



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗ
ΕΠΕΝΔΥΣΗ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.**

AXIAL COLLAPSE OF METALLIC SHELLS WITH POLYMERIC INTERNAL COATING:
EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS.

ΤΣΟΥΛΚΑΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Δ.Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

AΘΗΝΑ 2016

Περίληψη

Η εργασία έχει ως στόχο τη μοντελοποίηση, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM - Finite Element Method) και τη χρήση του κώδικα Ls-Dyna, της αξονικής συμπίεσης κυλινδρικών κελυφών κατασκευασμένων από αλουμίνιο, από πολυμερές υλικό και από συνδυασμό των δύο υλικών, καθώς και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (Crashworthiness - Energy Absorption) σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

Τα πειραματικά δεδομένα ελήφθησαν από την διπλωματική εργασία “Αξονική συμπίεση μεταλλικών κελυφών επενδυμένων εσωτερικά με πολυμερές υλικό “ του κ. Κωνσταντίνου Κόκοτου, για τις ανάγκες της οποίας είχαν κατασκευαστεί τα δοκίμια και διεξήχθησαν πειράματα στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου.

Όλα τα πειράματα αξονικής κατάρρευσης προσομοιώθηκαν με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, Ls-Dyna της Livermore Software Technology Corporation (LSTC) και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με τα προαναφερθέντα πειραματικά.

Τέλος, αφού αξιολογήθηκε η αξιοπιστία της μοντελοποίησης με την παραπάνω σύγκριση αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε το παραπάνω λογισμικό για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την κατάρρευση των κελυφών και την ικανότητά τους σε απορρόφηση ενέργειας.

Abstract

The thesis aimed to achieve the best possible simulation of the experiment of axial compression of cylindrical shell made of aluminum, polymer material and metal coated polymer, using the method of Finite Elements and the special software Ls-Dyna, and the export of conclusions about Crashworthiness and Energy Absorption by comparing the experimental results to the results came from the simulation.

The experimental results received from the thesis “Axial compression of metal coated polymer shells” of mr.Konstantinos Kokotos, for the needs of which, test shells have been constructed and tested in the facilities of the Laboratory.

All the experiments simulated with the special software Ls-Dyna of Livermore Software Technology Corporation (LSTC) using the finite elements methodology and the results of this simulation compared with the results of the experiments.

In the end, after evaluating the reliability of the simulation using the above-mentioned comparison, the software been used to export conclusion about the axial compression of shells and their absorbing capacity.

Στη μνήμη του πατέρα μου

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract	4
Εισαγωγή.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	9
1.1 Crashworthiness και ασφάλεια στις μηχανολογικές κατασκευές.	9
1.2 Αξονική κατάρρευση κυλινδρικών σωλήνων.	10
1.3 Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης.....	10
1.4 Μη-αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης.	11
1.5 Μικτός τρόπος κατάρρευσης.....	12
1.6 Αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων κυλινδρικών κελυφών αποτελούμενων από δύο επάλληλα υλικά.....	13
1.7 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	14
1.8 Κώδικας Ls-Dyna.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	15
2.1 Παρουσίαση πειραματικής διαδικασίας.....	15
2.1.1 Δοκίμια.....	15
2.1.2 Συνθήκες πειραμάτων.	18
2.2 Μοντελοποίηση δοκιμίων και πειραματικής διαδικασίας μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.....	19
2.2.1 Καθορισμός γεωμετρίας κομματιών	19
2.2.2 Keyword manager	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	32
3.1 Συγκριτική παρουσίαση υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.	32
3.1.1 Δοκίμιο A1:50X48 κατασκευασμένο από αλουμίνιο.	33
3.1.2 Δοκίμιο E1:48X44 κατασκευασμένο από πλαστικό.	38
3.1.3 Δοκίμιο E2:48X42 κατασκευασμένο από πλαστικό.	43
3.1.4 Δοκίμιο A1E1:50X44 κατασκευασμένο από αλουμίνιο και επενδυμένο εσωτερικά με πλαστικό.	48
3.1.5 Δοκίμιο A1E2:50X42 κατασκευασμένο από αλουμίνιο και επενδυμένο εσωτερικά με πλαστικό.	53
3.1.6 Δοκίμιο A2:50X46 κατασκευασμένο από αλουμίνιο.	58
3.1.7 Δοκίμιο E3:46X42 κατασκευασμένο από πλαστικό.	63
3.1.8 Δοκίμιο E4:46X40 κατασκευασμένο από πλαστικό.	68
3.1.9 Δοκίμιο A2E3:50X42 κατασκευασμένο από αλουμίνιο και επενδυμένο εσωτερικά με πλαστικό.	73
3.1.10 Δοκίμιο A2E4:50X40 κατασκευασμένο από αλουμίνιο και επενδυμένο εσωτερικά με πλαστικό.	78
3.2 Σημαντικότερα αίτια αποκλίσεων υπολογιστικών και πειραματικών μεγεθών.....	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	84
4.1 Γενικά Συμπεράσματα– Προτάσεις για Συνέχιση και Επέκταση της Έρευνας	84
Βιβλιογραφία.....	86

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Συστημάτων Αυτοματισμού.

Σκοπός είναι η όσο δυνατόν καλύτερη αποτύπωση του πειράματος της αξονικής συμπίεσης κυλινδρικών κελυφών κατασκευασμένων από αλουμίνιο, από πολυμερές υλικό και μεταλλικών επενδυμένων με πολυμερές, χρησιμοποιώντας το ειδικό λογισμικό Ls-Dyna και την εξαγωγή συμπερασμάτων, συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μοντελοποίηση.

Αρχικά γίνεται μια γενική περιγραφή του φαινομένου του crassworthiness και της αξονικής κατάρρευσης κελυφών. Γίνεται αναφορά σε βιβλιογραφία και μελέτες που έχουν διεξαχθεί σε αυτόν τον τομέα καταστροφικών καταπονήσεων και παρουσιάζεται το μοντέλο αξονικής κατάρρευσης λεπτότοιχων κυλινδρικών σωλήνων από δύο επάλληλα υλικά. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων και μια σύντομη παρουσίαση του λογισμικού Ls-Dyna που χρησιμοποιήθηκε στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στην συνέχεια γίνεται μια συνοπτική περιγραφή στην κατασκευή των δοκιμών και τις συνθήκες διεξαγωγής των πειραμάτων από τον κ. Κόκοτο αλλά και στην κατασκευή των Cad μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση και παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε ώστε να οι συνθήκες της προσομοίωσης να πλησιάζουν τις πραγματικές πειραματικές συνθήκες μέσω του προγράμματος Ls-Dyna.

Έπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν της προσομοίωσης και πραγματοποιείται η σύγκρισή τους με τα πραγματικά αποτελέσματα των πειραμάτων.

Τέλος, γίνεται μια αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων -αποτελεσμάτων προσομοίωσης , αλλά και γενικά συμπεράσματα σχετικά με την κατάρρευση των δοκιμών και την απορρόφηση ενέργειας .

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το μέλος ΕΔΙΠ Δρ. Μηχ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για την πολύτιμη βοήθειά του σε ότι χρειάστηκα κατά την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Crashworthiness και ασφάλεια στις μηχανολογικές κατασκευές.

Στην σημερινή βιομηχανία ο σχεδιαστής ενός νέου προϊόντος ή μιας νέας μηχανολογικής κατασκευής θα πρέπει να λάβει υπ' όψιν του μια σειρά από κριτήρια όπως η εργονομία, το χαμηλό κόστος κατασκευής, το βάρος και οι διαστάσεις. Ένα χαρακτηριστικό όμως το οποίο είναι πολύ σημαντικό και πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή είναι η ασφάλεια του χρήστη. Ειδικά στην αυτοκινητοβιομηχανία, είναι απαραίτητο οι εταιρίες να μεριμνούν για την μέγιστη ασφάλεια των επιβατών σε περίπτωση ατυχήματος. Έτσι βλέπουμε πως σε αυτόν τον τομέα έχουν γίνει πολλά σημαντικά βήματα τα τελευταία χρόνια με τις εταιρίες να χρησιμοποιούν διαφορετικά υλικά κατασκευής απ' ό,τι παλιότερα, ο χάλυβας έχει αντικατασταθεί με υλικά όπως το αλουμίνιο, το κέβλαρ, τα ανθρακονήματα και γενικότερα παρατηρείται μια αλλαγή στην φιλοσοφία σχεδίασης η οποία πλέον έχει ως γνώμονα της παθητική ασφάλεια. Σε αυτό έχει συμβάλει και η νομοθεσία, με την Ε. Ε. να έχει θεσπίσει αυστηρή νομοθεσία και να αναγκάζει τις εταιρίες να καλύπτουν κάποιες βασικές προδιαγραφές και να δοκιμάζουν τα οχήματά τους σε crash test πετυχαίνοντας έτσι την αύξηση της ασφάλειας και την μείωση των θανατηφόρων ατυχημάτων.

Όλα τα παραπάνω συνέβαλαν στην ανάπτυξη του κλάδου του **crashworthiness (συμπεριφορά έναντι πρόσκρουσης)**, δηλαδή την ικανότητα μιας κατασκευής να παραμορφώνεται ελεγχόμενα και προοδευτικά, προστατεύοντας τους επιβάτες από τα υψηλά φορτία που αναπτύσσονται κατά τη σύγκρουση.

Το **crashworthiness** δηλαδή ασχολείται με την συμπεριφορά κατάρρευσης διατάξεων, συνήθως κελυφών, που προσλαμβάνουν κινητική ενέργεια από την κρούση και την μετατρέπουν σε πλαστικό έργο. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται **ενεργειακοί απορροφητές ή συστήματα απορρόφησης ενέργειας (energy absorbers)** [6] και σκοπός τους είναι η όσο δυνατόν μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας κατά την πρόσκρουση και η μετατροπή της - μη αντιστρεπτά - σε πλαστικό έργο (μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις), με τελικό σκοπό την προστασία της κατασκευής στην οποία ενσωματώνονται.

Οι **ενεργειακοί απορροφητές** είναι συνήθως λεπτότοιχοι σωλήνες από μαλακό χάλυβα ή αλουμίνιο που προέρχονται ή από διέλαση ή από στραντζαριστά ελάσματα με ραφή συγκόλλησης. Συνήθως η διατομή τους είναι κυκλική, ορθογωνική ή τετραγωνική και οι συνήθειες γεωμετρίας τους είναι ο ευθύς κυλινδρικός σωλήνας, ο ορθογωνικός σωλήνας τετραγωνικής διατομής και οι κωνικοί σωλήνες με σχήμα πυραμίδας.

Από μελέτες έχει αποδειχθεί πως ό,τι γεωμετρική μορφή του ενεργειακού απορροφητή παίζει μεγάλο ρόλο στον τρόπο κατάρρευσης και την ενέργεια απορρόφησης [10]. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τον τρόπο κατάρρευσης και την ενέργεια απορρόφησης είναι το μήκος του δοκιμίου, το πάχος του τοιχώματος και η διατομή [9]. Για παράδειγμα έχει αποδειχθεί πως αύξηση του πάχους του τοιχώματος οδηγεί και σε αύξηση της ενέργειας απορρόφησης.

Οι συνηθέστεροι **τρόποι φόρτισης** που επιβάλλονται στους ενεργειακούς απορροφητές είναι η αξονική σύνθλιψη, η πλευρική συμπίεση, η λοξή φόρτιση, η πλευρική διεσδυσση, η διάρρηξη και η αναστροφή (inversion) [10,6]. Ο επικρατέστερος και πιο αποτελεσματικός όμως τρόπος επιβολής φορτίου, όπως προκύπτει από πολλές μελέτες, είναι η αξονική σύνθλιψη.

Τέλος, άλλη μια σημαντική διάκριση του τρόπου επιβολής φορτίου στους ενεργειακούς απορροφητές είναι ο διαχωρισμός σε δυναμικό και ήμι-στατικό τρόπο φόρτισης. Ο δυναμικός τρόπος φόρτισης λαμβάνει υπ' όψιν αδρανειακές δυνάμεις που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις μεγάλες ταχύτητες σύγκρουσης, ενώ ο ήμι-στατικός που αφορά χαμηλές ταχύτητες πρόσκρουσης, αγνοεί τις αδρανειακές δυνάμεις και μοιάζει με τον στατικό [10]. Επικρατέστερος είναι ο ήμι-στατικός τρόπος φόρτισης, καθώς περιέχει τα πλεονεκτήματα του στατικού και μπορεί να προσομοιώσει ικανοποιητικά αρκετές περιπτώσεις συγκρούσεων που εμφανίζονται στην πράξη.

1.2 Αξονική κατάρρευση κυλινδρικών σωλήνων.

Σε μια δοκιμή αξονικής καταπόνησης η ενέργεια η οποία απορροφάται από το δοκίμιο κατά την διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσης μπορεί να υπολογιστεί από το εμβαδόν του χωρίου κάτω από την καμπύλη φορτίου - βράχυνσης δοκιμίου(μετατόπισης). Αρχικά το κέλυφος παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά, μέχρι μια μέγιστη τιμή P_{max} . Το μέγεθος αυτής της μέγιστης τιμής εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Όταν φτάσει αυτή την τιμή το φορτίο παρουσιάζει απότομη πτώση. Καθώς συνεχίζεται η παραμόρφωση η μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης και τις συνθήκες φόρτισης.

Για την καταγραφή της ικανότητας προς απορρόφησης ενέργειας ενός αξονικά καταπονούμενου κελύφους λαμβάνεται ως μέγεθος μέτρησης και σύγκρισης η ειδική ενέργεια απορρόφησης W_s . Αυτή ορίζεται σαν ο λόγος της ενέργειας που απορροφά το κέλυφος κατά την κατάρρευσή του W , προς τη μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει m_c , η οποία υπολογίζεται από τον αντίστοιχο όγκο V_c πολλαπλασιαζόμενο με την πυκνότητα του υλικού ρ .

Το ληφθέν διάγραμμα αξονικού φορτίου-μετατόπισης έχει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ ανωτάτων και κατωτάτων ορίων όπου κάθε φορά το ανώτατο όριο αντιστοιχεί στην έναρξη μια αναδίπλωσης. Εξαιτίας της συνεχούς πλαστικής παραμόρφωσης των λεπτότοιχων δοκιμίων απορροφάται σημαντικό ποσό ενέργειας. Το σημαντικό στην σχεδίαση αυτών των δομών απορρόφησης είναι να μην αναπτύσσονται υψηλές δυνάμεις, και το μέσο φορτίο να παραμένει υψηλό. Έτσι, οι δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα είναι οι ελάχιστες δυνατές και η ενέργεια απορροφάται σταθερά και προοδευτικά χωρίς να υπάρχουν μεγάλες αυξομειώσεις φορτίων.

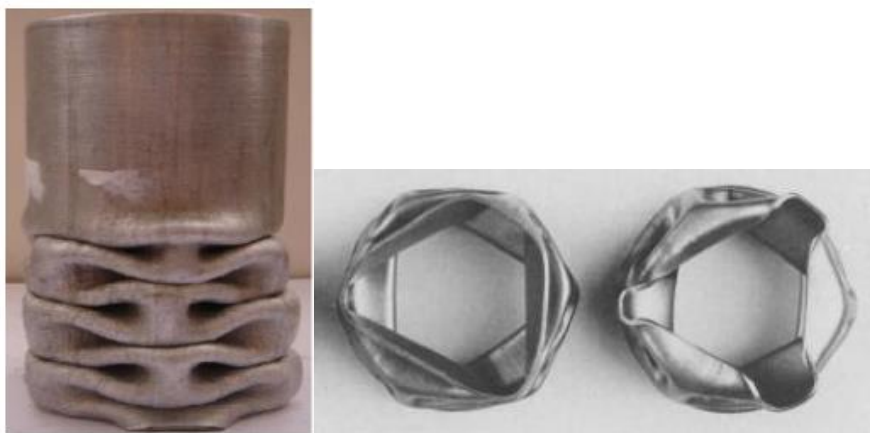
1.3 Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης.



Εικόνα 1: Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης

Κατά τον αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης οι λοβοί σχηματίζονται με εκτατό τρόπο, έτσι χαρακτηρίζεται και ως εκτατός τρόπος κατάρρευσης. Συμβαίνει δηλαδή μια έκταση στη διατομή της κατασκευής όπου η περίμετρος αυξάνεται. Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα η διατομή του δοκιμίου παραμένει κυκλική, αλλά κατά την συμπίεση εκτείνεται και αυξάνεται η περίμετρος της. Αυτός είναι και ο πιο επιθυμητός τρόπος κατάρρευσης επειδή συνήθως οδηγεί σε υψηλότερα ποσοστά απορροφούμενης ενέργειας δημιουργώντας συμμετρικές δομές.

1.4 Μη-αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης.



Εικόνα 2: Μη-αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης σε πρόσοψη και κάτοψη [3].

Κατά τον μη-αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης δημιουργούνται λοβοί με μη εκτατό τρόπο. Η διατομή της κατασκευής που καταρρέει δεν εκτείνεται, δεν αυξάνεται η περίμετρος της, αλλά μεταβάλλεται η μορφή της. Λόγω της μορφής των δοκιμίων μετά της κατάρρευση τους ο μηχανισμός αυτός έχει ονομαστεί και *diamond*, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2 όπου διακρίνεται αυτή η χαρακτηριστική μορφή της διατομής. Κάθε λοβός που σχηματίζεται έχει την ίδια μορφή με τον προηγούμενο, ωστόσο, δεν συμπίπτει με τους γειτονικούς του, αλλά έχει περιστραφεί κατά κάποια γωνία σε σχέση με αυτούς. Η γωνία περιστροφής εξαρτάται από τη μορφή του λοβού σύμφωνα με τον εξής μηχανισμό:

αν έχει x αριθμό ακμών, δηλαδή είναι της μορφής xD , τότε ο κάθε λοβός θα απέχει από τον προηγούμενο και τον επόμενο κατά π/x rad.

Γενικά, πρόκειται για έναν πιο ασταθή τρόπο κατάρρευσης αφού δεν υπάρχει συμμετρία ως προς τον άξονα συμπίεσης. Έτσι το φαινόμενο οδηγεί σε χαμηλότερα φορτία κατά την συμπίεση και κατά συνέπεια σε χαμηλότερο ποσό απορροφούμενης ενέργειας, χωρίς όμως αυτό να αποτελεί δέσμευση.

1.5 Μικτός τρόπος κατάρρευσης.



Εικόνα 3: Μικτός τρόπος κατάρρευσης [3].

Ο τρόπος κατάρρευσης δοκιμίων με λοβούς ανάμικτου τύπου αποτελεί ένα συνδυασμό των δύο προηγούμενων τρόπων κατάρρευσης. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ένα συνδυασμό ενός ή περισσότερων αρχικά σχηματισμένων αξονοσυμμετρικών λοβών οι οποίοι ακολουθούνται από μη εκτατούς λοβούς καθώς προχωράει η κατάρρευση του δοκιμίου. Κυρίως, ο μικτός τρόπος εμφανίζεται όταν οι διαστάσεις του δοκιμίου, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τον τρόπο κατάρρευσης, είναι κοντά στο οριακό σημείο. Άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει είναι οι ατέλειες στην δομή ή την κατασκευή των δοκιμίων.

1.6 Αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων κυλινδρικών κελυφών αποτελούμενων από δύο επάλληλα υλικά.



Εικόνα 4: Κυλινδρικά κελύφη αποτελούμενα από δύο επάλληλα υλικά πριν και μετά την κατάρρευση [3].

Δύο σωλήνες από διαφορετικά υλικά τοποθετούνται ο ένας μέσα στον άλλον ώστε να αποτελέσουν έναν ενιαίο κύλινδρο από δύο στρώματα υλικών. Τα δύο υλικά έχουν διαφορετικές ιδιότητες, επομένως, κατά την κατάρρευση έχουν διαφορετικό τρόπο συμπεριφοράς. Όταν συμπιεστούν, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, γεγονός που επηρεάζει όλες τις παραμέτρους της κατάρρευσης, την καμπύλη του φορτίου, την απορρόφηση ενέργειας και την δημιουργία λοβών.

1.7 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

Η **Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων** αποτελεί πλέον ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων μηχανικού. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών, μαγνητικής ροής, υπόγειας ροής και άλλων προβλημάτων ροής. Με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των Η/Υ και των συστημάτων CAD, σύνθετα προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν πολύ εύκολα. Διάφορες εναλλακτικές συνθέσεις μπορούν να δοκιμαστούν σε έναν Η/Υ πριν κατασκευαστεί το πρώτο πρωτότυπό τους. Στην Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων, μια περίπλοκη περιοχή, η οποία ορίζει ένα συνεχές, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements). Οι ιδιότητες υλικών και οι διέπουσες σχέσεις θεωρούνται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων. Μια διαδικασία σύνθεσης, η οποία καταλλήλως θεωρεί τα φορτία και τους περιορισμούς, έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων. Η λύση αυτών των εξισώσεων δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς.

1.8 Κώδικας Ls-Dyna.

Πρόκειται για ένα εξειδικευμένο πακέτο λογισμικού γενικής χρήσης, το οποίο αναπτύχθηκε από την εταιρία Livermore Software Technology Corporation(LSTC). Ο κώδικας LS-DYNA έχει τις ρίζες του στο πρόγραμμα τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων DYNA3D, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Dr. John Hallquist στο Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Livermore της California τω ΗΠΑ. Το πρόγραμμα δημιουργήθηκε λόγω της ανάγκης για ανάπτυξη ενός 3D κώδικα, επειδή η 2D ανάλυση κρινόταν ανεπαρκής για ορισμένες προσομοιώσεις. Το LS-DYNA δέχεται ως είσοδο εκτελέσιμα αρχεία που καθοδηγούνται από μια γραμμή εντολών και βρίσκονται σε απλή μορφή ASCII, συνεπώς μπορούν να δημιουργηθούν και να επεξεργαστούν με την χρήση οποιουδήποτε επεξεργαστή κειμένου ή μέσω ενός κατάλληλου γραφικού προ-επεξεργαστή. Στην αγορά υπάρχουν πολλά εξωτερικά λογισμικά για την προ-επεξεργασία αρχείων εισόδου, με την LSTC να έχει αναπτύξει και το δικό της προ-επεξεργαστή (Ls-Prepost), ο οποίος είναι και αυτός που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για τον σχεδιασμό και την ανάλυση των μοντέλων.

Το LS-DYNA διαθέτει πλήρεις δυνατότητες 2D και 3D προσομοίωσης, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για εφαρμογές όπως μη-γραμμική δυναμική ανάλυση, ανάλυση στερεών σωμάτων, θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική ανάλυση, δυναμική σύζευξη πολλών σωμάτων, ακουστική πραγματικού χρόνου, προσαρμοστική ανάδιατύπωση πλέγματος, μεταφορά ακτινοβολίας, ηλεκτρομαγνητισμό και ανάλυση κατάρρευσης. Οι τυπικές χρήσεις του κώδικα αφορούν γενικά τη μη-γραμμική ανάλυση και τη μεταβατική δυναμική ανάλυση. Ο κώδικας είναι σε θέση να αντιμετωπίσει ένα μεγάλο φάσμα προβλημάτων, από περιπτώσεις μεγάλων στατικών παραμορφώσεων έως γεγονότα μεγάλης ταχύτητας και μικρής διάρκειας όπου βασικός παράγοντας είναι η επίδραση αδρανειακών δυνάμεων, όπως προσκρούσεις οχημάτων, εκρήξεις κτλ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Παρουσίαση πειραματικής διαδικασίας.

2.1.1 Δοκίμια

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας του κ. Κόκοτου κατασκευάστηκαν δέκα δοκίμια. Δύο δοκίμια από αλουμίνιο, τέσσερα δοκίμια από πλαστικό(Ertalon) και άλλα τέσσερα αποτελούμενα από πλαστικούς σωλήνες μέσα σε αλουμινένιους.

Αρχικά κατασκευάστηκαν δύο δοκίμια από αλουμίνιο ίδιας διαμέτρου αλλά διαφορετικού πάχους μεταξύ τους. Για κάθε έναν από τους σωλήνες αλουμινίου κατασκευάστηκαν δύο πλαστικοί σωλήνες διαφορετικού πάχους με εξωτερική διάμετρο όση η εσωτερική διάμετρος των αλουμινένιων. Έπειτα, για να μελετηθεί η κατάρρευση των σωλήνων αυτών μαζί, τοποθετήθηκαν οι παραπάνω σωλήνες μέσα στους μεταλλικούς αποτελώντας μία ενιαία κατασκευή.

Η πρώτη σειρά δοκιμών που μελετήθηκε είχε πάχη 1mm για τους αλουμινένιους σωλήνες και για πλαστικούς αντίστοιχα 2mm και 3mm.

Η δεύτερη σειρά δοκιμών περιελάμβανε αλουμινένιους σωλήνες με πάχη 2mm και για του πλαστικούς 2mm και 3mm.

Το ύψος όλων των δοκιμών ήταν $H=150\text{mm}$, ύψος τυπικό για εργαστηριακές δοκιμές θλίψης.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι **θεωρητικές διαστάσεις** των δοκιμών, όπου **A=σωλήνας από αλουμίνιο** και **E=σωλήνας από Ertalon**:

Δοκίμιο	Εξωτερική διάμετρος	Εσωτερική διάμετρος	Εξωτερική διάμετρος	Εσωτερική διάμετρος
A1	50mm	48mm	-	-
E1	48mm	44mm	-	-
E2	48mm	42mm	-	-
A1E1	50mm	48mm	48mm	44mm
A1E2	50mm	48mm	48mm	42mm
A2	50mm	46mm	-	-
E3	46mm	42mm	-	-
E4	46mm	40mm	-	-
A2E3	50mm	46mm	46mm	42mm
A2E4	50mm	46mm	46mm	42mm

Οι πραγματικές διαστάσεις των δοκιμών όμως παρουσιάζουν διαφορά από τις ονομαστικές τους. Αυτό οφείλεται κυρίως στον τρόπο κατασκευής των δοκιμών. Στους σωλήνες από αλουμίνιο οι διαφορές αυτές είναι αμελητέες διότι η κατασκευή τους έγινε σε βιομηχανία από όπου προέκυψαν μεγάλοι μήκους σωλήνες με μεγάλη ακρίβεια στην διάμετρο και το πάχος τους. Η επεξεργασία όμως των σωληνών από Ertalon προήλθε από τόννευση με αποτέλεσμα να υπάρχει μια μικρή μεταβολή πάχους κατά μήκος των σωληνών και κυμάτωση του πάχους που μπορεί να σχηματίζει τοπικά ακρότατα σε κάποια σημεία. Οι **πραγματικές διαστάσεις** των δοκιμών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Δοκίμια	Εξωτερική διάμετρος (Deξ)mm	Εσωτερική διάμετρος (Deσ)mm	Πάχος(t)mm	Ύψος(H)mm
A1	50	48	1	150.36
E1	47.80	44.26	1.995	150
E2	47.71	42.03	2.85	149.86
A1E1	50	44	3	150
A1E2	50	42	4.04	150.13
A2	50	46	2	150.30
E3	45.90	42.10	2.06	150.08
E4	45.8	40.20	4	149.95
A2E3	50	41.5	4.10	150.12
A2E4	50	40.20	4.99	150.01

Στη συνέχεια ακολουθεί μια περιγραφή των **υλικών που χρησιμοποιήθηκαν**, των χαρακτηριστικών τους και των βασικών ιδιοτήτων τους:

Αλουμίνιο: Το κράμα του αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε είναι το 6063-F25. Η πυκνότητα του υλικού είναι $\rho=2.7 \text{ gr/cm}^3$, με μέτρο ελαστικότητας $E=70 \text{ GPa}$ και λόγο Poisson=0.33. Η αντοχή σε εφελκυσμό (UTS) είναι 225 MPa. Το αρχικό όριο διαρροής είναι $\sigma_s=195 \text{ MPa}$ και η ολκιμότητα, δηλαδή η παραμόρφωση θραύσης, είναι περίπου 10%. Τέλος, η σκληρότητα του υλικού είναι περίπου 73 HB.

Πλαστικό: Το πλαστικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Ertalon6SA. Η πυκνότητα του είναι $\rho=1.20 \text{ gr/cm}^3$. Η εφελκυστική τάση σε διαρροή είναι ίση με $\sigma_s=45 \text{ MPa}$, η εφελκυστική παραμόρφωση σε θράυση είναι >100% και το μέτρο ελαστικότητας $E=1400 \text{ MPa}$ με λόγο Poisson=0.39. Οι μετρήσεις των ιδιοτήτων αφορούν υλικά σε ισορροπία με το περιβάλλον σε θερμοκρασία 23C/50% RH που αντιπροσωπεύουν καλά τις συνθήκες τους πειράματος στο Εργαστήριο.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα πλαστικά δοκίμια δεν είχαν την μορφή σωλήνων. Για την κατασκευή τους ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω:

Κατασκευή κελυφών από αλουμίνιο: Η μέθοδος κατασκευής που ακολουθήθηκε ήταν η διέλαση. Το υλικό υπήρχε στις αποθήκες του εργαστηρίου αλλά ήταν αρχικά σε μορφή σωλήνα μεγάλου μήκους, όπως είχε προκύψει από την κατεργασία της διέλασης. Έτσι, οι σωλήνες αυτοί κόπηκαν στο επιθυμητό μήκος των 150 mm με την χρήση τροχού κοπής στο εργαστήριο.

Κατασκευή κελυφών από πλαστικό: Οι πλαστικοί σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από συμπαγείς πλαστικούς σωλήνες που βρίσκονταν στο εργαστήριο. Αυτοί έπειτα κατεργάστηκαν στον τόρνο όπου κόπηκαν στην επιθυμητή εσωτερική και εξωτερική διάμετρο ώστε να αποκτήσουν την τελική τους μορφή.

Κατασκευή δοκιμίων από αλουμινένια κελύφη επενδυμένα εσωτερικά με πλαστικό: Η τοποθέτηση των εσωτερικών πλαστικών σωλήνων μέσα στους μεταλλικούς εξωτερικούς έγινε με τη χρήση του τόρνου. Οι αλουμινένιοι σωλήνες στερεώθηκαν στο τσοκ του τόρνου και οι πλαστικοί στο εργαλειοφορείο. Στη συνέχεια, η διείσδυση του εσωτερικού σωλήνα έγινε με την πίεση του εργαλειοφορείου. Οι διαστάσεις των δοκιμίων ήταν οριακές ώστε να επιτευχθεί σφιχτή συναρμογή. Επιπλέον, η μία άκρη του εσωτερικού σωλήνα είχε ελαφρώς κοπεί στην εξωτερική της πλευρά ώστε να έρθει στο οριακό σημείο που είναι δυνατόν για να αρχίσει η διείσδυση. Έπειτα, με την παρουσία λιπαντικού συνεχίστηκε η διείσδυση και πραγματοποιήθηκε η σφιχτή συναρμογή.

2.1.2 Συνθήκες πειραμάτων.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στη **μηχανή δοκιμών INSTRON 4482**. Η μηχανή αυτή μεταφέρει κίνηση, ροπή και δυνάμεις με μηχανικό τρόπο. Έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία και το ονομαστικό της φορτίο είναι 10 tn, κάτι που σημαίνει ότι η μέγιστη θλιπτική της ικανότητα αρκούσε για τον σκοπό των πειραμάτων που διεξήχθησαν. Επίσης, η δυνατότητα σύνδεσης της μηχανής με Η/Υ δίνει την δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων συμπίεσης κατευθείαν στην μνήμη του. Τέλος, παρέιχε άμεσα το διάγραμμα φορτίου- μετατόπισης κάθε δοκιμίου έτσι ώστε να γίνονται καλύτερα αντιληπτές οι μεταβολές του.



Εικόνα 5: Μηχανή δοκιμών INSTRON 4482.

Τα πειράματα διεξήχθησαν υπό στατικές συνθήκες. Η ταχύτητα του εμβόλου ήταν 10 mm/min, ταχύτητα που προσεγγίζει πολύ αρκετά καλά τις στατικές συνθήκες και χρησιμοποιείται συχνά σε τέτοιου είδους πειράματα. Τα δοκίμια συμπίεστηκαν κατά 100 mm δηλαδή στα $\frac{2}{3}$ του μήκους τους. Η πειραματική διαδικασία καταγραφόταν οπτικά με φωτογραφική μηχανή, όπου γινόταν λήψη φωτογραφιών στα πιο χαρακτηριστικά σημεία της κατάρρευσης.

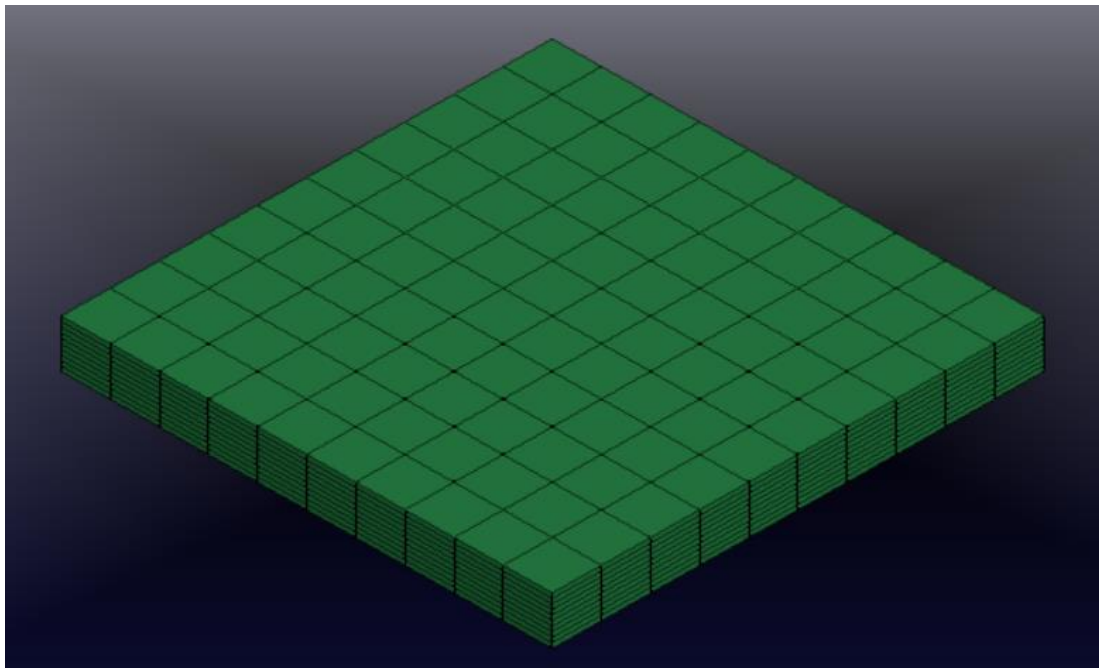
2.2 Μοντελοποίηση δοκιμίων και πειραματικής διαδικασίας μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Ο σχεδιασμός όλων των υπολογιστικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία έγινε με την βοήθεια του προ-επεξεργαστή LS-PrePost. Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε ήταν η 4.2 η οποία και διατίθεται δωρεάν στην επίσημη ιστοσελίδα της εταιρίας LSTC.

2.2.1 Καθορισμός γεωμετρίας κομματιών

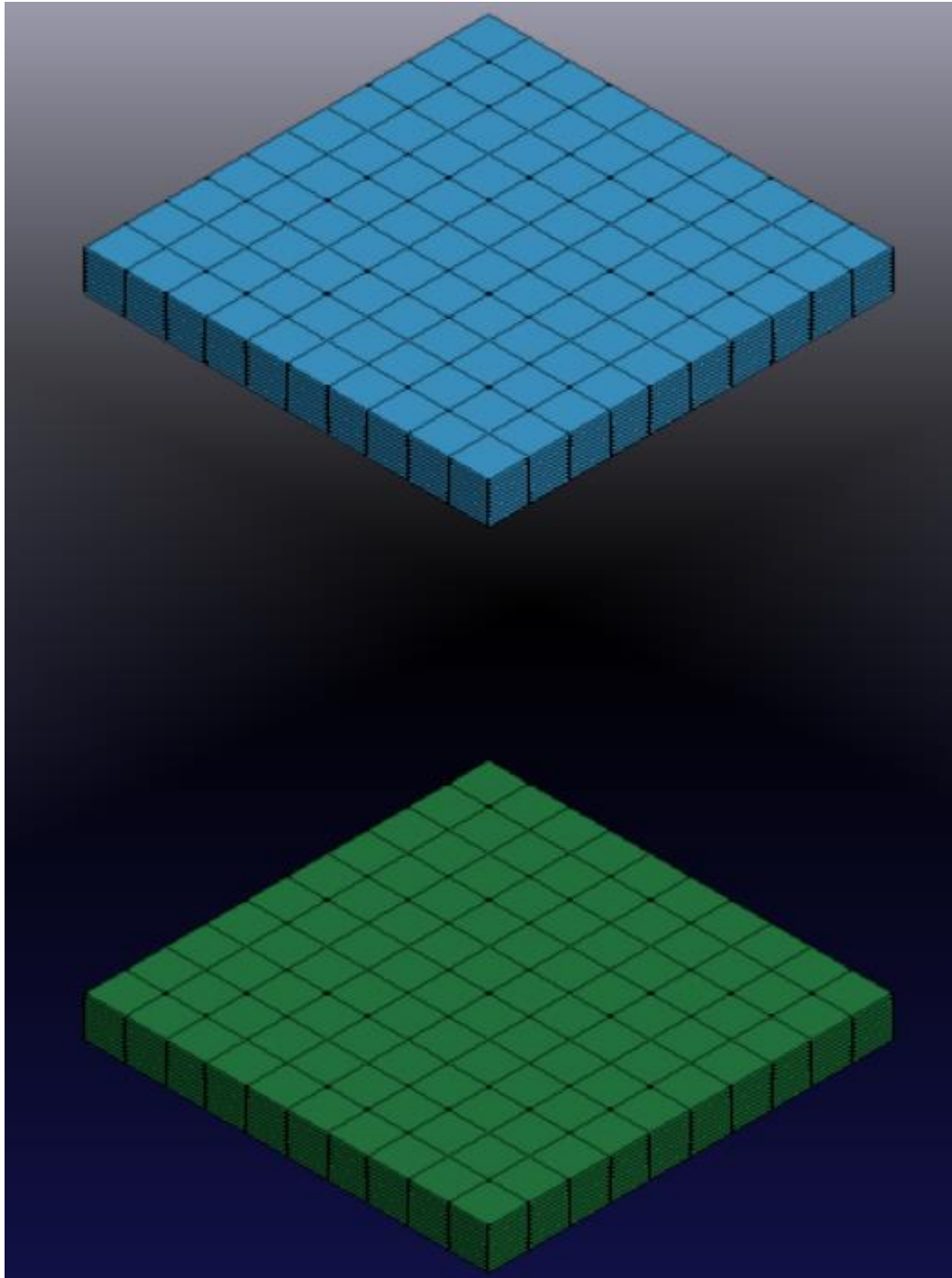
Πλάκες.

Αρχικά έπρεπε να σχεδιασθεί η πλάκα πάνω στην οποία θα στερεωθούν τα δοκίμια. Έτσι στην συντεταγμένη $z=0$ σχεδιάστηκε ένα συμπαγές ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με διαστάσεις 100×100 . Η πλάκα αυτή είναι απαραμόρφωτη και απλής γεωμετρίας και έτσι χρησιμοποιήθηκε διακριτοποίηση 10 πεπερασμένων στοιχείων κατά μήκος της πλάκας 10 πεπερασμένα στοιχεία κατά πλάτος και 10 πεπερασμένα στοιχεία κατά ύψος, η οποία δεν θεωρείται πολύ πυκνή.



Εικόνα 6: Κάτω πλάκα.

Για τον σχεδιασμό της πάνω πλάκας που θα συμπίπτει το δοκίμιο ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία, μόνο που η πλάκα σχεδιάστηκε στο $z=150$, ώστε να είναι ακριβώς πάνω από τα δοκίμια που θα σχεδιαστούν αργότερα.



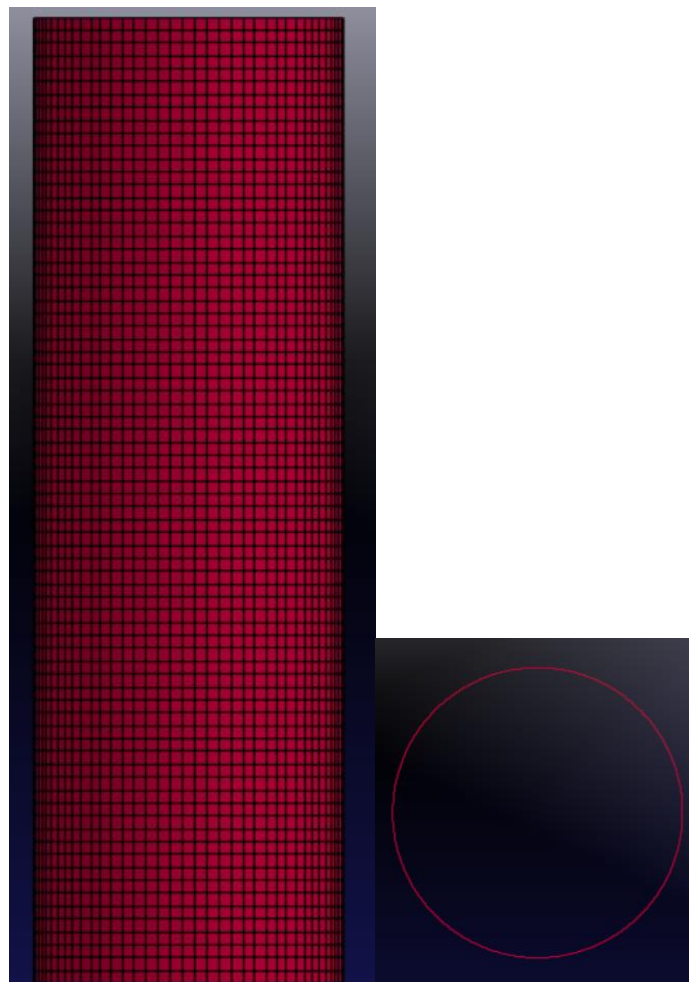
Εικόνα 7: Πάνω και κάτω πλάκα.

Δοκίμια.

Για τον σχεδιασμό των δοκιμίων ακολουθήθηκαν δύο διαφορετικές διαδικασίες σχεδίασης, με σκοπό κατά την μοντελοποίηση να γίνει σύγκριση των δύο τρόπων ως προς το ποιος από τους δύο δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα στην κάθε περίπτωση. Έτσι, αρχικά το δοκίμιο σχεδιάστηκαν ως **cylinder_shell** και έπειτα ως **cylinder_solid**.

Απλά δοκίμια ως cylinder_shell:

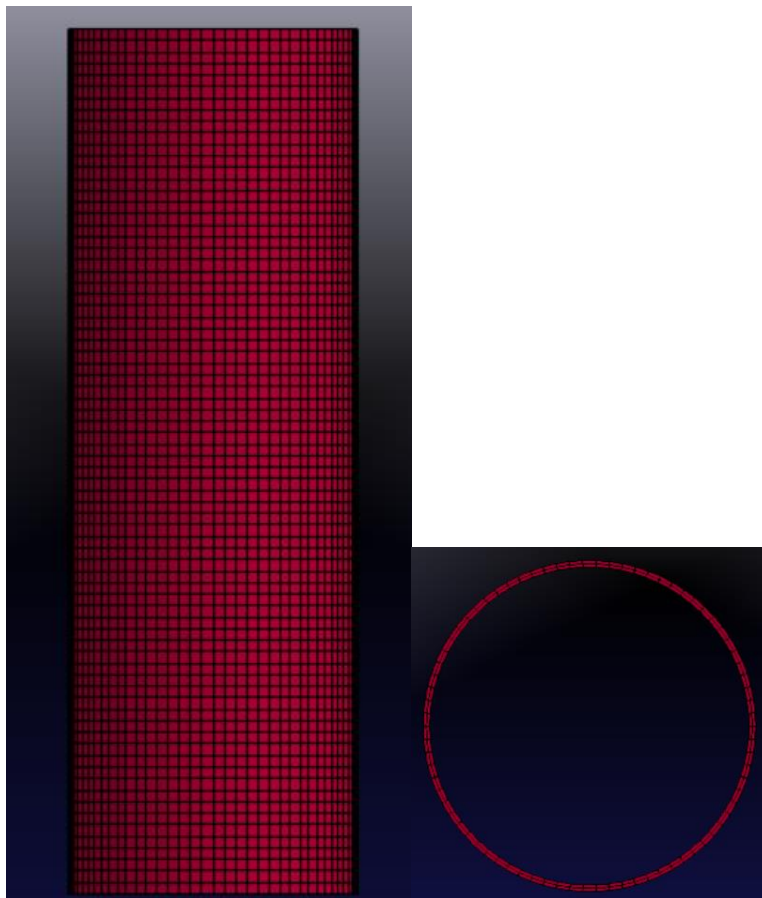
Για την σχεδίαση των δοκιμίων ως **cylinder_shell** επιλέχθηκε από το **SHAPE MESHER** η αντίστοιχη επιλογή. Στην επιλογή **RADIUS** δινόταν η μέση ακτίνα του κάθε δοκιμίου και στην επιλογή **LENGTH** δινόταν το πραγματικό ύψος του κάθε δοκιμίου, δηλαδή 150 με κάποιες μικρές αποκλίσεις κάποιες φορές. Έπειτα στις επιλογές **NUM ELE** και **NUM** δηλωνόταν τα πεπερασμένα στοιχεία κατά περίμετρο του δοκιμίου και κατά ύψος αντίστοιχα. Η διακριτοποίηση που χρησιμοποιήθηκε εδώ αποφασίστηκε να είναι 2x2, δηλαδή οι διαστάσεις του κάθε πεπερασμένου στοιχείου να είναι 2mm x 2mm. Αυτή η διακριτοποίηση εξυπηρετούσε καλύτερα τις ανάγκες τις εργασίας από την 1x1 που δοκιμάστηκε αρχικά επειδή μείωσε κατά πολύ τους χρόνους προσομοίωσης και δεν επηρέασε την ακρίβεια της προσομοίωσης, αφού το λεπτότερο κέλυφος είχε πάχος 1mm κάτι που σημαίνει πως, θεωρητικά, οι λοβοί που σχηματίζονταν ήταν αρκετά μεγάλοι για να προσομοιωθούν με τις διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων που επιλέχθηκαν τελικώς.



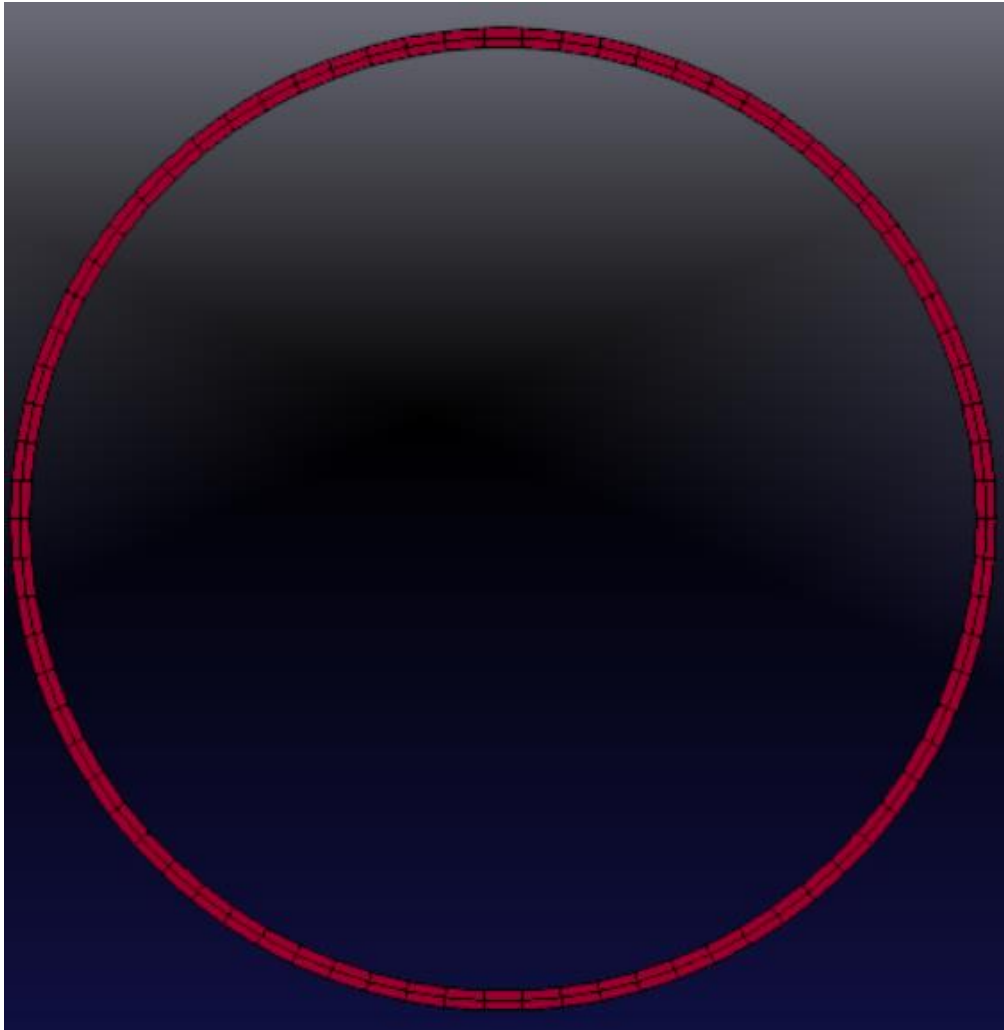
Εικόνα 8: Δοκίμιο *cylinder_shell* σε front και top view.

Απλά δοκίμια ως `cylinder_solid`:

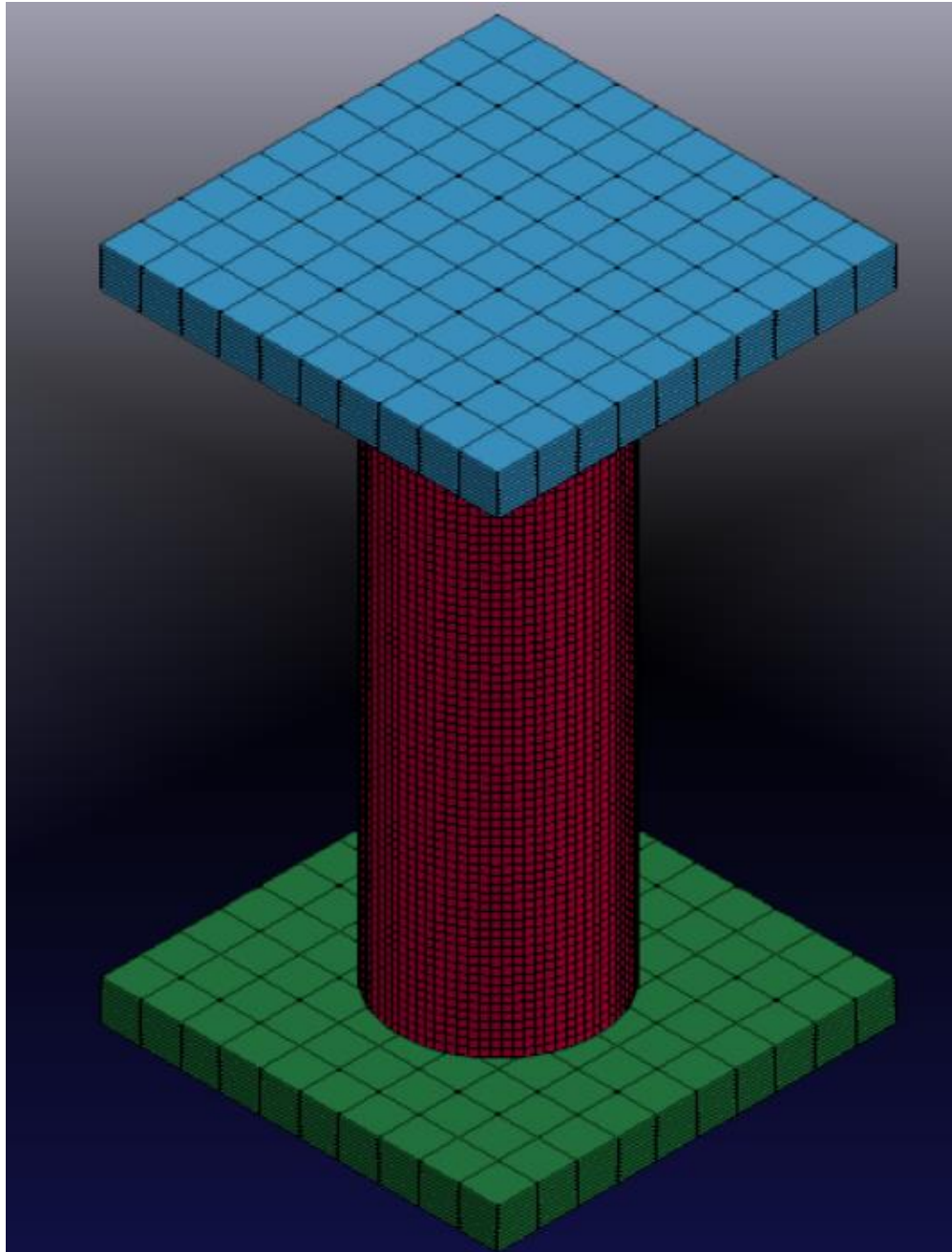
Για την σχεδίαση των δοκιμίων ως `cylinder_solid` ακολουθήθηκε λίγο διαφορετική διαδικασία από πριν. Αρχικά, μέσω του **GEOMETRY**, σχεδιάστηκαν δύο κύκλοι, ο ένας με την εσωτερική ακτίνα και ο άλλος με την εξωτερική ακτίνα του αντίστοιχου δοκιμίου. Έπειτα, πάλι μέσα από το **GEOMETRY**, από το **SURFACE** και με την επιλογή **FILL PLANE** αυτοί οι κύκλοι ενώθηκαν και έγιναν μια επιφάνεια. Μέσα από το **FEM**, **N-LINE MESHER**, **N-SIDE SURF** δημιουργήθηκε η επιθυμητή διακριτοποίηση, 2x2 όπως και πριν αλλά τώρα με δύο σειρές πεπερασμένων στοιχείων κατά πάχος του δοκιμίου, ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με solid elements να είναι πιο ακριβή. Τέλος, μέσω του **FEM**, **ELEMENT GENERATION** δόθηκε το κατάλληλο ύψος στην επιφάνεια με τα πεπερασμένα στοιχεία που είχε δημιουργηθεί και ο κύλινδρος ήρθε στην τελική του μορφή.



Εικόνα 9: Δοκίμιο `cylinder_solid` σε front και top view.



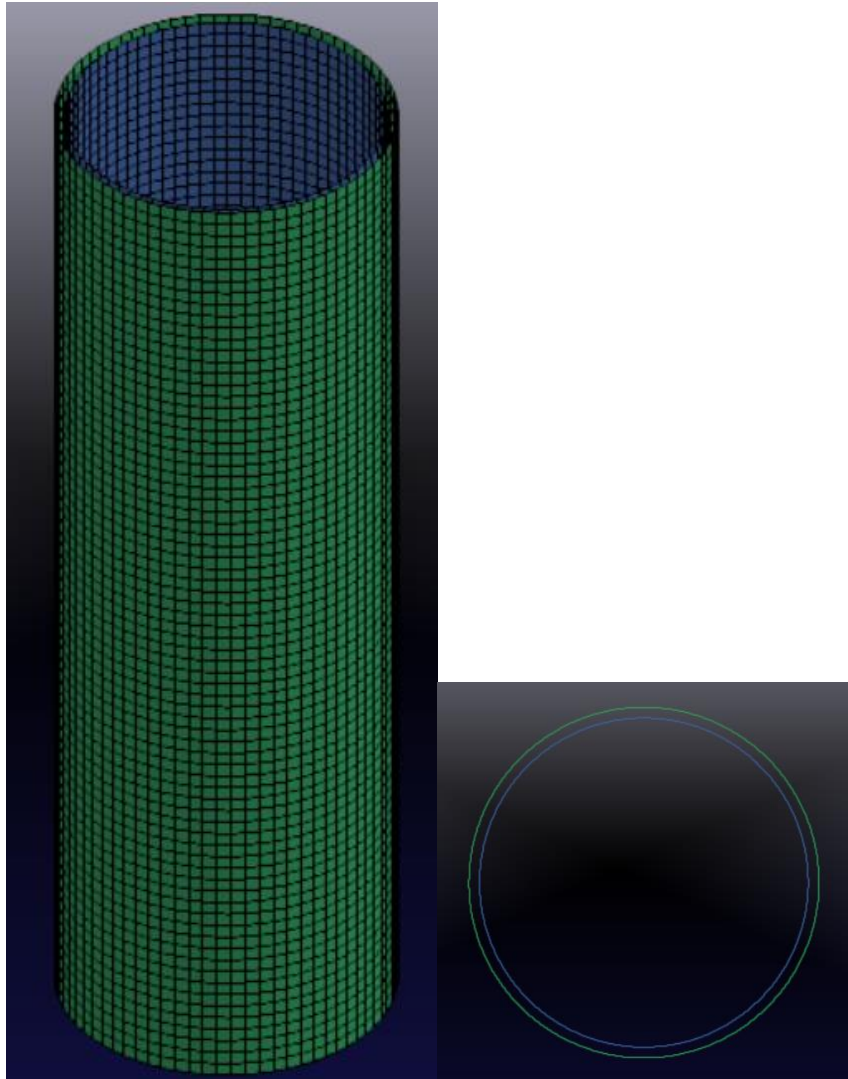
Εικόνα 10: Δοκίμιο *cylinder_solid* σε *top view* σε μεγένθυση όπου διακρίνεται καλύτερα η διακριτοποίηση με δύο περασμένα στοιχεία κατά πάχος.



Εικόνα 11: Ολοκληρωμένο σχήμα πλακών και δοκίμιου.

Διπλά δοκίμια ως cylinder_shell:

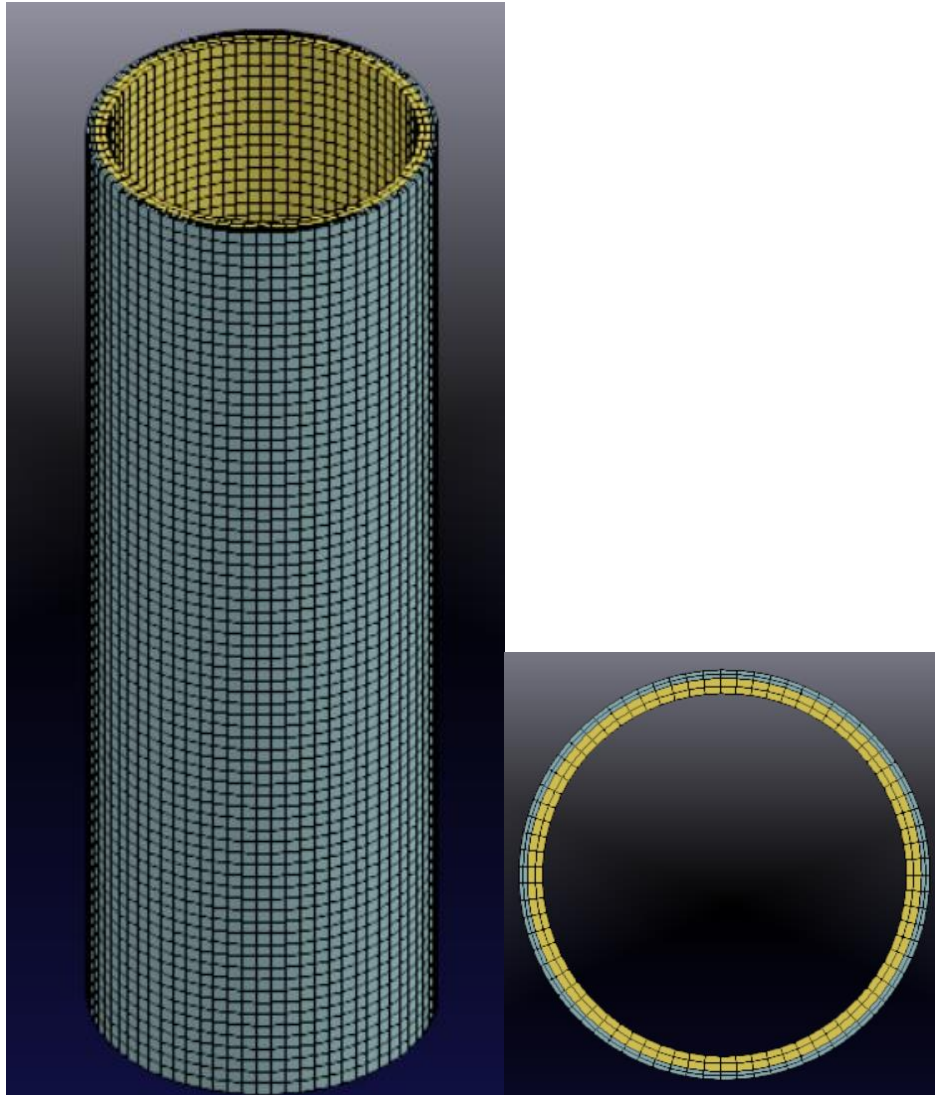
Για την κατασκευή των δοκιμίων αλουμινίου τα οποία περιβάλουν τα δοκίμια από πλαστικό ως cylinder_shell ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία σχεδιασμού όπως και στα μονά. Σχεδιάζεται πρώτα το πλαστικό δοκίμιο δίνοντας την μέση ακτίνα του και συνεχίζοντας με τον τρόπο που αναλύθηκε παραπάνω και έπειτα σχεδιάζεται και το δοκίμιο από αλουμίνιο με τον ίδιο τρόπο. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην διακριτοποίηση, η οποία είναι η ίδια με παραπάνω, 2x2, αλλά θα πρέπει να συμπίπτει απόλυτα στα δύο δοκίμια κατά το ύψος και την περίμετρο, ώστε να ολοκληρωθεί σωστά η προσομοίωση.



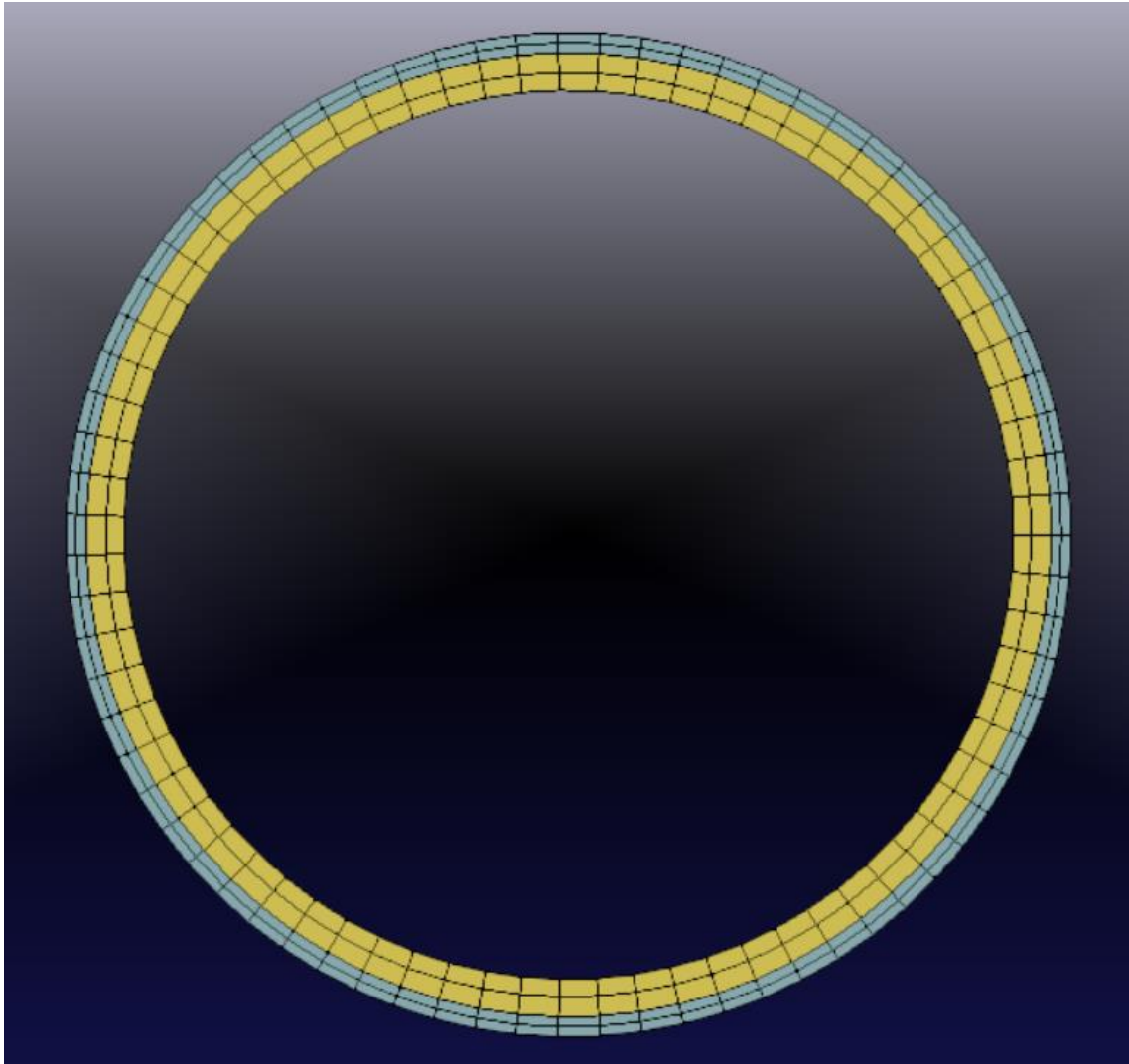
Εικόνα 12: Διπλό δοκίμιο ως cylinder_shell σε isometric και top view.

Διπλά δοκίμια ως cylinder_solid:

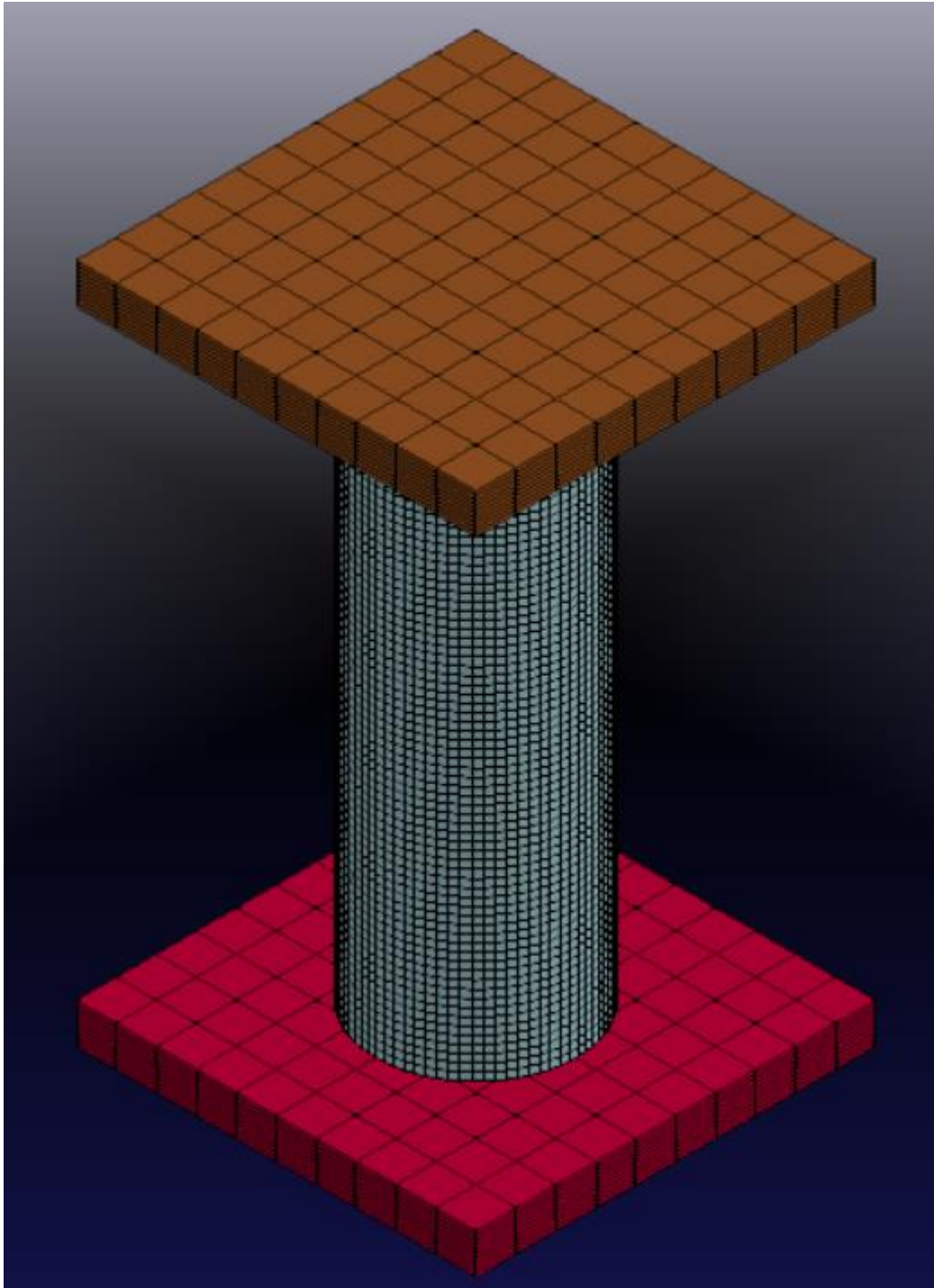
Αντίστοιχα και εδώ, για την κατασκευή των δοκιμών αλουμινίου τα οποία περιβάλλουν τα δοκίμια από πλαστικό ως cylinder_solid ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία σχεδιασμού όπως και στα μονά. Σχεδιάζεται πρώτα το πλαστικό δοκίμιο και έπειτα το δοκίμιο αλουμινίου με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω, με ιδιαίτερη προσοχή και εδώ ώστε η διακριτοποίηση των δύο δοκιμών να είναι 2x2, να υπάρχουν δύο πεπερασμένα στοιχεία κατά πάχος του κάθε κελύφους και να συμπίπτει απόλυτα κατά ύψος και κατά περίμετρο.



Εικόνα 13: Διπλό δοκίμιο ως cylinder_shell σε isometric και top view



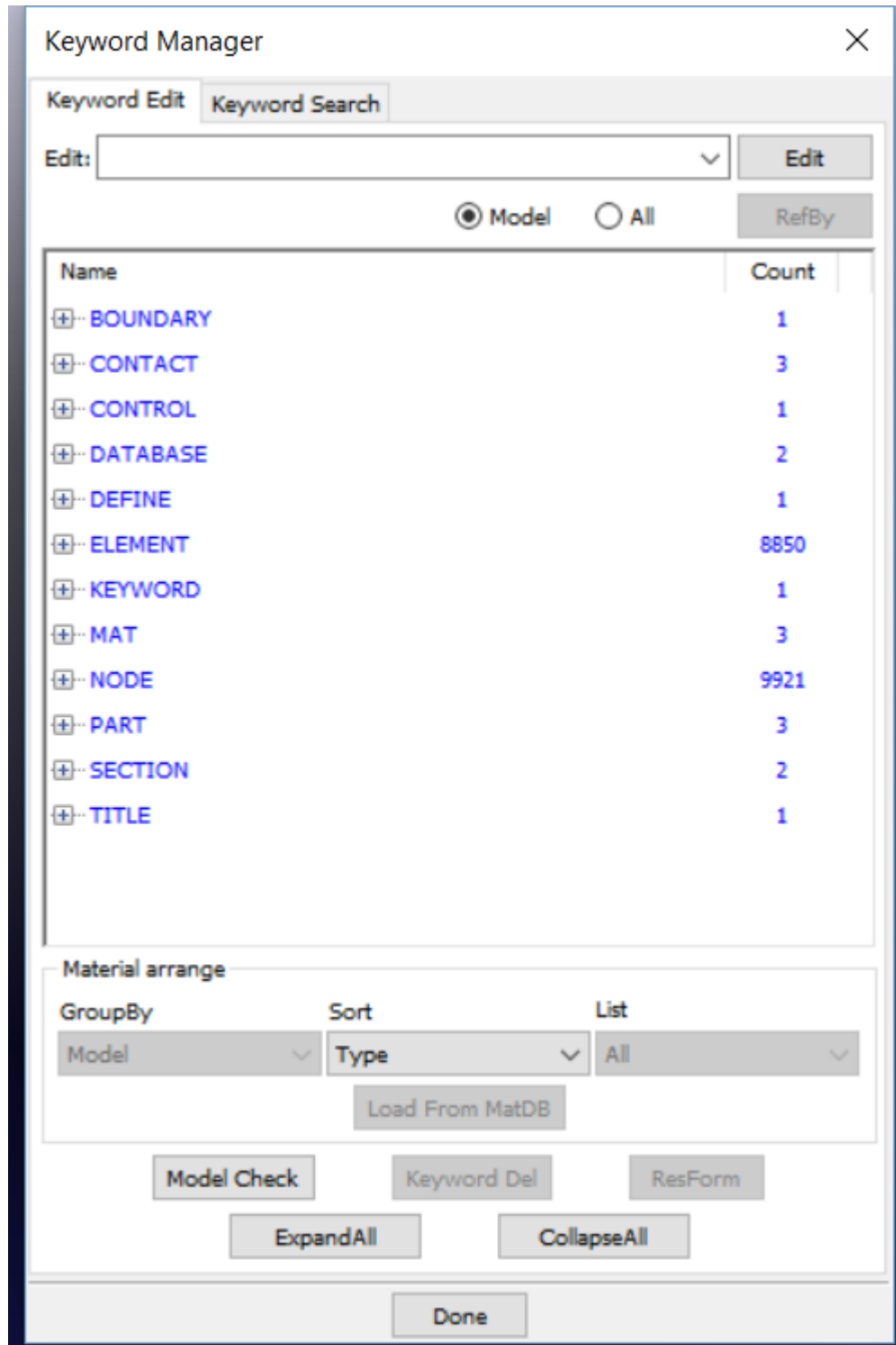
Εικόνα 14: Διπλό δοκίμιο *cylinder_solid* σε *top view* σε μεγένθυση όπου διακρίνεται καλύτερα η διακριτοποίηση με δύο περασμένα στοιχεία κατά πάχος κάθε κελύφους.



Εικόνα 15: Ολοκληρωμένο σχήμα πλακών και δοκίμιου.

2.2.2 Keyword manager

Μετά τον σχεδιασμό της γεωμετρίας και της διακριτοποίησης των μοντέλων ο σχεδιασμός συνεχίζεται μέσω του **KEYWORD MANAGER**. Εκεί θα δηλώσουμε συνοριακές συνθήκες, ακριβώς τα υλικά και τις κινήσεις που γίνονται, χρόνο τερματισμού κλπ.



Εικόνα 16: Το menu του keyword manager και οι εντολές που έχουν χρησιμοποιηθεί.

Πιο αναλυτικά:

Απλά δοκίμια ως cylinder_shell:

Ξεκινώντας από την επιλογή **SECTION**, δημιουργούμε δύο sections, ένα solid για τις πλάκες με ELFORM=1 και ένα shell για το κέλυφος με ELFORM=2 και Tx ίσο με το πάχος του κάθε κελύφους που σχεδιάζουμε. Έπειτα στην επιλογή **MAT** επιλέγουμε για τις απαραμόρφωτες πλάκες την καρτέλα **RIGID_no.20** και αφήνουμε την πάνω πλάκα ελεύθερη να κινηθεί στον άξονα z. Για το παραμορφώσιμο υλικό επιλέγουμε την καρτέλα **PIECIEWISE_LINEAR_PLASTICITY_no.24** και συμπληρώνουμε τις τιμές του υλικού μας για πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας, λόγο Poisson και όριο διαρροής στα αντίστοιχα πεδία. Συνεχίζοντας στην επιλογή **PART**, αντιστοιχούμε το κάθε γεωμετρικό σχήμα με το υλικό και το section του.

Τώρα, θα πρέπει να ορίσουμε τις επαφές που δημιουργούνται μεταξύ των σωμάτων. Αυτές είναι δύο ειδών, αρχικά πρέπει να οριστεί η επαφή του κελύφους με τον εαυτό του, έτσι ώστε στην κατάρρευση το πρόγραμμα να πετυχαίνει καλύτερη προσομοίωση των λοβών, και έπειτα η επαφή του κυλίνδρου με την πλάκα στερέωσης και με την πλάκα συμπίεσης. Για την επαφή του κελύφους με τον εαυτό του επιλέγουμε την καρτέλα **AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE** στην οποία ορίζουμε τον κύλινδρο ως slave part και συμπληρώνουμε τους συντελεστές στατικής και δυναμικής τριβής. Για τις επαφές του κυλίνδρου με τις πλάκες επιλέγουμε την καρτέλα **NODES_TO_SURFACE** όπου ουσιαστικά δηλώνουμε πως η επιφάνεια της πλάκας αλληλεπιδρά με τους κόμβους της αντίστοιχης πλευράς του κυλίνδρου. Μέσα στην καρτέλα επιλέγουμε τον κύλινδρο ως slave part και την αντίστοιχη πλάκα ως master part και συμπληρώνουμε τους συντελεστές στατικής και δυναμικής τριβής.

Τέλος, μας μένει να ορίσουμε την ταχύτητα κίνησης της πλάκας κατά την συμπίεση και να ορίσουμε τον χρόνο τερματισμού. Μέσω της καρτέλας **CONTROL, TERMINATION** ορίζουμε τον χρόνο τερματισμού ως 100 msec. Από την καρτέλα **DEFINE_CURVE** ορίζουμε την ταχύτητα σταθερή και ίση με -1 έτσι ώστε στα 100 msec να έχουμε συμπιέσει το δοκίμιο μέχρι τα 100 mm όπως έγινε και στο πείραμα. Από την καρτέλα **BOUNDARY_PRESRIBED_MOTION_RIGID** αναθέτουμε στην πάνω πλάκα την αντίστοιχη ταχύτητα και ορίζουμε ως άξονα κίνησης τον z. Τελειώνοντας, από την καρτέλα **DATABASE** ορίζουμε το **BINARY_D3PLOT** ίσο με 1 ώστε η προσομοίωση να μας δίνει τιμές για κάθε 1 msec και το **RCFORC** ίσο με 0.1 ώστε η γραφική παράσταση φορτίου- χρόνου να έχει τις αντίστοιχες τιμές.

Απλά δοκίμια ως cylinder_solid:

Για την προσομοίωση των δοκιμίων ως solid δεν αλλάζουν πολλά. Όλα ορίζονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω με εξαίρεση τα sections. Εδώ δεν υπάρχει πλέον **SHELL SECTION**, αλλά ορίζουμε δύο διαφορετικά **SOLID SECTIONS**. Το πρώτο αντιστοιχεί στις πλάκες όπως παραπάνω με ELFORM=1. Το δεύτερο θα αντιστοιχεί πλέον στο solid δοκίμιο προς παραμόρφωση και έτσι ορίζουμε το ELFORM=2.

Διπλά δοκίμια ως cylinder_shell:

Για την προσομοίωση των διπλών δοκιμίων με shell elements αρχικά πρέπει να ορίσουμε ένα **SOLID SECTION** για τις πλάκες όπως και πριν και δύο **SHELL SECTIONS**, ένα για το κέλυφος του πλαστικού δοκιμίου και ένα για το κέλυφος του αλουμινένιου, με τα αντίστοιχα πάχη στο καθένα. Στην καρτέλα **MAT** ορίζουμε ως **PIECIEWISE_LINEAR_PLASTICITY_no.24** τα δύο υλικά, Ertalon και αλουμίνιο, και δηλώνουμε τις ιδιότητές τους με τον τρόπο που είχε αναφερθεί παραπάνω. Αφού στην ενότητα **PART** γίνει η αντιστοιχία της κάθε γεωμετρίας με το κατάλληλο section και υλικό το μόνο που πρέπει να αλλάξουμε σε σχέση με πριν είναι οι επαφές.

Εδώ οι επαφές που υπάρχουν δεν είναι μόνο του κάθε δοκιμίου με τον εαυτό του και με τις πλάκες που αλληλεπιδρά, αλλά δημιουργείται και επαφή μεταξύ των δύο δοκιμίων κατά την κατάρρευση. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να προσομοιωθούν όλες αυτές οι επαφές και να κρατηθούν οι χρόνοι προσομοίωσης χαμηλά ήταν με το να ορίσουμε μέσω της ενότητας **SET, PART_LIST** τα δύο κελύφη ως ένα σώμα. Έπειτα, στην ενότητα **CONTACT** ορίζουμε στην καρτέλα **AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE** το set part ως slave part και δηλώνουμε τους συντελεστές τριβής. Τέλος, στην καρτέλα **NODES_TO_SURFACE** ορίζουμε ως slave part το set part και ως master part την κάθε πλάκα και επίσης δηλώνουμε συντελεστές τριβής.

Διπλά δοκίμια ως cylinder_solid:

Για την προσομοίωση των διπλών δοκιμίων με solid elements ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία με παραπάνω, με την μόνη διαφορά στην ενότητα **SECTION**, όπου δηλώνονται δύο **SOLID SECTION**, αφού πλέον όλα τα σώματα, και οι πλάκες και τα κελύφη, έχουν σχεδιαστεί με αρχιτεκτονική solid elements.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Συγκριτική παρουσίαση υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης που περιγράφηκε και θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα πειραματικά. Συγκεκριμένα, θα παρουσιασθούν στιγμιότυπα της κατάρρευσης σε αντιπαραβολή με τα πειραματικά, συγκριτικά διαγράμματα των υπολογιστικών και πειραματικών καμπυλών, θα παρουσιασθούν συγκριτικά τα μεγέθη κατάρρευσης και θα υπολογισθούν οι διαφορές του μοντέλου με το πείραμα. Τέλος, θα γίνει μια προσπάθεια να ερμηνευθούν οι πιθανές αποκλίσεις των υπολογιστικών με τα πειραματικά αποτελέσματα.

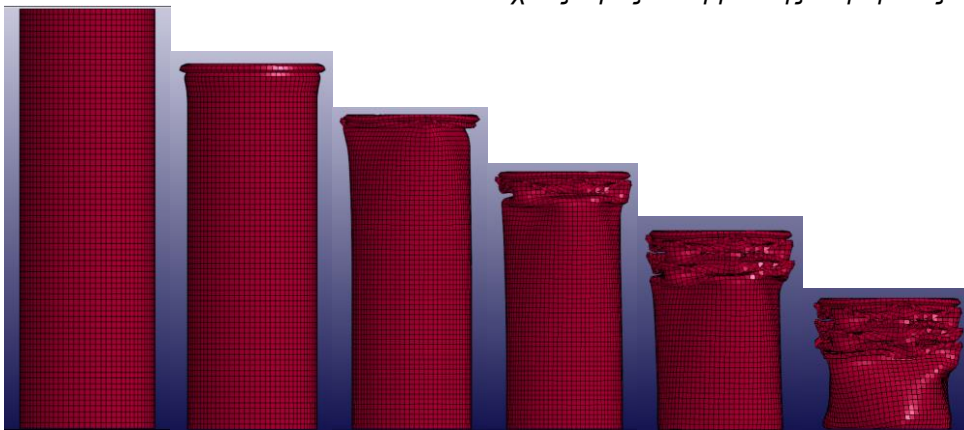
Τα μεγέθη που θα παρουσιασθούν είναι η συνολική ενέργεια παραμόρφωσης, το μέγιστο φορτίο θλίψης, το μέσο φορτίο θλίψης και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου.

- Η **Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης** ορίζεται ως $E_{abs} = \int P * d\delta = P_{\mu} \cdot \delta$, όπου P το φορτίο και δ η μετατόπιση του εμβόλου. Αντιστοιχεί με το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου- μετατόπισης. Στόχος είναι τα δοκίμια να απορροφούν όσο γίνεται περισσότερη ενέργεια.
- Το **Μέγιστο φορτίο θλίψης** συνήθως είναι το πρώτο τοπικό μέγιστο του φορτίου. Επιθυμητό είναι να μην υπάρχουν μεγάλα αρχικά φορτία, η μετάβαση στην πλαστική περιοχή των κατασκευών να γίνεται ομαλά και στη συνέχεια το φορτίο να διατηρείται σε σχετικά σταθερά επίπεδα.
- Το **Μέσο Φορτίο Θλίψης** είναι η μέση τιμή του φορτίου θλίψης κατά την διάρκεια της κατάρρευσης.
- Ο **Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)** ορίζεται ως $CFE = \frac{P_m}{P_{max}}$. Είναι ο λόγος του μέσου φορτίου θλίψης προς το μέγιστο και είναι ιδιαίτερα σημαντικός γιατί αποτελεί ένδειξη του πόσο σταθερή είναι η καμπύλη του φορτίου. Ιδανική τιμή του δείκτη είναι η μονάδα και ο στόχος είναι οι κατασκευές να προσεγγίζουν όσο γίνεται περισσότερο την ιδανική τιμή.

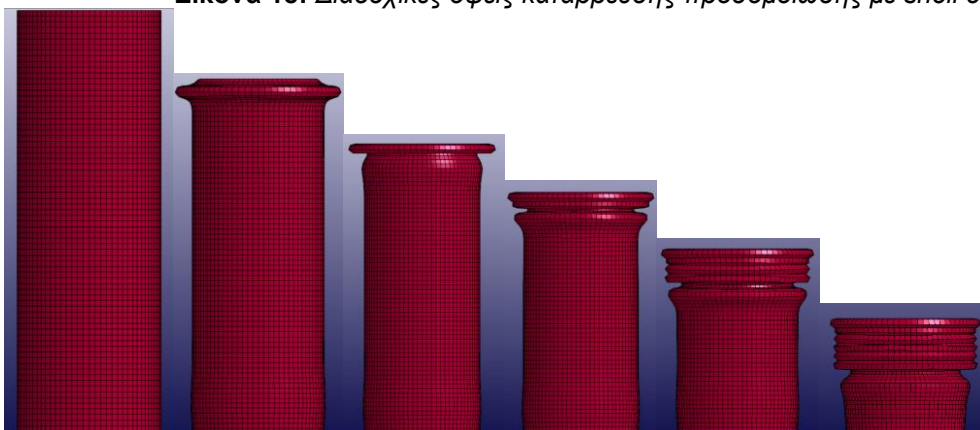
3.1.1 Δοκίμιο A1:50X48 κατασκευασμένο από αλουμίνιο.



Εικόνα 17: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης πειράματος.



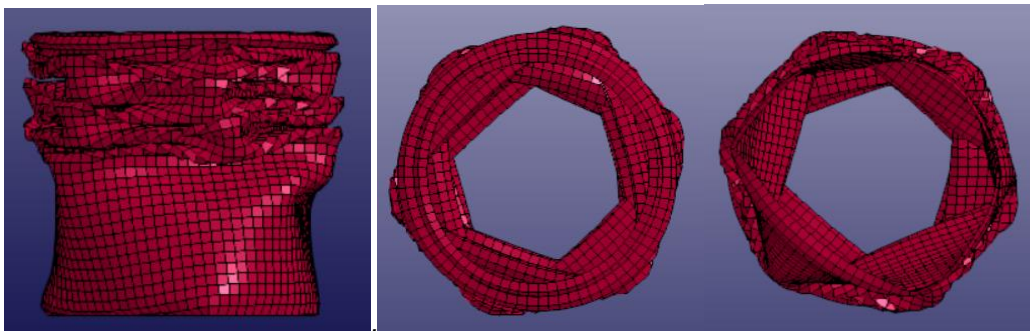
Εικόνα 18: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements.



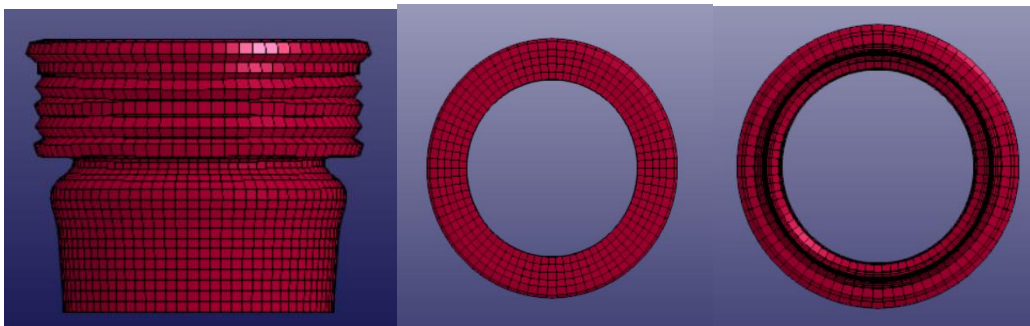
Εικόνα 19: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements.



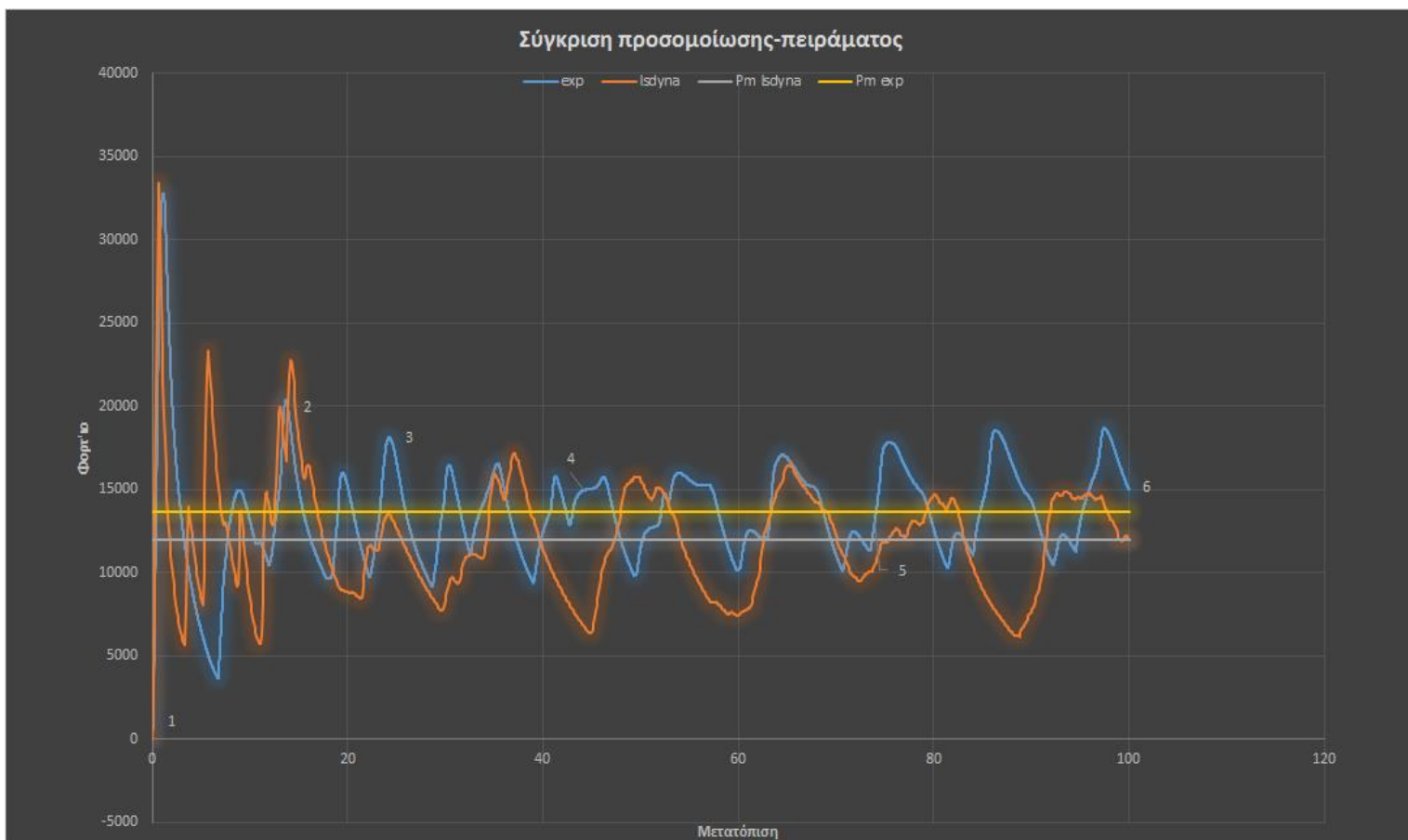
Εικόνα 20: Τελικές όψεις κατάρρευσης πειράματος(πρόσωση, κάτοψη και άνοψη).



Εικόνα 21: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements(πρόσωση, κάτοψη και άνοψη).

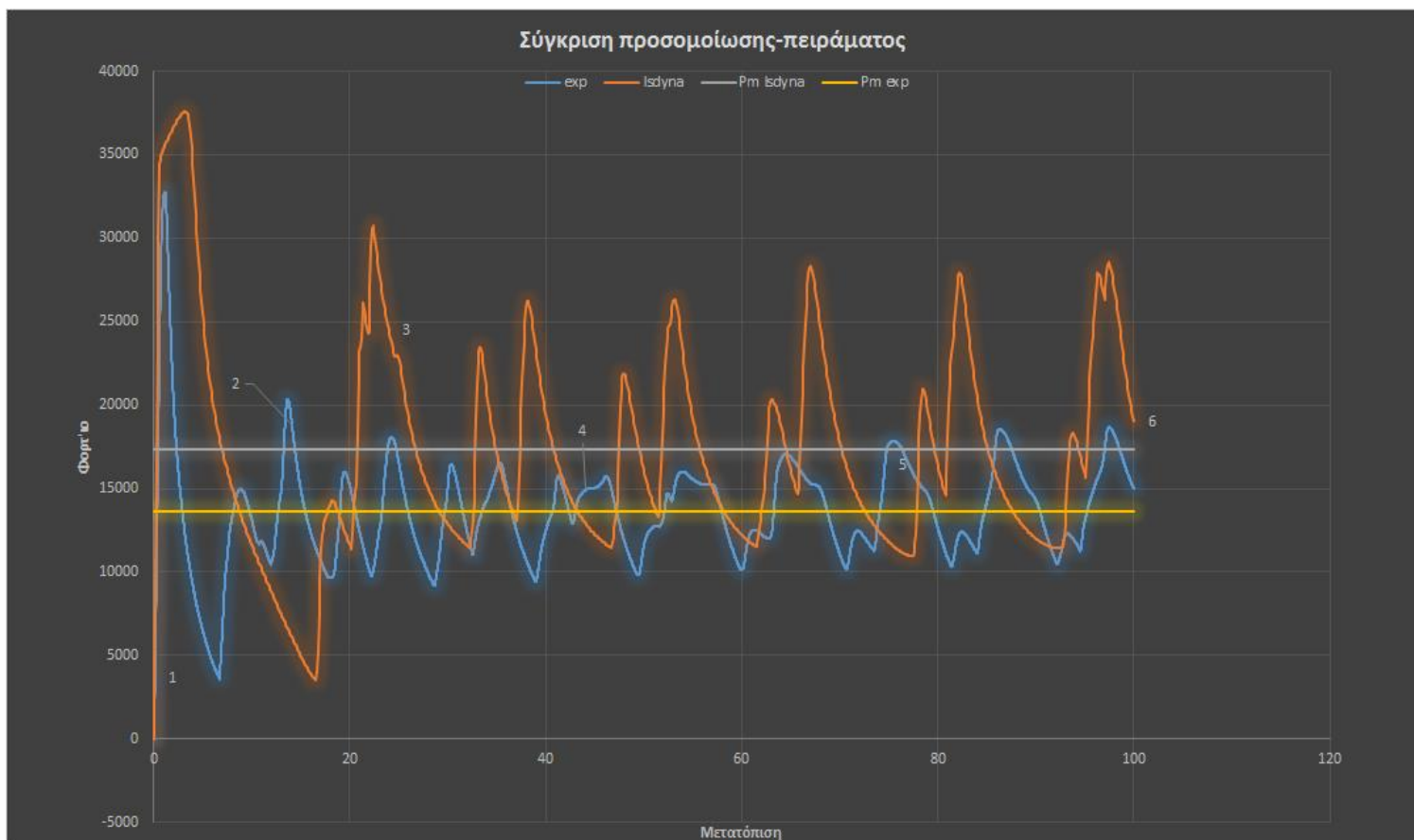


Εικόνα 22: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements(πρόσωση, κάτοψη και άνοψη).



Εικόνα 23: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με shell elements.

Δοκίμιο A1	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	1,366 kJ	13,66 kN	32,76 kN	0,42
Προσομοίωση με shell elements.	1,1948 kJ	11,948 kN	33.368 kN	0,35
Διαφορά(%)	12,5%	12,5%	1,85%	16,66 %



Εικόνα 24: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με *solid elements*.

Δοκίμιο A1	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	1,366 kJ	13,66 kN	32,76 kN	0,42
Προσομοίωση με solid elements.	1,7383 k J	17,383 kN	37,580 kN	0.46
Διαφορά(%)	27,25%	27,25%	14,7 %	9,5 %

Συμπεράσματα

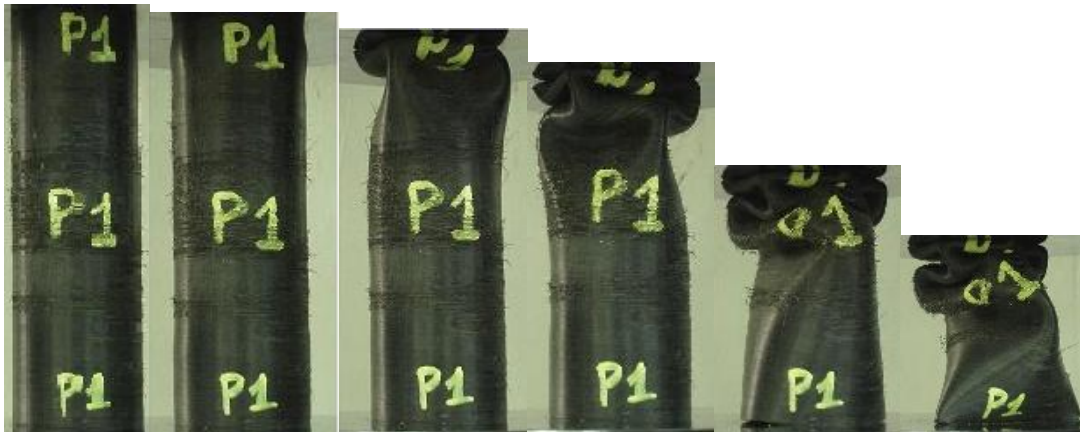
Το δοκίμιο A1 κατά την πειραματική διαδικασία παρουσίασε εκτατό (αξονοσυμμετρικό) τρόπο κατάρρευσης. Δημιουργήθηκαν δέκα λοβοί, ενώ ο τελευταίος δεν πρόλαβε να ολοκληρωθεί. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κάθε τοπικό ακρότατο της καμπύλης αντιστοιχεί στον σχηματισμό μιας πλαστικής άρθρωσης και κάθε λοβός αποτελείται από τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις. Έτσι, για την ολοκλήρωση ενός λοβού στο διάγραμμα αντιστοιχούν τέσσερα τοπικά ακρότατα, από τα οποία το πρώτο ανήκει και στον προηγούμενο λοβό. Για την δημιουργία του πρώτου λοβού απαιτείται το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης, αφού το υλικό είναι ακόμα στην ελαστική περιοχή, ενώ για την δημιουργία των υπολοίπων το φορτίο που απαιτείται είναι μικρότερο, αφού το υλικό είναι ήδη τραυματισμένο.

Κατά την προσομοίωση της διαδικασίας με shell elements δημιουργούνται στο δοκίμιο επτά λοβοί. Στην δημιουργία του πρώτου λοβού ο τρόπος κατάρρευσης που ακολουθείται είναι αξονοσυμμετρικός, ενώ στην δημιουργία των υπολοίπων λοβών αλλάζει σε μη-αξονοσυμμετρικό. Η διαφορά του μέγιστου φορτίου θλίψης είναι πολύ μικρή με το πραγματικό, όμως τα μέσα φορτία φαίνεται ότι διαφέρουν πιο έντονα. Οι αποκλίσεις που υπάρχουν δεν μας επιτρέπουν να πούμε ότι η προσομοίωση του πειράματος είναι εντελώς ακριβής, αλλά είναι εντός αποδεκτών πλαισίων.

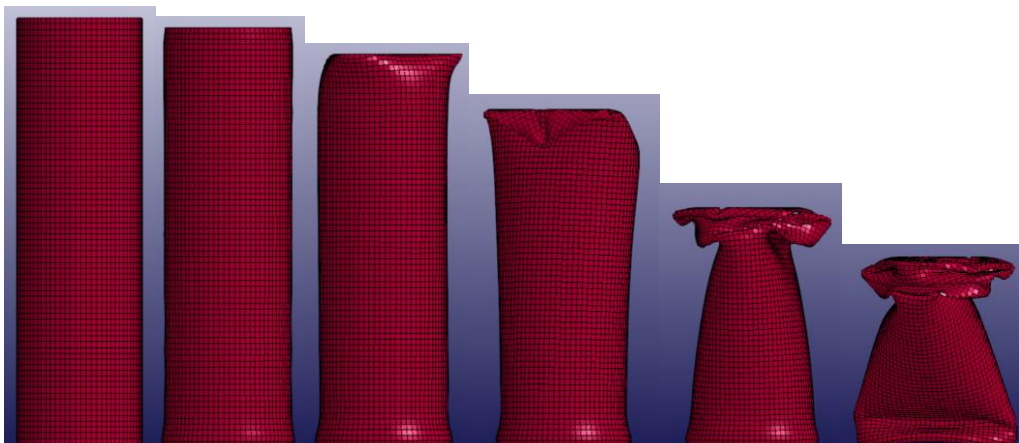
Κατά την προσομοίωση της διαδικασίας με solid elements δημιουργούνται έξι λοβοί με αξονοσυμμετρικό τρόπο. Φαίνεται πως με αυτό τον τρόπο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της γεωμετρίας κατάρρευσης είναι πολύ καλύτερα από πριν. Η διαφορά με το πείραμα είναι πως εδώ δημιουργούνται μόνο έξι λοβοί αντί για δέκα. Αντίθετα, οι τιμές των φορτίων και της ενέργειας βλέπουμε πως απέχουν περισσότερο από τις πραγματικές, σε σχέση με τις τιμές που προέκυψαν κατά την προσομοίωση με shell elements. Θα μπορούσαμε να πούμε σε αυτή την περίπτωση πως η προσομοίωση είναι οριακά εντός αποδεκτών πλαισίων.

Συμπερασματικά, συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους μεταξύ τους, θα λέγαμε πως οι τιμές των φορτίων και της ενέργειας είναι πιο κοντά στις πραγματικές στην προσομοίωση με shell elements, ενώ η καλύτερη πιστότητα του τρόπου κατάρρευσης πετυχαίνεται με τα solid elements σε αυτό το δοκίμιο.

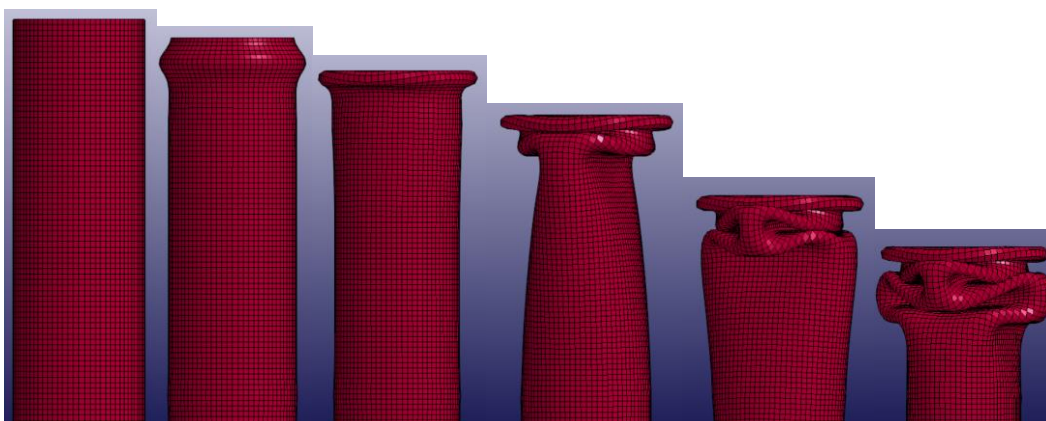
3.1.2 Δοκίμιο E1:48X44 κατασκευασμένο από πλαστικό.



Εικόνα 25: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης πειράματος.



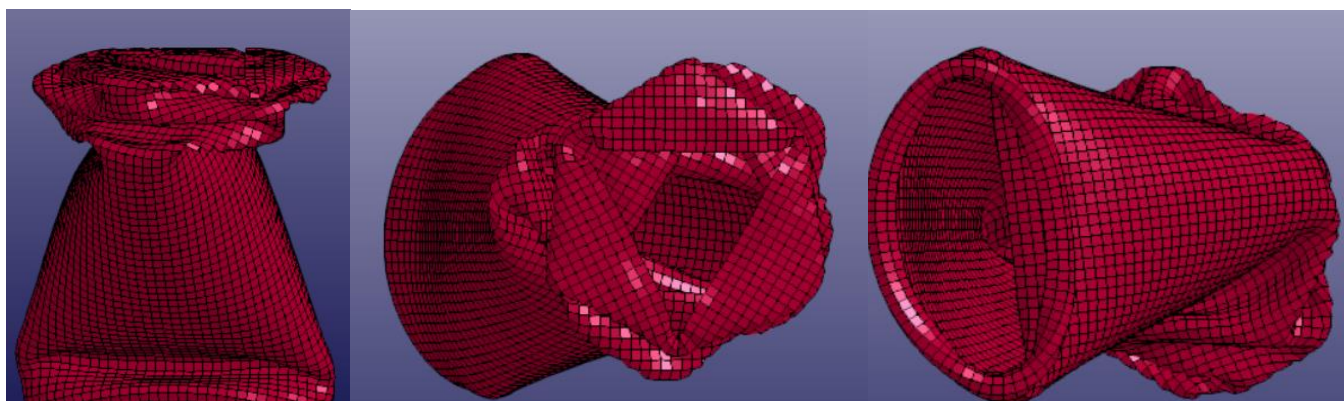
Εικόνα 26: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements



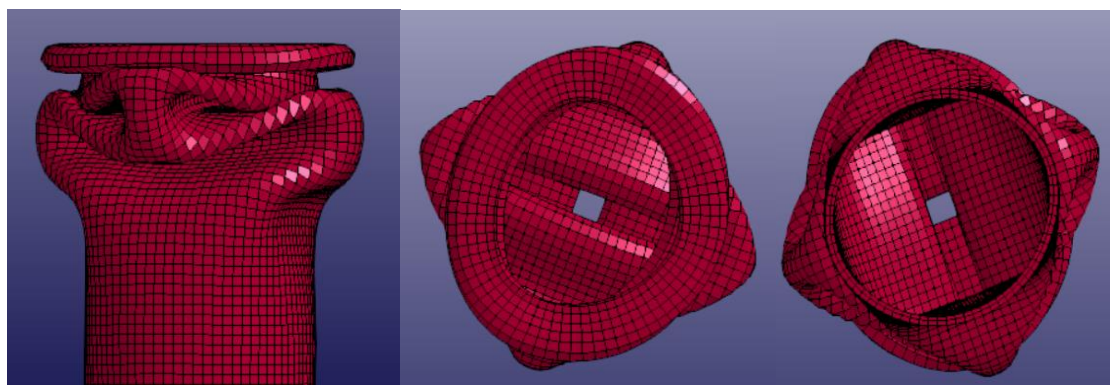
Εικόνα 27: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements.



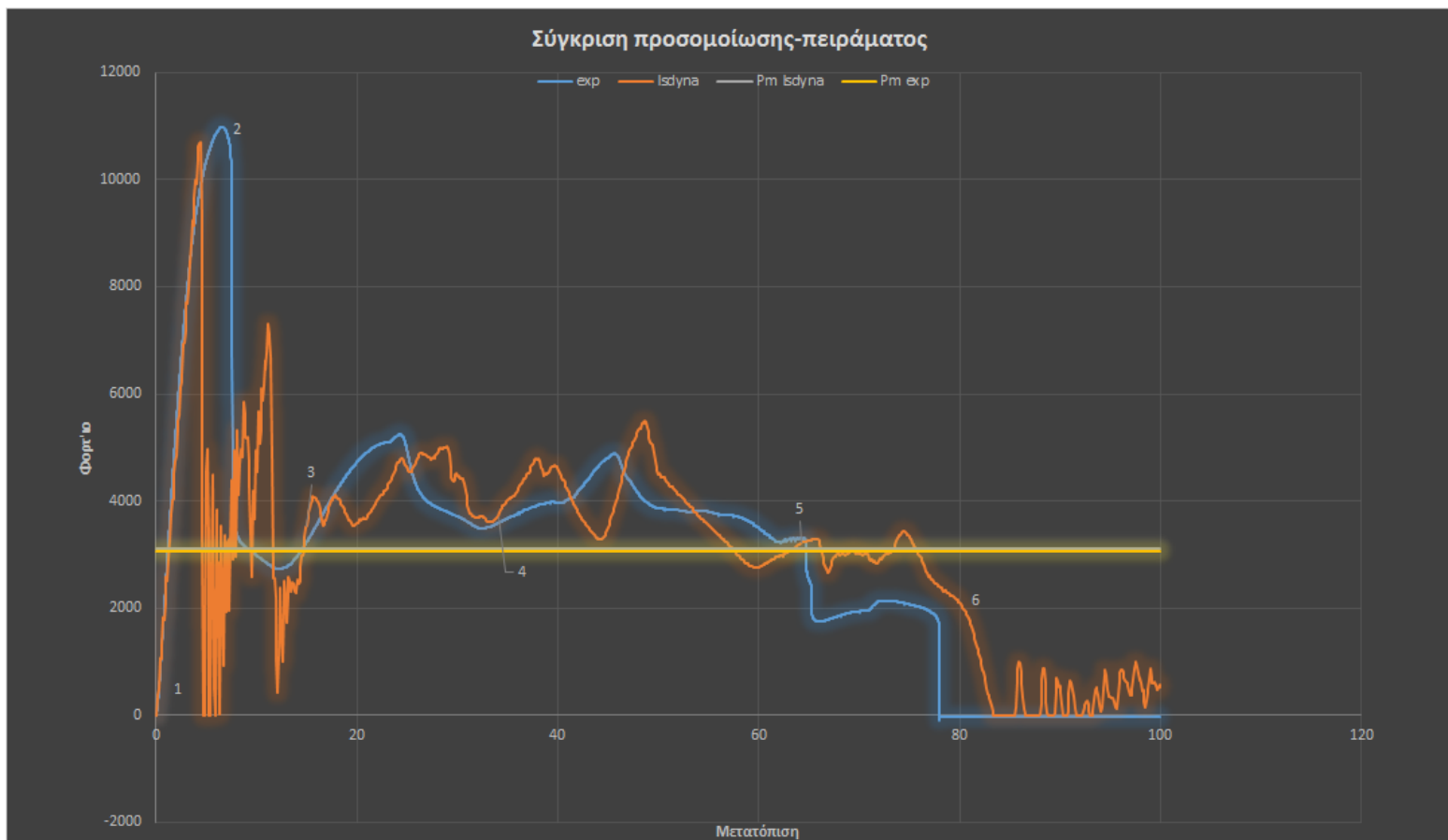
Εικόνα 28: Τελικές όψεις κατάρρευσης πειράματος(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη).



Εικόνα 29: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη).



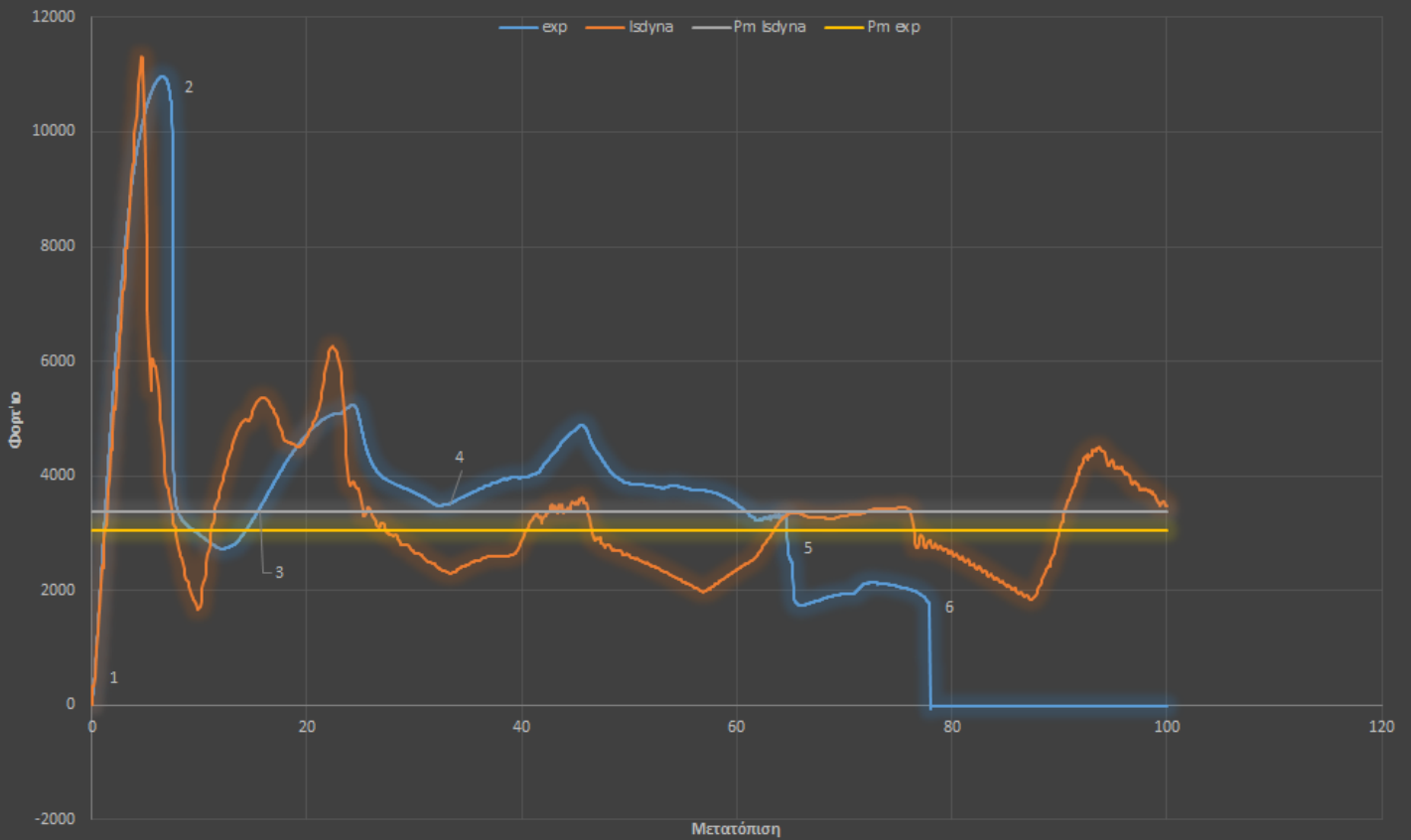
Εικόνα 30: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη).



Εικόνα 31: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με shell elements.

Δοκίμιο E1	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	0,3136 kJ	3,92 kN	10,97 kN	0,36
Προσομοίωση με shell elements.	0,249 kJ	3,122 kN	10,686 kN	0,29
Διαφορά(%)	20,6 %	0,44%	2,6%	19,4%

Σύγκριση προσομοίωσης-πειράματος



Εικόνα 32: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με solid elements.

Δοκίμιο E1	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	0,3136 kJ	3,92 kN	10,97 kN	0,36
Προσομοίωση με solid elements.	0,3375 k J	3,375 kN	11,306 kN	0,29
Διαφορά(%)	7,62 %	13,9%	3,06%	19,4%

Συμπεράσματα

Κατά την πειραματική διαδικασία ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου χαρακτηρίζεται ως μη εκτατός (μη αξονοσυμμετρικός). Οι λοβοί που σχηματίζονται είναι τρεις της μορφής 3D diamond. Μετά το σημείο δημιουργίας του τρίτου λοβού μορφοποιείται η κάτω διατομή από κυκλική σε ελλειψοειδή και ακολουθεί λυγισμός, με συνέπεια την απότομη μείωση του φορτίου θλίψης. Εξαιτίας του λυγισμού, το καμπτικό φορτίο αναγκάζει το δοκίμιο να πεταχτεί έξω από την μηχανή στην μετατόπιση των 78 mm και να σταματήσει την δοκιμή. Στις προσομοιώσεις, στην προσπάθεια να επιτευχθεί το παραπάνω αποτέλεσμα, έγινε μια δοκιμή με shell elements και πολύ μικρούς συντελεστές τριβής, και μια δοκιμή με solid elements και κανονικούς συντελεστές τριβής.

Κατά την προσομοίωση με shell elements δημιουργούνται δύο μη εκτατοί λοβοί 3D diamond. Στη συνέχεια ακολουθεί λυγισμός και το δοκίμιο πέφτει έξω από την μηχανή, όπως έγινε και στην πραγματικότητα. Οι τιμές του μέσου και μέγιστου φορτίου θλίψης βλέπουμε πως είναι πάρα πολύ κοντά στις πειραματικές, αλλά υπάρχει μια μεγαλύτερη απόκλιση στην τιμή της ενέργειας και του δείκτη ομοιομορφίας. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης μπορεί να κριθεί αρκετά ικανοποιητικό, αφού επιτεύχθηκε ο μη εκτατός τρόπος κατάρρευσης, ο λυγισμός και το πέσιμο από την μηχανή, ενώ και οι τιμές των μεγεθών ήταν πολύ κοντά στις πειραματικές.

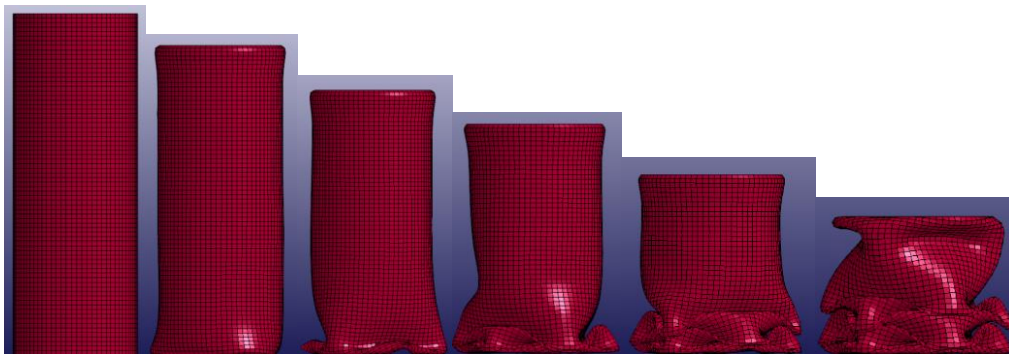
Κατά την προσομοίωση με solid elements δημιουργείται ένας εκτατός λοβός, ένας μη εκτατός και ακόμα ένας μη εκτατός ο οποίος δεν προλαβαίνει να ολοκληρωθεί. Εδώ δεν παρατηρείται λυγισμός ούτε πέσιμο και η προσομοίωση ολοκληρώνεται κανονικά. Για αυτό ευθύνονται οι συντελεστές τριβής που δεν μειώθηκαν όπως στην προσομοίωση με shell elements. Οι τιμές του μέγιστου και μέσου φορτίου έχουν μεγαλύτερη απόκλιση από πριν αλλά και πάλι βρίσκονται σε ικανοποιητικά επίπεδα, όπως και οι τιμές της ενέργειας παραμόρφωσης και του δείκτη ομοιομορφίας φορτίου. Τελικά, η προσομοίωση κρίνεται ικανοποιητική όσο αναφορά τις τιμές των μεγεθών αλλά όχι τόσο ικανοποιητική σχετικά με την κατάρρευση.

Συμπερασματικά, συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους μεταξύ τους, θα λέγαμε πως η προσομοίωση με shell elements κρίνεται πιο επιτυχημένη όσο αναφορά τις τιμές των μεγεθών αλλά και την επίτευξη της γεωμετρίας κατάρρευσης και των ακριβών συνθηκών του πειράματος.

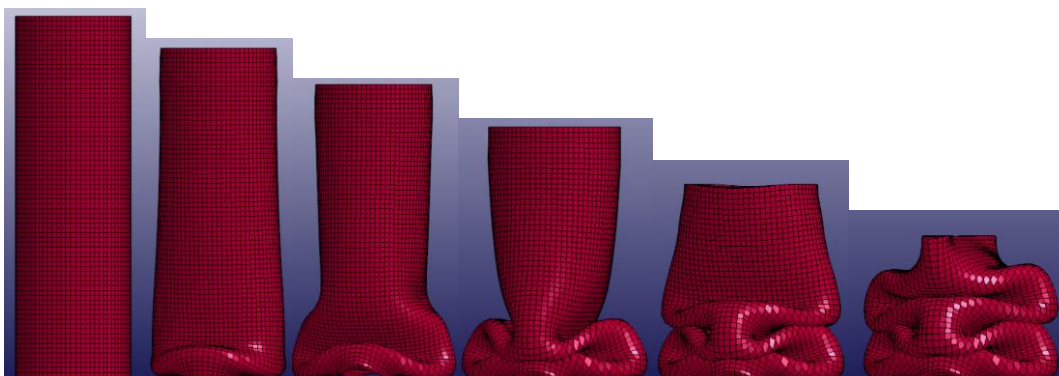
3.1.3 Δοκίμιο E2:48X42 κατασκευασμένο από πλαστικό.



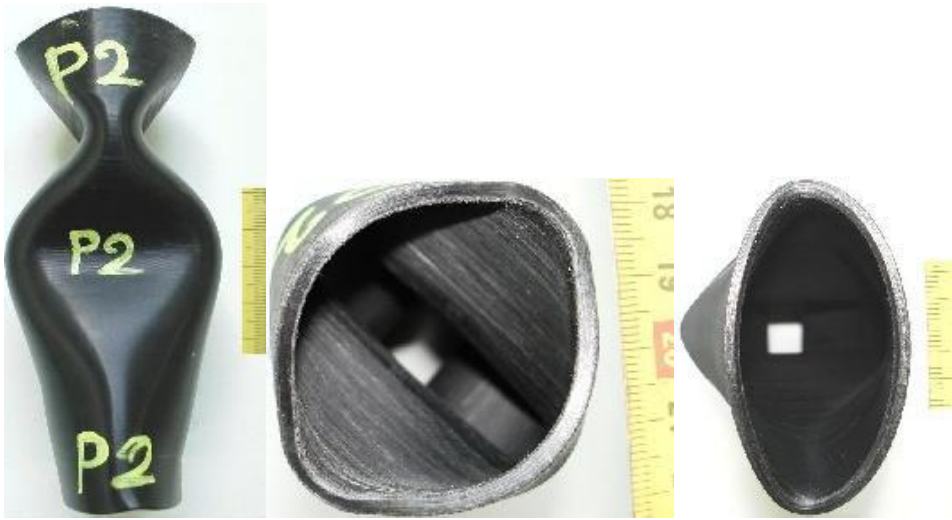
Εικόνα 33: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης πειράματος.



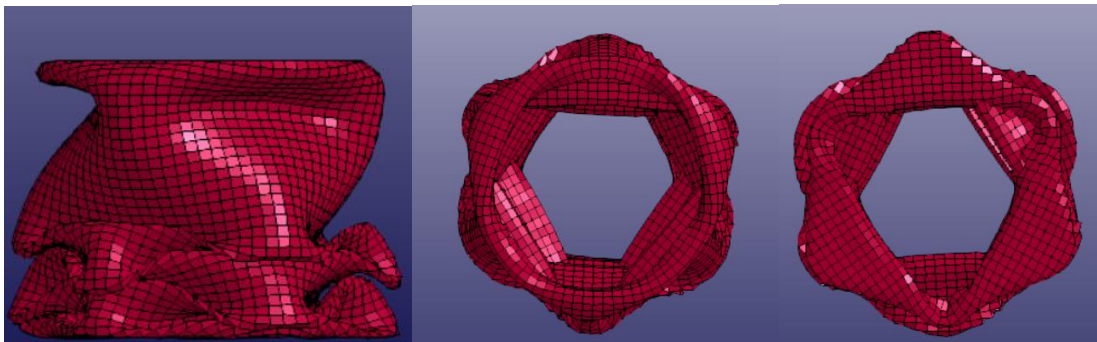
Εικόνα 34: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements.



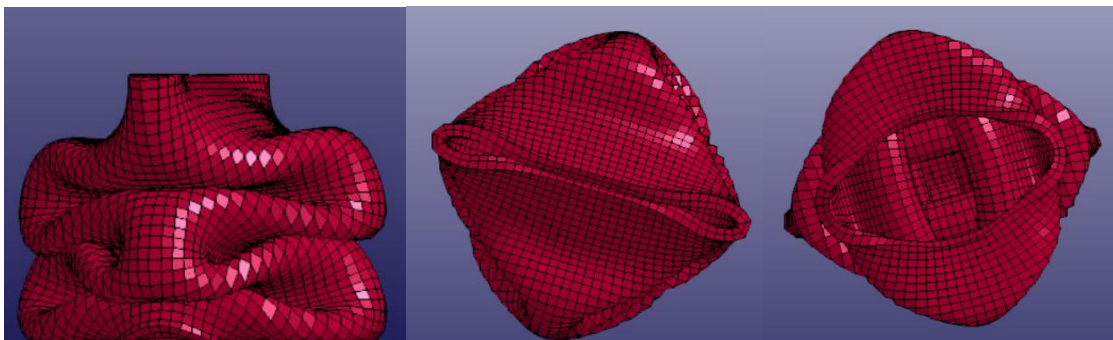
Εικόνα 35: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements.



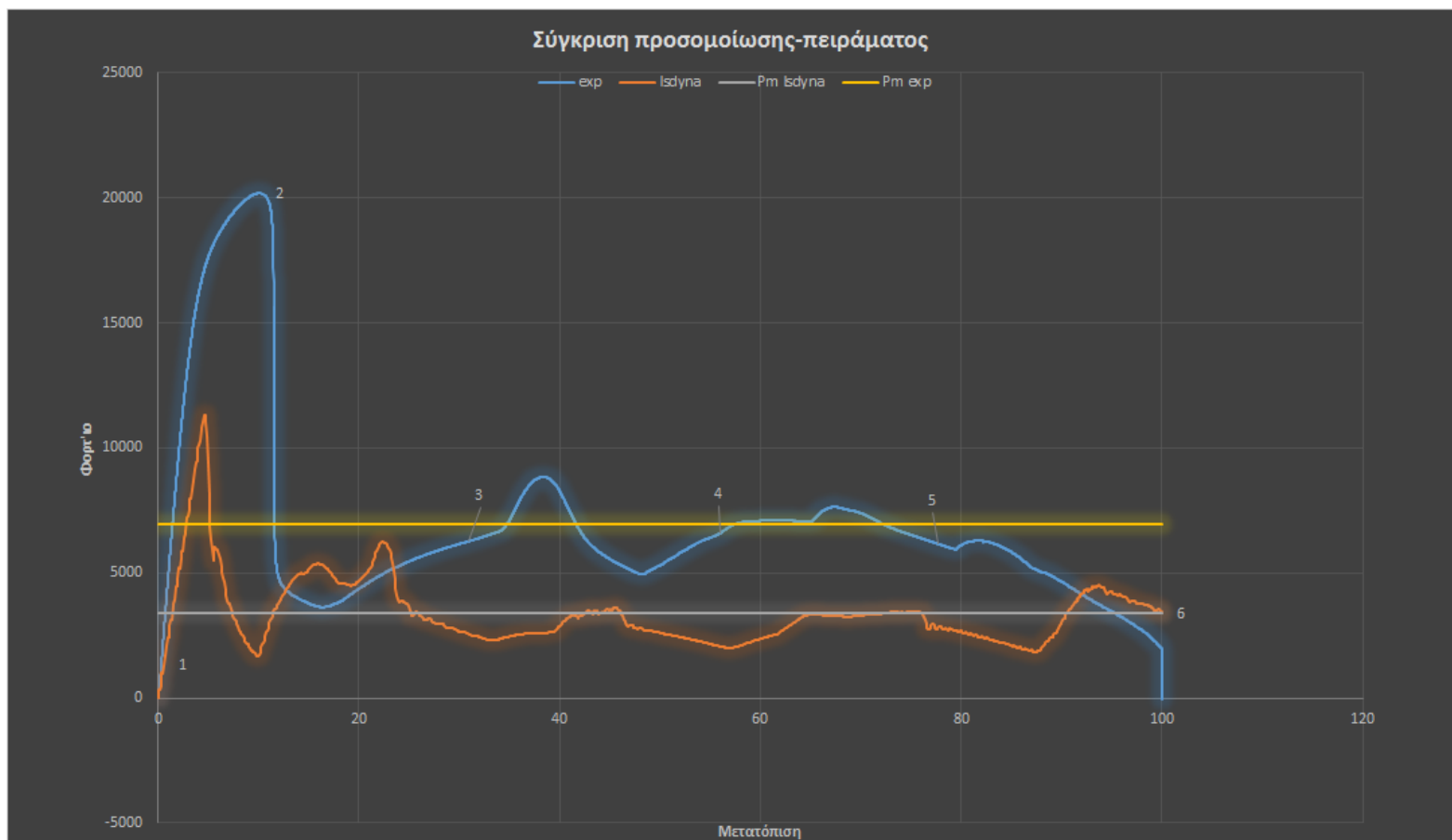
Εικόνα 36: Τελικές όψεις κατάρρευσης πειράματος(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη).



Εικόνα 37: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη).



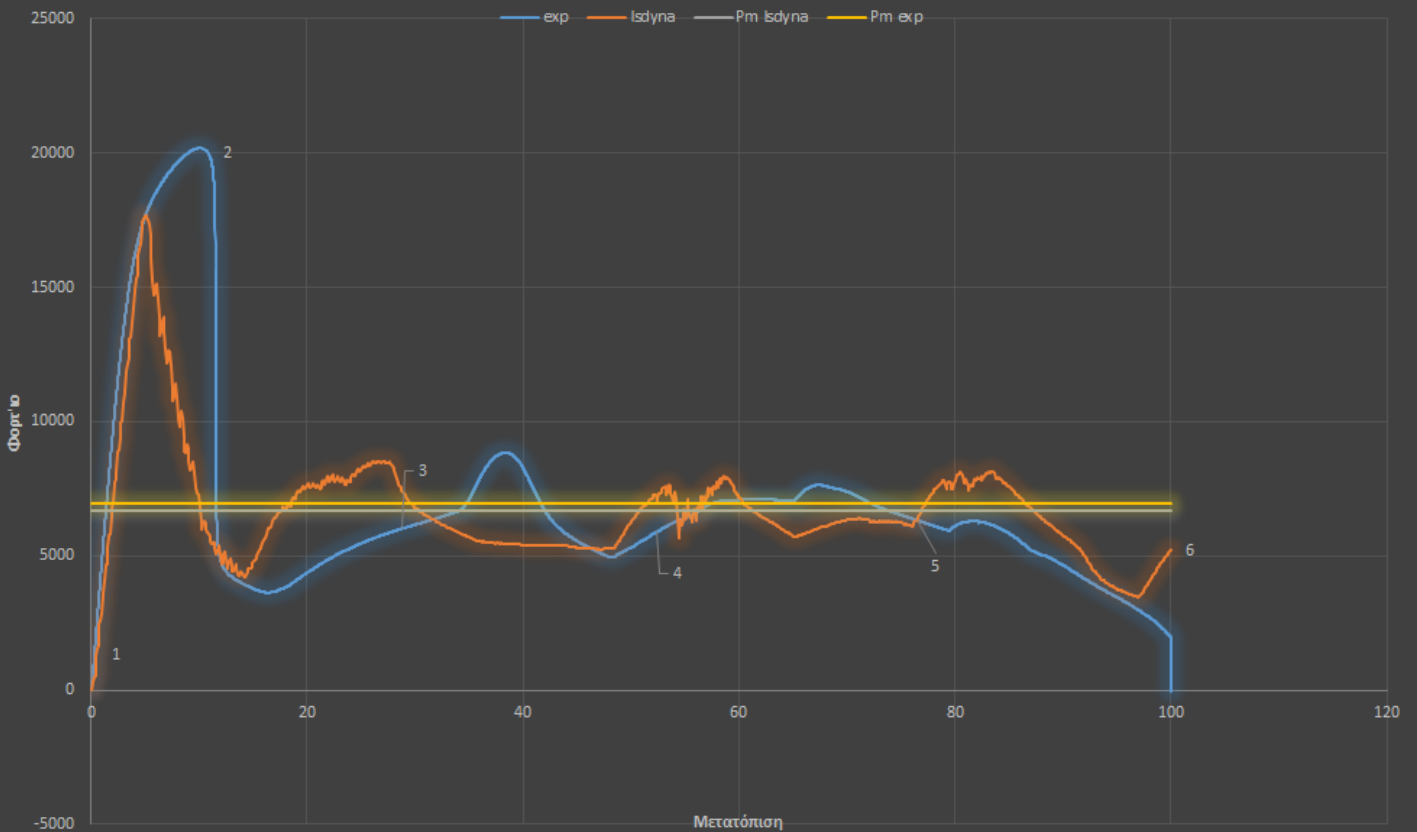
Εικόνα 38: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη).



Εικόνα 39: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με shell elements.

Δοκίμιο Ε2	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	0,694 kJ	6,94 kN	20,17 kN	0,34
Προσομοίωση με shell elements.	0,3375 kJ	3,375 kN	10,788 kN	0,31
Διαφορά(%)	51.36%	51,36%	46,51%	8.82%

Σύγκριση προσομοίωσης-πειράματος



Εικόνα 40: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με solid elements.

Δοκίμιο E2	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	0,694 kJ	6,94 kN	20,17 kN	0,34
Προσομοίωση με solid elements.	0,6680 kJ	6,680 kN	17,676 kN	0,37
Διαφορά(%)	3,74%	3,74%	12,36%	8,82%

Συμπεράσματα

Κατά την πειραματική διαδικασία ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου χαρακτηρίζεται ως μη εκτατός. Κατά την συμπίεση διαμορφώνονται τρεις μη εκτατοί λοβοί. Μετά την εμφάνιση του δεύτερου λοβού η διαμόρφωση επιβάλλεται στο κάτω μέρος του δοκιμίου με την δημιουργία του τρίτου λοβού και τη στένεψη της κάτω διατομής. Στη συνέχεια, λόγω της πολύ στενής κάτω διατομής, το φορτίο αναγκάζει το δοκίμιο να γλιστρήσει και να λυγίσει. Στις προσομοιώσεις, στην προσπάθεια να επιτευχθεί το παραπάνω αποτέλεσμα, έγιναν δοκιμές με πολύ μικρούς συντελεστές τριβής, αλλά δεν καταφέραμε την εξομοίωση του γλιστρήματος και του λυγισμού παρ' όλα αυτά.

Κατά την προσομοίωση με shell elements δημιουργούνται αρχικά τρεις μη εκτατοί λοβοί στο κάτω μέρος του δοκιμίου. Έπειτα, παρατηρείται μια διαμόρφωση στο πάνω μέρος του δοκιμίου αλλά δεν προλαβαίνει να σχηματιστεί άλλος λοβός, Επίσης, δεν παρατηρείται λυγισμός ή γλίστρημα. Τα φορτία της προσομοίωσης παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά με τα αντίστοιχα πειραματικά, περίπου 50%, όπως και η συνολική ενέργεια παραμόρφωσης. Μόνο η τιμή του δείκτη ομοιομορφίας φορτίου είναι πολύ κοντά στην πειραματική. Για αυτή την τόσο μεγάλη αστοχία στις τιμές μπορεί να ευθύνονται οι πολύ μικροί συντελεστές τριβής που χρησιμοποιήθηκαν στην προσπάθεια να εξομοιωθεί ο λυγισμός, αλλά και το ότι η προσομοίωση με shell elements χρησιμοποιείται συνήθως όταν έχουμε πολύ μικρά πάχη κελυφών. Εδώ, η μεγάλη τιμή του πάχους του δοκιμίου, επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την προσομοίωση. Τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι αυτή η προσομοίωση δεν μπορεί να κριθεί ικανοποιητική, αφού αν και επιτεύχθηκε σχετική ομοιότητα με τον τρόπο κατάρρευσης του πειράματος, οι τιμές των μεγεθών παρουσίασαν μεγάλες διαφορές.

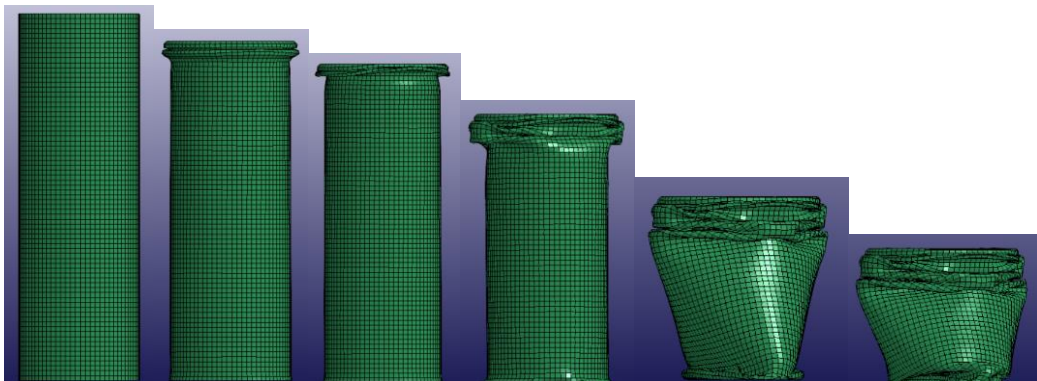
Κατά τη προσομοίωση με solid elements δημιουργούνται στο κάτω μέρος του δοκιμίου τρεις μη εκτατοί λοβοί. Μετά την εμφάνιση του τρίτου λοβού παρατηρείται στένεμα στο πάνω μέρος του δοκιμίου, αλλά όχι λυγισμός. Οι τιμές των φορτίων και της ενέργειας παραμόρφωσης είναι πολύ κοντά στις πειραματικές, με μια μικρή απόκλιση περίπου 3%. Ο δείκτης CFE επίσης είναι πολύ κοντά σε αυτόν του πειράματος. Εδώ, αυτός ο τρόπος προσομοίωσης φαίνεται ότι ήταν ο κατάλληλος για την προσομοίωση κατάρρευσης δοκιμίων με μεγάλο πάχος. Έτσι, η προσομοίωση κρίνεται πολύ ικανοποιητική, αφού και η γεωμετρία της πειραματικής κατάρρευσης επιτεύχθηκε, αλλά και οι τιμές των μεγεθών ήταν κοντά στις πειραματικές.

Συμπερασματικά, συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους μεταξύ τους, θα λέγαμε πως η προσομοίωση με solid elements κρίνεται πιο επιτυχημένη όσο αναφορά τις τιμές των μεγεθών αλλά και την επίτευξη της γεωμετρίας κατάρρευσης και των ακριβών συνθηκών του πειράματος.

3.1.4 Δοκίμιο A1E1:50X44 κατασκευασμένο από αλουμίνιο και επενδυμένο εσωτερικά με πλαστικό.



Εικόνα 41: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης πειράματος.



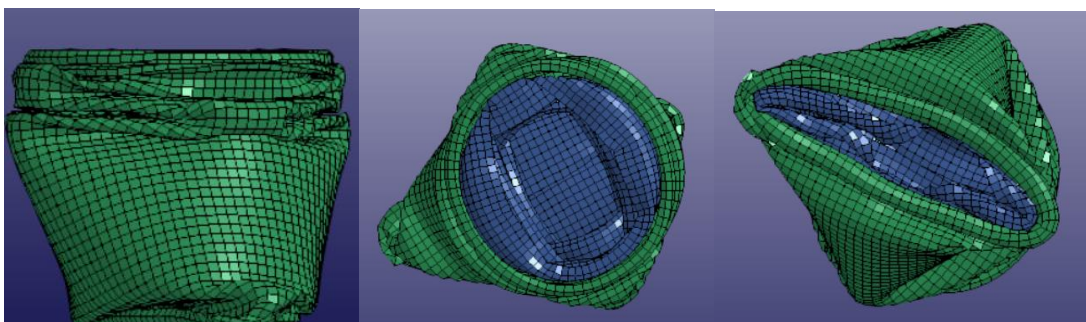
Εικόνα 42: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements.



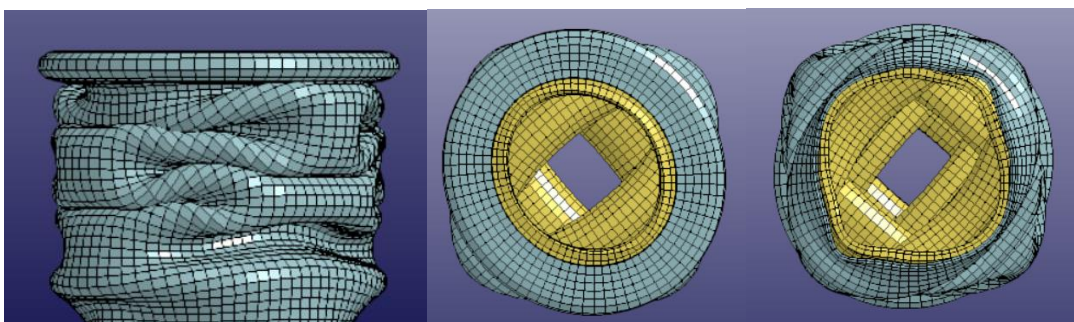
Εικόνα 43: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements.



Εικόνα 44: Τελικές όψεις κατάρρευσης πειράματος(πρόσψη, κάτοψη και άνοψη).

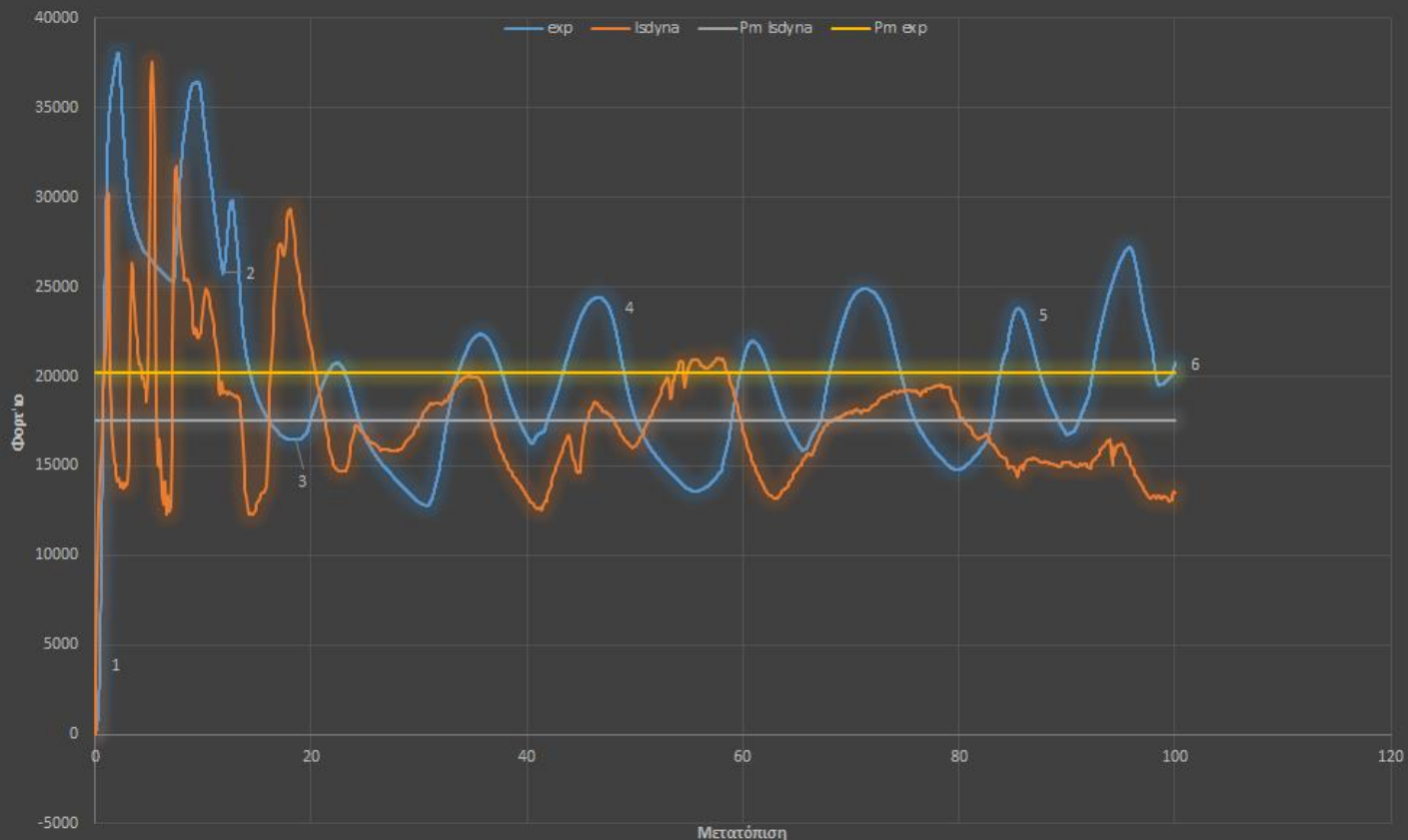


Εικόνα 45: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements(πρόσψη, κάτοψη και άνοψη).



Εικόνα 46: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements(πρόσψη, κάτοψη και άνοψη).

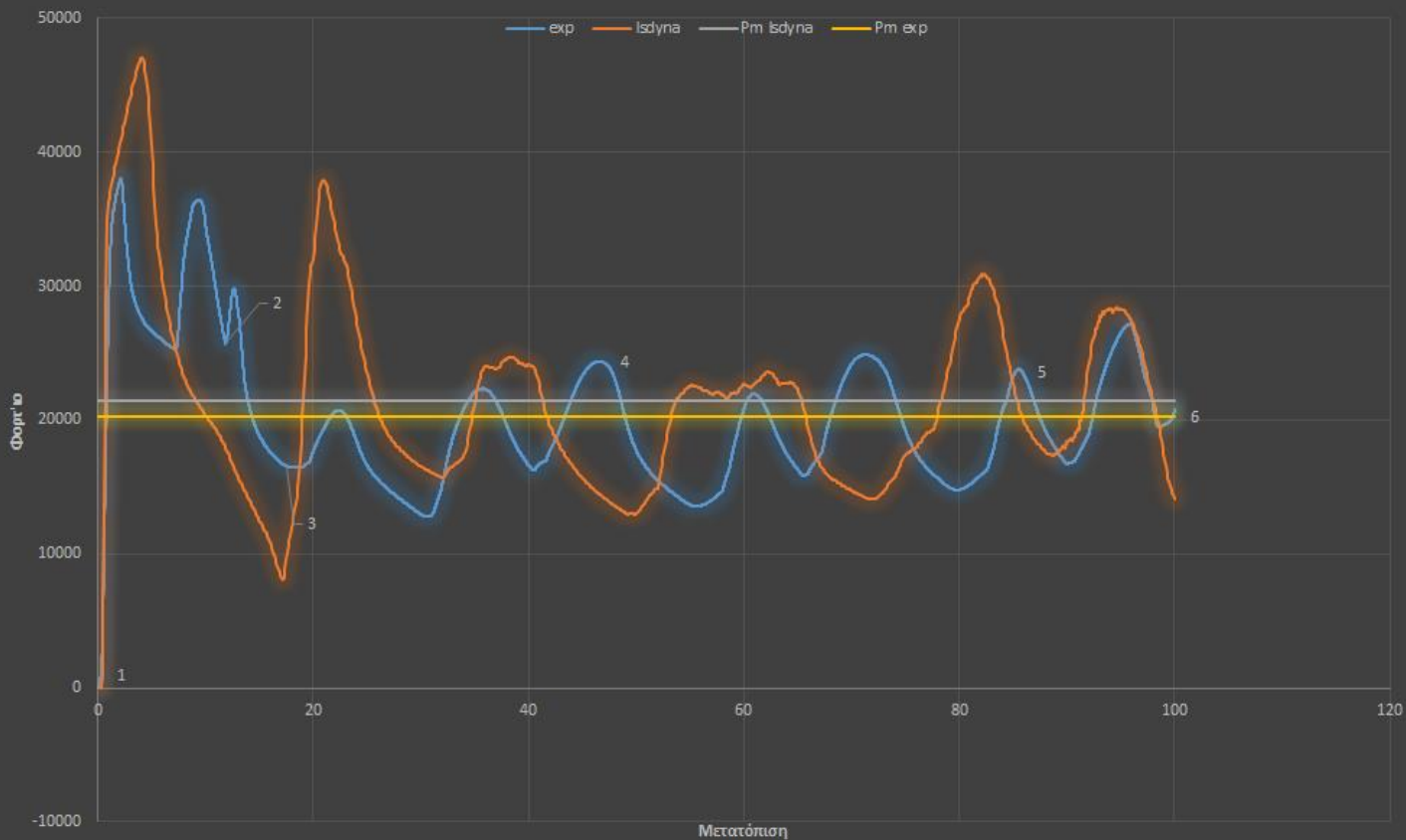
Σύγκριση προσομοίωσης-πειράματος



Εικόνα 47: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με shell elements

Δοκίμιο A1E1	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	2,023 kJ	20,23 kN	38,08 kN	0,53
Προσομοίωση με shell elements.	1,7562 kJ	17,562 kN	37,5 kN	0,46
Διαφορά(%)	13,18%	13,18%	1,52%	13,2%

Σύγκριση προσομοίωσης-πειράματος



Εικόνα 48: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με solid elements.

Δοκίμιο A1E1	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	2,023 kJ	20,23 kN	38,08 kN	0,53
Προσομοίωση με solid elements.	2,144 kJ	21,44 kN	46,6 kN	0,46
Διαφορά(%)	5,98%	5,98%	22,37%	13,2%

Συμπεράσματα

Κατά την πειραματική διαδικασία ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου χαρακτηρίζεται ως μη εκτατός, αφού ο εσωτερικός πλαστικός σωλήνας επηρέασε πολύ την διαδικασία κατάρρευσης. Η συμπίεση οδήγησε στην δημιουργία εννέα λοβών, ενός αξονοσυμμετρικού και οκτώ μη αξονοσυμμετρικών. Αρχικά, το μέγιστο φορτίο οδηγεί στην δημιουργία ενός αξονοσυμμετρικού λοβού, στον οποίο δεν συμμετείχε το πλαστικό δημιουργώντας έναν μη αξονοσυμμετρικό. Έπειτα, για την δημιουργία του δεύτερου λοβού επέδρασαν ο εκτατός τρόπος κατάρρευσης του αλουμινίου και ο μη εκτατός του πλαστικού με αποτέλεσμα μια δεύτερη κορυφή στο διάγραμμα και την δημιουργία ενός μη εκτατού λοβού. Στην συνέχεια, η κατάρρευση συνεχίστηκε με μη εκτατό τρόπο μέχρι το τέλος, όπου υπήρχε μια μικρή υποχώρηση του πλαστικού προς τα κάτω λόγω της τάσης του για ελαστική επαναφορά.

Κατά την προσομοίωση με shell elements αρχικά δημιουργούνται ένας αξονοσυμμετρικός λοβός από τον σωλήνα αλουμινίου και ένας μη αξονοσυμμετρικός από τον σωλήνα πλαστικού. Έτσι εξηγούνται και οι δύο κορυφές που εμφανίζονται στο αντίστοιχο διάγραμμα, αφού πρώτα καταρρέει το αλουμίνιο και μετά το πλαστικό. Έπειτα, η κατάρρευση συνεχίζεται με μη εκτατό τρόπο και δημιουργούνται άλλοι τρεις λοβοί. Στο τέλος της διαδικασίας η κάτω διατομή του δοκιμίου στενεύει αλλά δεν προλαβαίνει να δημιουργηθεί άλλος λοβός. Η τιμή του μέγιστου φορτίου θλίψης που χρειάζεται για την δημιουργία των πρώτων λοβών αλουμινίου και πλαστικού προσεγγίζεται πολύ καλά, με απόκλιση 1,5%, αλλά οι τιμές του μέσου φορτίου, της ενέργειας και του δείκτη CFE παρουσιάζουν πιο μεγάλη απόκλιση, της τάξης του 13%. Η προσομοίωση θα λέγαμε πως κρίνεται σχετικά ικανοποιητική όσο αναφορά τον υπολογισμό των μεγεθών, αλλά όχι τόσο ικανοποιητική όσο αναφορά την γεωμετρία κατάρρευσης.

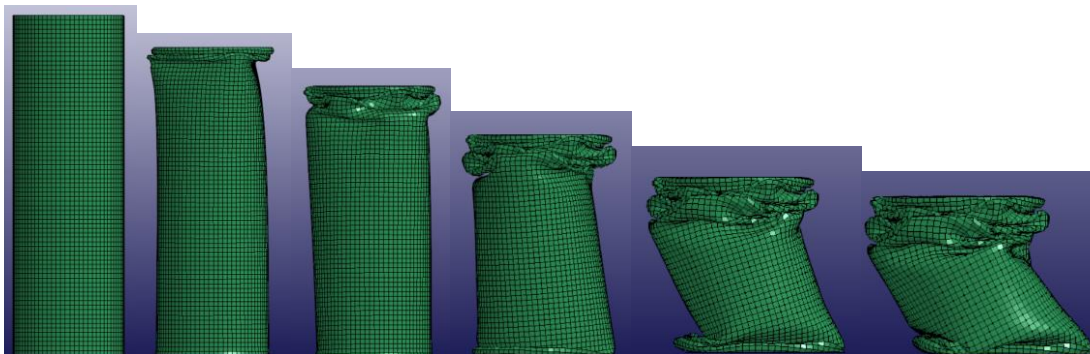
Κατά την προσομοίωση με solid elements αρχικά δημιουργείται με εκτατό τρόπο ένας λοβός από τα δύο υλικά σε αλληλεπίδραση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην γραφική παράσταση να μην εμφανίζονται δύο κορυφές, αλλά μία, και το μέγιστο φορτίο που απαιτείται για την κατάρρευση των δύο υλικών μαζί να είναι μεγαλύτερο από αυτό που χρειάζεται το κάθε υλικό ανεξάρτητα. Έπειτα, δημιουργούνται με μη εκτατό τρόπο, που προκύπτει από την αλληλεπίδραση των δύο υλικών, ακόμα πέντε λοβοί και ένας έκτος δεν προλαβαίνει να σχηματιστεί. Εδώ, οι τιμές της ενέργειας παραμόρφωσης και του μέσου φορτίου θλίψης έχουν πολύ μικρή απόκλιση από τις πειραματικές, περίπου 6%, και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου λίγο μεγαλύτερη αλλά αποδεκτή απόκλιση. Η τιμή του μέγιστου φορτίου παρουσιάζει αρκετά μεγάλη απόκλιση, περίπου 22%, αλλά αυτό οφείλεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο ότι τα δύο υλικά αλληλεπίδρασαν μαζί για την δημιουργία του πρώτου λοβού. Συνολικά, θα λέγαμε πως η προσομοίωση με αυτόν τον τρόπο θεωρείται αρκετά ικανοποιητική, αφού και οι τιμές των μεγεθών προσεγγίζουν τις πειραματικές αλλά και η γεωμετρία κατάρρευσης φαίνεται να ακολουθεί τα μοτίβο της πραγματικής προσφέροντας αρκετά καλά αποτελέσματα.

Συμπερασματικά, συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους μεταξύ τους, θα λέγαμε πως η προσομοίωση με solid elements κρίνεται πιο επιτυχημένη όσο αναφορά τις τιμές των μεγεθών αλλά και την επίτευξη της γεωμετρίας κατάρρευσης και των ακριβών συνθηκών του πειράματος.

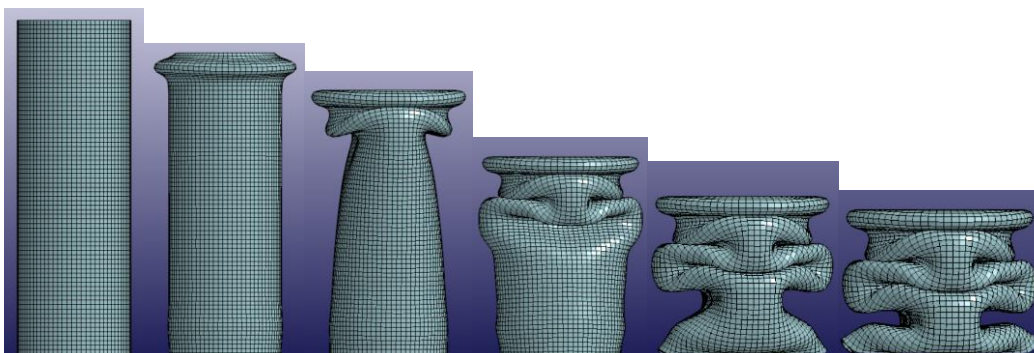
3.1.5 Δοκίμιο A1E2:50X42 κατασκευασμένο από αλουμίνιο και επενδυμένο εσωτερικά με πλαστικό.



Εικόνα 49: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης πειράματος.



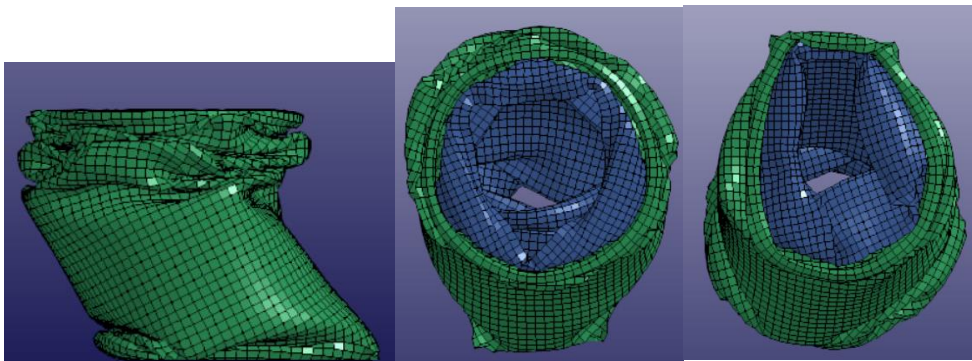
Εικόνα 50: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements.



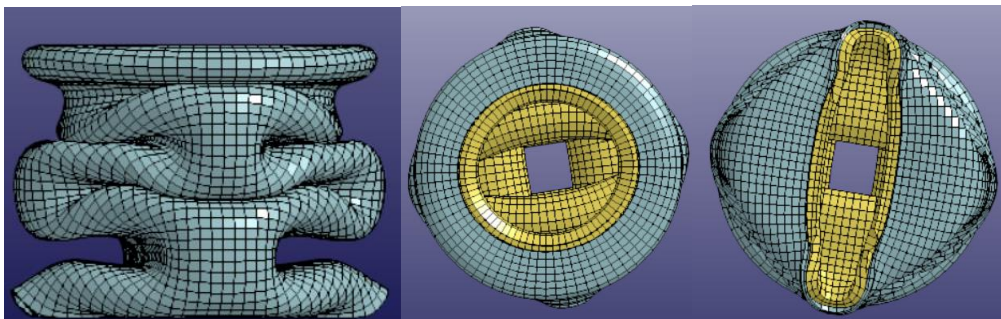
Εικόνα 51: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements.



Εικόνα 52: Τελικές όψεις κατάρρευσης πειράματος(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη).

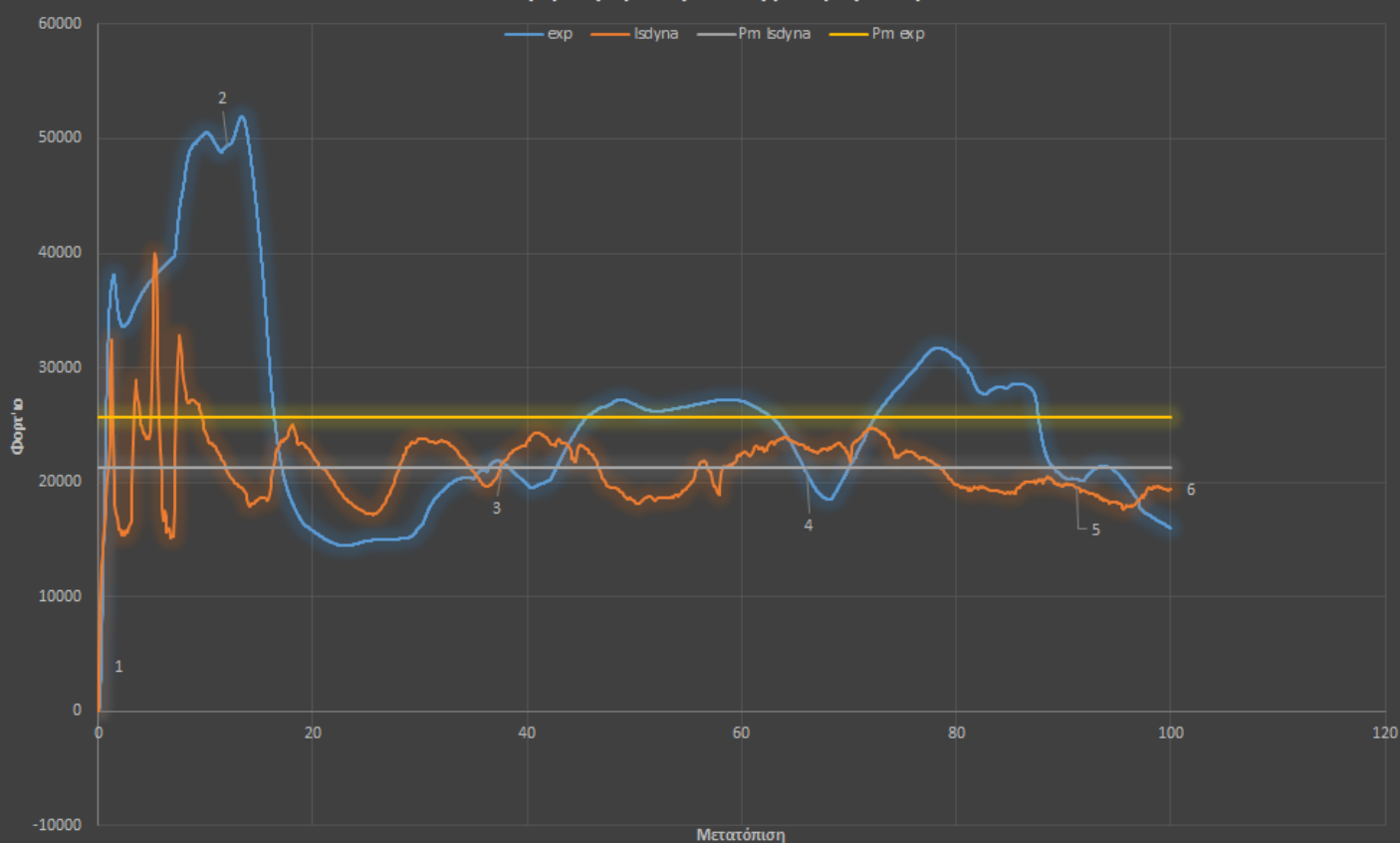


Εικόνα 53: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη).



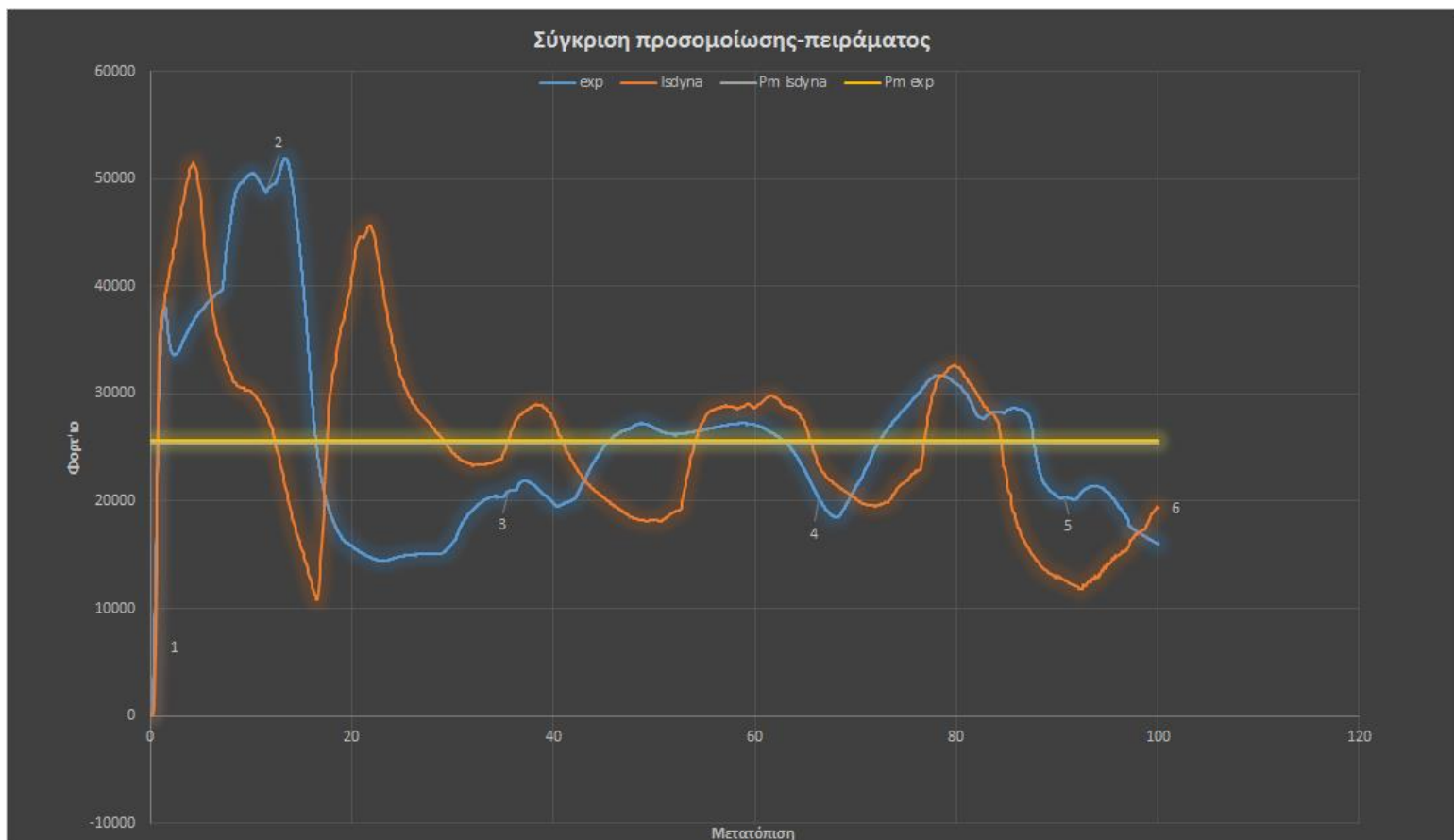
Εικόνα 54: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη)

Σύγκριση προσομοίωσης-πειράματος



Εικόνα 55: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με shell elements

Δοκίμιο A1E2	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	2,568 kJ	25,68 kN	51,92 kN	0,49
Προσομοίωση με shell elements.	2,1236 kJ	21,236 kN	40,01 kN	0,53
Διαφορά(%)	17,30%	17,30%	22.9%	8,16%



Εικόνα 56: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με solid elements

Δοκίμιο A1E2	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	2,568 kJ	25,68 kN	51,92 kN	0,49
Προσομοίωση με solid elements.	2,5349 kJ	25,349 kN	51,6 kN	0,49
Διαφορά(%)	1,2%	1,2%	0,6%	0%

Συμπεράσματα

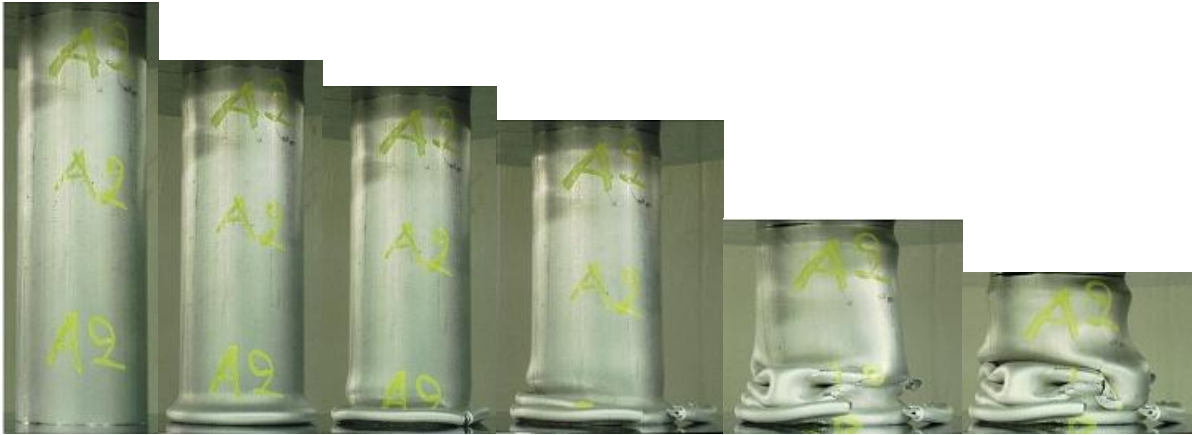
Κατά την πειραματική διαδικασία ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου χαρακτηρίζεται ως μη εκτατός. Αρχικά, με την εμφάνιση του πρώτου τοπικού μέγιστου δημιουργείται ο πρώτος λοβός μόνο στο αλουμίνιο, καθώς το πλαστικό δεν ακολουθεί τον ίδιο σχηματισμό. Ο σχηματισμός του αλουμινίου είναι αρχικά αξονοσυμμετρικός και στην πορεία του επιβάλλεται ελλειψοειδής λόγω του πλαστικού. Μετά τον σχηματισμό του πρώτου λοβού λόγω της αλληλεπίδρασης των δύο υλικών το φορτίο αυξάνεται και ακολουθείται μη εκτατός τρόπος κατάρρευσης. Σχηματίζονται έξι λοβοί, από τους οποίους ο τελευταίος δεν πρόλαβε να ολοκληρωθεί. Διακρίνεται μια μικρή θραύση στον τρίτο λοβό λόγω των μεγάλων εσωτερικών τάσεων που εμφανίζονται αλλά δεν εξελίσσεται στην συνέχεια της κατάρρευσης. Από τα 80mm και μετά η διαμόρφωση λαμβάνει χώρα στο κάτω μέρος του δοκιμίου και στο τέλος το δοκίμιο μετατοπίζεται ελαφρώς προς το πλάι με συνέπεια την μείωση του φορτίου θλίψης. Μετά την αποφόρτιση ο πλαστικός σωλήνας υποχωρεί ελαφρώς στην πάνω και κάτω διατομή του δοκιμίου.

Κατά την προσομοίωση με shell elements αρχικά δημιουργούνται ένας αξονοσυμμετρικός λοβός στο αλουμίνιο και ένας μη αξονοσυμμετρικός στο πλαστικό. Στη συνέχεια δημιουργούνται με μη εκτατό τρόπο τέσσερις λοβοί ξεκινώντας από το πάνω μέρος του δοκιμίου. Σε αυτό το σημείο στο κάτω μέρος του δοκιμίου αρχίζει να διαμορφώνεται ακόμα ένας λοβός και να παρατηρείται λυγισμός. Τα μεγέθη που υπολογίζονται κατά την προσομοίωση έχουν σημαντικές αποκλίσεις από τα αντίστοιχα πειραματικά. Στο μέσο φορτίο και την ενέργεια παραμόρφωσης η διαφορά είναι της τάξης του 17% ενώ στο μέγιστο φορτίο η απόκλιση είναι ακόμα μεγαλύτερη, της τάξης του 23%. Μόνο ο δείκτης CFE είναι σχετικά κοντά στον πειραματικό με απόκλιση 8%. Συνολικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με αυτόν τον τρόπο δεν κρίνονται ικανοποιητικά, αφού αν και επιτεύχθηκε μια σχετική ομοιότητα στον τρόπο κατάρρευσης, οι τιμές των μεγεθών παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις.

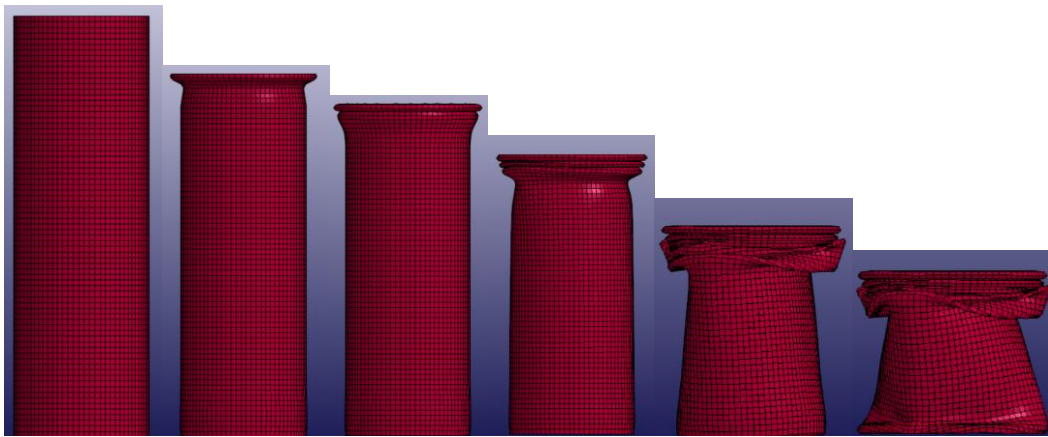
Κατά την προσομοίωση με solid elements αρχικά δημιουργείται ένας αξονοσυμμετρικός λοβός στον οποίο συμμετέχουν και τα δύο υλικά. Έπειτα, ακολουθείται μη εκτατός τρόπος κατάρρευσης εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των δύο υλικών. Δημιουργούνται τρεις ακόμα λοβοί και στο τέλος της διαδικασίας άλλος ένας στην κάτω διατομή του δοκιμίου. Οι τιμές των μεγεθών που υπολογίζονται από την προσομοίωση παρουσιάζουν ελάχιστες αποκλίσεις από τις αντίστοιχες πειραματικές. Οι τιμές του μέσου φορτίου και της συνολικής ενέργειας έχουν απόκλιση 1,2% ενώ του μέγιστου φορτίου 0,6%. Η τιμή του δείκτη CFE δεν παρουσιάζει καμία απόκλιση. Βάση των παραπάνω, η προσομοίωση κρίνεται πολύ ικανοποιητική.

Συμπερασματικά, η πιο επιτυχημένη προσομοίωση κρίνεται αυτή με τα solid elements, αφού οι τιμές των μεγεθών παρουσιάζουν μηδαμινές αποκλίσεις από τα πειραματικά και η γεωμετρία κατάρρευσης έχει προσομοιωθεί σε μεγάλο βαθμό.

3.1.6 Δοκίμιο A2:50X46 κατασκευασμένο από αλουμίνιο.



Εικόνα 57: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης πειράματος.



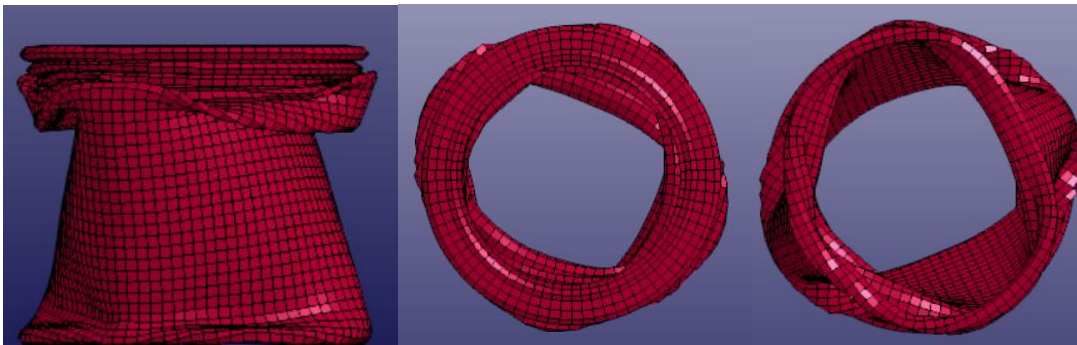
Εικόνα 58: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements.



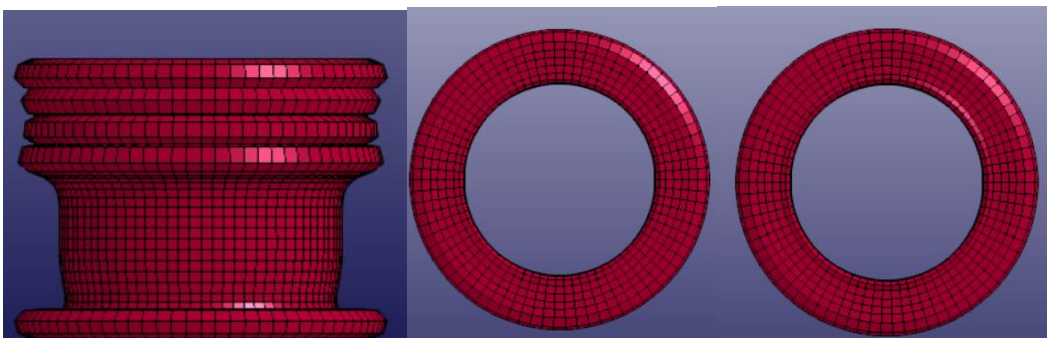
Εικόνα 59: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements.



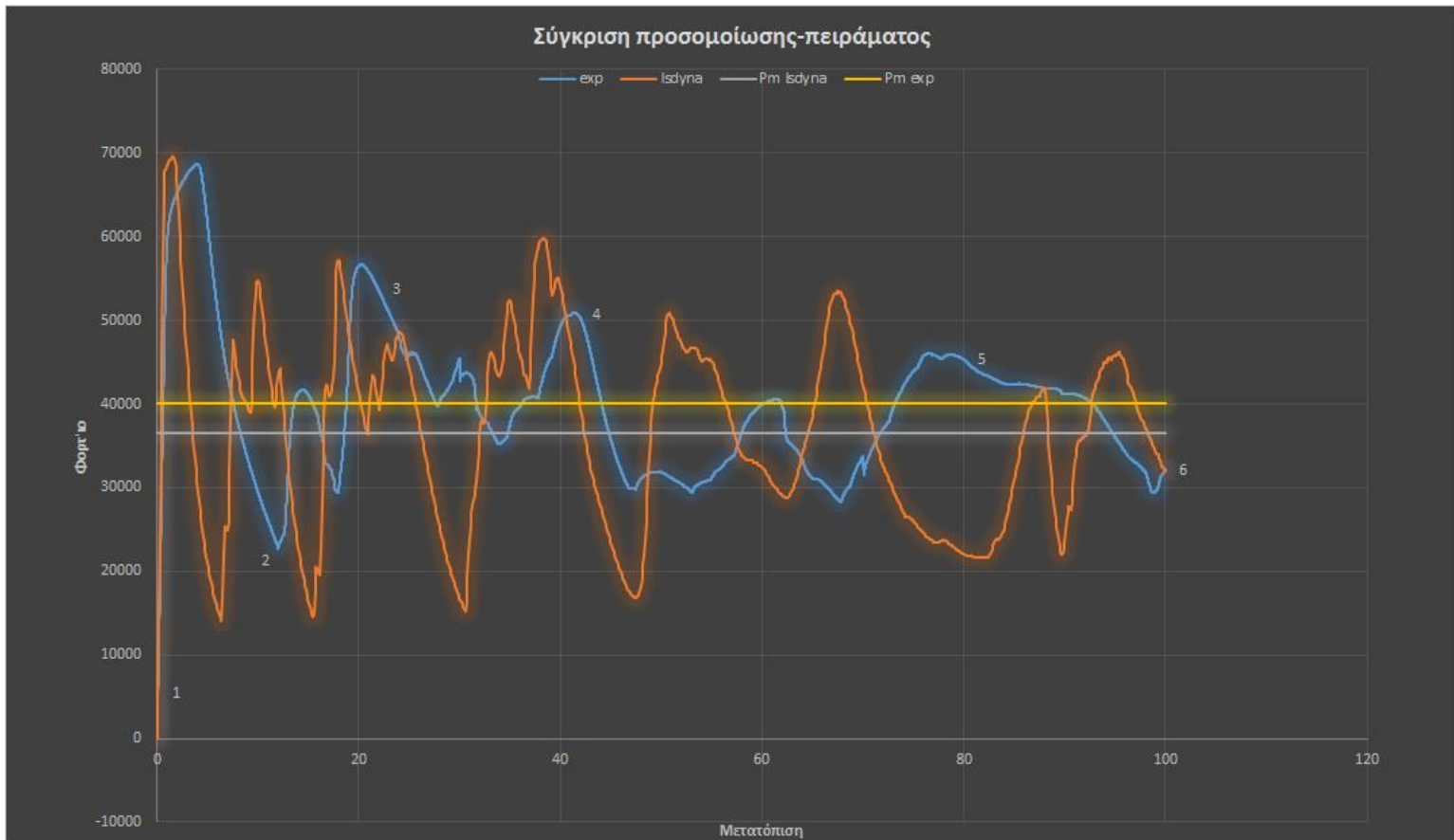
Εικόνα 60: Τελικές όψεις κατάρρευσης πειράματος(πρόσωση, κάτοψη και άνοψη).



Εικόνα 61: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements(πρόσωση, κάτοψη και άνοψη).

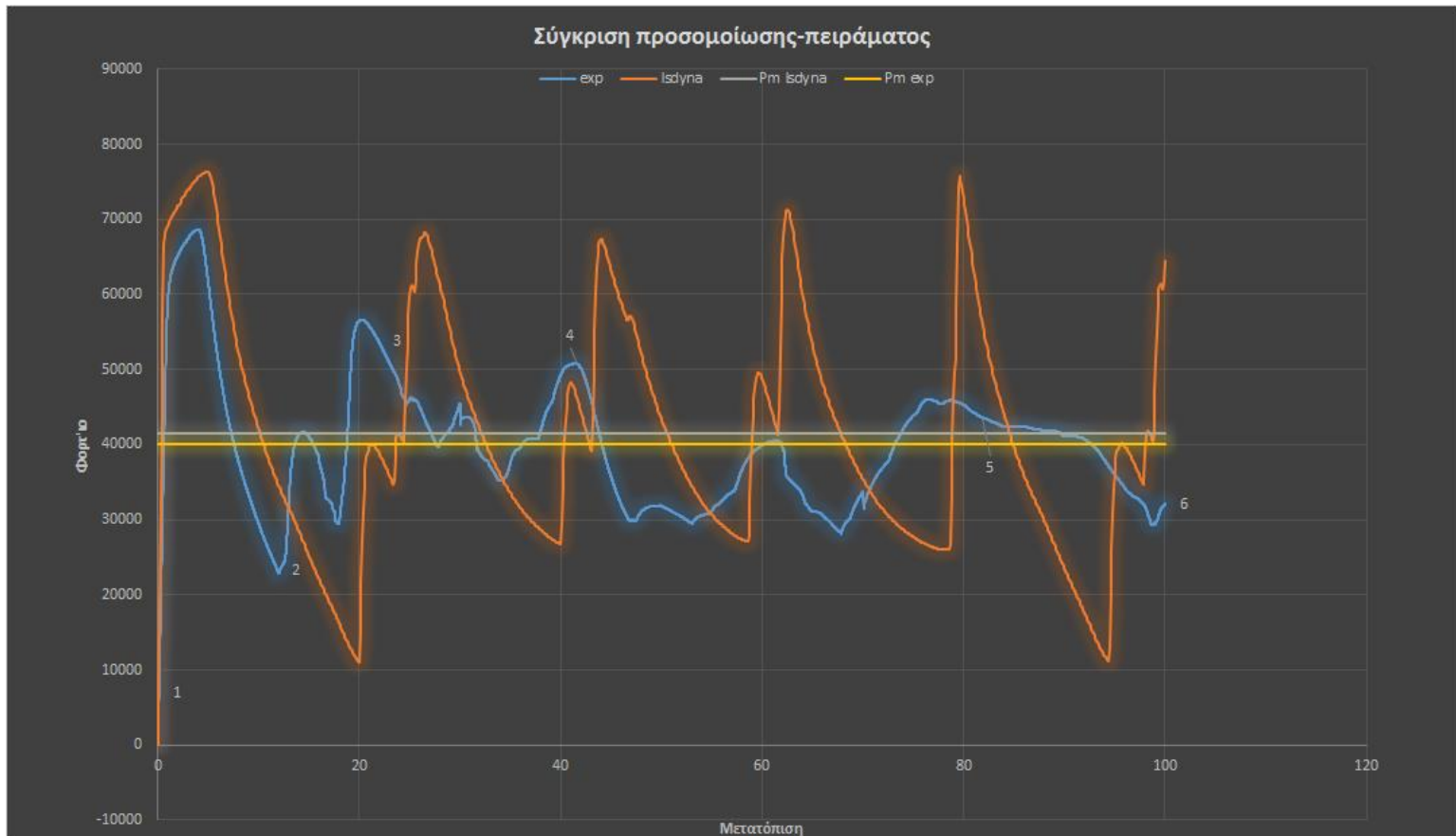


Εικόνα 62: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements(πρόσωση, κάτοψη και άνοψη)



Εικόνα 63: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με shell elements

Δοκίμιο A2	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	4,001 kJ	40,01 kN	68,67 kN	0,58
Προσομοίωση με shell elements.	3,6561kJ	36,561 kN	69,568 kN	0,52
Διαφορά(%)	8,6%	8,6%	1,3%	10,3%



Εικόνα 64: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με *solid elements*

Δοκίμιο A2	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	4,001 kJ	40,01 kN	68,67 kN	0,58
Προσομοίωση με solid elements.	4,1562 kJ	41,562 kN	76,304 kN	0,54
Διαφορά(%)	3,87%	3,87%	11,1%	6,89%

Συμπεράσματα

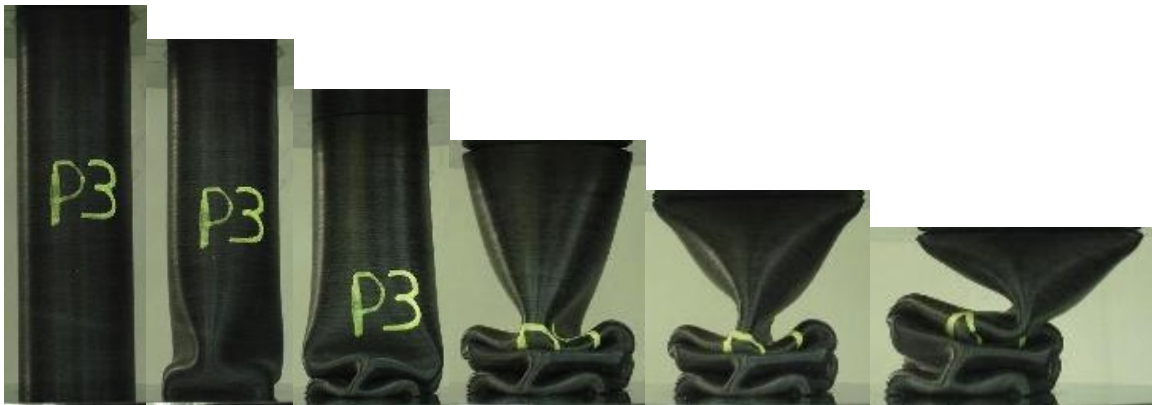
Κατά την πειραματική διαδικασία το δοκίμιο παρουσίασε μικτό τρόπο κατάρρευσης που αποτελείται από δύο αξονοσυμμετρικούς λοβούς και τρεις μη εκτατούς. Λόγω μεγαλύτερου πάχους από το δοκίμιο A1 παρουσιάστηκε μικρότερος αριθμός λοβών και ο τρόπος κατάρρευσης από εκτατός άλλαξε σε μη εκτατό. Μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου και την δημιουργία του πρώτου λοβού εμφανίστηκαν θραύσεις στην κάτω πλευρά εξαιτίας της έκτασης του λοβού που προκάλεσε έντονο περιφερειακό εφελκυσμό. Οι θραύσεις ήταν τρεις μη κατανομημένες και μετά την δημιουργία του δεύτερου λοβού οδήγησαν στην αποκοπή δύο κομματιών του πρώτου λοβού. Στην συνέχεια ακολούθησαν τρεις μη εκτατοί λοβοί. Κατά τον σχηματισμό του τελευταίου λοβού διαμορφώθηκε μια ελαφρώς ελλειψοειδής διατομή στο πάνω μέρος του δοκιμίου και εμφανίστηκαν κάποιες ακόμα ρηγματώσεις στους μη εκτατούς λοβούς λόγω των καμπτικών τάσεων της δημιουργίας των λοβών.

Κατά την προσομοίωση της διαδικασίας με την μέθοδο των shell elements αρχικά ακολουθείται εκτατός τρόπος κατάρρευσης με αποτέλεσμα την δημιουργία δύο λοβών. Έπειτα, δημιουργούνται ακόμα δύο λοβοί με μη εκτατό τρόπο και προς το τέλος της συμπίεσης εμφανίζεται πλάτυνση της κάτω διατομής και η δημιουργία ακόμα ενός μη αξονοσυμμετρικού λοβού, ο οποίος δεν προλαβαίνει να ολοκληρωθεί. Οι τιμές της συνολικής ενέργειας και του μέσου φορτίου θλίψης που προκύπτουν από την προσομοίωση παρουσιάζουν αποκλίσεις από τις αντίστοιχες πειραματικές, της τάξης του 8% περίπου. Η τιμή του μέγιστου φορτίου διαφέρει μόνο κατά 1,3%, ενώ του δείκτη φορτίου περίπου 10%. Συνολικά η προσομοίωση θα μπορούσε να κριθεί αρκετά ικανοποιητική, αφού οι τιμές των μεγεθών προσεγγίζουν με καλή ακρίβεια τις πειραματικές και η γεωμετρία κατάρρευσης ακολουθεί αυτή του πειράματος.

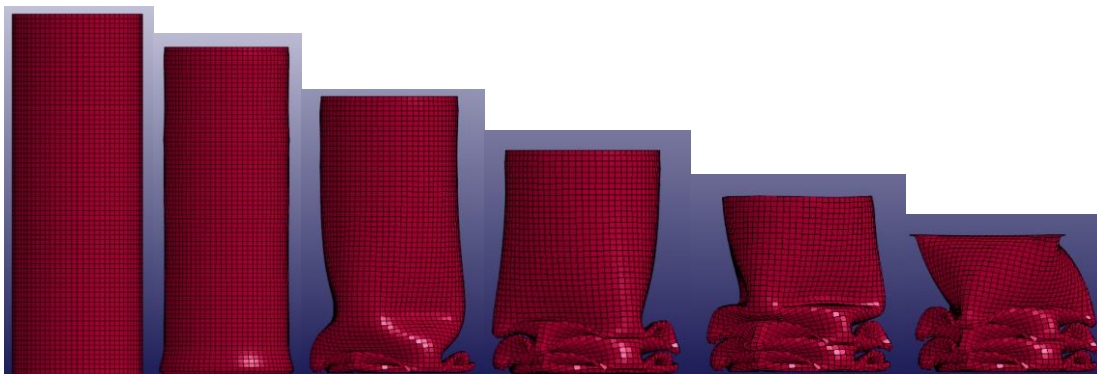
Κατά την προσομοίωση της διαδικασίας με την μέθοδο των solid elements ακολουθείται μόνο εκτατός τρόπος κατάρρευσης. δημιουργούνται συνολικά πέντε λοβοί, τέσσερις ξεκινώντας από το πάνω μέρος και άλλος ένας που εμφανίζεται στο τέλος της συμπίεσης στο κάτω μέρος. Οι τιμές της συνολικής ενέργειας και του μέσου φορτίου που προκύπτουν από την προσομοίωση παρουσιάζουν απόκλιση 3,87% από τις αντίστοιχες πειραματικές. Η τιμή του μέγιστου φορτίου έχει απόκλιση 11%, ενώ του δείκτη CFE 6,89%. Συνολικά η προσομοίωση δεν κρίνεται πολύ ικανοποιητική, αφού αν και οι τιμές του μέσου φορτίου και της ενέργειας παρουσιάζουν μικρές διαφορές με τις πειραματικές, η τιμή του μέγιστου φορτίου παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση. Επίσης ο μη εκτατός τρόπος κατάρρευσης του πειράματος δεν εμφανίζεται καθόλου στην προσομοίωση, κάτι που μας οδηγεί στο παραπάνω συμπέρασμα.

Συμπερασματικά, πιο επιτυχημένη προσομοίωση σε αυτή την περίπτωση κρίνεται αυτή με τα shell elements, αφού και οι τιμές παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις, αλλά και υπάρχει καλύτερη αποτύπωση της γεωμετρίας κατάρρευσης με την παρουσίαση των μη αξονοσυμμετρικών λοβών. Αξίζει να σημειωθεί πως η θραύση έπαιξε σημαντικό ρόλο στην κατάρρευση, επηρεάζοντας τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου. Αν δεν είχαν εμφανιστεί αυτές οι θραύσεις, πιο πιθανά η προσομοίωση με solid elements θα ήταν πιο κοντά στην πραγματικότητα.

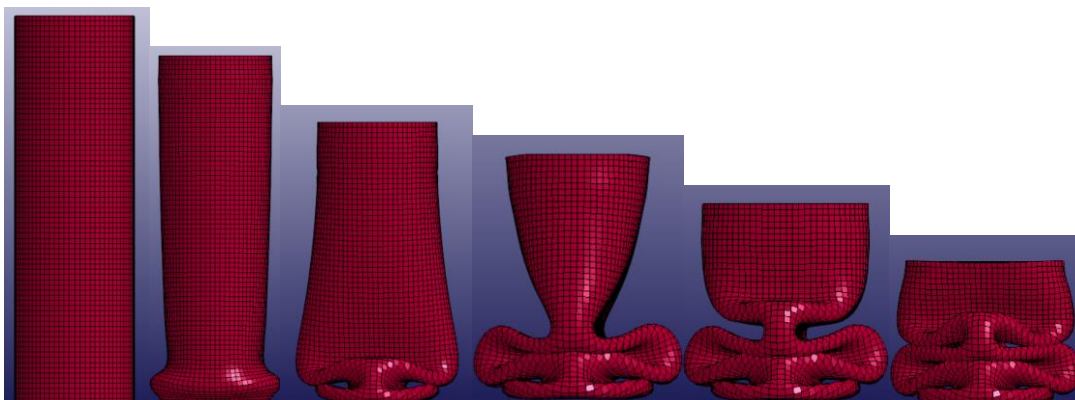
3.1.7 Δοκίμιο E3:46X42 κατασκευασμένο από πλαστικό.



Εικόνα 65: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης πειράματος.



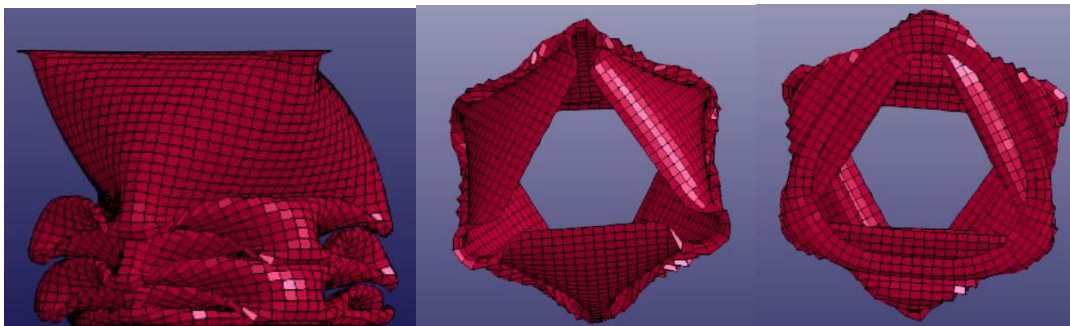
Εικόνα 66: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements.



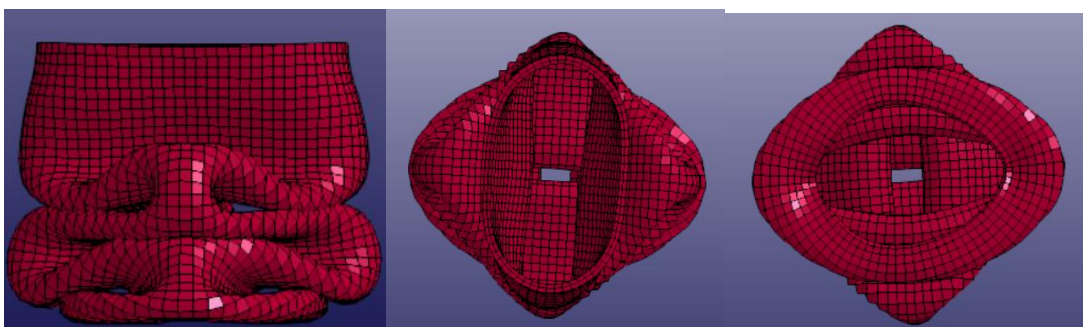
Εικόνα 67: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements.



Εικόνα 68: Τελικές όψεις κατάρρευσης πειράματος(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη).

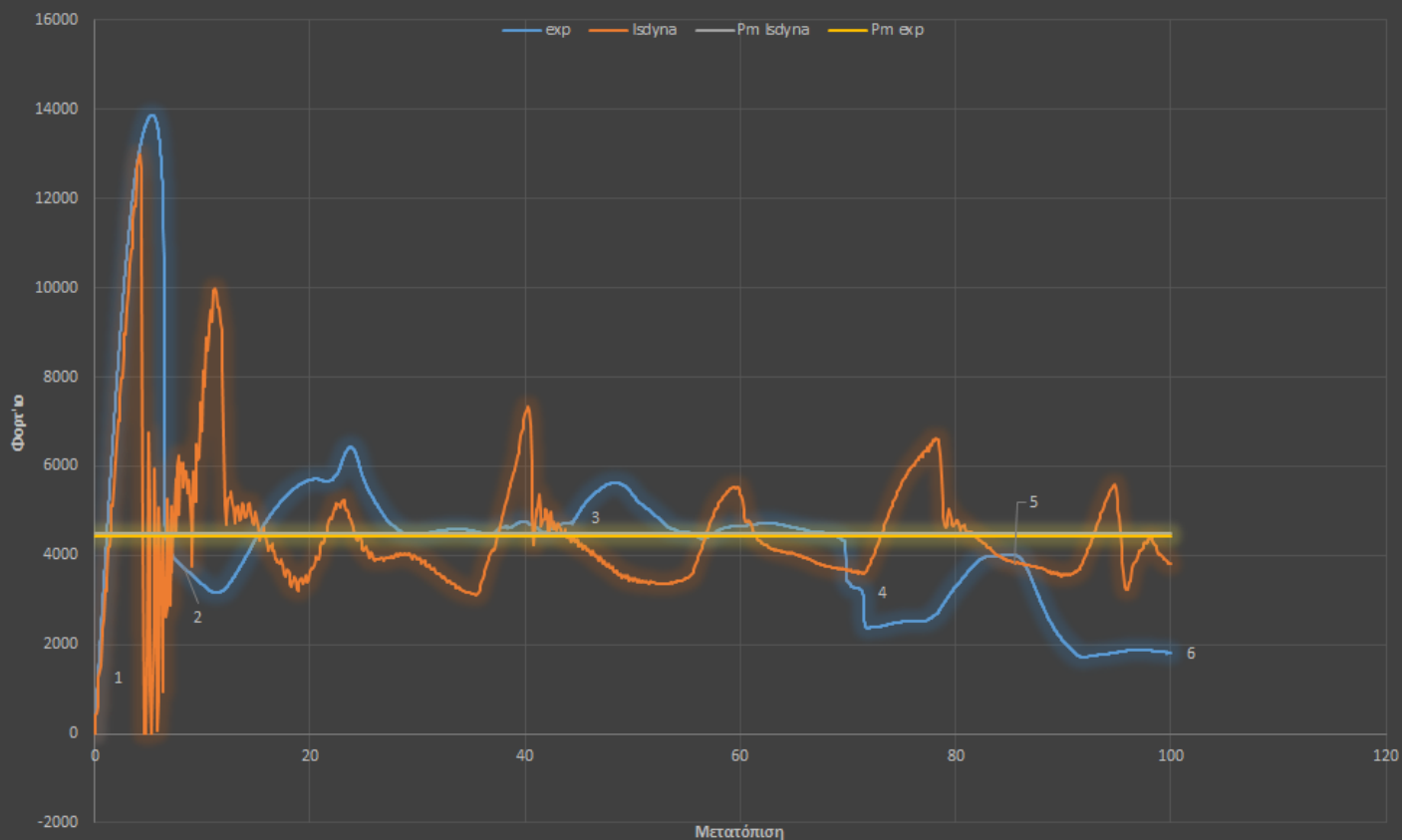


Εικόνα 69: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη)



Εικόνα 70: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη)

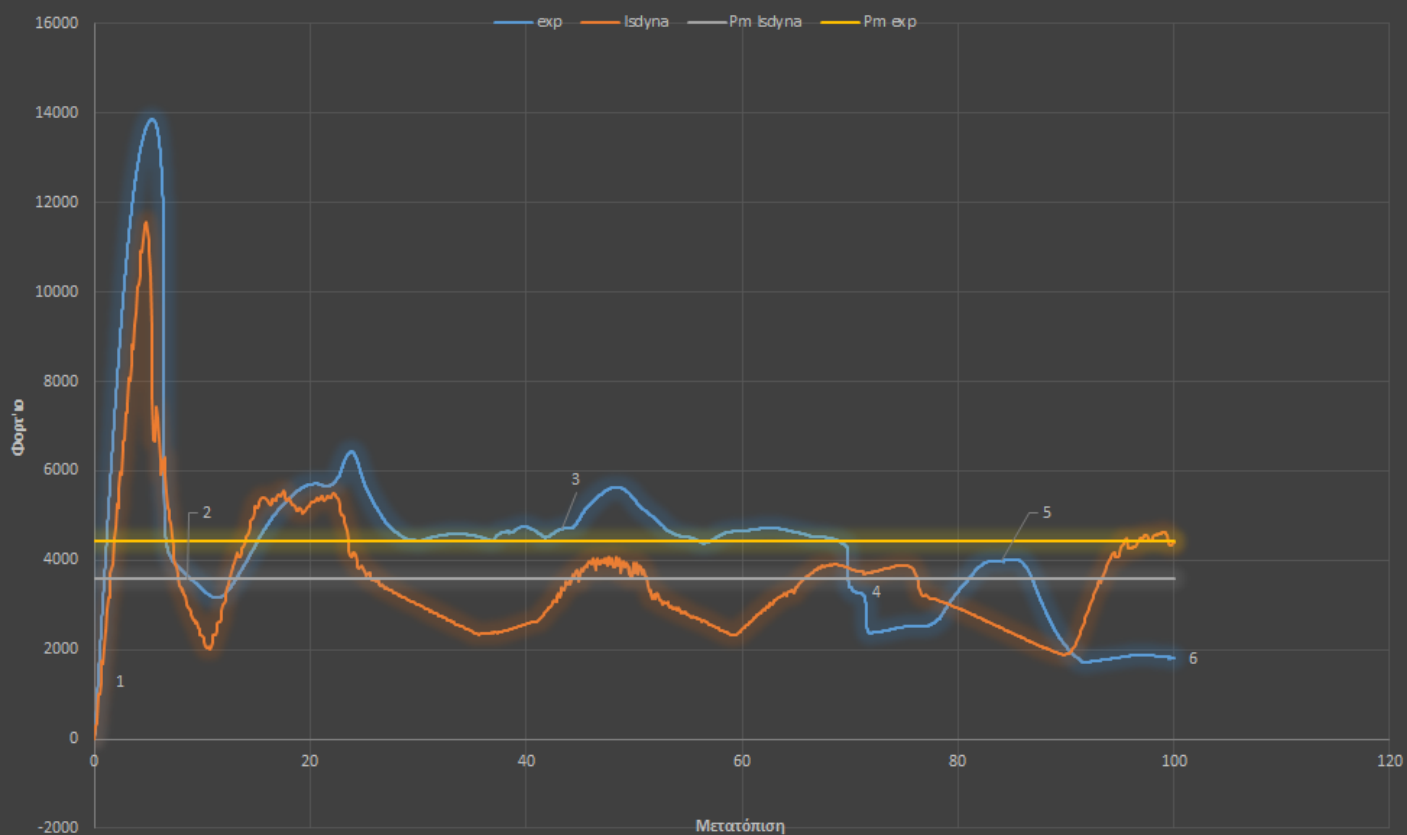
Σύγκριση προσομοίωσης-πειράματος



Εικόνα 71: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με shell elements.

Δοκίμιο Ε3	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	0,441 kJ	4,41 kN	13,86 kN	0,32
Προσομοίωση με shell elements.	0,4478kJ	4,478kN	12,974 kN	0,34
Διαφορά(%)	1,54%	1,54%	6,39%	6,25%

Σύγκριση προσομοίωσης-πειράματος



Εικόνα 72: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με solid elements.

Δοκίμιο Ε3	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	0,441 kJ	4,41 kN	13,86 kN	0,32
Προσομοίωση με solid elements.	0,3586 kJ	3,586 kN	11,556 kN	0,31
Διαφορά(%)	18,6%	18,6%	16,6%	3,1%

Συμπεράσματα

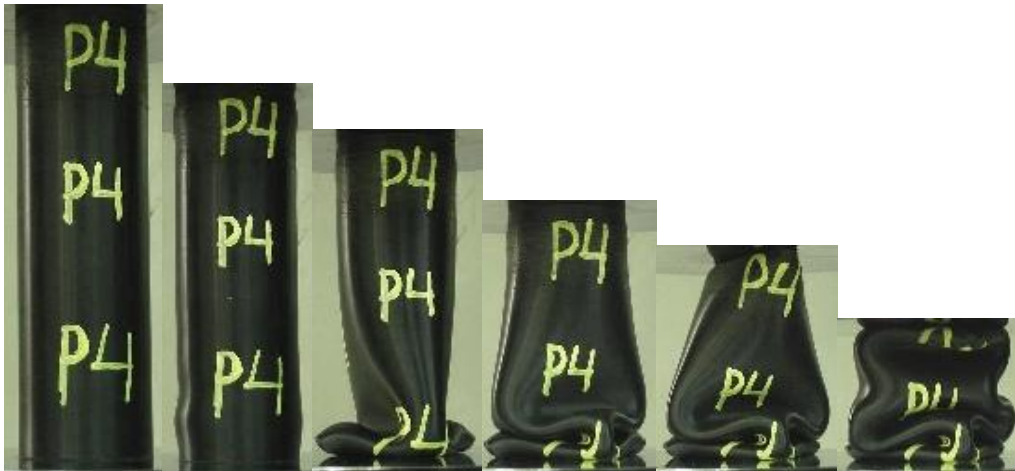
Κατά την πειραματική διαδικασία το δοκίμιο καταρρέει με μη εκτατό τρόπο σχηματίζοντας τρεις λοβούς. Στα 70 mm η διατομή στη μέση του δοκιμίου στενεύει και λίγο αργότερα λαμβάνει χώρα η διαμόρφωση της πάνω διατομής. Όταν η διατομή έχει στενέψει αρκετά, το δοκίμιο λυγίζει προς τα δεξιά με συνέπεια τη σημαντική μείωση του φορτίου θλίψης στο τελευταίο στάδιο της κατάρρευσης.

Κατά την προσομοίωση της διαδικασίας με την μέθοδο των shell elements ακολουθείται μη εκτατός τρόπος κατάρρευσης. Σχηματίζονται συνολικά πέντε λοβοί με αυτό τον τρόπο και στο τέλος της διαδικασίας παρατηρείται λυγισμός της πάνω διατομής προς τα αριστερά. Οι τιμές της συνολικής ενέργειας και του μέσου φορτίου παρουσιάζουν πολύ μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τις πειραματικές, 1,54%. Η τιμή του μέγιστου φορτίου διαφέρει κατά 6,39% και η τιμή του δείκτη CFE κατά 6,25%. Συνολικά η προσομοίωση μπορεί να κριθεί ως ικανοποιητική. Τα μεγέθη βρίσκονται πολύ κοντά στα αντίστοιχα πειραματικά αλλά παρουσιάζονται αρκετές διαφορές στην μορφή και την δημιουργία της κατάρρευσης.

Κατά την προσομοίωση της διαδικασίας με την μέθοδο των solid elements ακολουθείται και εδώ μη εκτατός τρόπος κατάρρευσης. Σχηματίζονται συνολικά τέσσερις λοβοί, ενώ στο τέλος εμφανίζεται πλάτυνση στην πάνω διατομή του δοκιμίου, αλλά δεν προλαβαίνει να σχηματιστεί άλλος λοβός. Οι τιμές της ενέργειας και του μέσου φορτίου παρουσιάζουν απόκλιση 18,6%, ενώ του μέγιστου φορτίου 16,6%. Ο δείκτης ομοιομορφίας CFE παρουσιάζει απόκλιση 3,1%. Συνολικά θα μπορούσαμε να πούμε πως οι τιμές των μεγεθών παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση για να τις θεωρήσουμε ως ικανοποιητικές, αλλά παρουσιάζεται καλή ακρίβεια στην γεωμετρία της κατάρρευσης.

Συμπερασματικά, θα λέγαμε πως με την μέθοδο των shell elements καταφέρνουμε μεγάλη ακρίβεια στις τιμές των μεγεθών, αλλά με την μέθοδο solid elements καταφέρνουμε καλύτερη αποτύπωση στην γεωμετρία της κατάρρευσης.

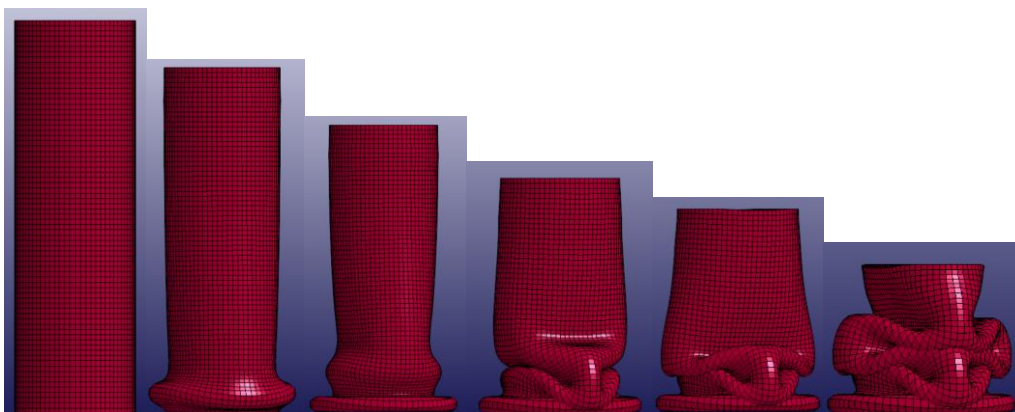
3.1.8 Δοκίμιο Ε4:46Χ40 κατασκευασμένο από πλαστικό.



Εικόνα 73: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης πειράματος.



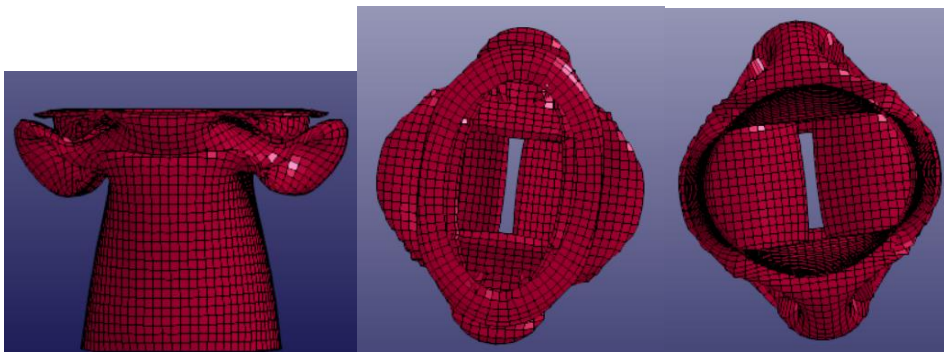
Εικόνα 74: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements.



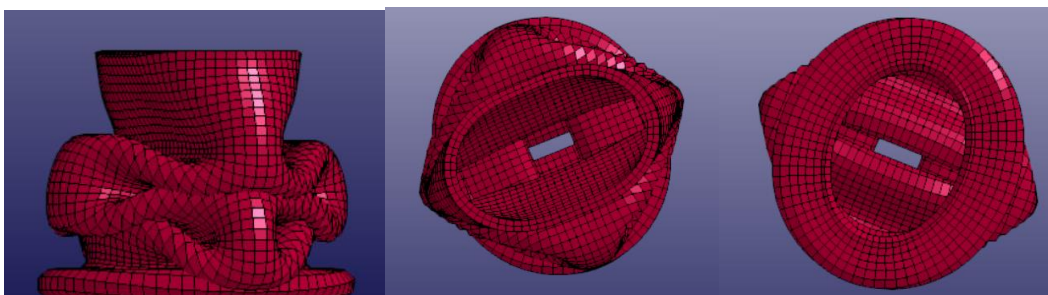
Εικόνα 75: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements.



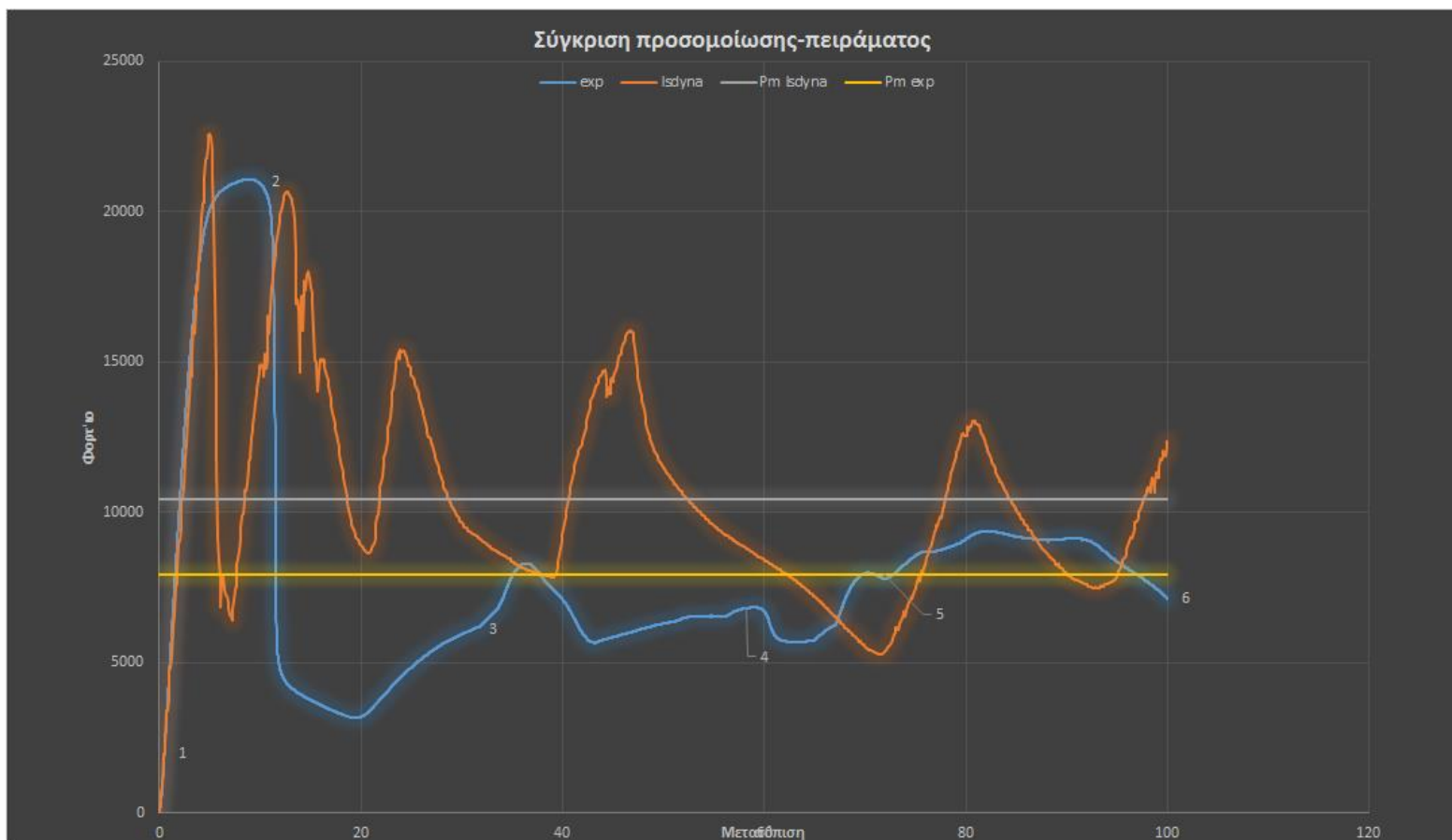
Εικόνα 76: Τελικές όψεις κατάρρευσης πειράματος(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη).



Εικόνα 77: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη)

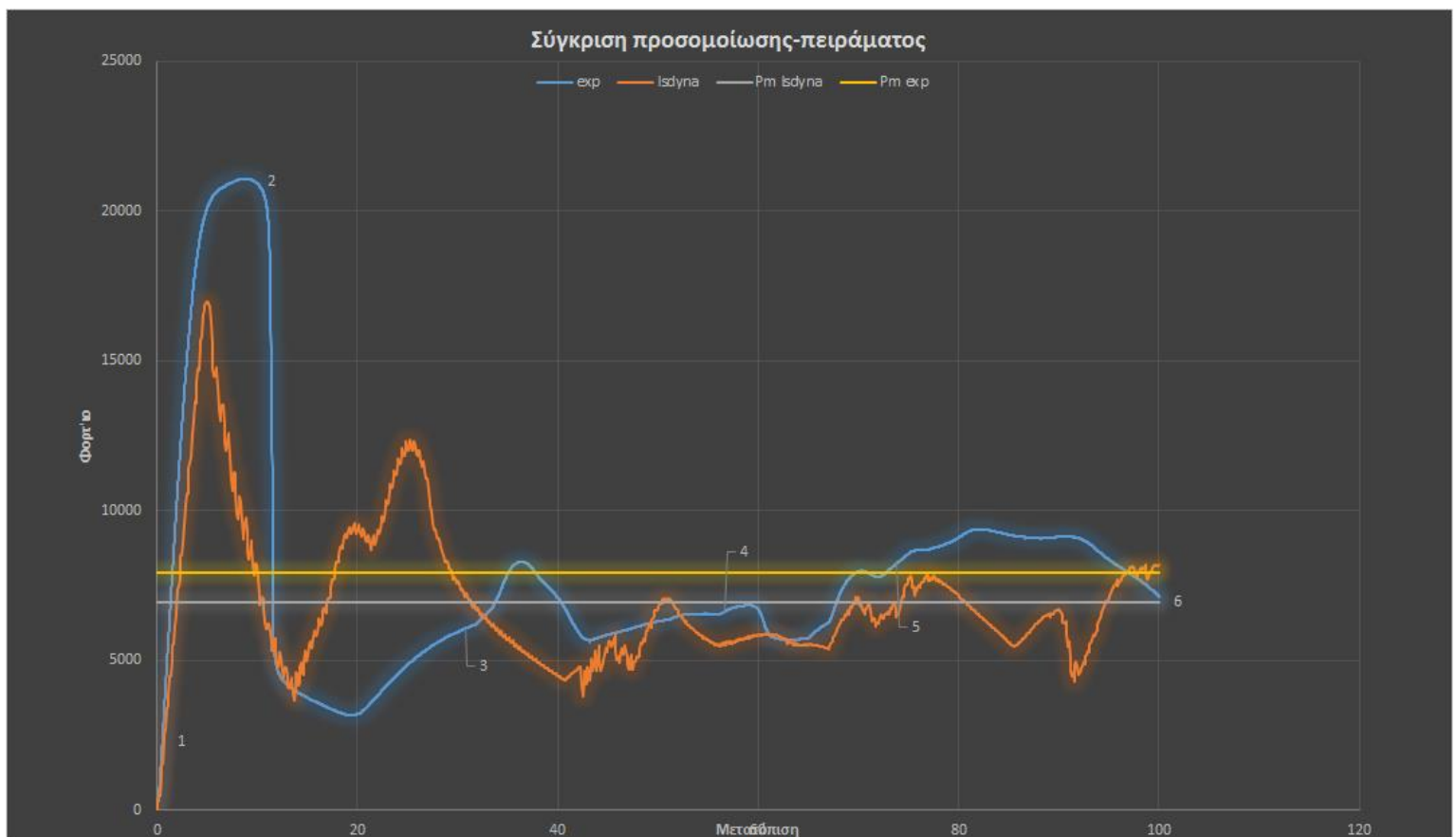


Εικόνα 77: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη)



Εικόνα 78: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με shell elements.

Δοκίμιο Ε4	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	0,793 kJ	7,93 kN	21,07 kN	0,38
Προσομοίωση με shell elements.	1,0441 kJ	10,441 kN	22,60 kN	0,46
Διαφορά(%)	31,6%	31,6%	7,26%	21,05%



Εικόνα 79: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με solid elements.

Δοκίμιο Ε4	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	0,793 kJ	7,93 kN	21,07 kN	0,38
Προσομοίωση με solid elements.	0,6954 kJ	6,954 kN	16,98 kN	0,40
Διαφορά(%)	12,3%	12,3%	19,41%	5,2%

Συμπεράσματα

Κατά την πειραματική διαδικασία ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου χαρακτηρίζεται ως μη εκτατός, σχηματίζοντας συνολικά τέσσερις λοβούς. Μετά την διαμόρφωση του πρώτου λοβού το φορτίο πέφτει απότομα και αφού δημιουργηθεί και ο δεύτερος λοβός η διαμόρφωση μεταφέρεται στην πάνω διατομή, όπου παίρνει ελλειψοειδή μορφή. Μετά την διαμόρφωση της πάνω διατομής το φορτίο αυξάνεται και πάλι, το δοκίμιο αποκτά την τελική του μορφή και η διαδικασία τελειώνει.

Κατά την προσομοίωση της διαδικασίας με shell elements δημιουργείται αρχικά με αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης πρώτος λοβός. Έπειτα, η κατάρρευση συνεχίζεται με μη εκτατό τρόπο, όπου και δημιουργούνται ακόμα τρεις λοβοί στο δοκίμιο. Οι τιμές της συνολικής ενέργειας και του μέσου φορτίου παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από τις πειραματικές, 31,6%. Το μέγιστο φορτίο παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση, 7,26%, ενώ ο δείκτης CFE επίσης παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση, 21,05%. Συνολικά θα λέγαμε πως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν κρίνονται ικανοποιητικά. Αν και επιτεύχθηκε σχετική ομοιότητα με τον πειραματικό τρόπο κατάρρευσης, οι τιμές των μεγεθών παρουσίασαν πολύ μεγάλες αποκλίσεις από τα αντίστοιχα πειραματικά, οδηγώντας μας στο παραπάνω συμπέρασμα.

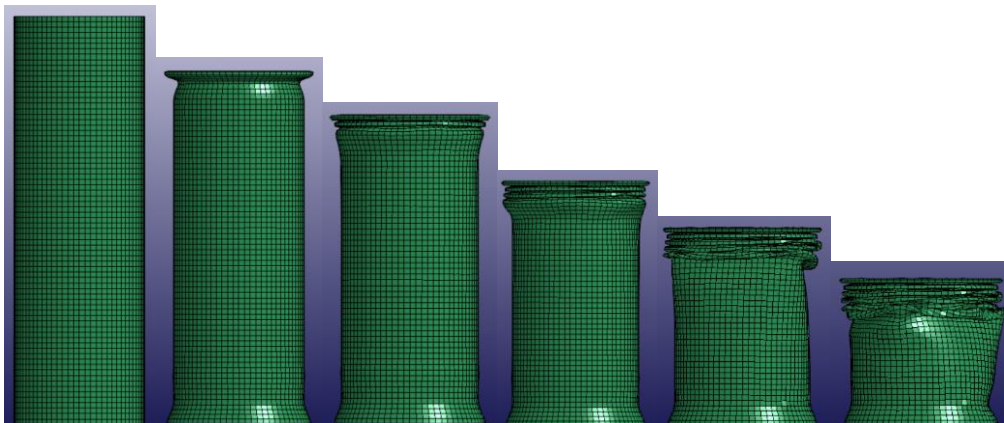
Κατά την προσομοίωση της διαδικασίας με solid elements ο πρώτος λοβός δημιουργείται και εδώ με αξονοσυμμετρικό τρόπο. Έπειτα, η κατάρρευση συνεχίζεται με μη εκτατό τρόπο, οδηγώντας στην δημιουργία ακόμα τριών λοβών. Οι τιμές της συνολικής ενέργειας και του μέσου φορτίου παρουσιάζουν απόκλιση 12,3%, ενώ η τιμή του μέγιστου φορτίου παρουσιάζει απόκλιση 19,41%. Τέλος, η τιμή του δείκτη CFE έχει απόκλιση 5,2% από την πειραματική. Συνολικά, θα λέγαμε πως η προσομοίωση μπορεί να χαρακτηριστεί ικανοποιητική γιατί επιτεύχθηκε μεγάλη ομοιότητα του τρόπου κατάρρευσης, και αν και οι τιμές των μεγεθών είχαν αρκετή απόκλιση, κινούνταν σε λογικά πλαίσια.

Συμπερασματικά, θα λέγαμε πως η προσομοίωση με solid elements ήταν πιο επιτυχημένη, αφού οι τιμές των μεγεθών παρουσίασαν μικρότερες αποκλίσεις από εκείνες της προσομοίωσης με shell elements, και επιπλέον η γεωμετρία κατάρρευσης αποτυπώθηκε πιο πιστά.

3.1.9 Δοκίμιο A2E3:50X42 κατασκευασμένο από αλουμίνιο και επενδυμένο εσωτερικά με πλαστικό



Εικόνα 80: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης πειράματος



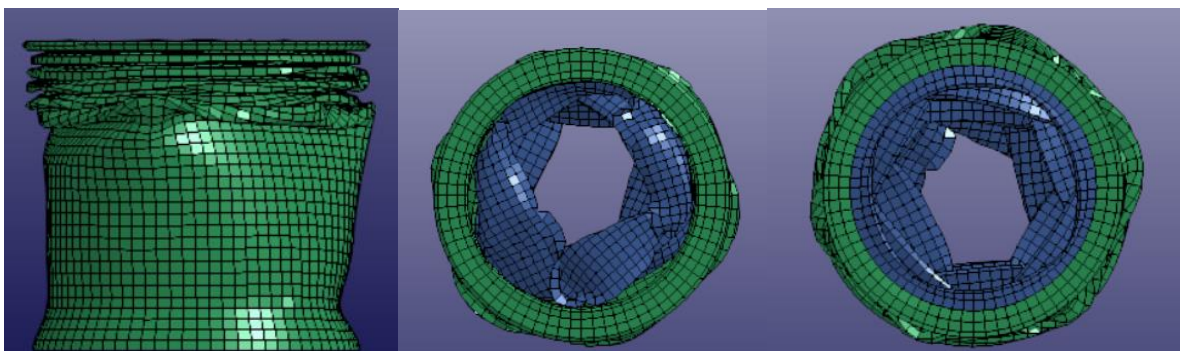
Εικόνα 81: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements.



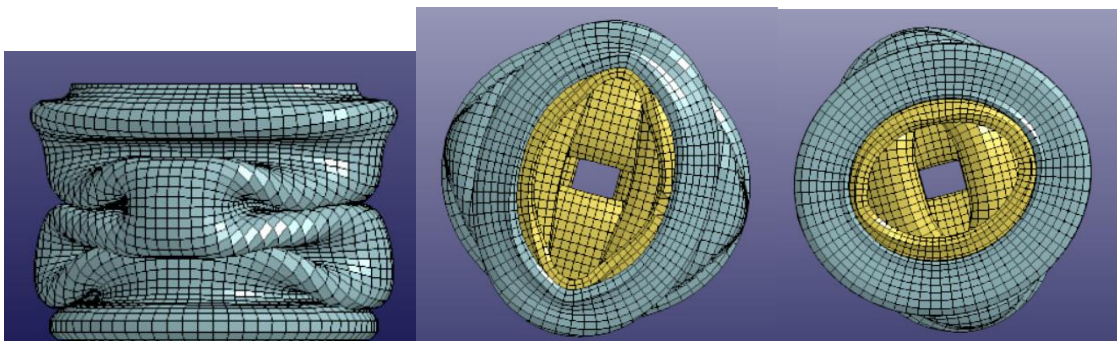
Εικόνα 82: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements.



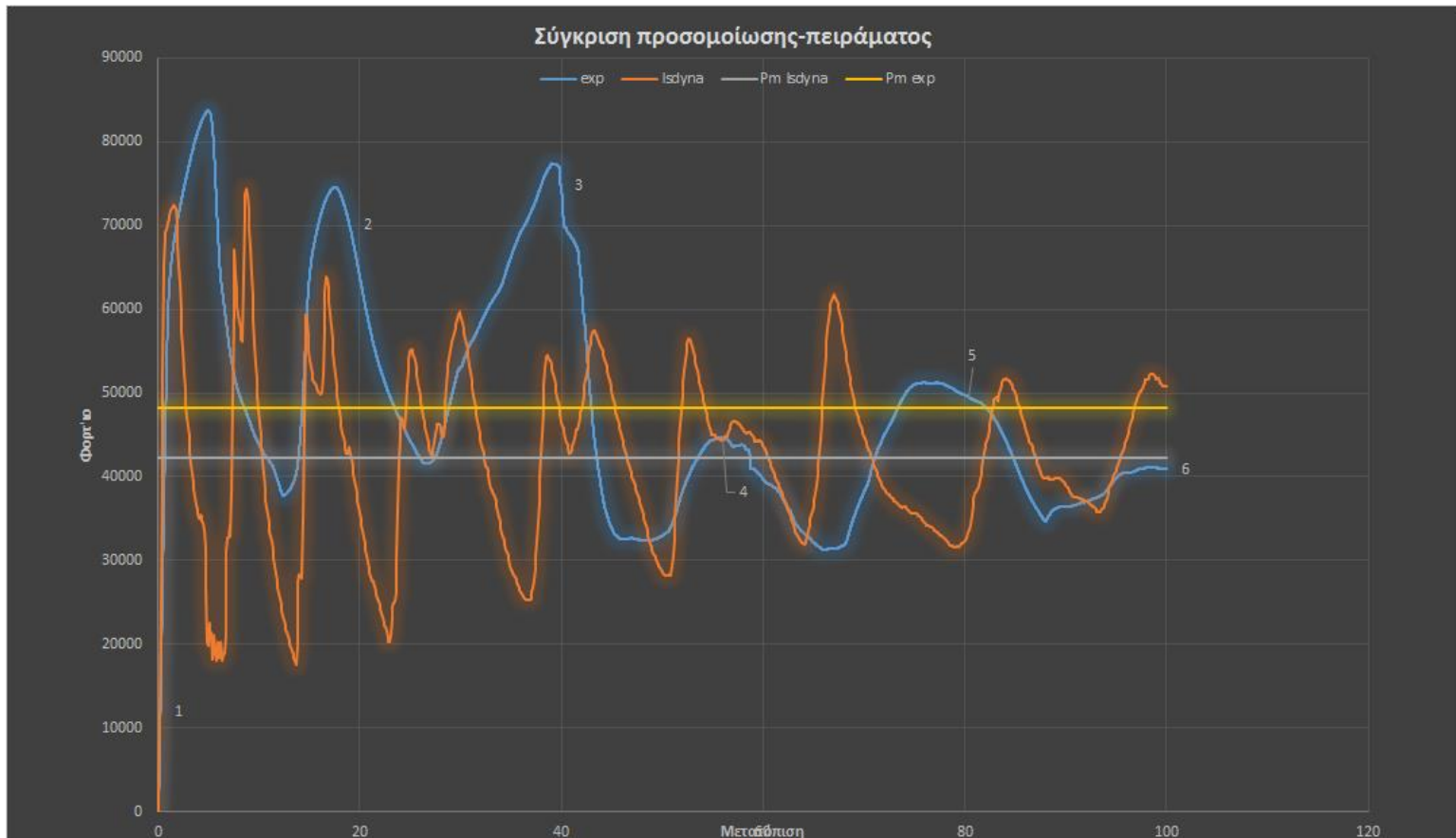
Εικόνα 83: Τελικές όψεις κατάρρευσης πειράματος(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη).



Εικόνα 84: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη)

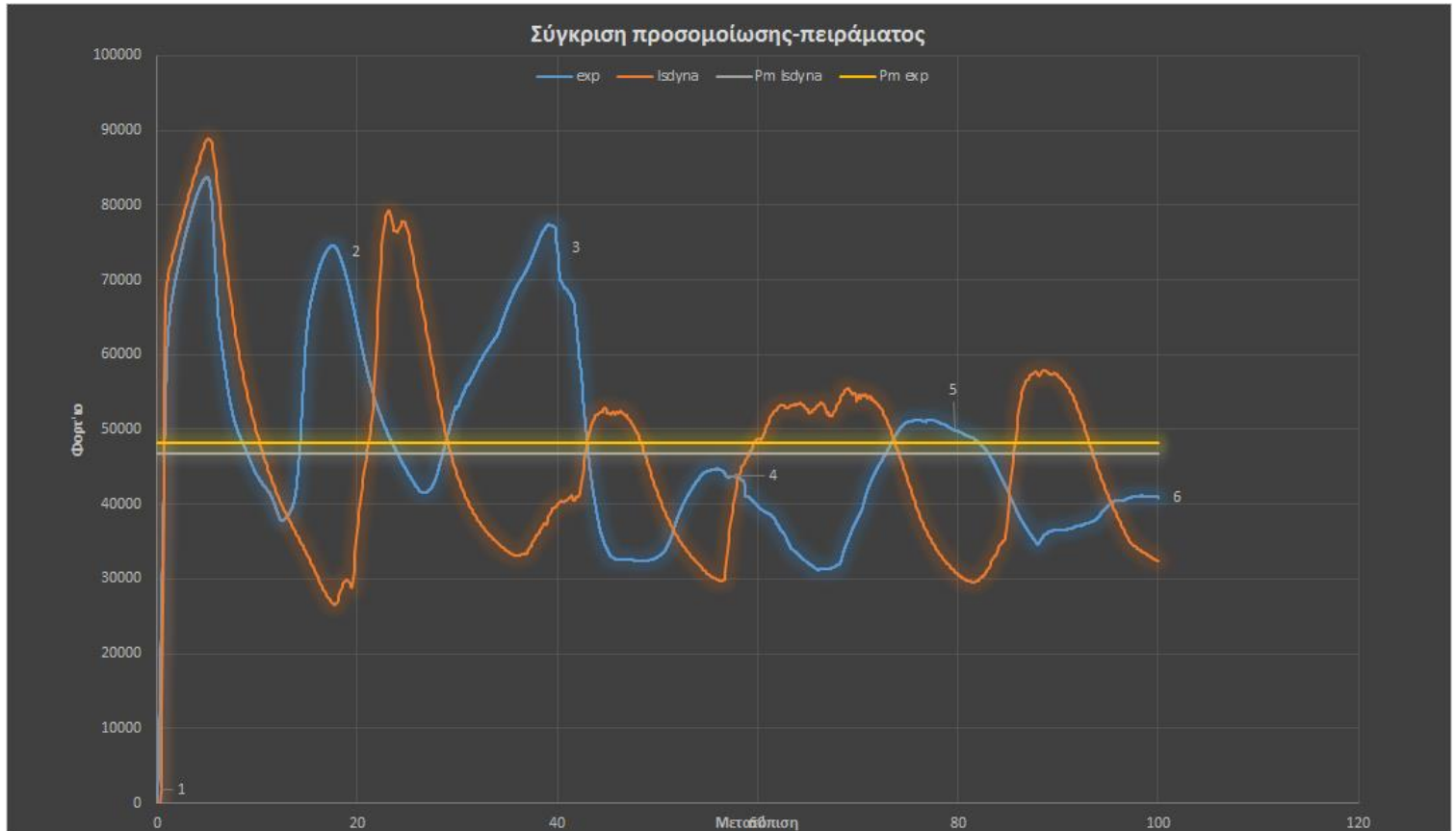


Εικόνα 85: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη)



Εικόνα 86: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με shell elements

Δοκίμιο A2E3	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	4,817 kJ	48,17 kN	83,70 kN	0,58
Προσομοίωση με shell elements.	4,232 kJ	42,32 kN	74,4 kN	0,56
Διαφορά(%)	12,1 %	12,1%	11,1%	3,4%



Εικόνα 87: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με solid elements

Δοκίμιο A2E3	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	4,817 kJ	48,17 kN	83,70 kN	0,58
Προσομοίωση με solid elements.	4,679 kJ	46,79 kN	88,90 kN	0,52
Διαφορά(%)	2,86%	2,86%	6,21%	10,3%

Συμπεράσματα

Κατά την πειραματική διαδικασία το δοκίμιο ακολούθησε μικτό τρόπο κατάρρευσης. Συνολικά δημιουργήθηκαν έξι λοβοί, δύο αξονοσυμμετρικοί και τέσσερις μη αξονοσυμμετρικοί, από τους οποίους ο τελευταίος δεν πρόλαβε να ολοκληρωθεί. Κυρίως λόγω του μεγάλου πάχους τα φορτία της κατάρρευσης ήταν πολύ ισχυρά, ειδικά για την δημιουργία του πρώτου λοβού. Κατά την ολοκλήρωση του τρίτου λοβού, ο δεύτερος μη εκτατός πιέστηκε πολύ και κατά τη διαπλάτυνσή του παρουσιάστηκαν θραύσεις λόγω των μεγάλων εφελκυστικών τάσεων που εμφανίστηκαν. Οι θραύσεις τελικώς εξελίχθηκαν σε αποκόλληση ενός μέρους του εξωτερικού σωλήνα. Έπειτα η κατάρρευση συνεχίστηκε με μη εκτατό τρόπο με χαμηλότερα φορτία. Και εδώ υπήρξε μια υποχώρηση του εσωτερικού πλαστικού σωλήνα. Τέλος, από την πάνω διατομή αποκολλήθηκε ένας μεταλλικός δακτύλιος λόγω του μεγάλου πάχους του μεταλλικού τοιχώματος και την υψηλή συμπίεση κατά την κάμψη για την δημιουργία του πρώτου λοβού.

Κατά την προσομοίωση της διαδικασίας με shell elements αρχικά υπάρχει μια διαμόρφωση στην κάτω διατομή του δοκιμίου, η οποία όμως δεν σχηματίζει ολοκληρωμένο λοβό. Έπειτα, δημιουργούνται δύο αξονοσυμμετρικοί λοβοί. Στη συνέχεια σχηματίζονται ακόμα τρεις μη αξονοσυμμετρικοί μέχρι το τέλος της κατάρρευσης. Οι τιμές της συνολικής ενέργειας και του μέσου φορτίου παρουσιάζουν απόκλιση 11%, ενώ του μέγιστου φορτίου 12%. Ο δείκτης CFE παρουσιάζει μικρή απόκλιση 3,4%. Συνολικά θα λέγαμε πως η προσομοίωση κρίνεται ικανοποιητική. Οι τιμές των μεγεθών παρουσίασαν απόκλιση από τις αντίστοιχες πειραματικές αλλά εντός ικανοποιητικών ορίων και ο τρόπος κατάρρευσης ακολούθησε το μοτίβο του πειράματος, χωρίς όμως μεγάλη ακρίβεια στην γεωμετρία των λοβών.

Κατά την προσομοίωση της διαδικασίας με solid elements αρχικά δημιουργείται ένας αξονοσυμμετρικός λοβός. Στη συνέχεια ακολουθείται μη εκτατός τρόπος κατάρρευσης με την δημιουργία ακόμα τριών λοβών. Στο τέλος της συμπίεσης, στο πάνω μέρος του δοκιμίου σχηματίζεται ένας αξονοσυμμετρικός λοβός και η διαδικασία τελειώνει. Οι τιμές της συνολικής ενέργειας και του μέσου φορτίου παρουσιάζουν μικρή απόκλιση 2,86%, του μέγιστου φορτίου 6,21% και του δείκτη CFE 10,3%. Συνολικά θα λέγαμε πως η προσομοίωση κρίνεται πολύ ικανοποιητική. Οι τιμές των μεγεθών διαφέρουν ελάχιστα από τις πειραματικές, η διαδικασία κατάρρευσης έχει προσομοιωθεί καλά και η γεωμετρία των λοβών φαίνεται πιστή στην πειραματική.

Συμπερασματικά, θα λέγαμε πως η προσομοίωση με solid elements κρίνεται πιο επιτυχημένη, αφού και οι τιμές βρίσκονται πολύ κοντά στις αντίστοιχες πειραματικές, αλλά και η κατάρρευση παρουσιάζει μεγαλύτερη πιστότητα στην κατάρρευση που εμφανίστηκε κατά το πείραμα.

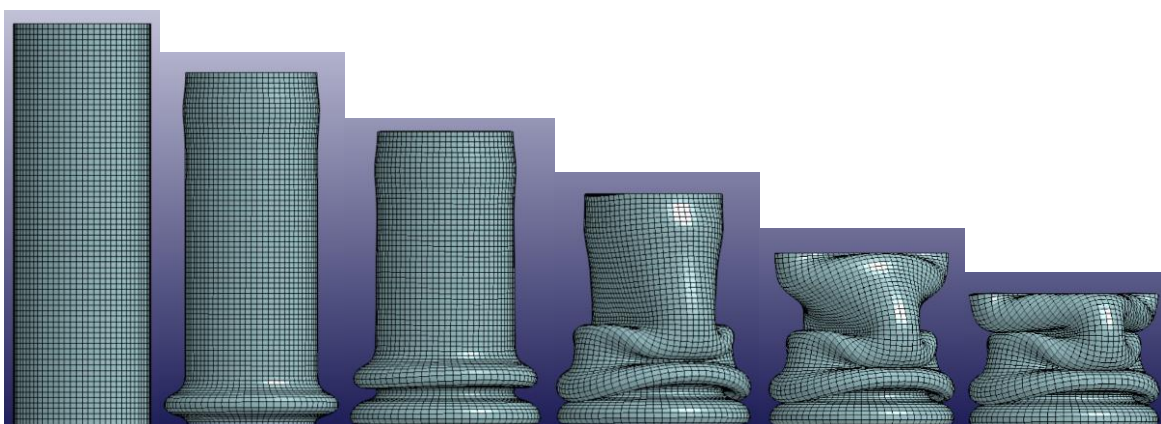
3.1.10 Δοκίμιο Α2Ε4:50Χ40 κατασκευασμένο από αλουμίνιο και επενδυμένο εσωτερικά με πλαστικό



Εικόνα 88: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης πειράματος



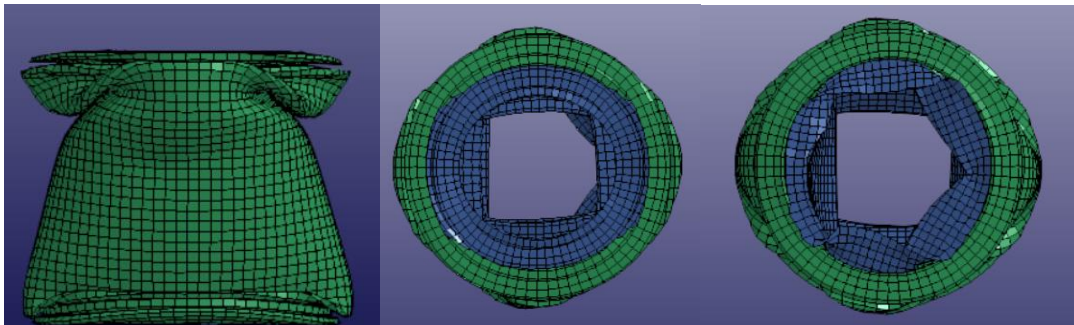
Εικόνα 89: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements.



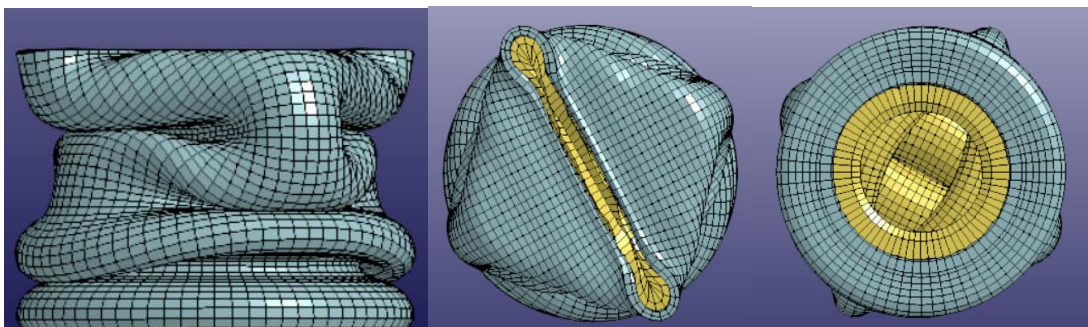
Εικόνα 90: Διαδοχικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με solid elements.



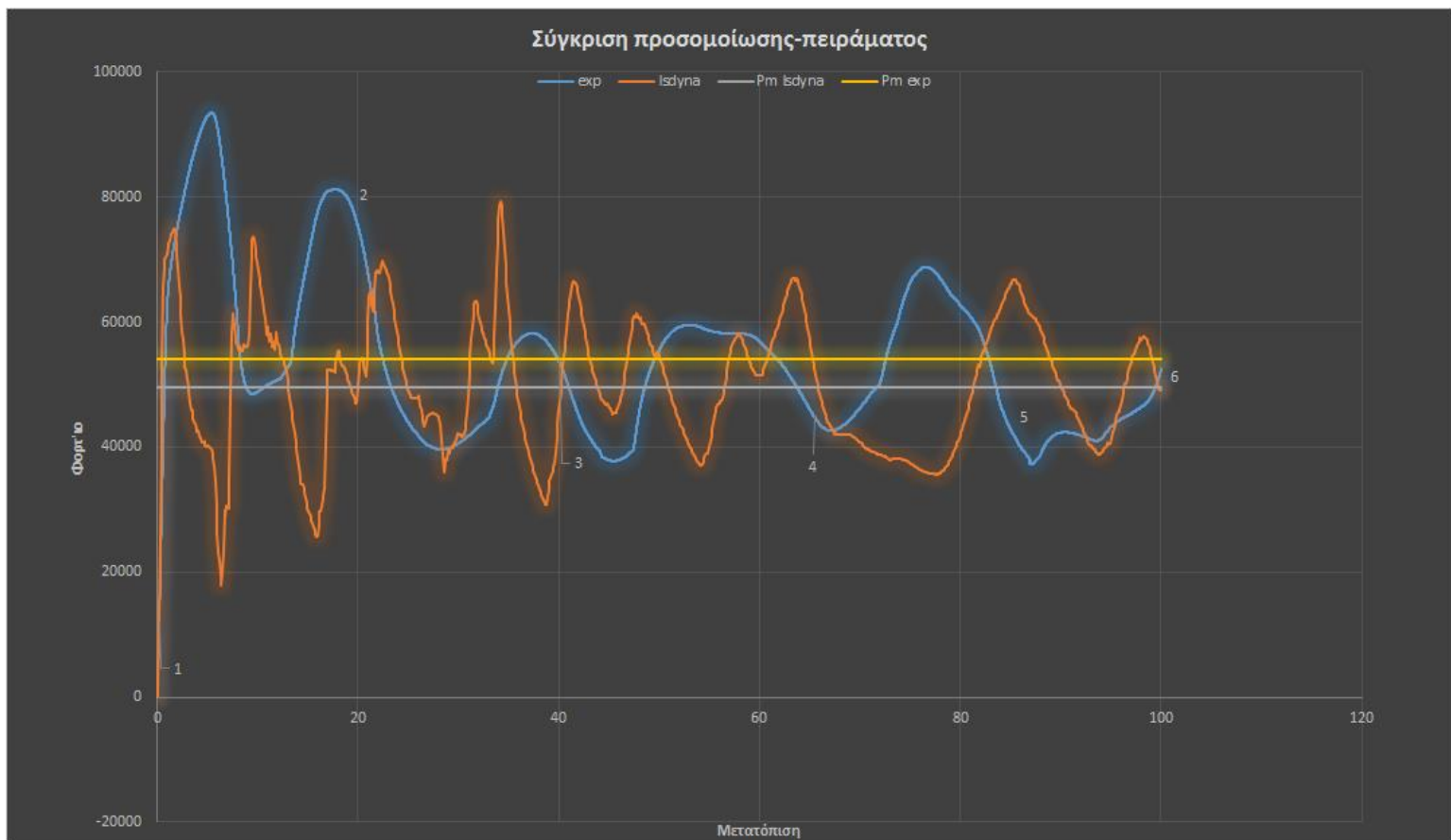
Εικόνα 91: Τελικές όψεις κατάρρευσης πειράματος(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη).



Εικόνα 92: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη)

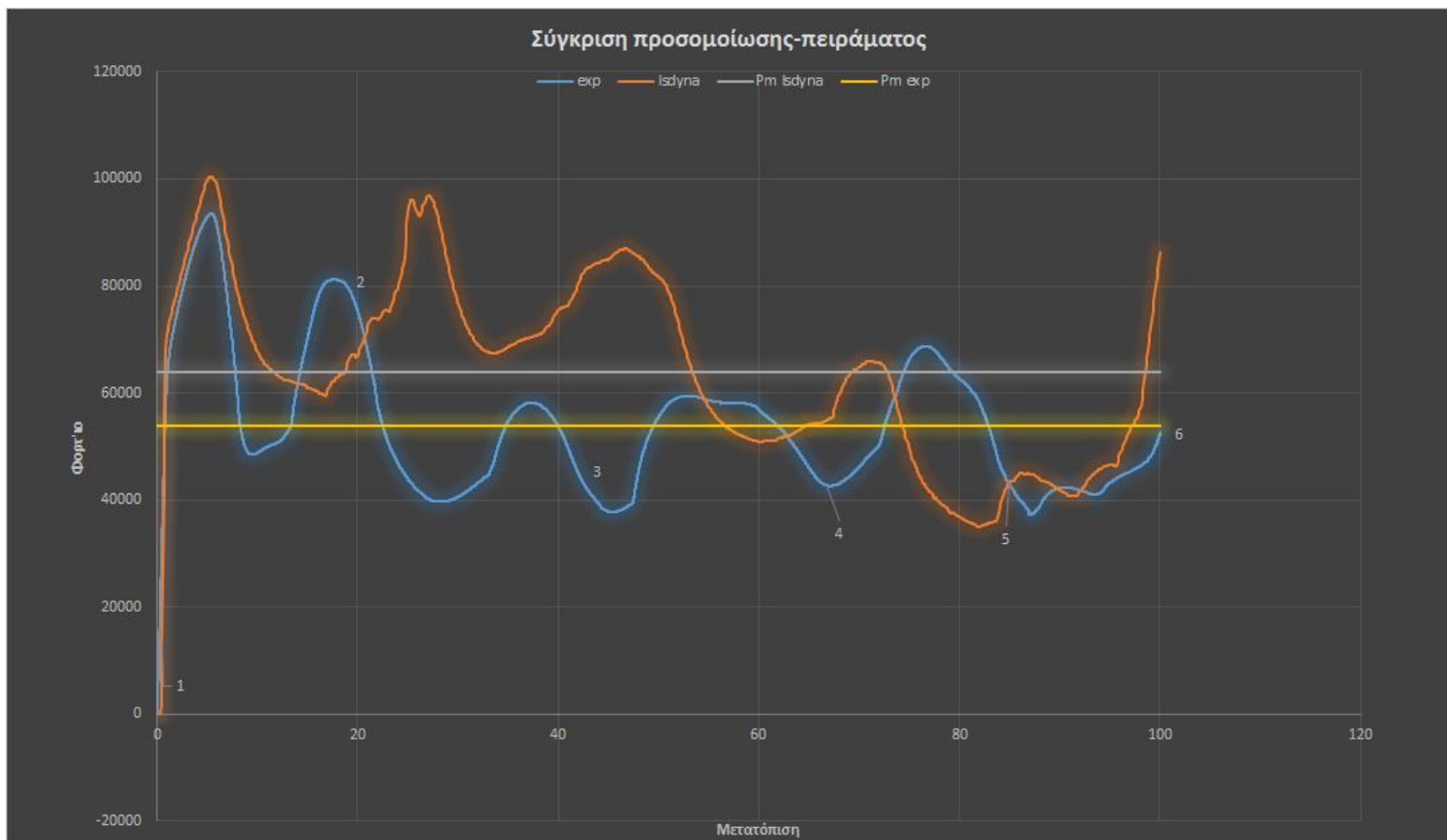


Εικόνα 93: Τελικές όψεις κατάρρευσης προσομοίωσης με shell elements(πρόσοψη, κάτοψη και άνοψη)



Εικόνα 94: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με shell elements

Δοκίμιο A2E4	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	5,399 kJ	53,99 kN	93,56 kN	0,58
Προσομοίωση με shell elements.	4,964 kJ	49,64 kN	78,7 kN	0,63
Διαφορά(%)	8,05%	8,05%	15,88%	8,6%



Εικόνα 95: Συγκριτική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης πειράματος και προσομοίωσης με solid elements

Δοκίμιο A2E4	Συνολική Ενέργεια Παραμόρφωσης (KJ)	Μέσο φορτίο θλίψης (kN)	Μέγιστο φορτίο θλίψης(kN)	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου(CFE)
Πείραμα	5,399 kJ	53,99 kN	93,56 kN	0,58
Προσομοίωση με solid elements.	6,387 kJ	63,87 kN	100 kN	0,63
Διαφορά(%)	18,2%	18,2%	6,88%	8,6%

Συμπεράσματα

Κατά την πειραματική διαδικασία στο παρών δοκίμιο εμφανίστηκαν οι μεγαλύτερες τιμές φορτίου από ότι στα υπόλοιπα πειράματα εξαιτίας του μεγαλύτερου πάχους του. Ο τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται μικτός, ξεκινώντας με έναν αξονοσυμμετρικό λοβό και συνεχίζοντας με τέσσερις μη αξονοσυμμετρικούς. Εξαιτίας του πολύ μεγάλου πάχους εμφανίζονται λίγοι λοβοί στο δοκίμιο κάτι που φαίνεται και στο διάγραμμα που τα μέγιστα φορτία απέχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Και σε αυτό το δοκίμιο εμφανίστηκαν θραύσεις στους πρώτους τέσσερις λοβούς, που όμως έμειναν περιορισμένες εντός τους και δεν εξελίχθηκαν.

Κατά την προσομοίωση της πειραματικής διαδικασίας με shell elements ακολουθείται και εδώ μικτός τρόπος κατάρρευσης. Αρχικά η παραμόρφωση ξεκινά στην κάτω διατομή του δοκιμίου σχηματίζοντας δύο αξονοσυμμετρικούς λοβούς. Έπειτα συνεχίζεται στην πάνω διατομή δημιουργώντας άλλον έναν αξονοσυμμετρικό και δύο μη αξονοσυμμετρικούς λοβούς. Τέλος η κάτω διατομή σχηματίζει έναν μη αξονοσυμμετρικό λοβό, ο οποίος είναι και ο τελευταίος. Οι τιμές της συνολικής ενέργειας και του μέσου φορτίου παρουσιάζουν απόκλιση 8,05%, ενώ το μέγιστο φορτίο απόκλιση 15,88%. Ο δείκτης CFE, τέλος, παρουσιάζει απόκλιση 8,6%. Συνολικά θα λέγαμε πως η προσομοίωση κρίνεται σχετικά ικανοποιητική, μιας και οι τιμές παρουσιάζουν απόκλιση εντός ορίων και ακολουθείται το μοτίβο της κατάρρευσης, αλλά η γεωμετρία των λοβών δεν παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με την πειραματική.

Κατά την προσομοίωση της πειραματικής διαδικασίας με solid elements επίσης ακολουθείται μικτός τρόπος κατάρρευσης. Αρχικά στην κάτω διατομή του δοκιμίου δημιουργείται ένας αξονοσυμμετρικός λοβός και η κατάρρευση συνεχίζεται με μη εκτατό τρόπο σχηματίζοντας ακόμα δύο λοβούς. Τέλος, υπάρχει πλάτυνση της πάνω διατομής η οποία τελικά σχηματίζει ακόμη έναν τελευταίο μη αξονοσυμμετρικό λοβό. Οι τιμές της συνολικής ενέργειας και του μέσου φορτίου παρουσιάζουν αρκετή απόκλιση από τις πειραματικές, 18,2%, ενώ το μέγιστο φορτίο παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση 6,88%. Ο δείκτης CFE παρουσιάζει την ίδια απόκλιση με πριν, 8,6%. Συνολικά θα λέγαμε πως η προσομοίωση κρίνεται σχετικά ικανοποιητική γιατί αν και οι τιμές των μεγεθών παρουσιάζουν αρκετή απόκλιση, που όμως είναι εντός λογικών ορίων, το μοτίβο της κατάρρευσης και η γεωμετρία των λοβών παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι με την προσομοίωση με shell elements πετυχαίνουμε καλύτερη προσέγγιση στα πειραματικά μεγέθη, όμως με την προσομοίωση με solid elements αν και η απόκλιση στα μεγέθη είναι λίγο μεγαλύτερη, πετυχαίνουμε καλύτερη πιστότητα στην αποτύπωση της κατάρρευσης.

3.2 Σημαντικότερα αίτια αποκλίσεων υπολογιστικών και πειραματικών μεγεθών.

Όπως παρατηρήθηκε στη σύγκριση μεταξύ των πειραμάτων και των προσομοιώσεων υπήρξαν αποκλίσεις, τόσο στις τιμές των μεγεθών όσο και στον τρόπο ή την γεωμετρία (μοτίβο) κατάρρευσης, οι οποίες διέφεραν από δοκίμιο σε δοκίμιο και από προσομοίωση σε προσομοίωση. Εδώ θα γίνει μια προσπάθεια να εξηγηθούν τα αίτια της παρουσίας αυτών των αποκλίσεων.

Αρχικά παρατηρήθηκε σε αρκετά δοκίμια διαφορά στον αριθμό των λοβών που σχηματίστηκαν σε σχέση με το πείραμα. Σημαντικός λόγος για τον σχηματισμό λιγότερων λοβών είναι η πυκνότητα της διακριτοποίησης κατά ύψος και κατά περίμετρο. Η διακριτοποίηση που επιλέχθηκε στις προσομοιώσεις ήταν 2x2, δηλαδή οι διαστάσεις του κάθε πεπερασμένου στοιχείου ήταν 2mm x 2mm. Ο σημαντικότερος λόγος επιλογής αυτής της διακριτοποίησης ήταν ότι μείωσε τους χρόνους προσομοίωσης τουλάχιστον στο μισό, από τη διακριτοποίηση 1x1 που είχε επιλεγεί αρχικά, χωρίς πρακτικά να μειώσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, το λεπτότερο τοίχωμα δοκιμίου που μελετούσαμε ήταν ίσο με 1mm, οπότε οι λοβοί που θα σχηματίζονταν θα είχαν - θεωρητικά - το λιγότερο 1mm ημιμήκος. Τα παραπάνω δεν μας επηρέασαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σημαντικά, αλλά οδήγησαν σε σχηματισμό λοβών μεγαλύτερης κλίμακας. Αυτό σε συνδυασμό με τις συνοριακές συνθήκες (μέτωπο επαφής και τριβή) οδήγησαν σε κάποιες περιπτώσεις στην εμφάνιση ενός ή δύο λιγότερων λοβών σε σχέση με τα πειράματα.

Δεύτερος σημαντικός λόγος που οδήγησε σε απόκλιση μεταξύ των δύο τρόπων προσομοίωσης μεταξύ τους είναι οι συνοριακές συνθήκες που δημιουργούνται. Κατά την προσομοίωση με shell elements και solid elements διαφέρουν, και αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό παρατηρώντας την επαφή της πάνω πλάκας με το δοκίμιο όταν ξεκινάει η συμπίεση. Στις προσομοιώσεις με solid elements φαίνεται πώς το πρόγραμμα 'αντιλαμβάνεται' καλύτερα την επαφή πλάκας δοκιμίου (πλήρες/επίπεδο μέτωπο) με αποτέλεσμα σε κάποιες περιπτώσεις να σχηματίζεται αξονοσυμμετρικός λοβός, ενώ στην αντίστοιχη shell elements προσομοίωση σχηματιζόταν μη αξονοσυμμετρικός. Επιπλέον φαίνεται σε κάποιες περιπτώσεις πως το δοκίμιο δέχεται την επαφή από την πάνω πλάκα και ο λοβός σχηματίζεται λίγο αργότερα, και όχι στην άμεση πρώτη επαφή όπως γίνεται στα shell elements (οριακά κυκλική γραμμή επαφής λόγω - θεωρούμενου από τον κώδικα - ημικυλινδρικής ακμής των μετωπικών shell elements).

Άλλος λόγος εμφάνισης αποκλίσεων είναι το είδος προσομοίωσης κάμψης που χρησιμοποιήθηκε. Σε όλα τα δοκίμια χρησιμοποιήσαμε, από τις παραμέτρους του keyword manager, το ELFORM=2 (element formulation – μηχανική συμπεριφορά/μαθηματική διατύπωση του εν λόγω πεπερασμένου στοιχείου [30, 31]). Έτσι, το δοκίμιο είναι γενικά δύσκαμπτο, αλλά τα αποτελέσματα που δίνει το παρών element formulation είναι πιο ρεαλιστικά.

Σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση αποκλίσεων, επίσης, διαδραματίζει και η διαφορά στην σύσφιξη πλαστικών-αλουμινένιων σωλήνων. Η σύσφιξη αυτή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έγινε στο Εργαστήριο από εμάς χρησιμοποιώντας τον τόρνο. Η μοντελοποίηση όμως, που χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει αυτή την σύσφιξη, έγινε με σχετικά απλού τύπου contact λόγω μη περεταίρω έρευνας σε αυτό το κομμάτι. Έτσι τα τελικά αποτελέσματα είναι λογικό να επηρεάζονται σε έναν, όχι μεγάλο, βαθμό και να εμφανίζονται αποκλίσεις σε σχέση με τα πειραματικά.

Τέλος, ο σημαντικότερος ίσως λόγος για τις διαφορές που παρουσιάζονται μεταξύ πειράματος-προσομοίωσης, και ειδικά στα δοκίμια κατασκευασμένα από ertalon, είναι η εξιδανίκευση του πάχους των δοκιμίων. Αυτός ο λόγος δεν επηρεάζει σημαντικά τα μονά δοκίμια από αλουμίνιο γιατί η κατασκευή τους έγινε σε βιομηχανία και οι διαστάσεις ήταν πολύ κοντά στις ονομαστικές. Τα πλαστικά δοκίμια όμως κατασκευάστηκαν στον τόρνο του εργαστηρίου. Το αποτέλεσμα ήταν οι διαστάσεις των δοκιμίων να μην ταυτίζονται ακριβώς με τις ονομαστικές και να υπάρχουν ανομοιομορφίες στο πάχος. Αυτές οι ανομοιομορφίες παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατάρρευση

των δοκιμίων και είναι πολύ δύσκολο να προσομοιωθούν, αφού τα δοκίμια μοντελοποιούνται με τις ονομαστικές διαστάσεις τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Γενικά Συμπεράσματα – Προτάσεις για Συνέχιση και Επέκταση της Έρευνας

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματος σχετικά με την αξονική κατάρρευση δοκιμίων και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εσωτερικής επένδυσης μεταλλικών σωλήνων με πλαστικό.

Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων της αξονικής καταπόνησης το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στη μεταβολή του τρόπου κατάρρευσης και της συνακόλουθης απορροφούμενης ενέργειας με την προσθήκη της εσωτερικής πολυμερούς επένδυσης. Το πρώτο πράγμα που παρατηρείται είναι πως το μέσο φορτίο (και η απορροφούμενη ενέργεια) παρουσιάζει σημαντική αύξηση με την προσθήκη εσωτερικής επένδυσης, με ελάχιστη αύξηση του βάρους λόγω της ιδιαίτερα χαμηλής πυκνότητας του πολυμερούς. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το μικρό βάρος των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας αποτελεί αυτονόητη πρϋπόθεση, καθώς η πλέον εκτεταμένη εφαρμογή τους αφορά σε μέσα μεταφοράς. Η αύξηση του φορτίου και της απορροφούμενης ενέργειας οφείλεται σίγουρα στο μεγαλύτερο πάχος του δοκιμίου που προκύπτει, αλλά και στην αλληλεπίδραση των τρόπων κατάρρευσης των δοκιμίων. Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, τα μονά δοκίμια ακολουθούσαν ή εκτατό ή μη εκτατό τρόπο κατάρρευσης. Με την προσθήκη επένδυσης όμως το δοκίμιο ακολουθούσε μικτό τρόπο, συνήθως σχηματίζοντας αξονοσυμμετρικούς λοβούς στην αρχή και μη αξονοσυμμετρικούς έπειτα. Σημαντική παρατήρηση είναι επίσης πως το μέσο φορτίο κατάρρευσης στα δοκίμια από δύο υλικά είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερο από το άθροισμα των μέσων φορτίων του κάθε υλικού ξεχωριστά.

Γενικά, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποτύπωσαν πολύ ικανοποιητικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις που εμφανίστηκαν ήταν εντός αποδεκτών ορίων με λίγες εξαιρέσεις στις περιπτώσεις που στο πείραμα υπήρξαν θραύσεις ή άλλες ανωμαλίες στην διαδικασία που δεν γίνονταν να προσομοιωθούν. Φυσικά, δεν επιτυγχάνεται απόλυτη σύγκλιση, ιδιαίτερα στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, καθώς δεν εξαλείφονται εντελώς οι υπόλοιπες συνθήκες του μοντέλου που απέχουν από την πραγματικότητα και αφορούν το υλικό και άλλες παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Συνολικά θα λέγαμε όμως πως η προσομοίωση προέβλεψε με ικανοποιητική ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα, καθιστώντας αυτή τη μέθοδο πολύ χρήσιμη σε περιπτώσεις μελέτης αξονικής κατάρρευσης, χωρίς να χρειάζεται σε πρώτο βήμα να διεξαχθεί πείραμα για να εξαχθούν κάποια πρώτα συμπεράσματα με πολύ οικονομικό τρόπο (εργαλείο πρόβλεψης).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι από την σύγκριση μεταξύ των μεθόδων προσομοίωσης, η μέθοδος με shell elements παρουσίασε πολύ μικρούς χρόνους τρεξίματος και καλύτερα αποτελέσματα στις περιπτώσεις τις οποίες τα δοκίμια ήταν λεπτότοιχα. Όταν το πάχος των δοκιμίων ξεπερνούσε τα 2mm, και ιδιαίτερα στα δοκίμια επενδυμένα με πλαστικό όπου τα υλικά αλληλεπιδρούσαν μεταξύ τους, η μέθοδος με solid elements κρίθηκε πιο αποτελεσματική στην καλύτερη προσομοίωση και επίτευξη και των τιμών των μεγεθών, παρουσιάζοντας μικρές αποκλίσεις, αλλά και της γεωμετρίας κατάρρευσης, σχηματίζοντας λοβούς πιστούς γεωμετρικά στους πραγματικούς.

Κλείνοντας, σημειώνονται δύο προτάσεις για την συνέχιση και επέκταση της έρευνας αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη η περαιτέρω διερεύνηση της ποιότητας σύνδεσης (ισχύος σύνδεσης) μεταξύ δύο σωληνών, με στόχο την καλύτερη μοντελοποίηση και με πιο εξειδικευμένους τύπους για την μεταξύ τους διεπαφή (contacts τύπου tied και release). Τέλος, θα μπορούσε να προσομοιωθεί και να μοντελοποιηθεί το ενδεχόμενο θράυσης των μεταλλικών δοκιμίων κατά την συμπίεση, με κριτήρια κρίσιμης παραμόρφωσης, αστοχίας και με την μέθοδο της απότομης διαγραφής πεπερασμένων στοιχείων (element deletion).

Βιβλιογραφία

- 1. Axial plastic collapse of thin bi-material tubes as energy dissipating systems - A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous, W. Johnson**
- 2. Experimental and analytical assesment of axial crushing of circular hybrid tubes under quasi-static load - M. Mirazei, M. Shakeri, M. Sadighi, H. Akbarshahi**
- 3. Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading - S. Salehghaffari, M. Tajdari, M. Panahi, F. Mokhtarnezhad**
- 4. Collapsible impact energy absorbers: an overview - A.A.A. Alghamdi**
- 5. The energy absorption characteristics of double-cell tubular profiles - S. Chung Kim Yuen, G.N. Nurick, R.A. Starke**
- 6. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis - A.G. Olabi, Edmund Morris, M.S.J. Hashmi**
- 7. Axial crushing force of externally fibre-reinforced metal tubes - X. Wang, G. Lu**
- 8. A numerical study on the impact response and energy absorption of tapered thin-walled tubes - G.M. Nagel, D.P. Thambiratnam. (2004). International Journal of Mechanical Sciences.**
- 9. A study of lateral collapse of square and rectangular metallic tubes. - N.K. Gupta, G.S. Sekhon, P.K. Gupta. (2001). Thin-Walled Structures 39.**
- 10. Static and dynamic crushing of tapered sheet metal tubes of rectangular cross section. - S.R. Reid, T.Y.Reddy. (1986). International Journal of Mechanical Sciences 28(9).**
- 11. The quasi-static crumpling of thin-walled circular cylinders and frusta under axial compression - A.G. Mamalis, W. Johnson, Int. J. Mech. Sci. Vol. 25, No. 9-10, pp. 713-732, 1983.**
- 12. Inextensional collapse of thin-walled tubes under axial compression - W. Johnson, P.D. Soden, S.T.S. Al-Hassani, Journal of Strain Analysis 12 (4), 317-330, 1977.**
- 13. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading - J.M. Alexander, Q. J. Mech. Appl. Math. 13, 1-9, 1960.**
- 14. Some aspects of axial collapse of thin cylindrical thin –walled tubes - N.K. Gupta, Thin-Walled Structures 32, 111-126, 1998**
- 15. Mathematical modeling of axial crushing of cylindrical tubes - .K. Gupta, Husain Abbas, Thin-Walled Structures 38, 355-375, October 2000.**
- 16. An analysis of axi-symmetric axial collapse of round tubes - N.K. Gupta & R. Velmurugan, Thin-Walled Structures 22, 261-274, 1995.**

- 17. Curved fold model analysis for axi-symmetric axial crushing of tubes** - H. Abbas, B.L. Tyagi, M. Arif, N.K. Gupta, Thin-Walled Structures 41, 639-661, December 2002.
- 18. Dynamic axial crushing of circular tubes** - Wlodzimierz Abramowicz, Norman Jones, Int. J. Impact Engng. Vol. 2, No. 3, pg. 263-281, 1984
- 19. Static and dynamic axial crushing of circular and square tubes** - Norman Jones, Wlodzimierz Abramowicz. In Reid SR, editor, Metal forming and Impact Mechanics, Oxford, Pergamon Press, 1985:225
- 20. The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns** - Wlodzimierz Abramowicz, Polish Academy of sciences, Institute for Fundamental Technological Research, Poland 1983
- 21. Simplified crushing analysis of thin-walled columns and beams** - Wlodzimierz Abramowicz, Eng. Transactions 29, 5-26, 1981
- 22. On the crushing mechanics of thin-walled structures** - T. Wierzbicki, W. Abramowicz, J. Appl. Mech. 50, 727-734, 1983
- 23. Optimum design of integrated front panel against crush** - Report for Ford Motor Company, Vehicle Component Dept., 1983
- 24. Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading** - K.R.F. Andrews, G.L. England, E. Ghani, Int. J. Mech. Sci., 25:687-96, 1983
- 25. An alternate method for determining the behaviour of round stocky tubes subjected to an axial crush load** - R.H. Grzebeita, Thin-Walled Structures, 9:61-89, 1990
- 26. The large scale crumpling of thin cylindrical columns** - A.G. Pugsley, M. Macaulay, Quart. J. Mech. and Applied Math., 13:1-9, 1960
- 27. On the crumpling of thin tubular struts** - A.G. Pugsley, Quart. J. Mech. and Applied Math., 32:1-7, 1979
- 28. Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading** - S. Salehghaffari, M. Tajdari, M. Panahi, F. Mokhtarnezhad, Thin-Walled Structures, 48 (2010), 379-390
- 29. Transition from progressive to global bending of circular shells under axial impact- Part 1: Experimental and numerical observation** - D. Karagiozova, M. Alves, International Journal of Solids and Structures, Volume 41, Issues 5-6, March 2004, 1565-1580
- 30. LS-DYNA Theoretical Manual** – Livermore Software Technology Corporation, compiled by John O. Hallquist, 1992
- 31. LS-DYNA Training Manual, A pre- and post- processor for use with LS-DYNA** - Livermore Software Technology Corporation, 2003