

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ»

"Τομέας Τεχνολογίας των κατεργασιών"

"Μελέτη της συμβολής διαφόρων μηχανισμών triggering στα άκρα λεπτότοιχων σωληνωτών φορέων στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (Crashworthiness) σε περίπτωση κρούσης."

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΑΣΚΑΛΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (51120006)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Δ.Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

Φεβρουάριος 2021

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμβολής μηχανισμών σκανδάλης (triggering), συγκεκριμένα τύπου σταυρού, στα άκρα λεπτότοιχων τετραγωνικών σωληνωτών δοκιμίων στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (Crashworthiness), τα οποία υπόκεινται σε αξονική στατική καταπόνηση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με δοκίμιο χωρίς τη χρήση μηχανισμού triggering.

Το πειραματικό μέρος της διπλωματικής πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο οποίο χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος εξοπλισμός για την κατασκευή των δοκιμίων, την στατική φόρτιση τους και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (crashworthiness) και στους λόγους για τους οποίους έχει αποκτήσει μείζον σημασία στη σύγχρονη εποχή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η ανάγκη που οδήγησε στη χρήση των μηχανισμών triggering και γίνεται παρουσίαση των κυριότερων μηχανισμών που χρησιμοποιούνται και ερευνώνται.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε και παραθέτονται τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας, η εξαγωγή των συμπερασμάτων και προτάσεις ως προς τη βελτιστοποίηση της χρήση των μηχανισμών triggering.

Abstract

The purpose of this master thesis is the contribution of the study of triggering mechanisms, specifically cross-type, at the ends of thin-walled square tubular specimens to the energy absorption capacity (Crashworthiness), which are subjected to axial static stress and the comparison of results with an essay without the use of a triggering mechanism.

The experimental part of the diploma took place at the Laboratory of Machining Technology of the National Technical University of Athens, where appropriate equipment was used for the construction of the specimens, their static loading and the extraction of the measurement results.

The first chapter makes a reference to crashworthiness and the reasons that have led to its acquisition of major importance in modern times.

The second chapter describes the need that led to the use of triggering mechanisms and the main mechanisms that are used and researched are presented.

The third chapter analyzes the experimental procedure followed and lists the results obtained.

The fourth chapter compares the results of the experimental process, draws conclusions and suggestions on how to optimize the use of triggering mechanisms.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον Καθηγητή κο Μανωλάκο Δημήτριο για την επίβλεψη και την κατεύθυνση που μου παρείχε καθώς και για την συνεχή υποστήριξη που μου παρείχε επί του θέματος

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ Παπαντωνίου Ιωάννη για τη βοήθεια στου στην εκτέλεση των πειραμάτων και στην παροχή κάθε είδους πληροφορίας που χρειάστηκε και το τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου και ιδιαίτερα τον κ. Μελισσά Νικόλαο, για την προετοιμασία των δοκιμίων για τα πειράματα.

Περίλι	ηψη	3
Abstra	act	4
Ευχαρ	ηστίες	5
Περιεχ	χόμενα	6
Κατάλ	λογος Σχημάτων	8
Κατάλ	λογος Πινάκων	11
ПРОЛ	ΛΟΓΟΣ	12
ΚΕΦΑ	ΑΛΑΙΟ 1 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	13
CRAS	SHWORTHINESS	13
1.1	Εισαγωγή στην ασφάλεια των κατασκευών	13
1.2	Εισαγωγή στο Crashworthiness	14
1.3	Δείκτες απόδοσης του Crashworthiness	18
1.4	Λεπτότοιχες διατομές	19
1.5	Ανοιχτές διατομές	20
1.6	Δομές λεπτών τοιχωμάτων πολλαπλών κυψελίδων	20
KEΦA	ΑΛΑΙΟ 2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΚΑΝΔΑΛΩΝ (TRIGGERS)	22
2.1	Εισαγωγή στους μηχανισμούς σκανδαλών Triggering	22
2.2	Διάφορες μορφές Triggering	22
2.3	Triggering με τετραγωνικές διατομές	28
2.4	Τρόποι κατάρρευσης	29
KEΦA	ΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	32
3.1	Παρουσίαση διάταξης	32
3.2	Εξεταζόμενα δοκίμια	34
3.3	Παρουσίαση σταυρών για το trigger	35
3.4	Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών	36
3.4.1	Πειραματική δοκιμή χωρίς μηχανισμό trigger	36
3.4.2	Πειραματικές δοκιμές με μηχανισμό trigger T1	39
3.4.2.1	1 Μηχανισμός trigger T1-0°	
3.4.2.2	2 Μηχανισμός trigger T1-45°	42
3.4.2.3	3 Μηχανισμός trigger T1-30°	44
3.4.2.4	4 Μηχανισμός trigger T1-60°	47
3.4.3	Πειραματικές δοκιμές με μηχανισμό trigger T2	49
3.4.3.1	1 Μηχανισμός trigger T2-0°	49
3.4.3.2	2 Μηχανισμός trigger T2-45°	53
3.4.3.3	3 Μηχανισμός trigger T2-30°	55

Περιεχόμενα

3.4.3.	4 Μηχανισμός trigger T2-60°	58
КЕФА ПРОТ	ΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΓΑΣΕΙΣ	61
4.1	Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων	61
4.2	Συγκριτικά διαγράμματα δεικτών	62
4.2.1	Συγκριτικά διαγράμματα βασικών δεικτών Crashworthiness	62
4.2.2	Συγκριτικά διαγράμματα δεικτών Crashworthiness-Trigger	65
4.3	Βαθμολόγηση και ταξινόμηση δοκιμίων	67
ΒΙΒΛ	ΙΟΓΡΑΦΙΑ	69

Κατάλογος Σχημάτων

	καταλογός Ζχηματών	
Σχ.1.1	Εμπρόσθιες διαμήκεις λεπτότοιχες δομές αυτοκινήτου (1)1	4
Σχ.1.2 απορρόφ	Διάγραμμα ροής της βέλτιστης διαδικασίας σχεδιασμού συστημάτων ρησης ενέργειας1	6
Σχ.1.3 πενταπλ	(a) Σωλήνας μονής κυψέλης (b) Σωλήνας τετραπλής κυψέλης (c) Σωλήνας ής κυψέλης (4)	21
Σχ.1.4	Εμπρόσθια ράγα επιβατηγού αυτοκινήτου (4)2	21
Σχ.2.1 σκανδάλ coupled	Διαμορφώσεις μιας μονής σκανδάλης λοξότμησης (chamfer trigger), ες διπλής σύζευξης (coupled triggers) και σκανδάλες τριπλής ζεύξης (triple triggers) (5)	25
Σχ.2.2 τετράγω	Λεπτομέρειες μιας σκανδάλης τριπλής ζεύξης που εφαρμόζεται σe νο σωλήνα, λαμβάνοντας ως παράδειγμα το C-H-P (chamfer/hole/plug) (5)2	25
Σχ.2.3	Σύστημα σκανδάλης για σκέλος προσγείωσης αεροπλάνου (6)	26
Σχ.2.4	Δοκίμια με χρήση σκανδάλης αποκοπής υλικού (7)	26
Σχ.2.5	Triggers τύπου slot σε τετραγωνική διατομή2	26
Σχ.2.6	Triggers τύπου slot σε κυλινδρική διατομή2	27
Σχ.2.7	Triggers τύπου slot σε εξαγωνική διατομή2	27
Σχ.2.8	Triggers τύπου slot σε οκταγωνική διατομή	27
Σχ.2.9	Triggers με τροποποίηση πάχους τετραγωνικής διατομής2	27
Σχ.2.10	Triggers με τροποποίηση πάχους κυλινδρικής διατομής	27
Σχ.2.11	Triggers με τροποποίηση πάχους εξαγωνικής διατομής2	28
Σχ.2.12	Triggers με τροποποίηση πάχους οκταγωνικής διατομής (8)2	28
Σχ.2.13	Συμμετρική κατάρρευση σωλήνα τετραγωνικής διατομής2	29
Σχ.2.14 συμπιέσ το δεξί κ	Σύγκριση δυναμικής και στατικής φόρτισης. Το αριστερό δοκίμιο τηκε κατόπιν δυναμικής φόρτισης με ταχύτητα κρούσης V=8,963 m*s ⁻¹ ενώ ατόπιν στατικής φόρτισης	30
Σχ.2.15	Σύγκριση στατικής και δυναμικής φόρτισης. Το αριστερό δοκίμιο	
συμπιέσ ταχύτητο	τηκε κατόπιν στατικής φόρτισης ενώ το δεξί κατόπιν δυναμικής φόρτισης με α κρούσης V=10,369 m*s ⁻¹	≘ 30
Σχ.2.16	Ασύμμετρος τρόπος φόρτισης τύπου Α	31
Σχ.2.17	Ασύμμετρος τρόπος φόρτισης τύπου Β	31
Σχ.3.1	Μηχανική Πρέσα δοκιμών INSTRON 4482	33
Σχ.3.2	Πρόγραμμα ελέγχου και καταγραφής μετρήσεων Bluehill 2	33
Σχ.3.3	Εξεταζόμενο δοκίμιο λεπτότοιχου χάλυβα	34
Σχ.3.4	Δοκίμιο εφελκυσμού	34
Σχ.3.5	Διάγραμμα Τάσης Παραμόρφωσης Δοκιμίου Εφελκυσμού	35
Σχ.3.6	Μηχανισμοί triggering T1, T2 (από αριστερά προς τα δεξιά)	35
Σχ.3.7	Διαδικασία παραμόρφωσης για το αρχικό δοκίμιο (χωρίς trigger)	36
Σχ.3.8	Όψεις τελικού δοκιμίου χωρίς μηχανισμό trigger	37

Σχ.3.9	Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για το δοκίμιο χωρίς μηχανισμό trigger 37
Σχ.3.10 τη χρήστ	Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο χωρίς μηγανισμού trigger
Σχ.3.11	Διαδικασία παραμόρφωσης για δοκίμιο με μηγανισμό trigger T1-0°39
Σχ.3.12	Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger $T1 - 0^{\circ}$
Σχ.3.13	Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης δοκιμίου με μηχανισμό trigger T1-0°40
Σχ.3.14 trigger T	Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με 1-0°
Σχ.3.15	Διαδικασία παραμόρφωσης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-45° 42
Σχ.3.16	Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1 – 45° 42
Σχ.3.17 T1-45°	Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger 43
Σχ.3.18 μηχανισμ	Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης δοκιμίου με χρήση 10ύ trigger T1-45°43
Σχ.3.19	Διαδικασία παραμόρφωσης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-30° 44
Σχ.3.20	Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1 – 30° 45
Σχ.3.21 trigger T	Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού 1-30°46
Σχ.3.22 χρήση μτ	Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με ηχανισμού trigger T1-30°46
Σχ.3.23	Διαδικασία παραμόρφωσης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-60° 47
Σχ.3.24	Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1 – 60° 48
Σχ.3.25 trigger T	Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού 1-60°48
Σχ.3.26 χρήση μτ	Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με ηχανισμού trigger T1-60°49
Σχ.3.27	Διαδικασία παραμόρφωσης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2-0° 49
Σχ.3.28	Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2 – 0° 50
Σχ.3.29	Όψεις δοκιμίου προτού αποκολληθεί το trigger T2 – 0° 51
Σχ.3.30 trigger T	Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού 2-0°
Σχ.3.31 χρήση μτ	Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με ηχανισμού trigger T2-0°
Σχ.3.32	Διαδικασία παραμόρφωσης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2-45° 53
Σχ.3.33	Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2 – 45° 53

Σχ.3.34 trigger T	Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού '2-45°	.54
Σχ.3.35 χρήση μι	Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με ηχανισμύ trigger T2-45°	.54
Σχ.3.36 30°	Διαδικασία παραμόρφωσης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T 55	2-
Σχ.3.37	Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2 – 30°	.56
Σχ.3.38 trigger T	Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού '2-30°	.56
Σχ.3.39 χρήση μι	Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με ηχανισμού trigger T2-30°	.57
Σχ.3.40 60°	Διαδικασία παραμόρφωσης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger Τ 58	1-
Σχ.3.41	Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2 – 60°	.58
Σχ.3.42 χρήση μι	Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με ηχανισμού trigger T2-60°	.59
Σχ.4.1	Συγκριτικό διάγραμμα Pmax	.62
Σχ.4.2	Συγκριτικό διάγραμμα Pmean	.63
Σχ.4.3	Συγκριτικό διάγραμμα Eabs	.63
Σχ.4.4	Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη SEA	.64
Σχ.4.5	Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη CFE	.64
Σχ.4.6	Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη CFE	.65
Σχ.4.7	Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη CFE	.65
Σχ.4.8	Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη CFE	.66
Σχ.4.9	Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη CFE	.66
Σχ.4.10	Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη CFE	.67

Κατάλογος Πινάκων

Піν.3.1	Διαστάσεις και βάρη μηχανισμών triggering T1 και T235
Πιν.3.2 μηχανισμό	Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για το δοκίμιο χωρίς trigger (Δείκτες Crashworthiness)
Πιν.3.3	Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης δοκιμίου με χρήση
μηχανισμο	ύ trigger T1-0° (Δείκτες Crashworthiness)41
Πιν.3.4	Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση
μηχανισμο	ύ trigger T1-45° (Δείκτες Crashworthiness)44
Πιν.3.5	Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση
μηχανισμο	ύ trigger T1-30° (Δείκτες Crashworthiness)46
Πιν.3.6	Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση
μηχανισμο	ύ trigger T1-60° (Δείκτες Crashworthiness)49
Πιν.3.7	Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση
μηχανισμο	ύ trigger T2-0° (Δείκτες Crashworthiness)
Πιν.3.8	Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση
μηχανισμο	ύ trigger T2-45° (Δείκτες Crashworthiness)55
Πιν.3.9	Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση
μηχανισμο	ύ trigger T2-30° (Δείκτες Crashworthiness)57
Πιν.3.10	Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση
μηχανισμο	ύ trigger T2-600 (Δείκτες Crashworthiness)60
Πιν.4.1	Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμίων61
Піv.4.2	Πίνακας εκτιμώμενων συντελεστών βαρύτητας
Піv.4.3	Συγκριτικός πίνακας βαθμολόγησης δοκιμίων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη της κατάρρευσης λεπτότοιχων σωληνωτών φορέων και η συμβολή μηχανισμών σκανδαλών (triggering) στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Στα πλαίσια της μελέτης συμπιέστηκαν χαλύβδινα σωληνωτά δοκίμια υπό την επίδραση 2 trigger τύπου σταυρού διαφορετικής γεωμετρίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών του ΔΠΜΣ «Επιστήμη και τεχνολογία υλικών» της Σχολής Χημικών Μηχανικών.

Σκοπός της επιλογής του συγκεκριμένου μηχανισμού trigger είναι η εξέταση της επίδρασης της γεωμετρίας τους σε σχέση με αρχικό δοκίμιο χωρίς τη χρήση trigger, καθώς πλέον δεν έχουμε συμπίεση σε επίπεδη πλάκα. Επιπρόσθετα, η συμπίεση υπό διαφορετικές γωνίες προκαλεί διαφορετικό τρόπο κατάρρευσης, κάτι το οποίο έχει επίδραση στην απορροφούμενη ενέργεια και στους άλλους συντελεστές crashworthiness.

Επίσης βαθμολογήθηκαν και οι συντελεστές crashworthiness ώστε να ταξινομηθούν οι διατάξεις δοκιμίων-trigger από την καλύτερη έως τη χειρότερη και να έχουμε μια ολιστική ιεράρχηση συνεπώς της συμπεριφοράς τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ CRASHWORTHINESS

Με τον όρο Crashworthiness ή Ικανότητα Απορρόφησης Ενέργειας, αναφερόμαστε στην ικανότητα διατάξεων οι οποίες χρησιμοποιούνται, μέσω της κατάρρευσης τους και της διάταξης τους, για την απορρόφηση ενέργειας που προέρχεται από κρούση, ώστε να επιτύχουμε την προστασία της υπόλοιπης, συνήθως σύνθετης κατασκευής στην οποία έχουν προσαρμοστεί. Δηλαδή, το crashworthiness αναφέρεται στην συμπεριφορά κατάρρευσης διατάξεων (κυρίως λεπτότοιχων για θέματα βάρους κελυφών), οι οποίες διαχέουν την κινητική ενέργεια που παραλαμβάνουν από την κρούση, μετατρέποντάς την σε πλαστικό έργο.

1.1 Εισαγωγή στην ασφάλεια των κατασκευών

Η ζήτηση για νέα επιβατηγά αυτοκίνητα αυξάνει κάθε χρόνο με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και αναμένεται ο αριθμός τους να φτάσει τα 1,7 δις μέχρι το 2035. Με την αύξηση του αριθμού των οχημάτων παρατηρείται και η αντίστοιχη αύξηση των ατυχημάτων, ενώ ο αριθμός των καταγεγραμμένων θυμάτων παραμένει στα πολύ υψηλά των 1,2 εκ. το χρόνο, από τα οποία το 50% είναι οι επιβάτες των οχημάτων. Για τη μείωση τους, εξασφαλίζεται το μέγιστο της προστασίας μέσω της παθητικής ασφάλειας, που επιτυγχάνεται με την σχεδίαση της δομής του αυτοκινήτου ώστε να παρέχεται το υψηλότερο δυνατό επίπεδο προστασίας και ασφάλειες σε περίπτωση ατυχήματος.

Οι κύριες δομές του οχήματος που είναι υπεύθυνες για την απορρόφηση ενέργειας από πρόσκρουση σε μετωπική σύγκρουση είναι τα μετωπικά διαμήκη μέλη, εναλλακτικά καλούμενα πλευρικά μέλη (όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ.1.1). Το πλευρικό στέλεχος είναι μια κοίλη σωληνοειδής δομή λεπτού τοιχώματος ορθογώνιας ή τετραγωνικής διατομής που διαχύει την ενέργεια σύγκρουσης μέσω πλαστικής παραμόρφωσης. Οι δομές λεπτού τοιχώματος χρησιμοποιούνται ευρύτερα για εφαρμογές αντοχής στην κρούση και απορρόφησης ενέργειας (crashworthiness), λόγω του μικρού βάρους τους και της αποδοτικής απορρόφησης ενέργειας.

Τα αυστηρά πρότυπα ασφάλειας της αυτοκινητοβιομηχανίας οδήγησαν τους μηχανικούς να βελτιώσουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας χωρίς συμβιβασμούς στο συνολικό βάρος του οχήματος. Έχουν δημοσιευθεί πολλές μελέτες για τη διερεύνηση της ενεργειακής απορρόφησης μεταλλικών σωληνοειδών δομών λεπτού τοιχώματος. Αυτές οι μελέτες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- (1) Μελέτη της επίδρασης διαφορετικών γεωμετριών και διαμορφώσεων και
- (2) Διερεύνηση της επίδρασης των πληρωτικών αφρού (3).



Σχ.1.1 Εμπρόσθιες διαμήκεις λεπτότοιχες δομές αυτοκινήτου (1)

1.2 Εισαγωγή στο Crashworthiness

Η ικανότητα πρόσκρουσης μπορεί να επιτευχθεί με έναν από τους δύο τρόπους εξαρτώμενη από:

(α) Την ελάχιστη παραμόρφωση του εκτεθειμένου δομικού στοιχείου ή συστήματος, ή

(β) Τη μέγιστη παραμόρφωση έως ένα καθορισμένο όριο.

Στην πρώτη περίπτωση, το εξεταζόμενο πλαίσιο υποβάλλεται σε υψηλή ορμή και μεταφορική δύναμη που μπορεί να είναι μη αποδεκτή, ενώ στη δεύτερη περίπτωση είναι συνέπεια μεγάλων, μη αναστρέψιμων μετατοπίσεων ενός μέρους ή όλης της δομής, αλλά η μεταδιδόμενη δύναμη και ορμή στο προστατευτικό κέλυφος και στο περιεχόμενό του, μειώνεται σημαντικά. Ένας βέλτιστος τρόπος για την επίτευξη της δεύτερης περίπτωσης είναι η χρήση κατάλληλων συσκευών απορρόφησης ενέργειας σε κομβικά σημεία του οχήματος.

Ο στόχος του σχεδιασμού είναι να διαχέει την κινητική ενέργεια με μη αναστρέψιμο τρόπο αντί να τη μετατρέπει και να την αποθηκεύει ελαστικά και να αποφεύγεται η αποκατάσταση. Οι γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι συνήθως αντικείμενα μίας χρήσης, δηλαδή, όταν έχουν παραμορφωθεί, απορρίπτονται και αντικαθίστανται. Συχνά, αποτελούν ένα ειδικό είδος περιοριστή φορτίου, με καθορισμένη αναλογία ώστε να διαθέτουν περισσότερο ή λιγότερο χαρακτηριστικό μετατόπισης ορθογώνιας δύναμης. Το κόστος αυτών των συσκευών πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη και η έρευνα για υψηλή απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα βάρους ή όγκου, που είναι πολύ σημαντική στα αεροσκάφη, μπορεί να δικαιολογηθούν. Ωστόσο, μετά την εφαρμογή, δηλαδή, σε τραυματισμούς που προκλήθηκαν από συγκρούσεις οι απόψεις ως αναφορά το κόστος συνήθως μεταβάλλονται.

Τα βέλτιστα στάδια σχεδιασμού ενός δομικού συστήματος αντοχής στην κρούση με απορρόφηση ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν όπως παρακάτω (Σχ.1.2):

1. Βάση δεδομένων δομικών στοιχείων:

Αποτελεί την έναρξη της διαδικασίας σχεδιασμού. Τα συστατικά δεδομένα λαμβάνονται μέσω δοκιμών ή αναλύσεων.

2. Απόκτηση δεδομένων στοιχείων με δοκιμή και ανάλυση:

Εάν η βάση δεδομένων είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί για ένα συγκεκριμένο σχέδιο, κατασκευάζεται και δοκιμάζεται το αντίστοιχο δομικό στοιχείο. Ο μηχανισμός της κατάρρευσης του αναλύεται έτσι ώστε να αποφευχθεί η αστοχία ενός συγκεκριμένου τμήματος με την κατάλληλη ενίσχυση του. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται προστίθενται στη βάση δεδομένων 1.

3. Γενική ανάλυση του μηχανισμού κατάρρευσης:

Μετά την αξιολόγηση των μη γραμμικών ιδιοτήτων των δομικών στοιχείων, όσον αφορά τη δύναμη και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, πραγματοποιείται μια οιονεί στατική ανάλυση ολόκληρης της δομής, προκειμένου να προβλεφθεί συνολική ικανότητα μεταφοράς φορτίου. Θεωρείται ότι η μάζα της δομής που κατέρρευσε είναι αμελητέα σε σύγκριση με την προσκρουόμενη μάζα και η κατεύθυνση των φορτίων που ασκούνται κατά την πρόσκρουση στη δομή που καταρρέει μπορεί να προβλεφθεί εκ των προτέρων.



Σχ.1.2 Διάγραμμα ροής της βέλτιστης διαδικασίας σχεδιασμού συστημάτων απορρόφησης ενέργειας.

<u>4. Δομική βελτιστοποίηση:</u>

Μέσω της συνολικής ικανότητας μεταφοράς φορτίου της δομής (Στάδιο 3), αξιολογούνται η ισχύς και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κάθε δομικού στοιχείου Αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν στον σχεδιαστή να επανασχεδιάσει μη συμβατά εξαρτήματα. Επιβάλλονται κριτήρια για την αξιολόγηση της ικανότητας του εξαρτήματος να μεταφέρει τα φορτία που ασκούνται σε όλη την κτυπημένη δομή και να απορροφά ταυτόχρονα ένα σημαντικό ποσό της διασκορπιζόμενης ενέργειας, ενώ πρέπει να αποφεύγονται οι υψηλές τοπικές παραμορφώσεις.

5. Βελτίωση της αντοχής και της ικανότητας πρόσκρουσης του εξαρτήματος:

Μετά την πρόβλεψη ασυμβίβαστων εξαρτημάτων, πραγματοποιείται ανάλυση κατάρρευσης, προκειμένου να βελτιωθεί η αντοχή και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των φορτωμένων εξαρτημάτων για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σχεδιασμού. Στη συνέχεια, οι διαστάσεις των βελτιωμένων συμβατών εξαρτημάτων υπολογίζονται, όταν υπό συμπιεστική ή καμπτική φόρτιση, επιτευχθεί το απαραίτητο εσωτερικό φορτίο.

6. Σχεδιασμός εξαρτημάτων:

Τα απλοποιημένα στοιχεία που προβλέπονται στο Στάδιο 5, τα οποία πληρούν τις απαιτήσεις για την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, είναι επαρκή για τα αρχικά στάδια σχεδιασμού της δομής. Ωστόσο, λόγω πολλών άλλων απαιτήσεων, η διαδικασία υπολογισμού γίνεται περίπλοκη. Η συμβολή τους στη συμπεριφορά ολόκληρης της δομής μπορεί να ελεγχθεί μέσω του Σταδίου 3.

<u>7. Δυναμική ανάλυση:</u>

Δύο πιθανές περιπτώσεις μπορεί να σχετίζονται με δυναμική ανάλυση:

(α) Εάν η μάζα της δομής που καταρρέει είναι αμελητέα σε σύγκριση με τη μάζα που χτυπά και η ταχύτητα πρόσκρουσης δεν είναι πολύ υψηλή, πχ. ανατροπή λεωφορείου ή πλευρική πρόσκρουση αυτοκινήτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η στατική καμπύλη παραμόρφωσης φορτίου που λαμβάνεται στο Στάδιο 3

(β) Εάν υπάρχουν σημαντικές μάζες μέσα στη δομή που καταρρέει, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται στα Στάδια 1, 2, 5 και 6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας.

8. Προσομοίωση επιβατών:

Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου 7, η ταχύτητα και η δομή που καταρρέει είναι ήδη γνωστά. Στο παρόν στάδιο, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η ασφάλεια των επιβατών ή του φορτίου κατά τη διάρκεια της συντριβής, ενώ το Στάδιο 4 διασφαλίζει ότι η φόρτιση και η παραμόρφωση κατανέμονται σε όλα τα δομικά στοιχεία, έτσι ώστε να πραγματοποιείται η βέλτιστη διάχυση ενέργειας. Αναλύεται λεπτομερώς η επίδραση του αντίκτυπου του συνόλου (δομή-επιβάτης) στον επιβάτη.

9. Δυναμική βελτιστοποίηση:

Εάν τα αποτελέσματα που λαμβάνονται στο Στάδιο 9 δεν είναι αποδεκτά όσον αφορά την ασφάλεια των επιβατών, πρέπει να επαναληφθεί ολόκληρη η διαδικασία

ανάλυσης που περιγράφεται στα Στάδια 1 εως 8, έως ότου σχεδιαστεί μια ασφαλής κατασκευή (2).

1.3 Δείκτες απόδοσης του Crashworthiness

Η απόδοση των κατασκευών αξιολογείται κυρίως με βάση τη συνολική απόκριση συντριβής και δευτερευόντως με βάση την άνεση της κατασκευής. Για την εκτίμηση της απόκρισης σφαλμάτων εξετάστηκαν οι ακόλουθες παράμετροι:

• Φορτίο κορυφής Pmax

Το φορτίο κορυφής Pmax είναι το μέγιστο φορτίο που απαιτείται για να αρχίσει η μόνιμη παραμόρφωση της δομής. Αυτή η παράμετρος έχει σημασία καθώς είναι το υψηλότερο φορτίο που αισθάνεται ο επιβάτης κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης.

• Μέσο φορτίο Pmean

Το μέσο φορτίο Pmean είναι το μέσο φορτίο που έχει αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{mean} = \frac{E_a}{S}$$

• Απορροφούμενη ενέργεια

Η συνολική απορρόφηση ενέργειας Ε σε μια σύγκρουση ισούται με την περιοχή κάτω από τη γραμμή σε ένα διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης. Ισούται με:

$$E = \int_0^{dmax} Fds$$

• Ειδική απορρόφηση ενέργειας

Για να συσχετιστεί πόση ενέργεια μπορεί να απορροφήσει μια δομή στη μάζα της, λαμβάνεται η ειδική απορρόφηση ενέργειας (Specific Energy Absorption-SEA). Ορίζεται ως:

$$SEA = \frac{E}{m}$$

Όπου m είναι η συμπιεζόμενη μάζα της δομής. Η SEA είναι πολύ σημαντική σε εφαρμογές όπου η μείωση του βάρους είναι πολύ σημαντική, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική βιομηχανία.

• Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου (Crush Force Efficiency-CFE)

Ο Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου είναι ο λόγος της μέσης προς την μέγιστη θλιπτική δύναμη, οι δυο παράγοντες που είναι άμεσα συνδεδεμένοι με τα επίπεδα επιβράδυνσης που αισθάνονται οι επιβάτες. Ορίζεται ως:

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}}$$

• Ομοιομορφία φορτίου LU

Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου, ο οποίος είναι πρακτικά ο αντίστροφος CFE, δίδεται από την σχέση:

$$LU = \frac{P_{max}}{P_{mean}}$$

Ένας ιδανικό απορροφητής ενέργειας θα είχε συντελεστή CFE ίσο με 100%. Αυτό γίνεται επειδή ένας ιδανικός απορροφητής θα διατηρούσε το φορτίο κορυφής για τη συνολική διάρκεια της θλίψης. Εάν η τιμή του CFE είναι μακριά του 100%, αυτό υποδεικνύει μια μεγάλη αλλαγή επιβράδυνσης που θα είναι επικίνδυνη για τον επιβάτη. Συνοψίζοντας, μια καλή σχεδίαση θα είχε ένα λογικό φορτίο κορυφής, μια υψηλή ειδική απορρόφηση ενέργειας και τιμή CFE κοντά στο 100%.

Σε ορισμένες δομές, προστίθεται μηχανισμός σκανδάλης (trigger mechanism) στο υπάρχον σύστημα ως μέσο μείωσης της υψηλής αρχικής δύναμης κορυφής (1).

1.4 Λεπτότοιχες διατομές

Οι λεπτότοιχες διατομές έχουν ένα ευρύ πεδίο μηχανολογικών εφαρμογών το οποίο συνεχώς επεκτείνεται, καθώς αναζητείται συνεχώς η βέλτιστη αναλογία αντοχής και κόστους ταυτόχρονα με την ελαχιστοποίηση του υλικού και αντίστοιχα του βάρους. Σε όλες τις περιπτώσεις το ζητούμενο είναι η ικανή αντοχή της κατασκευής το οποίο επιτυγχάνεται με το σωστό σχεδιασμό. Οι λεπτότοιχες κατασκευές βρίσκουν εφαρμογή στα εναέρια και επίγεια οχήματα, σε οικιστικά και βιομηχανικά κτήρια, σε δεξαμενές και αγωγούς. Οι κυριότερες λεπτότοιχες διατομές που χρησιμοποιούνται είναι κλειστής διατομής και έχουν διατομές: κυκλικές, τετραγωνικές, top-hat και double-hat συγκολλητές.

Ένας λεπτότοιχος κυκλικός σωλήνας, όταν φορτιστεί αξονικά με στατικό φορτίο μπορεί να αποκτήσει είτε αξονοσυμμετρικούς λοβούς, είτε μη- αξονοσυμμετρικό μοτίβο.

1.5 Ανοιχτές διατομές

Οι λεπτότοιχες ανοιχτές διατομές χρησιμοποιούνται ευρέως σε μεταλλικές κατασκευές λόγω της αποδοτικότητά τους. Σχήματα διατομών όπως Ι, L, C, και Z είναι συνήθη στις μηχανολογικές κατασκευές και σε συνδυασμό με τη βελτίωση των βιομηχανικών κατεργασιών θερμής και ψυχρής έλασης επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του βάρους και υψηλή αντοχή.

Οι λεπτότοιχες δοκοί έχουν καλή καμπτική αντίσταση ως προς τον πρωτεύον άξονα αλλά χαμηλή καμπτική αντίσταση ως προς τον δευτερεύων άξονα και χαμηλή αντίσταση στην στρέψη. Επιπρόσθετα είναι ευαίσθητες στις αστοχίες του υλικού.

Οι παραμορφώσεις εξαιτίας λυγισμού παίζουν κυρίαρχο ρόλο στις λεπτότοιχες κατασκευές ανοιχτών διατομών, με χαρακτηριστικά μη-γραμμικής ανάλυσης αλλά οι παράμετροι αυτοί αγνοούνται εάν θεωρηθεί το φαινόμενο γραμμικό και ευσταθές (3).

1.6 Δομές λεπτών τοιχωμάτων πολλαπλών κυψελίδων

Οι δομές λεπτών τοιχωμάτων πολλαπλών κυψελίδων έχουν προσελκύσει αυξανόμενη προσοχή και έχουν εφαρμοστεί ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική βιομηχανία για τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους, τα οποία είναι η υψηλή απορρόφηση ενέργειας και το μικρό βάρος.

Ο αριθμός των κυψελών και οι τυπολογικές διαμορφώσεις των δομών λεπτού τοιχώματος πολλαπλών κυψελών έχουν σημαντική επίδραση στην ικανότητα αξιοπιστίας.

Ως μια τυπική κατηγορία απορροφητών ενέργειας, οι δομές λεπτού τοιχώματος έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εφαρμογές αξιοπλοΐας, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, για την προστασία των επιβατών από σοβαρούς τραυματισμούς για την εξαιρετική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και το ελαφρύ τους βάρος. Η αρχική έρευνα των απορροφητών ενέργειας επικεντρώθηκε κυρίως σε χαλύβδινους σωλήνες λόγω του χαμηλού κόστους και της υψηλής ολκιμότητας τους. Καθώς αυξάνει η σημασία του μικρού βάρους, η χρήση σωλήνων από αλουμίνιο έχει γίνει επικρατέστερη στα πρόσφατα χρόνια (4).



Σχ.1.3 (a) Σωλήνας μονής κυψέλης (b) Σωλήνας τετραπλής κυψέλης (c) Σωλήνας πενταπλής κυψέλης (4)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΚΑΝΔΑΛΩΝ (TRIGGERS)

2.1 Εισαγωγή στους μηχανισμούς σκανδαλών Triggering

Οι ενεργοποιητές ή μηχανισμοί σκανδαλών (triggers/trigger mechanisms) μπορούν να εφαρμοστούν στο σχεδιασμό του κουτιού συντριβής για να βοηθήσουν στην επίτευξη του επιθυμητού μοτίβου παραμόρφωσης, απορρόφησης ενέργειας και μέγιστης τιμής δύναμης.

2.2 Διάφορες μορφές Triggering

Ένας λογικά συζευγμένος μηχανισμός ενεργοποίησης έχει μεγαλύτερη δυνατότητα να παράγει μια προοδευτική λειτουργία σύνθλιψης και να βελτιώνει την ικανότητα πρόσκρουσης των απορροφητών σύνθετων υλικών.

Έχει αποδειχθεί ότι οι σύνθετες δομές με δυνατότητα πρόσκρουσης είναι ικανές να απορροφούν σημαντικές ποσότητες ενέργειας μέσω διαφόρων τύπων λειτουργιών αστοχίας. Ωστόσο, ένας παράλογος σχεδιασμός σύνθετων κατασκευών είναι ακριβώς αντίθετος από αυτό που επιθυμεί κανείς. Για παράδειγμα, μπορεί να συμβεί μια καταστροφική δομική αποτυχία στη σύνθετη δομή. Η απουσία ενός μηχανισμού ενεργοποίησης μπορεί να προκαλέσει τη δομή να εμφανίσει μια ανεπιθύμητη λειτουργία σύνθλιψης και ακόμη και να αποτύχει χωρίς καμία ενέργεια να απορροφηθεί πλήρως. Για να αποφευχθεί αυτό, μια σωστά σχεδιασμένη διαμόρφωση σκανδάλης μπορεί όχι μόνο να προκαλέσει προοδευτικούς τρόπους λειτουργίας, αλλά και να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη μεγιστοποίηση της απορρόφησης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση του αρχικού φορτίου αιχμής μιας σύνθετης δομής με δυνατότητα πρόσκρουσης. Ως εκ τούτου, ένας μηχανισμός ενεργοποίησης έχει εισαχθεί ευρέως στις σύνθετες δομές. Πρόσφατα, σημαντικές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στο σχεδιασμό και την ανάλυση των διαμορφώσεων σκανδάλης (trigger).

Οι ενσωματωμένες σκανδάλες ορίζονται ως ένας τύπος αυτόνομης σκανδάλης που ενσωματώνεται στα άκρα των σύνθετων δομών απορρόφησης ενέργειας κατά τη διαδικασία κατασκευής. Κατ 'αρχήν, οι συγκεντρώσεις πίεσης που εμφανίζονται στα άκρα των χειλιών προκαλούνται από ενσωματωμένους παράγοντες ενεργοποίησης και στη συνέχεια, τα υλικά στα άκρα των χειλιών συνεχώς αποτυγχάνουν. Οι διαμορφώσεις της ολοκληρωμένης σκανδάλης επιτυγχάνονται με τοπική μείωση του πάχους ενός φύλλου ή την εισαγωγή μιας εντοπισμένης διακοπής (localized cutout). Το τελευταίο χρησιμοποιήθηκε συχνότερα, όπως λοξότμητη ή λοξοτμημένη άκρη (bevel or chamfered tip), καμπύλη σκανδάλης (steeple trigger), τουλίπα σκανδάλη (tulip trigger), δόντι πριονιού (saw tooth) και πτώση πλύσης (ply-drop).

Η σκανδάλη 45 μοιρών έχει εφαρμοστεί σε διάφορες σύνθετες δομές απορρόφησης ενέργειας, όπως κυκλικό σωλήνα, τετράγωνο σωλήνα, κωνικό σωλήνα, ημιτονοειδές κύμα, I-, Η- και C- πλάκα σχήματος, κ.ο.κ. Συνεπώς αποφεύχθηκαν οι καταστροφικές καταστάσεις αποτυχίας θρυμματισμού. Μερικοί συγγραφείς μελέτησαν εκτενώς την επίδραση της γωνίας λοξοτομής στις αποκρίσεις μετατόπισης φορτίου και αποκάλυψαν ένα μεγάλο αποτέλεσμα. Διαφορετικά, οι Jiang et al πρότειναν αρκετές νέες σκανδάλες με υβριδικές γωνίες που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε διαφορετικές συντριβές. Στην πραγματικότητα, η διαρθρωτική περιοχή που ήρθε σε επαφή κατά το αρχικό στάδιο σύνθλιψης ήταν μικρότερη από την πλήρη διατομή της κατασκευής λόγω της αλλαγής γωνίας. Ως εκ τούτου, η μειωμένη περιοχή είχε ως αποτέλεσμα μεγάλες συγκεντρώσεις στρες στην περιοχή που ενεργοποιήθηκε.

Μια καμπύλη σκανδάλης (steeple trigger), όπως μια σκανδάλη λοξοτομής, μειώνει επίσης τη διατομή του υλικού που έρχεται σε επαφή και προκαλεί συγκεντρώσεις τάσεων. Για παράδειγμα, οι Jiménez et al. και Joosten et al. υιοθέτησαν διαφορετικούς τρόπους ενεργοποίησης για την έναρξη προοδευτικών τρόπων αστοχίας σύνθετων κατασκευών κάτω από στατικό φορτίο σύνθλιψης. Εντούτοις, διαπιστώθηκε ότι το βάθος της καμπύλης (για steeple trigger) παίζει καθοριστικό ρόλο σε ένα σταθερό θλιπτικό φορτίο.

Μια σκανδάλη τουλίπας είναι παρόμοια με μια καμπύλη σκανδάλης (steeple trigger), η οποία προκαλεί επίσης μια μειωμένη περιοχή μέσω πολλών καμπυλών. Ωστόσο, μια σκανδάλη τουλίπας αποτελείται από τέσσερεις ή πολλαπλές ξεχωριστές καμπύλες που μοιάζουν με σχήμα τουλίπας. Οι Palanivelu et al. διερεύνησαν μηχανισμούς απορρόφησης ενέργειας από κυκλικούς και τετράγωνους σωλήνες σύνθετων υλικών που ενεργοποιήθηκαν από μια σκανδάλη τουλίπας. Οι Chiu et al. μελέτησαν τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας του σωλήνα σύνθετου υλικού που ενεργοποιήθηκαν από μια σκανδάλη τουλίπας. Οι Chiu et al. μελέτησαν τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας του σωλήνα σύνθετου υλικού που ενεργοποιήθηκε από την σκανδάλη τουλίπας κάτω από το αξονικό οιονεί (quasi) στατικό φορτίο. Από τα αποτελέσματά τους, το μέτωπο θραύσης εισήχθη σταδιακά στη δομή έως ότου η πλήρης περιοχή διατομής της δομής εμφάνισε σταθερούς προοδευτικούς τρόπους αστοχίας. Είναι ενδιαφέρον ότι διαπιστώθηκε ότι τελικά εμφανίστηκε μια εξωτερική παραμόρφωση αστοχίας, ακριβώς όπως μια διαδικασία ανθοφορίας ενός λουλουδιού.

Μια σκανδάλη δοντιού πριονιού είναι μια επαναλαμβανόμενη ακολουθία διαδοχικών κοπών κατά μήκος του πλάτους της δομής, η οποία χρησιμοποιείται μόνο για επίπεδες κατασκευές. Αυτός ο τύπος σκανδάλης είναι ισοδύναμος με μια σειρά μικρών σκανδάλων. Οι Feraboli et al. και Jiang et al. αντίστοιχα διερεύνησαν τις αξονικές συμπεριφορές σύνθλιψης και απορρόφησης ενέργειας των επίπεδων πλακών και των κυματιστών δοκών από σύνθετα υλικά.

Μια σκανδάλη πτύχωσης επιτυγχάνεται με τη μετακίνηση ενός (ή περισσότερων) πτυχώσεων προς την κατεύθυνση παράλληλη στην κατεύθυνση φόρτισης κατά την κατασκευή. Έτσι, υπάρχει ένας διαφορετικός αριθμός πτυχώσεων στην περιοχή ενεργοποίησης, ο οποίος οδηγεί σε μειωμένη περιοχή. Ωστόσο, υπάρχουν ασυνέχειες μεταξύ των γειτονικών πλακών στην περιοχή που ενεργοποιείται. Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει προηγουμένως τους μηχανισμούς ενεργοποίησης της σκανδάλης πτύχωσης. Οι Thuis και Metz μελέτησαν την επίδραση των διαμορφώσεων σκανδάλης στη λειτουργία αστοχίας των σωλήνω από σύνθετο υλικό. Στη δουλειά τους, οι σκανδάλες πτύχωσης προτάθηκαν για να εκκινήσουν την αρχική θλιπτική αστοχία. Οι Luo et al. πρότειναν παρόμοιες σκανδάλες πτύχωσης και μελέτησαν την ικανότητα πρόσκρουσης των κυματοειδών δοκών σύνθετων υλικών που ενεργοποιήθηκαν κρουστικά κάτω από το κρουστικό φορτίο. Παρουσιάστηκε η προοδευτική αστοχία και ζημιά, αλλά μεγάλες διαφορές μεταξύ πολλών σκανδαλών πτύχωσης βρέθηκαν στο αρχικό φορτίο και την ΕΑ. Υποδείχθηκε λοιπόν ότι η εισαγωγή κατάλληλων στρατηγικών της σκανδάλης πτύχωσης είναι επίσης πολύ σημαντική για την πρόκληση της επιθυμητής απορρόφησης ενέργειας. Από αυτά τα αποτελέσματα, θα μπορούσε κανείς να συμπεράνει ότι η σκανδάλη πτύχωσης έχει μεγάλο πλεονέκτημα στο να μειώσει το αρχικό φορτίο αιχμής και να παρουσιάσει σταθερό φορτίο και τρόπο θλίψης.

Οι παραπάνω σκανδάλες πτύχωσης σχεδιάστηκαν από τη μακροσκοπική άποψη για να σχηματίσουν αδύναμες περιοχές στην άκρη της δομής. Εμπνευσμένη από την σκανδάλη πτύχωσης, η σκανδάλη πτύχωσης ινών (fiber drop trigger) ή ρυμούλκησης (tow drop trigger) μπορεί επίσης να είναι μια παρόμοια αρχή σκανδάλης στη μικροκλίμακα για να μελετηθεί μελλοντικά. Από τις ιδιότητες των μακρουλικών, ανήκει σε μια ενσωματωμένη σκανδάλη που βασίζεται στην υποβάθμιση του υλικού.

Μια σκανδάλη τύπου βύσματος είναι μια σκανδάλη που εφαρμόζεται εξωτερικά, δεν είναι ενσωματωμένη στη δομή αλλά συναρμολογούνται μεταξύ τους. Γενικά, τα υλικά ενεργοποίησης βύσματος είναι πολύ άκαμπτα και έτσι θεωρείται ως ένα άκαμπτο σώμα. Επομένως, η σκανδάλη μπορεί να περιορίσει το δείγμα από το να παραμορφωθεί προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις και ακόμη και να οδηγήσει τα υλικά με ελεγχόμενο τρόπο. Συνήθως, υπάρχουν δύο τύποι σκανδάλης βύσματος, το εσωτερικό βύσμα και το εξωτερικό βύσμα. Και οι δύο σκανδάλες βύσματος μπορούν να προκαλέσουν με ενδιαφέρον τρόπο τον τρόπο διάχυσης του υλικού προς τα μέσα ή προς τα έξω, μοιάζοντας με έναν τρόπο αστοχίας που προκαλείται από τη σκανδάλη τουλίπας, για τη βελτίωση της απορρόφησης ενέργειας. Επομένως, οι εσωτερικές και οι εξωτερικές σκανδάλες βύσματος έχουν προσελκύσει μεγάλη προσοχή. Οι Eshkoor et al., Xiao et al. και Mcgregor et al. μελέτησαν τα χαρακτηριστικά της ικανότητας πρόσκρουσης των σωλήνων σύνθετων υλικών που ενεργοποιήθηκαν από τη σκανδάλη βύσματος που απλώνεται προς τα έξω (outward-splaying plug trigger). Διαπίστωσαν ότι οι σύνθετοι σωλήνες εμφάνιζαν έναν τρόπο αστοχίας διάχυσης προς τα έξω και άλλαξαν περαιτέρω τις αποκρίσεις μετατόπισης φορτίου σε μεγάλο βαθμό. Οι Siromani et al. αποκάλυψε ότι μια σκανδάλη με πτυσσόμενο βύσμα προς τα έσω ήταν πιο αποτελεσματική από μια σκανδάλη βύσματος προς το εξωτερικό, σχετικά με τη μείωση του αρχικού φορτίου αιχμής και την αύξηση του ΕΑ. Ανέφεραν επίσης ότι η μικρότερη ακτίνα στη σκανδάλη βύσματος παρουσίαζε υψηλότερο αρχικό φορτίο αιχμής και EA. Οι Jiang et al. μελέτησαν διεξοδικά δύο τύπους σκανδάλης βύσματος που εφαρμόστηκαν στον σωλήνα σύνθετου υλικού

Ελήφθησαν οι ίδιοι τρόποι αστοχίας εσωτερικής και εξωτερικής διάχυσης (splaying) αλλά οι μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας δεν επιβεβαιώθηκαν σαφώς λόγω της μεγάλης ακτίνας που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον, άλλοι χρησιμοποίησαν επίσης τη μεταλλική σκανδάλη για να ξεκινήσουν την αξονική αποτυχία σύνθλιψης του σύνθετου σωλήνα, όπως τα έργα του Eshkoor. Παρόλο που τα μεταλλικά τεμάχια ενεργοποίησαν τον σύνθετο σωλήνα εμφάνισαν προοδευτικούς τρόπους αστοχίας, το αρχικό φορτίο αιχμής και η ΕΑ δεν ήταν πολύ ιδανικά και έτσι κατέληξαν σε χαμηλή απόδοση δύναμης θρυμματισμού (5).



Σχ.2.1 Διαμορφώσεις μιας μονής σκανδάλης λοξότμησης (chamfer trigger), σκανδάλες διπλής σύζευξης (coupled triggers) και σκανδάλες τριπλής ζεύξης (triple coupled triggers) (5)



Σχ.2.2 Λεπτομέρειες μιας σκανδάλης τριπλής ζεύξης που εφαρμόζεται σε τετράγωνο σωλήνα, λαμβάνοντας ως παράδειγμα το C-H-P (chamfer/hole/plug) (5)



Σχ.2.3 Σύστημα σκανδάλης για σκέλος προσγείωσης αεροπλάνου (6)



Σχ.2.4 Δοκίμια με χρήση σκανδάλης αποκοπής υλικού (7)



Σχ.2.5 Triggers τύπου slot σε τετραγωνική διατομή



Σχ.2.10 Triggers με τροποποίηση πάχους κυλινδρικής διατομής



Σχ.2.12 Triggers με τροποποίηση πάχους οκταγωνικής διατομής (8)

Η μείωση του αρχικού φορτίου αιχμής και η πρόκληση σταθερών προοδευτικών λειτουργιών αστοχίας σύνθλιψης είναι τα κύρια πλεονεκτήματα των ενσωματωμένων σκανδαλών. Ωστόσο, με την ανάπτυξη των απορροφητών σύνθετων υλικών, οι ενσωματωμένες σκανδάλες δεν είναι σε θέση να ικανοποιήσουν υψηλότερες απαιτήσεις για πρόσκρουση. Ως εκ τούτου, πρόσφατα, εξωτερικά εφαρμοσμένοι μηχανισμοί ενεργοποίησης έχουν χρησιμοποιηθεί για να προκαλέσουν έναν συγκεκριμένο ή επιθυμητό τρόπο αστοχίας (8).

2.3 Triggering με τετραγωνικές διατομές

Η έρευνα στην δυναμική πλαστική απόκριση των δομών είναι σημαντική τα τελευταία χρόνια και ένα σημαντικό μέρος αυτής της προσπάθειας αφορούσε τη δομική ικανότητα σύγκρουσης των οχημάτων. Η συμπεριφορά σωλήνων λεπτού τοιχώματος με κυκλικές και ορθογώνιες διατομές που υπόκεινται σε αξονικά φορτία έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από το πρωτοποριακό έργο του Pugsley [10] στον αντίκτυπο των ιδανικών σιδηροδρομικών βαγονιών. Η αρχική απόκριση λυγισμού αυτών των μελών είναι λιγότερο σημαντική από την άποψη της απορρόφησης ενέργειας σε σχέση με την επακόλουθη συμπεριφορά μετά το λυγισμό με μεγάλες καταπονήσεις και εκτροπές. Αυτή η συμπεριφορά συχνά εξιδανικεύεται ως άκαμπτο πλαστικό αφού η ενέργεια που απορροφάται ελαστικά συνήθως δεν είναι σημαντική.

Τα μέλη με λεπτά τοιχώματα με κλειστές και ορθογώνιες διατομές σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας των δομών του αμαξώματος του αυτοκινήτου καθώς και των τρένων και των λεωφορείων. Πολλές θεωρητικές μελέτες σε αξονικά συμπιεσμένους σωλήνες με ορθογώνιες διατομές έχουν παραμελήσει τις δυναμικές (αδρανειακές) επιδράσεις και έχουν αντιμετωπίσει το πρόβλημα ως οιονεί στατικό, το οποίο είναι μάλλον λογικό για χαμηλές ταχύτητες πρόσκρουσης που δεν ενεργοποιούν δυναμικά φαινόμενα πλαστικού λυγισμού. Αρκετοί συγγραφείς, ωστόσο, έχουν εξετάσει ευαίσθητες επιδράσεις του ρυθμού παραμόρφωσης των υλικών, οι οποίες μπορεί να είναι σημαντικές ακόμη και όταν οι επιδράσεις αδράνειας δεν είναι. Η βέλτιστη απορρόφηση ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω του προοδευτικού λυγισμού που αποφεύγει το συνολικό λυγισμό (Euler). (11, 12)

2.4 Τρόποι κατάρρευσης

Έχουμε το διαχωρισμό της παραμόρφωσης σωλήνων τετράγωνων διατομών σε δυο τύπους, συμμετρικό και ασύμμετρο.

Στο συμμετρικό, ο πρώτος αλλά και οι επακόλουθοι λοβοί που σχηματίζονται έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. Το θλιπτικό φορτίο και η απορροφούμενη ενέργεια για ένα σωλήνα τετραγωνικής διατομής παραμένουν ίδια εάν οι εξωτερικοί λοβοί σχηματιστούν εσωτερικά αντί για εξωτερικά, αντίθετα δηλαδή του Σχήματος 2-13. Σε αυτή την περίπτωση, οι 4 ανεξάρτητοι λοβοί θα έχουν κινηθεί εσωτερικά και η συμπεριφορά αυτή θεωρείται αξονοσυμμετρική, όπως στον σχηματισμό λοβών σε θλίψη σωληνωτών δοκιμίων. Και στην περίπτωση όπου ο ένας λοβός σχηματίζεται εσωτερικά και οι άλλοι τρεις εξωτερικά, έχουμε συμμετρική συμπεριφορά. Δηλαδή, ο όρος συμμετρία περιγράφει τρείς διαφορετικούς τρόπους παραμόρφωσης, οι οποίοι έχουν όμως πανομοιότυπα θλιπτικά φορτία και χαρακτηριστικά παραμόρφωσης ενέργειας.



Σχ.2.13 Συμμετρική κατάρρευση σωλήνα τετραγωνικής διατομής



Σχ.2.14 Σύγκριση δυναμικής και στατικής φόρτισης. Το αριστερό δοκίμιο συμπιέστηκε κατόπιν δυναμικής φόρτισης με ταχύτητα κρούσης V=8,963 m*s⁻¹ ενώ το δεξί κατόπιν στατικής φόρτισης



Σχ.2.15 Σύγκριση στατικής και δυναμικής φόρτισης. Το αριστερό δοκίμιο συμπιέστηκε κατόπιν στατικής φόρτισης ενώ το δεξί κατόπιν δυναμικής φόρτισης με ταχύτητα κρούσης V=10,369 m*s⁻¹

Ο άλλος τρόπος παραμόρφωσης είναι η ασύμμετρη παραμόρφωση και η οποία εμφανίζεται με 2 διαφορετικές, μεικτές μορφές. Εάν η πρώτη στρώση των λοβών σχηματίζεται συμμετρικά, τότε μια ασύμμετρη στρώση εμφανίζεται στη συνέχεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-16, και αυτή η διαδοχή των στρώσεων επαναλαμβάνεται στην περαιτέρω παραμόρφωση, αν και συχνά οι ξεχωριστοί λοβοί της ασύμμετρης φόρτισης αλλάζουν θέση.

Η ασυμμετρία της παραμόρφωσης όπως φαίνεται στα 2 παρακάτω σχήματα, προκαλεί την εμφάνιση κλίσης στο απαραμόρφωτο κομμάτι του σωλήνα σε σχέση με τον κάθετο άξονα. Η μετάβαση από την προοδευτική θλίψη στην γενική κάμψη μπορεί να συμβεί εάν σχηματιστούν σε ένα σωλήνα επαρκείς ασύμμετροι λοβοί ώστε να προκαλέσουν αστάθεια στην έννοια του Euler. Η γενικότερη κάμψη λόγω της εμφάνιση ασυμμετριών δεν εξαρτάται στο αρχικό μήκος του δοκιμίου αλλά, πιθανώς, στην ύπαρξη αρχικών ατελειών (9).



Σχ.2.16 Ασύμμετρος τρόπος φόρτισης τύπου Α



Σχ.2.17 Ασύμμετρος τρόπος φόρτισης τύπου B(1)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, τα εξεταζόμενα δοκίμια και οι αντίστοιχες σκανδάλες, οι συνθήκες των πειραματικών δοκιμών και τα αποτελέσματα τους. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν είναι δοκιμές αξονικής συμπίεσης υπό την επίδραση στατικού φορτίου, αρχικά σε λεπτότοιχο δοκίμιο χάλυβα τετραγωνικής διατομής χωρίς μηχανισμό trigger και εν συνεχεία σε ίδια δοκίμια με μηχανισμούς trigger τύπου σταυρού τοποθετημένους στη βάση και υπό διαφορετικές γωνίες. Σκοπός ήταν η βελτίωση των χαρακτηριστικών απόκρισης και η εύρεση της βέλτιστης διάταξης. Οι ασυνέχειες που προκαλούνται από τους χρησιμοποιούμενος μηχανισμούς trigger μπορούν να επηρεάσουν τον τρόπο αξονικής κατάρρευσης εξασφαλίζοντας μια σταθερή διαδικασία κατάρρευσης και μειώνοντας το αρχικό μέγιστο φορτίο. Οι πειραματικές διαδικασίες και η κατασκευή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π.

3.1 Παρουσίαση διάταξης

Τα βασικά μέρη της μηχανικής πρέσας INSTRON 4482 είναι τα παρακάτω:

• Ο μηχανισμός της κινητής κεφαλής.

 Το πλαίσιο μορφής Ο που περιλαμβάνει το τραπέζι στερέωσης του δοκιμίου και τον μηχανισμό κίνησης του εργαλείου διαμόρφωσης.

 Ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο ΙΕΕΕ, συνδεδεμένη μέσω παράλληλης θύρας με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανικής πρέσας INSTRON 4482 είναι τα παρακάτω:

- Ονομαστική δύναμη 100 kN
- Μεγίστη ταχύτητα κινητής κεφαλής 500 mm/min
- Ταχύτητα επιστροφής της κεφαλής στην αρχική θέση 600 mm/min
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στην μεγίστη ταχύτητα 75 kN
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο 250 mm/min
- Ευαισθησία κεφαλής πρέσας 2 mV/V

Ο πίνακας ελέγχου έχει ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή που αναλαμβάνει την ρύθμιση όλων των παραμέτρων της κατεργασίας και την επεξεργασία όλων των απαραιτήτων υπολογισμών. Αποτελείται από τα παρακάτω:

- Τον κεντρικό τομέα
- Τον τομέα οθονών υγρών κρυστάλλων
- Τον τομέα οριοθέτησης
- Τον τομέα ρύθμισης της κεφαλής



Σχ.3.1 Μηχανική Πρέσα δοκιμών INSTRON 4482



Σχ.3.2 Πρόγραμμα ελέγχου και καταγραφής μετρήσεων Bluehill 2

3.2 Εξεταζόμενα δοκίμια



Σχ.3.3 Εξεταζόμενο δοκίμιο λεπτότοιχου χάλυβα



Σχ.3.4 Δοκίμιο εφελκυσμού

Δοκιμή εφελκυσμού

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του χάλυβα, πραγματοποιήθηκε δοκιμή εφελκυσμού σε πλακίδιο [80mm x 11,1mm x 1,20 mm] με ελεύθερο μήκος 50mm και ολόκληρο μήκος 80mm (15 mm για την κάθε αρπάγη), πλάτους 11,10mm και πάχους 1,20 mm. Η ταχύτητα εφελκυσμού ήταν 5 mm/min. Από την καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης προέκυψαν προσεγγιστικά αποτελέσματα για την τιμή του μέτρου ελαστικότητας καθώς και στοιχεία για την συμπεριφορά του υλικού στην πλαστική περιοχή.

E=tan(φ)=1276.564 Mpa

Διάγραμμα Δοκιμής Εφελκυσμού



Σχ.3.5 Διάγραμμα Τάσης Παραμόρφωσης Δοκιμίου Εφελκυσμού



3.3 Παρουσίαση σταυρών για το trigger



Σχ.3.6 Μηχανισμοί triggering T1, T2 (από αριστερά προς τα δεξιά)

Μηχανισμός	Γεωμετρία	Διάμετρος (mm)	Μήκος (mm)	Mάζα (gr)
T1	Σταυρός	10	10	37,2
T2	Σταυρός	70	70	171.2

Πιν.3.1 Διαστάσεις και βάρη μηχανισμών triggering T1 και T2

3.4 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών

3.4.1 Πειραματική δοκιμή χωρίς μηχανισμό trigger





Άνοψη



Κάτοψη



Πρόσοψη Οπίσθια όψη Σχ.3.8 Όψεις τελικού δοκιμίου χωρίς μηχανισμό trigger

Διαγράμματα



Σχ.3.9 Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για το δοκίμιο χωρίς μηχανισμό trigger



Σχ.3.10 Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger

Δοκίμιο 1	Τιμή
Ύψος Δοκιμίου	80,00
Μάζα (gr)	135,4
Μάζα Καταρρέουσα (gr)	94,78
Μέγιστη Δύναμη Αντίδρασης Pmax (kN)	66,8169
Μέση Δύναμη Αντίδρασης Pmean (kN)	24,3826
Μέγιστη Βράχυνση Smax (mm)	70
Ενέργεια απορρόφησης Eabs (kJ)	1,7107
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (J/gr)	18,0496
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου CFE	0,3649

Πιν.3.2 Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για το δοκίμιο χωρίς μηχανισμό trigger (Δείκτες Crashworthiness)

Παρατηρήσεις Δοκιμίου χωρίς τη χρήση μηχανισμού trigger

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 135,4 gr. Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης (Pmax) μετρήθηκε 66,82 kN και η μέση (Pmean) 24,38kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,7107 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 18,05 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,3649.

Στο πείραμα δημιουργηθήκαν 4 μη-εκτατοί λοβοί μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm. Η δημιουργία του πρώτου λοβού όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες ολοκληρώνεται κοντά στα 15 mm. Η δημιουργία των υπόλοιπων 3 λοβών ξεκινάει κοντά στα 28 mm και ολοκληρώνεται στα 65 mm. Αυτό οφείλεται στις γεωμετρικές ατέλειες του δοκιμίου οι οποίες έχουν προκύψει κατά την διαμόρφωση του χάλυβα και από την ύπαρξη συγκολλήσεων.

3.4.2 Πειραματικές δοκιμές με μηχανισμό trigger T1

3.4.2.1 Μηχανισμός trigger T1-0°







Κάτοψη

Άνοψη



Πρόσοψη Οπίσθια όψη Σχ.3.12 Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1 – 0°

Διαγράμματα



Σχ.3.13 Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης δοκιμίου με μηχανισμό trigger T1-0°



Σχ.3.14 Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με trigger T1-0°

Δοκίμιο 2	Τιμή
Ύψος Δοκιμίου (mm)	80
Μάζα (gr)	135,3
Μάζα Καταρρέουσα (gr)	94,71
Μέγιστη Δύναμη Αντίδρασης Pmax (kN)	40,3851
Μέση Δύναμη Αντίδρασης Pmean (kN)	24,7773
Μέγιστη Βράχυνση Smax (mm)	70
Ενέργεια απορρόφησης Eabs (kJ)	1,7347
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (J/gr)	18,3157
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου CFE	0,6135

Πιν.3.3 Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-0° (Δείκτες Crashworthiness)

Παρατηρήσεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-0°

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 135,3 gr. Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης (Pmax) μετρήθηκε 40,39 kN και η μέση (Pmean) 24,77 kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,7347 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 18,32 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,6135.

Στο πείραμα δημιουργηθήκαν 4 μη-εκτατοί λοβοί μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm. Η δημιουργία του πρώτου λοβού όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες ολοκληρώνεται κοντά στα 21 mm. Η δημιουργία των υπόλοιπων 3 λοβών ξεκινάει κοντά στα 25 mm και ολοκληρώνεται στα 60 mm. Αυτό οφείλεται στις γεωμετρικές ατέλειες του δοκιμίου οι οποίες έχουν προκύψει κατά την διαμόρφωση του χάλυβα, από την ύπαρξη συγκολλήσεων και από την επίδραση του μηχανισμού trigger.

3.4.2.2 Μηχανισμός trigger T1-45°



Σχ.3.15 Διαδικασία παραμόρφωσης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-45°



Κάτοψη

Άνοψη



 Πρόσοψη
 Οπίσθια όψη

 Σχ.3.16 Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1 – 45°

Διαγράμματα



Σχ.3.17 Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-45°



Σχ.3.18 Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-45°

Πίνακας με στοιχεία

Δοκίμιο 3	Τιμή
Ύψος Δοκιμίου (mm)	80 mm
Μάζα (gr)	135,2
Μάζα Καταρρέουσα (gr)	94,64
Μέγιστη Δύναμη Αντίδρασης Pmax (kN)	46,0320
Μέση Δύναμη Αντίδρασης Pmean (kN)	20,4790
Μέγιστη Βράχυνση Smax (mm)	70
Ενέργεια απορρόφησης Eabs (kJ)	1.4341
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (J/gr)	15.1529
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου CFE	0.4449

Πιν.3.4 Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T1-45° (Δείκτες Crashworthiness)

Παρατηρήσεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-45°

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 135,2 gr. Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης (Pmax) μετρήθηκε 46,03 kN και η μέση (Pmean) 20,47kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,4341 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 15,15 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,4449.

Στο πείραμα δεν δημιουργηθήκαν μη-εκτατοί λοβοί και δεν είχαμε συμπίεση του δοκιμίου, αλλά όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι το δοκίμιο ανοίγει ομοιόμορφα στις 4 γωνίες υπό την επίδραση του μηχανισμού trigger και αναδιπλώνεται κάθε πλευρά ομοιόμορφα γύρω από τον εαυτό της, μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm.

3.4.2.3 Μηχανισμός trigger T1-30°



 $\Delta f=38.8 \text{ mm}$ $\Delta f=51.3 \text{ mm}$ $\Delta f=61.5 \text{ mm}$ $\Delta f=66.7 \text{ mm}$ $\Delta f=70 \text{ mm}$ Σχ.3.19 Διαδικασία παραμόρφωσης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-30°

















Διαγράμματα

Σχ.3.21 Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T1-30°



Σχ.3.22 Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T1-30°

Δοκίμιο 4	Τιμή
Ύψος Δοκιμίου (mm)	80
Μάζα (gr)	133,4
Μάζα Καταρρέουσα (gr)	93,38
Μέγιστη Δύναμη Αντίδρασης Pmax (kN)	46,7298
Μέση Δύναμη Αντίδρασης Pmean (kN)	22,4933
Μέγιστη Βράχυνση Smax (mm)	70
Ενέργεια απορρόφησης Eabs (kJ)	1,5752
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (J/gr)	16,8683
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου CFE	0,4813

Πιν.3.5 Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T1-30° (Δείκτες Crashworthiness)

Παρατηρήσεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-30°

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 133,4 gr. Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης (Pmax) μετρήθηκε 46,73 kN και η μέση (Pmean) 22,49 kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,5752 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 16,86 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,4815.

Στο πείραμα δημιουργηθήκαν 4 μη-εκτατοί λοβοί μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm. και παρατηρείται και μια τάση του δοκιμίου να συμπιέζεται με κατεύθυνση στην αριστερή πλευρά. Η δημιουργία του πρώτου λοβού όπως φαίνεται και από τις παραπάνω

εικόνες ολοκληρώνεται κοντά στα 20 mm. Η δημιουργία των υπόλοιπων 2 λοβών ξεκινάει κοντά στα 40 mm και ολοκληρώνεται στα 65 mm. Αυτό οφείλεται στις γεωμετρικές ατέλειες του δοκιμίου οι οποίες έχουν προκύψει κατά την διαμόρφωση του χάλυβα, από την ύπαρξη συγκολλήσεων και από την επίδραση του μηχανισμού trigger.



3.4.2.4 Μηχανισμός trigger T1-60°

 $\Delta f=29.3 \text{ mm}$ $\Delta f=34 \text{ mm}$ $\Delta f=50.2 \text{ mm}$ $\Delta f=65.5 \text{ mm}$ $\Delta f=70 \text{ mm}$ Σχ.3.23 Διαδικασία παραμόρφωσης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-60°



Κάτοψη



Άνοψη



Πρόσοψη



Οπίσθια όψη

Σχ.3.24 Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1 – 60° Διαγράμματα



Σχ.3.25 Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T1-60°



Δοκίμιο 5	Τμή	
Ύψος Δοκιμίου (mm)	80	
Μάζα (gr)	133,8	
Μάζα Καταρρέουσα (gr)	93,66	
Μέγιστη Δύναμη Αντίδρασης Pmax (kN)	48,5989	
Μέση Δύναμη Αντίδρασης Pmean (kN)	21,7876	
Μέγιστη Βράχυνση Smax (mm)	70	
Ενέργεια απορρόφησης Eabs (kJ)	1,5287	
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (J/gr)	16,3214	
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου CFE	0,4483	

Σχ.3.26 Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T1-60°

Πιν.3.6 Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T1-60° (Δείκτες Crashworthiness)

Παρατηρήσεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T1-60°

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 133,8 gr. Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης (Pmax) μετρήθηκε 48,6 kN και η μέση (Pmean) 21,79 kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,5287 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 16,32 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,4483.

Στο πείραμα δημιουργηθήκαν 4 μη-εκτατοί λοβοί μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm. Η δημιουργία του πρώτου λοβού όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες ολοκληρώνεται κοντά στα 30 mm. Η δημιουργία των υπόλοιπων 3 λοβών ξεκινάει κοντά στα 35 mm και ολοκληρώνεται στα 65 mm. Αυτό οφείλεται στις γεωμετρικές ατέλειες του δοκιμίου οι οποίες έχουν προκύψει κατά την διαμόρφωση του χάλυβα, από την ύπαρξη συγκολλήσεων και από την επίδραση του μηχανισμού trigger.

3.4.3 Πειραματικές δοκιμές με μηχανισμό trigger T2

3.4.3.1 Μηχανισμός trigger T2-0°



 $\Delta I=58.4$ IIIII $\Delta I=44.1$ IIIII $\Delta I=51.2$ IIIII $\Delta I=57.6$ IIIII $\Delta I=70$ IIII Σχ.3.27 Διαδικασία παραμόρφωσης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2-0°



Κάτοψη



Άνοψη



Πρόσοψη



Οπίσθια όψη





Κάτοψη



Άνοψη





Οπίσθια όψη

Σχ.3.29 Όψεις δοκιμίου προτού αποκολληθεί το trigger $T2-0^{\rm o}$

Καμπύλη Φορτίου Φορτίο (NA) ортіо 12 10 -5 Μετατόπιση (mm)

Διαγράμματα

Σχ.3.30 Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T2-0°



Σχ.3.31 Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T2-0°

Δοκίμιο 6	Τιμή
Ύψος Δοκιμίου (mm)	80
Μάζα (gr)	135,7
Μάζα Καταρρέουσα (gr)	94,99
Μέγιστη Δύναμη Αντίδρασης Pmax (kN)	31,9606
Μέση Δύναμη Αντίδρασης Pmean (kN)	23,8572
Μέγιστη Βράχυνση Smax (mm)	70
Ενέργεια απορρόφησης Eabs (kJ)	1,6723
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (J/gr)	17,6045
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου CFE	0,7465

Πιν.3.7 Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T2-0° (Δείκτες Crashworthiness)

Παρατηρήσεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2-0°

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 135,7 gr. Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης (Pmax) μετρήθηκε 31,96 kN και η μέση (Pmean) 23,85 kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,6703 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 17,06 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,7465.

Στο πείραμα δημιουργηθήκαν 4 μη-εκτατοί λοβοί μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm. Η δημιουργία του πρώτου λοβού όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες ολοκληρώνεται κοντά στα 30 mm. Η δημιουργία των υπόλοιπων 3 λοβών ξεκινάει κοντά στα 35 mm και ολοκληρώνεται στα 58 mm. Αυτό οφείλεται στις γεωμετρικές ατέλειες του δοκιμίου οι οποίες έχουν προκύψει κατά την διαμόρφωση του χάλυβα και από την ύπαρξη συγκολλήσεων. Επίσης, παρατηρήθηκε η «παγίδευση» του μηχανισμού trigger από υλικό του δοκιμίου, καθιστώντας δύσκολη την αποκόλληση του, κάτι που αποδίδεται στη μεγάλη γεωμετρία του εν λόγω μηχανισμού.

3.4.3.2 Μηχανισμός trigger T2-45°



Σχ.3.32 Διαδικασία παραμόρφωσης δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2-45°



Κάτοψη

Πρόσοψη



Άνοψη



Οπίσθια όψη



Διαγράμματα



Σχ.3.34 Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T2-45°



Σχ.3.35 Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμύ trigger T2-45°

Δοκίμιο 7	Τιμή
Ύψος Δοκιμίου	80
Μάζα (gr)	132,9
Μάζα Καταρρέουσα)gr)	93,03
Μέγιστη Δύναμη Αντίδρασης Pmax (kN)	35,6462
Μέση Δύναμη Αντίδρασης Pmean (kN)	26,0037
Μέγιστη Βράχυνση Smax (mm)	70
Ενέργεια απορρόφησης Eabs (kJ)	1,822
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (J/gr)	19,5851
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου CFE	0,7295

Πιν.3.8 Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T2-45° (Δείκτες Crashworthiness)

Παρατηρήσεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2-45°

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 132,9 gr. Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης (Pmax) μετρήθηκε 35,65 kN και η μέση (Pmean) 26 kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,822 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 19,58 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,7295.

Στο πείραμα δημιουργηθήκαν 2 μη-εκτατοί λοβοί μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm. Η δημιουργία του πρώτου λοβού όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες ολοκληρώνεται κοντά στα 30 mm. Η δημιουργία του δεύτερου ξεκινάει κοντά στα 40 mm και ολοκληρώνεται στα 60 mm, ενώ στα 65 mm ξεκινάει και η δημιουργία τρίτου λοβού. Επιπλέον βλέπουμε ότι ανοίγουν οι πλευρές του δοκιμίου μέχρι περίπου τα 20 mm λόγω της επίδρασης του μηχανισμού trigger.





Σχ.3.36 Διαδικασία παραμόρφωσης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T2-30°



Κάτοψη



Άνοψη





Πρόσοψη Οπίσθια όψη Σχ.3.37 Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2 – 30°

Καμπύλη Φορτίου 35 Φορτίο 30 25 (NA) ортоф 10 10 5 0 -5 L 0 10 20 30 40 60 70 80 50 Μετατόπιση (mm) Σχ.3.38 Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T2-30°

Διαγράμματα



Σχ.3.39 Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T2-30°

Δοκίμιο 8	Τιμή
Ύψος Δοκιμίου (mm)	80
Μάζα (gr)	134,8
Μάζα Καταρρέουσα (gr)	94,36
Μέγιστη Δύναμη Αντίδρασης Pmax (kN)	30,3020
Μέση Δύναμη Αντίδρασης Pmean (kN)	23,4817
Μέγιστη Βράχυνση Smax (mm)	70
Ενέργεια απορρόφησης Eabs (kJ)	1,6456
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (J/gr)	17,4393
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου CFE	0,7749

Πιν.3.9 Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T2-30° (Δείκτες Crashworthiness)

Παρατηρήσεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2-30°

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 134,8 gr. Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης (Pmax) μετρήθηκε 30,30 kN και η μέση (Pmean) 23,48 kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,6456 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 17,44 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,7749.

Στο πείραμα δημιουργηθήκαν 3 μη-εκτατοί λοβοί μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm.. Η δημιουργία του πρώτου λοβού όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες ολοκληρώνεται κοντά στα 27 mm. Η δημιουργία των υπόλοιπων 2 λοβών ξεκινάει κοντά στα 40 mm και ολοκληρώνεται στα 55 mm. Αυτό οφείλεται στις γεωμετρικές ατέλειες

του δοκιμίου οι οποίες έχουν προκύψει κατά την διαμόρφωση του χάλυβα και από την ύπαρξη συγκολλήσεων και την παραμόρφωση του δοκιμίου πάνω στη σκανδάλη-σταυρό.







Κάτοψη





Άνοψη



 Πρόσοψη
 Οπίσθια όψη

 Σχ.3.41 Όψεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού
 trigger T2 – 60°

Διαγράμματα



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T2-60°



Σχ.3.42 Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας-Μετατόπισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T2-60°

Δοκίμιο 9	Τιμή
Ύψος Δοκιμίου	80
Μάζα (gr)	133,8
Μάζα Καταρρέουσα (gr)	93,66
Μέγιστη Δύναμη Αντίδρασης Pmax (kN)	32,3291
Μέση Δύναμη Αντίδρασης Pmean (kN)	22,9807
Μέγιστη Βράχυνση Smax (mm)	70
Ενέργεια απορρόφησης Eabs (kJ)	1,6104
Ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA (J/gr)	17,1945
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου CFE	0,7108

Πιν.3.10 Αποτελέσματα του πειράματος στατικής φόρτισης για δοκίμιο με χρήση μηχανισμού trigger T2-600 (Δείκτες Crashworthiness)

Παρατηρήσεις δοκιμίου με χρήση μηχανισμού trigger T2-60°

Η μάζα του δοκιμίου στο πείραμα μετρήθηκε 133,8 gr. Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης (Pmax) μετρήθηκε 32,33 kN και η μέση (Pmean) 22,98 kN. Η ενέργεια απορρόφησης του δοκιμίου ήταν 1,6104 kJ, η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA 17,19 J/gr και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE ήταν 0,7108.

Στο πείραμα δημιουργηθήκαν 1 ασύμμετρος και 2 μη-εκτατοί λοβοί μέχρι την μέγιστη βράχυνση των 70 mm. Η δημιουργία του πρώτου λοβού όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες ολοκληρώνεται κοντά στα 35 mm. Η δημιουργία των υπόλοιπων 2 λοβών ξεκινάει κοντά στα 45 mm και ολοκληρώνεται στα 65 mm. Αυτό οφείλεται στις γεωμετρικές ατέλειες του δοκιμίου οι οποίες έχουν προκύψει κατά την διαμόρφωση του χάλυβα και από την ύπαρξη συγκολλήσεων. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε η μέγιστη Pmax στην τρίτη κορυφή και όχι στην πρώτη, όπως είδαμε σε όλα τα δοκίμια μέχρι τώρα και όπως και στις άλλες δοκιμές με το T2 δοκίμιο παρατηρήθηκε η εισχώρηση της σκανδάλης στο δοκίμιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετήθηκαν πειραματικά σωλήνες λεπτού τοιχώματος χάλυβα τετραγωνικής διατομής υπό στατική φόρτιση με χρήση σκανδάλης τύπου σταυρού στη μια επιφάνεια του δοκιμίου υπό διαφορετικές γωνίες ώστε να μελετηθεί η επίδραση τους στους δείκτες Crashwoerthiness.

Στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με σκοπό την σύγκριση των περιπτώσεων και προτείνεται βαθμολογία για την ιεραρχική ταξινόμηση των διατάξεων δοκιμίων-σκανδαλών.

4.1 Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Στον παρακάτω πίνακα έχουμε τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά, όπου μπορεί να γίνει μια πρώτη σύγκριση μεταξύ τους και με το αρχικό δοκίμιο χωρίς μηχανισμό trigger. Σε αυτά τα αποτελέσματα δεν λαμβάνεται υπόψη η παραμόρφωση των δοκιμίων αλλά αυτό θα εξεταστεί παρακάτω.

Δοκίμιο	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μάζα (gr)	135,4	135,3	135,2	133,4	133,8	135,7	132,9	134,8	133,8
Μάζα Καταρ- ρέουσα (gr)	94,78	94,71	94,64	93,38	93,66	94,99	93,03	94,36	93,66
Μέγιστη Δύναμη Αντί- δρασης Pmax (kN)	66,8169	40,3851	46,0320	46,7298	48,5989	31,9606	35,6462	30,3020	32,3291
Μέση Δύναμη Αντίδρασης Pmean (kN)	24,3826	24,7773	20,4790	22,4933	21,7876	23,8572	26,0037	23,4817	22,9807
Ενέργεια απορρόφησης Eabs (kJ)	1,7107	1,7347	1,4341	1,5752	1,5287	1,6723	1,8220	1,6456	1,6104
Ειδική ενέρ- γεια απορρό- φησης SEA (J/gr)	18,0496	18,3157	15,1529	16,8683	16,3214	17,6045	19,5851	17,4393	17,1945
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου CFE	0,3649	0,6135	0,4449	0,4813	0,4483	0,7465	0,7295	0,7749	0,7108

Πιν.4.1 Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμίων

4.2 Συγκριτικά διαγράμματα δεικτών

4.2.1 Συγκριτικά διαγράμματα βασικών δεικτών Crashworthiness

Η μέγιστη δύναμη Pmax είναι η μέγιστη δύναμη αντίδρασης που παράγεται από τη δομή ενός συστήματος απορρόφησης ενέργειας. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη Pmax εμφανίζεται στο δοκίμιο χωρίς τη χρήση trigger, άρα έχει επιτευχθεί ο σκοπός της μικρότερης Pmax και σε συγκεκριμένη περίπτωση (T2-60°) είναι λιγότερη από το μισό της αρχικής (30,3 kN)

Η μέγιστη τιμή Pmax των πειραμάτων εμφανίστηκε με τη χρήση του trigger T1-60° και είναι ίση με 48,59 kN.



Σχ.4.1 Συγκριτικό διάγραμμα Pmax

Η τιμή του μέσου φορτίου Pmean, αναφέρεται στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για δεδομένη παραμόρφωση. Είναι ένα μέγεθος το οποίο είναι ανάλογο με την παραμόρφωση και την ενέργεια παραμόρφωσης, η οποία εκφράζει την συνολική ενέργεια που απορροφήθηκε από τη δομή του συστήματος απορρόφησης ενέργειας μέσω πλαστικής παραμόρφωσης.

Παρατηρώντας το παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε ότι η μέγιστη Pmean εμφανίστηκε στο πείραμα με το δοκίμιο T2-45° και είναι ίση με 26 kN. Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι μεγαλύτερη από αυτή του αρχικού δοκιμίου η οποία είναι ίση με 24,38 kN.

Η ελάχιστη P
mean εμφανίστηκε στο πείραμα με το δοκίμιο Τ
1-45° και είναι ίση με 20,47 kN



Σχ.4.2 Συγκριτικό διάγραμμα Pmean

Η μέγιστη τιμή της ενέργειας απορρόφησης Eabs των πειραμάτων εμφανίστηκε με τη χρήση του trigger T2-45° και είναι ίση με 1.8 kJ, η οποία είναι και η μέγιστη τιμή που εμφανίστηκε, μεγαλύτερη και από αυτή του αρχικού δοκιμίου (1,7 kJ).

Η ελάχιστη τιμή Eabs εμφανίστηκε στο πείραμα με το δοκ
ίμιο T1-45° και είναι ίση με 1,43kJ :





Ο δείκτης Specific Energy Absorption (S.E.A) χρησιμοποιείται για την μελέτη της απορροφούμενης ενέργειας, όπου μεγάλες τιμές συνεπάγονται ότι ένα δομικό στοιχείο μπορεί να απορροφήσει περισσότερη ενέργεια με λιγότερο βάρος.

Η μέγιστη τιμή SEA των πειραμάτων εμφανίστηκε με τη χρήση του trigger T2-45° και είναι ίση με 19.58 J/gr, η οποία είναι και η μέγιστη τιμή που εμφανίστηκε, μεγαλύτερη και από αυτή του αρχικού δοκιμίου (18,04 J/gr).





Σχ.4.4 Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη SEA

Ο τελευταίος δείκτης που παρουσιάζεται είναι ο δείκτης Crush Force Efficiency (CFE). Η καλύτερη απόδοση του δείκτη είναι το 1, οπότε επιθυμητό σε μια κατασκευή είναι να πλησιάζεται όσο το δυνατόν πιο κοντά.

Η μέγιστη τιμή του δείκτη CFE των πειραμάτων εμφανίστηκε με τη χρήση του trigger T2-30° και είναι ίση με 0.7749, η οποία είναι μεγαλύτερη και από αυτή του αρχικού δοκιμίου (0.3649).

Η ελάχιστη τιμή SEA εμφανίστηκε στο πείραμα με το δοκ
ίμιο T1-45° και είναι ίση με 0.4449.



Σχ.4.5 Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη CFE

4.2.2 Συγκριτικά διαγράμματα δεικτών Crashworthiness-Trigger

Στα παρακάτω διαγράμματα παρατίθεται η σύγκριση των δεικτών Crashworthiness ανά γωνία εφαρμογής δοκιμίου ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση των διαφορετικών τύπων trigger :

Από το συγκριτικό διάγραμμα Pmax βλέπουμε ότι η χρήση του trigger T2 έχει ως συνέπεια την εμφάνιση μικρότερων τιμών στις αντίστοιχες γωνίες.



Σχ.4.6 Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη CFE

Από το συγκριτικό διάγραμμα Pmean βλέπουμε ότι η χρήση του trigger T2 έχει ως συνέπεια την εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών στις αντίστοιχες γωνίες, με εξαίρεση των 0°, όπου στο trigger T1 εμφανίζεται οριακά μεγαλύτερη μέση δύναμη.



Σχ.4.7 Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη CFE

Αντίστοιχη συμπεριφορά με την Pmean παρατηρούμε και στο διάγραμμα της Eabs αλλά και της SEA όπου με εξαίρεση τη γωνία των 45°, οι τιμές είναι σχετικά παραπλήσιες.



Σχ.4.8 Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη CFE



Σχ.4.9 Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη CFE

Στο τελευταίο διάγραμμα όπου παρουσιάζεται η συγκριση του δείκτη CFE, παρατηρούμε αρχικά ότι η μικρότερη τιμή ανήκει στο αρχικό δοκίμιο και σε όλες τις άλλες περιπτώσεις υπερέχει το trigger T2 και με σημαντική διαφορά.



Σχ.4.10 Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη CFE

4.3 Βαθμολόγηση και ταξινόμηση δοκιμίων

Ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας είναι η βαθμολόγηση των δοκιμίων, από το μικρότερο στο μεγαλύτερο, με το μικρότερο να είναι το χειρότερο.

Για την εξαγωγή της βαθμολογίας, ταξινομήθηκαν οι συντελεστές των δοκιμίων όπως παρακάτω:

- Pmax: Από το μεγαλύτερο που έχει τη μικρότερη βαθμολογία, έως το μικρότερο
- Pmean: Ομοίως
- Eabs: Από το μικρότερο που έχει τη μικρότερη βαθμολογία έως το μεγαλύτερο
- SEA: Ομοίως
- CFE: Ομοίως

Η βαθμολόγηση ήταν από το 1 έως το 9, αφού είχαμε στο σύνολο 9 πειραματικά δοκίμια και απονεμήθηκε μια στο καθένα.

Υπολογίστηκαν και συντελεστές βαρύτητας για τον κάθε συντελεστή Crashworthiness, καθώς εκτιμάται ότι δεν έχουν όλοι την ίδια βαρύτητα, όπως παρακάτω, εκτίμηση η οποία εξάχθηκε από τη συχνότητα εμφάνισης σε papers και είναι μεταβλητή ανάλογα με την εφαρμογή σε πραγματική κατασκευή.

Pmax	SEA	Eabs	Pmean	CFE
1	0,95	0,9	0,85	0,8

Πιν.4.2 Πίνακας εκτιμώμενων συντελεστών βαρύτητας

Ως καλύτερος συνδυασμός δοκιμίου-trigger είναι αυτός με τη μεγαλύτερη συγκεντρωτική βαθμολογία, ενώ ο λιγότερο αποδοτικό, πάντα σύμφωνα με την εκτιμώμενη βαθμονόμηση, είναι ο συνδυασμός με τη μικρότερη βαθμολογία.

Δοκίμιο	Βαθμολογία	Σειρά Αξιολόγησης
T2 60°	2,5	1
T1 30°	2,7	2
αρχικό	2,9	3
T1 60°	3,46	4
T2 45°	3,9	5
T1 45°	4,3	6
T1 0°	4,5	7
T2 30°	4,5	8
T2 0°	4,7	9

Πιν.4.3 Συγκριτικός πίνακας βαθμολόγησης δοκιμίων

Από τον παραπάνω συγκεντρωτικό πίνακα βαθμολογιών, προκύπτει ότι η καλύτερη διάταξη δοκιμίου-trigger είναι αυτή με το trigger T2-0° ενώ η χειρότερη αυτή με το trigger T2-60°.

Παρατηρούμε επίσης ότι με τη συγκεκριμένη προσέγγιση, η οποία είναι να επιχειρήσει να αναλύσει ολιστικά τις βαθμολογίες, το αρχικό δοκίμιο δεν είναι στην χερότερη θέση της βαθμολογίας, κυρίως λόγω της υψηλής Pmean και SEA.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

(1) «Energy absorption capabilities of complex thin walled structures», F Tarlochan, Sami AlKhatib, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017

(2) «Crashworthiness of composite thin-walled structural components» A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A Demosthenous, M.B. Ioannidis, Technonomic Publishing Co., Athens, 1998

(3) «Lateral post-buckling analysis of thin-walled open section beams» F. Mohri, L. Azra, M. Potier-Ferry, Elsevier, accepted 28 May 2002

(4) «On design of multi-cell thin-wall structures for crashworthiness», SuzhenWu, Gang Zheng, Guangyong Sun, Qiang Liu, Guangyao Li, Qing Li, International Journal of Impact Engineering 88 (2016) 102–117, Accepted 9 September 2015

(5) «Evaluation of double- and triple-coupled triggering mechanisms to improve crashworthiness of composite tubes», Yiru Ren , Hongyong Jiang, Zhihui Liu, Elsevier, accepted 15 May 2019 (revised)

(6) «A design solution for a crashworthy landing gear with a new triggering mechanism for the plastic collapse of metallic tubes», Alessandro Airoldi, Gerardus Janszen, Elsevier, Aerospace Science and Technology 9 (2005) 445–455, accepted 14 Jan 2005 (7) «An experimental and numerical scrutiny of crashworthiness variables for square column with V-notch and groove initiators under quasi-static loading», G. Balaji1, K. Annamalai1, Balaji & Annamalai, Cogent Engineering, accepted 01 Jan 2017

(8) Numerical investigation into the effect of various trigger configurations on crashworthiness of GFRP crash boxes made of different types of cross sections, International Journal of Crashworthiness, N. Nasir Hussain, Srinivasa Prakash Regalla & Venkata Daseswara Rao Yendluri, published 13 Feb 2017

(9) «Dynamic axial crushing of square tubes», Wlodzimierz Abramowicz and Norman Jones Department of Mechanical Engineering, The University of Liverpool, Revised 8 June 1984, Int.d.Impact Engng. Vol.2,No.2, pp.179-208, 1984, Pergamon Press Ltd.

(10) «The crumpling of tubular structures under impact conditions», A.Pugsley, Proc. Syrup. The Use of Aluminium in Railway Rolling Stock, Inst. Loco. Engrs., pp. 33-41. The Aluminium Development Association, /London (1960)

(11) «Design of thin-walled columns for crash energy management - their strength and mode of collapse», H. F. Mahmood and A. Paluszny, Proc. 4th Int. Conf. on Vehicle Structural Mechs., pp. 7-18 (1981)

(12) «Magee, Energy absorption by structural collapse.Structural Crashworthiness» (N. Jones and T. Wierzbicki, Eds.), P. H. Thornton, H. F. Mahmood and C. L. Magee, Chap. 4, pp. 96-117. Butterworths, London (1983)