ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΟΠΩΝ ΣΤΗΝ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

ΚΛΕΑΝΘΗΣ-ΧΡΥΣΟΒΑΛΑΝΤΗΣ ΚΑΡΠΟΥΖΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Π. ΚΩΣΤΑΖΟΣ

Αθήνα
Σεπτέμβριος
2025

Στην οικογένεια μου

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη περί βελτιστοποίησης της συμπεριφοράς έναντι κρουστικής καταπόνησης σε δομές λεπτότοιχων μεταλλικών σωλήνων κυκλικής διατομής από γαλβανιζέ χάλυβα. Συγκεκριμένα θα πραγματοποιηθεί πειραματική ανάλυση για την διερεύνηση της συμβολής των μηχανισμών triggering σε σχηματισμούς τύπου σταυρού και τριγώνου στο κέλυφος των δοκιμίων, για διαφορετικές θέσεις καθ' ύψος των σωλήνων, στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (crashworthiness). Τα δοκίμια θα υποβληθούν σε αξονική συμπίεση (quasi-static compression) και θα ακολουθήσει σύγκριση των αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με δοκίμια χωρίς την χρήση του μηχανισμού triggering. Μάλιστα, θα διερευνηθεί η βέλτιστη περίπτωση συνδυασμού θέσεων των οπών, του πλήθους τους και των συνδυασμών τους. Στη συνέχεια θα υπολογιστούν οι δείκτες μελέτης της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας, ώστε να αιτιολογηθεί πλήρως η επιλογή των βέλτιστων μηχανισμών triggering. Επιπλέον, θα αξιολογηθούν ορισμένα συμπεράσματα περί της συμβολής της αύξησης των οπών στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο οποίο χρησιμοποιήθηκε εξειδικευμένος εξοπλισμός σε συνεργασία με το προσωπικό του.

Abstract

The objective of this diploma thesis is to study the optimization of the impact behavior of thin-walled circular metallic tube structures made of galvanized steel. Specifically, an experimental analysis will be conducted to investigate the contribution of triggering mechanisms in cross- and triangle-type configurations on the tube shell, at different positions along the tube height, to their energy absorption capability (crashworthiness). The specimens will be subjected to axial quasi-static compression tests and the results will be compared with those obtained from specimens without the use of triggering mechanisms. Furthermore, the optimal configuration regarding the position, number and combination of holes will be examined. Subsequently, the energy absorption performance indicators will be calculated to fully justify the selection of the optimal triggering mechanisms. In addition, certain conclusions will be drawn regarding the influence of increasing the number of holes on the energy absorption capability. The experimental part of this thesis was carried out at the Laboratory of Manufacturing Technology of the National Technical University of Athens (NTUA), utilizing specialized equipment in collaboration with the laboratory staff.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντές μου, Ομότιμο Καθηγητή Δημήτριο Μανωλάκο και Επίκουρο Καθηγητή Πρωτεσίλαο Κωστάζο, για την καθοδήγηση που μου παρείχαν για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Επιπροσθέτως, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην Δρ. Κωνσταντίνα Καραντζά για την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων μου, καθώς και στην κάθε πληροφορία για την επίλυση των απορίων μου.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή 10
   1.1 Σημασία της αντοχής δομών έναντι δυναμικής/κρουστικής καταπόνησης . 10
   1.2 Εφαρμογές 10
   1.3 Χάλυβας 11
   1.4 Λεπτότοιχες διατομές 13
2. Ανθεκτικότητα σε κρούση και μηχανισμός σκανδάλης *trigger* 15
   2.1 Δείκτες *Crashworthiness* 15
   2.1.1 Ικανότητα απορρόφησης της ενέργειας κρούσης 17
   2.2 Μηχανισμός σκανδάλης *trigger* 20
   2.3 Δοκιμές σύγκρουσης 24
3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση 26
4. Πειραματικό μέρος 31
   4.1 Παρουσίαση της διάταξης 31
   4.2 Δοκίμια 32
   4.2.1 Χαρακτηρισμός υλικού 33
   4.3 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών 34
5. Συμπεράσματα 51
Βιβλιογραφία 54

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1.2.1: Ζώνες παραμόρφωσης (Crumple zones)..... 11
Εικόνα 1.3.1: Χάλυβας οπλισμένου σκυροδέματος..... 12
Εικόνα 1.3.2: Διατομή λεπτότοιχων χαλύβων..... 12
Εικόνα 1.3.3: Κυλινδικά δοκίμια χάλυβα..... 12
Εικόνα 1.4.1: Αξονομετρικοί λοβοί σε αξονικά συμπιεσμένο κυκλικό δοκίμιο..... 13
Εικόνα 1.4.2: Αξονοσυμμετρικοί και μη αξονομετρικοί λοβοί σε αξονικά συμπιεσμένα κυκλικά δοκίμια..... 14
Εικόνα 1.4.3: Top-hat διατομή με μεικτή κατάρρευση..... 14
Εικόνα 1.4.4: Double-hat διατομή σε κατάρρευση..... 14
Εικόνα 2.1.1: Θέσεις απορροφητών ενέργειας στις δομές ατράκτου αυτοκινήτων και αεροσκαφών..... 16
Εικόνα 2.1.1.1: Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης ενός δοκιμίου……..…..…. 18
Εικόνα 2.1.1.2: Αποδοτικότητα μετατόπισης δοκιμίου…….. 19
Εικόνα 2.1.1.3: Διάγραμμα αναπαράστασης ιδανικού και πραγματικού ενεργειακού απορροφητή…… 20
Εικόνα 2.2.1: Επίδραση της ταχύτητας συμπίεσης στην απορρόφηση ενέργειας……. 21
Εικόνα 2.2.2: Εγκάρσια διάτμηση και θρυμματισμός……...… 22
Εικόνα 2.2.3: Λειτουργία θραύσης θραυσμάτων……...…... 22
Εικόνα 2.2.4: Λειτουργία θραύσης με εύθραυστη ρωγμάτωση…… 22
Εικόνα 2.2.5: Λειτουργία ανοίγματος (Splaying mode)……...…. 23
Εικόνα 2.2.6: Λειτουργία ανοίγματος (Splaying mode)……...…. 23
Εικόνα 2.2.7: Τοπική κάμψη ή λειτουργία προοδευτικής αναδίπλωσης……..…. 24
Εικόνα 2.2.8: Σχηματική αναπαράσταση των τρόπων συμπίεσης και των μηχανισμών αστοχίας…….. 24
Εικόνα 2.3.1: Απεικόνιση ημιστατικής κρούσης……... 25
Εικόνα 2.3.2: Δοκιμή κρούσης πτώσης βάρους σε οροφή οχήματος…….....……. 25
Εικόνα 4.1.1: Μηχανική πρέσα δοκιμών INSTRON 4482……... 32
Εικόνα 4.1.2: Πρόγραμμα ελέγχου και καταγραφής μετρήσεων Bluehill 2…….. 32
Εικόνα 4.2.1: Δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη……..… 33
Εικόνα 4.2.1.1: Διάγραμμα συμβατικής τάσης σ – συμβατικής παραμόρφωσης ε..... 34
Εικόνα 4.3.1: Δοκίμιο 1……..... 34
Εικόνα 4.3.2: Προοδευτική παραμόρφωση δοκιμίου 1 μέχρι την κατάρρευση……. 35
Εικόνα 4.3.3: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 1.....……. 36
Εικόνα 4.3.4: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης δοκιμίου 1…….. 36
Εικόνα 4.3.5: Δοκίμιο 2a……... 37
Εικόνα 4.3.6: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 2a μέχρι την κατάρρευση…. 37
Εικόνα 4.3.7: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 2a……..… 38
Εικόνα 4.3.8: Δοκίμιο 2b…… 38
Εικόνα 4.3.9: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 2b μέχρι την κατάρρευση.... 38
Εικόνα 4.3.10: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 2b……. 39
Εικόνα 4.3.11: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης δοκιμίων 2a, 2b……..... 39
Εικόνα 4.3.12: Δοκίμιο 3a……..... 40
Εικόνα 4.3.13: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 3a μέχρι την κατάρρευσή... 40

Εικόνα 4.3.14: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 3a…… 41
Εικόνα 4.3.15: Δοκίμιο 3b…….. 41
Εικόνα 4.3.16: Προοδευτική παραμόρφωση δοκιμίου 3b μέχρι την κατάρρευση……. 41
Εικόνα 4.3.17: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 3b…… 42
Εικόνα 4.3.18: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης δοκιμίων 3a, 3b..…… 43
Εικόνα 4.3.19: Δοκίμιο 4a…….. 44
Εικόνα 4.3.20: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 4a μέχρι την κατάρρευση... 44
Εικόνα 4.3.21: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 4a…… 44
Εικόνα 4.3.22: Δοκίμιο 4b…….. 45
Εικόνα 4.3.23: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 4b μέχρι την κατάρρευση.. 45
Εικόνα 4.3.24: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 4b…… 46
Εικόνα 4.3.25: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης δοκιμίων 4a, 4b..……..…….. 46
Εικόνα 4.3.26: Δοκίμιο 5a…… 47
Εικόνα 4.3.27: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 5a μέχρι την κατάρρευση... 47
Εικόνα 4.3.28: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 5a…… 48
Εικόνα 4.3.29: Δοκίμιο 5b…….. 48
Εικόνα 4.3.30: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 5b μέχρι την κατάρρευση.. 48
Εικόνα 4.3.31: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 5b…… 48
Εικόνα 4.3.32: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης δοκιμίων 5a, 5b…..……..... 50
Εικόνα 5.1: Διάγραμμα μέγιστου φορτίου και μέσου φορτίου ανά δοκίμιο……..… 51
Εικόνα 5.2: Διάγραμμα απορρόφησης ενέργειας ανά δοκίμιο……... 51

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 4.2.1: Πίνακας παρουσίασης δοκιμίων πειράματος..... 33
Πίνακας 4.3.1: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 1..... 36
Πίνακας 4.3.2: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 2a……..… 39
Πίνακας 4.3.3: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 2b…..……..… 40
Πίνακας 4.3.4: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 3a……..… 43
Πίνακας 4.3.5: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 3b……..... 43
Πίνακας 4.3.6: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 4a..... 46
Πίνακας 4.3.7: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 4b……..... 46
Πίνακας 4.3.8: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 5a…….. 50
Πίνακας 4.3.9: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 5b…….. 50

1. Εισαγωγή

1.1 Σημασία της αντοχής δομών έναντι δυναμικής/κρουστικής καταπόνησης

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα που απασχολεί σήμερα τους μηχανικούς στον τομέα της κατασκευαστικής βιομηχανίας είναι η αντοχή των δομών στην κρούση. Οι κατασκευές όλες, είτε στατικές, είτε κινούμενες αντιμετωπίζουν διάφορες μορφές κρούσεων από φυσικές καταστροφές όπως σεισμοί, τυφώνες, πλημμύρες κ.ά. Μορφές κρούσεων έχουμε και από τα διάφορα ατυχήματα που συμβαίνουν γύρω μας, εντός βιομηχανικών πεδίων και εκτός, όπως συγκρούσεις οχημάτων, τρένων, αεροσκαφών και άλλων μέσων, η μελέτη των οποίων έχει ιδιαίτερη βαρύτητα, αφού προέχει η διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής και η αποφυγή τραυματισμών.

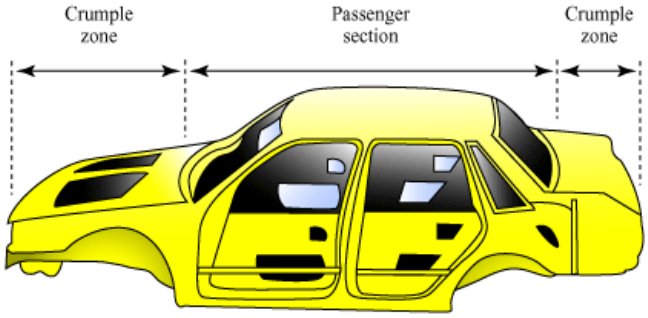
Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, πρωτίστως η ασφάλεια του προσωπικού πρώτα και κατόπιν των εγκαταστάσεων αποτελούν κύριο γνώμονα των μελετών. Οι ποιοτικές και ανθεκτικές κατασκευές έχουν σχεδιαστεί ώστε να αντέχουν τις κρουστικές/δυναμικές καταπονήσεις χωρίς να καταρρεύσουν. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, εύκολα κανείς μπορεί να βγάλει το συμπέρασμα ότι δομές που αντέχουν τέτοιου είδους ισχυρές καταπονήσεις, διατηρούν την ακεραιότητά τους στο χρόνο εξασφαλίζοντας την εύρυθμη λειτουργία της κοινότητας, αφού δεν δαπανούνται άσκοπα χρήματα και χρόνος για συχνές επισκευές και αντικαταστάσεις. Επίσης, η σοβαρή επιδείνωση των φυσικών καταστροφών, καθώς και η ραγδαία αύξηση ατυχημάτων και πιο σοβαρή μορφή ατυχημάτων σε όλο τον κόσμο ώθησε την επιστημονική κοινότητα να επικεντρωθεί σε νέα σχεδιαστικά μοντέλα και καινοτόμα κατασκευαστικά υλικά. Άρα, παράγονται νέα υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες αντοχής στην κρούση και διερευνάται η χρήση νέων τεχνολογιών για ενίσχυση της αντοχής των υλικών, όπως επενδύσεις από νανοϋλικά.

Οι έρευνες επί των μηχανικών αντοχών στην κρούση, επομένως κρίνονται σημαντικές. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί και η σημασία της έρευνας στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης, αλλά και προσομοιώσεων προκειμένου να αξιολογηθεί η αντοχή των υλικών στις διάφορες συνθήκες κρούσης.

1.2 Εφαρμογές

Η αντοχή δομών έναντι κρουστικής δυναμικής καταπόνησης έχει πληθώρα εφαρμογών. Μια εξ αυτών είναι η σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία, όπου η μελέτη της απορρόφησης της ενέργειας κρίνεται σκόπιμη για την ασφάλεια των επιβατών αλλά και του ευρύτερου περιβάλλοντος όπως επιβάτες άλλων αυτοκινήτων, πεζούς και άλλες κατασκευές που επηρεάζονται άμεσα ή έμμεσα από μία σύγκρουση. Επομένως, η αυτοκινητοβιομηχανία έχει υιοθετήσει και εφαρμόζει σύγχρονες τεχνικές και υλικά, ώστε τα οχήματα να μπορούν να απορροφήσουν όσο το δυνατόν περισσότερους κραδασμούς δηλαδή ενέργεια, μειώνοντας κατά πολύ τις δυνάμεις που ασκούνται στους επιβάτες, ώστε να προστατεύεται η σωματική τους ακεραιότητα. Άξιο παρατήρησης είναι ότι τα παλαιότερα αυτοκίνητα σε μια ενδεχόμενη σύγκρουση δεν κατάφερναν να απορροφήσουν μεγάλο μέρος του έργου πλαστικής παραμόρφωσης, ώστε να διατηρηθεί επαρκής και ικανός χώρος στην καμπίνα για την επιβίωση των επιβατών. Αντίθετα,

σήμερα τα σύγχρονα επιβατηγά οχήματα ακόμα και με μικρής έντασης σύγκρουση δύνανται να παραμορφωθούν, σε τέτοιο βαθμό ώστε να υπάρχει σημαντική πλαστική παραμόρφωση στο αμάξωμα πλην της καμπίνας. Ακόμη, για το λόγο αυτό προστίθενται στοιχεία εντός του αμαξώματος όπως αερόσακοι, ενίσχυση στις καμπίνες επιβατών και ζώνες καταστροφής (*crumple zones*).

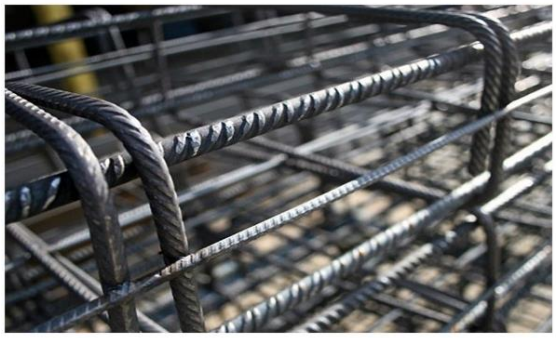


Εικόνα 1.2.1: Ζώνες παραμόρφωσης (Crumple zones)

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα το πίσω και το εμπρός μέρος ενός αυτοκινήτου αποτελούν τις κύριες ζώνες παραμόρφωσης του. Επί της ουσίας απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας μιας σύγκρουσης με ελεγχόμενη παραμόρφωση. Ένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για να επιτευχθούν τα ανωτέρω αποτελέσματα είναι ο χάλυβας υψηλής αντοχής που μπορεί να παραμορφωθεί υπό την επιβολή μεγάλων φορτίων, απορροφώντας και διαχέοντας την ενέργεια της κρούσης. Οι δομές από λεπτότοιχους χάλυβες σε σύγκριση με συμπαγείς μεταλλικές δομές είναι καταλληλότερες και αποδοτικότερες, ειδικά στις περιπτώσεις που το βάρος είναι κρίσιμος παράγοντας για την κατασκευή. Στις εφαρμογές αυτές, οι δομές έχουν την δυνατότητα να παρέχουν σημαντική αντοχή, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούν την χρήση υλικού. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα των χαλύβων είναι η ανθεκτικότητα σε διάβρωση που αποκτούν με την εφαρμογή επιστρώσεων.

1.3 Χάλυβας

Ένα από τα ευρύτερα διαδεδομένα υλικά που χρησιμοποιούνται όχι μόνο στην αυτοκινητοβιομηχανία που αναφέρθηκε προηγουμένως, αλλά γενικότερα στις σύγχρονες βιομηχανίες ανά τον κόσμο είναι ο χάλυβας. Συγκεκριμένα, συνδυάζει τις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και χαμηλό κόστος. Γενικά, υπάρχουν πολλοί τύποι χάλυβα οι οποίοι κατηγοριοποιούνται με βάση την χημική τους σύσταση, τέτοιοι είναι το ατσάλι, ο χυτοσίδηρος και ο εργαλειοχάλυβας.



Εικόνα 1.3.1: Χάλυβας οπλισμένου σκυροδέματος

Εικόνα 1.3.2: Διατομή λεπτότοιχων χαλύβων

Εικόνα 1.3.3: Κυλινδρικά δοκίμια χάλυβα

Ο χάλυβας έχει αποτελεσματικές μηχανικές ιδιότητες. Μερικές εξ αυτών είναι:

- Ολκιμότητα (*Ductility*)
- Ελαστικότητα (*Elasticity*)
- Αντοχή σε εφελκυσμό (*Tensile Strength*)

Ο χάλυβας αποτελείται από κύρια και δευτερεύοντα στοιχεία. Ως κύρια θεωρούνται

ο σίδηρος και ο άνθρακας. Ως δευτερεύοντα χρησιμοποιούνται το μαγγάνιο, το χρώμιο, το νικέλιο και το μολυβδαίνιο προκειμένου να ενισχυθούν οι ιδιότητές του. Όσον αφορά τα δευτερεύοντα κραματικά στοιχεία του χάλυβα αυτά μπορούν να είναι:

- Κοβάλτιο (*Cobalt*): Για αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και φορτία
- Βανάδιο (*Vanadium*): Για βελτιωμένη σκληρότητα και αντοχή
- Νικέλιο (*Nickel*): Για ανθεκτικότητα στη διάβρωση
- Χρώμιο (*Chromium*): Για αντοχή σε διάβρωση
- Μαγγάνιο (*Manganese*): Για ανθεκτικότητα στην διάβρωση, βελτίωση της σκληρότητας και επιπλέον αντοχή

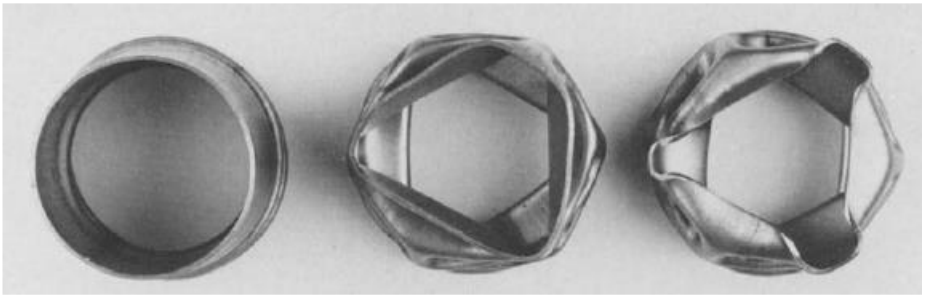
Συνοψίζοντας, ο χάλυβας έχει μεγάλο πεδίο εφαρμογών. Μερικές από αυτές είναι η μηχανολογία, η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η κατασκευή κτηρίων και η αεροδιαστημική.

1.4 Λεπτότοιχες διατομές

Μια σημαντική αναφορά που είναι απαραίτητο να γίνει αφορά τις λεπτότοιχες διατομές. Συναντώνται σε μια πληθώρα κατασκευών της σύγχρονης βιομηχανικής τεχνολογίας όπως οχήματα, αεροπλάνα, γέφυρες οικήματα. Κύριος στόχος είναι η δημιουργία πολύ ανθεκτικών κατασκευών με το μικρότερο δυνατό κόστος και προφανώς την ελάχιστη ποσότητα υλικού. Η εφαρμογή των λεπτότοιχων διατομών σε κατασκευές είναι αξιοσημείωτη, αφού χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση ενέργειας στα οχήματα. Ο λόγος είναι ότι αυτού του είδους οι κατασκευές απορροφούν μεγάλη ποσότητα ενέργειας κατά την σύγκρουση μέσω πλαστικής παραμόρφωσης.

Επομένως, γίνεται εκτενής μελέτη στις κατασκευές με λεπτότοιχες διατομές εφαρμόζοντας στατικό και δυναμικό φορτίο. Οι λεπτότοιχες διατομές μπορούν να είναι *top-hat, double hat,* συγκολλητές και τετραγωνικές.

Εικόνα 1.4.1: Αξονοσυμμετρικοί λοβοί σε αξονικά συμπιεσμένο κυκλικό δοκίμιο



Εικόνα 1.4.2: Αξονοσυμμετρικοί και μη αξονοσυμμετρικοί λοβοί σε αξονικά συμπιεσμένα κυκλικά δοκίμια

Εκτός από τις λεπτότοιχες διατομές κλειστής διατομής έχουμε και ανοιχτής διατομής. Οι τελευταίες συνήθως χρησιμοποιούνται σε μεταλλικές κατασκευές και ιδιαίτερα στη στήριξη ελασμάτων, διότι είναι πολύ αποδοτικές. Στις ανοιχτές διατομές υπάρχουν ποικίλα σχήματα τα οποία είναι αποτελεσματικά στην μείωση του βάρους και την υψηλή αντοχή. Αυτά συναντώνται και σε μηχανολογικές κατασκευές. Τέτοιες διατομές είναι: *I, L, C* και *Z*. Ακόμη, οι διατομές αυτές έχουν και κάποια μειονεκτήματα όπως ευαισθησία στην ροπή.

Εικόνα 1.4.3: Top-hat διατομή με μεικτή κατάρρευση

Εικόνα 1.4.4: Double-hat διατομή σε κατάρρευση

2. Ανθεκτικότητα σε κρούση και μηχανισμός σκανδάλης *trigger*

2.1 Δείκτες *Crashworthiness*

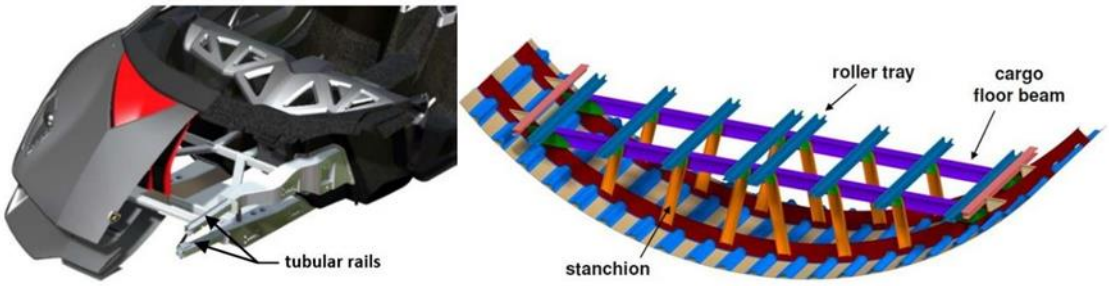
Αρχικά, αξίζει να αναφέρουμε ότι ο όρος *Crashworthiness* πρωτοεμφανίστηκε στον τομέα της αεροναυπηγικής βιομηχανίας περί το 1950 με σκοπό να περιγράψει αποτελεσματικά πόσο αποδοτική είναι η κρούση μιας κατασκευής με μία άλλη προκειμένου στα ατυχήματα να προστατευθούν οι επιβάτες.

Η επιθυμία των σχεδιαστών και των μηχανικών να αυξήσουν την ασφάλεια των επιβατών στις κατασκευές οχημάτων έχει φέρει την ανάγκη βελτίωσης των χαρακτηριστικών αντοχής σε σύγκρουση των κατασκευών. Η αντοχή σε σύγκρουση είναι μία φιλοσοφία σχεδιασμού που εφαρμόζεται σε κάθε δομή οχήματος στον τομέα των μεταφορών, από αυτοκίνητα και τρένα έως αεροσκάφη και ελικόπτερα. Ο γενικός στόχος του σχεδιασμού για αντοχή σε σύγκρουση είναι η μείωση των επιπτώσεων της σύγκρουσης στους επιβάτες, με αποτέλεσμα την αύξηση των επιπέδων ασφάλειας της κατασκευής. Η μείωση των επιπτώσεων της σύγκρουσης στοχεύει στην εξάλειψη των τραυματισμών και των θανάτων σε περίπτωση ήπιων συγκρούσεων και στην ελαχιστοποίησή τους σε σοβαρές συγκρούσεις. Επίσης, τα σύγχρονα οχήματα έχουν σχεδιαστεί για να ελέγχουν την έκταση των ζημιών από την κρούση, απορροφώντας μεγάλες ποσότητες ενέργειας, ενώ παράλληλα πρέπει να διατηρείται επαρκής χώρος για τους επιβάτες. Έτσι, ο σχεδιασμός κατασκευών αντοχής σε σύγκρουση στοχεύει στην απορρόφηση της μεγαλύτερης δυνατής ποσότητας ενέργειας που παράγεται κατά τη σύγκρουση. Ωστόσο, η απορρόφηση ενέργειας είναι προτιμότερο να επιτυγχάνεται με ελεγχόμενη κατάρρευση σε περίπτωση σύγκρουσης και εντός ορισμένων περιορισμών, όπως τα όρια στη μετάδοση δύναμης, οι επιτρεπόμενες παραμορφώσεις και η αστοχία.

Πιο συγκεκριμένα, εάν επιτρέπονται μόνο μικρές παραμορφώσεις όσον αφορά τον χώρο των επιβατών, τότε θα προκύψουν μεγάλη μεταφορά ορμής και δύναμης, κάτι που δεν είναι καλό να βιώνουν οι επιβάτες. Από την άλλη πλευρά, πρέπει να επιβληθεί ένα όριο στις μόνιμες παραμορφώσεις για να διατηρηθεί ένας ελάχιστος όγκος επιβίωσης. Έτσι, προκειμένου να επιτευχθεί ένας βέλτιστος συνδυασμός επιτρεπόμενης παραμόρφωσης πλαισίου και μεταδιδόμενων δυνάμεων στους επιβάτες, εφαρμόζονται ειδικές συσκευές απορρόφησης ενέργειας, στρατηγικά τοποθετημένα στις κατάλληλες θέσεις πλαισίου, στις δομές των οχημάτων για να βελτιωθεί η συμπεριφορά αντοχής τους σε κρούσεις.

Οι απορροφητές ενέργειας κατασκευάζονται κυρίως από μέταλλα (χάλυβα, αλουμίνιο κ.λπ.), πολυμερή, σύνθετα ή διμεταλλικά υλικά. Τα δύο τελευταία υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως στην τρέχουσα τεχνολογία, καθώς παρέχουν ελαφριές κατασκευές ικανές να απορροφούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας κρούσης υπό συνθήκες αξονικής συμπίεσης, κάμψης ή/και συνδυασμένης φόρτισης. Επιπλέον, ερευνητικές μελέτες και πειράματα προτείνουν ότι οι κατασκευές με λεπτά τοιχώματα είναι πιο ωφέλιμες για χρήση ως απορροφητές ενέργειας, καθώς παρέχουν συσκευές με υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και μειωμένο συνολικό βάρος. Η μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μιας κατασκευής με λεπτά τοιχώματα βασίζεται στο γεγονός ότι μια κατασκευή με λεπτά τοιχώματα απαιτεί χαμηλότερα φορτία συμπίεσης

για να συμπεριφέρεται πλαστικά και να διαχέει ποσότητες ενέργειας. Αντίθετα, οι συμπαγείς κατασκευές απαιτούν μεγαλύτερα φορτία για να δεχθούν πλαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες μπορούν να τις διατηρήσουν σε πλήρη ελαστική συμπεριφορά χωρίς να διαχέουν την ενέργεια, ή να τις παραμορφώσουν σε χαμηλά επίπεδα παραμόρφωσης, μειώνοντας την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε κάθε περίπτωση. Ως αποτέλεσμα, οι απορροφητές ενέργειας είναι προτιμότερο να είναι κατασκευές με λεπτά τοιχώματα.



Εικόνα 2.1.1: Θέσεις απορροφητών ενέργειας στις δομές ατράκτου αυτοκινήτων και αεροσκαφών

Γενικά, η συμπεριφορά αντοχής σε σύγκρουση μπορεί να βελτιωθεί τροποποιώντας τη δομική γεωμετρία ή εισάγοντας ειδικά σχεδιασμένες συσκευές απορρόφησης ενέργειας. Και οι δύο ερευνητικές κατευθύνσεις έχουν διερευνηθεί από τους σχεδιαστές για την παραγωγή κατασκευών ανθεκτικών σε σύγκρουση που διαχέουν την κινητική ενέργεια της σύγκρουσης με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Η Εικόνα 2.1.1 απεικονίζει τυπικές θέσεις πλαισίων στις οποίες συνήθως τοποθετούνται απορροφητές ενέργειας για τις ατράκτους τόσο των αυτοκινήτων όσο και των αεροσκαφών. Όπως φαίνεται, οι απορροφητές ενέργειας χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες κατασκευές ως πτυσσόμενες σωληνωτές ράγες στο μπροστινό μέρος των αυτοκινήτων ή στην περίπτωση των αεροσκαφών, ως πτυσσόμενες δοκοί και δοκοί δαπέδου.

Η νέα φιλοσοφία σχεδιασμού της αντοχής σε σύγκρουση έχει αντικαταστήσει πιο παραδοσιακές προσεγγίσεις σχεδιασμού, οι οποίες θεωρούσαν τις ισχυρές, ογκώδεις και άκαμπτες κατασκευές ως καλύτερες. Τέτοιες προσεγγίσεις έχουν απορριφθεί από τις τρέχουσες τάσεις σχεδιασμού, καθώς δεν καταφέρνουν να διαχέουν την ενέργεια κατά τη διάρκεια της κρούσης, μεταφέροντάς την στους επιβαίνοντες. Αντίθετα, οι ανθεκτικές σε σύγκρουση κατασκευές έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν μια προοδευτική ελεγχόμενη κατάρρευση, κατά την οποία εξασφαλίζουν την ασφαλή διάχυση επαρκών ποσοτήτων κινητικής ενέργειας.

Επομένως, τα κριτήρια σχεδιασμού έναντι κρουστικής καταπόνησης αποσκοπούν στην επίτευξη των παρακάτω στόχων όπως αυτά αναφέρονται στην μελέτη της *K. Karantza* [1]:

- 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 μεταβαίνει 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 μεγάλη αύξηση του αριθμού των μεταφορικών μέσων στην εποχή μας έχει οδηγήσει τους σχεδιαστές στην προσπάθεια να εφεύρουν και να ενσωματώσουν σε αυτά νέα συστήματα που αυξάνουν το επίπεδο της παρεχόμενης ασφάλειας, μέσω της βελτίωσης της συμπεριφοράς έναντι κρούσεων (*crashworthiness*). Τα συστήματα αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:
α) Συστήματα με στόχο την βελτίωση της ενεργητικής ασφάλειας, δηλαδή την αποφυγή ενός ατυχήματος
β) Συστήματα με στόχο την βελτίωση της παθητικής ασφάλειας του οχήματος, η οποία περιορίζει στο ελάχιστο τις συνέπειες ενός ατυχήματος για τους επιβάτες.

Επίσης, μπορεί να προστεθεί και ο όρος *structural crashworthiness* που περιγράφει την σύγκρουση μεταξύ δύο διαφορετικών κατασκευών. Αυτό προφανώς σαν στόχο έχει τον υπολογισμό και την μελέτη δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την σύγκρουση ώστε να διαπιστωθεί η κατάσταση μίας κατασκευής και η ασφάλεια των επιβατών. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο τομέας αυτός επικεντρώνεται σε συγκρούσεις μέσων όπως τρένα, αυτοκίνητα, λεωφορεία, αεροπλάνα κ.ά.

Η προστασία από συγκρούσεις μπορεί να επιτευχθεί επιδιώκοντας είτε την ελάχιστη παραμόρφωση της εκτιθέμενης επιφάνειας, όπου το πλαίσιο υποβάλλεται σε υψηλές θλιπτικές δυνάμεις, είτε την μέγιστη παραμόρφωση του πλαισίου μέχρι ένα ανώτατο επιτρεπτό όριο, όπου μετατοπίζεται ένα τμήμα του χωρίς να μεταφέρονται μεγάλα φορτία στην καμπίνα του οχήματος και τους επιβάτες. Σκοπός του σχεδιαστή είναι να διοχετευθεί η κινητική ενέργεια σε επιμέρους τμήματα του αμαξώματος, παρά να επικρατήσουν συνθήκες ελαστικής παραμόρφωσης.

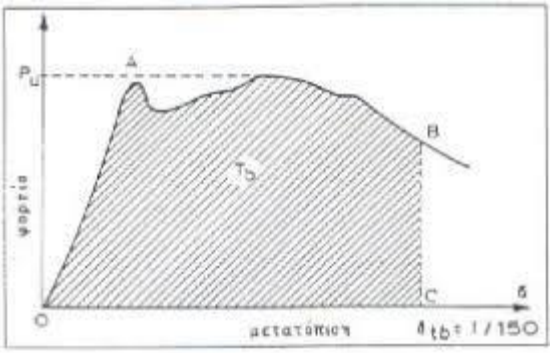
Επομένως, τα χαρακτηριστικά *crashworthiness* είναι μια σειρά μεγεθών, τα οποία βαθμονομούν την ικανότητα των υλικών να απορροφούν ενέργεια μέσω της παραμόρφωσης ή της ολοκληρωτικής τους θραύσης. Τα αποτελέσματα αυτά εξάγονται με πειραματική δοκιμή υλικών (δοκιμίων) με την καμπύλη του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης.

2.1.1 Ικανότητα απορρόφησης της ενέργειας κρούσης

Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ενός αξονικά καταπονούμενου κελύφους αποτυπώνεται μέσω της ειδικής ενέργειας απορρόφησης W_s, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της απορροφημένης από το κέλυφος ενέργειας κατά την κατάρρευση W, προς την μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει m_c ,η οποία με την σειρά της υπολογίζεται από τον αντίστοιχο όγκο V_c πολλαπλασιαζόμενο με την πυκνότητα του υλικού ρ. Τα δοκίμια που θα μας απασχολήσουν είναι όλκιμα. Έτσι, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης έχει πολλές βυθίσεις, σε αντίθεση με το αντίστοιχο των ψαθυρών υλικών, που είναι σχεδόν σταθερό λόγω των πολλών μικροθραύσεων κατά την κατάρρευση. Η μορφή της καμπύλης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου και την αλληλεπίδραση

των δομικών του μερών.

Για τον υπολογισμό της ενέργειας που απορροφάται από το δοκίμιο κατά την διαδικασία κατάρρευσης σε μια δοκιμή αξονικής καταπόνησης μέσω εμβαδομέτρησης του χωρίου κάτω από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, το δοκίμιο παραμορφώνεται αρχικά ελαστικά και το φορτίο αυξάνεται σταθερά μέχρι μία μέγιστη τιμή P_{max}, η οποία εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Στη συνέχεια το φορτίο εμφανίζει μια απότομη πτώση, ενώ η μορφή της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου και τις συνθήκες φόρτισης.



Εικόνα 2.1.1.1: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης ενός δοκιμίου

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει μελέτη της συμπεριφοράς έναντι κρουστικής καταπόνησης λεπτότοιχων μεταλλικών σωλήνων κυκλικής διατομής (γαλβανιζέ χάλυβας) και στη συνέχεια αξιολόγηση των δοκιμίων ως προς την απορρόφηση ενέργειας προκειμένου να προχωρήσουμε σε βελτιστοποίηση. Ο σχεδιαστικός στόχος είναι η μέγιστη μη αναστρέψιμη διάχυση ενέργειας. Επομένως, πρέπει να αναπτυχθούν κριτήρια-δείκτες προκειμένου να εξαχθούν απτά συμπεράσματα για την ικανότητα ενός πλαστικού υλικού να απορροφά αποτελεσματικά την ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα:

Ενέργεια απορρόφησης – *Energy absorption* (E_{abs})

Η ενέργεια απορρόφησης δίνεται από την σχέση:

$$E_{abs} = \int F(x)\, dx$$

όπου: E_{abs} (J), F (kN), x (mm). Η ενέργεια απορρόφησης είναι η συνολική ενέργεια του υλικού που απορροφήθηκε σε συνθήκες κρούσης μέσω πλαστικής παραμόρφωσης.

Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης – *Peak crushing force* (*PCF* ή P_{max})

Η μέγιστη δύναμη *PCF* παρατηρείται πάντα στην αρχή της διαδικασίας κατάρρευσης και είναι η μέγιστη δύναμη που δημιουργείται από ένα σύστημα απορρόφησης ενέργειας. Πρακτικά, είναι η υψηλότερη τιμή φορτίου που δημιουργείται κατά την διάρκεια μιας δοκιμής.

Μέσο φορτίο – *Mean load* (P_{mean})

Δίνεται από την σχέση:

$$P_{mean} = \frac{E_{abs}}{s_{max}}$$

όπου: E_{abs} (J), s_{max} (mm). Επομένως, είναι ο λόγος της ενέργειας παραμόρφωσης E_{abs} προς την βράχυνση s_{max} που υπέστη το δοκίμιο.

Ειδική ενέργεια απορρόφησης – *Specific Energy Absorption* (*SEA*)

Δίνεται από την σχέση:

$$SEA = \frac{E_{abs}}{m_c}$$

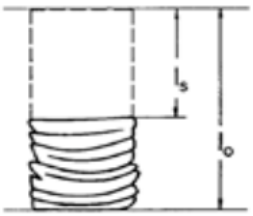
όπου: E_{abs} (J) και $m_c = \rho \cdot V_c$ η μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει και V_c ο αντίστοιχος όγκος. Επομένως, είναι ο λόγος της ενέργειας απορρόφησης προς την μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει.

Αποδοτικότητα μετατόπισης – *Stroke efficiency* (*SE*)

Δίνεται από την σχέση:

$$SE = \frac{l_s}{l_o}$$

Επομένως, είναι ο λόγος της μέγιστης βράχυνσης l_s από την απορρόφηση ενέργειας του δοκιμίου προς το αρχικό του μήκος l_o.



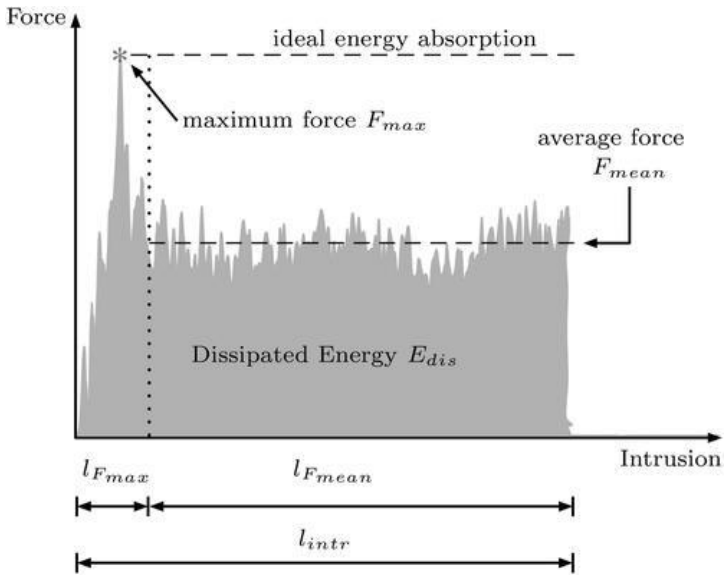
Εικόνα 2.1.1.2 Αποδοτικότητα μετατόπισης δοκιμίου

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου – *Crush Force Efficiency* (*CFE*)

Δίνεται από την σχέση:

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

Επομένως, είναι ο λόγος του μέσου φορτίου P_{mean} προς το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης PCF.



Εικόνα 2.1.1.3: Διάγραμμα αναπαράστασης ιδανικού και πραγματικού ενεργειακού απορροφητή

Αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς δείκτες για την μελέτη και αξιολόγηση της απορρόφησης ενέργειας, Όπως, φαίνεται και παραπάνω στο διάγραμμα έχουμε τον ιδανικό και τον πραγματικό απορροφητή ενέργειας. Άρα, αν ο δείκτης *CFE* είναι μονάδα, δηλαδή $P_{mean} = PCF$ τότε έχουμε ιδανικό απορροφητή με *CFE = 100%*. Αν όμως έχουμε χαμηλό *CFE* << 1 τότε αυτό σημαίνει πως P_{mean}<< *PCF* με αποτέλεσμα υψηλότερα επίπεδα επιβράδυνσης σε ένα όχημα κάτι το οποίο μπορεί να έχει άσχημες επιπτώσεις στους επιβάτες.

2.2 Μηχανισμός σκανδάλης *trigger*

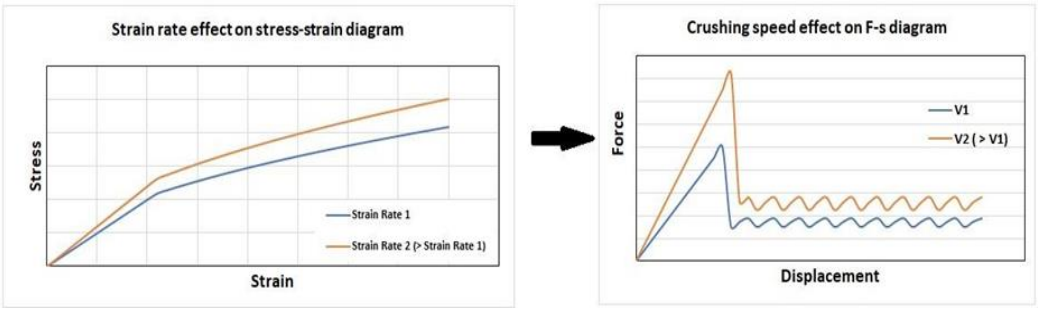
Η κύρια παράμετρος η οποία χαρακτηρίζει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μια κατασκευής και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αστοχία της είναι η ειδική απορρόφηση ενέργειας. Πρακτικά, έχουμε την εμφάνιση δύο τρόπων συμπίεσης: τον καταστροφικό τρόπο αστοχίας και τον προοδευτικό τρόπο αστοχίας, οι οποίοι εκτενέστερα θα αναλυθούν παρακάτω.

Καταστροφική ή ανεξέλεγκτη αστοχία έχουμε όταν παρουσιάζεται προοδευτικά ασταθής εμφάνιση ρωγμών μεταξύ των στρωμάτων και στη συνέχεια έχουμε απότομη αύξηση φορτίου μέχρι το μέγιστο ασκούμενο φορτίο το οποίο ακολουθείται από ένα χαμηλό μέχρι την αστοχία. Προοδευτική ή ελεγχόμενη αστοχία έχουμε όταν ένας μηχανισμός ενεργοποίησης παρέχεται σε ένα από τα άκρα της δομής ως συγκέντρωση τάσεων και προκαλεί την έναρξη της αστοχίας.

Στην προοδευτική ή ελεγχόμενη κατάρρευση έχουμε την μείωση από το μέγιστο ασκούμενο φορτίο σε ένα πολύ χαμηλότερο και σταθερό. Αυτό, όμως είναι και πλέον παρατεταμένο και υπεύθυνο για την σταθερή κατάρρευση. Αυτού του είδους η αστοχία έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Κύριο πλεονέκτημα είναι ότι η απορρόφηση ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερη σε μία ελεγχόμενη αστοχία εν αντιθέσει με μία καταστροφική αστοχία. Ένα ακόμα σημαντικό προτέρημα της ελεγχόμενης αστοχίας είναι ότι οι κατασκευές που έχουν σχεδιαστεί για να ανταποκρίνονται σε φορτία με προοδευτική αστοχία είναι ελαφρύτερες από εκείνες που έχουν σχεδιαστεί για την καταστροφική αστοχία. Επομένως, η προοδευτική ή ελεγχόμενη αστοχία είναι πιο αποτελεσματική

από την καταστροφική διότι παρουσιάζει ελαφρύτερες κατασκευές με υψηλότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ή αλλιώς υψηλότερη *SEA*.

Ο τρόπος συμπίεσης αποτελεί ένδειξη για το πόσο αποτελεσματικά συνθλίβεται μια κατασκευή. Η διαδικασία πρόβλεψης της απόκρισης της συμπίεσης σε μία κατασκευή μας οδηγεί να αντιληφθούμε πως η απορρόφηση ενέργειας επηρεάζεται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και από την γεωμετρία. Η ταχύτητα συμπίεσης επηρεάζει την απορρόφηση ενέργειας όπως ο ρυθμός παραμόρφωσης επηρεάζει την μηχανική απόκρισή του υλικού της κατασκευής. Επομένως, προκύπτει πως η ποσότητα της απορροφούμενης ενέργειας εξαρτάται από την ταχύτητα κατάρρευσης.



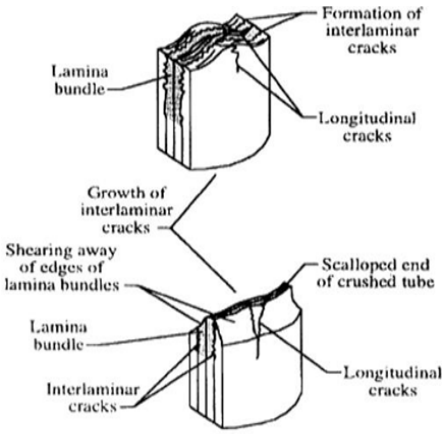
Εικόνα 2.2.1: Επίδραση της ταχύτητας συμπίεσης στην απορρόφηση ενέργειας

Για την ανάλυση του μηχανισμού σκανδάλης (*triggering*) αναφερθήκαμε στις μελέτες των *Farley* και *Jones* [2]. Σύμφωνα λοιπόν με αυτούς τους μελετητές εντοπίζονται τέσσερις τρόποι συμπίεσης. Αφορούν κυρίως εύθραυστα σύνθετα υλικά.

α) Εγκάρσια διάτμηση και θρυμματισμός
β) Ψαθυρή θραύση
γ) Κάμψη ή διάστρωση ελασμάτων
δ) Τοπική κάμψη ή προοδευτική αναδίπλωση

α) Εγκάρσια διάτμηση και θρυμματισμός

Σύμφωνα με τους *Farley* και *Jones* η απορρόφηση ενέργειας σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα συμπίεσης επειδή και η μηχανική απόκριση των ινών εξαρτάται από τον ρυθμό παραμόρφωσης. Αναλυτικότερα, η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από διατομή ελασματοειδούς υλικού με ορισμένες εγκάρσιες και διαμήκεις ρωγμές που σχηματίζουν μερικές δέσμες ελασμάτων. Η απορρόφηση ενέργειας σχετίζεται με την θραύση των δεσμών των ελασμάτων. Όταν το μήκος των εγκάρσιων και διαμηκών ρωγμών είναι μικρότερο από το μήκος του ελάσματος παρατηρείται θρυμματισμός. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εγκάρσια αντοχή του υλικού σε κάμψη, η οποία είναι συνάρτηση της ακαμψίας και της αντοχής των ινών στα σύνθετα υλικά είναι στην ουσία ο μηχανισμός που ελέγχει την συμπίεση.

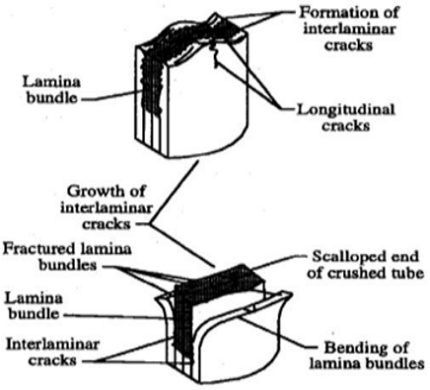


Εικόνα 2.2.2: Εγκάρσια διάτμηση και θρυμματισμός [2]

Εικόνα 2.2.3: Λειτουργία θραύσης θραυσμάτων [2]

β) Ψαθυρή θραύση

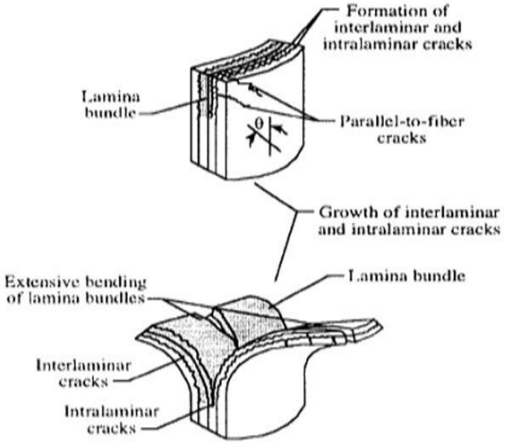
Ο ίδιος μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας με τον θρυμματισμό παρατηρείται και στην περίπτωση της συμπίεσης με ψαθυρή θραύση. Επίσης, και στην περίπτωση αυτή έχουμε αστοχία των δεσμίδων των ελασμάτων όπου το μήκος των εγκαρσίων ρωγμών είναι μία έως και δέκα φορές το πάχος του ελάσματος. Οι δέσμες ελασμάτων στην περίπτωση αυτή εμφανίζουν κάμψη και θραύση κοντά στην βάση τους. Πιο αναλυτικά, όταν με την άσκηση του φορτίου ξεκινά η θραύση των πρώτων δεσμών ελασμάτων γίνεται ανακατανομή του φορτίου και στην συνέχεια προοδευτική ανάπτυξη και άλλων ρωγμών με θραύση και άλλων δεσμίδων. Ο μηχανισμός που επιτελείται εδώ είναι η ακαμψία της μήτρας και η αντοχή σε εφελκυσμό της δέσμης των ελασμάτων. Ο μηχανισμός ελέγχου εδώ αναφέρεται σε σύνθετα υλικά. Η ακαμψία της μήτρας ελέγχει την ανάπτυξη των εγκαρσίων και παράλληλων προς τις ίνες ρωγμών ενώ η αντοχή σε εφελκυσμό ελέγχει την θραύση της δέσμης ελασμάτων.



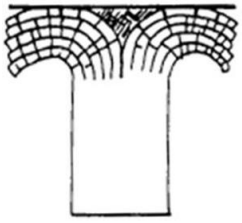
Εικόνα 2.2.4: Λειτουργία θραύσης με εύθραυστη ρωγμάτωση [2]

γ) Κάμψης ή διάστρωσης ελασμάτων

Η δέσμη των ελασμάτων δεν σπάει παρόλο που παρατηρούνται μακριές εγκάρσιες και παράλληλες με τις ίνες ρωγμές. Η ανάπτυξη ρωγμών είναι ο μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας σε αυτή την περίπτωση όπου το μήκος είναι μεγαλύτερο από δέκα φορές του πάχους του ελάσματος. Στην κάμψη οι δέσμες παρά την παραμόρφωση που υφίστανται δεν σπάνε. Η αντοχή της μήτρας είναι ο μηχανισμός ελέγχου της θραύσης, καθώς ελέγχει την ανάπτυξη ρωγμών. Ο τρόπος όπου ο ρυθμός της παραμόρφωσης επηρεάζει την μηχανική απόκριση ενός υλικού είναι ακριβώς ίδιος με εκείνον όπου η ταχύτητα θραύσης επηρεάζει την κάμψη του ελάσματος.



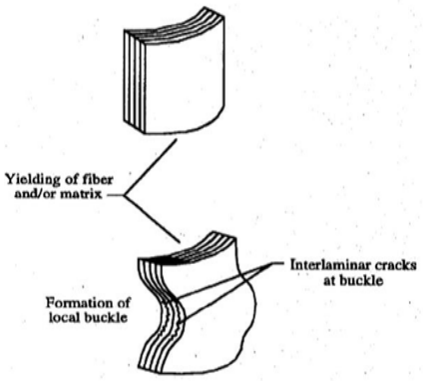
Εικόνα 2.2.5: Λειτουργία ανοίγματος (Splaying mode) [2]



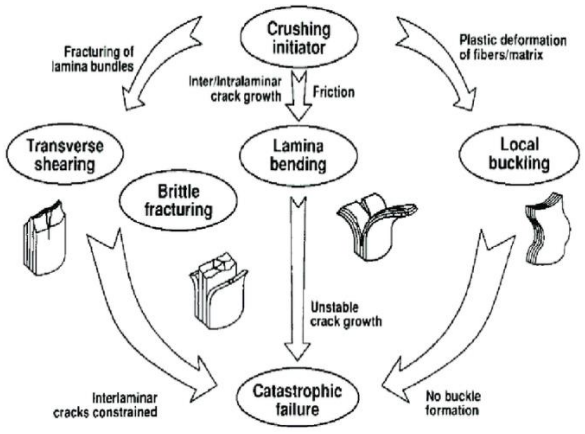
Εικόνα 2.2.6 : Λειτουργία ανοίγματος (Splaying mode) [2]

δ) Τοπική κάμψη ή προοδευτική αναδίπλωση

Η προοδευτική αναδιπλούμενη συμπίεση ή τοπική κάμψη χαρακτηρίζεται από σχηματισμό πτυχώσεων μέσω παραμόρφωσης πλαστικού υλικού. Οι μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας στην περίπτωση αυτή και κατ' επέκταση ο έλεγχος της προοδευτικής αναδιπλούμενης συμπίεσης είναι η πλαστική διαρροή της ίνας και της μήτρας. Ειδικότερα, επειδή η απόκριση αυτή συναντάται σε ψαθυρά και όλκιμα υλικά η μη γραμμική απόκριση της τάσης – παραμόρφωσης της μήτρας ελέγχει τον τοπικό λυγισμό στα ψαθυρά υλικά ενώ στα όλκιμα υλικά η δυσκαμψία των ινών ή της μήτρας ελέγχει τον τοπικό λυγισμό.



Εικόνα 2.2.7: Τοπική κάμψη ή λειτουργία προοδευτικής αναδίπλωσης [2]



Εικόνα 2.2.8: Σχηματική αναπαράσταση των τρόπων συμπίεσης και των μηχανισμών αστοχίας

2.3 Δοκιμές σύγκρουσης

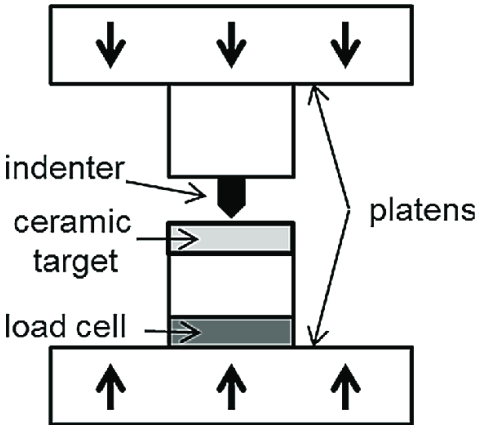
Τα κύρια χαρακτηριστικά της σύγκρουσης μιας κατασκευής καθώς και η συμπεριφορά της αντοχής της μπορούν να μελετηθούν εκτενώς μέσω πειραματικών δοκιμών και προσομοιώσεων. Γενικά, όπως σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας έτσι και εδώ οι πειραματικές δοκιμές μας δίνουν πολύ ακριβή στοιχεία και αποτελέσματα σε κάθε στάδιο όπως:

- Πρόβλεψη ικανότητας απορρόφησης ενέργειας
- Μέγιστο φορτίο
- Μέγιστη βράχυνση του δοκιμίου
- Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης
- Τρόπος αστοχίας

Οι δοκιμές συμπίεσης που στην ουσία είναι οι πειραματικές δοκιμές διεξάγονται με δύο διαφορετικούς τρόπους: ημιστατικές (*quasi-static*) και συνθήκες κρούσης (*impact conditions*).

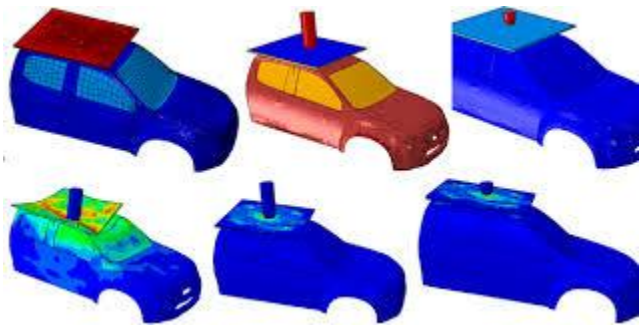
Αρχικά, μελετώνται οι ημιστατικές συνθήκες κρούσης, όπου η κατασκευή μας (δείγμα) συνθλίβεται με σταθερή ταχύτητα. Οι συνθήκες αυτές κρούσης δεν

αντιπροσωπεύουν πραγματικές συνθήκες συμπίεσης ώστε με την σειρά μας να εξάγουμε ρεαλιστικά αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό προκύπτει επειδή στις πραγματικές συνθήκες συμπίεσης το δείγμα υπόκειται σε μείωση της ταχύτητας συμπίεσης από την αρχική κρούση ως την ηρεμία. Πολλά χρησιμοποιούμενα υλικά είναι ευαίσθητα στον ρυθμό παραμόρφωσης και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας εξαρτάται από την ταχύτητα συμπίεσης. Επομένως ενδέχεται να οδηγήσουν σε ανακριβή πρόβλεψη της ποσότητας απορροφούμενης ενέργειας. Εκτός όμως των μειονεκτημάτων εντοπίζονται και πλεονεκτήματα για τις ημιστατικές συνθήκες συμπίεσης. Τα πλεονεκτήματα είναι ότι είναι απλές και εύχρηστες στον έλεγχο χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός.



Εικόνα 2.3.1: Απεικόνιση ημιστατικής κρούσης

Έπειτα εξετάζονται οι δοκιμές σε κρούση. Οι δοκιμές σε κρούση σε αντίθεση με τις ημιστατικές συνθήκες κρούσης αντιπροσωπεύουν πραγματικές συνθήκες συμπίεσης για να εξαχθούν ρεαλιστικά αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει διότι η ταχύτητα συμπίεσης μειώνεται από την αρχική ταχύτητα κρούσης ως την ηρεμία λόγω απορρόφησης ενέργειας. Μειονέκτημα των δοκιμών σε κρούση είναι ο ακριβός εξοπλισμός προηγμένης τεχνολογίας όπως κάμερες υψηλής ταχύτητας καθώς η διαδικασία εξελίσσεται σε κλάσματα δευτερολέπτου. Τέλος, πλεονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι η ακρίβεια ανίχνευσης του τρόπου κατάρρευσης και των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών αντοχής σε κρούση.



Εικόνα 2.3.2: Δοκιμή κρούσης πτώσης βάρους σε οροφή

3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Πριν την έναρξη μελέτης του πειραματικού μέρους αναγκαία κρίνεται και μια σύντομη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας. Αρχικά, αντλούμε χρήσιμες πληροφορίες από τις μελέτες των *Mamalis* κ.α. [3] όπου ομοιόμορφοι λεπτοί κύλινδροι από χάλυβα χαμηλού ποσοστού άνθρακα, καταπονήθηκαν αξονικά σε μεγάλους ρυθμούς παραμόρφωσης. Παρατηρήθηκε ότι άρχισαν να αναπτύσσονται μη αξονοσυμμετρικοί δακτύλιοι σε μη συμμετρικά σχέδια όπως τετράγωνα και ελλειπτικά τρίγωνα. Επιπροσθέτως, όσο προχωρούσε η φόρτιση εντοπίστηκε σχηματισμός μη συμμετρικών διαμαντοειδών σχεδίων λυγισμού, χαρακτηριστικό γνώρισμα της κατάρρευσης κόλουρων κώνων.

Συνήθως τα κοινά σχήματα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε είναι κυκλικοί σωλήνες, τετράγωνης διατομής σωλήνες, κόλουροι κώνοι, κυψελίδες και πλάκες. Πληθώρα τέτοιων σχημάτων που δύναται να καταρρεύσουν καθώς και τους τρόπος παραμόρφωσης εξετάζει ο *Alghamdi* [4]. Στην συγκεκριμένη διατριβή οι κοινοί τρόποι παραμόρφωσης ιδιαίτερα για τους κυκλικούς σωλήνες είναι η αξονική συμπίεση, τα εγκάρσια βαθουλώματα, το εγκάρσιο ίσιωμα και ο διαχωρισμός.

Οι *Abramowicz* και *Jones* [5] προχώρησαν σε κατασκευή χαλύβδινων κυκλικών κυλινδρικών κελυφών που έχουν στατικό ή δυναμικό φορτίο και τα υπέβαλαν σε αξονική συμπίεση. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με υφιστάμενες εμπειρικές σχέσεις. Έτσι, η βελτιωμένη εκδοχή της ανάλυσης του *Alexander* για αξονοσυμμετρικές παραμορφώσεις αποδίδει κοντινά αποτελέσματα με του πειράματος όταν υπολογίζεται η απόσταση συμπίεσης με την προϋπόθεση ότι η ευαισθησία του συντελεστή καταπόνησης του υλικού διατηρείται σταθερή.

Στην εκτεταμένη μελέτη τους οι *El-Hage* κ.α. [6] περιγράφουν την ανάγκη για ελαφριές ανθεκτικές σε συμπίεση κατασκευές. Αυτό επί της ουσίας είναι μια πρόκληση για τους σύγχρονους ερευνητές για να διεξάγουν πειραματικές μελέτες σχετικά με την συμπίεση των σωλήνων αλουμινίου, καθώς και των σύνθετων σωλήνων πολυμερικής μήτρας. Οι πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι οι υβριδικοί σωλήνες που περιέχουν σύνθετο περιτύλιγμα αλουμινίου έχουν υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας από τους σωλήνες αλουμινίου ή τους σύνθετους σωλήνες. Σε αυτό το σημείο πρέπει να πούμε ότι η δημοσιευμένη έρευνα για τους υβριδικούς σωλήνες ήταν περιορισμένης εμβέλειας και το ενεργητικό αποτέλεσμα της συνδυασμένης χρήσης σύνθετου υλικού δεν έχει διευρυνθεί πλήρως. Στόχος λοιπόν αυτής της έρευνας ήταν η διεξαγωγή μιας αριθμητικής μελέτης σχετικά με τα χαρακτηριστικά αξονικής συμπίεσης τόσο των τετραγωνικών υβριδικών σωλήνων αλουμινίου όσο και των τετραγωνικών υβριδικών σωλήνων αλουμινίου – σύνθετου υλικού σε ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων σχεδιασμού, όπως ο μηχανισμός ενεργοποίησης, το πάχος, το πάχος του σωλήνα αλουμινίου, το πάχος του περιτυλίγματος και η γωνία προσανατολισμού των ινών στο περιτύλιγμα. Τα αριθμητικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας το *LS-DYNA* και επικυρώθηκαν χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα που ήταν διαθέσιμα για τους σωλήνες αλουμινίου και τους σύνθετους σωλήνες. Η παραμετρική μελέτη περιελάβανε τόσο σωλήνες αλουμινίου όσο και σωλήνες σύνθετου υλικού.

Από την μελέτη των *Baroutaji* κ.α. [7] μαθαίνουμε ότι, τις τελευταίες δεκαετίες ειδικά, ένας αξιοσημείωτος αριθμός ερευνητικών προσπαθειών έχει κατευθυνθεί στην ελαχιστοποίηση των τραυματισμών και των θανάτων σε άτομα μέσα σε μία κατασκευή (αεροπλάνο, αυτοκίνητο, τραίνο) που υπόκειται σε φόρτιση κρούσης. Τα σωληνωτά

στοιχεία με λεπτό τοίχωμα (*TW*) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε κατασκευές απορρόφησης ενέργειας για την άμβλυνση των αρνητικών επιπτώσεων μια φόρτισης κρούσης κατά την διάρκεια ενός συμβάντος σύγκρουσης και, ως εκ τούτου για τη βελτίωση της αντοχής σε σύγκρουση μια κατασκευής. Η ολοκληρωμένη γνώση των ιδιοτήτων των υλικών και της δομικής συμπεριφοράς διαφόρων στοιχείων *TW* υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού συστήματος απορρόφησης ενέργειας.

Επιπροσθέτως, στη μελέτη αυτή δίνεται μία ολοκληρωμένη επισκόπηση των πρόσφατων εξελίξεων στον τομέα της αντοχής σε σύγκρουση των σωλήνων *TW*, με ιδιαίτερη έμφαση στα θέματα που αναδύθηκαν τα τελευταία χρόνια, όπως ο σχεδιασμός βελτιστοποίησης της αντοχής σε σύγκρουση και οι αποκρίσεις απορρόφησης ενέργειας μη συμβατικών εξαρτημάτων *TW*, στα οποία συμπεριλαμβάνονται και οι σωλήνες πολλαπλών κυψελών, οι σωλήνες διαβαθμισμένου πάχους και οι σωλήνες με λειτουργική διαβάθμιση αφρού. Λόγω, όμως του τεράστιου αριθμού μελετών που ανέλυσαν και αξιολόγησαν τη συμπεριφορά απορρόφησης ενέργειας διαφόρων εξαρτημάτων *TW*, η παρούσα διατριβή παρουσιάζει μόνο μια ανασκόπηση της συμπεριφοράς αντοχής σε σύγκρουση των εξαρτημάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των κοίλων και των σωλήνων *TW* με αφρό, υπό πλευρική, αξονική, λοξή και καμπτική φόρτιση.

Στην εργασία του *Liu* [8] παρουσιάζεται ένας σχεδιασμός αντοχής σε σύγκρουση κανονικών πολύγωνων λεπτότοιχων υποστυλωμάτων με διαφορετικούς τύπους διατομών και διαφορετικά προφίλ, συμπεριλαμβανομένων ευθύγραμμων οκταγωνικών υποστυλωμάτων και καμπύλων εξαγωνικών υποστυλωμάτων. Στην παρούσα μελέτη τα ευθύγραμμα οκταγωνικά υποστυλώματα βελτιστοποιούνται πρώτα αφού δέχονται κυρίως αξονικά φορτία σύγκρουσης κατά την διάρκεια των καταπονήσεων. Στη συνέχεια τα καμπύλα εξαγωνικά υποστυλώματα βελτιστοποιούνται ακολουθώντας την ίδια μέθοδο και τα οποία καταπονούνται σε ροπή κάμψης όταν συμβαίνει η κρούση. Κατά τη διάρκεια των βελτιστοποιήσεων σχεδιασμού, η ειδική απορρόφηση ενέργειας (*SEA*) ορίζεται ως ο στόχος σχεδιασμού, το μήκος της πλευράς των διατομών και το πάχος του τοιχώματος επιλέγονται ως μεταβλητές σχεδιασμού και η μέγιστη δύναμη συμπίεσης (P_{max}) ορίζεται ως ο περιορισμός σχεδιασμού. Ο στόχος και ο περιορισμός διατυπώνονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο επιφάνειας απόκρισης (*RSM*) με βάση τα αποτελέσματα πεπερασμένων στοιχείων (*FE*) που λαμβάνονται από αναλύσεις *FEA*. Μετά την απόκτηση των βέλτιστων σχεδίων, πραγματοποιούνται παραμετρικές μελέτες για να διερευνηθούν οι επιδράσεις των μεταβλητών σχεδιασμού στην απόδοση σε σύγκρουση τέτοιων πολύγωνων λεπτότοιχων υποστυλωμάτων.

Στο επιστημονικό άρθρο των *Mamalis* κ.α. [9] αναφέρεται η συμπεριφορά που παρουσιάζει σε σύγκρουση ο τετραγωνικής διατομής σωλήνας από σύνθετο υλικό ύστερα από καταπόνηση σε στατική αξονική συμπίεση σε διάφορες συνθήκες. Επιπροσθέτως, διερευνήθηκε η συμπεριφορά του αλουμινίου και κάποιων πολυμερικών αφρών στην ανθεκτικότητα σε σύγκρουση των σωλήνων προκειμένου να προσδιοριστεί η λειτουργική και οικονομική αποδοτικότητα όλων των δοκιμίων. Επίσης, στην συγκεκριμένη μελέτη αναλύθηκαν οι τρόποι κατάρρευσης σε μακροσκοπική κλίμακα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αστοχίας. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης *LS-DYNA* για να γίνει η σύγκριση αποτελεσμάτων με τους παρατηρούμενους μηχανισμούς κατάρρευσης των εξαρτημάτων καθώς και τη υπολογισμένη απορροφούμενη ενέργεια κατά την εκτέλεση των διεργασιών. Τα ανωτέρω αποτελέσματα από την προσομοίωση ταιριάζουν πλήρως με τα πειραματικά

κάτι που δικαιολογεί πλήρως την μελετώμενο μοντέλο δηλαδή την αποτελεσματικότητα και την πρόβλεψη της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας του κελύφους που κατέρρευσε.

Διεξήχθη πειραματική δοκιμή παραμόρφωσης από τους *Lee* κ.α. [10] και προσομοίωσης της για επτά δοκίμια εξωθημένων σωλήνων στα οποία εισήχθησαν διάφοροι τύποι βαθουλωμάτων και τα δεδομένα των δοκιμών διερευνήθηκαν μέσω παρατήρησης του τρόπου παραμόρφωσης, της μέγιστης απωστικής δύναμης και της απορροφούμενης ενέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα εξαγόμενα στοιχεία της προσομοίωσης σε υπολογιστή συσχετίστηκαν πολύ καλά με τον τρόπο θλιπτικής παραμόρφωσης, υποδεικνύοντας ότι η προσομοίωση ήταν χρήσιμη για την αξιολόγηση της απορροφούμενης ενέργειας. Η ανωτέρω πειραματική διάταξη εκτελέστηκε για την απόδοση απορρόφησης ενέργειας των εξωθημένων σωλήνων αλουμινίου για χωροδικτυώματα και αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας δοκιμές θλίψης που προσομοιώθηκαν σε υπολογιστή και δοκιμές ημιστατικής θλιπτικής παραμόρφωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν εισήχθησαν βαθουλώματα ενεργοποίησης στις θέσεις αναδίπλωσης αυτά είχαν εκτιμηθεί προηγουμένως από την προσομοίωση σε υπολογιστή. Η απορρόφηση ενέργειας θα μπορούσε να βελτιωθεί και τα δείγματα με μισή οδοντωτή επιφάνεια απορροφήθηκαν πιο αποτελεσματικά από τα δείγματα με πλήρη οδοντωτή επιφάνεια. Από την άλλη πλευρά, όταν εισήχθησαν βαθουλώματα ενεργοποίησης του ιδίου διαστήματος χωρίς να ληφθεί υπόψη η θέση κορυφής του κύματος αναδίπλωσης, παρατηρήθηκε ανομοιογενής παραμόρφωση, μαζί με τη συνολική κάμψη, και επιδείνωσε την απορρόφηση ενέργειας επειδή οι ενέργειες στην κάμψη δεν απορροφήθηκαν τόσο αποτελεσματικά όσο κατά την αναδίπλωση.

Μία άλλη σημαντική μελέτη από τους *Manolakos* κ.α. [11] μας δείχνει ότι η αντοχή σε σύγκρουση των οχημάτων τα τελευταία χρόνια, βελτιώνεται εκθετικά με ιδιαίτερη έμφαση στη μείωση των επιπτώσεων της σύγκρουσης στους επιβάτες. Έχει καταβληθεί προσπάθεια στην πειραματική έρευνα και στη θέσπιση ασφαλών θεωρητικών κριτηρίων σχεδιασμού σχετικά με τους μηχανισμούς θραύσης, παρέχοντας στους μηχανικούς τη δυνατότητα να σχεδιάζουν δομές οχημάτων έτσι ώστε η μέγιστη ποσότητα ενέργειας να διαχέεται ενώ το υλικό που περιβάλλει την καμπίνα επιβατών παραμορφώνεται, προστατεύοντας έτσι τους επιβάτες.

Κατά την τελευταία δεκαετία, δίνεται μεγάλη προσοχή στην αντοχή σε σύγκρουση και την διαχείριση της ενέργειας σύγκρουσης σε σύνθετες πλέον κατασκευές. Κύρια πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών τα οποία είναι ενισχυμένα με ίνες σε σχέση με τα πιο συμβατικά ισότροπα υλικά είναι οι πιο μεγάλες ειδικές αντοχές και η ειδική ακαμψία που μπορεί να επιτύχουν. Επιπροσθέτως, ο εκάστοτε σχεδιαστής – κατασκευαστής μπορεί με αυτά τα σύνθετα υλικά να ποικίλει τον τύπο της ίνας, τη μήτρα και τον προσανατολισμό των ινών για να παράγει σύνθετα υλικά με αποδεδειγμένα αποτελεσματικές ιδιότητες υλικού. Εκτός όμως από τη προοπτική του μειωμένου βάρους, της ευελιξίας σχεδιασμού και του χαμηλού κόστους κατασκευής τα σύνθετα υλικά προσφέρουν σημαντικά ελαφριές κατασκευές απορρόφησης ενέργειας.

Τα προτερήματα αυτά κέντρισαν το ενδιαφέρον της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροναυπηγικής βιομηχανίας λόγω της αυξημένης χρήσης σύνθετων υλικών σε διάφορες εφαρμογές αντικαθιστώντας τα χρησιμοποιούμενα συμβατικά.

Ένας λογικός μηχανισμός συζευγμένης ενεργοποίησης (*triggering*) έχει μεγαλύτερες δυνατότητες να παράγει μια προοδευτική λειτουργία συμπίεσης και να βελτιώσει την αντοχή σε σύγκρουση των σύνθετων απορροφητών. Για την σαφή

κατανόηση των συζευγμένων μηχανισμών ενεργοποίησης, αξιολογείται διεξοδικά η αντοχή σε σύγκρουση των σύνθετων σωλήνων που ενεργοποιούνται από διπλά και τριπλά συζευγμένες ενεργοποιήσεις. Σχεδιάζονται πέντε διπλά συζευγμένες ενεργοποιήσεις, συμπεριλαμβανομένων των ενεργοποιητών λοξοτομής/οπής, λοξοτομής/σχισμής, λοξοτομής/δοντιού πριονιού, λοξοτομής/βύσματος και λοξοτομής/υποβάθμισης υλικού (*C-GMD*). Για την επίδειξη καλύτερης αντοχής σε σύγκρουση, σχεδιάζονται τριπλά συζευγμένες ενεργοποιήσεις συνδέοντας κάθε διπλά συζευγμένη ενεργοποίηση με μία ενεργοποίησης βύσματος. Με βάση τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (*FEM*) διεξάγονται συγκρίσεις της αντοχής σε σύγκρουση σωλήνων που χρησιμοποιούν διπλά και τριπλά συζευγμένες ενεργοποιήσεις. Μελετώνται περεταίρω οι επιδράσεις του πλάτους και του ύψους του βύσματος στις καταστάσεις αστοχίας. Από τα προβλεπόμενα αποτελέσματα, αποκαλύπτονται εκτενώς οι συζευγμένοι μηχανισμοί ενεργοποίησης και απορρόφησης ενέργειας. Οι διπλά συζευγμένες ενεργοποιήσεις αποδυναμώνουν περαιτέρω τις ενεργοποιούμενες περιοχές για να μειώσουν την αρχική κορυφή, ενώ οι τριπλά συζευγμένοι σωλήνες που ενεργοποιούνται βελτιώνουν την απορρόφηση ενέργειας (*EA*). Η τριπλή σύζευξη σκανδάλη *C-GMD* βύσματος παρουσιάζει 26,62% υψηλότερη *EA* από την σκανδάλη *C-GMD*. Οι μηχανισμοί αναδίπλωσης και λυγισμού υλικού έχουν μεγάλη επίδραση στη διαδικασία συσσώρευσης υλικού. Με βάση τα παραπάνω που προκύπτουν από τους *Ren* κ.α. [12] συνιστώνται ορισμένες προτάσεις σχεδιασμού για την σκανδάλη *C-GMD* βύσματος.

Η εργασία των *Airoldi* και *Janszen* [13] παρουσιάζει τις βασικές οδηγίες για το σχεδιασμό ενός συστήματος προσγείωσης που υιοθετεί έναν σωλήνα κρούσης ως συσκευή απορρόφησης ενέργειας σε συνθήκες σύγκρουσης. Στη θεωρούμενη διάταξη συστήματος προσγείωσης, ένας λεπτός σωλήνας από ελαφρύ κράμα τοποθετείται ομοαξονικά στον κύλινδρο απορρόφησης κραδασμών και, σε συνθήκες σοβαρής κρούσης, καταρρέει προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση απορρόφησης ενέργειας του συστήματος προσγείωσης. Ένας νέος μηχανισμός ενεργοποίησης (*triggering*), που ενεργοποιείται σε συνθήκες κρούσης, έχει αναπτυχθεί προκειμένου να εξαλειφθεί η αρχική κορυφή φορτίου στη διαδικασία κατάρρευσης του σωλήνα. Η συσκευή επιτρέπει τη μελέτη πιθανών λύσεων σχεδιασμού για ένα πρόσθετο στάδιο απορρόφησης κραδασμών που μπορεί να ενσωματωθεί σε μια δομή συστήματος προσγείωσης χωρίς να απαιτείται η εισαγωγή εύθραυστων εξαρτημάτων. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της συσκευής ενεργοποίησης (*triggering*) και περιγράφεται η δομική διάταξη ενός συστήματος προσγείωσης κατάλληλου για κρούση που υιοθετεί το αναπτυγμένο πρόσθετο στάδιο απορρόφησης ενέργειας. Αναφέρονται πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα σχετικά με την ανάπτυξη του συστήματος ενεργοποίησης. Οι πιθανές επιδόσεις ενός συστήματος προσγείωσης που διαθέτει το πρόσθετο στάδιο αναλύονται μέσω ενός απλοποιημένου αριθμητικού μοντέλου, δείχνοντας ότι μπορούν να επιτευχθούν αξιόλογες ικανότητες και αποδόσεις απορρόφησης ενέργειας σε συνθήκες σύγκρουσης.

Σύμφωνα με τους *Daneshi* και *Hosseinipour* [14] τα χαρακτηριστικά αντοχής σε σύγκρουση λεπτότοιχων χαλύβδινων σωλήνων που περιέχουν δακτυλιωτές αυλακώσεις μελετώνται πειραματικά. Οι αυλακώσεις εισάγονται στον σωλήνα για να επιβάλουν την πλαστική παραμόρφωση σε προκαθορισμένα διαστήματα κατά μήκος του σωλήνα. Οι στόχοι είναι η βελτίωση της ομοιομορφίας της συμπεριφοράς φορτίου – μετατόπισης και η πρόβλεψη της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας των σωλήνων. Πραγματοποιούνται ημιστατικές δοκιμές αξονικής συμπίεσης με διαφορετικές

αποστάσεις αυλακώσεων. Περιγράφονται οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης και προσδιορίζεται η απορρόφηση ενέργειας και το μέσο φορτίο μετά την κάμψη. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης και η ενέργεια που απορροφάται από την αξονική συμπίεση των σωλήνων θα μπορούσαν να ελεγχθούν με την εισαγωγή αυλακώσεων με διαφορετικές αποστάσεις. Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τους *Daneshi* και *Hosseinipour* [14] το *SE*, όπως προαναφέρθηκε, υποδηλώνει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ενός δομικού μέρους κατά την διάρκεια μιας κρούσης. Οι υψηλές αναλογίες υποδεικνύουν την αποτελεσματική χρήση του υλικού.

Οι δομές που αποτυγχάνουν κατά την διάρκεια της αναδίπλωσης μόνο ένας αριθμός λοβών μπορεί να σχηματιστεί εντός του αρχικού μήκους. Σε δομές που υπάρχουν μηχανισμοί *trigger* μπορεί να περιοριστεί το μήκος της παραμόρφωσης οπότε να έχουμε και μικρότερο δείκτη *SE*. Στην ιδανική περίπτωση που το *SE* πλησιάζει την μονάδα τότε παραμορφώνεται το συνολικό μήκος του μέλους απορρόφησης ενέργειας κατά την διάρκεια απορρόφησης της ενέργειας σύγκρουσης. Όλα τα ανωτέρω, συνθέτουν μια χρήσιμη παράμετρο που πρέπει σαφώς να αξιολογείται κατά τον σχεδιασμό ενεργειακών απορροφητών ενέργειας ειδικά όταν μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα. Τέτοια μέρη απορρόφησης μπορεί για παράδειγμα να είναι ένας προφυλακτήρας όπου βιώνει τα πρώτα φορτία σύγκρουσης προκειμένου στην περίπτωση ενός οχήματος να υποστούν ελάχιστη ζημιά τα υπόλοιπα μέρη του και κυριότερα οι επιβάτες σε μια δεδομένη ταχύτητα κρούσης.

4. Πειραματικό μέρος

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί αναλυτικά η πειραματική διαδικασία. Αρχικά, σκόπιμο κρίνεται να παρουσιάσουμε τον πειραματικό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, τα δοκίμια που εξετάστηκαν και ο αντίστοιχος μηχανισμός σκανδάλης, οι συνθήκες των πειραματικών δοκιμίων και τα αποτελέσματα τους. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο πείραμα μας είναι δοκιμές αξονικής συμπίεσης υπό τη επίδραση στατικού φορτίου σε λεπτότοιχα δοκίμια χάλυβα κυκλικής διατομής. Όλη η πειραματική διάταξη πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π.

4.1 Παρουσίαση της 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 IEEE, συνδεδεμένη μέσω παράλληλης θύρας με ηλεκτρονικό υπολογιστή

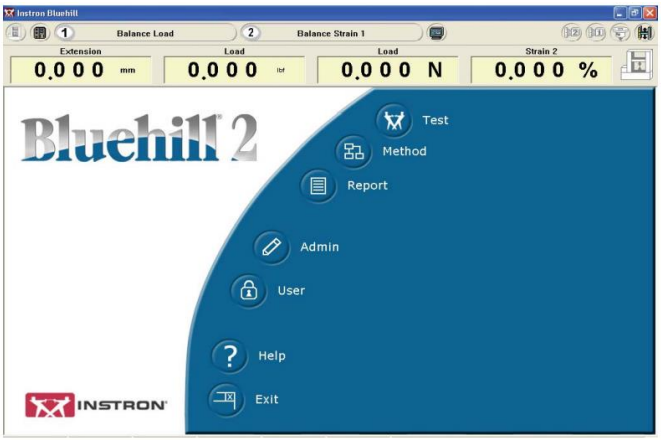
Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανικής πρέσας INSTRON 4482 είναι τα παρακάτω:

✓ 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

Εικόνα 4.1.1 Μηχανική πρέσα δοκιμών INSTRON 4482



Εικόνα 4.1.2 Πρόγραμμα ελέγχου και καταγραφής μετρήσεων Bluehill 2

4.2 Δοκίμια

Στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκαν λεπτότοιχοι χαλύβδινοι σωλήνες κυκλικής διατομής με τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

- Πάχος δοκιμίου: $t = 1,7$ *mm*
- Εξωτερική διάμετρος δοκιμίου: $D_{ext} = 42,2$ *mm*
- Εσωτερική διάμετρος δοκιμίου: $D_{int} = 38,8$ *mm*
- Ύψος δοκιμίου: $h = 100$ *mm*
- Οπές: *Φ10 mm*

Εικόνα 4.2.1: Δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη

Στα δοκίμια ανοίχτηκαν οπές *Φ10 mm* στο άνω, μέσο και κάτω μέρος. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.2.1 με το νούμερο 2 αναφέρονται τα δοκίμια με οπές στο μέσο, με το νούμερο 3 αναφέρονται τα δοκίμια με οπές στο άνω μισό, με το νούμερο 4 αναφέρονται τα δοκίμια με οπές στο άνω μισό και στο μέσο, ενώ με το νούμερο 5 τα δοκίμια με οπές στο άνω και κάτω μισό και στο μέσο. Με το νούμερο 1 αναφέρεται το αρχικό δοκίμιο χωρίς καμία οπή. Επίσης, με το γράμμα a αναφέρονται τα δοκίμια με 3 οπές ενώ με το γράμμα b τα δοκίμια με 4 οπές. Η ονομασία των δοκιμίων, ο αριθμός των οπών και η θέση των οπών παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

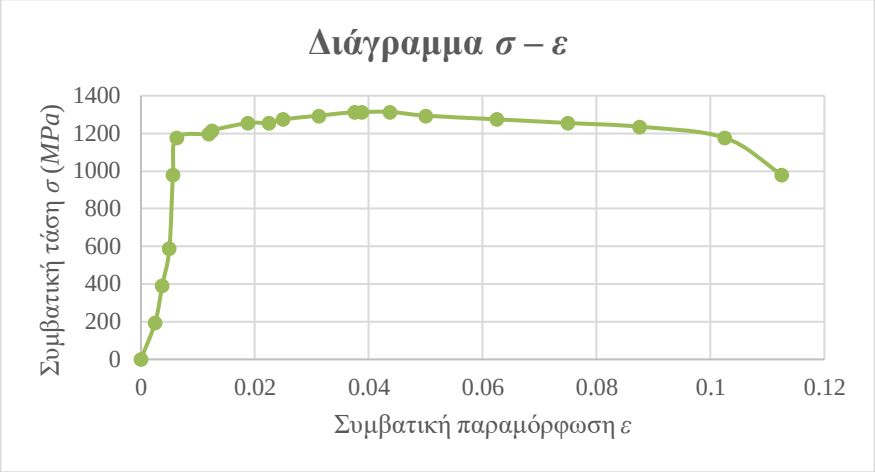
Πίνακας 4.2.1: Πίνακας παρουσίασης δοκιμίων πειράματος

Ονομασία δοκιμίου	**Αριθμός οπών**	**Θέση οπών (καθ΄ύψος)**
1	0	–
2a	3	*50 mm*
2b	4	*50 mm*
3a	3	*75 mm*
3b	4	*75 mm*
4a	3	*50 mm* και *75 mm*
4b	4	*50 mm* και *75 mm*
5a	3	*25 mm*, *50 mm* και *75 mm*
5b	4	*25 mm*, *50 mm* και *75 mm*

4.2.1 Χαρακτηρισμός υλικού

Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές εφελκυσμού λωρίδας του υλικού, έτσι ώστε να εξακριβωθεί το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές. Οι λωρίδες του υλικού είχαν πάχος *1,7 mm*, πλάτος *3 mm* και ενεργό μήκος *80 mm* (το ελεύθερο μήκος του υλικού μεταξύ των αρπαγών). Ο ρυθμός παραμόρφωσής που επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη εφελκυστική δοκιμή ήταν *10 mm/min*.

Στο κάτωθι διάγραμμα φαίνεται η σχέση τάσης – παραμόρφωσης της λωρίδας του χάλυβα. Η εφελκυστική παραμόρφωση στο σημείο διαρροής είναι ίση περίπου με *0,006* και η τάση στο σημείο αυτό είναι ίση με *1200 MPa*. Συμπεραίνουμε από το αντίστοιχο διάγραμμα συμβατικής τάσης – συμβατικής παραμόρφωσης πως η μέγιστη τάση είναι ίση με *1300 MPa*, το όριο διαρροής είναι περίπου *1200 MPa* και το μέτρο ελαστικότητας είναι *294 GPa*.



Εικόνα 4.2.1.1: Διάγραμμα συμβατικής τάσης σ – συμβατικής παραμόρφωσης ε

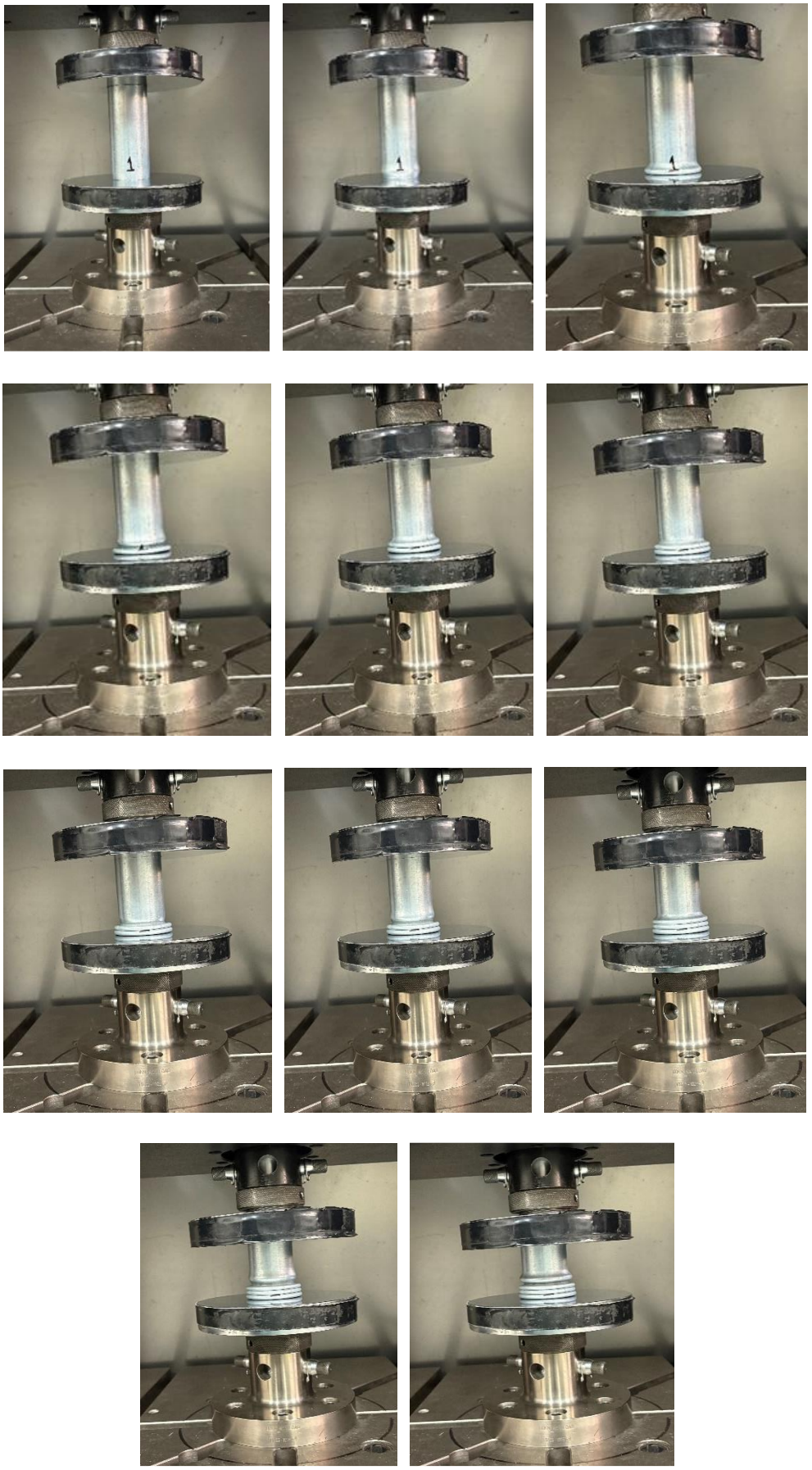
4.3 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών

Ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας με την μορφή διαγραμμάτων, εικόνων και πινάκων.

➢ **Δοκίμιο 1**

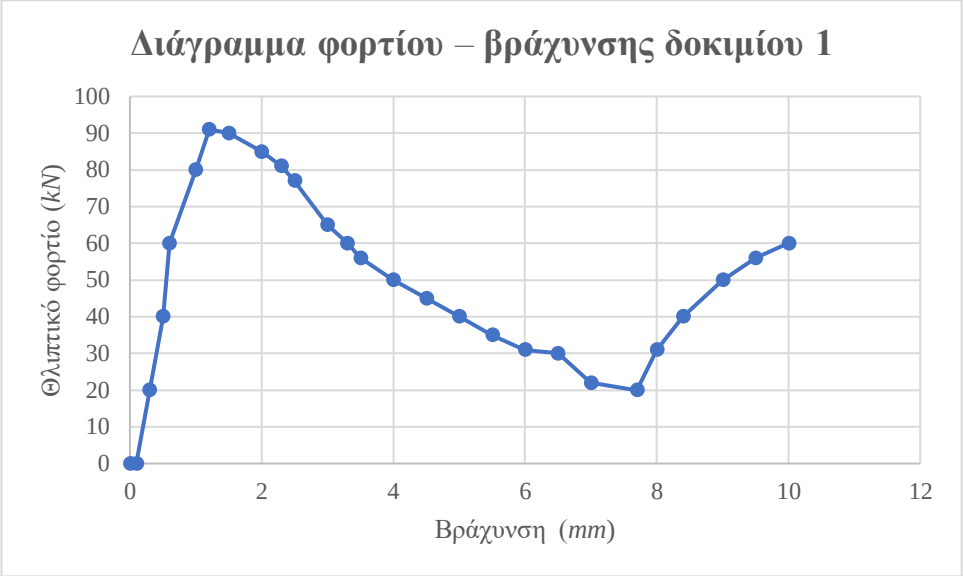
Αρχικά, θα μελετηθεί το δοκίμιο 1, δηλαδή το δοκίμιο χωρίς οπές. Το δοκίμιο δέχτηκε σταθερό θλιπτικό φορτίο *10 mm/min*. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης και οι διαδοχικές φωτογραφίες που υποδεικνύουν την πορεία της κατάρρευσης του δοκιμίου.

Εικόνα 4.3.1: Δοκίμιο 1



Εικόνα 4.3.2: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 1 μέχρι την κατάρρευση

Εικόνα 4.3.3: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 1 (πρόοψη και κάτοψη)



Εικόνα 4.3.4: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης δοκιμίου 1

Πίνακας 4.3.1: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 1

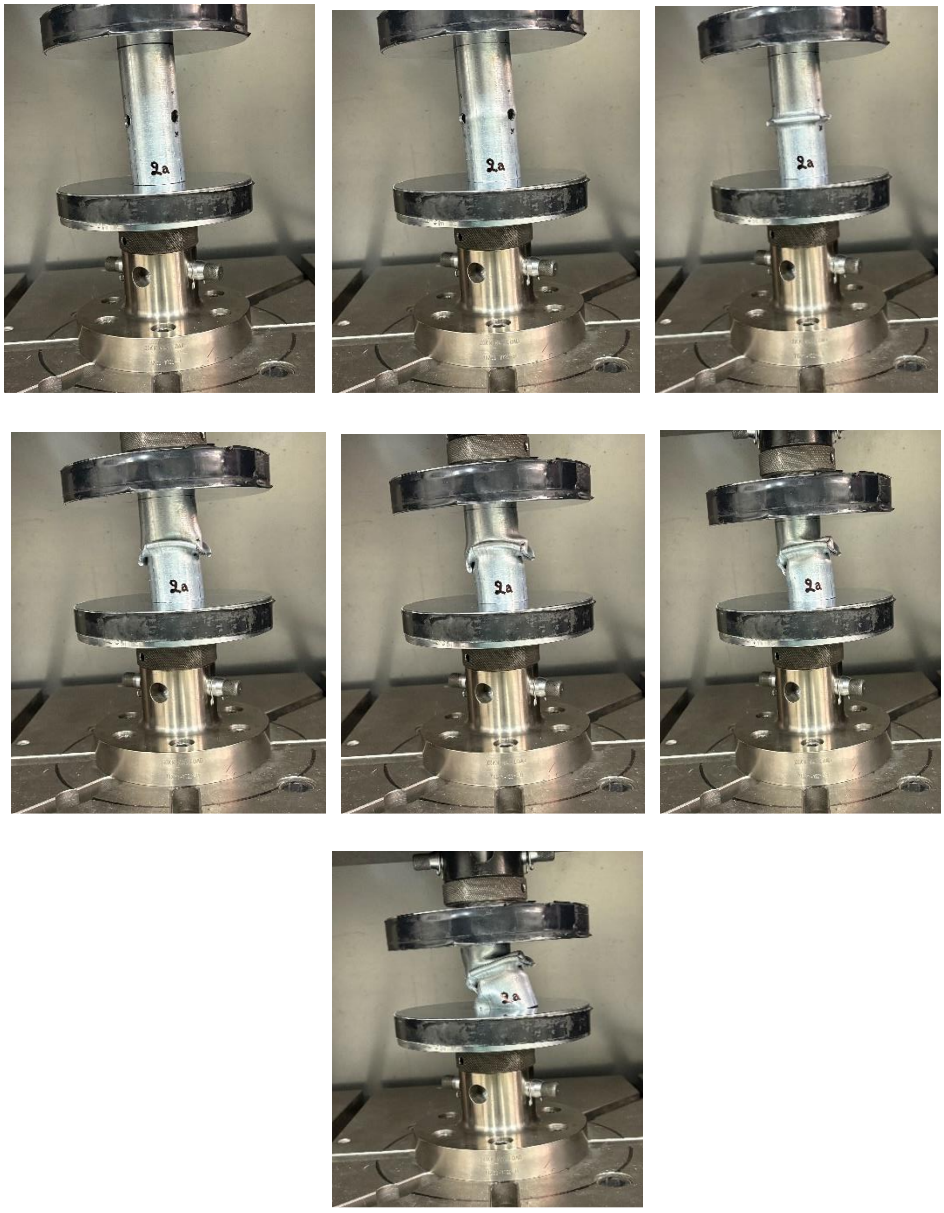
Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 1	
***PCF* (*kN*)**	*91*
P_{mean} **(*kN*)**	*48,71*
E_{abs} **(*J*)**	*487,1*

➢ **Δοκίμια 2**

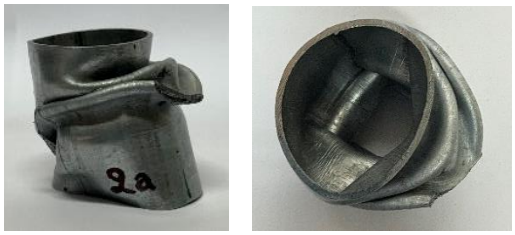
Θα εξεταστούν τα δοκίμια 2a, 2b. Τα δοκίμια δέχτηκαν σταθερό θλιπτικό φορτίο *10 mm/min*. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης και οι διαδοχικές φωτογραφίες που υποδεικνύουν την πορεία της κατάρρευσης του δοκιμίου.

Δοκίμιο 2a

Εικόνα 4.3.5: Δοκίμιο 2a (πρόοψη και κάτοψη)



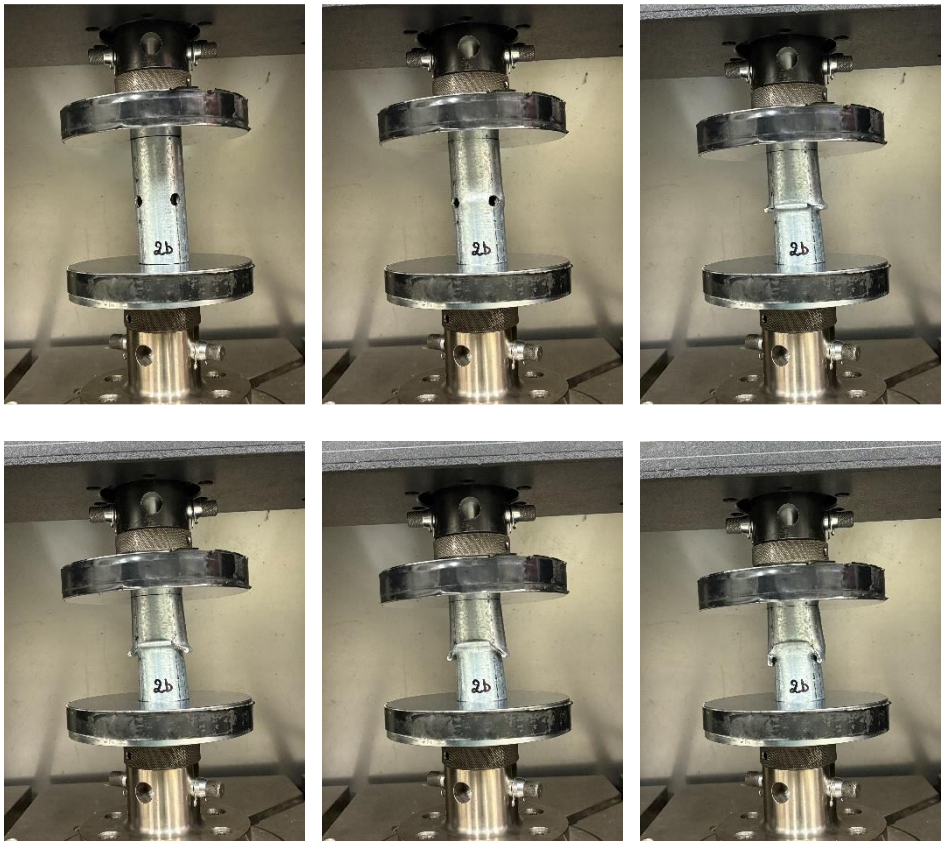
Εικόνα 4.3.6: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 2a μέχρι την κατάρρευση

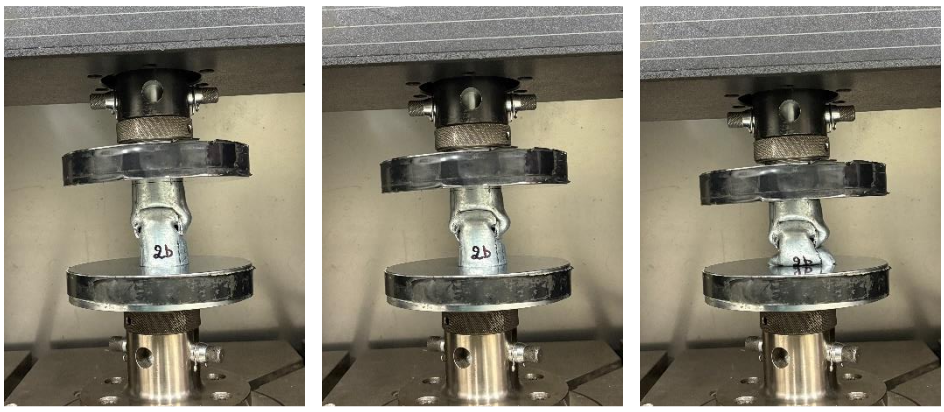


Εικόνα 4.3.7: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 2a 1 (πρόοψη και κάτοψη)

Δοκίμιο 2b

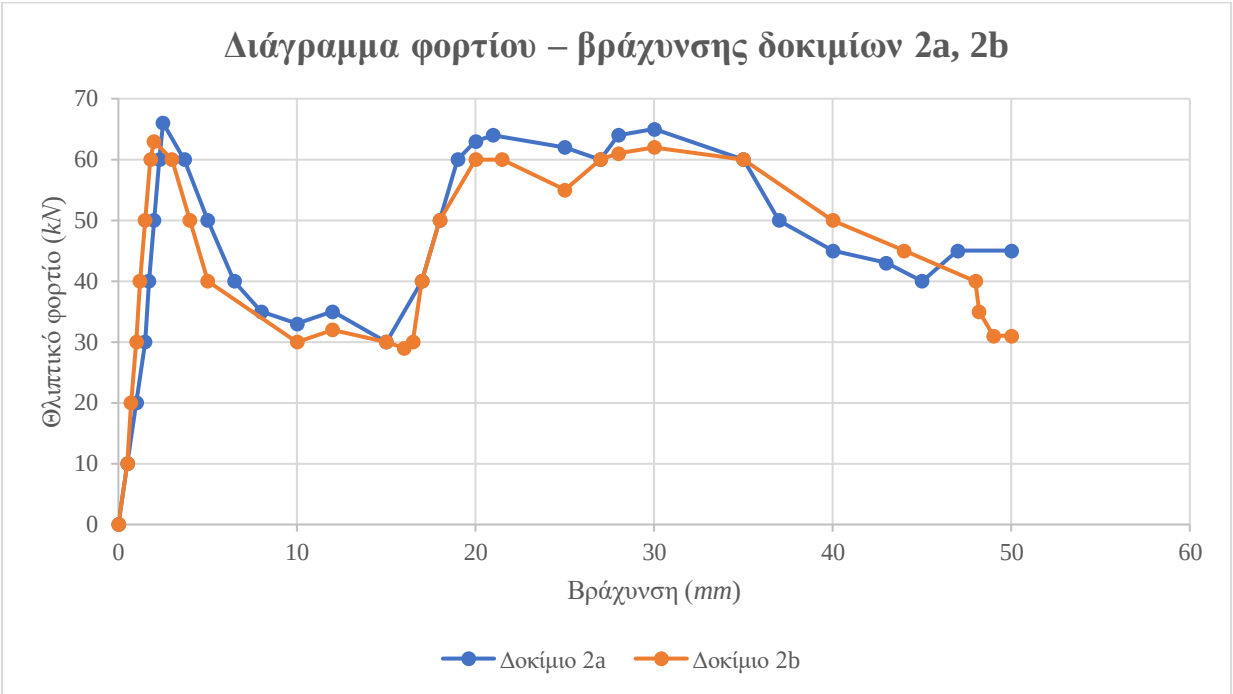
Εικόνα 4.3.8: Δοκίμιο 2b (πρόοψη και κάτοψη)





Εικόνα 4.3.9: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 2b μέχρι την κατάρρευση

Εικόνα 4.3.10: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 2b



Εικόνα 4.3.11: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης δοκιμίων 2a, 2b

Πίνακας 4.3.2: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 2a

Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 2a	
PCF (kN)	*66*
$\boldsymbol{P_{mean}}$ ***(kN)***	*45,6*
$\boldsymbol{E_{abs}}$ ***(J)***	*2282,3*

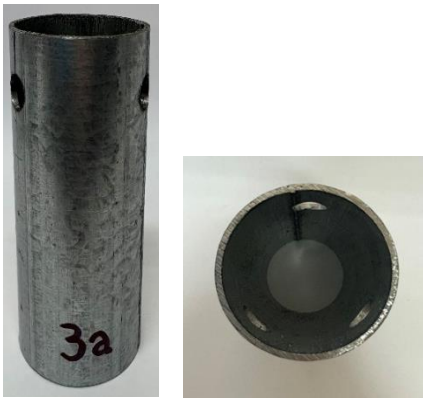
Πίνακας 4.3.3: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 2b

Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 2b	
***PCF* (*kN*)**	*63*
$\boldsymbol{P_{mean}}$ **(*kN*)**	*42,4*
$\boldsymbol{E_{abs}}$ **(*J*)**	*2119,4*

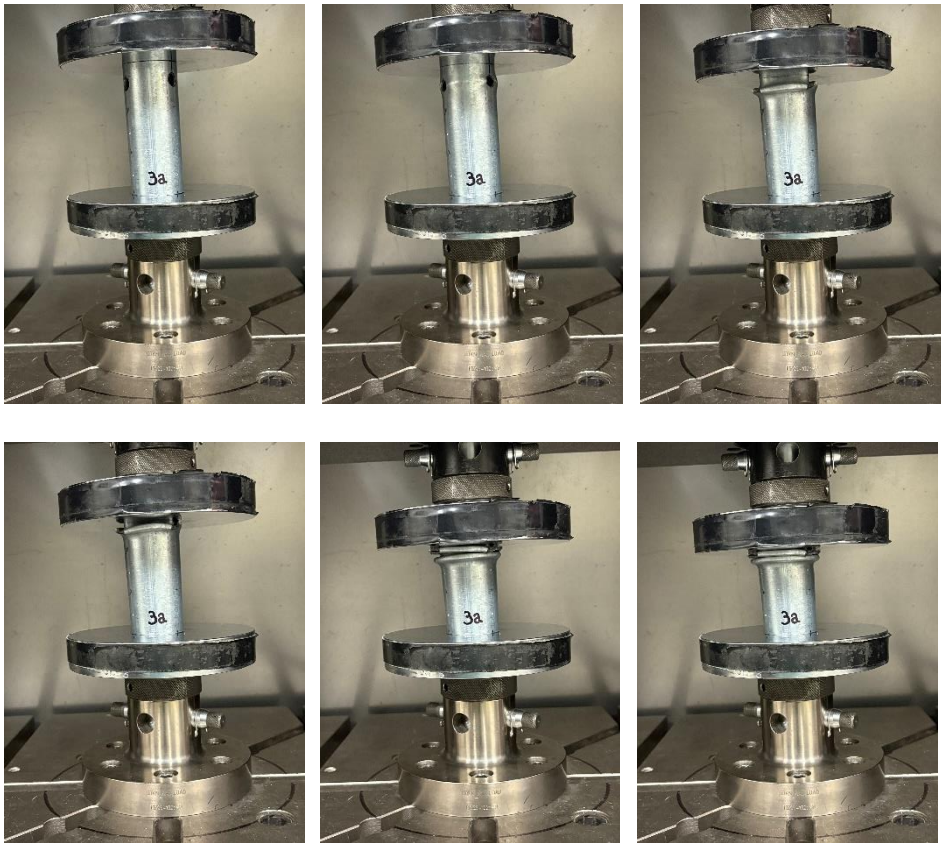
- **Δοκίμια 3**

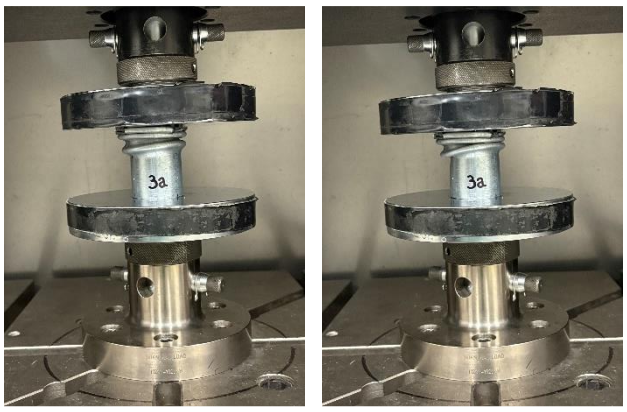
Θα εξεταστούν τα δοκίμια 3a, 3b. Τα δοκίμια δέχτηκαν σταθερό θλιπτικό φορτίο *10 mm/min*. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης και οι διαδοχικές φωτογραφίες που υποδεικνύουν την πορεία της κατάρρευσης του δοκιμίου.

Δοκίμιο 3a



Εικόνα 4.3.12: Δοκίμιο 3a (πρόοψη και κάτοψη)



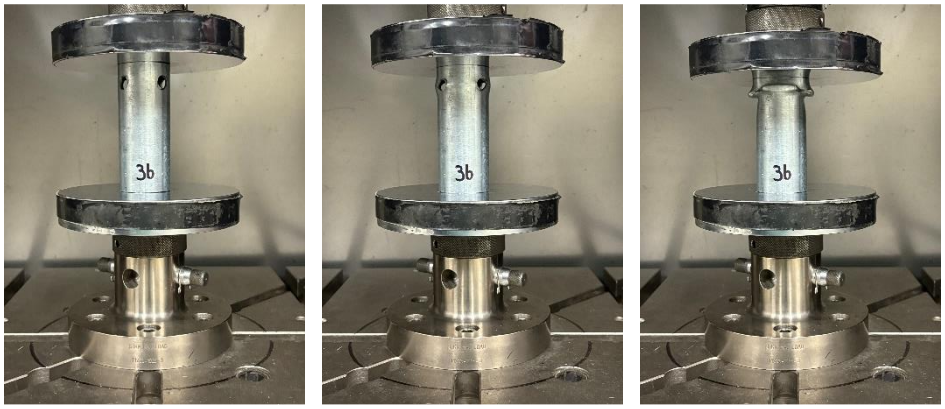


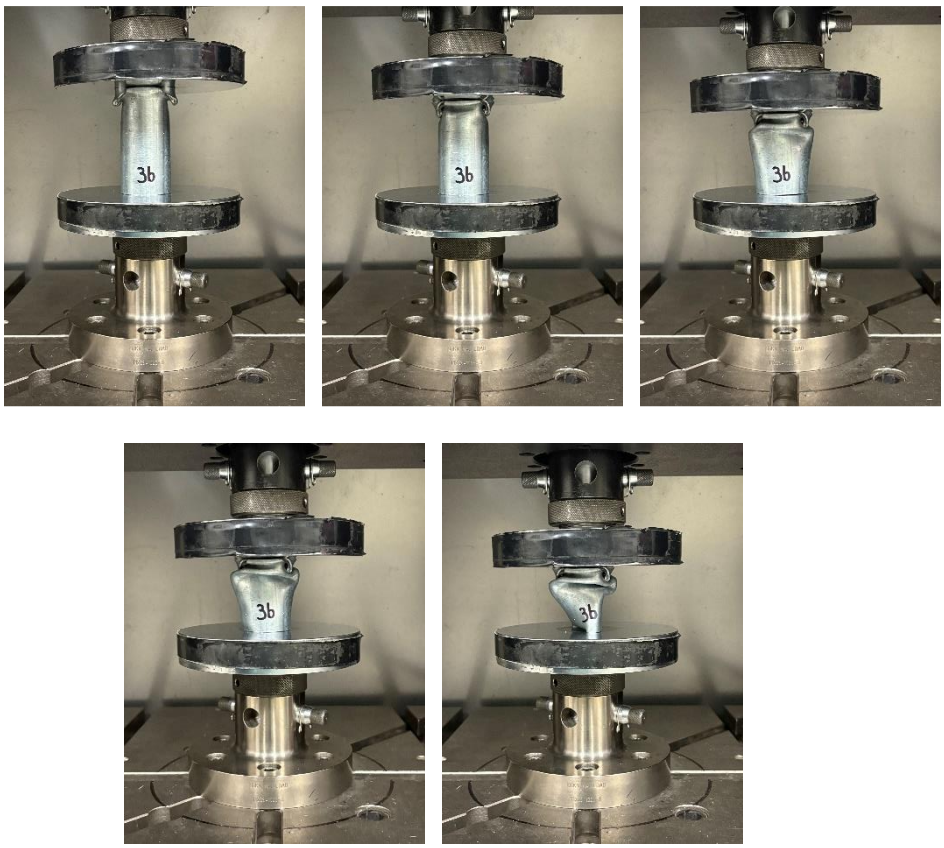
Εικόνα 4.3.13: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 3a μέχρι την κατάρρευση

Εικόνα 4.3.14: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 3a

Δοκίμιο 3b

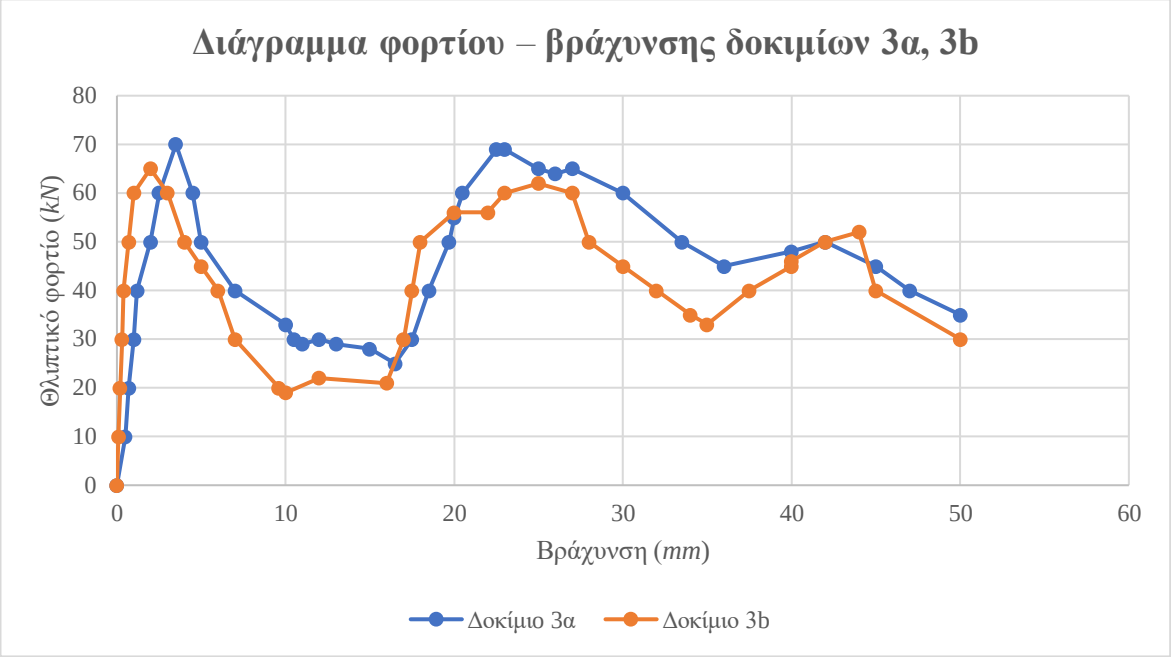
Εικόνα 4.3.15: Δοκίμιο 3b (πρόοψη και κάτοψη)





Εικόνα 4.3.16: Προοδευτική παραμόρφωση δοκιμίου 3b μέχρι την κατάρρευση

Εικόνα 4.3.17: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 3b



Εικόνα 4.3.18: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης 3a, 3b

Πίνακας 4.3.4: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 3α

Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 3α	
***PCF* (*kN*)**	*70*
P_{mean} **(*kN*)**	*43,7*
E_{abs} **(*J*)**	*2186,1*

Πίνακας 4.3.5: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 3b

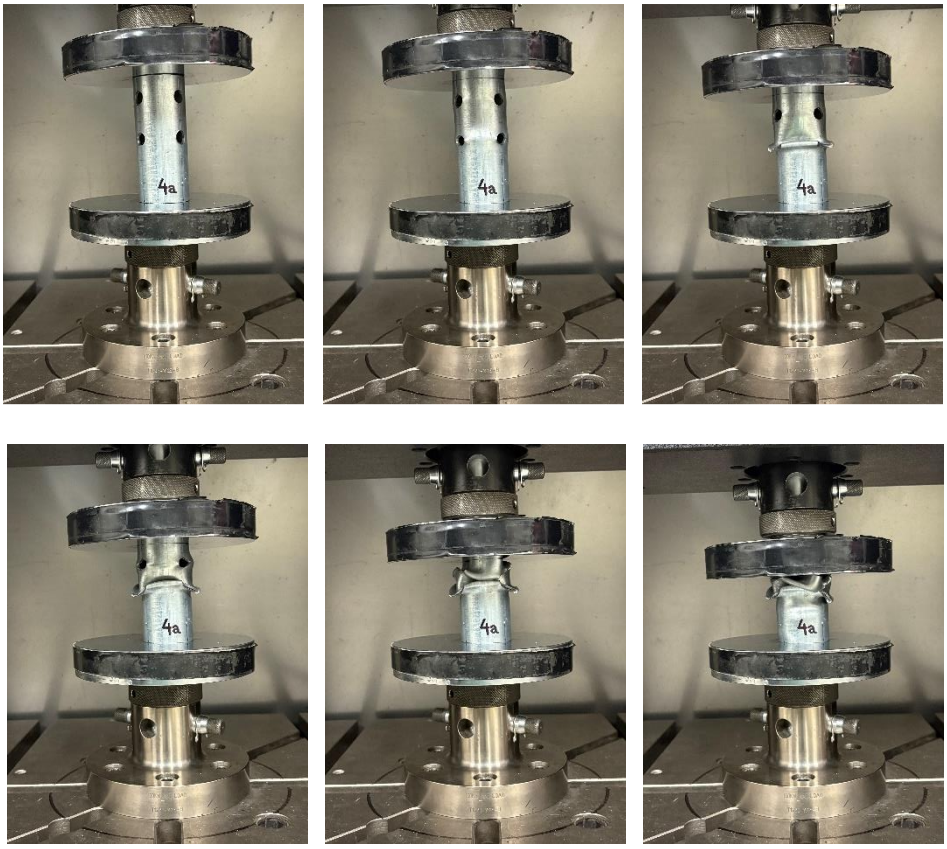
Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 3b	
***PCF* (*kN*)**	*65*
P_{mean} **(*kN*)**	*40,6*
E_{abs} **(*J*)**	*2029,7*

➢ **Δοκίμια 4**

Θα εξεταστούν τα δοκίμια 4a, 4b. Τα δοκίμια δέχτηκαν σταθερό θλιπτικό φορτίο *10 mm/min*. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης και οι διαδοχικές φωτογραφίες που υποδεικνύουν την πορεία της κατάρρευσης του δοκιμίου.

Δοκίμιο 4a

Εικόνα 4.3.19: Δοκίμιο 4a (πρόοψη και κάτοψη)

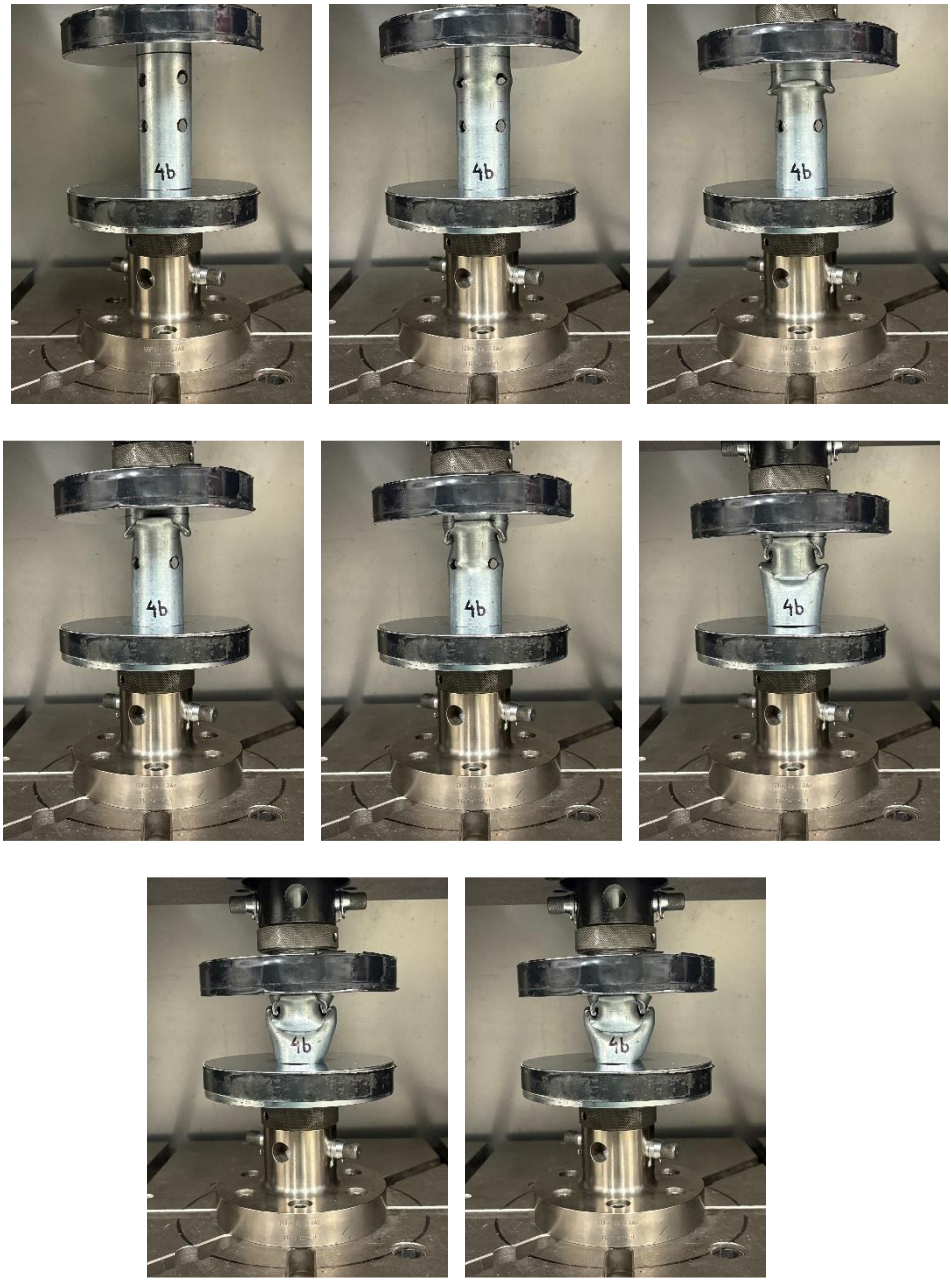


Εικόνα 4.3.20: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 4a μέχρι την κατάρρευση

Εικόνα 4.3.21: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 4a

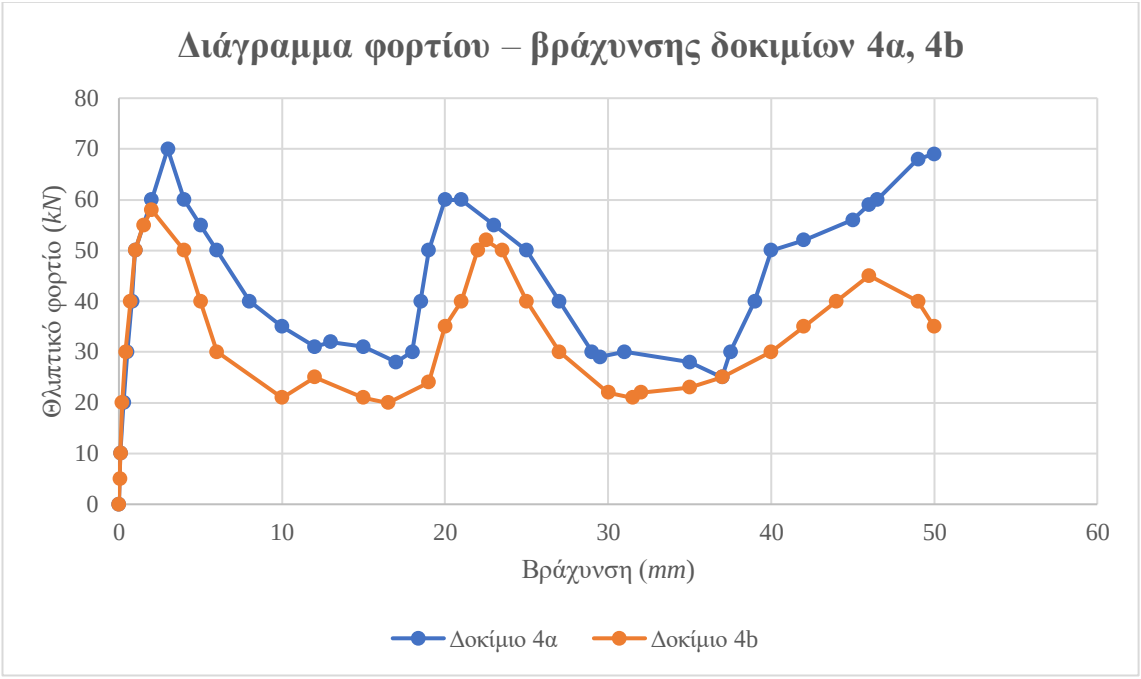
Δοκίμιο 4b

Εικόνα 4.3.22: Δοκίμιο 4b (πρόοψη και κάτοψη)



Εικόνα 4.3.23: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 4b μέχρι την κατάρρευση

Εικόνα 4.3.24 : Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 4b



Εικόνα 4.3.25: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης δοκιμίων 4a,4b

Πίνακας 4.3.6: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 4a

Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 4a	
***PCF* (*kN*)**	*70*
$\boldsymbol{P_{mean}}$ **(*kN*)**	*42,4*
$\boldsymbol{E_{abs}}$ **(*J*)**	*2119,2*

Πίνακας 4.3.7: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 4b

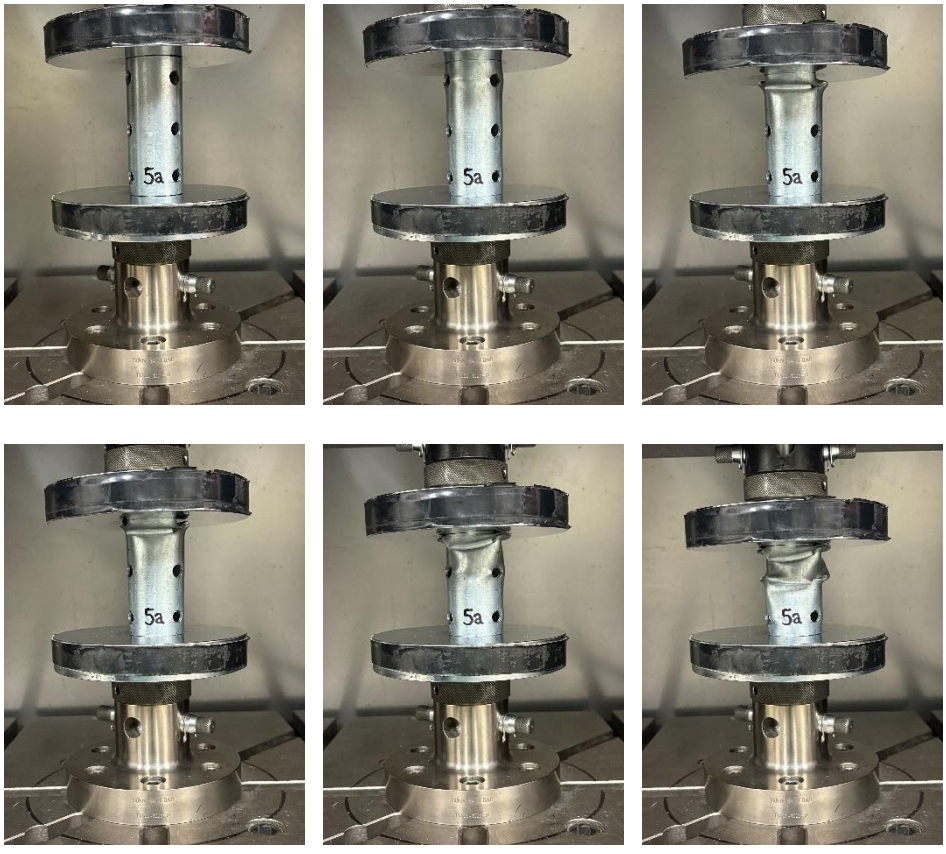
Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 4b	
***PCF* (*kN*)**	*58*
$\boldsymbol{P_{mean}}$ **(*kN*)**	*32,4*
$\boldsymbol{E_{abs}}$ **(*J*)**	*1620*

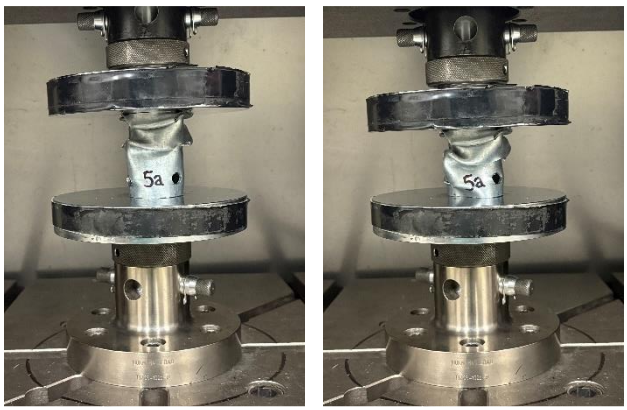
➢ **Δοκίμια 5**

Θα εξεταστούν τα δοκίμια 5a, 5b. Τα δοκίμια δέχτηκαν σταθερό θλιπτικό φορτίο *10 mm/min*. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης και οι διαδοχικές φωτογραφίες που υποδεικνύουν την πορεία της κατάρρευσης του δοκιμίου.

Δοκίμιο 5a

Εικόνα 4.3.26: Δοκίμιο 5a (πρόοψη και κάτοψη)



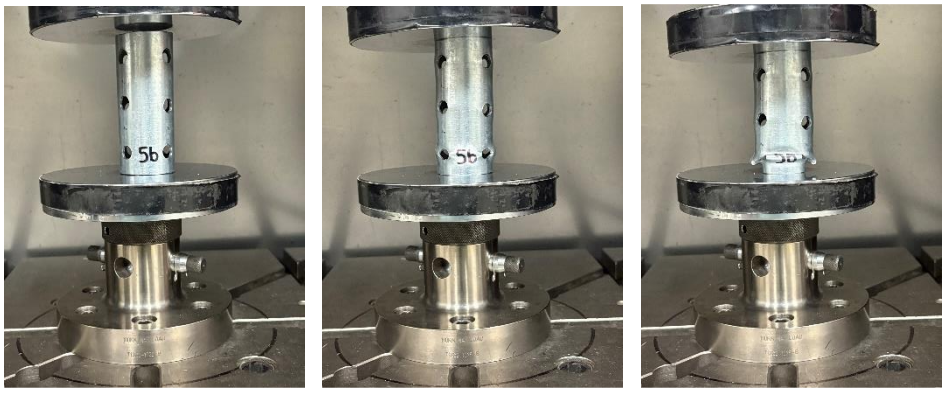


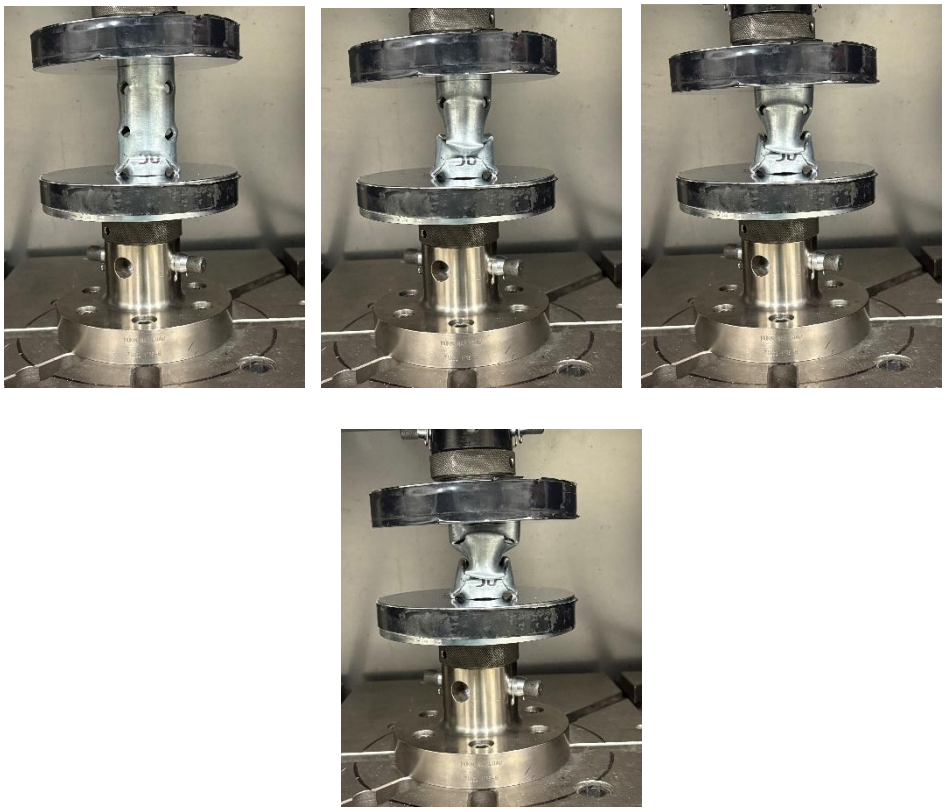
Εικόνα 4.3.27: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 5a μέχρι την κατάρρευση

Εικόνα 4.3.28: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 5a

Δοκίμιο 5b

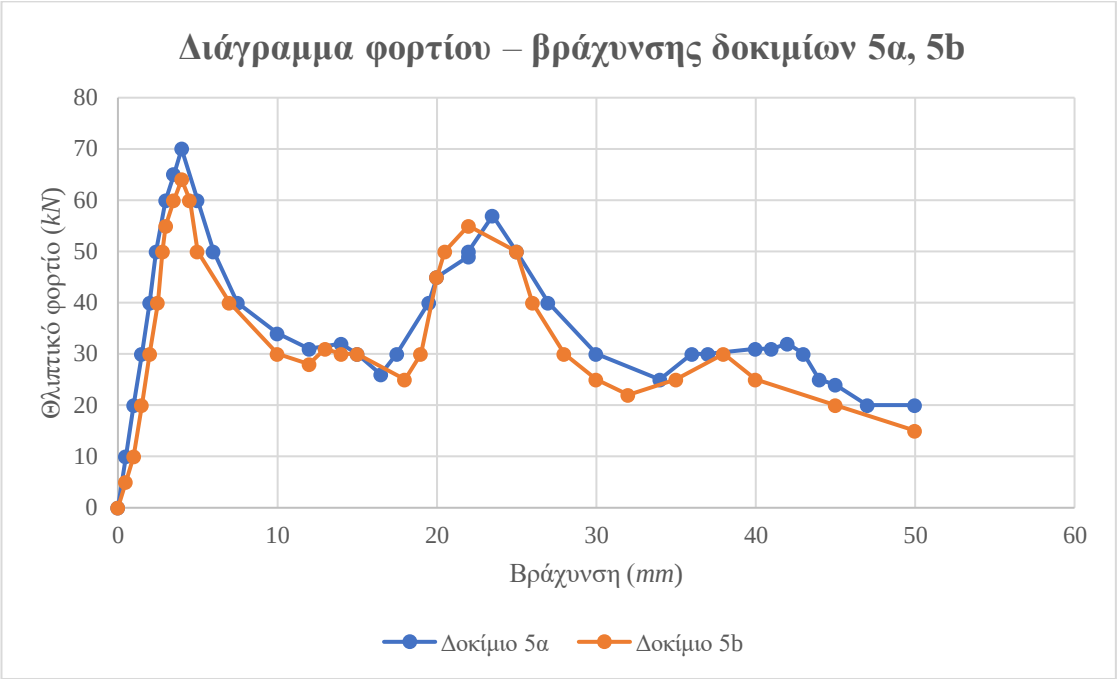
Εικόνα 4.3.29: Δοκίμιο 5b (πρόοψη και κάτοψη)





Εικόνα 4.3.30: Προοδευτική παραμόρφωση του δοκιμίου 5b μέχρι την κατάρρευση

Εικόνα 4.3.31: Τελική μορφή συμπιεσμένου δοκιμίου 5b



Εικόνα 4.3.32: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης δοκιμίων 5a, 5b

Πίνακας 4.3.8: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 5a

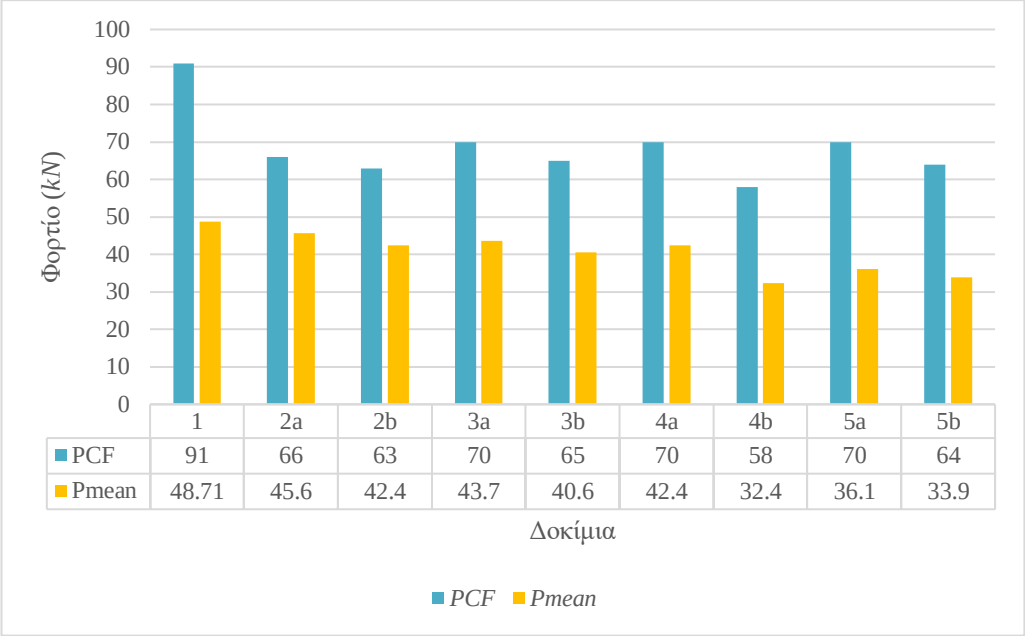
Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 5a	
PCF (kN)	*70*
$\boldsymbol{P_{mean}}$ ***(kN)***	*36,1*
$\boldsymbol{E_{abs}}$ ***(J)***	*1806,8*

Πίνακας 4.3.9: Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 5b

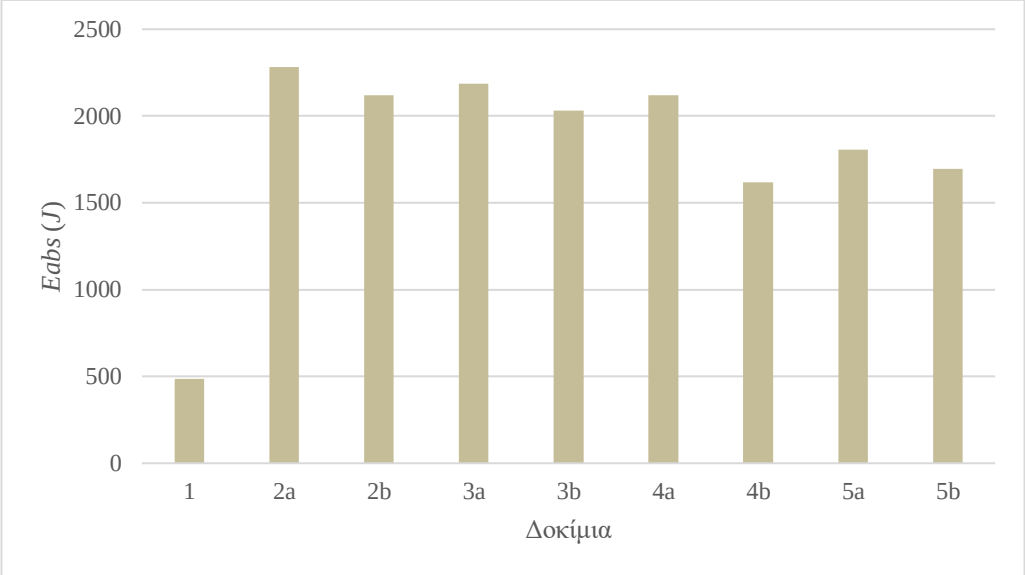
Πειραματικά δεδομένα δοκιμίου 5b	
PCF (kN)	*64*
$\boldsymbol{P_{mean}}$ ***(kN)***	*33,9*
$\boldsymbol{E_{abs}}$ ***(J)***	*1696,9*

5. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τα πειράματα, μπορούν να εξαχθούν κρίσιμα συμπεράσματα για την απόκριση αντοχής σε κρούση των εξεταζόμενων δοκιμίων. Ακολουθούν τα ραβδογράμματα για το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης *PCF*, το μέσο φορτίο P_{mean} και την ενέργεια απορρόφησης E_{abs} για κάθε δοκίμιο σε ενιαία απεικόνιση για την ευκολότερη σύγκρισή τους και σχολιασμό.



Εικόνα 5.1: Διάγραμμα μέγιστου φορτίου και μέσου φορτίου ανά δοκίμιο



Εικόνα 5.2: Διάγραμμα απορρόφησης ενέργειας ανά δοκίμιο

Αρχικά, από την Εικόνα 5.1 παρατηρούμε ότι το P_{mean} έχει την ίδια ακριβώς μεταβολή με το *PCF*. Σύμφωνα με τα ανωτέρω πειραματικά αποτελέσματα αντιλαμβανόμαστε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η E_{abs} ανά δοκίμιο τόσο καλύτερα αποτελέσματα έχουμε στην απορρόφηση ενέργειας της κατασκευής μας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2.

Επιπροσθέτως, επιθυμητή είναι η υψηλή τιμή στο *PCF*, αλλά σε λογικά πλαίσια αλλιώς η κατασκευή δεν θα μπορέσει να απορροφήσει όλη την ενέργεια από τη συμπίεση και επομένως δεν θα παραμορφωθεί πλαστικά που είναι το αναγκαίο αποτέλεσμα, αλλά ελαστικά.

- <u>Για την σύγκριση σχετικά με τον αριθμό των οπών:</u> Από το δοκίμιο 1 (δοκίμιο χωρίς οπές) παρατηρούμε ότι έχει τις μεγαλύτερες τιμές *PCF* και P_{mean} αλλά ταυτόχρονα την ελάχιστη τιμή E_{abs}. Έπειτα, συγκρίνοντας τα υπόλοιπα δοκίμια (2a, 2b, 3a, 3b, 4a, 4b, 5a, 5b) παρατηρούμε ότι τα δοκίμια με λιγότερες οπές (δοκίμια a) έχουν μεγαλύτερη τιμή *PCF* και P_{mean}, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν μεγάλη απορρόφηση ενέργειας συγκριτικά με τα δοκίμια με περισσότερες οπές (δοκίμια b). Επομένως, σύμφωνα με την παραπάνω διαπίστωση συγκρίνοντας ανά ζεύγη a, b τα δοκίμια παρατηρούμε καλύτερα αποτελέσματα του 2a έναντι του 2b και αντίστοιχα για τα υπόλοιπα δοκίμια δηλαδή του 3a έναντι του 3b, του 4a έναντι του 4b και του 5a έναντι του 5b.

- <u>Για την σύγκριση σχετικά με την θέση των οπών:</u> Όταν οι οπές είναι πιο ψηλά καθ' ύψος του δοκιμίου, δηλαδή και πιο κοντά στην περιοχή της φόρτισης και όχι στο μέσο, επηρεάζεται η E_{abs} και το *PCF*. Άρα, αν συγκριθεί το δοκίμιο 2a με το 3a επιλέγουμε το 2a. Ίδια συμπεράσματα παίρνουμε και για τα 2b και 3b που έχουν μεγαλύτερο αριθμό οπών.

- <u>Για την σύγκριση σχετικά με το πλήθος των οπών:</u> Παρατηρούμε ότι το *PCF*, όσες πολλαπλάσιες οπές και αν έχουμε, αναφερόμαστε στην περίπτωση των 3 οπών (3a, 4a, 5a), παραμένει σταθερό όμως η E_{abs} από ένα σημείο και μετά φθίνει αισθητά κάτι που δεν είναι επιθυμητό. Άρα από τα 3a, 4a, 5a επιλέγεται το 3a. Αντίστοιχα, αποτελέσματα λαμβάνουμε από την σύγκριση των 3b, 4b, 5b. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, συγκρίνοντας το 2a με το 3a διαλέγουμε το 2a το οποίο είναι καλύτερο ως προς θέση και την επανάληψη οπών. Αντίστοιχο συμπέρασμα θα εξαχθεί και από την σύγκριση 2b και 3b. Συγκρίνοντας το 2a με 2b την καλύτερη επίδοση έχει το 2a όπως συμπεραίνεται και από τα διαγράμματα.

Συνεπώς, τα αποτελέσματα παρουσίασαν ότι το P_{mean} παραμένει περίπου σταθερό και για τα εννιά δοκίμια. Επίσης, στις περιπτώσεις που το δοκίμιο δεν έχει οπές απορροφά λιγότερη E_{abs} σε σχέση με όταν το δοκίμιο έχει οπές. Ωστόσο, με την σύγκριση ανά ζεύγος των δοκιμίων (a, b), παρατηρήθηκε ότι όταν τα δοκίμια έχουν 3 οπές (δοκίμια a) απορροφούν περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τις 4 οπές (δοκίμια b) για την ίδια διάταξη οπών (διατάξεις 2, 3, 4, 5). Αναλυτικότερα, τα βασικά συμπεράσματα συνοψίζονται στα ακόλουθα

- Η περίπτωση των 3 οπών στο ήμισυ του ύψους του δοκιμίου (2a) παρέχει την καλύτερη επιλογή με ιδιαίτερα αυξημένη E_{abs} έναντι του συμπαγούς δοκιμίου (1) και με χαμηλότερο, αλλά σεβαστό *PCF*

- Οι περισσότερες οπές στην ίδια διάμετρο συγκεκριμένου ύψους (δηλαδή 4 έναντι 3) ή επαναληψημότητα των οπών σε διαφορετικά ύψη του δοκιμίου μειώνουν την E_{abs} περισσότερο απ' όσο ωφελούν σε εύλογη μείωση *PCF* και P_{mean}, λύση που δεν είναι βέλτιστη

- Η μετατόπιση των οπών από το ήμισυ του ύψους του δοκιμίου (2a, 2b) στο ήμισυ του άνω μισού (3a, 3b) αυξάνει ελαφρά το *PCF* χωρίς ουσιαστικό κέρδος στην E_{abs}, συνεπώς δεν συνιστάται

- Τα δοκίμια με 4 οπές ανά διαφορετικό ύψος (2b, 3b, 4b, 5b) υστερούν ενεργειακά, δηλαδή ως προς την E_{abs} έναντι των αντίστοιχων με 3 οπές, επιβεβαιώνοντας ότι η αύξηση των οπών αφαιρεί δυνατότητα απορρόφησης έργου πλαστικής παραμόρφωσης

Βιβλιογραφία

[1] Karantza, K. D. (2020). *Crashworthiness behavior of thin-walled bi-tubes under axial collapse*. [Diploma thesis, National Technical University of Athens]. Dspace NTUA. https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/52022

[2] Farley, G. L., & Jones, R. M. (1989). *Energy-absorption capability of composite tubes and beams (No. 19890020120)*. NASA Technical Publication, https://ntrs.nasa.gov/citations/19890020120

[3] Mamalis, A. G., Johnson, W., & Viegelahn, G. L. (1984). The crumpling of steel thin-walled tubes and frusta under axial compression at elevated strain-rates: Some experimental results. *International Journal of Mechanical Sciences*, *26*(11–12), 537–547. https://doi.org/10.1016/0020-7403(84)90008-0

[4] Alghamdi, A. A. A. (2001). Collapsible impact energy absorbers: An overview. *Thin-Walled Structures*, *39* (2), 189–213. https://doi.org/10.1016/S0263-8231(00)00048-3

[5] Abramowicz, W., & Jones, N. (1984). Dynamic axial crushing of circular tubes. *International Journal of Impact Engineering*, *2*(3), 263–281. https://doi.org/10.1016/0734-743X(84)90010-1

[6] El-Hage, H., Mallick, P. K., & Zamani, N. (2005). A numerical study on the quasi-static axial crush characteristics of square aluminum tubes with chamfering and other triggering mechanisms. *International Journal of Crashworthiness*, *10*(2), 183–196. https://doi.org/10.1533/ijcr.2005.0337

[7] Baroutaji, A., Sajjia, M., & Olabi, A.-G. (2017). On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures*, *118*, 137–163. https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.05.018

[8] Liu, Y. (2008). Crashworthiness design of multi-corner thin-walled columns. *Thin-Walled Structures*, *46*(12), 1329–1337. https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.04.003

[9] Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B., Chronopoulos, D. G., & Kostazos, P. K. (2009). On the crashworthiness of composite rectangular thin-walled tubes internally reinforced with aluminium or polymeric foams: Experimental and numerical simulation. *Composite Structures*, *89*(3), 416–423. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.09.008

[10] Lee, S., Hahn, C., Rhee, M., & Oh, J.-E. (1999). Effect of triggering on the energy absorption capacity of axially compressed aluminum tubes. *Materials & Design*, *20*(1), 31–40. https://doi.org/10.1016/S0261-3069(98)00043-0

[11] Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Demosthenous, G. A., & Ioannidis, M. B. (1998). *Crashworthiness of composite thin-walled structures* (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315140452

[12] Ren, Y., Jiang, H., & Liu, Z. (2019). Evaluation of double- and triple-coupled triggering mechanisms to improve crashworthiness of composite tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, *157–158*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.04.024

[13] Airoldi, A., & Janszen, G. (2005). A design solution for a crashworthy landing gear with a new triggering mechanism for the plastic collapse of metallic tubes. *Aerospace Science and Technology*, *9*(5), 445–455. https://doi.org/10.1016/j.ast.2005.04.001

[14] Daneshi, G. H., & Hosseinipour, S. J. (2002). Grooves effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes under axial compression. Materials & Design, *23*(7), 611–617. https://doi.org/10.1016/S0261-3069(02)00052-3