

**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών



**Υπολογιστική διερεύνηση τετραγωνικών σωλήνων αλουμινίου  
σε λοξή κρούση**

Διπλωματική Εργασία

Γαβριελάτος Παναγής

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Μανωλάκος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2022

## Περίληψη

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς των διατάξεων απορρόφησης κρουστικής ενέργειας απασχολεί τις τελευταίες δεκαετίες το ενδιαφέρον της βιομηχανίας των μεταφορικών μέσων για το σχεδιασμό κατασκευών χαμηλούς βάρους και υψηλής ικανότητας απορρόφησης ενέργειας με σκοπό την μείωση του βάρους των οχημάτων και την αύξηση της ασφάλειάς τους ενάντια στην κρούση. Η διπλωματική εργασία αυτή μελετά τη συμπεριφορά σωλήνων λεπτότοιχης τετραγωνικής διατομής από κράμα αλουμινίου T6-6060 τόσο ενάντια σε αξονική κρούση όσο και σε λοξή υπό γωνίες φόρτισης έως 20°. Πιο αναλυτικά, η διερεύνηση γίνεται με τη διεξαγωγή υπολογιστικών προσομοιώσεων στο λογισμικό LS-DYNA κατόπιν της δημιουργίας των μοντέλων μέσω πεπερασμένων στοιχείων. Μάλιστα, για την επικύρωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων πραγματοποιείται σχετική σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα αντίστοιχων δοκιμών αξονικής και λοξής συμπίεσης υπό οιονείστατικές συνθήκες που διεξήχθησαν στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων παράχθηκε η καμπύλη δύναμης-βράχυνσης από την οποία υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα μεγέθη αξιολόγησης της συμπεριφοράς του δοκιμίου, όπως το μέγιστο και το μέσο φορτίο, η απορροφώμενη ενέργεια καθώς και η ανηγμένη τιμή της στη μάζα του δοκιμίου και ο συντελεστής απόδοσης της φόρτισης, ενώ ακόμη παρατηρήθηκε ο τρόπος κατάρρευσης των δοκιμίων με κατάλληλα στιγμιότυπα κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης. Σκοπός των αριθμητικών προσομοιώσεων ήταν η ανάδειξη της επίδρασης της γωνίας φόρτισης στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και η σύγκριση της απόδοσης και του τρόπου κατάρρευσης μεταξύ αξονικής και λοξής κρούσης. Τέλος, παρατηρήθηκε πως οι λοξές συνθήκες φόρτισης μειώνουν τόσο το μέγιστο φορτίο όσο και την απορροφώμενη ενέργεια και μάλιστα η μείωση αυτή γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η γωνία φόρτισης.

## **Abstract**

The last decades, the transportation industry has focused its research on the behavior of energy absorbing devices in order to design low-weight structures with increased safety levels against crushes. This diploma thesis studies the behavior of thin-walled tetragonal aluminium alloy (T6-6060) tubes against both axial and oblique crush under angle of loading up to 20°. For the purpose of this thesis, numerical simulations are conducted in LS-DYNA software by creating the appropriate finite element models which are compared and validated to experimental data of quasi-static compression tests of another previous diploma thesis carried out in Manufacturing Technology Lab of NTUA. The evaluation of specimens behavior is based on the force-displacement curve from which the crashworthiness parameters are extracted, such as peak and mean force, energy absorption and the specific one corrected to specimen mass and the crushing force efficiency, while further the failure mode is also captured by collapse states. This thesis aims to show the loading angle effect on energy absorption capability and to compare the axial and oblique crushing with respect to energy absorption efficiency and failure mode stability. Finally, it is concluded that oblique loading reduces the absorbed energy compared to axial one, a trend which becomes even more intense at increased angles of loading.

# Περιεχόμενα

## Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικά Στοιχεία.....	8
1.2 Μηχανισμός Σύγκρουσης – Απορροφητές Ενέργειας.....	9
1.3 Στόχος της Εργασίας.....	11

## Κεφάλαιο 2 - Στοιχεία Θεωρίας

2.1 Ορισμοί – Συμπληρωματικές Έννοιες.....	12
2.1.1 Οριακή Ανάλυση – Μοντελοποίηση Υλικών.....	12
2.1.2 Καμπτική Ροπή στην Οριακή Ανάλυση.....	13
2.1.3 Πλαστικός αρμός.....	13
2.2 Τρόποι Κατάρρευσης.....	15
2.3 Δυναμικά Φαινόμενα.....	19
2.4 Δείκτες Κατάρρευσης.....	20
2.5 Ιστορική Ανασκόπηση.....	23
2.5.1 Υλικά Απορροφητών Ενέργειας.....	23
2.5.2 Γεωμετρικές Δομές Απορροφητών Ενέργειας.....	26
2.5.3 Τύποι Φόρτισης.....	29

## Κεφάλαιο 3 - Μοντελοποίηση μέσω Πεπερασμένων Στοιχείων

3.1 Περιπτώσεις Μελέτης.....	32
3.2 Διαδικασία Μοντελοποίησης.....	35
3.2.1 Δημιουργία Γεωμετρίας και Πλέγματος.....	35
3.2.2 Επιλογή Υλικού.....	39
3.2.3 Οριακές συνθήκες στήριξης και διεπιφανειών.....	42
3.2.4 Συνθήκες Φόρτισης.....	44
3.2.5 Χρόνος τερματισμού και καταγραφή δεδομένων.....	46
3.3 Μετα-επεξεργασία Αποτελεσμάτων Προσομοιώσεων.....	47

## Κεφάλαιο 4 - Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

4.1 Σύγκριση Πειραματικών Δοκιμών και Υπολογιστικών Προσομοιώσεων.....	48
4.2 Αξονική Φόρτιση υπό γωνία $0^\circ$ .....	50
4.3 Λοξή Φόρτιση υπό γωνία $5^\circ$ .....	52
4.4 Λοξή Φόρτιση υπό γωνία $10^\circ$ .....	55
4.5 Λοξή Φόρτιση υπό γωνία $15^\circ$ .....	58
4.6 Λοξή Φόρτιση υπό γωνία $20^\circ$ .....	61
4.7 Δείκτες Κατάρρευσης.....	64

## Κεφάλαιο 5 - Συμπεράσματα – Μελλοντικές Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα.....	72
5.2 Προτάσεις για Μελλοντική Μελέτη.....	73

Βιβλιογραφία.....	74
-------------------	----



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Η ανάγκη της βιομηχανίας επίγειων, εναέριων και θαλάσσιων μεταφορικών μέσων για το σχεδιασμό ασφαλέστερων και ελαφρύτερων κατασκευών εντείνεται διαρκώς από την επιβολή συνεχώς αυστηρότερων προδιαγραφών ασφαλείας οι οποίοι θεσπίζονται από την ανάγκη καταπολέμησης των ατυχημάτων που παρατηρούνται, των οποίων η κλίμακα συνεχώς αυξάνεται εξαιτίας της αύξησης του πλήθους των οχημάτων και της χρήσης τους. Απόρροια αυτής της ανάγκης είναι η στροφή των βιομηχανιών στη φιλοσοφία σχεδιασμού του «crashworthiness» η οποία αποσκοπεί στην αυξημένη ικανότητα απορρόφησης της κρουστικής ενέργειας που εμφανίζει μια κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα, κατά αυτή τη φιλοσοφία, οι κατασκευές σχεδιάζονται ώστε να μετατρέπουν το μεγαλύτερο δυνατό μέρος της κινητικής ενέργειας της κρούσης σε ενέργεια παραμόρφωσης για τη πλαστικοποίηση της κατασκευής αποσβένοντάς την κατά αυτό το τρόπο ώστε να μην απορροφάται από τους επιβάτες.

Παράλληλα, οι προδιαγραφές επιβάλλουν αυστηρά όρια στην διασφάλιση επαρκούς όγκου της κατασκευής με σκοπό την εξασφάλιση της ασφαλούς διεξόδου των επιβατών από αυτήν, γεγονός που επιβάλλει την αποδοτική λειτουργία της κατασκευής έναντι κρούσης. Ωστόσο, η παραπάνω στρατηγική σχεδιασμού πρέπει να συμφωνεί με τη μείωση του βάρους των οχημάτων που επιθυμούν οι κατασκευαστές με σκοπό την μείωση της κατανάλωσης καυσίμων, και επομένως ο απώτερος σκοπός είναι ο σχεδιασμός ελαφριών κατασκευών με υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Προς αυτήν την κατεύθυνση, οι σχεδιαστικές λύσεις που έχουν επικρατήσει συνοψίζονται στις ακόλουθες:

- Χρήση ελαφρύτερων υλικών και νέες εναλλακτικές.

Τα κράματα αλουμινίου και τιτανίου, τα αφρώδη υλικά χαμηλής πυκνότητας και τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες είναι υλικά που έχουν εκτενώς αντικαταστήσει τη χρήση του χάλυβα σε πλήθος δομικών μερών των οχημάτων. Το χαμηλό βάρος τους και οι σημαντικές μηχανικές τους ιδιότητες κατέστησαν πλεονεκτική τη χρήση τους σε πολλές περιπτώσεις, χωρίς ωστόσο να καθίσταται εφικτή πάντα εξαιτίας της επαρκούς αντοχής της κατασκευής, τις διαστάσεις των εξαρτημάτων και το κόστος παραγωγής τους.

- Ενσωμάτωση νέων εξαρτημάτων.

Η χρήση ειδικών συσκευών (απορροφητές ενέργειας) για την παραλαβή των κρουστικών φορτίων έχει πλέον καθιερωθεί, καθώς η ενσωμάτωσή τους προσφέρει τη δυνατότητα διζωνικής ή πολυζωνικής παραμόρφωσης της κατασκευής με αποτέλεσμα το κύριο τμήμα της – στο οποίο βρίσκονται και οι επιβάτες – να συμμετέχει κατά το δυνατόν λιγότερο στη παραλαβή κρουστικής ενέργειας. Οι απορροφητές ενέργειας αποτελούν συνήθως ελαφρές κατασκευές λεπτότοιχης διατομής ώστε να διευκολύνεται η έναρξη πλαστικοποίησής τους, οι οποίοι πολλές φορές είναι πληρωμένοι με μεταλλικούς αφρούς ή χαρακτηρίζονται από πολύπλοκη ή σύνθετη γεωμετρία με σκοπό πάντα την υψηλότερη ικανότητα απορρόφησης κρουστικής ενέργειας.

- Βελτιστοποίηση δομικού σχεδιασμού.

Χρησιμοποιείται συνδυασμός τριών τύπων βελτιστοποίησης δομικού σχεδιασμού: (α) βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης, (β) βελτιστοποίηση μορφής και (γ) βελτιστοποίηση τοπολογίας. Μελέτη βελτιστοποίησης μέσω αλλαγής τοπολογίας και διαστασιολόγησης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων έδωσε ελαφρύτερο πλαίσιο οχήματος με ίδια καμπτική δυσκαμψία και καλύτερη στρεπτική δυσκαμψία.

## **1.2 Μηχανισμός Σύγκρουσης – Απορροφητές Ενέργειας**

Κατά τη σύγκρουση ενός οχήματος η ταχύτητα του οχήματος και άρα και των επιβατών, μειώνεται δραματικά έως τη τελική ακινητοποίησή του, σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Η μεταβολή της κρουστικής κινητικής ενέργειας επιφέρει την επιβολή των αδρανειακών δυνάμεων στο όχημα και στους επιβάτες, οι οποίες είναι ανάλογες της συνολικής μάζας του συστήματος οχήματος-επιβατών και της ταχύτητας της σύγκρουσης και αντιστρόφως ανάλογη του χρονικού διαστήματος που λαμβάνει χώρα. Και οι τρεις αυτές παράμετροι συνηγούνται στην επιβολή πολύ υψηλών δυνάμεων στους επιβάτες οι οποίες είναι υπεύθυνοι για τραυματισμούς και υλικές ζημιές. Προς αποφυγή και των δυο, οι αυτοκινητοβιομηχανίες στρέφονται στο σχεδιασμό των οχημάτων κατά τρόπο ώστε αφενός να αυξάνουν τη διάρκεια του φαινομένου της παραμόρφωσης, αφετέρου να αποσβένουν ένα σημαντικό ποσοστό της μεταβολής της κινητικής ενέργειας κατά την κρούση. Αυτή η ενέργεια αποσβένεται καταναλισκόμενη προς την πλαστικοποίηση ειδικών απορροφητών ενέργειας με τελικό σκοπό την ελαχιστοποίηση της συμμετοχής της κύριας δομικής κατασκευής στην κρούση, και άρα και των επιβατών. Επομένως, προορισμός των συσκευών αυτών είναι η διάχυση της κινητικής κρουστικής ενέργειας με ελεγχόμενο και ανελαστικό τρόπο ώστε να μην μπορεί να ανακτηθεί, και αυτό γίνεται με την μετατροπή σε ενέργεια

πλαστικής παραμόρφωσης. Τα επιθυμητά λοιπόν χαρακτηριστικά που πρέπει να πληρούν οι απορροφητές ενέργειας συνοψίζονται σε:

- Μη αναστρέψιμη μετατροπή ενέργειας.

Η μετατροπή ενέργειας από τους απορροφητές ενέργειας πρέπει να γίνεται με τρόπο μη αναστρέψιμο. Να δύνανται δηλαδή οι απορροφητές ενέργειας να μετατρέπουν το μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης κινητικής ενέργειας σε μη ελαστική ενέργεια μέσω πλαστικής παραμόρφωσης ή άλλης μορφής διαδικασία διάχυσης. Αυτό είναι επιθυμητό γιατί αν η αρχική ενέργεια φόρτισης μετατρέπεται σε ελαστική παραμόρφωση, μετά το πέρας της αρχικής φόρτισης η ενέργεια θα αποδιδόταν και πάλι στην κατασκευή. Επομένως, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας είναι επιθυμητό να είναι κατά το δυνατόν μεγαλύτερη.

- Περιορισμένη και σταθερή δύναμη αντίδρασης.

Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης ενός απορροφητή ενέργειας πρέπει να διατηρείται κάτω από ένα ανώτατο όριο, και ιδανικά να παραμένει σταθερή καθ όλη τη διάρκεια της κατάρρευσης, για να περιορίζονται οι ζημιές και οι τραυματισμοί κατά την σύγκρουση. Επίσης δε, η ομαλή διακύμανσή αποτρέπει την εισαγωγή πρόσθετων αδρανειακών δυνάμεων στην όλη κατασκευή και κατά συνέπεια στους επιβάτες.

- Μεγάλη διαδρομή παραμόρφωσης.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η δύναμη κατά την κατάρρευση πρέπει να διατηρείται κάτω από ένα ανώτατο όριο. Αν ακόμα αναλογιστούμε πως η ενέργεια που απορροφάται είναι ίση με το μέτρο της δύναμης επί την μετατόπιση πάνω στην οποία δρα  $W = F \cdot \delta$ , συμπεραίνουμε πως η διαδρομή (δηλαδή η παραμόρφωση) του απορροφητή ενέργειας κατά την κατάρρευση πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλη για να απορροφάει η κατασκευή όσο το δυνατό περισσότερη ενέργεια, περιοριζόμενη ωστόσο από τις προδιαγραφές εξασφάλισης επαρκούς και ασφαλούς δομικού όγκου της κατασκευής.

- Χαμηλό βάρος και υψηλή απορροφώμενη ενέργεια.

Οι απορροφητές ενέργειας πρέπει να συνδυάζουν υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας υπό χαμηλό βάρος, δηλαδή υψηλή ειδική απορρόφηση ενέργειας η οποία ορίζεται ανηγμένη στη μάζα της συνθλιβόμενης κατασκευής. Μάλιστα, η ειδική απορρόφηση ενέργειας θεωρείται το πιο αξιόπιστο κριτήριο σύγκρισης αναφορικά με την απόδοση αυτών των συσκευών καθώς προσφέρει τη δυνατότητα σύγκρισης και αξιολόγησης της συμπεριφοράς των κατασκευών ανεξαρτήτως υλικού, γεωμετρίας και διαστάσεων.



- Χαμηλό κόστος και εύκολη εγκατάσταση.

Η παραγωγή, εγκατάσταση και συντήρηση των απορροφητών ενέργειας πρέπει να είναι εύκολη και οικονομική. Στον σημερινό ανταγωνιστικό κόσμο, ο σχεδιασμός ενός απορροφητή ενέργειας είναι πάντα περιορισμένος από τον διαθέσιμο προϋπολογισμό. Για αυτό, όλες οι προστατευτικές κατασκευές πρέπει να λειτουργούν εντός οικονομικών ορίων.

### **1.3 Στόχος της Εργασίας**

Η διπλωματική εργασία αυτή στοχεύει στην υπολογιστική διερεύνηση της συμπεριφοράς λεπτότοιχων τετραγωνικών σωλήνων αλουμινίου ενάντια σε συνθήκες αξονικής και λοξής κρούσης. Για το σκοπό αυτό, γίνεται μελέτη του τρόπου κατάρρευσης και των χαρακτηριστικών παραμέτρων απόκρισης τα οποία σχετίζονται με την αποδοτικότητα της φόρτισης και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας με στόχο τη τελική αξιολόγηση των συνθηκών φόρτισης. Η διερεύνηση πραγματοποιείται σε υπολογιστικό επίπεδο με τη διεξαγωγή αριθμητικών προσομοιώσεων με χρήση του μη-γραμμικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων του λογισμικού LS-DYNA κατόπιν της δημιουργίας των μοντέλων. Τα μοντέλα αρχικά επικυρώνονται με βάση πειραματικά δεδομένα από υπό οιονεί στατικές δοκιμές συμπίεσης των δοκιμών οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ. Τα αριθμητικά αποτελέσματα σε συνδυασμό με τα πειραματικά χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων και την τελική αξιολόγηση των δοκιμών με κυριότερη παράμετρο την ειδική απορροφώμενη ενέργεια κρούσης η οποία αποδίδει με τον πιο ασφαλή τρόπο την αποδοτικότητα μια κατασκευής ενάντια σε κρούση. Η διερεύνηση στοχεύει αρχικά στη σύγκριση της συμπεριφοράς σε συνθήκες αξονικής και λοξής φόρτισης και στην ανάδειξη της επίδρασης της γωνίας φόρτισης επί της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας και της πλαστικοποίησης της διατομής υπό ευσταθή τρόπο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Στοιχεία Θεωρίας

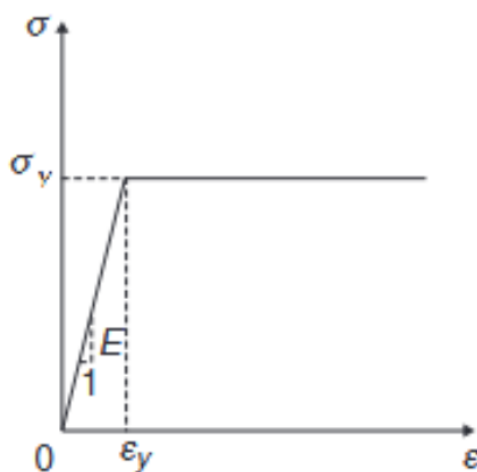
#### 2.1 Ορισμοί – Συμπληρωματικές Έννοιες

##### 2.1.1 Οριακή Ανάλυση – Μοντελοποίηση Υλικών

Στην οριακή ανάλυση των λεπτότοιχων κελύφων που συναντώνται στις εφαρμογές απορροφητών ενέργειας υπό κρουστική καταπόνηση τα όλκιμα υλικά προσεγγίζονται συχνά ως ελαστικά – ιδεωδώς πλαστικά υλικά. Η θεώρηση αυτή προσεγγίζει τα υλικά με γραμμική ελαστική συμπεριφορά στην ελαστική τους περιοχή, ενώ η πλαστική περιοχή θεωρείται υπό σταθερή τάση ίση με το όριο διαρροής του υλικού (Σχήμα 1). Η θεώρηση αυτή βρίσκει ικανοποιητική αντιστοίχιση σε υλικά με σχεδόν μηδενικό εκθέτη κράτνυσης ή γενικότερα σημαντικά χαμηλό. Άλλες πιο ρεαλιστικές προσεγγίσεις της πλαστικής περιοχής από την έναρξη της διαρροής έως την αντοχή συγκαταλέγονται μεταξύ άλλων στην γραμμική κράτνυση και στην εκθετική κράτνυση με εκθέτη  $n$ , κατά τις οποίες υποθέτεται γραμμική και εκθετική αύξηση του ορίου διαρροής με την παραμόρφωση. Κατά συνέπεια, η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης στην ελαστική και στην πλαστική περιοχή για ένα ελαστικό-ιδεωδώς πλαστικό υλικό προσεγγίζεται ως:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, 0 < \varepsilon < \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}$$

$$\sigma = \sigma_y, \varepsilon_y < \varepsilon < \varepsilon_f$$



**Σχήμα 1:** Ιδεατή καμπύλη  $\sigma$ - $\varepsilon$  για ελαστικό-ιδεωδώς πλαστικό υλικό

## 2.1.2 Καμπτική Ροπή στην Οριακή Ανάλυση

Κατά την οριακή ανάλυση θεωρούμε πως σε έναν φορέα που υπόκειται σε κάμψη επιτυγχάνεται η μετάβαση από την ελαστική φόρτιση στην πλήρη πλαστική φόρτιση όταν σε αυτόν ασκηθεί ροπή κάμψης πλήρους πλαστικοποίησης  $M_p$ . Η τελευταία αποτελεί τη τιμή της καμπτικής ροπής η οποία θα επιφέρει την πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής, και υπό την υπόθεση ιδεωδώς πλαστικού υλικού, αυτή θα επιφέρει ομοιόμορφη κατανομή θλιπτικών και εφελκυστικών ορθών τάσεων ίσων κατά απόλυτη τιμή με το όριο διαρροής  $\sigma_Y$  του υλικού. Μάλιστα, κατά τη πλήρη πλαστικοποίηση της καμπτόμενης διατομής, ο πλαστικός ουδέτερος άξονας μπορεί να μετατοπισθεί παράλληλα ως προς τον αρχικό ουδέτερο άξονα που αποτελεί και τον κεντροβαρικό άξονα της διατομής. Πιο συγκεκριμένα μάλιστα, ο πλαστικός ουδέτερος άξονας μεταπίπτει σε θέση ώστε να διαχωρίζει την πλήρη πλαστικοποιημένη διατομή σε θλιβόμενη και εφελκυσόμενη περιοχή ίσων εμβαδών και κατά συνέπεια ίσων με το μισό εμβαδό της συνολικής διατομής. Απόρροια του παραπάνω, αποτελεί η ικανοποίηση των συνθηκών ισορροπίας του φορέα για την οποία η θεώρηση ιδεωδώς πλαστικής συμπεριφοράς θα επιφέρει την ανωτέρω θέση του πλαστικού ουδέτερου άξονα. Έτσι λοιπόν, η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης μπορεί να οριστεί ως:

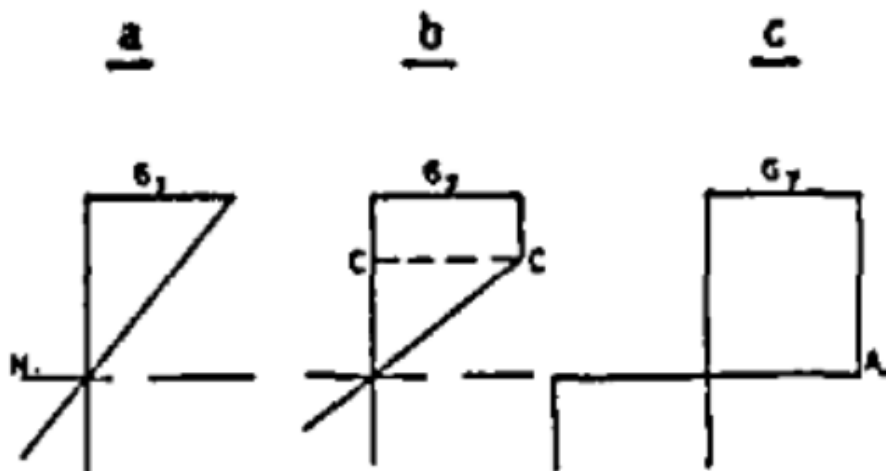
$$M_p = \sigma_0(A_1h_1 + A_2h_2)$$

, όπου  $A_1$  και  $A_2$  τα εμβαδά της εφελκυσόμενης και θλιβόμενης πλήρως πλαστικοποιημένων τμημάτων της διατομής ώστε  $A_1=A_2=A/2$ , και  $h_1$  και  $h_2$  οι αποστάσεις των κέντρων βάρους τους από τον πλαστικό ουδέτερο άξονα, ενώ ως  $\sigma_0$  λαμβάνεται το ισοδύναμο όριο διαρροής το οποίο για γραμμικούς φορείς ταυτίζεται με το όριο σε μονοαξονικό εφελκυσμό  $\sigma_Y$ , ενώ σε επιφανειακούς φορείς με  $2\sigma_Y/\sqrt{3}$  όπως προκύπτει από το κριτήριο διαρροής Von Mises.

## 2.1.3 Πλαστικός Αρμός

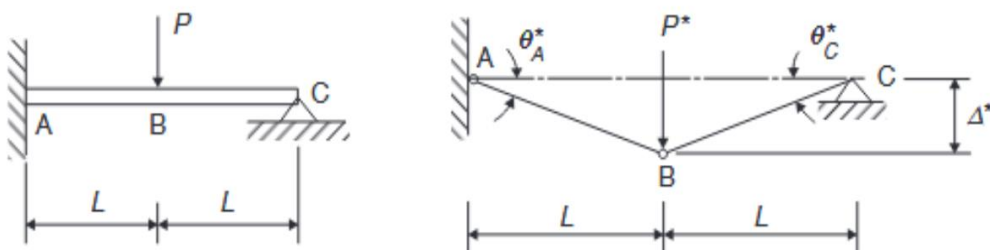
Κατά την καμπτική φόρτιση με ροπή  $M$  μικρότερη από τη ροπή διαρροής  $M_Y$ , η οποία λογαριάζεται ως εκείνη η οποία επιφέρει στις ακρότατες ίνες όπου συναντώνται οι μέγιστες ορθές τάσεις τάση ίση με το όριο διαρροής  $\sigma_Y$ , ολόκληρη η διατομή φορτίζεται στην ελαστική περιοχή. Όταν η ασκούμενη καμπτική ροπή γίνει ίση με την ροπή διαρροής  $M_Y$  τότε στο σημείο μέγιστης τάσης η τάση γίνεται ίση με το όριο διαρροής και αρχίζει να ξεκινά η διαρροή της διατομής. Με περαιτέρω αύξηση της καμπτικής ροπής  $M$  σε μεγαλύτερες τιμές αλλά μικρότερης της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης  $M_p$  όλο και μεγαλύτερο μέρος της διατομής αρχίζει να πλαστικοποιείται καταπονούμενη από τάση ίση με το όριο διαρροής, ενώ το εσωτερικό τμήμα της διατομής εξακολουθεί να φορτίζεται ελαστικά. Η συνεχώς αυξανόμενη ροπή  $M$  προκαλεί την επέκταση του εξωτερικού

πλαστικοποιημένου τμήματος προς το εσωτερικό της διατομής συρρικνώνοντας τον ελαστικό πυρήνα ολοένα και περισσότερο. Όταν η ροπή  $M$  φτάσει τη ροπή πλήρους πλαστικοποίησης  $M_P$  τότε ολόκληρη η διατομή έχει πλαστικοποιηθεί και συμπεριφέρεται σαν πλαστικός κόμβος. Ο παραπάνω μηχανισμός δημιουργίας πλαστικών κόμβων (πλαστικών αρμών) παριστάνεται ακολούθως από τα διαδοχικά στάδια (α), (β) και (γ).



**Σχήμα 2:** Μηχανισμός δημιουργίας πλαστικών κόμβων: (α)  $M < M_Y$ , (β)  $M_Y < M < M_P$ , (γ)  $M = M_P$

Ο πλαστικός αρμός σαν μηχανισμός διαφέρει από την άρθρωση καθώς δεν επιτρέπει ελεύθερη περιστροφή χωρίς τριβή, αλλά θεωρούμε πως παρουσιάζεται μια σταθερή ανθιστάμενη ροπή στην περιστροφή, με τιμή της πλήρους πλαστικοποίησης ( $M_P$ ). Με την εισαγωγή πλαστικών αρμών σε έναν στατικά ορισμένο φορέα δημιουργείται ένας κινηματικός μηχανισμός και έτσι έχουμε δημιουργία μετατοπίσεων στον αρχικά ακίνητο και απαραμόρφωτο φορέα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.



**Σχήμα 3:** Μηχανισμός κατάρρευσης δοκού με το άκρο A πακτωμένο, το άκρο C με απλή στήριξη και δημιουργία πλαστικού αρμού στο κέντρο της (σημείο B)

Το παραπάνω είναι γνωστό ως μηχανισμός κατάρρευσης και για να δημιουργηθεί πρέπει για κάθε βαθμό στατικής αοριστίας να προστεθεί ένας επιπλέον πλαστικός αρμός. Η θέση και το πλήθος των πλαστικών αρμών σε έναν φορέα εξαρτάται από την γεωμετρία του και την κατανομή των φορτίων πάνω σε αυτόν. Για τις δικές μας ανάγκες θεωρούμε ότι οι αρμοί περιορίζονται σε σημεία στην περίπτωση γραμμικών φορέων ή σε γραμμές στην περίπτωση επιφανειακών φορέων.

## 2.2 Τρόποι Κατάρρευσης

Κατά την πλαστικοποίηση και συμπίεση ενός λεπτότοιχου σωλήνα υπό κρούση, η διατομή του εμφανίζει πλαστική κατάρρευση σχηματίζοντας πλαστικούς αρμούς οι οποίοι από την κάμψη αναδιπλώνονται σχηματίζοντας πτυχώσεις. Οι τρόποι κατάρρευσης των λεπτότοιχων σωλήνων κυκλικής διατομής ήταν οι πρώτοι που μελετήθηκαν στα πλαίσια διερεύνησης των τρόπων κατάρρευσης των υλικών. Σύμφωνα με τα προκύπτοντα ερευνητικά συμπεράσματα οι τρόποι κατάρρευσης συνοψίζονται σε τέσσερις συνολικά και εξαρτώνται από τη γεωμετρία της διατομής, τις διαστάσεις όπως η εξωτερική διάμετρος, το μήκος και το πάχος τοιχώματος του σωλήνα, τη σύσταση και τη μικροδομή του φορτιζόμενου υλικού. Έτσι λοιπόν, οι τέσσερις τρόποι κατάρρευσης είναι:

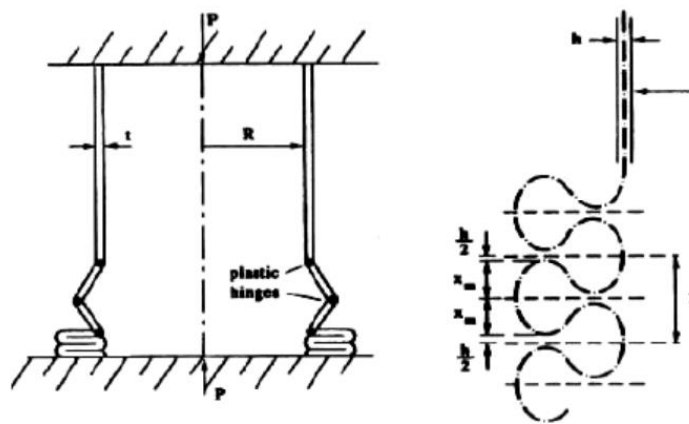
- Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης
- Μη-αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης
- Μικτός τρόπος κατάρρευσης
- Κατάρρευση μέσω λυγισμού Euler

Στην αξονοσυμμετρική κατάρρευση (σχήμα 4) ο σωλήνας παραμορφώνεται κατά εκτατό τρόπο σχηματίζοντας συμμετρικούς λοβούς κυκλικής γεωμετρίας και μεγαλύτερης διαμέτρου από την αρχική διάμετρο του δοκιμίου. Αυτό οφείλεται στην έκταση που υφίσταται ο σωλήνας κατά την παραμόρφωσή του, με αποτέλεσμα την αύξηση της διαμέτρου του. Η αξονοσυμμετρική κατάρρευση αποτελεί έναν ελεγχόμενο και ευσταθή τρόπο κατάρρευσης εξαιτίας της προοδευτικής εξέλιξής του. Μάλιστα, χαρακτηρίζεται από την υψηλότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μεταξύ των υπολοίπων τρόπων. Πιο συγκεκριμένα, το έργο που χρειάζεται για να δημιουργηθεί μία τέτοια αναδίπλωση μπορεί να χωρισθεί σε δύο μέρη, το ένα μέρος αφορά την κάμψη του ελάσματος γύρω από τους πλαστικούς αρμούς (hinges) και το άλλο την έκταση του υλικού μεταξύ των αρμών (σχήμα 5). Για χάρη απλότητας οι ελαστικές

παραμορφώσεις, η αλληλεπίδραση κάμψης-εφελκυσμού και η κράτυση του υλικού αμελούνται, ενώ θεωρούμε άκαμπτο-ιδεωδώς πλαστικό υλικό.



**Σχήμα 4:** Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης



**Σχήμα 5:** Μοντέλο δημιουργίας πλαστικών αρμών κατά Alexander (αριστερά) και αναδίπλωσης στρώσεων κατά Wierzbicki-Abramowicz (δεξιά)

Στην μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση (σχήμα 6) ο σωλήνας παραμορφώνεται κατά μη-εκτατό τρόπο διατηρώντας δηλαδή την περίμετρο της διατομής του σταθερή αλλά μεταβάλλοντας κατά αυτόν τον τρόπο το γεωμετρικό της σχήμα. Έτσι λοιπόν, μπορεί να μεταπίπτει σε ελλειψοειδή διατομή με δυο λοβούς (2D diamond), σε τριγωνοειδή διατομή με τρεις λοβούς (3D diamond) ή σε τετραγωνοειδή διατομή με τέσσερις λοβούς (4D diamond). Λόγω της αλλαγής γεωμετρίας υποβάθρου όμως κάθε λοβός σχηματίζεται περιστραμμένος κατά τον

άξονα του ύψους σε σχέση με τον προηγούμενο. Η γωνία περιστροφής τους ( $\varphi$ ) εξαρτάται από την διατομή του λοβού υπό την σχέση  $\varphi = \pi n$  (rad) , όπου  $n$  το πλήθος των σχηματισμένων ακμών στον λοβό. Η μη-αξονοσυμμετρική κατάρρευση αποτελεί έναν ελεγχόμενο και ευσταθή επίσης τρόπο κατάρρευσης εξαιτίας της προοδευτικής εξέλιξής της χαρακτηριζόμενη ωστόσο από ελαφρά χαμηλότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας συγκριτικά με τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης. Τέλος, λιγότερες προσεγγίσεις του μηχανισμού σχηματισμού των πλαστικών αρμών έχουν αναπτυχθεί συγκριτικά με την αξονοσυμμετρική κατάρρευση.



**Σχήμα 6:** Μη-αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης

Στο μικτό τρόπο κατάρρευσης (σχήμα 7) ο σωλήνας παραμορφώνεται αρχικά σχηματίζοντας αξονοσυμμετρικούς λοβούς και έπειτα μη-αξονοσυμμετρικούς συνδυάζοντας κατά αυτό το τρόπο τους δυο παραπάνω τρόπους κατάρρευσης. Σε γενικές γραμμές, η μορφή μη-αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης διαμαντιού συμβαίνει για λόγο διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος ( $D/t$ ) μεγαλύτερο του 80. Για  $D/t$  μικρότερο του 50 και λόγο ύψους προς πάχος ( $L/t$ ) μικρότερους του 2 παρατηρείται κατάρρευση αξονοσυμμετρικής μορφής, ενώ για το ίδιο  $D/t$  αλλά με  $L/t$  μεγαλύτερο του 2 παρατηρείται μικτή μορφή κατάρρευσης. Τέλος, και αυτός ο τρόπος αποτελεί έναν ελεγχόμενο και ευσταθή επίσης τρόπο κατάρρευσης εξαιτίας της προοδευτικής εξέλιξής της χαρακτηριζόμενος από χαμηλότερη απορρόφηση ενέργειας από ότι ο αξονοσυμμετρικός τρόπος αλλά υψηλότερη από ότι ο μη-αξονοσυμμετρικός.



**Σχήμα 7:** Μικτός τρόπος κατάρρευσης

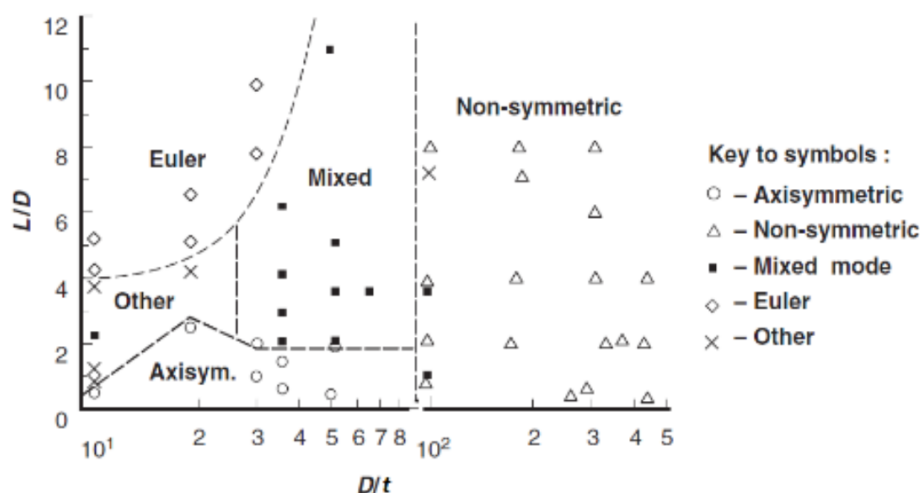
Η κατάρρευση κατά λυγισμό Euler (σχήμα 8) εμφανίζεται σε δοκίμια μεγάλου μήκους συγκριτικά με την διάμετρο και το πάχος τοιχώματος. Είναι πιθανόν μια κατάρρευση η οποία προοδεύει αρχικά εκτατά ή μη να μετατραπεί σε λυγισμό. Ο λυγισμός Euler επιφέρει τη λιγότερη απορρόφηση ενέργειας από όλους τους προηγούμενους τρόπους κατάρρευσης, καθώς αποτελεί έναν ασταθή και μη-ελεγχόμενο τρόπο κατάρρευσης στον οποίο το δοκίμιο εμφανίζει ολικό λυγισμό και αναδίπλωση γύρω από έναν κεντρικό πλαστικό αρμό.



**Σχήμα 8:** Κατάρρευση κατά λυγισμό Euler



Τέλος, η εξάρτηση των τρόπων κατάρρευσης από τις διαστάσεις της εξωτερικής διαμέτρου, του μήκους και το πάχος τοιχώματος του σωλήνα παριστάνονται στο ακόλουθο σχήμα που έχει συνταχθεί από πειραματικά δεδομένα ερευνών από την ανοιχτή βιβλιογραφία. Παρατηρείται πως η μεγάλη διάμετρος, το αυξημένο πάχος και το μικρό μήκος συνηγορούν σε έναν αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης, ενώ αντιθέτως μεγάλες διαμέτροι, μικρά πάχη τοιχώματος και μεγάλα μήκη προδιαθέτουν την εμφάνιση λυγισμού Euler.



**Σχήμα 9:** Εξάρτηση τρόπου κατάρρευσης από τους λόγους  $D/t$  και  $L/D$  για σωλήνες αλουμινίου

## 2.3 Δυναμικά Φαινόμενα

Στην μελέτη της κατάρρευσης σωλήνων εκτός από την αρχική και τελική παραμόρφωση πρέπει να ληφθεί υπόψιν το φορτίο και το ιστορικό της παραμόρφωσης. Είναι λογικό λοιπόν να ξεκινάει η διερεύνηση με τη διεξαγωγή οιονεί στατικών δοκιμών, για τρεις λόγους. Πρώτον, γιατί η πειραματική διάταξη είναι απλούστερη από αυτή για τη δοκιμή κρούσης, δεύτερον γιατί μας επιτρέπει να παρατηρούμε το ιστορικό της παραμόρφωσης με σχετική ευκολία και τρίτον επειδή περιορίζει αρκετά την συμβολή δυναμικών φαινομένων κατά την κρούση, επιτρέποντάς μας να τα αμελήσουμε. Για παράδειγμα αν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος η κατακόρυφη ταχύτητα της κεφαλής που προκαλεί την κατάρρευση κυμαίνεται μεταξύ 3-5mm ανά λεπτό, για μία κατασκευή με χαρακτηριστικό μήκος 100mm, η ταχύτητα των 3 mm/min παράγει ολικό ρυθμό παραμόρφωσης της τάξης των  $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , που μπορεί να θεωρηθεί στατικό φορτίο. Στο σχήμα 10 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των τεχνικών δοκιμής ανάλογα με τον ρυθμό παραμόρφωσης.

STRAIN RATE, s <sup>-1</sup>	COMMON TESTING METHODS	DYNAMIC CONSIDERATIONS	
10 <sup>7</sup>	<b>HIGH VELOCITY IMPACT</b> -Explosives -Normal plate impact -Pulsed laser -Exploding foil -incl. plate impact (pressure-shear)	<b>SHOCK-WAVE PROPAGATION</b>	<b>INERTIAL FORCES IMPORTANT</b>
10 <sup>6</sup>			
10 <sup>5</sup>	<b>DYNAMIC-HIGH</b> -Taylor anvil tests -Hopkinson Bar -Expanding ring	<b>SHEAR-WAVE PROPAGATION</b>	
10 <sup>4</sup>			
10 <sup>3</sup>			
10 <sup>2</sup>	<b>DYNAMIC-LOW</b> High-velocity hydraulic, or pneumatic machines; cam plastometer	<b>PLASTIC-WAVE PROPAGATION</b>	
10 <sup>1</sup>			
10 <sup>0</sup>	<b>QUASI-STATIC</b> Hydraulic, servo-hydraulic or screw-driven testing machines	<b>MECHANICAL RESONANCE IN            SPECIMEN AND MACHINE            IS IMPORTANT</b>	<b>INERTIAL FORCES NEGLIGIBLE</b>
10 <sup>-1</sup>			
10 <sup>-2</sup>			
10 <sup>-3</sup>			
10 <sup>-4</sup>			
10 <sup>-5</sup>	<b>CREEP AND STRESS-            RELAXATION</b> -Conventional testing machines -Creep testers	<b>TESTS WITH CONSTANT CROSS-            HEAD VELOCITY STRESS THE            SAME THROUGHOUT LENGTH OF            SPECIMEN</b>	
10 <sup>-6</sup>			
10 <sup>-7</sup>			
10 <sup>-8</sup>			
10 <sup>-9</sup>			

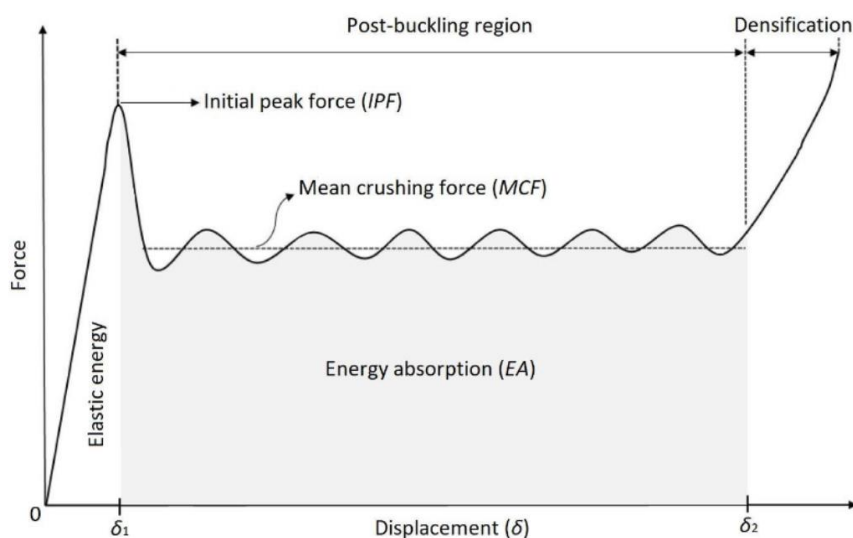
**Σχήμα 10:** Κατηγοριοποίηση των τεχνικών δοκιμής ανάλογα με τον ρυθμό παραμόρφωσης

## 2.4 Δείκτες Κατάρρευσης

Για την μελέτη της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας των υλικών μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης που δέχονται κατά τη κρούση, εκτός από το τρόπο κατάρρευσης αξιολογείται ακόμα και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης από το οποίο εξάγονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη απορρόφησης ενέργειας που περιλαμβάνουν το μέγιστο και το μέσο φορτίο κατάρρευσης, την απορροφώμενη και την ειδική απορροφώμενη ενέργεια και το συντελεστή απόδοσης της δύναμης κατάρρευσης. Η εκτίμηση αυτών των δεικτών γίνεται μέσω του διαγράμματος δύναμης-μετατόπισης, ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της οποίας παριστάνεται στο ακόλουθο σχήμα. Όπως παρατηρούμε, η δύναμη κατάρρευσης αρχικά παρουσιάζει την μέγιστη δύναμη (Initial Peak Force - IPF) η οποία σηματοδοτεί την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης του δοκιμίου. Έπειτα, κατά τη πρόοδο

της κατάρρευσης η δύναμη κρούσης κυμαίνεται γύρω από τη μέση δύναμη κατάρρευσης (Mean Crushing Force - MCF) με τοπικά μέγιστα και ελάχιστα τα οποία χαρακτηρίζουν τον σχηματισμό λοβών κατά τη κατάρρευση. Τέλος, η ασκούμενη δύναμη μπορεί να παρουσιάσει μια απότομη αύξηση εξαιτίας της προσπάθειάς της να συμπιέσει την πλήρως πλαστικοποιημένη δομή κατάρρευσης. Έτσι λοιπόν, ως μέγιστη δύναμη κατάρρευσης IPF ορίζεται ως η μέγιστη δύναμη για την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης.

$$IPF = \max F(\delta)$$



**Σχήμα 11:** Τυπική καμπύλη δύναμης-μετατόπισης κατά την κρούση

Ως απορροφώμενη ενέργεια (Energy Absorption - EA) κατά την κρούση ορίζεται το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη δύναμη-μετατόπισης δηλαδή το απαιτούμενο έργο για την πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου η οποία υπολογίζεται ως:

$$EA = \int_0^{\delta_2} F(\delta) d\delta$$

, όπου  $\delta_2$  η μέγιστη μετατόπιση δηλαδή η μέγιστη συμπίεση του δοκιμίου στο τέλος της κρούσης.

Ως ειδική απορροφώμενη ενέργεια (Specific Energy Absorption - SEA) κατά την κρούση ορίζεται το ποσό της απορροφώμενης ενέργειας ανά μονάδα μάζας της κατασκευής και υπολογίζεται ως:

$$SEA = EA/m$$

Ως μέση δύναμη κατάρρευσης (Mean Crushing Force - MCF) ορίζεται η παραμένουσα δύναμη κατά την πλαστική παραμόρφωση η οποία αν ασκούταν σταθερά θα επέφερε την ίδια απορροφώμενη ενέργεια κατά την κρούση και έτσι υπολογίζεται ως:

$$MCF = EA/\delta_2$$

Τέλος, ως συντελεστής απόδοσης της δύναμης κατάρρευσης (Crushing Force Efficiency - CFE) ορίζεται ο λόγος της μέσης δύναμης προς τη μέγιστη δύναμη κατάρρευσης ως:

$$CFE = MCF/IPF$$

Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός απορροφητή ενέργειας για να χαρακτηριστεί ως αποδοτική διάταξη κατά την κρούση είναι η μεγάλη απορρόφηση ενέργειας και η μεγάλη αντίστοιχα μέση δύναμη κατάρρευσης, ενώ ακόμα υψηλή ειδική ενέργεια κατάρρευσης θα αύξανε την αποδοτικότητα του απορροφητή καθώς θα συνδύαζε υψηλή απορρόφηση ενέργειας υπό χαμηλό βάρος που είναι επιθυμητό στο πλήθος των κατασκευών. Μάλιστα, η ειδική απορροφώμενη ενέργεια είναι ο πλέον αξιόπιστος δείκτης κατάρρευσης για σύγκριση ανόμοιων κατασκευών έναντι κρούσης, όπως λ.χ. κατασκευών διαφορετικής γεωμετρίας και διατομής, διαφορετικών διαστάσεων ή διαφορετικού υλικού. Ακόμη, η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης είναι επιθυμητό να είναι υψηλή καθώς αυτό θα επιτρέψει μια υψηλή μέση δύναμη και κατά συνέπεια υψηλή απορρόφηση ενέργειας, όμως όχι παράλογα υψηλή καθώς ενδέχεται η κατασκευή σε μια τέτοια περίπτωση να μην καταφέρει να παραμορφωθεί πλαστικά και άρα να μην αποσβέσει ποσά της κρουστικής ενέργειας. Τέλος, ο συντελεστής απόδοσης της δύναμης κατάρρευσης επίσης επιθυμείται να είναι υψηλός και όσο πλησιέστερα στην μονάδα καθώς αυτό σημαίνει αφενός υψηλή απορρόφηση ενέργειας εξαιτίας υψηλής μέσης δύναμης κατάρρευσης, αφετέρου η μικρή διαφορά μεταξύ μέγιστης και μέσης δύναμης κατά την κατάρρευση θα σήμαινε μικρά αδρανειακά φορτία προς παραλαβή στους επιβάτες.

## 2.5 Ιστορική Ανασκόπηση

### 2.5.1 Υλικά απορροφητών ενέργειας

Η ανάγκη για ασφαλέστερα οχήματα έχει αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα για την μελέτη και τη βελτίωση των απορροφητών ενέργειας. Οι έρευνες πάνω στους απορροφητές ενέργειας είναι και σήμερα εκτενείς, καθώς ο κλάδος εξαπλώνεται μεταξύ άλλων σε μελέτες νέων υλικών και γεωμετριών στην προσπάθεια βελτιστοποίησης των κατασκευών έναντι κρούσης. Η ανάδειξη της σημασίας των απορροφητών ενέργειας μελετήθηκε και αναδείχθηκε πρώτα τη δεκαετία του 1940 στο τομέα της αεροναυπηγικής από τον De Haven [1]. Η μελέτη ανέδειξε πως κυριότερη αιτία τραυματισμών κατά τη σύγκρουση οφείλεται στο φορτίο που αναπτύσσεται και παραλαμβάνεται από τους επιβάτες προτείνοντας έτσι τη χρήση ειδικών διατάξεων όπως οι απορροφητές ενέργειας. Η πρώτη θεωρητική μελέτη για τη μέση δύναμη κατάρρευσης έγινε από τον Alexander [2] το 1960 πάνω σε λεπτότοιχους σωλήνες χάλυβα. Το μοντέλο που θεωρήθηκε βασίστηκε στην υπόθεση σχηματισμού ευθέων αναδιπλώσεων για αξονοσυμμετρική κατάρρευση με τους λοβούς κάθετους στον άξονα του κελύφους. Αργότερα, οι Abramowicz και Wierzbicki [3] επέκτειναν την θεώρηση του Alexander για χαλύβδινους σωλήνες τετραγωνικής διατομής σε συνδυασμό με πειραματικές δοκιμές προς επαλήθευση. Με το πέρασμα του χρόνου ήρθε η ανάγκη για βελτίωση των μηχανισμών απορρόφησης ενέργειας ως προς το βάρος και το κόστος παραγωγής. Έτσι επήλθε η μελέτη και άλλων υλικών, εκτός του χάλυβα, για την κατασκευή μηχανισμών απορρόφησης ενέργειας.

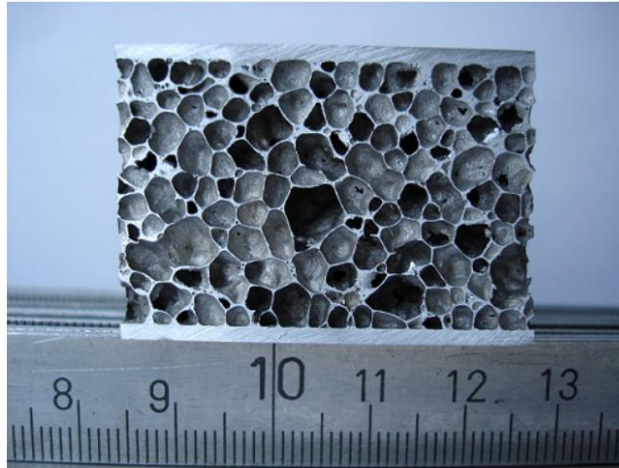
Οι Langseth και Hopperstad [4] διερεύνησαν το 1996 πειραματικά την αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων κελύφων τετραγωνικής διατομής από αλουμίνιο σε οιονεί στατικές και δυναμικές συνθήκες φόρτισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν πως σε δυναμικές συνθήκες φόρτισης εμφανίστηκε μικτός τρόπος κατάρρευσης ενώ ακόμη η μέση δύναμη κατάρρευσης και η απορροφώμενη ενέργεια εμφανίστηκαν σε μεγαλύτερα επίπεδα από ότι στις οιονεί στατικές συνθήκες φόρτισης. Ακόμη, στην ίδια μελέτη διερευνήθηκε και η εισαγωγή ατελειών υπό τη μορφή μιας αρχικά εισαγόμενης παραμόρφωσης και συμπεράνθηκε πως οι σωλήνες με αρχική παραμόρφωση κατάφεραν να φτάσουν σε μεγαλύτερη τελική παραμόρφωση συγκριτικά με τα αρχικά απαραμόρφωτα δοκίμια, καταφέροντας έτσι να πετύχουν μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας. Αργότερα, οι δύο τους μαζί με τον Jensen [5] το 2005 αποπειράθηκαν να προσομοιώσουν και υπολογιστικά στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων LS-Dyna τους ίδιους τύπους λεπτότοιχων κελυφών. Από την έρευνά τους εξήχθησαν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για την απορροφούμενη ενέργεια και τη μέγιστη και μέση δύναμη που εμφανίζονται σε διάφορους τρόπους κατάρρευσης των υπό εξέταση δοκιμίων.

Την τελευταία δεκαετία η πρόοδος των τεχνολογιών στις υπολογιστικές και πειραματικές τεχνικές μηχανικών δοκιμών καθώς και στις τεχνολογίες κατασκευής και παραγωγής, έχει οδηγήσει την έρευνα πάνω στους απορροφητές

ενέργειας να στραφεί στην μελέτη πιο καινοτόμων υλικών, δομών και τρόπων φόρτισης. Το υλικό κατασκευής ενός απορροφητή ενέργειας επιλέγεται βάσει κάποιων προδιαγραφών όπως οι μηχανικές του ιδιότητες, το κόστος πρώτης ύλης, το κόστος και η ευκολία επεξεργασίας του καθώς και η ευκολία ενσωμάτωσης του σε μια κατασκευή. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή απορροφητών ενέργειας είναι μεταλλικές λεπτότοιχες δομές από χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ή κράματα αλουμινίου. Αυτό συμβαίνει λόγω του σχετικά εύκολου τρόπου παραγωγής, του χαμηλού κόστους, της ευκολίας εγκατάστασης αυτών των δομών και της υψηλής ικανότητάς τους προς απορρόφηση ενέργειας κατά τη πλαστική παραμόρφωση.

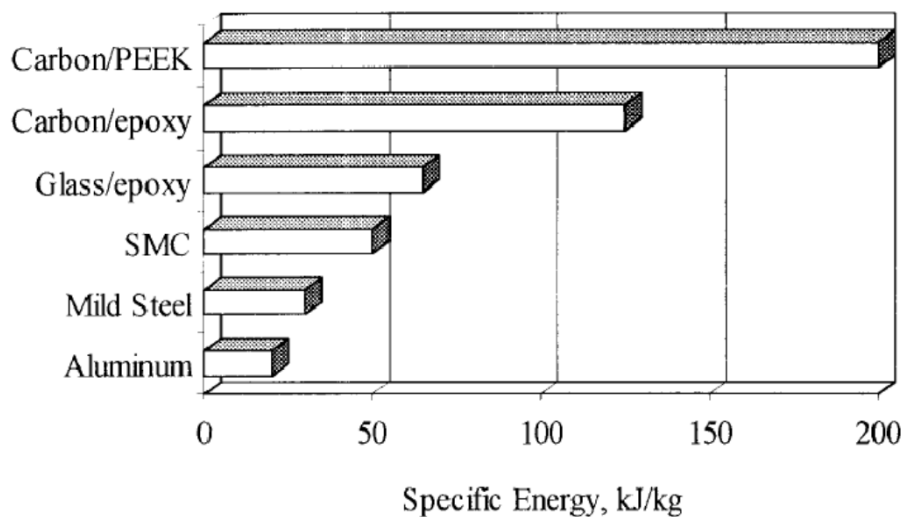
Η διάχυση ενέργειας στις μεταλλικές κατασκευές και στις κατασκευές από σύνθετα υλικά είναι σημαντικά διαφορετική. Η πλαστική συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στο ρυθμό παραμόρφωσης. Τέτοια υλικά παρουσιάζουν αύξηση της τάσης διαρροής όσο ο ρυθμός παραμόρφωσης αυξάνεται. Η ευαισθησία αυτή ενός υλικού αποτελεί θετική συνιστώσα, δεδομένου ότι επιτρέπει στο υλικό να επιτύχει μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης υπό δυναμική φόρτιση [6]. Η ολκιμότητα των μεταλλικών κατασκευών τους επιτρέπει να διαχέουν την ενέργεια μέσω πλαστικής παραμόρφωσης, ενώ απορροφητές ενέργειας που κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά είναι ψαθυρές κατασκευές και διαχέουν ενέργεια μέσω διαφορετικών μηχανισμών όπως η διαστρωματική αποκόλληση (delamination), η θραύση ινών και η θλάση μήτρας [7].

Πιο καινοτόμες διατάξεις μεταλλικού απορροφητή ενέργειας είναι οι απορροφητές με μεταβαλλόμενο πάχος τοιχώματος (FGT) [8] και τύπου sandwich [9] αποτελώντας εξαιρετικά ελαφρές κατασκευές με πολύ καλές ιδιότητες αντοχής και απορρόφησης ενέργειας, αλλά με μεγαλύτερο κόστος παραγωγής από αυτό των λεπτότοιχων συμβατικών απορροφητών ενέργειας. Χαρακτηριστική επίσης μελέτη μεταλλικού απορροφητή ενέργειας τύπου sandwich ήταν αυτή του Crupi [10] στην οποία ο προς διερεύνηση απορροφητής ενέργειας που εξετάστηκε αποτελούταν από μεταλλικά φύλλα αλουμινίου που περιείχαν εσωτερικά αφρό αλουμινίου ή αλουμίνιο σε κυψελοειδή μορφή. Τα πειράματα που διεξήχθησαν υπό οιονεί στατικές συνθήκες έδειξαν πως αμφότερες οι εξεταζόμενες διατάξεις εμφάνισαν υψηλά επίπεδα απορροφώμενης ενέργειας υπό χαμηλό βάρος. Απορροφητές σταδιακά μεταβαλλόμενου πάχους μελετήθηκαν από τον Li [11] υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης ενώ παράλληλα με την πειραματική δοκιμή διεξήχθη και προσομοίωση κάνοντας χρήση του μη-γραμμικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-Dyna. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν πως παρά τις δυναμικές συνθήκες επιτυγχάνεται σταδιακή παραμόρφωση. Επιπλέον, συγκρινόμενοι με τους απορροφητές ομοιόμορφου πάχους τοιχώματος, οι απορροφητές σταδιακά μεταβαλλόμενου πάχους παρουσίασαν μειωμένη αρχική μέγιστη φόρτιση IPF.



**Σχήμα 12:** Μεταλλικός απορροφητής αλουμινίου τύπου sandwich [10]

Εκτός των μεταλλικών απορροφητών, τα σύνθετα υλικά επιπλέον έχουν συγκεντρώσει το ερευνητικό ενδιαφέρον στη χρήση του ως υλικά απορροφητών ενέργειας κατά την κρούση και αυτό γιατί παρουσιάζουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, ειδική αντοχή, καμπτική δυσκαμψία και ιδιότητες απορρόφησης ενέργειας, ενώ όπως παριστάνεται στο σχήμα 13 φαίνεται μάλιστα πως απορροφούν περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τα μεταλλικά υλικά ανα μονάδα μάζας [12].



**Σχήμα 13:** Τυπικές τιμές ειδικής ενέργειας για διάφορα υλικά [12]

Η λειτουργία των σύνθετων υλικών κατά την απορρόφηση ενέργειας είναι διαφορετική από αυτήν των όλκιμων υλικών, καθώς καταρρέουν με μηχανισμούς θραύσης όπως αποκόλληση, σπάσιμο ινών ή ρηγμάτωση μήτρας. Οι λόγοι που η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη σε εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας, σε

σχέση με τα όλκιμα υλικά, είναι επειδή τα σύνθετα υλικά είναι δυσκολότερα στην κατασκευή, έχουν χαμηλή ανακυκλωσιμότητα και υψηλότερο κόστος. Τέλος παρουσιάζουν ανισότροπες ιδιότητες, γεγονός που δυσχεραίνει το σχεδιασμό και την ανάλυσή τους.

Έτσι, η σύγχρονη τάση που προσπαθεί να υιοθετηθεί είναι η αξιοποίηση υβριδικών κατασκευών ως διατάξεις απορρόφησης ενέργειας, οι οποίες θα συνδυάζουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των μεταλλικών και των σύνθετων υλικών με απώτερο σκοπό την αυξημένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας υπό χαμηλό βάρος και υπό μια προοδευτική κατάρρευση με σχετικά χαμηλή μέγιστη απαιτούμενη δύναμη για την ενεργοποίησή της. Η γενική μορφή που παρουσιάζουν οι υβριδικές διατάξεις είναι είτε λεπτότοιχοι μεταλλικοί σωλήνες που συνδυάζονται με σωλήνες από σύνθετα υλικά είτε μεταλλικοί σωλήνες ενισχυμένοι με συγκολλημένες ίνες. Με αυτό τον τρόπο συνδυάζονται οι επιθυμητές ιδιότητες κάθε υλικού, δηλαδή ο υψηλός λόγος αντοχής-βάρους που παρουσιάζουν τα σύνθετα και η προοδευτική κατάρρευση με έντονη πλαστική παραμόρφωση που χαρακτηρίζει τα μεταλλικά υλικά.

Ο Borja [13] ασχολήθηκε με την πειραματική μελέτη των υβριδικών απορροφητών υπό μορφή λεπτότοιχων σωλήνων σε αξονική κατάρρευση υπό οιονεί στατικές συνθήκες φόρτισης. Τα δοκίμια κυκλικής διατομής που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατασκευασμένα από σύνθετο υλικό με θερμοπλαστική μήτρα ενισχυμένα εσωτερικά με σωλήνες αλουμινίου. Αυτό το υβριδικό υλικό παρουσιάζει καλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας αλλά ασυνήθιστη συμπεριφορά κατά την κατάρρευσή του. Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας έδειξαν επίσης ότι η απόδοση απορρόφησης ενέργειας της υβριδικής διάταξης είναι μεγαλύτερη από την απόδοση του αθροίσματος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

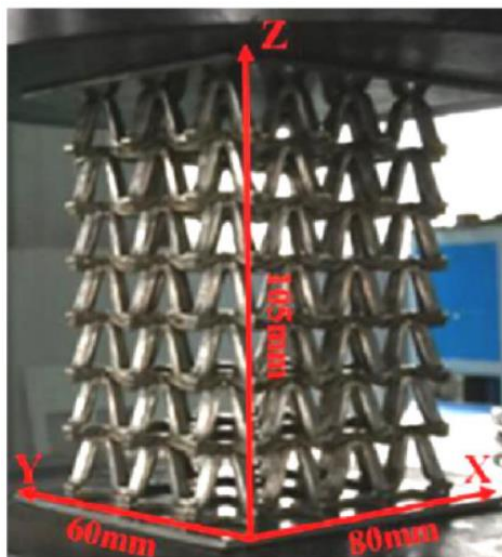
## **2.5.2 Γεωμετρικές δομές απορροφητών ενέργειας**

Πέραν του υλικού κατασκευής καθοριστικό ρόλο κατά το σχεδιασμό παίζει και η γεωμετρία της δομής. Η γεωμετρία αποτελεί αντικείμενο πολλών μελετών χάρη στο πλήθος επιλογών που δημιουργούνται για τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Σημαντικός παράμετρος σχεδιασμού αποτελεί το πάχος του απορροφητή ενέργειας. Ως προς αυτή την παράμετρο η συνηθέστερη επιλογή στην βιομηχανία είναι οι λεπτότοιχες δομές. Εκτός αυτών, πληθώρα μη λεπτότοιχων δομών μελετάται σήμερα για να καθοριστεί αν τέτοιου τύπου δομές παρουσιάζουν πιο επιθυμητή συμπεριφορά κατά την κατάρρευση.

Ένα παράδειγμα είναι οι αυξητικές διατάξεις (auxetic structures, σχήμα 14) οι οποίες λεπταίνουν κατά πλάτος όταν συμπιέζονται και εκτείνονται όταν εφελκύνονται. Αυτή η διαδικασία είναι ακριβώς αντίθετη από αυτή των συμβατικών διατάξεων και συνεπακόλουθό της είναι η εμφάνιση αρνητικού λόγου Poisson. Τέτοιου είδους διατάξεις περιγράφονται στη βιβλιογραφία, όπου

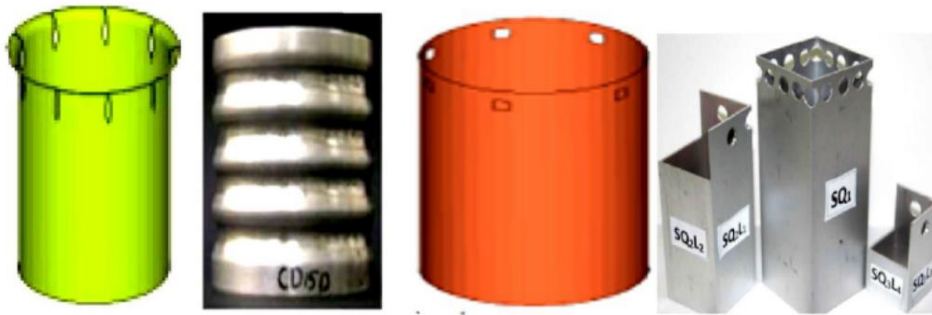


συμπερασματικά φαίνεται να έχουν μικρότερη αρχική μέγιστη φόρτιση και μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας [14]. Επιπλέον, η ασκούμενη στη διάταξη δύναμη παραμένει σχετικά σταθερή κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης.



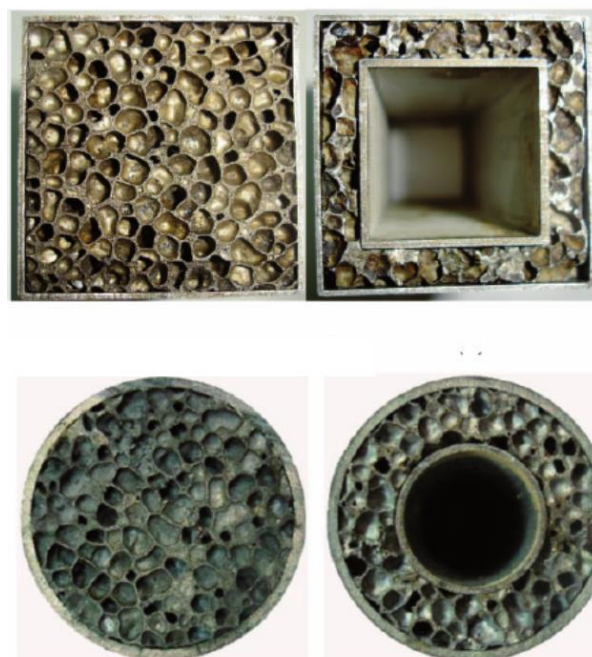
**Σχήμα 14:** Παράδειγμα αυξητικής διάταξης αρνητικού λόγου Poisson [14]

Μια άλλη δομική παρέμβαση για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του απορροφητή ενέργειας κατά την κατάρρευση είναι η δημιουργία ατελειών στη δομή. Αυτές οι ατέλειες αποτελούν σημεία συγκέντρωσης τάσεων και συνεπώς σημεία εκκίνησης της κατάρρευσης του απορροφητή. Οι λόγοι για τους οποίους δημιουργούνται αυτές οι παρεμβάσεις είναι αφενός για να σταθεροποιηθεί η διαδικασία κατάρρευσης και αφετέρου για να ελαττωθεί η αρχική μέγιστη φόρτιση κατά τη σύγκρουση. Η βιβλιογραφία αναφέρει διάφορες μορφές παρέμβασης στη δομή του απορροφητή όπως τομές, αυλακώσεις/εγκοπές, οπές και ακανόνιστο τελείωμα (σχήμα 15). Τα ευρήματα όλων των μελετών που αναφέρουν τη χρησιμοποίηση τέτοιας κατηγορίας μορφών παρέμβασης συμφωνούν στο γεγονός ότι υφίσταται μια αξιόλογη θετική επίδραση στην απόκριση κατά την κατάρρευση και στην απόδοση απορρόφησης ενέργειας. Οι Lu και Ha [15] μελέτησαν ακόμη την επίδραση εισαγωγής καθ' ύψος αυλακώσεων σε κελύφη κλειστής διατομής, καθώς και σε συνδυασμούς αυτών με άλλες τροποποιήσεις για την ενίσχυση των τεμαχίων, καταλήγοντας πως η προσθήκη των καθ' ύψος αυλακώσεων είχε ως αποτέλεσμα αύξηση στην ειδική ενέργεια απορρόφησης των δοκιμίων από 10% έως 90% σε σχέση με τις αντίστοιχες περιπτώσεις για απολύτως ευθεία δοκίμια, ενώ η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης αποδόθηκε μειωμένη διευκολύνοντας την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης γεγονός που καθιστά την εφαρμογή τους συχνή και ως διατάξεις triggering.



**Σχήμα 15:** Παραδείγματα μορφών δομικής παρέμβασης σε απορροφητές ενέργειας [15]

Επιπλέον, οι λεπτότοιχες διατάξεις απορροφητών ενέργειας με πλήρωση αφρού έχουν μελετηθεί εκτενώς καθώς έχουν αποδειχθεί ως διατάξεις που διατηρούν τα επίπεδα απορροφώμενης ενέργειας σε υψηλά επίπεδα υπό χαμηλή παράλληλα μάζα. Πιο αναλυτικά, προς αυτή τη κατεύθυνση το υλικό του αφρού πλήρωσης συνηθίζεται να είναι υλικό χαμηλής πυκνότητας το οποίο μπορεί να προκύψει από ενίσχυση με ίνες πολυαμιδίου [16-19], από φελλό [20-21], από αφρό πολυουρεθάνης [22] ή από άνθρακα-νανοπολυουρεθάνη [23], καθώς επίσης και από μεταλλικό αφρό [24]. Τα παραπάνω υλικά έχουν βρει ευρεία χρήση ως πληρωτικά υλικά των κελύφων απορροφητών καθώς λόγω της χαμηλής πυκνότητάς τους παραμορφώνονται σε μεγάλο βαθμό υπό σταθερό φορτίο κατά τη κατάρρευση απορροφώντας έτσι σημαντικά ποσοστά ενέργειας.



**Σχήμα 16:** Παραδείγματα πλήρωσης με αφρό τετραγωνικών και κυκλικών κελύφων

Ο μεταλλικό και ο πολυμερής αφρός είναι αυτοί που έχουν συγκεντρώσει την υψηλότερη συχνότητα χρήσης σε τέτοιες εφαρμογές με πολλές δυνατότητες απορρόφησης ενέργειας λόγω της προβλέψιμης απόκρισης κατά την κατάρρευση. Το βάρος και η αποδοτικότητά τους σαν πληρωτικά υλικά τους καθιστούν πρακτικούς και κατάλληλους για διάφορες εφαρμογές όπως λ.χ. τα επιβατικά οχήματα.

Από την ανοιχτή βιβλιογραφία έχει διαπιστωθεί ότι η μηχανική συμπεριφορά του αφρού εξαρτάται από τη μικροδομή των κυψελών (μέγεθος και τοπολογία), τη πυκνότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού του αφρού. Η μηχανική αντοχή αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας [25-26], ενώ η απόκρισή τους παρουσιάζει διαφορές μεταξύ οιονεί-στατικών και δυναμικών συνθηκών φόρτισης καθώς η ευαισθησία στο ρυθμό παραμόρφωσης είναι σημαντική λόγω της επίδρασής της στην πυκνότητα του αφρού [27-28] και στη πίεση του παγιδευμένου αέρα μέσα στις κυψέλες [29].

### 2.5.3 Τύποι φόρτισης

Το είδος της φόρτισης κατά την κρούση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των λεπτότοιχων κατασκευών και στον τρόπο κατάρρευσης που πρόκειται να εμφανιστεί. Οι πιο σημαντικοί τρόποι φόρτισης είναι η αξονική κρούση, η πλευρική ή εγκάρσια και η λοξή, ενώ μπορεί να εμφανιστεί και συνδυασμός των παραπάνω. Η αξονική φόρτιση συνήθως αποδίδει τη μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας καθώς συνοδεύεται από τα μεγαλύτερα επίπεδα αναφορικά με τη μέγιστη και τη μέση δύναμη κατάρρευσης έως και 10% [30].



**Σχήμα 17:** Αξονική φόρτιση λεπτότοιχου τετραγωνικού κελύφους

Δεδομένου ότι τα αξονικά φορτισμένα κελύφη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές αξιοπιστίας σύγκρουσης (crashworthiness) στο όχημα, κατά τις οποίες το σύστημα διαχείρισης κατάρρευσης υποβάλλεται τόσο σε πλάγια όσο

και σε αξονική φόρτιση, έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες για την ανάλυση και την αξιολόγηση της απορροφητικής συμπεριφοράς διαφόρων κατασκευαστικών λεπτότοιχων στοιχείων κάτω από πλάγια φορτία (oblique loading). Οι απαιτήσεις ασφαλείας για τα οχήματα απαιτούν τη σχεδίασή του έτσι ώστε να αντέχει ένα πλάγιο φορτίο με γωνία έως  $30^\circ$  προς τον διαμήκη άξονα [31]. Γενικά, η πλάγια φόρτιση προκαλεί την κάμψη του σωλήνα, ενώ υποβάλλεται σε κάποια μορφή προοδευτικής αναδίπλωσης που τελικά πιθανόν να εξελιχθεί σε μια ολική κάμψη (global bending). Αρκετές έρευνες έχουν διεξαχθεί για την ανάλυση και εκτίμηση της συμπεριφοράς απορρόφησης ενέργειας υπό λοξή φόρτιση. Η λοξή φόρτιση προκαλεί κάμψη στις σωληνοειδείς διατάξεις, ενώ παράλληλα αυτές υπόκεινται σε μια μορφή προοδευτικής αναδίπλωσης. Αυτό σταδιακά θα αναπτυχθεί σε μια γενικευμένη μορφή λυγισμού, κάτι που μειώνει ιδιαίτερα την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Η τάση ανάπτυξης γενικευμένου λυγισμού και οι παράγοντες που την ενισχύουν έγινε αντικείμενο μελέτης σε διάφορες έρευνες[32]. Στη βιβλιογραφία έχει μελετηθεί εκτενώς η συμπεριφορά σε λοξή φόρτιση κι άλλων γεωμετρικών διατομών λεπτότοιχων απορροφητών ενέργειας, όπως αυτή των σωλήνων αλουμινίου κυκλικής διατομής κατά την κατάρρευση υπό οιονεί στατικές συνθήκες λοξής φόρτισης [33]. Διαπιστώθηκε ότι η απορρόφηση ενέργειας και η τιμή της μέγιστης φόρτισης μειώθηκαν με την αύξηση της γωνίας επιβολής της λοξής φόρτισης. Η γενική διαπίστωση, ανεξαρτήτως γεωμετρίας διατομής, είναι ότι οι λεπτότοιχοι απορροφητές ενέργειας που υπόκεινται σε λοξή φόρτιση είναι πιο πιθανό να υφίστανται παραμόρφωση υπό μορφή γενικευμένου λυγισμού, γεγονός που μειώνει ιδιαίτερα την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.



**Σχήμα 18:** Λοξή φόρτιση λεπτότοιχου τετραγωνικού κελύφους

Τέλος, αναφορικά με την εγκάρσια φόρτιση, αυτή ασκείται κάθετα στο διαμήκη άξονα και προκαλεί συμπίεση ή ισοπέδωση κατά μήκος των λεπτότοιχων σωληνοειδών διατάξεων οποιουδήποτε σχήματος. Πέραν των λεπτότοιχων διατάξεων, μελέτες έχουν διεξαχθεί και για άλλες γεωμετρίες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μελέτης είναι αυτή του Niknejad [34] στην οποία εξετάστηκε η εγκάρσια κατάρρευση ορειχάλκινων και αλουμινένιων λεπτότοιχων δοκιμίων τετραγωνικής διατομής υπό οιονεί στατικές συνθήκες φόρτισης. Σύμφωνα με αυτή, η ειδική ενέργεια που απορροφάται κατά την εγκάρσια κατάρρευση τέτοιου είδους δοκιμίων αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος των τοιχωμάτων.



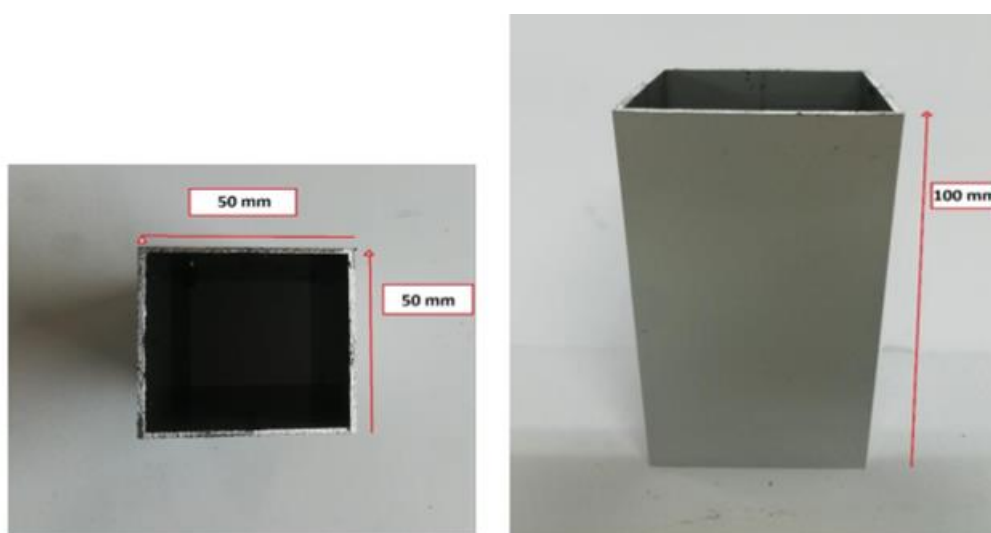
**Σχήμα 19:** Εγκάρσια φόρτιση λεπτότοιχου κελύφους αλουμινίου [34]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Μοντελοποίηση μέσω Πεπερασμένων Στοιχείων

#### 3.1 Περιπτώσεις Μελέτης

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η συμπεριφορά λεπτότοιχων τετραγωνικών σωλήνων αλουμινίου απέναντι σε αξονική και λοξή φόρτιση. Οι γωνίες φόρτισης που μελετήθηκαν ήταν 0°, 5°, 10°, 15° και 20°. Τα δοκίμια ήταν σε όλες τις περιπτώσεις τετραγωνικοί λεπτότοιχοι σωλήνες αλουμινίου T6-6060 με διαστάσεις διατομής 50mm x 50mm (εξωτερική πλευρά διατομής) και πάχος τοιχώματος  $t=1\text{mm}$  και μήκος  $L=100\text{mm}$  όπως παριστάνεται στο ακόλουθο σχήμα. Η σύσταση του κράματος αλουμινίου T6-6060 κατά EN573-3 που χρησιμοποιήθηκε περιέχει κατά βάρος 0,04% πυρίτιο (Si), 0,34% σίδηρο (Fe), 0,02% χαλκό (Cu), 0,47% μαγνήσιο (Mg), 0,004% χρώμιο (Cr), 0,06% ψευδάργυρο (Zn) ενώ το υπόλοιπο ποσοστό είναι αλουμίνιο (Al).

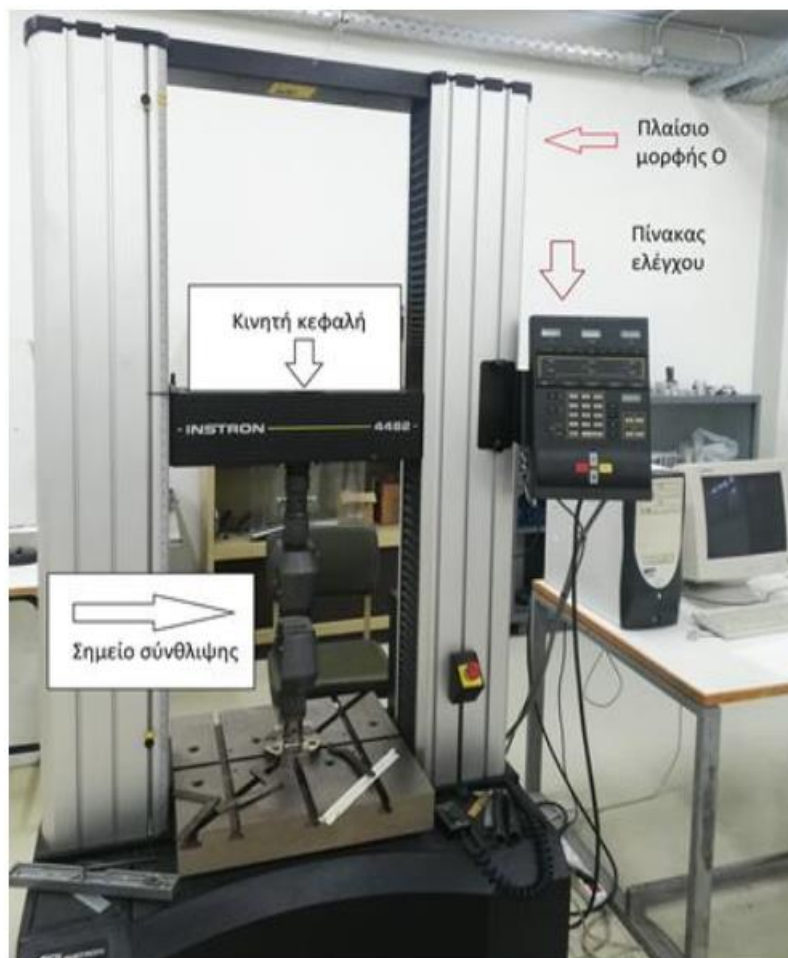


**Σχήμα 20:** Δοκίμιο μελέτης σε αξονική και λοξή φόρτιση

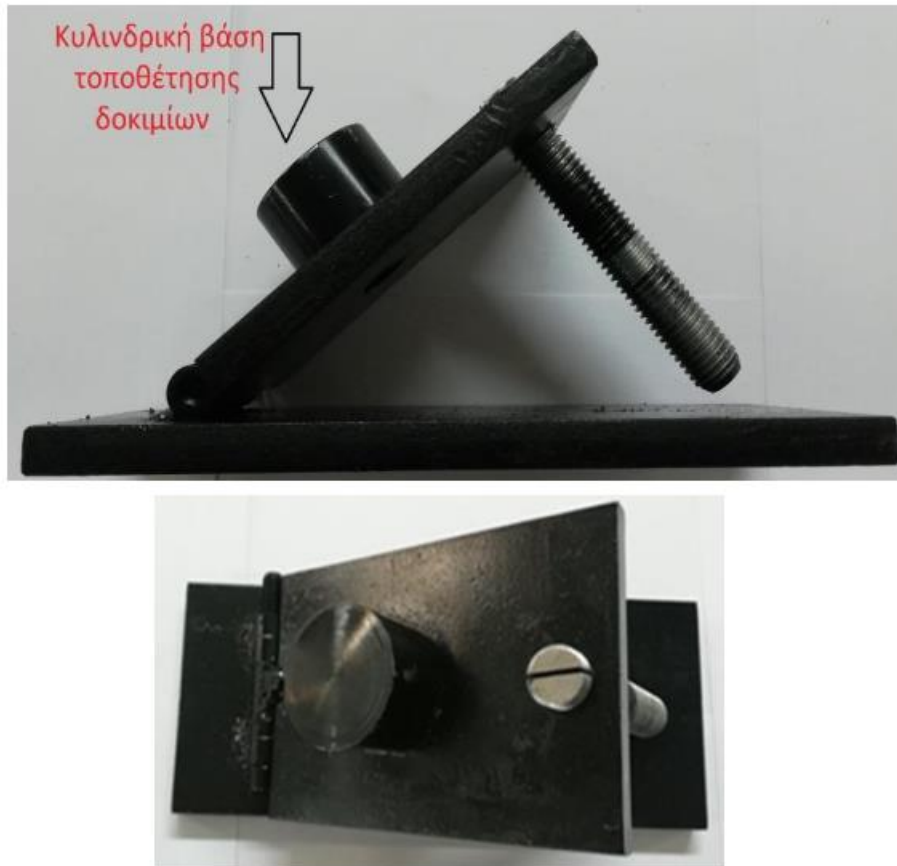
Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η υπολογιστική διερεύνηση της συμπεριφοράς των σωλήνων αυτών έναντι αξονικής και λοξής κρούσης, και η επιβεβαίωση πειραματικών αποτελεσμάτων τα οποία διεξήχθησαν στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας [35] στο εργαστήριο τεχνολογίας των κατεργασιών του ΕΜΠ στην οποία μελετήθηκαν οι συγκεκριμένες περιπτώσεις



φόρτισης σε  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  και  $20^\circ$  γωνία επιβολής του φορτίου. Οι πειραματικές δοκιμές διεξήχθησαν, στην πρέσσα INSTRON 4482 του εργαστηρίου υπό οιονεί-στατικές συνθήκες σε σταθερή ταχύτητα  $20\text{mm}/\text{min}$  μέχρι βράχυνση ίση με το  $60\%$  του μήκους του δοκιμίου, ενώ η διάταξη φόρτισης περιελάμβανε την κινητή κεφαλή της πρέσσας η οποία με τη κάθοδό της επέβαλλε τα ασκούμενα θλιπτικά φορτία, το συμπιεζόμενο δοκίμιο και την κάτω βάση στήριξης (σχήμα 21). Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων λοξής φόρτισης η κάτω βάση στήριξης του δοκιμίου ανασηκωνόταν με τη βοήθεια κοχλίας ώστε να ρυθμίζεται ανάλογα η γωνία του δοκιμίου στην επιθυμητή γωνία φόρτισης. Η βάση (Σχήμα 22) αυτή διέθετε κυλινδρική προεξοχή ώστε να εξασφαλίζεται ότι το δοκίμιο κατά τη λοξή συμπίεση δεν θα ολισθήσει πάνω στη πλάκα χάνοντας την επαφή με τη κεφαλή φόρτισης.



**Σχήμα 21:** Διάταξη φόρτισης στην πρέσσα για τις πειραματικές δοκιμές [35]



**Σχήμα 22:** Κάτω βάση στήριξης για τις πειραματικές δοκιμές [35]

Στην εργασία αυτή δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων και διεξάχθηκαν οι αντίστοιχες υπολογιστικές προσομοιώσεις στο λογισμικό LS-Dyna με σκοπό την επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων και την πιο αξιόπιστη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Τέλος, στον πίνακα 1 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα οι περιπτώσεις μελέτης της συμπεριφοράς των δοκιμών ενάντια σε αξονική και λοξή φόρτιση όπως αυτές διεξήχθησαν στις πειραματικές δοκιμές [35] και έπειτα μελετήθηκαν από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις στο λογισμικό LS-Dyna μέσω των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκαν στην παρούσα εργασία.

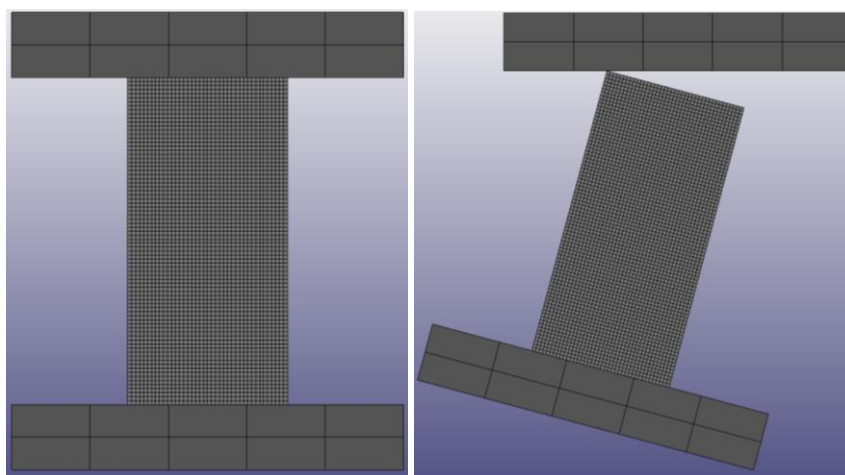
Γωνία φόρτισης (μοίρες)	Μετατόπιση κεφαλής (mm)
0	60
5	61.95
10	63.43
15	64.43
20	64.93

**Πίνακας 1:** Περιπτώσεις μελέτης μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης



## 3.2 Διαδικασία Μοντελοποίησης

Κάθε εξεταζόμενη διάταξη που μοντελοποιήθηκε περιελάμβανε το προς κατάρρευση αριθμητικό μοντέλο, την κάτω και την πάνω πλάκα όπως παριστάνεται στο σχήμα 23. Κάθε σώμα εκ των διατάξεων απορρόφησης ενέργειας, άνω και κάτω πλάκα, μοντελοποιήθηκε με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Σε κάθε μοντέλο, η κάτω πλάκα θεωρήθηκε ακίνητη, ενώ στη πάνω πλάκα επιβλήθηκε καθοδική κίνηση υπό σταθερή ταχύτητα 1m/s ώστε να προκαλεί τη συμπίεση του δοκιμίου, ενώ τέλος αμφότερες οι πλάκες θεωρήθηκαν χαλύβδινες και άκαμπτες (απαραμόρφωτες). Η επιλεγμένη ταχύτητα φόρτισης δίνει ικανοποιητικούς χρόνους περάτωσης των προσομοιώσεων και αντιπροσωπεύει δυναμικές συνθήκες κρούσης.



**Σχήμα 23:** Διάταξη προσομοίωσης: αξονική (αριστερά) και λοξή φόρτιση (δεξιά)

Τέλος, οι υπολογιστικές προσομοιώσεις έγιναν στο λογισμικό LS-Dyna και τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων δημιουργήθηκαν αρχικά στο LS-prepost όπου έγινε και η μετα-επεξεργασία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με σκοπό να εξαχθούν τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης και τα στιγμιότυπα της παραμόρφωσης ώστε να αναγνωρισθεί ο τρόπος κατάρρευσης.

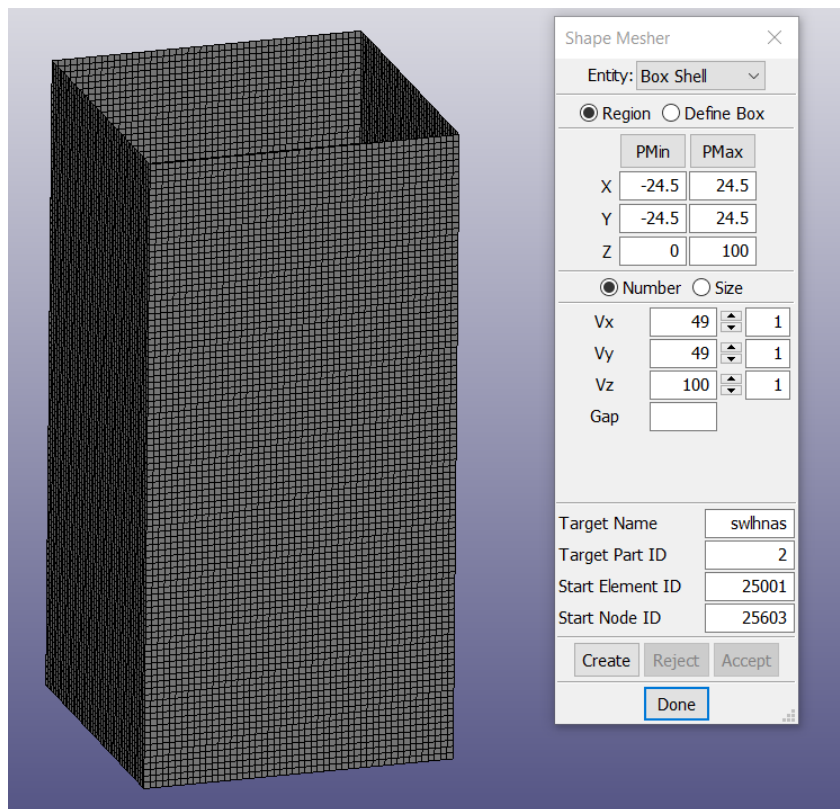
### 3.2.1 Δημιουργία γεωμετρίας και πλέγματος

Στην αρχή, η μοντελοποίηση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων ξεκίνησε με τη δημιουργία της γεωμετρίας, των διαστάσεων και του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων για το σωλήνα τετραγωνικής διατομής, της πάνω και της κάτω πλάκας. Για τον τετραγωνικό σωλήνα, χρησιμοποιήθηκαν επίπεδα στοιχεία (shell elements) εξαιτίας της λεπτότοιχης κατασκευής του, ενώ για τις

πλάκες χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα στοιχεία (solid elements) καθώς ήταν συμπαγείς. Η γεωμετρία του λεπτότοιχου σωλήνα καθορίστηκε με χρήση επίπεδων πεπ. στοιχείων με την επιλογή Box Shell και η διατομή του τετραγωνικού σωλήνα θεωρήθηκε ως η μέση περιμέτρος του, δηλαδή η πλευρά του μοντέλου του σωλήνα θεωρήθηκε ίση με  $a-t$ , όπου  $a$  η εξωτερική πλευρά του δοκιμίου και  $t$  το πάχος τοιχώματός του. Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων για το σωλήνα επιλέχθηκε διαλέγοντας τον αριθμό τους κατά πλάτος και κατά ύψος του σωλήνα, καθορίζοντας έτσι τις διαστάσεις των στοιχείων με τρόπο ώστε να είναι ίσες με το πάχος τοιχώματός του. Δηλαδή, με διαστάσεις δοκιμίου  $a=50$  mm,  $t=1$  mm και  $L=100$  mm, ο αριθμός των στοιχείων του σωλήνα κατά πλάτος  $V_x, V_y$  και κατά ύψος  $V_z$  διαλέχθηκαν ως:

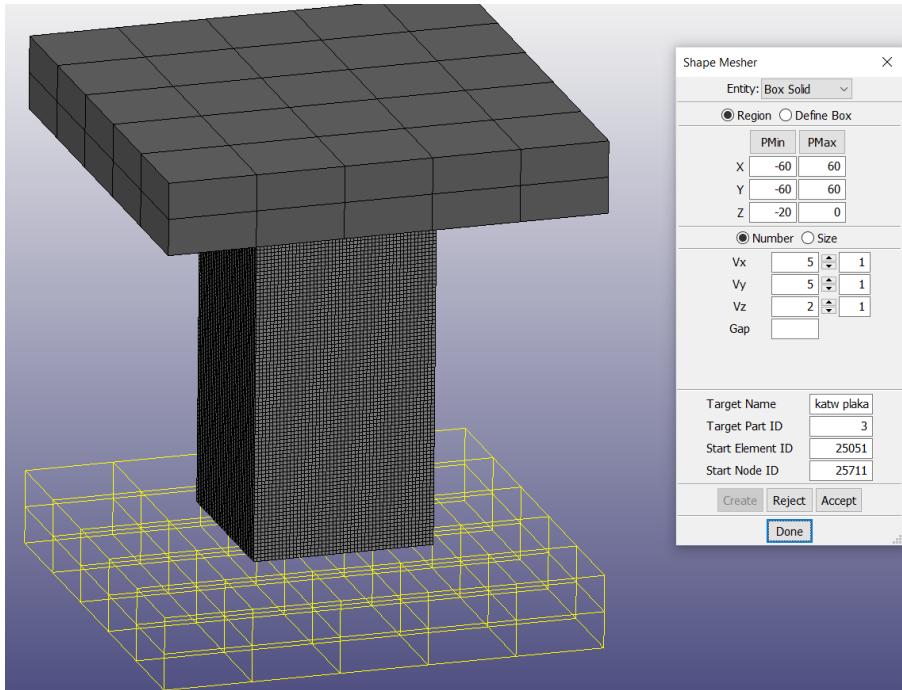
$$V_x = V_y = (a-t) / t = 49 \text{ mm} / 1 \text{ mm} = 49 \text{ στοιχεία}$$

$$V_z = L / t = 100 \text{ mm} / 1 \text{ mm} = 100 \text{ στοιχεία}$$



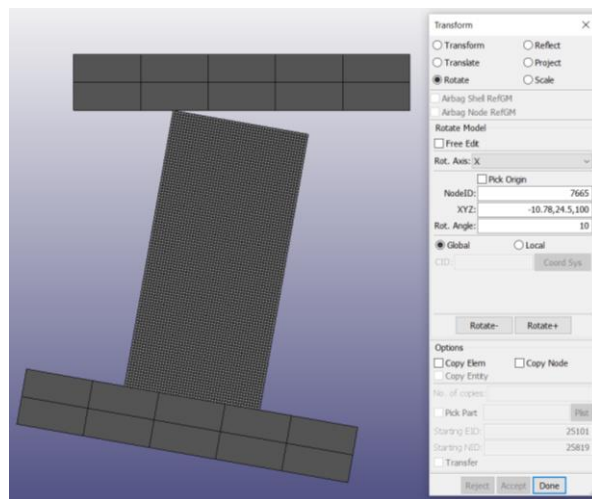
**Σχήμα 24:** Χρήση shell elements για μοντέλο σωλήνα

Οι δυο πλάκες μοντελοποιήθηκαν με solid στοιχεία ως συμπαγείς στην καρτέλα Box solid με διαστάσεις επαρκώς μεγάλες ώστε να αρκούν για την αναδίπλωση των πτυχώσεων του σωλήνα και τη στήριξή του. Τέλος, για τις πλάκες επιλέχθηκε αραιό πλέγμα καθώς τα στοιχεία τους θεωρήθηκαν άκαμπτα και απαραμόρφωτα, και άρα δεν κρίθηκε πως απαιτείται υπολογιστική ακρίβεια.



**Σχήμα 25:** Χρήση solid elements για τις πλάκες

Για τις περιπτώσεις μελέτης της λοξής φόρτισης, ο σωλήνας και η κάτω πλάκα περιστρέφονται μαζί στην κατάλληλη γωνία, μέσω της καρτέλας Transform του Keyword Manager, επιλέγοντας στην επιλογή Rotate το κέντρο περιστροφής και την γωνία περιστροφής. Ως κέντρο περιστροφής επιλέχθηκε ένας κόμβος του πλέγματος του σωλήνα που ευρίσκεται στην πάνω ακμή του, ώστε κατά την περιστροφή σωλήνα και κάτω πλάκας να μην προκληθεί ανεπιθύμητη διείσδυση των στοιχείων του σωλήνα σε αυτά της πάνω πλάκας καθώς τότε θα προκαλούνταν σφάλματα εκκίνησης της υπολογιστικής προσομοίωσης.



**Σχήμα 26:** Περιστροφή σωλήνα και κάτω πλάκας

Για τα στοιχεία του σωλήνα το πάχος τοιχώματός του αποδόθηκε στην καρτέλα Section Shell όπου το πάχος στοιχείων τέθηκε ίσο με το πάχος τοιχώματος  $t=1$  mm στις παραμέτρους T1-T4, ενώ ακόμα η παράμετρος NIP τέθηκε ίση με 3 αναφορικά με τα σημεία ολοκλήρωσης διαμέσω του πάχους και η παράμετρος ELFORM ίση με 2 στην προκαθορισμένη τιμή της σύμφωνα με την οποία επιβάλλεται κατάλληλο πρότυπο παραμόρφωσης των πεπερασμένων στοιχείων. Αντίστοιχα, επιλέχθηκε η καρτέλα Section Solid για τα στοιχεία των πλακών προσαρμόζοντας και εκεί στην παράμετρο ELFORM την προκαθορισμένη τιμή της ίση με 1.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Sort/T1 Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 4.k) Setting

\*SECTION\_SHELL(TITLE) (1)

TITLE  
swlhns

1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
1	1	2	1.0000000	3	1	0	0	1
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
2	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0

Repeated Data by Button and List

Data Pt. Replace Insert Delete Help

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

**Σχήμα 27:** Καρτέλα Section Shell

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 4.k) Setting

\*SECTION\_SOLID(TITLE) (1)

TITLE  
plakes

1	SECID	ELFORM	AET
1	2	1	0

Repeated Data by Button and List

Data Pt. Replace Insert Delete Help

**Σχήμα 28:** Καρτέλα Section Solid

Τέλος, για τον ελεγχόμενο τρόπο παραμόρφωσης και κατάρρευσης των πεπερασμένων στοιχείων του σωλήνα, επιλέχθηκε η καρτέλα hourglass διαλέγοντας το μοντέλο Flanagan-Belytschko για το μητρώο στιβαρότητας της επίλυσης του μοντέλου θέτοντας την παράμετρο IHQ ίση με 4.

Keyword Input Form

NewID RefBy Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 4.k) Setting

\*HOURGLASS\_(TITLE) (1)

TITLE

swlhnas

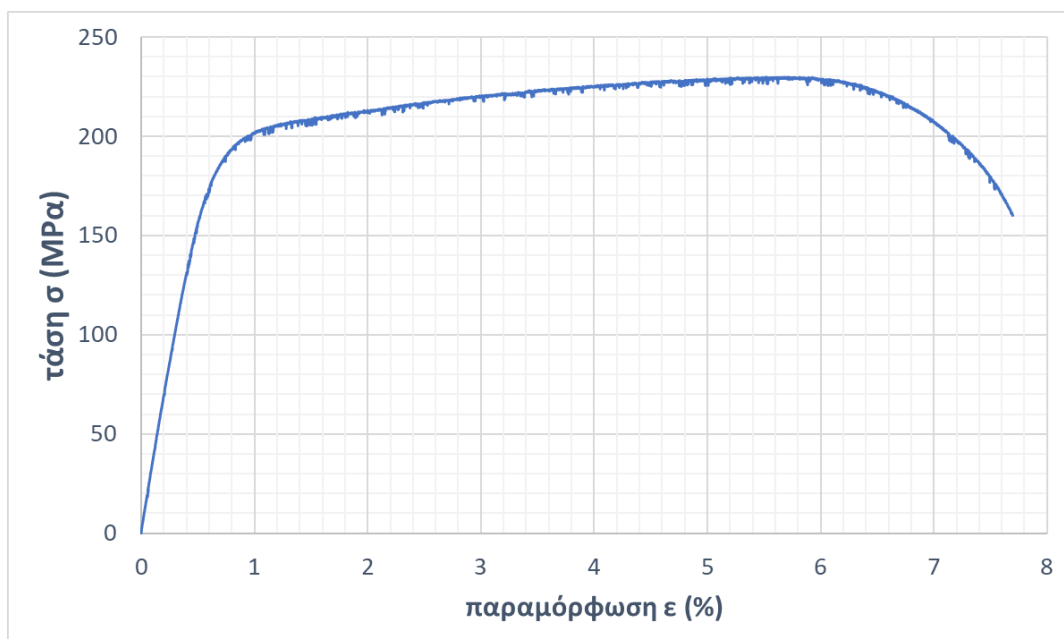
HGID	IHQ	QM	IBQ	Q1	Q2	QB/VDC	QW
1	4	0.1000000	0	1.5000000	0.0600000	0.1000000	0.1000000

COMMENT:

**Σχήμα 29:** Καρτέλα Hourglass

### 3.2.2 Επιλογή υλικού

Για την ενημέρωση του υλικού του σωλήνα απαιτούνται οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου T6-6060 και η συμπεριφορά του κατά την πλαστική παραμόρφωση. Για αυτό το σκοπό, έγινε πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού του κράματος αλουμινίου στη μηχανική πρέσσα INSTRON-4482 του εργαστηρίου από την οποία καταγράφηκε το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης σ-ε που φαίνεται στο σχήμα 30. Από αυτό εξάχθηκαν το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, το όριο διαρροής και 5 ζεύγη τάσης-πλαστικής παραμόρφωσης για την καμπύλη πλαστικής διαρροής μέχρι το σημείο μέγιστης αντοχής UTS του υλικού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 2.



**Σχήμα 30:** Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης αλουμινίου (δοκιμή εφελκυσμού)

Τάση $\sigma$ (MPa)	Πλαστική παραμόρφωση $\epsilon_{\text{πλ}}$ (-)
198	0
210	0,004
220	0,023
230	0,0425
232	0,052

**Πίνακας 2:** Καμπύλη διαρροής σωλήνα αλουμινίου T6-6060

Για το υλικό του σωλήνα κράματος αλουμινίου T6-6060 επιλέχθηκε η καρτέλα υλικού MAT024\_PIECEWISE LINEAR PLASTICITY, στην οποία τέθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού όπως η πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας, το όριο διαρροής και ο λόγος poisson, καθώς και η καμπύλη διαρροής μέσω 5 ζευγών τάσης-πλαστικής παραμόρφωσης όπως προέκυψαν από το πείραμα εφελκυσμού του υλικού (σχήμα 31). Οι μηχανικές ιδιότητες συμπληρώθηκαν ως εξής:

- πυκνότητα  $\rho = 2,7 \text{ gr/cm}^3$
- μέτρο ελαστικότητας  $E = 84000 \text{ MPa}$
- λόγος poisson  $\nu = 0.33$
- όριο διαρροής  $\sigma_Y = 198 \text{ MPa}$

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 4.k) Setting

\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY\_(TITLE) (024) (1)

swlhnas

MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
3	0.0027000	8.400e+004	0.3300000	198.00000	0.0	1.000e+021	0.0
C	P	LCSS	LCSR	VP	LCF		
0.0	0.0	0	0	0.0	0		
EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
0.0	0.0040000	0.0230000	0.0425000	0.0520000	0.0	0.0	0.0
ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
198.00000	210.00000	220.00000	230.00000	232.00000	0.0	0.0	0.0

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

**Σχήμα 31:** Καρτέλα MAT024 υλικού σωλήνα

Στη συνέχεια, οι δυο πλάκες θεωρήθηκαν χαλύβδινες και άκαμπτες-απαραμόρφωτες και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε για τη μοντελοποίησή τους η καρτέλα υλικού MAT020\_RIGID, στην οποία συμπληρώθηκαν οι μηχανικές

ιδιότητες ενός τυπικού χάλυβα πυκνότητας 7,8 gr/cm<sup>3</sup>, μέτρου ελαστικότητας E ίσου με 200 GPa και λόγου poisson 0.3. Ακόμα όμως, η καρτέλα MAT020 απαιτεί τον καθορισμό των κινηματικών βαθμών ελευθερίας και για αυτό το λόγο δημιουργήθηκαν δυο μοντέλα υλικών – ένα για κάθε πλάκα – καθώς η πάνω πλάκα ήταν ελεύθερη να μετατοπίζεται κατακόρυφα (CON1=4 και CON2=7), ενώ η κάτω πλάκα δεσμευμένη έναντι όλων των βαθμών ελευθερίας σε μετατοπίσεις και περιστροφές (CON1=CON2=7) αναφορικά με το καθολικό σύστημα συντεταγμένων (CMO=1).

Keyword Input Form

NewID Draw MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 4.k) Setting

\*MAT\_RIGID\_(TITLE) (020) ( 2 )

TITLE  
panw plaka

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	2	0.0078000	2.000e+005	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

**Σχήμα 32:** Καρτέλα MAT020 υλικού πάνω πλάκας

Keyword Input Form

NewID Draw MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 4.k) Setting

\*MAT\_RIGID\_(TITLE) (020) ( 2 )

TITLE  
panw plaka

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	2	0.0078000	2.000e+005	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

**Σχήμα 33:** Καρτέλα MAT020 υλικού κάτω πλάκας

Τέλος, πριν τον καθορισμό των οριακών συνθηκών στήριξης και στις διεπιφάνειες, αντιστοιχήθηκαν σε κάθε σώμα (πλάκες και σωλήνας), οι αντίστοιχες ιδιότητες υλικών, το είδος των πεπερασμένων στοιχείων, και ο έλεγχος παραμόρφωσης του hourglass συγκεκριμένα μόνο για το σωλήνα όπως παριστάνεται στο ακόλουθο σχήμα.

\*PART\_(TITLE) ( 3 )

1	TITLE							
	swlhnas							
2	PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
	1	1	3	0	1	0	0	0

1	TITLE							
	katw plaka							
2	PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
	2	2	1	0	0	0	0	0

1	TITLE							
	panw plaka							
2	PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
	3	2	2	0	0	0	0	0

**Σχήμα 34:** Αντιστοίχιση ιδιοτήτων στα parts

### 3.2.3 Οριακές συνθήκες στήριξης και διεπιφανειών

Μετέπειτα, οι οριακές συνθήκες στήριξης του δοκιμίου του σωλήνα και μη-εισχώρησης στις διεπιφάνειες καθορίστηκαν στην καρτέλα Contact. Για αρχή, οι αντίστοιχοι κόμβοι του πλέγματος στο ύψος του τετραγωνικού σωλήνα το οποίο ήταν βυθισμένο σε δακτύλιο στήριξης ώστε να μην ολισθαίνει ο σωλήνας κατά την λοξή φόρτιση, θεωρήθηκαν πακτωμένοι δεσμεύοντάς τους κινηματικούς βαθμούς ελευθερίας μετατόπισης ή περιστροφής (σχήμα 35).

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 4.k) Setting

\*BOUNDARY\_SPC\_SET\_(ID) ( 2 )

ID	TITLE							
1	epafh swlhna katw plakas							
1	NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
	1	0	1	1	1	1	1	1

**Σχήμα 35:** Κινηματικοί περιορισμοί κάτω άκρου σωλήνα

Αναφορικά με τις οριακές συνθήκες μη-εισχώρησης των διεπιφανειών, αυτές ορίστηκαν για τη αποφυγή της σχετικής εισχώρησης του σωλήνα στις δυο πλάκες με την καρτέλα CONTACT\_NODES TO SURFACE καθώς η διεπιφάνεια επαφής ήταν αυτή του ίχνους της περιμέτρου της διατομής του σωλήνα και των επιφανειών των πλακών. Ως παραμορφώσιμο σώμα (slave) θεωρήθηκε αυτό του



σωλήνα και ως απαραμόρφωτο σώμα (master) θεωρήθηκε αυτό των πλακών. Οι συντελεστές στατικής και δυναμικής τριβής FS και FD τέθηκαν ίσοι με 0,35 και οι δυο.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 4,k) Setting

\*CONTACT\_NODES\_TO\_SURFACE\_(ID/TITLE/MPP) ( 2 )

1	CID	TITLE						
	1	swlhnas katw plaka	<input type="checkbox"/> MPP1 <input type="checkbox"/> MPP2					
2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARMS
	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	2	3	3	0	0	0	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.3500000	0.3500000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+020
6	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSE
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000

Σχήμα 36: Μη-εισχώρηση σωλήνα και κάτω πλάκας

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 4,k) Setting

\*CONTACT\_NODES\_TO\_SURFACE\_(ID/TITLE/MPP) ( 2 )

1	CID	TITLE						
	2	swlhnas panw plaka	<input type="checkbox"/> MPP1 <input type="checkbox"/> MPP2					
2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARMS
	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	3	3	3	0	0	0	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.3500000	0.3500000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+020
6	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSE
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000

Σχήμα 37: Μη-εισχώρηση σωλήνα και πάνω πλάκας

Τέλος, οι οριακές συνθήκες μη-εισχώρησης μεταξύ των σχηματιζόμενων λοβών του σωλήνα κατά την παραμόρφωσή του λήφθηκαν υπόψιν με την καρτέλα CONTACT\_AUTOMATIC SINGLE SURFACE όπου ορίστηκε μόνο

παραμορφώσιμο σώμα (slave) αυτό του σωλήνα με τους συντελεστές στατικής και δυναμικής τριβής FS και FD ίσους με 0,35.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 4.k) Setting

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE\_(ID/TITLE/MPP) ( 1 )

1	CID	TITLE						
	3	dokimio dokimio						
		<input type="checkbox"/> MPP1		<input type="checkbox"/> MPP2				
2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARMS
	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
	0.3500000	0.3500000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+020
6	SFS	SFM	SSI	MSI	SFST	SFMT	ESE	VSE
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000

Σχήμα 38: Μη-εισχώρηση λοβών του σωλήνα

### 3.2.4 Συνθήκες φόρτισης

Οι συνθήκες φόρτισης που διαλέχθηκαν για τις υπολογιστικές προσομοιώσεις ήταν αυτές δυναμικής φόρτισης με σταθερή ταχύτητα καθόδου της πάνω πλάκας. Ο ρυθμός επιβολής του φορτίου διαλέχθηκε ίσος με 1 m/s ώστε κιάλας ο χρόνος τερματισμού να μην προκύψει παράλογα υψηλός. Αρχικά, ορίστηκε μια καμπύλη σταθερής ταχύτητας ίσης με 1 m/s για χρόνο έως την τελική επιθυμητή συμπίεση του σωλήνα μέχρι μέγιστη μετατόπιση σύμφωνα με αυτές που διεξήχθησαν τα πειράματα σύμφωνα με τον πίνακα 1. Έτσι λοιπόν, η καμπύλη σταθερής ταχύτητας διαλέχθηκε στην καρτέλα DEFINE\_CURVE με ταχύτητα 1 m/s έως το κατάλληλο χρόνο περάτωσης ώστε να επιτυγχάνεται κάθε φορά η επιθυμητή μέγιστη μετατόπιση της πάνω πλάκας ανάλογα με την κάθε περίπτωση που εξετάστηκε.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 4.k) Setting

\*DEFINE\_CURVE\_(TITLE) (1)

TITLE  
cuve

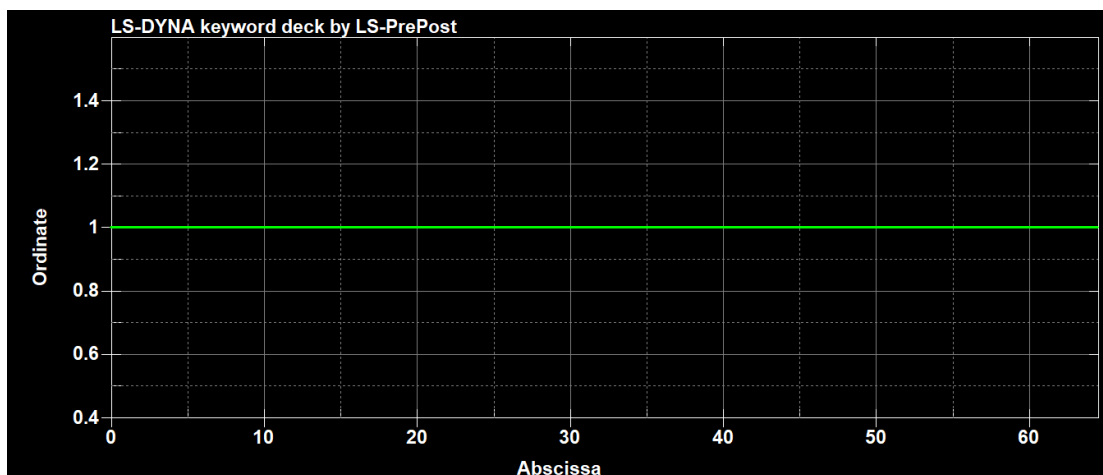
LCID	SIDR	SFA	SFO	OFFA	OFFO	DATTYP	LCINT
1	0	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0	0

Repeated Data by Button and List

A1	O1
0.0	1.0
1 0.0 1.0	
2 64.5 1.0	

Data Pt. 1 Load XYData

Σχήμα 39: Καρτέλα DEFINE\_CURVE



Σχήμα 40: Καμπύλη σταθερής ταχύτητας

Μετέπειτα, η καμπύλη αυτή της σταθερής ταχύτητας αντιστοιχήθηκε στην πάνω πλάκα στην καρτέλα BOUNDARY\_PRESCRIBED MOTION RIGID διαλέγοντας κατάλληλα το part ID της και σκαλάρωντας την καμπύλη με scaling factor SF ίσο με -1 ώστε να αντιστοιχεί σε καθοδική κίνηση της πάνω πλάκας και να επιτυγχάνεται η συμπίεση του σωλήνα. Ο κινηματικός βαθμός ελευθερίας της πάνω πλάκας ώστε να είναι ελεύθερη να μετατοπίζεται κατακόρυφα κατά τον άξονα - z τέθηκε με την παράμετρο DOF = 3, ενώ ο χαρακτήρας της καμπύλης σταθερής ταχύτητας αποδόθηκε με την παράμετρο VAD ίση με 0.

Keyword Input Form

Use \*Parameter (Subsys: 1 4.k)

\*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID\_(ID) ( 1 )

ID	TITLE
1	sumpiesh

1	PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
	3	3	0	1	-1.0000000	0	1.000e+028	0.0

**Σχήμα 41:** Καρτέλα BOUNDARY\_PRESCRIBED MOTION RIGID

### 3.2.5 Χρόνος τερματισμού και καταγραφή δεδομένων

Ως χρόνος τερματισμού σε ms καθορίστηκε η χρονική στιγμή κατά την οποία επιτεύχθηκε η μέγιστη επιθυμητή εκάστοτε μετατόπιση μέσω της καρτέλας CONTROL\_TERMINATION στην παράμετρο DT για την κάθε περίπτωση που εξετάστηκε. Τέλος, για την καταγραφή δεδομένων για την μετα-επεξεργασία των αποτελεσμάτων των υπολογιστικών προσομοιώσεων, επιλέχθηκαν οι καρτέλες DATABASE\_ASCII OPTION και DATABASE\_D3PLOT. Στην μεν πρώτη, επιλέχθηκε η καταγραφή της μετατόπισης της πάνω πλάκας (rbdout) και της ασκούμενης δύναμης στις διεπιφάνειες (rforc), ενώ στη δε δεύτερη επιλέχθηκε η καταγραφή στιγμιοτύπων της κατάρρευσης. Και στις δυο περιπτώσεις το χρονικό βήμα καταγραφής επιλέχθηκε ίσο με 1 ms το οποίο σε συνδυασμό με την ταχύτητα φόρτισης 1 m/s σημαίνει καταγραφεί δεδομένων για κάθε 1 mm μετατόπισης της πάνω πλάκας.

Keyword Input Form

Use \*Parameter (Subsys: 1 4.k)

\*CONTROL\_TERMINATION ( 1 )

1	ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS
	64.500000	0	0.0	0.0	1.000e+008

**Σχήμα 42:** Χρόνος τερματισμού

The image contains two screenshots of a software interface titled "Keyword Input Form".

The top screenshot shows the form for "\*DATABASE\_OPTION (1)". It includes a "Use \*Parameter" checkbox, a "Setting" button, and a "(Subsys: 1 4.k)" label. The form contains two main rows, each with a checked checkbox and four sub-parameters:

- RBDOUT:** DT (0.0), BINARY (0), LCUR (0), IOOPT (1)
- RCFORC:** DT (1), BINARY (0), LCUR (0), IOOPT (1)

The bottom screenshot shows the form for "\*DATABASE\_BINARY\_D3PLOT (1)". It includes a "Use \*Parameter" checkbox, buttons for "Pick", "Accept", "Delete", "Default", and "Done", a "Setting" button, and a "(Subsys: 1 4.k)" label. The form contains two rows of parameters:

- Row 1:** DT (1.0000000), LCDT (0), BEAM (0), NPLTC (0), PSETID (0)
- Row 2:** IOOPT (0)

**Σχήμα 43:** Καταγραφή δεδομένων δύναμης – μετατόπισης (πάνω) και στιγμιοτύπων της κατάρρευσης (κάτω)

### 3.3 Μετα-επεξεργασία Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

Η μετα-επεξεργασία των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής προσομοίωσης σε κάθε περίπτωση πραγματοποιήθηκε σε δυο στάδια. Αρχικά, σκοπός ήταν η εξαγωγή του διαγράμματος δύναμης-μετατόπισης και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε να εξαχθεί το αρχείο της καταγεγραμμένης δύναμης μεταξύ σωλήνα και πάνω πλάκας επιβολής του φορτίου με το χρόνο. Μέσω της σταθερής ταχύτητας καθόδου της πάνω πλάκας, ο χρόνος προσομοίωσης αντιστοιχήθηκε σε μετατόπιση της πάνω πλάκας, ώστε να δημιουργηθεί το επιθυμητό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης. Από αυτήν, οι ενδεικτικοί δείκτες κατάρρευσης όπως η μέγιστη δύναμη (IPF) και η μέση δύναμη κατάρρευσης (MCF), η απορροφώμενη ενέργεια (EA) και η ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA) και τέλος ο συντελεστής απόδοσης της δύναμης κατάρρευσης (CFE) εξάχθηκαν κατάλληλα από την αριθμητική επεξεργασία των καταγεγραμμένων δυνάμεων και μετατοπίσεων. Οι δείκτες κατάρρευσης χρησιμοποιήθηκαν αφενός για την εξακρίβωση των αριθμητικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα προηγούμενης διπλωματικής εργασίας [35], αφετέρου για την αξιολόγηση των συνθηκών φόρτισης που εξετάστηκαν.

Τέλος, τα στάδια κατάρρευσης επίσης καταγράφηκαν με στόχο την σύγκριση του τρόπου κατάρρευσης που εμφάνισαν οι υπολογιστικές προσομοιώσεις σε σχέση με αυτές που ανέδειξαν οι πειραματικές δοκιμές [35], καθώς και για την αξιολόγηση του τρόπου κατάρρευσης και των χαρακτηριστικών του που επηρεάζουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των δοκιμίων κατά την

αξονική και την λοξή φόρτιση. Στόχος είναι η εξακρίβωση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, η σύγκριση της αξονικής και της λοξής φόρτισης, και η επίδραση της γωνίας φόρτισης στους δείκτες κατάρρευσης η οποία μελετάται από τη σύγκριση πειραμάτων και υπολογιστικών προσομοιώσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

#### 4.1 Σύγκριση Πειραματικών Δοκιμών και Υπολογιστικών Προσομοιώσεων

Τα αριθμητικά αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων σε κάθε περίπτωση περιείχαν την εξαγωγή του διαγράμματος δύναμης-μετατόπισης και την καταγραφή του τρόπου κατάρρευσης που εμφανίστηκε. Από το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης, οι ενδεικτικοί δείκτες κατάρρευσης όπως η μέγιστη δύναμη (IPF) και η μέση δύναμη κατάρρευσης (MCF), η απορροφώμενη ενέργεια (EA) και η ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA) και τέλος ο συντελεστής απόδοσης της δύναμης κατάρρευσης (CFE) εξάχθηκαν κατάλληλα από την αριθμητική επεξεργασία των καταγεγραμμένων δυνάμεων και μετατοπίσεων. Οι δείκτες κατάρρευσης χρησιμοποιήθηκαν αφενός για την εξακρίβωση των αριθμητικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα προηγούμενης διπλωματικής εργασίας [35], αφετέρου για την αξιολόγηση των συνθηκών φόρτισης που εξετάστηκαν.

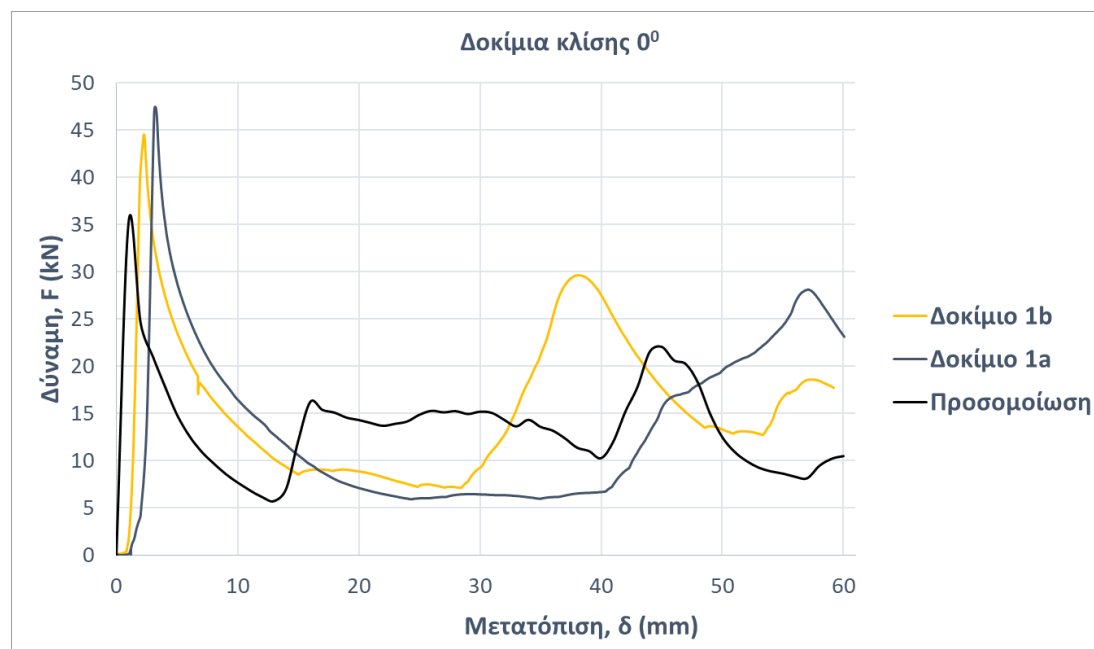
Τέλος, τα στάδια κατάρρευσης επίσης καταγράφηκαν με στόχο την σύγκριση του τρόπου κατάρρευσης που εμφάνισαν οι υπολογιστικές προσομοιώσεις σε σχέση με αυτές που ανέδειξαν οι πειραματικές δοκιμές [35], καθώς και για την αξιολόγηση του τρόπου κατάρρευσης και των χαρακτηριστικών του που επηρεάζουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των δοκιμίων κατά την αξονική και την λοξή φόρτιση. Στόχος είναι η εξακρίβωση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, η σύγκριση της αξονικής και της λοξής φόρτισης, και η επίδραση της γωνίας φόρτισης στους δείκτες κατάρρευσης η οποία μελετάται από τη σύγκριση πειραμάτων και υπολογιστικών προσομοιώσεων.

Ακολούθως, παρουσιάζονται οι σχετικές συγκρίσεις των αριθμητικών και των πειραματικών [35] διαγραμμάτων δύναμης-μετατόπισης και των αντίστοιχων εμφανιζόμενων τρόπων κατάρρευσης για κάθε περίπτωση εξέτασης της γωνίας φόρτισης από 0° έως 20°, ενώ τέλος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε πινακοποιημένη μορφή οι δείκτες κατάρρευσης σύμφωνα με τις πειραματικές δοκιμές και τις υπολογιστικές προσομοιώσεις καθώς και τα αντίστοιχα σφάλματα, όπως επίσης και τα αντίστοιχα συγκριτικά ραβδογράμματα των δεικτών κατάρρευσης για την εξακρίβωση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, τη σύγκριση της αξονικής και της λοξής φόρτισης, και την επίδραση της γωνίας φόρτισης στους δείκτες κατάρρευσης.

## 4.2 Αξονική φόρτιση υπό γωνία 0°

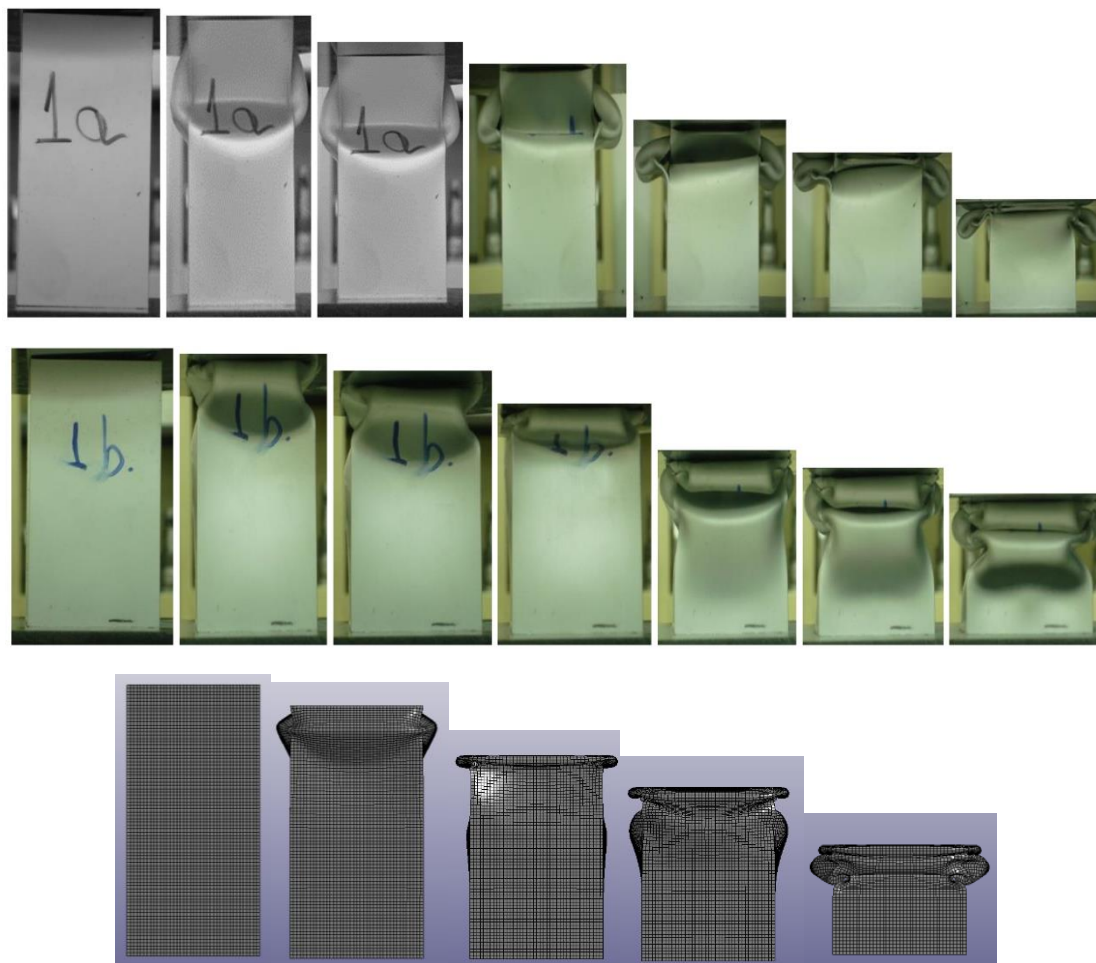
Στην πρώτη περίπτωση που μελετήθηκε, το δοκίμιο υποβλήθηκε σε αξονική φόρτιση, και το σχήμα 44 παριστάνει τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης των δυο πειραματικών δοκιμών [35] και της υπολογιστικής προσομοίωσης. Παρατηρούμε πως η τάση μεταβολής της δύναμης κατάρρευσης προβλέπεται σωστά με την αρχική μέγιστη δύναμη (IPF) να σηματοδοτεί την εκκίνηση της πλαστικής κατάρρευσης και έπειτα η δύναμη να κυμαίνεται γύρω από τη μέση δύναμη κατάρρευσης (MCF) όπου σχηματίζονται οι λοβοί κατά την πλαστική παραμόρφωση του λεπτότοιχου σωλήνα. Η υπολογιστική προσομοίωση προέβλεψε τη μέση δύναμη κατάρρευσης στα 13.6 kN τη στιγμή που η μέση τιμή που αποδόθηκε από τα δυο πειράματα 1α-1β ήταν στα 15.3 kN εμφανίζοντας απόκλιση 11,2%, η οποία χαρακτήρισε και την απόκλιση στην απορροφώμενη ενέργεια την οποία η προσομοίωση προέβλεψε στα 816,6 J με SEA = 10.9 J/gr, ενώ τα πειράματα απέδωσαν απορροφώμενη ενέργεια 920 J με SEA = 12.3 J/gr.

Παρόλο αυτά, η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης παρουσίασε μεγαλύτερη απόκλιση καθώς η προσομοίωση προέβλεψε 35 kN, ενώ τα πειράματα 44,5 kN. Τέλος, ο συντελεστής απόδοσης της δύναμης κατάρρευσης (CFE) αποδόθηκε ίσος με 0,37 και 0,34 από την προσομοίωση και τα πειράματα αντίστοιχα. Συνεπώς, αν και η απόκλιση στην μέγιστη δύναμη εμφανίστηκε σημαντική, η πρόβλεψη στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κυμάνθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα.



**Σχήμα 44:** Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης δοκιμίου σε γωνία 0°





**Σχήμα 45:** Πορεία κατάρρευσης δοκιμίου σε  $0^\circ$  (πάνω: πειράματα 1α-1β, κάτω: προσομοίωση)

Τέλος, τα πειράματα έδειξαν έναν μη-εκτατό τρόπο κατάρρευσης με τον σχηματισμό τριών πτυχώσεων, ενώ η υπολογιστική προσομοίωση έδειξε πως αρχικά σχηματίστηκε ένας εκτατός λοβός και στη συνέχεια ένας μη-εκτατός λοβός δείχνοντας έναν μικτό τρόπο κατάρρευσης (σχήμα 46). Ωστόσο, τόσο τα πειράματα όσο και η υπολογιστική προσομοίωση έδειξαν μια προοδευτική κατάρρευση (σχήμα 45) κατά την οποία η ελεγχόμενη πλαστική παραμόρφωση έδωσε τη δυνατότητα για απορρόφηση σημαντικών ποσών ενέργειας. Τέλος, ο σχηματισμός των πτυχώσεων εντοπίζεται και στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης στο οποίο τα τοπικά μέγιστα της δύναμης αντιπροσωπεύουν το σχηματισμό των εξωτερικών μη-εκτατών λοβών και τα τοπικά ελάχιστα το σχηματισμό των εσωτερικών πτυχώσεων.



**Σχήμα 46:** Τελική εικόνα κατάρρευσης δοκιμίου σε  $0^\circ$  (πάνω: πειράματα 1α-1β, κάτω: προσομοίωση)

### 4.3 Λοξή φόρτιση υπό γωνία $5^\circ$

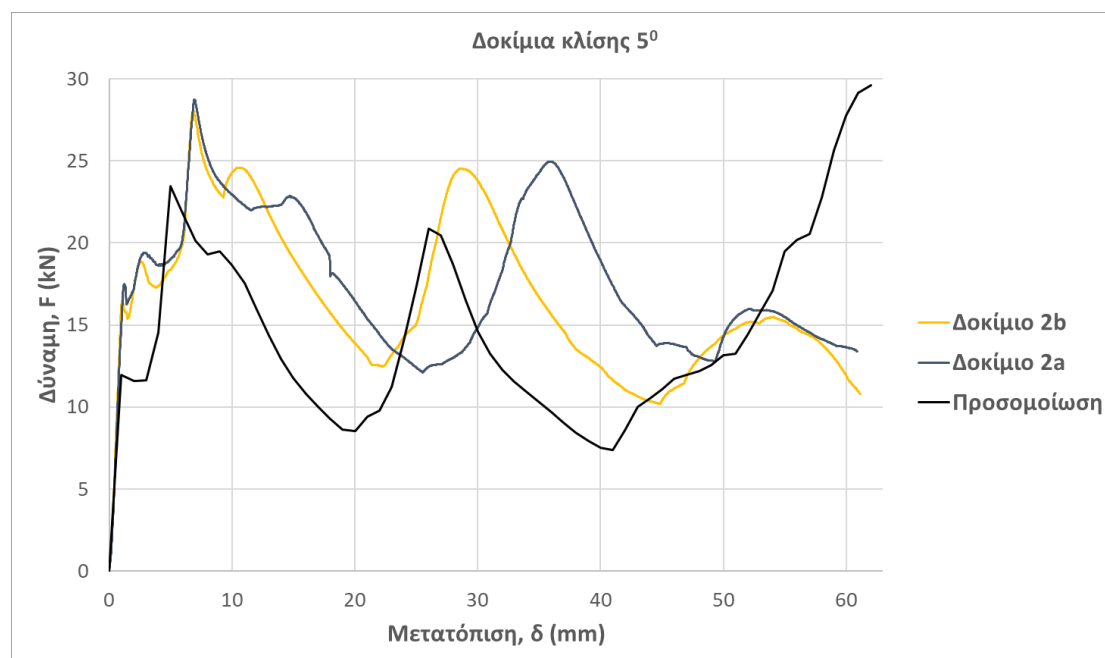
Στην δεύτερη περίπτωση που μελετήθηκε, το δοκίμιο υποβλήθηκε σε λοξή φόρτιση υπό γωνία  $5^\circ$ , και το σχήμα 47 δείχνει τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης των δυο πειραματικών δοκιμών και της υπολογιστικής προσομοίωσης. Παρατηρούμε πως η διακύμανση της δύναμης κατάρρευσης προβλέπεται ικανοποιητικά με τα δυο μέγιστα της δύναμης κατάρρευσης να σηματοδοτούν τις δυο εξωτερικές πτυχώσεις που σχηματίστηκαν κατά μη-εκτατό τρόπο. Η υπολογιστική προσομοίωση παρουσιάζει ωστόσο μια απότομη αύξηση στη δύναμη κατάρρευσης στα τελικά στάδια της συμπίεσης η οποία θεωρείται πως παρουσιάζεται από την μεγάλη αντίσταση του υλικού του σωλήνα ενάντια στην επιπλέον συμπίεσή του.

Η υπολογιστική προσομοίωση προέβλεψε τη μέση δύναμη κατάρρευσης στα 14.5 kN τη στιγμή που η μέση τιμή που αποδόθηκε από τα δυο πειράματα 2α-2β ήταν στα 16.2 kN εμφανίζοντας απόκλιση 11%, η οποία χαρακτήρισε και την απόκλιση στην απορροφώμενη ενέργεια την οποία η προσομοίωση προέβλεψε

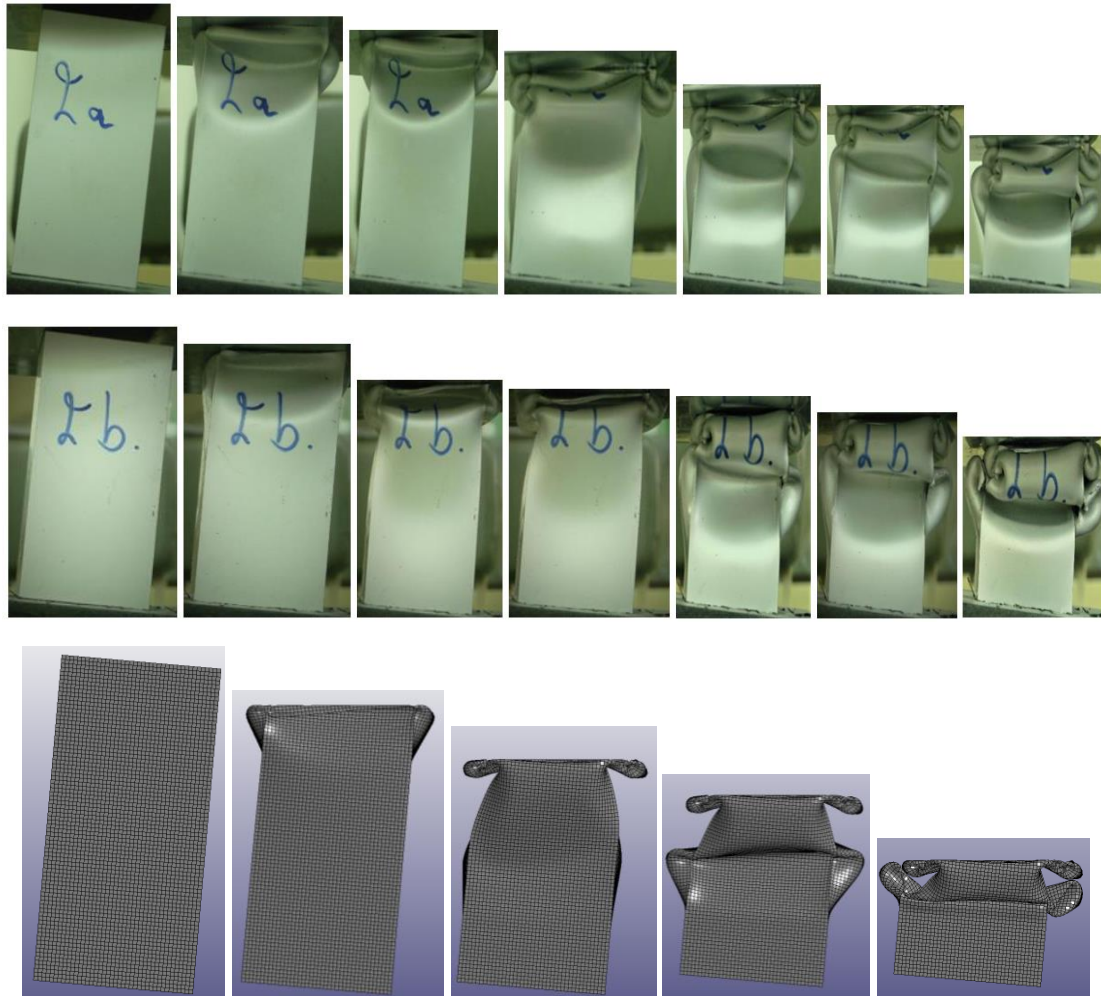
στα 895,9 J με SEA = 12 J/gr, ενώ τα πειράματα απέδωσαν απορροφώμενη ενέργεια 1009 J με SEA = 13.5 J/gr.

Ακόμα, η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης παρουσίασε επίσης ικανοποιητική απόκλιση περί το 5,7%, καθώς η προσομοίωση προέβλεψε μέγιστη δύναμη ίση με 29,6 kN ενώ τα πειράματα 28 kN. Ο συντελεστής απόδοσης της δύναμης κατάρρευσης αποδόθηκε ίσος με 0,49 και 0,58 από την προσομοίωση και τα πειράματα αντίστοιχα. Συνεπώς, στη περίπτωση της λοξής φόρτισης υπό γωνία 5° η πρόβλεψη στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και στην μέγιστη δύναμη κατάρρευσης κυμάνθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα με απόκλιση 11% και 5.7% αντίστοιχα μεταξύ προσομοίωσης και πειραμάτων.

Τέλος, συγκριτικά με την πρώτη περίπτωση μελέτης του δοκιμίου σε αξονική φόρτιση, διαπιστώνουμε πως παρατηρείται μικρότερη μέγιστη δύναμη κατάρρευσης που δικαιολογείται εξαιτίας της πλάγιας φόρτισης η οποία διευκολύνει την εκκίνηση της πλαστικής παραμόρφωσης του σωλήνα, ενώ η απορροφώμενη ενέργεια παρουσιάζεται αυξημένη εξαιτίας της διατήρησης της δύναμης κατάρρευσης σε υψηλά επίπεδα σε σύγκριση με την αξονική φόρτιση όπου μετά την εκκίνηση της κατάρρευσης αυτή μειώθηκε σημαντικότερα. Απεναντίας, στην περίπτωση της λοξής φόρτισης υπό γωνία 5° η θλιπτική δύναμη που απαιτείται για την μορφοποίηση των μη-εκτατών πτυχώσεων παρουσιάζεται σε υψηλά επίπεδα και μάλιστα στην ίδια τάξη μεγέθους με την μέγιστη δύναμη, καθώς οι εξωτερικές μη-εκτατές πτυχώσεις σχηματίζονται σε δυνάμεις περί τα 20 έως 25 kN.



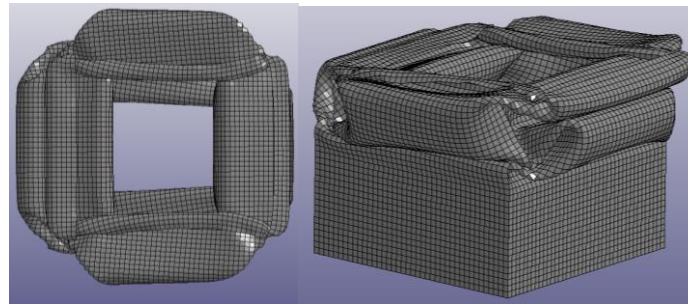
**Σχήμα 47:** Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης δοκιμίου σε γωνία 5°



**Σχήμα 48:** Πορεία κατάρρευσης δοκιμίου σε 5° (πάνω: πειράματα 2α-2β, κάτω: προσομοίωση)

Τέλος, τόσο τα πειράματα όσο και η υπολογιστική προσομοίωση έδειξαν έναν μη-εκτατό τρόπο κατάρρευσης με τον σχηματισμό τριών εξωτερικών λοβών και δυο εσωτερικών λοβών υπό γωνία 90° μεταξύ διαδοχικών πτυχώσεων όπως παριστάνεται στο σχήμα 49. Ακόμα, οι πειραματικές δοκιμές και η υπολογιστική προσομοίωση έδειξαν μια προοδευτική κατάρρευση (σχήμα 48) κατά την οποία η ελεγχόμενη πλαστική παραμόρφωση έδωσε τη δυνατότητα για απορρόφηση σημαντικών ποσών ενέργειας. Τέλος, ο σχηματισμός των πτυχώσεων εντοπίζεται και στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης στο οποίο τα δυο τοπικά μέγιστα της δύναμης αντιπροσωπεύουν το σχηματισμό των δυο εξωτερικών μη-εκτατών λοβών και τα δυο τοπικά ελάχιστα το σχηματισμό των δυο εσωτερικών πτυχώσεων. Ο προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης διαπιστώνεται από τη ομοιόμορφη διακύμανση της δύναμης κατάρρευσης κατά την εξέλιξη της πλαστικής παραμόρφωσης, καθώς δεν παρουσιάζεται κάποια απότομη μείωσή της που θα μπορούσε να σηματοδοτήσει τον τοπικό λυγισμό του λεπτότοιχου σωλήνα κατά την κατάρρευσή του.





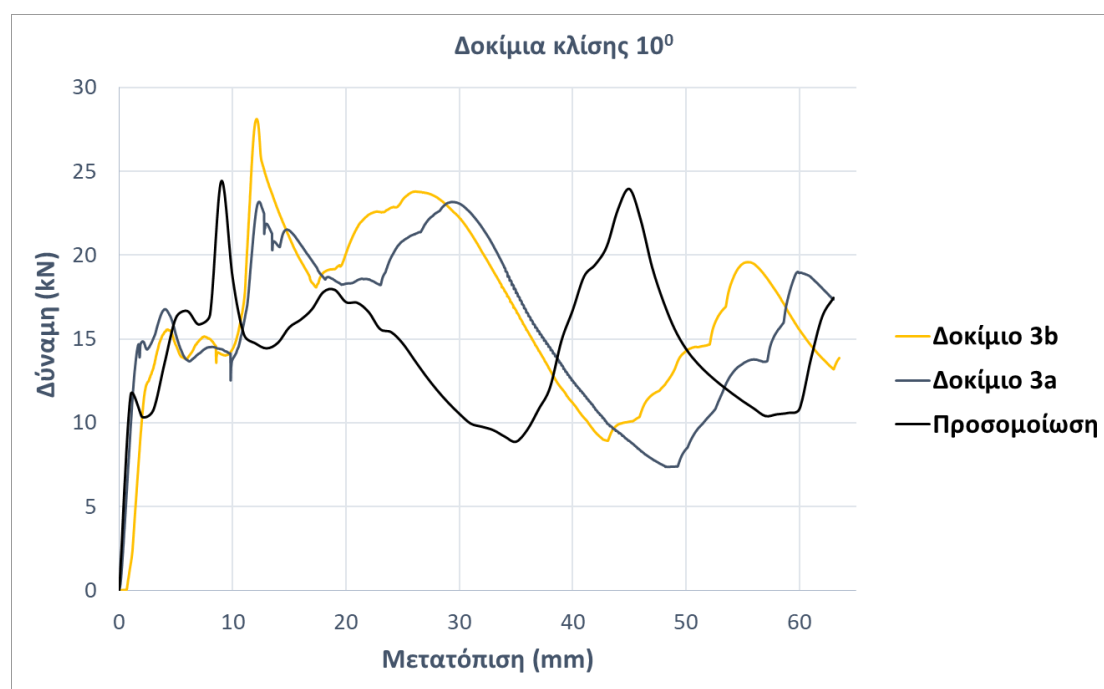
**Σχήμα 49:** Τελική εικόνα κατάρρευσης δοκιμίου σε 5° (πάνω: πειράματα 2α-2β, κάτω: προσομοίωση)

#### 4.4 Λοξή φόρτιση υπό γωνία 10°

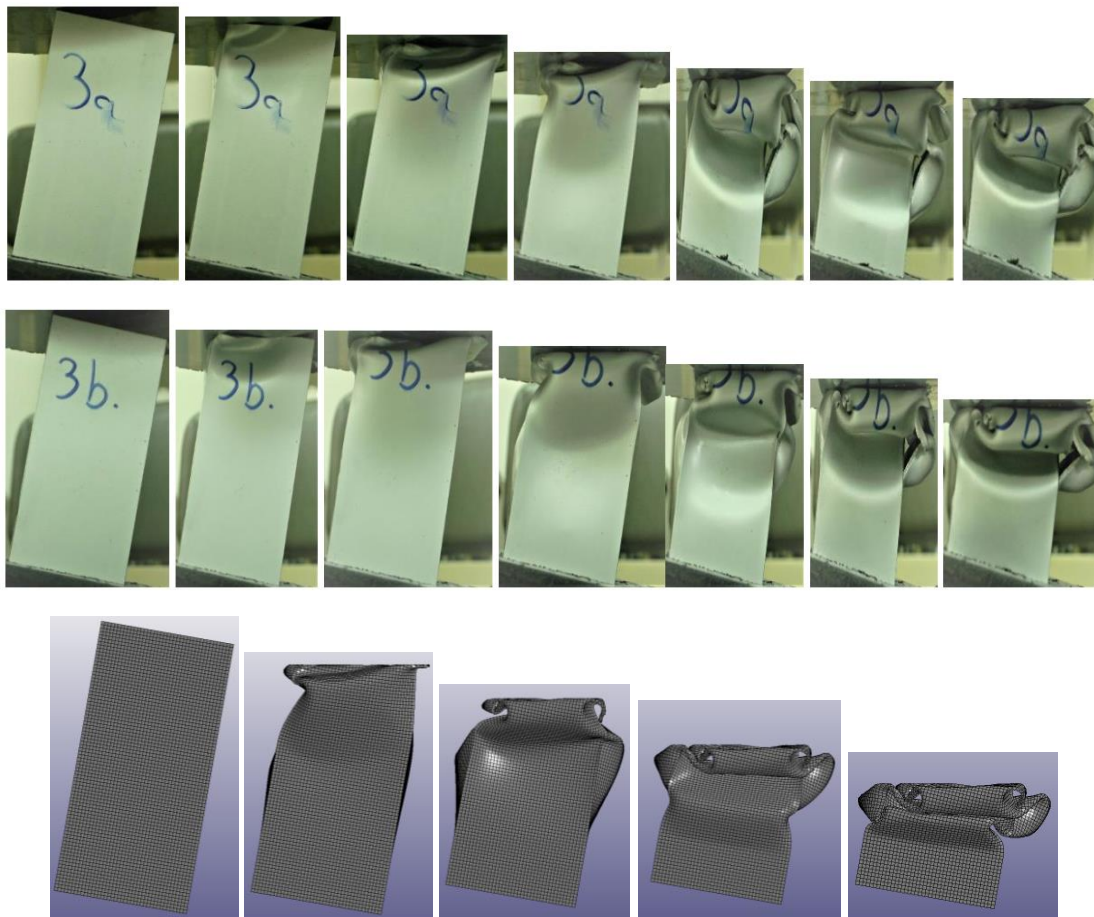
Στην τρίτη περίπτωση που μελετήθηκε, το δοκίμιο υποβλήθηκε σε λοξή φόρτιση υπό γωνία 10°, και το σχήμα 50 δείχνει τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης των δυο πειραματικών δοκιμών και της υπολογιστικής προσομοίωσης. Παρατηρούμε πως η διακύμανση της δύναμης κατάρρευσης προβλέπεται ικανοποιητικά με τα δυο μέγιστα της δύναμης κατάρρευσης να σηματοδοτούν τις δυο εξωτερικές πτυχώσεις που σχηματίστηκαν κατά μη-εκτατό τρόπο. Η υπολογιστική προσομοίωση προέβλεψε τη μέση δύναμη κατάρρευσης στα 14.5 kN τη στιγμή που η μέση τιμή που αποδόθηκε από τα δυο πειράματα 3α-3β ήταν στα 16.5 kN εμφανίζοντας απόκλιση 12%, η οποία χαρακτήρισε και την απόκλιση στην απορροφώμενη ενέργεια την οποία η προσομοίωση προέβλεψε στα 914 J με SEA = 12,2 J/gr, ενώ τα πειράματα απέδωσαν απορροφώμενη ενέργεια 1051 J με SEA = 14,1 J/gr.

Ακόμα, η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης παρουσίασε επίσης ικανοποιητική απόκλιση περί το 13%, καθώς η προσομοίωση προέβλεψε μέγιστη δύναμη ίση με 24,4 kN ενώ τα πειράματα 28,1 kN. Ο συντελεστής απόδοσης της δύναμης κατάρρευσης εμφάνισε πλήρη συμφωνία μεταξύ προσομοίωσης και πειραμάτων και αποδόθηκε ίσος με 0,59. Συνεπώς, στη περίπτωση της λοξής φόρτισης υπό γωνία  $10^\circ$  η πρόβλεψη στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και στην μέγιστη δύναμη κατάρρευσης κυμάνθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα με απόκλιση 13%.

Τέλος, συγκριτικά με δυο προηγούμενες περιπτώσεις μελέτης του δοκιμίου σε αξονική και  $5^\circ$  λοξή φόρτιση, διαπιστώνουμε πως παρατηρείται μικρότερη μέγιστη δύναμη κατάρρευσης που δικαιολογείται εξαιτίας της πλάγιας φόρτισης υπό ακόμα μικρότερη γωνία φόρτισης η οποία διευκολύνει την εκκίνηση της πλαστικής παραμόρφωσης του σωλήνα καθώς τον καταπονεί ακόμη σε κάμψη, ενώ η απορροφώμενη ενέργεια παρουσιάζεται αυξημένη εξαιτίας της διατήρησης της δύναμης κατάρρευσης σε υψηλά επίπεδα σε σύγκριση με την αξονική φόρτιση όπου μετά την εκκίνηση της κατάρρευσης αυτή μειώθηκε σημαντικότερα. Απεναντίας, στην περίπτωση της λοξής φόρτισης υπό γωνία  $10^\circ$  η θλιπτική δύναμη που απαιτείται για την μορφοποίηση των μη-εκτατών πτυχώσεων παρουσιάζεται σε υψηλά επίπεδα και μάλιστα στην ίδια τάξη μεγέθους με την μέγιστη δύναμη, καθώς οι εξωτερικές μη-εκτατές πτυχώσεις σχηματίζονται σε δυνάμεις περί τα 25 kN.



**Σχήμα 50:** Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης δοκιμίου σε γωνία  $10^\circ$



**Σχήμα 51:** Πορεία κατάρρευσης δοκιμίου σε  $10^\circ$  (πάνω: πειράματα 3α-3β, κάτω: προσομοίωση)

Τέλος, τόσο τα πειράματα όσο και η υπολογιστική προσομοίωση έδειξαν έναν μη-εκτατό τρόπο κατάρρευσης με τον σχηματισμό τριών εξωτερικών πτυχώσεων και τριών εσωτερικών πτυχώσεων υπό γωνία  $90^\circ$  μεταξύ τους όπως παριστάνεται στο σχήμα 52. Ωστόσο, ο τρόπος κατάρρευσης της υπολογιστικής προσομοίωσης δεν κατάφερε να αναδείξει το σχίσμο των τοιχωμάτων στις γωνίες της διατομής του λεπτότοιχου σωλήνα κατά την κατάρρευσή του όπως ανέδειξαν τα πειράματα. Ακόμα, οι πειραματικές δοκιμές και η υπολογιστική προσομοίωση έδειξαν μια προοδευτική κατάρρευση (σχήμα 51) κατά την οποία η ελεγχόμενη πλαστική παραμόρφωση έδωσε τη δυνατότητα για απορρόφηση σημαντικών ποσών ενέργειας. Τέλος, ο σχηματισμός των πτυχώσεων εντοπίζεται και στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης στο οποίο τα δυο τοπικά μέγιστα της δύναμης αντιπροσωπεύουν το σχηματισμό των δυο εξωτερικών μη-εκτατών λοβών και τα δυο τοπικά ελάχιστα το σχηματισμό των δυο εσωτερικών πτυχώσεων. Ο προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης διαπιστώνεται από τη ομοιόμορφη διακύμανση της δύναμης κατάρρευσης κατά την εξέλιξη της πλαστικής παραμόρφωσης, καθώς δεν παρουσιάζεται κάποια απότομη μείωσή της που θα μπορούσε να σηματοδοτήσει τον τοπικό λυγισμό του λεπτότοιχου σωλήνα κατά την κατάρρευσή του.



**Σχήμα 52:** Τελική εικόνα κατάρρευσης δοκιμίου σε  $10^\circ$  (πάνω: πειράματα 3α-3β, κάτω: προσομοίωση)

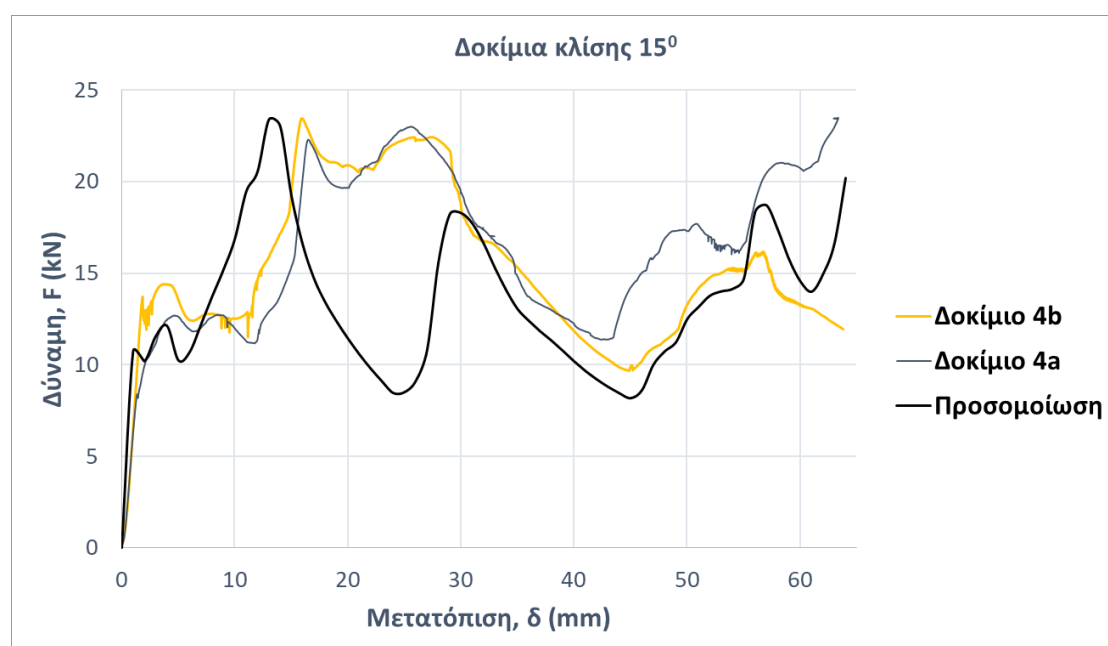
#### 4.5 Λοξή φόρτιση υπό γωνία $15^\circ$

Στην τέταρτη περίπτωση μελέτης στην οποία το δοκίμιο υποβλήθηκε σε λοξή φόρτιση υπό γωνία  $15^\circ$  το σχήμα 53 παριστάνει τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης των δυο πειραματικών δοκιμών και της υπολογιστικής προσομοίωσης. Παρατηρούμε πως η διακύμανση της δύναμης κατάρρευσης προβλέπεται ικανοποιητικά με τα δυο μέγιστα της δύναμης κατάρρευσης να σηματοδοτούν τις εξωτερικές πτυχώσεις που σχηματίστηκαν κατά μη-εκτατό τρόπο. Η υπολογιστική προσομοίωση προέβλεψε τη μέση δύναμη κατάρρευσης στα 13,4 kN τη στιγμή που η μέση τιμή που αποδόθηκε από τα δυο πειράματα 4α-4β ήταν στα 15,1 kN εμφανίζοντας απόκλιση 11%, η οποία χαρακτήρισε και την απόκλιση στην απορροφώμενη ενέργεια την οποία η προσομοίωση προέβλεψε



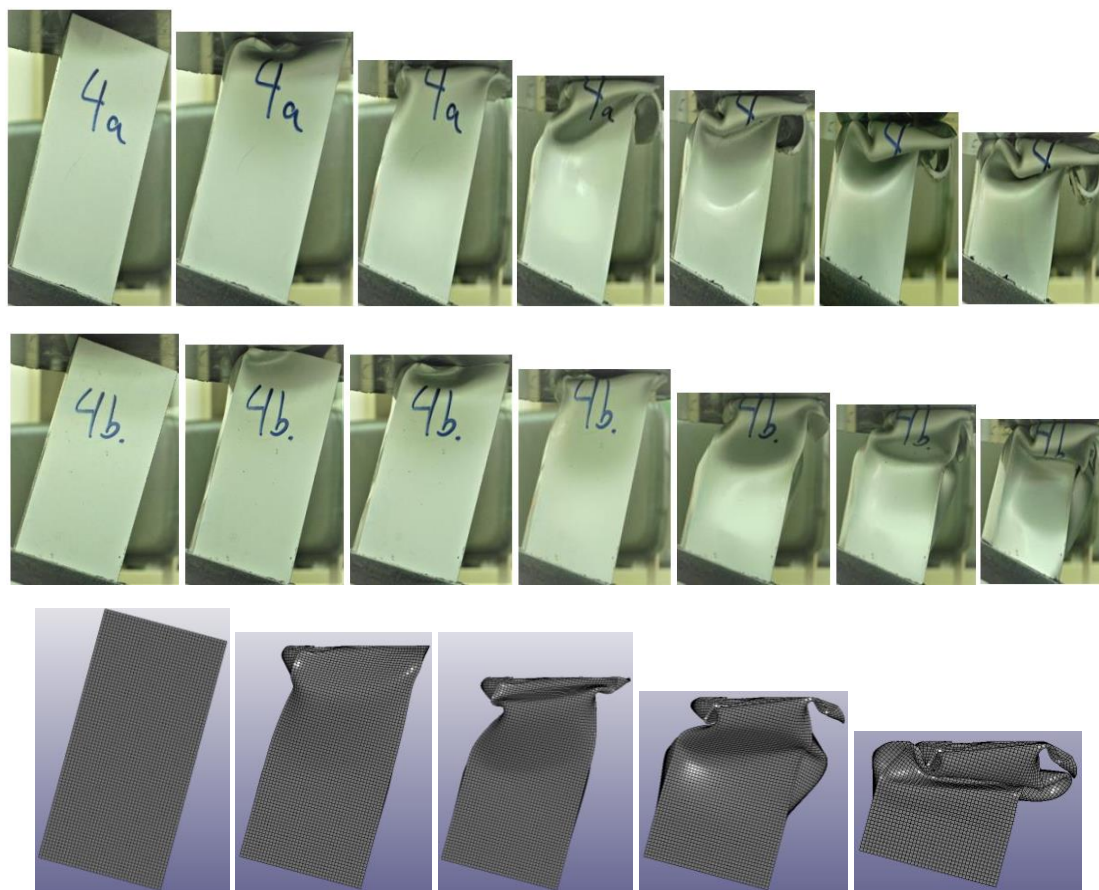
στα 857 J με SEA = 11,45 J/gr, ενώ τα πειράματα απέδωσαν απορροφώμενη ενέργεια 972 J με SEA = 13 J/gr.

Ακόμα, η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης παρουσίασε πλήρη ταύτιση μεταξύ πειραμάτων και προσομοίωσης κυμαινόμενη στα 23,4 kN ενώ ο συντελεστής απόδοσης της δύναμης κατάρρευσης εμφάνισε απόκλιση 11,7% με τα αριθμητικά αποτελέσματα να αποδίδουν 0,57 ενώ τα πειραματικά 0,64. Συνεπώς, στη περίπτωση της λοξής φόρτισης υπό γωνία 15° η πρόβλεψη στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κυμάνθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα με απόκλιση 11%, ενώ η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης εμφάνισε πλήρη ταύτιση.



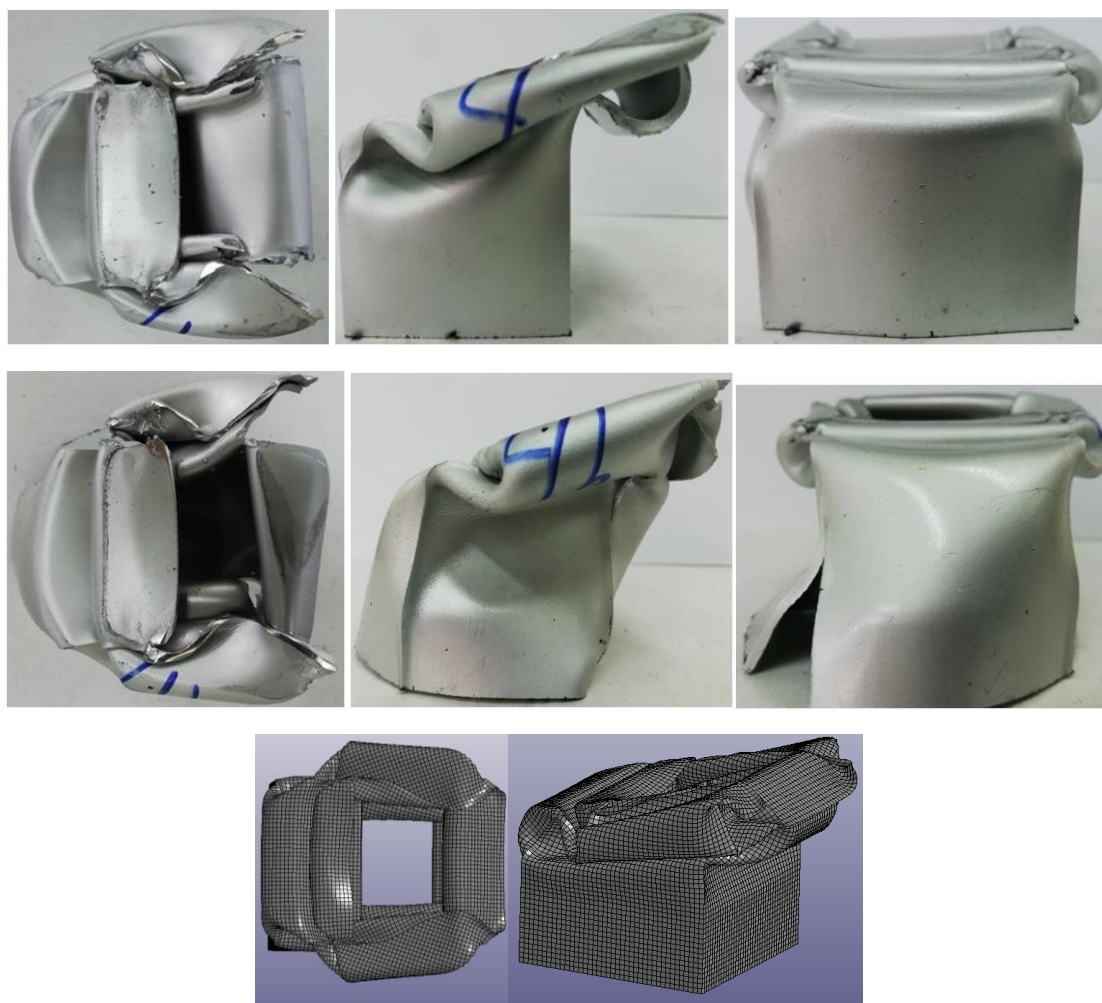
**Σχήμα 53:** Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης δοκιμίου σε γωνία 15°

Συγκριτικά με τις προηγούμενες περιπτώσεις μελέτης του δοκιμίου, διαπιστώνουμε πως παρατηρείται μικρότερη μέγιστη δύναμη κατάρρευσης που δικαιολογείται εξαιτίας της πλάγιας φόρτισης υπό ακόμα μικρότερη γωνία φόρτισης η οποία διευκολύνει την εκκίνηση της πλαστικής παραμόρφωσης του σωλήνα καθώς προκαλεί ελαφριά κάμψη στους αναδιπλωμένους μη-εκτατούς λοβούς, γεγονός που προκαλεί επίσης μείωση στην απορροφώμενη ενέργεια και στην απόδοση του δοκιμίου. Ακόμη, στην περίπτωση της λοξής φόρτισης υπό γωνία 15° η θλιπτική δύναμη που απαιτείται για την μορφοποίηση των μη-εκτατών πτυχώσεων παρουσιάζεται σε υψηλά επίπεδα περί τα 20 kN ή χαμηλότερα, ελαφριά μικρότερη από των προηγούμενων περιπτώσεων καθώς η επίδραση πλέον της υψηλότερης γωνίας φόρτισης είναι πιο ισχυρή.



**Σχήμα 54:** Πορεία κατάρρευσης δοκιμίου σε 15° (πάνω: πειράματα 4α-4β, κάτω: προσομοίωση)

Τέλος, τα πειράματα έδειξαν έναν μη-εκτατό τρόπο κατάρρευσης Ωστόσο, ο τρόπος κατάρρευσης εμφανίζοντας μάλιστα μια ελαφριά κάμψη των αναδιπλωμένων πτυχώσεων ή οποία σε συνδυασμό με τον μη-εκτατό σχηματισμό των λοβών οδήγησε στο σχίσμο των γωνιών της τετραγωνικής διατομής του λεπτότοιχου σωλήνα. Η υπολογιστική προσομοίωση κατάφερε να αναδείξει τον μη-εκτατό τρόπο κατάρρευσης χωρίς παρόλα αυτά να δείξει ικανοποιητικά την ελαφριά κάμψη του σωλήνα και το σχίσμο των τοιχωμάτων. Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης ανέδειξαν το σχηματισμό τριών εξωτερικών και δυο εσωτερικών μη-εκτατών πτυχώσεων, ο σχηματισμός των οποίων εντοπίζεται και στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης από τα τοπικά μέγιστα της δύναμης αντιπροσωπεύουν το σχηματισμό των εξωτερικών λοβών και τα τοπικά ελάχιστα το σχηματισμό των εσωτερικών πτυχώσεων. Ακόμα, οι πειραματικές δοκιμές και η υπολογιστική προσομοίωση έδειξαν μια προοδευτική κατάρρευση (σχήμα 54) κατά την οποία η ελεγχόμενη πλαστική παραμόρφωση έδωσε τη δυνατότητα για απορρόφηση σημαντικών ποσών ενέργειας. Τέλος, ο προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης διαπιστώνεται από τη ομοιόμορφη διακύμανση της δύναμης κατάρρευσης κατά την εξέλιξη της πλαστικής παραμόρφωσης.



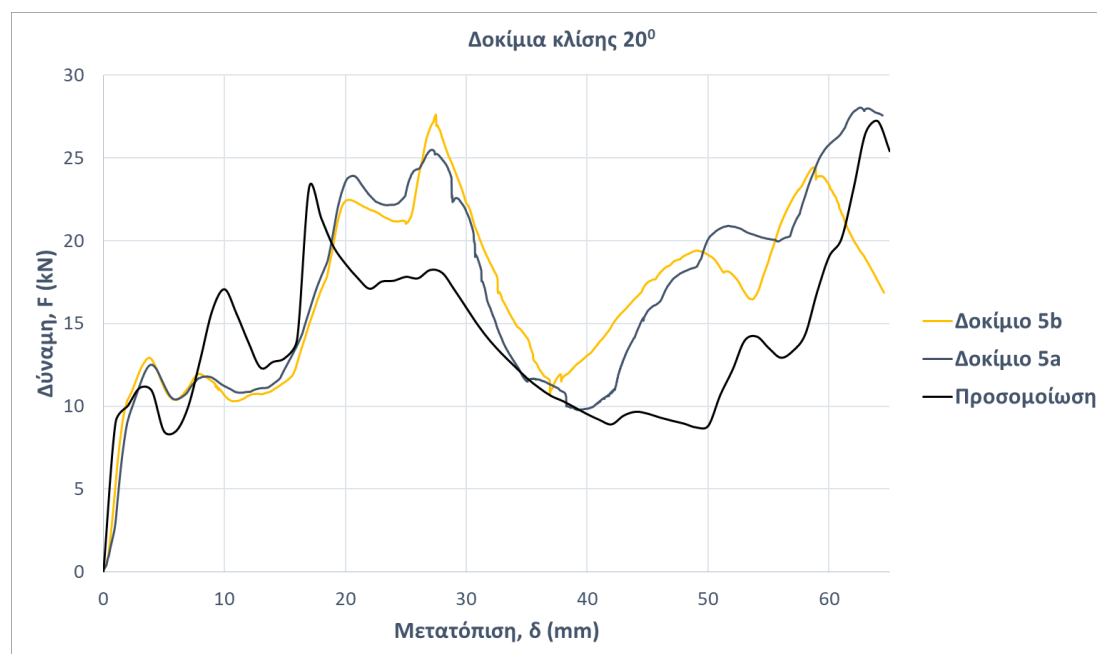
**Σχήμα 55:** Τελική εικόνα κατάρρευσης δοκιμίου σε  $15^\circ$  (πάνω: πειράματα 4α-4β, κάτω: προσομοίωση)

#### 4.6 Λοξή φόρτιση υπό γωνία $20^\circ$

Στην τελευταία περίπτωση που μελετήθηκε, το δοκίμιο υποβλήθηκε σε λοξή φόρτιση υπό γωνία  $20^\circ$ , και το σχήμα 56 δείχνει τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης των δυο πειραμάτων και της υπολογιστικής προσομοίωσης. Παρατηρούμε πως η διακύμανση της δύναμης κατάρρευσης αποτυπώνεται με ακρίβεια τόσο για τη μέγιστη τιμή της κατά τη στιγμή που δημιουργείται ο πρώτος λοβός όσο και για την μετέπειτα ανοδική της πορεία. Η υπολογιστική προσομοίωση προέβλεψε τη μέση δύναμη κατάρρευσης στα 14 kN τη στιγμή που η μέση τιμή που αποδόθηκε από τα δυο πειράματα 5α-5β ήταν στα 16,6 kN εμφανίζοντας απόκλιση 15%, η οποία χαρακτήρισε και την απόκλιση στην απορροφώμενη ενέργεια την οποία η προσομοίωση προέβλεψε στα 912,8 J με

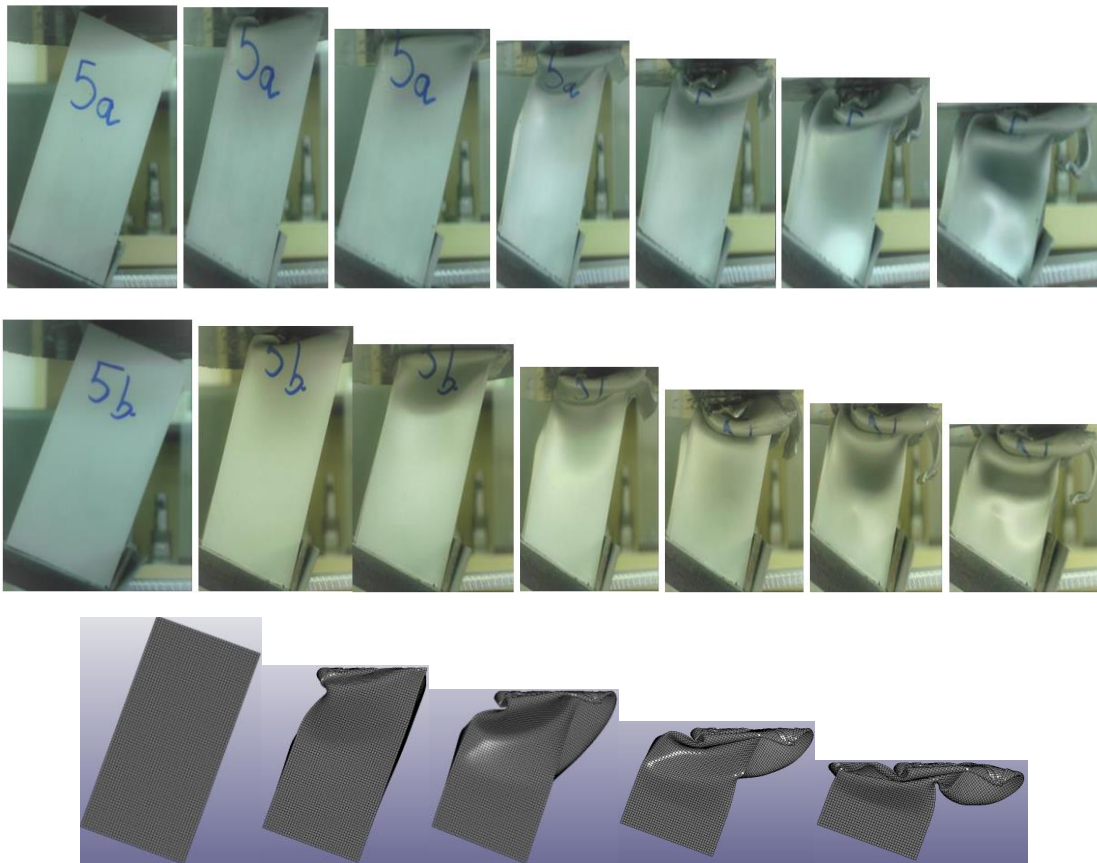
SEA = 12,2 J/gr, ενώ τα πειράματα απέδωσαν απορροφώμενη ενέργεια 1080 J με SEA = 14,4 J/gr.

Παρόλο αυτά, η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης προβλέφθηκε με καλύτερη ακρίβεια με την προσομοίωση να δίνει 27,2 kN ενώ τα πειράματα 27,6 kN. Ο συντελεστής απόδοσης της δύναμης κατάρρευσης υπολογίσθηκε ίσος με 0,52 και 0,6 από την προσομοίωση και τα πειράματα αντίστοιχα. Η απόκλιση στην μέγιστη δύναμη κυμαίνεται στο 1,5%, ενώ ακόμα η πρόβλεψη στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κυμάνθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα με μεγαλύτερη όμως απόκλιση κοντά στο 15%.



**Σχήμα 56:** Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης δοκιμίου σε γωνία 20°

Συγκριτικά με τις προηγούμενες περιπτώσεις μελέτης του δοκιμίου, διαπιστώνουμε πως παρατηρείται μεγαλύτερη απορροφώμενη ενέργεια που ενδεχομένως αποδίδεται στο γεγονός ότι η απαιτούμενη μέση δύναμη συμπίεσης εμφανίστηκε υψηλή λόγω του σχισίματος της διατομής του τετραγωνικού σωλήνα στις άκρες της. Η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης είναι μειωμένη σε σύγκριση με την αξονική φόρτιση και τις περιπτώσεις λοξής φόρτισης υπό μικρές γωνίες που δικαιολογείται εξαιτίας της πλάγιας φόρτισης υπό ακόμα μεγαλύτερη γωνία φόρτισης η οποία διευκολύνει την πλαστική παραμόρφωση του σωλήνα καθώς προκαλεί ελαφριά κάμψη στους αναδιπλωμένους λοβούς.



**Σχήμα 57:** Πορεία κατάρρευσης δοκιμίου σε 20° (πάνω: πειράματα 5α-5β, κάτω: προσομοίωση)

Τέλος, τα πειράματα έδειξαν έναν μη-εκτατό τρόπο κατάρρευσης και παράλληλα ένα σχίσμο των γωνιών της τετραγωνικής διατομής του λεπτότοιχου σωλήνα ενώ οι κομμένες πλευρές μετέπειτα κάμφθηκαν και αναδιπλώθηκαν καθώς η πλάκα κατέβαινε. Η υπολογιστική προσομοίωση κατάφερε να αναδείξει τον μη-εκτατό τρόπο κατάρρευσης ικανοποιητικά σε συνδυασμό με την ελαφριά κάμψη του σωλήνα αλλά όχι το σχίσμο των τοιχωμάτων. Ακόμα, οι πειραματικές δοκιμές και η υπολογιστική προσομοίωση έδειξαν μια προοδευτική κατάρρευση (σχήμα 57) κατά την οποία η ελεγχόμενη πλαστική παραμόρφωση έδωσε τη δυνατότητα για απορρόφηση υψηλών ποσών ενέργειας. Τέλος, ο προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης διαπιστώνεται από τη σταθερή τάση στη διακύμανση της δύναμης κατάρρευσης κατά την εξέλιξη της πλαστικής παραμόρφωσης.





**Σχήμα 58:** Τελική εικόνα κατάρρευσης δοκιμίου σε 20° (πάνω: πειράματα 5α-5β, κάτω: προσομοίωση)

#### 4.7 Δείκτες Κατάρρευσης

Οι δείκτες κατάρρευσης υπολογίστηκαν από τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης για κάθε περίπτωση μελέτης όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.4 της παρούσας εργασίας. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη μέγιστη δύναμη κατάρρευσης και στην ειδική ενέργεια απορρόφησης, καθώς η πρώτη αντιπροσωπεύει την εκκίνηση της πλαστικής κατάρρευσης, ενώ η δεύτερη αντιπροσωπεύει με τον πιο κατάλληλο τρόπο την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από μια κατασκευή. Επίσης, εκτός από την αξιολόγηση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας και της αποδοτικότητας των τετραγωνικών σωλήνων στις συνθήκες φόρτισης που εξεταστήκανε, παρουσιάζεται ακόμα η σύγκριση μεταξύ πειραμάτων και προσομοιώσεων αναφορικά με τους δείκτες κατάρρευσης και τα αντίστοιχα σχετικά σφάλματα που προέκυψαν, ώστε να επαληθευτούν τα αριθμητικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων και να διασφαλιστεί η ακρίβειά τους αναφορικά με την ικανότητα πρόβλεψης των βασικών δεικτών κατάρρευσης. Όπως παρουσιάστηκε

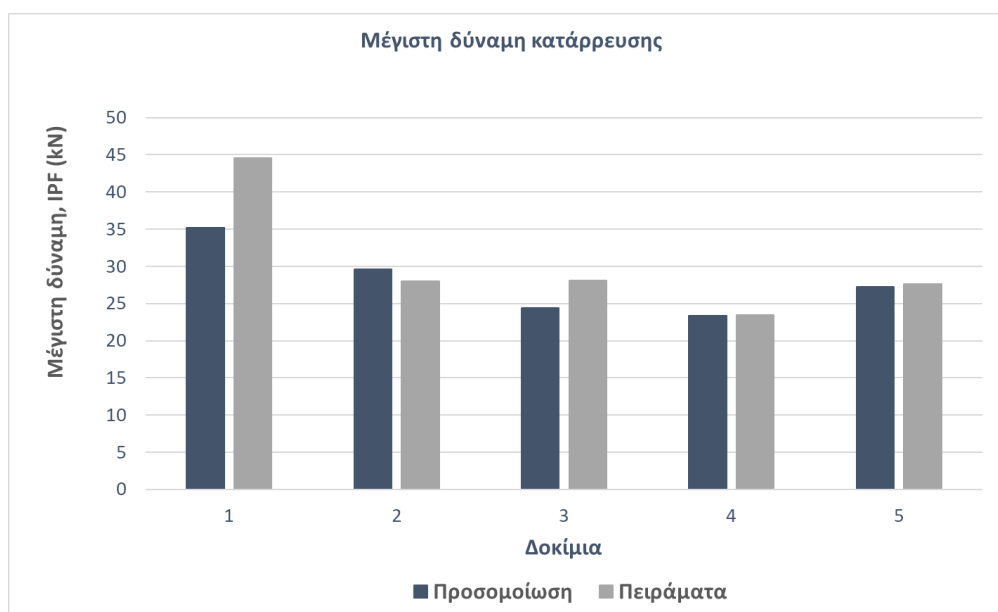
αναλυτικά κατά τις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου αυτού, οι υπολογιστικές προσομοιώσεις έδειξαν ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με τον τρόπο κατάρρευσης που παρατηρήθηκε, προβλέποντας σε κάθε περίπτωση τον μη-εκτατό σχηματισμό πτυχώσεων όπως και την κάμψη του σωλήνα στις μεγάλες γωνίες φόρτισης υπό 15° και 20°, χωρίς όμως να καταφέρει να προβλέψει και το σχίσσιμο των άκρων της τετραγωνικής διατομής του λεπτότοιχου σωλήνα στις περιπτώσεις που εμφανίστηκε, καθώς η μοντελοποίηση του υλικού δεν ήταν ικανή να αποδώσει την αστοχία υλικού και τον αποχωρισμό των κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος του σωλήνα.

Σχετικά με τους δείκτες κατάρρευσης όπως προέκυψαν από τα πειραματικά και τα αριθμητικά αποτελέσματα, αυτοί παραθέτονται στον ακόλουθο πίνακα 3 συγκεντρωτικά μαζί με τα αντίστοιχα σφάλματα από τις σχετικές συγκρίσεις πειραμάτων και υπολογιστικής προσομοίωσης.

Δοκίμιο – Γωνία φόρτισης		IPF (kN)	MCF (kN)	EA (J)	SEA (J/gr)	CFE (-)
1 – 0°	Προσομοίωση	35,2	13,6	816,6	10,9	0.37
	Πειράματα 1α-1β	44,6	15,3	920	12,3	0.34
	Σφάλμα (%)	21	11,2	11,2	11,2	11.2
2 – 5°	Προσομοίωση	29,6	14,5	895,9	12	0.49
	Πειράματα 2α-2β	28	16,2	1009	13,5	0.58
	Σφάλμα (%)	5,8	11	11,3	13	11.2
3 – 10°	Προσομοίωση	24,4	14,5	914	12,2	0.59
	Πειράματα 3α-3β	28,1	16,5	1051	14,05	0.585
	Σφάλμα (%)	13,2	12,3	13	13	1
4 – 15°	Προσομοίωση	23,4	13,4	857	11,45	0.57
	Πειράματα 4α-4β	23,3	15,1	972	13	0.64
	Σφάλμα (%)	0,2	11,3	12,3	11,9	11.7
5 – 20°	Προσομοίωση	27,2	14	912,8	12,2	0.52
	Πειράματα 5α-5β	27,6	16,6	1080	14,4	0.6
	Σφάλμα (%)	1,5	15	15,4	15,4	14

**Πίνακας 3:** Σύγκριση δεικτών κατάρρευσης μεταξύ πειραμάτων και προσομοίωσης

Παρατηρώντας στο ακόλουθο σχήμα 59 τη μεταβολή της μέγιστης δύναμης κατάρρευσης με τη γωνία φόρτισης συγκριτικά μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων [35], βλέπουμε πως η μεγαλύτερη μέγιστη δύναμη εντοπίζεται στην περίπτωση 1 της αξονικής φόρτισης του δοκιμίου μεταξύ 35kN και 40kN όπως προέκυψε από την προσομοίωση και τα πειράματα αντίστοιχα. Ακόμα, βλέπουμε πως η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας φόρτισης παρουσιάζοντας αρχικά απότομη πτώση ήδη από τις 5<sup>ο</sup> γωνία φόρτισης. Οι περιπτώσεις λοξής φόρτισης μάλιστα έδειξαν μέγιστη δύναμη κατάρρευσης κάτω από 30 kN, ενώ για υψηλές γωνίες φόρτισης η μέγιστη δύναμη παρουσίασε μια ελαφριά αύξηση όπως στην περίπτωση 5 για 20<sup>ο</sup> γωνία φόρτισης. Σε αυτήν τη περίπτωση, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τα τελευταία στάδια της κατάρρευσης ο σωλήνας έχει ήδη συμπιεστεί πλήρως και άρα παρουσίαζε μεγάλη αντοχή για παραπάνω συμπίεση, δείχνοντας μια έντονη αύξηση της δύναμης κατά τα τελευταία στάδια της μετατόπισης όπου εντοπίστηκε και η μέγιστη δύναμη καθόλη την κατάρρευση σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις όπου η μέγιστη δύναμη εντοπίστηκε στην αρχή της κατάρρευσης τη στιγμή σχηματισμού του πρώτου μη-εκτατού λοβού.

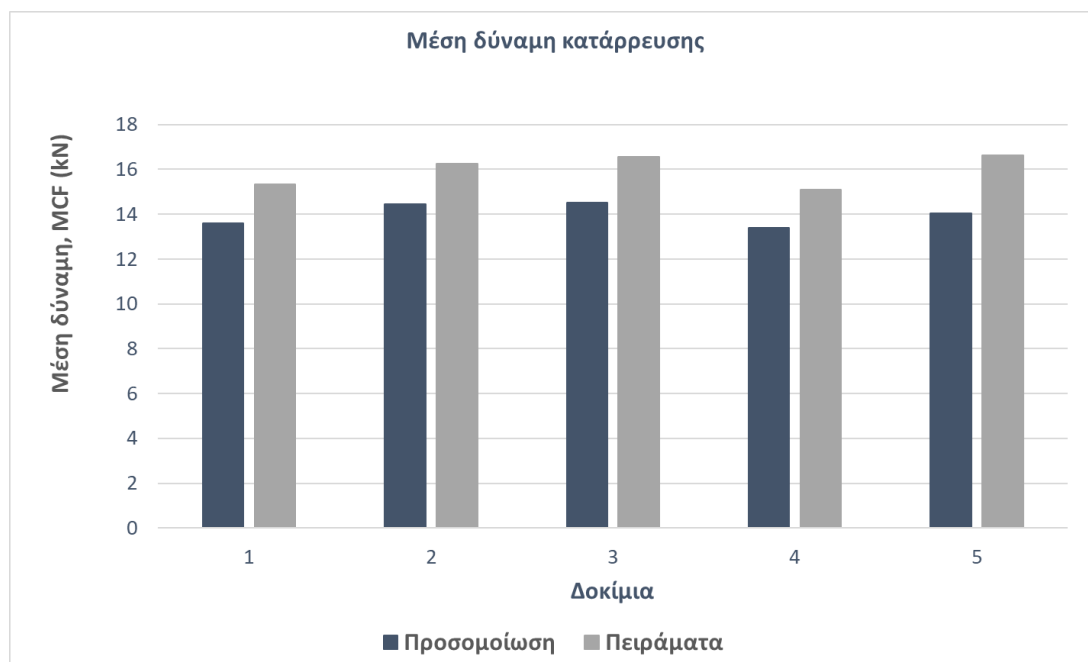


**Σχήμα 59:** Σύγκριση μέγιστης δύναμης κατάρρευσης

Παρατηρώντας στο ακόλουθο σχήμα 60 τη μεταβολή της μέσης δύναμης κατάρρευσης με τη γωνία φόρτισης συγκριτικά μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων, βλέπουμε πως αυτή προβλέφθηκε από τις προσομοιώσεις γύρω από τα 14 kN ενώ από τα πειράματα γύρω από τα 15 έως 16 kN. Ακόμα, παρατηρείται γενικά μια σταθερή διακύμανση της μέσης δύναμης κατάρρευσης με τη γωνία φόρτισης καθώς στις περιπτώσεις λοξής φόρτισης 2 – 5 παρόλο την υπό γωνία θλιπτική φόρτιση το δοκίμιο εμφάνισε στις περισσότερες περιπτώσεις σχίσσιμο στις γωνίες

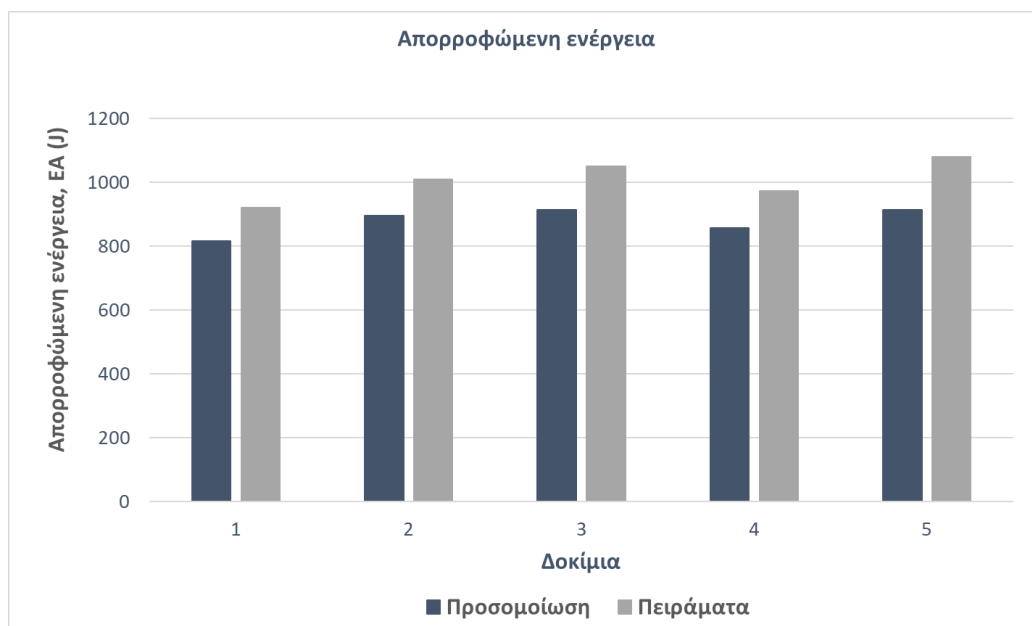


της τετραγωνικής διατομής του για το οποίο η δύναμη κατάρρευσης οδηγήθηκε σε αυξημένες τιμές. Επίσης, κατά τα τελευταία στάδια της κατάρρευσης λόγω της λοξής συμπίεσης η δύναμη εμφάνισε αύξηση εφόσον αναγκαζόταν να συμπίεσει μεγαλύτερη επιφάνεια συσσωρευμένου όγκου κατασκευής, και έτσι προκάλεσε μεγαλύτερη μέση δύναμη κατάρρευσης.



**Σχήμα 60:** Σύγκριση μέσης δύναμης κατάρρευσης

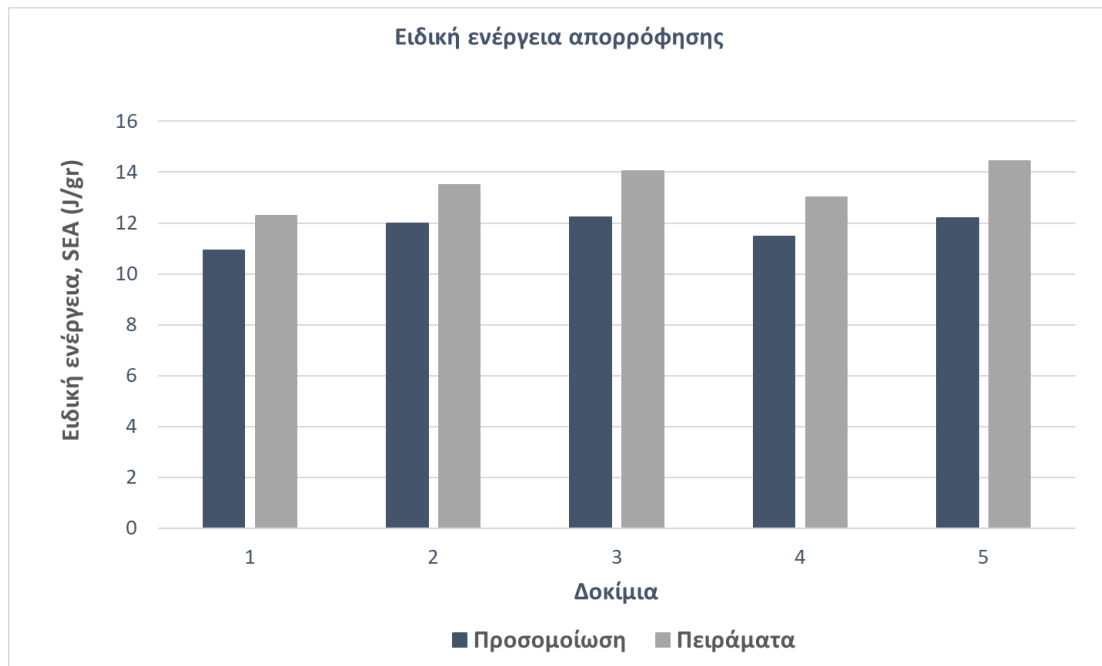
Παρατηρώντας στο ακόλουθο σχήμα 61 τη μεταβολή της απορροφώμενης ενέργειας με τη γωνία φόρτισης συγκριτικά μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων, βλέπουμε πως αυτή ακολούθησε τη τάση μεταβολής της μέσης δύναμης κατάρρευσης. Παρατηρείται δηλαδή γενικά μια σταθερή διακύμανση της απορροφώμενης ενέργειας με τη γωνία φόρτισης με μέγιστη τιμή τα 914 J στην περίπτωση 3 κατά τις προσομοιώσεις, καθώς στις περιπτώσεις λοξής φόρτισης 2 - 5 παρόλο την υπό γωνία θλιπτική φόρτιση το δοκίμιο εμφάνισε στις περισσότερες περιπτώσεις σχίσμο στις γωνίες της τετραγωνικής διατομής του προκαλώντας έτσι αυξημένη ενέργεια παραμόρφωσης. Επίσης, στις περιπτώσεις λοξής φόρτισης προκειμένου να εξεταστεί σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη συμπίεση έως το 60% του αρχικού μήκους του δοκιμίου, η μέγιστη μετατόπιση αυξανόταν με την αύξηση της γωνίας φόρτισης επιτρέποντας κάποια επιπλέον ποσά απορροφώμενης ενέργειας συγκριτικά με την αξονική φόρτιση.



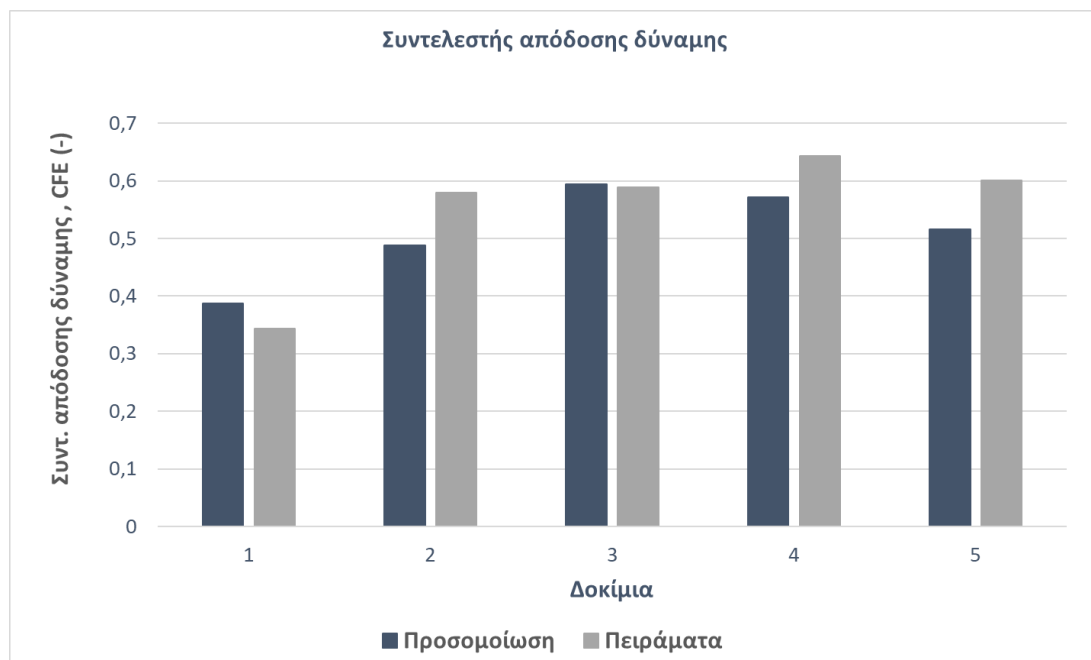
**Σχήμα 61:** Σύγκριση απορρόφησης ενέργειας

Παρατηρώντας στο ακόλουθο σχήμα 62 τη μεταβολή της ειδικής απορροφώμενης ενέργειας με τη γωνία φόρτισης συγκριτικά μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων, βλέπουμε πως αυτή ακολούθησε τη τάση μεταβολής της μέσης δύναμης κατάρρευσης και της ενέργειας απορρόφησης. Παρατηρείται δηλαδή γενικά μια σταθερή και ελαφριά αυξητική διακύμανση της ειδικής απορροφώμενης ενέργειας με τη γωνία φόρτισης παρουσιάζοντας μέγιστη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας περί τα 14 J/gr για τις περιπτώσεις 3 και 5 γωνιών 10° και 20° αντίστοιχα, καθώς στις περιπτώσεις λοξής φόρτισης 2 – 5 παρόλο την υπό γωνία θλιπτική φόρτιση το δοκίμιο εμφάνισε στις περισσότερες περιπτώσεις σχίσμο στις γωνίες της τετραγωνικής διατομής του προκαλώντας έτσι αυξημένη ενέργεια παραμόρφωσης.

Ακόμα, παρατηρώντας στο ακόλουθο σχήμα 63 τη μεταβολή του συντελεστή απόδοσης της δύναμης κατάρρευσης με τη γωνία φόρτισης συγκριτικά μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων, βλέπουμε πως ο δείκτης CFE παρουσιάζει αυξητική τάση με την αύξηση της γωνίας φόρτισης καθώς η μέση δύναμη κατάρρευσης παρουσίασε μια σχεδόν σταθερή διακύμανση η οποία παρόλη την αύξηση της γωνίας φόρτισης παρουσιάστηκε λόγω της έντονης αύξησης της δύναμης κατά τα τελευταία στάδια της λοξής κατάρρευσης, ενώ σε συνδυασμό με τη μείωση της μέγιστης δύναμης κατάρρευσης καθώς η γωνία φόρτισης αυξανόταν ο δείκτης CFE οδηγήθηκε σε υψηλότερες τιμές έως και 0,64 στην περίπτωση 4 για 15° γωνία φόρτισης.

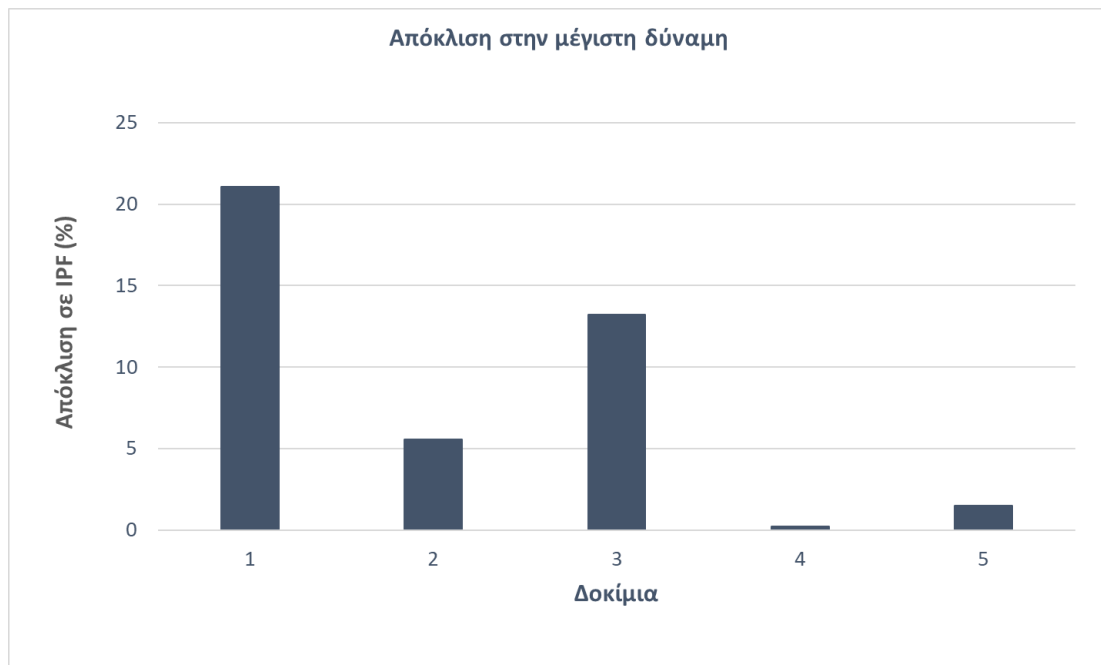


**Σχήμα 62:** Σύγκριση ειδικής ενέργειας απορρόφησης



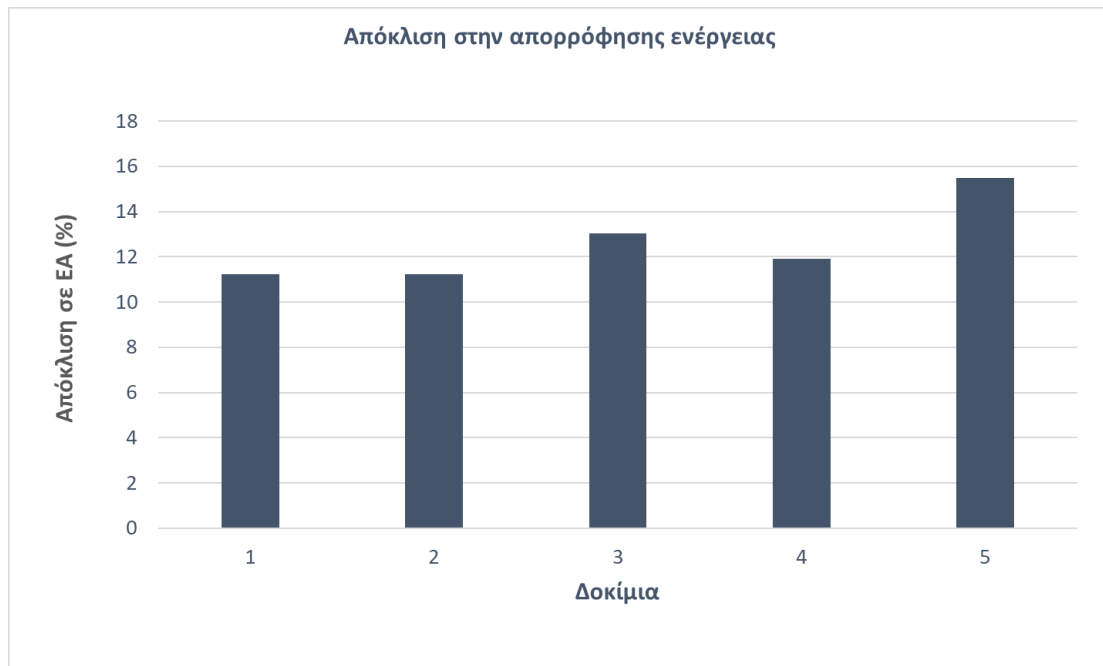
**Σχήμα 63:** Σύγκριση συντελεστή απόδοσης δύναμης κατάρρευσης

Τα ακόλουθα σχήματα 64 και 65 παριστάνουν τα σχετικά σφάλματα στην πρόβλεψη της μέγιστης δύναμης απορρόφησης και της απορροφώμενης ενέργειας όπως προέκυψαν από τις συγκρίσεις των αριθμητικών αποτελεσμάτων των υπολογιστικών προσομοιώσεων και αυτών των πειραματικών δοκιμών. Όπως βλέπουμε αναφορικά με την πρόβλεψη του δείκτη IPF, η περίπτωση της αξονική κρούσης εμφάνισε τη μεγαλύτερη απόκλιση, ενώ οι περιπτώσεις λοξής φόρτισης εμφάνισαν πολύ ικανοποιητικότερη ταύτιση με τα πειράματα εμφανίζοντας στις περισσότερες περιπτώσεις απόκλιση κάτω του 5% με εξαίρεση τη περίπτωση 3 υπό γωνία 10°. Ωστόσο, η ταύτιση αυτή παρουσιάστηκε σε τόσο χαμηλά επίπεδα καθώς στις υπολογιστικές προσομοιώσεις η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης εντοπίστηκε στα τελευταία στάδια της κατάρρευσης λόγω του συσσωρευμένου συμπιεσμένου σωλήνα και στην υψηλή αντοχή ενάντια στην περισσότερη συμπίεσή του, αποδίδοντας έτσι μεγαλύτερη δύναμη κατάρρευσης σε σχέση με την αρχικά μέγιστη για την εκκίνηση της πλαστικής κατάρρευσης και το σχηματισμό του πρώτου μη-εκτατού λοβού.



**Σχήμα 64:** Σφάλματα πειραμάτων-προσομοιώσεων στο δείκτη IPF

Τέλος, τα σχετικά σφάλματα στην προβλεπόμενη απορροφώμενη ενέργεια από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις εμφανίστηκαν μεταξύ 10% και 12% δείχνοντας ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ πειραμάτων και προσομοιώσεων, με εξαίρεση μόνο την περίπτωση 5 της γωνίας φόρτισης 20° όπου το αριθμητικό μοντέλο δεν κατάφερε να προβλέψει ορθά το σχίσμο της διατομής του λεπτότοιχου σωλήνα κατά την κατάρρευση υποεκτιμώντας έτσι την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για αυτόν.



**Σχήμα 65:** Σφάλματα πειραμάτων-προσομοιώσεων στο δείκτη ΕΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Συμπεράσματα – Μελλοντικές Προτάσεις

#### 5.1 Συμπεράσματα

Σε αυτή η διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά τετραγωνικών λεπτότοιχων σωλήνων αλουμινίου T6-6060 σε αξονική και λοξή συμπίεση μέχρι γωνία φόρτισης 20°. Η μελέτη έγινε μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων στο λογισμικό LS-dyna εφόσον πριν δημιουργήθηκαν τα αριθμητικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα από αντίστοιχες δοκιμές προηγούμενης διπλωματικής εργασίας [35], και η σύγκρισή τους εστιάστηκε στο τρόπο κατάρρευσης που εμφανίστηκε και στον υπολογισμό των δεικτών κατάρρευσης μέσω των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των προσομοιώσεων και των πειραμάτων στο τρόπο κατάρρευσης δείχνοντας ότι σε αξονική φόρτιση και σε μικρές γωνίες λοξής φόρτισης κατέρρευσαν σχηματίζοντας μη-εκτατούς λοβούς, ενώ οι προσομοιώσεις δεν κατάφεραν να αναδείξουν στο σχίσμο του λεπτότοιχου πάχους του σωλήνα στις γωνίες της τετραγωνικής διατομής του για μεγάλες γωνίες λοξής φόρτισης. Επίσης, η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης προβλέφθηκε ικανοποιητικά από τις προσομοιώσεις στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας εμφανίζοντας σφάλματα μικρότερα από 12%.

Τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης έδειξαν καλή συμφωνία μεταξύ προσομοιώσεων και πειραμάτων, αποτυπώνοντας σωστά τη διακύμανση της δύναμης κατάρρευσης τόσο στην αρχή της πλαστικής κατάρρευσης όσο και κατά την εξέλιξή της. Όπου η περιοχή σχηματισμού των πτυχώσεων προβλέφθηκε ικανοποιητικά από τις προσομοιώσεις. Η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης φάνηκε να είναι η μεγαλύτερη για την αξονική φόρτιση, ενώ όσο αυξανόταν η γωνία φόρτισης αυτή μειωνόταν με εξαίρεση τη γωνία φόρτισης 20° όπου εμφάνισε μια μικρή αύξηση εξαιτίας των υψηλών δυνάμεων στα τελευταία στάδια της κατάρρευσης.

Η διακύμανση της απορροφώμενης ενέργειας φάνηκε σε σταθερά επίπεδα με την μεταβολή της γωνίας φόρτισης, καθώς παρόλο την αύξηση της γωνίας φόρτισης και την διευκόλυνση της εκκίνησης της πλαστικής κατάρρευσης, το σχίσμο των τετραγωνικών σωλήνων στις άκρες της διατομής τους, η αύξηση της δύναμης κατάρρευσης στα τελευταία στάδια της πλαστικής παραμόρφωσης και η μεγαλύτερη μέγιστη μετατόπιση καθώς η γωνία αυξανόταν ήταν παράγοντες

που οδήγησαν την απορροφώμενη ενέργεια να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα παρόλο την αύξηση της γωνίας φόρτισης. Συμπερασματικά, η λοξή φόρτιση φαίνεται να εμφανίζει μικρότερη μέγιστη δύναμη κατάρρευσης εξαιτίας της υπό κλίσης συμπίεσης του δοκιμίου, ενώ μπορεί να μειώσει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας εξαιτίας της λοξής φόρτισης και της κάμψης του δοκιμίου που μπορεί να εμφανιστεί κατά την κατάρρευση. Ωστόσο, όπως φάνηκε στις περιπτώσεις φόρτισης 4 και 5 υπό 15° και 20° γωνία, η ειδική ενέργεια απορρόφησης μπορεί να διατηρηθεί σε υψηλά επίπεδα εξαιτίας άλλων χαρακτηριστικών της κατάρρευσης, όπως αυτού του σχισίματος της τετραγωνικής διατομής στις άκρες της, γεγονός που απαιτεί μεγαλύτερη δύναμη κατάρρευσης για να γίνει. Τέλος, ο συντελεστής απόδοσης της δύναμης κατάρρευσης έδειξε να αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας φόρτισης καθώς η μέση δύναμη κατάρρευσης διατηρήθηκε σε σταθερά επίπεδα εμφανίζοντας μικρή διακύμανση, ενώ η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης έδειξε σημαντική μείωση καθώς η γωνία φόρτισης στη λοξή συμπίεση αυξανόταν.

## 5.2 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Η μελέτη της λοξής φόρτισης λεπτότοιχων σωλήνων όπως πραγματεύθηκε σε αυτή την εργασία θα μπορούσε να γίνει και για άλλα υλικά δοκιμίων, όπως ο χάλυβας, κάποια σύνθετα υλικά σαν αυτά που είναι ενισχυμένα με ίνες ή τα υλικά τύπου sandwich με διαφορετικές στρώσεις, καθώς και για διαφορετικά κράματα αλουμινίου. Ακόμη, σημαντική θα ήταν η μελέτη διαφορετικών διατομών ως προς τη γεωμετρία τους για να διαπιστωθεί η καλύτερη γεωμετρία και η επίδρασή της στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Επιπλέον, σωλήνες διαφορετικής κατασκευής όπως αυτοί του βαθμιαία μεταβλητού πάχους μπορούν να μελετηθούν είτε μέσω πειραματικών δοκιμών είτε σε συνδυασμό με αντίστοιχες υπολογιστικές προσομοιώσεις. Ακόμη, ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών ταχυτήτων φόρτισης στην πρέσσα διεξαγωγής των πειραμάτων, όπως και η μελέτη διαφορετικών διαστάσεων του δοκιμίου όπως το πάχος του τοιχώματός του, το μήκος των πλευρών του και το αρχικό ύψος τους εφόσον ενδέχεται να εμφανιστούν διαφορετικά χαρακτηριστικά στην κατάρρευση που θα επηρεάσουν με διαφορετικό τρόπο την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Τέλος, σε σχέση με τη μοντελοποίηση μέσω των πεπερασμένων στοιχείων, η μελέτη διαφορετικών στοιχείων από ότι τα διδιάστατα στοιχεία παρουσιάζει ένα ενδιαφέρον, όπως και η μοντελοποίηση των ιδιοτήτων του υλικού ιδίως κατά τη πλαστική του παραμόρφωση μέσω διαφορετικών καρτελών υλικού στο LS-dyna.

## Βιβλιογραφία

- [1] UK government. Department for transport. Statistics on freight, 2016. <https://www.gov.uk/government/statistical-data-sets/tsgb04-freight>, visited on 9/3/2021
- [2] J.M. Alexander: *An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading*. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 13(1):10–15, January 1960.
- [3] T. Wierzbicki and W. Abramowicz: *On the crushing mechanics of thin-walled structures*. Journal of Applied Mechanics, 50:727–734, 1983.
- [4] M. Langseth and O.S. Hopperstad: *Static and dynamic axial crushing of square thin-walled aluminium extrusions*. Int. Journal of Impact Engineering, 18 (7): 949–968, 1996, ISSN 0734-743X.
- [5] O. Jensen, O.S. Hopperstad, and M. Langseth: *Transition from progressive to global buckling of aluminium extrusions – a numerical study*. International Journal of Crashworthiness, 10(6):609–620, 2005.
- [6] N. Jones, Structural Impact, Cambridge University Press, 2011.
- [7] A.G. Mamalis, M. Robinson, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous, M.B. Ioannidis, J. Carruthers, Crashworthy capability of composite material structures, Compos.Struct. 37 (2) (1997) 109–134
- [8] O. Mohammadiha and H. Ghariblu: *Multi-objective optimization of functionally graded thickness tubes under external inversion over circular dies*. Int. Journal of Mechanical and Materials Engineering, 11(8), September 2016.
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium\\_foam\\_sandwich](https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_foam_sandwich)
- [10] V. Crupi, G. Epasto, and E. Guglielmino: *Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam*. Marine Structures, 30:74–96, 2013.
- [11] G. Li, F. Xu, G. Sun, and Q. Li: *Crashworthiness study on functionally graded thin-walled structures*. International Journal of Crashworthiness, 20, 2015.
- [12] S. Ramakrishna and H. Hamada: *Energy absorption characteristics of crashworthy structural composite materials*. 141:585–622, September 1997.
- [13] S. Boria, A. Scattina, and G. Belingardi: *Axial crushing of metal-composite hybrid tubes: experimental analysis*. Procedia Structural Integrity, 8:102–117, 2018.
- [14] Q. Gao, C. Ge, W. Zhuang, L. Wang, and Z. Ma: *Crashworthiness analysis of double-arrowed auxetic structure under axial impact loading*. Materials & Design, 161:22–34, 2019.



- [15] Z. Ahmad, D.P. Thambiratnam, Application of foam-filled conical tubes in enhancing the crashworthiness performance of vehicle protective structures, *Int. J. Crashworthiness* 14 (4) (2009) 349–363.
- [16] M. Costas, J. Díaz, L.E. Romera, S. Hernández, A. Tielas, Static and dynamic axial crushing analysis of car frontal impact hybrid absorbers, *Int. J. Impact Eng.* 62 (2013) 166–181.
- [17] M. Costas, D. Morin, M. Langseth, L. Romera, J. Diaz, J. Díaz, Axial crushing of aluminum extrusions filled with PET foam and GFRP. An experimental investigation, *Thin-Walled Struct.* 99 (2016) 45–57.
- [18] J. Paz, J. Díaz, L. Romera, M. Costas, Crushing analysis and multi-objective crashworthiness optimization of GFRP honeycomb-filled energy absorption devices, *Finite Elem. Anal. Des.* 91 (2014) 30–39.
- [19] M. Costas, J. Díaz, L. Romera, S. Hernández, A multi-objective surrogate-based optimization of the crashworthiness of a hybrid impact absorber, *Int. J. Mech. Sci.* 88 (2014) 46–54.
- [20] C.P. Gameiro, J. Cirne, Dynamic axial crushing of short to long circular aluminium tubes with agglomerate cork filler, *Int. J. Mech. Sci.* 49 (9) (2007) 1029–1037.
- [21] R.M. Coelho, R.J. Alves de Sousa, F.A.O. Fernandes, F. Teixeira-Dias, New composite liners for energy absorption purposes, *Mater. Des.* 43 (2013) 384–392.
- [22] Z. Ahmad, D.P. Thambiratnam, Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading, *Comput. Struct.* 87 (3–4) (2009) 186–197.
- [23] D. Tankara, R. Moradi, Y.Y. Tay, H.M. Lankarani, Energy Absorption Characteristics of a Thin-Walled Tube Filled with Carbon Nano Polyurethane Foam and Application in Car Bumper, in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, p. V012T15A029, 2014.
- [24] A.G. Hanssen, O.S. Hopperstad, M. Langseth, Design of aluminium foam-filled crash boxes of square and circular cross-sections, *Int. J. Crashworthiness* 6 (2) (2001) 177–188.
- [25] A. Markaki, T. Clyne, The effect of cell wall microstructure on the deformation and fracture of aluminium-based foams, *Acta Mater.* 49 (9) (2001) 1677–1686.
- [26] L.J. Gibson, M.F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, Cambridge University Press, 1999.
- [27] R. Brezny, D.J. Green, The effect of cell size on the mechanical behavior of cellular materials, *Acta Metall. Mater* 38 (1990), pp. 2517–2526.

- [28] C. Chen, T.J. Lu, N.A. Fleck, Effect of imperfections on the yielding of two-dimensional foams, *J. Mech. Phys. Solids* 47 (11) (1999) 2235–2272.
- [29] R. Bouix, P. Viot, J.-L. Lataillade, Polypropylene foam behaviour under dynamic loadings: strain rate, density and microstructure effects, *Int. J. Impact Eng.* 36 (2) (2009) 329–342.
- [30] A.A.A. Alghamdi, Collapsible impact energy absorbers: an overview, *Thin Walled Struct.* 39 (2) (2001) 189–213.
- [31] S.R. Reid, T.Y. Reddy, Static and dynamic crushing of tapered sheet metal tubes of rectangular cross-section, *Int. J. Mech. Sci.* 28 (9) (1986) 623–637.
- [32] A. Reyes, M. Langseth, and O.S. Hopperstad: *Square aluminum tubes subjected to oblique loading*. *International Journal of Impact Engineering*, 28(10):1077–1106, 2003.
- [33] T. Børvik, O.S. Hopperstad, A. Reyes, M. Langseth, G. Solomos, and T. Dyngel: *Empty and foam-filled circular aluminium tubes subjected to axial and oblique quasistatic loading*. *International Journal of Crashworthiness*, 8 (5):481–494, 2003.
- [34] A. Niknejad, S.M. Elahi, S.A. Elahi, and S.A. Elahi: *Theoretical and experimental study on the flattening deformation of the rectangular brazen and aluminum columns*. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13(4):449–464, 2013.
- [35] Κ. Ρηγόπουλος. *Κατάρρευση κελύφων τετραγωνικής διατομής υπό λοξή φόρτιση*. Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2021