



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΡΟΦΙΛ  
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ  
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΚΑΤΣΑΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβρης 2017

Περιεχόμενα	
Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract .....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	9
Crashworthiness και Ενεργειακοί Απορροφητές (Energy Absorbers) .....	9
Δείκτης Ομοιομορφίας ( $\eta$ ) .....	9
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA).....	10
Χαρακτηριστικά Crashworthiness και Ενεργειακών Απορροφητών .....	10
Γεωμετρία.....	10
Υλικό .....	11
Τρόποι Φόρτισης.....	11
Θεωρητική προσέγγιση διαδικασίας λυγισμού – Διαμόρφωση πλαστικών αρμών .....	13
Κατάρρευση με μη εκατούς λοβούς.....	13
Κατάρρευση με εκατούς λοβούς.....	13
Κατάρρευση με λοβούς μικτού τύπου .....	14
Λυγισμός.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	15
Πειραματικό Μέρος – Αποτελέσματα.....	15
Πειράματα-Γενικά .....	15
Διατομές και Αρίθμηση Δοκιμών.....	17
Αξονική Καταπόνηση.....	19
Αποτελέσματα-Δοκίμιο 1 .....	19
Αποτελέσματα-Δοκίμιο 2 .....	23
Αποτελέσματα-Δοκίμιο 3 .....	26
Αποτελέσματα-Δοκίμιο 4 .....	30
Πλευρική Καταπόνηση .....	34
Αποτελέσματα-Δοκίμιο 1 .....	34
Αποτελέσματα-Δοκίμιο 2_1 .....	37
Αποτελέσματα-Δοκίμιο 2_2 .....	40
Αποτελέσματα-Δοκίμιο 3 .....	43
Αποτελέσματα-Δοκίμιο 4 .....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	48

Προσομοιώσεις των πειραματικών δοκιμών μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Ls-Dyna .....	48
Σχεδίαση Διάταξης- Συνοριακές Συνθήκες .....	48
Προσομοιώσεις-Μοντέλα .....	51
Προσομοίωση Αξονικής Καταπόνησης- Δοκίμιο 1.....	51
Προσομοίωση Αξονικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 2.....	55
Προσομοίωση Αξονικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 3.....	59
Προσομοίωση Αξονικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 4.....	63
Προσομοίωση Πλευρικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 1 .....	67
Προσομοίωση Πλευρικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 2_1 .....	71
Προσομοίωση Πλευρικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 2_2 .....	77
Προσομοίωση Πλευρικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 3 .....	81
Προσομοίωση Πλευρικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 4 .....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	90
Γενικά Συμπεράσματα.....	90
Συμπεράσματα από τις πειραματικές δοκιμές .....	95
Συμπεράσματα από την υπολογιστική προσομοίωση .....	95
Βιβλιογραφία .....	96

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, όλους όσοι βοήθησαν στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ξεκινώντας από τον επιβλέποντα Καθηγητή κύριο Δημήτριο Μανωλάκο, τον οποίο κι ευχαριστώ ιδιαίτερα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος καθώς επίσης και για την καθοδήγηση του καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Πρωτεσίλαο Κωστάζο, Διδάκτορα μηχανολόγο μηχανικό και μέλος Ε.Δι.Π., η συμβολή του οποίου υπήρξε καθοριστική τόσο στην κατασκευή των δοκιμών και τη διεξαγωγή των πειραμάτων, όσο και στην υπολογιστική προσομοίωση και χωρίς τη συνεισφορά του οποίου δε θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## Περίληψη

Μια από τις βασικότερες παραμέτρους που λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό των μηχανολογικών κατασκευών, είναι το *crashworthiness*, δηλαδή ο τρόπος που απορροφάται η ενέργεια σε μία σύγκρουση. Ειδικότερα, ο κλάδος του *crashworthiness* μελετά την κατάρρευση ειδικά διαμορφωμένων μεταλλικών σωλήνων (ενεργειακών απορροφητών), ώστε αυτοί μέσω της παραμόρφωσης και του πλαστικού έργου να απορροφούν την ενέργεια της κρούσης και να προστατεύουν την υπόλοιπη κατασκευή και τους χρήστες της.

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας μελετήθηκε η αξονική και πλευρική καταπόνηση σε 4 διαφορετικούς τύπους από προφίλ αλουμινίου. Πρόκειται για σύνθετα προφίλ αλουμινίου με ανοιχτές και κλειστές επιφάνειες, τα οποία προήλθαν από επεξεργασία *extrusion*.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν πειράματα αξονικής και πλευρικής καταπόνησης σε πρέσσα για τα 4 διαφορετικά δοκίμια. Για κάθε πείραμα παρουσιάζονται κάποια στιγμιότυπα της πειραματικής διαδικασίας, η καμπύλη μετατόπισης-φορτίου καθώς και τα βασικότερα αριθμητικά αποτελέσματα που δείχνουν την αποδοτικότητα στην απορρόφηση ενέργειας για το κάθε δοκίμιο. Επίσης γίνονται παρατηρήσεις και σχόλια για το τρόπο κατάρρευσης του κάθε δοκιμίου.

Τέλος, γίνεται και υπολογιστική προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων *Ls-Dyna*. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά και εξετάσθηκε κατά πόσο συγκλίνουν.

## Abstract

Crashworthiness is an important factor which plays a crucial role at the design of mechanical structures. Crashworthiness is the way that energy is absorbed in case of impact. Specifically, it deals with the special structures called energy absorbers. Energy absorbers are metallic tubes which absorb impact energy by converting it to plastic energy via deformation in an irreversible manner.

In the present study axial and lateral collapse of 4 different types of aluminum extrusions were analyzed. They are complex aluminum extrusions with open and closed areas.

Firstly, axial and lateral collapse experiments have been done in a mechanical press. For every experiment are presented some pictures, the curve of load – displacement and the most important numerical results which show the efficiency of of the material in crashworthiness.

Finally, a numerical simulation for the experiments has been done with the finite element method LS-Dyna. The results of the modeling have been compared with the experimental results.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μηχανολογικές κατασκευές και κυριότερα στις ζώνες πρόσκρουσης, μία πολύ σημαντική παράμετρος είναι η απορρόφηση ενέργειας στις συγκρούσεις (Crashworthiness). Το πως απορροφάται η ενέργεια σε μια σύγκρουση είναι θέμα ασφαλείας κατά κύριο λόγο, με το πιο σύνθημα να είναι αυτό του αυτοκινήτου, αφού καθημερινά γίνονται συγκρούσεις αυτοκινήτων αριθμώντας απώλειες ανθρώπων. Οι αυτοκινητοβιομηχανίες επενδύουν πολλά στην παθητική ασφάλεια των οχημάτων, δηλαδή στην ομαλή απορρόφηση ενέργειας από τα μεταλλικά κυρίως μέρη του αμαξώματος. Παράλληλα στόχος είναι και η μείωση του βάρους του οχήματος με στόχο τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Για το λόγο αυτό η χρήση κραμάτων αλουμινίου είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη. Το αλουμίνιο είναι ελαφρύ και κατάλληλα ανθεκτικό για να απορροφήσει ελεγχόμενα και ομαλά την ενέργεια μιας σύγκρουσης.



Εικόνα 1

Για να επιτευχθεί όμως ένα τόσο ολοκληρωμένο αποτέλεσμα, δηλαδή η προόδευτική και ελεγχόμενη κατάρρευση μιας τόσο σύνθετης μηχανολογικής κατασκευής όπως το αυτοκίνητο, θα πρέπει να ελεγχθούν και να μετρηθούν όλα τα επιμέρους μέρη του. Θα πρέπει όλα τα επιμέρους μηχανολογικά στοιχεία να υποβληθούν σε πειράματα ή προσομοιώσεις και να επιλεγθούν ανάλογα με το τρόπο που αντιδρούν, ώστε να οδηγηθούμε σταδιακά σε ένα πιο ολοκληρωμένο αποτέλεσμα.

Η μέτρηση των μηχανολογικών στοιχείων γίνεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι πειραματικά μέσω πρέσας, όπου παίρνουμε τις μετρήσεις του μηχανήματος από μια πραγματική κατάσταση. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω της δημιουργίας μοντέλων σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Σε αυτή τη περίπτωση δεν υπάρχει πραγματική κατάσταση, αλλά μια ιδανική προσομοίωση, έχοντας γίνει κάποιες παραδοχές.

Στη παρούσα διπλωματική έγινε επεξεργασία σε 4 διαφορετικά δοκίμια αλουμινίου. Τα δοκίμια ήταν ουσιαστικά προφίλ αλουμινίου σε διαφορετικές γεωμετρίες. Πρόκειται για σύνθετες διατομές, ανοιχτές ή κλειστές που μελετάται η συμπεριφορά τους σε πλευρική και αξονική καταπόνηση. Αρχικά πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση και μετά έγινε και προσομοίωση των πειραμάτων στο

πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA. Παρουσιάζονται παρατηρήσεις πάνω στις διαφορετικές αντιδράσεις του εκάστοτε δοκιμίου ως προς το crashworthiness. Έπειτα συγκρίνονται τα αποτελέσματα και αξιολογείται η αξιοπιστία του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Πιο αναλυτικά, στο δεύτερο κεφάλαιο παραθέτονται πληροφορίες από βιβλιογραφία πάνω στο Crashworthiness και την αντοχή υλικών. Στο τρίτο κεφάλαιο ακολουθεί το πειραματικό μέρος και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων και στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται σύγκριση αποτελεσμάτων ανάμεσα σε πειραματικό μέρος και τις προσομοιώσεις, καθώς και συμπεράσματα. Τέλος παρατίθεται βιβλιογραφία.



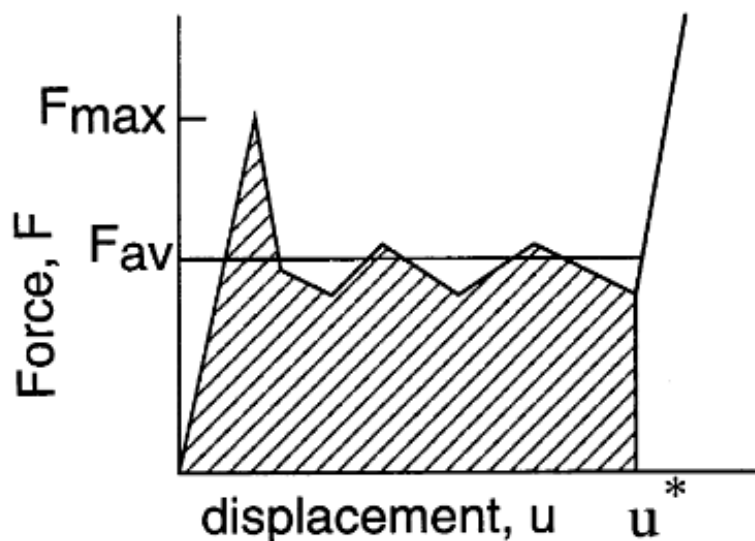
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Crashworthiness και Ενεργειακοί Απορροφητές (Energy Absorbers)

Με τον όρο Crashworthiness, περιγράφουμε τη μελέτη διατάξεων οι οποίες χρησιμοποιούνται ώστε, μέσω της κατάρρευσής τους, να απορροφούν την ενέργεια που προέρχεται από σύγκρουση και να προστατεύουν την υπόλοιπη κατασκευή στην οποία έχουν εφαρμοσθεί. Ουσιαστικά, το crashworthiness, ασχολείται με τη συμπεριφορά κατάρρευσης διατάξεων (κυρίως κελυφών), οι οποίες διαχέουν την κινητική ενέργεια που παραλαμβάνουν από την κρούση, μετατρέποντάς την σε πλαστικό έργο. Οι διατάξεις που μελετώνται για αυτό το σκοπό, ονομάζονται ενεργειακοί απορροφητές. Σκοπός των ενεργειακών απορροφητών είναι η (όσο το δυνατόν) μεγαλύτερη απορρόφηση κινητικής ενέργειας κατά την κρούση και η μετατροπή της σε μη αναστρέψιμη μορφή (πλαστικό έργο), με απώτερο στόχο την προστασία της κατασκευής στην οποία εμπεριέχονται. [1]

#### Δείκτης Ομοιομορφίας ( $\eta$ )

Πρακτικά οι ενεργειακοί απορροφητές έχουν το χαρακτηριστικό της διακύμανσης του φορτίου όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Μία αρχική μέγιστη τιμή φορτίου  $F_{max}$  ξεπερνά τη μέση τιμή φορτίου  $F_{av}$  και οδηγεί σε μια αυξημένη ταχύτητα και ενδεχόμενη κατάρρευση του αντικειμένου. Η απόδοση της δύναμης συγκρούσε ορίζεται από το δείκτη  $\eta = \frac{F_{av}}{F_{max}}$ , που είναι ένα χρήσιμο μέγεθος, αφού δείχνει την ομοιομορφία του φορτίου κατάρρευσης. Σε μια ιδανική περίπτωση θα είχαμε  $\eta=1$ . Η απόδοση της δύναμης κατάρρευσης σχετίζεται με τη στατική αποτελεσματικότητα που εισήχθει από τον Puglsey (1960), που ορίστηκε σαν το λόγο του μέσου φορτίου κατάρρευσης προς το οριακό φορτίο της κατασκευής. Σε μια ιδανική περίπτωση ένας ενεργειακός απορροφητής είναι όσο το δυνατό πιο συμπαγής, με μήκος  $L$  ίσο με το ωφέλιμο μήκος διαδρομής. Περιληπτικά η απορρόφηση της ενέργειας μεγιστοποιείται όταν χρησιμοποιούμε έναν ενεργειακό απορροφητή με υψηλή απόδοση φορτίου. Στις εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας χρησιμοποιείται ένα υλικό ελάχιστου όγκου και μάζας για ένα συγκεκριμένο επίπεδο απορροφούμενης ενέργειας  $W$  και για μια μέγιστη δύναμη κατάρρευσης  $F_{max}$ . [2]



Εικόνα 2 [2]

## Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται συχνά για τη μείωση του βάρους των μηχανολογικών κατασκευών. Στη βιομηχανία αυτοκινήτων μείωση του βάρους είναι σημαντική, αφού η κατανάλωση καυσίμου συνδέεται άμεσα με το βάρος του οχήματος. Μια σημαντική παράμετρος στη μελέτη του crashworthiness και της απορρόφησης ενέργειας, που χρησιμοποιείται συχνά από τις αυτοκινητοβιομηχανίες είναι η ενέργεια που απορροφάται ανά μέτρο μάζας του υλικού που καταρρέει. Η παράμετρος αυτή ονομάζεται ειδική ενέργεια απορρόφησης (Specific Energy Absorption - SEA). Η SEA δίνει ένα μέτρο απόδοσης της απορροφούμενης ενέργειας μιας κατασκευής.

Η Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$SEA = \frac{E}{m_c} = \frac{\int_0^{s_f} F ds}{m_l \cdot s_f}$$

Δηλαδή ισούται με τη συνολική απορροφούμενη ενέργεια του υλικού προς την ειδική του μάζα. Όπου η ειδική μάζα της κατασκευής υπολογίζεται από τη μάζα ανά μέτρο μήκους του υλικού επί το μήκος του υλικού. [13]

## Χαρακτηριστικά Crashworthiness και Ενεργεικών Απορροφητών

### Γεωμετρία

Ο δομικός σχεδιασμός για την απορρόφηση ενέργειας είναι μια πρόκληση ως προς τη μηχανική, αφού απαιτείται προσεκτική αντιστάθμιση στη στατική αντοχή της κατασκευής, στο πόσο συμπαγής είναι και στην ικανότητα να απορροφά την ενέργεια της σύγκρουσης με έναν ελεγχόμενο και αποδοτικό τρόπο. Πλέον η απορρόφηση ενέργειας κατά τη σύγκρουση επιτυγχάνεται με λεπτότοιχα σωληνοειδή κελύφη.

Οι επικρατούσες διατομές είναι: η κυκλική, η τετραγωνική και η ορθογωνική διατομή, ενώ οι συνήθεις γεωμετρικές μορφές είναι: ο ορθογωνικός σωλήνας τετραγωνικής διατομής, ο ευθύς κυλινδρικός σωλήνας και οι κωνικοί σωλήνες με σχήμα κόλουρης πυραμίδας (frusta).

Παρόλα αυτά η διαμόρφωση χρησιμοποιούνται και πιο σύνθετες διατομές συμμετρικές ή και ασύμμετρες ανάλογα με την εφαρμογή. Σε αυτό βοηθάει το γεγονός ότι τα κελύφη προκύπτουν εύκολα μέσω της διέλασης (extrusion). [3,4]



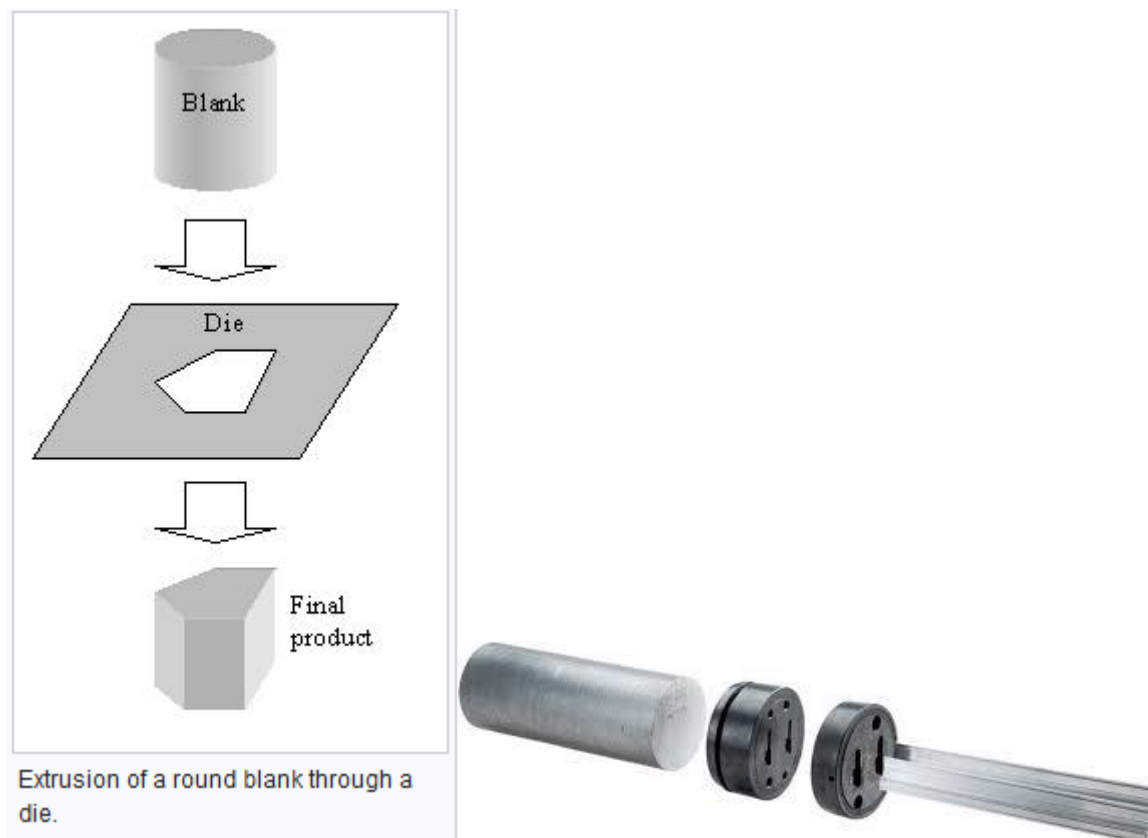
Εικόνα 3 [5]

## Υλικό

Οι ενεργειακοί απορροφητές είναι στη πλειονότητά τους, λεπτότοιχοι σωλήνες από μαλακό χάλυβα ή αλουμίνιο που προέρχονται είτε από διέλαση (extrusion) είτε από στραντζαριστά ελάσματα με ραφή συγκόλλησης.

Διέλαση είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αντικειμένων σταθερού διατομής. Ένα υλικό ωθείται μέσω μίας μήτρας της επιθυμητής διατομής. Τα δύο κύρια πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας σε σχέση με άλλες κατασκευαστικές διαδικασίες είναι η ικανότητά της να δημιουργεί πολύ σύνθετες διατομές και να δουλεύει υλικά που είναι εύθραυστα επειδή το υλικό συναντά μόνο πιεστικές και διατμητικές τάσεις. Επίσης σχηματίζει εξαρτήματα με εξαιρετικό φινίρισμα. [5]

Το αλουμίνιο είναι ένα υλικό ιδανικό για τέτοιες εφαρμογές, δεδομένου ότι είναι αποδοτικός ενεργειακός απορροφητής, έχει σχετικά χαμηλό κόστος και σχηματίζεται πολύ εύκολα μέσω διέλασης. Γενικά τα βασικά στοιχεία του υλικού που παίζουν βασικό ρόλο στην αποδοτικότητα απορρόφησης ενέργειας είναι η πυκνότητα του υλικού, ο μέτρο Young, που δείχνει την ελαστικότητα του υλικού, καθώς και ο λόγος Poisson.



Εικόνα 4 [5]

## Τρόποι Φόρτισης

Υπάρχουν πολλοί τρόποι φόρτισης και επιβολής φορτίου για τη μελέτη της συμπεριφοράς των ενεργειακών απορροφητών. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι: η αξονική θλίψη, η πλευρική συμπίεση, η λοξή φόρτιση, η πλευρική διάτρηση, η διάσπαση και η αναστροφή (inversion) [1]. Ο επικρατέστερος όμως είναι η αξονική θλίψη, αφού σε αυτή παρουσιάζεται περισσότερη απορρόφηση ενέργειας, άρα

και καλύτερη απόδοση. Παρόλα αυτά και οι άλλες μέθοδοι είναι χρήσιμες και απαραίτητες για την επίτευξη αποτελεσμάτων που θα ανταποκριθούν σε πραγματικές συνθήκες. Αφού σε μια σύγκρουση σε πραγματική κατάσταση κατασκευή θα φορτιστεί με πολύπλοκο τρόπο και οι συνιστώσες δυνάμεις δεν θα είναι προς μία μόνο κατεύθυνση σε καμία περίπτωση.

Σε αυτό το σημείο, κρίνεται σκόπιμο να περιγραφεί ο τρόπος κατάρρευσης δοκιμίων που υπόκεινται σε αξονική θλίψη. Ο συνήθης τρόπος κατάρρευσης των δοκιμίων που υπόκεινται σε αξονική συμπίεση, είναι αυτός που εμπεριέχει το σχηματισμό λοβών. Αρχικά, το δοκίμιο που υφίσταται αξονική θλίψη παραμορφώνεται ελαστικά. Όταν το φορτίο φτάσει σε τέτοια τιμή ώστε να ξεπεραστεί το όριο διαρροής του υλικού, τότε αρχίζει η δημιουργία του πρώτου λοβού, κατά την οποία παρατηρείται και το πρώτο τοπικό μέγιστο στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης εμβόλου (σχηματισμός 1ης πτύχωσης εξωτερικά). Από εκείνη τη στιγμή και μέχρι να σταθεροποιηθεί ο σχηματισμός του λοβού και το υλικό να ξαναγίνει στιβαρό, παρατηρούμε πτώση του φορτίου (σχηματισμός 2<sup>ης</sup> πτύχωσης εσωτερικά) και τοπικό ελάχιστο στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το δοκίμιο να μη μπορεί να παραλάβει περαιτέρω φορτία και να αστοχήσει ολικά.

Ανάλογα τώρα με τη μορφή που λαμβάνουν τα δοκίμια κατά την παραμόρφωση, προκύπτουν οι αντίστοιχοι τρόποι κατάρρευσης. Συγκεκριμένα για τις περιπτώσεις όπου έχουμε σχηματισμό λοβών, υπάρχουν 3 είδη κατάρρευσης: με μη εκατούς λοβούς, με εκατούς λοβούς και τέλος με λοβούς μικτού τύπου. [7]

Επιστρέφοντας στους τρόπους κατάρρευσης, αξίζει να αναφερθεί η περίπτωση όπου παρουσιάζεται λυγισμός κατά Euler (global buckling), όπου το δοκίμιο δε σχηματίζει λοβούς αλλά κάμπτεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μη μπορεί να παραλάβει επιπλέον φορτία και να παραμορφωθεί περαιτέρω. Πρόκειται για τον πλέον ανεπιθύμητο τρόπο κατάρρευσης, γιατί δεν επιτρέπει στο δοκίμιο την απορρόφηση υψηλού ποσού ενέργειας κατά την κρούση. Για το λόγο αυτό επιλέγονται τρόποι για τη αποφυγή εμφάνισής του, όπως μικρός λογός μήκους σωλήνα προς διατομή (L/D) [15] και δημιουργία γεωμετρικών ατελειών για πρόκληση συγκέντρωσης τάσης (triggering) [9].



Εικόνα 5 : Αποτελέσματα αξονικής σύμθλιψης και παρουσίαση λοβών κελύφων [8]

## Θεωρητική προσέγγιση διαδικασίας λυγισμού – Διαμόρφωση πλαστικών αρμών

Οι μελετητές, προκειμένου να προσεγγίσουν θεωρητικά τη διαδικασία με την οποία καταρρέει ένας λεπτότοιχος σωλήνας υπό αξονική θλιπτική φόρτιση, εισήγαγαν την έννοια του πλαστικού αρμού.

Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, ένα δοκίμιο που υφίσταται αξονική θλίψη, κατά την κατάρρευσή του εμφανίζει πλαστικούς αρμούς και συνδετικούς βραχίονες. Το δοκίμιο αρχικά, καθώς μεταβαίνει από την ελαστική στην πλαστική περιοχή εμφανίζει στο μέσον των ακμών πλαστικούς αρμούς. Στη συνέχεια και όσο εξελίσσεται η φόρτιση, εμφανίζονται νέοι πλαστικοί αρμοί. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, οι πλαστικοί αρμοί μετακινούνται έτσι ώστε να ακολουθήσουν τη μορφή που λαμβάνει το δοκίμιο κατά το σχηματισμό των λοβών. Για την περιγραφή του σχηματισμού λοβών, χρησιμοποιούνται οριζόντιοι και κεκλιμένοι πλαστικοί αρμοί.

Η χρήση πλαστικών αρμών ήταν το εργαλείο που βοήθησε τους μελετητές στην κατασκευή θεωρητικών μοντέλων πρόβλεψης της πλαστικά διαχεόμενης ενέργειας. Έτσι σε ένα θεωρητικό μοντέλο, το πλαστικό έργο διαχέεται στους πλαστικούς αρμούς και στον εφελκυσμό των μεταξύ τους υλικών, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδρασή τους. [1]

### Κατάρρευση με μη εκτατούς λοβούς

Επιστρέφοντας τώρα στους τρόπους κατάρρευσης, ο τρόπος παραμόρφωσης δοκιμίου με μη εκτατούς λοβούς, μπορεί να περιγραφεί με οριζόντιους και κεκλιμένους πλαστικούς αρμούς. Δοκίμιο που καταρρέει σχηματίζοντας μη εκτατούς λοβούς, παρουσιάζει σταθερούς οριζόντιους και μετατοπισμένους κεκλιμένους πλαστικούς αρμούς. Κατά το σχηματισμό λοβού, οι οριζόντιοι πλαστικοί αρμοί που βρίσκονται στις δυο απέναντι πλευρές κινούνται προς τα έξω, μειώνοντας το αρχικό τους μήκος ενώ οι άλλοι πλαστικοί αρμοί που βρίσκονται στις παράπλευρες έδρες κινούνται προς τα μέσα αυξάνοντας το αρχικό μήκος τους. Κατά αυτόν τον τρόπο διαμορφώνονται όμοιοι λοβοί, ανά επίπεδο, ο καθένας στραμμένος κατά γωνία 90 μοιρών σε σχέση με τον προηγούμενο.

Σε ό,τι αφορά τους κεκλιμένους πλαστικούς αρμούς, αυτοί ξεκινούν από τις γωνίες του δοκιμίου και καταλήγουν σε γωνία ως προς τους οριζόντιους. Στη βιβλιογραφία, ο τρόπος κατάρρευσης με μη εκτατούς λοβούς, συναντάται με τον αγγλικό όρο **diamond mode**. Χαρακτηριστικό αυτού του τύπου κατάρρευσης, είναι το γεγονός ότι η διατομή πριν και μετά την κατάρρευση έχει την ίδια περίμετρο. [10]

### Κατάρρευση με εκτατούς λοβούς

Για την κατάρρευση δοκιμίων με εκτατούς λοβούς είναι γνωστό ότι στη γενική περίπτωση χαρακτηρίζεται ως αξονοσυμμετρική κατάρρευση. Χαρακτηριστική μορφή κατάρρευσης με εκτατούς λοβούς, είναι αυτή των κυλινδρικών σωλήνων, όπου περιγράφεται στη βιβλιογραφία με τον όρο **concertina mode**. Αντίστοιχα με την εκτατή κατάρρευση των κυλινδρικών δοκιμίων (*concertina mode*) όπου έχουμε το σχηματισμό κυλινδρικών δακτυλίων, σε τετραγωνική διατομή αυτό το είδος παραμόρφωσης χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό τετραγωνικού τύπου αναδίπλωσης, συμμετρικό ως προς κάθετο άξονα συμμετρίας – περιστροφής του δοκιμίου. Σε αυτήν την περίπτωση, η περίμετρος του δοκιμίου αυξάνεται μετά την κατάρρευση.



Εικόνα 6 : Αριστερά concertina mode και δεξιά diamond mode

### Κατάρρευση με λοβούς μικτού τύπου

Ο τρόπος κατάρρευσης δοκιμίων με λοβούς μικτού τύπου, αποτελεί ένα συνδυασμό των δυο προηγούμενων τρόπων κατάρρευσης. Ουσιαστικά, σε αυτήν 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.



Εικόνα 6 : Λοβοί μικτού τύπου

### Λυγισμός

Ο λυγισμός θεωρείται ένας ξεχωριστός τρόπος κατάρρευσης με ιδιαίτερη σημασία καθώς θα πρέπει με κάθε τρόπο να αποφεύγεται στους μηχανισμούς απορρόφησης ενέργειας και είναι το φαινόμενο κατά το οποίο μια ελαστική ράβδος με ευθύγραμμο άξονα, που υποβάλλεται σε κεντρική θλίψη με συνεχώς αυξανόμενη τιμή φορτίου, μεταπίπτει, μετά από μια ορική τιμή φορτίου, σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας. Η ισοροπία χαρακτηρίζεται ως ασταθής διότι στη παραμικρή διαταραχή (επίδραση φορτίου κατά την εγκάρσια κατεύθυνση) επέρχεται κατάρρευση.

Στην προκειμένη περίπτωση, όπου έχουμε λεπτότοιχα κελύφη ο παράγοντας που μπορεί να οδηγήσει σε λυγισμό είναι το μεγάλο μήκος των δοκιμίων σε συνάρτηση με τα μήκη των πλευρών των δοκιμίων και το πάχος των τοιχωμάτων τους.



*Εικόνα 7 : Χαρακτηριστικό παράδειγμα λυγισμού*

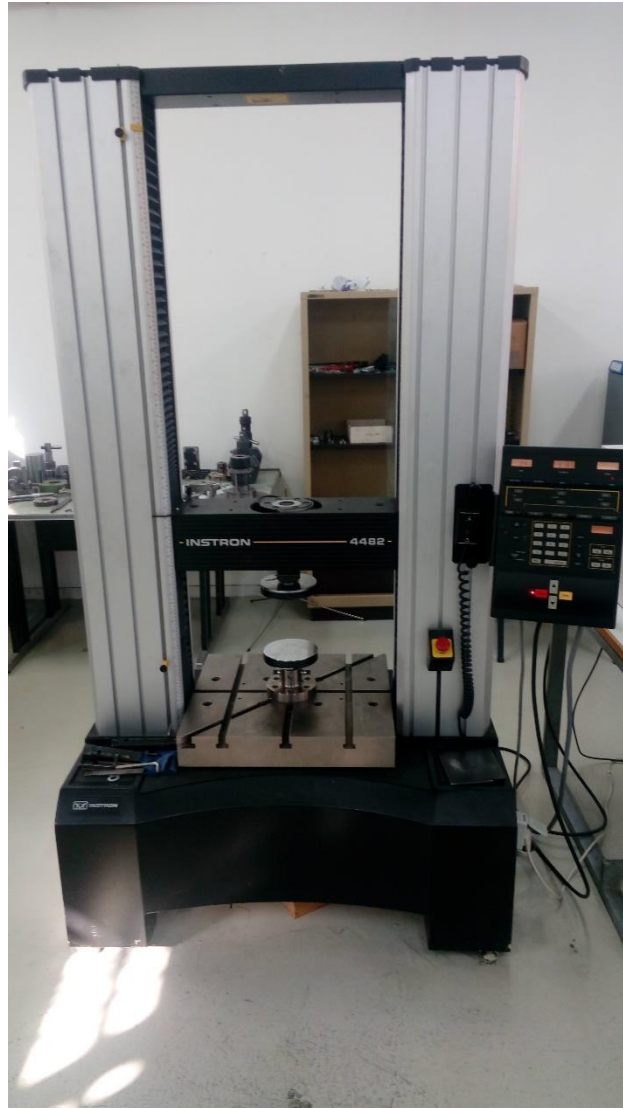
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Πειραματικό Μέρος – Αποτελέσματα

#### Πειράματα-Γενικά

Στη παρούσα διπλωματική πραγματοποιήσαμε μια σειρά πειραμάτων αξονικής θλίψης (axial loading) και πλευρικής συμπίεσης (3-point bending). Για τα πειράματα αυτά σαν δοκίμια χρησιμοποιήσαμε κάποιες σύνθετες τομές από προφίλ αλουμινίου και παρατηρήσαμε τη διαδικασία και το τρόπο κατάρρευσης τους.

Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή INSTRON 4482 του εργαστηρίου, η οποία έχει ονομαστικό φορτίο 10 kN και μηχανισμό κοχλία-περικοχλίου. Για την εισαγωγή των πειραματικών συνθηκών στην πρέσσα αλλά και την καταγραφή των δεδομένων που προκύπτουν από το πείραμα (καμπύλη φορτίου – μετατόπισης), η μηχανή συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Bluehill.



*Εικόνα 7: Μηχανή Instron 4482*

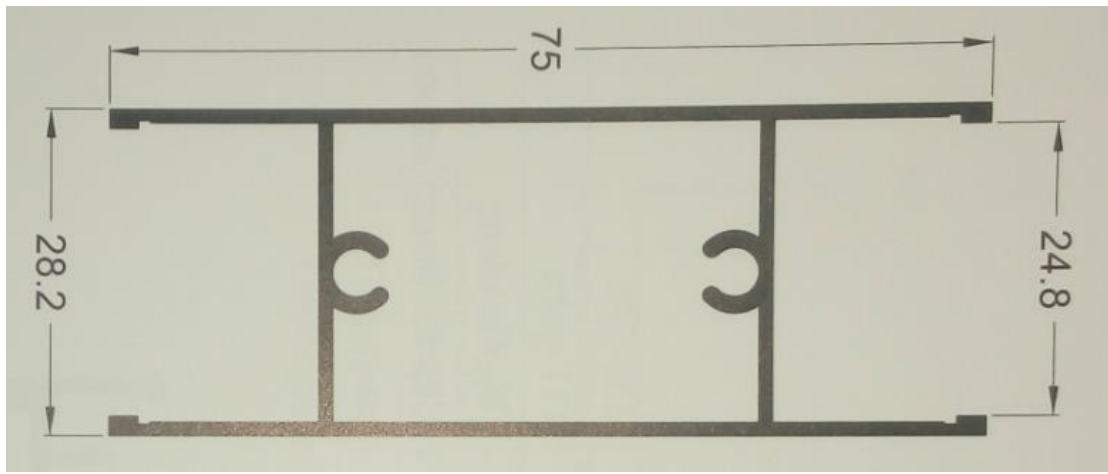
Τα δοκίμια που χρησιμοποιήσαμε είναι τέσσερα (4) προφίλ αλουμινίου τα οποία προμηθεύτηκαν από γνωστές εταιρίες το τομέα της κατεργασίας αλουμινίου και είναι τυποποιημένα υλικά.

Σε κάθε πείραμα στόχος είναι να γίνουν παρατηρήσεις ως προς τη συμπεριφορά κατάρρευσης του δοκιμίου ανάλογα με τη γεωμετρία του, καθώς και παρατηρήσεις πάνω στη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης που εξάγει το λογισμικό της πρέσσας.



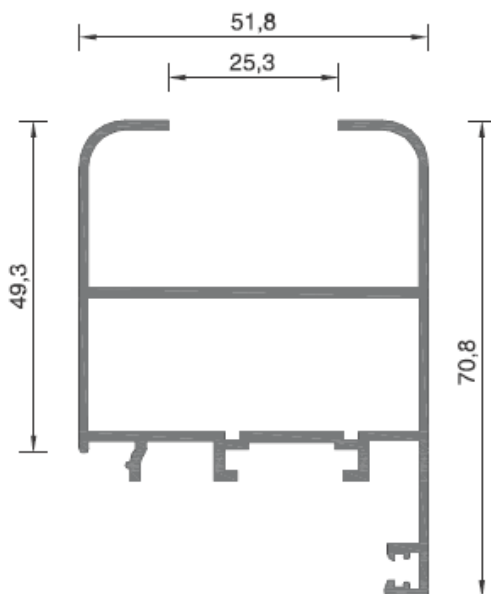
## Διατομές και Αρίθμηση Δοκιμών

### Δοκίμιο 1



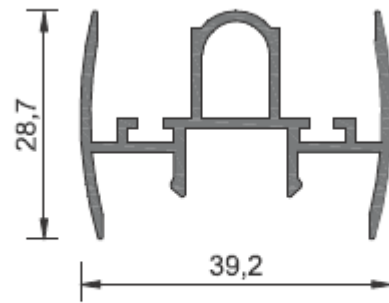
Βάρος: 749 gr/m

### Δοκίμιο 2



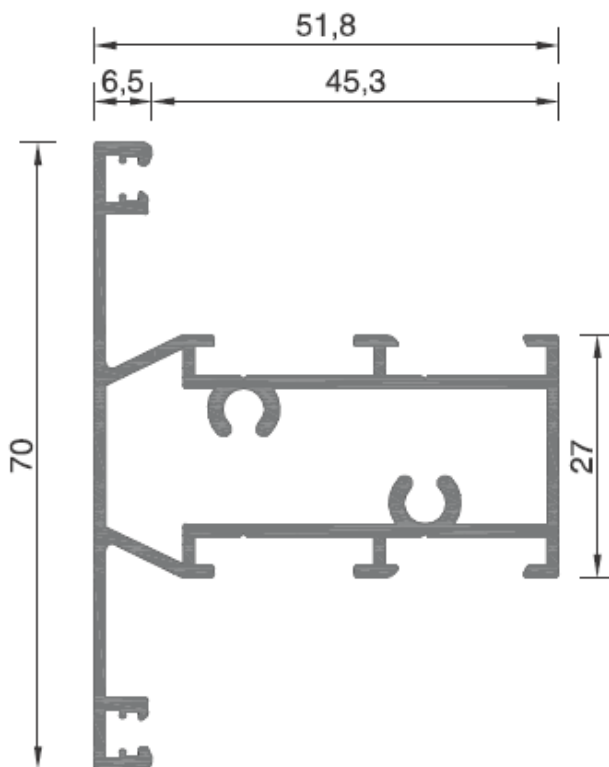
**101-026B** ΒΑΡΟΣ / WEIGHT **990 gr/m**

**Δοκίμο 3**



**205-029A** ΒΑΡΟΣ / WEIGHT **535 gr/m**

**Δοκίμο 4**



**101-039** ΒΑΡΟΣ / WEIGHT **1010 gr/m**

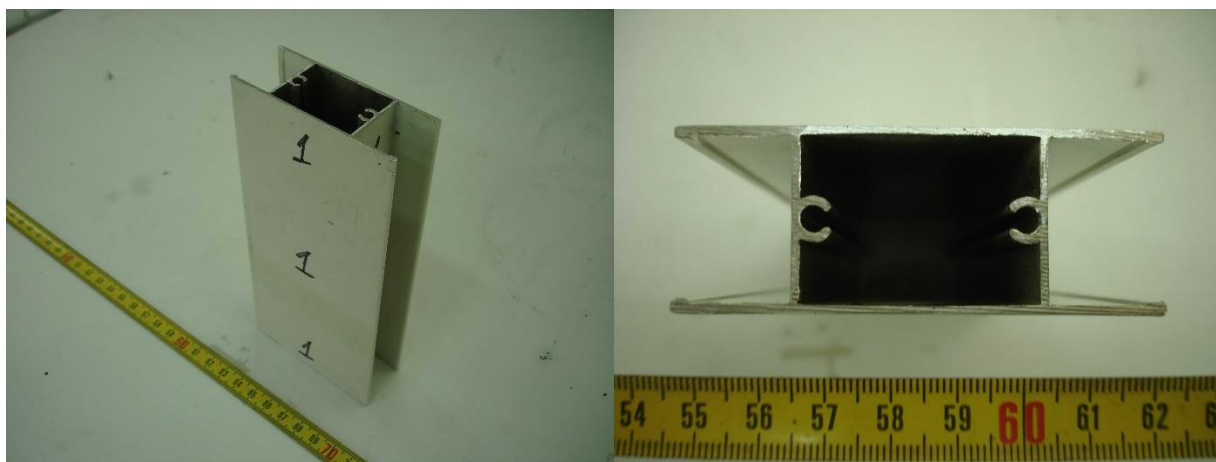
Παρακάτω παρουσιάζονται οι φωτογραφίες των δοκιμών που ελήφθησαν κατά την εξέλιξη των πειραμάτων. Οι φωτογραφίες αυτές δείχνουν την αρχική κατάσταση, τις σταδιακές φάσεις κατάρρευσης και τη τελική κατάσταση των δοκιμών. Ανά δοκίμιο παρουσιάζεται και το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης που προέκυψε από τη πειραματική διαδικασία και αντιστοιχίζεται πάνω σε αυτό η φάση της κάθε φωτογραφίας ανάλογα της μετατόπισης που είναι γνωστή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα, που είναι το μέγιστο φορτίο, το μέσο φορτίο παραμόρφωσης, η ενέργεια παραμόρφωσης και ο δείκτης ομοιομορφίας, που είναι το ο λόγος του μέγιστου φορτίου προς το μέσο. Έπειτα περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος κατάρρευσης του κάθε δοκιμίου.

### Αξονική Καταπόνηση

Για τις πειραματικές δοκιμές της αξονικής θλίψης οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου είναι 160mm στο κάθετο άξονα θλίψης. Η μετατόπιση ρυθμίστηκε στα 100mm. Δηλαδή μετά τη θλίψη το κάθε δοκίμιο από τα 160mm θα συμπιεστεί στα 60mm. Για ικανοποιητικά αποτελέσματα σε εύλογο χρονικό διάστημα ρυθμίζεται στα 50mm/min.

#### Αποτελέσματα-Δοκίμιο 1

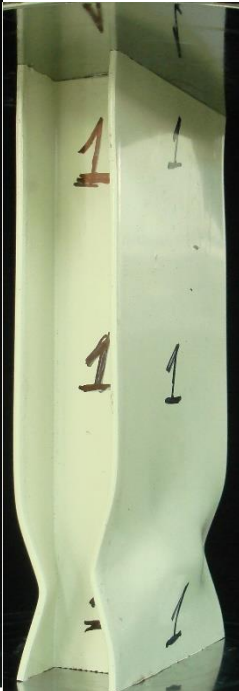
Το πρώτο δοκίμιο όπως φάνηκε παραπάνω πρόκειται για ένα συμμετρικό προφίλ αλουμινίου με βάρος 749gr/m και καταλαμβάνει περιοχή 277,4mm<sup>2</sup>.



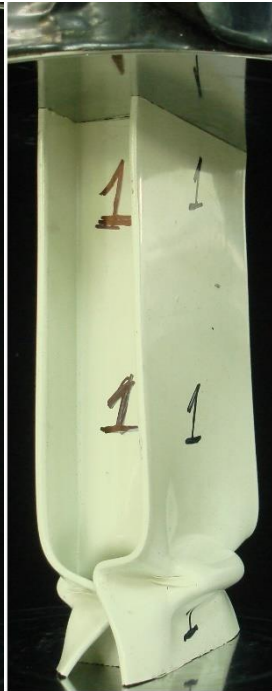
Αρχικές φωτογραφίες του δοκιμίου 1



1



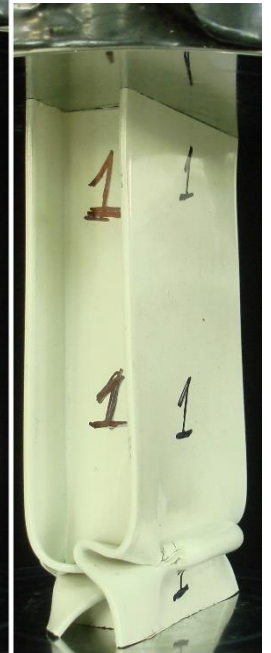
2



3



4



5



6



7



8



9

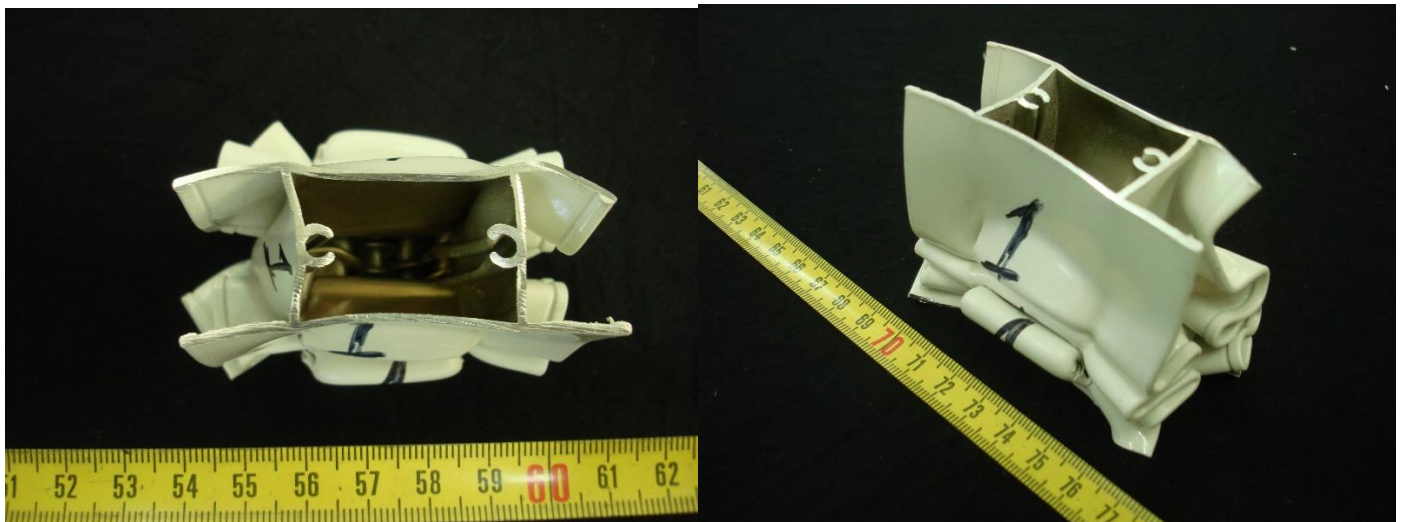
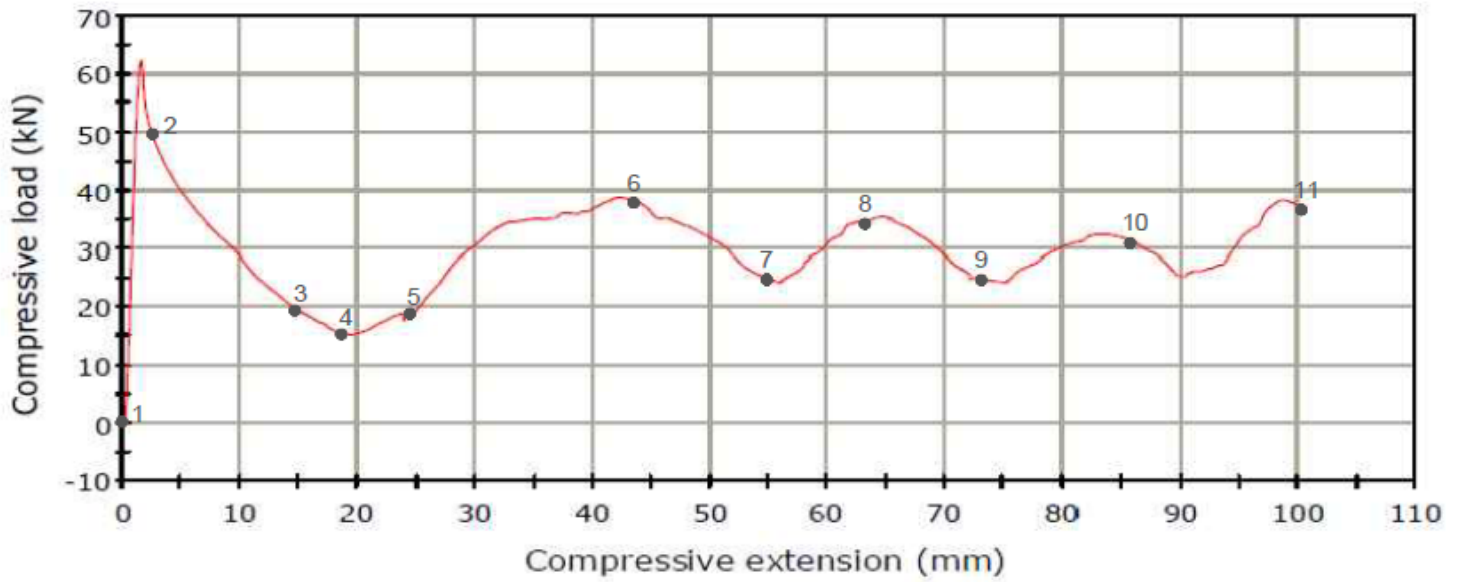


10

11

Φωτογραφίες προοδευτικής κατάρρευσης δοκιμίου 1

### LOAD - DEFLECTION GRAPH







Τελικές φωτογραφίες Δοκιμίου

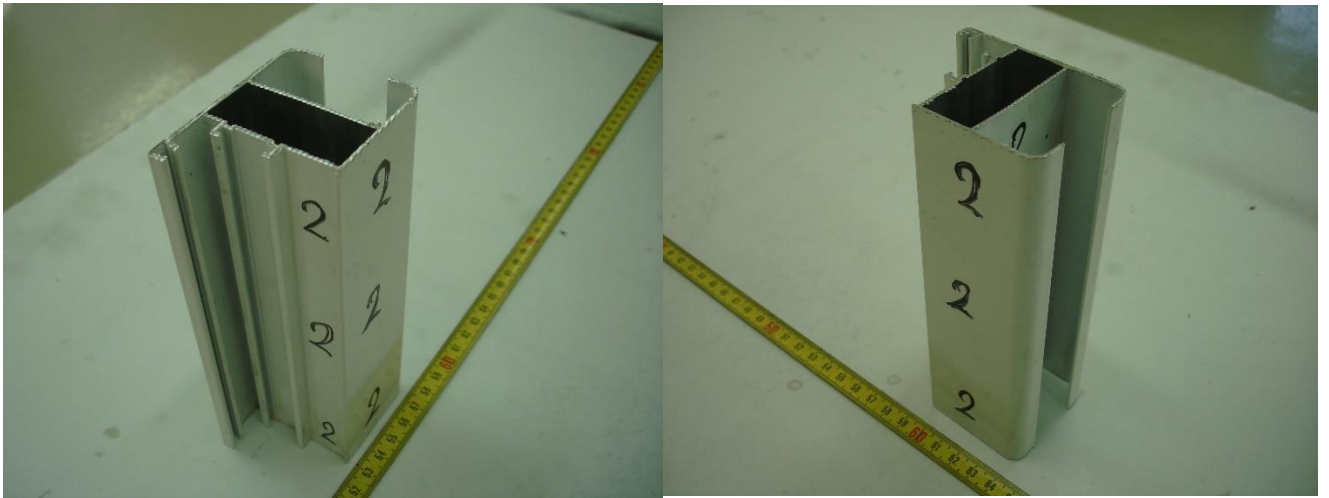
Βασικά Αποτελέσματα Πειράματος

Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	62kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	32kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	2900J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,937
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)	24,2J/gr

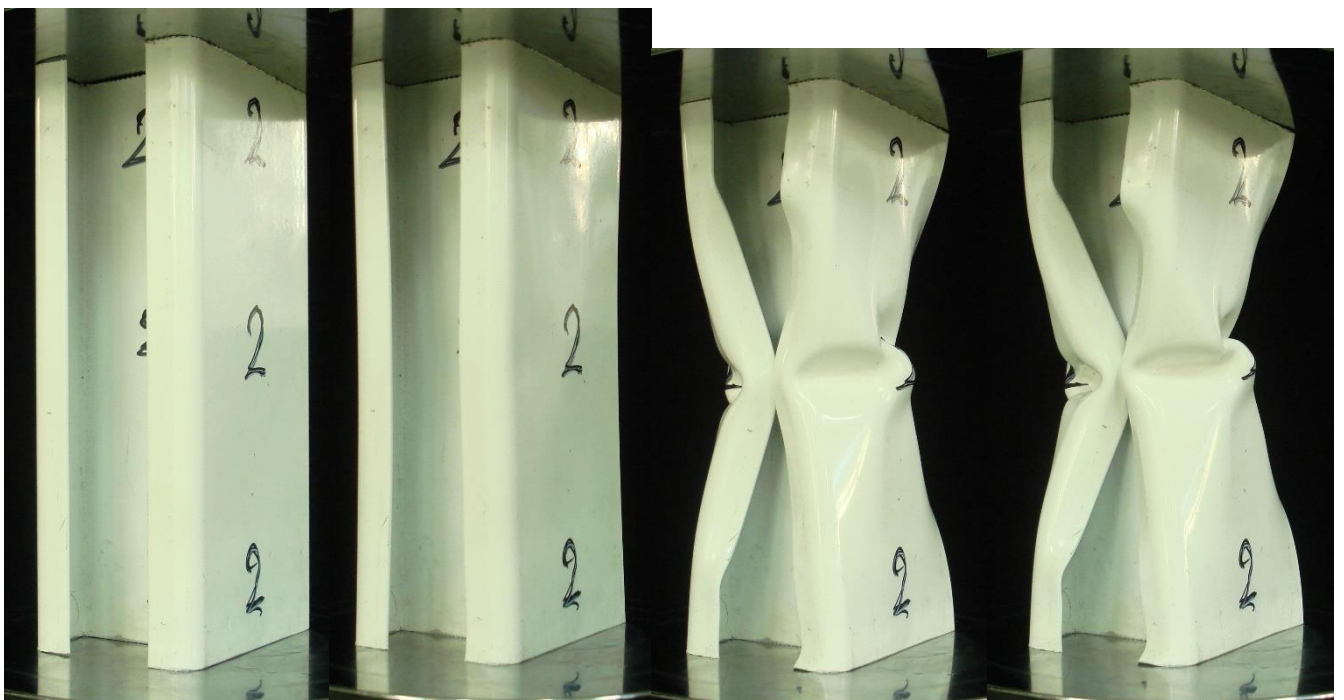
Παρατηρήσεις

Η διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου ήταν αναμενόμενη. Πρόκειται για ένα δοκίμιο με κλειστές και ανοιχτές επιφάνειες. Υπάρχουν περιοχές που συγκλίνουν πάνω από δύο επιφάνειες και συγκεντρώνουν τάσεις. Η κατάρρευση ήταν μη εκτατή με εναλλασσόμενους λοβούς. Δημιουργήθηκαν τρεις (3) μη εκτατοί λοβοί. Το δοκίμιο κατά τη κατάρρευση παρουσιάζει συμμετρία ως προς δύο άξονες κάθετους μεταξύ τους και γενικά προσομοιάζει το τρόπο κατάρρευσης μιας ορθογωνικής διατομής. Η κατάρρευση ξεκινάει για φορτίο ίσο με 62kN και συνεχίζεται για μικρότερες τιμές φορτίου, όπως φαίνεται στη καμπύλη μετατόπισης-φορτίου, στο ξεκίνημα δημιουργίας κάθε λοβού παρατηρείται ένα peak στο φορτίο, το οποίο υποχωρεί κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του λοβού. Εκτός της αρχικής ανύψωσης του φορτίου, υπάρχουν και άλλες τρεις (όσοι και οι λοβοί) στα 3,8kN, 3,5kN και 3,2kN κατά σειρά μετατόπισης, όσο περισσότερο φθείρεται το δοκίμιο, τόσο μικρότερο φορτίο απαιτεί η αξονική θλίψη. Παρατηρείται ότι το δοκίμιο μένει αλώβητο στο πάνω μέρος του και υπάρχει κατάρρευση άκρου, δηλαδή η κατάρρευση ξεκινάει από το κάτω άκρο του δοκιμίου και μεταδίδεται προοδευτικά και ελεγχόμενα στην υπόλοιπη έκταση του δοκιμίου μέχρι ένα σημείο.

Αποτελέσματα-Δοκίμιο 2



Αρχικές φωτογραφίες του δοκιμίου 2

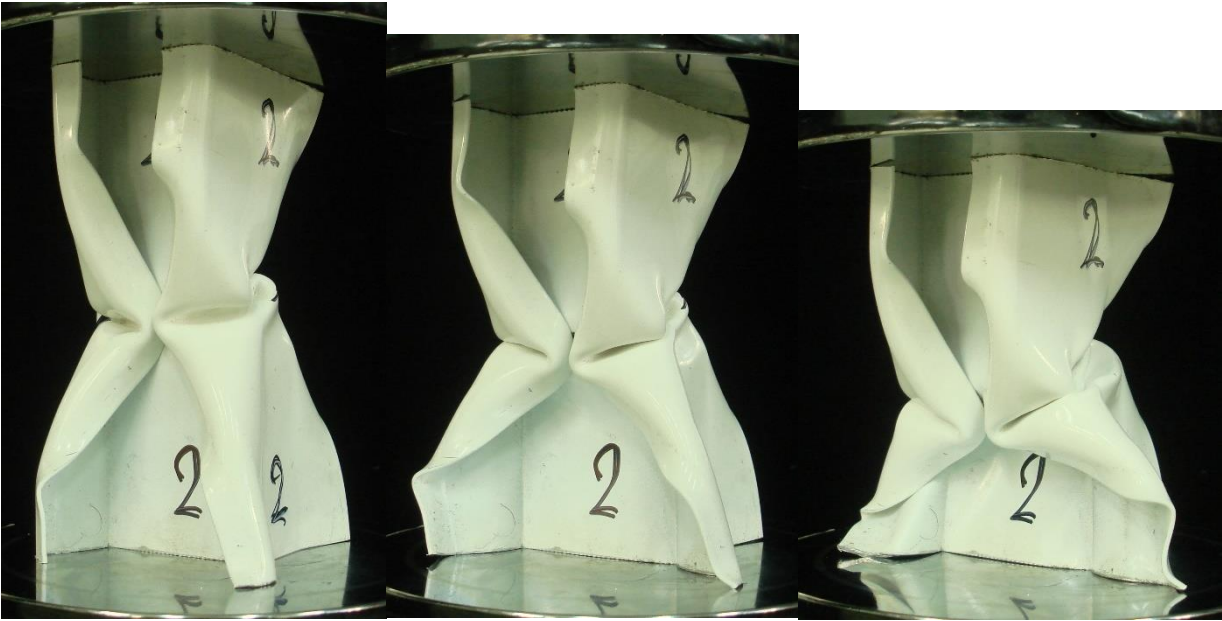


1

2

3

4



5

6

7

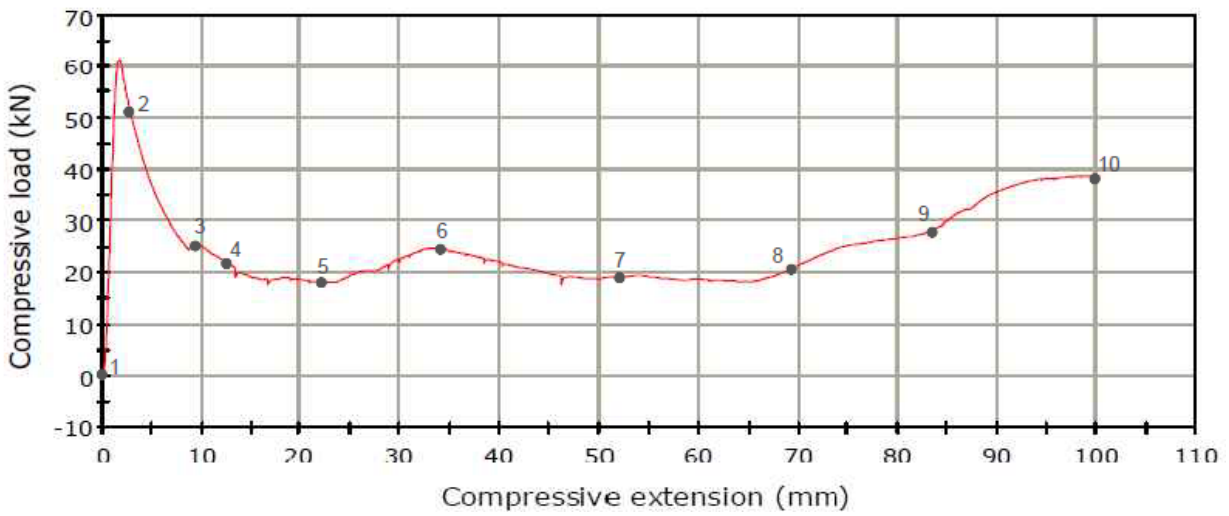


8

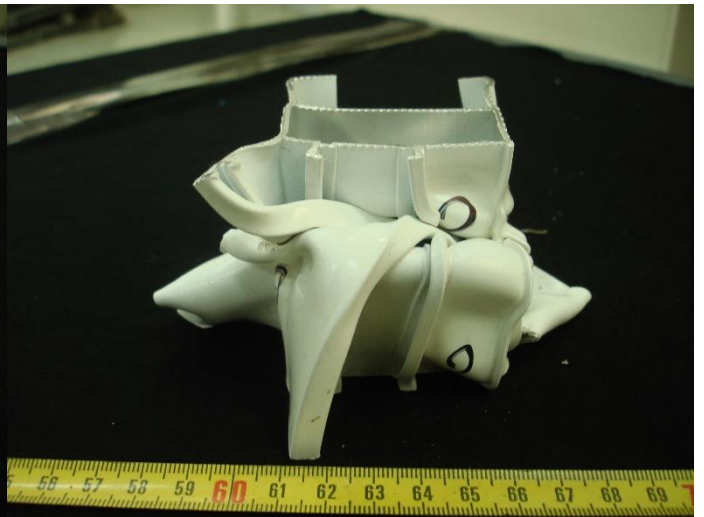
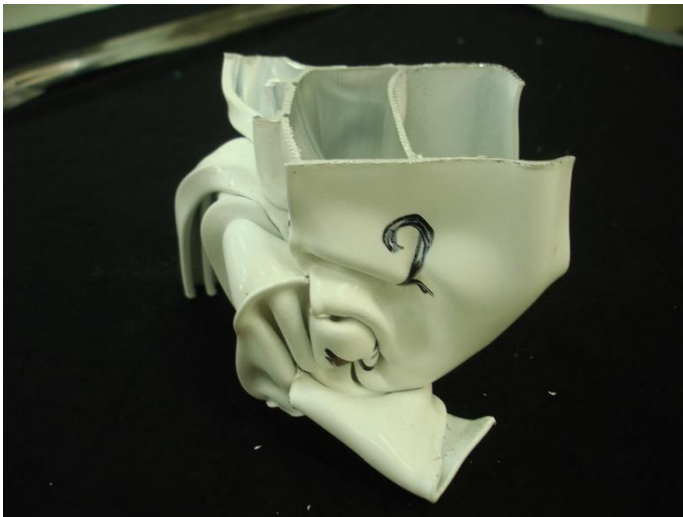
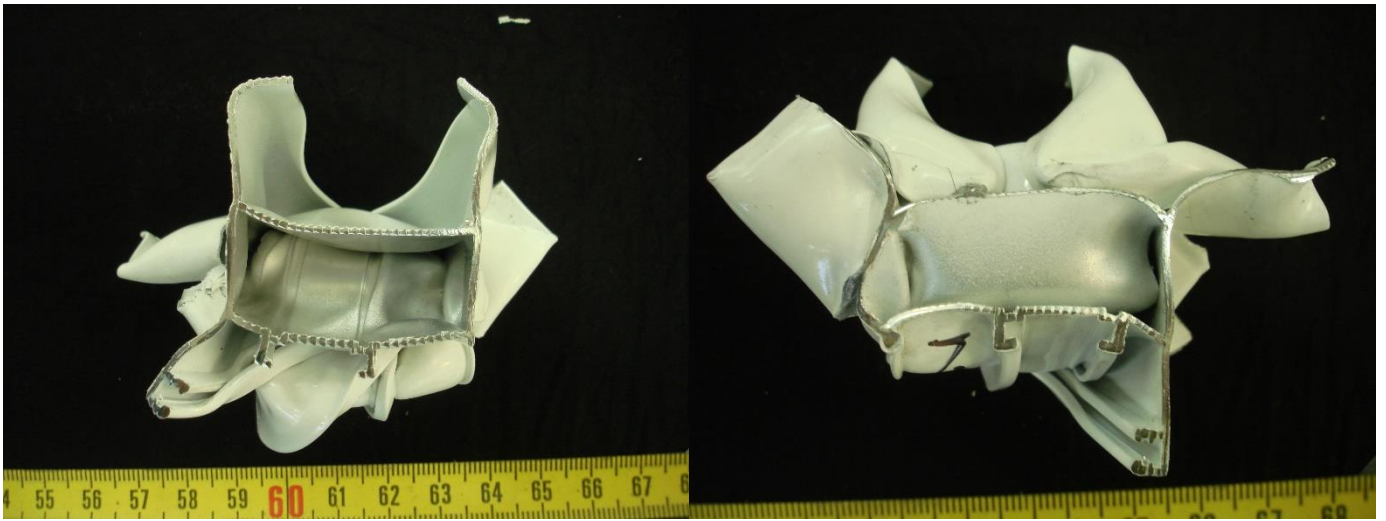
9

10

LOAD - DEFLECTION GRAPH







Τελικές φωτογραφίες Δοκιμίου 2

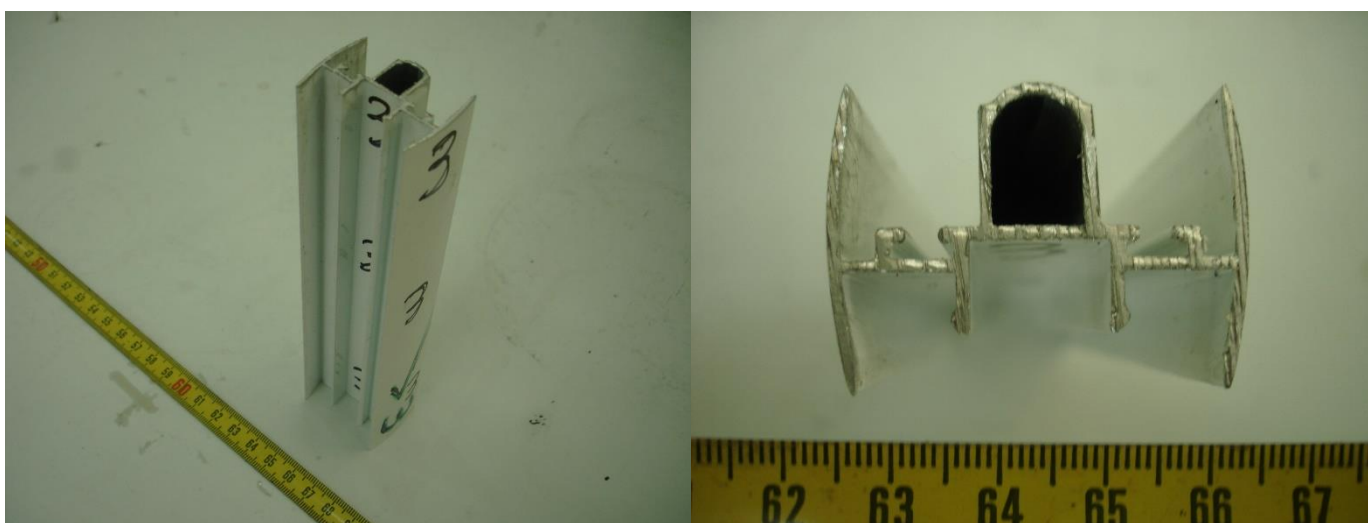
### Βασικά Αποτελέσματα Πειράματος

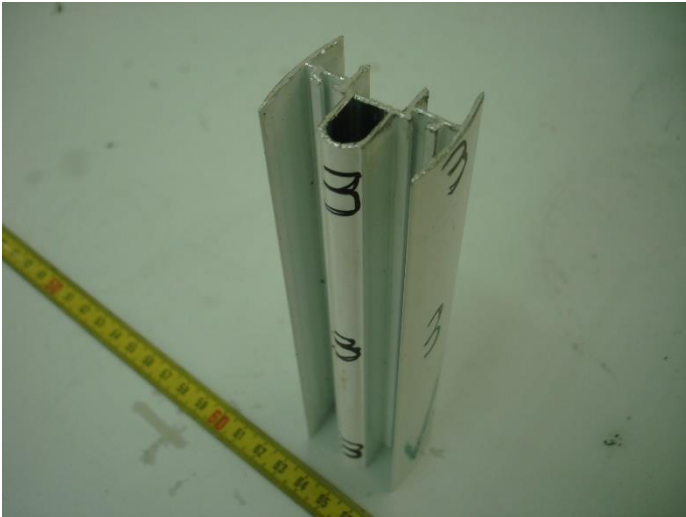
Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	61,5kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	28kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	2350J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	2,196
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)	14,84 J/gr

### Παρατηρήσεις

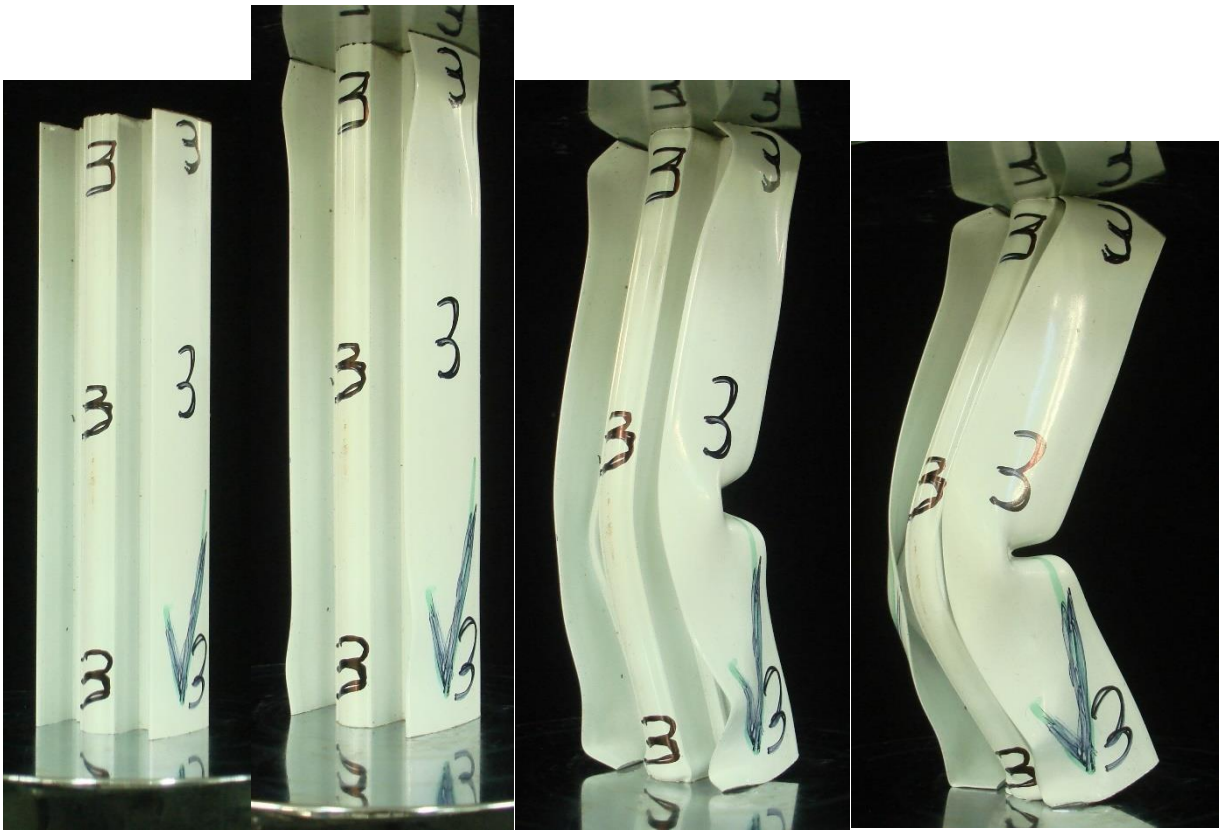
Η διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου ήταν ακαθόριστη, το οποίο ήταν αναμενόμενο αφού το δοκίμιο δεν είναι συμμετρικό. Πρόκειται για ένα δοκίμιο με κλειστές και ανοικτές επιφάνειες. Παρατηρείται ότι η αρχική κατάρρευση του δοκιμίου είναι συνολική (global) και όχι σημειακή. Αυτό φαίνεται στα πρώτα στιγμιότυπα όπου το δοκίμιο φαίνεται ότι επηρεάζεται σε όλο το μήκος του. Η απορρόφηση ενέργειας ήταν αρκετά ομοιόμορφη κατά της κατάρρευσης, μετά το μέγιστο φορτίο στο οποίο ξεκίνησε. Το δοκίμιο καταλάμβανε περιοχή ίση με  $366,6\text{mm}^2$ , είχε αρκετά μεγάλες επιφάνειες πλευρικά και σημεία συγκέντρωσης τάσης, γι' αυτό παρατηρείται και διάσχιση του υλικού στη μία πλευρά. Όπως φαίνεται από το στιγμιότυπο 8 και μετά, παρατηρούμε μια στρέβλωση του δοκιμίου, με αποτέλεσμα το έμβολο να χάνει την επαφή του με τις 2 από τις 4 πλευρές της τετραγωνικής διατομής και το φορτίο να ασκείται μέσω των υπολοίπων 2. Η αλλαγή στη διεπιφάνεια, είναι πιθανό να οφείλεται σε ολίσθηση του δοκιμίου πάνω στα τοιχώματα της βάσης (πριονωτή μορφή της καμπύλης), η οποία προκλήθηκε από τις θραύσεις. Έτσι το δοκίμιο ολισθαίνει, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να παραλάβει φορτία μέχρις ότου να σταθεροποιηθεί και να γίνει στιβαρό. Αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση του φορτίου μέχρι να σταθεροποιηθεί το δοκίμιο για το σχηματισμό του επόμενου λοβού, μετά τα 69mm.

### Αποτελέσματα-Δοκίμιο 3





Αρχικές φωτογραφίες του δοκιμίου 3



1

2

3

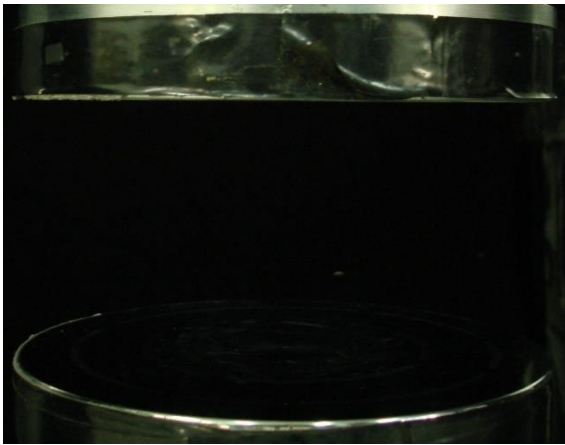
4



5

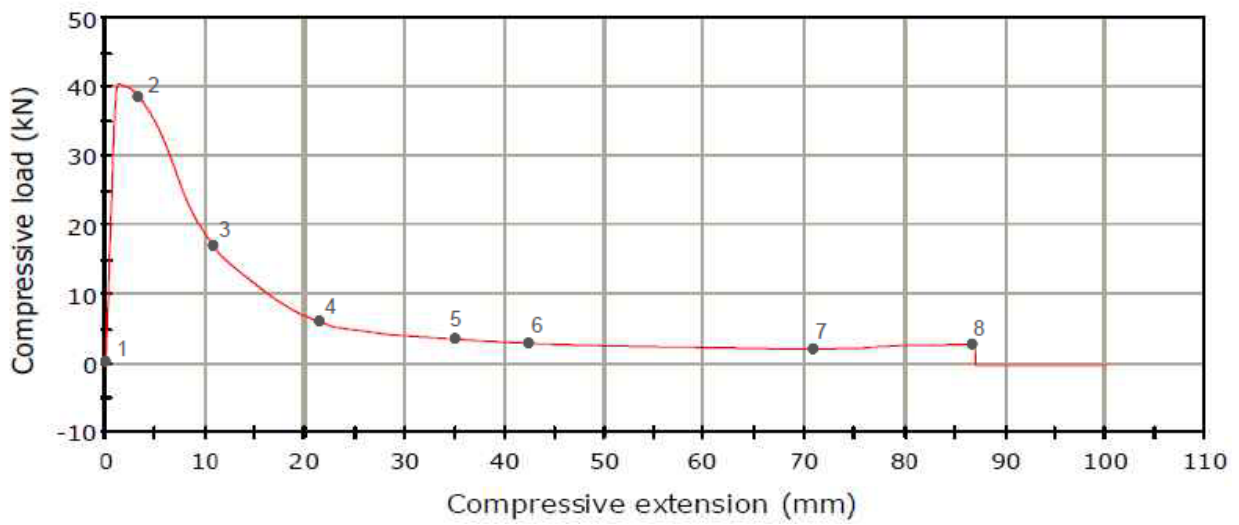
6

7

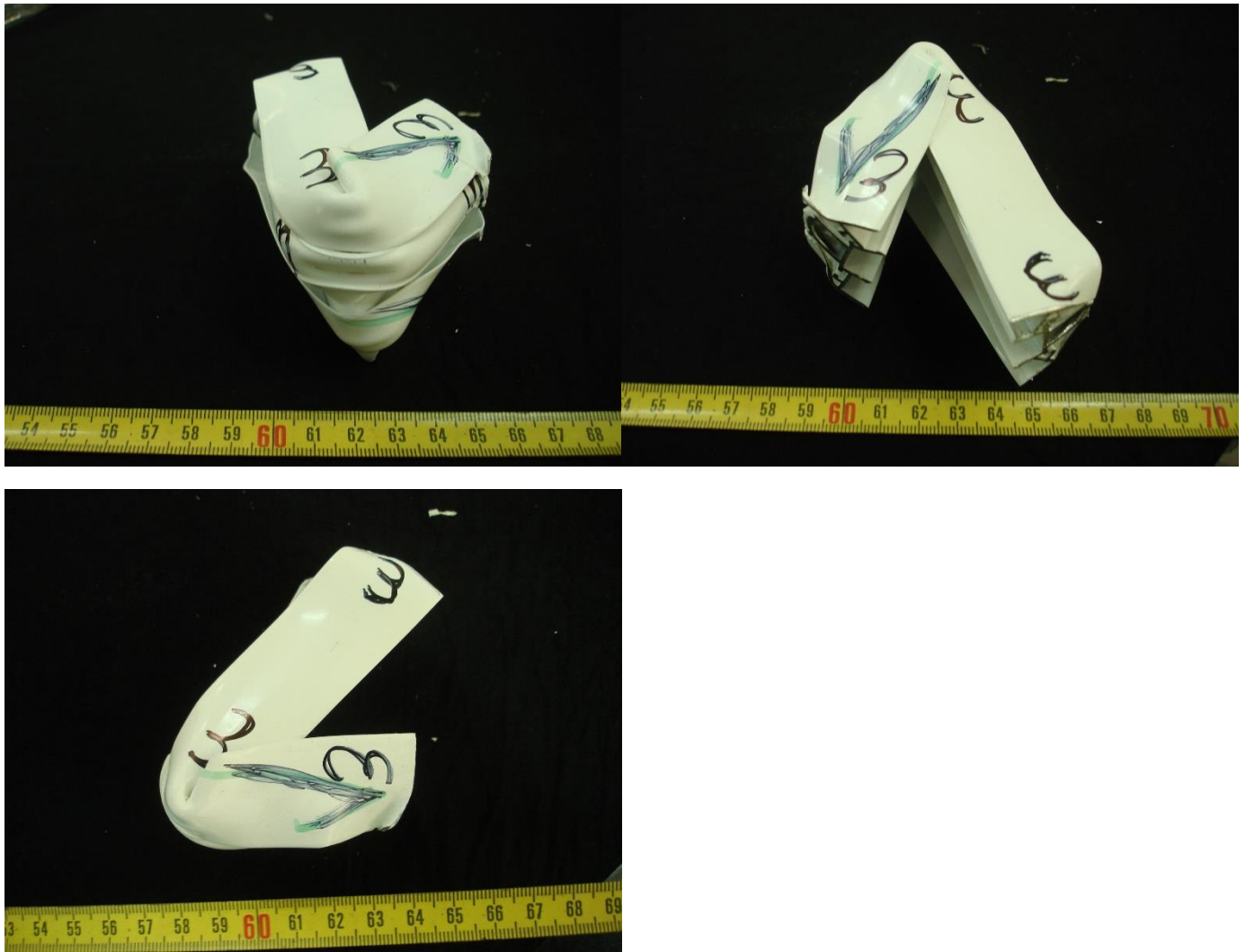


8

LOAD - DEFLECTION GRAPH







Τελικές φωτογραφίες Δοκιμίου 3

Βασικά Αποτελέσματα Πειράματος

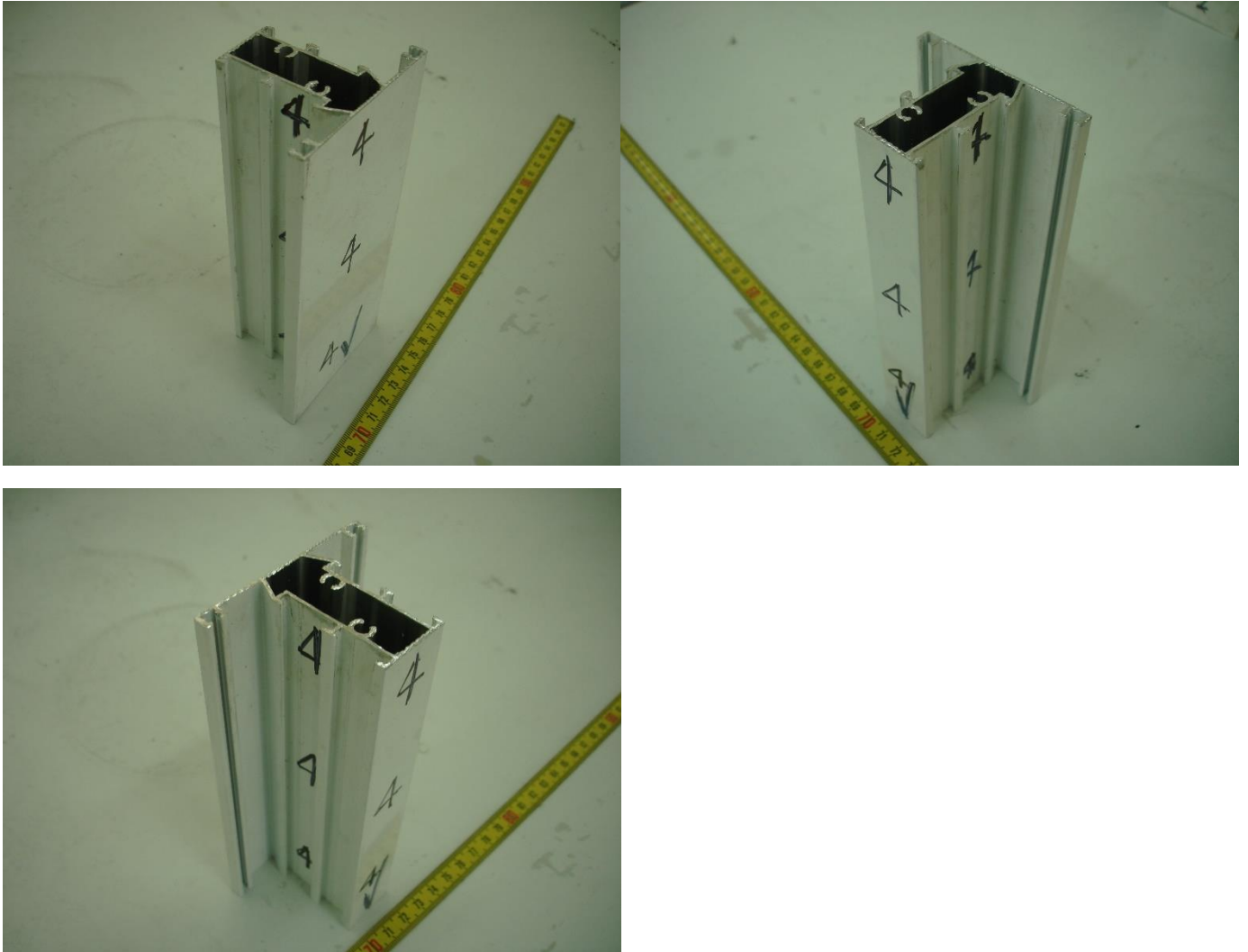
Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	40kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	14kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	600J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	2,85
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)	7,01 J/gr

Παρατηρήσεις

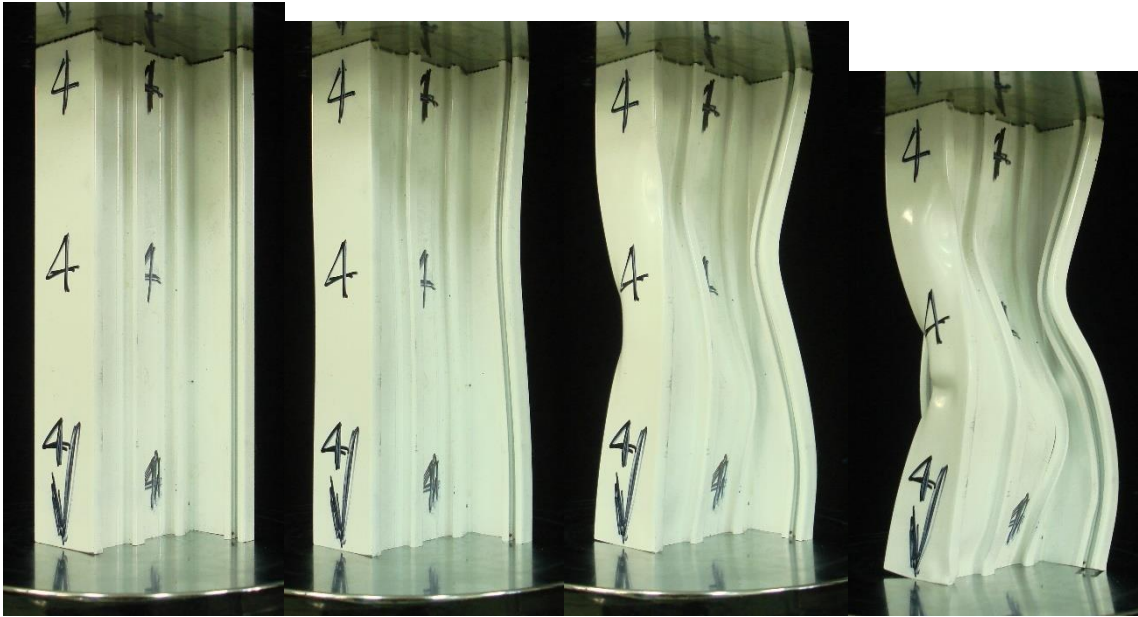
Αυτό το δοκίμιο φαίνεται εξαρχής ότι έχει έναν αξονα συμμετρίας και είναι μονόπλευρα ενισχυμένο. Οπότε αναμενόμενα λυγίζει προς την αδύναμη και μικρότερη πλευρά, όπου η ροπή αδράνειας είναι μικρότερη. Επίσης, άλλος ένας λόγος που οδηγεί σε λυγισμό είναι ότι το δοκίμιο αυτό καταλαμβάνει επιφάνεια  $198,24\text{mm}^2$ , η οποία είναι μικρή σε σχέση με το μήκος του ( $160\text{mm}$ ). Σε αυτή τη περίπτωση δεν μπορεί να παραλάβει περαιτέρω φορτία και απορροφάει λίγη ενέργεια κατά την κατάρρευση. Στο τέλος λόγω της ελαστικότητας του υλικού και του τρόπου φθοράς της βάσης του

δοκίμιου, ο λυγισμός και η δύναμη της πρέσας εκτονώνονται με ολίσθηση της κάτω πλευράς του δοκίμιου και αποκόλληση του από τη θέση του και εκτόξευσή του μακριά από τη πρέσα.

#### Αποτελέσματα-Δοκίμιο 4



Αρχικές φωτογραφίες του δοκίμιου 4

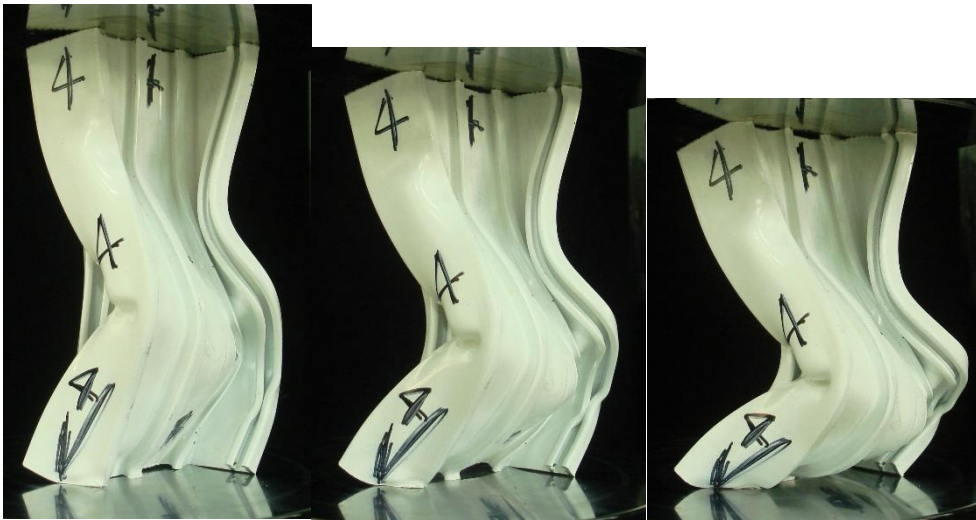


1

2

3

4



5

6

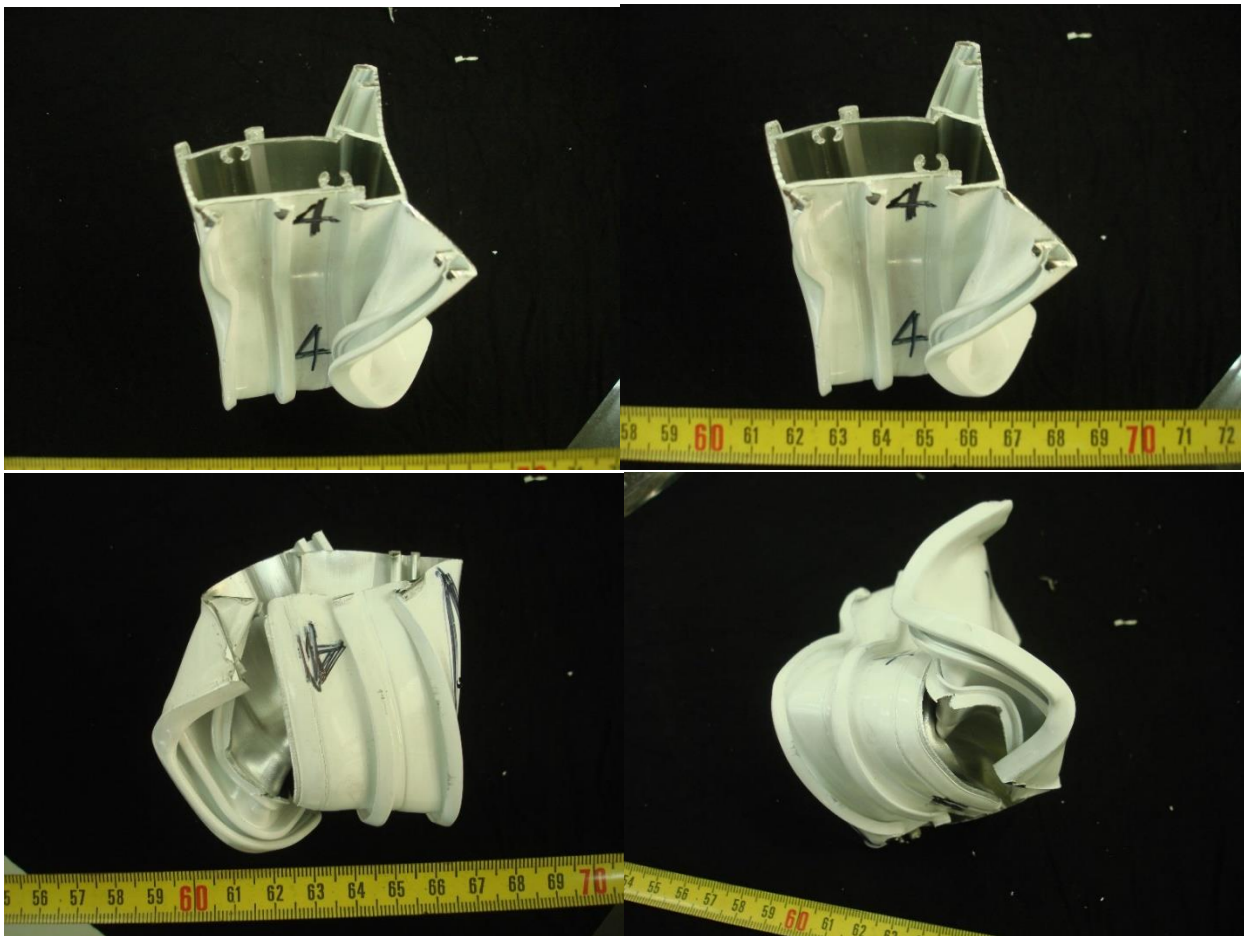
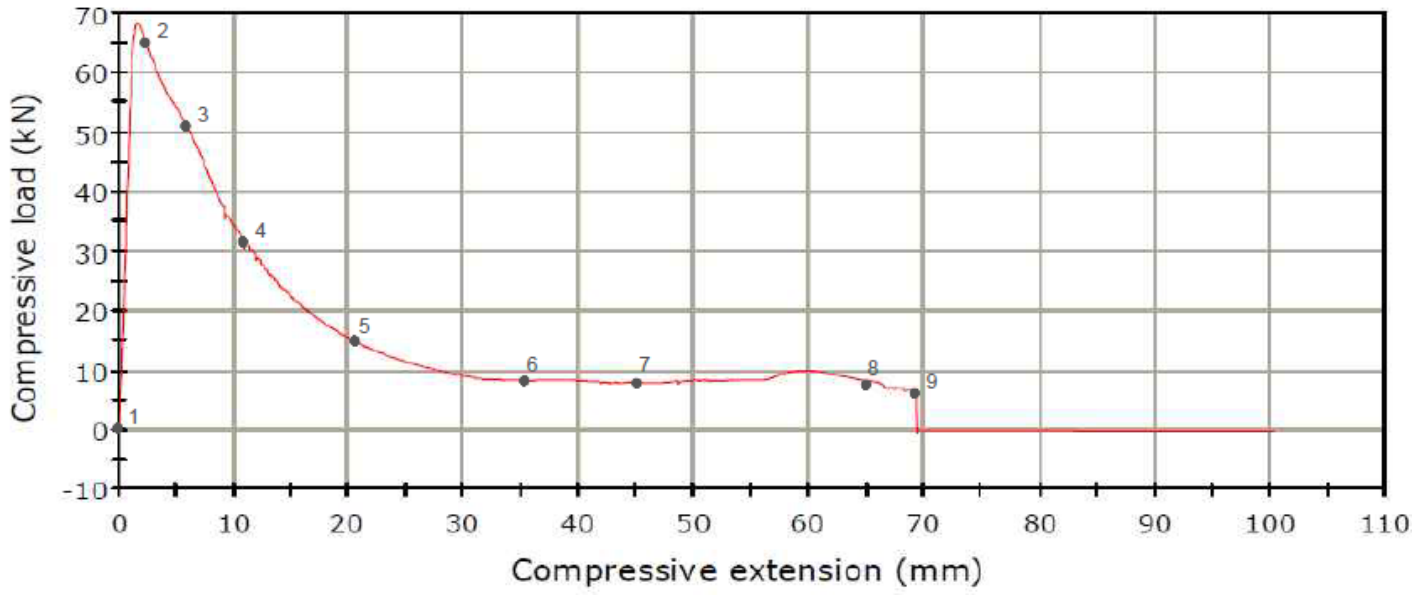
7



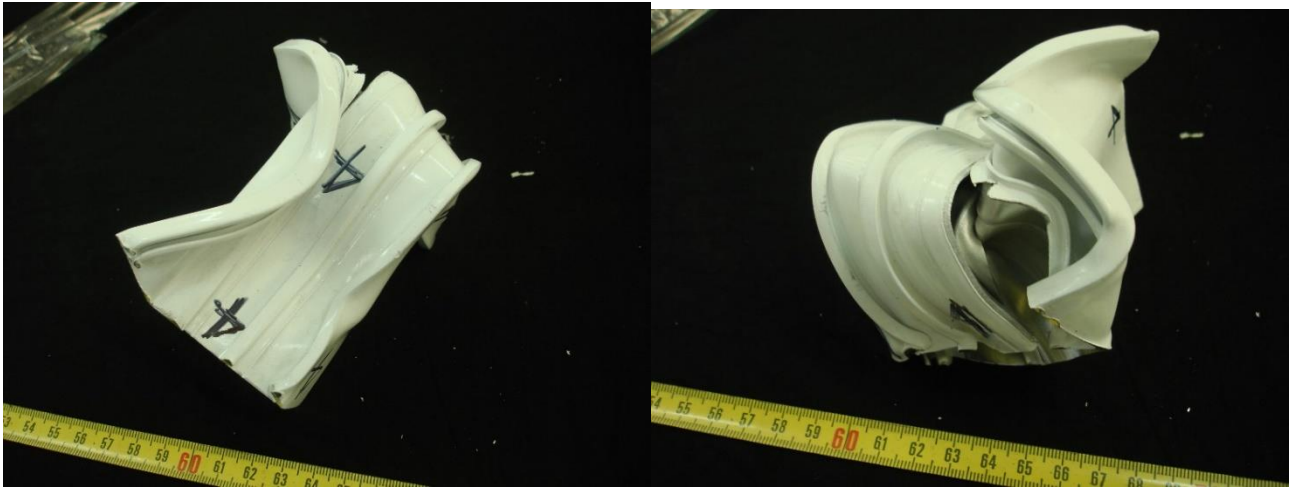
8

9

# LOAD - DEFLECTION GRAPH







Τελικές φωτογραφίες Δοκιμίου 4

#### Βασικά Αποτελέσματα Πειράματος

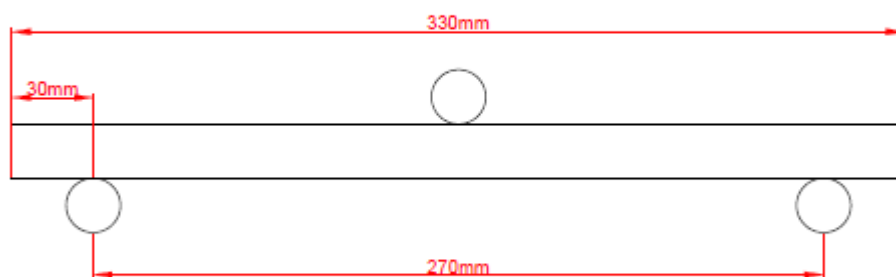
Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	69kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	25kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	1250J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	2,76
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)	7,74 J/gr

#### Παρατηρήσεις

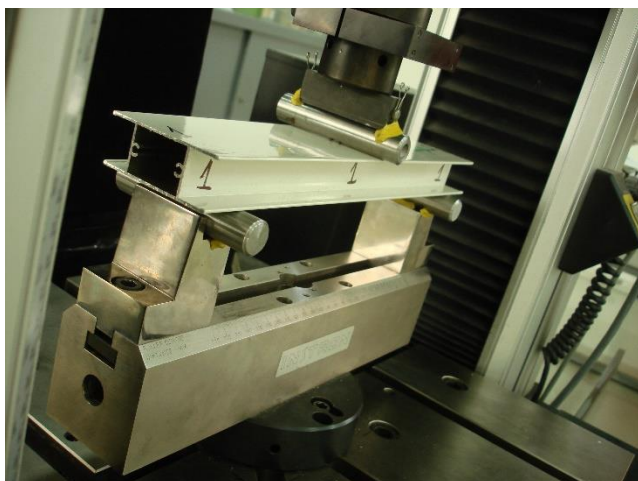
Η τομή του δοκιμίου αυτού παρουσιάζει μεγάλο λόγο του κύριου μέρους του μήκους προς το πλάτος του κυρίως μέρους του δοκιμίου. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το δοκίμιο δεν είναι συμμετρικό, οδηγεί στη μη συμμετρική κατάρρευση του δοκιμίου κατά την αξονική θλίψη και όπως φαίνεται από τα πρώτα στιγμιότυπα έχουμε συνολική (global) κατάρρευση, που οδηγεί σε λυγισμό. Ετσι απορροφάει λίγη ενέργεια κατά την κατάρρευση. Στο τέλος λόγω της ελαστικότητας του υλικού και του τρόπου φθοράς της βάσης του δοκιμίου, ο λυγισμός και η δύναμη της πρέσσας εκτονώνονται με αποκόλληση του δοκιμίου από τη θέση του και εκτόξευσή του μακριά από τη πρέσσα πριν την ολοκλήρωση του πειράματος. Το δοκίμιο καταλάμβανε περιοχή ίση με  $381\text{mm}^2$ , είχε αρκετά μεγάλες επιφάνειες πλευρικά, καθώς και περιοχές συγκεντρώσεως τάσεων και γι' αυτό παρατηρείται και διάσχιση του υλικού στη μία πλευρά από τον εκτεταμένο λυγισμό. Το δοκίμιο όπως φαίνεται και από τη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης δεν απορροφά μεγάλη ποσότητα ενέργειας, άρα σε αυτές τις συνθήκες δεν είναι καλός ενεργειακός απορροφητής.

## Πλευρική Καταπόνηση

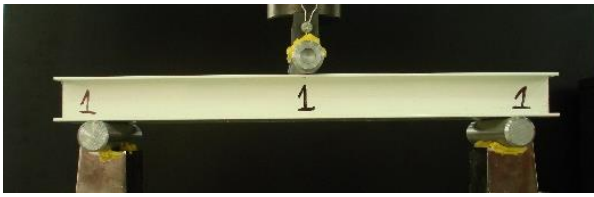
Για τις πειραματικές δοκιμές της πλευρικής συμπίεσης οι διαστάσεις του κάθε δοκίμιου είναι 330mm στον οριζόντιο άξονα συμπίεσης. Το βύθισμα ρυθμίστηκε στα 70mm. Δηλαδή μετά τη θλίψη το κάθε δοκίμιο από τα 160mm θα συμπιεστεί στα 60mm. Για ικανοποιητικά αποτελέσματα σε εύλογο χρονικό διάστημα ρυθμίζεται στα 50mm/min. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται νοηματικά η πειραματική διάταξη της πλευρικής συμπίεσης που πραγματοποιήθηκε για κάθε δοκίμιο.



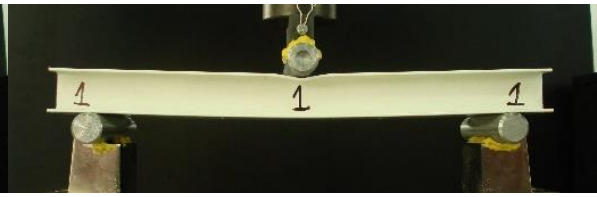
## Αποτελέσματα-Δοκίμιο 1



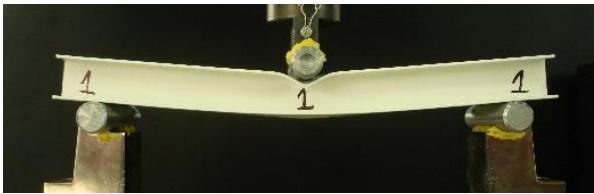
Αρχική Διάταξη Δοκίμιου 1



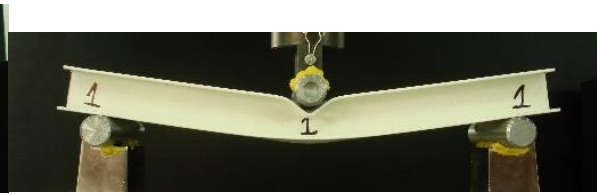
1



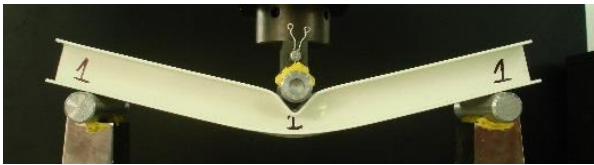
2



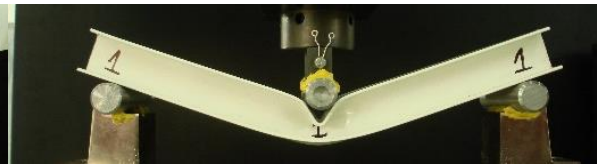
3



4



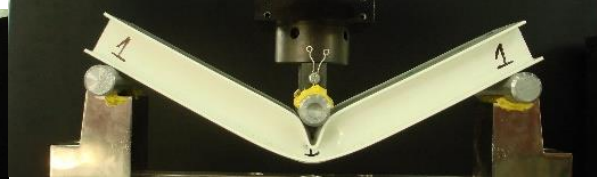
5



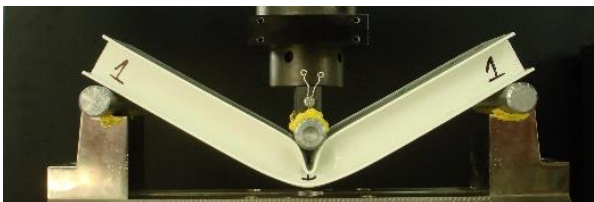
6



7

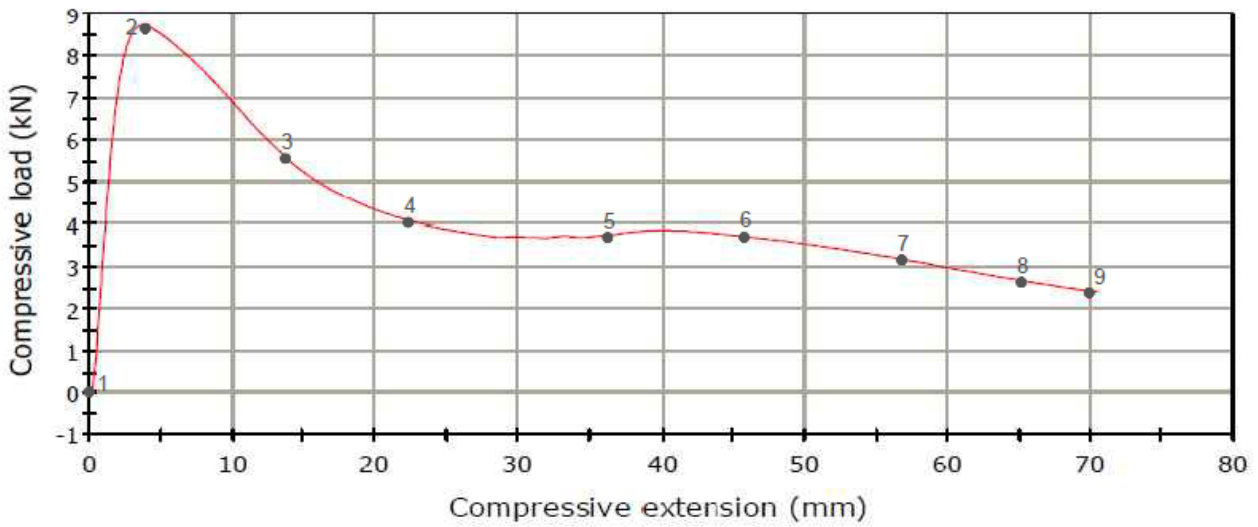


8



9

## LOAD - DEFLECTION GRAPH



Τελική φωτογραφία Δοκιμίου 1

### Βασικά Αποτελέσματα Πειράματος

Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	8,7kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	5kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	310J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,740

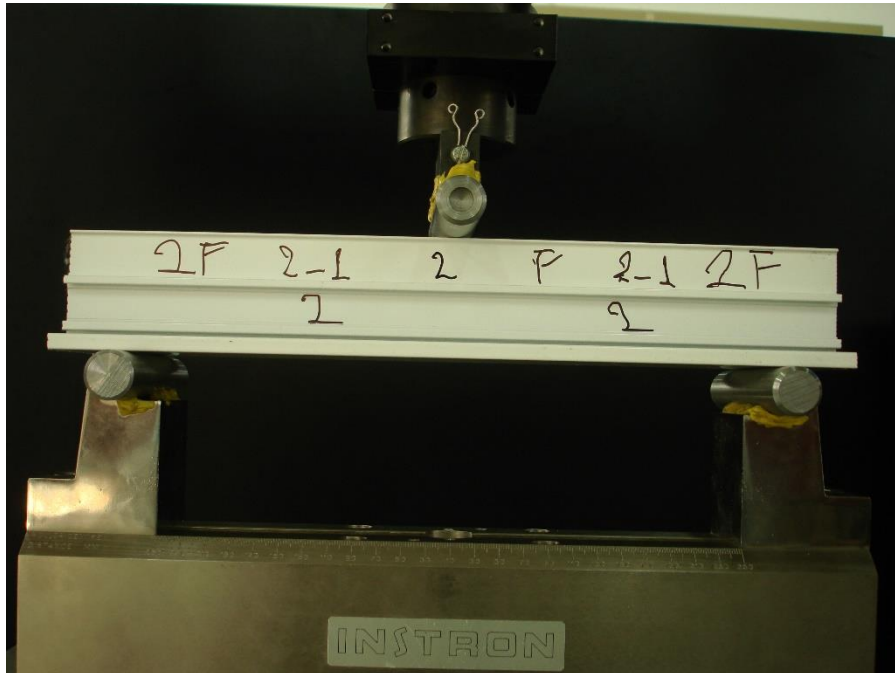
### Παρατηρήσεις

Η διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου ήταν αναμενόμενη, η κατάρρευση έγινε προοδευτικά. Το δοκίμιο λύγισε και όπως φαίνεται από τη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, όσο μεγαλώνει η

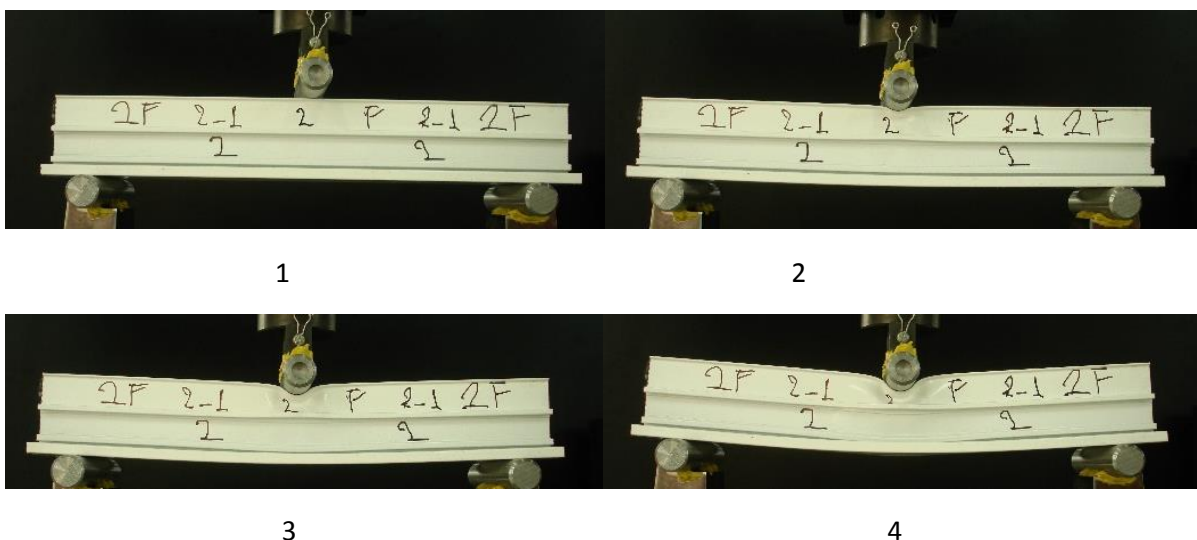
μετατόπιση τόσο μικραίνει το φορτίο. Να σημειωθεί ότι η πλευρά του δοκιμίου που συμπιέζεται έχει τη μικρότερη ροπή αδράνειας και ευνοεί το λυγισμό του δοκιμίου.

### Αποτελέσματα-Δοκίμιο 2\_1

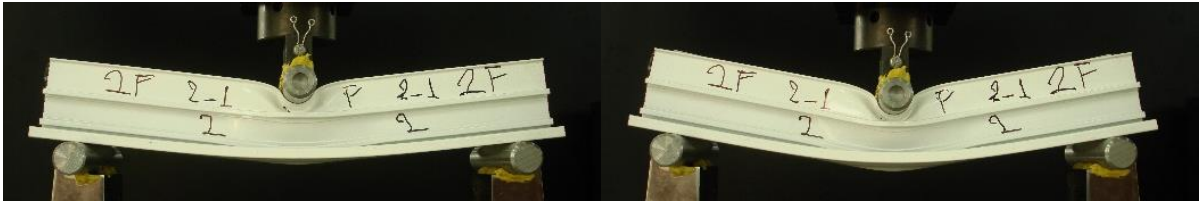
Στη περίπτωση του δοκιμίου 2, πραγματοποιήσαμε 2 διαφορετικές πλευρικές συμπιέσεις σε διαφορετικές πλευρές του δοκιμίου αφού δεν ήταν συμμετρικό ως προς αυτές τις πλευρές και παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η απορρόφηση ενέργειας από κάθε πλευρά.



Αρχική Διάταξη Δοκιμίου 2\_1

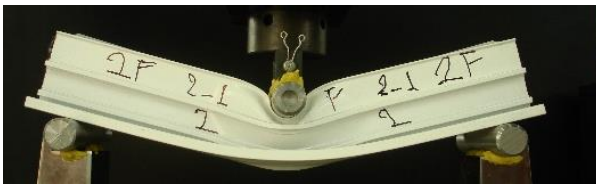




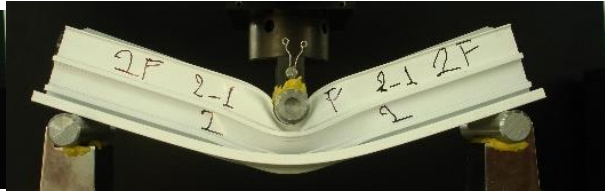


5

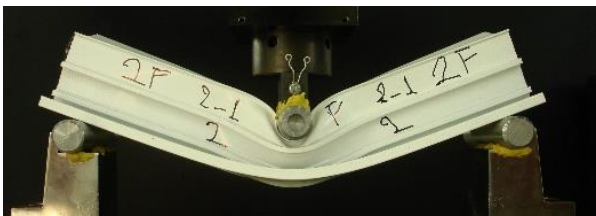
6



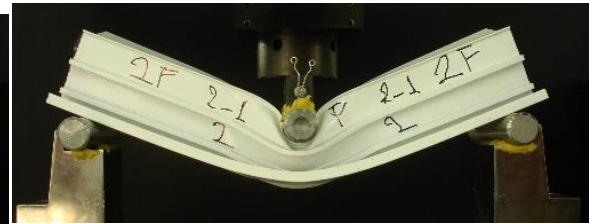
7



8

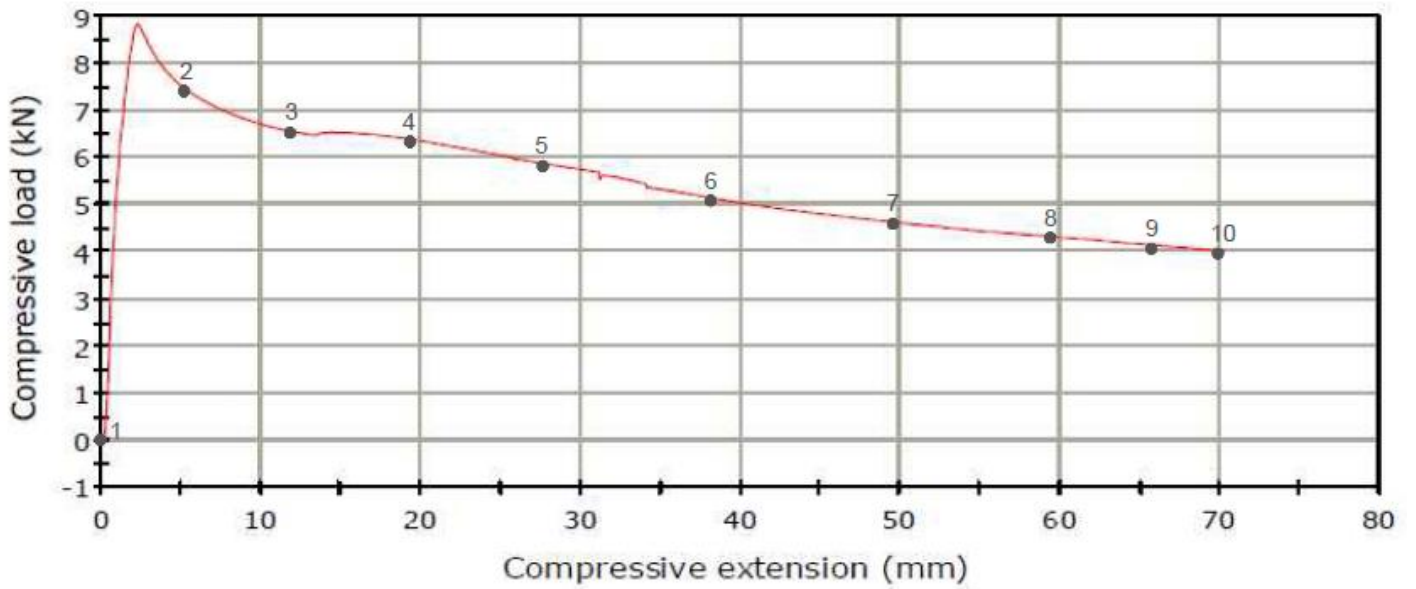


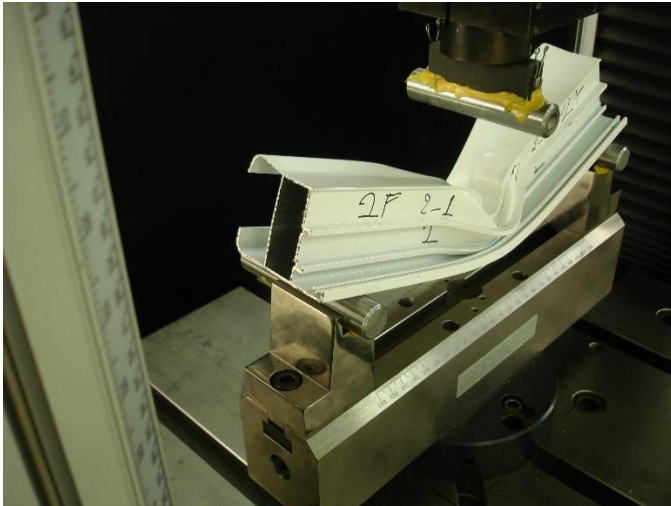
9



10

### LOAD - DEFLECTION GRAPH





Τελικές φωτογραφίες Δοκιμίου 2\_1

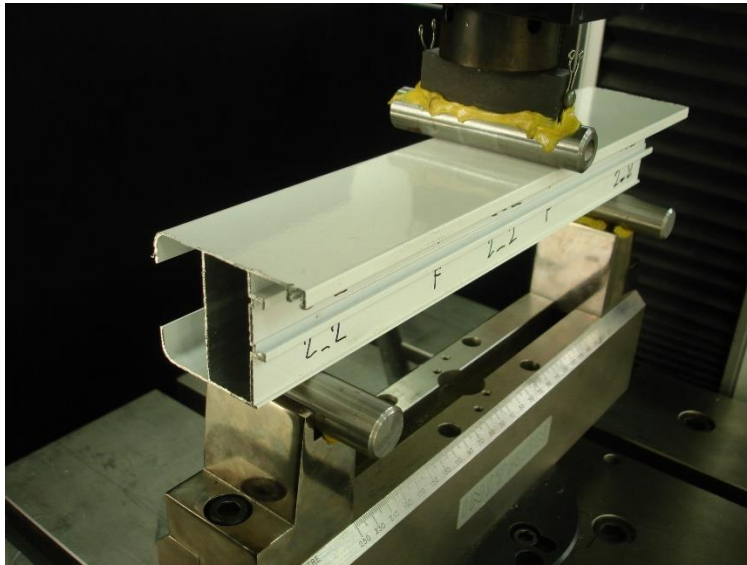
#### Βασικά Αποτελέσματα Πειράματος

Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	8.8kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	6,1kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	375J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,44

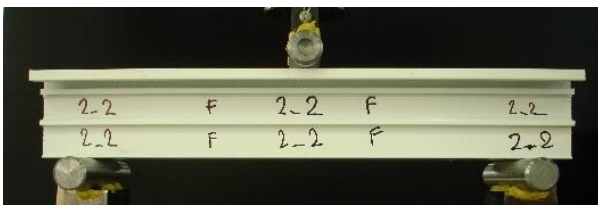
#### Παρατηρήσεις

Η διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου ήταν αναμενόμενη, η κατάρρευση έγινε προοδευτικά. Πρόκειται για ένα δοκίμιο με ανοικτές και κλειστές επιφάνειες. Το δοκίμιο λύγισε και όπως φαίνεται από τη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, όσο μεγαλώνει η μετατόπιση τόσο μικραίνει το φορτίο. Παρατηρείται επίσης ότι λόγω των μεγάλων πλευρών του δοκιμίου καταπονούνται κυρίως οι πλαϊνές πλευρές του δοκιμίου. Όπως φαίνεται μέχρι το στιγμιότυπο 5 η κάτω πλευρά του δοκιμίου έχει επηρεαστεί ελάχιστα. Από το στιγμιότυπο 6 και μετά, δηλαδή στα 38,5mm ξεκινάει ο λυγισμός του δοκιμίου σε όλη του την έκταση. Υπάρχει δηλαδή πλευρική δισείδωση (denting), αφού η διατομή είναι πιο ενδοτική τοπικά.

Αποτελέσματα-Δοκίμιο 2\_2



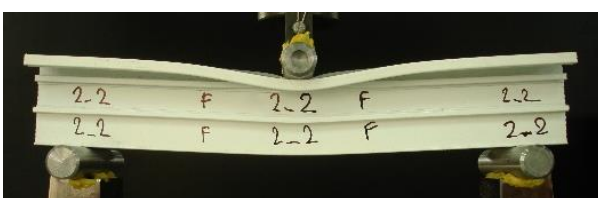
Αρχική Διάταξη Δοκίμιου 2\_2



1



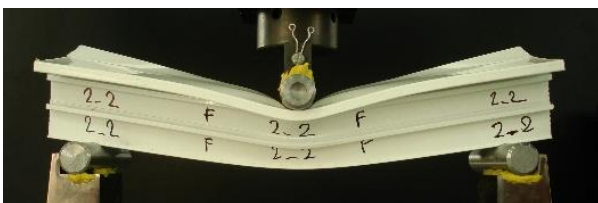
2



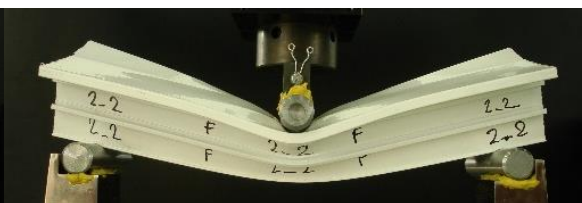
3



4

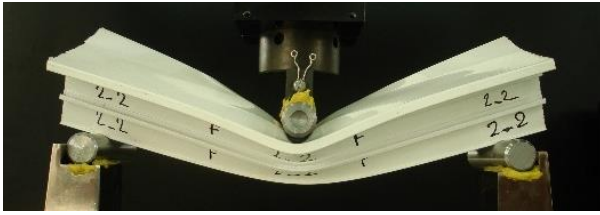


5

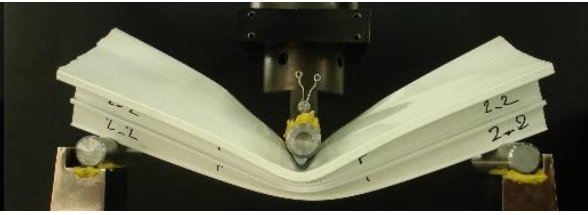


6

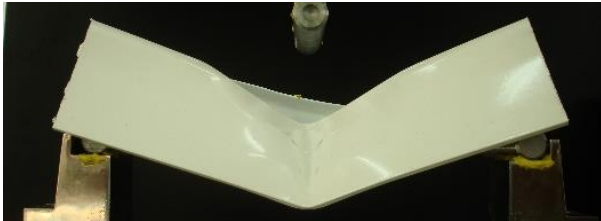




7

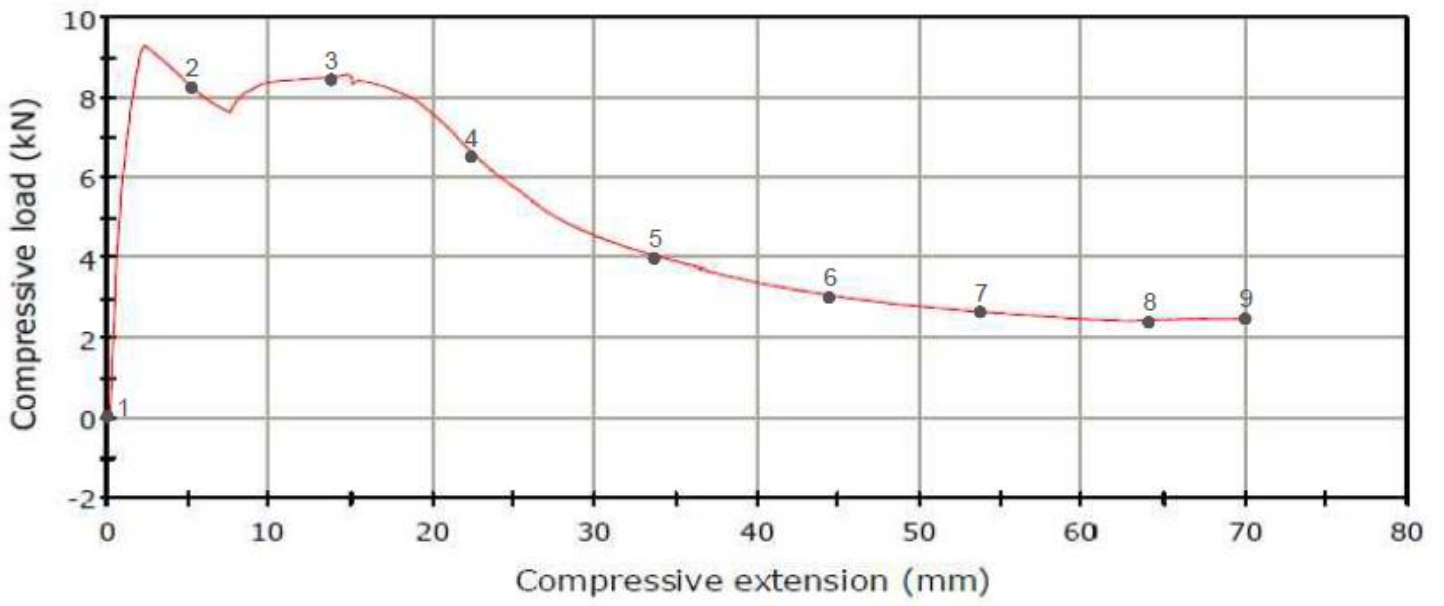


8



9

### LOAD - DEFLECTION GRAPH





Τελική φωτογραφία Δοκιμίου 2\_2

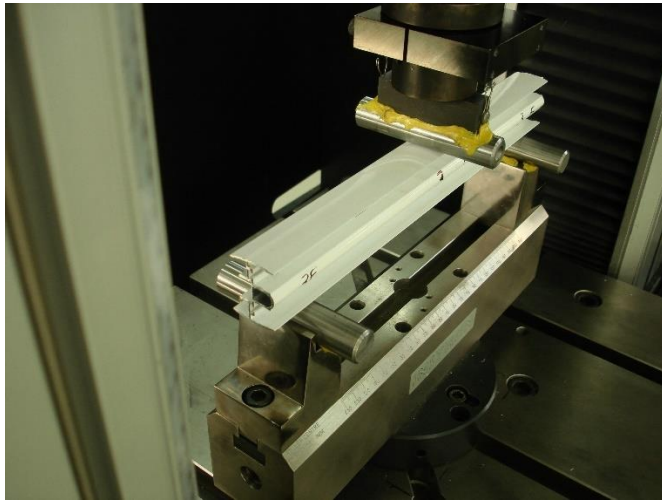
#### Βασικά Αποτελέσματα Πειράματος

Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	8.6kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	5kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	340J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,72

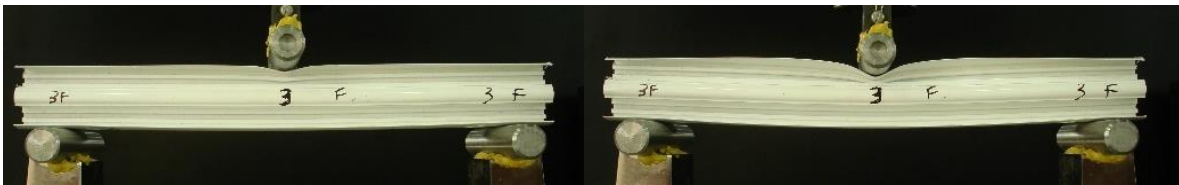
#### Παρατηρήσεις

Η διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου ήταν αναμενόμενη, η κατάρρευση έγινε προοδευτικά. Το δοκίμιο λύγισε και όπως φαίνεται από τη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, όσο μεγαλώνει η μετατόπιση τόσο μικραίνει το φορτίο. Πρόκειται για το ίδιο δοκίμιο με το προηγούμενο αλλά η συμπίεση γίνεται σε άλλη πλευρά του δοκιμίου. Σε αυτή τη περίπτωση όμως υπάρχει πιο μεγάλη αντίσταση τοπικά και το δοκίμιο επηρεάζεται πιο ολοκληρωτικά. Επειδή η βάση είναι μικρότερη από την επιφάνεια συμπίεσης το δοκίμιο βρίσκει δίοδο περιστροφής και όπως φαίνεται περιστρέφεται μετά το στιγμιότυπο 5.

Αποτελέσματα-Δοκίμιο 3



Αρχική Διάταξη Δοκιμίου 3



1

2



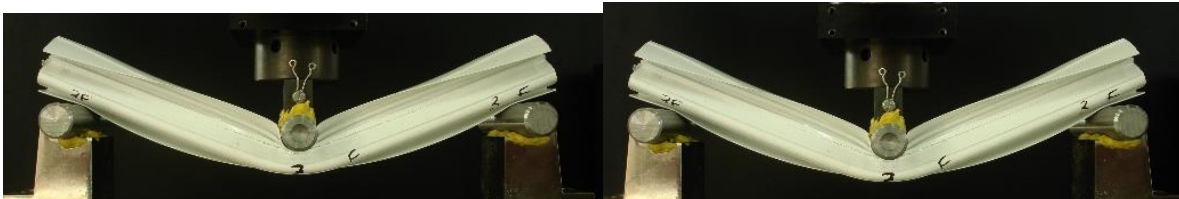
3

4



5

6



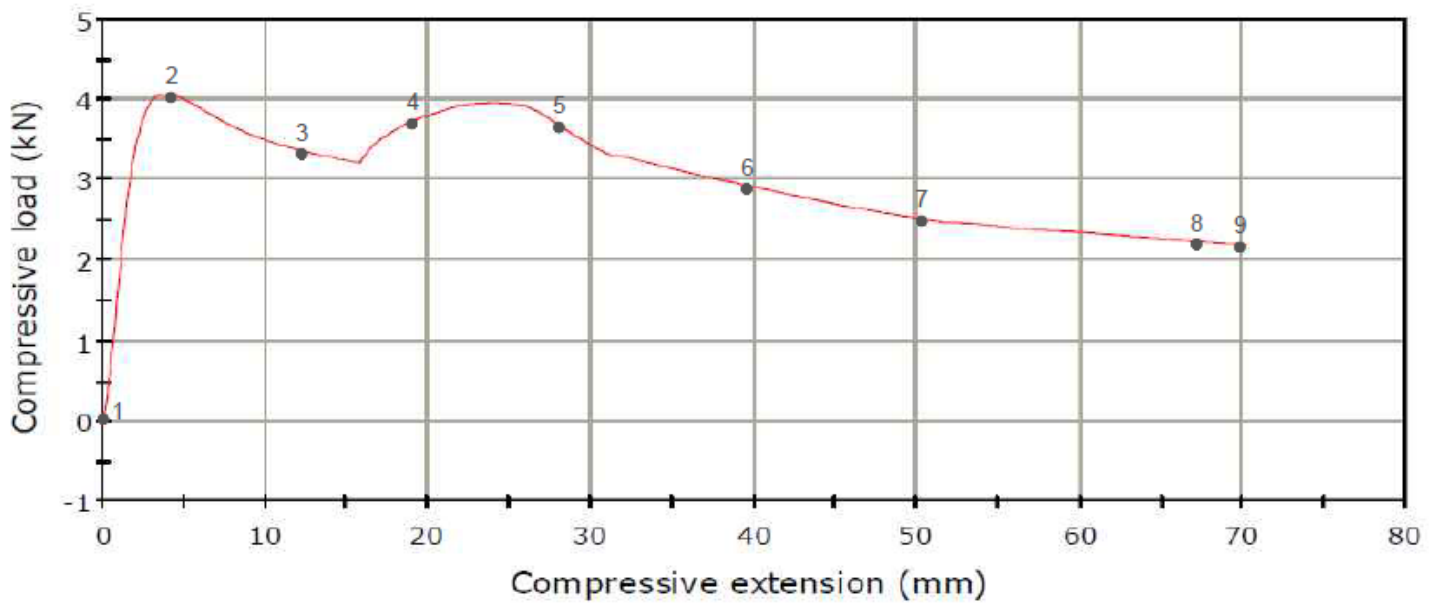
7

8



9

### LOAD - DEFLECTION GRAPH



Τελική φωτογραφία Δοκιμίου 3

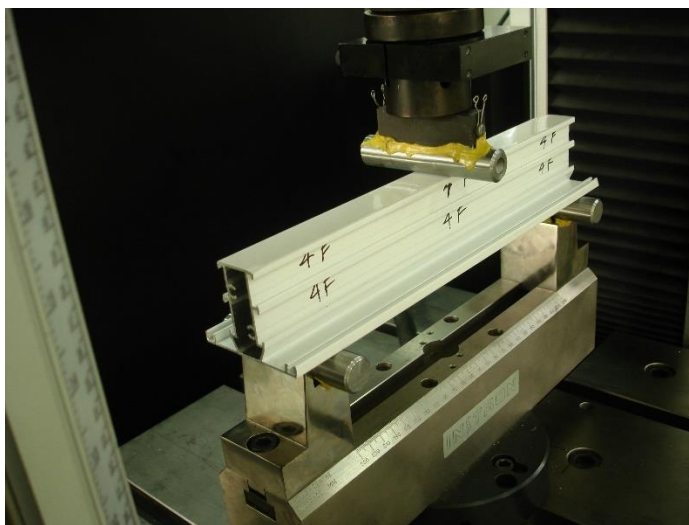
Βασικά Αποτελέσματα Πειράματος

Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	4.05kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	2,9kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	210J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,40

## Παρατηρήσεις

Η διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου ήταν αναμενόμενη, η κατάρρευση έγινε προοδευτικά. Το δοκίμιο λύγισε και όπως φαίνεται από τη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, όσο μεγαλώνει η μετατόπιση τόσο μικραίνει το φορτίο. Εξάιρεση αποτελεί το κομμάτι της καμπύλης από 20mm έως 30mm, όπου παρουσιάζονται ανομοιομορφίες στο δοκίμιο και περιοχές συγκέντρωσης τάσης και έτσι παρατηρείται άνοδος του φορτίου. Παρότι έτσι απορροφάται περισσότερη ενέργεια, η απορρόφηση δεν είναι προοδευτικά ομοιόμορφη. Επίσης και σε αυτή τη περίπτωση υπάρχει πλευρική διείσδυση (denting).

## Αποτελέσματα-Δοκίμιο 4



Αρχική Διάταξη Δοκιμίου 4



1

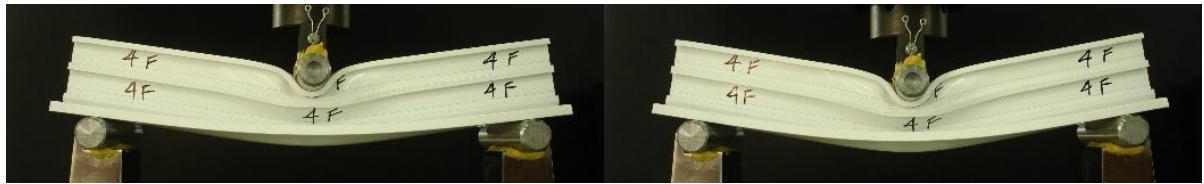
2



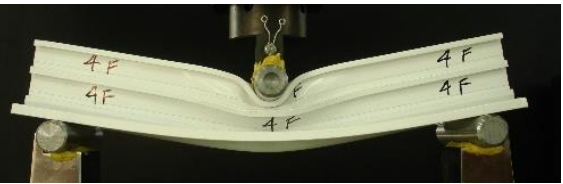
3

4

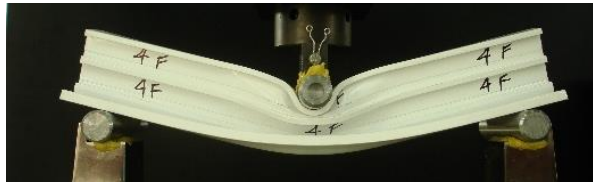




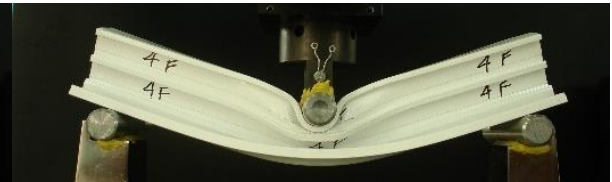
5



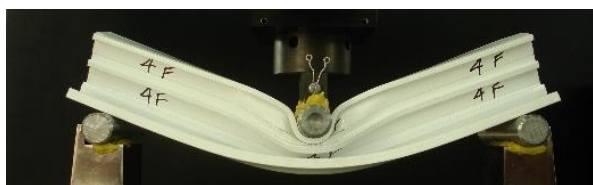
6



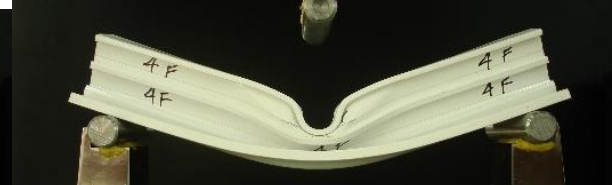
7



8

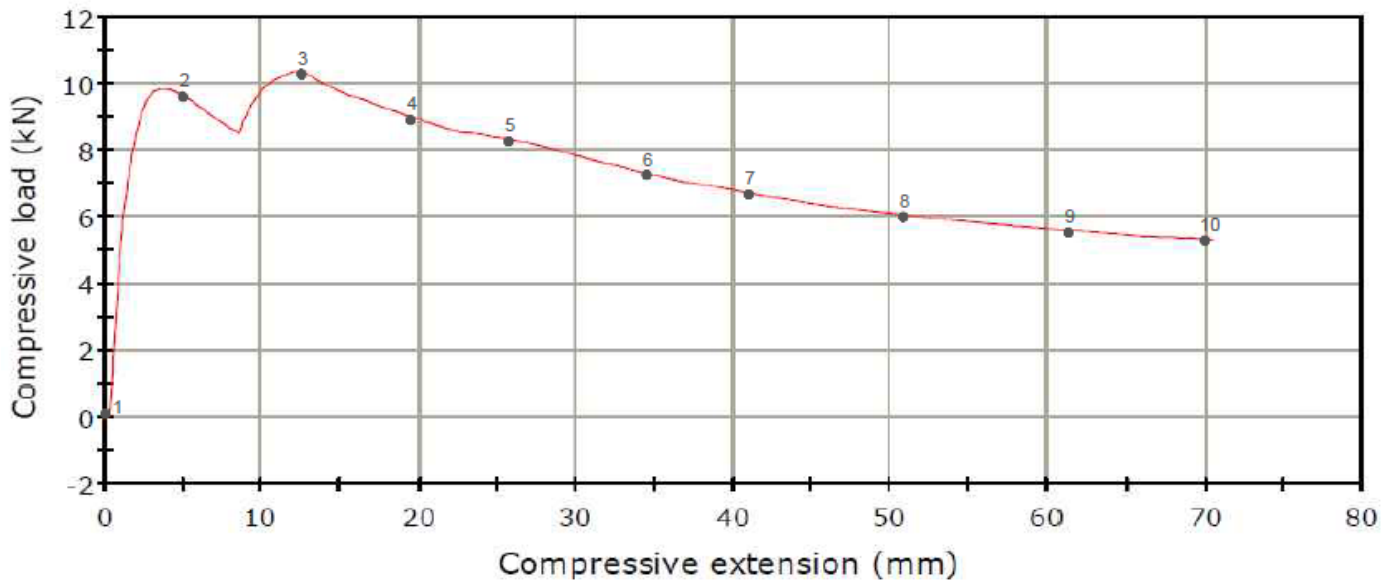


9



10

### LOAD - DEFLECTION GRAPH





Τελική Φωτογραφία Δοκιμίου 4

#### Βασικά Αποτελέσματα Πειράματος

Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	10,2kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	7,5kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	490J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,360

#### Παρατηρήσεις

Η διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου ήταν αναμενόμενη, η κατάρρευση έγινε προοδευτικά. Το δοκίμιο λύγισε και όπως φαίνεται από τη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, όσο μεγαλώνει η μετατόπιση τόσο μικραίνει το φορτίο. Και σε αυτό το δοκίμιο παρατηρείται πλευρική διείδυση λόγω της μεγάλης επιφάνειας των κάθετων πλευρών του, καταπονούνται αρχικά οι πλαινές πλευρές και όπως φαίνεται από το στιγμιότυπο 5 και μετά λυγίζει το δοκίμιο σε όλη του την έκταση, δηλαδή από τα 26mm.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Προσομοιώσεις των πειραματικών δοκιμών μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Ls-Dyna

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται απόπειρα προσομοίωσης των πειραματικών δοκιμών που εκτελέστηκαν στη μηχανή Instron και παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Ls-Dyna επιχειρήθηκε η προσομοίωση της συμπεριφοράς κατάρρευσης των δοκιμών, τα αποτελέσματα της οποίας θα παρουσιασθούν συγκριτικά με τα πειραματικά αποτελέσματα. Έπειτα, θα διαπιστωθεί κατά πόσο συγκλίνουν τα θεωρητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ θα ερμηνευθούν οι όποιες διαφορές υπάρχουν.

Η κάθε πειραματική διάταξη και δοκίμιο σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα Ls-Prepost του Ls-Dyna. Έπειτα αφού τέθηκαν οι απαραίτητες συνοριακές συνθήκες που αναλύονται παρακάτω, έγινε η επεξεργασία και η υπολογιστική διαδικασία σε Ls-Dyna Solver. Τέλος τα αποτελέσματα που λάβαμε εισήχθησαν στο post-processor του Ls-dyna και πήραμε γραφικές απεικονίσεις των πειραμάτων καθώς και τις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης του κάθε πειράματος.

#### Σχεδίαση Διάταξης- Συνοριακές Συνθήκες

Η κάθε πειραματική διάταξη και δοκίμιο σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα Ls-Prepost του Ls-Dyna. Αρχικά σχεδιάστηκαν τα περιγράμματα των τομών του κάθε δοκιμίου και στη συνέχεια τους αποδόθηκε το κατάλληλο μήκος. Σε ότι αφορά την πυκνότητα διακριτοποίησης, είναι γεγονός ότι όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα τόσο καλύτερη προσομοίωση του σχηματισμού λοβών επιτυγχάνεται. Όμως, αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος, οδηγεί σε αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Για το λόγο αυτό, μετά από δοκιμές και προκειμένου να αποφύγουμε τη στρέβλωση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά και να αποφύγουμε μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους, επιλέχθηκε η διακριτοποίηση να γίνει ανά 2 mm της κάθε πλευράς του δοκιμίου. Τέλος, για το έμβολο και τη βάση, εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν παραμορφώνονται, δεν απαιτείται μεγάλη πυκνότητα πλέγματος και για αυτό επιλέχθηκε μικρότερη διακριτοποίηση, ανά 10 mm της κάθε πλευράς.

Για να οριστεί το πάχος του κάθε δοκιμίου και να αποδωθεί η ιδιότητα του κελύφους στο μοντέλο μας, χρησιμοποιήσαμε το τύπο **SECTION\_SHELL** του Ls-Dyna. Εκεί ορίσαμε πάχος στη κατασκευή μας. Τα δοκίμια δεν είχαν όλα το ίδιο πάχος, το δοκίμιο 1 είχε πάχος 1,4mm, ενώ τα δοκίμια 2,3,4 είχαν πάχος 1,25mm. Χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικές μέθοδοι ολοκλήρωσης με σκοπό να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Η μέθοδος Belytscko – Tsay (ELFORM 2) και η μέθοδος πλήρους ολοκλήρωσης (ELFORM 16).

Έπειτα, επιλέχθηκε το υλικό για το δοκίμιο, το έμβολο και τη βάση. Το υλικό του δοκιμίου μοντελοποιήθηκε με τον τύπο **MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY**, που υπάρχει στο αρχείο υλικών του κώδικα. Στη συνέχεια εισήχθησαν τα χαρακτηριστικά του αλουμινίου και χαρακτηριστικά σημεία από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) από πείραμα εφελκυσμού για το συγκεκριμένο δοκίμιο, τα οποία παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα.

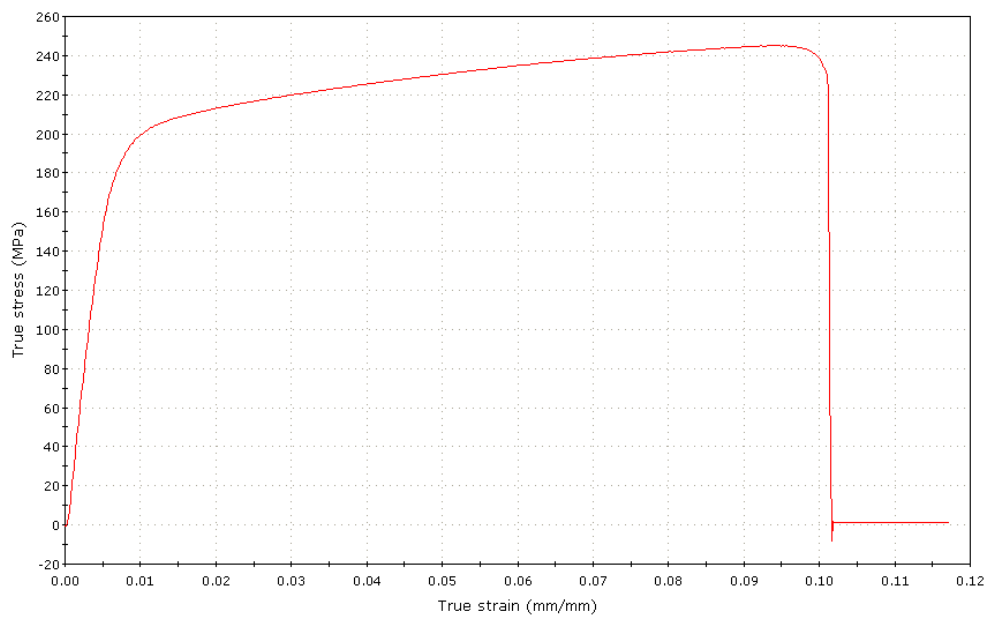


Πυκνότητα (gr/mm <sup>3</sup> )	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Λόγος Poisson	Όριο Διαρροής (MPa)
0.0027	69000	0.33	200

Ιδιότητες Αλουμινίου

σ (MPa)	ε
200	0
210	0,008
218	0,018
238	0,038
245	0,09
245	0,20

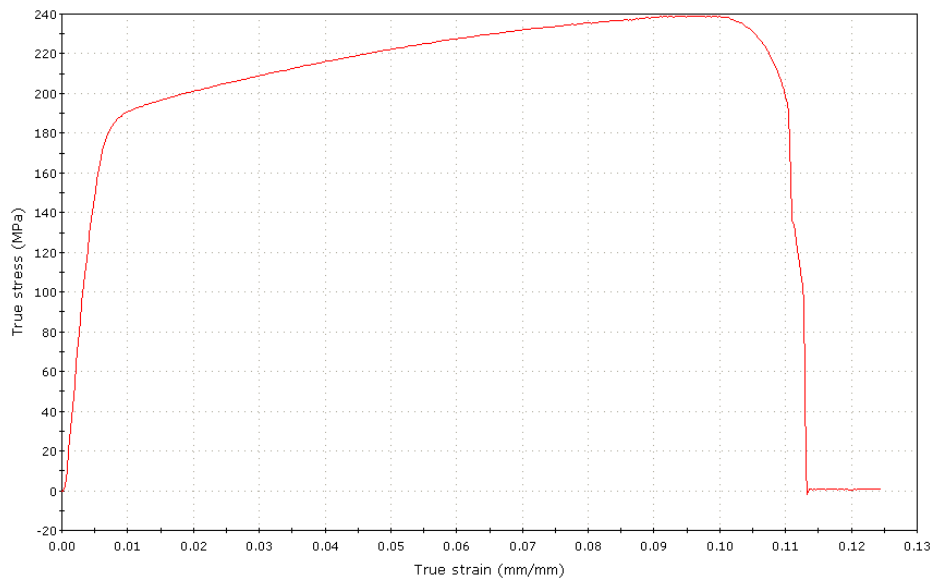
Χαρακτηριστικές τιμές από την καμπύλη σ-ε του υλικού του δοκιμίου 1



Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού του δοκιμίου 1

σ (MPa)	ε
192	0
200	0,008
209	0,018
222	0,038
238	0,09
238	0,20

Χαρακτηριστικές τιμές από την καμπύλη σ-ε του υλικού των δοκιμίων 2,3,4



Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης του υλικού των δοκιμών 2,3,4

Για τις πλάκες αξονικής συμπίεσης ή τους κυλίνδρους κάμψης τριών σημείων αντίστοιχα, που χρησιμοποιούνται για τη προσομοίωση των εργαλείων επιβολής φορτίου της πρέσσας, επιλέχθηκε ο τύπος υλικού MAT\_RIGID. Με τον τρόπο αυτό μοντελοποιούνται τα απαραμόρφωτα (πρακτικά) μέρη της πειραματικής διαδικασίας, με αξιόπιστα αποτελέσματα και εύθετο χρόνο προσομοίωσης. Τα υλικά αυτά είναι από χάλυβα οπότε τους δίνουμε τις παρακάτω ιδιότητες.

Πυκνότητα (gr/mm <sup>3</sup> )	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Λόγος Poisson
0.00783	207000	0.30

Ιδιότητες Χάλυβα

Επίσης από τις μεταβλητές CON1 και CON2 θέτονται οι κατάλληλοι περιορισμοί στη κίνηση των υλικών, ώστε να έχουν τα περιθώρια κίνησης στους επιθυμητούς άξονες του εκάστοτε πειράματος.

Αφού ορίστηκαν τα υλικά του δοκιμίου, της βάσης και του εμβόλου, προχωρούμε στην εισαγωγή των διεπιφανειών στον κώδικα. Για να προσομοιάσουν οι πειραματικές δοκιμές, ορίζονται 3 διεπιφάνειες. Η πρώτη διεπιφάνεια αφορά την επαφή του δοκιμίου με τη βάση. Η δεύτερη διεπιφάνεια αφορά την επαφή του δοκιμίου με το έμβολο και η τρίτη αφορά την επαφή των στοιχείων του δοκιμίου μεταξύ τους κατά την κατάρρευση.

Αρχικά, για να ορίσουμε τη διεπιφάνεια δοκιμίου – βάσης, επιλέξαμε την επαφή **AUTOMATIC\_NODES\_TO\_SURFACE**, στην οποία ορίσαμε ως master τη βάση και ως slave το δοκίμιο. Στους συντελεστές τριβής, χρησιμοποιήθηκαν τυπικές τιμές για επαφή μετάλλου με μέταλλο, δηλαδή για το συντελεστή στατικής τριβής  $f_s = 0,2$  και για το συντελεστή δυναμικής τριβής  $f_d = 0,15$ .

Έπειτα δημιουργήσαμε τη διεπιφάνεια δοκιμίου – εμβόλου, επιλέγοντας την επαφή **AUTOMATIC\_NODES\_TO\_SURFACE**, στην οποία ορίσαμε ως master το έμβολο και ως slave το δοκίμιο. Οι συντελεστές τριβής λαμβάνουν τις ανωτέρω τιμές, δηλαδή  $f_s = 0,2$  και  $f_d = 0,15$ .

Τέλος, δημιουργήθηκε η διεπιφάνεια του δοκιμίου με τον εαυτό του, καθώς πεπερασμένα στοιχεία του δοκιμίου έρχονται σε επαφή μεταξύ τους κατά την κατάρρευση. Για τη δημιουργία, επιλέχθηκε η επαφή **AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE**. Οι συντελεστές τριβής λαμβάνουν και σε αυτήν την περίπτωση τις τυπικές τιμές  $f_s = 0,2$  και  $f_d = 0,15$ . Στις περιπτώσεις του ELFORM 16 ενεργοποιείται

η επιλογή **soft\_constraint\_option (SOFT)** προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα που παρουσιαζόταν κατά την κατάρρευση δοκιμών με οξείες γωνίες κορυφής, όπου τα πεπερασμένα στοιχεία, ιδιαίτερα στο τριγωνικό τμήμα υφίστανται μεγάλες διατμητικές τάσεις που τα παραμορφώνουν με αποτέλεσμα να σταματά η εξέλιξη της κατάρρευσης λόγω μεγάλης και εκτεταμένης αλληλοδιείσδυσης στο πλέγμα του δοκιμίου. Επιπλέον, κατά τη προσομοίωση διατηρείται το πάχος του ελάσματος ανεξαρτήτως του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων. Με την επιλογή αυτή γίνεται πιο αποτελεσματική και πλήρης η διαχείριση της μηχανικής αλληλεπίδρασης επαφής εντός των ζωνών υψηλής παραμόρφωσης.

Τέλος, για την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης, εισάγονται στον κώδικα οι οριακές συνθήκες. Έτσι, επιλέγεται μετατόπιση του εμβόλου κατά 100mm προς τα κάτω (αξονική συμπίεση) με ταχύτητα 1 mm / msec (ημι-στατική φόρτιση). Σε αυτό το σημείο, πρέπει να επισημάνουμε ότι επιλέχθηκε μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή του πειράματος, προκειμένου να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος. Πάντως, η συγκεκριμένη ταχύτητα που επιλέχθηκε είναι εντός των ορίων που μας επιτρέπουν αξιόπιστα αποτελέσματα (αποφυγή ανεπιθύμητων αδρανειακών φαινομένων) σε σχέση με το πείραμα.

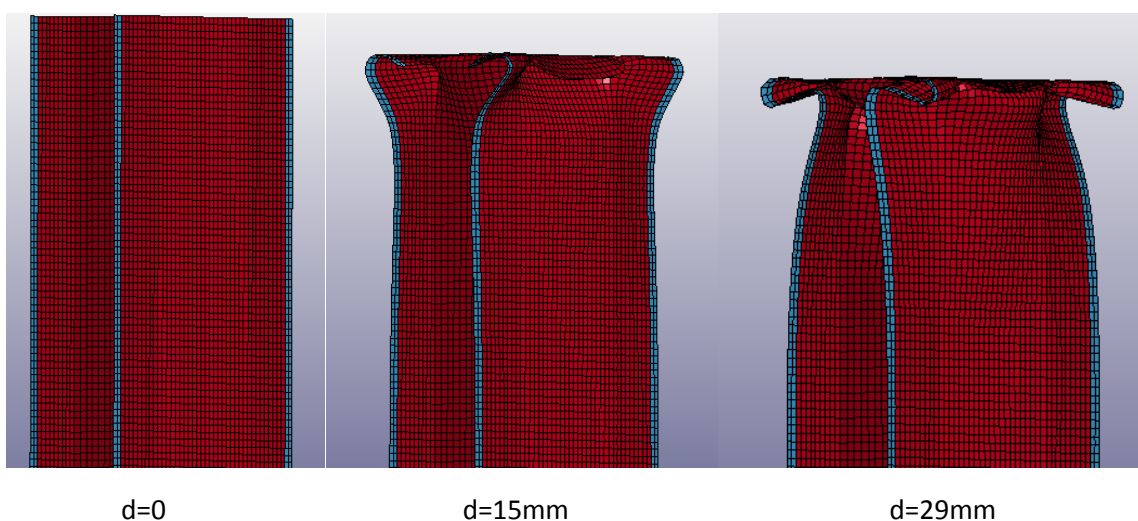
Η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθήθηκε για την κατασκευή όλων των μοντέλων που αντιστοιχούν στα πειραματικά δοκίμια και για την αξονική θλίψη και για την πλευρική συμπίεση τριών σημείων.

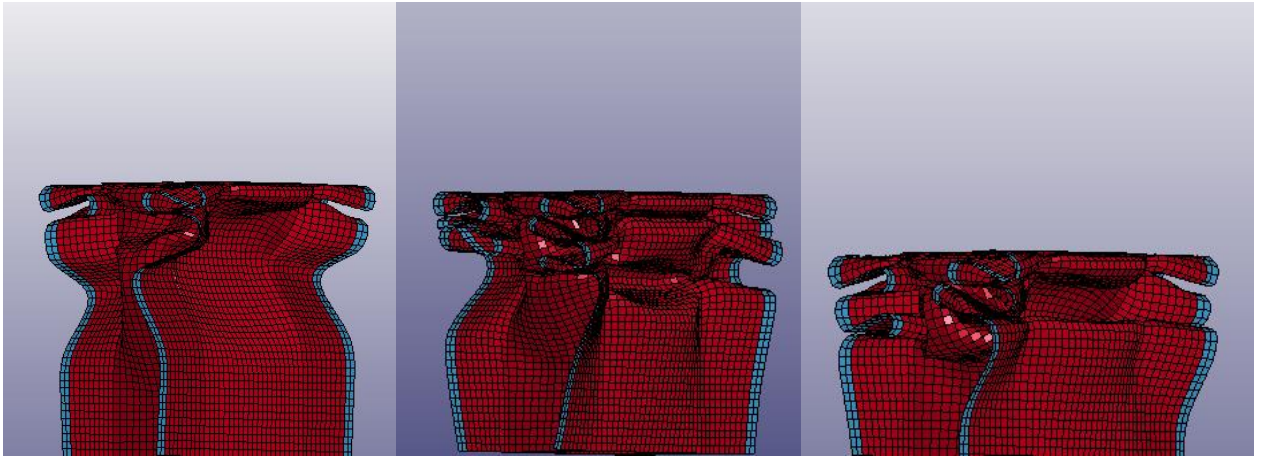
## Προσομοιώσεις-Μοντέλα

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του κυλινδρικού δοκιμίου και θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα.

### Προσομοίωση Αξονικής Καταπόνησης- Δοκίμιο 1

Αρχικά, παρουσιάζονται στιγμιότυπα τόσο από τη μοντελοποίηση της κατάρρευσης, όσο και από την πειραματική δοκιμή για το αντίστοιχο δοκίμιο





d=50mm

d=73mm

d=100mm



d=0



d=15mm



d=29mm



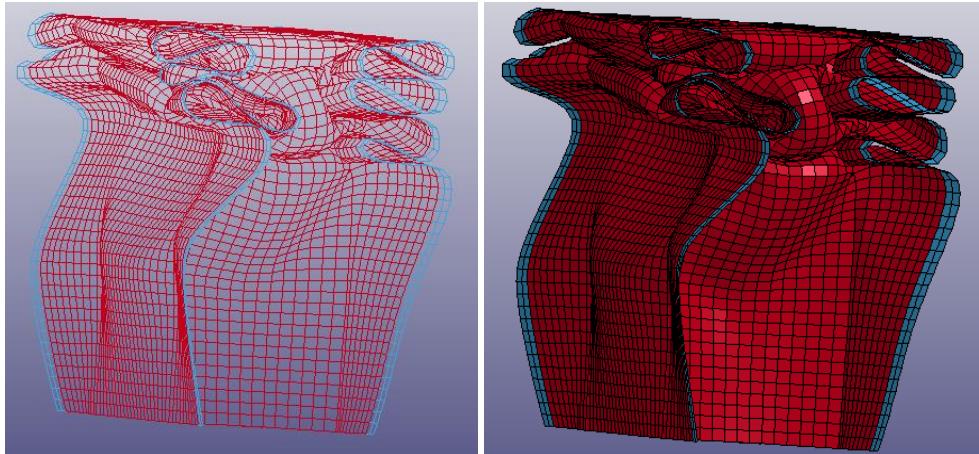
d=50mm



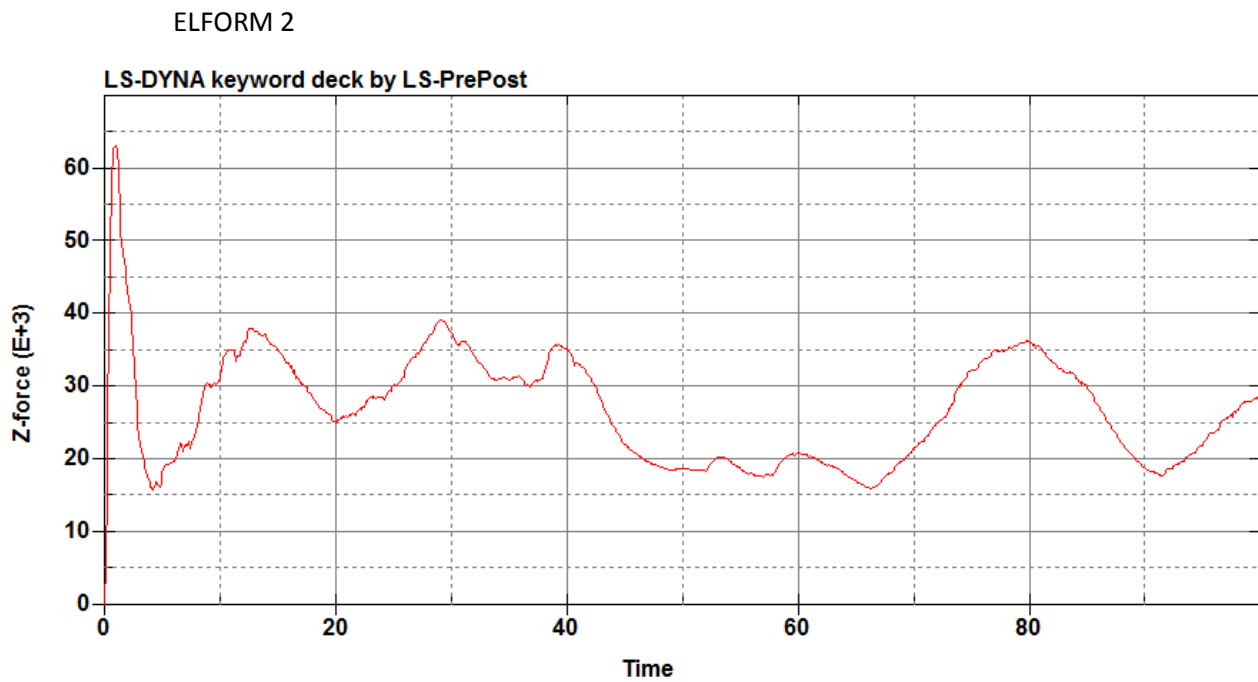
d=73mm



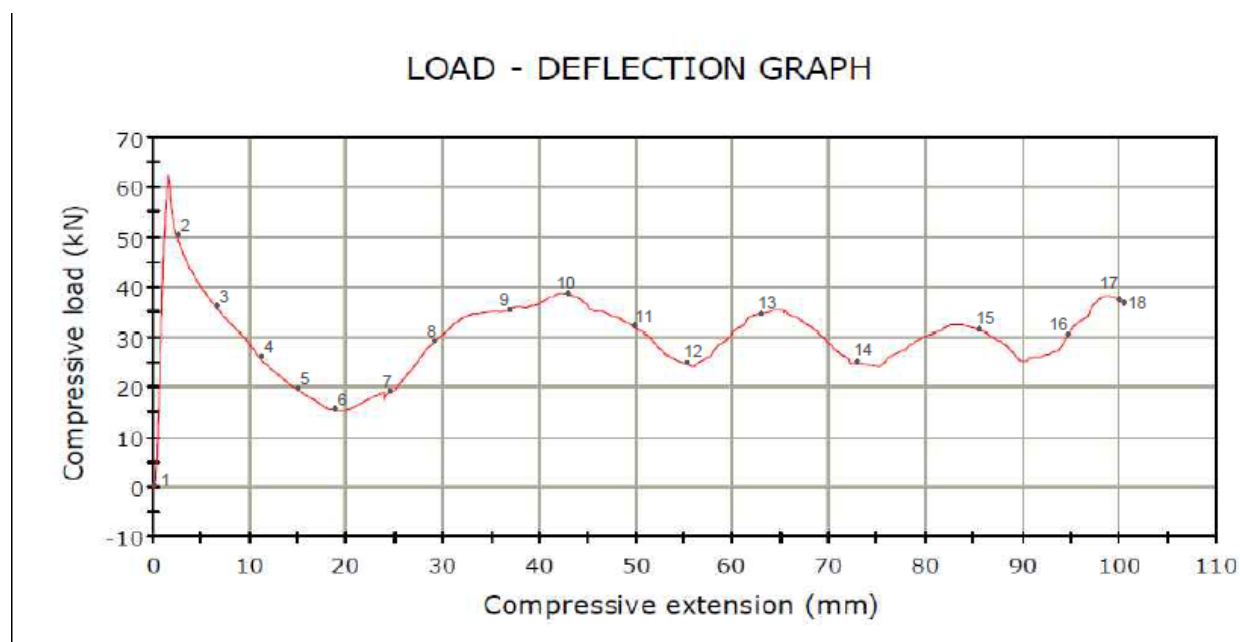
d=100mm



Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα η θεωρητική καμπύλη που προέκυψε από τη μοντελοποίηση και η πειραματική καμπύλη του δοκιμίου, ώστε να συγκριθούν οι πειραματικές τιμές με τις τιμές της προσομοίωσης.



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



### Σύγκριση Βασικών Αποτελεσμάτων

	ELFORM 2	ELFORM 16	Πειραματικά Αποτελέσματα
Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	63kN	-	62kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	30kN	-	32kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	2650J	-	2900J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	2,1	-	1,937
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)	22,11 J/gr	-	24,2J/gr

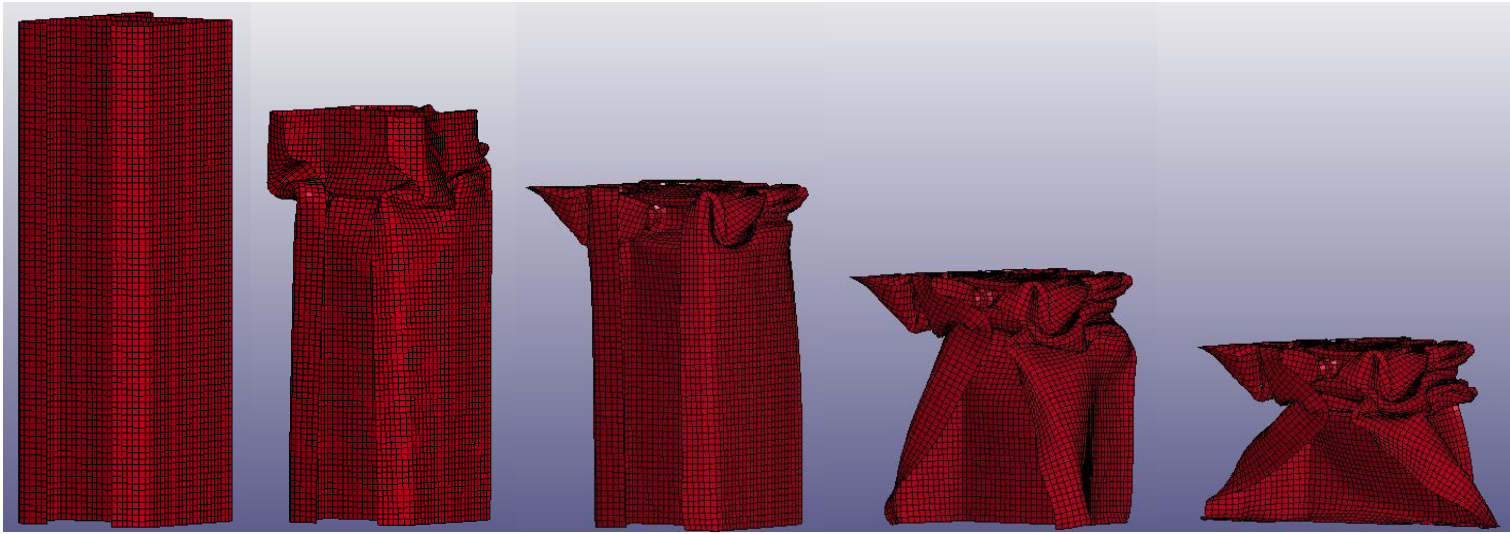
### Παρατηρήσεις-Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Στα παραπάνω στιγμιότυπα και τις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης παρατηρούμε τις διαφορές μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Όπως βλέπουμε για την αξονική θλίψη στο δοκίμιο 1 υπάρχουν ομοιότητες και η προσομοίωση προσεγγίζει τα πειραματικά αποτελέσματα. Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε τη δημιουργία μη εκτατών λοβών και τα ποσά της απορροφούμενης ενέργειας και της αρχικής δύναμης κατάρρευσης έχουν μικρές διαφορές. Η βασική διαφορά όπως βλέπουμε στα στιγμιότυπα είναι το σημείο του δοκιμίου, όπου ξεκινάνε να δημιουργούνται οι λοβοί, στο πείραμα οι λοβοί και η αρχική κατάρρευση έγιναν σε χαμηλό ύψος, ενώ στη προσομοίωση η κατάρρευση γίνεται σε ψηλότερο σημείο. Ουσιαστικά η διαφορά είναι στο σημείο που ξεκινάει η κατάρρευση, γιατί από εκεί και πέρα η συμπεριφορά ήταν παρόμοια. Γενικά στις προσομοιώσεις είναι φυσιολογικό να υπάρχουν numerical errors λόγω μεγάλης και πολύπλοκης συγκέντρωσης τάσεων.



Προσομοίωση Αξονικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 2

ELFORM 2



d=0mm

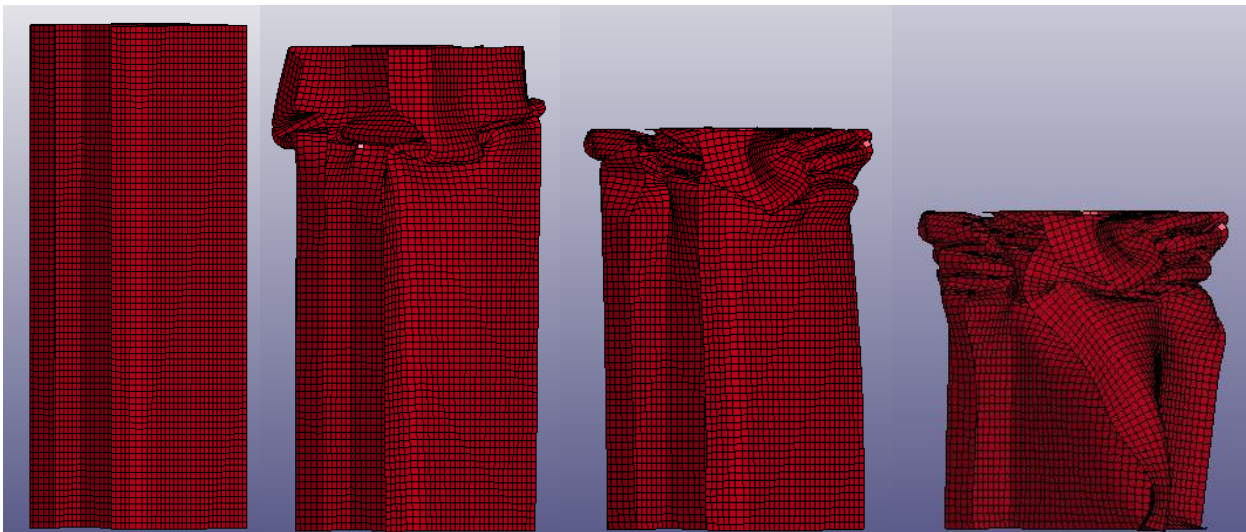
d=22,5mm

d=52mm

d=80mm

d=100mm

ELFORM 16



d=0mm

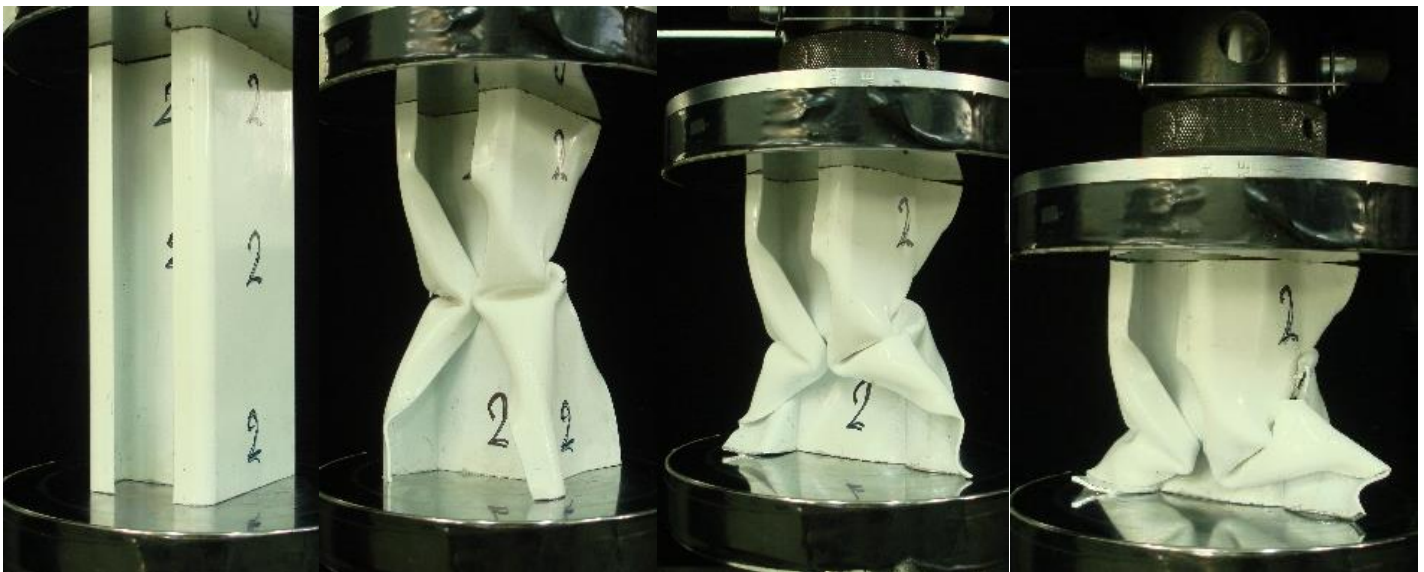
d=22,5mm

d=52mm

d=80mm



d=100mm

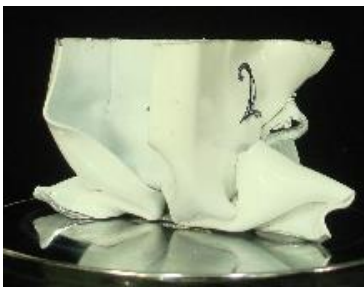


d=0mm

d=22,5mm

d=52mm

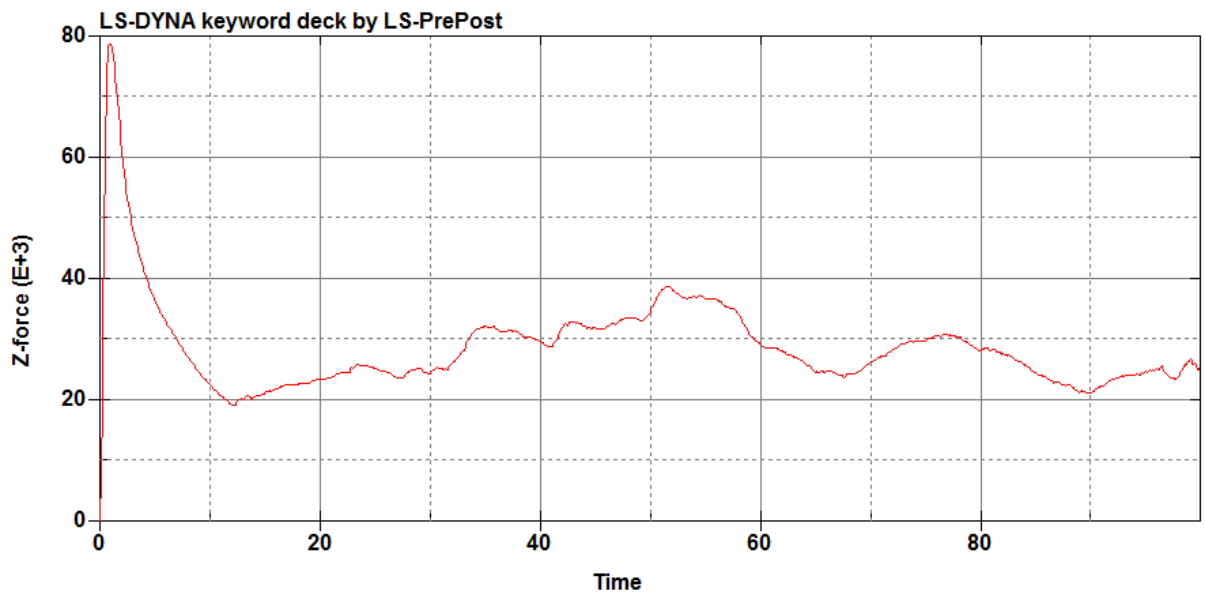
d=80mm



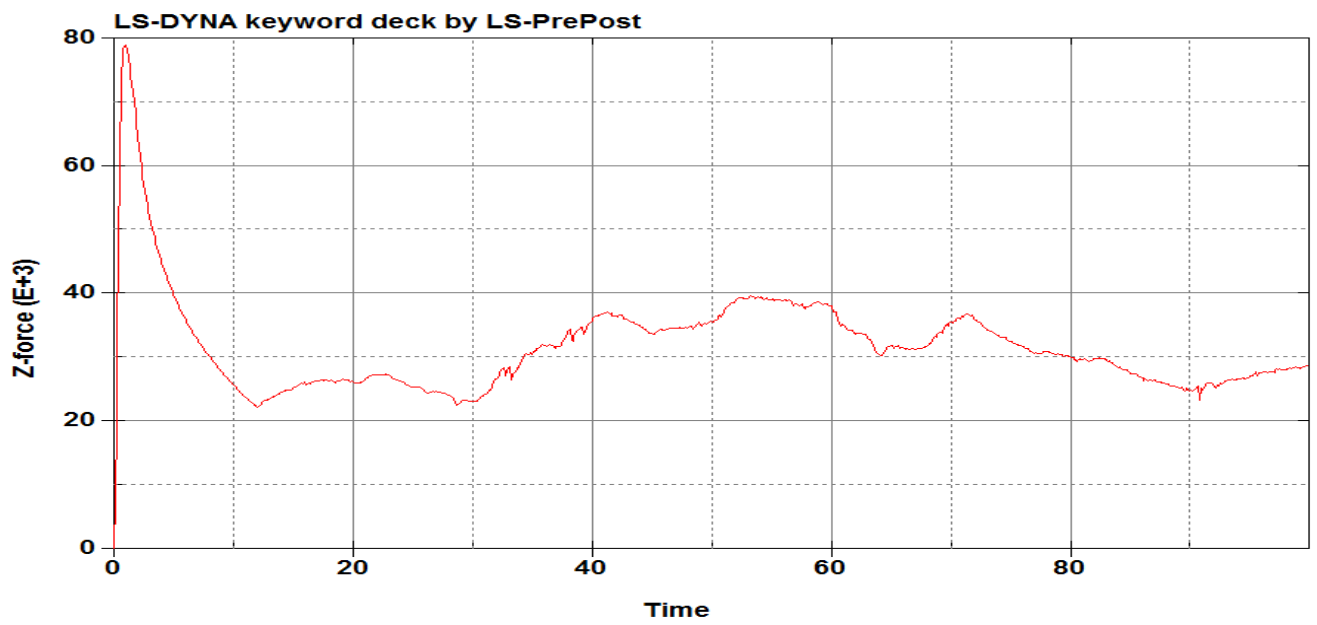
d=100mm

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα η θεωρητική καμπύλη που προέκυψε από τη μοντελοποίηση και η πειραματική καμπύλη του δοκιμίου, ώστε να συγκριθούν οι πειραματικές τιμές με τις τιμές της προσομοίωσης.

ELFORM 2

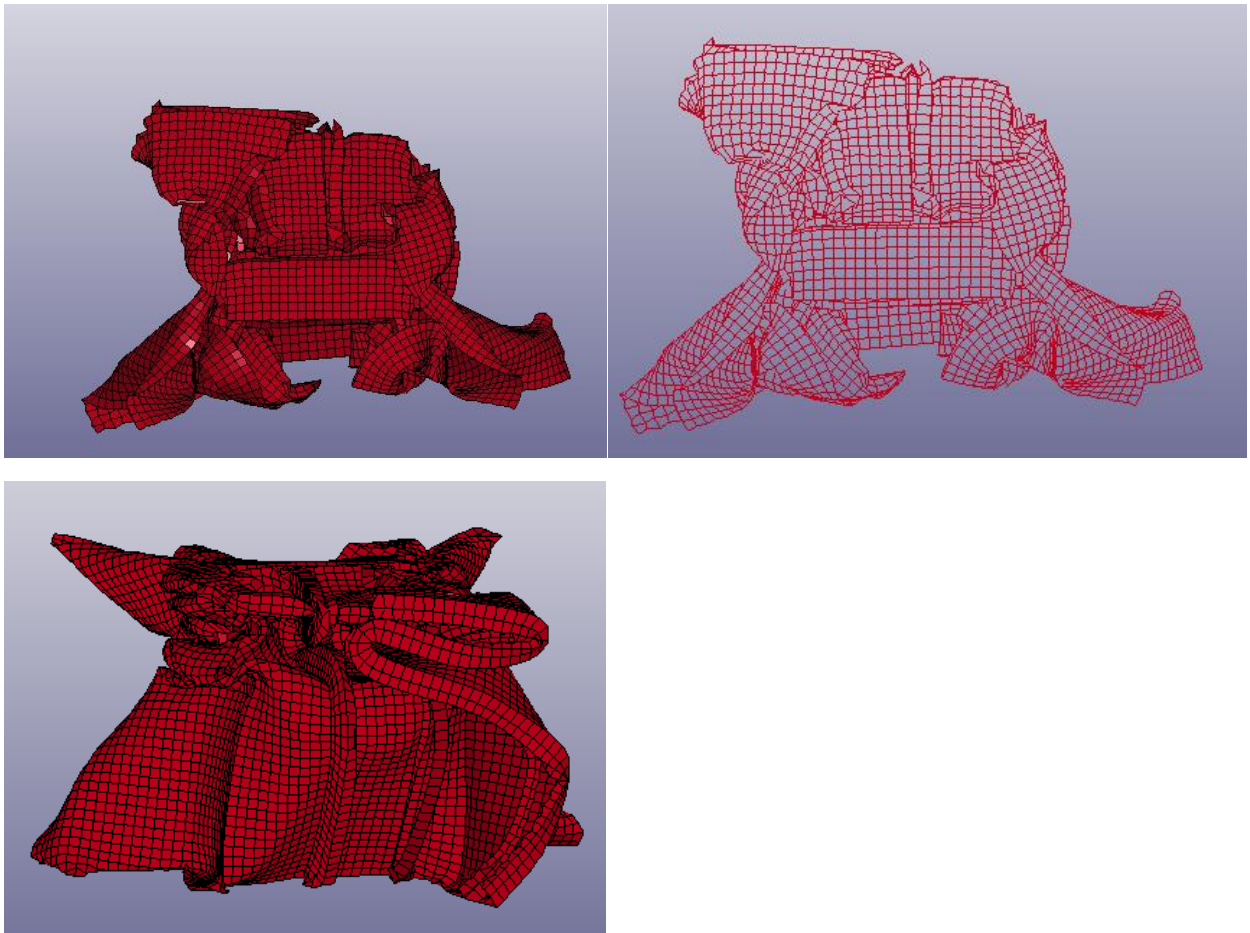
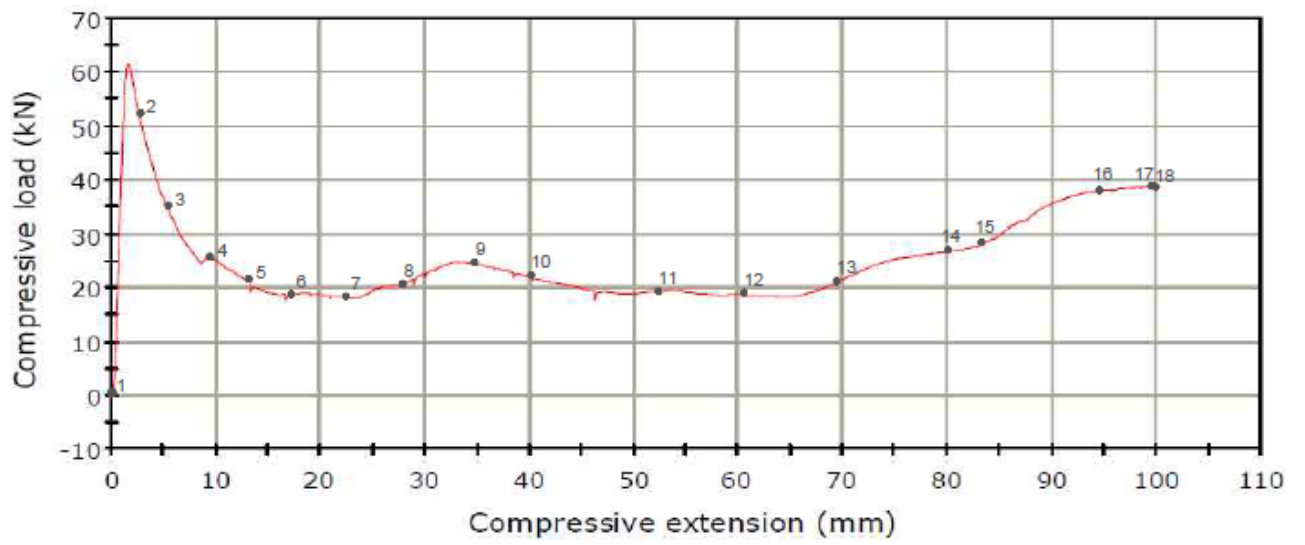


ELFORM 16



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

LOAD - DEFLECTION GRAPH



Τελικές απεικονίσεις προσομοίωσης δοκιμίου 2



### Σύγκριση Βασικών Αποτελεσμάτων

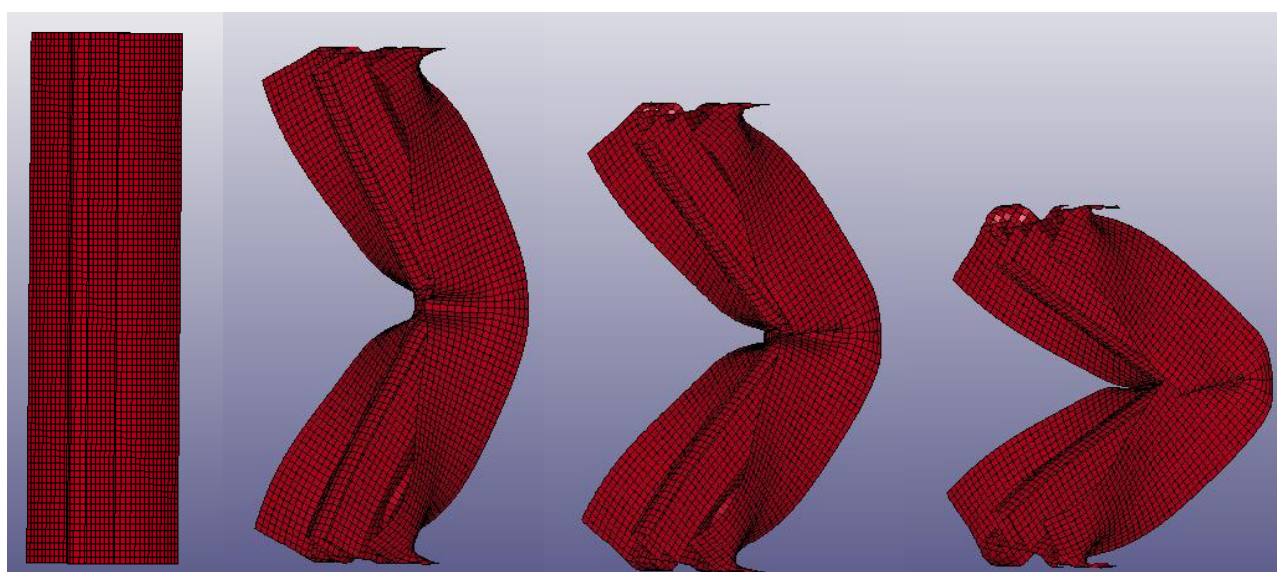
	ELFORM 2	ELFORM 16	Πειραματικά Αποτελέσματα
Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	79.5kN	79.5kN	61,5kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	35.1kN	40.5kN	28kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	2800J	3150J	2350J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	2,26	1,96	2,196
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)	17,68 J/gr	19,89J/gr	14,84J/gr

### Παρατηρήσεις-Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Όπως βλέπουμε για την αξονική θλίψη στο δοκίμιο 2 υπάρχουν ομοιότητες ανάμεσα στη προσομοίωση και τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα βασικά αποτελέσματα παρουσιάζουν κάποιες διαφορές, αφού η αρχική δύναμη κατάρρευσης στη προσομοίωση είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή του πειράματος, πιθανότατα λόγω κάποιας αστοχίας του υλικού ή της θέσης του στη πρέσσα (ατέλειες στο κόψιμο). Για το λόγο αυτό και η απορροφούμενη ενέργεια στο πείραμα είναι μικρότερη από των προσομοιώσεων. Επίσης η κατάρρευση ξεκινάει σε ψηλότερο σημείο του δοκιμίου και δεν είναι ολοκληρωτική (global buckling) στη προσομοίωση εν αντιθέση με το πείραμα. Σημαντικό ρόλο παίζει και το γεγονός ότι στα μοντέλα δεν περιλαμβάνεται η προσομοίωση της διάσκησης. Στο συγκεκριμένο πείραμα το δοκίμιο είχε διάσκηση στα σημεία συγκέντρωσης τάσεων.

Όσον αφορά τις διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν (ELFORM 16 και ELFORM 2) παρατηρούμε μια μικρή διαφορά στα βασικά αποτελέσματα, αλλά η συμπεριφορά ήταν παρόμοια. Πρόκειται για διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης των κελύφων και είναι υπολογιστικό κομμάτι της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

### Προσομοίωση Αξονικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 3 ELFORM 2

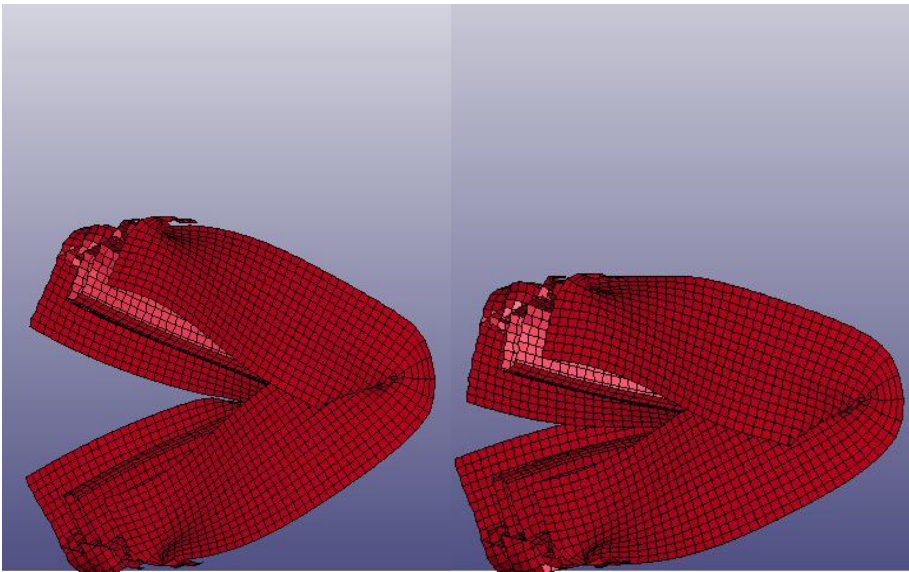


d=0mm

d=22mm

d=35mm

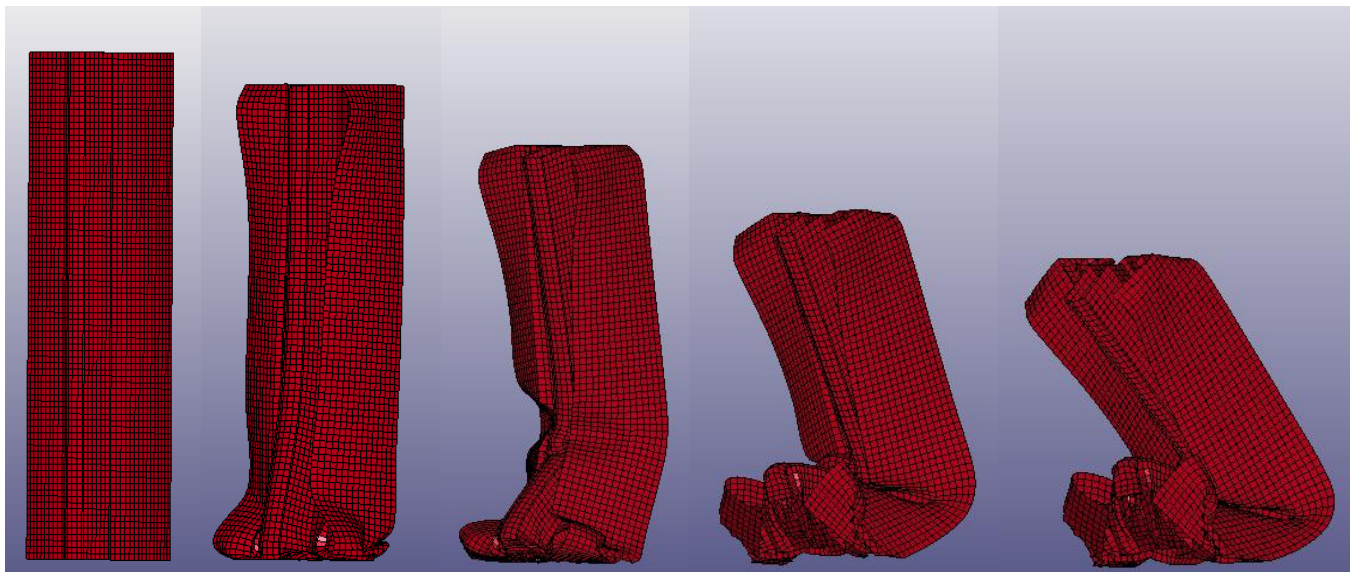
d=62mm



d=81mm

d=100mm

ELFORM 16



d=0mm

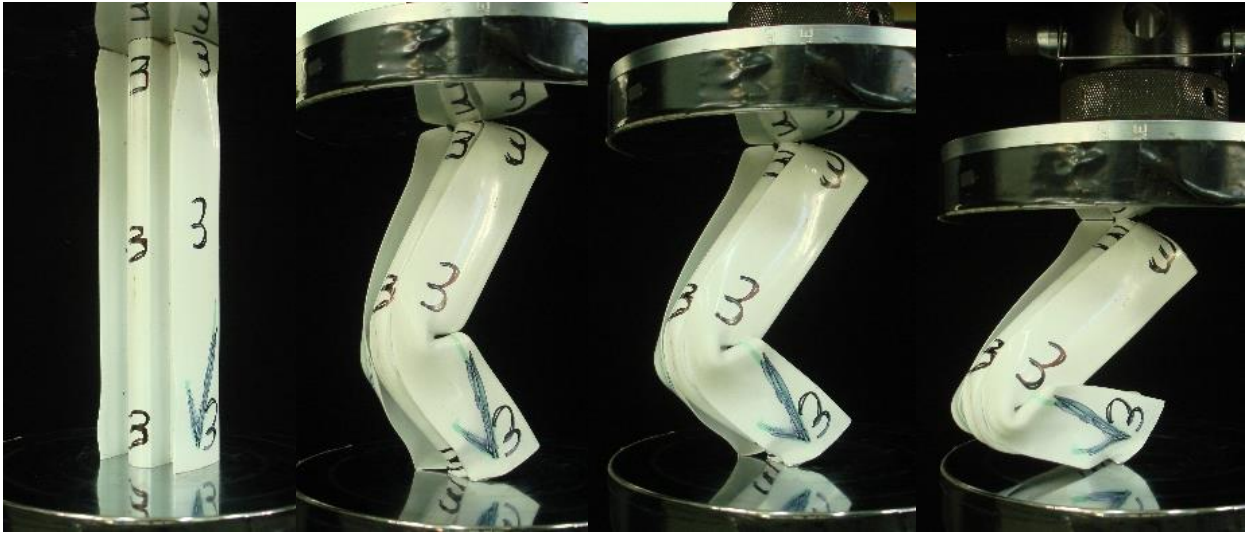
d=22mm

d=35mm

d=62mm

d=81mm



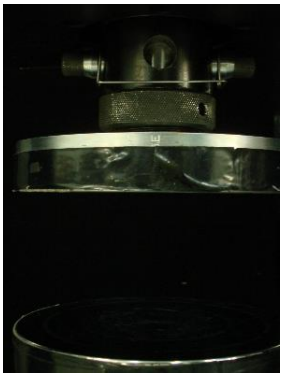


d=0mm

d=22mm

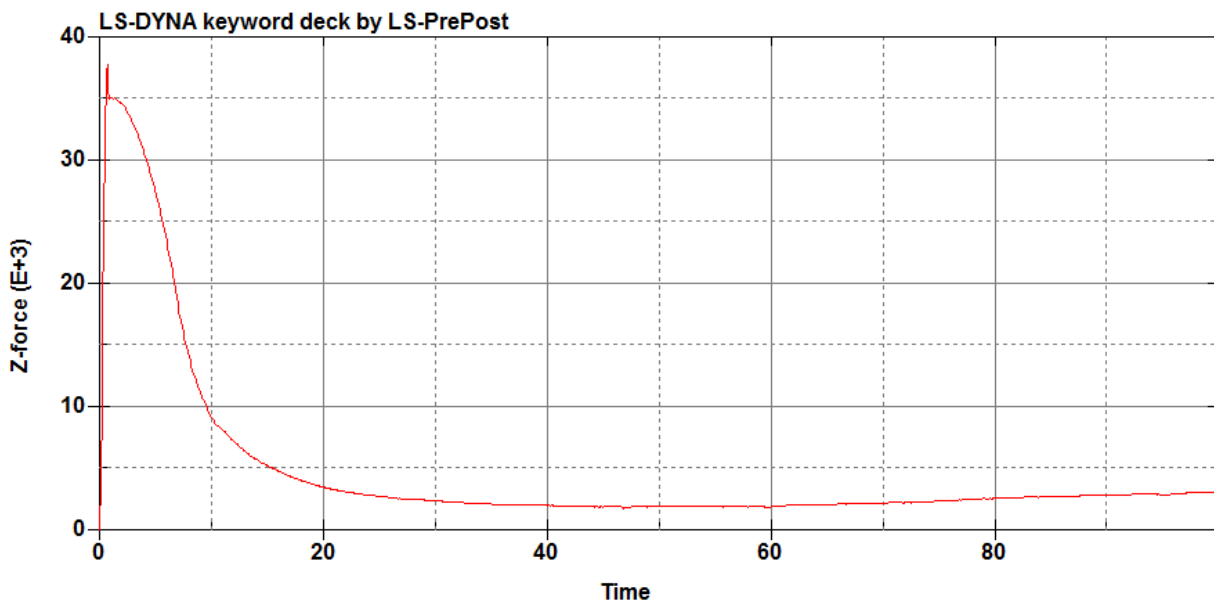
d=35mm

d=62mm

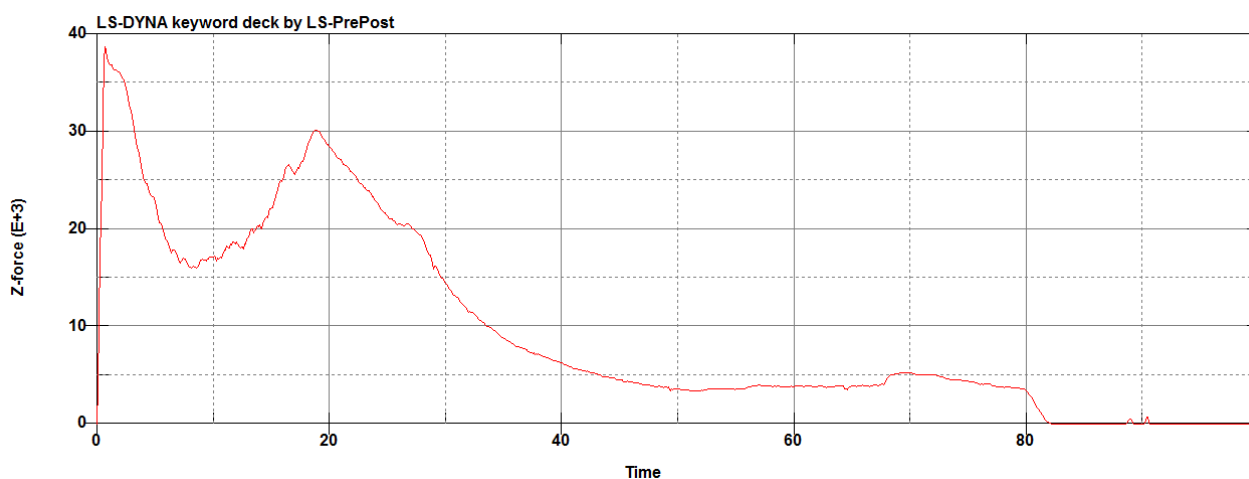


d=81mm

ELFORM 2

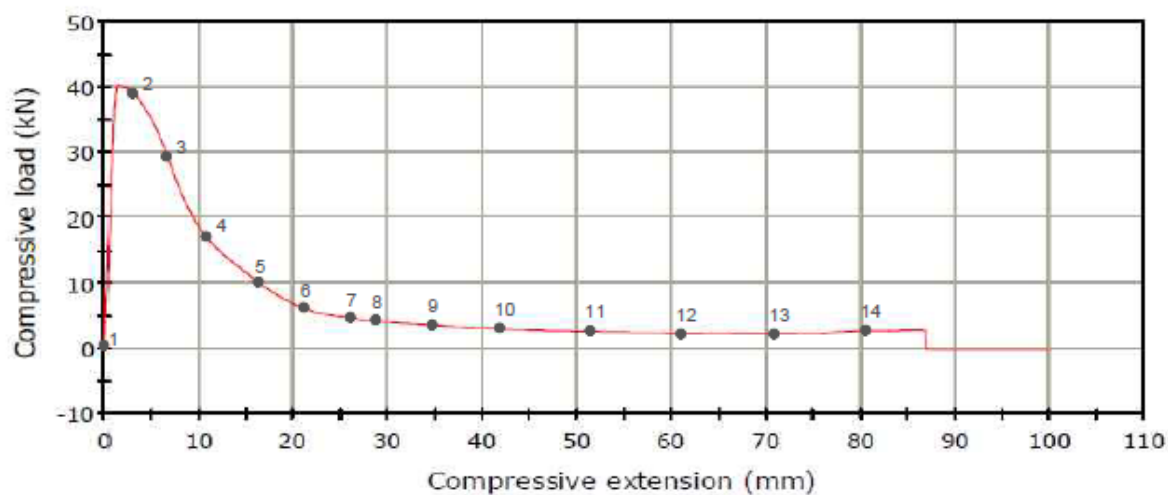


## ELFORM 16



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### LOAD - DEFLECTION GRAPH



### Σύγκριση Βασικών Αποτελεσμάτων

	ELFORM 2	ELFORM 16	Πειραματικά Αποτελέσματα
Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	39kN	39kN	40kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	16.5kN	17.8kN	14kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	480J	950J	600J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	2,36	2,19	2,85
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)	5,61 J/gr	11,1 J/gr	7,01J/gr

### Παρατηρήσεις-Σύγκριση Αποτελεσμάτων

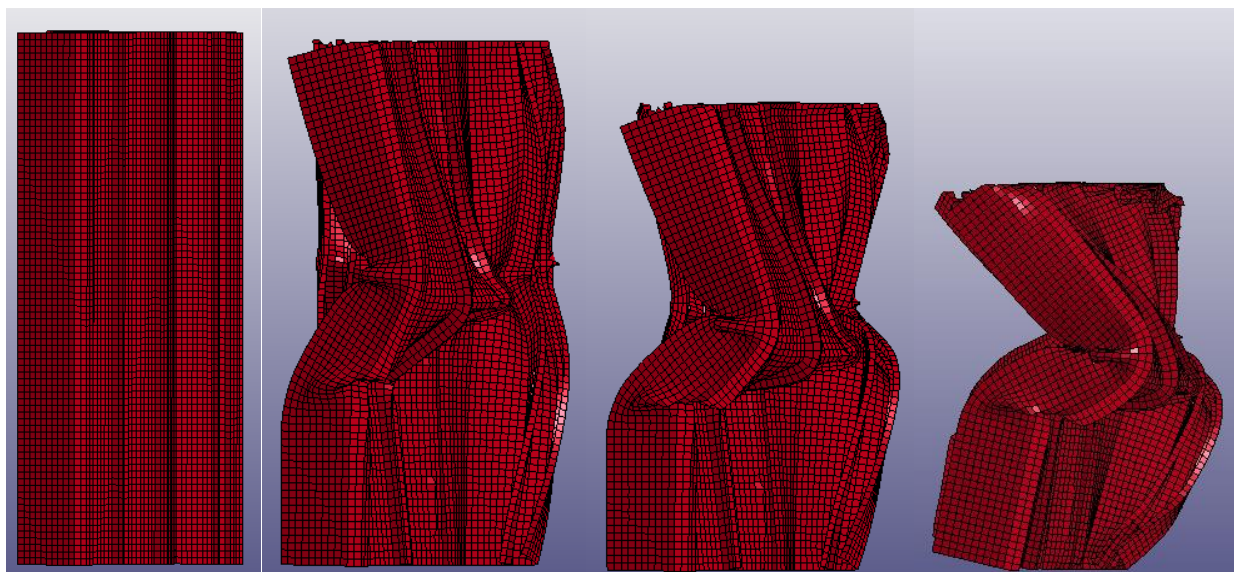
Όπως βλέπουμε για την αξονική θλίψη στο δοκίμιο 3 υπάρχουν ομοιότητες και η προσομοίωση σε ELFORM 2 προσεγγίζει τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα βασικά αποτελέσματα παρουσιάζουν ομοιότητες, η αρχική δύναμη κατάρρευσης είναι παρόμοια. Η απορροφούμενη ενέργεια στο πείραμα είναι μεγαλύτερη από των προσομοιώσεων, διότι ο λυγισμός στο πείραμα παρουσιάζει μεγαλύτερη

αντίσταση από ότι στη προσομοίωση. Η μορφή κατάρρευσης είναι παρόμοια, όπως φαίνεται από τα στιγμιότυπα πρόκειται για λυγισμό.

Όσον αφορά τις διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν (ELFORM 16 και ELFORM 2) παρατηρούμε σημαντική διαφορά στα βασικά αποτελέσματα. Αυτό γίνεται γιατί παρότι η μορφή κατάρρευσης είναι παρόμοια, σε ELFORM 16 το δοκίμιο πριν ξεκινήσει ο λυγισμός παρουσιάζει κατάρρευση με μη εκτατούς λοβούς μέχρι ένα σημείο και γι' αυτό απορροφά και περισσότερη ενέργεια.

#### Προσομοίωση Αξονικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 4

##### ELFORM 2

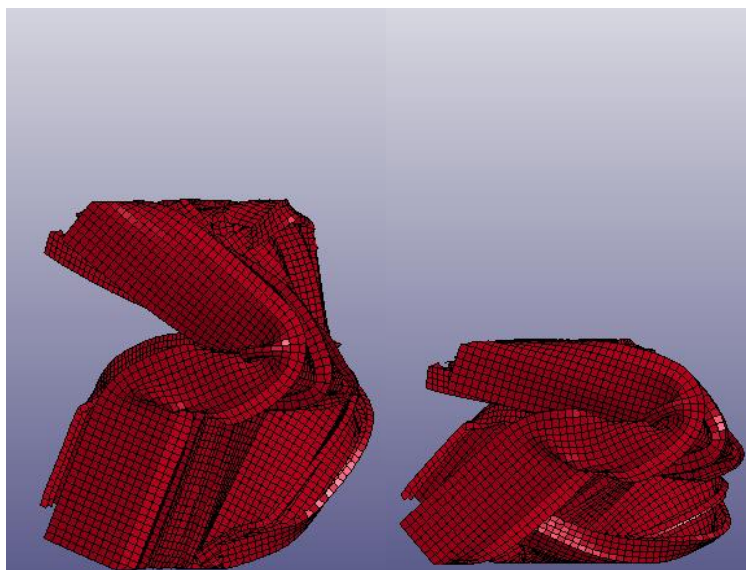


d=0mm

d=26mm

d=36mm

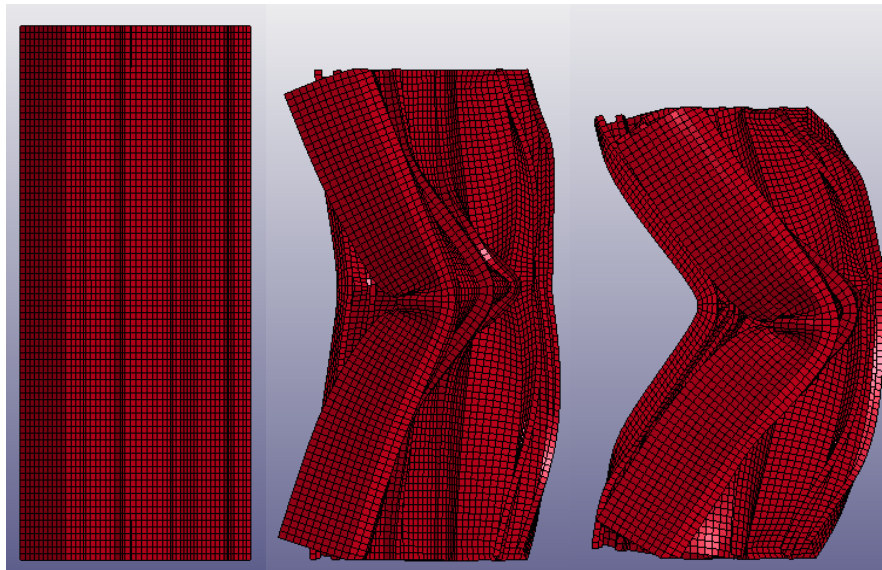
d=54mm



d=66mm

d=100mm

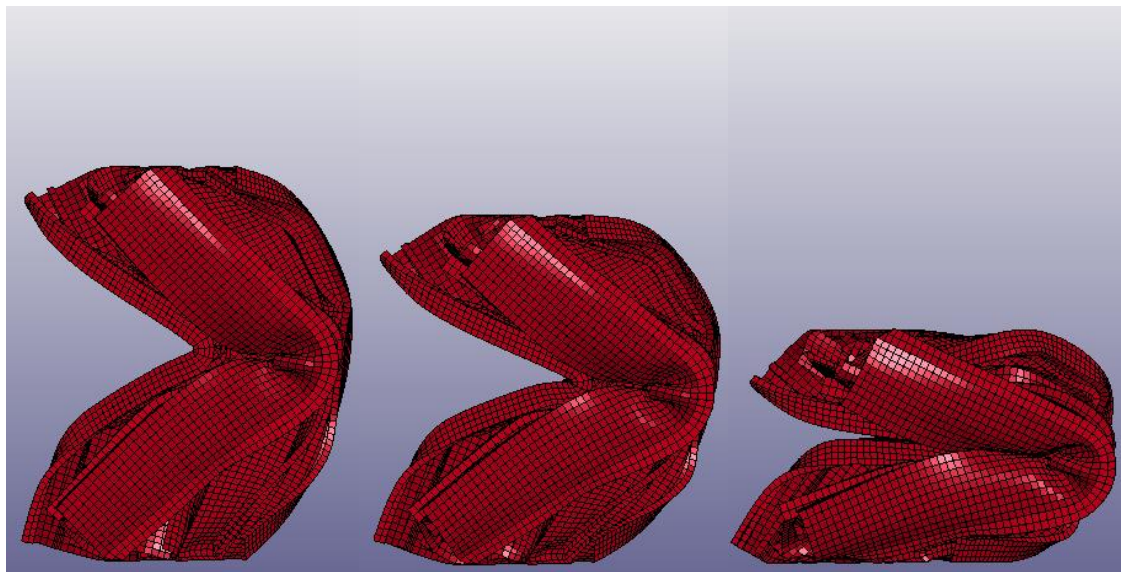
ELFORM 16



d=0mm

d=26mm

d=36mm

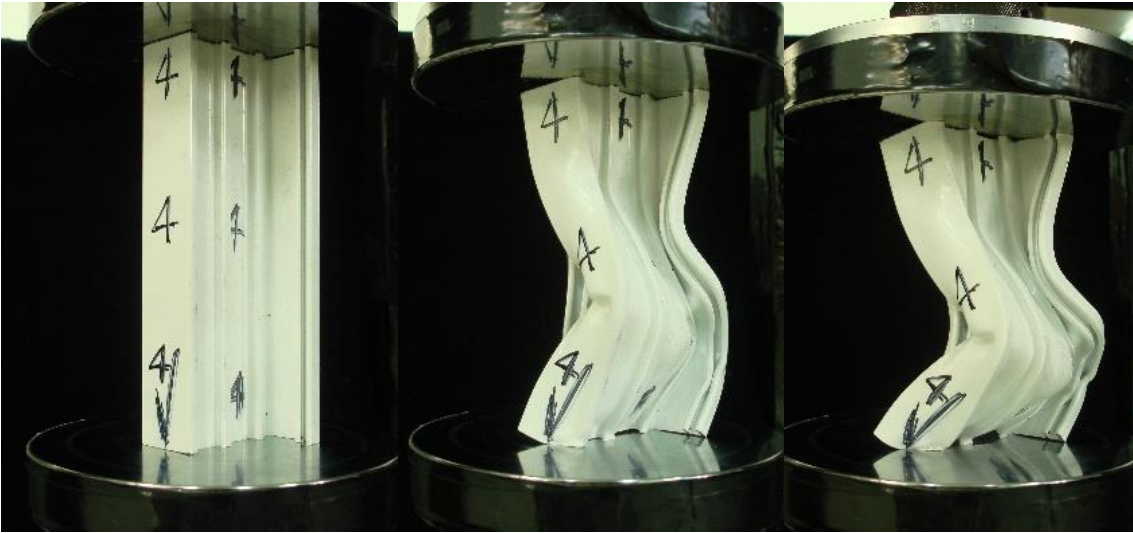


d=54mm

d=66mm

d=100mm

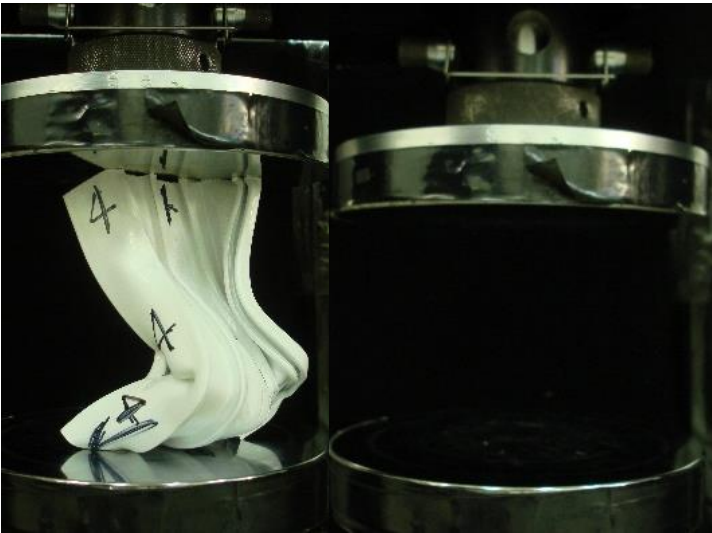




d=0mm

d=26mm

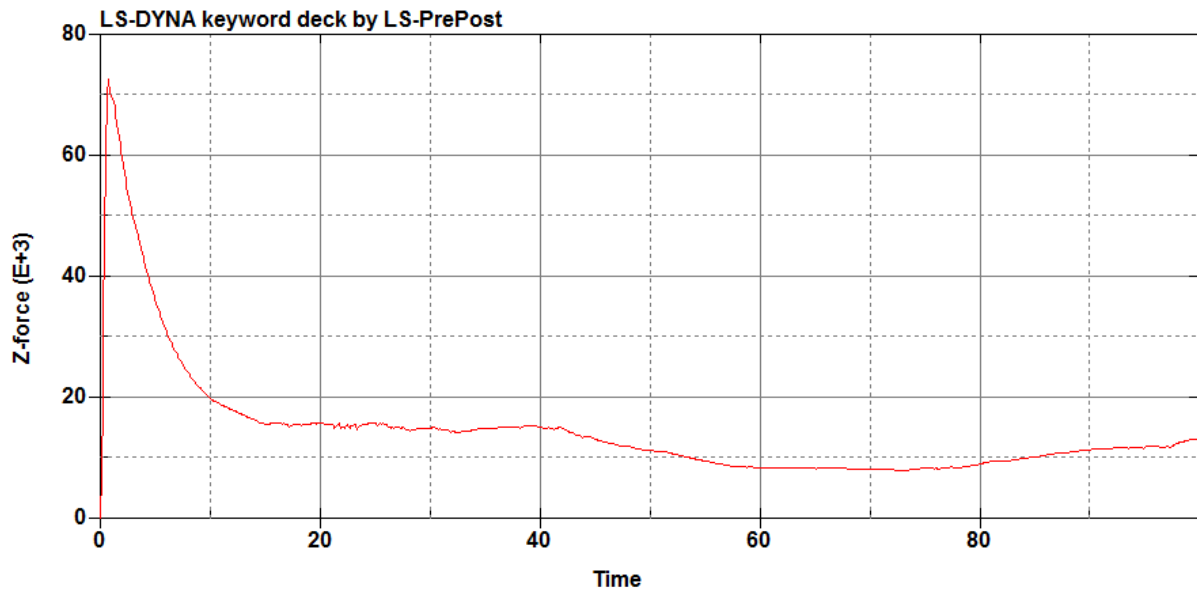
d=36mm



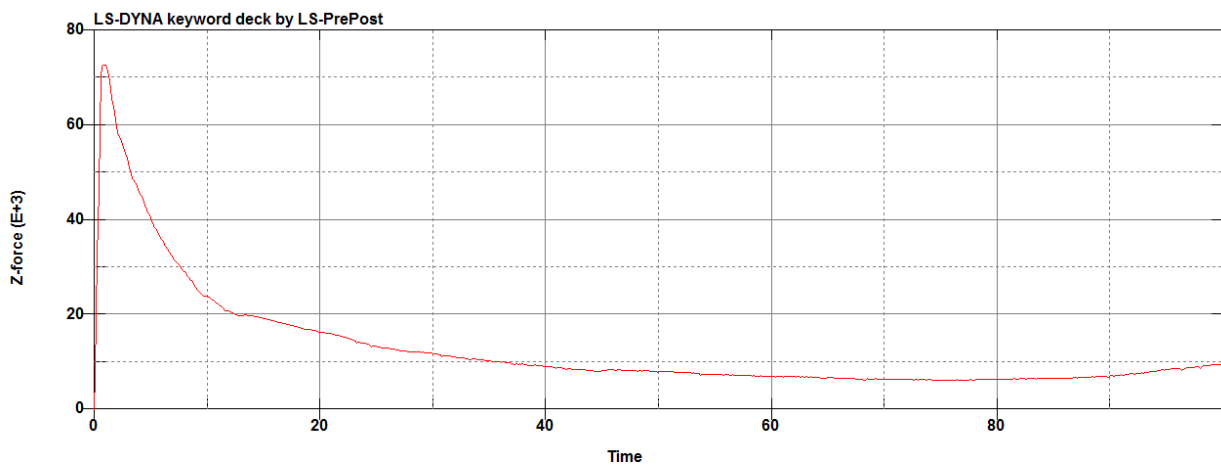
d=54mm

d=66mm

## ELFORM 2

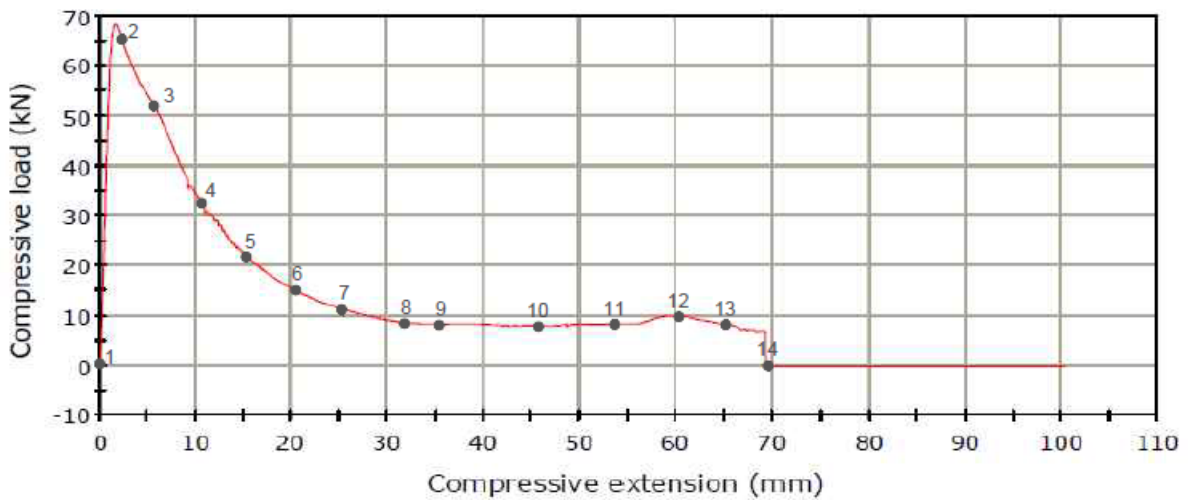


## ELFORM 16



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ

### LOAD - DEFLECTION GRAPH





### Σύγκριση Βασικών Αποτελεσμάτων

	ELFORM 2	ELFORM 16	Πειραματικά Αποτελέσματα
Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	71kN	71kN	69kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	28.5kN	26kN	25kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	1450J	1300J	1250J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	2,49	2,73	2,76
Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)	8,97 J/gr	8,04 J/gr	7,74J/gr

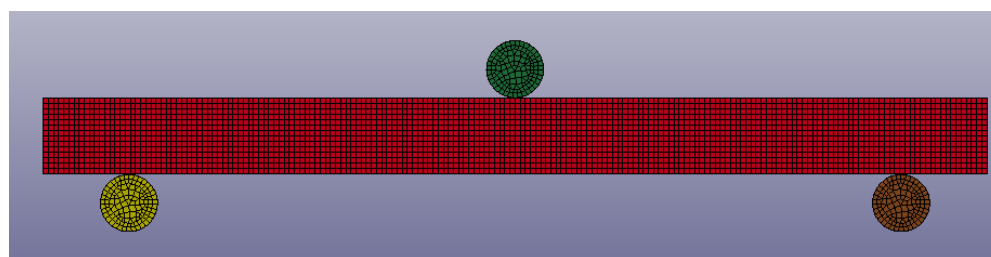
### Παρατηρήσεις-Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Όπως βλέπουμε για την αξονική θλίψη στο δοκίμιο 4 υπάρχουν ομοιότητες και η προσομοίωση σε ELFORM 2 προσεγγίζει τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα βασικά αποτελέσματα παρουσιάζουν ομοιότητες, η αρχική δύναμη κατάρρευσης είναι σχεδόν ίδια. Η απορροφούμενη ενέργεια στο πείραμα είναι λίγο μικρότερη από των προσομοιώσεων. Η μορφή κατάρρευσης είναι παρόμοια, όπως φαίνεται από τα στιγμιότυπα πρόκειται για λυγισμό. Η σημαντική διαφορά προκύπτει λόγω του ότι στις προσομοιώσεις δεν περιλαμβάνεται η διάσχιση. Το συγκεκριμένο δοκίμιο στο πείραμα παρουσίασε διάσχιση στα σημεία συγκέντρωσης τάσεων.

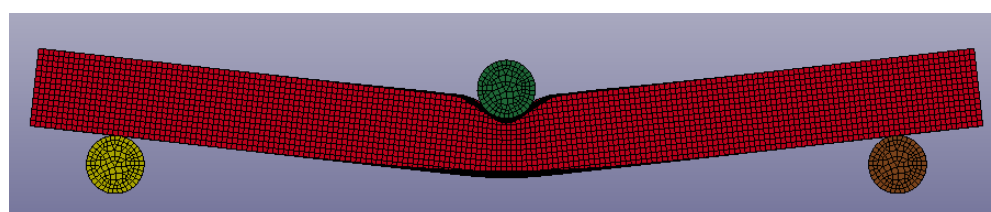
Όσον αφορά τις διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν (ELFORM 16 και ELFORM 2) παρατηρούμε μια μικρή διαφορά στα βασικά αποτελέσματα, αλλά η συμπεριφορά ήταν παρόμοια. Πρόκειται για διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης των κελύφων και είναι υπολογιστικό κομμάτι της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

### Προσομοίωση Πλευρικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 1

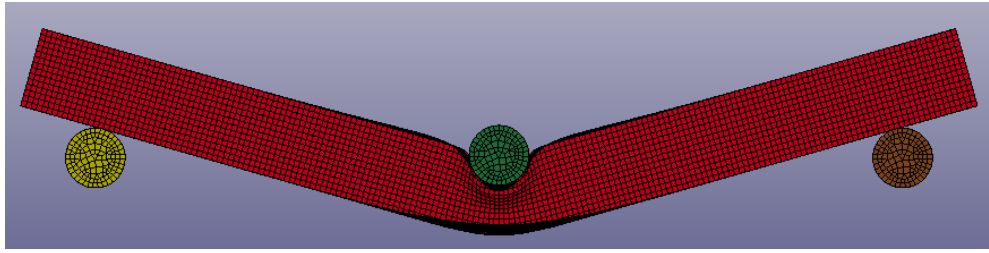
#### ELFORM 2



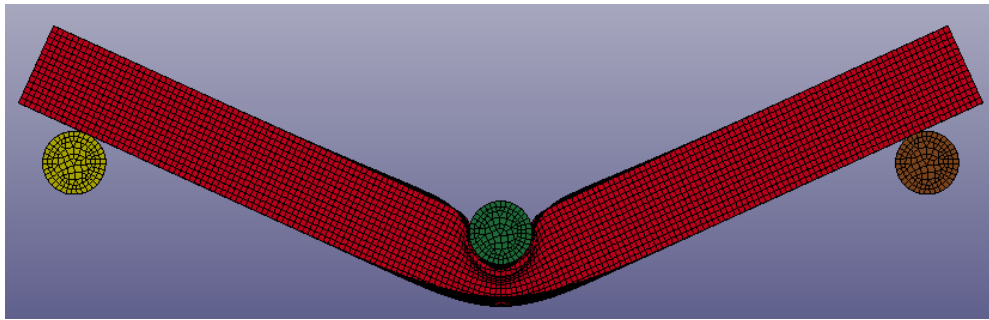
d=0mm



d=22mm

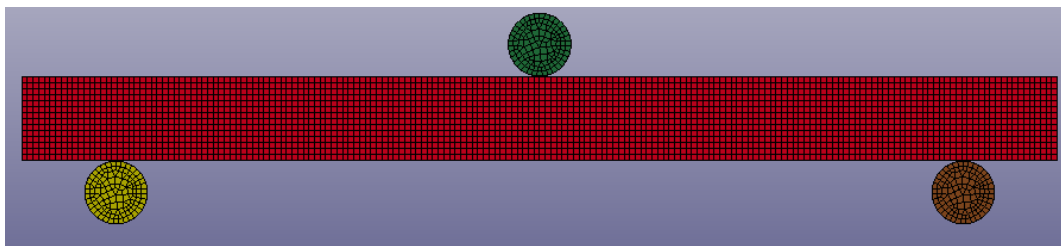


d=47mm

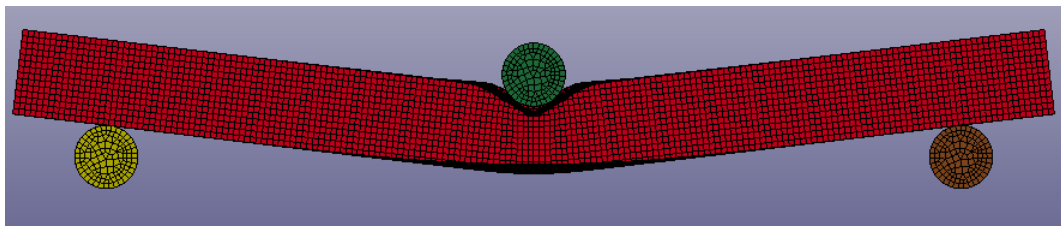


d=70mm

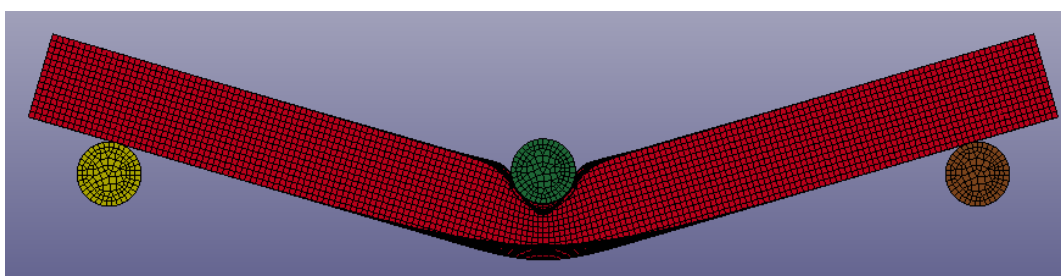
ELFORM 16



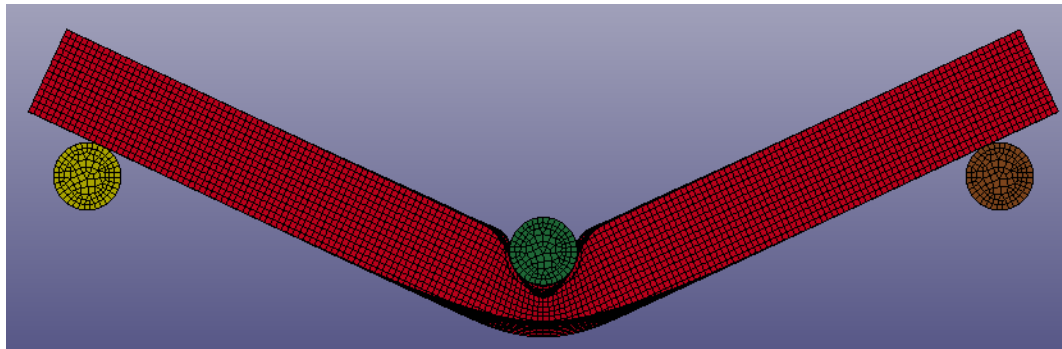
d=0mm



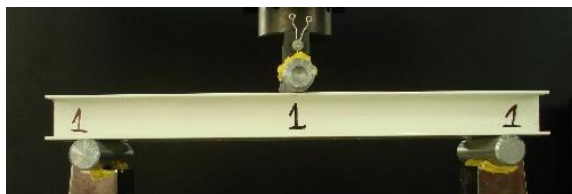
d=22mm



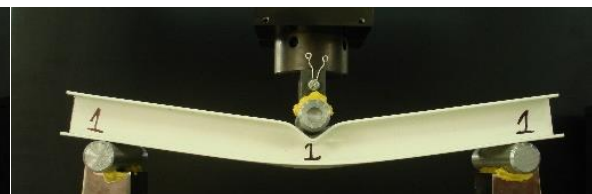
d=47mm



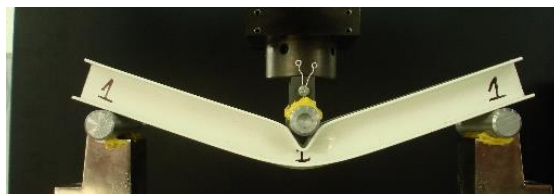
d=70mm



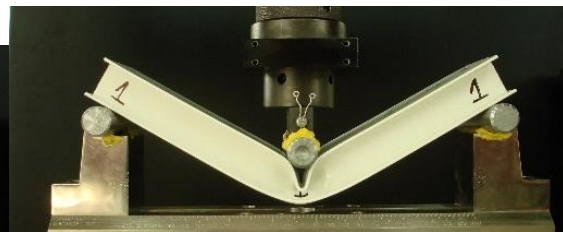
d=0mm



d=22mm

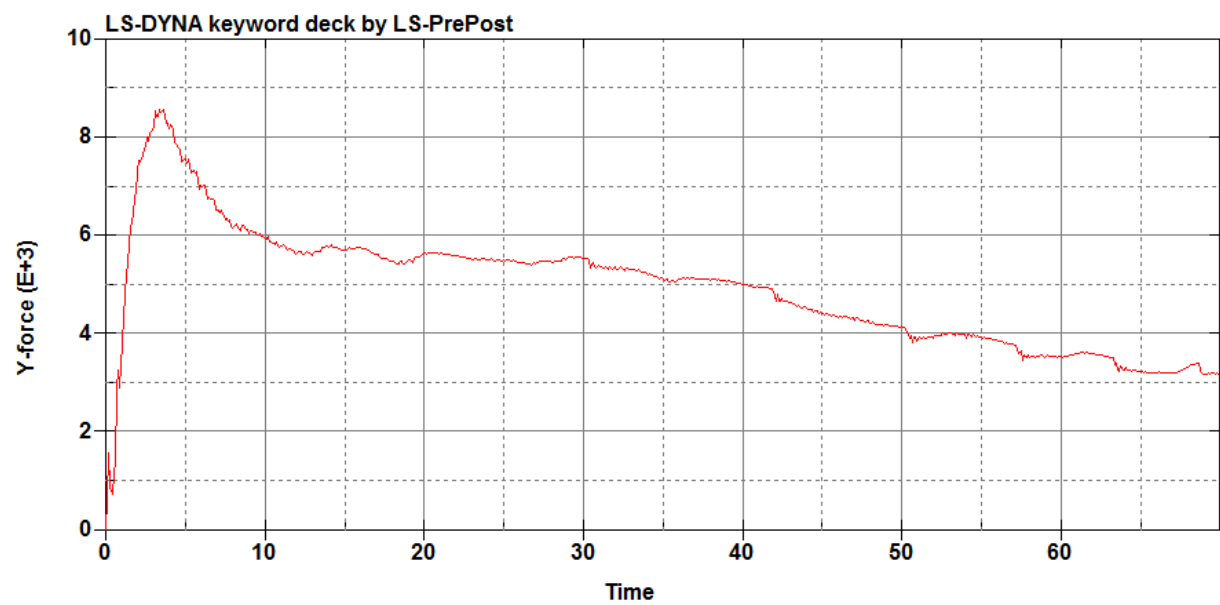


d=47mm

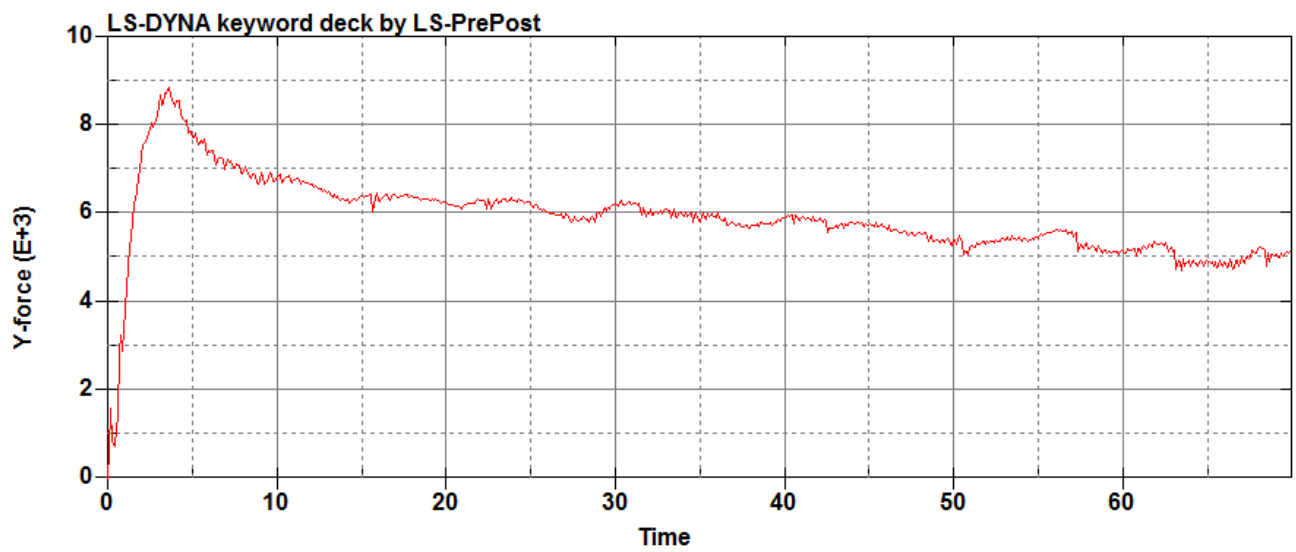


d=70mm

ELFORM 2

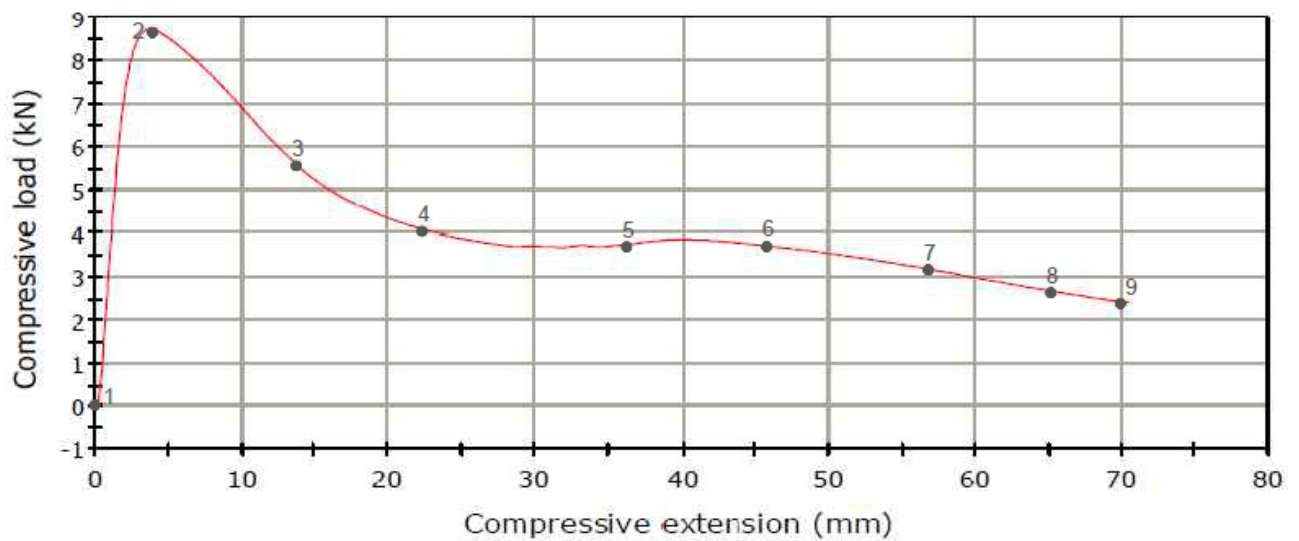


ELFORM 16



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### LOAD - DEFLECTION GRAPH



### Σύγκριση Βασικών Αποτελεσμάτων

	ELFORM 2	ELFORM 16	Πειραματικά Αποτελέσματα
Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	8,5kN	8,9kN	8,7kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	5,5kN	5,25kN	5kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	340J	410J	310J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,55	1,70	1,74

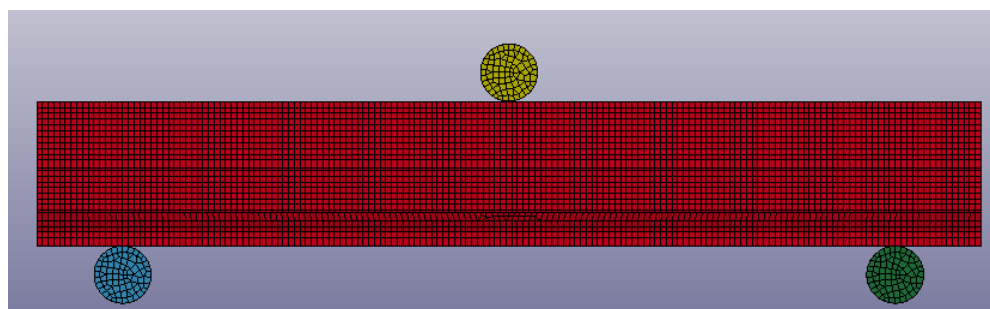
### Παρατηρήσεις-Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Όπως βλέπουμε για την πλευρική συμπίεση στο δοκίμιο 1 υπάρχουν ομοιότητες στη προσομοίωση και τα περαματικά αποτελέσματα. Η αρχική δύναμη κατάρρευσης είναι παρόμοια, αλλά η απορροφούμενη ενέργεια παρουσιάζει διαφορές. Στα στιγμιότυπα όμως παρατηρείται η βασική διαφορά στη πλευρική διείδυση. Στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρείται πλευρική διείδυση (denting), ενώ στο πείραμα δεν υπάρχει.

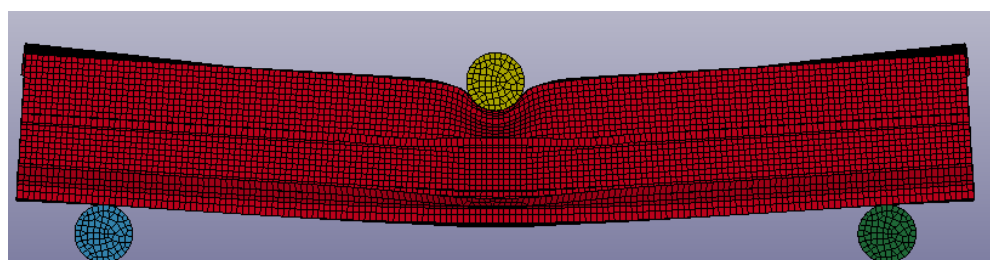
Όσον αφορά τις διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν (ELFORM 16 και ELFORM 2) παρατηρούμε ότι υπάρχουν διαφορές στα βασικά αποτελέσματα, αλλά η συμπεριφορά ήταν παρόμοια. Η βασική διαφορά όπως βλέπουμε στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης είναι ότι για τη μέθοδο ELFORM 16 το φορτίο διατηρείται σε υψηλά επίπεδα κατά τη διάρκεια του μεγαλύτερου μέρους της μετατόπισης. Πρόκειται για διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης των κελύφων και είναι υπολογιστικό κομμάτι της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Και είναι αναμενόμενο σε ELFORM 16 το δοκίμιο να είναι πιο συμπαγές (stiff).

### Προσομοίωση Πλευρικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 2\_1

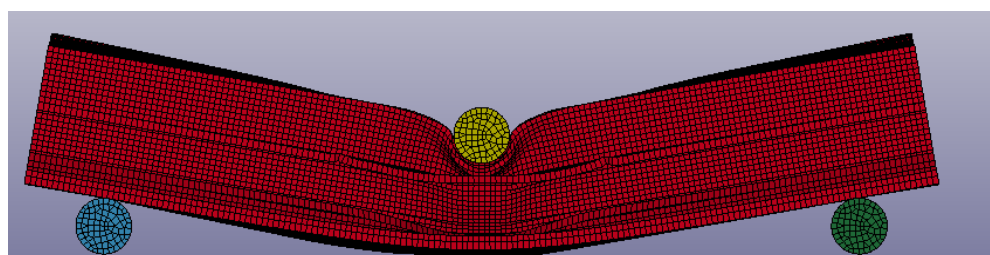
#### ELFORM 2



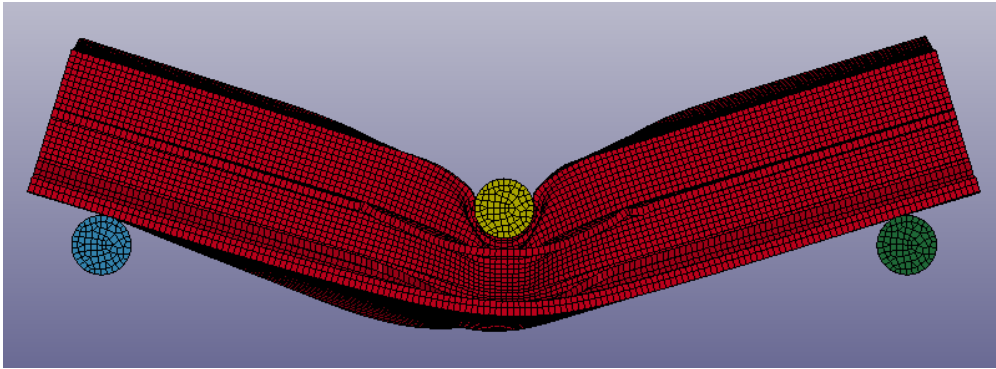
d=0mm



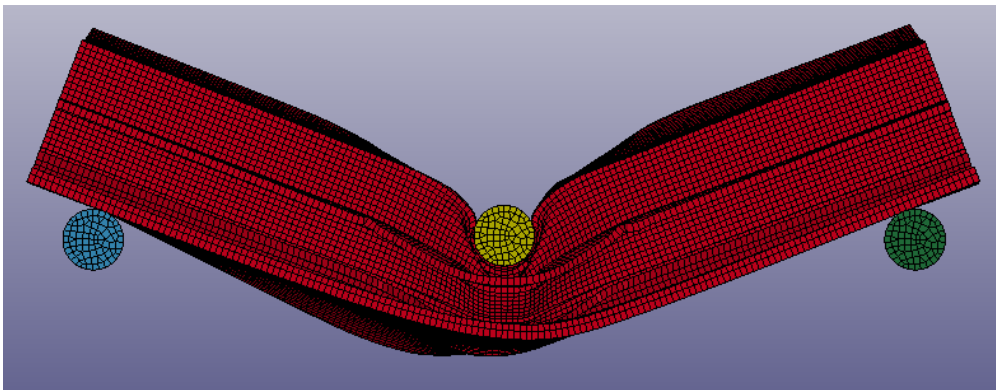
d=19mm



d=39mm

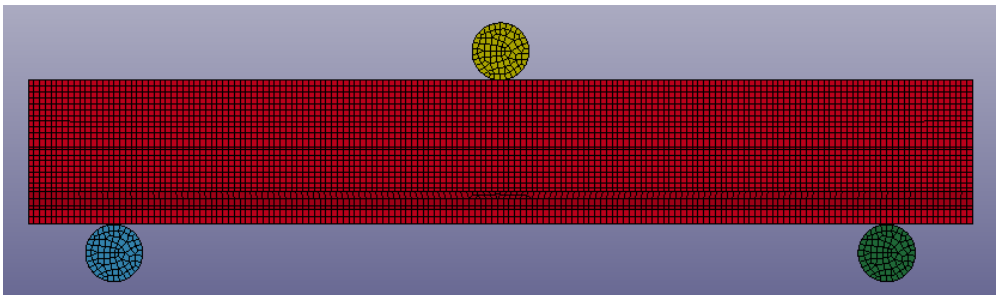


d=59mm

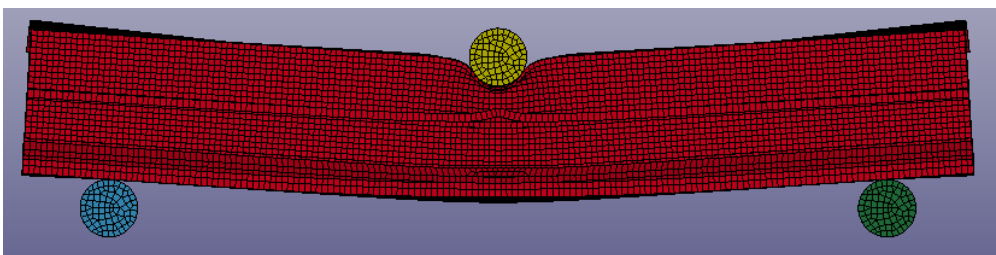


d=70mm

ELFORM 16

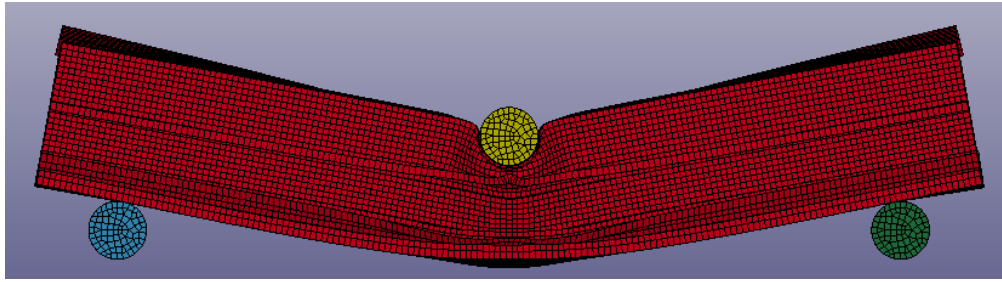


d=0mm

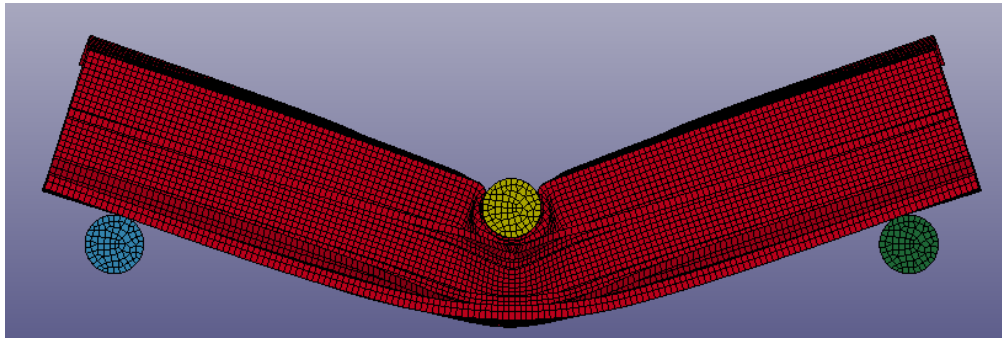


d=19mm

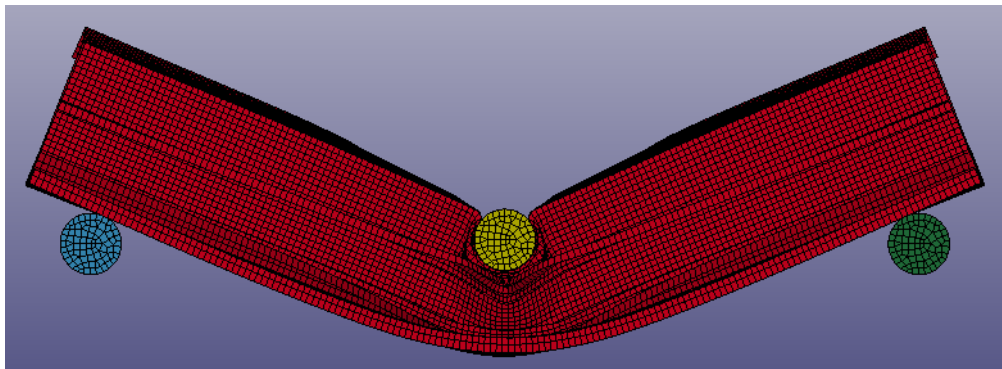




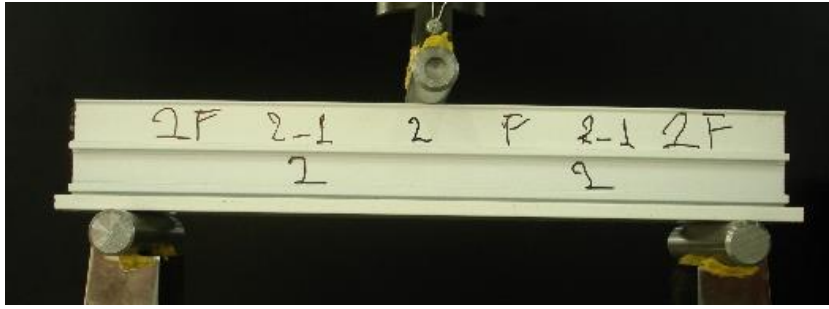
d=39mm



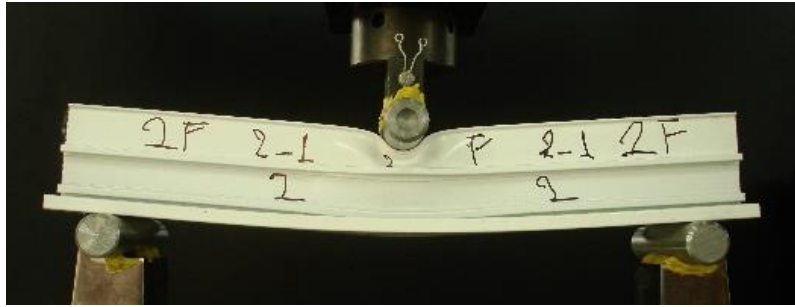
d=59mm



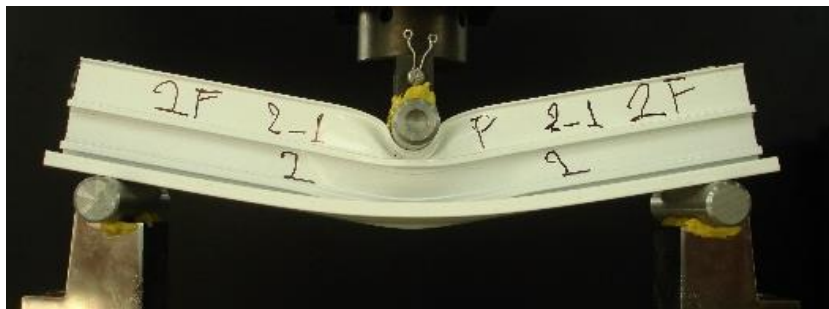
d=70mm



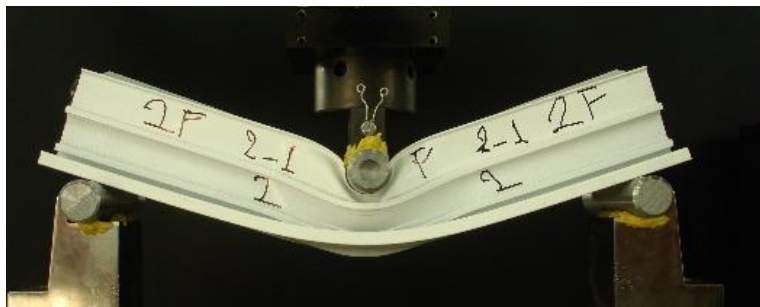
d=0mm



d=19mm



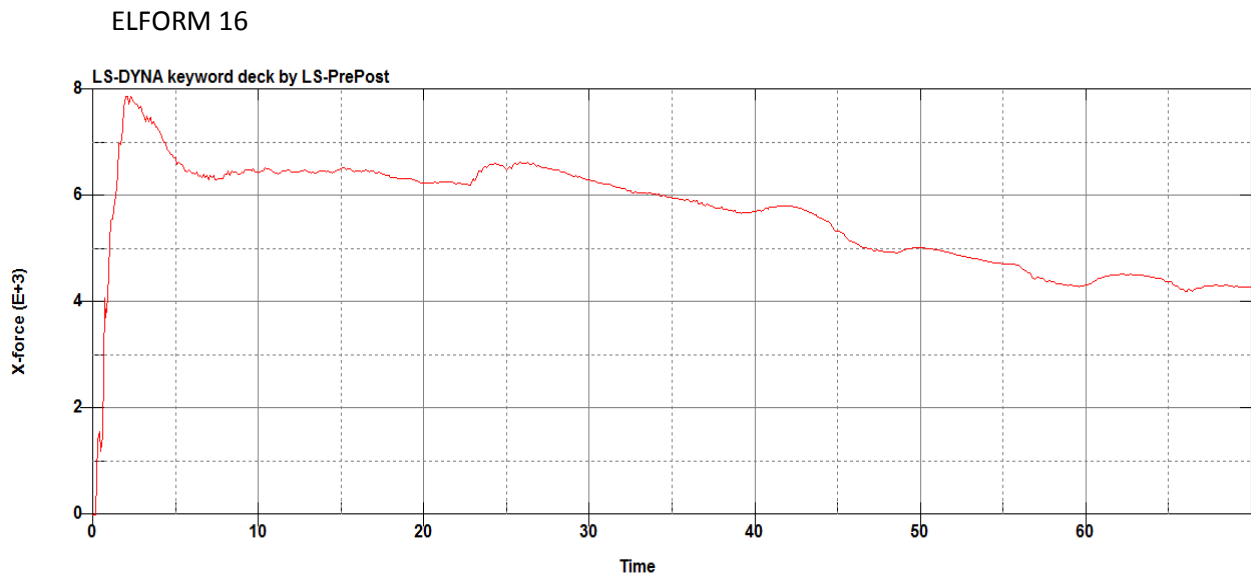
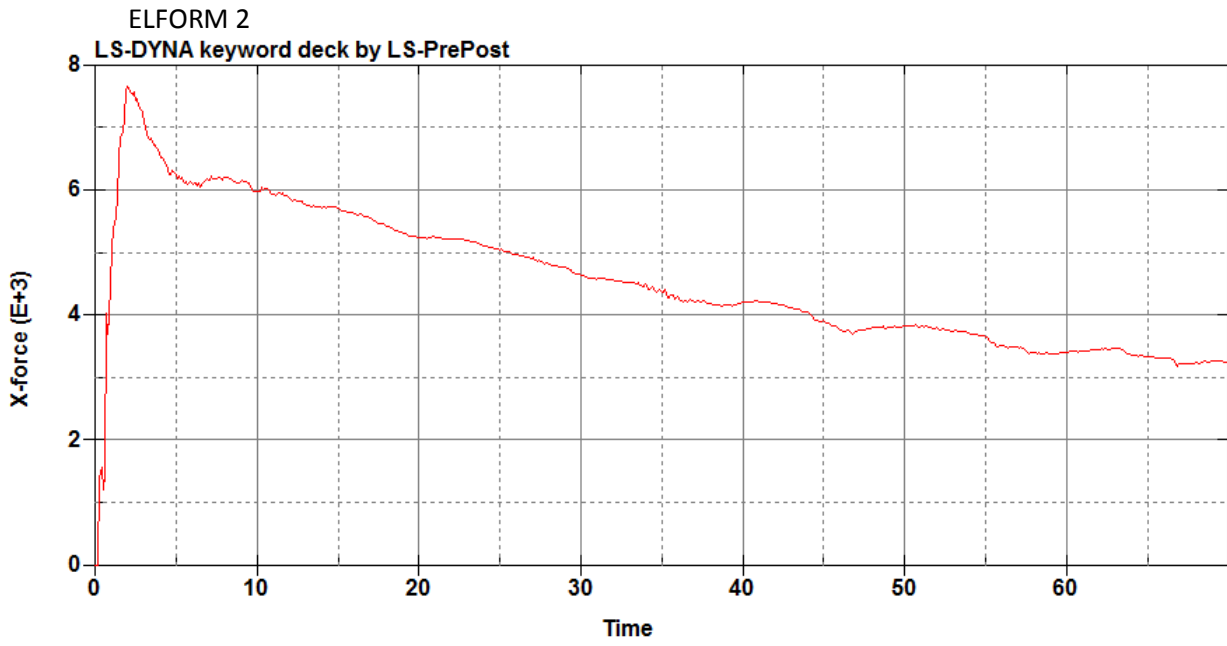
d=39mm



d=59mm

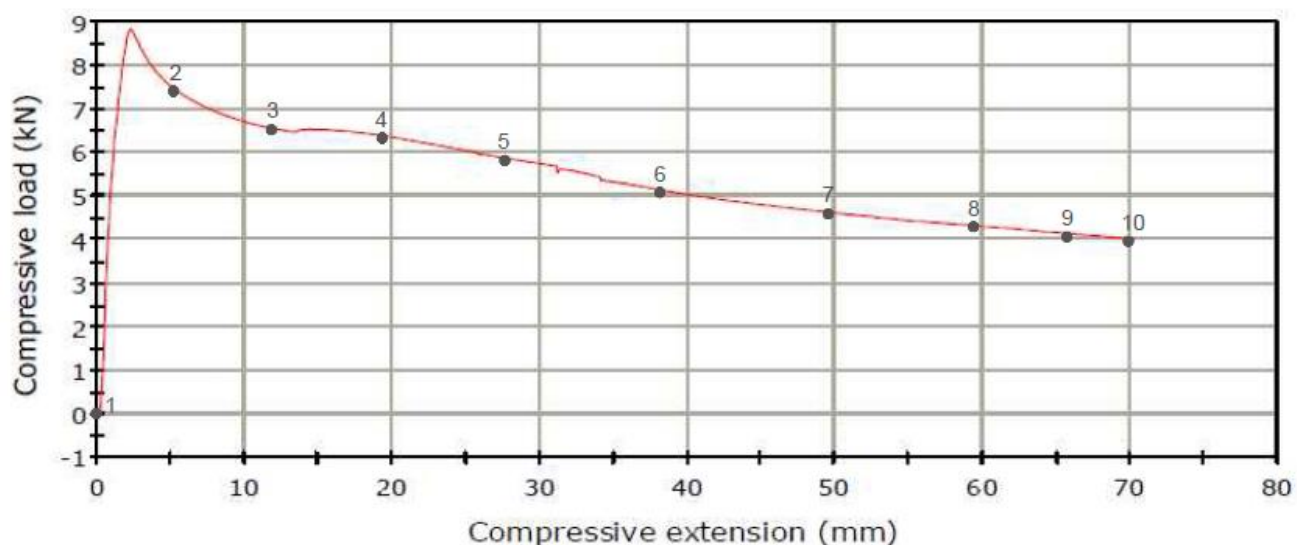


d=70mm



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

LOAD - DEFLECTION GRAPH



Σύγκριση Βασικών Αποτελεσμάτων

	ELFORM 2	ELFORM 16	Πειραματικά Αποτελέσματα
Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	7,8kN	7,9kN	8,8kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	5,25kN	5,5kN	6,1kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	320J	390J	375J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,49	1,44	1,44

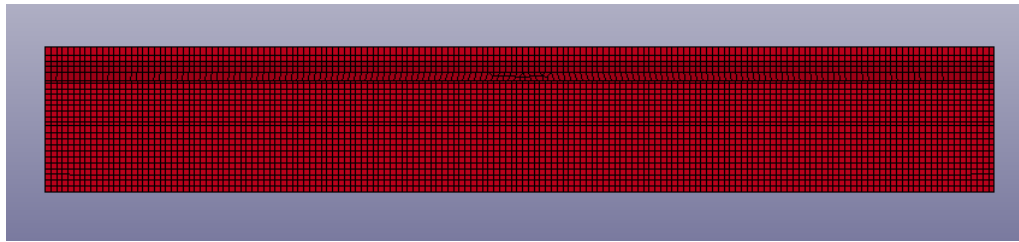
Παρατηρήσεις-Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Όπως βλέπουμε για την πλευρική συμπίεση στο δοκίμιο 2\_1 υπάρχουν ομοιότητες στη προσομοίωση και τα πειραματικά αποτελέσματα. Η αρχική δύναμη κατάρρευσης είναι μεγαλύτερη στο πείραμα, αλλά η απορροφούμενη ενέργεια είναι παρόμοια.

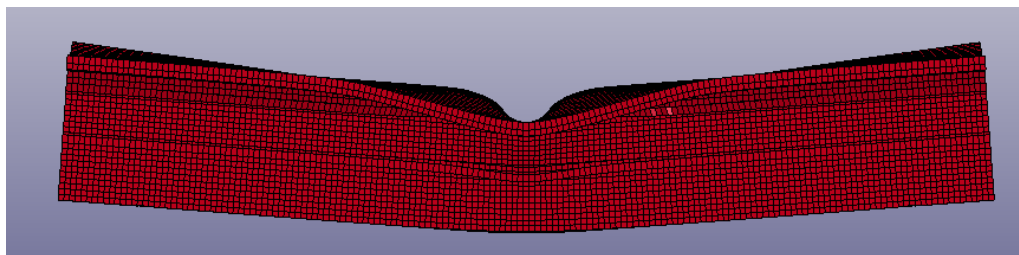
Όσον αφορά τις διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν (ELFORM 16 και ELFORM 2) παρατηρούμε μια μικρή διαφορά στα βασικά αποτελέσματα, αλλά η συμπεριφορά ήταν παρόμοια. Πρόκειται για διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης των κελύφων και είναι υπολογιστικό κομμάτι της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

Προσομοίωση Πλευρικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 2\_2

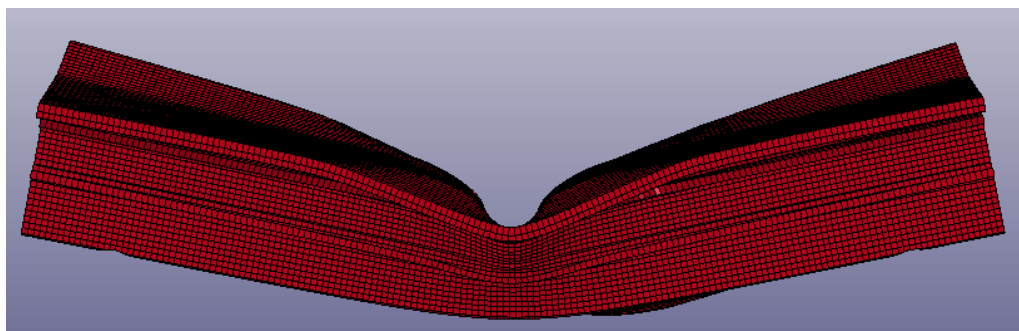
ELFORM 2



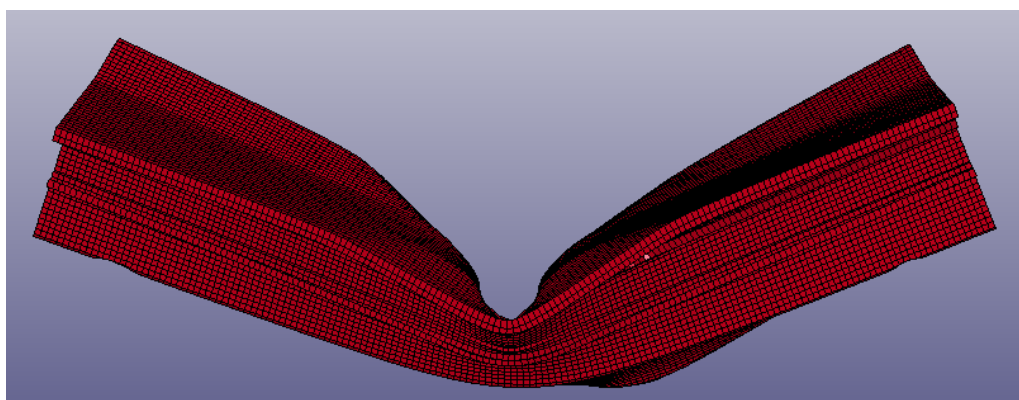
d=0mm



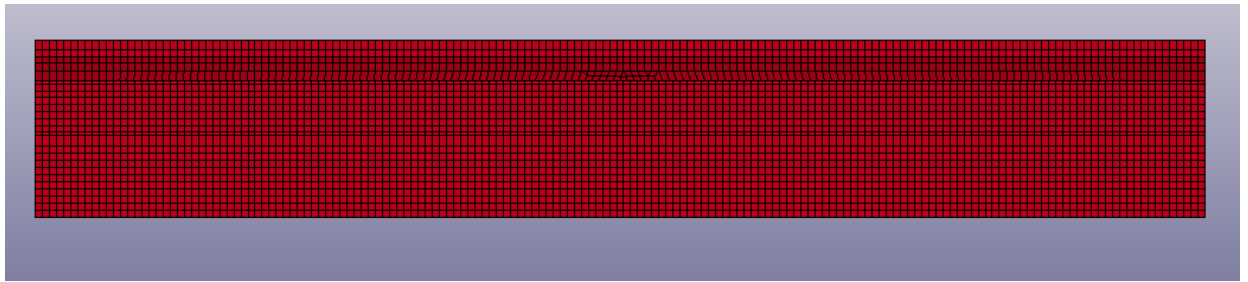
d=22mm



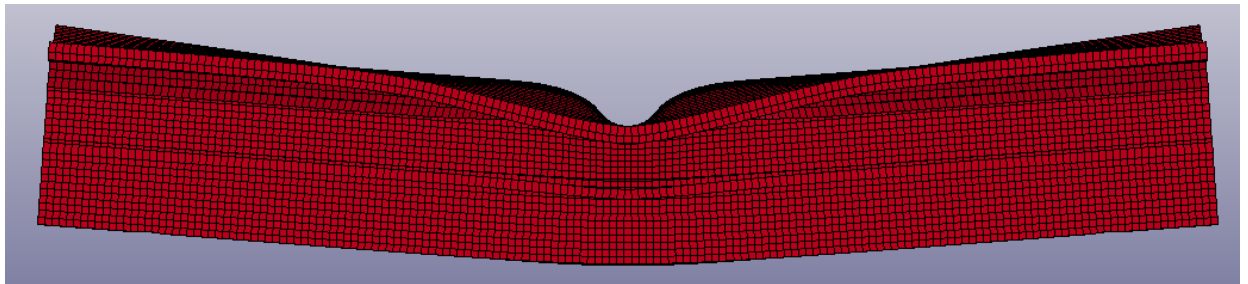
d=44mm



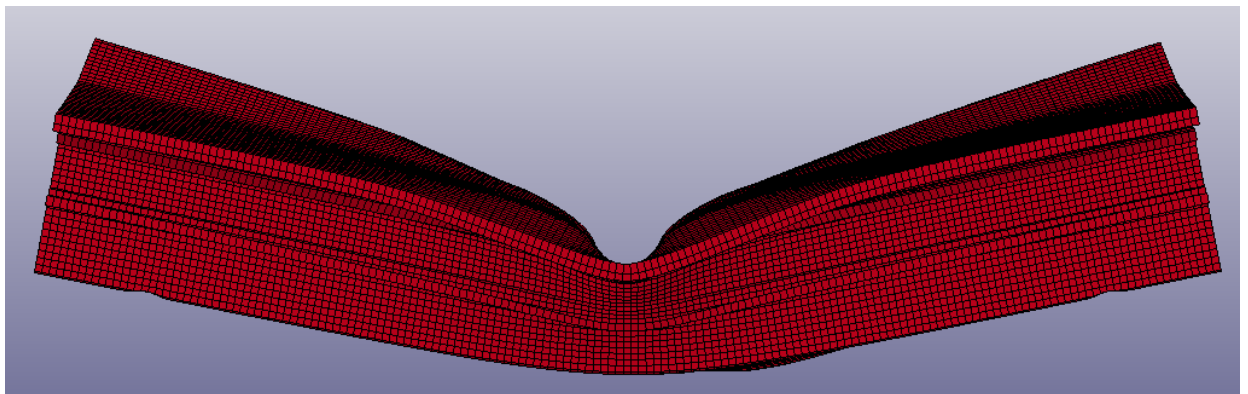
d=70mm



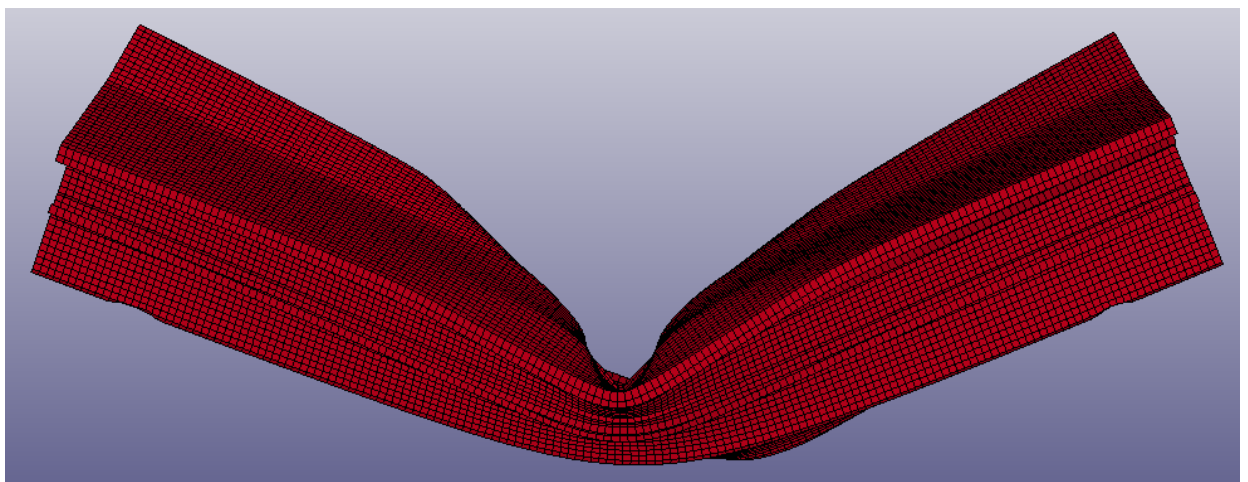
d=0mm



d=22mm

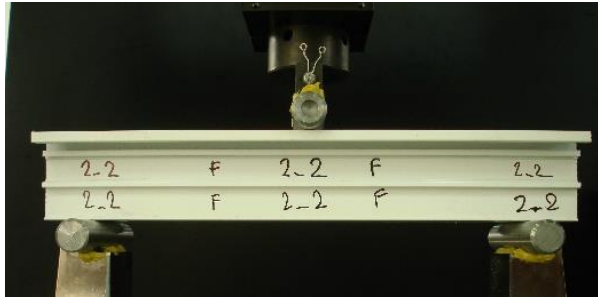


d=44mm

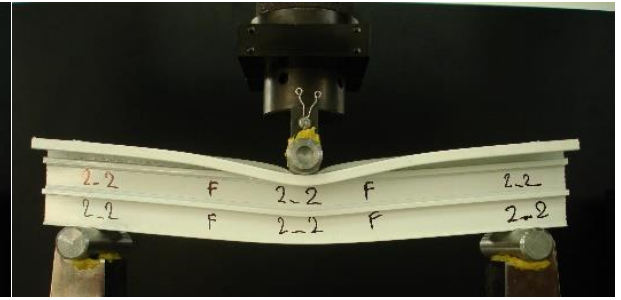


d=70mm

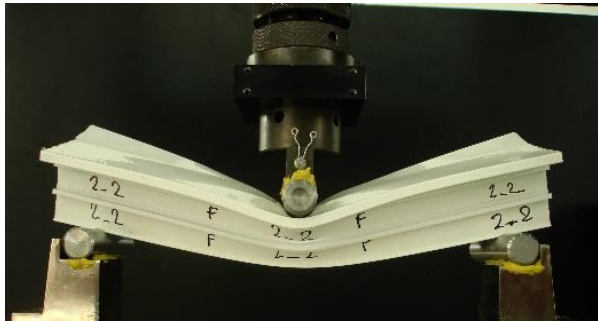




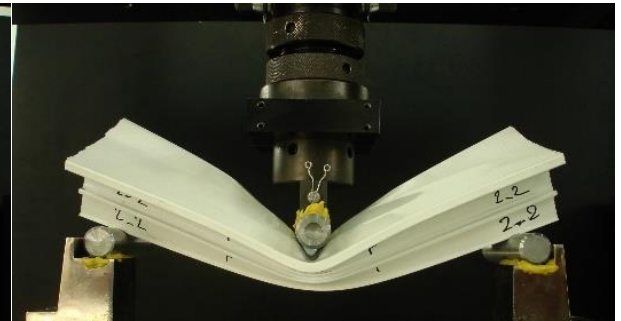
d=0mm



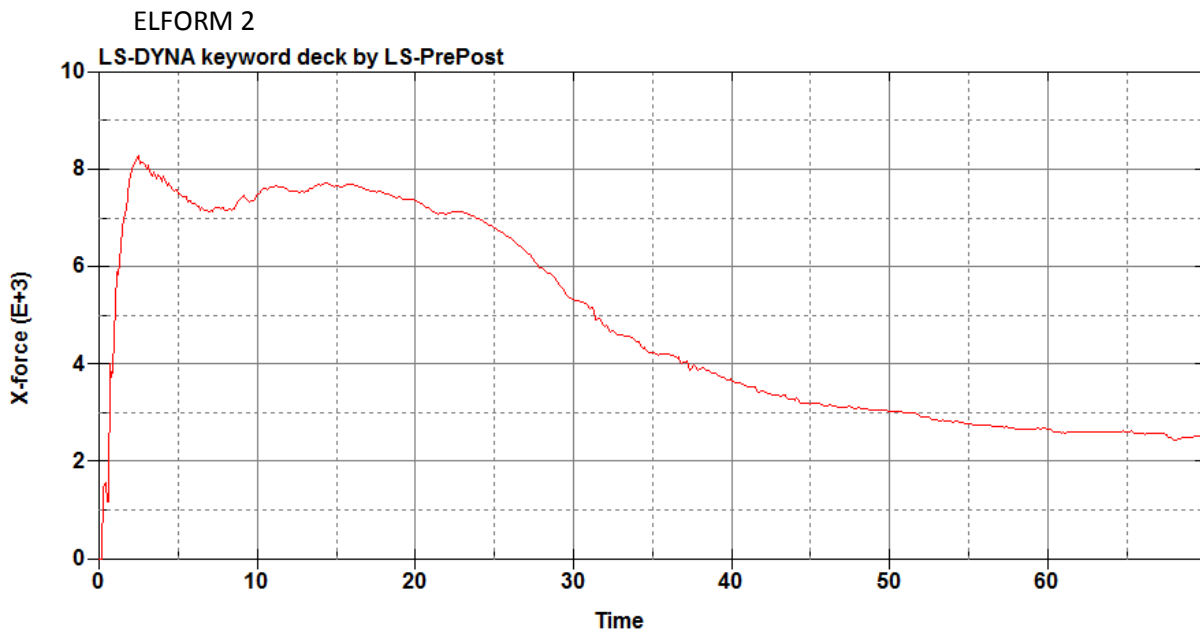
d=22mm



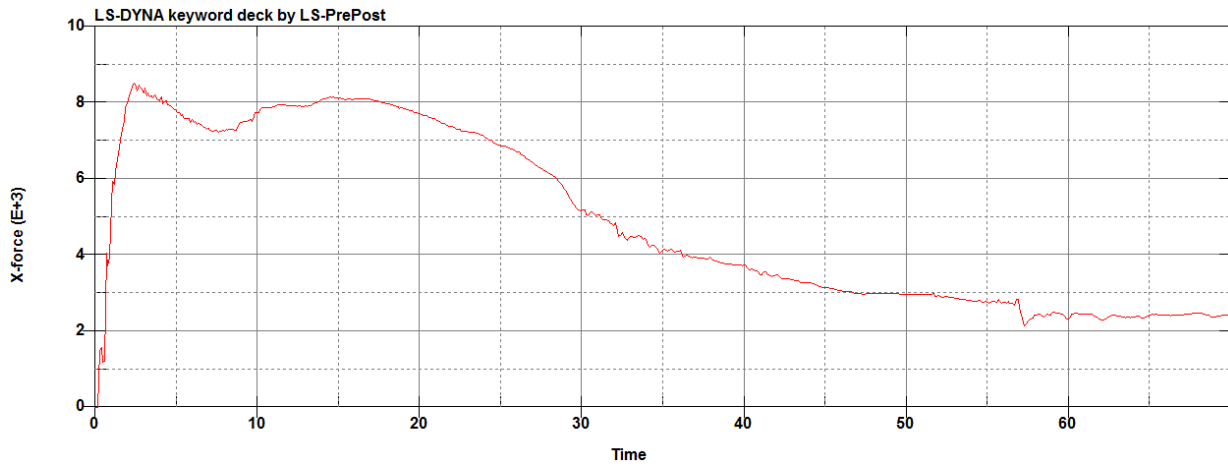
d=44mm



d=70mm

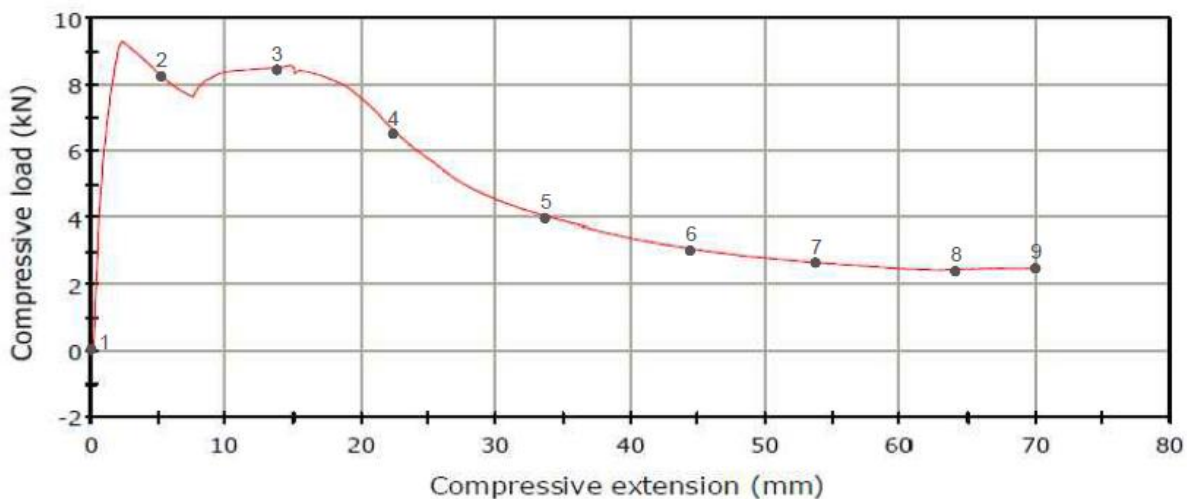


## ELFORM 16



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### LOAD - DEFLECTION GRAPH



### Σύγκριση Βασικών Αποτελεσμάτων

	ELFORM 2	ELFORM 16	Πειραματικά Αποτελέσματα
Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	8,1kN	8,2kN	8,6kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	5,75kN	5,75kN	5kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	340J	340J	340J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,41	1,43	1,72

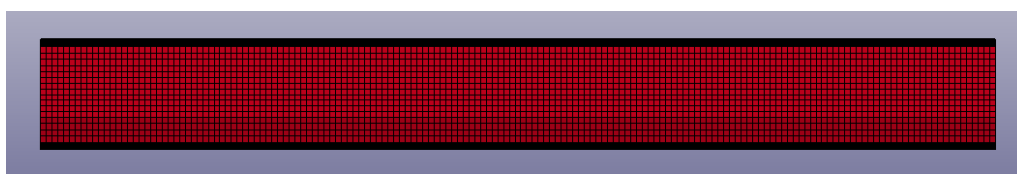
### Παρατηρήσεις-Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Όπως βλέπουμε για την πλευρική συμπίεση στο δοκίμιο 2\_2 τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα προσομοίωσης σχεδόν ταυτίζονται. Η μορφή κατάρρευσης παρουσιάζει πολλές

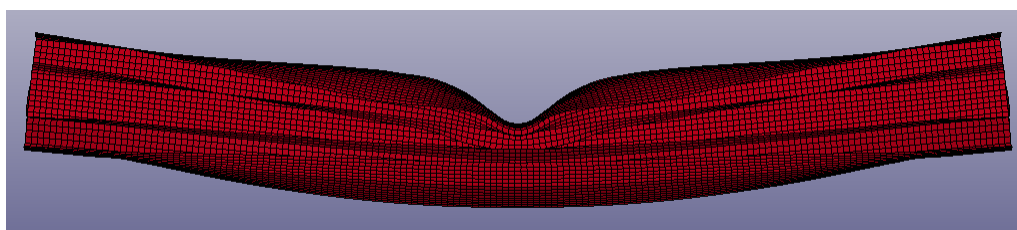
ομοιότητες. Όπως βλέπουμε και στο πείραμα και στη προσομοίωση το δοκίμιο περιστρέφεται στον διαμήκη άξονα του καθώς συμπιέζεται.

Όσον αφορά τις διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν (ELFORM 16 και ELFORM 2), τα αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται. Πρόκειται για διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης των κελύφων και είναι υπολογιστικό κομμάτι της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

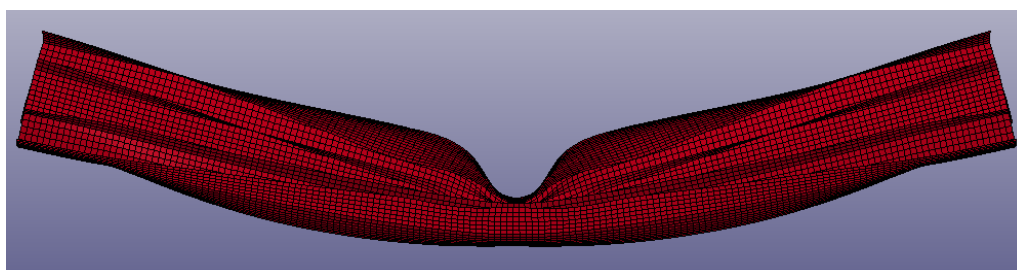
### Προσομοίωση Πλευρικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 3 ELFORM 2



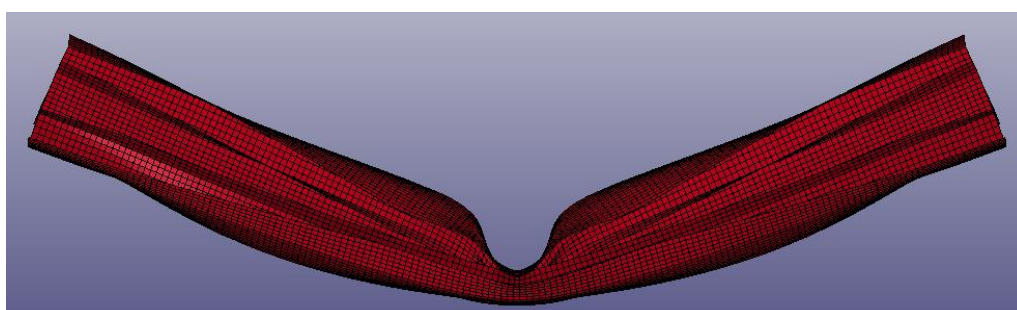
d=0mm



d=28mm

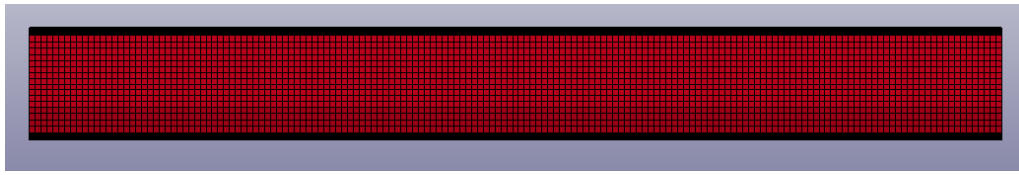


d=50mm

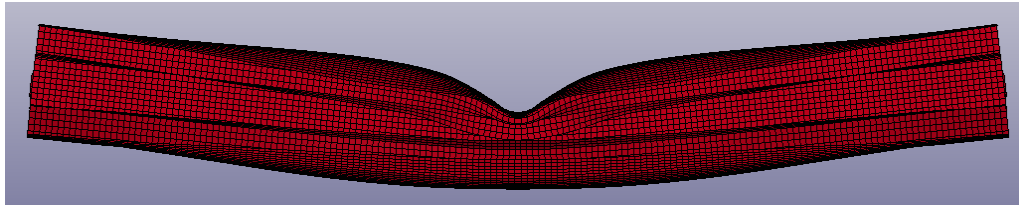


d=70mm

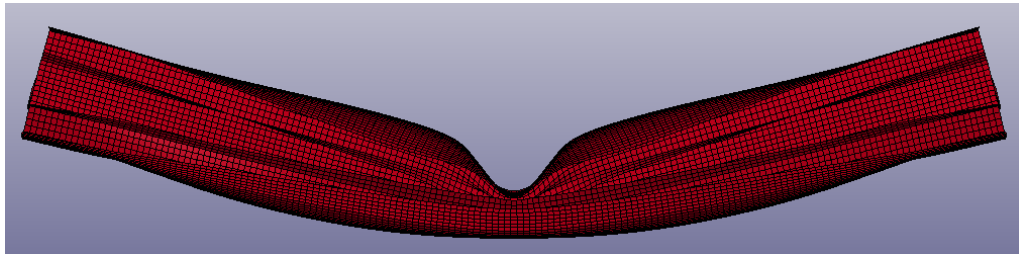
ELFORM 16



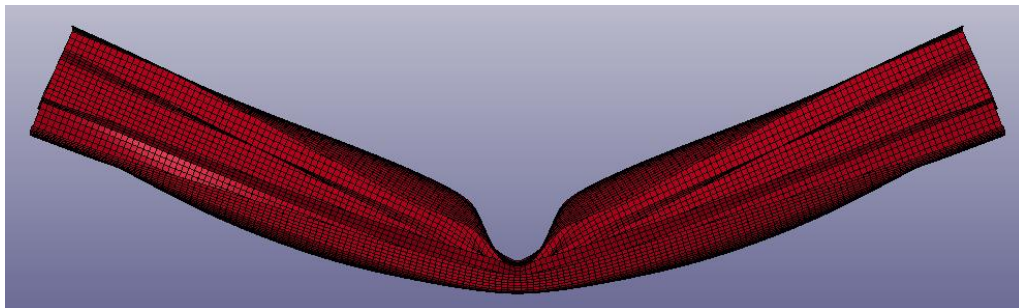
d=0mm



d=28mm



d=50mm



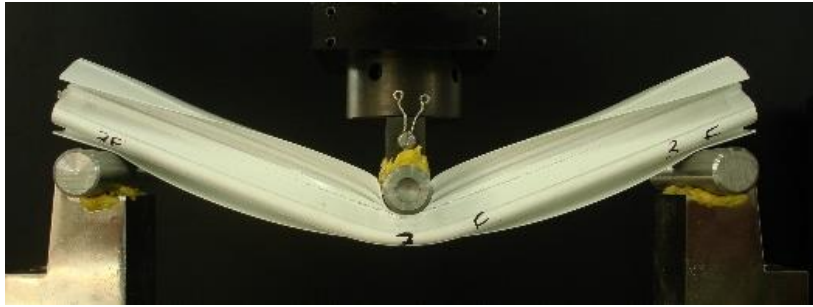
d=70mm



d=0mm



d=28mm



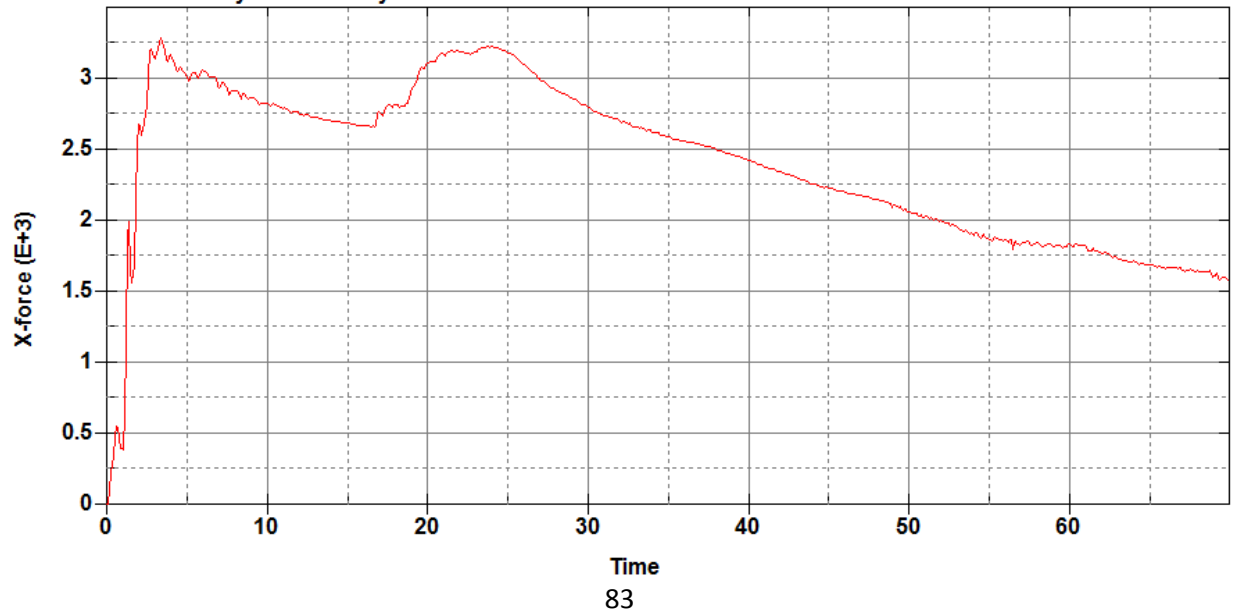
d=50mm



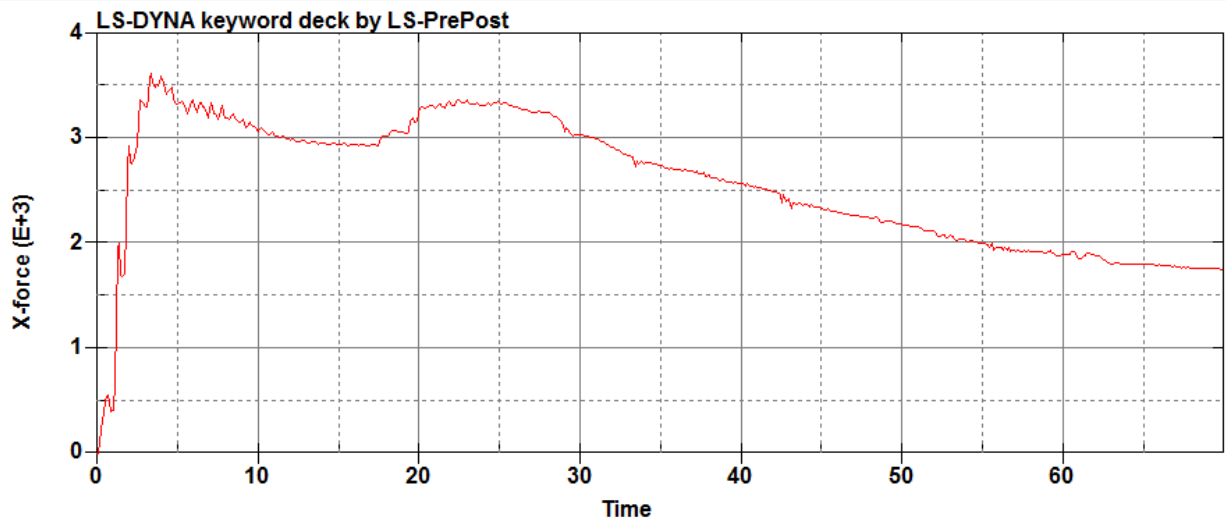
d=70mm

ELFORM 2

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

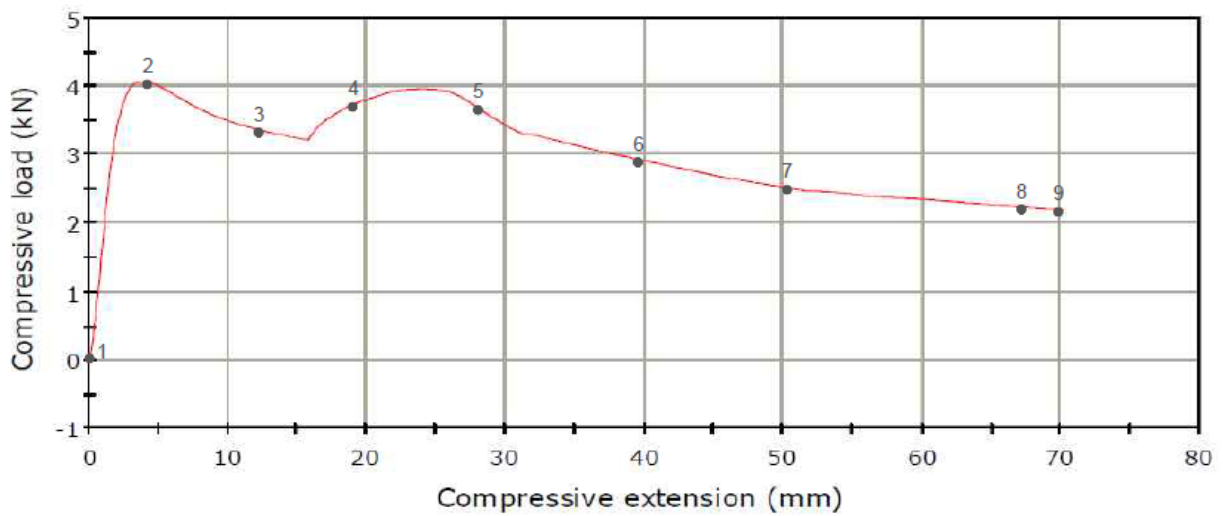


## ELFORM 16



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### LOAD - DEFLECTION GRAPH



### Σύγκριση Βασικών Αποτελεσμάτων

	ELFORM 2	ELFORM 16	Πειραματικά Αποτελέσματα
Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	3,125kN	3,55kN	4,05kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	2,1kN	2,5kN	2,9kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	170J	170J	210J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,49	1,42	1,40



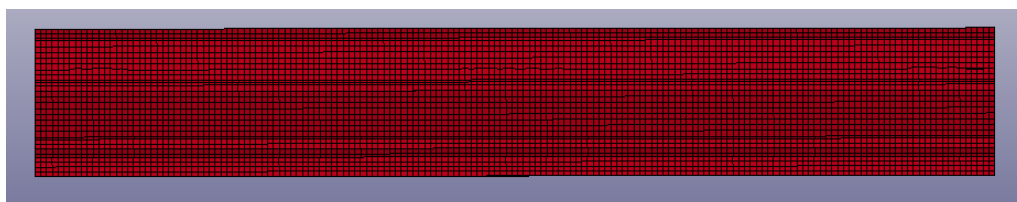
### Παρατηρήσεις-Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Όπως βλέπουμε για την πλευρική συμπίεση στο δοκίμιο 3 τα αποτελέσματα προσομοίωσης προσεγγίζουν τα πειραματικά αποτελέσματα. Η αρχική δύναμη κατάρρευσης παρουσιάζει μια διαφορά, αφού είναι λίγο μεγαλύτερη στα πειραματικά αποτελέσματα. Η μορφή κατάρρευσης παρουσιάζει πολλές ομοιότητες. Όπως βλέπουμε και στο πείραμα και στη προσομοίωση το δοκίμιο περιστρέφεται στον διαμήκη άξονα του καθώς συμπιέζεται.

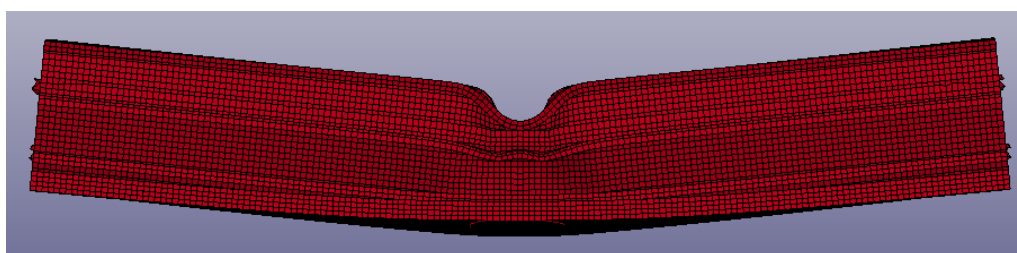
Όσον αφορά τις διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν (ELFORM 16 και ELFORM 2), τα αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται. Πρόκειται για διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης των κελύφων και είναι υπολογιστικό κομμάτι της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

### Προσομοίωση Πλευρικής Καταπόνησης - Δοκίμιο 4

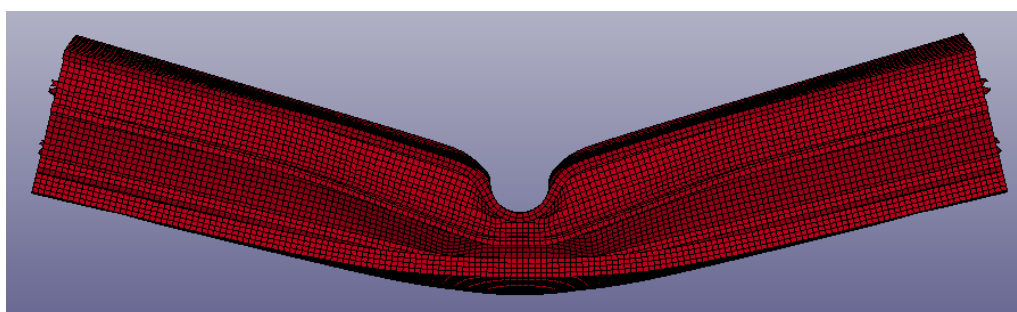
#### ELFORM 2



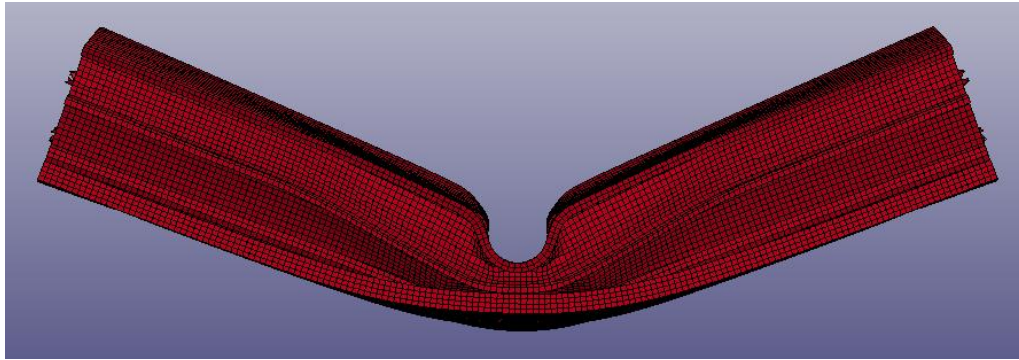
d=0mm



d=26mm

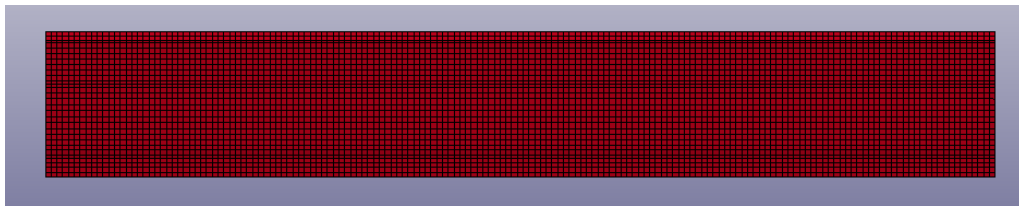


d=52mm

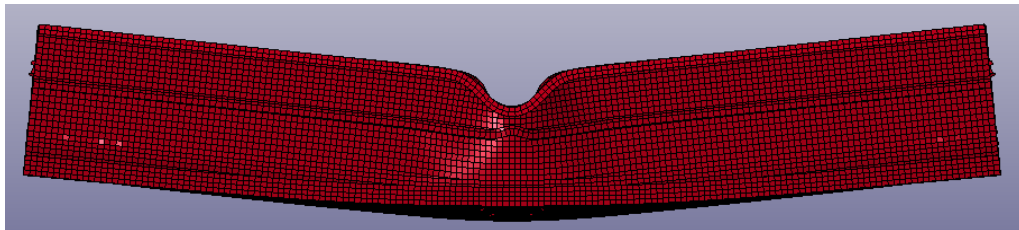


d=70mm

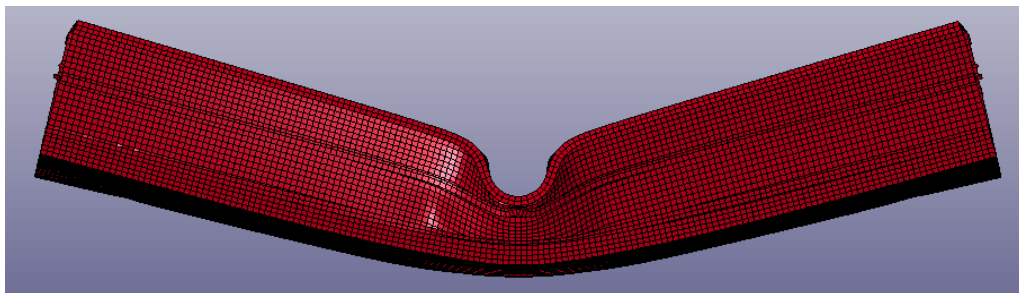
ELFORM 16



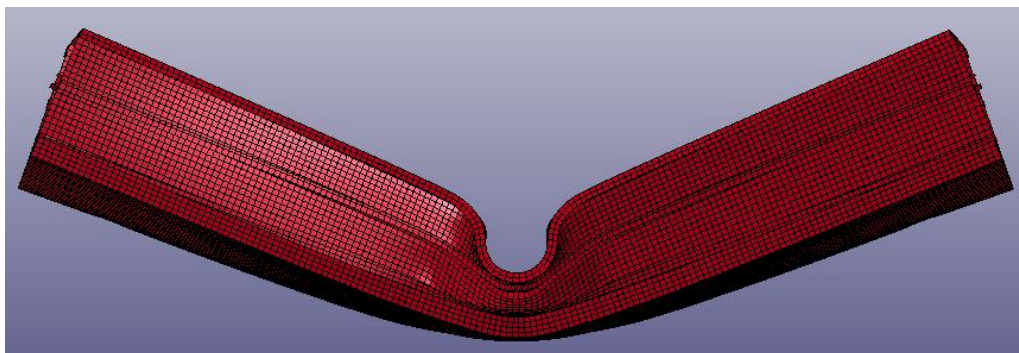
d=0mm



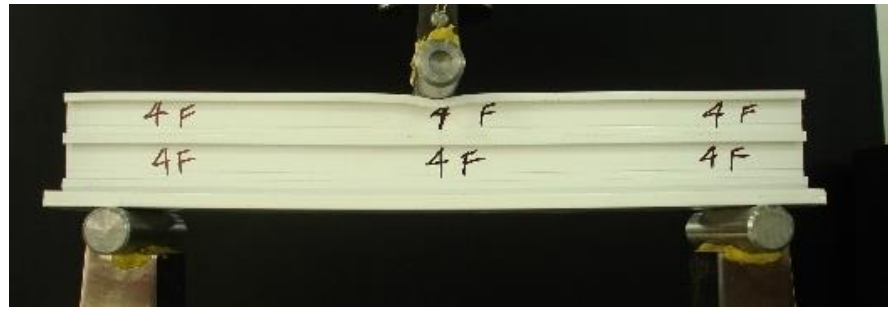
d=26mm



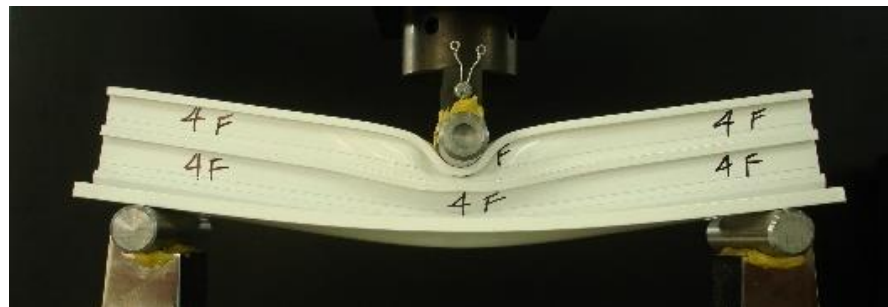
d=52mm



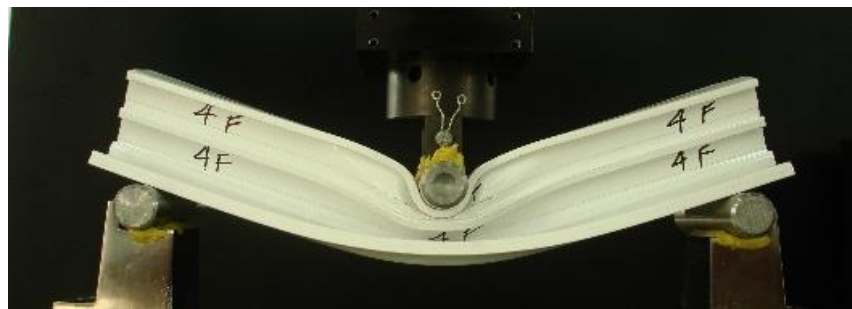
d=70mm



d=0mm



d=26mm

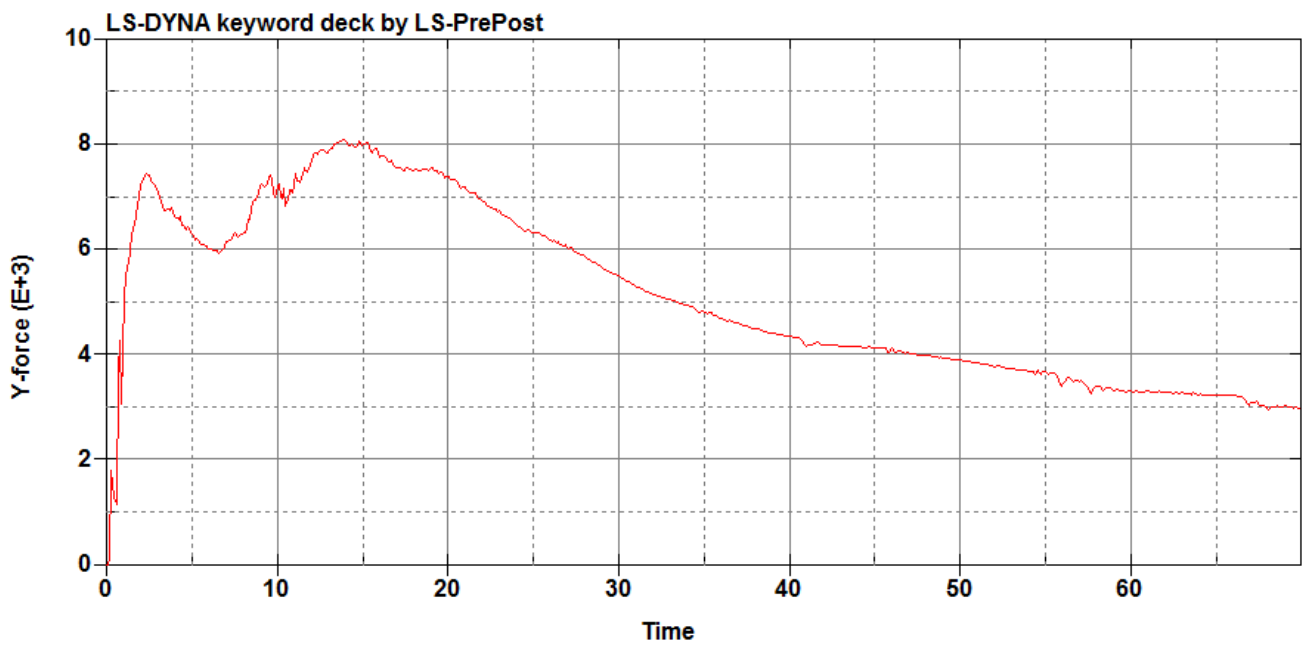


d=52mm

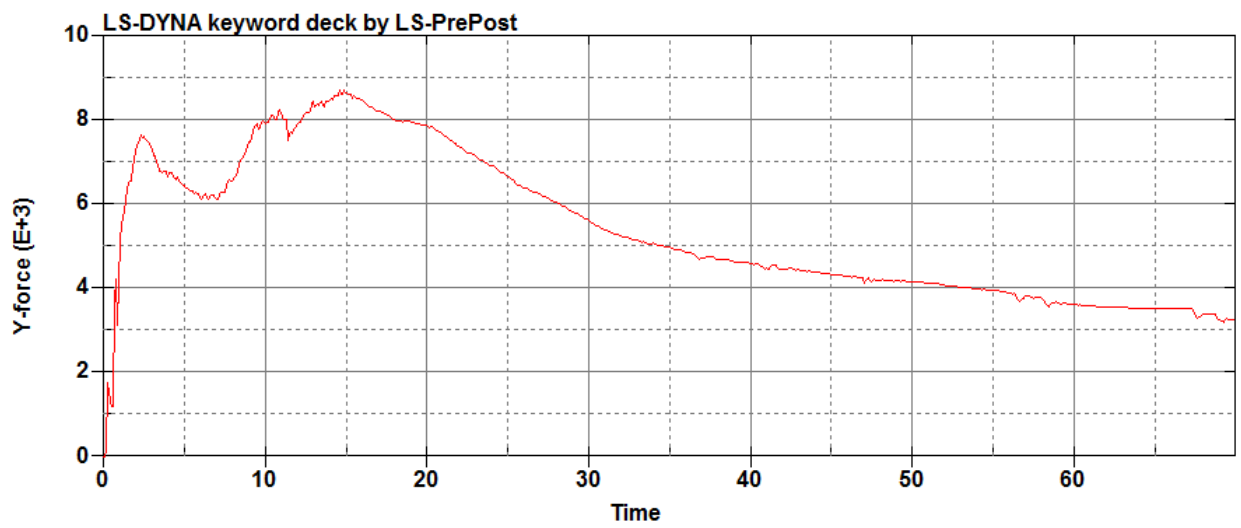


d=70mm

ELFORM 2

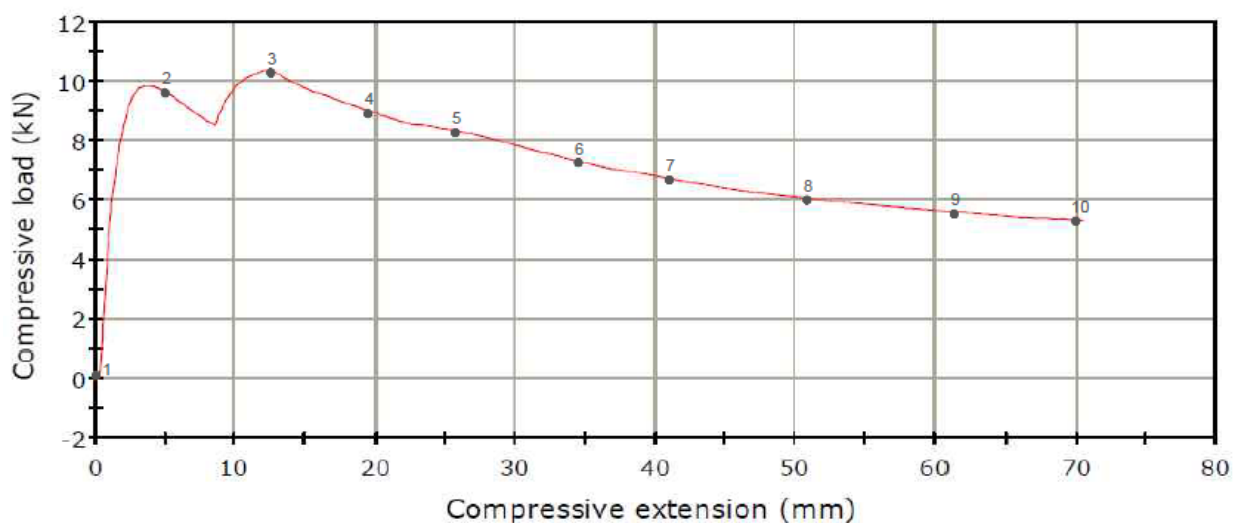


ELFORM 16



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### LOAD - DEFLECTION GRAPH



#### Σύγκριση Βασικών Αποτελεσμάτων

	ELFORM 2	ELFORM 16	Πειραματικά Αποτελέσματα
Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	8kN	8,5kN	10,2kN
Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	5kN	5,2kN	7,5kN
Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	310J	380J	490J
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,60	1,63	1,36

#### Παρατηρήσεις-Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Όπως βλέπουμε για την πλευρική συμπίεση στο δοκίμιο 4 τα αποτελέσματα προσομοίωσης προσεγγίζουν τα πειραματικά αποτελέσματα. Η αρχική δύναμη κατάρρευσης παρουσιάζει μια διαφορά, αφού είναι λίγο μεγαλύτερη στα πειραματικά αποτελέσματα. Η μορφή κατάρρευσης παρουσιάζει πολλές ομοιότητες.

Όσον αφορά τις διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν (ELFORM 16 και ELFORM 2), τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μικρές διαφορές, αλλά η μορφή κατάρρευσης είναι παρόμοια. Πρόκειται για διαφορετικές μεθόδους ολοκλήρωσης των κελύφων και είναι υπολογιστικό κομμάτι της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Γενικά Συμπεράσματα

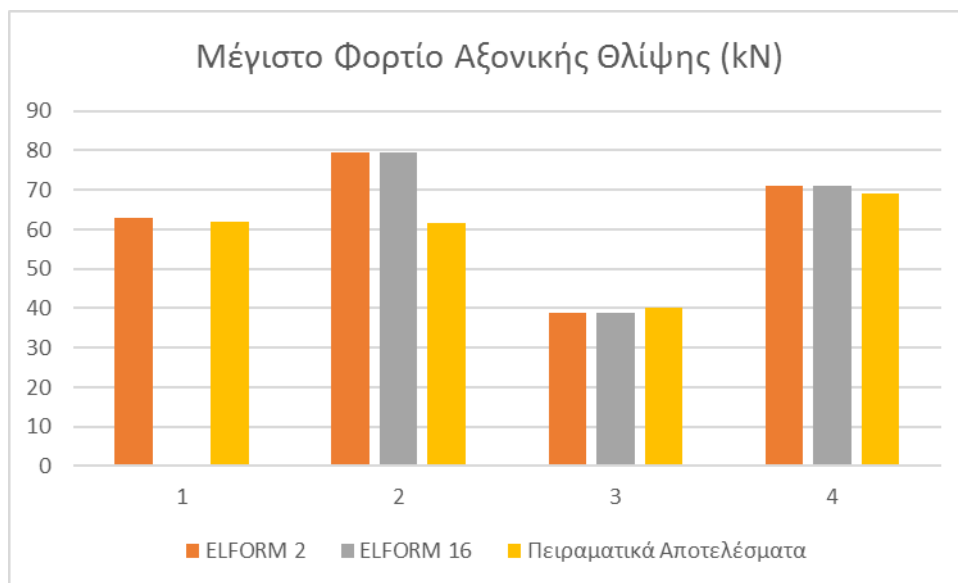
Παρακάτω φαίνονται δύο συγκεντρωτικοί πίνακες των βασικότερων αποτελεσμάτων για την αξονική θλίψη και τη πλευρική συμπίεση όλων των δοκιμών.

Αξονική Σύνθλιψη				
Δοκίμιο		Αποτελεσματα Προσομοιώσεων		Πειραματικά Αποτελέσματα
		ELFORM 2	ELFORM 16	
1	Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	63kN	-	62kN
	Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	30kN	-	32kN
	Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	2650J	-	2900J
	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	2,1	-	1,937
	Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)	22,11 J/gr	-	24,2J/gr
2	Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	79.5kN	79.5kN	61,5kN
	Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	35.1kN	40.5kN	28kN
	Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	2800J	3150J	2350J
	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	2,26	1,96	2,196
	Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)	17,68 J/gr	19,89J/gr	14,84J/gr
3	Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	39kN	39kN	40kN
	Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	16.5kN	17.8kN	14kN
	Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	480J	950J	600J
	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	2,36	2,19	2,85
	Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)	5,61 J/gr	11,1 J/gr	7,01J/gr

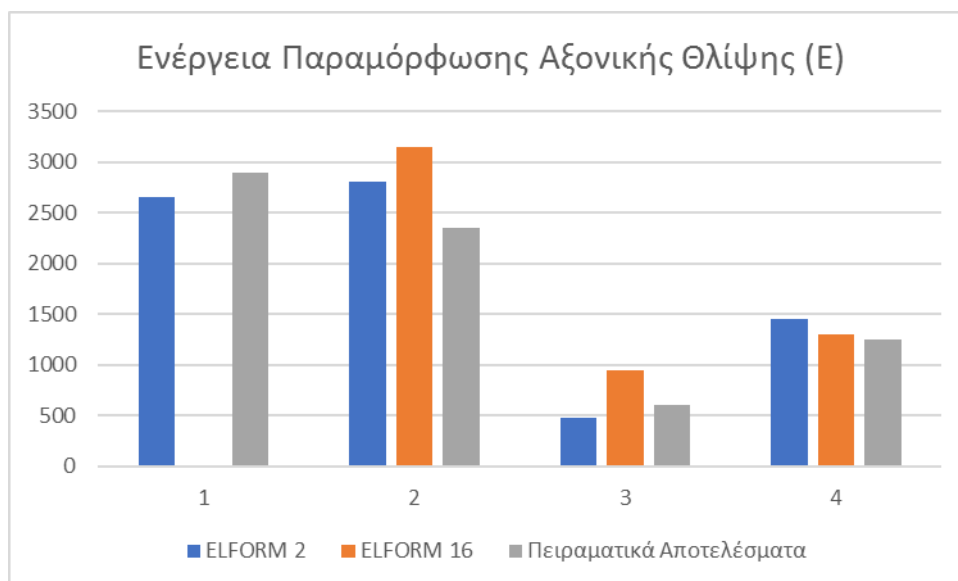


4	Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	71kN	71kN	69kN
	Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	28.5kN	26kN	25kN
	Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	1450J	1300J	1250J
	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	2,49	2,73	2,76
	Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (SEA)	8,97 J/gr	8,04 J/gr	7,74J/gr

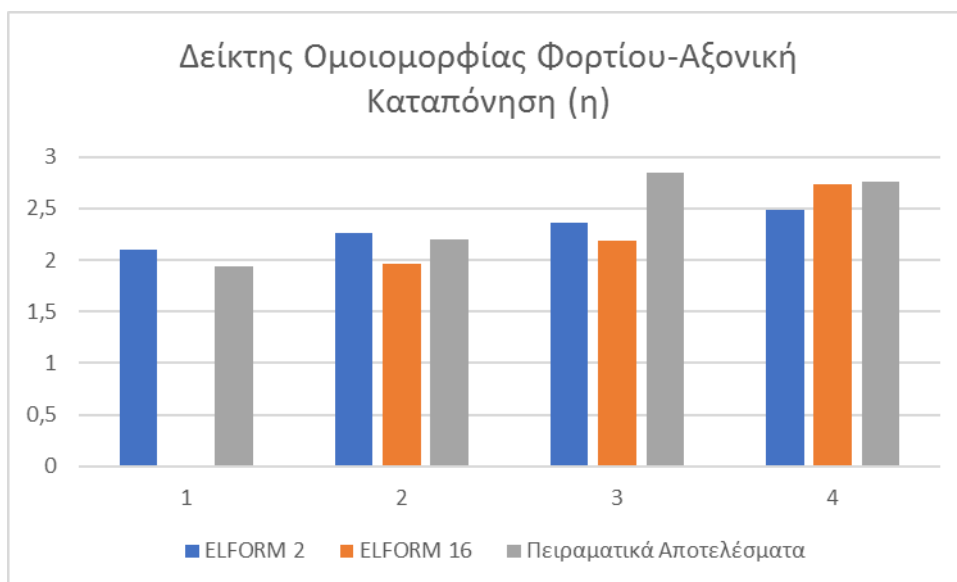
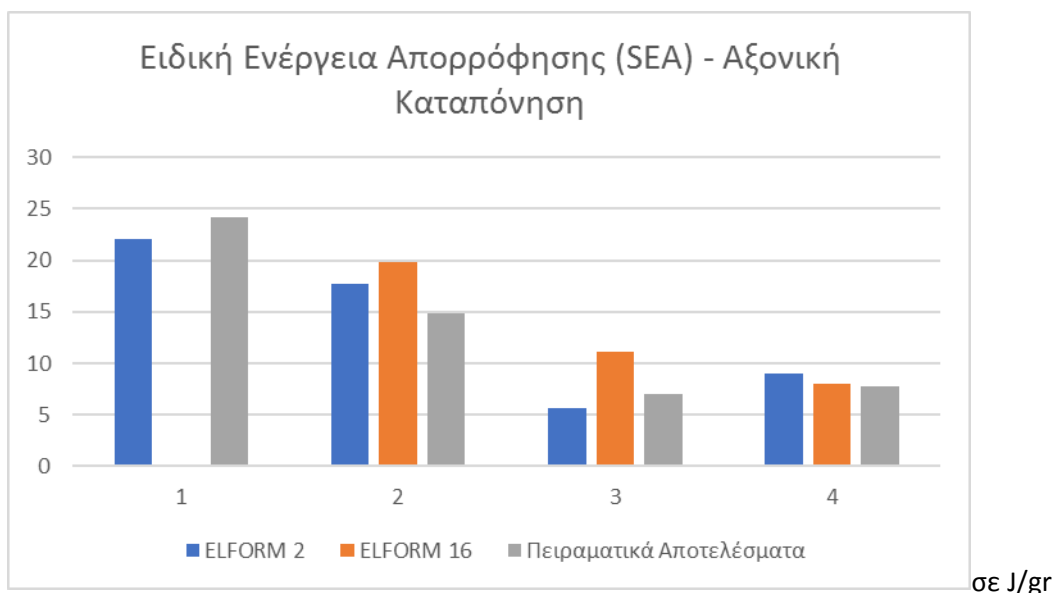
Στο παρακάτω ραβδόγραμμα φαίνεται ποιο δοκίμιο παρουσίασε τη μεγαλύτερη αντίσταση για την αρχική κατάρρευση. Φαίνεται καθαρά επίσης η διαφορά ανάμεσα σε πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης.



Στο παρακάτω ραβδόγραμμα φαίνεται η απορροφούμενη ενέργεια του κάθε δοκιμίου.

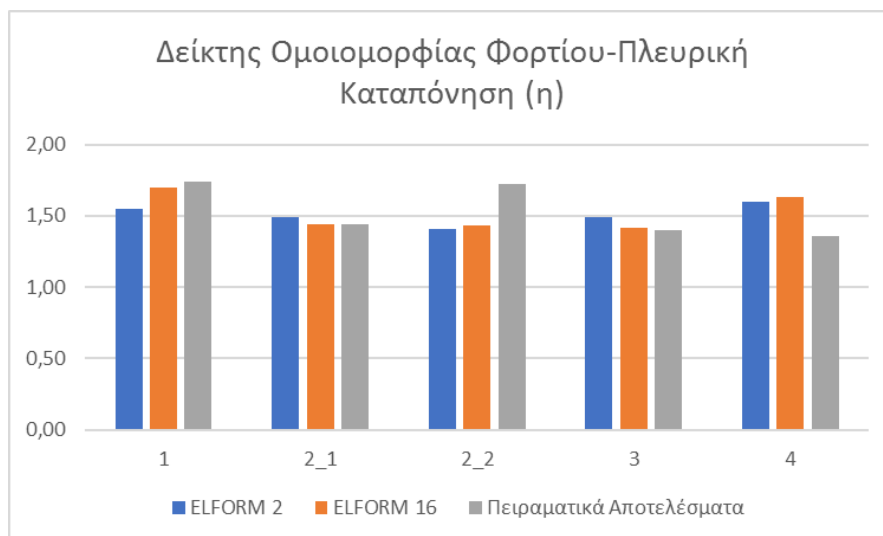
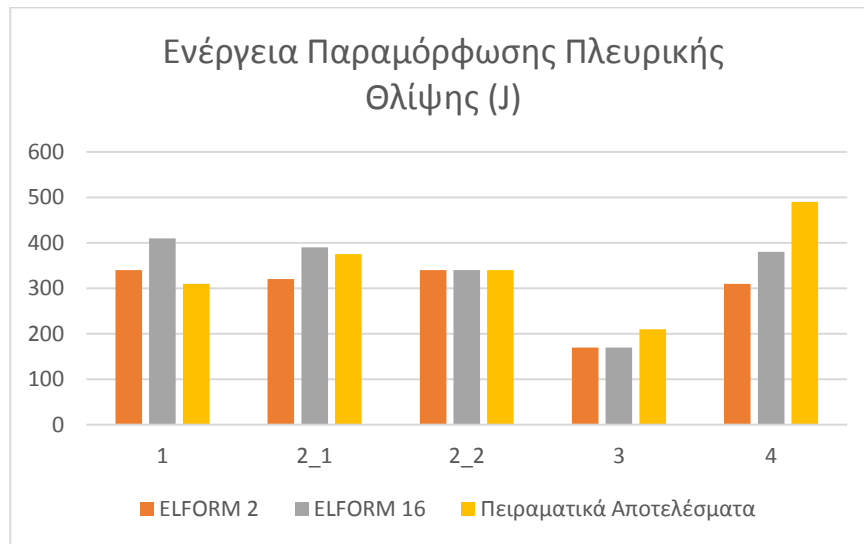
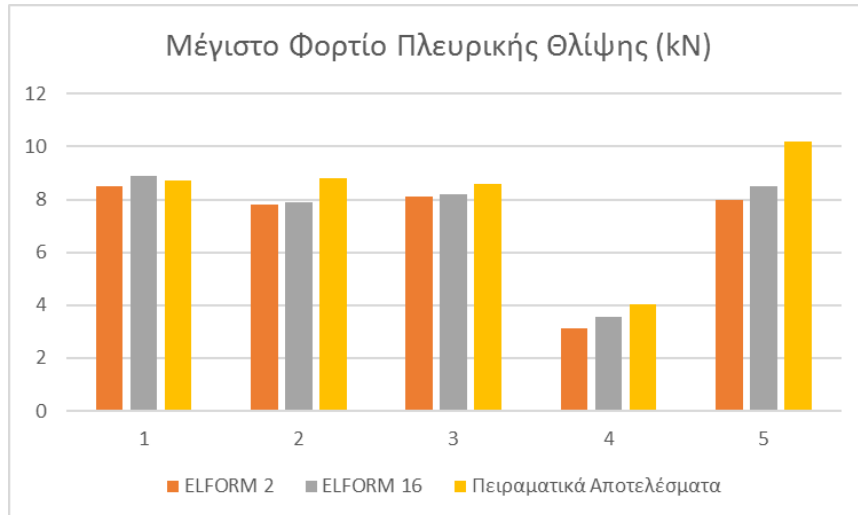


Στο παρακάτω ραβδόγραμμα φαίνεται ο δείκτης SEA σε J/gr.



Πλευρική Συμπίεση				
Δοκίμιο		Αποτελεσματα Προσομοιώσεων		Πειραματικά Αποτελέσματα
		ELFORM 2	ELFORM 16	
1	Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	8,5kN	8,9kN	8,7kN
	Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	5,5kN	5,25kN	5kN
	Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	340J	410J	310J

	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,55	1,70	1,74
2_1	Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	7,8kN	7,9kN	8,8kN
	Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	5,25kN	5,5kN	6,1kN
	Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	320J	390J	375J
	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,49	1,44	1,44
2_2	Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	8,1kN	8,2kN	8,6kN
	Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	5,75kN	5,75kN	5kN
	Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	340J	340J	340J
	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,41	1,43	1,72
3	Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	3,125kN	3,55kN	4,05kN
	Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	2,1kN	2,5kN	2,9kN
	Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	170J	170J	210J
	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,49	1,42	1,40
4	Μέγιστο Φορτίο Θλίψης ( $F_{max}$ )	8kN	8,5kN	10,2kN
	Μέσο Φορτίο Θλίψης ( $F_{av}$ )	5kN	5,2kN	7,5kN
	Ενέργεια Παραμόρφωσης (E)	310J	380J	490J
	Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου ( $\eta$ )	1,60	1,63	1,36



## Συμπεράσματα από τις πειραματικές δοκιμές

Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι προφίλ αλουμινίου διαφόρων διαστάσεων και γεωμετριών. Σε ότι αφορά τον τρόπο κατάρρευσης των δοκιμίων, είχαμε διαφορετικούς τρόπους κατάρρευσης στην αξονική θλίψη, είτε με μη εκτατούς λοβούς, είτε με λυγισμό. Όπως ήταν αναμενόμενο στη περίπτωση του λυγισμού, είχαμε μη ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την απορρόφηση ενέργειας από το υλικό. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζει το μήκος των δοκιμίων σε συνάρτηση με τα μήκη των πλευρών τους, το πάχος των τοιχωμάτων τους καθώς και η γεωμετρία τους. Παρατηρούμε ότι τα δοκίμια όπου τα προφίλ είχαν μεγαλύτερες πλευρές και ήταν συμμετρικά ως προς τους εγκάρσιους άξονες παρουσίαζαν κατάρρευση με μη εκτατούς λοβούς κατά βάση, το οποίο σημαίνει ότι ήταν και καλύτεροι ενεργειακοί απορροφητές.

Για την πλευρική συμπίεση παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι πλευρές του δοκιμίου, τόσο πιο καλός ενεργειακός απορροφητής είναι. Παρόλα αυτά η πλευρικά τα προφίλ αλουμινίου δεν μπορούν να θεωρηθούν καλοί ενεργειακοί απορροφητές. Απορροφούν πολύ λιγότερη ενέργεια σε σχέση με την αξονική θλίψη.

## Συμπεράσματα από την υπολογιστική προσομοίωση

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα υπολογιστικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν στον κώδικα Is-dyna προσομοιάζουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά κατάρρευσης των πειραματικών δοκιμίων, ενώ ακόμα παρατηρείται μικρή απόκλιση μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τα χαρακτηριστικά μεγέθη. Επίσης, σε ότι αφορά τον τρόπο κατάρρευσης, τα υπολογιστικά μοντέλα σε όλες τις περιπτώσεις, καταρρέουν σχηματίζοντας ίδιο τύπο λοβών με αυτόν του πειράματος.

Τώρα, οι όποιες διαφοροποιήσεις υπάρχουν, στην πλειοψηφία των μοντέλων, παρουσιάζονται εξαιτίας των σχετικά βελτιωμένων χαρακτηριστικών κατάρρευσης, τα οποία οφείλονται στις παραδοχές που έχουν γίνει κατά τη μοντελοποίηση, που αποτελούν εξιδανίκευση των πραγματικών συνθηκών. Επίσης σημαντικός λόγος απόκλισης μεταξύ των πειραμάτων και της αριθμητικής ανάλυσης είναι ότι στα μοντέλα δεν συμπεριλήφθηκε η προσομοίωση της διάσκισης.

## Προτάσεις για περαιτέρω Έρευνα

Με βάση όσα έγιναν θα μπορούσε σε επόμενο στάδιο συνεχιστεί η έρευνα με την αναζήτηση περισσότερων σύνθετων διατομών, κοντά σε αυτές που παρουσιάζουν πιο καλή συμπεριφορά ως προς την απορρόφηση ενέργειας, δηλαδή με τα παραπλήσια χαρακτηριστικά των δοκιμίων 1 και 2.

Θα ήταν χρήσιμο επίσης να εξεταστεί η συμπεριφορά των δοκιμίων πιο σφαιρικά, με καταπόνηση σε περισσότερες πλευρές και υπό διαφορετικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα μεταξύ παράλληλων πλακών. Σε αυτή τη περίπτωση θα εξεταζόντουσαν διαφορετικές παράμετροι για την απορρόφηση της ενέργειας, καθώς σημαντικό ρόλο θα έπαιζαν τα κατακόρυφα τοιχώματα των δοκιμίων.

Τέλος, εφόσον διαπιστώθηκε η λειτουργία του κώδικα αριθμητικής ανάλυσης θα μπορούσαν να σχεδιαστούν διατομές για δοκιμές, ώστε επιτευχθεί ένα βέλτιστο αποτέλεσμα υπό ιδανικές συνθήκες.

## Βιβλιογραφία

1. 'Metallic tube type energy absorbers: A synopsis'. A.G. Olabi , Edmund Morris , M.S.J. Hashmi. (2007).
2. 'Energy absorption of foam-filled circular tubes with braided composite walls'. Anne-Marie Harte, Norman A. Fleck, Michael F. Ashby. (1999).
3. 'Effect of thin-walled Tube Geometry on its Crashworthiness Performance'. Anton Kuznetcov, Igor Telichev, Christine Q. Wu University of Manitoba, Canada. (2016).
4. 'Effect of geometry on crashworthiness parameters of natural kenaf fibre reinforced composite hexagonal tubes'. M.F.M. Alkbir, S.M. Sapuan, A.A. Nuraini, M.R. Ishak, University Putra Malaysia. 2014.
5. <https://en.wikipedia.org/wiki/Extrusion>
6. 'Crashworthiness of Automotive Composite Material Systems'. George C. Jacob, John F. Fellers, J. Michael Starbuck , Srdan Simunovic Materials Science and Engineering Department, University of Tennessee, Knoxville, 434 Dougherty Engineering, Knoxville, Tennessee 37996, USA. 2003.
7. 'Numerical Simulation of Axial Crushing of Circular Tubes'. A. A. N. ALJAWI. Faculty of Engineering, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia. (2002).
8. 'Design and finite Element Simulations of aluminium foam-filled thin walled tubes' A.G Hanssen , A. Reyes. 2005.
9. 'Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles'. M.A. Jimenez, A. Miravete, E. Larrod, D. Revuelta. (2000).
10. 'Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes'. S.R. Guillowa, G. Lua, R.H. Grzebietab. (2001)
11. LS - DYNA THEORY MANUAL
12. 'Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes'. S.R. Guillowa, G. Lua, R.H. Grzebietab. (2001)
13. 'Specific energy absorption capacity of glass-polyester composite tubes under static compressive loading' M. Stamenovi, S. Puti, M. Zrili, Lj. Milovi, J. Pavlov-Krsti. (2011)
14. 'Axial crush behaviours and energy absorption characteristics of aluminium and E-glass/epoxy over-wrapped aluminium conical frusta under low velocity impact loading' M. Kathiresan , K. Manisekar (2015)