

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ</b>	<b>2</b>
<b>ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ</b>	<b>3</b>
<b>ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>5</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>5</b>
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b>	<b>6</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>7</b>
<b>1.1 ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	<b>7</b>
<b>1.2 ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗΣ ΚΡΟΥΣΕΩΝ ΤΑΥΤΜ</b>	<b>9</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΣ ΑΦΡΟΣ</b>	<b>11</b>
<b>2.1 ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗ</b>	<b>11</b>
2.1.1 Χαρακτηριστικά	12
2.1.2 Εφαρμογές	14
<b>2.2 Παρασκευή πολυμερικού αφρού</b>	<b>15</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Σωλήνες χωρίς την προσθήκη αφρού</b>	<b>19</b>
3.1.1 Σωλήνας διαστάσεων φ50x2x60	19
3.1.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise	21
3.1.3 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-flatwise	22
3.1.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2	24
3.1.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2	25
3.1.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2	27
<b>3.2 Σωλήνας με προσθήκη αφρού εμπορίου διαστάσεων Φ50x2x60</b>	<b>28</b>
<b>3.3 Σωλήνες με προσθήκη παρασκευασμένου αφρού</b>	<b>30</b>
3.3.1 Σωλήνας διαστάσεων Φ50x2x60	30
3.3.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise	32
3.3.3 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2 flatwise	34
3.3.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2	36
3.3.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2	38
3.3.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2	40
3.3.7 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise ελεύθερης εκτόνωσης	41
<b>3.4 Δοκίμια αφρού</b>	<b>44</b>
3.4.1 Δοκίμιο διαστάσεων 60x40-axially	44
3.4.2 Δοκίμιο διαστάσεων 60x40-transverse	45

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</b>	<b>47</b>
<b>4.1 Σωλήνας διαστάσεων φ50x2x60 με και χωρίς προσθήκη αφρού εμπορίου</b>	<b>47</b>
<b>4.2 Σύγκριση σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-edgewise και edgewise ελεύθερης εκτόνωσης με προσθήκη πολυμερικού αφρού</b>	<b>48</b>
<b>4.3 Σωλήνες με και χωρίς προσθήκη παρασκευασμένου πολυμερικού αφρού</b>	<b>49</b>
4.3.1 Σωλήνας διαστάσεων φ50x2x60	49
4.3.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise	50
4.3.3 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-flatwise	51
4.3.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2	52
4.3.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2	53
4.3.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2	54
<b>4.4 Σχόλια- Παρατηρήσεις</b>	<b>55</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΝΤΥΠΗ &amp; ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ</b>	<b>57</b>

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

EIKONA 1.1	9
EIKONA 2.1	11
EIKONA 2.2	14
EIKONA 2.3	15
EIKONA 2.4	16
EIKONA 3.1	20
EIKONA 3.2	22
EIKONA 3.3	23
EIKONA 3.4	25
EIKONA 3.5	26
EIKONA 3.6	28
EIKONA 3.7	31
EIKONA 3.8	33
EIKONA 3.9	35
EIKONA 3.10	38
EIKONA 3.11	39
EIKONA 3.12	41
EIKONA 3.13	43
EIKONA 3.14	43
EIKONA 3.15	45
EIKONA 3.16	46
EIKONA 4.1	48
EIKONA 4.2	48
EIKONA 4.3	49
EIKONA 4.4	49

ΕΙΚΟΝΑ 4.5 .....	50
ΕΙΚΟΝΑ 4.6 .....	50
ΕΙΚΟΝΑ 4.7 .....	51
ΕΙΚΟΝΑ 4.8 .....	52
ΕΙΚΟΝΑ 4.9 .....	53
ΕΙΚΟΝΑ 4.10 .....	54

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗΣ, [IVPU F, 1994].....	13
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	17
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3: ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	17
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4: ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΜΑΖΕΣ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ .....	17
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΑΠΟΡΡΟΦΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (J).....	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΑΝΑ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ (KN) .....	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: ΤΕΛΙΚΑ ΥΨΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (MM) .....	56

## ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1.1: ΘΑΝΑΤΗΦΟΡΑ ΤΡΟΧΑΙΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΣΟΒΑΡΟΤΗΤΑ .....	7
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1.2: ΘΑΝΑΤΗΦΟΡΑ ΤΡΟΧΑΙΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΑΝΑ ΤΡΟΠΟ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ.....	8
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.1: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ–ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ Φ50Χ2Χ60 ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ.....	20
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.2: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50Χ30Χ2-EDGEWISE ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ .....	21
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.3: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50Χ30Χ2-FLATWISE ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ .....	23
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.4: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50Χ50Χ2 ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ .....	24
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.5: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 40Χ40Χ2 ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ .....	26

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.6: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 30Χ30Χ2 ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ .....	27
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.7: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ Φ50Χ2Χ60 ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΕΜΠΟΡΙΟΥ .....	29
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.8: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ Φ50Χ2Χ60 ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟΥ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ .....	31
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.9: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50Χ30Χ2-EDGEWISE ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ .....	33
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.10: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50Χ30Χ2-FLATWISE ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ .....	35
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.11: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50Χ50Χ2 ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ .....	37
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.12: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 40Χ40Χ2 ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ .....	39
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.13: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 30Χ30Χ2 ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ .....	40
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.14: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50Χ30Χ2-EDGEWISE ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ .....	42
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.15: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 60Χ40-AXIALLY .....	44
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.16: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ –ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 60Χ40-TRANSVERSE .....	46
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1:ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ Φ50Χ2Χ60.....	47
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50Χ30Χ2-EDGEWISE .....	48
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ Φ50Χ2Χ60.....	49
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.4: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50Χ30Χ2-EDGEWISE .....	50
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.5: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50Χ30Χ2-FLATWISE .....	51
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.6: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50Χ50Χ2 .....	52
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.7: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 40Χ40Χ2 .....	53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.8: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΩΛΗΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 30Χ30Χ2 .....	54

## ABSTRACT

This dissertation was produced as part of the Post Graduate Program of Materials Science and Technology School of Chemical Engineering and scientifically comes under the study of energy absorption structures. Due to the pressing need for further study of crashworthiness of automobiles and road crash barriers, several experiments were performed by lateral compression on cylindrical, rectangular and square metallic tubes with and without loading them with laboratory manufactured polyurethane foam. The main goal was to discover if polyurethane foam increases significantly energy absorption rates of tubes. Load-displacement curves were obtained as well as technical characteristics such as yield strength and elastic modulus. The comparison of experimental results showed not only that polyurethane foam increases energy absorption but also that cylindrical tubes loaded with polyurethane foam operate as better absorbers than the rectangular and square ones. For the experimental procedure was used an Instron machine.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του ΔΠΜΣ Επίστίμη & Τεχνολογία Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών και εντάσσεται επιστημονικά στην μελέτη των κατασκευών απορρόφησης ενέργειας. Έχοντας ως έναυσμα την ανάγκη περαιτέρω μελέτης της αντοχής των αυτοκινήτων και προστασίας των επιβατών καθώς επίσης και την απορρόφηση ενέργειας από τα οδικά στηθαία ασφαλείας, έγινε μια σειρά πειραμάτων με πλευρική συμπίεση σε κυλινδρικά, ορθογώνια και τετραγωνικά μεταλλικά δοκίμια με και χωρίς την προσθήκη αφρού πολυουρεθάνης που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο. Ο κύριος στόχος ήταν να διαπιστωθεί εάν η προσθήκη αφρού πολυουρεθάνης αυξάνει σημαντικά τον βαθμό απορρόφησης ενέργειας των δοκιμών. Ελήφθησαν οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης καθώς και τεχνικά χαρακτηριστικά όπως η αντοχή διαρροής και το μέτρο ελαστικότητας. Η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξε ότι ο αφρός πολυουρεθάνης αυξάνει σημαντικά την απορρόφηση ενέργειας, αλλά και ότι οι κυλινδρικοί σωλήνες με προσθήκη αφρού πολυουρεθάνης λειτουργούν καλύτερα ως απορροφητές από ότι οι αντίστοιχοι ορθογώνιοι και τετραγωνικοί. Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε η μηχανή Instron.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω κατ' αρχήν τον καθηγητή και διευθυντή του τομέα Τεχνολογίας και Κατεργασιών κ. Δημήτριο Μ. Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη του και την βοήθεια του κατά την διάρκεια εκπόνησης διπλωματικής εργασίας καθώς επίσης το μέλος ΕΔΙΠ Δρ. Μηχ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για την υποστήριξη και την υπομονή του σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται επιστημονικά στην μελέτη των κατασκευών απορρόφησης ενέργειας. Αρχικά, έγινε μια μελέτη για τα τροχαία ατυχήματα και στις συνέπειές τους. Δίνονται μερικά στατιστικά στοιχεία και επισημαίνεται η αναγκαιότητα της μελέτης και εφαρμογής των απορροφητών ενέργειας. Η προστασία των επιβατών κατά τη σύγκρουση ενός οχήματος έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα 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 απορρόφητης ενέργειας. Παρακάτω δίνονται συνοπτικά μερικά στατιστικά στοιχεία των τροχαίων ατυχημάτων.



**Διάγραμμα 1.1: Θανατηφόρα Τροχαία Ατυχήματα Σοβαρότητα**



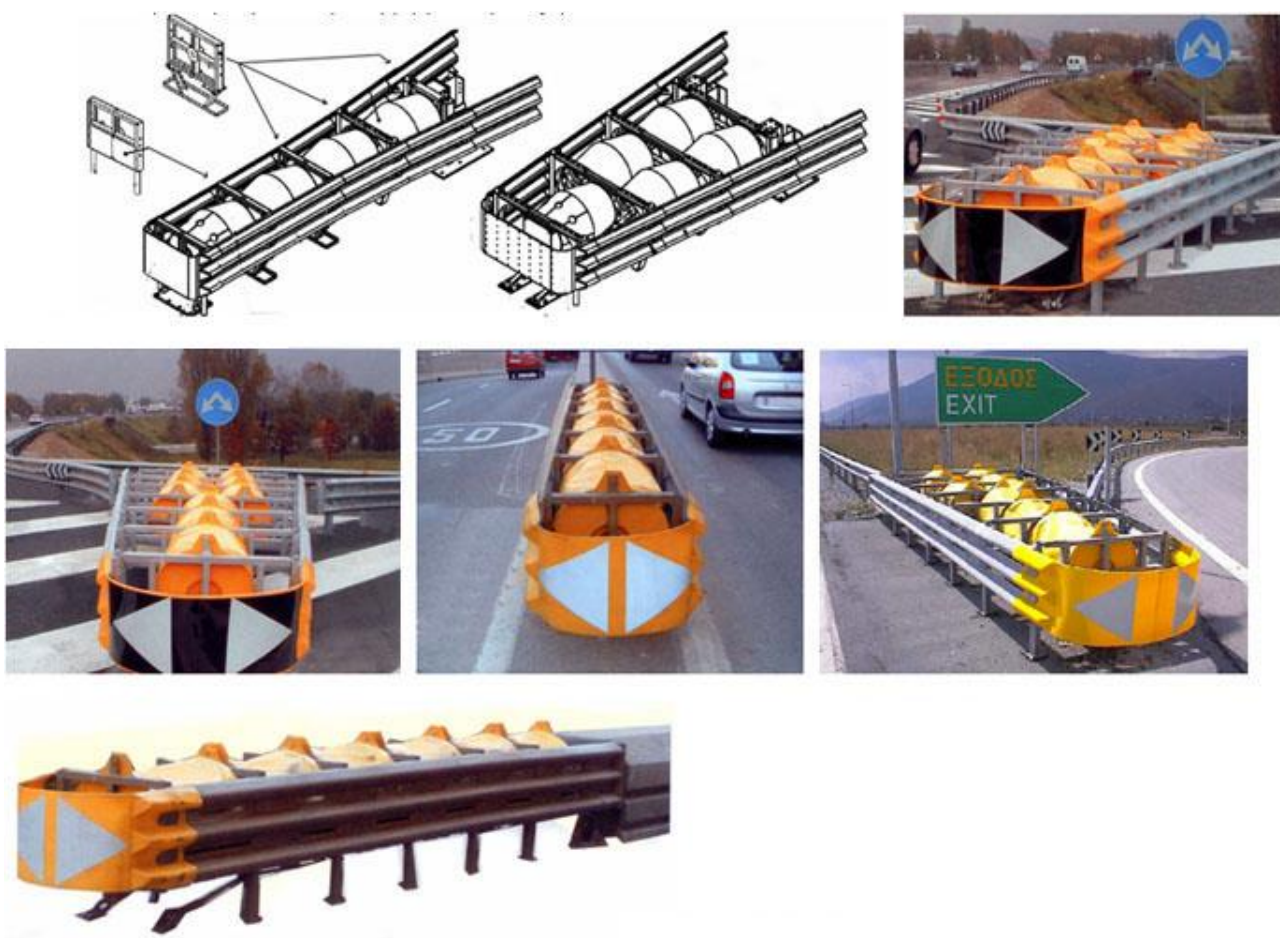
**Διάγραμμα 1.2: Θανατηφόρα Τροχαία Ατυχήματα ανά τρόπο Σύγκρουσης**

Από τις παραπάνω στατιστικές φαίνεται ότι αρκετά συχνό φαινόμενο αποτελεί η σύγκρουση οχημάτων. Συχνό φαινόμενο επίσης είναι και η σύγκρουση οχημάτων στα συνήθη εμπόδια των αυτοκινητοδρόμων (σταθμούς διοδίων, κολώνες δικτύων ή σήμανσης κλπ.), έτσι τις τελευταίες δεκαετίες έχουν τοποθετηθεί στα οδοστρώματα συστήματα αναχαίτησης οχημάτων. Τα συστήματα αναχαίτησης οχημάτων, ή συστήματα παθητικής ασφάλειας οδών, έχουν σκοπό τη συγκράτηση κάθε οχήματος που παρεκκλίνει από την κανονική του πορεία και κινδυνεύει είτε να περάσει έξω από το κατάστρωμα της οδού, είτε να βρεθεί στο αντίθετο ρεύμα κυκλοφορίας, σε διαχωρισμένες οδούς. Κύριος εκπρόσωπος των εν λόγω συστημάτων είναι τα γνωστά στηθαία. Τα στηθαία είναι επιμήκεις διατάξεις που τοποθετούνται στις οριογραμμές του οδοστρώματος ή του ενδιάμεσου χώρου, και σκοπό έχουν να αποτρέψουν την έξοδο του οχήματος, υποχρεώνοντάς το να κινηθεί κατά μήκος του μετά από τη σύγκρουση. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ότι γίνεται προσπάθεια δημιουργίας κατασκευών στηθαίων που θα συμπεριφέρονται και αυτά ως απορροφητές ενέργειας. Παρακάτω αναφέρονται παραδείγματα στηθαίων που έχουν κατασκευαστεί σε αυτήν την κατεύθυνση.



## 1.2 ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗΣ ΚΡΟΥΣΕΩΝ ΤΑΥΤΜ

Ο απορροφητής κρούσεων ΤΑΥΤΜ είναι ένα σύστημα προστασίας που ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις από σύγκρουση οχήματος σε όλα τα συνηθισμένα μη μετακινήσιμα εμπόδια των Εθνικών οδών.



**Εικόνα 1.1**

Έχει σχεδιαστεί ειδικά για περιπτώσεις που οι περισσότερες διαδρομές σύγκρουσης είναι προς το μέτωπο ενός στενού εμποδίου, εγκατεστημένου στον άξονα κίνησης, ή στα άκρα της οδού (σταθμοί διοδίων, κολόνες δικτύων, η σήμανσης, διαχωρισμό λωρίδων και άλλων).

Σήμερα όλο και μεγαλύτερη είναι η ανάγκη μελέτης και βαθιάς κατανόησης των συστημάτων που λειτουργούν ως απορροφητές ενέργειας αφού η χρησιμότητα τους με την πάροδο του χρόνου πολλαπλασιάζεται. Στα πλαίσια αυτής της ανάγκης εκπονήθηκε η παρακάτω εργασία που στόχο είχε την πειραματική μελέτη της επίδρασης του πολυμερικού αφρού στην κατάρρευση μεταλλικών κελυφών.

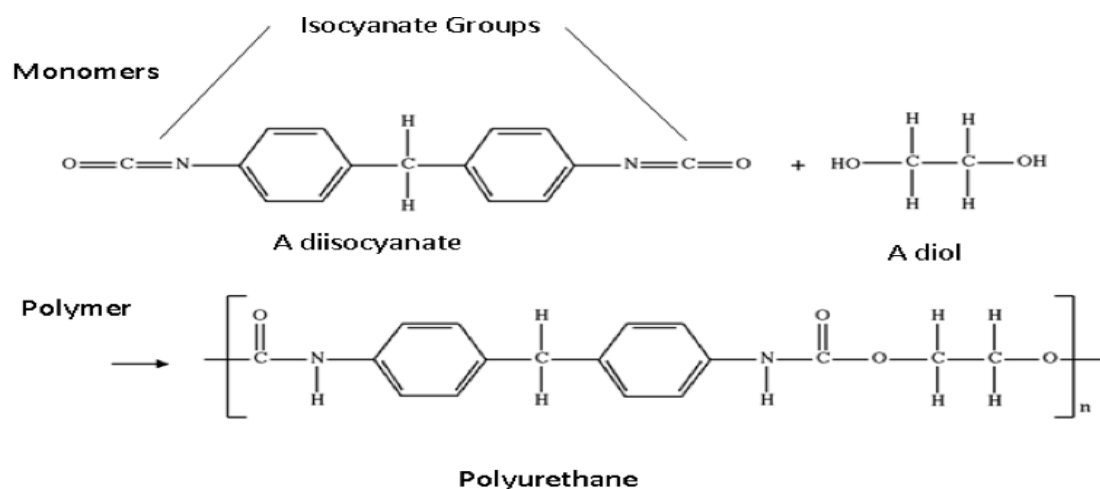
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΣ ΑΦΡΟΣ

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε αφρός πολυουρεθάνης εμπορίου αλλά και αφρός που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο. Παρακάτω γίνεται αναφορά σχετικά με την πολυουρεθάνη, τις εφαρμογές της σήμερα και τέλος δίνονται κάποια στοιχεία σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αφρών που χρησιμοποιήθηκαν.

### 2.1 ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗ

Η πολυουρεθάνη είναι η ένωση δύο στοιχείων, της πολυόλης και του ισοκυανικού που ανήκει στην ευρύτερη οικογένεια των πλαστικών. Είναι σκληροποιημένος αφρός, του οποίου οι πόροι σε ποσοστό τουλάχιστον 90%, είναι κλειστοί και παρασκευάζονται με τη βοήθεια καταλυτών και προωθητικών μέσων.

Μία ουρεθάνη παράγεται από την αντίδραση μιας αλκοόλης με ένα ισοκυανικό ομόλογο:  $R-OH + O=C=N-R' \rightarrow R-O-CO-NH-R'$  (ουρεθάνη). Οι πολυουρεθάνες συνήθως παράγονται με αντίδραση μιας διόλης (πολυμερές με πρωτοταγείς  $-OH$  με ένα δισοκυανικό παράγωγο, το οποίο συνήθως είναι το τολουολο-2,4-δισοκυανικό. Προσθήκη μικρής ποσότητας νερού στο μίγμα που πολυμερίζεται προκαλεί μερική υδρόλυση του  $R-N=C=O$  προς  $CO_2$ . Αυτό δημιουργεί τον **αφρότης πολυουρεθάνης**.



Εικόνα 2.1

### 2.1.1 Χαρακτηριστικά

Οι πολυουρεθάνες συνιστούν μία ευρεία κατηγορία υλικών που χωρίζεται σε θερμοπλαστικές, οι οποίες είναι αρκετά ευλύγιστες με χαμηλή έως μέση αντοχή σε εφελκυσμό, και θερμοσκληρυνόμενες που παρουσιάζουν παρόμοια ευλυγισία με υψηλότερη όμως αντοχή σε εφελκυσμό.

Ο αφρός πολυουρεθάνης αποτελεί το θερμομονωτικό υλικό με τον μικρότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda=0,02 \text{ W/(mK)}$ . Ωστόσο, με την από το 1995 απαγόρευση της χρήσης FCKW ως προωθητικού μέσου και με την αντικατάστασή του από το πεντάνιο αυξήθηκε η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και ως σήμερα ο αφρός πολυουρεθάνης δεν κατάφερε ακόμη να φτάσει στην κατηγορία θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda = 0,02 \text{ W/(mK)}$ .

Όσον αφορά στην αντοχή σε εφελκυσμό ο αφρός πολυουρεθάνης αντέχει σε αναπτυσσόμενες τάσεις που κυμαίνονται από 20 έως 30 N/cm<sup>2</sup> και συντελεστή αντίστασης στη διάχυση υδρατμών από 50 έως και πάνω από 100 και παρουσιάζει εξαιρετικά μικρή απορρόφηση υγρασίας. Ουσιαστικά δηλαδή πρόκειται για ένα αδιάβροχο υλικό, λόγω της κλειστής δομής των κυψελίδων του.

Το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης είναι σχετικά περιορισμένο, αν συγκριθεί με αυτό του υαλοβάμβακα και του πετροβάμβακα με κατώτερο όριο τους -50 0 C και ανώτερο 120 0 C. Ο αφρός πολυουρεθάνης δεν παρέχει ικανοποιητική προστασία αν και κατά την παραγωγή του προστίθενται μέσα αύξησης της πυραντοχής και κατατάσσεται στις B1 και B2 κατηγορίες πυραντοχής.

Σημειώνεται ότι κατά την καύση του παράγει σε μικρές ποσότητες τοξικά αέρια. Ο αφρός πολυουρεθάνης επηρεάζεται αν μείνει εκτεθειμένος στην ηλιακή ακτινοβολία, καθώς οι επιφανειακές κυψέλες αδυνατίζουν και το υλικό θρυμματίζεται. Διαθέτει ιδιαίτερα καλές συγκολλητικές ιδιότητες, αφού προσκολλάται στα περισσότερα οικοδομικά υλικά για αυτό και συχνά παρασκευάζεται επί τόπου στα έργα με εκτόξευση με ψεκασμό. Τέλος, το υλικό δεν παρέχει προστασία ηχομόνωσης και ως εκ τούτου δεν χρησιμοποιείται ως ηχομονωτικό υλικό.

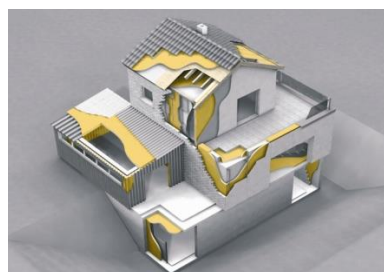
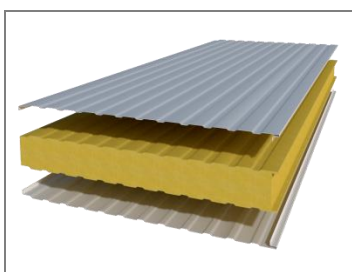
Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις ιδιότητες (μηχανικές, θερμικής προστασίας, υγραπροστασίας, πυρασφάλειας, ακουστικές και αντοχής στη χρήση) του αφρού πολυουρεθάνης.

Ιδιότητες	Μονάδες	Τεχνικά Χαρακτηριστικά		
		Ελάχιστη τιμή	Μέση Τιμή	Μέγιστη Τιμή
<b>Μηχανικές ιδιότητες</b>				
Πάχος Υλικού	cm		2-20	
Πυκνότητα	Kg/m <sup>3</sup>	30	31-35	80
Αντοχή στον εφελκυσμό	N/mm <sup>2</sup>			
Όριο Θραύσης	N/mm <sup>2</sup>			
Θλιπτική Τάση σε 10% βράχυνση	N/mm <sup>2</sup>	10		>15
<b>Ιδιότητες θερμικής προστασίας</b>				
Θερμική αγωγιμότητα λ στους 10οC	W/(mK)	0,02		0,027
Εύρος χρήσεως min/max	°C	-50	50/-40/100	120
<b>Ιδιότητες υγραπροστασίας</b>				
Συντελεστής αντίστασης στη διάχυση υδρατμών	-	50	65	>100
Ποσότητα υγρασίας εξομοίωσης στους 23 οC και 80% σχ. υγρασία			5	
<b>Ιδιότητες πυρασφάλειας</b>				
Κατηγορία πυραντοχής	-	B1	-	B2
<b>Αντοχή στη χρήση</b>				
Αναμενόμενη διάρκεια χρήσης	έτος	30	50	50
Υλικά προστασίας από βιολογικούς παράγοντες			ναι	
<b>Οικονομικά στοιχεία</b>				
Ποσό πρωτογενούς ενέργειας	kWh/m <sup>3</sup>	16	28/33	36

### 0.1 Πίνακας Τεχνικών Χαρακτηριστικών Πολυουρεθάνης, [IVPU F, 1994].

### 2.1.2 Εφαρμογές

Αντίθετα με τις γνωστές μέχρι σήμερα πλαστικές ύλες, η πολυουρεθάνη έχει αμέτρητες εφαρμογές και χρήσεις σε πολλαπλούς κλάδους. Είναι ένα από τα πλέον σημαντικά και ασταθή μέλη της οικογένειας των πλαστικών, και αυτή ακριβώς η σύνθεσή της είναι που την κάνει τόσο εύχρηστη. Η πολυουρεθάνη βρίσκει εφαρμογή σε μια ευρεία γκάμα προϊόντων, από τη δημιουργία ειδικών καλουπιών, μέχρι τη χρήση του ως μονωτικό υλικό και τη δημιουργία μηχανημάτων, ειδών οικιακής χρήσης και επίπλων. Χρησιμοποιείται κατά κόρον στις κατασκευές ως μονωτικό υλικό, είτε με επί τόπου ψεκασμό των επιφανειών είτε με την χρήση έτοιμων εργοστασιακών πλακών στις τοποθετήσεις θερμομονωτικών πάνελ πολυουρεθάνης.



Εικόνα 2.2 Εφαρμογές Πολυουρεθάνης

## 2.2 Παρασκευή πολυμερικού αφρού

Ο πρώτος αφρός (πράσινος) που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων αγοράστηκε από το εμπόριο και πιο συγκεκριμένα κατασκευάζεται από την εταιρία ZWALUW. Επειδή τα αποτελέσματα έδειξαν πως η απορόφηση ενέργειας με την προσθήκη αφρού εμπορίου στο κυλινδρικό δοκίμιο διαστάσεων  $\phi 50 \times 2 \times 60$  είναι η ίδια με αυτήν χωρίς την προσθήκη αφρού, κρίθηκε ακατάλληλη η χρήση του για την διεξαγωγή των πειραμάτων και παρασκευάστηκε διογκούμενος αφρός πολυουρεθάνης στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών.



**Εικόνα 2.3: Αφρός πολυουρεθάνης-εμπορίου**

Για την παρασκευή του αφρού επιλέχθηκαν συστατικά από την εταιρία Bayer και οι εμπορικές ονομασίες των επιμέρους συστατικών του αφρού είναι για την πολυόλη BAYTHERM-BOF, ενώ για το ισοκυανικό άλας DESMODUR 44 V20 L. Παρακάτω αναφέρεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του.

1. Δοχείο πολυόλης
2. Δοχείο ισοκυανικού
3. Πλαστικά ποτήρια γενικής χρήσης
4. Μονωτική ταινία
5. Κοπίδι
6. Πριόνι
7. Ζυγαριά ακριβείας
8. Ελάσματα αλουμινίου
9. Μέγγενη
10. Λίμα



Πολυόλη & Ισοκυανικό



Πλαστικά Ποτήρια



Ταινία, Κοπίδι, Πρίονι



Ζυγαριά Ακριβείας



Ελάσματα αλουμινίου

Λίμα



Μέγγενη

### Εικόνα 2.4 Εξοπλισμός

Παρακάτω παραθέτονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρασκευασμένου αφρού καθώς επίσης οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητές του.

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	142 ±



	λειτουργικότητας	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**

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 250kg/m<sup>3</sup>) 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 <sub>in</sub> (mm <sup>3</sup> )	m (gr)
1	φ50x2x60	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 δοκίμιου 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.

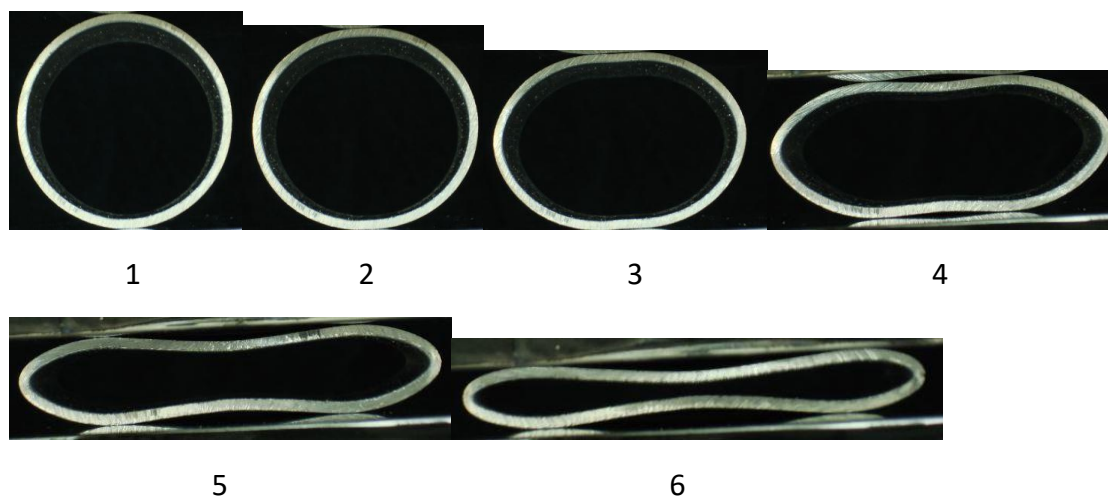
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

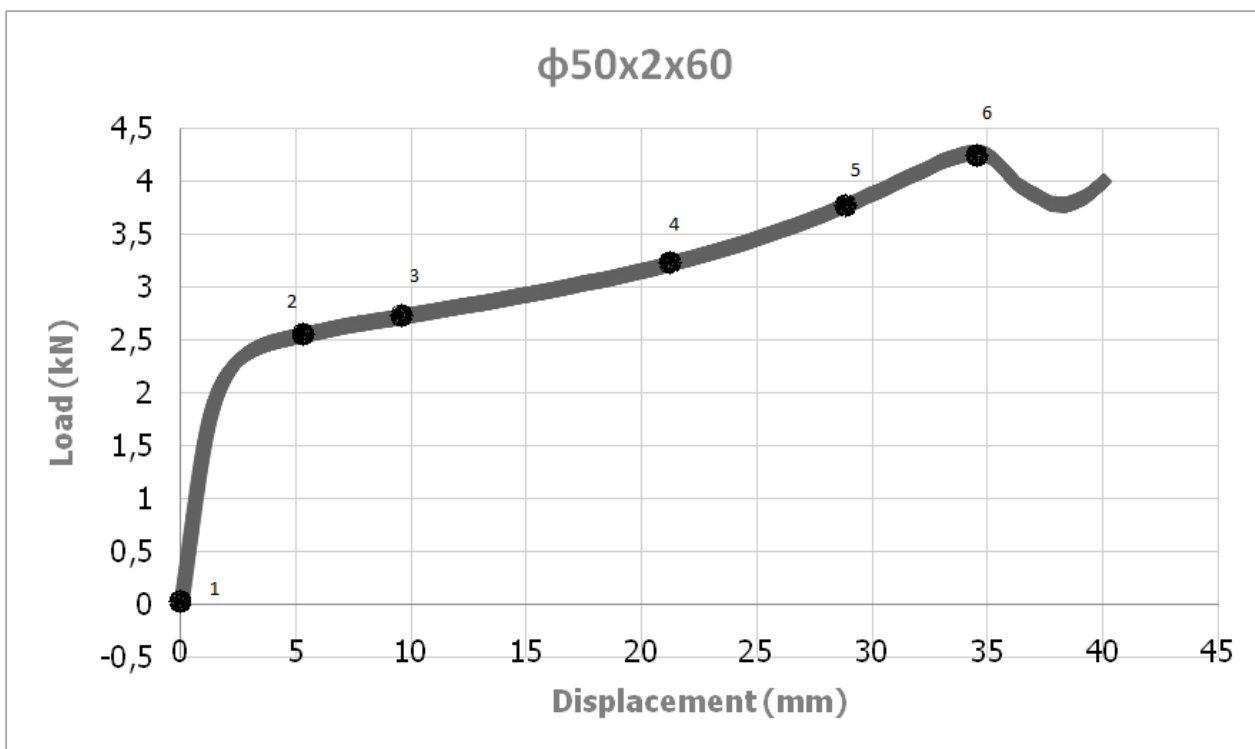
Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζονται με διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια αλουμινίου τα οποία αρχικά καταπονήθηκαν σε πλευρική συμπίεση χωρίς την προσθήκη αφρού, στη συνέχεια έγινε πλευρική συμπίεση σε ένα από τα δοκίμια με προσθήκη αφρού εμπορίου και κατόπιν παρασκευάστηκε πολυμερικός αφρός στο εργαστήριο, με τον οποίο πληρώθηκαν τα δοκίμια προτού καταπονηθούν. Τέλος έγιναν δοκιμές και σε δοκίμια από τον κατασκευασμένο πολυμερικό αφρό. Το συνολικό μήκος συμπίεσης προκύπτει από το ύψος κάθε δοκιμίου μείον 10 mm.

Συνολικά επιλέχθηκαν 6 δοκίμια αλουμινίου ίσου ύψους 60mm και πάχους τοιχωμάτων 2mm. Τετραγωνικά 50mmx50mm, 40mmx40mm, 30mmx30mm, τετραγωνικά 50mmx30mm τα οποία καταπονήθηκαν σε δύο κατευθύνσεις flatwise και edgewise και κυλινδρικό διαμέτρου  $\phi$ 50mm.

### 3.1 Σωλήνες χωρίς την προσθήκη αφρού

#### 3.1.1 Σωλήνες διαστάσεων $\phi$ 50x2x60





**Διάγραμμα 3.1:** Καμπύλη φορτίου–μετατόπισης κυλινδρικού σωλήνα διαστάσεων φ50x2x60 χωρίς προσθήκη πολυμερικού αφρού

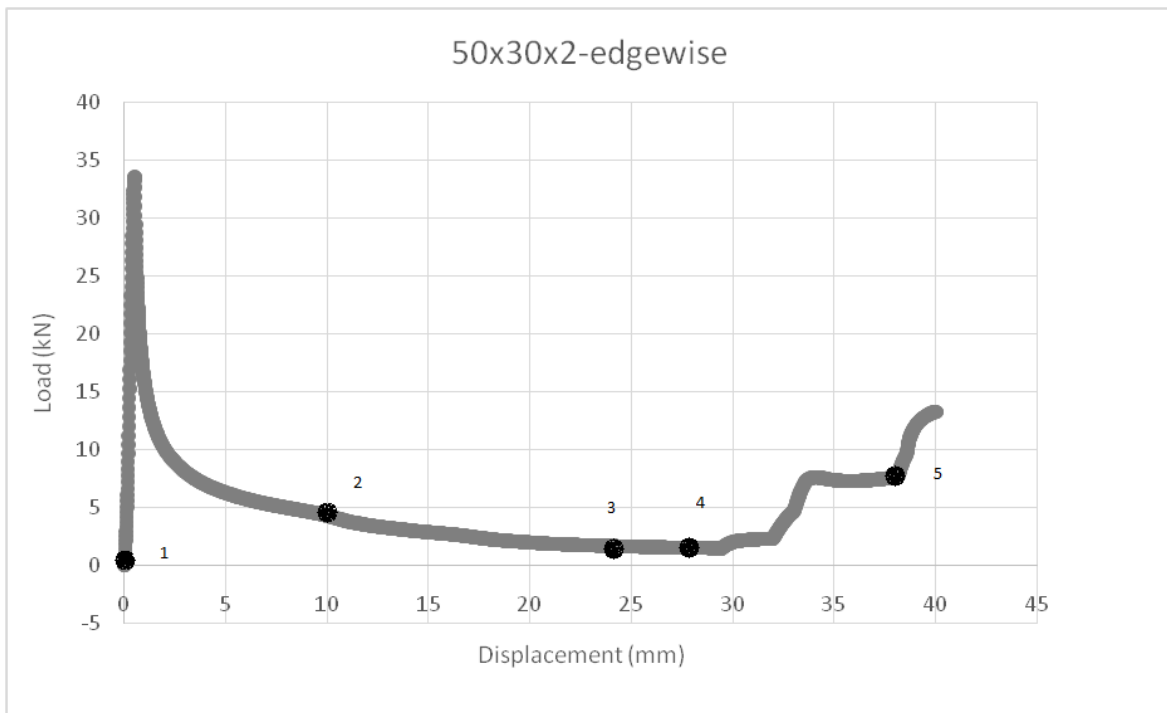
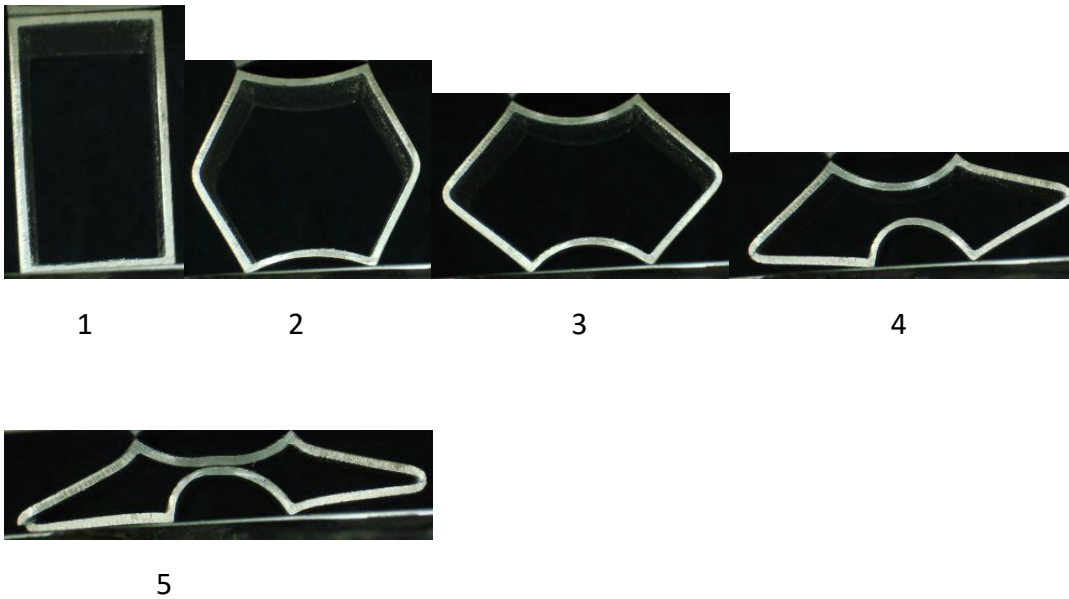
### Παρατηρήσεις

Στην αρχή όλη η διατομή του υλικού συμμετέχει στην καταπόνηση και έτσι παρατηρούμε αύξηση του φορτίου. Στη συνέχεια 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.



**Εικόνα 3.1**

### 3.1.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise



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

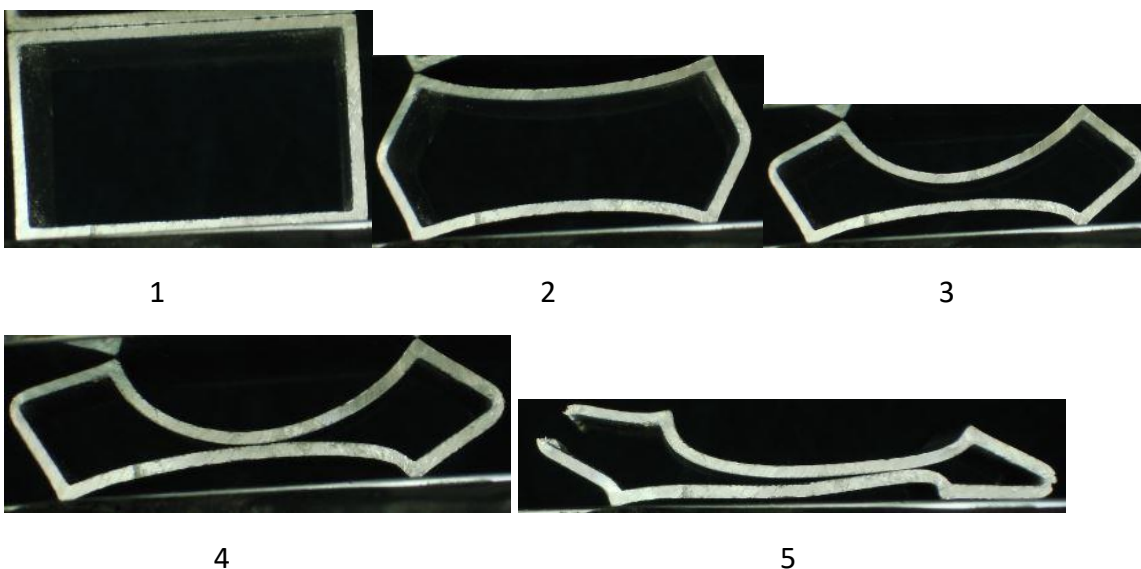
## Παρατηρήσεις

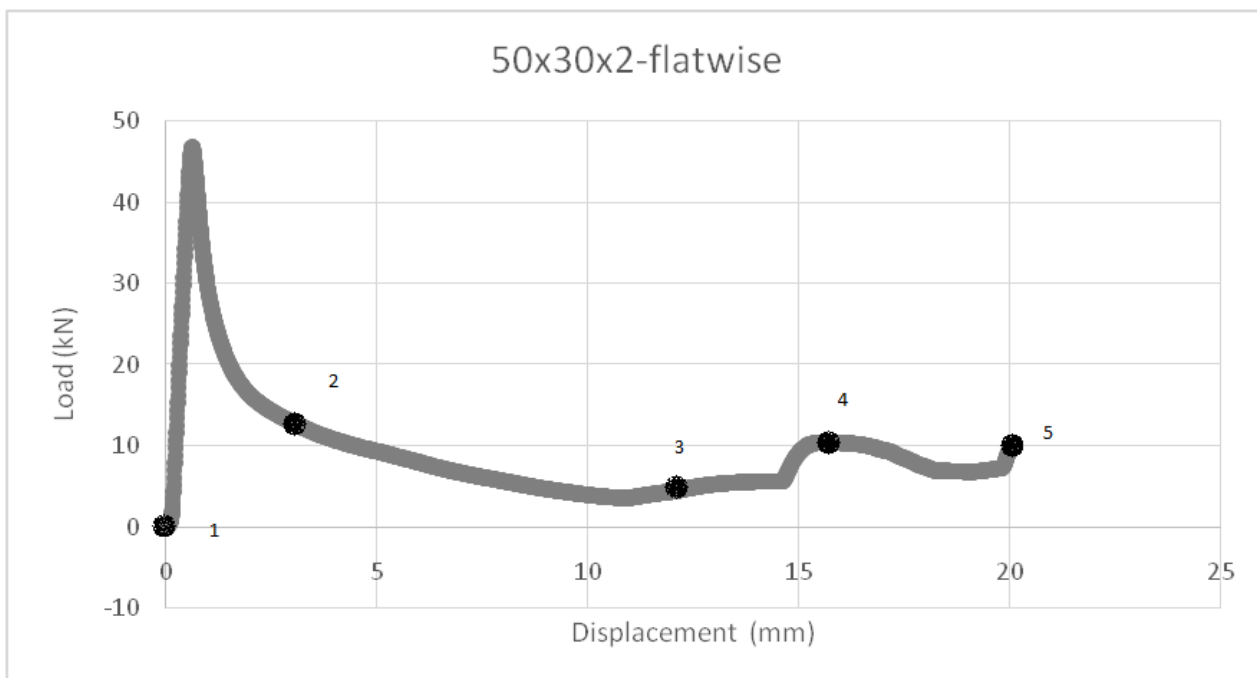
Οι οριζόντιες έδρες της κατασκευής συμμετέχουν πολύ λιγότερο στην καταπόνηση απ' ό τι η κάθετες. Στην αρχή παρατηρούμε αύξηση του φορτίου αλλά από την στιγμή που ξεκινά να παρατηρείται ουσιαστικά η μετατόπιση έχουμε μεγάλη και απότομη πτώση και αρχίζει να δημιουργείται αρμός. Περίπου στα 29mm έχουμε 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.



Εικόνα 3.2

### 3.1.3 Σωλήνας διαστάσεων 50X30x2-flatwise





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

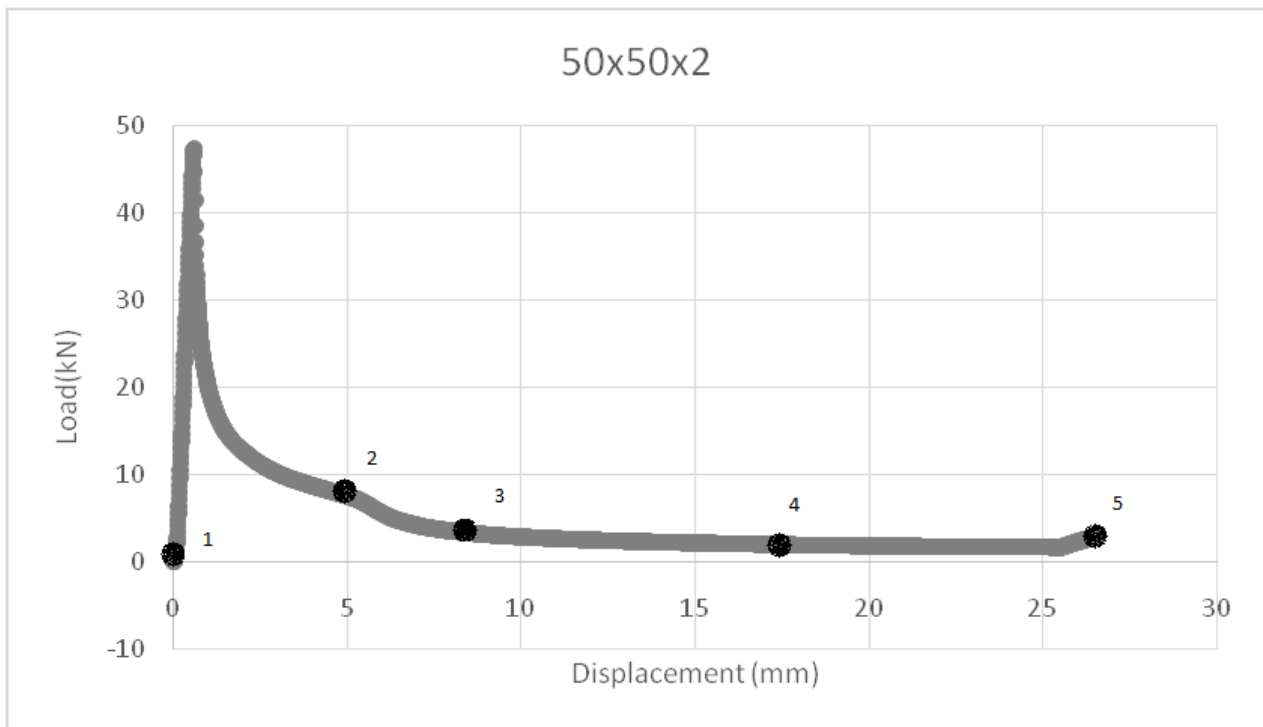
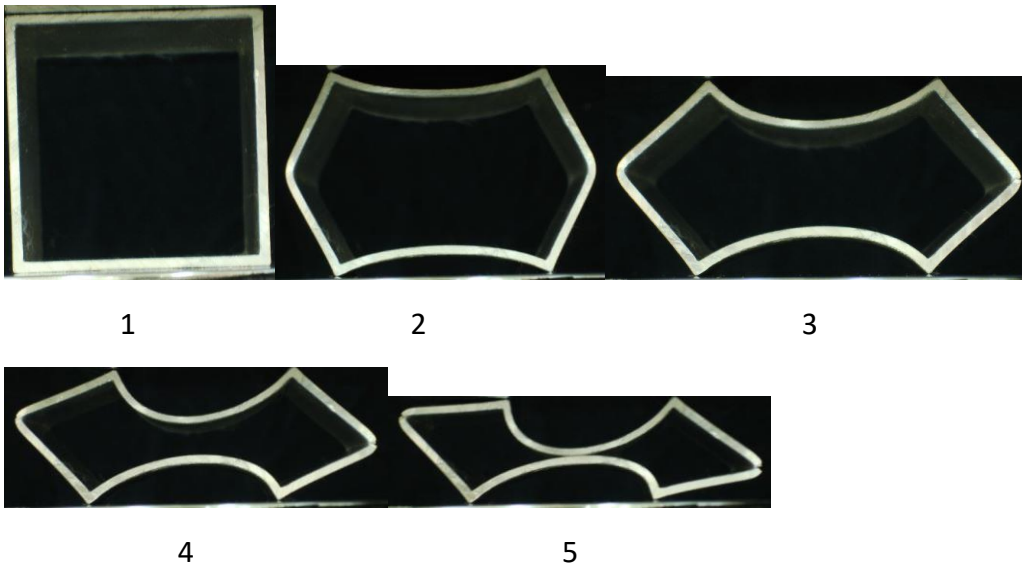
### Παρατηρήσεις

Αντίστοιχα και με το προηγούμενο δοκίμιο παρατηρείται στην αρχή μία αύξηση και στην συνέχεια πτώση του φορτίου. 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. Το τελικό μετρούμενο ύψος του δοκιμίου είναι 10,7mm που έχει απόκλιση μόλις 7% από τη θεωρητική τιμή του.



**Εικόνα 3.3**

### 3.1.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2



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



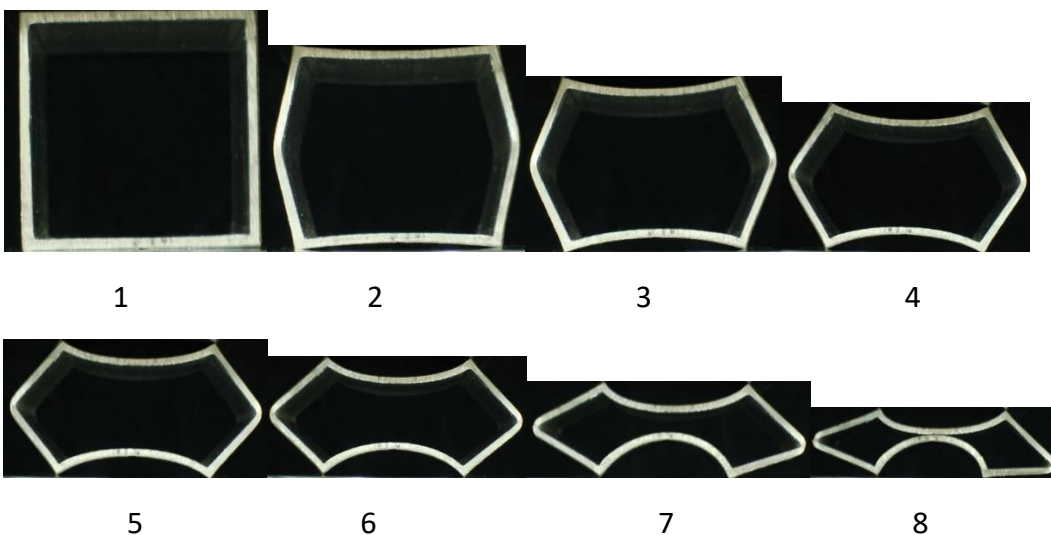
## Παρατηρήσεις

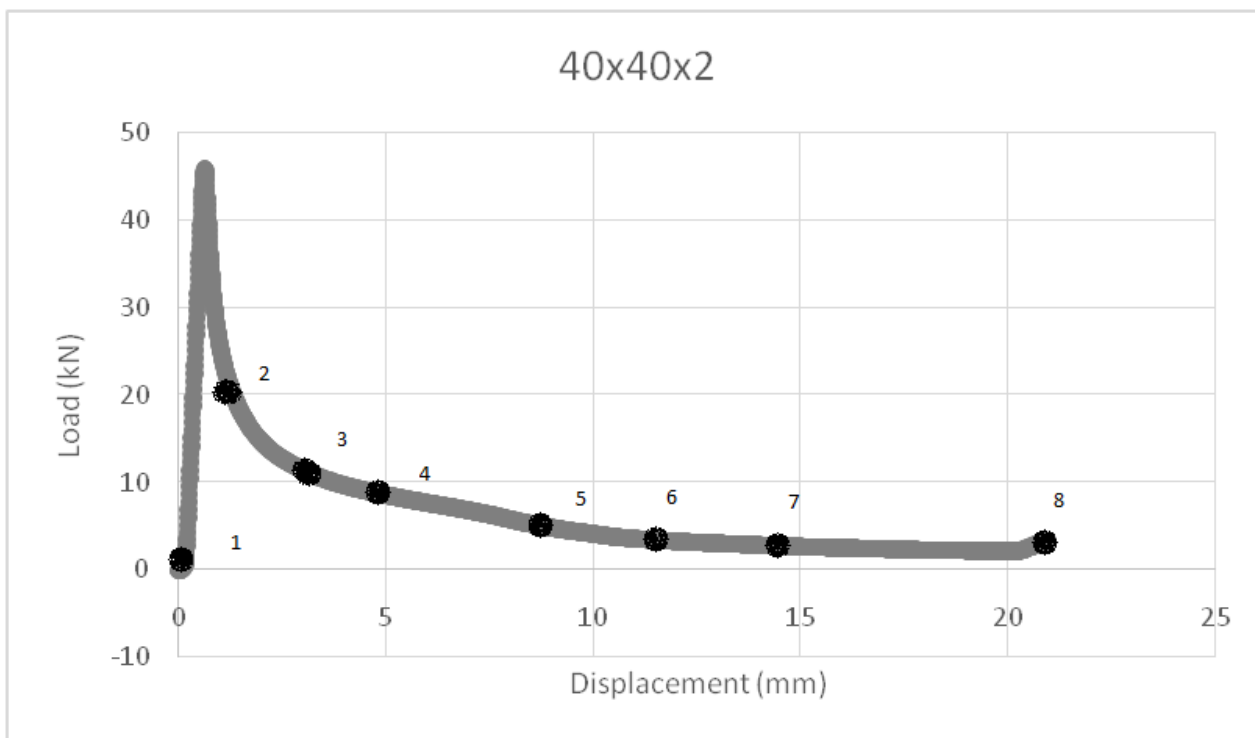
Σημειώνεται κατ' αρχάς πως η συμπίεση δεν συνεχίστηκε μέχρι τα 40mm διότι στα 26mm περίπου είχαμε ολική καταστροφή της δεξιάς παράπλευρης επιφάνειας. Με ρηγματωμένη τη μία πλευρά, η περαιτέρω συμπίεση δε θα έδινε έγκυρα αποτελέσματα. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στους υπόλοιπους δύο τετραγωνικούς 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.



Εικόνα 3.4

### 3.1.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2





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

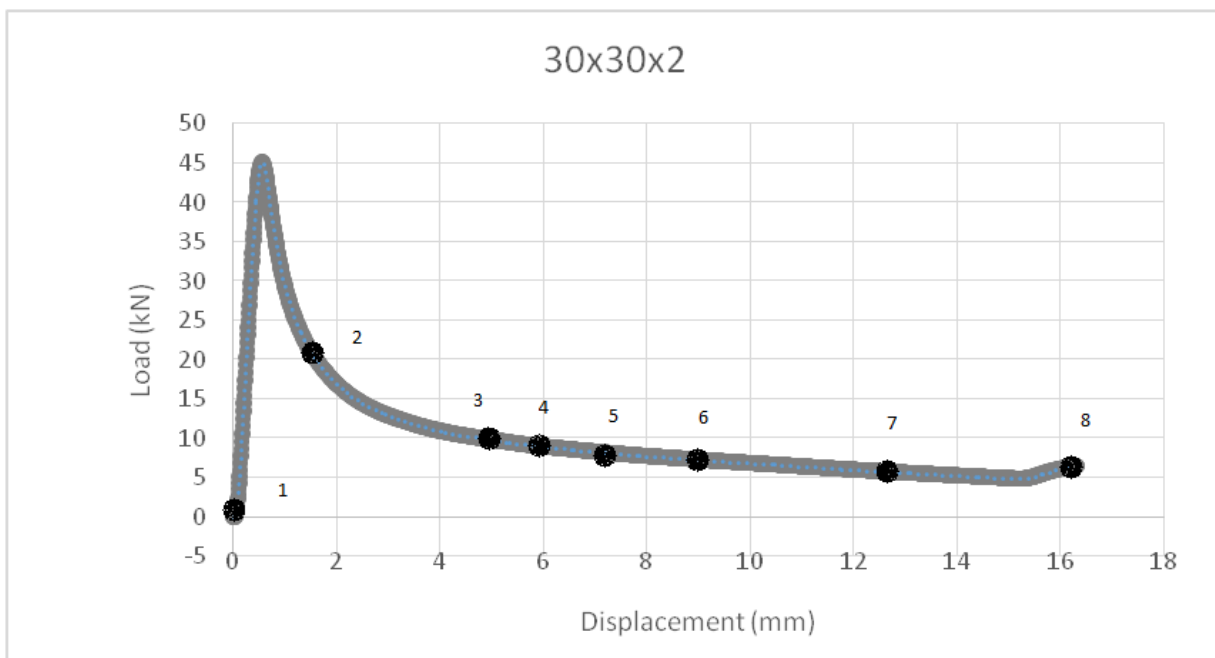
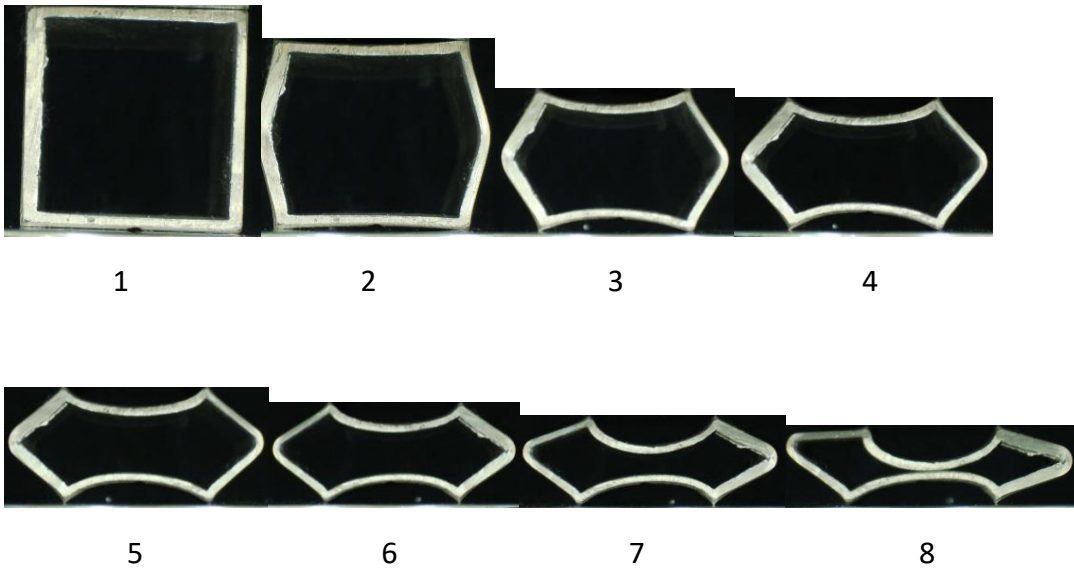
### Παρατηρήσεις

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.



**Εικόνα 3.5**

### 3.1.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2



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

### Παρατηρήσεις

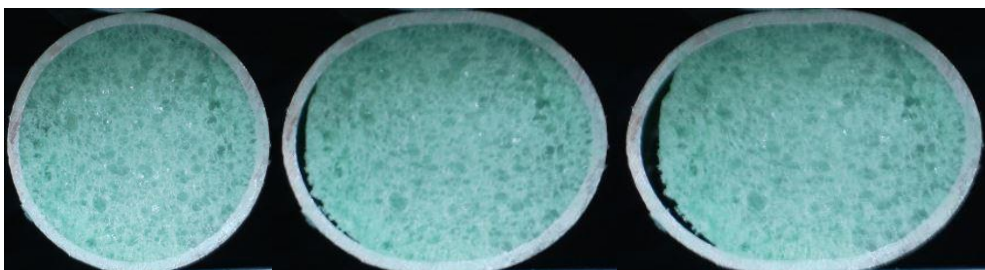
Στην προοδευτική κατάρρευση αυτού του τετραγωνικού δοκιμίου παρατηρούμε ότι στο τέλος ακουμπούν οι άνω και κάτω έδρες του δοκιμίου. Εδώ δηλαδή δε θα μπορέσει να γίνει σύγκριση με το δοκίμιο του αφρού, γιατί λόγω της ύπαρξής του δε θα μπορέσουν ποτέ να ακουμπήσουν οι απέναντι έδρες.



Εικόνα 3.6

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

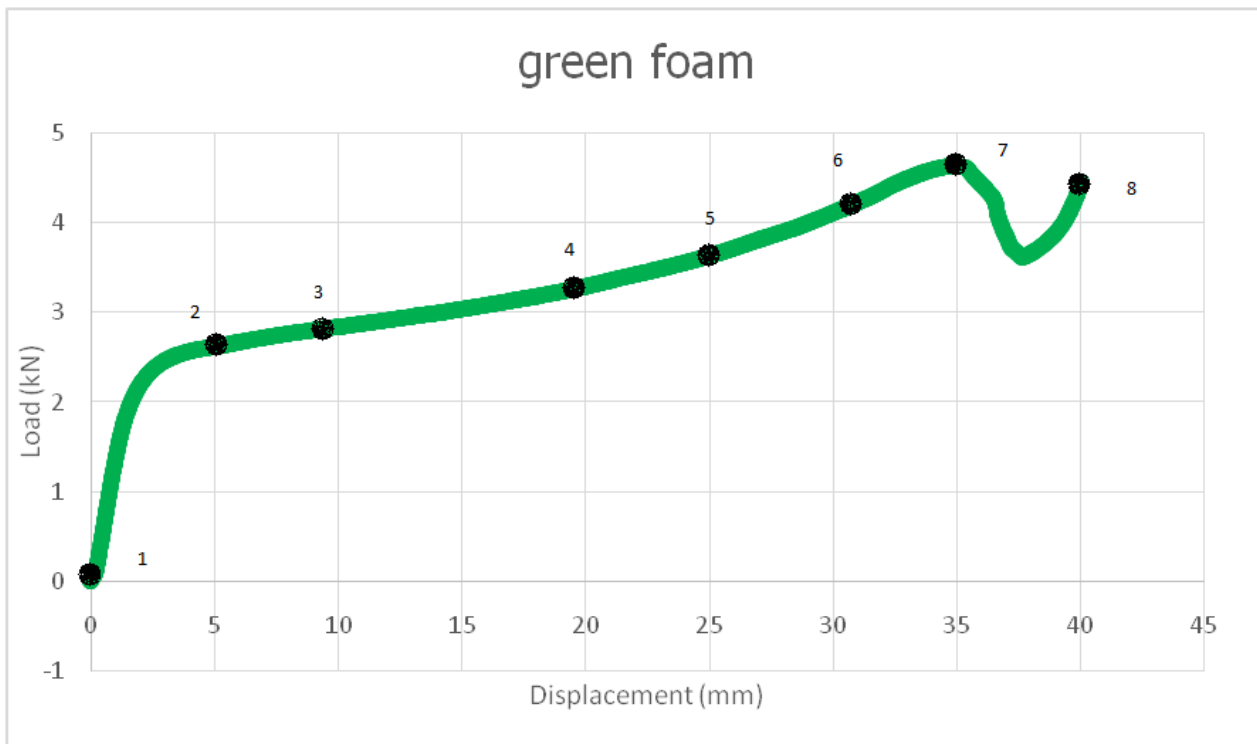
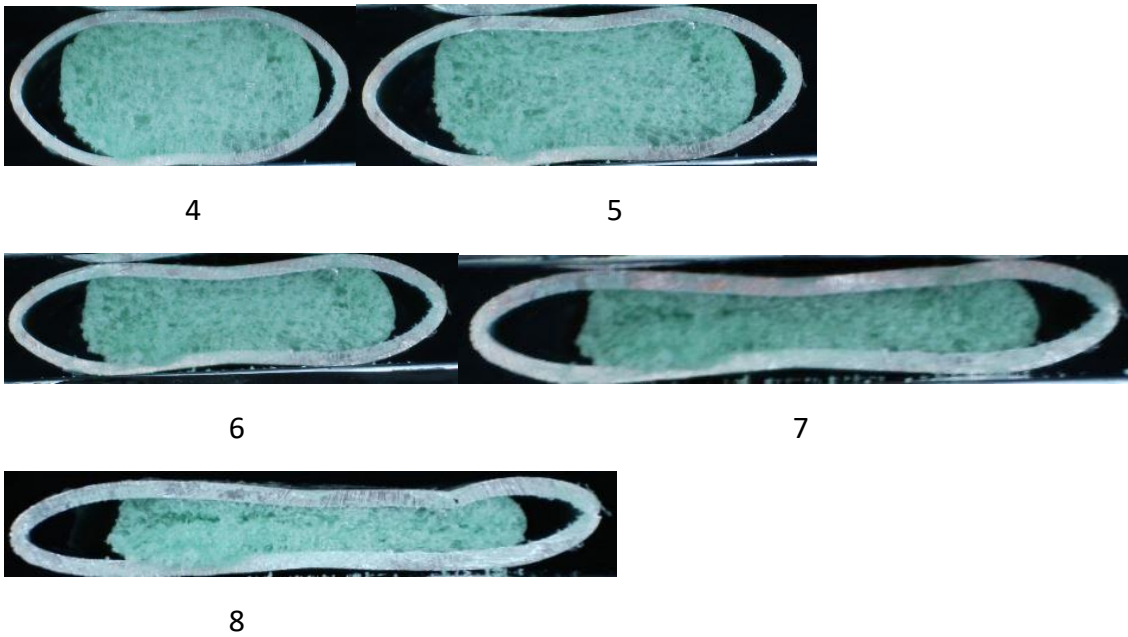
Παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα που λήφθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία τα οποία μας βοηθούν στην κατανόηση του φαινομένου της κατάρρευσης. Οι εικόνες είναι αριθμημένες και αντιστοιχούν στην αρίθμηση της πειραματικής καμπύλης. Σημειώνεται πως προοδευτικές και τελικές όψεις των υπόλοιπων δοκιμίων παρουσιάζονται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



1

2

3



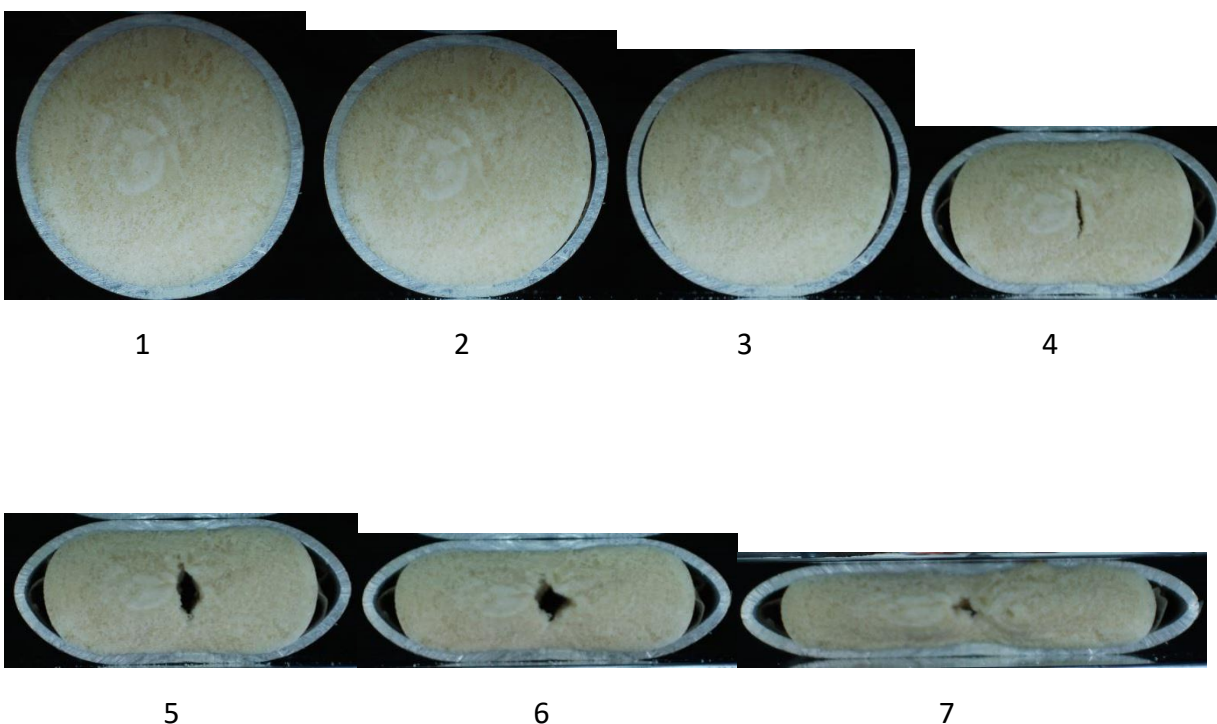
Διάγραμμα 3.7: Καμπύλη φορτίου –μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων  $\phi 50 \times 2 \times 60$  με προσθήκη πολυμερικού αφρού εμπορίου

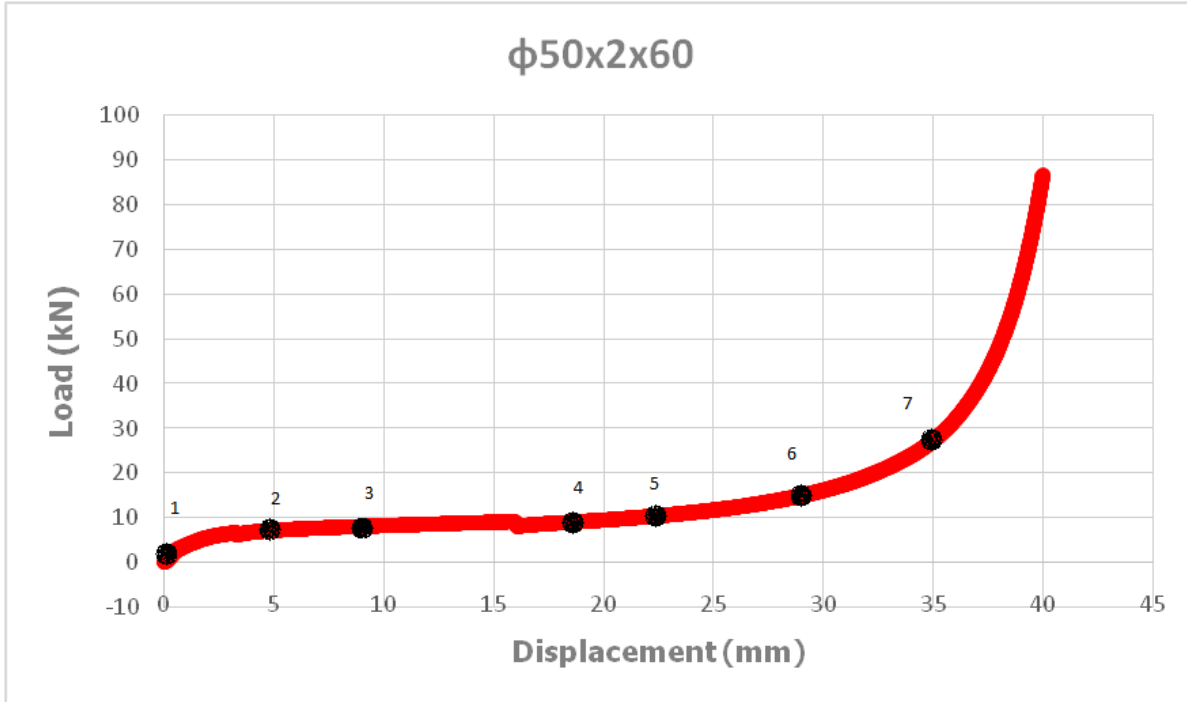
## Παρατηρήσεις

Λόγω του μεγάλου πορώδους του συγκεκριμένου αφρού δεν παρατηρήθηκε πειραματικά αξιοσημείωτη αύξηση της απορρόφησης ενέργειας που αναμενόταν. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για τις ίδιες μετατοπίσεις το τελικό φορτίο είναι 4kN και 4,5kN χωρίς και με την προσθήκη αφρού αντίστοιχα. Για το λόγω αυτο αποφασίστηκε να μην χρησιμοποιηθεί περετέρω στην πειραματική διαδικασία. 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 φ50x2x60 με προσθήκη παρασκευασμένου πολυμερικού αφρού**

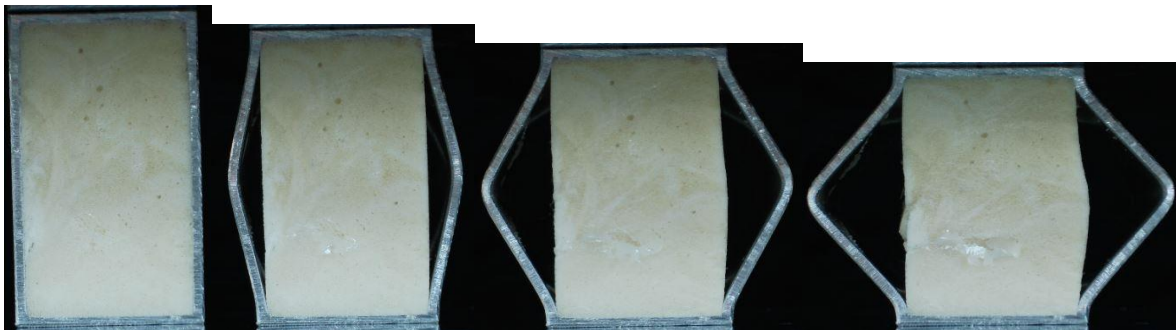
### Παρατηρήσεις

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ακούστηκε ένας θόρυβος όπου και ξεκόλλησε ο αφρός από το δεξί μέρος του σωλήνα. Στη συνέχεια, περίπου στα 14mm ξεκόλλησε και το αριστερό μέρος. 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.



**Εικόνα 3.7**

### 3.3.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise



1

2

3

4



5

6

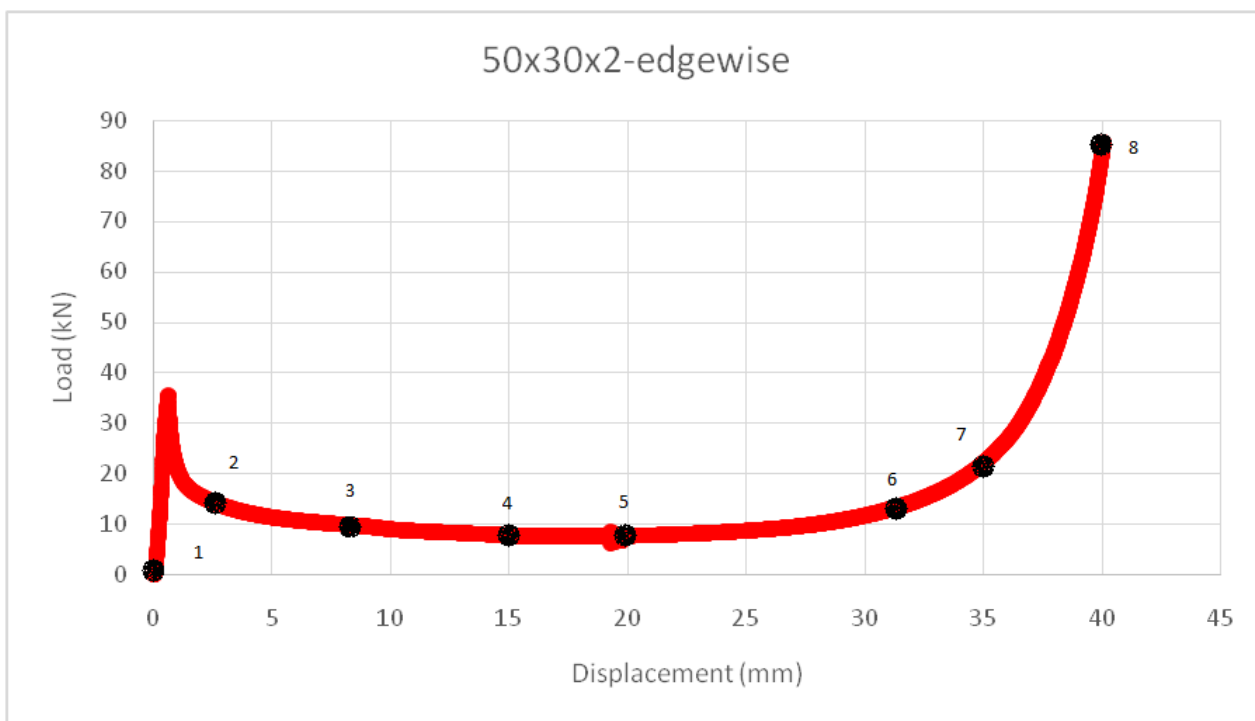


7



8





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

### Παρατηρήσεις

Εδώ η συμπεριφορά του δοκιμίου 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.



**Εικόνα 3.8**

### 3.3.3 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2 flatwise



1

2

3



4

5

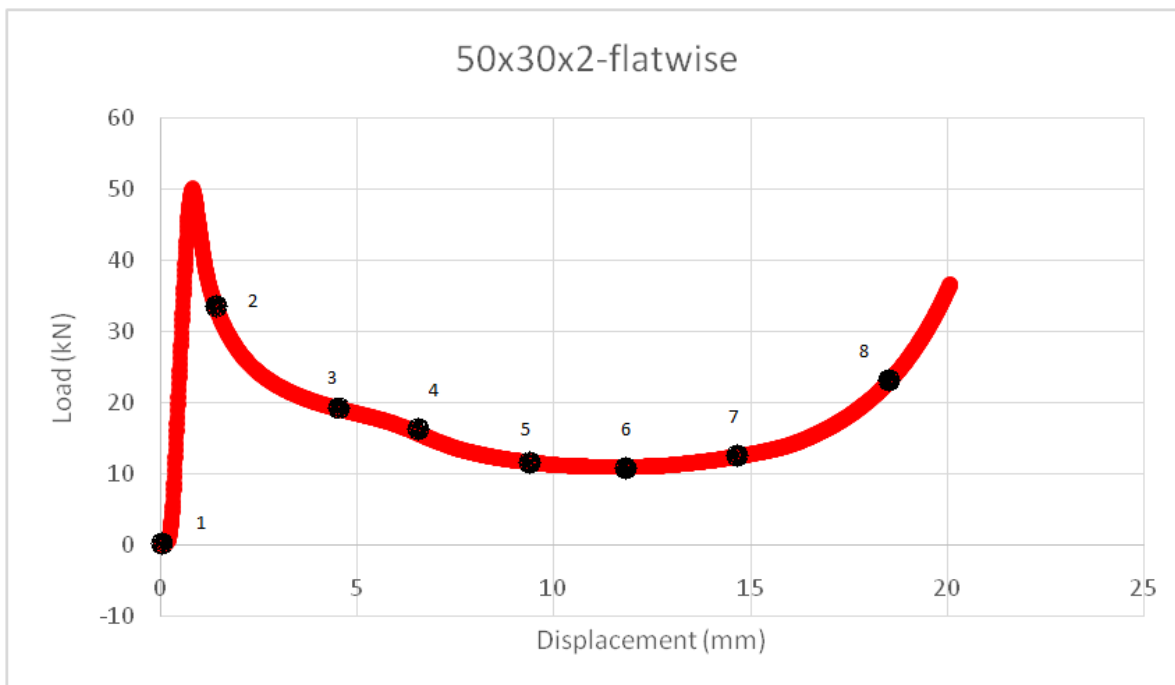


6

7



8



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

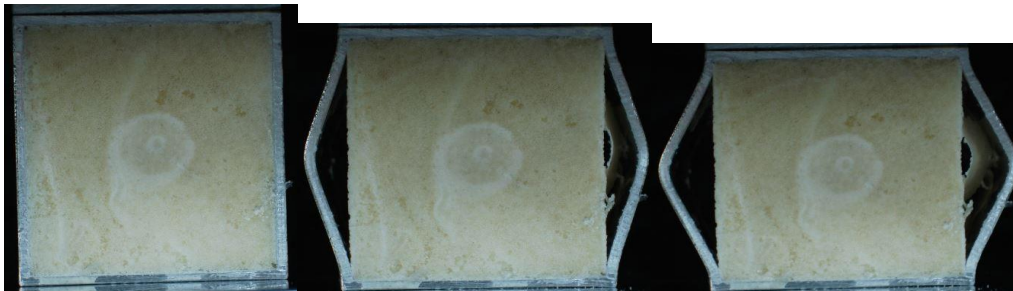
### Παρατηρήσεις

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 αυξάνεται 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 συμπίεστηκε μικρότερο ποσοστό του μήκους από πριν (20mm από τα 30mm, ενώ πριν 40mm από τα 50mm).



**Εικόνα 3.9**

### 3.3.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2



1

2

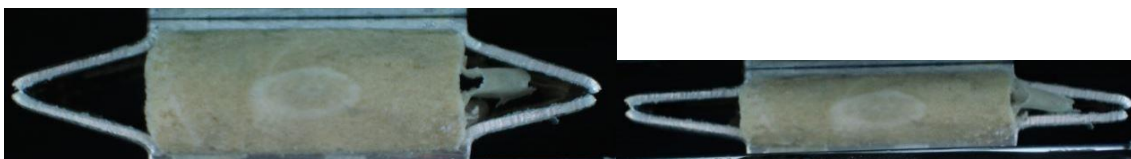
3



4

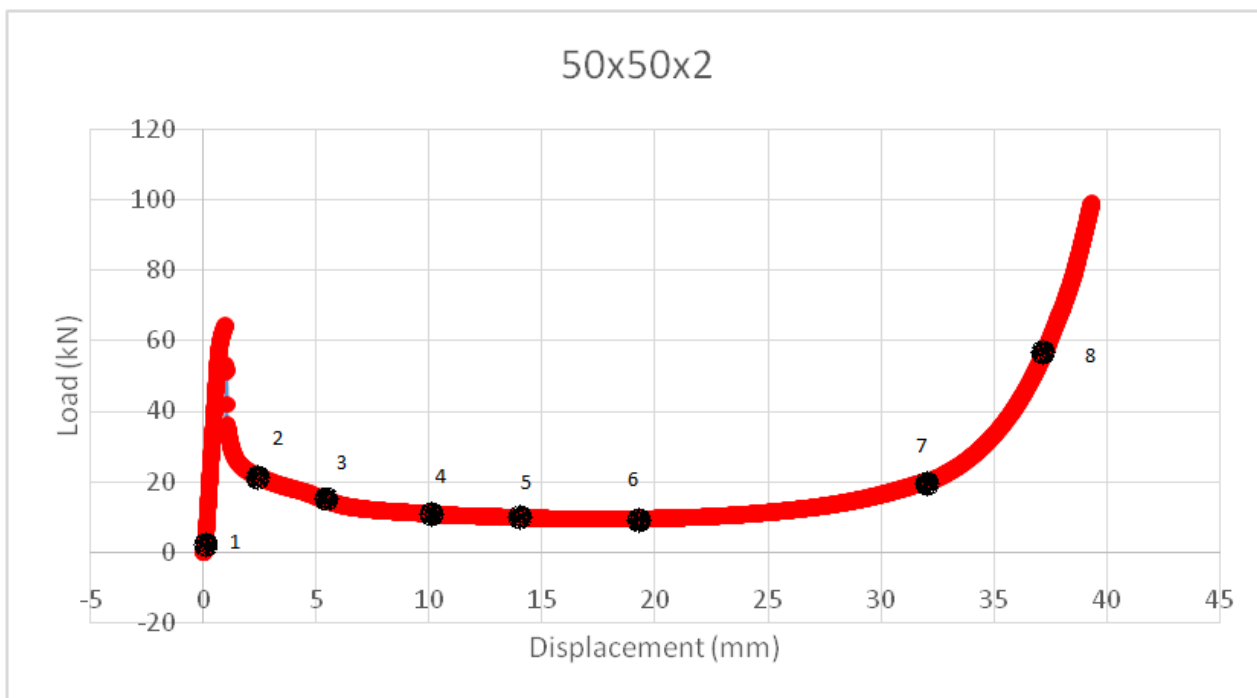
5

6



7

8



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

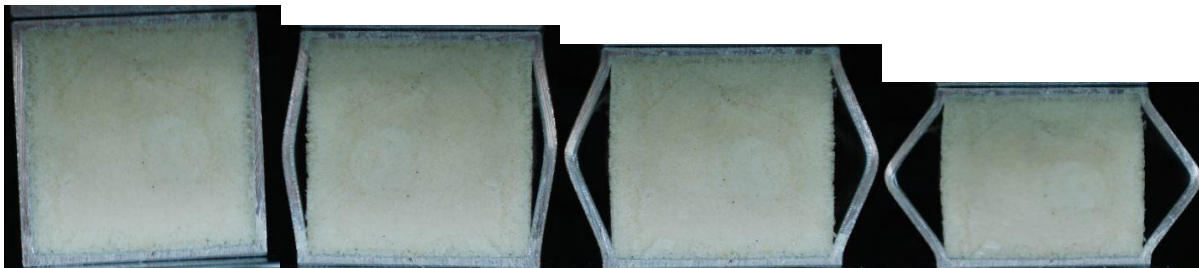
### Παρατηρήσεις

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 την προστασία της μηχανής. Το εμβαδόν της καμπύλης είναι πολύ μεγάλο και η απορρόφηση ενέργειας αξιοσημείωτη. Καμία άλλη δοκιμή δεν τερματίστηκε αυτόματα για την προστασία της μηχανής.



Εικόνα 3.8

### 3.3.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2

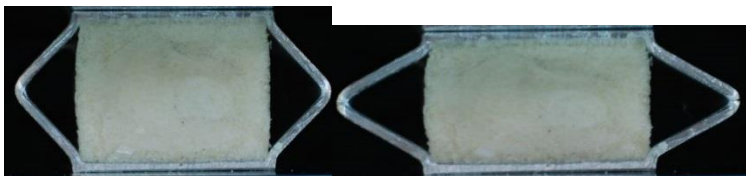


1

2

3

4



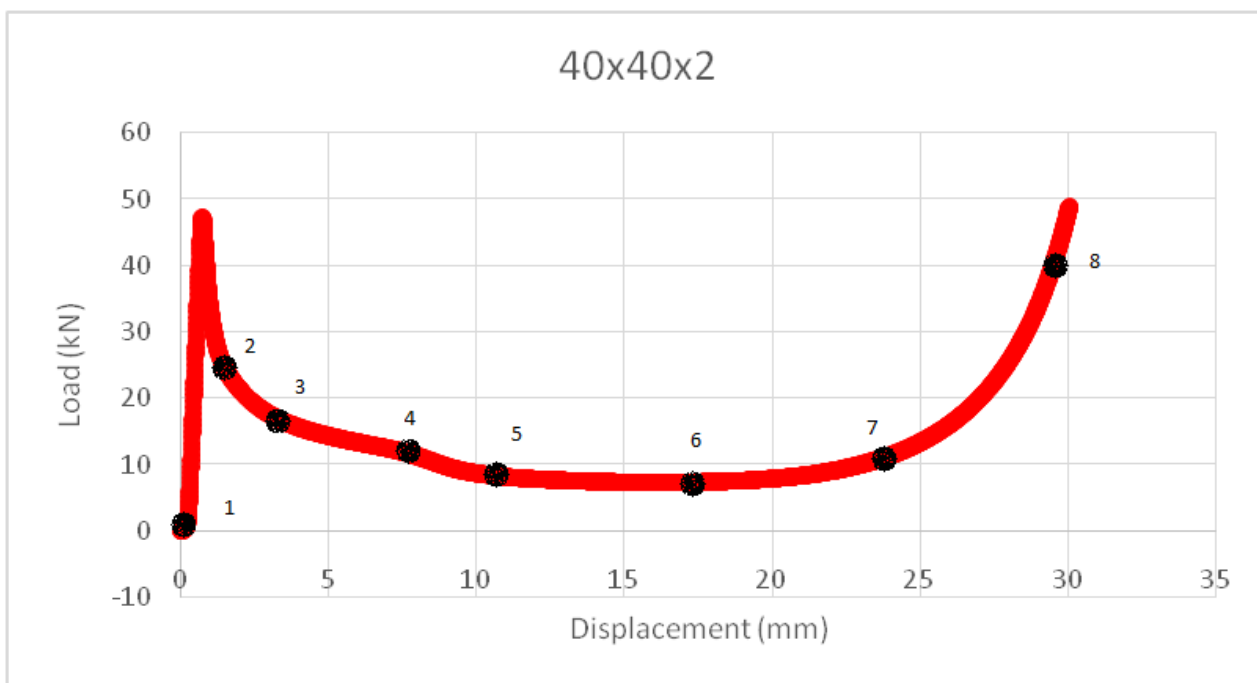
5

6



7

8



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

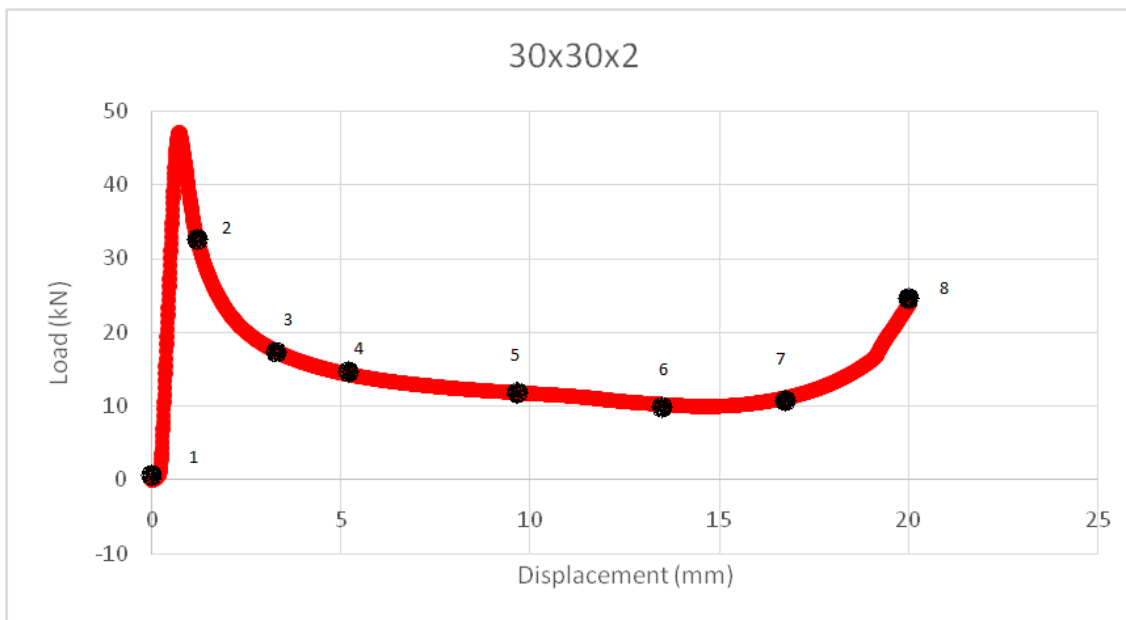
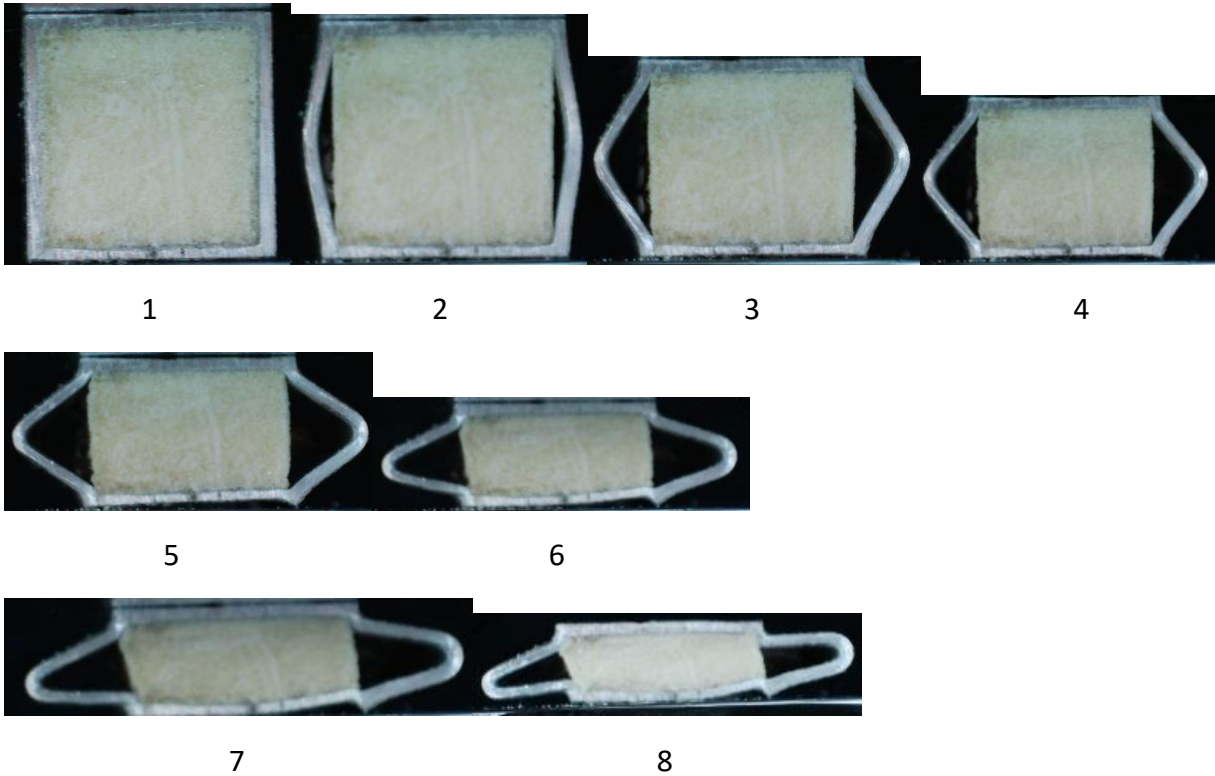
### Παρατηρήσεις

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.



**Εικόνα 3.9**

### 3.3.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2



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



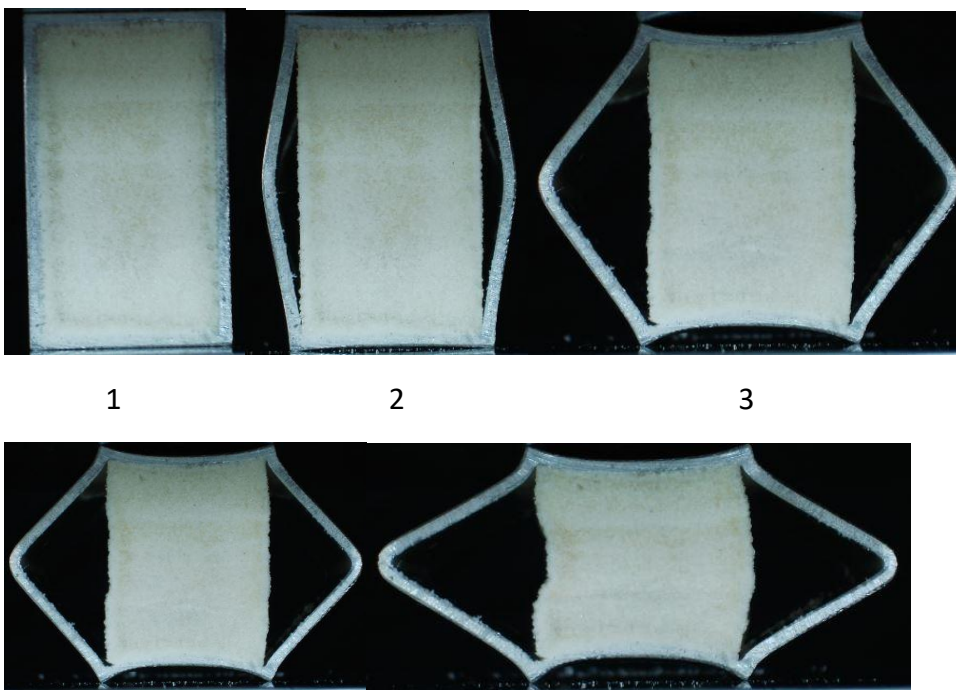
### Παρατηρήσεις

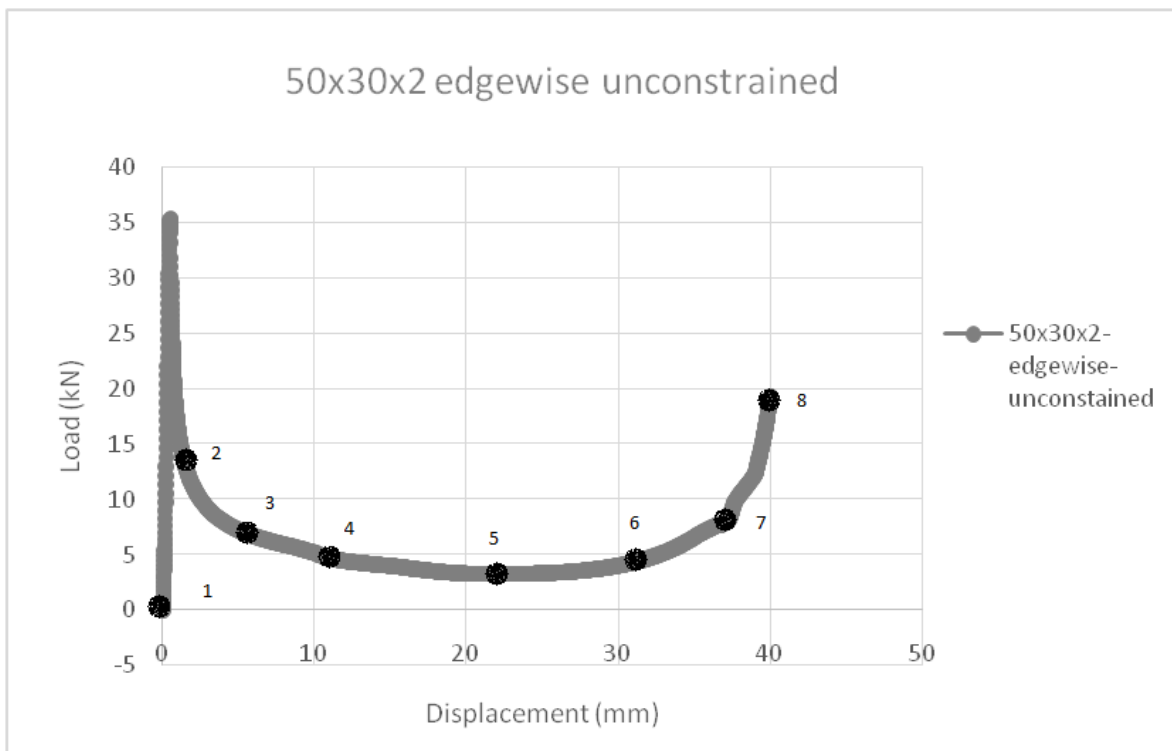
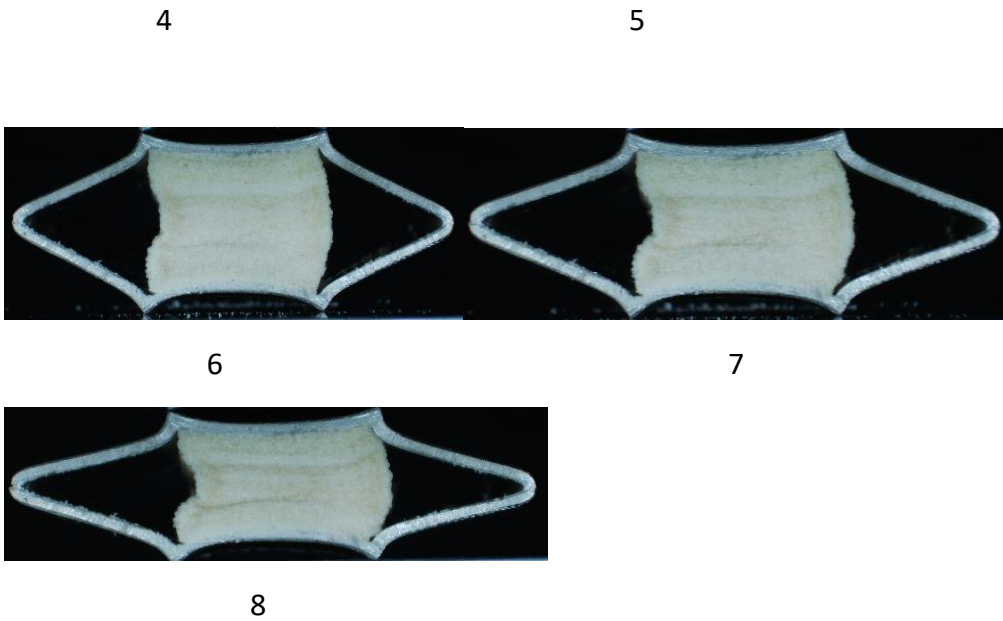
Λόγω μικρής διαδρομής της άνω πλάκας της μηχανής το φορτίο αρχίζει να αυξάνεται μετά τη μέση της ακμής. Θα περίμενε κανείς αυτό να γίνει στα 10mm αλλά συνέβη από τα 16mm και μετά. Από εκείνο το σημείο είναι σαν να συμπιέζεται μόνο ο αφρός όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.



Εικόνα 3.10

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





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

## Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε ότι σε σύγκριση με το δοκίμιο διαστάσεων 50x30x2 (edgewise) 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.



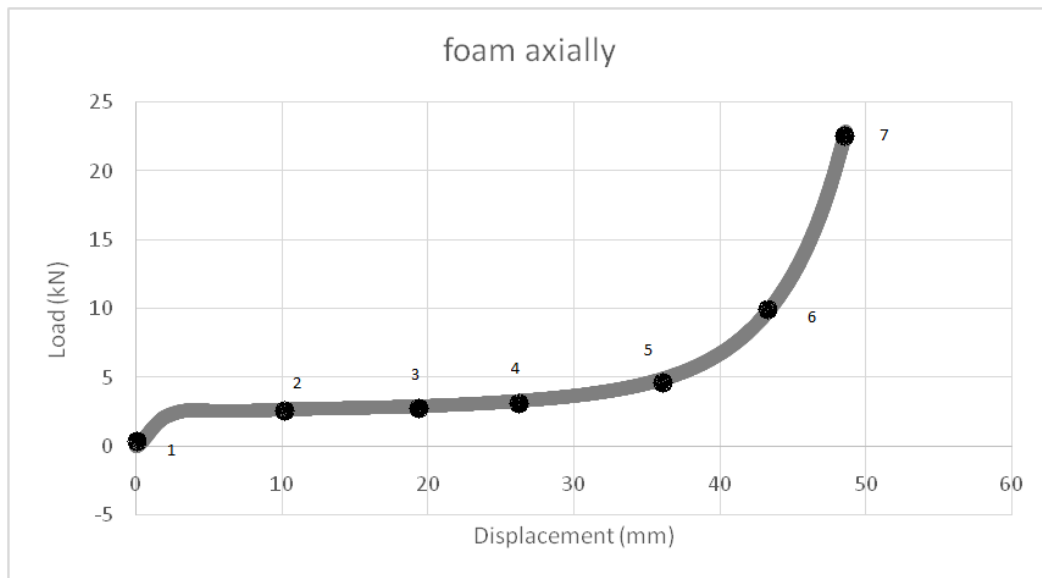
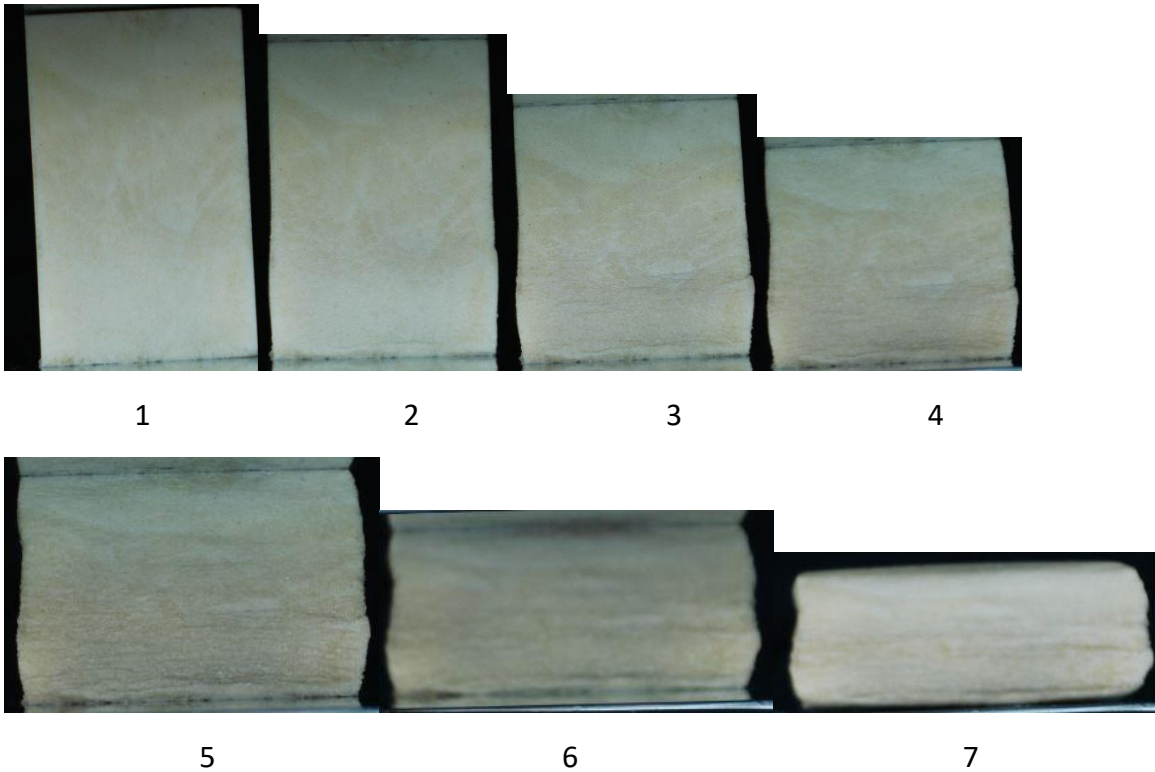
Εικόνα 3.11



Εικόνα 3.12

### 3.4 Δοκίμια αφρού

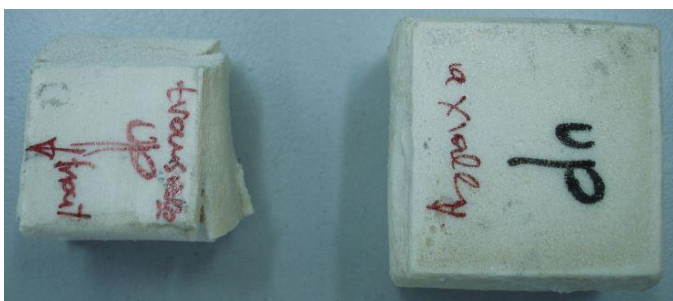
#### 3.4.1 Δοκίμιο διαστάσεων 60x40-axially



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

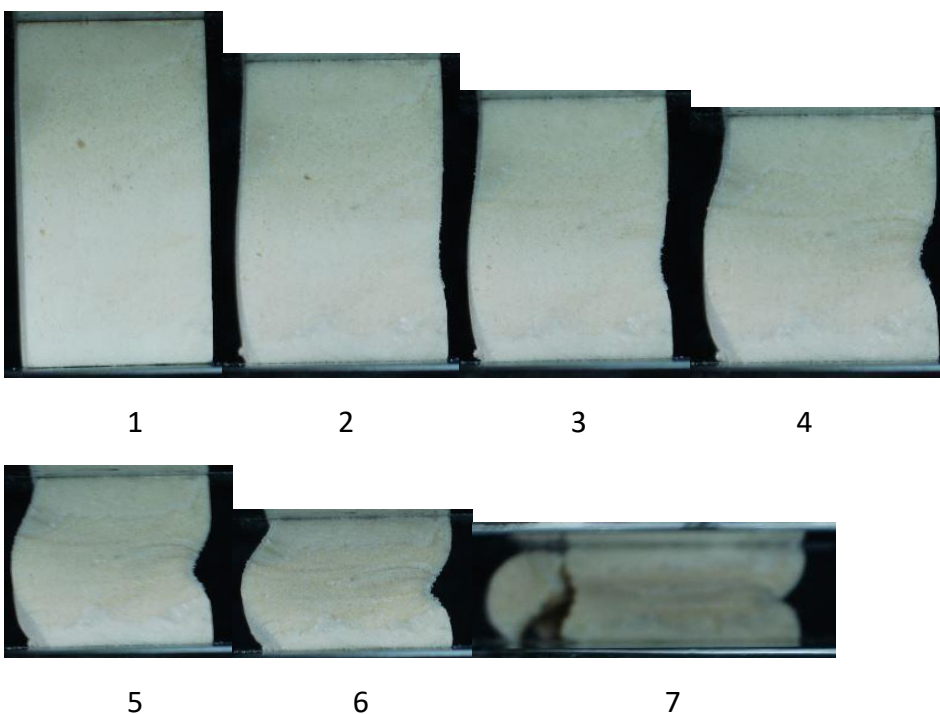
### Παρατηρήσεις

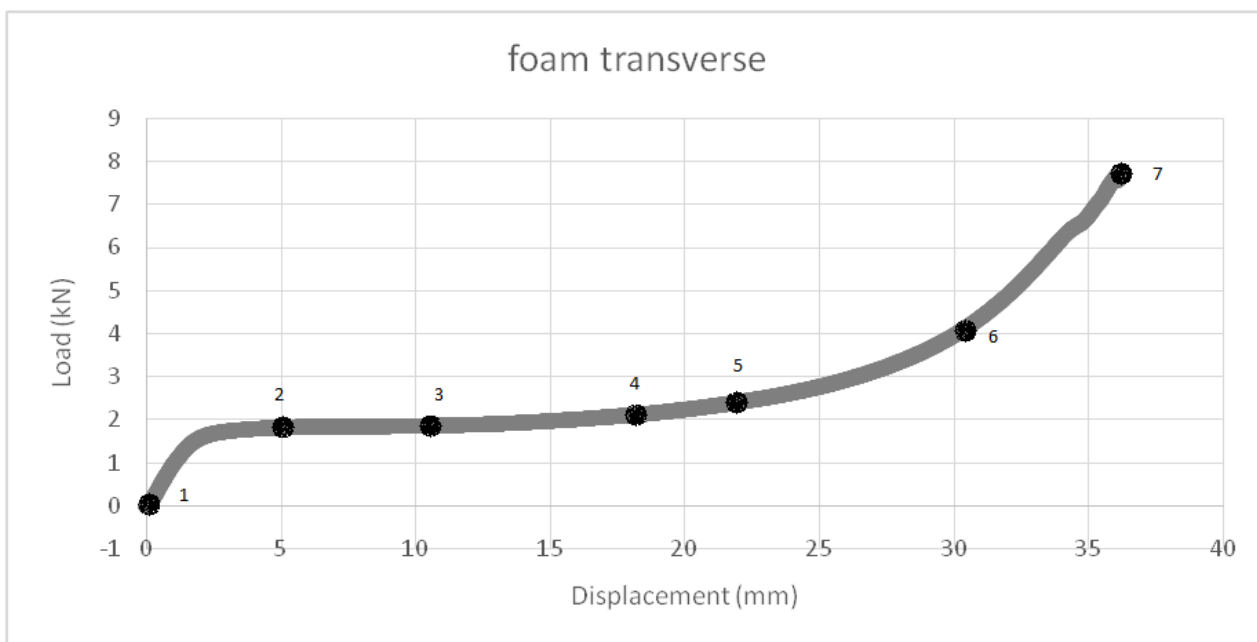
Οι πραγματικές μετρούμενες διαστάσεις του δοκιμίου του αφρού είναι λίγο μικρότερες από τις αναμενόμενες διότι αφού αφαιρέθηκε το κέλυφος λιμάραμε τις πλευρές του. Αναμενόταν να είχε διαστάσεις 46mmx26mm, αφού τα τοιχώματα έχουν πάχος ίσο με 2mm. Από τα 5mm μέχρι και τα 30mm σχεδόν το φορτίο παραμένει 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.



Εικόνα 3.13

### 3.4.2 Δοκίμιο διαστάσεων 60x40-transverse





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

**Παρατηρήσεις**

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.

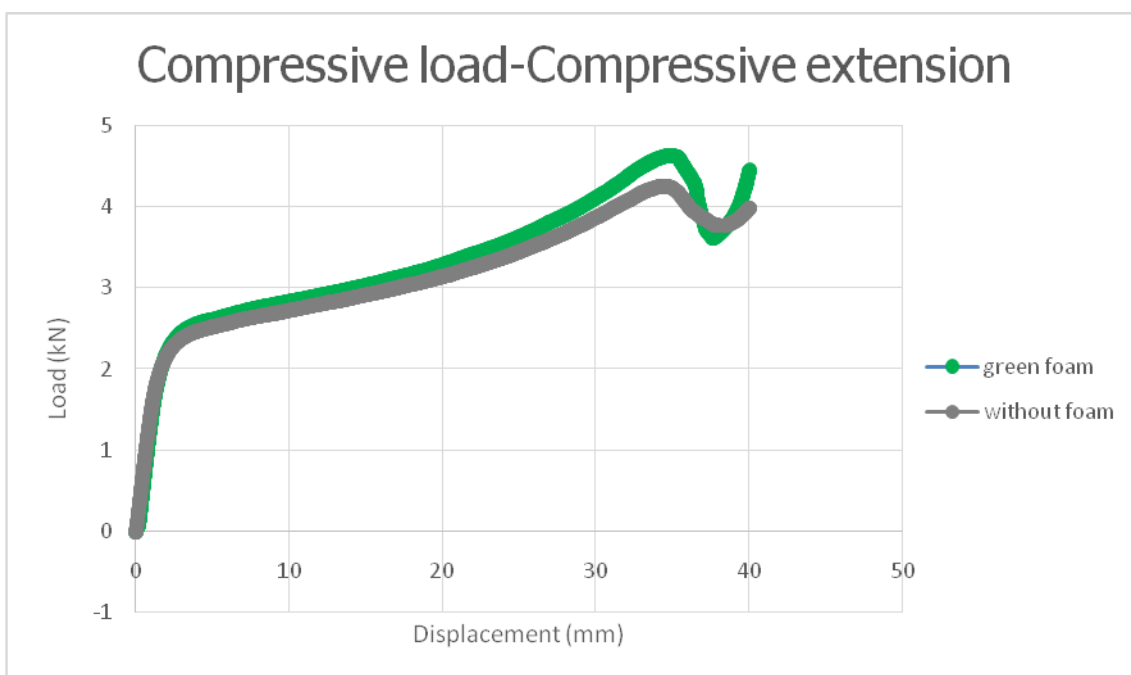


**Εικόνα 3.14**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο παρακάτω κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων, η οποία παρουσιάζεται στα διαγράμματα με ταυτόχρονη απεικόνιση των καμπυλών μετατόπισης των δοκιμίων με και χωρίς προσθήκη αφρού, ενώ παραθέτονται και τα διαγράμματα σύγκρισης με και χωρίς προσθήκη αφρού εμπορίου, καθώς και το διάγραμμα καμπύλης μετατόπισης του δοκιμίου 50x30x2-edgewise σε σύγκριση με το ίδιο ελεύθερης εκτόνωσης. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι πίνακες με τα τελικά ύψη των δοκιμίων, την απορροφώμενη ενέργεια και το μέγιστο φορτίο ανά περίπτωση, καθώς επίσης σχόλια και παρατηρήσεις.

### 4.1 Σωλήνας διαστάσεων φ50x2x60 με και χωρίς προσθήκη αφρού εμπορίου



Διάγραμμα 4.1: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων φ50x2x60



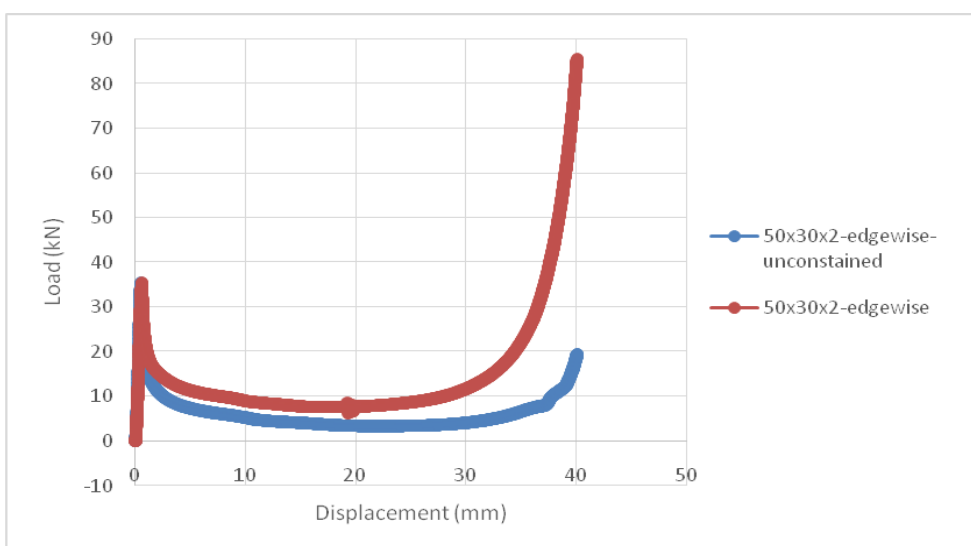
Εικόνα 4.1



Εικόνα 4.2

Παρατηρείται ότι το εμβαδό που περικλείεται από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης δηλαδή η απορροφώμενη ενέργεια είναι σχεδόν η ίδια και στις δύο περιπτώσεις.

#### 4.2 Σύγκριση σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-edgewise και edgewise ελεύθερης εκτόνωσης με προσθήκη πολυμερικού αφρού



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





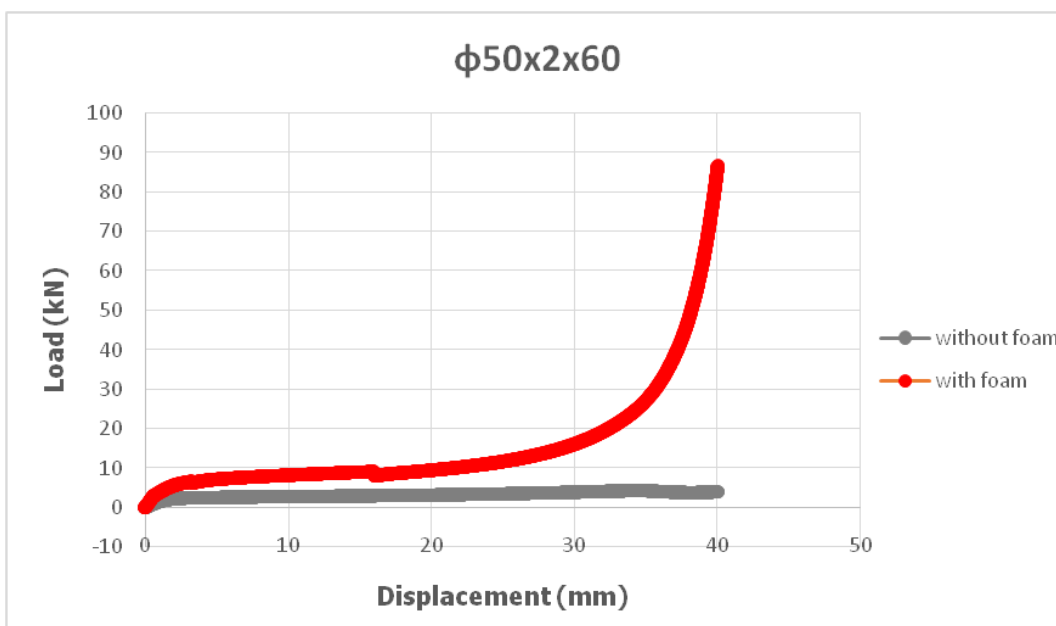
Εικόνα 4.3



Εικόνα 4.4

### 4.3 Σωλήνες με και χωρίς προσθήκη παρασκευασμένου πολυμερικού αφρού

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

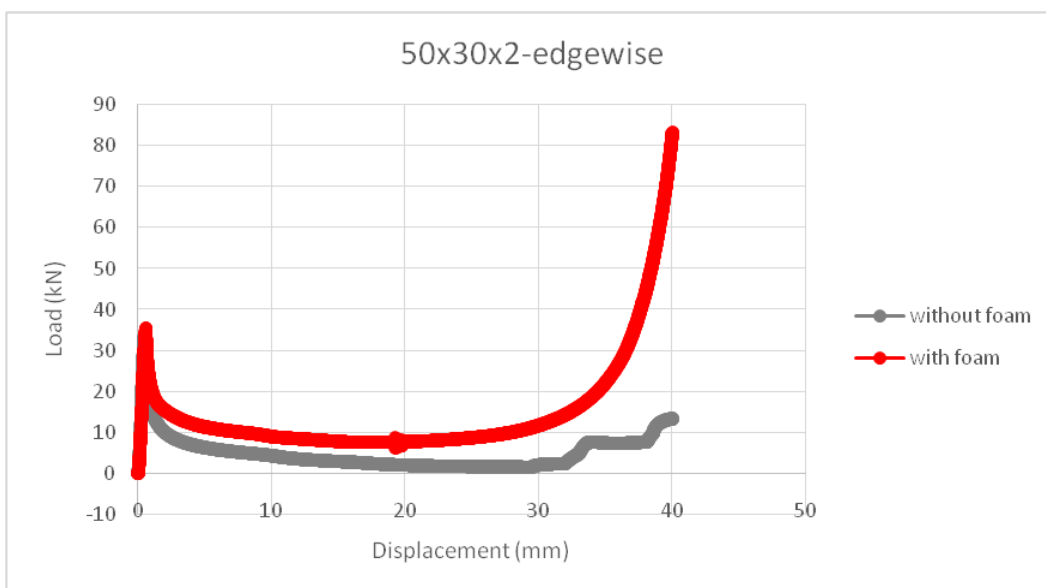


Διάγραμμα 4.3: Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων  $\phi 50 \times 2 \times 60$

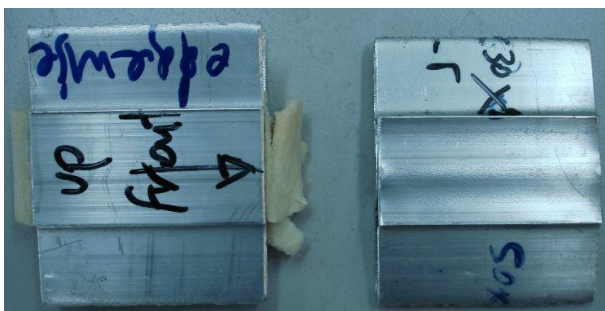


Εικόνα 4.5

### 4.3.2 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-edgewise

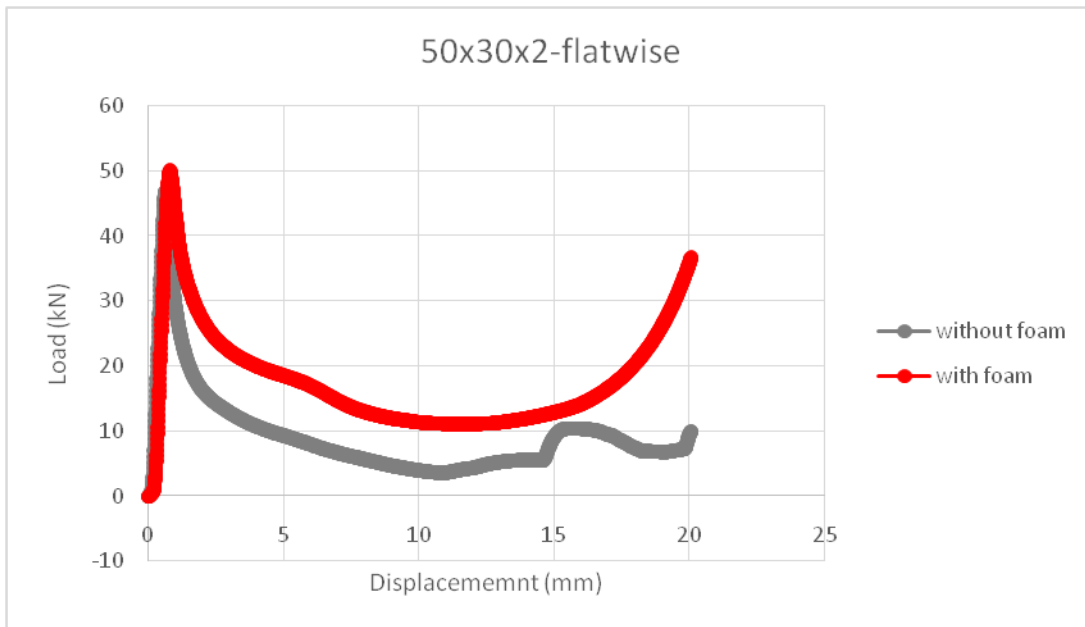


Διάγραμμα 4.4: Καμπύλες φορτίου- μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-edgewise



Εικόνα 4.6

### 4.3.3 Σωλήνας διαστάσεων 50x30x2-flatwise

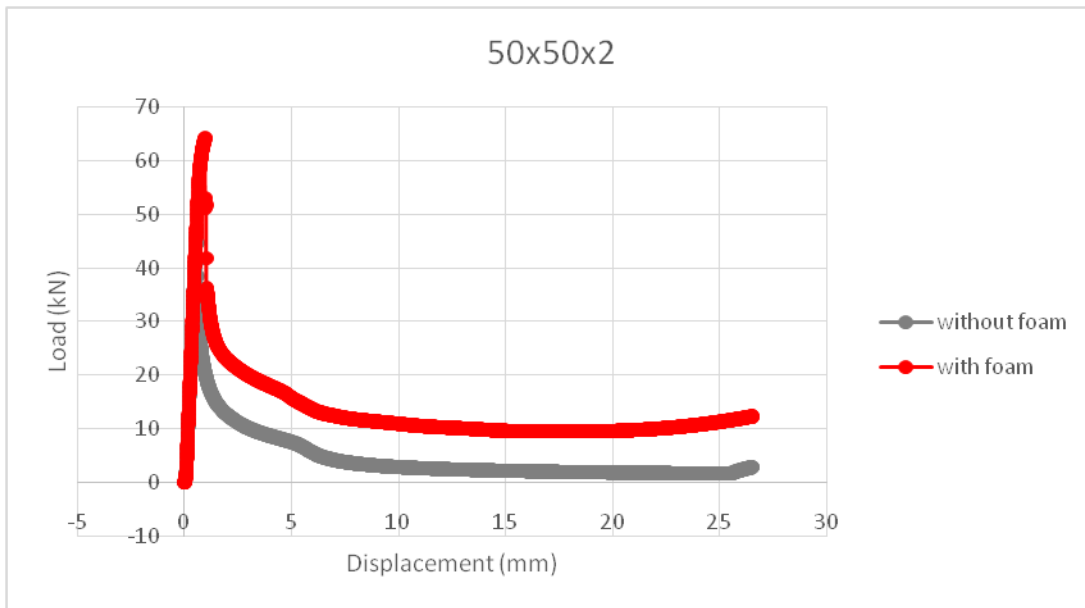


Διάγραμμα 4.5: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x30x2-flatwise



Εικόνα 4.7

#### 4.3.4 Σωλήνας διαστάσεων 50x50x2

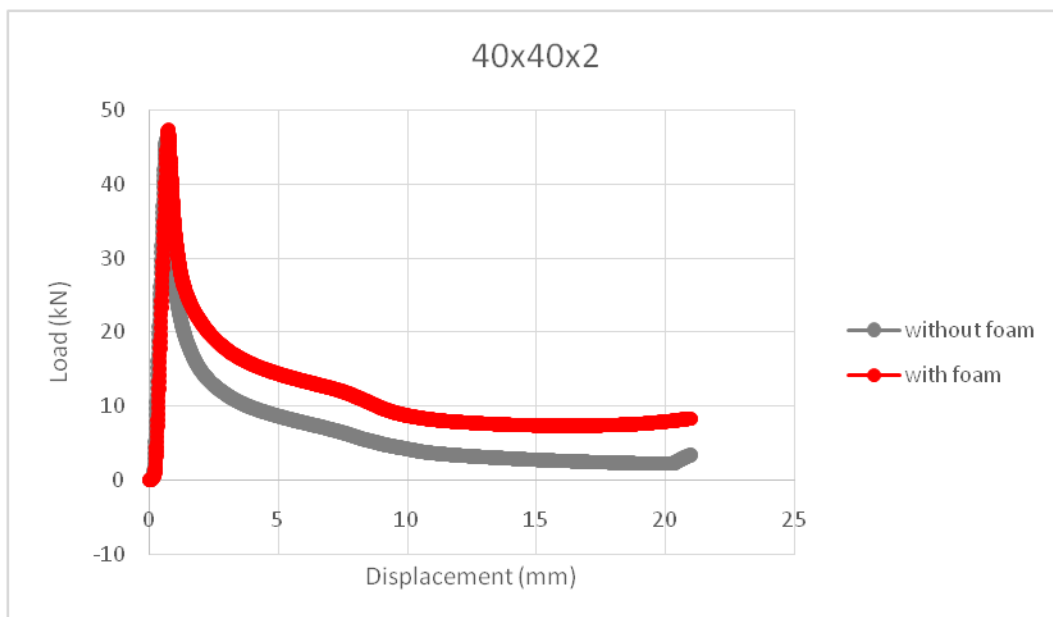


Διάγραμμα 4.6: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 50x50x2



Εικόνα 4.8

### 4.3.5 Σωλήνας διαστάσεων 40x40x2

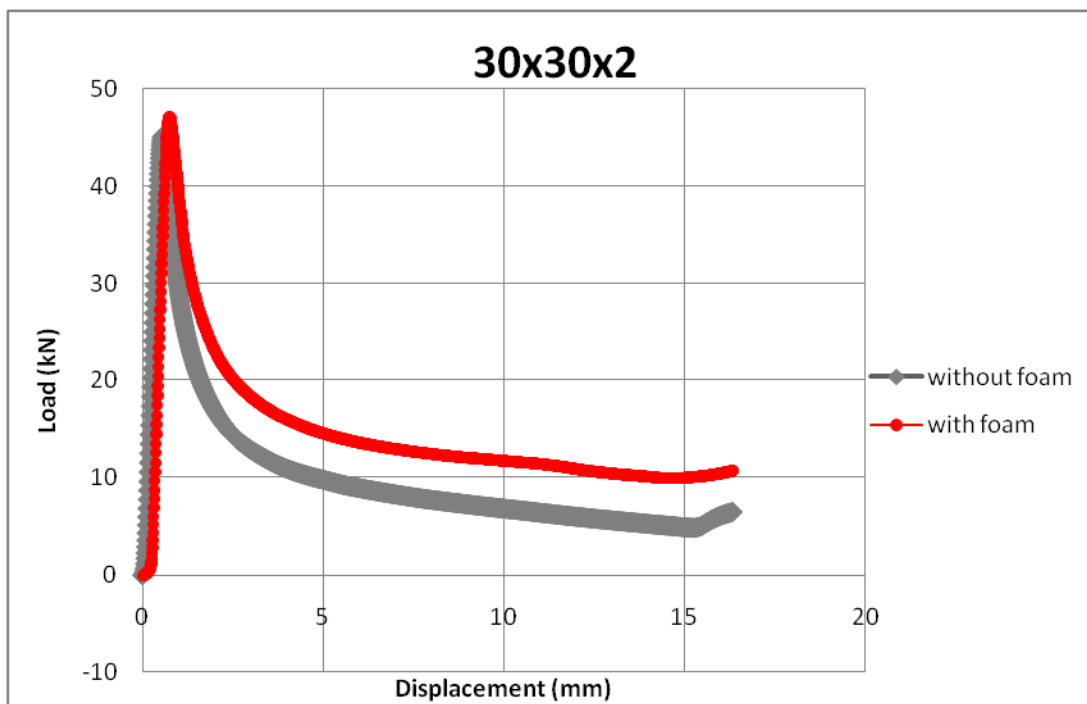


Διάγραμμα 4.7: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 40x40x2



Εικόνα 4.8

### 4.3.6 Σωλήνας διαστάσεων 30x30x2



Διάγραμμα 4.8: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης σωλήνα διαστάσεων 30x30x2



Εικόνα 4.9

#### 4.4 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	Without foam	With foam
1	φ50x2x60	127.25	611.14
2	50x30x2 (edgewise)	192.03	596.05
3	50x30x2 (flatwise)	183.23	355.48
4	50x50x2	122.23	767.54
5	40x40x2	137.29	410.45
6	30x30x2	164.63	293.34
7	foam transverse	-	99.81

**Πίνακας 0.1: Απορροφώμενη ενέργεια (J)**

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

α/α	Διαστάσειςδοκιμίου	Without foam	With foam
1	φ50x2x60	42.6	86.8
2	50x30x2 (edgewise)	33.5	85.6
3	50x30x2 (flatwise)	46.8	50.1
4	50x50x2	47.3	99.1
5	40x40x2	45.9	48.9
6	30x30x2	45.1	47.1
7	foam transverse	-	76.9

**Πίνακας 0.2: Μέγιστο φορτίο ανά περίπτωση (kN)**

#### 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 δοκιμών 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 δοκιμών 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 0.3: Τελικά ύψη δοκιμών (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.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΝΤΥΠΗ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

1. [http://library.tee.gr/digital/m2316/m2316\\_kahramanoglou.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2316/m2316_kahramanoglou.pdf)
2. [http://www.fibran.gr/sappek/docs/deliverables/deliverable\\_4.pdf](http://www.fibran.gr/sappek/docs/deliverables/deliverable_4.pdf)
3. <http://www.astynomia.gr>
4. 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)
5. N.K. Gupta, G.S. Sekhon, P.K. Gupta, "Finite Element Analysis of Collapse of Metallic Tubes", Indian Institute of Technology, New Delhi (2008)
6. 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)
7. 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)
8. 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)
9. 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
10. 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
11. 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,
12. 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
13. J. A. RINDE, "Poisson's Ratio for Rigid Plastic Foams", Lawrence Radiation Laboratory, University of California, 1970
14. 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
15. Abramowicz W, Jones N., "Dynamic progressive buckling of circular and square tubes", 1986

16. Abramowicz W. “Thin-walled structures as impact energy absorbers. Thin Walled Structures”, 2003
17. Ashida K., “Polyurethane and related foams: Chemistry and technology”, 2007