



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

**Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΡΗΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΑΦΡΟΥ ΣΤΗΝ  
ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ**

**ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΥ ΔΙΑΜΑΝΤΩ**

ΑΘΗΝΑ 2014

Αφιερώνεται στον παππού μου

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	4
ΛΙΣΤΑ ΠΙΚΑΚΩΝ	5
ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	5
ABSTRACT	8
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	9
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1 Τροχαία δυστυχήματα-Παγκόσμια στατιστικά	12
1.2 Αλλαγές στην αυτοκινητοβιομηχανία	13
1.3 Μηχανισμός πλευρικής κατάρρευσης σωλήνων	15
1.3.1 Πλευρική κατάρρευση σωλήνων κυλινδρικής διατομής	15
1.3.2 Πλευρική κατάρρευση σωλήνων ορθογωνικής ή τετραγωνικής διατομής	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΣ ΑΦΡΟΣ	20
2.1 Πολυουρεθάνη	20
2.2 Εφαρμογές	21
2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά	23
2.3.1 Αφρός εμπορίου	24
2.3.2 Παρασκευασμένος αφρός	25
2.4 Διαδικασία παρασκευής πολυμερικού αφρού	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	30
3.1 Σωλήνες χωρίς την προσθήκη αφρού	30
3.1.1 Σωλήνας διαστάσεων φ50x2x60	30
3.1.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise	31
3.1.3 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-flatwise	32
3.1.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2	33
3.1.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2	34
3.1.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2	35
3.2 Σωλήνας με προσθήκη αφρού εμπορίου διαστάσεων Φ50x2x60	36
3.3 Σωλήνες με προσθήκη παρασκευασμένου αφρού	38

3.3.1 Σωλήνας διαστάσεων Φ50x2x60 .....	38
3.3.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise .....	39
3.3.3 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2 flatwise.....	40
3.3.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2 .....	41
3.3.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2 .....	42
3.3.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2 .....	43
3.3.7 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise ελεύθερης εκτόνωσης .....	44
<b>3.4 Δοκίμια αφρού</b> .....	<b>46</b>
3.4.1 Δοκίμιο διαστάσεων 60x40-axially .....	46
3.4.2 Δοκίμιο διαστάσεων 60x40-transverse .....	47
<b>3.5 Τελικές εικόνες δοκιμών (terminal views)</b> .....	<b>48</b>
3.5.1 Δοκίμιο με και χωρίς την προσθήκη παρασκευασμένου αφρού .....	48
3.5.2 Δοκίμιο με προσθήκη αφρού εμπορίου .....	52
3.5.3 Δοκίμιο αφρού.....	53
<b>3.6 Παρατηρήσεις</b> .....	<b>54</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>56</b>
<b>4.1 Εισαγωγή</b> .....	<b>56</b>
<b>4.2 Κώδικας LS-DYNA</b> .....	<b>57</b>
<b>4.3 Πειραματικές και θεωρητικές τιμές</b> .....	<b>58</b>
4.3.1 Σωλήνες χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού .....	58
4.3.1.1 Σωλήνας διαστάσεων Φ50x2x60.....	58
4.3.1.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise .....	60
4.3.1.3 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2 flatwise .....	62
4.3.1.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2.....	63
4.3.1.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2.....	65
4.3.1.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2.....	66
4.3.2 Σωλήνες με προσθήκη πολυμερικού αφρού .....	68
4.3.2.1 Σωλήνας διαστάσεων Φ50x2x60.....	68
4.3.2.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise .....	70
4.3.2.3 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2 flatwise .....	72
4.3.2.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2.....	74
4.3.2.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2.....	76
4.3.2.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2.....	78
4.3.3 Δοκίμιο αφρού διαστάσεων 60x40- transverse .....	80
<b>4.4 Πειραματικές τιμές: Σωλήνες με και χωρίς προσθήκη παρασκευασμένου πολυμερικού αφρού</b> .....	<b>82</b>
<b>4.5 Σχόλια- Παρατηρήσεις</b> .....	<b>85</b>
<b>4.6 Προτάσεις για περαιτέρω εργασία</b> .....	<b>92</b>
<b>ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>93</b>

ΕΝΤΥΠΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ _____	93
<b>ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ</b>	
Εικόνα Α.1: Μηχανή Instron _____	11
Εικόνα 1.1 Αριθμός θανάτων παγκοσμίως εξ' αιτίας αυτοκινητιστικών συγκρούσεων. _____	13
Εικόνα 1.2: Καταστροφή αμαξώματος παλαιότερα (πάνω), σήμερα (κάτω) _____	14
Εικόνα 1.3: Υλικά κατασκευής αμαξώματος οχήματος _____	15
Εικόνα 1.4: Διατομή σωλήνα κυλινδρικής διατομής μετά την συμπίεση (ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος) _____	16
Εικόνα 1.5: Εμφάνιση πλαστικών αρμών σε σωλήνα κυλινδρικής διατομής _____	17
Εικόνα 1.6: Διατομή σωλήνα ορθογωνικής διατομής πριν την συμπίεση (ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος) _____	18
Εικόνα 1.7: Διατομή σωλήνα ορθογωνικής διατομής μετά την συμπίεση (ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος) _____	19
Εικόνα 2.1: Σύνθεση πολυουρεθάνης _____	20
Εικόνα 2.2: Εφαρμογές πολυουρεθάνης _____	23
Εικόνα 2.3: Αφρός πολυουρεθάνης-εμπορίου _____	24
Εικόνα 2.4 Εξοπλισμός _____	28
Εικόνα 4.1: Διαφορά μέγιστου φορτίου θεωρητικής και πειραματικής καμπύλης με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) την προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	86
Εικόνα 4.2: Αλλαγή κλίσης καμπύλης _____	87
Εικόνα 4.3: Συμπύεση μεταλλικού σωλήνα με μοντελοποίηση αστοχίας υλικού _____	88
Εικόνα 4.4: Συμπύεση μπιγέτας αφρού με μοντελοποίηση αστοχίας υλικού (coarse meshing) _____	88
Εικόνα 4.5 Συμπύεση μπιγέτας αφρού με μοντελοποίηση αστοχίας υλικού (fine meshing) _____	88
Εικόνα 4.6: Συμπύεση κυλινδρικής μπιγέτας αφρού με μοντελοποίηση αστοχίας υλικού _____	89
Εικόνα 4.7: Συμπύεση κυλινδρικού σωλήνα με προσθήκη πολυμερικού αφρού με μοντελοποίηση αστοχίας υλικού _____	89
Εικόνα 4.8: Συμπύεση ορθογωνικού σωλήνα με προσθήκη πολυμερικού αφρού ισχυρά συνδεδεμένου με το κέλυφος. _____	91
Εικόνα 4.9: Συμπύεση κυλινδρικού σωλήνα με προσθήκη πολυμερικού αφρού ισχυρά συνδεδεμένου με το κέλυφος. _____	91

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΚΑΚΩΝ

Πίνακας 2.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά _____	26
Πίνακας 2.3: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες _____	26
Πίνακας 2.4: Απαιτούμενες μάζες συστατικών _____	28
Πίνακας 3.1: Τελικά ύψη δοκιμίων (mm) _____	54
Πίνακας 4.1 Ιδιότητες υλικών _____	56
Πίνακας 4.2 : Απορροφώμενη ενέργεια (J) _____	85
Πίνακας 4.3 : Μέγιστο φορτίο ανά περίπτωση (kN) _____	85

## ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων $\phi 50 \times 2 \times 60$ με και χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού εμπορίου _____	25
Διάγραμμα 3.1: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων $\phi 50 \times 2 \times 60$ χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	30
Διάγραμμα 3.2: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων $50 \times 30 \times 2$ -edgewise χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	31
Διάγραμμα 3.3: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων $50 \times 30 \times 2$ -flatwise χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	32
Διάγραμμα 3.4: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων $50 \times 50 \times 2$ χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	33
Διάγραμμα 3.5: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων $40 \times 40 \times 2$ χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	34
Διάγραμμα 3.6: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων $30 \times 30 \times 2$ χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	35
Διάγραμμα 3.7: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων $\phi 50 \times 2 \times 60$ με προσθήκη πολυμερικού αφρού εμπορίου _____	37
Διάγραμμα 3.8: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων $\phi 50 \times 2 \times 60$ με προσθήκη παρασκευασμένου πολυμερικού αφρού _____	38
Διάγραμμα 3.9: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων $50 \times 30 \times 2$ -edgewise με προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	39

Διάγραμμα 3.10: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-flatwise με προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	40
Διάγραμμα 3.11: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x50x2 με προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	41
Διάγραμμα 3.12: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 40x40x2 με προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	42
Διάγραμμα 3.13: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 30x30x2 με προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	43
Διάγραμμα 3.14: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-edgewise ελεύθερης εκτόνωσης με προσθήκη πολυμερικού αφρού _____	45
Διάγραμμα 3.15: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης δοκιμίου πολυμερικού αφρού διαστάσεων 60x40-axially _____	46
Διάγραμμα 3.16: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης δοκιμίου πολυμερικού αφρού διαστάσεων 60x40-transverse _____	47
Διάγραμμα 4.1: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων φ50x2x60 _____	59
Διάγραμμα 4.2: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-edgewise ____	61
Διάγραμμα 4.3: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-flatwise ____	63
Διάγραμμα 4.4: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x50x2 _____	64
Διάγραμμα 4.5: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 40x40x2 _____	66
Διάγραμμα 4.6: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 30x30x2 _____	67
Διάγραμμα 4.7: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων φ50x2x60 _____	69
Διάγραμμα 4.8: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-edgewise ____	72
Διάγραμμα 4.9: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-flatwise ____	74
Διάγραμμα 4.10: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x50x2 _____	76
Διάγραμμα 4.11: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 40x40x2 _____	77
Διάγραμμα 4.12: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 30x30x2 _____	79
Διάγραμμα 4.13: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου διαστάσεων 60x40-transverse _	81
Διάγραμμα 4.14: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων φ50x2x60 _____	82
Διάγραμμα 4.15: Καμπύλες φορτίου- μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-edgewise_	82
Διάγραμμα 4.16: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-flatwise ____	83

Διάγραμμα 4.17: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x50x2	_____	83
Διάγραμμα 4.18: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 40x40x2	_____	84
Διάγραμμα 4.19: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 30x30x2	_____	84



## ABSTRACT

This report is written to display and briefly analyze the structural behavior of energy absorbers being integral parts of chassis frames. The study deals with the problem of safety of automobile vehicles. A detailed experimental and computational investigation of metallic circular, rectangular and quadrangular tubes subjected to lateral compression is presented. The experiments were carried out in an Instron machine. Their extension and load-compression curves as well as mechanical properties (such as yield strength and elastic modulus) were obtained. The effect of polyurethane foam-filler on the lateral plastic deformation in the tubes under radial quasi-static load is also investigated. The deformation process of the tubes has been studied and simulated using the finite element code LS-DYNA. Experimental and computed results are compared. The basic mechanism of their deformation is presented and discussed. The experimental results show that the polyurethane foam-filler increase the energy absorption capability of tubes. What is more, using the polyurethane foam in the circular tubes under the lateral compression works as a better filler, compared to rectangular and quadrangular tubes.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε για να μελετηθεί και να αναλυθεί η στατική συμπεριφορά των απορροφητών ενέργειας που αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των πλαισίων μιας κατασκευής. Η μελέτη ασχολείται με το πρόβλημα της ασφάλειας των μηχανοκίνητων οχημάτων. Παρουσιάζεται μια λεπτομερής πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση των μεταλλικών κυλινδρικών, ορθογωνικών και τετραγωνικών σωλήνων που υποβάλλονται σε πλευρική συμπίεση. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε μία μηχανή Instron. Ελήφθησαν οι καμπύλες φορτίου- μετατόπισης καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες (όπως όριο διαρροής και το μέτρο ελαστικότητας). Η επίδραση της πολυουρεθάνης στην πλευρική πλαστική παραμόρφωση των σωλήνων υπό ακτινικό στατικό φορτίο έχει επίσης διερευνηθεί. Η διαδικασία παραμόρφωσης των σωλήνων έχει μελετηθεί και προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA. Τα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα συγκρίνονται. Παρουσιάζεται ο βασικός μηχανισμός της παραμόρφωσής τους. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ο πυρήνας πολυουρεθάνης αυξάνει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των σωλήνων. Επίσης, στους κυλινδρικούς σωλήνες υπό πλευρική συμπίεση ο αφρός πολυουρεθάνης λειτουργεί ως καλύτερος απορροφητής ενέργειας σε σύγκριση με τους ορθογωνικούς και τετραγωνικούς σωλήνες.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στόχος της είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των απορροφητών ενέργειας οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο στην ασφάλεια ενός αμαξώματος. Πιο συγκεκριμένα, απορροφητές ενέργειας τοποθετούνται στο πλαίσιο (σασί), η συμπεριφορά του οποίου σχετίζεται με την ασφάλεια των επιβατών κατά τη σύγκρουση του οχήματος. Η ικανότητα μιας κατασκευής να προστατεύει το εσωτερικό της και η συμπεριφορά της σε περίπτωση κρούσης είναι γνωστή και ως Crashworthiness. Συνήθως ερευνάται κατά τον έλεγχο της ασφάλειας αεροσκαφών και οχημάτων.

Έτσι μελετάται η πλευρική κατάρρευση κυλινδρικών, ορθογωνικών καθώς και τετραγωνικών σωλήνων. Οι σωλήνες είναι μεταλλικοί και πιο συγκεκριμένα από αλουμίνιο (Al). Επίσης τα δοκίμια ενισχύθηκαν στο εσωτερικό τους με αφρό πολυουρεθάνης (PU foam). Έτσι διερευνήθηκε η επίδραση του πυρήνα αφρού στην πλαστική ενέργεια παραμόρφωσης καθώς και στον τρόπο κατάρρευσης.

Αρχικά διεξήχθησαν οι δοκιμές συμπίεσης στην πρέσα του εργαστηρίου για έξι (6) δοκίμια χωρίς την προσθήκη αφρού πολυουρεθάνης και στη έπειτα με αυτόν. Χρησιμοποιήθηκε επιπλέον ένας αφρός εμπορίου για δοκιμή σε ένα μόνο κυλινδρικό δοκίμιο. Στη συνέχεια συμπίεστηκαν δύο δοκίμια κατασκευασμένα από αφρό εξ' ολοκλήρου (χωρίς εξωτερικό κέλυφος-σωλήνα) για να ελεγχθούν οι ιδιότητές του. Έγινε επίσης δοκιμή ελεύθερης εκτόνωσης με χρήση του παρασκευασμένου αφρού. Φυσικά έγινε και δοκιμή εφελκυσμού για τη μελέτη του υλικού των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν. Τελικά οι σωλήνες που υπέστησαν πλευρική συμπίεση είναι δεκαέξι (16). Εδώ σημειώνεται πως η κοπή και η προετοιμασία των δοκιμών καθώς και οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο κτήριο Ξ του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Μετά το πειραματικό στάδιο, ακολούθησε προσομοίωση των συνθηκών των μηχανικών δοκιμών στο λογισμικό LS-DYNA της εταιρίας Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος κώδικας καθώς ενδείκνυται για μελέτη με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis, FEA).

Τέλος, έγινε σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν πως ο αφρός πολυουρεθάνης λειτουργεί ως ένας εξαιρετικός απορροφητής ενέργειας. Ακόμα, η απορρόφηση ενέργειας είναι πιο αισθητή στα κυλινδρικά δοκίμια από ότι στα τετραγωνικά ή ορθογωνικά.

Γεωργακοπούλου Διαμάντω  
Αθήνα, Οκτώβριος 2014

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και διευθυντή του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών κύριο Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την εν λόγω διπλωματική εργασία. Επίσης ευχαριστώ θερμά το μέλος ΕΔΙΠ Δρ. Μηχ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για τη βοήθειά του κατά το πειραματικό στάδιο, την εκμάθηση του κώδικα LS-DYNA και για την υπομονή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου. Τέλος, ευχαριστώ τον κύριο Κωνσταντίνο Κερασιώτη για τη βοήθεια και συμμετοχή του στην πειραματική διαδικασία.

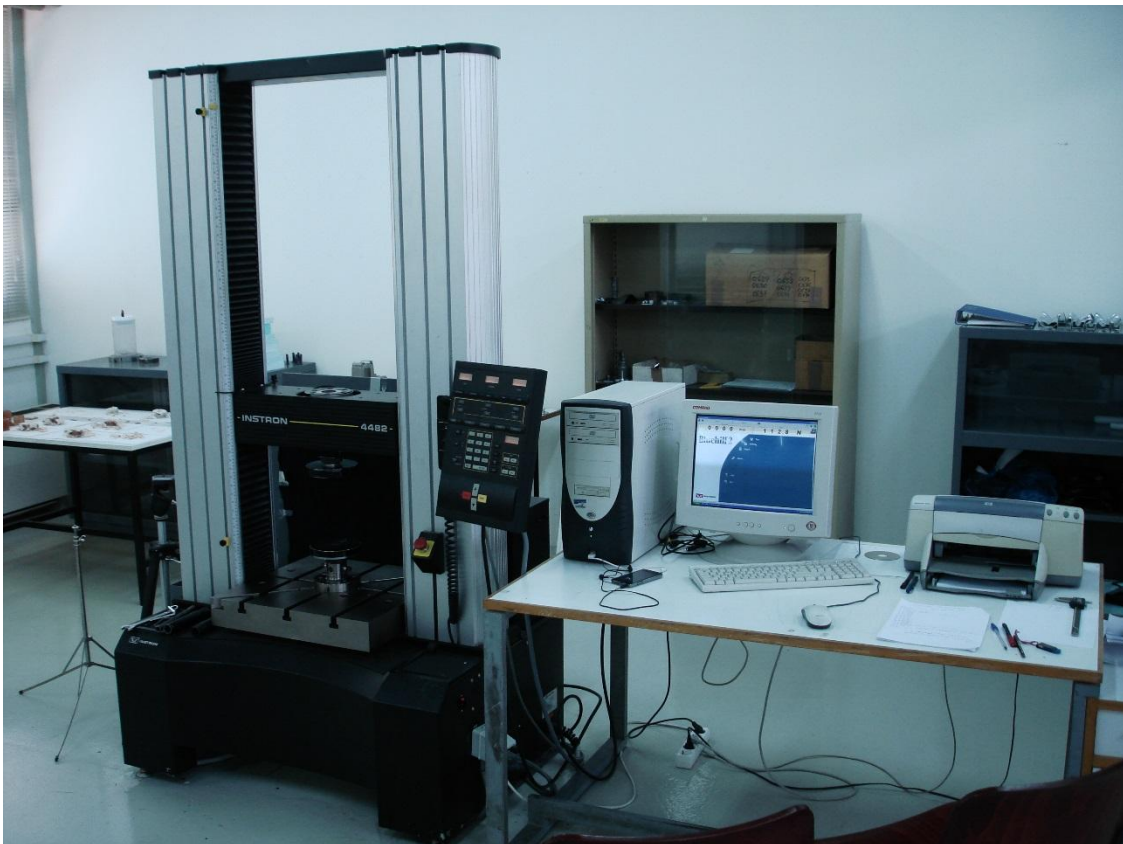
## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αρχικά, έγινε μια μελέτη για τα ατυχήματα οχημάτων και στις συνέπειές τους. Δίνονται μερικά στατιστικά στοιχεία και επισημαίνεται η αναγκαιότητα της μελέτης και εφαρμογής των απορροφητών ενέργειας. Σε αυτό το σημείο εισάγεται και η έννοια Crashworthiness, η ικανότητα δηλαδή μιας κατασκευής να προστατεύει το εσωτερικό της.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια θεωρητικά στοιχεία για τον πολυμερικό αφρό, όπως δομή, τρόπος εφαρμογής-χρήσης, ιδιότητες, τύποι, εφαρμογές στη βιομηχανία. [32]

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Αρχικά κατασκευάστηκαν τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε πλευρική συμπίεση (συμπεριλαμβανομένων των δοκιμίων κατασκευασμένων εξ' ολοκλήρου από αφρό, αυτών της ελεύθερης και περιορισμένης εκτόνωσης). Έγιναν οι δοκιμές στην πρέσα του εργαστηρίου, κατασκευασμένη από την εταιρία Instron (βλ. Εικόνα Α.1), κατά τη διάρκεια των οποίων λήφθηκαν φωτογραφίες για ταυτόχρονη οπτική μελέτη του φαινομένου της κατάρρευσης. Εκτός από το φωτογραφικό υλικό, λήφθηκε και το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης όπου παρουσιάζονται η μέγιστη τιμή του φορτίου που εφαρμόστηκε, εάν και σε ποιο μήκος ήρθαν σε επαφή οι δύο απέναντι πλευρές του δοκιμίου καθώς και η συνολική ενέργεια απορρόφησης. Από τη μορφή της εκάστοτε καμπύλης εξήχθησαν ποικίλα συμπεράσματα. Στη συνέχεια, τα αντίστοιχα δοκίμια (ίδιων διαστάσεων) ενισχύθηκαν στο εσωτερικό τους με αφρό πολυουρεθάνης και υποβλήθηκαν και αυτά σε πλευρική συμπίεση. Τα δεδομένα που πάρθηκαν είναι τα ίδια όπως και στην περίπτωση των δοκιμίων χωρίς αφρό για να μπορούν να είναι συγκρίσιμα. Σημειώνεται πως μελετήθηκαν δύο είδη αφρού (ένας του εμπορίου και ένας που παρασκευάστηκε στο εργαστήριο). Γίνεται σε αυτό το σημείο μία πρώτη παρατήρηση της επίδρασης του αφρού καθώς και των διαστάσεων των σωλήνων στην απορρόφηση ενέργειας.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο παρατίθενται τα αριθμητικά-θεωρητικά αποτελέσματα των μετρήσεων μέσω του κώδικα LS-DYNA που αναπτύχθηκε για τους σκοπούς της μελέτης και συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα. Ουσιαστικά αναλύεται θεωρητικά ο τρόπος κατάρρευσης. Μετά την ανάπτυξη του κώδικα, παρατηρούνται η ενέργεια απορρόφησης, το μήκος συμπίεσης, το τελικό ύψος δοκιμίου κ.ά. Σχολιάζονται οι διαφορές που προκύπτουν ανάμεσα σε θεωρητικές και πειραματικές τιμές καθώς και οι αιτίες εμφάνισής τους. Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και η γενική εικόνα των πειραμάτων και των προσομοιώσεων.



Εικόνα A.1: Μηχανή Instron

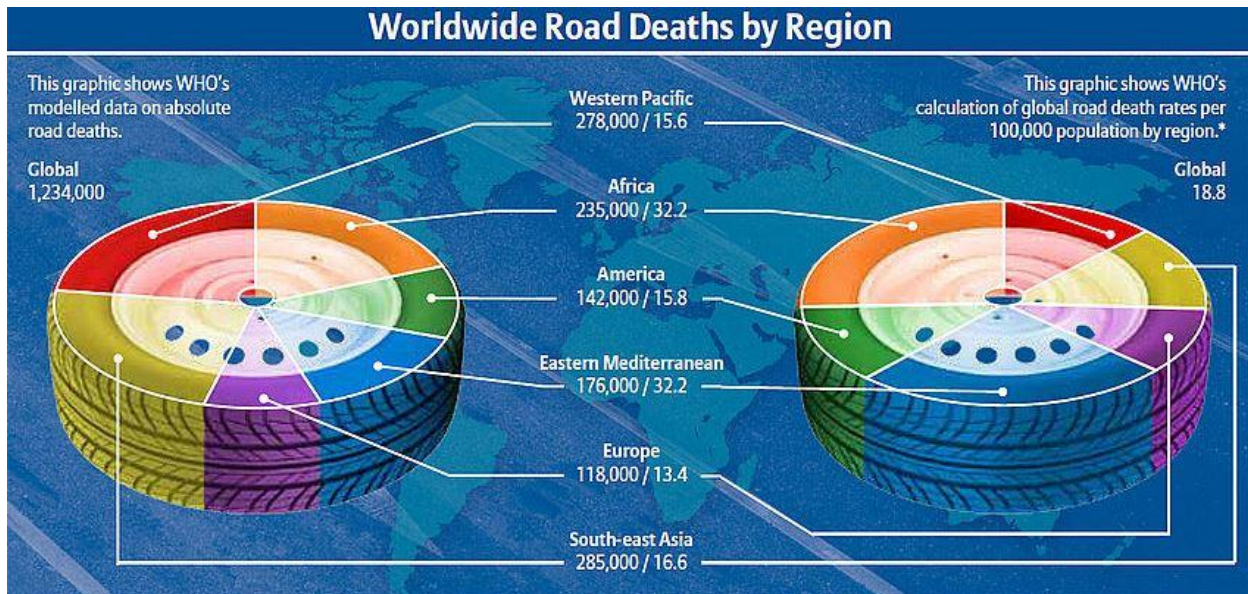
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προστασία των επιβατών κατά τη σύγκρουση ενός οχήματος έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σχετίζονται άμεσα με την ικανότητα του πλαισίου του οχήματος να προστατεύει το εσωτερικό του και τη συμπεριφορά του έναντι κρούσεων (Crashworthiness). Μία προσέγγιση είναι η μελέτη της συμπεριφοράς της κατασκευής ως προς τον τρόπο απορρόφησης ενέργειας. [1], [2]

### 1.1 Τροχαία δυστυχήματα-Παγκόσμια στατιστικά

- Σχεδόν 1.3 εκατομμύρια άνθρωποι πεθαίνουν παγκοσμίως κάθε χρόνο σε οδικές συγκρούσεις (κατά μέσο όρο 3287 θάνατοι ημερησίως)
- 20-50 εκατομμύρια άνθρωποι τραυματίζονται ή καθίστανται ανάπηροι.
- Τα τροχαία δυστυχήματα είναι η ένατη αιτία θανάτου (αντιπροσωπεύοντας το 2.2% του συνόλου των θανάτων)
- Προβλέπεται ότι το 2030 θα είναι η πέμπτη αιτία θανάτου.
- Είναι η πρώτη αιτία θανάτου στην ηλικιακή ομάδα των 15-29 ετών και η δεύτερη στις ηλικίες 5-14.
- Πάνω από το 90% των θανάτων που οφείλονται σε τροχαία δυστυχήματα συμβαίνουν σε μικρού και μεσαίου εισοδήματος χώρες, οι οποίες κατέχουν λιγότερο από το 50% των οχημάτων παγκοσμίως.[3], [4]

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (World Health Organisation, WHO) ο αριθμός θανάτων και τα ποσοστά ανά 100.000 κατοίκους ανά την υφήλιο παρουσιάζεται παρακάτω. [5]



Εικόνα 1.1 Αριθμός θανάτων παγκοσμίως εξ' αιτίας αυτοκινητιστικών συγκρούσεων.

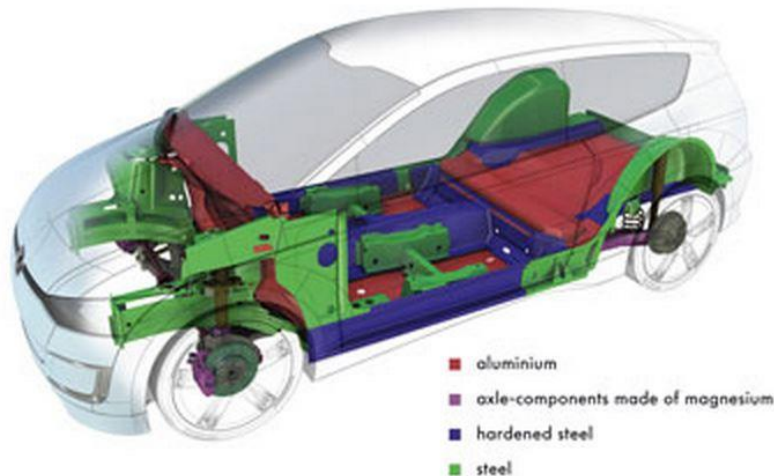
## 1.2 Αλλαγές στην αυτοκινητοβιομηχανία

Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη της τεχνολογίας παράγονται ολοένα και περισσότερα (καθώς και γρηγορότερα) αυτοκίνητα. Έτσι, οι βλάβες (σωματικές και υλικές) σε περίπτωση σύγκρουσης είναι μεγάλες.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως η μελέτη και βελτίωση στην κατασκευή των οχημάτων είναι μείζονος σημασίας. Σε αυτό το σημείο εισάγεται η εξής φιλοσοφία: Παλαιότερα και κατά την εμφάνιση της αυτοκινητοβιομηχανίας, στα αυτοκίνητα (και κυρίως το αμάξωμα) δεν συναντούσε κανείς σοβαρές καταστροφές. Η ενέργεια κατά την κρούση μεταφερόταν λοιπόν στην καμπίνα και τραυματίζονταν ή ακόμα και πέθαναν οι επιβάτες. Τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει μία τάση ενίσχυσης του αμαξώματος με σκοπό την καταστροφή του σε περίπτωση σύγκρουσης. (Εικόνα 1.2, [6], [7]) Έτσι οι κατασκευαστές προσανατολίζονται στον ανθρωποκεντρικό σχεδιασμό και η τάση έχει αλλάξει οριστικά. Σκοπός είναι η απορρόφηση της ενέργειας από το αμάξωμα ώστε να μην μεταφερθεί στην καμπίνα. Σημειώνεται πως ο χάλυβας ως υλικό κατασκευής του πλαισίου αντικαθίσταται ολοένα και συχνότερα από αλουμίνιο, ντουραλουμίνιο, μαγνήσιο, ίνες άνθρακα, κέβλαρ κτλ.[8] (Εικόνα 1.3, [9])



Εικόνα 1.2: Καταστροφή αμαξώματος παλαιότερα (πάνω), σήμερα (κάτω)



Εικόνα 1.3: Υλικά κατασκευής αμαξώματος οχήματος

### 1.3 Μηχανισμός πλευρικής κατάρρευσης σωλήνων

Οι μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας σταματούν ελεγχόμενα μια κινούμενη μάζα ανάλογα με το ποσό απορρόφησης της ενέργειας που προέρχεται από την παραγωγή πλαστικής παραμόρφωσης. Με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν και τα συστήματα πέδης και οι αποσβεστήρες κραδασμών. Η χρήση σωλήνων σε μηχανισμούς απορρόφησης ενέργειας αποτελεί αντικείμενο μελέτης τα τελευταία χρόνια. Η ανάλυση των μηχανισμών οδηγεί στην κατανόηση του τρόπου παραμόρφωσης των σωλήνων και ως εκ τούτου στην κατανόηση του τρόπου απορρόφησης ενέργειας. Για την εν λόγω ανάλυση γίνεται συνήθως χρήση σωλήνων κυλινδρικής και ορθογωνικής ή τετραγωνικής διατομής.

#### 1.3.1 Πλευρική κατάρρευση σωλήνων κυλινδρικής διατομής

Όταν ένας σωλήνας κυλινδρικής διατομής συμπιέζεται ακτινικά μεταξύ δύο επίπεδων, παράλληλων και άκαμπτων πλακών το φορτίο αυξάνεται μονοτονικά με τη μείωση της κατακόρυφης διαμέτρου του σωλήνα. Είναι πιθανή η πρόκληση δύο στρεβλώσεων, μία στην κορυφή και μία στο κάτω μέρος.

Η πλευρική συμπίεση ενός σωλήνα κυλινδρικής διατομής απεικονίζεται ως ένα πρόβλημα επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης η οποία παρουσιάζει διπλή συμμετρία της παραμόρφωσης. Έτσι μελετάται μόνο το άνω δεξιό τμήμα του σωλήνα και ονομάζεται τομέας, ο οποίος χωρίζεται σε τρεις ζώνες (I, II και III). Ορίζονται δώδεκα σημεία- κλειδιά ( $A_1, A_2, A_3, G_1, G_2, G_3, H_1, H_2, H_3, B_1, B_2, B_3$ ) και δύο ευθείες ( $A_1A_3$  και  $B_1B_3$ ). Τα σημεία  $A_2, G_2, H_2$  και  $B_2$  βρίσκονται στο κέντρο των ευθειών  $A_1A_3, G_1G_3$ , και  $B_1B_3$  αντίστοιχα. Οι ευθείες  $H_2H_3$  και  $G_1G_3$  βρίσκονται υπό κλίση  $30^\circ$  και  $60^\circ$  αντίστοιχα σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα (Εικόνα 1.4).



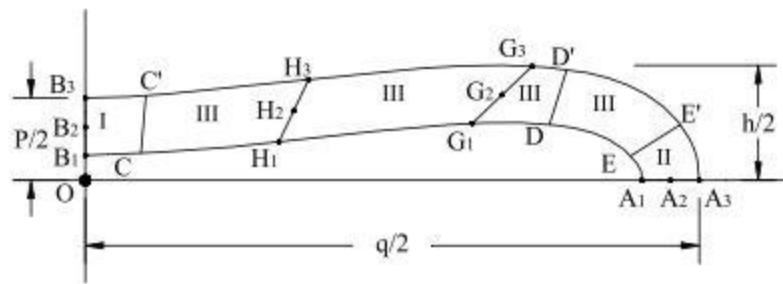
Ισοδύναμη παραμόρφωση στα σημεία-κλειδιά:

Η ισοδύναμη παραμόρφωση στα σημεία  $A_1$ ,  $A_2$ , και  $A_3$  αυξάνεται κατά τη διαδικασία της συμπίεσης. Συγκρίνοντας τις τρεις τιμές μεταξύ τους μπορεί κανείς να δει ότι αυτή του σημείου  $A_1$  είναι η μεγαλύτερη, του  $A_2$  έχει μια μέση τιμή και του  $A_3$  είναι μικρότερη. Αυτό υποδεικνύει πως ο σωλήνας υπόκειται σε συμπίεση και κάμψη. Η αύξηση των τιμών της ισοδύναμης παραμόρφωσης εμφανίζεται λόγω ύπαρξης αυξανόμενης αξονικής δύναμης και κάμψης στην ευθεία  $A_1A_3$ .

Στα σημεία  $G_1$ ,  $G_2$  και  $G_3$  η ισοδύναμη παραμόρφωση παραμένει σχεδόν ίση με το μηδέν μέχρι ένα στάδιο της συμπίεσης και έπειτα αυξάνει απότομα. Αυτή η διακύμανση δείχνει πως η περιοχή γύρω από την ευθεία  $G_1G_3$  μένει απαραμόρφωτη πριν από αυτό το στάδιο της συμπίεσης και στη συνέχεια η παραμόρφωση αυξάνει στην γύρω περιοχή. Η θέση της ευθείας  $G_1G_3$  σε αυτό το στάδιο παραμένει ακριβώς αριστερά από το σημείο επαφής σωλήνα-πλακών.

Η ισοδύναμη παραμόρφωση στα σημεία  $H_1$  και  $H_3$  παραμένει αρχικά σχεδόν ίση με το μηδέν μέχρι ένα στάδιο της συμπίεσης. Έπειτα ξαφνικά αρχίζει να αυξάνει. Με περαιτέρω συμπίεση η ισοδύναμη παραμόρφωση των δύο σημείων μειώνεται ξανά και τελικά παίρνει πάλι σχεδόν μηδενική τιμή. Η ισοδύναμη παραμόρφωση στο σημείο  $H_2$  παραμένει μηδέν καθ' όλη τη διάρκεια της συμπίεσης.

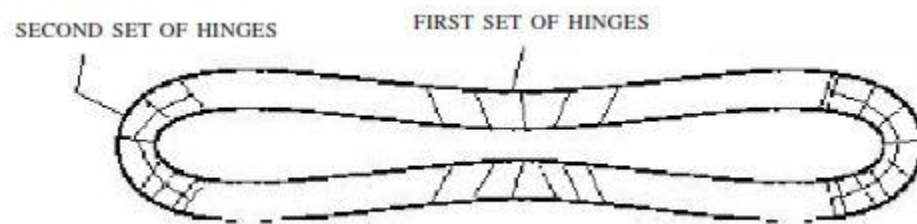
Με την εφαρμογή πλευρικής συμπίεσης η ισοδύναμη παραμόρφωση στα σημεία  $B_1$  και  $B_3$  αρχικά αυξάνεται ομοιόμορφα και στη συνέχεια μειώνεται πλησιάζοντας το μηδέν. Η ισοδύναμη παραμόρφωση στο σημείο  $B_1$  είναι σχετικά με αυτή του σημείου  $B_3$  μεγαλύτερη. Αυτό ισχύει γιατί το σημείο  $B_3$  είναι πιο κοντά στις πλάκες.



Εικόνα 1.4: Διατομή σωλήνα κυλινδρικής διατομής μετά την συμπίεση (ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος)

Ανάπτυξη πλαστικών αρμών:

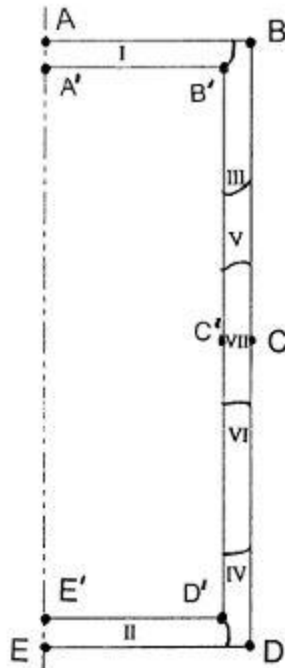
Είναι σαφές πως οι πλαστικοί αρμοί σχηματίζονται στις ζώνες I και II (περιοχή γύρω από τον κατακόρυφο οριζόντιο άξονα συμμετρίας αντίστοιχα). Οι ευθείες  $B_1B_3$  και  $A_1A_3$  κινούνται πάνω στους άξονες  $y$  και  $x$  αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της πλευρικής συμπίεσης. Άρα οι συντεταγμένες των σημείων αυτών αλλάζουν συνεχώς. Επίσης σε αυτά τα σημεία δεν εμφανίζεται καθόλου διατμητική τάση. Μετά από ένα σημείο της συμπίεσης η ζώνη I μπαίνει στην πλαστική περιοχή και ακολουθεί η ζώνη II. Ο κυλινδρικός σωλήνας γίνεται σταδιακά επίπεδος λόγω του σχηματισμού τεσσάρων πλαστικών αρμών (στους άξονες συμμετρίας). [19], [20], [21], [25], [27], [31]



Εικόνα 1.5: Εμφάνιση πλαστικών αρμών σε σωλήνα κυλινδρικής διατομής

### 1.3.2 Πλευρική κατάρρευση σωλήνων ορθογωνικής ή τετραγωνικής διατομής

Για τη μελέτη σωλήνων ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής είναι βολικό να χωριστεί η διαδικασία παραμόρφωσης σε τρία στάδια: αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό. Επίσης θα μελετηθεί μόνο το δεξί μισό μέρος των σωλήνων αφού είναι συμμετρικοί ως προς το διαμήκη άξονά τους. Έτσι χωρίζουμε ένα σωλήνα στη μέση (ζώνες I έως VII) και ορίζουμε τα σημεία A,B,C,D,E και τα A', B',C',D',E' που βρίσκονται στην εξωτερική και εσωτερική πλευρά του σωλήνα αντίστοιχα όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6: Διατομή σωλήνα ορθογωνικής διατομής πριν την συμπίεση (ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος)

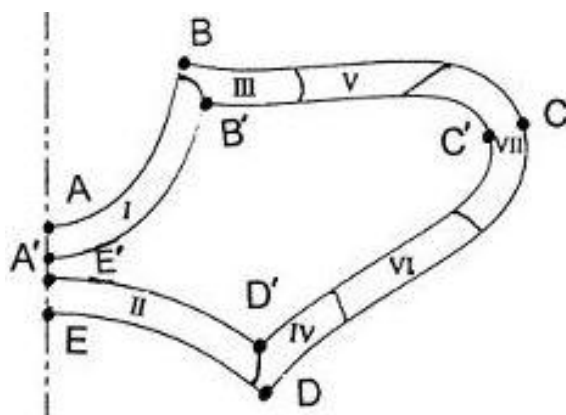
Στην αρχή της διαδικασίας οι πάνω και κάτω επιφάνειες του σωλήνα (AB και DE) βρίσκονται σε επαφή με την άνω και κάτω πλάκα αντίστοιχα. Σε αυτή τη φάση, μπορούμε να θεωρήσουμε τις πάνω και κάτω πλευρές ως δοκούς που δέχονται κατανομημένο φορτίο καθ' όλο το μήκος τους. Οι δοκοί φέρουν δύο στηρίξεις στα άκρα τους και (τις κατακόρυφες πλευρές) και η συνεχιζόμενη συμπίεση προκαλεί κάμψη των φορτισμένων δοκών αλλά και λυγισμό των κατακόρυφων πλευρών. Τα κεντρικά σημεία των δύο δοκών χάνουν αρχικά επαφή με τις πλάκες. Με την περαιτέρω συμπίεση η περιοχή της επαφής σταδιακά μειώνεται μέχρις ότου να περιοριστεί σε μια μικρή περιοχή μεταξύ των ακραίων σημείων B και D. Καθώς η παραμόρφωση εξελίσσεται, η τριβή μεταξύ της διεπιφάνειας σωλήνα-πλακών αντιστέκεται στην κάμψη των οριζόντιων πλευρών. Οι λεγόμενοι πλαστικοί αρμοί σχηματίζονται στα σημεία τομής των κάθετων και οριζόντιων πλευρών B και D. Στη συνέχεια αρχίζει να εμφανίζεται το φαινόμενο του λυγισμού στις κατακόρυφες πλευρές όπου και αναπτύσσεται ένα δεύτερο σύνολο πλαστικών αρμών. Δεδομένου ότι η κάμψη στις άνω και κάτω πλευρές του σωλήνα είναι διαφορετική λόγω του άνισου πάχους τους, η θέση των πλαστικών αρμών δεν είναι στο μέσο του ύψους του. Έτσι η απόσταση του αρμού από το παχύτερο οριζόντιο τοίχωμα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το λεπτότερο και αντιστρόφως. Στο τέλος της αρχικής φάσης της διαδικασίας συμπίεσης, οι πλαστικοί αρμοί έχουν αναπτυχθεί πλήρως στα σημεία τομής των κάθετων και οριζόντιων πλευρών B και D. Ωστόσο ο σχηματισμός των πλαστικών αρμών στη ζώνη VII βρίσκεται ακόμα

σε πρώιμο στάδιο. Το φορτίο στις πλάκες παίρνει μια μέγιστη τιμή λίγο πριν την έναρξη του λυγισμού στη ζώνη VII.

Κατά το ενδιάμεσο στάδιο της συμπίεσης, η μεταφορά του φορτίου από τις πλάκες στο σωλήνα γίνεται μέσα σε μικρές περιοχές γύρω από τα σημεία B και D. Περαιτέρω παραμόρφωση εντοπίζεται κυρίως μέσα στην ζώνη VII. Ο σωλήνας γύρω από την ζώνη VII κινείται συνεχώς προς τα έξω, με αποτέλεσμα ο λεγόμενος μοχλοβραχίονας (δηλαδή η απόσταση μεταξύ του σημείου δράσης του φορτίου και του κέντρου της ζώνης VII) να αυξάνει συνεχώς. Ως εκ τούτου, το φορτίο της πλάκας τείνει να μειωθεί και συνεπώς η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης παρουσιάζει αρνητική κλίση. Στο τέλος του ενδιάμεσου σταδίου, ο λυγισμός των κατακόρυφων προχωρά τόσο πολύ ώστε το τμήμα BC γίνεται σχεδόν επίπεδο και στιγμιαία έρχεται σε επαφή με τις πλάκες. [26], [31]

Ακριβώς μετά, η επαφή σωλήνα-πλάκας μετατοπίζεται απότομα από το σημείο B προς το σημείο C (κοντά στον αρμό στο σημείο C). Τώρα το φορτίο των πλακών αρχίζει να αυξάνεται σχετικά απότομα μέχρι να φτάσει μια δεύτερη κορυφή. Ωστόσο η δεύτερη αυτή κορυφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης ποτέ δεν φτάνει το ύψος της πρώτης. Ο αρμός στο σημείο C προσπαθεί να κυλήσει προς τη ζώνη VI. Περαιτέρω παραμόρφωση εντοπίζεται στις περιοχές γύρω από το σημείο C. Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται και πάλι και η παραμόρφωση συνεχίζεται με τη μείωση του φορτίου μέχρι οι άνω και κάτω πλευρές να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους.

Μετά τη διαδικασία συμπίεσης ο σωλήνας έχει την παρακάτω μορφή. [22], [23]



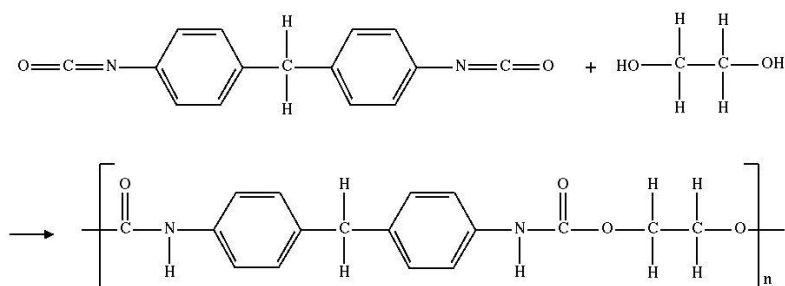
Εικόνα 1.7: Διατομή σωλήνα ορθογωνικής διατομής μετά την συμπίεση (ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΣ ΑΦΡΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τον αφρό πολυουρεθάνης που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω έγινε χρήση δύο ειδών αφρού, ένας έτοιμος- εμπορίου και ένας που παρασκευάστηκε στο εργαστήριο. Πριν απ' όλα όμως αξίζει να γίνει μια αναφορά στην πολυουρεθάνη, της εφαρμογές της και έπειτα στα τεχνικά χαρακτηριστικά των αφρών.

### 2.1 Πολυουρεθάνη

Η πολυουρεθάνη (η συντομογραφία κατά IUPAC είναι PUR, αλλά συχνά συναντάται και ως PU) ανακαλύφθηκε το 1937 στη Γερμανία και έχει ευρύτατη εφαρμογή τόσο στον κατασκευαστικό τομέα όσο και στη βιομηχανία. Ονομάζεται οποιοδήποτε πολυμερές αποτελείται από μια αλυσίδα οργανικών ομάδων. Οι ομάδες αυτές ενώνονται μεταξύ τους με δεσμούς ουρεθάνης\* όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 2.1: Σύνθεση πολυουρεθάνης

\* - NH-(C=O)-O-

Η πολυουρεθάνη ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των πλαστικών και τα πολυμερή της σχηματίζονται μέσω σταδιακού πολυμερισμού\*. Αποτελείται από δύο στοιχεία: την πολυόλη και το ισοκυανικό και παράγεται μέσω ειδικού μηχανήματος υψηλής πίεσης. Αντέχει σε θερμοκρασίες από  $-150^{\circ}\text{C}$  έως  $+120^{\circ}\text{C}$ , είναι αδιάλυτη στους οργανικούς διαλύτες, αντέχει στο νερό, στα έλαια, στα αραιά οξέα και στις βάσεις. Σε περίπτωση μακροχρόνιας έκθεσής της στον ήλιο πρέπει να προστατεύεται με ελαστική ακρυλική ή πολυουθερανική βαφή διότι διαφορετικά η επιφάνειά της πολυμερίζεται και καταστρέφεται. Έχει σήμερα αμέτρητες εφαρμογές καθώς είναι από τα πιο σημαντικά μέλη της οικογένειας των πλαστικών. [1], [10], [11], [12],[24]

\*Σταδιακός πολυμερισμός χαρακτηρίζεται η αντίδραση όπου μπορούν να ενωθούν οποιαδήποτε μονομερή βρίσκονται παρόντα στο μίγμα της αντίδρασης ανεξάρτητα από το μέγεθός τους. Ένα μονομερές αντιδρά με άλλο μονομερές και οι αντιδράσεις αυτές προχωρούν κατά στάδια. [13]

## 2.2 Εφαρμογές

Τα προϊόντα πολυουρεθάνης έχουν ποικίλες εφαρμογές. Πάνω από τα τρία τέταρτα της παγκόσμιας κατανάλωσης των προϊόντων αυτών έχουν αφρώδη μορφή. Στις περιπτώσεις των ελαστικών και των άκαμπτων τύπων ο αφρός βρίσκεται πίσω από άλλα υλικά. Για παράδειγμα, ελαστικοί αφροί βρίσκονται πίσω από υφάσματα ταπετσαρίας σε έπιπλα, ενώ άκαμπτοι αφροί βρίσκονται μέσα στα μεταλλικά και πλαστικά τοιχώματα των περισσότερων ψυγείων και καταψυκτών και πίσω από χάρτινες, μεταλλικές ή άλλες επιφάνειες στην περίπτωση των θερμομονωτικών πάνελ που χρησιμοποιούνται στον τομέα της οικοδομής. Οι πολυουρεθάνες χρησιμοποιούνται ευρέως και στην κατασκευή αυτοκινήτων, όπου προσφέρουν οφέλη από την άποψη της άνεσης, της προστασίας και της διατήρησης της ενέργειας. Σε ποσοστό μεγαλύτερο από 70% χρησιμοποιείται η πολυουρεθάνη στον κατασκευαστικό τομέα, στις μεταφορές αλλά και στην επίπλωση. Κυρίαρχοι λόγοι για την ευρεία χρήση του πολυμερούς αφρού είναι το χαμηλό βάρος, η χρήση ως μονωτικό υλικό, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και κραδασμών. Οι κύριες εφαρμογές της πολυουρεθάνης παγκοσμίως είναι: επίπλωση, αυτοκινητοβιομηχανία, ψυγεία, μόνωση κτιρίων, στεγανωτικά. [14], [15], [16], [17]



Μαξιλάρι



Ψυγεία



Υπόδηση



Επίπλωση



Γάντια



Προστατευτική μεμβράνη



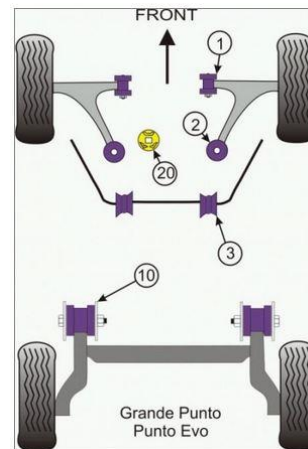
Στεγανωτικά



Σφυριά



Αυτοκινητοβιομηχανία





Μόνωση κτιρίων

Εικόνα 2.2: Εφαρμογές πολυουρεθάνης

### 2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Η μηχανική αντοχή του αφρού εξαρτάται από την πυκνότητά του. Έτσι για συστήματα απορρόφησης ενέργειας χρησιμοποιούνται αφροί υψηλής πυκνότητας, ενώ αντίθετα χαμηλής πυκνότητας αφροί χρησιμοποιούνται για μόνωση (κυρίως θερμική). [33]

Οι περισσότεροι αφροί σχηματίζονται ύστερα από διαδικασία που προκαλεί ανάπτυξη φυσαλίδων στο πολυμερές υλικό (nucleation and growth). Η δομή του υλικού μεταβάλλεται καθώς αναπτύσσονται φυσαλίδες. Αρχικά, γίνεται πλήρωση μιας μήτρας με αφρό όπου παρατηρείται μικρή μείωση της πυκνότητας. Ο αφρός βρίσκεται στην υγρή φάση. Όταν πληρωθεί όλος ο χώρος της μήτρας και αναπτύσσονται φυσαλίδες, ο αφρός έχει αποκτήσει την ελάχιστη δυνατή πυκνότητα και περνά σταδιακά στη στερεή φάση. Η ανάπτυξη των φυσαλίδων προκαλεί παραμόρφωση των κυψελίδων (cells), οι οποίες αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Με την περαιτέρω διόγκωση, θραύονται τα τοιχώματα των κυψελίδων και έχουμε δημιουργία αφρού ανοιχτών κυψελίδων. Στην πραγματικότητα ο αφρός αποτελείται από κυψελίδες διαφορετικού μεγέθους και συνήθως αναφερόμαστε σε ένα μέσο όρο αυτών. [28]

Ανοιχτές κυψελίδες: Ο αέρας διέρχεται ελεύθερα ανάμεσα στις ανοιχτές κυψελίδες του πολυμερούς. Όπως είναι φυσικό σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε μεγαλύτερη απορροφητικότητα νερού, υγρασίας καθώς και ήχου, αλλά χειρότερη απόδοση σε θερμότητα ή ηλεκτρισμό. [18]



Κλειστές κυψελίδες: Οι κυψελίδες σε αυτή την περίπτωση είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους με επιφάνειες και παρουσιάζουν αντίθετη συμπεριφορά από τις ανοιχτές. Ωστόσο μερικές φορές μπορούν να χωριστούν ακόμα και να καταστραφούν. [18]

Ένας ισοτροπικός αφρός μπορεί να περιγραφεί από δύο χαρακτηριστικά μεγέθη. Αυτά μπορεί να είναι το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , το μέτρο διάτμησης  $G$ , το μέτρο διόγκωσης  $K$  ή ο λόγος Poisson. [29] Αφροί που δεν είναι ισοτροπικοί χρειάζονται για να περιγραφούν περισσότερα μεγέθη. Στην περίπτωση μας, παρ' όλο που ο αφρός δεν είναι απόλυτα ισοτροπικός θα τον θεωρήσουμε.

### 2.3.1 Αφρός εμπορίου

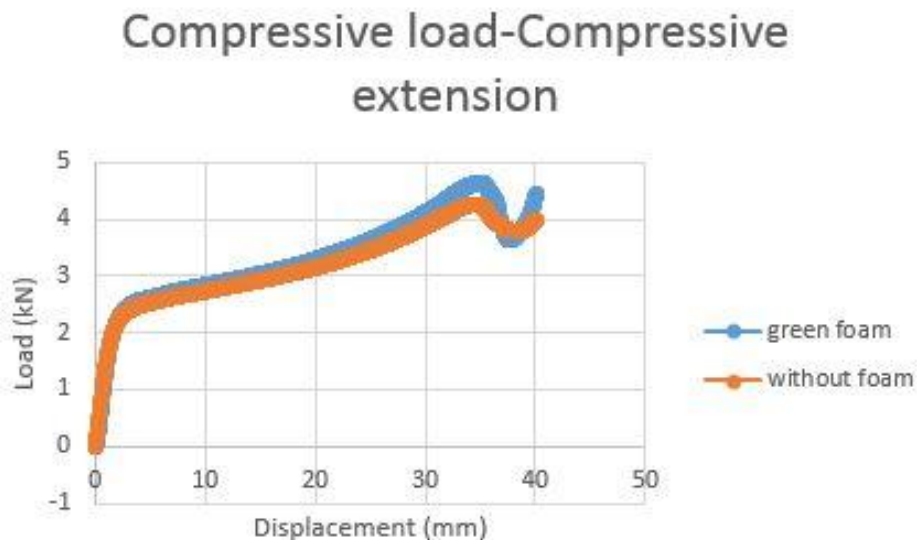
Ο πρώτος αφρός (πράσινος) που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων αγοράστηκε από το εμπόριο. Επειδή ο αφρός ήταν ήδη έτοιμος δεν έχε νόημα η δοκιμή ελεύθερης και περιορισμένης εκτόνωσης (η εκτόνωση του αφρού είναι έτσι και αλλιώς ελεύθερη). Τον εν λόγω αφρό κατασκευάζει η εταιρία ZWALUW και η συσκευασία του φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3: Αφρός πολυουρεθάνης-εμπορίου

Για να ελεγχθεί αν απορροφάται περισσότερη ενέργεια (και κατά πόσο) μετά την προσθήκη του αφρού συγκρίνονται οι δύο καμπύλες φορτίου- μετατόπισης (για το ίδιο κυλινδρικό δοκίμιο διαστάσεων  $\phi 50 \times 2 \times 60$ ). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί το εμβადόν που

περικλείεται από τις δύο καμπύλες (πορτοκαλί και μπλε) είναι σχεδόν το ίδιο. Αυτό σημαίνει πως η ενέργεια που απορροφάται είναι και στις δύο περιπτώσεις η ίδια. Τελικά, αποφασίστηκε να μη συνεχιστούν τα πειράματα με αυτό τον αφρό, αλλά να παρασκευαστεί ένας νέος στο εργαστήριο. Είναι προφανές πως αυτός ο αφρός δεν είναι κατάλληλος για απορρόφηση ενέργειας. Είναι πιο χρήσιμος σε περιπτώσεις θερμικής ή ηχητικής μόνωσης.



Διάγραμμα 2.1: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων  $\phi 50 \times 2 \times 60$  με και χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού εμπορίου

### 2.3.2 Παρασκευασμένος αφρός

Στη συνέχεια παρασκευάστηκε ένας διογκούμενος αφρός πολυουρεθάνης με συστατικά από την εταιρία Bayer. Οι εμπορικές ονομασίες των επιμέρους συστατικών του αφρού είναι για την πολυόλη BAYTHERM-BOF, ενώ για το ισοκυανικό άλας DESMODUR 44 V 20 L.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται πίνακες με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρασκευασμένου αφρού καθώς και με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητές του. [30]

ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΜΙΞΗΣ	1:1	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	24 ± 2 °C	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΟΡΜΑΣ	40 ± 2 °C	
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ (22 °C)	Χρόνος κρεμοποίησης	43 ± 4"
	Χρόνος πήξεως	105 ± 5"
	Χρόνος πλήρους λειτουργικότητας	142 ± 10"
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ	170 ± 10 kg/m <sup>3</sup>	
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΦΡΟΥ	400 ± 20 kg/m <sup>3</sup>	
ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	Σε σκιερό δωμάτιο στους 20 ± 5 °C για τουλάχιστον 6 μήνες	
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	Παραγωγή τεχνικών μερών και μερών απομίμησης ξύλου	

Πίνακας 2.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΦΡΟΥ	DIN 53420	400 kg/m <sup>3</sup>
ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ	DIN 53464	0,5 %
ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ 10 % ΣΥΜΠΙΕΣΗ	DIN 53421	1,5 MPa
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (24 °C)	DIN 18164	0,040 W/mK
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	DIN 53431	100×10 <sup>-6</sup> /K
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΗ ΦΩΤΙΑ	DIN 4102	B3

Πίνακας 2.3: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες

## 2.4 Διαδικασία παρασκευής πολυμερικού αφρού

Ο αφρός με τον οποίο έγινε πλήρωση των δοκιμών παρασκευάστηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής και φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:

- Δοχείο πολυόλης
- Δοχείο ισοκυανικού
- Πλαστικά ποτήρια γενικής χρήσης
- Μονωτική ταινία
- Κοπίδι
- Πριόνι

- Ζυγαριά ακριβείας
- Ελάσματα αλουμινίου
- Μέγγενη
- Λίμα



Δοχείο πολυόλης και ισοκυανικού



Πλαστικά ποτήρια γενικής χρήσης



Μονωτική ταινία, Κοπίδι, Πριόνι



Ζυγαριά ακριβείας



Ελάσματα αλουμινίου



Λίμα



Μέγγενη

## Εικόνα 2.4 Εξοπλισμός

Αρχικά υπολογίστηκε η ποσότητα των δύο συστατικών που απαιτούνται για την πλήρωση του κάθε δοκιμίου. Η μάζα αυτή υπολογίστηκε ως το γινόμενο της πυκνότητας των συστατικών (που αναγράφεται στις συσκευασίες και ισούται με  $250\text{kg/m}^3$ ) και του εσωτερικού όγκου των δοκιμίων (που υπολογίστηκε με δεδομένες τις διαστάσεις τους). Έτσι για το κάθε δοκίμιο χρειαστήκαμε μάζα πολυόλης και ισοκυανικού που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

α/α	Διαστάσεις δοκιμίου	$V_{in}$ ( $\text{mm}^3$ )	$m$ (gr)
1	$\phi 50 \times 2 \times 60$	99714.15	24.93
2	50x30x2-edgewise	71760	17.94
3	50x30x2-flatwise	71760	17.94
4	50x50x2	126960	31.74
5	40x40x2	77760	19.44
6	30x30x2	40560	10.14

Πίνακας 2.4: Απαιτούμενες μάζες συστατικών

Στη συνέχεια τοποθετήσαμε μονωτική ταινία στη μία άκρη του δοκιμίου καθώς και πάνω στα δύο ελάσματα αλουμινίου.

Έπειτα τοποθετήσαμε τις απαιτούμενες ποσότητες (που μετρήθηκαν στη ζυγαριά ακριβείας) των επιμέρους συστατικών σε δύο ξεχωριστά πλαστικά ποτήρια. Με τη βοήθεια των μικρότερων ελασμάτων αλουμινίου έγινε σταδιακά έγχυση της πολυόλης μέσα στο ισοκυανικό με ταυτόχρονο ανακάτεμα. Αφού έγιναν τα δύο συστατικά ένα μίγμα έγινε έγχυση στο εσωτερικό του δοκιμίου και αμέσως τοποθετήθηκαν εκατέρωθέν του τα ελάσματα αλουμινίου. Το δοκίμιο μαζί με τα ελάσματα τοποθετήθηκαν στη μέγγενη ώστε να παραμείνει ολόκληρη η ποσότητα

των συστατικών στο δοκίμιο και να συγκρατηθεί η απότομη και συνεχόμενη διόγκωση του αφρού. Το δοκίμιο παρέμεινε για περίπου 10 λεπτά στη μέγγενη για να περάσει ο αφρός από την υγρή στη στερεή φάση. Τέλος, απομακρύνθηκε και η ταινία από το κάτω μέρος του. Με αυτή τη διαδικασία πληρώθηκαν όλα τα δοκίμια με αφρό, με εξαίρεση αυτό της ελεύθερης εκτόνωσης όπου το δοκίμιο δεν τοποθετήθηκε στη μέγγενη, για να εκτονωθεί ελεύθερα. Όπως είναι λογικό αρκετή ποσότητα αφρού ξεχείλισε και αργότερα απομακρύνθηκε με το κοπίδι. Για τα δοκίμια του σκέτου αφρού, τοποθετήθηκαν στη μέγγενη οι σωλήνες μαζί με τον αφρό στο εσωτερικό τους και με τη λίμα απομακρύνθηκε το αλουμίνιο. Επίσης για το δοκίμιο που πληρώθηκε με τον αφρό του εμπορίου έπρεπε να περιμένουμε αρκετές ώρες για να στεγνώσει σε αντίθεση με αυτά του παρασκευασμένου αφρού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το πειραματικό μέρος της εργασίας το οποίο εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

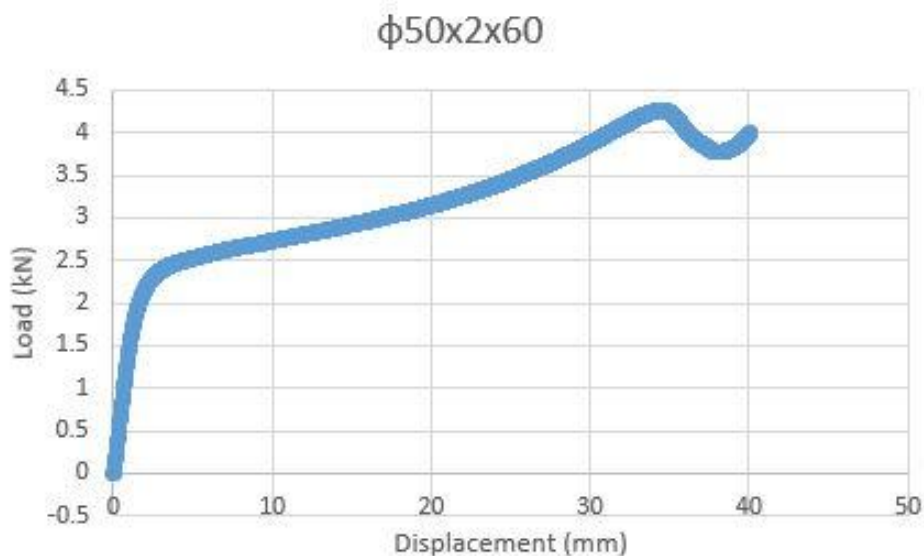
Επιλέχθηκαν 6 δοκίμια διαφορετικών διαστάσεων (αλλά με ίδιο ύψος ίσο με 60mm και πάχος τοιχώματος 2mm) για να μελετηθούν:

1. Κυλινδρικό διαμέτρου  $\phi 50\text{mm}$
2. Τετραγωνικά  $50\text{mm} \times 30\text{mm}$  (καταπόνηση σε δύο διευθύνσεις flatwise και edgewise)
3. Τετραγωνικά  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ,  $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ ,  $30\text{mm} \times 30\text{mm}$

Αρχικά καταπονήθηκαν τα δοκίμια σε πλευρική συμπίεση χωρίς την προσθήκη αφρού πολυουρεθάνης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης καθώς και παρατηρήσεις που αφορούν στον τρόπο κατάρρευσης. Επίσης το συνολικό μήκος συμπίεσης είναι το ύψος του κάθε δοκιμίου μείον 10mm. Έπειτα έγινε πλευρική κατάρρευση ενός κυλινδρικού δοκιμίου με την προσθήκη αφρού εμπορίου. Στη συνέχεια παρασκευάστηκε αφρός στο εργαστήριο με τον οποίο πληρώθηκαν τα δοκίμια και τέλος έγινε μια δοκιμή σε δοκίμιο κατασκευασμένο εξ' ολοκλήρου από αφρό για να μπορέσουμε να εξάγουμε τις ιδιότητές του.

### 3.1 Σωλήνες χωρίς την προσθήκη αφρού

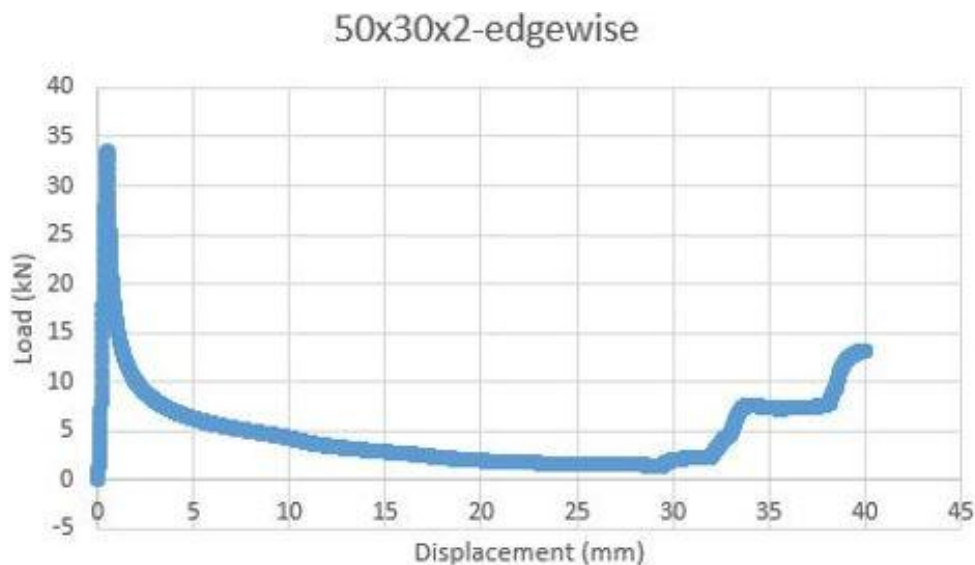
#### 3.1.1 Σωλήνας διαστάσεων $\phi 50 \times 2 \times 60$



Διάγραμμα 3.1: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων  $\phi 50 \times 2 \times 60$  χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού

Παρατηρούμε ότι όταν μειώθηκε η διατομή που καταπονείται τότε μειώθηκε και το φορτίο. Όσο λιγότερο διαθέσιμο υλικό υπάρχει τόσο μικρότερη είναι η περίμετρος του δοκιμίου. Έτσι το υλικό δείχνει να είναι λιγότερο όλκιμο, καταπονείται σε κάμψη και η εξωτερική ίνα εφελκύεται. Λόγω εφελκυσμού ρηγματώνεται στα πλάγια και αστοχεί.

### 3.1.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise

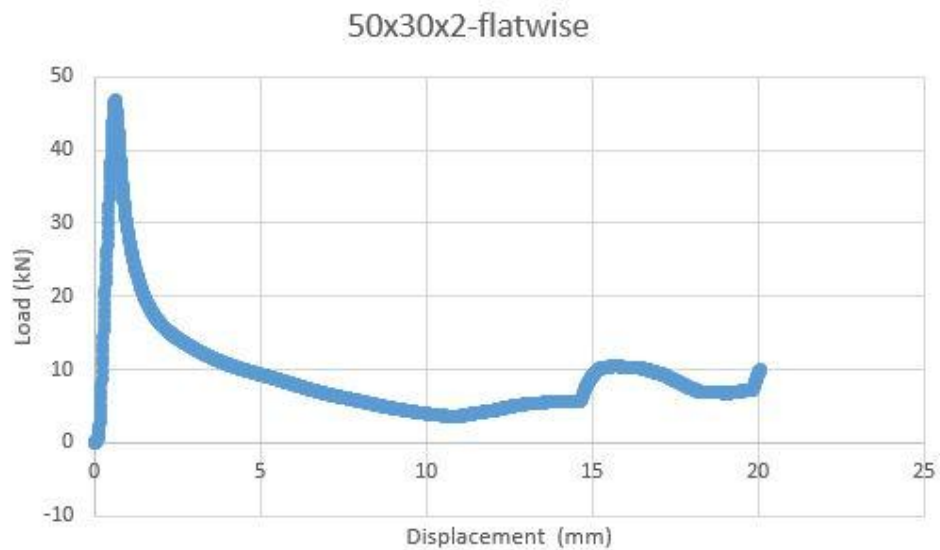


Διάγραμμα 3.2: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-edgewise χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού

Περίπου στα 29mm έχουμε την πρώτη επαφή των τοιχωμάτων του σωλήνα. Στα 33mm σκίζεται στα πλάγια ο σωλήνας και γι' αυτό παρατηρούμε μια αρκετά έντονη αλλαγή της κλίσης του φορτίου στο διάγραμμα. Η πλήρης επαφή των δύο απέναντι (άνω και κάτω) καμπυλωμένων πλέον εδρών του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε στα 38mm. Έχουμε δηλαδή αύξηση του φορτίου λόγω περαιτέρω επαφής των τμημάτων του δοκιμίου.



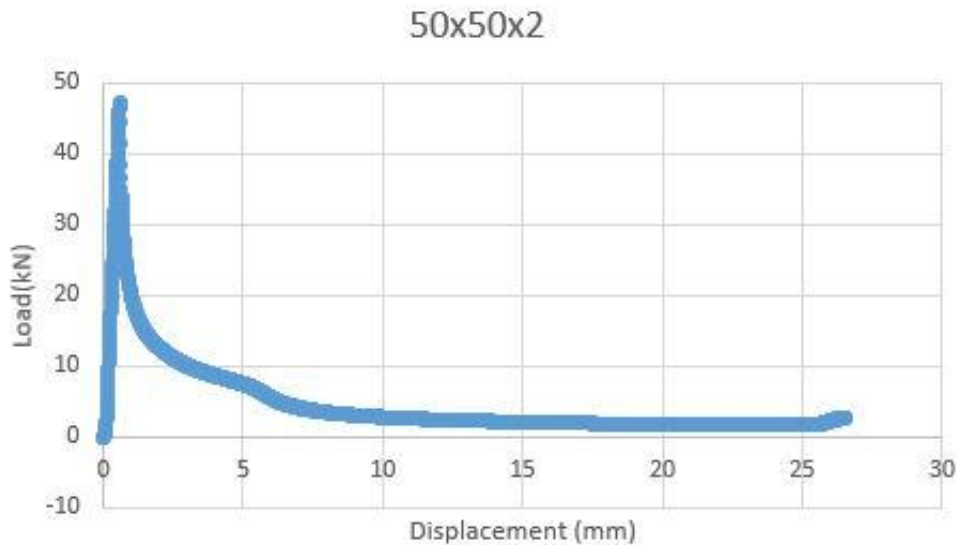
### 3.1.3 Σωλήνας διαστάσεων 50X30x2-flatwise



Διάγραμμα 3.3: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-flatwise χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού

Το τελικό μετρούμενο ύψος του δοκιμίου είναι 10,7mm που έχει απόκλιση μόλις 7% από τη θεωρητική τιμή του. Μετά τα 11mm περίπου αρχίζει η επαφή των εσωτερικών τοιχωμάτων του σωλήνα και μετά τα 15mm έχουμε πλήρη επαφή των δύο απέναντι τμημάτων. Γι' αυτό αλλάζει και η κλίση του φορτίου. Στα 18mm όμως έχουμε θραύση των τοιχωμάτων και γι' αυτό από εκείνο το σημείο και ύστερα μειώθηκε το φορτίο.

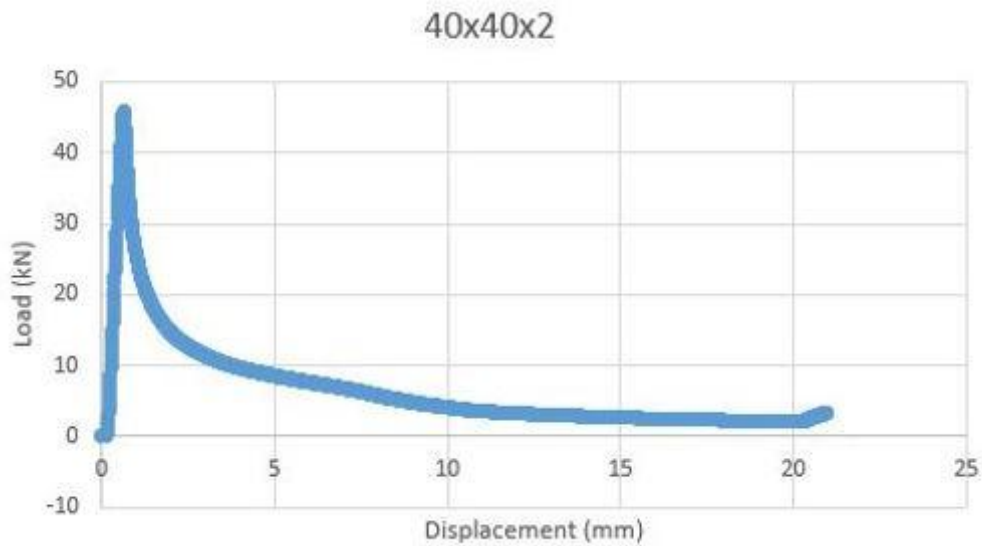
## 3.1.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2



Διάγραμμα 3.4: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x50x2 χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού

Σημειώνεται κατ' αρχάς πως η συμπίεση δεν συνεχίστηκε μέχρι τα 40mm διότι στα 26mm περίπου είχαμε ολική καταστροφή της δεξιάς παράπλευρης επιφάνειας. Με ρηγματωμένη τη μία πλευρά, η περαιτέρω συμπίεση δε θα έδινε έγκυρα αποτελέσματα. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στους υπόλοιπους δύο τετραγωνικούς σωλήνες και διακόπηκε η συμπίεση. Λίγο μετά τα 4mm παρατηρείται μείωση του φορτίου που οφείλεται στη ρηγμάτωση των εξωτερικών ινών του σωλήνα. Μετά τη ρηγμάτωση, λοιπόν, έχουμε μια μικρή αλλαγή στην κλίση της καμπύλης του φορτίου που σημαίνει ουσιαστικά μείωση αυτού. Το φορτίο παραμένει σχεδόν σταθερό και ίσο προς 1-2kN ως το τέλος της συμπίεσης.

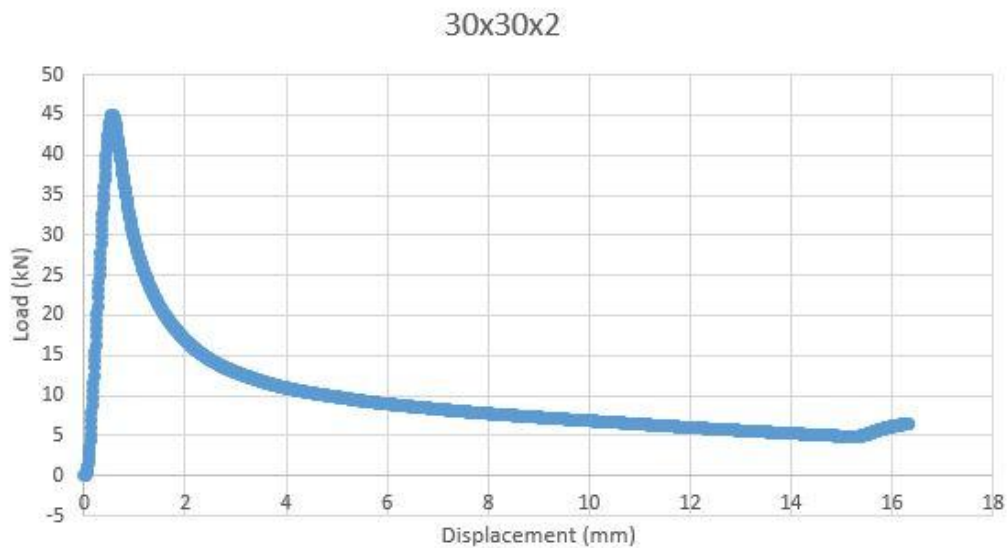
### 3.1.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2



Διάγραμμα 3.5: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 40x40x2 χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού

Λίγο μετά τη μέση της ακμής ακουμπούν οι άνω και κάτω πλευρές του δοκιμίου. Φαίνεται σαν να αναδιπλώνεται στη μέση το δοκίμιο αλλά χωρίς να ακουμπούν τα πλαϊνά άκρα.

### 3.1.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2

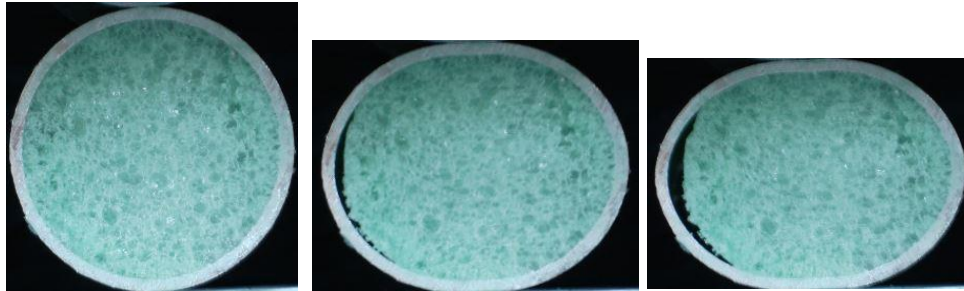


Διάγραμμα 3.6: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 30x30x2 χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού

Στην προοδευτική κατάρρευση αυτού του τετραγωνικού δοκιμίου παρατηρούμε ότι στο τέλος ακουμπούν οι άνω και κάτω έδρες του δοκιμίου. Εδώ δηλαδή δε θα μπορέσει να γίνει σύγκριση με το δοκίμιο του αφρού, γιατί λόγω της ύπαρξής του δε θα μπορέσουν ποτέ να ακουμπήσουν οι απέναντι έδρες.

### 3.2 Σωλήνας με προσθήκη αφρού εμπορίου διαστάσεων $\Phi 50 \times 2 \times 60$

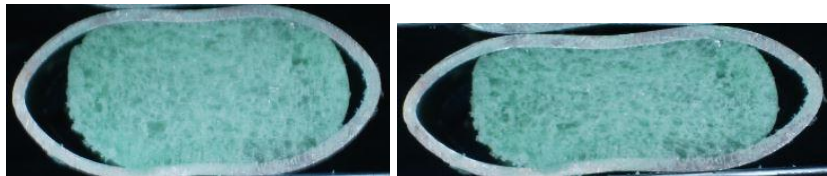
Παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα που λήφθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία τα οποία μας βοηθούν στην κατανόηση του φαινομένου της κατάρρευσης. Οι εικόνες είναι αριθμημένες και αντιστοιχούν στην αρίθμηση της πειραματικής καμπύλης. Σημειώνεται πως προοδευτικές και τελικές όψεις των υπόλοιπων δοκιμών παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.



1

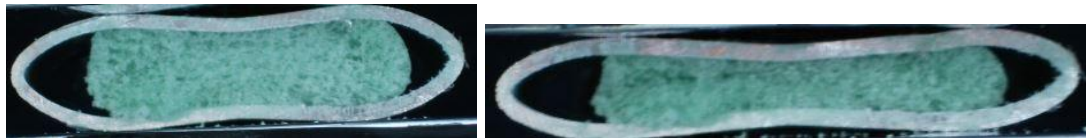
2

3



4

5

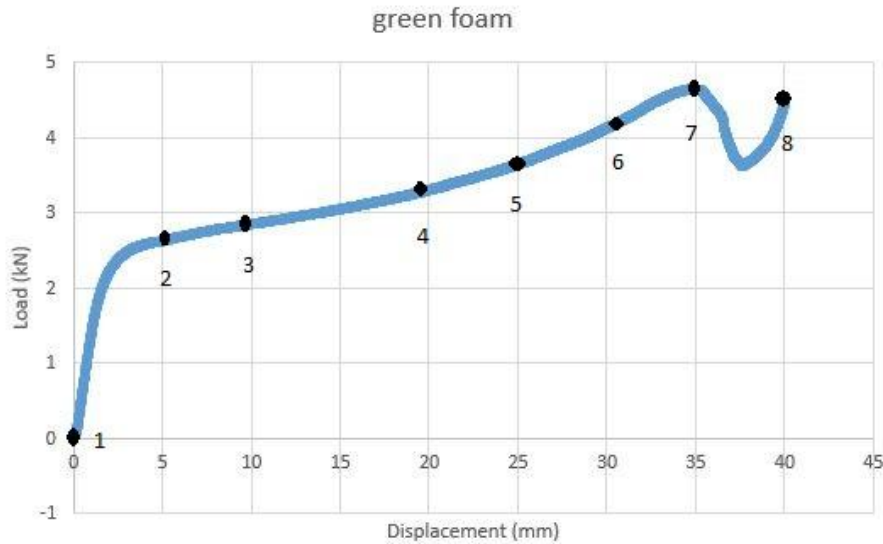


6

7



8

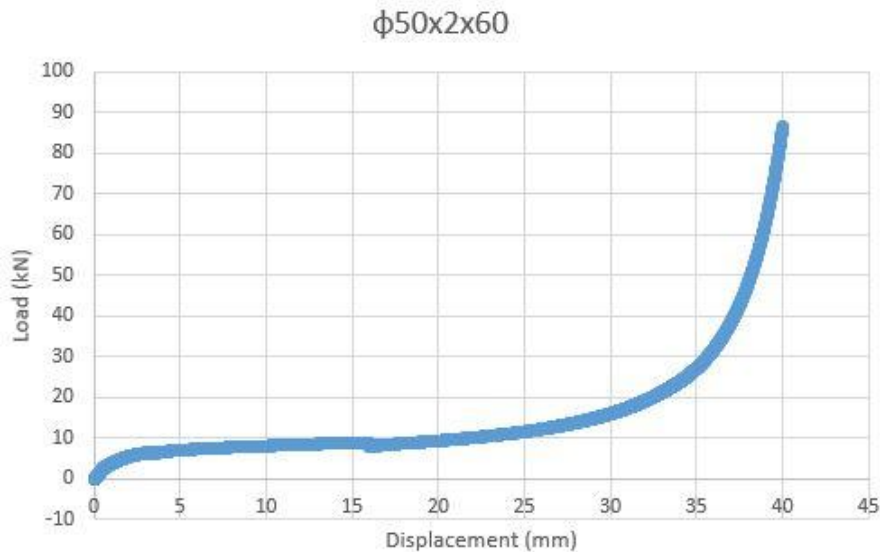


Διάγραμμα 3.7: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων  $\phi 50 \times 2 \times 60$  με προσθήκη πολυμερικού αφρού εμπορίου

Λόγω κακής πρόσφυσης ξεκόλλησε ο αφρός από το τοίχωμα του σωλήνα. Ο αφρός έχει πολύ μεγάλο πορώδες και έτσι δεν απορροφά σχεδόν καθόλου μεγαλύτερη ενέργεια από ότι το δοκίμιο χωρίς την προσθήκη αυτού. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για τις ίδιες μετατοπίσεις το τελικό φορτίο είναι 4kN και 4,5kN χωρίς και με την προσθήκη αφρού αντίστοιχα. Δηλαδή το εμβαδό που περικλείεται από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης που είναι η απορροφώμενη ενέργεια είναι σχεδόν η ίδια. Γι' αυτό το λόγω και αφού ο συγκεκριμένος αφρός του εμπορίου δεν προσφέρει απορρόφηση ενέργειας αποφασίστηκε πως δεν θα χρησιμοποιηθεί περαιτέρω. Έτσι παρασκευάστηκε στο εργαστήριο ένας άλλος αφρός πολυουρεθάνης με το οποίο έγιναν οι παρακάτω δοκιμές.

### 3.3 Σωλήνες με προσθήκη παρασκευασμένου αφρού

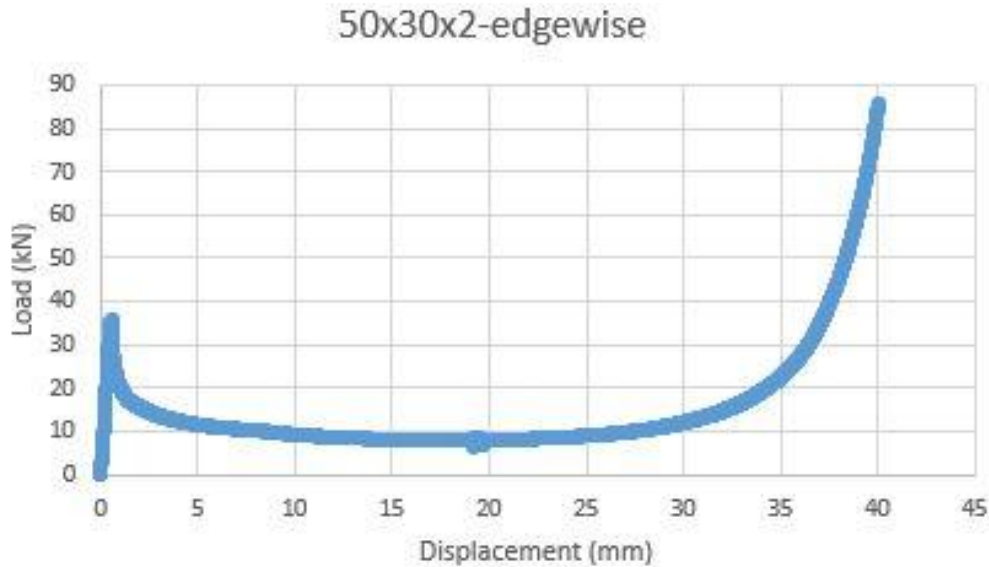
#### 3.3.1 Σωλήνας διαστάσεων $\Phi 50 \times 2 \times 60$



Διάγραμμα 3.8: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων  $\Phi 50 \times 2 \times 60$  με προσθήκη παρασκευασμένου πολυμερικού αφρού

Κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής αρχικά ακούστηκε ένας θόρυβος όπου και ξεκόλλησε ο αφρός από το δεξί μέρος του σωλήνα. Στη συνέχεια, περίπου στα 14mm ξεκόλλησε και το αριστερό μέρος και ακούστηκε ο ίδιος θόρυβος. Προς το τέλος της δοκιμής έχουμε μεγάλη αύξηση της κλίσης της καμπύλης του φορτίου. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αφρός έχει χάσει πλέον το πορώδες του λόγω συμπίεσης και μοιάζει σαν να συμπιέζεται ένα συμπαγές υλικό. Λόγω της μείωσης του πορώδους αυξάνεται και η φαινόμενη πυκνότητα του αφρού. Η δοκιμή μοιάζει με σφυρηλάτηση (hammering) όπου το μέταλλο υποβάλλεται σε μια σειρά επαναλαμβανόμενων κρούσεων.

## 3.3.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise

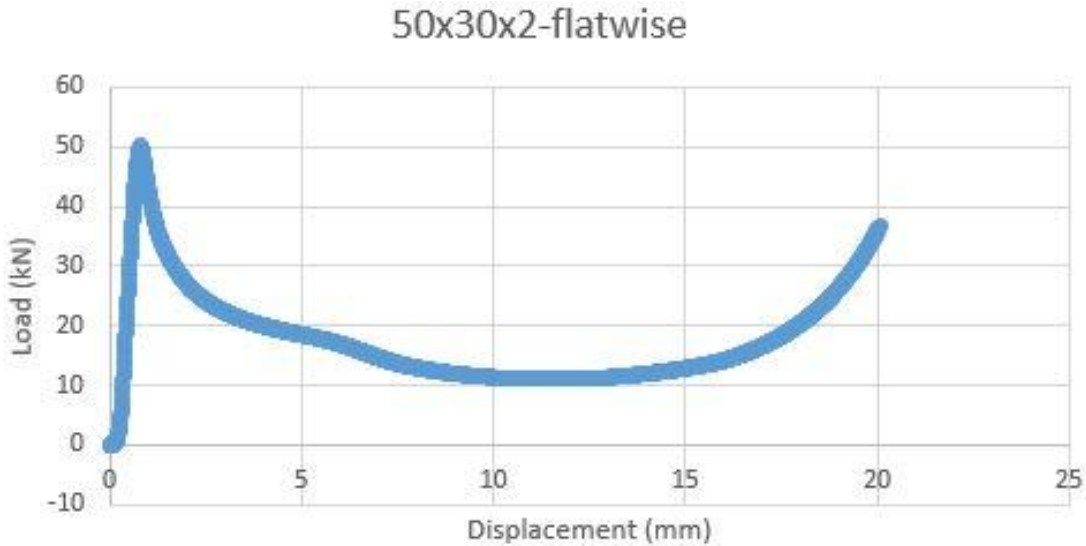


Διάγραμμα 3.9: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-edgewise με προσθήκη πολυμερικού αφρού

Εδώ η συμπεριφορά του δοκίμιου σε κατάρρευση είναι διαφορετική από πριν. Αρχικά άνοιξαν τα μεταλλικά τοιχώματα και αποκολλήθηκε ο αφρός όπως και πριν. Στη συνέχεια όμως (περίπου στα 20mm) παρατηρήθηκαν περιφερειακά σκισίματα του μετάλλου. Στην ουσία είναι σαν αν μην υπάρχει πια το μέταλλο αφού δε συνεισφέρει τίποτα και συμπιέζεται μόνο ο αφρός. Αν συμπιέζαμε ένα δοκίμιο σκέτου αφρού η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης θα ήταν ίδια με την παραπάνω από τα 20mm και μετά.



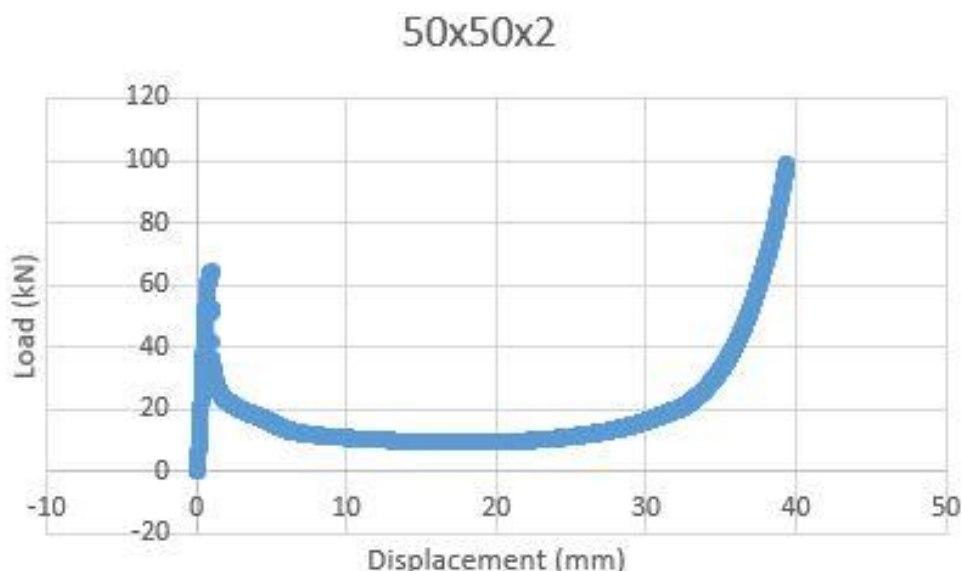
## 3.3.3 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2 flatwise



Διάγραμμα 3.10: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-flatwise με προσθήκη πολυμερικού αφρού

Ο μηχανισμός κατάρρευσης είναι όμοιος με πριν. Αρχικά ξεκολλά ο αφρός από τα τοιχώματα του δοκιμίου και όπως φαίνεται στο διάγραμμα στα 13,5mm το μέταλλο σταματά να συνεισφέρει και γι' αυτό αυξάνεσαι σημαντικά το φορτίο. Τέλος, με την άνοδο της πάνω πλάκας σκίστηκε τελείως η αριστερή πλευρά του δοκιμίου. Επίσης, τελικά το φορτίο διαμορφώθηκε στα 37kN και όχι περισσότερο από τα 50kN που εφαρμόστηκαν αρχικά. Ενώ προηγουμένως (edgewise) το τελικό φορτίο ήταν 3 φορές μεγαλύτερο από το αρχικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τώρα συμπιέστηκε μικρότερο ποσοστό του μήκους από πριν (20mm από τα 30mm, ενώ πριν 40mm από τα 50mm).

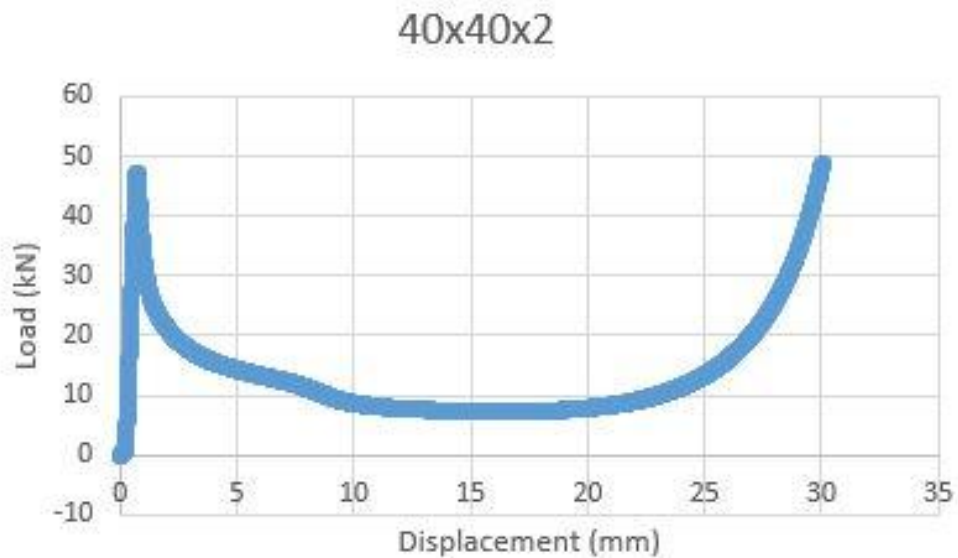
## 3.3.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2



Διάγραμμα 3.11: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x50x2 με προσθήκη πολυμερικού αφρού

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί σε αυτή τη δοκιμή είναι ότι το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης σταματά λίγο πιο πριν από τα 40mm. Πράγματι, το πείραμα διακόπηκε χωρίς να φτάσει την τελική τιμή του ύψους που δόθηκε αρχικά. Αυτό συνέβη διότι το φορτίο έφτασε τα 100kN , δηλαδή τους 10tn και σταμάτησε για να μη σπάσει η μηχανή. Το εμβαδόν της καμπύλης είναι πολύ μεγάλο και η απορρόφηση ενέργειας αξιοσημείωτη. Καμία άλλη δοκιμή δεν τερματίστηκε αυτόματα για την προστασία της μηχανής.

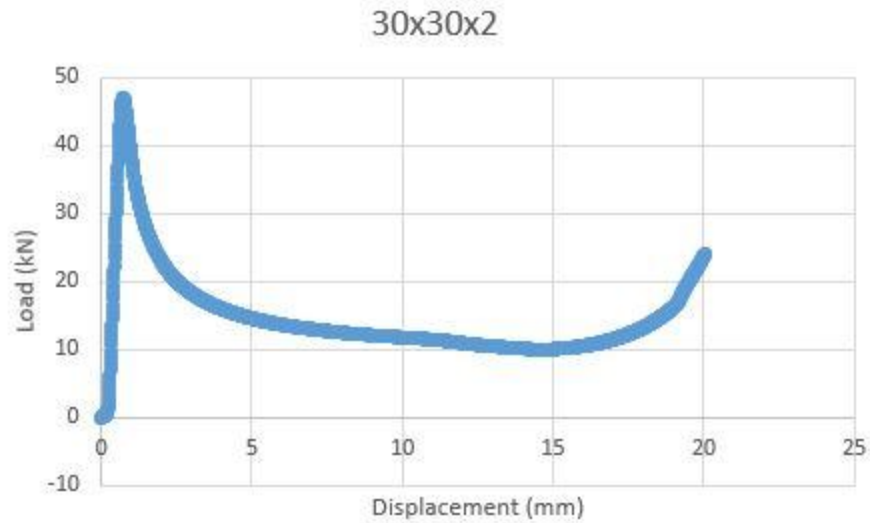
### 3.3.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2



Διάγραμμα 3.12: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 40x40x2 με προσθήκη πολυμερικού αφρού

Σε αυτή την περίπτωση πάλι δεν έχω πλευρική αλληλεπίδραση διότι ο αφρός ξεκόλλησε από το τοίχωμα. Περίπου στο 50% της παραμόρφωσης απαξιώνεται το δοκίμιο αλουμινίου και αναλαμβάνει ο αφρός.

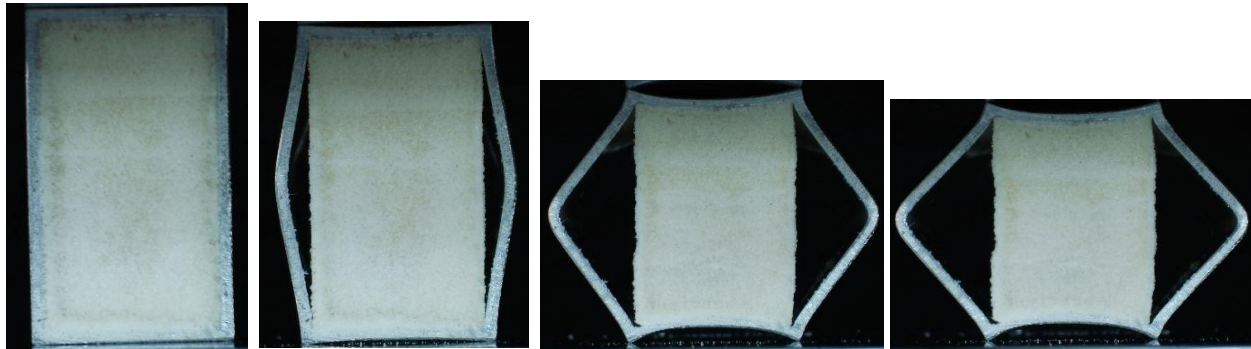
## 3.3.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2



Διάγραμμα 3.13: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 30x30x2 με προσθήκη πολυμερικού αφρού

Λόγω μικρής διαδρομής της άνω πλάκας της μηχανής το φορτίο αρχίζει να αυξάνεται μετά τη μέση της ακμής. Θα περίμενε κανείς αυτό να γίνει στα 10mm αλλά συνέβη από τα 16mm και μετά. Από εκείνο το σημείο είναι σαν να συμπιέζεται μόνο ο αφρός όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

### 3.3.7 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise ελεύθερης εκτόνωσης

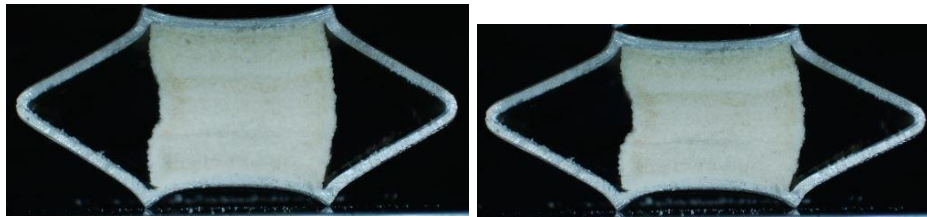


1

2

3

4



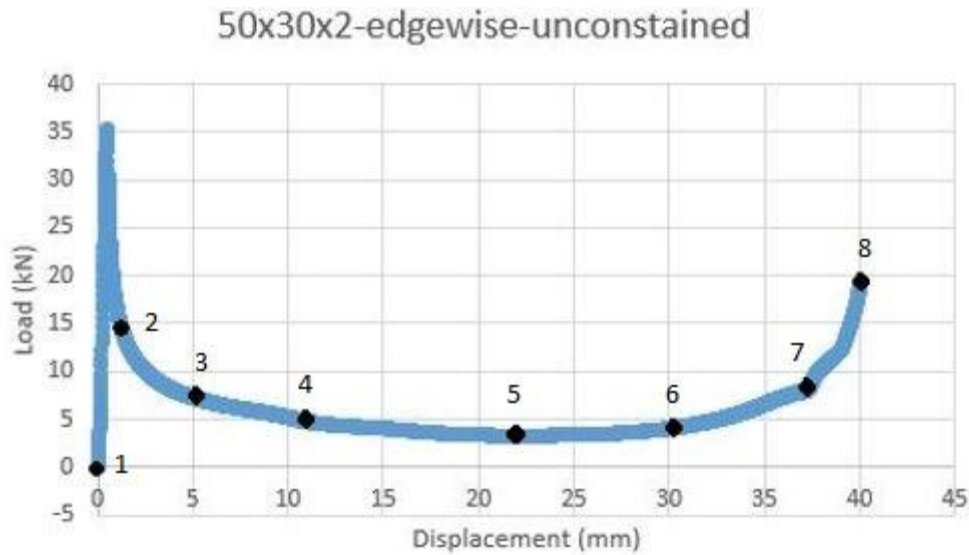
5

6



7

8

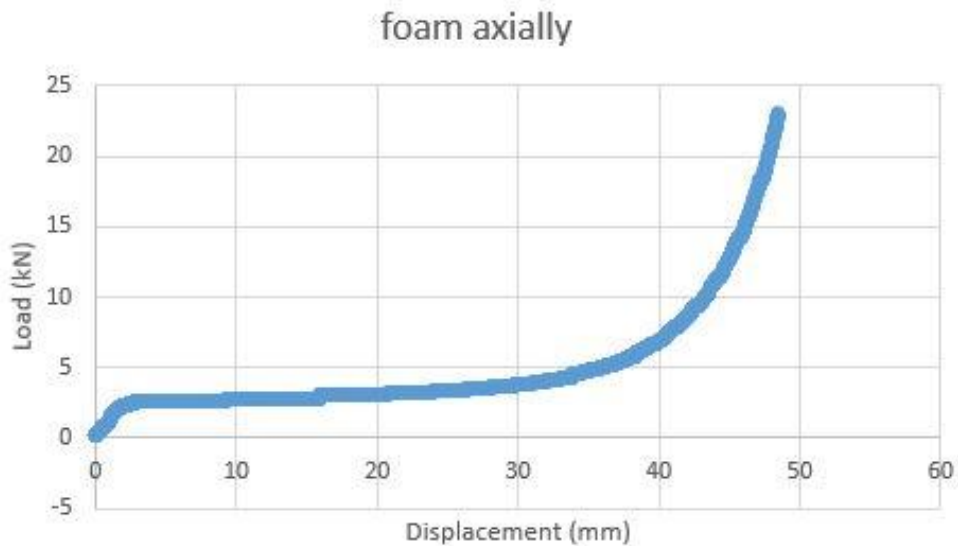


Διάγραμμα 3.14: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-edgewise ελεύθερης εκτόνωσης με προσθήκη πολυμερικού αφρού

Παρατηρούμε ότι σε σύγκριση με το δοκίμιο διαστάσεων 50x30x2 (flatwise) το αρχικό είναι σχεδόν ίδιο και ίσο με 35kN. Τελικά όμως σε αυτό της ελεύθερης εκτόνωσης το φορτίο είναι πολύ μικρότερο (20kN). Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ακούστηκε αρχικά ένας έντονος θόρυβος. Σε αυτό το σημείο (περίπου στο 1mm μετατόπισης) ξεκόλλησαν τα τοιχώματα του σωλήνα από τον αφρό. Από τότε και έπειτα το αλουμίνιο δεν συμμετείχε στην απορρόφηση ενέργειας και συμπιέζεται μόνο ο αφρός. Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται στα 37mm μια μεταβολή της καμπύλης η οποία οφείλεται στην ολική καταστροφή της αριστερής ακμής του σωλήνα η οποία και ακούμπησε στην άνω πλάκα της μηχανής.

### 3.4 Δοκίμια αφρού

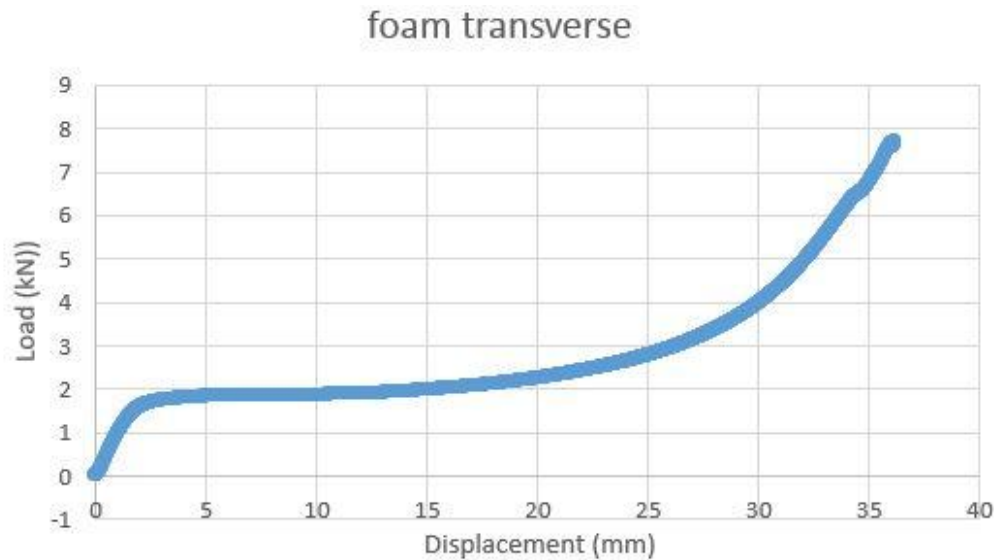
#### 3.4.1 Δοκίμιο διαστάσεων 60x40-axially



Διάγραμμα 3.15: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης δοκιμίου πολυμερικού αφρού διαστάσεων 60x40-axially

Οι πραγματικές μετρούμενες διαστάσεις του δοκιμίου του αφρού είναι λίγο μικρότερες από τις αναμενόμενες διότι αφού αφαιρέθηκε το κέλυφος λιμάραμε τις πλευρές του. Αναμενόταν να είχε διαστάσεις 46mmx26mm , αφού τα τοιχώματα έχουν πάχος ίση προς 2mm. Από τα 5mm μέχρι και τα 30mm σχεδόν το φορτίο παραμένει σταθερό και ίσο με 3kN. Σε αυτή τη φάση καταρρέουν οι κυψελίδες (cells) του αφρού και σταδιακά μετατρέπεται σε συμπαγές υλικό. Επειδή αυτή η δοκιμή έγινε κατά τη φορά που διογκώθηκε ο αφρός δεν περιμένουμε να είναι στην πραγματικότητα απόλυτα ισότροπο υλικό. Θα το θεωρήσουμε όμως ισότροπο. Στην εγκάρσια διεύθυνση περιμένουμε μεγαλύτερη ισοτροπία του υλικού.

## 3.4.2 Δοκίμιο διαστάσεων 60x40-transverse



Διάγραμμα 3.16: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης δοκμίου πολυμερικού αφρού διαστάσεων 60x40-transverse

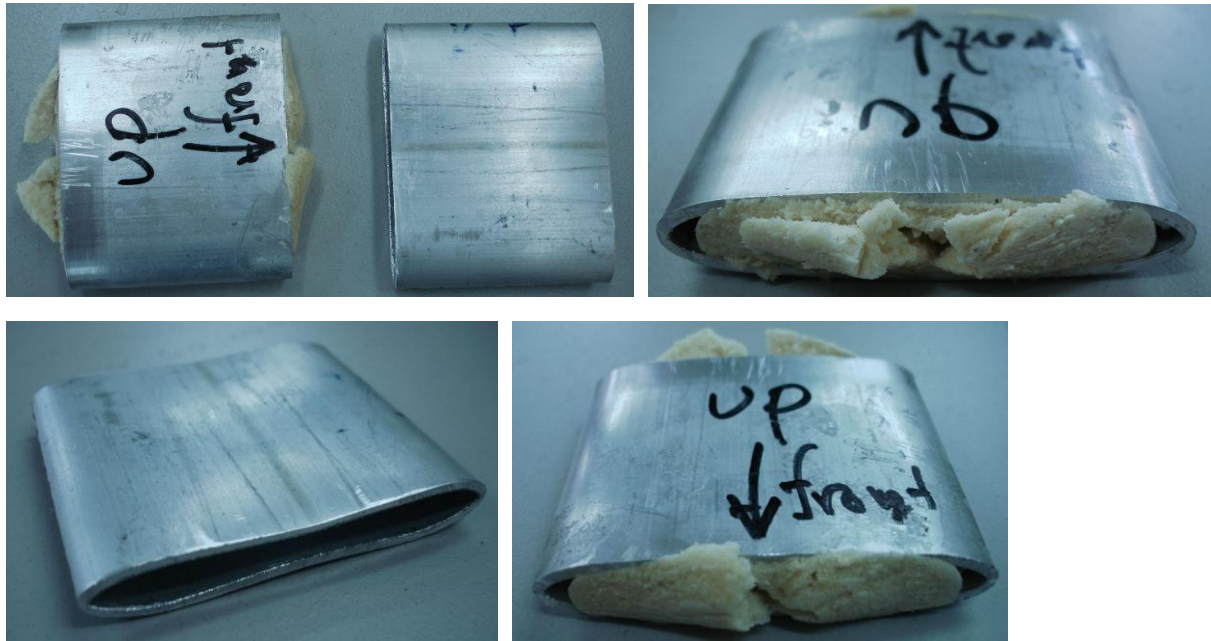
Πράγματι στην εγκάρσια διεύθυνση το υλικό του αφρού δείχνει να είναι περισσότερο ισότροπο από την αξονική. Αλλά και πάλι δεν θεωρείται τελείως ισότροπο. Σε αυτή τη διεύθυνση παρατηρούμε πως η απορρόφηση ενέργειας είναι σημαντικά μικρότερη από ότι πριν. Χαρακτηριστικά σημειώνεται ότι το μέγιστο φορτίο εδώ είναι λιγότερο από 8kN ενώ στην διεύθυνση διόγκωσης είναι 23kN.



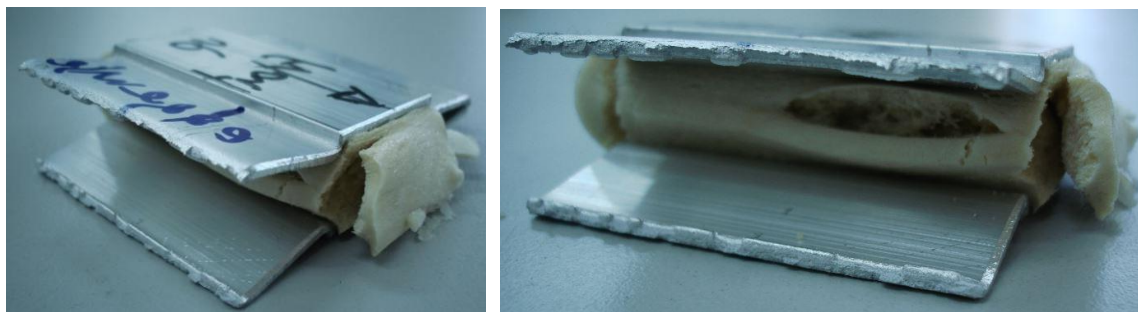
### 3.5 Τελικές εικόνες δοκιμών (terminal views)

#### 3.5.1 Δοκίμια με και χωρίς την προσθήκη παρασκευασμένου αφρού

φ50x2x60



50x30x2-edgewise

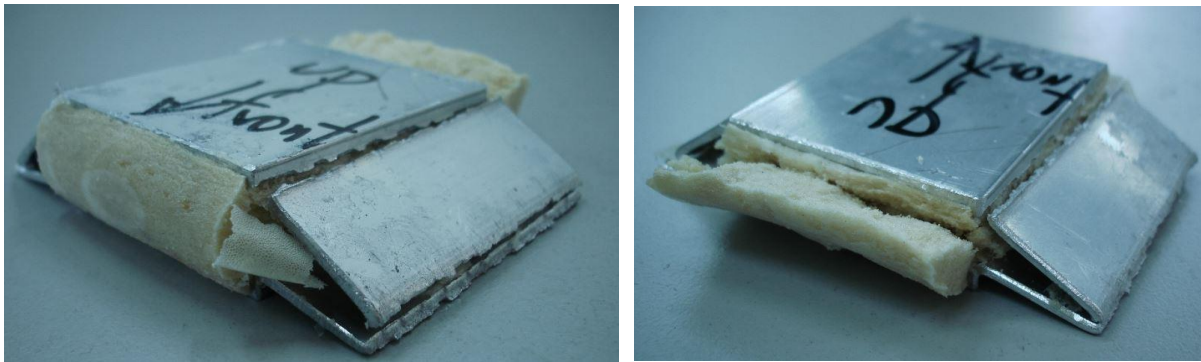




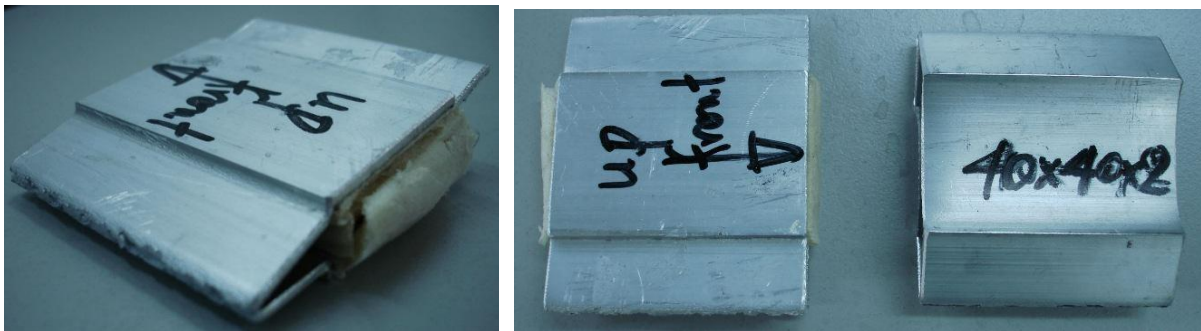
50X30x2-flatwise



50x50x2

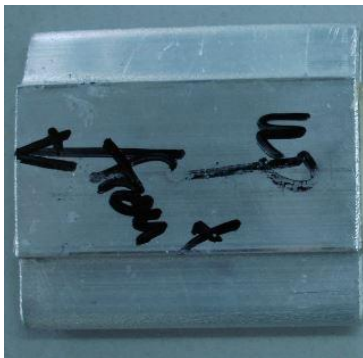


40x40x2





30x30x2



Δοκίμιο ελεύθερης εκτόνωσης

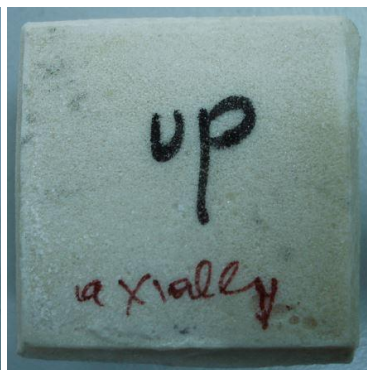
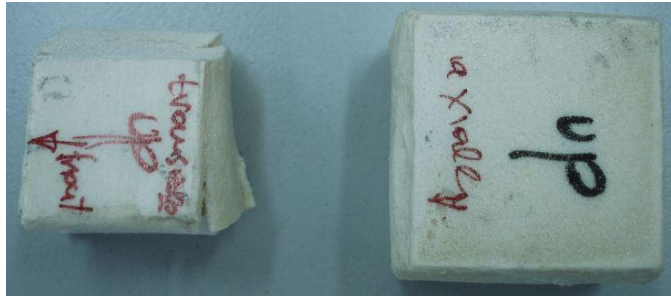


3.5.2 Δοκίμιο με προσθήκη αφρού εμπορίου  
φ50x2x60

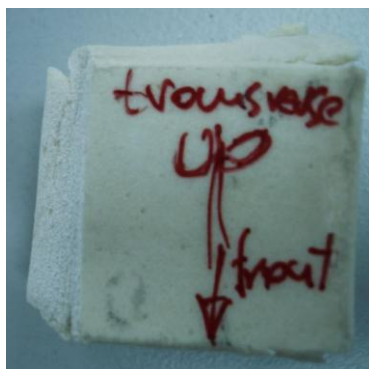


### 3.5.3 Δοκίμα αφρού

60x40-axially



60x40-transverse





### 3.6 Παρατηρήσεις

- Ως ενεργός διατομή ορίζεται ολόκληρη η διατομή των δοκιμίων αφού καταπονούνται και οι 4 πλευρές των ορθογωνικών και τετραγωνικών σωλήνων. Το ίδιο ισχύει προφανώς και για τον κυλινδρικό.
- Το θεωρητικό τελικό ύψος των δοκιμίων ορίστηκε στα 10mm. Κανένα όμως δοκίμιο δεν έφτασε σε αυτό το ύψος. Αυτό συνέβη λόγω ελαστικής επαναφοράς του αλουμινίου κατά την απομάκρυνση της άνω πλάκας της μηχανής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις τελικές μετρούμενες τιμές του ύψους των δοκιμίων σε mm.

α/α	Διαστάσεις	χωρίς αφρό	αφρός εμπορίου	παρασκευασμένος αφρός
1	φ50x2x60	12.4	12.68	15.15
2	50x30x2 (edgewise)	11.8	-	19.6
3	50x30x2 (flatwise)	10.7	-	16.47
4	50x50x2	28.71	-	17.4
5	40x40x2	21.78	-	18.3
6	30x30x2	12.42	-	11.74

Πίνακας 3.1: Τελικά ύψη δοκιμίων (mm)

- Οι σωλήνες είναι απόλυτα συμμετρικοί σε θεωρητικό επίπεδο, όχι όμως και σε πρακτικό. Έτσι λόγω της υποτιθέμενης μικρής διάτμησης που υπόκεινται δημιουργείται εν γένει διαφορά στις άνω και κάτω πλευρές του δοκιμίου. Είναι όμως σαν να έχουμε ένα παραλληλόγραμμο και ως εκ τούτου έχουμε διπλή συμμετρία. Ότι συμβαίνει στην πάνω δεξιά μεριά, παρατηρείται και στην κάτω αριστερά.
- Όσον αφορά τα δοκίμια με την προσθήκη αφρού: Αν δεν ξεκολλούσε ο αφρός από τα τοιχώματα του δοκιμίου θα καταπονούνταν σε εφελκυσμό κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επειδή όμως ο αφρός είναι ένα ψαθυρό υλικό θα δημιουργούνταν ρωγμές στο εσωτερικό του και τελικά η απορρόφηση ενέργειας θα ήταν μικρότερη. Αυτό δεν θα

μας έδινε επιθυμητά αποτελέσματα και γι' αυτό το λόγω δεν τοποθετήθηκε κάποια ρητίνη για να κολλήσει ο αφρός στα τοιχώματα.

- Παρατηρούμε μεγάλη αύξηση του εμβαδού που περικλείεται την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης ανάμεσα στα δοκίμια χωρίς και με τον αφρό πολυουρεθάνης. Αυτό δεν ισχύει για το δοκίμιο που τοποθετήθηκε ο αφρός του εμπορίου (πράσινος αφρός). Έτσι, ο συγκεκριμένος αφρός δεν δύναται σε καμία περίπτωση για απορρόφηση ενέργειας αλλά για μόνωση.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 4.1 Εισαγωγή

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων. Παρατίθενται αρχικά οι εικόνες από την πειραματική διαδικασία σε επαλληλία με εκείνες από την προσομοίωση. Στη συνέχεια απεικονίζονται οι αριθμημένες καμπύλες φορτίου-μετατόπισης που προέκυψαν. Σχολιάζονται φυσικά και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί πως αναμένουμε διαφορές μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών διότι:

- Λόγω αδυναμίας κατασκευής, οι σωλήνες δεν είναι απόλυτα συμμετρικοί (προβλήματα καθετότητας και παραλληλότητας).
- Υπάρχει ανισοκατανομή του πάχους του υλικού στις πλευρές του αλλά και στις γωνίες.
- Το υλικό (αλουμίνιο) είναι ανισότροπο.
- Εκλείπουν οι ιδανικές συνθήκες που επικρατούν κατά την προσομοίωση.

Παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας με τις ιδιότητες των υλικών που αποτελούν μέρος της κατασκευής.

Μέγεθος	Σύμβολο	Al	St	PU	Μονάδες
Μέτρο ελαστικότητας	E	69000	207000	19	Mpa
Λόγος Poisson	PR	0.33	0.3	0	-
Πυκνότητα	RO	0.0027	0.00783	0.0004	gr/mm <sup>3</sup>
Όριο διαρροής	SIGY	220	-	-	Mpa
Εφελκυστική τάση	TSC	-	-	2	Mpa

Πίνακας 4.1 Ιδιότητες υλικών

Οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν εξαρτώνται από το χρήστη και είναι οι ακόλουθες:

- μήκος: mm
- μάζα: gr
- χρόνος: msec

και προκύπτουν

- δύναμη: N
- τάση: MPa

## 4.2 Κώδικας LS-DYNA

Ο κώδικας LS-DYNA που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της υπολογιστικής προσομοίωσης της μονοαξονικής συμπίεσης των δοκιμίων είναι κώδικας πεπερασμένων στοιχείων κατάλληλος για τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση κατασκευών σε τρεις διαστάσεις. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε μπορεί να διαιρεθεί σε τρία μέρη: μοντελοποίηση, επίλυση και έλεγχος αποτελεσμάτων.

Η μοντελοποίηση αποτελείται από τα εξής βήματα:

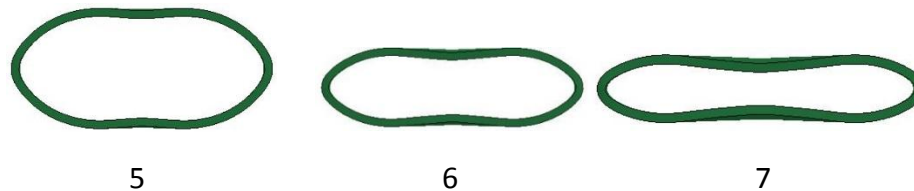
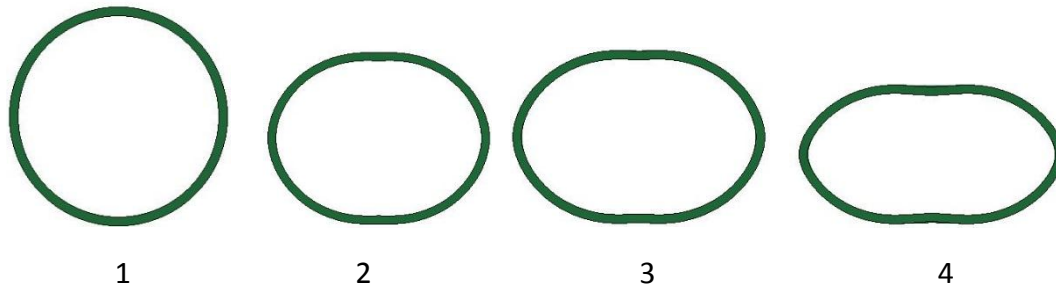
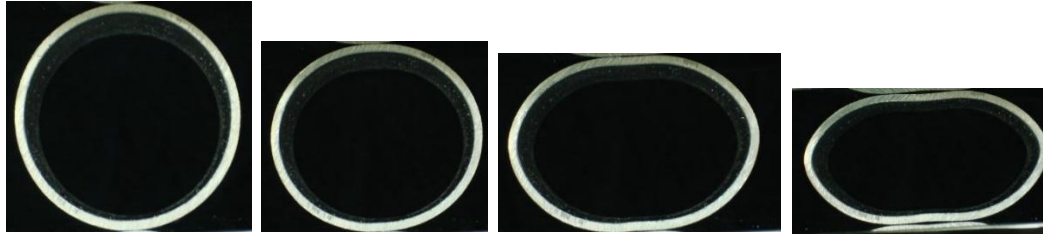
- Ορισμός γεωμετρίας της κατασκευής και απόδοση διαστάσεων.
- Διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία.
- Καθορισμός υλικών και φυσικών ιδιοτήτων (βλ. Πίνακα 4.1)
- Ορισμός διεπιφανειών μεταξύ διαφορετικών οντοτήτων της κατασκευής. Έγινε δηλαδή μοντελοποίηση της επαφής μεταξύ των αλληλοεπιδρώντων τμημάτων του μοντέλου (πλάκες, κέλυφος και πυρήνας αφρού). Οι τύποι επιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν είναι CONTACT AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE, CONTACT AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE και CONTACT INTERIOR.
- Προσδιορισμός αρχικών και συνοριακών συνθηκών του μοντέλου (π.χ. στηρίξεις, ταχύτητα και τροχιά κίνησης άνω πλάκας)
- Προσδιορισμός άλλων παραμέτρων όπως διάρκεια φαινομένου, συχνότητα λήψης αποτελεσμάτων.

Μετά τη μοντελοποίηση ακολουθεί η επίλυση από τον solver του κώδικα και τέλος γίνεται ανάλυση στον post-processor.

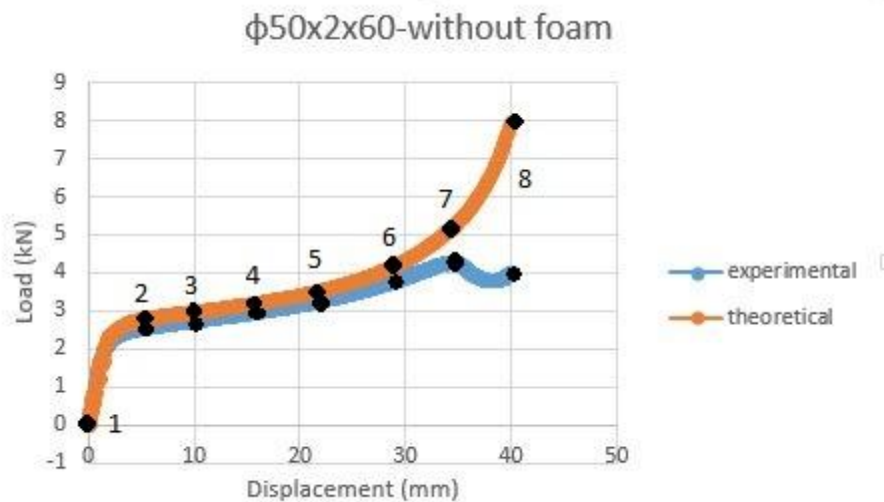
### 4.3 Πειραματικές και θεωρητικές τιμές

#### 4.3.1 Σωλήνες χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού

##### 4.3.1.1 Σωλήνας διαστάσεων $\Phi 50 \times 2 \times 60$



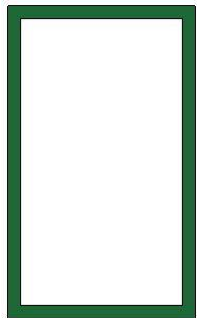
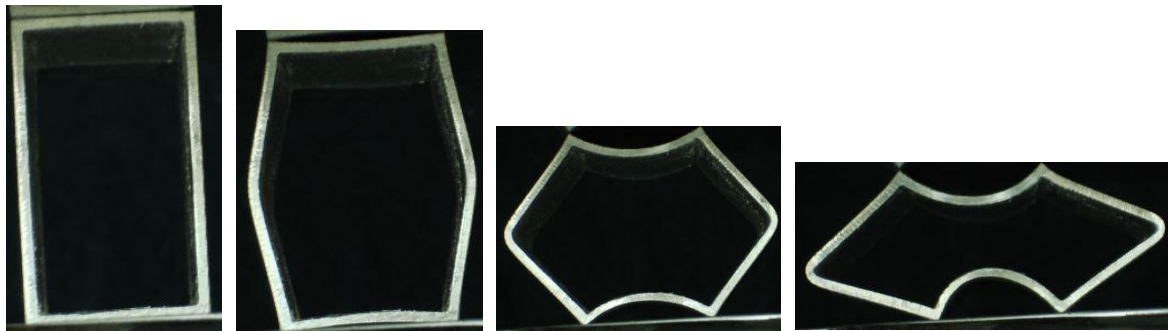
8



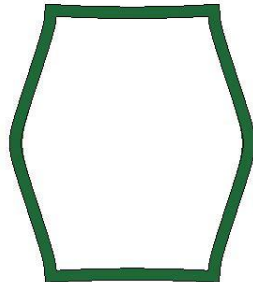
Διάγραμμα 4.1: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων φ50x2x60

Παρατηρείται μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των στιγμιότυπων και των καμπυλών κατά τις αρχικές φάσεις. Μετά τα 32mm μετατόπισης περίπου διαφοροποιούνται οι καμπύλες. Αυτό συνέβη διότι πειραματικά σε εκείνο το σημείο άρχισαν να αναπτύσσονται οι παράπλευροι πλαστικοί αρμοί. Μετά τα 38mm το φορτίο άρχισε πάλι να αυξάνεται διότι οι απέναντι πλευρές του σωλήνα ήρθαν σε επαφή. Ο κώδικας LS-DYNA δεν έχει αυτή τη δυνατότητα και γι' αυτό το λόγο συνέχισε το φορτίο να αυξάνεται με την περαιτέρω μετατόπιση.

#### 4.3.1.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise



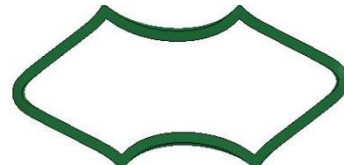
1



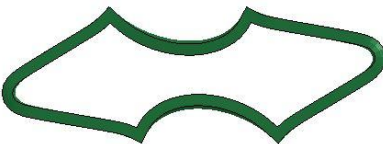
2



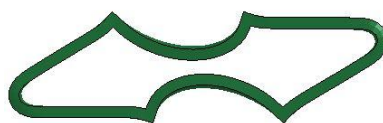
3



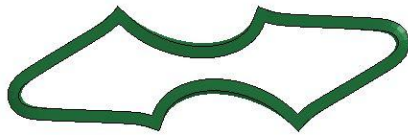
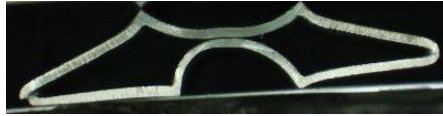
4



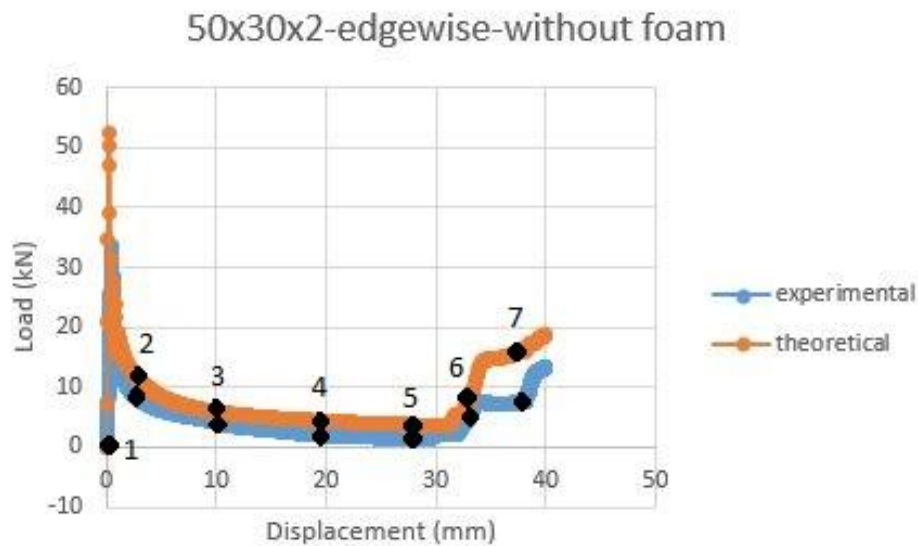
5



6



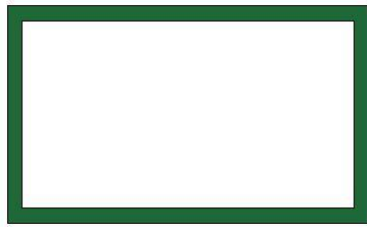
7



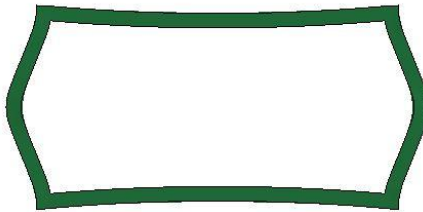
Διάγραμμα 4.2: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-edgewise

Εδώ παρατηρούνται περισσότερες διαφορές ιδιαίτερα στις εικόνες 6 και 7 και φυσικά στα αντίστοιχα σημεία του διαγράμματος. Κατά την πλευρική του κατάρρευση ο σωλήνας αφού δεν είναι πραγματικά συμμετρικός δε συμπεριφέρεται και αναλόγως. Στις εικόνες που προκύπτουν από τον κώδικα βλέπουμε πως ο σωλήνας παραμένει συμμετρικός. Επειδή το μήκος συμπίεσης είναι μεγάλο (40mm) οι διαφορές είναι αρκετά έντονες. Σημειώνεται πως δεν υπάρχει τόσο έντονη ελαστική επαναφορά του υλικού μετά την απομάκρυνση της άνω πλάκας, όπως στην περίπτωση του κυλινδρικού σωλήνα. Εδώ έχουμε έντονους πλαστικούς αρμούς κατά τις παράπλευρες επιφάνειες και εν τέλει ρηγμάτωση του σωλήνα.

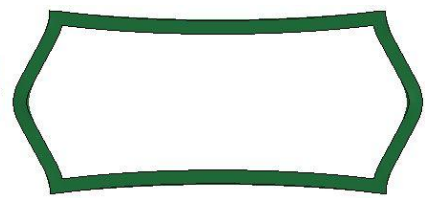
### 4.3.1.3 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2 flatwise



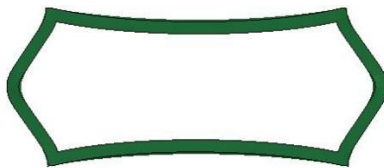
1



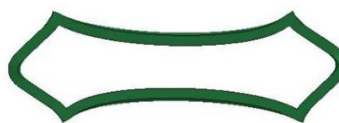
2



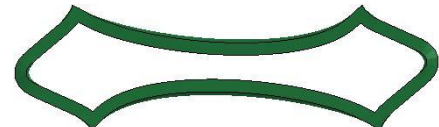
3



4



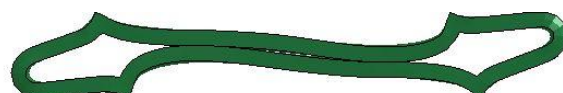
5



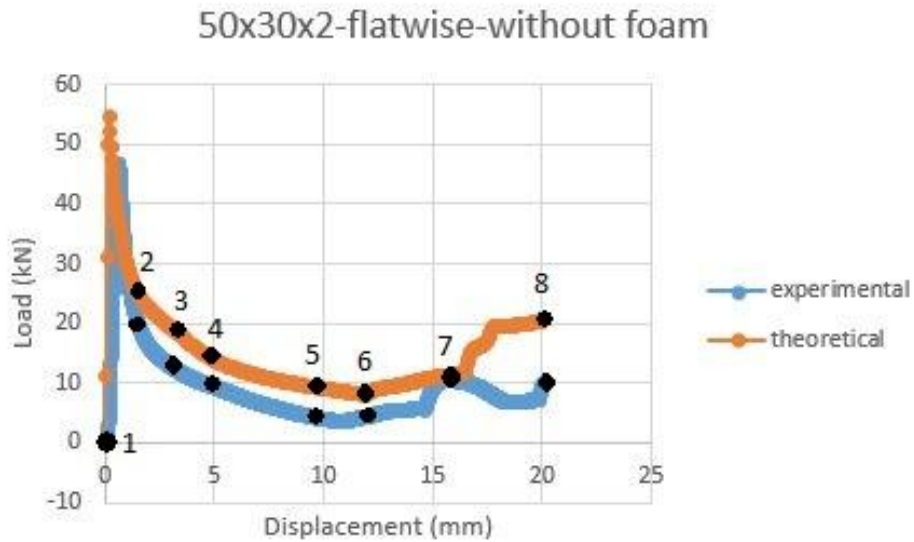
6



7

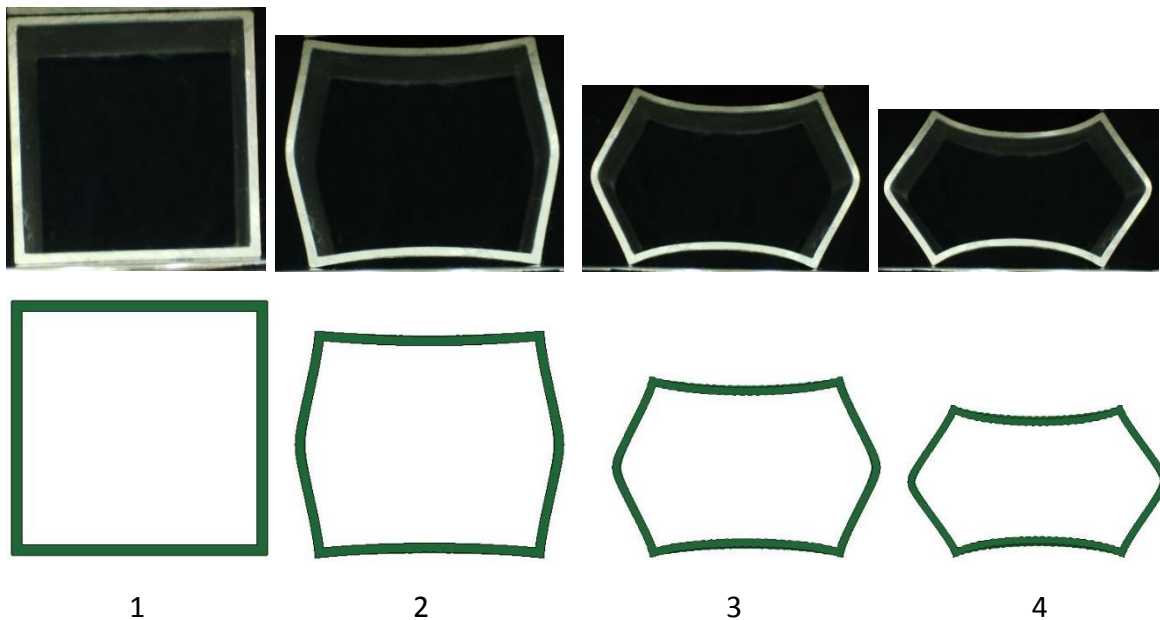


8

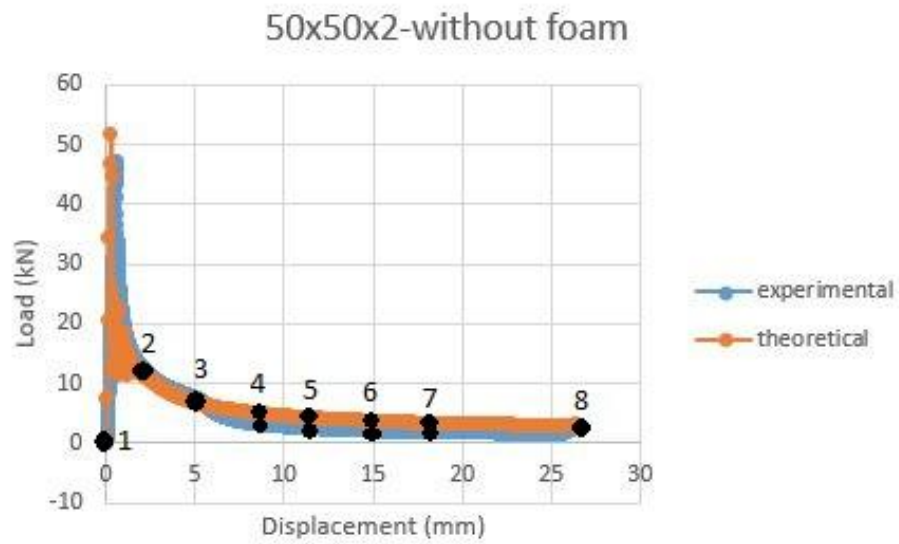
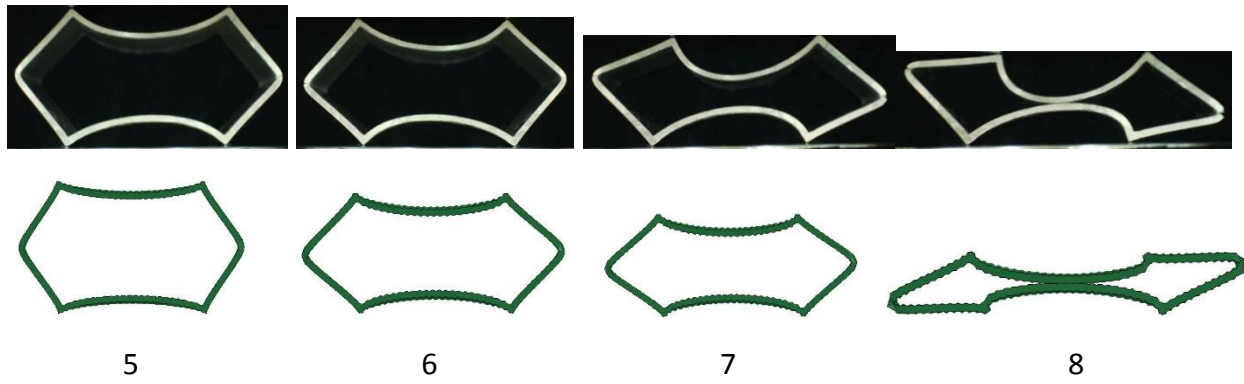


Διάγραμμα 4.3: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-flatwise. Επίσης έχουμε διαφορές μετά τα 10mm μετατόπισης (εικόνες –σημεία 6,7 και 8). Στα 11mm περίπου μειώνεται η κλίση της πειραματικής καμπύλης διότι, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1.3, σε εκείνο το σημείο ήρθαν σε επαφή οι απέναντι έδρες του σωλήνα. Σε θεωρητικό επίπεδο αυτό δε συμβαίνει και γι’ αυτό στην αντίστοιχη καμπύλη το φορτίο συνεχίζει να αυξάνει με την περαιτέρω μετατόπιση ώσπου τελικά παίρνει την τιμή των 20kN.

#### 4.3.1.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2

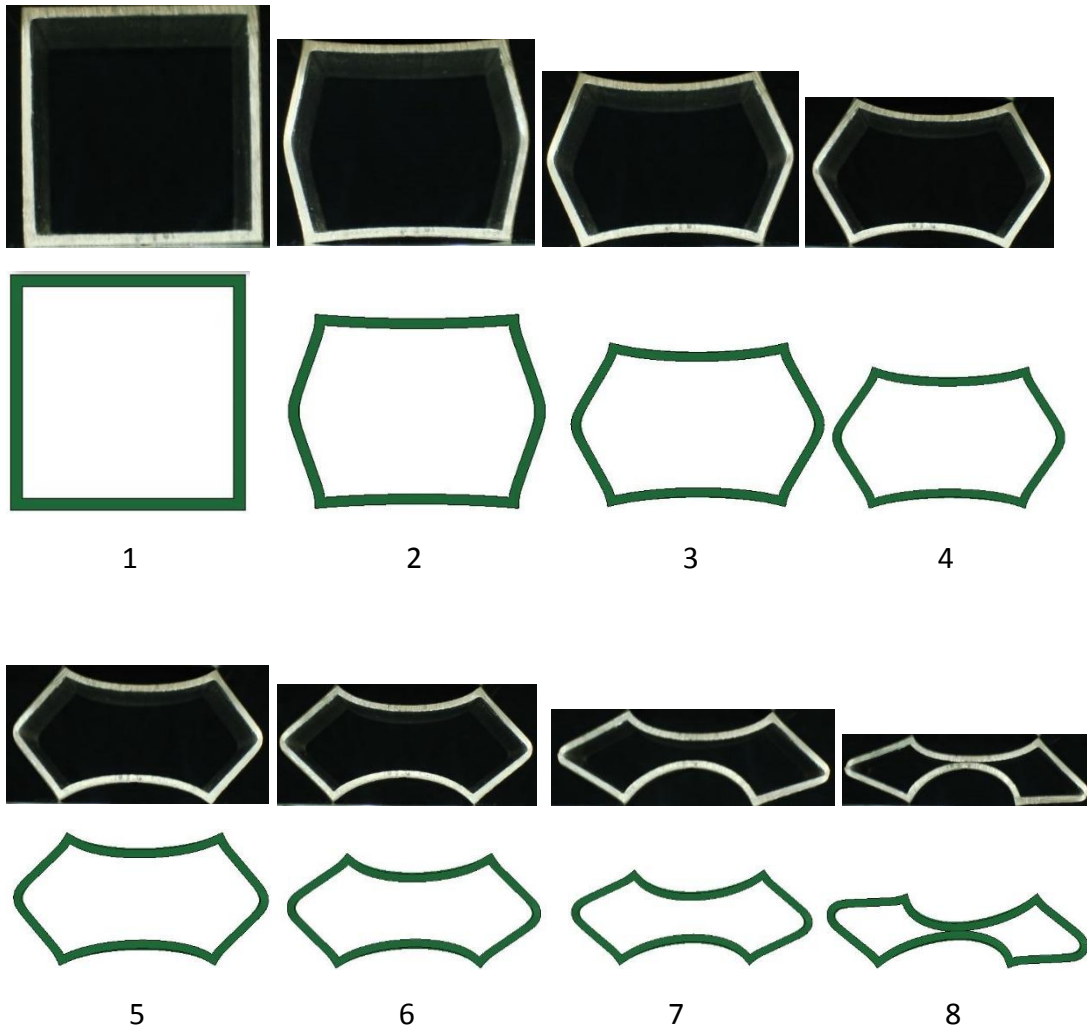


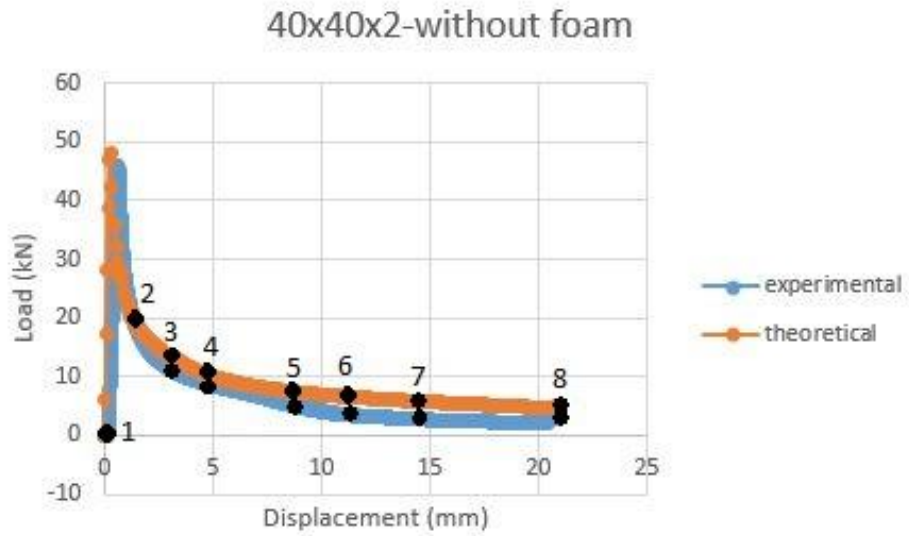




Διάγραμμα 4.4: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x50x2

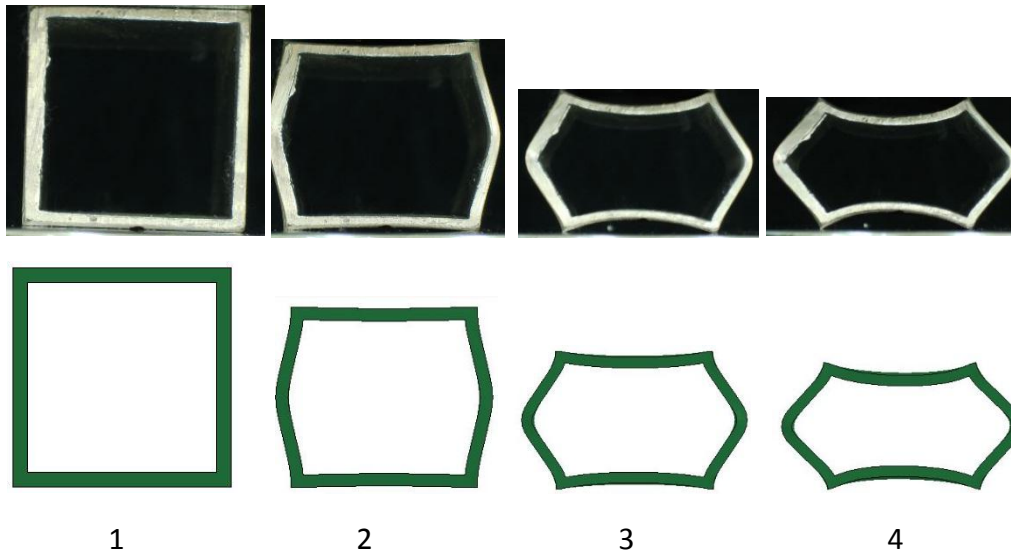
#### 4.3.1.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2

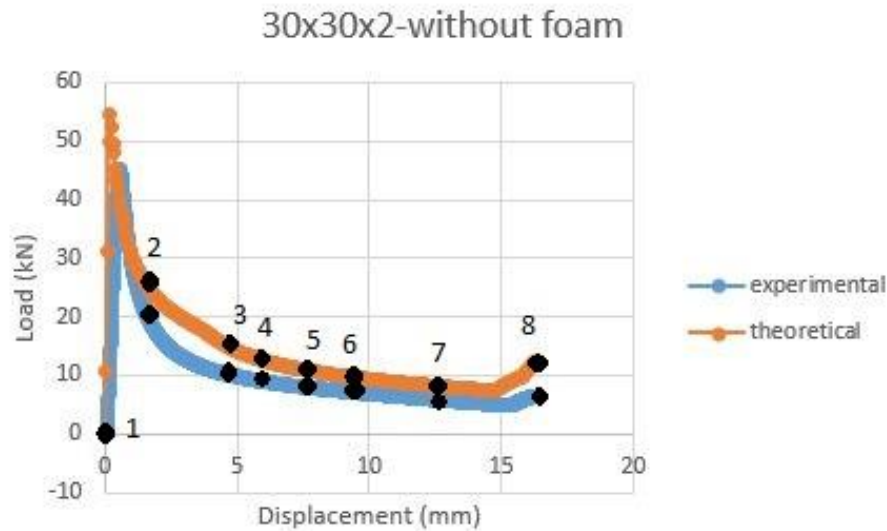
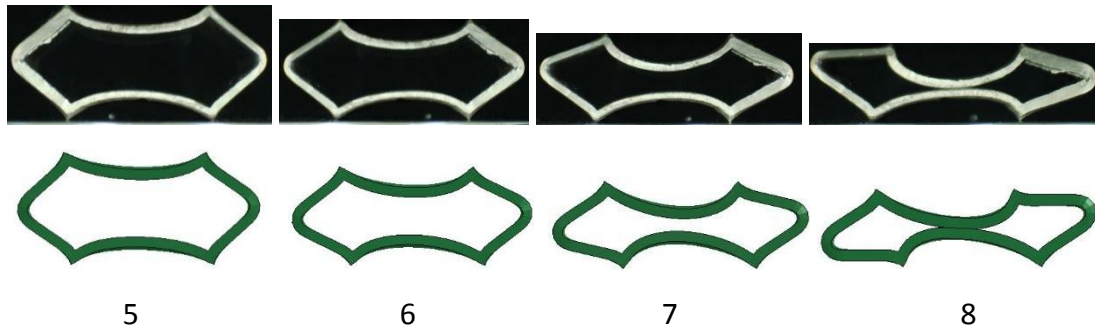




Διάγραμμα 4.5: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 40x40x2

#### 4.3.1.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2



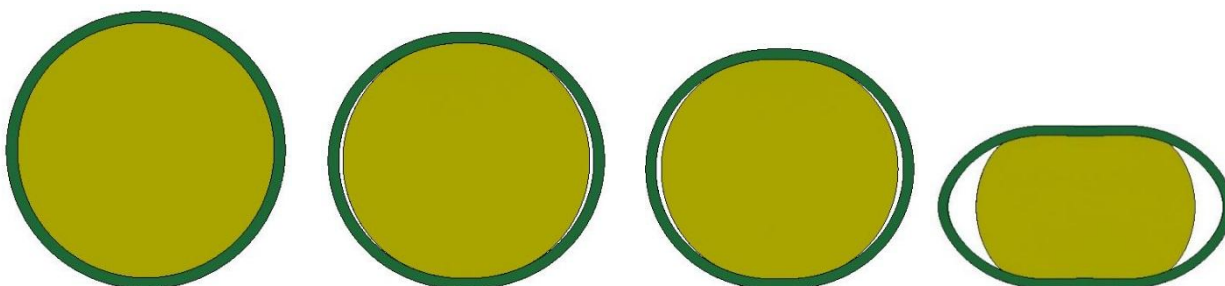
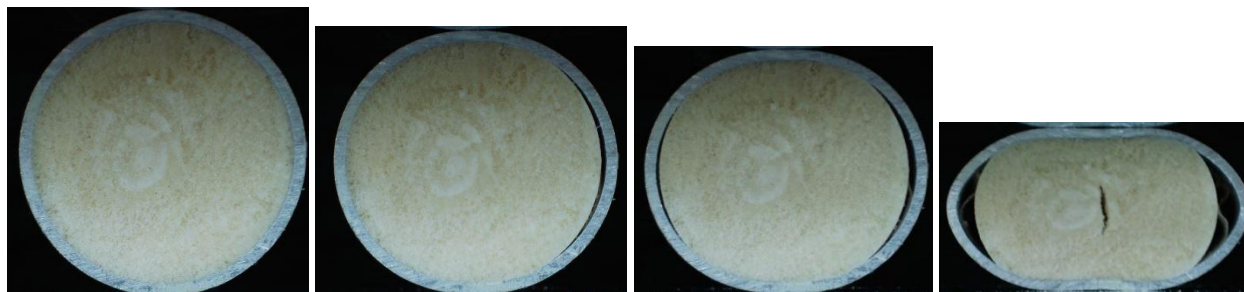


Διάγραμμα 4.6: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 30x30x2

Οι πειραματικές και θεωρητικές καμπύλες των τριών τετραγωνικών σωλήνων παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα. Το ίδιο φυσικά ισχύει και με τα στιγμιότυπα. Εξάιρεση αποτελεί η εικόνα 8 του σωλήνα διαστάσεων 30x30x2. Στο εργαστήριο κατά τη συμπίεση του εν λόγω σωλήνα, λίγο μετά τα 16mm ήρθαν σε επαφή οι απέναντι πλευρές του, κάτι που δεν συνέβη στην προσομοίωση του φαινομένου. Και στις άλλες δύο περιπτώσεις ήρθαν σε επαφή οι απέναντι πλευρές με απότομη αύξηση του φορτίου, αλλά τερματίστηκε χειροκίνητα η συμπίεση τη στιγμή της επαφής και όχι λίγο μετά από αυτήν. Το διάγραμμα 4.6 μας δείχνει πως αν συνεχιζόταν η συμπίεση οι δύο καμπύλες θα είχαν διαφορετική συμπεριφορά. Τέλος παρατηρείται πώς όσο μικρότερη είναι η περίμετρος ενός τετραγωνικού σωλήνα τόσο λιγότερο μοιάζει η πειραματική με τη θεωρητική καμπύλη φορτίου- μετατόπισης.

### 4.3.2 Σωλήνες με προσθήκη πολυμερικού αφρού

#### 4.3.2.1 Σωλήνας διαστάσεων $\Phi 50 \times 2 \times 60$

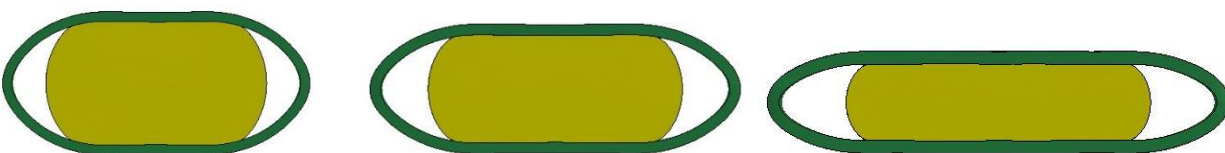


1

2

3

4



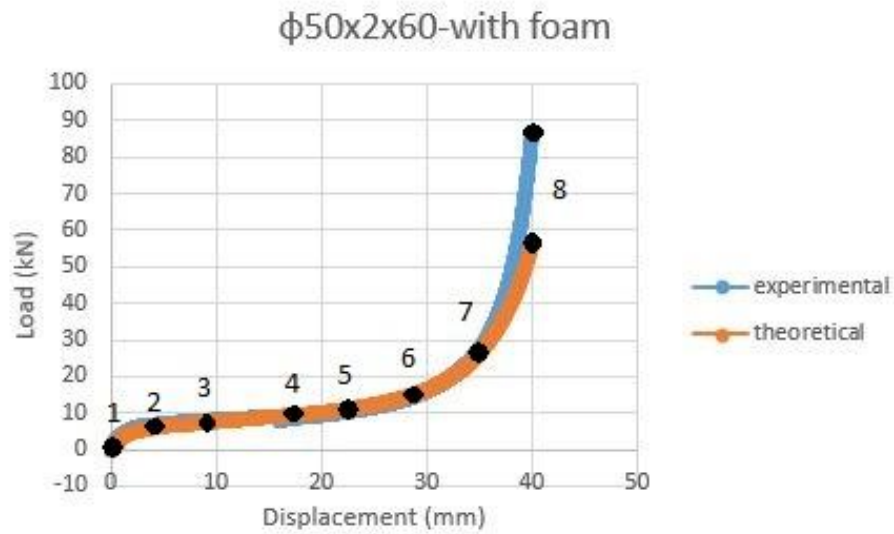
5

6

7



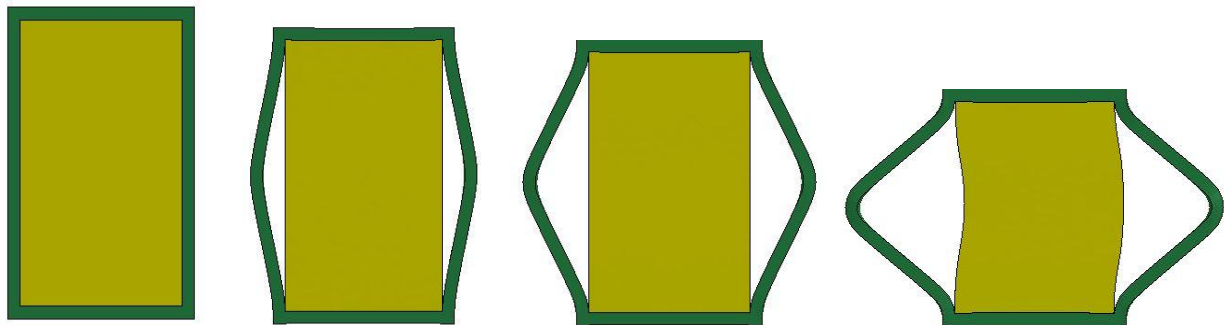
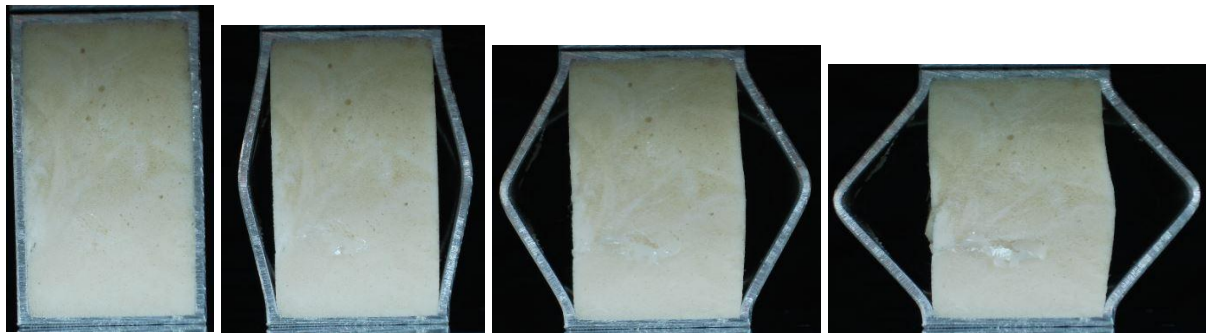
8



Διάγραμμα 4.7: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων φ50x2x60

Η καμπύλη φορτίου μετατόπισης είναι ομαλή λόγω της διαδοχικής εμπλοκής όλο και περισσότερων τμημάτων της κατασκευής στην κατάρρευση.

#### 4.3.2.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise

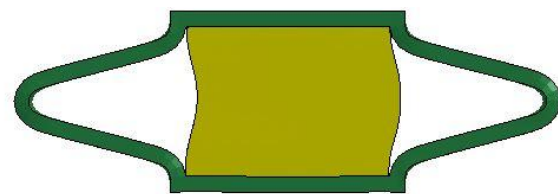
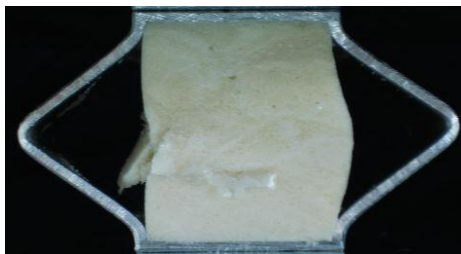


1

2

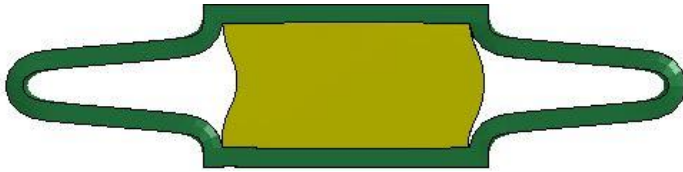
3

4

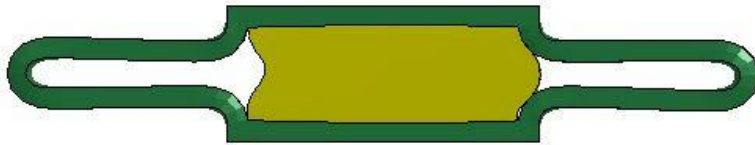


5

6



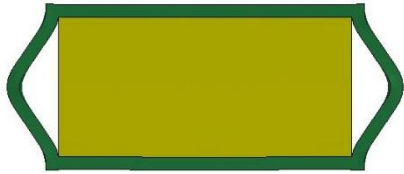
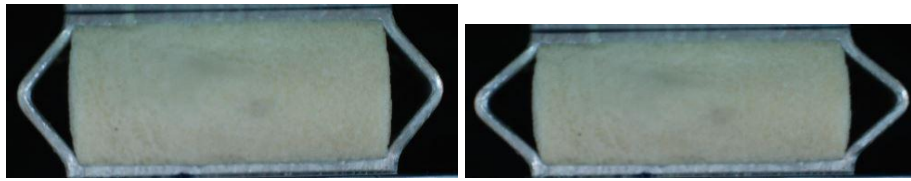
7



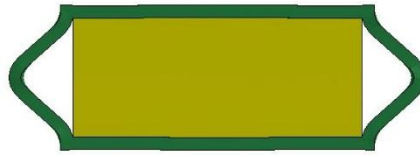
8



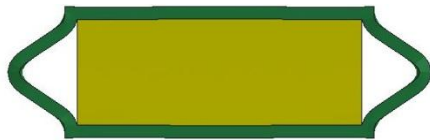
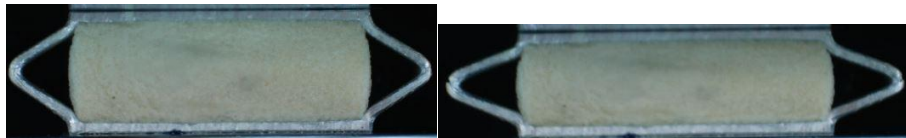




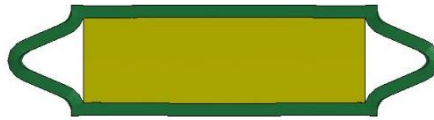
4



5



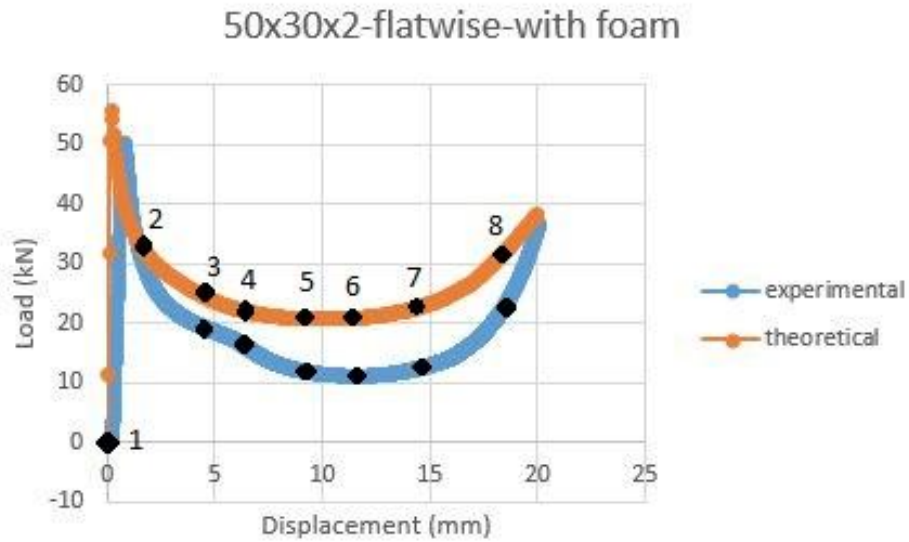
6



7

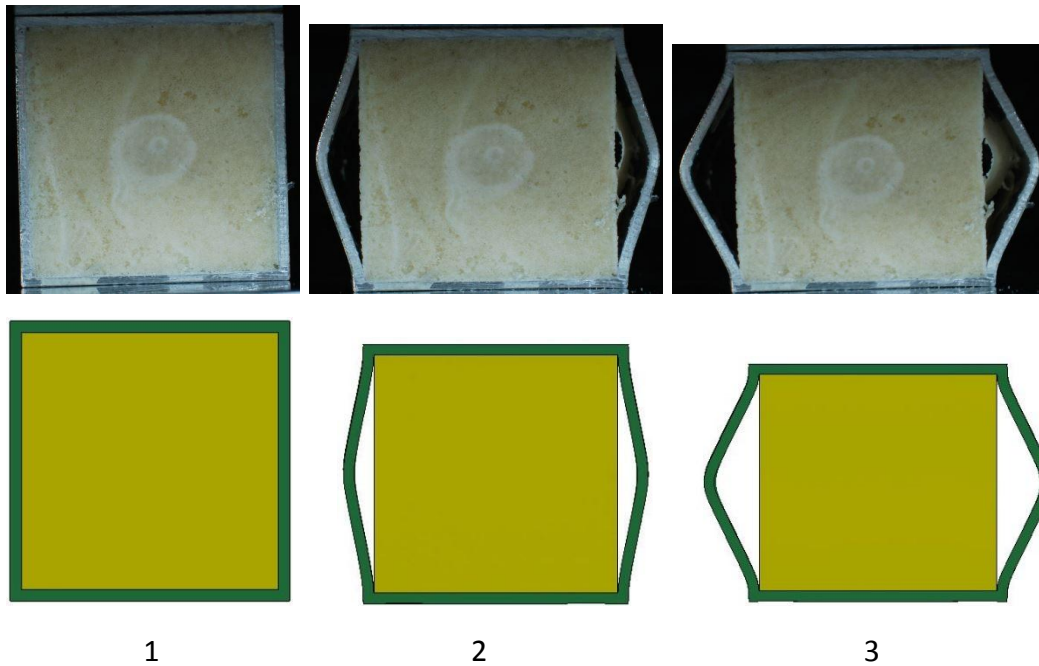


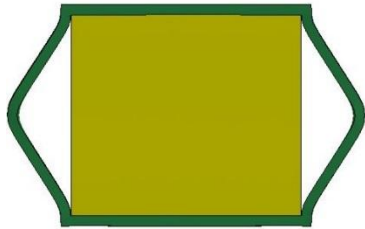
8



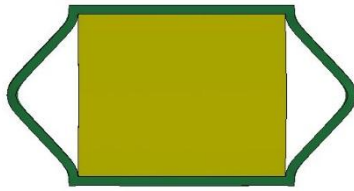
Διάγραμμα 4.9: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-flatwise

#### 4.3.2.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2

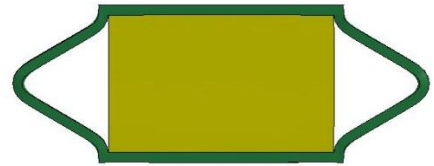




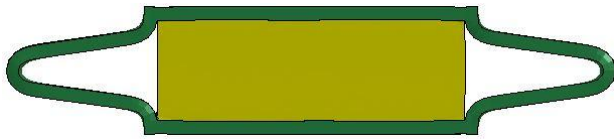
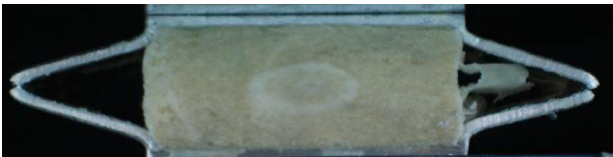
4



5



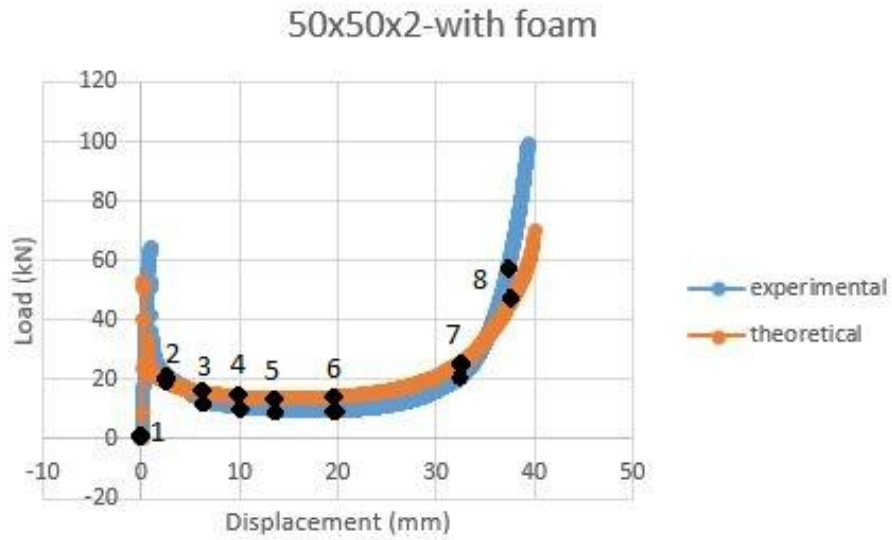
6



7

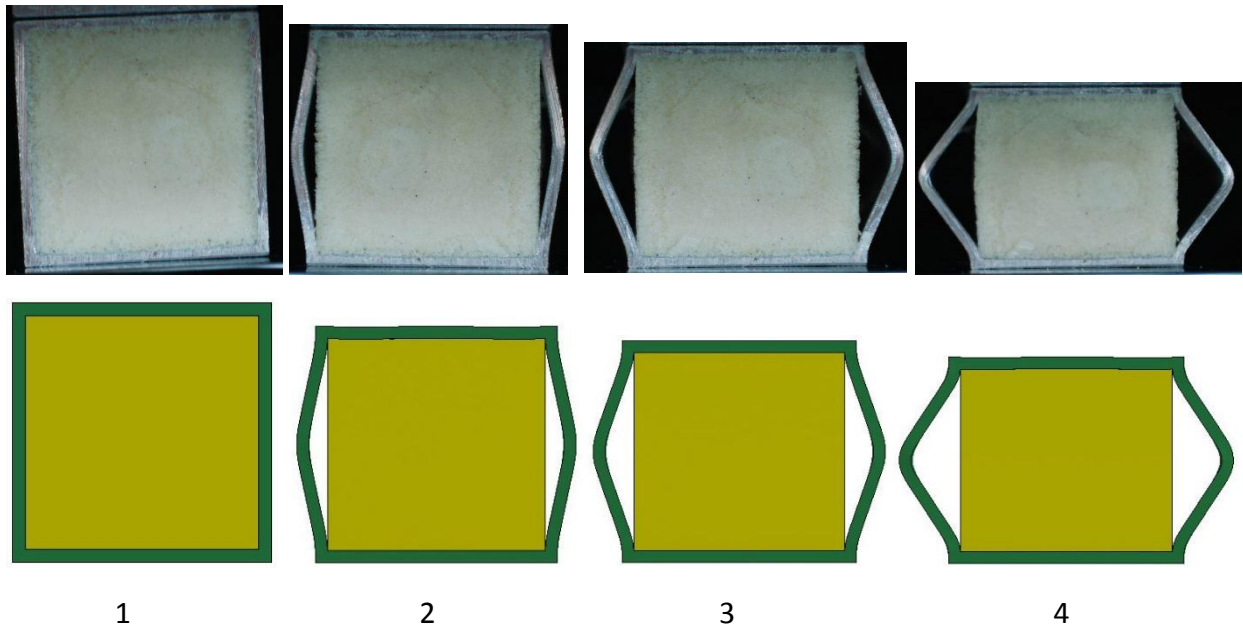


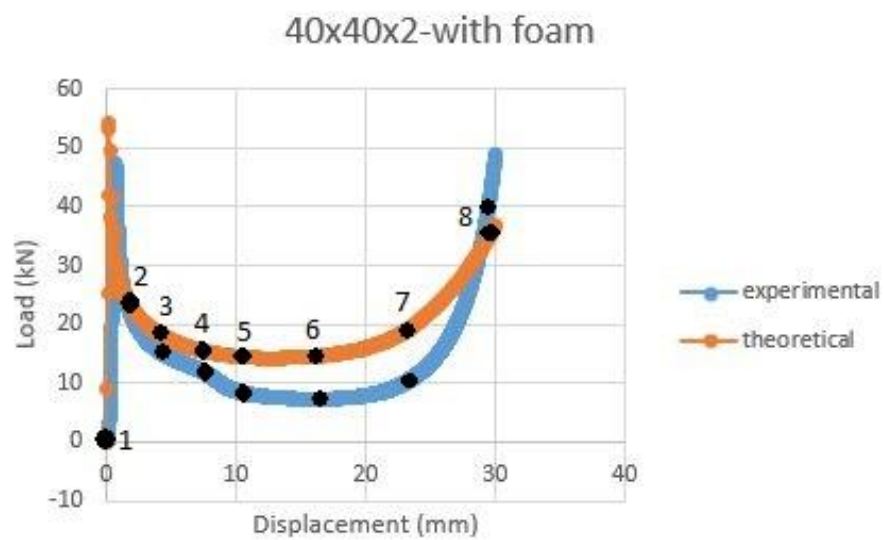
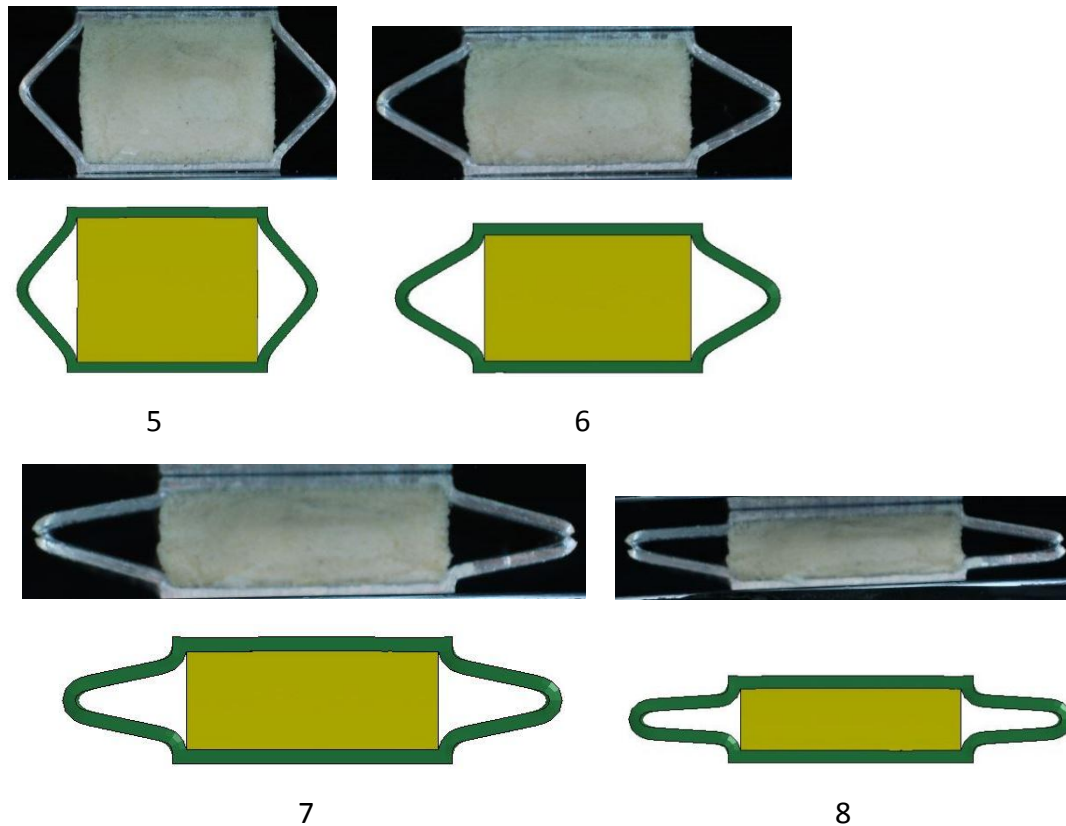
8



Διάγραμμα 4.10: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x50x2

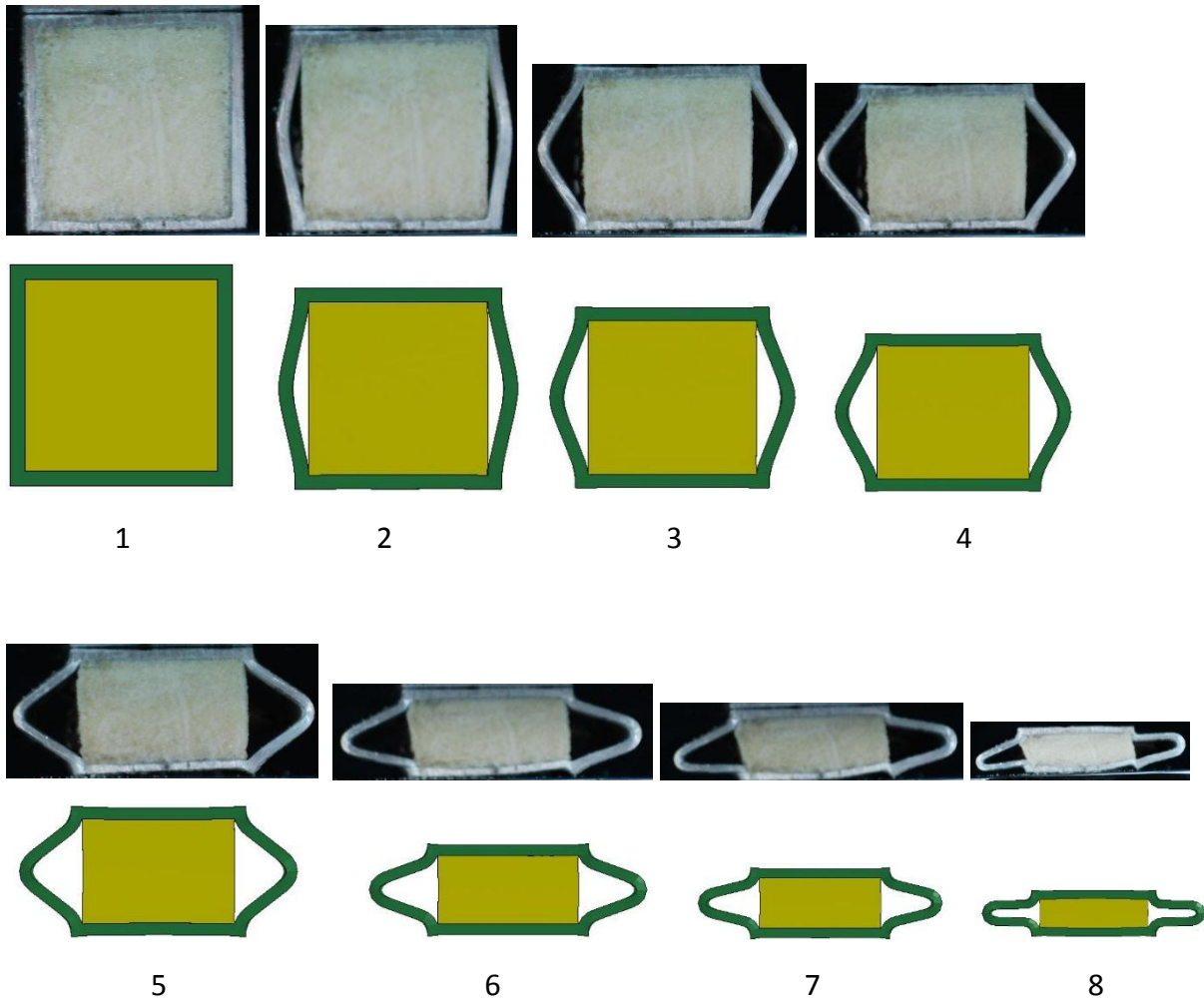
#### 4.3.2.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2

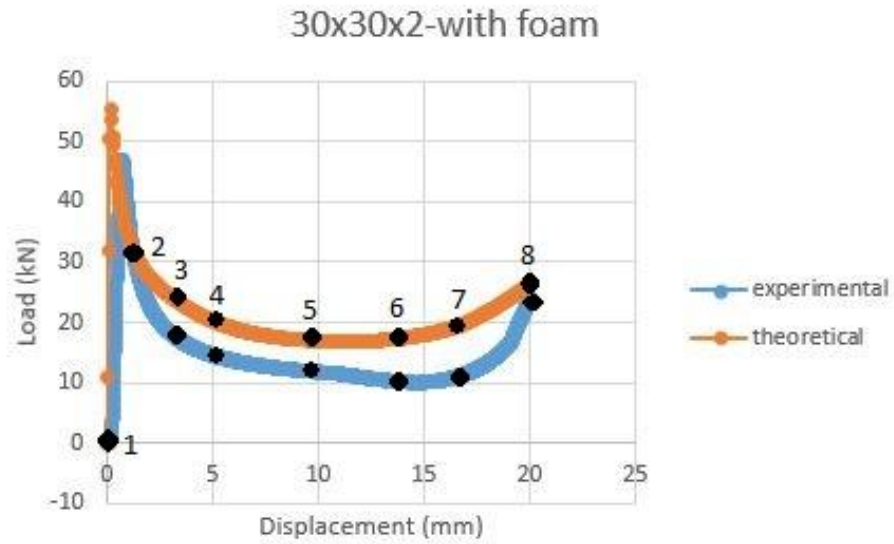




Διάγραμμα 4.11: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 40x40x2

#### 4.3.2.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2

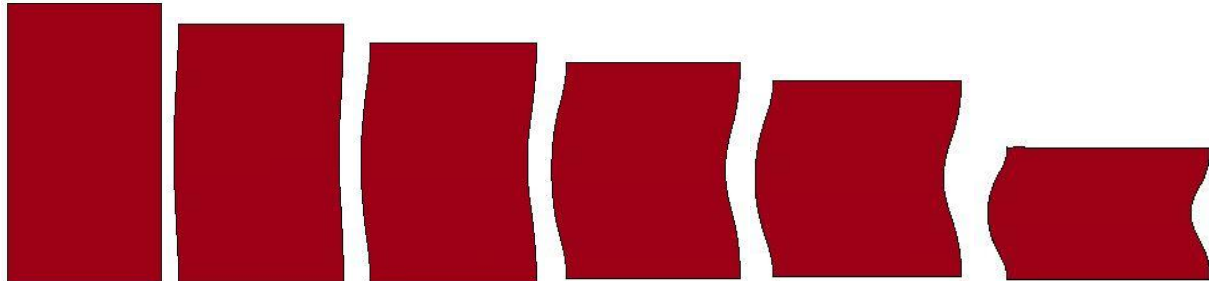
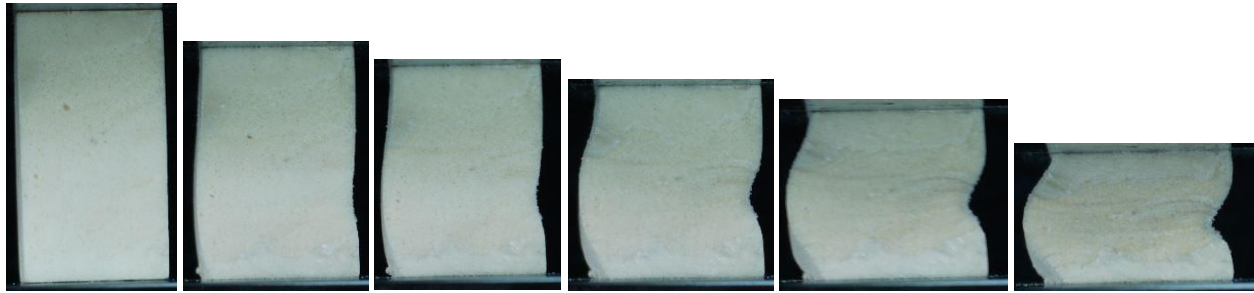




Διάγραμμα 4.12: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 30x30x2



### 4.3.3 Δοκίμιο αφρού διαστάσεων 60x40- transverse



1

2

3

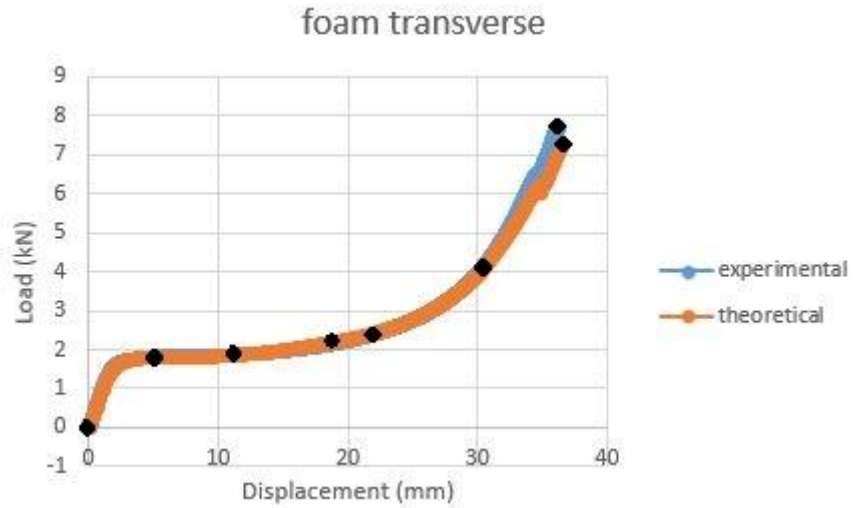
4

5

6



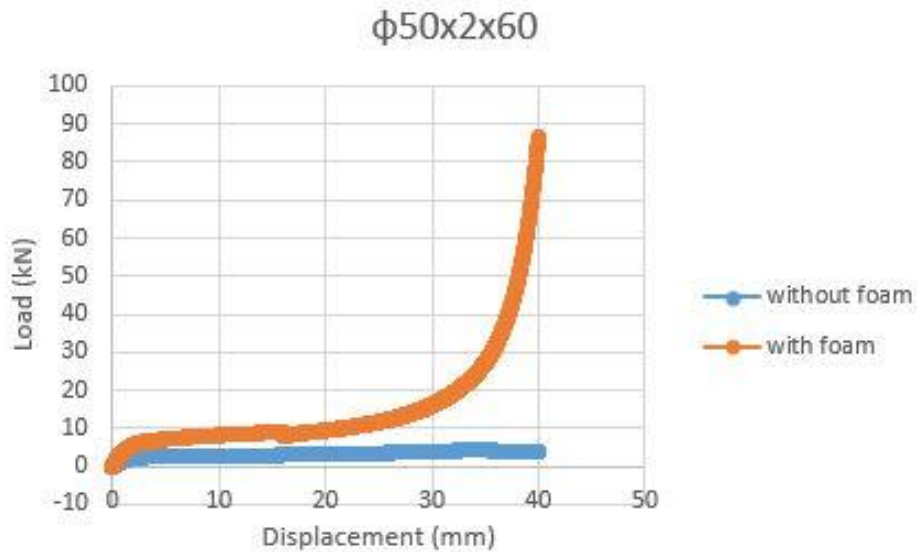
7



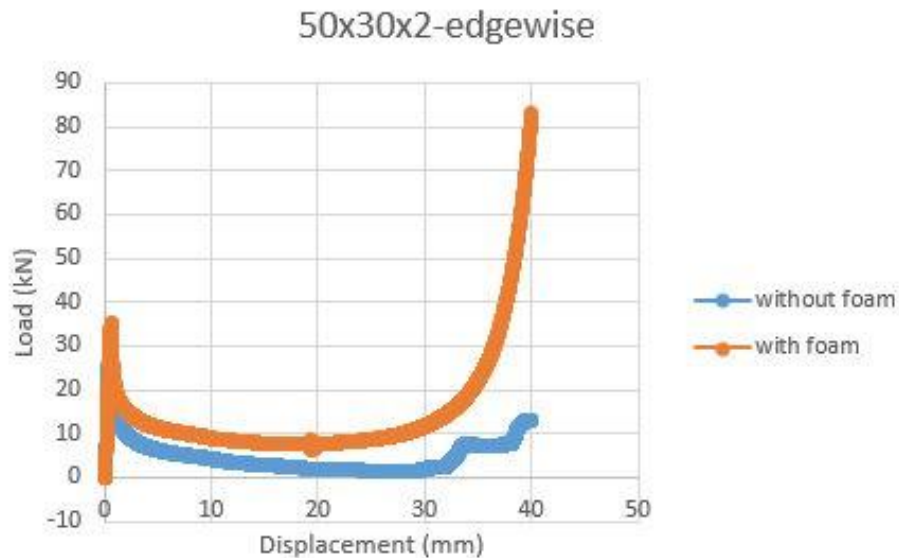
Διάγραμμα 4.13: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκίμιου διαστάσεων 60x40-transverse

Για το δοκίμιο του αφρού που καταπονήθηκε σε συμπίεση κατά τη φορά διόγκωσης του αφρού (axially) δεν έγινε αντίστοιχη προσομοίωση διότι η οι σωλήνες συμπίεστηκαν κατά την εγκάρσια κατεύθυνση. Έτσι, λοιπόν, συμπιέζοντάς τον εγκάρσια μπορούμε να πάρουμε τις πραγματικές ιδιότητες του αφρού.

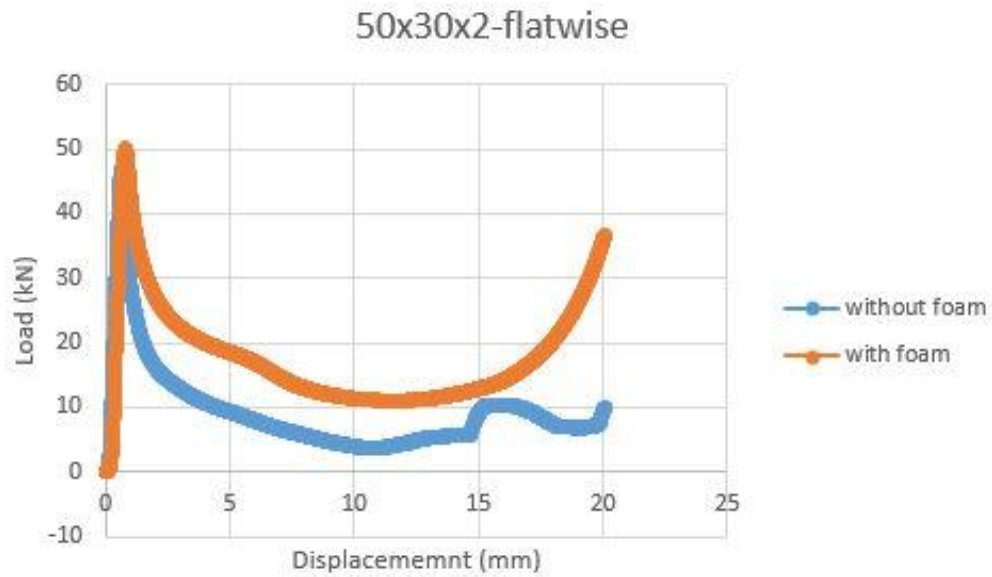
#### 4.4 Πειραματικές τιμές: Σωλήνες με και χωρίς προσθήκη παρασκευασμένου πολυμερικού αφρού



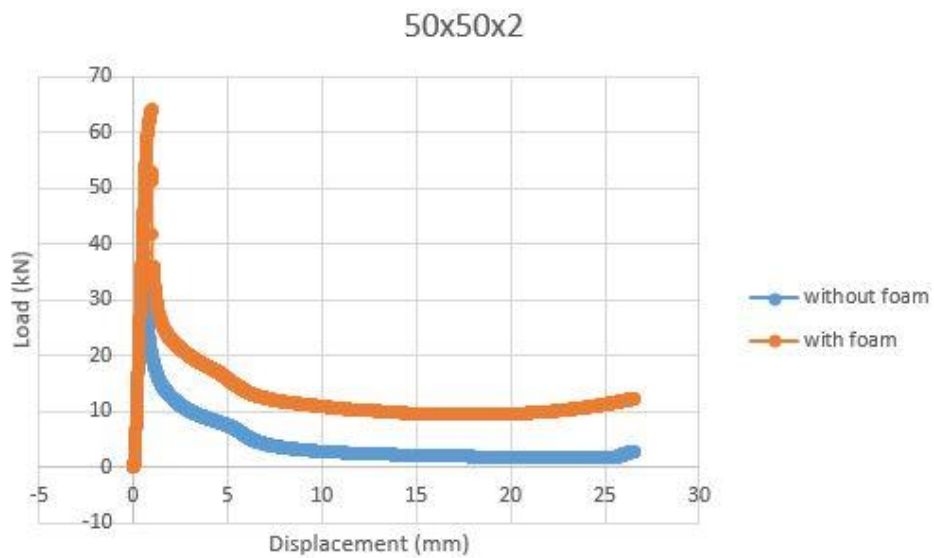
Διάγραμμα 4.14: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων φ50x2x60



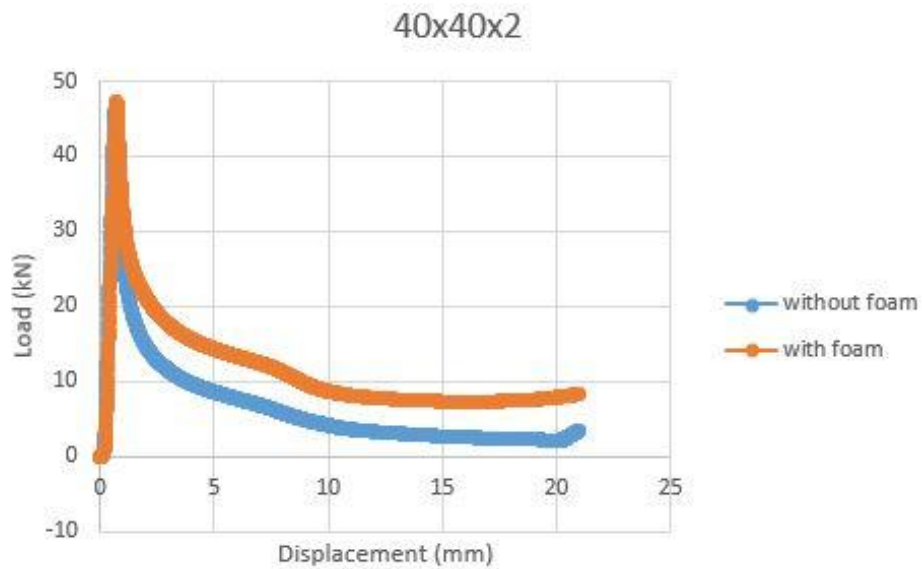
Διάγραμμα 4.15: Καμπύλες φορτίου- μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-edgewise



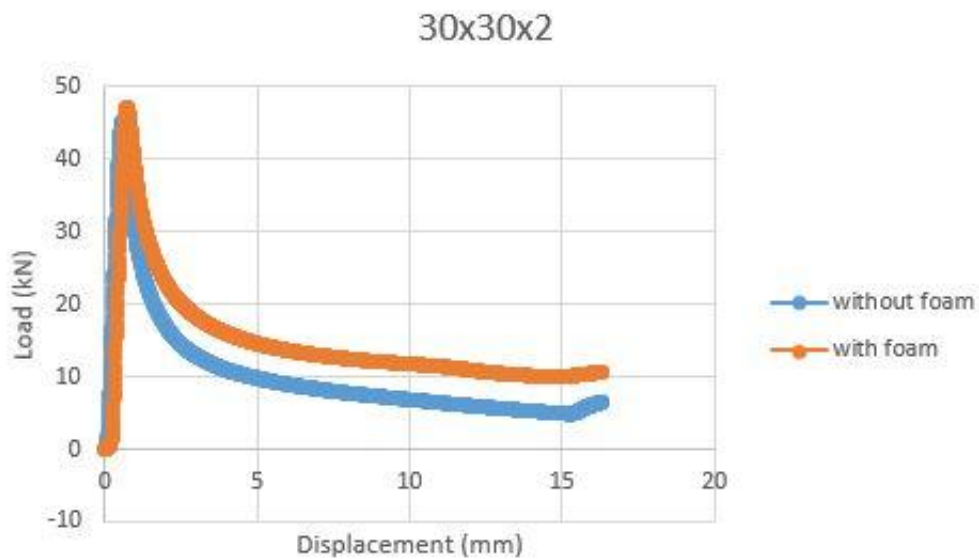
Διάγραμμα 4.16: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-flatwise



Διάγραμμα 4.17: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x50x2



Διάγραμμα 4.18: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 40x40x2



Διάγραμμα 4.19: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 30x30x2

#### 4.5 Σχόλια- Παρατηρήσεις

- Η ενέργεια που απορροφάται από τους σωλήνες με την προσθήκη του πολυμερικού αφρού είναι σαφώς μεγαλύτερη από εκείνους χωρίς την προσθήκη αφρού. Συμπεραίνουμε πως ο αφρός πολυουρεθάνης ενεργεί ως εξαιρετικός απορροφητής ενέργειας στην περίπτωση της πλευρικής κατάρρευσης σωλήνων. Παρακάτω φαίνεται η απορροφώμενη ενέργεια σε J.

α/α	Διαστάσεις δοκιμίου	experimental without foam	experimental with foam	theoretical without foam	theoretical with foam
1	φ50x2x60	127.25	611.14	150.11	565.65
2	50x30x2 (edgewise)	192.03	596.05	318.15	604.34
3	50x30x2 (flatwise)	183.23	355.48	299.92	516.02
4	50x50x2	122.23	767.54	212.47	850.65
5	40x40x2	137.29	410.45	310.08	576.98
6	30x30x2	164.63	293.34	303.96	422.81
7	foam transverse	-	99.81	-	100

Πίνακας 4.2 : Απορροφώμενη ενέργεια (J)

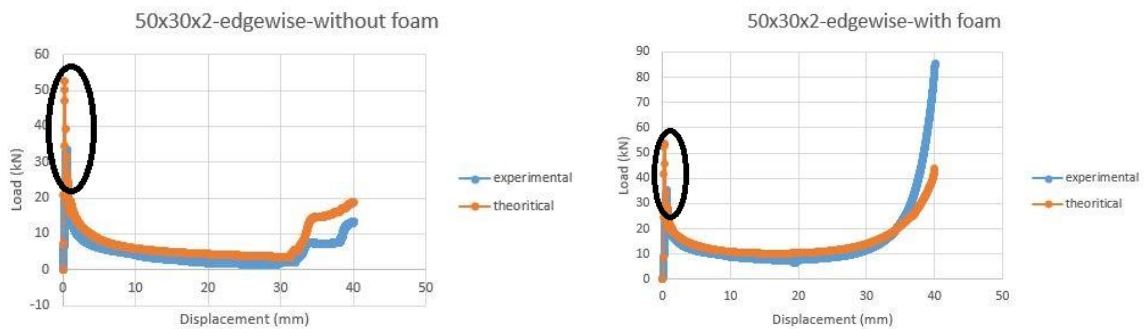
- Το μέγιστο φορτίο σε kN ανά περίπτωση παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

α/α	Διαστάσεις δοκιμίου	experimental without foam	experimental with foam	theoretical without foam	theoretical with foam
1	φ50x2x60	42.6	86.8	79.7	56.1
2	50x30x2 (edgewise)	33.5	85.6	53.7	53
3	50x30x2 (flatwise)	46.8	50.1	54.6	55.7
4	50x50x2	47.3	99.1	52	70.4
5	40x40x2	45.9	48.9	48.1	54.2
6	30x30x2	45.1	47.1	54.6	55.3
7	foam transverse	-	76.9	-	72.6

Πίνακας 4.3 : Μέγιστο φορτίο ανά περίπτωση (kN)

- Γενικά παρατηρείται πως οι θεωρητικές και πειραματικές καμπύλες ταυτίζονται σε ένα μεγάλο βαθμό. Οι συνθήκες που επικρατούν στο εργαστήριο αποτυπώθηκαν με μεγάλη σαφήνεια στον κώδικα.
- Το μέγιστο φορτίο στις θεωρητικές καμπύλες είναι εν γένει λίγο μεγαλύτερο από εκείνο στις πειραματικές (βλ. Εικόνα 4.1). Αυτό συμβαίνει διότι στο περιβάλλον του κώδικα

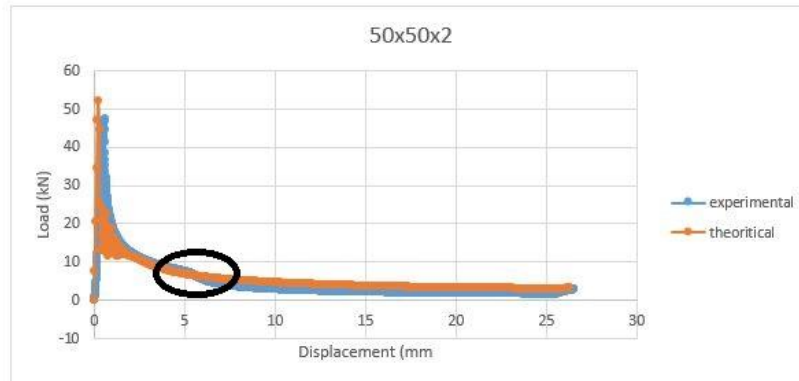
επικρατούν εξιδανικευμένες συνθήκες. Αυτή η διαφορά όμως δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη συνολική ενέργεια απορρόφησης διότι το εμβαδόν που περικλείεται σε εκείνη την περιοχή του διαγράμματος είναι μικρό και στις δύο περιπτώσεις. Όσον αφορά στο μοντέλο με την προσθήκη πυρήνα αφρού η μικρή διαφορά του φορτίου ανάμεσα στην πειραματική και θεωρητική καμπύλη φορτίου -μετατόπισης οφείλεται στην μη ακριβή αποτύπωση α)της πειραματικής καμπύλης του αφρού παρά την προσπάθεια επέκτασής της και β)των ιδιοτήτων του αφρού.



Εικόνα 4.1: Διαφορά μέγιστου φορτίου θεωρητικής και πειραματικής καμπύλης με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) την προσθήκη πολυμερικού αφρού

- Οι θεωρητικές καμπύλες φορτίου- μετατόπισης σε μικρές μετατοπίσεις βρίσκονται πιο αριστερά. Θεωρητικά απεικονίζεται η στιβαρότητα ολόκληρης της κατασκευής και όχι μόνο των υλικών που συμμετέχουν σε αυτήν και γι' αυτό υπάρχει αυτή η αρχική διαφοροποίηση.
- Στην πειραματική και θεωρητική σύγκριση των ορθογωνικών σωλήνων χωρίς την προσθήκη πολυμερικού αφρού (παράγραφος 4.1.1) παρατηρείται μεγαλύτερη διαφορά από ότι στους τετραγωνικούς ή τον κυλινδρικό. Αυτό πιθανολογείται να συμβαίνει λόγω διαφορετικής τριβής στην άνω και κάτω επιφάνεια του σωλήνα. Οι υπόλοιποι σωλήνες είναι συμμετρικοί και δεν εμφανίζεται αυτή η διαφοροποίηση.
- Στο σωλήνα διαστάσεων 50x50x2 παρατηρούμε μια αλλαγή της κλίσης της καμπύλης φορτίου- μετατόπισης, όπως φαίνεται παρακάτω. Αυτό συνέβη διότι σε εκείνο το σημείο ξεκίνησε η ανάπτυξη των επιφανειακών παράπλευρων πλαστικών αρμών. Αν η καμπύλη συνεχιζόταν με την ήδη υπάρχουσα κλίση της οι δύο καμπύλες (θεωρητική και πειραματική) θα ταυτίζονταν απόλυτα. Στους τετραγωνικούς σωλήνες διαστάσεων 40x40x2 και 30x30x2 παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο αλλά σε μεγαλύτερο μήκος

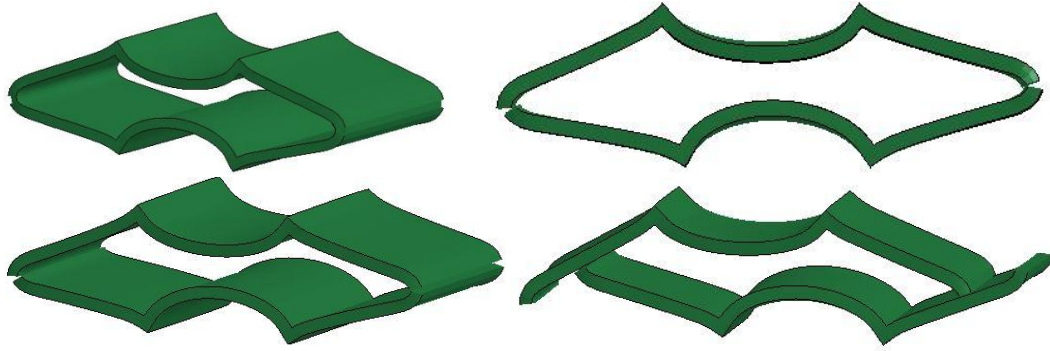
συμπίεσης κάθε φορά. Αυτό συμβαίνει διότι οι αρμοί σχηματίζονται αργότερα και ο σωλήνας δεν προλαβαίνει να ρηγματωθεί πλήρως.



Εικόνα 4.2: Αλλαγή κλίσης καμπύλης

- Στα ορθογωνικά δοκίμια, όπως και στα τετραγωνικά, παρατηρείται επίσης μια αλλαγή στην κλίση της καμπύλης. Αυτό οφείλεται στην ανάπτυξη πλαστικών αρμών. Σε θεωρητικό επίπεδο αυτό μπορεί να συμβεί, μόνο με μοντελοποίηση της αστοχίας (βλ. Εικόνες 4.1- 4.5).
- Οι πυρήνες αφρού που χρησιμοποιήθηκαν δεν αποτελούν τμήματα μιας ενιαίας ράβδου αφρού. Λόγο της ξεχωριστής αυτής παρασκευής τους οι πυρήνες παρουσιάζουν διαφορές στις ιδιότητές τους (π.χ. αστοχία σε διαφορετικό μήκος βράχυνσης).
- Μοντελοποίηση αστοχίας:
  - Ο σκοπός της μοντελοποίησης δεν είναι η προσομοίωση της αστοχίας του δοκιμίου-κατασκευής, αλλά η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πριν από την αστοχία. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε μεγάλο μήκος βράχυνσης για να μελετηθεί η αστοχία στα τελευταία στάδια της κατάρρευσης. Εν τούτοις, υπάρχει δυνατότητα μοντελοποίησης της αστοχίας του μεταλλικού κελύφους καθώς και του πυρήνα αφρού, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνες 4.3- 4.7).

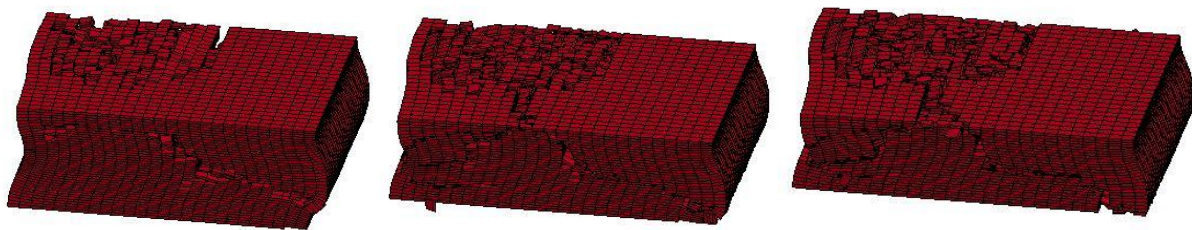




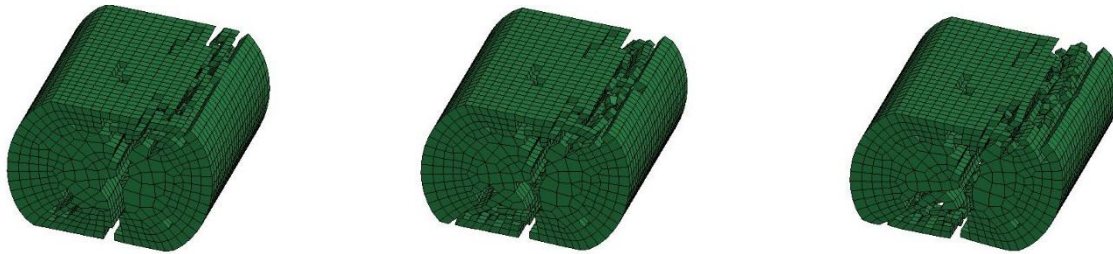
Εικόνα 4.3: Συμπίεση μεταλλικού σωλήνα με μοντελοποίηση αστοχίας υλικού



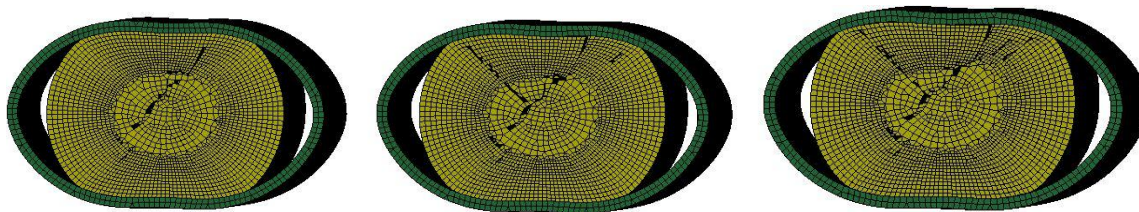
Εικόνα 4.4: Συμπίεση μπιγέτας αφρού με μοντελοποίηση αστοχίας υλικού (coarse meshing)



Εικόνα 4.5 Συμπίεση μπιγέτας αφρού με μοντελοποίηση αστοχίας υλικού (fine meshing)



Εικόνα 4.6: Συμπύεση κυλινδρικής μπιγέτας αφρού με μοντελοποίηση αστοχίας υλικού



Εικόνα 4.7: Συμπύεση κυλινδρικού σωλήνα με προσθήκη πολυμερικού αφρού με μοντελοποίηση αστοχίας υλικού

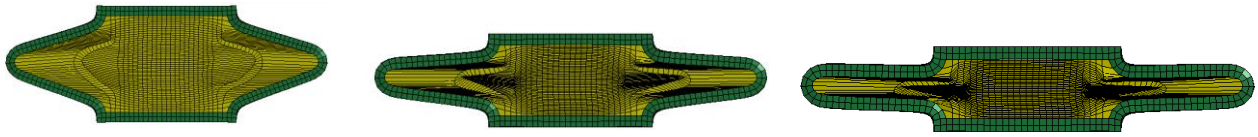
- Η μοντελοποίηση της αστοχίας στο μεταλλικό κέλυφος, έγινε με την ρύθμιση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου η οποία αφορά στην πλαστική παραμόρφωση της αστοχίας. Στον κώδικα LS-DYNA αυτό έγινε στο τμήμα μοντελοποίησης του υλικού (MAT 24-PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY\_STOCHASTIC). Η αστοχία-θραύση του υλικού προσομοιώθηκε με την διαδικασία Element-Erosion-Deletion. Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία, όταν σε μια περιοχή καλυφθεί το κριτήριο της αστοχίας από τα πεπερασμένα στοιχεία τότε εκείνα διαγράφονται.
- Όσον αφορά στον αφρό, το μοντέλο του υλικού (MAT 63- CRUSHABLE\_FOAM) δεν ενσωματώνει καμία παράμετρο κριτηρίου αστοχίας. Σε αυτή την περίπτωση, ενεργοποιείται ξεχωριστή κάρτα μοντελοποίησης υλικού προς αστοχία (MAT-ADD-EROSION) όπου περιέχονται παράμετροι-κριτήρια αστοχίας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις και ιδιαίτερα σε σύνθετες καταπονήσεις, χρειάζεται η διαδικασία δοκιμής και επαλήθευσης (trial and error) προκειμένου να αποδοθεί ρεαλιστικά η αστοχία με βάση τις πειραματικές παρατηρήσεις (ρύθμιση παραμέτρων). Η μοντελοποίηση με αυτόν τον τρόπο χρειάζεται να οριστεί μια επιπλέον επιφάνεια επαφής (CONTACT\_ ERODING)

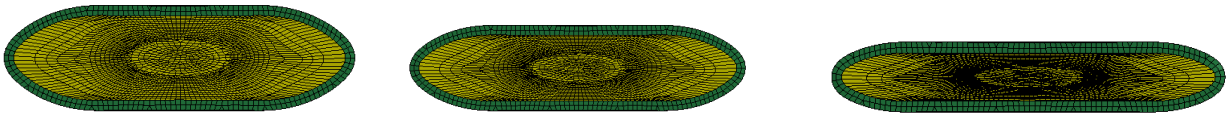
που διαχειρίζεται την επαφή-αλληλεπίδραση ανάμεσα στις νεοδημιουργηθείσες επιφάνειες (λόγο διαγραφής πεπερασμένων στοιχείων).

- Με χρήση διεπιφάνειας επαφής, τύπου SINGLE (SELF CONTACT) μοντελοποιούμε την αλληλεπίδραση μεταξύ κελύφους και πυρήνα αφρού ως part set. Αυτή η διεπιφάνεια επαφής καλύπτει την ενδεχόμενη επαφή μεταξύ τμημάτων του κελύφους αλλά και του πυρήνα αφρού ξεχωριστά. Αυτό δεν προέκυψε όμως ούτε πειραματικά. Για πιο αποτελεσματική διαχείριση της αλληλεπίδρασης του μεταλλικού κελύφους με τον πυρήνα αφρού στα όρια της κατασκευής κατά την υψηλή παραμόρφωση της κατασκευής ενεργοποιήθηκε κατάλληλη παράμετρος στην σχετική διεπιφάνεια επαφής (SOFT=2).
- Μοντελοποίηση πυρήνα αφρού:
  - Επειδή το υλικό του αφρού είναι ιδιαίτερα ενδοτικό (πολύ μικρή στιβαρότητα), η συμπίεσή του σε υψηλές παραμορφώσεις συνήθως οδηγεί σε δύο χαρακτηριστικά φαινόμενα της ανάλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
    1. HOURGLASS: Γίνεται αντιληπτό με την μη ρεαλιστική μορφή του πλέγματος, σε μορφή διαδοχικών κλεψυδρών (αριθμητική αστάθεια, NUMERICAL INSTABILITY).
    2. NEGATIVE VOLUME: Είναι αποτέλεσμα της ακραίας παραμόρφωσης των πεπερασμένων στοιχείων του αφρού, που οδηγούν σε υπολογισμό αρνητικού όγκου (αριθμητική αστάθεια και πρόωρος εσφαλμένος τερματισμός της ανάλυσης).

Το πρώτο πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με έλεγχο του HOURGLASS (κάρτα HOURGLASS) και το δεύτερο με την κάρτα “εσωτερικής επαφής” (CONTACT INTERIOR).
- Στην παρούσα διπλωματική εργασία δε μας ενδιαφέρει η ύπαρξη ισχυρής σύνδεσης μεταξύ μεταλλικού κελύφους και πυρήνα αφρού. Εν τούτοις έγιναν κάποιες προσπάθειες μοντελοποίησης του φαινομένου (TIED). Στην πράξη αυτή η σύνδεση εξασφαλίζεται με κάποια ρητίνη που τοποθετείται ανάμεσα στις δύο διεπιφάνειες. Παρακάτω φαίνονται οι προοδευτικές εικόνες κατάρρευσης του κυλινδρικού και ενός ορθογωνικού σωλήνα. (Εικόνες 4.8, 4.9)



Εικόνα 4.8: Συμπίεση ορθογωνικού σωλήνα με προσθήκη πολυμερικού αφρού ισχυρά συνδεδεμένου με το κέλυφος.



Εικόνα 4.9: Συμπίεση κυλινδρικού σωλήνα με προσθήκη πολυμερικού αφρού ισχυρά συνδεδεμένου με το κέλυφος.

- Παρατηρήθηκε το φαινόμενο “αρνητικού όγκου” (NEGATIVE VOLUME) στο ορθογωνικό δοκίμιο λόγω της ορθογωνικής διατομής του πλέγματος. Αυτό αντιμετωπίζεται με α) αρχικό διαφορετικό πλέγμα, β) δημιουργία νέου πλέγματος κατά την εξέλιξη του φαινομένου της κατάρρευσης (remeshing) ή γ) διαγραφή πεπερασμένων στοιχείων (element erosion). Τα πλαϊνά μέρη του σωλήνα δρουν όπως στο flash στη σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. Εκεί παρατηρούνται μεγαλύτερα φορτία και γι’ αυτό η καμπύλη φορτίου μετατόπισης είναι ελαφρώς πιο ψηλά από την περίπτωση χωρίς τη σύνδεση. Στην πράξη θα έχουμε ρηγμάτωση στο κέντρο του αφρού λόγω εμφάνισης δευτερευουσών εφελκυστικών τάσεων εγκάρσια στη διεύθυνση φόρτισης.
- Καμπύλη αφρού: Επειδή στο πείραμα της συμπίεσης της μπιγέτας του αφρού η μέγιστη παραμόρφωση είναι μικρότερη από την παραμόρφωση που υπέστη ο αφρός όντας πυρήνας, προεκτείναμε την πειραματική καμπύλη συμπίεσης του αφρού εκθετικά (με βάση την μέχρι το σημείο εκείνο τροχιά της). Αυτό έγινε προκειμένου να εισαχθεί στον κώδικα πληρέστερα και ακριβέστερα η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις (επιπλέον μέτρο πρόληψης εμφάνισης NEGATIVE VOLUME).
- Στις διεπιφάνειες επαφής που διαχειρίζονται την επαφή μεταξύ των πλακών συμπίεσης και του αφρού (μοντέλο συμπίεσης μπιγέτας) και την επαφή μεταξύ μεταλλικού κελύφους και πυρήνα αφρού, λόγω της μεγάλης διαφοράς στην στιβαρότητα, ενεργοποιήθηκε η συγκεκριμένη παράμετρος (SOFT=1) προκειμένου να προληφθεί η αλληλοδιείσδυση (interpenetration) των αλληλοεπιδρώντων τμημάτων του μοντέλου.
- Τέτοιου είδους αφροί παρουσιάζουν λόγω Poisson πρακτικά ίσο με μηδέν (βλ. πίνακα 4.1). Ουσιαστικά δεν υπάρχει εγκάρσια παραμόρφωση αλλά μόνο αξονική.

- Στο ύψος του πλατό του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης του αφρού προστέθηκε  $TSC=2$  (TENSILE STRESS CUTOFF) ώστε να μοντελοποιηθεί έστω μια στοιχειώδης αντοχή του αφρού σε εφελκυσμό για πρόληψη αριθμητικής αστάθειας κατά την ανάλυση.
- Για λόγους δημιουργίας πιο ευέλικτων μοντέλων (εύθετος χρόνος ανάλυσης) αποφεύχθηκε η μοντελοποίηση μη πιθανών ενδεχομένων όπως για παράδειγμα μοντελοποίηση αλληλεπίδρασης πλακών και πυρήνα αφρού στις πλήρης κατασκευές. Αφού ο λόγος Poisson είναι ίσος με το μηδέν, δεν αναμένεται διόγκωση του αφρού και επαφή του με τις πλάκες συμπίεσης. Παρόλα αυτά, κατά την πειραματική διαδικασία λόγω θραύσης των τμημάτων του αφρού, ήρθαν σε επαφή μεταξύ τους (μικρή υπερχειλίση).
- Όπως φαίνεται παρακάτω, θεωρητικά στην πλήρη κατασκευή ο αφρός πληγώνεται και θραύεται αλλά υποστηρίζεται από το κέλυφος και έτσι δεν αποκόπτεται όπως έγινε πειραματικά.



#### 4.6 Προτάσεις για περαιτέρω εργασία

- Μοντελοποίηση αστοχίας.
- Παραμετρική μοντελοποίηση με βάση την ισχύ σύνδεσης μεταξύ μεταλλικού κελύφους και πυρήνα αφρού.
- Μελέτη συμπεριφοράς σε δυναμική-κρουστική καταπόνηση.

## ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. <http://en.wikipedia.org>
2. <http://www.nhtsa.gov>
3. <http://www.asirt.org>
4. <http://digilib.lib.unipi.gr>
5. <http://knowledge.allianz.com>
6. <http://google.gr>
7. <http://aitoloakarnanianet.blogspot.gr>
8. <http://www.carbodydesign.com>
9. <http://www.autotriti.gr>
10. <http://www.inostech.com>
11. <http://www.polygrow.nl>
12. <http://www.ritoras.gr>
13. <http://www.civilplus.gr>
14. <http://www.foampartner.com>
15. <http://library.tee.gr>
16. <http://www.kaboodan.ir>
17. <http://www.subrosa.com.my>
18. <http://dspace.lib.ntua.gr>

## ΕΝΤΥΠΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

19. N.K. Gupta G.S. Sekhon, P.K. Gupta, "Study of lateral compression of round metallic tubes", Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology, Civil Engineering Group, Birla Institute of Technology and Science, New Delhi, (2004)
20. N.K. Gupta, G.S. Sekhon, P.K. Gupta, "Finite Element Analysis of Collapse of Metallic Tubes", Indian Institute of Technology, New Delhi (2008)
21. Sebastian Lipa, Maria Kotelko, "Lateral impact of tubular structure- theoretical and experimental analysis", Lodz University of Technology, Institute of Material Science and Engineering, Department of Strength of Materials, Łódź, Poland (2013)
22. N. K. Gupta & Atul Khullar, "Collapse Load Analysis of Square and Rectangular Tubes Subjected to Transverse In-Plane Loading", Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology, New Delhi (1993)
23. N.K. Gupta, G.S. Sekhon, P.K. Gupta, "A study of lateral collapse of square and rectangular metallic tubes", Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology, New Delhi, India (2001)
24. Z.H. Tu, V.P.W. Shim, C.T. Lim, "Plastic deformation modes in rigid polyurethane foam under static loading", Department of Mechanical and Production Engineering, National University of Singapore, 2001

25. Abbas Niknejad, Seyed Ali Elahi, Gholam Hossein Liaghat, “Experimental investigation on the lateral compression in the foam-filled circular tubes”, Mechanical Engineering Department, Yasouj University, Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Iran, 2011
26. Spyros A. Karamanos, Kyros P. Andreadakis, “Denting of internally pressurized tubes under lateral loads”, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Thessaly, Volos, 2006
27. Sebastian Lipa, “Comparative experimental-numerical study into tubular energy absorbers under lateral crushing load”, Department of Strength of Materials and Structures, Technical University of Łódź,
28. S. H. Goods, C. L. Neuschwanger, C. Henderson, D. M. Skala, “Mechanical properties and energy absorption characteristics of a polyurethane foam”, Materials Reliability Department, California, 1997
29. J. A. RINDE, “Poisson’s Ratio for Rigid Plastic Foams”, Lawrence Radiation Laboratory, University of California, 1970
30. Fabrice Saint-Michel, Laurent Chazeau, Jean-Yves Cavaille, Emanuelle Chabert, “Mechanical properties of high density polyurethane foams”, Laboratoire de Mecanique des Solides, Ecole Polytechnique, France, 2006
31. Abramowicz W, Jones N., “Dynamic progressive buckling of circular and square tubes”, 1986
32. Abramowicz W. “Thin-walled structures as impact energy absorbers. Thin Walled Structures”, 2003
33. Ashida K., “Polyurethane and related foams: Chemistry and technology”, 2007