



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ TRIGGERING ΣΤΗΝ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ
ΕΝΑΝΤΙ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ:
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

ΤΣΕΛΑ ENTMONT

Επιβλέπων Καθηγητής: Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

Αθήνα
Σεπτέμβριος 2020

Πρόλογος

Σκοπός της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης μηχανισμών triggering στην συμπεριφορά λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκαν λεπτότοιχοι κυλινδρικοί σωλήνες κράματος αλουμινίου 6063-F25 (σειράς 6000) σε αξονική κρουστική καταπόνηση τόσο μέσω διεξαγωγής πειραματικών δοκιμών υπό ημι-στατικές συνθήκες, όσο και μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA. Εξετάστηκαν συνολικά τρία δοκίμια λεπτότοιχων σωλήνων διαφορετικών διαστάσεων (μήκους, διαμέτρου και πάχους τοιχώματος) ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή τους τόσο στα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς τους κατά την κρούση, όσο και στον παρατηρούμενο μηχανισμό αξονικής κατάρρευσης. Επίσης, για την έγκυρη διεξαγωγή συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων, τα δοκίμια εξετάστηκαν σε αξονική συμπίεση με και χωρίς την παρουσία μηχανισμών triggering ώστε να προσφερθούν οι κατάλληλες συγκρίσεις των αποτελεσμάτων. Πρόσθετα, διαφορετικοί μηχανισμοί triggering τόσο σε γεωμετρία όσο και σε διαστάσεις εξετάστηκαν ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση και η αποτελεσματικότητά τους. Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών και των αριθμητικών προσομοιώσεων συγκρίθηκαν τόσο προς επικύρωση των παραγόμενων μοντέλων στο LS-DYNA, όσο και προς εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με την επίδραση των μηχανισμών triggering στην συμπεριφορά των δοκιμίων έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης. Η επίδραση των μηχανισμών triggering αξιολογήθηκε ως προς τον επιρροή τους στον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης των δοκιμίων και στα χαρακτηριστικά της απόκρισης κατά την αξονική συμπίεση λαμβάνοντας υπόψιν τα φορτία κατάρρευσης και την απορροφώμενη ενέργεια της κρούσης.

Οι πειραματικές δοκιμές διεξήχθησαν υπό ημι-στατικές συνθήκες φόρτισης όπως επέβαλλε ο υπάρχων εξοπλισμός του εργαστηρίου, επιλέγοντας ταχύτητα συμπίεσης 20 mm/min για τα εξεταζόμενα δοκίμια. Η τυπική εξεταζόμενη διάταξη αποτελούνταν σε κάθε περίπτωση από δυο πλάκες, εκ των οποίων η κάτω ήταν ακλόνητη ενώ η πάνω κινούμενη από την κεφαλή της πρέσσας ώστε να προκαλεί τη συμπίεση του δοκιμίου. Στις εξεταζόμενες μάλιστα διατάξεις με την παρουσία μηχανισμού triggering, ο τελευταίος παρεμβαλλόταν μεταξύ κάτω πλάκας και κυλινδρικού δοκιμίου. Κατά την πειραματική διαδικασία, καταγράφηκαν κατάλληλα στιγμιότυπα της αξονικής κατάρρευσης μέσω φωτογραφικού εξοπλισμού, καθώς και μετρήσεις επιβαλλόμενης δύναμης και μετατοπίσεων από αισθητήρες, η καταγραφή των οποίων έγινε από κατάλληλο λογισμικό προς εξαγωγή των πειραματικών διαγραμμάτων δύναμης-μετατόπισης.

Αναφορικά με τις αριθμητικές προσομοιώσεις, αυτές διεξήχθησαν έπειτα από την δημιουργία των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό LS-DYNA. Τα μοντέλα των κυλινδρικών δοκιμίων δημιουργήθηκαν με διδιάστατα επίπεδα πεπερασμένα στοιχεία, καθώς κρίθηκαν καταλληλότερα τόσο ως προς το χρόνο προσομοίωσης, όσο και ως προς την ακρίβειά τους δεδομένου των

λεπτότοιχων διατάξεων που κρίθηκαν να προσομοιώσουν. Για τις προσομοιώσεις επιλέχθηκε ταχύτητα συμπίεσης 1 mm/ms ως πιο αντιπροσωπευτική των πραγματικών συνθηκών κρούσης.

Τέλος, τα πειραματικά αποτελέσματα εμφάνισαν ικανοποιητική ποιοτική και ποσοτική τάνυση με αυτά των προσομοιώσεων στις περισσότερες περιπτώσεις, καθώς οι τελευταίες προέβλεψαν στην πλειοψηφία τους ορθά τόσο τον μηχανισμό κατάρρευσης όσο και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι της αξονικής κρούσης. Παρατηρήθηκε δε απόσχιση των δοκιμίων στα σημεία επαφής με τους μηχανισμούς triggering όταν αυτοί αποτελούνταν από λεπτότοιχα τοιχώματα, ενώ η επίδραση των μηχανισμών triggering ήταν εμφανής στην μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης και στην επιβολή ανάλογου μηχανισμού κατάρρευσης σύμφωνα με την γεωμετρική τους μορφή.

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω βαθύτατα τις θερμές μου ευχαριστίες στο πρόσωπο του επιβλέποντα καθηγητή κ. Δ. Μανωλάκου για την εμπιστοσύνη του στην ανάδειξη ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, καθώς και για την συνεχή υποστήριξη και καθοδήγησή του στη διάρκεια της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Δρ. Π. Κωστάζο για την συνεχή βοήθεια και καθοδήγησή του σε θέματα χρήσης του λογισμικού LS-DYNA κατά την ανάπτυξη των μοντέλων των αριθμητικών προσομοιώσεων, ενώ θα ήθελα παράλληλα να ευχαριστήσω το τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου για την πολύτιμη βοήθειά του στην παραγωγή των δοκιμίων και τις πειραματικές δοκιμές.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πολύτιμη και διαρκή στήριξη που μου παρείχαν από την αρχή των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή στο σχεδιασμό έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης.....	1
1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας.....	3
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	3
2. Μηχανική Συμπεριφορά έναντι Αξονικής Κρουστικής Καταπόνησης.....	5
2.1 Χαρακτηριστικά απόκρισης έναντι αξονικής κρούσης.....	5
2.2 Μηχανισμοί Κατάρρευσης	9
2.3 Δοκιμές Κρούσης	15
2.4 Σύντομη Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	15
2.5 Αναλυτική έκφραση μέσου φορτίου κατάρρευσης.....	18
3. Πειραματικές Δοκιμές	22
3.1 Εισαγωγή	22
3.2 Πειραματικός Εξοπλισμός.....	22
3.3 Εξεταζόμενα Δοκίμια	23
3.4 Εξεταζόμενοι Μηχανισμοί Triggering	24
3.4.1 Μηχανισμοί Triggering S1,S2,S3,S4	24
3.4.2 Μηχανισμοί Triggering T1,T2	25
3.4.3 Μηχανισμοί Triggering V1,V2	26
3.4.4 Μηχανισμός Triggering U1	27
3.5 Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών.....	27
3.5.1 Πείραμα 1	28
3.5.2 Πείραμα 2-1	30
3.5.3 Πείραμα 2-2	32
3.5.4 Πείραμα 2-3	34
3.5.5 Πείραμα 2-4	36
3.5.6 Πείραμα 3-1	38
3.5.7 Πείραμα 3-2	40
3.5.8 Πείραμα 4.....	42
3.5.9 Πείραμα 4-1-α.....	44
3.5.10 Πείραμα 4-2-α.....	46
3.5.11 Πείραμα 4-2.....	48
3.5.12 Πείραμα 4-3-α.....	50
3.5.13 Πείραμα 5	51

3.5.14	Πείραμα 5-1	53
3.5.15	Πείραμα 5-2	54
3.6	Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων	56
4.	Μοντελοποίηση Πεπερασμένων Στοιχείων και Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	59
4.1	Εισαγωγή	59
4.2	Διαδικασία Μοντελοποίησης	61
4.2.1	Προσδιορισμός γεωμετρίας	61
4.2.2	Γέννηση πλέγματος	62
4.2.3	Καθορισμός υλικών	62
4.2.4	Οριακές συνθήκες διεπιφανειών	64
4.2.5	Χαρακτηριστικά φόρτισης	64
4.3	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	65
4.3.1	Προσομοίωση πειράματος 1	65
4.3.2	Προσομοίωση πειράματος 2-1	66
4.3.3	Προσομοίωση πειράματος 2-2	68
4.3.4	Προσομοίωση πειράματος 2-3	70
4.3.5	Προσομοίωση πειράματος 2-4	72
4.3.6	Προσομοίωση πειράματος 3-1	74
4.3.7	Προσομοίωση πειράματος 3-2	77
4.3.8	Προσομοίωση πειράματος 4	79
4.3.9	Προσομοίωση πειράματος 4-1-α	81
4.3.10	Προσομοίωση πειράματος 4-2	83
4.3.11	Προσομοίωση πειράματος 4-2-α	85
4.3.12	Προσομοίωση πειράματος 4-3-α	87
4.3.13	Προσομοίωση πειράματος 5	89
4.3.14	Προσομοίωση πειράματος 5-1	91
4.3.15	Προσομοίωση πειράματος 5-2	93
4.4	Συγκρίσεις Αριθμητικών και Πειραματικών Αποτελεσμάτων	95
5.	Σύνοψη και Συμπεράσματα	100
5.1	Σύνοψη	100
5.2	Συμπεράσματα	101
6.	Βιβλιογραφία	103

1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στο σχεδιασμό έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης

Οι σύγχρονες σχεδιαστικές τάσεις συχνά περιορίζονται σήμερα από αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας οι οποίες αποσκοπούν στην μείωση της επίδρασης που επιφέρει η κρούση στη συγκρότηση/δομή μια κατασκευής, ιδίως μάλιστα όταν πρόκειται για κατασκευή μεταφοράς επιβατών, όπου το κριτήριο πλέον αποτελεί η ελαχιστοποίηση της επίδρασης της κρούσης στους επιβάτες. Ο σχεδιασμός μάλιστα έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης αποσκοπεί στην επιβολή ενός ελεγχόμενου μηχανισμού κατάρρευσης κατά τον οποίο η συμπιεζόμενη κατασκευή θα απορροφά τα μέγιστα δυνατά ποσά της ενέργειας της κρούσης. Η απορρόφηση της ενέργειας της κρούσης αποτελεί ένα από τα κυριότερα επιθυμητά χαρακτηριστικά μιας τέτοιας κατασκευής, καθώς η σημαντική μεταβολή της κινητικής ενέργειας σε μία κρούση πλέον μετατρέπεται σε έργο εσωτερικής παραμόρφωσης προς την πλαστικοποίηση της διατομής αντί να μεταφέρεται στην δομή της κατασκευής και στους πιθανούς επιβάτες. Ωστόσο, η σημασία της ελεγχόμενης κατάρρευσης είναι ιδιαίτερα κρίσιμη καθώς αυτή επηρεάζει σημαντικά τη δυνατότητα μιας κατασκευής για απορρόφηση κρουστικής ενέργειας, αλλά και λόγω περιορισμών που θέτονται στις μεταφερόμενες δυνάμεις, στις επιβαλλόμενες μετατοπίσεις ή ακόμη και σε ανεπιθύμητες αστοχίες μελών της κατασκευής.

Πιο συγκεκριμένα, περιορισμοί αναφορικά με μικρές επιτρεπόμενες μετατοπίσεις επιφέρουν τεράστια μεταφερόμενα φορτία προς τους επιβάτες κατά την κρούση προσφέροντας χαμηλά επίπεδα απορρόφησης της ενέργειας της κρούσης. Απεναντίας, πολύ μεγάλες μετατοπίσεις επιτρέπουν μεν υψηλά ποσοστά απορροφώμενης ενέργειας, ωστόσο δεν είναι συχνά επιθυμητές καθώς επιφέρουν πολύ μικρό όγκο της τελικά συμπιεσμένης κατασκευής αφήνοντας ενδεχομένως πολύ μικρό χώρο για τον ασφαλή απεγκλωβισμό των επιβατών.

Ως εκ τούτου, οι θεσπισμένοι κανονισμοί ασφαλείας και διάφοροι εμπειρικοί κανόνες από παρελθόντα ή πρόσφατα συμβάντα, είναι αυτοί οι οποίοι θέτουν τις αντίστοιχες προδιαγραφές σχεδιασμού έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης. Επομένως, τα κριτήρια σχεδιασμού έναντι κρουστικής καταπόνησης αποσκοπούν στην επίτευξη των παρακάτω στόχων:

- Αύξηση της απορρόφησης ενέργειας κατά την κρούση, η οποία επιτυγχάνεται με την επιβολή πλαστικών παραμορφώσεων όπου πλέον η κινητική ενέργεια της κρούσης δαπανάται στην πλαστικοποίηση της κατασκευής (έργο παραμόρφωσης) χωρίς να μεταβαίνετε στους επιβάτες.
- Μείωση της επίδρασης της κρούσης στους επιβάτες, ώστε να αποφεύγονται θανάσιμοι ή μη τραυματισμοί

- Διατήρηση ικανοποιητικής δομής της κατασκευής κατόπιν της κρούσης, π.χ. σε επίπεδο μέγιστων επιτρεπτών παραμορφώσεων ή ελάχιστου αναγκαίου απαιτούμενου όγκου/χώρου κλπ.
- Περιορισμός των μεταβιβαζόμενων δυνάμεων προς τους επιβάτες, καθώς η απορρόφηση αυτών από τη δομή της κατασκευής θα τις εξουδετερώσει δαπανώντας τις στην πλαστική παραμόρφωσή της.
- Διατήρηση ασφαλούς και επαρκούς όγκου της κατασκευής, ώστε π.χ. να εξασφαλίζεται η ασφαλής έξοδος των επιβατών.

Η επίτευξη όλων των παραπάνω προδιαγραφών είναι επιθυμητό να συνδυάζεται με μια ελεγχόμενη και προοδευτική κατάρρευση της κατασκευής κατά την κρούση. Οι συσκευές/εξαρτήματα που σχεδιάζονται έναντι κρουστικής καταπόνησης ώστε να απορροφούν την ενέργεια της κρούσης ονομάζονται απορροφητές ενέργειας. Οι τελευταίοι κατασκευάζονται συνήθως από μέταλλα (χάλυβας, αλουμίνιο κ.ά.), πολυμερή, σύνθετα υλικά ή τέλος δι-στρωματικά υλικά, καθώς τέτοια υλικά επιτρέπουν την εκτενή πλαστικοποίησή τους δίνοντας την ικανότητα για απορρόφηση υψηλών ποσών κρουστικής ενέργειας.

Ιδιαίτερη χρήση μάλιστα έχουν αποκτήσει οι λεπτότοιχες δομές οι οποίες συνδυάζουν αυξημένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας υπό χαμηλό μάλιστα βάρος. Συγκριτικά δε με τις συμπαγείς κατασκευές, οι λεπτότοιχες είναι μεν ελαφρύτερες λόγω μικρότερης διατομής, ενώ παρουσιάζουν δε αυξημένη ικανότητα απορρόφησης της κινητικής ενέργειας της κρούσης καθώς η πλαστικοποίηση της λεπτότοιχης διατομής είναι πιο εφικτή από της συμπαγούς, γεγονός που σημαίνει αυξημένο εσωτερικό έργο παραμορφώσεων και άρα απορρόφηση κρουστικής ενέργειας. Η πιο εύκολη πλαστικοποίηση των λεπτότοιχων διατομών οφείλεται στο χαμηλότερο μέγιστο φορτίο κατάρρευσης που απαιτείται ώστε να επιφέρει πλαστικές παραμορφώσεις, γεγονός αναγκαίο για την απορρόφηση ποσών κρουστικής ενέργειας.

Στην ίδια κατεύθυνση κατά τον σχεδιασμό απορροφητών ενέργειας συμπεριλαμβάνεται και η προσθήκη μηχανισμών triggering στη βάση τους. Τέτοιοι μηχανισμοί διαμορφώνουν συχνά την αρχική παραμόρφωση των άκρων διατάξεων απορρόφησης ενέργειας επιβάλλοντας τον επιθυμητό μηχανισμό κατάρρευσης ανάλογα με το γεωμετρικό τους σχήμα. Ως εκ τούτου, διατάξεις που αρχικά αναμένονταν να καταρρεύσουν υπό μηχανισμούς που προσφέρουν χαμηλά επίπεδα απορροφώμενης ενέργειας, μπορούν μέσω κατάλληλων μηχανισμών triggering να καταρρεύσουν υπό διαφορετικό μηχανισμό, αφενός μεν πιο ελεγχόμενο και προοδευτικό, αφετέρου δε υψηλότερης δυνατότητας προς πλαστικοποίηση της διατομής και απορρόφησης κρουστικής ενέργειας. Επιπροσθέτως όμως, η προσθήκη μηχανισμών triggering αποσκοπεί επίσης στην μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης καθιστώντας πιο ευνοϊκή την πλαστικοποίηση της διατομής, καθώς συχνά τμήματα των διατάξεων αποσπάζονται στην διεπαφή τους με τους μηχανισμούς triggering μειώνοντας έτσι την ενεργό διατομή επιβολής του κρουστικού φορτίου.

Με στόχο λοιπόν τον έγκυρο και ακριβή σχεδιασμό διατάξεων απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, η σύγχρονη σχεδιαστική και ερευνητική δραστηριότητα αποσκοπεί στην αξιολόγηση κατασκευών ως προς την

ικανότητα απορρόφησης ενέργειας υπό ελεγχόμενη κατάρρευση τόσο διεξάγοντας πειραματικές δοκιμές όσο και εκτελώντας αριθμητικές προσομοιώσεις σε κατάλληλα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων. Αμφότερες οι προσεγγίσεις στοχεύουν στην επικύρωση της εγκυρότητας και της ακρίβειας αριθμητικών μοντέλων, αλλά και στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων που αποσκοπούν στο βέλτιστο σχεδιασμό έναντι κρουστικής καταπόνησης.

1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης μηχανισμών triggering στην συμπεριφορά λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων κράματος αλουμινίου 6063-F25 (σειράς 6000) έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης. Για το σκοπό αυτό διεξήχθησαν τόσο πειραματικές δοκιμές υπό ημι-στατικές συνθήκες, όσο και αριθμητικές προσομοιώσεις στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αξιολογήθηκαν αφενός για την επικύρωση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκαν, όσο και για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων περί της επίδρασης των μηχανισμών triggering στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Για το λόγο αυτό, εξετάστηκαν συνολικά τρία δοκίμια λεπτότοιχων σωλήνων διαφορετικών διαστάσεων (μήκους, διαμέτρου και πάχους τοιχώματος) ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή τους τόσο στα χαρακτηριστικά της απόκρισης κατά την κρούση, όσο και στον παρατηρούμενο μηχανισμό αξονικής κατάρρευσης. Τα δοκίμια εξετάστηκαν σε αξονική συμπίεση με και χωρίς την παρουσία μηχανισμών triggering ώστε να προσφερθούν οι κατάλληλες συγκρίσεις των αποτελεσμάτων. Τέλος, διαφορετικοί μηχανισμοί triggering τόσο σε γεωμετρία όσο και σε διαστάσεις εξετάστηκαν ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση και η αποτελεσματικότητά τους.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Στο παρόν 1^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, παρουσιάζεται αρχικά μία σύντομη εισαγωγική περιγραφή της φιλοσοφίας σχεδιασμού έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης, των αναγκών που την επιβάλλουν και των προδιαγραφών που καλείται αυτή να ικανοποιεί. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας παρατίθεται στη συνέχεια, συνοδευόμενη από μια σύντομη παρουσίαση της διάρθρωσής της.

Εν συνεχεία, στο 2^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια πιο εκτενής περιγραφή των χαρακτηριστικών της μηχανικής συμπεριφοράς και απόκρισης μια κατασκευής έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης καθώς και των εμφανιζόμενων μηχανισμών κατάρρευσης. Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη, όπως το μέγιστο και το μέσο φορτίο κατάρρευσης αλλά και η απορροφώμενη ενέργεια της κρούσης εισάγονται, όπως και η επίδραση διαφόρων παραγόντων επί αυτών με ιδιαίτερη έμφαση στην επίδραση που επιφέρουν οι μηχανισμοί

triggering. Τέλος, παραθέεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση προηγούμενων ερευνητικών δραστηριοτήτων σχετικών με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Το 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζει αρχικά τα εξεταζόμενα δοκίμια και τη διαδικασία παραγωγής τους, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται οι διατάξεις που μελετήθηκαν παραθέτοντας τα απαραίτητα στοιχεία των εξεταζόμενων μηχανισμών triggering, όπως γεωμετρία και διαστάσεις. Τέλος, εφόσον περιγραφεί η πειραματική διάταξη και η συνθήκες διεξαγωγής των δοκιμών, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα αναφορικά τόσο με των παρατηρούμενο μηχανισμό κατάρρευσης όσο και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι της κρούσης.

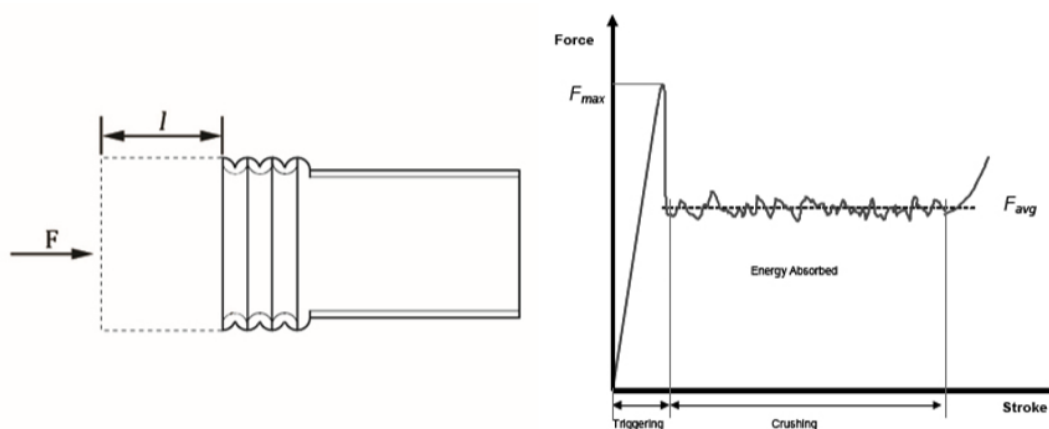
Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφει τη διαδικασία ανάπτυξης των μοντέλων στο λογισμικό LS-DYNA. Έπειτα, ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων όπως αυτά προέκυψαν από τις αριθμητικές προσομοιώσεις, ενώ επίσης παρουσιάζονται εν συνεχεία και οι σχετικές συγκρίσεις πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων προς επικύρωση των μοντέλων και εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων περί της επίδρασης των μηχανισμών triggering στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και την βελτίωση της συμπεριφοράς έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης.

Τέλος, το 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζει μια σύντομη σύνοψη της διπλωματικής εργασίας αναφορικά με το σκοπό της και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια των πειραμάτων και των αριθμητικών προσομοιώσεων. Έπειτα, παραθέτονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την αξιολόγηση των πειραματικών και των αριθμητικών αποτελεσμάτων σχετικά με την επίδραση των μηχανισμών triggering στην συμπεριφορά έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης, ενώ τέλος προτείνονται κατευθύνσεις προς μελλοντική διερεύνηση.

2. Μηχανική Συμπεριφορά έναντι Αξονικής Κρουστικής Καταπόνησης

2.1 Χαρακτηριστικά απόκρισης έναντι αξονικής κρούσης

Ο σχεδιασμός κατασκευών έναντι κρουστικής καταπόνησης αποσκοπεί κυρίως στην βελτίωση της ικανότητας απορρόφησης της ενέργειας που παράγεται κατά την κρούση λόγω της μεταβολής της κινητικής ενέργειας. Μια τυπική απόκριση/συμπεριφορά μια κατασκευής έναντι κρουστικής καταπόνησης απεικονίζεται στην **Σφάλμα!** Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε. μέσω της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης (βράχυνσης). Από την καμπύλη κρουστικού αξονικού φορτίου-μετατόπισης (F-s), μερικά κρίσιμα μεγέθη μπορούν να ορισθούν και τα οποία εν τέλει χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά και την αντοχή μιας κατασκευής έναντι κρουστικής καταπόνησης.



Εικόνα 1 Τυπική απόκριση μιας κατασκευής έναντι κρουστικής καταπόνησης

Διακρίνουμε λοιπόν τις παρακάτω παραμέτρους, οι περισσότερες εκ των οποίων μάλιστα παριστάνονται στην Εικόνα 1.

- **Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης (F_{max})**, το οποίο είναι το μέγιστο παρατηρούμενο φορτίο της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης F-s.
- **Μέσο φορτίο κατάρρευσης (F_{avg})**, το οποίο είναι το παραμένον φορτίο κατάρρευσης της κατασκευής έπειτα από το μέγιστη φόρτιση, και το οποίο επιφέρει την ίδια απορρόφηση ενέργειας εάν ασκούταν κατά αποκλειστικότητα.

$$F_{avg} = \frac{1}{s} \cdot \int_0^s F \cdot ds$$

- **Ομοιομορφία φόρτισης (LU)**, η οποία είναι ο λόγος του μέσου φορτίου κατάρρευσης προς το μέγιστο παρατηρούμενο φορτίο της κατασκευής.

$$LU = \frac{F_{avg}}{F_{max}}$$

- **Απορροφώμενη ενέργειας κρούσης (E_{abs})**, η οποία ορίζεται ως το μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας κατά την κρούση το οποίο απορροφάται από την κατασκευή και αναλώνεται στην πλαστικοποίησή της υπό τη μορφή εσωτερικού έργου παραμόρφωσης. Διαφορετικά, εκφράζεται ως το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη δύναμης-μετατόπισης F-s.

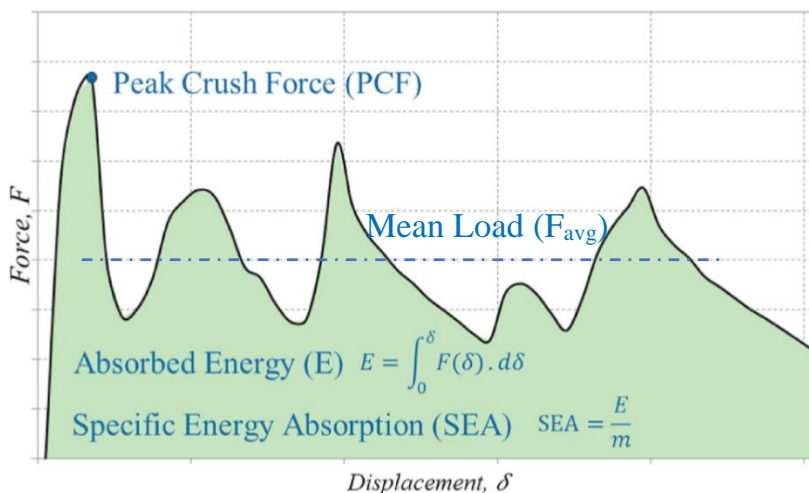
$$E_{abs} = \int_0^s F \cdot ds = F_{avg} \cdot s$$

- **Ειδική απορρόφηση ενέργειας (SEA)**, η οποία εκφράζεται ως η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ανά μονάδα μάζας, μετρημένη σε J/g.

$$SEA = \frac{\int_0^s F \cdot ds}{m} = \frac{E_{abs}}{\rho \cdot A \cdot l}$$

- **Συντελεστής βράχυνσης (SE)**, ο οποίος εκφράζεται ως ο λόγος του τελικού μήκους της συμπιεσμένης δομής προς το αρχικό της μήκος.

$$SE = \frac{L_s}{L_0}$$



Εικόνα 2 Χαρακτηριστικά συμπεριφοράς μιας κατασκευής έναντι κρουστικής καταπόνησης

Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με το μέγιστο φορτίο που παρατηρείται κατά την κατάρρευση, αυτό επιδρά αναλογικά στην δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας από την κατασκευή, καθώς όσο αυξάνεται, τόσο η καμπύλη δύναμης-μετατόπισης μετατοπίζεται προς τα πάνω, και αυξάνεται το εμβαδό κάτω από αυτήν. Έτσι, υψηλά μέγιστα φορτία κατάρρευσης συχνά επιφέρουν υψηλό μέσο παραμένων φορτίο και άρα υψηλά επίπεδα ενέργειας απορρόφησης κατά την κρούση. Ωστόσο, από μια τιμή και πάνω, η περαιτέρω αύξηση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης επιδρά ανασταλτικά στη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας της κατασκευής, καθώς εξαιρετικά υψηλό μέγιστο φορτίο επιφέρει τον κίνδυνο το φορτίο κρούσης να μην υπερβεί τη τιμή του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης και άρα η κατασκευή να μην προλάβει να πλαστικοποιηθεί. Σε μια τέτοια περίπτωση, το εσωτερικό έργο παραμόρφωσης θα ήταν εξαιρετικά μικρό, και κατ' επέκταση η δυνατότητα της κατασκευής να απορροφήσει την παραγόμενη ενέργεια κατά την κρούση.

Πρόσθετα, αναφορικά με το μέσον παραμένων φορτίο κατάρρευσης, η αύξηση του μετατοπίζει την καμπύλη δύναμης-μετατόπισης προς τα άνω, αυξάνοντας έτσι το εμβαδόν υπό της καμπύλης και συνεπώς την απορροφώμενη ενέργεια της κρούσης.

Η απορροφώμενη ενέργεια της κρούσης εκφράζει το ποσοστό της κρουστικής κινητικής ενέργειας που μετατράπηκε σε εσωτερικό έργο παραμόρφωσης προς πλαστικοποίηση της συμπιεζόμενης δομής της κατασκευής. Η μεγιστοποίησή της αποτελεί τον ουσιαστικό σκοπό της σχεδίασης κατασκευών έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης.

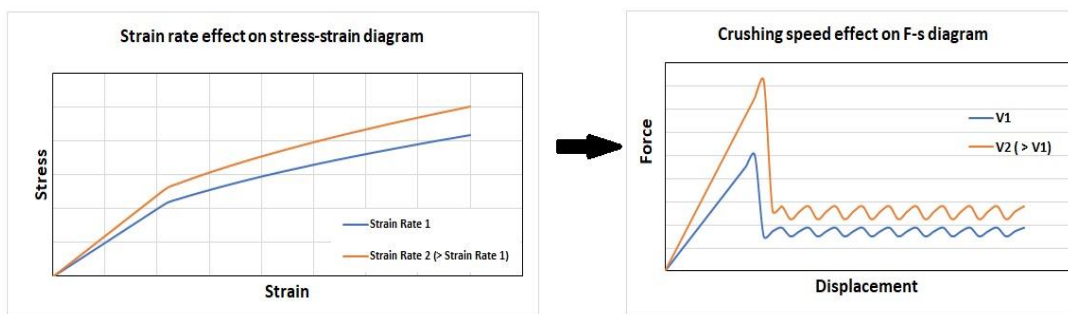
Η ειδική ενέργεια απορρόφησης είναι ενδεικτική της ικανότητας της κατασκευής να αντιστέκεται έναντι κρούσης, ενώ παρουσιάζεται ως το πλέον κατάλληλο μέγεθος προς αξιολόγηση της αντίστασης των κατασκευών έναντι αξονικής κρούσης, καθώς αποτελεί ανηγμένο μέγεθος ως προς τη μάζα της κατασκευής, το υλικό της και την διατομή της.

Η ομοιομορφία φόρτισης εκφράζει την ομοιομορφία της κατανομής των κρουστικών θλιπτικών φορτίων κατά την κατάρρευση, και συνεπώς την μεταφορά των κρουστικών αδρανειακών φορτίων προς την υπόλοιπη κατασκευή. Ουσιαστικά, χαμηλός συντελεστής ομοιομορφίας της φόρτισης φανερώνει ισχυρή απόκλιση του μέγιστου και του μέσου φορτίου κατάρρευσης, και άρα ισχυρές αδρανειακές δυνάμεις μεταφερόμενες στην υπόλοιπη κατασκευή.

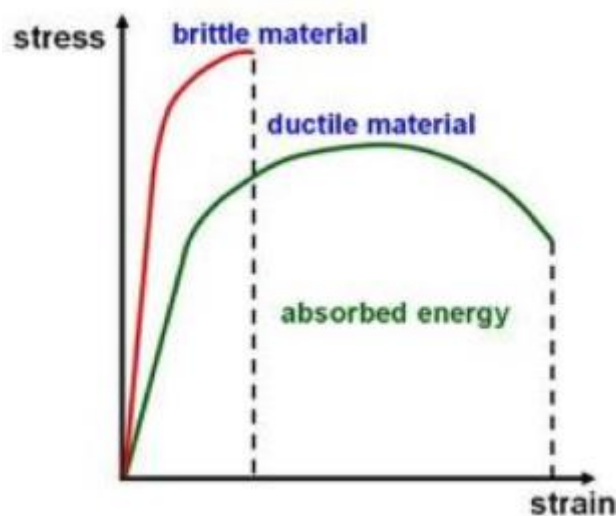
Τέλος, ο συντελεστής βράχυνσης εκφράζει το ποσοστό συμπίεσης της κατασκευής κατά την κατάρρευσή της. Μεγάλες τιμές αποδίδουν ισχυρή βράχυνση, η οποία επιδρά ευεργετικά στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, με περιορισμό ωστόσο πάντα τις μέγιστες δυνατές παραμορφώσεις.

Ως εκ τούτου, ένας ιδανικός απορροφητής ενέργειας χαρακτηρίζεται από υψηλή ειδική ενέργεια απορρόφησης, μοναδιαία ομοιομορφία φορτίου ($LU=1$), τη μέγιστη δυνατή βράχυνση της κατασκευής, ή αλλιώς την ιδανική/μέγιστη βράχυνση έως και του αρχικού της μήκους, και ένα υψηλό μέγιστο φορτίο κατάρρευσης το οποίο ωστόσο εντοπίζεται εντός λογικών ορίων ώστε να επιτρέπει την επαρκή πλαστικοποίηση της κατασκευής.

Διάφοροι επιπρόσθετοι παράγοντες όπως η ταχύτητα της κρούσης, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ολκιμότητα του υλικού κ.α. ασκούν σημαντική επίδραση στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, υψηλές θερμοκρασίες έχουν αποδειχθεί πως μειώνουν τα επίπεδα φόρτισης, μετατοπίζοντας την καμπύλη φορτίου-βράχυνσης προς τα κάτω και μειώνοντας έτσι την απορροφώμενη ενέργεια. Αντιθέτως, η επίδραση της ταχύτητας κρούσης (Εικόνα 3) ή ισοδύναμα της ταχύτητας επιβολής του φορτίου στην απορροφώμενη ενέργεια είναι ομόσημη της επίδρασης του ρυθμού παραμόρφωσης στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης σ - ϵ . Εναλλακτικά, όσο αυξάνεται η ταχύτητα επιβολής του κρουστικού φορτίου (ταχύτητα κρούσης), τόσο αυξάνεται η ενέργεια που απορροφάται κατά την κρούση από την κατασκευή προς πλαστικοποίησή της [1]. Τέλος δε, η ολκιμότητα ενός υλικού επιδρά αναλογικά στην ανθεκτικότητά του έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης καθώς επιτρέπει μεγαλύτερες παραμορφώσεις και άρα υψηλότερα επίπεδα πλαστικοποίησης και συνεπώς έργου παραμόρφωσης (Εικόνα 4).



Εικόνα 3 Επίδραση ταχύτητας κρούσης στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας



Εικόνα 4 Επίδραση της ολκιμότητας στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας

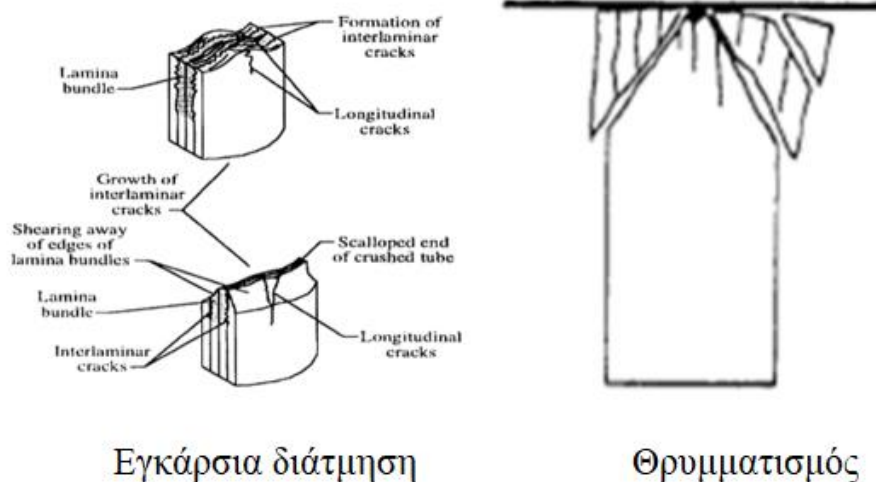
Αναφορικά δε με την επίδραση των μηχανισμών triggering, αυτοί επιβάλλουν συχνά τον μηχανισμό κατάρρευσης της κατασκευής ανάλογα με τη γεωμετρία τους, ενώ μειώνουν το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης ευνοώντας την πλαστικοποίηση της κατασκευής. Η μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης οφείλεται στη συγκέντρωση τάσεων που παρατηρείται στην διεπαφή δοκιμίου και trigger η οποία μάλιστα πολλές φορές οδηγεί στην απόσχιση του δοκιμίου μειώνοντας έτσι και την ενεργό διατομή φόρτισης. Μάλιστα δε, προηγούμενες μελέτες έχουν αποδείξει πως ορισμένοι μηχανισμοί triggering μπορούν να αυξήσουν ελαφρά ακόμη και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας στην διάταξη στην οποία εφαρμόζονται, με την κυριότερη επίδραση να έχουν οι διαστάσεις του μηχανισμού. Ιδιαίτερα σημαντική τέλος κρίνεται η επιρροή των μηχανισμών triggering στον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης, καθώς η γεωμετρία τους επιβάλλει την μορφή της αρχικής παραμόρφωσης και έπειτα αυτήν της κατάρρευσης. Ως εκ τούτου, ένα δοκίμιο που αρχικά κατέρρευε υπό έναν μηχανισμό κατάρρευσης χαμηλών επιπέδων απορροφώμενης ενέργειας, μπορεί μέσω ενός μηχανισμού triggering να καταρρεύσει υπό έναν διαφορετικό με μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, αλλά ακόμα ένας μηχανισμός triggering μπορεί να αναιρέσει έναν ασταθή μηχανισμό κατάρρευσης όπως ο λυγισμός Euler, επιβάλλοντας έναν ευσταθή και προοδευτικά ελεγχόμενο.

2.2 Μηχανισμοί Κατάρρευσης

Μια κατασκευή η οποία υπόκειται σε αξονικά θλιπτικά φορτία κρούσης αστοχεί σύμφωνα με συγκεκριμένους μηχανισμούς κατάρρευσης. Οι μηχανισμοί κατάρρευσης που εμφανίζονται μπορεί να είναι ελεγχόμενοι και προοδευτικοί ή καταστροφικοί και ασταθής. Προφανώς, μια κατασκευή η οποία καταρρέει υπό κρουστική φόρτιση, είναι επιθυμητό να καταρρέει κατά ελεγχόμενο και προοδευτικό τρόπο, εφόσον αυτός είναι που εξασφαλίζει ελεγχόμενη αστοχία αλλά και μεγαλύτερα ποσά απορροφώμενης ενέργειας κατά την κρούση, καθώς το έργο παραμόρφωσης τότε θα είναι μεγαλύτερο. Σύμφωνα με τους Farley και Jones (1989), οι μηχανισμοί κατάρρευσης είναι οι εξής τέσσερις [2]:

1. Εγκάρσια διάτμηση και θρυμματισμός

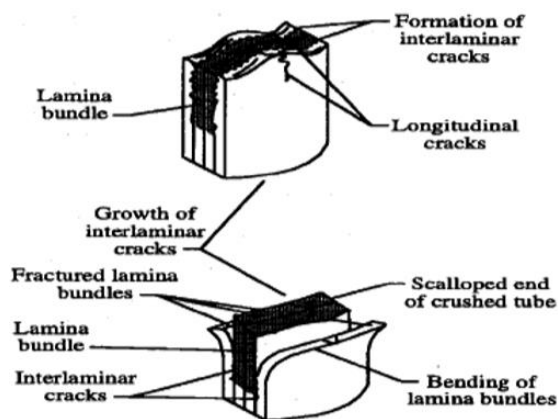
Χαρακτηρίζεται από διατομή με παράλληλες στρώσεις με ενδοστρωματικές διαμήκεις ρωγμές μικρού μήκους οι οποίες σχηματίζουν μερικώς δέσμες στρώσεων. Ο κύριος μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας κατά την κρούση οφείλεται στην θραύση των δεσμών των στρώσεων κατά την έναρξη του θρυμματισμού. Παρατηρείται σε κατασκευές μικρού μήκους, ενώ η αντοχή των στρωματικών δεσμών σε κάμψη είναι αυτή που καθορίζει και ελέγχει την διαδικασία της κρουστικής κατάρρευσης. Στην περίπτωση δε των σύνθετων υλικών, η αντοχή των στρώσεων σε κάμψη εξαρτάται από την ελαστικότητα και την αντοχή των ινών.



Εικόνα 5 Εγκάρσια διάτμηση και θρυμματισμός, [2]

2. Ψαθυρή θραύση

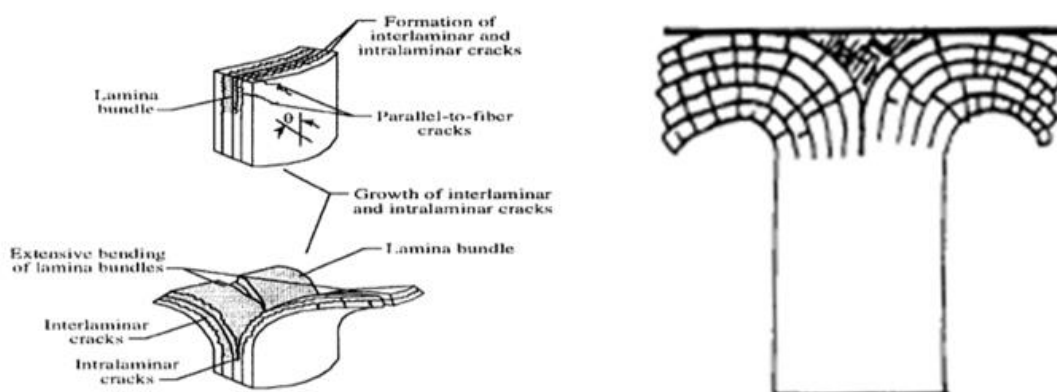
Ο μηχανισμός κατάρρευσης της ψαθυρής θραύσης παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά του θρυμματισμού τα οποία έγκειται στην αστοχία των δεσμών στρώσεων. Στην ψαθυρή θραύση, όταν αστοχήσει η πρώτη δέσμη στρώσεων, η ανακατανομή του φορτίου στις εναπομείναντες δέσμες συμβάλλει στην εξέλιξη των ρωγμών και κατ' επέκταση στην αστοχία περαιτέρω δεσμών στρώσεων. Οι παράμετροι που ελέγχουν τον μηχανισμό κατάρρευσης της ψαθυρής θραύσης στην περίπτωση των σύνθετων υλικών είναι η ελαστικότητα της μήτρας και η αντοχή σε εφελκυσμό των δεσμών στρώσεων. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη παράμετρος ελέγχει την ανάπτυξη και την εξέλιξη των ρωγμών που εκτείνονται παράλληλα στην διεύθυνση των ιών, ενώ η δεύτερη την αστοχία των δεσμών στρώσεων.



Εικόνα 6 Ψαθυρή θραύση, [2]

3. Κάμψη και αναδίπλωση στρώσεων

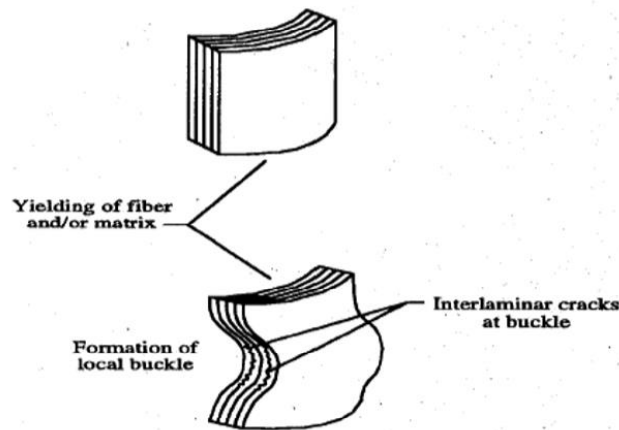
Η κάμψη και η αναδίπλωση των δεσμών των στρώσεων χαρακτηρίζονται από επιμήκειες ρωγμές που αναπτύσσονται ενδιάμεσα και παράλληλα των στρώσεων οι οποίες ωστόσο δεν αστοχούν σε αυτήν την περίπτωση. Ο μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας εδώ έγκειται στην ανάπτυξη των ρωγμών, οι οποίες εκτείνονται εις μήκος τουλάχιστον δεκαπλάσιο του πάχους των στρώσεων. Έτσι, όταν η κατάρρευση συνοδεύεται από αναδίπλωση των στρώσεων, οι τελευταίες εμφανίζουν σημαντική κάμψη χωρίς ωστόσο να αστοχούν. Στην περίπτωση δε των σύνθετων υλικών, η αντοχή της μήτρας είναι αυτή που ελέγχει το μηχανισμό κατάρρευσης καθώς ελέγχει την ανάπτυξη των ρωγμών.



Εικόνα 7 Μηχανισμός κατάρρευσης με κάμψη και αναδίπλωση στρώσεων, [2]

4. Τοπικός λυγισμός και προοδευτικός σχηματισμός πτυχώσεων

Ο συγκεκριμένος μηχανισμός κατάρρευσης συναντάται τόσο σε όλκιμα όσο και σε ψαθυρά υλικά. Αρχικά εκδηλώνεται τοπικός λυγισμός σε περιοχές του υλικού, ο οποίος εξελίσσεται εν συνεχεία στον σχηματισμό προοδευτικών διαδοχικών πτυχώσεων/αναδιπλώσεων. Οι μηχανισμοί που ελέγχουν τη προοδευτική κατάρρευση υπό σχηματισμό πτυχώσεων/αναδιπλώσεων είναι η πλαστική διαρροή των ινών ή/και της μήτρας σε περίπτωση σύνθετων υλικών. Μάλιστα δε, στην περίπτωση ψαθυρών υλικών, η κατάρρευση υπό τοπικό λυγισμό καθορίζεται από τη μη-γραμμική συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων της μήτρας, ενώ αντιθέτως στην περίπτωση των όλκιμων υλικών, η ελαστικότητα των ινών ή της μήτρας είναι αυτή που καθορίζει την ανάπτυξη τοπικού λυγισμού και διαδοχικών πτυχώσεων/αναδιπλώσεων.

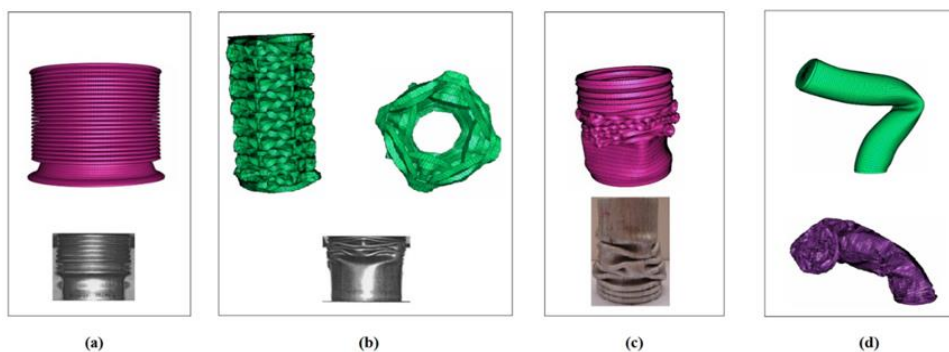


Εικόνα 8 Τοπικός λυγισμός και ανάπτυξη πτυχώσεων/αναδιπλώσεων, [2]

Εξετάζοντας τον μηχανισμό κατάρρευσης μιας κατασκευής και την προσφερόμενη σε αυτήν ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά την κρούση, η κατάρρευση υπό μικροθρυμματισμό είναι εκείνη που αποδίδει τα μεγαλύτερα ποσά απορροφώμενης ενέργειας σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ωστόσο σε περίπτωση υπερβολικού θρυμματισμού, η ενέργεια απορρόφησης μπορεί να κυμανθεί σε μικρότερα επίπεδα εξαιτίας του περιορισμού βράχυνσης της κατασκευής λόγω των θρυμματισμένων αποβλήτων τα οποία μπορούν συχνά να επιβάλλουν έναν περιορισμό στο τελικό μήκος του συμπιεζόμενου δοκιμίου. Έπειτα, η κατάρρευση υπό τοπικό λυγισμό και προοδευτικό σχηματισμό πτυχώσεων και αναδιπλώσεων προσφέρει μεσαία επίπεδα ικανότητας απορρόφησης ενέργειας από μια κατασκευή, ενώ η κατάρρευση υπό ψαθυρή θραύση προσφέρει τα μικρότερα ποσά απορροφώμενης ενέργειας ως μη ελεγχόμενος και καταστροφικός τρόπος κατάρρευσης.

Αναφορικά δε με τους τρόπους κατάρρευσης με τοπικό λυγισμό και ανάπτυξη πτυχώσεων και αναδιπλώσεων, διακρίνονται οι εξής τέσσερις κατηγορίες:

- ✓ Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης (concertina mode)
- ✓ Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης (diamond mode)
- ✓ Μικτός τρόπος κατάρρευσης (mixed mode)
- ✓ Λυγισμός Euler (Euler type buckling mode)



Εικόνα 9 Τρόποι κατάρρευσης με τοπικό λυγισμό και ανάπτυξη πτυχώσεων/αναδιπλώσεων (a:concertina mode, b:diamond mode, c:mixed mode, d:Euler buckling mode), [3]

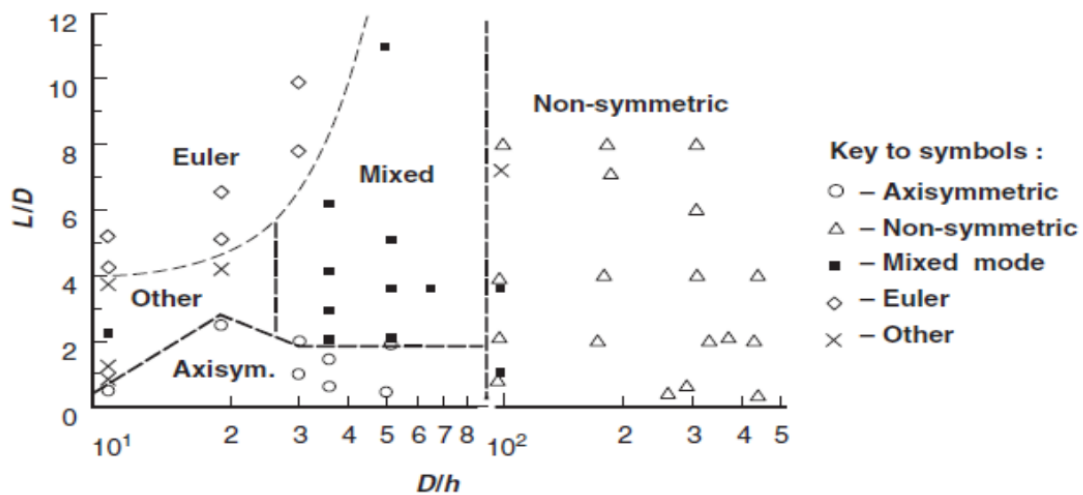
Πιο αναλυτικά, ο αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό πτυχώσεων, ή λοβών, κατά εκτατό τρόπο καθώς η επιφάνεια της δομής παραμένει κυκλική με τη περίμετρο της επιφάνειας ωστόσο να αυξάνεται. Είναι επιθυμητός τρόπος κατάρρευσης καθώς αποτελεί έναν ελεγχόμενο τρόπο κατάρρευσης ο οποίος συμβάλλει μάλιστα στην απορρόφηση μεγάλων ποσών ενέργειας κατά την κρούση.

Σχετικά με τον μη αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης, αποτελεί και αυτός έναν ελεγχόμενο τρόπο κατάρρευσης, ο οποίος μάλιστα επιτρέπει την απορρόφηση μεγαλύτερων ποσών ενέργειας συγκριτικά με την αξονοσυμμετρική κατάρρευση. Εκδηλώνεται με τον σχηματισμό δυο, τριών ή σπανιότερα τεσσάρων λοβών κατά την περιφέρεια της διατομής. Οι λοβοί σχηματίζονται κατά μη εκτατό τρόπο καθώς η περίμετρος της διατομής δεν μεταβάλλεται αλλά αλλάζει η γεωμετρία της (Εικόνα 9b). Επομένως, στην περίπτωση που η αρχικά κυκλική διατομή μετατραπεί σε τριγωνική από την ανάπτυξη τριών λοβών διακρίνουμε 3D μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση (3D diamond mode), σε ανάπτυξη αντίστοιχα δυο λοβών διακρίνουμε 2D μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση (2D diamond mode) κ.ο.κ. Τέλος, η ανάπτυξη θεωρητικών μοντέλων υπολογισμού αναλυτικών εκφράσεων του φορτίου κατάρρευσης είναι λιγότερο ακριβή σε περίπτωση μη αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης.

Επιπλέον, μικτός τρόπος κατάρρευσης δύναται να εμφανισθεί συνδυάζοντας την δημιουργία εκτατών αξονοσυμμετρικών πτυχώσεων συνήθως κατά το αρχικό στάδιο της κατάρρευσης, και συνεχίζοντας με μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση.

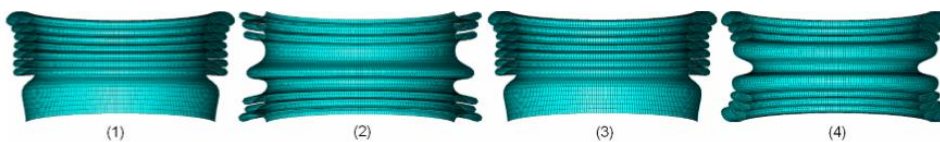
Η κατάρρευση υπό λυγισμό Euler τέλος αποτελεί μια μη ελεγχόμενη και ασταθή μέθοδο κατάρρευσης καθώς σύμφωνα με αυτήν η κατασκευή αστοχεί χωρίς ωστόσο να έχει υπερβεί το όριο αντοχής της. Γενικά, πρόκειται για ανεπιθύμητο τρόπο κατάρρευσης για μια κατασκευή εξαιτίας τόσο του ασταθούς χαρακτήρα της όσο και των πολύ μικρών ποσών ενέργειας που επιτρέπει να απορροφηθούν.

Επιπρόσθετα, ο μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο καταρρέει μια κατασκευή υπό κρουστική θλιπτική φόρτιση, εξαρτάται ισχυρά από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, όπως το μήκος, η διάμετρος, το πάχος τοιχώματος και το γεωμετρικό σχήμα της διατομής. Πιο συγκεκριμένα, όπως παριστάνεται και στην παρακάτω εικόνα, βραχείς σωλήνες μεγάλου πάχους αναμένεται να καταρρεύσουν με αξονοσυμμετρικό μηχανισμό, ενώ για μικρότερα πάχη τοιχώματος μικτός ή μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης ενδέχεται να εμφανιστεί. Ακόμη, λεπτότοιχοι σωλήνες μεγάλου μήκους αναμένεται να καταρρεύσουν υπό ασταθή λυγισμό Euler.

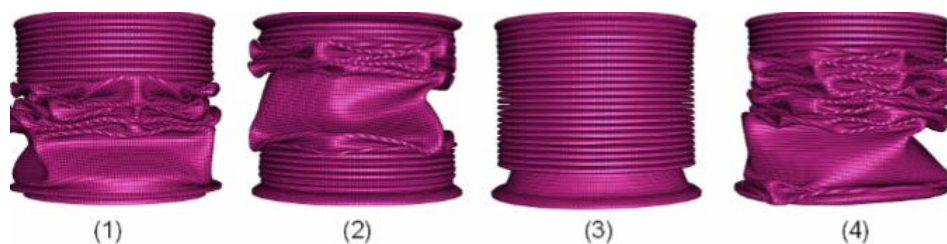


Εικόνα 10 Αναμενόμενοι τρόποι κατάρρευσης για σωλήνες αλουμινίου

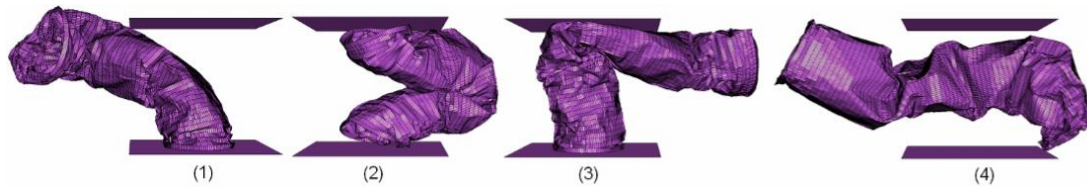
Η επίδραση των στηρίξεων των άκρων της εξεταζόμενης κατασκευής θεωρείται επίσης σημαντική, καθώς σχετικές μελέτες [3] έδειξαν ότι συμμετρικές στηρίξεις των άκρων θα αποδώσουν συμμετρικό σχηματισμό πτυχώσεων/αναδιπλώσεων (Εικόνα 11b και 11c). Επίσης, όταν τουλάχιστον ένα άκρο του συμπιεζόμενου δοκιμίου είναι πακτωμένο, έχει διαπιστωθεί πως η εμφάνιση αξονοσυμμετρικού μηχανισμού κατάρρευσης είναι πολύ πιθανόν να εμφανιστεί (Εικόνα 12), ενώ τέλος ένα απλά στηριζόμενο άκρο ενός δοκιμίου που καταρρέει υπό τον ασταθή λυγισμό Euler αναμένεται να χάσει την επαφή του με τη στήριξή του (Εικόνα 13).



Εικόνα 11 Επίδραση στηρίξεων στην συμμετρία σχηματισμού αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης, (1) απλή έδραση-κύλιση, (2) πάκτωση-πάκτωση, (3) πάκτωση-κύλιση και (4) κύλιση-κύλιση, [3]



Εικόνα 12 Επίδραση πακτωμένου άκρου στην εμφάνιση αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης, (1) απλή έδραση-κύλιση, (2) πάκτωση-πάκτωση, (3) πάκτωση-κύλιση και (4) κύλιση-κύλιση, [3]



Εικόνα 13 Επίδραση κύλισης στην απώλεια επαφής με το άκρο, (1) απλή έδραση-κύλιση, (2) πάκτωση-πάκτωση, (3) πάκτωση-κύλιση και (4) κύλιση-κύλιση, [3]

Συνοψίζοντας επομένως, αναφορικά με τις στηρίξεις των άκρων, η επιβολή πάκτωσης σε τουλάχιστον ένα από τα άκρα επιφέρει το σχηματισμό περισσότερων πτυχώσεων αξονοσυμμετρικών ή μη, αυξάνοντας την ικανότητα απορρόφησης ποσών κρουστικής ενέργειας. Αντιθέτως, η επιβολή κύλισης στα άκρα αυξάνει το κίνδυνο απώλεια επαφής με τη στήριξη, και συνεπώς μη ελεγχόμενη και ασταθής κατάρρευση.

2.3 Δοκιμές Κρούσης

Οι δοκιμές κρούσης είναι πειραματικές δοκιμές που αποσκοπούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς και της απόκρισης μιας κατασκευής έναντι κρούσης. Στόχος αποτελεί να παρατηρηθεί ο εμφανιζόμενος μηχανισμός κατάρρευσης, και να εκτιμηθούν σημαντικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, όπως το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης, η μέγιστη βράχυνση, η απορροφώμενη ενέργεια κατά την κρούση κ.ο.κ.

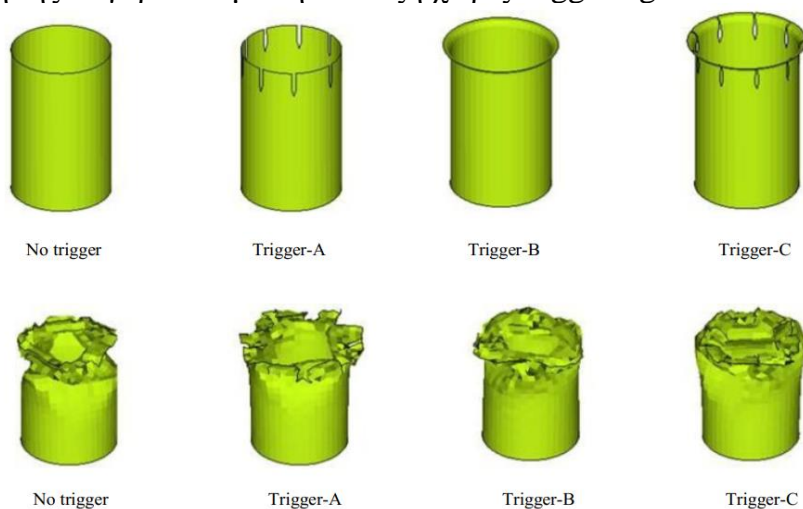
Οι δοκιμές κρούσης μπορούν να διεξαχθούν τόσο σε ημι-στατικές συνθήκες, όσο και σε δυναμικές. Οι δοκιμές κρούσης που διεξάγονται σε ημι-στατικές συνθήκες πραγματοποιούνται σε ταχύτητες κρούσης πολύ μικρότερες αυτών των πραγματικών συνθηκών κρούσης. Αυτές οι δοκιμές δεν απαιτούν ακριβό εξοπλισμό (στιβαρές μηχανές, κάμερες ταχείας λήψης, καταγραφείς δεδομένων υψηλών συχνοτήτων κλπ.), ωστόσο δεν αντιπροσωπεύουν πλήρως τις εξεταζόμενες συνθήκες κρούσης. Αντιθέτως, οι δοκιμές κρούσης υπό δυναμικές συνθήκες απαιτούν ακριβό εξοπλισμό (στιβαρές μηχανές, κάμερες ταχείας λήψης, καταγραφείς δεδομένων υψηλών συχνοτήτων κλπ.), όμως αντιπροσωπεύουν πλήρως τις πραγματικές συνθήκες κρούσης και για αυτό το λόγο είναι περισσότερο ακριβείς. Ωστόσο, εξαιτίας του κόστους, οι δοκιμές υπό ημι-στατικές συνθήκες επιλέγονται πιο συχνά για την εκτίμηση και διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς και του μηχανισμού κατάρρευσης μιας κατασκευής που υπόκειται σε κρουστική φόρτιση.

2.4 Σύντομη Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Πλήθος πειραματικών δοκιμών κρούσης και αριθμητικών προσομοιώσεων έχουν διεξαχθεί μέχρι σήμερα από την επιστημονική ερευνητική κοινότητα με σκοπό την ανάλυση και διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των

κατασκευών έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης. Συγκεκριμένα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο προσδιορισμός τόσο του μηχανισμού κατάρρευσης όσο και των κύριων χαρακτηριστικών μεγεθών της απόκρισης της κατασκευής, όπως λ.χ. το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης (F_{max}), το παραμένον φορτίο κατάρρευσης (F_{avg}), την ομοιομορφία φόρτισης (LU), την ενέργεια απορρόφησης (EA) και την ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA). Η τελευταία δε αποτελεί το πιο χρηστικό μέγεθος προς σύγκριση διαφορετικών κατασκευών ως προς την αντοχή τους έναντι κρούσης, καθώς είναι ανηγμένη προς τη μάζα της κατασκευής.

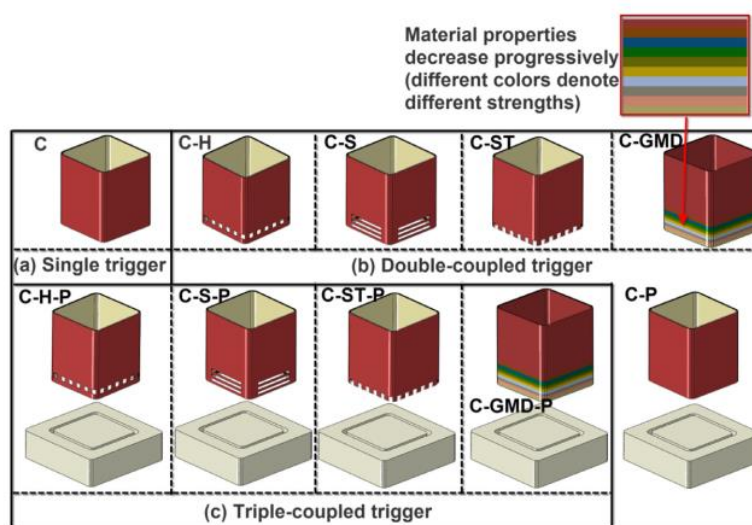
Μεταξύ πολλών ερευνητικών δραστηριοτήτων [4]-[8] σχετικά με την συμπεριφορά διατάξεων έναντι κρουστικής καταπόνησης, σημαντικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί στο εδάφιο της επίδρασης των μηχανισμών triggering το οποίο αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στα πλαίσια αυτά λοιπόν, ο Hussain [9] μελέτησε την επίδραση μηχανισμών triggering την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κυλινδρικών λεπτότοιχων πλαστικών σωλήνων ενισχυμένων από ίνες γυαλιού. Όλοι οι εξεταζόμενοι σωλήνες είχαν μήκος 120mm, εξωτερική διάμετρο 72mm και πάχος τοιχώματος 1,892 mm. Εξετάστηκαν τρεις μηχανισμοί triggering (Εικόνα 14) ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή τους. Η μελέτη διεξάχθηκε μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων στο λογισμικό LS-DYNA στο οποίο η προσομοίωση της κρούσης έγινε με ταχύτητα φόρτισης 16km/h. Η δημιουργία των μοντέλων έγινε στον προ-επεξεργαστή HyperMesh, ενώ η εξαγωγή των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων στον μετά-επεξεργαστή HyperView. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, των οποίων τα μοντέλα είχαν αρχικά επικυρωποιηθεί έναντι πειραματικών δεδομένων, έδειξαν πως κάθε μηχανισμός triggering επέφερε μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης ευνοώντας την πλαστικοποίηση της διατομής, καθώς επίσης και αυξημένα επίπεδα απορροφώμενης ενέργειας. Επίσης, στα δοκίμια που κατέρρευσαν υπό τη βοήθεια μηχανισμού triggering παρατηρήθηκε σημαντικότερη ομοιομορφία φόρτισης, ενώ τέλος πιο αποτελεσματική διάταξη εντοπίστηκε αυτή με το μηχανισμό triggering B προκαλώντας αύξηση ~35% στην ειδική ενέργεια απορρόφησης συγκριτικά με τη διάταξη χωρίς triggering.



Εικόνα 14 Εξεταζόμενοι μηχανισμοί triggering κατά Hussain, [9]

Επιπλέον, ο Eshkooor [10] μελέτησε την επίδραση δυο διαφορετικών γεωμετρικά μηχανισμών triggering στη συμπεριφορά κυλινδρικών σύνθετων σωλήνων έναντι αξονικής κρούσης. Οι δυο διατάξεις triggering που εξετάστηκαν ήταν μια επίπεδη πλάκα και 4 πλακίδια χάλυβα σε σχήμα σταυρού, αμφότερες τοποθετημένες στη βάση του συμπιεζόμενου δοκιμίου. Τα 50mm μήκους δοκίμια συμπίεστηκαν σε ημι-στατικές συνθήκες, και παρατηρήθηκε πως και οι δυο μηχανισμοί triggering επέφεραν μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης, ενώ ο μηχανισμός των 4 χαλύβδινων πλακιδίων σε σχήμα σταυρού διατήρησε επίσης την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του δοκιμίου καθώς αύξησε την ομοιομορφία φόρτισης ενώ επίσης μετέβαλλε και τον μηχανισμό κατάρρευσης από τον αρχικό χωρίς triggering, προσδίδοντάς του μάλιστα ελεγχόμενο και ευσταθή χαρακτήρα ο οποίος αρχικά απουσίαζε.

Ακόμη, ο Ren [11] μελέτησε την επίδραση απλών και διπλών μηχανισμών triggering (Εικόνα 15) σε λεπτότοιχους σωλήνες υπό αξονική κρούση. Σαν απλοί και διπλοί μηχανισμοί triggering λογίσθηκαν αυτοί που συνδυάζουν ειδικά διαμορφωμένη πλάκα στήριξης, διαμορφωμένα άκρα δοκιμίου, καθώς επίσης και μεταβαλλόμενες ιδιότητες του δοκιμίου στο άκρο στήριξής του. Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων αφού αρχικά ελέχθηκαν ως προς την ακρίβεια και εγκυρότητά τους έναντι πειραματικών δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή αριθμητικών προσομοιώσεων. Η μελέτη έδειξε πως οι απλοί μηχανισμοί triggering μείωσαν το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης, ενώ οι διπλοί μηχανισμοί triggering αύξησαν επίσης και την απορροφώμενη κρουστική ενέργειας έως και 26%.



Εικόνα 15 Εξεταζόμενοι μηχανισμοί triggering κατά Ren, [11]

Πρόσθετα, ο Sivagurunathan [12] εξέτασε την επίδραση διαφορετικών μηχανισμών triggering σε τετραγωνικούς σύνθετους σωλήνες διεξάγοντας πειραματικές δοκιμές υπό στατικές συνθήκες. Τα εξεταζόμενα δοκίμια είχαν πάχος τοιχώματος 3mm και μήκος 100mm. Οι μηχανισμοί triggering που εξετάστηκαν ήταν υπό τη μορφή των διαμορφωμένων άκρων των δοκιμίων. Λαμβάνοντας υπόψιν τα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρήθηκε πως όλοι οι εξεταζόμενοι μηχανισμοί triggering

μείωσαν το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης, αλλά επίσης αύξησαν και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας καθώς επέβαλλαν διαφορετικό μηχανισμό κατάρρευσης από τον αρχικό προσφέροντας δυνατότητα περαιτέρω πλαστικής παραμόρφωσης.

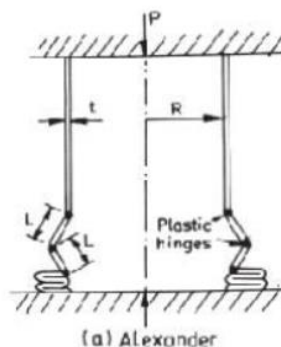
Τέλος, ο Airoidi [13] μελέτησε την επίδραση μηχανισμού triggering στο σύστημα τροχών προσγείωσης των αεροσκαφών με σκοπό το σχεδιασμό ανάλογων διατάξεων υπό χαμηλότερα επίπεδα μέγιστης φόρτισης κατά την αρχική επαφή με το έδαφος. Στα πλαίσια της μελέτης, διεξήχθησαν πειραματικές δοκιμές τόσο δυναμικού όσο και στατικού χαρακτήρα σε λεπτότοιχους μεταλλικούς κυλινδρικούς σωλήνες, ενώ αναπτύχθηκαν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό ABAQUS για την διεξαγωγή κατάλληλων προσομοιώσεων. Έπειτα από την επικύρωση των μοντέλων, από τα προκύπτοντα αποτελέσματα διαπιστώθηκε πως ο μηχανισμός triggering μειώνει σημαντικά το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης έως και 17% χωρίς να μειώνει ωστόσο και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά την κρούση.

2.5 Αναλυτική έκφραση μέσου φορτίου κατάρρευσης

Αναφορικά με την αναλυτική έκφραση υπολογισμού του μέσου φορτίου κατάρρευσης, αυτή έχει αναπτυχθεί από αρκετές μελέτες σε διαφορετικές εκφράσεις οι οποίες ωστόσο όλες φανερώνουν την ίδια ποιοτική εξάρτηση ως προς τις διαστάσεις και τις ιδιότητες του υλικού. Σχετικά με τη διασύνδεσή τους με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης, μοντέλα ικανοποιητικής ακρίβειας έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα μόνο για αξονοσυμμετρική και μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση, ενώ ο μικτός μηχανισμός κατάρρευσης δεν έχει καταφέρει ακόμη να αναδείξει μια αναλυτική σχέση υπολογισμού εφάμιλλης ακρίβειας.

Έτσι λοιπόν, πιο αναλυτικά, αναφορικά με το μέσο φορτίο αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης, ο Alexander (1960) πρώτος θεώρησε τρεις πλαστικούς αρμούς για το σχηματισμό ενός λοβού προβλέποντας το μέσο φορτίο συμπίεσης:

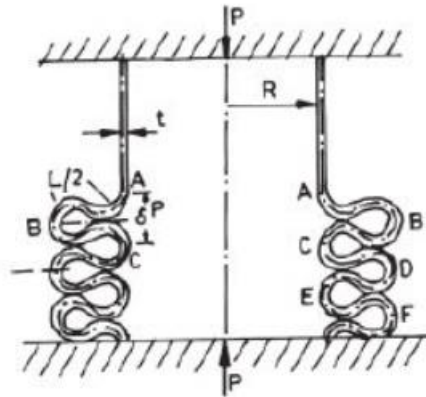
$$F_{avg} = \frac{t \cdot F_0}{4\sqrt{3}\pi R} (20.73 \cdot \{2R/t\}^{0.5} + 6.283)$$



Εικόνα 16 Θεώρηση Alexander για το φορτίο κατάρρευσης

Άλλες παρόμοιες σχετικές προσεγγίσεις είναι αυτή των Abramowicz και Jones οι οποίοι πρότειναν ουσιαστικά τη σχέση του Alexander καταλήγοντας ωστόσο σε διαφορετικούς διορθωτικούς συντελεστές:

$$F_{avg} = \frac{t \cdot F_0}{4\sqrt{3}\pi R} (20.79 \cdot \{2R/t\}^{0.5} + 11.9)$$

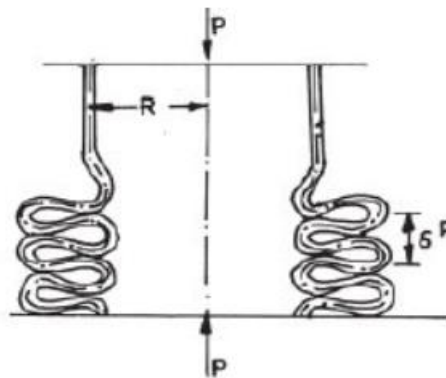


Εικόνα 17 Θεώρηση Abramowicz και Jones για το φορτίο κατάρρευσης

Ακόμη, οι Gurta και Velmurugan ανέπτυξαν επίσης μια έκφραση υπολογισμού του μέσου φορτίου κατάρρευσης ως:

$$\frac{P_m}{P_0} = \frac{1}{R \left[2L - t - \frac{2L}{3a} \right]} \left\{ \frac{L^2}{3} \sin a + \frac{t}{\sqrt{3}} \left[2Ra + \frac{L}{3} (1 - \cos a) \right] \right\}$$

$$\text{με } L = 1.347\sqrt{Rt} \quad \text{και} \quad L - 2L \sin a - L \sin a - \frac{3at}{2} = 0$$

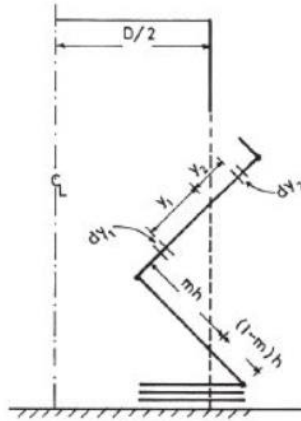


Εικόνα 18 Θεώρηση Gurta και Velmurugan για το φορτίο κατάρρευσης

Επιπροσθέτως, υπάρχουν πολλές ακόμη προσεγγίσεις ανάλογες με τις προηγούμενες όπως αυτή των Gurta και Abbas οι οποίοι ήταν οι πρώτοι που θεώρησαν την κίνηση του υλικού και προς τα μέσα και προς τα έξω κατά τη κατάρρευση:

$$\begin{aligned}
P_m = & 2k\pi f_{yt} D^2 t_o^2 \frac{D^2 - 2m^2 h^2}{hA^{2/3}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{D - mh}{\sqrt{A}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{-mh}{\sqrt{A}} \right) \right] + \\
& + 2k\pi f_{yt} D^2 t_o^2 \frac{D^2 - (1-m)^2 h^2}{hB^{2/3}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{D + (1-m)h}{\sqrt{B}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{(1-m)h}{\sqrt{B}} \right) \right] + \\
& + \pi f_{yt} D^2 t_o^2 \left[\frac{(-m)}{A} + \frac{(1-m)}{B} \right] + \frac{\pi}{3} f_{yt} t_o h \left[4rh^2 + \frac{rmD}{h} \ln \left(\frac{1-mh}{D} \right) + 4(1-m)^2 - \right. \\
& \left. - \frac{(1-m)D}{h} \ln \left(1 + \frac{(1-m)h}{D} \right) \right]
\end{aligned}$$

με f_{yt} , f_{yc} τα όρια διαρροής σε εφελκυσμό και θλίψη αντίστοιχα, D η διάμετρος του σωλήνα, t_o το αρχικό πάχος, h το μέγεθος του λοβού, $r=f_{yc}/f_{yt}$ και k,m παράμετροι του λοβού.



Εικόνα 19 Θεώρηση Gurta και Abbas για το φορτίο κατάρρευσης

Αναφορικά δε με τα φορτία κατάρρευσης υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο, τα αναπτυχθέντα μοντέλα λαμβάνουν πιο απλοϊκή μορφή, όπως αυτό των Pugsley και Macaulay:

$$\frac{P_m}{P_0} = 1.6 \frac{t}{R} + 0.12$$

Εναλλακτικά, το μοντέλο των Johnson, Soden και Al-Hassani είναι το πρώτο που προέβλεψε την επίδραση του αριθμού των σχηματιζόμενων μη-αξονοσυμμετρικών λοβών (m), καθώς και τον τύπο τους ($n=2$ για 2D diamond, $n=3$ για 3D diamond κλπ.):

$$P_m = 2\pi M_p \left(1 + n \cos \frac{n}{2\pi} + \frac{m-1}{m} n \cot \frac{\pi}{2n} \right)$$

Οι Abramowicz και Jones πρότειναν επίσης μια έκφραση για τον αναλυτικό υπολογισμό του μέσου φορτίου κατάρρευσης:

$$\frac{P_m}{M_0} = 86.14 \left(\frac{2R}{t} \right)^{1/3}$$

Τέλος, ο Wierzbicki πρότεινε μια παρόμοια έκφραση με αυτήν των Abramowicz και Jones, αντικαθιστώντας όμως το πάχος τοιχώματος με το μέγεθος του λοβού:

$$\frac{P_m}{M_0} = 62.88 \left(\frac{2R}{h} \right)^{1/3}$$

Αναφορικά δε με το φορτίο κατάρρευσης υπό μηχανισμό Euler, αυτό προκύπτει από τον κλασσικό ορισμό του θλιπτικού φορτίου λυγισμού όπως διατυπώθηκε από τον Euler (1757):

$$P = \frac{EI\pi^2}{L_e^2}$$

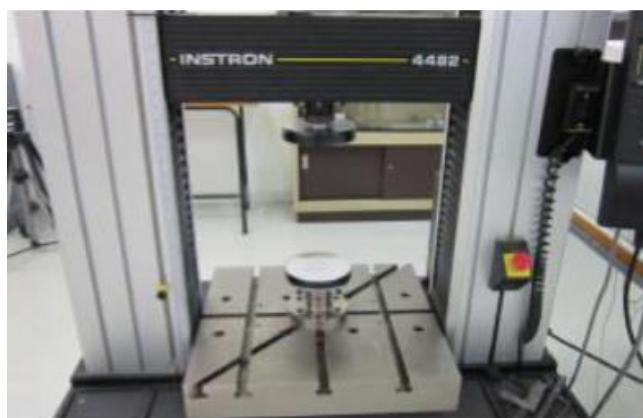
3. Πειραματικές Δοκιμές

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εξεταζόμενες διατάξεις των συμπιεζόμενων δοκιμών καθώς και η διαδικασία των πειραματικών δοκιμών και οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξήχθησαν. Τους μηχανισμούς triggering τους αποτέλεσαν χαλύβδινες ράβδοι συγκολλημένες μεταξύ τους σε κατάλληλες διατάξεις διαφορετικών διαστάσεων και γεωμετρίας ώστε να εξεταστεί επιπροσθέτως και η επίδρασή τους. Τα συμπιεζόμενα δοκίμια ήταν λεπτότοιχοι κυλινδρικοί σωλήνες κράματος αλουμινίου 6063-F25 (σειράς 6000), οι οποίοι τοποθετήθηκαν πάνω από τους μηχανισμούς triggering, ενώ εξετάστηκε τέλος και η συμπίεσή τους χωρίς την παρουσία triggering ώστε να πραγματοποιηθούν εκτενέστερες συγκρίσεις προς διαπίστωση της επίδρασης των μηχανισμών αυτών.

3.2 Πειραματικός Εξοπλισμός

Οι πειραματικές δοκιμές αξονικής συμπίεσης πραγματοποιήθηκαν στην μηχανική πρέσσα INSTRON 4482 στις εργαστηριακές εγκαταστάσεις του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Η κεφαλή της πρέσσας ασκεί τα αξονικά, θλιπτικά εν προκειμένω, φορτία κινούμενη από μηχανισμό κοχλία-περικοχλίου. Σε αυτήν πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές δοκιμές συμπίεσης, καθώς επίσης και δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού σε λωρίδα κράματος αλουμινίου 6063-F25 ώστε να εντοπισθούν οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού των εξεταζόμενων δοκιμών από την προκύπτουσα καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων.



Εικόνα 20 Μηχανική πρέσσα INSTRON 4482

Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά της πρέσσας είναι ακολούθως:

- Ονομαστικό φορτίο 10kN
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής 500mm/min
- Ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής 600mm/min
- Μέγιστο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα 7.5kN
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο 250mm/min

Η πρέσσα απαρτίζεται δομικά από το κυρίως σώμα το οποίο περιλαμβάνει την τράπεζα και την κινητή κεφαλή όπου έχει προσαρμοστεί το δυναμόμετρο, και τον πίνακα ελέγχου που διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE η οποία με τη σειρά της είναι συνδεδεμένη με Η/Υ. Μέσω του πίνακα ελέγχου, προσφέρεται η δυνατότητα ρύθμισης των συνθηκών των δοκιμών ενώ η σύνδεση με τον Η/Υ επιτρέπει την αποθήκευση των πειραματικών δεδομένων προς περαιτέρω επεξεργασία.

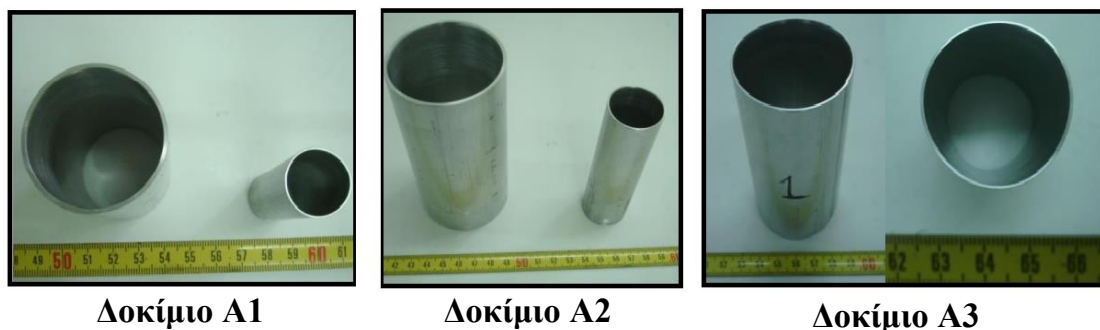
Τέλος, η ταχύτητα της κινητής κεφαλής είχε προσαρμοστεί στα 20mm/min για κάθε μια από τις διεξαχθείσες πειραματικές δοκιμές προσδίδοντάς τους ημιστατικό χαρακτήρα.

3.3 Εξεταζόμενα Δοκίμια

Τα εξεταζόμενα δοκίμια αποτελούσαν λεπτότοιχους κυλινδρικούς σωλήνες από κράμα αλουμινίου 6063-F25 (σειράς 6000) τριών διαφορετικών διαστάσεων, οι οποίοι είχαν παρασκευαστεί με τη μέθοδο της θερμής διέλασης. Κατά τη κατεργασία αυτή, το μέταλλο συμπιέζεται θερμαινόμενο (θερμή διέλαση) μέσω ενός εμβόλου και αναγκάζεται να διέλθει από κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα καθώς ωθείται και παραμορφώνεται πλαστικά. Η ταυτόχρονη δε θέρμανσή του διευκολύνει την πλαστικοποίησή του καθώς μειώνει το όριο διαρροής του υλικού, και συνεπώς το φορτίο διέλασης, αυξάνοντας έτσι την ολκιμότητα του υλικού. Οι θερμοκρασίες θέρμανσης του αλουμινίου στη θερμή διέλαση φτάνουν έως και τους 470° C. Ο μεταλλικός θάλαμος εντός του οποίου συμπιέζεται το υλικό, είναι ένας δακτύλιος μεγάλου πάχους στο εσωτερικό του οποίου τοποθετείται το προς διέλαση θερμαινόμενο αλουμίνιο. Ο θάλαμος αυτός υπόκειται υψηλές εσωτερικές πιέσεις κατά την κατεργασία με κίνδυνο την θραύση του σε συνθήκες υπερφόρτισής του. Για αυτό το λόγο, κατασκευάζεται συνήθως από χάλυβα υψηλής αντοχής σε πιέσεις έως και 1000 MPa, ενώ για πιέσεις έως 1700 MPa οι θάλαμοι αυτοί κατασκευάζονται από δυο ομόκεντρους δακτυλίους συνδεδεμένους με συναρμογή σύσφιξης.

Τα δοκίμια έπειτα από τη διέλαση κόπηκαν σε αυτόματη προιονοκορδέλα στο επιθυμητό μήκος, ενώ ακολούθως οι επιφάνειές τους φινιρίστηκαν στον τόρνο

και τέλος λειάνθηκαν τα άκρα τους ώστε να αφαιρεθούν τυχόν προεξοχές της κοπής. Τα δοκίμια όπως προέκυψαν από την παρασκευή τους παριστάνονται στην Εικόνα 21, ενώ ο πίνακας 1 παρουσιάζει τις διαστάσεις των εξεταζόμενων δοκιμίων.



Εικόνα 21 Εξεταζόμενα δοκίμια

Δοκίμιο	Εξωτερική διάμετρος (mm)	Εσωτερική διάμετρος (mm)	Πάχος τοιχώματος (mm)	Μήκος (mm)
A1	30	28	1	100
A2	50	48	1	100
A3	60	56	2	120

Πίνακας 1 Διαστάσεις εξεταζόμενων δοκιμίων

3.4 Εξεταζόμενοι Μηχανισμοί Triggering

Οι μηχανισμοί triggering πάνω στους οποίους στηρίχθηκαν τα εξεταζόμενα δοκίμια κατά τη συμπίεσή τους αποτελούνται από εννιά συνολικά συγκολλημένες χαλύβδινες ραβδωτές κατασκευές. Οι έξι από αυτές είχαν αστεροειδή μορφή (τρεις ακτίνες), δυο μορφή σταυρού (τέσσερις ακτίνες) και μία κυλινδρική γεωμετρία, ενώ η διατομή των ράβδων ήταν ορθογωνική και κυκλική ανά περίπτωση. Παρακάτω, ακολουθεί μια πιο αναλυτική περιγραφή των εξεταζόμενων μηχανισμών triggering με τις διαστάσεις τους, τη γεωμετρία τους και την κωδική ονομασία τους.

3.4.1 Μηχανισμοί Triggering S1,S2,S3,S4

Οι πρώτοι τέσσερις μηχανισμοί triggering (S1, S2, S3, S4) που εξετάστηκαν είναι κατασκευές αστεροειδούς μορφής με ράβδους ορθογωνικής διατομής.

Όπως παριστάνεται παρακάτω, όλοι είχαν το ίδιο μήκος ακτινών (50mm) και το ίδιο ύψος (20mm) ενώ διέφεραν στο πάχος των ράβδων, κατά τρόπο ώστε ο μηχανισμός S1 να αποτελείται από τις πιο λεπτές ράβδους και ο S4 από αυτές του μεγαλύτερου πάχους.



Εικόνα 22 Μηχανισμοί triggering S1, S2, S3, S4 (από αριστερά προς τα δεξιά)

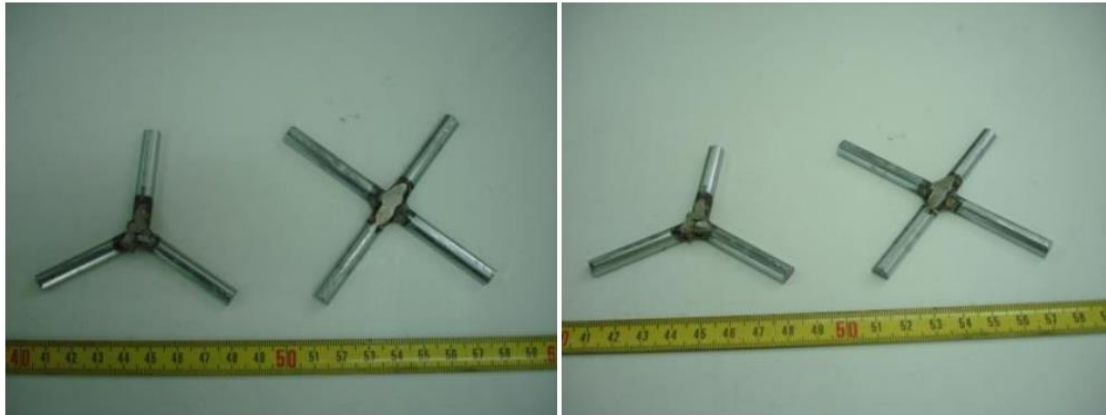
Μηχανισμός	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)	Μήκος (mm)
S1	20	1,9	50
S2	20	4,7	50
S3	20	7,2	50
S4	20	10,4	50

Πίνακας 2 Διαστάσεις μηχανισμών triggering S1, S2, S3 και S4

3.4.2 Μηχανισμοί Triggering T1, T2

Οι επόμενοι δυο μηχανισμοί triggering (T1, T2) που εξετάστηκαν είναι κατασκευές αστεροειδούς και σταυροειδούς μορφής αντίστοιχα από ράβδους κυκλικής διατομής και ίδιων διαστάσεων μεταξύ τους.

Όπως παριστάνεται παρακάτω, όλοι είχαν το ίδιο μήκος ακτινών (42mm), το ίδιο ύψος (3,5mm) και το ίδιο πλάτος (7mm). Ο μηχανισμός T1 αναφέρεται σε αυτόν της αστεροειδούς μορφής, ενώ ο T2 στον μηχανισμό σταυροειδούς μορφής.



Εικόνα 23 Μηχανισμοί triggering T1, T2 (από αριστερά προς τα δεξιά)

Μηχανισμός	Γεωμετρία	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)	Μήκος (mm)
T1	Αστέρας	3,5	7	42
T2	Σταυρός	3,5	7	42

Πίνακας 3 Διαστάσεις μηχανισμών triggering T1 και T2

3.4.3 Μηχανισμοί Triggering V1, V2

Ακολούθως, οι δυο επόμενοι μηχανισμοί triggering (V1, V2) που εξετάστηκαν είναι κατασκευές επίσης αστεροειδούς και σταυροειδούς μορφής αντίστοιχα από ράβδους κυκλικής πλέον διατομής και ίδιων διαστάσεων μεταξύ τους. Όπως παριστάνεται παρακάτω, όλοι είχαν το ίδιο μήκος ακτινών (70mm), και την ίδιο διάμετρο (10mm). Ο μηχανισμός V1 αναφέρεται σε αυτόν της αστεροειδούς μορφής, ενώ ο V2 στον μηχανισμό σταυροειδούς μορφής.



Εικόνα 24 Μηχανισμοί triggering V1, V2 (από δεξιά προς τα αριστερά)

Μηχανισμός	Γεωμετρία	Διάμετρος (mm)	Μήκος (mm)
V1	Αστέρας	10	70
V2	Σταυρός	10	70

Πίνακας 4 Διαστάσεις μηχανισμών triggering V1 και V2

3.4.4 Μηχανισμός Triggering U1

Τέλος, ο τελευταίος μηχανισμός triggering (U1) που εξετάστηκε είναι μια απλή κυλινδρική ράβδος κυκλικής διατομής και διαμέτρου 10mm.



Εικόνα 25 Μηχανισμοί triggering U1

3.5 Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκαν συνολικά δεκαπέντε πειραματικές δοκιμές αξονικής συμπίεσης υπό ταχύτητα φόρτισης 20mm/min προσδίδοντας ημι-στατικό χαρακτήρα. Τα τρία εξεταζόμενα δοκίμια συμπίεστηκαν τόσο χωρίς, όσο και με την παρουσία μηχανισμών triggering ώστε να παραχθούν οι αναγκαίες συγκρίσεις προς εξαγωγή συμπερασμάτων. Οι πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν χαρακτηρίζονται η καθεμία από μια κωδική ονομασία η οποία πληροφορεί για το εξεταζόμενο δοκίμιο και τον εφαρμοζόμενο (εάν υπήρχε) μηχανισμό triggering, όπως καταδεικνύει ο πίνακας 5 παρακάτω.

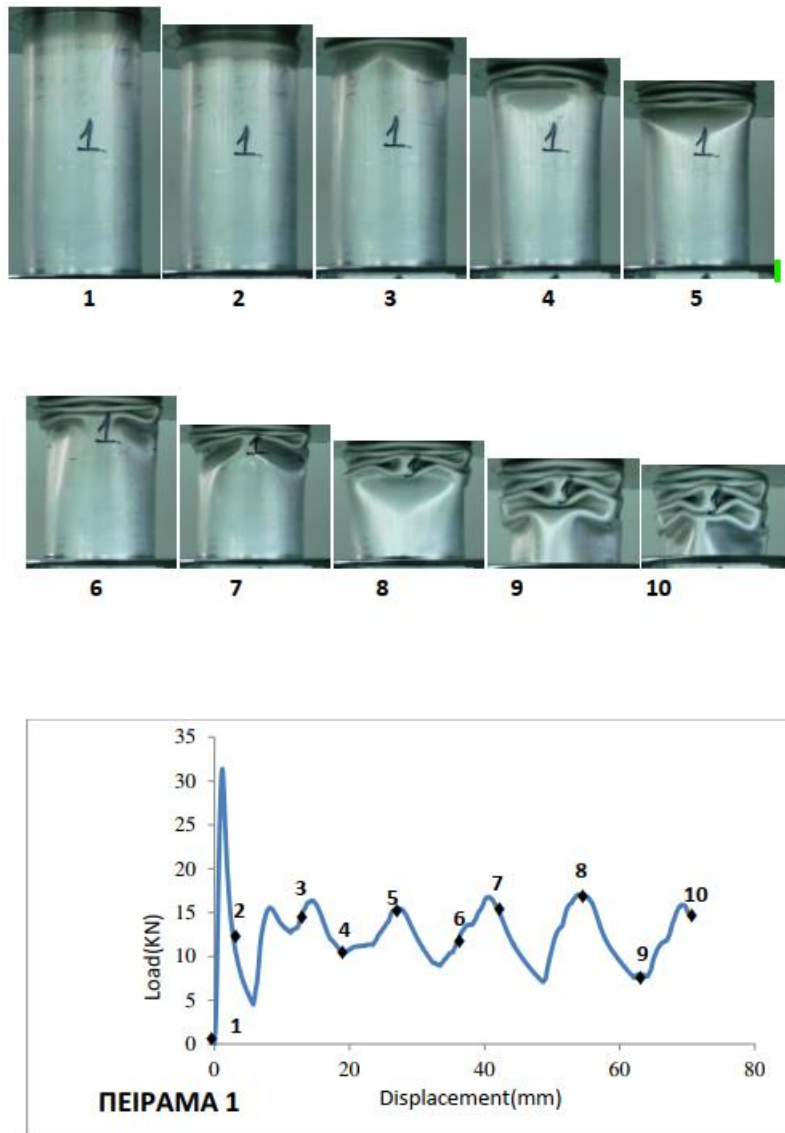
Κωδική Ονομασία Πειράματος	Δοκίμιο	Μηχανισμός triggering
1	A2	-
2-1	A2	S1
2-2	A2	S2
2-3	A2	S3
2-4	A2	S4
3-1	A2	T1
3-2	A2	T2
4	A3	-
4-1-α	A3	V1
4-2	A3	T2
4-2-α	A3	V2
4-3-α	A3	U1
5	A1	-
5-1	A1	T1
5-2	A1	T2

Πίνακας 5 Πειραματικές δοκιμές

3.5.1 Πείραμα 1

Στο πείραμα 1 το δοκίμιο A2 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 70mm μέχρι το τελικό ύψος των 30mm, χωρίς κάποιο μηχανισμό triggering. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

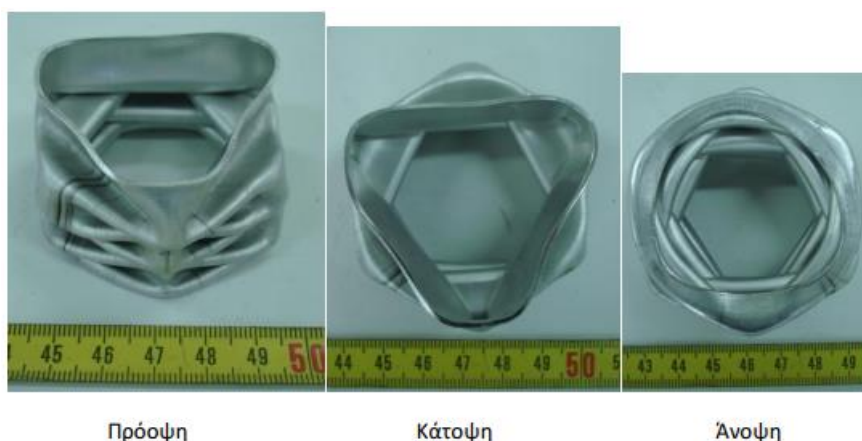
Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρόν πείραμα, το δοκίμιο A2 κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο, σχηματίζοντας πέντε μη-εκτατούς 3D diamond λοβούς, όπως άλλωστε αναμενόταν βάση του σχήματος της εικόνας 10 για $L/D=3,33$ και $D/t=50$.



Εικόνα 26 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 1

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	30
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	31,6
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	12,4
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	870
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	36.6
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,39

Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 1

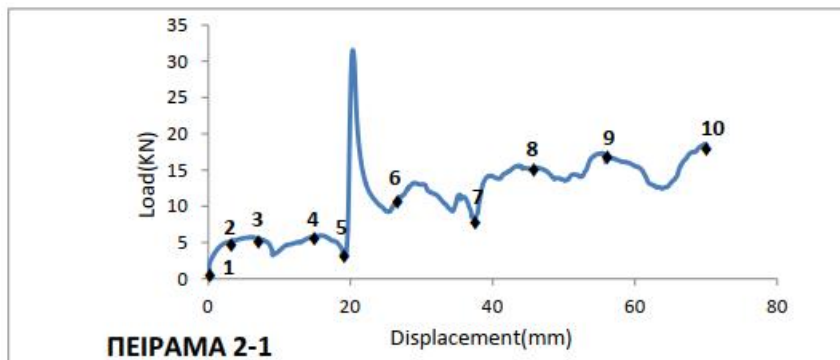
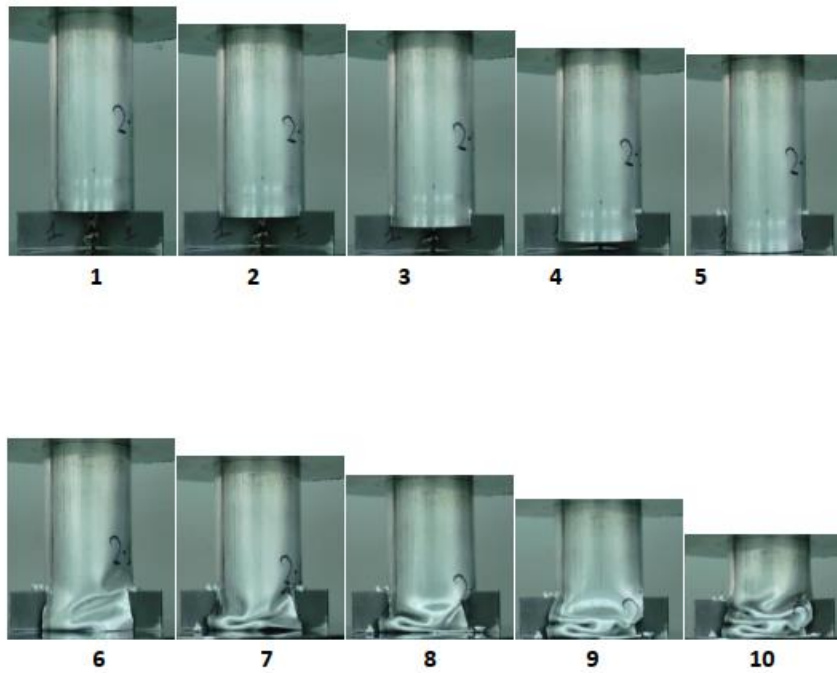


Εικόνα 27 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A2 πειράματος 1

3.5.2 Πείραμα 2-1

Στο πείραμα 2-1 το δοκίμιο A2 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 70mm μέχρι το τελικό ύψος των 30mm υπό τον μηχανισμό triggering S1. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατέρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

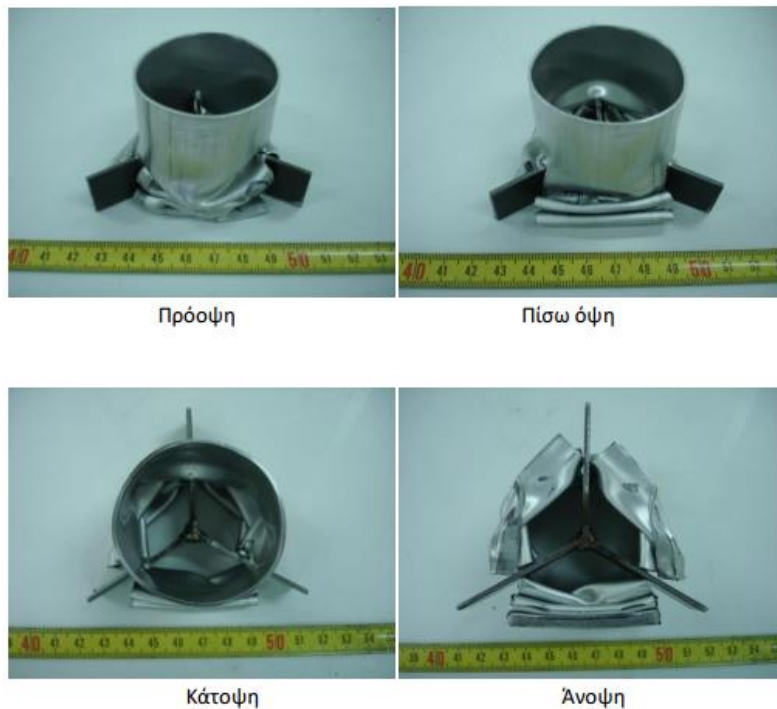
Αναφορικά με τον μηχανισμό κατέρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρόν πείραμα με την επήρεια του μηχανισμού triggering S1, το δοκίμιο A2 κατέρρευσε υπό ακανόνιστη μορφή. Η αιχμηρή γεωμετρία των ελασμάτων του μηχανισμού triggering S1 προκάλεσε την απόσχιση του δοκιμίου στα σημεία επαφής, ενώ κατά τη βράχυνση των 20mm, όσο δηλαδή και το ύψος του μηχανισμού triggering, παρατηρείται το μέγιστο φορτίο εφόσον πλέον η περαιτέρω συμπίεση του δοκιμίου βρίσκει αντίσταση στο συσσωρευμένο παραμορφωμένο υλικό στη βάση της πλάκας το οποίο αυξάνει την ενεργό διατομή συμπίεσης. Επιπλέον δε, όσο αυξάνεται η βράχυνση του δοκιμίου τόσο περισσότερο υλικό συγκεντρώνεται προς τη βάση και άρα τόσο μεγαλύτερο φορτίο συμπίεσης απαιτείται για την περαιτέρω παραμόρφωσή του, όπως παρατηρείται και στην αυξητική τάση της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης.



Εικόνα 28 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 2-1

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	30
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	31,5
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	11,5
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	810
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	34
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,36

Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 2-1

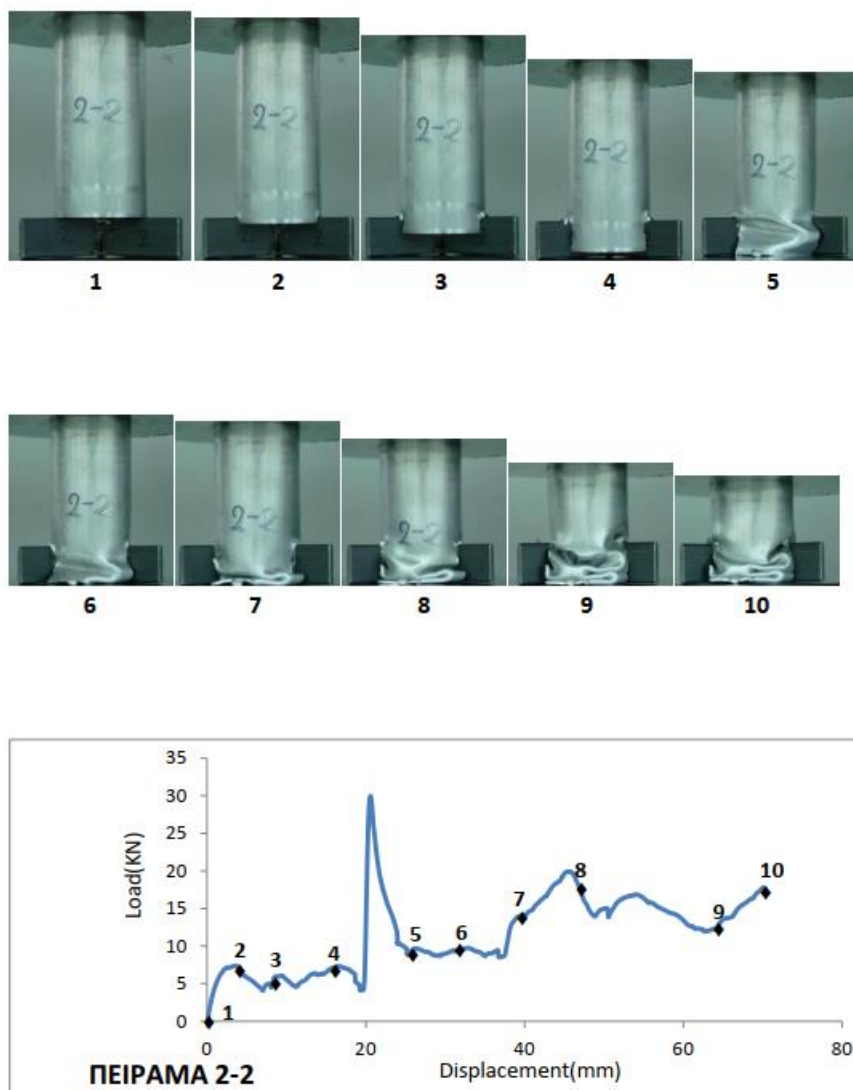


Εικόνα 29 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A2 πειράματος 2-1

3.5.3 Πείραμα 2-2

Στο πείραμα 2-2 το δοκίμιο A2 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 70mm μέχρι το τελικό ύψος των 30mm υπό τον μηχανισμό triggering S2. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατέρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

Αναφορικά με τον μηχανισμό κατέρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρών πείραμα με την επήρεια του μηχανισμού triggering S2, το δοκίμιο A2 κατέρρευσε υπό ακανόνιστη μορφή. Η αιχμηρή γεωμετρία των ελασμάτων του μηχανισμού triggering S2 προκάλεσε και εδώ την απόσχιση του δοκιμίου στα σημεία επαφής, ενώ κατά τη βράχυνση των 20mm, όσο δηλαδή και το ύψος του μηχανισμού triggering, παρατηρείται το μέγιστο φορτίο εφόσον πλέον η περαιτέρω συμπίεση του δοκιμίου βρίσκει αντίσταση στο συσσωρευμένο παραμορφωμένο υλικό στη βάση της πλάκας το οποίο αυξάνει την ενεργό διατομή συμπίεσης. Επιπλέον δε, όσο αυξάνεται η βράχυνση του δοκιμίου τόσο περισσότερο υλικό συγκεντρώνεται προς τη βάση και άρα τόσο μεγαλύτερο φορτίο συμπίεσης απαιτείται για την περαιτέρω παραμόρφωσή του, όπως παρατηρείται και στην αυξητική τάση της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης.



Εικόνα 30 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 2-2

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	30
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	30
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	11,6
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	812
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	34.3
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,387

Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 2-2

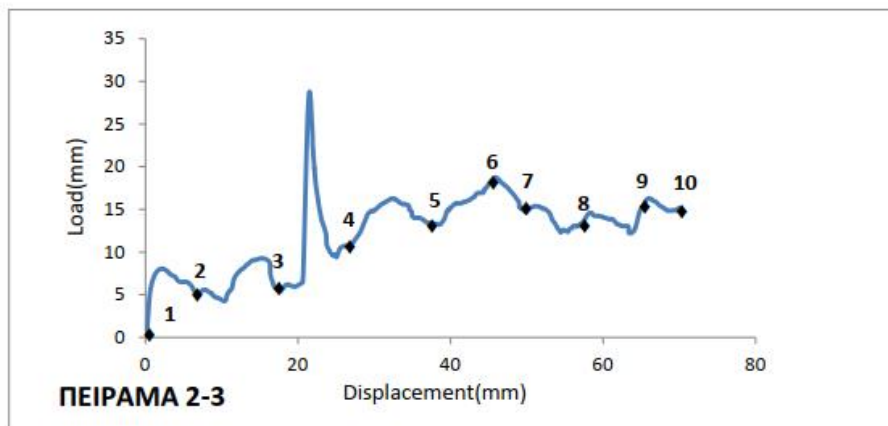
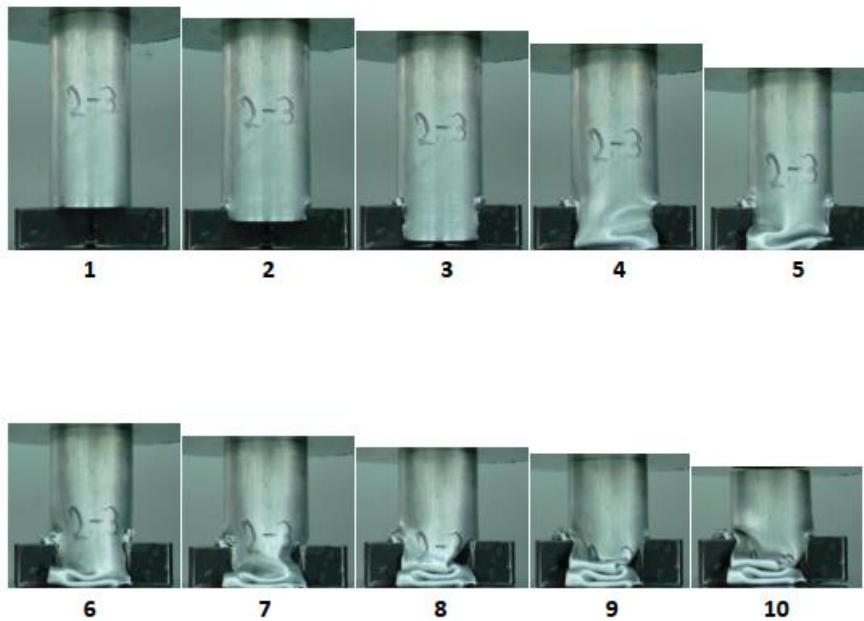


Εικόνα 31 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A2 πειράματος 2-2

3.5.4 Πείραμα 2-3

Στο πείραμα 2-3 το δοκίμιο A2 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 70mm μέχρι το τελικό ύψος των 30mm υπό τον μηχανισμό triggering S3. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

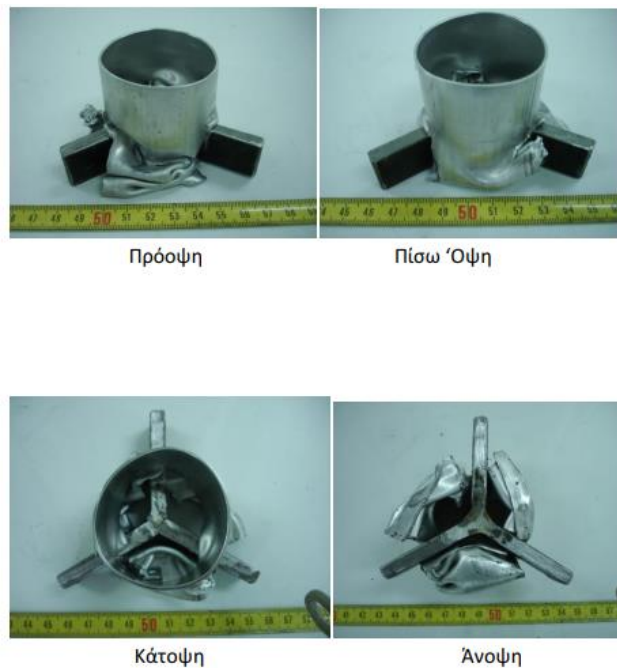
Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρών πείραμα με την επήρεια του μηχανισμού triggering S3, το δοκίμιο A2 κατέρρευσε υπό ακανόνιστη μορφή. Η αιχμηρή γεωμετρία των ελασμάτων του μηχανισμού triggering S3 προκάλεσε και εδώ την απόσχιση του δοκιμίου στα σημεία επαφής, ενώ κατά τη βράχυνση των 20mm, όσο δηλαδή και το ύψος του μηχανισμού triggering, παρατηρείται το μέγιστο φορτίο εφόσον πλέον η περαιτέρω συμπίεση του δοκιμίου βρίσκει αντίσταση στο συσσωρευμένο παραμορφωμένο υλικό στη βάση της πλάκας το οποίο αυξάνει την ενεργό διατομή συμπίεσης. Επιπλέον δε, όσο αυξάνεται η βράχυνση του δοκιμίου τόσο περισσότερο υλικό συγκεντρώνεται προς τη βάση και άρα τόσο μεγαλύτερο φορτίο συμπίεσης απαιτείται για την περαιτέρω παραμόρφωσή του, όπως παρατηρείται και στην αυξητική τάση της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης. Τέλος, παρατηρούμε πως καθώς αυξάνεται το πάχος των ελασμάτων του αστεροειδούς μηχανισμού triggering, μειώνεται περισσότερο το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης και η απορροφώμενη ενέργεια αυξάνεται.



Εικόνα 32 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 2-3

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	30
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	28,8
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	12,32
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	862
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	36.3
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,43

Πίνακας 9 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 2-3



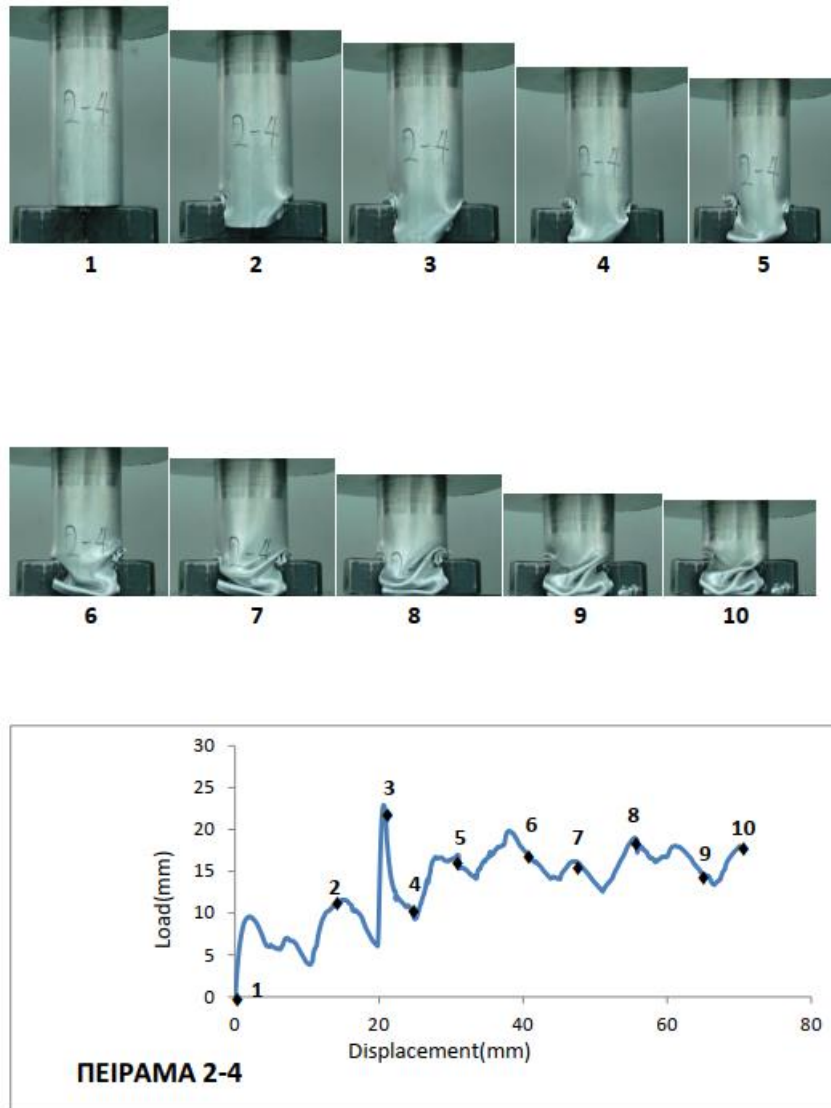
Εικόνα 33 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A2 πειράματος 2-3

3.5.5 Πείραμα 2-4

Στο πείραμα 2-4 το δοκίμιο A2 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 70mm μέχρι το τελικό ύψος των 30mm υπό τον μηχανισμό triggering S4. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρών πείραμα με την επήρεια του μηχανισμού triggering S4, το δοκίμιο A2 κατέρρευσε υπό ακανόνιστη μορφή. Η αιχμηρή γεωμετρία των ελασμάτων του μηχανισμού triggering S4 προκάλεσε και εδώ την απόσχιση του δοκιμίου στα σημεία επαφής, ενώ κατά τη βράχυνση των 20mm, όσο δηλαδή και το ύψος του μηχανισμού triggering, παρατηρείται το μέγιστο φορτίο εφόσον πλέον η περαιτέρω συμπίεση του δοκιμίου βρίσκει αντίσταση στο συσσωρευμένο παραμορφωμένο υλικό στη βάση της πλάκας το οποίο αυξάνει την ενεργό διατομή συμπίεσης. Επιπλέον δε, όσο αυξάνεται η βράχυνση του δοκιμίου τόσο περισσότερο υλικό συγκεντρώνεται προς τη βάση και άρα τόσο μεγαλύτερο φορτίο συμπίεσης απαιτείται για την περαιτέρω παραμόρφωσή του, όπως παρατηρείται και στην αυξητική τάση της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης. Πρόσθετα, παρατηρούμε πως καθώς αυξάνεται το πάχος των ελασμάτων του αστεροειδούς μηχανισμού triggering, μειώνεται περισσότερο το μέγιστο φορτίο

κατάρρευσης και η απορροφώμενη ενέργεια αυξάνεται. Τέλος, ο μηχανισμός triggering S4 προκαλεί μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης όπως και οι υπόλοιποι, αλλά είναι ο πρώτος που βελτιώνει μάλιστα και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας συγκριτικά με τη διάταξη χωρίς triggering.



Εικόνα 34 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 2-4

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	30
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	22,9
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	13,5
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	942
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	39.9
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,59

Πίνακας 10 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 2-4

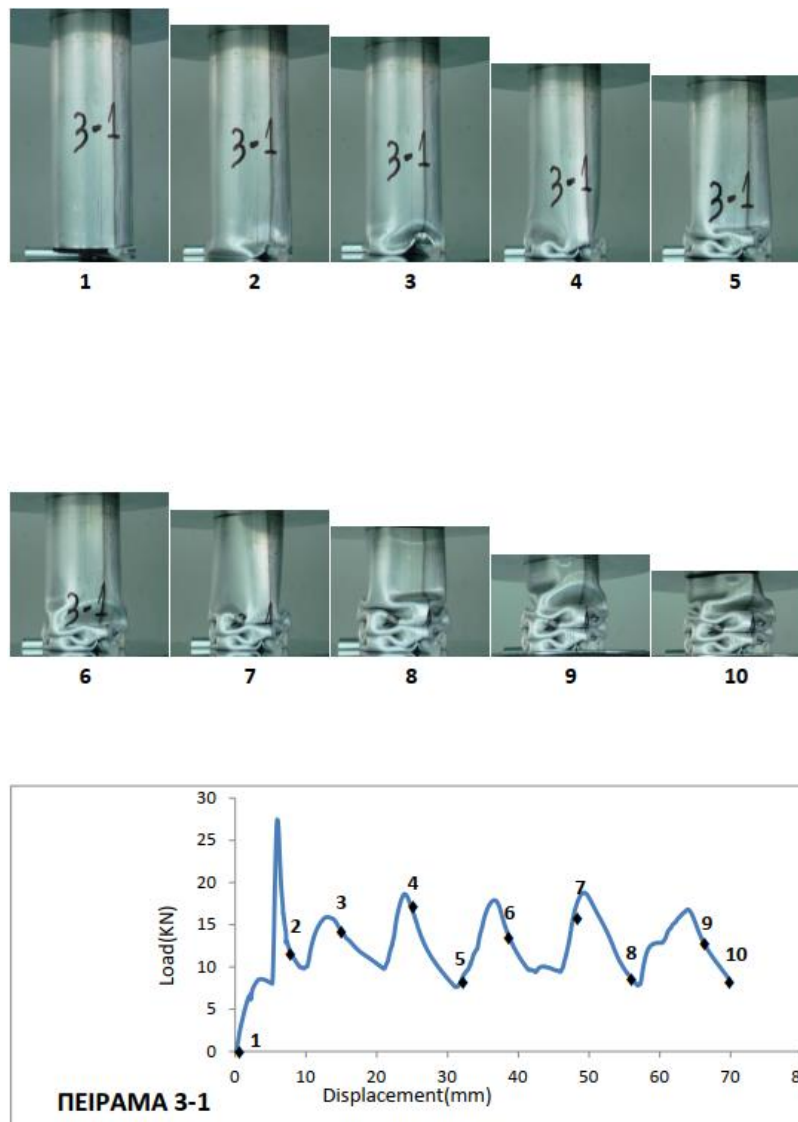


Εικόνα 35 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A2 πειράματος 2-4

3.5.6 Πείραμα 3-1

Στο πείραμα 3-1 το δοκίμιο A2 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 70mm μέχρι το τελικό ύψος των 30mm υπό τον μηχανισμό triggering T1. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

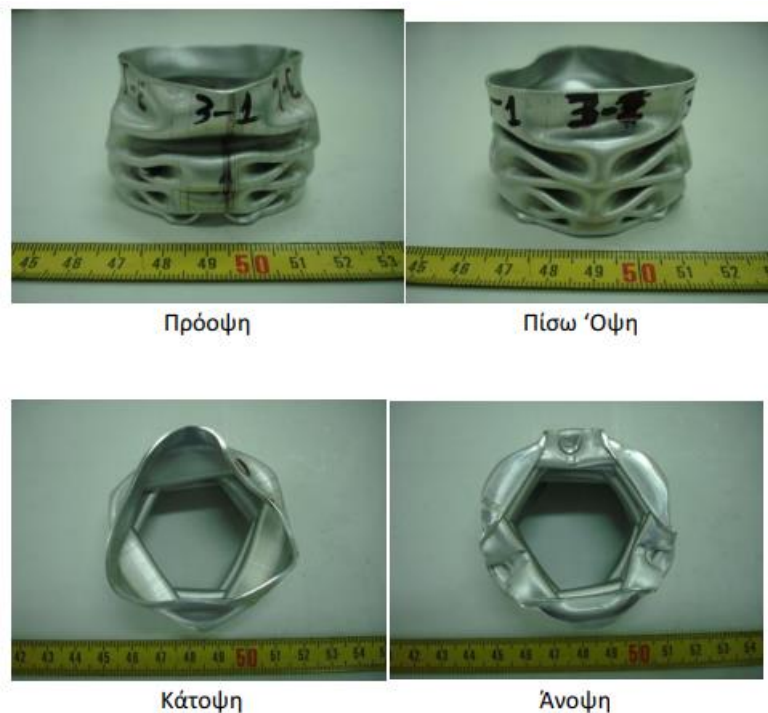
Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρών πείραμα με την επήρεια του μηχανισμού triggering T1, το δοκίμιο A2 κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρική μορφή σχηματίζοντας έξι μη-εκτατούς 3D diamond λοβούς. Η κυκλική διατομή των ράβδων triggering ακτίνας περίπου 5mm δεν προκάλεσε κάποια απόσχιση στο δοκίμιο. Το μέγιστο φορτίο παρατηρήθηκε δε όταν το συμπιεζόμενο δοκίμιο υπερκάλυψε το μηχανισμό triggering και άρχισε να συμπιέζεται συγκεντρωμένο στην κάτω πλάκα, όπου πλέον λόγω της συγκέντρωσης του υλικού παρατηρήθηκε η μέγιστη φόρτιση συμπίεσης περίπου στη βράχυνση των 5mm. Τέλος, η αστεροειδής μορφή του μηχανισμού triggering επέβαλε τον μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης μέσω της ανάπτυξης 3D diamond λοβών, καθώς αυτοί άρχισαν να σχηματίζονται από τη γεωμετρία του μηχανισμού triggering όπου οι ράβδοι σχηματίζουν περιεχόμενη γωνία 120°, όση δηλαδή και η γωνία μεταξύ των λοβών.



Εικόνα 36 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 3-1

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	30
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	27,4
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	12,4
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	866
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	36.6
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,45

Πίνακας 11 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 3-1

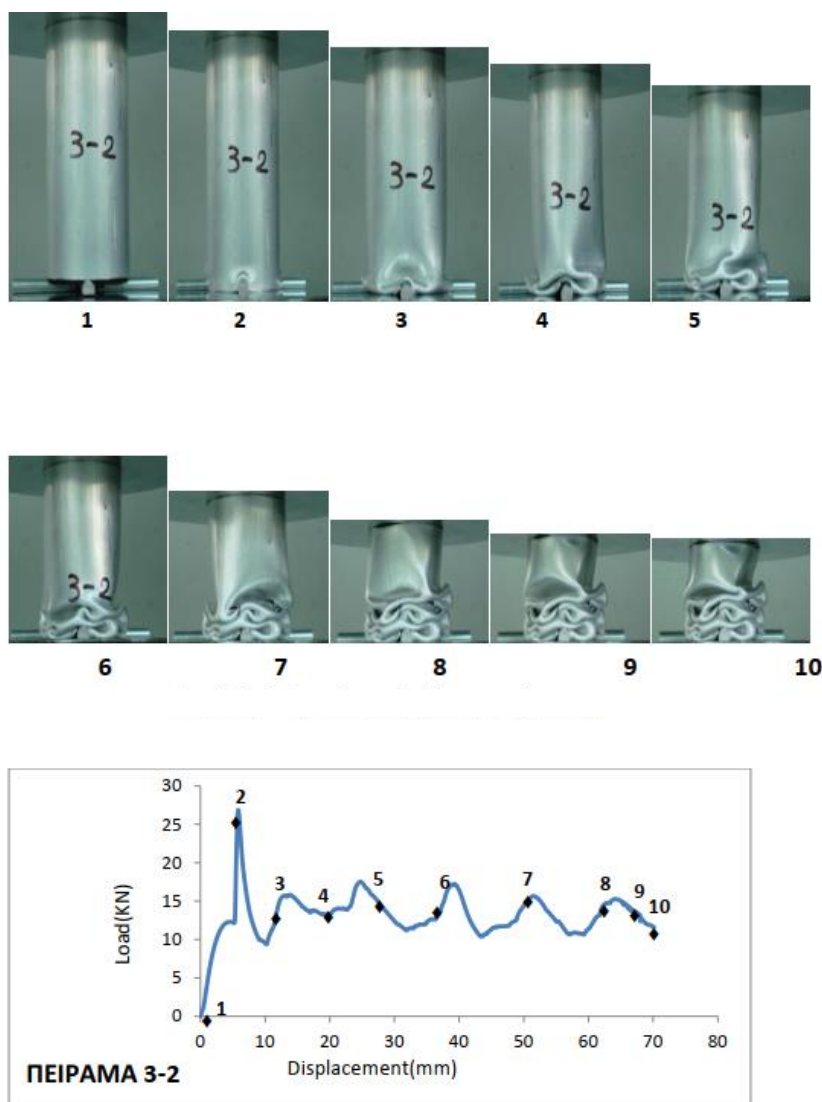


Εικόνα 37 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A2 πειράματος 3-1

3.5.7 Πείραμα 3-2

Στο πείραμα 3-2 το δοκίμιο A2 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 70mm μέχρι το τελικό ύψος των 30mm υπό τον μηχανισμό triggering T2. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρών πείραμα με την επήρεια του μηχανισμού triggering T2, το δοκίμιο A2 κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρική μορφή σχηματίζοντας έξι μη-εκτατούς 3D diamond λοβούς. Η κυκλική διατομή των ράβδων triggering ακτίνας περίπου 5mm δεν προκάλεσε κάποια απόσχιση στο δοκίμιο. Το μέγιστο φορτίο παρατηρήθηκε δε όταν το συμπιεζόμενο δοκίμιο υπερκάλυψε το μηχανισμό triggering και άρχισε να συμπιέζεται συγκεντρωμένο στην κάτω πλάκα, όπου πλέον λόγω της συγκέντρωσης του υλικού παρατηρήθηκε η μέγιστη φόρτιση συμπίεσης περίπου στη βράχυνση των 5mm. Τέλος, η σταυροειδής μορφή του μηχανισμού triggering προσπάθησε να επιβάλει τον σχηματισμό 2D diamond λοβών χωρίς όμως να το καταφέρει εφόσον το δοκίμιο κατέρρευσε τελικά σχηματίζοντας 3D diamond λοβούς.



Εικόνα 38 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 3-2

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	30
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	26,8
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	13,2
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	923
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	39
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,49

Πίνακας 12 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 3-2

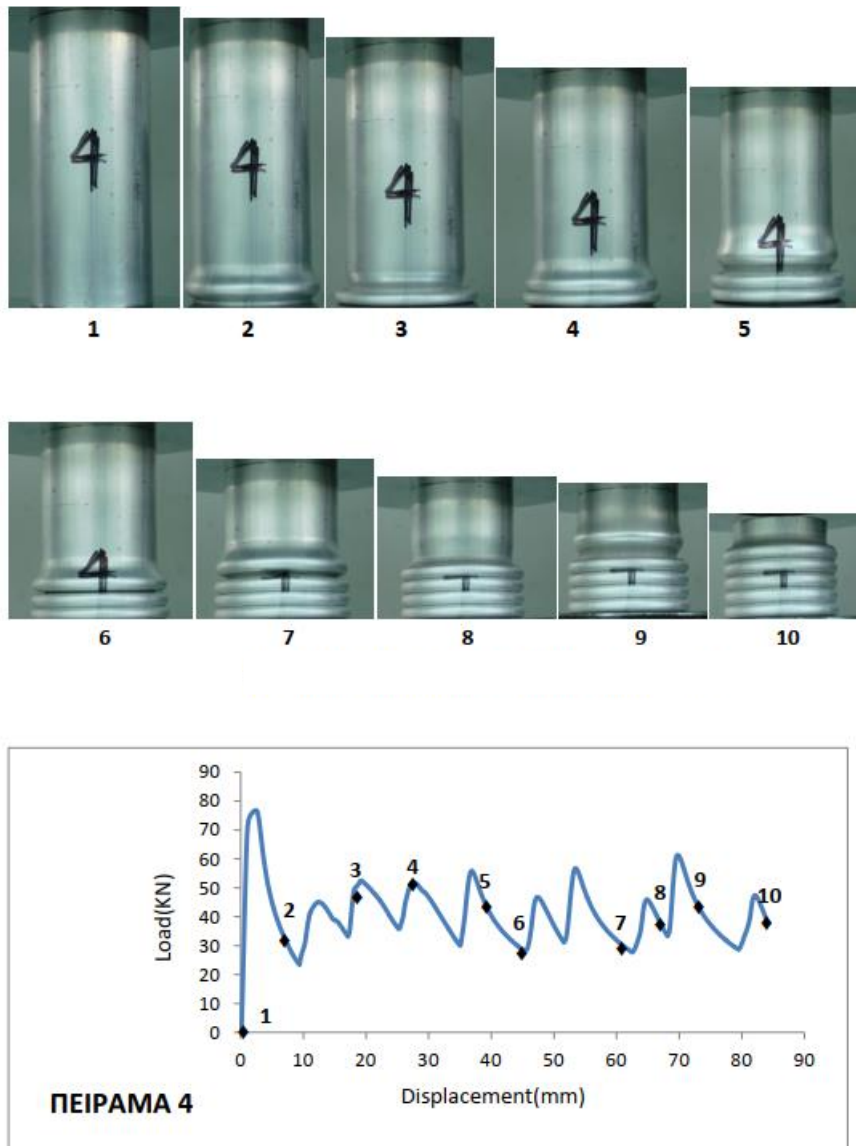


Εικόνα 39 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A2 πειράματος 3-2

3.5.8 Πείραμα 4

Στο πείραμα 4 το δοκίμιο A3 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 84mm μέχρι το τελικό ύψος των 36mm, χωρίς κάποιο μηχανισμό triggering. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

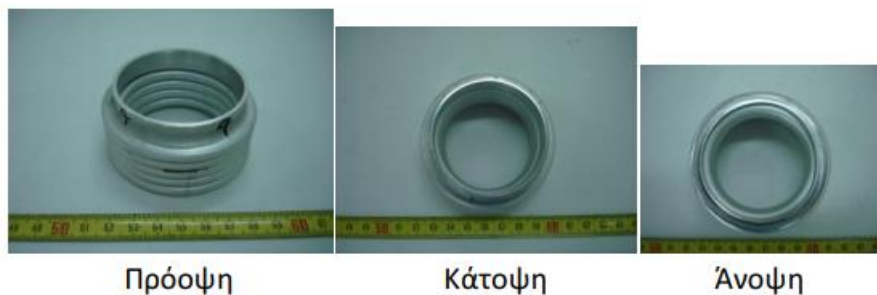
Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρών πείραμα, το δοκίμιο A3 κατέρρευσε υπό αξονοσυμμετρικό τρόπο, σχηματίζοντας πέντε εκτατούς αξονοσυμμετρικούς λοβούς, όπως άλλωστε αναμενόταν βάση του σχήματος της εικόνας 10 για $L/D=2$ και $D/t=30$.



Εικόνα 40 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 4

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	36
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	76,8
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	41,3
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	3470
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	30.5
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,538

Πίνακας 13 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 4

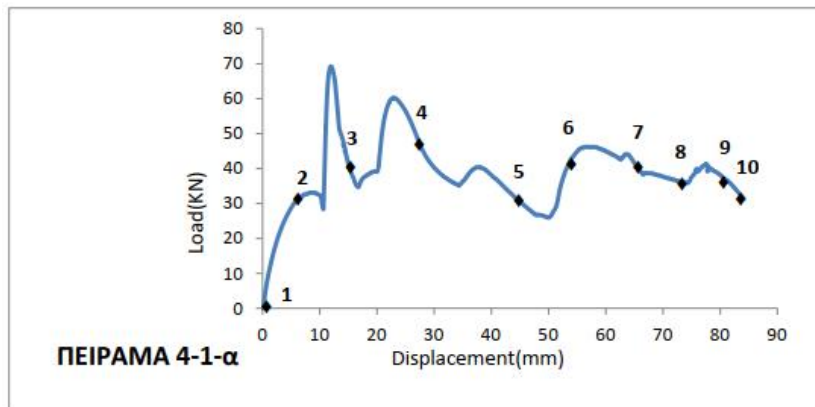
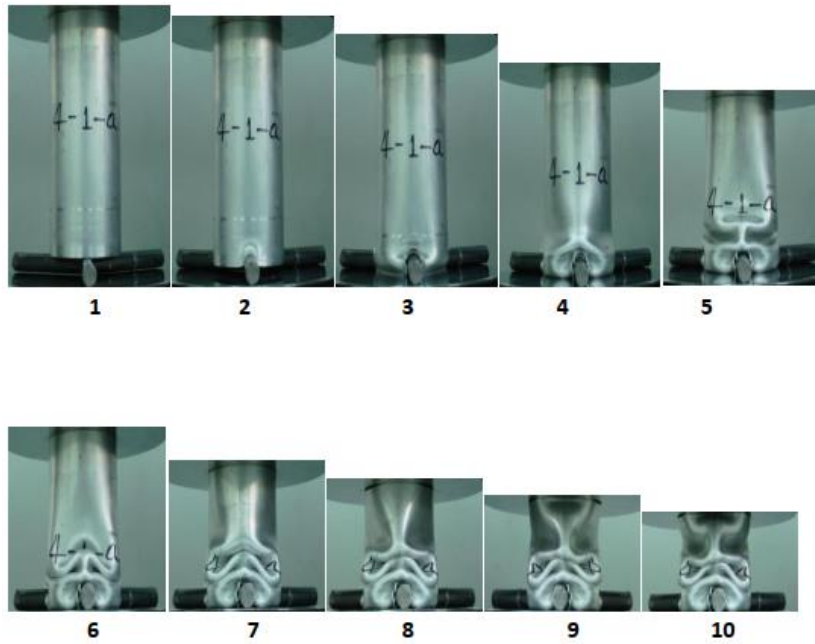


Εικόνα 41 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A3 πειράματος 4

3.5.9 Πείραμα 4-1-α

Στο πείραμα 4-1-α το δοκίμιο A3 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 84mm μέχρι το τελικό ύψος των 36mm υπό μηχανισμό triggering V1. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

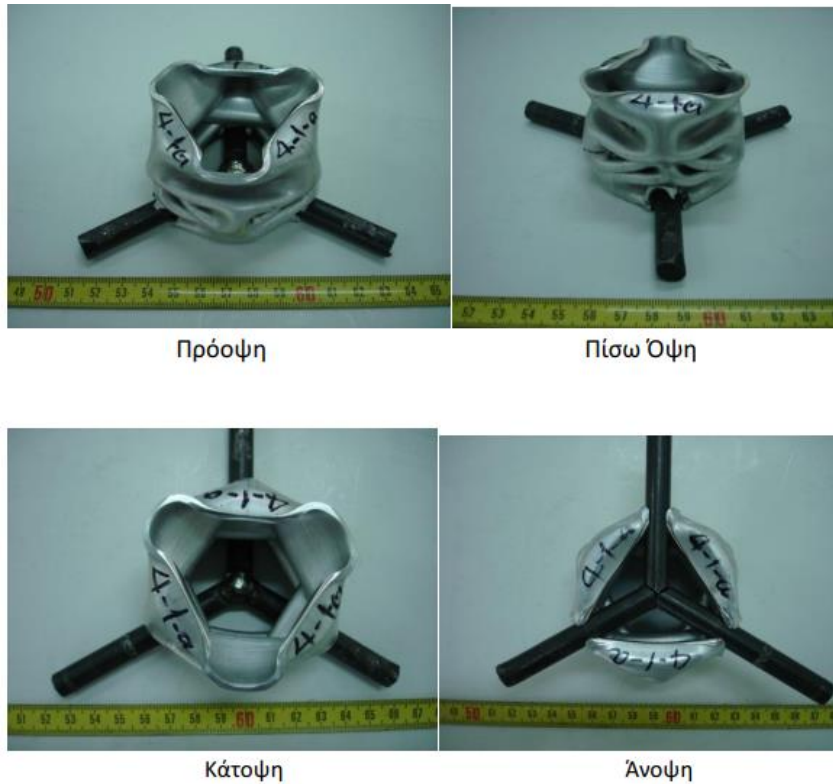
Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρών πείραμα, το δοκίμιο A3 κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο, σχηματίζοντας τέσσερις μη-εκτατούς 3D diamond λοβούς χωρίς κάποια απόσχιση του. Το συγκεκριμένο πείραμα φανερώνει εμφανώς την επίδραση του μηχανισμού triggering ο οποίος αφενός μείωσε το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης, αφετέρου επέβαλε μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση εξαιτίας της αστεροειδούς μορφής του, σε αντίθεση με την αρχική τάση του δοκιμίου για αξονοσυμμετρική κατάρρευση όπως φανέρωσε το πείραμα 4.



Εικόνα 42 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 4-1-α

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	36
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	69,2
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	38,7
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	3248
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	28.6
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,558

Πίνακας 14 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 4-1-α

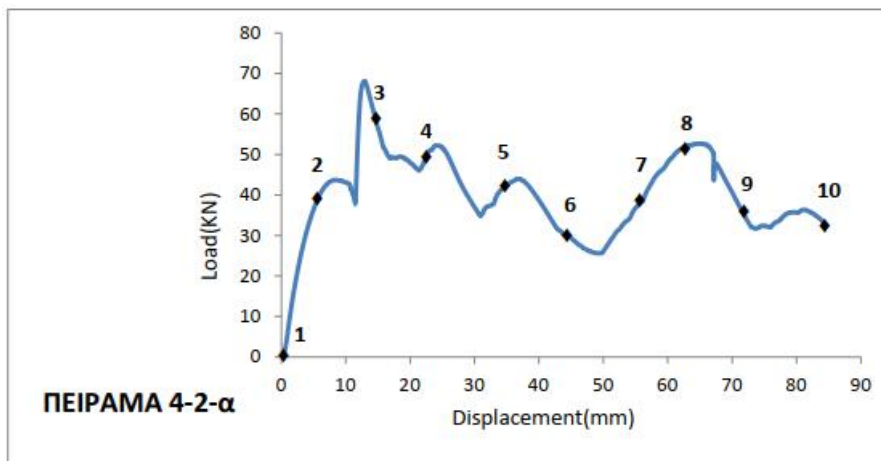
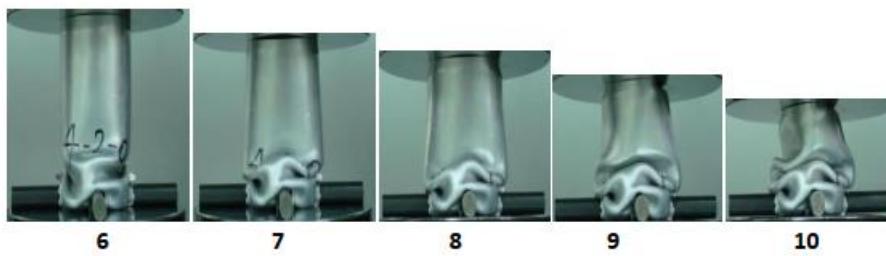
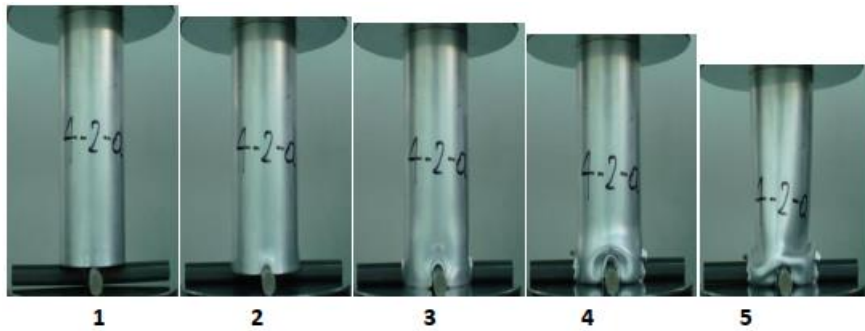


Εικόνα 43 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A3 πειράματος 4-1-α

3.5.10 Πείραμα 4-2-α

Στο πείραμα 4-2-α το δοκίμιο A3 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 84mm μέχρι το τελικό ύψος των 36mm υπό μηχανισμό triggering V2. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρών πείραμα, το δοκίμιο A3 κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο, σχηματίζοντας τρεις μη-εκτατούς 2D diamond λοβούς ελλειπτικής γεωμετρίας, χωρίς κάποια απόσχιση του. Το συγκεκριμένο πείραμα φανερώνει επίσης εμφανώς την επίδραση του μηχανισμού triggering ο οποίος αφενός μείωσε το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης, αφετέρου επέβαλε μη-αξονοσυμμετρική 2D diamond κατάρρευση εξαιτίας της σταυροειδούς μορφής του, σε αντίθεση με την αρχική τάση του δοκιμίου για αξονοσυμμετρική κατάρρευση όπως φανέρωσε το πείραμα 4.



Εικόνα 44 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 4-2-α

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	36
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	68.1
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	40
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	3360
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	29.5
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0.587

Πίνακας 15 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 4-2-α

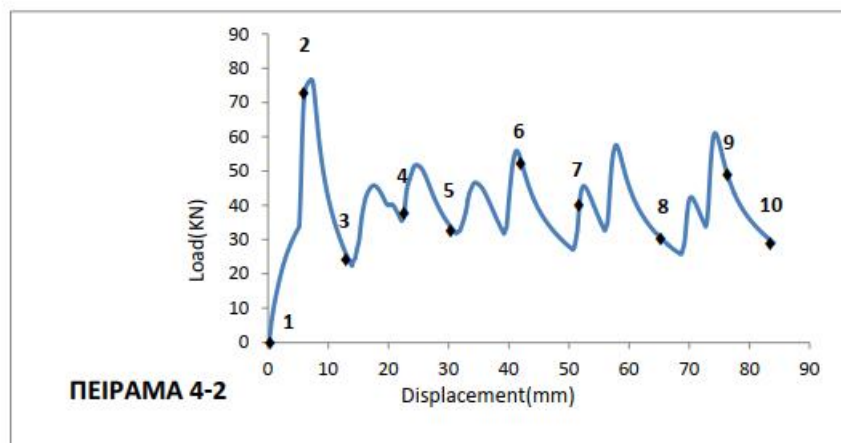
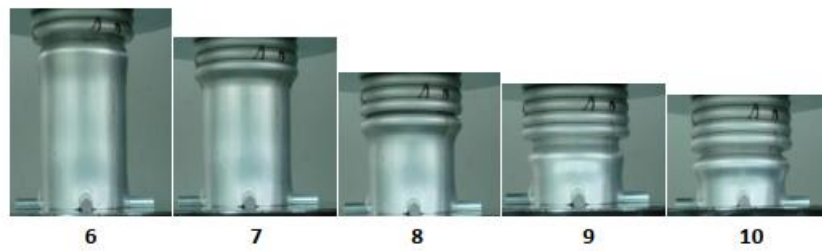
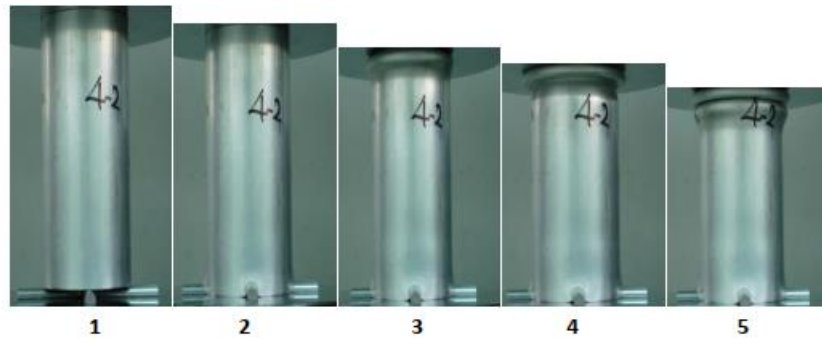


Εικόνα 45 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A3 πειράματος 4-2-α

3.5.11 Πείραμα 4-2

Στο πείραμα 4-2 το δοκίμιο A3 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 84mm μέχρι το τελικό ύψος των 36mm υπό μηχανισμό triggering T2. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

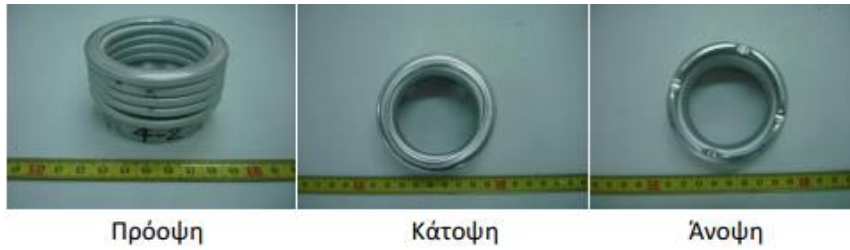
Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρών πείραμα, το δοκίμιο A3 κατέρρευσε υπό αξονοσυμμετρικό τρόπο όπως και στο πείραμα 4 χωρίς triggering. Αυτό συνέβη διότι το δοκίμιο συμπιεζόμενο άρχισε να καταρρέει από το άνω άκρο του σχηματίζοντας αξονοσυμμετρικούς λοβούς, πέντε στο σύνολο, και έτσι η επίδραση του triggering ήταν εντελώς αμελητέα τόσο ως προς την μείωση του μέγιστου φορτίου όσο και ως προς την επιρροή στον μηχανισμό κατάρρευσης.



Εικόνα 46 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 4-2

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	36
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	76,4
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	39,4
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	3310
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	29.1
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,516

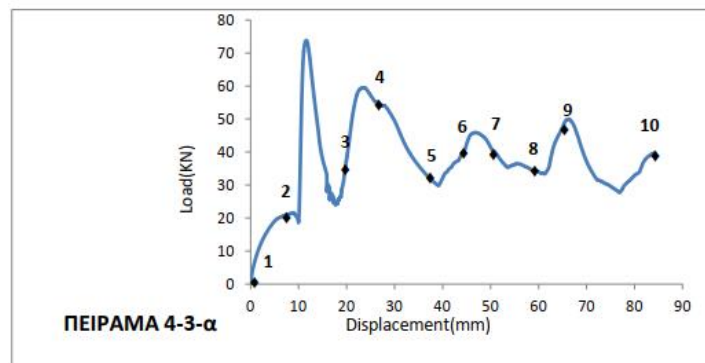
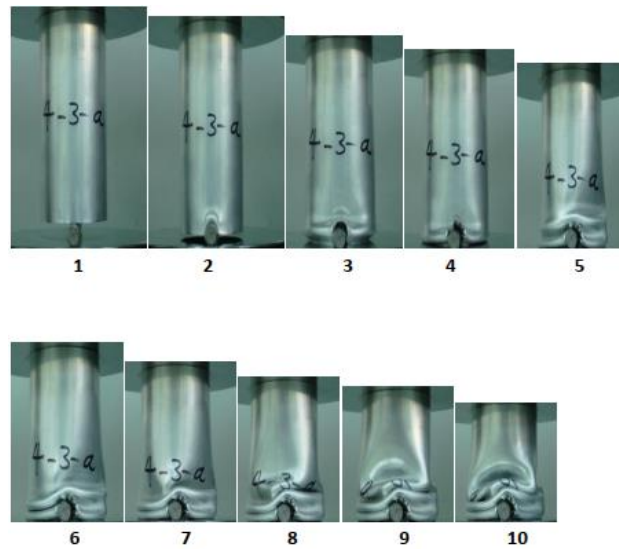
Πίνακας 16 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 4-2



Εικόνα 47 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου Α3 πειράματος 4-2

3.5.12 Πείραμα 4-3-α

Στο πείραμα 4-3-α το δοκίμιο Α3 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 84mm μέχρι το τελικό ύψος των 36mm υπό μηχανισμό triggering U1. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 48 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 4-3-α

Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρών πείραμα, το δοκίμιο A3 κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας τέσσερις μη-εκτατούς 3D diamond λοβούς, παρόλο που ο μηχανισμός U1 προσπάθησε μέσω της γεωμετρίας του να του επιβάλλει το σχηματισμό 2D diamond λοβών.

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	36
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	73.8
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	37.6
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	3160
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	32.77
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0.51

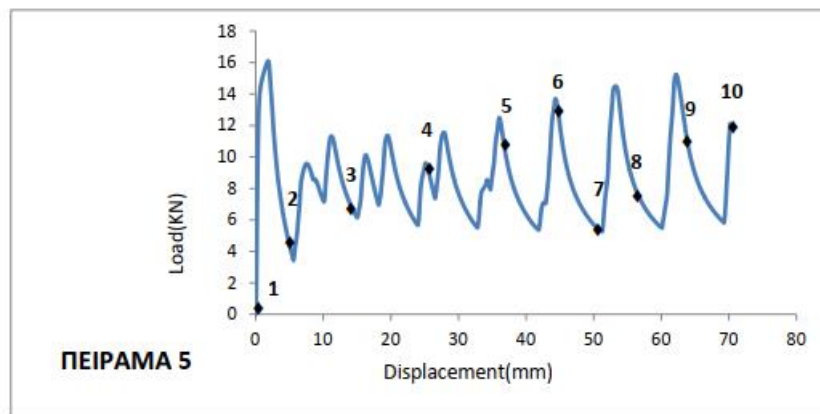
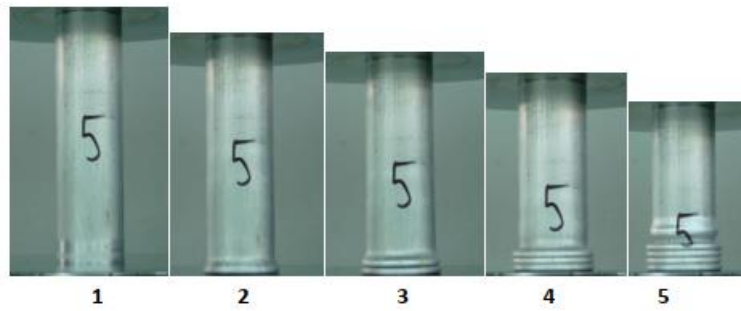
Πίνακας 17 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 4-3-α



Εικόνα 49 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A3 πειράματος 4-3-α

3.5.13 Πείραμα 5

Στο πείραμα 5 το δοκίμιο A1 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 70mm μέχρι το τελικό ύψος των 30mm χωρίς μηχανισμό triggering. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 50 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 5

Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρών πείραμα, το δοκίμιο A1 κατέρρευσε υπό αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας οκτώ εκτατούς λοβούς όπως άλλωστε αναμενόταν για τους λόγους $L/D=3.33$ και $D/t=30$.

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	30
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	16,1
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	8,6
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	600
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	15.1
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,532

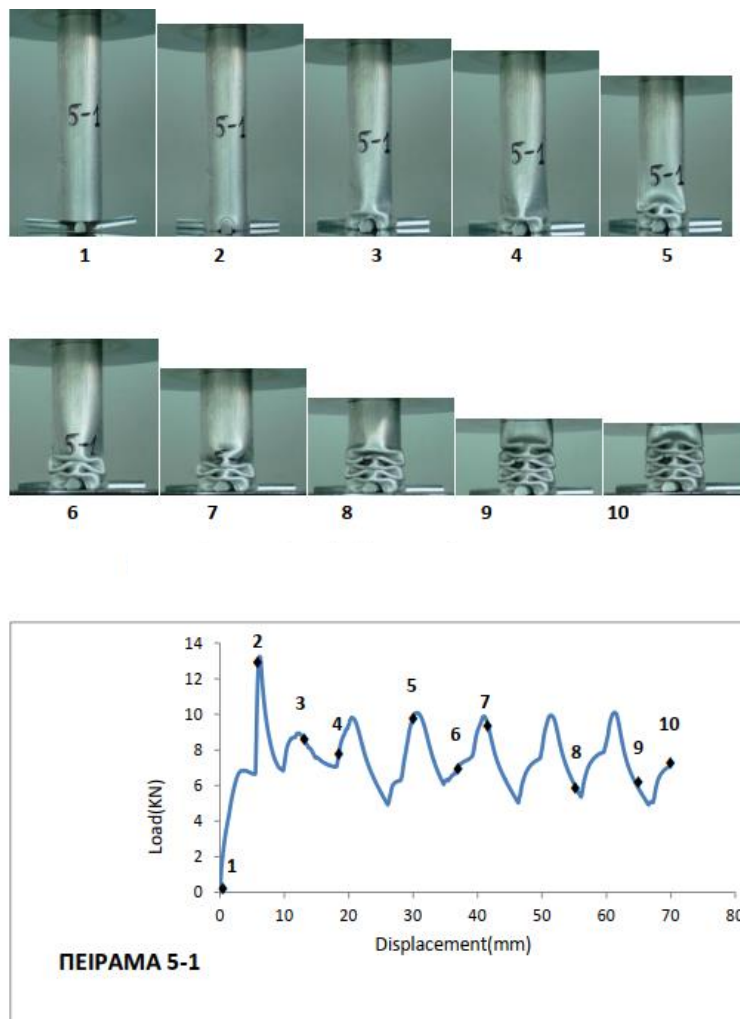
Πίνακας 18 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 5



Εικόνα 51 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου Α1 πειράματος 5

3.5.14 Πείραμα 5-1

Στο πείραμα 5-1 το δοκίμιο Α1 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 70mm μέχρι το τελικό ύψος των 30mm υπό τον μηχανισμό triggering T1. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

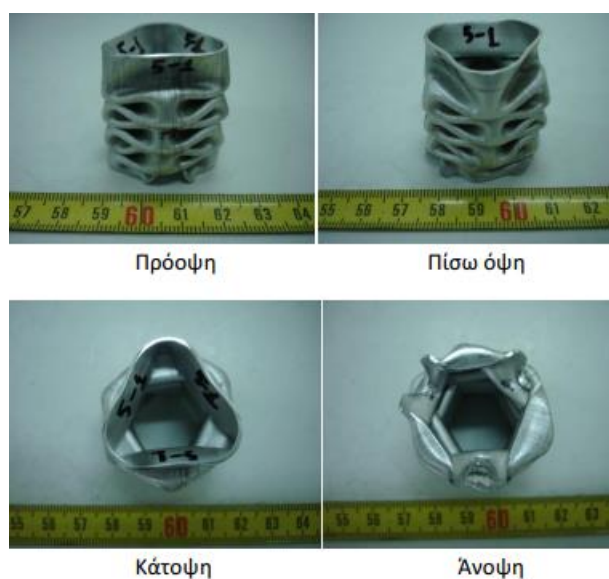


Εικόνα 52 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 5-1

Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρών πείραμα, το δοκίμιο A1 κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας επτά μη-εκτατούς 3D diamond λοβούς επηρεαζόμενο από την αστεροειδή μορφή του εφαρμοσμένου triggering το οποίο μετέτρεψε την αξονοσυμμετρική (πείραμα 5) σε μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση (πείραμα 5-1).

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	30
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	13,2
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	7,4
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	520
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	12.95
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,56

Πίνακας 19 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 5-1

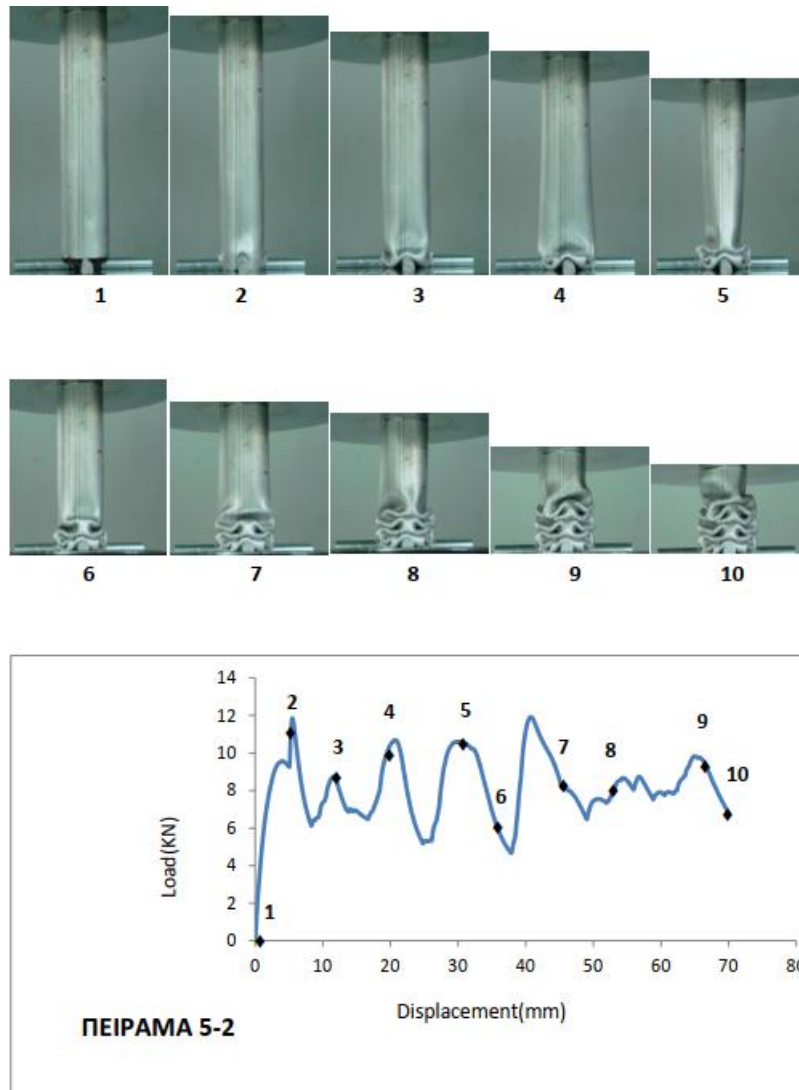


Εικόνα 53 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A1 πειράματος 5-1

3.5.15 Πείραμα 5-2

Στο πείραμα 5-2 το δοκίμιο A1 συμπιέστηκε βραχυνόμενο κατά 70mm μέχρι το τελικό ύψος των 30mm υπό τον μηχανισμό triggering T2. Τα αποτελέσματα παριστάνονται παρακάτω τόσο αναφορικά με τα στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τη τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου, όσο και με το διάγραμμα

δύναμης-μετατόπισης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

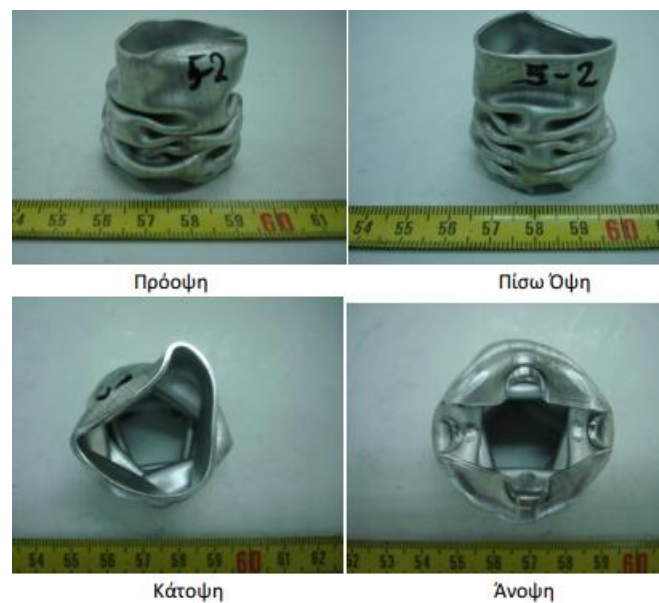


Εικόνα 54 Διάγραμμα F-s και στιγμιότυπα κατάρρευσης πειράματος 5-2

Αναφορικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης που εμφανίστηκε κατά το παρόν πείραμα, το δοκίμιο A1 κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας επτά μη-εκτατούς 3D diamond λοβούς παρόλο που η σταυροειδής μορφή του εφαρμοσμένου triggering αρχικά προσπάθησε να επιβάλλει τον σχηματισμό 2D diamond λοβών ελλειπτικής μορφής.

Τελικός ύψος δοκιμίου (mm)	30
Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max} (kN)	11,8
Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg} (kN)	8,2
Ενέργεια απορρόφησης E_{abs} (J)	570
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (kJ/kg)	14.4
Ομοιομορφία φόρτισης LU (-)	0,688

Πίνακας 20 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης πειράματος 5-2



Εικόνα 55 Συμπιεσμένη μορφή δοκιμίου A1 πειράματος 5-2

3.6 Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων

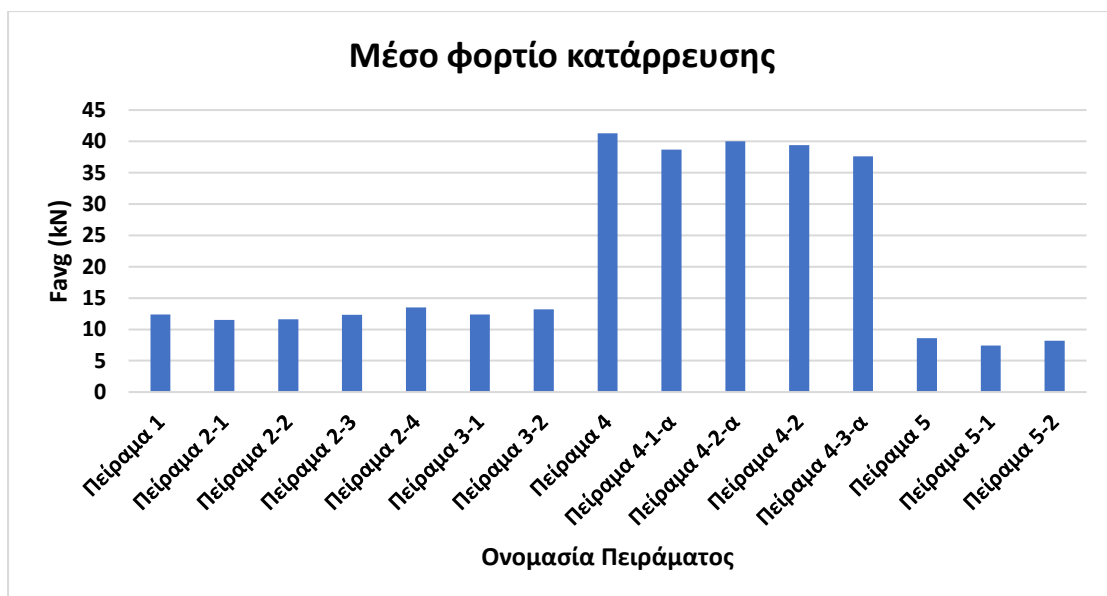
Παρατηρώντας τα πειραματικά αποτελέσματα συμπεραίνουμε πως αρχικά κάθε διάταξη που περιείχε μηχανισμό triggering εμφάνισε μικρότερο μέγιστο φορτίο κατάρρευσης εφόσον η ενεργός διατομή φόρτισης κατά τη συμπίεση μειώνεται κατά το εμβαδό της διεπαφής με τον μηχανισμό triggering, και ως εκ τούτου μικρότερο φορτίο απαιτείται προς την πλαστικοποίηση του υλικού. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερο ήταν το πάχος των ράβδων των μηχανισμών triggering, τόσο μειωνόταν η ενεργός διατομής φόρτισης κατά την συμπίεση και συνεπώς η μείωση στο μέγιστο φορτίο κατάρρευσης ήταν πιο έντονη, γεγονός που διαπιστώνεται εύκολα συγκρίνοντας τα πειράματα 1 έως 2-4.

Ακόμη οι αστεροειδείς μηχανισμοί S1, S2, S3, S4 ήταν οι μόνοι που προκάλεσαν απόσχιση του συμπιεζόμενου δοκιμίου στα σημεία επαφής τους εξαιτίας των λεπτών ορθογωνικής διατομής ελασμάτων τους. Για το λόγο αυτό

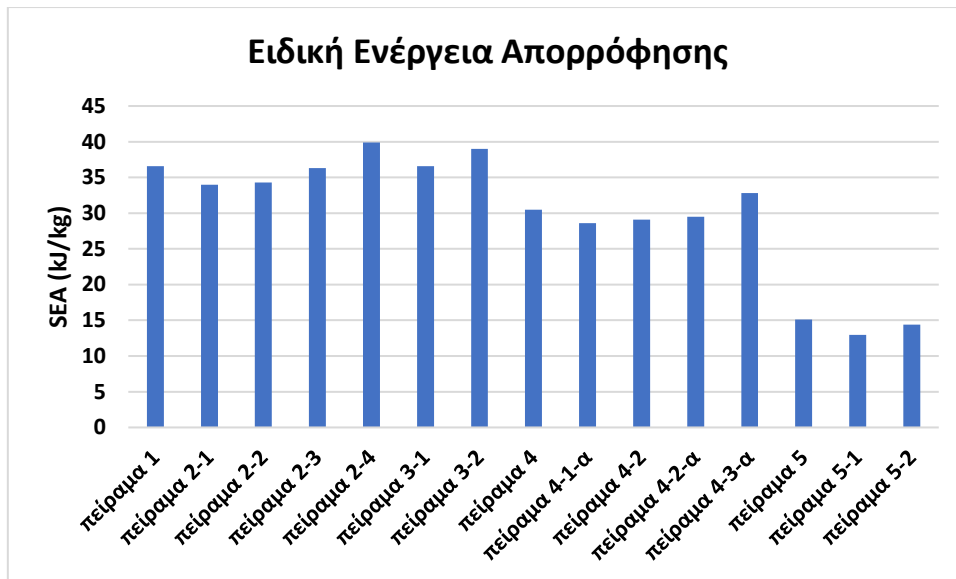
μάλιστα, οι δοκιμές 2-1 έως 2-4 εμφάνισαν ακανόνιστη μορφή κατάρρευσης λόγω της απόσχισης των δοκιμίων. Ωστόσο, όλες οι παρατηρήσεις όλων των δοκιμών συμφώνησαν πως το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης εντοπίζεται στη βράχυνση κατά την οποία το παραμορφωμένο υλικό του δοκιμίου έρχεται σε επαφή με την κάτω πλάκα και συσσωρεύεται σε αυτήν, οπότε η αυξημένη αυτή συγκέντρωση του υλικού εκεί προβάλλει ισχυρή αντίσταση στην περαιτέρω συμπίεσή του σημειώνοντας το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης. Τέλος, συγκριτικά με τους μηχανισμούς S1 έως S4, ο τελευταίος κατάφερε επιπλέον να ενισχύσει την ικανότητα του δοκιμίου A2 προς απορρόφηση κρουστικής ενέργειας αυξάνοντας το μέσο φορτίο κατάρρευσης.



Εικόνα 56 Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης- Πειραματικά αποτελέσματα



Εικόνα 57 Μέσο φορτίο κατάρρευσης- Πειραματικά αποτελέσματα



Εικόνα 58 Ειδική ενέργεια απορρόφησης- Πειραματικά αποτελέσματα

Όλοι δε οι υπόλοιποι μηχανισμοί δεν προκάλεσαν κάποια απόσχιση στο τεμάχιο εξαιτίας της λιγότερο αιχμηρής διατομής τους. Επιπροσθέτως, συγκρίνοντας τα πειράματα 1, 3-1 και 3-2, διακρίνουμε πως ο μηχανισμός T1 επιβάλλει τον 3D diamond μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης στο δοκίμιο A2 εξαιτίας της αστεροειδούς μορφής του, κάτι που δεν καταφέρνει απεναντίας ο σταυροειδής μηχανισμός T2 ο οποίος όμως λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας προκάλεσε ελαφρά σημαντικότερη μείωση του μέγιστου φορτίου.

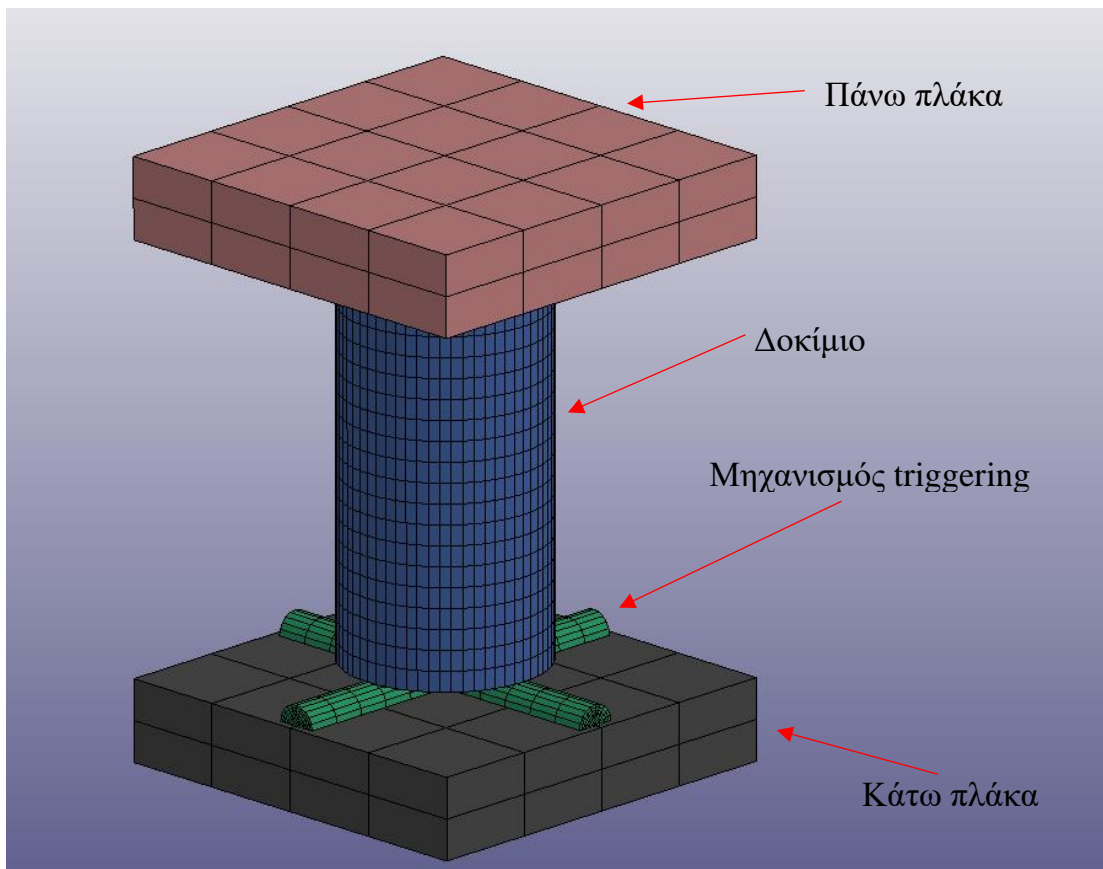
Αναφορικά με τη συμπίεση του δοκιμίου A3, οι μηχανισμοί V1 και V2 μπόρεσαν να επιβάλουν τον εκάστοτε ανάλογα με τη γεωμετρία τους τρόπο κατάρρευσης. Πιο συγκεκριμένα, ενώ το δοκίμιο A3 είχε τη τάση να καταρρεύσει αξονοσυμμετρικά (πείραμα 4), ο αστεροειδής μηχανισμός V1 του επέβαλε έναν 3D diamond μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης, ενώ ο σταυροειδής μηχανισμός V2 του επέβαλε έναν 2D diamond μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης. Ωστόσο, δεν συνέβη το ίδιο και με τον μηχανισμό U1 ο οποίος δεν μπόρεσε να επιβάλει το σχηματισμό 2D diamond ελλειπτικών λοβών καθώς το δοκίμιο κατέρρευσε σύμφωνα με την αρχική του τάση. Στο πείραμα 4-2, η επίδραση του triggering ήταν μηδαμινή καθώς ο σχηματισμός λοβών συνέβη στο άνω άκρο του δοκιμίου, αναιρώντας την οποιαδήποτε επίδραση του triggering.

Τέλος, για τη συμπίεση του δοκιμίου A1, ο αστεροειδής μηχανισμός T1 επέβαλε μέσω της γεωμετρίας του την μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευσης του δοκιμίου, το οποίο χωρίς triggering σχημάτιζε εκτατούς λοβούς. Ωστόσο, το ίδιο δεν μπόρεσε να συμβεί και με τον μηχανισμό T2, ο οποίος μεν αντικατέστησε τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης με σχηματισμό 3D diamond λοβών, χωρίς όμως να καταφέρει να επιβάλλει τη γεωμετρία του μέσω ελλειπτικών λοβών.

4. Μοντελοποίηση Πεπερασμένων Στοιχείων και Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

4.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προς διερεύνηση της συμπεριφοράς έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης λεπτότοιχων κυλινδρικών σωλήνων αλουμινίου υπό την επίδραση μηχανισμών triggering, εκτός από την διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν και αντίστοιχες αριθμητικές προσομοιώσεις στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA. Έτσι λοιπόν, δημιουργήθηκαν συνολικά δεκαπέντε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για κάθε μία εξεταζόμενη διάταξη συμπίεσης. Κάθε μοντέλο (Εικόνα 59) απαρτίζεται από το συμπιεζόμενο δοκίμιο (λεπτότοιχος σωλήνας κράματος αλουμινίου), την πάνω κινούμενη πλάκα επιβολής του φορτίου συμπίεσης, την κάτω πλάκα στήριξης και τον εκάστοτε μηχανισμό triggering όταν αυτός υπήρχε.

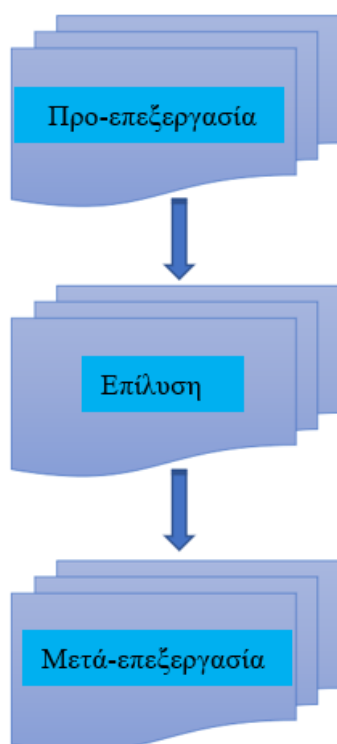


Εικόνα 59 Τυπικό μοντέλο εξεταζόμενης διάταξης

Κατά τη δημιουργία ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων μιας τέτοιας διάταξης, αρχικά προσδιορίζεται η γεωμετρία των σωμάτων δηλώνοντας το γεωμετρικό τους σχήμα και τις απαραίτητες διαστάσεις τους. Στη συνέχεια, ακολουθεί η γέννηση πλέγματος προσδιορίζοντας την πυκνότητα των κόμβων θέτοντας τον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων σε κάθε διάσταση για κάθε σώμα. Μετά, εισάγονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών των σωμάτων δίνοντας πληροφορίες όπως το μέτρο ελαστικότητας, η πυκνότητα, ο λόγος Poisson, το όριο διαρροής ή/και η καμπύλη κράτυνσης, δηλαδή η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων στην πλαστική περιοχή. Τέλος, επιβάλλονται οι απαιτούμενες οριακές συνθήκες στις εκάστοτε διεπιφάνειες, θεσπίζονται τα χαρακτηριστικά των στηρίξεων και ορίζεται εν τέλει η καμπύλη φόρτισης.

Ως εκ τούτου, η διαδικασία δημιουργίας ενός μοντέλου η οποία πραγματοποιείται στον προ-επεξεργαστή LS-PrePost, μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω βήματα:

- ✓ Προσδιορισμός γεωμετρίας
- ✓ Γέννηση πλέγματος
- ✓ Προσδιορισμός ιδιοτήτων υλικών
- ✓ Προσδιορισμός οριακών συνθηκών στις διεπιφάνειες
- ✓ Χαρακτηριστικών των στηρίξεων
- ✓ Χαρακτηριστικά φόρτισης



Εικόνα 60 Διαδικασία διεξαγωγής αριθμητικής προσομοίωσης

Έπειτα το αναπτυχθέν μοντέλο προσομοιώνεται στον επιλυτή LS-DYNA του λογισμικού ANSYS, και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση

επεξεργάζονται έπειτα στον μετα-επεξεργαστή LS-PrePost, ο οποίος διαθέτει την δυνατότητα τόσο για δημιουργία μοντέλων (προ-επεξεργασία), όσο και για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων μετά την επίλυση (μετά-επεξεργασία) η οποία ολοκληρώνει μια πλήρη διαδικασία προσομοίωσης όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 60. Κατά την μετά-επεξεργασία, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα στιγμιότυπα κατάρρευσης ώστε να εντοπίσουμε τον μηχανισμό κατάρρευσης, αλλά και να επεξεργαστούμε τα υπολογισθέντα μεγέθη ώστε να εξάγουμε το διάγραμμα δύναμης-βράχυνσης.

Τέλος, οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται στο LS-DYNA παραθέτονται στον πίνακα 21 για κάθε βασική μεταβλητή, ενώ για παράγωγα μεγέθη οι αντίστοιχες μονάδες προκύπτουν από αυτές των βασικών, όπως λ.χ. η ενέργεια θα μετριέται σε $N*mm=mJ=10^{-3} J$.

Μέγεθος	Μον. Μέτρησης
Μάζα	gr
Μήκος	mm
Χρόνος	msec
Ταχύτητα	mm/msec
Δύναμη	N
Τάση	N/mm^2
Πυκνότητα	gr/mm^3

Πίνακας 21 Μονάδες μέτρησης στο LS-DYNA

4.2 Διαδικασία Μοντελοποίησης

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια που ακολουθήθηκαν προς ανάπτυξη των μοντέλων που πρόκειται να εξετασθούν μέσω των αριθμητικών προσομοιώσεων. Η διαδικασία είναι η ίδια για καθεμία εξεταζόμενη διάταξη από τις δεκαπέντε συνολικά, με ελαφρώς διαφοροποιημένες αυτές στις οποίες απουσίαζε κάποιος μηχανισμός triggering και επομένως αγνοήθηκε προφανώς η επίδρασή του.

4.2.1 Προσδιορισμός γεωμετρίας

Στο πρώτο στάδιο, προσδιορίστηκε η γεωμετρία των σωμάτων καθορίζοντας το σχήμα τους και τις διαστάσεις τους. Έτσι λοιπόν, το δοκίμιο μοντελοποιήθηκε με χρήση επίπεδων 2D πεπερασμένων στοιχείων (shell elements) ενώ οι πλάκες και οι μηχανισμοί triggering με στερεά 3D πεπερασμένα στοιχεία (solid elements).

Ως εκ τούτου, τα δοκίμια δημιουργήθηκαν από την γεωμετρία “cylinder shell”, οι πλάκες από την γεωμετρία “box solid”, ενώ τέλος οι μηχανισμοί triggering από τις γεωμετρίες “box solid” ή “cylinder solid” ανάλογα με τη μορφή της διατομής τους. Κατά τη μοντελοποίηση των δοκιμίων δε, αυτά διαστασιολογήθηκαν στη μέση διάμετρό τους $d_m=(d_{in}+d_{out})/2$. Οι μηχανισμοί triggering φτιάχτηκαν τμηματικά, και στο τέλος τα στοιχεία (ράβδοι) που τους απαρτίζουν θέτονταν ως ενιαίο κοινό τεμάχιο με την κάτω πλάκα (set part), ώστε να συντελέσουν το σώμα του εκάστοτε εξεταζόμενου μηχανισμού triggering. Συνεπώς, η κάτω πλάκα στήριξης μαζί με τους ράβδους των μηχανισμών triggering αντιμετωπίστηκαν σαν ένα ενιαίο σώμα (triggered plate).

4.2.2 Γέννηση πλέγματος

Στο δεύτερο στάδιο της μοντελοποίησης, προσαρμόστηκε κατάλληλα το κομβικό πλέγμα επιλέγοντας για κάθε σώμα το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων του σε κάθε βασική διάστασή του. Στα σώματα που θεωρήθηκαν στερεά (solid) στοιχεία, όπως οι πλάκες και οι μηχανισμοί triggering, το πλέγμα επιλέχθηκε αραιό ώστε να μην προσθέτει υπολογιστικό κόστος και δεδομένου πως θεωρούνται τα συγκεκριμένα σώματα ως άκαμπτα και απαραμόρφωτα. Απεναντίας, για τα δοκίμια που μοντελοποιήθηκαν με επίπεδα (shell) στοιχεία, το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων κατά την περιφέρεια και κατά το ύψος, επιλέχθηκε ώστε να αποδίδει πεπερασμένα στοιχεία με διαστάσεις τουλάχιστον ίσες με το πάχος τοιχώματος του δοκιμίου με σκοπό την ορθή πρόβλεψη του σχηματισμού πτυχώσεων/λοβών κατά την κατάρρευσή του. Έτσι λοιπόν στα δοκίμια A1 και A2 με πάχος τοιχώματος 1mm, το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων επιλέχθηκε ώστε να αποδίδει στοιχεία 1,5mm, ενώ για το δοκίμιο A3 με πάχος τοιχώματος 2mm, το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων επιλέχθηκε ώστε να αποδίδει στοιχεία 2,5mm. Για κάθε δοκίμιο επίσης, επιλέχθηκε η παράμετρος NIP (number of through shell thickness integration points) ίση με 3, ενώ η παραμόρφωση των πεπερασμένων στοιχείων κατά την κατάρρευση ακολούθησε το μοντέλο των Belytschko-Lin-Tsay θέτοντας ELFORM=2, ενώ η αντίστοιχη τιμή διατηρήθηκε ίση με 1 όπως καθοριζόταν ως προεπιλογή για τα σώματα με solid στοιχεία (πλάκες και triggering).

4.2.3 Καθορισμός υλικών

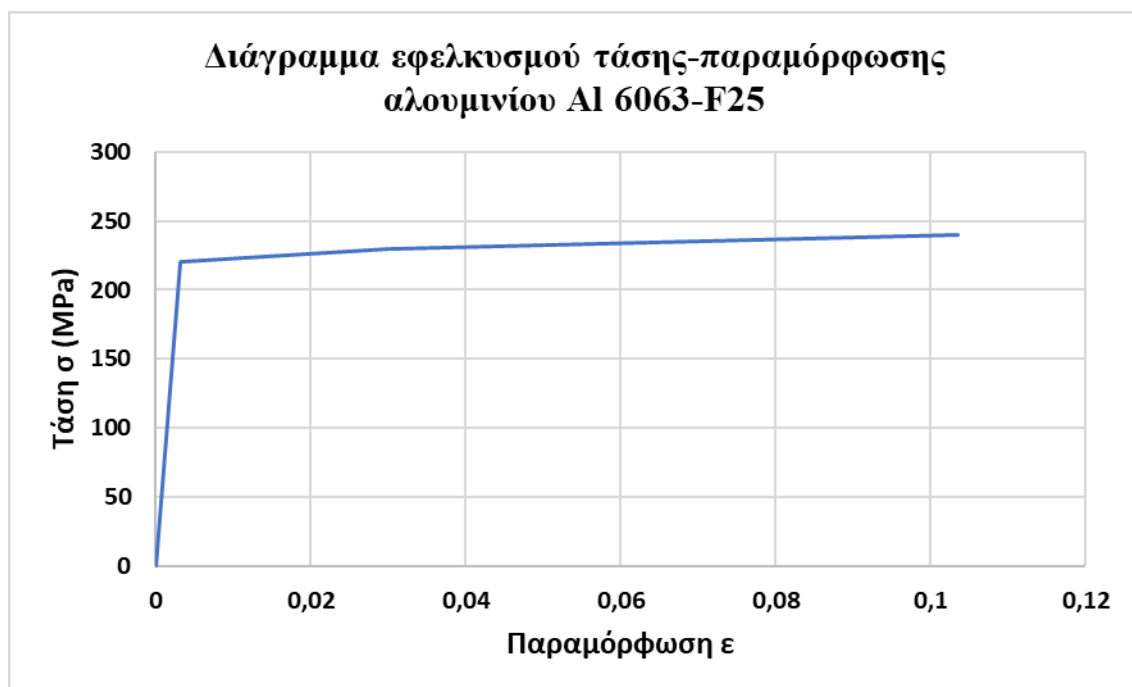
Η επιλογή των ιδιοτήτων των υλικών των σωμάτων κάθε μοντέλου έγινε με βάση στοιχεία από την ανοιχτή βιβλιογραφία και από πειραματικά δεδομένα. Οι πλάκες και οι μηχανισμοί triggering θεωρήθηκαν, ενώ για τα δοκίμια κράματος αλουμινίου 6063-F25 στοιχεία όπως η πυκνότητα και ο λόγος Poisson πάρθηκαν από την βιβλιογραφία, ενώ το όριο διαρροής, το μέτρο ελαστικότητας και η καμπύλη κράτυνσής του από πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού υπό ταχύτητα 20 mm/min.

Έτσι λοιπόν, ο χάλυβας των πλακών και των μηχανισμών triggering χαρακτηρίζεται από:

- $\rho = 0,00783 \text{ gr/mm}^3$
- $E = 207000 \text{ MPa}$
- $\nu = 0.3$

Απεναντίας, το κράμα αλουμινίου 6063-F25 του οποίου η καμπύλη σ - ϵ από πείραμα εφελκυσμού υπό 20mm/min φαίνεται στην Εικόνα 61, χαρακτηρίζεται από:

- $\rho = 0,0026 \text{ gr/mm}^3$
- $E = 68300 \text{ MPa}$
- $\sigma_Y = 220 \text{ MPa}$
- $\nu = 0.35$



Εικόνα 61 Καμπύλη σ - ϵ από πείραμα εφελκυσμού Al 6063-F25

Για τις πλάκες και τους μηχανισμούς triggering επιλέχθηκε η καρτέλα υλικών «MAT020_rigid», στην οποία αποδόθηκαν πληροφορίες σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας, το λόγο Poisson, την πυκνότητα του χάλυβα και τους κινηματικούς περιορισμούς του συγκεκριμένου σώματος. Πιο συγκεκριμένα, διαλέγοντας η πληροφορία περί κινηματικών βαθμών ελευθερίας να αποδίδεται στο ολικό σύστημα συντεταγμένων (CMO=1), η κάτω πλάκα μαζί με τους μηχανισμούς triggering χαρακτηρίστηκαν ως ακλόνητοι επιβάλλοντας CON1=7 και CON2=7, ενώ στην άνω πλάκα επιτράπηκε η κατακόρυφη μετατόπιση ώστε κινούμενη να συμπιέζει το δοκίμιο, και λόγω αυτού επιβλήθηκαν CON1=4 και CON2=7. Αξίζει να σημειωθεί πως ρύθμιση των παραμέτρων CON1 και CON2 επιβάλλει συγκεκριμένους την εκάστοτε φορά κινηματικούς περιορισμούς μετατοπίσεων και περιστροφών αντίστοιχα.

Αναφορικά με το δοκίμιο, επιλέχθηκε η καρτέλα υλικών «MAT024_pieewise linear plasticity», στην οποία αποδόθηκαν πληροφορίες σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας, το λόγο Poisson, την πυκνότητα και το όριο διαρροής του κράματος αλουμινίου, ενώ επιπλέον η καμπύλη κράτυνσης αποδόθηκε δίνοντας ζεύγη τιμών τάσης και παραμένουσας πλαστικής παραμόρφωσης από την καμπύλη σ - ϵ του μονοαξονικού εφελκυσμού. Τέλος, στα δοκίμια επιβλήθηκε ακόμη και ένας έλεγχος της παραμόρφωσής τους προσαρμόζοντας στην παράμετρο hourglass την τιμή IHQ=4 η οποία επέβαλλε έλεγχο κατά τη μορφή δυσκαμψίας Flanagan-Belytschko.

4.2.4 Οριακές συνθήκες διεπιφανειών

Η επιβολή οριακών συνθηκών στις διεπιφάνειες (contacts) αποσκοπεί στην αποτροπή εισχώρησης της μιας επιφάνειας στην άλλη κατά τη σχετική τους κίνηση. Έτσι λοιπόν πιο συγκεκριμένα, για να προβλεφθεί η μη-εισχώρηση των άκρων του δοκιμίου στις δυο πλάκες και στον μηχανισμό triggering επιβλήθηκε στην διεπιφάνειά τους συνθήκη «nodes-to-surface» θεωρώντας παραμορφώσιμο το σώμα του συμπιεζόμενου σωλήνα και άκαμπτα-απαραμόρφωτα τα σώματα των πλακών και του μηχανισμού triggering. Για τη σχετική δε κίνηση μεταξύ τους, επιβλήθηκαν συντελεστές στατικής και δυναμικής τριβής ίσοι με 0,2.

Ακόμη, για την μη-εισχώρηση του δοκιμίου στον μηχανισμό triggering και στην κάτω πλάκα, επιβλήθηκε επιπρόσθετα και η οριακή συνθήκη «surface-to-surface», με το δοκίμιο να θεωρείται πλέον το παραμορφώσιμο σώμα και η κάτω πλάκα με τον μηχανισμό triggering το απαραμόρφωτο/άκαμπτο σώμα. Και εδώ εφαρμόστηκαν συντελεστές στατικής και δυναμικής τριβής ίσοι με 0,2.

Επιπλέον, για τους σχηματιζόμενους λοβούς/πτυχώσεις κατά την κατάρρευση, εφαρμόστηκε οριακή συνθήκη «automatic single surface» ώστε να αποφευχθεί η εισχώρηση του ενός λοβού στον άλλο κατά την κατάρρευση. Σε αυτήν θεωρήθηκε το δοκίμιο ως το μοναδικό πλέον παραμορφώσιμο σώμα με συντελεστές τριβής 0,2, ενώ προφανώς απουσίαζε κάποιο απαραμόρφωτο/άκαμπτο σώμα.

Τέλος, στην περίπτωση των διατάξεων με τους μηχανισμούς triggering S1, S2, S3 και S4, με σκοπό να προβλεφθεί η απόσχιση του δοκιμίου στην διεπαφή με τον μηχανισμό triggering, στο δοκίμιο επιβλήθηκαν εκ των προτέρων οι γραμμές αστοχίας/απόσχισης, χωρίζοντας έτσι το δοκίμιο σε ένα κύριο σώμα και στις λωρίδες απόσχισης. Στα δυο τελευταία επιβλήθηκε οριακή συνθήκη «single edge», ενώ στην αλληλεπίδραση των λωρίδων απόσχισης του δοκιμίου με τον μηχανισμό triggering επιβλήθηκε οριακή συνθήκη «tie-break» ώστε να προβλεφθεί η απόσχιση. Και εδώ οι συντελεστές τριβής θεωρήθηκαν ίσοι με 0,2.

4.2.5 Χαρακτηριστικά φόρτισης

Το φορτίο συμπίεσης επιβλήθηκε αναγκάζοντας την πάνω πλάκα να κινείται προς τα κάτω με σταθερή ταχύτητα 1mm/ms, συμπιέζοντας το δοκίμιο. Ως εκ

τούτου, η καμπύλη φόρτισης αποτελεί ουσιαστικά μια καμπύλη σταθερής καθοδικής ταχύτητας για την άνω πλάκα ίση με 1mm/ms.

4.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων στο LS-DYNA για κάθε μια εξεταζόμενη διάταξη. Οι διατάξεις χαρακτηρίζονται από την ίδια κωδική ονομασία με αυτήν των πειραμάτων, και συνεπώς η εξεταζόμενη λ.χ. διάταξη 3-1 είναι αυτή της συμπίεσης του δοκιμίου A2 στηριζόμενο στον μηχανισμό triggering T1. Τα αποτελέσματα τέλος αξιολογούνται τόσο ως προς τον μηχανισμό κατάρρευσης, όσο και ως προς τα χαρακτηριστικά της απόκρισης, όπως είναι π.χ. το μέγιστο και το μέσο φορτίο κατάρρευσης, η ενέργεια απορρόφησης, η ομοιομορφία φόρτισης και η ειδική απορροφώμενη ενέργεια που αποτελεί και το ιδανικότερο μέτρο σύγκρισης ανόμοιων διατάξεων προς αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης.

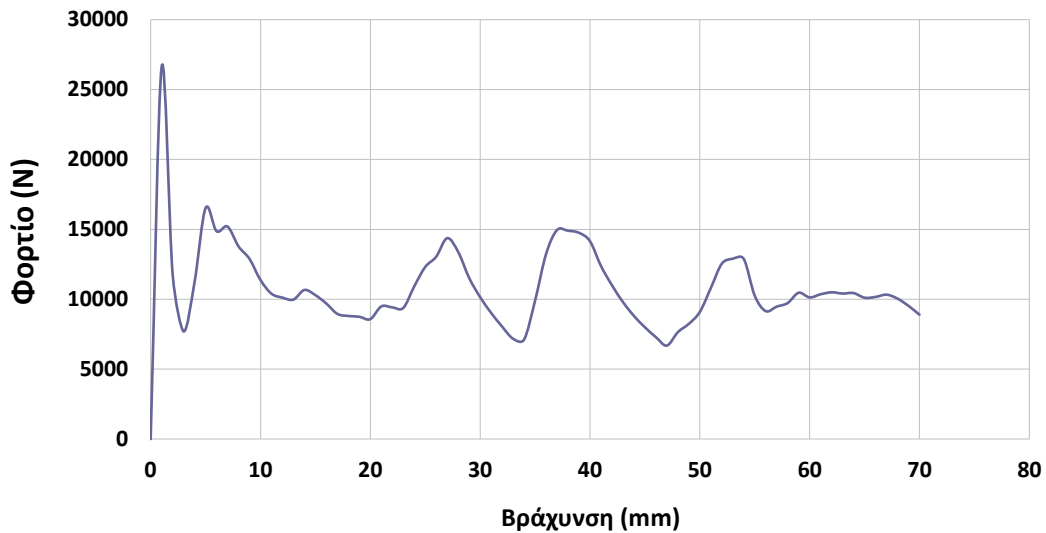
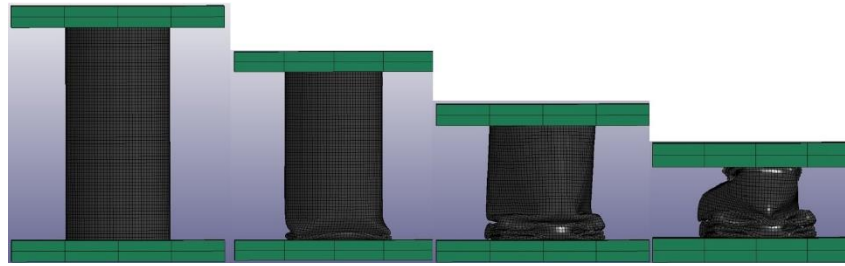
4.3.1 Προσομοίωση πειράματος 1

Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 1 στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

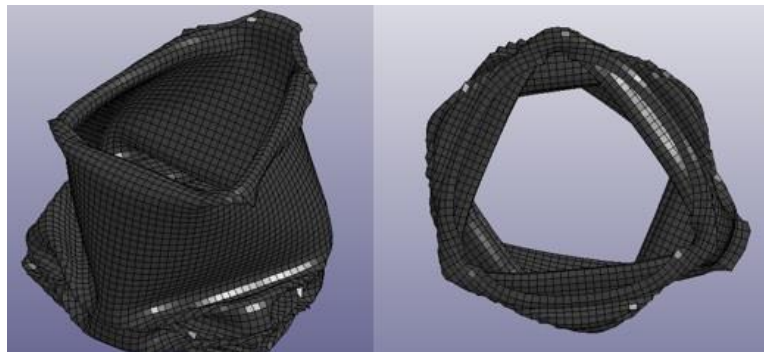
Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A2 χωρίς την παρουσία κάποιου μηχανισμού triggering κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας πέντε 3D diamond λοβούς. Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 63.

<i>Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης</i>	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	26,62
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	11,2
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	785
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	18,96
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,41

Πίνακας 22 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 1



Εικόνα 62 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 1



Εικόνα 63 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 1

4.3.2 Προσομοίωση πειράματος 2-1

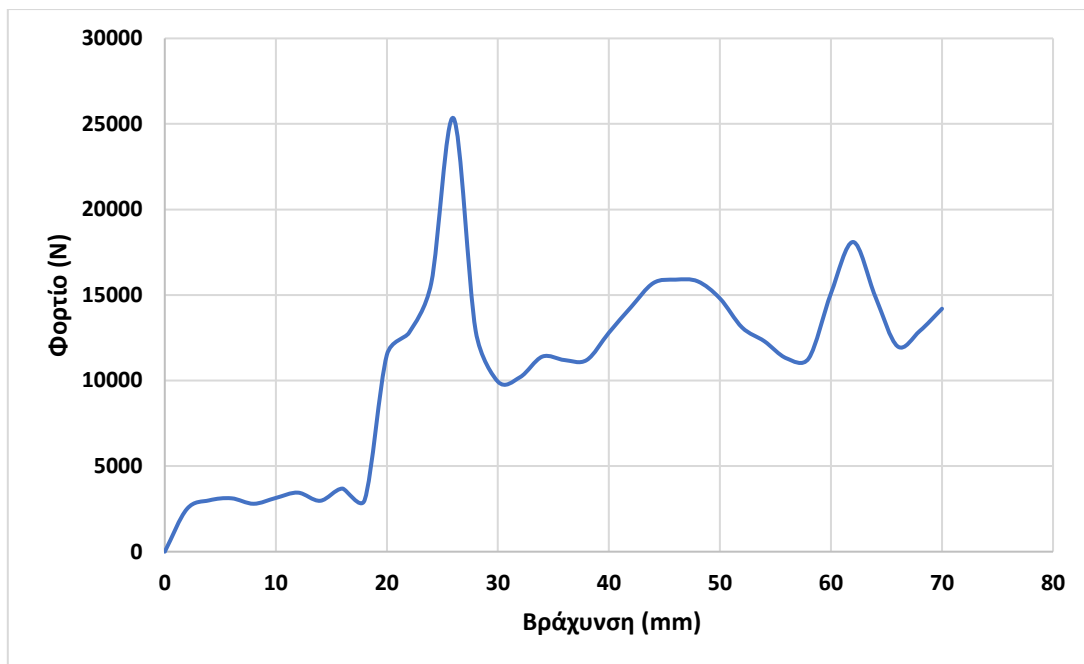
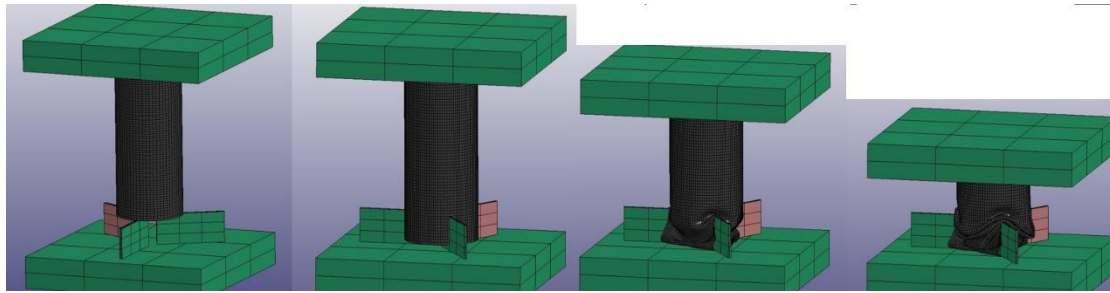
Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 2-1 στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A2 υπό την παρουσία του μηχανισμού triggering S1 κατέρρευσε υπό ακανόνιστο τρόπο, ενώ στα σημεία επαφής του με τα τοιχώματα του triggering αποσχίστηκε γεγονός που επέφερε τη μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης. Ωστόσο, η επίδραση του μηχανισμού triggering προκάλεσε ελαφριά μείωση του ποσού της απορροφώμενης ενέργειας της κρούσης. Τέλος, το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης παρατηρήθηκε όταν το συμπιεζόμενο δοκίμιο, καθώς αποσχίστηκε, συγκεντρώθηκε στην κάτω πλάκα και πλέον η αυξημένη συγκεντρωμένη μάζα του προέκβαλε αυξημένη αντίσταση σε περαιτέρω συμπίεση, δηλαδή σε βράχυνση λίγο μεγαλύτερη των 20mm που ήταν το ύψος του μηχανισμού triggering.

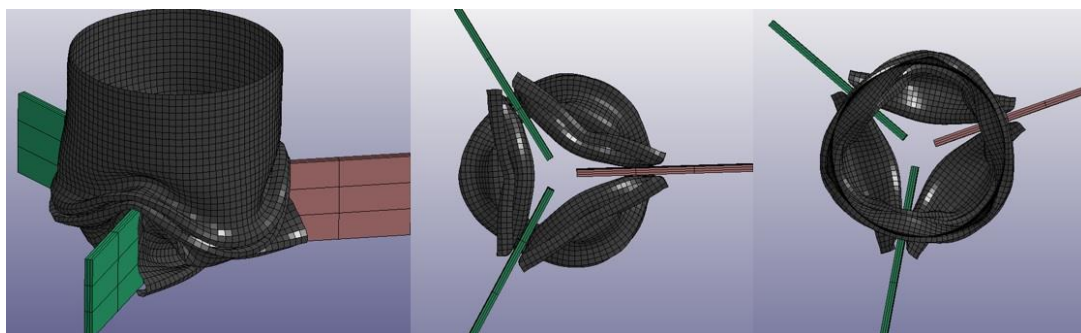
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 65.

<i>Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης</i>	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	25,38
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	10,8
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	754
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	18,84
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,42

Πίνακας 23 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 2-1



Εικόνα 64 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 2-1



Εικόνα 65 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 2-1

4.3.3 Προσομοίωση πειράματος 2-2

Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 2-2 στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με

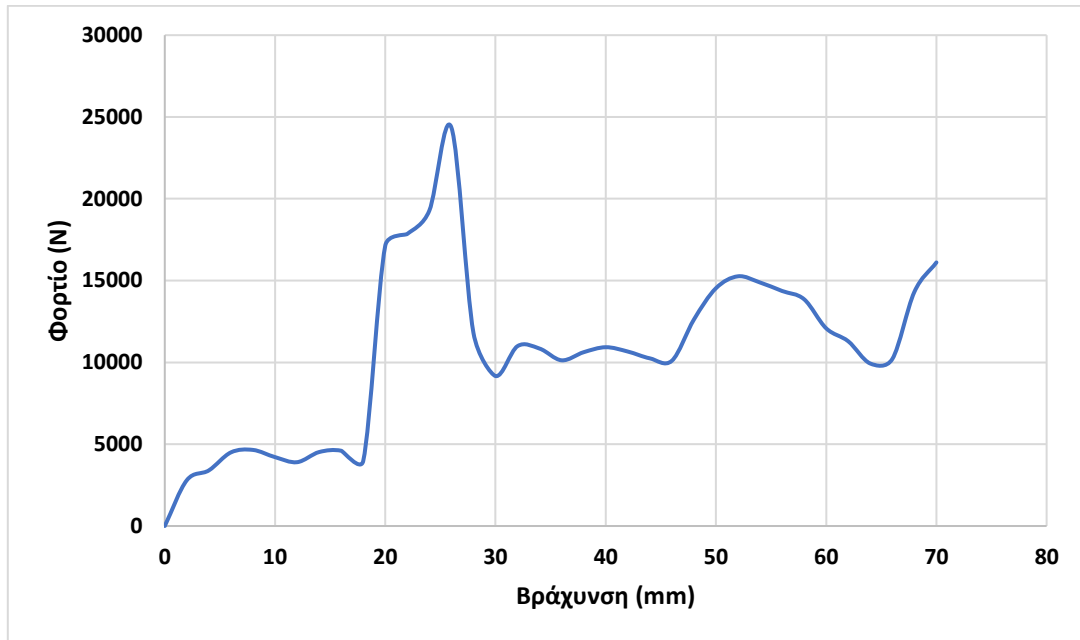
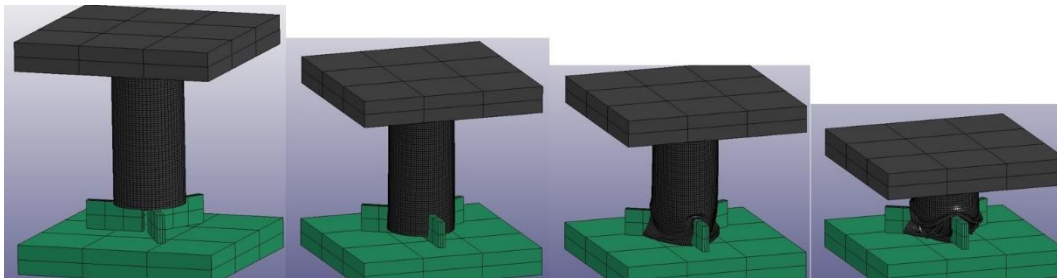
τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A2 υπό την παρουσία του μηχανισμού triggering S2 κατέρρευσε υπό επίσης ακανόνιστο τρόπο, ενώ στα σημεία επαφής του με τα τοιχώματα του triggering αποσχίστηκε και αυτό, γεγονός που επέφερε τη μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης. Το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης παρατηρήθηκε όταν το συμπιεζόμενο δοκίμιο, καθώς αποσχίστηκε, συγκεντρώθηκε στην κάτω πλάκα και πλέον η αυξημένη συγκεντρωμένη μάζα του προέκβαλε αυξημένη αντίσταση σε περαιτέρω συμπίεση, δηλαδή σε βράχυνση λίγο μεγαλύτερη των 20mm που ήταν το ύψος του μηχανισμού triggering. Μάλιστα, παρουσιάστηκε επίσης χαμηλότερα ποσοστά απορρόφησης ενέργειας υπό την επίδραση triggering, ενώ τέλος τα στελέχη του μηχανισμού triggering S2, όντας μεγαλύτερου πάχους από αυτά του S1, προκάλεσαν μεγαλύτερη μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης μειώνοντας περισσότερο την ενεργό διατομή φόρτισης.

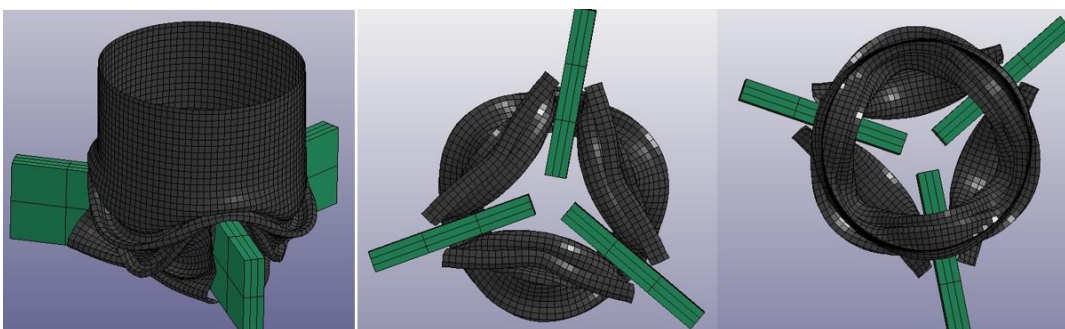
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 67.

Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	24,4
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	10,63
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	744
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	18,6
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,44

Πίνακας 24 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 2-2



Εικόνα 66 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 2-2



Εικόνα 67 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 2-2

4.3.4 Προσομοίωση πειράματος 2-3

Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 2-3 στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με

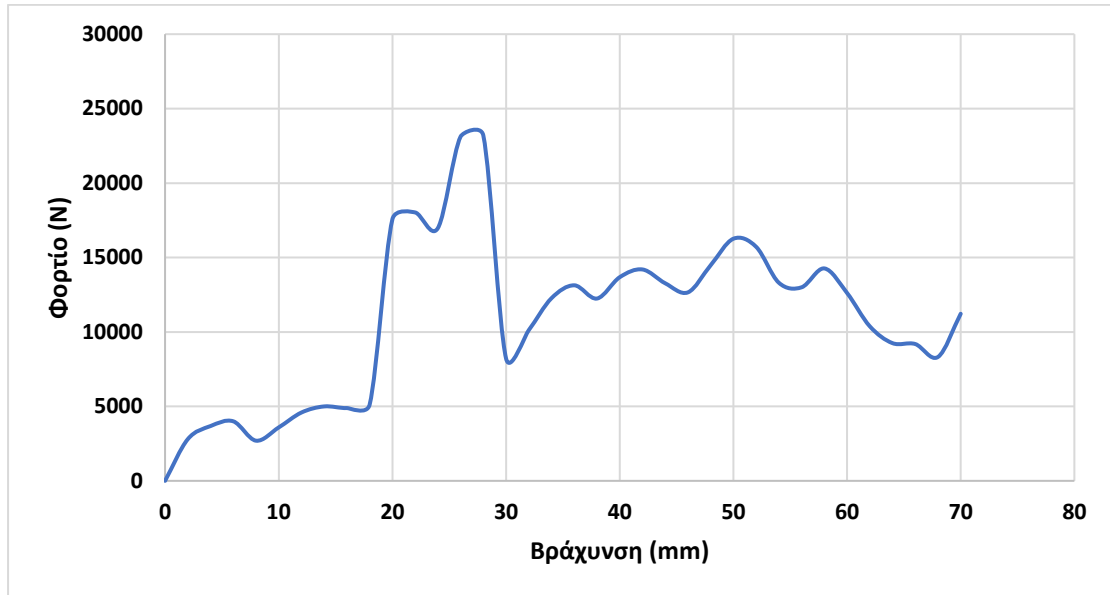
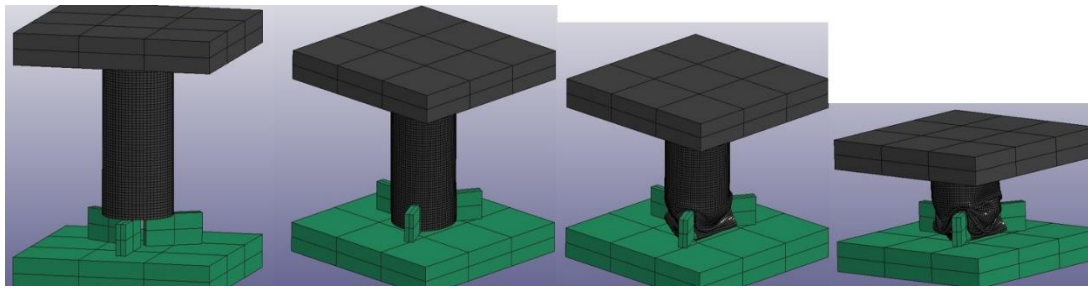
τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A2 υπό την παρουσία του μηχανισμού triggering S3 κατέρρευσε υπό επίσης ακανόνιστο τρόπο, ενώ στα σημεία επαφής του με τα τοιχώματα του triggering αποσχίστηκε και αυτό, γεγονός που επέφερε τη μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης. Το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης παρατηρήθηκε όταν το συμπιεζόμενο δοκίμιο, καθώς αποσχίστηκε, συγκεντρώθηκε στην κάτω πλάκα και πλέον η αυξημένη συγκεντρωμένη μάζα του προέκβαλε αυξημένη αντίσταση σε περαιτέρω συμπίεση, δηλαδή σε βράχυνση λίγο μεγαλύτερη των 20mm που ήταν το ύψος του μηχανισμού triggering. Μάλιστα, παρουσιάστηκε επίσης ελαφρά χαμηλότερα ποσοστά απορρόφησης ενέργειας, ενώ τέλος τα στελέχη του μηχανισμού triggering S3, όντας μεγαλύτερου πάχους, προκάλεσαν μεγαλύτερη μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης μειώνοντας περισσότερο την ενεργό διατομή φόρτισης.

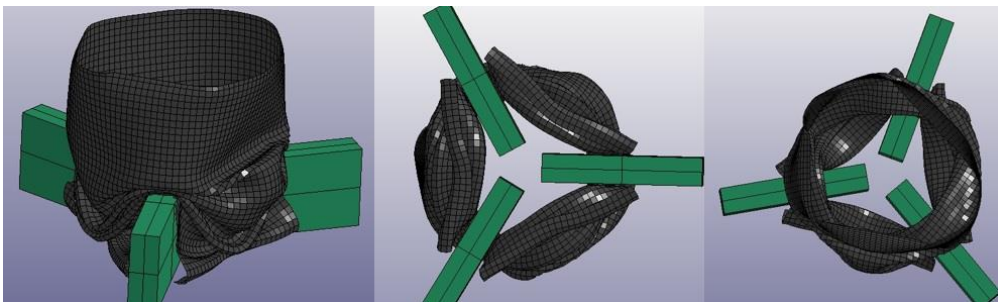
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 69.

Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	23,2
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	11,07
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	775
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	19,38
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,48

Πίνακας 25 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 2-3



Εικόνα 68 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 2-3



Εικόνα 69 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 2-3

4.3.5 Προσομοίωση πειράματος 2-4

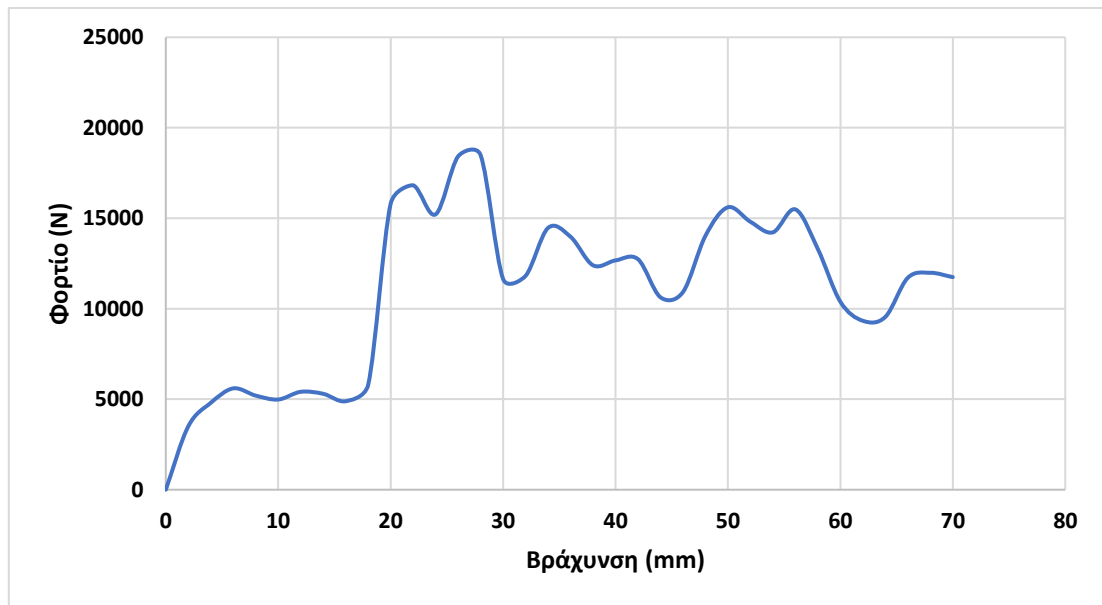
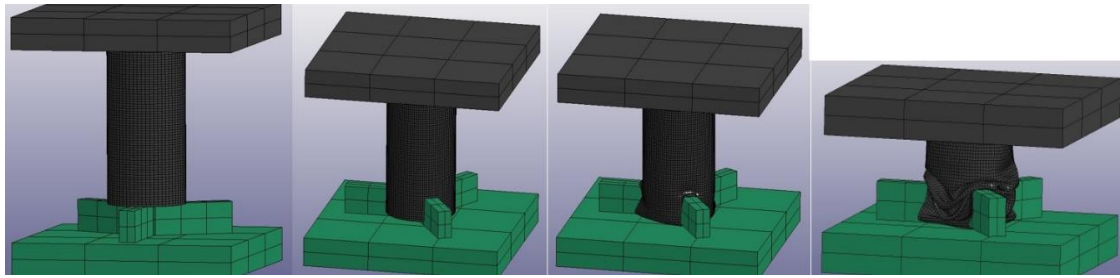
Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 2-4 στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A2 υπό την παρουσία του μηχανισμού triggering S4 κατέρρευσε υπό επίσης ακανόνιστο τρόπο, ενώ στα σημεία επαφής του με τα τοιχώματα του triggering αποσχίστηκε και αυτό, γεγονός που επέφερε τη μείωση του μέγιστου φορτίου κατέρρευσης. Το μέγιστο φορτίο κατέρρευσης παρατηρήθηκε όταν το συμπιεζόμενο δοκίμιο, καθώς αποσχίστηκε, συγκεντρώθηκε στην κάτω πλάκα και πλέον η αυξημένη συγκεντρωμένη μάζα του προέκβαλε αυξημένη αντίσταση σε περαιτέρω συμπίεση, δηλαδή σε βράχυνση λίγο μεγαλύτερη των 20mm που ήταν το ύψος του μηχανισμού triggering. Τέλος τα στελέχη του μηχανισμού triggering S4, όντας μεγαλύτερου πάχους, προκάλεσαν τη μεγαλύτερη μείωση του μέγιστου φορτίου κατέρρευσης μειώνοντας ακόμα περισσότερο την ενεργό διατομή φόρτισης.

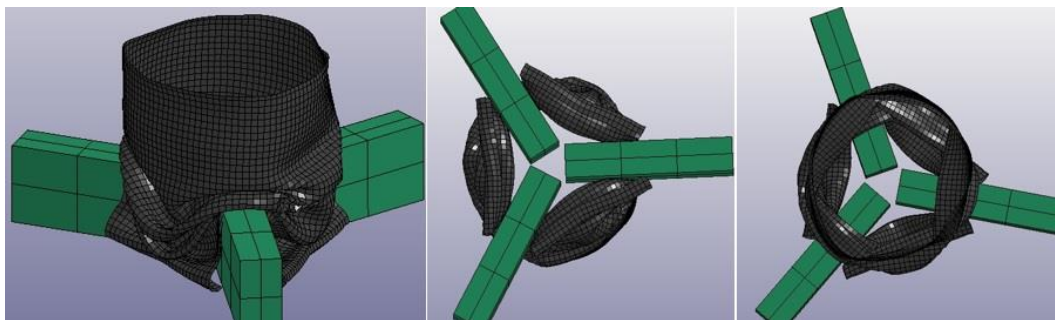
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατέρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 71.

Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης	
Μέγιστο Φορτίο Κατέρρευσης, F_{max} (kN)	18,49
Μέσο Φορτίο Κατέρρευσης, F_{avg} (kN)	11,08
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	775
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	19,37
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,6

Πίνακας 26 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 2-4



Εικόνα 70 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 2-4



Εικόνα 71 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 2-4

4.3.6 Προσομοίωση πειράματος 3-1

Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 3-1 στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με

τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

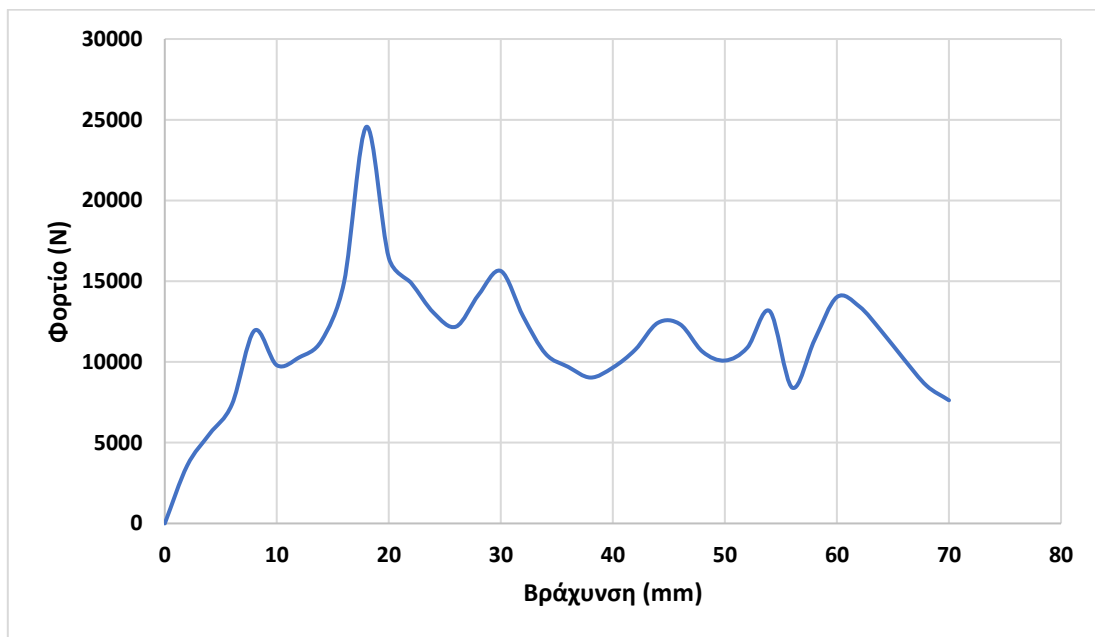
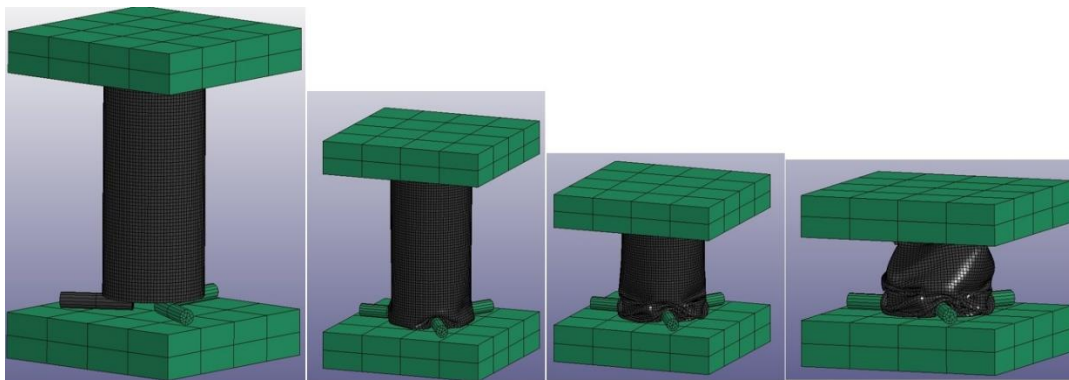
Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A2 υπό την παρουσία του μηχανισμού triggering T1 δεν αποσχίστηκε από το μηχανισμό triggering, ενώ κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας τέσσερις 3D diamond λοβούς. Μάλιστα, η αστεροειδής μορφή του μηχανισμού triggering T1 μπόρεσε να επιβληθεί στον μηχανισμό κατάρρευσης του δοκιμίου, καθώς επέβαλε αρχικά τον σχηματισμό λοβού με κορυφές υπό γωνία 120° εξαιτίας της αστεροειδούς μορφής του μηχανισμού T1. Ακόμη, το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης παρατηρήθηκε όταν το συμπιεζόμενο δοκίμιο, συγκεντρώθηκε στην κάτω πλάκα και πλέον η αυξημένη συγκεντρωμένη μάζα του προέκβαλε αυξημένη αντίσταση σε περαιτέρω συμπίεση, δηλαδή σε βράχυνση λίγο μεγαλύτερη των 10mm που ήταν το ύψος του μηχανισμού triggering. Τέλος τα στελέχη του μηχανισμού triggering προκάλεσαν τη μεγαλύτερη μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης μειώνοντας ακόμα περισσότερο την ενεργό διατομή φόρτισης.

Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 73.

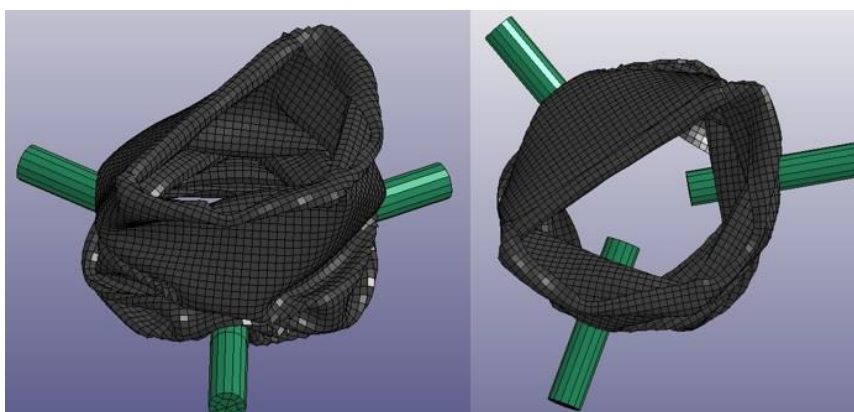
Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης

Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	24,56
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	11,4
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	798
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	19,95
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,46

Πίνακας 27 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 3-1



Εικόνα 72 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 3-1



Εικόνα 73 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 3-1

4.3.7 Προσομοίωση πειράματος 3-2

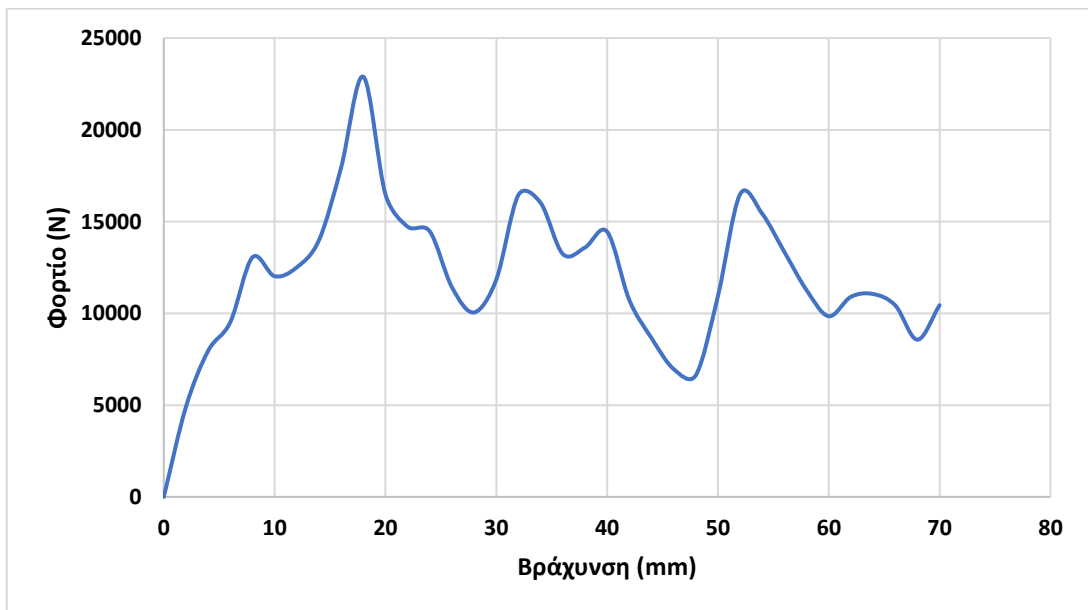
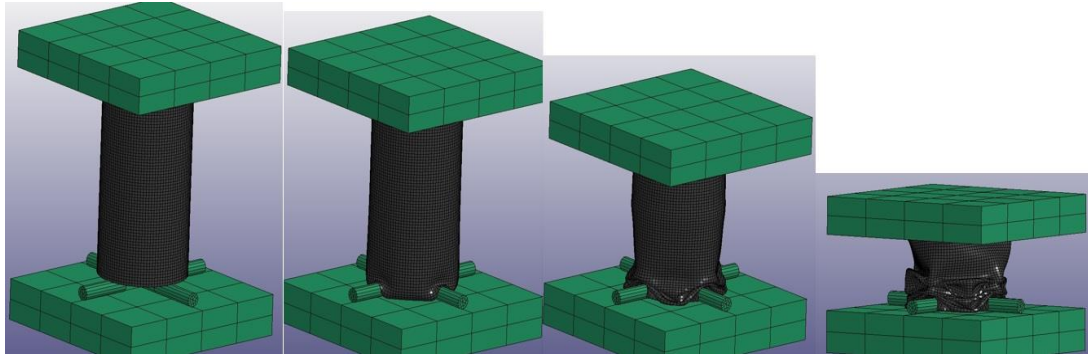
Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 3-2 στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A2 υπό την παρουσία του μηχανισμού triggering T2 δεν αποσχίστηκε από το μηχανισμό triggering, ενώ κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας τέσσερις 4D diamond λοβούς. Μάλιστα, η σταυροειδής μορφή του μηχανισμού triggering T2 μπόρεσε να επιβληθεί στον μηχανισμό κατάρρευσης του δοκιμίου, καθώς επέβαλε αρχικά τον σχηματισμό λοβού με κορυφές υπό γωνία 90° εξαιτίας της σταυροειδούς μορφής του μηχανισμού T2. Σημειώνοντας δε πως το δοκίμιο A2 είχε αυτοτελώς τη τάση προς μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση με 3D diamond λοβούς (πείραμα 1), ο μηχανισμός triggering T2 κατάφερε λόγω της σταυροειδούς μορφής του να του επιβάλλει 4D diamond λοβούς, αυξάνοντας μάλιστα έτσι και την ικανότητά του προς απορρόφηση ποσών κρουστικής ενέργειας. Ακόμη, το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης παρατηρήθηκε όταν το συμπιεζόμενο δοκίμιο, συγκεντρώθηκε στην κάτω πλάκα και πλέον η αυξημένη συγκεντρωμένη μάζα του προέκβαλε αυξημένη αντίσταση σε περαιτέρω συμπίεση, δηλαδή σε βράχυνση λίγο μεγαλύτερη των 10mm που ήταν το ύψος του μηχανισμού triggering. Τέλος τα στελέχη του μηχανισμού triggering προκάλεσαν μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης μειώνοντας την ενεργό διατομή φόρτισης.

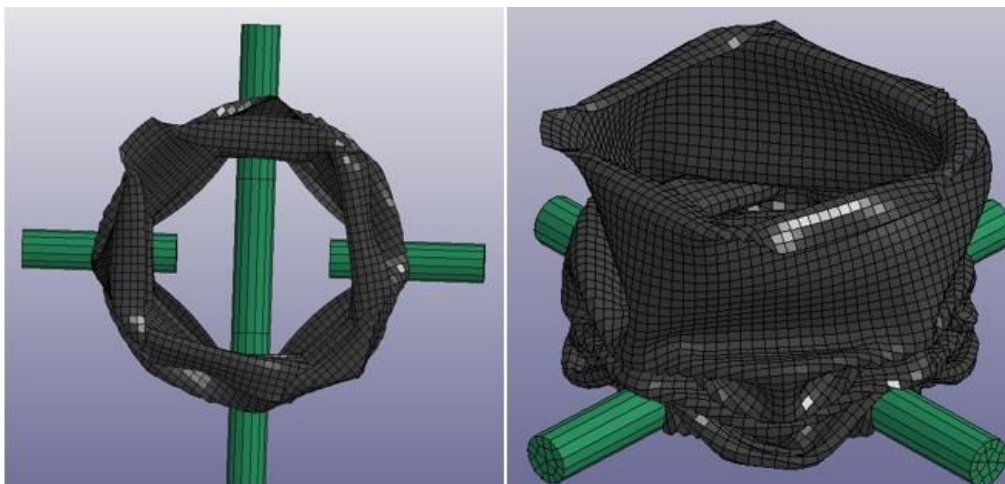
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 75.

Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	22,9
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	12,11
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	848
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	21,2
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,53

Πίνακας 28 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 3-2



Εικόνα 74 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 3-2



Εικόνα 75 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 3-2

4.3.8 Προσομοίωση πειράματος 4

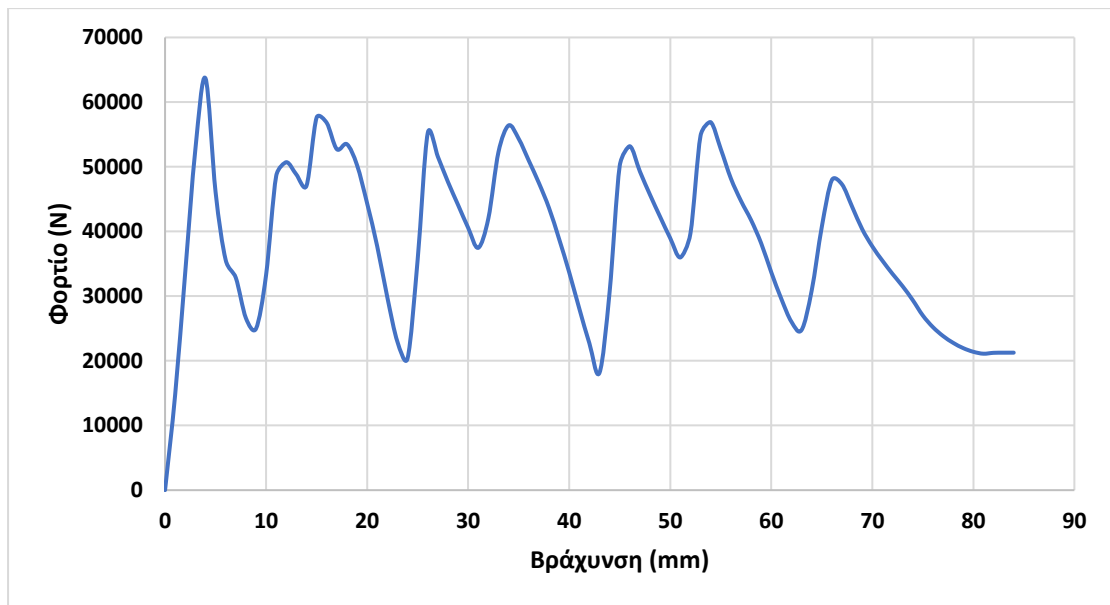
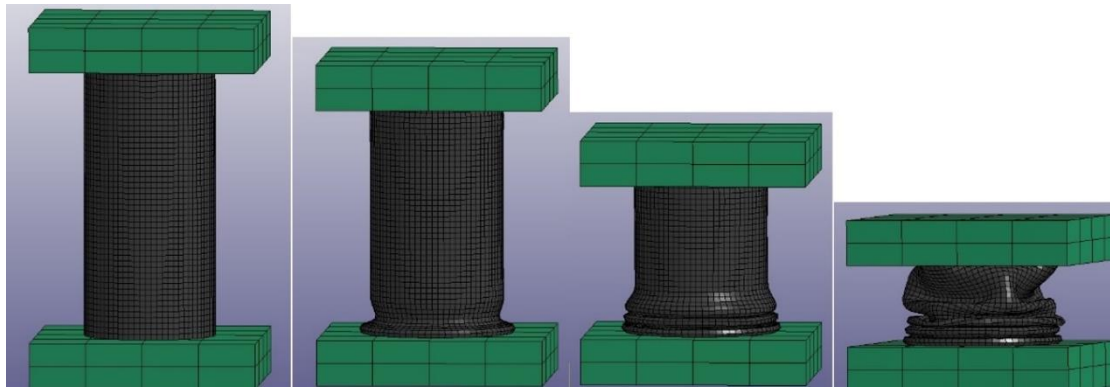
Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 4 στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A3, χωρίς την παρουσία κάποιου μηχανισμού triggering, κατέρρευσε υπό μικτό μηχανισμό καθώς σχημάτισε αρχικά τρεις αξονοσυμμετρικούς λοβούς, και έπειτα έναν 3D diamond λοβό. Εξαιτίας δε της μεγαλύτερης διαμέτρου του, του μεγαλύτερου πάχους του και της μεγαλύτερης βράχυνσής του, εκδήλωσε μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ποσών κρουστικής ενέργειας συγκριτικά με το δοκίμιο A2.

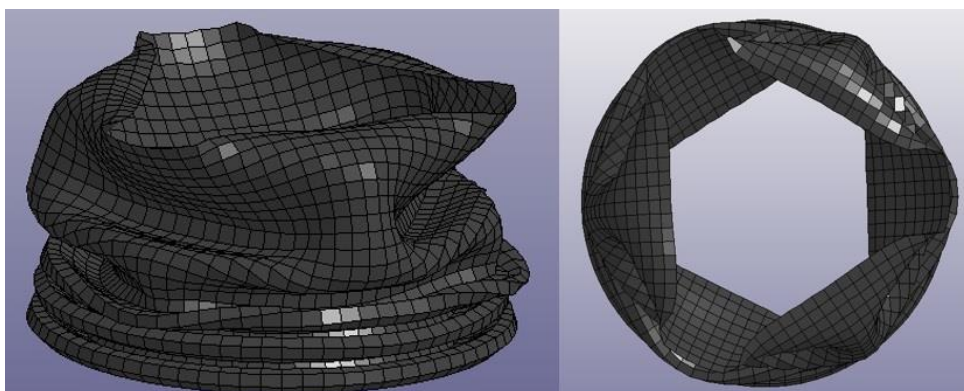
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 77.

Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	63,7
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	38,8
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	3258
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	28,65
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,61

Πίνακας 29 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 4



Εικόνα 76 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 4



Εικόνα 77 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 4

4.3.9 Προσομοίωση πειράματος 4-1-α

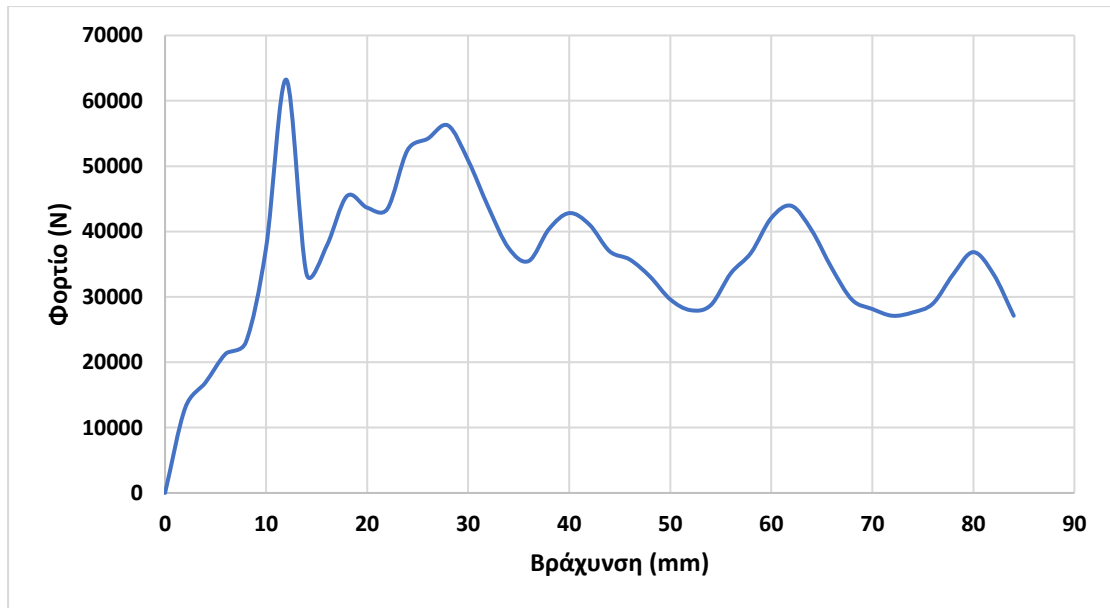
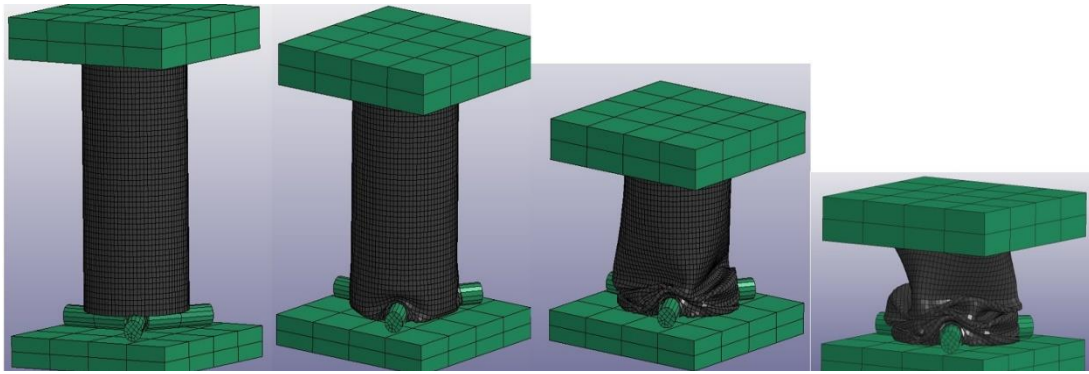
Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 4-1-α στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A3 υπό την παρουσία του μηχανισμού triggering V1, κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας τέσσερις 3D diamond λοβούς. Το δοκίμιο δεν εμφάνισε απόσχιση εξαιτίας του μηχανισμού triggering, ενώ το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης εμφανίστηκε όταν η συγκεντρωμένη μάζα του συμπιεζόμενου δοκιμίου συσσωρεύθηκε στην κάτω πλάκα επικαλύπτοντας τον μηχανισμό triggering, σε βράχυνση λίγο μεγαλύτερη των 10mm που είναι και το ύψος των ράβδων του μηχανισμού. Μάλιστα, ο μηχανισμός triggering επέφερε μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης καθώς μείωσε την ενεργό διατομή φόρτισης. Τέλος, ο μηχανισμός triggering V1 επέβαλε τον σχηματισμό 3D diamond λοβών εξαιτίας της αστεροειδούς μορφής του, παρόλο που το δοκίμιο A3 είχε την τάση αυτοτελώς να σχηματίζει αρχικά αξονοσυμμετρικούς λοβούς.

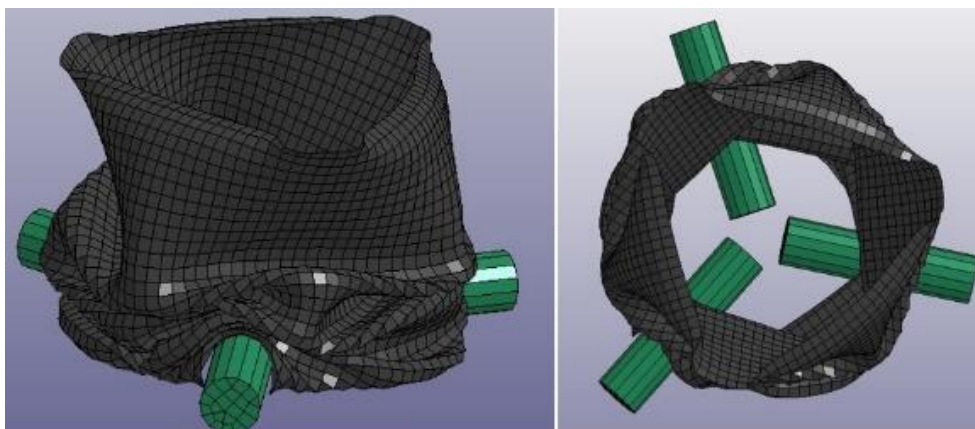
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 79.

<i>Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης</i>	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	63.2
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	36,08
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	3031
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	26.7
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0.57

Πίνακας 30 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 4-1-α



Εικόνα 78 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 4-1-α



Εικόνα 79 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 4-1-α

4.3.10 Προσομοίωση πειράματος 4-2

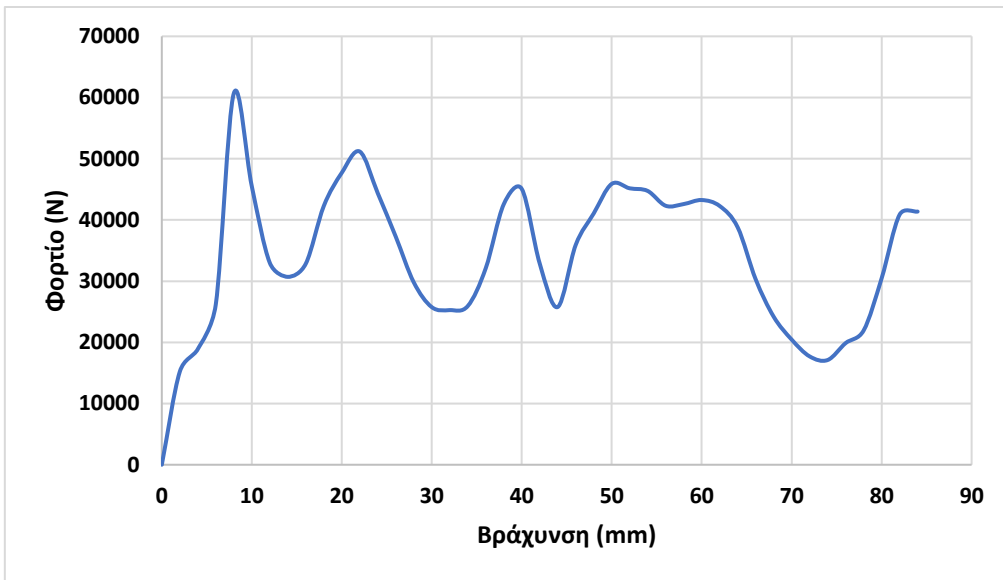
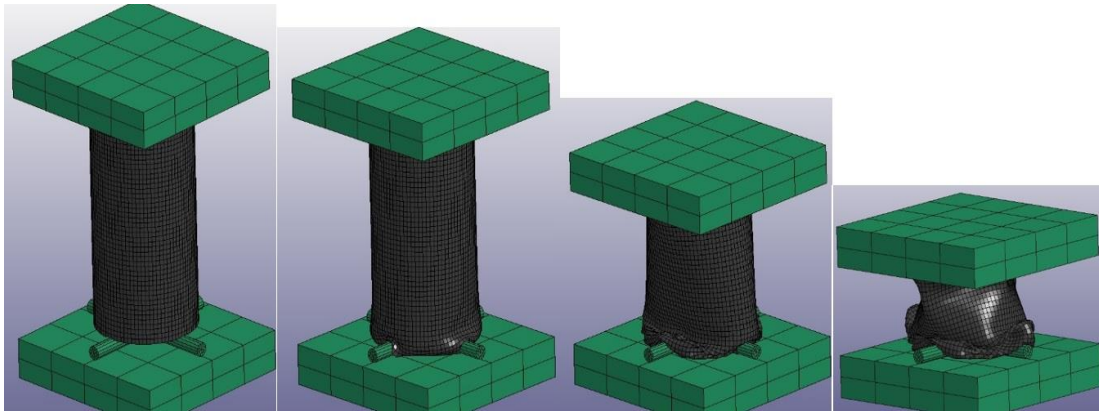
Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 4-2 στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A3 υπό την παρουσία του μηχανισμού triggering T2, κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας τέσσερις 2D ελλειπτικούς diamond λοβούς. Το δοκίμιο δεν εμφάνισε απόσχιση εξαιτίας του μηχανισμού triggering, ενώ το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης εμφανίστηκε όταν η συγκεντρωμένη μάζα του συμπιεζόμενου δοκιμίου συσσωρεύθηκε στην κάτω πλάκα επικαλύπτοντας τον μηχανισμό triggering, σε βράχυνση λίγο μικρότερη των 10mm που είναι και το ύψος των ράβδων του μηχανισμού. Μάλιστα, ο μηχανισμός triggering επέφερε μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης καθώς μείωσε την ενεργό διατομή φόρτισης. Τέλος, ο μηχανισμός triggering T2 επέβαλε τον σχηματισμό 2D diamond ελλειπτικών λοβών εξαιτίας της σταυροειδούς μορφής του, παρόλο που το δοκίμιο A3 είχε την τάση αυτοτελώς να σχηματίζει αρχικά αξονοσυμμετρικούς λοβούς.

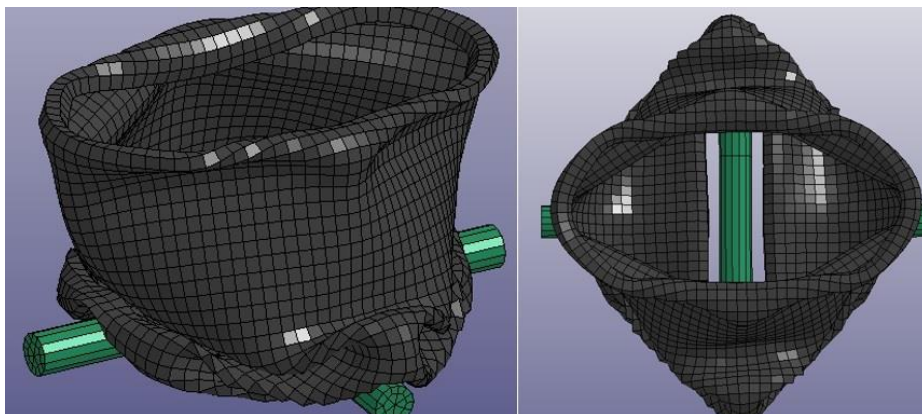
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 81.

<i>Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης</i>	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	60,7
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	34,2
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	2873
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	2,3
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,56

Πίνακας 31 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 4-2



Εικόνα 80 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 4-2



Εικόνα 81 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 4-2

4.3.11 Προσομοίωση πειράματος 4-2-α

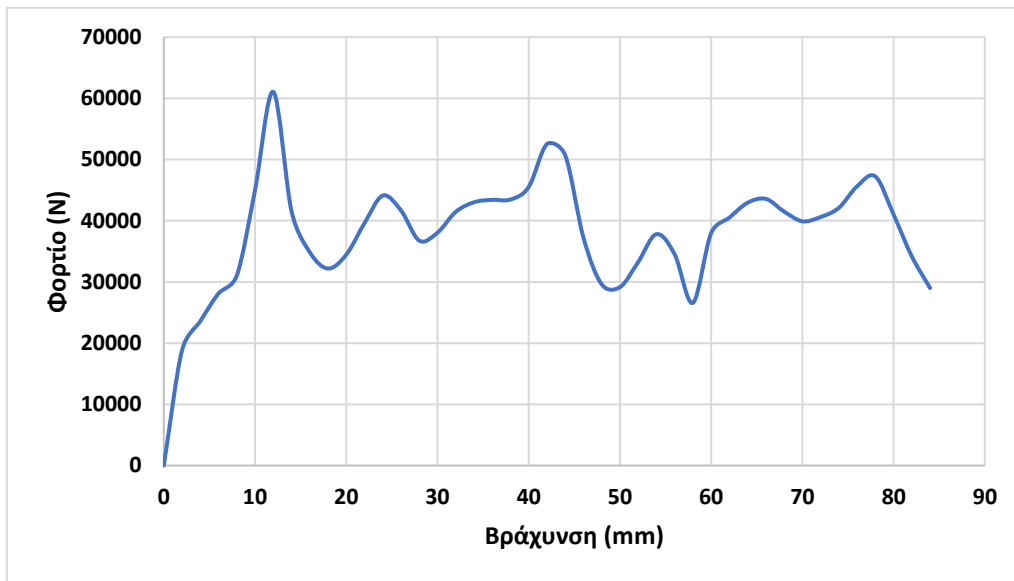
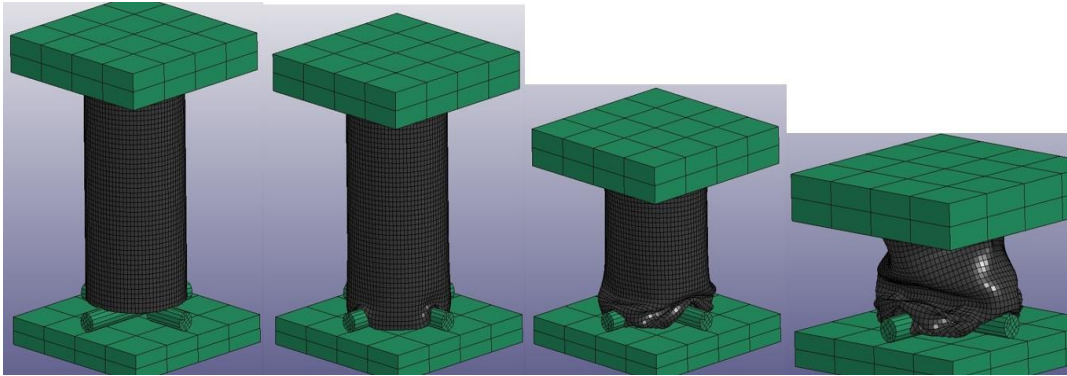
Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 4-2-α στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A3 υπό την παρουσία του μηχανισμού triggering V2, κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας τέσσερις 2D ελλειπτικούς diamond λοβούς. Το δοκίμιο δεν εμφάνισε απόσχιση εξαιτίας του μηχανισμού triggering, ενώ το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης εμφανίστηκε όταν η συγκεντρωμένη μάζα του συμπιεζόμενου δοκιμίου συσσωρεύθηκε στην κάτω πλάκα επικαλύπτοντας τον μηχανισμό triggering, σε βράχυνση λίγο μεγαλύτερη των 10mm που είναι και το ύψος των ράβδων του μηχανισμού. Μάλιστα, ο μηχανισμός triggering επέφερε μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης καθώς μείωσε την ενεργό διατομή φόρτισης. Τέλος, ο μηχανισμός triggering V2 επέβαλε τον σχηματισμό 2D diamond ελλειπτικών λοβών εξαιτίας της σταυροειδούς μορφής του, παρόλο που το δοκίμιο A3 είχε την τάση αυτοτελώς να σχηματίζει αρχικά αξονοσυμμετρικούς λοβούς.

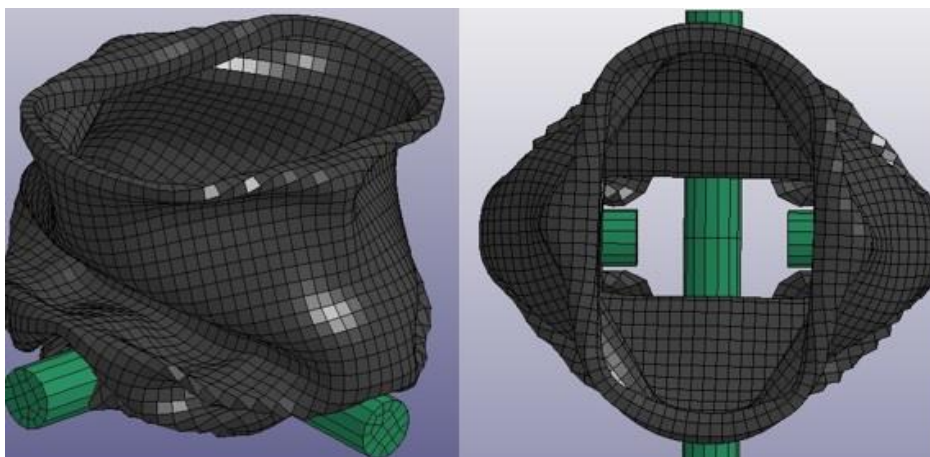
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 83.

<i>Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης</i>	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	61,06
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	38,4
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	3222
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	28,34
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,63

Πίνακας 32 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 4-2-α



Εικόνα 82 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 4-2-α



Εικόνα 83 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 4-2-α

4.3.12 Προσομοίωση πειράματος 4-3-α

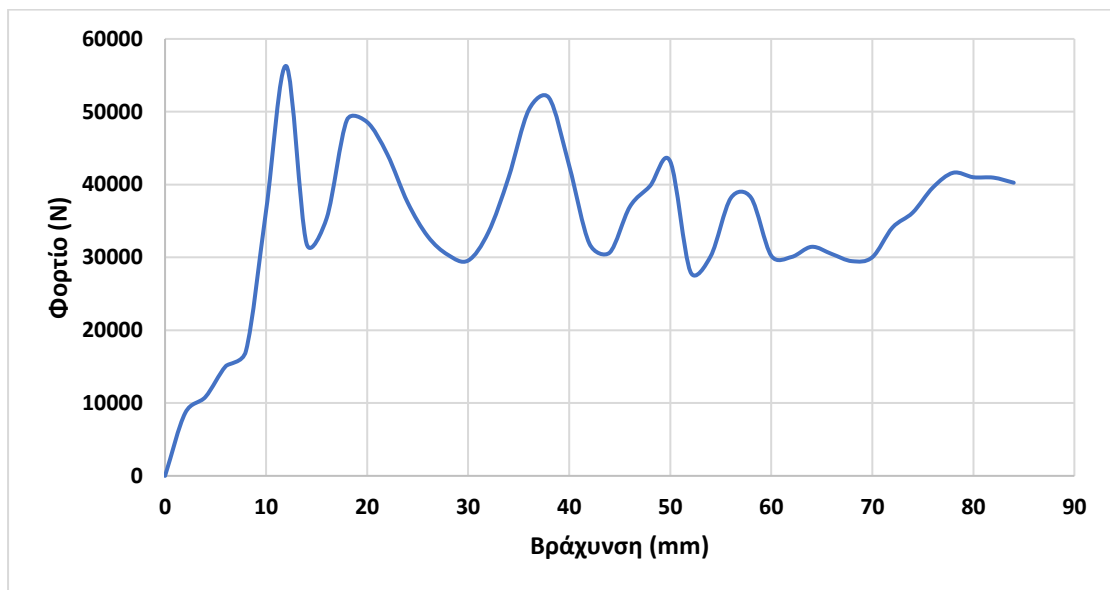
Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 4-3-α στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A3 υπό την παρουσία του μηχανισμού triggering U1, κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας τρεις 2D ελλειπτικούς diamond λοβούς. Το δοκίμιο δεν εμφάνισε απόσχιση εξαιτίας του μηχανισμού triggering, ενώ το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης εμφανίστηκε όταν η συγκεντρωμένη μάζα του συμπιεζόμενου δοκιμίου συσσωρεύθηκε στην κάτω πλάκα επικαλύπτοντας τον μηχανισμό triggering, σε βράχυνση λίγο μεγαλύτερη των 10mm που είναι και το ύψος των ράβδων του μηχανισμού. Μάλιστα, ο μηχανισμός triggering επέφερε μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης καθώς μείωσε την ενεργό διατομή φόρτισης. Τέλος, ο μηχανισμός triggering U1 επέβαλε τον σχηματισμό 2D diamond ελλειπτικών λοβών εξαιτίας της κυλινδρικής μορφής του, παρόλο που το δοκίμιο A3 είχε την τάση αυτοτελώς να σχηματίζει αρχικά αξονοσυμμετρικούς λοβούς.

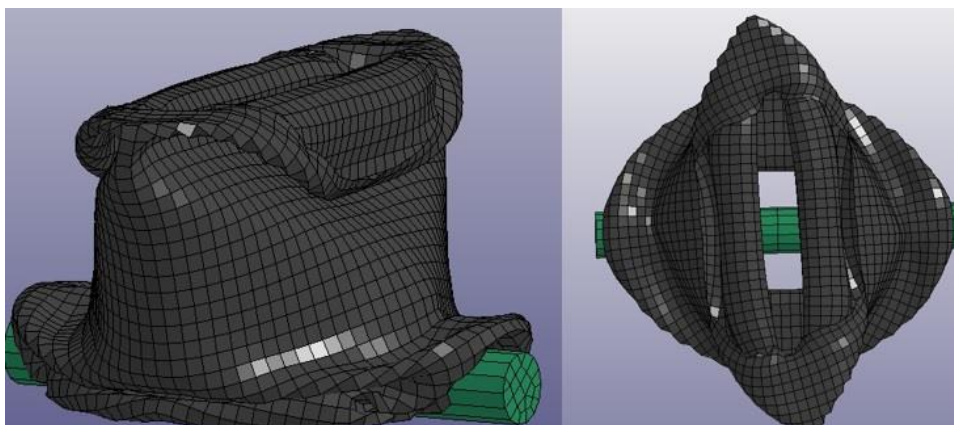
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 85.

<i>Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης</i>	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	56.3
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	34.6
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	2910
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	25.6
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0.62

Πίνακας 33 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 4-3-α



Εικόνα 84 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 4-3-α



Εικόνα 85 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 4-3-α

4.3.13 Προσομοίωση πειράματος 5

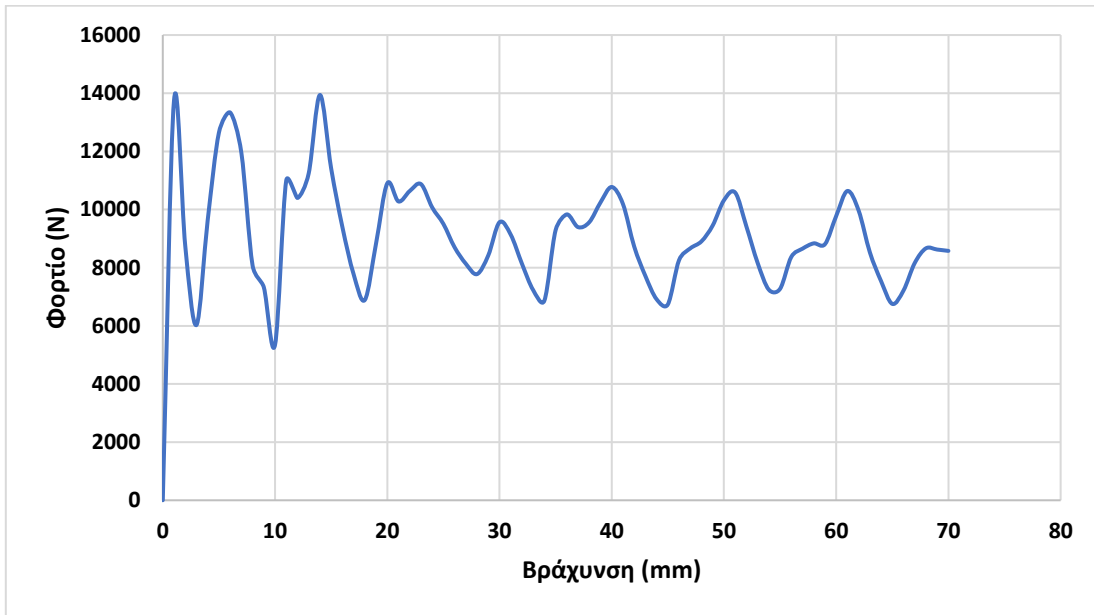
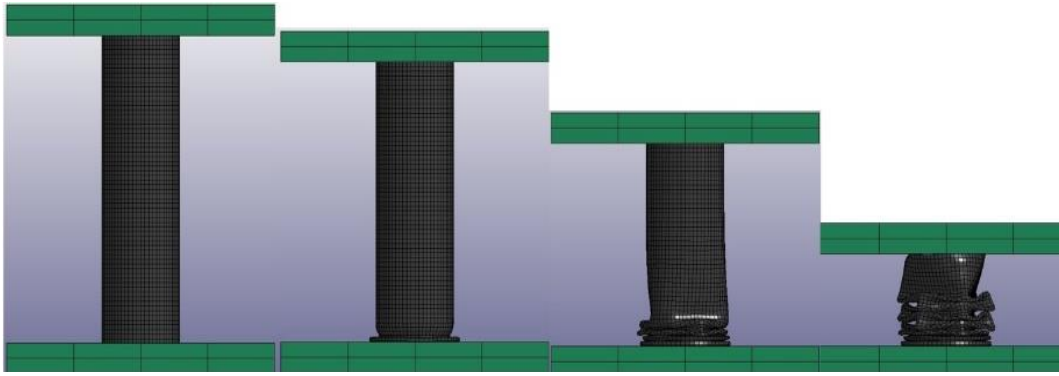
Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 5 στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A1 χωρίς την παρουσία κάποιου μηχανισμού triggering, κατέρρευσε υπό μικτό τρόπο σχηματίζοντας αρχικά δυο αξονοσυμμετρικούς λοβούς και έπειτα πέντε μη-αξονοσυμμετρικούς 3D diamond λοβούς.

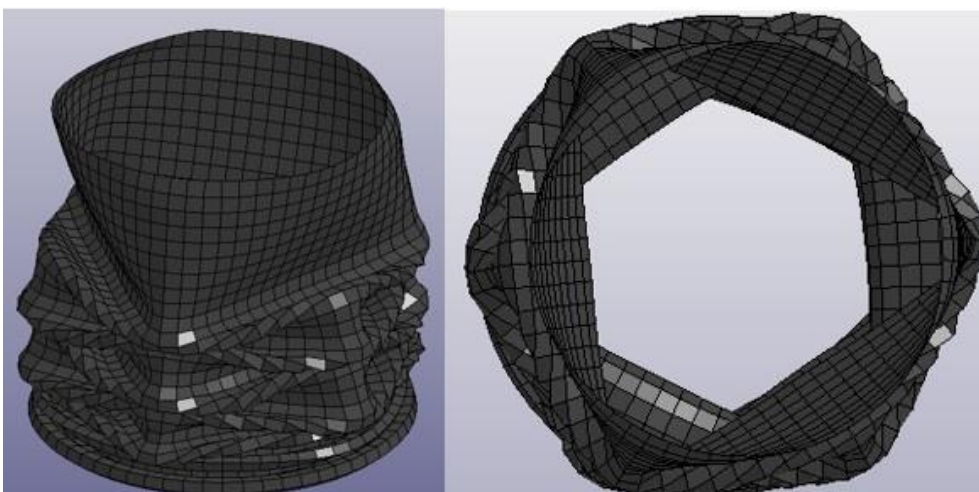
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 87.

<i>Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης</i>	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	13,94
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	9,1
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	636
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	26,84
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,65

Πίνακας 34 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 5



Εικόνα 86 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 5



Εικόνα 87 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 5

4.3.14 Προσομοίωση πειράματος 5-1

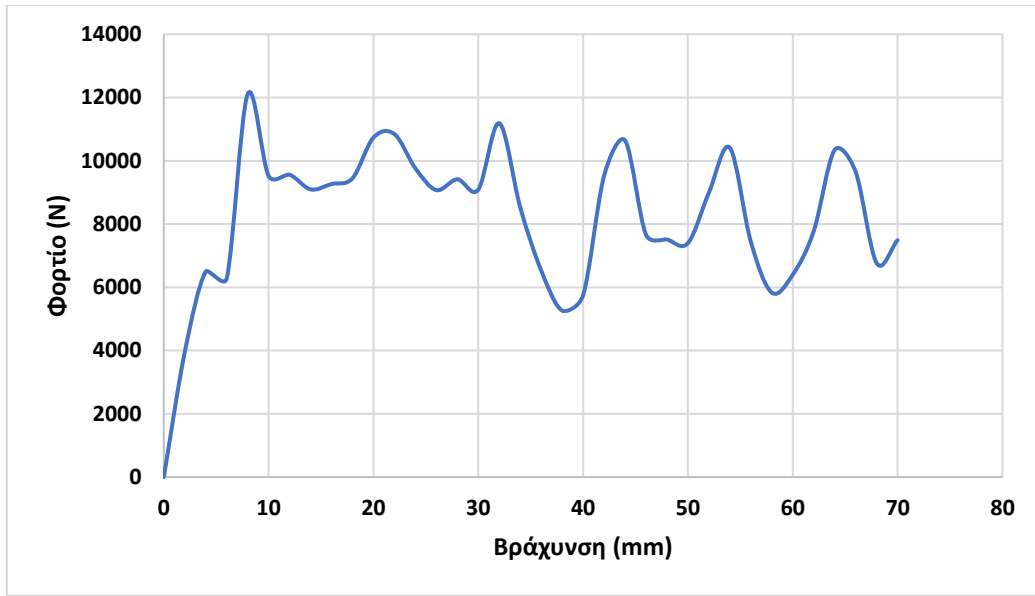
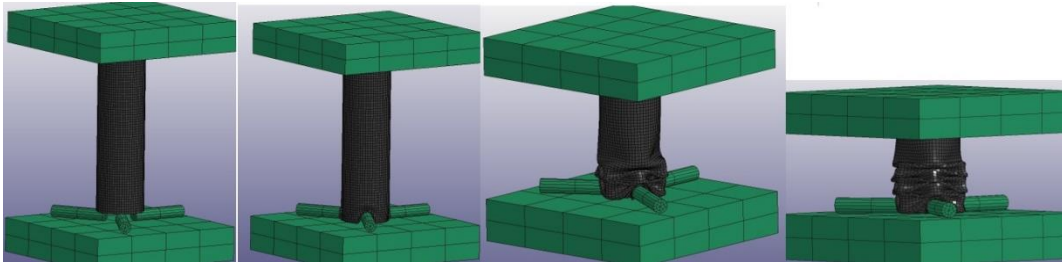
Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 5-1 στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A1 υπό την παρουσία του μηχανισμού triggering T1, κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας έξι 3D diamond λοβούς. Το δοκίμιο δεν εμφάνισε απόσχιση εξαιτίας του μηχανισμού triggering, ενώ το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης εμφανίστηκε όταν η συγκεντρωμένη μάζα του συμπιεζόμενου δοκιμίου συσσωρεύθηκε στην κάτω πλάκα επικαλύπτοντας τον μηχανισμό triggering, σε βράχυνση λίγο πριν των 10mm που είναι και το ύψος των ράβδων του μηχανισμού. Μάλιστα, ο μηχανισμός triggering επέφερε μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης καθώς μείωσε την ενεργό διατομή φόρτισης, καθώς επίσης μειώθηκε υπό την επίδρασή του και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Τέλος, ο μηχανισμός triggering T1 επέβαλε τον σχηματισμό 3D diamond λοβών εξαιτίας της αστεροειδούς μορφής του, παρόλο που το δοκίμιο A1 είχε την τάση αυτοτελώς να σχηματίζει αρχικά αξονοσυμμετρικούς λοβούς.

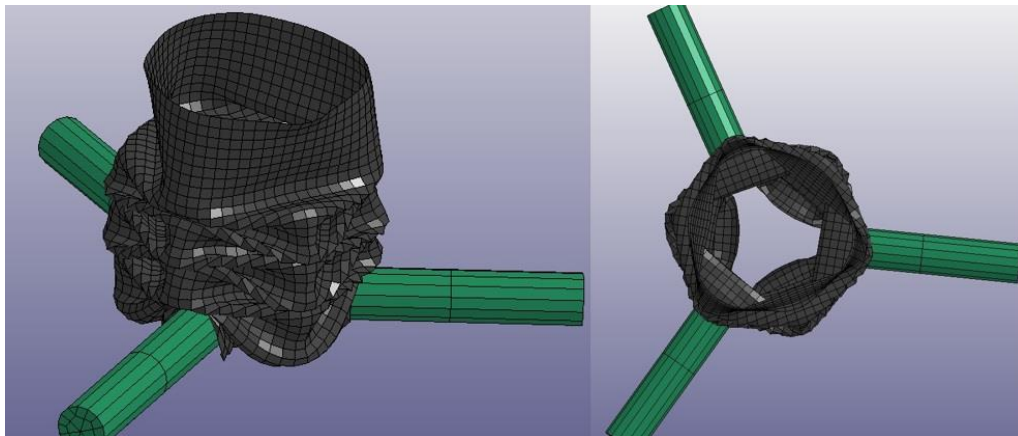
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 89.

Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	12,11
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	8,34
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	584
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	24,64
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,69

Πίνακας 35 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 5-1



Εικόνα 88 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 5-1



Εικόνα 89 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 5-1

4.3.15 Προσομοίωση πειράματος 5-2

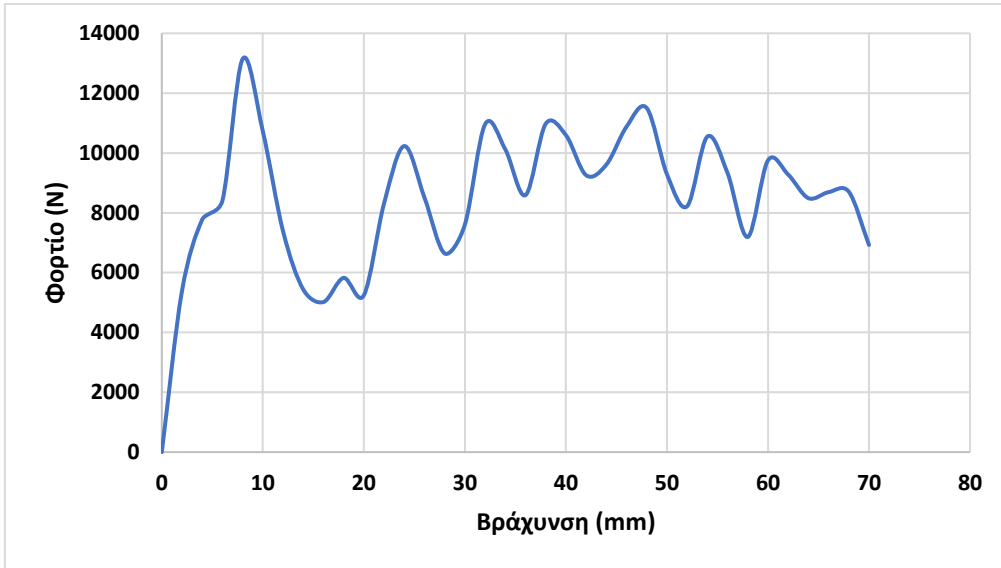
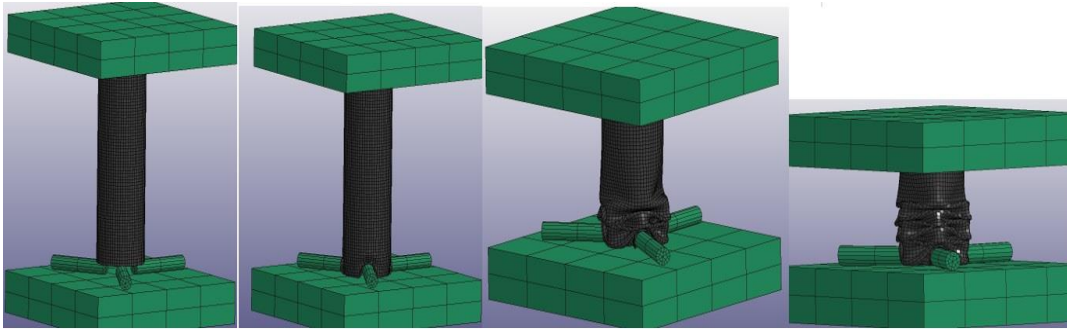
Η αριθμητική προσομοίωση για το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 5-2 στο λογισμικό LS-DYNA απέδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τα χαρακτηριστικά της απόκρισης έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης.

Πιο συγκεκριμένα, τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδωσαν πως το δοκίμιο A1 υπό την παρουσία του μηχανισμού triggering T2, κατέρρευσε υπό μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο σχηματίζοντας πέντε 2D diamond ελλειπτικούς λοβούς. Το δοκίμιο δεν εμφάνισε απόσχιση εξαιτίας του μηχανισμού triggering, ενώ το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης εμφανίστηκε όταν η συγκεντρωμένη μάζα του συμπιεζόμενου δοκιμίου συσσωρεύθηκε στην κάτω πλάκα επικαλύπτοντας τον μηχανισμό triggering, σε βράχυνση λίγο πριν των 10mm που είναι και το ύψος των ράβδων του μηχανισμού. Μάλιστα, ο μηχανισμός triggering επέφερε μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης καθώς μείωσε την ενεργό διατομή φόρτισης, καθώς επίσης μειώθηκε υπό την επίδρασή του και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Τέλος, ο μηχανισμός triggering T2 επέβαλε τον σχηματισμό 2D diamond ελλειπτικών λοβών εξαιτίας της σταυροειδούς μορφής του, παρόλο που το δοκίμιο A1 είχε την τάση αυτοτελώς να σχηματίζει αρχικά αξονοσυμμετρικούς λοβούς.

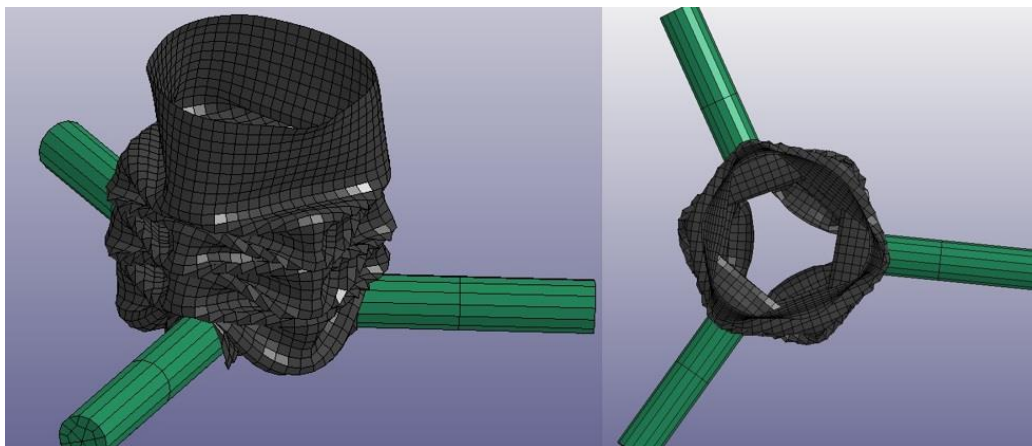
Τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισής του έναντι της κατάρρευσης παριστάνονται στον κάτωθι ακόλουθο πίνακα, στον οποίο παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη περί ικανότητας απορρόφησης κρουστικής ενέργειας, ενώ τέλος η τελική μορφή του συμπιεσμένου δοκιμίου παριστάνεται στην εικόνα 91.

Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης	
Μέγιστο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{max} (kN)	13,1
Μέσο Φορτίο Κατάρρευσης, F_{avg} (kN)	8,6
Απορροφώμενη Ενέργεια, EA (J)	602
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης, SEA (kJ/kg)	25,4
Ομοιομορφία Φόρτισης, LU (-)	0,65

Πίνακας 36 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου της διάταξης του πειράματος 5-2



Εικόνα 90 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και στιγμιότυπα κατάρρευσης από προσομοίωση μοντέλου πειράματος 5-2

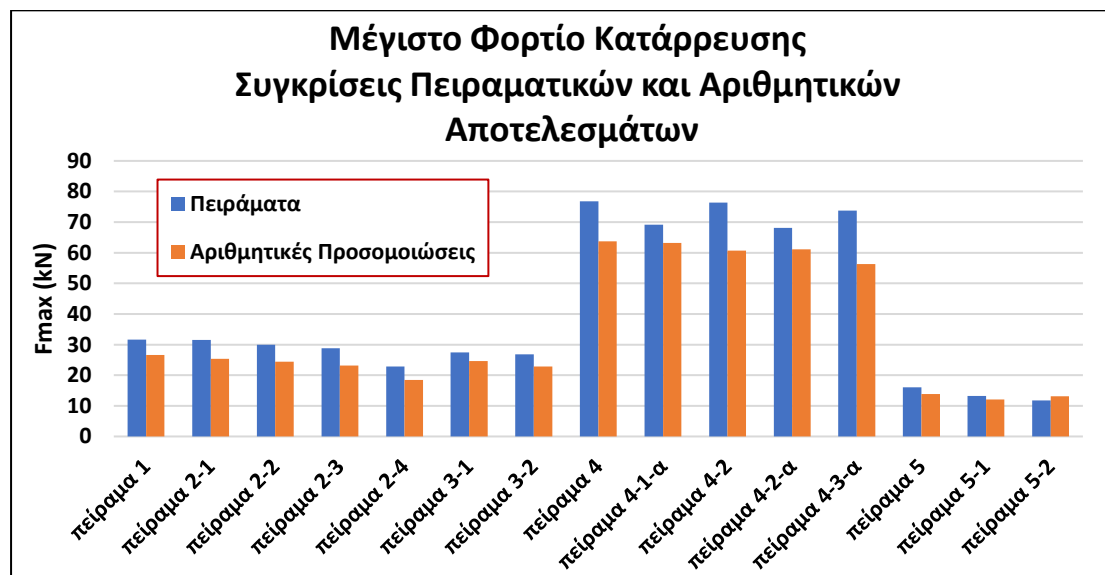


Εικόνα 91 Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου από προσομοίωση της διάταξης του πειράματος 5-2

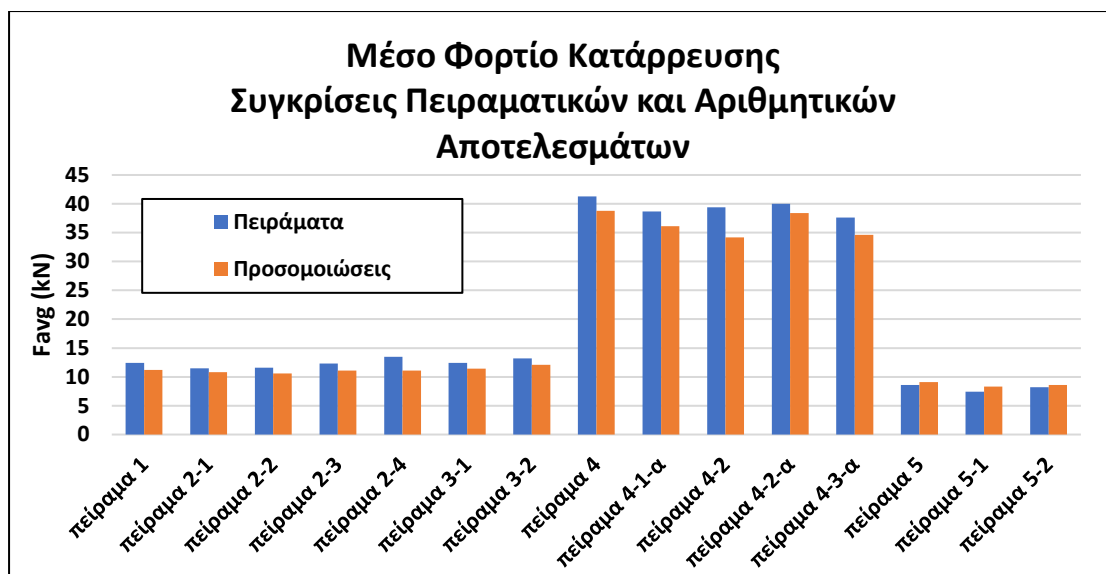
4.4 Συγκρίσεις Αριθμητικών και Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Οι συγκρίσεις που προέκυψαν μεταξύ των παραγόμενων πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων αξιολογήθηκαν τόσο προς επικύρωση των μοντέλων, όσο και προς εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων περί της επίδρασης των εξεταζόμενων μηχανισμών triggering στην συμπεριφορά λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων αλουμινίου έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης.

Οι παρακάτω εικόνες και ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζουν ποσοτικά τις αποκλίσεις των αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις των μοντέλων σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών που διεξήχθησαν. Οι αποκλίσεις αφορούν την ακρίβεια πρόβλεψης από τα μοντέλα των χαρακτηριστικών μεγεθών της κατάρρευσης, και συγκεκριμένα του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης που μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην ανάλυση και διερεύνηση της επίδρασης των μηχανισμών triggering, και του μέσου φορτίου κατάρρευσης το οποίο είναι απόλυτα ενδεικτικό της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας για ένα δοκίμιο. Όπως παρουσιάζει ο πίνακας 37, οι αποκλίσεις μεταξύ πειραμάτων και προσομοιώσεων αναφορικά με το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης κυμαίνονται από 8% έως και περίπου 20%, αποκλίσεις που θεωρούνται αποδεκτές για απλά δομημένα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Αναφορικά δε με το μέσο φορτίο κατάρρευσης και άρα την απορροφώμενη ενέργεια, οι αποκλίσεις κρίθηκαν αρκετά ικανοποιητικές καθώς κυμάνθηκαν από 4% μέχρι και 10% στην πλειοψηφία τους, γεγονός που επιβεβαιώνει την εγκυρότητα των μοντέλων ως προς την πρόβλεψη της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας των δοκιμίων.



Εικόνα 92 Συγκρίσεις πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων αναφορικά με το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης



Εικόνα 93 Συγκρίσεις πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων αναφορικά με το μέσο φορτίο κατάρρευσης

Αποκλίσεις (%)		
	Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης F_{max}	Μέσο φορτίο κατάρρευσης F_{avg}
Πείραμα 1	15.8	9.7
Πείραμα 2-1	19.3	6.1
Πείραμα 2-2	18.6	6.9
Πείραμα 2-3	19.4	13.8
Πείραμα 2-4	19.2	15.7
Πείραμα 3-1	10.2	8.1
Πείραμα 3-2	14.5	8.3
Πείραμα 4	17.1	6.1
Πείραμα 4-1-α	8.7	6.7
Πείραμα 4-2	20.5	10.3
Πείραμα 4-2-α	10.3	4.0
Πείραμα 4-3-α	21.7	7.9
Πείραμα 5	13.6	5.8
Πείραμα 5-1	8.3	12.7
Πείραμα 5-2	11.0	4.9

Πίνακας 37 Αποκλίσεις πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων

Αναφορικά δε με την εγκυρότητα των μοντέλων σχετικά με την πρόβλεψη του εμφανιζόμενου μηχανισμού κατάρρευσης και την επίδραση του μηχανισμού triggering, το μοντέλο της διάταξης τους πειράματος 1 προέβλεψε ορθά και με απόλυτη ακρίβεια την μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση του δοκιμίου, καθώς και τον ακριβή αριθμό και τύπο των σχηματιζόμενων λοβών ως πέντε 3D diamond λοβούς, αποδίδοντας απόλυτη ταύτιση της πειραματικής δοκιμής και της αριθμητικής προσομοίωσης.

Τα μοντέλα των διατάξεων των πειραμάτων 2-1, 2-2, 2-3 και 2-4, προέβλεψαν ορθά την απόσχιση του δοκιμίου στα σημεία επαφής με το μηχανισμό triggering, καθώς και την ακανόνιστη μορφή της κατάρρευσης εξαιτίας της απόσχισης. Μάλιστα, και τα τέσσερα συγκεκριμένα μοντέλα προέβλεψαν ορθά το μειωμένο μέγιστο φορτίο κατάρρευσης εξαιτίας του triggering, καθώς και τη μείωση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας, με εξαίρεση ωστόσο το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 2-4 το οποίο προέβλεψε αυξημένη απορρόφηση ενέργειας εξαιτίας του triggering. Τέλος, πειράματα και προσομοιώσεις συμφώνησαν πως όσο αυξάνεται το πάχος των στελεχών του μηχανισμού triggering, τόσο μειώνεται το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης καθώς μειώνεται η ενεργός διατομή συμπίεσης.

Το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 3-1 προέβλεψε ορθά την μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση υπό σχηματισμό 3D diamond λοβών όπως επιβλήθηκε από την αστεροειδή μορφή του μηχανισμού triggering T1. Ωστόσο, ο αριθμός των σχηματιζόμενων λοβών δεν προβλέφθηκε απόλυτα ορθά, καθώς η πειραματική διαδικασία απέδωσε έξι λοβούς, ενώ η προσομοίωση τέσσερις. Τέλος, και η πειραματική διαδικασία και η αριθμητική προσομοίωση προέβλεψαν ορθά τη μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης εξαιτίας του μηχανισμού triggering.

Το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 3-2 προέβλεψε ορθά την μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση. Ωστόσο, ο αριθμός και ο τύπος των σχηματιζόμενων λοβών δεν προβλέφθηκε απόλυτα ορθά, καθώς η πειραματική διαδικασία απέδωσε έξι 3D diamond λοβούς, ενώ η προσομοίωση τέσσερις 4D diamond λοβούς. Τέλος, και η πειραματική διαδικασία και η αριθμητική προσομοίωση προέβλεψαν ορθά τη μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης εξαιτίας του μηχανισμού triggering, καθώς και τη βελτίωση της ικανότητας προς απορρόφηση ενέργειας που επέφερε στο δοκίμιο.

Το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 4 απέδωσε μικτό μηχανισμό κατάρρευσης υπό αρχικά τρεις αξονοσυμμετρικούς λοβούς και έπειτα έναν 3D diamond λοβό, σε αντίθεση με τη πειραματική διαδικασία που απέδωσε πέντε αξονοσυμμετρικούς λοβούς.

Το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 4-1-α προέβλεψε απόλυτα ορθά τον μη-αξονοσυμμετρικό μηχανισμό κατάρρευσης. Μάλιστα, πείραμα και προσομοίωση συμφώνησαν απόλυτα τόσο στον αριθμό όσο και στον τύπο των σχηματιζόμενων λοβών, αποδίδοντας αμφότερα τέσσερις 3D diamond λοβούς. Έτσι, η πειραματική διαδικασία και η αριθμητική προσομοίωση ταυτίστηκαν στην πρόβλεψη της επιβολής του triggering στο σχηματισμό 3D diamond λοβών

μέσω της αστεροειδούς μορφής του triggering V1. Τέλος, απόλυτη ταύτιση παρουσιάστηκε και στην πρόβλεψη της επίδρασης του triggering στην μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης και της απορρόφησης ενέργειας.

Το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 4-2 προέβλεψε μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση με σχηματισμό τεσσάρων 2D diamond ελλειπτικών λοβών τους οποίους ο μηχανισμός triggering T2 επέβαλε λόγω της σταυροειδούς μορφής του. Επίσης, ο μηχανισμός triggering προκάλεσε την μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης λόγω της μείωσης της ενεργούς διατομής φόρτισης. Απεναντίας, η πειραματική διαδικασία απέδωσε αξονοσυμμετρική κατάρρευση με τους λοβούς ωστόσο να αναπτύσσονται στο άνω άκρο του δοκιμίου, και όχι στην πλευρά του μηχανισμού triggering. Ως εκ τούτου, η επίδραση του triggering στην μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης αναιρέθηκε, ενώ τέλος τόσο η προσομοίωση όσο και η πειραματική δοκιμή απέδωσαν μείωση της απορροφώμενης ενέργειας εξαιτίας του μηχανισμού triggering T2.

Το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 4-2-a προέβλεψε ορθά την μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση με σχηματισμό τεσσάρων 2D diamond ελλειπτικών λοβών τους οποίους ο μηχανισμός triggering V2 επέβαλε λόγω της σταυροειδούς μορφής του. Επίσης, τόσο η προσομοίωση όσο και η πειραματική δοκιμή απέδωσαν μείωση της απορροφώμενης ενέργειας και του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης εξαιτίας του μηχανισμού triggering T2, ενώ τα αποτελέσματα μεταξύ τους διέφεραν στον αποδιδόμενο αριθμό των λοβών, με την πειραματική διαδικασία να αποδίδει τρεις και την προσομοίωση τέσσερις 2D diamond λοβούς.

Το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 4-3-a προέβλεψε ορθά την μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση και την μείωση τόσο της απορροφώμενης ενέργειας, όσο και του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης εξαιτίας του μηχανισμού triggering U1. Ωστόσο, η πειραματική διαδικασία απέκλινε από την προσομοίωση στον τύπο και στον αριθμό των σχηματιζόμενων μη-αξονοσυμμετρικών λοβών, καθώς η πρώτη απέδωσε τέσσερις 3D diamond λοβούς, ενώ η προσομοίωση τρεις 2D diamond λοβούς τον σχηματισμό των οποίων επέβαλε η κυλινδρική μορφή του μηχανισμού triggering.

Το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 5 απέδωσε μικτό μηχανισμό κατάρρευσης υπό αρχικά δυο αξονοσυμμετρικούς λοβούς και έπειτα πέντε 3D diamond λοβούς, σε αντίθεση με τη πειραματική διαδικασία που απέδωσε οκτώ αξονοσυμμετρικούς λοβούς.

Το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 5-1 προέβλεψε ορθά την μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση με σχηματισμό 3D diamond λοβών τους οποίους ο μηχανισμός triggering T1 επέβαλε λόγω της αστεροειδούς μορφής του. Επίσης, τόσο η προσομοίωση όσο και η πειραματική δοκιμή απέδωσαν μείωση της απορροφώμενης ενέργειας και του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης εξαιτίας του μηχανισμού triggering, ενώ τα αποτελέσματα μεταξύ τους διέφεραν στον αποδιδόμενο αριθμό των λοβών, με την πειραματική διαδικασία να αποδίδει επτά και την προσομοίωση έξι λοβούς.

Το μοντέλο της διάταξης του πειράματος 5-2 προέβλεψε ορθά την μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση και την μείωση τόσο της απορροφώμενης ενέργειας, όσο και του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης εξαιτίας του μηχανισμού triggering T2. Ωστόσο, η πειραματική διαδικασία απέκλινε από την προσομοίωση στον τύπο και στον αριθμό των σχηματιζόμενων μη-αξονοσυμμετρικών λοβών, καθώς η πρώτη απέδωσε επτά 3D diamond λοβούς, ενώ η προσομοίωση πέντε 2D diamond λοβούς τον σχηματισμό των οποίων επέβαλε η σταυροειδής μορφή του μηχανισμού triggering.

Τέλος, όλα τα μοντέλα συμφώνησαν με τις πειραματικές δοκιμές πως το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης εντοπίστηκε σε βράχυνση στην οποία το υλικό του συμπιεζόμενου δοκιμίου είχε συγκεντρωθεί και συσσωρευθεί στην κάτω πλάκα προβάλλοντας αυξημένη αντίσταση προς περαιτέρω συμπίεση. Συνεπώς, το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης εντοπίστηκε σε βράχυνση περίπου ίση με το ύψος του μηχανισμού triggering.

5. Σύνοψη και Συμπεράσματα

5.1 Σύνοψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε και διερευνήθηκε η επίδραση μηχανισμών triggering στην συμπεριφορά λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων κράματος αλουμινίου 6063-F25 (σειράς 6000) έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης. Η μελέτη των προς ανάλυση μηχανισμών πραγματοποιήθηκε τόσο μέσω διεξαγωγής πειραματικών δοκιμών υπό ημι-στατικές συνθήκες, όσο και μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν συνολικά τρία δοκίμια λεπτότοιχων σωλήνων διαφορετικών διαστάσεων (μήκους, διαμέτρου και πάχους τοιχώματος) ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή τους τόσο στα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς τους κατά την κρούση, όσο και στον παρατηρούμενο μηχανισμό αξονικής κατάρρευσης. Επίσης, για την έγκυρη διεξαγωγή συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων περί της μηχανικής συμπεριφοράς τους έναντι αξονικής κρούσης, τα δοκίμια εξετάστηκαν σε αξονική συμπίεση με και χωρίς την παρουσία μηχανισμών triggering ώστε να προσφερθούν οι κατάλληλες συγκρίσεις των αποτελεσμάτων. Διάφοροι μηχανισμοί triggering τόσο σε γεωμετρία όσο και σε διαστάσεις εξετάστηκαν ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση και η αποτελεσματικότητά τους. Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών και των αριθμητικών προσομοιώσεων συγκρίθηκαν τόσο προς επικύρωση των παραγόμενων μοντέλων στο LS-DYNA, όσο και προς εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με την επίδραση των μηχανισμών triggering στην συμπεριφορά των δοκιμίων έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης. Η επίδραση των μηχανισμών triggering αξιολογήθηκε ως προς τον επιρροή τους στον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης των δοκιμίων και στα χαρακτηριστικά της απόκρισης κατά την αξονική συμπίεση λαμβάνοντας υπόψιν τα φορτία κατάρρευσης και την απορροφώμενη ενέργεια της κρούσης.

Πιο αναλυτικά, οι πειραματικές δοκιμές διεξήχθησαν υπό ημι-στατικές συνθήκες φόρτισης με ταχύτητα συμπίεσης 20 mm/min για όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια. Κατά την πειραματική διαδικασία, καταγράφηκαν κατάλληλα στιγμιότυπα της αξονικής κατάρρευσης μέσω φωτογραφικού εξοπλισμού, καθώς και μετρήσεις επιβαλλόμενης δύναμης και μετατοπίσεων από αισθητήρες, η καταγραφή των οποίων έγινε από κατάλληλο λογισμικό προς εξαγωγή των πειραματικών διαγραμμάτων δύναμης-μετατόπισης.

Αναφορικά με τις αριθμητικές προσομοιώσεις, αυτές διεξήχθησαν έπειτα από την δημιουργία των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό LS-DYNA. Τα μοντέλα των κυλινδρικών δοκιμίων δημιουργήθηκαν με διδιάστατα επίπεδα πεπερασμένα στοιχεία, καθώς κρίθηκαν καταλληλότερα τόσο ως προς το χρόνο προσομοίωσης, όσο και ως προς την ακρίβειά τους δεδομένου των λεπτότοιχων διατάξεων που κρίθηκαν να προσομοιώσουν. Κατά τη δημιουργία κάθε μοντέλου προσομοίωσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων, αρχικά

ορίσθηκαν η γεωμετρία και οι διαστάσεις των σωμάτων που απαρτίζουν το μοντέλο, όπως δοκίμιο, πλάκες και μηχανισμός triggering (όταν υπήρχε), και έπειτα ορίσθηκε το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Κατόπιν, επιλέχθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών και ορίσθηκαν οι οριακές συνθήκες μη-εισχώρησης στις διεπιφάνειες. Τέλος, ορίσθηκαν τα χαρακτηριστικά φόρτισης εισάγοντας σταθερή ταχύτητα συμπίεσης από την πάνω πλάκα 1 mm/ms ως πιο αντιπροσωπευτική των πραγματικών συνθηκών κρούσης.

5.2 Συμπεράσματα

Οι συγκρίσεις μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων απέδωσαν κρίσιμα συμπεράσματα τόσο ως προς την εγκυρότητα και την ακρίβεια των αναπτυχθέντων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, όσο και περί της επίδρασης των μηχανισμών triggering στην μηχανική συμπεριφορά των εξεταζόμενων λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων αλουμινίου έναντι αξονικής κρούσης.

Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με εγκυρότητα των μοντέλων, τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων απέδωσαν απόκλιση 4% έως 10% στο προβλεπόμενο μέσο φορτίο κατάρρευσης το οποίο είναι και απόλυτα ενδεικτικό της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας, ενώ οι αποκλίσεις στο μέγιστο φορτίο κατάρρευσης κυμάνθηκαν από 8% έως και 20%, αποδίδοντας στα μοντέλα ικανοποιητική ακρίβεια. Σχετικά δε με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης, τα μοντέλα προέβλεψαν ορθά στην πλειοψηφία τους τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης και τον τύπο των σχηματιζόμενων λοβών, ενώ μάλιστα πολλές φορές απέδωσαν και τον ακριβή αριθμό λοβών σύμφωνα με αυτούς που παρατηρήθηκαν κατά τις αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές. Τα ανάλογα δε μοντέλα προέβλεψαν μάλιστα την απόσχιση των δοκιμίων (πειράματα 2-1 έως 2-4), ενώ μάλιστα όλα τα μοντέλα προέβλεψαν ορθά τη μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης όπως επίσης και τη βράχυνση στην οποία εντοπίστηκε για κάθε διάταξη. Τέλος, στην μοντέλα στην συντριπτική πλειοψηφία απέδωσαν ορθά την επίδραση του μηχανισμού triggering στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, παρουσιάζοντας ταύτιση με τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα.

Τέλος δε, αξιολογώντας τόσο τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων όσο και αυτά των πειραματικών δοκιμών, συμπεράστηκε πως οι μηχανισμοί triggering επέφεραν μείωση του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης καθώς μείωσαν την ενεργό διατομή στην οποία ασκούταν το φορτίο συμπίεσης. Μάλιστα, όσο αυξανόταν το πάχος των στελεχών του μηχανισμού triggering, τόσο περισσότερο η ενεργός διατομή φόρτισης μειωνόταν και άρα το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης. Το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης, σε κάθε περίπτωση εξεταζόμενου μηχανισμού triggering, παρουσιάστηκε σε βράχυνση όσο περίπου το ύψος του triggering, καθώς εκεί το υλικό του συμπιεζόμενου δοκιμίου είχε συγκεντρωθεί και συσσωρευθεί στην κάτω πλάκα, επικαλύπτοντας τον μηχανισμό triggering, και έτσι η συσσωρευμένη μάζα του δοκιμίου προέκβαλε

αυξημένη αντίσταση προς περαιτέρω συμπίεση. Επιπλέον, οι μηχανισμοί triggering τύπου S, προκάλεσαν απόσχιση του δοκιμίου εξαιτίας των πολύ λεπτών στελεχών τους, επιβάλλοντας έτσι δε μια ακανόνιστη μορφή κατάρρευσης. Από την άλλη πλευρά, οι περισσότεροι μηχανισμοί triggering μορφής T, V και U, επέβαλαν τον αντίστοιχο μηχανισμό κατάρρευσης ανάλογα με τη μορφή τους, όπως λ.χ. οι αστεροειδείς μηχανισμοί επέβαλαν μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση με 3D diamond λοβών, ενώ οι σταυροειδείς μηχανισμοί triggering επέβαλαν μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση με 4D ή 2D ελλειπτικούς diamond λοβούς. Τέλος, σχεδόν όλοι οι μηχανισμοί triggering επέφεραν μείωση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας, με εξαίρεση ωστόσο κάποιους όπως αυτούς μορφής T στα πειράματα 3-1 και 3-2.

6. Βιβλιογραφία

- [1] **M. Ptak, P.Kaczynski, F.A.O. Fernandes, R.J. Alves de Sousa** (2017). "Assessing impact velocity and temperature effects on crashworthiness properties of cork material." ELSEVIER. *International Journal of Impact Engineering*
- [2] **G.L. Farley, R.M.Jones** (1989). "Energy-absorption capability of composite tube and beams." NASA Technical Publications. TM 101634. pp: 1-248
- [3] **P.Florent, Y.Wenji, W.Cui'e** (2007). "Crushing modes of aluminium tubes under axial compression." 5th Australian Congress on Applied Mechanics. Brisbane Australia
- [4] **W.J. Hughes** (2016). "Crushing Behavior of Laminated Composite Structural Elements: Experiment and LS-DYNA Simulations." Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation, DOT / FAA / TC-15/25
- [5] **H. Nikkhah, A. Baroutaji, A. Ghani Olabi** (2019). "Crashworthiness design and optimisation of windowed tubes under axial impact loading." ELSEVIER
- [6] **A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis, D.G. Chronopoulos, P.K. Kostazos** (2009). "On the crashworthiness of composite rectangular thin-walled tubes internally reinforced with aluminium or polymeric foams: Experimental and Numerical simulation." ELSEVIER. *Composite Structures*
- [7] **A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis, D.P. Papapostolou** (2004). "Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tubes: experimental." ELSEVIER. *Composite Structures*
- [8] **E. Acar, M. Altin, M.A. Guler** (2019). "Evaluation of various multi-cell design concepts for crashworthiness design of thin-walled aluminium tubes." ELSEVIER. *Thin-walled Structures*
- [9] **N. Hussain, S. P. Regalla, Y. D. Rao** (2017). "Comparative Study of Trigger Configuration for Enhancement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial Impact Loading", 11th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics, ELSEVIER.
- [10] **R. A. Eshkoor, S. A. Oshkovr, A. B. Sulong, R. Zulkifli, A. K. Ariffin, C. H. Azhari** (2013). "Effect of trigger configuration on the crashworthiness characteristics of natural silk epoxy composite tubes", ELSEVIER, *Composites: Part B* 55 (2013) 5-10.

[11] **Y. Ren, H. Jiang, Z. Liu** (2019). "Evaluation of double- and triple- coupled triggering mechanisms to improve crashworthiness of composite tubes", ELSEVIER, *Internacional Journal of Mechanical Sciences* 157-158 (2019) 1-12.

[12] **R. Sivagurunathan, S. L. Tze Way, L. Sivagurunathan, M. Y. Yaakob** (2018). "Effects of triggering mechanisms on the crashworthiness characteristics of square wovenjute/epoxy composite tubes", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1-17.

[13] **A. Airoidi, G. Janszen** (2005). "A deisgn for a crashworthy landing gear with a new triggering mechanicm for the plastic collapse of metallic tubes", ELSEVIER, *Aerospace Science and Technology* 9 (2005) 445-455.