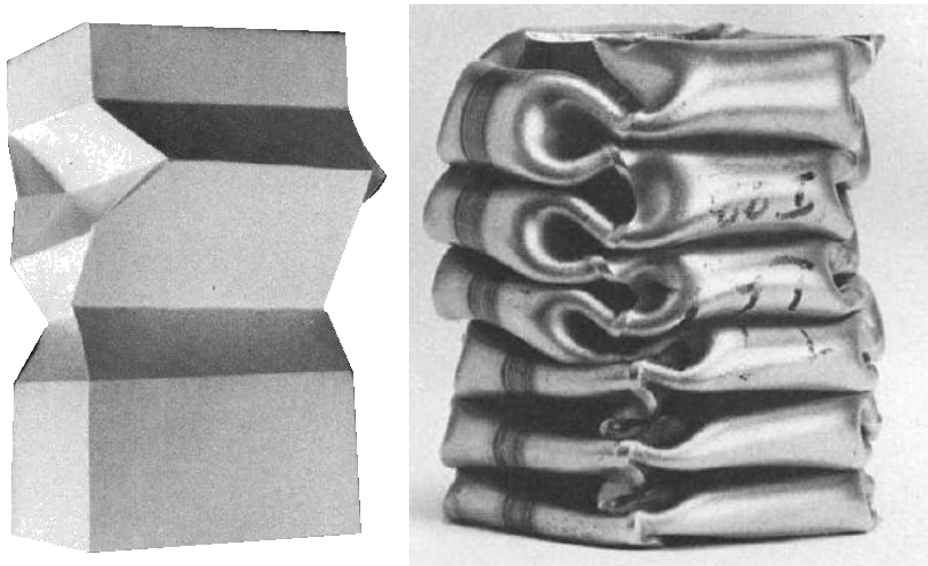
Σε αυτή την περίπτωση ο σχηματισμός του πρώτου λοβού είναι συμμετρικός, αλλά στη συνέχεια σχηματίζεται μη συμμετρικός και επαναλαμβάνεται με το ίδιο μοτίβο κατά την υπόλοιπη παραμόρφωση. Ορισμένοι λοβοί κατά τη διάρκεια της συμπίεσης μπορεί να σχηματιστούν από την αντίθετη πλευρά.



Σχήμα 2.11: Ασύμμετρη μεικτή κατάρρευση τύπου A

Ασύμμετρη μεικτή κατάρρευση τύπου B

Ιδανικώς, αποτελείται από δύο παρακείμενα επίπεδα με λοβούς που αποτελούνται από επτά βασικά στοιχεία κατάρρευσης τύπου I και ένα μόνο στοιχείο τύπου II. Αυτού του είδους η κατάρρευση υπολογίζεται ότι προκαλείται όταν $7,5 \leq C/H \leq 40,8$. Στην πραγματικότητα η διαφορά ανάμεσα στο συμμετρικό και ασύμμετρο μοντέλο τύπου B είναι τόσο μικρή, ώστε μπορεί να σχηματιστεί σε οποιοδήποτε δοκίμιο με μικρές ατέλειες.



Σχήμα 2.12: Ασύμμετρη μεικτή κατάρρευση τύπου B

Ακανόνιστη παραμόρφωση

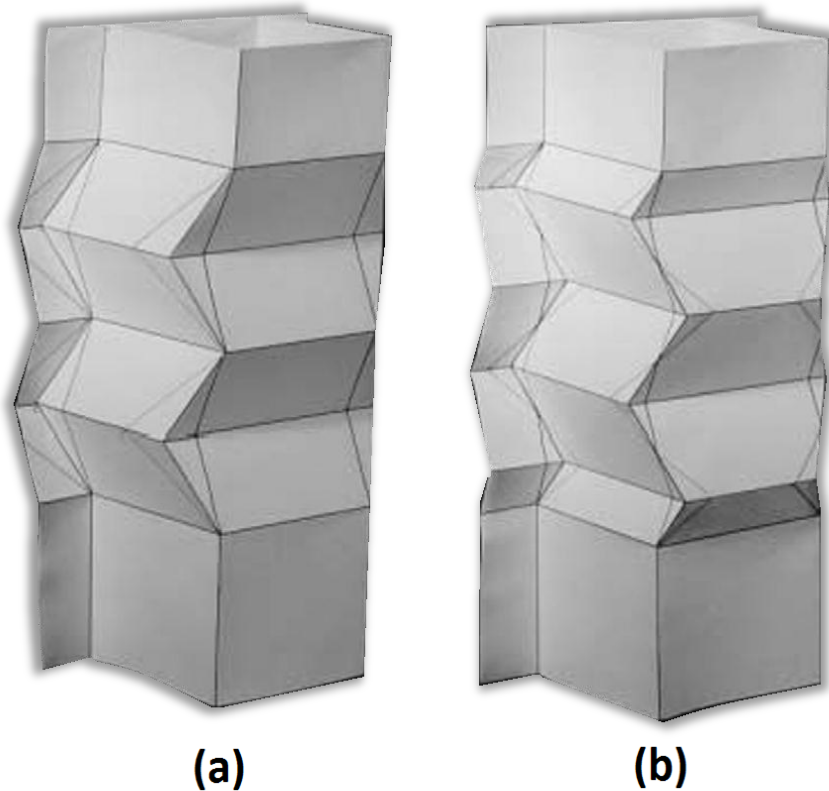
Λυγισμός των λεπτότοιχων κατασκευών τετραγωνικής διατομής μπορεί να προκληθεί από ατέλειες που παράγονται κατά τη δυναμική ασύμμετρη παραμόρφωση. Μεταβολή από προοδευτική αξονική κατάρρευση σε γενικευμένη κάμψη μπορεί να προκληθεί όταν δημιουργούνται ασύμμετροι λοβοί μονοπλεύρως του δοκιμίου. Από πειράματα προκύπτει ότι η ακανόνιστη παραμόρφωση δεν εξαρτάται από το αρχικό μήκος το δοκιμίου αλλά από την παρουσία ελαττωμάτων κατά την παραγωγή.



Σχήμα 2.13: Ακανόνιστη παραμόρφωση τετραγωνικών δοκιμίων

2.5.3. Κατάρρευση top-hat διατομών

Γενικά, στις συγκολλητές λεπτότοιχες κατασκευές, η φλάντζα θα πρέπει να έχει επαρκές πλάτος για να διευκολύνεται ο προοδευτικός σχηματισμός των λοβών. Ωστόσο, το πλάτος της φλάντζας δεν αποτελεί τη μοναδική παράμετρο. Δύο μορφές κατάρρευσης επικρατούν στις top-hat διατομές όπως φαίνονται στο σχ. 2.14. Θεωρητικά ανάμεσα στις δύο κατωτέρω μορφές υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί σχηματισμών [48].



Σχήμα 2.14: Μοντέλο κατάρρευσης top-hat διατομών

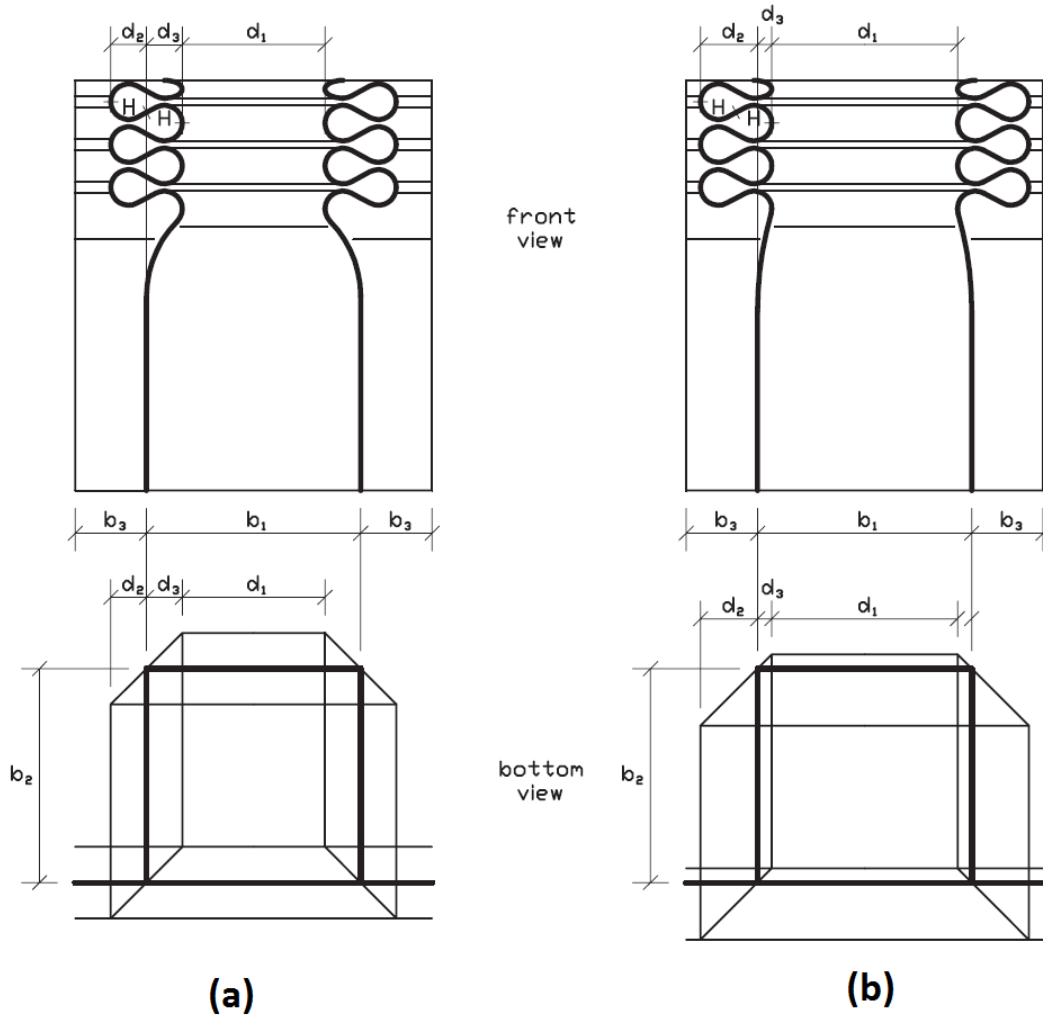
- (a) συμμετρική κατάρρευση
- (b) ασύμμετρη κατάρρευση

Συμμετρική κατάρρευση

Αντιστοιχεί στη συνήθη μορφή κατάρρευσης των τετραγωνικών διατομών όπου η τοπική κίνηση του υλικού προς τα μέσα ή προς τα έξω πραγματοποιείται ασυμμετρικά ανάμεσα στις παρακείμενες πλευρές του δοκιμίου, σε ίσα διαστήματα ως προς το αρχικό απαραμόρφωτο. Στο σχ. 2.15(α) διακρίνονται τα γεωμετρικά στοιχεία που προκύπτουν στο δοκίμιο μετά την παραμόρφωση και το σχηματισμό λοβών κατά τη συμμετρική κατάρρευση. Κατά συνέπεια, για αυτή τη μορφή ισχύει $d_2 = d_3$, ενώ και τα δύο μεγέθη συμβάλουν στο σχηματισμό του διπλώματος H του υλικού κατά το ήμισυ περίπου. Η πραγματική τιμή είναι μικρότερη από H αφού ένα τμήμα του υλικού μετέχει στην καμπυλότητα του κάθε λοβού. Υπολογίζεται ότι η τιμή του μεγέθους d_2 κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $2/3 H$ και $3/4 H$. Το πλάτος των εσωτερικών λοβών μεταξύ τους, d_1 , είναι περίπου ίσο με $b_1 - 2d_3$ και είναι εμφανώς μικρότερο από το αρχικό πλάτος b_1 .

Ασύμμετρη κατάρρευση

Η ασύμμετρη κατάρρευση χαρακτηρίζεται από μια εμφανώς μεγαλύτερη κίνηση προς τα έξω των πλαϊνών τοιχωμάτων του δοκιμίου, δηλαδή $d_2 > d_3$. Η μετακίνηση των εσωτερικών λοβών προς το εσωτερικό του δοκιμίου, d_3 , είναι ελάχιστη όπως φαίνεται το σχ. 2.15(β).

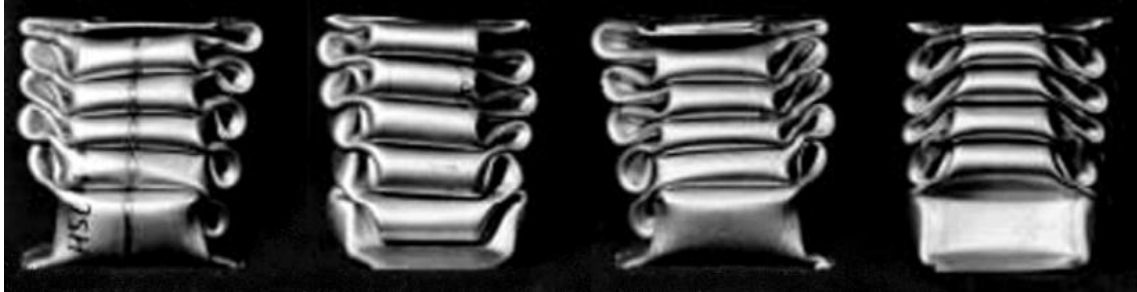


Σχήμα 2.15: Σχηματική αναπαράσταση κατάρρευσης top-hat διατομών

- (a) συμμετρική κατάρρευση
- (b) ασύμμετρη κατάρρευση

Για τη θεωρητική ανάλυση της συμμετρικής κατάρρευσης top-hat διατομής απαιτείται η χρήση 4^{ov} βασικών στοιχείων τύπου I γωνίας 90° , όμως στην πλειοψηφία των πειραμάτων επικρατεί το μοντέλο ασύμμετρης παραμόρφωσης. Μια εξήγηση ίσως είναι οι οριακές συνθήκες που επιβάλλονται για την παραμόρφωση δοκιμίων με συγκόλληση της φλάντζας. Άλλη εξήγηση μπορεί να είναι η πολύ μικρή καμπυλότητα του δοκιμίου στις γωνίες, ειδικά για σκληρυνόμενα υλικά, όπου το υλικό στις γωνίες έχει προένταση και το πάχος του ελάσματος είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις υπόλοιπες επιφάνειες.

Έχει παρατηρηθεί [48] ότι κατά τη διαδικασία της συμπίεσης δεν πραγματοποιείται μετάβαση από το ένα στο άλλο είδος κατάρρευσης. Η αρχική παραμόρφωση συνήθως αναπαράγεται σταθερά και στα επόμενα επίπεδα κατά τη σταδιακή παραμόρφωση, ενώ υπάρχουν εξαιρέσεις προοδευτικής μετατόπισης των λοβών ανά επίπεδο σχηματισμού. Αυτό οδηγεί σε αλλαγή του μοτίβου παραμόρφωσης από το αναμενόμενο.



Σχήμα 2.16: Προοδευτική μετατόπιση λοβών ανά επίπεδο σχηματισμού

Άλλες μορφές κατάρρευσης

Οι top-hat διατομές πολλές φορές εμφανίζουν ίδια μορφή κατάρρευσης όπως και οι τετραγωνικές διατομές [2], [1].

- Κάμψη τύπου Euler, όπου ορισμένοι ‘κανονικοί’ λοβοί σχηματίζονται από τη μια μόνο πλευρά του δοκιμίου προκαλώντας κατάρρευση της άλλης πλευράς και τελικώς ολική κάμψη. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται αποκλειστικά σε δοκίμια με μεγάλο ύψος [59].
- Ακανόνιστη σταδιακή κατάρρευση, προκαλούμενη σε δοκίμια μικρού ύψους. Η κατάρρευση γίνεται και από τις δύο πλευρές, και οι ανωμαλίες προκύπτουν στο επίπεδο ανάμεσα στους λοβούς που σχηματίζονται από το κάτω ως το πάνω μέρος. Υπάρχει περίπτωση κατά την έναρξη της παραμόρφωσης να έχουμε φυσιολογική μορφή αλλά στη συνέχεια να μετατραπεί σε ακανόνιστη. Η κατασκευή μπορεί να επηρεαστεί από την ασύμμετρη θέση των σημειακών συγκολλήσεων.



Σχήμα 2.17: Ακανόνιστη σταδιακή κατάρρευση top-hat διατομής

2.5.4. Κατάρρευση double-hat διατομών

Μερικές από τις μορφές που παρατηρούνται [59] κατά την κατάρρευση των double-hat διατομών εξετάζονται ακολούθως.

Κατάρρευση τύπου I

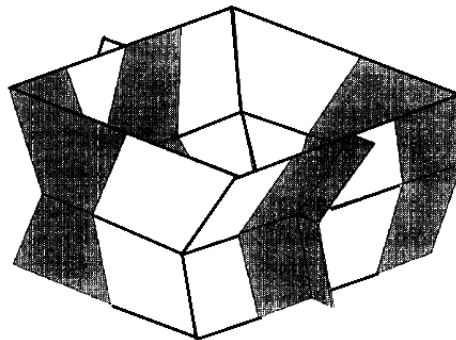
Η κίνηση του υλικού της φλάντζας είναι καθοριστικής σημασίας. Αντί η φλάντζα να υπόκειται σε παραμόρφωση και αναδίπλωση κατά μήκος του δοκιμίου, στην πραγματικότητα το υλικό κάμπτεται στο επίπεδο της φλάντζας. Το δοκίμιο εμφανίζεται με βαρελοειδή μορφή που ίσως να προκαλεί εσωτερική κίνηση κάθε αναδίπλωσης. Κυρίως εμφανίζεται για δοκίμια με μικρό πλάτος φλάντζας.



Σχήμα 2.18: Μορφή κατάρρευσης τύπου I double-hat διατομής

Κατάρρευση τύπου II

Το δοκίμιο παρουσιάζει κανονικό, ομοιόμορφα κατανεμημένο προφίλ. Το μοντέλο κατάρρευσης αποτελείται από 4 βασικά στοιχεία, όπως του σχ. 2.17, που δημιουργούν δύο ακλόνητα άκρα και είναι ασυμμετρικά, ενώ τα στοιχεία της φλάντζας αναδιπλώνονται και επιτρέπουν την παραμόρφωση του δοκιμίου.



Σχήμα 2.19: Βασικό στοιχείο κατάρρευσης double-hat διατομής

Κατάρρευση τύπου III

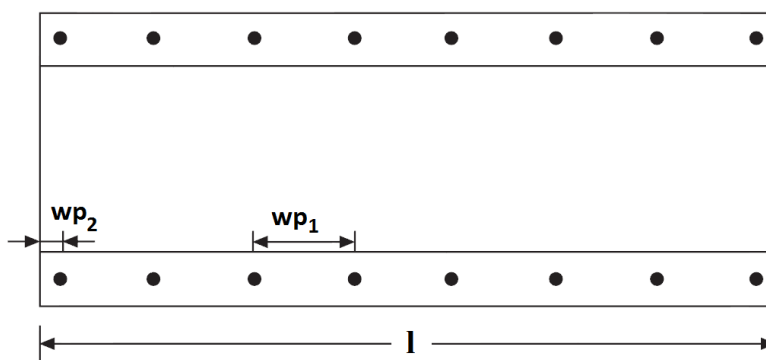
Προκύπτει λιγότερο φυσιολογικό προφίλ από το αντίστοιχο τύπου II, καθώς και συνολική κάμψη του δοκιμίου αντίστοιχα με την κάμψη τύπου Euler των top-hat διατομών. Προκαλείται κατά τη μεταφορά του δοκιμίου από συμμετρική μορφή κατάρρευσης σε λιγότερο σταθερή [24].

2.6. Σημειακές συγκολλήσεις κατασκευών

2.6.1. Εισαγωγή

Οι κατασκευές με σημειακές συγκολλήσεις (*spot welds*) χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξαρτήματα σχετικά μικρού μεγέθους στη βιομηχανία αυτοκινήτων για την κατασκευή του αμαξώματος. Ωστόσο, λόγω της φορητότητας και του χαμηλού κόστους υπάρχουν προσδοκίες και για τη χρήση και σε άλλους μηχανολογικούς τομείς. Μεγάλο πλεονέκτημα των σημειακών συγκολλήσεων έναντι των άλλων μεθόδων συγκόλλησης είναι ότι δεν απαιτείται ιδιαίτερη ικανότητα από τον χειριστή. Αυτό το πλεονέκτημα είναι σημαντικό όταν χρησιμοποιούνται λεπτά ελάσματα. Με την πρόοδο των μηχανών συγκόλλησης και της χωρητικότητας αυτών, η αξιοποίηση αναμένεται να εξαπλωθεί.

Η κατανομή των συγκολλήσεων παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά της κατασκευής κατά την παραμόρφωση. Όλες θα πρέπει να βρίσκονται στην ίδια ευθεία, διατηρώντας σταθερό βήμα συγκόλλησης και τοποθέτηση στο μέσο της κάθε φλάντζας.



Σχήμα 2.20: Κατανομή συγκολλήσεων σε δοκίμιο top-hat διατομής

Σημαντικό είναι να εξασφαλίζει ο συγκολλητής ότι η ποιότητα των κολλήσεων είναι μεν η καλύτερη δυνατή, αλλά η αντοχή τους δεν διαφέρει αισθητά ανάμεσά τους. Αν δεν μπορεί να εξασφαλισθεί αυτή η απαίτηση, θα πρέπει να υπερδιαστασιολογηθεί ο αριθμός των συγκολλήσεων χωρίς ωστόσο να εξασφαλίζεται πάντα η ομοιομορφία και η ασφάλεια.

Επηρεασμός top και double-hat δοκιμίων από την αλλαγή βήματος

Από προηγούμενες μελέτες [10] έχουν παρατηρηθεί τα ακόλουθα:

- Με την αύξηση του βήματος συγκόλλησης στις double-hat διατομές, παρουσιάστηκε μεγαλύτερος ρυθμός μείωσης του μέσου φορτίου κατάρρευσης από τις top-hat.
- Τα χαρακτηριστικά της κατάρρευσης επηρεάστηκαν από το μέγεθος μεταβολής του βήματος συγκόλλησης και για τα δύο δοκίμια. Στην περίπτωση των top-hat, η μεταβολή δεν ήταν μεγάλη επειδή η γραμμή συγκόλλησης απέχει από την κεντρική γραμμή φόρτισης.
- Για τις double-hat διατομές, η αντοχή ανάμεσα στη φλάντζα και την ανοιχτή τετραγωνική δίοδο αυξήθηκε θεαματικά από το βήμα επειδή η γραμμή συγκόλλησης βρίσκεται στο ενεργό τμήμα της φόρτισης. Γι' αυτό το λόγο, ενώ οι top-hat διατομές παραμορφώνονται διαδοχικά, οι double-hat δεν παρουσιάζουν αναμενόμενη κατάρρευση.

2.6.2. Ποιοτικός έλεγχος

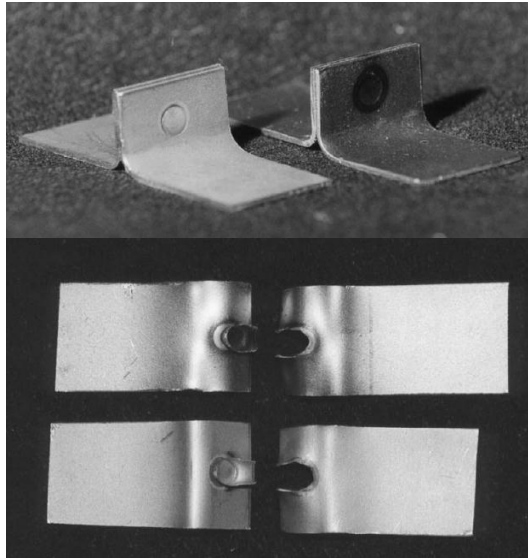
Πιθανά ελαττώματα κάθε είδους στις συγκολλήσεις μπορεί να προκαλέσουν αστοχία όλης της κατασκευής. Γι' αυτό είναι σημαντική η κατανόηση των παραμέτρων της διαδικασίας συγκόλλησης όπως εξετάζονται παρακάτω [41].

- Θέση συγκολλήσεων: Δεν πρέπει να τοποθετούνται κοντά στο άκρο του ελάσματος γιατί αυξάνεται ο κίνδυνος αστοχίας.
- Βήμα συγκολλήσεων: Αποφεύγεται η συγκόλληση σε κοντινή απόσταση από άλλη, πρώτον επειδή τμήμα του ρεύματος διέρχεται από την αρχική συγκόλληση μειώνοντας την ένταση του ρεύματος και δεύτερον επειδή μπορεί να προκληθεί ομαδική αστοχία σαν σύνολο των κοντινών συγκολλήσεων.
- Δύναμη σύσφιξης: Μικρή δύναμη σύσφιξης των ελασμάτων μεταξύ τους προκαλεί μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση από την επιθυμητή που οδηγεί σε spattering.
- Σχήμα ηλεκτροδίων: Η επιφάνεια επαφής των ηλεκτροδίων έχει επίπεδο ή σφαιρικό σχήμα.

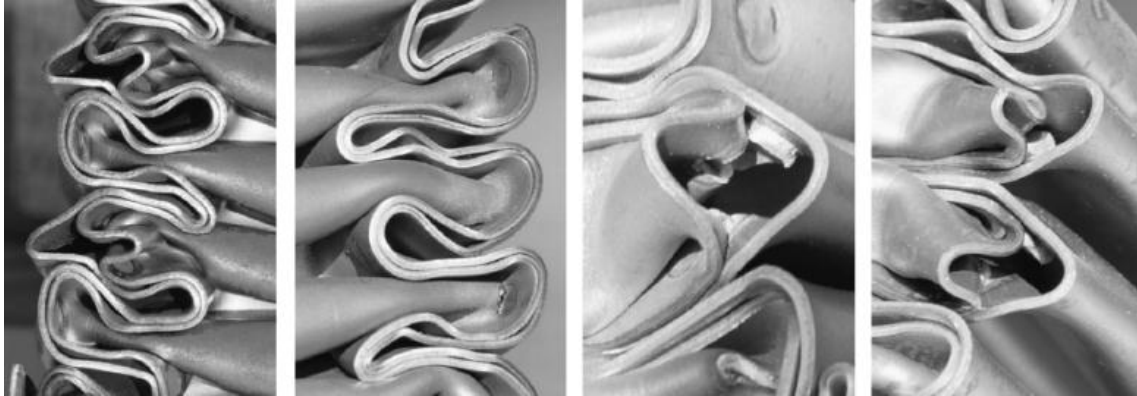
2.6.3. Αστοχία συγκολλήσεων

Η μερική ή ολική αστοχία των σημειακών συγκολλήσεων κατά την αξονική φόρτιση δοκιμίων μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στην ενέργεια απορρόφησης, το μηχανισμό κατάρρευσης ή το μέσο φορτίο σύγκρουσης. Μάλιστα έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές στην απόδοση της κατασκευής ανάλογα το υλικό [46]. Η ενέργεια απορρόφησης δεν σχετίζεται γραμμικά με την αντοχή του υλικού.

Αποτελεί συχνό φαινόμενο, να προκαλείται αστοχία της κατασκευής όχι λόγω διαχωρισμού του υλικού στο σημείο της συγκόλλησης αλλά του υλικού γύρω από τη συγκόλληση [47]. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα δεν αποκολλείται πλήρως το υλικό, αλλά μερικώς και διατηρείται. Επίσης, μπορεί η ρωγμή να ξεκινήσει στην περιοχή γύρω από τη συγκόλληση αλλά προοδευτικά να μεταφερθεί πέρα από τη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, προς το βασικό υλικό ρωγμή κατά μήκος ή εγκάρσια της φλάντζας.



Σχήμα 2.21: Δοκιμή αποκόλλησης συγκολλητών μετάλλων (*peel test*)



Σχήμα 2.22: Μερική και ολική αποκόλληση υλικού γύρω από τη συγκόλληση

3. ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΑΦΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ

3.1. Εισαγωγή

Η χρήση πολυμερούς αφρού παρουσιάζει ταχεία εξέλιξη και εφαρμογή στις σύγχρονες βιομηχανίες. Διαφορετικοί λόγοι όπως το χαμηλό βάρος, η εξαιρετική αναλογία αντοχής – βάρους, η χρήση ως μονωτικό υλικό, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, κραδασμών, ήχου συμβάλλουν σε αυτή την εξάπλωση. Οι αφροί μπορούν να παραχθούν από μεγάλο πλήθος πολυμερών καθώς απαιτείται μόνο η ενεργοποίησή τους από ένα διογκωτικό μέσο.

Οι πολυμερείς αφροί παράγονται σε μεγάλο εύρος πυκνοτήτων από $1,5 \text{ kg/m}^3$ και ξεπερνούν τα 960 kg/m^3 . Επειδή η μηχανική αντοχή του αφρού γενικά εξαρτάται από την πυκνότητά του, οι αφροί επιλέγονται με βάση την πυκνότητα και ανάλογα την εφαρμογή τους. Ωστόσο, οι αφροί που χρησιμοποιούνται για συστήματα απορρόφησης ενέργειας απαιτούν υψηλή πυκνότητα ενώ οι αφροί χαμηλής πυκνότητας χρησιμοποιούνται κυρίως για θερμική μόνωση. Οι μαλακοί εύκαμπτοι αφροί μικρής πυκνότητας περίπου 30 kg/m^3 χρησιμοποιούνται σε έπιπλα, καθίσματα οχημάτων.

Λόγω της ικανότητας των πολυμερών αφρών να παραμορφώνονται πλαστικά σε χαμηλές τάσεις, χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα απορρόφησης ενέργειας. Για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας και τη βελτίωση της κατασκευής απαιτείται λεπτομερή γνώση της μηχανικής παραμόρφωσης τέτοιων υλικών. Ο τρόπος διάδοσης του τασικού κύματος στο υλικό, η περιοχή έναρξης της πλαστικής παραμόρφωσης, η ταχύτητα πρόσκρουσης για την οποία η κατασκευή απορροφά την περισσότερη ενέργεια είναι σημαντικοί παράμετροι στη μελέτη των δυνατοτήτων των αφρών.

Η αφροποίηση του πολυμερούς μπορεί να προκληθεί μηχανικά, χημικά ή με φυσικές μεθόδους. Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι παραγωγής είναι [25]:

- Θερμική αποσύνθεση του διογκωτικού μέσου ενεργοποιούμενο από άζωτο ή διοξείδιο του άνθρακα, με την πρόσδοση θερμότητας ή μέσω εξώθερμης αντίδρασης.
- Μηχανική ανάδευση του αερίου (*frothing*) σε σύστημα πολυμερούς με σκοπό τη σκλήρυνση μέσω καταλύτη ή θερμότητα εμποδίζοντας τον εγκλωβισμό των φυσαλίδων.
- Εξαέρωση υγρού χαμηλού σημείου βρασμού (π.χ. *fluorocarbon*, *methylene chloride*) εντός του πολυμερούς με πρόσδοση θερμότητας.
- Εξαέρωση μέσω εξώθερμης αντίδρασης αερίου που παράγεται από πολυμερισμό, όπως για παράδειγμα η αντίδραση ισοκυανάτης με νερό για το σχηματισμό διοξειδίου του άνθρακα.

- Αποτόνωση αερίου διαλυμένου σε πολυμερές κατόπιν μείωσης της πίεσης του συστήματος.
- Ενσωμάτωση μικρο-φουσαλίδων στη μάζα του πολυμερούς. Οι μικρο-φουσαλίδες μπορεί να περιέχουν κοιλότητες με γυαλί ή πλαστικό.

Βέβαια, ο πολυμερής αφρός παρουσιάζει και ορισμένα αρνητικά χαρακτηριστικά με βασικότερο την ανάφλεξη και την ανάπτυξη καπνού. Ορισμένοι μέθοδοι περιορισμού του προβλήματος είναι:

- Η χρήση προσθετικών όπως φωσφόρου, αλογόνου, αζώτου και συνδυαστικών ουσιών.
- Ενσωμάτωση επιβραδυντών ανάφλεξης που δρουν σε συνδυασμό με άλλα συστατικά του αφρού.
- Μετατροπή της βασικής πολυμερής δομής με ενσωμάτωση στοιχείων αντίστασης σε υψηλές θερμοκρασίες όπως isocyanurates, cyclic imides.

3.2. Δομή αφρού

Οι περισσότεροι αφροί σχηματίζονται ύστερα από διαδικασία που προκαλεί ανάπτυξη φουσαλίδων στο πολυμερές υλικό (*nucleation and growth*). Κατά την ανάπτυξη των φουσαλίδων η δομή του υλικού μεταβάλλεται στα εξής στάδια [12]:

- Αρχικά, ενεργοποιείται μικρή διασπορά σφαιρικών φουσαλίδων σε μήτρα υγρής φάσης προκαλώντας ταυτόχρονα μικρή μείωση της πυκνότητας.
- Ενώ οι φουσαλίδες αναπτύσσονται αλλά παραμένουν σφαιρικές, ο αφρός έχει αποκτήσει την ελάχιστη δυνατή πυκνότητα όταν πληρωθεί όλος ο χώρος της μήτρας.
- Επιπλέον ανάπτυξη φουσαλίδων προκαλεί παραμόρφωση των κυψελίδων (*cells*) και σχηματισμό πολύεδρων δομών, οι οποίες ιδανικώς θα λάβουν σχήμα δωδεκάεδρου.
- Το ιξώδες και ακολούθως η αντίσταση από τα τοιχώματα προκαλούν ροή του υλικού και αλληλεπίδραση των κυψελίδων μεταξύ τους σχηματίζοντας κόμβους με αιχμές.
- ένα τελευταίο στάδιο μπορεί να είναι η θραύση των τοιχωμάτων δημιουργώντας αφρό ανοιχτών κυψελίδων.

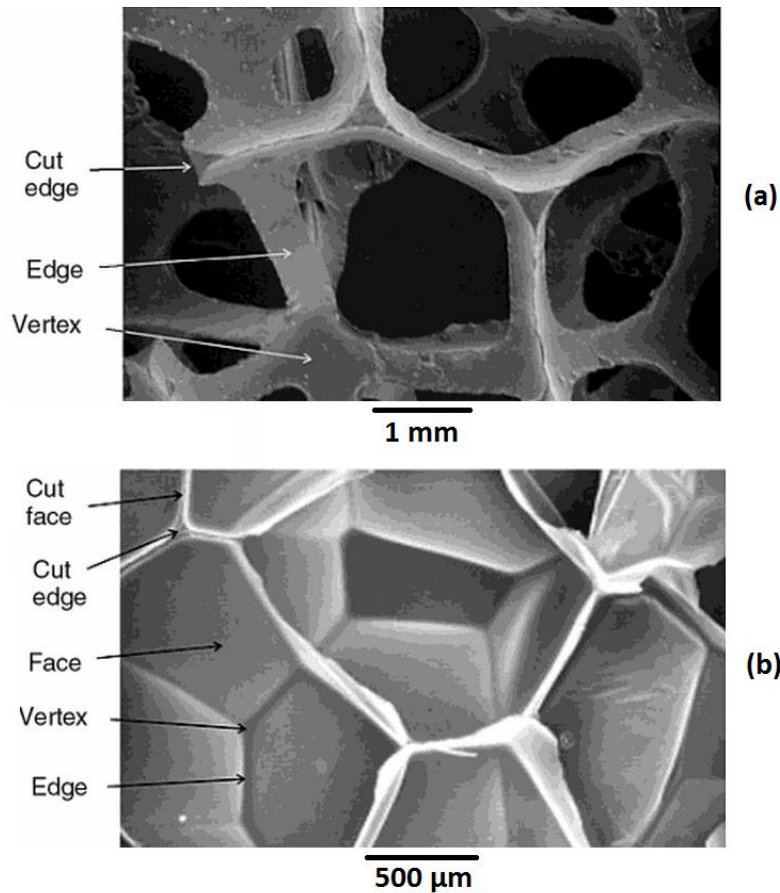
Τα συνήθη μεγέθη που αποτελούν χαρακτηριστικά ενός πολυμερούς αφρού είναι

- η πυκνότητα μετρούμενη σε kg/m^3 ή σε σύγκριση με τον αρχικό όγκο του πολυμερούς
- το μέγεθος των κυψελίδων, το οποίο μετριέται απευθείας με μικροσκόπιο. Στην πραγματικότητα ο αφρός αποτελείται από κυψελίδες διαφορετικού μεγέθους γι' αυτό προσδιορίζονται από ένα μέσο όρο ή από εύρος τιμών

- ο λόγος ανοικτών προς κλειστές κυψελίδες που μπορεί για παράδειγμα να καθοριστεί από την απορροφητικότητα του νερού. Αποτελεί σημαντικό μέγεθος ιδίως στους αφρούς χαμηλής πυκνότητας
- το σχήμα των κυψελίδων που μπορεί να καθορίσει την ικανότητα του αέρα να διαπερνά τον αφρό.

3.3. Ανοιχτές και κλειστές κυψελίδες

Σε ένα scanning electron μικροσκόπιο (SEM) μπορεί να παρατηρηθεί η μικρο-δομή του αφρού κλειστών ή ανοικτών κυψελίδων [40].



Σχήμα 3.1: Φωτογραφία κυψελίδων αφρού από scanning electron microscope

- (a) ανοικτές κυψελίδες πολυουρεθανικού αφρού
- (b) κλειστές κυψελίδες πολυαιθυλενικού αφρού χαμηλής πυκνότητας (LDPE)

Ανοιχτές κυψελίδες

Ο αέρας διέρχεται ελεύθερα ανάμεσα στις ανοικτές κυψελίδες του πολυμερούς. Επίσης, παρουσιάζουν μεγαλύτερη απορροφητικότητα νερού και υγρασίας, χειρότερη απόδοση σε μόνωση από θερμότητα ή ηλεκτρισμό και καλύτερη απορρόφηση ήχου.

Κλειστές κυψελίδες

Σε μια τυπική μορφή θερμοπλαστικού αφρού κλειστών κυψελίδων, αυτές περικλείονται από κλειστές συνδεδεμένες μεταξύ τους επιφάνειες. Οι κυψελίδες θερμοπλαστικού παρόλο που έχουν μεγαλύτερο πάχος και αντοχή σε σχέση με τις αντίστοιχες πολυουρεθάνης, ωστόσο ορισμένες φορές μπορεί να χωριστούν ή να καταστραφούν .

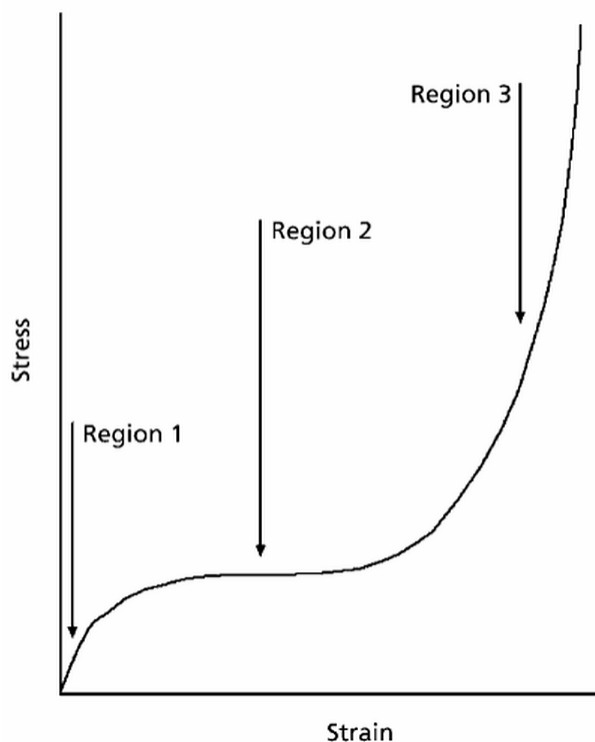
3.4. Ιδιότητες αφρού

3.4.1. Παραμόρφωση

Η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων του πολυμερούς αφρού χωρίζεται σε τρεις βασικές περιοχές [12]:

- γραμμική συμπεριφορά
- ζώνη κατάρρευσης
- ζώνη αύξησης πυκνότητας (*densification*)

Η γραμμική ελαστική συμπεριφορά προσδιορίζεται από την κάμψη των τοιχωμάτων των φυσαλίδων ενώ στις κλειστές κυψελίδες από την έκταση των τοιχωμάτων λόγω της περιεχόμενης πίεσης αερίου. Στη ζώνη κατάρρευσης, οι κυψελίδες καταρρέουν λόγω λυγισμού των τοιχωμάτων ή θραύση ύστερα από πρόσκρουση μεταξύ τους [8].



Σχήμα 3.2: Τυπικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων πολυμερούς αφρού

Όσο προχωράει η συμπίεση, αυξάνεται η τάση λόγω densification και τείνει ασυμπτωτικά σε ένα όριο. Αυτό το όριο είναι χαμηλότερο από το σημείο όπου όλο το πορώδες έχει εξαλειφτεί και τα τοιχώματα των κυψελών έχουν ταυτιστεί.

3.4.2. Απορρόφηση ενέργειας

Αρκετές εφαρμογές των αφρών κάνουν χρήση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας, που παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά από τα στερεά πολυμερή που παρασκευάζονται. Αυτό προκύπτει από την ικανότητα των αφρών να διατηρούν το μέγιστο φορτίο κάτω από το όριο αστοχίας του περιβάλλοντος υλικού ενώ ταυτόχρονα απορροφούν την ενέργεια πρόσκρουσης κυρίως στη ζώνη κατάρρευσης της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων.

Σε ελαστομερικούς αφρούς όπως είναι ο εύκαμπτος πολουρεθανικός αφρός, η τάση στη ζώνη κατάρρευσης καθορίζεται από την ελαστική παραμόρφωση των κυψελίδων οπότε μεγάλη ποσότητα εξωτερικού φορτίου αποθηκεύεται κατά τη σύγκρουση και αποδεσμεύεται μετά [26]. Στους πλαστικούς αφρούς η ενέργεια αποθηκεύεται μέσω πλαστικής ροής των κυψελών ενώ στους εύθραυστους μέσω κατάρρευσης των κυψελίδων. Στον αφρό πολυαιθυλενίου κλειστών κυψελίδων, η απορρόφηση γίνεται μέσω πλαστικής παραμόρφωσης. Παρόλο που δεν γίνεται άμεση επαναφορά μετά τη σύγκρουση, τέτοιοι αφροί προκαλούν σημαντική επαναφορά σε βάθος χρόνου λόγω της παραμένουσας πίεσης αερίου στο εσωτερικό. Έτσι, έχουν καλή συμπεριφορά σε πολλαπλές συγκρούσεις και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αποθήκευσης προϊόντων για προστασία από κραδασμούς και δονήσεις (package cushioning).

3.4.3. Θερμικές ιδιότητες

Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα των πολυμερών αφρών είναι μια βασική ιδιότητα στη μόνωση κτιρίων και κατασκευών, μεταφορικών μέσων (φορτηγά με ψυγείο, πετρελαιοφόρα). Η θερμική αγωγιμότητα των αφρών περιλαμβάνει: μεταφορά της θερμότητας μέσω του στερεού πολυμερούς, του αερίου ή των κυψελίδων και ακτινοβολία μέσω των τοιχωμάτων των κυψελίδων και των διακένων. Η διάδοση της θερμότητας είναι σημαντική μόνο για αφρούς με μεγάλου μεγέθους κυψελίδες (πάνω από 10mm) όταν οι εμπορικοί αφροί έχουν μέγεθος 0,1-2mm. Καλύτερη απόδοση παρουσιάζει η αγωγιμότητα μέσω του αερίου.

Η επιρροή του μεγέθους των κυψελίδων στη θερμική αγωγιμότητα για διάμετρο μέχρι 2mm είναι σχετικά μικρή, αλλά η τάση είναι για τη μείωση της αγωγιμότητας να μειώνεται το μέγεθος των κυψελίδων. Αυτό οφείλεται στη μείωση της ακτινοβολίας λόγω εσωτερικών προσκρούσεων στα τοιχώματα. Μικρή βελτίωση της αγωγιμότητας μπορεί να επιτευχθεί με τη μετατροπή των τοιχωμάτων για την αύξηση της ανακλαστικότητας.

Άλλες θερμικές ιδιότητες

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του αφρού είναι συνήθως ίδιος με αυτόν του πολυμερούς με τιμή περίπου $10^{-4}/K$. Ωστόσο, στις περιπτώσεις κλειστών κυψελίδων χαμηλής πυκνότητας τείνουν να έχουν μεγαλύτερη τιμή λόγω της ασκούμενης εσωτερικής πίεσης που προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας. Αρχικά ο αφρός διαστέλλεται, αλλά ακολουθεί μείωση του όγκου λόγω της διάχυσης του αερίου. Αν η θερμοκρασία αυξηθεί αισθητά, υπάρχει περίπτωση ο όγκος του αφρού να μειωθεί κάτω από τον αρχικό.

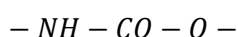
3.5. Εφαρμογές και χρήση

Τα τελευταία 25 χρόνια η χρήση πολυμερούς αφρού έχει αυξηθεί ραγδαία. Η αύξηση της ογκομετρικής κατανάλωσης των αφρών έχει ξεπεράσει την αντίστοιχη των πολυμερών, παρόλο που υπόκειται σε πιο αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς [28].

Η χρήση αφρών άρχισε να ανθίζει τη δεκαετία του '70, με την κατασκευή συστημάτων αποθήκευσης προϊόντων. Ύστερα, πολλές εφαρμογές εμφανίστηκαν στον κατασκευαστικό τομέα, στη βιομηχανία αυτοκινήτων, στα ηλεκτρονικά, στις ιατρικές συσκευές. Αργότερα, ανακαλύφθηκε ότι ο μικροκυτταρικός αφρός ενίσχυε το λόγο ιδιοτήτων προς το βάρος του και συνείσφερε στον επαναπροσδιορισμό των θερμοπλαστικών υλικών γενικότερα.

3.6. Αφρός πολυουρεθάνης (PU)

Ο όρος 'πολυουρεθάνη' καλύπτει ένα μεγάλο εύρος υλικών που παράγονται από αντίδραση ισοκυανάτων (*isocyanates*) με ουσίες (*πολυόλες - polyols*) που περιέχουν τουλάχιστον δύο ομάδες υδροξυλίου. Η κύρια χημική ρίζα που προκύπτει από αυτή την αντίδραση είναι η ουρεθανική ομάδα



Σχετικά μικρή ομάδα ισοκυανάτων και μεγάλο εύρος από πολυόλες διαφορετικού μοριακού βάρους και ιδιοτήτων χρησιμοποιούνται για την παρασκευή όλου του φάσματος πολυουρεθανικών υλικών. Αντίστοιχα, διάφορες χημικές αντιδράσεις ισοκυανάτων χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή και επέκταση του εύρους των πολυμερών υλικών. Η χημική πολυμερική αντίδραση μπορεί να ενισχυθεί από καταλύτες, επιτρέποντας μεγαλύτερη και ταχύτερη παραγωγή.

Άλλες ομάδες που μπορεί να σχηματιστούν είναι urea, amide, biuret, allophanate, ether, ester linkages, ανάλογα τις συνθήκες αντίδρασης και τον εκάστοτε καταλύτη που θα χρησιμοποιηθεί. Ως εκ τούτου, ο όρος 'πολυουρεθάνη' είναι πολύ γενικός και καλύπτει υλικά με διαφορετικές ιδιότητες [12].

Σε αντίθεση με τους εύκαμπτους PU αφρούς όπου περιέχουν ανοικτές κυψελίδες, οι σκληροί αφροί έχουν κατά πλειοψηφία κλειστές κυψελίδες. Αναπτύσσονται με τη βοήθεια

φυσικού διογκωτικού μέσου που διατηρείται εντός των κλειστών κυψελίδων και παρουσιάζουν μεγάλη επίδραση σε ορισμένες ιδιότητες του αφρού, κυρίως στη θερμική μόνωση.

Σημαντικό πλεονέκτημα των PU αφρών έναντι άλλων πλαστικών υλικών είναι η δυνατότητα που δίνουν για μεταβολή και έλεγχο ακόμα και κατά τη διάρκεια της παραγωγής του, αφού για την παραγωγή τους χρησιμοποιούνται συσκευές που αναμιγνύουν τα συστατικά και αντιδρούν παρασκευάζοντας το πολυμερές. Αλλαγές στη χημική σύνθεση της πολυόλης, του ισοκυανάτη ή των πρόσθετων επιτρέπουν διαφορετικό αποτέλεσμα. Βελτίωση του πολυμερούς μπορεί να γίνει με μικρές αλλαγές στις δοσολογίες των συστατικών. Ο πολυμερής αφρός σχηματίζεται συνήθως στο τελευταίο στάδιο, κατά τον πολυμερισμό όπου και μπορεί να προκληθεί μεταβλητότητα του αφρού.

Άλλη σημαντική ιδιότητα είναι ότι οι PU αφροί αποτελούν πολύ ισχυρές κόλλες επιτρέποντας τη χρήση σε εφαρμογές όπως η ενίσχυση οικιακών συσκευών, του ταμπλό των αυτοκινήτων, εξαρτημάτων πλοίου ή οχημάτων. Γι' αυτό και είναι τόσο πολύτιμοι σε κατασκευαστικές διατάξεις αφού η χρήση τους είναι δυνατό να μειώσει περίπλοκα και ακριβά βήματα του σχεδιασμού.

Ο συνδυασμός των παραπάνω πλεονεκτημάτων του αφρού έχει προκαλέσει την εξάπλωση σε πολλούς τομείς των κατασκευών. Παράγοντες όπως ο κύκλος ζωής, το κόστος εργαλείων, το μικρό απορριπτόμενο υλικό και η δυνατότητα ανακύκλωσης του υλικού επιδρούν θετικά. Επειδή η δημιουργία του πολυουρεθανικού αφρού απαιτεί μικρές πιέσεις, τα καλούπια μπορούν να κατασκευαστούν από φθηνότερα υλικά όπως το αλουμίνιο ή ο πολυεστέρας ενισχυμένος με γυαλί έναντι του χάλυβα. Η τελευταία παρατήρηση είναι ιδιαίτερης σημασίας για μικρή ποσότητα παραγωγής. Τέλος, ο PU αφρός μπορεί να εφαρμοστεί στην ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων.

3.6.1. Τύποι PU αφρών

Εξαρχής η αντίδραση πολυμερισμού παράγει στερεή πολυουρεθάνη. Προσθέτοντας ένα διογκωτικό μέσο κατά τη διαδικασία πολυμερισμού παράγεται ο αφρός. Τρία είναι τα κυριότερα είδη αφρού που παράγονται [30].

εύκαμπτος αφρός (*flexible foam*) χαμηλής πυκνότητας

Έχει εύρος πυκνότητας 10–80 kg/m³, κατασκευασμένο από συνδυασμό πολυμερούς με μικροδομή ανοικτών κυψελίδων. Δεν περιλαμβάνει τοιχώματα ανάμεσα στις διασυνδέσεις των κυψελίδων οπότε επιτρέπει τη ροή αέρα εντός. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως για γέμισμα των επίπλων ή των καθισμάτων παρέχοντας ανθεκτικότητα. Παράγονται σε μπλοκ και στη συνέχεια κόβονται στις επιθυμητές διαστάσεις ή σε καλούπια δίνοντας συγκεκριμένη μορφή. Παρασκευάζονται και σε ημί-σκληρη μορφή για χρήση σε συστήματα απορρόφησης ενέργειας όπως είναι οι προφυλακτήρες των αυτοκινήτων.

εύκαμπτος αφρός υψηλής πυκνότητας

Χαρακτηρίζονται από πυκνότητα μεγαλύτερη από 100 kg/m^3 . Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται οι αφροί με ομοιόμορφη περιβάλλουσα επιφάνεια (*self-skinning foams*) και τα ελαστομερή μικροκυτταρικής δομής (*microcellular elastomers*). Οι self-skinning αφροί είναι δύο τύπων: με ανοικτές κυψελίδες και πυκνότητα μέχρι 450 kg/m^3 και με κλειστές κυψελίδες και πυκνότητα πάνω από 500 kg/m^3 . Τα ελαστομερή μικροκυτταρικής δομής έχουν πιο ομοιόμορφη πυκνότητα με εύρος $400 - 800 \text{ kg/m}^3$, κυρίως με κλειστές κυψελίδες [7].

σκληρός αφρός (rigid foam)

Παρασκευάζεται από συνδυασμό πολυμερούς και υλικό κλειστών κυψελίδων με μεγάλο εύρος πυκνότητας αφρού. Οι κυψελίδες διαχωρίζονται μεταξύ τους από πολυμερείς επιφάνειες που παρεμποδίζουν τη ροή αερίου. Το υλικό παρουσιάζει μεγάλη αντοχή σε καταπονήσεις αναλογικά με το βάρος του καθώς και ιδιότητες θερμικής μόνωσης. Οι κυψελίδες περιέχουν μίγμα αερίου με διαφορετικές προσμίξεις ανάλογα τη χρήση μεταβάλλοντας τη θερμική αγωγιμότητα. Για να διατηρηθούν οι ιδιότητες του αφρού μακροπρόθεσμα θα πρέπει το αέριο να παραμείνει έγκλειστο, δηλαδή οι κυψελίδες σε ποσοστό περίπου 90% να παραμείνουν κλειστές. Η χρήση τους έχει εξαπλωθεί στα κτίρια, στα μεταφορικά ψυγεία, στους καταψύκτες.

Στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε σκληρός αφρός πυκνότητας 250 kg/m^3 , γι' αυτό και γίνεται εκτενέστερη αναφορά σε αυτή την κατηγορία.

3.6.2. Αντιδρώντα υλικά

Ο σκληρός πολυουρεθανικός αφρός σχηματίζεται από την αντίδραση ισοκυανάτων, πολυολών και κατά περίπτωση καταλυτών, σταθεροποιητών (*stabilizers*), διογκωτικών μέσων (*blowing agents*), επιφανειοδραστικών ουσιών (*surfactants*) [25], [12].

Ισοκυανάτες (Isocyanates)

Η βιομηχανία πολυουρεθάνης βασίζεται στη μεγάλη αλλά ελεγχόμενη αντιδραστικότητα των ισοκυανάτων για την παραγωγή διαφορετικών προϊόντων. Για τους σκληρούς αφρούς, οι πολυμερικοί ισοκυανάτες diphenylmethane diisocyanate (MDI) χρησιμοποιούνται ευρέως. Οι πολυμερικοί MDI αφροί παρασκευάζονται από την αντίδραση φωσγενίου (χλωριούχο καρβονύλιο) με πολυαμίνες που παρασκευάζονται από οξύ που καταλύεται από συμπύκνωση ανιλίνης και φορμαλδεΰδης. Η σύνθεση των ισοκυανάτων μπορεί να μεταβληθεί με έλεγχο του συμπυκνώματος ανιλίνης – φορμαλδεΰδης. Μεγάλες αναλογίες του παραπάνω συμπυκνώματος παράγουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις διλειτουργικών προϊόντων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι πολύ-ισοκυανάτες έχουν την ίδια μοριακή δομή και την ίδια κατανομή βάρους της πολυαμίνης.

Η χρήση toluene diisocyanate (TDI) στους πολυουρεθανικούς αφρούς είναι περιορισμένη λόγω της μεγάλης ποσότητας ισοκυανάτης και υψηλής πίεσης ατμών. Η υψηλή παραγόμενη θερμότητα περιορίζεται από τη χρήση προπολυμερών παρασκευασμένα από αντίδραση 1/3 ισοκυανατικής ομάδας με κατάλληλη πολυόλη. Απαιτείται περιορισμένη έκθεση του χειριστή στους ατμούς του TDI με σύστημα εξαερισμού. Αυτοί οι δύο παράγοντες αποτρέπουν την τοποθέτηση σε συστήματα ψύξης.

Πολυόλες (Polyols)

Οι πολυόλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πολυουρεθανικού αφρού αποτελούνται από πολυμερή χαμηλού μοριακού βάρους περιέχοντας τουλάχιστον δύο υδροξυλικές ομάδες. Μπορεί να είναι πολυαιθέρας, πολυεστέρας, πολυολεφίνη. Οι δύο πρώτες πολυόλες είναι τα κύρια συστατικά που χρησιμοποιούνται στους σκληρούς και τους εύκαμπτους αφρούς.

Υδροξυλική ένωση	Λειτουργικότητα
Ethylene Glycol	2
Glycerol	3
Trimethylol Propane	3
1,2,6 - Hexane Triol	3
Tricthanolamine	4
Sorbitol	6
Sucrose	8

Πίνακας 3.1: Λειτουργικότητα συνηθέστερων πολυολών

Οι πολυόλες πολυεστέρα αρχικά χρησιμοποιούνταν ευρέως αλλά στη συνέχεια περιορίστηκαν μόνο σε ειδικές εφαρμογές λόγω του υψηλού κόστους, της μικρής λειτουργικότητας, του μεγάλου ιξώδους και της μικρής διαστασιολογικής ακρίβειας του τελικού αφρού. Πλέον, έχει αυξηθεί η παραγωγή πολυολών πολυεστέρα για σκληρούς PU αφρούς με εφαρμογή στις κατασκευές λόγω της καλής θερμικής μόνωσης που επιτυγχάνεται.

Οι πολυόλες πολυαιθέρα παράγονται από ανιονικό πολυμερισμό αλκαλικών οξειδίων, όπως propylene oxide ή ethylene oxide, με την προσθήκη ενεργοποιητών και καταλυτών. Η λειτουργικότητα και το ισοδύναμο βάρος της πολυόλης μπορεί να ελεγχθεί μέσα σε ευρεία πλαίσια. Οι ενεργοποιητές είναι υδροξυλικές ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους που καθορίζουν σημαντικά το αποτέλεσμα. Οι χρησιμοποιούμενοι ενεργοποιητές είναι υψηλής απόδοσης όπως glycerol, sorbitol, sucrose.

Οι αρωματικές πολυεστερικές πολυόλες (*aromatic polyester polyols – APP*) έχουν αποτελέσει τα τελευταία χρόνια την καλύτερη επιλογή για σκληρούς PU αφρούς που χρησιμοποιούνται για μόνωση στις κατασκευές [12]. Αρχικά, αυτά τα υλικά

χρησιμοποιούνταν σαν φθηνά πρόσθετα στις πολυόλες πολυαιθέρα, μέχρι να αποδειχθούν οι ιδιότητες αντίστασης σε ανάφλεξη και παραγωγή καπνού. Η παρασκευή APP περιλαμβάνει την αντίδραση καρβοξυλικών οξέων με αλκοόλες. Τα οξέα παράγονται από τρεις πηγές: di-methyl terephthalate (DMT), polyethylene terephthalate (PET), phthalic acid ή anhydride (PA).

Ιδιότητα πολυόλης	Εύκαμπτος αφρός	Ημί-σκληρός αφρός	Σκληρός αφρός
Λειτουργικότητα	2.0 – 3.0	3.0 – 3.5	3.0 – 8.0
Μέτρο ελαστικότητας στους 23 °C (MPa)	< 70	70 – 700	> 700

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά πολυολών για διάφορα είδη PU αφρών

Διογκωτικά μέσα (Blowing agents)

Μέχρι τα τέλη του 1950 οι PU αφοί χρησιμοποιούσαν σαν διογκωτικό υλικό διοξείδιο του άνθρακα, που απελευθερώνεται από την αντίδραση ισοκυανάτης με νερό. Στη συνέχεια, ανακαλύφθηκε η χρήση chlorofluorocarbons (CFCs) σαν φυσικό διογκωτικό μέσο που επιτάχυνε την εξάπλωση των αφρών. Οδήγησε στην παραγωγή αφρού κλειστών κυψελίδων με χαμηλή πυκνότητα, καλές μηχανικές ιδιότητες και μικρή θερμική αγωγιμότητα [30]. Λόγω της επιβάρυνσης της ατμόσφαιρας απορρίφθηκε και αυτό το διογκωτικό μέσο.

Πλέον, η βιομηχανία πολυουρεθάνης έχει στραφεί στη χρήση πιο φιλικών υλικών όπως hydrochlorofluorocarbons (HCFCs), hydrofluorocarbons (HFCs), hydrocarbons (HCs). Το πλεονέκτημα των υδρογονανθράκων (HC) είναι το χαμηλό κόστος, η μεγάλη διαθεσιμότητα και οι μηδενικές επιπτώσεις στο όζον αλλά υστερούν όσο αφορά την υψηλή αναφλεξιμότητα. Το μειονέκτημα εξαλείφτηκε με τη χρήση 3^{ov} ισομερών pentane που έχουν υγρή μορφή σε θερμοκρασία δωματίου και δύο ισομερών butane που βρίσκονται σε αέρια μορφή. Στον πίνακα 3.3 διακρίνονται οι φυσικές τους ιδιότητες.

Τέλος, μεγάλη εφαρμογή εμφανίζουν τα χημικά διογκωτικά μέσα (π.χ. azodicarbimides) κυρίως στα πλαστικά όπου η θερμοκρασία παρασκευής προκαλεί χημική αστοχία του διογκωτικού κατά το σχηματισμό αερίων. Καθότι αυτό το χημικό μέσο δεν χρησιμοποιείται στους πολυουρεθανικούς αφρούς, ένα άλλο μέσο, το διοξείδιο του άνθρακα παραγόμενο από την αντίδραση νερού με ισοκυανάτη, έχει εξαπλωθεί. Πλέον, όλοι οι PU αφοί, είτε εύκαμπτοι είτε σκληροί, χρησιμοποιούν έστω μερικώς το διοξείδιο του άνθρακα.

	Iso-butane	Iso-pentane	n-pentane	Cyclo-pentane
Chemical formula	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₅ H ₁₂	(CH ₂) ₅
Molecular weight	58	72.0	72.0	70.1
Boiling Point, °C	-12.0	28.8	36.2	49.3
Liquid specific gravity at 25 °C	0.55	0.62	0.63	0.75
Heat of vapor, at BP, kJ/mole	21.3	24.6	25.7	27.3
Gas conductivity, at 25 °C	16.2	14.3	15.0	12.8
Flammable limit in air, vol-%	1.8-8.4	1.4-7.8	1.3-8.0	1.4-8.0

Πίνακας 3.3: Φυσικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες των HCs

Καταλύτες (Catalysts)

Η ποικιλία των πολυουρεθανικών αφρών εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των καταλυτών για τον έλεγχο της ισοκυανατικής αντίδρασης [25]. Τα δύο κυριότερα είδη για την αντίδραση ισοκυανάτης – υδροξυλίου των σκληρών αφρών είναι τριτογενής αμίνες (*tertiary amines*) και οργανομεταλλικές ενώσεις (*organometallic compounds*). Η καταλυτική δράση των αμινών εξαρτάται από την αντοχή σαν βάση και τη διαθεσιμότητα του ζεύγους ηλεκτρονίων των αμινοξέων αζώτου. Συνήθεις οργανομεταλλικοί καταλύτες είναι οι *dibutyltin esters*, *stannous octoate*. Ο πρώτος είναι πιο σταθερός αλλά τείνει να λειτουργεί ως καταλύτης της υψηλής θερμοκρασίας αποδόμησης του πολυμερούς αφρού.

Οι σκληροί αφροί εξαρτώνται πλήρως από την ισοκυανατική αντίδραση για το σχηματισμό του πολυμερούς. Ορισμένα συστήματα που προορίζονται για χύτευση ή απευθείας τοποθέτηση του αφρού περιέχουν επιβραδυντικούς καταλύτες.

Επιφανειοδραστικές ουσίες (Surfactants).

Ο ομοιόμορφος σχηματισμός αφρού κλειστών κυψελίδων εξαρτάται άμεσα από τη χρήση σταθεροποιητών (*stabilizers*) και επιφανειοδραστικών ουσιών [12]. Με τη μείωση της επιφανειακής τάσης στην πολυόλη, οι επιφανειοδραστικές ουσίες μπορούν να προσδώσουν χρήσιμες ιδιότητες κατά την παραγωγή του αφρού, όπως να σταθεροποιήσουν τη διασπορά υγρού – αερίου, ελέγχοντας τον αριθμό των κυψελίδων, να ελέγξουν τη ροή του διογκούμενου αφρού. Η εφαρμογή τους συνήθως γίνεται με υψηλής απόδοσης πολυόλες και ισοκυανάτες επιδρώντας στο ιξώδες για τη σταθεροποίηση.

Για την παραγωγή σκληρών αφρών η μετάβαση από CFC διογκωτές σε HCs, σήμανε την εξέλιξη των επιφανειοδραστικών ουσιών για να ξεπεραστεί η χαμηλή διαλυτότητα του διογκωτικού μέσου στην πολυόλη και η σχετικά μεγαλύτερη πυκνότητα του αφρού με πιο χονδροειδείς κυψελίδες.

Cell openers

Ο φυσιολογικός λόγος ανοικτών κυψελίδων στου σκληρούς PU αφρούς είναι περίπου 10 – 20% και σε περιπτώσεις θερμικής μονώσεις είναι καλύτερο να διατηρείται το διογκωτικό μέσο εντός των κυψελίδων για τη διατήρηση χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας. Σε αντίθεση με τους εύκαμπτους αφρούς, δεν απαιτείται στο τέλος της διαδικασίας το άνοιγμα των κλειστών κυψελίδων για να αποτραπεί η συστολή. Ωστόσο, σε εφαρμογές που δεν ζητείται η μόνωση, μερικές φορές προτείνεται η χρήση των cell openers για τη βελτίωση της διαστασιολογικής ακρίβειας. Ενώ στους εύκαμπτους αφρούς μπορεί να πραγματοποιηθεί με συμπίεση του αφρού, στους σκληρούς αφρούς αυτή η μέθοδος μπορεί να προκαλέσει μόνιμη παραμόρφωση. Γι' αυτό απαιτείται η χρήση μιας χημικής μεθόδου.

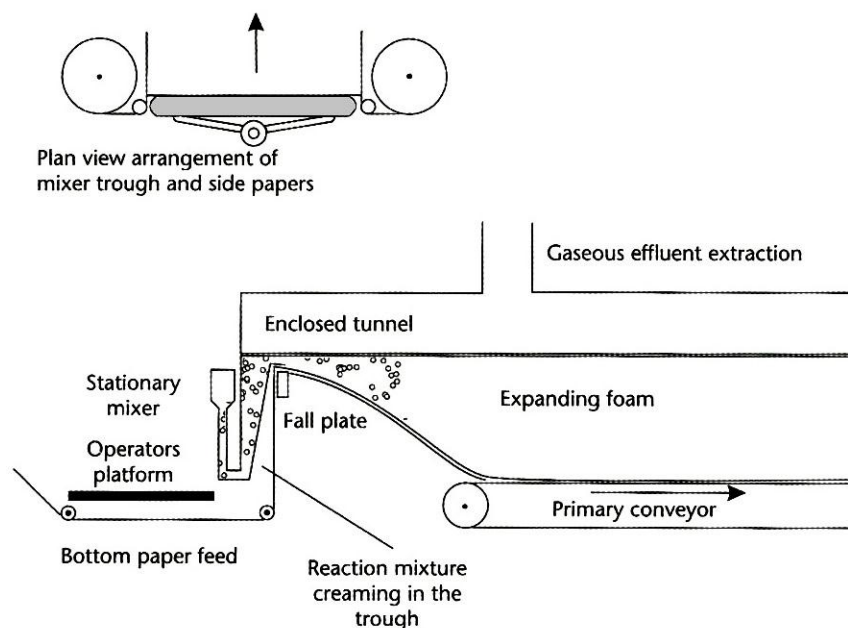
Οι cell openers κατασκευάζονται ως ανεξάρτητα προσθετικά για χρήση σε επιφανειοδραστικές ουσίες σιλικόνης – πολυαιθέρα με σκοπό να επιτρέψουν τον εύκαμπτο σχηματισμό. Το προσθετικό ενσωματώνεται σε μικρές ποσότητες μέχρι 0,25 ρρη πολυόλης για να διευκολύνει την ταχεία θραύση των κλειστών επιφανειών των κυψελίδων πριν την αύξηση του ιξώδους και το σχηματισμό του αφρού. Επιδρά αντικαθιστώντας την επιφάνεια του σχηματιζόμενου αφρού με εναλλακτική μικρής ή μηδενικής ελαστικότητας, με αποτέλεσμα γρήγορα να σπάει ανοίγοντας τις κυψελίδες όσο διαστέλλεται ο αφρός.

3.6.3. Παραγωγή

Οι λεπτομέρειες της παραγωγής σκληρού πολυουρεθανικού αφρού εξαρτώνται από το σχήμα και την εφαρμογή του τελικού προϊόντος. Όταν συνδυαστεί και αναμιχτεί η πολυόλη με την ισοκυανάτη και τα κατά περίπτωση πρόσθετα, τότε αντιδρά και αρχίζει να διογκώνεται γεμίζοντας το διαθέσιμο χώρο ή ελεύθερα αν δεν περιορίζεται. Οι ισχυρές πολυουρεθανικές κόλλες προσχωρούν στα διάφορα υποστρώματα. Οι PU αφροί παράγονται σε τρεις κύριες μορφές:

- πλάκες ή φύλλα
- απευθείας παραγωγή σε κοιλότητα
- ψεκαστικά μέσα

Κατά πλειοψηφία παρασκευάζονται από δύο κύρια συστατικά σε μια μόνο φάση. Διαδικασία δύο φάσεων που περιλαμβάνει καταρχήν αντίδραση της ισοκυανάτης με μέρος της πολυόλης πραγματοποιείται όταν ζητείται ο περιορισμός της αναπτυσσόμενης θερμότητας κατά την αντίδραση. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας είναι σημαντικός αφού η θερμοκρασία της αντίδρασης επηρεάζει το ιξώδες και την κινητική του αφρού. Σε μεγάλες εφαρμογές, εναλλάκτες θερμότητας είναι εγκατεστημένοι σε διαφορετικές θέσεις της παραγωγής. Η μεταβολή του ιξώδους επηρεάζει την αντλία των συστατικών και την απόδοση του αναδευτήρα, ενώ ο ρυθμός αντίδρασης επηρεάζει τη μηχανική της ροής και την ποιότητα του διογκούμενου αφρού.



Σχήμα 3.3: Διάταξη maxfoam για την παραγωγή πλακών PU αφρού

3.6.4. Φυσική σχηματισμού PU αφρού

Παρόλο που ο σχηματισμός της πολυουρεθάνης είναι χημική διαδικασία, ο σχηματισμός του αφρού είναι πρωτίστως φυσική. Μια φυσική ή χημική διαδικασία ενεργοποιεί το σχηματισμού αφρού όταν αέριο αναμιχθεί με υγρό. Όταν το υγρό βρεθεί σε υπερκορεσμένη κατάσταση με το αέριο, φυσαλίδες αρχίζουν να σχηματίζονται από διάσπαρτα σωματίδια αέρα ή στερεού. Άμεσα σχηματίζονται φυσαλίδες, μέσω ομογενής πυρήνωσης, και στην περίπτωση του πολυουρεθανικού αφρού παράγονται ακανόνιστες δομές και ασταθείς κυψελοειδείς μορφές.

Πρόσθετο αέριο διαχέεται προς τις αναπτυσσόμενες φυσαλίδες που σταθεροποιούνται μέσω κατάλληλων ουσιών. Σύμφωνα με τη θεωρία, η πίεση ισορροπίας στο εσωτερικό του αφρού εξαρτάται από το μέγεθος των φυσαλίδων. Μικρές φυσαλίδες, ωστόσο, ενώνονται με μεγαλύτερες παράγοντας μικρότερο αριθμό κυψελίδων. Οι κυψελίδες αναπτύσσονται σφαιρικά μέχρι να έρθουν σε επαφή με στερεό τοίχωμα και να δημιουργήσουν ένα παραμορφωμένο, κλειστό σχηματισμό.

Η γεωμετρία του αφρού συνδυάζει ένα πλήθος σχηματισμών και δεν έχει μοντελοποιηθεί απολύτως. Το κωνικό οκτάεδρο προσεγγίζει την κατασκευή με ελάχιστες επιφάνειες για υδάτινους αφρούς. Σε συνδυασμό με πενταγωνικό δωδεκάεδρο προσεγγίζει ευκολότερα τη γεωμετρία του σκληρού πολυουρεθανικού αφρού. Σε γενικές γραμμές, ο πολυουρεθανικός αφρός αποτελείται από τετραεδρική διάταξη δοκών συνδεδεμένων με λεπτές επιφάνειες δημιουργώντας ανεξάρτητη κυψελίδα. Οι δοκοί συμβάλουν στη μηχανική αντοχή του αφρού και οι λεπτές επιφάνειες διαχωρίζουν τις κυψελίδες (που εμπεριέχουν διογκωτικό υλικό) και αποτρέπουν τη μεταφορά διογκωτικού υλικού [25].

3.6.5. Ιδιότητες

Οι ιδιότητες του σκληρού PU αφρού εξαρτώνται από τη σύνθεση και την κατασκευή. Δεν είναι ισοτροπικό, μονοφασικό υλικό ενώ η μορφή και ο προσανατολισμός του αφρού επηρεάζει όλες τις ιδιότητες.

Πυκνότητα

Οι ιδιότητες του πολυμερούς αφρού σχετίζονται άμεσα με την πυκνότητα ή αλλιώς τη σχετική ποσότητα πολυμερούς και αερίου. Πολλές ιδιότητες συνδέονται με την πυκνότητα ρ μέσω της σχέσης

$$E = K \rho^n \quad (3.1)$$

όπου K , n είναι σταθερές που υπολογίζονται πειραματικά. Η σταθερά n έχει εύρος 1-2 και μπορεί να ποικίλει ανάλογα την εκάστοτε ιδιότητα. Η σταθερά K εξαρτάται από την ιδιότητα του πολυμερούς και τη θερμοκρασία.

Μηχανικές ιδιότητες

Οι πολυουρεθανικοί αφροί ενεργούν περισσότερο σαν κατασκευές παρά σαν στερεά υλικά. Για παράδειγμα, κατά τη συμπίεση ο σκληρός αφρός δρα σαν δοκός που λυγίζει παρά συμπιέζεται. Οι ιδιότητες του σκληρού αφρού επηρεάζονται επίσης από τη δομή των κλειστών κυψελίδων και τη ροή του αέρα ή άλλου αερίου μέσα από ανοικτές κυψελίδες.

Η πληθώρα σκληρών PU αφρών και η αβέβαιη συμπεριφορά λόγω του διογκωτικού μέσου κάνει δύσκολο τον προσδιορισμό τυπικών ιδιοτήτων. Γενικά, έχουν κλειστές κυψελίδες και τείνουν να συμπεριφέρονται ως όλκιμα υλικά παρά ως ψαθυρά. Μακράς διάρκειας ερπυσμός και χαλάρωση δεν μπορεί να καθοριστεί εύκολα, ίσως επειδή δεν καταπονούνται από μεγάλα φορτία στις κατασκευές. Επίσης, ιδιότητες που περιλαμβάνουν μεταβολή της κατασκευής όπως λυγισμός της δοκού δύσκολα ερμηνεύονται.

Η μοντελοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων του πολυμερούς αφρού κλειστών κυψελίδων γίνεται θεωρώντας κρυσταλλική δομή κυβικού χωροκεντρωμένου συστήματος BCC [39].

Αντίσταση σε νερό και διαλύτες

Οι αφροί δέχονται ισχυρά οξέα και διαλύτες κατά την παρασκευή τους. Ωστόσο, τα πολυμερή παραμένουν αδρανή σε μεγάλο αριθμό διαλυτών υδρογονανθράκων, ελαφρά οξέα και βιομηχανικούς ρύπους. Η απορρόφηση νερού περιορίζεται από τις κλειστές κυψελίδες. Οι υδρατμοί διαχέονται στον αφρό αλλά δεν ξεπερνούν το 5 wt %.

Θερμική αγωγιμότητα

Η ευρεία χρήση των σκληρών αφρών για θερμική μόνωση βασίζεται στο μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k . Η μεταφοράς θερμότητας δQ μέσω του τοιχώματος πάχους t , με διατομή A υπολογίζεται από τη σχέση:

$$dQ = -k A \frac{dT}{dx} \quad (3.2)$$

Για παράδειγμα, το CFCl_3 σε θερμοκρασία $25\text{ }^\circ\text{C}$ και πίεση περιβάλλοντος έχει συντελεστή k ίσο με $8,4 \times 10^{-3}\text{ W/(m K)}$.

3.6.6. Γήρανση

Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω των κλειστών κυψελίδων του αφρού με τους εξής τρόπους [42]:

- αγωγιμότητα μέσω του στερεού πολυμερούς που κατασκευάζονται οι κυψελίδες
- αγωγιμότητα μέσω του αερίου που βρίσκεται εντός των κυψελίδων
- θερμική ακτινοβολία

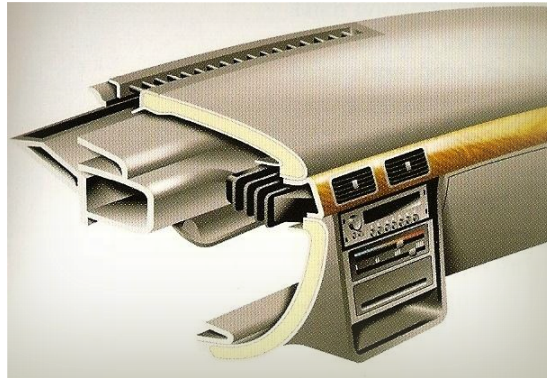
Λόγω μικρού μεγέθους των κυψελίδων δεν υφίσταται μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Τουλάχιστον 50% της θερμότητας μεταφέρεται με αγωγή μέσω του έγκλειστου αερίου γι' αυτό επιδιώκεται η χρήση αερίων μικρής θερμικής αγωγιμότητας εντός του αφρού, όπως του fluorocarbon 11 (R-11). Η θερμική αγωγιμότητα του σκληρού πολυουρεθανικού αφρού είναι μόνο το 1/3 της αντίστοιχης του αέρα, ενώ για αφρούς ανοικτών κυψελίδων η αναλογία φτάνει το 1,3 – 2.

Η αύξηση της αγωγιμότητας του αφρού με το χρόνο είναι σημαντικός επιβραδυντικός παράγοντας στη χρήση αφρών κλειστών κυψελίδων. Η γήρανση προκύπτει όταν ο αέρας διαχέεται στο εσωτερικό του αφρού ενώ οι ατμοί του διογκωτικού μέσου διαχέονται εκτός. Τα συστατικά του αέρα παρουσιάζουν ταχύτερη διάχυση οπότε η διαδικασία της γήρανσης μπορεί να διαιρεθεί σε δύο στάδια: τη διάχυση των συστατικών του αέρα που για δείγμα πάχους 2,5cm διαρκεί περίπου ένα χρόνο και τη διάχυση του διογκωτικού μέσου που διαρκεί 20 φορές περισσότερο.

Μόλις καθοριστούν οι σταθερές διάχυσης των συστατικών του αέρα και του R-11, μπορεί να γίνει χρήση της εξίσωσης ενεργής διάχυσης για να προβλεφθεί η μεταβολή του αερίου με την πάροδο του χρόνου. Ο συντελεστής διάχυσης του αφρού μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά μετρώντας τη διαπερατότητα του αφρού ή βάσει της γνώσης της γεωμετρίας του αφρού και της διαπερατότητας του στερεού πολυμερούς των κυψελίδων. Σημαντικές παράμετροι είναι το πάχος των τοιχωμάτων, το μέγεθος των κυψελίδων, η επιμήκυνση και το ποσοστό των ανοικτών κυψελίδων. Άλλος τρόπος εύρεσης του συντελεστή διάχυσης του αφρού είναι με αναλυτικά μοντέλα, με τη δυσκολία όμως της πολύπλοκης γεωμετρίας του σχηματισμένου αφρού, της μεγάλης διασποράς των χαρακτηριστικών του αφρού.

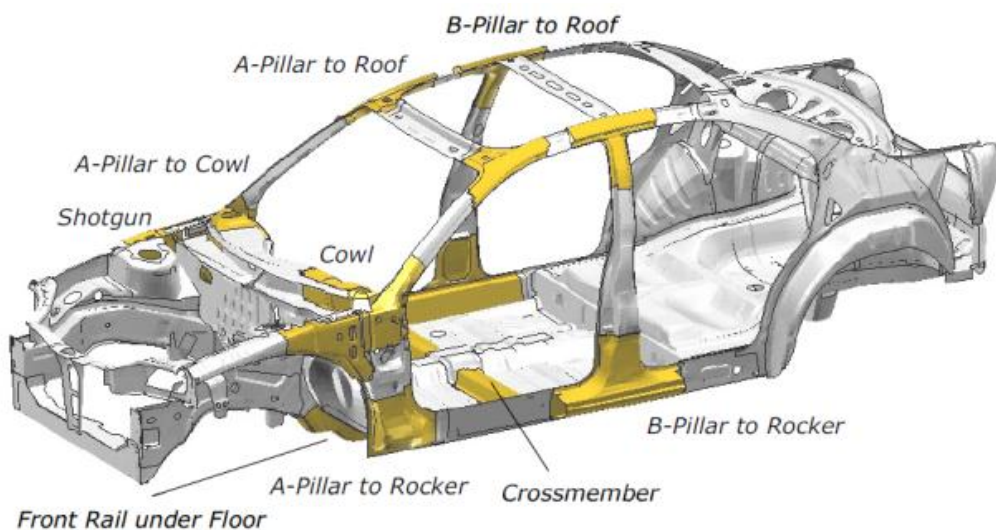
3.6.7. Εφαρμογή ως σύστημα απορρόφησης ενέργειας

Η βιομηχανία αυτοκινήτων χρησιμοποιεί πολυουρεθανικό αφρό σε μεγάλη ποικιλία εξαρτημάτων όπως τα καθίσματα, οι προφυλακτήρες, συστήματα απορρόφησης ενέργειας, ηχομόνωση.



Σχήμα 3.4: Χρήση PU αφρού στο πάνελ του αυτοκινήτου

Οι εφαρμογές του αφρού έχουν αυξηθεί λόγω του μειωμένου βάρους, της δυνατότητας ανακύκλωσης και των μειωμένων ρύπων κατά την παραγωγή. Υπολογίζεται ότι στο εσωτερικό ενός οχήματος περιέχεται αφρός βάρους περίπου 18-20 kg, εκ των οποίων τα 13 kg αποτελούν εύκαμπτο αφρό. Ο ημίσκληρος αφρός χρησιμοποιείται και σε συστήματα απορρόφησης ενέργειας σε διάφορα τμήματα του αμαξώματος. Παρουσιάζει σκληρότητα συμπίεσης ανάμεσα στις τιμές των σκληρών και εύκαμπτων αφρών με δομή ανοικτών κυψελίδων ενώ είναι εύκαμπτος σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η κυριότερη διαφορά είναι η μεγάλη σκληρότητα συμπίεσης και ο μικρός ρυθμός επαναφοράς μετά τη συμπίεση γεγονός που τον κάνει ιδανικό για συστήματα απορρόφησης ενέργειας. Έτσι επιτυγχάνεται η αύξηση της στιβαρότητας του αμαξώματος και η καλύτερη απόδοση κατά τη σύγκρουση προσθέτοντας τοπικά εξαρτήματα ενισχυμένα με αφρό [30].



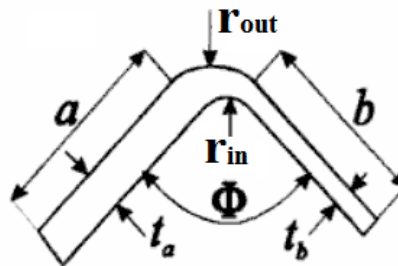
Σχήμα 3.5: Εφαρμογή PU αφρού για την ενίσχυση του αμαξώματος

4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

4.1. Κατάρρευση με τη μέθοδο των Superfolding Elements (SE)

Η παραμόρφωση που προκαλείται από τη συμπίεση των λεπτότοιχων δοκιμίων προκύπτει από την τοπική απώλεια σταθερότητας και τη δημιουργία τοπικής πλαστικής παραμόρφωσης (*plastic wave*). Μετά τη δημιουργία του λοβού, διευκολύνεται η παραμόρφωση του κελύφους μέχρι να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους τα τοιχώματα παρεμποδίζοντας την περαιτέρω παραμόρφωση. Στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τη δημιουργία του επόμενου λοβού. Αυτού του τύπου η κατάρρευση ονομάζεται προοδευτική διαδικασία κατάρρευσης (*progressive crushing ή progressive folding process*).

Χαρακτηριστικό της διαδικασίας κατάρρευσης είναι η “γεωμετρική ομοιότητα”. Έχει παρατηρηθεί ότι τα περισσότερα μοτίβα παραμόρφωσης μπορούν να απεικονισθούν με ακρίβεια μέσω ενός βασικού στοιχείου κατάρρευσης. Μια τέτοια μεθοδολογία είναι με ένα superfolding element (SE) για κάθε λοβό. Σε περιπτώσεις όπου το σχήμα του κελύφους προκύπτει ύστερα από διαμόρφωση ενός αρχικού ελάσματος ισχύει $t_a = t_b$. Το ύψος του στοιχείου, $2H$, δεν είναι εξ αρχής γνωστό και υπολογίζεται σαν μέρος της επίλυσης. Ο αριθμός των στοιχείων για κάθε επίπεδο παραμόρφωσης εξαρτάται από τη γεωμετρία της κατασκευής και πιο συγκεκριμένα το πλήθος των γωνιών που σχηματίζει.

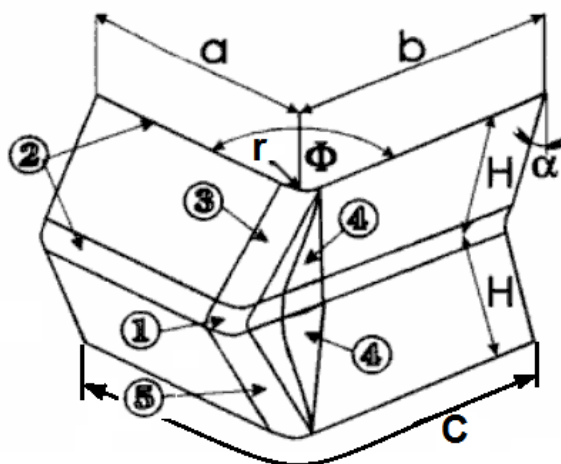


Σχήμα 4.1: Βασικά χαρακτηριστικά διατομής SE

Η πιο γενική μορφή παραμόρφωσης ενός SE περιλαμβάνει 5 διαφορετικούς μηχανισμούς παραμόρφωσης όπως στο παρακάτω σχήμα [6].

- i. συνεχής παραμόρφωση της διατομής κατά το κάθετο επίπεδο που διέρχεται από το μέσο του ύψους, στο γωνιακό σημείο 1
- ii. κάμψη ως προς τις οριζόντιες γραμμές 2
- iii. κυλιόμενη παραμόρφωση (*rolling deformation*) ως προς την κεκλιμένη γραμμή 3
- iv. εκτατή παραμόρφωση (*extensional deformation*) της κωνικής επιφάνειας 4 κατά το τελικό στάδιο της διαδικασίας παραμόρφωσης

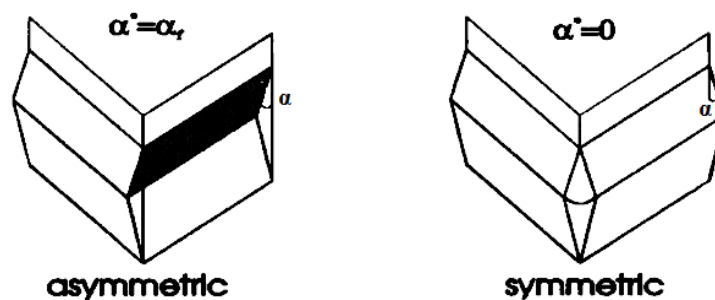
- v. παραμόρφωση λόγω κάμψης κατά την κεκλιμένη γραμμή 3 στο τελικό στάδιο του σχηματισμού του λοβού όπου η αναδίπλωση διακόπτεται λόγω επαφής των τοιχωμάτων.



Σχήμα 4.2: Μηχανισμός παραμόρφωσης του superfolding element

Ο μηχανισμός κατάρρευσης του σχ. 4.2 προκύπτει από 2 απλούστερα στοιχεία που αναφέρονται σε ασύμμετρη και συμμετρική κατάρρευση. Η χρονική στιγμή της παραμόρφωσης σε κάθε περίπτωση ελέγχεται από μια παράμετρο α που καθορίζει την περιστροφή του πλαϊνού τοιχώματος ενός στοιχείου από την αρχική κατακόρυφη θέση όπου $\alpha=0$. Η διαδικασία διακόπτεται όταν $\alpha = \pi/2$. Όπως παρατηρούμε στο επόμενο σχήμα κατά την ασύμμετρη παραμόρφωση δεν υφίσταται η κωνική επιφάνεια 4 οπότε η παραμόρφωση καθορίζεται από τη γραμμή 3.

Η ανάπτυξη μιας μορφής κατάρρευσης εξαρτάται από την παράμετρο $\alpha^* \in (0, \alpha_f)$. Για τιμές $\alpha^* = \alpha_f$ επικρατεί ασύμμετρη παραμόρφωση ενώ για $\alpha^* = 0$ συμμετρική. Στις ενδιάμεσες τιμές έχουμε μεικτές συνθήκες. Η τιμή της παραμέτρου α^* εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (C, t, Φ) και τους περιορισμούς που υπόκεινται οι επιφάνειες. Ένα SE που μετέχει στην παραμόρφωση περιορίζεται από τα γειτνιάζοντα στοιχεία. Κινηματικοί περιορισμοί προκαλούνται λόγω παραμόρφωσης των πλαϊνών τοιχωμάτων [6].

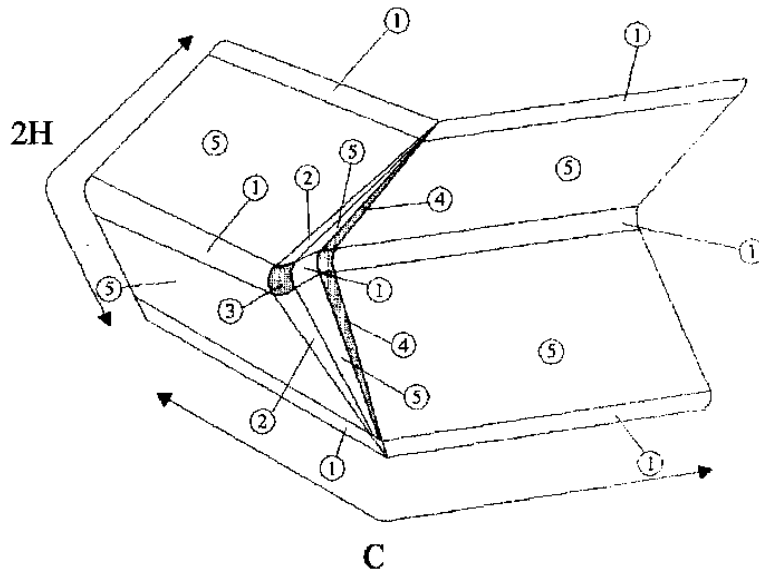


Σχήμα 4.3: Βασικές μορφές κατάρρευσης τυπικού SE

4.2. Υπολογισμός βασικών μεγεθών της ανάλυσης

4.2.1. Top – hat διατομή

Στην ανάλυση που ακολουθεί η κατασκευή χωρίστηκε σε στοιχεία σχήματος “L” ώστε να είναι δυνατή η χρήση του improved superfolding element. Το υλικό θεωρείται ισοτροπικό με ιδιότητες ανεξάρτητες από το χρόνο και ιδανικώς πλαστικό καθώς οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στην πλαστική περιοχή είναι μεγάλες συγκριτικά με τις μέγιστες ελαστικές παραμορφώσεις. Το ύψος $2H$ κάθε παραμορφωμένου στοιχείου (*folding wave*) θεωρείται σταθερό κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης. Το improved SE αποτελείται από 18 στοιχεία κελύφους · άκαμπτα στοιχεία (δείκτης 5), στοιχεία που υπόκεινται σε μη εκτατή παραμόρφωση (δείκτης 1 και 2), quasi-μη εκτατά στοιχεία (δείκτης 3), εκτατά στοιχεία (δείκτης 4).



Σχήμα 4.4: Δομικά στοιχεία improved SE

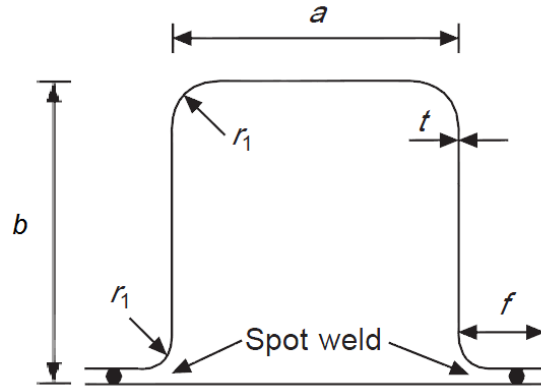
Σύμφωνα με τους White, Jones, Abramowicz [12] το μέσο φορτίο κατάρρευσης για ασύμμετρη παραμόρφωση δίνεται από τη σχέση:

$$P_m = \frac{t^2}{2} \left\{ \sigma_0^{(1)} A_1 \frac{r}{t} + \sigma_0^{(2)} A_2 \frac{C}{H} + \sigma_0^{(3)} A_3 \frac{H}{r} + \sigma_0^{(4)} A_4 \frac{H}{t} + \sigma_0^{(5)} A_5 \right\} \frac{2H}{\delta_c} \quad (4.1)$$

$$\delta_c = 0.73 \cdot (2H) \quad (4.2)$$

$$C = \frac{\alpha + 2b + 2f}{4} \quad (4.3)$$

όπου δ_c είναι η ενεργή απόσταση κατάρρευσης, $\sigma_0^{(i)}$ η ισοδύναμη τάση διαρροής του i στοιχείου, A_i σταθεροί συντελεστές, r η ακτίνα καμπυλότητας του 4^{ου} δομικού στοιχείου του SE και C το ολικό μήκος του SE. Η διατομή του δοκιμίου έχει μήκος a , πλάτος b , μήκος φλάντζας f και πάχος t .



Σχήμα 4.5: Διατομή top-hat δοκιμίου

Η ενέργεια που απορροφάται κατά την ασύμμετρη κατάρρευση από ένα SE είναι:

$$E_{int} = P_m \cdot \delta_c = \frac{t^2}{4} \left\{ \sigma_0^{(1)} 8I_1 \frac{r}{t} + \sigma_0^{(2)} \pi \frac{C}{H} + \sigma_0^{(3)} 2I_3 \frac{H}{r} \right\} 2H \quad (4.4)$$

όπου οι σταθερές A_i προκύπτουν $A_1 = 8I_1$, $A_2 = \pi$, $A_3 = 2I_3$, $A_4 = A_5 = 0$.

Η ανωτέρω λύση είναι αποδεκτή για τα 4 βασικά στοιχεία που συγκροτούν ένα επίπεδο παραμόρφωσης της top-hat διατομής. Όμως ένα τέτοιο δοκίμιο περιλαμβάνει και ένα επίπεδο έλασμα που συγκολλείται όπως διακρίνεται στο σχ.4.5. Η ενέργεια που απορροφά το σύστημα κατά την κάμψη του ελάσματος είναι

$$E_{pl} = \frac{\pi}{2} 4 \cdot M_0 \cdot (a + 2f) = \frac{t^2}{4} \sigma_{pl}^{(2)} 2\pi(a + 2f) \quad (4.5)$$

όπου $\sigma_{pl}^{(2)}$ είναι η ισοδύναμη τάση διαρροής του ελάσματος σε κάμψη.

Η ολική ενέργεια E_T που απορροφά το σώμα κατά την ασύμμετρη κατάρρευση μιας κλειστής top-hat διατομής προκύπτει με υπέρθεση των συμβαλλόμενων ενεργειών E_{int} , E_{pl} .

$$E_T = \frac{t^2}{4} \left\{ 32\sigma_o^{(1)} I_1 \frac{r}{l} + \sigma_o^{(2)} \pi \frac{L}{H} + 8\sigma_o^{(3)} I_3 \frac{H}{L} \right\} 2H \quad (4.6)$$

$$L = 2a + 2b + 4f \quad (4.7)$$

Εξ' ορισμού ισχύει $P_m \cdot \delta_c = E_T$, ενώ από τη βιβλιογραφία [2] προκύπτουν οι τιμές των σταθερών $I_1 = 0.55$, $I_3 = 1.148$ οπότε τελικά έχουμε:

$$P_m = \frac{t^2}{4} \left\{ \sigma_o^{(1)} 17.76 \frac{r}{t} + \sigma_o^{(2)} \pi \frac{L}{H} + \sigma_o^{(3)} 9.184 \frac{H}{r} \right\} \frac{2H}{\delta_c} \quad (4.8)$$

Θεωρήσαμε ότι η τάση διαρροής είναι η ίδια στην εκάστοτε περιοχή κατάρρευσης. Για ιδανικά πλαστικό υλικό, ισχύει $\sigma_o^{(i)} = \sigma_o$ δηλαδή ίσο με την τάση διαρροής του υλικού άρα η σχέση 4.8 γίνεται

$$\frac{P_m}{M_o} = \left\{ 17.76 \frac{r}{t} + \pi \frac{L}{H} + 9.184 \frac{H}{r} \right\} \frac{2H}{\delta_c} \quad (4.9)$$

$$M_o = \frac{\sigma_o t^2}{4} \quad (4.10)$$

με τους όρους H/t και r/t να προκύπτουν ως εξής:

$$\frac{H}{t} = 0.39 \left(\frac{L}{t}\right)^{2/3} \quad (4.11)$$

$$\frac{r}{t} = 0.45 \left(\frac{L}{t}\right)^{1/3} \quad (4.12)$$

οπότε η σχέση 4.9 απλοποιείται στη μορφή:

$$\frac{P_m}{M_o} = 32.89 \left(\frac{L}{t}\right)^{1/3} \quad (4.13)$$

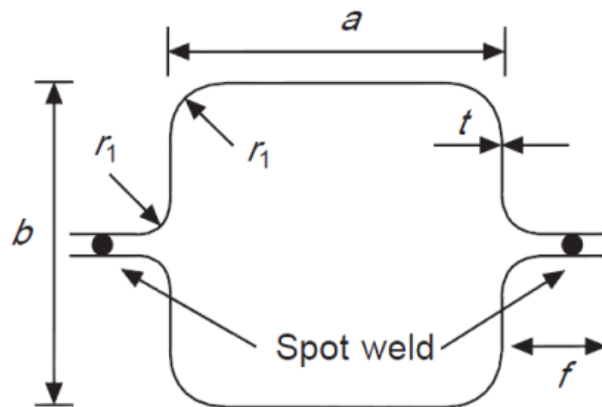
Μια άλλη μορφή αυτών των σχέσεων [56] είναι:

$$E_T = \sigma_o \left[4.44rt + \frac{\pi Lt^2}{4H} + 2.30 \frac{Ht^2}{r} \right] 2H \quad (4.14)$$

$$P_m = \frac{E_T}{\delta_e} = \sigma_o \left[6.08rt + \frac{1.08Lt^2}{H} + \frac{3.15Ht^2}{r} \right] \quad (4.15)$$

4.2.2. Double – hat διατομή

Παρόμοια διαδικασία χρησιμοποιείται για την ανάλυση της στατικής συμπεριφοράς δοκιμίου με διατομή τύπου double-hat [58]. Κάθε περιοχή παραμόρφωσης αποτελείται από 8 SE. Η ενέργεια που απορροφάται από την κατάρρευση του δοκιμίου είναι η 8πλάσια της απορρόφησης ενός SE έχοντας μέσο μήκος $C = L/8$.



Σχήμα 4.6: Διατομή double-hat δοκιμίου

$$E_T = \frac{t^2}{4} \left\{ 64\sigma_o^{(1)} I_1 \frac{r}{t} + \sigma_o^{(2)} 8\pi \frac{C}{H} + 16\sigma_o^{(3)} I_3 \frac{H}{r} \right\} 2H \quad (4.16)$$

$$P_m = \frac{t^2}{4} \left\{ \sigma_o^{(1)} 35.52 \frac{r}{t} + \sigma_o^{(2)} \pi \frac{L}{H} + \sigma_o^{(3)} 18.368 \frac{H}{r} \right\} \frac{2H}{\delta_c} \quad (4.17)$$

$$L = 2a + 2b + 4f \quad (4.18)$$

Για ιδανικά πλαστικό υλικό με $\sigma_o^{(i)} = \sigma_o$ προκύπτει η μορφή

$$\frac{P_m}{M_o} = 52.20 \left(\frac{L}{t}\right)^{1/3} \quad (4.19)$$

$$\frac{H}{t} = 0.247 \left(\frac{L}{t}\right)^{2/3} \quad (4.20)$$

$$\frac{r}{t} = 0.358 \left(\frac{L}{t}\right)^{1/3} \quad (4.21)$$

Μια άλλη μορφή αυτών των σχέσεων [56] είναι:

$$E_T = \sigma_o \left[8.88rt + \frac{\pi Lt^2}{4H} + 4.59 \frac{Ht^2}{r} \right] 2H \quad (4.22)$$

$$P_m = \frac{E_T}{\delta_e} = \sigma_o \left[12.16rt + \frac{1.08Lt^2}{H} + \frac{6.3Ht^2}{r} \right] \quad (4.23)$$

4.3. Υπολογισμός παραμέτρων της ανάλυσης

Με σκοπό την αύξηση της χρηστικότητας του μετάλλου και την ανταγωνιστικότητα σε σχέση με άλλα υλικά στις κατασκευαστικές εφαρμογές, ιδιαίτερα στην αυτοκίνηση, απαιτείται μια βαθύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων της κατάρρευσης των λεπτότοιχων συγκολλητών κατασκευών. Η γνώση των μηχανισμών κατάρρευσης επιτρέπει την επέκταση στα υπάρχοντα μαθηματικά μοντέλα για την πρόβλεψη της απόδοσης της κατασκευής, συνυπολογίζοντας την επιρροή λόγω του μήκους της φλάντζας και του ύψους του δοκιμίου.

Η ανάπτυξη του σχεδιασμού των οχημάτων κινητοποιείται από την ανάγκη για τη μείωση του βάρους των διαφόρων εξαρτημάτων ώστε να επιτευχθεί η βελτίωση της απόδοσης καυσίμου και η μείωση του κόστους παραγωγής. Εξετάζοντας τον τρόπο που επηρεάζεται μια κατασκευή με διατομή τύπου top-hat από το μήκος της φλάντζας, μείωση του βάρους μπορεί να επέλθει από τη μείωση του μήκους της αν είναι δυνατόν με βάση τους περιορισμούς που έχουμε θέσει.

Στη συνέχεια εξετάζονται ορισμένοι συντελεστές που χρησιμοποιούνται ως ενδείξεις ορθής κατασκευής ενός συστήματος απορρόφησης ενέργειας με διατομή τύπου top-hat ή double-hat, κατά τη στατική του φόρτιση [59].

4.3.1. Παράμετροι crashworthiness

Πλήθος από συντελεστές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της απόδοσης διαφορετικών διατομών. Καλός σχεδιασμός ως προς το crashworthiness μπορεί να θεωρηθεί όταν η ενέργεια που απορροφά το σύστημα προκύπτει με ελεγχόμενο τρόπο και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κατά την κατάρρευση δεν ξεπερνούν τα μέγιστα επιτρεπτά όρια. Οι παράμετροι crashworthiness αντιπροσωπεύουν τις φυσικές μετρήσεις από τις οποίες εξαρτάται η γεωμετρία του συστήματος.

Μέσο φορτίο κατάρρευσης P_m

$$P_m = \frac{E_a}{\delta_f} \quad (4.24)$$

όπου E_a είναι η συνολική ενέργεια που απορροφάται από την κατασκευή και δ_f η μετατόπιση που επιβάλλουμε κατά τον άξονα του δοκιμίου

Αποτελεί ένδειξη της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας ως προς την αξονική μετατόπιση που απαιτείται για την απορρόφηση. Για ένα σχεδιαστή οχήματος αυτή η τιμή είναι σημαντική καθώς ορισμένες συσκευές απορρόφησης ενέργειας έχουν περιορισμό του επιτρεπτού ύψους της κατασκευής. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ανοχές του σώματος του επιβάτη ώστε να εξασφαλισθεί ότι δεν θα προκληθεί τραυματισμός λόγω της μεγάλης τιμής του μέσου φορτίου κατάρρευσης και κατά συνέπεια μεγάλης επιβράδυνσης.

Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης P_{max}

Δίνει μια ένδειξη για το φορτίο που απαιτείται ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία της κατάρρευσης και ακολούθως η απορρόφηση της ενέργειας. Θα πρέπει να βρίσκεται επίσης εντός των ορίων για το ανθρώπινο σώμα. Σκοπός είναι η μείωση της τιμής του μέγιστου φορτίου που επιτυγχάνεται με τον έλεγχο του μηχανισμού παραμόρφωσης.

Ένας σχεδιαστικός τρόπος που χρησιμοποιείται είναι η τοποθέτηση διαφόρων τύπων εκκινητών παραμόρφωσης (*triggers*) όπως για παράδειγμα οπές (*trigger holes*) που αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τρόπο στα αυτοκίνητα και τα αεροπλάνα. Κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης η γεωμετρία του trigger αποτελεί την αδύνατη διατομή που προκαλεί της εκκίνηση της κατάρρευσης τοπικά λόγω συγκέντρωσης τάσεων. Στη συνέχεια, η παραμόρφωση επεκτείνεται σταδιακά σε όλο το σώμα [18].

Απορρόφηση ενέργειας E_a

Η ενέργεια που απορροφά το σύστημα κατά την κατάρρευση είναι ενδεικτική και επιτρέπει σύγκριση αποτελεσμάτων ανάμεσα σε διαφορετικές μορφές διατομών και άλλων χαρακτηριστικών. Ο θεωρητικός υπολογισμός αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο ενώ προκύπτει και από τα πειραματικά διαγράμματα.

Ειδική ενέργεια απορρόφησης ανά μάζα, S.E.A.

Ο αριθμός SEA (mass specific energy absorption) αποτελεί ένα διαδεδомένο δείκτη για τον καθορισμό της αποδοτικότητας της μάζας της κατασκευής του συστήματος και μετρείται σε μονάδες απορροφόμενης ενέργειας ανά μονάδα βάρους [57].

$$S.E.A. = \frac{E_a}{m} \quad (4.25)$$

Αποδοτικότητα σύγκρουσης e_o

Λόγω των χαρακτηριστικών της διαδικασίας κατάρρευσης, δεν χρησιμοποιούνται όλες οι κατασκευές απορρόφησης ενέργειας σε κάθε διαδικασία, οπότε ένας καλός δείκτης για την ποσότητα υλικού που χρησιμοποιείται κατά την κατάρρευση προκύπτει [36]:

$$e_o = \frac{\delta_f}{l} \quad (4.26)$$

όπου l το ύψος του δοκιμίου.

Για κατασκευές όπου όλο το υλικό της κατασκευής παραμορφώνεται με σταθερό ρυθμό η τιμή του e_o είναι μεγάλη, ενώ αντίθετα για σύστημα κακού σχεδιασμού η τιμή είναι μικρή. Η μετατόπιση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη αποδοτικότητας της σύγκρουσης είναι αυτή για την οποία αρχίζει η παραμόρφωση να είναι ασταθής.

Αποτελεσματικότητα κατασκευής η

Η αποτελεσματικότητα που διέπει την κατασκευή επιτρέπει τη σύγκριση ανάμεσα σε κατασκευές με διαφορετικές ιδιότητες υλικού και ορίζεται ως [54], [24].

$$\eta = \frac{P_m}{(2a + 2b + 4f)t \cdot \sigma_o} \quad (4.27)$$

4.3.2. Παράμετροι σχεδιασμού

Για να υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της επίδρασης των διαφορετικών σχεδιαστικών επιλογών στο crashworthiness της κατασκευής, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παράμετροι [59].

Λόγος διατομής β_σ

Χρησιμοποιείται για τη σύγκριση διαφορετικών διατομών και τον έλεγχο της επιρροής στην κατάρρευση του δοκιμίου. Οπότε, για την περίπτωση διατομών μορφής top-hat και double-hat ισχύει

$$\beta_\sigma = \frac{\text{Περίμετρος διατομής}}{\text{Περίμετρος φλάντζας}} = \frac{2a + 2b}{4f} \quad (4.28)$$

Αντίστοιχα υπολογίζεται ο λόγος β_σ για την περίπτωση περίπλοκων διατομών.

Αυτή η παράμετρος επιτρέπει τον έλεγχο της επιρροής του μεγέθους της φλάντζας και της διατομής του δοκιμίου.

Λόγος σταθερότητας α_σ

Ελέγχει την επιρροή του μήκους του δοκιμίου και της διατομής ως προς τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Για την περίπτωση top-hat και double-hat διατομών είναι

$$\alpha_\sigma = \frac{\text{Ολική περίμετρος διατομής}}{\text{Μήκος δοκιμίου}} = \frac{2\alpha + 2b + 4f}{l} \quad (4.29)$$

Λόγος πυκνότητας κατασκευής φ_σ

Ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του υλικού που χρησιμοποιείται προς τον όγκο που εσωκλείεται εντός αυτής και είναι

$$\varphi_\sigma = \frac{\text{Όγκος υλικού}}{\text{Όγκος που περικλείεται}} \quad (4.30)$$

Οπότε για top-hat και double-hat διατομές

$$\varphi_\sigma = \frac{(2\alpha + 2b + 4f) \cdot t}{ab} \quad (4.31)$$

ενώ για τετραγωνική διατομή όπου $\alpha=b$, έχουμε

$$\varphi_\sigma = \frac{4(b + f) \cdot t}{b^2} \quad (4.32)$$

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

5.1. Εισαγωγή

Κατά το πειραματικό σκέλος της διπλωματικής πραγματοποιήθηκε συμπίεση λεπτότοιχων δοκιμίων υπό την επίδραση στατικού φορτίου. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Κάθε δοκίμιο αποτελείται από δύο ελάσματα διαμορφωμένα κατά περίπτωση και συγκολλημένα μεταξύ τους σημειακά. Εξετάστηκε η συμπεριφορά των δοκιμίων κατά τη συμπίεση με διαφορετικές παραμέτρους όπως είναι το μήκος της φλάντζας, το σχήμα της διατομής και το γέμισμα του εσωτερικού όγκου με αφρό πολυουρεθάνης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα αφορούν το αναπτυσσόμενο φορτίο, την ενέργεια που απορροφάται και τη μορφή κατάρρευσης των δοκιμίων.

5.2. Εξοπλισμός και συνθήκες πειράματος

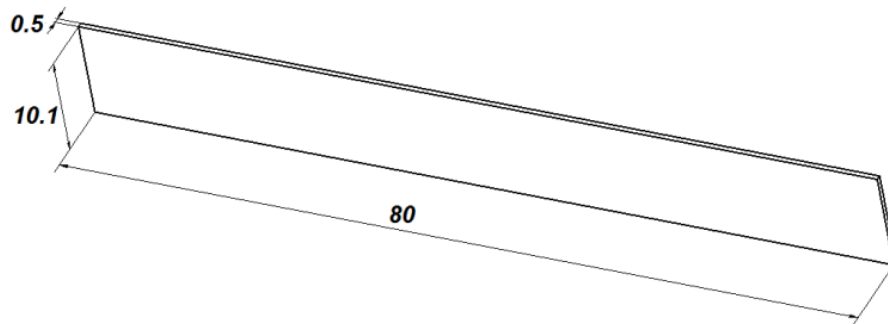
5.2.1. Υλικό δοκιμίων και διαμόρφωση

Τα σταθερά χαρακτηριστικά των παραγόμενων δοκιμίων είναι:

- υλικό: χάλυβας
- μέτρο ελαστικότητας $E = 207000\text{MPa}$
- πυκνότητα, $\rho = 7535\text{ kg/m}^3 = 0.007535\text{ gr/mm}^3$
- λόγος Poisson, $\nu = 0.28$
- πάχος ελάσματος, $t = 0.5\text{ mm}$
- ύψος ελάσματος, $l = 100\text{ mm}$
- ελεύθερη περίμετρος διατομής (χωρίς το μήκος των φλάντζων), 110 mm
- πλήθος σημειακών συγκολλήσεων: 4 σε κάθε φλάντζα
- απόσταση 1^{ns} συγκόλλησης από το άκρο του δοκιμίου, $sw_1 = 5\text{ mm}$
- βήμα σημειακών συγκολλήσεων, $sw_2 = 30\text{ mm}$

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υλικού, πραγματοποιήθηκε δοκιμή εφελκυσμού σε πλακίδιο διαστάσεων $80 \times 10.1 \times 0.5\text{mm}^3$. Αρχικά, από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε το διάγραμμα φορτίου P – παραμόρφωσης DL και στη συνέχεια με κατάλληλους υπολογισμούς προέκυψε η καμπύλη πραγματικών τάσεων – πραγματικών παραμορφώσεων του υλικού.

Έστω ότι A_0 είναι η αρχική διατομή του πλακιδίου, L_0 , L το αρχικό ελεύθερο και το τρέχον ύψος του πλακιδίου αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1: Διαστάσεις πλακιδίου δοκιμής εφελκυσμού

Συμβατική τάση s – Συμβατική παραμόρφωση e

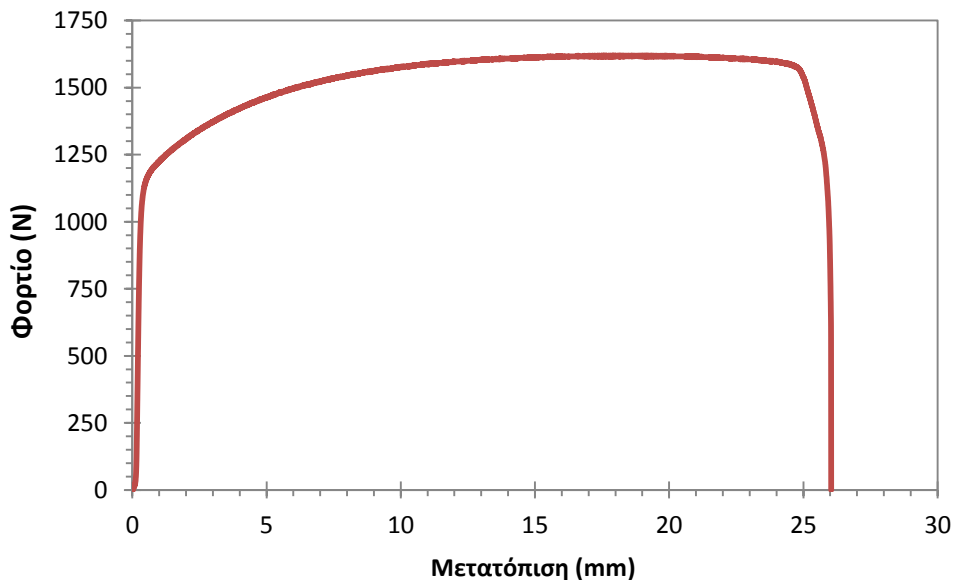
$$e = \frac{DL}{L_o} \tag{5.1}$$

$$s = \frac{P}{A_o} \tag{5.2}$$

Πραγματική τάση s_I – Πραγματική παραμόρφωση e_I

$$e_I = \ln \left(\frac{L}{L_o} \right) \tag{5.3}$$

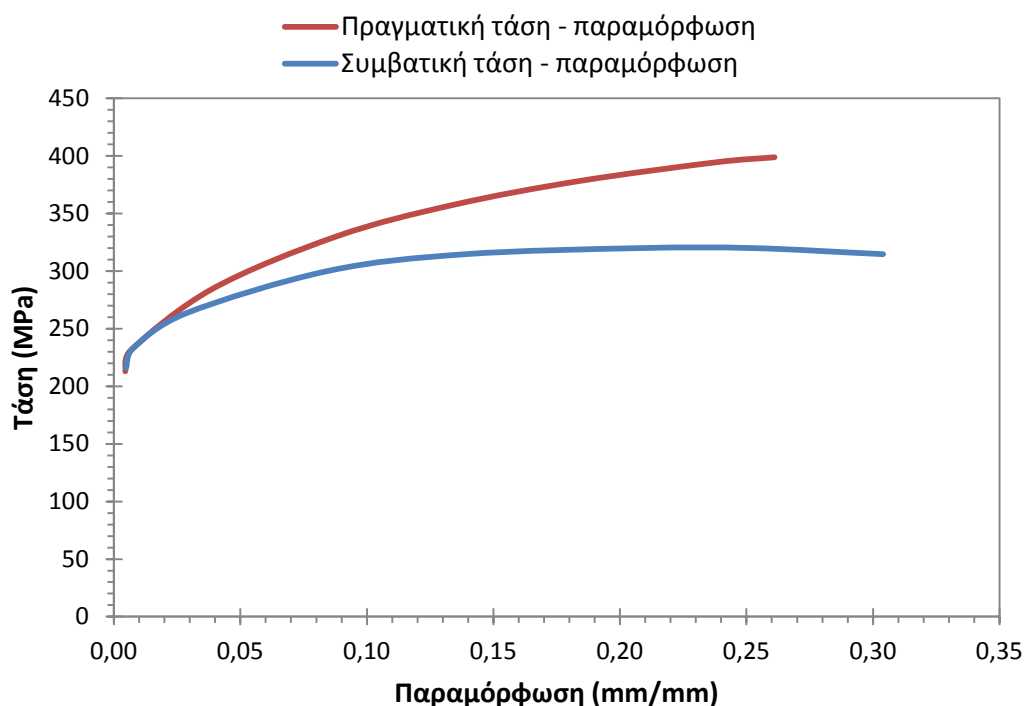
$$s_I = s (1 + e_I) \tag{5.4}$$



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης πλακιδίου

Η απότομη μείωση του φορτίου στο ανωτέρω διάγραμμα οφείλεται στη θραύση του δοκιμίου. Η ρωγμή του δοκιμίου ήταν υπό κλίση 45° που αποτελεί ένδειξη ορθής τοποθέτησης και εξέλιξης σύμφωνα με τη θεωρία.

Από το πλακίδιο που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή εφελκυσμού μπορούν να προκύψουν προσεγγιστικά αποτελέσματα για την καμπύλη του υλικού, από το όριο διαρροής και πέρα, δηλαδή μετά την ελαστική περιοχή.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων υλικού

Το αρχικό έλασμα διαμορφώθηκε στο επιθυμητό σχήμα με τη βοήθεια στράντζας και στη συνέχεια συγκολλήθηκε με πόντες. Συνολικά παράχθηκαν 18 δοκίμια, εκ των οποίων 9 πληρώθηκαν εσωτερικά με αφρό πολυουρεθάνης χωρίς να αλλάξει άλλο χαρακτηριστικό στη γεωμετρία της λεπτότοιχης κατασκευής. Τα 3 πρώτα δοκίμια έχουν διατομή double-hat και μεταβλητό μήκος φλάντζας (10mm, 15mm, 20mm). Τα υπόλοιπα 6 δοκίμια έχουν μήκος ελάσματος ίσο με 130mm, μήκος φλάντζας ίσο με 10mm και μεταβλητό σχήμα διατομής.

5.2.2. Συνθήκες πειράματος

Η συμπίεση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε μηχανική πρέσσα δοκιμών INSTRON 4482 με βασικά χαρακτηριστικά ως εξής:

- ονομαστικό φορτίο 10kN
- μηχανισμό κινητής κεφαλής
- μέγιστη ταχύτητα κεφαλής 500 mm/min
- μέγιστο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα, 75kN
- μέγιστη ταχύτητα κεφαλής στο μέγιστο φορτίο, 250 mm/min.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πρέσσα είναι:

- διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης
- απορροφόμενη ενέργεια πρόσκρουσης
- μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο
- τάση διαρροής για παραμόρφωση 0.2%
- μέση τάση συμπίεσης.

Τα δοκίμια συμπίεστηκαν μέχρι το 50% του αρχικού ύψους, δηλαδή $\delta_f = 50$ mm σε συνθήκες περιβάλλοντος θερμοκρασίας 18 °C. Η φόρτιση των δοκιμίων θεωρείται στατική καθώς πραγματοποιήθηκε με ταχύτητα κεφαλής, $u = 20$ mm/min οπότε συνολικό χρόνο συμπίεσης 150 sec.

5.3. Παραγωγή πολυουρεθανικού αφρού

5.3.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά αφρού

Για την πλήρωση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ο σκληρός αφρός (*rigid foam*) Baytherm BD-100 της εταιρίας BAYER με πυκνότητα 250 kg/m³. Τα δοκίμια με ένδειξη F συμβολίζουν αυτά που έχουν πληρωθεί με αφρό πολυουρεθάνης στο εσωτερικό τους.

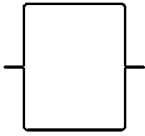
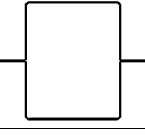
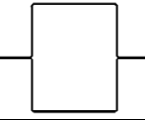



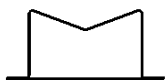
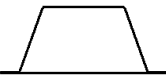
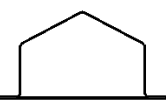
Το πρώτο στάδιο για την παρασκευή του αφρού είναι ο υπολογισμός των απαιτούμενων ποσοτήτων των δύο επιμέρους συστατικών, της πολυόλης και της ισοκυανάτης. Γνωρίζοντας ότι η πυκνότητα του αφρού είναι 250 kg/m³ μπορεί να υπολογιστεί το συνολικό βάρος του αφρού πολλαπλασιάζοντας την πυκνότητα με τον εσωτερικό όγκο κάθε δοκιμίου. Ο εσωτερικός όγκος ισούται με το εμβαδό της διατομής επί το ύψος του δοκιμίου. Τελικά επειδή από τα στοιχεία του πίνακα 5.1 η αναλογία πολυόλης – ισοκυανάτης που απαιτείται είναι 1:1 προκύπτουν οι τιμές του βάρους των δύο συστατικών όπως καταγράφονται στον πίνακα 5.3.

Αναλογία πρόσμιξης	100:100 DESMODUR 44 V 20 L	
Θερμοκρασία ακατέργαστων υλικών	24 °C / 22 °C	
Θερμοκρασία σχηματισμού	40 ± 5 °C	
Εργαστηριακοί χρόνοι αντίδρασης (22 °C)	χρόνος κρεμοποίησης	35 ± 3''
	χρόνος πήξεως	105 ± 5''
	χρόνος πλήρους λειτουργικότητας	135 ± 10''
Πυκνότητα ελεύθερης εκτόνωσης	100 ± 10 kg/m ³	
Πυκνότητα αφρού	250 ± 20 kg/m ³	
Σταθερότητα αποθήκευσης	3 μήνες στους 20 ± 5 °C	
Εφαρμογές	παραγωγή τεχνικών μερών	

Πίνακας 5.1: Τεχνικές προδιαγραφές αφρού BD-100

Πυκνότητα αφρού	DIN 53420	250 kg/m ³
Συρρίκνωση	DIN 53464	0.55 %
Απορρόφηση ύδατος (20 °C, 14 ημέρες)	DIN 53428	0.4 % vol
Αντοχή συμπίεσης για 10% παραμόρφωση	DIN 53421	5 MPa
Θερμική αγωγιμότητα (24 °C)	DIN 18164	0.057 W/mK
Συντ. θερμικής αγωγιμότητας	DIN 53431	900x10 ⁻⁶ /K
Αντίσταση σε φωτιά	DIN 4102	B3

Πίνακας 5.2: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες αφρού BD-100

α/α δοκιμίου	μορφή δοκιμίου	εσωτερικός όγκος (x10 ⁻³ m ³)	βάρος πολυόλης (gr)	βάρος ισοκυανάτης (gr)	ολικό βάρος αφρού (gr)
1F		0.3081	38.5	38.5	77.0
2F		0.3078	38.4	38.4	76.8
3F		0.3072	38.4	38.4	76.8
4F		0.1557	19.5	19.5	39.0
5F		0.1463	18.3	18.3	36.6
6F		0.1884	23.6	23.6	47.2
7F		0.1328	16.6	16.6	33.2
8F		0.1758	21.2	21.2	42.4
9F		0.1759	21.2	21.2	42.4

Πίνακας 5.3: Υπολογισμός βάρους πολυόλης – ισοκυανάτης

5.3.2. Διαδικασία πλήρωσης δοκιμίου με αφρό

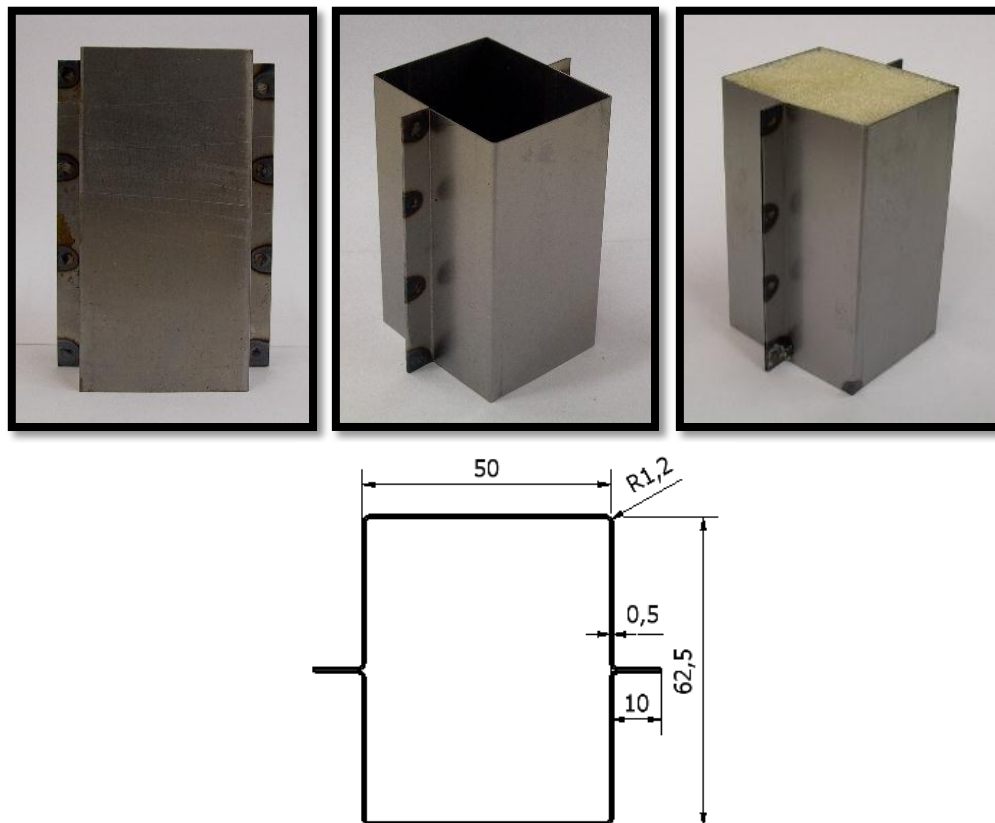
Για την προετοιμασία των δοκιμίων, καλύφθηκε ο πάτος με ταινία για την αποφυγή διαρροής κατά την υγρή φάση του μίγματος. Όταν ο αφρός άρχισε να διογκώνεται και αφού έφτασε στο μέσο του ύψους (αποφυγή ύπαρξης έγκλειστου αέρα), τότε το δοκίμιο σκεπάστηκε με τάκο κατάλληλου βάρους μέχρι την πήξη του αφρού και τη διακοπή διόγκωσης περίπου 110'' αργότερα.

Από τον κατασκευαστή προτείνεται θερμοκρασία δωματίου 20-22 °C ώστε να εξασφαλίζεται η άρτια συμπεριφορά των αντιδρώντων.

5.4. Πειραματικά δοκίμια και διαστάσεις

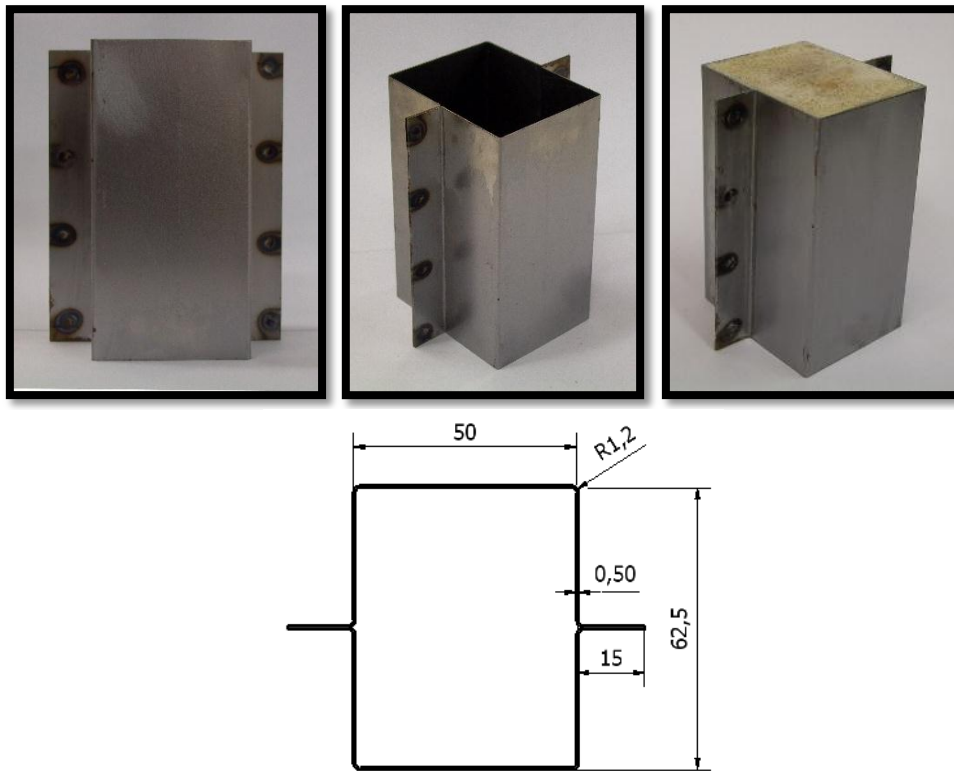
Στις επόμενες σελίδες παραθέτονται τα σχήματα και οι διαστάσεις κάθε δοκιμίου. Τα δοκίμια με ένδειξη **F** συμβολίζουν αυτά που έχουν πληρωθεί με αφρό πολυουρεθάνης στο εσωτερικό τους.

5.4.1. Δοκίμια 1 – 1F



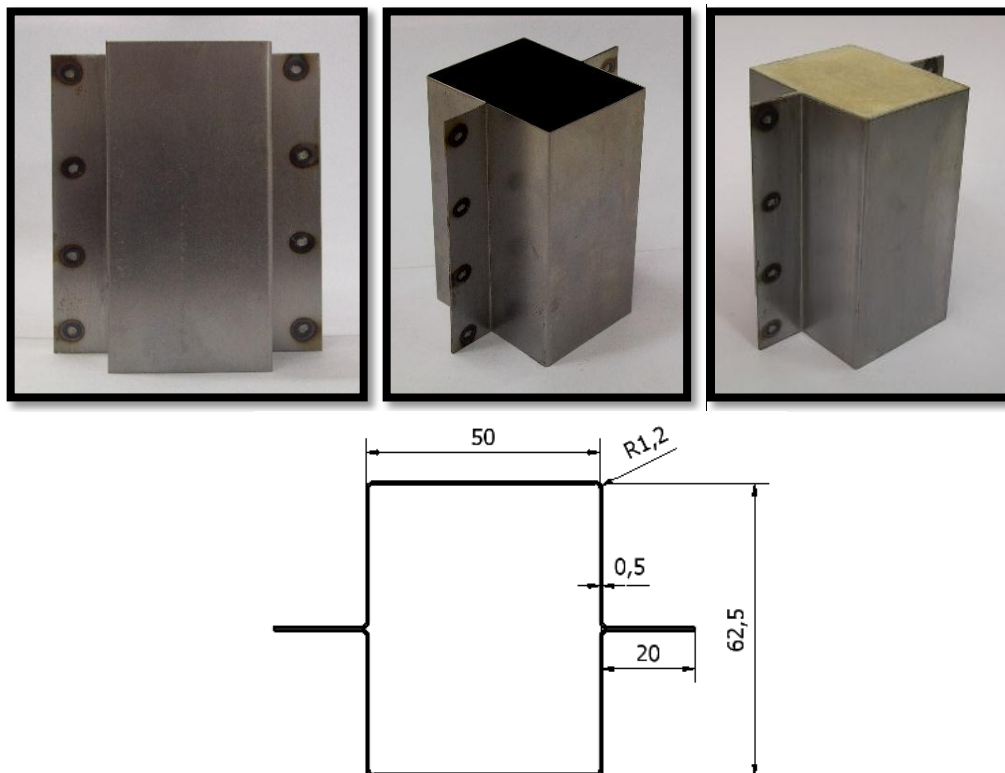
Σχήμα 5.4: Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 1 και 1F

5.4.2. Δοκίμια 2 – 2F



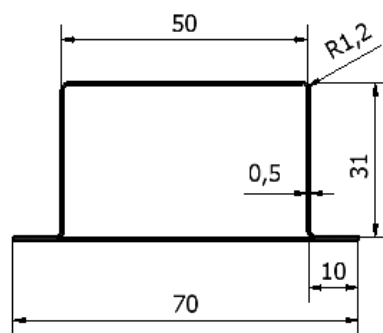
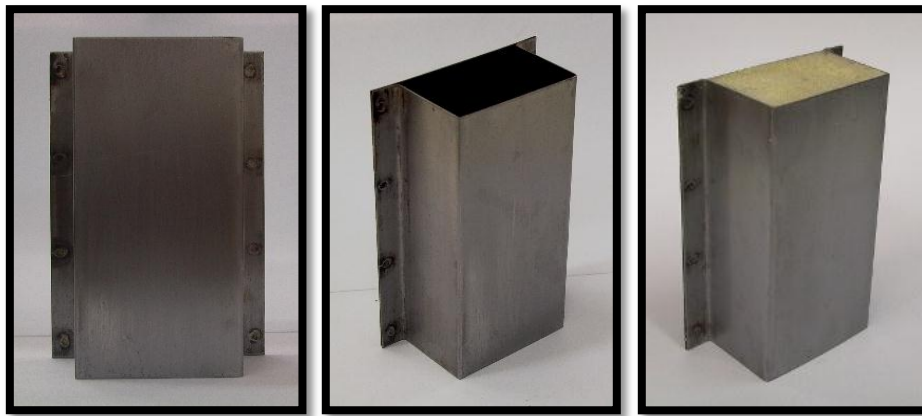
Σχήμα 5.5: Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 2 και 2F

5.4.3. Δοκίμια 3 – 3F



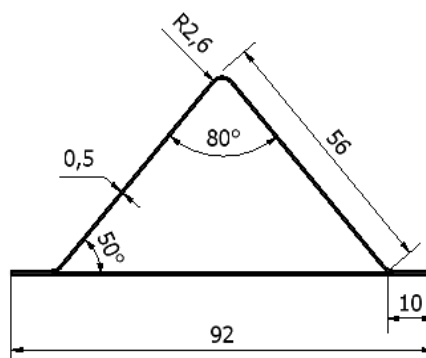
Σχήμα 5.6: Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 3 και 3F

5.4.4. Δοκίμια 4 – 4F



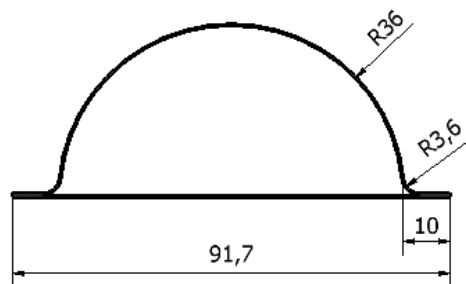
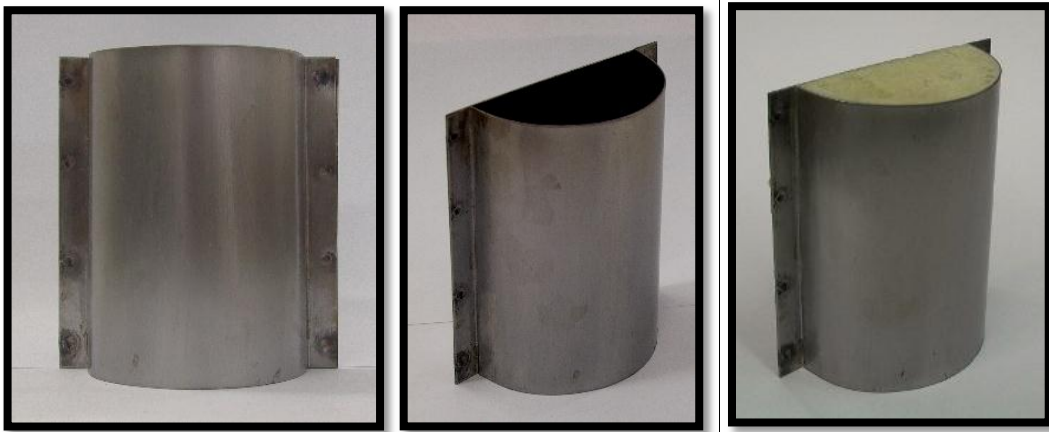
Σχήμα 5.7: Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 4 και 4F

5.4.5. Δοκίμια 5 – 5F



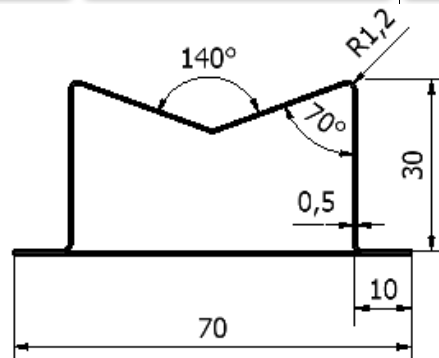
Σχήμα 5.8: Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 5 και 5F

5.4.6. Δοκίμια 6 – 6F



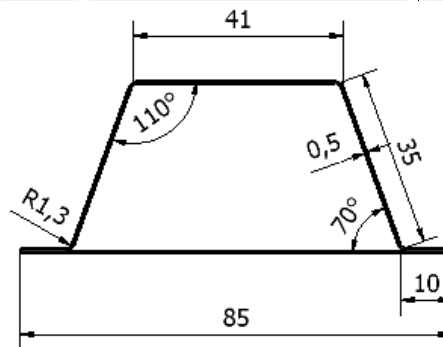
Σχήμα 5.9: Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 6 και 6F

5.4.7. Δοκίμια 7 – 7F



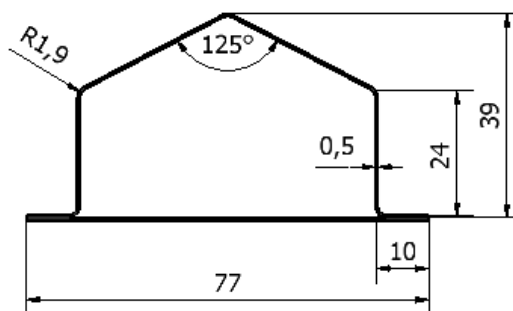
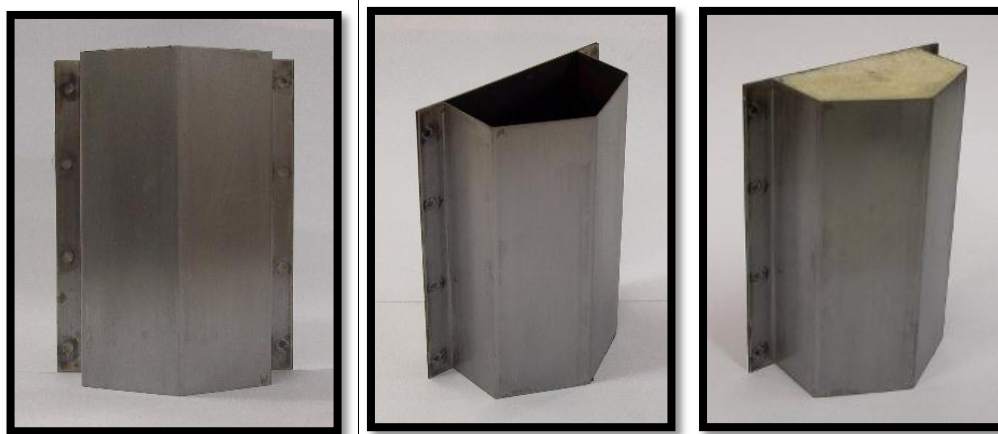
Σχήμα 5.10: Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων 7 και 7F

5.4.8. Δοκίμα 8 – 8F



Σχήμα 5.11: Μορφή και διαστάσεις δοκιμών 8 και 8F

5.4.9. Δοκίμα 9 – 9F



Σχήμα 5.12: Μορφή και διαστάσεις δοκιμών 9 και 9F

6. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

6.1. Εισαγωγή

Ο σκοπός της ανάλυσης μιας κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία είναι η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κατασκευής πέρα από την αστοχία. Η αστοχία συνήθως προκαλείται ως αποτέλεσμα τοπικής διαρροής και θραύσης, ορισμένες φορές και σε συνδυασμό με τοπική ή ολική κάμψη. Οι κυριότεροι λόγοι που καθιστούν την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κατασκευής με χρήση ΠΣ είναι:

- Η διαδικασία αστοχίας επηρεάζεται από τυχαίες και απροσδιόριστες ατέλειες του σχήματος ή του υλικού.
- Η μοντελοποίηση του υλικού κατά την ανάλυση δεν περιγράφει πλήρως τις φυσικές ιδιότητές του.
- Ο αλγόριθμος επίλυσης δεν προσεγγίζει επαρκώς το μοντέλο κατάρρευσης και τη διάδοση του στο υπόλοιπο σώμα.

Γενικά, η πρόβλεψη της έναρξης αστοχίας δεν είναι όσο δύσκολη η πρόβλεψη της μετέπειτα διαδικασίας και η τελική μορφή αστοχίας καθώς η διαδικασία που οδηγεί σε έναρξη αστοχίας, ακόμα και με ύπαρξη ατελειών, είναι πιο κατανοητή. Για παράδειγμα, τα μοντέλα που περιγράφουν μη-γραμμικά υλικά, συχνά υπάρχουν στις βάσεις δεδομένων των προγραμμάτων, όμως η εξέλιξη της διαδικασίας φόρτισης είναι δύσκολη λόγω μη γραμμικών διαδικασιών όπως η μεγάλη μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού και της γεωμετρίας ή η ανακατανομή των φορτίων που ασκούνται [9].

Ορθά αποτελέσματα από την ανάλυση με ΠΣ μπορεί να προκύψουν όταν η μεταβολή των μεγεθών υπολογισμού είναι ομαλή και γίνεται σωστή και πυκνή πλεγματοποίηση της κατασκευής. Προβλήματα στην ανάλυση προκύπτουν από ξαφνικές μεταβολές των μεταβλητών όπως π.χ. τον λυγισμό. Έτσι, μπορεί να απαιτούνται πολλά ΠΣ ή μικρότερο βήμα επανάληψης αυξάνοντας το υπολογιστικό κόστος.

6.2. Ο κώδικας LS – DYNA

Για την πραγματοποίηση της υπολογιστικής προσομοίωσης της μονοαξονικής συμπίεσης των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας LS-DYNA 971 version date 2006 της εταιρίας Livermore Software Technology Corporation (LSTC).

Ο κώδικας LS-DYNA είναι κώδικας πεπερασμένων στοιχείων [33], κατάλληλος για μη γραμμική δυναμική ανάλυση κατασκευών σε τρεις διαστάσεις με μεγάλο πλήθος υλικών στη βιβλιοθήκη του. Η μεθοδολογία επίλυσης στηρίζεται στην explicit ολοκλήρωση του χρόνου.

Η διαδικασία που ακολουθείται διαιρείται σε τρεις υποπεριοχές: τη μοντελοποίηση, την επίλυση, τον έλεγχο των αποτελεσμάτων. Η μοντελοποίηση πραγματοποιείται από τον pre-processor ETA Femb 28.0 built date 2005 και αποτελείται από τα εξής κύρια βήματα:

- Ορισμός της γεωμετρίας και απόδοση διαστάσεων
- Διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία και προσδιορισμός των ιδιοτήτων τους.
- Καθορισμός υλικών και φυσικών ιδιοτήτων για τις επιμέρους οντότητες της κατασκευής.
- Ορισμός διεπιφανειών μεταξύ των διαφορετικών οντοτήτων της κατασκευής αλλά και των ΠΣ μεταξύ τους για την αποφυγή φαινομένων λανθασμένης εισχώρησης.
- Προσδιορισμός αρχικών και συνοριακών συνθηκών του μοντέλου, όπως η αρχική φόρτιση, η διάρκεια του φαινομένου, οι στηρίξεις και όλοι σχετικοί περιορισμοί.

Μετά την επίλυση του μοντέλου γίνεται η ανάλυση στον post-processor όπου εξετάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα. Σε περίπτωση μη αποδεκτού μοντέλου, αυτό επαναπροσδιορίζεται και πραγματοποιούνται διορθωτικές αλλαγές στον pre-processor. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να προκύψει ένα αποδεκτό μοντέλο προσομοίωσης.

Οι μονάδες μέτρησης που ισχύουν εξαρτώνται από τον χρήστη οπότε είναι οι ακόλουθες:

- μήκος: mm
- μάζα: gr
- χρόνος msec

οπότε προκύπτουν τα μεγέθη:

- δύναμη: N
- τάση: MPa

6.3. Διαδικασία μοντελοποίησης στο LS – DYNA

6.3.1. Ορισμός γεωμετρίας και φυσικών ιδιοτήτων

Γεωμετρία

Επειδή το δοκίμιο αποτελείται από δύο λεπτότοιχα ελάσματα πάχους 0.5mm χρησιμοποιήσαμε στοιχεία κελύφους τα οποία έχουν 2 διαστάσεις. Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας έγινε στο μέσο επίπεδο του ελάσματος. Με αυτή τη μέθοδο μειώνουμε το υπολογιστικό κόστος χωρίς να μειώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Γι' αυτό το λόγο η κάθετη απόσταση των φλαντζών δεν είναι μηδενική αλλά ίση με το πάχος, δηλαδή

0.5mm. Σε αυτή την απόσταση συνεισφέρει η κάθε φλάντζα κατά το ήμισυ. Η αρχή των αξόνων διέρχεται από το επίπεδο όπου θα εφάπτονταν οι δύο φλάντζες αν μοντελοποιούνταν με πάχος.

Για τη μοντελοποίηση του δοκιμίου θεωρήσαμε δύο parts, ένα για κάθε έλασμα. Ο σχηματισμός της γεωμετρίας έγινε σχεδιάζοντας γραμμές από τις οποίες στη συνέχεια προέκυψαν επιφάνειες. Επόμενο βήμα είναι η διακριτοποίηση κάθε επιφάνειας σε πεπερασμένα στοιχεία. Γνωρίζοντας το πάχος του ελάσματος και τον τρόπο κατάρρευσης, κάθε ΠΣ έχει διαστάσεις περίπου $2 \times 2 \text{mm}^2$.

Οι άνω και κάτω πλάκα που προσομοιώνουν τις πλάκες του εμβόλου είναι απαραμόρφωτες σε σχέση με το έλασμα. Γι' αυτό και κάθε πλάκα αποτελεί ένα ενιαίο πεπερασμένο στοιχείο.

Ιδιότητες

Στη συνέχεια σε κάθε part δίνονται οι ιδιότητες του υλικού. Από την καρτέλα Property, στο έλασμα αποδίδονται στοιχεία κελύφους πάχους 0.5mm σε κάθε κόμβο ενώ στις πλάκες, απαραμόρφωτα στοιχεία.

Μέσω της καρτέλας Material το έλασμα θα μοντελοποιηθεί με το υλικό MAT 24: PIECEWISE LINEAR PLASTICITY, με τις εξής ιδιότητες:

- πυκνότητα: 0.007535 kg/m^3
- μέτρο ελαστικότητας: 207000 MPa
- λόγος Poisson: 0.28
- καμπύλη $\sigma - \epsilon$ πέρα από το όριο διαρροής μέσω 8 ζευγών, δηλαδή

a/a	σ (MPa)	ϵ (mm/mm)
1	213.06	0.0000
2	231.17	0.0021
3	284.38	0.0343
4	330.28	0.0836
5	357.45	0.1294
6	378.09	0.1789
7	394.48	0.2334
8	398.87	0.2566

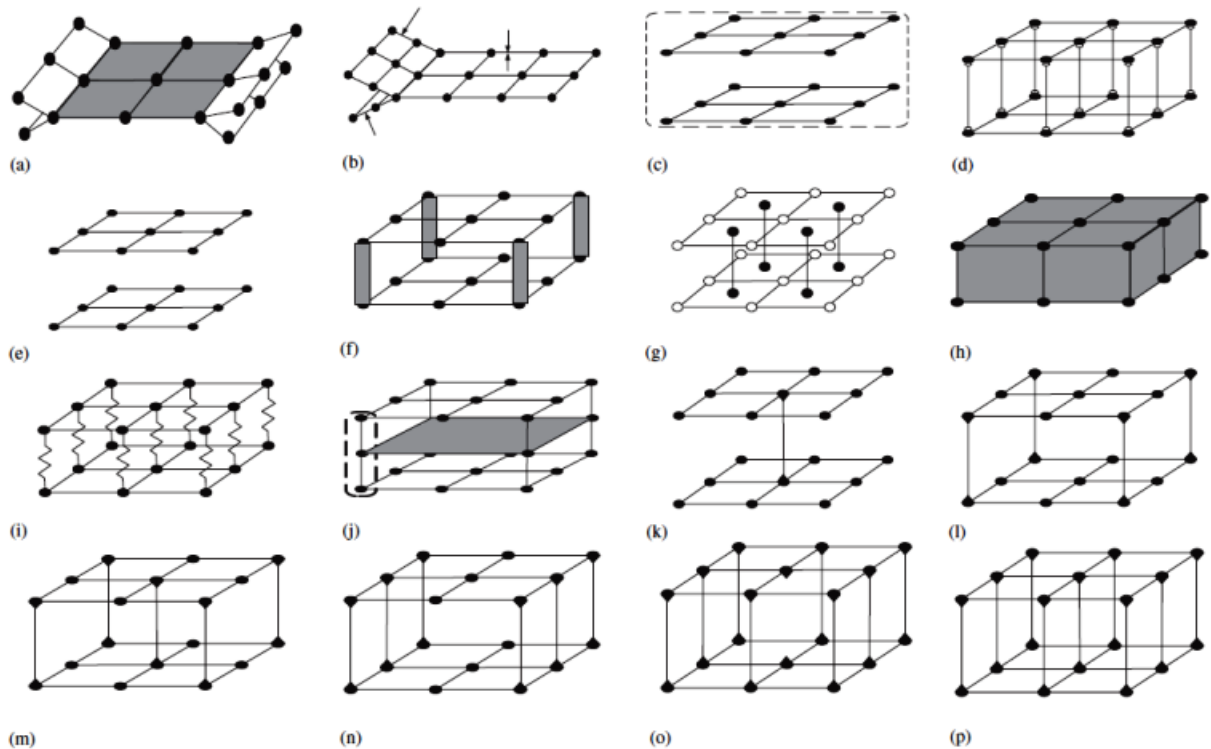
Πίνακας 6.1: Ζεύγη τιμών για τον προσδιορισμό της καμπύλης $\sigma - \epsilon$ υλικού

Οι πλάκες θα μοντελοποιηθούν με το υλικό MAT 20: RIGID. Η κάτω πλάκα παραμένει ακλόνητη ενώ η άνω επιτρέπει τη μετατόπιση κατά τον άξονα x.

6.3.2. Μοντελοποίηση σημειακών συγκολλήσεων

Η μοντελοποίηση των σημειακών συγκολλήσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικές μεθόδους όπως στο σχ.6.1. Από τη βιβλιογραφία [62] προκύπτει ως ενδεδειγμένος τρόπος μοντελοποίησης η θεώρηση άκαμπτων κόμβων στο σημείο των συγκολλήσεων. Άλλες πιθανές μέθοδοι που φαίνεται να προσεγγίζουν ορθά τη σημειακή συγκόλληση είναι: με ταύτιση των κόμβων γύρω από τη συγκόλληση (a), με σύνδεση των 9 κόμβων κάθε φλάντζας μέσω άκαμπτων δοκών με τους απέναντι κόμβους της εφαπτόμενης φλάντζας (p), με σύνδεση των πεπερασμένων στοιχείων κελύφους της συγκόλλησης με ΠΣ όγκου (h).

Στα αρνητικά της συγκεκριμένης μοντελοποίησης μπορεί να καταλογιστεί ότι δεν εξετάζει την περίπτωση αστοχίας των συγκολλήσεων μερικώς ή ολικώς.



Various spot-weld models (a) Common element model (CM), (b) equivalent thickness model (QE), (c) coupling-node model (CP), (d) truss model (TR), (e) rigid-node model (RI), (f) beam model (BM1), (g) surface node beam model (BM2), (h), volume element model (BK), (i) spring model (SP), (j) shell element model (SH) The spot-weld area covers four shell elements, (k) rigid-bar model (SW1: 1 bar), (l) rigid-bar model (SW2: 4 bar), (m) rigid-bar model (SW3: 5 bar), (n) rigid-bar model (SW4: 6 bar), (o) rigid-bar model (SW5: 8 bar) and (p) rigid-bar model (SW6: 9 bar).

Σχήμα 6.1: Διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης σημειακών συγκολλήσεων

Με αυτό τον τρόπο δημιουργήσαμε ένα NODE SET για κάθε συγκόλληση που αποτελείται από τους απέναντι κόμβους κάθε ελάσματος. Στη συνέχεια περιορίστηκαν οι κόμβοι με την καρτέλα CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY.

6.3.3. Ορισμός διεπιφανειών

Οι διεπιφάνειες επαφής που ορίζουμε είναι δύο ειδών, της κάθε πλάκας με τους κόμβους του αντίστοιχου τμήματος των ελασμάτων που αναμένεται να έρθει σε επαφή και των πεπερασμένων στοιχείων του ελάσματος μεταξύ τους. Αυτό γίνεται με την καρτέλα Set και σκοπό έχει να μην εισέρχεται το ένα ΠΣ εντός του γειτονικού του κατά την παραμόρφωση. Ο συντελεστής στατικής τριβής ορίζεται 0.20 ενώ δυναμικής 0.15. Διαφοροποίηση υπάρχει κατά τη μοντελοποίηση των δοκιμίων που εσωτερικά έχουν ενισχυθεί με πολυμερικό αφρό.

6.3.4. Προσδιορισμός συνθηκών συμπίεσης

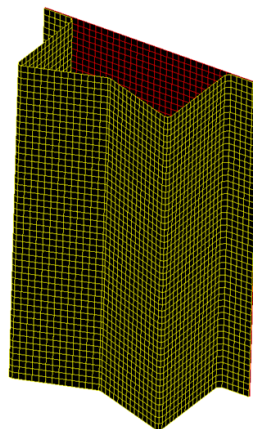
Τα εξαγόμενα στοιχεία που επιθυμούμε να επεξεργαστούμε στη συνέχεια στον post-processor είναι η φάση του φαινομένου και το αναπτυσσόμενο φορτίο συμπίεσης.

Μέσω τα καρτέλας DynaMisc, καθορίζουμε την καμπύλη μετατόπισης της άνω πλάκας σε συνάρτηση με το χρόνο και στη συνέχεια την αποδίδουμε στη άνω πλάκα (καρτέλα BC – Boundary). Η μετατόπιση της άνω πλάκας πραγματοποιείται με σταθερή ταχύτητα σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Το φαινόμενο στην πραγματικότητα διήρκησε 150000 msec αλλά στην προσομοίωση θα διαρκέσει 1500 msec (TERMINATION TIME) που θεωρείται επαρκής χρόνος για την εξάλειψη των δυναμικών φαινομένων που δημιουργούνται άρα τη θεώρηση στατικής φόρτισης.

Τέλος καθορίζουμε κάθε πόσα msec θα γίνεται καταγραφή του φαινομένου (Dynamisc – D3PLOT) και καταγραφή του φορτίου που ασκείται στην πλάκα (Dynamisc - RCFORCE) και στους τρεις άξονες.

Το αρχείο του pre-processor αποθηκεύεται σε μορφή *.fmb ενώ εξάγεται σε μορφή *.dyn και εισάγεται στον solver για να επιλυθεί το μοντέλο. Το αρχείο *.dyn περιέχει όλα τα στάδια της μοντελοποίησης σε μορφή καρτελών οι οποίες μπορούν να τροποποιηθούν σε text editor και να επανεκτελεστούν από τον solver.



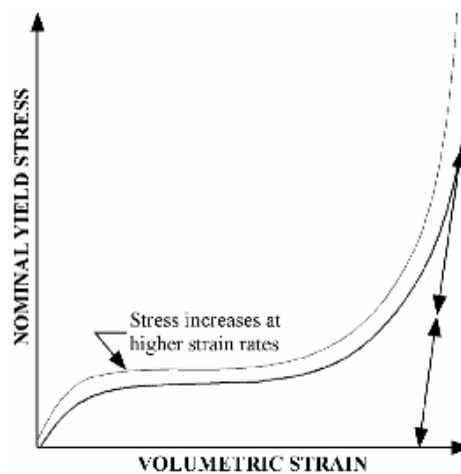
Σχήμα 6.2: Μορφή δοκιμίου 7 στο περιβάλλον ETA Femb Pre-processor

6.3.5. Μοντελοποίηση πολυουρεθανικού αφρού

Σε αυτό το στάδιο δημιουργήσαμε ένα καινούργιο part που αντιπροσωπεύει τον εσωτερικό αφρό του δοκιμίου, με solid property και υλικό το MAT 63: CRUSHABLE_FOAM.

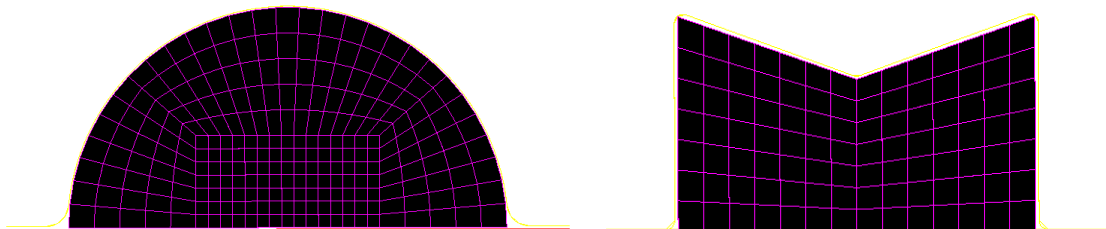
Η πυκνότητα του υλικού είναι δοσμένη από τον κατασκευαστή στα 250kg/m^3 . Για το MAT63 απαιτούνται επιπλέον στοιχεία του υλικού που είναι το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson και η καμπύλη τάσης – ογκομετρικής παραμόρφωσης.

Τα επιμέρους χαρακτηριστικά μεγέθη προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια δοκιμών αλλά και τη συμβολή παλαιότερων δημοσιεύσεων για σκληρούς πολυουρεθανικούς αφρούς μεγάλης πυκνότητας [17], [43-45], [55].



Σχήμα 6.3: Μορφή καμπύλης τάσης – ογκομετρικής παραμόρφωσης PU αφρού

Τα προηγούμενα contacts παρέμειναν προσθέτοντας επιπλέον των πεπερασμένων στοιχείων του αφρού μεταξύ τους (CONTACT_SINGLE_SURFACE) και της επαφής αυτών με το έλασμα. Για τη μοντελοποίηση της επαφής ανάμεσα στον πολυουρεθανικό αφρό και το μεταλλικό έλασμα επιλέχθηκαν τα ΠΣ αυτών και χρησιμοποιήθηκε η καρτέλα CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE. Φυσικά προστέθηκαν οι ανάλογοι κόμβοι του αφρού στα node set που αντιστοιχούν στην επαφή με την άνω και κάτω πλάκα.



Σχήμα 6.4: Πλεγματοποίηση πολυουρεθανικού αφρού δοκιμών 6F, 7F

7. ΕΚΘΕΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στα διαγράμματα – σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αντίστοιχα του μοντέλου της προσομοίωσης όπως προέκυψε από το LS-DYNA. Πιο αναλυτικά εμφανίζονται:

- το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης
- πίνακας βασικών μεγεθών ανάλυσης και σχεδιαστικών παραμέτρων
- εικόνες του παραμορφωμένου δοκιμίου
- απεικόνιση της διαδικασίας παραμόρφωσης με βήμα 5mm

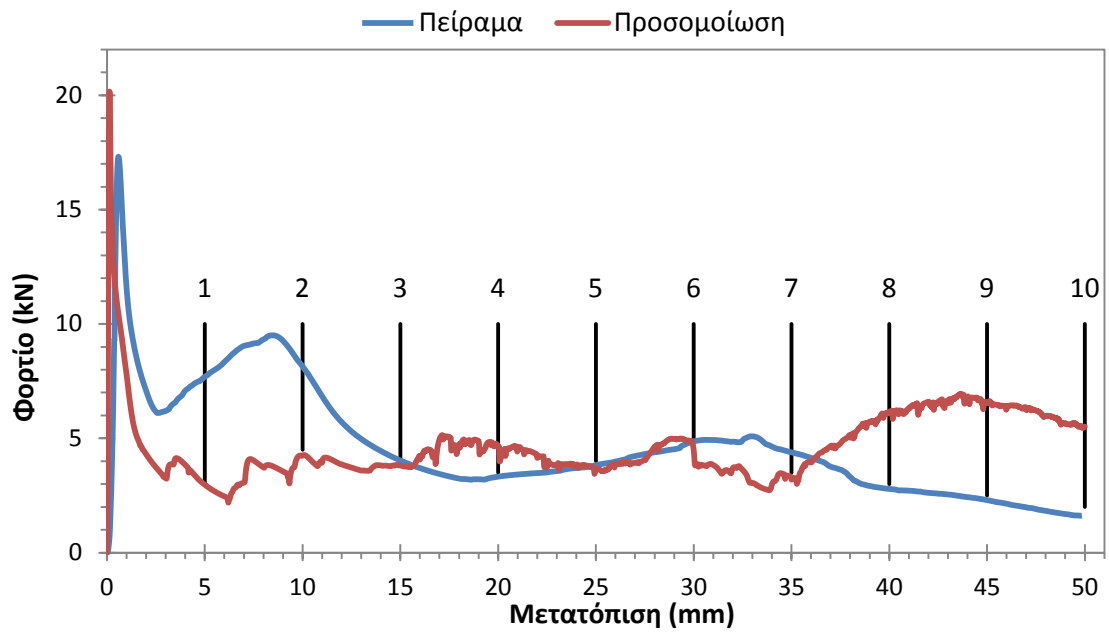
Σε πρώτη φάση πραγματοποιείται άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων του πειράματος και της προσομοίωσης ενώ σε δεύτερη φάση της συνεισφοράς του πολυουρεθανικού αφρού στην παραμόρφωση σε σχέση με τα άδεια δοκίμια. Ύστερα γίνονται ορισμένες αξιοσημείωτες παρατηρήσεις επί της διαδικασίας της συμπίεσης και το αποτέλεσμα που προέκυψε για κάθε δοκίμιο.

Υπενθυμίζεται ότι:

- Τα δοκίμια με ένδειξη F συμβολίζουν αυτά που έχουν πληρωθεί με αφρό πολυουρεθάνης στο εσωτερικό τους.
- Το ύψος των δοκιμίων είναι $l = 100$ mm και το πάχος ελάσματος $t = 0.5$ mm.
- Το ελεύθερο μήκος του διαμορφωμένου ελάσματος (αν αφαιρεθεί το μήκος της φλάντζας) είναι 110 mm.

7.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος – προσομοίωσης

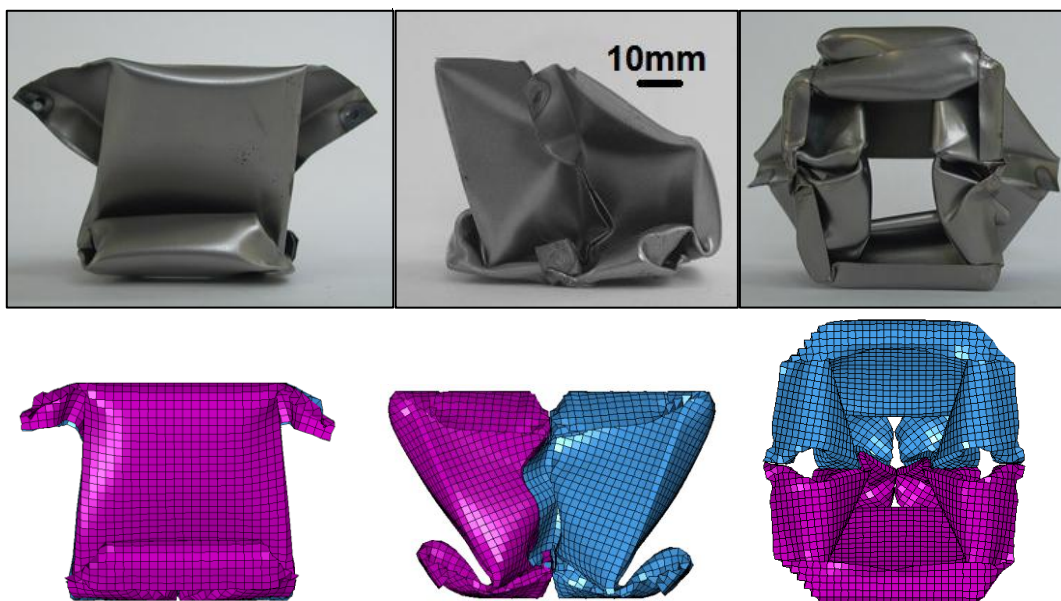
7.1.1. Δοκίμιο 1



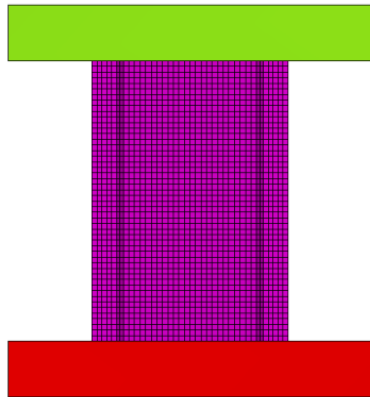
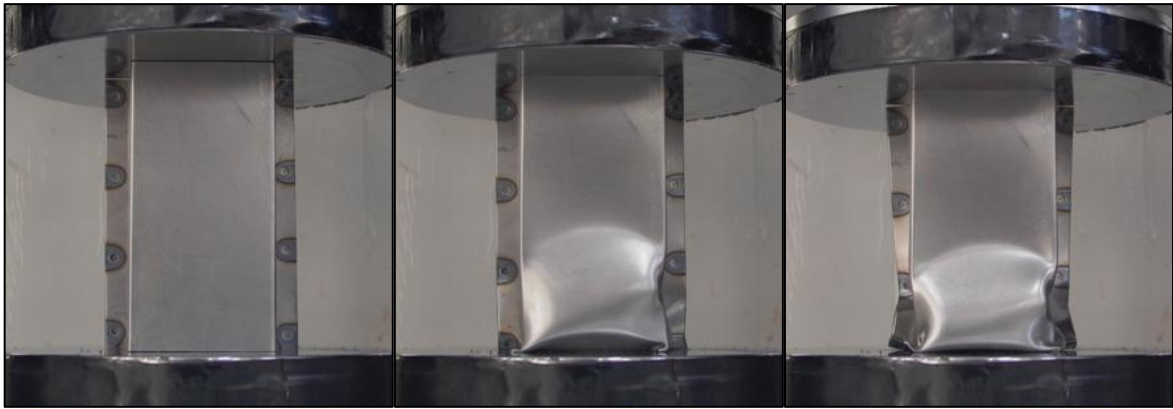
Σχήμα 7.1: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 1

	Πείραμα	Προσομοίωση
Energy Absorption E_a (J)	232.03	232.57
Max Force P_{max} (kN)	17.32	20.16
Mean Force P_m (kN)	4.64	4.65
S.E.A. (J/gr)	2.39	2.40
Mass (gr)	97.1	

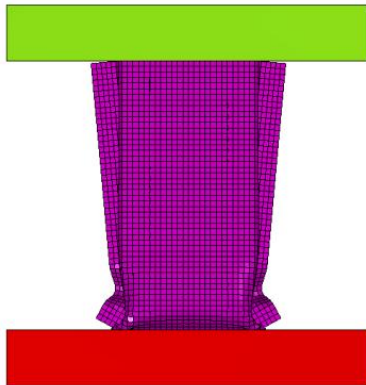
Πίνακας 7.1: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 1



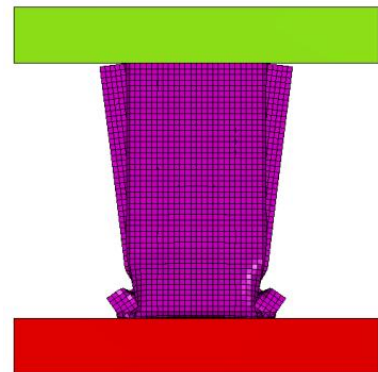
Σχήμα 7.2: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



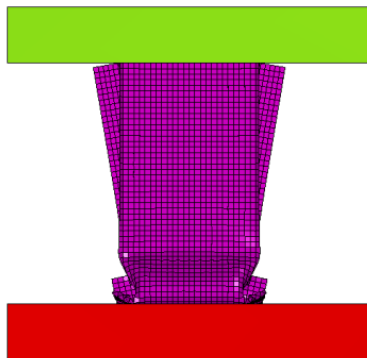
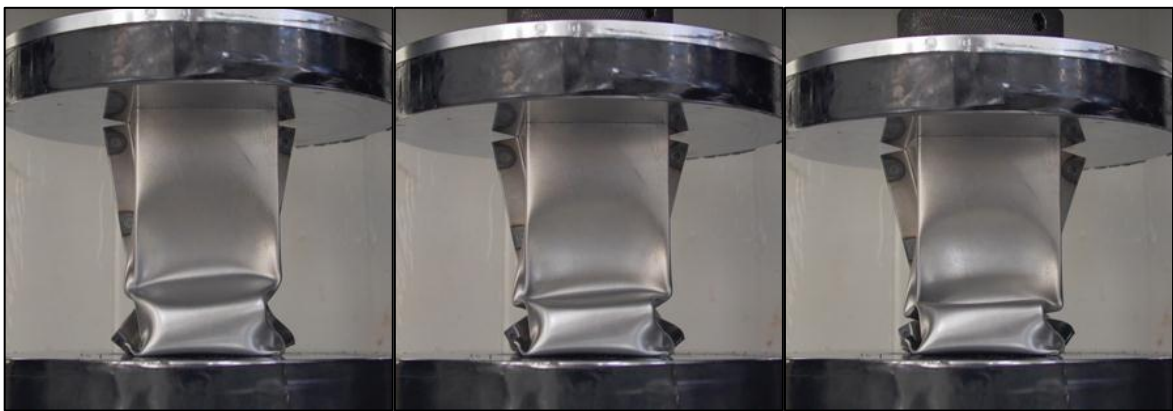
[0] $\delta_f = 0 \text{ mm}$



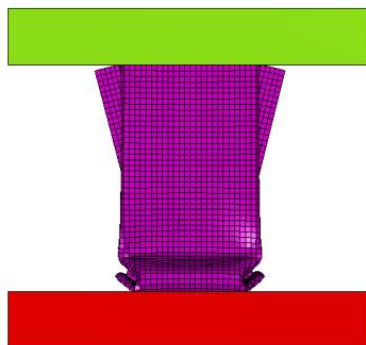
[1] $\delta_f = 5 \text{ mm}$



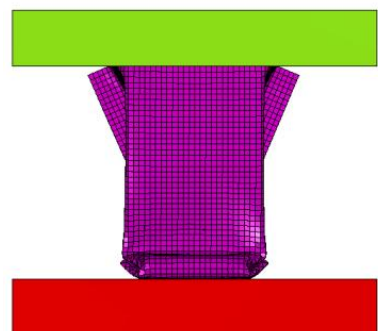
[2] $\delta_f = 10 \text{ mm}$



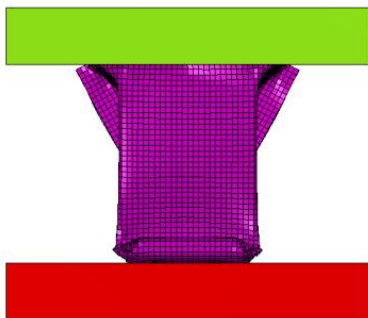
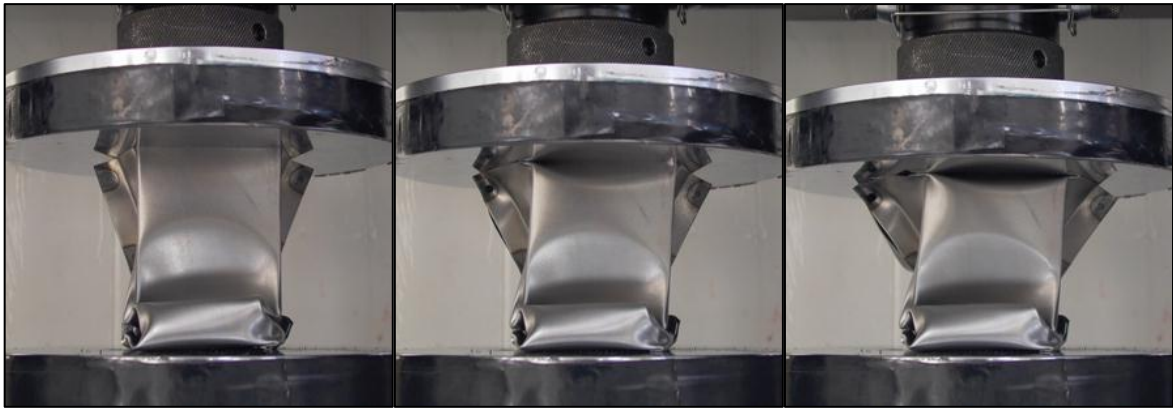
[3] $\delta_f = 15 \text{ mm}$



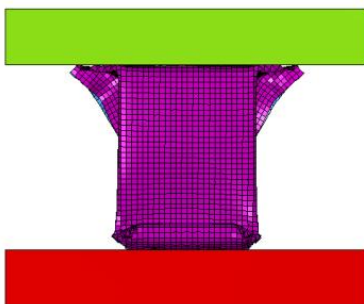
[4] $\delta_f = 20 \text{ mm}$



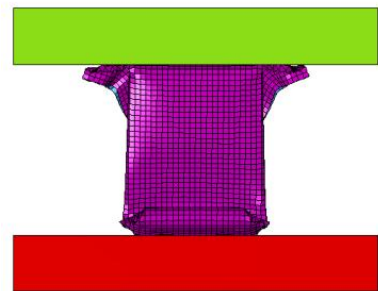
[5] $\delta_f = 25 \text{ mm}$



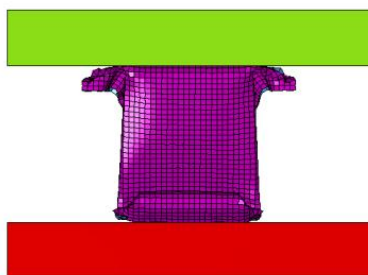
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



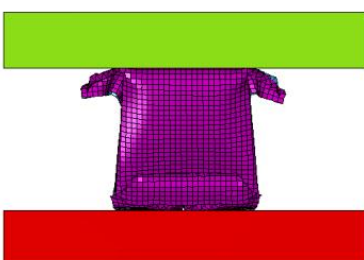
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



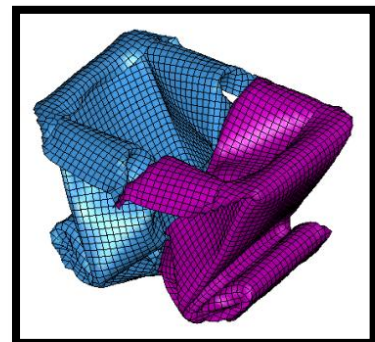
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.3: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

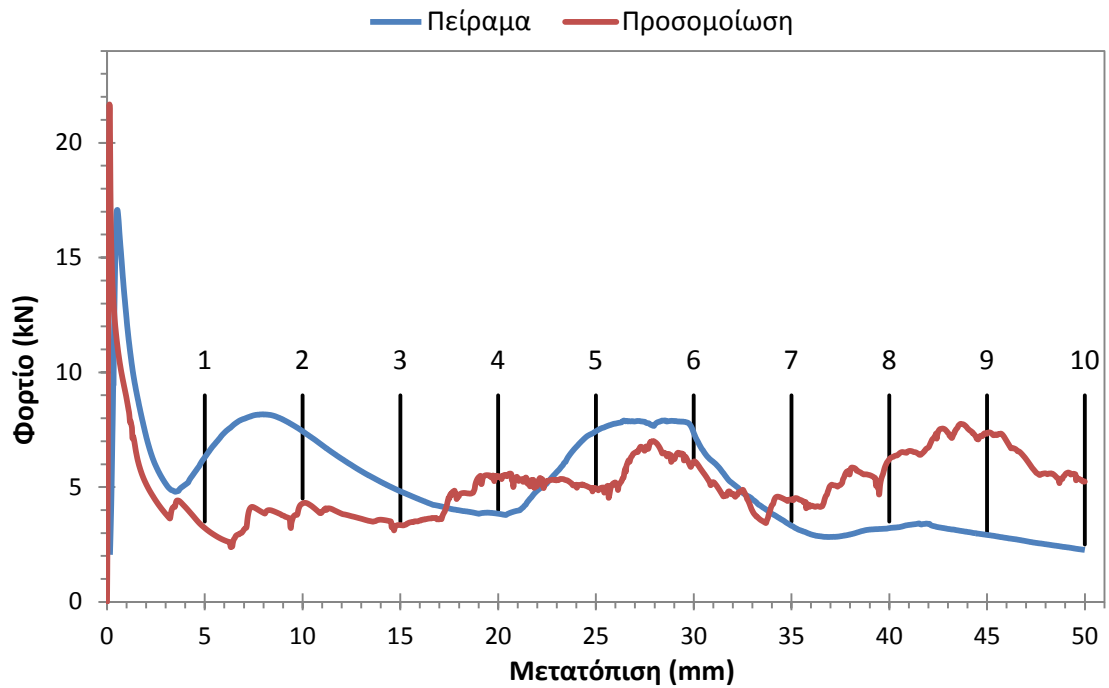
Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο στο πείραμα υπολογίζεται σε 232.03J, τιμή παρόμοια με την προσομοίωση. Όμως στη δεύτερη περίπτωση εμφανίζεται ελαφρώς μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο της τάξης των 20.16kN έναντι 17.32kN. Η μάζα του δοκιμίου μετρήθηκε ίση με 97.1gr.

Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο. Κατ' αυτό τον τρόπο το πειραματικό δοκίμιο σχηματίζει το δεύτερο λοβό για συμπίεση 8mm οπότε και αυξάνεται το αναπτυσσόμενο φορτίο στα 10kN. Για συμπίεση 32mm αρχίζει το άνω τμήμα του δοκιμίου να αυξάνει το πλάτος, με αποτέλεσμα μια πλευρά του δοκιμίου να κάμπτεται προς τα έξω. Σε αυτή τη χρονική στιγμή τροποποιείται το αποτέλεσμα του πειράματος έναντι της προσομοίωσης και αρχίζει να συμπιέζεται το δοκίμιο υπό κλίση πλευρικά. όπως παρατηρείται και από την πλάγια όψη. Από το διάγραμμα στο εύρος 35-45 mm το υπολογιστικό μοντέλο εμφανίζει σταθερή αύξηση στην τιμή του φορτίου ως αποτέλεσμα της έντονης κάμψης των φλάντζων μέχρι την αναδίπλωση τους.

Η προσέγγιση από την προσομοίωση είναι ικανοποιητική όσον αφορά την ενέργεια απορρόφησης αλλά και τη σταδιακή κατάρρευση του δοκιμίου. Και στις δύο περιπτώσεις σχηματίστηκαν 2 μεγάλοι λοβοί στο δοκίμιο, ένας στο άνω τμήμα και ένας στο κάτω. Τροποποίηση παρουσιάζεται στο τμήμα του πειραματικού δοκιμίου που κάμφθηκε προς τα μέσα με αποτέλεσμα να παρασύρει το κάτω τμήμα προς τα έξω. Αυτή η παραμόρφωση προκάλεσε την ολίσθηση όλου του δοκιμίου στην άνω πλάκα της πρέσσας. Η ανωτέρω κατάσταση ίσως να οφείλεται σε κάποια ατέλεια του πειραματικού δοκιμίου κατά την κατασκευή του, προκαλώντας κάποιας μορφής triggering. Πιθανή ατέλεια είναι η ολίσθηση των ελασμάτων κατά τη συγκόλληση της φλάντζας. Άλλωστε λόγω του μικρού πάχους του ελάσματος οποιαδήποτε ατέλεια στην κατασκευή έχει μεγαλύτερες επιπτώσεις στο τελικό αποτέλεσμα.

Σε όλη τη διάρκεια της συμπίεσης οι φλάντζες των δυο ελασμάτων του δοκιμίου παρέμειναν ενωμένες. Αντιθέτως, στο υπολογιστικό μοντέλο κατά το σχηματισμό του 2^{ου} λοβού στο άνω τμήμα οι φλάντζες απομακρύνθηκαν στην περιοχή εκτός των συγκολλήσεων. Δεν παρατηρήθηκε ολική αστοχία κάποιας συγκόλλησης κατά τη διάρκεια του πειράματος, αλλά μερική της άνω συγκόλλησης της αριστερής φλάντζας όπως φαίνεται στην πρόσοψη του σχ.7.2.

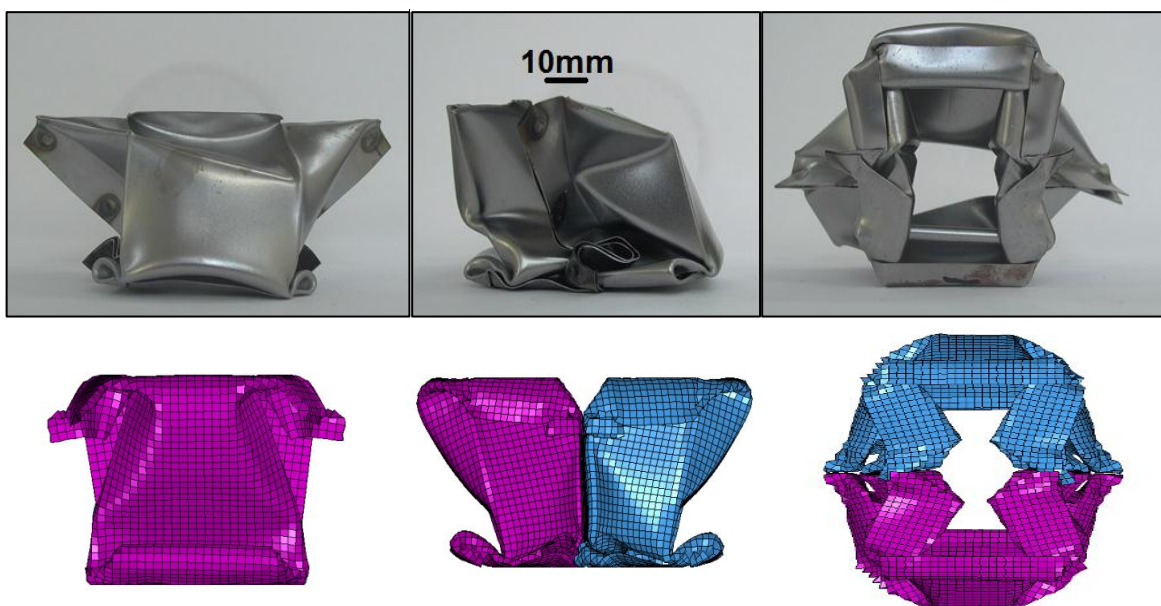
7.1.2. Δοκίμιο 2



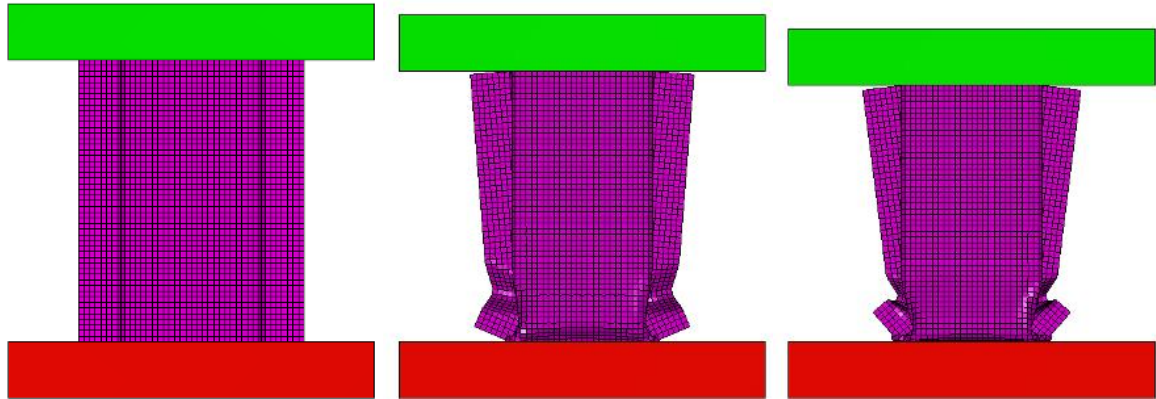
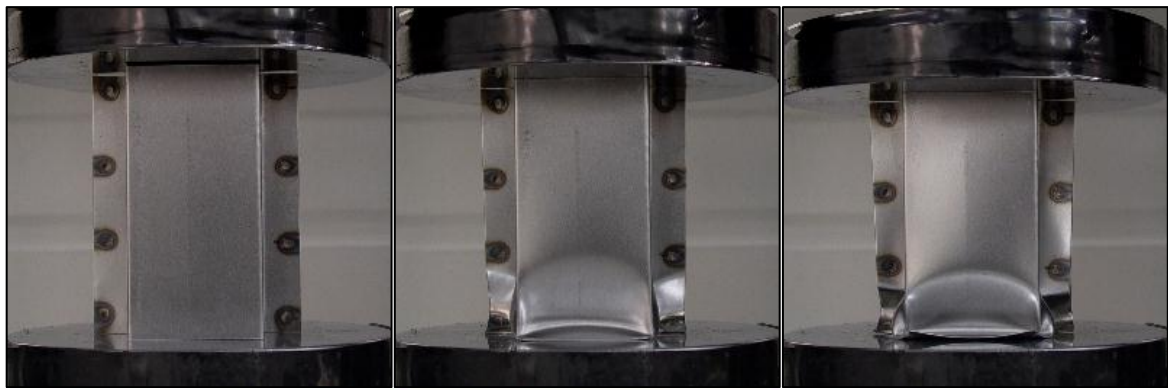
Σχήμα 7.4: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκίμιου 2

	Πείραμα	Προσομοίωση
Energy Absorption E_a (J)	260.82	259.01
Max Force P_{max} (kN)	17.07	21.67
Mean Force P_m (kN)	5.22	5.18
S.E.A. (J/gr)	2.46	2.44
Mass (gr)	106.1	

Πίνακας 7.2: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκίμιου 2



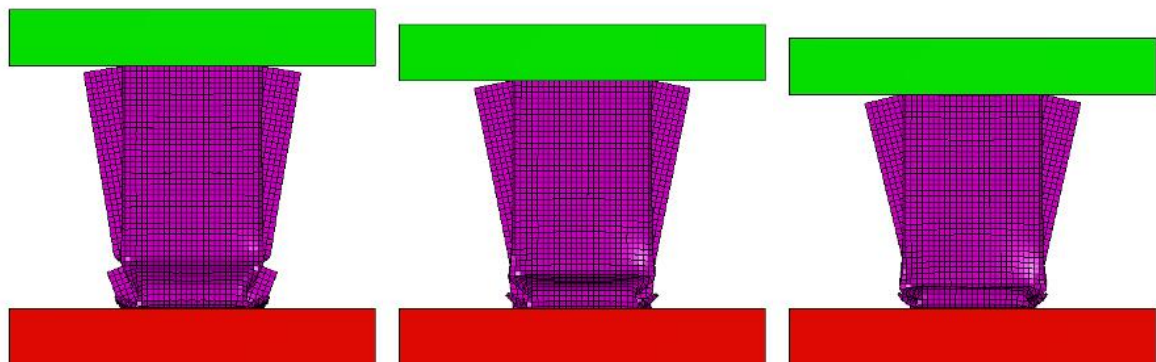
Σχήμα 7.5: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκίμιου



[0] $\delta_f = 0 \text{ mm}$

[1] $\delta_f = 5 \text{ mm}$

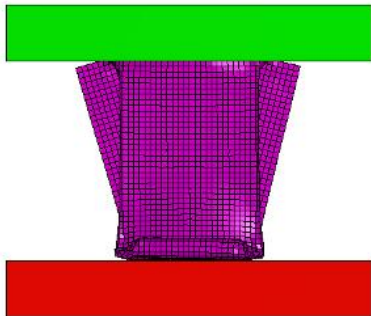
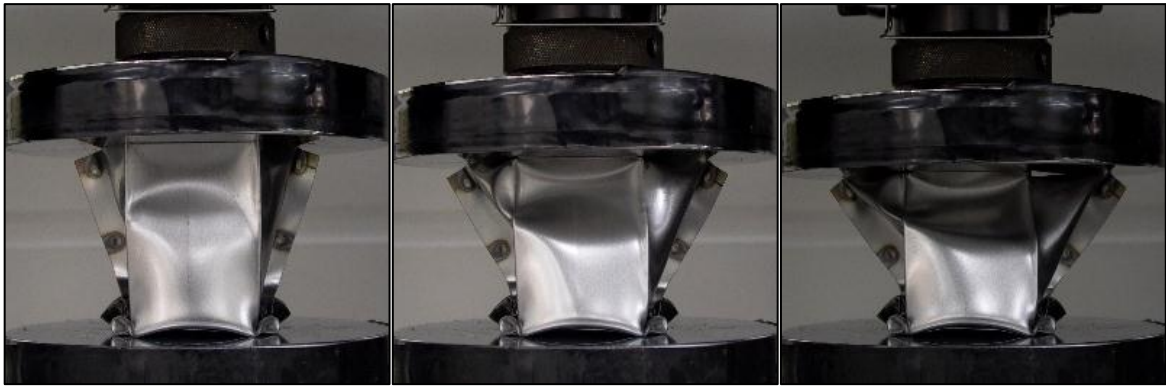
[2] $\delta_f = 10 \text{ mm}$



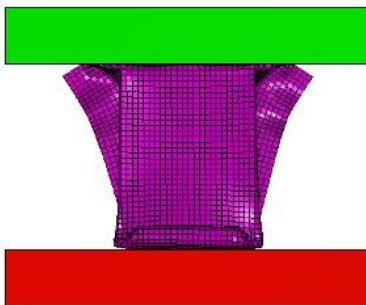
[3] $\delta_f = 15 \text{ mm}$

[4] $\delta_f = 20 \text{ mm}$

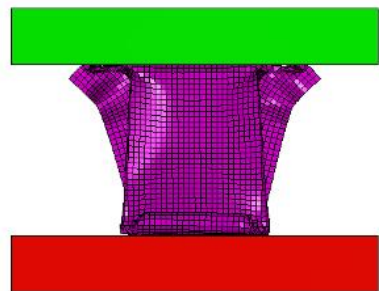
[5] $\delta_f = 25 \text{ mm}$



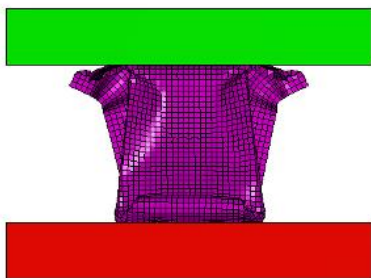
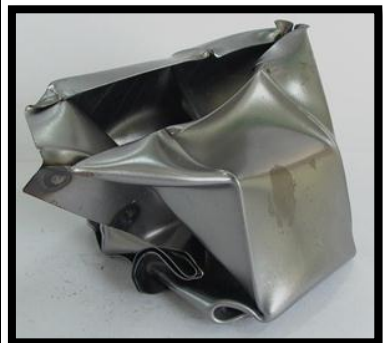
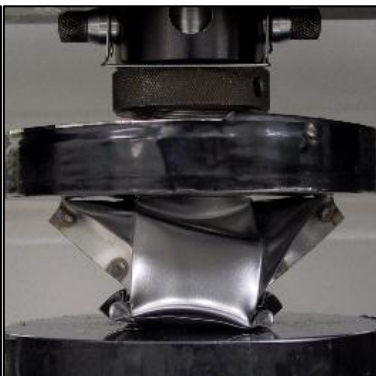
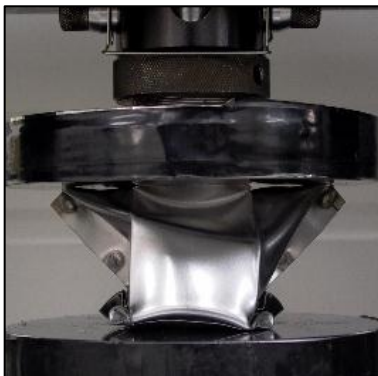
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



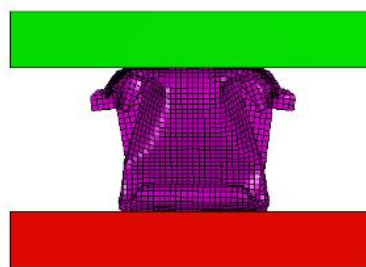
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



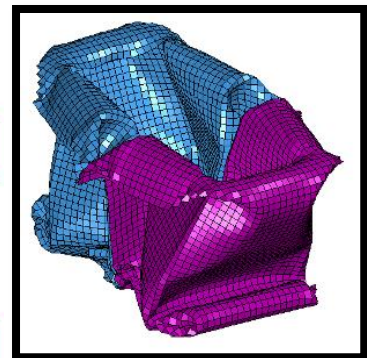
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.6: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

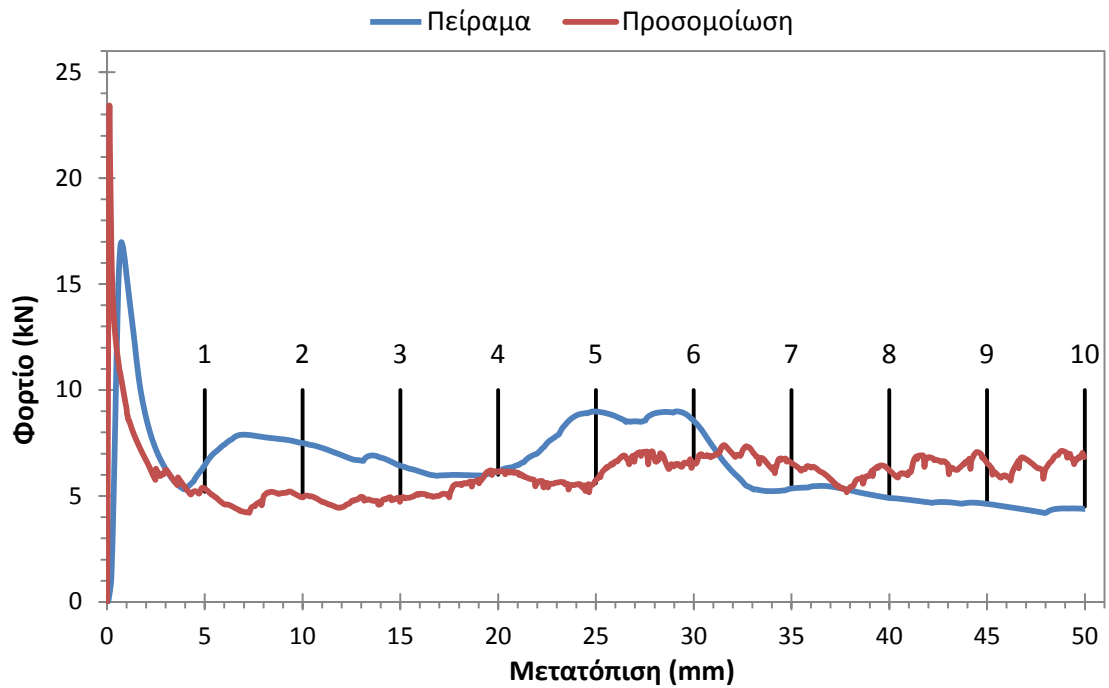
Στο 2^ο δοκίμιο όπως και στο 1^ο, η ενέργεια που απορροφήθηκε είναι παρόμοια για το πειραματικό και το υπολογιστικό μοντέλο της τάξης των 260J. Το μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο είναι μεγαλύτερο για την περίπτωση της προσομοίωσης, 21.67kN έναντι 17.07kN για το πείραμα. Όπως παρατηρούμε η αύξηση του μήκους κάθε φλάντζας κατά 5mm, διατηρώντας τα υπόλοιπα στοιχεία σταθερά προκάλεσε αύξηση της απορροφόμενης ενέργειας κατά 12% ενώ το μέγιστο φορτίο παραμόρφωσης δεν μεταβλήθηκε. Η μάζα του 2^{ου} δοκιμίου είναι 106,1gr δηλαδή μεγαλύτερη κατά 9.3%.

Οι μορφές των καμπυλών είναι όμοιες με του δοκιμίου 1. Πέρα από την αιχμή κάθε καμπύλης κατά την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης όπου και αναπτύσσεται το μέγιστο φορτίο, η πειραματική καμπύλη εμφανίζει δύο λόφους για $\delta_f = 7\text{mm}$ $\delta_f = 27\text{mm}$. Η καμπύλη της προσομοίωσης εμφανίζει πιο ομαλή μεταβολή του φορτίου. Για $\delta_f = 45\text{mm}$ το μοντέλο δέχεται πλαϊνά φορτία από το γειτονικό υλικό και την φλάντζα οπότε και δημιουργείται η συγκεκριμένη παραμόρφωση καθώς και η αύξηση του φορτίου συμπίεσης. Αντιθέτως, το πειραματικό φορτίο σε αυτό το διάστημα εμφανίζει την ελάχιστη τιμή του καθώς έχουν σχηματιστεί πλέον οι λοβοί.

Για $\delta_f = 27\text{mm}$ το τοπικό μέγιστο φορτίο διατηρείται για ένα διάστημα συμπίεσης 5mm. Ο λόγος είναι μια αναδίπλωση περίπου στο μέσο του ύψους με γωνία κλίσης 30^ο που οφείλεται σε γεωμετρική ατέλεια. Πέρα από αυτή την παραμόρφωση το δοκίμιο συμπιέζεται ανομοιόμορφα και προκύπτει η τελική μορφή υπό μικρή κλίση ως προς την κάθετη στο έδαφος. Μέχρι τη συγκεκριμένη φάση η προσομοίωση δίνει ικανοποιητική προσέγγιση στη διαδικασία κατάρρευσης, αλλά στη συνέχεια η παραμόρφωση γίνεται πιο συμμετρική σε σχέση με το πείραμα. Γι' αυτό το λόγο υπάρχει απόκλιση στο τελικό σχήμα που είναι ευδιάκριτη από την πλάγια όψη. Στα δοκίμια 1 και 2 το υπολογιστικό μοντέλο εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά στο τελικό παραμορφωμένο σχήμα και δεν επηρεάζεται αισθητά από τη μεταβολή του μήκους της φλάντζας.

Η παραμόρφωση της φλάντζας στο πείραμα είναι ομαλή χωρίς να παρουσιαστεί αποκόλληση μεταξύ των ελασμάτων σε όλο το ύψος. Δεν παρατηρήθηκε μερική ή ολική αστοχία καμίας συγκόλλησης. Στο υπολογιστικό μοντέλο υπήρξε απομάκρυνση του υλικού των ελασμάτων κατά το σχηματισμό και των δύο λοβών στην κάτω και άνω περιοχή της φλάντζας, ενώ στο ενδιάμεσο ύψος δεν παρουσιάστηκε αξιοσημείωτη παραμόρφωση.

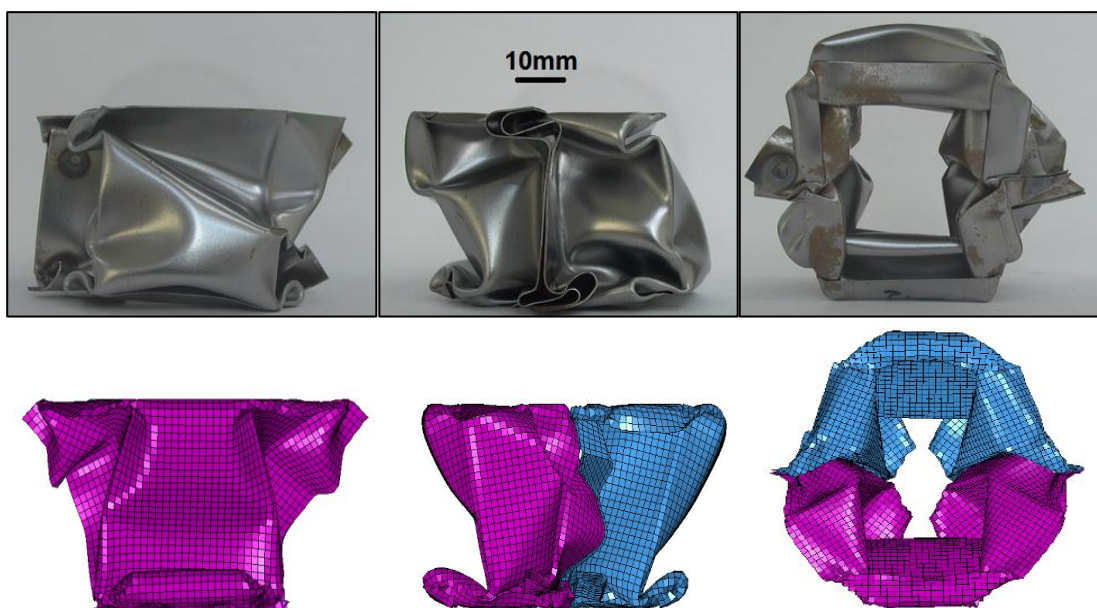
7.1.3. Δοκίμιο 3



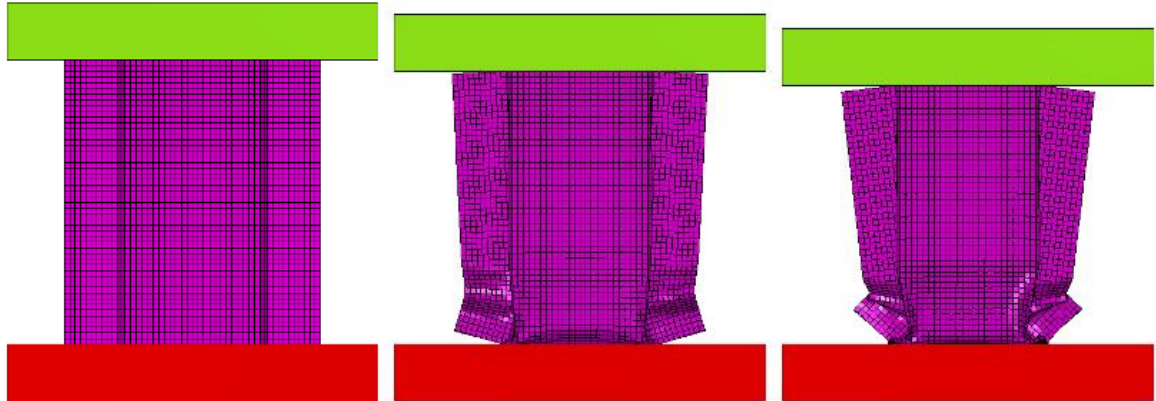
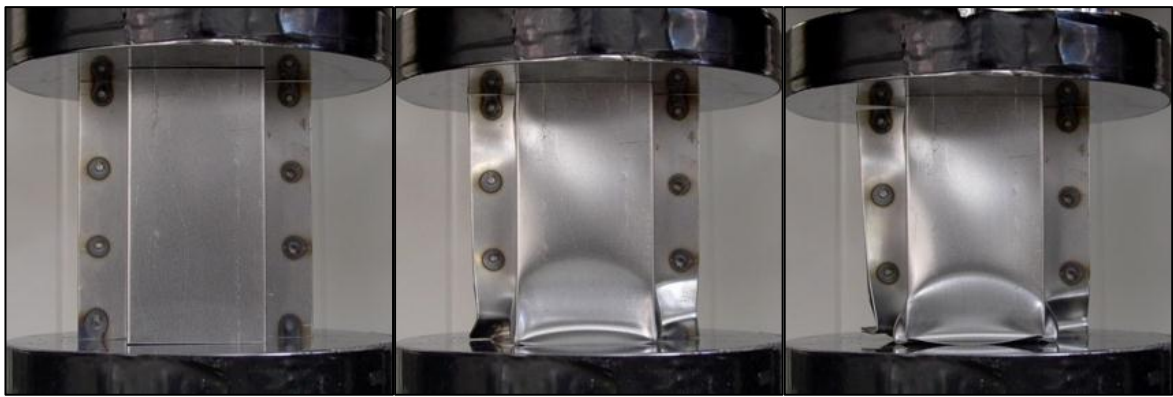
Σχήμα 7.7: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκίμιου 3

	Πείραμα	Προσομοίωση
Energy Absorption E_a (J)	327.90	303.45
Max Force P_{max} (kN)	16.98	23.43
Mean Force P_m (kN)	6.56	6.07
S.E.A. (J/gr)	3.09	2.70
Mass (gr)	112.4	

Πίνακας 7.3: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκίμιου 3



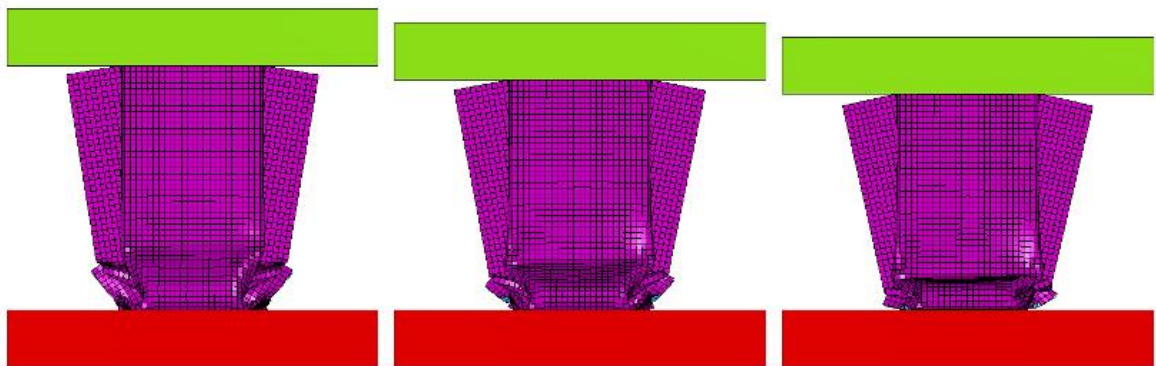
Σχήμα 7.8: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκίμιου



[0] $\delta_f = 0 \text{ mm}$

[1] $\delta_f = 5 \text{ mm}$

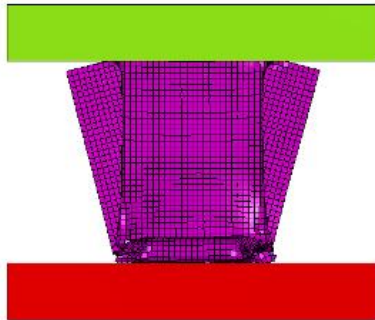
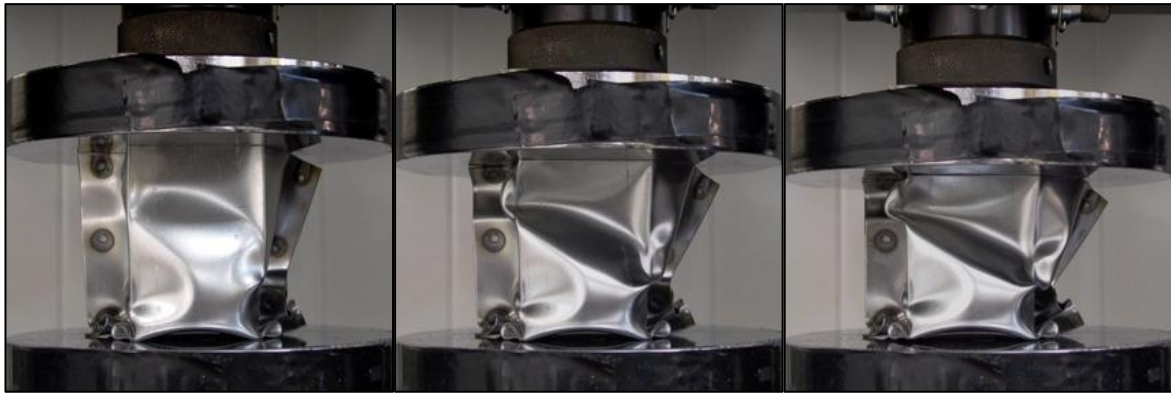
[2] $\delta_f = 10 \text{ mm}$



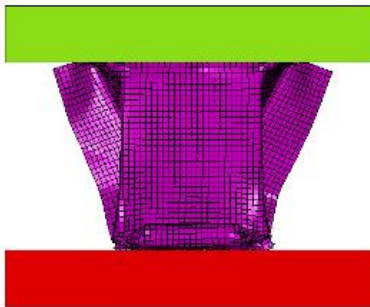
[3] $\delta_f = 15 \text{ mm}$

[4] $\delta_f = 20 \text{ mm}$

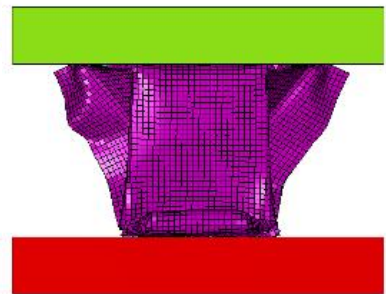
[5] $\delta_f = 25 \text{ mm}$



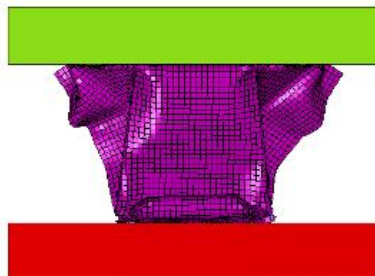
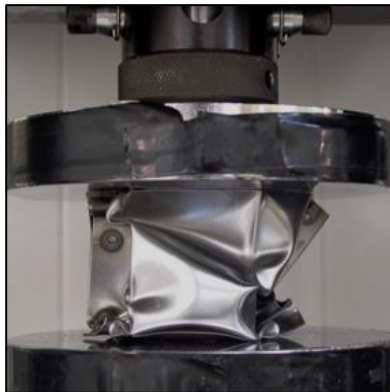
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



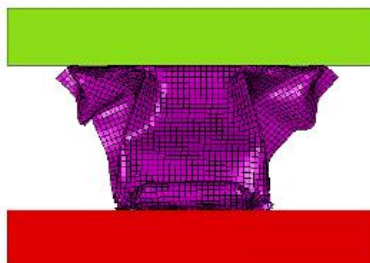
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



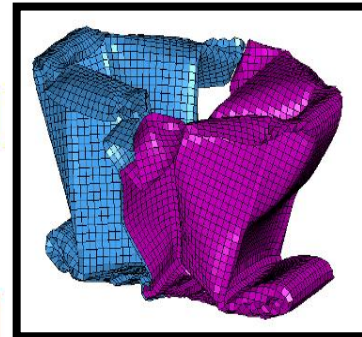
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.9: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

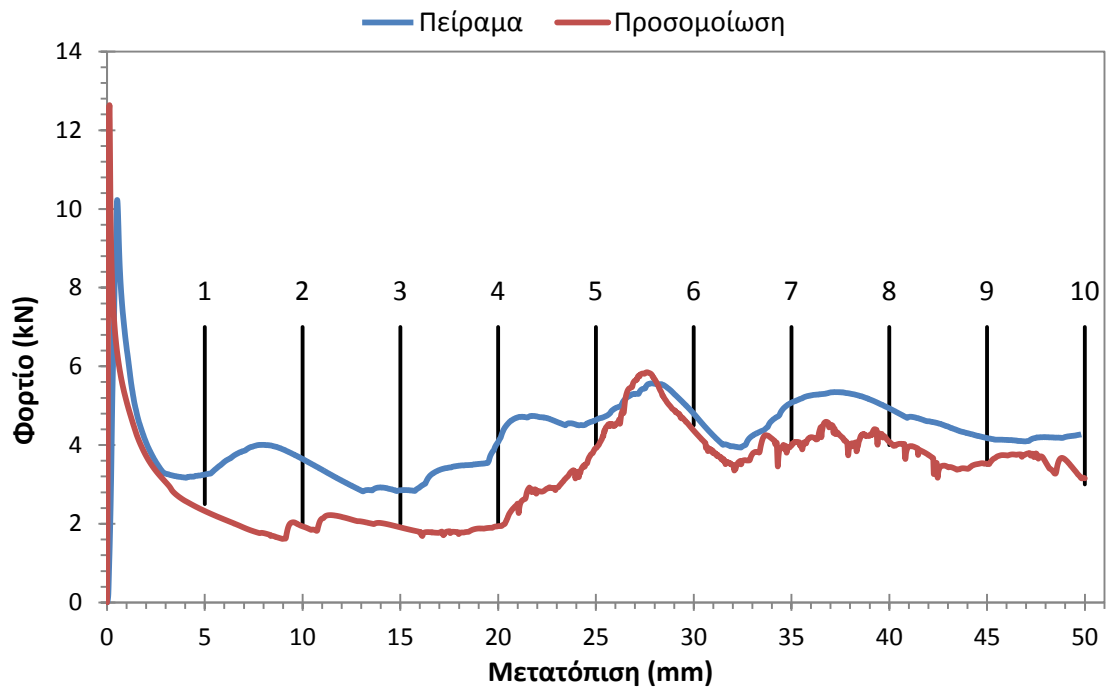
Το δοκίμιο παρουσίασε καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τα δύο πρώτα με φλάντζες μήκους 10 και 15mm. Η ενέργεια απορρόφησης κατά την πειραματική συμπίεση είναι 327.90J ενώ κατά την προσομοίωση 303.45J δηλαδή μικρότερη κατά 7.5%. Το μέγιστο φορτίο είναι αισθητά μικρότερο (16.98kN έναντι 23.43kN) από το αντίστοιχο της προσομοίωσης, γεγονός αναμενόμενο για την πλειοψηφία των αποτελεσμάτων. Η μάζα του δοκιμίου είναι 112.4gr οπότε προέκυψε η τιμή του συντελεστή ειδικής ενέργειας ανά μάζα SEA, 3.09 J/gr.

Συγκριτικά με τα υπόλοιπα double-hat δοκίμια δεν εμφανίζεται αισθητή μεταβολή του μέγιστου φορτίου. Αντιθέτως, η ενέργεια απορρόφησης αυξήθηκε 12.4% στο δεύτερο και 41.3% στο τρίτο δοκίμιο. Βεβαίως είναι σημαντικό να αξιολογηθεί η ενέργεια ανά μάζα κάθε δοκιμίου. Ουσιαστική μεταβολή του συντελεστή SEA παρατηρείται στο τρίτο δοκίμιο με τιμή 3.09J/gr έναντι 2.40J/gr για τα υπόλοιπα δύο.

Η καμπύλη φορτίου μετατόπισης της προσομοίωσης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ασφαλή συμπεράσματα όσον αφορά την έναρξη σχηματισμού νέων λοβών πέρα από το αρχικό μέγιστο φορτίο. Στο διάγραμμα των πειραματικών αποτελεσμάτων παρατηρείται τοπικό μέγιστο του φορτίου για εύρος τιμών παραμόρφωσης 24-30mm. Από τις καταγεγραμμένες φάσεις αυτό το διάστημα αντιστοιχεί στην παραμόρφωση του άνω τμήματος του δοκιμίου μετά τον πλήρη σχηματισμό του πρώτου λοβού. Η παραμόρφωση είναι ασύμμετρη και προκαλεί αναδίπλωση του ελάσματος σε γωνία 45°. Πλέον, το δοκίμιο παρουσιάζει απόκλιση στη μορφή σε σχέση με το μοντέλο της προσομοίωσης για το οποίο παραμορφώνεται το άνω τμήμα με έκταση των φλαντζών και σταδιακή παραμόρφωσή τους μέχρι το τέλος της διαδικασίας.

Στην πρόοψη και πλάγια όψη του δοκιμίου είναι εμφανής η απόκλιση πειράματος και προσομοίωσης. Το πειραματικό δοκίμιο σχημάτισε λοβούς άνω και κάτω με τσάκιση 45° στο εμπρός τμήμα, ενώ το μοντέλο είχε ομοιόμορφη κατάρρευση με αναδίπλωση προς τα μέσα στο κάτω τμήμα και προς τα έξω στο άνω τμήμα. Από τη φωτογραφία του απαραμόρφωτου δοκιμίου παρατηρείται μια μικρή απόκλιση ανάμεσα στις αντικριστές συγκολλήσεις που ίσως να προκάλεσε την ασύμμετρη παραμόρφωση στο μέσο της διαδικασίας. Δεν παρατηρήθηκε αστοχία κάποιας συγκόλλησης στο δοκίμιο.

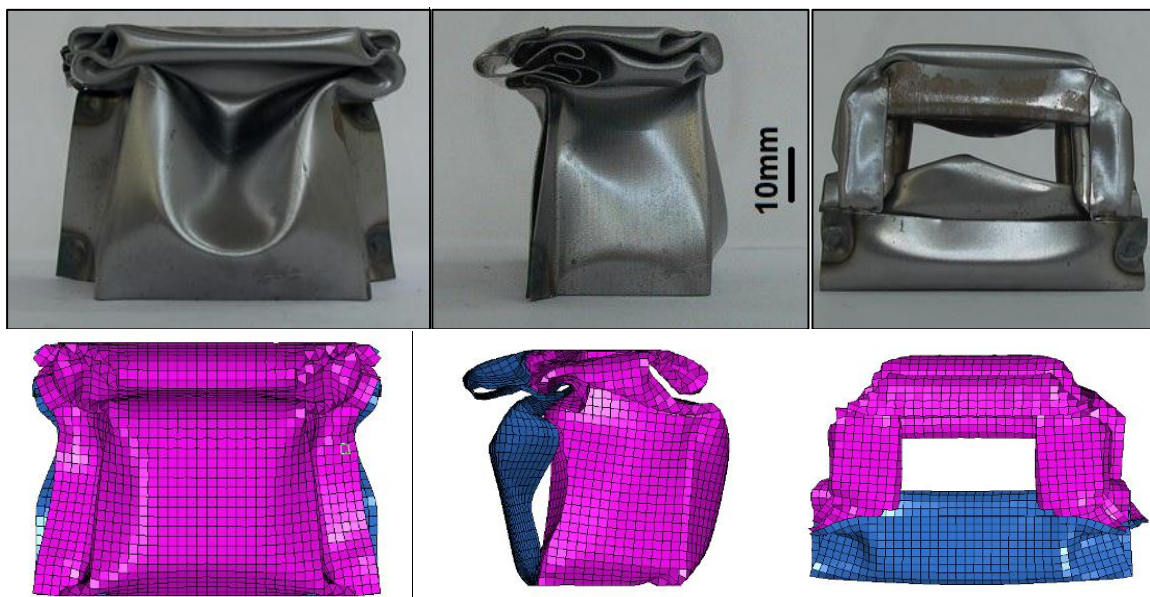
7.1.4. Δοκίμιο 4



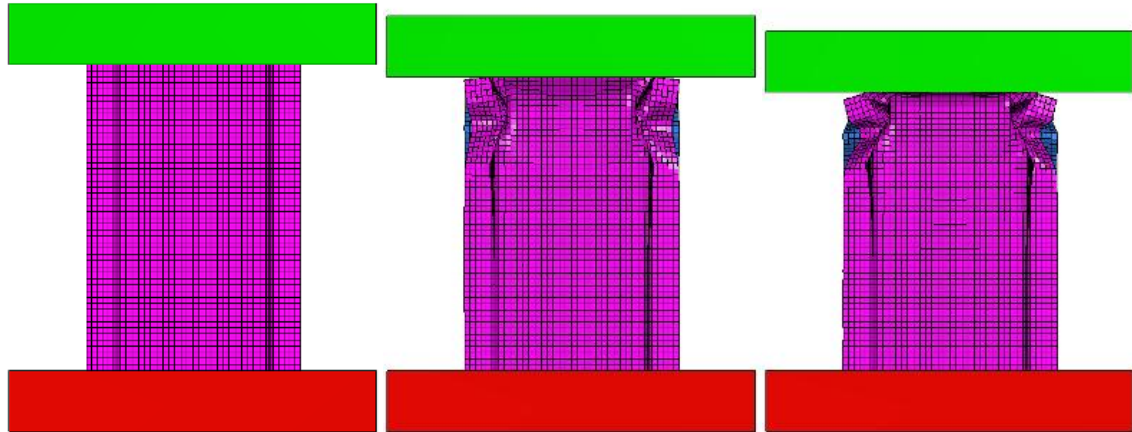
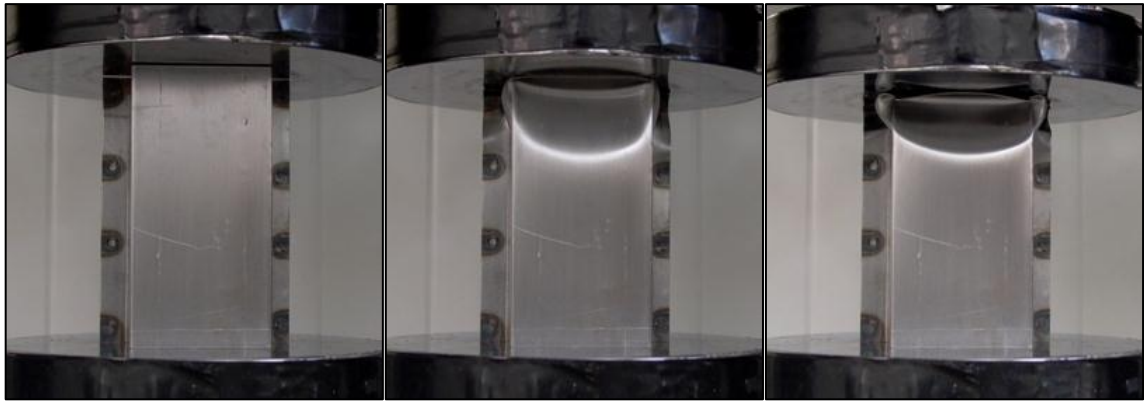
Σχήμα 7.10: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 4

	Πείραμα	Προσομοίωση
Energy Absorption E_a (J)	212.22	164.83
Max Force P_{max} (kN)	10.23	12.64
Mean Force P_m (kN)	4.24	3.30
S.E.A. (J/gr)	2.82	2.19
Mass (gr)	75.3	

Πίνακας 7.4: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 4



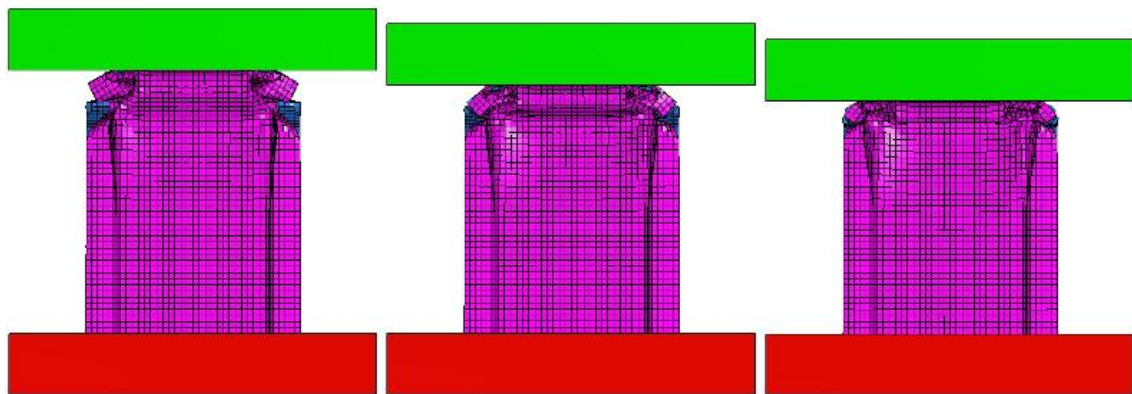
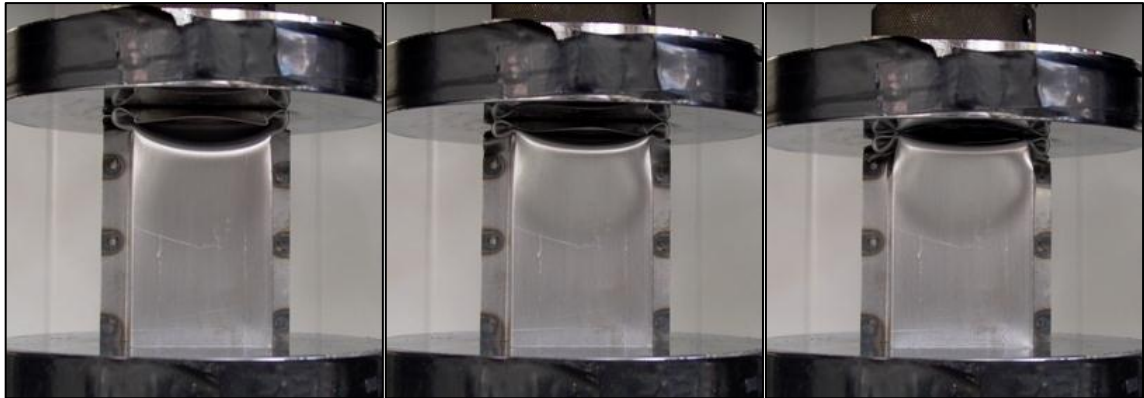
Σχήμα 7.11: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



[0] $\delta_f = 0$ mm

[1] $\delta_f = 5$ mm

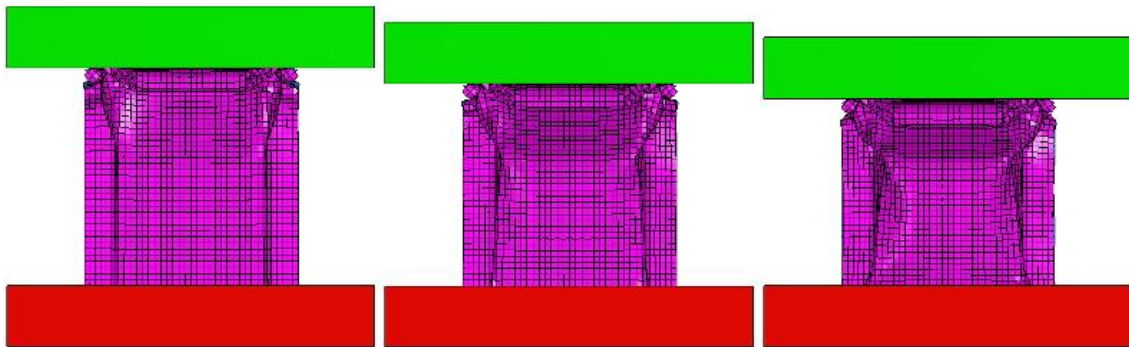
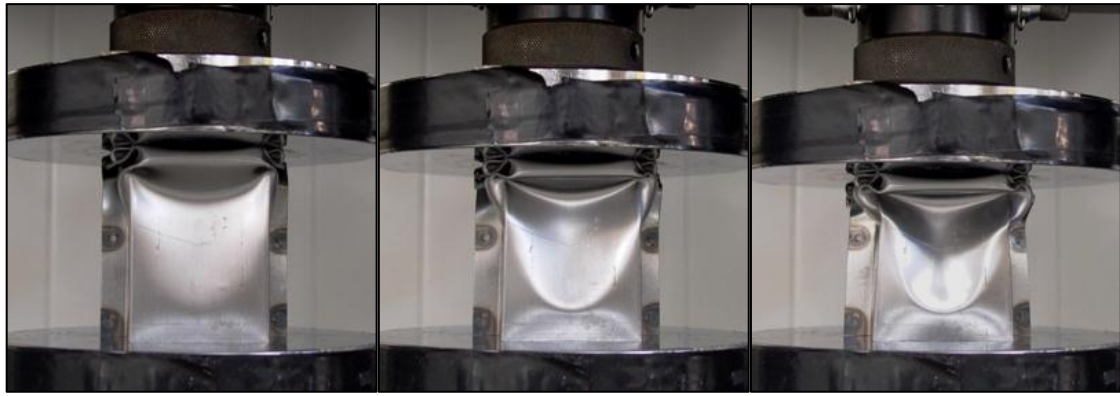
[2] $\delta_f = 10$ mm



[3] $\delta_f = 15$ mm

[4] $\delta_f = 20$ mm

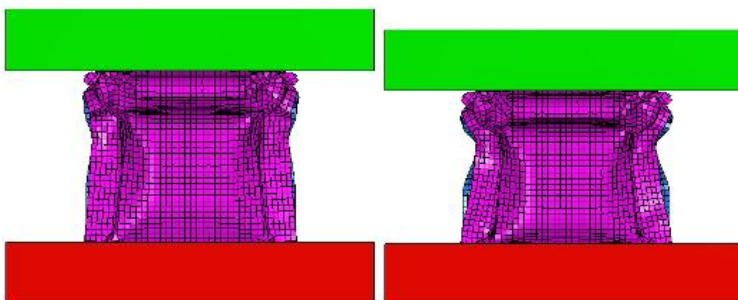
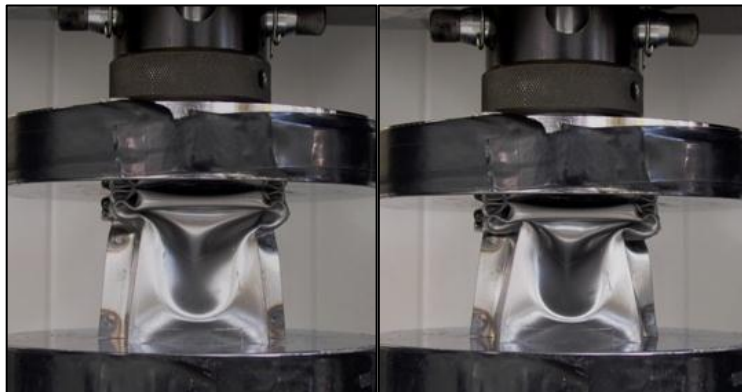
[5] $\delta_f = 25$ mm



[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$

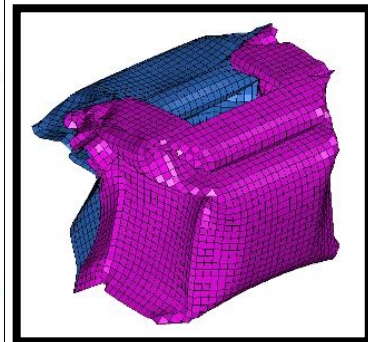
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$

[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$

[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.12: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

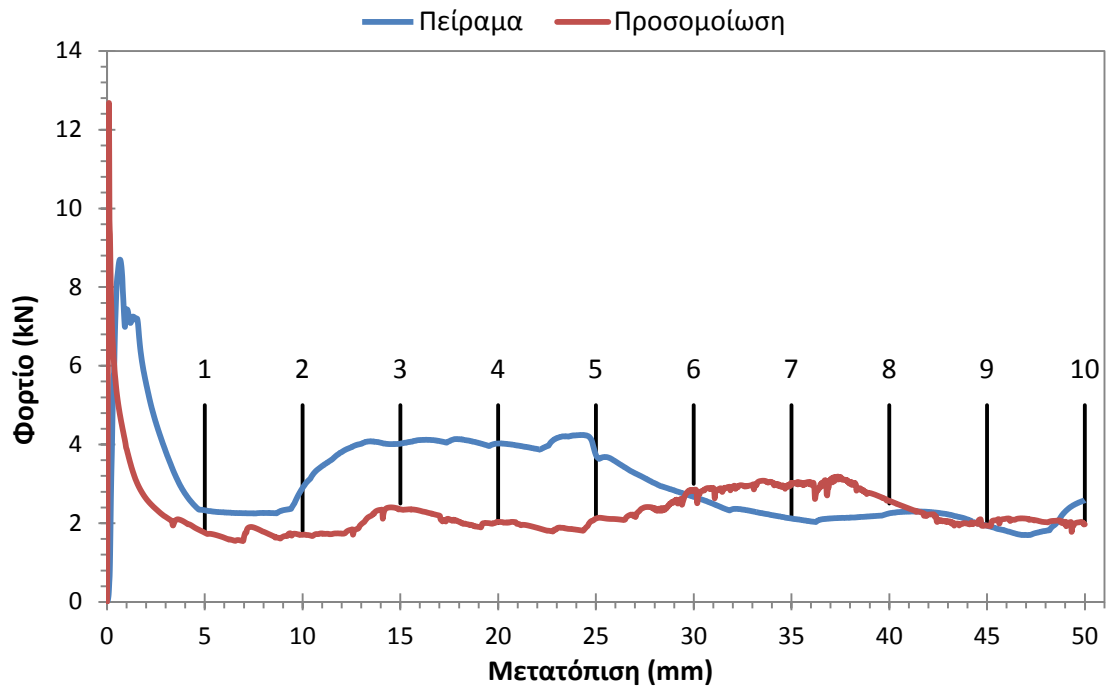
Αποκλίσεις παρατηρούνται στα βασικά αποτελέσματα της ανάλυσης ανάμεσα στο πειραματικό και το υπολογιστικό μοντέλο. Στην πρώτη περίπτωση η απορροφόμενη ενέργεια είναι 212.22J με μέγιστο φορτίο 10.23kN, ενώ στη δεύτερη οι αντίστοιχες τιμές είναι 164.83J και 12.64kN. Η διαφορά της ενέργειας είναι 29% και του μέγιστου φορτίου 24%. Εμφανείς και οι διαφοροποιήσεις στο μέσο φορτίο και στο συντελεστή mass specific energy absorbtion όπως φαίνεται στον πίνακα 7.4. Η μάζα του δοκιμίου μετρήθηκε στα 75.3 gr.

Το δοκίμιο παρουσιάζει εμφανώς μικρότερες τιμές απορροφόμενης ενέργειας και μέγιστου φορτίου σε σχέση με τις double-hat διατομές όμως συγκρίνοντας την τιμή του αριθμού SEA προκύπτει καλύτερη αποδοτικότητα της μάζας της τάξης των 0.40J/gr σε σχέση με τα δύο πρώτα δοκίμια, αλλά χειρότερη κατά 0.25J/gr σε σχέση με το δοκίμιο με μήκος φλάντζας 20mm.

Οι καμπύλη φορτίου – μετατόπισης για πείραμα και προσομοίωση είναι παρόμοια. Ελαφρώς μειωμένη είναι η τιμή του φορτίου της προσομοίωσης μέχρι τα 25mm όπου εμφανίζει αδυναμία συγκράτησης φορτίου (περίπου 2kN). Μετά από συμπίεση 27mm σχεδόν ταυτίζεται η μεταβολή των δύο καμπυλών. Για την προσομοίωση το φορτίο αυξάνει σημαντικά στα 27mm συμπίεσης και από την καταγραφή γίνεται εμφανής ο λόγος. Αυτός είναι η ολοκλήρωση του σχηματισμού του 1^{ου} λοβού και η έναρξη σχηματισμού του επόμενου που προέρχεται από την τσάκισή των πλαϊνών τοιχωμάτων του ελάσματος σε γωνία 45° και μεταφορά του επάνω τμήματος προς τα εμπρός. Κατά τα άλλα η συμπεριφορά του μοντέλου είναι ομαλή και αναμενόμενη ενώ το κάτω τμήμα δεν παραμορφώνεται σημαντικά. Στο πειραματικό δοκίμιο μετά τον ομοιόμορφο σχηματισμό του 1^{ου} λοβού, το δοκίμιο παραμορφώνεται ως προς μια ευθεία παράλληλη στο ύψος του δοκιμίου, δημιουργώντας μια αυλάκωση στην πρόοψη εμφανή και στις φωτογραφίες του σχ.7.11. Παρόμοια αυλάκωση δημιουργείται με παρόμοιο τρόπο στην επίπεδη πλάκα του δοκιμίου. Η κάτοψη των δύο μοντέλων παρουσιάζει όμοιο σχηματισμό. Η παραμόρφωση του πειραματικού δοκιμίου ακολουθεί την ακανόνιστη σταδιακή κατάρρευση όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.5.3.

Οι συγκολλήσεις επηρεάζουν διαφορετικά τη συμπεριφορά του δοκιμίου σε κάθε περίπτωση. Στο πειραματικό μοντέλο στο άνω τμήμα του δοκιμίου το έλασμα της πλάκας λυγίζει προς τα έξω του δοκιμίου ενώ η φλάντζα του διαμορφωμένου ελάσματος λυγίζει προς τα μέσα δημιουργώντας περισσότερες πτυχωσεις. Σε αυτό το ύψος (2^η σειρά κολλήσεων από πάνω) οι συγκολλήσεις αποκολλήθηκαν μερικώς χωρίς ολική αστοχία. Στο υπολογιστικό μοντέλο κατά το σχηματισμό του 1^{ου} λοβού απομακρύνθηκαν τα ελάσματα της φλάντζας μεταξύ τους. Στη συνέχεια της συμπίεσης η θέση των συγκολλήσεων φαίνεται να συμβάλλει στην τσάκισή των πλαϊνών τοιχωμάτων. Σε τελικό στάδιο προκαλείται ο βαρελοειδής σχηματισμός της επίπεδης πλάκας λόγω των δύο τελευταίων σειρών κολλήσεων.

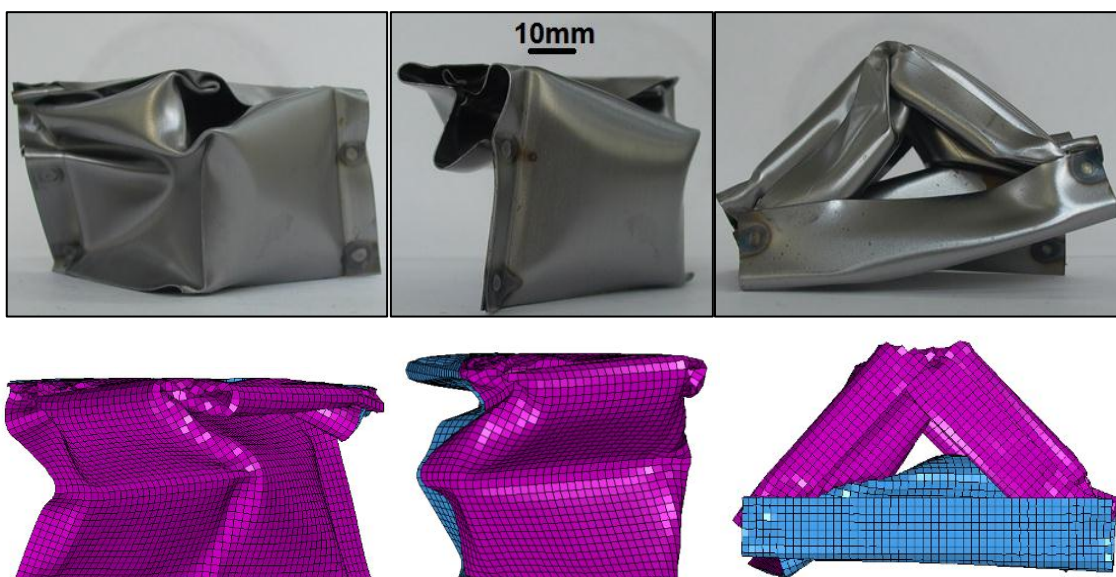
7.1.5. Δοκίμιο 5



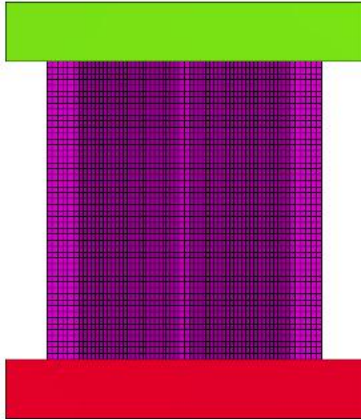
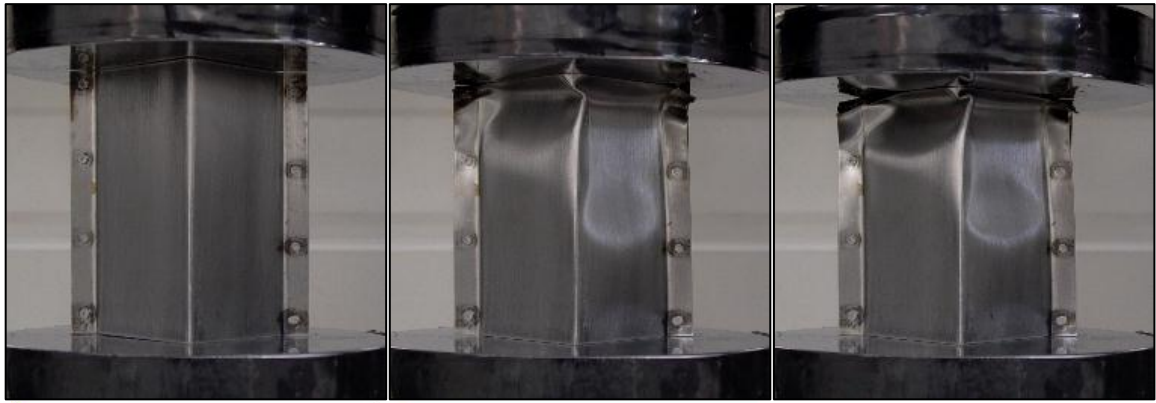
Σχήμα 7.13: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 5

	Πείραμα	Προσομοίωση
Energy Absorption E_a (J)	153.20	115.89
Max Force P_{max} (kN)	8.70	12.68
Mean Force P_m (kN)	3.06	2.32
S.E.A. (J/gr)	1.84	1.39
Mass (gr)	83.3	

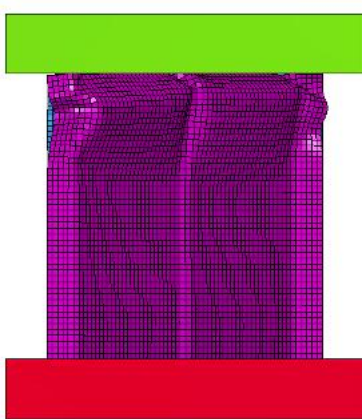
Πίνακας 7.5: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 5



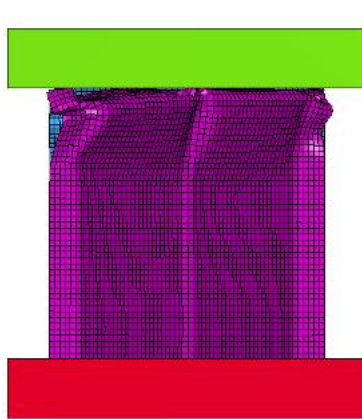
Σχήμα 7.14: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



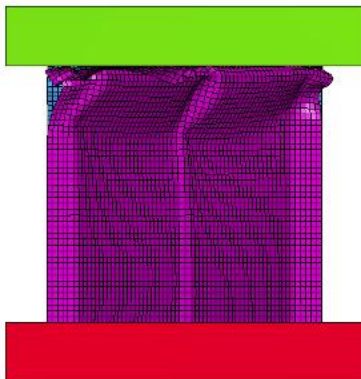
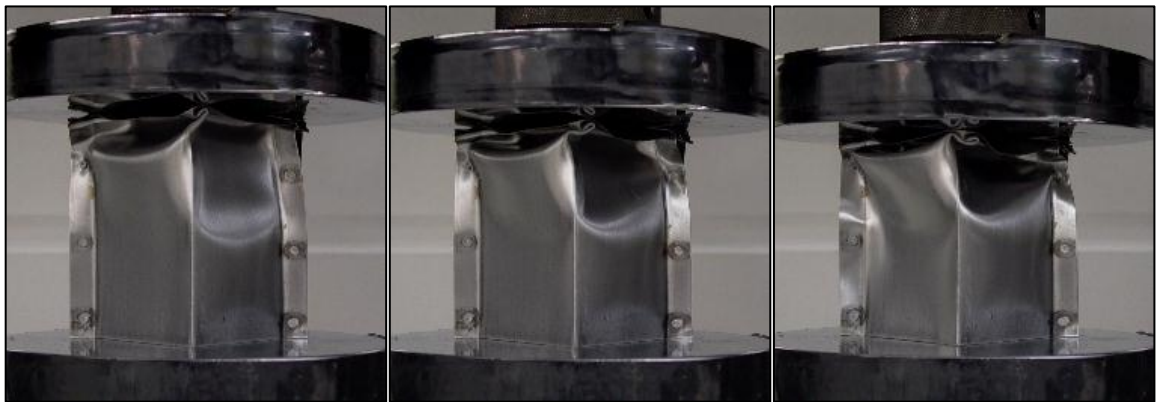
[0] $\delta_f = 0$ mm



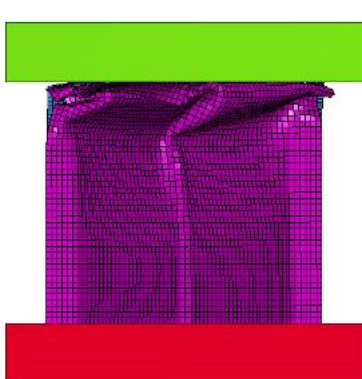
[1] $\delta_f = 5$ mm



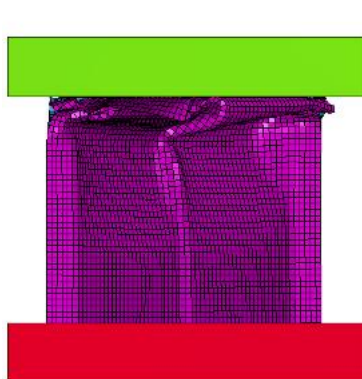
[2] $\delta_f = 10$ mm



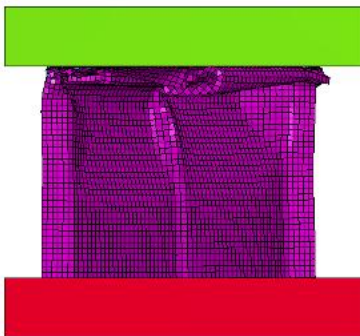
[3] $\delta_f = 15$ mm



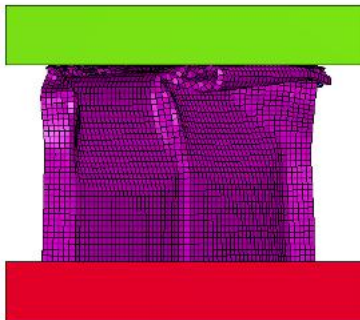
[4] $\delta_f = 20$ mm



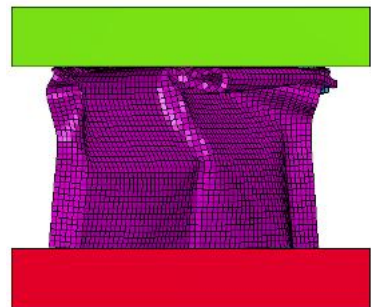
[5] $\delta_f = 25$ mm



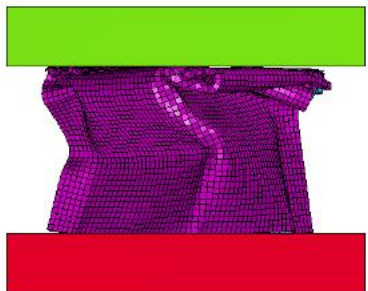
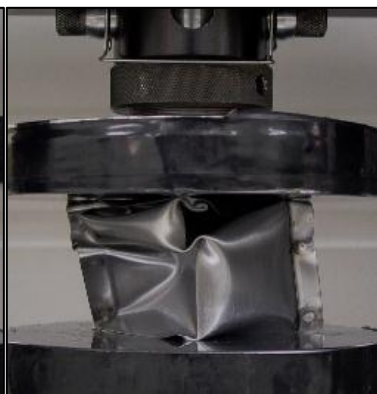
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



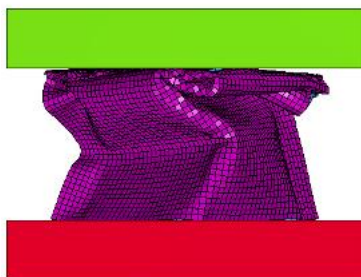
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



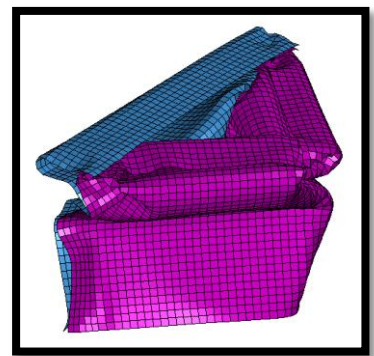
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.15: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

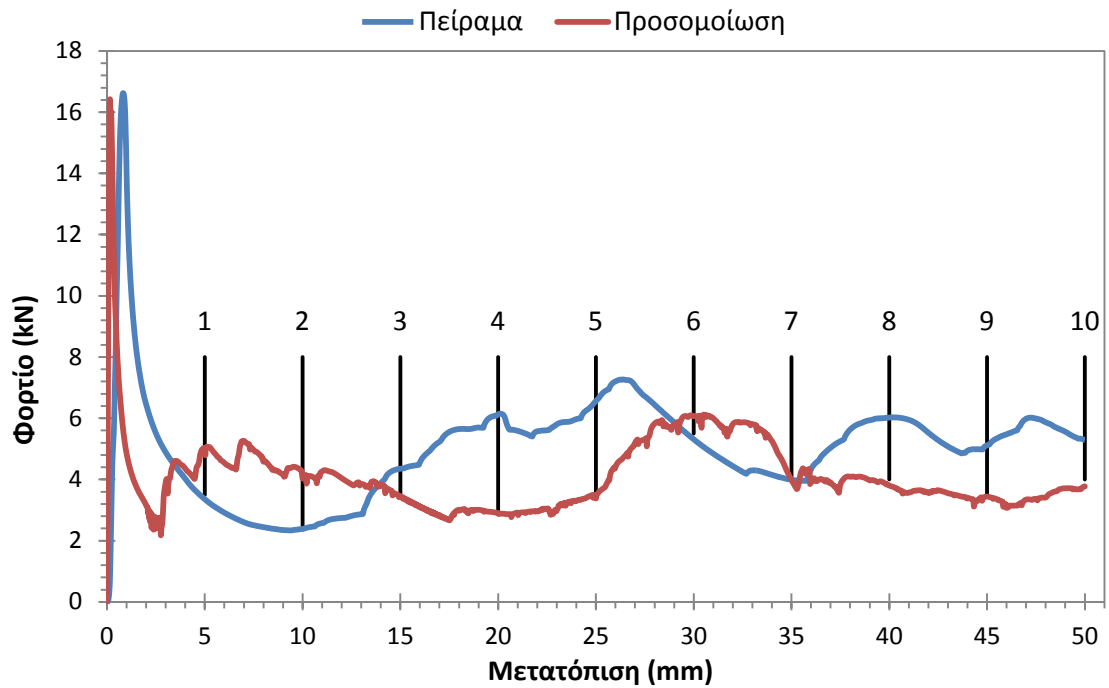
Το πειραματικό δοκίμιο απορρόφησε ενέργεια 153.2J, με μέγιστο φορτίο 8.70kN και συντελεστή ενέργειας ανά μάζα 1.84J/gr. Τα αντίστοιχα μεγέθη για το μοντέλο προσομοίωσης εμφανίζουν διαφοροποιήσεις σε ποσοστό -33% για την ενέργεια και +46% για το μέγιστο φορτίο. Τα ανωτέρω μεγέθη για το τριγωνικό σχήμα της διατομής είναι αισθητά μικρότερα από την ορθογώνια διατομή του δοκιμίου 4 γεγονός που αποτρέπει σε σημαντικό βαθμό τη χρήση της σε κατασκευές σε συνδυασμό με τη μη προβλεπόμενη μορφή κατά την κατάρρευση.

Από την πειραματική καμπύλη του φορτίου προκύπτει συγκράτηση του μέγιστου φορτίου για μικρό διάστημα περίπου 1-2mm. Στο διάστημα 12-25mm το δοκίμιο δέχεται υψηλότερα φορτία και αντιστοιχεί στο τελικό στάδιο σχηματισμού του λοβού. Πέρα από αυτό το σημείο το δοκίμιο δέχεται εσωτερικά πλευρικά φορτία με αποτέλεσμα τη μείωση του αξονικού φορτίου και την ασύμμετρη κατάρρευση. Παρατηρώντας το δοκίμιο διακρίνουμε κάποια απόκλιση στις αποστάσεις των συγκολλήσεων που μπορεί να λειτούργησαν ως triggering για την πλευρική φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα, στη δεύτερη από πάνω σειρά συγκολλήσεων, η αριστερή συγκόλληση βρισκόμενη ελαφρώς ψηλότερα, συγκράτησε την παραμόρφωση του δοκιμίου για ένα διάστημα προκαλώντας συμπίεση μόνο του δεξιού τμήματος. Από την πλάγια όψη του πειραματικού στο σχ.7.14, διακρίνουμε ότι κατά τη συμπίεση του άνω τμήματος, γίνεται ταυτόχρονη μετατόπιση των ελασμάτων προς τα πίσω.

Στο μοντέλο του προγράμματος σχηματίστηκαν πλήρως δύο λοβού και στο τέλος το απαραμόρφωτο τμήμα του ελάσματος λύγισε στο μέσο σχηματίζοντας ένα μεγάλο λοβό που δεν ολοκληρώθηκε, σε αντίθεση με το πείραμα που σχηματίστηκαν τρεις λοβοί. Κάθε πλευρά του διαμορφωμένου ελάσματος που σχηματίζει την τριγωνική διατομή, μεταφέρεται προς τα μέσα και προς τα έξω εναλλάξ για τους διαδοχικούς λοβούς. Κατά τη φάση λυγισμού του δοκιμίου (δημιουργία τελευταίου μεγάλου λοβού) το φορτίο αυξάνεται ελαφρώς περίπου στα 4kN. Γενικότερα, η καμπύλη φορτίου του μοντέλου μεταβάλλεται ομαλά.

Οι συγκολλήσεις του πειραματικού δοκιμίου παρέμειναν ακέραιες σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας κατάρρευσης. Τα ελάσματα στην περιοχή ανάμεσα στις πάνω συγκολλήσεις αποχωρίστηκαν κατά την έναρξη της κατάρρευσης χωρίς εν τέλει να επηρεάσουν την ποιότητα τους.

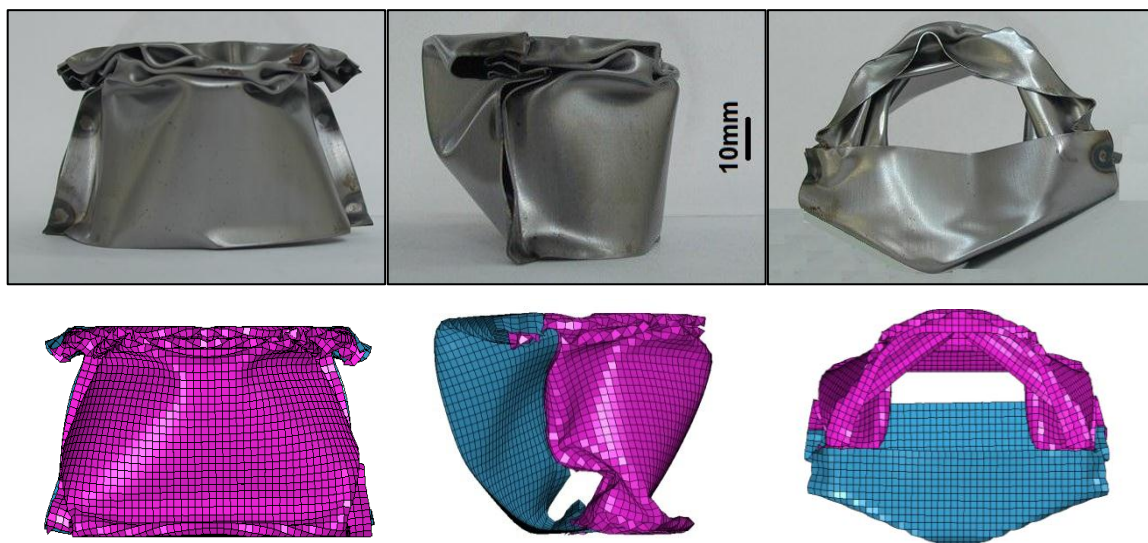
7.1.6. Δοκίμιο 6



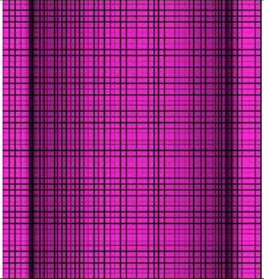
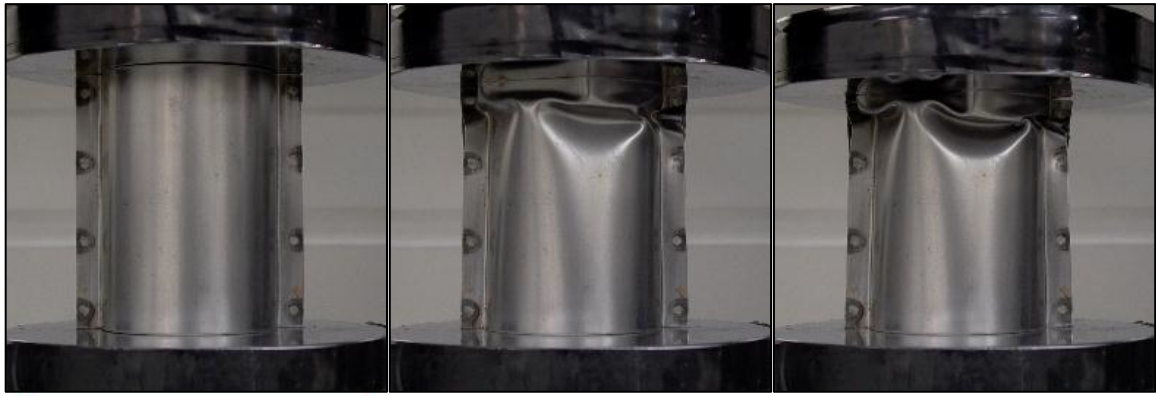
Σχήμα 7.16: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 6

	Πείραμα	Προσομοίωση
Energy Absorption E_a (J)	251.97	206.06
Max Force P_{max} (kN)	16.62	16.42
Mean Force P_m (kN)	5.04	4.12
S.E.A. (J/gr)	3.01	2.46
Mass (gr)	83.6	

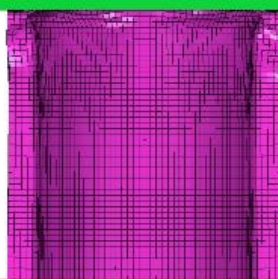
Πίνακας 7.6: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 6



Σχήμα 7.17: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



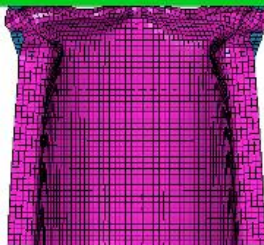
[0] $\delta_f = 0$ mm



[1] $\delta_f = 5$ mm



[2] $\delta_f = 10$ mm



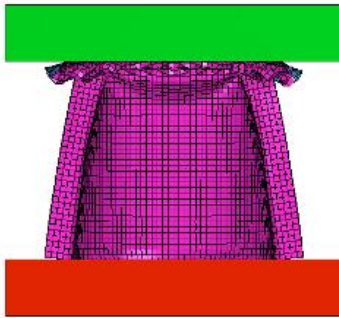
[3] $\delta_f = 15$ mm



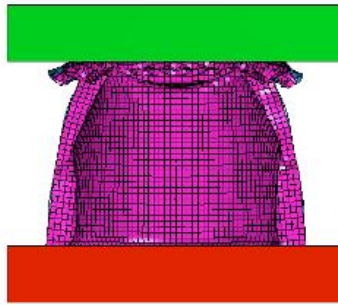
[4] $\delta_f = 20$ mm



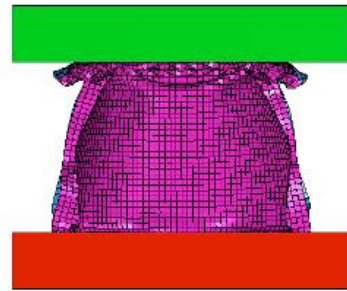
[5] $\delta_f = 25$ mm



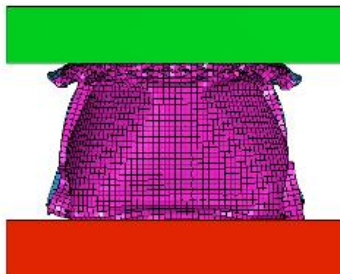
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



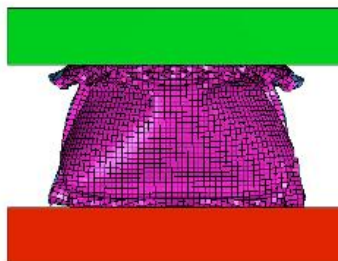
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



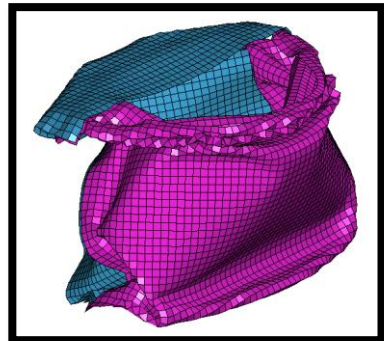
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.18: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

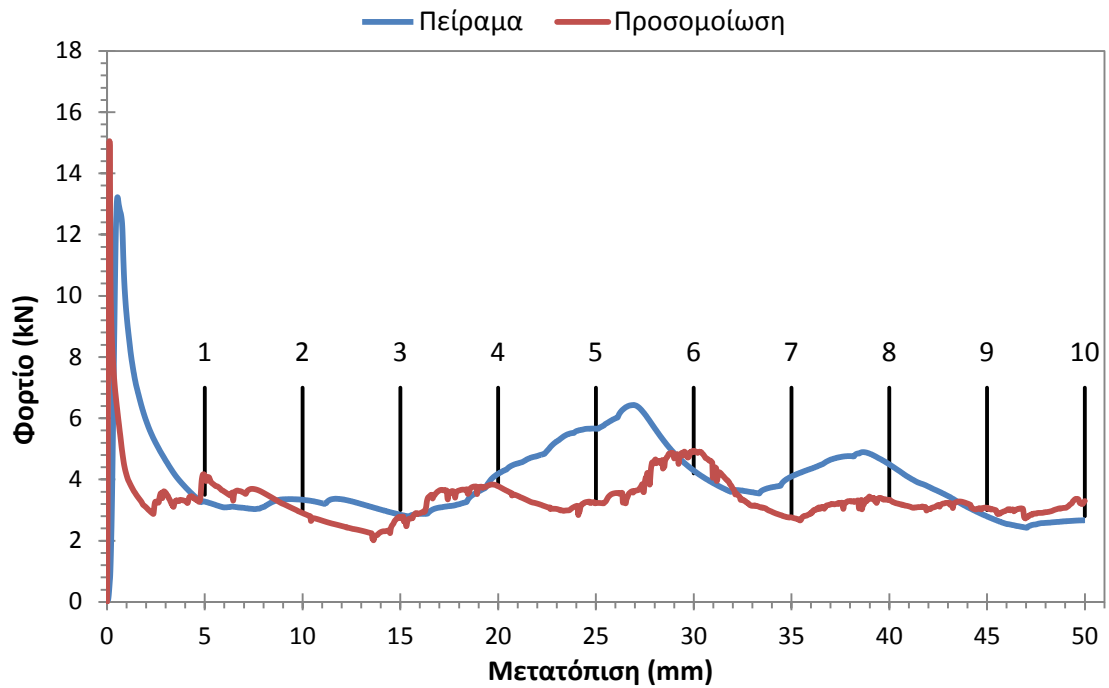
Το δοκίμιο απορρόφησε ενέργεια ίση με 251.97J με μέγιστο φορτίο 16.62kN. Το αντίστοιχο φορτίο κατά το μοντέλο προσομοίωσης είναι το ίδιο αλλά με λιγότερη ενέργεια απορρόφησης κατά 22%. Η μάζα του είναι 83.6g οπότε προκύπτει συντελεστής ενέργειας ανά μάζα $SEA = 3.01J/g$ για το πειραματικό μοντέλο και $2.46J/g$ για την προσομοίωση.

Τα βασικά αποτελέσματα του ημικυκλικού δοκιμίου είναι αισθητά αυξημένα σε σχέση με τα προηγούμενα της ορθογώνιας και τριγωνικής διατομής. Η ενέργεια είναι αυξημένη 19% σε σχέση με το πρώτο δοκίμιο και 64% σε σχέση με το δεύτερο ενώ το μέγιστο φορτίο 62% και 90% αντίστοιχα. Μάλιστα η απορροφημένη ενέργεια μπορεί να συγκριθεί με το δοκίμιο double-hat διατομής με φλάντζα μήκους 15mm όπου η ενέργεια είναι 260.82J. Ομοίως και το μέγιστο φορτίο, το οποίο σε κάθε double-hat δοκίμιο είχε τιμή περίπου 17kN. Βάσει αποτελεσμάτων μπορεί να κριθεί ως δοκίμιο με ικανοποιητική συμπεριφορά.

Από τη θεωρία που αναφέρθηκε στο κεφ.2.5.1 προκύπτει πλήρης μη-αξονοσυμμετρική παραμόρφωση του δοκιμίου σχηματίζοντας 3 σειρές λοβών. Από το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης μπορούμε να αναγνωρίσουμε ορισμένες φάσεις της συμπίεσης. Οπότε, προκύπτει ότι ο σχηματισμός λοβών αρχίζει για συμπίεση 27mm, 40mm και 48mm. Στο τέλος της συμπίεσης το κάτω τμήμα του δοκιμίου αρχίζει να παραμορφώνεται ανομοιόμορφα. Το μοντέλο προσομοίωσης παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με το πείραμα και σχηματίζει επίσης 3 λοβούς στο επάνω τμήμα του δοκιμίου. Διαφοροποίηση υπάρχει στο τέλος της συμπίεσης όπου εκκινεί ο σχηματισμός ενός επιπλέον λοβού στο κάτω τμήμα. Και στις δύο περιπτώσεις το επίπεδο έλασμα κάμφθηκε προς τα έξω.

Στη φλάντζα τα ελάσματα αποχωρίστηκαν χωρίς να αστοχήσει κάποια συγκόλληση. Από την πλάγια όψη του δοκιμίου παρατηρούμε ότι στη φλάντζα του διαμορφωμένου ελάσματος δημιουργήθηκαν περισσότεροι λοβοί κατά την κατάρρευση στο επάνω τμήμα. Ο τελευταίος λοβός που σχηματίστηκε μερικώς στο μοντέλο προσομοίωσης προκάλεσε μεγάλη αποχώρηση των ελασμάτων στην ελεύθερη περιοχή της φλάντζας.

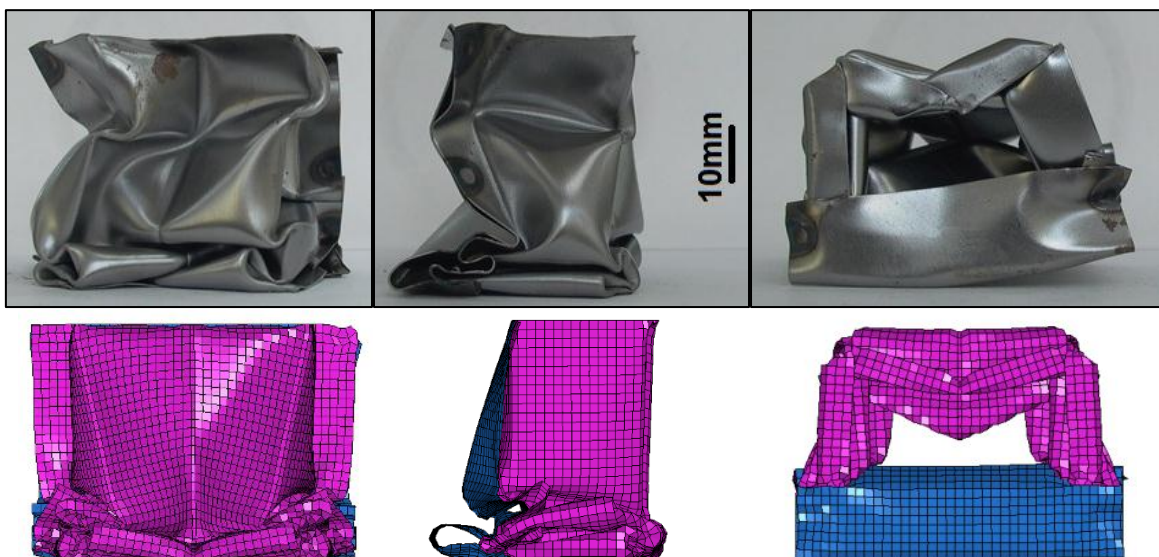
7.1.7. Δοκίμιο 7



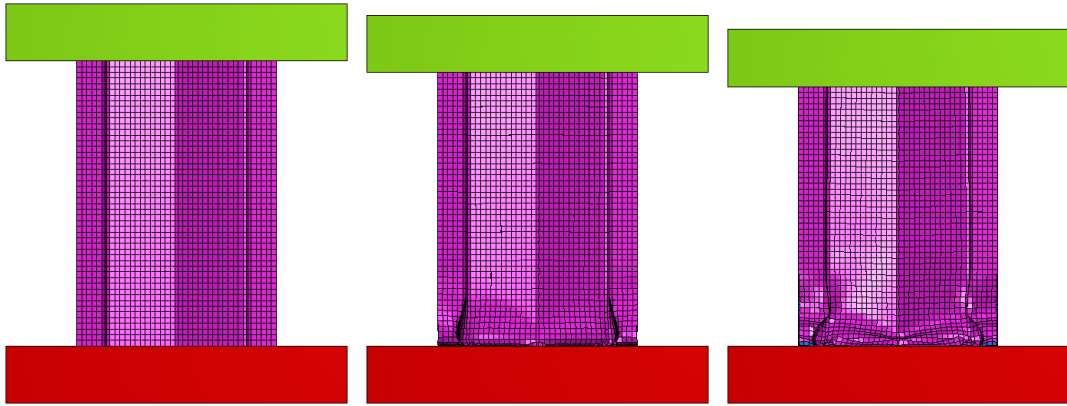
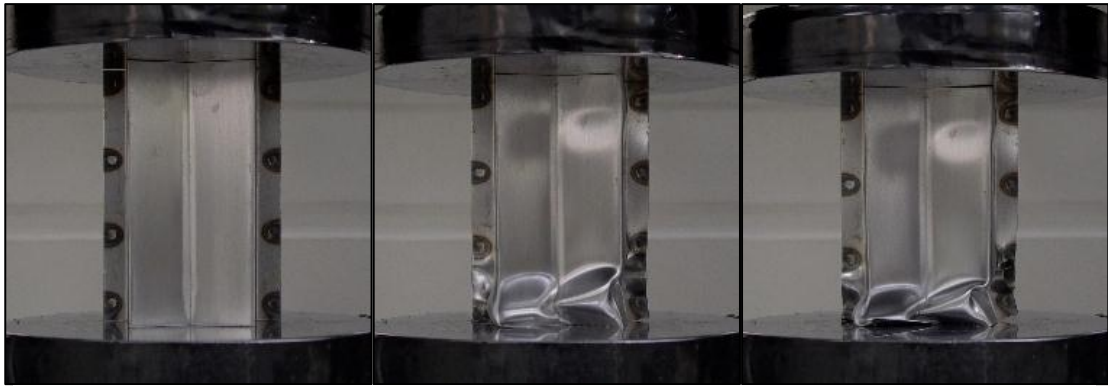
Σχήμα 7.19: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 7

	Πείραμα	Προσομοίωση
Energy Absorption E_a (J)	202.57	168.62
Max Force P_{max} (kN)	13.22	15.05
Mean Force P_m (kN)	4.05	3.37
S.E.A. (J/gr)	2.69	2.24
Mass (gr)	75.4	

Πίνακας 7.7: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 7



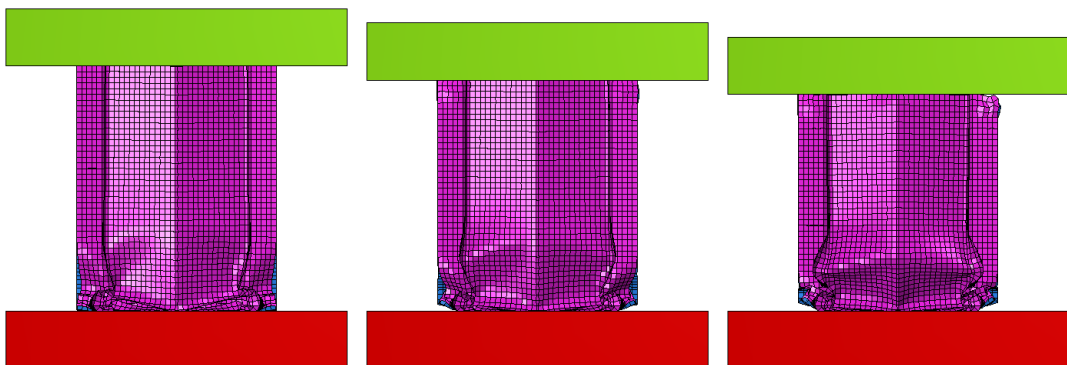
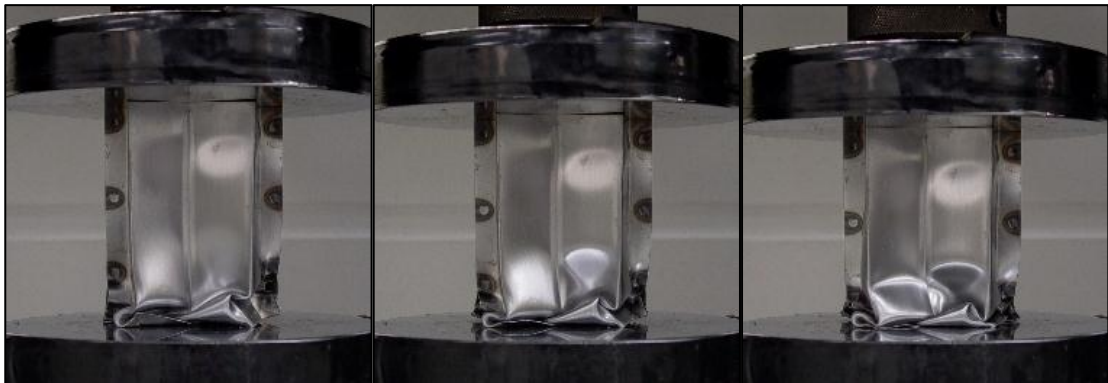
Σχήμα 7.20: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



[0] $\delta_f = 0$ mm

[1] $\delta_f = 5$ mm

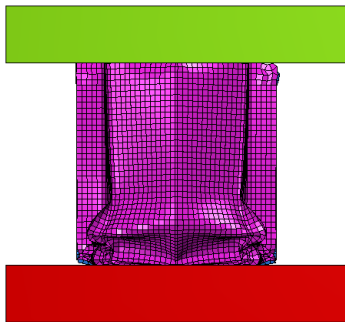
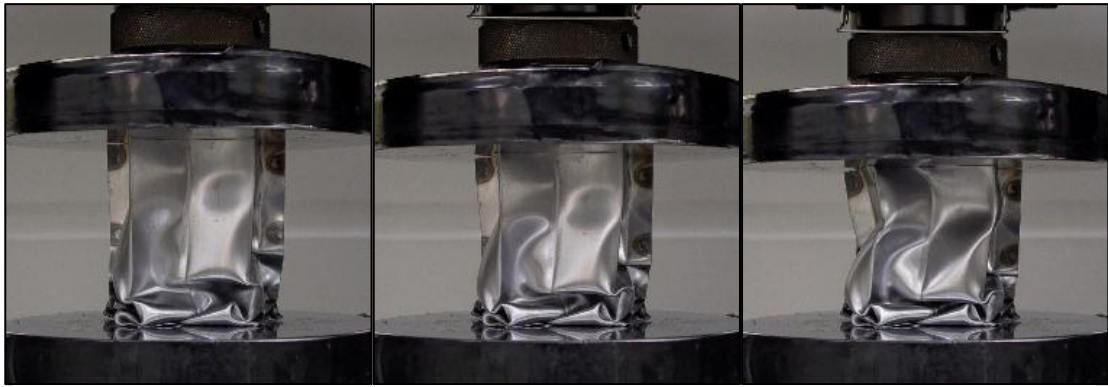
[2] $\delta_f = 10$ mm



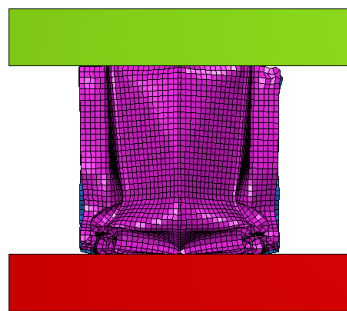
[3] $\delta_f = 15$ mm

[4] $\delta_f = 20$ mm

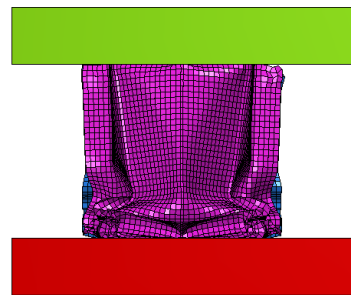
[5] $\delta_f = 25$ mm



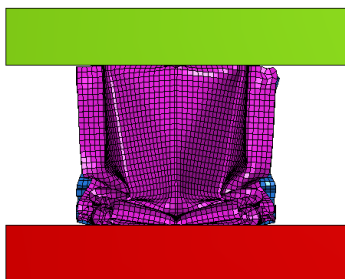
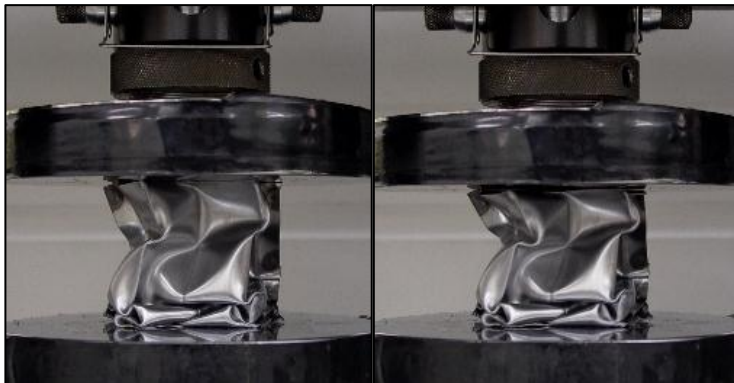
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



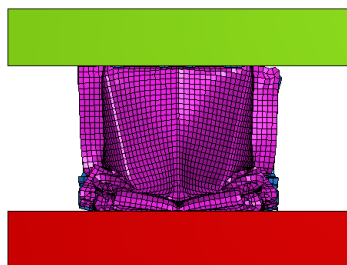
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



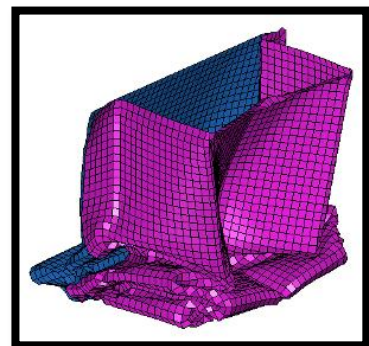
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.21: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

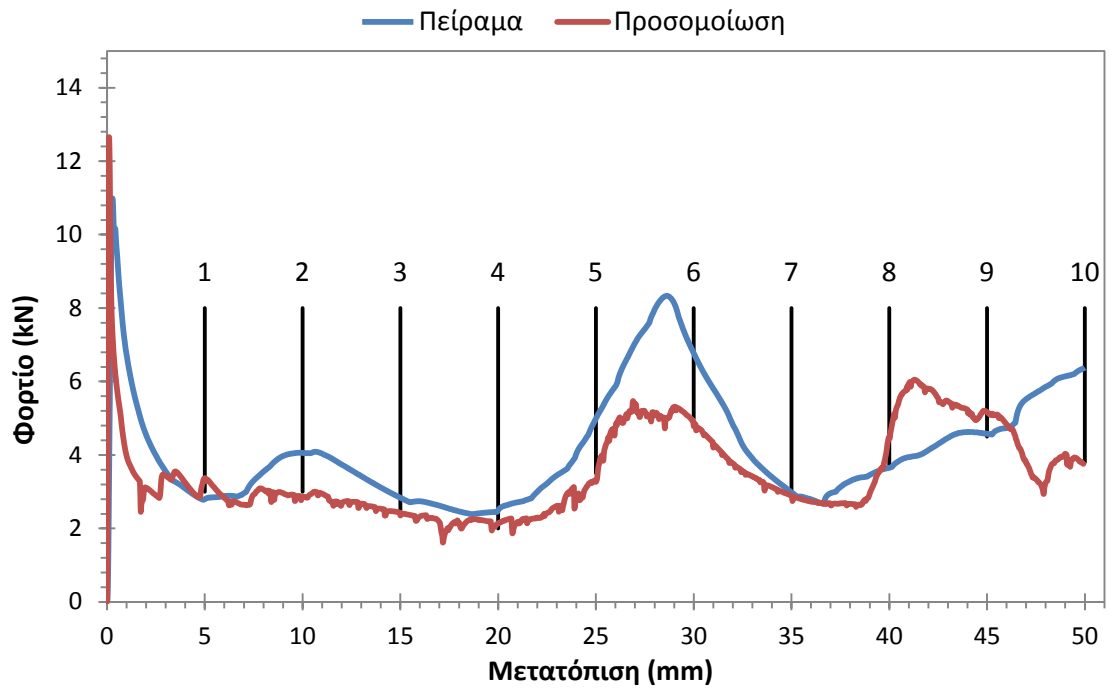
Το δοκίμιο απορρόφησε ενέργεια 202.57J με μέγιστο φορτίο 13.22kN και συντελεστή ενέργειας ανά μάζα SEA 2.69J/gr. Αντίστοιχα το πειραματικό μοντέλο απορρόφησε ενέργεια 168.62J με μέγιστο φορτίο 15.05kN και SEA 2.24J/gr. Η διαφορά στην ενέργεια είναι δηλαδή της τάξης του 20% ενώ για το μέγιστο φορτίο 14%. Σε σχέση με τα άλλα δοκίμια δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα αποδοτικά αποτελέσματα.

Το δοκίμιο αρχίζει να παραμορφώνεται από κάτω σχηματίζοντας πλήρως δύο λοβούς και μερικώς έναν επιπλέον. Ο τελευταίος διακόπτεται όταν κατά τη συμπίεση το άνω τμήμα παραμορφώνεται προς το πλάι προκαλώντας ασύμμετρη κατάρρευση. Η αντιστοιχία του φαινομένου μπορεί να γίνει και από την καμπύλη φορτίου όπου παρατηρείται αύξηση των τιμών των πειραματικών αποτελεσμάτων πέρα από τα 17mm με αιχμή στα 6.5kN για συμπίεση 27mm. Παρόμοια διακύμανση αλλά με μικρότερο πλάτος της τάξης των 4kN παρατηρείται στα 38mm όπου το δοκίμιο αρχίζει να λυγίζει αισθητά. Πιθανό ελάττωμα για το συγκεκριμένο σχηματισμό ίσως είναι η ολίσθηση των ελασμάτων μεταξύ τους κατά τη συγκόλληση.

Το μοντέλο της προσομοίωσης ακολουθεί το πειραματικό μέχρι το στάδιο που αρχίζει η κατάρρευση του επάνω τμήματος. Πέρα από αυτό το μοντέλο ακολουθεί ποιο αναμενόμενη παραμόρφωση. Για συμπίεση 30mm προκαλείται αύξηση του φορτίου ως αποτέλεσμα του λυγισμού των πλαϊνών τοιχωμάτων προς τα μέσα κατά το σχηματισμό του τρίτου λοβού σε συνδυασμό με την κάμψη της φλάντζας. Η γωνιακή διαμόρφωση του ελάσματος στο μέσο του ύψους τείνει να μειώνει τη γωνία της κατά το πέρασ της συμπίεσης όπου τα πλαϊνά τμήματα συμπιέζουν το δοκίμιο. Για τον ίδιο λόγο η διατομή του δοκιμίου στο επάνω τμήμα τείνει σε ορθογώνιο αυξάνοντας τη γωνία περίπου στις 180°.

Οι συγκολλήσεις του δοκιμίου παρέμειναν ακέραιες ενώ και στις δύο περιπτώσεις στην ελεύθερη περιοχή της φλάντζας στο κάτω τμήμα τα ελάσματα αποχωρίστηκαν μεταξύ τους.

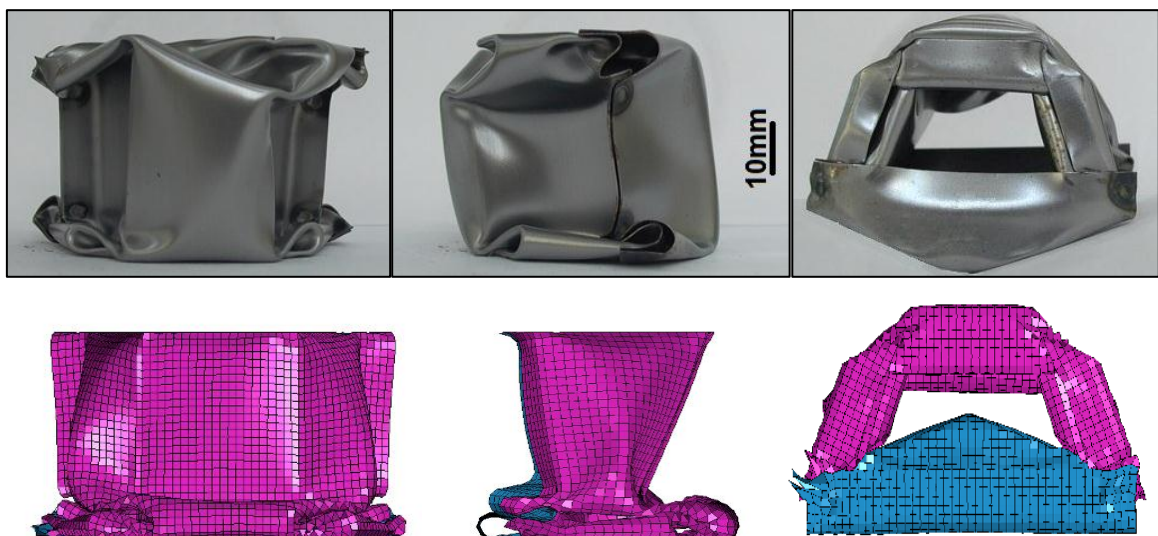
7.1.8. Δοκίμιο 8



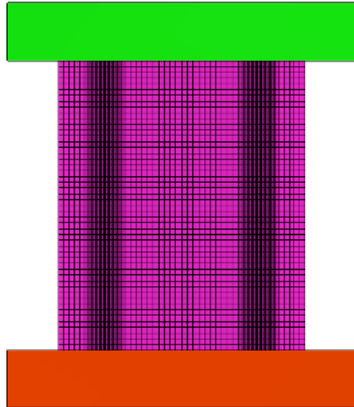
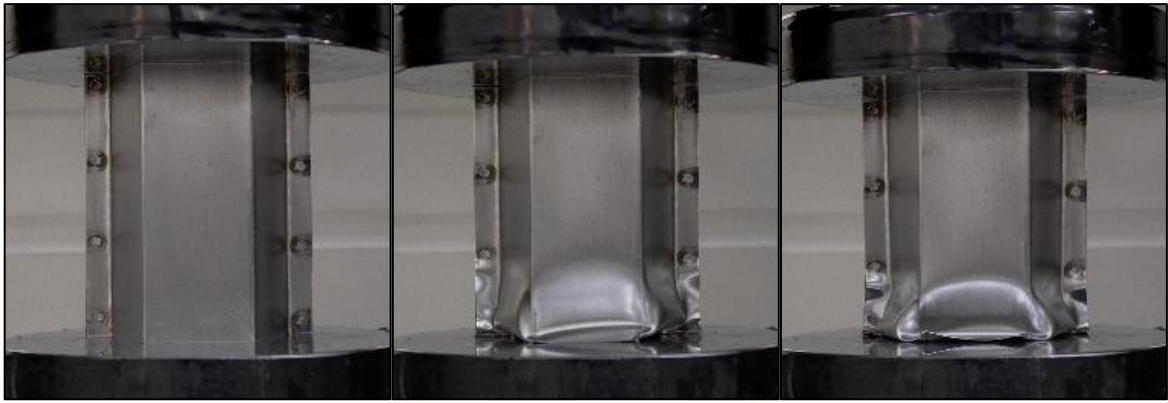
Σχήμα 7.22: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 8

	Πείραμα	Προσομοίωση
Energy Absorption E_a (J)	210.45	176.02
Max Force P_{max} (kN)	10.99	12.65
Mean Force P_m (kN)	4.21	3.52
S.E.A. (J/gr)	2.55	2.14
Mass (gr)	82.4	

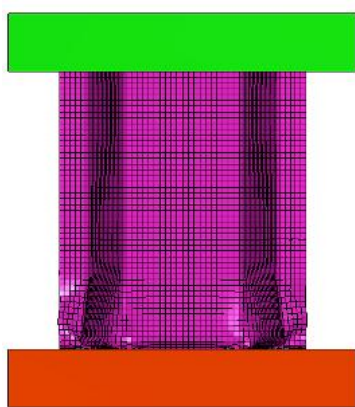
Πίνακας 7.8: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 8



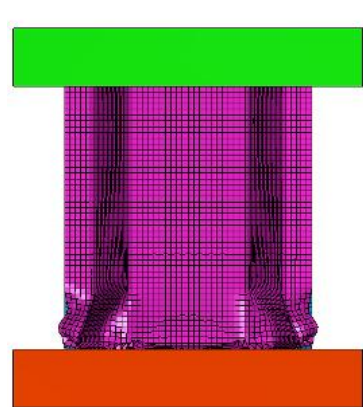
Σχήμα 7.23: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



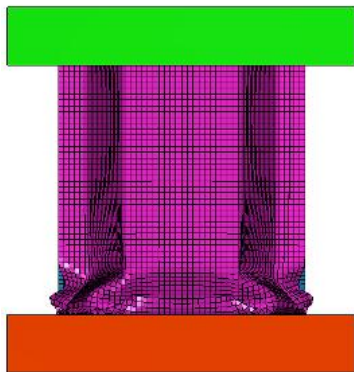
[0] $\delta_f = 0$ mm



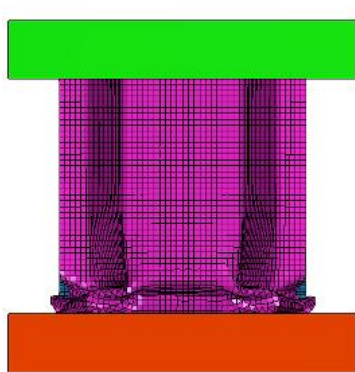
[1] $\delta_f = 5$ mm



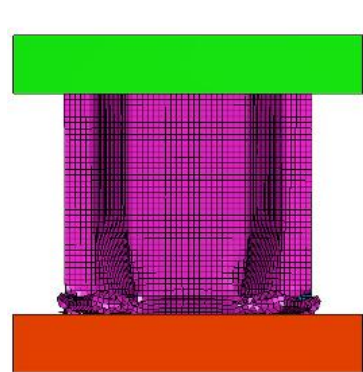
[2] $\delta_f = 10$ mm



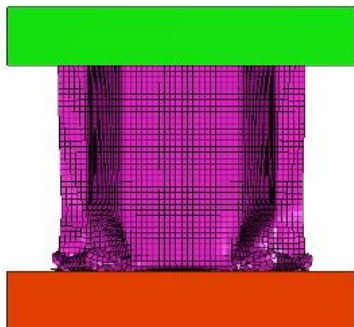
[3] $\delta_f = 15$ mm



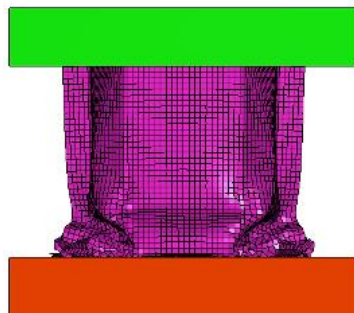
[4] $\delta_f = 20$ mm



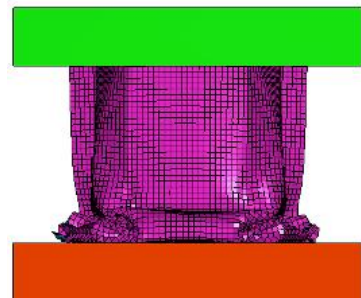
[5] $\delta_f = 25$ mm



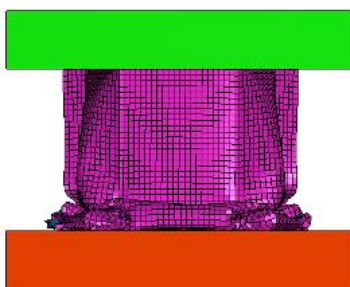
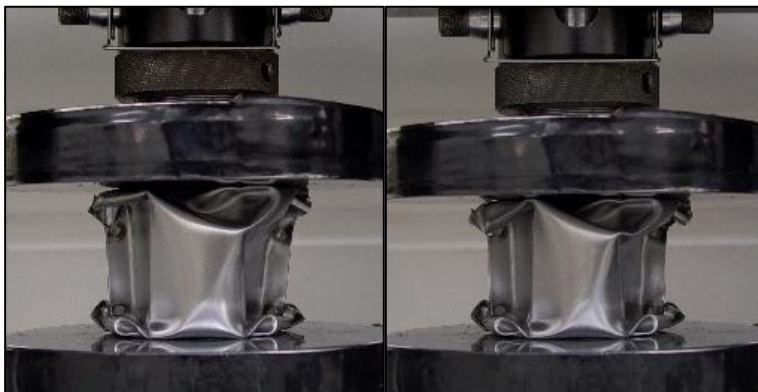
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



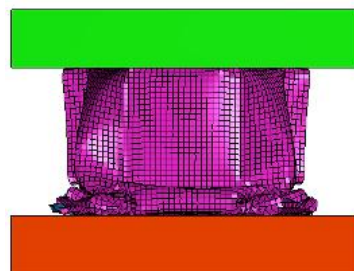
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.24: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

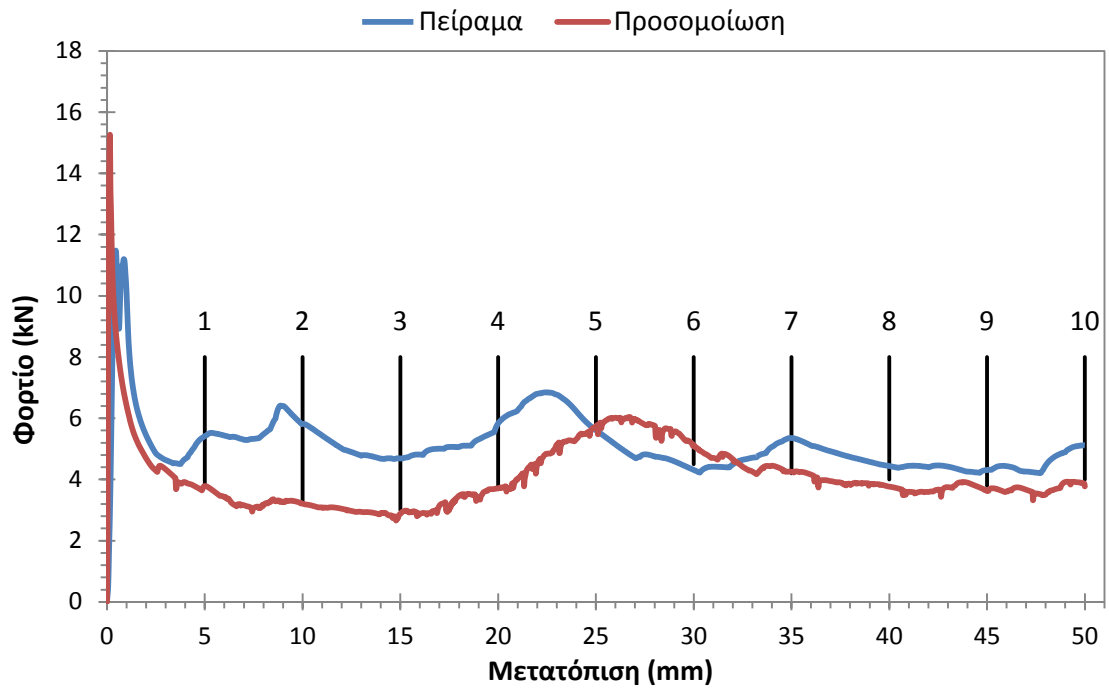
Το 8^ο δοκίμιο απορρόφησε ενέργεια 210.45J με μέγιστο φορτίο 10.99kN ενώ για την προσομοίωση η ενέργεια προέκυψε 176.02J και το μέγιστο φορτίο 12.65kN δηλαδή μεταβολή -20% και +15% αντίστοιχα. Η μάζα του δοκιμίου είναι 82.4gr. Τα αποτελέσματα δεν εμφανίζουν αισθητές διαφορές σε σχέση με το 4^ο δοκίμιο με ορθογώνια διατομή όπως αναμενόταν λόγω της σχετικής ομοιότητας της διατομής. Παρατηρώντας όμως το δοκίμιο στις διαδοχικές φάσεις της συμπίεσης προκύπτει αξιοσημείωτη μεταβολή του αποτελέσματος.

Στο πειραματικό δοκίμιο, το κάτω τμήμα του ελάσματος αρχικά ολίσθησε πάνω στην πλάκα της πρέσσας και στη συνέχεια σχηματίστηκε ο πρώτος λοβός. Ακολούθως η παραμόρφωση μεταφέρθηκε στο υπόλοιπο τμήμα του δοκιμίου προκαλώντας ασύμμετρη κατάρρευση και αναδίπλωση του ελάσματος προς τα μέσα. Αυτή η διαδικασία εκκίνησε στα 27mm συμπίεσης οπότε και αναπτύχθηκε υψηλό θλιπτικό φορτίο της τάξης των 8kN. Για συμπίεση 37mm άρχισε να κάμπτεται και η φλάντζα του δοκιμίου με αποτέλεσμα τη σταδιακή αύξηση του φορτίου μέχρι το τέλος της διαδικασίας. Το επίπεδο έλασμα παραμορφώνεται προς τα έξω ως προς άξονα στο μέσο καθ' ύψος δημιουργώντας τη μορφή του σχ.7.23.

Το μοντέλο προσομοίωσης ακολουθεί πιο ομαλή κατάρρευση από το πειραματικό. Κατά την έναρξη της κατάρρευσης προκαλείται ολίσθηση του διαμορφωμένου ελάσματος στην πλάκα. Σχηματίζονται 2 λοβοί, αρχικά στα πλαϊνά τοιχώματα και στη συνέχεια στη μπροστά επιφάνεια. Ένας επιπλέον λοβός τείνει να σχηματιστεί προς το τέλος της διαδικασίας στα πλαϊνά τοιχώματα προκαλώντας ταυτόχρονα τη μεταφορά των ελασμάτων προς τα μέσα. Από το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης διακρίνεται αύξηση του φορτίου για εύρος τιμών 25-30mm καθώς και 40-47mm. Η πρώτη περιοχή αντιστοιχεί στην έναρξη σχηματισμού του τρίτου λοβού συμπιέζοντας τα πλαϊνά τοιχώματα ενώ η δεύτερη περιοχή αντιστοιχεί στο λυγισμό των πλαϊνών τοιχωμάτων του άνω τμήματος του μοντέλου και τη μεταφορά της μπροστινής επιφάνειας προς τον εσωτερικό όγκο αυτού.

Οι τοπικές συγκολλήσεις διατηρήθηκαν ακέραιες ενώ προκλήθηκε απομάκρυνση των ελασμάτων της φλάντζας στην ελεύθερη περιοχή στο άνω τμήμα του δοκιμίου.

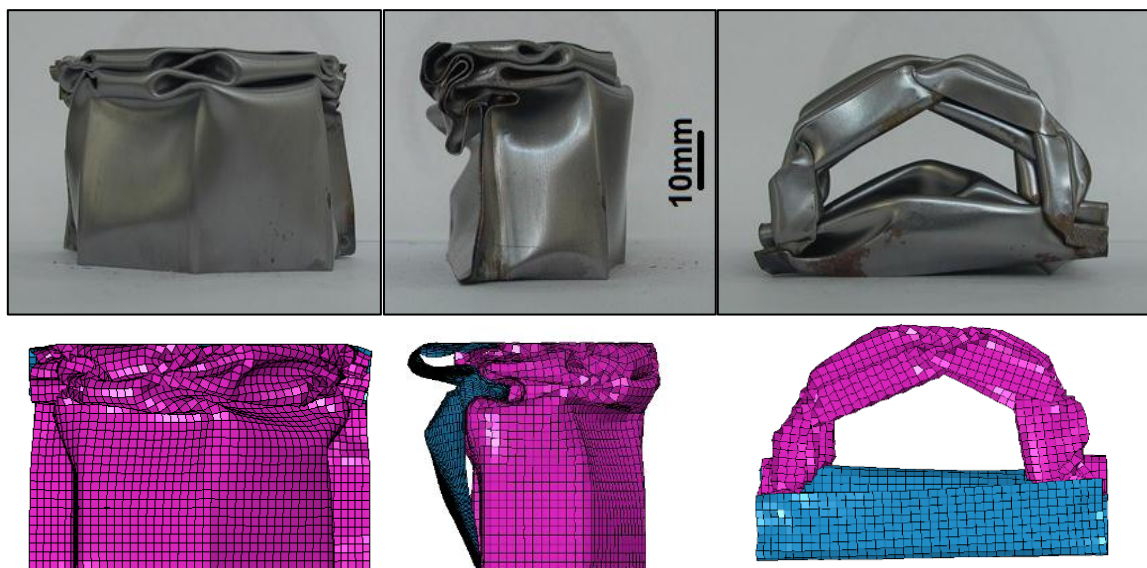
7.1.9. Δοκίμιο 9



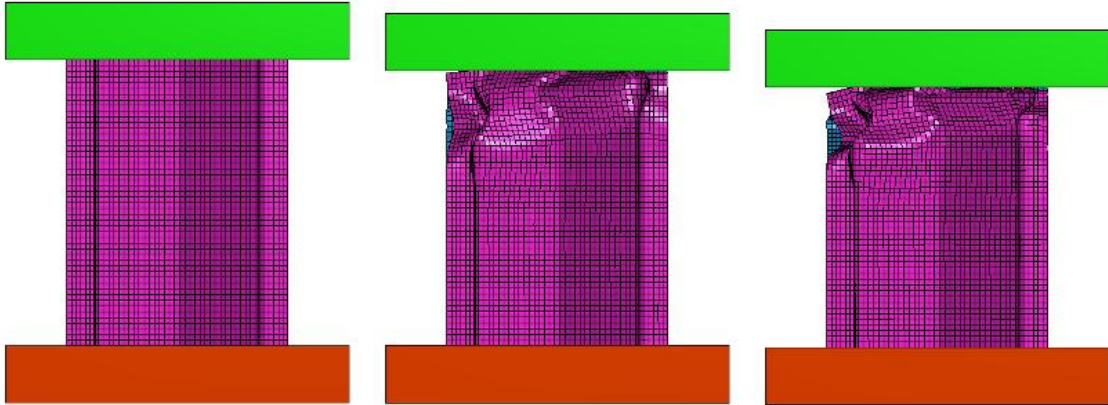
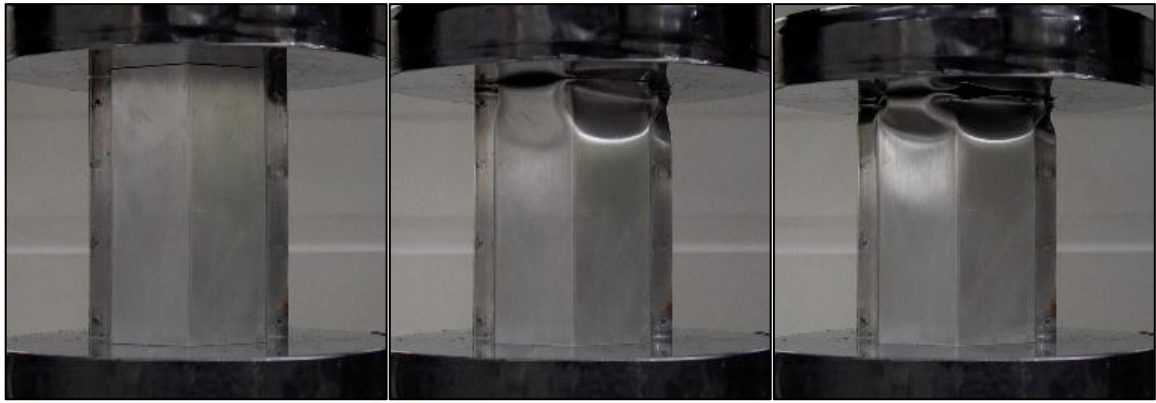
Σχήμα 7.25: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 9

	Πείραμα	Προσομοίωση
Energy Absorption E_a (J)	257.08	205.90
Max Force P_{max} (kN)	11.48	15.26
Mean Force P_m (kN)	5.14	4.12
S.E.A. (J/gr)	3.30	2.64
Mass (gr)	78.0	

Πίνακας 7.9: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 9



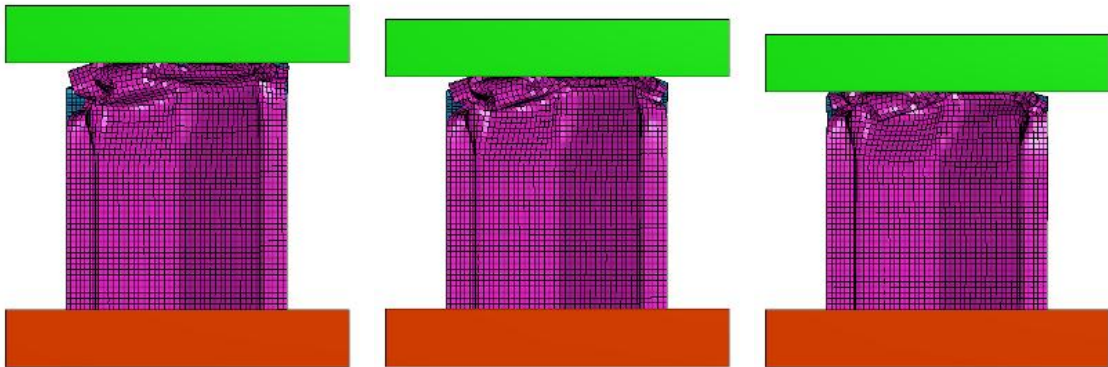
Σχήμα 7.26: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



[0] $\delta_f = 0$ mm

[1] $\delta_f = 5$ mm

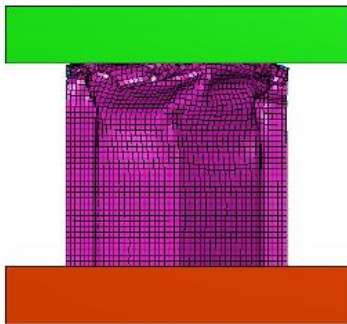
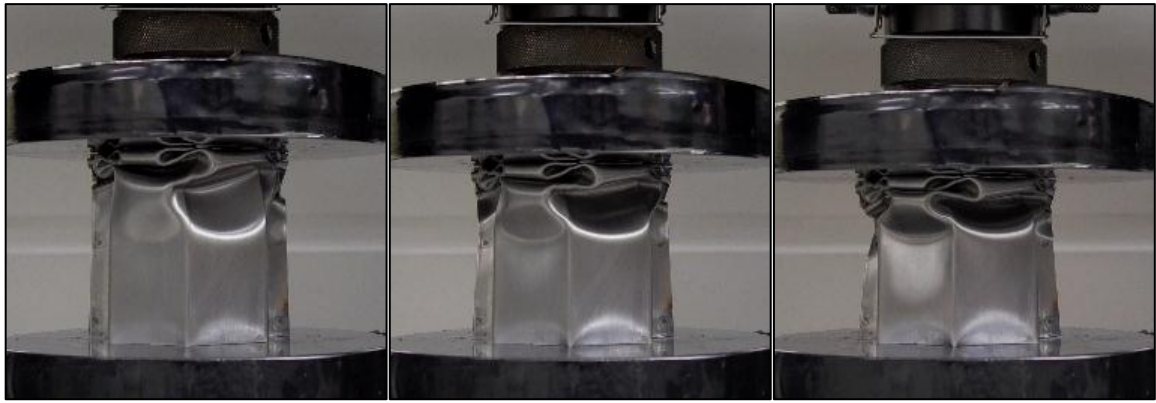
[2] $\delta_f = 10$ mm



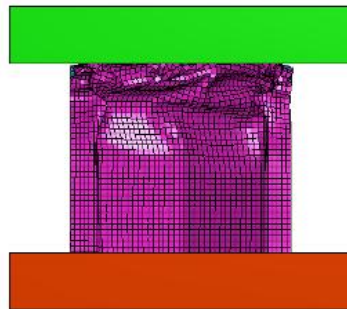
[3] $\delta_f = 15$ mm

[4] $\delta_f = 20$ mm

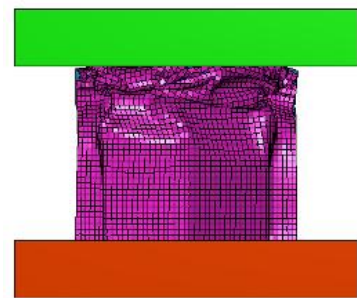
[5] $\delta_f = 25$ mm



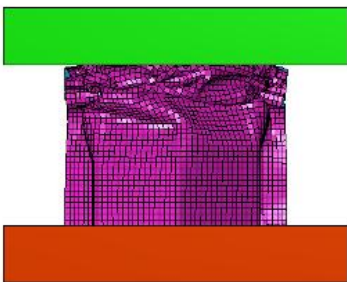
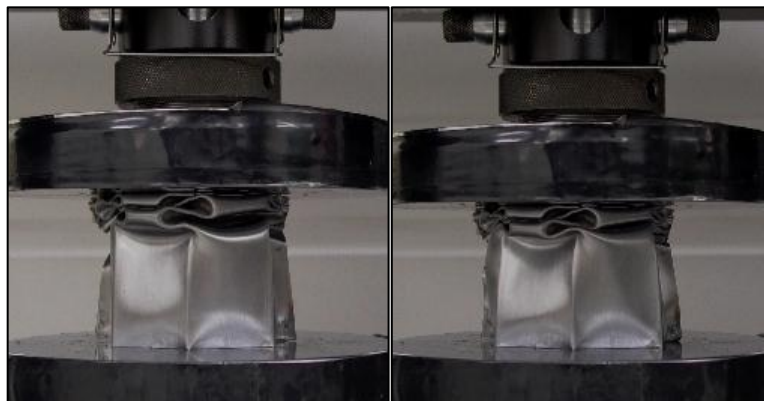
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



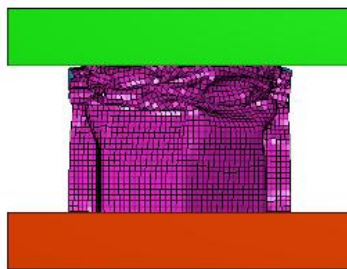
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



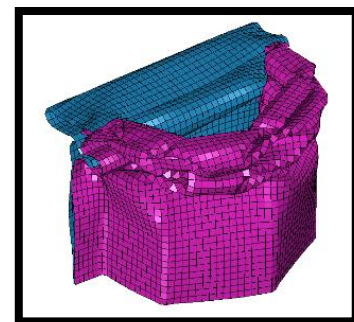
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.27: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

Από τα βασικά αποτελέσματα της ανάλυσης του 9^{ου} δοκιμίου προκύπτει πειραματική ενέργεια απορρόφησης 257.08J έναντι 205.90J για το μοντέλο (μείωση 23%), μέγιστο φορτίο 11.48J για το πείραμα και 15.26J για το μοντέλο άρα αύξηση 33%. Η μάζα του δοκιμίου ζυγίστηκε στα 78.0gr οπότε προκύπτει η ενέργεια ανά μάζα ίση με 3.30J/gr και 2.64J/gr για πείραμα και προσομοίωση αντίστοιχα. Εν τέλει παρατηρείται αξιοσημείωτη απόκλιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης έναντι της πειραματικής διαδικασίας.

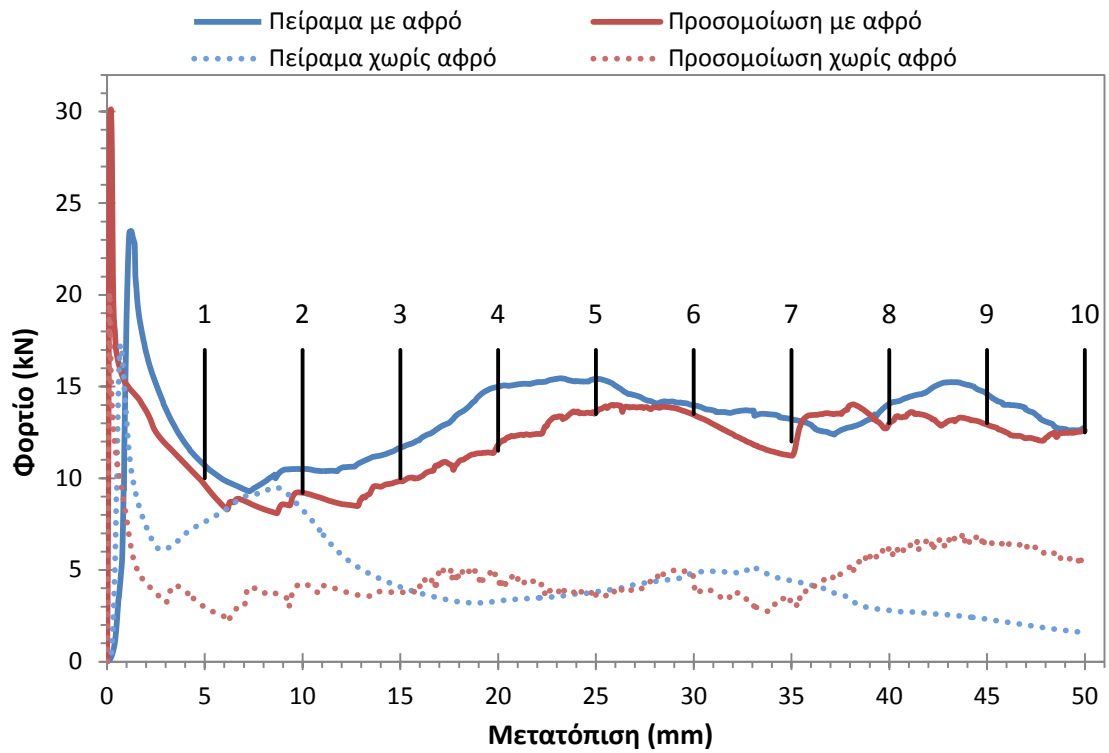
Σε σχέση με τα προηγούμενα πειράματα, η απόδοση της διατομής μπορεί να συγκριθεί μόνο με το δοκίμιο ημικυκλικής όπου η ενέργεια απορρόφησης είναι όμοια. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διατομής είναι το μικρότερο μέγιστο φορτίο. Όπως έχει αναφερθεί ο σκοπός του σχεδιαστή είναι η υψηλή ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης σε συνδυασμό με περιορισμένη τιμή του μέγιστου αναπτυσσόμενου φορτίου. Επίσης το βάρος του δοκιμίου είναι ελαφρώς μικρότερο από το δοκίμιο 6 κατά 7.2% το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη σε περίπτωση μεγάλων κατασκευών που επιθυμείται η μείωση της παραμέτρου της μάζας, όπως είναι τα οχήματα.

Στο πειραματικό δοκίμιο σχηματίστηκαν πλήρως τρεις λοβοί. Η παραμόρφωση του δοκιμίου έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζεται λοβός με την μετακίνηση του ελάσματος προς τα μέσα και προς τα έξω εναλλάξ για κάθε ένα από τα δύο τμήματα υπό κλίση της μπροστά επιφάνειας. Οπότε στο αριστερό τμήμα σχηματίστηκαν δύο λοβοί ενώ στο δεξί ένας όπως προκύπτει και από την πρόοψη του δοκιμίου στο σχ.7.26. Η έναρξη σχηματισμού των λοβών πέραν του πρώτου, μπορεί να αναγνωριστεί και από το διάγραμμα οπότε προκύπτει για συμπίεση 9mm και 23mm. Στη συνέχεια το δοκίμιο συνέχισε να καταρρέει μέχρι που τα ελάσματα κάθε αναδίπλωσης ήρθαν σε επαφή. Σύμφωνα με την καμπύλη του σχ.7.25, το πειραματικό δοκίμιο συγκράτησε μέρος του μέγιστου φορτίου για 1mm περίπου.

Στο υπολογιστικό μοντέλο σχηματίστηκαν επίσης 3 λοβοί με την ίδια διάταξη όπως και στο πείραμα. Η αύξηση του φορτίου περίπου στα 6kN για συμπίεση 27mm οφείλεται στην έναρξη σχηματισμού του τρίτου λοβού και την τσάκιση του δεξιού τμήματος του διαμορφωμένου ελάσματος.

Από την πλάγια όψη του δοκιμίου διακρίνεται η ολική αστοχία της μεσαίας συγκόλλησης και στις δύο φλάντζες. Στην προσομοίωση, το επίπεδο έλασμα κατά το σχηματισμό του πρώτου λοβού αναδίπλωσε προς την εξωτερική πλευρά ενώ η φλάντζα του διαμορφωμένου ελάσματος συνέχισε να παραμορφώνεται ποιο ομαλά.

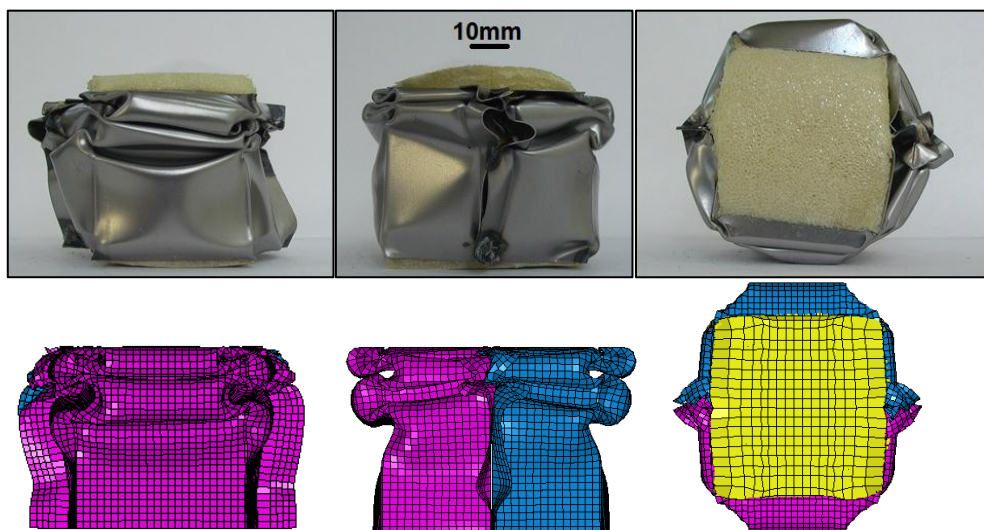
7.1.10. Δοκίμιο 1F



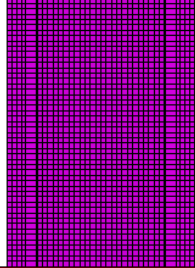
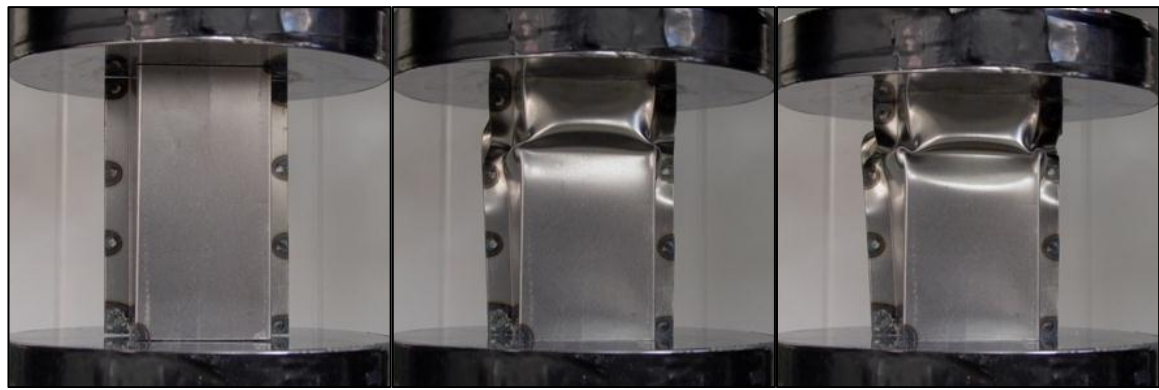
Σχήμα 7.28: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 1F

	Πείραμα με αφρό	Προσομοίωση με αφρό	Πείραμα χωρίς αφρό	Προσομοίωση χωρίς αφρό
Energy Absorption E_a (J)	656.62	598.41	232.03	232.57
Max Force P_{max} (kN)	23.48	30.12	17.32	20.16
Mean Force P_m (kN)	13.13	11.97	4.64	4.65
S.E.A. (J/gr)	3.77	3.44	2.39	2.40
Mass (gr)	174.1		97.1	

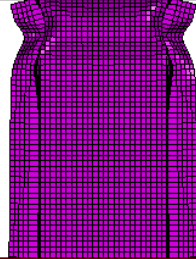
Πίνακας 7.10: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 1F



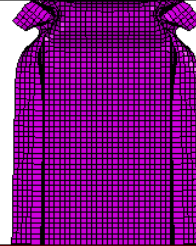
Σχήμα 7.29: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



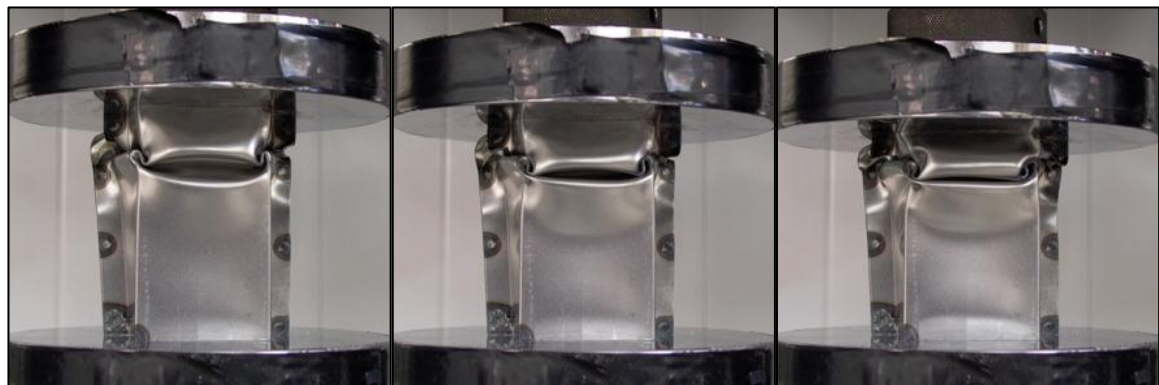
[0] $\delta_f = 0$ mm



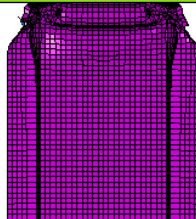
[1] $\delta_f = 5$ mm



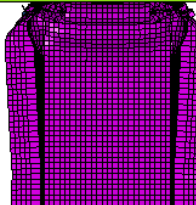
[2] $\delta_f = 10$ mm



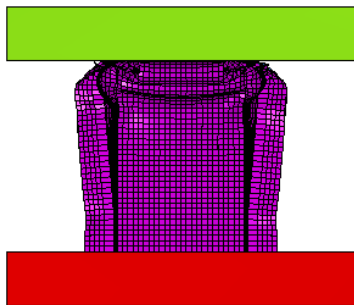
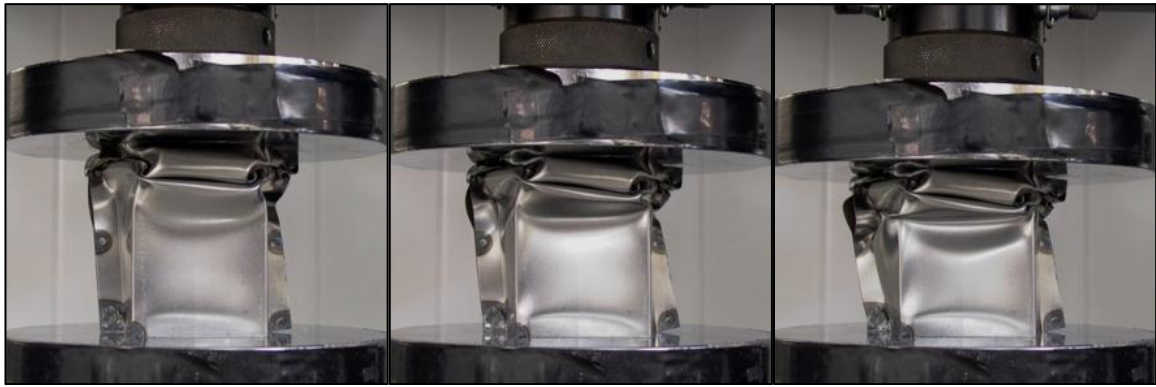
[3] $\delta_f = 15$ mm



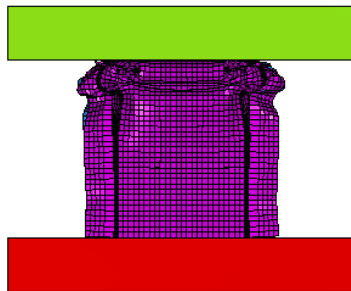
[4] $\delta_f = 20$ mm



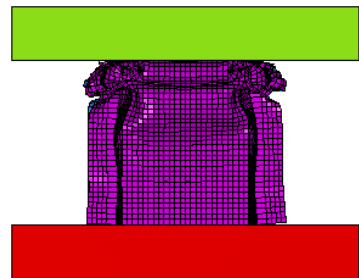
[5] $\delta_f = 25$ mm



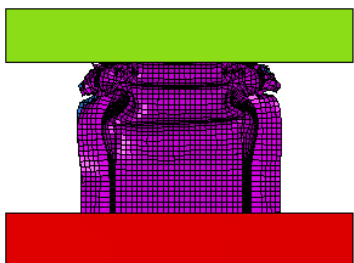
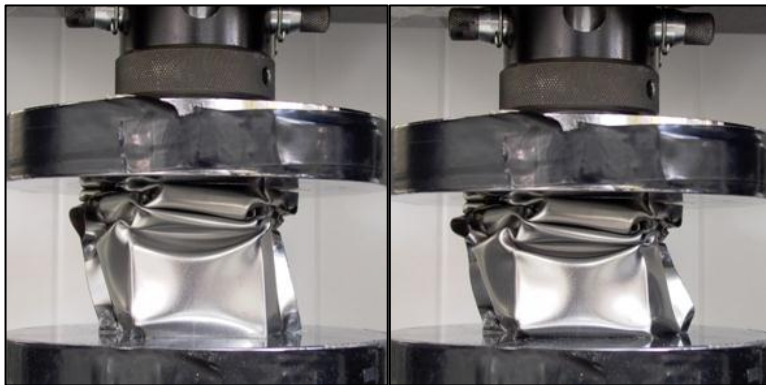
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



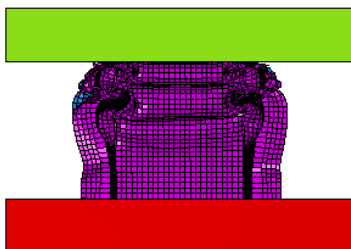
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



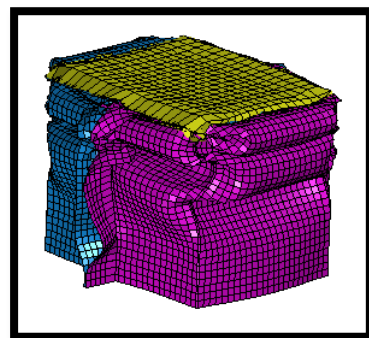
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.30: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

Το πειραματικό δοκίμιο απορροφά ενέργεια 656.62J με μέγιστο φορτίο 23.48kN και ειδική ενέργεια ανά μάζα 3.77J/gr. Τα αντίστοιχα μεγέθη για το υπολογιστικό μοντέλο είναι 598.41J, 30.12kN, 3.44J/gr. Δηλαδή, παρατηρείται μειωμένη απόδοση του μοντέλου καθώς απορροφά μικρότερη ποσότητα ενέργειας περίπου 10% αλλά αναπτύσσει μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο της τάξης του 28% σε σχέση με το δοκίμιο.

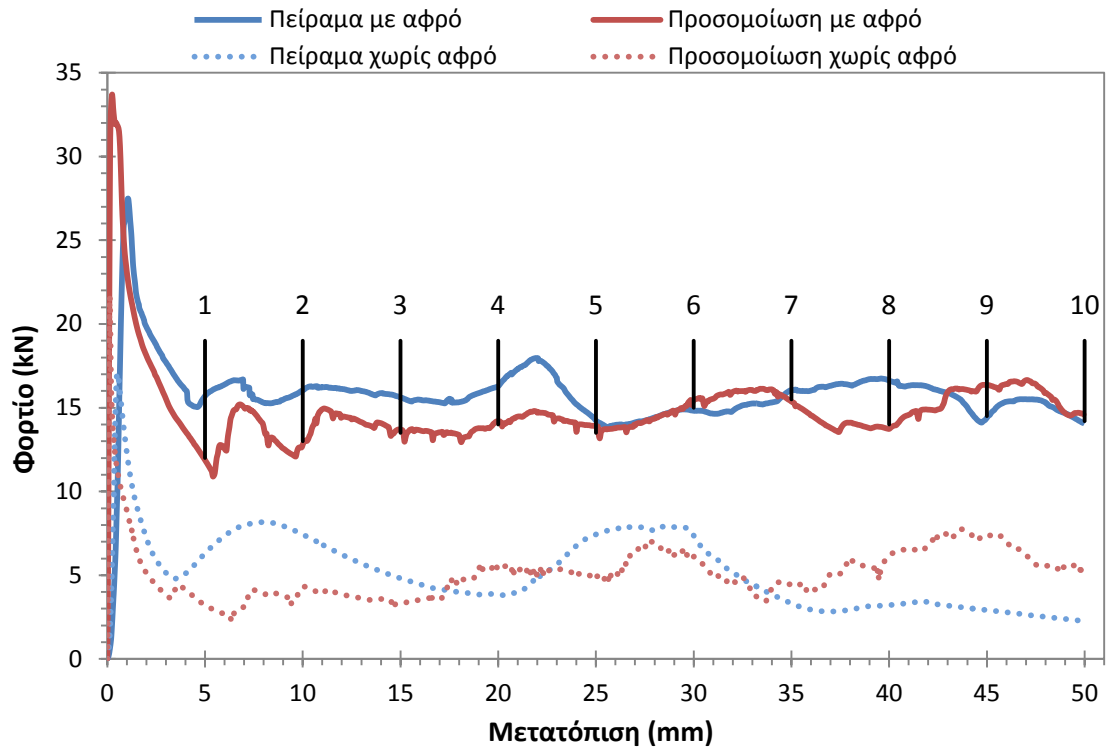
Σε σχέση με τα αποτελέσματα των άδειων δοκιμίων, παρουσιάζεται σημαντική αύξηση όλων των μεγεθών. Η απορροφώμενη ενέργεια είναι αυξημένη 2.5 – 3 φορές ενώ μικρή αύξηση υφίσταται και για το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης. Η μάζα του δοκιμίου με αφρό είναι 174.1gr ενώ του άδειου 97.1gr οπότε προκύπτει μια αύξηση της ειδικής ενέργειας ανά μάζα της τάξης του 1- 1.5J/gr.

Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης παρατηρείται καλή προσέγγιση του υπολογιστικού μοντέλου. Το πειραματικό δοκίμιο εμφανίζει μικρή καθυστέρηση ανάπτυξης του μέγιστου φορτίου. Συνολικά δημιουργούνται 2 μεγάλοι λοβοί στο επάνω τμήμα του δοκιμίου. Ο πρώτος πλαστικός αρμός που δημιουργείται στα 2/3 του ύψους προς τα πάνω, σχηματίζεται πλήρως για βράχυνση 25mm όπου και έχουμε τοπικό μέγιστο του φορτίου. Από εκεί και πέρα το δοκίμιο αρχίζει να παραμορφώνεται προς το πλάι με ταυτόχρονη δημιουργία του επόμενου λοβού.

Στο υπολογιστικό μοντέλο σχηματίστηκαν επίσης 2 λοβοί μεγάλου ύψους. Η κατάρρευση του μοντέλου είναι ομαλή και η καμπύλη φορτίου μεταβάλλεται ανάλογα με την πειραματική. Η φλάντζα του δοκιμίου κάμπτεται παρατεταμένα για εύρος 15-30mm προκαλώντας σταθερή αύξηση του φορτίου. Απότομη αύξηση του φορτίου για συμπίεση 35mm οφείλεται στο διαχωρισμό των ελασμάτων της φλάντζας ανάμεσα στη 2^η και 3^η σειρά συγκολλήσεων.

Δεν προέκυψε αστοχία κάποιας συγκόλλησης του πειραματικού δοκιμίου παρόλο το διαχωρισμό των ελασμάτων στην ελεύθερη περιοχή της φλάντζας όπως παρατηρείται από την πλάγια όψη του δοκιμίου.

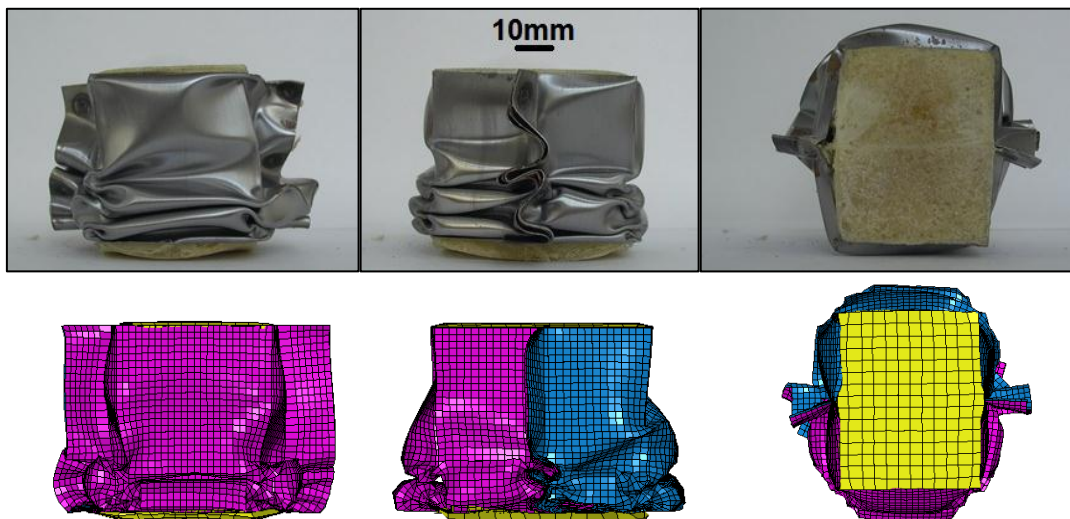
7.1.11. Δοκίμο 2F



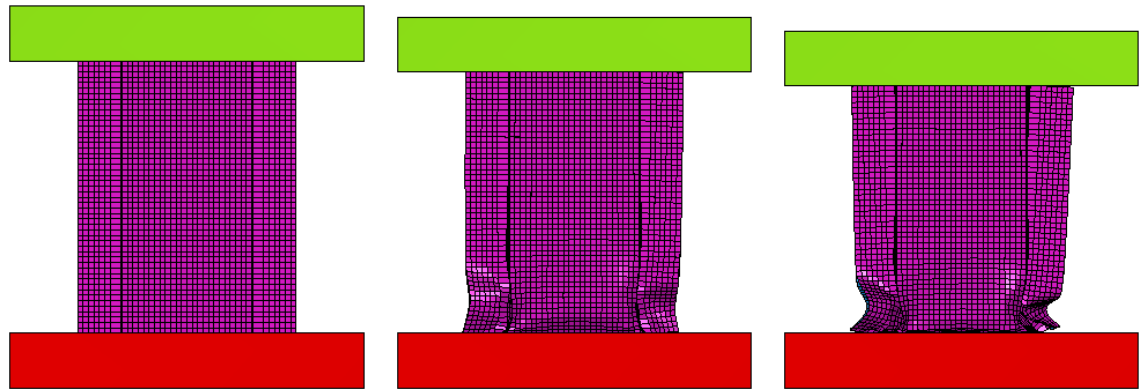
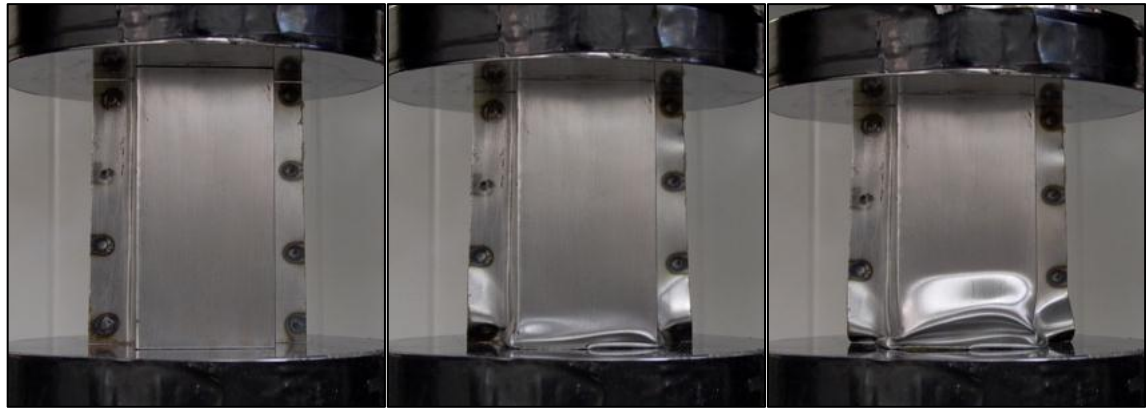
Σχήμα 7.31: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 2F

	Πείραμα με αφρό	Προσομοίωση με αφρό	Πείραμα χωρίς αφρό	Προσομοίωση χωρίς αφρό
Energy Absorption E_a (J)	788.45	744.37	260.82	259.01
Max Force P_{max} (kN)	27.49	33.71	17.07	21.67
Mean Force P_m (kN)	15.77	14.89	5.22	5.18
S.E.A. (J/gr)	4.31	4.07	2.46	2.44
Mass (gr)	182.9		106.1	

Πίνακας 7.11: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 2F



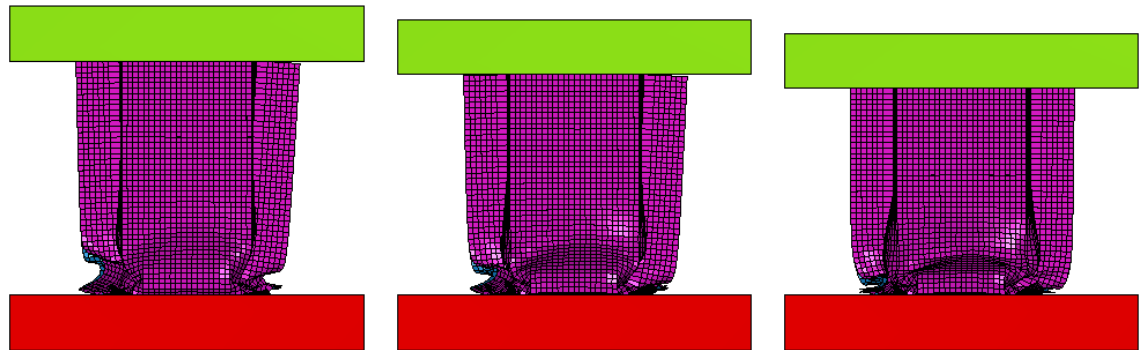
Σχήμα 7.32: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



[0] $\delta_f = 0$ mm

[1] $\delta_f = 5$ mm

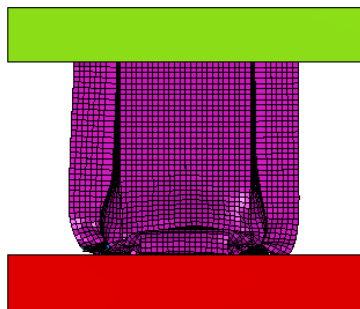
[2] $\delta_f = 10$ mm



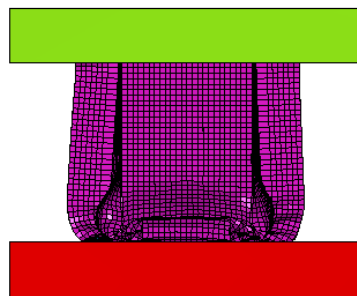
[3] $\delta_f = 15$ mm

[4] $\delta_f = 20$ mm

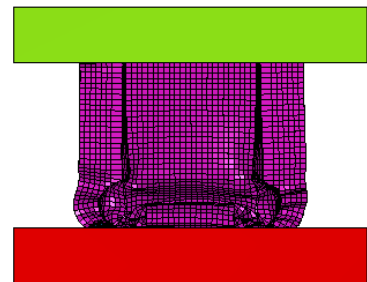
[5] $\delta_f = 25$ mm



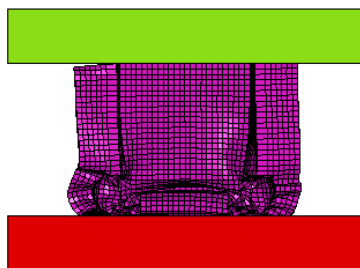
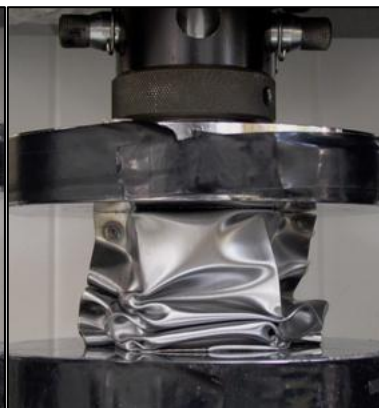
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



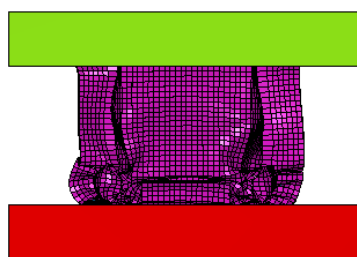
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



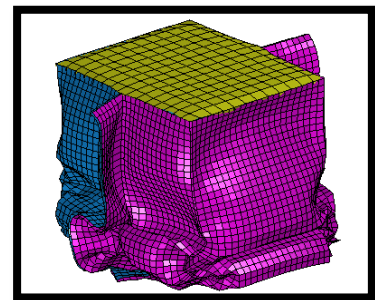
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.33: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

Το δοκίμιο 2F εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά από το προηγούμενο. Τα βασικά αποτελέσματα της ανάλυσης για το πείραμα και την προσομοίωση αντίστοιχα έχουν ως εξής: απορροφώμενη ενέργεια 788.45J έναντι 744.37J, μέγιστο θλιπτικό φορτίο 27.48kN έναντι 33.71kN, ειδική ενέργεια ανά μάζα 4.31J/gr έναντι 4.07J/gr. Σε σχέση με το δοκίμιο 1F η αύξηση της ενέργειας απορρόφησης είναι πάνω από 100J ενώ του μέγιστου φορτίου περίπου 3kN.

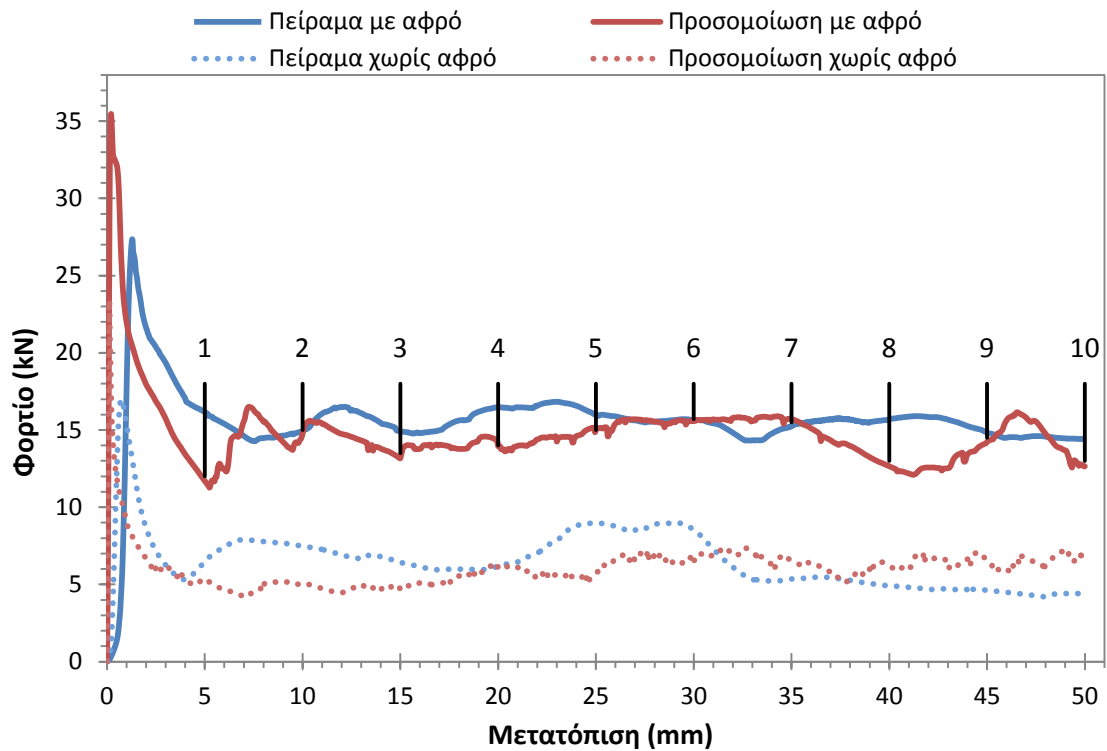
Συγκριτικά με τα άδεια δοκίμια, η βελτίωση της συμπεριφοράς είναι αξιόλογη χωρίς όμως να αποφευχθεί η αύξηση του μέγιστου φορτίου κατά την έναρξη της κατάρρευσης. Η ενέργεια απορρόφησης παρουσιάζει αύξηση κατά 300% ενώ το μέγιστο φορτίο κατά 60%. Η μάζα του δοκιμίου μετρήθηκε στα 182.9gr οπότε η ειδική ενέργεια απορρόφησης αυξήθηκε σε ποσοστό περίπου 70%.

Η έναρξη παραμόρφωσης του πειραματικού δοκιμίου γίνεται από κάτω όπου σχηματίζονται συνολικά 3 λοβοί. Σύμφωνα με την πειραματική καμπύλη, το φορτίο αυξάνει για συμπίεση 23mm όπου αρχίζει ο σχηματισμός ενός λοβού. Σε όλο τη μήκος τους οι φλάντζες παραμορφώνονται λόγω λυγισμού μέχρι το τέλος της διαδικασίας όπου προκαλούν την ανομοιόμορφη παραμόρφωση του άνω τμήματος του δοκιμίου προς το πλάι.

Η προσομοίωση της κατάρρευσης μέσου του προγράμματος δίνει αποτελέσματα επαρκούς ακρίβειας ως προς τη δοκιμή. Μικρή αύξηση του θλιπτικού φορτίου πραγματοποιείται όταν κάμπτεται η φλάντζα του μοντέλου. Μετά το σχηματισμό του πρώτου λοβού τα πλαϊνά τοιχώματα κάμπτονται λόγω λυγισμού ωθώντας τμήμα του υλικού της πρόοψης προς το εσωτερικό και λειτουργώντας ως εκκινητής για την έναρξη δημιουργίας νέου λοβού. Στην τελευταία φάση της παραμόρφωσης τα πλαϊνά τοιχώματα του ελάσματος στο άνω τμήμα κάμπτονται λόγω της επίδρασης του αφρού στο εσωτερικό του δοκιμίου.

Σε όλη τη διάρκεια του πειράματος τα ελάσματα της φλάντζας παραμένουν ενωμένα και δεν προκαλείται κάποια αστοχία των συγκολλήσεων.

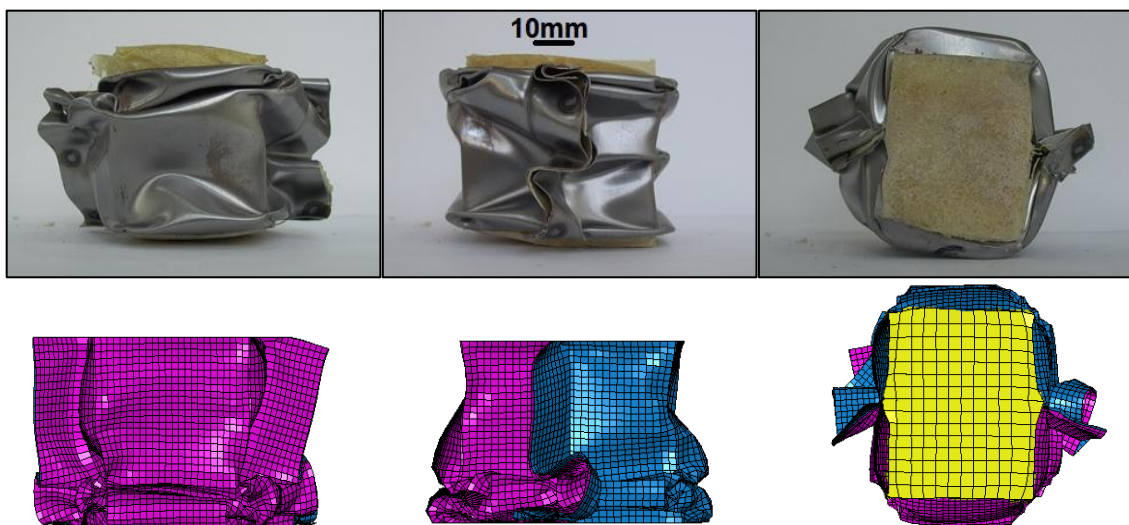
7.1.12. Δοκίμιο 3F



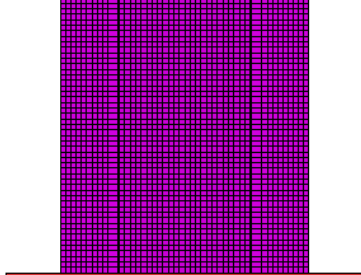
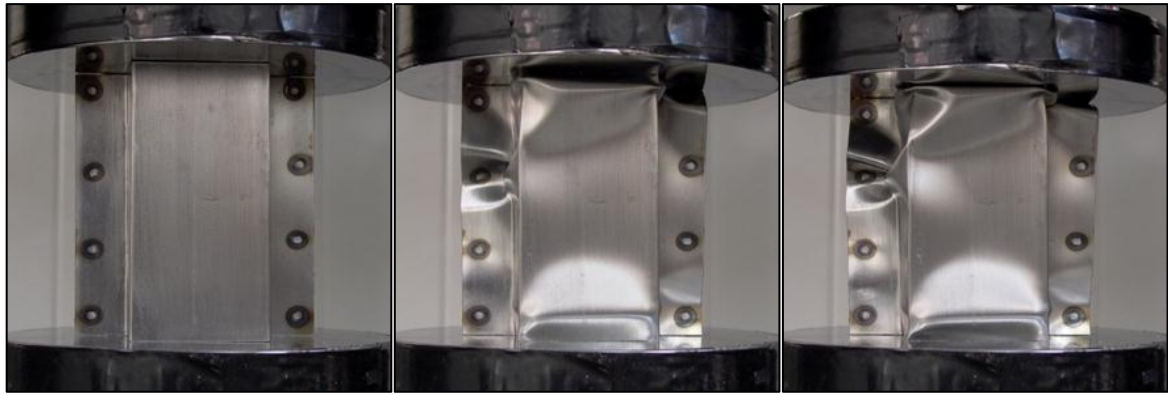
Σχήμα 7.34: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 3F

	Πείραμα με αφρό	Προσομοίωση με αφρό	Πείραμα χωρίς αφρό	Προσομοίωση χωρίς αφρό
Energy Absorption E_a (J)	778.03	740.62	327.90	303.45
Max Force P_{max} (kN)	27.36	35.44	16.98	23.43
Mean Force P_m (kN)	15.56	14.81	6.56	6.07
S.E.A. (J/gr)	4.11	3.91	3.09	2.70
Mass (gr)	189.2		112.4	

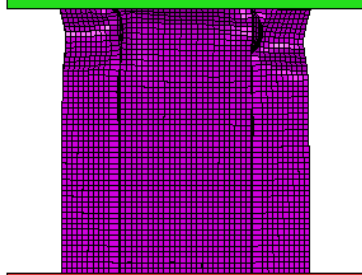
Πίνακας 7.12: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 3F



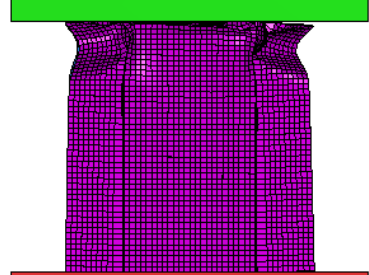
Σχήμα 7.35: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



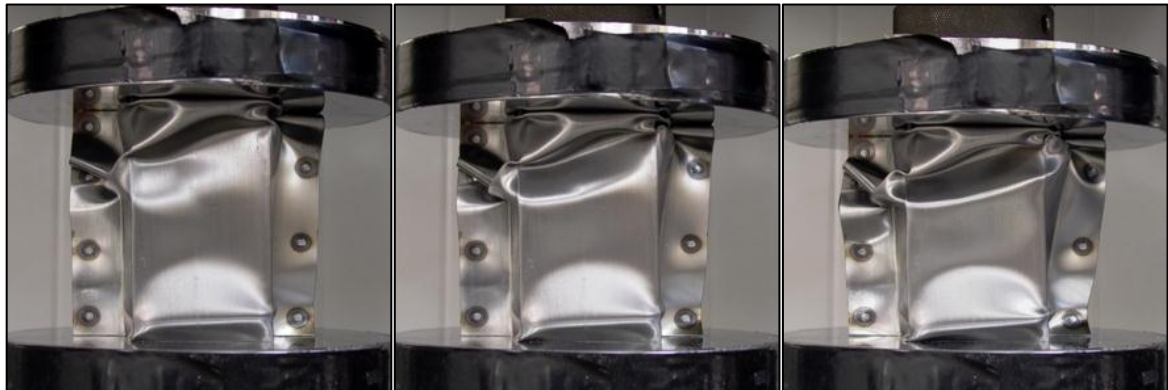
[0] $\delta_f = 0$ mm



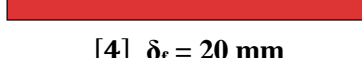
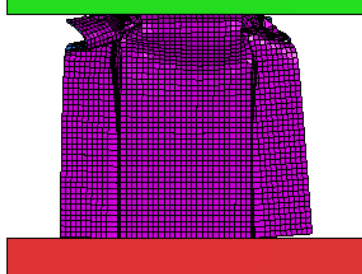
[1] $\delta_f = 5$ mm



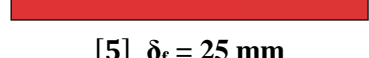
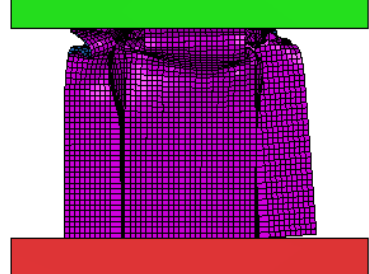
[2] $\delta_f = 10$ mm



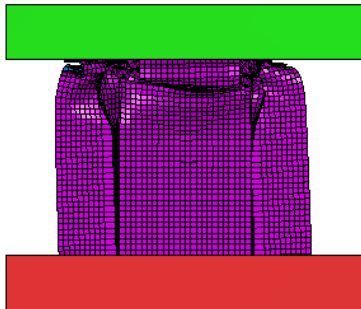
[3] $\delta_f = 15$ mm



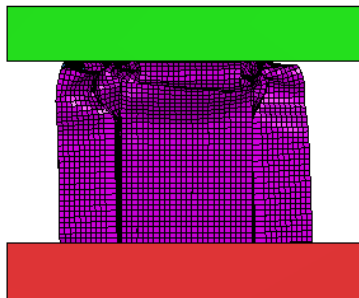
[4] $\delta_f = 20$ mm



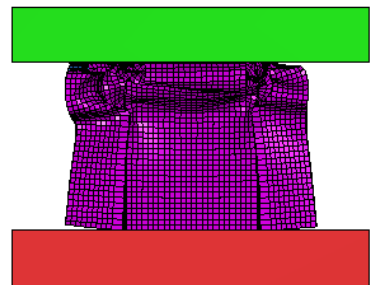
[5] $\delta_f = 25$ mm



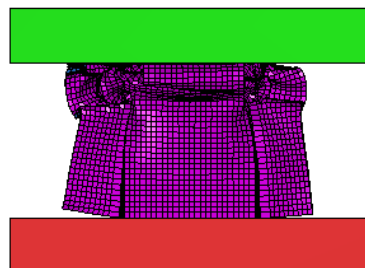
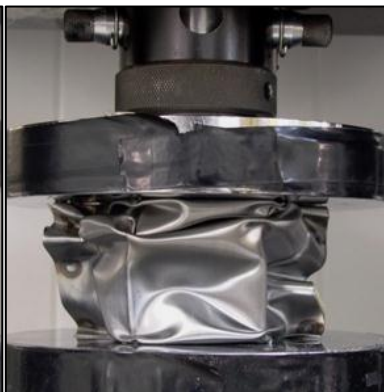
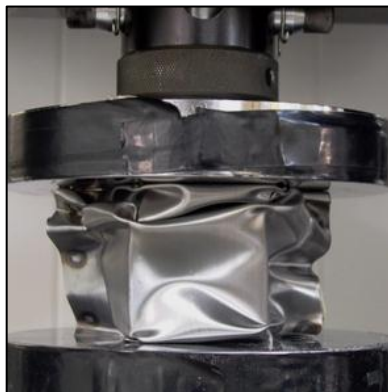
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



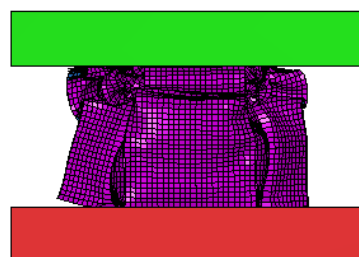
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



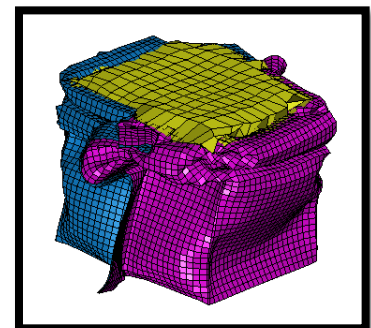
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.36: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

Στην περίπτωση της πειραματικής διάταξης η ενέργεια που απορροφήθηκε προέκυψε ίση με 778.03J, το μέγιστο φορτίο 27.36kN, η ειδική ενέργεια ανά μάζα 4.11J/gr. Για την προσομοίωση η μεταβολή ως προς τα πειραματικά αποτελέσματα είναι: μείωση 5% της απορροφόμενης ενέργειας, αύξηση 29% του μέγιστου φορτίου και μείωση 5% του συντελεστή SEA.

Ελέγχοντας τη μεταβολή σε σχέση με το δοκίμιο με μήκος φλάντζας 15mm (2F) παρατηρούμε ότι δεν επήλθε αύξηση της ενέργειας απορρόφησης ή του μέγιστου φορτίου. Επομένως λόγω της αύξησης του βάρους του δοκιμίου 3F, εντέλει μειώθηκε η ειδική ενέργεια απορρόφησης κατά 6% για το πείραμα και 4% για την προσομοίωση. Οπότε, η συνεχόμενη αύξηση του μήκους της φλάντζας δεν συνεπάγεται καλύτερη αντιμετώπιση του φαινομένου της κατάρρευσης.

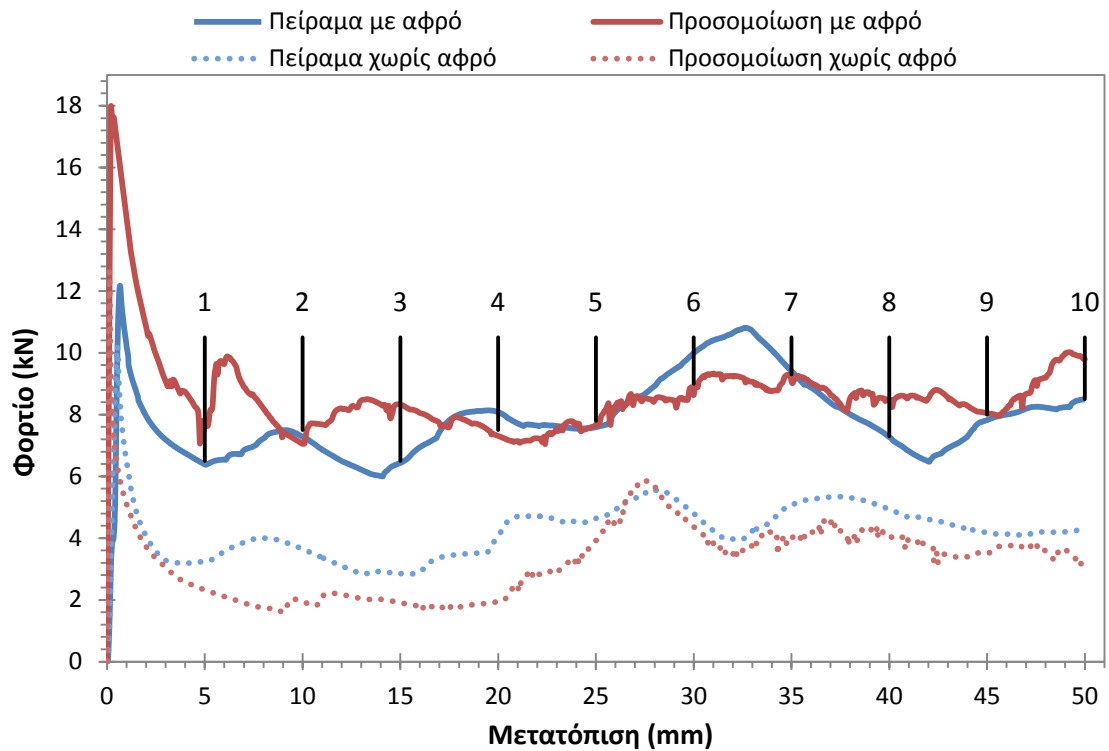
Σε σχέση με το αντίστοιχο άδειο δοκίμιο υπάρχει καλύτερη συμπεριφορά με την αύξηση της ενέργειας απορρόφησης 2.5 φορές και του συντελεστή SEA κατά 35 – 40% όταν η μεταβολή της μάζας είναι +68%.

Από την πειραματική καμπύλη φορτίου παρατηρείται ομαλή μεταβολή κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Κατά την έναρξη παρατηρείται παραμόρφωση των φλαντζών καθ' όλο το μήκος τους αλλά στη συνέχεια η κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται από πάνω. Η παραμόρφωση στο σύνολο είναι ανομοιομορφη με τις πτυχώσεις να δημιουργούνται υπό γωνία ως προς τις πλάκες. Το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δεν ενδείκνυται για την αναγνώριση κάποιας συγκεκριμένης φάσης της διαδικασίας.

Ικανοποιητική προσέγγιση προκύπτει για την προσομοίωση ενώ σχηματίζονται 2 λοβοί στην πρόοψη του μοντέλου. Διακρίνεται μια μικρή απόκλιση και ασύμμετρη κατάρρευση της διατομής που εντέλει οδηγεί και στην πλάγια παραμόρφωση του άνω τμήματος γεγονός που οφείλεται και στην ύπαρξη του πολυμερικού αφρού εσωτερικά. Το φορτίο αυξάνεται απότομα για συμπίεση 7mm όπου οι φλάντζες κάμπτονται έντονα. Παρόμοια αύξηση του φορτίου για συμπίεση 42mm οφείλεται στην παραμόρφωση των πλάγιων τοιχωμάτων των ελασμάτων στο άνω τμήμα του μοντέλου.

Μια συγκόλληση αστόχησε στην μια μόνο πλευρά της φλάντζας λόγω αποχώρησης των ελασμάτων της φλάντζας. Η αντιδιαμετρική φλάντζα παρέμεινε ανέπαφη χωρίς αστοχία ή διαχωρισμό ελασμάτων.

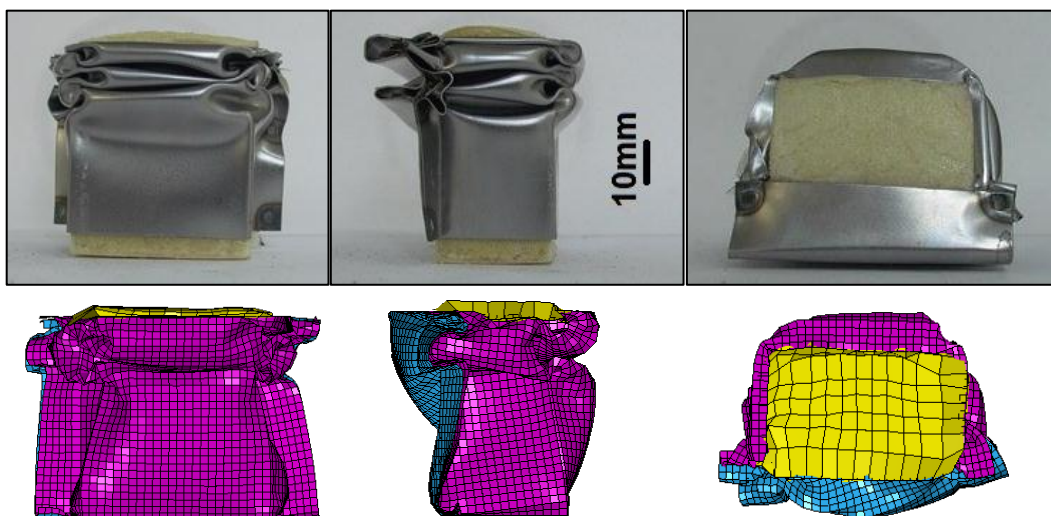
7.1.13. Δοκίμιο 4F



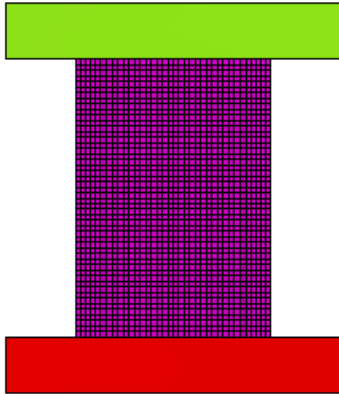
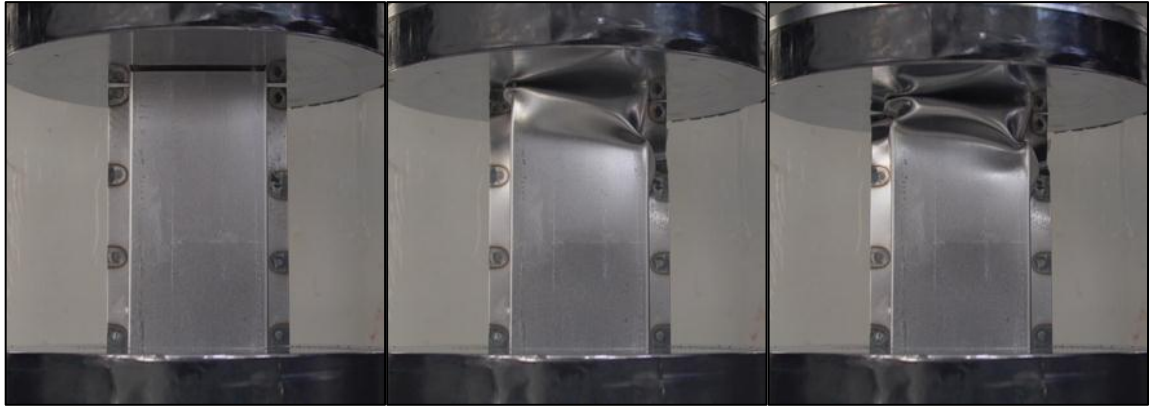
Σχήμα 7.37: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 4F

	Πείραμα με αφρό	Προσομοίωση με αφρό	Πείραμα χωρίς αφρό	Προσομοίωση χωρίς αφρό
Energy Absorption E_a (J)	392.86	431.09	212.22	164.83
Max Force P_{max} (kN)	12.17	17.96	10.23	12.64
Mean Force P_m (kN)	7.86	8.62	4.24	3.30
S.E.A. (J/gr)	3.44	3.77	2.82	2.19
Mass (gr)	114.3		75.3	

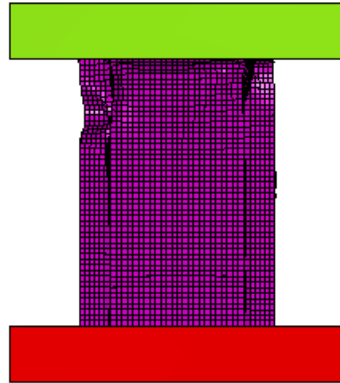
Πίνακας 7.13: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 4F



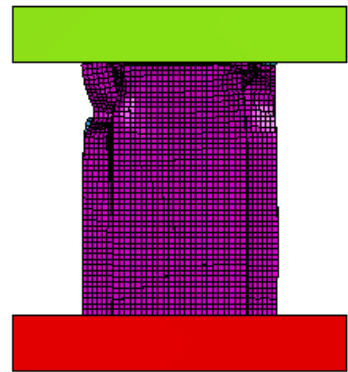
Σχήμα 7.38: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



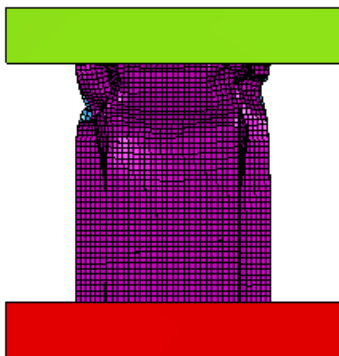
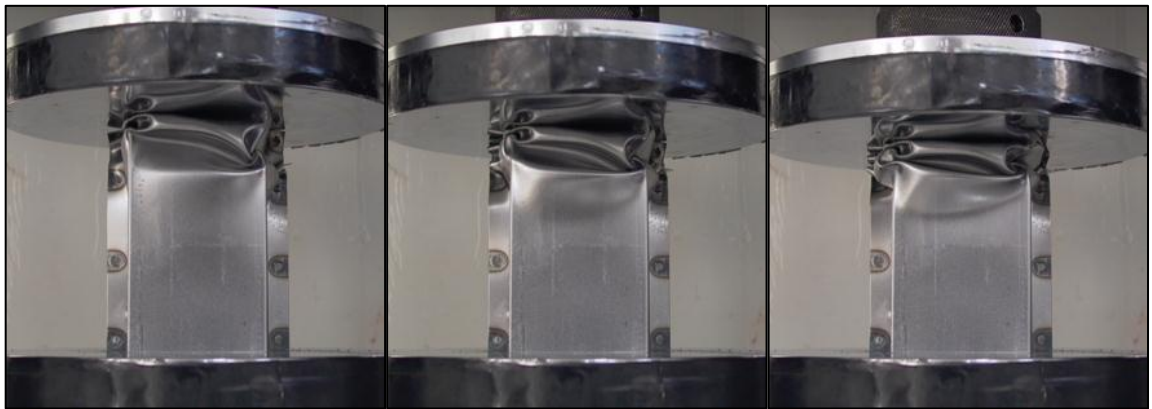
[0] $\delta_f = 0$ mm



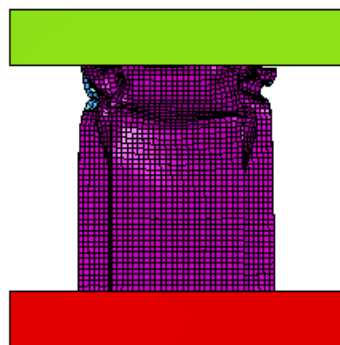
[1] $\delta_f = 5$ mm



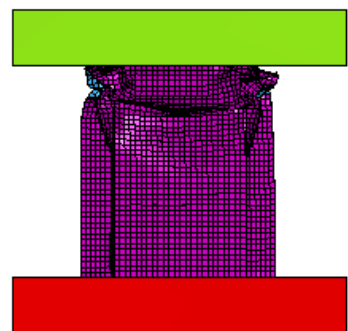
[2] $\delta_f = 10$ mm



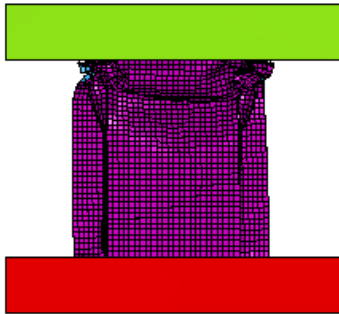
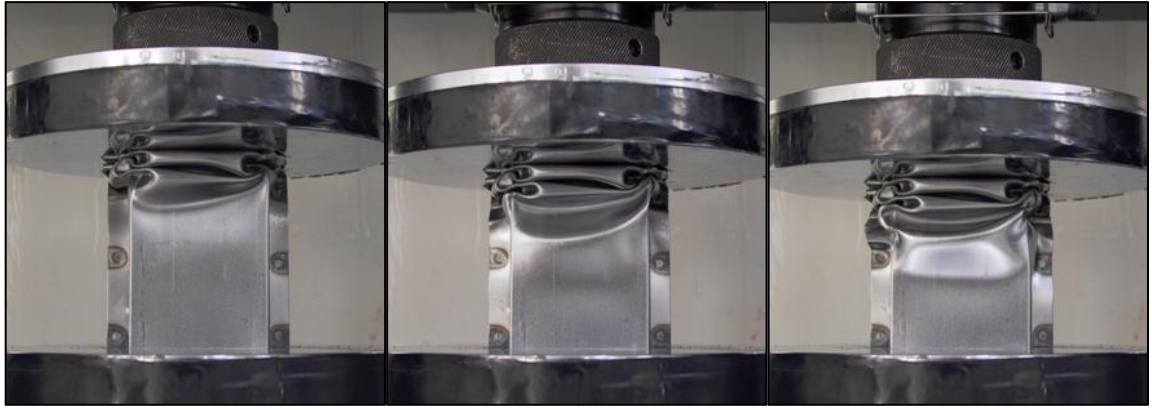
[3] $\delta_f = 15$ mm



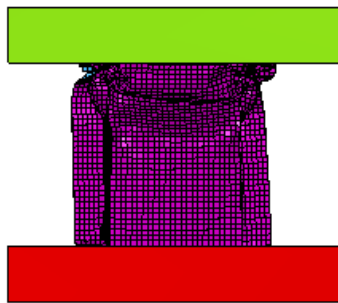
[4] $\delta_f = 20$ mm



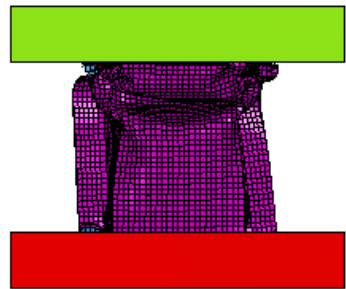
[5] $\delta_f = 25$ mm



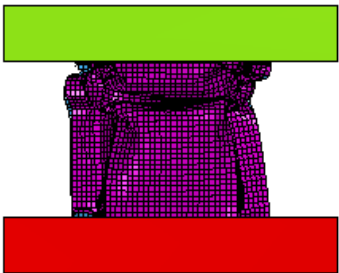
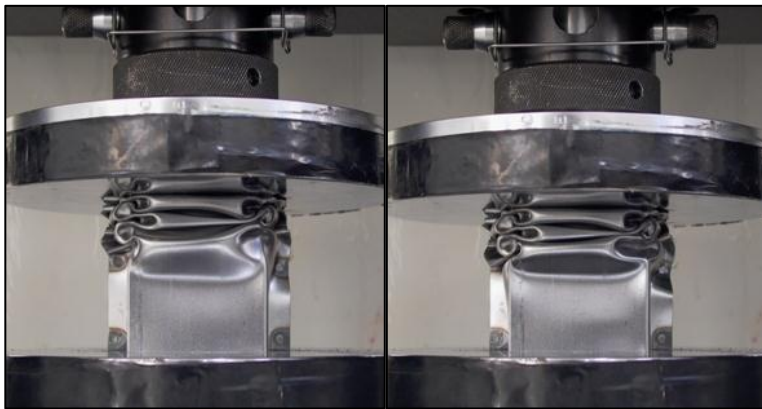
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



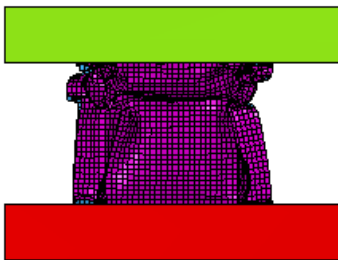
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



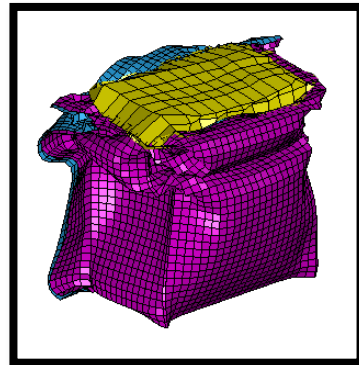
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.39: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

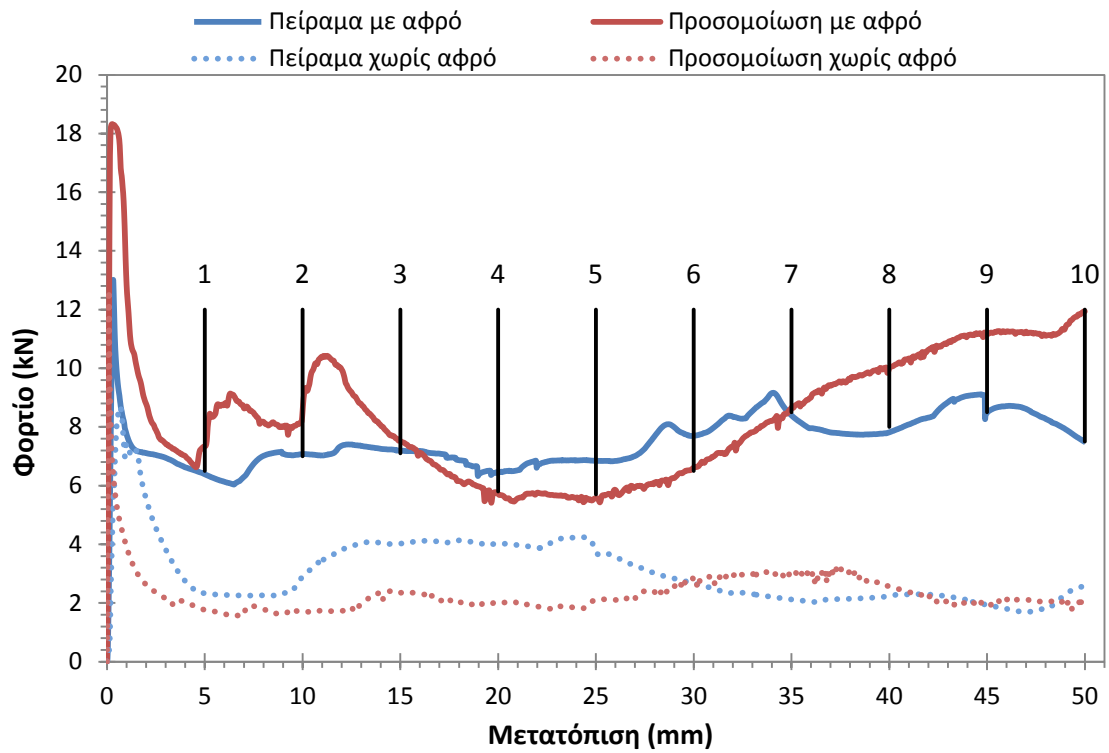
Το δοκίμιο απορροφά ενέργεια 392.86J έναντι του μοντέλου με 431.09J, με μέγιστο φορτίο 12.17kN έναντι 17.96kN και συντελεστή SEA 3.44J/gr έναντι 3.77J/gr. Η απόδοση σε απορροφώμενη ενέργεια έπεσε σημαντικά σε σχέση με τις double-hat διατομές καθώς και το μέγιστο φορτίο. Συγκριτικά με το όμοιο δοκίμιο χωρίς εσωτερική πλήρωση αφρού αυξήθηκε η ειδική ενέργεια απορρόφησης κατά 22% για το πειραματικό και 72% για την προσομοίωση.

Το πειραματικό μοντέλο εκκινεί την παραμόρφωση από πάνω δημιουργώντας αναδίπλωση υπό κλίση 30°. Συνολικά δημιουργούνται 3 λοβοί. Από την καμπύλη μπορεί να αναγνωρισθεί η έναρξη σχηματισμού κάθε αναδίπλωσης για βράχυνση 1mm, 26mm, 43mm. Σε αυτές τις στιγμές το φορτίο αυξάνει μέχρι να αποκτήσει το μέγιστο φορτίο τοπικά που αντιστοιχεί στη δημιουργία πλαστικού αρμού και τη έναρξη της κατάρρευσης σε αυτή την περιοχή.

Το υπολογιστικό μοντέλο εμφανίζει μια συγκράτηση του αρχικού μέγιστου φορτίου συμπίεσης. Στη συνέχεια, η αύξηση του φορτίου για βράχυνση 5mm οφείλεται στην κάμψη της φλάντζας. Λόγω της ύπαρξης του εσωτερικού αφρού δημιουργείται ένας μεγάλος λοβός τόσο στην πρόοψη όσο και στις πλάγιες όψεις του μοντέλου. Ύστερα, από το μέσο της διαδικασίας ο έγκλειστος αφρός μη έχοντας διέξοδο προκαλεί βαρελοποίηση της μεταλλικής κατασκευής.

Τα ελάσματα της φλάντζας κατά την κατάρρευση του πειραματικού δοκιμίου διαχωρίστηκαν στο επάνω τμήμα αλλά συγκρατήθηκαν από τις τοπικές συγκολλήσεις χωρίς να αστοχήσουν.

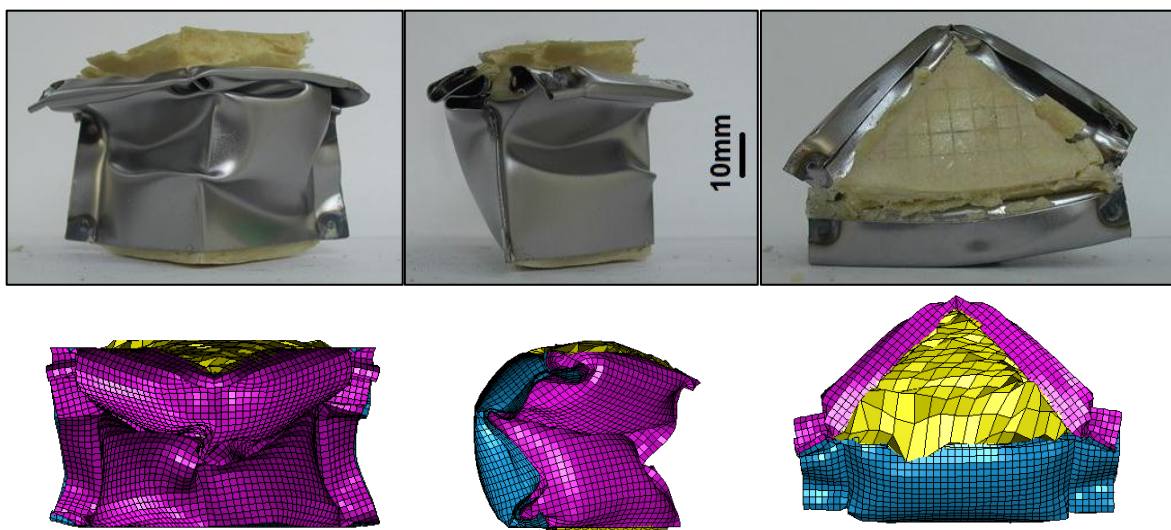
7.1.14. Δοκίμιο 5F



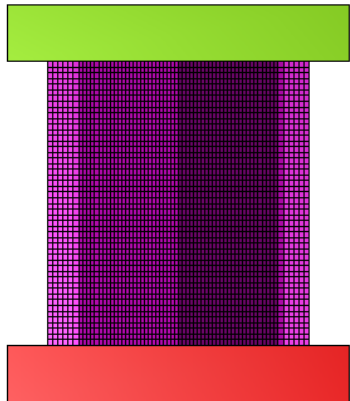
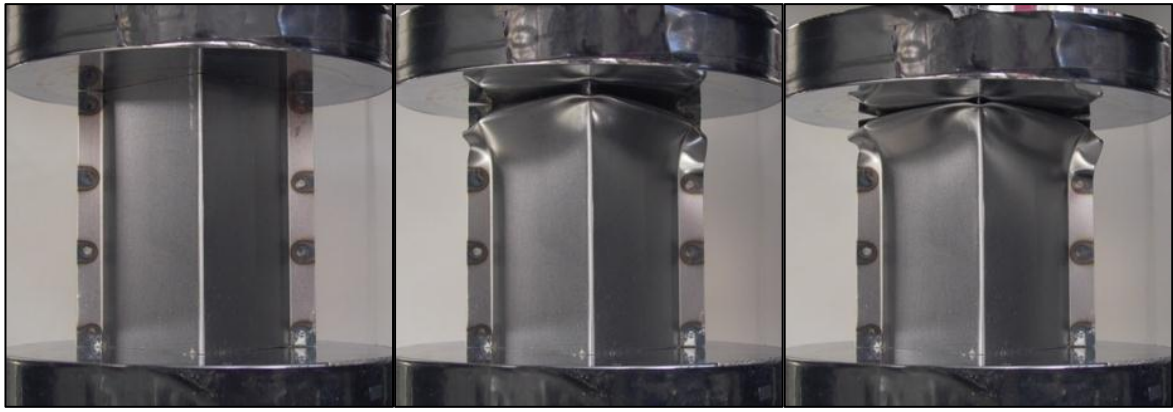
Σχήμα 7.40: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 5F

	Πείραμα με αφρό	Προσομοίωση με αφρό	Πείραμα χωρίς αφρό	Προσομοίωση χωρίς αφρό
Energy Absorption E_a (J)	375.83	421.11	153.20	115.89
Max Force P_{max} (kN)	13.01	18.32	8.70	12.68
Mean Force P_m (kN)	7.52	8.42	3.06	2.32
S.E.A. (J/gr)	3.13	3.51	1.84	1.39
Mass (gr)	119.9		83.3	

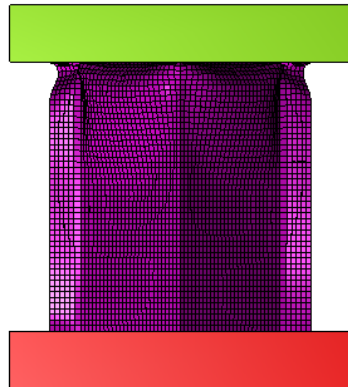
Πίνακας 7.14: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 5F



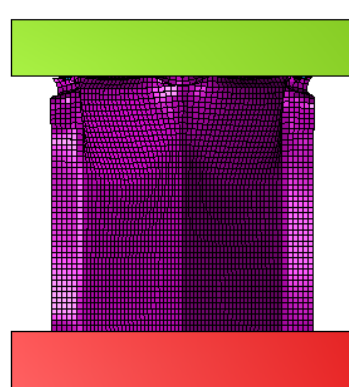
Σχήμα 7.41: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



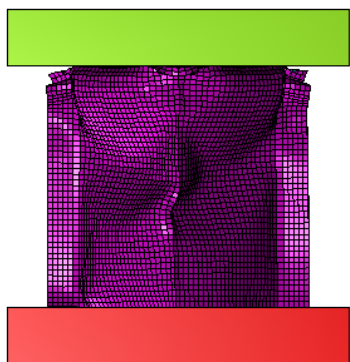
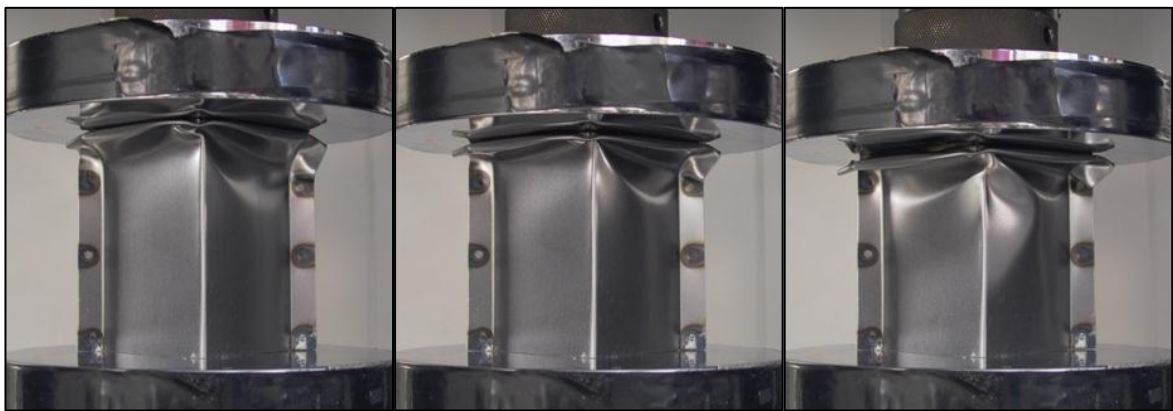
[0] $\delta_f = 0$ mm



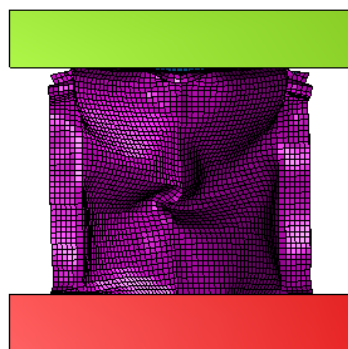
[1] $\delta_f = 5$ mm



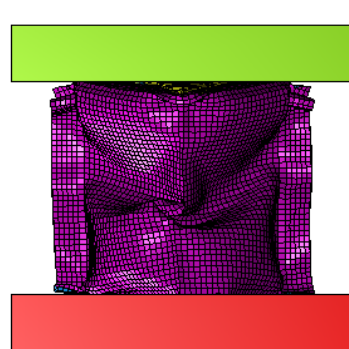
[2] $\delta_f = 10$ mm



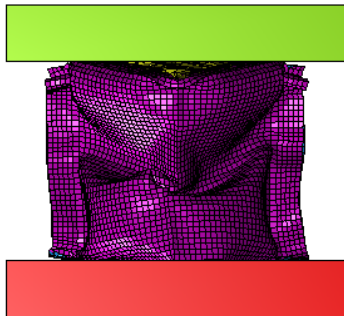
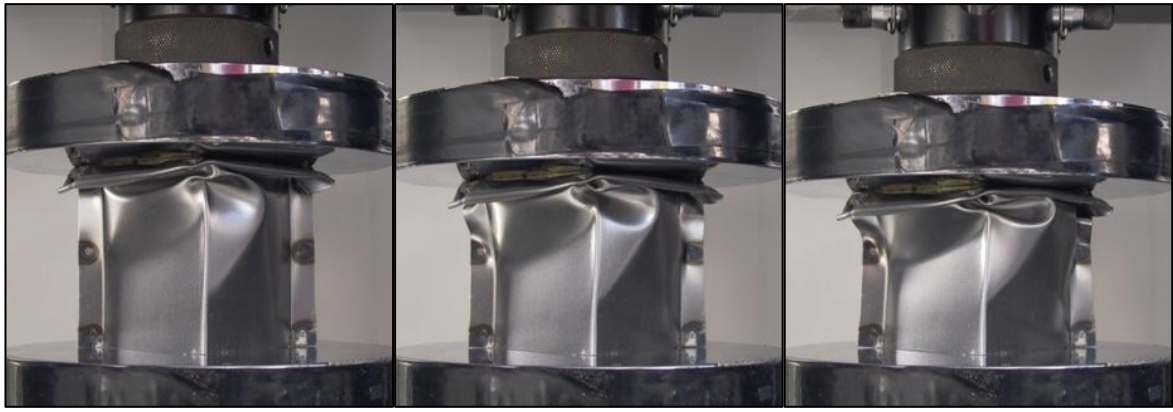
[3] $\delta_f = 15$ mm



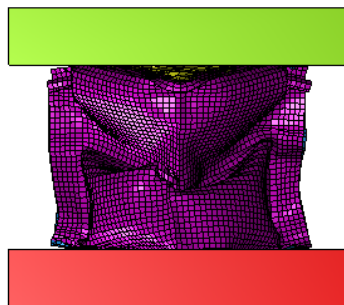
[4] $\delta_f = 20$ mm



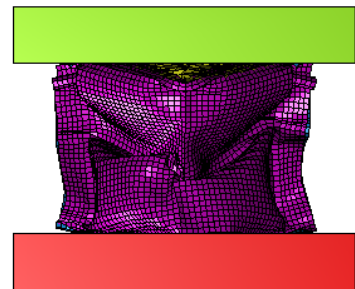
[5] $\delta_f = 25$ mm



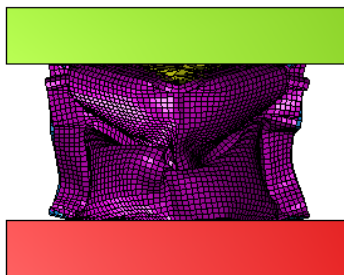
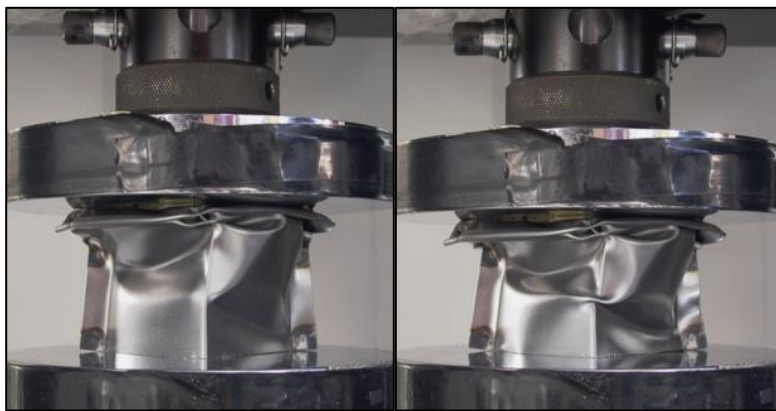
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



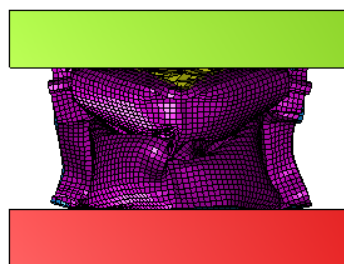
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



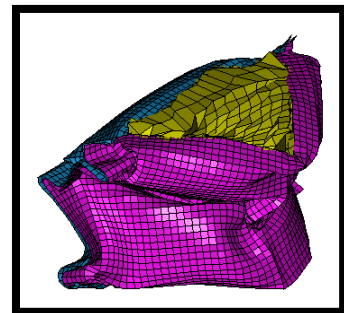
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.42: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης καταδεικνύουν μια μη αποδοτική διατομή αν συγκριθεί και με τα επόμενα δοκίμια. Για το πειραματικό τεμάχιο η απορροφώμενη ενέργεια προέκυψε 375.83J, το μέγιστο φορτίο 13.01kN, το μέσο φορτίο 7.52kN, η ειδική ενέργεια ανά μάζα 3.13J/gr. Η αντίστοιχη μεταβολή για το υπολογιστικό μοντέλο είναι αύξηση της ενέργειας +12% και του μέγιστου φορτίου +41%.

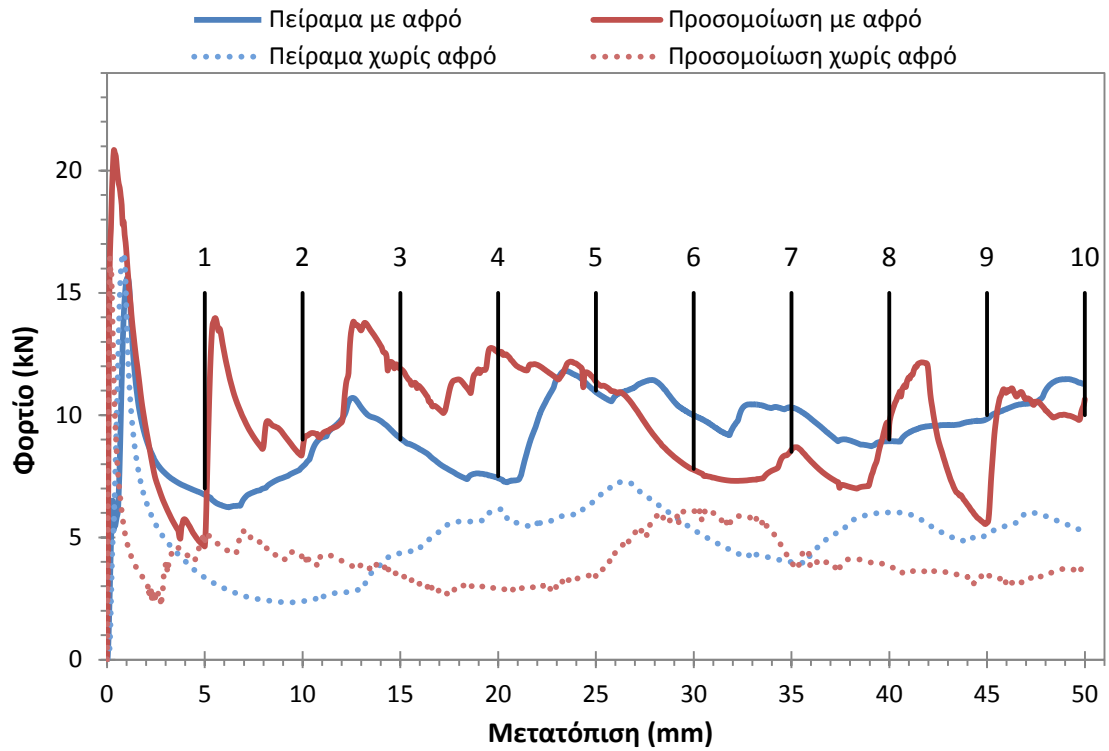
Ως προς το άδειο πειραματικό δοκίμιο η μεταβολή της ενέργειας απορρόφησης είναι περίπου 2.5 φορές ενώ η μεταβολή του μέγιστου φορτίου 50%. Η μάζα έχει μεταβολή 44% με τιμές 119.9gr έναντι 83.3gr για το άδειο δοκίμιο.

Το πειραματικό δοκίμιο εμφανίζει απρόβλεπτη κατάρρευση με σχηματισμό λοβών στο άνω τμήμα. Λόγω της βράχυνσης παραμορφώνεται κυρίως η κορυφή του τριγώνου στο διαμορφωμένο έλασμα ωθώντας το υλικό προς τα εμπρός. Όμως, λόγω της ύπαρξης του εσωτερικού αφρού δεν γίνεται μετακίνηση όλου του όγκου με αποτέλεσμα εντέλει να σπάσει η πάνω σειρά συγκολλήσεων του δοκιμίου. Για συμπίεση πέρα από 25mm το κάτω τμήμα παραμορφώνεται υπό γωνία κλίσης προκαλώντας γενικότερη ασύμμετρη κατάρρευση.

Η κατάρρευση του υπολογιστικού μοντέλου προκύπτει ακόμα πιο απροσδιόριστη και απρόσμενη. Αρχικά εκκινεί η παραμόρφωση από το άνω τμήμα αλλά λόγω περιορισμού του εσωτερικού χώρου από τον αφρό διακόπτεται ο σχηματισμός του λοβού. Στη συνέχεια, αρχίζει να αναδιπλώνει η κορυφή του τριγωνικού ελάσματος στο μέσο του ύψους και να παρασύρει όλο το δοκίμιο αυξάνοντας ταυτόχρονα και το θλιπτικό φορτίο. Εν τέλει το δοκίμιο γέρνει προς τα μπρός και παύει να εφάπτεται στην άνω πλάκα όπως παρατηρείται και στην πλάγια όψη του παραμορφωμένου μοντέλου. Για συμπίεση 25mm και μέχρι το τέλος το θλιπτικό φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, γεγονός που οφείλεται στην προηγούμενη παρατήρηση.

Όπως αναφέρθηκε υπήρξε ολική αστοχία της άνω σειράς συγκολλήσεων και επιπλέον μιας συγκόλλησης στην μια μόνο πλευρά.

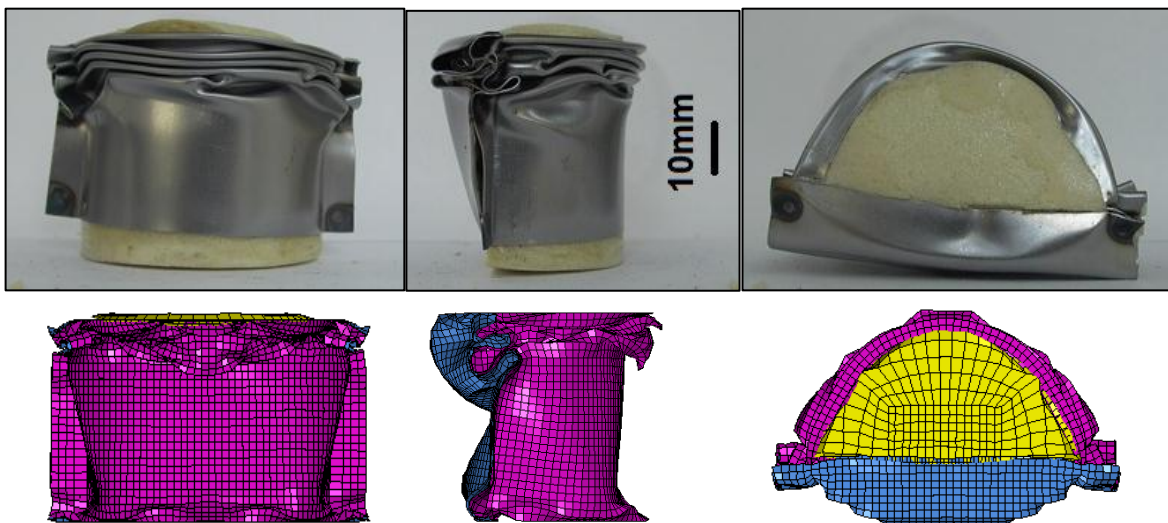
7.1.15. Δοκίμιο 6F



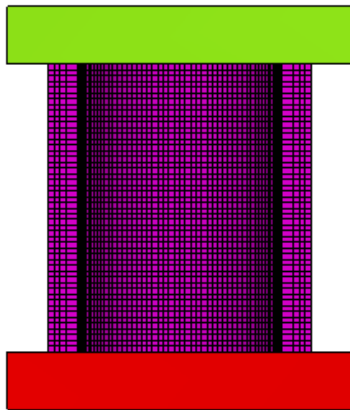
Σχήμα 7.43: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 6F

	Πείραμα με αφρό	Προσομοίωση με αφρό	Πείραμα χωρίς αφρό	Προσομοίωση χωρίς αφρό
Energy Absorption E_a (J)	463.93	492.14	251.97	206.06
Max Force P_{max} (kN)	15.62	20.83	16.62	16.42
Mean Force P_m (kN)	9.28	9.84	5.04	4.12
S.E.A. (J/gr)	3.55	3.76	3.01	2.46
Mass (gr)	130.8		83.6	

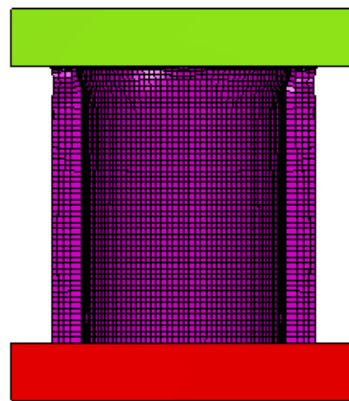
Πίνακας 7.15: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 6F



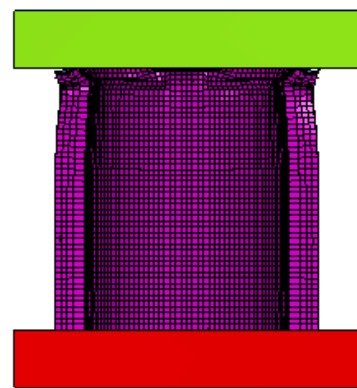
Σχήμα 7.44: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



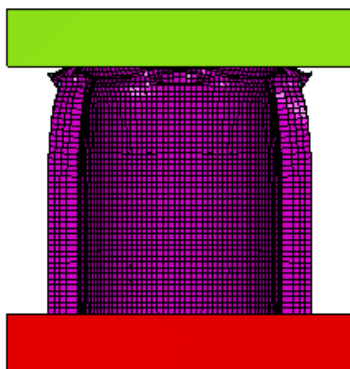
[0] $\delta_f = 0$ mm



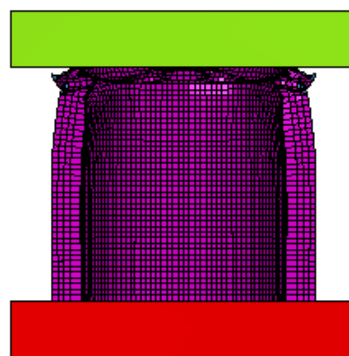
[1] $\delta_f = 5$ mm



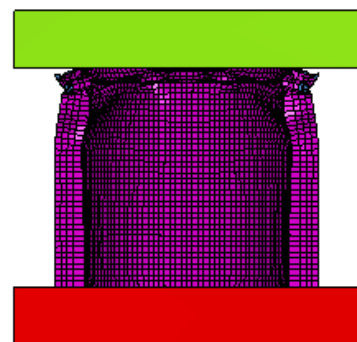
[2] $\delta_f = 10$ mm



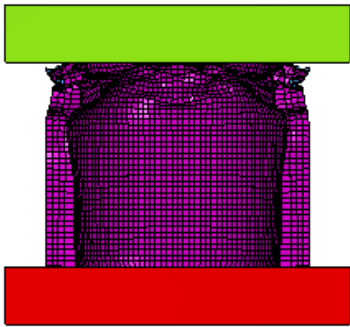
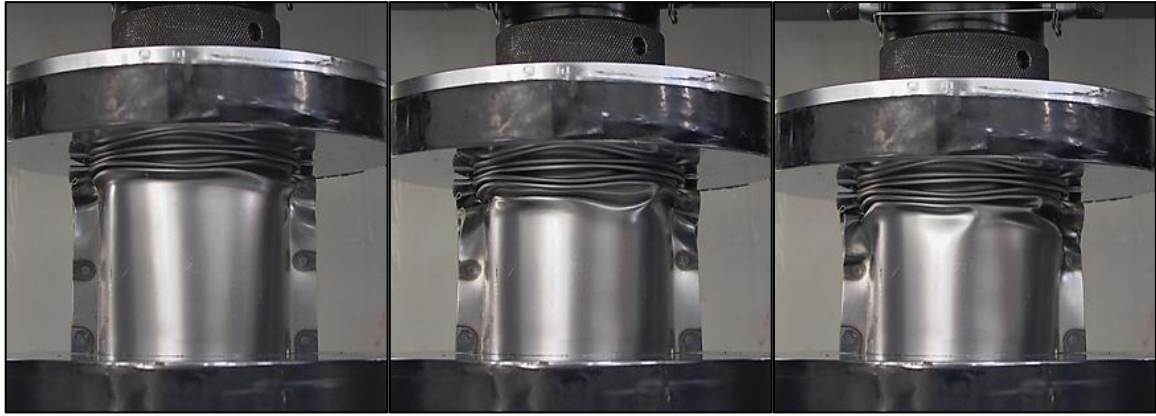
[3] $\delta_f = 15$ mm



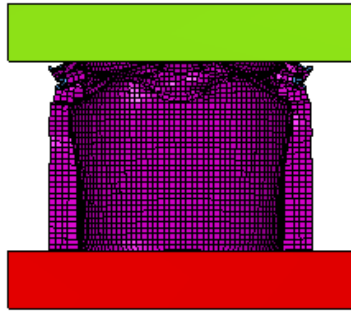
[4] $\delta_f = 20$ mm



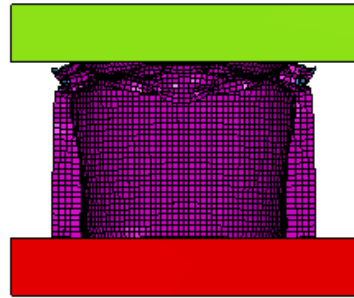
[5] $\delta_f = 25$ mm



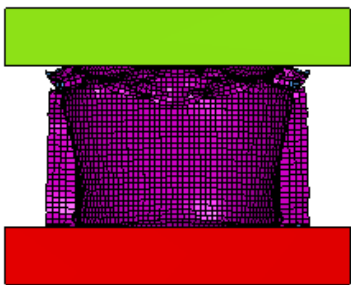
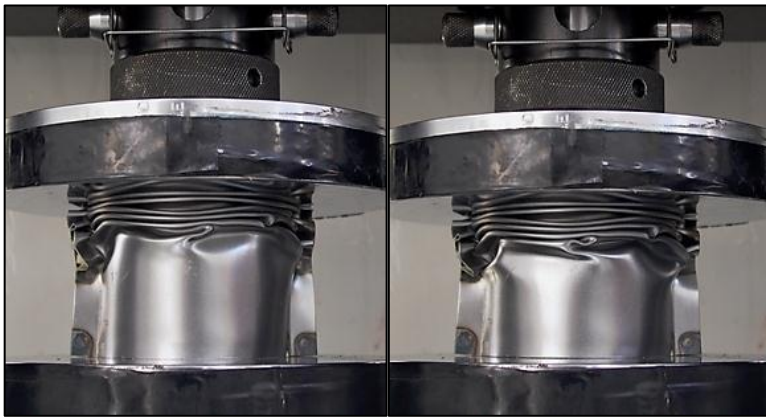
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



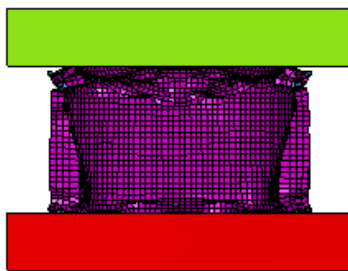
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



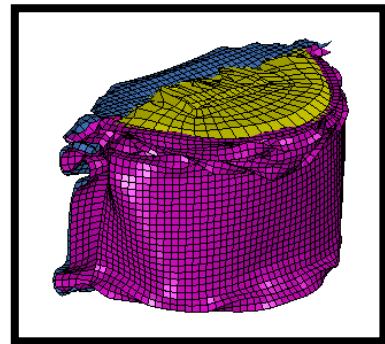
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.45: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

Το δοκίμιο ημικυκλικής διατομής εμφανίζει πολύ καλά αποτελέσματα ως προς την ικανότητα διάχυσης ενέργειας και μορφής κατάρρευσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα δίδουν τις εξής τιμές: απορροφώμενη ενέργεια 463.93J, μέγιστο φορτίο κατάρρευσης 15.62kN και η ειδική ενέργεια ανά μάζα 3.55J/gr. Η μεταβολή του υπολογιστικού μοντέλου για τα ανωτέρω μεγέθη είναι: 6% αύξηση της ενέργειας, 33% αύξηση του μέγιστου φορτίου.

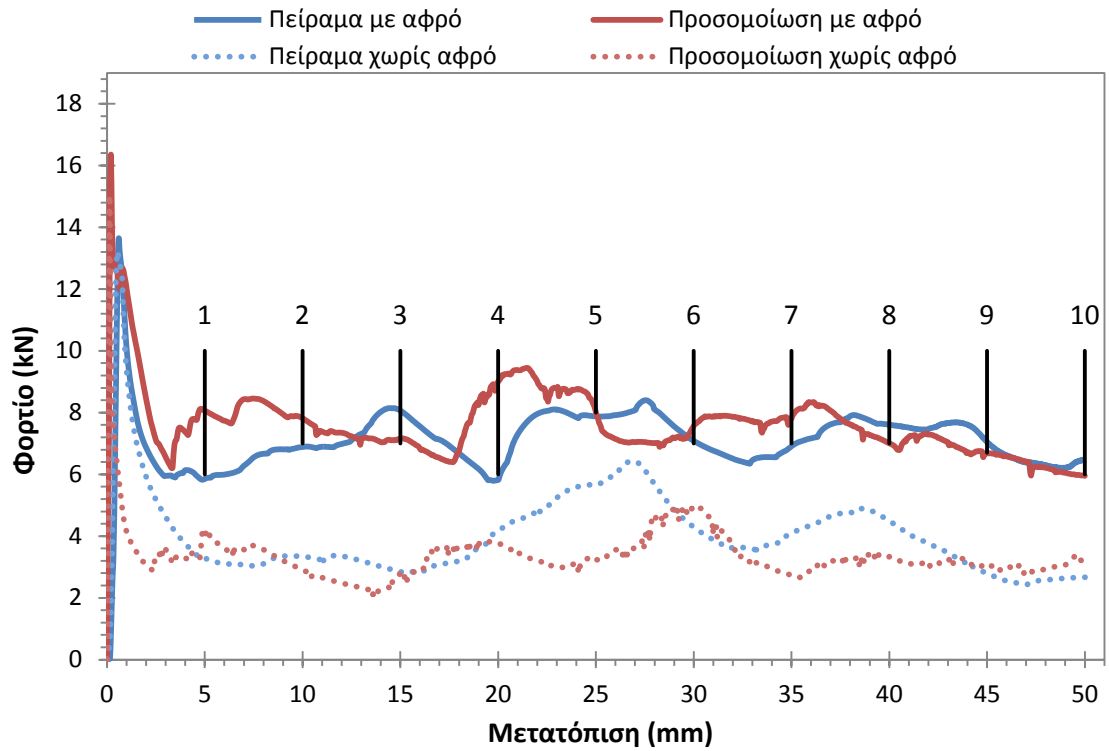
Συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα του άδειου και γεμάτου με αφρό δοκιμίου προκύπτει βελτίωση. Η μάζα του δοκιμίου 6F είναι 130.8gr δηλαδή μεγαλύτερη κατά 56% έναντι του δοκιμίου 6 ενώ ο συντελεστής SEA αυξήθηκε 18%. Αξιοσημείωτη είναι η διατήρηση του μέγιστου φορτίου ανάμεσα στα δοκίμια 6F, 6 στο ίδιο επίπεδο.

Το αναπτυσσόμενο φορτίο κατά τη διάρκεια της συμπίεσης παρουσιάζει συνεχείς διακυμάνσεις που οφείλονται στο σχηματισμό πολλών αναδιπλώσεων στο μεταλλικό έλασμα. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν 4 λοβοί μικρού ύψους, αξονοσυμμετρικοί εκτός από τον τελευταίο.

Μεγαλύτερη διακύμανση τιμών εμφανίζεται στο υπολογιστικό μοντέλο. Οι λοβοί που δημιουργούνται έχουν μη αξονοσυμμετρική μορφή όπως συζητήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο για τις κυκλικές διατομές. Η αύξηση του θλιπτικού φορτίου που διακρίνεται στην καμπύλη οφείλεται στην έναρξη σχηματισμού κάθε λοβού. Πέρα από τη βράχυνση 40mm η παραμόρφωση μεταφέρεται στο κάτω τμήμα του τεμαχίου όπου λόγω του εσωτερικού πολυμερούς αφρού ωθεί το υλικό στα πλάγια προς τα έξω. Προς το τέλος της συμπίεσης ένας επιπλέον λοβός τείνει να σχηματιστεί στο κατώτερο τμήμα του τεμαχίου.

Παρατηρήθηκε ολική αστοχία της 2^{ης} συγκόλλησης της αριστερής φλάντζας. Οι δύο τελευταίες σειρές κολλήσεων παρέμειναν ανέπαφες καθώς η παραμόρφωση δεν μεταφέρθηκε σε αυτή την περιοχή.

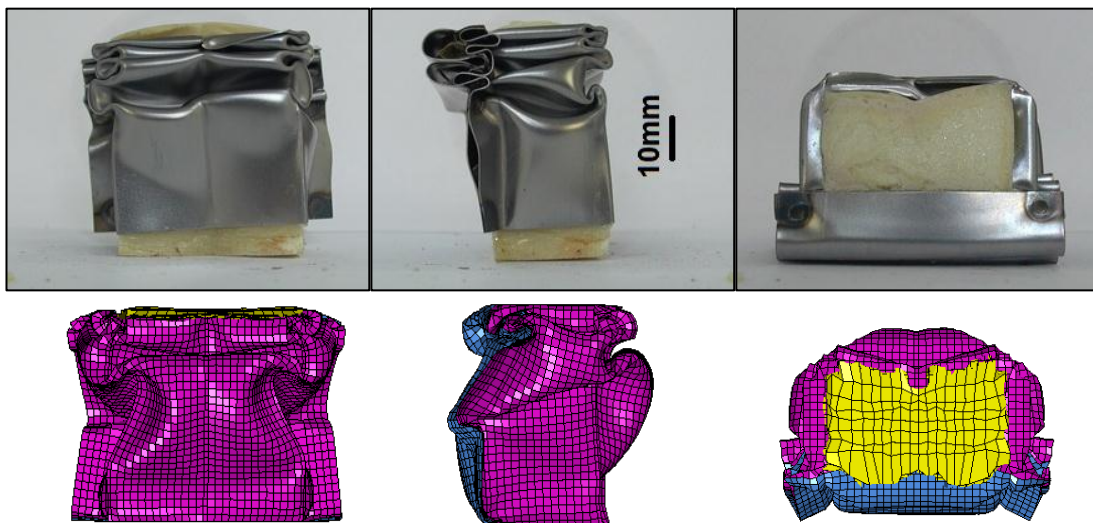
7.1.16. Δοκίμιο 7F



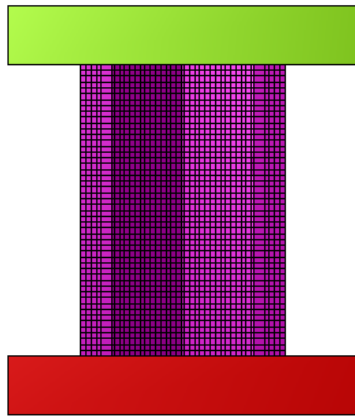
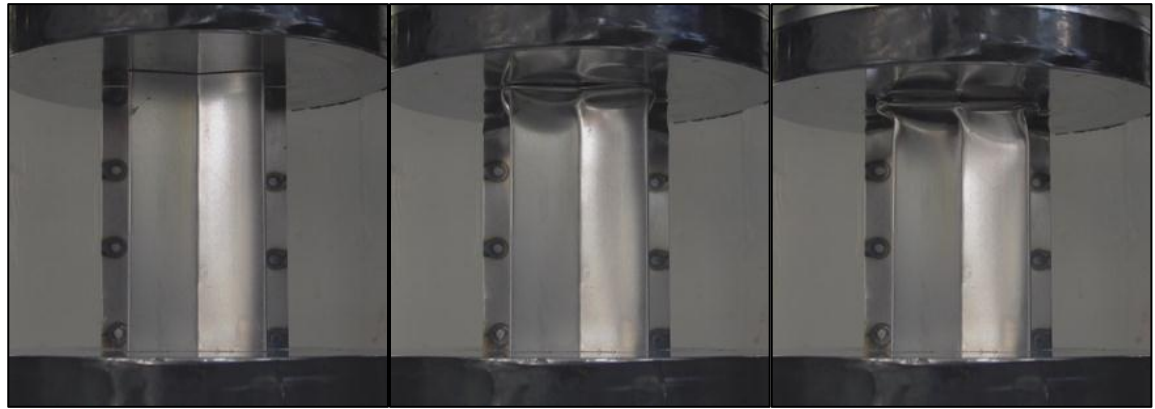
Σχήμα 7.46: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 7F

	Πείραμα με αφρό	Προσομοίωση με αφρό	Πείραμα χωρίς αφρό	Προσομοίωση χωρίς αφρό
Energy Absorption E_a (J)	355.34	381.82	202.57	168.62
Max Force P_{max} (kN)	13.65	16.35	13.22	15.05
Mean Force P_m (kN)	7.11	7.64	4.05	3.37
S.E.A. (J/gr)	3.27	3.52	2.69	2.24
Mass (gr)	108.6		75.4	

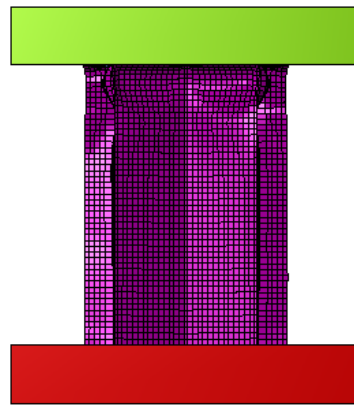
Πίνακας 7.16: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 7F



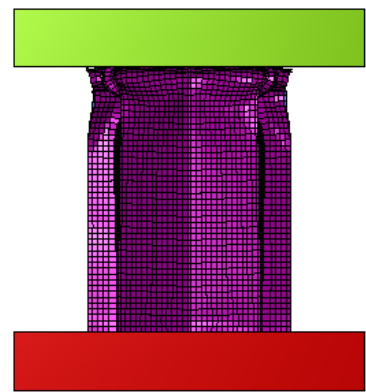
Σχήμα 7.47: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



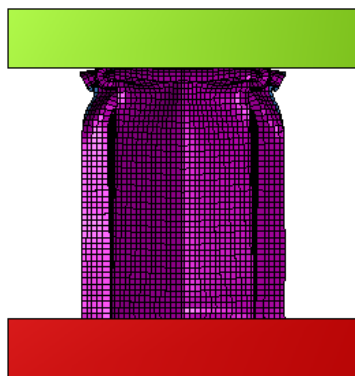
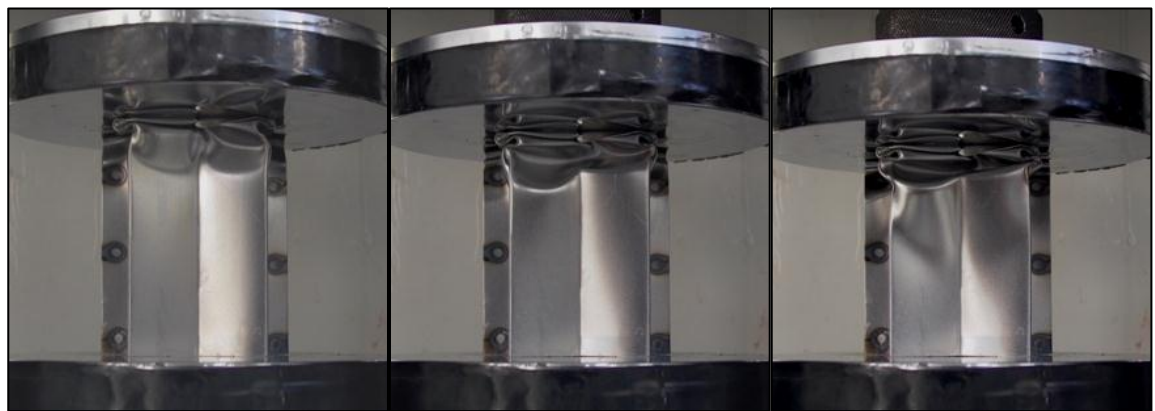
[0] $\delta_f = 0$ mm



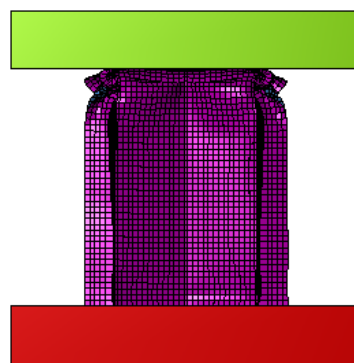
[1] $\delta_f = 5$ mm



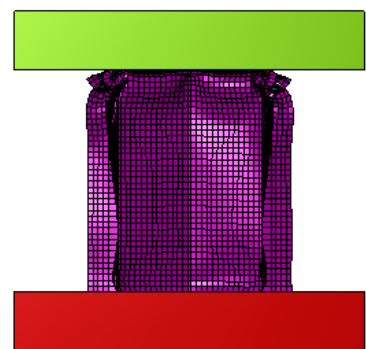
[2] $\delta_f = 10$ mm



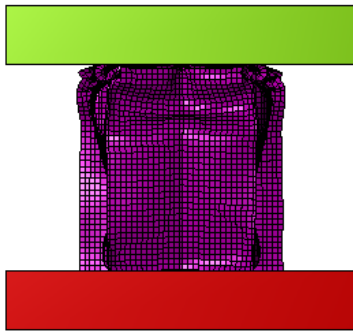
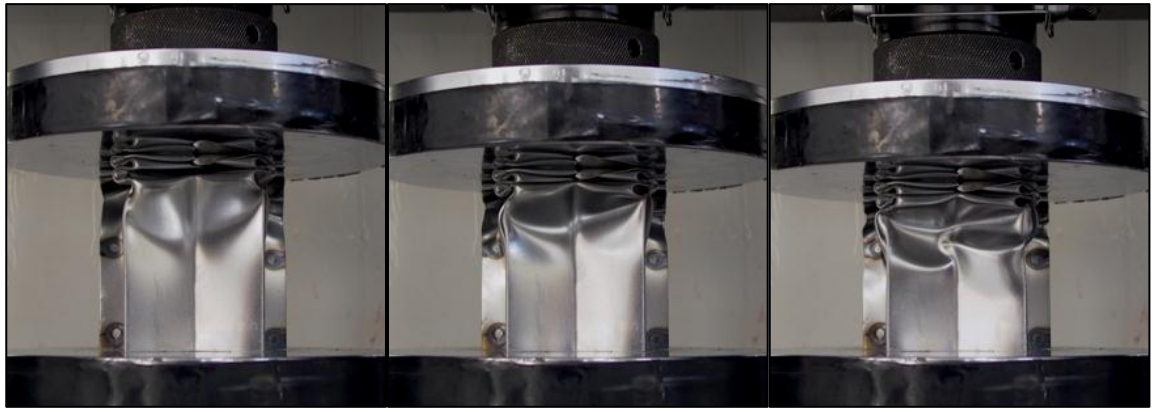
[3] $\delta_f = 15$ mm



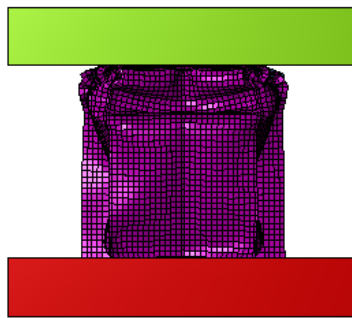
[4] $\delta_f = 20$ mm



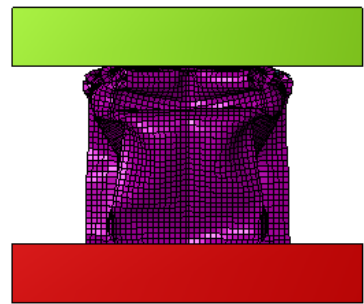
[5] $\delta_f = 25$ mm



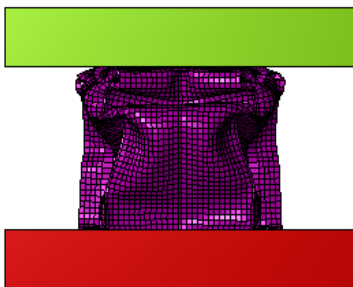
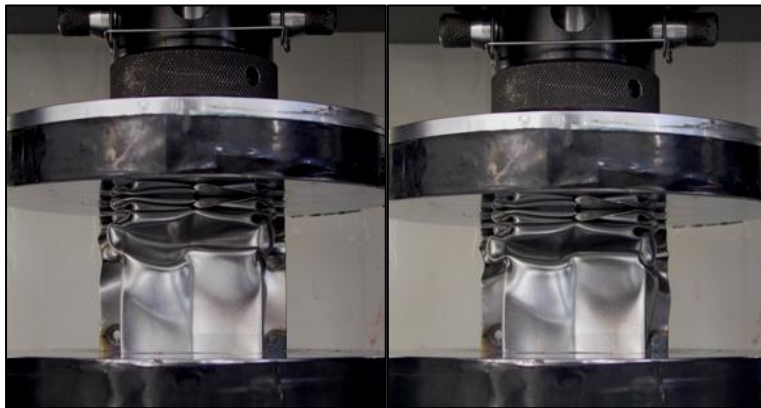
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



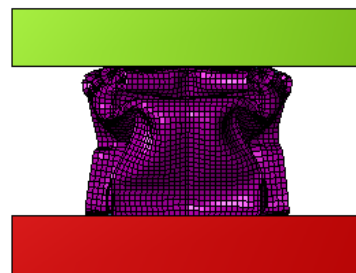
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



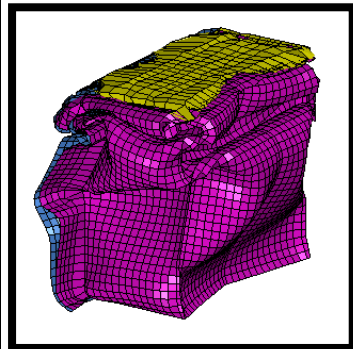
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.48: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση του δοκιμίου προκύπτουν χαμηλότερα από την προηγούμενη διατομή. Η απορροφώμενη ενέργεια είναι 355.34J για το πείραμα και αυξημένη 7% για το μοντέλο ενώ η ειδική ενέργεια SEA είναι 3.27J/gr και 3.52J/gr για δοκίμιο και μοντέλο αντίστοιχα. Το μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο είναι παρόμοιο με τα προηγούμενα δοκίμια ενώ το μέσο φορτίο για το πειραματικό και υπολογιστικό αντίστοιχα είναι 7.11kN και 7.64kN.

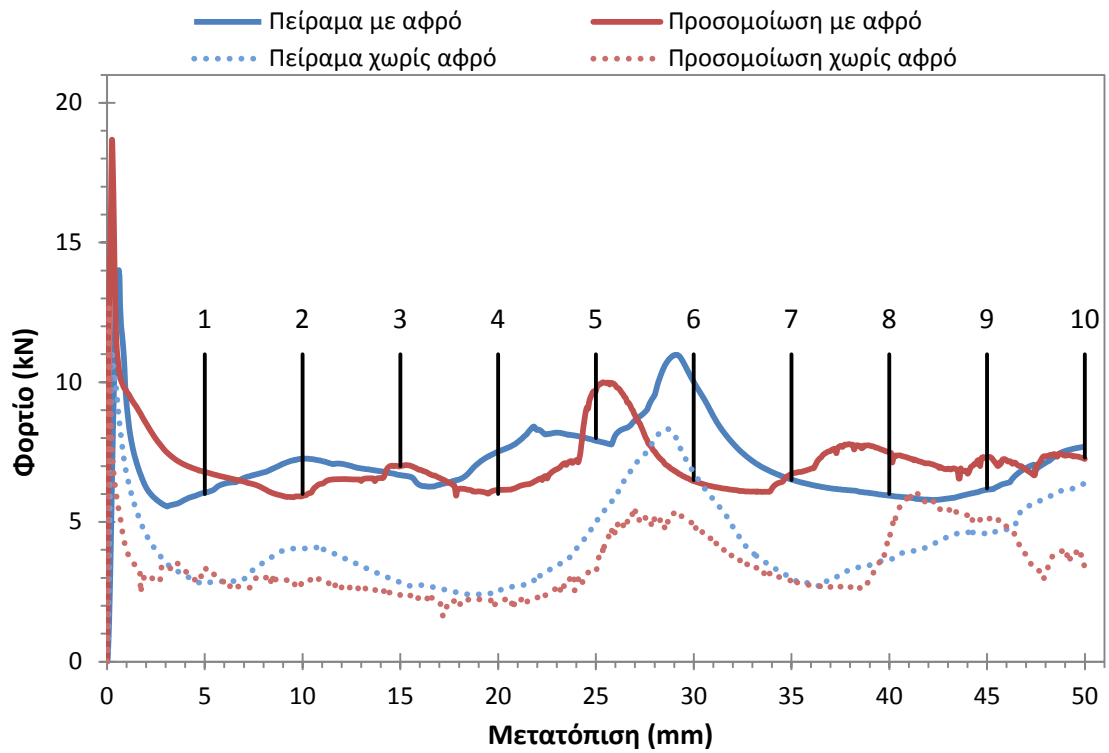
Ανάμεσα στο άδειο και γεμάτο δοκίμιο η απορροφώμενη ενέργεια είναι εμφανώς αυξημένη ενώ το μέγιστο φορτίο δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Παρόλο που η μεταβολή της μάζας είναι 44% μεγαλύτερη, ο συντελεστής SEA έχει διαφορά σε ποσοστό 22%.

Στο πειραματικό δοκίμιο δημιουργήθηκαν 3 λοβοί διαδοχικά στο επάνω μέρος. Η έναρξη σχηματισμού αναγνωρίζεται και από το διάγραμμα όπου αυξάνεται σταθερά το φορτίο κατάρρευσης. Το κάτω μέρος του δοκιμίου παρέμεινε σχεδόν απαραμόρφωτο σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Αντίστοιχοι λοβοί δημιουργούνται και στα πλαϊνά τοιχώματα του διαμορφωμένου ελάσματος. Στην επίπεδη πλάκα παρατηρούνται δύο λοβοί που σχηματίζονται εκμεταλλευόμενοι την ελεύθερη περιοχή εκτός συγκολλήσεων.

Για το μοντέλο προσομοίωσης σχηματίζονται εναλλάξ 2 λοβοί στην πρόοψη και πλάγια όψη αυξάνονται κατά την εκκίνηση το θλιπτικό φορτίο. Η ύπαρξη του αφρού εσωτερικά ωθεί τα στοιχεία κελύφους προς τα έξω. Όταν η παραμόρφωση μεταφέρεται προς το κάτω τμήμα του μοντέλου τα πλαϊνά τοιχώματα παραμορφώνονται προς τα μέσα προκαλώντας τη μετατόπιση του αφρού προς την άλλη κατεύθυνση όπως διακρίνεται στην απεικόνιση του παραμορφωμένου σχήματος.

Η δεύτερη σειρά συγκολλήσεων αστόχησε πλήρως και στις δύο φλάντζες αλλά δεν προκάλεσε εκτεταμένη βλάβη στο υπόλοιπο δοκίμιο. Οι υπόλοιπες συγκολλήσεις παρέμειναν ακέραιες.

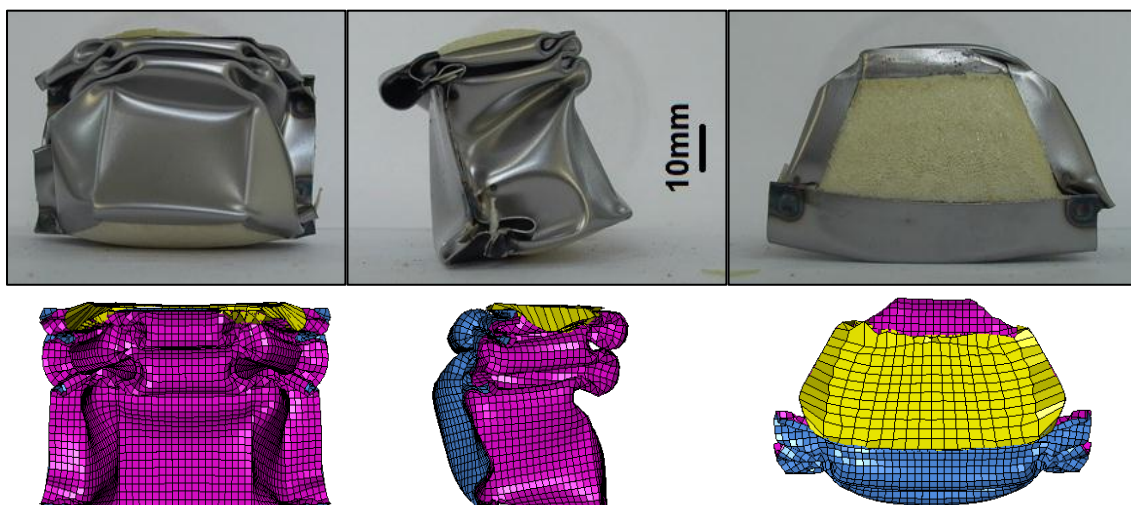
7.1.17. Δοκίμιο 8F



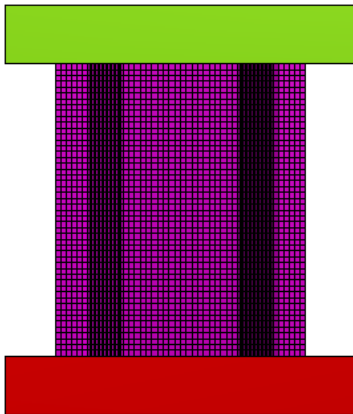
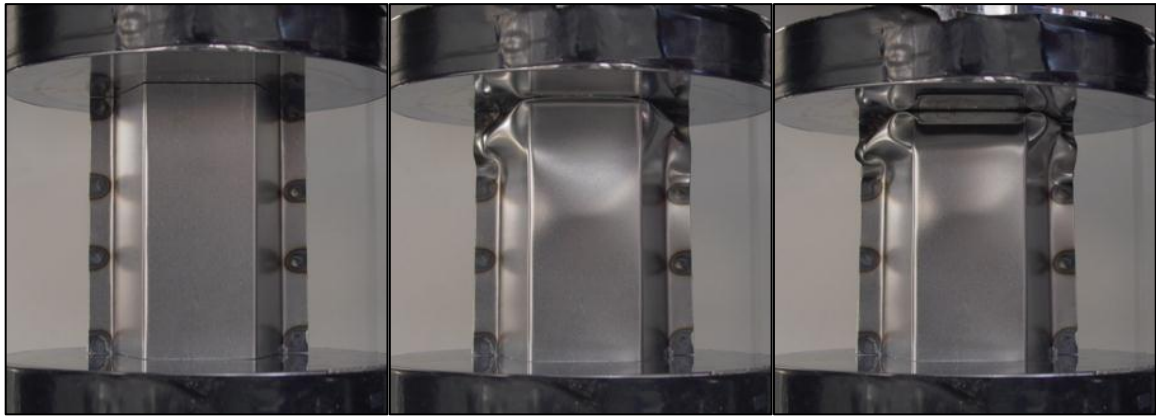
Σχήμα 7.49: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 8F

	Πείραμα με αφρό	Προσομοίωση με αφρό	Πείραμα χωρίς αφρό	Προσομοίωση χωρίς αφρό
Energy Absorption E_a (J)	356.20	355.14	210.45	176.02
Max Force P_{max} (kN)	14.01	18.65	10.99	12.65
Mean Force P_m (kN)	7.12	7.10	4.21	3.52
S.E.A. (J/gr)	2.85	2.85	2.55	2.14
Mass (gr)	124.8		82.4	

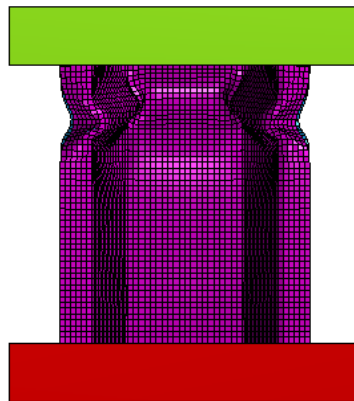
Πίνακας 7.17: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 8F



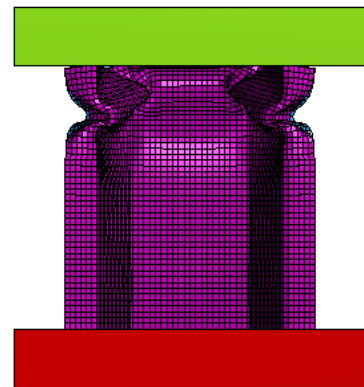
Σχήμα 7.50: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



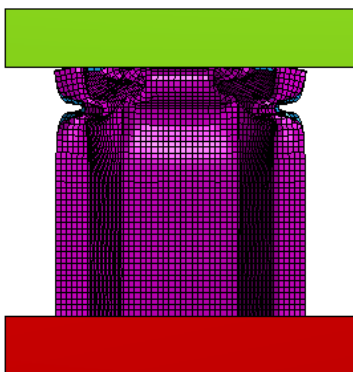
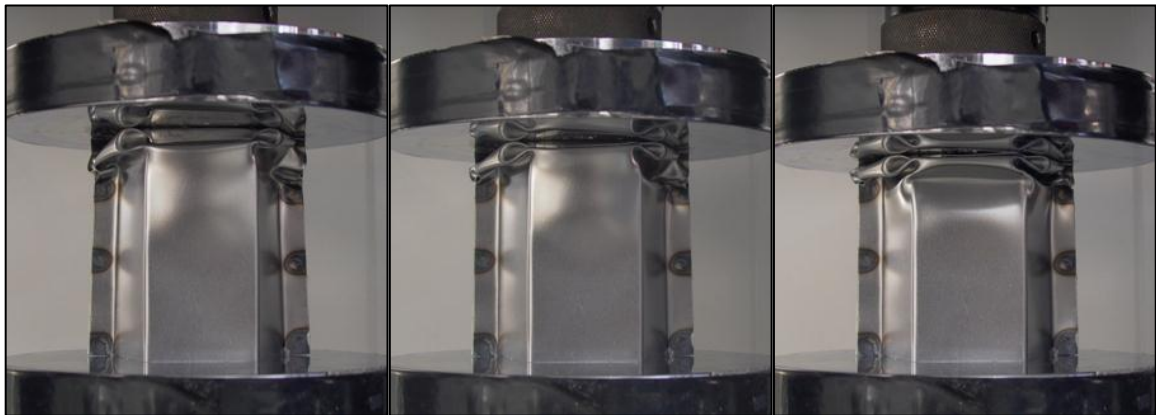
[0] $\delta_f = 0$ mm



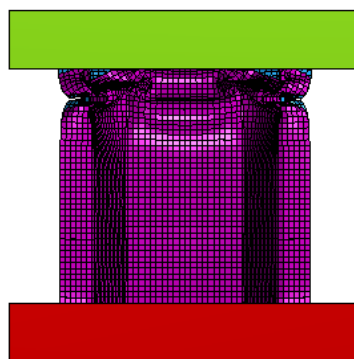
[1] $\delta_f = 5$ mm



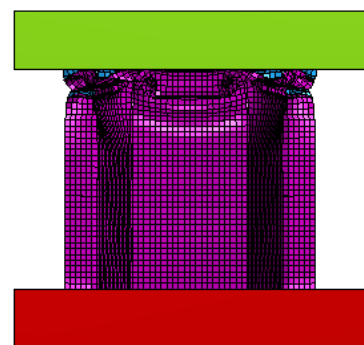
[2] $\delta_f = 10$ mm



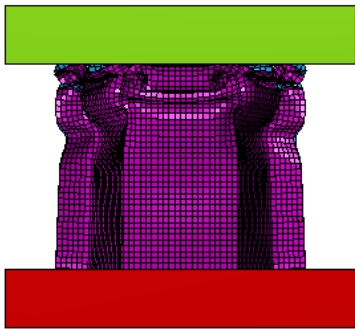
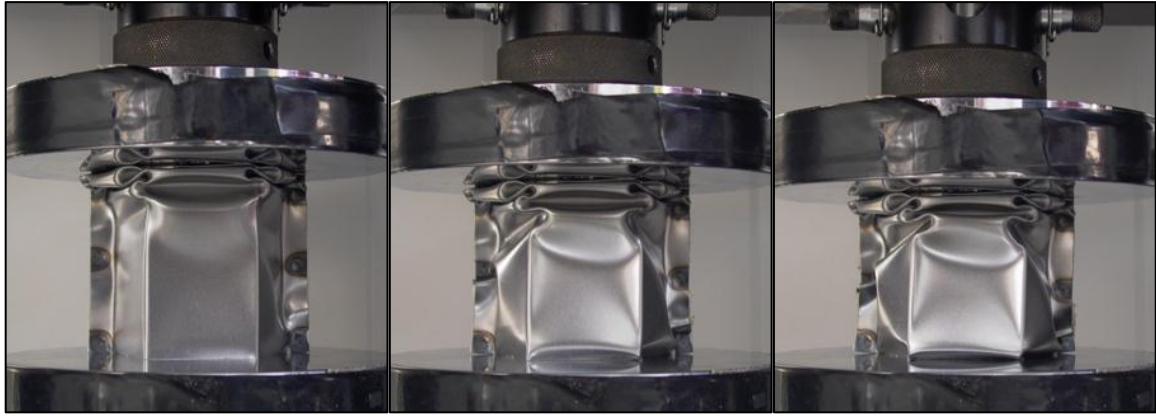
[3] $\delta_f = 15$ mm



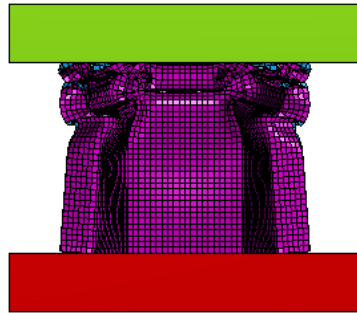
[4] $\delta_f = 20$ mm



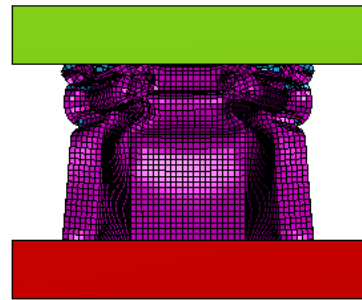
[5] $\delta_f = 25$ mm



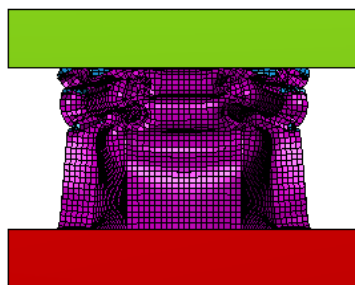
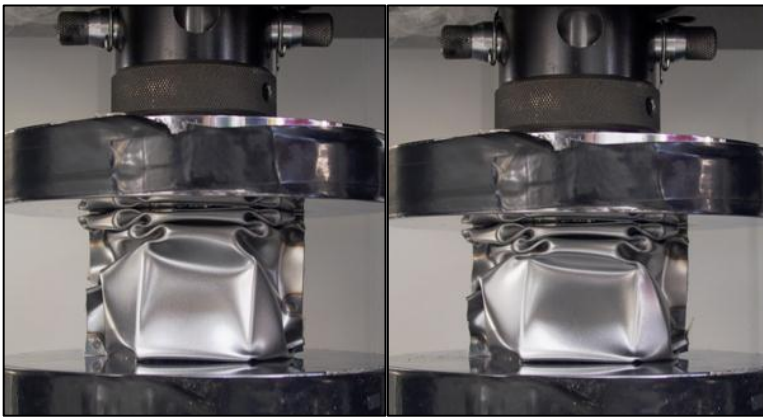
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



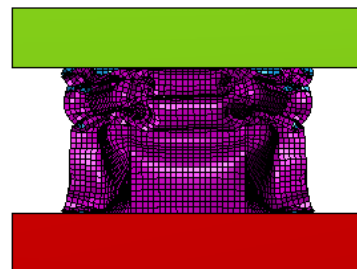
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



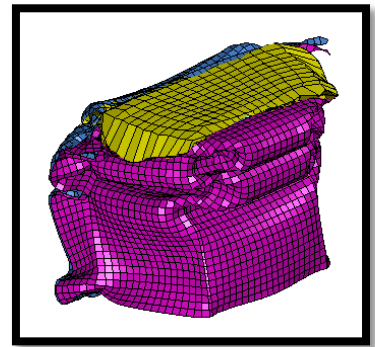
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.51: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

Η απορροφώμενη ενέργεια για πείραμα και προσομοίωση είναι σχεδόν ίδια περίπου 355J. Το μέγιστο φορτίο του πειράματος είναι 14.01kN και διαφέρει κατά -33% από το αντίστοιχο της προσομοίωσης. Οπότε, το μέσο φορτίο σε κάθε περίπτωση είναι 7.10kN και ο συντελεστής SEA 2.85J/gr.

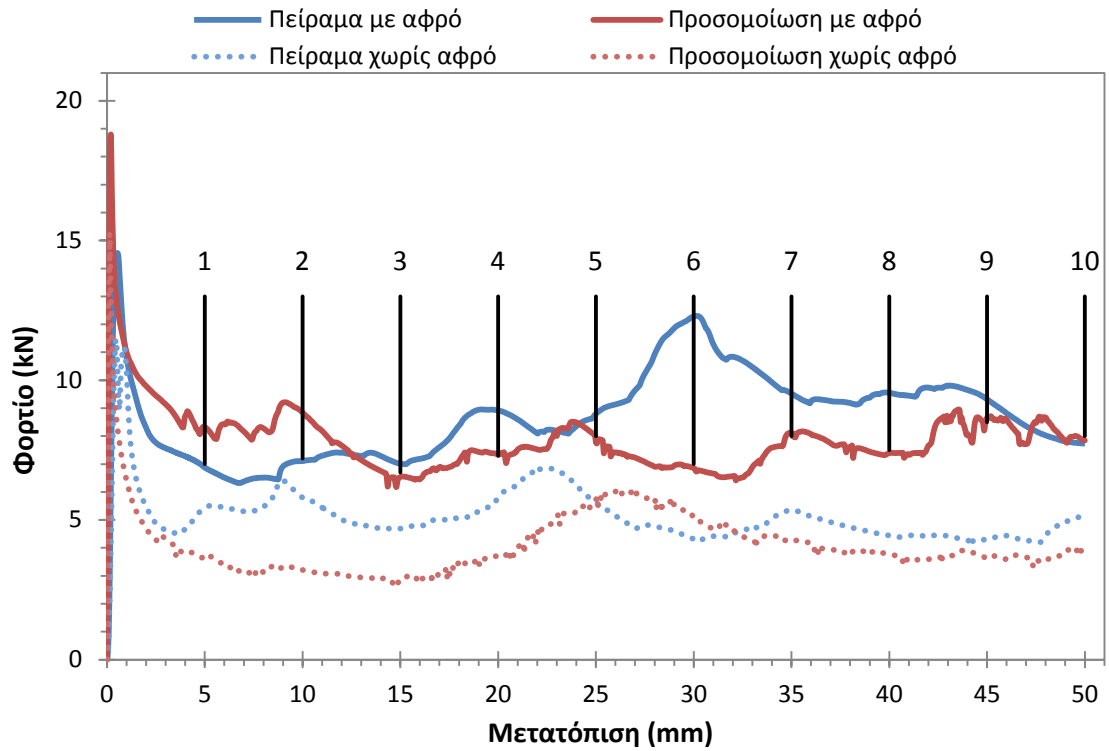
Σε σχέση με το άδειο δοκίμιο, εμφανίζει αύξηση της ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης κατά 70%, του μέγιστου φορτίου κατά 27% και της ειδικής ενέργειας SEA 12%. Η μάζα του πληρωμένου με αφρό δοκιμίου είναι 124.8gr ενώ του άδειου 82.4gr, δηλαδή μειωμένη κατά 51%.

Η προσέγγιση του υπολογιστικού μοντέλου είναι ικανοποιητική ως προς το αναπτυσσόμενο φορτίο κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Όμως υστερεί στη μορφή κατάρρευσης που παρουσιάζει σε σχέση με το πειραματικό δοκίμιο. Στο πείραμα δημιουργούνται δύο λοβοί σε κάθε πλευρά του διαμορφωμένου ελάσματος. Ο πρώτος λοβός που δημιουργείται είναι στο πλάι και μετά η διαδικασία γίνεται εναλλάξ. Η απότομη αύξηση του φορτίου για βράχυνση 28mm οφείλεται στην κάμψη τις δύο φλάντζων στο μέσο περίπου του ύψους. Από εκείνο το σημείο και πέρα αρχίζει η παραμόρφωση στο κάτω τμήμα με τη μεταφορά μεταλλικού ελάσματος προς τον εσωτερικό όγκο μέχρι ενός σημείου υπό τον περιορισμό του πολυουρεθανικού αφρού.

Στο μοντέλο του LS-DYNA δημιουργούνται 2 λοβοί μεγάλου ύψους στη μπροστά επιφάνεια και από ένας σε κάθε πλαϊνή. ταυτόχρονα στην πίσω όψη σχηματίζεται πλήρως ένας λοβός και το υπόλοιπο τμήμα υλικού κάμπτεται προς τα έξω εξωθούμενο από τον αφρό. Η αύξηση του φορτίου για συμπίεση 25mm προκύπτει από την κάμψη της φλάντζας όπως και στο πείραμα.

Υπήρξε ολική αστοχία της μεσαίας συγκόλλησης που δεν προκάλεσε όμως ανομοιόμορφη συμπεριφορά στο δοκίμιο.

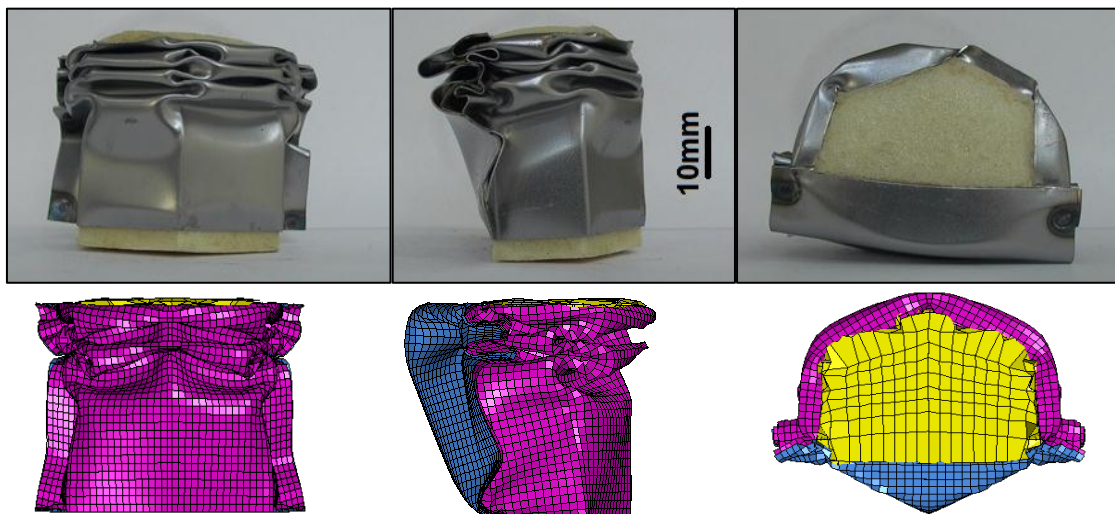
7.1.18. Δοκίμιο 9F



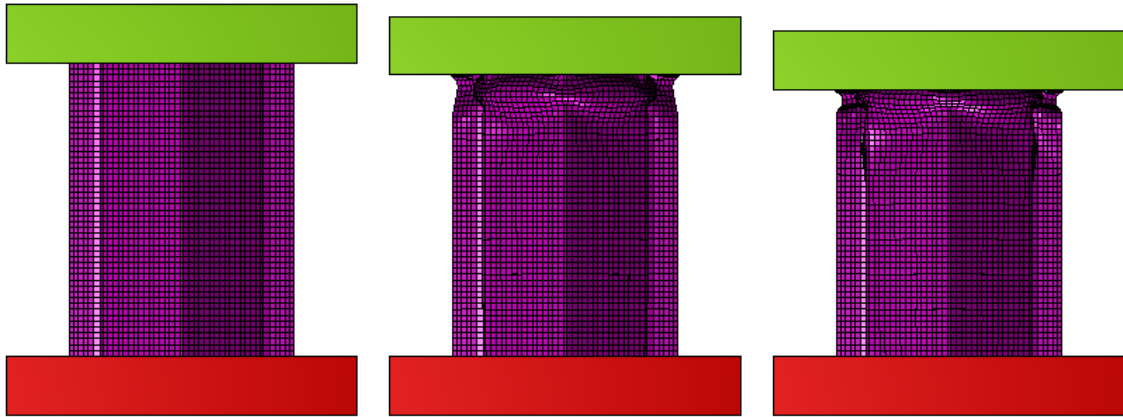
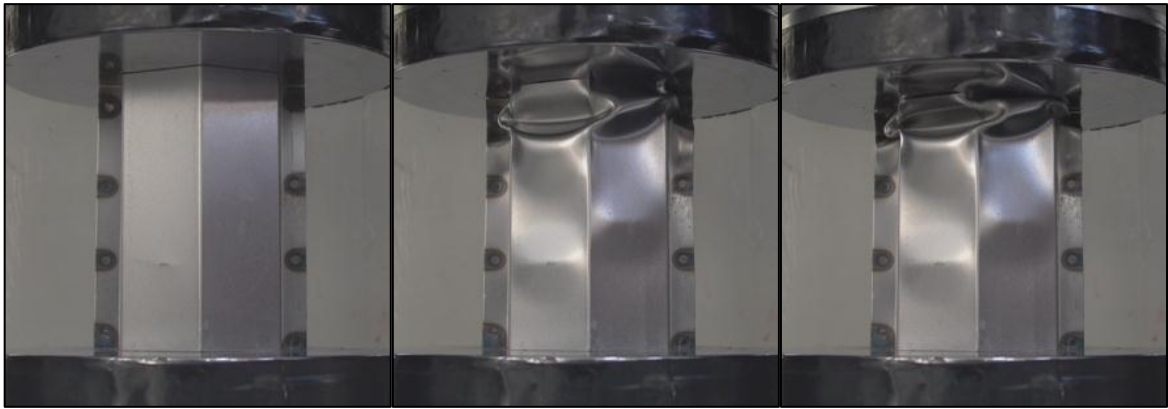
Σχήμα 7.52: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 9F

	Πείραμα με αφρό	Προσομοίωση με αφρό	Πείραμα χωρίς αφρό	Προσομοίωση χωρίς αφρό
Energy Absorption E_a (J)	434.74	393.80	257.08	205.90
Max Force P_{max} (kN)	14.56	18.79	11.48	15.26
Mean Force P_m (kN)	8.69	7.88	5.14	4.12
S.E.A. (J/gr)	3.61	3.27	3.30	2.64
Mass (gr)	120.4		78.0	

Πίνακας 7.18: Βασικά αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίου 9F



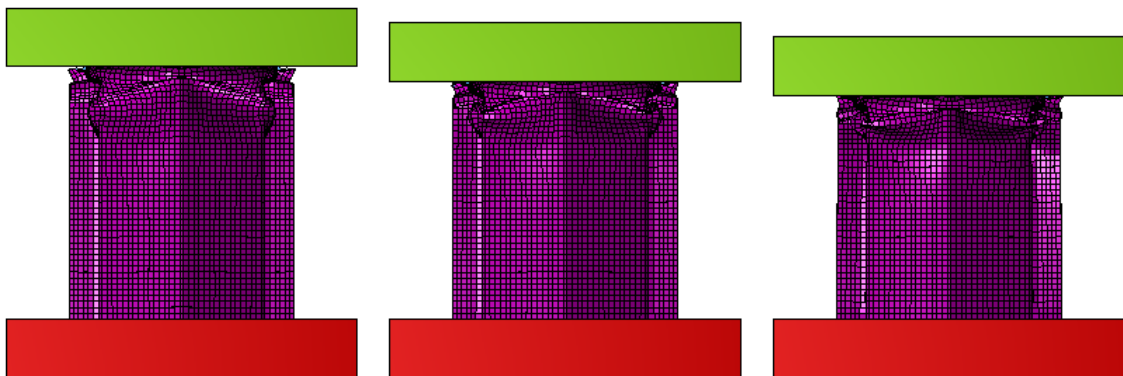
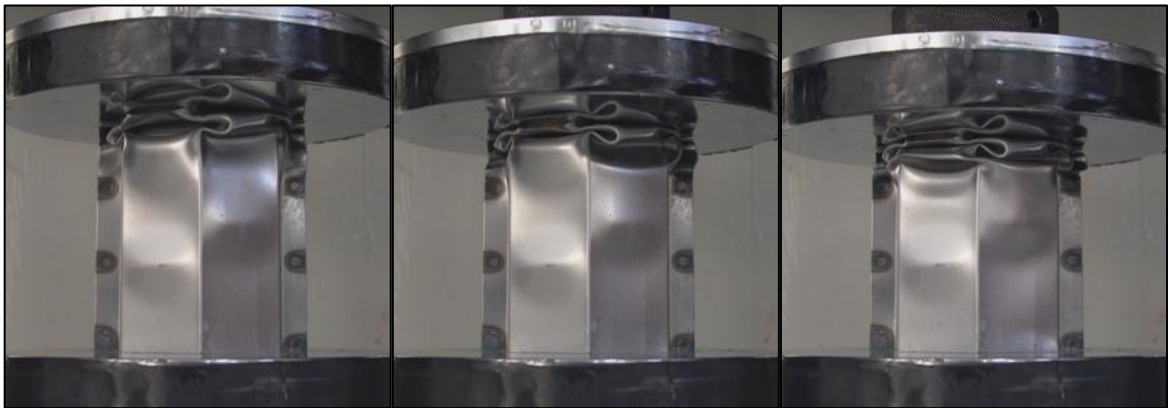
Σχήμα 7.53: Απεικόνιση παραμορφωμένου δοκιμίου



[0] $\delta_f = 0$ mm

[1] $\delta_f = 5$ mm

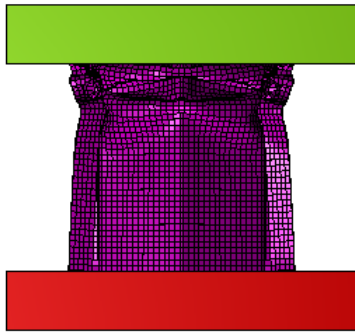
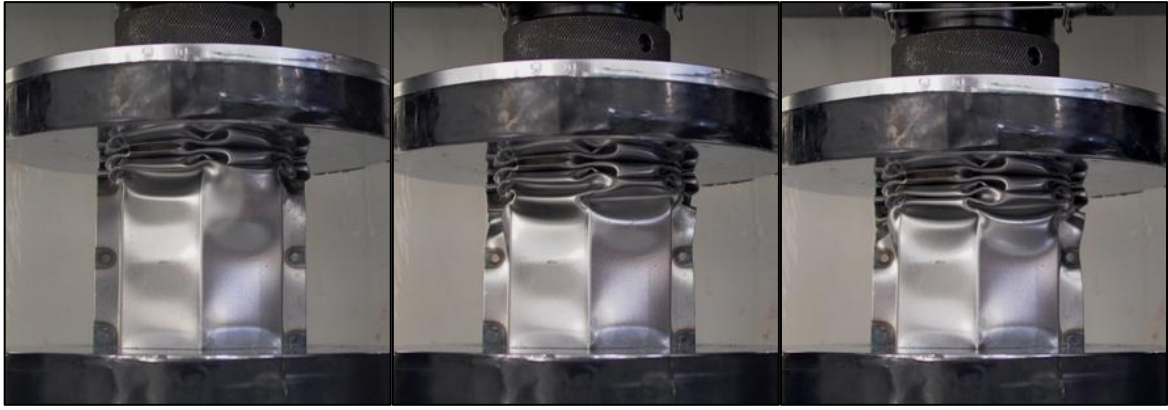
[2] $\delta_f = 10$ mm



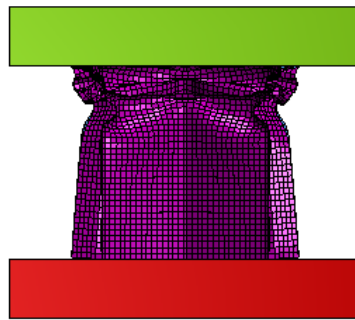
[3] $\delta_f = 15$ mm

[4] $\delta_f = 20$ mm

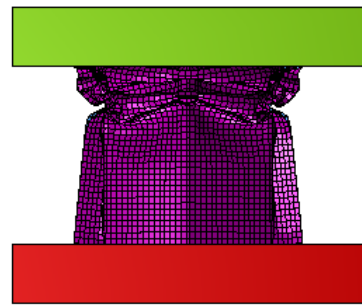
[5] $\delta_f = 25$ mm



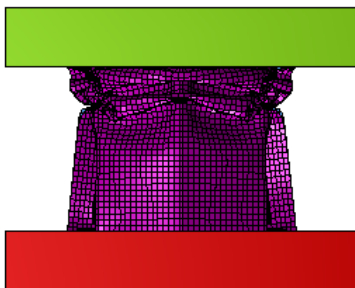
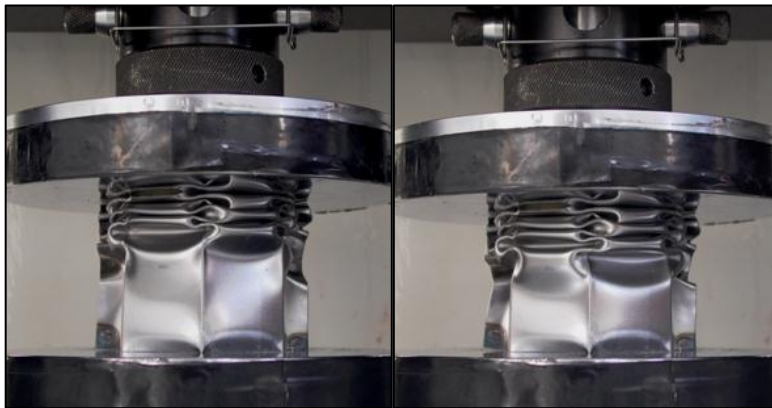
[6] $\delta_f = 30 \text{ mm}$



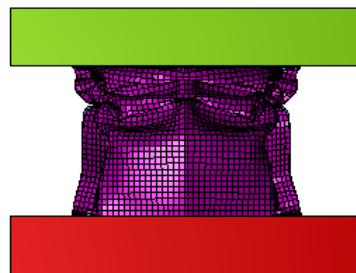
[7] $\delta_f = 35 \text{ mm}$



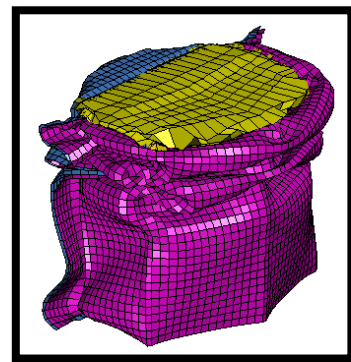
[8] $\delta_f = 40 \text{ mm}$



[9] $\delta_f = 45 \text{ mm}$



[10] $\delta_f = 50 \text{ mm}$



Σχήμα 7.54: Διαδικασία παραμόρφωσης με βήμα 5 mm

Σχολιασμός - Παρατηρήσεις

Για το δοκίμιο 9F τα βασικά μεγέθη της ανάλυσης του πειράματος και της προσομοίωσης αντίστοιχα προέκυψαν ως εξής: ενέργεια απορρόφησης 434.74J και 393.80J, μέγιστο φορτίο 14.56kN και 18.79kN, μέσο φορτίο 8.69kN και 7.88kN, ειδική ενέργεια ανά μάζα 3.61kN και 3.27kN. Σε σχέση με προηγούμενες διατομές εμφανίζει υψηλά αποτελέσματα.

Αν συγκριθεί με το άδειο δοκίμιο 9 παρατηρείται αύξηση της ενέργειας 69%, αύξηση του μέγιστου φορτίου 27%, αύξηση της ειδικής ενέργειας 9% και τέλος αύξηση της μάζας 54%.

Στο δοκίμιο σχηματίζονται εναλλάξ 3 λοβοί σε κάθε επιφάνεια υπό γωνία της πρόοψης. Η παραμόρφωση γίνεται εξ ολοκλήρου στο πάνω τμήμα του δοκιμίου. Η επίπεδη πλάκα παραμορφώνεται ομαλά στην αρχή αλλά προοδευτικά δημιουργείται κυματοειδής αναδίπλωση με κλίση 45° από την οριζόντια διεύθυνση. Αύξηση του φορτίου αρχικά για βράχυνση 17mm και στη συνέχεια ακόμα μεγαλύτερη στα 30mm οφείλεται στην κάμψη του ελάσματος στα πλαϊνά τοιχώματα και την φλάντζα. Μάλιστα για βράχυνση 30mm το φορτίο κοντεύει να φτάσει τη μέγιστη τιμή κατά την έναρξη της διαδικασίας.

Όσον αφορά το υπολογιστικό μοντέλο υπάρχει απόκλιση αν εξεταστούν οι επιμέρους φάσεις της κατάρρευσης. Οι λοβοί σε κάθε επίπεδο δημιουργούνται ταυτόχρονα και έχουν μεγαλύτερο ύψος. Συνολικά δημιουργούνται δύο στο άνω τμήμα. Ταυτόχρονα η ύπαρξη του αφρού πιέζει το επίπεδο έλασμα με αποτέλεσμα να το ωθεί προς τα έξω. Στο τέλος της διαδικασίας εκκινεί η παραμόρφωση της φλάντζας στο κάτω μέρος οπότε και αυξάνεται ελαφρώς το θλιπτικό φορτίο.

Στη δεύτερη σειρά συγκολλήσεων εμφανίστηκε μερική αποκόλληση χωρίς επιπλέον επέκταση. Οι συγκολλήσεις άντεξαν και δεν επηρέασαν αρνητικά τα πειραματικά αποτελέσματα.

7.2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανάλυσης

a/a	Μέθοδος	Energy Absorption E_a (J)	Max Force P_{max} (kN)	Mean Force P_m (kN)	S.E.A. (J/gr)	Mass (gr)
1	Πείραμα	232.03	17.32	4.64	2.39	97.1
	Προσομοίωση	232.57	20.16	4.65	2.40	
2	Πείραμα	260.82	17.07	5.22	2.46	106.1
	Προσομοίωση	259.01	21.67	5.18	2.44	
3	Πείραμα	327.90	16.98	6.56	3.09	112.4
	Προσομοίωση	303.45	23.43	6.07	2.70	
4	Πείραμα	212.22	10.23	4.24	2.82	75.3
	Προσομοίωση	164.83	12.64	3.30	2.19	
5	Πείραμα	153.20	8.70	3.06	1.84	83.3
	Προσομοίωση	115.89	12.68	2.32	1.39	
6	Πείραμα	251.97	16.62	5.04	3.01	83.6
	Προσομοίωση	206.06	16.42	4.12	2.46	
7	Πείραμα	202.57	13.22	4.05	2.69	75.4
	Προσομοίωση	168.62	15.05	3.37	2.24	
8	Πείραμα	210.45	10.99	4.21	2.55	82.4
	Προσομοίωση	176.02	12.65	3.52	2.14	
9	Πείραμα	257.08	11.48	5.14	3.30	78.0
	Προσομοίωση	205.90	15.26	4.12	2.64	
1F	Πείραμα	656.62	23.48	13.13	3.77	174.1
	Προσομοίωση	598.41	30.12	11.97	3.44	
2F	Πείραμα	788.45	27.49	15.77	4.31	182.9
	Προσομοίωση	744.37	33.71	14.89	4.07	
3F	Πείραμα	778.03	27.36	15.56	4.11	189.2
	Προσομοίωση	740.62	35.44	14.81	3.91	
4F	Πείραμα	392.86	12.17	7.86	3.44	114.3
	Προσομοίωση	431.09	17.96	8.62	3.77	
5F	Πείραμα	375.83	13.01	7.52	3.13	119.9
	Προσομοίωση	421.11	18.32	8.42	3.51	
6F	Πείραμα	463.93	15.62	9.28	3.55	130.8
	Προσομοίωση	492.14	20.83	9.84	3.76	
7F	Πείραμα	355.34	13.65	7.11	3.27	108.6
	Προσομοίωση	381.82	16.35	7.64	3.52	
8F	Πείραμα	356.20	14.01	7.12	2.85	124.8
	Προσομοίωση	355.14	18.65	7.10	2.85	
9F	Πείραμα	434.74	14.56	8.69	3.61	120.4
	Προσομοίωση	393.80	18.79	7.88	3.27	

Πίνακας 7.19: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανάλυσης

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη της συμπεριφοράς λεπτότοιχων διατομών με φλάντζα υπό στατικό αξονικό φορτίο. Τα δοκίμια διαθέτουν μεταβλητή μορφή διατομής ή διαφορετικό μήκος φλάντζας ανά περίπτωση. Επιπροσθέτως, τα ίδια πειράματα πραγματοποιήθηκαν αφού ενισχύθηκαν τα δοκίμια εσωτερικά με αφρό. Στις σταθερές συνιστώσες συγκαταλέγεται το ύψος των δοκιμίων, το υλικό και το πάχος του ελάσματος, η περίμετρος της διατομής χωρίς τον υπολογισμό της φλάντζας. Σε επόμενο στάδιο, έγινε μοντελοποίηση της διαδικασίας με τον κώδικα LS-DYNA και αξιολογήθηκε η ικανότητα προσέγγισης της λύσης με το πραγματικό φαινόμενο.

Πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας κάθε διατομής και της επίδρασης σε ορισμένα βασικά μεγέθη που αναλύθηκαν, ενώ ελέγχθηκε και ο τρόπος κατάρρευσης κάθε δοκιμίου.

Σχετικά με το μηχανισμό κατάρρευσης παρατηρήθηκε ότι τα άδεια δοκίμια εμφάνισαν γενική αστάθεια και αδυναμία πρόβλεψης της κατάρρευσης από το υπολογιστικό μοντέλο. Γενικά αναφέρεται ότι τέτοιου είδους κατάρρευση υπόκειται σε μη εκτατή παραμόρφωση όπου η περίμετρος της διατομής σε κάθε χρονική στιγμή παραμένει σταθερή ενώ μεταβάλλεται η μορφή της. Σε ορισμένα πειραματικά δοκίμια προκλήθηκε ασύμμετρος λυγισμός λόγω λοξής παραμόρφωσης και δεν επήλθε σταδιακή παραμόρφωση με το σχηματισμό διαδοχικών συμμετρικών λοβών όπως προέβλεπε η θεωρία. Παράγοντες που μπορεί να οφείλεται αυτή η συμπεριφορά είναι η ευαισθησία σε μικρές ατέλειες κατά την κατασκευή και συναρμολόγηση του δοκιμίου, η ποιότητα και ορθή ευθυγράμμιση των τοπικών συγκολλήσεων κάθε φλάντζας η μεταβλητότητα του πάχους ελάσματος σε όλη την επιφάνειά του σε συνδυασμό με το μικρό πάχος και κυρίως τη μορφή της διατομής.

Στο μοντέλο προσομοίωσης μπορεί να παρατηρηθεί σε ένα βαθμό η ομαλή κατάρρευση και διαδοχικότητα σχηματισμού των λοβών. Λόγω του τρόπου μοντελοποίησης των συγκολλήσεων παρατηρείται ευρεία απομάκρυνση των στοιχείων κελύφους στην ελεύθερη περιοχή γεγονός που δεν συμβαδίζει με το πείραμα. Επίσης, η συγκεκριμένη μοντελοποίηση των σημειακών συγκολλήσεων δεν έχει το δυνατότητα ελέγχου αστοχίας. Η αύξηση του μήκους της φλάντζας των double-hat διατομών δεν επηρεάζει το μηχανισμό κατάρρευσης παρά μόνο τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Τα ενισχυμένα με αφρό δοκίμια έχουν πιο ομαλή κατάρρευση με διαδοχικό σχηματισμό λοβών. Στα πειραματικά δοκίμια παρατηρήθηκε επαναφορά του πολυουρεθανικού αφρού λόγω ελαστικότητας όταν τα βγάλαμε από την πρέσσα της τάξης του 10% της ολικής βράχυνσης και μόνο στις περιπτώσεις που η παραμόρφωση του ελάσματος δεν εμποδίζεται από μια τουλάχιστον πλευρά τον όγκο αφρού. Εν τέλει, πιο προβλέψιμη κατάρρευση εμφάνισαν τα δοκίμια 4, 6, 9 με ορθογωνική, ημικυκλική και

πενταγωνική διατομή αντίστοιχα, ενώ αντιθέτως ανώμαλη κατάρρευση παρουσίασε η τριγωνική (δοκίμιο 5) και μορφής “M” (δοκίμιο 7) διατομή. Αξίζει να αναφερθεί ότι παρά την ικανότητα του αφρού για χρήση ως κολλητική ουσία σε διάφορες εφαρμογές, σε αυτή την περίπτωση κατά την έναρξη της παραμόρφωσης αποκολλήθηκε από το μέταλλο και δεν συμμετείχε στο σχηματισμό των λοβών.

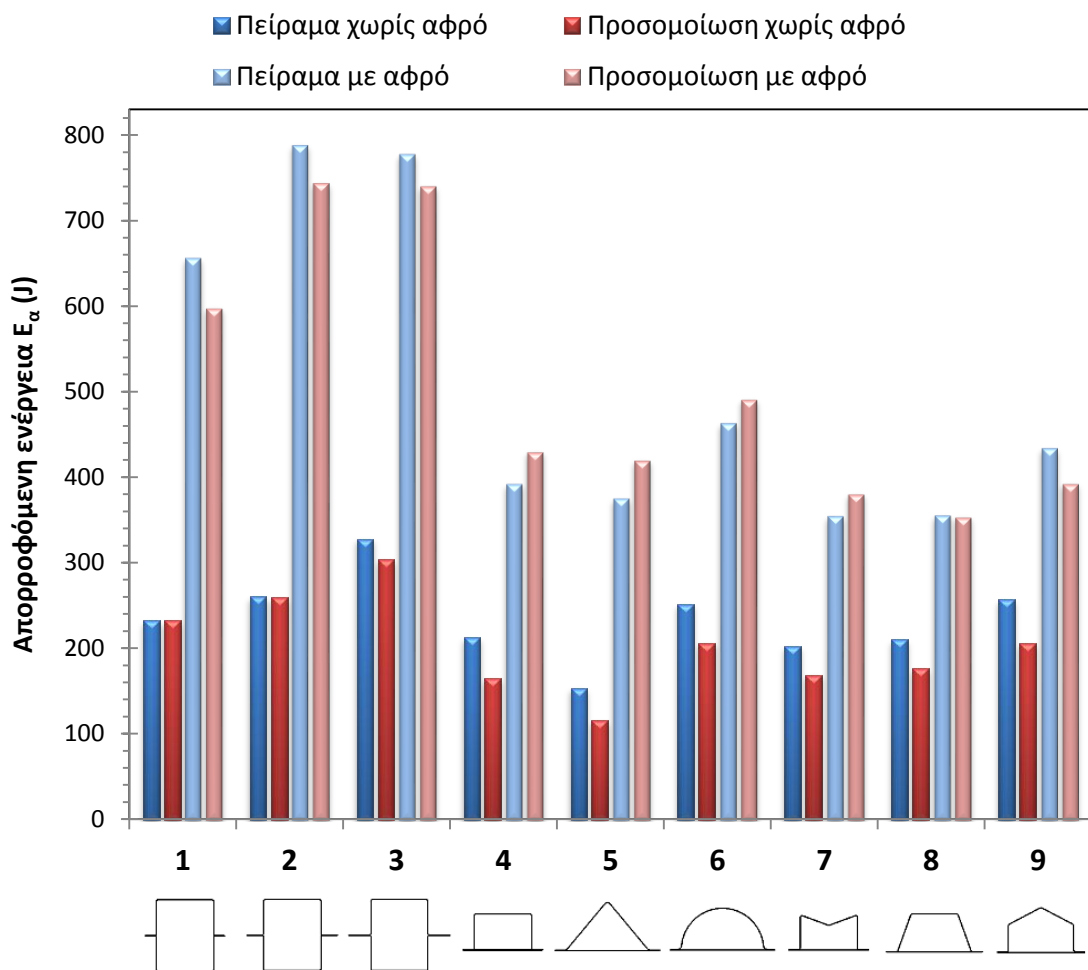
Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα του κώδικα εμφανίζουν την ίδια ομαλότητα βάσει και της θεωρίας αλλά όχι την ομοιότητα με το πείραμα. Βασικός παράγοντας είναι ο τρόπος που επιλέχθηκε για τη μοντελοποίηση της διεπαφής στοιχείων κελύφους για το έλασμα και στοιχείων όγκου για τον αφρό. Πιο συγκεκριμένα, στο μοντέλο θεωρήθηκε ότι το έλασμα παραμένει προσκολλημένο στην εξωτερική επιφάνεια του αφρού σε όλη τη διάρκεια της συμπίεσης παρόλο που στην πραγματικότητα δεν ισχύει. Με αυτό τον τρόπο οι λοβοί που δημιουργήθηκαν είχαν μεγάλο ύψος και μικρότερο πλήθος από το αντίστοιχο πείραμα. Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις όπως στο δοκίμιο 5 τριγωνικής διατομής, προκλήθηκε γενικότερη μεταβολή στην παραμόρφωση λόγω της εσωτερικής πίεσης που ασκήθηκε κατά τη δημιουργία του πρώτου λοβού.

Ο κυριότερος λόγος χρήσης κατασκευών με λεπτότοιχες διατομές είναι η ικανότητα απορρόφησης της ενέργειας πρόσκρουσης μετατρέποντας την σε πλαστική παραμόρφωση που παραλαμβάνεται από το σώμα. Στο διάγραμμα του σχ.8.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης ως προς την ενέργεια που απορροφήθηκε για κάθε ένα πειραματικό δοκίμιο.

Σύμφωνα με το διάγραμμα, η αύξηση του μεγέθους της φλάντζας από 10mm σε 15mm, 20mm επιφέρει αύξηση στην ενέργεια κατά 12% και 41% αντίστοιχα. Η προσομοίωση έδωσε αντίστοιχες τιμές με το πειραματικό δοκίμιο. Στη συνέχεια μεταβάλλοντας το σχήμα της διατομής με φλάντζα 10mm παρατηρείται μεγάλη διασπορά των τιμών. Από τις πιο αποτελεσματικές διατομές είναι οι 6, 9 με ενέργεια αντίστοιχη των δοκιμίων double-hat με φλάντζα 10mm. Η πιο αδύνατη διατομή είναι η τριγωνική, γεγονός αναμενόμενο αν αναλογιστούμε και τον τρόπο κατάρρευσης που απέχει αρκετά από τον ιδανικό. Το μοντέλο προσομοίωσης για τα δοκίμια με ευθεία πλάκα δεν κατάφερε σε καμία περίπτωση να προσεγγίσει πλήρως την πειραματική απορροφόμενη ενέργεια.

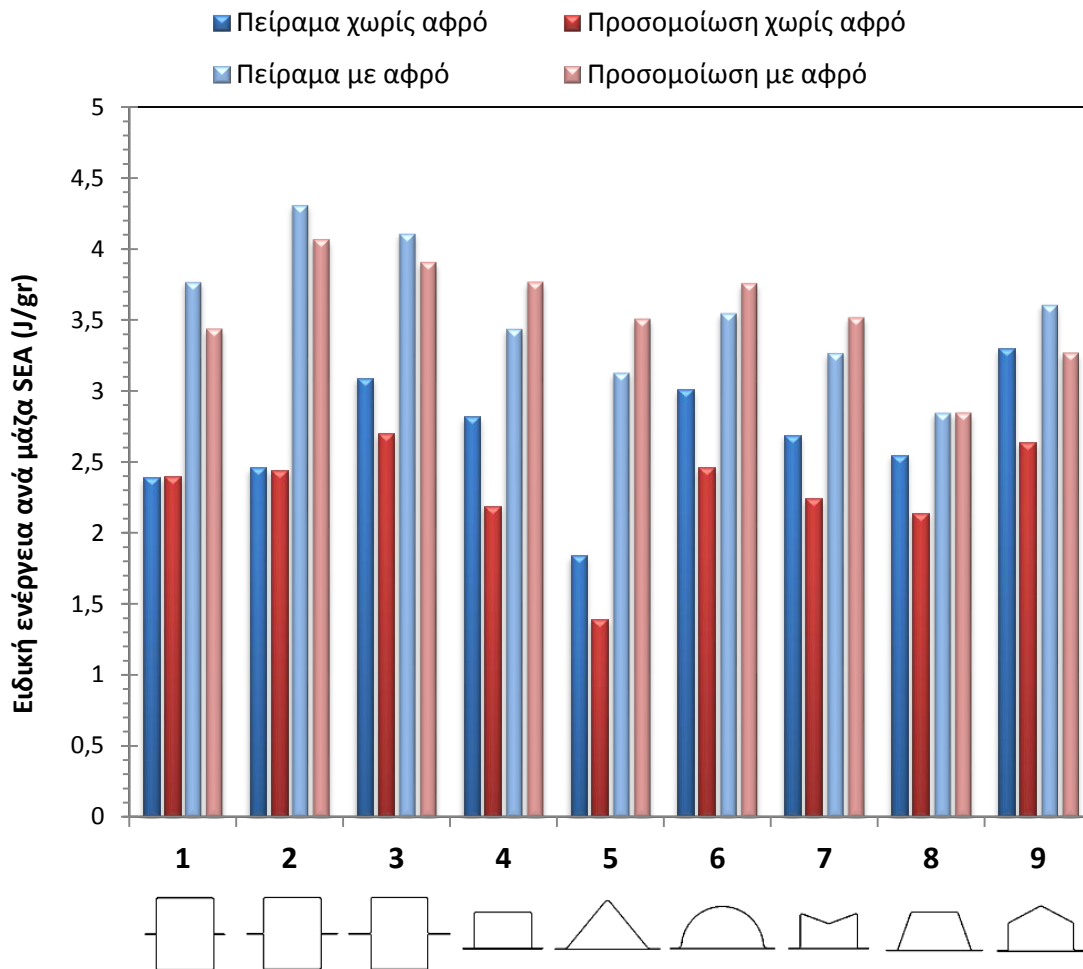
Στην περίπτωση των δοκιμίων που ενισχύθηκαν με πολουρεθανικό αφρό η συμπεριφορά κατά την κατάρρευση διαφέρει σημαντικά. Για την περίπτωση των double-hat διατομών η αύξηση της απορροφόμενης ενέργειας είναι θεαματική και φτάνει περίπου το 300%. Άρα μετά την πλήρωση των κελυφών με αφρό η βελτίωση στην αντοχή δεν οφείλεται απλώς στην αντοχή του αφρού, αλλά στην αλληλεπίδραση του αφρού με το κέλυφος και τη μετατροπή της κατάρρευσης σε ομαλή και συμμετρική αυξάνοντας τις δυνατότητες του δοκιμίου. Η προσομοίωση εμφανίζει μικρότερες τιμές απορροφόμενης ενέργειας. Υπενθυμίζεται ότι αντίθετα με το πραγματικό φαινόμενο όπου το έλασμα αποκολλήθηκε από τον αφρό, στην προσομοίωση κατά τη μοντελοποίηση θεωρήθηκε ότι οι δύο επιφάνειες είναι προσκολλημένες σε όλη τη διάρκεια, γεγονός που ίσως επηρέασε

αρνητικά την αντοχή του μοντέλου. Στα επόμενα δοκίμια και πάλι προκλήθηκε σημαντική αύξηση της ενέργειας χωρίς να ξεπεράσει τη διπλάσια τιμή σε σχέση με τα άδεια. Πλέον, το μοντέλο προσομοίωσης κατά πλειοψηφία ξεπέρασε την τιμή του αντίστοιχου πειράματος. Και σε αυτή την περίπτωση, οι διατομές με την καλύτερη απόδοση είναι οι 6, 9 που παρουσιάζουν και την πιο συμμετρική κατάρρευση, σε αντίθεση με τη διατομή 7, 8 που είχαν μειωμένη αντοχή. Τα μεγέθη της τριγωνικής διατομής του δοκιμίου 5 δεν αποτελούν αξιόπιστα καθότι από τη μορφή κατάρρευσης του υπολογιστικού μοντέλου προκλήθηκε μεγάλη απόκλιση. Βεβαίως, η χρήση του αφρού βελτίωσε την απόδοση της διατομής προκαλώντας αύξηση σε ποσοστό 240%.



Σχήμα 8.1: Διάγραμμα απορροφόμενης ενέργειας

Τέτοια συστήματα απορρόφησης ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως στα μέσα μεταφοράς. Οπότε, ένα επιπλέον στοιχείο που κάνει υποχρεωτική τη χρήση τους είναι το μειωμένο βάρος της κατασκευής. Δηλαδή, είναι σημαντικό να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απορρόφηση ενέργειας με το ελάχιστο βάρος κατασκευής. Γι' αυτό το λόγο εξετάστηκε η ειδική ενέργεια απορρόφησης ανά μάζα κάθε δοκιμίου μετρούμενη σε J/gr. Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται εμφανές η καταλληλότητα κάθε δοκιμίου σύμφωνα με αυτό το κριτήριο.



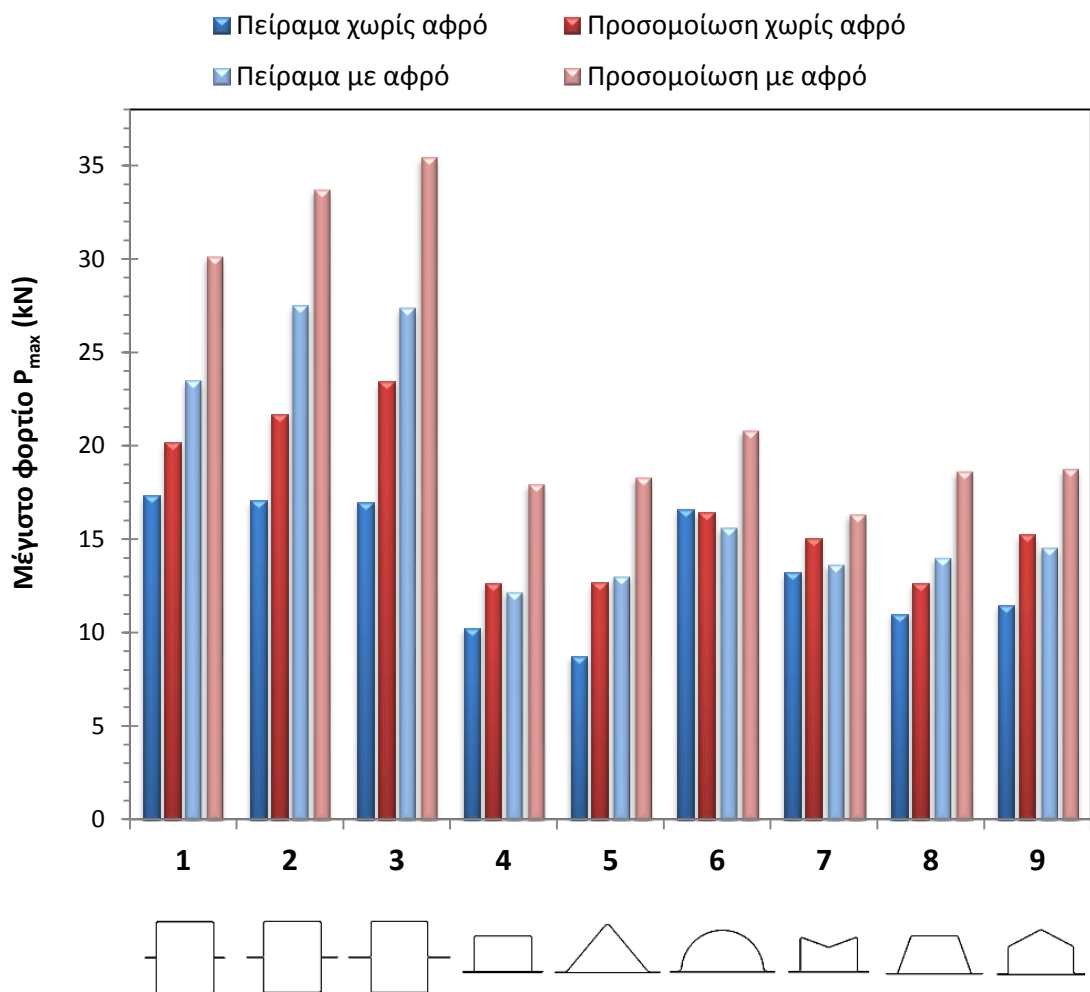
Σχήμα 8.2: Διάγραμμα ειδικής ενέργειας ανά μάζα

Σύμφωνα με το διάγραμμα, για τα άδεια δοκίμια, τη μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας εμφανίζει το δοκίμιο 9 και στη συνέχεια το δοκίμιο 6 κυκλικής διατομής και το δοκίμιο 3 ορθογωνικής διατομής με φλάντζα μήκους 20mm, ενώ μικρή ικανότητα παρουσιάζει το δοκίμιο 6 τριγωνικής διατομής. Διακρίνεται ότι η αύξηση του μήκους της φλάντζας δεν συνδέεται γραμμικά με την αύξηση του μεγέθους SEA. Μετά την ενίσχυση με αφρό παρατηρείται αξιοσημείωτη αύξηση της ειδικής ενέργειας μόνο για τις συγκεκριμένες διατομές που παρουσίασαν αρχικά ανομοιόμορφη κατάρρευση.

Το υπολογιστικό μοντέλο δεν μπόρεσε να φτάσει το αντίστοιχο πειραματικό μέγεθος της ενέργειας για τα άδεια δοκίμια ενώ αντιθέτως στην περίπτωση των ενισχυμένων δοκιμίων δεν επέδειξε σταθερότητα ως προς την ικανότητα προσέγγισης λόγω και της διαφορετικής μοντελοποίησης ως προς τις πραγματικές συνθήκες συμπίεσης. Για τη σύνθεση του μεγέθους SEA στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το βάρος του πραγματικού δοκιμίου γεγονός που αποτελεί παραδοχή. Το μοντέλο σχεδιάστηκε με στοιχεία κελύφους δύο διαστάσεων, χωρίς πάχος, και στη συνέχεια αποδώσαμε σε αυτά το πάχος κάθε κορυφής (property). Στην περίπτωση του αφρού, ο όγκος που σχεδιάστηκε στον κώδικα ήταν ελαφρώς μικρότερος χωρίς fillets στα άκρα για να γίνει ευκολότερη η

πλεγματοποίηση. Οπότε, προφανώς η πραγματική μάζα αλλά και η γεωμετρία του μοντέλου έχουν απόκλιση.

Κατά τη σύγκρουση ενός οχήματος, ένα τμήμα της ενέργειας διαχέεται από την κατασκευή λόγω πλαστικής παραμόρφωσης ενώ το υπόλοιπο παραλαμβάνεται από την γύρω κατασκευή και κατ' επέκταση και από τους επιβάτες. Οπότε, βάσει και του κριτηρίου τραυματισμών στο κεφάλι (HIC) όπου υποδηλώνει τα φορτία που αντέχει ο άνθρωπος, θα πρέπει το μέγιστο φορτίο πρόσκρουσης κατά την έναρξη της διαδικασίας να παραμένει κάτω από τα επιτρεπτά όρια για να μην προκληθεί θανάσιμος τραυματισμός κατά την αρχική επιβράδυνση. Το μέγιστο φορτίο που ανέπτυξε κάθε δοκίμιο παρατίθεται στη συνέχεια.



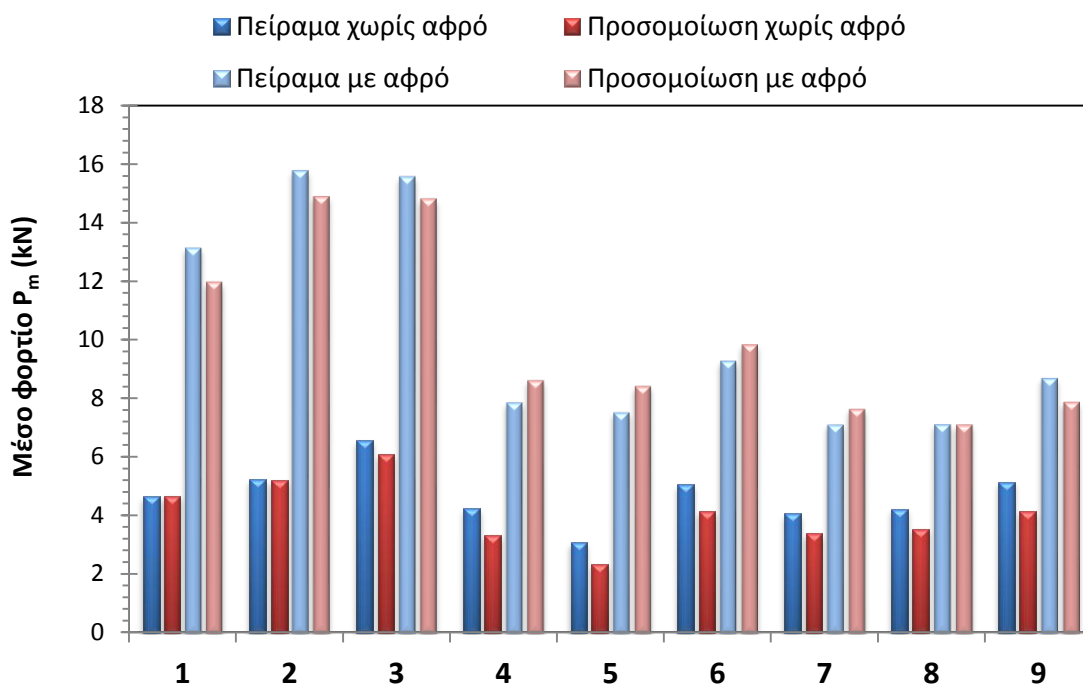
Σχήμα 8.3: Διάγραμμα μέγιστου φορτίου κατάρρευσης

Για τα άδεια δοκίμια η μεταβολή της φλάντζας δεν επέφερε σημαντική μεταβολή στο μέγιστο φορτίο. Διακύμανση παρατηρείται στα δοκίμια με μεταβλητό σχήμα με τη μέγιστη τιμή να έχει το ημικυκλικό και ελάχιστη το τριγωνικό δοκίμιο. Η βράχυνση των ενισχυμένων με αφρό δοκιμίων είχε ανάμικτα αποτελέσματα στο μέγιστο φορτίο. Στα double-hat δοκίμια αυξήθηκε το μέγιστο φορτίο αισθητά διατηρώντας ένα συγκεκριμένο

εύρος παρά τη μεταβολή του μήκους των φλαντζών Στην περίπτωση των δοκιμών 4 – 9, το μέγιστο φορτίο δεν επηρεάστηκε από την ύπαρξη του αφρού σε όλες τις περιπτώσεις και μάλιστα εμφάνισε και μείωση. Άρα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο αφρός δεν συντελεί άμεσα στην αύξηση του φορτίου αλλά επηρεάζει τη συμπεριφορά των δοκιμών και υπό περιπτώσεις αυξάνεται το μέγεθος.

Σε όλες τις περιπτώσεις η προσομοίωση έδωσε μεγαλύτερη τιμή του P_{max} σε σχέση με το πειραματικό δοκίμιο. Σε αυτό συντελεί και ο τρόπος μοντελοποίησης των οριακών συνθηκών. Η βράχυνση των πειραματικών δοκιμών έγινε με ταχύτητα 20mm/min δηλαδή είχε διάρκεια 1500 sec = 150000 msec. Στο υπολογιστικό μοντέλο έγινε η παραδοχή ότι επαρκεί χρόνος 1.5 sec = 1500 msec για να εξαλειφθούν τα δυναμικά φαινόμενα της διαδικασίας και να θεωρηθεί στατικό θλιπτικό φορτίο. Ο σκοπός είναι η μείωση του υπολογιστικού χρόνου επίλυσης με μικρή απώλεια στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αυτή η διαφοροποίηση αποτυπώνεται στο μέγιστο φορτίο. Στην περίπτωση των δοκιμών με αφρό συμβάλλει επίσης το υλικό και ο τρόπος που προσομοιώθηκε. Τα αφρώδη υλικά γενικότερα δεν παρουσιάζουν απόλυτη ομοιογένεια και πλήρη πρόβλεψη της συμπεριφοράς σε διάφορες συνθήκες φόρτισης. Ο αφρός που χρησιμοποιήθηκε είναι σκληρός πολουρεθανικός αφρός υψηλής πυκνότητας με κλειστές κυψελίδες. Το υλικό του μοντέλου είναι crushable foam που δεν δύναται να προσεγγίσει απόλυτα τον πραγματικό αφρό.

Ένας αντίστοιχος δείκτης με την απορροφώμενη ενέργεια για την αξιολόγηση της ικανότητας της κατασκευής για χρήση ως σύστημα απορρόφησης ενέργειας, είναι το μέσο φορτίο στο σύνολο της διαδικασίας κατάρρευσης.



Σχήμα 8.4: Διάγραμμα μέσου φορτίου κατάρρευσης

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω αναφέρονται οι ακόλουθες τελικές παρατηρήσεις επί της διπλωματικής εργασίας. Ο μηχανισμός κατάρρευσης των δοκιμίων ομαλοποιείται και προσεγγίζει το θεωρητικό μοντέλο ύστερα από την εσωτερική ενίσχυση με πολουρεθανικό αφρό. Κατά την παραμόρφωση, ο πολυμερικός αφρός απορροφά ελαστοπλαστικά την κινητική ενέργεια της πλάκας, γεγονός που προκαλεί την επαναφορά που εμφανίζει κατά την απομάκρυνση από την πρέσσα.

Τα δοκίμια που ακολούθησαν προοδευτική κατάρρευση με διαδοχικό σχηματισμό λοβών εμφανίζουν αποδοτικότερα αποτελέσματα. Σε αυτό συνηγορεί και η σημαντική αύξηση της απορροφώμενης ενέργειας των δοκιμίων double-hat διατομής με ενίσχυση αφρού, που τις μετατρέπει σε υψηλής απόδοσης για χρήση. Από τις αποδοτικότερες διατομές, αν συνυπολογιστεί και το βάρος της κατασκευής, προέκυψε ότι είναι η έκτη και η ένατη με ημικυκλική και πενταγωνική μορφή αντίστοιχα. Αξιοσημείωτη παράμετρος είναι και το μέγιστο φορτίο κατά την έναρξη της κατάρρευσης. Σε αυτό τον τομέα καλύτερη συμπεριφορά εμφάνισε το δοκίμιο 9 έναντι του ημικυκλικού (δοκίμιο 6) και των double-hat μεταβλητού μήκους φλάντζας (δοκίμια 1-3).

Η ικανότητα του μοντέλου προσομοίωσης να προσεγγίσει τα πειραματικά αποτελέσματα κρίνεται ως ένα βαθμό ικανοποιητική. Οι αποκλίσεις που εμφανίστηκαν πιθανών να οφείλονται στους ακόλουθους παράγοντες:

- Ατέλειες του πειραματικού δοκιμίου που δεν συμπεριλαμβάνονται στο υπολογιστικό μοντέλο. Παραδείγματα είναι η ανομοιομορφία του υλικού, διαστασιολογικές και γεωμετρικές ανοχές κατά την κατασκευή, η απόκλιση παραλληλότητας των πλακών της πρέσσας, η ολίσθηση των ελασμάτων μεταξύ τους κατά τη συγκόλληση.
- Παραδοχές μεταβλητών υπολογιστικού μοντέλου. Τέτοιες είναι οι συνθήκες τριβής ανάμεσα στις επιφάνειες επαφής, η πλεγματοποίηση δοκιμίου, η χρήση στοιχείων κελύφους για τη μείωση του υπολογιστικού κόστους, η μοντελοποίηση τοπικών συγκολλήσεων και η αδυναμία μοντελοποίησης αστοχίας αυτών. Σημαντική παράμετρος που συνέβαλε στην αύξηση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης είναι η διάρκεια της συμπίεσης του μοντέλου, όπου επιλέχθηκε 100 φορές μικρότερη από τον πειραματικό χρόνο.
- Δυσκολία προσδιορισμού της διαδικασίας παραγωγής πολουρεθανικού αφρού. Η διαδικασία παραγωγής του αφρού στο εσωτερικό των δοκιμίων είναι δυναμικό φαινόμενο και εξαρτάται από πολλές παραμέτρους που καθιστούν τη μοντελοποίηση ακόμη δυσκολότερη. Η τελική πυκνότητα του αφρού μπορεί να διαφέρει σε κάθε δοκίμιο λόγω του ασκούμενου βάρους κατά την παραγωγή. Επιπλέον, ο αφρός που χρησιμοποιήθηκε είναι κλειστών κυψελίδων και στο αποτέλεσμα που προέκυψε δεν γνωρίζουμε την αναλογία ανοιχτών-κλειστών κυψελίδων.

- Μοντελοποίηση πολυμερικού αφρού. Οι ιδιότητες του υλικού του αφρού όπως εισήχθησαν στον κώδικα προέκυψαν βάσει θεωρητικών τιμών σε βιβλιογραφικές αναφορές. Απλοποίηση έγινε και στη γεωμετρία του αφρού όπου παραλήφθηκε η καμπυλότητα των γωνιών για ευκολότερη πλεγματοποίηση. Επιπροσθέτως, ο τρόπος μοντελοποίησης της διεπαφής ελάσματος – αφρού δεν επιτρέπει μεταξύ τους ολίσθηση, γεγονός που αντιτίθεται στην πραγματική διαδικασία. Σημαντικός παράγοντας είναι το υλικό που προσέγγισε τον αφρό. Η βιβλιοθήκη του LS-DYNA διαθέτει πληθώρα μοντέλων για την προσέγγιση αφρού διαφορετικών ιδιοτήτων οπότε η ορθή επιλογή είναι κομβικό βήμα για τον σχεδιαστή.

Σύμφωνα, με αυτές τις παραδοχές θεωρήσαμε ότι δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό το μοντέλο προσομοίωσης ώστε να προκύψουν αναξιόπιστα αποτελέσματα. Άλλωστε, επιδίωξη σε ένα μοντέλο προσομοίωσης είναι τα αξιόπιστα συμπεράσματα σε σύντομο χρονικό διάστημα και με χαμηλό κόστος, στοιχεία εκ διαμέτρου αντίθετα μεταξύ τους. Άρα, για να αυξηθεί η ταχύτητα επίλυσης θα πρέπει να γίνονται παραδοχές και απλοποιήσεις από τις ιδανικές συνθήκες και να επιδιώκεται η ορθότερη πλεγματοποίηση σταθμίζοντας την ταχύτητα επίλυσης και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Κατά την ανάλυση των πειραμάτων προέκυψε η αποδοτικότερη συμπεριφορά ορισμένων διατομών. Οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται οι κατασκευές λεπτότοιχων διατομών είναι πιο πολύπλοκες και δεν υπόκεινται απλώς σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Τα φορτία που δέχονται είναι στην πλειοψηφία τους δυναμικά ενώ η κατάρρευση επηρεάζεται και από τα γειτονικά στοιχεία του συνόλου της κατασκευής. Γι' αυτό το λόγο προτείνεται εκτενέστερη ανάλυση των συγκεκριμένων διατομών που παρουσιάστηκαν στη διπλωματική εργασία ως προς άλλες συνθήκες φόρτισης ώστε να μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για κάποια συγκεκριμένη μορφή. Επίσης, ως μελλοντική προέκταση προτείνεται η βελτίωση του υπολογιστικού μοντέλου κυρίως όσο αφορά τον πολυμερικό αφρό. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η μοντελοποίηση του υλικού και με άλλους τρόπους από τη βιβλιοθήκη υλικών του κώδικα LS-DYNA καθώς και βελτίωση των συνθηκών διεπαφής μεταξύ μεταλλικού ελάσματος και αφρού.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abramowicz W, Jones N. Dynamic axial crushing of circular tubes. *Int J of Impact Engineering* 1984;2(3):263-81.
2. Abramowicz W, Jones N. Dynamic axial crushing of square tubes. *Int J of Impact Engineering* 1984;2(2):179–208.
3. Abramowicz W, Jones N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *Int J Impact Eng* 1986;4(4):243–70.
4. Abramowicz W. Thin-walled structures as impact energy absorbers. *Thin-Walled Structures* 2003;41:91–107.
5. Alexander JM. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *Quartely Journal of Mechanics and Applied Mathematics* 1960;13:10-15.
6. Ambrósio JAC. *Crashworthiness: energy management and occupant protection*. Springer Wien New York 2001.
7. Ashida K. *Polyurethane and related foams: Chemistry and technology*. Taylor & Francis Group 2007.
8. Avalle M, Belingardi G, Montanini R. Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. *Int J of Impact Engineering* 2001;25:455-72.
9. Bammann DJ, Chiesa ML, Horstemeyer MF, Weingarten LI. Structural crashworthiness and failure: Failure in ductile materials using finite element methods, Chap. 1, eds. N. Jones and T. Wierzbicki. Elsevier Applied Science, London 1993.
10. Cha CS, Chung JO, et al. Collapse analysis of spot welded thin section members in a vehicle body structure at various impact velocities. *KSME int J* 2003;17(4):501-10.
11. Du Bois P et al. *Vehicle crashworthiness and occupant protection*. American Iron and Steel Institute 2004.
12. Eaves D. *Handbook of Polymer Foams*. Rapra Technology Limited 2004.
13. Ezra AA, Fay RJ. An assessment of energy absorbing devices for prospective use in aircraft impact situations. In: Herrmann G, Perrone N, editors. *Dynamic response of structures*. New York: Pergamon Press; 1972. p. 225–46.
14. Franchini E. *The crash survival space*. SAE technical paper series, SAE 690005, New York, USA 1969.

15. Fyllingen O, Hopperstad OS, Langseth M. Simulations of a top-hat section subjected to axial crushing taking into account material and geometry variations. *Int J of Solids and Structures* 2008;45:6205–6219.
16. Godoy LA. *Thin-walled structures with structural imperfections: analysis and behavior*. Elsevier Science Ltd 1996.
17. Goods SH, et al. *Mechanical properties and energy absorption characteristics of a polyurethane foam*. Unlimited distribution 1997.
18. Gumruk R, Karadeniz S. A numerical study of the influence of bump type triggers on the axial crushing of top hat thin-walled sections. *Thin-Walled Structures* 2008;46:1094–1106.
19. Hsu SS, Jones N. Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminium alloy tubes. *Int J of Crashworthiness* 2004;9(2):195–217.
20. Johnson W, *Impact Strength of Materials*. Edward Arnold Publishers 1972.
21. Johnson W, Mamalis AG. *Crashworthiness of vehicles*. London: Mechanical Engineering Publications Ltd, 1978.
22. Jones N. Energy absorption effectiveness of thin-walled structures under static and dynamic axial crushing loads. In: Alves M, Jones N, editors. *Impact loading of lightweight structures*. Southampton and Boston: WIT Press. *WIT Transactions on Engineering Sciences* 2005;49:273–87.
23. Jones N. Energy-absorbing effectiveness factor. *Int J of Impact Engineering* 2010;37:754-65
24. Jones N. *Structural impact*. Paperback ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 1997.
25. Klempner D, et al. *Handbook of polymeric foams and foam technology*. New York: Oxford University Press; 1991.
26. Landrock AH. *Handbook of plastic foams: Types, properties, manufacture and applications*. Noyes Publications 1995.
27. Langseth M, Hopperstad OS, Berstad T. Crashworthiness of aluminium extrusions: Validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity. *International Journal of Impact Engineering* 1999;22 (9–10):829–54.
28. Lee ST, Park CB, Ramesh NS. *Polymeric foams: Science and technology*. Taylor & Francis Group 2007.
29. Lee ST, Ramesh NS, *Polymeric foams: Mechanisms and materials*. CRC Press 2004.

30. Lee ST, Randall D. The polyurethanes book. Huntsman International LLC 2002.
31. Love AEH. A treatise on the mathematical theory of elasticity. Dover Publications 1944.
32. LS-DYNA theory manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California, 2006.
33. LS-DYNA version 970 keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California 1998.
34. Lu G, Yu T. Energy absorption of structures and materials. Woodhead Publishing Limited 2003.
35. Mackay GM. The increasing importance of the biomechanics of impact trauma. *Sadhana* 2007;32:397-408.
36. Magee CL, Thornton PH. Design considerations in energy absorption by structural collapse. SAE Paper 780434 1978.
37. Mamalis AG, Manolakos DE, Demosthenous GA, Ioannidis MB. Crashworthiness of composite thin-walled structural components. Lancaster: Technomic Publishing Co. 1998.
38. Mamalis AG, Manolakos DE, Kostazos PK, Dimitriou C. Finite element simulation of the axial collapse of metallic thin-walled tubes with octagonal cross-section. *Thin-Walled Structures* 2003;41:891–900.
39. Mills NJ, Zhu HX. The high strain compression of closed-cell polymer foams. *J of the Mechanics and Physics of Solids* 1999;47:669-95.
40. Mills NJ. Polymer foams handbook: engineering and biomechanics applications and design guide. Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd 2007.
41. Murray NW. Load behaviour of thin-walled spot welded structures used in the vehicle industry. *Engineering Structures* 1994;16(5).
42. Ostrogorsky AG, Glicksman LR, Reitz DW. Aging of polyurethane foams. *Int. J. Heat Mass Transfer* 1986;29:1169-1176.
43. Philips PJ, Waterman NR. The mechanical properties of high-density rigid polyurethane foams in compression: I. Modulus. *Polymer Eng and Sci* 1974;14(1).
44. Rinde JA. Poisson's ratio for rigid plastic Foams. *J of applied polymer Sci* 1970;14:1913-26.

45. Saint-Michel F, et al. Mechanical properties of high density polyurethane foams: I. Effect of the density. *Composites Sci and Tech* 2006;66:2700-08.
46. Schneider F, Jones N. Impact of thin-walled high-strength steel structural sections. *Proc Inst Mech Eng J Automob Eng* 2004;218(Part D):131–58.
47. Schneider F, Jones N. Influence of spot-weld failure on crushing of thin-walled structural sections. *Int J Mech Sci* 2003;45(12):2061–81.
48. Schneider F, Jones N. Observations on the design and modelling of some joined thin-walled structural sections. *Thin-Walled Structures* 2008;46:887-97.
49. Shanahan F. Basic principles of helicopter crashworthiness. RTO-EN-HFM-113, 2004.
50. Shanmugam NE, Richard Liew JY, et al. Thin-walled structures: research and development. 2nd Int Conf on thin-walled structures 1998.
51. Tarigopula V, Langseth M, Hopperstad OS, Clausen AH. Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections. *Int J of Impact Engineering* 2006;32:847–82.
52. Thornton PH, Dharan CKH. The dynamics of structural collapse. *Materials Science and Engineering* 1975;18 (1):97-120.
53. Thornton PH, Mahmood HF, Magee CL. Energy absorption by structural collapse. *Structural crashworthiness*, ed. Jones N and Wierzbicki T, Butterworths, London 1983;96-117.
54. Thornton PH. Energy absorption by the structural collapse of spot-welded sheet metal sections. SAE Paper 800372, 1980.
55. Tu ZH, Shim VPW, Lim CT. Plastic deformation modes in rigid polyurethane foam under static loading. *Int J of Solids and Structures* 2001;38:9267-79.
56. Wang Q, Fan Z, Gui L. Theoretical analysis for axial crushing behaviour of aluminium foam-filled hat sections. *Int J of Mechanical Sciences* 2007;49:515–21.
57. Wang Q, Fan Z, Song H, Gui L. Experimental and numerical analyses of the axial crushing behaviour of hat sections partially filled with aluminium foam, *Int J of Crashworthiness* 2005;10:535-43.
58. White MD, Jones N, Abramowicz W. A theoretical analysis for the quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections. *Int J of Mechanical Science* 1999;41:209–33.
59. White MD, Jones N. Experimental quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections. *Int J Mech Sci* 1999;41:179–208.

60. Wierzbicki T, Abramowicz W. On the crushing mechanics of thin walled structures. *J Appl Mech* 1983;50(4):727–34.
61. Wong HF, Rhodes J, Zaras J, Ujihashi S. Experimental investigation of static progressive crushing of closed-hat section members. In: Gupta NK, editor. *Plasticity and impact mechanics*, New Age International Ltd 1997:250-72.
62. Xiang Y, Wang Q, Fan Z, Fang H. Optimal crashworthiness design of a spot-welded thin-walled hat section. *Finite Elements in Analysis and Design* 2006;42:846–55.

