



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Πειραματική Διερεύνηση Συμπεριφοράς Δοκιμίων Αλουμινίου
Διελατής Κοίλης Διατομής σε Αξονική Συμπίεση»

Συγγραφή: *Αλέξανδρος Ρέκκας*

Επιβλέπων καθηγητής: *Μανωλάκος Δημήτριος*

ΑΘΗΝΑ (Ιούλιος 2021)

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	5
1.1 Εισαγωγή – Ατυχήματα οχημάτων	5
1.2 Το κοινωνικό και οικονομικό κόστος των τραυματισμών στην οδική κυκλοφορία	7
1.2.1 Μεταβολή θεμελιωδών αντιλήψεων	8
1.2.2 Πρόληψη και έλεγχος τροχαίων ατυχημάτων – Η νέα αντίληψη	9
1.3 Σκοπός της διπλωματικής	11
1.4 Δομή της διπλωματικής	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	13
2.1 Απορρόφηση ενέργειας	13
2.1.1 Θεωρία κρούσης	17
2.1.2 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων [Finite Element Analysis]	18
2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση Crashworthiness	18
2.2.1 Δομική γεωμετρία	19
2.2.2 Υλικό κατασκευής	24
2.2.3 Φόρτιση	24
2.3 Βελτίωση ιδιοτήτων Crashworthiness	25
2.3.1 Δομική ενίσχυση	25
2.3.2 Βελτίωση υλικού	27
2.4 Δείκτες crashworthiness	28
2.5 Πειραματικές τεχνικές	29
2.5.1 Γενικά	29
2.5.2 Μηχανή δοκιμής Universal	29
2.5.3 Σφύρα ελεύθερης πτώσης, ολισθαίνουσα σφύρα και εκκρεμές (Drop hammer, sled and pendulum)	31
2.5.4 Split Hopkinson pressure bar	34
2.5.5 Όπλα αερίου (Gas guns) και άλλες τεχνικές	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	37
3.1 Διάταξη πειραματικών δοκιμών	37
3.2 Εξεταζόμενα Δοκίμια	38
3.3 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών	40
3.3.1 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών δοκιμών A1-A2-A4	40
3.3.2 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών δοκιμών A3-A5-A6	44

3.3.3 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών δοκιμίου B2-B3-B5	47
3.3.4 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών δοκιμίου B1-B4-B6	51
3.4 Αξιολόγηση μηχανικής απόκρισης δοκιμίων	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	60
4.1 Σύνοψη	60
4.2 Συμπεράσματα	61
4.3 Προτάσεις προς μελλοντική διερεύνηση	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	63

Περίληψη

Αντικείμενο της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της συμπεριφοράς δοκιμίων αλουμινίου υπό αξονικά θλιπτικά φορτία τα οποία προκαλούν τη συμπίεσή τους. Τα δοκίμια αλουμινίου που εξετάστηκαν ήταν κοίλης διατομής με ορθογωνική κατά κύριο λόγο γεωμετρία η οποία μάλιστα συμπεριελάμβανε κατάλληλες εσοχές και προεξοχές οι οποίες επιτελούν σκοπούς οδήγησης φορέων. Οι διατομές προέκυψαν έπειτα από διέλαση, από την οποία κατόπιν οι διελατές ράβδοι κόπηκαν κατά μήκος αποδίδοντας τα εξεταζόμενα δοκίμια διαφορετικού αρχικού μήκους για το καθένα. Οι εξεταζόμενες διατομές διακρίνονται σε δυο διαφορετικές μορφές σύμφωνα με την γεωμετρία τους, έτσι ώστε να διερευνηθεί η επίδραση τόσο του αρχικού μήκους του δοκιμίου όσο και της γεωμετρίας της διατομής του στην συμπεριφορά του έναντι αξονικής συμπίεσης.

Η διερεύνηση των δοκιμίων προς την αξιολόγησή τους έναντι αξονικής κατάρρευσης πραγματοποιήθηκε διεξάγοντας πειραματικές δοκιμές αξονικής συμπίεσης σε υδραυλική πρέσσα με σταθερή ταχύτητα καθόδου κινητής κεφαλής. Για την εξέταση καθενός δοκιμίου αλουμινίου (διατομή και αρχικό μήκος), πραγματοποιήθηκαν δυο πειραματικές δοκιμές συμπίεσης των δοκιμίων έως το μισό του αρχικού τους μήκους, με σκοπό να εξαλειφθούν πιθανά σφάλματα κατά την πειραματική διαδικασία, όπως σφάλματα διεξαγωγής των πειραμάτων, σφάλματα μετρήσεων, επίδραση ατελειών στην δομή του υλικού κλπ. Σε κάθε δοκιμή, λήφθηκαν μετρήσεις του φορτίου συμπίεσης και της αξονικής μετατόπισης της κινητής κεφαλής της πρέσσας ώστε να χαραχθούν οι αντίστοιχες καμπύλες φορτίου – μετατόπισης των εξεταζόμενων δοκιμίων με σκοπό να αξιολογηθεί η μηχανική τους συμπεριφορά έναντι αξονικής κατάρρευσης υπολογίζοντας βασικά μεγέθη απόκρισης όπως το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης, το μέσο φορτίο κατάρρευσης και το απαιτούμενο έργο πλαστικοποίησης με βάση τα πειραματικά δεδομένα που κατεγράφησαν. Επιπλέον, καταγράφηκαν διάφορα στιγμιότυπα της κατάρρευσης σε κατάλληλες χρονικές στιγμές ώστε να προσδιοριστεί ο μηχανισμός κατάρρευσης των δοκιμίων κάθε εξεταζόμενης διάταξης.

Από την επεξεργασία και την αξιολόγηση των πειραματικών δεδομένων, διαπιστώθηκε πως τα δοκίμια των κοίλων διελατών διατομών τύπου Β, τα οποία διέθεταν εσωτερικές διαμορφώσεις ενίσχυσης των γωνιών της ορθογωνικής κατά βάση διατομής, παρουσίασαν υψηλότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά τη συμπίεσή τους και υψηλότερα φορτία κατάρρευσης. Πρόσθετα, τα δοκίμια διατομών τύπου Α μικρότερου αρχικού μήκους εμφάνισαν υψηλότερη φορτία κατάρρευσης από τα αντίστοιχα μεγαλύτερου μήκους, ενώ τα δοκίμια διατομών τύπου Β παρουσίασαν υψηλότερη ομοιομορφία φόρτισης κατά την κατάρρευσή τους συγκρινόμενα με τα δοκίμια της ομάδας Α. Τέλος, σε αμφότερα τα δοκίμια διατομών Α και Β, το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης εμφάνισε μικρότερες αποκλίσεις μεταξύ των δυο πειραματικών δοκιμών που διεξήχθησαν για κάθε δοκίμιο, σε αντίθεση με το μέσο φορτίο κατάρρευσης, με αποκλίσεις έως 5% κατά πλειοψηφία, εν αντιθέσει με το μέσο φορτίο που απέδωσε αποκλίσεις μεγαλύτερες του 5% σε ορισμένες περιπτώσεις δοκιμίων.

Abstract

This diploma thesis aims to investigate the crashworthiness behavior of aluminium tubular extrusions under quasi static axial compression. Long aluminium bars of two different cross sections (type A and type B) were cut into specimens of different axial length to evaluate their impact on crashworthiness performance and deformation mechanisms.

The tests were on a conventional 60-tone hydraulic press with a prescribed crosshead speed of 10 mm/min. Each specimen layout was tested twice to minimize errors associated with the experimental procedure, such as manufacturing defects and measurement errors. Snapshots of the crushing process were taken for each specimen, and the experimental data were collected and further processed to obtain the force-displacement curves and crashworthiness parameters.

It was concluded that the specimens of type B cross section outperformed those of type A cross section in terms of energy absorption. Further, the specimens of A-type cross section demonstrated a correlation of axial length and energy absorption – the shorter the specimen the greater the energy absorption. The specimens of type B cross section, on the other hand, exhibited higher load uniformity levels than their counterparts of type A cross section. The values of the maximum collapse force between the two tests for each specimen configuration were consistent with each other, however, those of the energy absorption and mean crushing force demonstrated discrepancies of over 5%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αιτίες που έχουν επιβάλει τον σχεδιασμό έναντι κρουστικής καταπόνησης (crashworthiness) ως ιδιαίτερης σημασίας και αναπόσπαστη προδιαγραφή των σημερινών οχημάτων και γενικότερων μεταφορικών και δομικών κατασκευών. Ακόμη, παραθέτονται διάφορα στατιστικά στοιχεία και δεδομένα, τα οποία έχουν οδηγήσει τη σύγχρονη τάση σχεδιασμού των κατασκευών προς την κατεύθυνση της αντοχής έναντι κρουστικής καταπόνησης. Τέλος, υπογραμμίζεται ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας και παραθέτεται μια συνοπτική περιγραφή της διάρθρωσής της.

1.1 Εισαγωγή – Ατυχήματα οχημάτων

Την 11^η Σεπτεμβρίου του 2001, οι δίδυμοι πύργοι του Παγκόσμιου Κέντρου Εμπορίου καταστράφηκαν και η ιστορία κατέγραψε ότι πάνω από 3.000 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους. Πολλοί άνθρωποι όμως δεν γνωρίζουν ότι περίπου ο ίδιος αριθμός ανθρώπων πεθαίνουν καθημερινά παγκοσμίως στους δρόμους. Αυτός ο αριθμός δεν περιλαμβάνει τουλάχιστον 30.000 άλλους τραυματίες ή άτομα που αποκτούν κάποιου είδους αναπηρία καθημερινά. Έτσι, συγκεντρωτικά χάνονται πάνω από 1 εκατομμύριο ανθρώπινες ζωές και μεταξύ 20-50 εκατομμύρια τραυματίζονται σε τροχαία ατυχήματα κάθε χρόνο παγκοσμίως. Είναι σαφές ότι οι τραυματισμοί στην οδική κυκλοφορία αποτελούν μείζον ζήτημα της δημόσιας υγείας παγκοσμίως [1].

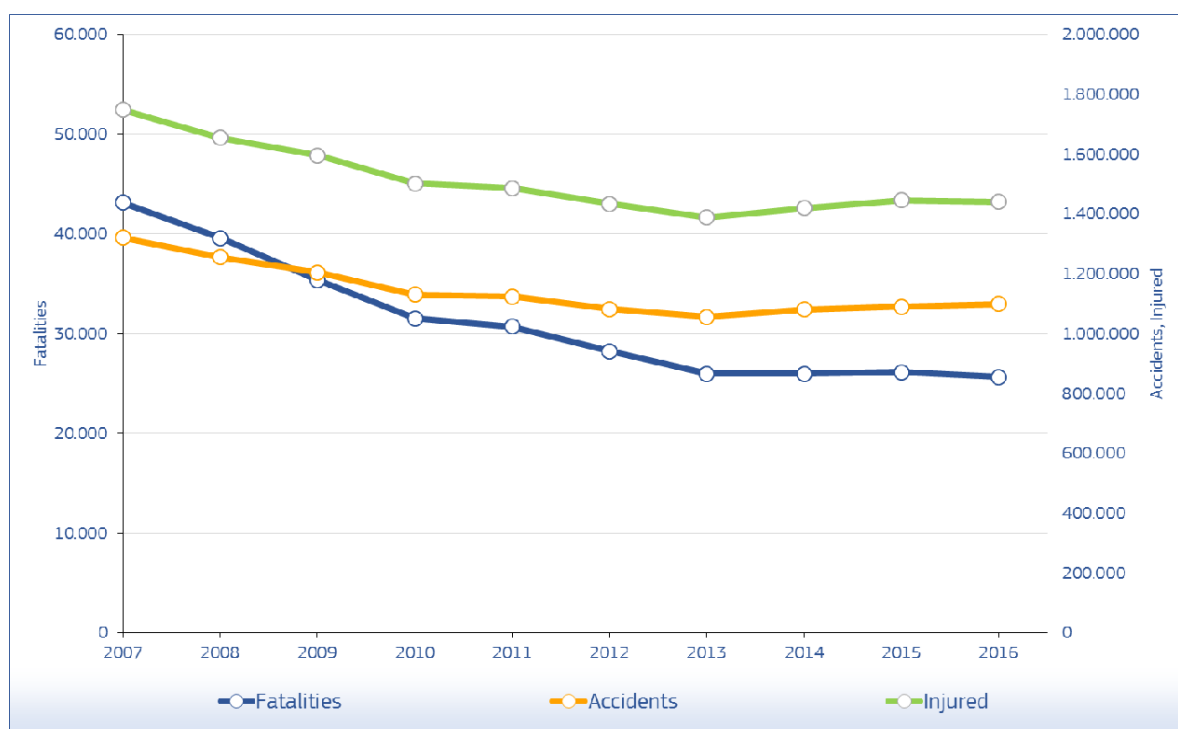
Τα τροχαία ατυχήματα είναι η κύρια αιτία θανάτου για τους νέους και η όγδοη κύρια αιτία όλων των θανάτων παγκοσμίως με 1,24 εκατομμύρια θανάτους κάθε χρόνο [2, 3]. Περίπου το 85% των θανάτων συμβαίνουν στις αναπτυσσόμενες χώρες. Οι άνδρες μεταξύ 15 και 44 ετών, είναι η ομάδα των ατόμων με τα περισσότερα τροχαία ατυχήματα. Οι δαπάνες των τροχαίων ατυχημάτων των χωρών ανέρχονται στο 1 έως 2% του συνολικού ακαθάριστου εθνικού προϊόντος (ΑΕΠ) [2]. Παρά το γεγονός ότι μόνο το 52% των οχημάτων στον κόσμο καταγράφεται στις αναπτυσσόμενες χώρες, το 80% των θανάτων συμβαίνει σε αυτές τις χώρες σύμφωνα με αντίστοιχη έρευνα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας [4].

Πίνακας 1.1 Φορτίο ασθενειών για τις πρώτες 10 κύριες αιτίες – Σύγκριση 1998 με 2020 [5]

S.No	1998 Νόσος ή τραυματισμός	2020 Νόσος ή τραυματισμός
1	Χαμηλότερες αναπνευστικές μολύνσεις	Ισχαιμική καρδιακή νόσος
2	HIV/AIDS	Μονοπολική μείζονα κατάθλιψη
3	Περιγεννητικές καταστάσεις	Τραυματισμοί στην οδική κυκλοφορία
4	Διαρροϊκές παθήσεις	Εγκεφαλοαγγειακή νόσος
5	Μονοπολική μείζονα κατάθλιψη	Χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια
6	Ισχαιμική καρδιακή νόσος	Χαμηλότερες αναπνευστικές μολύνσεις
7	Εγκεφαλο-αγγειακή νόσος	Φυματίωση
8	Ελονοσία	Πόλεμος
9	Τραυματισμοί στην οδική κυκλοφορία	Διαρροϊκές παθήσεις
10	Χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια	HIV/AIDS

Πίνακας 1.2 Σύγκριση των διεθνών ποσοστών θνησιμότητας [3]

Χώρα	Ποσοστό μηχανοκίνησης (Αριθμός οχημάτων ανά 1.000 άτομα)	Ποσοστό θνησιμότητας (αριθμός θανάτων ανά 10.000 οχήματα)	Κίνδυνος θανάτου (αριθμός θανάτων ανά 100.000 άτομα)
Ινδία (2013)	130	8.6	11.2
Γερμανία (2012)	657	0.67	4.4
Ιαπωνία (2012)	651	0.63	4.1
Νέα Ζηλανδία (2012)	733	0.91	6.9
Σουηδία (2012)	599	0.50	3.0
Ηνωμένο Βασίλειο (2012)	599	0.51	2.8
Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (2012)	846	1.26	10.7



Εικόνα 1.1 Ετήσιος αριθμός θανάτων, ατυχημάτων και τραυματιών στην ΕΕ, 2007-2016

Η παγκόσμια έκθεση για την πρόληψη των τραυματισμών από την οδική κυκλοφορία είναι η πρώτη σημαντική έκθεση που εκδίδεται από κοινού από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας και την Παγκόσμια Τράπεζα, σχετικά με αυτό το θέμα. Υπογραμμίζει την ανησυχία τους ότι τα μη ασφαλή συστήματα οδικής κυκλοφορίας βλάπτουν σοβαρά την παγκόσμια δημόσια υγεία και ανάπτυξη. Υποστηρίζει ότι το επίπεδο της ζημίας στην οδική κυκλοφορία είναι απαράδεκτο και ότι είναι σε μεγάλο βαθμό αποφευκτό. Η έκθεση έχει τρεις στόχους.

- Να δημιουργηθούν μεγαλύτερα επίπεδα ευαισθητοποίησης, δέσμευσης και ενημερωμένης λήψης αποφάσεων σε όλα τα επίπεδα - κυβέρνηση, βιομηχανία, διεθνείς οργανισμοί και μη κυβερνητικοί οργανισμοί - έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν στρατηγικές επιστημονικά αποδεδειγμένες αποτελεσματικές στην πρόληψη των τραυματισμών. Οποιαδήποτε αποτελεσματική απάντηση στην παγκόσμια πρόκληση της μείωσης των ατυχημάτων οδικής κυκλοφορίας θα απαιτήσει όλα αυτά τα επίπεδα να κινητοποιήσουν μεγάλη προσπάθεια.
- Να συμβάλει σε μια αλλαγή στη σκέψη σχετικά με τη φύση του προβλήματος των τραυματισμών από την οδική κυκλοφορία και τι συνιστά επιτυχημένη πρόληψη. Η αντίληψη ότι ο τραυματισμός στην οδική κυκλοφορία είναι το τίμημα που πρέπει να καταβληθεί για την επίτευξη κινητικότητας και οικονομικής ανάπτυξης πρέπει να αντικατασταθεί από μια πιο ολιστική ιδέα που δίνει έμφαση στην πρόληψη μέσω δράσης σε όλα τα επίπεδα του συστήματος οδικής κυκλοφορίας.
- Να βοηθήσει στην ενίσχυση των θεσμών και στη δημιουργία αποτελεσματικών συνεργασιών για την παροχή ασφαλέστερων συστημάτων οδικής κυκλοφορίας. Τέτοιες εταιρικές σχέσεις πρέπει να υπάρχουν οριζόντια μεταξύ διαφορετικών κυβερνητικών τομέων και κάθετα μεταξύ διαφορετικών επιπέδων διακυβέρνησης, καθώς και μεταξύ κυβερνήσεων και μη κυβερνητικών οργανισμών.

Σε κυβερνητικό επίπεδο, αυτό σημαίνει στενή συνεργασία μεταξύ τομέων, συμπεριλαμβανομένης της δημόσιας υγείας, των μεταφορών, των οικονομικών, της επιβολής του νόμου και άλλων σχετικών τομέων. Αυτή η σύνοψη της παγκόσμιας έκθεσης για την πρόληψη των τραυματισμών από την οδική κυκλοφορία προορίζεται πρωτίστως για άτομα που είναι υπεύθυνα για τις πολιτικές και τα προγράμματα οδικής ασφάλειας σε εθνικό επίπεδο και για εκείνους που βρίσκονται πιο κοντά σε προβλήματα και ανάγκες οδικής ασφάλειας σε τοπικό επίπεδο.

1.2 Το κοινωνικό και οικονομικό κόστος των τραυματισμών στην οδική κυκλοφορία

Όλοι οι άνθρωποι που έχασαν τη ζωή τους, τραυματίστηκαν ή μείναν ανάπηροι από τροχαίο δυστύχημα έχουν ένα δίκτυο άλλων, συμπεριλαμβανομένων των οικογενειών και των φίλων τους, που έχουν πληγεί σοβαρά. Σε παγκόσμιο επίπεδο, εκατομμύρια άνθρωποι αντιμετωπίζουν τον θάνατο ή την αναπηρία των μελών της οικογένειάς τους από τραυματισμό εξαιτίας τροχαίων ατυχημάτων. Θα ήταν αδύνατο να αποδώσουμε μια αξία σε κάθε περίπτωση ανθρώπινης θυσίας και ταλαιπωρίας, να προσθέσουμε τις αξίες και να παράγουμε μια μορφή που αποτυπώνει το παγκόσμιο κοινωνικό κόστος των τροχαίων ατυχημάτων και τραυματισμών. Το οικονομικό κόστος των τροχαίων ατυχημάτων και τραυματισμών εκτιμάται περίπου στο 1% του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος (ΑΕΠ) σε χώρες με χαμηλό εισόδημα,

1,5% σε χώρες μεσαίου εισοδήματος και 2% σε χώρες με υψηλό εισόδημα. Το παγκόσμιο κόστος εκτιμάται σε 518 δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως. Οι χώρες χαμηλού εισοδήματος και μεσαίου εισοδήματος αντιπροσωπεύουν 65 δισεκατομμύρια δολάρια, περισσότερα από αυτά που λαμβάνουν από την αναπτυξιακή βοήθεια [7].

Οι τραυματισμοί από την οδική κυκλοφορία επιβαρύνουν σημαντικά, όχι μόνο τις παγκόσμιες και εθνικές οικονομίες, αλλά και την οικονομία των νοικοκυριών. Πολλές οικογένειες οδηγούνται στη φτώχεια από την απώλεια εσόδων από τα μέλη τους που ήταν εργαζόμενοι, και το πρόσθετο βάρος της φροντίδας των μελών με αναπηρία λόγω τραυματισμών από κάποιο τροχαίο ατύχημα.

Αντιθέτως, επενδύονται πολύ λίγα χρήματα για την πρόληψη τροχαίων ατυχημάτων και τραυματισμών. Ο Πίνακας 1.2 συγκρίνει τα κονδύλια που δαπανήθηκαν για έρευνα και ανάπτυξη επικεντρωμένα σε διάφορα θέματα υγείας, συμπεριλαμβανομένης της οδικής ασφάλειας. Συγκριτικά λίγα χρήματα δαπανώνται για το σκοπό αυτό, παρόλο που πολλές παρεμβάσεις που θα μπορούσαν να αποτρέψουν συντριβές και τραυματισμούς είναι γνωστές, καλά δοκιμασμένες, οικονομικά αποδοτικές και αποδεκτές από το κοινό.

Πίνακας 1.3 Εκτιμώμενη παγκόσμια χρηματοδότηση έρευνας και ανάπτυξης για επιλεγμένα θέματα

Ασθένεια ή τραυματισμός	Εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ
HIV/AIDS	919–985
Ελονοσία	60
Διαρροϊκές παθήσεις	32
Τροχαία ατυχήματα	24–33
Φυματίωση	19–33

1.2.1 Μεταβολή θεμελιωδών αντιλήψεων

Από την τελευταία μεγάλη παγκόσμια έκθεση του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας για την οδική ασφάλεια που εκδόθηκε πριν από 40 χρόνια [8], υπήρξε μια σημαντική αλλαγή στην αντίληψη, την κατανόηση και την πρακτική της πρόληψης των τραυματισμών από τους επαγγελματίες της ασφάλειας της κυκλοφορίας σε όλο τον κόσμο.

Τα ατυχήματα παλαιότερα θεωρούνταν συμβάντα που συμβαίνουν ως αναπόφευκτο αποτέλεσμα των οδικών μεταφορών. Ο όρος «ατύχημα», ειδικότερα, μπορεί να δώσει την εντύπωση του αναπόφευκτου και του απρόβλεπτου - ένα γεγονός που δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί. Αυτή δεν είναι η περίπτωση. Τα τροχαία ατυχήματα είναι συμβάντα που επιδέχονται ορθολογική ανάλυση και διορθωτική δράση.

Στη δεκαετία του 1960 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970, πολλές χώρες άρχισαν να επιτυγχάνουν μεγάλες μειώσεις των θυμάτων μέσω προσεγγίσεων με γνώμονα τα αποτελέσματα και της επιστήμης.

1.2.2 Πρόληψη και έλεγχος τροχαίων ατυχημάτων – Η νέα αντίληψη

- Ο τραυματισμός από τροχαίο ατύχημα είναι σε μεγάλο βαθμό αποτρέψιμος και προβλέψιμος. Είναι ένα ανθρωπογενές πρόβλημα που επιδέχεται ορθολογική ανάλυση και αντίμετρα
- Η οδική ασφάλεια είναι ένα ζήτημα που αφορά πολλούς τομείς και ένα ζήτημα δημόσιας υγείας - όλοι οι τομείς, συμπεριλαμβανομένης της υγείας, πρέπει να συμμετέχουν πλήρως στην ευθύνη, τη δραστηριότητα και την υποστήριξη για την πρόληψη τραυματισμών από τροχαία ατυχήματα
- Τα κοινά λάθη οδήγησης και η κοινή συμπεριφορά των πεζών δεν πρέπει να οδηγούν σε θάνατο και σοβαρό τραυματισμό - το σύστημα κυκλοφορίας θα πρέπει να βοηθά τους χρήστες να αντιμετωπίζουν όλο και πιο απαιτητικές συνθήκες.
- Η ευπάθεια του ανθρώπινου σώματος πρέπει να είναι μια περιοριστική παράμετρος σχεδιασμού για το σύστημα κυκλοφορίας και η διαχείριση της ταχύτητας πρέπει να είναι κεντρικής σημασίας.
- Ο τραυματισμός από τροχαίο ατύχημα είναι ένα ζήτημα κοινωνικής δικαιοσύνης - πρέπει να επιδιώκεται η ίση προστασία σε όλους τους χρήστες του οδικού δικτύου, καθώς οι μη μηχανοκίνητοι χρήστες φέρουν δυσανάλογο μερίδιο τραυματισμού και κινδύνου
- Η μεταφορά τεχνολογίας από χώρες με υψηλό εισόδημα σε χώρες με χαμηλό εισόδημα πρέπει να ανταποκρίνεται στις τοπικές συνθήκες και πρέπει να καλύπτει τοπικές ανάγκες που βασίζονται στην έρευνα
- Οι τοπικές γνώσεις πρέπει να ενημερώνουν την εφαρμογή των τοπικών λύσεων

Πίνακας 1.4: Ετήσιος αριθμός ατυχημάτων ανά χώρα, για έτη 2007-2016.

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
BE	43.239	42.115	41.944	40.569	42.119	38.057	35.632	41.481	40.303	40.096
BG	8.01	8.047	7.068	6.61	6.638	6.716	7.016	7.019	7.226	7.404
CZ	23.06	22.481	21.706	19.675	20.486	20.503	20.342	21.054	21.561	21.386
DK	5.549	5.02	4.174	3.498	3.525	3.124	2.985	2.881	2.853	2.882
DE	335.845	320.614	310.667	288.297	306.266	299.637	291.105	302.435	305.659	308.145
EE	2.449	1.868	1.506	1.348	1.508	1.383	1.382	1.436	1.391	1.468
IE	5.467	6.736	6.615	5.779	5.23	5.61	4.976	5.743	5.831	5.893
EL	15.499	15.083	14.789	15.032	13.849	12.398	12.109	11.69	11.44	11.318
ES	100.508	93.161	88.251	85.503	83.027	83.115	89.519	91.57	97.756	102.362
FR	81.272	74.487	72.315	67.288	65.024	60.437	56.812	58.191	56.6	57.515
HR	18.033	16.29	15.731	13.274	13.229	11.774	11.228	10.323	11.038	10.457
IT	230.871	218.963	215.43	212.997	205.638	188.228	181.66	177.031	174.539	175.791
CY	1.468	1.392	1.197	1.198	1.058	919	774	758	660	650
LV	9.865	8.894	3.16	3.193	3.386	3.358	3.489	3.728	3.692	3.792
LT	6.448	4.796	3.827	3.53	3.266	3.392	3.391	3.256	3.031	3.201
LU	954	927	869	787	962	1.019	949	908	983	941
HU	20.634	19.174	17.863	16.308	15.827	15.174	15.691	15.847	16.333	16.627
MT	942	764	636	577	1.14	1.27	1.208	1.449	1.367	1.437
NL	25.819	23.708	19.378	10.778	5.134	4.968	9.522	13.358	18.523	18.749
AT	41.096	39.173	37.925	35.348	35.129	40.831	38.502	37.957	37.96	38.466
PL	49.536	49.054	44.195	38.832	40.069	37.046	35.847	34.97	32.967	33.664
PT	35.311	33.613	35.484	35.426	32.541	29.867	30.339	30.604	31.955	32.299
RO	24.661	29.307	28.612	25.995	26.647	26.928	24.827	25.355	28.944	30.751
SI	11.64	9.165	8.717	7.659	7.257	6.857	6.568	6.345	6.578	6.495
SK	8.483	8.416	8.415	6.131	5.775	5.37	5.113	2.149	5.502	5.602
FI	6.657	6.881	6.414	6.072	6.408	5.725	5.334	5.324	5.164	4.709
SE	18.548	18.462	18.027	16.627	16.274	16.636	14.942	13.091	14.829	14.086
UK	188.105	176.814	169.805	160.08	157.068	151.346	144.48	152.407	146.203	142.846
EU	1.319.969	1.255.405	1.204.720	1.128.411	1.124.480	1.081.688	1.055.742	1.078.360	1.090.888	1.099.032
Ετήσια αλλαγή		-4,9%	-4,0%	-6,3%	-0,3%	-3,8%	-2,4%	2,1%	1,2%	0,7%
IS	1.146	1.083	893	883	849	741	820	808	912	986
LI	420	402	358	366	327	405	468			
NO	8.182	7.716	6.912	6.419	5.956	5.922	5.127	4.931	4.492	4.195
CH	21.911	20.736	20.506	19.609	18.99	18.148	17.473	17.803	17.736	17.577

Πηγή: CARE (EU road accidents database) or national publications Last update: April 2018

1.3 Σκοπός της διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της συμπεριφοράς έναντι αξονικής συμπίεσης δοκιμίων αλουμινίου κοίλης διελατής διατομής, η οποία είναι κατά βάση ορθογωνική και διαθέτει κατάλληλα διαμορφωμένες εσοχές-προεξοχές οι οποίες αποσκοπούν στην οδήγηση συσκευών, καθώς οι ράβδοι των εξεταζόμενων διατομών προτίθεται να χρησιμοποιηθούν ως ράβδοι οδήγησης φορτίων. Για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών αντοχής των δοκιμίων έναντι των ασκούμενων θλιπτικών φορτίων πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές συμπίεσης σε υδραυλική πρέσσα. Τα εξεταζόμενα δοκίμια αποτελούνται στο σύνολό τους από δυο διαφορετικές ομάδες διατομών, διακρίνοντας έτσι έξι (6) δοκίμια διατομής τύπου-A και έξι (6) δοκίμια διατομής τύπου-B όπως παρουσιάζεται στην αντίστοιχη ενότητα της παρούσας εργασίας. Πρόσθετα, εξετάστηκαν δοκίμια διαφορετικού αρχικού μήκους για κάθε τύπο διατομής ώστε να εξεταστεί και η επίδρασή του στην απόκριση αξονικής συμπίεσής τους. Κάθε πειραματική δοκιμή αξονικής συμπίεσης πραγματοποιήθηκε σε ημι-στατικές συνθήκες, ενώ για κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν δυο πειραματικές δοκιμές με σκοπό να εξαλειφθούν πιθανά σφάλματα κατά την πειραματική διαδικασία. Για κάθε πειραματική δοκιμή, καταγράφηκαν κατάλληλα στιγμιότυπα κατάρρευσης ώστε να παρατηρηθεί ο εμφανιζόμενος μηχανισμός αξονικής κατάρρευσης, ενώ επίσης καταγράφηκαν και οι πειραματικές μετρήσεις των ασκούμενων δυνάμεων και μετατοπίσεων της πρέσσας.

1.4 Δομή της διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε τέσσερις θεματικές ενότητες. Στο 1^ο κεφάλαιο εκθέτονται οι αιτίες που έχουν επιβάλει τον σχεδιασμό έναντι αξονική κρουστικής καταπόνησης ως ιδιαίτερης σημασίας και αναπόσπαστη προδιαγραφή των σημερινών οχημάτων και γενικότερων κατασκευών. Επίσης, υπογραμμίζεται ο σκοπός της παρούσας εργασίας, ενώ στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η δομή της τρέχουσας διπλωματικής όπως αυτή έχει διαρθρωθεί.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται εκτενέστερη αναφορά στην μηχανική συμπεριφορά και απόκριση των κατασκευών έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης, παρουσιάζοντας τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που διέπουν τη μηχανική συμπεριφορά μιας κατασκευής έναντι αξονικής κρούσης, και τα οποία χρησιμοποιούνται για την τελική αξιολόγησή της. Πρόσθετα, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της κρούσης τόσο αναφορικά ως προς την μηχανική όσο και ως προς την κινηματική θεώρησή της, ενώ τέλος παραθέτονται συνοπτικά αποτελέσματα προηγούμενων εργασιών και δημοσιεύσεων της ανοιχτής βιβλιογραφίας αναφορικά με τρόπους βελτίωσης των χαρακτηριστικών απόκρισης των κατασκευών έναντι κρούσης.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα εξετασθέντα δοκίμια και ο εξοπλισμός της πειραματικής διαδικασίας των δοκιμών. Επιπλέον, παραθέτονται τα πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για κάθε μία δοκιμή που πραγματοποιήθηκε, μαζί με τα υπολογισθέντα χαρακτηριστικά της απόκρισης και τα καταγεγραμμένα στιγμιότυπα κατάρρευσης. Ακόμη, αξιολογούνται όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια ως προς την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων.

Τέλος, στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύνοψη της παρούσας εργασίας, ενώ ακολουθούν τα συμπεράσματα κατόπιν ανάλυσης και επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων, και ενδεικτικές προτάσεις προς μελλοντική διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

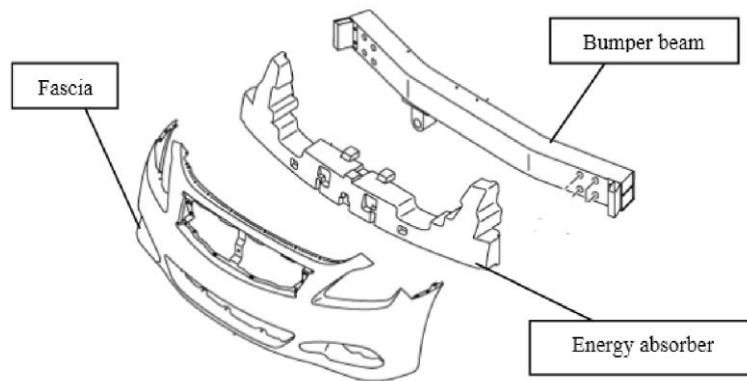
Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η μηχανική συμπεριφορά και απόκριση των κατασκευών έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης και κατάρρευσης, παρουσιάζοντας τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που διέπουν τη μηχανική συμπεριφορά μιας κατασκευής έναντι αξονικής κρούσης, και τα οποία χρησιμοποιούνται για την τελική αξιολόγησή των κατασκευών της έναντι κρούσης. Επίσης, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της κρούσης τόσο αναφορικά ως προς την μηχανική όσο και ως προς την κινηματική θεώρησή της, ενώ τέλος παραθέτονται συνοπτικά αποτελέσματα προηγούμενων εργασιών και δημοσιεύσεων της ανοιχτής βιβλιογραφίας αναφορικά με τρόπους βελτίωσης των χαρακτηριστικών απόκρισης των κατασκευών έναντι κρούσης.

2.1 Απορρόφηση ενέργειας

Η απορρόφηση ενέργειας κατά την πρόσκρουση είναι πολύ σημαντική στο σύστημα του προφυλακτήρα αυτοκινήτων και γενικότερα στην πρόληψη οδικών ατυχημάτων. Η δοκός του προφυλακτήρα είναι ένα από τα κύρια μέρη του συστήματος προφυλακτήρα που χρησιμοποιείται ως προστασία για τους επιβάτες κατά την πρόσκρουση.

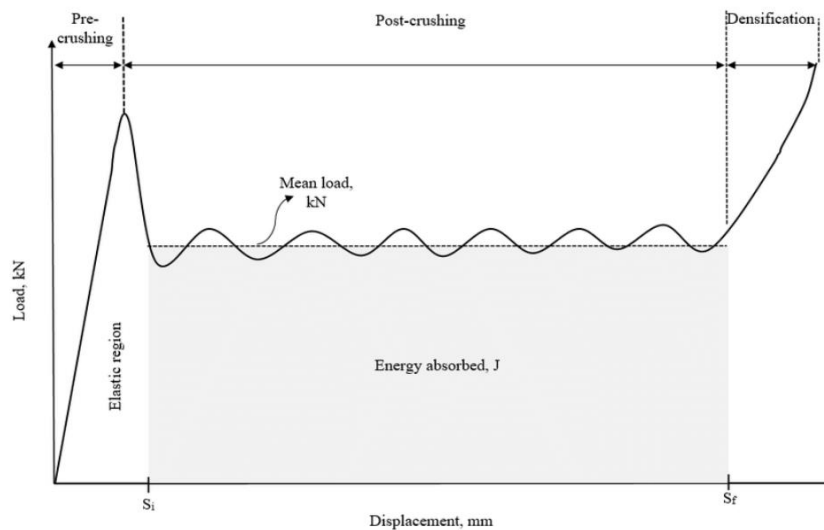
Μελέτες που σχετίζονται με τους παράγοντες που επηρεάζουν και βελτιστοποιούν την δοκό προφυλακτήρων επανεξετάστηκαν και συνοψίστηκαν από το 1995 έως το 2015. Από την βιβλιογραφία, η χρήση σύνθετου υλικού με βάση πολυμερές φυσικών ινών έχει χρησιμοποιηθεί σε εξαρτήματα αυτοκινήτων, αλλά σε μελέτες στη δομή της δοκού του προφυλακτήρα όχι.

Η κύρια λειτουργία ενός συστήματος προφυλακτήρα είναι η προστασία του αμαξώματος του αυτοκινήτου και των επιβατών κατά τη σύγκρουση. Το σύστημα μετωπικού προφυλακτήρα αποτελείται από τρία κύρια εξαρτήματα που ονομάζονται πρόσοψη, απορροφητής και δοκός προφυλακτήρα [9]. Η εικόνα 2.1 δείχνει τα τρία κύρια συστατικά ενός κοινού συστήματος προφυλακτήρα. Η πρόσοψη χρησιμοποιείται συνήθως ως αισθητική προσθήκη και για μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης. Δεν μπορεί να επηρεάσει την ενέργεια πρόσκρουσης, επομένως θεωρείται μη δομικό στοιχείο. Ο απορροφητής έχει σχεδιαστεί για να μειώνει ένα μέρος της κινητικής ενέργειας από μια σύγκρουση. Η δοκός προφυλακτήρα είναι η βασική δομή που βοηθά στην απορρόφηση της κινητικής ενέργειας από μια σύγκρουση υψηλής ενέργειας και στην παροχή αντίστασης κάμψης σε μια σύγκρουση χαμηλής πρόσκρουσης [10]. Η δέσμη προφυλακτήρα θα απορροφήσει την ενέργεια σύγκρουσης με ελεγχόμενο τρόπο προτού η ενέργεια μεταφερθεί στο χώρο των επιβατών.



Εικόνα 2.1 Κοινό σύστημα προφυλακτήρα [11]

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας είναι πολύ σημαντική για την αύξηση της ασφάλειας των επιβατών καθώς τα οχήματα χρησιμοποιούνται εκτενώς. Η δομική αξιοπιστία είναι απαραίτητη προϋπόθεση για το σχεδιασμό των ανταλλακτικών των αυτοκινήτων. Ως crashworthiness αναφέρεται η συμπεριφορά μιας κατασκευής στην απόκρισή της έναντι κρουστικής καταπόνησης. Η απόδοση crashworthiness είναι καλή όταν συμβαίνει λιγότερη ζημιά στο όχημα και στους επιβάτες μετά από κάποιο ατύχημα. Η αξιοπιστία για τα δομικά μέλη απαιτείται να αναλυθεί πριν από την εφαρμογή στον πραγματικό τομέα. Έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες με έμφαση σε λεπτότοιχες διατομές για τον προσδιορισμό της απορρόφησης ενέργειας [12, 13] και η πιο συνηθισμένη εξεταζόμενη δομή είναι λεπτότοιχες διατομές σε κυλινδρικούς σωλήνες [14], τετραγωνικούς σωλήνες [15, 16], διατάξεις κυψελωτής διατομής [17], και πολυστρωματικές πλάκες (sandwich) [18]. Κατά τον προσδιορισμό του Crashworthiness, η ειδική απορρόφηση ενέργειας (SEA), η απορρόφηση ενέργειας (E_{abs} ή EA), το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης (PCF), το μέσο φορτίο κατάρρευσης (MCF) και η απόδοση φορτίου σύγκρουσης ή ομοιομορφία φόρτισης (CLE) είναι οι βασικότεροι δείκτες αξιολόγησης της μηχανικής συμπεριφοράς μια κατασκευής έναντι κρούσης.



Εικόνα 2.2 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης σε συνθήκες κρουστικής καταπόνησης

Η απορροφώμενη ενέργεια εκφράζει την απορροφώμενη κινητική ενέργεια της κρούσης που δαπανάται για την πλαστικοποίηση της διατομής, και για αυτό το λόγο είναι ίση με το εσωτερικό έργο πλαστικοποίησης της διατομής:

$$EA = \int_0^s F(x) dx$$

Η ειδική απορροφώμενη ενέργεια ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας απορρόφησης προς τη μάζα του εξεταζόμενου δοκιμίου [19] και αποτελεί το πιο αξιόπιστο χαρακτηριστικό μέγεθος για την σύγκριση διατομών διαφορετικής γεωμετρίας ή διαφορετικού υλικού:

$$SEA = \frac{EA}{M}$$

Το μέσο φορτίο κατάρρευσης (MCF) που είναι και το πιο ενδεικτικό μέγεθος της απορρόφησης ενέργειας, και ισούται με την απορροφώμενη ενέργεια προς τη μέγιστη βράχυνση ως:

$$MCF = \frac{EA}{s_{max}}$$

Τέλος, ο συντελεστής απόδοσης/ομοιομορφίας της φόρτισης (CLE) εκφράζει το λόγο του μέσου (MCF) προς το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης (PCF) και ορίζεται ως:

$$CLE = \frac{MCF}{PCF} \times 100\%$$

Για να αξιολογηθεί μια κατασκευή ως υψηλών επιδόσεων έναντι αξονικής κρουστικής καταπόνησης (crashworthy structure) χρειάζεται να χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές της απορροφώμενης ενέργειας, του μέσου φορτίου κατάρρευσης, της ειδικής ενέργειας απορρόφησης και του συντελεστή ομοιομορφίας της φόρτισης. Αναφορικά όμως με το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης, αυτό είναι επιθυμητό να είναι υψηλό ώστε να μπορούν να αποδοθούν μεγάλες τιμές στο μέσο φορτίο κατάρρευσης και κατ'επέκταση στην απορροφώμενη ενέργεια, όμως το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης δεν πρέπει να είναι παράλογα μεγάλο διότι τότε είναι αρκετά πιθανό η κατασκευή να μην καταφέρει να πλαστικοποιηθεί κατά την κρούση, και επομένως να μην απορροφήσει κάποιο ποσοστό της κρουστικής ενέργειας.

Παλαιότερα, το μεγαλύτερο μέρος της δοκού του προφυλακτήρα ήταν κατασκευασμένο από χάλυβα. Ωστόσο, στα μέσα της δεκαετίας του '80 η εφαρμογή πολυμερικών σύνθετων υλικών έχει εισαχθεί για την αντικατάσταση συμβατικών υλικών όπως πλαστικό, αλουμίνιο και μέταλλο. Υπάρχουν πολλές προηγούμενες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας πολυμερές σύνθετο υλικό [20, 21, 22] όπου μπορεί να προσφέρει χαμηλό

βάρος, ευκολότερη παραγωγή σύνθετου σχήματος και ικανότητα απορρόφησης υψηλής ενέργειας κατά την κρούση.

Η χρήση σύνθετων υλικών, συχνά ενισχυμένων με ίνες, έχει επίσης εισαχθεί για να αντικαταστήσει τη χρήση συμβατικών υλικών επειδή έχει πλεονεκτήματα χαμηλής πυκνότητας, υψηλής ειδικής αντοχής και ακαμψίας [23]. Ο Πίνακας 2.1 δείχνει μερικά από τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε εξαρτήματα αυτοκινήτων.

Πίνακας 2.1 Σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε εξαρτήματα αυτοκινήτων

Υλικό	Μέρος	Εταιρία	Αναφ.
Εποξειδική μήτρα με την προσθήκη jute	Πάνελ πόρτας στα οχήματα E-class	Mercedes-Benz	[24]
Πολυουρεθάνη ενισχυμένη με μικτό λινάρι / σιζάλ	Πάνελ επένδυσης πόρτας	Audi	[24]
Νέο βιολογικό πλαστικό, το τελευταίο αντικαθίσταται με μια πρώτη ύλη από ζαχαροκάλαμο	Εσωτερικά εξαρτήματα	Toyota	[25]
Συνδυασμός από ίνες μπαμπού και μια φυτική ρητίνη πολυβουτυλενικού ηλεκτρικού (PBS), και πατάκια από PLA και νάιλον ίνες	Εσωτερικά εξαρτήματα	Mitsubishi	[26]
Με βάση τη σόγια	Αφρός καθίσματος	Toyota	[27]
Ζαχαροκάλαμο	Χώρος αποσκευών	Toyota	[25]
Υβριδικά σκληρημένη Kenaf/ Εποξειδικά Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με Γυαλί	Ενισχυμένες πλευρές για δοκό προφυλακτήρα	-	[28]
Σύνθετο ενισχυμένο με ίνες	Αγωνιστικό αυτοκίνητο της Formula 1	-	[29]
Θερμοπλαστικό	Κουτιά συντριβής	-	[30]
Σύνθετα ρητίνης από ίνες γυαλιού- πολυεστέρα	-	-	[31]
Υφασμένο υλικό από θερμοσκληρυνόμενη εποξειδική ρητίνη	Αυτοκίνητο και αεροδιαστημική	-	[32]

Η ενέργεια δεν μπορεί να δημιουργηθεί ή να καταστραφεί, αλλά μπορεί να αλλάξει από τη μία μορφή στην άλλη. Κατά τη διάρκεια μιας πρόσκρουσης, λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της απορρόφησης της ενέργειας, κατά την οποία η ενέργεια αλλάζει μορφή ή μετατρέπεται σε εσωτερική δυναμική ενέργεια ενός συστήματος. Ο θεωρητικός υπολογισμός της απορρόφησης ενέργειας μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τη θεωρία κρούσης [33].

Η απορρόφηση ενέργειας μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τη δοκιμή σε πραγματικό χρόνο, αλλά λόγω του υψηλού κόστους διεξαγωγής δοκιμών σε πραγματικό χρόνο, η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία πριν από τη διεξαγωγή δοκιμών σε πραγματικό χρόνο. Με τη χρήση της FEA, οι βιομηχανίες έχουν

μειώσει το κόστος και το χρόνο της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντων, ενώ αυξάνουν την ασφάλεια, την άνεση και την ανθεκτικότητα των κατασκευασμένων οχημάτων.

2.1.1 Θεωρία κρούσης

Υπάρχουν δύο τύποι κρούσης, ελαστική κρούση και πλαστική κρούση. Η συνολική ενέργεια διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας κρούσης. Η ορμή πριν από την πρόσκρουση και μετά την πρόσκρουση είναι ίση. Μετά την πρόσκρουση, οι εξισώσεις διατήρησης ενέργειας και ορμής μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\frac{1}{2} m_A v_A^2 = \frac{1}{2} m_A v_{A2}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{B2}^2$$

$$m_A v_A = (m_A + m_B) v_0$$

, όπου m_A είναι η μάζα του σώματος που προκαλεί την κρούση, m_B η μάζα του οχήματος, v_A η ταχύτητα του πρώτου σώματος πριν από την πρόσκρουση και v_0 η τελική ταχύτητα του οχήματος και του σώματος στο μέγιστο σημείο εκτροπής.

Οι ταχύτητες μετά την πρόσκρουση μπορούν να προσδιοριστούν από τον συντελεστή αποκατάστασης (ϵ). Ο συντελεστής αποκατάστασης (coefficient of restitution - COR) είναι ο λόγος ταχύτητας διαχωρισμού προς ταχύτητα προσέγγισης σε μια κρούση.

$$e = \frac{v_{B2} - v_{A2}}{v_B - v_A}$$

Ο ανωτέρω συντελεστής είναι ένας αριθμός που δείχνει πόση κινητική ενέργεια παραμένει μετά από πρόσκρουση των δύο σωμάτων. Εάν ο συντελεστής είναι υψηλός (πολύ κοντά στο 1), αυτό σημαίνει ότι χάθηκε πολύ μικρή κινητική ενέργεια κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης. Η ενέργεια που διαχέεται, (Energy dissipated - ED) μπορεί να προσδιοριστεί αφαιρώντας την κινητική ενέργεια των δύο μαζών μετά την πρόσκρουση, και την κινητική ενέργεια του κρουστικού πριν από την κρούση.

$$E_{plastic} = \frac{1}{2} m_A v_A^2 + \frac{1}{2} m_B v_B^2 - \frac{1}{2} m_{A2} v_{A2}^2 - \frac{1}{2} m_{B2} v_{B2}^2$$

2.1.2 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων [Finite Element Analysis]

Επί του παρόντος, η αυτοκινητοβιομηχανία βασίζεται στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) στην ανάπτυξη των προϊόντων της [34]. Η ανάλυση της απορρόφησης ενέργειας σε πραγματική κρούση είναι αρκετά περίπλοκη και εξαρτάται από διαφορετικές παραμέτρους. Η επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού στο βάρος, το κόστος ή τις λειτουργικές ιδιότητες των νέων μοντέλων αυτοκινήτων μπορεί να καθοριστεί με τη χρήση της μεθόδου FEA.

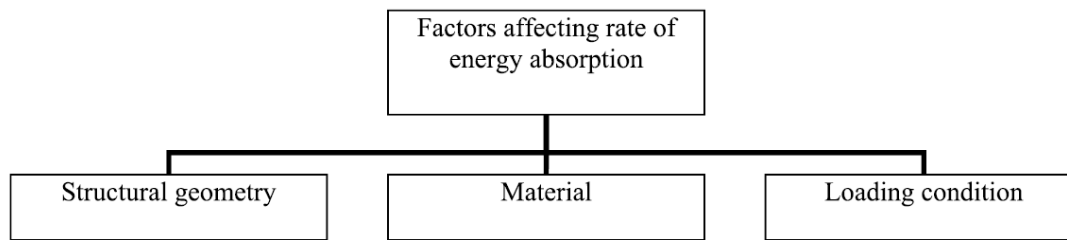
Η FEA είναι μια κατάλληλη μέθοδος για την ανάλυση της απορρόφησης ενέργειας κατά την πρόσκρουση για τον προσδιορισμό της κατά προσέγγιση συμπεριφοράς εκτροπής κατά τη διάρκεια μιας πρόσκρουσης. Τα πλεονεκτήματα της FEA είναι πολυάριθμα. Μπορεί να αναλύσει λεπτομερώς το σχεδιασμό, εξοικονομώντας χρόνο και χρήμα, μειώνοντας τον απαιτούμενο αριθμό πρωτοτύπων. Λόγω του υψηλού κόστους της φυσικής δοκιμής και του χρόνου που απαιτείται, χρησιμοποιώντας την FEA, χιλιάδες προσομοιώσεις μπορούν να γίνουν για να ικανοποιηθούν τα αποτελέσματα πριν από τη διεξαγωγή της πραγματικής φυσικής δοκιμής. Επί του παρόντος υπάρχουν πολλά λογισμικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση FEA όπως ANSYS, LS DYNA, PAMCRASH και ABAQUS.

2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση Crashworthiness

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, οι κατασκευαστές οχημάτων ανταγωνίζονται για την παραγωγή καλύτερου οχήματος με σημαντική ποιότητα απόδοσης και ασφάλειας. Η μελέτη της ικανότητας σύγκρουσης των οχημάτων έχει καταστεί σημαντικό θέμα στον ερευνητικό χώρο, καθώς οι κατασκευαστές προσπαθούν να παράγουν ασφαλέστερα οχήματα που μπορούν να αποτρέψουν θανατηφόρους τραυματισμούς στους επιβάτες σε περίπτωση σύγκρουσης.

Η μελέτη crashworthiness, που είναι η μελέτη της πλαστικής παραμόρφωσης των κατασκευών, έχει πραγματοποιηθεί σε μια σειρά κρίσιμων κατασκευών που βρέθηκαν σε οχήματα, όπως πλαίσιο οχημάτων, υπόγεια ελικοπτέρων και διαχωριστικό αυτοκινητόδρομων. Ο πρωταρχικός στόχος της διεξαγωγής τέτοιων μελετών είναι η προστασία των ανθρώπων σε περίπτωση ατυχημάτων.

Βάσει της βιβλιογραφικής έρευνας, οι περισσότερες μελέτες σχετικά με την δοκό ενός προφυλακτήρα επικεντρώνονται στην απόδοση της απορρόφησης ενέργειας από τη δομή του. Προηγούμενοι ερευνητές έχουν περιγράψει τρεις βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα μιας δοκού προφυλακτήρα να απορροφά ενέργεια κατά τη διάρκεια της κρούσης, και αυτοί συνοψίζονται στο υλικό της κατασκευής, στη γεωμετρία της και στις συνθήκες φόρτισης.



Εικόνα 2.3 Παράγοντες επίδρασης της ενέργειας απορρόφησης

2.2.1 Δομική γεωμετρία

Εκτεταμένη έρευνα έχει πραγματοποιηθεί από πολλούς ερευνητές σχετικά με τις διάφορες γεωμετρίες της δομής των πλαισίων συντριβής. Η επίδραση της γεωμετρίας του δείγματος στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας συντριβής διερευνήθηκε λαμβάνοντας υπόψη πολλές άλλες γεωμετρικές και υλικές παραμέτρους. Η επίδραση πολλών τύπων δομικής διαμόρφωσης στη σχεδίαση των δοκών προφυλακτήρων αναλύθηκαν για να προσδιοριστεί η επίδραση στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Οι μελέτες της δομής της δοκού μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε λεπτότοιχες και πυκνής πλήρωσης διατομές.

Οι πιο συνηθισμένες δομές λεπτότοιχης διατομής είναι φορείς κυκλικής ή ορθογωνικής ή πολυγωνικής διατομής καθώς επίσης και φορείς κωνικής διατομής (tapered-section beams). Οι κατασκευές λεπτότοιχων διατομών βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σήμερα σε αποσβεστήρες κρούσης καθώς συνδυάζουν ελάχιστο δομικό βάρος και υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας εξαιτίας της εύκολης πλαστικοποίησής τους και της ευσταθούς και προοδευτικής κατάρρευσής τους.

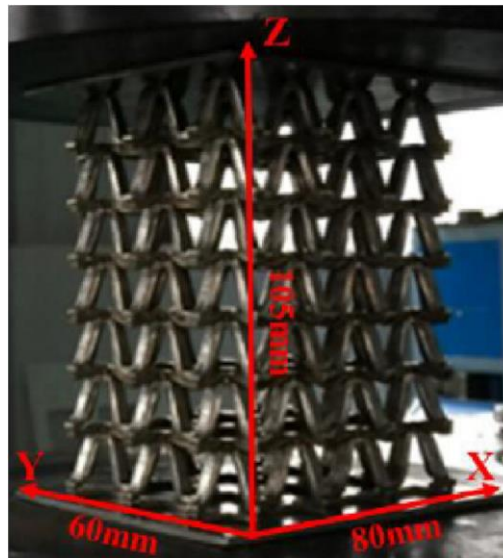
Υπάρχουν επίσης πολλά άλλα σχέδια δομής πυκνά πληρωμένων διατομών που συνήθως επιτυγχάνονται με πλήρωση του κοίλου όγκου μια λεπτότοιχης διατομής με αφρούς, δομές κυψελωτής διατομής ή δομές πλεκτής μεταλλικής ενίσχυσης. Το αποτέλεσμα της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας έχει δοκιμαστεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές γεωμετρικές παραμέτρους λεπτού τοιχώματος, όπως το πάχος, το αξονικό μήκος, η μέση διάμετρος ή οι περιφέρειες και η ημι-ακραία γωνία [35-38].

Όσον αφορά τη δομή λεπτού τοιχώματος, η σύγκριση της συμπεριφοράς απορρόφησης ενέργειας πολλών τύπων διατομών και διαμορφώσεων του πλαισίου συντριβής έχει συζητηθεί σε πολλά έγγραφα. Μεταξύ των καταγεγραμμένων τύπων σχημάτων διατομής που έχουν διερευνηθεί μέχρι στιγμής είναι σωλήνες κυκλικής, ορθογωνικής και πολυγωνικής διατομής, κατασκευές με προεξοχές τύπου Π (top-hat) και (double top-hat), κατασκευές μορφής W (w-shaped) και διατομές κωνικής γεωμετρίας (tapered-section).

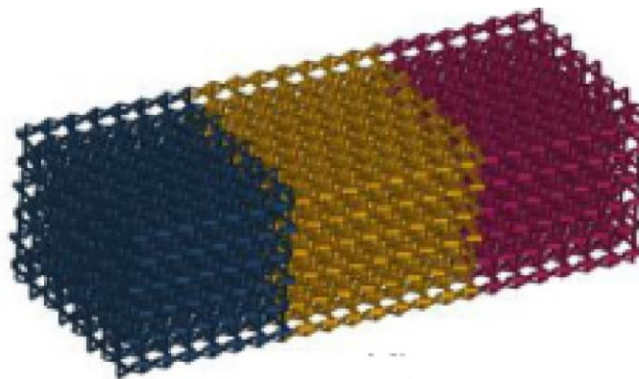
Πίνακας 2.3 Περίληψη της γεωμετρικής παραλλαγής στη δομή της δοκού σύγκρουσης λεπτού τοιχώματος

Σχήμα	Υλικό	Φόρτιση	Περίληψη των ευρημάτων	Αναφορά
Κυκλικό Εξαγωνικό Τετράγωνο Ορθογώνιο Τριγωνικό Tapered Κωνικός	Κράμμα αλουμινίου	Quasi-static	Η μέγιστη απορροφούμενη ενέργεια εμφανίζεται από κυλινδρικούς σωλήνες. Για πολυγωνικό σχήμα, όσο μικρότερος αριθμός ακμών, τόσο χαμηλότερος είναι ο ρυθμός απορρόφησης ενέργειας. Αύξηση στην περιοχή διατομής, τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός απορρόφησης ενέργειας.	[39]
Τετράγωνο Εξαγωνικό Δεκαγωνικό Κυλινδρικός	GFRP (glass fibre reinforced plastic)	Axial crushing (simulation)	Ο ρυθμός ενέργειας που απορροφάται από τη δομή λεπτού τοιχώματος σε αυξανόμενη σειρά είναι τετράγωνος, κυλινδρικός, εξαγωνικός και δεκαγωνικός. Η τιμή της δύναμης αιχμής είναι η υψηλότερη σε διαγώνιο σχήμα και η χαμηλότερη σε τετράγωνο σχήμα.	[40]
Κυκλικός Ορθογώνιο Τετράγωνο Εξαγωνικό Οκταγωνικός Έλλειψη	Χαλυβδοσίδηρος	Dynamic	Ο σωλήνας με εξαγωνικό σχήμα διατομής θεωρείται καλή ιδέα για την εφαρμογή απορρόφησης ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τους δείκτες απόδοσης σύγκρουσης, καθώς και το κόστος και τη σκοπιμότητα κατασκευής.	[41]
Τριγωνικό Τετράγωνο Εξαγωνικό Οκταγωνικό	Αλουμίνιο	Quasi-static	Η μέση τιμή φορτίου και η τιμή SEA, είναι η χαμηλότερη στον τριγωνικό σωλήνα και η υψηλότερη στον οκταγωνικό σωλήνα. Η τιμή του μέσου φορτίου και της SEA σε αυξανόμενη σειρά είναι τριγωνικός, τετράγωνος, εξαγωνικός και δεκαγωνικός σωλήνας.	[42]
Τετράγωνο Ορθογώνιο Πολυγωνικό	Ορείχαλκος CuZn40	Quasi-static (axial load)	Αυτή η μελέτη συγκρίνει την επίδραση της ενεργοποίησης origami σε διάφορα προφίλ, συμπεριλαμβανομένων των κωνικών. Ο τετραγωνικός σωλήνας παρουσιάζει ικανοποιητική απόδοση.	[43]
Κυκλικό Κυκλικό με ενισχυτικό μοτίβο	3D Εκτύπωση SUS316L μεταλλική σκόνη	Quasi static and dynamic	Αυτή η μελέτη συγκρίνει τον κανονικό κυκλικό σωλήνα και τον κυκλικό σωλήνα με το ενισχυτικό σχέδιο. Στην κατάσταση χαμηλής πρόσκρουσης, οι βοηθητικοί σωλήνες και οι κηρήθρες εμφανίζουν υψηλότερη ειδική απορρόφηση ενέργειας σε σύγκριση με τον συμβατικό. Ο βοηθητικός σωλήνας δεν επιδεικνύει μόνο βελτιωμένη ειδική απορρόφηση ενέργειας, αλλά επίσης εμφανίζει βελτιωμένη απόδοση απόσβεσης υπό συνθήκες χαμηλής πρόσκρουσης ως απορροφητής ενέργειας.	[44,45]

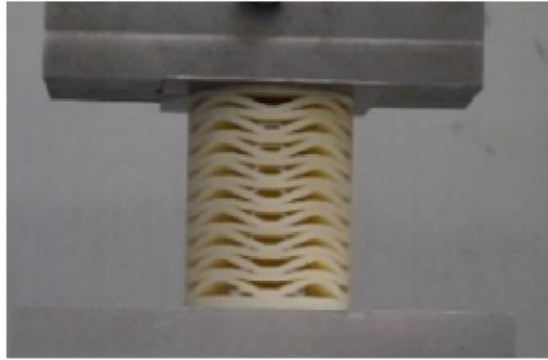
Εκτός από την κλασική δομή λεπτότοιχης διατομής, πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει νέες δομές λεπτότοιχων διατομών πληρωμένων με μέσο υψηλής πυκνότητας και διερεύνησαν τις επιδόσεις τους ως δομές απορρόφησης ενέργειας. Διαφορετικά από τον κανονικό σωλήνα λεπτού τοιχώματος, μερικές από αυτές τις δομές πυκνού τοιχώματος, όπως οι βοηθητικές δομές, μπορούν να συστέλλονται και να επεκτείνονται όταν συμπιέζονται και τεντώνονται. Αυτή η δομή ονομάζεται ιδιότητα αρνητικού λόγου Poisson's (NPR) [46]. Ο Πίνακας 2.4 παρουσιάζει μια περίληψη των πρόσθετων τροποποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε ποικίλους τύπους λεπτότοιχων σωλήνων. Επίσης κάτωθι παρατίθενται φωτογραφίες διαφορετικών γεωμετριών δομών πυκνού τοιχώματος που έχουν ερευνηθεί [46] [47].



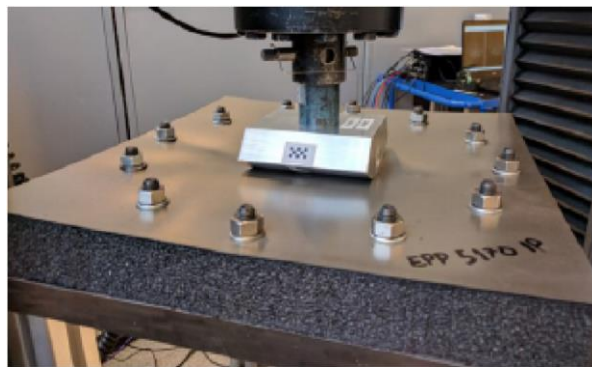
Εικόνα 2.4 Δομή Double-arrowed auxetic (DAA) [46].



Εικόνα 2.5 NPR κατασκευασμένο με βάση τη βιομιμητική δομή [47].



Εικόνα 2.6 Κυλινδρική δομή NPR [46].



Εικόνα 2.7 Δομή Sandwich-foam [48].



Εικόνα 2.8 Πορώδες πλεκτό μέταλλο (PCS) [49].

Πίνακας 2.4 Περίληψη των γεωμετρικών παραλλαγών στη δομή της δοκού προφυλακτήρα λεπτού τοιχώματος

Σχήμα	Υλικό	Γεωμετρική ατέλεια	Δομική διαμόρφωση	Στοιχείο σύνδεσης	Αναφορά
Τετράγωνο	Silk reinforced epoxy	No	No	-	[50]
	GFRP	Yes	No	-	[40]
	CFRP	Yes	Yes	-	[51]
	AHSS	No	Yes	-	[36]
	Carbon steel 1000 series	No	No	-	[52]
	Aluminum alloy AA6063	No	Yes	-	[53]
	Aluminum alloy AA6061-O	Yes	Yes	-	[54]
Ορθογώνιο	Steel Brass CuZn40	Yes Yes	No No	Πριτσίνια Συγκόλληση	[55]
	Aluminum alloy Brass CuZn40	No Yes	Yes No	Συγκόλληση Πριτσίνι	[56] [43]
Κυκλικό	GFRP	Yes	No	-	[57]
	GFRP	Yes	No	-	[40]
	GFRP and CFRP	Yes	Yes	Συρραφή	[58]
	Aluminum alloy 6061-O	No	Yes	-	[35]
	aluminum alloy	No	Yes	-	[49]
	Braided CFRP of 3-ply and 6-ply	No	Yes	-	[59]
	Aluminum alloy	No	Yes	-	[60]
	Flax fibre reinforced epoxy	No	Yes	-	[61]
	3D printing SUS316L	No	Yes	-	[44]
Top-hat	Polypropylene composite β Aluminum DP590	No No	Yes No	Συγκόλληση spot	[48]
	DP780 AHSS	No	No	-	[62]
Double-hat	Steel	No	No	Spot συγκόλληση, συγκόλληση με λέιζερ, κολλητικός δεσμός	[63]
Σχήμα - W	Mild steel	No	No	-	[64]
Πολυγωνικό	GFRP	Yes	No	-	[40]
	Glass/UV cured vinyl ester composite	No	Yes	Συγκολλητική ένωση	[65]
	Aluminum alloy 6061-O High-manganese steels	No No	Yes No	-	[35,66]
Κωνικό	AZ31 magnesium alloy	Yes	Yes	Συγκόλληση spot	[67]
	AZ31 magnesium alloy	No	Yes	Συγκόλληση ανάδευσης τριβής FSW	[68]

2.2.2 Υλικό κατασκευής

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, οι απαιτήσεις εξοικονόμησης βάρους ανάγκασαν τους κατασκευαστές αυτοκινήτων να δώσουν έμφαση στο σχεδιασμό, καθώς και στα υλικά των αμαξωμάτων των αυτοκινήτων και των εξαρτημάτων συναρμολόγησης [48]. Ορισμένες προηγούμενες μελέτες έχουν αξιολογήσει τις επιπτώσεις των διαφόρων υλικών στην απόδοση απορρόφησης ενέργειας. Δεδομένου ότι το επίκεντρο της παραγωγής του προφυλακτήρα τείνει πάντα να είναι όσο το δυνατόν πιο ελαφρύ αλλά εξαιρετικό για την απορρόφηση ενέργειας, διάφορες κατηγορίες υλικών έχουν εξεταστεί.

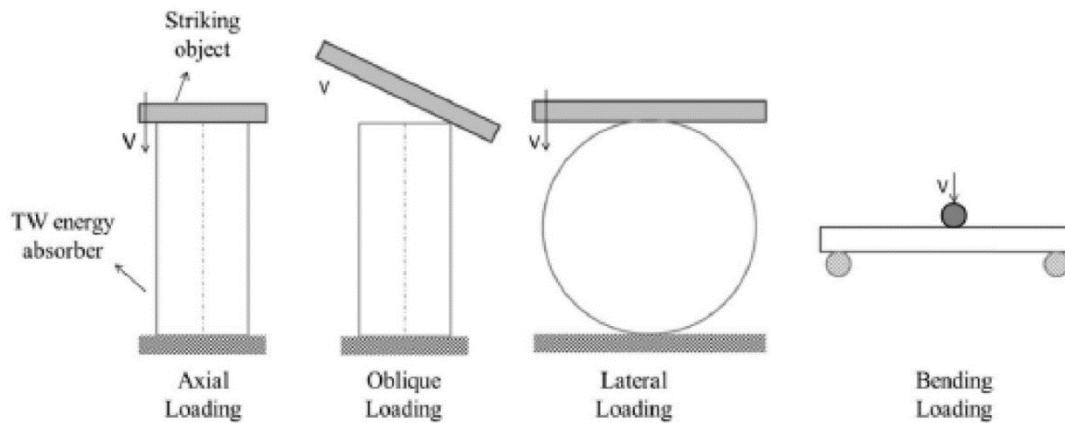
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μιας δοκού προφυλακτήρα μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις τύπους, δηλαδή μέταλλο / κράμα, σύνθετα υλικά και υβρίδια από σύνθετο μέταλλο / κράμα. Στην κατηγορία μετάλλων / κραμάτων, οι μελέτες έχουν επικεντρωθεί κυρίως στο χάλυβα και το αλουμίνιο ως το κύριο υλικό.

Σύμφωνα με τους Reyes et al. [69], ο χάλυβας επιλέγεται συνήθως ως υλικό μελέτης για διάφορους λόγους. Διαθεσιμότητα προηγούμενων αποτελεσμάτων με το ίδιο υλικό που επιτρέπει συγκρίσεις, εκτεταμένη εφαρμογή χάλυβα σε κατασκευές αμαξώματος αυτοκινήτου, εύκολη προσβασιμότητα και οικονομικά αποδοτικό. Το αλουμίνιο, από την άλλη πλευρά, είναι πάντα ένα ελαφρύ αλλά ισχυρό υλικό που έχει συγκεντρώσει το ενδιαφέρον ανάμεσα στους ερευνητές για την αξιολόγηση της απόδοσής του ως προς την αξιοπιστία της σύγκρουσης. Εν τω μεταξύ, η μελέτη του σύνθετου υλικού είναι πάντα ένα δημοφιλές θέμα, καθώς υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για ένα εναλλακτικό υλικό από το μέταλλο. Είναι ενδιαφέρον ότι η χρήση σύνθετων υλικών έχει οδηγήσει σε μοναδικά ή νέα σχέδια της δοκού με στόχο τη μεγιστοποίηση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας.

2.2.3 Φόρτιση

Εκτός από το γεωμετρικό σχήμα που είναι κυρίως ο παράγοντας που συμβάλλει στην απόδοση της σύγκρουσης, η κατάσταση φόρτισης μπορεί επίσης να επηρεάσει τη συμπεριφορά κατά την συντριβή. Η κατανόηση της συμπεριφοράς σύγκρουσης υπό διάφορες φορτίσεις συμβάλλει στη γνώση σχετικά με τον τρόπο τοποθέτησης της δοκού απορρόφησης σε ένα αυτοκίνητο.

Τέσσερις είναι οι φορτίσεις που σχετίζονται με το αυτοκινητιστικό ατύχημα. Αυτές είναι η αξονική φόρτιση, η πλάγια φόρτιση, η πλευρική φόρτιση και η φόρτιση κάμψης [70]. Η εικόνα 1.7 εμφανίζει τις ποικίλες καταστάσεις φόρτισης. Η δομή της δοκού συνδέεται στενά με αξονικές και πλάγιες συνθήκες φόρτισης. Η πλευρική κατάσταση φόρτισης συμβαίνει με συμπίεση της δοκού παράλληλα προς τον διαμήκη άξονα της. Μια τέτοια φόρτιση συνήθως διερευνάται για τη δομή του προφυλακτήρα του αυτοκινήτου, η οποία είναι τοποθετημένη κατά μήκος στο μπροστινό μέρος του οχήματος. Η κάμψη συμβαίνει συνήθως όταν το φορτίο τοποθετείται σε μια συγκεκριμένη περιοχή κατά μήκος της δομής λεπτού τοιχώματος.



Εικόνα 2.9 Κοινές καταστάσεις φόρτισης που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια σύγκρουσης στο αυτοκίνητο [70]

2.3 Βελτίωση ιδιοτήτων Crashworthiness

Για την απόκτηση καλύτερης γνώσης σχετικά με τον τρόπο συμπεριφοράς των υλικών ιδιοτήτων και των διαφορετικών δομικών παραμέτρων, πολλές μελέτες έχουν εξετάσει τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού. Οι μελετητές έχουν δείξει ενδιαφέρον για πολλές παραμέτρους σχεδιασμού για το σχεδιασμό μιας αποτελεσματικής κατασκευής για απορρόφηση ενέργειας. Με σκοπό να έχει τη βέλτιστη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, η τροποποίηση του σχεδιασμού μπορεί να είναι είτε με τη μορφή δομικής διαμόρφωσης ή ενίσχυσης ιδιοτήτων του υλικού.

2.3.1 Δομική ενίσχυση

Με βάση την βιβλιογραφία, δύο στρατηγικές βελτίωσης μπορούν να εφαρμοστούν στη δομή για να βελτιώσουν την απόδοσή στην ανάλυση σφαλμάτων ή στη δοκιμή. Η πρώτη στρατηγική είναι με την κατασκευή δομικής διαμόρφωσης ή τροποποίησης. Η διαμόρφωση χρησιμοποιείται συνήθως σε πλαίσιο συντριβής λεπτού τοιχώματος, όπου μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες κατηγορίες διαμόρφωσης. Παραδείγματα δομικών διαμορφώσεων είναι η πλήρωση με αφρό και οι πολυστρωματικοί σωλήνες ή ένθετοι σωλήνες. Η άλλη στρατηγική τροποποίησης είναι η χρήση ατέλειας στο σχεδιασμό, το οποίο ονομάζεται trigger.

➤ Πλήρωση με αφρό

Πολλές μελέτες έχουν επιδιώξει να προσδιορίσουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των γεμισμένων με μηχανικό αφρό δομών λεπτού τοιχώματος (βλέπε Εικ. 8). Η πλήρωση με αφρό έχει θεωρηθεί ένας καλός τρόπος για να βελτιωθεί η συμπεριφορά απορρόφησης ενέργειας, ειδικά υπό πλευρική φόρτιση. Αυτό οφείλεται στην καλύτερη παραμόρφωση που

εμφανίζεται στις ζώνες επαφής μεταξύ του σωλήνα και των πλακών φόρτωσης [70]. Οι σωλήνες λεπτού τοιχώματος με αφρό έχουν τη φήμη ότι έχουν καλύτερη ικανότητα απορρόφησης από τους σωλήνες χωρίς να αυξάνουν σημαντικά το συνολικό βάρος της κατασκευής [71]. Οι Kavi et al. [72], ανέφεραν ότι η αφρώδης δομή απορρόφησε υψηλότερη κινητική ενέργεια από την κενή γεωμετρία λεπτού τοιχώματος, προσθέτοντας ότι, σε σύγκριση με μεθόδους οι οποίες απαιτούν αύξηση του πάχους της δομής λεπτού τοιχώματος, προτιμάται η μέθοδος πλήρωσης.

Καθώς το προφίλ λεπτού τοιχώματος με διαφορετικά υλικά εμφανίζει ποικίλες ικανότητες απορρόφησης ενέργειας, έτσι και για το υλικό πλήρωσης ισχύει το ίδιο. Οι τέσσερις τύποι αφρών που έχουν κερδίσει ως επί το πλείστον ενδιαφέρον μεταξύ των ερευνητών είναι ο μεταλλικός αφρός, ο συνθετικός αφρός, ο αφρός κηρήθρας και ο lateral graded foam (LGF). Καθώς ο μεταλλικός αφρός είναι κατασκευασμένος από μέταλλο (δηλ. Αλουμίνιο), είναι καλύτερα από την άποψη της αντοχής. Η συμπεριφορά συντριβής του λεπτού τοιχώματος με μεταλλικό αφρό, όπως δηλώνεται από τους Santosa et al., έδειξε ότι όσο υψηλότερη είναι η αντοχή του αφρού, τόσο μικρότερο είναι το πλαστικό μήκος αναδίπλωσης, το οποίο οδηγεί σε υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας καταπόνησης στο τοίχωμα της δοκού [73]. Αν και ο συνθετικός αφρός είναι επίσης ικανός να απορροφά ενέργεια, η πυκνότητά του δεν είναι ομοιόμορφη. Επομένως, ο τρόπος κατάρρευσης δοκού με συνθετικό αφρό ποικίλλει ανάλογα με την πυκνότητα αφρού.

➤ Μεταβαλλόμενο πάχος

Οι σωλήνες λεπτού τοιχώματος με βαθμιαία μεταβαλλόμενο πάχος (functionally-graded thickness FGT) έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον μεταξύ των μελετητών. Οι συγκρίσεις μεταξύ της δομής ομοιόμορφου πάχους (uniform thickness UT) και του FGT έδειξαν ότι οι σωλήνες FGT ήταν καλύτεροι στην σύγκρουση [74,75]. Το μόνο μειονέκτημα αυτής της δομής, όπως δηλώνεται από τους Lu et al., είναι ότι οι μεταβλητές δομές πάχους μπορεί να αντιμετωπίσουν δυσκολίες εάν πρόκειται να κατασκευαστούν μαζικά [36,76].

➤ Πολλαπλά στρώματα

Κατά την εξερεύνηση μιας εναλλακτικής ιδέας για τη μεγιστοποίηση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας για δομή συντριβής, αναπτύχθηκε μια προσέγγιση χρήσης δοκού πολλαπλών τοιχωμάτων [53]. Η προσέγγιση πολλαπλών στρωμάτων συνδυάζεται με την προσέγγιση πλήρωσης, όπου εισάγεται αφρώδες υλικό μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών τοιχωμάτων της στήλης. Έχει αποδειχθεί καλύτερη απόδοση σύγκρουσης με αύξηση στο στρώμα από μονό τοίχωμα σε διπλό τοίχωμα, όπου ο ρυθμός απορρόφησης ενέργειας αυξήθηκε οριακά [77,78]. Όσον αφορά τη σύνθετη δομή λεπτού τοιχώματος, η χρήση πολλών στρωμάτων παρουσίασε καλά αποτελέσματα. Περισσότερος αριθμός σύνθετων ελασμάτων παρουσίασε υψηλότερη αντίσταση στη σύνθλιψη, άρα καλύτερη απόδοση [61,65]. Οι

συγγραφείς πρόσθεσαν ότι για να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα, πρέπει να εφαρμοστεί κατάλληλο πάχος για κάθε στρώμα.

➤ Ένθετοι σωλήνες

Η εφαρμογή ένθετων σωλήνων γίνεται με το συνδυασμό δύο ή περισσότερων προφίλ, για την αύξηση της αξιοπιστίας της δομής. Η ιδέα είναι να προταθεί ένας υβριδικός σχεδιασμός με εσωτερικά και εξωτερικά τοιχώματα κολλημένα μεταξύ τους έτσι ώστε να επιτευχθεί ένα σημαντικό αποτέλεσμα που μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση απορρόφησης ενέργειας της δομής λεπτού τοιχώματος. Έχει αναφερθεί ότι με τη βοήθεια ενός άλλου σωλήνα ως πληρωτικού, μπορεί να επιτευχθεί βελτιστοποίηση της δομής με τέλεια ισορροπία βάρους, ώστε τελικά να υπάρξει καλύτερη απόδοση σύγκρουσης [35,48,66 ,79].

➤ Trigger

Η χρήση του trigger είναι μια άλλη προσέγγιση για την επίτευξη βελτιωμένης σχεδίασης για τη δομή του πλαισίου συντριβής. Το Trigger ή σε πολλές άλλες μελέτες γνωστές επίσης ως «εκκινητής συντριβής», δημιουργείται με σκοπό την σταθεροποίηση της διαδικασίας κατάρρευσης και τη μείωση της μέγιστης δύναμης κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης. Οι τύποι trigger που έχουν εισαχθεί σε προηγούμενες μελέτες είναι η κοπή, οι αυλακώσεις / αυλάκωση, οι οπές και τα ακανόνιστα άκρα. Τα ευρήματα όλων των μελετών έχουν αξιοσημείωτη επίδραση στην απόκριση σύνθλιψης και στην απόδοση απορρόφησης ενέργειας [40, 54,57, 59,66].

2.3.2 Βελτίωση υλικού

Ο ερευνητικός τομέας που περιστρέφεται γύρω από την ικανότητα σύγκρουσης εξελίσσεται μέσω της αναζήτησης νέων υλικών ως εναλλακτικών, διατηρώντας παράλληλα την προοπτική εξοικονόμησης βάρους. Ενώ πολλοί τύποι σύνθετων υλικών με διαφορετικές συνθέσεις διερευνώνται ως δυνητικοί απορροφητές ενέργειας και κρούσης, τα ελαφριά μέταλλα έχουν αποκτήσει δημοτικότητα μεταξύ των κατασκευαστών. Ως εκ τούτου, διερευνώνται σε μεγάλο βαθμό μέθοδοι που μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση αυτών των ελαφρών μετάλλων. Η βελτίωση στα υλικά, όπως η θερμική επεξεργασία [37,69], η ανόπτηση ανάκτησης [37] και η επιφανειακή επεξεργασία [80], είναι μερικές μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί για τη μελέτη της απόδοσης κρούσης του επεξεργασμένου υλικού.

2.4 Δείκτες crashworthiness

Η μελέτη της ικανότητας των υλικών στην απορρόφηση ενέργειας μέσω της παραμόρφωσης ή ολοκληρωτικής τους θραύσης, βαθμονομείται βάσει μίας σειράς μεγεθών που συχνά καλούνται χαρακτηριστικά απόκρισης (crashworthiness characteristics). Τα εν λόγω μεγέθη προσδιορίζονται βάσει της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης, κατά την πειραματική δοκιμή των υλικών.

➤ Ενέργεια απορρόφησης- Energy absorption (E_{abs})

Η ενέργεια απορρόφησης (E_{abs}) εκφράζει την συνολική ενέργεια που απορροφήθηκε από το υλικό μέσω πλαστικής παραμόρφωσης σε συνθήκες πρόσκρουσης. Ουσιαστικά αποτελεί το ποσοστό της κινητικής ενέργειας της κρούσης, το οποίο απορροφήθηκε από το συμπιεζόμενο υλικό προς την πλαστικοποίησή του. Η τιμή του εν λόγω μεγέθους, προκύπτει μέσω του υπολογισμού του εμβαδού που εμπεριέχεται κάτω από την καμπύλη ασκούμενου φορτίου-μετατόπισης του προς μελέτη υλικού. Ως εκ τούτου, θεωρώντας την κατανομή του θλιπτικού φορτίου $F(x)$ το οποίο προκαλεί επιβράχυνση της κατασκευής κατά x_{max} , τότε η απορροφώμενη ενέργεια θα είναι:

$$E_{abs} = \int_0^{x_{max}} F(x) \cdot dx$$

➤ Μέσο φορτίο Κατάρρευσης – Mean Crushing Force (MCF)

Αντιστοιχεί, στον λόγο της ενέργειας απορρόφησης προς την μέγιστη επιβράχυνση που υπέστη το δοκίμιο κατά την διάρκεια επιβολής φορτίου. Υψηλή τιμή του μέσου φορτίου, αντιστοιχεί σε μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για δεδομένη παραμόρφωση.

$$MCF = \frac{E_{abs}}{x_{max}}$$

➤ Μέγιστο φορτίο- Peak Crushing Force (PCF)

Αντιστοιχεί στην υψηλότερη τιμή του φορτίου κατά την διάρκεια μίας δοκιμής. Παρατηρείται στις περισσότερες περιπτώσεις στην αρχή της κατάρρευσης, και έπειτα από αυτό το δοκίμιο αρχίζει να παραμορφώνεται υπό την επίδραση κάποιου μηχανισμού κατάρρευσης. Σε μετατοπίσεις μεγαλύτερες της τιμής εμφάνισης του PCF, συχνά η κατανομή φορτίου εμφανίζει μορφή παρόμοια της κυματοειδούς, γεγονός που εκδηλώνει συχνά το σχηματισμό πτυχώσεων κατά την κατάρρευση (post buckling region). Μάλιστα είναι σημαντικό κατά την κρούση το μέγιστο φορτίο να μην είναι παράλογα υψηλό διότι διαφορετικά υπάρχει ενδεχόμενο

η κατασκευή να μην καταφέρει να παραμορφωθεί πλαστικά, και κατά συνέπεια να αποσβέσει κάποια ποσά της κρουστικής ενέργειας.

➤ Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου - Crushing Load Efficiency (CLE)

Προκύπτει μέσω του λόγου του μέσου φορτίου (MCF) προς το μέγιστο φορτίο (PCF). Η τιμή του είναι εξ' ορισμού θετική και μικρότερη της μονάδας. Επιθυμητό μάλιστα είναι ο συντελεστής αυτός να είναι κατά το δυνατόν υψηλότερος (ιδανικά να τείνει στη μονάδα), καθώς σε αυτήν την περίπτωση θα επιτρέψει αφενός υψηλότερο μέσο φορτίο και άρα απορροφώμενη ενέργεια, αφετέρου μικρότερη διαφορά μεταξύ μέσου και μέγιστου φορτίου αποδίδοντας μικρότερες αδρανειακές μεταφερόμενες δυνάμεις στους επιβάτες.

$$CLE = \frac{MCF}{PCF}$$

➤ Ειδική απορροφώμενη ενέργεια – Specific Energy Absorption (SEA)

Αποτελεί ουσιαστικά το ποσό της απορροφώμενης ενέργειας ανά μονάδα μάζας του υλικού. Είναι το εγκυρότερο μέτρο σύγκρισης δοκιμών διαφορετικής γεωμετρίας, διαστάσεων ή και υλικού, καθώς οι παραπάνω παράγοντες λαμβάνονται υπόψιν από την πυκνότητα, τη διατομή και τις διαστάσεις κατά τον υπολογισμό της μάζας.

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

2.5 Πειραματικές τεχνικές

2.5.1 Γενικά

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι κυριότερες πειραματικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη απορροφητών ενέργειας που καταπονούνται σε ημι-στατικά (quasi-static) και δυναμικά φορτία.[83]

2.5.2 Μηχανή δοκιμής Universal

Για μια σύγκρουση χαμηλής ταχύτητας, τα μοτίβα της πλαστικής παραμόρφωσης είναι παρόμοια με αυτά που παράγονται με στατική (quasi-static) φόρτιση. Είναι βολικό να ξεκινάει η διερεύνηση με τη διεξαγωγή στατικών δοκιμών, για δύο λόγους. Πρώτον, γιατί η πειραματική διάταξη είναι απλούστερη από αυτή για τη δοκιμή κρούσης, και δεύτερον, γιατί μας επιτρέπει να παρατηρούμε το ιστορικό της παραμόρφωσης με σχετική ευκολία [81]. Είναι ευρέως

γνωστό ότι η πλαστική ενέργεια εξαρτάται από το φορτίο και το ιστορικό της παραμόρφωσης, και όχι μόνο από την τελική παραμόρφωση όπως στην περίπτωση της ελαστικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η συνεχής παρακολούθηση του φορτίου, της μετατόπισης και της παραμόρφωσης σε διάφορες χαρακτηριστικές θέσεις, καθώς επίσης και η παρατήρηση των τελικών δομών, οδηγούν σε πολύ καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών της πλαστικής παραμόρφωσης. Τέτοιες πληροφορίες είναι πολύ δύσκολο να αποκτήσουμε από δυναμικές δοκιμές [81]. Στατικές δοκιμές εφελκυσμού ή θλίψης μπορούν εύκολα να πραγματοποιηθούν με τη χρήση μίας πρότυπης universal μηχανής δοκιμών (standard universal testing machine). Η κατακόρυφη ταχύτητα της κεφαλής κυμαίνεται μεταξύ 3-5 mm/min. Για μία κατασκευή με χαρακτηριστικό μήκος 100mm, η ταχύτητα των 3mm/min παράγει ολικό ρυθμό παραμόρφωσης (strain rate) της τάξης των $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, που μπορεί να θεωρηθεί στατικό φορτίο. Στον πίνακα 2.5 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των τεχνικών δοκιμής ανάλογα με τον ρυθμό παραμόρφωσης [81]. Ελεγχόμενοι υδραυλικοί σερβοκινητήρες μπορούν να παράγουν ταχύτητες εμβόλου μέχρι 800 mm/min. Αυτό αντιστοιχεί σε έναν ρυθμό παραμόρφωσης της τάξης των 16 s^{-1} για ένα δοκίμιο μήκους 50mm και έτσι με αυτόν τον τρόπο μπορούν να διεξαχθούν μελέτες για την επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης που κυμαίνεται μεταξύ 10^{-4} και 10^{-1} s^{-1} . Η εικόνα 2.9 παρουσιάζει μία Universal μηχανή δοκιμών της εταιρίας MTS [82].

Πίνακας 2.5 Κατηγοριοποίηση των τεχνικών δοκιμής ανάλογα με τον ρυθμό παραμόρφωσης [81].

Strain rate (s^{-1})	Common testing methods	Dynamic considerations	
10^7	HIGH-VELOCITY IMPACT	SHOCK-WAVE PROPAGATION	Inertial forces important
10^6	– Explosives – Normal plate impact – Pulsed laser		
10^5	– Exploding foil – Incl. plate impact (pressure-shear)	SHEAR-WAVE PROPAGATION	
10^4	DYNAMIC-HIGH – Taylor anvil tests – Hopkinson bar – Expanding ring	PLASTIC-WAVE PROPAGATION	
10^3	DYNAMIC-LOW	MECHANICAL RESONANCE IN SPECIMEN AND MACHINE IS IMPORTANT	
10^2	High-velocity hydraulic, or pneumatic machines: cam plastometer		
10^1	QUASI-STATIC Hydraulic, servo-hydraulic or screw-driven testing machines	TESTS WITH CONSTANT CROSSHEAD VELOCITY STRESS THE SAME THROUGHOUT LENGTH OF SPECIMEN	Inertial forces negligible
10^0			
10^{-1}			
10^{-2}			
10^{-3}			
10^{-4}			
10^{-5}	CREEP AND STRESS-RELAXATION	VISCOPLASTIC RESPONSE OF METALS	
10^{-6}	– Conventional testing machine		
10^{-7}	Creep testers		
10^{-8}			
10^{-9}			

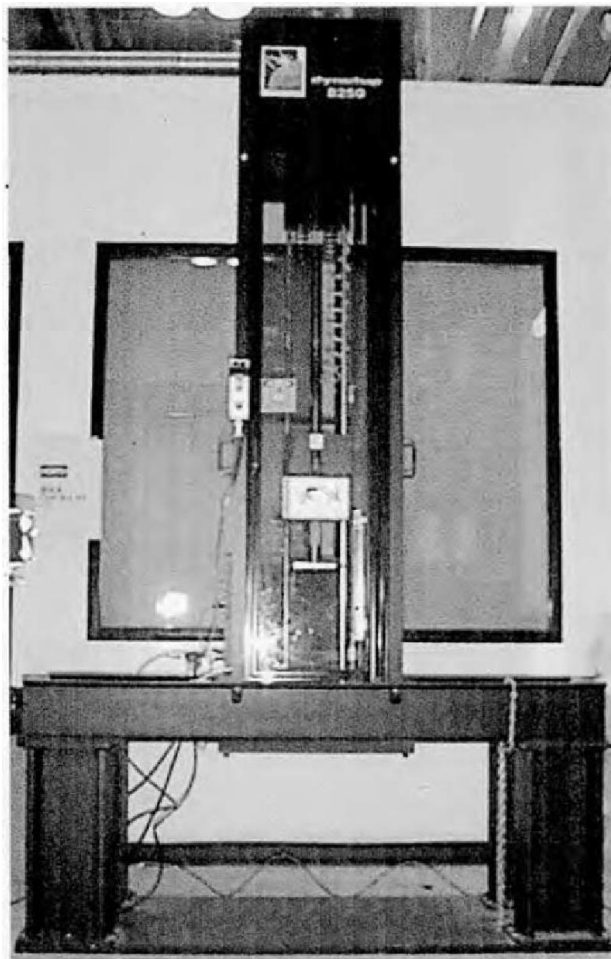


Εικόνα 2.10 Universal μηχανή δοκιμών της εταιρίας MTS [82].

2.5.3 Σφύρα ελεύθερης πτώσης, ολισθαίνουσα σφύρα και εκκρεμές (Drop hammer, sled and pendulum)

Κρουστικές δοκιμές μπορούν να διεξαχθούν με συσκευές όπως η σφύρα ελεύθερης πτώσης, η ολισθαίνουσα σφύρα και το εκκρεμές. Στην περίπτωση της σφύρας, μάζα ανυψώνεται σε ένα συγκεκριμένο ύψος και στη συνέχεια απελευθερώνεται για να προσκρούσει στην κατασκευή που είναι εδρασμένη στη βάση της. Η μέγιστη ταχύτητα της ελεύθερης πτώσης εξαρτάται από το ύψος που η μάζα απελευθερώνεται διότι η τριβή από τους κατακόρυφους οδηγούς συνήθως ελαχιστοποιείται τοποθετώντας ρουλεμάν. Στο άνω άκρο των οδηγών μπορούν να τοποθετηθούν και άλλα μέσα, όπως διάταξη με πιεσμένο αέρα ή ελατήρια, προκειμένου να προσκρούσει η μάζα στην κατασκευή με μεγαλύτερη ταχύτητα. Τέτοια

συστήματα περιλαμβάνουν ένα επιταχυνσιόμετρο συνδεδεμένο με τη μάζα πρόσκρουσης, μία συσκευή μέτρησης της ταχύτητας της λίγο πριν τη σύγκρουση (συνήθως μετρώντας το χρονικό διάστημα για να ταξιδέψει μία γνωστή απόσταση), ένας μεταλλάκτης μετατόπισης για να καταγράψει τη κίνηση της και μία κυψέλη μέτρησης δύναμης που συνήθως τοποθετείται κάτω από την κατασκευή που πρόκειται να εξετασθεί. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η σφύρα (Instron Dynatup 8250) που βρίσκεται στο πανεπιστήμιο Επιστήμης και Τεχνολογίας του Hong Kong. Έχει ύψος περίπου 1.5 μέτρα και μία ρυθμιζόμενη μάζα κρούσης που φτάνει τα 44.89 kg. Όταν επιδρά πάνω της μόνο η βαρύτητα, η ταχύτητα της μάζας κυμαίνεται μεταξύ 0.61-3.66 m/s και μπορεί να αυξηθεί μέχρι τα 13.41 m/s όταν υποστηρίζεται πνευματικά.



Εικόνα 2.11 Σφύρα του πανεπιστημίου του Hong Kong [81].

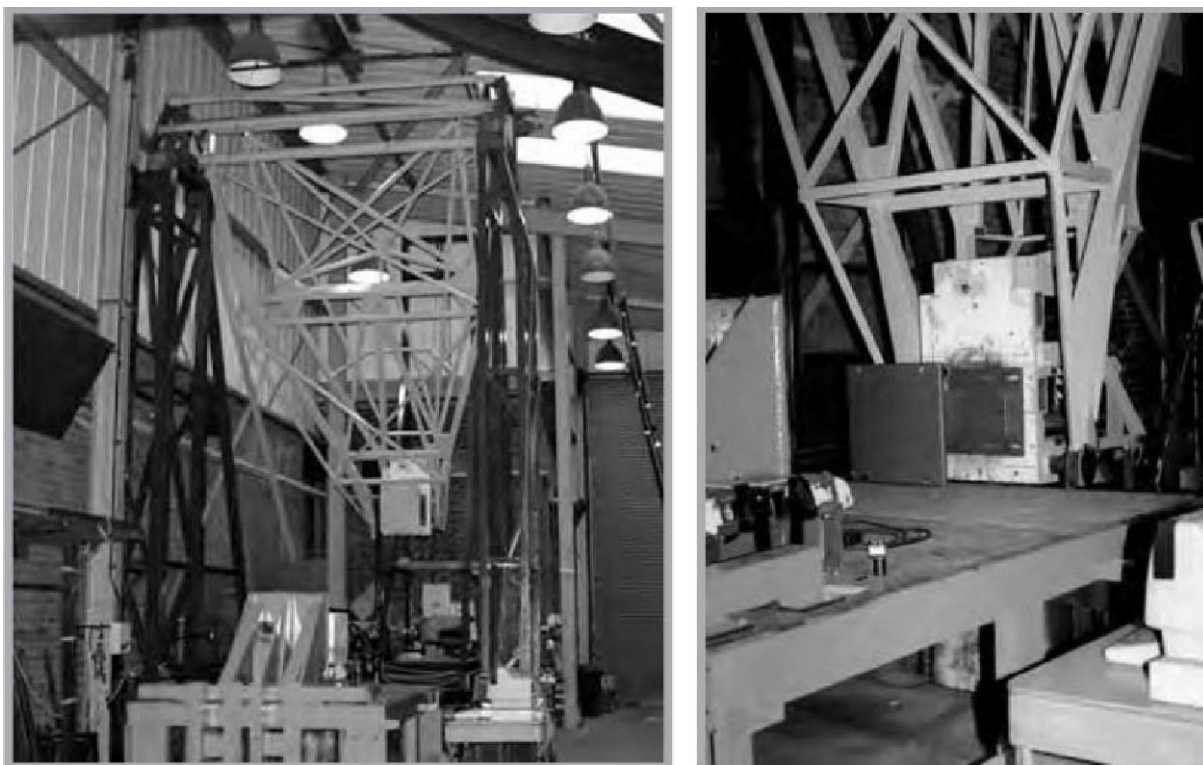
Η εικόνα 2.11 δείχνει μια άλλη μέθοδο διεξαγωγής δοκιμών κρούσης (impact tests). Η διάταξη αυτή ονομάζεται ολισθαίνουσα σφύρα (sled) και βρίσκεται στο Granfield Impact Centre. Αποτελείται από μία ράμπα, που σχηματίζει γωνία 11° με τον ορίζοντα και ένα φορείο που αιωρείται πάνω της. Με αυτόν τον τρόπο το φορείο κινείται χωρίς τριβές και έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί επαναλαμβανόμενες προσκρούσεις. Οι χαμηλές ταχύτητες κρούσης επιτυγχάνονται αποκλειστικά με την επίδραση της βαρύτητας, ενώ για την ανάπτυξη της μέγιστης ταχύτητας (13.5m/s) χρησιμοποιούνται λάστιχα. Η ελάχιστη μάζα που φέρει το

φορτίο είναι 780 kg και η μέγιστη 2000kg αποδίδοντας μέγιστη ενέργεια κατά την πρόσκρουση, 125kJ.



Εικόνα 2.12 Μηχανή δοκιμών Sled, που βρίσκεται στο κέντρο δοκιμών συγκρούσεων του Cranfield [81].

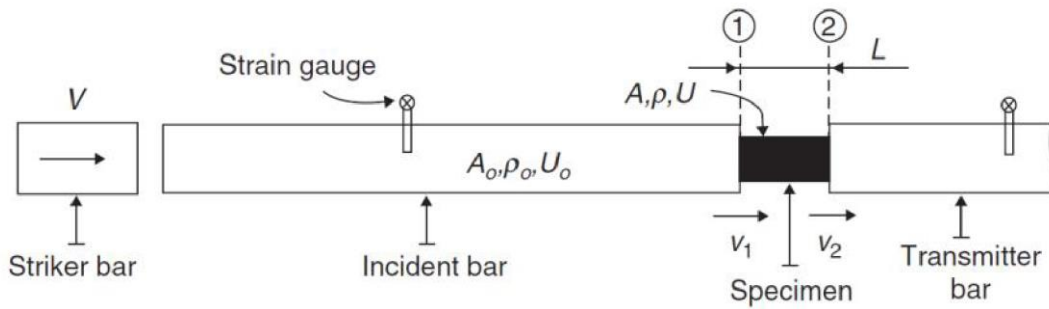
Το εκκρεμές, με κατάλληλη σχεδίαση του βραχίονα αιώρησης, μπορεί επίσης να παράγει κρουστικά φορτία (impact loads). Ο βραχίονας πρέπει να έχει αρκετά μεγάλο μήκος ώστε η κίνηση της μάζας, από την πρώτη επαφή με το υπό εξέταση δοκίμιο μέχρι το πέρας της κατάρρευσης, να είναι προσεγγιστικά ευθύγραμμη και το μέτωπο κρούσης μονίμως κάθετο. Μία τέτοια διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.12 και βρίσκεται στο Cranfield. Μια μεγάλη εγκατάσταση εκκρεμούς αποτελείται από δύο πλευρικά υποστηρίγματα με ένα εκκρεμές να στηρίζεται μεταξύ τους. Η διάταξη έχει ελάχιστη μάζα 1000kg, μέγιστη ταχύτητα 10m/s και μέγιστη ενέργεια 50kJ. Στις μεθόδους δοκιμών που εξετάστηκαν σ' αυτή την παράγραφο, η ταχύτητα της μάζας μετά την πρόσκρουση δεν παραμένει σταθερή, πράγμα που σημαίνει ότι ο ρυθμός παραμόρφωσης μεταβάλλεται διαρκώς. Αυτό μπορεί να δυσκολεύει τη μελέτη του φαινομένου, αλλά το σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι προσομοιάζονται ικανοποιητικά οι πραγματικές συνθήκες σύγκρουσης των οχημάτων [81].



Εικόνα 2.13 Μηχανή δοκιμών τύπου εκκρεμούς που βρίσκεται στο κέντρο δοκιμών συγκρούσεων του Cranfield [81].

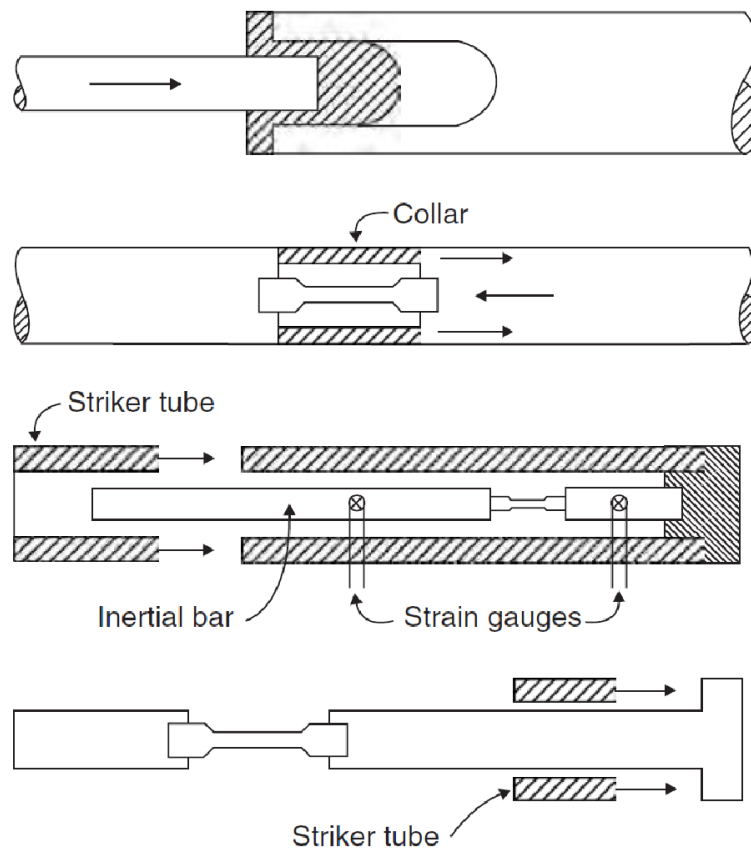
2.5.4 Split Hopkinson pressure bar

Για ρυθμούς παραμόρφωσης της μεταξύ 10^2 - 10^4 s⁻¹, οι καταστατικές σχέσεις του υλικού (material constitutive relationships) μπορούν να ληφθούν με τη δοκιμή της διαιρούμενης ράβδου πίεσης του Hopkinson (split Hopkinson pressure bar, SHPB). Η εικόνα 1.12 δείχνει ένα σκίτσο αυτή της διάταξης. Η τυπική καταγραφή των σημάτων από τα επιμηκυνσιόμετρα (strain gauges) που είναι τοποθετημένα στη ράβδο, μας επιτρέπει τη δημιουργία της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης. Το υπό εξέταση δοκίμιο τοποθετείται μεταξύ της προσπίπτουσας ράβδου και της ράβδου μετάδοσης (transmitter bar). Στη συνέχεια παράγεται ένας ελαστικός παλμός πίεσης που δρα στη προσπίπτουσα ράβδο και το δοκίμιο (διεπαφή 1, βλ. εικόνα 1.12). Ένα μέρος αυτής της ελαστικής τάσης ανακλάται και η υπόλοιπη μεταφέρεται στο δοκίμιο παραμορφώνοντας το πλαστικά. Ομοίως, στη διεπαφή 2 μεταξύ του δοκιμίου και της ράβδου μετάδοσης (transmitter bar), το τασικό κύμα ανακλάται και ένα μέρος του μεταδίδεται στο δοκίμιο. Αυτή η ανακλώμενη τάση πρέπει να είναι επαρκής διάρκειας. Το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης του υλικού μπορεί να εξαχθεί από το ιστορικό παραμόρφωσης-χρόνου των δύο ράβδων.



Εικόνα 2.14 Σκαρίφημα της διαιρούμενης ράβδου Hopkinson [81].

Επιπλέον, η διαιρούμενη ράβδος του Hopkinson μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των ιδιοτήτων του υλικού σε εφελκυσμό, στρέψη και διάτμηση. Μερικά σκίτσα της διάταξης αυτής για δοκιμή σε εφελκυσμό παρουσιάζονται στην εικόνα 2.15. Καμπύλες διατμητικής τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης μπορούν να εξαχθούν με τη χρήση στρεπτικής ράβδου [81].



Εικόνα 2.15 Σκαρίφηματα με διάφορες μορφές της διαιρούμενης ράβδου Hopkinson [81].

2.5.5 Όπλα αερίου (Gas guns) και άλλες τεχνικές

Τα όπλα αερίου χρησιμοποιούνται εκτεταμένα για την παραγωγή ταχυτήτων κρούσης από 100 μέχρι 8000m/s. Για τη μελέτη απορροφητών ενέργειας, ένα κοινό όπλο αερίου μίας βαθμίδας είναι επαρκές. Για παράδειγμα, αυτό στο Swinburne έχει μέγιστη ταχύτητα γύρω στα 600m/s. Η κάνη έχει μήκος 6 μέτρα και εσωτερική διάμετρο 12.58mm. Η μέγιστη πίεση λειτουργίας είναι περίπου 15MPa (150bar). Με αυτή τη συσκευή το κυλινδρικό δοκίμιο επιταχύνεται για να προσκρούσει σε ένα άκαμπτο αμόνι. Η μέση τάση ροής για υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης, μπορεί να καθοριστεί μετρώντας την ταχύτητα πρόσκρουσης και τις διαστάσεις του δοκιμίου μετά το πείραμα. Εφαρμόζοντας την τεχνική αυτή μπορούν να πραγματοποιηθούν ρυθμοί παραμόρφωσης της τάξης των 10^4 s^{-1} . Όπλα αερίου έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη πορωδών υλικών σε δυναμική καταπόνηση. Εναλλακτικά, ένας κυκλικής διατομής σωλήνας μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στη κάνη και μετά να επιταχυνθεί για να προσκρούσει στο αμόνι, παρουσιάζοντας ποικίλες μορφές λυγισμού και απόσχισης. Στην τελευταία περίπτωση η μέγιστη ταχύτητα φτάνει τα 250 m/s. Για την ανάπτυξη υψηλότερων ταχυτήτων χρησιμοποιούνται ελαφρά αέρια, όπως το υδρογόνο και το ήλιο, αλλά και όπλα δύο βαθμίδων. Για την παραγωγή δυναμικών φορτίων είναι διαθέσιμες και άλλες τεχνικές, όπως αυτές που κάνουν χρήση εκρηκτικών ή παράγουν επιτάχυνση με ηλεκτρομαγνητισμό [81].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα εξετασθέντα δοκίμια και ο εξοπλισμός της πειραματικής διαδικασίας δοκιμών αξονικής συμπίεσης. Επιπλέον, παραθέτονται τα πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για κάθε μία δοκιμή που πραγματοποιήθηκε, μαζί με τα υπολογισθέντα χαρακτηριστικά απόκρισης έναντι της αξονικής συμπίεσης. Ακόμη, συγκρίνονται όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια μεταξύ τους ως προς την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά απόκρισής τους για την αξιολόγησή τους, με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων.

3.1 Διάταξη πειραματικών δοκιμών

Οι πειραματικές δοκιμές αξονικής συμπίεσης πραγματοποιήθηκαν στην υδραυλική πρέσσα των εργαστηριακών εγκαταστάσεων του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Η κεφαλή της πρέσσας ασκεί τα αξονικά, θλιπτικά εν προκειμένω, φορτία κινούμενη υπό την πίεση υδραυλικού ελαίου. Σε αυτήν πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές δοκιμές συμπίεσης των εξεταζόμενων δοκιμίων αλουμινίου.



Εικόνα 3.1 Υδραυλική πρέσσα (γενική όψη και σημείο στήριξης δοκιμίων)

Για κάθε εξεταζόμενο δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν δυο πειραματικές δοκιμές αξονικής συμπίεσης ώστε να εξαλειφθούν πιθανά σφάλματα κατά την πειραματική διαδικασία, όπως σφάλματα κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων ή των μετρήσεων, καθώς επίσης και η επίδραση από ατέλειες κρυσταλλικής δομής του υλικού ή περιβαλλοντικές συνθήκες

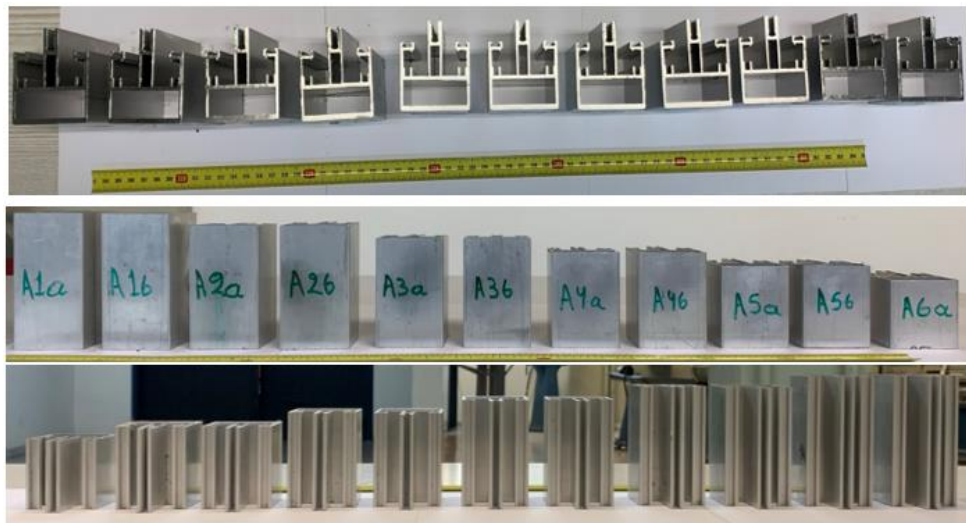
διεξαγωγής του πειράματος. Τέλος, σε κάθε πειραματική δοκιμή, το εξεταζόμενο δοκίμιο συμπίεστηκε έως το μισό του αρχικού του μήκους, ενώ η ταχύτητα καθόδου της κινητής κεφαλής της πρέσσας ήταν σταθερή και ίση με 10 mm/min αποδίδοντας ημι-στατικό χαρακτήρα στις δοκιμές αξονικής συμπίεσης.

3.2 Εξεταζόμενα Δοκίμια

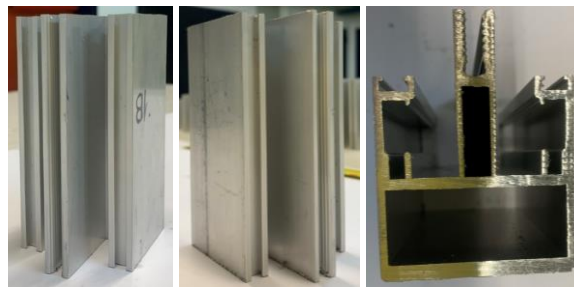
Τα εξεταζόμενα δοκίμια προήλθαν από ράβδους αλουμινίου κοίλης διελατής διατομής, οι οποίες προήλθαν από διέλαση από όπου κατόπιν κόπηκαν σε κατάλληλα σημεία ώστε να προμηθευτούμε τα επιθυμητά δοκίμια. Τα δοκίμια αλουμινίου προήλθαν μάλιστα από δυο ράβδους διαφορετικής διατομής εκ των οποίων και οι δυο διατομές είναι κοίλες και διελατές, ορθογωνικής κατά βάση γεωμετρίας με κατάλληλες - διαφορετικές μεταξύ τους - εσοχές και προεξοχές οι οποίες χρησιμοποιούνται για οδήγηση συσκευών καθόσον οι ράβδοι αποσκοπούσαν στην οδήγηση φορείων. Τα δοκίμια μάλιστα επιλέχθηκε να κοπούν σε πλήθος διαφορετικών αρχικών μηκών από 100 έως και 50 mm, ώστε εκτός από την επίδραση της γεωμετρίας της διατομής να εξεταστεί και η επίδραση του αρχικού μήκους των δοκιμίων στα χαρακτηριστικά της απόκρισής του έναντι αξονικής κατάρρευσης και στον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης. Ως εκ τούτου, τα εξεταζόμενα δοκίμια κατηγοριοποιήθηκαν σε δυο ομάδες, Α και Β, ανάλογα με τη μορφή της διατομής τους. Το εμβαδόν κάθε διατομής υπολογίστηκε ίσο με 777 mm² για την ομάδα Α, και 727 mm² για την ομάδα Β. Επιπλέον, κάθε δοκίμιο λήφθηκε δυο φορές («α» και «β»), κόβοντας δηλαδή κάθε ράβδο δυο διαδοχικές φορές στο ίδιο μήκος, ώστε για κάθε δοκίμιο να πραγματοποιηθεί δυο φορές κάθε δοκιμή συμπίεσης ώστε να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα κατά την πειραματική διαδικασία. Έτσι λοιπόν, διακρίνουμε τα ακόλουθα δοκίμια ανάλογα με τη διατομή τους και το αρχικό τους μήκος.

Πίνακας 3.1 Κωδικοποίηση και αρχικό μήκος εξεταζόμενων δοκιμίων

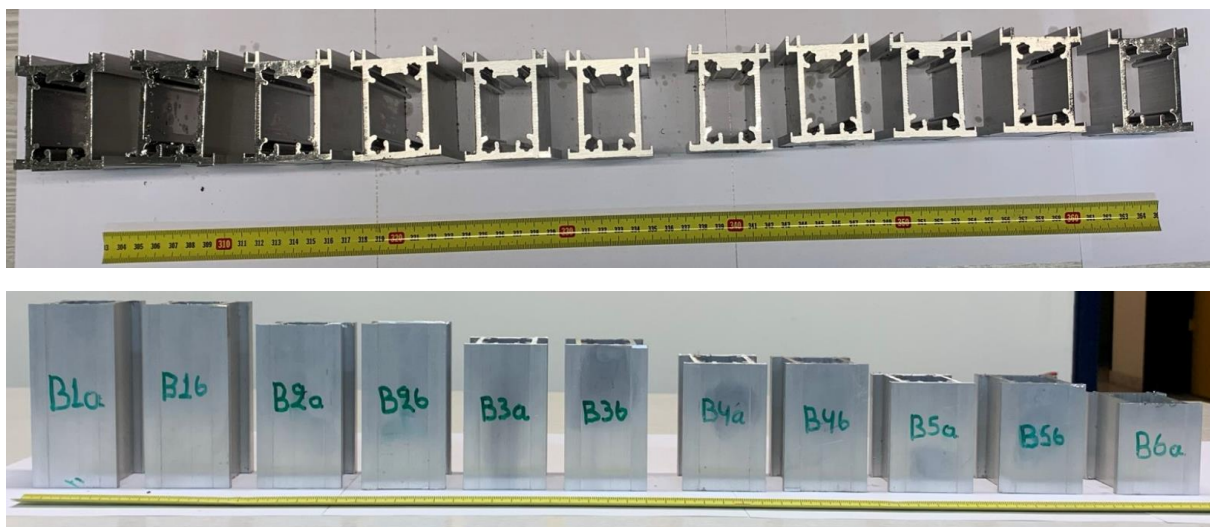
Δοκίμιο	Αρχ. Μήκος L ₀ (mm)	Μάζα (gr)	Δοκίμιο	Αρχ. Μήκος L ₀ (mm)	Μάζα (gr)
A1a	100	210	B1a	100	196
A1b	100	210	B1b	100	196
A2a	90	189	B2a	90	177
A2b	90	189	B2b	90	177
A3a	80	168	B3a	80	157
A3b	80	168	B3b	80	157
A4a	70	147	B4a	70	138
A4b	70	147	B4b	70	138
A5a	60	126	B5a	60	118
A5b	60	126	B5b	60	118
A6a	50	105	B6a	50	98



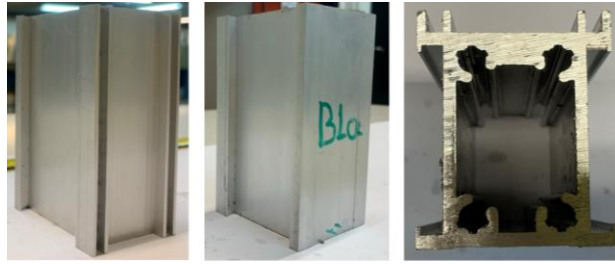
Εικόνα 3.2 Δοκίμια διατομής ομάδας-A (κάτοψη/οπίσθια όψη/ πρόοψη)



Εικόνα 3.3 Λεπτομέρεια δοκίμιου διατομής ομάδας-A



Εικόνα 3.4 Δοκίμια διατομής ομάδας-B (κάτοψη/ πρόοψη)



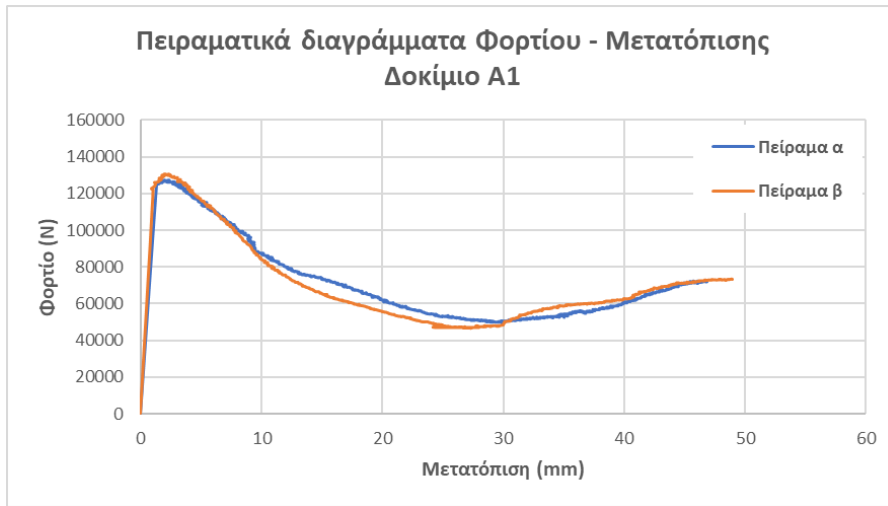
Εικόνα 3.5 Λεπτομέρεια δοκιμίου διατομής ομάδας-B

3.3 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών

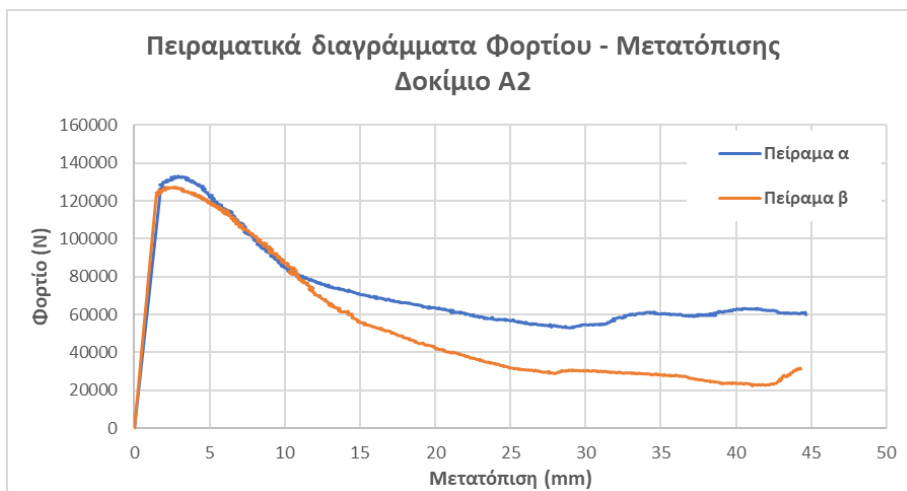
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών αξονικής συμπίεσης που διεξήχθησαν, τόσο αναφορικά με τις προκύπτουσες καμπύλες φορτίου-μετατόπισης, όσο και με τα υπολογισθέντα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισης των δοκιμίων έναντι της αξονικής τους κατάρρευσης. Κάθε πειραματική δοκιμή αξονικής συμπίεσης εκτελέστηκε υπό ημι-στατικές συνθήκες υπό σταθερή ταχύτητα ίση με 10 mm/min, ενώ τα δοκίμια συμπίεστηκαν έως το μισό του αρχικού τους ύψους. Μάλιστα, για κάθε εξεταζόμενη διάταξη πραγματοποιήθηκαν δυο πειραματικές δοκιμές για λόγους εξάλειψης σφαλμάτων. Τέλος, για κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και των δυο πειραματικών δοκιμών που διεξήχθησαν, με τις προκύπτουσες καμπύλες φόρτισης με τα επακόλουθα χαρακτηριστικά μεγέθη τους να παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο τέλος της ενότητας.

3.3.1 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών δοκιμών A1-A2-A4

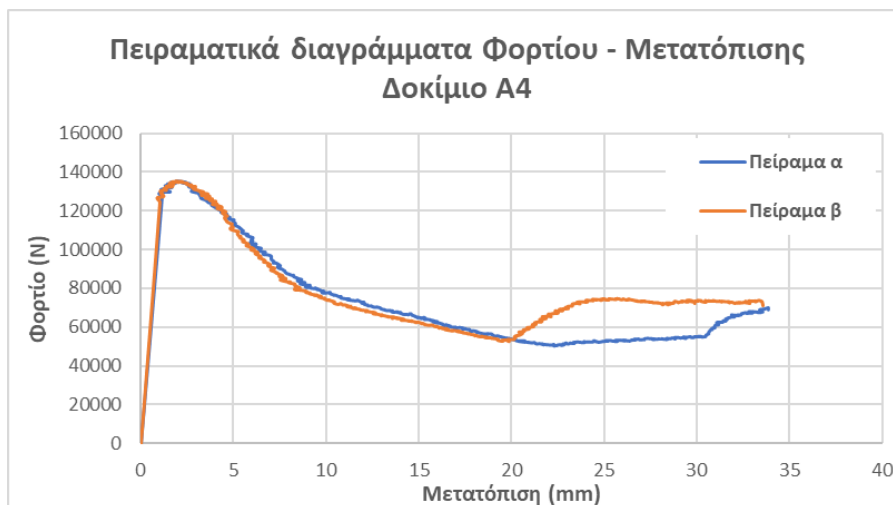
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα που καταγράφηκαν, τα αντίστοιχα διαγράμματα θλιπτικού φορτίου – μετατόπισης παραθέτονται παρακάτω για τις δυο πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν αναφορικά με τα δοκίμια A1, A2 και A4. Τα δοκίμια αυτά της ομάδας A παρουσίασαν την μικρότερη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας καθώς χαρακτηρίστηκαν από μικρότερη ειδική απορροφώμενη ενέργεια. Όπως παρατηρείται από τη μορφή των διαγραμμάτων, οι δυο πειραματικές δοκιμές απέδωσαν ικανοποιητική ταύτιση στο μέγιστο φορτίο κατάρρευσης που σηματοδοτεί την έναρξη της πλαστικοποίησης, ενώ αναφορικά με το μέσο φορτίο και την απορροφώμενη ενέργεια το δοκίμιο A1 εμφάνισε ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των δυο δοκιμών σε αντίθεση με τα δοκίμια A2 και A4 τα οποία εμφάνισαν σημαντικότερο σφάλμα λόγω της απόκλισης των φορτίων κατά την πρόοδο της κατάρρευσης. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στον ασταθή και απρόβλεπτο χαρακτήρα του λυγισμού Euler που εμφάνισαν τα προεξέχοντα τμήματα της διατομής. απέδωσαν τον ίδιο μηχανισμό αξονικής κατάρρευσης όπως περιγράφηκε και παριστάνεται στις αντίστοιχες εικόνες.



Εικόνα 3.6 Πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης δοκίμιου A1 για τις δυο δοκιμές

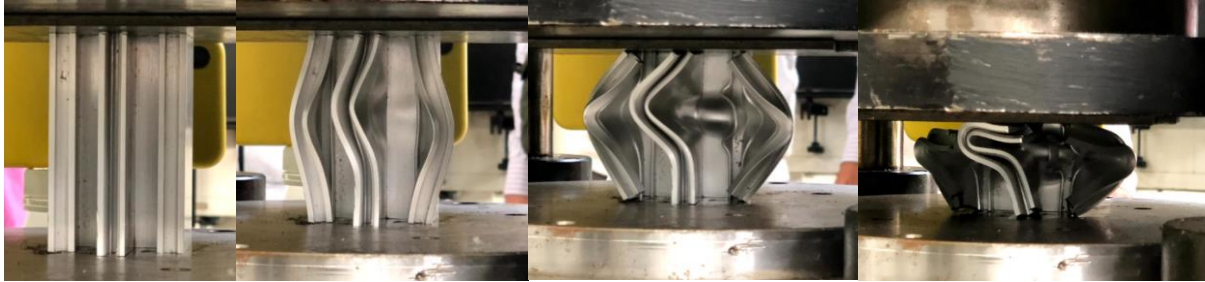


Εικόνα 3.7 Πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης δοκίμιου A2 για τις δυο δοκιμές

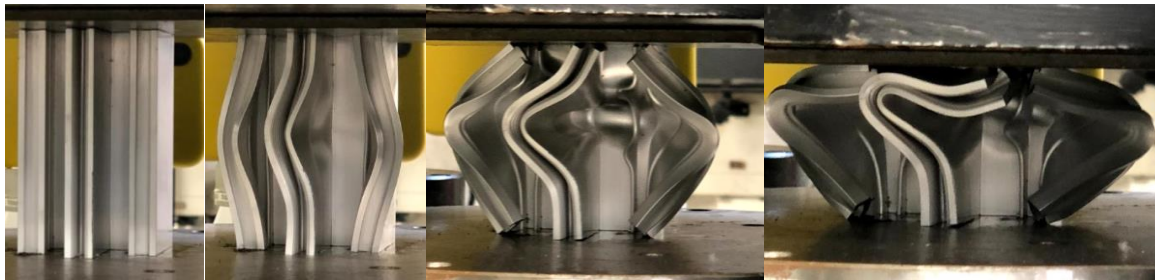


Εικόνα 3.8 Πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης δοκίμιου A4 για τις δυο δοκιμές

Παρατηρώντας δε τα στιγμιότυπα κατάρρευσης και την τελική μορφή των συμπιεσμένων δοκιμίων, διαπιστώνουμε πως το ορθογωνικής διατομής κύριο σώμα των δοκιμίων έχει καταρρεύσει σχηματίζοντας τις πτυχώσεις (folding mode) που συνήθως εμφανίζονται σε τυπικούς σωλήνες ορθογωνικής διατομής, ενώ τα στελέχη οδήγησης που διαθέτουν τα δοκίμια, από την μια πλευρά της διατομής, έχουν υποστεί λυγισμό-Euler κατά την κατάρρευση. Τέλος, και οι δυο δοκιμές απέδωσαν τον ίδιο μηχανισμό αξονικής κατάρρευσης όπως περιγράφηκε και παριστάνεται στις αντίστοιχες εικόνες και για τα τρία εξεταζόμενα δοκίμια.



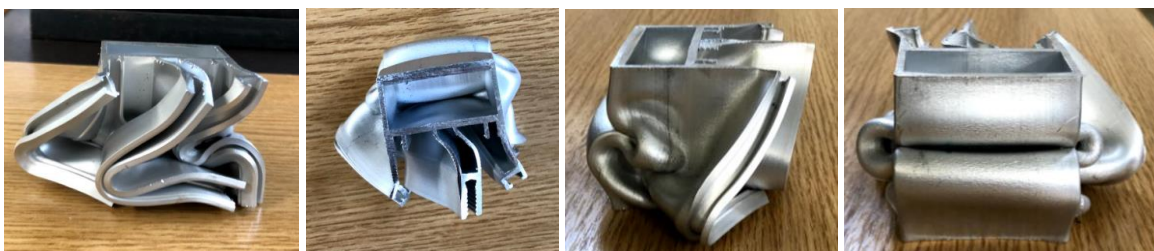
Εικόνα 3.9 Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίου A1



Εικόνα 3.10 Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίου A2



Εικόνα 3.11 Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίου A4



Εικόνα 3.12 Τελική άποψη δοκιμίου A1 κατά το πέρας της κατάρρευσης



Εικόνα 3.13 Τελική άποψη δοκιμίου A2 κατά το πέρας της κατάρρευσης



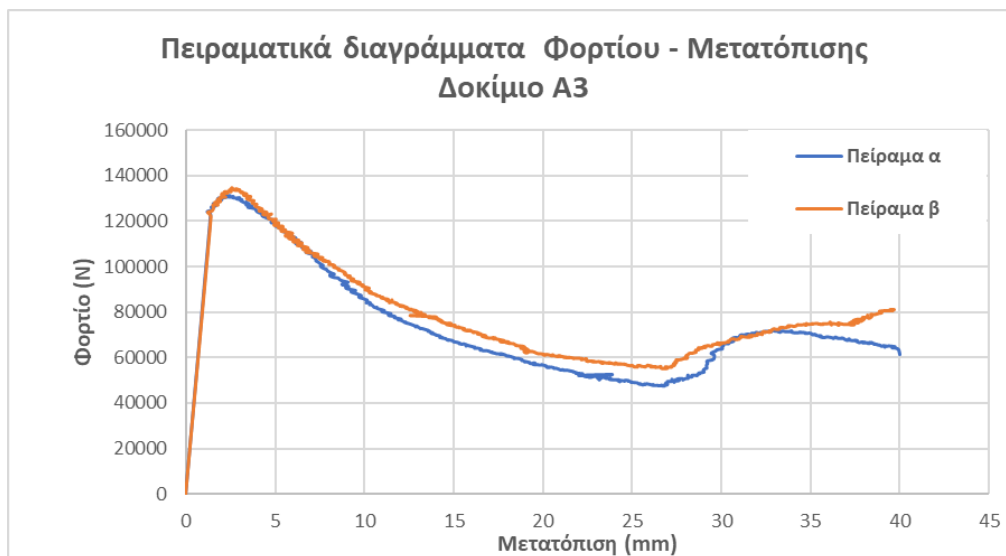
Εικόνα 3.14 Τελική άποψη δοκιμίου A4 κατά το πέρας της κατάρρευσης

Πίνακας 3.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών A1-A2-A4

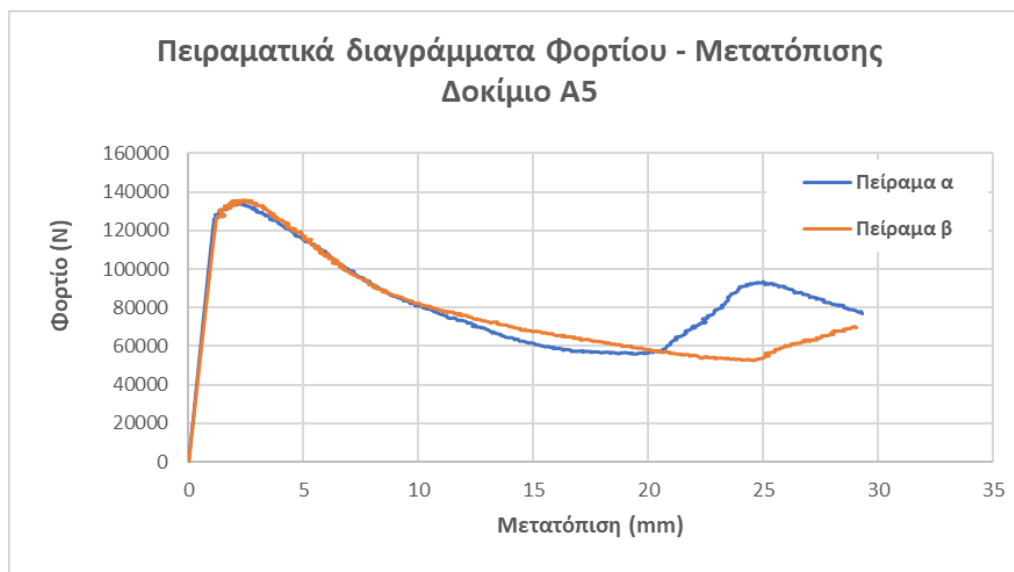
Δοκίμιο A1					
	PCF (kN)	MCF (kN)	E_{abs} (J)	CLE (-)	SEA (kJ/kg)
1 ^η Πειρ. Δοκιμή	127,21	70,69	3313,97	0,56	15,79
2 ^η Πειρ. Δοκιμή	130,73	70,07	3430,00	0,54	16,34
Απόκλιση (%)	2,77	0,88	3,50	3,54	3,50
Μέση Τιμή	128,97	70,38	3371,99	0,55	16,06
Δοκίμιο A2					
	PCF (kN)	MCF (kN)	E_{abs} (J)	CLE (-)	SEA (kJ/kg)
1 ^η Πειρ. Δοκιμή	133,26	72,32	3228,03	0,54	17,08
2 ^η Πειρ. Δοκιμή	127,44	53,58	2374,02	0,42	12,56
Απόκλιση (%)	4,37	25,91	26,45	22,53	26,45
Μέση Τιμή	130,35	62,95	2801,02	0,48	14,82
Δοκίμιο A4					
	PCF (kN)	MCF (kN)	E_{abs} (J)	CLE (-)	SEA (kJ/kg)
1 ^η Πειρ. Δοκιμή	135,13	72,36	2451,41	0,54	16,71
2 ^η Πειρ. Δοκιμή	135,58	77,70	2607,77	0,57	17,75
Απόκλιση (%)	0,34	7,37	6,38	7,01	6,38
Μέση Τιμή	135,35	75,03	2529,59	0,55	17,21

3.3.2 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών δοκιμών A3-A5-A6

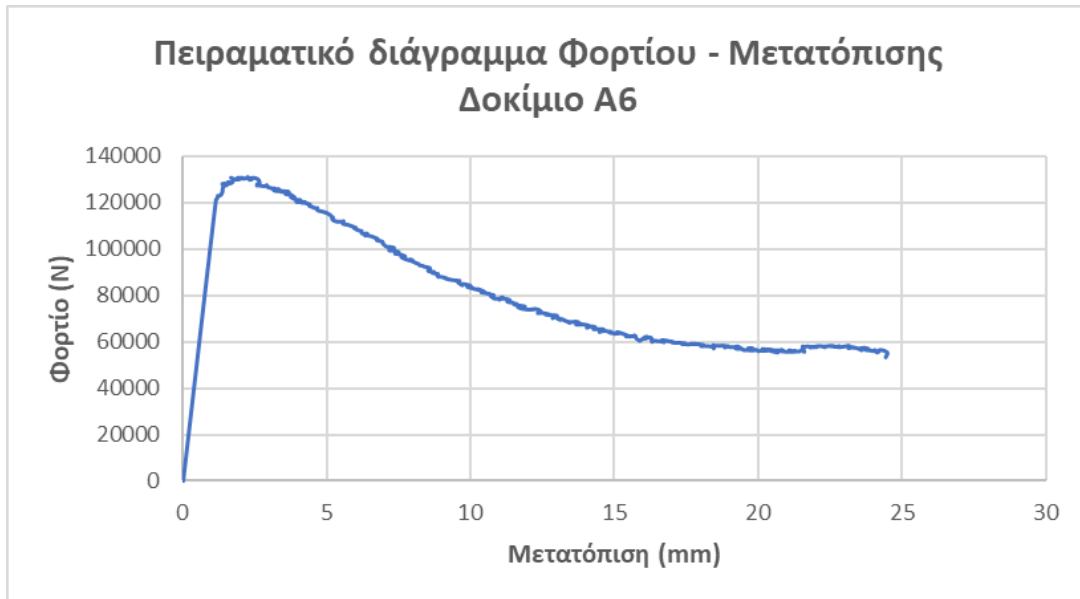
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα που καταγράφηκαν, τα αντίστοιχα διαγράμματα θλιπτικού φορτίου – μετατόπισης παραθέτονται παρακάτω για τις δυο πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν αναφορικά με τα δοκίμια A3, A5 και A6. Τα δοκίμια αυτά της ομάδας A παρουσίασαν την μεγαλύτερη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας καθώς χαρακτηρίστηκαν από την υψηλότερη ειδική απορροφώμενη ενέργεια. Όπως παρατηρείται από τη μορφή των διαγραμμάτων, οι δυο πειραματικές δοκιμές απέδωσαν ικανοποιητική ταύτιση στο μέγιστο φορτίο κατάρρευσης που σηματοδοτεί την έναρξη της πλαστικοποίησης, και στο μέσο φορτίο και την απορροφώμενη ενέργεια.



Εικόνα 3.15 Πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου A3 για τις δυο δοκιμές

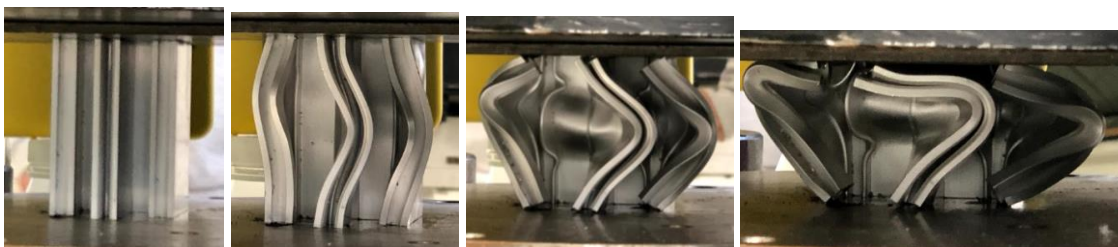


Εικόνα 3.16 Πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου A5 για τις δυο δοκιμές



Εικόνα 3.17 Πειραματικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου A6

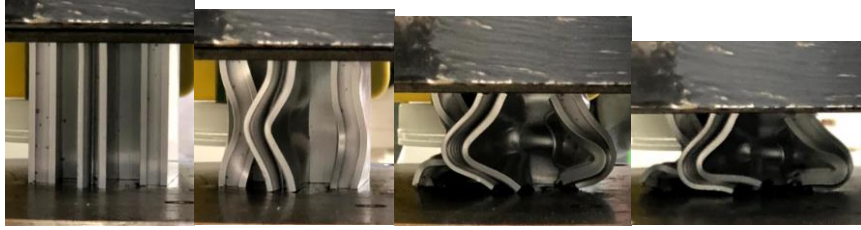
Παρατηρώντας δε τα στιγμιότυπα κατάρρευσης και την τελική μορφή των συμπιεσμένων δοκιμίων, διαπιστώνουμε πως το ορθογωνικής διατομής κύριο σώμα των δοκιμίων έχει καταρρεύσει σχηματίζοντας τις πτυχώσεις (folding mode), ενώ τα στελέχη οδήγησης που διαθέτουν τα δοκίμια, από την μια πλευρά της διατομής, έχουν υποστεί λυγισμό-Euler κατά την κατάρρευση. Τέλος, και οι δυο δοκιμές απέδωσαν τον ίδιο μηχανισμό αξονικής κατάρρευσης όπως περιγράφηκε και παριστάνεται στις αντίστοιχες εικόνες και για τα τρία εξεταζόμενα δοκίμια.



Εικόνα 3.18 Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίου A3



Εικόνα 3.19 Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίου A5



Εικόνα 3.20 Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίου A6



Εικόνα 3.21 Τελική άποψη δοκιμίου A3 κατά το πέρας της κατάρρευσης



Εικόνα 3.22 Τελική άποψη δοκιμίου A5 κατά το πέρας της κατάρρευσης



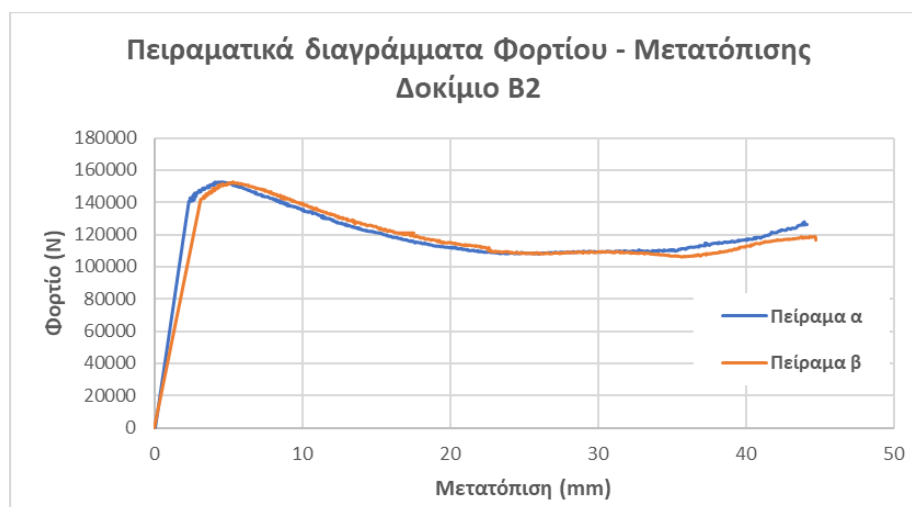
Εικόνα 3.23 Τελική άποψη δοκιμίου A6 κατά το πέρας της κατάρρευσης

Πίνακας 3.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών ομάδας A3-A5-A6

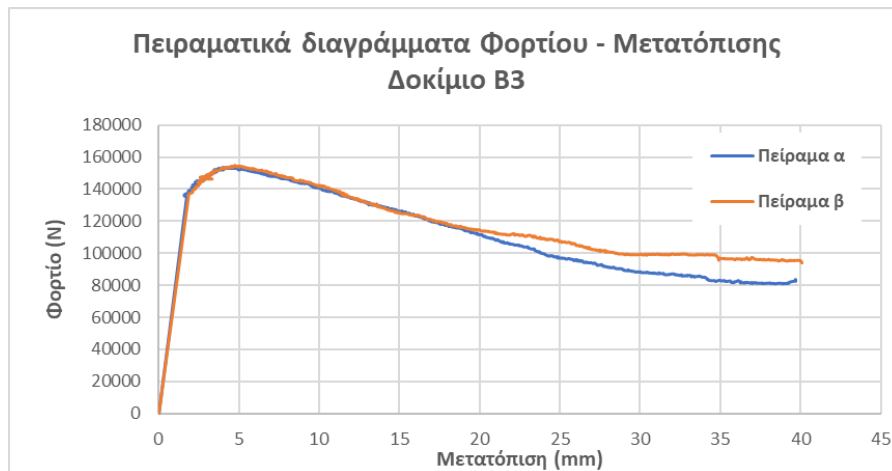
Δοκίμιο A3					
	PCF (kN)	MCF (kN)	E_{abs} (J)	CLE (-)	SEA (kJ/kg)
1 ^η Πειρ. Δοκιμή	131,46	73,80	2951,42	0,56	17,57
2 ^η Πειρ. Δοκιμή	134,73	78,82	3127,41	0,59	18,62
Απόκλιση (%)	2,49	6,79	5,96	4,20	5,96
Μέση Τιμή	133,10	76,31	3039,41	0,57	18,10
Δοκίμιο A5					
	PCF (kN)	MCF (kN)	E_{abs} (J)	CLE (-)	SEA (kJ/kg)
1 ^η Πειρ. Δοκιμή	133,88	83,05	2434,21	0,62	19,32
2 ^η Πειρ. Δοκιμή	135,87	78,07	2268,29	0,57	18,01
Απόκλιση (%)	1,48	6,00	6,81	7,37	6,81
Μέση Τιμή	134,87	80,56	2351,25	0,60	18,66
Δοκίμιο A6					
	PCF (kN)	MCF (kN)	E_{abs} (J)	CLE (-)	SEA (kJ/kg)
1 ^η Πειρ. Δοκιμή	131,30	80,09	1960,41	0,61	18,67

3.3.3 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών δοκιμίου B2-B3-B5

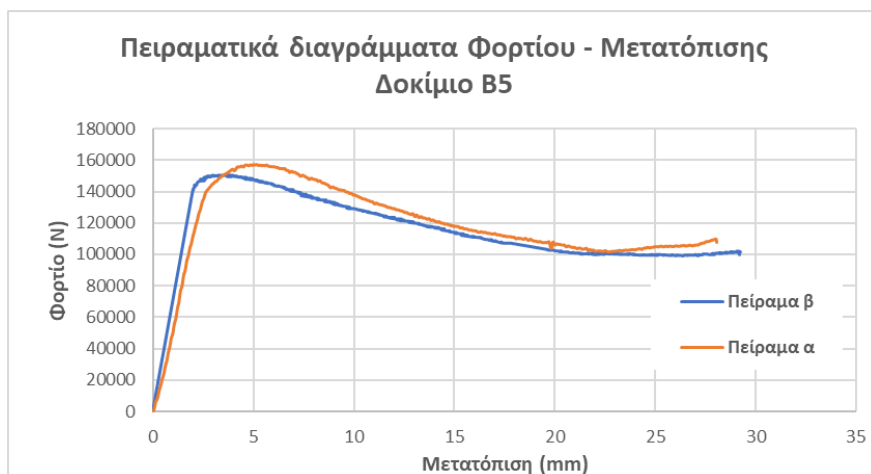
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα που καταγράφηκαν, τα αντίστοιχα διαγράμματα θλιπτικού φορτίου – μετατόπισης παραθέτονται παρακάτω για τις δυο πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν αναφορικά με τα δοκίμια B2, B3 και B5. Τα δοκίμια αυτά της ομάδας B παρουσίασαν την μικρότερη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας καθώς χαρακτηρίστηκαν από μικρότερη ειδική απορροφώμενη ενέργεια. Όπως παρατηρείται από τη μορφή των διαγραμμάτων, οι δυο πειραματικές δοκιμές απέδωσαν ικανοποιητική ταύτιση στο μέγιστο και στο μέσο φορτίο κατάρρευσης, παρουσιάζοντας έτσι πλήρη σύγκλιση στην εκτίμηση της έναρξης της πλαστικοποίησης και στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.



Εικόνα 3.24 Πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου B2 για τις δυο δοκιμές



Εικόνα 3.25 Πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου B3 για τις δυο δοκιμές



Εικόνα 3.26 Πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου B5 για τις δυο δοκιμές

Παρατηρώντας δε τα στιγμιότυπα κατάρρευσης και την τελική μορφή των συμπιεσμένων δοκιμίων, διαπιστώνουμε πως τα δοκίμια κατέρρευσαν σχηματίζοντας πτυχώσεις (folding mode) ανάλογες αυτών των σωλήνων ορθογωνικής διατομής, με τις προεξοχές οδήγησης πλέον να αναδιπλώνονται και αυτές σχηματίζοντας πτυχώσεις χωρίς να εμφανίζουν λυγισμό, καθώς καθοριστικός παράγοντας για αυτό αποτέλεσε το μικρής έκτασης μήκος κατά το οποίο προεξείχαν. Τέλος, και οι δυο δοκιμές απέδωσαν τον ίδιο μηχανισμό αξονικής κατάρρευσης όπως περιγράφηκε και παριστάνεται στις αντίστοιχες εικόνες.



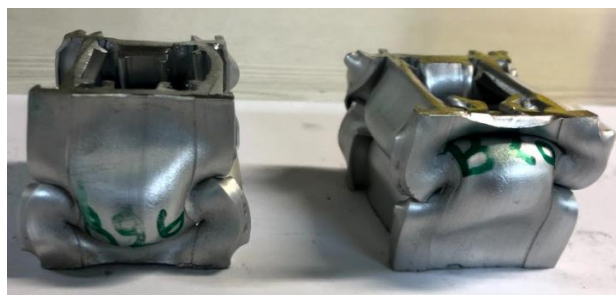
Εικόνα 3.27 Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίου B2



Εικόνα 3.28 Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίου B3



Εικόνα 3.29 Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίου B5



Εικόνα 3.30 Τελική άποψη δοκιμίου B2 κατά το πέρας της κατάρρευσης



Εικόνα 3.31 Τελική άποψη δοκιμίου B3 κατά το πέρας της κατάρρευσης



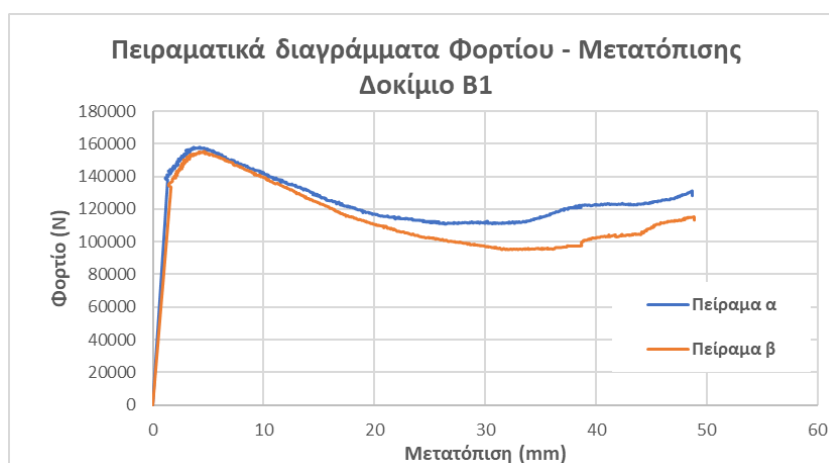
Εικόνα 3.32 Τελική άποψη δοκιμίου B5 κατά το πέρας της κατάρρευσης

Πίνακας 3.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών ομάδας B2-B3-B5

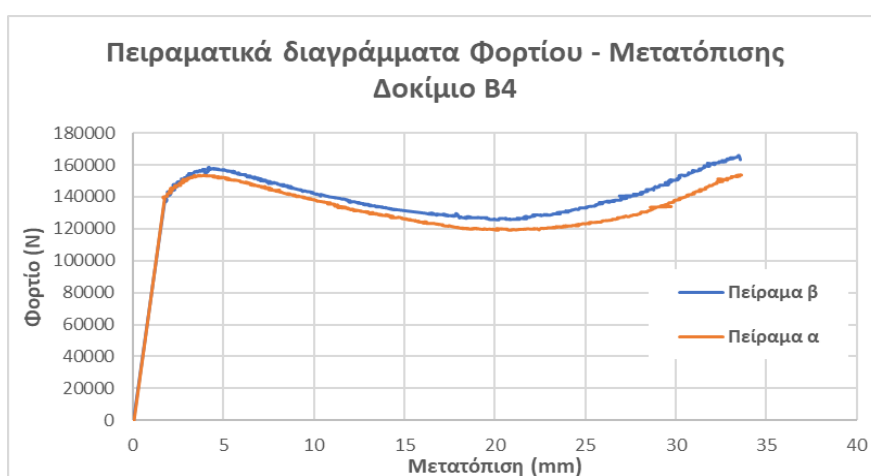
Δοκίμιο B2					
	PCF (kN)	MCF (kN)	E_{abs} (J)	CLE (-)	SEA (kJ/kg)
1 ^η Πειρ. Δοκιμή	152,45	117,01	5166,20	0,77	29,22
2 ^η Πειρ. Δοκιμή	153,04	116,84	5223,67	0,76	29,56
Απόκλιση (%)	0,39	0,14	1,11	0,52	1,11
Μέση Τιμή	152,74	116,93	5194,94	0,77	29,38
Δοκίμιο B3					
	PCF (kN)	MCF (kN)	E_{abs} (J)	CLE (-)	SEA (kJ/kg)
1 ^η Πειρ. Δοκιμή	153,85	110,97	4404,78	0,72	28,02
2 ^η Πειρ. Δοκιμή	154,88	116,10	4654,34	0,75	29,6
Απόκλιση (%)	0,67	4,62	5,67	3,93	5,67
Μέση Τιμή	154,37	113,53	4529,56	0,74	28,81
Δοκίμιο B5					
	PCF (kN)	MCF (kN)	E_{abs} (J)	CLE (-)	SEA (kJ/kg)
1 ^η Πειρ. Δοκιμή	157,15	118,53	3323,90	0,75	28,19
2 ^η Πειρ. Δοκιμή	150,91	114,63	3349,24	0,76	28,41
Απόκλιση (%)	3,97	3,29	0,76	0,71	0,76
Μέση Τιμή	154,03	116,58	3336,57	0,76	28,3

3.3.4 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών δοκιμίου B1-B4-B6

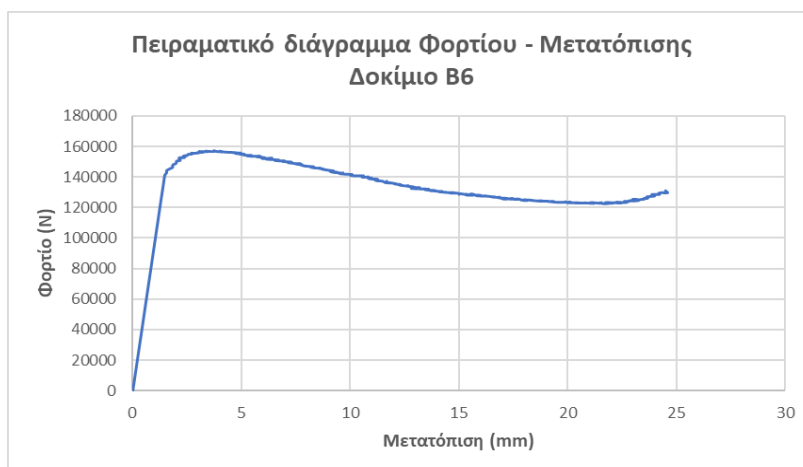
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα που καταγράφηκαν, τα αντίστοιχα διαγράμματα θλιπτικού φορτίου – μετατόπισης παραθέτονται παρακάτω για τις δυο πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν αναφορικά με τα δοκίμια B1, B4 και B6. Τα δοκίμια αυτά της ομάδας B παρουσίασαν την μεγαλύτερη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας καθώς χαρακτηρίστηκαν από υψηλότερη ειδική απορροφώμενη ενέργεια. Όπως παρατηρείται από τη μορφή των διαγραμμάτων, οι δυο πειραματικές δοκιμές απέδωσαν ικανοποιητική ταύτιση στο μέγιστο φορτίο κατάρρευσης, ενώ στο μέσο φορτίο και στην εκτιμώμενη ενέργεια απορρόφησης οι αποκλίσεις ήταν ελαφρώς πιο σημαντικές. Οι αποκλίσεις αυτές της κατανομής των φορτίων κατά την εξέλιξη της κατάρρευσης μπορούν να αποδοθούν στη θέση σχηματισμού της αρχικής πτύχωσης, όπου αναφορικά με το δοκίμιο B1α σχηματίστηκε κοντά στο σημείο στήριξης συσσωρευόντας την πλαστικοποιημένη μάζα του υλικού εκεί, προβάλλοντας έτσι περαιτέρω αντίσταση στην εξέλιξη της κατάρρευσης. Αντίθετα, το δοκίμιο B1β εμφάνισε τον αρχικό λοβό στο μέσο του μήκους του, διευκολύνοντας έτσι την εξέλιξη της κατάρρευσης.



Εικόνα 3.33 Πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου B1 για τις δυο δοκιμές



Εικόνα 3.34 Πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου B4 για τις δυο δοκιμές

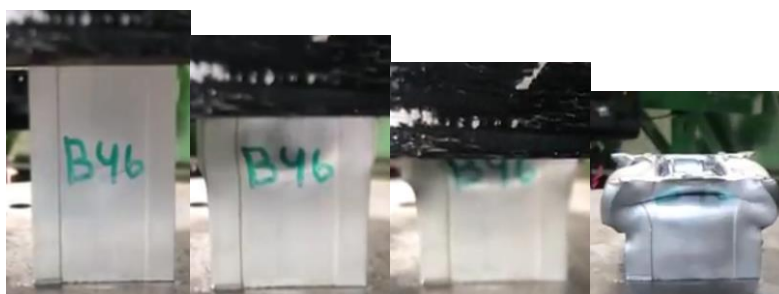


Εικόνα 3.35 Πειραματικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου B6

Παρατηρώντας δε τα στιγμιότυπα κατάρρευσης και την τελική μορφή των συμπιεσμένων δοκιμίων, διαπιστώνουμε πως τα δοκίμια κατέρρευσαν σχηματίζοντας πτυχώσεις (folding mode) ανάλογες αυτών των σωλήνων ορθογωνικής διατομής, με τις προεξοχές οδήγησης πλέον να αναδιπλώνονται και αυτές σχηματίζοντας πτυχώσεις χωρίς να εμφανίζουν λυγισμό, καθώς καθοριστικός παράγοντας για αυτό αποτέλεσε το μικρής έκτασης μήκος κατά το οποίο προεξείχαν. Τέλος, και οι δυο δοκιμές απέδωσαν τον ίδιο μηχανισμό αξονικής κατάρρευσης όπως περιγράφηκε και παριστάνεται στις αντίστοιχες εικόνες.



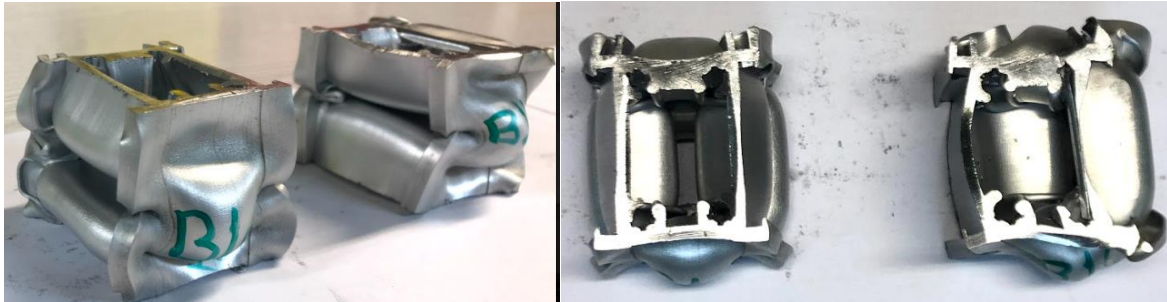
Εικόνα 3.36 Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίου B1



Εικόνα 3.37 Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίου B4



Εικόνα 3.38 Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίου B6



Εικόνα 3.39 Τελική άποψη δοκιμίου B1 κατά το πέρας της κατάρρευσης



Εικόνα 3.40 Τελική άποψη δοκιμίου B4 κατά το πέρας της κατάρρευσης



Εικόνα 3.41 Τελική άποψη δοκιμίου B6 κατά το πέρας της κατάρρευσης

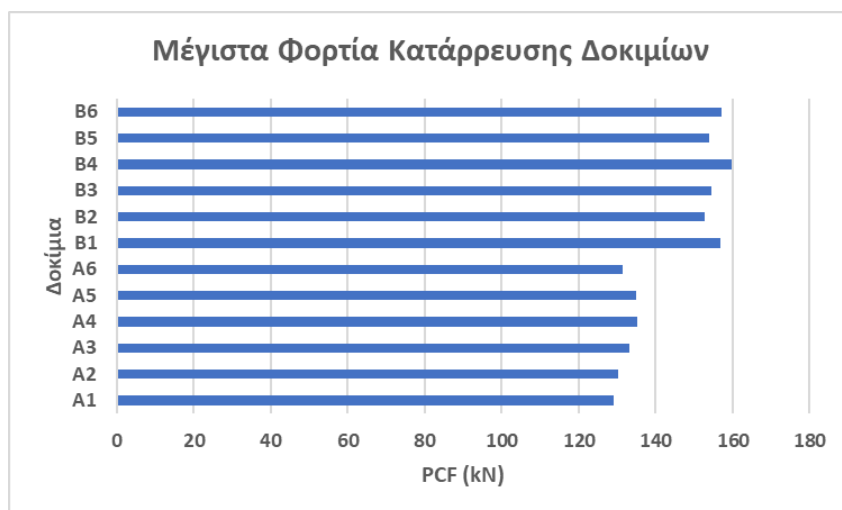
Πίνακας 3.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών B1-B4-B6

Δοκίμιο B1					
	PCF (kN)	MCF (kN)	E_{abs} (J)	CLE (-)	SEA (kJ/kg)
1 ^η Πειρ. Δοκιμή	158,16	124,42	6060,94	0,79	30,84
2 ^η Πειρ. Δοκιμή	155,21	113,20	5531,04	0,73	28,15
Απόκλιση (%)	1,86	9,02	8,74	7,29	8,74
Μέση Τιμή	156,69	118,81	5795,99	0,76	29,50
Δοκίμιο B4					
	PCF (kN)	MCF (kN)	E_{abs} (J)	CLE (-)	SEA (kJ/kg)
1 ^η Πειρ. Δοκιμή	153,99	130,04	4369,43	0,84	31,77
2 ^η Πειρ. Δοκιμή	165,77	137,09	4598,82	0,83	33,44
Απόκλιση (%)	7,65	5,42	5,25	2,07	5,25
Μέση Τιμή	159,88	133,57	4484,12	0,84	32,6
Δοκίμιο B6					
	PCF (kN)	MCF (kN)	E_{abs} (J)	CLE (-)	SEA (kJ/kg)
1 ^η Πειρ. Δοκιμή	157,26	132,27	3255,65	0,84	33,14

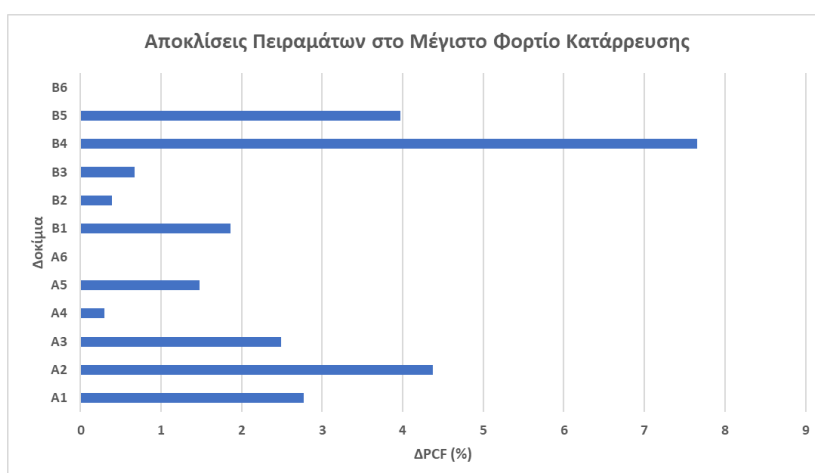
3.4 Αξιολόγηση μηχανικής απόκρισης δοκιμών

Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών αξονικής συμπίεσης, υπολογίστηκαν και παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα τα χαρακτηριστικά της απόκρισης των δοκιμών έναντι της αξονικής συμπίεσής τους. Παρακάτω ακολουθούν τα αντίστοιχα ραβδογράμματα με τα συγκεντρωμένα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών μεγεθών της μηχανικής απόκρισης, μαζί με τις αντίστοιχες αποκλίσεις που εμφανίστηκαν μεταξύ των δυο πειραματικών δοκιμών που διεξήχθησαν για κάθε δοκίμιο (εκτός των A6 και B6).

Όπως παρατηρούμε στις ακόλουθες δυο εικόνες, τα δοκίμια της ομάδας B παρουσίασαν υψηλότερο μέγιστο φορτίο κατάρρευσης από τα αντίστοιχα της ομάδας A, γεγονός που συνεπάγεται πως χρειάζονται υψηλότερη θλιπτική φόρτιση για την έναρξη της πλαστικοποίησής τους κατά την αξονική κρούση. Το συγκεκριμένο γεγονός είναι ιδιαίτερης σημασίας μάλιστα, εφόσον σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή όταν η δύναμη κρούσης δεν υπερβεί το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης της κατασκευής, η κατασκευή δεν θα πλαστικοποιηθεί και κατά συνέπεια δεν θα απορροφήσει ποσά κρουστικής ενέργειας τα οποία θα μετέτρεπε σε ενέργεια παραμόρφωσης προς την πλαστικοποίησή της. Πρόσθετα, παρατηρούμε πως σε όλα τα δοκίμια διακρίνουμε ικανοποιητική ταύτιση των εκτιμήσεων σε μέγιστο φορτίο κατάρρευσης μεταξύ των δυο πειραματικών δοκιμών, με εξαίρεση το δοκίμιο B4 στο οποίο παρουσιάστηκε ελαφρώς μεγαλύτερη απόκλιση της τάξης του 7,5% λόγω διαφορετικής εξέλιξης του λυγισμού των προεξοχόντων τμημάτων του δοκιμίου στις δυο περιπτώσεις.



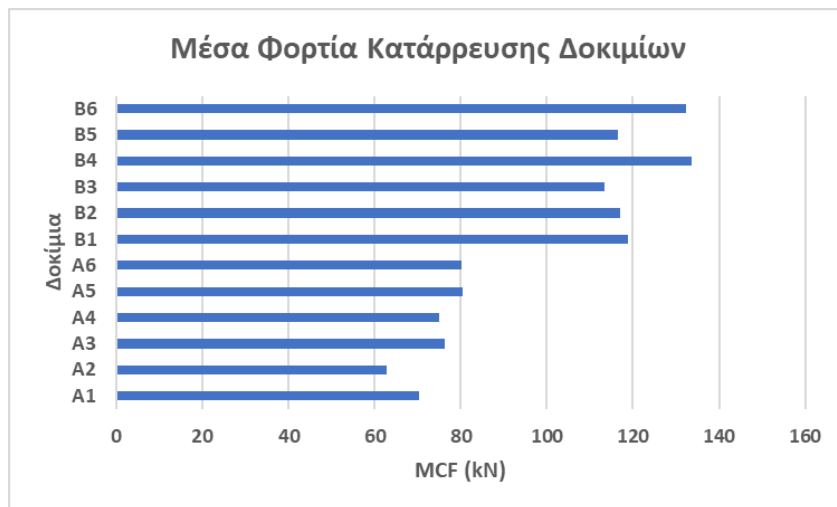
Εικόνα 3.43 Μέγιστα φορτία κατάρρευσης δοκιμίων



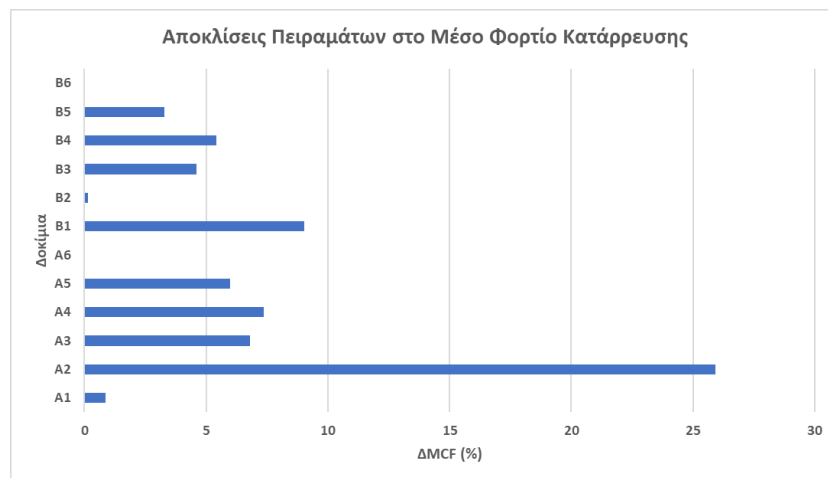
Εικόνα 3.44 Αποκλίσεις πειραμάτων στο μέγιστο φορτίο κατάρρευσης των δοκιμίων

Ακολουθώντας, παρατηρούμε πως τα δοκίμια της ομάδας B παρουσίασαν υψηλότερα μέσα φορτία κατάρρευσης και μεγαλύτερα κατά επέκταση ποσά απορροφώμενης ενέργειας συγκριτικά με τα δοκίμια της ομάδας A. Επομένως, η διατομή των δοκιμίων ομάδας B παρουσιάζει μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας συγκριτικά με τη διατομή των δοκιμίων A, γεγονός που παρατηρείται συγκρίνοντας την ειδική ενέργεια απορρόφησης των δοκιμίων, το οποίο οφείλεται στο ότι η διατομή A εμφάνισε στα προεξέχοντα στελέγχι της μηχανισμό κατάρρευσης κατά λυγισμό-Euler που εμφανίζει την μικρότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας λόγω του ασταθούς του χαρακτήρα, φαινόμενο που δεν παρατηρήθηκε ωστόσο στην κατάρρευση των δοκιμίων ομάδας B όπου ο μηχανισμό κατάρρευσης ήταν αποκλειστικά η εμφάνιση πτυχώσεων (folding mode) ο οποίος είναι ένα ευσταθής μηχανισμός με ιδιαίτερα υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά την πλαστικοποίηση της διατομής στην κατάρρευσή της. Τέλος, οι πειραματικές δοκιμές για κάθε δοκίμιο εμφάνισαν ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ τους αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης όπου εμφανίστηκε πλήρης ταύτιση μεταξύ των δυο πειραματικών δοκιμών σε κάθε δοκίμιο, όπως επίσης και στα χαρακτηριστικά μεγέθη της μηχανικής απόκρισης με εξαίρεση ωστόσο το

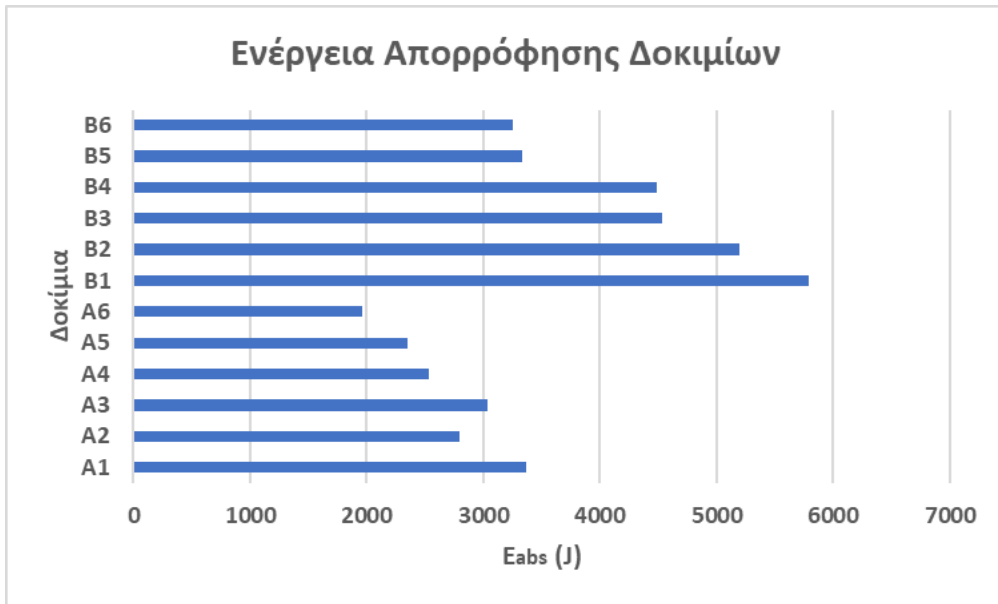
δοκίμιο A2 όπου υπήρξε σημαντική απόκλιση εξαιτίας των αποκλίσεων που εμφανίστηκε στα μετρούμενα φορτία κατά την εξέλιξη της κατάρρευσης του δοκιμίου.



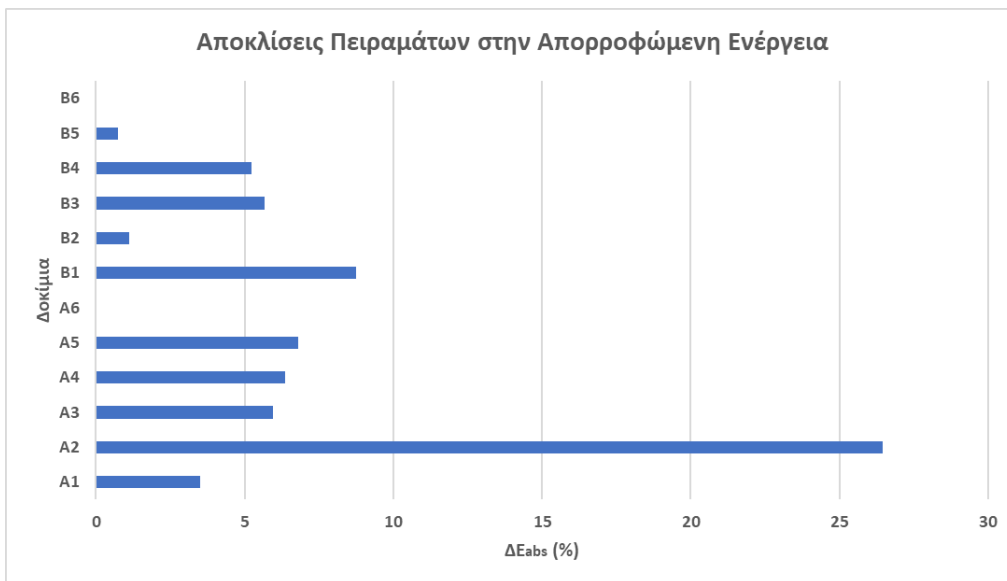
Εικόνα 3.45 Μέσα φορτία κατάρρευσης δοκιμίων



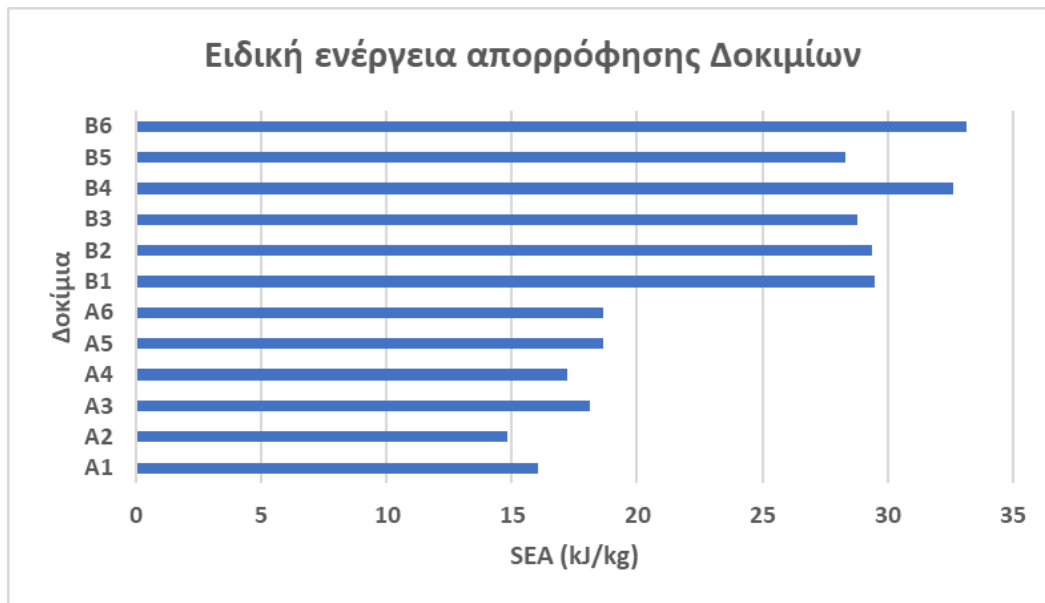
Εικόνα 3.46 Αποκλίσεις πειραμάτων στο μέσο φορτίο κατάρρευσης των δοκιμίων



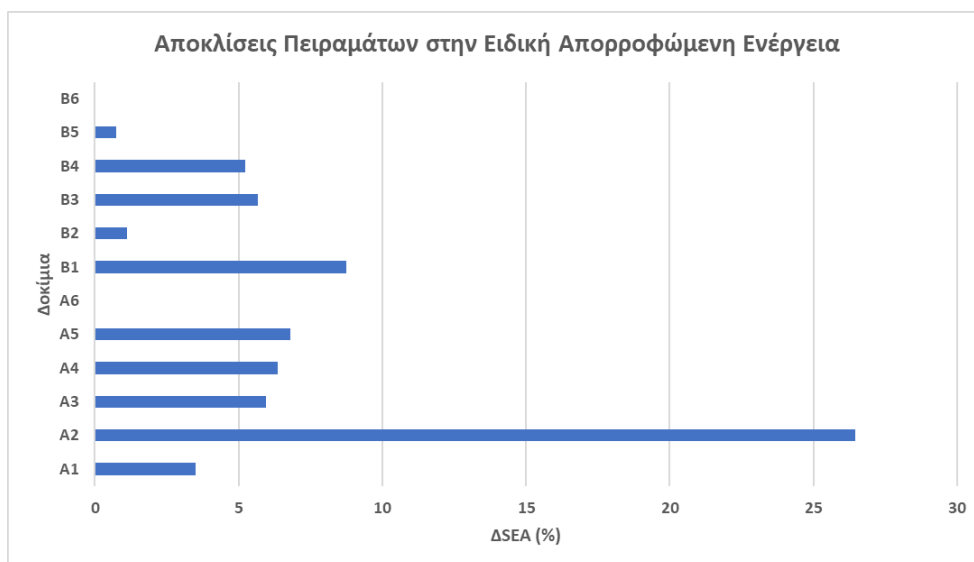
Εικόνα 3.47 Απορροφώμενη ενέργεια δοκιμίων



Εικόνα 3.48 Αποκλίσεις πειραμάτων στην απορροφώμενη ενέργεια των δοκιμίων



Εικόνα 3.49 Ειδική ενέργεια απορρόφησης δοκιμίων

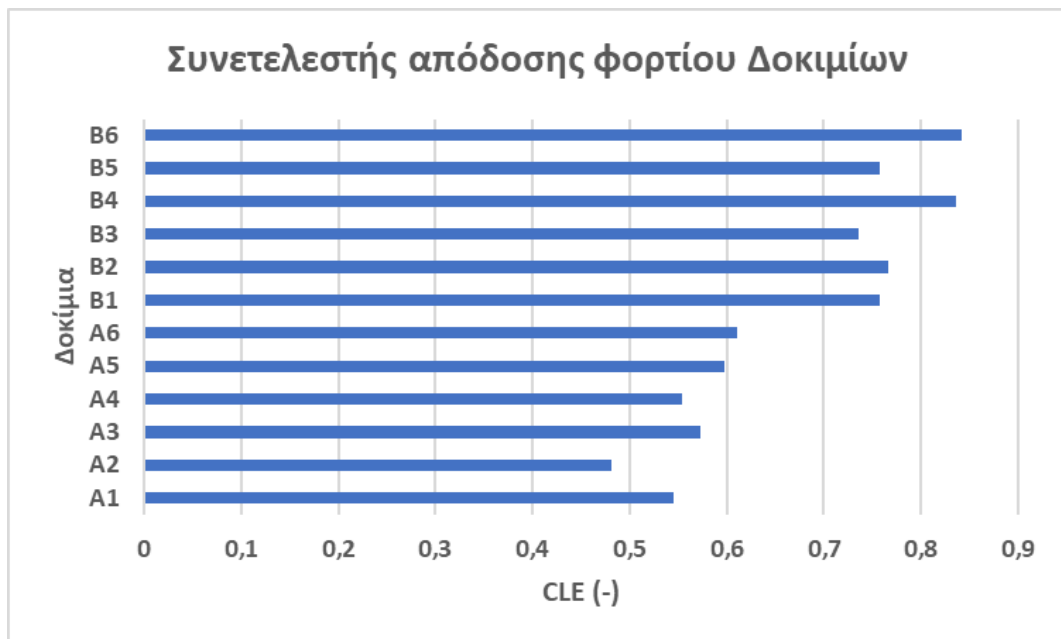


Εικόνα 3.50 Συντελεστής απόδοσης φορτίου δοκιμίων

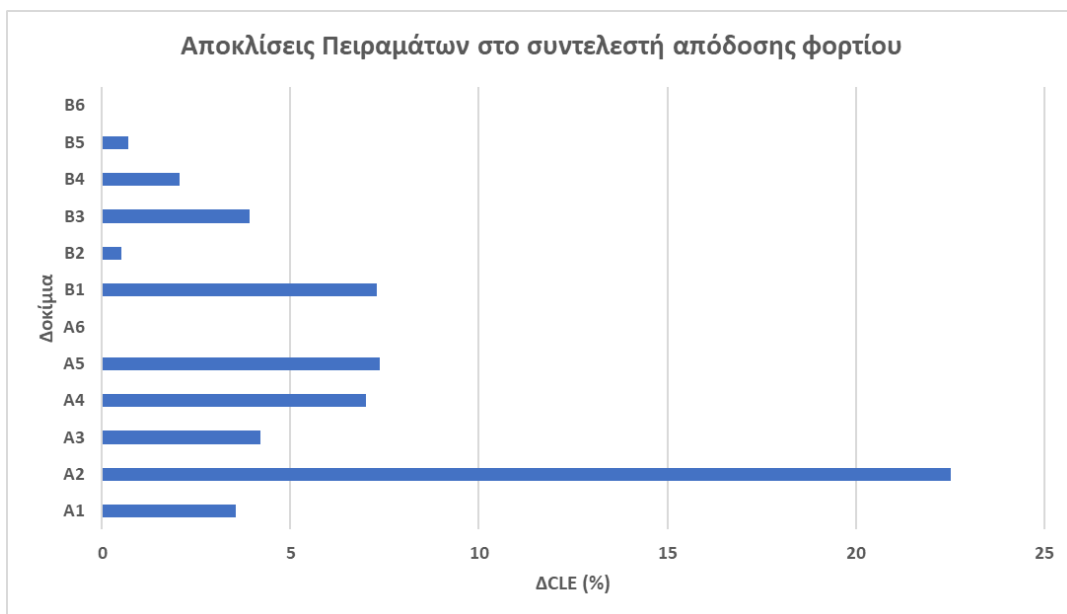
Τέλος, παρατηρούμε πως τα δοκίμια ομάδας Β εμφάνισαν υψηλότερες τιμές στο συντελεστή απόδοσης φορτίου αποδίδοντας πιο ομοιόμορφη καμπύλη φόρτισης, το οποίο είναι ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό για κατασκευές έναντι αξονική κρούσης εφόσον συνήθως ανάγεται σε υψηλότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από την κατασκευή. Ακόμη δε στην περίπτωση που η κατασκευή αποτελεί μεταφορικά οχήματα, αυτό σημαίνει μικρότερες αδρανειακές φορτίσεις στα επιβαίνοντα άτομα κατά την κρούση, γεγονός που επίσης αποτελεί ιδιαίτερης σημασίας για αποφυγή τραυματισμών.

Όπως σχολιάστηκε προηγουμένως, και εδώ οι πειραματικές δοκιμές εμφάνισαν ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ τους με εξαίρεση ωστόσο το δοκίμιο Α2 στο οποίο

παρατηρήθηκαν κάποιες αποκλίσεις στην κατανομή του φορτίου μεταξύ των δυο πειραματικών δοκιμών στην περιοχή εξέλιξης των πτυχώσεων (post-buckling region).



Εικόνα 3.51 Συντελεστής απόδοσης φορτίου δοκιμών



Εικόνα 3.52 Αποκλίσεις πειραμάτων στο συντελεστή απόδοσης φορτίου των δοκιμών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Στο παρών κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια συνοπτική σύνοψη του αντικειμένου και του σκοπού της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και των μέσων διερεύνησης που χρησιμοποιήθηκαν. Έπειτα, ακολουθεί μια παρουσίαση των εξεταθέντων συμπερασμάτων με βάση τα προκύπτοντα αποτελέσματα της ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων και τέλος παραθέτονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική μελέτη και διερεύνηση.

4.1 Σύνοψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε η συμπεριφορά δοκιμίων αλουμινίου έναντι αξονικής κατάρρευσης υπό αξονικά θλιπτικά φορτία. Τα εξεταζόμενα δοκίμια αλουμινίου ήταν κοίλης διελατής διατομής οι οποίες διαθέτουν κατά κύριο λόγο ορθογωνική γεωμετρία διαθέτοντας κατάλληλες εσοχές και προεξοχές οι οποίες επιτελούν σκοπούς οδήγησης φορείων. Τα εξεταζόμενα δοκίμια προέκυψαν από διελατές ράβδους αλουμινίου, οι οποίες κόπηκαν κατά μήκος αποδίδοντας στα εξεταζόμενα δοκίμια διαφορετικό αρχικό μήκος. Οι εξεταζόμενες διατομές διακρίνονται σε δυο διαφορετικές μορφές σύμφωνα με την γεωμετρία τους, έτσι ώστε να διερευνηθεί η επίδραση τόσο του αρχικού μήκους του δοκιμίου όσο και της γεωμετρίας της διατομής του στην συμπεριφορά του έναντι αξονικής συμπίεσης. Έτσι λοιπόν, τα δοκίμια κατηγοριοποιήθηκαν σε δοκίμια ομάδας Α και σε δοκίμια ομάδας Β ανάλογα με τη μορφή της διατομής τους.

Η διερεύνηση των δοκιμίων προς την αξιολόγησή τους έναντι αξονικής κατάρρευσης πραγματοποιήθηκε διεξάγοντας πειραματικές δοκιμές αξονικής συμπίεσης σε υδραυλική πρέσσα με σταθερή ταχύτητα καθόδου κινητής κεφαλής ίση με 10 mm/min. Για την εξέταση καθενός δοκιμίου αλουμινίου (διατομή και αρχικό μήκος), πραγματοποιήθηκαν δυο πειραματικές δοκιμές συμπίεσης προκαλώντας βράχυνση έως το μισό του αρχικού μήκους καθενός δοκιμίου. Η διεξαγωγή δυο πειραματικών δοκιμών για κάθε δοκίμιο – εκτός των Α6 και Β6 δοκιμίων – αποσκοπούσε στην εξάλειψη πιθανών σφαλμάτων κατά την πειραματική διαδικασία, όπως σφάλματα διεξαγωγής των πειραμάτων, σφάλματα μετρήσεων, επίδραση ατελειών στην δομή του υλικού κλπ. Σε κάθε πειραματική διαδικασία αξονικής συμπίεσης, λήφθηκαν μετρήσεις του φορτίου συμπίεσης και της αξονικής μετατόπισης της κινητής κεφαλής της πρέσσας ώστε να χαραχθούν οι αντίστοιχες καμπύλες φορτίου – μετατόπισης των εξεταζόμενων δοκιμίων με σκοπό να αξιολογηθεί η μηχανική τους συμπεριφορά έναντι αξονικής κατάρρευσης υπολογίζοντας βασικά μεγέθη απόκρισης όπως το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης (PCF), το μέσο φορτίο κατάρρευσης (MCF), την απορροφώμενη ενέργεια (Eabs) και τον συντελεστή απόδοσης/ομοιομορφίας της φόρτισης (CLE). Πρόσθετα, καταγράφηκαν κατάλληλα στιγμιότυπα της κατάρρευσης ώστε να παρατηρηθεί ο μηχανισμός κατάρρευσης.

Ακολούθως, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν έπειτα από την επεξεργασία και την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων με βάση τα οποία υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά της μηχανικής απόκρισης των δοκιμίων έναντι στην αξονική τους

κατάρρευση καθώς επίσης παρατηρήθηκαν και οι εμφανιζόμενοι μηχανισμοί κατάρρευσης των εξεταζόμενων δοκιμίων.

4.2 Συμπεράσματα

Η επεξεργασία και η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων επέτρεψε τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών της μηχανικής απόκρισης των δοκιμίων έναντι στην αξονική τους κατάρρευση καθώς επίσης παρατηρήθηκαν και οι εμφανιζόμενοι μηχανισμοί κατάρρευσης των εξεταζόμενων δοκιμίων. Με βάση τα εξαχθέντα αποτελέσματα ανάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- ✓ Τα δοκίμια της ομάδας B παρουσίασαν υψηλότερα μέσα φορτία κατάρρευσης και μεγαλύτερα κατά επέκταση ποσά απορροφώμενης ενέργειας συγκριτικά με τα δοκίμια της ομάδας A. Επομένως, η διατομή των δοκιμίων ομάδας B παρουσιάζει μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας συγκριτικά με τη διατομή των δοκιμίων A, γεγονός που διαπιστώνεται από τις σχετικές συγκρίσεις των ποσών της ειδικής ενέργειας απορρόφησης.
- ✓ Τα δοκίμια ομάδας B εμφάνισαν υψηλότερες τιμές στο συντελεστή απόδοσης φορτίου αποδίδοντας πιο ομοιόμορφη καμπύλη φόρτισης, το οποίο είναι ένα επιθυμητό. Ακόμη δε στην περίπτωση που η κατασκευή αποτελεί μεταφορικά οχήματα, αυτό σημαίνει μικρότερες αδρανειακές φορτίσεις στα επιβαίνοντα άτομα κατά την κρούση, γεγονός που επίσης αποτελεί ιδιαίτερης σημασίας για αποφυγή τραυματισμών.
- ✓ Οι πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν δυο φορές για κάθε δοκίμιο εκτός των A6 και B6, απέδωσαν ικανοποιητική ταύτιση σε όλα τα υπολογισθέντα χαρακτηριστικά μεγέθη της μηχανικής απόκρισης των δοκιμίων έναντι της αξονικής τους κατάρρευσης αποδίδοντας αποκλίσεις μικρότερες του 5%, με εξαίρεση την απόκλιση στο εκτιμώμενο μέγιστο φορτίο κατάρρευσης του δοκιμίου B4 στο οποίο εντοπίστηκε απόκλιση της τάξης του 7%, καθώς επίσης και στο μέσο φορτίο κατάρρευσης και την απορροφώμενη ενέργειά του δοκιμίου A2 η οποία εμφάνισε σημαντική απόκλιση μεταξύ των δυο πειραματικών δοκιμών, γεγονός που οφείλεται στις αποκλίσεις που εμφανίστηκαν στην κατανομή του φορτίου μεταξύ των δυο πειραματικών δοκιμών στην περιοχή εξέλιξης των πτυχώσεων (post-buckling region).
- ✓ Τα δοκίμια ομάδας B κατέρρευσαν σχηματίζοντας πτυχώσεις (folding mode) ο οποίος είναι ένα ευσταθής μηχανισμός με ιδιαίτερα υψηλή ικανότητα απορρόφησης και παρατηρείται πολύ συχνά σε δοκίμια ορθογωνικής κοίλης διατομής λεπτού πάχους. Τα δοκίμια ομάδας A εμφάνισαν και αυτά πτυχώσεις κατά την κατάρρευσή τους ενώ ακόμη τα προεξέχοντα στελέγη τους εμφάνισαν μηχανισμό κατάρρευσης κατά λυγισμό-Euler που εμφανίζει την μικρότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας λόγω του ασταθούς του χαρακτήρα
- ✓ Τέλος, οι πειραματικές δοκιμές για κάθε δοκίμιο εμφάνισαν ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ τους αναφορικά με τον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσης όπου εμφανίστηκε πλήρης ταύτιση μεταξύ των δυο πειραματικών δοκιμών σε κάθε δοκίμιο.

4.3 Προτάσεις προς μελλοντική διερεύνηση

Για την περαιτέρω διερεύνηση των εξετασθέντων δοκιμίων αλουμινίου κοίλης διελατής διατομής, προτείνονται σε ακόλουθο στάδιο να μελετηθούν επιπροσθέτως:

- ✓ Πειραματική διερεύνηση πρόσθετων δοκιμίων διαφορετικών κοίλων διελατών διατομών.
- ✓ Διερεύνηση της επίδρασης της κατανομής του πάχους στην περιφέρεια της διατομής, με ιδιαίτερη έμφαση στα προεξέχοντα στελέγχι οδήγησης των δοκιμίων της ομάδας A όπου ενδεχομένων μεγαλύτερα πάχη να αποτρέψουν τον λυγισμό τους κατά την κατάρρευση αποδίδοντας υψηλότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.
- ✓ Ανάπτυξη μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό τη διερεύνηση της μηχανικής απόκρισης των εξετασθέντων δοκιμίων έναντι αξονικής συμπίεσης μέσω διεξαγωγής αριθμητικών προσομοιώσεων σε κατάλληλο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων όπως το λογισμικό LS-Dyna.
- ✓ Μελέτη της επίδρασης του ρυθμού παραμόρφωσης στα χαρακτηριστικά μεγέθη της μηχανικής απόκρισης των δοκιμίων και στον εμφανιζόμενο μηχανισμό κατάρρευσής τους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Sulistio, X., 2018, "Effect of traffic flow, Proportion of Motorcycle, Speed, Lane Width, and the availabilities of Median and Shoulder on Motorcycle Accidents at Urban Roads in Indonesia", *Open Transp. J.*, vol. 12.
- [2] Elvik, R., 2013, "Risk of road accident associated with the use of drugs: A systematic review and meta-analysis of evidence from epidemiological studies", *Accid. Anal. Prev.*, vol. 60, pp. 254-267, [<http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2012.06.017>] [PMID: 22785089]
- [3] Kaygisiz, Ö., Yildiz, A., Duzgun, S., 2015, "Spatio-temporal pedestrian accident analysis to improve urban pedestrian safety: The case of the Eskisehir Motorway Gazi Univ", *J. Sci.*, vol. 28, pp. 623-630.
- [4] Toroyan, T., Peden, M., Iaych, M., 2013, "WHO launches second global status report on road safety", [<http://dx.doi.org/10.1136/injuryprev-2013-040775>]
- [5] S K Singh, "The neglected epidemic: Road traffic crashes in India", *Metamorphosis*, vol. 11, pp. 27-49, 2012.
- [6] S.K. Singh, "Road traffic accidents in India: Issues and challenges", *Transp. Res. Procedia*, vol. 25, pp. 4708-4719, 2017. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.484>]
- [7] Jacobs, G., Aeron-Thomas, A., Astrop, A., 2000, "Estimating global road fatalities. Crowthorne, Transport Research Laboratory", (TRL Report, No. 445).
- [8] "Road traffic accidents: epidemiology, control and prevention", Geneva, World Health Organization, 1962.
- [9] Sapuan, S. M., Maleque, M. A., Hameedullah, M., Suddin, M.N., and Ismail, N., 2005, "A note on the conceptual design of polymeric composite automotive bumper system", *Journal of Materials Processing Technology*, 159(2):145–151.
- [10] Davoodi, M. M., Sapuan, S. M., Yunus, R., 2008, "Conceptual Design of a Polymer Composite Automotive Bumper Energy Absorber", *Material and Design*, 29(7):1447–1452.
- [11] Infinitihelp website, 2016, Online Available: http://infinitihelp.com/diy/gcoupe/projects/images/infiniti_g_coupe_front_bumper_1.gif
- [12] Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B., Spentzas, K. N., Koutroubakis, S., 2008, "Static Axial Collapse of Foam-Filled Steel Thin-Walled Rectangular Tubes: Experimental and Numerical Simulation", *International Journal of Crashworthiness*, 13(2):117–126.
- [13] Liu, Y., and Day, M. L., 2009, "Advances in Computational Algorithms and Data Analysis", Dordrecht: Springer Netherlands.
- [14] Xu, F., Tian, X., Li, G., 2015, "Experimental Study on Crashworthiness of Functionally Graded Thickness Thin-Walled Tubular Structures", *Experimental Mechanics*, 55(7):1339–1352.

- [15] Maghami, S. A., Rezaeepazhand, J., Yousefsani, S. A., 2013, "Effect of Corner Bluntness on Energy Absorbing Capability of Non-Circular Metallic Tubes Subjected to Axial Impact", *International Journal Engineering, Transaction B: Application*, 26(8):875–884.
- [16] Kohar, C. P., Mohammadi, M., Mishra R. K., Inal K., 2015, " Effects of Elastic–Plastic Behaviour on the Axial Crush Response of Square Tubes", *Thin-Walled Structures*, 93:64–87.
- [17] Paz, J., Díaz, J., Romera, L., Costas, M., 2014, "Crushing Analysis and Multi-Objective Crashworthiness Optimization of GFRP Honeycomb-Filled Energy Absorption Devices", *Finite Element Analysis and Design*, 91:30–39.
- [18] Bai, Z., Liu, J., Zhu, F., Wang, F., Jiang, B., 2015, "Optimal Design of a Crashworthy Octagonal Thin-Walled Sandwich Tube Under Oblique Loading", *International Journal of Crashworthiness*, 20(4):401–411.
- [19] Yin, H., Xiao, Y., Wen, G., Qing, Q., Deng, Y., 2015, "Multi-objective Optimization for Foam-Filled Multi-Cell Thin-Walled Structures Under Lateral Impact", *Thin-Walled Structures*, 94:1–12.
- [20] Jeyanthi, S., Janci Rani, J., 2014, "Development of Natural Long Fiber Thermoplastic Composites for Automotive Frontal Beams", *Indian Journal Engineering Material and Science*, 21(5):580–584.
- [21] Jeyanthi, S., Paul ChandraKumar, J., Rajesh Kumar, N., Dhinakaran, S., Hari Prasad, K., 2014, "An Investigation on Dynamic Mechanical Analysis and Low Velocity Impact Analysis of Natural Thermoplastic Composite Frontal Beams", *International Journal of Applied Engineering Research*, 9(22):13709–13718.
- [22] Kim, J. W., Kim, H. S., Lee, D. G., 2015, "Manufacturing and Characterization of Glass Fiber/Polypropylene Prepreg for Automotive Bumper Beam", *Journal of Computational Theoretical Nanoscience*, 12(5): 842–846.
- [23] Caprino, G., Carrino, L., Durante, M., Langella, A., Lopresto, V., 2015, "Low Impact Behaviour of Hemp Fibre Reinforced Epoxy Composites", *Composite Structures*. 133:892–901.
- [24] Mohanty, A. K., Misra, M., Drzal L. T., 2005, "Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites"
- [25] Toyota 2012 North American Environmental Report. 2012.
- [26] Hoko, S. S., Komei, S., 2006, "Annual Report 2006 Mitsubishi Group Philosophy — Three Corporate Principles Management".
- [27] Toyota 2008 North America Environmental Report. 2008.
- [28] Davoodi, M. M., Sapuan, S. M., Aidy, A., 2012, "Effect of the Strengthened Ribs in Hybrid Toughened Kenaf/ Glass Epoxy Composite Bumper Beam", *Life Science Journal*. 9(1):285-289.
- [29] Bisagni, C., Di Pietro, G., Frascini, L., Terletti, D., 2005, "Progressive Crushing of Fiber-Reinforced Composite Structural Components of a Formula One Racing Car", *Composite Structures*, 68(4):491–503.
- [30] Hörmann, M., Wacker, M., 2005, "Simulation of the Crash Performance of Crash Boxes Based on Advanced Thermoplastic Composite» 5th Europe LS-DYNA Users Conference. 5d–31.

- [31] Daniel, L., Hogg, P. J., Curtis, P. T., 1999, "Relative Effects of Through-Thickness Properties and Fibre Orientation on Energy Absorption by Continuous Fibre Composites" *Composite Part B: Engineering*, 30(3): 257–266.
- [32] Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B., Papapostolou, D. P., 2006, "The Static and Dynamic Axial Collapse of CFRP Square Tubes: Finite Element Modelling" *Composite Structures*, 74(2):213–225.
- [33] Marzbanrad, J., Alijanpour, M., Kiasat, M.S., 2009, "Design and Analysis of an Automotive Bumper Beam In Low-Speed Frontal Crashes" *Thin-Walled Structures*. 47(8–9):902–911.
- [34] Bohn, B., Garcke, J., Iza-Teran, R., Paprotny, A., Peherstorfer, B., Schepsmeier, U., Thole, C.A., 2013, "Analysis of Car Crash Simulation Data With Nonlinear Machine Learning Methods" *Procedia Computer Science*, 18:621–630.
- [35] J. Wang, Y. Zhang, N. He, C.H. Wang, 2018, "Crashworthiness behavior of Koch fractal structures", *Mater. Des.* 144, pp. 229–244.
- [36] Y. Li, et al., 2018, "Crushing analysis and crashworthiness optimization of tailor rolled tubes with variation of thickness and material properties", *Int. J. Mech. Sci.* 136 (November 2017), pp. 67–84.
- [37] M. Bambach, L. Conrads, M. Daamen, O. Güvenç, G. Hirt, 2016, "Enhancing the crashworthiness of high-manganese steel by strain-hardening engineering, and tailored folding by local heat-treatment", *Mater. Des.* 110, pp.157–168.
- [38] N.N. Hussain, S.P. Regalla, Y.V.D. Rao, 2017, "Low velocity impact characterization of glass fiber reinforced plastics for application of crash box", *Mater. Today Proc.* 4 (2), pp.3252–3262.
- [39] SF, 2015, "Improvement of energy absorption of thin walled hexagonal tube made of magnesium alloy by using trigger mechanisms", *Int. J. Res. Eng. Technol.* 2 (10), pp. 173–180.
- [40] N.N. Hussain, S.P. Regalla, Y.V.D. Rao, 2017, "Low velocity impact characterization of glass fiber reinforced plastics for application of crash box", *Mater. Today Proc.* 4 (2), pp.3252–3262.
- [41] F. Tarlochan, F. Samer, A.M.S. Hamouda, S. Ramesh, K. Khalid, 2013, "Design of thin wall structures for energy absorption applications: enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces", *Thin-Walled Struct.* 71, pp.7–17.
- [42] A. Alavi Nia, J. Haddad Hamedani, 2010, "Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin-walled tubes with various section geometries", *Thin-Walled Struct.* 48 (12), pp.946–954.
- [43] L. Yuan, H. Shi, J. Ma, Z. You, 2019, "Quasi-static impact of origami crash boxes with various profiles", *Thin-Walled Struct.* 141, pp.435–446.
- [44] W. Lee, et al., 2019, "Effect of auxetic structures on crash behavior of cylindrical tube", *Compos. Struct.*
- [45] J. Fu, Q. Liu, K. Liufu, Y. Deng, J. Fang, Q. Li, 2019, "Design of Bionic-Bamboo Thin-Walled Structures for Energy Absorption", *Thin-Walled Struct.*
- [46] Q. Gao, C. Ge, W. Zhuang, L. Wang, Z. Ma, 2019, "Crashworthiness analysis of double arrowed auxetic structure under axial impact loading", *Mater. Des.* 161, pp.22–34.

- [47] C.Y. Wang, Y. Li, W.Z. Zhao, S.C. Zou, G. Zhou, Y.L. Wang, 2018, "Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure", *Int. J. Mech. Sci.* 138–139, pp.489–501.
- [48] S. Boria, A. Scattina, G. Belingardi, 2019, "Axial crushing of metal-composite hybrid tubes: experimental analysis", *Procedia Struct. Integr.* 8, pp.102–117
- [49] X. Xiao, et al., 2019, "Static and dynamic crushing of novel porous crochet-sintered metal and its filled composite tube", *Compos. Struct.* 209, pp.830–843.
- [50] S. Ataollahi, S.T. Taher, R.A. Eshkour, A.K. Ariffin, C.H. Azhari, 2012, "Energy absorption and failure response of silk/epoxy composite square tubes: Experimental, *Compos.* B Eng. 43 (2), pp.542–548.
- [51] Z. Xin, Y. Duan, J. Zhou, H. Xiao, 2019, "Effect of tailored plies on the energy absorption capability of square CFRP tubes with discontinuous fibers", *Compos. Struct.*
- [52] M. Arjomandi Rad, A. Khalkhali, 2018, "Crashworthiness multi-objective optimization of the thin-walled tubes under probabilistic 3D oblique load", *Mater. Des.* 156, pp.538–557.
- [53] T. Dirgantara, A. Jusuf, E.O. Kurniati, L. Gunawan, I.S. Putra, 2018, "Crashworthiness Analysis of Foam-Filled Square Column Considering Strain Rate Effect of the Foam", *Thin-Walled Struct.*
- [54] M.S. Zahran, P. Xue, M.S. Esa, M.M. Abdelwahab, 2018, "A novel tailor-made technique for enhancing the crashworthiness by multi-stage tubular square tubes", *Thin-Walled Struct.* 122 (November 2017), pp.64–82.
- [55] C. Zhou, et al., 2018, "The energy absorption of rectangular and slotted windowed tubes under axial crushing", *Int. J. Mech. Sci.*
- [56] C.Y. Wang, W.W. Wang, W.Z. Zhao, Y. Wang, G. Zhou, 2018, "Structure design and multi-objective optimization of a novel NPR bumper system", *Compos. B Eng.* 153 (June), pp. 78–96.
- [57] N.N. Hussain, S.P. Regalla, Y.V.D. Rao, 2017, "Comparative study of trigger configuration for enhancement of crashworthiness of automobile crash box subjected to axial impact loading", *Procedia Eng.* 173, pp.1390–1398.
- [58] A. Rabiee, H. Ghasemnejad, 2019, "Lightweight Design to Improve Crushing Behaviour of Multi-Stitched Composite Tubular Structures under Impact Loading", *Thin-Walled Struct.*
- [59] Y. Tong, Y. Xu, 2018, "Improvement of crash energy absorption of 2D braided composite tubes through an innovative chamfer external triggers", *Int. J. Impact Eng.* 11, pp. 11–20.
- [60] M.A. Choiron, A. Purnowidodo, E.S. Siswanto, N.A. Hidayati, 2016, "Crash Energy Absorption of Multi-Segments Crash Box under Frontal Load", *J. Teknol.*
- [61] L. Yan, N. Chouw, 2013, "Crashworthiness characteristics of flax fibre reinforced epoxy tubes for energy absorption application", *Mater. Des.* 51, pp.629–640.
- [62] D. Frometa, et al., 2018, "On the correlation between fracture toughness and crash resistance of advanced high strength steels", *Eng. Fract. Mech.* 205 (May), pp.319–332.
- [63] L. Peroni, M. Avalue, G. Belingardi, 2007, "Experimental investigation of the energy absorption capability of continuous joined crash boxes", *SAVE Proc.*, pp.1–13.
- [64] I.K. Yılmazçoban, Ö. Adanur, A. Bakhtiyar, A. Ergün, 2018, "Numerical and experimental approach of various sectioned new concept of the crash-boxes to determine

- the reliability and crashworthiness of the vehicles during frontal impacts", *Sak. Univ. J. Sci.* 23 (38708).
- [65] I. Saenz-Dominguez, I. Tena, A. Esnaola, M. Sarrionandia, J. Torre, J. Aurrekoetxea, 2019, "Design and characterization of cellular composite structures for automotive crash-boxes manufactured by out of die ultraviolet cured pultrusion", *Compos. B Eng.* 160 (March 2018), pp.217–224
- [66] X. Xu, Y. Zhang, J. Wang, F. Jiang, C.H. Wang, 2018, "Crashworthiness design of novel hierarchical hexagonal columns", *Compos. Struct.* 194 (June 2017), pp.36–48.
- [67] P. Kaczynski, 2018, "Progressive crushing as a new mechanism of energy absorption. The crushing study of magnesium alloy crash-boxes", *Int. J. Impact Eng.*
- [68] Z. Gronostajski, P. Kaczynski, S. Polak, B. Bartczak, 2018, "Energy absorption of thinwalled profiles made of AZ31 magnesium alloy", *Thin-Walled Struct.* 122 (November 2017), pp. 491–500.
- [69] A. Reyes, T. Børvik, 2018, "Quasi-static behaviour of crash components with steel skins and polymer foam cores", *Mater. Today Commun.* 17 (September), pp.541–553.
- [70] A. Baroutaji, M. Sajjia, A.G. Olabi, 2017, "On the crashworthiness performance of thinwalled energy absorbers: recent advances and future developments", *Thin-Walled Struct.* 118 (May), pp.137–163.
- [71] M. Altin, M.A. Güler, S.K. Mert, 2017, "The effect of percent foam fill ratio on the energy absorption capacity of axially compressed thin-walled multi-cell square and circular tubes", *Int. J. Mech. Sci.* 131, pp.368–379.
- [72] H. Kavi, A.K. Toksoy, M. Guden, 2006, "Predicting energy absorption in a foam-filled thin-walled aluminum tube based on experimentally determined strengthening coefficient", *Mater. Des.* 27 (4), pp.263–269.
- [73] S.P. Santosa, T. Wierzbicki, A.G. Hanssen, M. Langseth, 2000, "Experimental and numerical studies of foam-filled sections", *Int. J. Impact Eng.*
- [74] G. Sun, F. Xu, G. Li, Q. Li, 2014, "Crashing analysis and multi-objective optimization for thin-walled structures with functionally graded thickness", *Int. J. Impact Eng.*
- [75] X. Zhang, H. Zhang, Z. Wen, 2015, "Axial crushing of tapered circular tubes with graded thickness", *Int. J. Mech. Sci.*
- [76] R. Lu, X. Liu, S. Chen, X. Hu, L. Liu, 2017, "Axial Crashing Analysis for Tailor Rolled Square Tubes with Axially Graded Both Wall Thickness and Material Strength", *Thin-Walled Struct.*
- [77] M.D. Goel, 2015, "Deformation, energy absorption and crushing behavior of single-, double- and multi-wall foam filled square and circular tubes", *Thin-Walled Struct.* 90, pp.1–11.
- [78] A. Esnaola, I. Tena, J. Aurrekoetxea, I. Gallego, I. Ulacia, 2016, "Effect of fibre volume fraction on energy absorption capabilities of E-glass/polyester automotive crash structures", *Compos. B Eng.* 85, pp.1–7.
- [79] S. Boria, G. Belingardi, F. Giannoni, 2014, "A crashworthy problem on composite structures using a mathematical approach", *Procedia Eng.* 88, pp.125–132.
- [80] Tang, T., Gao, Y., Yao, L., Li, Y., Lu, J., 2018, "Development of high-performance energy absorption component based on the structural design and nanocrystallization", *Mater. Des.* 137, pp.214–225.

- [81] Lu, G., Yu, T., 2003, "Energy Absorption of Structures and Materials", Cambridge: Goodhead Publishing.
- [82] <http://www.directindustry.com/>
- [83] Λυκάκος, Σ., 2016, "Μελέτη των μηχανισμών κατάρρευσης κελυφών υβριδικής γεωμετρίας, Study of the developed collapse modes during the crushing of shells of hybrid geometry", Διπλωματική εργασία, Φεβρουάριος, Αθήνα.