



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σιδηρόπουλου Ευστάθιου

**«ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΚΕΛΥΦΩΝ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 6060 T6
ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΥΠΟ ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΛΟΞΗ ΟΙΟΝΕΙ
ΣΤΑΤΙΚΗ ΘΛΙΨΗ»**

**«QUASI STATIC AXIAL AND OBLIQUE CRUSHING OF ALUMINUM
ALLOY 6060 T6 THIN-WALLED SQUARE TUBES»**

Επιβλέπων: Δημήτριος Ε. Μανωλάκος

(Καθηγητής Ε.Μ.Π.)

ΑΘΗΝΑ 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την επίτευξη της παρούσας εργασίας, η συμβολή ορισμένων ανθρώπων ήταν καθοριστικής σημασίας και η ένδειξη της ευγνωμοσύνης μου πίσω από αυτές τις λέξεις, είναι το λιγότερο που μπορώ να κάνω.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Δ. Ε. Μανωλάκο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα. Πέρα από το τυπικό μέρος της συμβολής ενός καθηγητή, το οποίο εκπλήρωσε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, υπήρξε πολύτιμος σύμβουλος σε διάφορα θέματα που αφορούσαν τη ζωή μου και αρωγός σε κάθε μου προσπάθεια, καθ' όλα τα έτη σπουδών μου στο Ε.Μ.Π.

Συνεχίζοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Λυκάκο Σταύρο για την διεξαγωγή των πειραμάτων, τις συμβουλές του κατά την αριθμητική προσομοίωση και την προθυμία του να με βοηθήσει σε κάθε δυσκολία που αντιμετώπισα σ' αυτήν την εργασία. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Νικόλαο Μελισσά (τεχνικό προσωπικό), τον Κωνσταντίνο Κερασιώτη (μέλος Ε.Τ.Ε.Π), τον Δρ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για την πολύτιμη βοήθεια τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μεταλλικές δομές λεπτού πάχους εμφανίζονται συχνά στην βιομηχανία εναέριων, επίγειων καθώς και επιθαλάσσιων οχημάτων, το οποίο αναγκάζει τους μηχανικούς να διερευνήσουν την ικανότητα των κατασκευών αυτών σε απορρόφηση ενέργειας, ώστε να προστατευτούν οι επιβάτες και τα εμπορεύματα στην περίπτωση σύγκρουσης.

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν δοκίμια σταθερής και τετραγωνικής διατομής, από κράμα αλουμινίου της σειράς 6. Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε αξονική και λοξή οιονεί στατική θλίψη στο εργαστήριο κατεργασιών των υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στο Κτήριο Ξ των μηχανολόγων μηχανικών. Η μηχανή στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές είναι η Universal INSTRON 4482.

Γίνεται μία εισαγωγή στην οποία αναφέρεται το πρόβλημα για το οποίο αναγκάζονται οι μηχανικοί να σχεδιάζουν τις δομές των οχημάτων, για αντοχή σε σύγκρουση (crashworthiness), τόσο σε παγκόσμιο, όσο και πανελλαδικό επίπεδο.

Επιπλέον θα γίνει και μία αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου σε κώδικα πεπερασμένων στοιχείων (LS-Dyna), στο οποία αφιερώνεται ένα κεφάλαιο συνοπτικής περιγραφής. Ακολουθούν, κεφάλαια τα οποία περιγράφουν το φαινόμενο κατάρρευσης και πως είναι ο επιθυμητός μηχανισμός αυτής για να θεωρηθεί αξιόπιστο για αντοχή σε πρόσκρουση (crashworthiness). Επιπροσθέτως, αναλύεται η πειραματική διαδικασία καθώς και η αριθμητική προσομοίωση. Και τέλος, η ερμηνεία και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αυτές.

ABSTRACT

Thin-walled metal structures are common in the aircraft, land, and marine vehicles industries, forcing engineers to investigate their ability to absorb energy in order to protect passengers and goods in the event of a collision.

In this project we will test about square tubes, made of aluminum alloy of series 6. These specimens were subjected to axial and oblique quasi-static compression in the material processing laboratory of the National Technical University of Athens in Building Ξ of Mechanical Engineers. The engine on which the tests were performed is the Universal INSTRON 4482.

An introduction is made which mentions the problem for which engineers are forced to design the structures of vehicles, for crashworthiness, both worldwide and in Greece.

In addition, a numerical simulation of the phenomenon in finite element code (LS-Dyna) will be performed, to which a chapter of summary description is dedicated. The following are chapters describing the collapse phenomenon and how it is desired to be considered reliable for crashworthiness. In addition, the experimental process as well as the numerical simulation is analyzed. And finally, the interpretation and commentary of the results that emerge from them.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Ατυχήματα.....	1
1.1.1. Γενικά	1
1.1.2. Στατιστικά στοιχεία ατυχημάτων	1
1.1.3. Η κατάσταση στην Ελλάδα	2
1.1.4. Συνέπειες ατυχημάτων στον άνθρωπο.....	4
1.2. Αντοχή σε σύγκρουση (Crashworthiness)	5
2. ΒΙΒΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	6
2.1. Ιστορική εξέλιξη και εφαρμογές	6
2.2. Υλικά κατασκευής λεπτότοιχων απορροφητών ενέργειας	8
2.3. Μορφές κατάρρευσης κελυφών απορροφητών ενέργειας	9
2.3.1. Αξονική κατάρρευση κυκλικών και τετραγωνικών διατομών	9
2.3.2. Αξονοσυμμετρική κατάρρευση.....	11
2.3.3. Μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση	11
2.3.4. Κατάρρευση τύπου λυγισμού.....	12
2.4. Καμπτική κατάρρευση.....	12
2.5. Λοξή κατάρρευση	13
2.5.1. Κελύφη τετραγωνικής ή κυκλικής διατομής με ή χωρίς κωνικότητα.....	13
2.5.2. Άλλες διατομές	14
2.6. Πλευρική κατάρρευση	15
2.6.1. Κελύφη τετραγωνικής διατομής	15
2.6.2. Ένθετα κελύφη.....	16
2.7. Σκοπός εργασίας	18
3. ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	19
3.1. Γενικά.....	19
3.2. LS-DYNA	21
3.2.1. Δυνατότητες του προγράμματος LS-Dyna.....	22
3.2.2. LS-Dyna για crashworthiness και την ασφάλεια επιβατών οχήματος.....	23
3.2.3. LS-Dyna για λοιπές εφαρμογές	24
4. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ.....	25
4.1. Εισαγωγή	25
4.2. Γενικές αρχές.....	25
4.2.1. Μη αναστρέψιμη μετατροπή ενέργειας.....	25
4.2.2. Μέγιστη δύναμη αντίδρασης	26

4.2.3. Μεγάλη διαδρομή	26
4.2.4. Σταθερός και επαναλαμβανόμενος μηχανισμός παραμόρφωσης	26
4.2.5. Χαμηλό βάρος και υψηλή ειδική απορρόφηση ενέργειας	26
4.2.6. Εγκατάσταση και κόστος	27
4.2.7. Κριτήρια σχεδιασμού και βελτιστοποίηση	27
4.3. Ορισμοί – συμπληρωματικές έννοιες.....	28
4.3.1. Πλαστικός αρμός	29
4.3.2. Ροπή πλήρους πλαστικοποίησης.....	30
4.4. Δείκτες αξιολόγησης αντοχής σε πρόσκρουση.....	32
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	34
5.1. Γενικά.....	34
5.2. Μηχανή δοκιμής Universal	34
5.3. Σφύρα πίπτουσας μάζας, ολισθαίνουσα σφύρα & εκκρεμές	36
5.3.1. Σφύρα πίπτουσας μάζας	36
5.3.2. Ολισθαίνουσα σφύρα	37
5.3.3. Εκκρεμές.....	37
5.4. Δοκιμή διαιρούμενης ράβδου πίεσης Hopkinson.....	38
5.5. Όπλα αερίου.....	40
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	42
6.1. Γενικά.....	42
6.2. Περιγραφή δοκιμών	42
6.3. Μηχανικές ιδιότητες του υλικού των δοκιμών.....	43
6.4. Πειραματική διάταξη.....	44
6.5. Πειραματικές συνθήκες.....	46
7. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	47
7.1. Γενικά.....	47
7.2. Μοντελοποίηση.....	48
7.2.1. Κατασκευή γεωμετρίας του μοντέλου & διακριτοποίηση.....	48
7.2.2. Εισαγωγή δεδομένων	49
7.2.3. Ορισμός ενότητας (SECTION).....	50
7.2.4. Ορισμός υλικών (MAT).....	51
7.2.5. Ορισμός τμημάτων (PART).....	54
7.2.6. Ορισμός συνθηκών μη εισχώρησης των διεπιφανειών (CONTACT).....	55
7.2.7. Ορισμός ταχύτητας άνω πλάκας (DEFINE).....	57
7.2.8. Ορισμός κίνησης της άνω πλάκας (BOUNDARY)	58
7.2.9. Ορισμός ελέγχου (CONTROL).....	59

7.2.10.Ορισμός εξαγωγής αποτελεσμάτων (DATABASE)	60
7.2.11.Συγκράτηση και περιστροφή δοκιμίου για την λοξή θλίψη	61
7.2.12.Συγκράτηση και περιστροφή δοκιμίου για την λοξή θλίψη	62
8. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	64
8.1. Γενικά.....	64
8.2. Σύγκριση δοκιμίων-Αριθμητικών μοντέλων	64
8.2.1.Στιγμιότυπα κατάρρευσης & τελικές όψεις	64
8.2.2.Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης	68
8.2.3.Μηχανισμός κατάρρευσης.....	70
8.3. Ερμηνεία δεικτών απορρόφησης ενέργειας	71
8.3.1. Γενικά	71
8.3.2. Πίνακες αποτελεσμάτων δεικτών απορρόφησης ενέργειας	71
8.3.3.Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμίων και μοντέλου.....	72
8.4. Συμπεράσματα.....	76
8.5. Μελλοντική διερεύνηση.....	78
8.5.1. Τροποποίηση πειραματικών παραμέτρων.....	78
8.5.2. Μελέτη μικροδομής κατά την κατάρρευση	79
8.5.3. Σύγκριση απορροφητών ενέργειας από διαφορετικό υλικό	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	84
Παράρτημα Α. Υπολογισμός μήκους συμπίεσης για δεδομένη γωνία διεύθυνσης φορτίου β	84

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ατυχήματα

1.1.1. Γενικά

Η πρόοδος της τεχνολογίας έχει οδηγήσει στην ανάγκη για περισσότερα οχήματα μεταφοράς (είτε επίγεια, είτε επιθαλάσσια, είτε εναέρια), την ελαχιστοποίηση του βάρους τους, καθώς και την ικανότητα τους να διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις με την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων. Αυτό σημαίνει πως αν αυτά τα οχήματα συγκρουστούν, θα προκαλέσουν σοβαρές επιπτώσεις τόσο στους ανθρώπους όσο και στο περιβάλλον.^[1]

Το παγκόσμιο ενδιαφέρον διαρκώς αυξάνεται όσον αφορά τον ασφαλή σχεδιασμό συστημάτων που έχουν στόχο τη μείωση των ανθρώπινων τραυματισμών και ακόμα περισσότερο θανάτων, καθώς επίσης και των οικονομικών επιπτώσεων που προκύπτουν απ' αυτούς. Η σύγκρουση οχημάτων είναι ένα ατυχές φαινόμενο αλλά παρουσιάζεται με αρκετά υψηλή συχνότητα σε εθνικό αλλά και διεθνές επίπεδο.^[2]

Με βάση τα παραπάνω, είναι αυτονόητο ότι τα μελλοντικά οχήματα πρέπει να σχεδιαστούν με γνώμονα την προστασία των επιβατών, αλλά και των εμπορευμάτων που μεταφέρουν κατά την σύγκρουση τους. Σήμερα υπάρχει η τάση για την παραγωγή ελαφρών κατασκευών, το οποίο οδηγεί σε υψηλές απαιτήσεις σχεδίασης.^[2]

1.1.2. Στατιστικά στοιχεία ατυχημάτων

Σχεδόν 3.700 άνθρωποι χάνουν καθημερινά τη ζωή τους στους δρόμους όλου του κόσμου, σύμφωνα με την τελευταία αναφορά του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (World Health Organization), με τους ανθρώπους του οργανισμού να αναφέρουν χαρακτηριστικά ότι οι παγκόσμιοι στόχοι που έχουν τεθεί (Sustainable Development Goals) για την μείωση των θανατηφόρων τροχαίων στο μισό μέχρι το 2020 δεν πρόκειται να εκπληρωθούν.^[3]

Τα τροχαία ατυχήματα που οδηγούν σε θάνατο αποτελούν σύμφωνα με την αναφορά του οργανισμού την όγδοη αιτία θανάτου παγκοσμίως για όλες τις ηλικίες και την πρώτη σε ηλικίες μεταξύ 5-29 ετών. Προκαλούν παράλληλα σχεδόν 50 εκατομμύρια τραυματισμούς με εκατομμύρια από αυτούς να αλλάζουν για πάντα την ζωή των θυμάτων. Οι πιο ευπαθείς ομάδες είναι οι πεζοί και οι δικυκλιστές.^[3]

Η έρευνα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας αφορά μέχρι το έτος 2016 κατά το οποίο οι θάνατοι από τροχαία συνέχιζαν να αυξάνονται. Ωστόσο το ποσοστό των θανάτων συγκριτικά με τον

παγκόσμιο (και αυξανόμενο) πληθυσμό έχει σταθεροποιηθεί (περίπου 64 θάνατοι ανά 100.000 ανθρώπους τα τελευταία 15 χρόνια).^[3]

Θετικό είναι το γεγονός ότι παρά την συνεχή και ραγδαία αύξηση των οχημάτων που κυκλοφορούν κάθε χρόνο το ποσοστό των θανάτων έχει μειωθεί από τους 135 ανά 100 χιλιάδες οχήματα (το έτος 2000) στους 64 ανά 100 χιλιάδες οχήματα (το έτος 2016), ήτοι περισσότερο από 50%. Ο οργανισμός αναφέρει παράλληλα ότι έχει γίνει σημαντική πρόοδος όσον αφορά τα πρότυπα ασφάλειας των οχημάτων.^[3]

Συγκλονιστικά είναι και τα δεδομένα για τις χώρες με χαμηλά εισοδήματα αφού παρά το γεγονός ότι συγκεντρώνουν μόλις το 1% του παγκόσμιου στόλου των οχημάτων, οι θάνατοι ανέρχονται στο 13% επί του συνόλου. Η Ευρώπη ως περιοχή κατέχει τα πρωτεία στην ασφάλεια με 9,3 θανάτους ανά 100 χιλιάδες κατοίκους με τις χώρες της Αμερικής να ακολουθούν με 15,6 θανάτους, με τον μέσο όρο παγκοσμίως να φτάνει περίπου στους 18. Στη χειρότερη θέση όλων βρίσκεται η Αφρική με 26.6 θανάτους ακολουθούμενη από τις χώρες της Ν.Α. Ασίας με 20.7 θανάτους.^[3]

Να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη έρευνα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας συμμετείχαν με δεδομένα 175 χώρες. Από αυτές οι 104, σημείωσαν αύξηση στα θανατηφόρα τροχαία μεταξύ 2013-2016, με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας να αναφέρει χαρακτηριστικά πως όλοι αυτοί οι θάνατοι και τα ατυχήματα μπορούσαν να αποτραπούν.^[3]

1.1.3. Η κατάσταση στην Ελλάδα

Στατιστικά στοιχεία προερχόμενα από την Παγκόσμια Τράπεζα φανερώνουν ότι τα τροχαία ατυχήματα κοστίζουν από 1% έως 3% του ΑΕΠ κάθε χώρας. Ειδικότερα, η Ευρωπαϊκή Ένωση διαθέτει το ποσό των 160 δισ. ευρώ, που αντιστοιχεί σε 2% του ΑΕΠ για το έτος 2015.^[3] Στην Ελλάδα, ετησίως χάνουν τη ζωή τους περίπου 1600 άνθρωποι, με τους σοβαρά τραυματισμένους να στοιχίζουν περίπου 30 χιλιάδων €, ενώ αυτοί που τραυματίζονται ελαφρά 3 χιλιάδων €.^[3] Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζεται ο αριθμός των ατυχημάτων και παθόντων ανά έτος, την περίοδο 2010-2018.^[4]

Η χώρα μας δαπανά περισσότερα από 14 εκατομμύρια € σε συντάξεις, νοσηλεία, αποκατάσταση ζημιών που προέρχονται από τροχαία ατυχήματα κτλ. Αυτά τα χρήματα δεν περιλαμβάνουν τους εργαζόμενους που απασχολούνται για την αντιμετώπιση των παραπάνω συνεπειών (γιατροί, νομικοί, πραγματογνώμονες κτλ.). Τα έξοδα αυτά επιβαρύνουν ακόμα περισσότερο την Ελληνική οικονομία.^[3]

Οι επιδόσεις της Ελλάδας σε θέματα οδικής ασφάλειας σημείωσε εντυπωσιακή βελτίωση από το 2010 (-41%). Ωστόσο, ο αριθμός των θυμάτων από τροχαία ατυχήματα στην Ελλάδα παραμένει πολύ υψηλότερος από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο: 69 θανάτους ανά εκατομμύριο κατοίκων.

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, μόνο το 8% των τροχαίων ατυχημάτων σημειώθηκε σε αυτοκινητόδρομους, το 55% σε αγροτικούς δρόμους και το 37% σε αστικές περιοχές.^[3]

Σχεδόν το 14% των ανθρώπων που σκοτώθηκαν στους δρόμους της ΕΕ είναι ηλικίας μεταξύ 18 και 24 ετών, ενώ μόλις το 8% του ευρωπαϊκού πληθυσμού εμπίπτει σε αυτήν την ηλικιακή ομάδα. Επιπλέον, λόγω των δημογραφικών μεταβολών, το ποσοστό θανάτων ηλικιωμένων (άνω των 65 ετών) αυξήθηκε από 22% το 2010 σε 27% το 2017. Το 76% των θανάτων από τροχαία ατυχήματα είναι άνδρες και το 24% γυναίκες, το 2% των θυμάτων είναι κάτω των 15 ετών.^[3]

Στις 16 Απριλίου, το Κοινοβούλιο αναμένεται να ψηφίσει νέους κανόνες για την υποχρεωτική καθιέρωση 30 χαρακτηριστικών ασφαλείας για τα νέα αυτοκίνητα, όπως είναι το ευφυές σύστημα ελέγχου ταχύτητας, τη συσκευή προειδοποίησης για την απόσπαση της προσοχής του οδηγού και το σύστημα πέδησης έκτακτης ανάγκης.^[3]

Οι υποχρεωτικές τεχνολογίες ασφαλείας θα μπορούσαν να συμβάλουν στη διάσωση πάνω από 25 χιλιάδων ζωών και την αποτροπή τουλάχιστον 140 χιλιάδων τραυματισμών έως το 2038, δεδομένου ότι το 95% των ατυχημάτων οφείλεται σε ανθρώπινο λάθος. Για να γίνουν πιο ασφαλείς οι ευρωπαϊκοί δρόμοι, η ΕΕ ενισχύει επίσης τους κανόνες για τη διαχείριση της ασφάλειας των οδικών υποδομών και εργάζεται για τη διασφάλιση κοινών κανόνων για αυτοκινούμενα οχήματα. Στον Πίνακα 1.1 απεικονίζονται τα αριθμητικά στοιχεία των τροχαίων ατυχημάτων και οι κατηγορίες αυτών, όπως αυτά έχουν από την ελληνική αστυνομία.^[3]

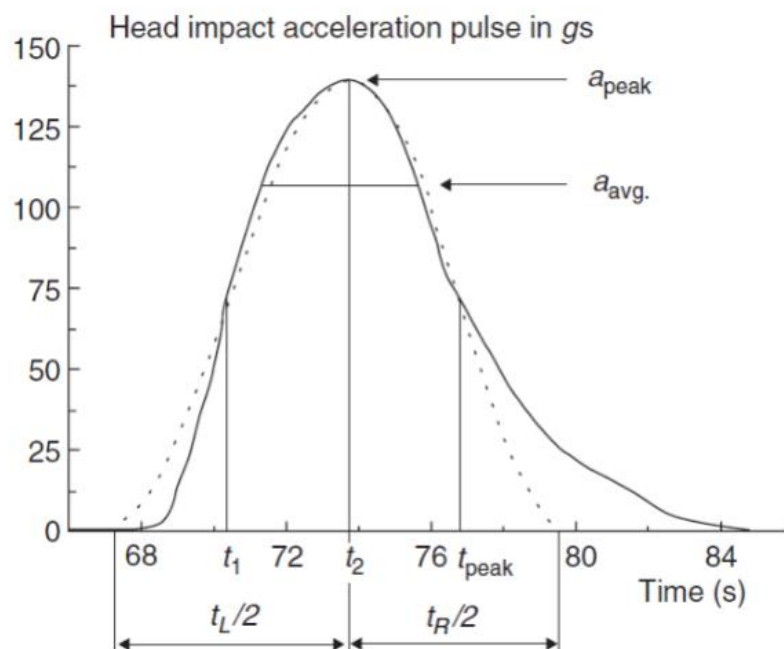
Πίνακας 1.1: Αριθμός των ατυχημάτων και παθόντων ανά έτος την περίοδο 2010-2019^[4].

Έτος	Ατυχήματα			Παθόντες		
	Θανατηφόρα	Σοβαρά	Ελαφρά	Νεκροί	Βαριά Τραυματίες	Ελαφρά Τραυματίες
2010	1162	1454	12456	1281	1754	17024
2011	1011	1397	11223	1091	1675	15129
2012	899	1189	10099	976	1443	13675
2013	799	1114	10275	861	1326	13515
2014	747	895	10037	801	1068	13206
2015	752	743	9901	796	1061	12872
2016	753	742	9901	805	855	12798
2017	679	607	9416	730	704	12070
2018	655	601	9377	709	701	12073
2019	665	550	9525	701	642	12026

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας κατατάσσει την Ελλάδα στην τρίτη θέση, ανάμεσα στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που αφορά θανάτους από τροχαία ατυχήματα, για ηλικίες μέχρι 25 ετών (αντιστοιχεί σε 14 θανάτους ανά 1 εκατομμύριο άτομα). Η Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος αναφέρει ότι οι 450 από τους 1600 θανάτους που προαναφέραμε, αφορούν ανθρώπους ηλικίας έως 25 ετών.[3]

1.1.4. Συνέπειες ατυχημάτων στον άνθρωπο

Είναι γνωστό, πως κατά την σύγκρουση ενός οχήματος, ο χρόνος εξέλιξης του φαινομένου είναι πολύ μικρός. Προκειμένου να μεταβληθεί η ορμή ($m \cdot \vec{u}$, όπου m : μάζα και \vec{u} : ταχύτητα), στην αρχή παράγεται μία μέση δύναμη (\vec{F}) που διαρκεί χρόνο (t) και αναπτύσσεται στις επιφάνειες που συγκρούονται. Αυτή η μέση δύναμη είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τον χρόνο διότι ισχύει, ($\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ με $\vec{a} = \vec{u}/t$), συμπεραίνοντας πως όσο πιο μικρός είναι ο χρόνος (t) τόσο μεγαλύτερη δύναμη (\vec{F}) θα προκληθεί. Το μέγεθος αυτής της αναπτυσσόμενης δύναμης, θα προκαλέσει μία αντίστοιχη επιβράδυνση στα σώματα των επιβατών (κυρίως στα κεφάλια που δεν υπάρχει συγκράτηση διαμέσου της ζώνης ασφαλείας). Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζεται η καμπύλη επιβράδυνσης των κεφαλιών των επιβατών σε δοκιμή πρόσκρουσης αυτοκινήτου (crash test).[1]



Εικόνα 1.1: Τυπικός ρυθμός επιβράδυνσης που αναπτύσσεται στα κεφάλια των επιβατών σε crash test.[1]

Η επιβράδυνση μπορεί να προκαλέσει μεγάλη ζημιά σε ανθρώπους και κατασκευές. Τις συνέπειες μιας σύγκρουσης οχήματος μπορούμε να τις διακρίνουμε ως εξής:

- Σοβαρός τραυματισμός έμβιου όντος (ανθρώπου ή ζώου) είτε φυσικός, είτε ψυχολογικός.

- Ζημιές στην κατασκευή. Πέρα από την πλαστική παραμόρφωση ή θραύση του μεταφορικού μέσου, που μπορεί να οδηγήσουν μέχρι και σε καταστροφές από πυρκαγιά προερχόμενη από την σύγκρουση.
- Ζημιά εξαιτίας του φορτίου προερχόμενο από την επιβράδυνση που αναπτύσσεται κατά την σύγκρουση.
- Περιβαλλοντικές ζημιές (λόγου χάριν καταστροφή δέντρων, πετρελαιοκηλίδες στη θάλασσα κ.λπ.).

Στην πρώτη περίπτωση ειδικότερα, αν συμβεί σύγκρουση με μεγάλη επιβράδυνση, υπάρχει πιθανότητα τα κεφάλια των επιβατών να προσκρούσουν στο εσωτερικό του οχήματος. Το παραπάνω φαινόμενο είναι γνωστό και ως δευτερεύουσα σύγκρουση και έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα επικίνδυνο. [1]

1.2. Αντοχή σε σύγκρουση (Crashworthiness)

Με τον όρο Crashworthiness ή αλλιώς αντοχή σε σύγκρουση εννοείται η ικανότητα μιας κατασκευής (συνήθως οχήματος) να φέρει μεγάλη απορρόφηση ενέργειας κατά την διάρκεια μιας σύγκρουσης. Ο όρος αυτός χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από την αεροδιαστημική βιομηχανία στις αρχές της δεκαετίας του '50. Όσο μεγαλύτερη αντοχή σε σύγκρουση έχει μια κατασκευή οχήματος τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να διατηρηθεί αρκετός ζωτικός χώρος για τους επιβάτες. [5]

Κατά τη διερεύνηση της ασφάλειας των οχημάτων το Crashworthiness αποτελεί από τη φύση του μέγεθος ύψιστης σημασίας. Για κάθε τύπο σύγκρουσης της κατασκευής, τα κριτήρια καθορισμού της αντοχής σε σύγκρουση ποικίλουν. [5]

Η αντοχή σε σύγκρουση μπορεί να μελετηθεί είτε με υπολογιστικά μοντέλα (λόγου χάριν LS-DYNA), είτε με πειράματα, είτε και με την ανάλυση των αποτελεσμάτων κατάρρευσης. Η αντοχή σε σύγκρουση για να καθοριστεί θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πάρα πολλές παράμετροι, όπως τα μοτίβα κατάρρευσης της δομής, η επιβράδυνση του οχήματος κατά τη διάρκεια σύγκρουσης και σαφώς η πιθανότητα τραυματισμού των επιβατών. [5]

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης σκοπός είναι η αναλυτική περιγραφή των πρόσφατων εξελίξεων στον τομέα των λεπτότοιχων απορροφητών ενέργειας που χρησιμοποιούνται στα οχήματα, με έμφαση στην οιονεί στατική θλίψη (αξονική ή λοξή) που αφορά άλλωστε και την παρούσα εργασία. Επίσης, θα αναφερθούν κάποια χαρακτηριστικά της πλευρικής θλίψης.

2.1. Ιστορική εξέλιξη και εφαρμογές

Η προστασία των επιβατών στη σύγκρουση των μεταφορικών μέσων αποτέλεσε μεγάλη ανάγκη για μελέτη από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Όταν εμφανίστηκαν τα πρώτα αεροσκάφη, για την προστασία από χτύπημα στο κεφάλι κρίθηκε αναγκαία η χρήση κράνους και δερμάτινων παλτών. Ο Hugh De Haven στη δεκαετία του 1940 ήταν ο πρώτος που ερεύνησε την αντοχή σε σύγκρουση στα πλαίσια των αεροναυπηγικών εφαρμογών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας του, η πλειοψηφία των τραυματισμών κατά την συντριβή προκαλείται από το αναπτυσσόμενο φορτίο κατά την σύγκρουση, το οποίο μπορεί να μειωθεί με τη χρήση διατάξεων απορροφητών ενέργειας. Αργότερα το 1951, έγινε πρόταση για το πρώτο κριτήριο σχεδιασμού ενός απορροφητή ενέργειας, το οποίο ήταν βασισμένο στην έρευνα του Hugh De Haven.^[6]

Στη δεκαετία του 70, η ανωτέρω έρευνα επεκτάθηκε και στις βιομηχανίες των αυτοκινήτων καθώς επίσης και σε στρατιωτικές βιομηχανίες με ένα πρόγραμμα πειραματικών δοκιμών ασφαλείας (γνωστό και ως Experimental Safety Vehicle – E.S.V. σε οχήματα), το οποίο δημιουργήθηκε από τις Η.Π.Α. και εν συνεχεία αποτέλεσε μέρος διακρατικής συμφωνίας διεθνώς. Τα παραπάνω στοιχεία ενίσχυσαν σημαντικά την έρευνα γύρω από την ασφάλεια των οχημάτων και πλέον αναπτύχθηκαν τα πρότυπα στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας.^[7]

Χάρη στην έρευνα της δεκαετίας του 1970 στο αντικείμενο της αντοχής σε σύγκρουση, παρουσιάστηκε σημαντική πρόοδος ως προς την ασφάλεια των επιβατών κατά τη σύγκρουση. Τα περισσότερα πλαίσια οχημάτων είναι κατασκευασμένα από λεπτότοιχα δομικά μέρη ενώ παράλληλα τοποθετούνται και ειδικές διατάξεις crash boxes και προφυλακτήρες όπου συνεχώς βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά τους. Επιπροσθέτως, για τον εντοπισμό των σχεδιαστικών σφαλμάτων, γίνεται η χρήση της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων και προσομοίωση της σύγκρουσης με ανδρείκελα (ανθρώπινα ομοιώματα). Για την περίπτωση της προσομοίωσης με ανδρείκελα (βλ. Εικόνα 2.1), γίνεται χρήση του κριτηρίου της πρόσκρουσης της κεφαλής (Head Impact Criterion-HIC).^[8] Το ανωτέρω κριτήριο βάση της βιβλιογραφίας θεωρείται ο καλύτερος

τρόπος προσέγγισης του τραυματισμού της κεφαλής και δίνεται από την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$HIC = \max(t_2 - t_1) \cdot \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5}$$

όπου:

HIC : ο δείκτης τραυματισμού κεφαλής. Η μέγιστη τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 1000, όπου σηματοδοτεί την πιθανή πρόκληση μη αναστρέψιμου τραυματισμού (λόγου χάριν κρανιοεγκεφαλική κάκωση).

t_1, t_2 : η αρχική και η τελική χρονική στιγμή του χρονικού εύρους κατά το οποίο ο δείκτης *HIC* λαμβάνει μέγιστη τιμή.

$a(t)$: η αντίστοιχη επιτάχυνση.



Εικόνα 2.1: Ανδρείκελα στην προσομοίωση σύγκρουσης.^[8]

Εκτός της αυτοκινητοβιομηχανίας και των εφαρμογών της αεροναυπηγικής, η χρήση των διατάξεων αντοχής σε σύγκρουση επεκτείνεται και σε άλλους τομείς πλέον. Ειδικότερα, έχει παρατηρηθεί σε διατάξεις που αναπτύσσονται στο οδικό δίκτυο, λόγω χάριν στηθαία και κιγκλιδώματα, καθώς επίσης στις βιομηχανίες ως μέτρο πρόληψης για αποφυγή σοβαρών ατυχημάτων, όταν συσκευάζεται κάποιο προϊόν και στην ατομική προστασία. Για παράδειγμα, τέτοιες διατάξεις στη συσκευασία ενός προϊόντος είναι το φελιζόλ, τα πλαστικά υλικά με κυψέλες αέρα, κατάλληλο περιτύλιγμα κλπ. Στην ατομική προστασία, χρησιμοποιούνται κράνη για κάποια αθλήματα, ή κατάλληλος εξοπλισμός σχεδιασμένος για να προστατεύει τα γόνατα και τους αγκώνες από πιθανή σύγκρουση. Στις βιομηχανίες, προβλέπεται ο σχεδιασμός παθητικής προστασίας, ώστε σε περίπτωση αστοχίας ή ατυχήματος να προστατεύεται το προσωπικό και το

εργοστάσιο. Οπότε η τεχνογνωσία στο σχεδιασμό των υλικών, κρίνεται υψίστης σημασίας για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.^[8]

Στα πλαίσια της μελέτης των οχημάτων, ίσως το πιο σημαντικό στοιχείο παθητικής ασφάλειας για την αποφυγή ενός σοβαρού ή θανάσιμου τραυματισμού είναι οι απορροφητές ενέργειας. Οπότε, θα γίνει μία βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τους απορροφητές ενέργειας και η ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών τους, μιας και αυτό αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.^[8]

2.2. Υλικά κατασκευής λεπτότοιχων απορροφητών ενέργειας

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απορρόφηση ενέργειας των κελυφών είναι:

- το υλικό του απορροφητή ενέργειας
- η γεωμετρία της κατασκευής
- οι συνθήκες φόρτισης

Άρα, η γνώση των ανωτέρων είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού απορροφητή ενέργειας. Τα συνηθέστερα υλικά απορροφητών ενέργειας είναι τα εξής:

- μαλακός χάλυβας
- κράματα αλουμινίου
- σύνθετα υλικά (κυρίως τα ινώδη)

Η διάχυση ενέργειας στα μεταλλικά υλικά διαφέρει από την αντίστοιχη των σύνθετων υλικών. Ο μηχανισμός της πλαστικής παραμόρφωσης των μεταλλικών υλικών, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον ρυθμό παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης παρατηρείται και αύξηση στο όριο διαρροής του υλικού. Η επίδραση αυτή είναι επιθυμητή, διότι επιφέρει και μεγάλη απορρόφησης ενέργειας σε κατάσταση δυναμικής φόρτισης. Επιπλέον, παράγοντας της απορρόφησης ενέργειας αποτελεί η ολκιμότητα του υλικού, επιτρέποντας στην κατασκευή την ικανότητα απορρόφησης υψηλού πλαστικού έργου. Τα μεταλλικά υλικά έχουν υψηλή ολκιμότητα και υψηλό σχετικά όριο διαρροής. Από την άλλη τα σύνθετα υλικά είναι κυρίως ψαθυρά εξαιτίας του μηχανισμού αστοχίας των ινών.^[9]

Τα σύνθετα υλικά ως απορροφητές ενέργειας έχουν παρουσιάσει αρκετό ενδιαφέρον λόγω της απορρόφησης ενέργειας ελεγχόμενα, του χαμηλού βάρους κατασκευής και τις καλές μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά εξαιτίας της ανισότροπης ιδιότητας του υλικού, έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις στον σχεδιασμό τους, όσον αφορά την επιλογή τους για απορροφητές

ενέργειας. Επιπλέον, λόγω της δυσκολίας τους για ανακύκλωση τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις.^[9]

Συγκριτικά με το κόστος των υλικών, στα σύνθετα υλικά είναι αυξημένο σε σχέση με το αντίστοιχο των μεταλλικών υλικών, περιορίζοντας τα σε πολύ μικρό εύρος εφαρμογών (λόγου χάριν αεροδιαστημικές κατασκευές και αγωνιστικά αυτοκίνητα). Το γεγονός αυτό, ώθησε τους ερευνητές στην χρήση υβριδικών δομών που περιλαμβάνουν και τους δύο τύπους υλικών (μεταλλικά και σύνθετα με μεταλλική μήτρα). Σκοπός αυτής της επιλογής είναι η μεγιστοποίηση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας, λόγου χάριν οι μεταλλικοί σωλήνες από σύνθετο υλικό με μεταλλική μήτρα και εσωτερικό από σύνθετο υλικό (ινοπλισμένο πολυμερές). Ο συνδυασμός αυτός πετυχαίνει ταυτόχρονα τις επιθυμητές ιδιότητες κάθε τύπου υλικού. Συγκεκριμένα, την αναλογία μηχανικής αντοχής προς τη μάζα των σύνθετων υλικών, την ολκιμότητα των μεταλλικών υλικών και την σταθερή μορφή κατάρρευσης.^[10-16]

Στην παρούσα εργασία θα γίνεται η ανάλυση των απορροφητών ενέργειας από μεταλλικά υλικά, πιο συγκεκριμένα από κράμα αλουμινίου, υπό αξονική και λοξή θλιπτική φόρτιση. Τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται ευρέως από τις βιομηχανίες κατασκευής οχημάτων επειδή συνδυάζουν την υψηλή απορρόφηση ενέργειας με το χαμηλό βάρος.

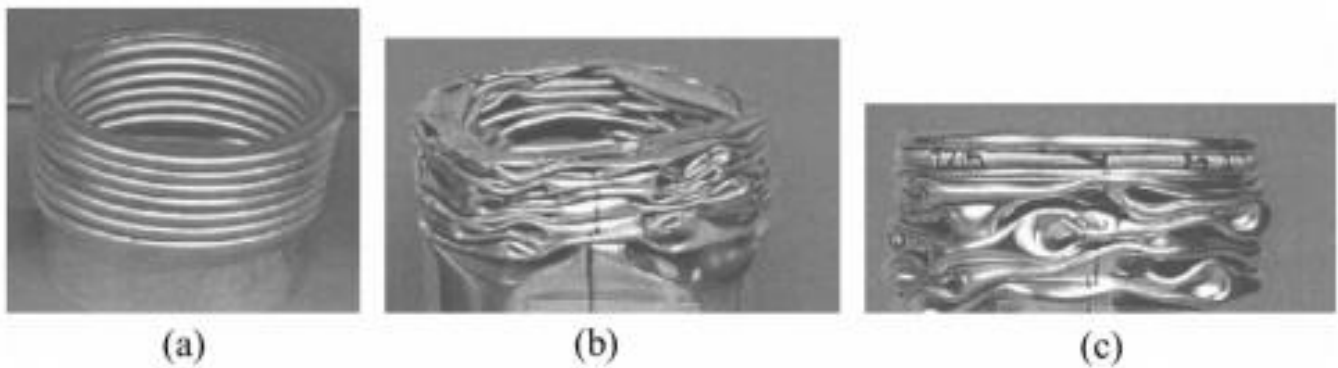
2.3. Μορφές κατάρρευσης κελυφών απορροφητών ενέργειας

Ο κυριότερος παράγοντας που επιδρά στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κελυφών, είναι οι συνθήκες φόρτισης.^[17-32] Συνήθως η μελέτη τέτοιων απορροφητών ενέργειας περιλαμβάνουν την αξονική, την λοξή, την πλευρική κατάρρευση και την κάμψη. Οι ανωτέρω καταστάσεις σχετίζονται με έναν ή και περισσότερους μηχανισμούς παραμόρφωσης, οι οποίοι είναι καθοριστικής σημασίας στη διαδικασία διάχυσης ενέργειας. Η εξέλιξη της τεχνολογίας οδήγησε τις βιομηχανίες οχημάτων να σχεδιάσουν πλαίσια με πολύπλοκες γεωμετρίες, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν ελαφρύτερες κατασκευές χωρίς όμως να επιδρά αρνητικά στην ασφάλεια των επιβατών. Παρακάτω, αναλύονται οι διάφορες περιπτώσεις μορφών κατάρρευσης, αναλόγως των συνθηκών φόρτισης και της γεωμετρίας των απορροφητών ενέργειας.^[17-32]

2.3.1. Αξονική κατάρρευση κυκλικών και τετραγωνικών διατομών

Οι λεπτότοιχες δομές οι οποίες δέχονται αξονικά φορτία, προτιμούνται στις δομές ως απορροφητές ενέργειας και χρησιμοποιούνται κυρίως στο crash box πίσω από τον προφυλακτήρα του αυτοκινήτου. Οι συγγραφείς αυτοί, όπως Abramowicz et al. και Wierzbicki et al., ήταν από τους ερευνητές που ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο για την αξονική κατάρρευση κελύφους κυκλικής διατομής. Η αξονική κατάρρευση των δοκιμίων χαρακτηρίζεται από ένα αρκετά σταθερό φορτίο κατάρρευσης και μια σχετικά υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Οι απορροφητές ενέργειας που υφίστανται αξονική κατάρρευση έχουν πολύ μεγάλη διακύμανση ως προς το

γεωμετρικό τους σχήμα (π.χ. κυκλική, τετραγωνική, τριγωνική ή και πολυγωνική διατομή). Επιπλέον, μπορούν να σχηματιστούν μονοκυψελωτές και πολυκυψελωτές διαμορφώσεις με η χωρίς κωνικότητα. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζονται οι κύριες μορφές κατάρρευσης.^[33-36]



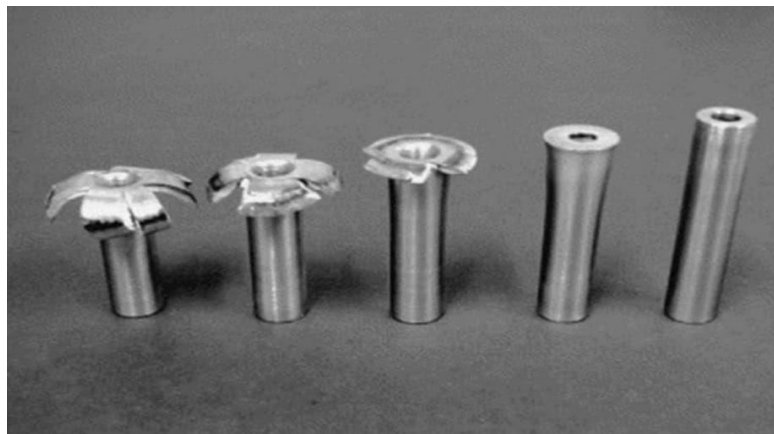
Εικόνα 2.2: Αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων δοκιμίων: a) αξονοσυμμετρική κατάρρευση (τύπου σερπαντίνας), b) μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση (τύπου διαμαντιού), γ) μεικτή κατάρρευση.^[17]

Η γεωμετρία ενός κυκλικού κελύφους, αντιπροσωπεύεται από τον λόγο της διαμέτρου (D) προς το πάχος του τοιχώματος (t) και το λόγο ύψους (H) προς το πάχος (t), καθώς και οι δύο παράμετροι επιδρούν σημαντικά στην μορφή της παραμόρφωσης και τη διάρκεια της αξονικής κατάρρευσης. Πειραματικά, έχει προκύψει πως αξονοσυμμετρική κατάρρευση εμφανίζεται σε σωλήνες με λόγο D/t μεγαλύτερο από 80, ενώ μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση με λόγο D/t μικρότερο από 50 και λόγο H/t μικρότερο από 2. Στην περίπτωση που ο σωλήνας έχει λόγο D/t μικρότερο από 50 και λόγο H/t μεγαλύτερο από 2, εμφανίζεται μεικτή κατάρρευση.^[1]

Επιπλέον παράγοντας που επιδρά στην μορφή της παραμόρφωσης, όπως έχει μελετηθεί από τους Wang και Lu είναι ο ρυθμός φόρτισης σε κυκλικής διατομής κέλυφος. Συμπέραναν, πως οι υψηλές ταχύτητες πρόσκρουσης παρήγαγαν μία ξεχωριστή μορφή κατάρρευσης που την αποκάλεσαν «Mushrooming», με το πάχος του τοιχώματος να αυξήθηκε κατά την εξέλιξη της κατάρρευσης. Οι ανωτέρω συγγραφείς διατύπωσαν πως η μορφή «Mushrooming» χωρίζεται σε 3 μορφές ανάλογα την ταχύτητα πρόσκρουσης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.3.^[37] Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

- προοδευτική παραμόρφωση για κελύφη με μικρό πάχος τοιχώματος σε σχετικά χαμηλή ταχύτητα πρόσκρουσης
- «Mushrooming» η οποία διεκπεραιώνεται υπό μέτρια ταχύτητα πρόσκρουσης
- «Mushrooming» η οποία διεκπεραιώνεται υπό υψηλή ταχύτητα πρόσκρουσης

Λόγω της δυσκολίας σύνδεσης των κυκλικών σωλήνων με τα υπόλοιπα δομικά μέρη οι βιομηχανίες κατέφυγαν σε άλλες γεωμετρίες, λόγου χάριν τα δομικά μέρη τετραγωνικής διατομής.[37]



Εικόνα 2.3: Μορφή παραμόρφωσης τύπου *Mushrooming* σε ταχύτητες πρόσκρουσης: 385, 277, 227, 173 και 0 m/s διαδοχικά.[37]

Σύμφωνα με τον Tang et al. η αποτελεσματικότητα απορρόφησης ενέργειας ενός τετραγωνικού κελύφους είναι σχεδόν το 70% του αντίστοιχου κυκλικού. Συμπλήρωσε επίσης, πως αυτό γίνεται επειδή το μεγαλύτερο τμήμα της παραμόρφωσης συγκεντρώνονται σε ζώνες κοντά στις γωνίες. Επιπλέον, σημαντική επίδραση στην μορφή της παραμόρφωσης είναι οι διαστάσεις της διατομής του. Ο μηχανισμός κατάρρευσης εξαρτάται από το λόγο πλάτους (b) προς το πάχος του τοιχώματος (t).[37]

2.3.2. Αξονοσυμμετρική κατάρρευση

Το κελυφωτό δοκίμιο που καταρρέει αξονοσυμμετρικά, παρομοιάζεται και ως μοτίβο κατάρρευσης σερπαντίνας με ευθείες αναδιπλώσεις κάθετες στον άξονα του κελύφους. Το έργο που απαιτείται για την δημιουργία μιας τέτοιας αναδίπλωσης μπορεί να χωρισθεί σε δύο μέρη, το πρώτο μέρος αφορά την κάμψη του κελύφους γύρω από τους πλαστικούς αρμούς και το δεύτερο αφορά έκταση του υλικού μεταξύ των αρμών (εκτατός τρόπος κατάρρευσης). Η μορφή αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης λαμβάνει χώρα συνήθως σε κελύφη κυκλικής γεωμετρίας (με τις γεωμετρικές συνθήκες που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 2.3.1). Ο εκτατός τρόπος κατάρρευσης εμφανίζεται και σε κελύφη τετραγωνικής γεωμετρίας μεγάλου πάχους.[38]

2.3.3. Μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση

Το κελυφωτό δοκίμιο που καταρρέει μη αξονοσυμμετρικά, παρομοιάζεται και ως μοτίβο κατάρρευσης διαμαντιού με ευθείες αναδιπλώσεις κάθετες στον άξονα του κελύφους. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός κατάρρευσης ονομάζεται και μη εκτατός διότι η αρχική διατομή είναι σταθερή σε όλη τη διάρκεια του φαινομένου. Εμφανίζεται πιο συχνά σε κελύφη τετραγωνικής

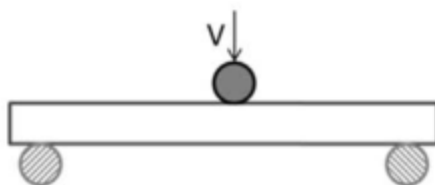
διατομής λεπτού πάχους. Εμφανίζεται όμως και σε κελύφη κυκλικής διατομής (αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 2.3.1).^[38]

2.3.4. Κατάρρευση τύπου λυγισμού

Το κελυφωτό δοκίμιο που καταρρέει υπό την μορφή λυγισμού αστοχεί σε συγκεκριμένη φάση (συνήθως από κάμψη) της καταπόνησης αυτού. Δεν ορίζεται κάποια απαραίτητη υπέρβαση του ορίου αντοχής του υλικού, γι' αυτό και η συγκεκριμένη μορφή κατάρρευσης είναι ξεχωριστή. Δοκίμια τα οποία έχουν πολύ μεγάλο μήκος, και πάχος διατομής αμελητέο ή πολύ μικρότερο σε σχέση με το μήκος τους, κινδυνεύουν να εμφανίσουν αυτόν τον μηχανισμό κατάρρευσης, όταν ασκηθεί σε αυτά αξονικό θλιπτικό φορτίο.^[39]

2.4. Καμπτική κατάρρευση

Η μελέτη των κελυφών σε κάμψη είναι αρκετά πιο περίπλοκη από την αξονική φόρτιση, εξαιτίας του ότι η δύναμη κάμψης επηρεάζεται από τη γεωμετρία του δοκιμίου, το μέγεθος και τη θέση άσκησης του φορτίου. Η παραμόρφωση του κελύφους υπό κάμψη αρχίζει με μια τοπική εσοχή στο σημείο της δύναμης και ακολουθείται από καθαρή κάμψη του σωλήνα, λόγω της σημαντικής μείωσης της διατομής στη θέση αυτή.^[40] Στην Εικόνα 2.4 απεικονίζεται η δοκιμή κάμψης τριών σημείων,



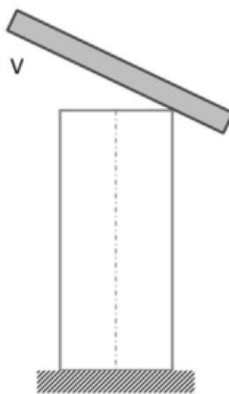
Εικόνα 2.4: Σκαρίφημα δοκιμής κάμψης τριών σημείων.^[40]

Η κάμψη ως καταπόνηση σε κελύφη σε διάφορες διατομές, λόγου χάριν κυκλική, ορθογώνια κι άλλες, μελετήθηκε και συγκρίθηκε ως προς την απόδοση τους από τον Tang et al υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης. Ο οποίος διαπίστωσε πως ο ελλειπτικός σωλήνας παρουσίασε μεγαλύτερη αντίσταση στην παραμόρφωση και καλύτερη συμπεριφορά απορρόφησης ενέργειας από τις άλλες διατομές.^[41]

Σύμφωνα με τον Wang et al, η απορρόφηση ενέργειας κατά την καμπτική καταπόνηση μπορεί να ενισχυθεί με χρήση πολλαπλών κυψελών. Ο τελευταίος ισχυρίζεται πως η διατομή του σωλήνα σε διπλή κυψέλη είναι πιο ανθεκτική σε αυτές τις συνθήκες φόρτισης.^[40]

2.5. Λοξή κατάρρευση

Ως γνωστών τα δοκίμια που υποβάλλονται σε αξονική κατάρρευση εφαρμόζονται συχνά σε εφαρμογές οχημάτων για να απορροφήσουν την ενέργεια σύγκρουσης, δεν είναι σπάνιο η πρόσκρουση αυτών να μην γίνει μετωπικά αλλά πλαγιομετωπικά. Γεγονός που οδηγεί στην απαραίτητη μελέτη αυτών των δοκιμών σε λοξή κατάρρευση. Οι απαιτήσεις ασφάλειας για τα οχήματα απαιτούν λοιπόν εκτός από μετωπική προστασία αλλά και προστασία από λοξό φορτίο έως 30° από τον διαμήκη άξονα του. Η λοξή κατάρρευση γενικά προκαλεί κάμψη στο δοκίμιο και υποβάλλεται σε προοδευτική αναδίπλωση μέχρις ότου εξελιχθεί σε καθαρή κάμψη, το οποίο εξαρτάται από το aspect ratio πάχους προς το μήκος του δοκιμίου.^[42] Στην Εικόνα 2.5 αναπαρίσταται η έναρξη ενός πειράματος λοξής θλίψης.



Εικόνα 2.5: Σκαρίφημα λοξής θλιπτικής φόρτισης.^[42]

2.5.1. Κελύφη τετραγωνικής ή κυκλικής διατομής με ή χωρίς κωνικότητα

Τα κελύφη τετραγωνικής και κυκλικής διατομής υπό λοξή φόρτιση αρχικά μελετήθηκαν από τους Reid και Reddy. Τα δοκίμια με κωνικότητα υποβλήθηκαν σε λοξή φόρτιση με γωνία 10° ως προς τον διαμήκη άξονα. Συμπέραναν, πως η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των κελυφών και σε αξονική και λοξή φόρτιση ήταν παρόμοια. Επιπλέον, η έρευνα τους επεκτάθηκε συμπεριλαμβανομένης της ταχύτητας κρούσης, της γωνίας διεύθυνσης του φορτίου, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (όπου συμπεριλαμβάνεται και η γωνία της κωνικότητας), ο αριθμός των πλευρών με κωνικότητα, το πάχος του τοιχώματος και το μήκος των κελυφών. Τα κελύφη με κωνικότητα παρουσίασαν πλεονεκτήματα σε σχέση με τα αντίστοιχα χωρίς, ως προς τον συντελεστή ομοιομορφίας του φορτίου κατάρρευσης (ο οποίος θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 4), την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε καθαρή κάμψη, καθώς και ποια τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας είναι λιγότερο εξαρτημένα από τις παραμέτρους του φορτίου.^[43]

Η μελέτη της συμπεριφοράς της απορρόφησης ενέργειας των τετραγωνικών κελυφών από κράμα αλουμινίου, υπό συνθήκες δυναμικής και οιονεί στατικής θλίψης πραγματοποιήθηκε από τον Reyes. Ο τελευταίος παρατήρησε ότι η κύρια μορφή παραμόρφωσης στην λοξή θλίψη ήταν η κάμψη, όπου εξαρτάται τόσο από την γωνία διεύθυνσης του θλιπτικού φορτίου, όσο και το πάχος τοιχώματος του κελύφους. Επιβεβαιώθηκε πως τα μέσα και τα μέγιστα φορτία κατάρρευσης (μεγέθη που θα αναλυθούν στο κεφάλαιο 4), μειώνονταν όσο αυξανόταν η γωνία διεύθυνσης του φορτίου. Ο ίδιος ανέφερε επίσης, πως δεν υπήρξε αλλαγή στην μορφή της κατάρρευσης μεταξύ των οιονεί στατικών και δυναμικών θλιπτικών φορτίσεων. Επιπλέον, επισήμαναν πως μειώθηκε και η απορρόφηση της ενέργειας συναρτήσει της αύξησης της γωνίας διεύθυνσης του φορτίου.^[42]

Πρώτη φορά που μελετήθηκε η μοντελοποίηση κελυφών τετραγωνικής διατομής υπό λοξή φόρτιση στο LS-DYNA, ήταν από τον Han et al. το 1999. Η αριθμητική προσομοίωση που πραγματοποίησε, απέδειξε ότι μία κρίσιμη γωνία διεύθυνσης φορτίου μεταβάλλει την αξονική κατάρρευση σε κάμψη. Επιπλέον, συμπέρανε ότι η κρίσιμη αυτή γωνία είναι σχεδόν ανεξάρτητη του πάχους τοιχώματος, όμως επηρεάζεται σημαντικά από τα άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κελύφους (λόγου χάριν το μήκος και το πλάτος). Η διερεύνηση της συμπεριφοράς της κωνικότητας των τετραγωνικών κελυφών, απλής διατομής και διατομής πολλαπλών κυψελών πραγματοποιήθηκε από τον Yang et al., ο οποίος διαπίστωσε πως οι βέλτιστες διαμορφώσεις κελυφών αλλάζουν για διαφορετικές γωνίες διεύθυνσης φορτίου.^[44]

2.5.2. Άλλες διατομές

Η διερεύνηση εναλλακτικών διατομών πέραν των τετραγωνικών και κυκλικών σωλήνων, πραγματοποιήθηκε το 2013 από τον Tarlochan et al., ο οποίο διαπίστωσε πως η βέλτιστη επιλογή διατομής ήταν η εξαγωνική για εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας. Επιπλέον, ορισμένες εξαγωνικές διατομές χρησιμοποιήθηκαν εκ των υστέρων, για περαιτέρω μελέτη ως προς το πάχος των κελυφών και της επίδρασης των συνθηκών φόρτισης.^[45]

Μία διατομή που παρουσίασε την πιο καλή απόδοση για αντοχή σε πρόσκρουση ήταν το κωνικό ελλειπτικό κέλυφος σε συνθήκες λοξής φόρτισης και για πολλές γωνίες διεύθυνσης φορτίου. Ο Wang et al., πραγματοποίησε την σύγκριση μεταξύ αυτής της διατομής, της τετραγωνικής, της ορθογώνιας και της κυκλικής, με διάφορες διαμορφώσεις (λόγου χάριν ευθύγραμμη, κωνική κλπ.).^[46]

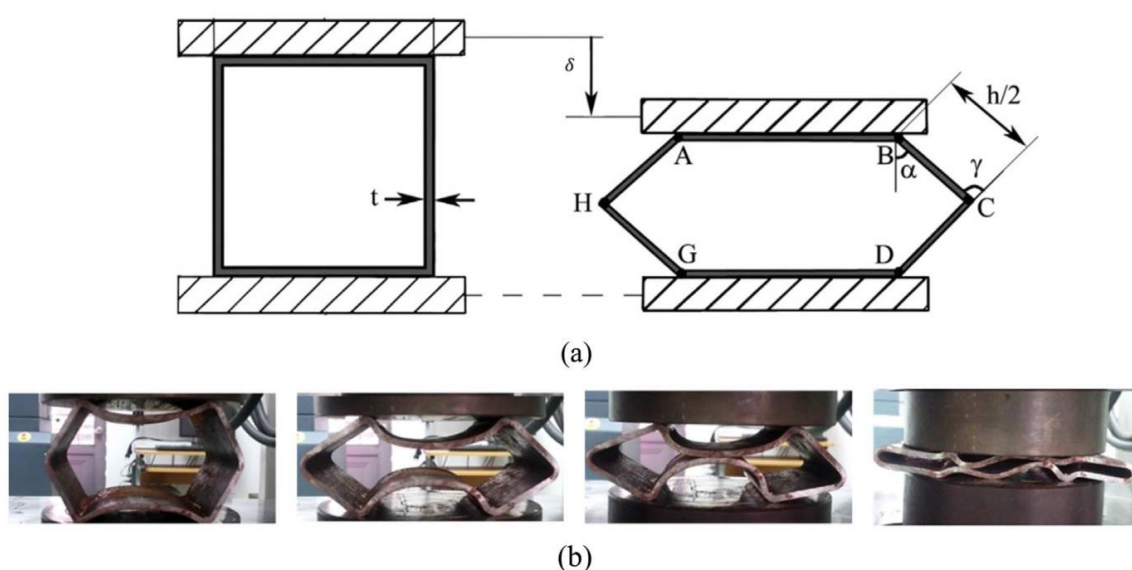
Την αριθμητική επίδραση στην απορρόφηση ενέργειας, της γωνίας διεύθυνσης φορτίου και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε κυματοειδή κωνικά κελύφη (corrugated conical shells) υπό 7 διαφορετικές γωνίες φόρτισης, διεκπεραίωσε ο Alkhatib et al.. Ο τελευταίος διαπίστωσε ότι η αύξηση της γωνίας διεύθυνσης φορτίου, για εύρος 0 έως 40° μειώνει αισθητά την ενέργεια απορρόφησης (μέγεθος που θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 4).[47]

2.6. Πλευρική κατάρρευση

Πλευρική κατάρρευση προκαλείται από πλευρική άσκηση θλιπτικού φορτίου και μέχρις ότου το υλικό υποχωρήσει πλήρως. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός κατάρρευσης σε ένα λεπτότοιχο δοκίμιο περιλαμβάνει τη θλίψη κατά το μήκος του δοκιμίου παράλληλα με τον διαμήκη άξονά του. Συνήθως αναπτύσσεται σε πρόσκρουση δύο οχημάτων σε μία διασταύρωση, αλλά και σε μετωπική σύγκρουση στη σύνδεση μεταξύ crash box και του "προφυλακτήρα" δηλαδή του εγκάρσιου σωλήνα που συνδέεται με τα δύο crash boxes. Εξαιτίας αυτών αποτέλεσε αντικείμενο πολλών ερευνητικών μελετών.[48]

2.6.1. Κελύφη τετραγωνικής διατομής

Ο μηχανισμός παραμόρφωσης ενός τετραγωνικού σωλήνα υπό πλευρική φόρτιση περιλαμβάνει τη δημιουργία τριών ζευγών πλαστικών αρμών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6, δύο ζεύγη πλαστικών αρμών σχηματίζονται σε διασταυρώσεις κάθετων και οριζόντιων πλευρών ενώ το τελευταίο ζεύγος σχηματίστηκε στο μέσο ύψος των κατακόρυφων πλευρών του σωλήνα. Στην Εικόνα 2.6 απεικονίζεται το θεωρητικό μοντέλο πλαστικής παραμόρφωσης από πλευρική φόρτιση, καθώς και ο μηχανισμός παραμόρφωσης σωλήνων κράματος αλουμινίου ορθογώνιας διατομής υπό οιονεί στατική πλευρική θλίψη.[21,48-53]



Εικόνα 2.6: (α) Θεωρητικό μοντέλο πλαστικής παραμόρφωσης ορθογώνιου υπό πλευρική φόρτιση [54] β) Μηχανισμός παραμόρφωσης σωλήνων κράματος αλουμινίου με ορθογώνια διατομή υπό οιονεί στατική πλευρική φόρτιση [55]

2.6.2. Ένθετα κελύφη

Σύμφωνα με πολλούς ερευνητές, τα κελύφη μπορούν να στοιβάζονται μαζί ώστε να σχηματιστεί ένα σωληνωτό σύστημα με επιθυμητή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Τα ένθετα κελύφη παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον για εφαρμογές με περιορισμένη ζώνη κατάρρευσης, καθώς έχουν περισσότερα από ένα στοιχεία που συμπιέζονται στον ίδιο χώρο, με αποτέλεσμα να παρουσιάσουν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ανά μονάδα μήκους σε σχέση με ένα κέλυφος απλής γεωμετρίας.^[55-57]

Η προσπάθεια βελτίωσης της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας για τα ένθετα κελύφη πραγματοποιήθηκε από τον Baroutaji et al., ο οποίος κατάφερε την ταυτόχρονη παραμόρφωση των κελυφών αυτών, με σκοπό να επιτευχθεί η επιθυμητή απόκριση του απορροφητή ενέργειας (επιθυμητή καμπύλη φορτίου-μετατόπισης). Ο ίδιος ανέφερε ότι ένα ένθετο κέλυφος με δύο όμοιους εσωτερικούς σωλήνες παρουσιάζει μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Ο Morris et al. απέδειξε πως η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, αν εφαρμοστούν οι κατάλληλοι εξωτερικοί περιορισμοί στους βαθμούς ελευθερίας κίνησης (πάκτωση δοκιμίων). Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζεται η προοδευτική κατάρρευση μερικών τυπικών ένθετων κελυφών.^[58]



(a)



(b)



(c)



(d)

Εικόνα 2.7: Προοδευτική πλευρική κατάρρευση ένθετων διατομών: a) πρότυπα ένθετα κελύφη,^[59] b) βελτιστοποιημένα ένθετα κελύφη,^[57,60] γ) πλευρική κατάρρευση ένθετων κελυφών^[56] d) ένθετα κελύφη με εξωτερικούς περιορισμούς.^[57]

2.7. Σκοπός εργασίας

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο εμπλουτισμός της υπάρχουσας βιβλιογραφίας όσον αφορά την συμπεριφορά της κατάρρευσης κελυφών κράματος αλουμινίου τετραγωνικής διατομής, υπό οιονεί στατική αξονική και λοξή θλίψη πειραματικά και αριθμητικά. Στην διεθνή βιβλιογραφία το αντικείμενο του crashworthiness έχει μελετηθεί διεξοδικά από πάρα πολλούς ερευνητές.

Ευρύτερος σκοπός είναι η διερεύνηση της απόδοσης συγκεκριμένης γεωμετρίας και υλικού σε συνθήκες λοξής φορτίσης με σκοπό την βελτιστοποίηση της παθητικής ασφάλειας των οχημάτων και η επιλογή "ελαφρού" υλικού έγινε με σκοπό τη μείωση του βάρους των οχημάτων και κατά επέκταση των εκπομπών ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ (που ευθύνονται για το global warming).

Τα κελύφη αυτά έχουν ευρεία εφαρμογή στα οχήματα, όπως και σε περιπτώσεις πλαγιομετωπικής σύγκρουσης αυτών. Η σύγκρουση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί υπό διαφορετικές γωνίες φόρτισης. Σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν προσαρμοστεί τα μέτρα για την αντοχή των οχημάτων σε λοξή φόρτιση.

Τέσσερα δοκίμια κράματος αλουμινίου, υποβλήθηκαν σε αξονική και λοξή θλίψη σε γωνία 45 μοίρες από τον διαμήκη άξονα του και ανά 5 μοίρες διαφορά κλίσης φορτίου (0, 5, 10 και 15 μοίρες). Σκοπός αυτού είναι η διερεύνηση της επίδρασης της κλίσης του δοκιμίου στους τρόπους παραμόρφωσης, στα μοτίβα κατάρρευσης, όπως και την επίδραση στους δείκτες απορρόφησης ενέργειας.

Μετά την διεκπεραίωση της εργασίας, θα προκύψει το συμπέρασμα ως προς την αξιοπιστία του συγκεκριμένου απορροφητή ενέργειας, για την χρήση του σε εφαρμογές οχημάτων. Σκοπός είναι η αισθητή μείωση των συνεπειών κατά την σύγκρουση αυτών, με γνώμονα των υλικών και της δομικής συμπεριφοράς κελυφών για συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης και γεωμετρίας.

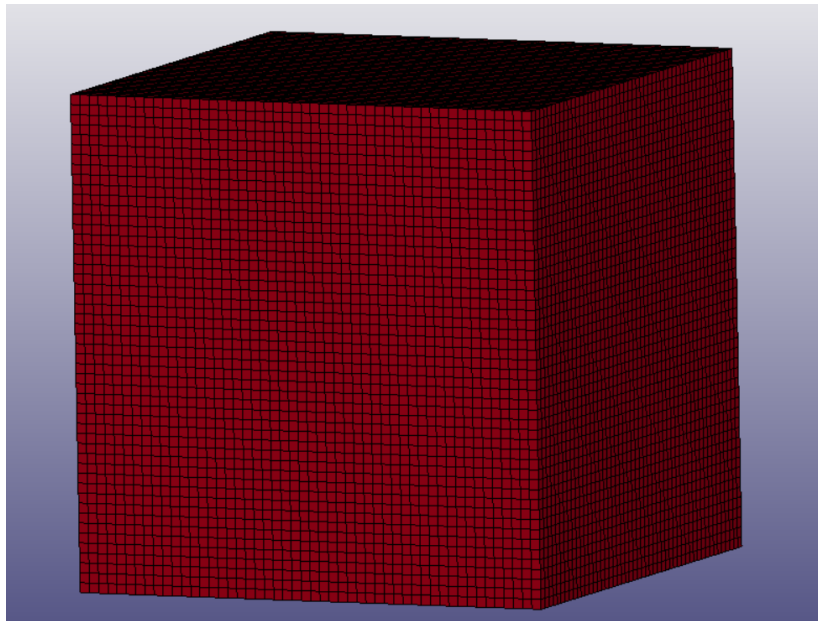
3. ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.1. Γενικά

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, αναλύει τις τάσεις που δημιουργούνται σε διάφορες κατασκευές υπολογίζοντας τις αριθμητικά σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αυτή η αριθμητική μέθοδος, παρέχει τη δυνατότητα αντιμετώπισης περίπλοκων προβλημάτων που συνήθως εκφράζονται σε μορφή διαφορικών εξισώσεων. Αρχικά, όταν ανακαλύφθηκε η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων προκάλεσε μεγάλο κώλυμα εξαιτίας της απαίτησης υψηλής υπολογιστικής ισχύος και χωρητικότητας δεδομένων, μειονέκτημα το οποίο εξαλείφτηκε με την εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Το παραπάνω μειονέκτημα της μεθόδου δεν επέτρεπε τη χρήση εκτός από τις περιπτώσεις των εξαιρετικά απλών προβλημάτων. Σήμερα η μείωση του κόστους της υπολογιστικής ισχύος στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, όπου ήταν το μεγάλο μειονέκτημα, έφερε ως αποτέλεσμα να αποτελεί αναγκαίο εργαλείο. Ως αριθμητική μέθοδος, αποτελείται από τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που έχουν και οι περισσότερες μέθοδοι αυτού του τύπου. Λόγου χάριν δεν υπάρχει εγγύηση για σύγκλιση της μεθόδου, είναι επιρρεπής σε ταλαντώσεις και υπάρχει απαίτηση για ανώτερες μαθηματικές γνώσεις.^[59] Όμως η πρόοδος της τεχνολογίας και η συνεχής έρευνα για το θέμα της βελτίωσης των αριθμητικών μεθόδων, οδηγεί τις λύσεις των προβλημάτων με σχετικά αμελητέα σφάλματα. Επιπροσθέτως, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων ως αριθμητική μέθοδος, επιλύει τα κατασκευαστικά προβλήματα με καθορισμό των αρχικών συνθηκών από τον χρήστη. Η κεντρική ιδέα πίσω από την μέθοδο είναι η διακριτοποίηση του κάθε στοιχείου σε ένα υπολογιστικό πλέγμα όπου το κάθε σημείο του συγκεκριμένου πλέγματος ονομάζεται πεπερασμένο στοιχείο.^[58]

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό νέων προϊόντων, τα οποία αρχικά δημιουργούνται ως μοντέλα στον χώρο σχεδίασης του προγράμματος και εν συνεχεία πραγματοποιείται η υπολογιστική ανάλυση με βάση τις ιδιότητες που έχουν οριστεί από τον χρήστη. Επιπλέον, χρησιμεύει στην μετατροπή των σχεδιαζόμενων προϊόντων ώστε να μελετηθούν οι ενδεχόμενες μηχανικές αστοχίες και αν χρειαστεί στην διόρθωση της λύσης. Δηλαδή, η μελέτη ενός προβλήματος που θα λυθεί με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων συνίσταται στη δημιουργία μοντέλου κατασκευής, το οποίο καλούμαστε να επιλύσουμε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για την εξαγωγή των απαιτούμενων αποτελεσμάτων, τα οποία στη συνέχεια μας βοηθούν σε κατάλληλα συμπεράσματα.^[58]

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, η δομή διαιρείται σε ένα πλήθος από πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε σημεία (τους αποκαλούμενους κόμβους), και δημιουργείται το προαναφερόμενο υπολογιστικό πλέγμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1.[58]



Εικόνα 3.1: Δημιουργία πλέγματος σε κυβικό δοκίμιο

Τα βήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων διακρίνονται ως εξής:

- 1) Σχεδιασμός της υπό μελέτης γεωμετρίας σε κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD, δηλ. δημιουργία ενός μοντέλου.
- 2) Ακολουθεί ο διαμερισμός του μοντέλου και η εισαγωγή των απαιτούμενων δεδομένων, χρησιμοποιώντας κάποιο πρόγραμμα τύπου pre-processor.
- 3) Έπειτα ακολουθείται η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται πρόγραμμα τύπου solver.
- 4) Όταν ολοκληρωθεί η επίλυση του προβλήματος, τα αποτελέσματα εισάγονται σε πρόγραμμα τύπου post-processor, ώστε ο μελετητής να δει και να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα.[9]

Μερικά παραδείγματα προγραμμάτων επίλυσης ενός κατασκευαστικού προβλήματος με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής:

- 1) LS-Dyna
- 2) Solidworks
- 3) Inventor

3.2. LS-DYNA

Το LS-DYNA είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ικανό να προσομοιώνει περίπλοκα πραγματικά προβλήματα. Συνήθως χρησιμοποιείται σε αυτοκινητοβιομηχανίες, αεροπορικές βιομηχανίες, κτηριακές δομές, στρατιωτικές εφαρμογές, βιομηχανίες κατεργασιών και εμβιομηχανικής. Χρησιμοποιείται σε πλατφόρμες Unix, Linux, και Windows. Ο κώδικας του στην ουσία είναι η μεταβαλλόμενη δυναμική ανάλυση μη γραμμικών προβλημάτων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε ενσωματωμένο ολοκληρωμένο χρόνο.^[60]

Μη γραμμικότητα προκύπτει όταν συνυπάρχουν κατ' ελάχιστον μία (και πολλές φορές όλες) από τις παρακάτω επιπλοκές:

- Μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες (για παράδειγμα επαφή μεταξύ των κομματιών η οποία διαφοροποιείται με την πάροδο του χρόνου)
- Μεγάλες παραμορφώσεις (για παράδειγμα η παρουσία μετώπων κατάρρευσης σε μεταλλικά ελάσματα)
- Υλικά τα οποία δεν παρουσιάζουν ακριβώς ελαστική συμπεριφορά (για παράδειγμα τα θερμοπλαστικά πολυμερή)

Μεταβαλλόμενη δυναμική ανάλυση είναι οι περιπτώσεις που υπάρχουν υψηλές ταχύτητες και μικρή χρονική διάρκεια, στις οποίες υπάρχουν σημαντικές αδρανειακές δυνάμεις. Τυπικές εφαρμογές αποτελούν:

- Αυτοκινητιστική πρόσκρουση (παραμόρφωση του πλαισίου, εμφύσηση του αερόσακου, εφελκυσμός ζώνης ασφαλείας)
- Εκρήξεις (υποβρύχιες νάρκες)
- Κατεργασίες (διαμόρφωση με πλαστική παραμόρφωση)

Οι δυνατότητες του LS-DYNA είναι ποικίλες και μπορούν να προσαρμοστούν σε πολλά πεδία. Σε μία δεδομένη προσομοίωση, οι ιδιότητες του LS-DYNA μπορούν να συνδυαστούν ώστε να μοντελοποιηθεί ένα μεγάλο εύρος φυσικών προβλημάτων. Ένα παράδειγμα προσομοίωσης, το οποίο περιέχει έναν μοναδικό συνδυασμό ιδιοτήτων, είναι η προσομοίωση της προσγείωσης του ανιχνευτή μονοπατιών της NASA στον Άρη.^[60]

Το πρόγραμμα αυτό αποτελείται από ένα εκτελέσιμο αρχείο και καθοδηγείται εξ ολοκλήρου από γραμμές εντολών. Επομένως, για να τρέξει το πρόγραμμα, απαιτείται ένα μπλοκ εντολών, το εκτελέσιμο αρχείο, το αρχείο δεδομένων και επαρκής μνήμη για την εκτέλεση των υπολογισμών. Όλα τα αρχεία δεδομένων είναι σε απλή ASCII μορφή και μπορούν να παραχθούν με χρήση

οποιοδήποτε επεξεργαστή κειμένου. Επίσης, μπορούν να παραχθούν και με γραφικό προεπεξεργαστή (για παράδειγμα ο επιλυτής του Ansys ή το Software του LS-Dyna).[60]

3.2.1. Δυνατότητες του προγράμματος LS-Dyna

Οι πιθανές εφαρμογές της LS-DYNA είναι πολλές και μπορούν να προσαρμοστούν σε πολλούς τομείς, δεν περιορίζεται σε κάποιο συγκεκριμένο τύπο προσομοίωσης. Σε μια δεδομένη προσομοίωση, οποιοδήποτε από τα πολλά χαρακτηριστικά του LS-DYNA μπορεί να συνδυαστεί για να μοντελοποιήσει μια μεγάλη ποικιλία φυσικών φαινομένων. Λόγου χάριν, μία προσομοίωση που περιλαμβάνει έναν μοναδικό συνδυασμό χαρακτηριστικών είναι η προσγείωση της NASA JPL Mars Pathfinder, η οποία προσομοίωσε τη χρήση αερόσακων από το διαστημικό ανιχνευτή για να βοηθήσει στην προσγείωσή του. Οι δυνατότητες ανάλυσης του προγράμματος LS-Dyna είναι οι εξής[60]:

- Πλήρης ανάλυση σε γεωμετρίες δύο και τριών διαστάσεων
- Ανάλυση μη γραμμικής δυναμικής
- Ανάλυση δυναμικής άκαμπτων σωμάτων
- Προσομοίωση οιονεί στατικών δοκιμών
- Ανάλυση γραμμικών στατικών δοκιμών
- Θερμική ανάλυση
- Ρευστοδυναμική ανάλυση
 1. Ανάλυση εξισώσεων Euler
 2. Ανάλυση αλληλεπίδρασης ρευστού – στερεού
 3. Ανάλυση εξισώσεων Navier-Stokes
 4. Ανάλυση εξισώσεων συμπιεστής ροής
- Ανάλυση δυναμικής σύζευξης πολλαπλών άκαμπτων σωμάτων
- Ανάλυση αστοχίας
- Ανάλυση διάδοσης μετώπων ρωγμής
- Ανάλυση σύζευξης θερμότητας και στερεού σώματος
- Ανάλυση υδροδυναμικής λείων σωματιδίων
- Μέθοδος διακριτών στοιχείων
- Μετάδοση ακτινοβολίας
- Ηλεκτρομαγνητισμός

Η βιβλιοθήκη του προγράμματος αποτελείται από τα παρακάτω μοντέλα υλικών:

- Μεταλλικών
- Πλαστικών
- Υάλινων

- Αφρώδων
- Υφασμάτων
- Ελαστομερών
- Παχύρευστων υγρών

Μερικά επιπλέον στοιχεία που διαθέτει το πρόγραμμα είναι:

- Δοκοί
- Ελατήρια
- Αποσβεστήρες
- Κελύφη (3, 4, 6 και 8 κόμβων συμπεριλαμβανομένων 3D κελύφους, μεμβρανών, 2D επίπεδου τάσης, επίπεδης παραμόρφωσης και αξονικά συμμετρικά στερεά με περισσότερες από 25 συνθέσεις στοιχείων κελύφους)
- Στερεά (τετράεδρα 4 και 10 κόμβων, πεντάεδρα 6 κόμβων και εξάεδρα 8 κόμβων με περισσότερες από 20 συνθέσεις στερεών στοιχείων)

3.2.2. LS-Dyna για *crashworthiness* και την ασφάλεια επιβατών οχήματος

Το LS-DYNA χρησιμοποιείται από την αυτοκινητοβιομηχανία για την ανάλυση οχημάτων, επίσης, προβλέπει με ακρίβεια τη συμπεριφορά ενός αυτοκινήτου σε μια σύγκρουση και τις επιπτώσεις της σύγκρουσης στους επιβάτες του αυτοκινήτου. Με το LS-DYNA, οι αυτοκινητοβιομηχανίες και οι προμηθευτές τους μπορούν να δοκιμάσουν σχέδια αυτοκινήτων χωρίς να χρειάζεται να δοκιμάσουν εξαρτήματα ή πειραματικά ένα πρωτότυπο, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και έξοδα.^[63]
^[64] Ειδικά διαθέτει τα παρακάτω στοιχεία ενός αυτοκινήτου οχήματος:

- Ζώνες ασφαλείας
- Δακτύλιοι ολίσθησης
- Προεντατήρες
- Συσπειρωτές
- Αισθητήρες
- Επιταχυνσιόμετρα
- Αερόσακους
- Υβριδικά ανδρείκελα
- Μοντέλα φουσκωτών

Στην παρούσα εργασία θα πραγματοποιηθεί ανάλυση των δεικτών απορρόφησης ενέργειας σε σωλήνα τετραγωνικής διατομής. Τα κελύφη αυτά χρησιμοποιούνται για την ασφάλεια των επιβατών οχήματος σε περίπτωση πρόσκρουσης του οχήματος. Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι να ληφθούν συμπεράσματα στην ικανότητα τους να επιτύχουν την επιθυμητή ασφάλεια των επιβατών σε περίπτωση πρόσκρουσης του οχήματος. Στο κεφάλαιο 4 θα δούμε κάποια σημαντικά στοιχεία

θεωρίας, όπου θα μας δώσουν μία σφαιρική εικόνα για το τι συμβαίνει στο υλικό όταν απορροφά την ενέργεια πρόσκρουσης.

3.2.3. LS-Dyna για λοιπές εφαρμογές

Μία από τις εφαρμογές του LS-DYNA είναι η διαμόρφωση μεταλλικού ελάσματος, το οποίο προβλέπει με ακρίβεια τις τάσεις και τις παραμορφώσεις του μετάλλου και καθορίζει εάν αυτό θα αστοχήσει. Επιπλέον, υποστηρίζει την προσαρμοσμένη ανακατασκευή πλέγματος κατά την ανάλυση και θα βελτιώσει το πλέγμα εάν είναι απαραίτητο, για να αυξήσει την ακρίβεια και να εξοικονομήσει χρόνο.^{[63],[64]} Το πρόγραμμα περιλαμβάνει τις εξής εφαρμογές διαμόρφωσης μεταλλικών υλικών:

- Μεταλλική σφράγιση
- Υδροδιαμόρφωση
- Σφυρηλάτηση
- Βαθεία κοίλανση

Επιπλέον το πρόγραμμα χρησιμοποιείται από την αεροναυπηγική βιομηχανία για να προσομοιώσει την σύγκρουση των πτηνών με το αεροσκάφος, τη μηχανική ανάλυση της πτερύγωσης και του κινητήρα, καθώς και την ανάλυση αστοχίας.^{[62], [63]}

Χρησιμοποιείται εκτενώς από ερευνητές του στρατού και της άμυνας.^{[65],[66]} Μερικές από αυτές τις εφαρμογές περιλαμβάνουν:

- Εκρήξεις (υποβρύχιες, διαμορφωμένες γομώσεις κ.λπ.)
- Διείσδυση βλημάτων
- Μοντελοποίηση κρουστικών κυμάτων

Και τέλος γίνεται χρήση του προγράμματος στις βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου για να πραγματοποιήσει ανάλυση κόπωσης σε υπεράκτιες κατασκευές, ανάλυση αστοχίας πλοίων σε περίπτωση σύγκρουσης και προσομοίωση αλληλεπιδράσεων δομής ρευστού.^[67] Οι εφαρμογές LS-DYNA για τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου περιλαμβάνουν:

- Συγκρούσεις πλοίων
- Επίδραση πάγου
- Επίδραση κυμάτων και τσουνάμι

4. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

4.1. Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία εστιάζεται στους απορροφητές ενέργειας που εφαρμόζεται κατά κόρον στις βιομηχανίες κατασκευής οχημάτων. Σκοπός τους είναι η προστασία των επιβατών και των εμπορευμάτων από κάποια πιθανή σύγκρουση. Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η αξονική και λοξή κατάρρευση ενός λεπτότοιχου κελύφους τετραγωνικής διατομής από κράμα αλουμινίου.

Ο απορροφητής ενέργειας είναι ένα σύστημα που μετατρέπει μέρος ή ολόκληρη την κινητική ενέργεια κατά τη σύγκρουση σε άλλη μορφή ενέργειας, όπου ιδανικά δε θα μπορεί να ανακτηθεί. Μη αντιστρεπτή (ανελαστική) ενέργεια μπορεί να υπάρξει σε διάφορες μορφές, όπως είναι η πλαστική παραμόρφωση, η ιξώδης ενέργεια, η ενέργεια τριβής ή η ενέργεια θραύσης.^[19]

Οι απορροφητές ενέργειας των υλικών που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε πλαστικό έργο, έχουν ευρεία εφαρμογή, τόσο στις βιομηχανίες των εναέριων μεταφορικών μέσων, όσο και στις αντίστοιχες των επίγειων. Ουσιαστικά μας δείχνουν την ικανότητα προστασίας των επιβατών και των εμπορευμάτων από ενδεχόμενη σύγκρουση.^[17]

4.2. Γενικές αρχές

Μέχρι στιγμής, είναι προφανές ότι ο σχεδιασμός απορροφητών ενέργειας και τα «ενεργό-απορροφητικά» υλικά πρέπει να ταιριάζουν με τον σκοπό και τις συνθήκες που πρόκειται να λειτουργήσουν. Ο σχεδιασμός και η επιλογή μπορεί να έχουν μεγάλη ποικιλία από εφαρμογή σε εφαρμογή, αλλά σε όλες τις περιπτώσεις, ο στόχος είναι κοινός, η διάχυση της κινητικής ενέργειας με έναν ελεγχόμενο τρόπο ή προκαθορισμένο ρυθμό. Επομένως, ισχύουν μερικές θεμελιώδεις αρχές για όλες τις εφαρμογές τέτοιου είδους και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν κατευθυντήριες γραμμές για τον σχεδιασμό ενός απορροφητή ενέργειας. Οι κυριότερες παρουσιάζονται παρακάτω.^[1]

4.2.1. Μη αναστρέψιμη μετατροπή ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε και στον ορισμό, η μετατροπή ενέργειας από δομές/υλικά πρέπει να είναι μη αντιστρεπτή, γι' αυτό οι δομές/υλικά πρέπει να είναι σε θέση να μετατρέπουν το μεγαλύτερο δυνατό ποσό κινητικής ενέργειας σε πλαστικό έργο ή άλλης μορφής διαδικασίας διάχυσης.

Η μετατροπή της κινητικής ενέργειας όσο το δυνατόν πρέπει να γίνει σε πλαστική παραμόρφωση. Αν η αρχική κινητική ενέργεια δε μετατραπεί σε πλαστική παραμόρφωση της κατασκευής, τότε η

αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια θα απελευθερωθεί και θα διοχετευθεί στους επιβάτες του οχήματος κάτι που θέλουμε να αποφύγουμε.^[1]

4.2.2. Μέγιστη δύναμη αντίδρασης

Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης ενός απορροφητή ενέργειας δεν πρέπει να ξεπερνά ένα όριο, ιδανικά θα πρέπει να παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της παραμόρφωσης του, καθώς θα παρέχει επαρκή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά την πρόσκρουση. Η μέγιστη δύναμη (και κατ' επέκταση η μέγιστη επιβράδυνση) της κατασκευής/υλικού απορρόφησης ενέργειας πρέπει να κρατηθεί κάτω από ένα όριο από το οποίο προκαλείται ζημιά ή τραυματισμός, γι' αυτό λοιπόν η δύναμη αντίδρασης πρέπει να παραμένει σχετικά σταθερή, ώστε να αποφεύγεται μία υπερβολικά μεγάλη επιβράδυνση.^[1]

4.2.3. Μεγάλη διαδρομή

Όπως επισημάνθηκε παραπάνω, η δύναμη αντίδρασης για έναν απορροφητή ενέργειας πρέπει να είναι σχετικά σταθερή, αλλά το έργο που προκαλείται από μία δύναμη, είναι το γινόμενο αυτής επί τη μετατόπιση της διεύθυνσης που δρα. Γι' αυτό, αν η κατασκευή προορίζεται να έχει μεγάλη ενέργεια απορρόφησης, η διαδρομή πρέπει να είναι σχετικά μεγάλη.^[1]

4.2.4. Σταθερός και επαναλαμβανόμενος μηχανισμός παραμόρφωσης

Για την αντιμετώπιση αβέβαιων συνθηκών φόρτισης, ο μηχανισμός παραμόρφωσης και η ικανότητα διάχυσης ενέργειας του απορροφητή πρέπει να είναι σταθερά και επαναλαμβανόμενα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της κατασκευής.^[1]

Αναμένεται ότι τα εξωτερικά δυναμικά φορτία που πρόκειται να δράσουν στις δομές/υλικά απορρόφησης ενέργειας, είναι μεγάλης αβεβαιότητας ως προς το μέγεθος, το χρόνο δράσης, την κατεύθυνση και την κατανομή τους. Ως εκ τούτου, οι δομές/υλικά θα πρέπει να κατέχουν σταθερό και επαναλαμβανόμενο μηχανισμό παραμόρφωσης που θα είναι ανθεκτικός στις παραπάνω αβεβαιότητες της φόρτισης, αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει να εξασφαλίζουν την απαιτούμενη απορρόφηση ενέργειας.^[1]

4.2.5. Χαμηλό βάρος και υψηλή ειδική απορρόφηση ενέργειας

Το στοιχείο απορρόφησης ενέργειας πρέπει να είναι ελαφρύ και να διαθέτει υψηλή ικανότητα διάχυσης ενέργειας ανά μονάδα βάρους, το οποίο είναι ζωτικής σημασίας για απορροφητές ενέργειας τοποθετημένους σε οχήματα και συσκευές που εξασφαλίζουν την ανθρώπινη ασφάλεια.^[1]

Τα σχέδια κατασκευής αυτοκινήτων τροποποιούνται συχνά με σκοπό τη βελτίωση της παθητικής τους ασφάλειας. Έπειτα, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η πιθανή αύξηση βάρους, γιατί η μεταβολή στο βάρος συνεπάγεται και ομόσημη μεταβολή στην κατανάλωση καυσίμου άρα και μεγαλύτερες

επιπτώσεις στο περιβάλλον. Για διάφορες βοηθητικές, προστατευτικές συσκευές, το χαμηλό βάρος είναι μια εξαιρετικά σημαντική σχεδιαστική παράμετρος. Λόγου χάριν, ένα τυπικό κράνος ποδηλάτου στις μέρες μας έχει μάζα 250 gr, αλλά οι αναβάτες θα επιθυμούσαν ένα ελαφρύτερο κράνος, το οποίο θα έχει μάζα μικρότερη από 200 gr.^[1]

4.2.6. Εγκατάσταση και κόστος

Η παραγωγή, η εγκατάσταση και η συντήρηση των απορροφητών ενέργειας θα πρέπει να είναι εύκολη, αποδοτική και χαμηλού κόστους.^[1]

Ο σχεδιασμός ενός απορροφητή ενέργειας είναι πάντα περιορισμένος από τον διαθέσιμο προϋπολογισμό. Γι' αυτό, όλες οι προστατευτικές δομές πρέπει να λειτουργούν εντός κάποιων οικονομικών ορίων. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για απορροφητές ενέργειας που είναι συνήθως μίας χρήσης.^[1]

4.2.7. Κριτήρια σχεδιασμού και βελτιστοποίηση

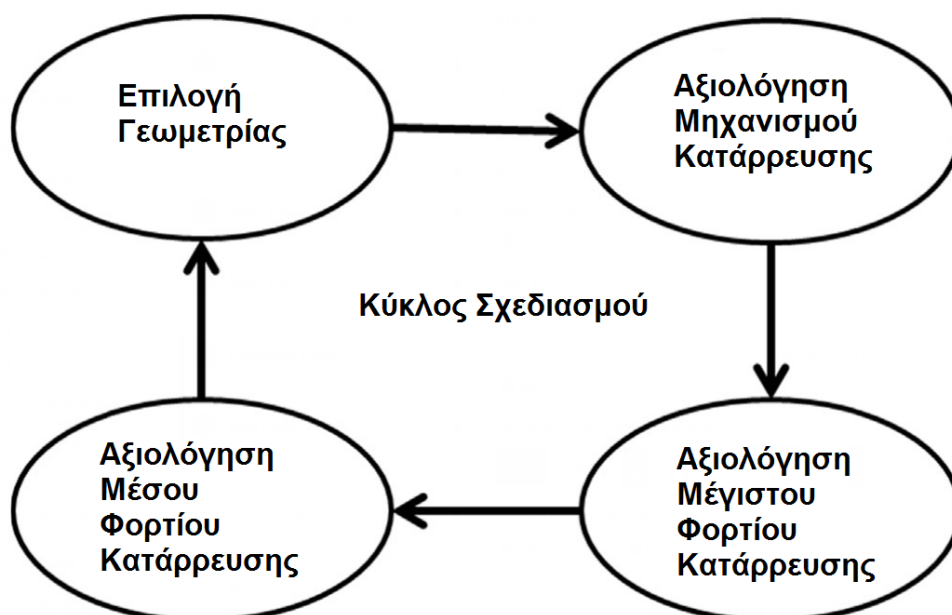
Το βασικότερο από όλα, όπως προαναφέρθηκε, είναι η μετατρέπόμενη μορφή ενέργειας να μην επανακτάται. Αυτό σημαίνει ότι η κατασκευή πρέπει να είναι ικανή να μετατρέψει το μεγαλύτερο ποσοστό της κινητικής ενέργειας που δέχεται σε ανελαστική ενέργεια μέσα από την πλαστική παραμόρφωση ή άλλη διαδικασία διάχυσης ενέργειας. Αυτό χρειάζεται να συμβεί διότι σε περίπτωση ελαστικής παραμόρφωσης, η ενέργεια παραμένει και απελευθερώνεται πλήρως κατά την επαναφορά – όπως ακριβώς συμβαίνει σε ένα ελατήριο – προκαλώντας επακόλουθες ζημιές.

Πέραν των προηγούμενων, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και ο παράγοντας της αβεβαιότητας κατά το σχεδιασμό διατάξεων απορρόφησης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, οι δυναμικές φορτίσεις που θα αναπτυχθούν κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης είναι απροσδιόριστες ειδικά ως προς το μέγεθος, την κατεύθυνση και την κατανομή. Για το λόγο αυτό, οι δομές και τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις διατάξεις πρέπει να λαμβάνουν σταθερή και επαναλαμβανόμενη μορφή παραμόρφωσης ώστε να εξασφαλίζουν την απαιτούμενη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

Επιπρόσθετα, πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό η ανάγκη για ελαφριές κατασκευές. Μελέτες δείχνουν ότι, συγκρινόμενες με κατασκευές χωρίς κάποια επέμβαση αφαίρεσης βάρους, οι ελαφριές κατασκευές παρουσιάζουν μείωση στις μηχανικές ιδιότητες που ωστόσο είναι συνήθως μικρότερη συγκρινόμενη με τη μείωση σε βάρος. Ακόμα, η υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ανά μονάδα βάρους, μπορεί να προσφέρει ένα διαρκές και σταθερό επίπεδο δύναμης κάτω από θλίψη. Τα κυψελοειδή χαρακτηριστικά στις κατασκευές συνδυάζουν ικανότητα απορρόφησης με μειωμένο βάρος.

Ουσιαστικά, αυτό που έχει ύψιστη σημασία στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη μιας κατασκευής απορρόφησης ενέργειας, είναι η εύρεση μιας βέλτιστης τομής διαμόρφωσης δοκιμίου λεπτού τοιχώματος που ικανοποιεί καλύτερα τις απαιτήσεις για ικανοποιητική αντοχή σε πρόσκρουση.[11]

Συνήθως, ο κύκλος σχεδιασμού μιας αξιόπιστης δομής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1, ξεκινά με την επιλογή του γεωμετρικού σχήματος της τομής που συνήθως καθορίζεται από τους περιορισμούς χώρου και άλλες λειτουργίες που απαιτούνται από το στοιχείο. Εν συνεχεία, η αξιοπιστία της αντοχής σε πρόσκρουση αξιολογείται λαμβάνοντας υπόψη τις κύριες αποκρίσεις συμπεριλαμβανομένης της λειτουργίας παραμόρφωσης, της μέσης δύναμης κατάρρευσης, και της μέγιστης δύναμης κατάρρευσης (τα οποία αναλύονται στο υποκεφάλαιο 4.3). Προκειμένου να επιτευχθεί ο σχεδιασμός της βέλτιστης αντοχής σε πρόσκρουση, πρέπει να επαναλαμβάνεται πολλές φορές και απαιτείται μια άμεση αξιολόγηση του προτεινόμενου σχεδιασμού.[11]



Εικόνα 4.1: Κύκλος σχεδιασμού για κατασκευή βέλτιστης αντοχής σε πρόσκρουση[11]

4.3. Ορισμοί – συμπληρωματικές έννοιες

Το υποκεφάλαιο αυτό έχει ως στόχο να μας δώσει μία σφαιρική εικόνα για τον μηχανισμό της παραμόρφωσης των υλικών όταν τα τελευταία εισέρχονται στην πλαστική παραμόρφωση. Επίσης, θα δοθούν ορισμοί και συμπληρωματικές έννοιες που αφορούν την πλαστική παραμόρφωση των υλικών που συναντάμε τόσο σε γραμμικούς φορείς, όσο και σε επιφανειακούς φορείς.

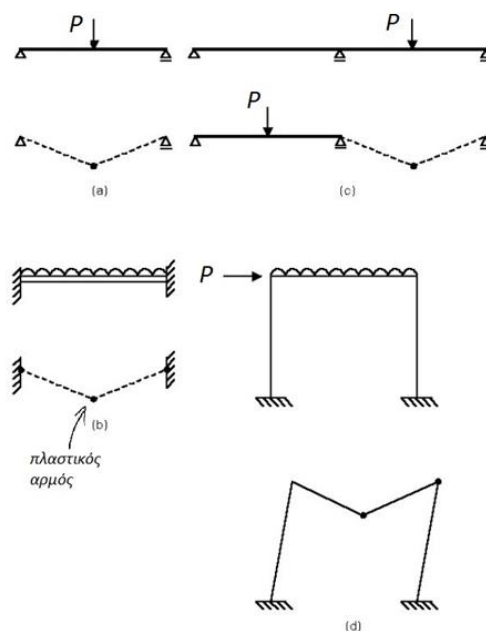
4.3.1. Πλαστικός αρμός

Στην Οριακή Ανάλυση των δομικών φορέων που καταπονούνται σε κάμψη, θεωρείται μία απότομη μετάβαση από την ελαστική στην ιδεωδώς πλαστική παραμόρφωση, η οποία επιτυγχάνεται για κάποια συγκεκριμένη τιμή καμπτικής ροπής, ονομαζόμενη ως ροπή πλήρους πλαστικοποίησης (M_p). Όσο η καμπτική ροπή είναι μικρότερη της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης (δηλ. $M_b < M_p$) ο φορέας παραμορφώνεται ελαστικά, όταν ξεπεράσει την ροπή πλήρους πλαστικοποίησης (δηλ. $M_b > M_p$), τότε δημιουργείται πλαστικός αρμός.[17]

Σε αντίθεση με μία άρθρωση δίχως τριβή η οποία επιτρέπει την ελεύθερη περιστροφή, θεωρείται ότι ο πλαστικός αρμός είναι ικανός να προκαλέσει μεγάλες περιστροφές με σταθερή ροπή, τη M_p . [17]

Οι πλαστικοί αρμοί περιορίζονται σε μικρά μήκη επάνω στον φορέα. Η διατομή του φορέα και η κατανομή του φορτίου πάνω σε αυτόν επιδρούν στη μεταβολή των πραγματικών τιμών του μήκους, όπου εκτείνεται ένας πλαστικός αρμός. Με ικανοποιητική ακρίβεια μπορεί ο φορέας να θεωρηθεί άκαμπτος (αμελητέα ελαστική παραμόρφωση) και ιδεωδώς πλαστικός (παραμόρφωση χωρίς κράτυνση), με την πλαστικότητα να περιορίζεται σε σημεία ή σε γραμμές αρμών (σημεία για γραμμικούς και γραμμές για επιφανειακούς φορείς). [17]

Ο πλαστικός αρμός σε ένα οριακό φορτίο ενός στατικού φορέα, δημιουργεί έναν κινηματικό μηχανισμό που επιτρέπει μία μη φραγμένη μετατόπιση του εξαρχής απαραμόρφωτου φορέα, το οποίο είναι γνωστό ως μηχανισμός κατάρρευσης. Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται, ο μηχανισμός κατάρρευσης και η δημιουργία πλαστικού αρμού. [17]



Εικόνα 4.2: Μηχανισμοί κατάρρευσης με τη δημιουργία πλαστικών αρμών. [16]

4.3.2. Ροπή πλήρους πλαστικοποίησης

Η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης ονομάζεται η ροπή κάμψης όπου όλη η διατομή του φορέα έχει φτάσει στο όριο διαρροής. Όταν έχουμε γραμμικό φορέα, το όριο διαρροής αυτό είναι το αντίστοιχο σε μονοαξονικό εφελκυσμό (σ_y), ενώ στην περίπτωση των επιφανειακών φορέων χρησιμοποιείται το κριτήριο Von Misses για επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση, δηλαδή το ισοδύναμο όριο διαρροής (σ_0), το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_y$$

Αυτή η θεωρητικά μέγιστη ροπή κάμψης που η διατομή αντιστέκεται υπό την άσκηση ενός κρίσιμου φορτίου, συνοδεύεται από ένα σχηματιζόμενο πλαστικό αρμό, το οποίο φορτίο αν ξεπεραστεί οδηγεί το υλικό σε άπειρη πλαστική παραμόρφωση της εν λόγω διατομής. Τα περισσότερα υλικά όμως παρουσιάζουν κράτυνση, δηλαδή σε παρεμπόδιση της πλαστικής παραμόρφωση και αύξηση στιβαρότητας. Η κράτυνση αυτή είναι σχετικά μικρή, διότι όταν υπερβεί το όριο διαρροής του υλικού τότε ξεκινάει να αστοχεί το υλικό. Η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης δίνεται από την σχέση:

$$M_p = \sigma_0 \cdot \int_{t_1}^{t_2} y dy$$

όπου:

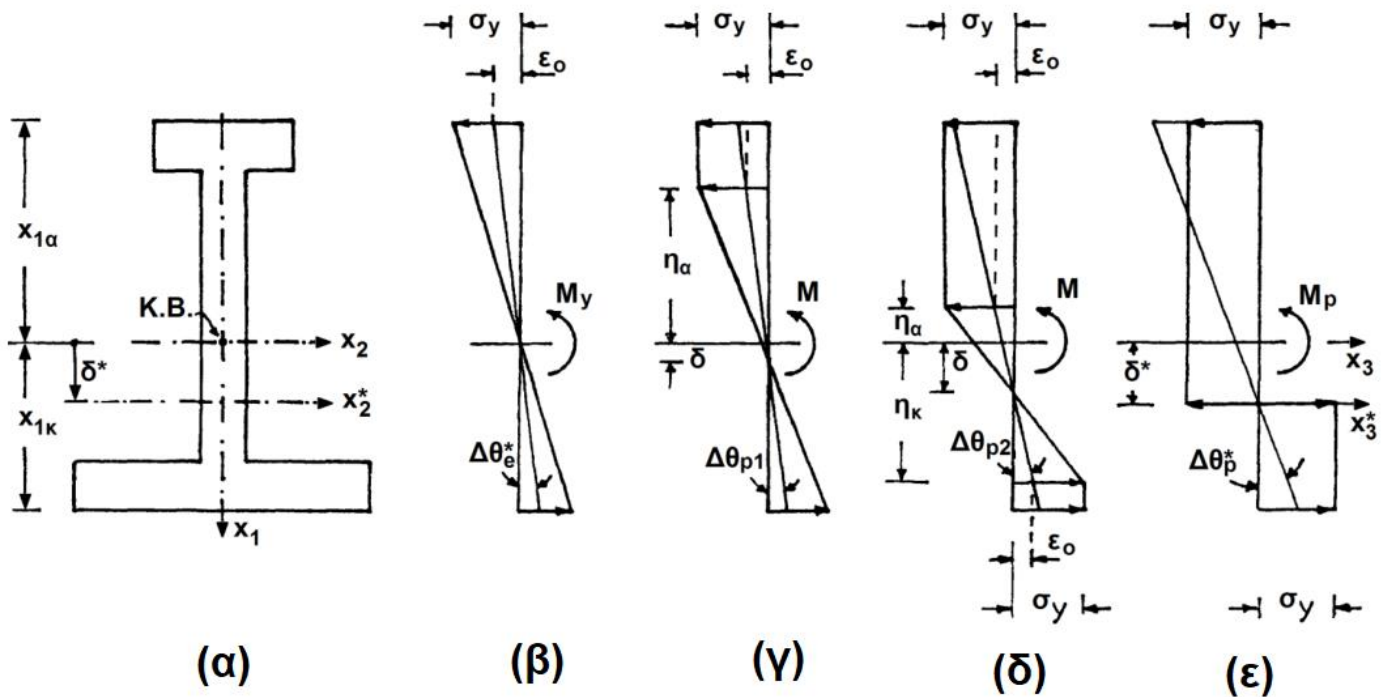
$\sigma_0 = \sigma_y$: όριο διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό (όταν έχουμε γραμμικό φορέα)

$\sigma_0 = 2/\sqrt{3} \cdot \sigma_y$: ισοδύναμο όριο διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό (όταν έχουμε επιφανειακό φορέα)

y : απόσταση από το ουδέτερο επίπεδο

t_1, t_2 : αποστάσεις των ακρότατων ινών από το ουδέτερο επίπεδο (δηλ. $t_1 + t_2 = t$, με t το πάχος του φορέα)

Η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης είναι πάντα μεγαλύτερη της ροπής διαρροής. Όπου ροπή διαρροής ορίζεται η ροπή κάμψης που ένα μέρος της διατομής περνά στο όριο διαρροής ενώ στην υπόλοιπη αναπτύσσεται τάση μικρότερη του ορίου διαρροής). Στην Εικόνα 4.3 απεικονίζεται η εξέλιξη της πλαστικής παραμόρφωσης.[6]



Εικόνα 4.3: Εξέλιξη της πλαστικής παραμόρφωσης.^[16]

Στα σχήματα που απεικονίζονται στην Εικόνα 4.3 συμβαίνουν τα εξής:

- Στη διατομή (α) η φόρτιση αυξάνεται μονοτονικά. Παρατηρείται η εντατική κατάσταση μέσα στη διατομή. Στις επόμενες διατομές έχουμε βαθμιαία μεταβολή των μηχανικών τάσεων καθώς και των παραμορφώσεων εντός της διατομής κατά την αύξηση της φόρτισης.
- Εν συνεχεία στη διατομή (β) η πιο ακραία ίνα της διατομής αποκτά τιμή τάσης ίση με το όριο διαρροής του υλικού σ_y , ενώ στα υπόλοιπα η τιμή της τάσης είναι μικρότερη της σ_y για την ελαστική περιοχή. Στη θέση αυτή η καμπτική ροπή είναι $M=M_y$. Όπου M_y ονομάζεται ροπή διαρροής.
- Αυξάνοντας περαιτέρω την φόρτιση στη διατομή (γ) περνά στην ελαστοπλαστική περιοχή. Στην περιοχή αυτή ελαστική και πλαστική περιοχή συνυπάρχουν στη διατομή. Επιπλέον συμβαίνουν τα εξής:
 1. Η(Οι) πλαστική(-ες) περιοχή(-ες) επεκτείνεται(-ονται) εις βάρος της ελαστικής περιοχής.
 2. Μετατόπιση του αρχικού ελαστικού ουδέτερου άξονα σε νέα (ελαστοπλαστική) θέση κατά δ (βλ. Εικόνα 5.2 διατομή (γ))
 3. Σχηματισμός άνω και κάτω ελαστοπλαστικού συνόρου (η_α, η_κ).
- Συνεχίζοντας την αύξηση της φόρτισης προχωράμε στη διατομή (δ), όπου εξελίσσεται η ελαστοπλαστική κατάσταση.
 1. Πλαστικές περιοχές εκατέροθεν του ουδέτερου άξονα.
 2. Περαιτέρω μείωση της ελαστικής περιοχής
 3. Περαιτέρω αύξηση του δ

- Τέλος στη διατομή (ϵ) πλήρης πλαστικοποίηση της διατομής.
 1. Εξαφάνιση της ελαστικής περιοχής
 2. Σταθεροποίηση του ουδετέρου άξονα σε μετατόπιση του αρχικού κατά δ^* .
 3. Ο x_2^* είναι ο πλαστικός ουδέτερος άξονα ίσων διατομών, δηλαδή χωρίζει τη διατομή σε δύο ίσα μέρη, σε νέα ελαστοπλαστική θέση δ .
 4. Η καμπτική ροπή αποκτά τη τιμή της M_p .
 5. Στη θέση της διατομής σχηματίζεται πλαστική άρθρωση.

4.4. Δείκτες αξιολόγησης αντοχής σε πρόσκρουση

Οι δείκτες αξιολόγησης απορροφητών ενέργειας ορίζονται τα μεγέθη, τα οποία κατά κύριο λόγο δείχνουν την συμπεριφορά ενός υλικού σε πρόσκρουση. Επιπλέον, επιτρέπουν την άμεση σύγκριση των χαρακτηριστικών αντοχής σε πρόσκρουση της πειραματικής δοκιμής με την αριθμητική προσομοίωση.[11]

Η επιλογή των κατάλληλων κριτηρίων σχεδιασμού είναι ζωτικής σημασίας για τον βέλτιστο σχεδιασμό. Οι κύριοι δείκτες που μας βοηθούν να αξιολογήσουμε αν μία κατασκευή έχει ικανοποιητική συμπεριφορά σε σύγκρουση είναι οι ακόλουθοι (όπως φαίνονται και στον Πίνακα 4.1)[11]:

Μέγιστη δύναμη ή μέγιστο φορτίο κατάρρευσης (F_{max})

Απορρόφηση ενέργειας (EA)

Μέση δύναμη ή μέσο φορτίο κατάρρευσης (F_m)

Ειδική απορρόφηση ενέργειας (SEA)

Συντελεστής ομοιομορφίας φορτίου (CFE)

Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης (F_{max}): είναι το μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο που φέρει το κέλυφος κατά την θλίψη. Γνωρίζοντας πως στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης που προκύπτει για το κέλυφος, η καμπύλη έχει κορυφές και κοιλάδες (αυξομειώσεις κατά την εξέλιξη του φαινομένου), το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης είναι η μέγιστη τιμή και συνήθως εμφανίζεται στην πρώτη κορυφή το λεγόμενο peak.

Ενέργεια απορρόφησης (EA): ορίζεται η συνολική ενέργεια που απορροφά το υλικό μέχρι τη λήξη της κατάρρευσης. Λαμβάνεται, ως το εμβαδόν το οποίο βρίσκεται κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και τον άξονα της μετατόπισης. Η ενέργεια απορρόφησης EA δίνεται από τη σχέση:

$$EA = \int_0^{\delta} F(x) dx$$

Μέσο φορτίο κατάρρευσης (F_m): είναι η (σταθερή) δύναμη, η οποία για την ίδια μετατόπιση φορτίου (δ) όταν καταρρέει, δίνει την ίδια απορρόφηση ενέργειας. Το μέσο φορτίο κατάρρευσης F_m δίνεται από την σχέση:

$$F_m = \frac{EA}{\delta}$$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA): ορίζεται ως η ενέργεια απορρόφηση (EA) του υλικού προς την μάζα (m) του υλικού που έχει παραμορφωθεί. Είναι μία παράμετρος που δείχνει πόσο ελαφριά ή βαριά πρέπει να είναι μία κατασκευή, για να απορροφήσει την ενέργεια σύγκρουσης που απαιτείται. Η ειδική ενέργεια απορρόφησης SEA δίνεται από τη σχέση:

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

Συντελεστής ομοιομορφίας φορτίου (CFE): ορίζεται ο λόγος του μέσου φορτίου προς το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης, είναι μία παράμετρος που δείχνει πόσο κοντά είναι το μέσο και το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης. Ο συντελεστής ομοιομορφίας φορτίου CFE δίνεται από τη σχέση:

$$CFE = \frac{F_m}{F_{max}}$$

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

5.1. Γενικά

Στο προηγούμενο ο κεφάλαιο αναφέρθηκαν, τα βασικότερα θεωρητικά στοιχεία που είναι αναγκαία για την κατανόηση της συμπεριφοράς των απορροφητών ενέργειας. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη απορροφητών ενέργειας σε οιονεί στατική θλίψη και δυναμική φόρτιση.

5.2. Μηχανή δοκιμής Universal

Για σύγκρουση χαμηλής ταχύτητας, οι μηχανισμοί της πλαστικής παραμόρφωσης είναι παρόμοιοι με τους αντίστοιχους που παράγονται κατά την οιονεί στατική θλίψη. Για διευκόλυνση της διεξαγωγής των δοκιμών πραγματοποιείται διερεύνηση της οιονεί στατικής θλίψης, για δύο λόγους. Πρώτον, είναι πιο απλή η πειραματική διάταξη σε σχέση με την αντίστοιχη της δοκιμής κρούσης, και δεύτερον, είναι ευκολότερο να παρατηρηθεί η εξέλιξη του φαινομένου της παραμόρφωσης.^[1]

Ως γνωστόν, το παραγόμενο πλαστικό έργο εξαρτάται από μέγεθος του φορτίου και την εξέλιξη της παραμόρφωσης, και όχι μόνο από την τελική παραμόρφωση όπως στην περίπτωση του παραγόμενου ελαστικού έργου. Κατά συνέπεια, η συνεχόμενη παρακολούθηση του φορτίου, της μετατόπισης και της παραμόρφωσης σε διαφορετικές χαρακτηριστικές θέσεις, καθώς και η παρατήρηση των τελικών μορφών των δοκιμίων, δίνουν μία σφαιρική εικόνα όσον αφορά τους μηχανισμούς απορρόφησης ενέργειας. Αυτές οι πληροφορίες είναι δύσκολο να αντληθούν διαμέσου δυναμικών δοκιμών.^[1]

Οι οιονεί στατικές δοκιμές εφελκυσμού ή θλίψης μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη χρήση μίας πρότυπης μηχανής δοκιμών Universal. Η κατακόρυφη ταχύτητα της κεφαλής κυμαίνεται μεταξύ 3 έως 5mm/min. Για μία κατασκευή μήκους 100mm, η ταχύτητα των 3mm/min παράγει ολικό ρυθμό παραμόρφωσης $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, όπου η παραδοχή στατικού φορτίου θεωρείται είναι επαρκής για την μελέτη του φαινομένου. Στον Πίνακα 5.1 κατηγοριοποιούνται όλες οι τεχνικές δοκιμές ανάλογα με τον ρυθμό παραμόρφωσης.^[1]

Υπάρχουν ελεγχόμενοι υδραυλικοί σερβοκινητήρες, οι οποίοι δίνουν τη δυνατότητα παραγωγής ταχυτήτων εμβόλου έως και 800mm/min. Η ανωτέρα ταχύτητα αντιστοιχεί σε ρυθμό παραμόρφωσης της τάξεως των 16 s^{-1} για δοκίμιο μήκους 50mm και επομένως με αυτόν τον τρόπο μπορούν να διεξαχθούν μελέτες επίδρασης του ρυθμού παραμόρφωσης που έχουν εύρος μεταξύ 10^{-4} και 10^{-1} s^{-1} . Η Εικόνα 5.1 παρουσιάζει μία πρότυπη μηχανή Universal της εταιρείας MTS.^[74]

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1

Strain rate (s ⁻¹)	Common testing methods	Dynamic considerations	
10 ⁷	HIGH-VELOCITY IMPACT – Explosives	SHOCK-WAVE PROPAGATION	Inertial forces important
10 ⁶	– Normal plate impact – Pulsed laser – Exploding foil		
10 ⁵	– 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			Inertial forces negligible
10 ⁰	QUASI-STATIC Hydraulic, servo-hydraulic or screw-driven testing machines	TESTS WITH CONSTANT CROSSHEAD VELOCITY STRESS THE SAME THROUGHOUT LENGTH OF SPECIMEN	
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			

Πίνακας 5.1: Κατηγοριοποίηση των τεχνικών δοκιμής ανάλογα με τον ρυθμό παραμόρφωσης.^[1]



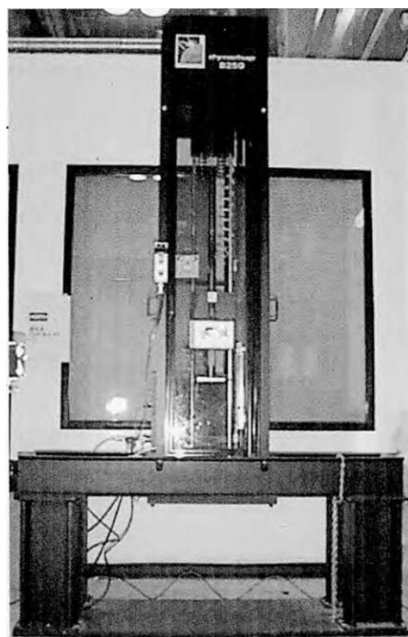
Εικόνα 5.1: Universal μηχανή δοκιμών της εταιρίας MTS.^[70]

5.3. Σφύρα πίπτουσας μάζας, ολισθαίνουσα σφύρα & εκκρεμές

5.3.1. Σφύρα πίπτουσας μάζας

Οι κρουστικές δοκιμές μπορούν διεξαχθούν με πειραματικές διατάξεις όπως η σφύρα πίπτουσας μάζας, η ολισθαίνουσα σφύρα και το εκκρεμές. Στην περίπτωση της σφύρας πίπτουσας μάζας, η σφύρα ανυψώνεται σε ένα δεδομένο ύψος. Εν συνεχεία, αφήνεται με γνωστή αρχική ταχύτητα (συνήθως μηδενική) ώστε να προσκρούσει στο δοκίμιο το οποίο εδράζεται στη βάση του. Η ταχύτητα της μάζας που πέπτει προς το δοκίμιο εξαρτάται από το ύψος, το οποίο αφήνεται, διότι η τριβή από τους κατακόρυφους οδηγούς ελαχιστοποιείται τοποθετώντας ρουλεμάν. Στο άνω άκρο των οδηγών μπορούν να τοποθετηθούν κι άλλα μέσα, όπως διάταξη με πεπιεσμένα ελατήρια ή αέρα, έτσι ώστε η ταχύτητα πρόσκρουσης με το δοκίμιο να αυξηθεί.^[1]

Τα ανωτέρω συστήματα περιλαμβάνουν έναν μετρητή επιτάχυνσης συνδεδεμένο με τη σφύρα, έναν μετρητή ταχύτητας λίγο πριν την πρόσκρουση της με το δοκίμιο (συνήθως μετρώντας το χρόνο της μετατόπισης από την αρχική θέση της σφύρας μέχρι την πρόσκρουση), έναν μεταλλάκτη μετατόπισης για την καταγραφή της κίνησης της και έναν μετρητή δύναμης που συνήθως τοποθετείται κάτω από το εξεταζόμενο δοκίμιο. Στην Εικόνα 5.2 απεικονίζεται η σφύρα (Instron Dynaturp 8250) που βρίσκεται στο πανεπιστήμιο Επιστήμης και Τεχνολογίας του Hong Kong. Το ύψος της είναι περίπου 1.5m και υπάρχει μία ρυθμιζόμενη σφύρα κρούσης με μάζα που μπορεί να φτάσει τα 44.89 kg. Στην περίπτωση που δρα στη σφύρα μόνο η δύναμη της βαρύτητας, η ταχύτητα της σφύρας έχει εύρος από 0.61 έως 3.66 m/s και μπορεί να αυξηθεί μέχρι τα 13.41m/s όταν η σφύρα υποστηρίζεται πνευματικά.^[1]



Εικόνα 5.2: Σφύρα του πανεπιστημίου του Hong Kong.^[1]

5.3.2. Ολισθαίνουσα σφύρα

Στην Εικόνα 5.3 φαίνεται μία άλλη πειραματική διάταξη δοκιμών κρούσης. Η διάταξη αυτή ονομάζεται ολισθαίνουσα σφύρα και βρίσκεται στο Granfield Impact Centre. Αποτελείται από μία ράμπα, που σχηματίζει με το έδαφος 11 μοίρες και ένα φορείο που αιωρείται σε αυτήν. Για την επίτευξη χαμηλών ταχυτήτων κρούσης επιτυγχάνονται αποκλειστικά με την επίδραση της βαρύτητας, ενώ για ανάπτυξη της μέγιστης ταχύτητας (δηλαδή 13.5 m/s) χρησιμοποιούνται λάστιχα. Η ελάχιστη μάζα της σφύρας είναι 780kg και η μέγιστη 2000kg με μέγιστη ενέργεια πρόσκρουσης 125 J.^[1]

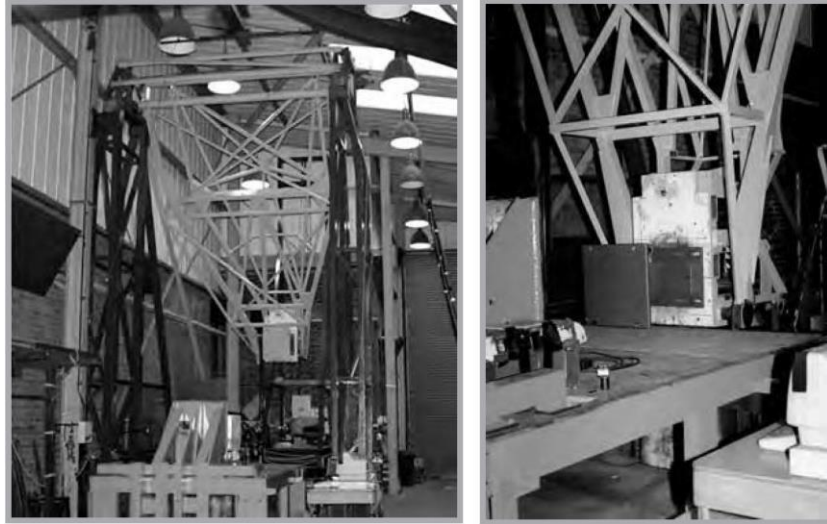


Εικόνα 5.3: Μηχανή δοκιμών Sled, που βρίσκεται στο κέντρο δοκιμών συγκρούσεων του Cranfield.^[1]

5.3.3. Εκκρεμές

Το εκκρεμές, με κατάλληλη σχεδίαση του βραχίονα αιώρησης, μπορεί να παράγει φορτία κρούσης. Το μήκος του βραχίονα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε η κίνηση της σφύρας από την πρώτη επαφή με το δοκίμιο μέχρι το πέρας της κατάρρευσης, να είναι προσεγγιστικά ευθύγραμμη και με κάθετο μέτωπο κρούσης. Η Εικόνα 5.4 παρουσιάζει ένα εκκρεμές το οποίο βρίσκεται στο Cranfield. Είναι μία μεγάλη πειραματική εγκατάσταση εκκρεμούςς αποτελούμενη από δύο πλευρικά υποστηρίγματα με ένα εκκρεμές να στηρίζεται μεταξύ τους. Η διάταξη αυτή έχει ελάχιστη μάζα 1000kg, μέγιστη ταχύτητα 10 m/s και μέγιστη ενέργεια κρούσης 50kJ.^[1]

Στις δοκιμές που αναφέρθηκαν σ' αυτήν την παράγραφο, η ταχύτητα της μάζας μετά την πρόσκρουση δεν είναι σταθερή, το οποίο σημαίνει πως και ο στιγμιαίος ρυθμός παραμόρφωσης δεν είναι σταθερός. Κατά συνέπεια, η μελέτη του φαινομένου δυσκολεύει σημαντικά, αλλά το κύριο πλεονέκτημα είναι πως με αυτές τις τεχνικές προσομοιάζονται ικανοποιητικά οι πραγματικές συνθήκες σύγκρουσης των οχημάτων.^[1]



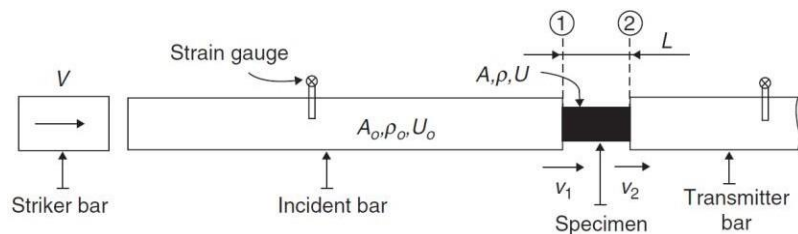
Εικόνα 5.4: Μηχανή δοκιμών τύπου εκκρεμούς που βρίσκεται στο κέντρο δοκιμών συγκρούσεων του Cranfield.^[1]

5.4. Δοκιμή διαιρούμενης ράβδου πίεσης Hopkinson

Όταν ο ρυθμός παραμόρφωσης κυμαίνεται μεταξύ 10^2 έως 10^4 s^{-1} , οι καταστατικές σχέσεις του υλικού λαμβάνονται με τη δοκιμή διαιρούμενης ράβδου πίεσης του Hopkinson (split Hopkinson pressure bar, SHPB). Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζεται το σκαρίφημα της δοκιμής αυτής. Η δημιουργία της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης δημιουργείται μέσω των κατάλληλων επιμηκυνσιομέτρων (strain gauges), τα οποία είναι τοποθετημένα σε συγκεκριμένα σημεία της ράβδου.^[1]

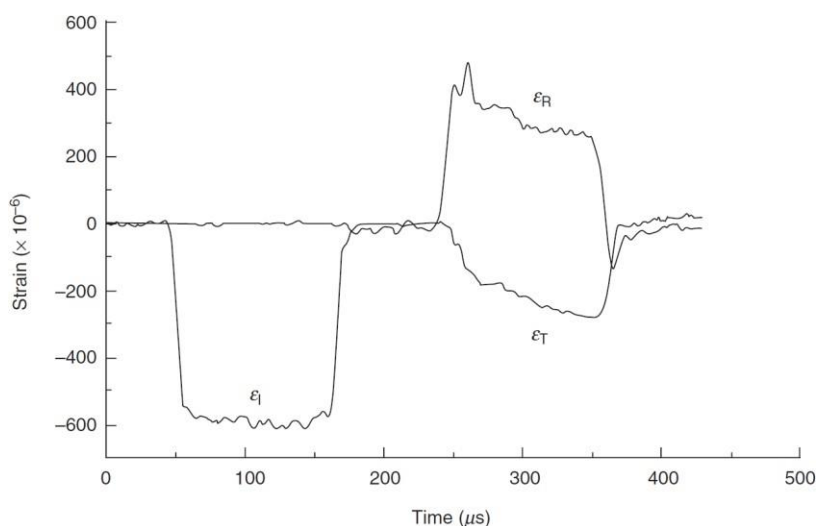
Το εξεταζόμενο δοκίμιο τοποθετείται μεταξύ της προσπίπτουσας ράβδου και της ράβδου μετατόπισης. Εν συνεχεία, ένας ελαστικός παλμός πίεσης δρα στη προσπίπτουσα ράβδο και το δοκίμιο (διεπαφή 1 όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.5). Μέρος της ελαστικής πίεσης ανακλάται και η υπόλοιπη απορροφάται από το δοκίμιο, το οποίο παραμορφώνεται πλαστικά.^[1]

Ομοίως, στη διεπαφή 2 μεταξύ της ράβδου μετατόπισης και του δοκιμίου, το τασικό κύμα ανακλάται και μέρος αυτού μεταδίδεται στο δοκίμιο. Η ανακλώμενη τάση θα πρέπει να έχει επαρκή διάρκεια. Το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης προκύπτει μετά από την εξέλιξη της παραμόρφωσης στο χρόνο των δύο ράβδων.

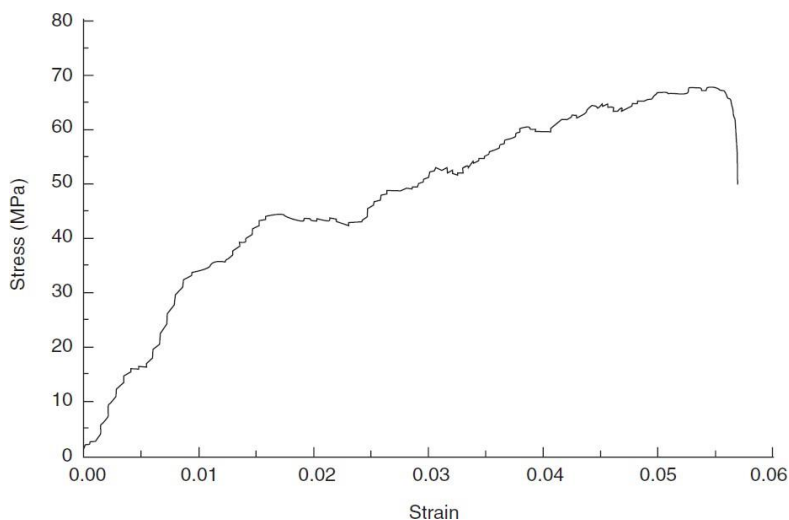


Εικόνα 5.5. Σκαρίφημα της διαιρούμενης ράβδου Hopkinson.[1]

Η Εικόνα 5.6, απεικονίζει τα σήματα παραμόρφωσης από τη δοκιμή θερμοσυσσωματωμένου ορείχαλκου με πορώδες 37%. Το δοκίμιο είχε αρχικό μήκος 6.25 mm και αρχική διάμετρο 12 mm. Η ταχύτητα της προσπίπτουσας ράβδου ήταν 11.63 m/s. Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που προέκυψε ήταν αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 5.7.[1]

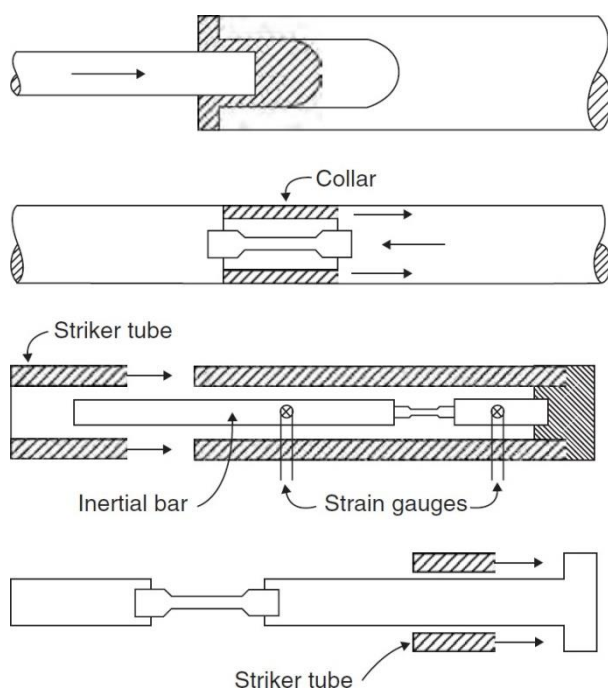


Εικόνα 5.6: Τυπικά σήματα παραμόρφωσης από δοκιμή με τη διαιρούμενη ράβδο πίεσης Hopkinson.[1]



Εικόνα 5.7: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης προερχόμενη από τα σήματα της εικόνας 5.6.[1]

Επιπλέον μηχανικές δοκιμές που μπορούν να μελετηθούν με την διαιρούμενη ράβδο Hopkinson είναι ο εφελκυσμός, η στρέψη και η διάτμηση και να βγουν τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης. Κάποια σκαριφήματα των ανωτέρω παραδειγμάτων απεικονίζονται στην Εικόνα 5.8. Οι καμπύλες διατμητικής τάσης – διατμητικής παραμόρφωσης μπορούν να προκύψουν με τη χρήση ράβδου στρέψης.[1]



Εικόνα 5.8: Σκαριφήματα με διάφορες μορφές της διαιρούμενης ράβδου Hopkinson.[1]

5.5. Όπλα αερίου

Για την παραγωγή μεγάλων ταχυτήτων κρούσης χρησιμοποιούνται εκτεταμένα τα όπλα αερίου, ταχύτητες κρούσης οι οποίες φτάνουν και τα 8000 m/s. Για τη μελέτη απορροφητών ενέργειας, αρκεί η χρήση ενός κοινού όπλου αερίων μίας βαθμίδας. Λόγου χάριν, στο Swinburne η ταχύτητα κρούσης που αναπτύσσεται φτάνει τα 600 m/s. Η κάνη έχει μήκος 6 m και εσωτερική διάμετρο 12.58 mm. Η μέγιστη πίεσης λειτουργίας δεν ξεπερνά τα 15 MPa. Σε αυτήν την πειραματική διάταξη το δοκίμιο επιταχύνεται για να προσκρούσει σε ένα άκαμπτο τοίχωμα (αμόνι). Η μέση τάση ροής για υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης, καθορίζεται μετρώντας την ταχύτητα πρόσκρουσης και τις διαστάσεις του δοκιμίου μετά το πείραμα. Κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής, πραγματοποιούνται ρυθμοί παραμόρφωσης της τάξεως των 10^4 s^{-1} . [1]

Για την διερεύνηση πορωδών υλικών σε δυναμική φόρτιση χρησιμοποιούνται επίσης όπλα αερίου. Ένας σωλήνας κυκλικής διατομής (δηλ. το πορώδες υλικό) τοποθετείται εντός της κάνης και μετά εκτοξεύεται μέχρι να προσκρούσει στο αμόνι (δηλ. η άκαμπτη επιφάνεια), με αποτέλεσμα να προκύψουν ποικίλες μορφές απόσχισης και λυγισμού. Η μέγιστη ταχύτητα που αναπτύσσεται φτάνει τα 250 m/s.^[1]

Στην περίπτωση που υπάρχει ανάγκη για ανάπτυξη υψηλότερων ταχυτήτων χρησιμοποιούνται αέρια χαμηλής πυκνότητας, λόγω χάριν το ήλιο και το υδρογόνο, καθώς και όπλα δύο βαθμίδων. Για την παραγωγή δυναμικών καταπονήσεων υπάρχουν και άλλες τεχνικές, λόγω χάριν η χρήση εκρηκτικών ή παραγωγής επιτάχυνσης διαμέσου ηλεκτρομαγνητισμού.^[1]

Στην παρούσα εργασία τα πειράματα θα πραγματοποιηθούν μέσω μιας μηχανής δοκιμής Universal (Universal Testing Machine). Στο εργαστήριο των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιο Πολυτεχνείου, όπου γίνεται και το πείραμα, υπάρχει μία αντίστοιχη πειραματική διάταξη πραγματοποίησης μηχανικών δοκιμών. Όπως έχει προαναφερθεί, η δοκιμή που θα πραγματοποιηθεί στην διάταξη αυτήν, είναι η οιονεί στατική αξονική και λοξή θλίψη σε τετραγωνικούς λεπτότοιχους σωλήνες.

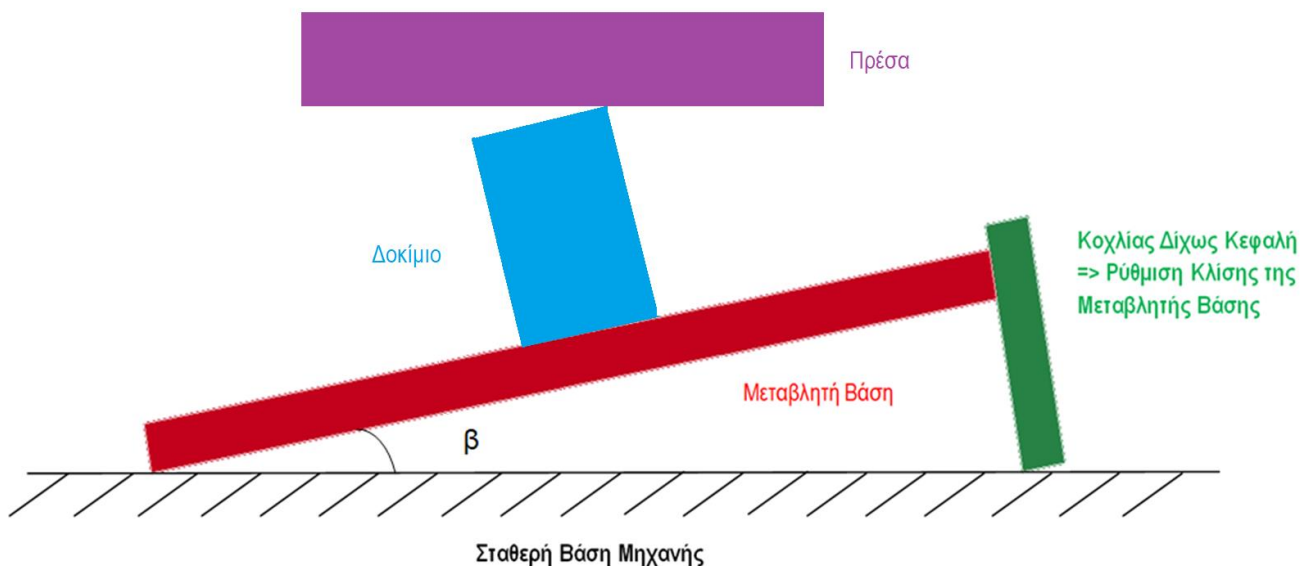
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

6.1. Γενικά

Κατά την πειραματική διαδικασία θα γίνει μελέτη του μηχανισμού κατάρρευσης λεπτότοιχων δοκιμίου από κράμα αλουμινίου 6060 T6 που έχει υποστεί θερμική κατεργασία ομογενοποίησης και τεχνητής γήρανσης (σκλήρυνση με κατακρήμνιση) με χημική σύσταση: 0.30-0.60% Si, 0.10-0.30% Fe, 0.10% Cu, 0.10% Mn, 0.35-0.60% Mg, 0.05% Cr, 1058 0.15% Zn, 0.10% Ti, 0,05-0,15% λοιπά χημικά στοιχεία. Το παραπάνω κράμα έχει υποστεί επεξεργασία για να παρέχει μέτρια σκληρότητα.

6.2. Περιγραφή δοκιμών

Στην παρούσα εργασία μελετάται η αξονική και λοξή κατάρρευση λεπτότοιχου κελύφους, τετραγωνικής διατομής από κράμα αλουμινίου-μαγνησίου-πυριτίου 6060 T6. Τα δοκίμια έχουν χωριστεί σε ομάδες ανάλογα με τη γωνία τοποθέτησης της βάσης (ανά 5°) από 0 έως 15°. Στην εικόνα 6.1 απεικονίζεται ένα σκαρίφημα του πειράματος, το οποίο δείχνει πως πραγματοποιήθηκε η λοξή οιονεί στατική θλιπτική φόρτιση.



Εικόνα 6.1: Απεικόνιση της κλίσης φόρτισης για την περίπτωση της λοξής οιονεί στατικής θλίψης

όπου:

β : η γωνία κλίσης του θλιπτικού φορτίου

Στον Πίνακα 6.1. φαίνονται οι διαστάσεις των δοκιμίων:

Πίνακας 6.1: Διαστάσεις δοκιμίων

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Πλευρά τετραγωνικής διατομής	w	50	mm
Αξονικό ύψος	h	100	mm
Πάχος τοιχώματος	t	1.5	mm
Γωνία κλίσης φορτίου	β	0, 5, 10, 15	μοίρες

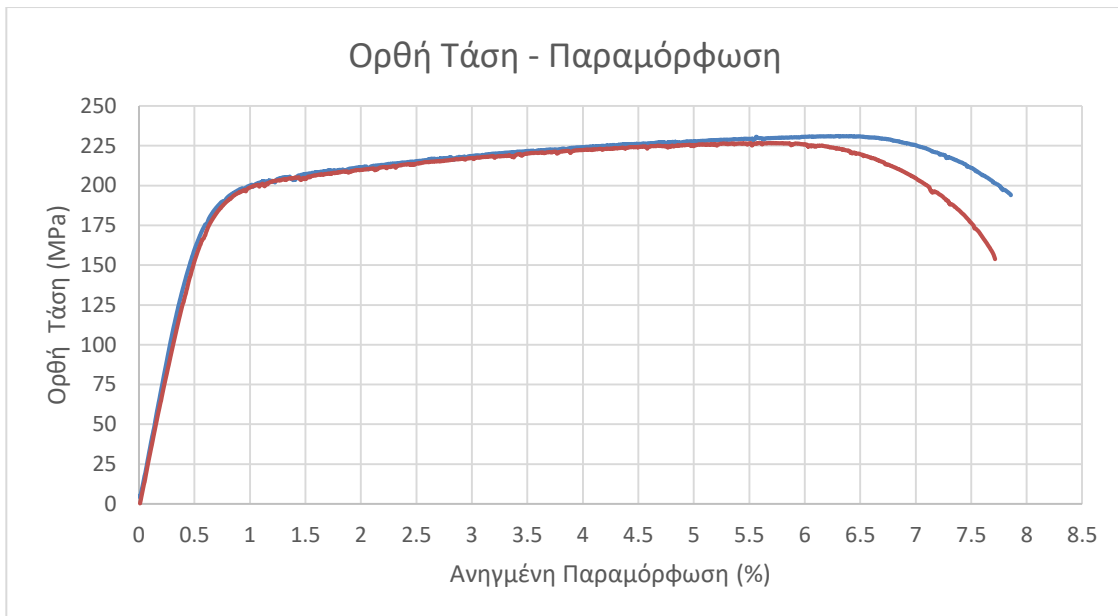
Σε όλα τα δοκίμια έχουν δοθεί διαφορετικές ονομασίες, ανάλογα το είδος της διεύθυνσης του φορτίου και την σειρά που εκτελέστηκε. Στον Πίνακα 6.2 φαίνονται οι μάζες και οι ονομασίες των δοκιμίων.

Πίνακας 6.2: Μάζες δοκιμίων

Δοκίμιο	Μάζα (gr)	Γωνία κλίσης φόρτισης (°)
1a	73,9	0
1b	74,4	0
2a	74,5	5
2b	74,5	5
3a	74,3	10
3b	74,2	10
4a	73,8	15
4b	74,4	15

6.3. Μηχανικές ιδιότητες του υλικού των δοκιμίων

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού των δοκιμίων, αποσπάρστηκαν δύο ελάσματα σχήματος ορθογωνίου, από τον ίδιο σωλήνα που κατασκευάστηκαν τα δοκίμια, στη συνέχεια μετρήθηκαν οι διαστάσεις τους και πραγματοποιήθηκε δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού. Από τα δεδομένα της δοκιμής, κατασκευάστηκαν οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6.1. Αυτό έγινε γιατί τα δοκίμια έχουν υποστεί σημαντικές καταπονήσεις εξαιτίας της κατεργασίας διέλασης μέχρι να φτάσουν στην τελική τους μορφή, το οποίο μεταβάλλει τις αρχικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος.



Διάγραμμα 6.1: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης των ελασμάτων από κράμα αλουμινίου 6060 T6.^[12]

Για την παρούσα προσεγγιστική διερεύνηση, οι μικροδιαφορές που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6.1 αμελούνται και έτσι οι δύο καμπύλες αντιμετωπίζονται σαν μία. Ο Πίνακας 6.3 περιέχει τις σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Τα μεγέθη σ_y , UTS , ϵ , ϵ_{UTS} προέρχονται από το Διάγραμμα 6.1, ενώ τα E , ρ , ν , από τη βιβλιογραφία.^[71]

Πίνακας 6.3: Μηχανικές ιδιότητες υλικού του δοκιμίου.^[12]

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδα
Τάση στο Όριο Διαρροής	σ_y	200	MPa
Μέγιστη Εφελκυστική Τάση	UTS	226	MPa
Παραμόρφωση στο Όριο Διαρροής	ϵ	0.20	%
Παραμόρφωση στη Μέγιστη Εφελκυστική Τάση	ϵ_{UTS}	6.25	%
Μέτρο Ελαστικότητας	E	69.7	GPa
Πυκνότητα	ρ	2700	kg/m ³
Λόγος Poisson	ν	0.33	-

6.4. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τη Universal μηχανή δοκιμών, έναν Η/Υ και το λογισμικό της εταιρίας Bluehill απαραίτητο για την επεξεργασία δεδομένων. Με την βοήθεια της Universal μηχανής της εταιρίας Instron και τοποθετώντας τα απαιτούμενα εργαλεία, εκτελέστηκαν οι δοκιμές αξονικής και λοξής θλίψης. Στην Εικόνα 6.2 (δεξιά) απεικονίζονται τα εργαλεία θλίψης που είναι προσαρμοσμένα στη μηχανή.

Πίνακας 6.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής δοκιμής INSTRON 4482

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδα
Ονομαστικό Φορτίο	10	kN
Μέγιστη Ταχύτητα Κεφαλής	500	mm/min
Μέγιστο Φορτίο στη Μέγιστη Ταχύτητα	75	kN
Μέγιστη Ταχύτητα Κεφαλής στο Μέγιστο Φορτίο	250	mm/min



Εικόνα 6.2: (Δεξιά) Η πειραματική διάταξη που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου Κατεργασιώντων Υλικών του ΕΜΠ. (Αριστερά) Τα εργαλεία θλίψης της INSTRON 4482.

Η μηχανή που απεικονίζεται στην Εικόνα 6.1 αποτελείται από τα εξής μέρη:

- 1) Το πλαίσιο, το οποίο περιλαμβάνει τους οδηγούς, κατά μήκος των οποίων κινείται η κινητή κεφαλή, και την τράπεζα, όπου φιλοξενούνται οι πλάκες συμπίεσης.
- 2) Την κινητή κεφαλή, όπου είναι εγκατεστημένο το δυναμόμετρο και πάνω σε αυτό στερεώνεται η πάνω πλάκα συμπίεσης.
- 3) Τον πίνακα ελέγχου, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση των συνθηκών του πειράματος και την κίνηση της κεφαλής.

Για το κομμάτι του πειράματος που αφορά την λοξή θλίψη των δοκιμίων προστέθηκε και ένα επιπλέον εξάρτημα, το οποίο φέρει έναν κοχλία που καθορίζει την διεύθυνση του φορτίου θλίψης. Επιπλέον, αποτελείται από μία βάση κυκλικής διατομής με διάμετρο 47 mm, στην οποία τοποθετείται το εξεταζόμενο δοκίμιο. Με αυτόν τον τρόπο, η κεφαλή της πρέσας συμπιέζει το δοκίμιο υπό την επιθυμητή κλίση.

6.5. Πειραματικές συνθήκες

Τα δοκίμια τοποθετούνται στη μηχανή με τρόπο ώστε η βάση τους, να δεσμεύει μόνο τον κατακόρυφο βαθμό ελευθερίας. Κατά την αξονική θλίψη, η άνω πλάκα (κινούμενη) ρυθμίζεται για να προκαλέσει βράχυνση 60 mm (ίση με το 60% της μάζας του δοκιμίου, εφόσον το μήκος των δοκιμίων είναι 100 mm). Το συγκεκριμένο μήκος βράχυνσης επιλέχθηκε για επαρκή συλλογή δεδομένων για τα συμπεράσματα του πειράματος, αλλά μην υπερβεί ένα όριο στο οποίο τα συμπεράσματα θα είναι αλλοιωμένα. Για την λοξή θλίψη, τροποποιείται κάθε φορά το μήκος βράχυνσης, ώστε πάντα να είναι το 60% του ποσοστού της μάζας το οποίο παραμορφώνεται. Για κάθε περίπτωση (αξονικής και λοξής θλίψης των δοκιμίων, με γωνία διεύθυνσης φόρτισης 5, 10 και 15 μοίρες) η ταχύτητα του εμβόλου της μηχανής (κίνηση άνω πλάκας) είναι στα 20 mm/min, όπου για δοκίμιο μήκους 100 mm αντιστοιχεί σε ρυθμό παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 3.333 \cdot 10^{-3} s^{-1}$, όπου σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1, η δοκιμή χαρακτηρίζεται ως οιονεί στατική θλίψη (quasi-static compression). Για την περίπτωση της λοξής κατάρρευσης προστίθεται ειδικό εργαλείο ρύθμισης κλίσης της βάσης της μηχανής, το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 6.3.



Εικόνα 6.3: Εργαλείο ρύθμισης κλίσης της βάσης της μηχανής

Για να μην ολισθαίνει κατά την λοξή θλίψη το δοκίμιο, το εργαλείο ρύθμισης κλίσης έχει και μία εξοχή στην οποία τοποθετείται κατάλληλα το δοκίμιο (βλ. Εικόνα 6.3).

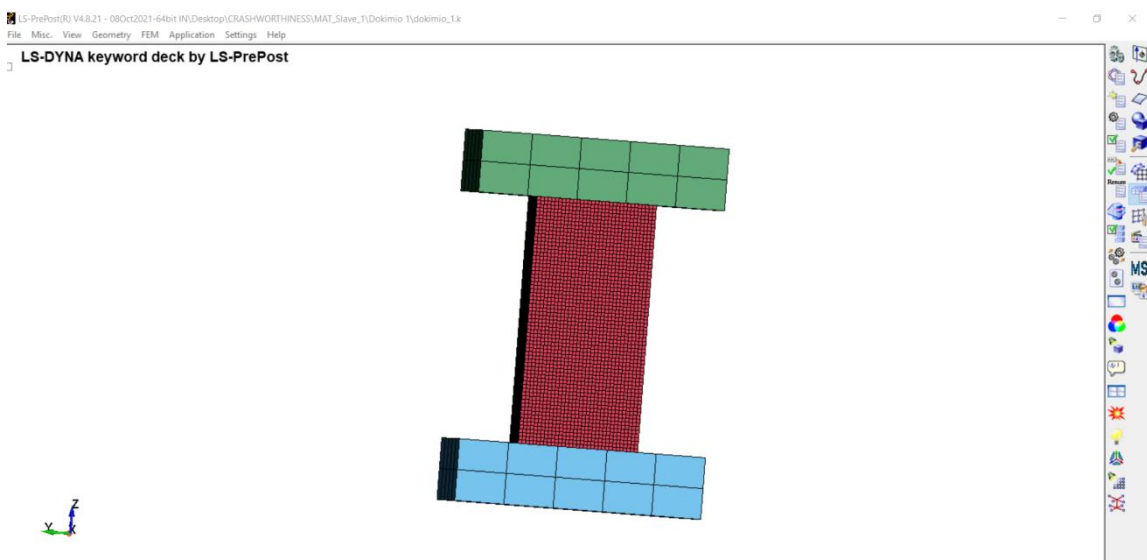
7. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

7.1. Γενικά

Στην αριθμητική προσομοίωση κατασκευάζουμε τον κώδικα του μοντέλου της πειραματικής διαδικασίας μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων του προγράμματος LS-Dyna. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η ανάλυση του κάθε βήματος κατασκευής του κώδικα αυτού με σκοπό την τελική σύγκριση των αποτελεσμάτων του πειράματος και του μοντέλου. Ο κώδικας αυτός αποτελείται από τρεις συνιστώσες:

1. τον pre-processor (ο χώρος σχεδίασης του μοντέλου)
2. τον solver (ο επιλυτής του μοντέλου)
3. τον post-processor (ο χώρος επεξεργασίας των αποτελεσμάτων)

Στην Εικόνα 7.1. φαίνεται ο χώρος εργασίας στον Ls-PrePost του LS-Dyna.



Εικόνα 7.1: Περιβάλλον εργασίας Ls-PrePost 4.3.

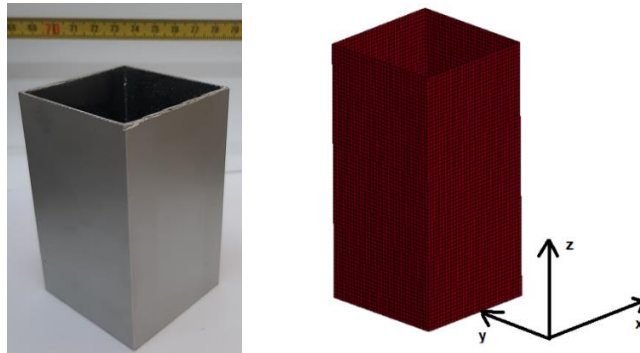
Η περιγραφή των αριθμητικών μοντέλων θα συγκριθεί με τα πειραματικά δοκίμια:

Αυτό γίνεται και στην περίπτωση της προσομοίωσης τόσο για την οιονεί στατική αξονική θλίψη όσο και για την λοξή.

7.2. Μοντελοποίηση

7.2.1. Κατασκευή γεωμετρίας του μοντέλου & διακριτοποίηση

Τα δοκίμια του πειράματος και του μοντέλου ως γνωστών είναι τετραγωνικής διατομής, όπως φαίνονται στην Εικόνα 7.2, καθώς επίσης φαίνεται ο ορισμός των αξόνων x, y και z.

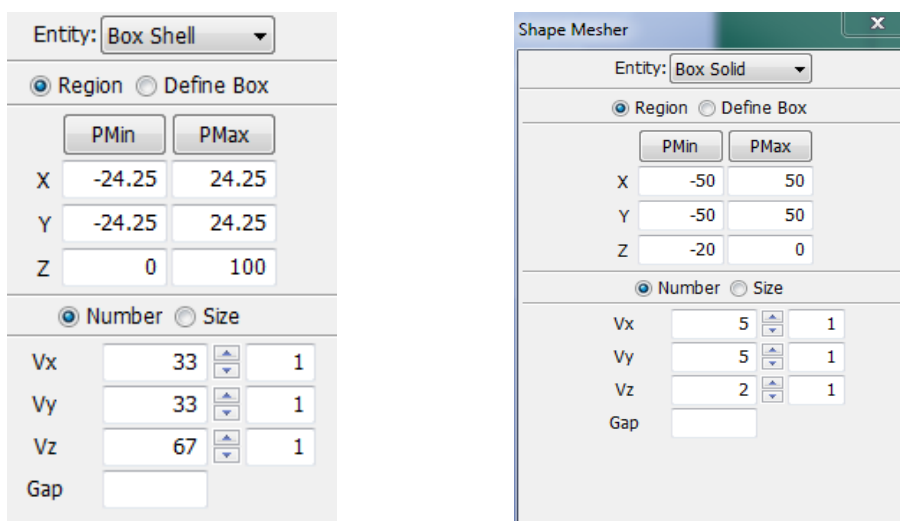


Εικόνα 7.2: Δοκίμιο (αριστερά) και αριθμητικό μοντέλο δοκίμιο (δεξιά) & ορισμός των αξόνων αναφοράς

Για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας του μοντέλου επιλέχθηκε η σειρά των εντολών ως εξής:

FEM → Element and Mesh → Shape Mesher, (βλ. Εικόνα 7.3.)

Το δοκίμιο μοντελοποιήθηκε με κελυφωτά στοιχεία (shell elements), τα στοιχεία αυτά αρχικά έχουν μηδενικό πάχος εξ' ορισμού από το πρόγραμμα, όμως με την κατάλληλη υποκαρτέλα, την οποία θα δούμε παρακάτω το ορίζουμε. Οι πλάκες θλίψης μοντελοποιήθηκαν ως στερεά στοιχεία (solid elements).



Εικόνα 7.3: Κατασκευή γεωμετριών δοκίμιο (αριστερά - box shell) και των πλακών θλίψης (δεξιά - box solid)

Η διακριτοποίηση του δοκιμίου έγινε με βάση το αραιότερο πλέγμα, ώστε να μην επηρεάζεται σημαντικά η λύση, αλλά ταυτόχρονα ο χρόνος επίλυσης να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα για το εν λόγω είδος ανάλυσης. Κανονικά, απαιτείται να γίνουν δοκιμές από το πιο αραιό στο πιο πυκνό πλέγμα, για να αποφανθεί ποια είναι η βέλτιστη πυκνότητα πλέγματος. Όμως εμπειρικά, ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων (Π.Σ.) δίνεται από τη σχέση.[61]

$$\text{Πλήθος Π.Σ. (Άξονας Αναφοράς)} = (\text{Μήκος Δοκιμίου στον Άξονα Αναφοράς}) / (\text{Πάχος Δοκιμίου})$$

Όπου, το πάχος του δοκιμίου είναι 1.5 mm, η διάσταση των δοκιμίων στον άξονα x είναι 50 mm, ομοίως και στον άξονα y και στον άξονα z είναι 100 mm. Το πλήθος των Π.Σ ως προς κάθε άξονα για το δοκίμιο επιλέχθηκε:

- Ως προς τον άξονα x: 33 Π.Σ.
- Ως προς τον άξονα y: 33 Π.Σ.
- Ως προς τον άξονα z: 67 Π.Σ.

Για τις πλάκες θλίψης η διακριτοποίηση γίνεται με παρόμοιο τρόπο, όμως με πολύ πιο αραιό πλέγμα αφ' ενός επειδή δεν θέλουμε να επιβαρύνουμε τον κώδικα με περιττά Π.Σ. και αφετέρου επειδή θεωρούμε πως οι πλάκες είναι άκαμπτες στο συγκεκριμένο πείραμα (εντελώς απαραμόρφωτες). Οι πλάκες δεν απαιτούν πυκνό πλέγμα, επειδή όλη την παραμόρφωση την δέχεται το δοκίμιο. Επιπλέον, επιλέγονται οι διαστάσεις των πλακών με κριτήριο να καλύπτεται όλο το δοκίμιο κατά τη δοκιμή.

7.2.2.Εισαγωγή δεδομένων

Μετά την κατασκευή της γεωμετρίας του μοντέλου και την επιλογή πυκνότητας πλέγματος, ακολουθεί η εισαγωγή των δεδομένων. Για να εισάγουμε όλα τα απαραίτητα δεδομένα, θα πρέπει να ακολουθήσουμε την εξής σειρά βημάτων.

Διαλέγουμε την σειρά εντολών: FEM → Model and Part → Keyword Manager και με τη σειρά που ακολουθούν ορίζουμε τα παρακάτω.

1. Ορισμός ενότητας (SECTION)
2. Ορισμός υλικού (MAT)
3. Ορισμός τμημάτων (PART)
4. Ορισμός συνθηκών μη εισχώρησης των διεπιφανειών (CONTACT)
5. Ορισμός ταχύτητας άνω πλάκας (DEFINE)
6. Ορισμός κίνησης της άνω πλάκας (BOUNDARY)
7. Ορισμός ελέγχου (CONTROL)
8. Ορισμός εξαγωγής αποτελεσμάτων (DATABASE)

Για την λοξή θλίψη είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν και κάποια επιπλέον βήματα. Διαλέγοντας τη σειρά εντολών: FEM → Model and Part → Create Entity (ενοποίηση του δοκιμίου και της κάτω πλάκας θλίψης) και ορίζουμε το παρακάτω.

- Συγκράτηση δοκιμίου

Επιπλέον, θα πρέπει να εφαρμοστεί μία ακόμα σειρά εντολών: FEM → Element Tools → Transformation και έτσι θα περιστρέψουμε το πλέον ενιαίο σώμα του δοκιμίου και της κάτω πλάκας θλίψης.

7.2.3.Ορισμός ενότητας (SECTION)

Για τον ορισμό ενότητας (SECTION) έχουμε να δηλώσουμε στο Keyword Manager. Στην υποκαρτέλα Section δηλώνουμε τον τύπο των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρόγραμμα ως Shell Element διακρίτοποιεί ένα υλικό με σχεδιαστικά μηδενικό πάχος (το οποίο ορίζεται στην υποκαρτέλα Section). Αντιθέτως, το Solid Element αντιμετωπίζεται από το πρόγραμμα ως ένα σώμα συμπαγές. Οπότε επιλέξαμε ως Shell Element τα δοκίμια (βλ. Εικόνα 7.2) και ως Solid Element τις πλάκες θλίψης. Η επιλογή αυτή, έγινε ώστε να μην επιβαρυνθεί ο κώδικας με επιπλέον Π.Σ., τα οποία θα καθυστερούσαν την επίλυση. Τα δοκίμια ονομάστηκαν Tube και οι πλάκες θλίψης Plates. Στις Εικόνες 7.4 και 7.5 φαίνονται ο ορισμός της κάθε ενότητας για το δοκίμιο και τις πλάκες θλίψης αντίστοιχα:

Keyword Input Form

Buttons: NewID, Draw, RefBy, Sort/T1, Add, Accept, Delete, Default, Done, Setting

Options: Use *Parameter, Comment (Subsys: 1 dokimio_1.k)

*SECTION_SHELL_(TITLE) (1)

TITLE: Tube

SECID	ELFORM	SHRE	NIP	PROPT	OR/IRID	ICOMP	SETYP
1	2	1.0000000	3	1	0	0	1

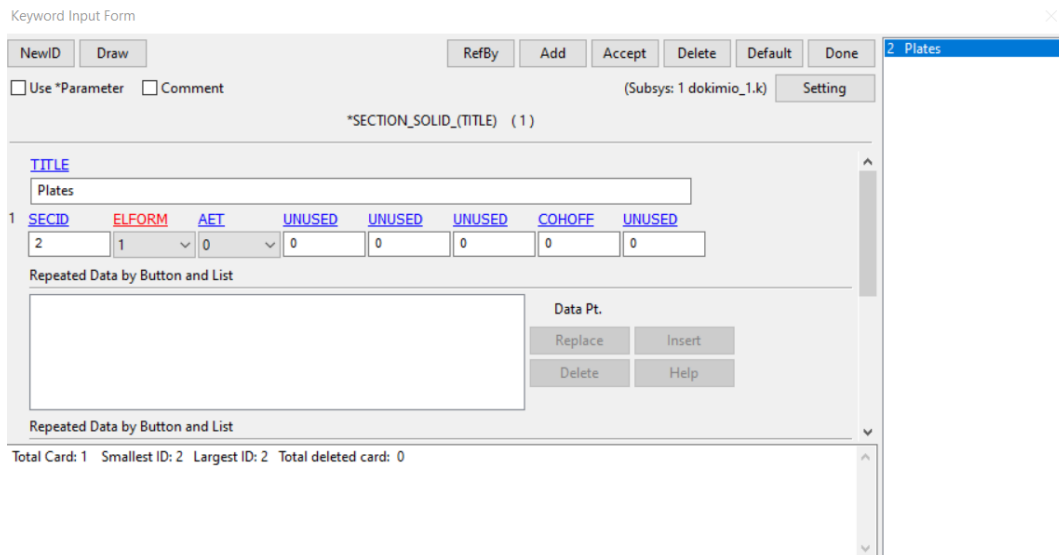
T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
1.5000000	1.5000000	1.5000000	1.5000000	0.0	0.0	0.0	0

Repeated Data by Button and List

Data Pt. Buttons: Replace, Insert, Delete, Help

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Εικόνα 7.4: Ορισμός ενότητας (SECTION) για το δοκίμιο (SHELL)



Εικόνα 7.5: Ορισμός ενότητας (SECTION) για τις πλάκες θλίψης (SOLID)

Στην συγκεκριμένη καρτέλα του Keyword Manager ορίζεται και το πάχος της κάθε πλευράς του δοκιμίου. Δηλαδή, $T1=T2=T3=T4=1.5$ (οι μονάδες είναι σε mm). Επιπλέον ορίστηκαν για το δοκίμιο:

- ELFORM=2 (το είδος επιφανειακού Π.Σ. Belytschko-Tsay (default))
- ΝΙΠ=3 (αριθμός σημείων ολοκλήρωσης κατά το πάχος του στοιχείου)

Για τις πλάκες θλίψης (Solid) όλες οι επιλογές ήταν οι αρχικές (default).

Η ταυτοποίηση των ενοτήτων για το δοκίμιο και τις πλάκες είναι:

- SID=1 για το δοκίμιο (Tube)
- SID=2 για τις πλάκες (Plates)

7.2.4.Ορισμός υλικών (MAT)

Στην παρούσα καρτέλα, ορίζουμε τα υλικά του δοκιμίου και των πλακών θλίψης. Θεωρώντας πως το δοκίμιο (Shell) μπαίνει στην πλαστική παραμόρφωση, επιλέγουμε την υποκαρτέλα 024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Ενώ για τις πλάκες θλίψης που συμπεριφέρονται ως στερεά αμιγώς άκαμπτα, επιλέγουμε την υποκαρτέλα 020-RIGID. Για λόγους κινηματικών περιορισμών οι πλάκες θλίψης θα έχουν διαφορετική ταυτότητα υλικού (material ID = MID). Η ονομασία που δόθηκε στο δοκίμιο είναι το Aluminum Tube, στην κάτω πλάκα θλίψης Steel Lower Plate και στην άνω πλάκα θλίψης Steel Top Plate. Στις Εικόνες 7.6, 7.7 και 7.8 φαίνονται οι ορισμοί των υλικών για το δοκίμιο, για την κάτω και την άνω πλάκα θλίψης αντίστοιχα.

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 dokimio_1.k) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (1)

TITLE
Aluminum_Tube

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
1		0.0027000	6.900e+04	0.3300000	200.00000	0.0	1.000e+21	0.0

2	C	P	LCSS	LCSR	VP
2	0.0	0.0	0	0	0.0

3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
3	0.0	0.0035000	0.0060000	0.0080000	0.0100000	0.0125000	0.0150000	0.0175000

4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
4	200.00000	205.00000	210.00000	212.50000	215.00000	217.50000	220.50000	222.50000

Plot Raise New Padd

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Εικόνα 7.6: Ορισμός υλικού (MAT) για το δοκίμιο (Aluminum_Tube)

Οι ιδιότητες του υλικού του δοκιμίου που φαίνονται είναι οι εξής:

- RO: πυκνότητα (σε gr/mm^3)
- E: μέτρο ελαστικότητας (σε N/mm^2)
- PR: λόγος Poisson (αδιάστατος αριθμός)
- SIGY: όριο διαρροής (σε N/mm^2)
- EPSi: τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης (αδιάστατος αριθμός)
- EPi: τιμές ορθής τάσης (σε N/mm^2), με $i = 1 - 8$ για το EPSi και το Epi.

Τα ζεύγη τιμών τάσης-παραμόρφωσης λήφθηκαν με τη βοήθεια του Διαγράμματος 6.2 τάσης-παραμόρφωσης (βλ. Κεφ. 6).

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 dokimio_1.k) Setting

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (2)

TITLE
Steel Lower Plate

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
1	2	0.0078000	2.080e+05	0.3000000	0.0	0	0.0	

2	CMO	CON1	CON2
2	1.0	7	7

3	LCQ OR A1	A2	A3	V1	V2	V3
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

COMMENT:

Total Card: 2 Smallest ID: 2 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

Εικόνα 7.7: Ορισμός υλικού (MAT) για την κάτω πλάκα θλίψης (Steel Lower Plate)

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 dokimio_1.k) Setting

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (2)

TITLE
Steel Top Plate

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	3	0.0078000	2.080e+05	0.3000000	0.0	0	0.0	

2	CMO	CON1	CON2
	1.0	4	7

3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

COMMENT:

Total Card: 2 Smallest ID: 2 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

Εικόνα 7.8: Ορισμός υλικού (MAT) για την άνω πλάκα θλίψης (Steel Top Plate)

Ομοίως προστέθηκαν οι ιδιότητες του υλικού για τις πλάκες θλίψης από χάλυβα. Επειδή οι πλάκες δεν παραμορφώνονται, η αντίστοιχη καρτέλα των πλακών θλίψης δεν μας ζητάει την εισαγωγή δεδομένων τάσης-παραμόρφωσης, όμως ζητάει τους κινηματικούς περιορισμούς. Δηλαδή:

- CMO=1: οι περιορισμοί απευθύνονται στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων (ίδιο και για τις δύο πλάκες)
- CON1: Βαθμοί ελευθερίας γραμμικής κίνησης
- CON2: Βαθμοί ελευθερίας περιστροφικής κίνησης

Για την κάτω πλάκα που δεν φέρει κανέναν βαθμό ελευθερίας επιλέχθηκαν οι ακόλουθοι κινηματικοί περιορισμοί:

- CON1=7→ Περιορισμός γραμμικής κίνησης της πλάκα στους άξονες x, y και z
- CON2=7→ Περιορισμός περιστροφικής κίνησης της πλάκα στους άξονες x, y και z

Για την άνω πλάκα φέρει έναν μόνο βαθμό ελευθερίας (κίνηση κατά τον άξονα z) επιλέχθηκαν οι ακόλουθοι κινηματικοί περιορισμοί:

- CON1=4→ Περιορισμός γραμμικής κίνησης της πλάκα στους άξονες x και y (κίνηση κατά z)
- CON2=7→ Περιορισμός περιστροφικής κίνησης της πλάκα στους άξονες x,y και z

Η ταυτοποίηση των υλικών για το δοκίμιο, την κάτω και την άνω πλάκα είναι:

- MID=1 για το δοκίμιο (Aluminum Tube)
- MID=2 για την κάτω πλάκα θλίψης (Steel Lower Plate)
- MID=3 για την άνω πλάκα θλίψης (Steel Top Plate)

7.2.5.Ορισμός τμημάτων (PART)

Έπειτα από την ολοκλήρωση των SECTION και MAT, θα πρέπει σε κάθε τμήμα της μοντελοποίησης να δηλωθούν στην υποκαρτέλα PART τα SECTION ID (SID) και MAT ID (MID). Στην ενότητα αυτήν το δοκίμιο ονομάστηκε Tube, η κάτω πλάκα θλίψης Lower Plate και η άνω πλάκα θλίψης Top Plate. Στις Εικόνες 7.9, 7.10 και 7.11 φαίνονται οι δηλώσεις αυτές για το δοκίμιο, την κάτω και την άνω πλάκα αντίστοιχα.

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for defining a part. The title bar reads 'Keyword Input Form'. At the top, there are buttons: 'NewID', 'Draw', 'RefBy', 'Pick', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. Below these are checkboxes for 'Use *Parameter' and 'Comment', and a 'Setting' button. The subsystem is identified as '(Subsys: 1 dokimio_1.k)'. The part title is '*PART_(TITLE) (3)'. The form contains the following fields:

- 1 **TITLE**: Tube
- 2 **PID**: 1, **SECID**: 1, **MID**: 1, **EOSID**: 0, **HGID**: 0, **GRAV**: 0, **ADPOPT**: 0, **TMID**: 0

At the bottom, there is a 'COMMENT:' field and a status bar showing 'Total Card: 3 Smallest ID: 1 Largest ID: 3 Total deleted card: 0'. On the right side, a list shows the parts: 1 Tube, 2 Lower Plate, and 3 Top Plate.

Εικόνα 7.9: Ορισμός τμήματος (PART) για το δοκίμιο (Tube)

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for defining a part. The title bar reads 'Keyword Input Form'. At the top, there are buttons: 'NewID', 'Draw', 'RefBy', 'Pick', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. Below these are checkboxes for 'Use *Parameter' and 'Comment', and a 'Setting' button. The subsystem is identified as '(Subsys: 1 dokimio_1.k)'. The part title is '*PART_(TITLE) (3)'. The form contains the following fields:

- 1 **TITLE**: Lower Plate
- 2 **PID**: 2, **SECID**: 2, **MID**: 2, **EOSID**: 0, **HGID**: 0, **GRAV**: 0, **ADPOPT**: 0, **TMID**: 0

At the bottom, there is a 'COMMENT:' field and a status bar showing 'Total Card: 3 Smallest ID: 1 Largest ID: 3 Total deleted card: 0'. On the right side, a list shows the parts: 1 Tube, 2 Lower Plate, and 3 Top Plate.

Εικόνα 7.10: Ορισμός τμήματος (PART) για την κάτω πλάκα θλίψης (Lower Plate)

Keyword Input Form

Use *Parameter
 Comment
 (Subsys: 1 dokimio_1.k)

*PART_(TITLE) (3)

1 TITLE
Top Plate

2 PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID

3	2	3	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

COMMENT:

Total Card: 3 Smallest ID: 1 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

1 Tube
2 Lower Plate
3 Top Plate

Εικόνα 7.11: Ορισμός τμήματος (PART) για την άνω πλάκα θλίψης (Top Plate)

Η ταυτοποίηση των τμημάτων για το δοκίμιο, την κάτω και την άνω πλάκα είναι:

- PID=1 για το δοκίμιο (Tube)
- PID=2 για την κάτω πλάκα (Lower Plate)
- PID=3 για την άνω πλάκα (Top Plate)

7.2.6.Ορισμός συνθηκών μη εισχώρησης των διεπιφανειών (CONTACT)

Κατά την εξέλιξη της κατάρρευσης του δοκιμίου δημιουργούνται πτυχώσεις, το πρόγραμμα δεν μπορεί να διακρίνει από μόνο του πως οι πτυχώσεις μεταξύ τους, δεν μπορούν να συμπεριφέρονται σαν άυλες (δηλαδή κατά την επαφή των πτυχώσεων θα πρέπει να βρίσκουν αντίσταση και να μην διεισδύει η μία μέσα στην άλλη), γι' αυτό θα πρέπει να ορίσουμε μία συνθήκη μη εισχώρησης των κόμβων του δοκιμίων μεταξύ τους. Αυτό πραγματοποιείται με την υποκαρτέλα CONTACT διαμέσου της AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE. Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημάνουμε πως στην υποκαρτέλα CONTACT το πρόγραμμα χωρίζει τις διεπιφάνειες ως SLAVE (παραμορφώσιμο τμήμα της διεπιφάνειας) και ως MASTER (απαραμόρφωτο τμήμα της διεπιφάνειας). Επειδή αναφερόμαστε στη συνθήκη μη εισχώρησης των πτυχώσεων του δοκιμίου, δε θα οριστεί MASTER τμήμα της διεπιφάνειας. Στην Εικόνα 7.12 φαίνεται ο ορισμός της συνθήκης μη εισχώρησης των διεπιφανειών των πτυχώσεων.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done 1 (1) Tube Folds

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 dokimio_1.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_ID/TITLE/MPP (1)

1 Tube Folds

MPP1 MPP2

2	IGNORE	BCKET	LCBCKT	NS2TRK	INITIIR	PARMAX	UNUSED	CPRMB
	0	200		3	2	1.0005		0

3	UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE
	0		1.0	0

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	1	0	3	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.6100000	0.4700000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20

6	SFS	SFM	SST	MSI	SFST	SFMT	SFE	VSE
---	-----	-----	-----	-----	------	------	-----	-----

FD:=Dynamic coefficient of friction. The frictional coefficient is assumed to be dependent on the relative velocity v-rel of the surfaces in contact. Give table ID if FS=2 (default=0.0).
 Note: For the special contact option TIED_SURFACE_TO_SURFACE_FAILURE only, the variables FD is Shear stress at failure

Εικόνα 7.12: Ορισμός συνθήκης μη εισχώρησης των πτυχώσεων (Tube Folds)

Το SLAVE τμήμα της διεπιφάνειας το ορίσαμε διαμέσου του PID και για να το κάνουμε αυτό επιλέξαμε στο κελί του SSTYP=3 (Slave segment set or node set type). Επιπλέον ορίσαμε τους συντελεστές στατικής τριβής FS και δυναμικής τριβής FD. Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από τα υλικά τα οποία έρχονται σε επαφή. Για επαφή συντελεστών τριβής αλουμίνιο-αλουμίνιο (self-contact) είναι το 0.61 για τον συντελεστή τριβής και 0.47 για τον συντελεστή δυναμικής τριβής^[72]. Οπότε:

- Συντελεστής στατικής τριβής → FS=0.61
- Συντελεστής δυναμικής τριβής → FD=0.47

Επιπλέον, θα πρέπει να ορισθεί και συνθήκη μη εισχώρησης τόσο για την διεπιφάνεια του δοκιμίου με την άνω πλάκα, όσο και για την διεπιφάνεια του δοκιμίου με την κάτω πλάκα. Αυτό πραγματοποιείται διαμέσου της NODES_TO_SURFACE. Για την διεπιφάνεια του δοκιμίου με την άνω πλάκα, το SLAVE (παραμορφώσιμο) τμήμα είναι το δοκίμιο και το MASTER (απαραμόρφωτο) κομμάτι είναι η άνω πλάκα. Αντίστοιχα, για την διεπιφάνεια του δοκιμίου με την κάτω πλάκα. Στις Εικόνες 7.13 και 7.14 φαίνονται οι ορισμοί των συνθηκών μη εισχώρησης των κόμβων του δοκιμίου στις επιφάνειες της άνω και της κάτω πλάκας αντίστοιχα. Το SLAVE και το MASTER τμήμα της διεπιφάνειας το ορίσαμε διαμέσου του PID και για να το κάνουμε αυτό επιλέξαμε στο SSTYP=3 (όπως πριν) και MSTYP=3 (Master segment type). Για επαφή συντελεστών τριβής χάλυβα-αλουμινίου 6060 T6 είναι το 1.05 για τον συντελεστή τριβής και 0.30 για τον συντελεστή δυναμικής τριβής^[72]. Οπότε:

- Συντελεστής στατικής τριβής → FS=1.05
- Συντελεστής δυναμικής τριβής → FD=0.30

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 dokimio_1.k) Setting

*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_(THERMAL) (2)

1 KEY TITLE
2 Tube to Top Plate

MPP1 MPP2

2 IGNORE BCKET LCBCKT NS2TRK INITITR PARMAX UNUSED CPARAM8
0 200 3 2 1.0005 0

3 UNUSED CHKSEGS PENSP GRPABLE
0 1.0 0

4 SSID MSID SSTYP MSTYP SBOXID MBOXID SPR MPR
1 3 3 3 0 0 0 0

5 FS FD DC VC VDC PENCHK BT DT
1.05 0.30 0.0 0.0 0.0 0 0 1.000e+20

FD:=Dynamic coefficient of friction. The frictional coefficient is assumed to be dependent on the relative velocity v-rel of the surfaces in contact. Give table ID if FS=2 (default=0.0).
Note: For the special contact option TIED_SURFACE_TO_SURFACE_FAILURE only, the variables FD is Shear stress at failure

2 (2) Tube to Top Plate
3 (3) Tube to Lower Plate

Εικόνα 7.13: Ορισμός συνθήκης μη εισχώρησης των κόμβων του δοκιμίου (SLAVE) με την άνω πλάκα θλίψης (MASTER) (Tube to Top Plate)

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 dokimio_1.k) Setting

*CONTACT_NODES_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_(THERMAL) (2)

1 KEY TITLE
3 Tube to Lower Plate

MPP1 MPP2

2 IGNORE BCKET LCBCKT NS2TRK INITITR PARMAX UNUSED CPARAM8
0 200 3 2 1.0005 0

3 UNUSED CHKSEGS PENSP GRPABLE
0 1.0 0

4 SSID MSID SSTYP MSTYP SBOXID MBOXID SPR MPR
1 2 3 3 0 0 0 0

5 FS FD DC VC VDC PENCHK BT DT
1.05 0.30 0.0 0.0 0.0 0 0 1.000e+20

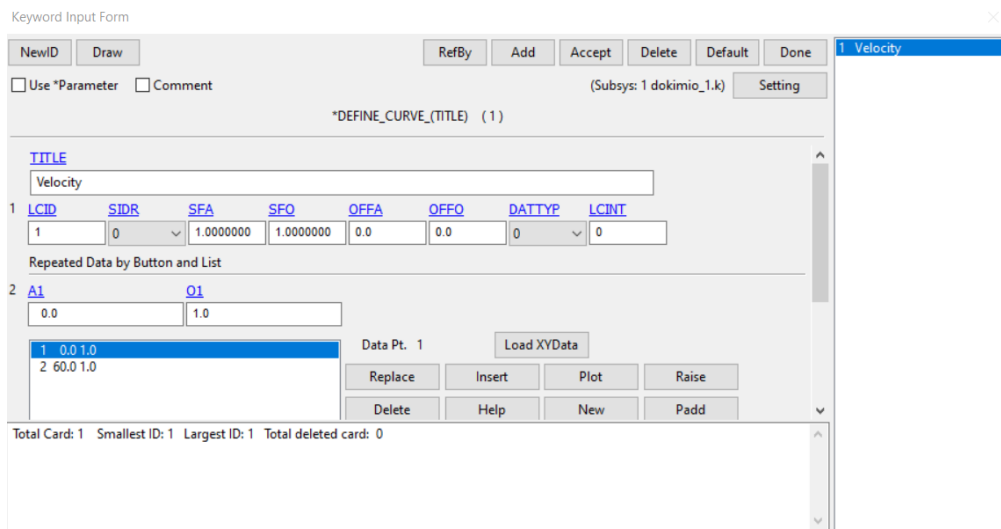
FD:=Dynamic coefficient of friction. The frictional coefficient is assumed to be dependent on the relative velocity v-rel of the surfaces in contact. Give table ID if FS=2 (default=0.0).
Note: For the special contact option TIED_SURFACE_TO_SURFACE_FAILURE only, the variables FD is Shear stress at failure

2 (2) Tube to Top Plate
3 (3) Tube to Lower Plate

Εικόνα 7.14: Ορισμός συνθήκης μη εισχώρησης των κόμβων του δοκιμίου (SLAVE) με την κάτω πλάκα θλίψης (MASTER) (Tube to Lower Plate)

7.2.7.Ορισμός ταχύτητας άνω πλάκας (DEFINE)

Στο πείραμα η ταχύτητα της άνω πλάκας είναι 20 mm/min (οιονεί στατική θλίψη) στο LS-Dyna θα ληφθεί η ταχύτητα της άνω πλάκας 1 mm/msec. Παρόλο που λάβαμε διαφορετική ταχύτητα συμπίεσης η παραπάνω ταχύτητα είναι αρκετή μικρή, ώστε να μη λαμβάνουν χώρα αδρανειακά φαινόμενα, οπότε η καταπόνηση στο μοντέλο από οιονεί στατική θλίψη (όπως έγινε στο πείραμα) γίνεται ήπια δυναμική θλίψη (dynamic low, βλ. Πίνακα 5.1 για ρυθμό παραμόρφωσης $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$). Το παραπάνω μας βολεύει, ώστε το διάγραμμα φορτίου-χρόνου που εξάγεται από τον solver, να συμπίπτει απευθείας και χωρίς μετατροπές με το αντίστοιχο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης. Οπότε στην υποκαρτέλα του Keyword Manager DEFINE και επιλέγοντας CURVE, ορίζουμε την καμπύλη της ταχύτητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.15:



Εικόνα 7.15: Ορισμός καμπύλης ταχύτητας (Velocity)

Τα σημεία που μας ενδιαφέρουν στην περίπτωση του CURVE είναι το LCID=1 (Load curve ID) και τα ζεύγη A1 και O1. Όπου A1 είναι ο χρόνος και O1 είναι η ταχύτητα. Ξεκινώντας δηλαδή από 0 msec και τελειώνοντας στα 60 msec, για να μετατοπιστεί η άνω πλάκα 60 mm. Επιλέγοντας το πρώτο ζεύγος τιμών A1=0.0 και O1=1.0, εν συνεχεία πατάμε insert και εισάγουμε το δεύτερο ζεύγος τιμών A1=60.0 και O1=1.0.

7.2.8.Ορισμός κίνησης της άνω πλάκας (BOUNDARY)

Επειδή το LS-Dyna δεν αναγνωρίζει την καμπύλη CURVE που ορίσαμε ως ταχύτητα, μέσω της υποκαρτέλας BOYNDARY καταλαβαίνει ποιο τμήμα (PART) είναι αυτό το οποίο θα χρησιμοποιήσει την καμπύλη για συγκεκριμένη ταχύτητα και χρόνο που εισάχθηκαν στο CURVE, ώστε να μετατοπιστεί. Επιλέγοντας PRESCRIBED_MOTION_RIGID, δηλώνουμε το τμήμα (PART) το οποίο θα κινείται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.16:

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 dokimio_1.k) Setting

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_ID (1)

ID	TITLE							
1	Movement of the Top Plate							
1	PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
3	3	0	0	1	-1.0000000	0	1.000e+28	0.0
2	OFFSET1	OFFSET2	MRB	NODE1	NODE2			
0.0	0.0	0	0	0	0			

COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Εικόνα 7.16: Ορισμός κίνησης της άνω πλάκας (Movement of the Top Plate)

Δηλώνουμε το ακόλουθα:

- Ταυτότητα τμήματος: PID=3 (Top Plate)
- Βαθμοί ελευθερίας: DOF=3 (Applicable degrees of freedom), (κίνηση μόνο κατά άξονα z)
- Επιλογή καμπύλης: LCID=1 (Velocity)
- Συντελεστής κλίμακας: SF= -1 (Load scale factor), (Το (-) δηλώνει πως θα κινηθεί στα αρνητικά του άξονα z συμπιέζοντας το δοκίμιο)

7.2.9.Ορισμός ελέγχου (CONTROL)

Στην υποκαρτέλα CONTROL και επιλέγοντας TERMINATION δηλώνουμε τον χρόνο που θα κάνει υπολογισμούς το πρόγραμμα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.17:

Keyword Input Form

Clear Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 dokimio_1.k) Setting

*CONTROL_TERMINATION (1)

1	ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS	NOSOL
60.000000	0	0.0	0.0	1.000e+08	0	

COMMENT:

Εικόνα 7.17: Ορισμός ελέγχου διάρκειας κατάρρευσης

Το μόνο που συμπληρώνεται εδώ είναι το κελί ENDTIM=60 (στην αξονική θλίψη, στην λοξή θλίψη επειδή λάβαμε ταχύτητα 1 mm/msec παίρνουμε χρόνο τερματισμού ίσο με το μήκος βράχυνσης σε mm), δηλαδή όσο χρόνο είχαμε δηλώσει πως θα τελειώσει η κίνηση της άνω πλάκας, μέσω της καμπύλης CURVE. Τα μήκη βράχυνσης για κάθε περίπτωση φαίνονται στο παράρτημα Α (βλ. Πίνακα Α.1).

7.2.10.Ορισμός εξαγωγής αποτελεσμάτων (DATABASE)

Στην εισαγωγή δεδομένων θα πρέπει να δηλώσουμε τα αποτελέσματα, τα οποία θέλουμε να εξαγει το πρόγραμμα μετά την επίλυση του κώδικα. Τα ζητούμενα εδώ είναι τα διαγράμματα φορτίου-χρόνου (RCFORC) και το βίντεο της μοντελοποίησης του πειράματος. Για τα διαγράμματα επιλέγουμε ASCII_option, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.18:

Keyword Input Form

Use *Parameter Comment

Accept Done

Subsys: Setting

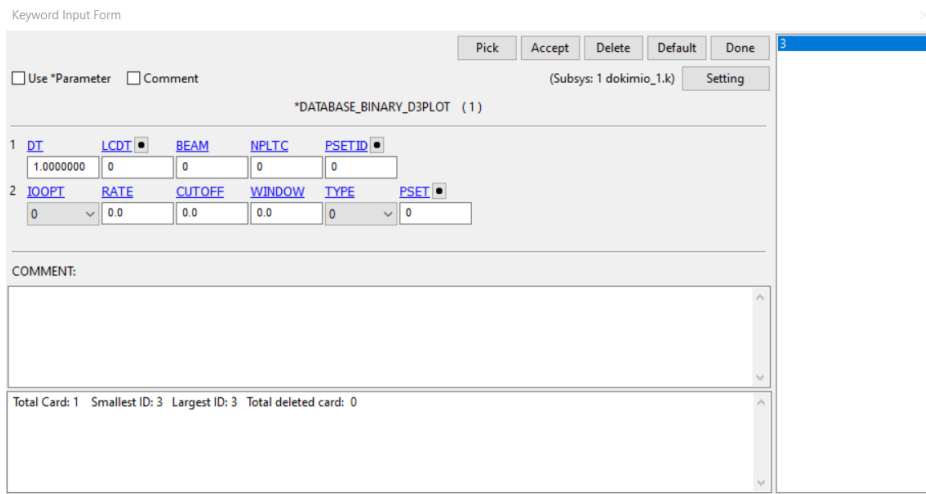
*DATABASE_OPTION (2)

	DT	BINARY	LCUR	IOOPT
<input checked="" type="checkbox"/> RCFORC	1	0	0	1
<input type="checkbox"/> RWFORC	0.0	0	0	1
<input type="checkbox"/> SBTOUT	0.0	0	0	1
<input type="checkbox"/> SECFORC	0.0	0	0	1
<input type="checkbox"/> SLEOUT	0.0	0	0	1
<input type="checkbox"/> SPCFORC	0.0	0	0	1

Εικόνα 7.18: Ορισμός εξαγωγής διαγραμμάτων (RCFORC)

Επιπλέον, ορίσαμε και χρονικό βήμα DT=1 το οποίο σημαίνει ότι θα εξαγονται τα αποτελέσματα κατά την επίλυση του κώδικα κάθε 1 msec.

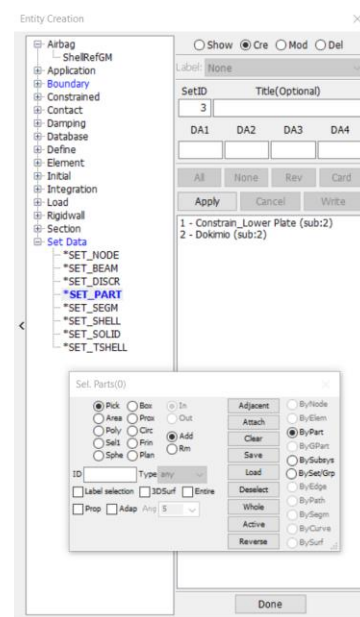
Για το βίντεο της μοντελοποίησης επιλέγουμε BINARY_D3PLOT και ορίζουμε ομοίως χρονικό βήμα DT=1, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.19:



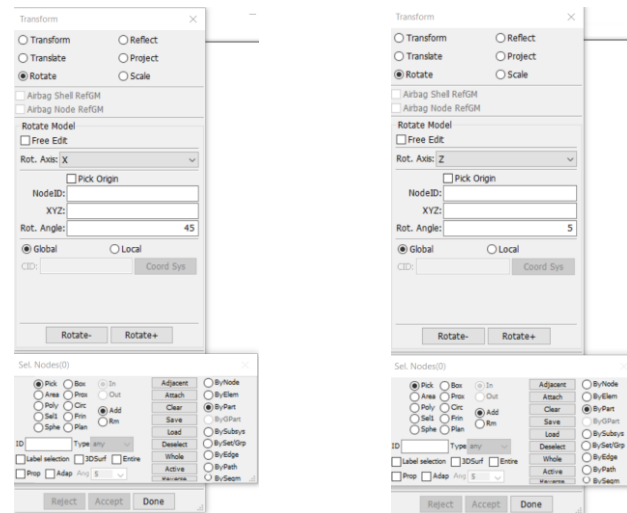
Εικόνα 7.19: Ορισμός εξαγωγής βίντεο

7.2.11. Συγκράτηση και περιστροφή δοκιμίου για την λοξή θλίψη

Κατά την μοντελοποίηση της λοξής θλίψης, πρέπει να εφαρμοστεί πρώτα η συγκράτηση του μοντέλου στην κάτω πλάκα, ώστε να αποφύγουμε ενδεχόμενη ολίσθηση. Από το Create Entity όπως αναφέρθηκε, πηγαίνοντας στο πλαίσιο Sel. Parts επιλέγουμε την κατηγορία ByPart. Ακολούθως πηγαίνοντας στο πλαίσιο Entity Creation επιλέγουμε την κατηγορία Set Data, έπειτα πατάμε SET_PART. Αφού επιλεχθούν το δοκίμιο και η κάτω πλάκα θλίψης, ολοκληρώνουμε την συγκράτηση του μοντέλου πατώντας την επιλογή Apply και μετά Done, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.20.



Εικόνα 7.20: Ενοποίηση του δοκιμίου και της κάτω πλάκας θλίψης



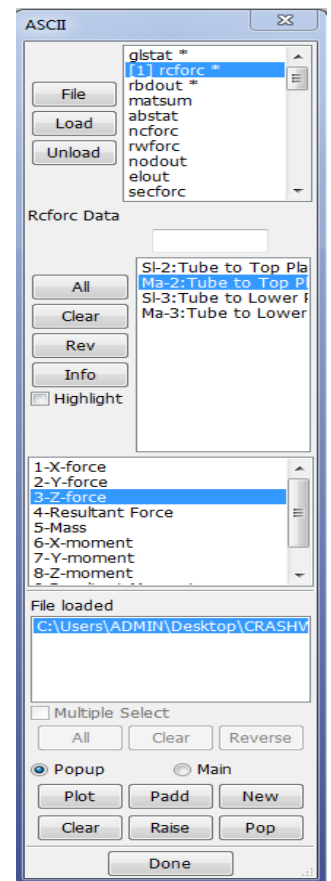
Εικόνα 7.21: Περιστροφή του δοκιμίου και της κάτω πλάκας θλίψης κατά 45° περί του άξονα x και κατά γωνία β περί του άξονα z

7.2.12. Συγκράτηση και περιστροφή δοκιμίου για την λοξή θλίψη

Έπειτα από την εισαγωγή δεδομένων και την επίλυση του προβλήματος, η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω του solver, ακολουθεί η επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Ανατρέχοντας στον φάκελο, όπου σώθηκαν τα αρχεία του LS-Dyna, βρίσκουμε το αρχείο d3plot. Ανοίγοντας το d3plot αρχείο με τον post-processor, μπορούμε να αναπαραστήσουμε τον μηχανισμό κατάρρευσης και να κατασκευάσουμε τα διαγράμματα που μας ενδιαφέρουν, συγκρίνοντας τα με αυτά του πειράματος.

Θα κατασκευαστούν τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης μέσω του post-processor, διαμέσου των διαγραμμάτων φορτίου-χρόνου τα οποία ταυτίζονται με τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης, εφόσον επιλέχθηκε ταχύτητα της άνω πλάκας 1mm/msec. Ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

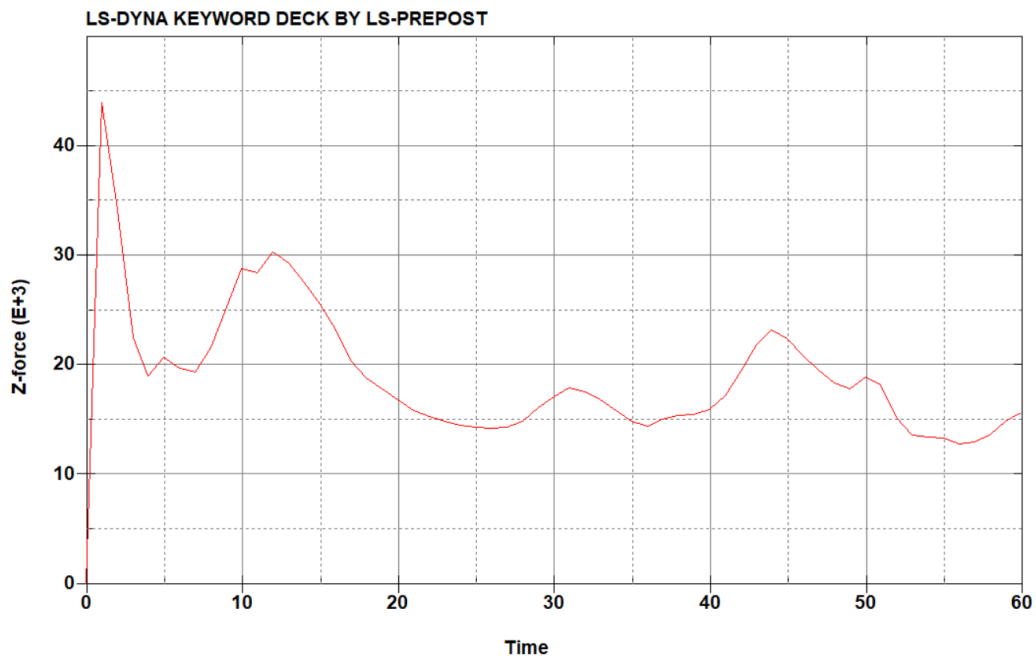
1. Ανοίγουμε το αρχείο d3plot μέσω του post-processor
2. Επιλέγοντας FEM → Post → ASCII
3. Στο εμφανιζόμενο παράθυρο επιλέγουμε με την σειρά: rcforc → load → Ma-2:Tube to Top Plate (όπως φαίνεται και στην δίπλα Εικόνα)
4. Επιλέγοντας Z-Force (επειδή είναι ο άξονας που κινείται η άνω πλάκα θλίψης) και πατάμε plot



Εικόνα 7.22: Επιλογή εντολών για τον σχεδιασμό του διαγράμματος φορτίου συναρτήσει του χρόνου

Στην Εικόνα 7.22 φαίνεται η επιλογή των κατάλληλων εντολών, ώστε το πρόγραμμα να σχεδιάσει το διάγραμμα φορτίου συναρτήσει του χρόνου.

Στην Εικόνα 7.23 απεικονίζεται το διάγραμμα που υπολόγισε ο κώδικας φορτίου-χρόνου, για την αξονική θλίψη.



Εικόνα 7.23: Διάγραμμα φορτίου συναρτήσει του χρόνου μέσω του LS-Dyna

8. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

8.1. Γενικά

Μετά την πλήρη περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και της αριθμητικής προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, θα ακολουθήσει ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Δηλαδή, θα πραγματοποιηθεί παρουσίαση των αποτελεσμάτων της αξονικής και λοξής θλίψης από τη μηχανή δοκιμών Universal αναλύοντας τα μοτίβα κατάρρευσης και παραθέτοντας φωτογραφικό υλικό για επεξήγηση και τεκμηρίωση. Εν συνεχεία θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης και του προγράμματος LS-Dyna για το σύνολο των δοκιμών που εξετάστηκαν πειραματικά. Το κεφάλαιο αυτό έχει σκοπό την παρουσίαση του συνόλου των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το πείραμα και την προσομοίωση αντίστοιχα ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των δύο και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά των δοκιμών.

8.2. Σύγκριση δοκιμών-Αριθμητικών μοντέλων

8.2.1. Στιγμιότυπα κατάρρευσης & τελικές όψεις

Στις Εικόνες 8.1, 8.2, 8.3 και 8.4 φαίνονται τα στιγμιότυπα κατάρρευσης για κάθε ομάδα δοκιμών και του αντίστοιχου αριθμητικού μοντέλου:



$\delta=15\text{mm}$



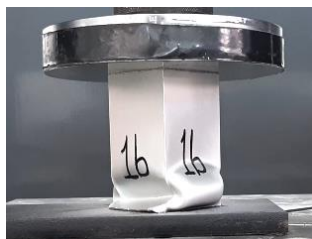
$\delta=30\text{mm}$



$\delta=45\text{mm}$



$\delta=60\text{mm}$



$\delta=15\text{mm}$



$\delta=30\text{mm}$



$\delta=45\text{mm}$



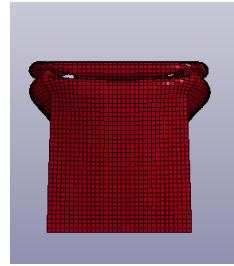
$\delta=60\text{mm}$



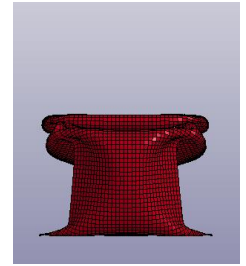
$\delta=15\text{mm}$



$\delta=30\text{mm}$



$\delta=45\text{mm}$



$\delta=60\text{mm}$

Εικόνα 8.1: Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίων (ομάδα 1) και μοντέλου (dokimio_1)



$\delta=15\text{mm}$



$\delta=30\text{mm}$



$\delta=45\text{mm}$



$\delta=60\text{mm}$



$\delta=15\text{mm}$



$\delta=30\text{mm}$



$\delta=45\text{mm}$



$\delta=60\text{mm}$



$\delta=15\text{mm}$



$\delta=30\text{mm}$



$\delta=45\text{mm}$



$\delta=60\text{mm}$

Εικόνα 8.2: Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίων (ομάδα 2) και μοντέλου (dokimio_2)



$\delta=15\text{mm}$



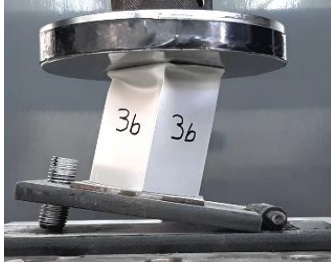
$\delta=30\text{mm}$



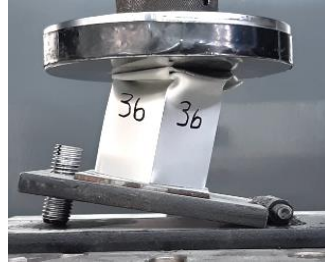
$\delta=45\text{mm}$



$\delta=60\text{mm}$



$\delta=15\text{mm}$



$\delta=30\text{mm}$



$\delta=45\text{mm}$



$\delta=60\text{mm}$



$\delta=15\text{mm}$



$\delta=30\text{mm}$



$\delta=45\text{mm}$



$\delta=60\text{mm}$

Εικόνα 8.3: Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμίων (ομάδα 3) και μοντέλου (dokimio_3)



$\delta=15\text{mm}$



$\delta=30\text{mm}$



$\delta=45\text{mm}$



$\delta=60\text{mm}$



$\delta=15\text{mm}$



$\delta=30\text{mm}$



$\delta=45\text{mm}$



$\delta=60\text{mm}$



$\delta=15\text{mm}$



$\delta=30\text{mm}$



$\delta=45\text{mm}$



$\delta=60\text{mm}$

Εικόνα 8.4: Στιγμιότυπα κατάρρευσης δοκιμών (ομάδα 4) και μοντέλου (dokimio_4)

όπου:

δ : το μήκος βράχυνσης των δοκιμών

Στην Εικόνα 8.5 φαίνονται οι τελικές όψεις όλων των δοκιμών και των αριθμητικών μοντέλων:

Περίπτωση	Δοκίμιο a	Δοκίμιο b	Μοντέλα
Αξονική Κατάρρευση Κλίση Φόρτισης: 0 μοίρες			
Λοξή Κατάρρευση Κλίση Φόρτισης: 5 μοίρες			
Λοξή Κατάρρευση Κλίση Φόρτισης: 10 μοίρες			

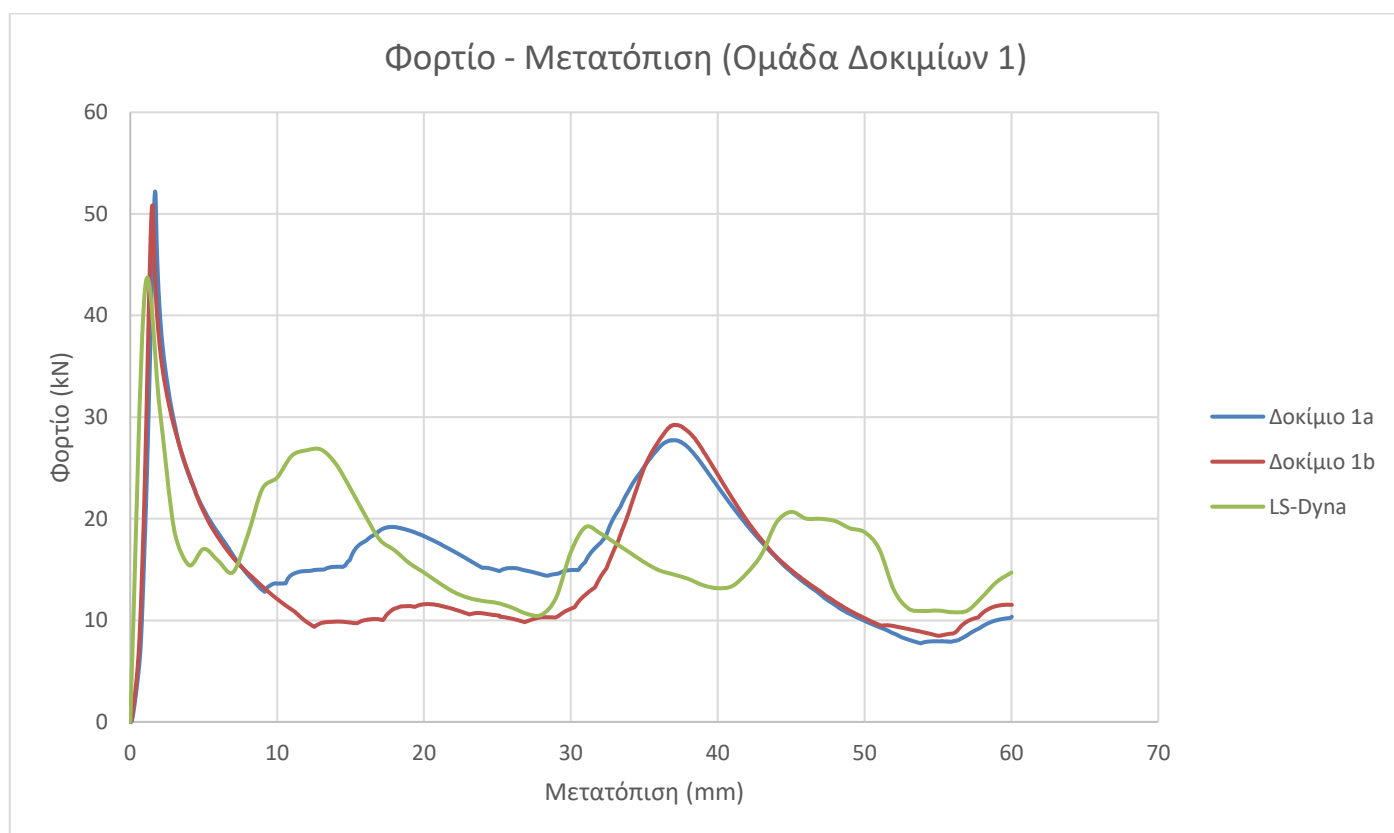
Λοξή
Κατάρρευση
Κλίση Φόρτισης:
15 μοίρες



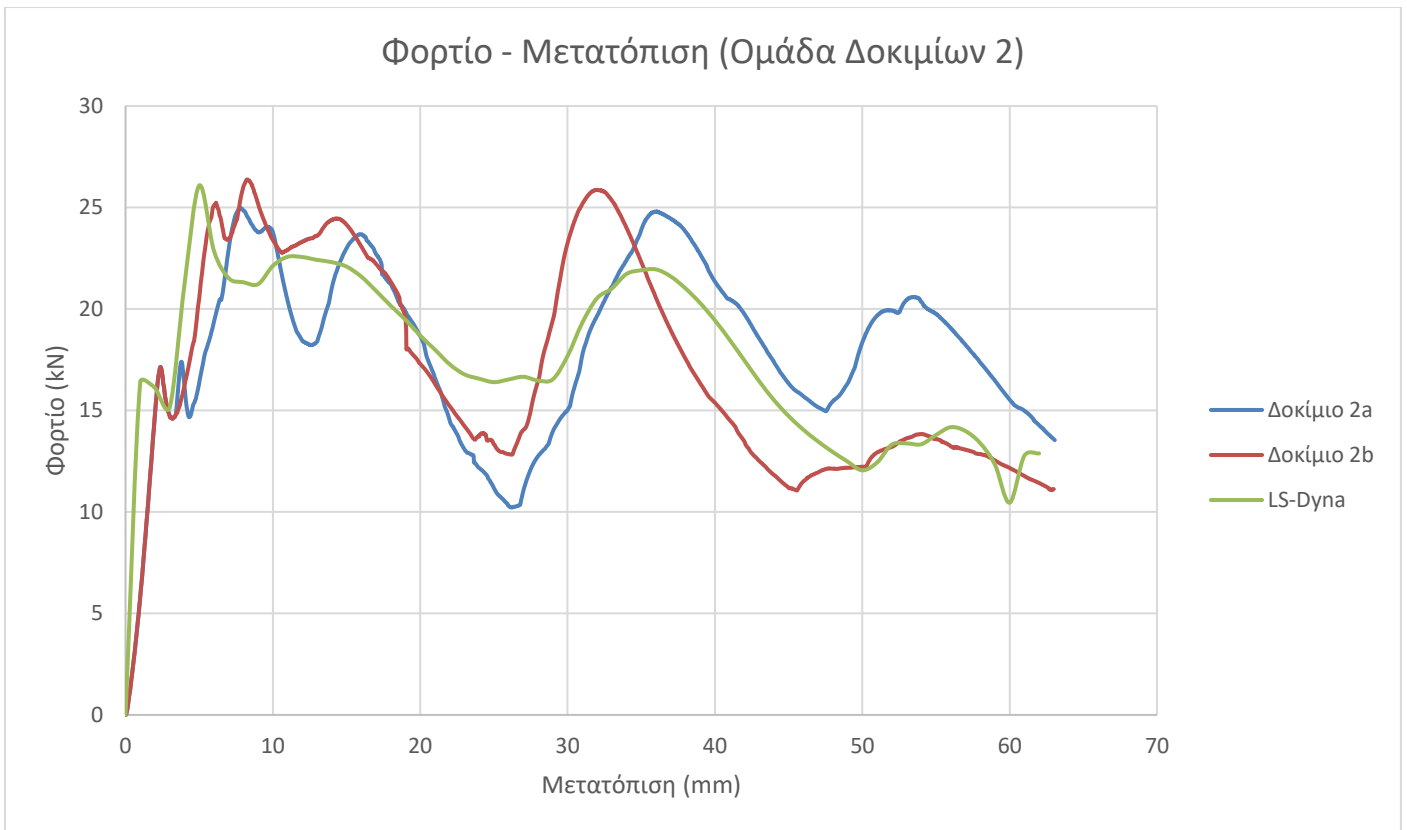
Εικόνα 8.5: Τελικές όψεις δοκιμών και μοντέλων ανάλογα την περίπτωση

8.2.2. Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης

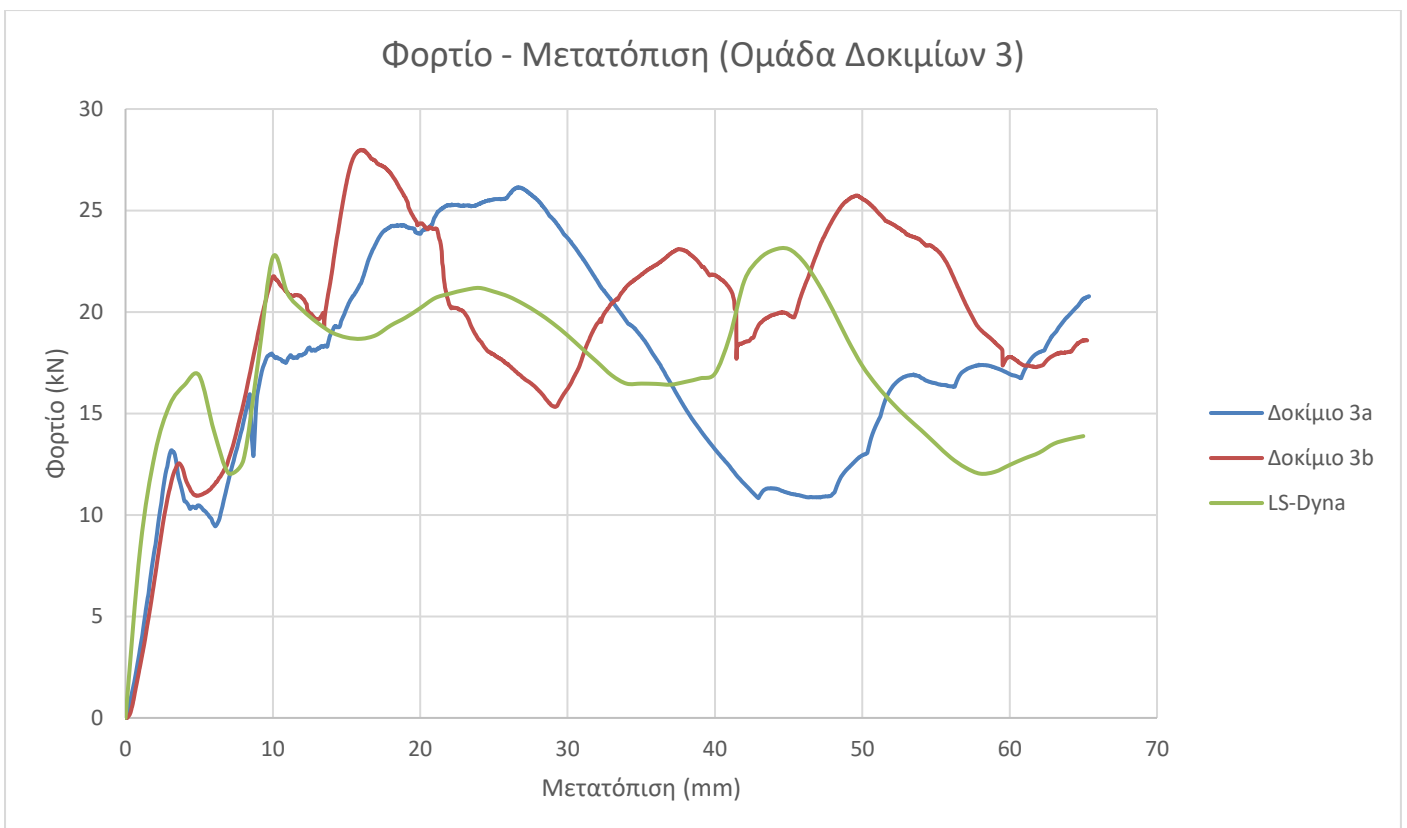
Στα επόμενα σχήματα φαίνονται τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για κάθε ομάδα δοκιμών σε σύγκριση με το αριθμητικό μοντέλο:



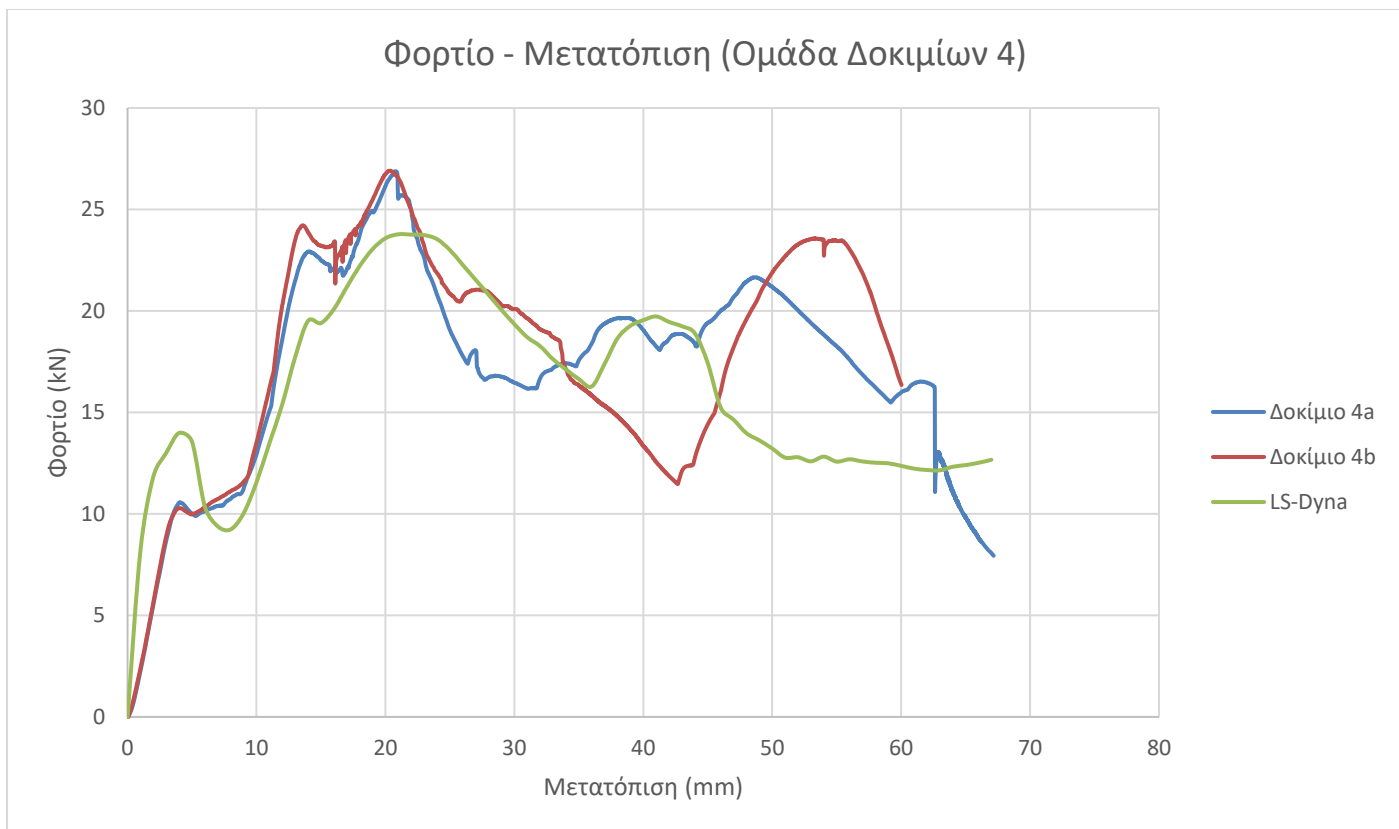
Διάγραμμα 8.1: Φορτίο συναρτήσει της μετατόπισης πρώτης ομάδας δοκιμών και αριθμητικού μοντέλου



Διάγραμμα 8.2: Φορτίο συναρτήσει της μετατόπισης δεύτερης ομάδας δοκιμών και αριθμητικού μοντέλου



Διάγραμμα 8.3: Φορτίο συναρτήσει της μετατόπισης τρίτης ομάδας δοκιμών και αριθμητικού μοντέλου



Διάγραμμα 8.4: Φορτίο συναρτήσει της μετατόπισης τέταρτης ομάδας δοκιμών και αριθμητικού μοντέλου

8.2.3. Μηχανισμός κατάρρευσης

Ξεκινώντας από τα επιλεγθέντα στιγμιότυπα κατάρρευσης των δοκιμών (για μήκη βράχυνσης 15, 30, 45, 60 mm), όπως είχαμε δει στις Εικόνες 8.1 έως 8.4. Επιλέχθηκαν κοινά στιγμιότυπα για κάθε περίπτωση φόρτισης για να είναι πιο εύκολη και η σύγκριση τόσο μεταξύ των πειραματικών δοκιμών ανά περίπτωση, όσο και προφανώς η σύγκριση πειράματος και μοντελοποίησης.

Στα δοκίμια που υπό αξονικό θλιπτικό φορτίο, είχαμε προοδευτική και ελεγχόμενη κατάρρευση όπως δείχνουν οι σχηματιζόμενες πτυχώσεις αλλά και τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης. Επιπροσθέτως, το μοτίβο της κατάρρευσης ήταν μη-αξονοσυμμετρικό, όπως το περιμέναμε για δοκίμιο τετραγωνικής διατομής. Τα υπόλοιπα δοκίμια στα οποία ασκήθηκε λοξό θλιπτικό φορτίο, η κατάρρευση ήταν κι αυτή προοδευτική και ελεγχόμενη. Οι σχηματιζόμενες πτυχώσεις (λοβοί) ήταν κι αυτές μη εκτατές. Μετρήθηκαν 5 πτυχώσεις με την τελευταία να είναι μη ολοκληρωμένη.

Η πρώτη πτύχωση εμφανίζεται για την μέγιστη τιμή του ασκούμενου φορτίο στο δοκίμιο, όπως ήταν αναμενόμενο για την αξονική θλίψη, αυτό όμως δεν ισχύει για την λοξή. Καθώς εξελίσσεται ο μηχανισμός της αξονικής κατάρρευσης η τιμή του φορτίου μειώνεται μετά την πρώτη πτύχωση, λόγω εξασθένησης της δομής του υλικού σε σύγκριση πάντα με την αρχική μέχρι μία ελάχιστη τιμή

του φορτίου. Εν συνεχεία, με την ολοκλήρωση της πρώτης πτύχωσης, η τιμή του φορτίου ξανανεβαίνει μέχρι ένα νέο μέγιστο (μικρότερο από το μέγιστο φορτίο της πρώτης πτύχωσης) και ακολουθεί παρόμοια συμπεριφορά μέχρι την ολοκλήρωση της δεύτερης πτύχωσης.

Το F_{max} στην λοξή θλίψη, εμφανίζεται αρκετά μετά την πρώτη πτύχωση και καθυστερεί να εμφανιστεί όσο αυξάνεται η κλίση του θλιπτικού φορτίου. Το τελευταίο συμβαίνει επειδή στην αρχή η άνω πλάκα θλίψης δεν συναντάει μεγάλη ποσότητα υλικού, όσο όμως εξελίσσεται η συμπίεση συναντάει όλο και περισσότερη. Επιπλέον παρατηρείται μικρότερο F_{max} στην περίπτωση της λοξής φόρτισης σε σχέση με την αξονική, κάτι που πιθανώς οφείλεται στην απόσχιση στη γωνία των σωλήνων, η οποία επεκτεινόταν για τις μεγαλύτερες κλίσεις φόρτισης των δοκιμίων. Επιπλέον, το μειωμένο F_{max} στην λοξή φόρτιση οφείλεται επειδή κατά την δημιουργία της δεύτερης πτύχωσης, το υλικό έχει εξασθενήσει, επομένως το πρόγραμμα όπως φαίνεται ήταν ικανό να το προσεγγίσει καλύτερα σε σχέση με την αξονική περίπτωση φόρτισης.

8.3. Ερμηνεία δεικτών απορρόφησης ενέργειας

8.3.1. Γενικά

Η σύγκριση της αριθμητικής προσομοίωσης με τα αποτελέσματα του πειράματος επιβεβαίωσαν την ικανοποιητική προσέγγιση της πρώτης, κυρίως όσον αφορά το μέσο φορτίο κατάρρευσης καθώς και την ενέργεια απορρόφησης.

8.3.2. Πίνακες αποτελεσμάτων δεικτών απορρόφησης ενέργειας

Στους Πίνακες 8.1 έως 8.4 φαίνονται οι δείκτες απορρόφησης ενέργειας, βάση των οποίων θα βγουν τα κατάλληλα συμπεράσματα για αντοχή σε πρόσκρουση (crashworthiness) των δοκιμίων.

Πίνακας 8.1: Δείκτες απορρόφησης ενέργειας των δοκιμίων 1a, 1b και αριθμητικού μοντέλου (dokimio_1)

Μέγεθος → Δοκίμιο ↓	EA (J)	F_m (kN)	SEA (J/gr)	F_{max} (kN)	CFE (-)
1a	999	16.7	22.5	52.2	0.32
1b	894	14.9	20.2	50.8	0.29
dokimio_1	1016	16.9	22.9	42.5	0.40
Απόκλιση 1a με dokimio_1	1.7%	1.7%	1.7%	-18.5%	24.8%
Απόκλιση 1b με dokimio_1	13.7%	13.7%	13.7%	-16.4%	35.9%

Πίνακας 8.2: Δείκτες απορρόφησης ενέργειας των δοκιμών 2a, 2b και αριθμητικού μοντέλου (dokimio_2)

Μέγεθος → Δοκίμιο ↓	EA (J)	F _m (kN)	SEA (J/gr)	F _{max} (kN)	CFE (-)
2a	1118	18.6	25.0	25.0	0.75
2b	1071	17.8	24.0	26.4	0.68
dokimio_2	1099	18.3	24.6	26.1	0.70
Απόκλιση 2a με dokimio_2	-1.7%	-1.7%	-1.7%	4.5%	-5.9%
Απόκλιση 2b με dokimio_2	2.6%	2.6%	2.6%	-1.1%	3.8%

Πίνακας 8.3: Δείκτες απορρόφησης ενέργειας των δοκιμών 3a, 3b και αριθμητικού μοντέλου (dokimio_3)

Μέγεθος → Δοκίμιο ↓	EA (J)	F _m (kN)	SEA (J/gr)	F _{max} (kN)	CFE (-)
3a	1131	18.8	25.4	26.1	0.72
3b	1118	18.6	25.2	28.0	0.67
dokimio_3	1122	18.7	25.2	23.1	0.81
Απόκλιση 3a με dokimio_3	-0.7%	-0.7%	-0.7%	-11.6%	12.3%
Απόκλιση 3b με dokimio_3	0.4%	0.4%	0.4%	-17.4%	21.6%

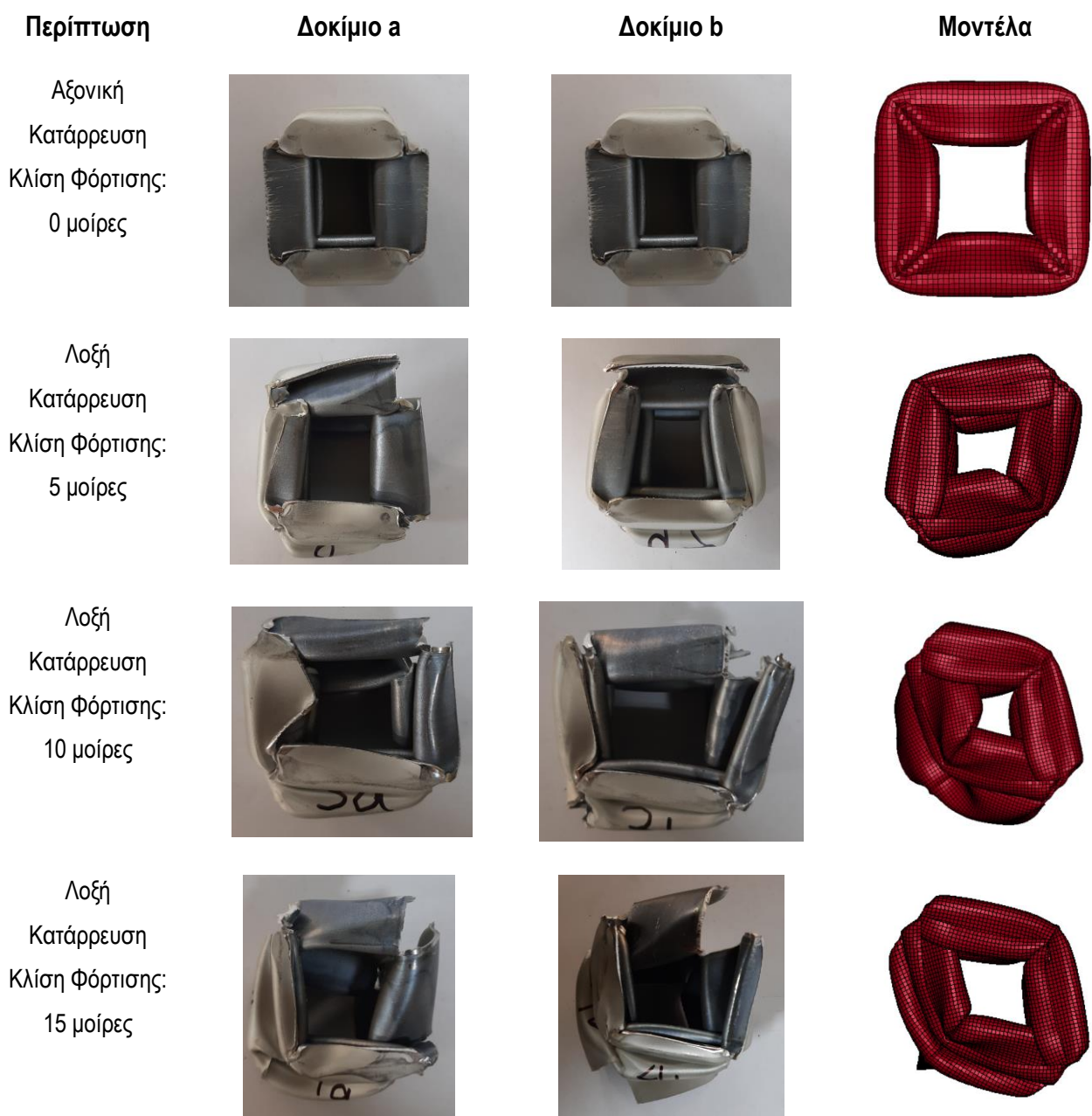
Πίνακας 8.4: Δείκτες απορρόφησης ενέργειας των δοκιμών 4a, 4b και αριθμητικού μοντέλου (dokimio_4)

Μέγεθος → Δοκίμιο ↓	EA (J)	F _m (kN)	SEA (J/gr)	F _{max} (kN)	CFE (-)
4a	1151	19.2	26.0	26.9	0.71
4b	1154	19.2	25.9	26.9	0.71
dokimio_4	1080	18.0	24.4	23.8	0.76
Απόκλιση 4a με dokimio_4	-6.2%	-6.2%	-6.2%	-11.5%	6.1%
Απόκλιση 4b με dokimio_4	-6.4%	-6.4%	-6.4%	-11.6%	5.9%

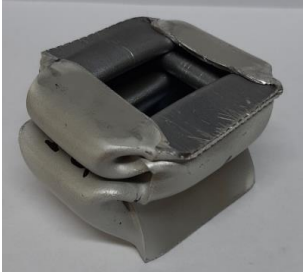
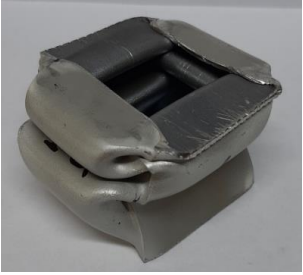
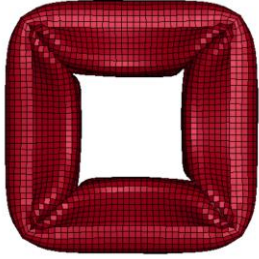


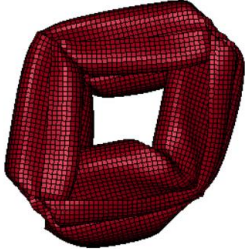




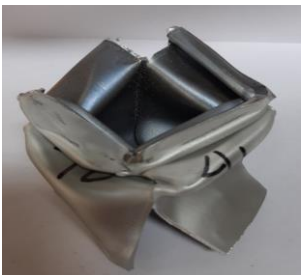

8.3.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών και μοντέλου

Μετά την παρουσίαση του συνόλου των αποτελεσμάτων από τα πειράματα και την ανάπτυξη των μοντέλων, θα πραγματοποιηθεί η σύγκριση τους. Σκοπός της σύγκρισης είναι αρχικά η διαπίστωση της ακρίβειας μεταξύ μοντέλου και δοκιμών, καθώς και η ανάδειξη και η αιτιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν οι συγκριτικές Εικόνες 8.5 (δοκίμια και μοντέλα σε κάτοψη) και 8.6 (δοκίμια και μοντέλα σε πλάγια όψη) όπως και τα συγκριτικά Διαγράμματα 8.5, 8.6, 8.7, 8.8 και 8.9. Στους πίνακες του υποκεφαλαίου 8.3.2 φαίνονται οι αποκλίσεις των δοκιμών με το μοντέλο για κάθε περίπτωση φόρτισης.

Από τις Εικόνες 8.5 και 8.6, παρατηρείται αρκετή ομοιότητα μεταξύ μοντέλων και δοκιμίων. Εκτός από τον τρόπο κατάρρευσης που σε γενικές γραμμές είναι κοινός και χαρακτηρίζεται ως μη εκτατός σχηματισμός πτυχώσεων. Μία σημαντική διαφορά των μοντέλων και των δοκιμίων είναι ότι τα πρώτα δεν παρουσίασαν καθόλου απόσχιση στις ακμές, σε αντίθεση με τα τελευταία. Η απόσχιση αυτή μπορεί να εμφανίσει σημαντική μείωση στην απόδοση του απορροφητή ενέργειας επηρεάζοντας το EA και το SEA. Το παραπάνω προφανώς είναι δεν είναι επιθυμητό, διότι η ενέργεια της σύγκρουσης που δεν θα απορροφηθεί από το υλικό, ενδεχομένως να απορροφηθεί από τους επιβάτες (αν πρόκειται για μεταφορικό επιβατικό όχημα) μειώνοντας έτσι την παθητική ασφάλεια του οχήματος.

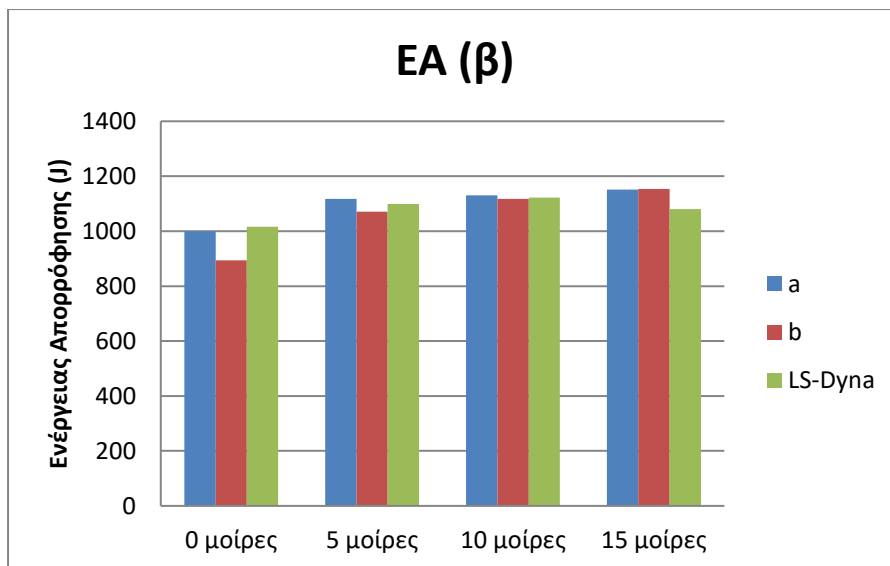


Εικόνα 8.4: Σύγκριση στιγμιότυπων τελικών μορφών δοκιμίων και μοντέλων σε κάτοψη

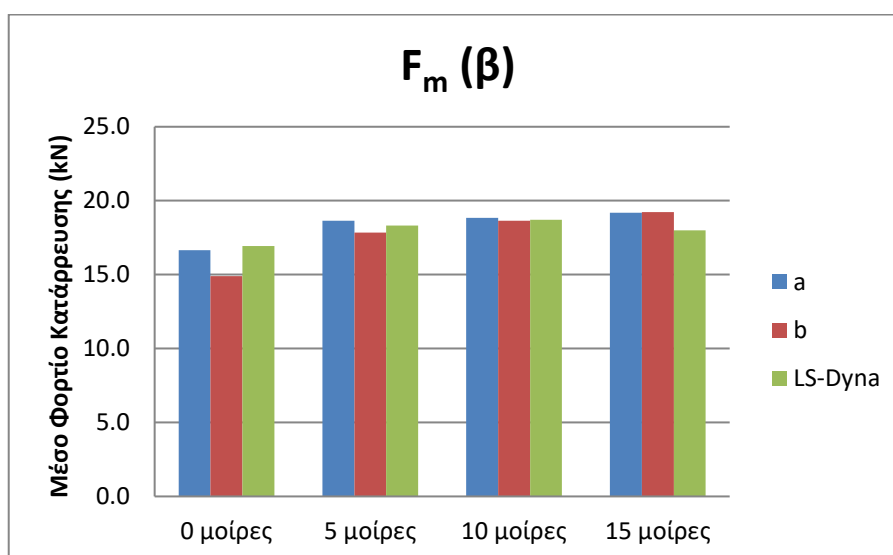
Περίπτωση	Δοκίμιο a	Δοκίμιο b	Μοντέλα
Αξονική Κατάρρευση Κλίση Φόρτισης: $\beta=0$ μοίρες			
Λοξή Κατάρρευση Κλίση Φόρτισης: $\beta=5$ μοίρες			
Λοξή Κατάρρευση Κλίση Φόρτισης: $\beta=10$ μοίρες			
Λοξή Κατάρρευση Κλίση Φόρτισης: $\beta=15$ μοίρες			

Εικόνα 8.5: Σύγκριση στιγμιότυπων τελικών μορφών δοκιμίων και μοντέλων σε πλάγια όψη

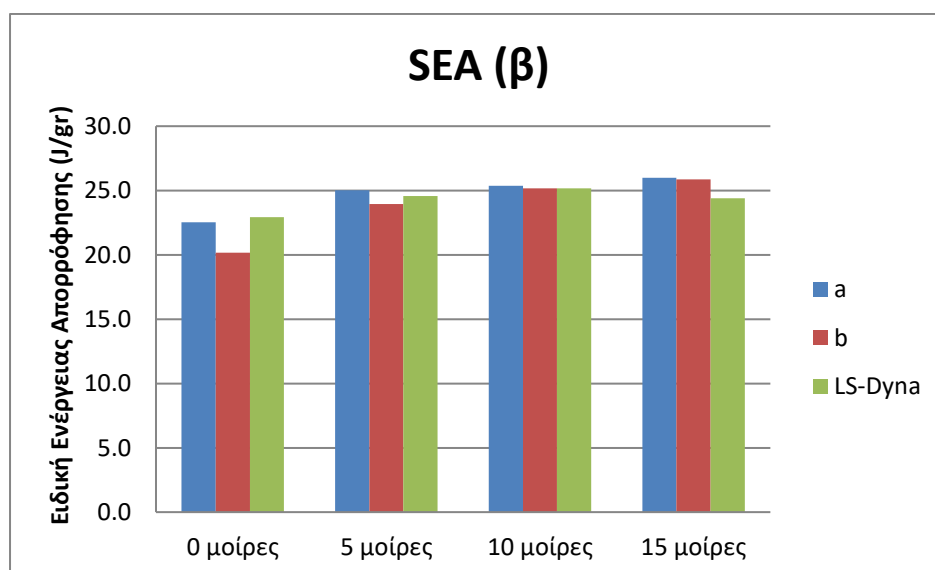
Οι παρατηρήσεις που προέκυψαν από την σύγκριση των τελικών μορφών δοκιμίων και μοντέλων, φαίνεται να επιβεβαιώνονται και από την σύγκριση των δεικτών αξιολόγησης απορροφητών ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, από τα Διαγράμματα 8.5 έως 8.9 φαίνονται αναλυτικά ο κάθε δείκτης αξιολόγησης απορρόφησης ενέργειας για κάθε περίπτωση φόρτισης. Το μόνο που φαίνεται να αποκλίνει σημαντικά είναι το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης και ο συντελεστής ομοιομορφίας φορτίο (ο οποίος όπως αναφέρθηκε εξαρτάται από το πρώτο).



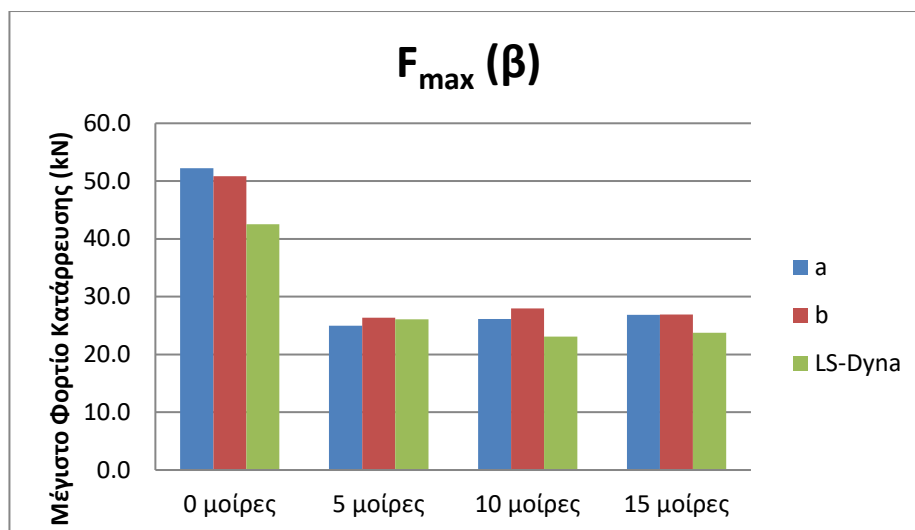
Διάγραμμα 8.5: Ενέργεια απορρόφησης συναρτήσει της κλίσης του θλιπτικού φορτίου



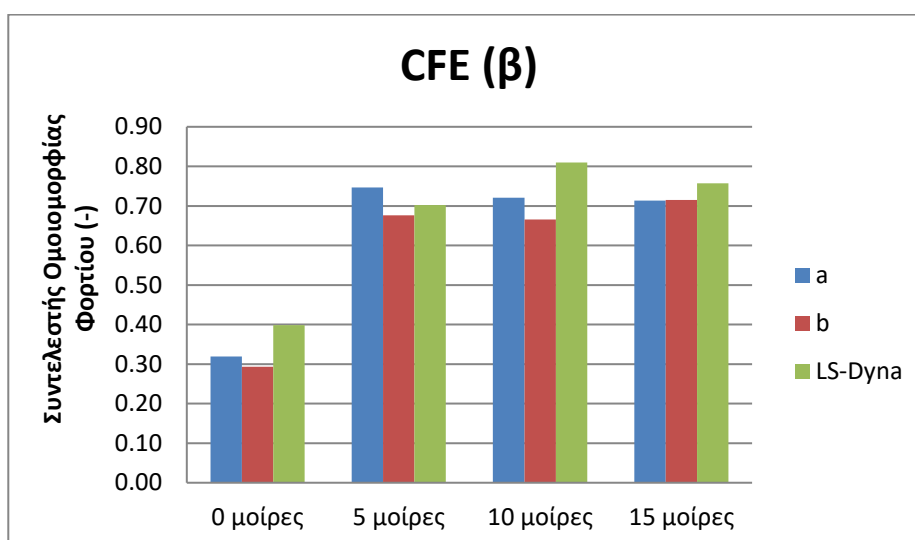
Διάγραμμα 8.6: Μέσο φορτίο κατάρρευσης συναρτήσει της κλίσης του θλιπτικού φορτίου



Διάγραμμα 8.7: Ειδική ενέργεια απορρόφησης συναρτήσει της κλίσης του θλιπτικού φορτίου



Διάγραμμα 8.8: Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης συναρτήσει της κλίσης του θλιπτικού φορτίου



Διάγραμμα 8.9: Συντελεστής ομοιομορφίας φορτίου κατάρρευσης συναρτήσει της κλίσης του θλιπτικού φορτίου

8.4. Συμπεράσματα

Κατά τη διεξαγωγή της παρούσας εργασίας εξετάστηκε η αξονική και η λοξή κατάρρευση λεπτότοιχων τετραγωνικών σωλήνων από κράμα αλουμινίου 6060 T6 τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά με τη χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων στο LS-Dyna. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικές φορτίσεις. Η πρώτη περίπτωση αφορούσε αξονική φόρτιση σε δύο δοκίμια, οι ενδιάμεσες περιπτώσεις λοξή φόρτιση υπό γωνία 5, 10 μοιρών και η τελευταία 15 μοιρών (στην περίπτωση της λοξής φόρτισης το δοκίμιο ήταν στραμμένο γύρω από τον διαμήκη του άξονα κατά 45 μοίρες).

Ως γνωστόν, αξιολογώντας το δοκίμιο για αντοχή σε πρόσκρουση αυτό γίνεται με τα χαρακτηριστικά μεγέθη δεικτών απορρόφησης ενέργειας (crashworthiness) και μέσω του

μηχανισμού κατάρρευσης. Ξεκινώντας από τα χαρακτηριστικά μεγέθη που υπολογίσαμε μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα:

- Ως προς το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης: Στην περίπτωση της αξονικής θλίψης παρατηρείται πως το F_{max} είναι σχεδόν διπλάσιο απ' το αντίστοιχο της λοξής ανεξάρτητα από την κλίση του φορτίου θλίψης, τόσο στις πειραματικές δοκιμές όσο και στην αριθμητική προσομοίωση. Το πείραμα και το πρόγραμμα είχαν αρκετά μεγάλη διαφορά στον υπολογισμό αυτού του μεγέθους, το οποίο ήταν αναμενόμενο εφόσον το LS-Dyna στις περισσότερες μοντελοποιήσεις δεν το υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια. Η απόκλιση αυτή οφείλεται ενδεχομένως στο ότι το πρόγραμμα δεν λαμβάνει υπόψη τις ατέλειες που μπορεί να έχει η δομή του δοκιμίου ή ενδεχομένως και η μηχανή.
- Ως προς το μέσο φορτίο κατάρρευσης: Όσον αφορά την αξονική φόρτιση και το πείραμα και το πρόγραμμα δεν έχουν μεγάλες διαφορές στο μέσο φορτίο κατάρρευσης. Το ίδιο ισχύει και για την λοξή φόρτιση. Γεγονός που ήταν αναμενόμενο, διότι σε αντίθεση με το F_{max} , το μέσο φορτίο προσεγγίζεται πολύ καλύτερα από το LS-Dyna. Παρατηρείται όμως αύξηση του μεγέθους αυτού συναρτήσει της κλίσης της διεύθυνσης του φορτίου.
- Ως προς την ενέργεια απορρόφησης: Οι τιμές της δεν αλλάζουν ιδιαίτερα για κάθε περίπτωση φόρτιση. Αυτό συμβαίνει επειδή η βράχυνση πραγματοποιήθηκε ως να συμπιέζεται το 60% της μάζας του δοκιμίου. Μικρή αύξηση φαίνεται να έχουν οι περιπτώσεις με μεγάλη κλίση φορτίου (10 και 15 μοίρες) σε σχέση με τις υπόλοιπες, το οποίο είναι λογικό εφόσον αυξάνεται το μήκος βράχυνσης και ταυτόχρονα με ένα αρκετά αυξημένο F_m , όσο αυξάνεται η κλίση φόρτισης.
- Ως προς την ειδική ενέργεια απορρόφησης: Επειδή η SEA είναι ανάλογη της EA τα συμπεράσματα είναι ακριβώς τα ίδια με αυτήν, εφόσον η μάζα των δοκιμίων είναι σχεδόν ίδια. Για διαφορετικές μάζες και διαφορετικά υλικά θα είχαμε διαφορετικά συμπεράσματα από τα αντίστοιχα της EA.
- Ως προς τον συντελεστή ομοιομορφίας φορτίου: Το CFE είναι αρκετά μικρός (0.3 περίπου) στην περίπτωση αξονικής θλίψης, αντιθέτως ανεβαίνει σε υπερδιπλάσιες τιμές για τα δοκίμια (0.6 έως 0.7 περίπου) στην περίπτωση της λοξής θλίψης. Για το μοντέλο ισχύει πως είναι μικρός στην αξονική φόρτιση (0.4 περίπου) και αρκετά μεγαλύτερος (0.6 έως 0.7 περίπου) στην λοξή φόρτιση. Αποτέλεσμα το οποίο είναι λογικό εφόσον το F_{max} μειώθηκε σχεδόν διπλά καθώς και το F_m αυξήθηκε στην περίπτωση αυτή.

Ως προς τον μηχανισμό κατάρρευσης, και οι πειραματικές δοκιμές και τα αριθμητικά μοντέλα, παρουσιάζουν προοδευτική και ελεγχόμενη κατάρρευσης. Ο οποίος μηχανισμός κατάρρευσης είναι ο ιδανικός για σχεδιασμό κατασκευών που απαιτείται υψηλή και ελεγχόμενη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

8.5. Μελλοντική διερεύνηση

Σκοπός στον τομέα της αξιοπιστίας για αντοχή σε σύγκρουση (crashworthiness), είναι η μείωση του βάρους, για επίτευξη της μείωσης κατανάλωσης καυσίμου, αλλά ταυτόχρονα διατηρώντας την απόδοση του οχήματος σε περίπτωση ατυχήματος. Χρησιμοποιώντας κράματα αλουμινίου, ο στόχος της μείωσης του βάρους έχει επιτευχθεί σε μεγάλο βαθμό. Με βάση το σύνολο των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας και τα συμπεράσματα που προέκυψαν, προτείνεται για μελλοντική διερεύνηση η τροποποίηση των παραμέτρων και ταυτόχρονα αναζήτηση των βέλτιστων δεικτών απορρόφησης ενέργειας. Επιπροσθέτως, μπορεί να επιτευχθεί μελέτη της μικροδομής, ώστε να αποφανθεί η καταλληλότερη για την ανάγκη μειωμένου βάρους της κατασκευής. Μία πρόταση για μελλοντική διερεύνηση είναι η σύγκριση των ιδιοτήτων crashworthiness νέων υλικών με παρόμοια γεωμετρία.

8.5.1. Τροποποίηση πειραματικών παραμέτρων

Ξεκινώντας από την τροποποίηση των παραμέτρων της πειραματικής διερεύνησης, προτείνεται η μελέτη δημιουργίας εγκοπών στις ακμές της κατασκευής (είτε σε όλες τις ακμές είτε στις μισές) ή την δημιουργία οπών στις πλευρές αυτής (είτε σε όλες τις πλευρές είτε στις μισές). Η διερεύνηση του αριθμού των οπών (σταθερής διαμέτρου) καθώς και του αντίστοιχου αριθμού εγκοπών (με σταθερό βάθος), θα ήταν ενδιαφέρουσα για την επίδραση στην αξιοπιστία του απορροφητή ενέργειας.

Επιπροσθέτως, μπορεί να μελετηθεί η αξιοπιστία του απορροφητή ενέργειας μη λεπτότοιχων κυψελοειδών δομών και οι δομές μεταβλητού πάχους. Μεγάλο εύρος της έρευνας για απορροφητές ενέργειας, αποτελεί ο τομέας των λεπτότοιχων διατάξεων με κωνικότητα, με τις τελευταίες να έχουν πολυγωνικές τομές. Τέτοιες διατάξεις με κωνικότητα επωφελοούνται από τον αριθμό ακμών και γωνιών για αυξημένη ικανότητα απορρόφησης και από την κωνική διάταξη για βελτιωμένη συμπεριφορά σε δυναμική καταπόνηση. Στις παραπάνω επιλογές μπορεί να πραγματοποιηθεί διερεύνηση συνδυαστικά, όπως για παράδειγμα σε πολυγωνικούς σωλήνες με μεταβλητό πάχος.

Όσον αφορά την αναζήτηση κατασκευής ασφαλέστερων οχημάτων εδάφους, προκύπτουν επίσης προτάσεις για έρευνα. Στο σημείο αυτό είναι πλέον επιτακτικό να ερευνηθούν και άλλες μορφές κατάρρευσης εκτός από την αξονική και την λοξή. Για τον λόγο αυτόν προτείνεται ως μελλοντικό

αντικείμενο μελέτης η ενασχόληση με την πλευρική κατάρρευση λεπτότοιχων κελυφών με σκοπό τη βελτίωση της απορρόφησης ενέργειας των τελευταίων στην περίπτωση ατυχήματος πλευρικά.

Τέλος, σχετικά με το κομμάτι που αφορά την τροποποίηση διαφόρων πειραματικών παραμέτρων, προτείνεται η διερεύνηση της επιλογής άλλου υλικού. Είναι γεγονός ότι τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το αλουμίνιο ως προς την αντοχή του σε σχέση με το βάρος του είναι και την εύκολη και οικονομική εύρεση του στην αγορά το αναδεικνύουν ως βέλτιστη λύση. Όμως, η διερεύνηση άλλου υλικού όπως το μαγνήσιο και τα ινοπλισμένα πολυμερή μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα.

8.5.2. Μελέτη μικροδομής κατά την κατάρρευση

Στην παρούσα εργασία λήφθηκαν υπόψη μόνο οι μακροσκοπικές ιδιότητες του υλικού και δεν μελετήθηκε η ακριβής συμπεριφορά των μικροσκοπικών ιδιοτήτων. Ωστόσο, η μελέτη των μικροσκοπικών χαρακτηριστικών καθώς και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την εξέλιξη της κατάρρευσης θα συμβάλει σε μία σφαιρική κατανόηση του φαινομένου και των ιδιοτήτων που το διέπουν, οπότε προτείνεται ως μελλοντική διερεύνηση για τον συγκεκριμένο τομέα. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη της μικροδομής κατά την κατάρρευση υπό δυναμική φόρτιση θα δώσει χρήσιμα αποτελέσματα στην κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς των απορροφητών ενέργειας.

8.5.3. Σύγκριση απορροφητών ενέργειας από διαφορετικό υλικό

Προτείνεται για μελλοντική διερεύνηση εναλλακτικών υλικών και η σύγκριση των ιδιοτήτων crashworthiness μεταξύ αυτών. Σαφώς για την εν λόγω πρόταση, όλα τα δοκίμια θα πρέπει να μελετηθούν υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Σκοπός αυτού είναι η πιο ορθή διεξαγωγή των συμπερασμάτων. Η συγκεκριμένη διερεύνηση θα μπορούσε να επιτευχθεί, είτε με έναν ήδη γνωστό απορροφητή ενέργειας και κάποιο υλικό που η αξιοπιστία του σε crashworthiness, δεν έχει μελετηθεί επαρκώς.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. G. Lu, T. Y., 2003. *Energy Absorption of Structures and Materials*. Cambridge: Woodhead Publishing.
2. A. Alghamdi, 2001. Collapsible impact energy absorbers: an overview. *Thin Walled Struct.* 39, pp. 189-213.
3. <https://www.newsauto.gr/news/135-ekat-thanati-se-trochea-kathe-chrono-pagkosmios/> (accessed on 27/10/2021)
4. <https://www.astynomia.gr/> (accessed on 27/10/2021)
5. <http://web.iitd.ac.in/> (accessed on 28/10/2021)
6. A. H. Hasbrook, R. M. P., 1951. *Handbook for Aircraft Accident Investigators Cooperating in Crash Injury Research*. s.l.:Cornell University Medical College.
7. <https://doi.org/10.5771/0040-117X-2020-1-1> (accessed on 28/10/2021)
8. <https://www.metalworkingworldmagazine.com/modernizing-dummy-crash-test/crashdummies/> (accessed 29/10/2010)
9. A.G. Mamalis, M. R., D.E. M., G.A. D., M.B. I., J. C., 1997. Crashworthy capability of composite material structures. *Compos. Struct.* 37, pp. 109-134.
10. K.C. Shin, J.J. L., K.H. K., M.C. S., J.S. H., 2002. Axial crush and bending collapse of an aluminum/GFRP hybrid square tube and its energy absorption capability, *Compos. Struct.* 57 pp. 279–287.
11. W. Song, M. M. W. M. M. X. W. W. D., 2000. Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tubes. *Int. J. Impact. Eng.* 24, pp. 385-401.
12. E. H. Hanefi, T. W., 1996. Axial resistance and energy absorption of externally reinforced metal tubes. *Compos. Part B Eng.* 27, pp. 387-394.
13. M. R. Bambach, M. E. X. L. Z., 2009. Composite steel - CFRP SHS tubes under axial impact. *Compos. Struct.* 87, pp. 282-292.
14. M. R. Bambach, M. E., 2007. Plastic mechanism analysis of steel SHS strengthened with CFRP under large axial deformation. *Thin Walled Struct.* 45, pp. 159-170.
15. Z. Ahmad, M. R. A. M. N. T. A. Ö. H. A., 2015. Experimental and numerical studies of fiber metal laminate (FML) thin-walled tubes under impact loading. *Advanced Structured Materials*, pp. 433-443.
16. R. D. Hussein, D. R. G. L., 2017. Cutting and crushing of square aluminium/CFRP tubes. *Compos. Struct.* 171, pp. 403-418.
17. S. R. Guillow, G. L. R. H. G., 2017. Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes. *Int. J. Mech. Sci.* 43, pp. 2103-2123.

18. T. Wierzbicki, M. S. S., 1988 Indentation of tubes under combined loading. *Int. J. Mech. Sci.* 30, pp. 229-248.
19. Y. Jing, D. C. B., 1998 The response of square cross-section tubes under lateral impact loading. *Int. J. Crashworthiness* 3, pp. 359-378.
20. G. Lu, 1993. A study of the crushing of tubes by two indenter. *Int. J. Mech. Sci.* 35, pp. 267-278.
21. N. K. Gupta, G. S. S. P. K. G., 2005. Study of lateral compression of round metallic tubes. *Thin Walled Struct.* 43, pp. 895-922.
22. P.C. Miscow, H.A. A., 1997. Mechanics of static and dynamic inversion processes. *Int J Mech.* pp.147–161.
23. A. Niknejad, M. M., 2012. Theoretical and experimental studies of the external inversion process in the circular metal tubes. *Mater. Des.* 40, pp. 324-330.
24. X. Qiu, L. H. J. G. X. Y., 2013. A three-dimensional model of circular tube under quasistatic external free inversion. *Int. J. Mech. Sci.* 75, pp. 87-93.
25. S. R. Reid, J. J. H., 1998. Transient effects in the quasi-static and dynamic internal inversion and nosing of metal tubes. *Int. J. Mech. Sci.* 40, pp. 263-280.
26. X. Yu, X. Q. T. X. Y., 1998. Analysis of the free external inversion of circular tubes based on deformation theory. *Int. J. Mech. Sci.* 100, pp. 262-268.
27. X. Huang, G. L. T. X. Y., 2002. On the axial splitting and curling of circular metal tubes. *Int. J. Mech. Sci.* 44, pp. 2369-2391.
28. X. Huang, G. L. T. X. Y., 2002. Energy absorption in splitting square metal tubes. *Thin Walled Struct.* 40, pp. 153-165.
29. W. J. Stronge, T. X. Y. W. J., 1986. Long stroke energy dissipation in splitting tubes. *Int. J. Mech. Sci.* 25, pp. 637-647.
30. T. Y. Reddy, S. R., 1986. Axial splitting of circular metal tubes. *Int. J. Mech. Sci.* 28, pp. 111-131.
31. P. Jiang, W. W. G. J. Z., 2006. Size effects in the axial tearing of circular tubes during quasi-static and impact loadings. *Int. J. Impact Eng.* 32, pp. 2048-2065.
32. S. Y. Jin, W. A. T. K., 2006. An experimental investigation into the cutting deformation mode of AA6061-T6 round extrusions. *Thin-Walled Struct.* 44, pp. 773-786.
33. J. M. Alexander, 1960. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *Q. J. Mech Appl. Math.* 13, pp. 10-15.
34. W. Abramowicz, N. Jones, Dynamic progressive buckling of circular and square tubes, *Int. J. Impact Eng.* 4 (4) (1986) 243–270.

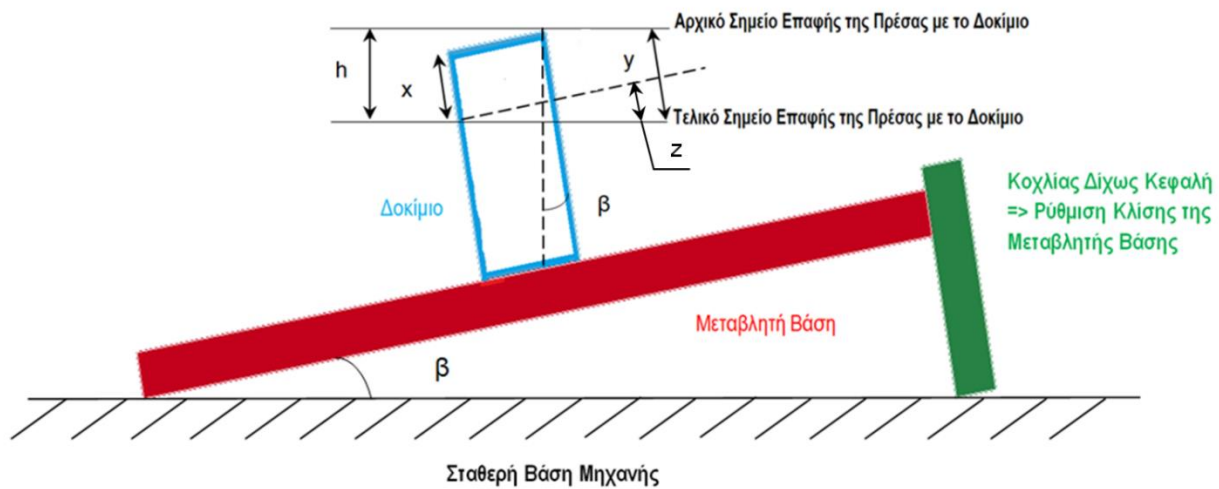
35. W. Abramowicz, N. J., 1984. Dynamic axial crushing of square tubes. *Int. J. Impact Eng.* 2, pp. 179–208.
36. T. Wierzbicki, S. B. W. A. D. B., 1992. Two folding elements model of progressive crushing of tubes. *J. Solids Struct.* 29, pp. 3269-3288.
37. B. Wang, G. L., 2002. Mushrooming of circular tubes under dynamic axial loading. *Thin Walled Struct.* 40, pp. 167-182.
38. Averill, N. S. & R. C., 2006. *Contribution of Failure Mechanisms to Crush Energy Absorption in a Composite Tube Mechanics of Advanced Materials and Structures.*
39. Z. Wang, Z. L. X. Z., 2016. Bending resistance of thin-walled multi-cell square tubes. *Thin-Walled Struct.* 107, pp. 287-299.
40. T. Tang, W. Z. H. Y. H. W., 2016. Crushing analysis of thin-walled beams with various section geometries under lateral impact. *Thin-Walled Struct* 102, pp. 43-57.
41. A. Reyes, O. H. M. L., 2004. Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: experimental and numerical study. *Int. J. Solids Struct.* 41, pp. 1645-1675.
42. S. R. Reid, T. R., 1978. Effect of strain hardening on the lateral compression of tubes between rigid plates. *Int. J. Solids Struct.* 14, pp. 213-225.
43. D. C. Han, S. H. P., 1999. Collapse behavior of square thin-walled columns subjected to oblique loads. *Thin-Walled Structures* 35.3, pp. 167-184.
44. F. Tarlochan, 2013. Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. *Thin-Walled Structures* 71, pp. 7-17.
45. Q. Gao, W. L., W. Y., W. C., "Multi-objective optimization of a tapered elliptical tube under oblique impact loading." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 231.14 (2017): 1978-1988.
46. S. E. Alkhatib, 2018. Collapse behavior of thin-walled corrugated tapered tubes under oblique impact. *Thin-Walled Structures* 122, pp. 510-528.
47. J.A. DeRuntz, P. H., 1963. Crushing of a tube between rigid plates. *J. Appl. Mech.* 30, p. 391.
48. R.G. Redwood, 1964. Discussion: Crushing of a Tube Between Rigid Plates., pp. 391-395.
49. T.Y. Reddy, S. R., 1980. Phenomena associated with the crushing of metal tubes between rigid plates. *Int. J. Solids Struct.* 16, pp. 545-562.
50. M. Avalle, L. G., 1997. Static lateral compression of aluminium tubes: strain gauge measurements and discussion of theoretical models. *J. Strain Anal. Eng. Des.* 32, pp. 335-343.
51. S.R. Reid, T. R., 1979. Effects of strain rate on the dynamic lateral compression of tubes in Proceedings 2nd Conference Mechanical Properties of Materials at High Rates of Strain.

52. S.R. Reid, T. R., 1978. Effect of strain hardening on the lateral compression of tubes between rigid plates. *Int. J. Solids Struct.* 14, pp. 213-225.
53. A. Niknejad, S. E., 2013. Theoretical and experimental. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 13, pp. 449-464.
54. T. Tran, T. Ton, 2016. Lateral crushing behavior and theoretical prediction of thin-walled rectangular and square tubes, *Compos. Struct.* 154, pp. 374–384.
55. H. Wang, J. Y., H. Liu, Y. Sun, T.X.X. Yu, 2015. Internally nested circular tube system subjected to lateral impact loading, *Thin-Walled Struct.* 91, pp. 72–81.
56. A.G. Olabi, E. M. M. H. M. G., 2008. Optimised design of nested oblong tube energy absorbers under lateral impact loading. *Int. J. Impact Eng.* 35, pp. 10-26.
57. E. Morris, A. O. M. H., 2006. Analysis of nested tube type energy absorbers with different indenters and exterior constraints, *Thin-Walled Struct.*
58. ΚΑΤΣΙΚΑΣ, Γ. Α., 2016. *Μοντελοποίηση της Μηχανικής Απόκρισης Πορωδών Υλικών με Χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων*, Θεσσαλονίκη.
59. <https://en.wikipedia.org/wiki/LS-DYNA> (accessed on 29/10/2010)
60. LSTC, LS-DYNA Applications, retrieved February 2, 2017
61. LSTC. "LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume 1" (PDF). Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Retrieved 2009-03-25.
62. www.lstc.com. (accessed on 29/10/2010)
63. www.dfe-tech.com. (accessed on 29/10/2010)
64. Al-Hassani STS, J. W. L. W., 1972. Mechanics of static and dynamic inversion processes. *J Mech Engng Sci.* pp. 370-381.
65. X. Huang, G. L. T. X. Y., 2002. On the axial splitting and curling of circular metal tubes. *Int. J. Mech. Sci.* 44, pp. 2369-2391.
66. <http://www.fgg.uni-lj.si/> (accessed on 29/10/2010)
67. Δ. Ε. Μανωλάκος, 2010. *Κατεργασίες Ι*. Αθήνα: Τυπογραφείο ΕΜΠ.
68. A. Baroutajia, M. S. A.-G. O., 2017. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments.
69. I. Mcgregor, 1983. Impact performance of aluminium structures, *in Structural Crashworthiness* (eds N. Jones and T. Wierzbicki), pp. 385–421, 1983.
70. <http://www.directindustry.com/> (accessed on 29/10/2021)
71. <http://www.azom.com/> (accessed on 30/10/2021)
72. P. Kostazos, S. L., P.E. K., D.E. M., 2021. Quasi-static axial crushing of multi-walled (spiral) aluminium tubes fabricated by roll bending: Experimental and numerical investigation, *Thin-Walled Struct.*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α. Υπολογισμός μήκους συμπίεσης για δεδομένη γωνία διεύθυνσης φορτίου β

Στην Εικόνα Α.1 απεικονίζεται το σκαρίφημα της ειδικής στήριξης του δοκιμίου για την δυνατότητα της τοποθέτησης του υπό κλίση.



Εικόνα Α.1: Σκαρίφημα και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ειδικής στήριξης του δοκιμίου

Όπου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ειδικής στήριξης του δοκιμίου είναι:

β : γωνία διεύθυνσης του θλιπτικού φορτίου (συμπίπτει με την γωνία της βάσης με τον ορίζοντα)

h : μήκος βράχυνσης

x : μικρή βάση του σχηματιζόμενου τραπεζίου από το αρχικό σημείο επαφής μέχρι το τελικό σημείο επαφής της πλάκας θλίψης με το δοκίμιο

y : μεγάλη βάση του σχηματιζόμενου τραπεζίου από το αρχικό σημείο επαφής μέχρι το τελικό σημείο επαφής της πρέσας με το δοκίμιο

z : κάθετη απόσταση μεταξύ του τελικού σημείου επαφής της πλάκας θλίψης με το δοκίμιο από την μεριά της μεγάλης βάσης και της προβολής του τελικού σημείου επαφής της πλάκας θλίψης από την μεριά της μικρής βάσης στη μεγάλη βάση

Για να είναι πιο ορθή η σύγκριση των αποτελεσμάτων, θα πρέπει να συμπιεστεί η ίδια μάζα του δοκιμίου για κάθε περίπτωση. Η μάζα που συμπιέζεται είναι το 60% της συνολικής του δοκιμίου. Με τις κατάλληλες παραδοχές:

1. Η πυκνότητα του υλικού δεν μεταβάλλεται κατά τη συμπίεση, συνεπώς αφού συμπιέζεται το 60%, συμπεραίνουμε πως συμπιέζεται το 60% του όγκου.
2. Για 60% συμπίεση του όγκου, το εμβαδόν του σχήματος (της μιας έδρας του δοκιμίου) που συμπιέζεται (ορθογώνιο για αξονική θλίψη και τραπέζιο για λοξή) θεωρούμε πως δεν μεταβάλλεται.

Ισχύει ότι το συνολικό εμβαδόν της πλευράς του δοκιμίου είναι: $E_{O\Lambda} = B_{O\Lambda} \cdot Y_{O\Lambda} \Rightarrow$

$$E_{O\Lambda} = 50mm \cdot 100mm \Rightarrow E_{O\Lambda} = 5000mm^2$$

Όπου:

$B_{O\Lambda}$: βάση του ορθογωνίου (το τμήμα του δοκιμίου που ακουμπάει την ακίνητη πλάκα της μηχανής)

$Y_{O\Lambda}$: ύψος του ορθογωνίου (το τμήμα του δοκιμίου που είναι κάθετο στην ακίνητη πλάκα της μηχανής)

Το συμπιεσμένο εμβαδόν είναι το 60% του συνολικού, το οποίο προκύπτει από τις παραδοχές, άρα:

$$E_{ΣΥΜΠ.} = 0.6 \cdot E_{O\Lambda} = 0.6 \cdot 5000mm^2 \Rightarrow E_{ΣΥΜΠ.} = 3000mm^2$$

Όταν το δοκίμιο συμπιέζεται υπό κλίση, το εμβαδόν του σχήματος που συμπιέζεται είναι τραπέζιο, δηλαδή:

$$E_{ΤΡΑΠ.} = E_{ΣΥΜΠ.} \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot (B_{ΤΡΑΠ.} + \beta_{ΤΡΑΠ.}) \cdot Y_{ΤΡΑΠ.} = 3000 \Rightarrow (x + y) \cdot 50 = 6000 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{x + y = 120} \quad (1)$$

Όπου:

$B_{ΤΡΑΠ.}$: μεγάλη βάση του τραπεζίου

$\beta_{ΤΡΑΠ.}$: μικρή βάση του τραπεζίου

ΥΤΡΑΠ.: ύψος του τραπέζιου

Αν χωρίσουμε το τραπέζιο σε εμβαδόν ορθογωνίου παραλληλογράμμου και ορθογωνίου τριγώνου τότε έχουμε:

$$E_{\text{ΠΑΡΑΛ.}} + E_{\text{ΤΡΙΓ.}} = E_{\text{ΣΥΜΠ.}} \Rightarrow B_{\text{ΠΑΡΑΛ.}} \cdot \Upsilon_{\text{ΠΑΡΑΛ.}} + \frac{1}{2} \cdot B_{\text{ΤΡΙΓ.}} \cdot \Upsilon_{\text{ΤΡΙΓ.}} = E_{\text{ΣΥΜΠ.}} \Rightarrow$$

$$50 \cdot x + \frac{1}{2} \cdot z \cdot 50 = 3000 \Rightarrow \boxed{x + \frac{1}{2} \cdot z = 60} \quad (2)$$

$$\text{Ισχύει: } \tan \beta = \frac{z}{50} \Rightarrow \boxed{z = 50 \cdot \tan \beta} \quad (3)$$

$$\text{Από τις εξισώσεις (2) και (3) έχουμε: } x + \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot \tan \beta = 60 \Rightarrow \boxed{x = 60 - 25 \cdot \tan \beta} \quad (4)$$

$$\text{Από τις εξισώσεις (4) και (1) έχουμε: } 60 - 25 \cdot \tan \beta + y = 120 \Rightarrow \boxed{y = 60 + 25 \cdot \tan \beta} \quad (5)$$

$$\text{Ισχύει: } \cos \beta = \frac{h}{y} \Rightarrow \boxed{h = y \cdot \cos \beta} \quad (6)$$

Το απαιτούμενο μήκος βράχυνσης προκύπτει από τις εξισώσεις (5) και (6) ως εξής:

$$h = (60 + 25 \cdot \tan \beta) \cdot \cos \beta \Rightarrow \boxed{h = 60 \cdot \cos \beta + 25 \cdot \sin \beta} \quad (7)$$

Επιλύοντας την εξίσωση (7) για τις γωνίες διεύθυνσης φορτίου που εφαρμόστηκαν στο πείραμα προκύπτουν και τα αντίστοιχα μήκη βράχυνσης που εφαρμόστηκαν για την συμπίεση του 60% της μάζας, τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον Πίνακα Α.1:

Πίνακας Α.1: Υπολογισμός απαιτούμενου μήκους βράχυνσης για συμπίεση του 60% της μάζας συναρτήσει της γωνίας διεύθυνσης του φορτίου

Γωνία Διεύθυνσης Φορτίου	Μήκος Βράχυνσης
β (°)	h (mm)
0	60.00
5	62.85
10	65.23
15	67.11