



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Υπολογιστική διερεύνηση οιονεί στατικής κατάρρευσης
σπειροειδών κελυφών αλουμινίου με σημειακές
συγκολλήσεις

Διπλωματική Εργασία

Αγγελίδης Δημήτριος

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτριος Μανωλάκος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2022

Ευχαριστίες

Ξεκινώντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω συγκεκριμένα πρόσωπα, τα οποία συνέβαλαν με το δικό τους τρόπο στην υλοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Πρώτα και κυριότερα, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα Καθηγητή, κύριο Δημήτριο Μανωλάκο, για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη που προσέφερε, αλλά και για την υπομονή που επέδειξε μαζί μου, καθόλη τη διάρκεια της ενασχόλησης μου με την παρούσα εργασία. Βρισκόμενος κοντά στο τέλος της, μπορώ να πω πως η επιλογή του θέματος ήταν ιδανική, και του είμαι ευγνώμων για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο καινοτόμο και ενδιαφέρον θέμα.

Στη συνέχεια, πρέπει να ευχαριστήσω τα μέλη του Εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών, και πρωτίστως τον κύριο Πρωτεσίλαο Κωστάζο, για τις σημαντικές συμβουλές του και όλες τις επεξηγήσεις και διορθώσεις που μου έδωσε όταν τις χρειάστηκα.

Ταυτόχρονα, ο υποψήφιος διδάκτορας Σταύρος Λυκάκος βοήθησε με τη συνεισφορά του πάνω σε συγκεκριμένα προβλήματα που αντιμετώπισα.

Προχωρώντας, τίποτα δε θα ήταν δυνατό χωρίς τη συμβολή των γονιών μου, Ανδρέα και Βασιλικής, που στάθηκαν με κατανόηση δίπλα μου και με υποστήριξαν με τη συνεχή ενθάρρυνσή τους.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Υπολογιστική διερεύνηση οιονεί στατικής κατάρρευσης σπειροειδών κελυφών αλουμινίου με σημειακές συγκολλήσεις

Διπλωματική Εργασία

Αγγελίδης Δημήτριος

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτριος Μανωλάκος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2022

Περίληψη

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις για μείωση κόστους και βάρους των οχημάτων, με σκοπό την μείωση των εκπομπών καυσαερίου και την κατανάλωση καυσίμου, έχει δώσει εφαλτήριο στην μελέτη νέων δομών και υλικών απορροφητών ενέργειας. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετούνται οι επιδόσεις, ως προς την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, λεπτότοιχων κυλινδρικών μοντέλων με πολλαπλά τοιχώματα (σε μορφή σπείρας) με ενίσχυση σημειακών ισαπέχουσων συγκολλήσεων (spotwelds) καθ' ύψος, σε κατάρρευση στα 2/3 του αρχικού τους ύψους. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με χρήση του μη γραμμικού κώδικα LS-Dyna σε περιβάλλον LS-PrePost. Αρχικά δημιουργήθηκαν τα μοντέλα στο λογισμικό και έγινε επιβεβαίωση πειραματικής μελέτης ίδιων δομών χωρίς εισαγωγή συγκολλήσεων. Ο τρόπος κατάρρευσης βρέθηκε πως είναι πρακτικά ο ίδιος μεταξύ των μοντέλων και των δοκιμών στα οποία βασίστηκαν, και οι δείκτες κατάρρευσης βρέθηκαν πως συμφωνούν ικανοποιητικά. Για σύγκριση δημιουργήθηκε και

μελετήθηκε υπολογιστικά σε όμοιες συνθήκες μια σειρά από κυλινδρικά κελύφη κλειστής διατομής ίδιου μήκους, μέσης διαμέτρου και εμβαδού διατομής με τα προαναφερθέντα μοντέλα σπειροειδούς διατομής. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση με μοντελοποίηση διαφόρου πλήθους spotwelds (3, 4, 5, 6, 8, 10 και συνεχής ραφή) σε μοντέλο 2 σπειρών. Η υπολογιστική μελέτη έδειξε πως υπάρχει αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας με την αύξηση των spotwelds. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν για ομάδες μοντέλων 2, 3, 4 και 5 σπειρών και για τέσσερα μοντέλα ίδιας μάζας με το μοντέλο 3 σπειρών, αλλά με διαφορετικές μέσες διαμέτρους και αριθμό περιελίξεων ("3.1", "3.3", "3.5", "3.7"). Έπειτα έγινε παραμετρική ανάλυση για πλήθος spotwelds για μοντέλο 3 σπειρών με πακτωμένα άκρα. Τα αποτελέσματα δείχνανε πως οι δείκτες κατάφρασης αυξάνονται και εδώ με αύξηση του πλήθους των σημειακών συγκολλήσεων. Τέλος μελετήθηκαν με συνθήκες πακτωμένων άκρων και τριών spotwelds τα οκτώ δοκίμια που μελετήθηκαν και στην πρώτη μελέτη (2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7") για να εξετασθούν οι επιπτώσεις της πάκτωσης για διάφορα πλήθη σπειρών. Τα αποτελέσματα δείχνανε πως ο δείκτης *IPF* αυξάνεται συγκριτικά με την περίπτωση απουσίας πάκτωσης, ενώ στους δείκτες *MCF*, *EA* και *SEA* υπήρξε μια μικρή αύξηση για κάποια από τα μοντέλα.



National Technical University of Athens

School of Mechanical Engineering

Department of Manufacturing Technology.

Quasi static axial crushing of multi walled (spiral) aluminum tubes with spotwelds: a numerical investigation

Diploma Thesis

Angelidis Dimitrios

Supervisor: Manolakos Dimitrios, Professor NTUA

Athens, 2022

Abstract

The increasing demand in the automotive industry for reduced manufacturing costs and vehicle weight, in order to reduce fuel consumption and exhaust emissions, has led to the study of new designs and materials for energy absorbers. This thesis investigates the crashworthiness performance of multi-walled (spiral) aluminum tubes, with spotweld reinforcement along their height dimension, for crushing lengths that corresponded to $2/3$ of their axial length. The numerical investigation was conducted using the explicit non-linear finite element code LS-Dyna. Initially eight models were built to verify the experimental study done on such specimens. The deformation patterns of the spiral models were found to be virtually the same as those of the spiral tubes. The absorbed energy and the mean crushing force appeared to be in good agreement. A series of conventional (closed-section) circular tube models of the same axial length, mean diameter, and cross-sectional area as those of the corresponding spiral models were built for comparison. A sensitivity analysis was

conducted for a variety of spotweld cases (3, 4, 5, 6, 8, 10 as well as a continuous weld) using the model with 2 spirals. The results showed that by increasing the number of spotwelds the absorbed energy was increased. These results were verified with models of 3, 4 and 5 spirals as well as four model with the same mass as model "3", but different mean diameter and number of spirals ("3.1", "3.3", "3.5", "3.7"). Additionally a sensitivity analysis was conducted on the model with 3 spirals and anchored ends. The results showed an increase of the initial peak force and no significant change in energy absorption. Lastly a numerical investigation was conducted on all eight models (2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7") for the scenario of three spotwelds and anchored ends. Results showed an increase on the initial peak force, which resulted in a minor increase in the absorbed energy on some of the models.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	i
1 Εισαγωγή	1
1.1 Αυτοκινητιστικά ατυχήματα	1
1.1.1 Γενικά	1
1.1.2 Αυτοκινητιστικά ατυχήματα σε παγκόσμιο επίπεδο	4
1.1.3 Αυτοκινητιστικά ατυχήματα στην Ελλάδα	5
1.1.4 Επιπτώσεις σύγκρουσης	6
1.2 Μελέτη υλικών ως προς την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας	8
1.2.1 Χαρακτηριστικά απορροφητών ενέργειας	8
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση και σκοπός εργασίας	11
2.1 Ιστορική ανασκόπηση	11
2.2 Σύγχρονες τεχνολογίες	13
2.2.1 Υλικά απορροφητών ενέργειας	13
2.2.2 Γεωμετρικές δομές απορροφητών ενέργειας	16
2.2.3 Τύποι μηχανικής καταπόνησης	18
2.3 Στόχος εργασίας και τρόπος επίτευξης αυτού	21
3 Στοιχεία θεωρίας	23
3.1 Ορισμοί - Συμπληρωματικές έννοιες	23
3.1.1 Οριακή ανάλυση - μοντελοποίηση υλικών	23
3.1.2 Καμπτική ροπή στην Οριακή Ανάλυση	24
3.1.3 Πλαστικός αρμός	25

3.2	Αξονική κατάρρευση σωλήνων κυκλικής διατομής	27
3.2.1	Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης	27
3.2.2	Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης	29
3.2.3	Μικτός τρόπος κατάρρευσης	29
3.2.4	Λυγισμός Euler	30
3.3	Δυναμικά φαινόμενα	31
3.4	Δείκτες κατάρρευσης	33
3.4.1	Ενέργεια απορρόφησης	33
3.4.2	Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης	34
3.4.3	Μέση δύναμη κατάρρευσης	34
3.4.4	Απόδοση δύναμης κατάρρευσης	34
3.4.5	Ειδική ενέργεια απορρόφησης	35
4	Διαδικασία ανάπτυξης αριθμητικών μοντέλων	36
4.1	Πειραματική διαδικασία	36
4.2	Υπολογιστική προσομοίωση	39
4.3	Περιγραφή μοντελοποίησης	40
4.4	Διαδικασία μοντελοποίησης	42
4.4.1	Δημιουργία σωμάτων και πλέγματος	42
4.4.2	Καθορισμός μηχανικών ιδιοτήτων υλικών	44
4.4.3	Καθορισμός οριακών συνθηκών	46
4.4.4	Συνθήκες φόρτισης	47
4.4.5	Καταγραφή αποτελεσμάτων και τερματισμός	49
4.5	Ενίσχυση με σημειακές συγκολλήσεις	50
4.6	Εισαγωγή πακτώσεων	54
4.7	Μοντέλα κλειστής διατομής	55
5	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	57
5.1	Επιβεβαίωση πειραματικής διαδικασίας	57
5.2	Μοντέλα με ελεύθερα άκρα	62

5.2.1	Παραμετρική ανάλυση για πλήθος spot welds	62
5.2.2	Παραμετρική ανάλυση για πλήθος σπειρών	72
5.3	Μοντέλα με πακτωμένα άκρα	79
5.3.1	Παραμετρική ανάλυση για πλήθος spot welds	79
5.3.2	Παραμετρική ανάλυση για πλήθος σπειρών	88
5.4	Ανάλυση αποτελεσμάτων	94
6	Σύνοψη εργασίας και συμπεράσματα	101
7	Μελλοντική Διερεύνηση	104
	Βιβλιογραφία	106

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

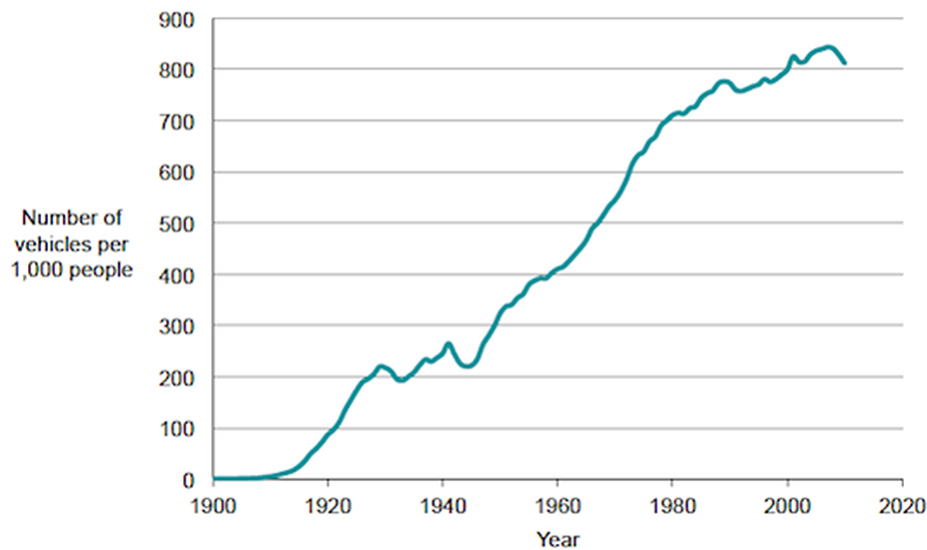
Σύνοψη: Στο παρακάτω κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση για το τρόπο κατάρρευσης των πλαισίων οχημάτων κατά τη σύγκρουση και την ανάγκη μελέτης λεπτότοιχων απορροφητών ενέργειας για την βελτίωση της ασφάλειας αυτών

1.1 Αυτοκινητιστικά ατυχήματα

1.1.1 Γενικά

Η πρόοδος στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας έχει καταστήσει το αυτοκίνητο ως το μακράν χρησιμότερο προσωπικό όχημα παγκοσμίως. Αυτό έχει γίνει εφικτό καθώς τα αυτοκίνητα έχουν γίνει στο πέρασμα του χρόνου ανετότερα, ασφαλέστερα, ταχύτερα, οικονομικότερα, μπορούν να διανύουν ολοένα και μεγαλύτερες αποστάσεις καθώς και να μεταφέρουν μεγαλύτερα φορτία. Αυτοί οι παράγοντες συνέβαλλαν στην ραγδαία αύξηση του αριθμού των επιβατικών αυτοκινήτων στους δρόμους κατά τον εικοστό και εικοστό πρώτο αιώνα όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1 για την περίπτωση της Αμερικής. Με την εφαρμογή νέων τεχνολογιών το αυτοκίνητο δύναται να συνεχίσει να βελτιώνεται στους προαναφερθέντες τομείς.

Figure 1. Vehicles per 1,000 People in the United States



Σχήμα 1.1: Αριθμός των επιβατικών αυτοκινήτων στις Η.Π.Α ανά 1000 άτομα 1900-2010[1]

Πληθώρα μελετών έχει δείξει πως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή και την υπερθέρμανση του πλανήτη και πως ο τομέας των μεταφορών είναι αυτός που παράγει το μεγαλύτερο ποσοστό αερίων του θερμοκηπίου. Χαρακτηριστικά, το 2016 οι μεταφορές ευθύνονταν για το 26% των αερίων του θερμοκηπίου στη Μεγάλη Βρετανία, το μεγαλύτερο ποσοστό από κάθε άλλο τομέα [2]. Αυτό συμβαίνει επειδή παραδοσιακά τα καύσιμα των οχημάτων είναι κυρίως μείγματα υδρογονανθράκων (για παράδειγμα βενζίνη) και η καύση τους παράγει μείγμα αερίων, μεταξύ αυτών και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), σε ποσοστό $\approx 12\%$ [3]. Αφού λοιπόν κύριο συστατικό των καυσίμων είναι ο άνθρακας, είναι λογικό πως η εκπομπή CO_2 και η κατανάλωση καυσίμου συνδέονται γραμμικά. Συνεπώς, μειώνοντας τις απαιτήσεις κατανάλωσης καυσίμου, μειώνονται και οι εκπομπές CO_2 .

Οι σχεδιαστικές παράμετροι ενός οχήματος (όπως π.χ. η μάζα, οι διαστάσεις, το σχήμα του και η απόδοση του κινητήρα του) είναι μεταξύ άλλων από τους παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπομπές ενός οχήματος [4]. Για ίδιες ταχύτητες κίνησης, ελαφρύτερα οχήματα τείνουν να έχουν χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Σχεδιαστικά η ελάφρυν-

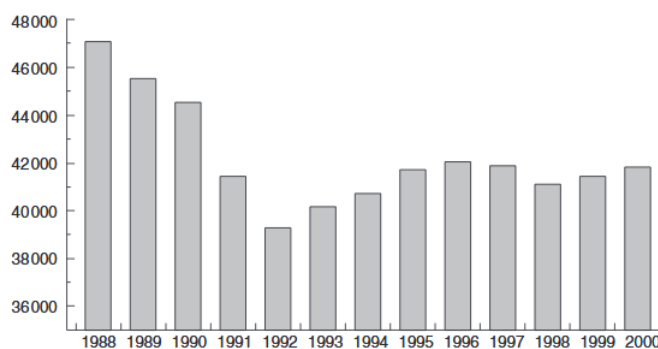
ση των οχημάτων μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους:

- *Αντικατάσταση υλικών με ελαφρύτερες εναλλακτικές.* Τα πιο συχνά υλικά που αντικαθιστούν τον χάλυβα είναι κράματα αλουμινίου, αφρώδη υλικά χαμηλής πυκνότητας και πολυμερή υλικά ενισχυμένα με ίνες (FRP) [5]. Αυτό δεν είναι πάντα εφικτό καθώς η εναλλαγή στα υλικά μιας κατασκευής περιορίζεται από παράγοντες όπως η αντοχή της κατασκευής, οι διαστάσεις των εξαρτημάτων και το κόστος παραγωγής αυτών [6].
- *Ενσωμάτωση εξαρτημάτων.* Άλλη μια μέθοδος ελάφρυνσης οχημάτων είναι η αντικατάσταση ενός ή περισσότερων εξαρτημάτων με ένα ίδιας λειτουργικότητας και ιδιοτήτων. Για παράδειγμα μελέτη έδειξε πως αντικατάσταση κλασσικού δαπέδου λεωφορείου από χαλύβδινες δοκούς και σανίδες ξύλου με θερμοδιαμορφωμένο πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GFRP) επέφερε μείωση του βάρους κατασκευής ως και 30% [7].
- *Βελτιστοποίηση δομικού σχεδιασμού.* Χρησιμοποιείται συνδυασμός τριών τύπων βελτιστοποίησης δομικού σχεδιασμού: (α) βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης (β) βελτιστοποίηση μορφής (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 [8].

Το ενδιαφέρον της έρευνας στην αυτοκινητοβιομηχανία σήμερα κινείται στην κατασκευή ελαφρύτερων οχημάτων για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους. Η σχεδιαστική τάση ελάττωσης του βάρους των πλαισίων των οχημάτων, σε συνδυασμό με την τάση αύξησης της ταχύτητας των νεότερων επιβατικών αυτοκινήτων, συνεπάγεται συνθήκες φόρτισης που ολοένα και πλησιάζουν τα όρια αντοχής των πλαισίων.

1.1.2 Αυτοκινητιστικά ατυχήματα σε παγκόσμιο επίπεδο

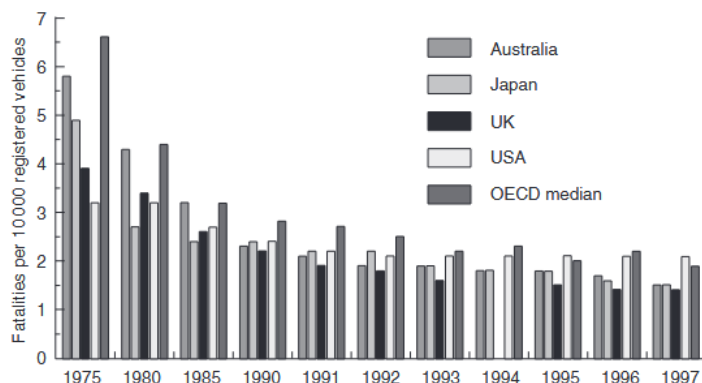
Ένα δυσάρεστο παρελκόμενο της ραγδαίας αύξησης στην χρήση και τον αριθμό των οχημάτων είναι και η αύξηση ατυχημάτων και συγκρούσεων αυτών. Δυστυχώς τη σημερινή εποχή τα αυτοκινητιστικά ατυχήματα είναι ακόμη ένας από τους κυριότερους παράγοντες απώλειας της ζωής και υγείας παγκοσμίως. Όσο μεγαλύτερη συμμετοχή έχει ο ανθρώπινος παράγοντας στην κίνηση του οχήματος, τόσο μεγαλύτερα είναι τα ποσοστά των ατυχημάτων. Κοιτάζοντας την κατάσταση σε χώρες του εξωτερικού, στην Αμερική τα αυτοκινητιστικά δυστυχήματα είναι η πρώτη αιτία θανάτου για νέους ηλικίας έως 34 ετών - πάνω από κάθε άλλο είδος ατυχημάτων ή ασθένειας. Στο σχήμα 1.2 φαίνονται οι θάνατοι από αυτοκινητιστικά δυστυχήματα ανά έτος στις Η.Π.Α. Ένα ακόμα θλιβερό στατιστικό είναι πως στις Η.Π.Α τα ατυχήματα μεταξύ τροχοφόρων οχημάτων είναι υπεύθυνα για το 95% των θανάτων που αφορούν τα επίγεια μεταφορικά μέσα. Για σύγκριση, οι θάνατοι εξ αιτίας αεροπορικών ατυχημάτων είναι μόνο το 2%.



Σχήμα 1.2: Θάνατοι από αυτοκινητιστικές συγκρούσεις στην Αμερική ανά χρόνο. [9]

Παγκοσμίως διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία υπάρχουν για τα κράτη του OECD (Organization for Economic Co-Operation and Development). Ο OECD παρέχει στατιστικά στοιχεία οδικής ασφάλειας στη διεθνή βάση δεδομένων κυκλοφορίας και ατυχημάτων (International Traffic and Accident Database) για τα κράτη μέλη του, με δείκτη τον αριθμό των θανάτων ανά 10.000 εγγεγραμμένα οχήματα. Ο μέσος όρος του δείκτη μεταξύ των χωρών μελών βρισκόταν στο 2.0 σημειώνοντας πτώση 6.7 μονάδων από το 1975. Οι τιμές του κυμαίνονταν από το 0.7 για την Ισλανδία έως το 11.1 για την

Κορέα [9]. Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται ο αριθμός των θανάτων για κάθε 10.000 εγγεγραμμένα οχήματα για μερικές χώρες του OECD.

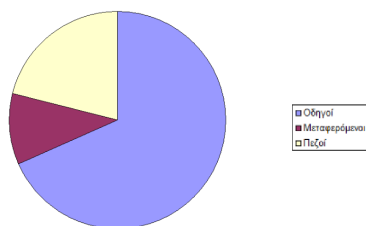


Σχήμα 1.3: Θανατηφόρα αυτοκινητιστικά ατυχήματα ανά 10.000 εγγεγραμμένα οχήματα για χώρες του OECD[9]

1.1.3 Αυτοκινητιστικά ατυχήματα στην Ελλάδα

Στη χώρα μας, σύμφωνα με την Ελληνική Στατιστική Αρχή [10], το έτος 2019 συνέβησαν 668 αυτοκινητιστικά ατυχήματα τα οποία απενέβησαν θανατηφόρα. Εξ αυτών το μεγαλύτερο ποσοστό θανάτων ήταν οδηγοί και μεταφερόμενοι στα οχήματα όπως βλέπουμε στο σχήμα 1.4. Ωστόσο φαίνεται πως καταγράφηκε μικρή μείωση σε όλες τις κατηγορίες των παθόντων από τα τροχαία ατυχήματα [11] όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4.

Νεκροί από αυτοκινητικά ατυχήματα στην Ελλάδα 2019



		2019 σε σχέση με το 2018	
		Ποσοστιαία Μεταβολή	Αριθμητική Μεταβολή
Ατυχήματα	Θανατηφόρα	1,5%	10
	Σοβαρά	-8,8%	-53
	Ελαφρά	1,6%	152
	Σύνολο	1,0%	109
Παθόντες	Νεκροί	-1,1%	-8
	Βαριά τραυματίες	-8,7%	-61
	Ελαφρά τραυματίες	-0,3%	-42
	Σύνολο	-0,8%	-111

Σχήμα 1.4: Θανατηφόρα αυτοκινητιστικά ατυχήματα στην Ελλάδα κατά το 2019 σύμφωνα με την ΕΣΑ [10] (αριστερά), ποσοστιαία και αριθμητική μεταβολή ατυχημάτων και παθόντων 2019 [11](δεξιά)

Σύμφωνα με τα δεδομένα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, η Ελλάδα κατέχει

την τρίτη υψηλότερη θέση στους δείκτες θνησιμότητας από τροχαία ατυχήματα μεταξύ παιδιών, εφήβων και νέων έως 25 ετών στην Ε.Ε. Στην Ελλάδα, κάθε βαριά τραυματισμένος κοστίζει περίπου 30.000 € και κάθε ελαφριά τραυματισμένος 3.000 €. Η ελληνική οικονομία επιβαρύνεται ετησίως με δαπάνες άνω των 14 εκατομμυρίων ευρώ για την πληρωμή συντάξεων ή αποζημιώσεων για νοσήλια, για αποκατάσταση ζημιών και σωματικών βλαβών. Σε αυτό το ποσό δεν έχει συμπεριληφθεί η απώλεια εργατικού δυναμικού ή η επιπλέον εργασιακή απασχόληση προσωπικού για την αντιμετώπιση των συνεπειών των τροχαίων ατυχημάτων. Αυτό συνεπάγεται επιπλέον ιατρικό προσωπικό, δαπάνες περίθαλψης, τροχονόμοι, πραγματογνώμονες, δικαστικοί, ασφαλιστές, όπως και άλλα δευτερεύοντα έξοδα (δικαστικά, οδοιπορικά κ.λπ.) που θα πρέπει να συνυπολογισθούν στην επιβάρυνση της ελληνικής οικονομίας [11]. Στο σχήμα 1.5 παρατίθενται συγκεντρωτικά στοιχεία τροχαίων ατυχημάτων και παθόντων από αυτά την περίοδο 2015-2019.

Έτος		2019*	2018	2017	2016	2015
Ατυχήματα	Θανατηφόρα	665	655	679	772	754
	Σοβαρά	550	603	607	742	928
	Ελαφρά	9.531	9.379	9.416	9.901	9.929
	Σύνολο	10.746	10.637	10.702	11.415	11.611
Παθόντες	Νεκροί	701	709	740	824	805
	Βαριά τραυματίες	642	703	698	879	1074
	Ελαφρά τραυματίες	12.029	12.071	12.201	12.946	12.959
	Σύνολο	13.372	13.483	13.639	14.649	14.838

Σχήμα 1.5: Ποσοστιαία και αριθμητική μεταβολή ατυχημάτων και παθόντων για τις χρονιές 2015-2019 [11]

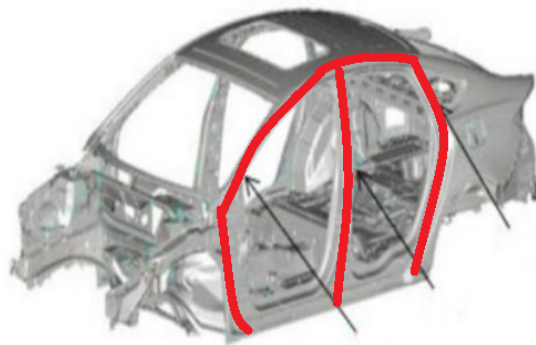
1.1.4 Επιπτώσεις σύγκρουσης

Όπως δείχνουν όλοι οι δείκτες με την πάροδο του χρόνου αναμένουμε περισσότερα οχήματα στους δρόμους παγκοσμίως, καθώς και περισσότερα διανυόμενα χιλιόμετρα ανά όχημα. Το γεγονός αυτό πιθανότατα θα συμβάλλει στη περαιτέρω αύξηση των ατυχημάτων κάθε φύσης στους δρόμους. Οπωσδήποτε η αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου πρέπει και μπορεί να είναι πολυμέτωπη, με πρώτο και κυριότερο μέλημα την σωστή εκπαίδευση των ίδιων των οδηγών ως προς τα θέματα οδικής συμπεριφοράς και τον κώδικα οδικής κυκλοφορίας.

Είναι γνωστό πως κατά την σύγκρουση ενός οχήματος, το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα είναι η μείωση της ταχύτητας του οχήματος (και ως εκ τούτου και των ίδιων των επιβατών) από μία ταχύτητα (v) με την οποία ταξιδεύει το όχημα, σε μηδενική ταχύτητα, εντός ενός πολύ μικρού χρονικού διαστήματος (t). Για να πραγματοποιηθεί αυτός ο μηδενισμός της ταχύτητας εφαρμόζεται στο όχημα μια δύναμη F ο ρόλος της οποίας είναι να αντισταθεί στη δύναμη της αδράνειας που είναι $\frac{mv}{t}$, όπου m η συνολική μάζα του φορτωμένου οχήματος. Ως εκ τούτου, όσο μικρότερος είναι ο χρόνος t κατά τον οποίο λαμβάνει χώρα η σύγκρουση, τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη F που αναπτύσσεται, και τόσο πιο απότομη επιβράδυνση βιώνουν το όχημα και οι επιβάτες. Αυτές είναι οι δυνάμεις που προκαλούν τραυματισμούς στους επιβάτες (κυρίως στο κρανίο που δεν συγκρατείται από τη ζώνη ασφάλειας όπως ο κορμός του σώματος) και υλικές ζημιές στο όχημα αλλά και στο φορτίο του οχήματος (cargo). Αξίζει εδώ να σημειωθεί πως για τους επιβάτες υπάρχει και ο κίνδυνος να συγκρουστούν και οι ίδιοι με το εσωτερικό του οχήματος ή με το εμπόδιο στο οποίο προσέκρουσε το όχημα ή με ένα τρίτο αντικείμενο κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης. Εν γένει, σε ένα αυτοκίνητο τα τμήματα του πλαισίου όπως σημειώνονται στο σχήμα 1.6 πρέπει να παραμένουν απαραμόρφωτα [12], καθώς μεταξύ αυτών είναι το τμήμα του αυτοκινήτου που φυλάσσει τους επιβάτες. Ωστόσο, λόγω της απότομης επιβράδυνσης υπάρχει κίνδυνος να χτυπήσει το κεφάλι κάποιου επιβάτη σε αυτές τις ράγες. Οι κατασκευαστές μεριμνούν για αυτό τοποθετώντας γύρω από τις εικονιζόμενες ράγες του σχήματος 1.6 επιπλέον κάποιο μαλακό υλικό ώστε να αποφευχθούν όσο γίνεται τραυματισμοί.

Με γνώμονα τα παραπάνω οι αυτοκινητοβιομηχανίες στρέφονται να σχεδιάσουν οχήματα τα οποία κατά τη σύγκρουση καταρρέουν με τρόπο τέτοιο ώστε να περιορίζουν τις δυνάμεις που αναπτύσσονται και να αυξάνουν τη διάρκεια του όλου φαινομένου, προφυλάσσοντας έτσι κατά το βέλτιστο τρόπο τους επιβάτες εντός του οχήματος. Αρκετοί κατασκευαστές αυτοκινήτων έχουν εισάγει ενισχυμένες πόρτες και πλαίσια που κρατάνε ανέπαφο το τμήμα του αυτοκινήτου που περιλαμβάνει τους επιβάτες για συγκρούσεις χαμηλότερες των 50 χλμ/ώρα. Πιο σύγχρονοι σχεδιασμοί επιτρέπουν στα καθίσματα, το τιμόνι και άλλα μέρη του οχήματος να έχουν κάποια περιορισμένη ικανότητα απορ-

ρόφησης ενέργειας, αυξάνοντας έτσι την ολική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του οχήματος [9].



Σχήμα 1.6: Πλαίσιο ενός τυπικού επιβατικού οχήματος

1.2 Μελέτη υλικών ως προς την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας

Με βάση τα παραπάνω είναι αυτονόητο πως πρέπει να υπάρξει σχεδιαστική μέριμνα για την ασφάλεια των αυτοκινήτων. Κομμάτι αυτών των σχεδιαστικών απαιτήσεων είναι να κατασκευάσουν πλαίσια τα οποία κατά τη σύγκρουση θα απορροφούν την κινητική ενέργεια του οχήματος και θα την μετατρέπουν σε άλλες μορφές ενέργειας (όπως είναι π.χ. το πλαστικό έργο), με τρόπο προβλέψιμο, ελεγχόμενο και επιθυμητό, ώστε να προφυλάξουν τους επιβάτες και τα φορτία-εμπορεύματα που τυχόν μεταφέρουν. Το μέτρο της ικανότητας μιας δομής να παραμορφώνεται πλαστικά απορροφώντας κινητική ενέργεια κατά την σύγκρουση ονομάζεται **crashworthiness**.

1.2.1 Χαρακτηριστικά απορροφητών ενέργειας

Για την κατανοήσουμε τους μηχανισμούς απορρόφησης κινητικής ενέργειας κατά τη σύγκρουση των οχημάτων, μελετάμε τη συμπεριφορά των επιμέρους τμημάτων στο εργαστήριο. Ο απορροφητής ενέργειας είναι ένα σύστημα που μετατρέπει μέρος ή ολόκληρη την κινητική ενέργεια κατά τη σύγκρουση σε άλλη μορφή ενέργειας, όπου

ιδανικά δε θα μπορεί να ανακτηθεί (όπως π.χ. πλαστικό έργο, έργο δύναμης τριβής, έργο ιξώδους κ.λπ.).

Η νοοτροπία σχεδιασμού ενός απορροφητή ενέργειας διαφέρει κατά την εφαρμογή καθώς είναι πολλοί οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν όπως π.χ. οι αρχικές συνθήκες φόρτισης κατά την κατάρρευση, το βάρος της κατασκευής κ.λπ.. Παρόλα αυτά σε όλες τις περιπτώσεις ο στόχος παραμένει ο ίδιος: η διάχυση της κινητική ενέργειας με ελεγχόμενο τρόπο ή με προκαθορισμένο ρυθμό. Μερικά από τα κριτήρια που πρέπει να πληρεί ένας απορροφητής ενέργειας είναι τα ακόλουθα:

- **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 μετατρέποταν σε ελαστική παραμόρφωση, μετά το πέρας της αρχικής φόρτισης η ενέργεια θα αποδιδόταν στην κατασκευή [9].

- **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 [9].

- **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 ($W = F \cdot \Delta x$), 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 [9].

- **Σταθερός και επαναλαμβανόμενος τρόπος παραμόρφωσης**

Για να ανταπεξέλθει στα αβέβαια φορτία η μορφή κατάρρευσης και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πρέπει να είναι σταθερές και επαναλαμβανόμενες για τον κάθε απορροφητή, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της κατασκευής [9].

- **Χαμηλό βάρος και υψηλή ειδική απορρόφηση ενέργειας**

Οι απορροφητές ενέργειας πρέπει να είναι όσο το δυνατό ελαφρύτεροι και ικανοί για μεγάλη ειδική απορρόφηση ενέργειας (δηλαδή απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα βάρους), παράγοντας που είναι ζωτικής σημασίας για απορροφητές ενέργειας που τοποθετούνται σε οχήματα (ιδιαίτερα εναέρια) και κατασκευές που εξασφαλίζουν την ασφάλεια ανθρώπων.

- **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. Γι' αυτό, όλες οι προστατευτικές κατασκευές πρέπει να λειτουργούν εντός οικονομικών ορίων. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για συσκευές απορρόφησης ενέργειας που είναι συνήθως μίας χρήσης (δηλαδή άπαξ και παραμορφωθούν απορρίπτονται και αντικαθίστανται) [9].

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση και σκοπός εργασίας

Σύνοψη: Στο παρακάτω κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση στην εξέλιξη της μελέτης πάνω στους απορροφητές ενέργειας και αναφορά στο αντικείμενο εξέτασης αυτής της εργασίας.

2.1 Ιστορική ανασκόπηση

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η ανάγκη για ασφαλέστερα οχήματα ήταν ο καθοριστικός λόγος για την μελέτη και βελτίωση των απορροφητών ενέργειας. Οι έρευνες πάνω στους απορροφητές ενέργειας είναι ακόμα και σήμερα εκτενείς, και ο κλάδος εξαπλώνεται και σε μελέτες νέων γεωμετριών και υλικών, στην προσπάθεια βελτιστοποίησης αυτών των κατασκευών.

Η πρώτη μελέτη αντοχής στη σύγκρουση έγινε τη δεκαετία του 1940 στον τομέα της αεροναυπηγικής από τον Hugh De Haven [13]. Η έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα πως η αιτία τραυματισμών κατά τη σύγκρουση οφείλεται στο φορτίο που αναπτύσσεται. Προτείνει ακόμη πως οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις θα μπορούσαν να μετριαστούν με την χρήση ειδικών διατάξεων απορρόφησης ενέργειας. Το 1951 προτάθηκε και το

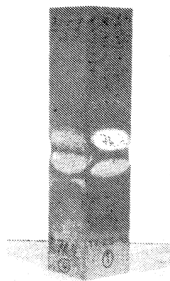
πρώτο κριτήριο αναφορικά με τον σχεδιασμό απορροφητών ενέργειας που βασίστηκε στην έρευνα του De Haven.

Η πρώτη θεωρητική μελέτη πάνω στο αντικείμενο έγινε από τον Alexander [14] το 1960 πάνω σε λεπτότοιχους σωλήνες χάλυβα. Το μοντέλο αυτό υποθέτει μοτίβο κατάρρευσης φουσαρόνικα (concertina mode) με ευθείες αναδιπλώσεις (straight-sided convolutions) κάθετες στον άξονα του κελύφους.

Το 1978 οι Johnson και Mamalis [15] ξεκίνησαν την έρευνα στις συγκρούσεις οχημάτων, τις συνέπειες αυτών για τους επιβάτες και πρότειναν τρόπους για την βελτίωση της συμπεριφοράς των οχημάτων κατά κατάρρευση. Την δεκαετία του 1980 οι Abramowicz και Wierzbicki [16] επέκτειναν την έρευνα και σε χαλύβδινους σωλήνες τετραγωνικών διατομών συνοδευόμενες από πειραματικές επαληθεύσεις αυτών των μελετών από τον Abramowicz.

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. Το 1996 οι Langseth και Hopperstad [17] διερεύνησαν πειραματικά την αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων κελυφών τετραγωνικής διατομής από αλουμίνιο σε οιονεί στατικές και δυναμικές φορτίσεις. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους έδειξαν πως σε δυναμικές φορτίσεις είχαμε μεικτό τρόπο κατάρρευσης των τεμαχίων. Επίσης σε συνθήκες δυναμικής φόρτισης παρουσιαζόταν μεγαλύτερη μέση δύναμη σε σχέση με την στατική φόρτιση. Στην ίδια έρευνα μελετήθηκε και η εισαγωγή ατελειών στα δοκίμια πριν την κατάρρευση, με την μορφή μιας αρχικής παραμόρφωσης (σχήμα 2.1). Τα αποτελέσματα έδειξαν πως τα δοκίμια με την αρχική παραμόρφωση εμφάνισαν μεγαλύτερη ολική παραμόρφωση μετά το πέρας της κατάρρευσης σε σχέση με τα απαραμόρφωτα. Αργότερα οι δύο τους μαζί με τον Jensen [18] 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.



Σχήμα 2.1: Λεπτότοιχος απορροφητής ενέργειας τετραγωνικής διατομής με εισαγωγή ατέλειας [17]

2.2 Σύγχρονες τεχνολογίες

Την τελευταία δεκαετία η πρόοδος των τεχνολογιών στις υπολογιστικές και πειραματικές τεχνικές μηχανικών δοκιμών καθώς και στις τεχνολογίες κατασκευής και παραγωγής των υπό εξέταση δομών, έχει οδηγήσει την έρευνα πάνω στους απορροφητές ενέργειας να στραφεί στην μελέτη πιο καινοτόμων υλικών, δομών και τρόπων φόρτισης. Σε αυτή την παράγραφο θα αναφερθούν επιγραμματικά μερικές από τις πιο σύγχρονες τεχνολογίες απορροφητών ενέργειας.

2.2.1 Υλικά απορροφητών ενέργειας

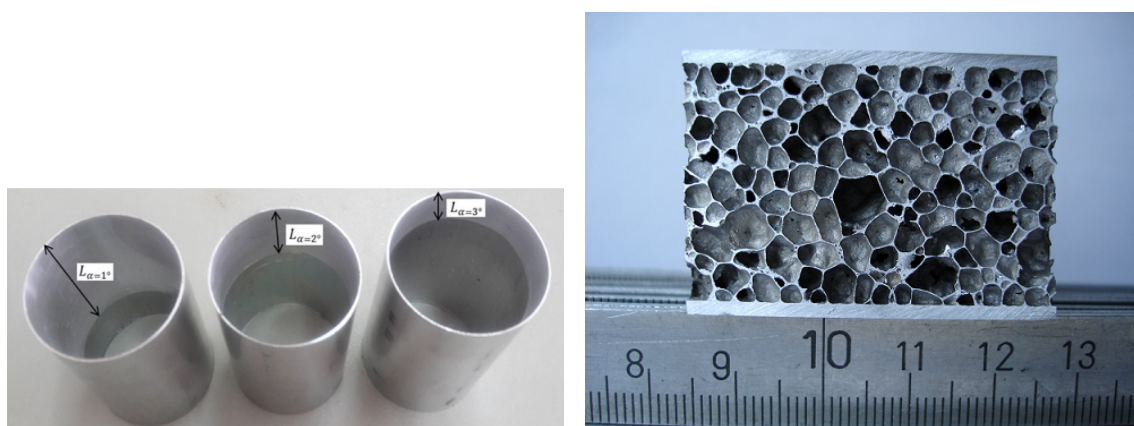
Βασικός παράγοντας που επηρεάζει τον τρόπο συμπεριφοράς των απορροφητών ενέργειας είναι το υλικό κατασκευής. Το υλικό κατασκευής ενός απορροφητή ενέργειας επιλέγεται βάσει κάποιων προδιαγραφών όπως οι μηχανικές του ιδιότητες, το κόστος πρώτης ύλης, το κόστος και η ευκολία επεξεργασίας του καθώς και η ευκολία ενσωμάτωσης του σε μια κατασκευή. Υπάρχει πληθώρα υλικών που μελετάται στη βιβλιογραφία και παρακάτω θα περιγραφούν τα βασικότερα εξ αυτών.

• Μεταλλικοί απορροφητές

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή μεταλλικών απορροφητών ενέργειας είναι λε-

πτότοιχες δομές από χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ή κράματα αλουμινίου. Αυτό συμβαίνει λόγω του σχετικά εύκολου τρόπου παραγωγής, του χαμηλού κόστους και της ευκολίας εγκατάστασης αυτών των δομών. Εκτενέστερη ανάλυση αυτών των δομών θα γίνει σε επόμενα κεφάλαια.

Ένας ακόμη τύπος μεταλλικού απορροφητή ενέργειας είναι οι απορροφητές με μεταβαλλόμενο πάχος τοιχώματος (FGT) και τύπου "σάντουιτς" (σχήμα 2.2). Εξαιρετικά ελαφρές κατασκευές με πολύ καλές ιδιότητες αντοχής και απορρόφησης ενέργειας, αλλά με μεγαλύτερο κόστος παραγωγής από αυτό των λεπτότοιχων απορροφητών.



Σχήμα 2.2: FGT σωλήνες με διάφορες γωνίες [19](αριστερά), απορροφητής ενέργειας από αλουμίνιο τύπου sandwich [20](δεξιά)

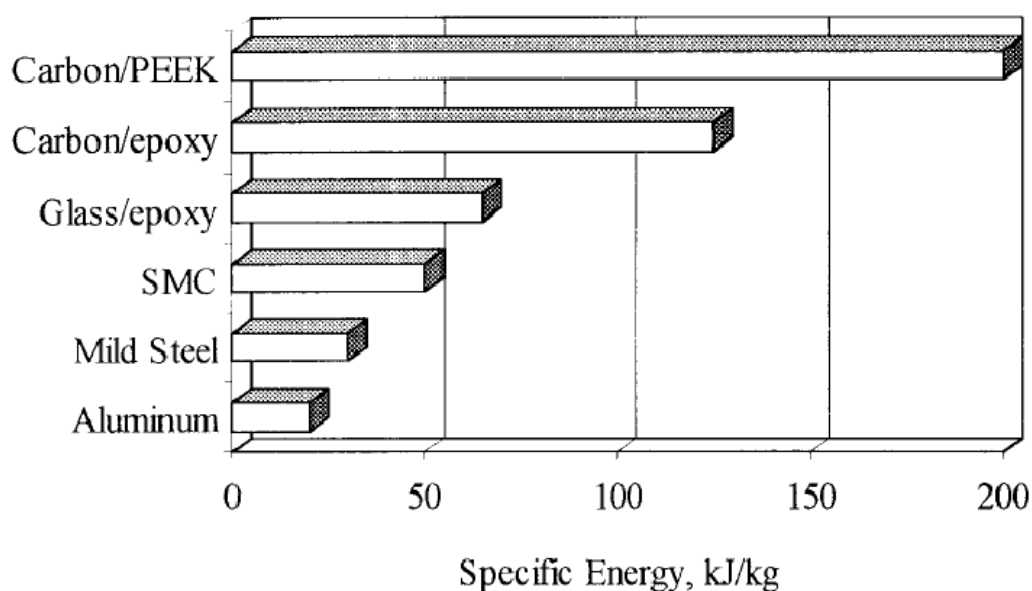
Χαρακτηριστική μελέτη μεταλλικού απορροφητή ενέργειας τύπου «σάντουιτς» είναι αυτή της ομάδας του Curi [21]. Η ομάδα αυτή ασχολήθηκε με δοκίμια κατασκευασμένα από φύλλα αλουμινίου που ενδιάμεσα περιέχουν αφρό αλουμινίου ή αλουμίνιο σε κυψελοειδή μορφή. Τα πειράματα αφορούσαν τη δημιουργία εσοχών στα δοκίμια υπό οιοσδήποτε συνθήκες. Μελετήθηκαν οι μηχανισμοί κατάρρευσης που αναπτύχθηκαν κατά τη δημιουργία της εσοχής. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι προέκυψαν ελαφρές κατασκευές με πολύ καλές ιδιότητες απορρόφησης ενέργειας.

Απορροφητές σταδιακά μεταβαλλόμενου πάχους μελετήθηκαν από τον Li και την ομάδα του [22]. Στην συγκεκριμένη μελέτη οι συνθήκες φόρτισης είναι δυναμικές ενώ παράλληλα με την πειραματική δοκιμή διεξάγεται και υπολογιστική μελέτη κάνοντας χρήση του μη γραμμικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-Dyna. Τα αποτελέσματα που

προέκυψαν έδειξαν πως παρά τις δυναμικές συνθήκες επιτυγχάνεται σταδιακή παραμόρφωση των δομών αυτών. Επιπλέον, συγκρινόμενοι με τους απορροφητές ομοιόμορφου πάχους τοιχώματος, οι απορροφητές σταδιακά μεταβαλλόμενου πάχους παρουσίασαν μειωμένη αρχική μέγιστη φόρτιση (initial peak force).

• Απορροφητές ενέργειας από σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν αντικείμενο συνεχώς εξελισσόμενης μελέτης σε εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας, και αυτό γιατί παρουσιάζουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, ειδική αντοχή, δυσκαμψία και ιδιότητες απορρόφησης ενέργειας. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται μάλιστα πως απορροφούν περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τα μεταλλικά υλικά ανά μονάδα μάζας [23].



Σχήμα 2.3: Τυπικές τιμές ειδικής ενέργειας διαφόρων υλικών [23]

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 ρηγματώση 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 ανισοτροπικές ιδιότητες,

γεγονός που δυσχεραίνει το σχεδιασμό και την ανάλυσή τους.

• Υβριδικοί απορροφητές ενέργειας

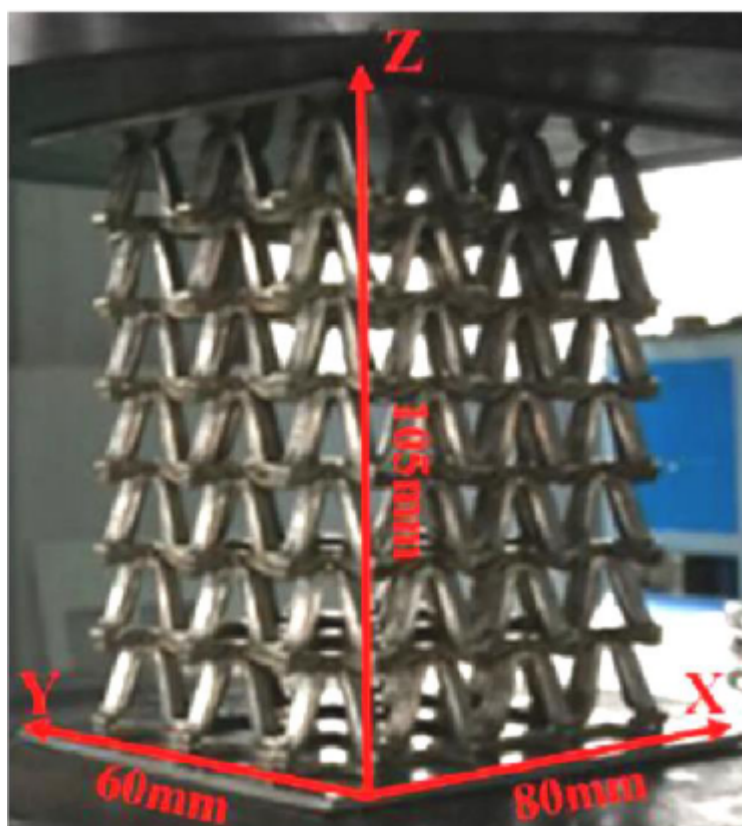
Μια τάση της έρευνας απορροφητών ενέργειας, προσπαθεί να αξιοποιήσει επιθυμητά χαρακτηριστικά και των μεταλλικών και των σύνθετων υλικών σε μορφή υβριδικών κατασκευών. Απώτερος σκοπός είναι σαφώς η μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας και η επικράτηση συνθηκών προοδευτικής κατάρρευσης με περιορισμένη αρχική μέγιστη φόρτιση. 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 υλικά και η προοδευτική κατάρρευση με έντονη πλαστική παραμόρφωση που χαρακτηρίζει τα μεταλλικά υλικά.

Μια μελέτη πάνω στους υβριδικούς απορροφητές είναι αυτή του Borja και των συνεργατών του [24]. Σε αυτή, μελετήθηκε πειραματικά η αξονική κατάρρευση υβριδικών σωλήνων σε 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 δύναμης κατάρρευσης της υβριδικής διάταξης είναι μεγαλύτερη από την απόδοση του αθροίσματος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

2.2.2 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. Σημαντική παράμετρος σχεδιασμού αποτελεί το πάχος του απορροφητή ενέργειας. Ως προς αυτή την παράμετρο η συνηθέστερη επιλογή στην βιομηχανία είναι οι λεπτότοιχες δομές.

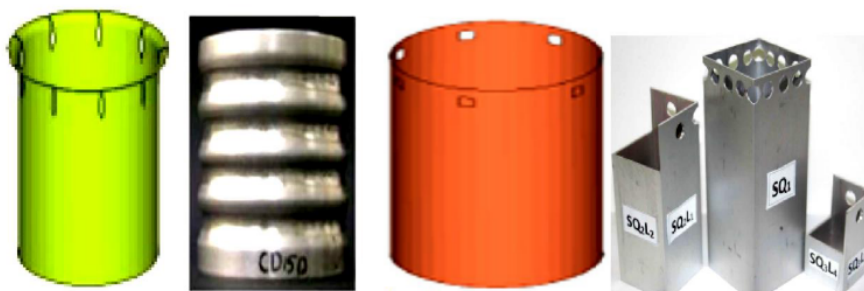
Εκτός αυτών, πληθώρα μη λεπτότοιχων δομών μελετάται σήμερα για να καθοριστεί αν τέτοιου τύπου δομές παρουσιάζουν πιο επιθυμητή συμπεριφορά κατά την κατάρρευση. Ένα παράδειγμα είναι οι αυξητικές διατάξεις (auxetic structures, σχήμα 2.4) οι οποίες λεπταίνουν κατά πλάτος όταν συμπιέζονται και εκτείνονται όταν εφελκύνονται. Αυτή η διαδικασία είναι ακριβώς αντίθετη από αυτή των συμβατικών διατάξεων και συνεπώς η εμφάνιση αρνητικού λόγου Poisson (Negative Poisson's Ratio). Τέτοιου είδους διατάξεις περιγράφονται στη βιβλιογραφία, όπου συμπερασματικά φαίνεται να έχουν μικρότερη αρχική μέγιστη φόρτιση και μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας [25]. Επιπλέον, η ασκούμενη στη διάταξη δύναμη παραμένει σχετικά σταθερή κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης.



Σχήμα 2.4: Παράδειγμα αυξητικής διάταξης [25]

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.

σης 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/εγχοπές, οπές και ακανόνιστο τελείωμα (σχήμα 2.5). 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. Ο Lu με τον Ngoc San Ha [26] μελέτησαν ακόμη την επίδραση εισαγωγής καθ' ύψος αυλακώσεων σε κελύφη κλειστής διατομής, καθώς και σε συνδυασμούς αυτών με άλλες τροποποιήσεις για την ενίσχυση των δοκιμίων. Κατέληξαν 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 .



Σχήμα 2.5: Παραδείγματα μορφών δομικής παρέμβασης σε απορροφητές ενέργειας. Από αριστερά προς τα δεξιά: τομές, αυλακώσεις, οπές και συνδυασμός οπών και ακανόνιστου τελειώματος [27]

2.2.3 Τύποι μηχανικής καταπόνησης

Ο τύπος μηχανικής καταπόνησης έχει αποδειχτεί ότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά των απορροφητών κατά την κατάρρευση [9]. Η κατανόηση της συμπεριφοράς κάτω από διαφορετικά είδη μηχανικής καταπόνησης είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί βοηθά στη γνώση και βελτίωση του τρόπου κατασκευής μιας διάταξης απορρόφησης ενέργειας. Όπως θα δούμε αναλυτικότερα και σε επόμενα κεφάλαια η μηχανική καταπόνηση στις δομές που μας απασχολούν εδώ προκύπτει από την επίδραση δυνάμεων

και ροπών πάνω σε αυτές. Αυτές οι δυνάμεις και οι ροπές έχουν ως αποτέλεσμα την πρόκληση παραμόρφωσης όταν επιδρούν σε ένα στερεό σώμα. Τα είδη μηχανικής καταπόνησης που μπορεί να ασκηθούν σε ένα αντικείμενο είναι ο εφελκυσμός, η θλίψη, η κάμψη, η στρέψη, ο λυγισμός και η διάτμηση. Ωστόσο, κατά τη σύγκρουση, το βασικό είδος καταπόνησης που αναπτύσσεται είναι η θλιπτική φόρτιση η οποία διακρίνεται σε αξονική, πλευρική και εγκάρσια, αναλόγως της γωνίας με την οποία ασκείται η φόρτιση. Από τη θλιπτική φόρτιση μπορεί επίσης να προκύψει ροπή κάμψης που οδηγεί σε λυγισμό.

Εκτός την αξονικής κατάρρευσης, πάνω στην οποία έχει πραγματοποιηθεί η περισσότερη διερεύνηση, και θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο, ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν και μερικές ακόμη μορφές κατάρρευσης.

• Πλευρική κατάρρευση

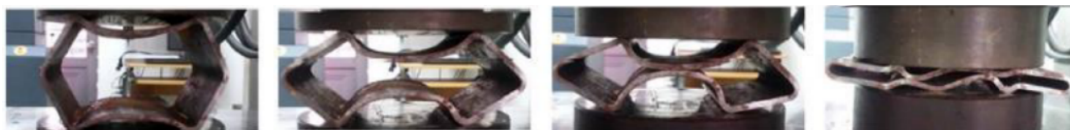
Αρκετές έρευνες έχουν διεξαχθεί για την ανάλυση και εκτίμηση της συμπεριφοράς απορρόφησης ενέργειας υπό λοξή φόρτιση. Η λοξή φόρτιση προκαλεί κάμψη στις σωληνοειδείς διατάξεις, ενώ παράλληλα αυτές υπόκεινται σε μια μορφή προοδευτικής αναδίπλωσης (σχήμα 2.6). Αυτό σταδιακά θα αναπτυχθεί σε μια γενικευμένη 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 [28]. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται η απόκριση σε λοξή φόρτιση κι άλλων γεωμετρικών διατομών λεπτότοιχων απορροφητών ενέργειας. Ο Borvik [29] εξέτασε την απόκριση σωλήνων αλουμινίου κυκλικής διατομής κατά την κατάρρευση υπό οιονεί στατικές συνθήκες λοξής φόρτισης. 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.

• Εγκάρσια φόρτιση



Σχήμα 2.6: Μορφή παραμόρφωσης σωλήνα αλουμινίου τετραγωνικής διατομής που υπόκειται σε λοξή φόρτιση γωνίας 5° [30]

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 Νικnejad [31] στην οποία εξετάστηκε η εγκάρσια κατάρρευση ορειγάλκινων 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. Παράδειγμα εγκάρσιας φόρτισης φαίνεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Διαδοχικά στάδια παραμόρφωσης σωλήνα αλουμινίου ορθογώνιας διατομής υποβαλλόμενου σε εγκάρσια θλίψη υπό οιονεί στατικές συνθήκες [30]

2.3 Στόχος εργασίας και τρόπος επίτευξης αυτού

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, δομές απορρόφησης ενέργειας όπως αυτές πολλαπλών κελυφών και μεταβαλλόμενου πάχους είναι μεν αποδοτικότερες ως προς την απορρόφηση ενέργειας, ωστόσο η εφαρμογή που βρίσκουν είναι σχετικά περιορισμένη εξ αιτίας του αυξημένου κόστους παραγωγής τους και της πολυπλοκότητας στην κατασκευή τους. Στο πρόβλημα αυτό αποπειράθηκε να δώσει μία λύση το 2018 ο Xiong Zhang και η ομάδα του [32], οι οποίοι μελέτησαν κελύφη ανοιχτής τετραγωνικής διατομής που προέρχονταν από αναδιπλώσεις, μέσω στραντζαρίσματος, φύλλων κράματος αλουμινίου AA3003 και πάχους 1mm. Η μελέτη τους περιείχε τόσο πειραματικές δοκιμές όσο και υπολογιστική μελέτη μέσω του μη-γραμμικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-Dyna, σε δοκίμια με αλληλοκαλυπτόμενες πλευρές αλλά και σε δοκίμια που περιείχαν κελύφη και εντός του πυρήνα τους.

Καθώς έχει δειχθεί πως οι κυκλικές διατομές είναι πιο αποδοτικές ως προς την απορρόφηση ενέργειας σε σχέση με τις τετραγωνικές [33], μελετήθηκαν στη συνέχεια κελύφη που δημιουργήθηκαν από στρώσεις φύλλου αλουμινίου και σχηματίζουν σπειροειδή διατομή (σχήμα 2.8), σε πειράματα που έγιναν κάτω από οιονεί στατικές συνθήκες [34].



Σχήμα 2.8: Παράδειγμα δοκιμίου πολλαπλών τοιχωμάτων κυκλικής διατομής σε κάτοψη [34]

Στη παρούσα εργασία θα γίνει υπολογιστική επιβεβαίωση των πειραματικών αποτε-

λεσμάτων στο λογισμικό μη γραμμικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-Dyna. Ακόμα θα μελετηθεί υπολογιστικά η επίδραση σημειακών συγκολλήσεων, χωρίς επιπλέον προσθήκη υλικού, κατά μήκος των σωλήνων στις προδιαγραφές απορρόφησης ενέργειας στα προαναφερθέντα μοντέλα. Η ανάλυση θα γίνει μέσω μοντελοποίησης στον μη-γραμμικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-Dyna.

Κεφάλαιο 3

Στοιχεία θεωρίας

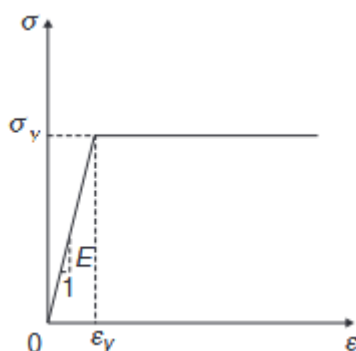
Σύνοψη: Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο της μηχανικής της κατάρρευσης λεπτότοιχων δομών και κάποια χρήσιμα μεγέθη για την εκτίμηση της αποδοτικότητας ως προς την απορρόφηση ενέργειας. Τα θεωρητικά στοιχεία που παρουσιάζονται παρακάτω, είναι απαραίτητα για την κατανόηση του φαινομένου της κατάρρευσης, αφορούν τους κυκλικούς (κυρίως) σωλήνες ως δομές απορρόφησης ενέργειας και συνδέονται άμεσα με την γεωμετρία των σπειροειδών διατομών που μελετούνται στην παρούσα εργασία.

3.1 Ορισμοί - Συμπληρωματικές έννοιες

3.1.1 Οριακή ανάλυση - μοντελοποίηση υλικών

Στην οριακή ανάλυση τα όλκιμα υλικά συνήθως θεωρούνται ελαστικά-ιδεωδώς πλαστικά με μέτρο ελαστικότητας (E) και λόγο Poisson (ν). Μετά το όριο διαρροής πολλά όλκιμα υλικά παρουσιάζουν το φαινόμενο της κράτυνσης (π.χ. ο χάλυβας) το οποίο οδηγεί σε αύξηση της τάσης μετά το όριο διαρροής. Εάν η κράτυνση και η ελαστική περιοχή του υλικού θεωρηθούν μικρές, τις αμελούμε και υποθέτουμε ιδεωδώς πλαστικό υλικό (π.χ. τα κράματα αλουμινίου και το PVC). Αυτό είναι μικρής σημασίας, διότι η εκτροπή που συμβαίνει όταν υπερβούμε το όριο διαρροής θεωρείται σαν σημείο αστοχίας του

φορέα. Εάν η κράτυνση θεωρηθεί αμελητέα υποθέτουμε ιδεωδώς πλαστικό υλικό, το υλικό δηλαδή θα συνεχίσει να παραμορφώνεται πλαστικά από την αρχική διαρροή μέχρι την θραύση υπό σταθερή τάση ίση με το όριο διαρροής (σ_Y) [9]. Η συμπεριφορά του ελαστικού-ιδεωδώς πλαστικού υλικού δίνεται στο σχήμα 3.1



Σχήμα 3.1: Ιδεατή καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για ελαστικό-ιδεωδώς πλαστικό υλικό

Οι εξισώσεις που αντιστοιχούν σε αυτό το μοντέλο είναι

$$\sigma = E\epsilon \text{ για } 0 < \epsilon < \epsilon_Y = \frac{\sigma_Y}{E} \quad (3.1)$$

$$\sigma = \sigma_Y \text{ για } \epsilon_Y < \epsilon < \epsilon_{failure} \quad (3.2)$$

3.1.2 Καμπτική ροπή στην Οριακή Ανάλυση

Κατά την οριακή ανάλυση θεωρούμε πως σε έναν φορέα υπό κάμψη επιτυγχάνεται η μετάβαση από την ελαστική στην ιδεωδώς πλαστική συμπεριφορά επιτυγχάνεται όταν η τιμή της καμπτικής ροπής ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή - την τιμή της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης (M_P). Η M_P ονομάζεται **ροπή πλήρους πλαστικοποίησης**. Για γραμμικούς φορείς αυτό το όριο είναι το όριο διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό (σ_Y), ενώ για τους επιφανειακούς φορείς χρησιμοποιείται το ισοδύναμο όριο διαρροής ($\sigma_0 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_Y$), προερχόμενο από το κριτήριο διαρροής Von Misses για επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση. Η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης υπολογίζεται από την

σχέση:

$$M_P = \sigma_0 \int_{t_1}^{t_2} y dy \quad (3.3)$$

όπου,

σ_0 ισοδύναμο όριο διαρροής,

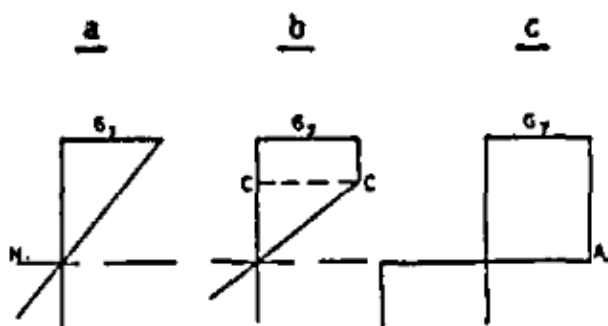
y : απόσταση από τον ουδέτερο επίπεδο,

t_1, t_2 : αποστάσεις από το ουδέτερο άξονα της διατομής, όπου $t_1+t_2=t$ το ύψος της διατομής του φορέα.

Όσο η τιμή της καμπτικής ροπής διατηρείται κάτω από την ροπή διαρροής (M_Y), οι τάσεις καθ' όλο το ύψος του φορέα παραμένουν μικρότερες από το ισοδύναμο όριο διαρροής του υλικού. Με αύξηση της καμπτικής ροπής στον φορέα στην τιμή M_Y , η μέγιστη τιμή της τάσης στη διατομή γίνεται σ_Y - αυτό είναι το όριο στο οποίο όλη η διατομή παραμένει στην ελαστική περιοχή. Με περαιτέρω αύξηση της καμπτικής ροπής αυξάνεται από τα άκρα της διατομής προς το κέντρο το εμβαδό της διατομής που εμφανίζει ιδεατή πλαστική συμπεριφορά και μειώνεται το τμήμα της διατομής στην ελαστική περιοχή. Σε αυτό το σημείο ίσως γίνει και μετακίνηση του ουδέτερου άξονα της διατομής από την αρχική του θέση. Όταν η τιμή της καμπτικής ροπής φτάσει την τιμή M_P τότε όλη η διατομή έχει πλαστικοποιηθεί πλήρως και συμπεριφέρεται σαν πλαστικός κόμβος [35]. Ο μηχανισμός δημιουργίας πλαστικών κόμβων που περιγράφηκε φαίνεται στο σχήμα 3.2.

3.1.3 Πλαστικός αρμός

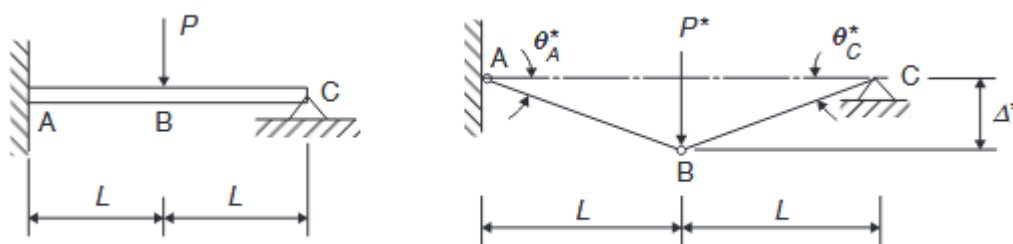
Όπως αναφέρθηκε, σε έναν φορέα που καταπονείται σε κάμψη, όταν η τιμή της καμπτικής ροπής ξεπεράσει την τιμή πλήρους πλαστικοποίησης (M_P) έχουμε δημιουργία κόμβου (πλαστικός αρμός-plastic hinge). Ο πλαστικός αρμός σαν μηχανισμός διαφέρει από την άρθρωση καθώς δεν επιτρέπει ελεύθερη περιστροφή χωρίς τριβή, αλλά θεωρούμε πως παρουσιάζεται μια σταθερή ανθιστάμενη ροπή στην περιστροφή, με τιμή αυτή της πλήρους πλαστικοποίησης (M_P). Με την εισαγωγή πλαστικών αρμών σε έναν



Σχήμα 3.2: Διαδικασία δημιουργίας πλαστικού αρμού: (a) Πλήρως ελαστική περιοχή, με μικρές παραμορφώσεις που συνδέονται με τις αναπτυσσόμενες τάσεις μέσω του νόμου του Hooke. (b) Μετάβαση στην ιδεωδώς πλαστική κατάσταση όπου τα άκρα της διατομής περνάνε το όριο διαρροής, ενώ το κέντρο της διατομής παραμένει στην ελαστική περιοχή. (c) Πλήρως πλαστικοποιημένη διατομή [36]

στατικά ορισμένο φορέα δημιουργείται ένας κινηματικός μηχανισμός και έτσι έχουμε δημιουργία μετατοπίσεων στον αρχικά ακίνητο και απαραμόρφωτο φορέα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. 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.



Σχήμα 3.3: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκού με το άκρο A πακτωμένο, το άκρο C με απλή στήριξη και δημιουργία πλαστικού αρμού στο κέντρο της (σημείο B) [9]

3.2 Αξονική κατάρρευση σωλήνων κυκλικής διατομής

Από τις συνηθέστερες γεωμετρίες διατομών που έχουν μελετηθεί σε απορροφητές ενέργειας, οι σωλήνες κυκλικής διατομής έχουν μια σχετικά απλή γεωμετρία που προσεγγίζει ικανοποιητικά τις σπειροειδής διατομές που μελετούνται σε αυτή την εργασία.

Οι τρόποι κατάρρευσης λεπτότοιχων μεταλλικών κελυφών σε αξονική φόρτιση, ήταν οι πρώτοι που ερευνήθηκαν στα πλαίσια διερεύνησης των χαρακτηριστικών κατάρρευσης των υλικών. Η αιτία πηγάζει από την ικανότητα των όλκιμων μεταλλικών υλικών να απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας, μέσω της μετατροπής της κινητικής ενέργειας σε πλαστικό έργο. Τα προκύπτοντα ερευνητικά συμπεράσματα συνοψίζονται σε τέσσερα μοτίβα κατάρρευσης τα οποία εξαρτώνται από τις γεωμετρικές διαστάσεις του δοκιμίου, το υλικό και την μικροδομή του φορτιζόμενου μετάλλου:

- Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης ή αλλιώς φουσαρμόνικα (concertina mode)
- Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης ή διαμάντι (diamond mode)
- Μεικτός τρόπος κατάρρευσης (Mixed mode)
- Κατάρρευση μέσω λυγισμού Euler

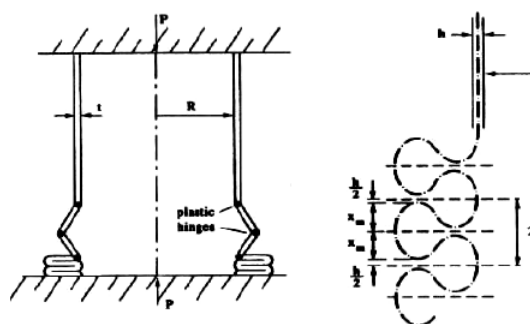
3.2.1 Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης

Ο αξονοσυμμετρικός ή εκτατός τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από την δημιουργία συμμετρικών λοβών κατά την άσκηση φορτίου και πλαστική παραμόρφωση με εκτατό τρόπο. Κατά τον σχηματισμό των λοβών παρατηρείται έκταση κατά πλάτος του δοκιμίου με αποτέλεσμα την αύξηση της τελικής διαμέτρου του δοκιμίου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Αυτού του είδους η κατάρρευση, παρουσιάζει εν γένει την μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.



Σχήμα 3.4: Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης με την δομή του δοκιμίου κυκλικής διατομής μετά την επιβολή θλιπτικού φορτίου [34]

Το έργο που χρειάζεται για να δημιουργηθεί μία τέτοια αναδίπλωση μπορεί να χωριστεί 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. Για χάρη απλότητας οι ελαστικές παραμορφώσεις, η αλληλεπίδραση κάμψης-εφελκυσμού και η κράτυνση του υλικού αμελούνται, ενώ θεωρούμε άκαμπτο-ιδεωδώς πλαστικό υλικό [37]. Ο μηχανισμός παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Μοντέλο Alexander για τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης σωλήνα κυκλικής διατομής μέσω της δημιουργίας πλαστικών αρμών (αριστερά) Μοντέλο Wierzbicki-Abramowicz αξονοσυμμετρικού τρόπου κατάρρευσης με εισαγωγή καμπυλωτών αναδιπλώσεων (δεξιά) [37]

3.2.2 Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης

Κατά την κατάρρευση ενός μεταλλικού κελύφους μη αξονοσυμμετρικά, η συνολική διάμετρος του φορτιζόμενου δοκιμίου παραμένει σταθερή. Η διαμόρφωση των σχηματιζόμενων λοβών δεν είναι αξονοσυμμετρική. Λόγω της μορφής των σχηματιζόμενων λοβών ο εν λόγω τρόπος κατάρρευσης ονομάζεται και ονομάζεται και αδαμαντοειδής (diamond mode, σχήμα 3.6). Ανάλογα με τον αριθμό των ακμών ανά επίπεδο προκύπτει ο χαρακτηρισμός της διαμαντοειδούς δομής.



Σχήμα 3.6: Μη αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης (diamond mode) [34]

Οι λοβοί μεταξύ τους έχουν την ίδια γεωμετρία. Λόγω της αλλαγής γεωμετρίας υποβάθρου όμως κάθε λοβός σχηματίζεται περιστραμμένος κατά τον άξονα του ύψους σε σχέση με τον προηγούμενο. Η γωνία περιστροφής (ϕ) εξαρτάται από την διατομή του λοβού υπό την σχέση $\phi = \frac{\pi}{n}$ rad, όπου n το πλήθος των σχηματισμένων ακμών στον λοβό.

3.2.3 Μικτός τρόπος κατάρρευσης

Μικτός τρόπος κατάρρευσης ονομάζεται ο συνδυασμός του αξονοσυμμετρικού και μη αξονοσυμμετρικού τρόπου κατάρρευσης. Επέρχεται όταν οι διαστάσεις του σωλήνα είναι μεταξύ των διαστάσεων που επιφέρουν αξονοσυμμετρική και σε αυτές που επιφέρουν μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση ή εξαιτίας ατελειών στην δομή του σωλήνα.

Ο μικτός τρόπος κατάρρευσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.7.



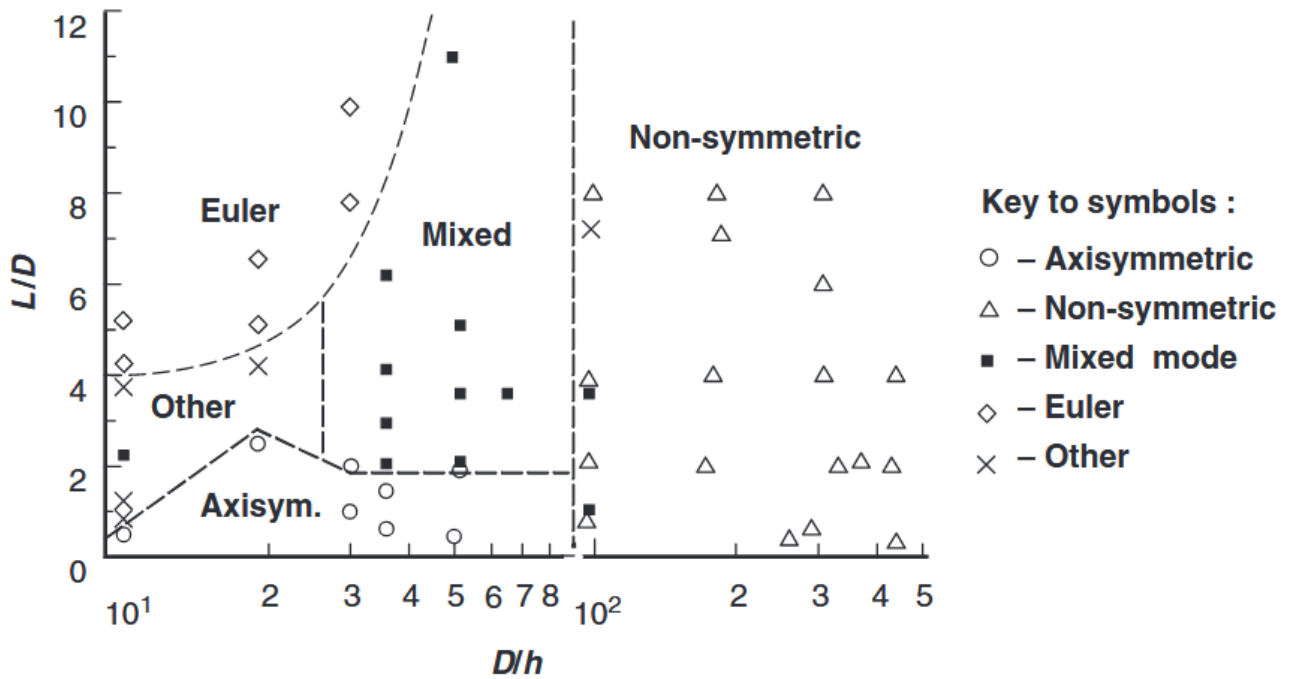
Σχήμα 3.7: Μικτός τρόπος κατάρρευσης [34]

Για κυκλικής διατομής δοκίμια η μορφή κατάρρευσης διαμαντιού (μη αξονοσυμμετρική) συμβαίνει για λόγο διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος ($\frac{D}{h}$) μεγαλύτερο του 80 [38]. Για $\frac{D}{h}$ μικρότερο του 50 και λόγο ύψους προς πάχος ($\frac{L}{h}$) μικρότερο του 2 παρατηρείται κατάρρευση μορφής δαχτυλιδιού/φυσαρμόνιας (αξονοσυμμετρική), ενώ για το ίδιο $\frac{D}{h}$ αλλά με $\frac{L}{h}$ μεγαλύτερο του 2 παρατηρείται μικτή μορφή κατάρρευσης.

3.2.4 Λυγισμός Euler

Η κατάρρευση μέσω λυγισμού Euler εμφανίζεται σε δοκίμια μεγάλου μήκους συγκριτικά με την διάμετρο και το πάχος τοιχώματος. Χαρακτηρίζεται από ξαφνική κατάρρευση του δοκιμίου, χωρίς να έχει ξεπεραστεί το όριο διαρροής του υλικού [35]. 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.

Βάση πολλών πειραμάτων με σωλήνες διαφόρων διαστάσεων, μπορεί να εξαχθεί ένα διάγραμμα κατάταξης του τρόπου κατάρρευσης ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι [9]. Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται ένα τέτοιο διάγραμμα για σωλήνες από κράμα αλουμινίου 6060-T5.



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα κατάταξης τρόπου κατάρρευσης σωλήνων κυκλικής διατομής από κράμα αλουμινίου 6060-T5 [9]

3.3 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 χρούσης, δεύτερον γιατί μας επιτρέπει να παρατηρούμε το ιστορικό της παραμόρφωσης με σχετική ευκολία και τρίτον επειδή περιορίζει αρκετά την συμβολή δυναμικών φαινομένων κατά την χρούση, επιτρέποντάς μας να τα αμελήσουμε [9].

Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των τεχνικών δοκιμής ανάλογα με τον ρυθμό παραμόρφωσης της κατάρρευσης ($\dot{\epsilon}$).

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

Σχήμα 3.9: Κατηγοριοποίηση των τεχνικών δοκιμής ανάλογα με τον ρυθμό παραμόρφωσης [9]

3.4 Δείκτες κατάρρευσης

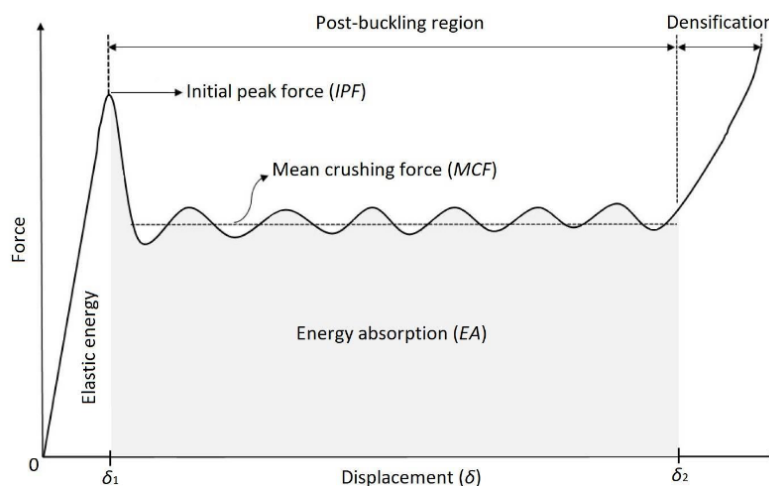
Για την μελέτη της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας των υλικών μέσω της παραμόρφωσης ορίζουμε κάποια μεγέθη. Τα περισσότερα εξ αυτών αποτυπώνονται στην καμπύλη φορτίου μετατόπισης που λαμβάνουμε από την πειραματική διαδικασία ή την υπολογιστική προσομοίωση (σχήμα 3.10).

3.4.1 Ενέργεια απορρόφησης

Η ενέργεια απορρόφησης (EA) εκφράζει τη συνολική ενέργεια που απορροφήθηκε από το υλικό μέσω πλαστικής παραμόρφωσης σε συνθήκες πρόσκρουσης. Η τιμή της ενέργειας προσδιορίζεται μέσω του εμβαδού που εμπεριέχεται μεταξύ της καμπύλης ασκούμενου φορτίου και του οριζόντιου άξονα στο διάγραμμα δύναμης μετατόπισης (σχήμα 3.10) και ορίζεται ως:

$$EA = \int_0^{\delta_{max}} F(s) ds \quad (3.4)$$

Όπου δ_{max} ορίζεται: η ολική βράχυνση του δοκιμίου μετά το πέρας της κατάρρευσης.



Σχήμα 3.10: Τυπικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για την αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων δομών

3.4.2 Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης

Μέγιστο φορτίο κατάρρευσης (Peak Crush Force - *PCF*) ορίζεται: η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η δύναμη κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής. Το πρώτο τοπικό μέγιστο στην τιμή της δύναμης ορίζεται ως Initial Peak Force (*IPF*). Για πιο απλές γεωμετρίες, όπως είναι τα κυλινδρικά κελύφη με ομοιόμορφο πάχος τοιχώματος, η δύναμη αυτή εμφανίζεται στα πρώτα στάδια της κατάρρευσης (σε αυτές τις περιπτώσεις $PCF = IPF$). Οι δομές σπειροειδούς διατομής που εξετάζονται στην παρούσα εργασία εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία και γι αυτό θα χρησιμοποιηθεί ο συμβολισμός *IPF*.

3.4.3 Μέση δύναμη κατάρρευσης

Μέση δύναμη κατάρρευσης (Mean Crushing Force - *MCF*) είναι η μέση τιμή της δύναμης που καταβάλλεται από το δοκίμιο κατά την κατάρρευση. Ορίζεται ως:

$$MCF = \frac{EA}{\delta_{max}} \quad (3.5)$$

Εν γένει για μια κατασκευή απορρόφησης ενέργειας είναι επιθυμητό η δύναμη αυτή να διατηρεί την τιμή της όσο το δυνατό πιο κοντά σε αυτή της μέγιστης δύναμης κατάρρευσης.

3.4.4 Απόδοση δύναμης κατάρρευσης

Απόδοση δύναμης κατάρρευσης (Crush Force Efficiency - *CFE*) ορίζεται: ο λόγος του μέσου φορτίου προς το μέγιστο φορτίο κατά την κατάρρευση. Σε ιδανικούς απορροφητές ενέργειας το μέγεθος αυτό τείνει προς την μονάδα, καθώς έχει αποδειχθεί πως υψηλές τιμές του μέγιστου φορτίου κατάρρευσης σε σχέση με το μέσο μπορεί να αποβούν μοιραίες για τους επιβάτες, ασχέτως της ενέργειας που απορροφάει το υλικό [35].

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \quad (3.6)$$

3.4.5 Ειδική ενέργεια απορρόφησης

Ειδική ενέργεια απορρόφησης (Specific Energy Absorbtion - *SEA*) ορίζεται: ο λόγος της ενέργειας απορρόφησης προς το τμήμα της μάζας του υλικού που έχει καταρρεύσει (m_c) και δίνεται από τη σχέση:

$$SEA = \frac{EA}{m_c} \quad (3.7)$$

Το τμήμα της καταρρέουσας μάζας (m_c) μπορεί να υπολογιστεί γνωρίζοντας την πυκνότητα του υλικού (ρ) και τον όγκο κατάρρευσης (V) μέσω της σχέσης $m_c = V \cdot \rho = A \cdot \delta \cdot \rho$.

Κεφάλαιο 4

Διαδικασία ανάπτυξης αριθμητικών μοντέλων

Σύνοψη: Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων πάνω στα οποία είναι βασισμένη η υπολογιστική μελέτη και η διαδικασία ανάπτυξης των αντίστοιχων αριθμητικών μοντέλων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των σπειροειδών σωλήνων σε αξονική κατάρρευση στις προσομοιώσεις. Ακόμη παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των σημειακών συγκολλήσεων. Τέλος γίνεται αναφορά στην μοντελοποίηση αντίστοιχων δομών κλειστής κυκλικής διατομής με τα δοκίμια σπειροειδούς διατομής.

4.1 Πειραματική διαδικασία

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται απορροφητές ενέργειας πολλαπλών τοιχωμάτων κατασκευασμένα από φύλλα κράματος αλουμινίου 6060-T5 (σχήμα 4.1), και έχει γίνει μελέτη σε οιονεί στατικές συνθήκες φόρτισης πάνω σε αυτές τις δομές [34]. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν σε μηχανή κάμψης τριών κυλίνδρων από φύλλα αλουμινίου πάχους $t=0.5\text{mm}$. Για τις ανάγκες της μελέτης δημιουργήθηκαν 2 ομάδες δοκιμίων. Η πρώτη

ομάδα αποτελούταν από δοκίμια ίδιας μέσης διαμέτρου D_m αλλά διαφορετικού αριθμού σπειρών N . Συνεπώς αφού το πάχος φύλλου αλουμινίου παραμένει σταθερό, το πάχος τοιχώματος (h) των δοκιμίων καθορίζεται από τον αριθμό των περιελίξεων ($h = Nt$). Η δεύτερη ομάδα δοκιμίων δημιουργήθηκε με βάση το δοκίμιο τριών σπειρών της πρώτης ομάδας. Για να μελετηθεί η επίδραση της κατανομής μάζας αυτού του τύπου γεωμετρίας στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, τα δοκίμια της δεύτερης ομάδας έχουν μάζα ίση με την μάζα του δοκιμίου 3 σπειρών της πρώτης ομάδας, αλλά διαφορετικές μέσες διαμέτρους και αριθμούς περιελίξεων. Όλα τα δοκίμια έχουν μήκος 120mm.



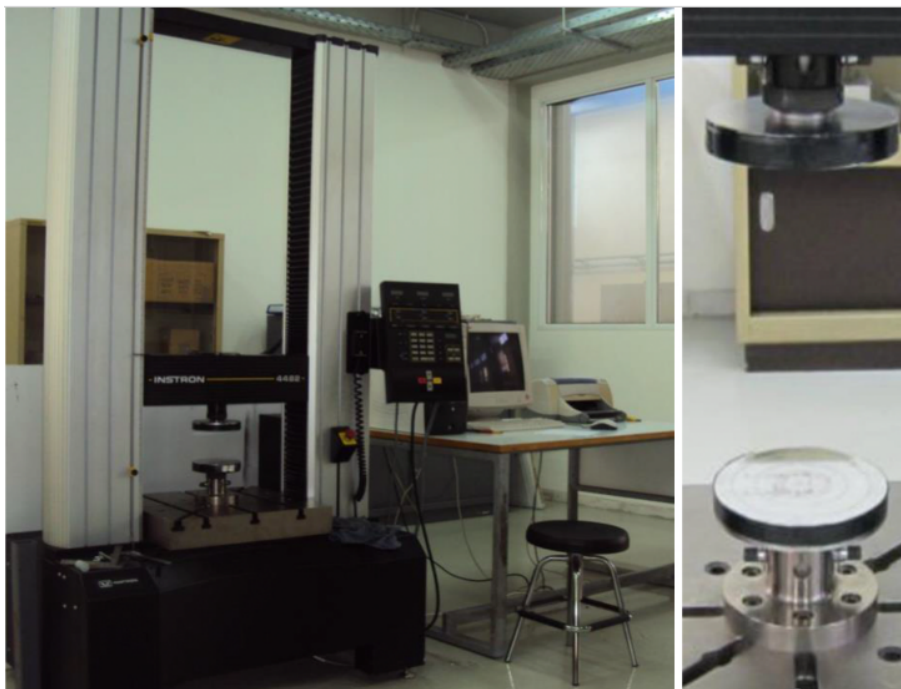
Σχήμα 4.1: Δοκίμια "2", "3", "4", "5" (αριστερά), δοκίμια "3.1", "3.2", "3.3", "3.4", "3.5", "3.6", "3.7", "3.8", "3.9", "3.10", "3.11" (δεξιά) [34]

Βασικό χαρακτηριστικό για την κωδική ονομασία των δοκιμίων της πρώτης ομάδας αποτέλεσε ο αριθμός των περιελίξεων του αλουμινίου για την δημιουργία τους. Έτσι προέκυψαν τα δοκίμια "2", "3", "4", "5". Για την δεύτερη ομάδα δοκιμίων επιλέχθηκαν οι ονομασίες "3.1", "3.2", "3.3", "3.4", "3.5", "3.6", "3.7", "3.8", "3.9", "3.10", "3.11", καθώς είναι όλα βασισμένα στο δοκίμιο "3". Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι διαστάσεις και οι κωδικές ονομασίες των εξετασθέντων δοκιμίων.

Αριθμητικό μοντέλο	Μάζα	Αριθμός Σπειρών	Διάμετροι mm			L/D_m	D_m/t	D_m/h
			Εσωτερική D_i	Εξωτερική D_o	Μέση D_m			
2	47.6	2.08	43.7	46.8	45.3	2.6	90.6	43.6
3	70.9	3.08	42.5	48.0	45.3	2.6	90.6	29.4
3.1	70.7	3.56	37.5	42.0	39.8	3.0	79.6	22.4
3.3	70.7	2.87	45.5	53.0	49.3	2.4	98.6	34.4
3.5	70.6	2.36	58.0	62.0	60.0	2.0	120.0	50.8
3.7	70.9	1.99	68.0	74.0	71.0	1.7	142.0	71.4
4	94.1	4.08	41.7	49.1	45.4	2.6	90.8	22.3
5	117.0	5.08	40.9	51.4	46.1	2.6	92.2	18.1

Πίνακας 4.1: Κωδική ονομασία εξεταζόμενων δοκιμών και διαστάσεις τους [34]

Η δοκιμή κατάρρευσης πραγματοποιήθηκε με μηχανή INSTRON (σχήμα 4.2). Το συνολικό μήκος κατάρρευσης ανέρχεται στα 2/3 του μήκους των δοκιμών (80mm) και για να βεβαιωθούν οι συνθήκες ομοιόμορφης στατικής φόρτισης η ταχύτητα της κεφαλής ορίστηκε στα 20mm ms^{-1} .



Σχήμα 4.2: Πειραματικός εξοπλισμός

Τέλος τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από κράμα αλουμινίου 6060-T5. Τα κύρια χαρακτηριστικά του υλικού αυτού συνοψίζονται στον πίνακα 4.2.

Μέτρο ελαστικότητας [GPa]	Λόγος Poisson ν	Πυκνότητα ρ [gr cm ⁻³]
69	0.3	2.7

Πίνακας 4.2: Μηχανικές ιδιότητες κράματος αλουμινίου 6060-T5 [34]

Η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης του υλικού (σ - ϵ) πάρθηκε με τον ίδιο εξοπλισμό με δοκιμή εφελκυσμού (σχήμα 4.3). Τονίζεται πως λόγω της περαιτέρω κατεργασίας του ελάσματος λόγω κάμψης, εισάγεται ανισοτροπία στο υλικό. Ωστόσο έχειδειχθεί πως η αυτή η ανισοτροπία μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, λόγω μικρού πάχους ελάσματος και ακτίνας καμπυλότητας, οπότε και δεν λαμβάνεται υπόψιν στην συνέχεια [32]. Τα δεδομένα από την δοκιμή εισάγονται στην συνέχεια στην καρτέλα υλικού του μοντέλου μας, κατά την υπολογιστική μελέτη.



Σχήμα 4.3: Καμπύλη τάσης-πλαστικής παραμόρφωσης(σ - ϵ) κράματος αλουμινίου 6065-T5 [34]

4.2 Υπολογιστική προσομοίωση

Στα πλαίσια της μελέτης των εξεταζόμενων δοκιμών της παραγράφου 4.1 μέσω της διεξαγωγής αριθμητικών προσομοιώσεων, αρχικά αναπτύχθηκαν τα αντίστοιχα μοντέλα των διατάξεων στο περιβάλλον LS-PrePost. Συγκεκριμένα, κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας (pre-processing) δημιουργήθηκαν τα μοντέλα των εξεταζόμενων διατάξεων σπειροειδούς διατομής μέσω πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία κατόπιν επιλύθηκαν

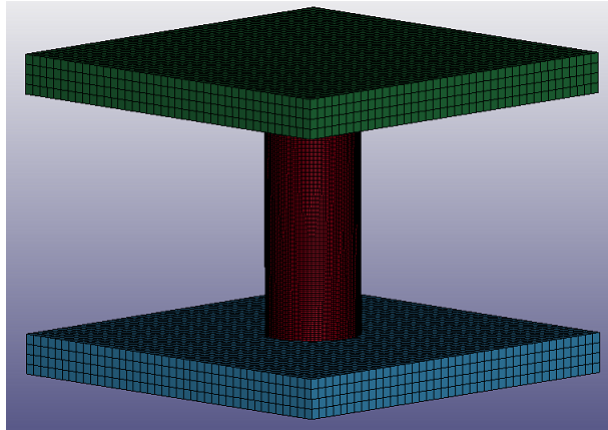
με τον μη γραμμικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-Dyna, από όπου τα προκύπτοντα αρχεία μετα-επεξεργάστηκαν (post-processing) ώστε να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τόσο αναφορικά με τα μοτίβα κατάρρευσης όσο και με τα χαρακτηριστικά μεγέθη της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης. Τα στάδια της προ- και της μετά-επεξεργασίας πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον LS-PrePost. Η ανάπτυξη των μοντέλων βασίστηκε στα ακόλουθα βήματα στα οποία καθορίστηκαν κατά σειρά:

- Η γεωμετρία και οι διαστάσεις των σωμάτων (αριθμητικά μοντέλα/πλάκες)
- Το είδος των πεπερασμένων στοιχείων και το πλέγμα τους
- Οι μηχανικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών
- Οι οριακές συνθήκες (π.χ. οι συνθήκες στήριξης των σωμάτων και μη-εισχώρησης των διεπιφανειών)
- Οι συνθήκες φόρτισης

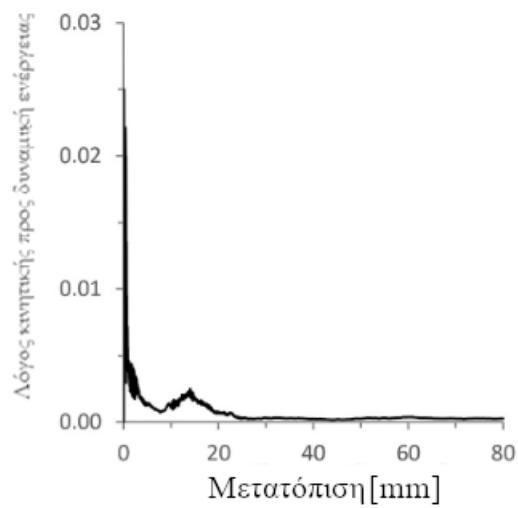
Ακολούθως, περιγράφεται πιο αναλυτικά κάθε στάδιο της διαδικασίας της μοντελοποίησης όπως αυτό πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον LS-PrePost.

4.3 Περιγραφή μοντελοποίησης

Κάθε εξεταζόμενη διάταξη που μοντελοποιήθηκε περιελάμβανε το προς κατάρρευση αριθμητικό μοντέλο, την κάτω και την πάνω πλάκα όπως παριστάνεται στο σχήμα 4.4. Κάθε σώμα εκ των απορροφητή 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 1 m s^{-1} ώστε να προκαλεί τη συμπίεση του δοκιμίου, ενώ τέλος αμφότερες οι πλάκες θεωρήθηκαν χαλύβδινες και άκαμπτες (απαραμόρφωτες). Καθώς η ταχύτητα των 20 mm ms^{-1} έδινε πολύ μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους, ταχύτητα 1 m s^{-1} επιλέχθηκε, καθώς βρέθηκε πως διατηρεί τις συνθήκες ομοιόστατικής φόρτισης μετά από διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5 η κινητική ενέργεια των στοιχείων παραμένει αμελητέα σε σχέση με την εσωτερική τους ενέργεια για 1 m s^{-1} . Ταυτόχρονα η ταχύτητα αυτή δίνει ικανοποιητικούς χρόνους περάτωσης των προσομοιώσεων.



Σχήμα 4.4: Αριθμητικό μοντέλο σε περιβάλλον LS-PrePost



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα κινητικής προς εσωτερική ενέργειας στοιχείων σε σχέση με την μετατόπιση

Για να γίνει η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν αντιστοιχούν στα δοκίμια "2", "3", "4", "5" της πρώτης ομάδας και "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" της δεύτερης ομάδας.

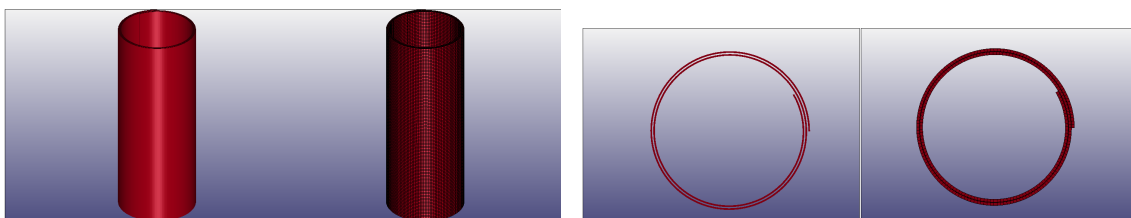
4.4 Διαδικασία μοντελοποίησης

Κατά τη δημιουργία των μοντέλων, ακολουθήθηκαν τα βήματα όπως περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω σύμφωνα με τα βήματα που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2 του παρόντος κεφαλαίου.

4.4.1 Δημιουργία σωμάτων και πλέγματος

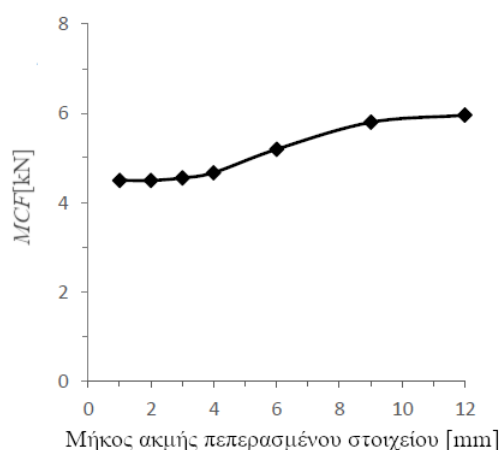
Στο πρώτο στάδιο της μοντελοποίησης, δημιουργήθηκαν τα μοντέλα που αντιστοιχούσαν στο δοκίμιο και στις δύο πλάκες θλίψης. Για κάθε σώμα, αρχικά προσδιορίστηκε το γεωμετρικό του σχήμα και οι διαστάσεις του, ενώ κατόπιν επιλέχθηκε το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων με τα οποία προσεγγίστηκε και εν τέλει η πυκνότητα του πλέγματος διακριτοποίησης (το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων).

Για τη μοντελοποίηση, η σπειροειδής γεωμετρία των απορροφητών με πολλαπλά τοιχώματα (spiral) καθορίστηκε ως καμπύλη αρχικά στην επιλογή "Geometry Curve" με βάση τις εκάστοτε διαστάσεις κάθε φορά, η οποία στην συνέχεια εκτείνονταν στο επιθυμητό μήκος κάθε δοκιμίου (Extrude) (σχήμα 4.6). Μάλιστα, επιλέχθηκαν επίπεδα τετράπλευρα τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία (Belytschko-Tsay shell elements) που είναι υπολογιστικά αποδοτικότερα για τη μοντελοποίησή του.



Σχήμα 4.6: Όψεις και διακριτοποίηση μοντέλου με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (shell elements) (αριστερά) και απεικόνιση των τοιχωμάτων κατά το πάχος (δεξιά)

Για τα μοντέλα ανοιχτής διατομής χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία με μήκος ακμής 1mm. Το μήκος αυτό επιλέχθηκε μετά από παραμετρική ανάλυση που διενεργήθηκε στο μοντέλο "2" και εξετάσθηκε η μέση δύναμη κατάρρευσης (MCF) συναρτήσει του μήκους ακμής των πεπερασμένων στοιχείων. Μετά τη διερεύνηση, δείχθηκε πως μήκος ακμής 1mm έδινε επαρκή αποτελέσματα, όσον αφορά αυτόν τον δείκτη, συγκριτικά με μικρότερα μήκη ακμών (σχήμα 4.7). Ταυτόχρονα το στοιχείο αυτό ήταν ικανό να συλλάβει την πλαστική παραμόρφωση στις θέσεις δημιουργίας λοβών για τιμή του πάχους στα 0.5mm, έχοντας παράλληλα ικανοποιητικότερους χρόνους για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα μέσου φορτίου κατάρρευσης $MCF[kN]$ συναρτήσει διάστασης τετρακομβικού στοιχείου [mm] που αφορά το αριθμητικό μοντέλο "2"

Σε επόμενο στάδιο, κατόπιν της δημιουργίας των μοντέλων ελέγχθηκε το πλέγμα διακριτοποίησής τους ώστε να μην αποδίδονται διπλοί κόμβοι (Duplicate nodes). Για την προσομοίωση του πάχους τοιχώματος του δοκιμίου, στην καρτέλα "Section Shell" του "Keyword Manager", επιλέχθηκε το πάχος των στοιχείων (T1/T2/T3/T4) που αφορούσε το πάχος του αρχικού ελάσματος ώστε λαμβάνοντας υπόψιν τον αριθμό των σπειρών να αποδίδεται το πάχος τοιχώματος. Ακόμη, επιλέχθηκε το μοντέλο των Belytschko-Tsay ως μοντέλο παραμόρφωσης θέτοντας την παράμετρο ELFROM ίση με 2 (προκαθορισμένη επιλογή), ενώ τέλος η παράμετρος NIP τέθηκε ίση με 3 όπως δείχνει το σχήμα 4.8.

Keyword Input Form

RefBy Sort/T1 Add Accept Delete Default Done 1 tube

Use *Parameter (Subsys: 1 Sp. 2) Setting

*SECTION_SHELL_(TITLE) (1)

TITLE

tube

SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
1	2	1.0000000	3	1	0	0	1
T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
0.5000000	0.5000000	0.5000000	0.5000000	0.0	0.0	0.0	0

Repeated Data by Button and List

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

Σχήμα 4.8: Απόδοση πάχους και βαθμών ελευθερίας στα πεπερασμένα στοιχεία του δοκιμίου

Για το τύπο στιβαρότητας που ακολουθείται κατά την παραμόρφωση των στοιχείων μόνο των μοντέλων των δοκιμίων επιλέχθηκε το μοντέλο Flanagan-Belytschko στην καρτέλα "Hourglass" αποδίδοντας την τιμή 4 στην παράμετρο IHQ κατά το σχήμα 4.9. Η επιλογή του μοντέλου Flanagan-Belytschko στην καρτέλα "Hourglass" επιλέχθηκε καθώς η θεωρία αυτή καθιστά το μητρώο στιβαρότητας κατά τη μη-γραμμική επίλυση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων πιο ευσταθή στην υπολογιστική διαδικασία ενισχύοντας έτσι την ικανότητα του μοντέλου για απόδοση μιας ελεγχόμενης και προοδευτικής κατάρρευσης όταν αυτή προκαλείται υπό την επίδραση των υπόλοιπων συνθηκών γεωμετρίας και φόρτισης.

4.4.2 Καθορισμός μηχανικών ιδιοτήτων υλικών

Για τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών χρησιμοποιήθηκαν οι καρτέλες "MAT_020" και "MAT_024" για τις δυο πλάκες και το αριθμητικό μοντέλο αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, το κράμα αλουμινίου 6060-T5 ως υλικό του δοκιμίου περιγράφηκε από τη πυκνότητά του ($\rho=2,7\text{gr cm}^{-3}$), το λόγο Poisson ($\nu=0.33$), το μέτρο ελαστικότητας ($E=69\text{ GPa}$) και το όριο διαρροής του ($\sigma_Y=135\text{ MPa}$), όπως αυτά αναφέρθηκαν και στην παράγραφο 4.1. Τρία ζεύγη τιμών τάσης (σ) – πλαστικής παραμόρφωσης (ϵ) χρησιμοποιήθηκαν ώστε να περιγράψουν τη κράτυνση του υλικού από την διαρροή έως

Keyword Input Form

RefBy Add Accept Delete Default Done 1 tube

Use *Parameter (Subsys: 1 3.k) Setting

*HOURLASS_(TITLE) (1)

TITLE
tube

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

COMMENT:

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

Σχήμα 4.9: Καρτέλα "Hourglass" για τα στοιχεία του μοντέλου

την αντοχή του. Τα τελευταία λήφθηκαν από πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού του υλικού, από το οποίο παράχθηκε η πραγματική καμπύλη σ - ϵ , όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.1.

Η επιλογή της καρτέλας "MAT_024" αντιπροσωπεύει ένα κατά τμήματα γραμμικά κρατυνόμο υλικό (piecewise linear plasticity) και για αυτό το λόγο θεωρήθηκε κατάλληλη για την συγκεκριμένη μοντελοποίηση δεδομένου του πειράματος εφελκυσμού που έγινε. Η συμπλήρωση της καρτέλας με τις αντίστοιχες τιμές παριστάνεται στο σχήμα 4.3. Η κράτυνση του υλικού, όπως φαίνεται από τη σχετική δοκιμή εφελκυσμού, ήταν αμελητέα, και γι αυτό το υλικό μοντελοποιήθηκε ως τέλεια πλαστικό.

Αναφορικά με τα υλικά των πλακών, επιλέχθηκε η καρτέλα υλικού "MAT_020" η οποία θεωρεί το υλικό ως άκαμπτο και απαραμόρφωτο (rigid). Οι πλάκες θεωρήθηκαν χαλύβδινες, και αποδόθηκαν η πυκνότητα του υλικού ($\rho=7,83\text{gr cm}^{-3}$), ο λόγος Poisson ($\nu=0.3$) και το μέτρο ελαστικότητάς τους ($E=207\text{GPa}$) [35]. Ακόμη, καθορίστηκαν και οι κινηματικοί περιορισμοί των δυο πλακών στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων (CMO=1), με την κάτω πλάκα πλήρως δεσμευμένη έναντι μετατοπίσεων (CON1=7) και περιστροφών (CON2=7), ενώ την άνω πλάκα πλήρως δεσμευμένη έναντι περιστροφών (CON2=7) και ελεύθερη έναντι μετατοπίσεων περί τον κατακόρυφο άξονα (CON1=4), όπως παριστάνεται στα ακόλουθα σχήματα 4.11 και 4.12 αντίστοιχα. Τέλος, σε κάθε

Keyword Input Form

NewID Draw MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done 1 tube

Use *Parameter (Subsys: 1 3.k) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (1)

TITLE
tube

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
1		0.0027000	6.900e+004	0.3300000	135.00000	0.0	1.000e+021	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP	LCF		
	0.0	0.0	0	0	0.0	0		
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0100000	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	135.00000	136.00000	137.00000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

COMMENTS
ES3:=Corresponding yield stress value to EPS3

Σχήμα 4.10: Καρτέλα υλικού "MAT_024"

σώμα του μοντέλου αντιστοιχήθηκαν στην καρτέλα Part κατάλληλα το είδος των στοιχείων με τα οποία διακριτοποιήθηκε (Section ID) και το υλικό (Material ID), ενώ συγκεκριμένα στο μοντέλο του απορροφητή αντιστοιχήθηκε και το Hourglass ID με το οποίο περιγράφηκε.

Keyword Input Form

NewID Draw MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done 2 pldn 3 plup

Use *Parameter (Subsys: 1 3.k) Setting

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (2)

TITLE
pldn

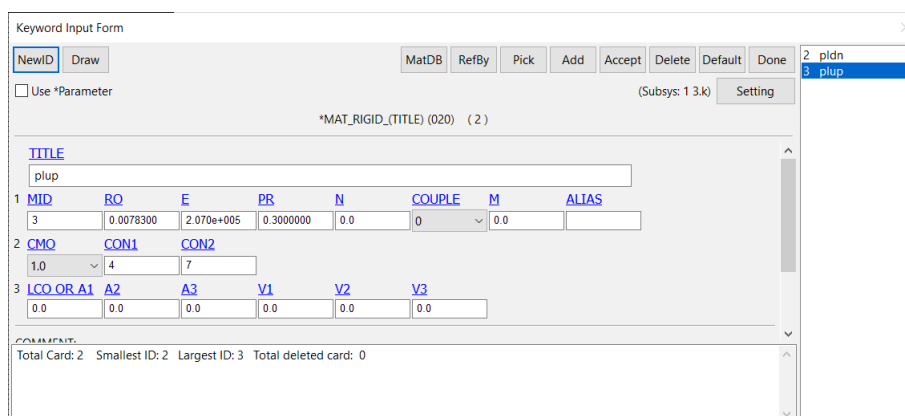
1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
2		0.0078300	2.070e+005	0.3000000	0.0	0	0.0	
2	CMO	CON1	CON2					
	1.0	7	7					
3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

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

Σχήμα 4.11: Καρτέλα υλικού "MAT_020" κάτω πλάκας

4.4.3 Καθορισμός οριακών συνθηκών

Σε κάθε διεπιφάνεια καθενός μοντέλου ορίστηκαν οριακές συνθήκες μη-εισχώρησης των τοιχωμάτων στην καρτέλα "Contact" του "Keyword Manager". Συγκεκριμένα,



Σχήμα 4.12: Καρτέλα υλικού "MAT_020" άνω πλάκας

οι τρεις διεπιφάνειες που λήφθηκαν υπόψιν ήταν αυτές μεταξύ δοκιμίου και πλακών (απορροφητής-άνω πλάκα και απορροφητής-κάτω πλάκα) και μεταξύ των σχηματιζόμενων πτυχώσεων του απορροφητή. Οι δυο πρώτες περιπτώσεις μοντελοποιήθηκαν στην υποκαρτέλα "Nodes-to-Surface" όπου ως άκαμπτο-απαραμόρφωτο σώμα (master segment) θεωρήθηκε η κάθε πλάκα σε καθεμία περίπτωση, ενώ ως παραμορφώσιμο σώμα (slave segment) ο απορροφητής (σχήματα 4.13 και 4.14). Στη δεύτερη περίπτωση, για τη μη-εισχώρηση των σχηματιζόμενων πτυχώσεων κατά τη συμπίεση του απορροφητή, επιλέχθηκε η υποκαρτέλα "Automatic Single Surface", στην οποία ορίστηκε ο απορροφητής ως το μόνο παραμορφώσιμο σώμα, καθώς οι σχηματιζόμενες διεπιφάνειες αποτελούνταν από τις πτυχώσεις του (σχήμα 4.15). Στις πρώτες δυο περιπτώσεις λήφθηκαν συντελεστές στατικής και δυναμικής τριβής ίσοι με 0.61 και 0.47 αντίστοιχα, ενώ στην περίπτωση των διεπιφανειών των πτυχώσεων του δοκιμίου λήφθηκαν ίσοι με 1.05 και 0.3 αντίστοιχα [39].

4.4.4 Συνθήκες φόρτισης

Για τον καθορισμό των συνθηκών φόρτισης, θεωρήθηκε η κάθοδος της πάνω πλάκας με σταθερή ταχύτητα ίση με 1m s^{-1} . Έτσι, αρχικά δημιουργήθηκε η καμπύλη ταχύτητας-χρόνου στην καρτέλα "Define Curve" έως τελική χρονική στιγμή αυτή στην οποία θα επιτευχθεί η επιθυμητή συμπίεση του μοντέλου (σχήμα 4.16). Τέλος, η καμπύλη αυτή αντιστοιχίστηκε στην άνω πλάκα στην καρτέλα "Boundary Prescribed Motion Rigid"

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter (Subsys: 1 3.k) Setting

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

1	CID	TITLE
1	plup-tube	

MPP1 MPP2

2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARM8
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	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
0.6100000	0.4700000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+020	

Total Card: 2 Smallest ID: 1 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

Σχήμα 4.13: Καρτέλα "Nodes-to-Surface" μεταξύ δοκιμίου και άνω πλάκας

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter (Subsys: 1 3.k) Setting

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

1	CID	TITLE
2	pldn-tube	

MPP1 MPP2

2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARM8
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	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
0.6100000	0.4700000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+020	

Total Card: 2 Smallest ID: 1 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

Σχήμα 4.14: Καρτέλα "Nodes-to-Surface" μεταξύ δοκιμίου και κάτω πλάκας

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter (Subsys: 1 3.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_(ID/TITLE/MPP) (1)

1	CID	TITLE
3	tube-self	

MPP1 MPP2

2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARM8
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	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
1.0500000	0.3000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+020	

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

Σχήμα 4.15: "Automatic Single Surface" για το μοντέλο

και θεσπίστηκε ως καμπύλη ταχύτητας αποδίδοντας στην παράμετρο VID τη τιμή 0 (σχήμα 4.17).

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Add Accept Delete Default Done 1 move

Use *Parameter (Subsys: 1 3.k) Setting

*DEFINE_CURVE_(TITLE) (1)

TITLE
move

LCID	SIDR	SFA	SFO	OFFA	OFFO	DATTYP	LCINT
h	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 80.0 -1.0	

Data Pt. 1 Load XYData

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

Σχήμα 4.16: Καθορισμός σταθερής ταχύτητας

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done 1 move

Use *Parameter (Subsys: 1 3.k) Setting

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_(ID) (1)

ID	TITLE
1	move

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

COMMENT:

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

Σχήμα 4.17: Καθορισμός σταθερής καθόδου άνω πλάκας

4.4.5 Καταγραφή αποτελεσμάτων και τερματισμός

Κατά το τελικό στάδιο της μοντελοποίησης, αρχικά στην καρτέλα "Control Termination" ορίστηκε ο χρόνος τερματισμού της προσομοίωσης, ο οποίος συμπίπτει με το χρόνο περάτωσης της συμπίεσης στην καμπύλη σταθερής ταχύτητας καθόδου της άνω πλάκας (4.18), ενώ στην καρτέλα "Database" επιλέχθηκαν χρονικά βήματα 1 ms καταγραφής

στιγμιότυπων της κατάρρευσης στην υποκαρτέλα "D3plot" και 0,5ms καταγραφής των ασκούμενων δυνάμεων στις διεπιφάνειες στην υποκαρτέλα "Rcforc" (σχήμα 4.19).

1	ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS
	80.000000	0	0.0	0.0	1.000e+008

Σχήμα 4.18: Καθορισμός χρόνου τερματισμού

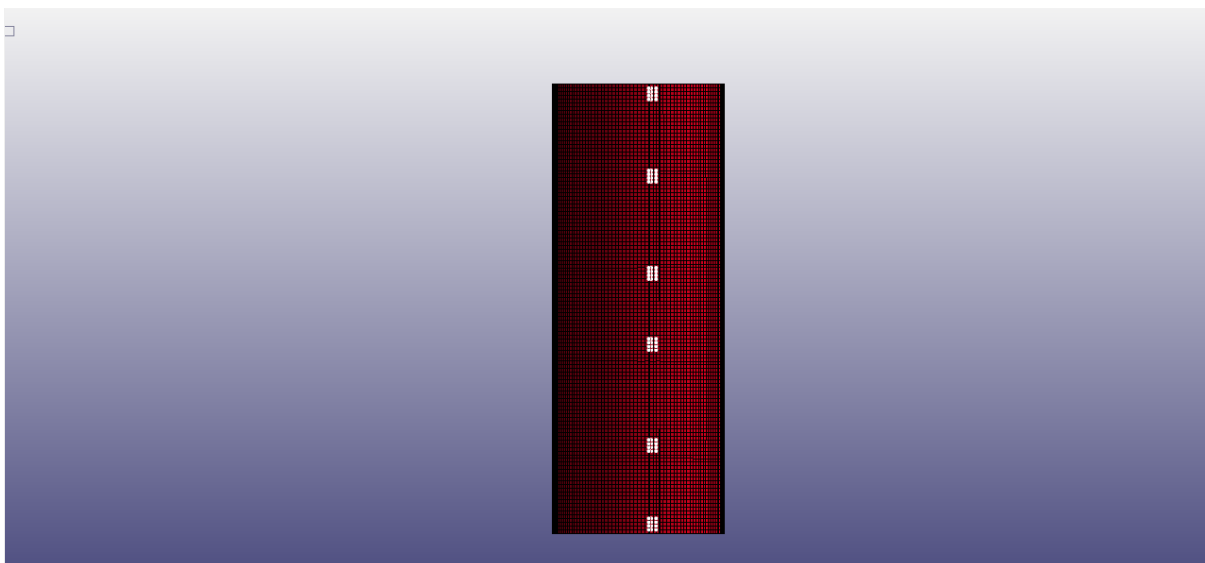
	DT	BINARY	LCUR	IOOPT
<input type="checkbox"/> PRTUBE	0.0	0	0	1
<input type="checkbox"/> RBDOUT	0.0	0	0	1
<input checked="" type="checkbox"/> RCFORC	0.05	0	0	1
<input type="checkbox"/> RWFORC	0.0	0	0	1

Σχήμα 4.19: Καθορισμός χρονικού βήματος καταγραφής δεδομένων

4.5 Ενίσχυση με σημειακές συγκολλήσεις

Στην εξωτερική σπείρα των μοντέλων εξετάστηκαν ένα πλήθος από σημειακές συγκολλήσεις (spotwelds), που συνδέουν σε συγκεκριμένα σημεία καθ' ύψος τα στρώματα των αναδιπλώσεων στην κατεύθυνση του πάχους. Σε όλες τις περιπτώσεις η πρώτη συγκόλληση δημιουργήθηκε στο άνω άκρο των μοντέλων των σωλήνων και η τελευταία στο κάτω άκρο. Οι εναπομένουσες συγκολλήσεις για κάθε περίπτωση τοποθετήθηκαν σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις καθ' όλο το ύψος των μοντέλων, όπως φαίνεται στο

σχήμα 4.20. Το πλήθος των συγκολλήσεων που μελετήθηκαν εκτίνεται μέχρι και την περίπτωση συνεχούς ραφής.



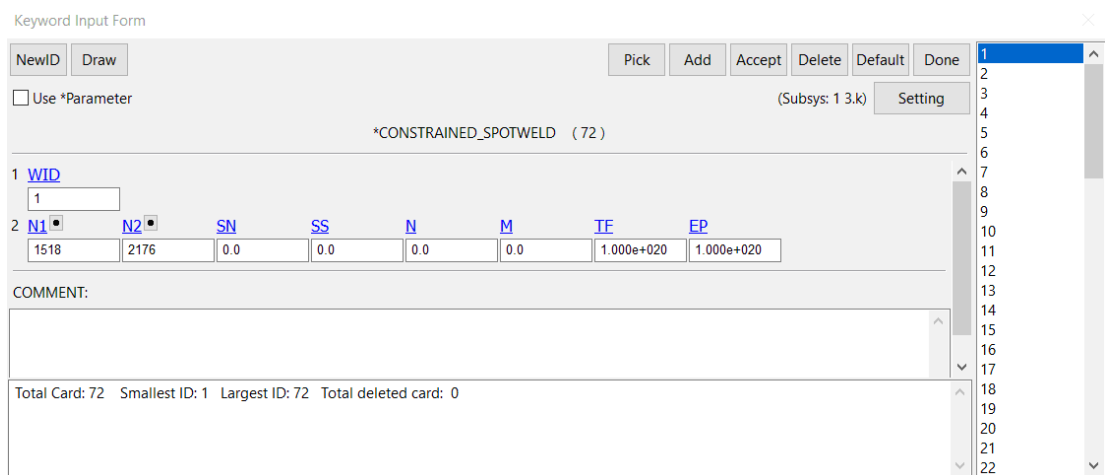
Σχήμα 4.20: Μοντέλο "2" με περίπτωση 6 σημειακών συγκολλήσεων (επισημασμένες με άσπρο)

Τέλος, κάθε εξεταζόμενη διάταξη μελετήθηκε σε δυο περιπτώσεις στήριξης των άκρων του μοντέλου του δοκιμίου επί των πλακών. Στη μεν πρώτη με απλή στήριξη των άκρων, στη δε δεύτερη με πλήρως πακτωμένα άκρα επί των πλακών. Έτσι, οι μελετημένες περιπτώσεις διακρίνονται στον πίνακα 4.3 αναφορικά με το τρόπο στήριξης των άκρων καθενός δοκιμίου και τον αριθμό των σημειακών συγκολλήσεων των άκρων της διατομής του. Στις περιπτώσεις των δοκιμίων "2" και "3" πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση για διάφορα πλήθη σημειακών συγκολλήσεων, για απλή στήριξη των άκρων και πάκτωσή τους αντίστοιχα.

Αριθμητικό μοντέλο	Απλή στήριξη άκρων	Πακτωμένα άκρα
	Αριθμός σημ. συγκολλ.	Αριθμός σημ. συγκολλ.
2	3 / 4 / 5 / 6 / 8 / 10 / συνεχής ραφή	3
3	4	3 / 4 / 5 / 6 / 8 / 10 / συνεχής ραφή
3.1	4	3
3.3	4	3
3.5	4	3
3.7	4	3
4	4	3
5	4	3

Πίνακας 4.3: Εξεταζόμενος αριθμός σημειακών συγκολλήσεων για κάθε μοντέλο ανάλογα με τις οριακές συνθήκες

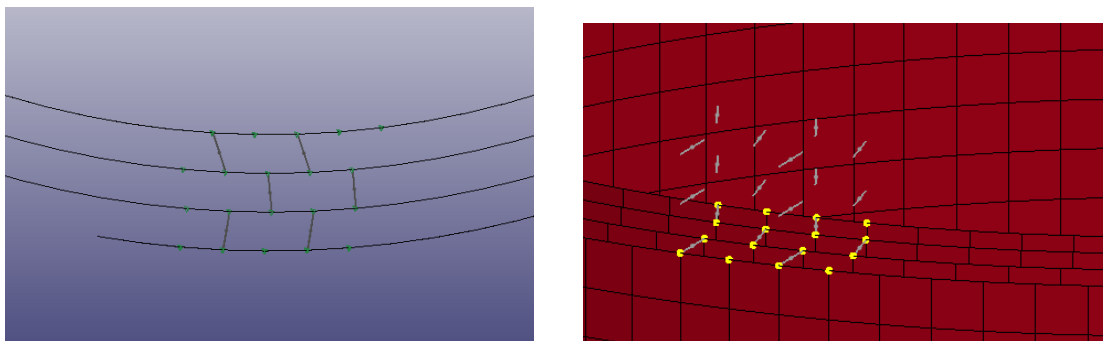
Στα αριθμητικά μοντέλα με συγκολλημένα τα άκρα του αναδιπλούμενου ελάσματος, είτε με συνεχή ραφή είτε με σημειακές συγκολλήσεις, στην καρτέλα "Constrained Spotweld" επιλέγονταν διαδοχικά οι μεταξύ τους δεσμευμένοι κόμβοι, με τρόπο τέτοιο ώστε να δεσμευτούν μεταξύ τους κόμβοι διαδοχικών αναδιπλώσεων καθ' όλο το πάχος του μοντέλου, όπως δείχνει το σχήμα 4.21.



Σχήμα 4.21: Καθορισμός συγκολλημένων κόμβων

Η διάμετρος της κάθε σημειακής συγκόλλησης ορίστηκε 3mm. Καθώς η καρτέλα

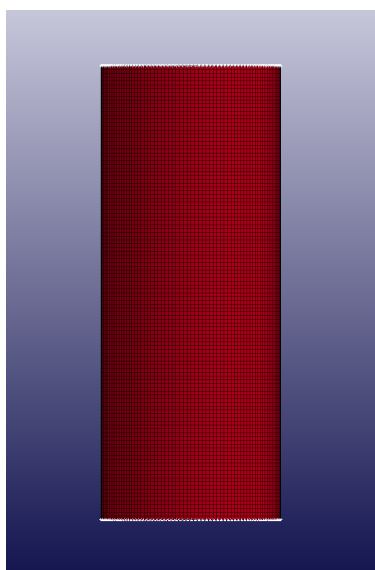
"Constrained Spotweld" του LS-Dyna δεν επιτρέπει σε έναν κόμβο να δεσμεύεται με περισσότερους από έναν άλλον κόμβο, η σύνδεση των κόμβων έγινε ανά δύο για κάθε στρώμα περιέλιξης, ώστε να υπάρξει δέσμευση κόμβων σε όλη την διεύθυνση του πάχους των μοντέλων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.22.



Σχήμα 4.22: Δύο όψεις σημειακών συγκολλήσεων μοντέλου δοκιμίου

4.6 Εισαγωγή πακτώσεων

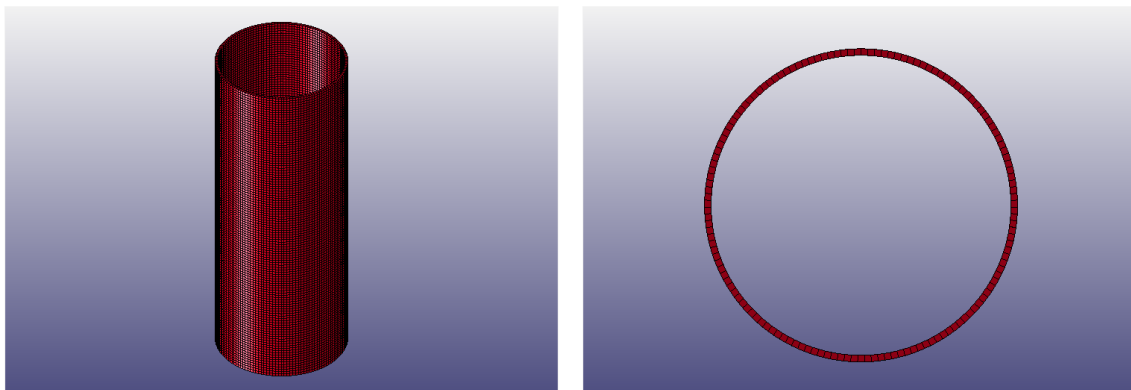
Σε μερικά από τα μοντέλα (πίνακας 4.3) έγινε εισαγωγή πακτώσεων στα άκρα τους. Αυτό είναι εφικτό από την επιλογή "SPC", στο μενού "Boundary", στην επιλογή "Create Entity" της καρτέλας "Model and Part". Εκεί επιλέχθηκαν οι κόμβοι των άκρων του εκάστοτε μοντέλου όπως φαίνεται στο σχήμα 4.23.



Σχήμα 4.23: Πακτώσεις στα άκρα των μοντέλων (σκιασμένες με άσπρο χρώμα)

4.7 Μοντέλα κλειστής διατομής

Στα πλαίσια της μελέτης των δομών σπειροειδούς διατομής, δημιουργήθηκαν για σύγκριση και οκτώ μοντέλα δοκιμίων κλειστής κυκλικής διατομής αντίστοιχα των μοντέλων "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7". Η διαδικασία μοντελοποίησης ήταν παρόμοια με αυτήν των μοντέλων σπειροειδούς διατομής. Διαφοροποίηση υπήρξε στην δημιουργία της γεωμετρίας αυτών των μοντέλων. Τα δοκίμια κυκλικής διατομής δημιουργήθηκαν από το μενού "Element and Mesh", με την επιλογή "Shape Mesher". Εκεί επιλέχθηκε η δημιουργία κυλινδρικού μοντέλου με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, και στη συνέχεια έγινε η εισαγωγή των διαστάσεων και ο ορισμός της πυκνότητας πλέγματος διακριτοποίησης για κάθε περίπτωση μοντέλου.



Σχήμα 4.24: Όψεις και διακριτοποίηση μοντέλου κλειστής διατομής με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (*shell elements*) (αριστερά) και απεικόνιση των τοιχωμάτων κατά το πάχος (δεξιά)

Τα μοντέλα αυτά σχεδιάστηκαν με το ίδιο μήκος, μέση διάμετρο και εμβαδό διατομής με τα αντίστοιχα τους με σπειροειδή διατομή. Για την διακριτοποίηση επιλέχθηκε μήκος πεπερασμένων στοιχείων 1.5 φορά το πάχος τοιχώματος (h) του κάθε μοντέλου, όπως αυτό πάρθηκε από τον πίνακα 4.1 ως αριθμός σπειρών επί το πάχος του φύλλου αλουμινίου ($h = Nt$) [32]. Αναλυτικά οι διαστάσεις που αφορούν τα μοντέλα κλειστής διατομής παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.

Αριθμητικό μοντέλο	πάχος τοιχώματος h (mm)	Μήκος πεπερασμένου στοιχείου (mm)
2	1.05	1.58
3	1.56	2.34
3.1	1.78	2.66
3.3	1.43	2.15
3.5	1.18	1.77
3.7	1.00	1.49
4	2.08	3.11
5	2.54	3.82

Πίνακας 4.4: Πάχη τοιχώματος και μήκη πεπερασμένων στοιχείων των μοντέλων κλειστής διατομής που αντιστοιχούν στα δοκίμια "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7"

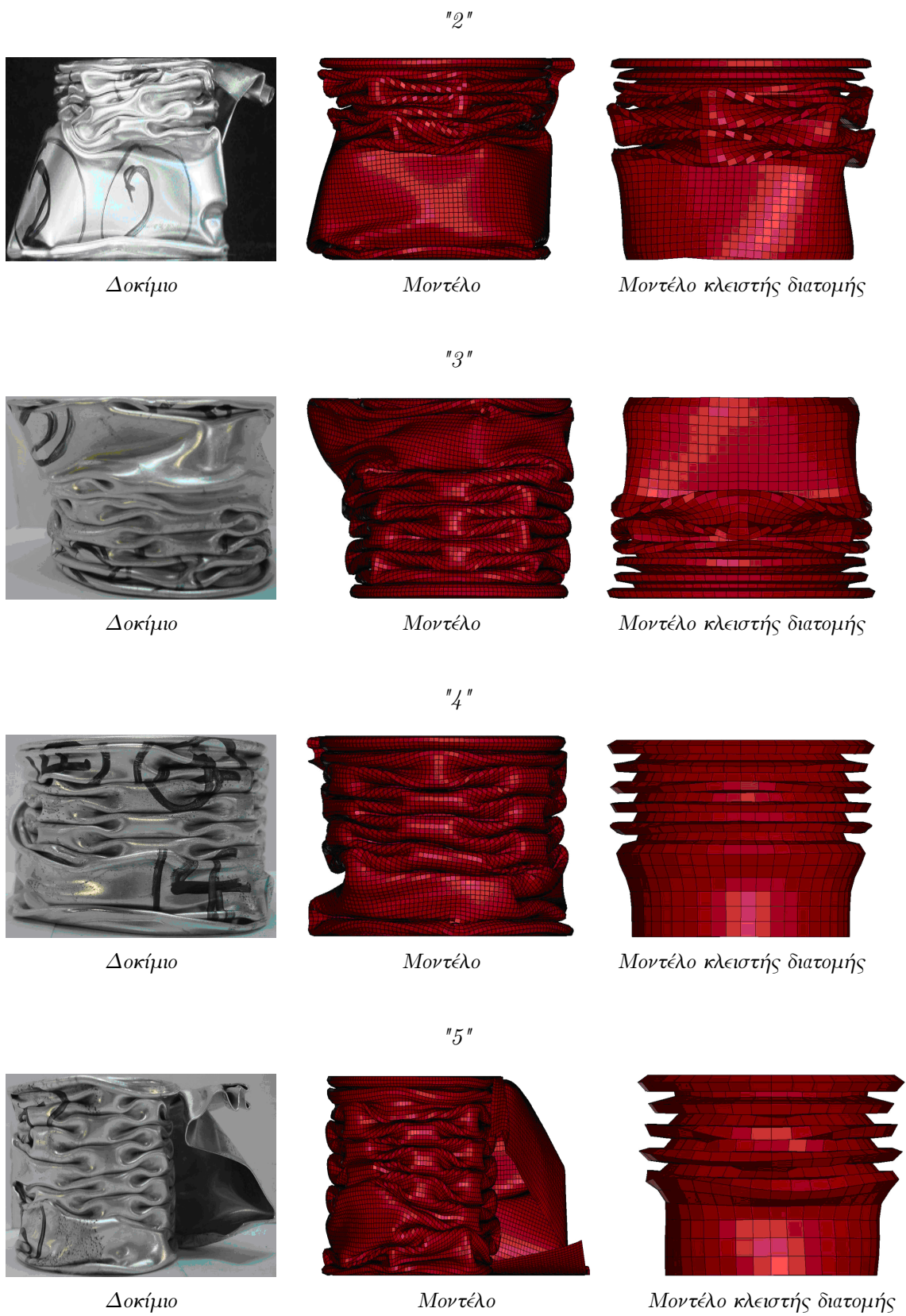
Κεφάλαιο 5

Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Σύνοψη: Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης των μοντέλων με τον μη γραμμικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων *LS-Dyna*, η επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς και η ανάλυση των επιπτώσεων των σημειακών συγκολλήσεων ως προς την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των μοντέλων των δοκιμίων. Γίνεται τέλος σύγκριση όλων των μοντέλων σπειροειδούς διατομής με τα μοντέλα κλειστής κυκλικής διατομής.

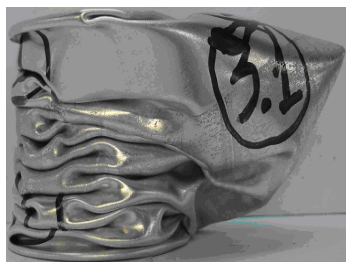
5.1 Επιβεβαίωση πειραματικής διαδικασίας

Με τον μη γραμμικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων *LS-Dyna* έγινε επίλυση των μοντέλων σπειροειδούς διατομής "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" χωρίς την εισαγωγή σημειακών συγκολλήσεων καθώς και των αντίστοιχων κλειστής κυκλικής διατομής. Στα σχήματα 5.1 και 5.2 συγκρίνονται οι τελικές μορφές των δοκιμίων σπειροειδούς διατομής, των αντίστοιχων μοντέλων τους και των αντίστοιχων μοντέλων κλειστής διατομής.

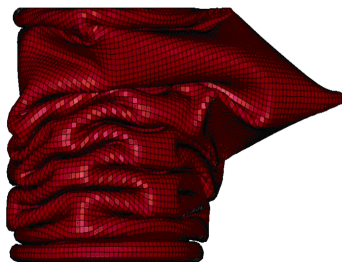


Σχήμα 5.1: Τελικές μορφές δοκιμίων "2", "3", "4", "5" [34] και των αντίστοιχων μοντέλων και μοντέλων κλειστής διατομής

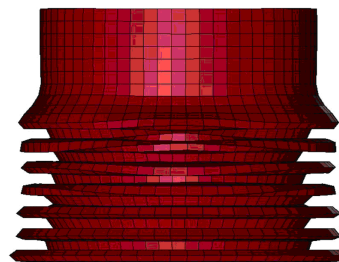
"3.1"



Δοκίμιο

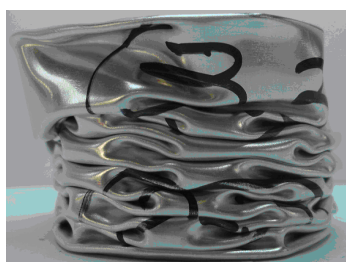


Μοντέλο

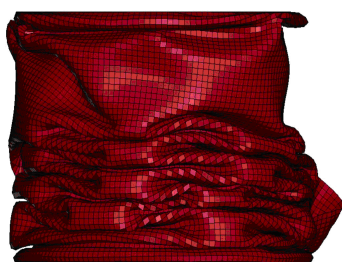


Μοντέλο κλειστής διατομής

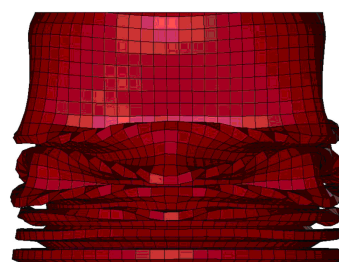
"3.3"



Δοκίμιο



Μοντέλο

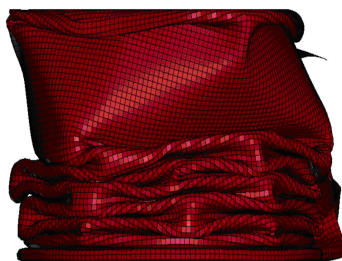


Μοντέλο κλειστής διατομής

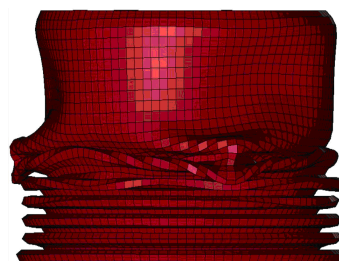
"3.5"



Δοκίμιο

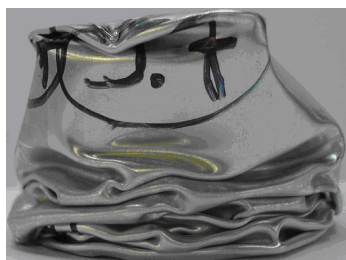


Μοντέλο

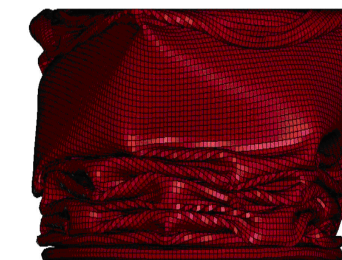


Μοντέλο κλειστής διατομής

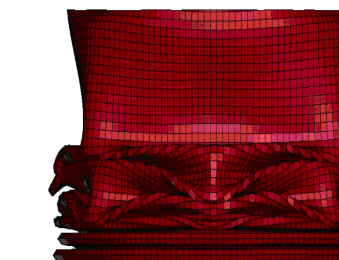
"3.7"



Δοκίμιο



Μοντέλο



Μοντέλο κλειστής διατομής

Σχήμα 5.2: Τελικές μορφές δοκιμών "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" [34] και των αντίστοιχων μοντέλων και μοντέλων κλειστής διατομής

Παρατηρούμε πως ο τρόπος κατάρρευσης μεταξύ των δοκιμίων και των αντίστοιχων μοντέλων τους εμφανίζουν πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους τόσο προς το πλήθος των περιφερειακών λοβών που δημιουργούνται, όσο και ως προς το μοτίβο κατάρρευσης που σε όλες τις περιπτώσεις προσεγγίζει τον 4D διαμαντοειδή. Φαίνεται επίσης πως τα μοντέλα πιάνουν πολύ καλά το "ζεδίπλωμα" που εμφανίζεται και στα δοκίμια

Τα μοντέλα κλειστής διατομής ωστόσο εμφανίζουν αξονοσυμμετρικό ή μικτό τρόπο κατάρρευσης που συμφωνεί με την ήδη υπάρχουσα έρευνα [40]. Η διαφορά στα μοτίβα κατάρρευσης σε όμοια σε διαστάσεις και υλικό μοντέλα πιθανώς οφείλεται στην έλλειψη των ενδοδιατμητικών τάσεων ανάμεσα στα στρώματα των φύλλων αλουμινίου που μειώνει την δυσκαμψία των τοιχωμάτων της δομής.

Μετά από την εξαγωγή διαγραμμάτων δύναμης-μετατόπισης (F - δ) και την μεταεπεξεργασία των δεδομένων έγινε η εξαγωγή δεικτών κατάρρευσης όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Όνομασία	Είδος	<i>IPF</i> [kN]	<i>EA</i> [J]	<i>MCF</i> [kN]	<i>SEA</i> [J/gr]	<i>CFE</i> [%]
2	Μοντέλο	19.22	359.78	4.50	11.10	23.42
	Δοκίμιο	16.1	401.5	5.02	12.65	31.17
	Κλειστή διατομή	20.05	600.56	7.51	18.75	37.44
3	Μοντέλο	28.86	564.51	7.06	11.77	24.46
	Δοκίμιο	23.46	652.47	8.16	13.83	34.77
	Κλειστή διατομή	29.91	1111.32	19.89	23.13	46.44
3.1	Μοντέλο	28.85	601.30	7.52	12.53	26.07
	Δοκίμιο	23.96	648.50	8.10	13.76	33.80
	Κλειστή διατομή	29.97	1369.82	17.12	28.51	57.14
3.3	Μοντέλο	28.77	551.41	6.90	11.50	23.97
	Δοκίμιο	20.93	590.90	7.38	12.50	35.29
	Κλειστή διατομή	29.70	995.24	12.44	20.81	41.88
3.5	Μοντέλο	28.79	482.41	6.03	10.06	20.96
	Δοκίμιο	22.70	504.80	6.31	10.68	27.80
	Κλειστή διατομή	29.69	860.85	10.76	17.92	36.24
3.7	Μοντέλο	28.79	428.81	5.36	8.94	18.63
	Δοκίμιο	22.32	398.15	4.97	8.46	22.30
	Κλειστή διατομή	29.72	713.21	8.92	14.81	30.00
4	Μοντέλο	37.58	745.32	9.32	11.66	24.80
	Δοκίμιο	31.72	874.18	10.93	13.93	34.45
	Κλειστή διατομή	39.99	1885.04	23.56	24.44	58.92
5	Μοντέλο	47.73	1012.90	12.67	12.72	26.54
	Δοκίμιο	36.60	998.65	13.62	12.67	33.75
	Κλειστή διατομή	49.68	2555.56	31.94	32.20	64.30

Πίνακας 5.1: Δείκτες κατάρρευσης (*IPF*, *EA*, *MCF*, *SEA*, *CFE*) για τα σπειροειδή δοκίμια [34], τα αντίστοιχα υπολογιστικά μοντέλα και τα αντίστοιχα κυλινδρικά μοντέλα κλειστής διατομής "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7"

Παρατηρούμε καλή συμφωνία στους δείκτες κατάρρευσης μεταξύ των πειραματικών δοκιμών και της μοντελοποίησης. Τα μοντέλα φαίνεται πως παρουσιάζουν μεγαλύτερη αρχική δύναμη κατάρρευσης (*IPF*) από τα αντίστοιχα τους δοκίμια. Αυτό είναι φυσικό αφού στην μοντελοποίηση δεν λήφθηκαν υπόψιν τυχόν ατέλειες στην κατασκευή των δοκιμίων που θα οδηγούσαν σε μη τέλεια επαφή μεταξύ δοκιμίου και πλάκας θλίψης κατά την πειραματική διαδικασία.

Τα μοντέλα κλειστής διατομής εμφάνισαν καλύτερη ενέργεια απορρόφησης (*EA*) και απόδοση δύναμης κατάρρευσης (*CFE*). Καθώς τα μοντέλα κλειστής κυκλικής και σπειροειδούς διατομής έχουν ίδια μάζα, ίδιο ύψος και ίδιο εμβαδό διατομής φαίνεται πως η σύνδεση των στρωμάτων κατά την διεύθυνση του πάχους τείνει να δώσει καλύτερη συμπεριφορά ως προς την απορρόφηση ενέργειας. Στα επόμενα κεφάλαια θα δούμε αν αυτό είναι δυνατό να επιτευχθεί ως ένα βαθμό μέσω της εισαγωγής σημειακών συγκολλήσεων στην εξωτερική σπείρα των μοντέλων.

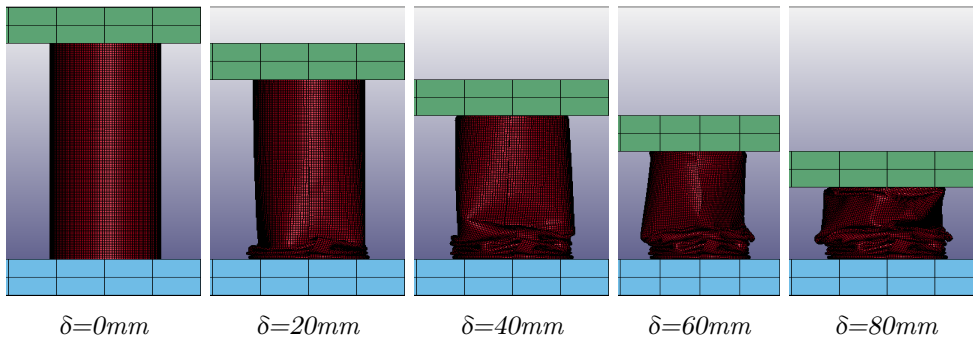
5.2 Μοντέλα με ελεύθερα άκρα

5.2.1 Παραμετρική ανάλυση για πλήθος spot welds

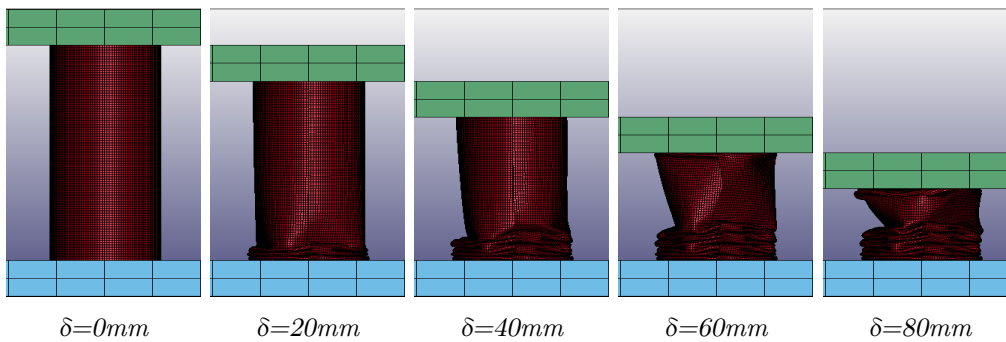
Στην πρώτη περίπτωση προσομοίωσης μοντέλων των δοκιμίων μελετήθηκε η επίδραση του πλήθους των σημειακών συγκολλήσεων για τα κυλινδρικά μοντέλα σπειροειδούς διατομής με ελεύθερα άκρα. Πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση για το μοντέλο "2" για 3, 4, 5, 6, 8 και 10 σημειακές, ισαπέχουσες καθ' ύψος συγκολλήσεις στην εξωτερική σπείρα του μοντέλου καθώς και για καθ' ύψος συνεχή ραφή επί της εξωτερικής σπείρας.

Στο σχήμα 5.3, και στο σχήμα 5.4 παρουσιάζονται κάποια στιγμιότυπα κατά την κατάρρευση για κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Οι τελικές μορφές των μοντέλων φαίνονται στο σχήμα 5.5. Από το LS-PrePost λαμβάνουμε τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης για τα μοντέλα, όπως φαίνονται στο σχήμα 5.6.

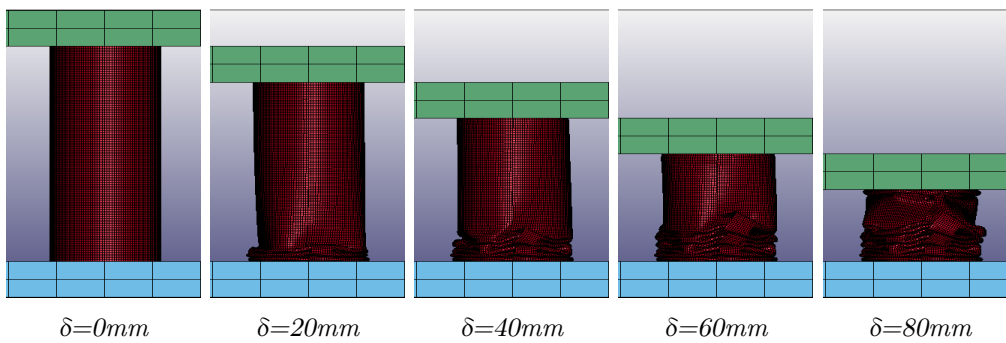
3 spowelds



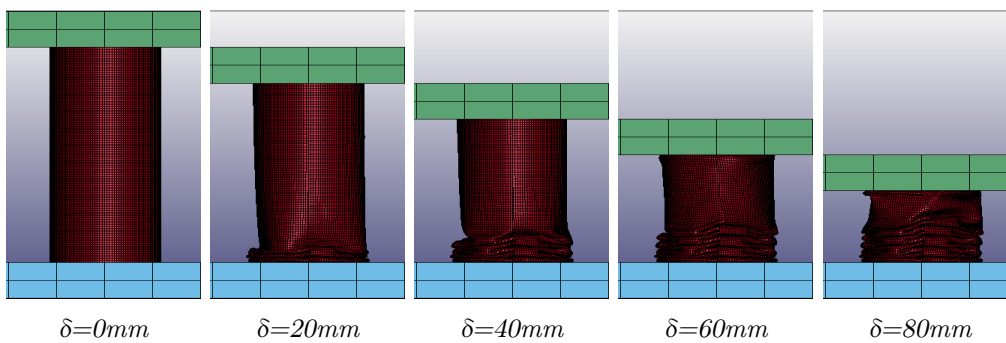
4 spowelds



5 spowelds

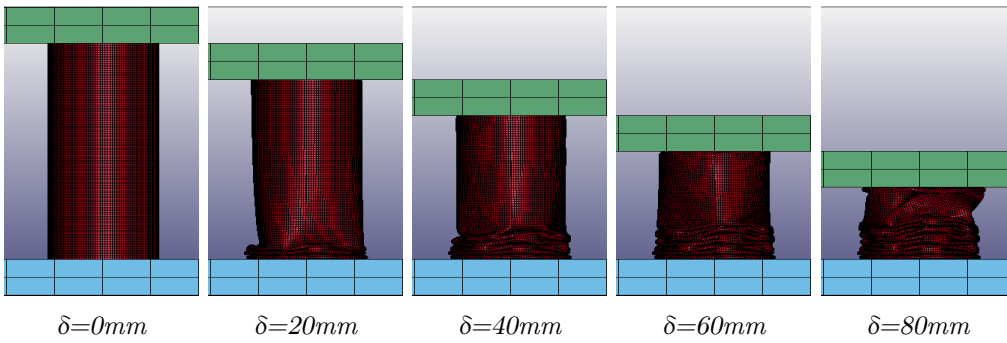


6 spowelds

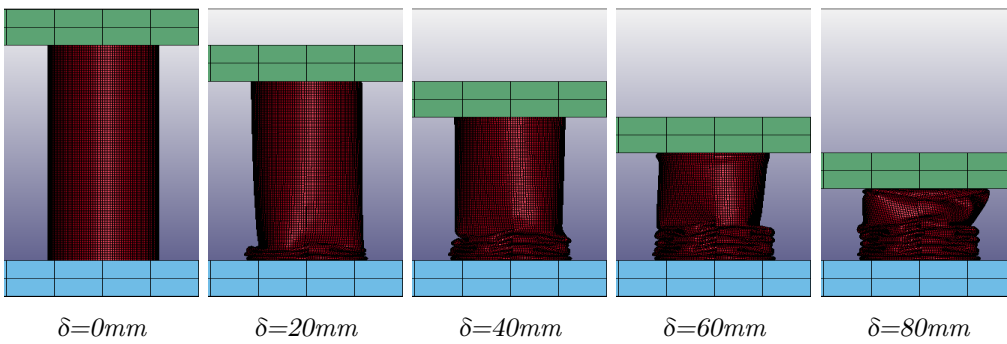


Σχήμα 5.3: Στιγμιότυπα κατάρρευσης μοντέλου "2" για 3, 4, 5, 6 σημειακές συγκολλήσεις για βράχυνση (δ) 0mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80 mm

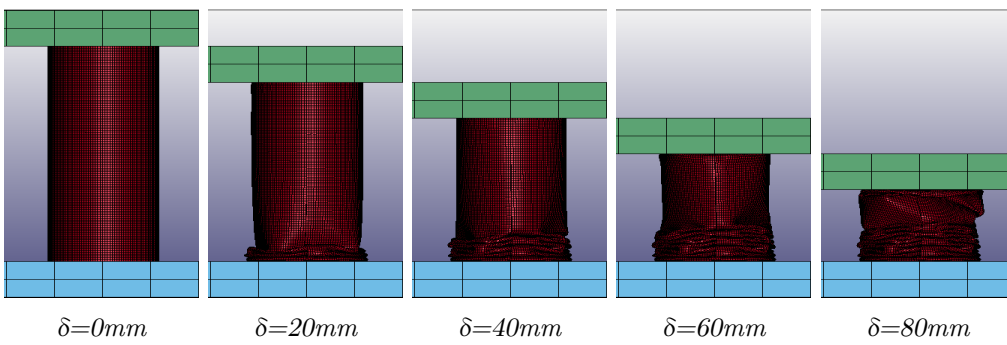
8 spowelds



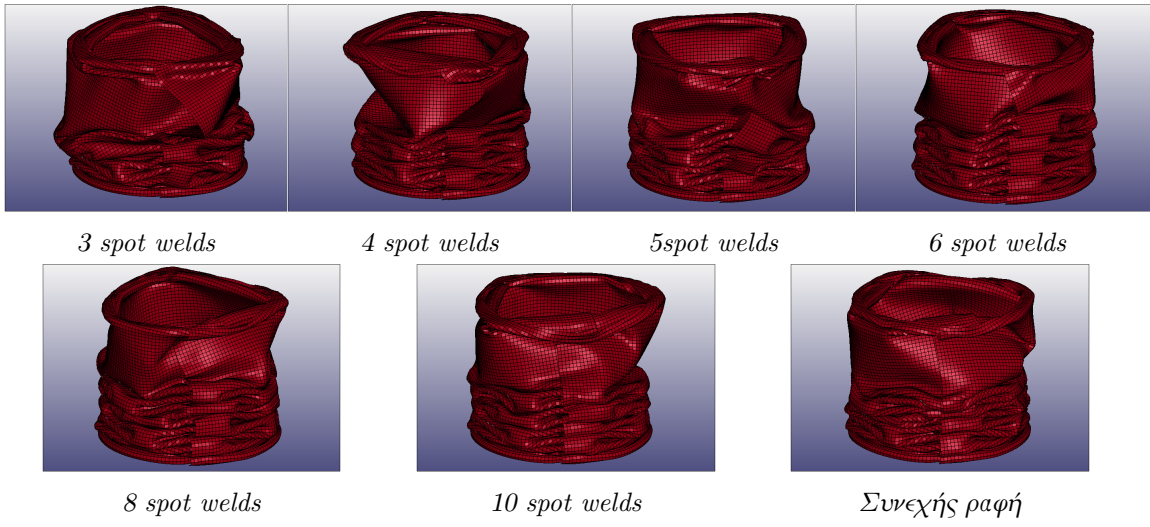
10 spowelds



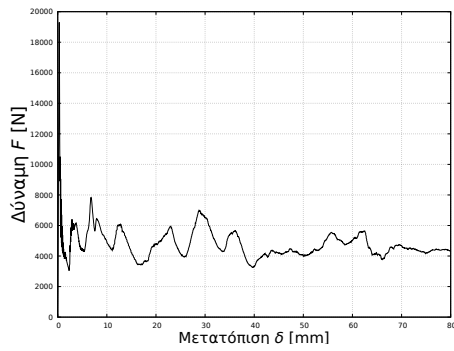
Συνεχής ραφή



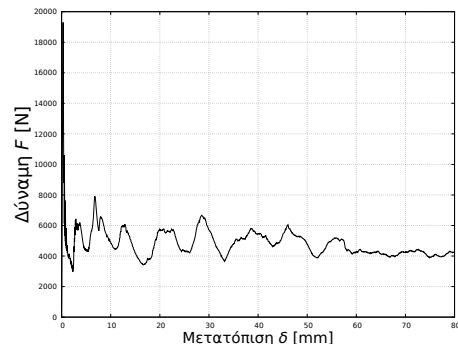
Σχήμα 5.4: Στιγμιότυπα κατάρρευσης μοντέλου "2" για 8, 10 συγκολλήσεις καθώς και για συνεχή ραφή για βράχυνση (δ) 0mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80 mm



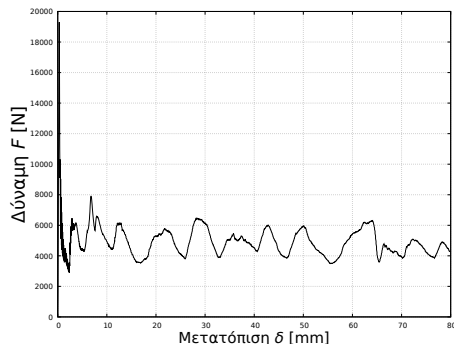
Σχήμα 5.5: Τελικές μορφές μοντέλου "2" για 3, 4, 5, 6, 8, 10 συγκολλήσεις καθώς και για συνεχή ραφή



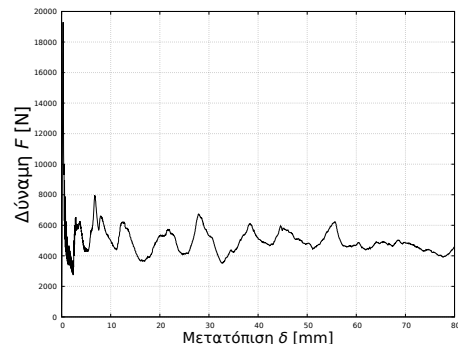
3 spot welds



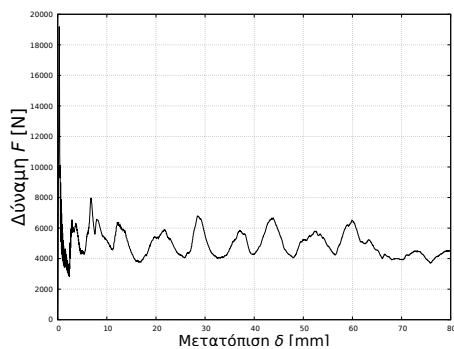
4 spot welds



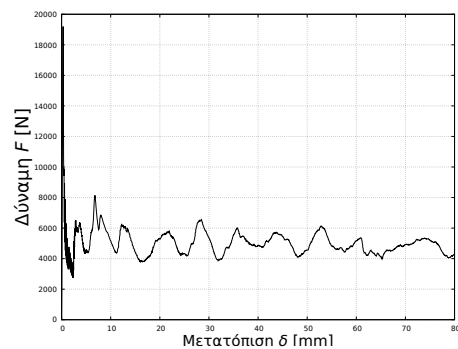
5 spot welds



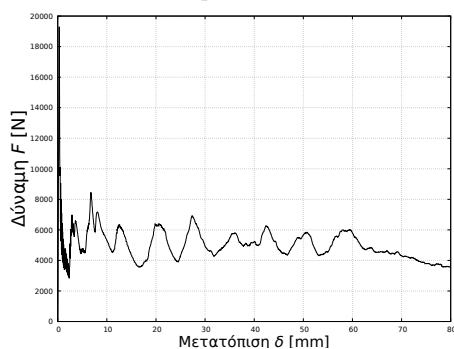
6 spot welds



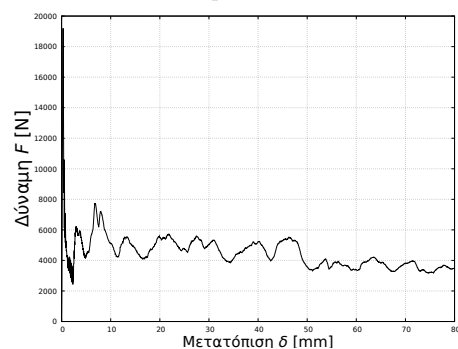
8 spot welds



10 spot welds



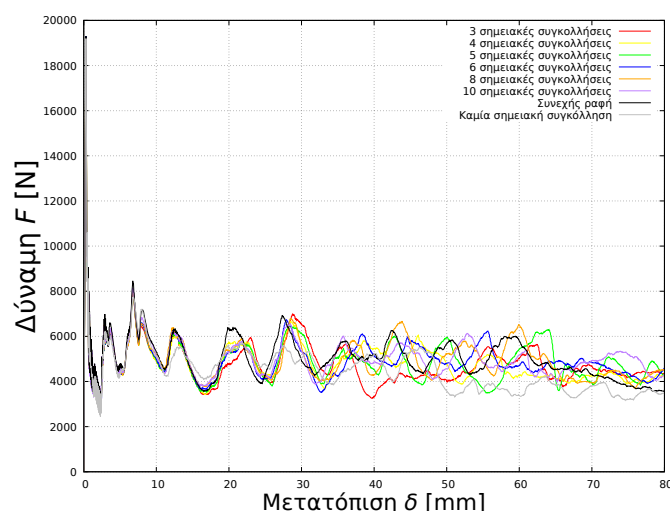
Σνεχής ραφή



Χωρίς συγκόλληση

Σχήμα 5.6: Διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης (F - δ) μοντέλου "2" για 3, 4, 5, 6, 8, 10 συγκολλήσεις καθώς και για συνεχή ραφή

Στο σχήμα 5.7 φαίνονται συγκεντρωμένα τα διαγράμματα του σχήματος 5.6.



Σχήμα 5.7: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης (F - δ) μοντέλου "2" για 3, 4, 5, 6, 8, 10 συγκολλήσεις καθώς και για συνεχή ραφή

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3, 5.5 ακόμα και η εισαγωγή τριών σημειακών συγκολλήσεων καθ' ύψος περιορίζει αρκετά το ξεδίπλωμα της εξωτερικής σπείρας κατά την κατάρρευση. Στην περίπτωση της συνεχούς ραφής βλέπουμε πως το εξωτερικό τοίχωμα ακολουθεί παράλληλα τα επίπεδα επικάλυψης κατά τον σχηματισμό των λοβών. Αυτό συμβαίνει καθώς η εισαγωγή περισσότερων σημειακών συγκολλήσεων, βελτιώνει την συνοχή της κατασκευής, αφού το μη "ξετύλιγμα" της σπείρας βοηθάει στην ανάπτυξη τριβής μεταξύ των στρωμάτων αυτής και στην δυσκαμψία των τοιχωμάτων της δομής. Στη πειραματική μελέτη έχει δειχθεί πως για τέτοιους τύπους δοκιμών, το ξεδίπλωμα των σπειρών είναι ένας βασικός λόγος που δεν τους επιτρέπει να καταρρεύσουν προοδευτικά για μεγάλα μήκη κατάρρευσης [34]. Με την εισαγωγή σημειακών συγκολλήσεων είναι εφικτό να αποτραπεί το ξεδίπλωμα των σπειρών, χωρίς να χρειαστεί να αυξήσουμε το πλήθος N αυτών, αφού χωρίς συγκολλήσεις ο κύριος μηχανισμός συγκράτησης των στρωμάτων μεταξύ τους είναι η αναμεταξύ τους τριβή (και έτσι με αύξηση του N έχουμε λιγότερο ξετύλιγμα των εσωτερικών στρωμάτων).

Όπως ακόμα μπορούμε να παρατηρήσουμε στα σχήματα 5.3, 5.4 και 5.5, το μοτίβο κατάρρευσης είναι μη αξονοσυμμετρικό. Κατά την έναρξη της κατάρρευσης ο πρώτος

λοβός σχηματίζεται στη χρονική στιγμή $t \approx 3s$ στο κάτω άκρο των μοντέλων και είναι αξονοσυμμετρικός με μορφή δακτυλιδιού για κάθε πλήθος σημειακών συγκολλήσεων. Ωστόσο δεν λαμβάνεται υπόψη ως προς τον χαρακτηρισμό του μοτίβου κατάρρευσης καθώς πιστεύεται ότι ο σχηματισμός του οφείλεται στη τριβή μεταξύ του άκρου του σωλήνα και της πλάκας θλίψης. Στη συνέχεια το πλήθος των λοβών κυμαίνεται από 6 έως 8 που προσεγγίζουν diamond 3D ή 4D γεωμετρίες μη εκτατών μορφών κατάρρευσης (σχήμα 5.8). Παρατηρούμε πως το πλήθος των λοβών που δημιουργούνται αυξάνεται με αύξηση του πλήθους των συγκολλήσεων, με την εξαίρεση του μοντέλου με 5 σημειακές συγκολλήσεις. Κάτι που ακόμα αξίζει να παρατηρηθεί είναι πως στο τέλος της κατάρρευσης (περίπου την χρονική στιγμή $t \approx 60s$) ξεκινάει η δημιουργία ενός δακτυλιδιού (δηλαδή αξονοσυμμετρικού λοβού) και στο πάνω άκρο των μοντέλων για κάθε αριθμό σημειακών συγκολλήσεων. Ο μηχανισμός αυτός πιθανώς να οφείλεται στην ύπαρξη μεγάλου συντελεστή στατικής τριβής μεταξύ του πάνω άκρου και της πλάκας θλίψης. Τέλος βλέπουμε πως με την αύξηση των σημειακών συγκολλήσεων η μορφή κατάρρευσης πλησιάζει αυτό του αντίστοιχου μοντέλου κλειστής διατομής, σε σχέση με την απουσία σημειακών συγκολλήσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8: Αρχή σχηματισμού diamond 4D λοβού στο μοντέλο αντίστοιχο του "3" (κέντρο), Τελική μορφή μοντέλου κλειστής διατομής αντίστοιχου του "2", (αριστερά) τελική μορφή μοντέλου σπειροειδούς διατομής "2" με συνεχή ραφή στην εξωτερική σπείρα.

Από τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης και την σύγκριση αυτών με τα στιγμιότυπα κατάρρευσης παρατηρούμε πως η εμφάνιση τοπικών μεγίστων συμπίπτει με την δημιουργία λοβών στα μοντέλα. Συγκριτικά με μία πρώτη ματιά μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα μέγιστα φορτία κατά την κατάρρευση είναι περίπου ίσα και άρα δεν επηρεάζονται από το πλήθος των σημειακών συγκολλήσεων. Τέλος φαίνεται ότι η δημιουργία των 5 πρώτων λοβών λαμβάνει χώρα σε ίδια χρονικά σημεία κατά την κατάρρευση για όλα

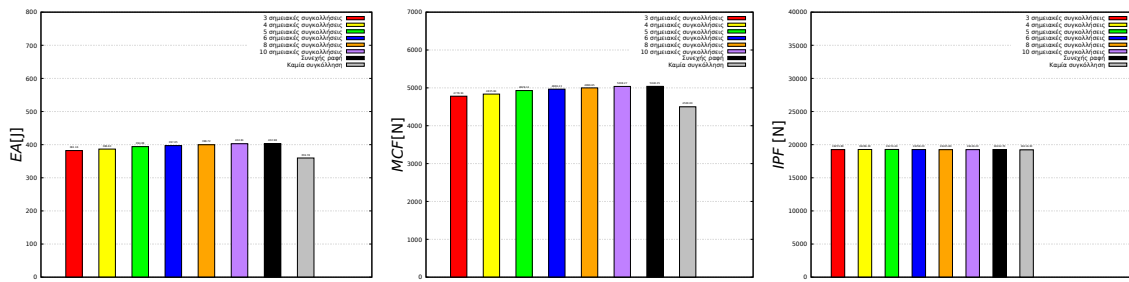
τα πλήθη σημειακών συγκολλήσεων. Οι επόμενοι λοβοί δημιουργούνται σε διαφορετικά σημεία βράχυνσης. Αυτό πιθανώς συμβαίνει επειδή ο αριθμός των συγκολλήσεων επηρεάζει την κατανομή της μάζας του υλικού στο τμήμα του μοντέλου που έχει ήδη καταρρεύσει, παράγοντας που επηρεάζει την δημιουργία λοβών στη συνέχεια της κατάρρευσης.

Από την μεταεπεξεργασία των διαγραμμάτων στο σχήμα 5.6 εξήχθησαν δείκτες κατάρρευσης των μοντέλων όπως φαίνεται στον πίνακα 5.2. Ως υπενθύμιση το εμβαδό μεταξύ της καμπύλης και του οριζόντιου άξονα αντιστοιχεί στην ενέργεια απορρόφησης κατά την κατάρρευση (EA). Το μέσο φορτίο κατάρρευσης αντιστοιχεί στην EA διαιρεμένη με την βράχυνση των μοντέλων μετά την κατάρρευση, που είναι $\delta=80\text{mm}$ για όλα τα μοντέλα. Η ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA) αντιστοιχεί στην ενέργεια απορρόφησης διαιρεμένη με την μάζα του δοκιμίου που κατέρρευσε (m_c). Η m_c υπολογίστηκε ως $m_c = V\rho = A\rho\delta$, όπου A είναι το εμβαδό της διατομής των δοκιμίων και υπολογίστηκε ως $A = L \cdot t$, όπου L το μήκος των φύλλων του αλουμινίου από το οποίο δημιουργήθηκε το κάθε αντίστοιχο δοκίμιο κατά τον πίνακα 4.1 και $t=0.5\text{mm}$ το πάχος των φύλλων.

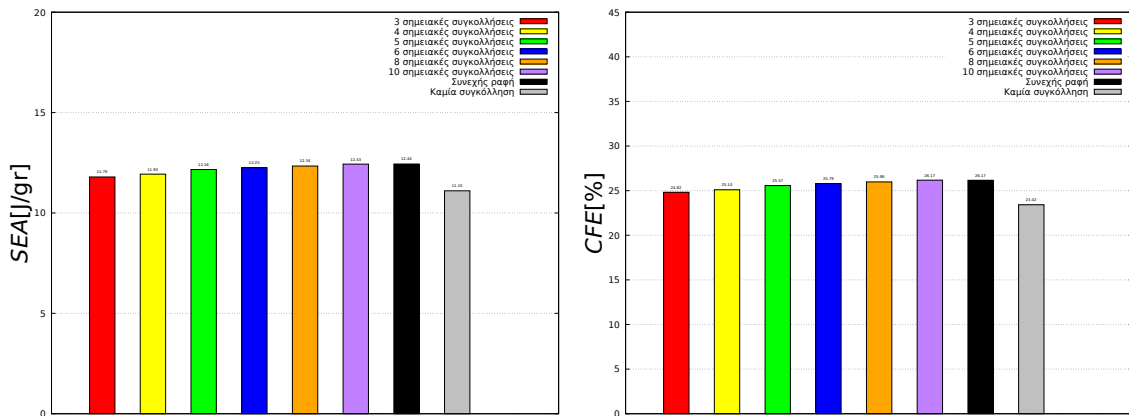
Αριθμός	IPF [kN]	EA [J]	MCF [kN]	SEA [J/gr]	CFE [%]	$\frac{IPF}{M}$	$\frac{MCF}{M}$
0	19.22	359.78	4.50	11.10	23.42	-	-
3	19.26	382.16	4.78	11.79	24.82	6.42	1.59
4	19.27	386.63	4.84	11.93	25.10	4.82	1.21
5	19.27	394.08	4.93	12.16	25.57	3.85	0.99
6	19.26	397.05	4.97	12.25	25.79	3.21	0.83
8	19.25	399.72	5.00	12.34	25.98	2.41	0.62
10	19.25	402.81	5.04	12.43	26.17	1.92	0.50
Συνεχής συγκόλληση	19.26	402.98	5.04	12.44	26.17	0.64	0.17

Πίνακας 5.2: Δείκτες κατάρρευσης (IPF , EA , MCF , SEA , CFE , $\frac{IPF}{M}$, $\frac{MCF}{M}$ όπου M το πλήθος των σημειακών συγκολλήσεων) μοντέλου αντίστοιχου του δοκιμίου "2" για 0, 3, 4, 5, 6, 8, 10 σημειακές συγκολλήσεις καθώς και για συνεχή ραφή

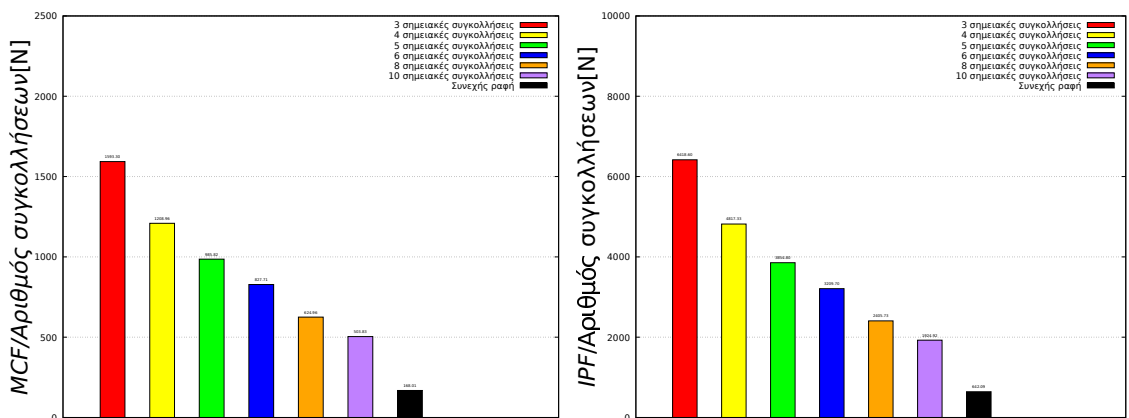
Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα για τους δείκτες κατάρρευσης στην παραμετρική ανάλυση.



Τιμές Ενέργειας Απορρόφησης (EA) Τιμές Μέσου Φορτίου (MCF) Τιμές Μέγιστου Φορτίου (IPF)



Τιμές Ενδικής Ενέργειας Απορρόφησης (SEA) Τιμές Δείκτη Ομοιομορφίας Φορτίου (CFE)



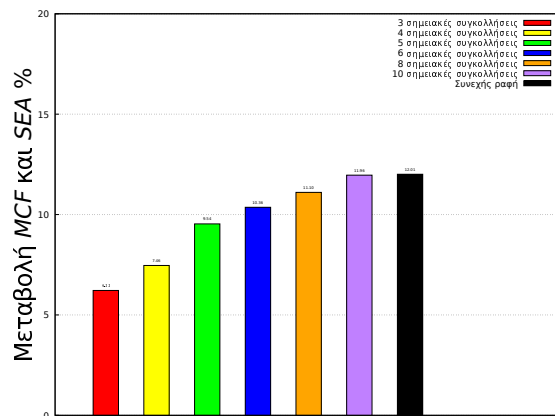
Τιμές Μέσου Φορτίου (MCF) προς αριθμό συ-Τιμές Μέγιστου Φορτίου (IPF) προς αριθμό συ-γκολλήσεων

Σχήμα 5.9: Διαγράμματα δεικτών κατάρρευσης μοντέλου "2" για 3, 4, 5, 6, 8, 10 σημειακές συγκολλήσεις καθώς και για συνεχή ραφή

Όπως φαίνεται από την ανάλυση των αποτελεσμάτων (σχήμα 5.9) το μέγιστο φορτίο κατά την κατάρρευση (IPF) παρουσιάζει μια ελάχιστη αύξηση της τάξεως του 0,2% με την εισαγωγή σημειακών συγκολλήσεων, στην συνέχεια ο ρυθμός αύξησης του

IPF μειώνεται με την εισαγωγή περισσότερων σημειακών συγκολλήσεων, και δεν είναι γραμμικός. Είναι φανερό πως η τιμή του μέσου φορτίου (MCF) (και άρα και της ενέργειας απορρόφησης, καθώς $EA = MCF \cdot \delta$) παρουσιάζει αυξητική τάση με την αύξηση του πλήθους των σημειακών συγκολλήσεων, ωστόσο και αυτή με μη γραμμικό τρόπο για την αύξηση του πλήθους σημειακών συγκολλήσεων. Αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με τον πίνακα 5.2 βλέπουμε πως ακόμα και για την περίπτωση της συνεχούς ραφής δεν μπορεί να επιτευχθούν οι τιμές δεικτών κατάρρευσης που έχουμε για το αντίστοιχο μοντέλο κλειστής διατομής. Αυτό πιθανώς συμβαίνει επειδή, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, η ενέργεια που απορροφάται από κατάρρευση λεπτότοιχων απορροφητών ενέργειας διαχέεται και παραμορφώνει πλαστικά τα τοιχώματα του απορροφητή. Μεγαλύτερο πάχος τοιχώματος σε απορροφητή συνεπάγεται πως περισσότερη ενέργεια διαχέεται για ίδια παραμόρφωση. Τα πολλαπλά τοιχώματα που πετυχαίνουν μεν ίδιο πάχος με την κλειστή διατομή αλλά δεν εμφανίζουν τις ίδιες ενδοδιατμητικές τάσεις κατά το πάχος τους, αφού δεν συνδέονται διαστρωματικά. Τα επιθυμητά αποτελέσματα της εισαγωγής των σημειακών συγκολλήσεων φαίνονται στην αύξηση της απόδοσης δύναμης κατάρρευσης (CFE), καθώς αύξηση της τιμής αυτού του δείκτη σημαίνει πως ο απορροφητής ενέργειας προσεγγίζει καλύτερα την συμπεριφορά ενός ιδανικού απορροφητή, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.4.

Στο σχήμα 5.10 φαίνεται πως βελτιώνεται ο δείκτης κατάρρευσης MCF με την αύξηση του πλήθους των σημειακών συγκολλήσεων σε σχέση με το μοντέλο χωρίς σημειακές συγκολλήσεις. Να σημειωθεί πως ίδια μορφή ακολουθούν και οι δείκτες EA , SEA . Με βάση το σχήμα μπορούν να εξαχθεί ποσοτικά η βελτίωση ως προς την απορρόφηση ενέργειας των απορροφητών σπειροειδούς διατομής με την εισαγωγή συγκολλήσεων.

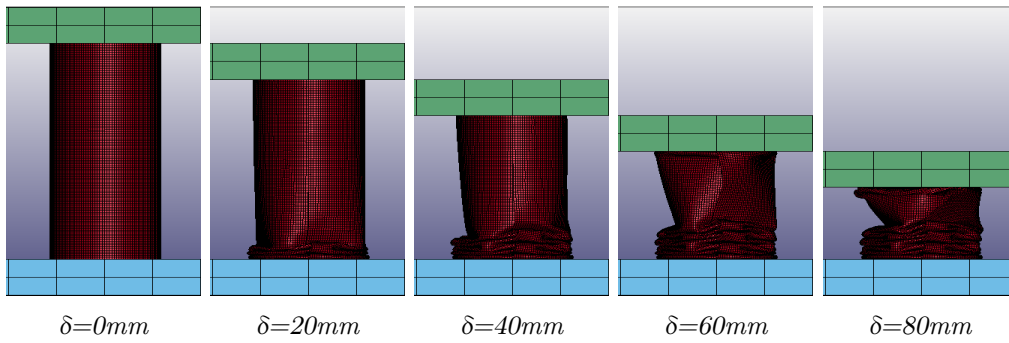


Σχήμα 5.10: Ποσοστιαία μεταβολή MCF για 3, 4, 5, 6, 8, 10 και συνεχή ραφή στο αντίστοιχο του μοντέλου "2" σε σχέση με το μοντέλο χωρίς spotweld

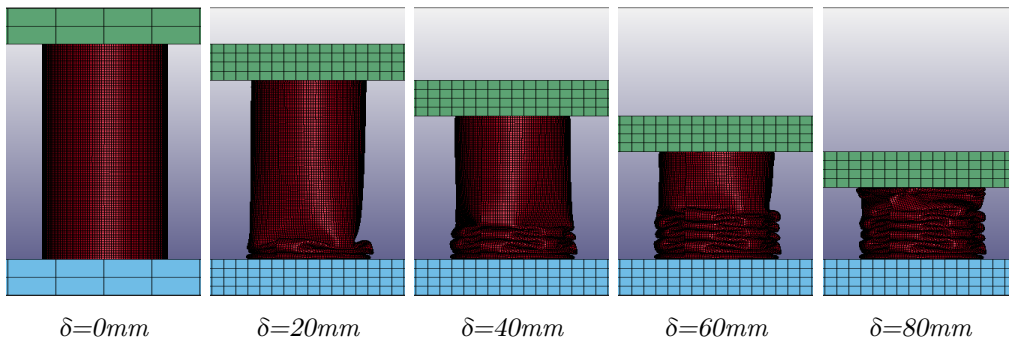
5.2.2 Παραμετρική ανάλυση για πλήθος σπειρών

Στη συνέχεια της διερεύνησης επιλέχθηκε ως κοινή αναφορά για όλα το πλήθος των τεσσάρων σημειακών συγκολλήσεων για να εξετασθεί η συμπεριφορά των δοκιμών "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7". Η επιλογή των τεσσάρων σημειακών συγκολλήσεων έγινε για να εξετασθεί αν μπορούν να αναχθούν τα ευρήματα για ίδιο αριθμό σημειακών συγκολλήσεων του μοντέλου "2" και για μοντέλα άλλων αριθμών περιελίξεων. Μερικά στιγμιότυπα κατάρρευσης φαίνονται στα σχήματα 5.11, 5.12. Οι τελικές μορφές των μοντέλων φαίνονται στα σχήματα 5.13, 5.14

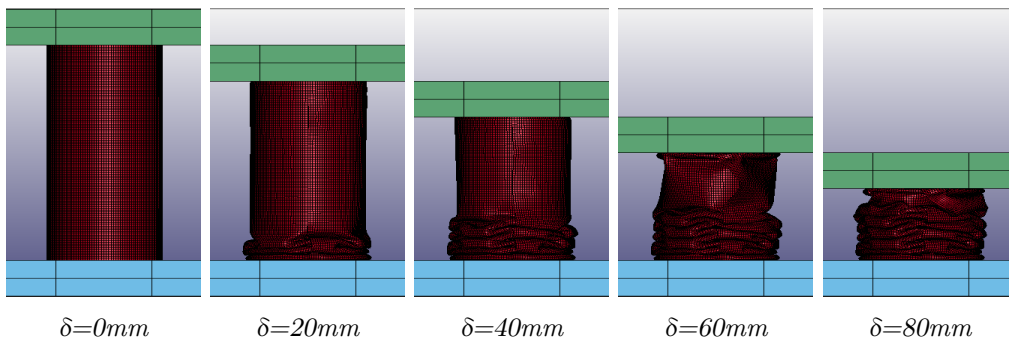
Μοντέλο 2



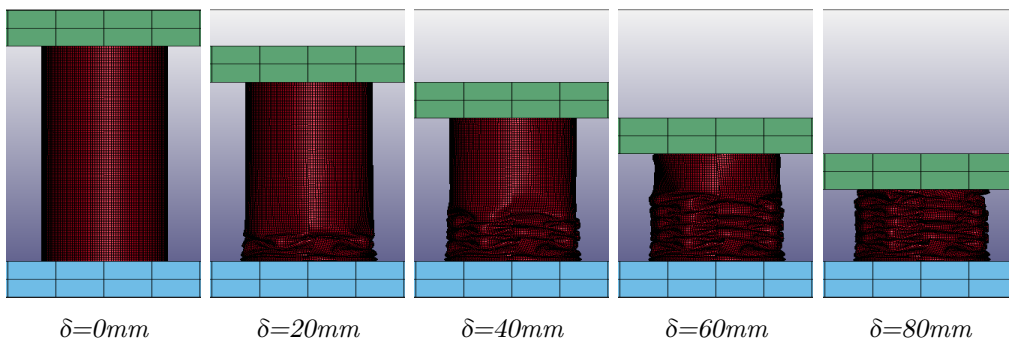
Μοντέλο 3



Μοντέλο 4

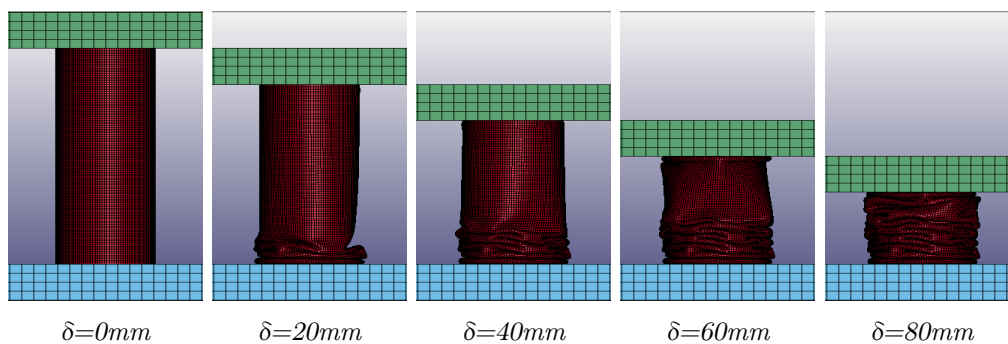


Μοντέλο 5

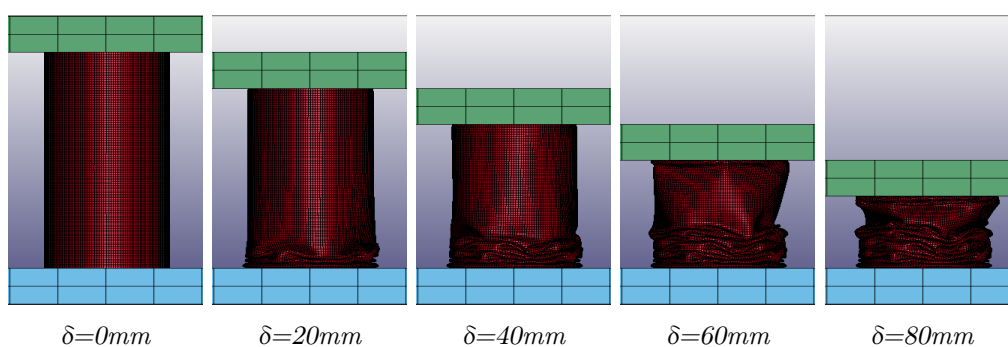


Σχήμα 5.11: Στιγμιότυπα κατάρρευσης μοντέλων "2", "3", "4", "5" με 4 σημειακές συγκολλήσεις καθ' ύψος για μήκη κατάρρευσης 0mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80mm

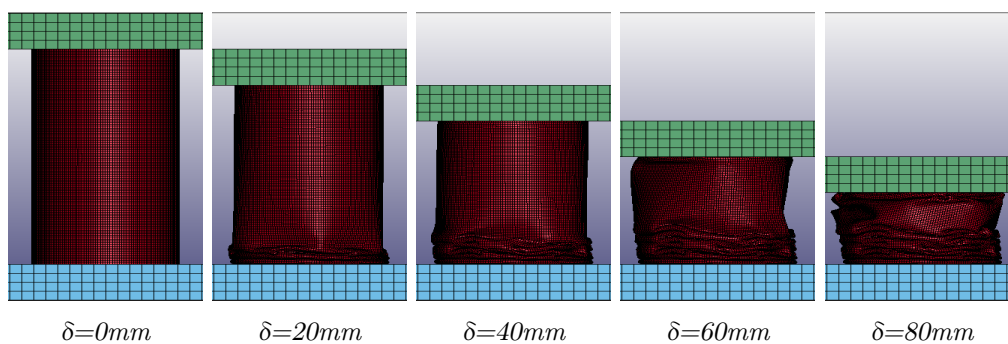
Μοντέλο 3.1



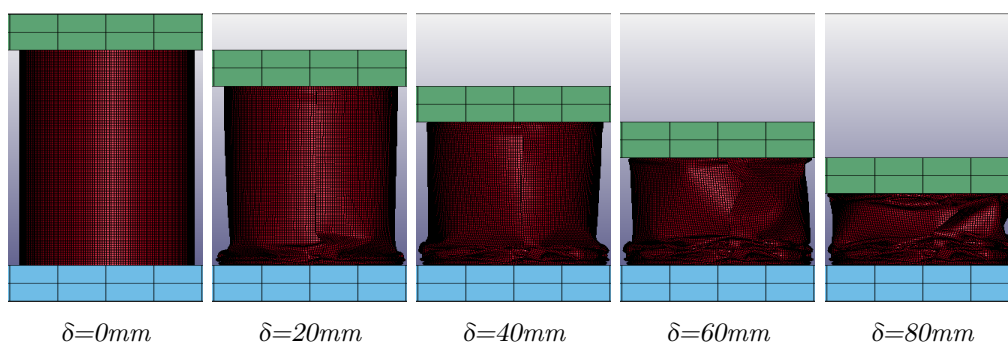
Μοντέλο 3.3



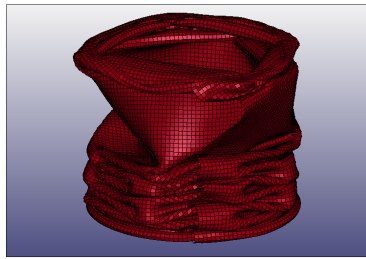
Μοντέλο 3.5



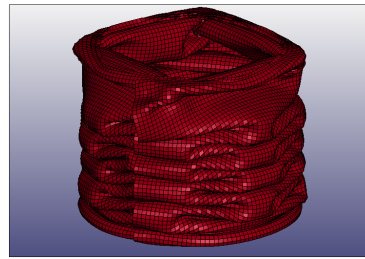
Μοντέλο 3.7



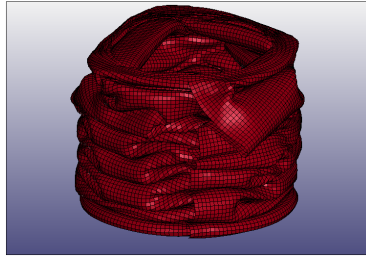
Σχήμα 5.12: Στιγμιότυπα κατάρρευσης μοντέλων "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" με 4 σημειακές συγκολλήσεις καθ' ύψος για μήκη κατάρρευσης 0mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80mm,



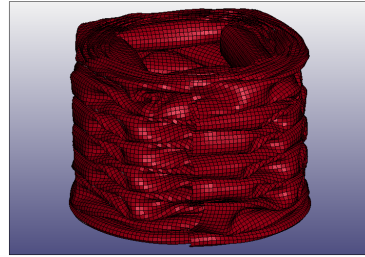
Μοντέλο "2"



Μοντέλο "3"

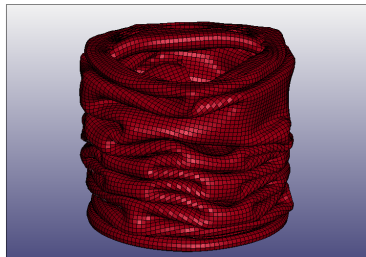


Μοντέλο "4"

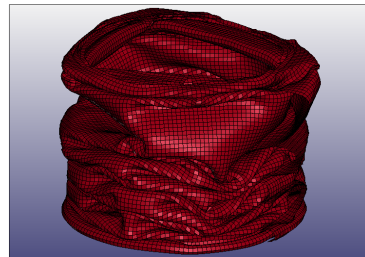


Μοντέλο "5"

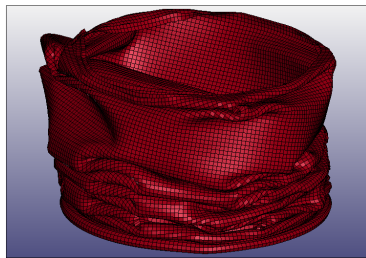
Σχήμα 5.13: Τελικές μορφές μοντέλων "2", "3", "4", "5" με 4 σημειακές συγκολλησεις καθ' ύψος



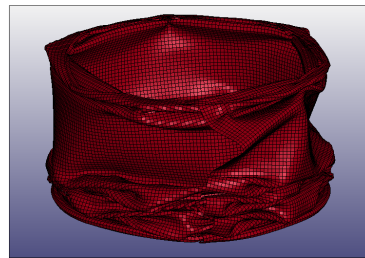
Μοντέλο "3.1"



Μοντέλο "3.3"



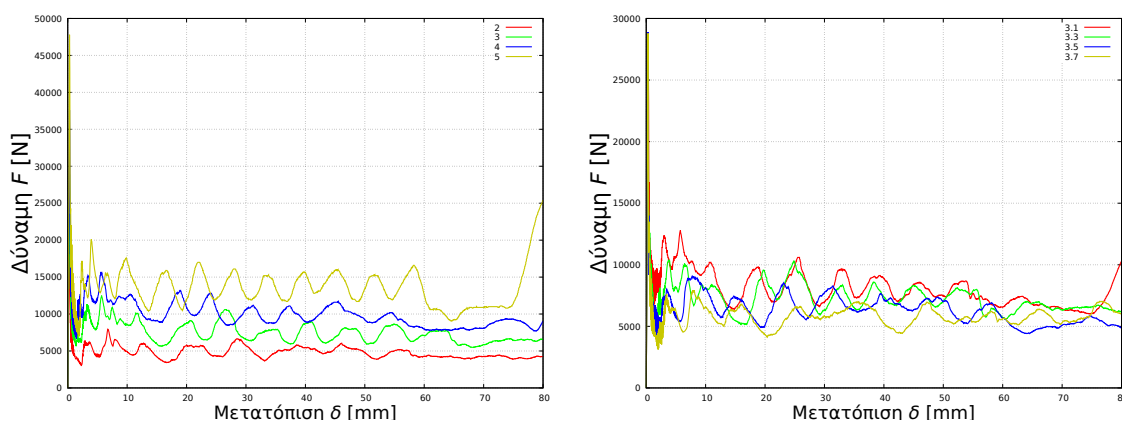
Μοντέλο "3.5"



Μοντέλο "3.7"

Σχήμα 5.14: Τελικές μορφές μοντέλων "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" με 4 σημειακές συγκολλησεις καθ' ύψος

Από το LS-PrePost παίρνουμε τα σημεία δύναμης-μετατόπισης κατά την κατάρρευση των μοντέλων. Από αυτά μπορούμε να εξάγουμε τα διαγράμματα στο σχήμα 5.15.

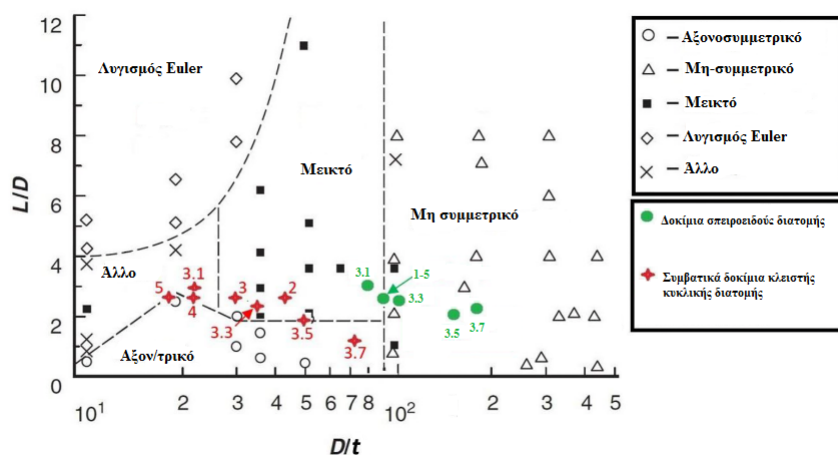


Σχήμα 5.15: Διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης (F - δ) μοντέλων "2", "3", "4", "5", (αριστερά) "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" (δεξιά) με 4 σημειακές συγκολλήσεις καθ' ύψος

Παρατηρούμε πως η εισαγωγή σημειακών συγκολλήσεων δεν επηρεάζει το σχηματισμό λοβών και το μοτίβο κατάρρευσης σε σχέση με την απουσία σημειακών συγκολλήσεων, απαλείφει ωστόσο το ξεδίπλωμα των μοντέλων. Με εξαίρεση τον πρώτο λοβό που είναι αξονοσυμμετρικός οι επόμενοι λοβοί που σχηματίζονται προσεγγίζουν 3D ή 4D μοτίβα κατάρρευσης. Ακόμη τα μοντέλα με μεγαλύτερο αριθμό σπειρών φαίνεται πως εμφανίζουν μεγαλύτερο πλήθος λοβών. Όπως μπορούμε να εξάγουμε από τα στιγμιότυπα, σε μοντέλα με μικρότερο αριθμό σπειρών τείνουν να σχηματίζονται λεπτότεροι λοβοί και για μακρύτερα διαστήματα. Αυτή η τάση εμφανίζεται τόσο στα μοντέλα "2", "3", "4", "5" όσο και στα "3.1", "3.3", "3.5", "3.7".

Μελέτη που έχει γίνει για λεπτότεχα δοκίμια αλουμινίου κυκλικής διατομής δείχνει πως το μοτίβο διαρροής εξαρτάται από το λόγο μέσης διαμέτρου προς το πάχος τοιχώματος ($\frac{D_m}{h}$), εάν ο λόγος του μήκους προς τη μέση διάμετρο του δοκίμιου ($\frac{L}{D_m}$) διατηρείται αρκετά μικρός για να αποφευχθεί ο λυγισμός [40] (σχήμα 5.16). Σε δοκίμια σπειροειδούς διατομής φαίνεται πως δεν είναι το πάχος τοιχώματος (h) που επηρεάζει το μοτίβο διαρροής, αλλά το πάχος του φύλλου (t) [34]. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός πως το μοτίβο κατάρρευσης επηρεάζεται από την μικρότερη καμπτική δυσκαμψία του τοιχώματος που αποτελείται από πολλαπλές στρώσεις λεπτότερων τοιχωμάτων, σε σχέση με αυτή του δοκίμιου ίδιου συνολικού πάχους τοιχώματος αλλά κλειστής διατομής. Αυτό το συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί και για τα μοντέλα στα οποία έχουν

πραγματοποιηθεί σημειακές συγκολλήσεις στην εξωτερική σπείρα.



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα ταξινόμησης μεθόδων κατάρρευσης. Τα ασπρόμαυρα σημάδια αναφέρονται σε μηχανικές δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί για δοκίμια αλουμινίου 6060-T5 κλειστής κυκλικής διατομής. Τα κόκκινα σημάδια αναφέρονται σε δοκίμια αλουμινίου κλειστής κυκλικής διατομής [40]. Τα πράσινα σημάδια αναφέρονται σε δοκίμια σπειροειδούς διατομής με 4 σημειακές καθ' ύψος συγκολλήσεις [34].

Από την μεταεπεξεργασία των παραπάνω διαγραμμάτων στο σχήμα εξήχθησαν δείκτες κατάρρευσης των μοντέλων όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3. Για να αποκτηθεί μια εικόνα της επίδρασης που είχε η εισαγωγή των σημειακών συγκολλήσεων, στον πίνακα 5.3 φαίνονται επίσης οι δείκτες κατάρρευσης για τα μοντέλα χωρίς εισαγωγή σημειακών συγκολλήσεων και των αντίστοιχων κυλινδρικών μοντέλων κλειστής διατομής.

Μοντέλο	Τύπος μοντέλου	IPF [kN]	EA [J]	MCF [kN]	SEA [J/gr]	CFE [%]	$\frac{IPF}{N}$	$\frac{MCF}{N}$
2	Χωρίς Συγκόλληση	19.22	359.78	4.50	11.10	23.42	9.24	2.16
	Με 4 σημειακές συγκολλήσεις	19.26	386.62	4.83	12.42	25.09	9.26	2.32
	Κλειστή διατομή	20.05	600.56	7.51	18.75	37.44	-	-
3	Χωρίς Συγκόλληση	28.86	564.51	7.06	11.77	24.46	9.37	2.29
	Με 4 σημειακές συγκολλήσεις	28.91	600.31	7.51	12.52	25.97	9.38	2.44
	Κλειστή διατομή	29.91	1111.32	19.89	23.13	46.44	-	-
3.1	Χωρίς Συγκόλληση	28.85	601.30	7.52	12.53	26.07	8.10	2.11
	Με 4 σημειακές συγκολλήσεις	28.87	646.21	8.08	13.48	28.00	8.11	2.27
	Κλειστή διατομή	29.97	1369.82	17.12	28.51	57.14	-	-
3.3	Χωρίς Συγκόλληση	28.77	551.41	6.90	11.50	23.97	10.03	2.40
	Με 4 σημειακές συγκολλήσεις	28.81	582.85	7.29	12.15	25.31	10.04	2.54
	Κλειστή διατομή	29.70	995.24	12.44	20.81	41.88	-	-
3.5	Χωρίς Συγκόλληση	28.79	482.41	6.03	10.06	20.96	12.20	2.56
	Με 4 σημειακές συγκολλήσεις	28.87	509.78	6.38	10.63	22.09	12.23	2.70
	Κλειστή διατομή	29.69	860.85	10.76	17.92	36.24	-	-
3.7	Χωρίς Συγκόλληση	28.79	428.81	5.36	8.94	18.63	14.47	2.70
	Με 4 σημειακές συγκολλήσεις	28.84	469.68	5.87	9.79	20.37	14.94	2.95
	Κλειστή διατομή	29.72	713.21	8.92	14.81	30.00	-	-
4	Χωρίς Συγκόλληση	37.58	745.32	9.32	11.66	24.80	9.21	2.28
	Με 4 σημειακές συγκολλήσεις	37.60	794.24	9.93	12.42	26.48	9.21	2.43
	Κλειστή διατομή	39.99	1885.04	23.56	24.44	58.92	-	-
5	Χωρίς Συγκόλληση	47.73	1012.90	12.67	12.72	26.54	9.40	2.49
	Με 4 σημειακές συγκολλήσεις	47.78	1088.94	13.62	13.68	28.51	9.41	2.68
	Κλειστή διατομή	49.68	2555.56	31.94	32.20	64.30	-	-

Πίνακας 5.3: Δείκτες κατάρρευσης (IPF , EA , MCF , SEA , CFE , $\frac{IPF}{N}$, $\frac{MCF}{N}$ όπου N το πλήθος των σπειρών) με 4 σημειακές καθ' ύψος συγκολλήσεις, χωρίς συγκόλληση και για τα αντίστοιχα κυλινδρικά μοντέλα κλειστής διατομής, για τα μοντέλα "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7"

Εκ πρώτης όψεως φαίνεται πως εξακολουθεί το μοτίβο αύξησης της απορροφούμενης ενέργειας (EA) με την αύξηση του πλήθους των σπειρών N , όπως και με την περίπτωση

απουσίας συγκολλήσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως με αύξηση του N έχουμε αύξηση της μάζας του δοκιμίου και άρα απαιτείται περισσότερη ενέργεια για να επιφέρει την ίδια παραμόρφωση [34]. Θα ακολουθήσει εκτενέστερη ανάλυση στην παράγραφο 5.4.

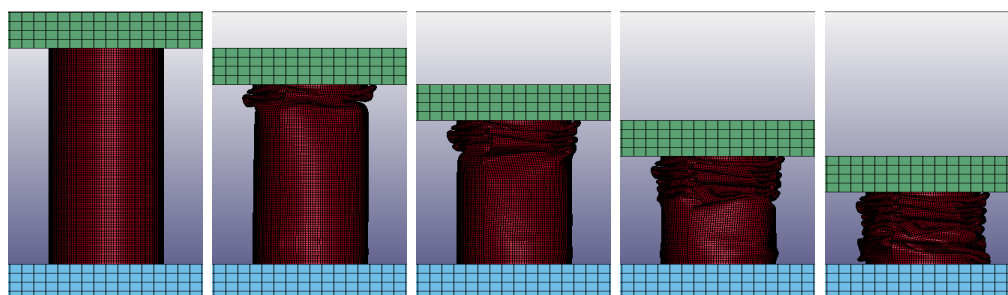
5.3 Μοντέλα με πακτωμένα άκρα

Στις παραγράφους 5.2.1 και 5.2.2 μελετήθηκαν μοντέλα σπειροειδούς διατομής με καθ' ύψος σημειακές συγκολλήσεις με τα άκρα τους ελεύθερα. Σε πρακτικές εφαρμογές ωστόσο σπάνια συναντάται ένας απορροφητής ενέργειας μόνος του, παρά είναι συνήθως ένα δομικό κομμάτι μιας κατασκευής ή ενός μηχανισμού. Παρότι η συνδεσμολογία του με την κατασκευή ποικίλει ανά εφαρμογή, μια πολύ συνηθισμένη περίπτωση είναι ο απορροφητής ενέργειας να είναι συγκολλημένος με τα γειτονικά του δομικά στοιχεία στην κατασκευή. Σε αυτή τη παράγραφο θα μελετηθεί αν η συγκόλληση των μοντέλων (η οποία μοντελοποιήθηκε ως πάκτωση στα άκρα που έρχονται σε επαφή με τις συμπαγής πλάκες) έχει αντίκτυπο στη συμπεριφορά των μοντέλων κατά την κατάρρευση.

5.3.1 Παραμετρική ανάλυση για πλήθος spot welds

Όπως έγινε και στην παράγραφο 5.2.1 πρώτα πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική ανάλυση στο μοντέλο "3" για μοντέλα με πακτωμένα τα άκρα τους στις πλάκες για 0, 3, 4, 5, 6, 8, 10 σημειακές συγκολλήσεις καθώς και για τις περιπτώσεις συνεχής ραφής και έλλειψης πάκτωσης χωρίς συγκόλληση. Μερικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης φαίνονται στο σχήμα 5.17. Οι τελικές μορφές των δοκιμίων φαίνονται στο σχήμα 5.19.

Πακτωμένο χωρίς συγκόλληση



$\delta=0mm$

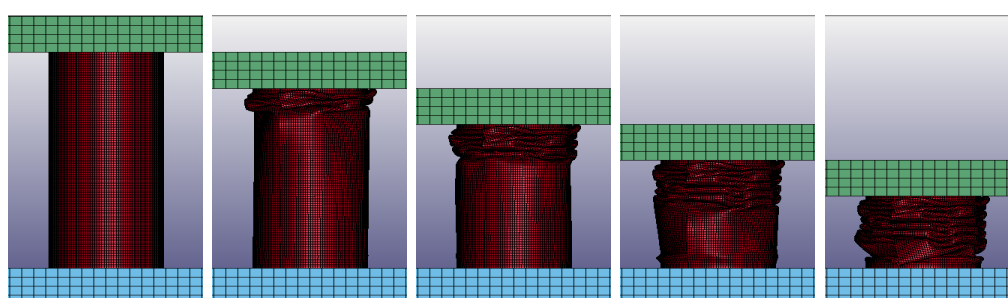
$\delta=20mm$

$\delta=40mm$

$\delta=60mm$

$\delta=80mm$

3 spowelds



$\delta=0mm$

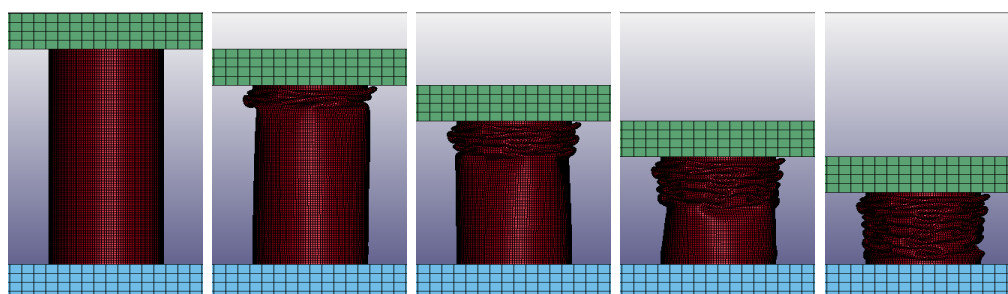
$\delta=20mm$

$\delta=40mm$

$\delta=60mm$

$\delta=80mm$

4 spowelds



$\delta=0mm$

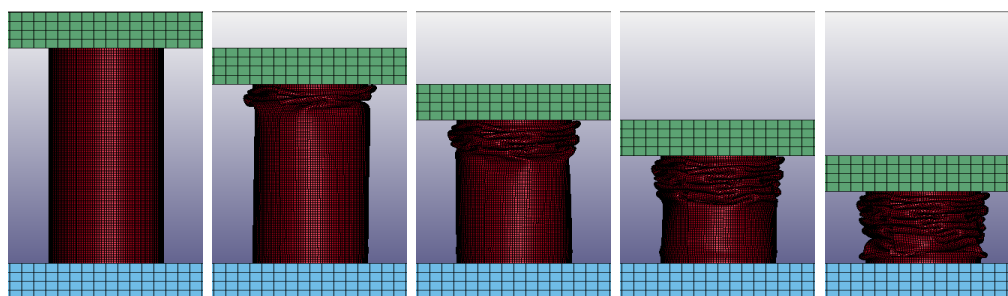
$\delta=20mm$

$\delta=40mm$

$\delta=60mm$

$\delta=80mm$

5 spowelds



$\delta=0mm$

$\delta=20mm$

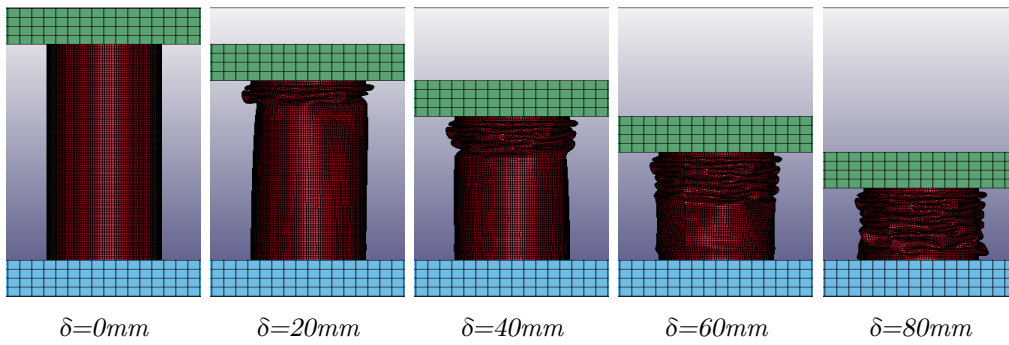
$\delta=40mm$

$\delta=60mm$

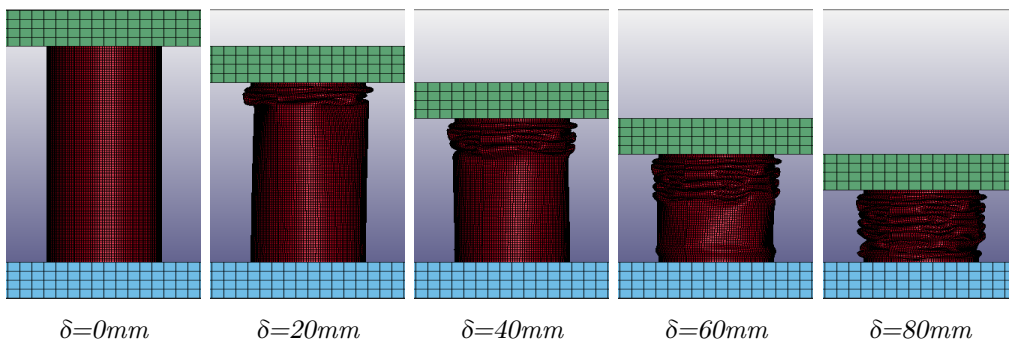
$\delta=80mm$

Σχήμα 5.17: Στιγμιότυπα κατάρρευσης μοντέλου "3" με πακτωμένα άκρα με 0, 3, 4, 5

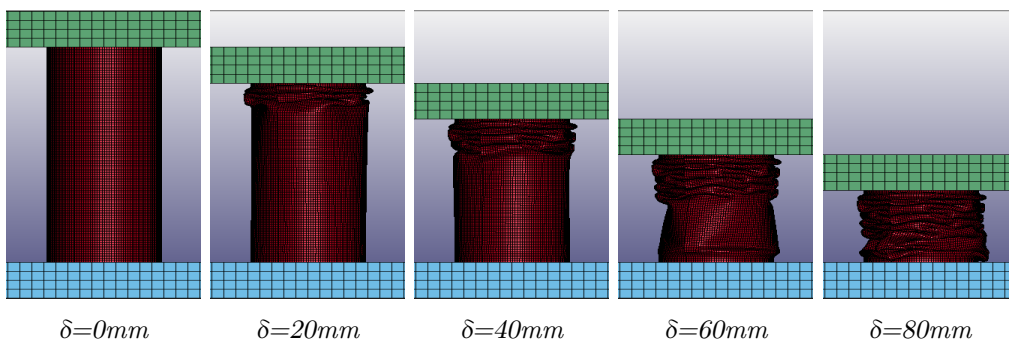
6 spowelds



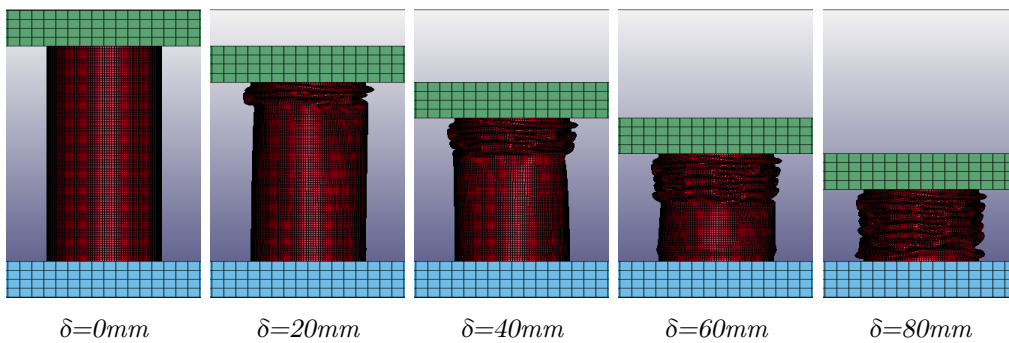
8 spowelds



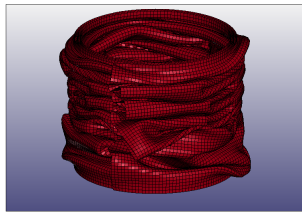
10 spowelds



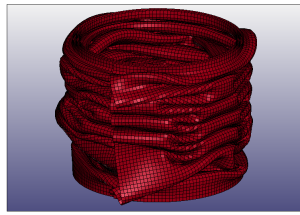
Συνεχής ραφή



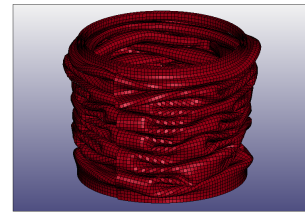
Σχήμα 5.18: Στιγμιότυπα κατάρρευσης μοντέλου "3" με πακτωμένα άκρα με 6, 8, 10 σημειακές συγκολλήσεις και για συνεχή ραφή



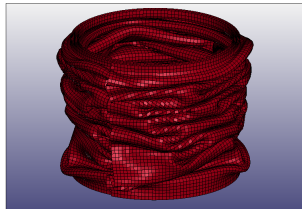
Πακτωμένο χωρίς συγκόλληση



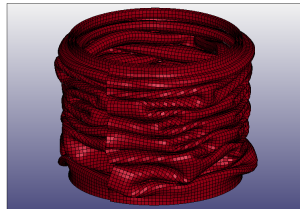
3 spot welds



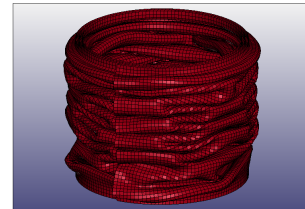
4 spot welds



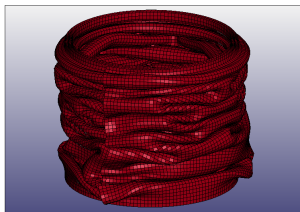
5spot welds



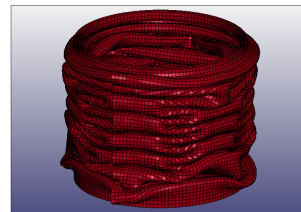
6 spot welds



8 spot welds

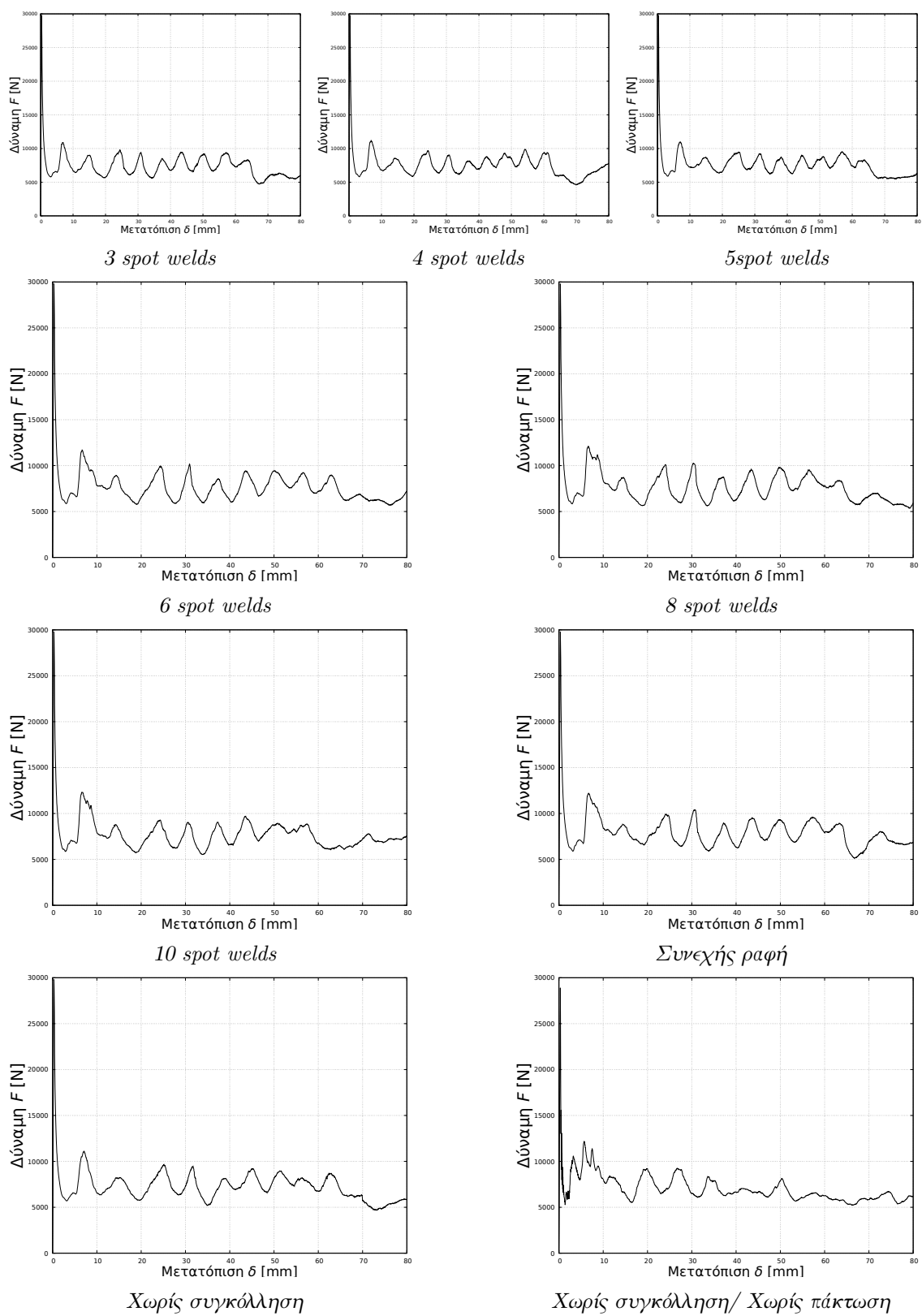


10 spot welds



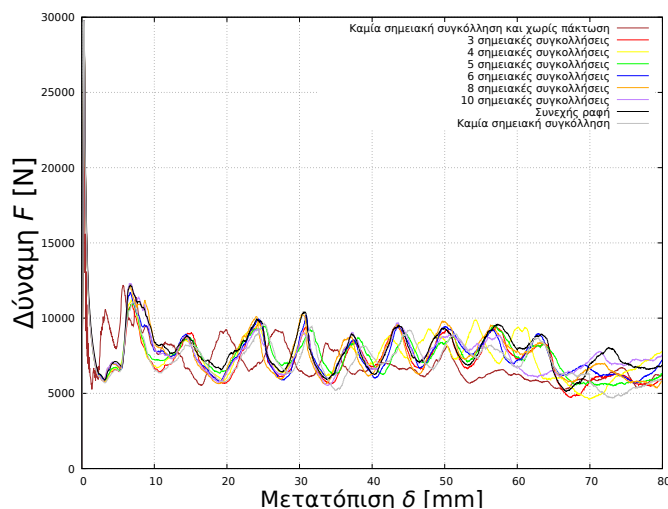
Συνεχής ραφή

Σχήμα 5.19: Τελικές μορφές μοντέλου "3" με 0, 3, 4, 5, 6, 8, 10 σημειακές συγκολλήσεις και για συνεχή ραφή με πακτωμένα άκρα και με ελεύθερα άκρα χωρίς συγκόλληση



Σχήμα 5.20: Διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης (F - δ) μοντέλου "3" με 0, 3, 4, 5, 6, 8, 10 σημειακές συγκολλήσεις, με συνεχή ραφή με πακτωμένα άκρα και με ελεύθερα άκρα χωρίς συγκόλληση

Όλα τα διαγράμματα στο σχήμα 5.20 τοποθετήθηκαν συγκεντρωτικά σε διάγραμμα στο σχήμα 5.21.



Σχήμα 5.21: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης (F - δ) μοντέλου "3" με 0, 3, 4, 5, 6, 8, 10 σημειακές συγκολλήσεις, για συνεχή ραφή με πακτωμένα άκρα και με ελεύθερα άκρα χωρίς συγκόλληση

Παρατηρούμε πως η κατάρρευση ξεκινάει από το πάνω άκρο του μοντέλου. Οι πακτώσεις δεν φαίνεται να επηρεάζουν το πλήθος και το μοτίβο των λοβών καθώς όπως φαίνεται οι λοβοί του μοντέλου "3" παραμένουν ίδιοι με το μοντέλο "3" χωρίς την ύπαρξη πακτώσεων στο σχήμα 5.11.

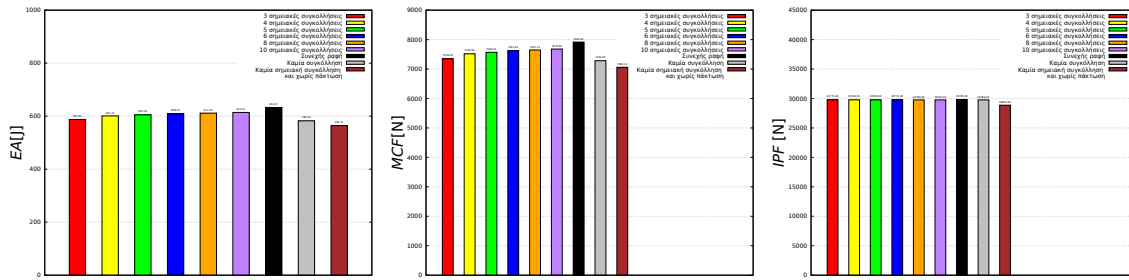
Από τα διαγράμματα F - δ φαίνεται πως με την εισαγωγή της πάκτωσης έχουμε δημιουργία των λοβών τις ίδιες χρονικές στιγμές για κάθε πλήθος σημειακών συγκολλήσεων. Ακόμη μπορεί να εξαχθεί πως η δημιουργία περιφερειακών λοβών λαμβάνει χώρα σε διαφορετικά μήκη βράχυνσης με την απουσία πάκτωσης, ωστόσο το πλήθος των λοβών είναι ίδιο. Οι λοβοί φαίνεται να δημιουργούνται νωρίτερα απουσία πάκτωσης κατά ίδια διαστήματα βράχυνσης. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στη διαφορά αρχικών συνθηκών τριβής που δημιουργούν τον πρώτο λοβό κατά την κατάρρευση, αλλά στη συνέχεια του φαινομένου έχουν αμελητέο ρόλο στα μοτίβα κατάρρευσης και έτσι οι λοβοί δημιουργούνται ανά ίδια διαστήματα βράχυνσης και στις δύο περιπτώσεις.

Από μεταεπεξεργασία των διαγραμμάτων όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2.1 ε-

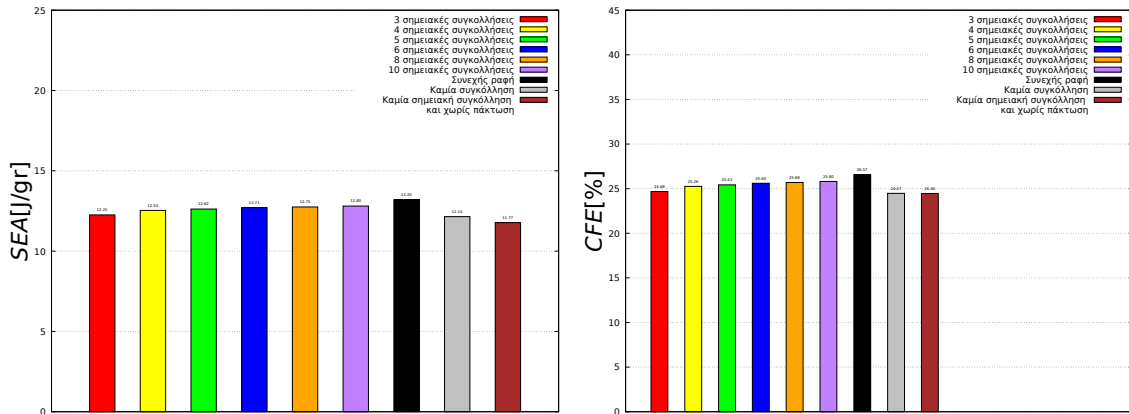
Ξήχθησαν οι δείκτες κατάρρευσης και παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4 και διαγραμματικά στο σχήμα 5.22.

Αριθμός	IPF [kN]	EA [J]	MCF [kN]	SEA [J/gr]	CFE [%]	$\frac{IPF}{M}$	$\frac{MCF}{M}$
Χωρίς πάκτωση	28.86	564.51	7.06	11.77	24.46	-	-
0	29.77	582.36	7.28	12.14	24.47	-	-
3	29.78	587.63	7.35	12.25	24.68	9.93	2.45
4	29.77	601.10	7.52	12.54	25.26	7.44	1.88
5	29.77	605.16	7.57	12.62	25.43	5.95	1.51
6	29.77	609.35	7.62	12.71	25.60	4.96	1.27
8	29.77	611.39	7.65	12.75	25.69	3.72	0.96
10	29.77	614.01	7.68	12.80	25.8	2.98	0.77
Συνεχής συγκόλληση	29.80	632.87	7.92	13.20	26.57	0.99	0.26

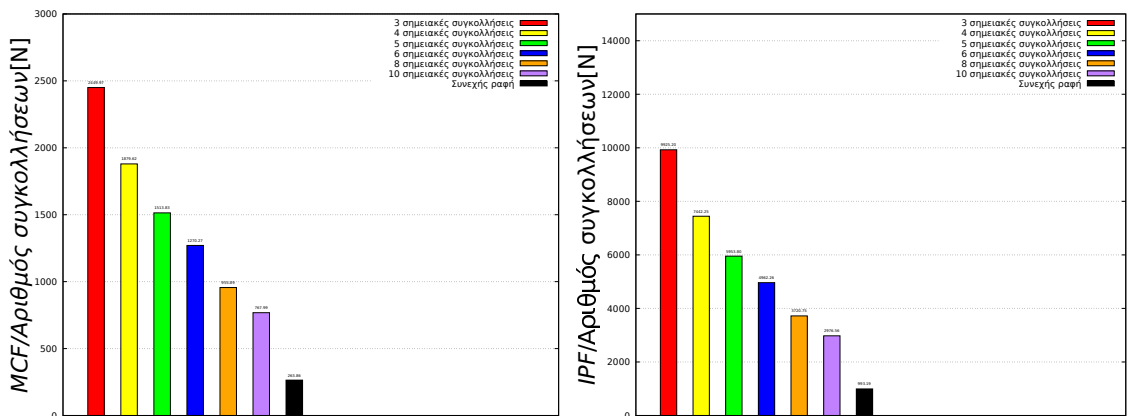
Πίνακας 5.4: Δείκτες κατάρρευσης (IPF , EA , MCF , SEA , CFE , $\frac{IPF}{M}$, $\frac{MCF}{M}$ όπου M το πλήθος των σημειακών συγκολλήσεων) μοντέλου αντίστοιχου του δοκιμίου "3" για 0, 3, 4, 5, 6, 8, 10 σημειακές συγκολλήσεις καθώς και για συνεχή ραφή με πάκτωση στα άκρα καθώς και για την περίπτωση 0 συγκολλήσεων απουσία πάκτωσης



Τιμές Ενέργειας Απορρόφησης (EA) Τιμές Μέσου Φορτίου (MCF) Τιμές Μέγιστου Φορτίου (IPF)



Τιμές Ειδικής Ενέργειας Απορρόφησης (SEA) Τιμές Δείκτη Ομοιομορφίας Φορτίου (CFEI)



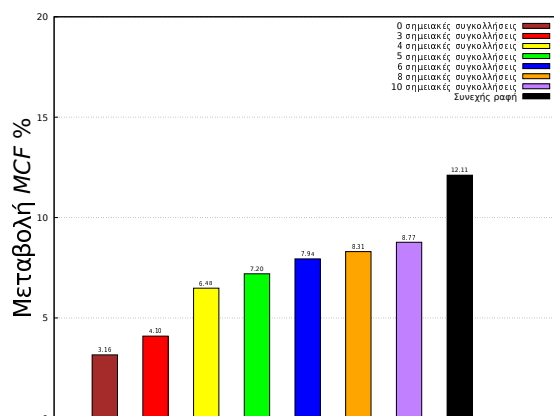
Τιμές Μέσου Φορτίου(MCF) προς αριθμό συ-Τιμές Μέγιστου Φορτίου(IPF) προς αριθμό συ-γκολλήσεων

Σχήμα 5.22: Διαγράμματα δεικτών κατάρρευσης μοντέλου "3" με 0, 3, 4, 5, 6, 8, 10 σημειακές συγκολλήσεις, για συνεχή ραφή με πάκτωση στα άκρα και με ελεύθερα άκρα χωρίς συγκόλληση

Στο σχήμα 5.22 φαίνεται πως και μόνο με την εισαγωγή πάκτωσης, παρουσιάζεται μικρή αύξηση στην ενέργεια απορρόφησης (EA) (και συνεπώς και στο μέσο φορτίο (MCF) και την ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA)) ακόμη και χωρίς την εισαγωγή συγκο-

λήσεων στο μοντέλο. Αυτό πιθανώς συμβαίνει λόγω της αύξησης της *IPF*. Μετά την εισαγωγή συγκολλήσεων παρατηρούμε όμοια συμπεριφορά κατά την κατάρρευση όπως με αυτή του μοντέλου "2" στην παράγραφο 5.2.1. Η αύξηση των σημειακών συγκολλήσεων φαίνεται να οδηγεί σε αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας κατά την κατάρρευση. Αξίζει να σημειωθεί πως ο ρυθμός μεταβολής της απορροφούμενης ενέργειας συναρτήσει του πλήθους των spotwelds παρουσιάζει μεγάλη αύξηση από τις 10 σημειακές συγκολλήσεις στην συνεχή ραφή. Ωστόσο όπως δείχνει ο δείκτης *CFE* η ποσοστιαία αύξηση με την εισαγωγή πακτώσεων είναι μικρότερη από ότι χωρίς τις πακτώσεις (σχήμα 5.9). Αυτός ίσως οφείλεται στο ότι η *IPF* παρουσίασε μεγαλύτερη αύξηση από την *MCF* σε σχέση με την περίπτωση απουσίας πάκτωσης, λόγω της διαφορετικής επαφής που έχει το μοντέλο του απορροφητή με την πλάκα στα πρώτα στάδια της κατάρρευσης.

Η ποσοστιαία μεταβολή του δείκτη κατάρρευσης *MCF* φαίνεται στο σχήμα 5.23. Αν συγκριθεί με την αντίστοιχη μεταβολή του μοντέλου "2" είναι εμφανές πως η ποσοστιαία αύξηση κυμαίνεται περίπου στο ίδιο εύρος τιμών για τις δύο περιπτώσεις οριακών συνθηκών.

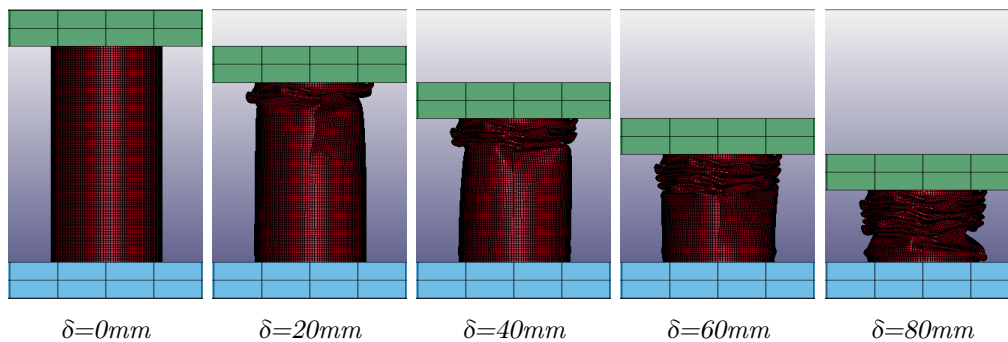


Σχήμα 5.23: Ποσοστιαία μεταβολή *MCF* για 0, 3, 4, 5, 6, 8, 10 και συνεχή ραφή στο μοντέλο "3" με πακτωμένα άκρα

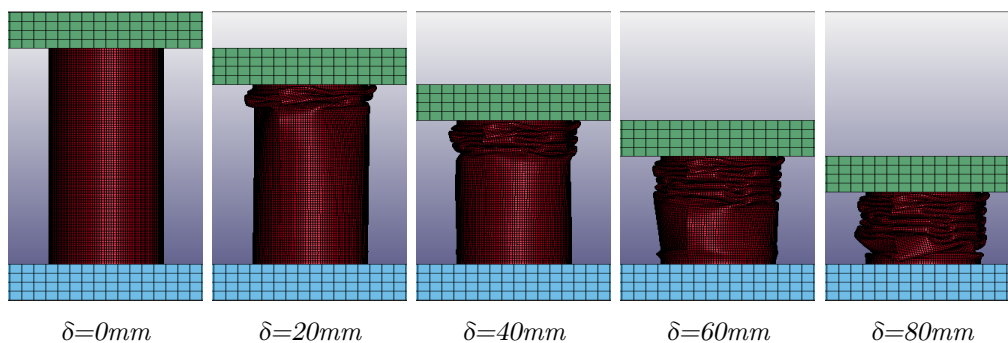
5.3.2 Παραμετρική ανάλυση για πλήθος σπειρών

Όπως και στην παράγραφο 5.2.2, στη συνέχεια γίνεται διερεύνηση και στα μοντέλα "2", "4", "5" και "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" με πλήθος αριθμού συγκολλήσεων 3 για αναφορά. Όπως είδαμε στις παραγράφους 5.2.1, 5.3.1 ακόμα και με τρεις σημειακές συγκολλήσεις παρατηρείται η αύξηση στους δείκτες απορρόφησης ενέργειας. Ακόμη τρεις σημειακές συγκολλήσεις δίνουν λίγο καλύτερους υπολογιστικούς χρόνους σε σχέση με περισσότερες. Με αυτά τα κριτήρια επιλέχθηκε το πλήθος των τριών σημειακών συγκολλήσεων. Στιγμιότυπα της κατάρρευσης φαίνονται στα σχήματα 5.24, 5.25. Οι τελικές μορφές των μοντέλων μετά το πέρας της κατάρρευσης φαίνονται στα σχήματα 5.26 και 5.27.

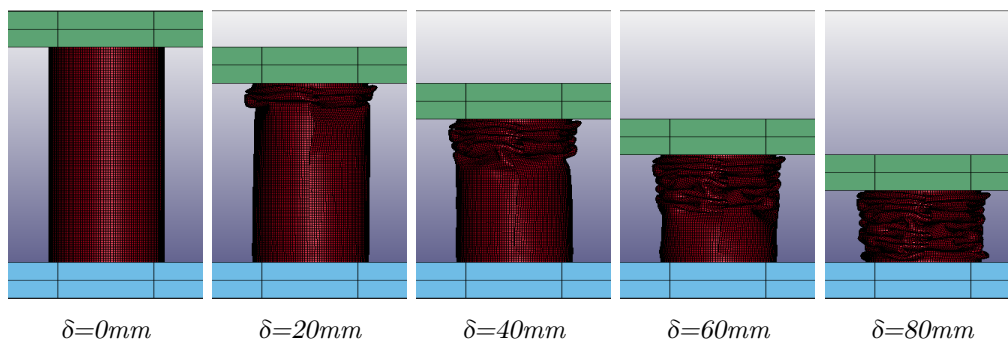
Μοντέλο 2



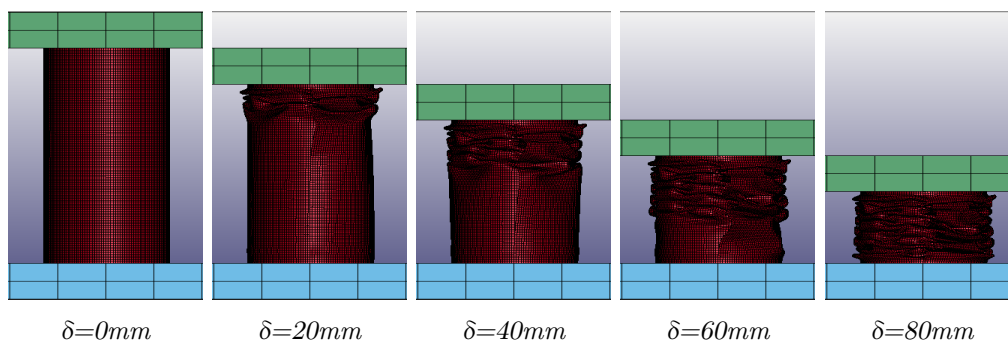
Μοντέλο 3



Μοντέλο 4

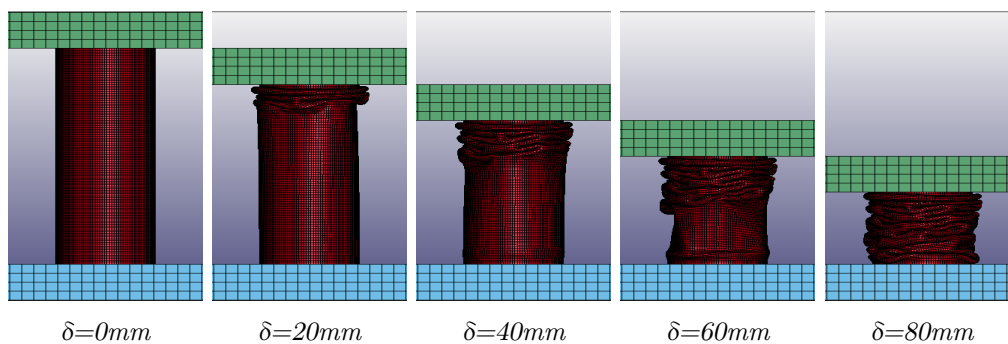


Μοντέλο 5

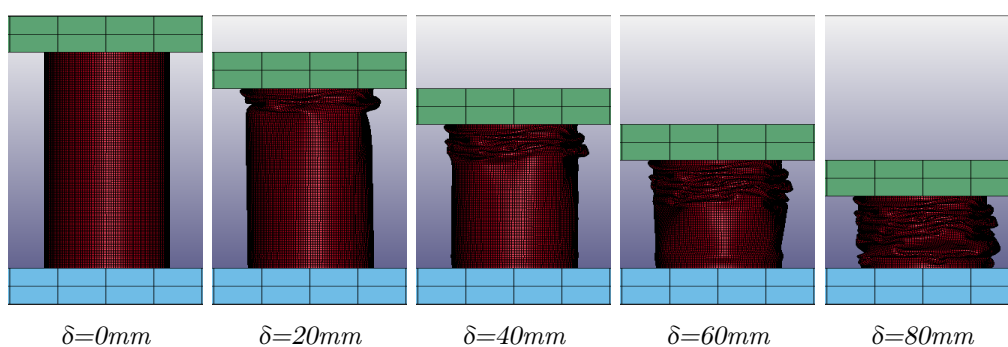


Σχήμα 5.24: Στιγμιότυπα κατάρρευσης μοντέλων "2", "3", "4", "5" με πακτωμένα άκρα και 3 σημειακές συγκολλήσεις για μήκη κατάρρευσης 0mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80mm

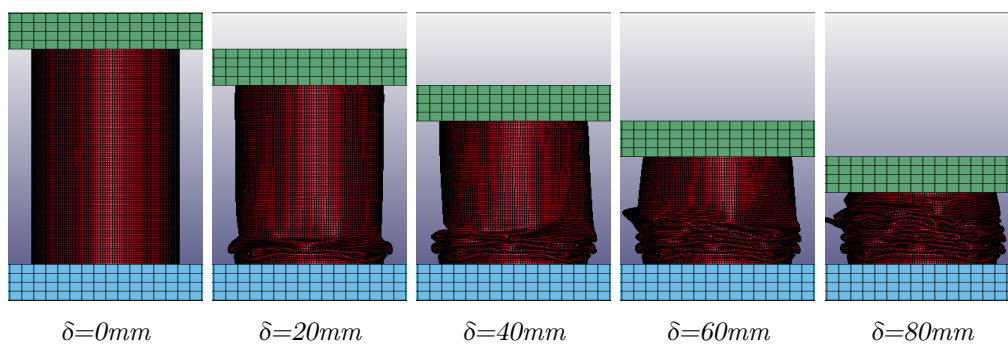
Μοντέλο 3.1



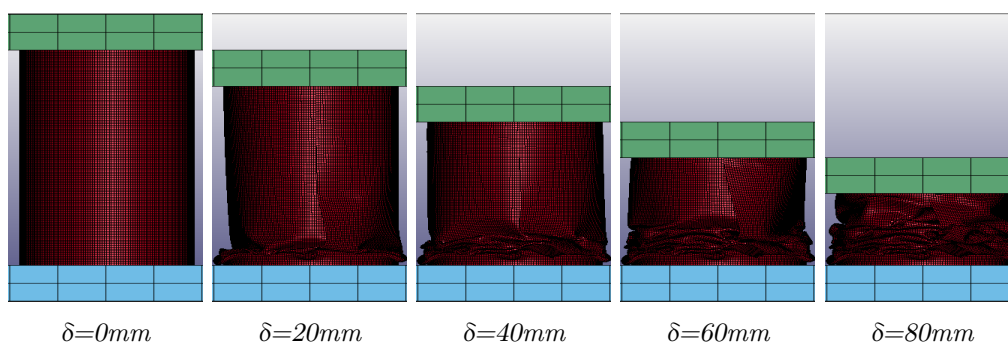
Μοντέλο 3.3



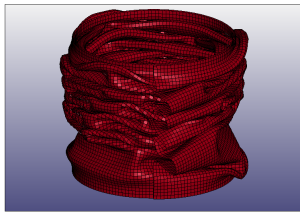
Μοντέλο 3.5



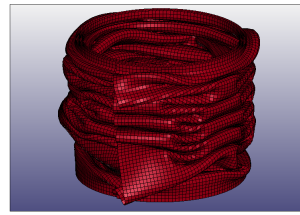
Μοντέλο 3.7



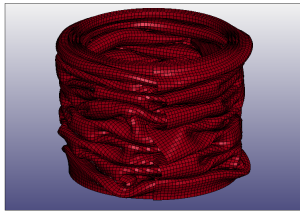
Σχήμα 5.25: Στιγμιότυπα κατάρρευσης μοντέλων "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" με πακτωμένα άκρα και 3 σημειακές συγκολλήσεις για μήκη κατάρρευσης 0mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80mm



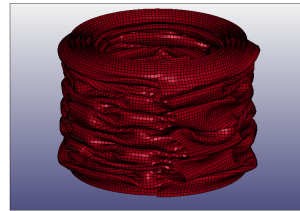
Μοντέλο "2"



Μοντέλο "3"

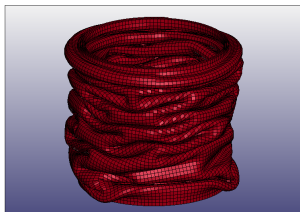


Μοντέλο "4"

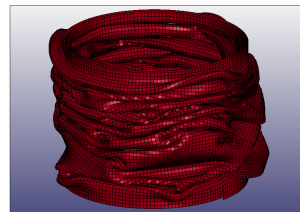


Μοντέλο "5"

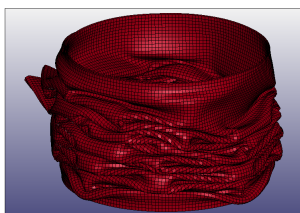
Σχήμα 5.26: Τελικές μορφές μοντέλων "2", "3", "4", "5" με 3 σημειακές συγκολλήσεις και πακτωμένα άκρα



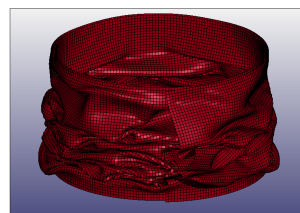
Μοντέλο "3.1"



Μοντέλο "3.3"



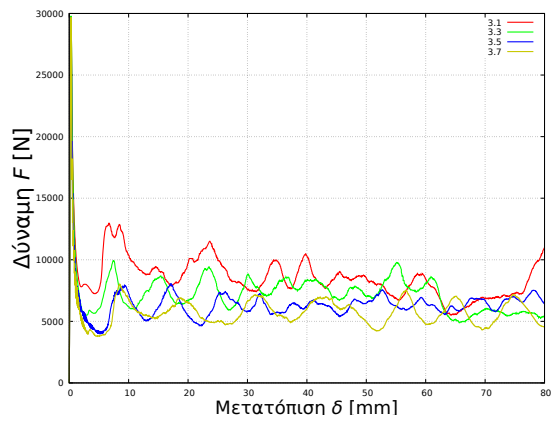
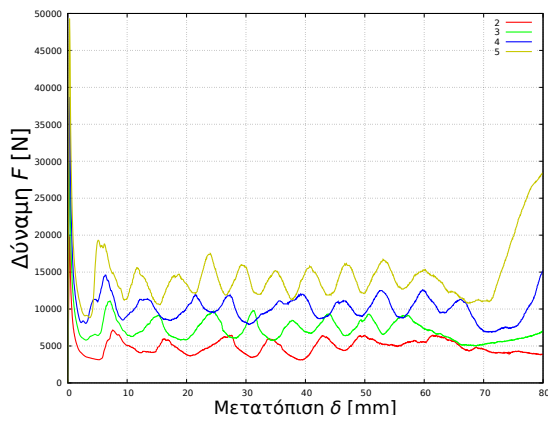
Μοντέλο "3.5"



Μοντέλο "3.7"

Σχήμα 5.27: Τελικές μορφές μοντέλων "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" με 3 σημειακές συγκολλήσεις και πακτωμένα άκρα

Από το LS-PrePost εξάγουμε σημεία δύναμης-μετατόπισης όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.28.



Σχήμα 5.28: Διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης (F - δ) μοντέλων "2", "3", "4", "5" (δεξιά), "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" (αριστερά) με 3 σημειακές συγκολλήσεις και πακτωμένα άκρα

Όπως και στην παράγραφο 5.2.1 εξάγουμε από τα διαγράμματα 5.28 δείκτες κατάρρευσης για τα μοντέλα "2", "3", "4", "5" και "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" όπως φαίνονται στον πίνακα 5.5.

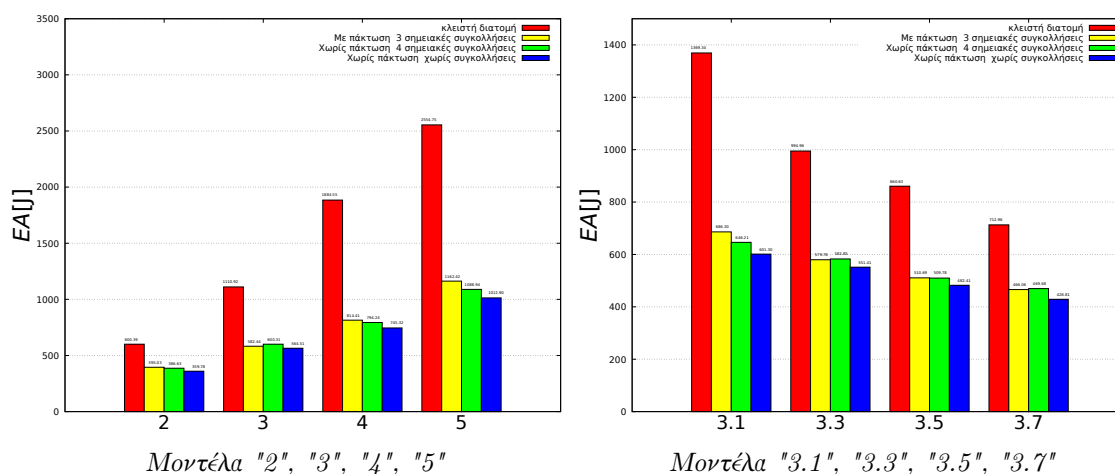
Μοντέλο	Τύπος μοντέλου	IPF [kN]	EA [J]	MCF [kN]	SEA [J/gr]	CFE [%]	$\frac{IPF}{N}$	$\frac{MCF}{N}$
2	Χωρίς Συγκόλληση	19.22	359.78	4.50	11.10	23.42	9.24	2.16
	Με 3 σημειακές συγκολλήσεις και πάκτωση	19.84	395.03	4.94	12.19	24.91	9.54	2.38
	Κλειστή διατομή	20.05	600.56	7.51	18.75	37.44	-	-
3	Χωρίς Συγκόλληση	28.86	564.51	7.06	11.77	24.46	9.37	2.29
	Με 3 σημειακές συγκολλήσεις και πάκτωση	29.78	582.44	7.29	12.15	24.47	9.67	2.37
	Κλειστή διατομή	29.91	1111.32	19.89	23.13	46.44	-	-
3.1	Χωρίς Συγκόλληση	28.85	601.30	7.52	12.54	26.07	8.10	2.11
	Με 3 σημειακές συγκολλήσεις και πάκτωση	29.82	686.3	8.58	14.31	28.79	8.38	2.41
	Κλειστή διατομή	29.97	1369.82	17.12	28.51	57.14	-	-
3.3	Χωρίς Συγκόλληση	28.77	551.41	6.90	11.50	23.97	10.03	2.40
	Με 3 σημειακές συγκολλήσεις και πάκτωση	29.76	579.78	7.25	12.09	24.36	10.37	2.53
	Κλειστή διατομή	29.70	995.24	12.44	20.81	41.88	-	-
3.5	Χωρίς Συγκόλληση	28.79	482.41	6.03	10.06	20.96	12.20	2.56
	Με 3 σημειακές συγκολλήσεις και πάκτωση	29.70	510.69	6.39	10.65	21.50	12.59	2.71
	Κλειστή διατομή	29.69	860.85	10.76	17.92	36.24	-	-
3.7	Χωρίς Συγκόλληση	28.79	428.81	5.36	8.94	18.63	14.47	2.70
	Με 3 σημειακές συγκολλήσεις και πάκτωση	29.67	466.06	5.83	9.72	19.65	14.91	2.93
	Κλειστή διατομή	29.72	713.21	8.92	14.81	30.00	-	-
4	Χωρίς Συγκόλληση	37.58	745.32	9.32	11.66	24.80	9.21	2.28
	Με 3 σημειακές συγκολλήσεις και πάκτωση	38.72	814.41	10.19	12.74	26.31	9.49	2.50
	Κλειστή διατομή	39.99	1885.04	23.56	24.44	58.92	-	-
5	Χωρίς Συγκόλληση	47.73	1012.90	12.67	12.73	26.54	9.40	2.49
	Με 3 σημειακές συγκολλήσεις και πάκτωση	49.29	1162.42	14.54	14.61	29.50	9.70	2.86
	Κλειστή διατομή	49.68	2555.56	31.94	32.20	64.30	-	-

Πίνακας 5.5: Δείκτες κατάρρευσης (IPF , EA , MCF , SEA , CFE , $\frac{IPF}{N}$, $\frac{MCF}{N}$ όπου N το πλήθος των σπειρών) με πάκτωση για 3 σημειακές καθ' ύψος συγκολλήσεις, χωρίς συγκόλληση με ελεύθερα άκρα και για τα αντίστοιχα κυλινδρικά μοντέλα κλειστής διατομής, για τα μοντέλα "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7"

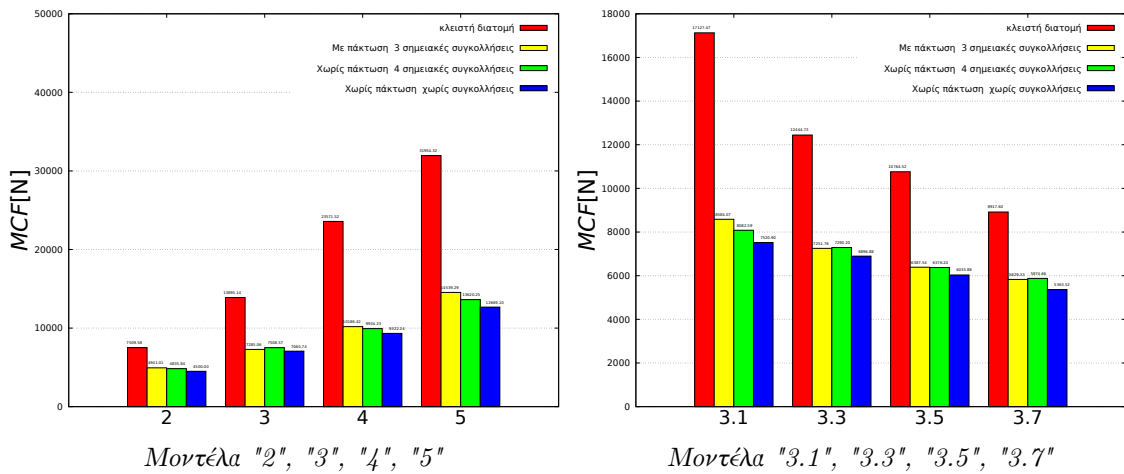
Όπως στην περίπτωση απουσία συγκολλήσεων ή πάκτωσης, παρατηρούμε αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας (EA) με την αύξηση του N . Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως με αύξηση του N έχουμε αύξηση της μάζας του δοκιμίου και άρα απαιτείται περισσότερη ενέργεια για να επιφέρει την ίδια παραμόρφωση. Ακολουθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής μελέτης για τα μοντέλα "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" κάθε περίπτωσης μελέτης στην παράγραφο 5.4.

5.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων

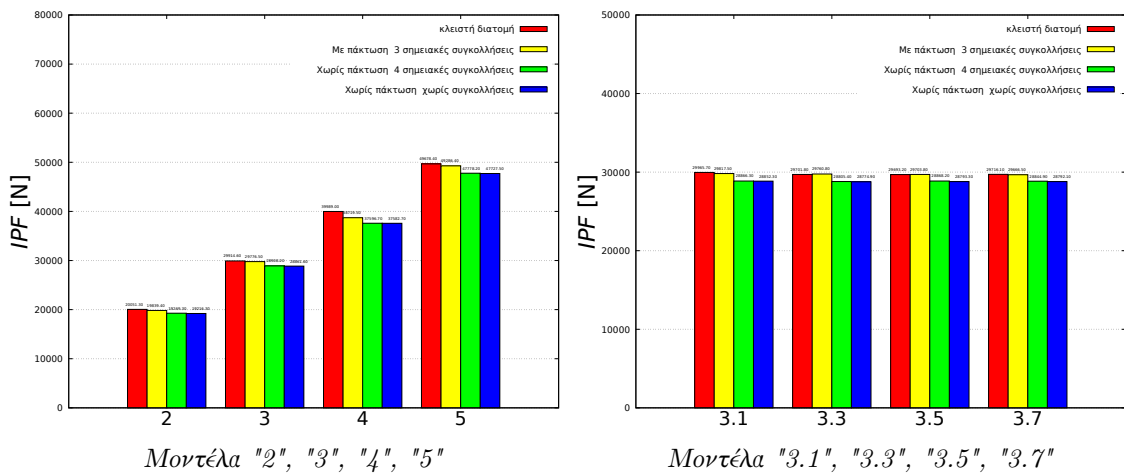
Σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων για τους δείκτες κατάρρευσης γίνεται στα σχήματα 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35.



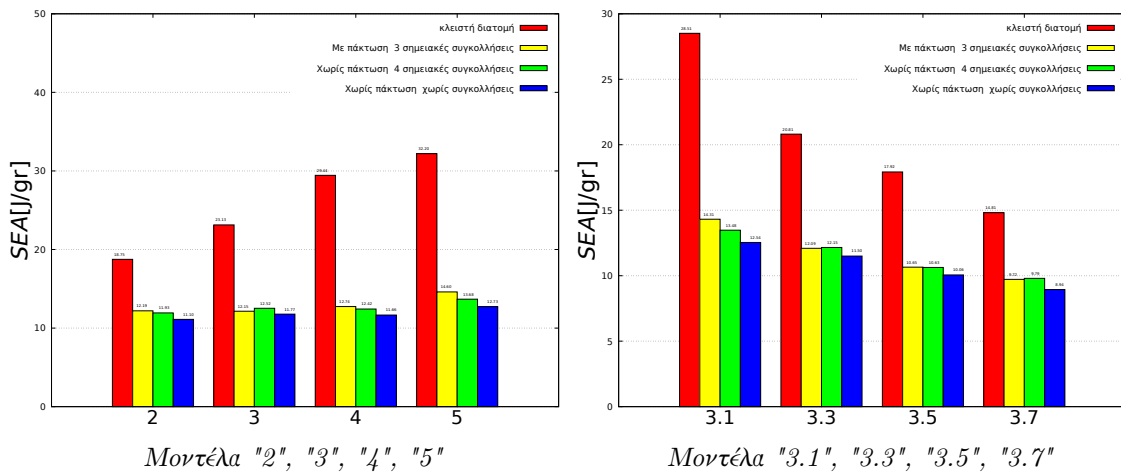
Σχήμα 5.29: Τιμές ενέργειας απορρόφησης EA "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" για 3 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις, 4 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις και πακτωμένα άκρα και τα αντίστοιχα μοντέλα κλειστής διατομής



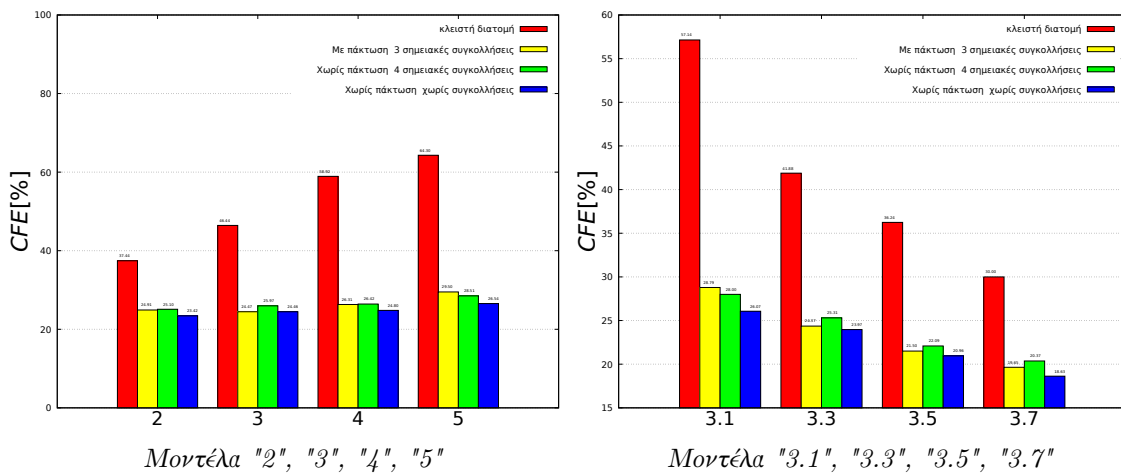
Σχήμα 5.30: Τιμές μέσου φορτίου MCF "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" για 4 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις, 3 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις και πακτωμένα άκρα και τα αντίστοιχα μοντέλα κλειστής διατομής



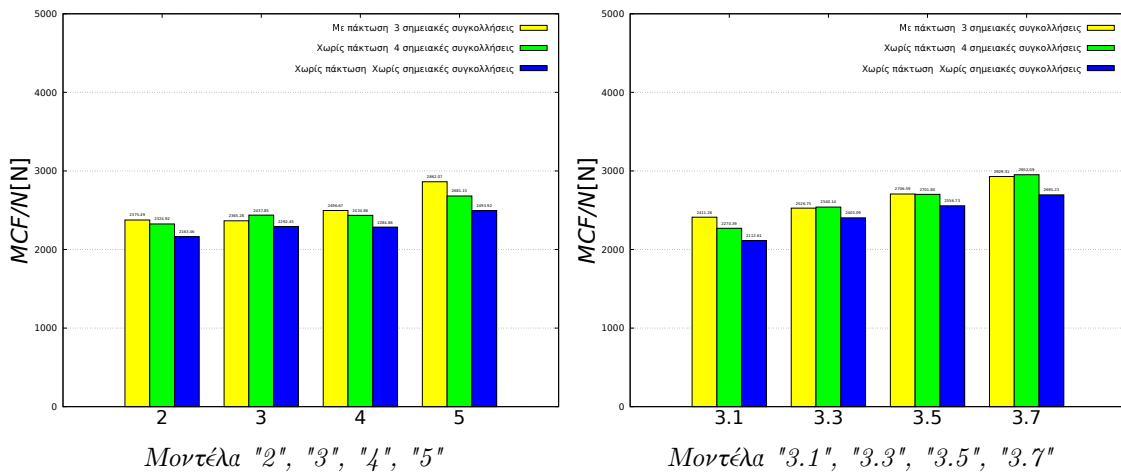
Σχήμα 5.31: Τιμές μέγιστου φορτίου IPF "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" για 4 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις, 3 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις και πακτωμένα άκρα και τα αντίστοιχα μοντέλα κλειστής διατομής



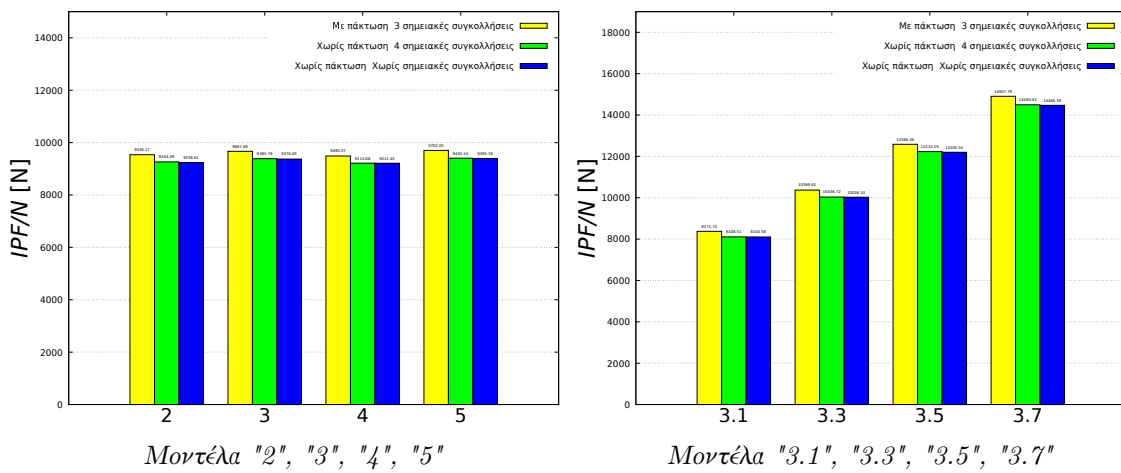
Σχήμα 5.32: Τιμές ειδικής ενέργειας απορρόφησης SEA "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" για 4 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις, 3 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις και πακτωμένα άκρα και τα αντίστοιχα μοντέλα κλειστής διατομής



Σχήμα 5.33: Τιμές απόδοσης δύναμης κατάρρευσης (CFE) "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" για 4 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις, 3 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις και πακτωμένα άκρα και τα αντίστοιχα μοντέλα κλειστής διατομής



Σχήμα 5.34: Τιμές μέσου φορτίου προς αριθμό σπειρών ($\frac{MCF}{N}$) "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" για 4 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις, 3 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις και πακτωμένα άκρα και τα αντίστοιχα μοντέλα κλειστής διατομής



Σχήμα 5.35: Τιμές μέγιστου φορτίου προς αριθμό σπειρών ($\frac{IPF}{N}$) "2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" για 4 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις, 3 σημειακές καθ ύψος συγκολλήσεις και πακτωμένα άκρα και τα αντίστοιχα μοντέλα κλειστής διατομής

Για τα μοντέλα "2", "3", "4", "5" στην περίπτωση της εισαγωγής τεσσάρων σημειακών συγκολλήσεων παρατηρείται αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας για κάθε μοντέλο σε σχέση με την απουσία σημειακών συγκολλήσεων (σχήμα 5.29). Αυτό συμφωνεί με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την παραμετρική ανάλυση στο μοντέλο "2" στην παράγραφο 5.2.1. Αξίζει ακόμα να σημειωθεί πως με την εισαγωγή των σημειακών συγκολλήσεων ο ρυθμός αύξησης της απορροφούμενης ενέργειας συναρτήσει του αριθμού των σπειρών (N) παρουσιάζει αύξηση σε σχέση με την περίπτωση απουσίας συγκολλήσεων όπως φαίνεται από την αύξηση του δείκτη $\frac{MCF}{N}$ στο σχήμα 5.34. Για κάθε μοντέλο η αύξηση στη μέση δύναμη κατάρρευσης (και άρα και στην ενέργεια απορρόφησης αφού $EA = MCF \cdot \delta$) φαίνεται να είναι της τάξης του 6.5-7.5% από το αντίστοιχο χωρίς σημειακές συγκολλήσεις (σχήμα 5.29). Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 5.2.1, αυτό πιθανώς συμβαίνει γιατί η εισαγωγή των σημειακών συγκολλήσεων και το μη "ξετύλιγμα" των σπειρών βελτιώνουν τη δυσκαμψία των τοιχωμάτων των δομών. Οι δείκτες MCF , SEA ακολουθούν την αύξηση του EA , και είναι φυσιολογικό αφού όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 5.2.1 εξάγονται από αυτόν ($MCF = \frac{EA}{\delta}$, $SEA = \frac{EA}{m_c}$). Στο σχήμα 5.35 και τον πίνακα 5.5 μπορούμε να δούμε πως η τιμή του μέγιστου φορτίου αυξάνει γραμμικά με τον αριθμό σπειρών του μοντέλου καθώς οι τιμές $\frac{IPF}{N}$ παραμένουν σταθερές. Επιπλέον φαίνεται πως η μέγιστη δύναμη (IPF) παραμένει σχετικά σταθερή για απουσία σημειακών συγκολλήσεων και τέσσερις σημειακές συγκολλήσεις. Αυτό δείχνει πως η μέγιστη δύναμη (IPF) δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη ή απουσία των συγκολλήσεων.

Τα μοντέλα "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" έχουν την ίδια μάζα αλλά διαφορετικό αριθμό περιελίξεων (N) και μέση διάμετρο (D_m). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της ενέργειας απορρόφησης στο σχήμα 5.29 τα μοντέλα με μικρότερο D_m παρουσιάζουν καλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Αυτό δείχνει πως η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας βελτιώνεται κατανέμοντας την ίδια μάζα υλικού πιο κοντά στον άξονα του δοκιμίου. Αυτό συμφωνεί και με την συμπεριφορά αυτών των διατάξεων απουσία συγκόλλησης και πάχτωσης [34]. Όπως και στην περίπτωση των μοντέλων "2", "3", "4", "5" έχουμε καλύτερη συμπεριφορά ως προς την απορρόφηση ενέργειας με την εισαγωγή τεσσάρων

σημειακών συγκολλήσεων καθώς όλοι οι δείκτες εμφανίζουν αύξηση (σχήματα 5.29, 5.30, 5.32). Να σημειωθεί πως η πιο επιθυμητή συμπεριφορά κατά την κατάρρευση φαίνεται και με την αύξηση της απόδοσης δύναμης κατάρρευσης (CFE) που με την εισαγωγή των συγκολλήσεων σημειώνει αύξηση από 3.2% (μοντέλο "3") μέχρι 14.8% (μοντέλο "5") σε σχέση με τα μοντέλα χωρίς συγκόλληση, για τους λόγους που αναφέρθηκαν πιο πάνω (σχήμα 5.33).

Κάτι ακόμα που μπορεί να εξαχθεί από το σχήμα 5.34 είναι η αύξηση του δείκτη $\frac{MCF}{N}$ με αύξηση του αριθμού των σπειρών. Φαίνεται πως η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ενός απορροφητή σπειροειδούς διατομής με N πλήθος σπειρών είναι μεγαλύτερη από N όμοιους απορροφητές μιας σπείρας. Το φαινόμενο αυτό δείχνει να ενισχύεται με την εισαγωγή σημειακών συγκολλήσεων και πάκτωσης. Αυτό δείχνει την επιθυμητή επίδραση της συνοχής και αλληλεπίδρασης των τοιχωμάτων στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των απορροφητών. Αυτή η αλληλεπίδραση σε αυτή τη μελέτη επιτυγχάνεται σε ένα βαθμό μέσω των σημειακών συγκολλήσεων.

Με την εισαγωγή των πακτώσεων φαίνεται πως αυξάνει το μέγιστο φορτίο που αναπτύσσεται σε όλα τα μοντέλα (σχήμα 5.31). Όπως αναφέρθηκε και στην παραμετρική ανάλυση του πακτωμένου μοντέλου "3" (παράγραφος 5.3.1) αυτό πιθανώς να οφείλεται στην μη ικανότητα ολίσθησης του άκρου του απορροφητή ενέργειας πάνω στην κινούμενη πλάκα στα πρώτα στάδια της κατάρρευσης. Αυτή η οριακή συνθήκη προκαλεί δημιουργία μεγαλύτερων τάσεων και έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη αρχική δύναμη κατάρρευσης (IPF). Η απορροφούμενη ενέργεια παραμένει περίπου ίδια σε σχέση με την μη ύπαρξη σημειακών συγκολλήσεων. Στο σχήμα 5.29 βλέπουμε πως στην περίπτωση των μοντέλων "2", "4", "5", "3.1", "3.5" τα μοντέλα με τρεις σημειακές συγκολλήσεις και πακτωμένα άκρα εμφάνισαν λίγο καλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ενώ στα μοντέλα "3", "3.3", "3.7" οι τιμές ήταν ικανοποιητικά κοντά. Αυτό πιθανώς να συμβαίνει επειδή η μέγιστη δύναμη IPF είναι μεγαλύτερη στα μοντέλα με πακτωμένα άκρα και αυτό επιφέρει μια πολύ μικρή αύξηση στην απορροφούμενη ενέργεια στα περισσότερα μοντέλα.

Ως προς την αύξηση του αριθμού των σπειρών (N) για τα μοντέλα "2", "3", "4", "5" βλέπουμε πως η εισαγωγή της πάκτωσης επηρεάζει την γραμμικότητα της αύξησης ενέργειας, αφού όπως φαίνεται στο σχήμα 5.34 το πηλίκο $\frac{MCF}{N}$ παρουσιάζει μεγάλη αύξηση από τέσσερεις σε πέντε σπείρες σε σχέση με τις περιπτώσεις τεσσάρων συγκολλησεων χωρίς πάκτωση και απουσίας συγκολλησεων και πάκτωσης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως πιθανώς η πάκτωση στα άκρα του απορροφητή δρα ως επιπλέον "συγκόλληση" με την επιφάνεια των πλακών. Επειδή όμως δεσμεύεται όλη η επιφάνεια της διατομής, και με αύξηση του N έχουμε κάθε φορά μεγαλύτερη επιφάνεια μεταξύ απορροφητή και πλακών (πίνακας 4.24), η αύξηση του N οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση της καμπτικής δυσκαμψίας της κατασκευής στα άκρα της και βελτίωση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. Και εδώ οι δείκτες SEA και MCF ακολουθούν τον ρυθμό αύξησης του EA (σχήμα 5.32, σχήμα 5.30). Ακόμη, λόγω της αύξησης της μέγιστης δύναμης (IPF), φαίνεται πως ο δείκτης CFE δεν παρουσιάζει την αύξηση που θα περιμέναμε με την εισαγωγή πακτώσεων και μάλιστα με τις εξαιρέσεις των μοντέλων "5" και "3.1", τα μοντέλα χωρίς πάκτωση δίνουν μεγαλύτερες τιμές CFE .

Τέλος όπως φαίνεται στα σχήματα 5.29, 5.30, 5.32, 5.33 ακόμα και με την εισαγωγή συγκολλησεων και πάκτωσης τα μοντέλα σπειροειδούς διατομής δεν εμφανίζουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας που εμφανίζουν τα αντίστοιχα μοντέλα κλειστής διατομής. Αυτό συμβαίνει καθώς στα μοντέλα κλειστής κυκλικής η σύνδεση των στρωμάτων κατά την διεύθυνση του πάχους δίνει πολύ καλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 5.1.

Κεφάλαιο 6

Σύνοψη εργασίας και συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία διερευνήθηκαν οκτώ μοντέλα σπειροειδούς διατομής ("2", "3", "4", "5", "3.1", "3.3", "3.5", "3.7"), ενισχυμένα με καθ' ύψος σημειακές συγκολλήσεις στο ελεύθερο άκρο τους, ως απορροφητές ενέργειας υπό οιονεί στατικές συνθήκες.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν τα δοκίμια σπειροειδούς διατομής και η πειραματική διάταξη που μελετήθηκε υπολογιστικά σε αυτή την εργασία. Στη συνέχεια ακολούθησε η μοντελοποίηση των δοκιμών σπειροειδούς διατομής, των πλακών, των spotwelds, οι μεταβλητές και οι συνθήκες που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση της κατάρρευσης στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων LS-Dyna. Ακόμα μοντελοποιήθηκαν όμοια δοκίμια κλειστής διατομής.

Αρχικά, στην παράγραφο 5.1 έγινε υπολογιστική επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια σπειροειδούς διατομής μέσω του μη γραμμικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-Dyna. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως τα μοντέλα έδιναν ικανοποιητικά αποτελέσματα για τους εξαχθέντες δείκτες κατάρρευσης και σχεδόν πανομοιότυπα μοτίβα κατάρρευσης.

Πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση για 3, 4, 5, 6, 8, 10 σημειακές ισαπέχουσες

καθ' ύψος συγκολλήσεις, καθώς και για συνεχή ραφή στο δοκίμιο "2". Στην παράγραφο 5.2.1, παρουσιάστηκαν τα στάδια και η τελική μορφή της κατάρρευσης αυτής της δομής για κάθε πλήθος σημειακών συγκολλήσεων. Διαπιστώθηκε πως τα μοτίβα κατάρρευσης των μοντέλων είναι μεικτά με έναν αξονοσυμμετρικό λοβό σε σχήμα δακτυλίου και 6 έως 8 μη εκτατούς λοβούς 3D ή 4D diamond μορφής. Βρέθηκε επίσης πως η μέγιστη δύναμη *IPF* σημειώνει αμελητέα αύξηση με αύξηση του πλήθους των σημειακών συγκολλήσεων, ενώ η απορροφούμενη ενέργεια *EA*, και κατά συνέπεια το μέσο φορτίο *MCF* και η ειδική ενέργεια απορρόφησης *SEA*, αυξάνονται μη γραμμικά με την αύξηση του πλήθους των σημειακών συγκολλήσεων. Ο μεγαλύτερος ρυθμός αύξησης της ενέργειας σημειώνεται με την εισαγωγή τριών σημειακών συγκολλήσεων. Στη συνέχεια, με αύξηση του αριθμού σημειακών συγκολλήσεων, έχουμε αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας με μειούμενο ρυθμό.

Στην παράγραφο 5.2.2 τα μοντέλα "2", "3", "4", "5" καθώς και "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" μελετήθηκαν με 4 σημειακές καθ' ύψος συγκολλήσεις. Τα μοτίβα κατάρρευσης παρατηρήθηκε πως ήταν οι ίδιες με την περίπτωση μη συγκολλημένης εξωτερικής σπείρας, ωστόσο οι δείκτες κατάρρευσης *MCF*, *SEA*, *EA* εμφάνισαν μια αύξηση της τάξης 6.5-7.5%. Η μέγιστη δύναμη κατά την κατάρρευση (*IPF*) παρέμεινε σχετικά ίδια με την περίπτωση απουσίας σημειακών συγκολλήσεων.

Στη συνέχεια, στην παράγραφο 5.3.1 εξετάστηκε η συμπεριφορά των μοντέλων με καθ' ύψος σημειακές συγκολλήσεις με την εισαγωγή πακτώσεων στα ελεύθερα άκρα αυτών. Αυτό έγινε για να μοντελοποιηθούν και να μελετηθεί η συμπεριφορά των μοντέλων, ως κομμάτια συγκολλημένα σε μια μεγαλύτερη κατασκευή, κάτι που είναι πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας των δομών απορρόφησης ενέργειας. Η παραμετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για το μοντέλο "3" με πακτωμένα άκρα και 0, 3, 4, 5, 6, 8, 10 ισαπέχουσες σημειακές συγκολλήσεις καθ' ύψος και για την περίπτωση συνεχούς ραφής. Παρατηρήθηκε και σε αυτό το σενάριο αύξηση των δεικτών κατάρρευσης συναρτήσει του πλήθους των σημειακών συγκολλήσεων. Ακόμη μόνο την εισαγωγή των πακτώσεων η μέγιστη δύναμη κατάρρευσης (*IPF*) εμφάνισε σημαντική αύξηση, αλλά στην συνέχεια δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τις σημειακές συγκολλήσεις. Οι

δείκτες κατάρρευσης MCF , EA , SEA κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα με την περίπτωση των ελεύθερων άκρων.

Τέλος εξετάστηκαν τα μοντέλα "2", "3", "4", "5" καθώς και "3.1", "3.3", "3.5", "3.7" με 3 σημειακές καθ' ύψος συγκολλήσεις. Οι μορφές κατάρρευσης αυτών των μοντέλων ήταν παρόμοιες με τη περίπτωση χωρίς την ύπαρξη της πάκτωσης. Επίσης, σε όλα τα μοντέλα με εξαίρεση τα μοντέλα "3", "3.3" και "3.7" φαίνεται πως η εισαγωγή της πάκτωσης δεν έδειξε μεγάλη διαφορά στους δείκτες MCF και EA στην περίπτωση των τριών συγκολλήσεων με την ύπαρξη πάκτωσης σε σχέση με την περίπτωση των ελεύθερων άκρων με 4 συγκολλήσεων, ενώ παρατηρήθηκε και εδώ αύξηση στον δείκτη IPF . Λόγω της αύξησης του IPF , ο δείκτης CFE δεν εμφάνισε αύξηση σε σχέση με την απουσία πακτώσεων με εξαίρεση τα μοντέλα "5" και "3.1".

Κεφάλαιο 7

Μελλοντική Διερεύνηση

Για μελλοντική διερεύνηση αυτών των δομών μπορεί να εξετασθεί η μελέτη των ίδιων των συγκολλήσεων κατά την κατάρρευση. Στην παρούσα εργασία οι σημειακές συγκολλήσεις εξετάστηκαν απλά ως δεσμεύσεις μεταξύ των κόμβων που μένουν παραμόρφωτες υπό την άσκηση φορτίων. Στην πραγματικότητα οι συγκολλήσεις είναι στοιχεία που εμφανίζουν μηχανικά όρια και συγκεκριμένη συμπεριφορά υπό την άσκηση καταπόνησης. Θα μπορούσαν να εξετασθούν οι δυνάμεις και οι παραμορφώσεις στις συγκολλήσεις κατά την κατάρρευση για διάφορα πλήθη σημειακών συγκολλήσεων.

Μια ακόμη διερεύνηση που μπορεί να γίνει είναι πάνω στις επιπτώσεις δυναμικών φαινομένων, για διάφορα strain rates, κατά την κατάρρευση πάνω σε απορροφητές ενέργειας με σπειροειδή διατομή και συγκολλημένη ή ελεύθερη εξωτερική πλευρά. Στην υπολογιστική μελέτη θεωρήθηκαν οιονεί στατικές συνθήκες και αγνοήθηκαν τυχόν δυναμικά φαινόμενα. Ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις οι απορροφητές ενέργειας καλούνται να καταρρεύσουν υπό δυναμικές συνθήκες. Θα ήταν λοιπόν χρήσιμο να πραγματοποιηθεί μελέτη για τις επιπτώσεις δυναμικών φαινομένων και να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα από την κατάρρευση απουσία αυτών, καθώς και αν συμφωνούν με τα ευρήματα για συμβατικούς απορροφητές ενέργειας κλειστής διατομής (όπου παρουσιάστηκε αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας σε δυναμικές από τις οιονεί στατικές [17]). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τον υπολογισμό των δυναμικών τάσε-

ων μέσω του μη γραμμικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-Dyna από την σχέση $\sigma_d = \sigma_s \cdot (1 + (\frac{\dot{\epsilon}}{D})^{\frac{1}{q}})$, όπου σ_d οι δυναμικές τάσεις που αναπτύσσονται, σ_s οι στατικές, $\dot{\epsilon}$ το strain rate και D,q παράμετροι του υλικού [32].

Τέλος μια ακόμα πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση μπορεί να γίνει για κόλληση μεταξύ των περιελίξεων απορροφητών ενέργειας σπειροειδούς διατομής με κόλλα(π.χ. κάποιου είδους ρητίνη) ή τύπο κόλλησης με πρόσθεση υλικού (π.χ. TIG) για να διαπιστωθεί αν θα έφερναν πιο επιθυμητά αποτελέσματα ως προς την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, σε σχέση με την συγκόλληση χωρίς πρόσθεση υλικού(spotweld) όπως αυτή μελετήθηκε στην παρούσα εργασία.

Βιβλιογραφία

- [1] S.C. Davis and R.G. Boundy: *Transportation energy data book: Edition 39*. February 2021. <https://doi.org/10.2172/1767864>.
- [2] *UK government. Department for transport. Statistics on freight, 2016*. <https://www.gov.uk/government/statistical-data-sets/tsgb04-freight>, visited on 9/3/2021.
- [3] W.A. Majewski and K.K. Magdi: *Diesel emissions and their control*. October 2006.
- [4] J. Simpson: *Reducing greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles: The role of the european commission*. 2008. https://ec.europa.eu/clima/system/files/2017-03/hdv_ghg_faber_maunsell_en.pdf.
- [5] L. Solazzi, A. Buffoli, and F. Ceresoli: *Weight optimization by using both aluminum and composite material on the big excavator*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1190(1):012010, October 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1190/1/012010>.
- [6] J. Galos, M. Sutcliffe, and G. Newaz: *Design, fabrication and testing of sandwich panel decking for use in road freight trailers*. Journal of Sandwich Structures & Materials, 20(6):735–758, December 2016. <https://doi.org/10.1177/1099636216680153>.
- [7] U.K. Vaidya, F. Samalot, S. Pillay, G.M. Janowski, G. Husman, and K. Gleich: *Design and manufacture of woven reinforced glass/polypropylene composites for mass transit floor structure*. Journal of Composite Materials, 38(21):1949–1971, 2004. <https://doi.org/10.1177/0021998304048418>.
- [8] G.W. Jang, M.S. Yoon, and J.H. Park: *Lightweight flatbed trailer design by using topology and thickness optimization*. Structural and Multidisciplinary Optimization, 41(2):295–307, 2010.
- [9] G. Lu and T. Yu: *Energy Absorption of Structures and Materials*. October 2003.

- [10] *Ελληνική Στατιστική Αρχή για αυτοκινητιστικά ατυχήματα 2019*. <https://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SDT04/->, επίσκεψη την 9/3/2021.
- [11] Ζοπουνίδης Κ.: *Περιφερειακές ενότητες της Ελλάδας και τροχαία ατυχήματα*. 2019. <https://www.protothema.gr/files/2020-04-26/troxaiio2019.pdf>.
- [12] A. Ikpe, E. Orhororo, and A. Gobir: *Design and reinforcement of a b-pillar for occupants safety in conventional vehicle applications*. International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences, 2:37–52, March 2017. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2017.2.1-004>.
- [13] *A.h. hasbrook, r.m. petry. handbook for aircraft accident investigators cooperating in crash injury research. cornell university medical college, 1951*. <https://www.yumpu.com/en/document/read/48086015/aircraft-accident-crash-injury-aviation-safety-and-security-archives>, visited on 9/3/2021.
- [14] 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. <https://doi.org/10.1093/qjmam/13.1.10>.
- [15] W. Johnson and A. Mamalis: *The Crashworthiness of Vehicles*. Mechanical Engineering Publications, January 1978.
- [16] T. Wierzbicki and W. Abramowicz: *On the crushing mechanics of thin-walled structures*. Journal of Applied Mechanics, 50:727–734, 1983. <https://doi.org/10.1115/1.3167137>.
- [17] M. Langseth and O.S. Hopperstad: *Static and dynamic axial crushing of square thin-walled aluminium extrusions*. International Journal of Impact Engineering, 18(7):949–968, 1996, ISSN 0734-743X. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(96\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(96)00025-5).
- [18] 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. <https://doi.org/10.1533/ijcr.2005.0373>.
- [19] O. Mohammadiha and H. Ghariblu: *Multi-objective optimization of functionally graded thickness tubes under external inversion over circular dies*. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 11(8), September 2016. <https://doi.org/10.1186/s40712-016-0061-3>.
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_foam_sandwich, visited on 9/3/2021.

- [21] V. Crupi, G. Epasto, and E. Guglielmino: *Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam*. *Marine Structures*, 30:74–96, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2012.11.002>.
- [22] G. Li, F. Xu, G. Sun, and Q. Li: *Crashworthiness study on functionally graded thin-walled structures*. *International Journal of Crashworthiness*, 20, 2015. <https://doi.org/10.1080/13588265.2015.1010396>.
- [23] S. Ramakrishna and H. Hamada: *Energy absorption characteristics of crash worthy structural composite materials*. 141:585–622, September 1997. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.141-143.585>.
- [24] S. Boria, A. Scattina, and G. Belingardi: *Axial crushing of metal-composite hybrid tubes: experimental analysis*. *Procedia Structural Integrity*, 8:102–117, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.12.012>.
- [25] 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. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.013>.
- [26] N. San Ha and G. Lu: *Thin-walled corrugated structures: A review of crashworthiness designs and energy absorption characteristics*. *Thin-Walled Structures*, 157:106995, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106995>.
- [27] N.A.Z. Abdullah, M.S.M. Sani, M.S. Salwani, and N.A. Husain: *A review on crashworthiness studies of crash box structure*. *Thin-Walled Structures*, 153:106795, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106795>.
- [28] 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. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(03\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(03)00045-9).
- [29] 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. <https://doi.org/10.1533/ijcr.2003.0254>.
- [30] A. Baroutaji, M. Sajjia, and A. Olabi: *On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments*. *Thin-Walled Structures*, 118:137–163, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.05.018>.
- [31] 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. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.04.008>.

- [32] X. Zhang, H. Zhang, and W. Ren: *Axial crushing of tubes fabricated by metal sheet bending*. Thin-Walled Structures, 122:252–263, 2018, ISSN 0263-8231. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.09.023>.
- [33] A. Alavi Nia and J. Haddad Hamedani: *Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries*. Thin-Walled Structures, 48(12):946–954, 2010, ISSN 0263-8231. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.07.003>.
- [34] Π.Ε. Κυρίτσης: *Αξονική κατάρρευση μεταλλικών κελυφών πολλαπλού τοιχώματος (σπειροειδούς διατομής) διαμορφωμένων με κυλινδρική κάμψη*. Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2019.
- [35] Δ.Ε. Μανωλάκος: *Σημειώσεις του μαθήματος: Κατεργασίες Ι*. Αθήνα: Τυπογραφείο ΕΜΠ, 2010.
- [36] M. Ish Horowic: *The application of plastic theory to bending: An examination of the general principles involved in applying 'limit design' to structural members*. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 23(7):203–208, 1951. <https://doi.org/10.1108/eb032057>.
- [37] S. Poonaya and C. Thinvongpituk: *Comparison of energy absorption of various section steel tubes under axial compression and bending loading*. December 2021.
- [38] K.R.F. Andrews, G.L. England, and E. Ghani: *Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading*. International Journal of Mechanical Sciences, 25(9):687–696, 1983. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(83\)90076-0](https://doi.org/10.1016/0020-7403(83)90076-0), Special Issue Structural Crashworthiness Conference.
- [39] D.D. Fuller: *2d coefficients of friction*. American Institute of Physics handbook. New York: Columbia Univ, 1963.
- [40] S.R. Guillow, G. Lu, and R.H. Grzebieta: *Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes*. International Journal of Mechanical Sciences, 43(9):2103–2123, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00031-5).