



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ**  
**ΥΠΟ ΠΕΡΙΟΡΙΣΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

**ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΔΙΑΡΜΙΣΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ Ε. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ - ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017**



## ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η καταπόνηση μεταλλικών κυλινδρικών κελυφών (σωλήνων) αλουμινίου σε πλευρική θλίψη με κυλινδρικό διεισδυτή παράλληλο προς τον άξονα του δοκιμίου, υπο περιοριστικές συνθήκες. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των κυλινδρικών λεπτότοιχων σωλήνων υπό τον περιορισμό τους με συμπαγείς και άκαμπτους σφήνες διαφόρων ημιγωνιών. Διεξάγονται πειραματικές δοκιμές και υπολογίζεται η απορρόφηση ενέργειας που επιτυγχάνεται κατά τη διαδικασία της καταπόνησης αυτής.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά περί των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας, εξηγούνται διάφοροι βασικοί όροι και παρουσιάζεται ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου Κατεργασιών που χρησιμοποιήθηκε. Οι διατάξεις απορρόφησης ενέργειας με κυλινδρικούς σωλήνες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ασφάλεια των οχημάτων καθώς συντελούν στον περιορισμό των συνεπειών μιας σύγκρουσης και συγκεντρώνουν, για το λόγο αυτό, σημαντικό τμήμα των ερευνών πάνω στο σχεδιασμό και την εξέλιξη τους. Στη συνέχεια, περιγράφεται θεωρητικά ο μηχανισμός κατάρρευσης λεπτότοιχων σωλήνων διαφόρων διατομών και παρατίθεται σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυρίων δημοσιεύσεων πάνω στο αντικείμενο της απορρόφησης ενέργειας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας με διεξοδική διερεύνηση και συμπεράσματα ανάλογα με το πάχος του δοκιμίου και διαφορετικές ημιγωνίες περιοριστικών σφηνών. Καταγράφεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης και γίνεται υπολογισμός του μέσου φορτίου και της ενέργειας που απορροφά το κάθε δοκίμιο, με πίνακες για σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο συγκρίνονται τα διαφορετικά δοκίμια μεταξύ τους για την ίδια περιοριστική ημιγωνία, εξάγονται γενικά συμπεράσματα και παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική εργασία.





**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS**  
**SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**MANUFACTURING TECHNOLOGY**

**DIPLOMA THESIS**

**LATERAL LOADING AT METALLIC SWELLS**  
**UNDER STRUCTURAL RESTRICTIONS**

STYLIANOS DIARMISIS

SUPERVISOR PROFESSOR: MANOLAKOS E. DIMITRIOS

ATHENS OCTOBER 2017



## **ABSTRACT**

In this thesis, we study aluminum cylindrical shells (tubes) exposed to lateral compression by a cylindrical indenter, placed parallel to the long axis of the specimen. This dissertation focuses on the lateral-compression behaviour of cylindrical thin-walled tubes, side-constrained by tube holders of different angles. Various experimental tests took place, where the energy dissipation is measured at each mechanical loading experiment.

First, energy absorption systems are outlined and the proper technical nomenclature is introduced and explained. The employed equipment of the Laboratory of Manufacturing Technology of the National Technical University of Athens (NTUA) is briefly presented as well. Energy absorbers consisting of metallic cylindrical tubes are integral components of vehicles' passive safety, as their role in mitigating crash forces is vital. As a result, the design and development of such systems is of high importance both in academia and automotive industry. A concise description of the lateral collapse process follows accompanied by a short review of the related literature.

In the 2<sup>nd</sup> chapter, we display the experimental results and draw conclusions regarding the effects of the specimen thickness and the angle of the tube holder. Load - deflection curves are recorded, whereas average load and energy absorption are computed for every specimen and compared to each other.

In the 3<sup>rd</sup> chapter, we compare the results of tests employing the same type (angle) of tube holder and important conclusions are reported. Finally, we make suggestions for future research.





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών κύριο Δημήτριο Μανωλάκο, ο οποίος μου έδωσε την δυνατότητα να εκπονήσω την διπλωματική μου εργασία στον τομέα των Κατεργασιών, διευρύνοντας έτσι τους ορίζοντές μου πάνω στους απορροφητές ενέργειας ως προστασία μιας κατασκευής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον διδάκτορα Μηχανολόγο Μηχανικό Μέλος Ε.Δι.Π. κύριο Πρωτεσίλαο Κωστάζο, η συμβολή του οποίου ήταν απαραίτητη και καθοριστική στην δημιουργία των δοκιμών, την διεξαγωγή των πειραμάτων και στον σχολιασμό διαφόρων φαινομένων και αποτελεσμάτων που μας απασχόλησαν στην παρούσα εργασία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Κωνσταντίνο Κερασιώτη, Τεχνικό Προσωπικό (Ε.Τ.Ε.Π.) και Νικόλαο Μελισσά, Τεχνικό Προσωπικό (Ι.Δ.Α.Χ.) για την συμβολή τους στην πειραματική διαδικασία και την κατασκευή των δοκιμών.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Σύνοψη</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vii</b>
<b>Ευχαριστίες</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. Εισαγωγή</b> .....	<b>1</b>
1.1 Γενικά.....	<b>1</b>
1.2 Θεωρητική Προσέγγιση του Μηχανισμού Κατάρρευσης.....	<b>3</b>
1.3 Πλευρική Θλίψη και Κατάρρευση Κελυφών.....	<b>4</b>
1.4 Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης.....	<b>8</b>
1.5 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας.....	<b>10</b>
1.6 Δοκίμια.....	<b>13</b>
<b>2. Παρουσίαση Πειραματικών Αποτελεσμάτων</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1 Γενικά</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2 Δοκίμιο 1 28mmΧ3mm</b> .....	<b>15</b>
2.2.1 Δοκίμιο 1 Ημιγωνία 0°.....	<b>15</b>
2.2.2 Δοκίμιο 1 Ημιγωνία 30°.....	<b>17</b>
2.2.3 Δοκίμιο 1 Ημιγωνία 45°.....	<b>18</b>
2.2.4 Δοκίμιο 1 Ημιγωνία 60°.....	<b>20</b>
2.2.5 Δοκίμιο 1 Ημιγωνία 90°.....	<b>21</b>
2.2.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Δοκιμίου 1.....	<b>23</b>
<b>2.3 Δοκίμιο 2 33mmΧ3mm</b> .....	<b>24</b>
2.3.1 Δοκίμιο 2 Ημιγωνία 0°.....	<b>24</b>
2.3.2 Δοκίμιο 2 Ημιγωνία 30°.....	<b>26</b>
2.3.3 Δοκίμιο 2 Ημιγωνία 45°.....	<b>27</b>
2.3.4 Δοκίμιο 2 Ημιγωνία 60°.....	<b>29</b>
2.3.5 Δοκίμιο 2 Ημιγωνία 90°.....	<b>30</b>
2.3.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Δοκιμίου 2.....	<b>32</b>

<b>2.4 Δοκίμιο 3 35mmΧ3mm.....</b>	<b>33</b>
2.4.1 Δοκίμιο 3 Ημιγωνία 0°.....	33
2.4.2 Δοκίμιο 3 Ημιγωνία 30°.....	34
2.4.3 Δοκίμιο 3 Ημιγωνία 45°.....	36
2.4.4 Δοκίμιο 3 Ημιγωνία 60°.....	37
2.4.5 Δοκίμιο 3 Ημιγωνία 90°.....	39
2.4.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Δοκιμίου 3.....	40
<b>2.5 Δοκίμιο 4 35mmΧ2mm.....</b>	<b>42</b>
2.5.1 Δοκίμιο 4 Ημιγωνία 0°.....	42
2.5.2 Δοκίμιο 4 Ημιγωνία 30°.....	43
2.5.3 Δοκίμιο 4 Ημιγωνία 45°.....	45
2.5.4 Δοκίμιο 4 Ημιγωνία 60°.....	47
2.5.5 Δοκίμιο 4 Ημιγωνία 90°.....	48
2.5.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Δοκιμίου 4.....	50
<b>2.6 Δοκίμιο 5 40mmΧ1,5mm.....</b>	<b>51</b>
2.6.1 Δοκίμιο 5 Ημιγωνία 0°.....	51
2.6.2 Δοκίμιο 5 Ημιγωνία 30°.....	52
2.6.3 Δοκίμιο 5 Ημιγωνία 45°.....	54
2.6.4 Δοκίμιο 5 Ημιγωνία 60°.....	55
2.6.5 Δοκίμιο 5 Ημιγωνία 90°.....	56
2.6.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Δοκιμίου 5.....	58
<b>3. Σύγκριση Δοκιμών - Συμπεράσματα - Προτάσεις.....</b>	<b>60</b>
<b>3.1 Σύγκριση Δοκιμών.....</b>	<b>60</b>
<b>3.2 Συμπεράσματα Πειραματικών Δοκιμών.....</b>	<b>66</b>
<b>3.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.....</b>	<b>70</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>71</b>

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Γενικά**

Τις τελευταίες δεκαετίες, υπήρξε έντονο ενδιαφέρον πάνω στην αντοχή μιας κατασκευής ως πρωτεύουσα απαίτηση κατά τον σχεδιασμό όλων των δομών μεταφοράς, που εμπεριέχουν επιβαίνοντες. Λεπτότοιχοι σωλήνες χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε εφαρμογές όπου η αντοχή σε σύγκρουση είναι κυρίαρχος παράγοντας, απορροφώντας την κινητική ενέργεια μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης και με τον τρόπο αυτό συμβάλλουν στην αύξηση της αντοχής σε κρούση της κατασκευής. Η ευρεία χρήση λεπτότοιχων σωλήνων ως απορροφητές ενέργειας οφείλεται στην καλή τους απόδοση όταν υποβληθούν σε δυναμική φόρτιση, την μεγάλη διαθεσιμότητα αυτών, το χαμηλό κόστος παράγωγής τους καθώς και στην αποδοτικότητά τους. Τέτοιες κατασκευές απορρόφησης ενέργειας, αποτελούμενες από λεπτότοιχους σωλήνες, βρίσκουμε στα μπροστινά μέρη αυτοκινήτων, σε πολύ ακριβά μοντέλα σ' όλο τον σκελετό τους, σε τραίνα, σε υποδαπέδιες κατασκευές αεροσκαφών, σε προστατευτικές δομές ανατροπής βαρέων οχημάτων όπως μπουλντόζες και καρότσες φορτηγών.

Σχεδιάζοντας μια μηχανολογική κατασκευή, ο μελετητής, προκειμένου να προχωρήσει στη μελέτη - σχεδίαση ενός νέου προϊόντος ή την βελτιστοποίηση ενός παλαιού λόγω των αδυναμιών που παρουσίαζε, λαμβάνει υπόψη του ένα σύνολο κριτηρίων, όπως το χαμηλό κόστος κατασκευής, τη λειτουργικότητα, την ελαχιστοποίηση του βάρους και την ασφάλεια του χρήστη και της κατασκευής. Η σημαντικότερη όμως παράμετρος, στην οποία δίνεται ιδιαίτερη έμφαση, είναι αυτή της ασφάλειας των χρηστών. Για το λόγο αυτό, μεγάλες βιομηχανίες πραγματοποιούν έρευνες προκειμένου να βελτιώσουν την ασφάλεια των κατασκευών τους. Ένας κλάδος της βιομηχανίας που ασχολείται ιδιαίτερος με τον τομέα της ασφάλειας, είναι αυτός των μεταφορών, ιδίως της αυτοκινητοβιομηχανίας και γενικά των συστημάτων αναχαίτησης οχημάτων (μπάρες προστασίας, κολωνάκια, κλπ).

Έτσι παρατηρείται να εκτελούνται αλληπάλληλα crash test προκειμένου να δοθεί στην κυκλοφορία ένα νέο μοντέλο αυτοκινήτου. Η τάση αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι τα τροχαία δυστυχήματα αποτελούν μία από τις κύριες αιτίες θανάτων στο σύγχρονο κόσμο. Ιδίως στη χώρα μας, η οποία κατέχει ένα από τα υψηλότερα ποσοστά στην Ε.Ε., καταδεικνύεται η αναγκαιότητα ενός σχεδιασμού που θα έχει ως στόχο του την προστασία ανθρώπινων ζώων. Η φιλοσοφία αυτού του τρόπου σχεδίασης, έγκειται στη χρήση διατάξεων που απορροφούν την ενέργεια της κρούσης μέσω της πλαστικής τους παραμόρφωσης, προστατεύοντας την υπόλοιπη κατασκευή (crashworthiness) αλλά και τους επιβαίνοντες από τα υψηλά φορτία που αναπτύσσονται κατά τη σύγκρουση.

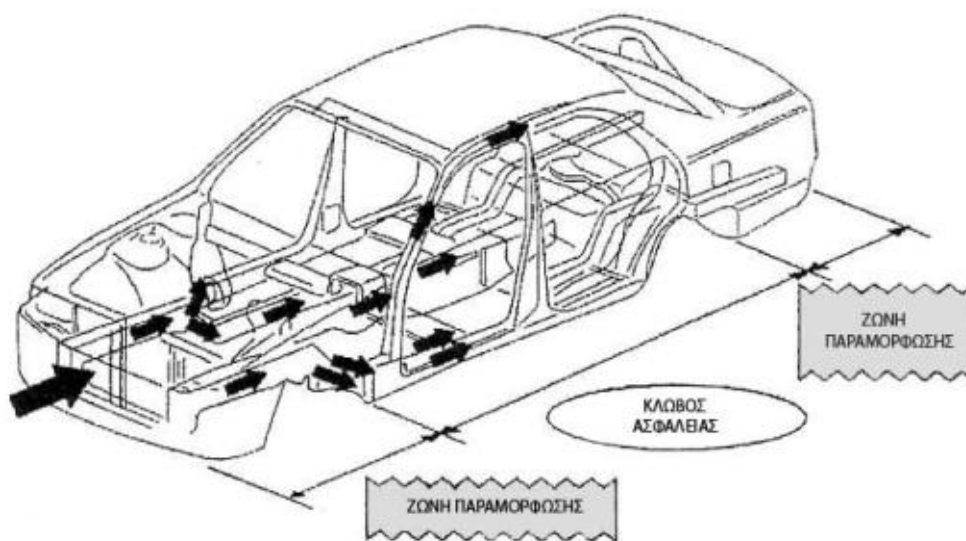
Έτσι όλοι οι σχεδιαστές καθώς και τα τμήματα έρευνας και ανάπτυξης των μεγάλων βιομηχανιών προσπαθούν να εφεύρουν και να ενσωματώσουν στα σύγχρονα μεταφορικά μέσα νέα συστήματα που αποσκοπούν στην αύξηση του επιπέδου παρεχόμενης ασφάλειας.

Τα συστήματα αυτά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, σε αυτά που αποσκοπούν στη βελτίωση της ενεργητικής ασφάλειας και σε εκείνα που προορίζονται για τη βελτίωση της

παθητικής ασφάλειας. Τα συστήματα που σχετίζονται με την ενεργητική ασφάλεια βοηθούν στην αποφυγή ενός ατυχήματος, ενώ αν αυτό τελικά συμβεί, η παθητική ασφάλεια είναι αυτή που περιορίζει στο ελάχιστο δυνατό τις συνέπειές του. Για να το επιτύχουν αυτό υιοθετούν στοιχεία και διατάξεις που ως σκοπό έχουν να περιορίσουν τις επιπτώσεις μιας πιθανής σύγκρουσης στους επιβάτες.

Ιστορικά αν δούμε το θέμα παρατηρούμε ότι η κατάσταση πριν από λίγες δεκαετίες ήταν διαφορετική. Το πρόβλημα της επικινδυνότητας των μέσων μεταφοράς δεν κατείχε σημαίνουσα θέση και γενικά υπήρχε η πεποίθηση ότι το όχημα που δεν παραμορφώνεται σε περίπτωση σύγκρουσης ήταν πιο ασφαλές. Η παραπάνω άποψη διατυπώθηκε ύστερα από την παρατήρηση πραγματικών ατυχημάτων ανάμεσα σε μικρά οχήματα όταν αυτά συγκρούονταν με μεγαλύτερα. Οι επιβάτες των μεγαλύτερων οχημάτων καταπονούνταν λιγότερο λόγω των μικρότερων επιβραδύνσεων που δέχονταν κατά τη σύγκρουση αφού η αυξημένη μάζα του μεγάλου οχήματος ανέπτυξε λόγω μεγάλης αδράνειας μικρότερη επιβράδυνση από ένα μικρότερο όχημα. Με το πέρασμα των δεκαετιών η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη του σύγχρονου ανθρώπου για μετακίνηση έκανε επιτακτική την κατασκευή φθηνών, ελαφρών και μικρών οχημάτων τα οποία ήταν πιο ευέλικτα αλλά δεν είχαν το προτέρημα της μεγάλης μάζας. Η επερχόμενη αύξηση των οχημάτων οδήγησε σε ταυτόχρονη αύξηση των ατυχημάτων με οδυνηρές συνέπειες για το σύγχρονο άνθρωπο. Το γεγονός αυτό έδωσε ώθηση στους κατασκευαστές για ανάπτυξη έρευνας γύρω από τον τομέα της ασφάλειας των μεταφορικών μέσων. Μακροχρόνιες έρευνες σχετικά με τη σχεδίαση συστημάτων που θα βελτίωναν αισθητά την παθητική ασφάλεια των οχημάτων οδήγησαν στη μέθοδο σχεδίασης του οχήματος με βάση το διαχωρισμό του αμαξώματος σε δύο ζώνες:

1. Τη ζώνη παραμόρφωσης η οποία με τη σειρά της διαχωρίζεται στην εμπρόσθια και στην οπίσθια ζώνη.
2. Την άκαμπτη ζώνη η οποία σχηματίζει ένα κλωβό ασφαλείας γύρω από τους επιβαίνοντες και τους εξασφαλίζει τον αναγκαίο ζωτικό χώρο για να επιβιώσουν σε περίπτωση σοβαρής σύγκρουσης.



*Εικόνα 1.1 Τυπικό αμάξωμα χωρισμένο σε ζώνες*



Εικόνα 1.2 Νέο αμάξωμα Volvo S60

Ένας ανθεκτικός προστατευτικός ατσάλινος κλωβός περιβάλλει τους επιβάτες και είναι ενισχυμένος με έναν από τους ανθεκτικότερους τύπους ατσαλιού που είναι διαθέσιμοι σήμερα – βιοριούχο ατσάλι εξελασμένο εν θερμώ. Σε μια σύγκρουση, η μπροστινή και η πίσω ζώνη παραμόρφωσης συμβάλλουν στην απορρόφηση της ενέργειας από τη σύγκρουση ώστε να μειωθούν οι δυνάμεις πρόσκρουσης που ασκούνται σε όσους βρίσκονται μέσα στο αυτοκίνητο, ενώ σε περίπτωση πλαγιομετωπικής πρόσκρουσης το σύστημα προστασίας από πλευρική πρόσκρουση (SIPS) κατανέμει τις δυνάμεις σε ένα μεγάλο μέρος του αμαξώματος, περιορίζοντας έτσι τον κίνδυνο τραυματισμού των επιβαινόντων. Και για ακόμη μεγαλύτερη προστασία των επιβαινόντων, υπάρχει μια χαλύβδινη τραβέρσα κάτω από το ταμπλό.

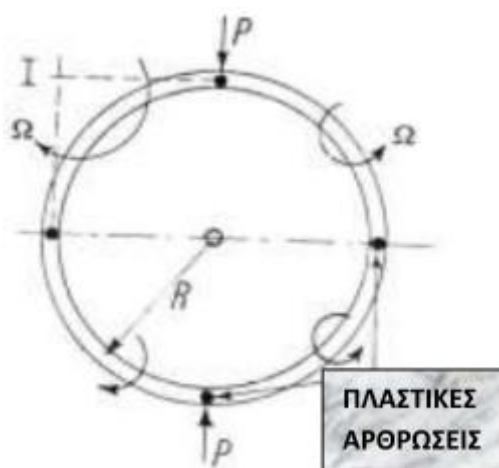
## 1.2 Θεωρητική Προσέγγιση του Μηχανισμού κατάρρευσης

Η συνολική ανάλυση της ολικής παραμόρφωσης ακόμα και της απλούστερης κατασκευής είναι πολύ περίπλοκη. Γι' αυτό το λόγο συνήθως χρησιμοποιούνται απλουστευτικές υποθέσεις οι οποίες οδηγούν σε κατά προσέγγιση εκφράσεις της σχέσης φορτίου - παραμόρφωσης.

Ειδικότερα, όταν η κάμψη είναι η λειτουργία που κυριαρχεί κατά την παραμόρφωση του δοκιμίου, είναι το πλέον σύνηθες να υποθέτουμε ότι το υλικό είναι τέλεια πλαστικό και ότι δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις σε κρίσιμα τμήματα της σωλήνωσης. Η γεωμετρία της δομής τροποποιείται με την παραδοχή ότι τα άκαμπτα τμήματα υποβάλλονται σε περιορισμένες περιστροφές γύρω από τις πλαστικές αρθρώσεις και έτσι το φορτίο μπορεί να αυξηθεί πέρα από το όριο κατάρρευσης του υλικού.

### 1.3 Πλευρική θλίψη και κατάρρευση κελυφών

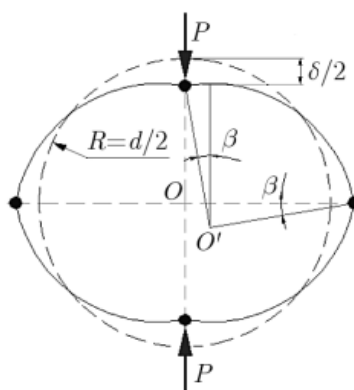
Ένας λεπτός κυκλικός σωλήνας δεν είναι αρκετά εύκαμπτος όσον αφορά την μέση ακτίνα  $R$  όταν αυτός υποβάλλεται σε φορτίο  $-P$  κατά την διάμετρο του και μπορεί να καταρρεύσει πλαστικά μόνο όταν δημιουργηθούν τέσσερις τέτοιες αρθρώσεις, που θα του επιτρέψουν να λειτουργήσει σαν ένας μηχανισμός εικόνα 1.3. Αυτές οι αρθρώσεις συμπεραίνουμε ότι εμφανίζονται στις περιοχές όπου παρουσιάζεται η μέγιστη ελαστικότητα.



Εικόνα 1.3 Σημεία εμφάνισης πλαστικών αρθρώσεων σε κυκλικούς σωλήνες

Εάν το κέντρο του σωλήνα παραμένει σταθερό, τότε κατά την κατάρρευση, τα τέσσερα αυτά άκαμπτα τμήματα που υπάρχουν μεταξύ των αρθρώσεων περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$  γύρω από ένα στιγμιαίο κέντρο  $I$  και η δύναμη  $P$  κινείται προς το κέντρο του σωλήνα με ταχύτητα  $R \cdot \Omega$ .

Όταν μια συνεχιζόμενη, οιονεί - στατική θλίψη ενός σωλήνα πραγματοποιείται μεταξύ παράλληλων και άκαμπτων επιφανιών, είναι προφανές ότι η δύναμη σύνθλιψης  $P$  αυξάνεται ταυτόχρονα με την μείωση της κάθετης διαμέτρου του δοκιμίου. Όσο η κάθετη παραμόρφωση συνεχίζεται, παρατηρούμε ότι οι αρχικές τέσσερις αρθρώσεις παραμένουν, αλλά τα σημεία όπου εφαρμόζονται οι δυνάμεις συμπίεσης απομακρύνονται από την κεντρική γραμμή χωριζόμενες σε δυο ίσες συνιστώσες  $P/2$ . Ενδεικτικά η παραμόρφωση αναμένεται να είναι όπως την εικόνα 1.4.



Εικόνα 1.4 Διαδικασία Παραμόρφωσης σε Κυκλικούς Σωλήνες



Κάθε τέταρτο του δακτυλίου του σωλήνα μπορεί να θεωρηθεί ότι περιστρέφεται γύρω από το παραμένον άκαμπτο τμήμα.

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 δεξιά τμήμα του σωλήνα και ονομάζεται τομέας, ο οποίος χωρίζεται σε τρεις ζώνες (I, II και III).

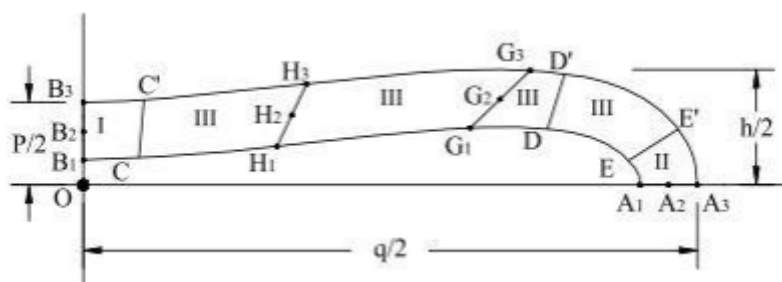
Μπορεί κανείς να επισημάνει δώδεκα χαρακτηριστικά σημεία ( $A_1, A_2, A_3, G_1, G_2, G_3, H_1, H_2, H_3, B_1, B_2,$  και  $B_3$ ) και δύο ευθείες ( $A_1A_3$  και  $B_1B_3$ ). Τα σημεία  $A_2, G_2, H_2$  και  $B_2$  βρίσκονται στο κέντρο των ευθειών  $A_1A_3, G_1G_3$  και  $B_1B_3$  αντίστοιχα. Οι ευθείες  $H_2H_3$  και  $G_1G_3$  βρίσκονται υπό κλίση  $30^\circ$  και  $60^\circ$  αντίστοιχα σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα (Εικόνα 1.5).

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.

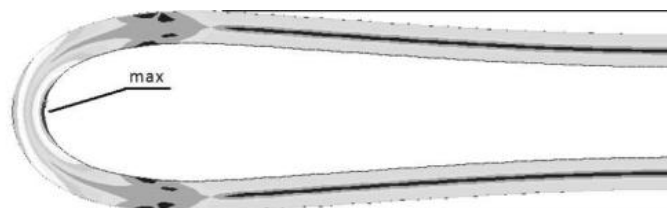
Η ισοδύναμη παραμόρφωση στα σημεία  $H_1$  και  $H_3$  παραμένει αρχικά σχεδόν ίση με το μηδέν μέχρι ένα στάδιο της συμπίεσης. Έπειτα ξαφνικά αρχίζει να αυξάνει. Με περαιτέρω συμπίεση η ισοδύναμη παραμόρφωση των δύο σημείων μειώνεται ξανά και τελικά παίρνει πάλι σχεδόν μηδενική τιμή. Η ισοδύναμη παραμόρφωση 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 1.5 Διατομή σωλήνα κυλινδρικής διατομής μετά την συμπίεση  
(ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος)

Όσο για τους πλαστικούς αρμούς είναι σαφές πως σχηματίζονται στις ζώνες I και II (περιοχή γύρω από τον κατακόρυφο οριζόντιο άξονα συμμετρίας αντίστοιχα). Οι ευθείες B1B3 και A1A3 κινούνται πάνω τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα 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.



Εικόνα 1.6 Εμφάνιση πλαστικών αρμών σε σωλήνα κυλινδρικής διατομής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα δοκίμια θα υποστούν την μηχανική δοκιμή της πλευρικής θλίψης με καταστροφική καταπόνηση και κατάρρευση των κελυφών. Ο μηχανισμός αυτός της απορρόφησης ενέργειας είναι που μετατρέπει ελεγχόμενα την κινητική ενέργεια σε πλαστική απορροφούμενη ενέργεια παραμόρφωσης του εξεταζόμενου δοκιμίου.

Λόγω της πολυπλοκότητας των σημερινών κατασκευών για την κάλυψη των ανθρωπίνων αναγκών θα μελετηθεί ο μηχανισμός αυτός όταν το δοκίμιο βρίσκεται υπό τον περιορισμό άκαμπτης και στιβαρής κατασκευής ημιγωνιών  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  και  $90^\circ$ . Οι κύριοι μηχανισμοί πλαστικής παραμόρφωσης σωλήνων, περιλαμβάνουν τις παρακάτω μορφές :

- πλευρική συμπίεση (lateral flattening)
- την αξονική θλίψη (axial crushing)
- την πλαστική αναστροφή των πλευρικών επιφανειών λόγω θλιπτικού φορτίου (inside - out tube inversion)
- την πλαστική απότμηση λόγω αξονικής φόρτισης (tube splitting).

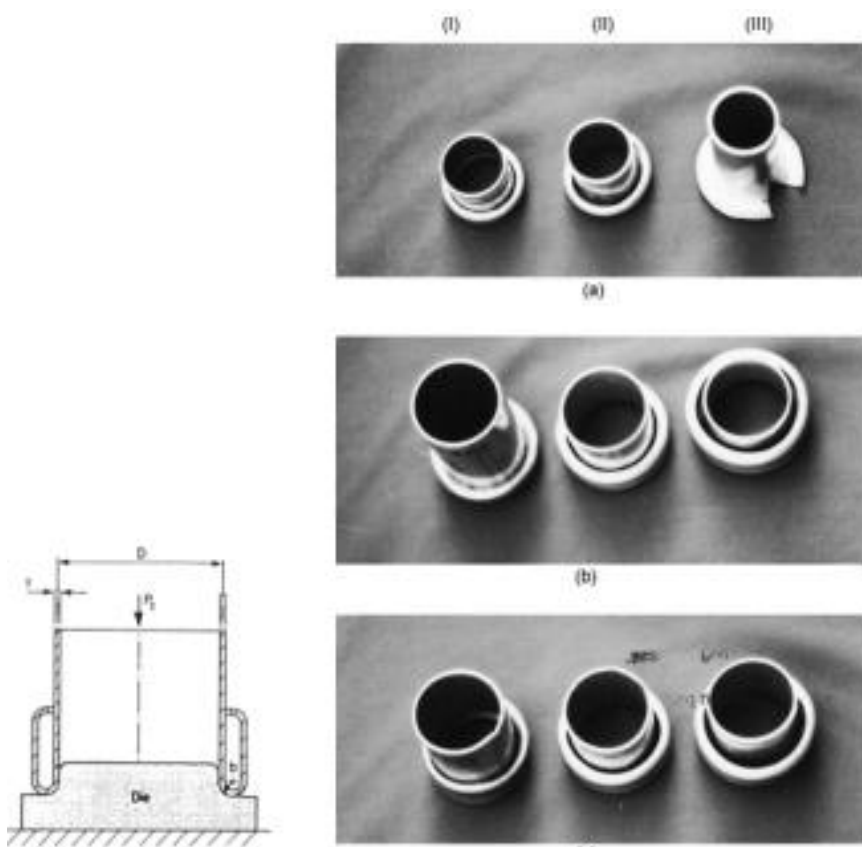
Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται δοκίμια στους κύριους μηχανισμούς απορρόφησης.



Εικόνα 1.7 Πλευρική θλίψη



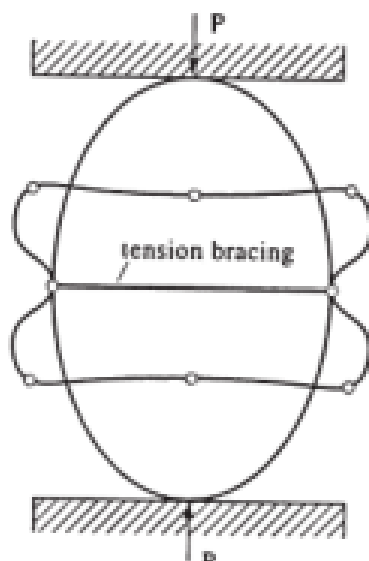
*Εικόνα 1.8 Πλευρική καταπόνηση σύνθετης κατασκευής*



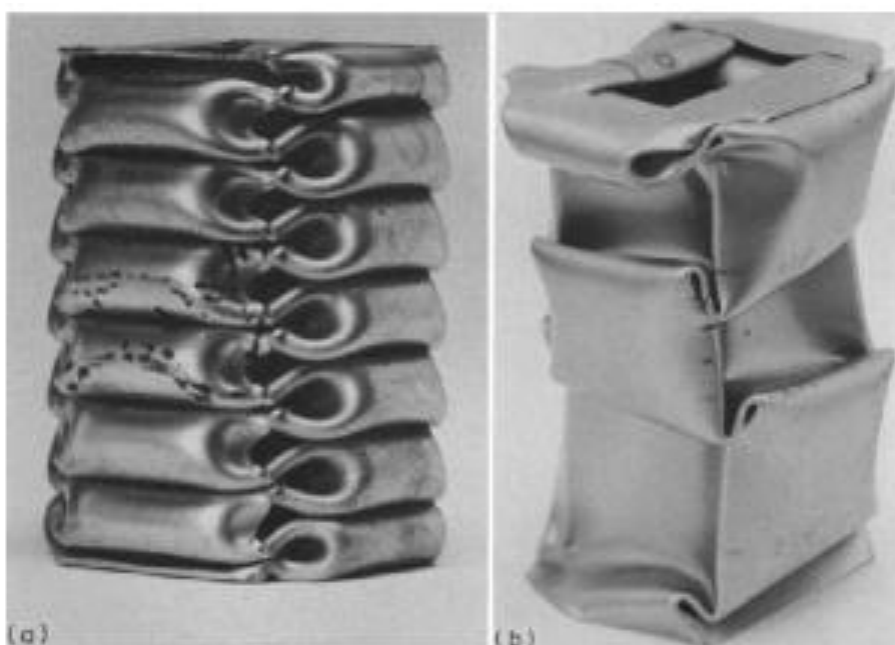
*Εικόνα 1.9 Πλαστική αναστροφή των πλευρικών επιφανειών λόγω θλιπτικού φορτίου*



*Εικόνα 1.10 Φάσεις πλαστικής απότμησης λόγω αξονικής φόρτισης*



Εικόνα 1.11 Πλευρική συμπίεση

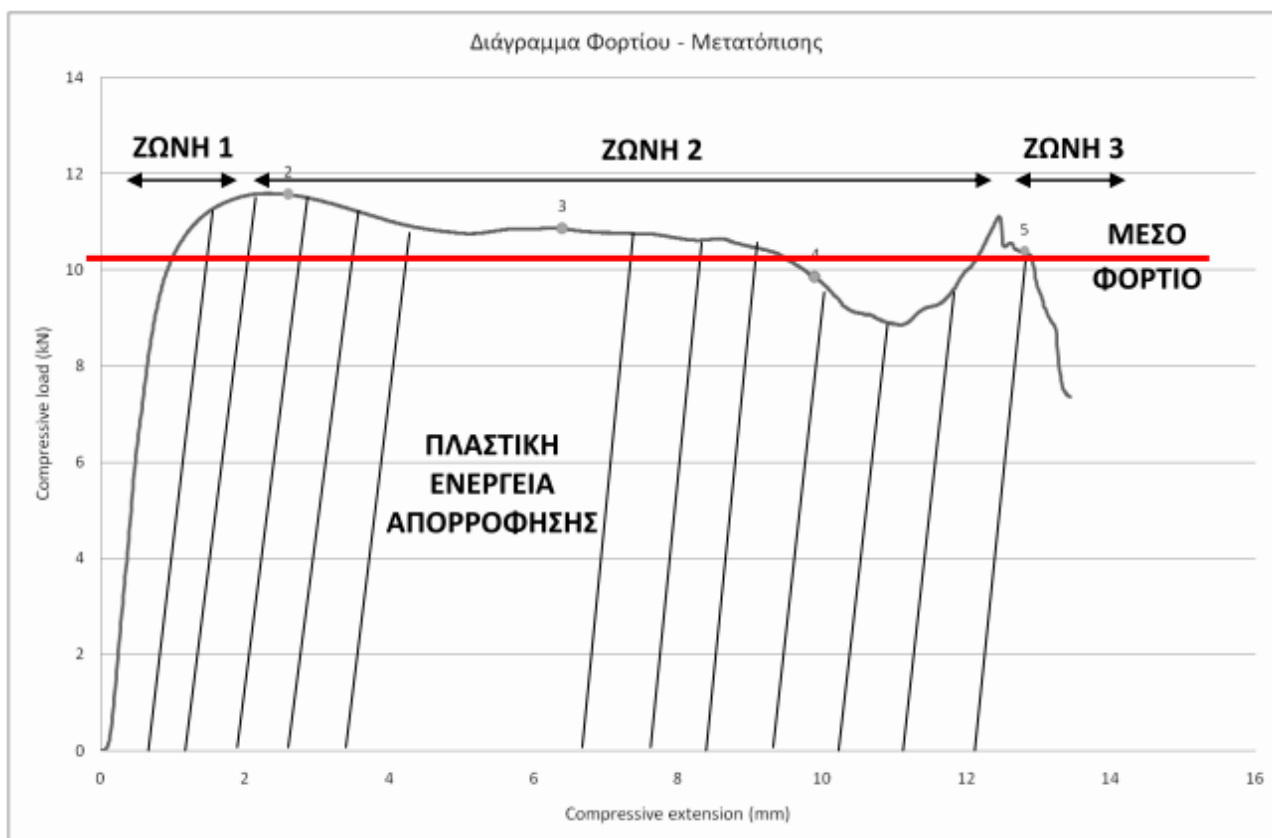


Εικόνα 1.12 Αξονική θλίψη

#### 1.4 Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης

Στήν Εικόνα 1.13 παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη που μπορούν να υπολογιστούν από ένα διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης, που αναφέρθηκαν προηγουμένα, εκτός από τον δείκτη ομοιομορφίας φορτίου που δεν φαίνεται στο διάγραμμα γιατί είναι ένα καθαρά υπολογιστικό μέγεθος.

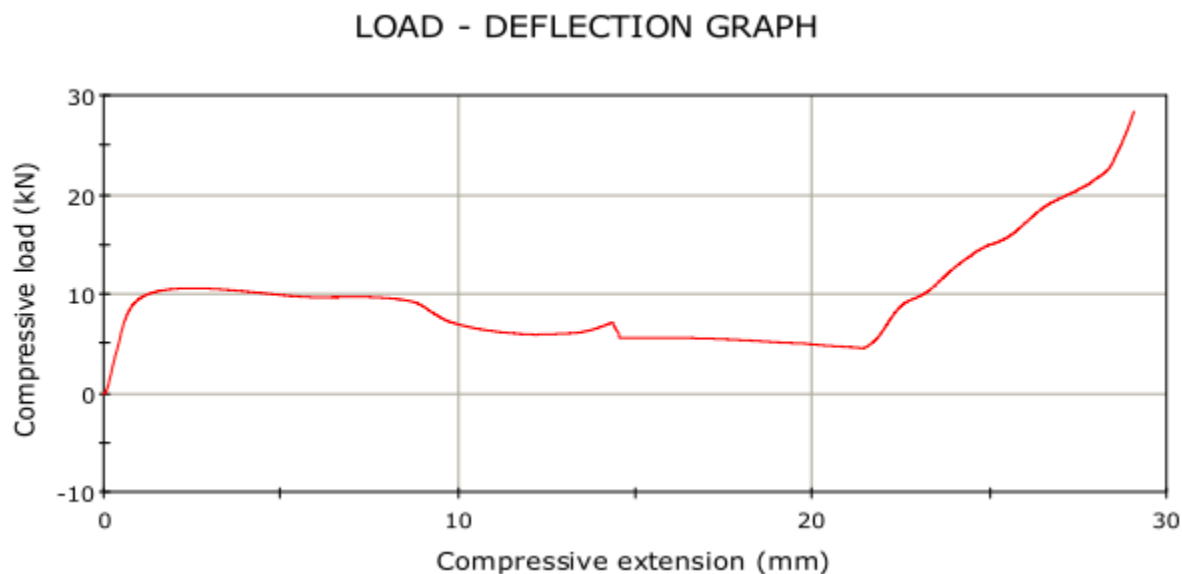
Μπορούμε να παρατηρήσουμε, ότι σε κάθε διάγραμμα φορτίου μετατόπισης η καμπύλη που απεικονίζεται από τη σειρά των δεδομένων, δημιουργεί τρεις διακριτές περιοχές - ζώνες σε αυτό. Η πρώτη - ελαστική περιοχή φαίνεται από την αρχή της θλίψης μέχρι ένα αρχικό πρώτο μέγιστο του φορτίου το οποίο δημιουργείται λόγω της επαφής του εμβόλου με το δοκίμιο και της δημιουργίας πλαστικής - μόνιμης παραμόρφωσης του. Διακόπτεται από μια μεγάλης κλίσης πτώση της καμπύλης του φορτίου.



Εικόνα 1.13 Παρουσίαση χαρακτηριστικών μεγεθών και περιοχών στην καμπύλη φορτίου –μετατόπισης.

Η δεύτερη ζώνη - πλαστική περιοχή της καμπύλης βρίσκεται μετά το πρώτο αυτό αρχικό μέγιστο και συνήθως, ανάλογα με την μορφή των δοκιμών, του τύπου της καταπόνησης (Αξονική, Πλευρική, Αναστροφή, Απότμηση) αλλά και του είδους του υλικού, ακολουθεί μία σχεδόν σταθερή τιμή με μικρές μη ομοιόμορφες διακυμάνσεις και είναι αυτό που φαίνεται στο μεγαλύτερο μήκος της μετατόπισης και ονομάζεται πλατό (Plateau) του διαγράμματος.

Η τρίτη ζώνη - περιοχή θραύσης του διαγράμματος οριοθετείται από το τέλος του πλατό και παρουσιάζει μια ασταθή περιοχή με μικρές αυξομειώσεις που σχετίζονται με την μεγάλη μείωση του κατακόρυφου ύψους του σωλήνα και την περαιτέρω συρρίκνωση των πλευρικών αρθρώσεων.



Εικόνα 1.14 Διάγραμμα χωρίς επεξεργασία απο το πρόγραμμα Bluehill 2

Η Εικόνα 1.14 δείχνει το διάγραμμα όπως πάρθηκε απο το πρόγραμμα Bluehill 2 της πρέσας INSTRON που θα περιγραφεί παρακάτω. Από αυτό το διάγραμμα, με βάση τα αριθμητικά σημεία (ζευγάρια) σε συνδυασμό με τις φωτογραφίες της πειραματικής διαδικασίας, παρουσιάστηκε μόνο το τμήμα ενδιαφέροντος (μέχρι τη θραύση του δοκιμίου, περίπου στα 14,5mm μετατόπισης του διεισδυτή) και προέκυψαν τα αποτελέσματα μέσου φορτίου, μετατόπισης και απορροφούμενης ενέργειας.

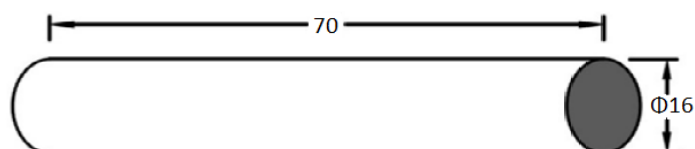
### 1.5 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται 25 πειράματα πλευρικής καταπόνησης μεταλλικών κυλινδρικών δοκιμίων με κυλινδρικό διεισδυτή Φ16 υπό περιοριστικές συνθήκες ημιγωνιών  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  και  $90^\circ$ . Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην μηχανική πρέσα δοκιμών INSTRON 4482 ονομαστικού φορτίου 100KN (10 τόνων) του εργαστηρίου τεχνολογίας των κατεργασιών ΕΜΠ υπό σταθερή ταχύτητα διείσδυσης 10mm/min και τα αποτελέσματα πάρθηκαν μέσω του αντίστοιχου λογισμικού στον υπολογιστή για επεξεργασία. Παράλληλα τραβήχτηκαν φωτογραφίες μέσω της φωτογραφικής μηχανής του εργαστηρίου οι οποίες θα παρουσιαστούν παρακάτω και θα γίνουν αντικείμενο μελέτης σε συνδυασμό με το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης στις διάφορες φάσεις καταπόνησης του δοκιμίου.



Εικόνα 1.14 Η πρέσα δοκιμών INSTRON 4482

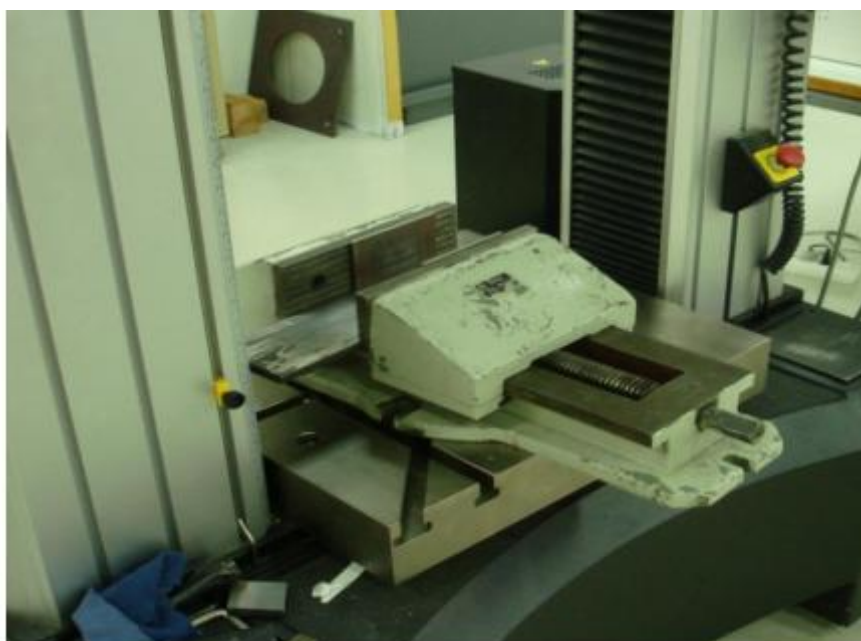
Ο ατσάλινος διεισδυτής είναι συμπαγής, άκαμπτος διαμέτρου  $\Phi 16$  και μήκους 70mm με κατάλληλες εσοχές στα δύο άκρα του για την στήριξή και προσαρμογή του πάνω στο έμβολο της πρέσας.



Εικόνα 1.15 Σκαρίφημα ατσάλινου Διεισδυτή



Εικόνα 1.16 Ο διεισδυτής στο έμβολο της πρέσας

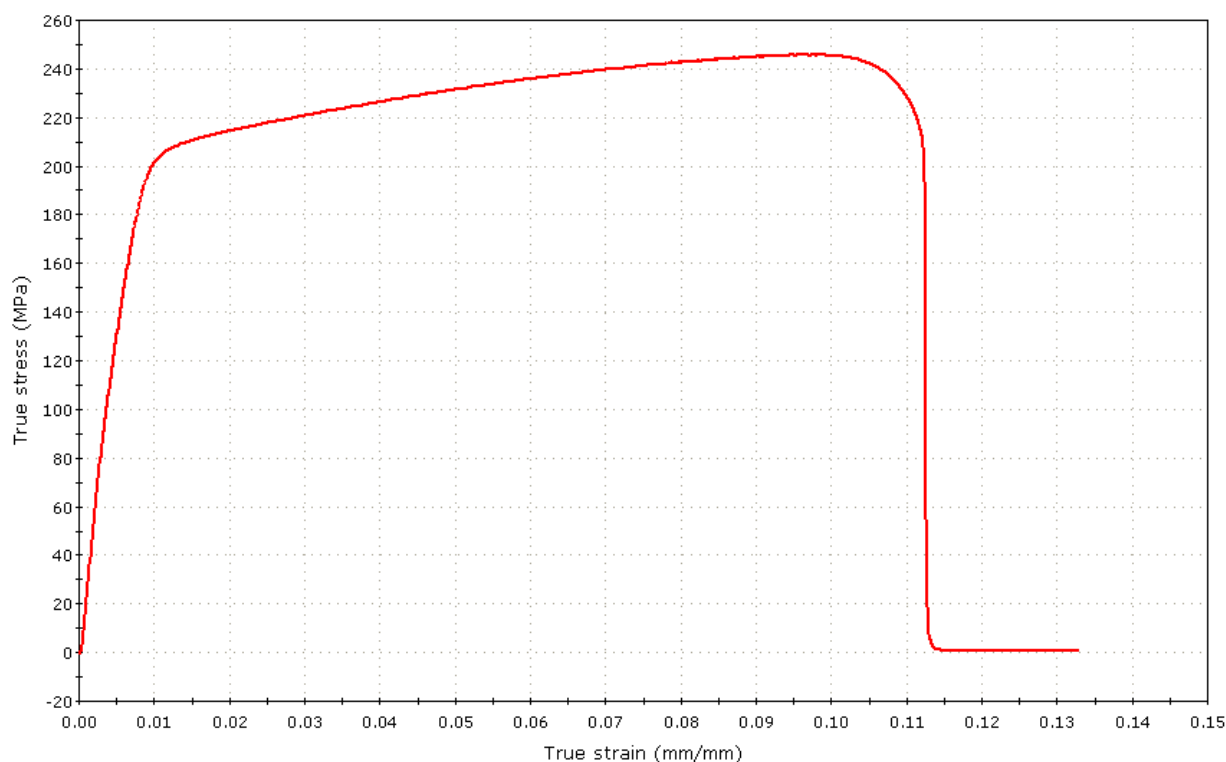


Εικόνα 1.17 Η μέγγενη συγκράτηση με την μεταλλική πλάκα για την εισαγωγή των σφηνών



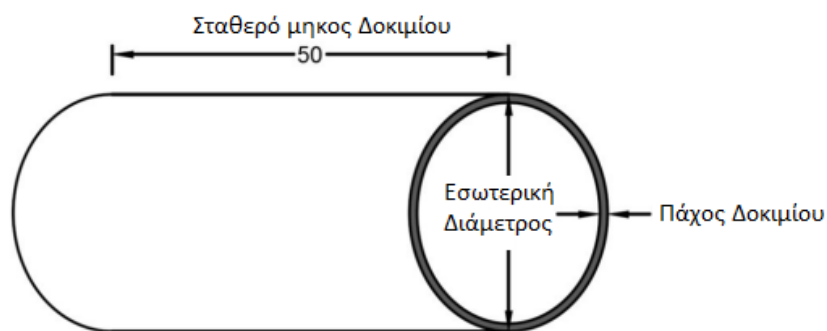
## 1.6 Δοκίμια

Τα δοκίμια είναι από αλουμίνιο AL6065 και έχουν υποστεί ανόπτηση στους 300°C για μισή ώρα και μετά ψύξη στο φούρνο. Συνίσταται στην ύψωση της θερμοκρασίας του χάλυβα πάνω ή κοντά στην  $A_{c3}$  με επακολουθούσα ήρεμη απόψυξη στον αέρα. Ανάλογα με τον επιδιωκόμενο σκοπό ρυθμίζονται κατάλληλα η θερμοκρασία ανόπτησης, η διάρκεια της θέρμανσης και η ταχύτητα απόψυξης. Παρακάτω παρουσιάζεται και το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων ( $\sigma - \epsilon$ ) του υλικού.



Εικόνα 1.18 Διάγραμμα  $\sigma - \epsilon$  υλικού AL6065

Η μέθοδος κατασκευής των δοκιμών έγινε με κοπή κυλινδρικών σωλήνων ώστε να πάρουμε κάθε φορά την επιθυμητή διάσταση. Συνολικά κατασκευάστηκαν 25 δοκίμια, δηλαδή 5 από την κάθε εξωτερική διάμετρο για την δοκιμή τους στις διάφορες ημιγωνίες περιορισμού 0°, 30°, 45°, 60° και 90°. Κάθε ένα από τα παραπάνω δοκίμια μετά την κοπή του, υποβλήθηκε σε κατεργασία λείανσης στις ακμές του, στον τόρνο, εσωτερικά και εξωτερικά, έτσι ώστε πιθανές δυνάμεις από τριβή να είναι το δυνατόν οι ελάχιστες.



*Εικόνα 1.19 Σκαρίφημα Δοκιμίου*

Πίνακας Δοκιμίων					
α/α	Εξωτερική Διάμετρος (mm)	Εσωτερική Διάμετρος (mm)	Πάχος Τοιχώματος (mm)	Μήκος (mm)	Συνολική Διαδρομή Εμβόλου (mm)
1	28	22	3	50	20
2	33	27	3	50	29
3	35	29	3	50	32
4	35	31	2	50	34
5	40	37	1,5	50	44

*Πίνακας 1.1 Παρουσίαση Δοκιμίων*

## 2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 2.1 Γενικά

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα πειράματα που διεξήχθησαν στο εργαστήριο με το απαραίτητο φωτογραφικό υλικό, τα διαγράμματα φορτίου - μετατόπισης για τις αντίστοιχες ημιγωνίες περιορισμού της παραμόρφωσης.

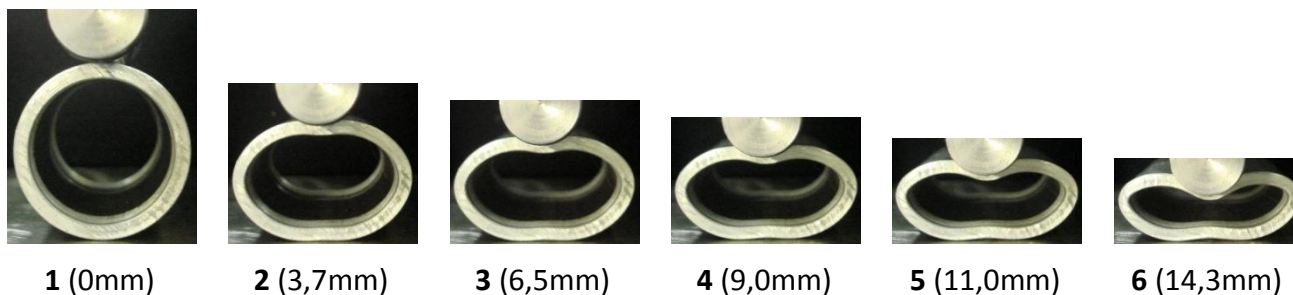
Συγκεκριμένα απεικονίζεται στις φωτογραφίες η σταδιακή παραμόρφωση των δοκιμών κατά την διάρκεια της συμπίεσής τους και αποτυπώνονται τα σημεία στο διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης. Συγκρίνονται για το ίδιο δοκίμιο οι παραμορφώσεις του στις διαφορετικές ημιγωνίες περιορισμού και για την ίδια ημιγωνία τα διαφορετικών διαμέτρων και πάχους δοκίμια.

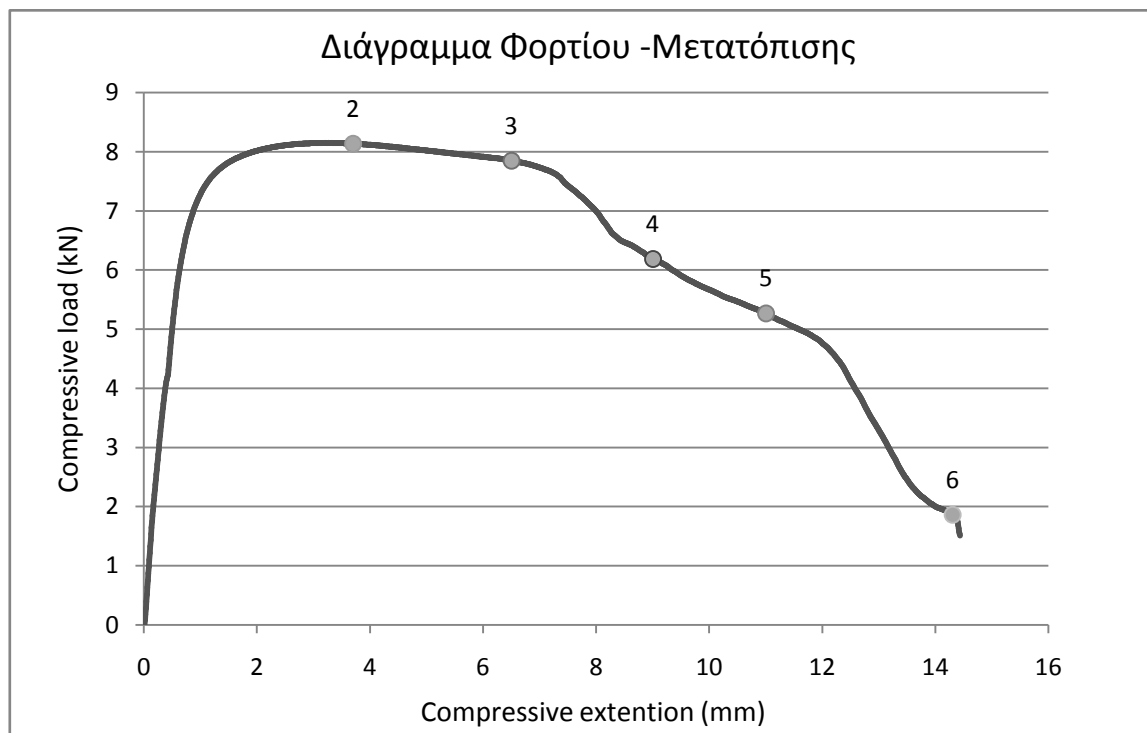
Ουσιαστικά η ανάλυση γίνεται στο κάθετο στους παράλληλους άξονες, διεισδυτή και σωλήνα, επίπεδο καθώς πρόκειται για διδιάστατη παραμορφωσιακή κατάσταση, που είναι το επίπεδο φωτογράφισης - αποτύπωσης των δοκιμών.

Τέλος, σχολιάζονται οι μεταβολές σε σχέση με την μετατόπιση και το φορτίο καθώς και την ενέργεια που απορροφά το κάθε πειραματικό δοκίμιο.

### 2.2 Δοκίμιο 1 28mmΧ3mm

#### 2.2.1 Δοκίμιο 1 Ημιγωνία Δοκιμής 0°





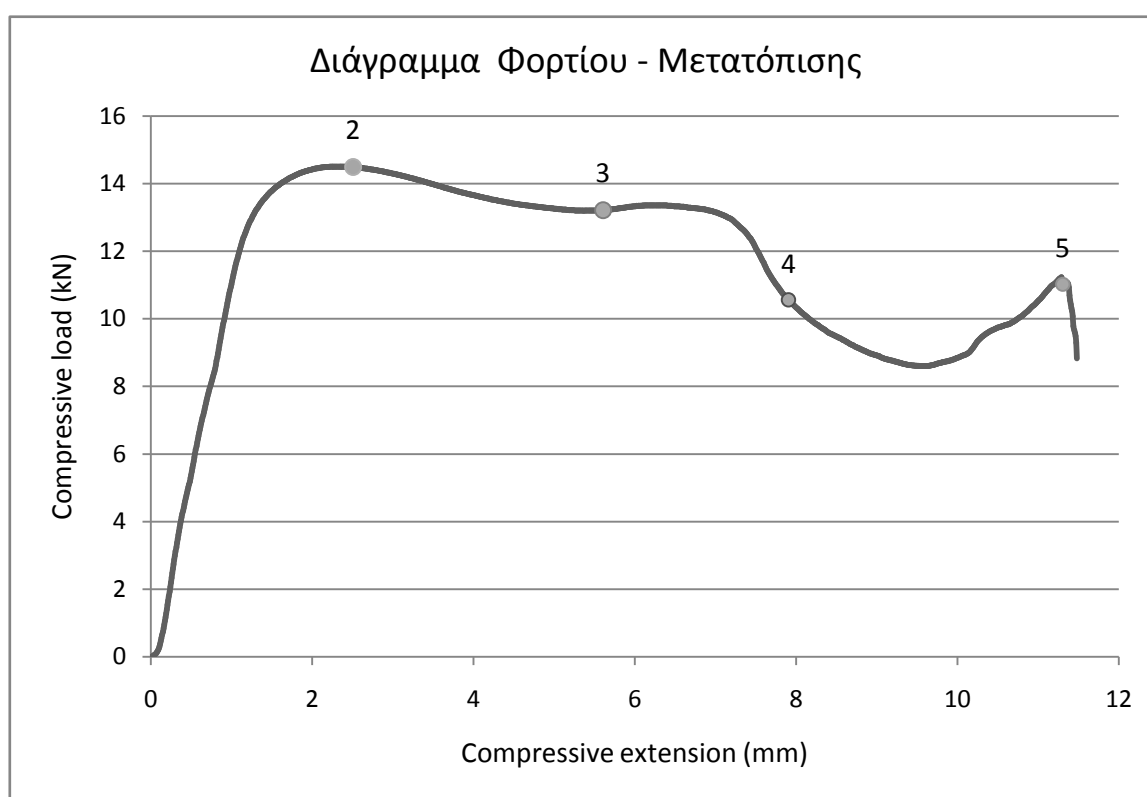
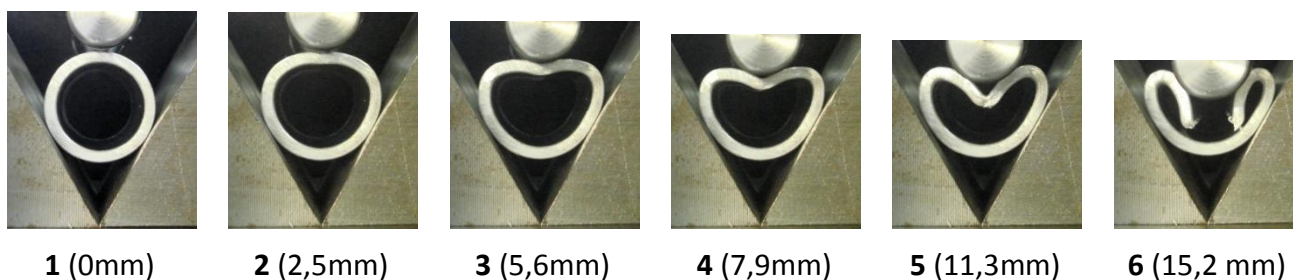
**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμιο</b>	28mmX3mm
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 14,45 \text{ mm}$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 6,24 \text{ kN}$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 90,20 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Το δοκίμιο παρουσιάζει διπλή συμμετρία στην παραμόρφωση στον κατακορυφο και οριζόντιο άξονα. Σύντομα εμφανίζονται οι πλαστικές αρθρώσεις στα 4 σημεία που η καμπυλότητα εκατέρωθεν του οριζόντιου άξονα απο θετική γίνεται αρνητική και εκατέρωθεν του κατακόρυφου άξονα που η ακτίνα καμπυλότητας μικραίνει. Όσο η μετατόπιση του εμβόλου αυξάνεται και το δοκίμιο συμπιέζεται, τα τμήματα εκατέρωθεν του οριζόντιου άξονα χάνουν τη συμμετρία τους (λόγω ασύμμετρων συνοριακών συνθηκών: απο πάνω κυλινδρικός διεισδυτής, απο κάτω οριζόντια επίπεδη πλάκα στήριξης) με το κάτω τμήμα του δοκιμίου μετά την εικόνα 4 (9mm) να μένει περίπου απαραμόρφωτο και να έχει την ίδια μορφή μέχρι το τέλος του πειράματος. Το φορτίο γίνεται μέγιστο όταν στο διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης το δοκίμιο βρίσκεται στην πλαστική περιοχή και παίρνει ουσιαστικά το "τελικό" σχήμα παραμόρφωσης .

### 2.2.2 Δοκίμιο 1 Ημιγωνία Δοκιμής 30°



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

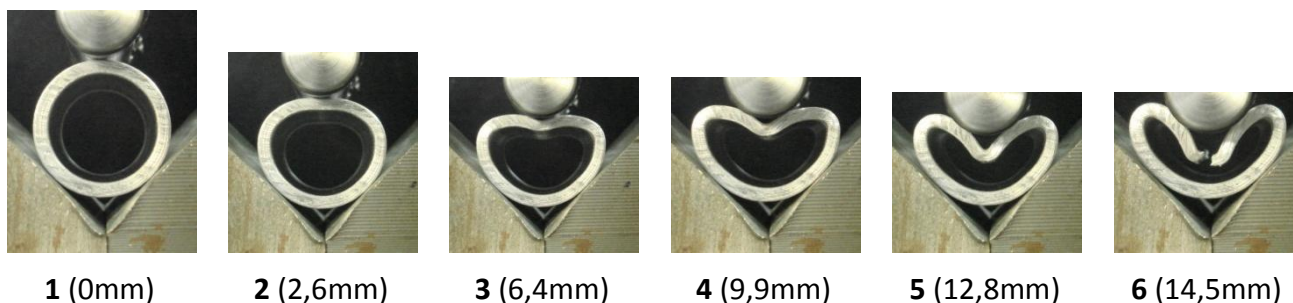
<b>Δοκίμιο</b>	$28mm \times 3mm$
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 11,50 mm$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 11,49 kN$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 131,97 j$

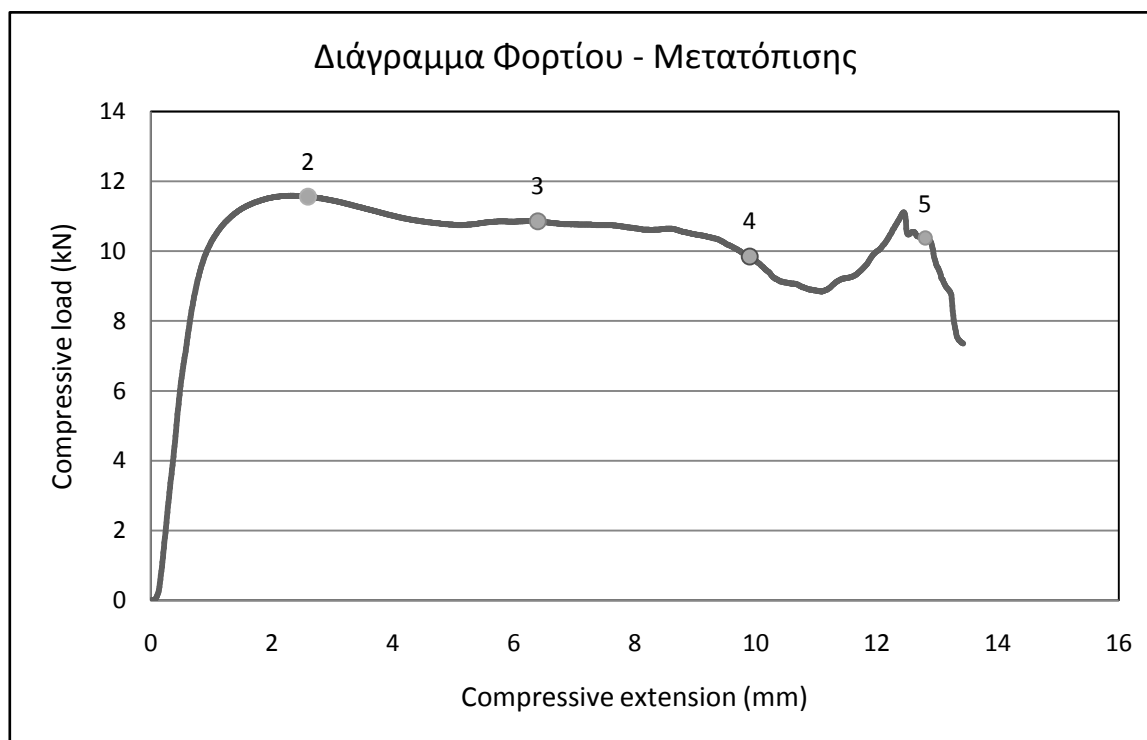
**Σχόλια επί του πειράματος:**

Με την τοποθέτηση των άκαμπτων επίπεδων περιοριστικών συνθηκών υπό ημιγωνία  $30^\circ$  παρατηρούμε αρχικά την έλλειψη συμμετρίας στον οριζόντιο άξονα και την αύξηση του μέσου φορτίου και της ενέργειας απορρόφησης σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς περιορισμούς (ημιγωνία  $0^\circ$ ). Αυτό συμβαίνει γιατί το δοκίμιο πλέον δεν παραμορφώνεται πλήρως συμμετρικά κατά τον οριζόντιο άξονα, εμφανίζονται πλαστικοί αρμοί στην επαφή με τον κυλινδρικό διεισδυτή και εγγύτερα σε αυτόν, εκατέρωθεν του κατακόρυφου άξονα. Επίσης το κέντρο, ως προς τον οριζόντιο άξονα, του δοκιμίου παραμορφώνεται έως την περιοριστική συνθήκη, η καμπυλότητα από θετική γίνεται επίπεδη και ταυτίζεται με τις πλάκες ενώ το κάτω μέρος παραμένει απαραμόρφωτο. Το δοκίμιο καταρρέει σε μετατόπιση 11,5mm όπου και σταματάει το πείραμα.

Χαρακτηριστική είναι η " μύτη " που εμφανίζεται και γίνεται έντονη στο στάδιο 5 (11,3mm) αφού η παρουσία των πλευρικών τοιχωμάτων εμποδίζει το κέλυφος να παραμορφωθεί ελεύθερα προς το εξωτερικό, με αποτέλεσμα να λυγίζει το πάνω τμήμα του κελύφους και τελικά καταρρέει (έντονη πλαστική παραμόρφωση). Αυτό συμβαίνει γιατί το δοκίμιο "υποχρεώνεται" να διαταχθεί σε περιορισμένο χώρο.

**2.2.3 Δοκίμιο 1 Ημιγωνία Δοκιμής  $45^\circ$**





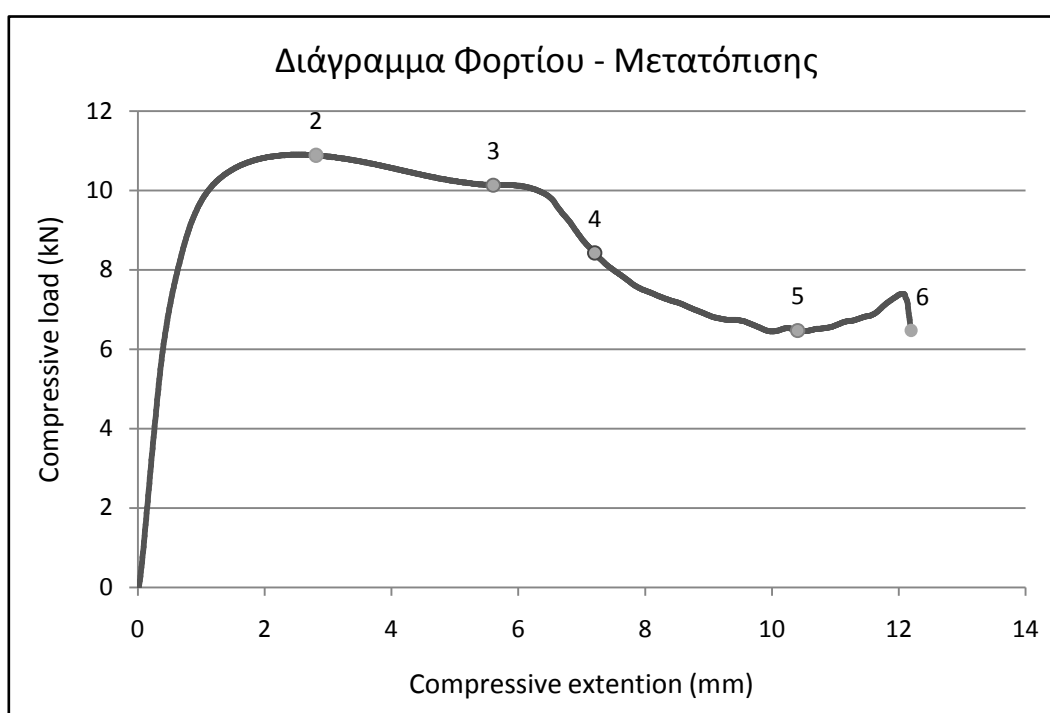
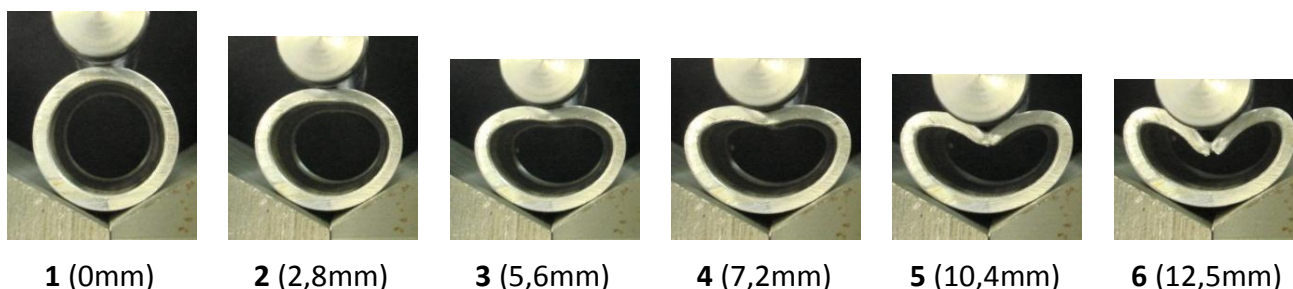
Πίνακας δεδομένων πειράματος

Δοκίμιο	28mmX3mm
Διαδρομή εμβόλου	$S = 13,45 \text{ mm}$
Μέσο φορτίο	$\bar{p} = 10,12 \text{ kN}$
Ενέργεια απορρόφησης	$E_{abs} = 135,93 \text{ j}$

#### Σχόλια επί του πειράματος:

Το δοκίμιο σε αυτή την περίπτωση καταρρέει σε μετατόπιση 13,5mm με την ενέργεια που απορροφά να αυξάνεται λίγο καθώς το μέσο φορτίο μειώνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί καταρρέει σε μεγαλύτερη μετατόπιση. Το δοκίμιο παίρνει την μορφή των απαραμόρφωτων πλακών και σχηματίζει πλαστικούς αρμούς άνωθεν του οριζόντιου άξονα κοντά στον κυλινδρικό διεισδυτή. Παρουσιάζει χαρακτηριστική μύτη στο κέντρο όπου έχουμε και την μέγιστη παραμόρφωση καθώς δεν πρόκειται για παραμόρφωση κλειστής μήτρας ώστε να πάρει το ακριβές σχήμα του διεισδυτή. Το φορτίο μειώνεται αισθητά από την εικόνα 4 και μετά καθώς το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει (σπάει).

### 2.2.4 Δοκίμο 1 Ημιγωνία Δοκιμής 60°



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμο</b>	$28mm \times 3mm$
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 12,18 mm$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 8,61 kN$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 104,98 j$



**Σχόλια επί του πειράματος:**

Παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά με την ημιγωνία  $0^\circ$  καθώς η ημιγωνία  $60^\circ$  είναι αρκετά κοντά με το επίπεδο. Βέβαια σε αυτό το πείραμα το δοκίμιο καταρρέει σε μετατόπιση 12,5mm λόγω πάλι της ασυμμετρίας της παραμόρφωσης (το κάτω μέρος του δοκιμίου δεν παραμορφώνεται σχεδόν καθόλου). Παρατηρούμε στην τελική φωτογραφία που ληφθηκε μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης ότι το δοκίμιο έχει σπάσει σε δύο σημεία λόγω του ότι δεν διακόπηκε το πείραμα αμέσως μετά την κατάρρευση και επίσης ήταν δύσκολη η απόλυτη ευθυγράμμιση και κεντράρισμα του δοκιμίου με το έμβολο.



Εικόνα 2.1 Κατάρρευση Δοκιμίου 1 σε ημιγωνία  $60^\circ$

**2.2.5 Δοκίμιο 1 Ημιγωνία Δοκιμής  $90^\circ$**



1 (0mm)



2 (1,4mm)



3 (2,8mm)



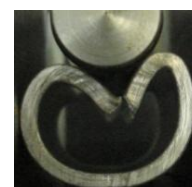
4 (4,2mm)



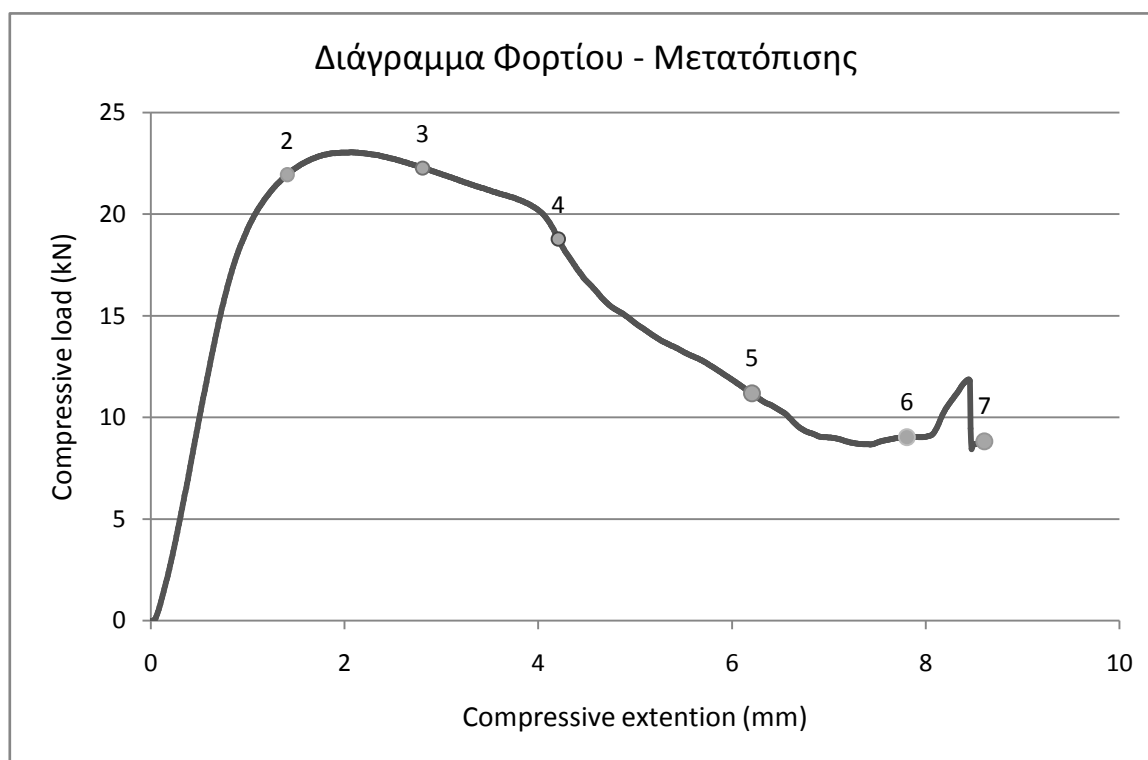
5 (6,2mm)



6 (7,8mm)



7 (8,6mm)



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

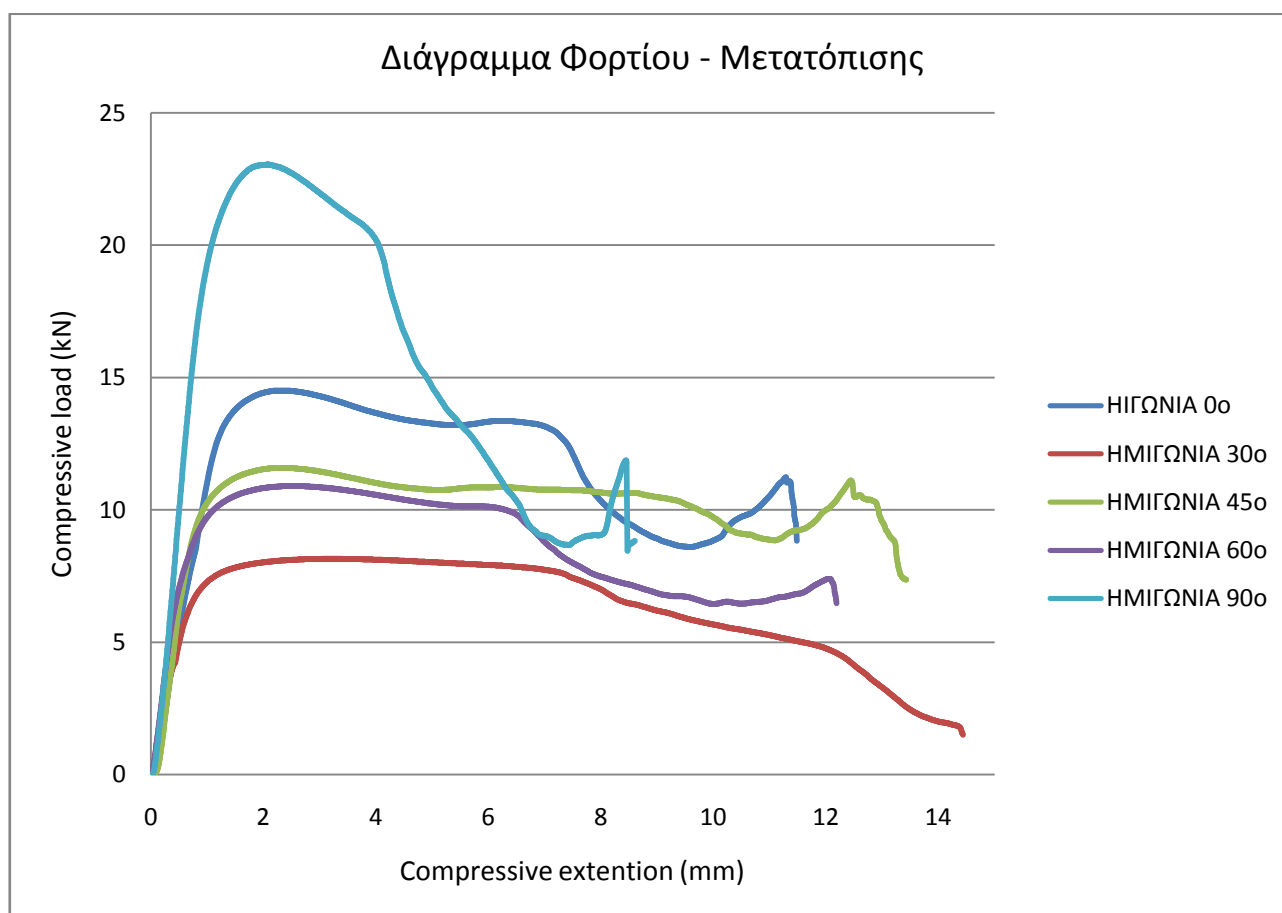
<b>Δοκίμιο</b>	28mmX3mm
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 8,60 \text{ mm}$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 15,20 \text{ kN}$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 130,86 \text{ j}$

### Σχόλια επί του πειράματος:

Στην συγκεκριμένη περιοριστική διάταξη παρατηρούμε ότι το μέσο φορτίο μεγιστοποιείται σε σχέση με τις παραπάνω διατάξεις. Αυτό συμβαίνει διότι μειώνεται ο όγκος που μπορεί να παραμορφωθεί το δοκίμιο, ασκείται μεγαλύτερο φορτίο, δημιουργούνται μικρές και πιο έντονες πλαστικές αρθρώσεις και το δοκίμιο καταρρέει.

Η διαδρομή του εμβόλου είναι η μικρότερη σε σχέση με όλες τις προηγούμενες περιοριστικές διατάξεις λόγω του ότι το δοκίμιο δεν μπορεί να παραμορφωθεί ελεύθερα προς τα έξω. Επιπεδώνεται το τμήμα του δοκιμίου κάτω από τον οριζόντιο άξονα και παρατηρείται ασυμμετρία ως προς τον κάθετο άξονα λόγω της μη απολύτως ακριβούς κέντρωσης - ευθυγράμμισης, πιθανή αλλαγή θέσης του δοκιμίου γύρω από το κέντρο του.

### 2.2.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Δοκιμίου 1



**Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος Δοκιμίου 28mmX3mm**

Ημιγωνία Δοκιμής	0°	30°	45°	60°	90°
Διαδρομή εμβόλου $S$ (mm)	14,45	11,50	13,45	12,18	8,60
Μέσο φορτίο $\bar{P}$ (kN)	6,24	11,49	10,12	8,61	15,20
Ενέργεια απορρόφησης $E_{abs}$ (J)	90,20	131,97	135,96	104,98	130,86

Καταρχάς δεν μπορούμε να συγκρίνουμε την ενέργεια στις διαφορετικές περιοριστικές συνθήκες του δοκιμίου καθώς διαφέρουν κατά πολύ οι μετατοπίσεις του εμβόλου. Η ενέργεια υπολογίστηκε από το εμβαδόν της καμπύλης το οποίο διαφέρει σε μετατόπιση ανάλογα με την θραύση του δοκιμίου.

Το μέσο φορτίο είναι περίπου ίδιο, στις 0° και 60°, στις 30° και 45° και μεγιστοποιείται στις 90° λόγω της άμεσης περιοριστικής συνθήκης που "εγκλωβίζει" το δοκίμιο χωρίς να το αφήνει να απλωθεί ελεύθερα με αποτέλεσμα να κορυφώνεται το φορτίο και να ελαχιστοποιείται η μετατόπιση του εμβόλου μέχρι την σύντομη θραύση του. Επίσης οι μηχανικές ιδιότητες του

δοκιμίου καθώς και οι σχετικές διαστάσεις του (διάμετρος, πάχος τοιχώματος) σε συνδυασμό με τον διεισδυτή επιτρέπουν την έντονη παραμόρφωση που φαίνεται και στο διάγραμμα.

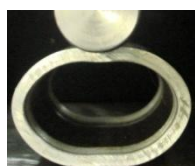
Η πλαστική περιοχή του δοκιμίου για τις διάφορες περιοριστικές συνθήκες βλέπουμε από το διάγραμμα ότι παραμένει στην ίδια μετατόπιση του εμβόλου με ελαφριά προς τα δεξιά μετακίνηση των καμπυλών.

## 2.3 Δοκίμιο 2 33mmΧ3mm

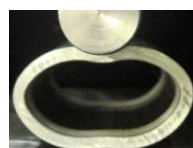
### 2.3.1 Δοκίμιο 2 Ημιγωνία Δοκιμής 0°



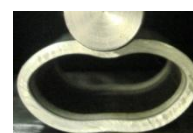
1 (0mm)



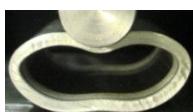
2 (7,5mm)



3 (10,6mm)



4 (13,0mm)



5 (16,0mm)



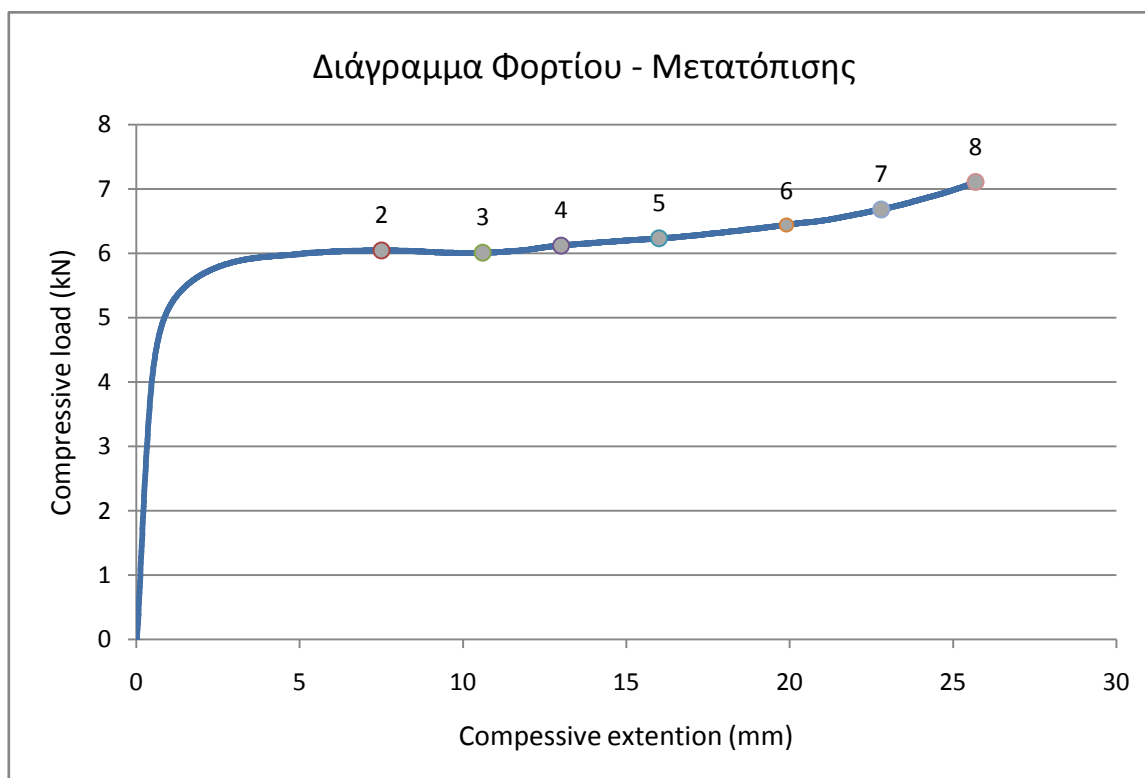
6 (19,9mm)



7 (22,8mm)



8 (25,6mm)



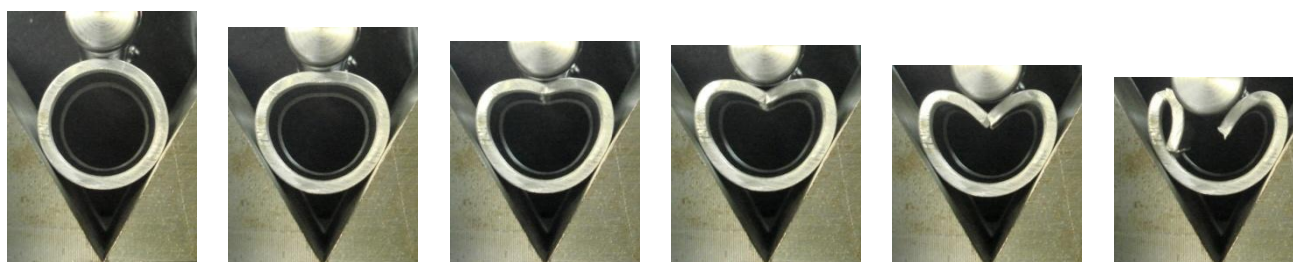
**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμιο</b>	$33mm \times 3mm$
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 25,68 mm$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 6,10 kN$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 156,89 j$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Πλήρως συμμετρικό δοκίμιο με το στάδιο 5 να είναι χαρακτηριστικές οι πλαστικές αρθρώσεις - παραμορφώσεις. Εκατέρωθεν του κατακόρυφου άξονα έχουμε μεγαλύτερη θετική καμπυλότητα. Το δοκίμιο λόγω του πάχους του τοιχώματος δεν μπορεί να "παρακολουθήσει" τον κυλινδρικό διεισδυτή. Δεν έχουμε περιοριστική συνθήκη και δεν καταρρέει μολονότι ελεύθερα "ανοίγει" εκατέρωθεν των δύο αξόνων.

2.3.2 Δοκίμιο 2 Ημιγωνία Δοκιμής 30°



1 (0,0mm)

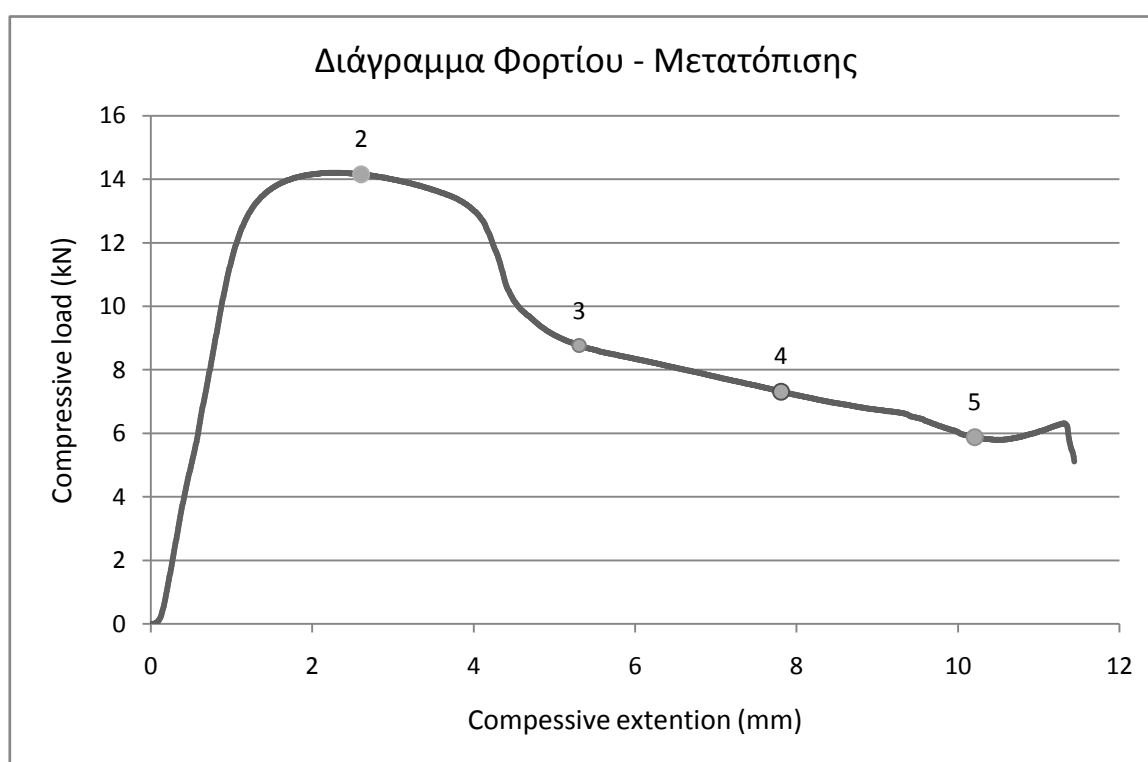
2 (2,6mm)

3 (5,3mm)

4 (7,8mm)

5 (10,2mm)

6 (13,9mm)



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμιο</b>	$33mm \times 3mm$
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 11,43 mm$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 9,01 kN$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 103,13 j$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Παρατηρείται απότομη πτώση του φορτίου από το στάδιο 2 στο 3 και αυτό οφείλεται στην σύντομη ρηγμάτωση σε όλο το μήκος του δοκιμίου λόγω του πάχους των 3mm. Έντονη "μύτη" στην επαφή με τον διεισδυτή, ανοιχτής μήτρας πείραμα. Η γεωμετρία του δοκιμίου και κυρίως το πάχος του δεν επιτρέπει μεγάλη μετατόπιση εμβόλου, έχουμε πολύ σύντομη μερική θραύση από τα πρώτα 5mm μετατόπισης έντονη ρηγμάτωση σε όλο το μήκος του δοκιμίου.

Στην εικόνα 6 φαίνεται η μη συμμετρική πλευρική κατάρρευση του δοκιμίου που μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες όπως στην διαφορά της τραχύτητας της ενεργούς επιφάνειας των συνεργαζόμενων σφηνών και πιθανή ελάχιστη διαφορά μεταξύ τους.

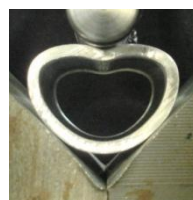
**2.3.3 Δοκίμιο 2 Ημιγωνία Δοκιμής 45°**



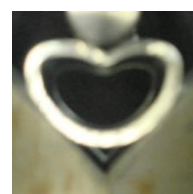
1 (0mm)



2 (3,1mm)



3 (6,9mm)



4 (9,3mm)



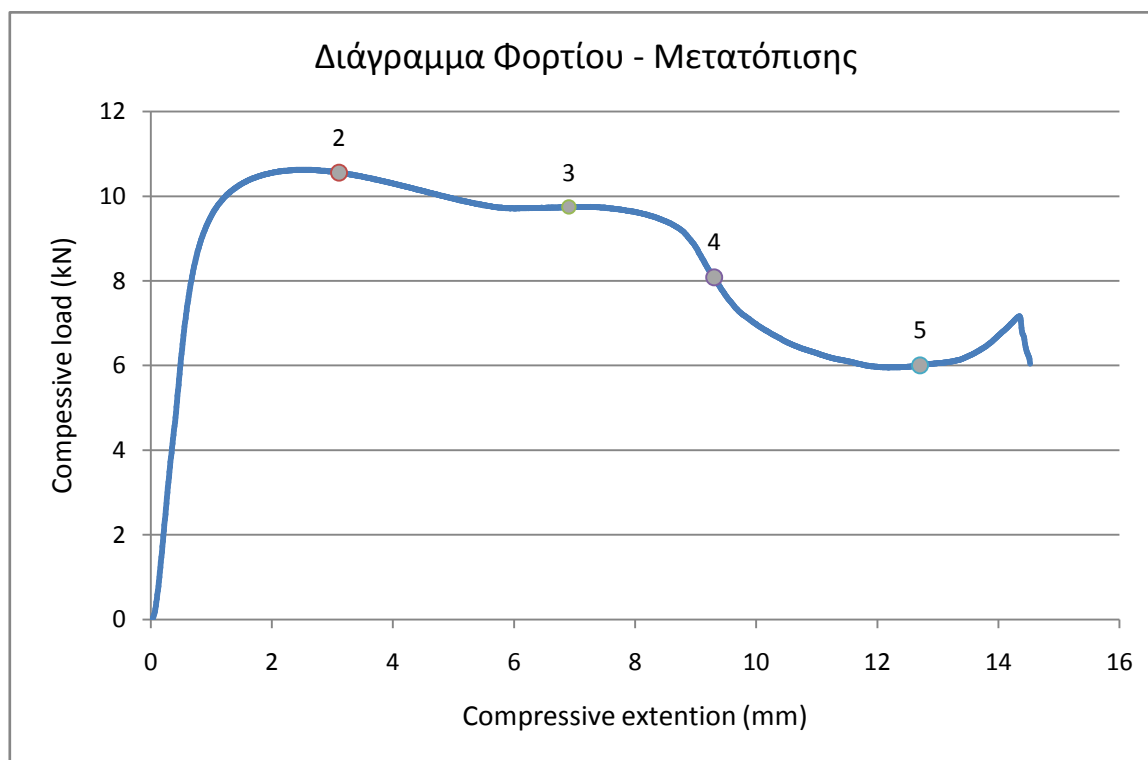
5 (12,7mm)



6 (14,7mm)



7 (16,3mm)



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμιο</b>	33mmX3mm
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 14,52 \text{ mm}$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 8,38 \text{ kN}$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 121,70 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Πλαστικοί αρμοί εμφανίζονται συμμετρικά στο άνω μέρος του δοκίμιου και στην επαφή με τον διεισδυτή (εντονότερη). Η μετατόπιση του εμβόλου είναι μεγαλύτερη καθώς το δοκίμιο λόγω της ανοιχτής περιοριστικής συνθήκης απλώνεται ελεύθερα και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέχρι την μερική θραύση στην εικόνα 5 και μετά την ολική κατάρρευση που η καμπύλη φορτίου - μετατόπισης κάνει την απότομη κλίση προς τα κάτω.



2.3.4 Δοκίμιο 2 Ημιγωνία Δοκίμης 60°



1 (0mm)



2 (3,4mm)



3 (5,8mm)



4 (7,1mm)



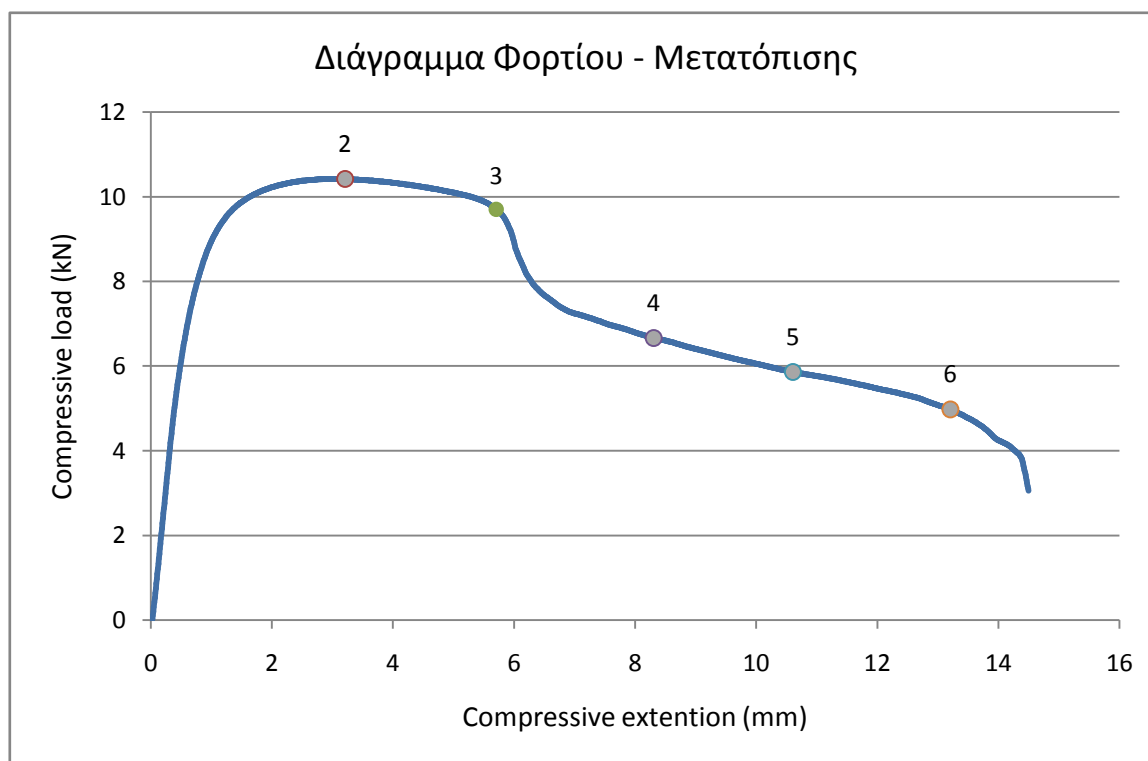
5 (10,2mm)



6 (14,2mm)



7 (14,9mm)



Πίνακας δεδομένων πειράματος

Δοκίμιο	33mmX3mm
Διαδρομή εμβόλου	$S = 14,49 \text{ mm}$
Μέσο φορτίο	$\bar{P} = 7,38 \text{ kN}$
Ενέργεια απορρόφησης	$E_{abs} = 107,07 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Παρόμοια συμπεριφορά του δοκιμίου με την περιοριστική συνθήκη των 0°. Απότομη πτώση του φορτίου στο σημείο 3 και αυτό γιατί έχουμε έντονους αρμούς (αρμοί θραύσης) όπως φαίνεται και από την εικόνα 4. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο πάχος και τις ιδιότητες του υλικού του δοκιμίου, την γεωμετρία του διεισδυτή και το ότι η δοκιμή είναι ανοιχτής μήτρας. Η μετατόπιση θραύσης ταυτίζεται με αυτή των 45° αλλά λόγω της ανοιχτής γωνίας δεν μειώνεται το μέσο φορτίο και κατά συνέπεια η ενέργεια απορρόφησης.

**2.3.5 Δοκίμιο 2 Ημιγωνία Δοκιμής 90°**



1 (0mm)



2 (1,4mm)



3 (2,6mm)



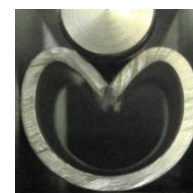
4 (4,3mm)



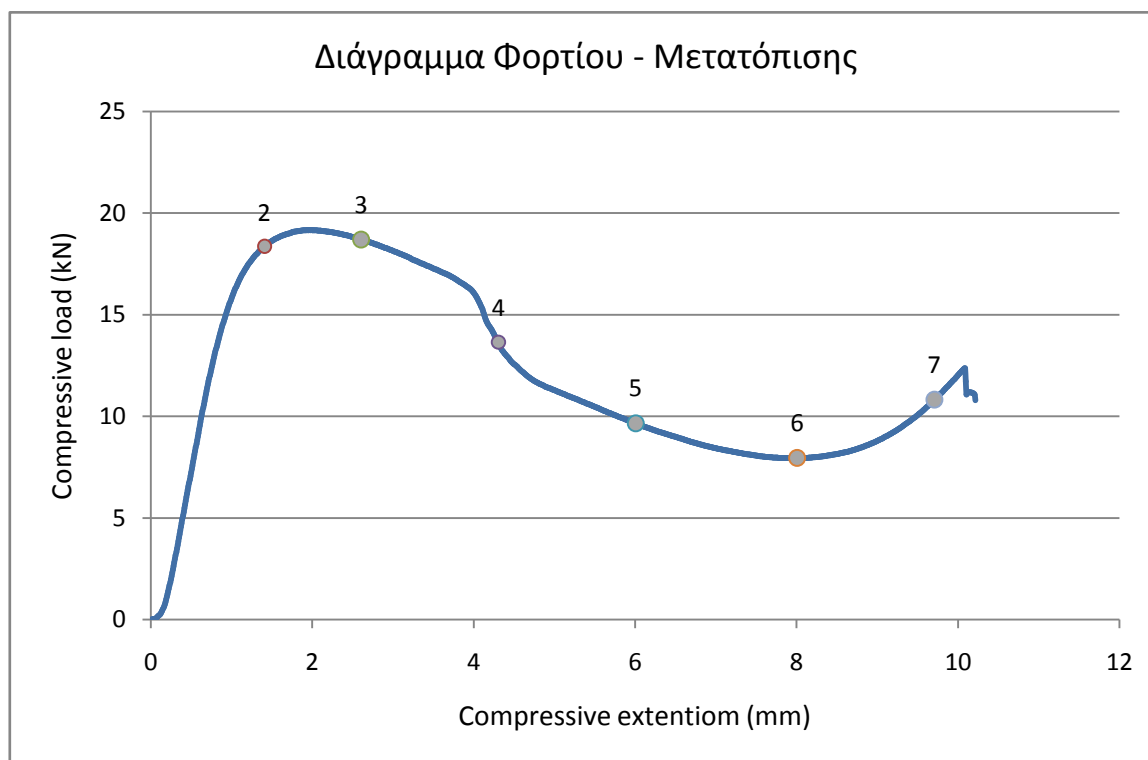
5 (6,0mm)



6 (8,0mm)



7 (9,7mm)



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμιο</b>	33mmX3mm
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 10,21 \text{ mm}$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 12,04 \text{ kN}$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 123,02 \text{ j}$

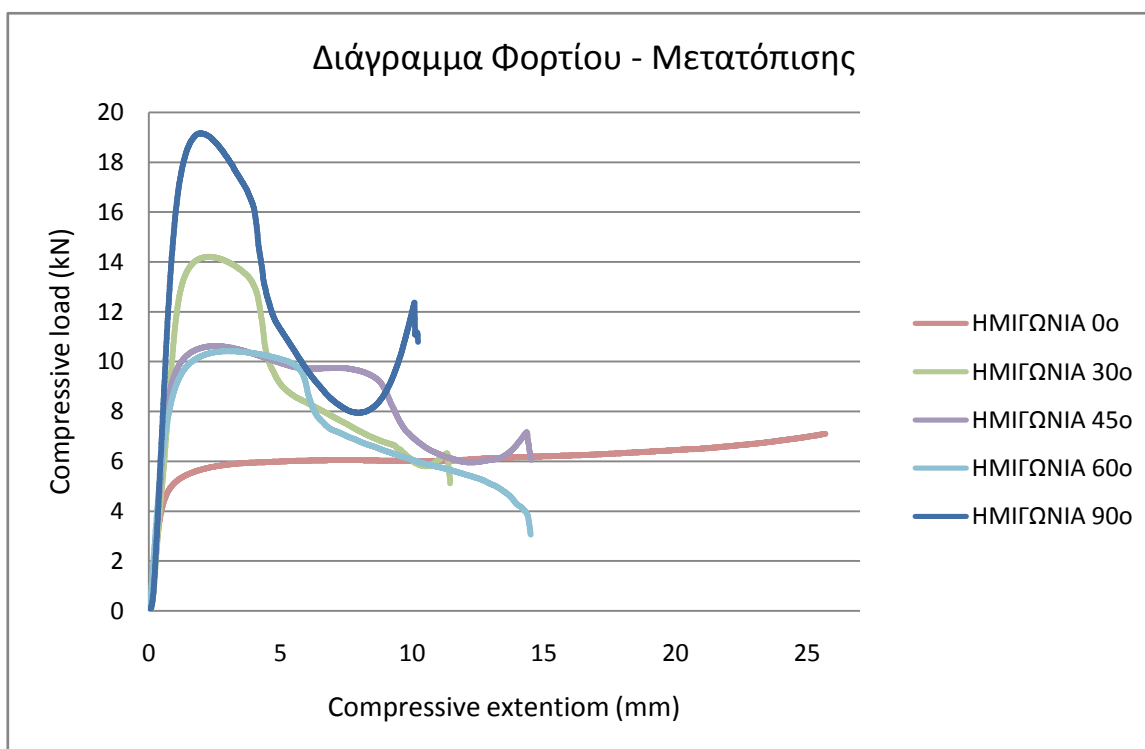
**Σχόλια επί του πειράματος:**

Ομοιόμορφη κατάρρευση δοκίμιου με το άνω μέρος του να εμφανίζει πλαστικούς αρμούς. Εκατέρωθεν του κάθετου άξονα οι πλευρές από κοίλες επιπεδώνονται προς τις συμπαγείς απαραμόρφωτες πλάκες που συνθέτουν την περιοριστική συνθήκη.

Το μέσο φορτίο μεγιστοποιείται αποτέλεσμα αναμενόμενο λόγω του εξαιρετικά περιορισμένου χώρου παραμόρφωσης. Η ενέργεια που απορροφά σε σχέση με την μετατόπιση του εμβόλου είναι υψηλή. Όλες οι έντονες αρθρώσεις που εμφανίζονται είναι σημεία απορρόφησης ενέργειας.

### 2.3.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Δοκιμίου 2

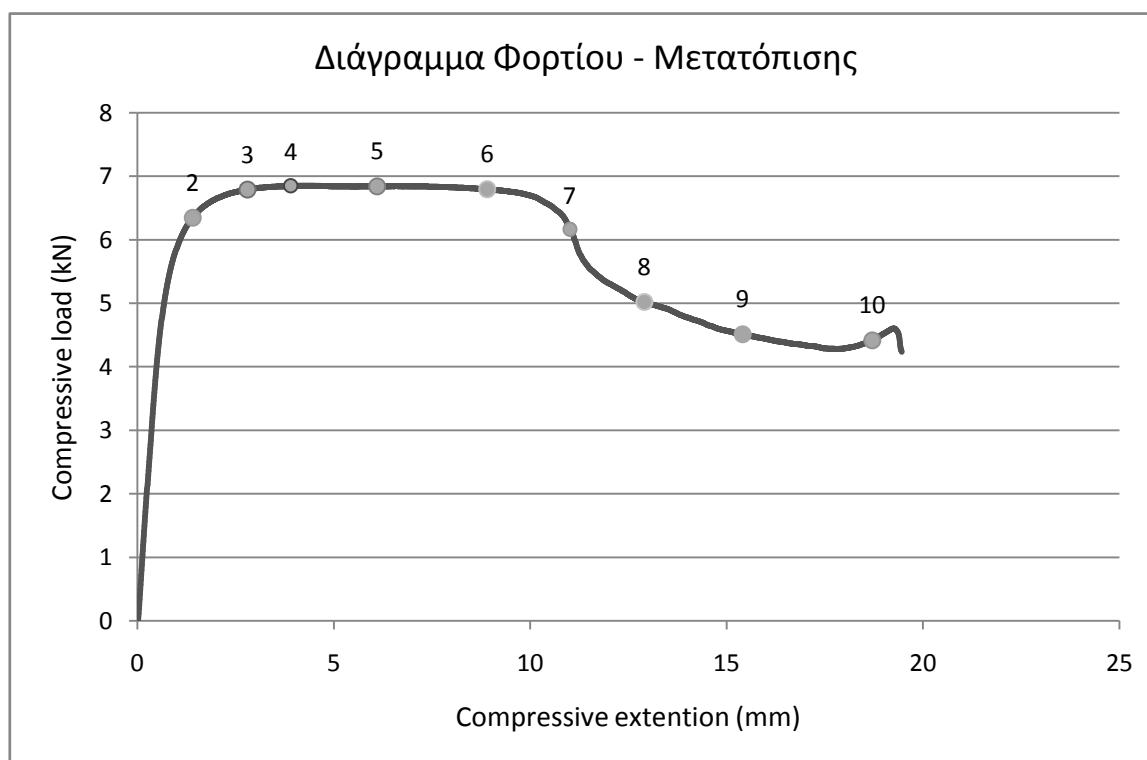
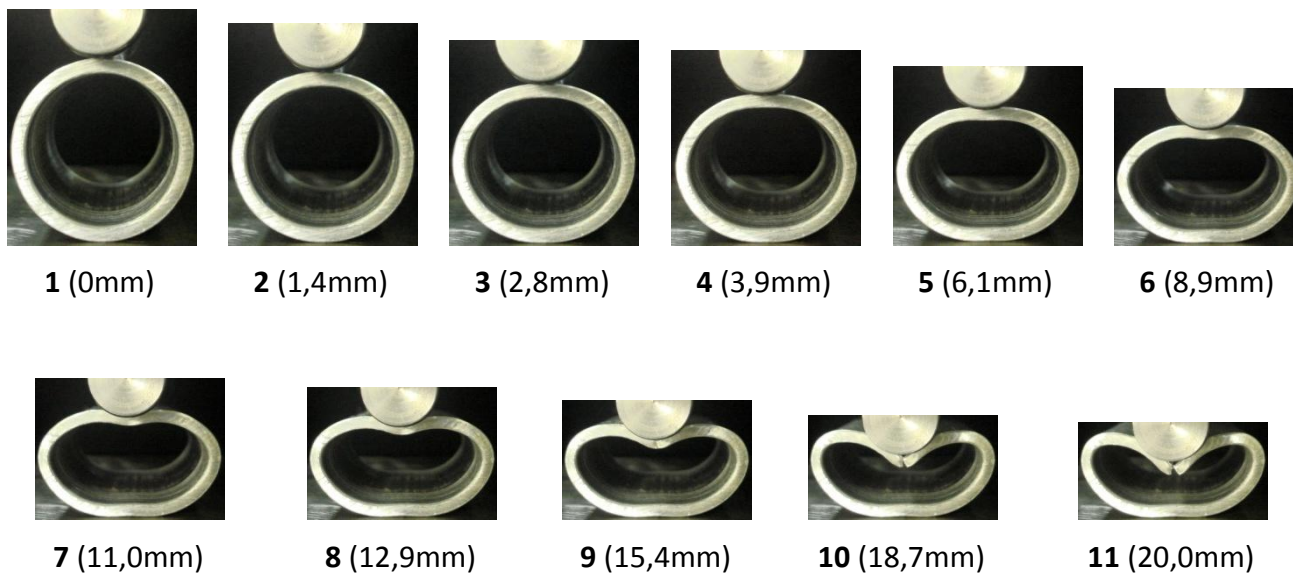
Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος Δοκιμίου 28mmX3mm					
Ημιγωνία Δοκιμής	0°	30°	45°	60°	90°
Διαδρομή εμβόλου $S$ (mm)	25,68	11,43	14,52	14,49	10,21
Μέσο φορτίο $\bar{P}$ (kN)	6,10	9,01	8,38	7,38	12,04
Ενέργεια απορρόφησης $E_{abs}$ (j)	156,89	103,13	121,70	104,98	123,02



Στο συγκριτικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης για τις διάφορες περιοριστικές συνθήκες το μέσο φορτίο μεγιστοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις με στην έκβαση από την πλαστική περιοχή στο πλατό του διαγράμματος. Παρουσιάζονται μεγάλες διακυμάνσεις σε αυτό σε όλες τις περιοριστικές συνθήκες πλην αυτής των 0° που το φορτίο μεγιστοποιείται όταν το άνω και κάτω μέρος του δοκιμίου τείνει να ακουμπήσει και ο κυλινδρικός δεισδυτής να συμπιέσει το υλικό. Το πείραμα σταματάει όταν άνω και κάτω μέρος εφάπτονται χωρίς να καταπονηθεί η βάση και το υλικό.

## 2.4 Δοκίμιο 1 35mmΧ3mm

### 2.4.1 Δοκίμιο 3 Ημιγωνία δοκιμής 0°



Πίνακας δεδομένων πειράματος	
Δοκίμιο	35mmX3mm
Διαδρομή εμβόλου	$S = 19,45 \text{ mm}$
Μέσο φορτίο	$\bar{P} = 5,70 \text{ kN}$
Ενέργεια απορρόφησης	$E_{abs} = 110,93 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Σταθερό παραμένει το φορτίο από το σημείο 3 έως και λίγο μετά το σημείο 6 καθώς το δοκίμιο παίρνει σχήμα οβάλ και οι πλαστικές αρθρώσεις αρχίζουν να διαμορφώνονται ομαλά (δεν έχουμε έντονους πλαστικούς αρμούς). Από την εικόνα 7 εμφανίζεται στο άνω μέρος του δοκιμίου στην επαφή με τον διεισδυτή αρμός θραύσης που γίνεται εντονότερος κατά την εξέλιξη του πειράματος μέχρι το σημείο - εικόνα 10 που έχει καταρρεύσει μερικώς το δοκίμιο αυξάνεται ελάχιστα μέχρι την ολική θραύση του δοκιμίου. Πλήρες συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα με την παραμόρφωση να είναι έντονη στο άνω μέρος του δοκιμίου.

**2.4.2 Δοκίμιο 3 Ημιγωνία Δοκιμής 30°**



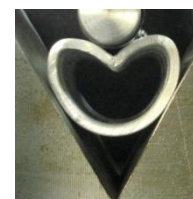
1 (0mm)



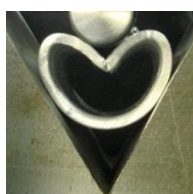
2 (2,6mm)



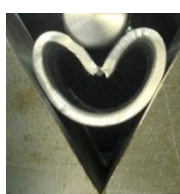
3 (6,1mm)



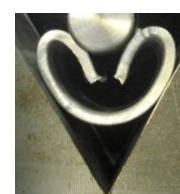
4 (11,1mm)



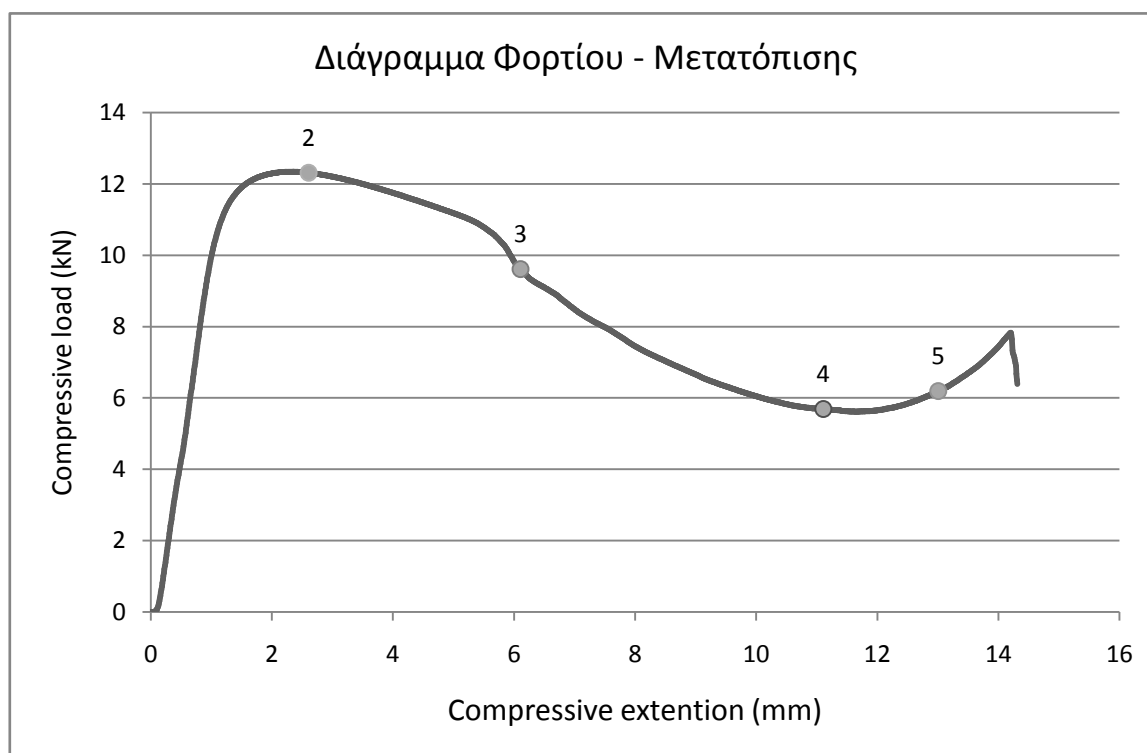
5 (13,0mm)



6 (14,8mm)



7 (17,1mm)



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμιο</b>	<i>35mmX3mm</i>
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 14,31 \text{ mm}$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 8,34 \text{ kN}$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 119,40 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Περιοριστική συνθήκη  $30^\circ$  που σημαίνει ότι έχουμε αναμενόμενη απότομη και γρήγορη πτώση του φορτίου καθώς το δοκίμιο στο περιορισμένο χώρο δεν μπορεί να παραμορφωθεί ελεύθερα ως προς την οβάλ γεωμετρία παραμόρφωσης αλλά εφάπτεται με τις απαραμόρφωτες πλάκες. Επιπεδώνεται στα σημεία αυτά κι η παραμόρφωση είναι έντονη στο άνω μέρος του οριζώντιου άξονα μέχρι τη στιγμή της ολικής θραύσης του σε όλο το μήκος του. Έχουμε πλήρη συμμετρία ως προς τον κατακόρυφο άξονα ενώ εμφανίζεται "μύτη" στην επαφή με τον διεισδυτή αφού το δοκίμιο υποχρεούται να διαταχθεί σε πολύ συγκεκριμένο χώρο.

2.4.3 Δοκίμιο 3 Ημιγωνία Δοκιμής 45°



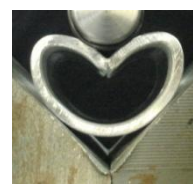
1 (0mm)



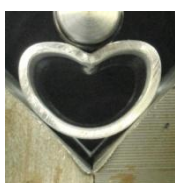
2 (2,9mm)



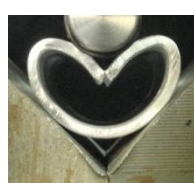
3 (6,5mm)



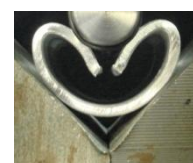
4 (10,0mm)



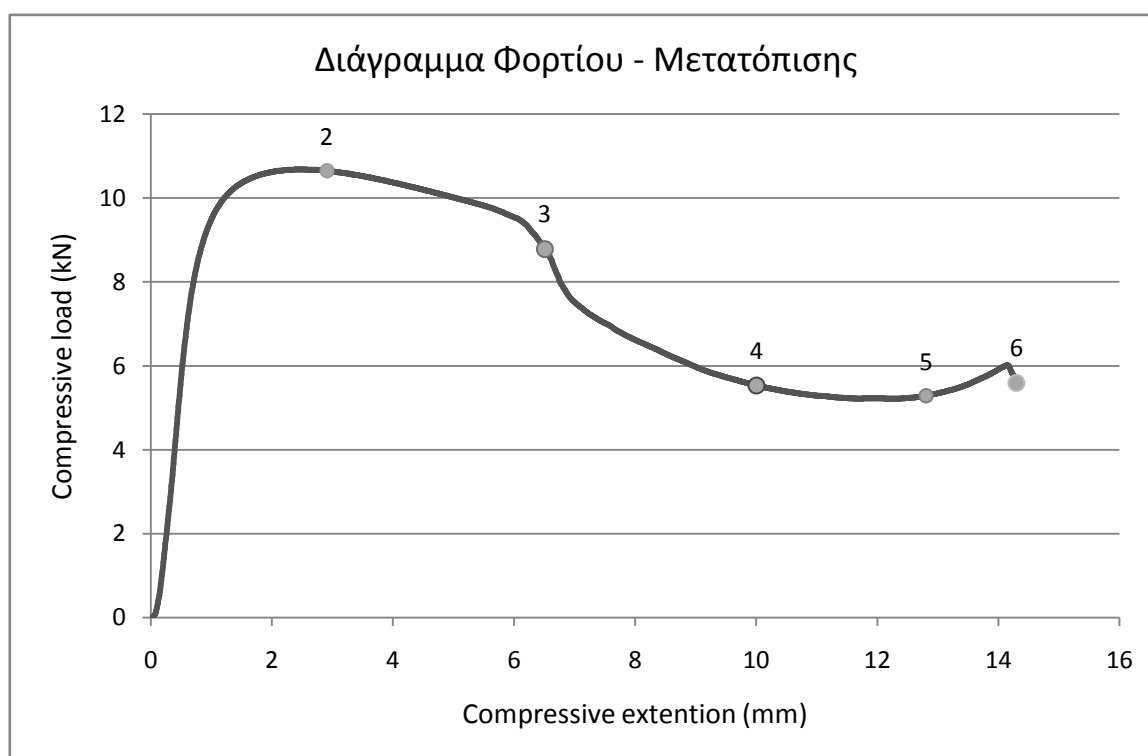
5 (12,8mm)



6 (14,3mm)



7 (17,3mm)





Πίνακας δεδομένων πειράματος

Δοκίμιο	35mmX3mm
Διαδρομή εμβόλου	$S = 14,29 \text{ mm}$
Μέσο φορτίο	$\bar{P} = 7,51 \text{ kN}$
Ενέργεια απορρόφησης	$E_{abs} = 107,46 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Παρατηρούμε στην εικόνα 2 πλήρη συμμετρία ως προς τον οριζόντιο άξονα επιπεδώνονται τα δύο σημεία, ένα της επαφής με τον διεισδυτή και ένα του κέντρου της ημιγωνίας. Στην εξέλιξη του πειράματος το κάτω μέρος του δοκιμίου παραμένει σταθερό, με την αρχική παραμόρφωση που πήρε στα πρώτα στάδια, ενώ το άνω μέρος παραμορφώνεται έντονα. Μεταξύ των σημείων - εικόνων 5, 6 υπάρχει ένα χαρακτηριστικό τοπικό μέγιστο που σηματοδοτεί την κατάρρευση του δοκιμίου. Τέλος έχουμε ένα παραμορφωμένο δοκίμιο που έχει πάρει την "γωνία" των συμπαγών περιοριστικών πλακών.

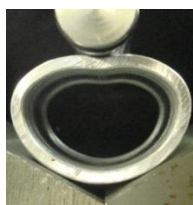
**2.4.4 Δοκίμιο 3 Ημιγωνία Δοκιμής 60°**



1 (0mm)



2 (3,9mm)



3 (6,3mm)



4 (8,4mm)



5 (9,3mm)



6 (11,6mm)



7 (14,2mm)



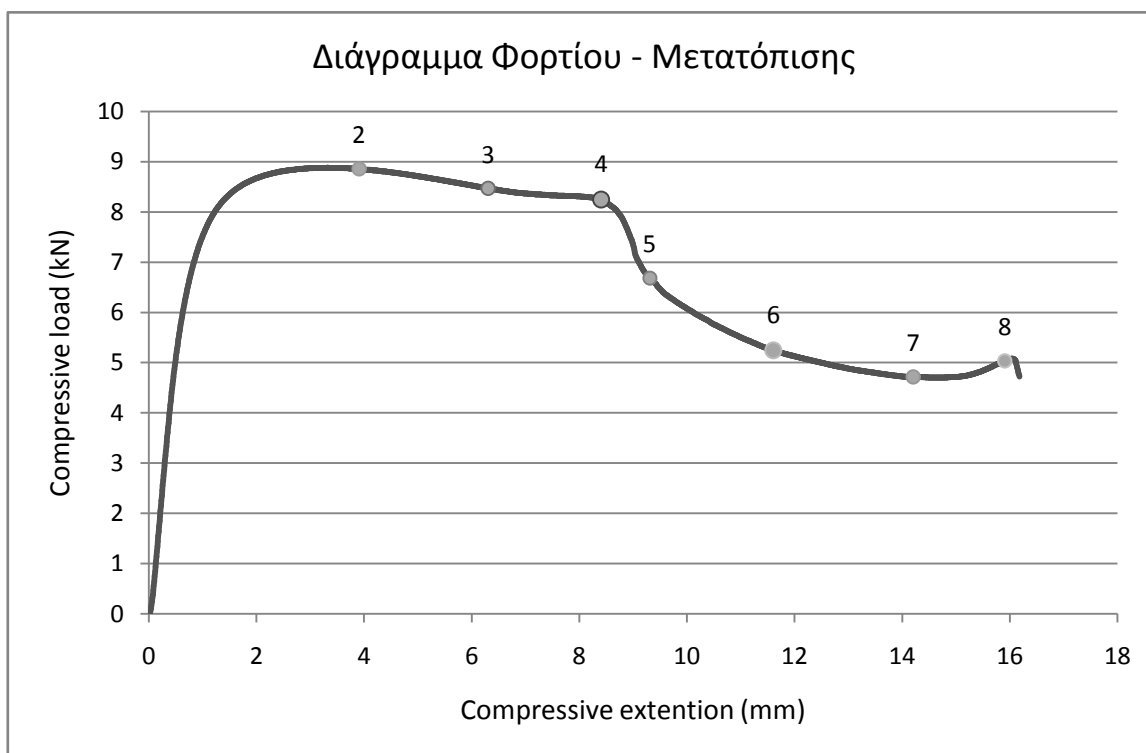
8 (15,9mm)



9 (16,4mm)



10 (20,0mm)



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμιο</b>	35mmX3mm
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 16,18 \text{ mm}$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{p} = 6,83 \text{ kN}$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 110,51 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Μεγαλύτερη μετατόπιση εμβόλου λόγω την ανοιχτής περιοριστικής συνθήκης και παρόμοια συμπεριφορά με την ημιγωνία των  $0^\circ$ . Η καμπύλη φορτίου - μετατόπισης από το σημείο 4 στο 5 κάνει μία απότομη πτώση όπου αρχίζουν και γίνονται εμφανή τα σημάδια θραύσης. Το φορτίο πέφτει καθώς το δοκίμιο σπάει και μέχρι το σημείο 8 που κάνει το τοπικό μέγιστο και καταρρέει τελείως.

2.4.5 Δοκίμο 3 Ημιγωνία Δοκίμης 90°



1 (0mm)



2 (1,5mm)



3 (3,0mm)



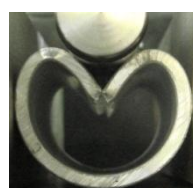
4 (5,1mm)



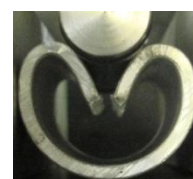
5 (7,1mm)



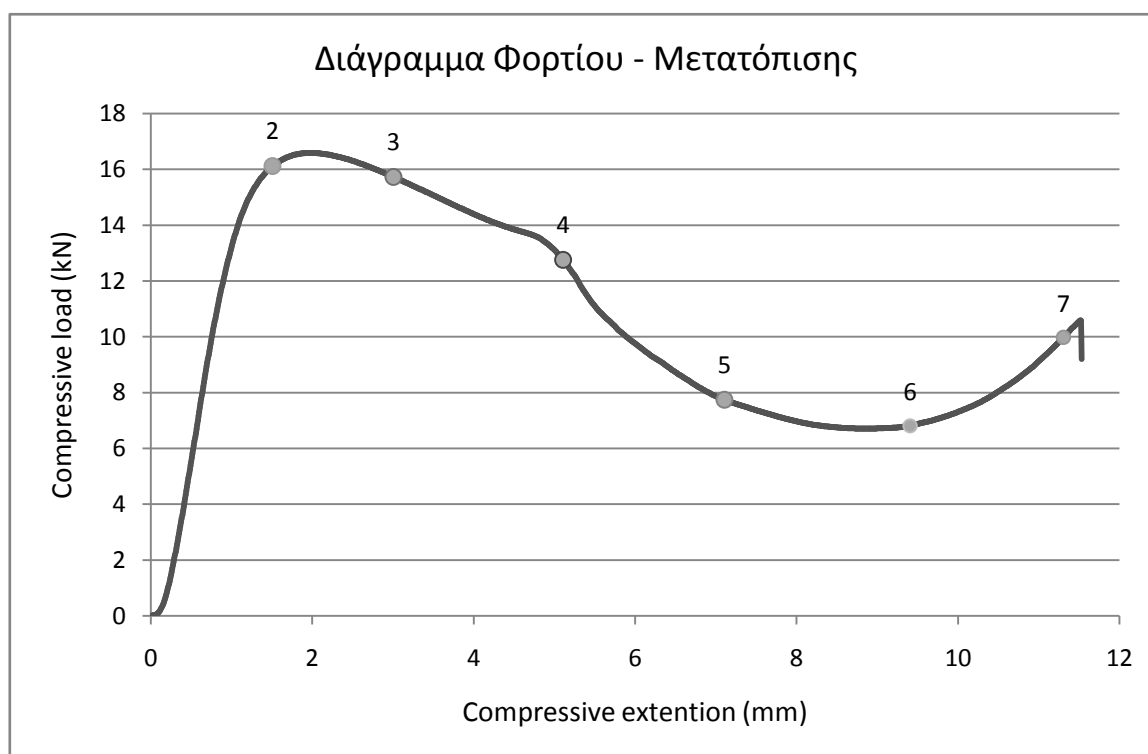
6 (9,4mm)



7 (11,3mm)



8 (13,0mm)



Πίνακας δεδομένων πειράματος	
Δοκίμιο	35mmX3mm
Διαδρομή εμβόλου	$S = 11,53 \text{ mm}$
Μέσο φορτίο	$\bar{P} = 10,50 \text{ kN}$
Ενέργεια απορρόφησης	$E_{abs} = 121,08 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

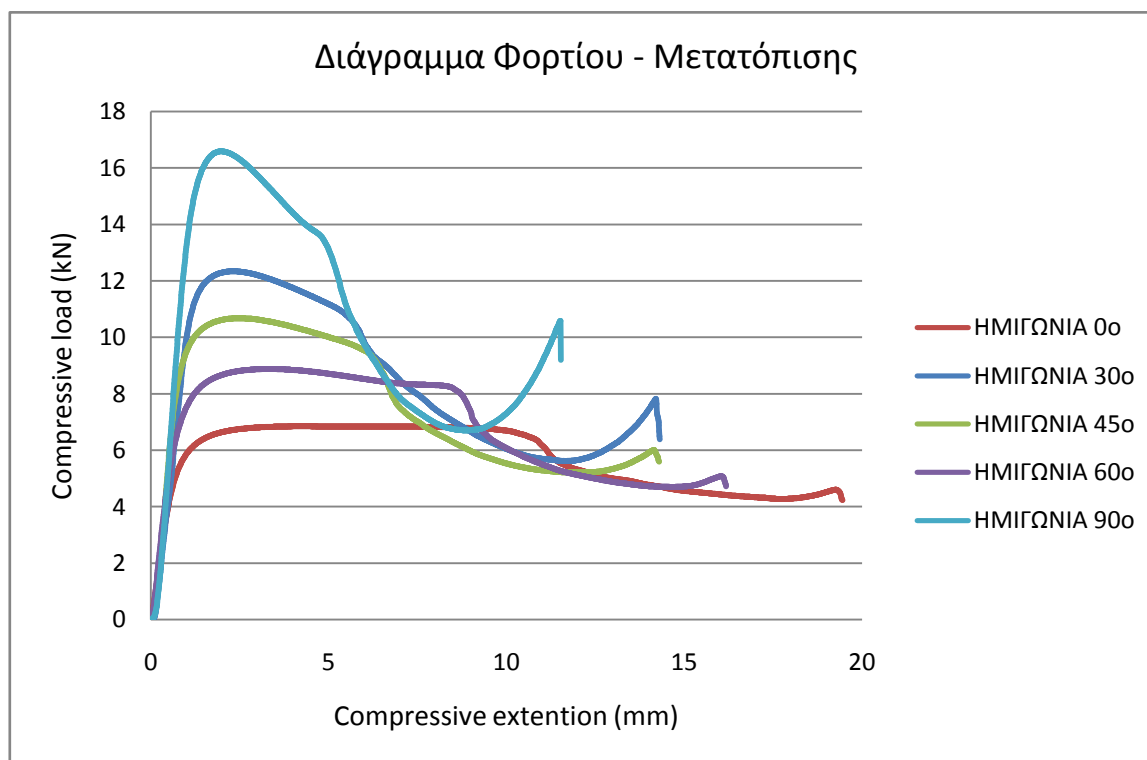
Μικρή διαδρομή εμβόλου, λόγω της πολύ κλειστής περιοριστικής συνθήκης, το δοκίμιο ταυτίζεται άμεσα με τις με τις απαραμόρφωτες πλάκες και επιπεδώνεται στα σημεία αυτά καθώς και στο κάτω μέρος του. Πλαστικοί αρμοί εμφανίζονται στο άνω μέρος που μπορεί να διαταχθεί το δοκίμιο οι οποίοι είναι εξαιρετικά έντονοι με τον μεσαίο να καταρρέει. Το δοκίμιο μέχρι την εικόνα 8 είναι πλήρως συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα ενώ η εικόνα που έχει τραβηχτεί μετά την ολοκλήρωση του πειράματος (μεγαλύτερη μετατόπιση εμβόλου από αυτή που παρουσιάζεται στο διάγραμμα) βλέπουμε ότι το δοκίμιο έχει ολισθήσει και έχει παραμορφωθεί περισσότερο από την δεξιά πλευρά.



Εικόνα 2.2 Δοκίμιο 3 κατάρρευση σε ημιγωνία 90°

**2.4.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Δοκιμίου 3**

Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος Δοκιμίου 35mmX3mm					
Ημιγωνία Δοκιμής	0°	30°	45°	60°	90°
Διαδρομή εμβόλου $S$ (mm)	19,45	14,31	14,29	16,18	11,53
Μέσο φορτίο $\bar{P}$ (kN)	5,70	8,34	7,53	6,83	10,50
Ενέργεια απορρόφησης $E_{abs}$ (j)	110,95	119,40	107,46	110,51	121,08



Αρχικά δεν μπορούμε να συγκρίνουμε την ενέργεια στις διαφορετικές περιοριστικές συνθήκες του δοκιμίου καθώς διαφέρουν κατά πολύ οι μετατοπίσεις του εμβόλου. Μπορούμε όμως να συγκρίνουμε για τις δύο γωνίες  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  που η μετατόπιση είναι σχεδόν η ίδια. Είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα πόσο επηρεάζουν το φορτίο που δέχεται το δοκίμιο οι άκαμπτες σφήνες.  $\Delta \bar{p} = 8,34 - 7,53 = 0,81 \text{ kN}$  παραπάνω από το δοκίμιο στην περιοριστική συνθήκη των  $45^\circ$ . Η ενέργεια υπολογίστηκε από το εμβαδόν της καμπύλης το οποίο διαφέρει σε μετατόπιση ανάλογα με την θραύση του δοκιμίου.

Το μέσο φορτίο διαφέρει κατά πολύ στις διάφορες ημιγωνίες δοκιμής και αναμενόμενα μεγιστοποιείται στις  $90^\circ$  λόγω της άμεσης περιοριστικής συνθήκης που " εγκλωβίζει " το δοκίμιο χωρίς να το αφήνει να απλωθεί ελεύθερα με αποτέλεσμα να κορυφώνεται το φορτίο και να ελαχιστοποιείται η μετατόπιση του εμβόλου μέχρι την σύντομη θραύση του. Επίσης οι μηχανικές ιδιότητες του δοκιμίου καθώς και οι σχετικές διαστάσεις του (διάμετρος, πάχος τοιχώματος) σε συνδυασμό με τον διεισδυτή επιτρέπουν την έντονη παραμόρφωση που φαίνεται και στο διάγραμμα.

Η πλαστική περιοχή του δοκιμίου για τις διάφορες περιοριστικές συνθήκες βλέπουμε από το διάγραμμα ότι παραμένει στην ίδια μετατόπιση του εμβόλου με ελαφριά προς τα δεξιά μετακίνηση των καμπυλών.

## 2.5 Δοκίμο 1 35mmΧ2mm

### 2.5.1 Δοκίμο 4 Ημιγωνία δοκιμής 0°



1 (0mm)



2 (1,3mm)



3 (2,7mm)



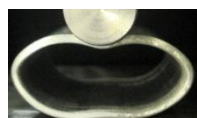
4 (4,5mm)



5 (6,9mm)



6 (10,4mm)



7 (15,1mm)



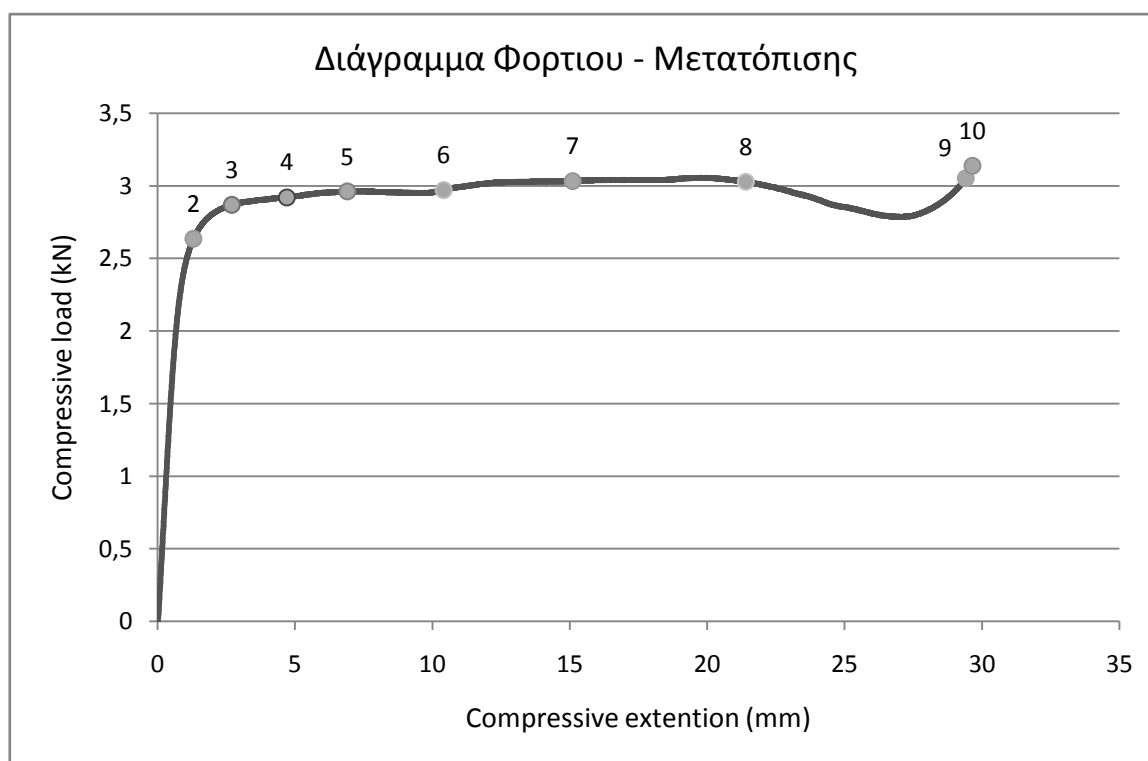
8 (21,4mm)



9 (29,4mm)



10 (29,9mm)

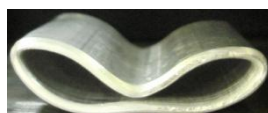


Πίνακας δεδομένων πειράματος

Δοκίμιο	35mmX2mm
Διαδρομή εμβόλου	$S = 29,64 \text{ mm}$
Μέσο φορτίο	$\bar{P} = 2,89 \text{ kN}$
Ενέργεια απορρόφησης	$E_{abs} = 85,96 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Το πείραμα τερματίστηκε ακριβώς την στιγμή που ακούμπησε το άνω με το κάτω μέρος του δοκίμιου για αυτό παρατηρείται και μια μικρή άνοδος του φορτίου. Το δοκίμιο δεν καταρρέει καθώς οι μηχανικές του ιδιότητες και κυρίως το πάχος του το κάνουν αρκετά ελαστικό. Το σημείο επαφής με τον κυλινδρικό διεισδυτή δεν σχηματίζει "μύτη" αλλά διαμορφώνεται στην γεωμετρία του διεισδυτή αν και η παραμόρφωση δεν είναι κλειστής μήτρας (Εικόνα 2.3). Επίσης παρατηρούμε στην Εικόνα 2.3 την ελαστική επαναφορά του άνω και κάτω μέρους την στιγμή που απομακρύνθηκε το έμβολο.

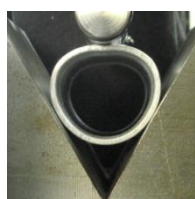


Εικόνα 2.3 Δοκίμιο 4 Τελική Μορφή

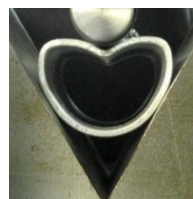
**2.5.2 Δοκίμιο 4 Ημιγωνία Δοκιμής 30°**



1 (0mm)



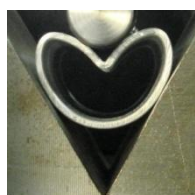
2 (2,7mm)



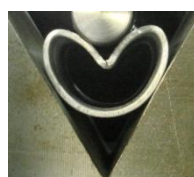
3 (10,1mm)



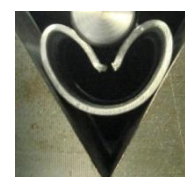
4 (12,7mm)



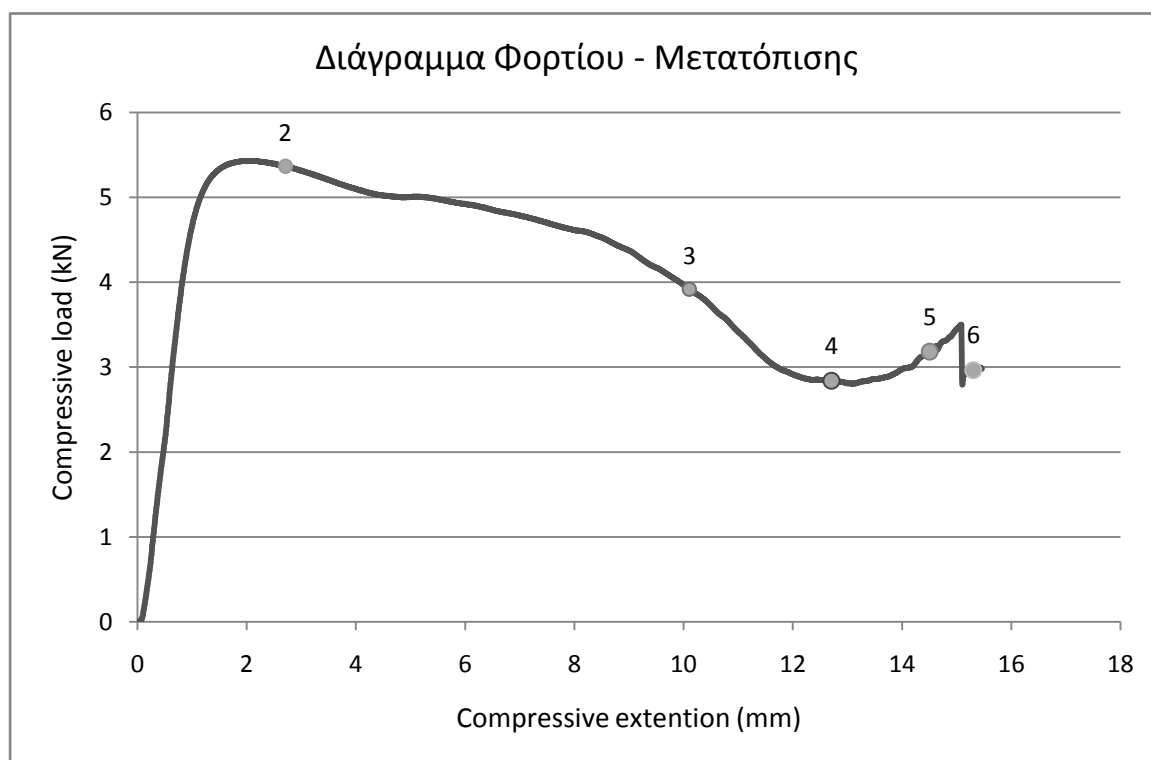
5 (14,5mm)



6 (15,3mm)



7 (17,1mm)



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

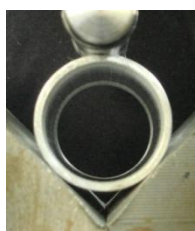
<b>Δοκίμιο</b>	<i>35mmX2mm</i>
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 15,46 \text{ mm}$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 4,10 \text{ kN}$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 63,41 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

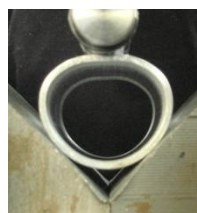
Το δοκίμιο παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με τα μεγαλύτερου πάχους δοκίμια. Παρουσιάζει χαρακτηριστική "μύτη" και δεν παίρνει την κυλινδρική μορφή του διεισδυτή λόγω της διάταξης της περιοριστικής συνθήκης. Η διαδρομή του εμβόλου μειώνεται σχεδόν στα μισά με την προηγούμενη ημιγωνία των 0°. Το φορτίο πέφτει καθώς εμφανίζονται οι έντονοι πλαστικοί αρμοί στο άνω μέρος μέχρι που γίνεται τοπικά μέγιστο το φορτίο αμέσως μετά την εικόνα 5 και καταρρέει ομοιόμορφα και συμμετρικά.



2.5.3 Δοκίμιο 4 Ημιγωνία Δοκιμής 45°



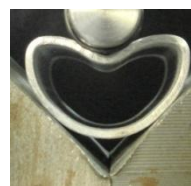
1 (0mm)



2 (3,1mm)



3 (9,1mm)



4(13,9mm)



5 (18,3mm)



6 (22,2mm)



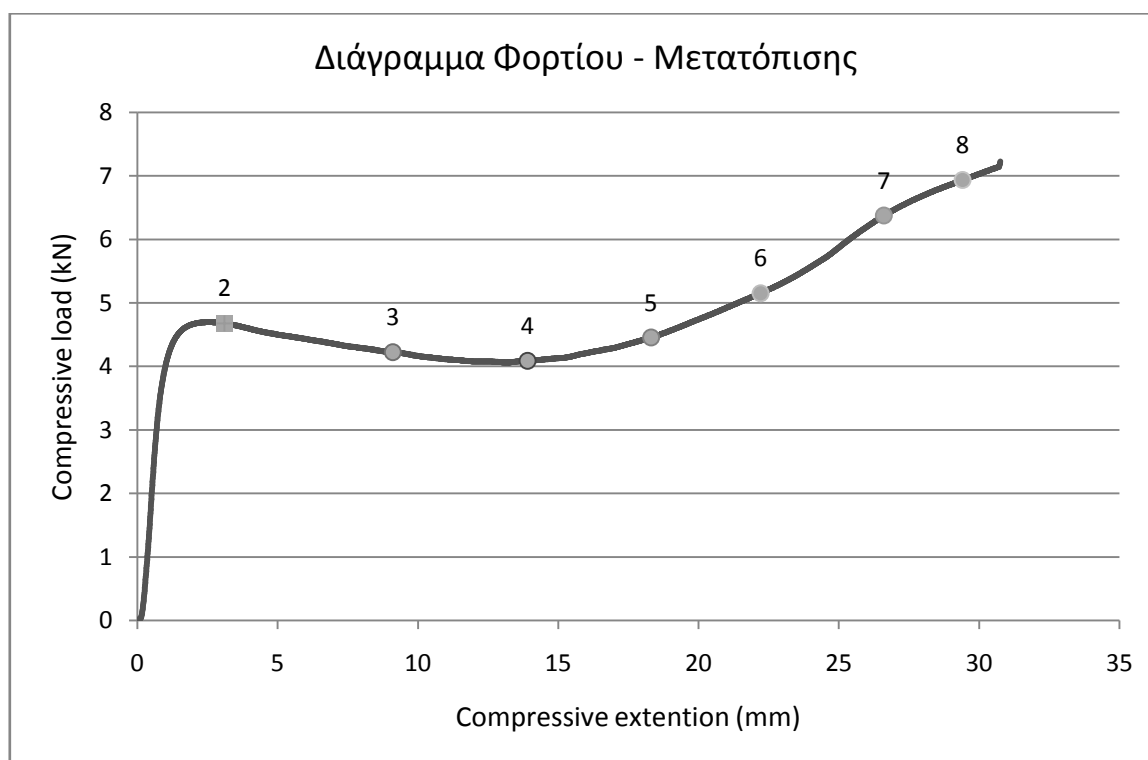
7 (26,6mm)



8 (29,4mm)



9 (32,0mm)



Πίνακας δεδομένων πειράματος	
Δοκίμιο	35mmX2mm
Διαδρομή εμβόλου	$S = 30,75 \text{ mm}$
Μέσο φορτίο	$\bar{P} = 4,83 \text{ kN}$
Ενέργεια απορρόφησης	$E_{abs} = 148,57 \text{ j}$

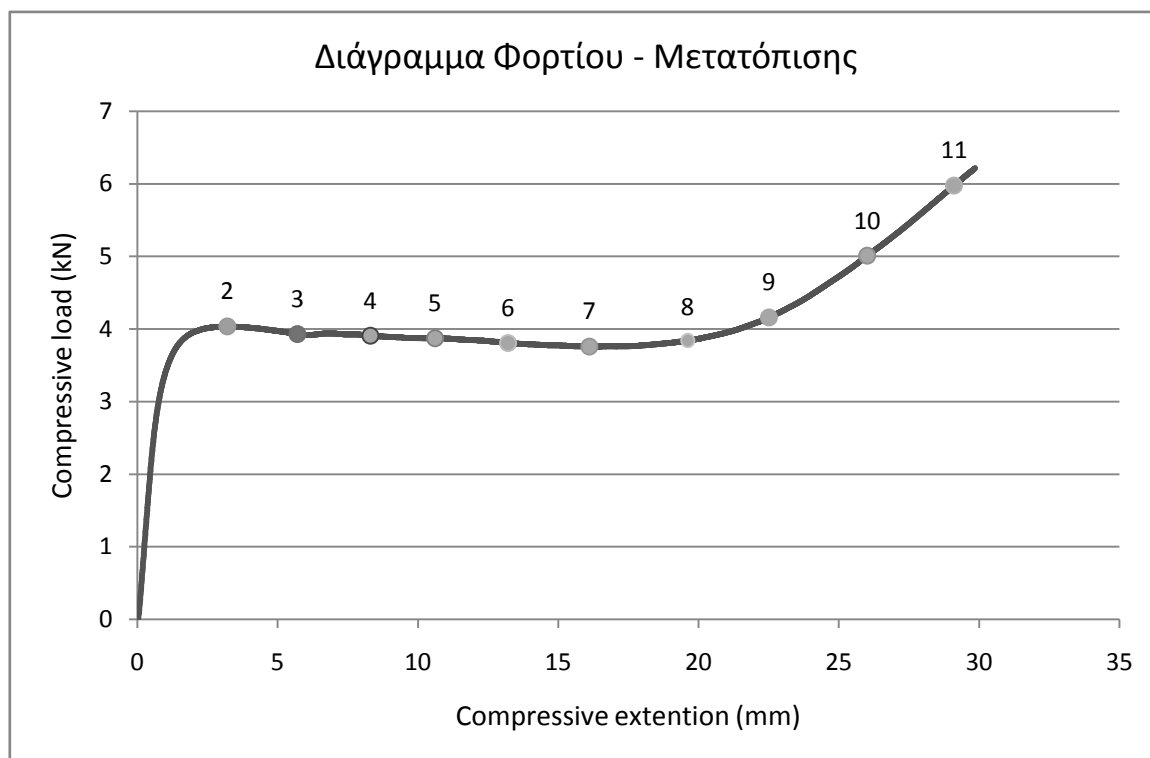
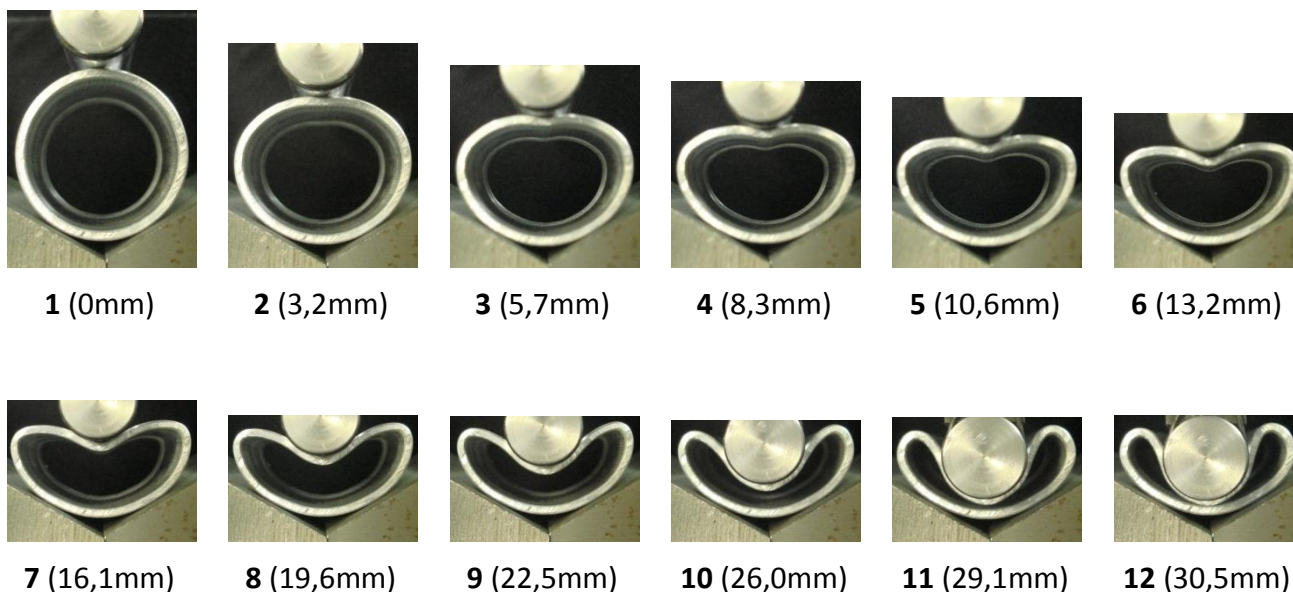
#### Σχόλια επί του πειράματος:

Το πείραμα από το σημείο 5 και γίνεται πιο έντονο στο σημείο 6 γίνεται από ανοιχτής μήτρας διαμόρφωση γίνεται "κλειστής" λόγω των περιοριστικών συνθηκών που στην μέση διαδρομή του εμβόλου "εγκλωβίζουν" κατάλληλα το δοκίμιο ώστε το άνω μέρος του παίρνει την μορφή του διεισδυτή. Αποτέλεσμα να αυξάνεται το μέσο φορτίο, κατά πολύ η ενέργεια απορρόφησης και η διαδρομή του εμβόλου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το παραμορφωμένο δοκίμιο το οποίο έχει ταυτιστεί (σφηνώσει) με τον κυλινδρικό διεισδυτή ενώ το πάχος των τοιχωμάτων είναι ίδιο με το αρχικό. Δεν έχει γίνει συμπίεση του υλικού.



Εικόνα 2.4 Δοκίμιο 4 ημιγωνία 45° τελικό

2.5.4 Δοκίμιο 4 Ημιγωνία Δοκιμής 60°



Πίνακας δεδομένων πειράματος

Δοκίμιο	35mmX2mm
Διαδρομή εμβόλου	$S = 29,85 \text{ mm}$
Μέσο φορτίο	$\bar{P} = 4,11 \text{ kN}$
Ενέργεια απορρόφησης	$E_{abs} = 122,89 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Το φορτίο παραμένει περίπου σταθερό από το σημείο 2 έως και το 9 δηλαδή καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος και αυξάνεται όταν ο διεισδυτής ενσωματώνεται στο δοκίμιο και το παραμορφώνει σύμφωνα με την γεωμετρία του. Οι πλαστικοί αρμοί εκατέρωθεν του κατακόρυφου άξονα γίνονται πιο έντονοι. Λόγω του μικρού πάχους του δοκιμίου δεν υπάρχουν αρμοί θραύσης και μετά την επαναφορά του εμβόλου όπως και στην Εικόνα 2.3 έχουμε ελαστική επαναφορά, δηλαδή δεν εφάπτεται το άνω με κάτω μέρος του δοκιμίου.

**2.5.5 Δοκίμιο 4 Ημιγωνία Δοκιμής 90°**



1 (0mm)



2 (1,4mm)



3 (2,2mm)



4 (4,1mm)



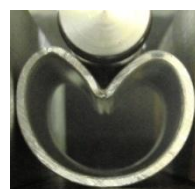
5 (6,4mm)



6 (8,1mm)



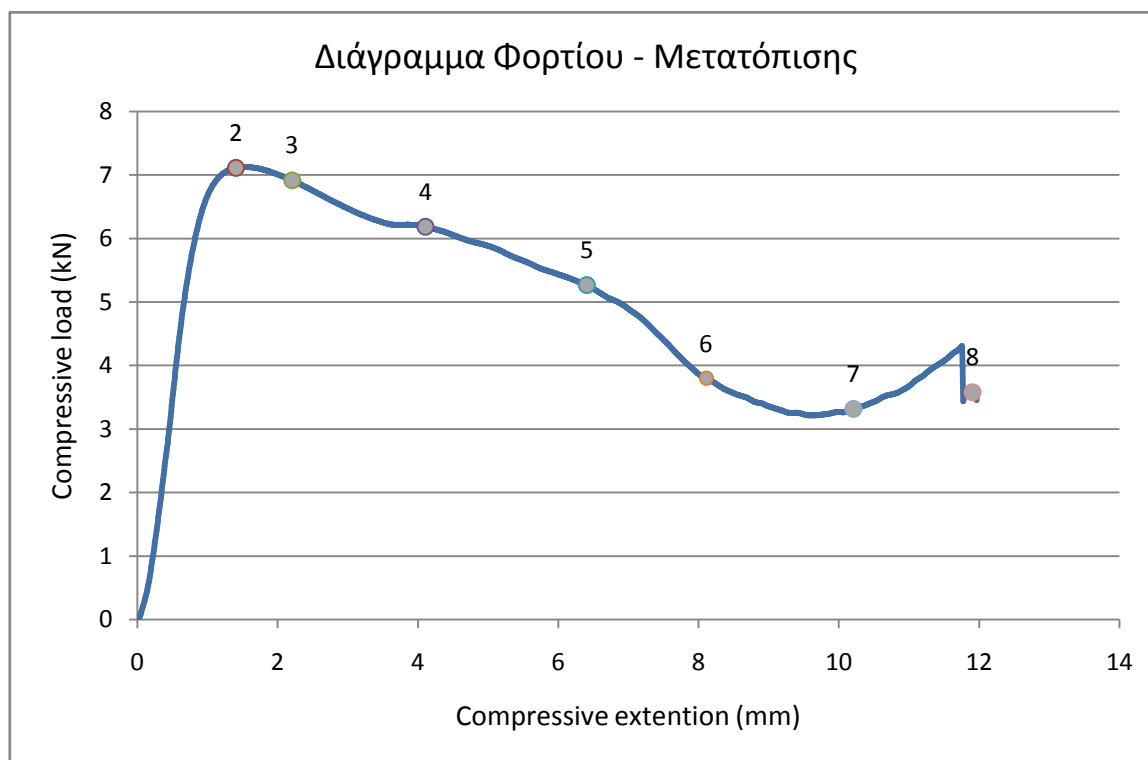
7 (10,2mm)



8 (11,9mm)



9 (13,3mm)



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμιο</b>	35mmX2mm
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 11,96 \text{ mm}$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 4,91 \text{ kN}$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 58,79 \text{ j}$

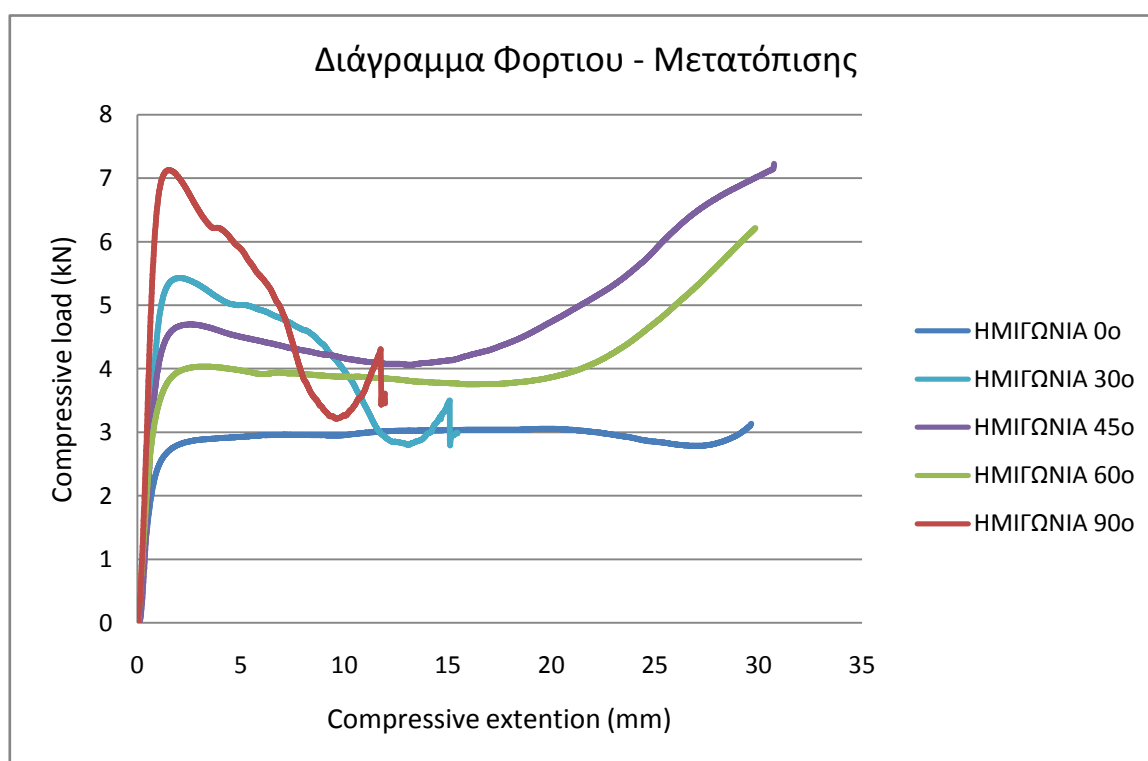
**Σχόλια επί του πειράματος:**

Το δοκίμιο πολύ γρήγορα καταρρέει σε σχέση με τις προηγούμενες περιοριστικές συνθήκες. Από το σημείο 2 έχει αρχίσει να γίνεται εμφανείς ο κεντρικός πλαστικός αρμός στην επαφή με τον διεισδυτή ενώ αυξάνεται και η καμπυλότητα στους υπόλοιπους δύο πλαστικούς αρμούς που εμφανίζουν έντονες οξείες γωνίες (Εικόνα - Σημείο 6). Η ενέργεια απορρόφησης είναι πολύ μικρή εφόσον η μετατόπιση είναι σχεδόν η μισή τις προηγούμενες περιοριστικές συνθήκες.

### 2.5.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Δοκιμίου 4

Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος Δοκιμίου 35mmX3mm

Ημιγωνία Δοκιμής	0°	30°	45°	60°	90°
Διαδρομή εμβόλου $S$ (mm)	29,64	15,46	30,75	29,85	11,96
Μέσο φορτίο $\bar{P}$ (kN)	2,89	4,10	4,83	4,11	4,91
Ενέργεια απορρόφησης $E_{abs}$ (j)	85,96	63,41	148,57	122,89	58,79



Η ελαστική περιοχή του δοκιμίου για τις διάφορες περιοριστικές συνθήκες βλέπουμε από το διάγραμμα ότι παραμένει στην ίδια μετατόπιση του εμβόλου με ελαφριά προς τα δεξιά μετακίνηση των καμπυλών.

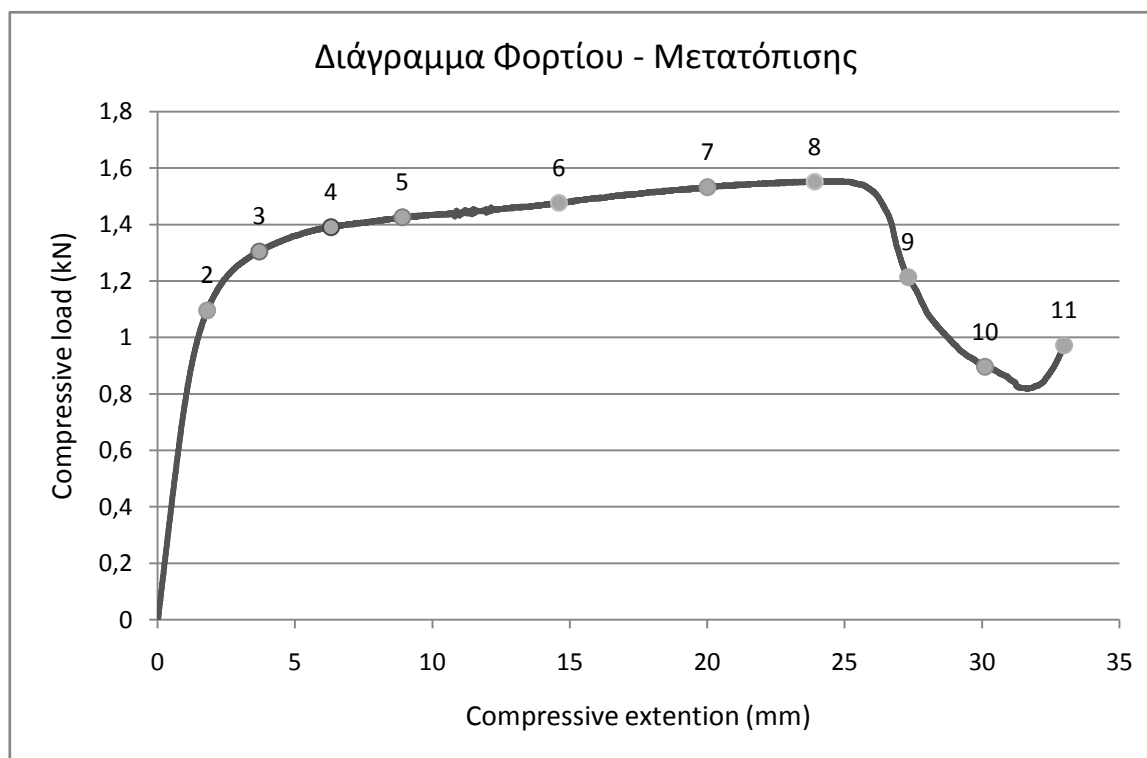
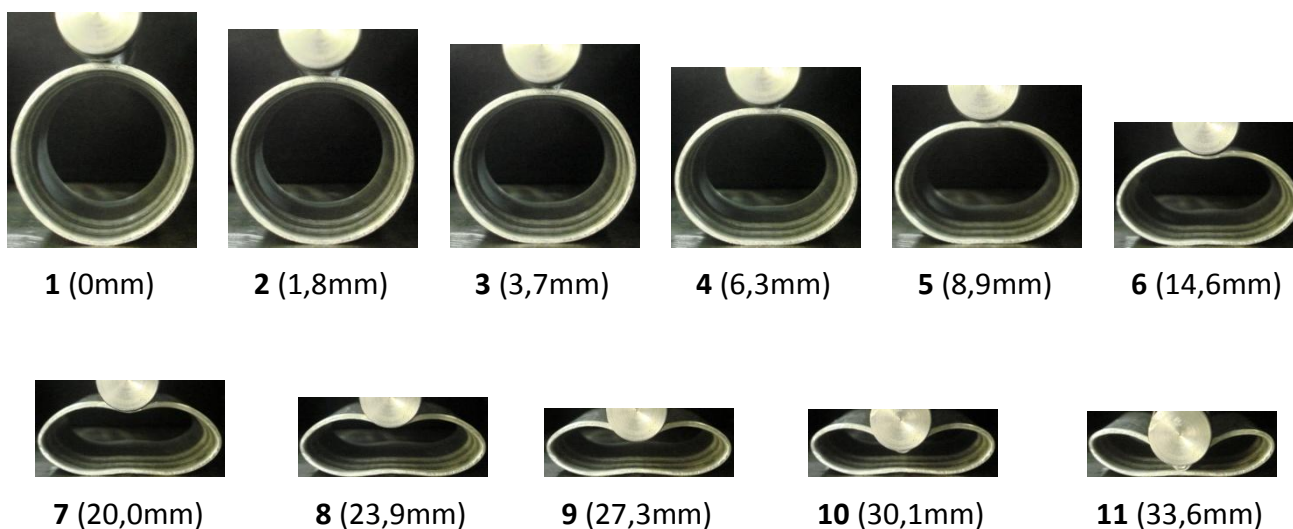
Μπορούμε να συγκρίνουμε την ενέργεια για τις περιοριστικές συνθήκες 0°, 45°, 60° καθώς οι μετατοπίσεις του εμβόλου είναι σχεδόν οι ίδιες. Παρατηρούμε ότι το φορτίο γίνεται μέγιστο για την ημιγωνία των 45° που η διαμόρφωση παραπέμπει σε κλειστής μήτρας αυτό οφείλεται ξεκάθαρα στην ημιγωνία καθώς στην ημιγωνία των 60° και 0° το φορτίο μειώνεται που το δοκίμιο έχει περισσότερο χώρο για να παραμορφωθεί ελεύθερα.

Το μέσο φορτίο διαφέρει κατά πολύ στις διάφορες ημιγωνίες δοκιμής και δεν μεγιστοποιείται στις 90° λόγω της άμεσης περιοριστικής συνθήκης που " εγκλωβίζει " το δοκίμιο χωρίς να το αφήνει να απλωθεί ελεύθερα με αποτέλεσμα να κορυφώνεται το φορτίο και να

ελαχιστοποιείται η μετατόπιση του εμβόλου μέχρι την πολύ σύντομη θραύση του. Επίσης οι μηχανικές ιδιότητες του δοκιμίου καθώς και οι σχετικές διαστάσεις του (διάμετρος, πάχος τοιχώματος) σε συνδυασμό με τον διεισδυτή επιτρέπουν την έντονη παραμόρφωση που φαίνεται και στο διάγραμμα.

## 2.6 Δοκίμιο 5 40mmX1,5mm

### 2.6.1 Δοκίμιο 5 Ημιγωνία Δοκιμής 0°



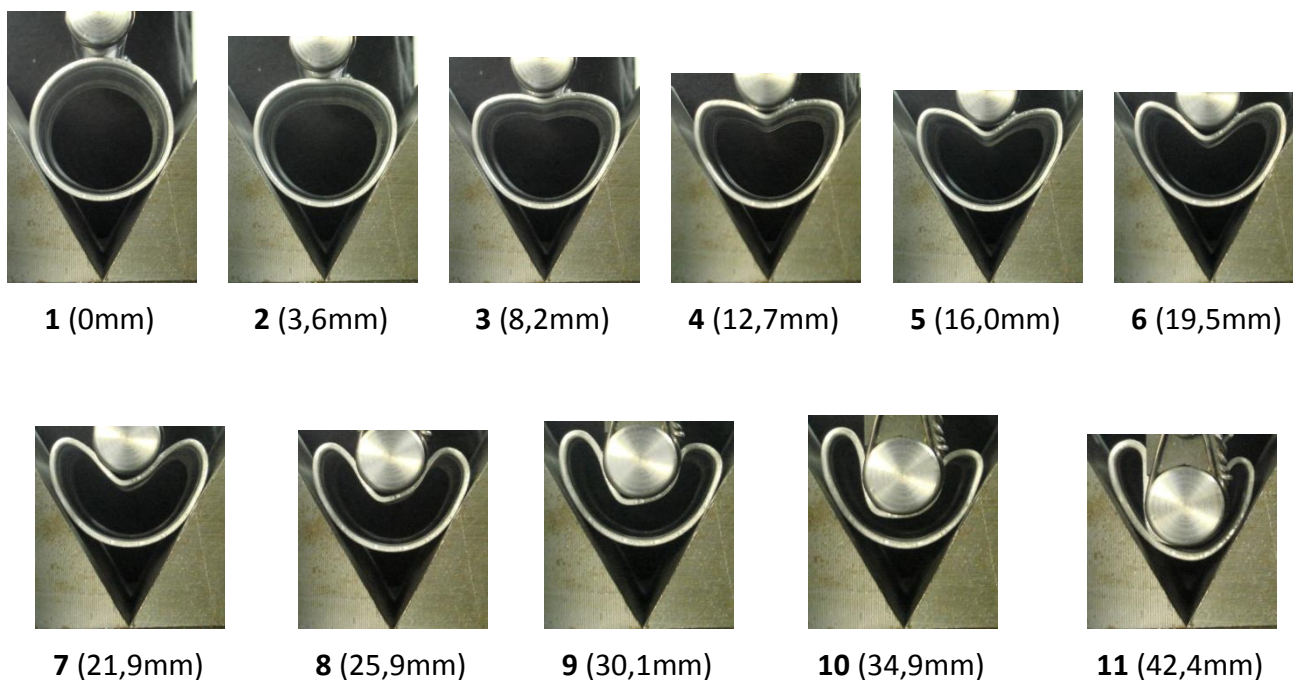
Πίνακας δεδομένων πειράματος

Δοκίμιο	40mmX1,5mm
Διαδρομή εμβόλου	$S = 32,98 \text{ mm}$
Μέσο φορτίο	$\bar{P} = 1,31 \text{ kN}$
Ενέργεια απορρόφησης	$E_{abs} = 43,48 \text{ j}$

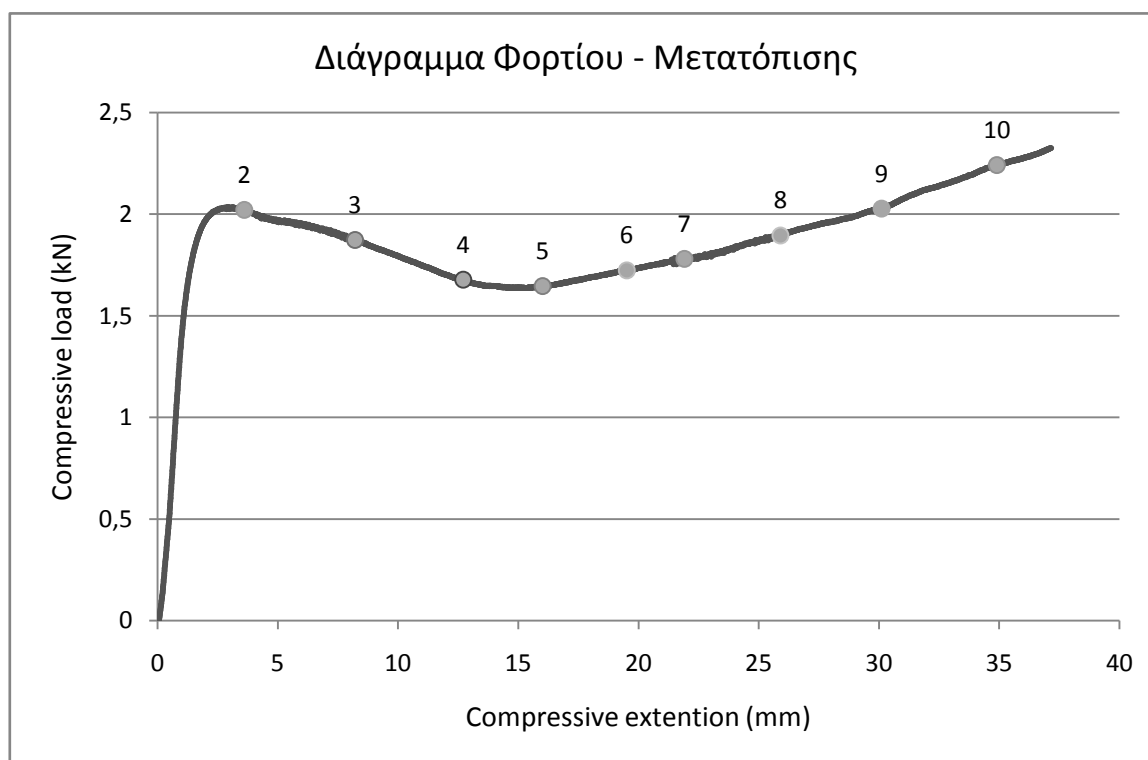
**Σχόλια επί του πειράματος:**

Μεγάλη πτώση του φορτίου παρατηρείται μεταξύ των σημείων 8 και 9 διότι το δοκίμιο έχει πάρει το "τελικό" σχήμα παραμόρφωσης, έχουν δημιουργηθεί οι πλαστικοί αρμοί και η "μύτη" λόγω των ιδιοτήτων του δοκιμίου και της μη περιοριστικής συνθήκης, δεν το αφήνει να συμπιεστεί μέχρι την τελική μετατόπιση που είναι περίπου 37mm. Έντονη είναι και η παραμόρφωση στο κάτω μέρος του οριζώντιου άξονα που επιτεδώνεται και μετά η καμπυλότητα αυξάνεται (χαρακτηριστικές εικόνες 8,9).

**2.6.2 Δοκίμιο 5 Ημιγωνία Δοκιμής 30°**







**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμιο</b>	40mmX1,5mm
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 37,16 \text{ mm}$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 1,85 \text{ kN}$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 69,06 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Το δοκίμιο παραμορφώνεται συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα μέχρι το σημείο - εικόνα 7 όπου φαίνεται να ολισθαίνει. Γίνεται πιο έντονος πλαστικός αρμός, αύξηση καμπυλότητας, από την δεξιά πλευρά ενώ από την αριστερή φαίνεται να επιπεδώνεται και να ταυτίζεται με τις συμπαγείς πλάκες που διαμορφώνουν την περιοριστική συνθήκη του δοκιμίου. Από το σημείο 5 και μετά το φορτίο αυξάνεται καθώς αρχίζει η διαμόρφωση του κυλινδρικού διεσδυτή πάνω στο δοκίμιο. Το δοκίμιο αυτό λόγω του πάχους του 1,5mm είναι αρκετά ελαστικό.

2.6.3 Δοκίμιο 5 Ημιγωνία Δοκιμής 45°



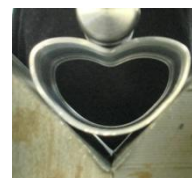
1 (0mm)



2 (4,1mm)



3 (8,2mm)



4 (13,3mm)



5 (19,0mm)



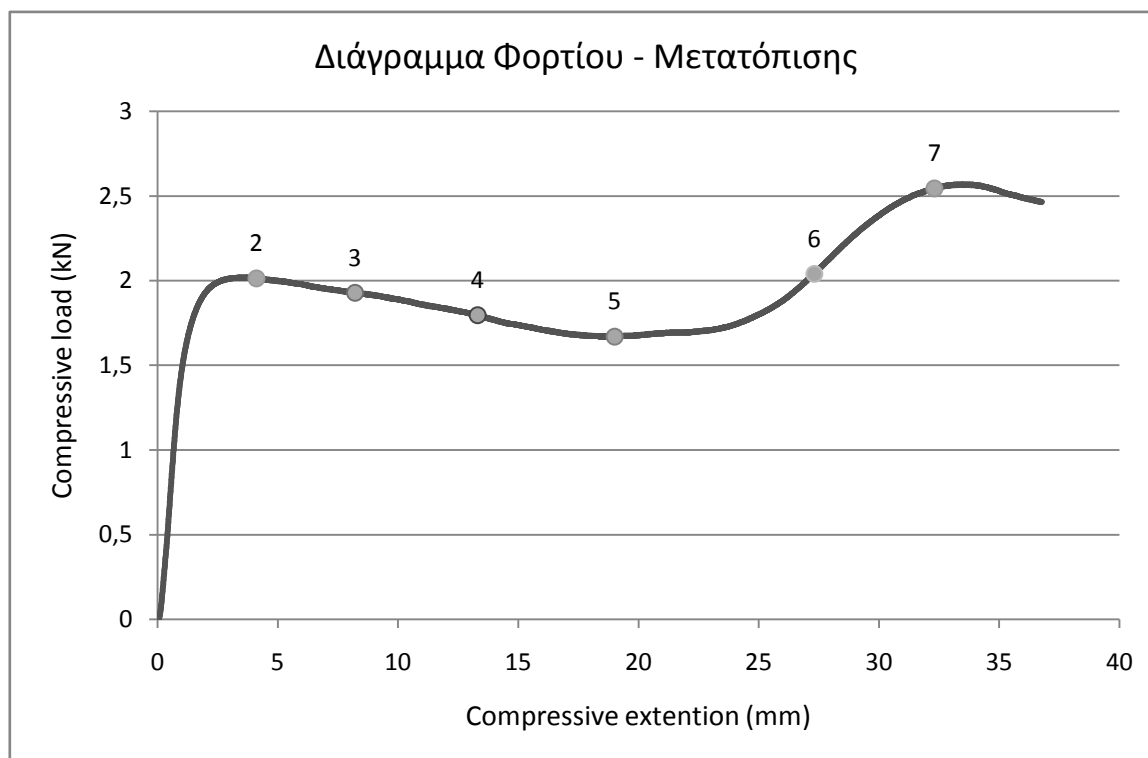
6 (27,3mm)



7 (32,3mm)



8 (37,0mm)



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμιο</b>	40mmX1,5mm
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 36,77 \text{ mm}$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 1,95 \text{ kN}$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 71,67 \text{ j}$

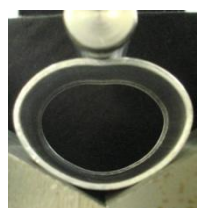
**Σχόλια επί του πειράματος:**

Το δοκίμιο παραμορφώνεται συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα μέχρι το σημείο - εικόνα 7 όπου φαίνεται να ολισθαίνει και να δημιουργούνται δύο πλαστικοί αρμοί "γωνίες" στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου που είναι εμφανείς στην τελευταία εικόνα 8. Στο σημείο 7 έχουμε και το peak του φορτίου που είναι αναμενόμενο για την τελική διαμόρφωση του δοκιμίου.

**2.6.4 Δοκίμιο 5 Ημιγωνία Δοκιμής 60°**



1 (0mm)



2 (6,2mm)



3 (8,6mm)



4 (12,0mm)



5 (16,0mm)



6 (13,2mm)



7 (16,1mm)



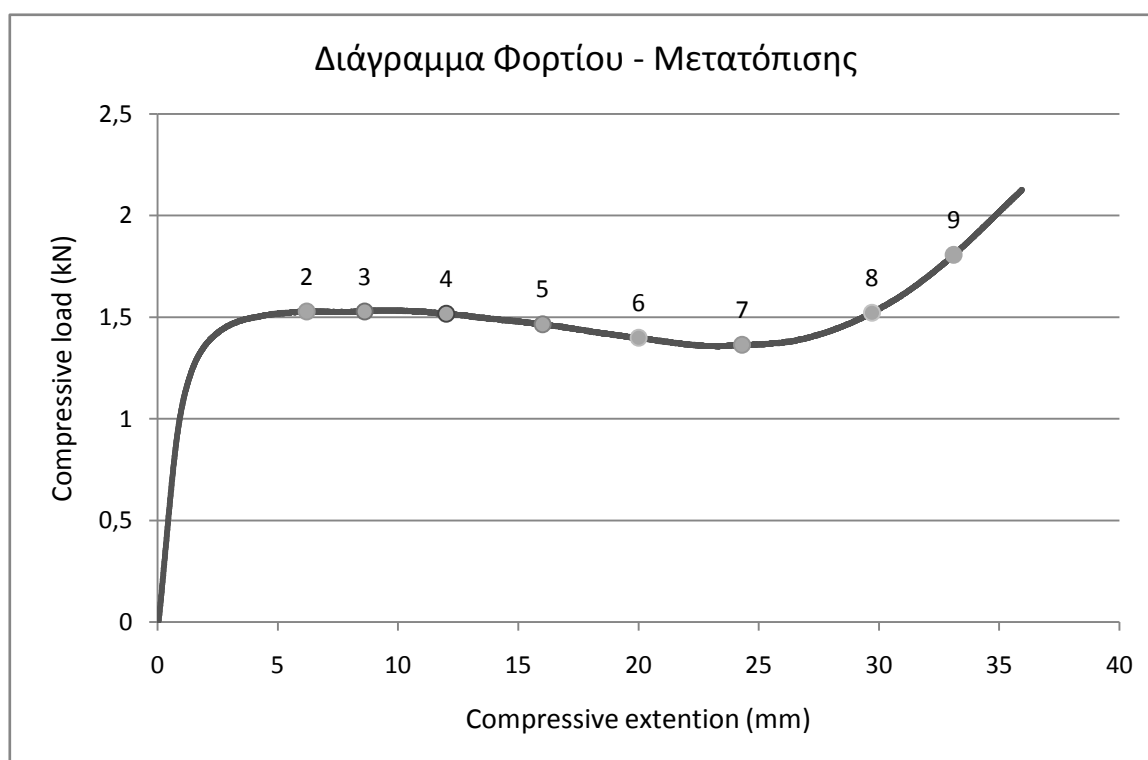
8 (19,6mm)



9 (22,5mm)



10 (33,1mm)



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμιο</b>	40mmX1,5mm
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 35,95 \text{ mm}$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{p} = 1,48 \text{ kN}$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 53,32 \text{ j}$

**Σχόλια επί του πειράματος:**

Πλήρως συμμετρικό το δοκίμιο ως προς τον κατακόρυφο άξονα μέχρι το τέλος του πειράματος που εφάπτονται άνω και κάτω μέρος. Κάνει μια χαρακτηριστική μύτη που στην συνέχεια διαμορφώνεται σύμφωνα με την γεωμετρία του κυλινδρικού διεισδυτή. Το φορτίο αυξάνεται από το σημείο 7 και μετά καθώς δεξιά και αριστερή πλευρά τείνουν να "κλείσουν" προς το κέντρο και το δοκίμιο παίρνει την τελική του μορφή. Υπάρχει κενό ανάμεσα σε άνω και κάτω μέρος καθώς μετά την επαναφορά του εμβόλου λόγω του λεπτού τοιχώματος του δοκιμίου.



Εικόνα 2.5 Τελική διαμόρφωση δοκιμίου

**2.6.5 Δοκίμιο 5 Ημιγωνία Δοκιμής 90°**



1 (0mm)

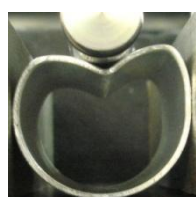
2 (1,4mm)

3 (2,1mm)

4 (4,4mm)

5 (6,0mm)

6 (7,0mm)



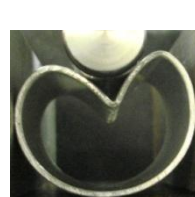
7 (9,5mm)



8 (10,7mm)



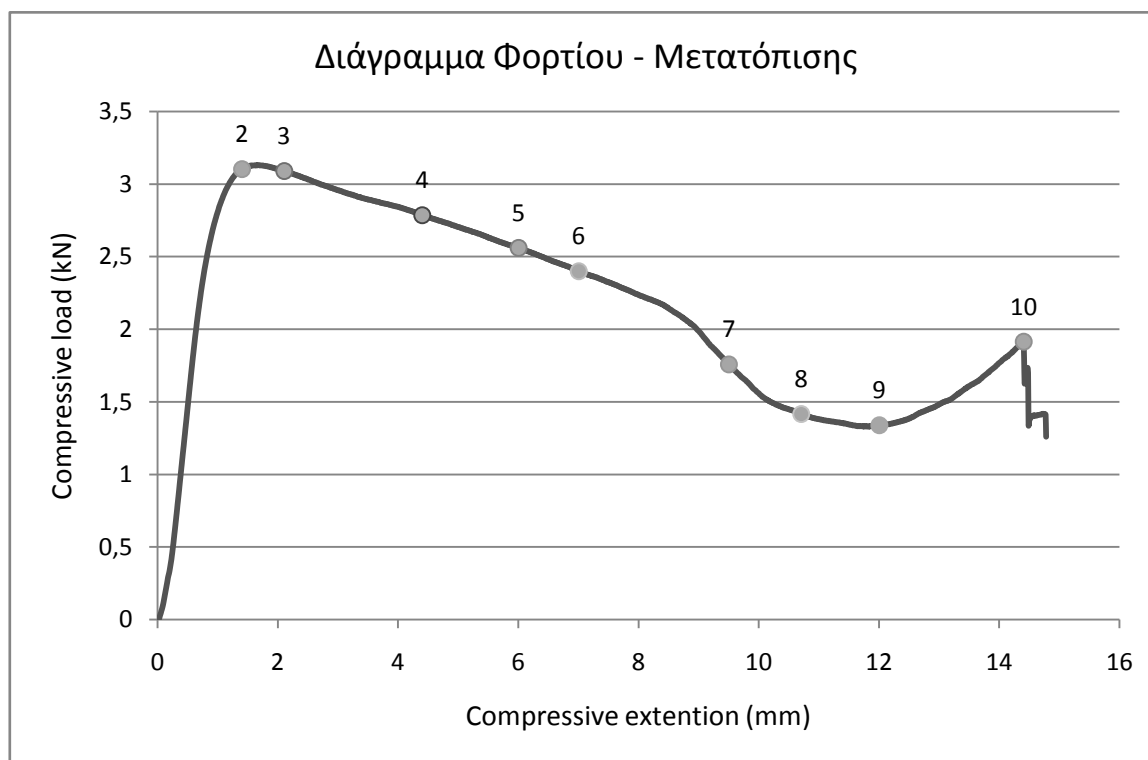
9 (12,0mm)



10 (14,4mm)



11 (18,0mm)



**Πίνακας δεδομένων πειράματος**

<b>Δοκίμιο</b>	40mmX1,5mm
<b>Διαδρομή εμβόλου</b>	$S = 14,78 \text{ mm}$
<b>Μέσο φορτίο</b>	$\bar{P} = 2,13 \text{ kN}$
<b>Ενέργεια απορρόφησης</b>	$E_{abs} = 31,60 \text{ j}$

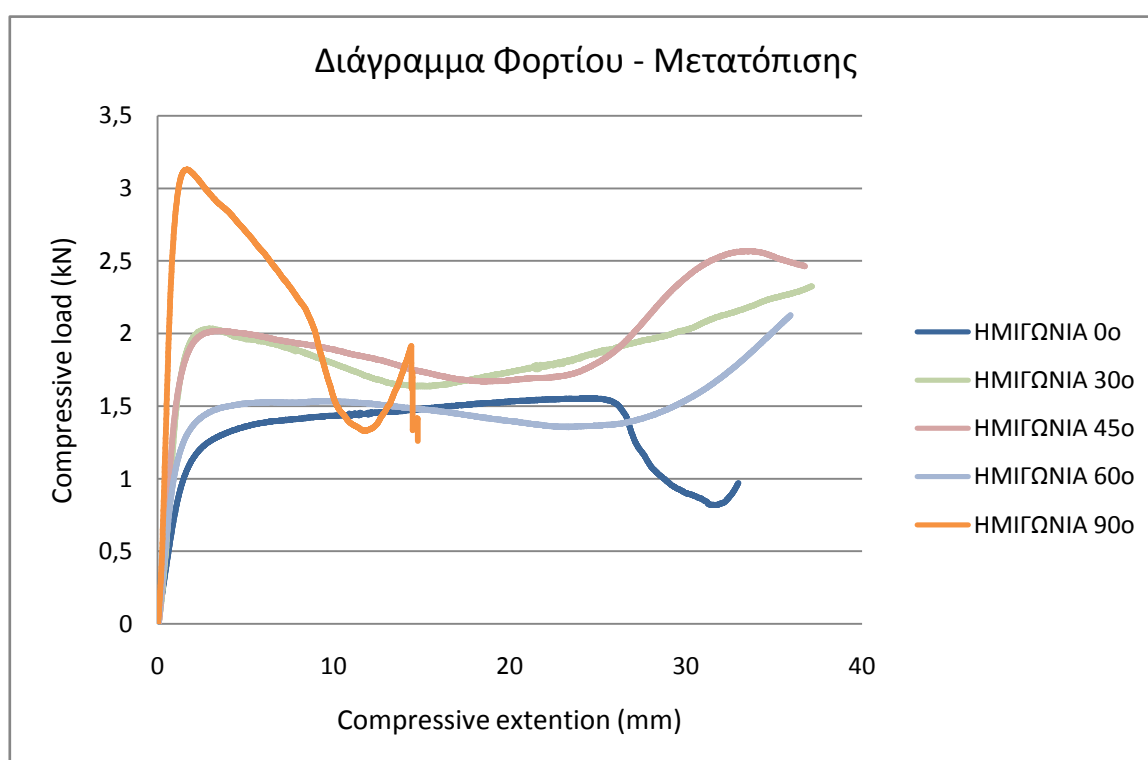
**Σχόλια επί του πειράματος:**

Η πολύ κλειστή περιοριστική συνθήκη "αναγκάζει" το δοκίμιο να καταρρεύσει σε πολύ μικρή διαδρομή του εμβόλου. Η "μύτη" γίνεται έντονη και τα πρώτα σημάδια ρηγμάτωσης φαίνονται στην εικόνα 4 και σε διαδρομή εμβόλου μόλις 4,4mm. είναι ασύμμετρο το τελικό δοκίμιο καθώς μπορεί να διαφέρει η τραχύτητα της ενεργούς επιφάνειας μεταξύ των συνεργαζόμενων επιφανειών, υπάρχει απόκλιση από την απόλυτη παραλληλότητα της πλάκας έδρασης των σφηνών εντός της μέγγενης συγκράτησης.

### 2.6.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Δοκιμίου 5

Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος Δοκιμίου 35mmX3mm

Ημιγωνία Δοκιμής	0°	30°	45°	60°	90°
Διαδρομή εμβόλου $S$ (mm)	32,98	37,16	36,77	35,95	14,78
Μέσο φορτίο $\bar{P}$ (kN)	1,31	1,85	1,95	1,48	2,13
Ενέργεια απορρόφησης $E_{abs}$ (j)	43,48	69,06	71,67	53,32	31,60



Πολύ μικρό μέσο φορτίο που οφείλεται στις μηχανικές ιδιότητες του δοκιμίου και κυρίως στο πάχος του τοιχώματός του (1,5mm). Η πλαστική περιοχή του δοκιμίου για τις διάφορες περιοριστικές συνθήκες βλέπουμε από το διάγραμμα ότι παραμένει στην ίδια μετατόπιση του εμβόλου με ελαφριά προς τα δεξιά μετακίνηση των καμπυλών.

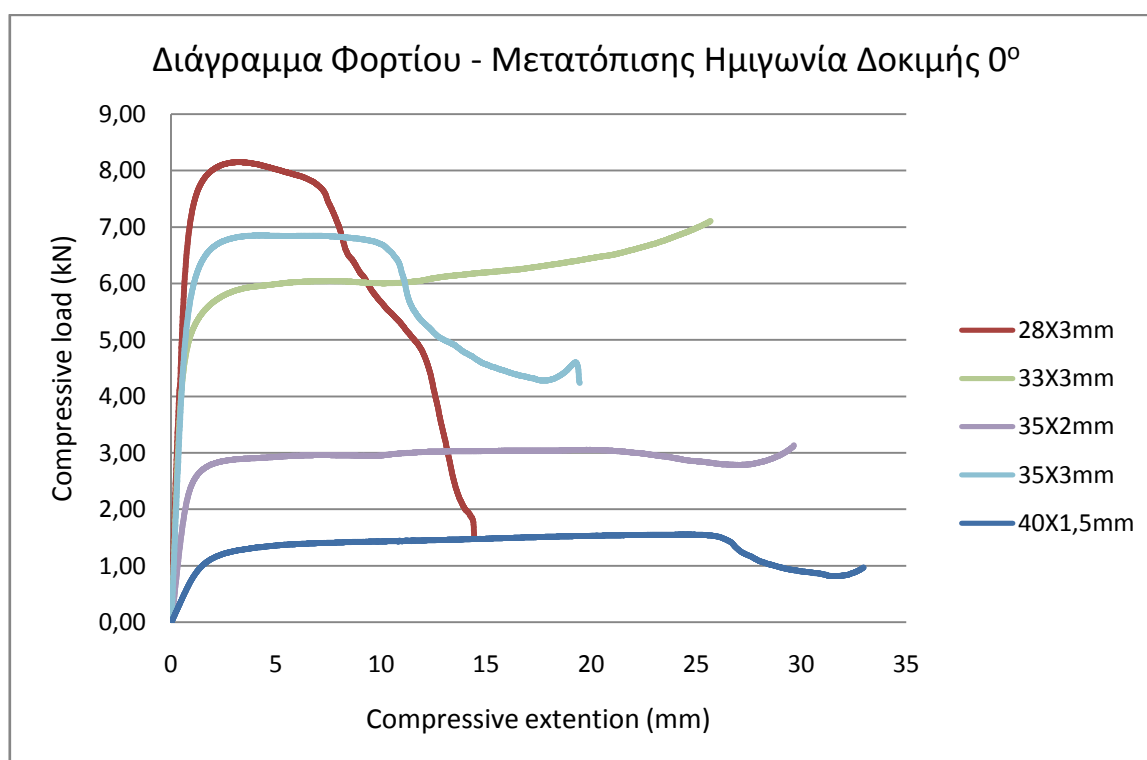
Μπορούμε να συγκρίνουμε την ενέργεια για τις περιοριστικές συνθήκες 30°, 45°, 60° καθώς οι μετατοπίσεις του εμβόλου είναι σχεδόν οι ίδιες. Παρατηρούμε ότι το φορτίο γίνεται μέγιστο για την ημιγωνία των 45° που η διαμόρφωση παραπέμπει σε κλειστής μήτρας αυτό οφείλεται ξεκάθαρα στην ημιγωνία καθώς στην ημιγωνία των 60° το φορτίο μειώνεται που το δοκίμιο έχει περισσότερο χώρο για να παραμορφωθεί ελεύθερα.

Το μέσο φορτίο διαφέρει κατά πολύ στις διάφορες ημιγωνίες δοκιμής και μεγιστοποιείται στις 90° λόγω της άμεσης περιοριστικής συνθήκης που "εγκλωβίζει" το δοκίμιο χωρίς να το αφήνει να απλωθεί ελεύθερα με αποτέλεσμα να κορυφώνεται το φορτίο και να ελαχιστοποιείται η μετατόπιση του εμβόλου μέχρι την θραύση του. Επίσης οι μηχανικές ιδιότητες του δοκιμίου καθώς και οι σχετικές διαστάσεις του (διάμετρος, πάχος τοιχώματος) σε συνδυασμό με τον διεισδυτή επιτρέπουν την έντονη παραμόρφωση που φαίνεται στις παραπάνω εικόνες των επιμέρους πειραμάτων.

### 3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

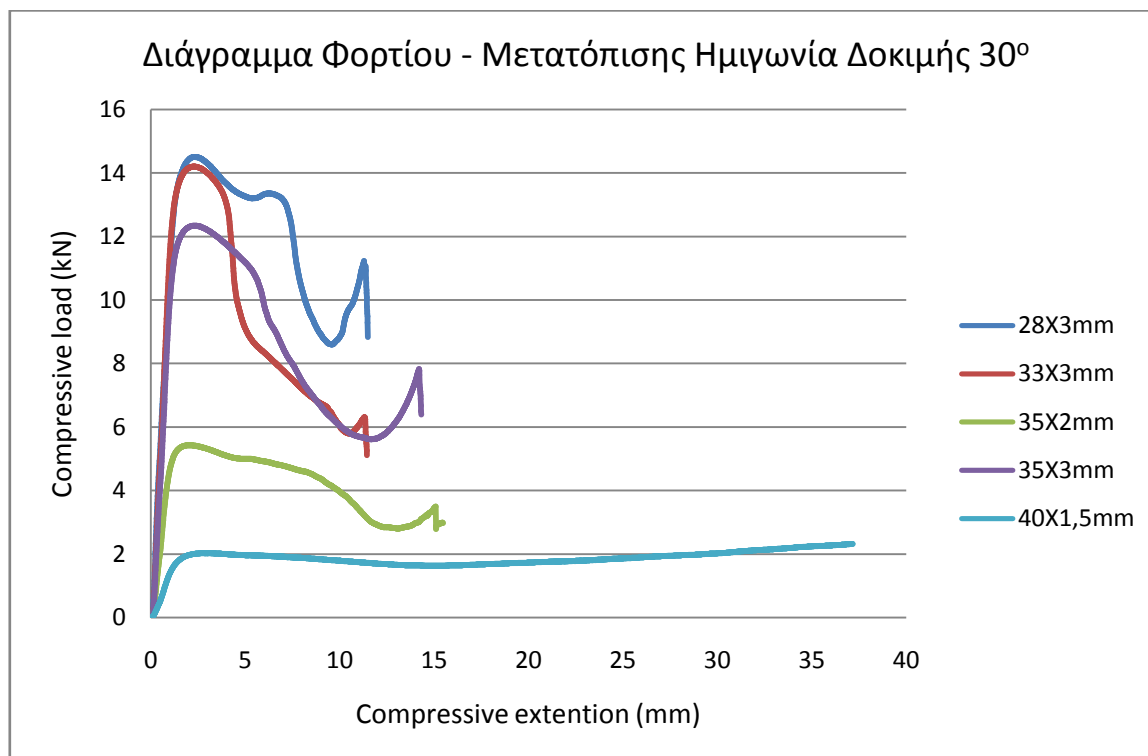
#### 3.1 Σύγκριση Δοκιμών

Ακολουθούν τα διαγράμματα φορτίου - μετατόπισης για τα διαφορετικά δοκίμια μεταξύ τους, σχολιασμός αυτών και συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων συνολικής μετατόπισης, μέσου φορτίου και ενέργειας που απορροφά κάθε δοκίμιο κατά την διάρκεια της πειραματικής δοκιμής του σε πλευρική θλίψη.

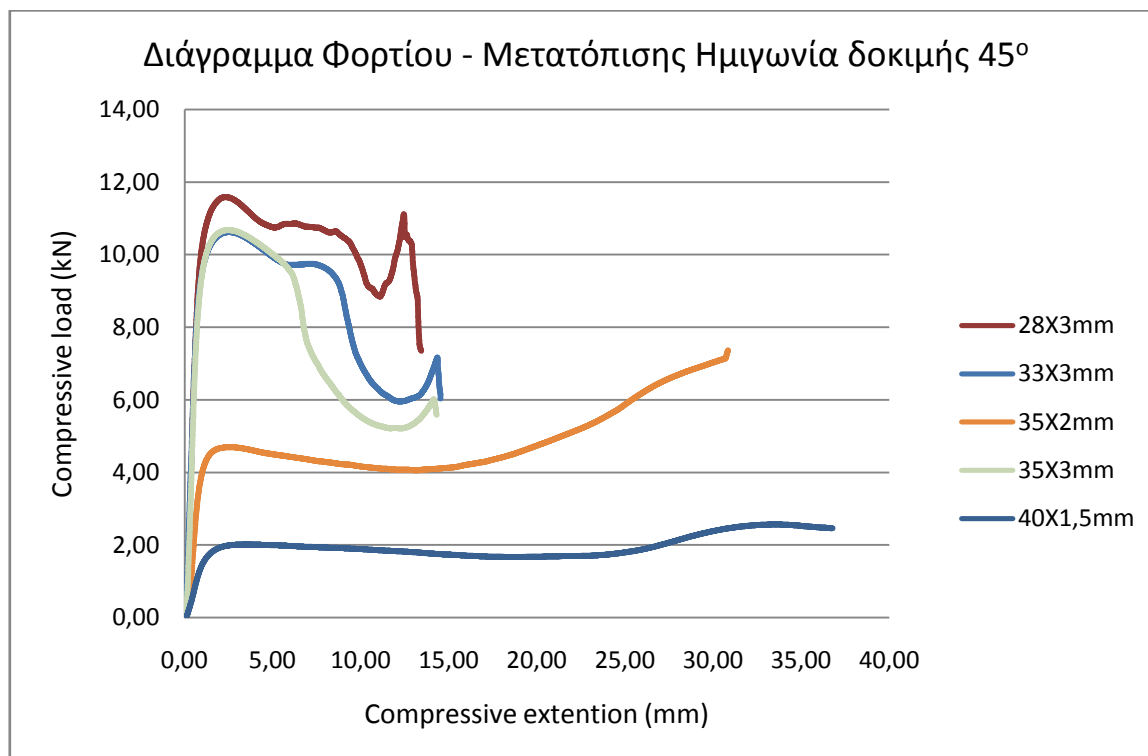


Όσο πιο μικρό πάχος έχει ένα δοκίμιο τόσο περισσότερο διαρκεί η πλαστική περιοχή παραμόρφωσης. Βέβαια παρατηρούμε ότι το δοκίμιο των 33mm δεν καταρρέει ενώ των 35mm με το ίδιο πάχος καταρρέει και μάλιστα ο κεντρικός αρμός θραύσης πολύ σύντομα. Συνεπώς επιδρά και η σχέση γεωμετρίας δοκιμίου - διεισδυτή (διάμετρος δοκιμίου - διεισδυτή). Το ίδιο συμβαίνει και με την ελαστική περιοχή παραμόρφωσης η οποία για τα λεπτότοιχα δοκίμια διαρκεί περισσότερο (μεγαλύτερη μετατόπιση για μετάβαση στην πλαστική περιοχή).

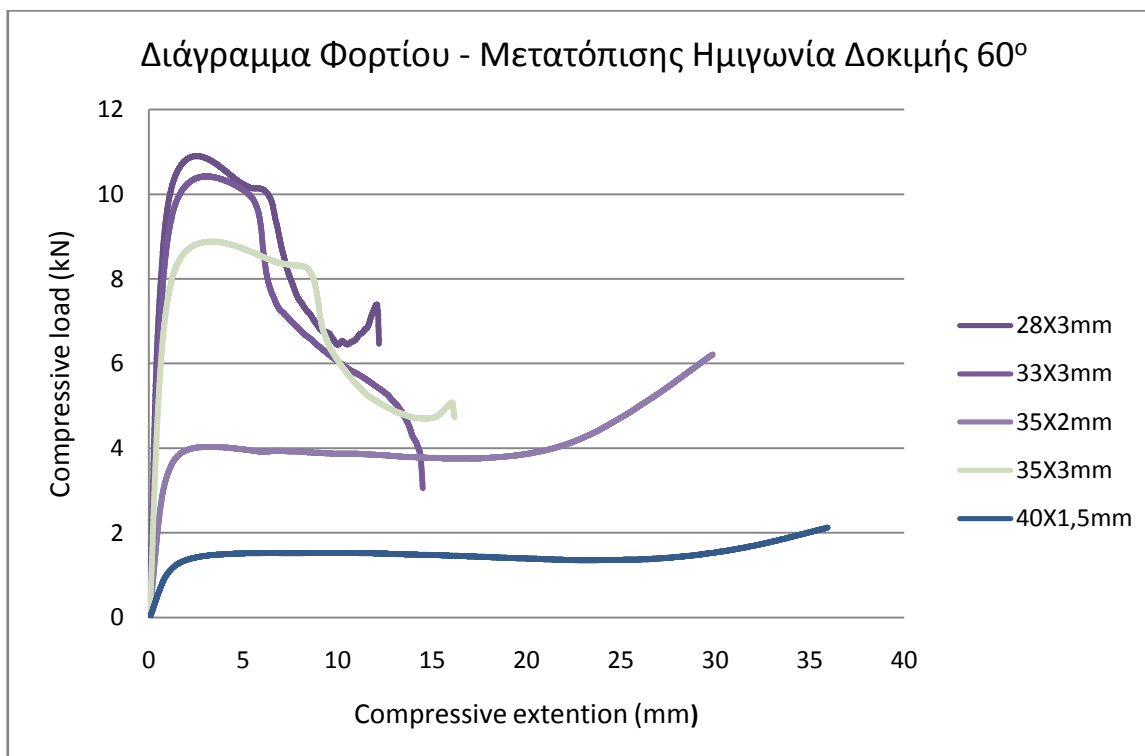




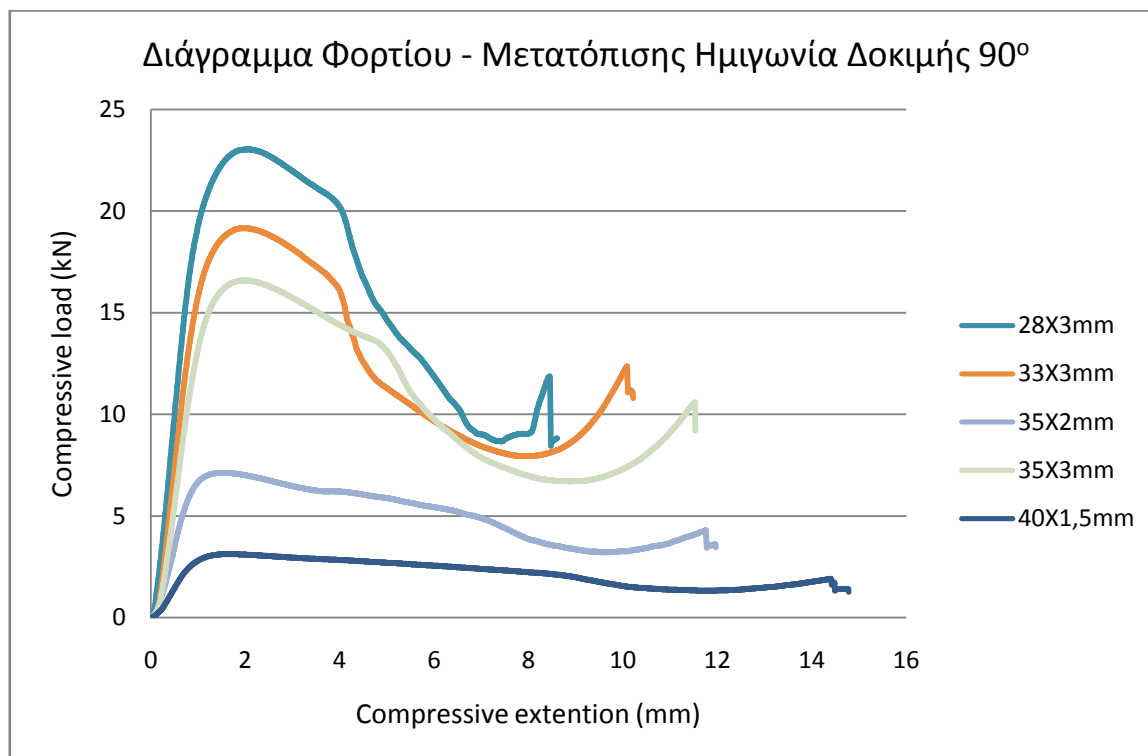
Με την εισαγωγή των εργαλείων - περιοριστικών σφηνών υπό γωνία 30° τα δοκίμια παρουσιάζουν περίπου ίδια συμπεριφορά στη μετατόπιση θραύσης τους πλην του 40X1,5mm ως πιο λεπτότοιχου που η πλαστική περιοχή διαρκεί μέχρι το τέλος του πειράματος χωρίς να καταρρέει. Εμφανίζουν αναμενόμενη συνάρτηση μέσου φορτίου - δοκιμίου (τα δοκίμια των 3mm έχουν μεγαλύτερο μέσο φορτίο από αυτά των 1,5 και 2mm).



Διαφορετική συμπεριφορά του δοκιμίου των 28mm το οποίο λόγω της διαμέτρου του θλίβεται συντομότερα από τα υπόλοιπα δυο που παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά και με την καμπύλη να είναι πιο άμεση και απότομη στην πτώση του φορτίου. Αυτό οφείλεται στην μικρή διάμετρο του δοκιμίου σε συνδυασμό με τις θλιπτικές δυνάμεις που του ασκούνται από τον κυλινδρικό διεισδυτή με αποτέλεσμα την θραύση του.



Ομοιόμορφες καμπύλες με αναμενόμενες μορφές εμφανίζονται στο διάγραμμα καθώς οι περιοριστικές σφηνές "ανοίγουν" (μεγαλύτερη ημιγωνία) και το υλικό διαρρέει ελεύθερα στο περιβάλλον. Το μέσο φορτίο μειώνεται λίγο σε σχέση με την προηγούμενη παραμορφωσιακή κατάσταση για τον παραπάνω λόγο.

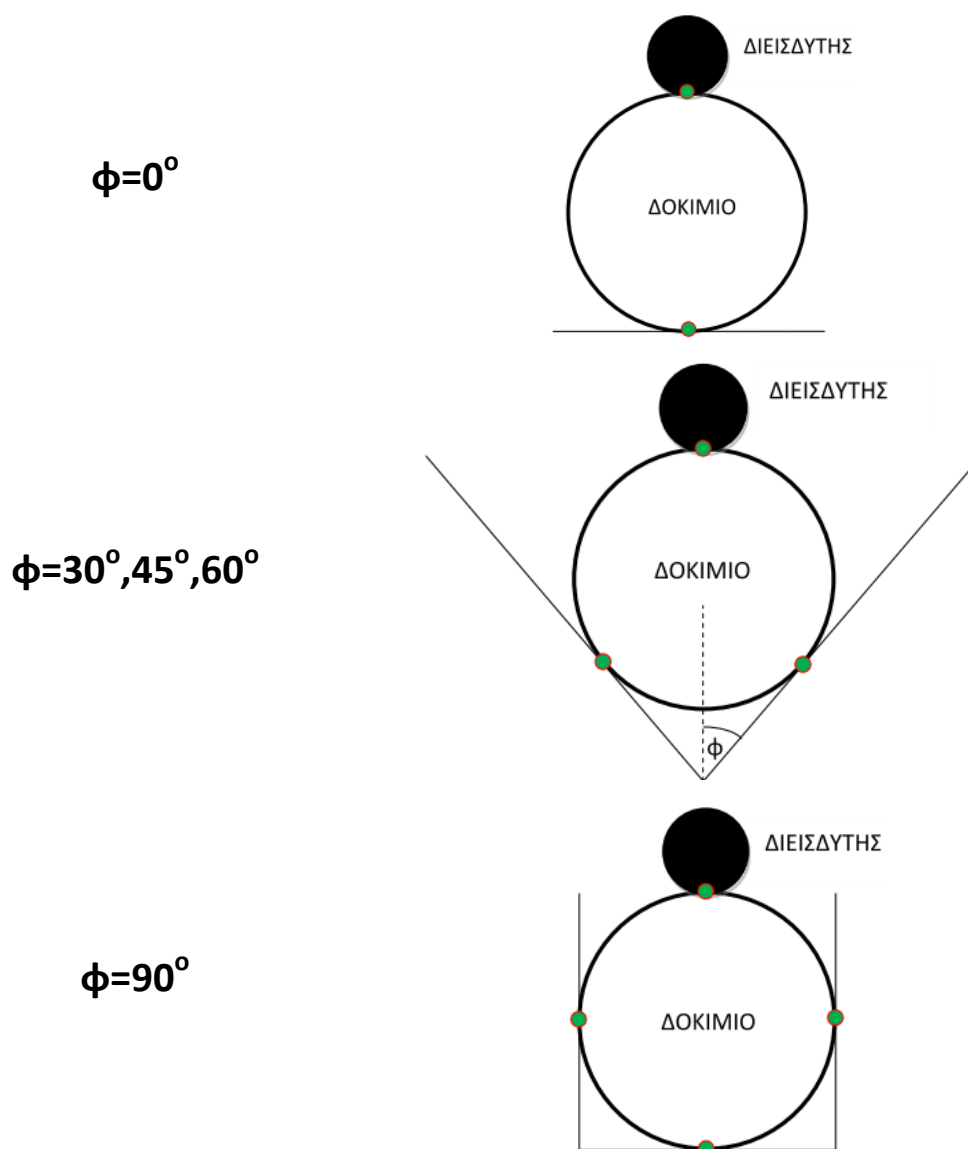


Αισθητή αύξηση μέσου φορτίου λόγω των "κλειστών" περιοριστικών συνθηκών και των περισσότερων επαφών του δοκιμίου με τα εργαλεία. Λόγω της χαμηλής ταχύτητας των δοκιμών παρουσιάζονται ομοιόμορφες καμπύλες και δεν έχουμε απότομες θραύσεις αλλά πλήρεις αναγνωριστικές περιοχές ελαστικής, πλαστικής και θραύσης ή τερματισμός του πειράματος (όπου εφάπτεται άνω και κάτω μέρος δοκιμίου).

Ακολουθεί συγκριτικός πίνακας με τα αποτελέσματα που υπολογίσθηκαν για όλα τα δοκίμια με βάση την μετατόπιση που παρουσιάζεται στα διαγράμματα.

Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων						
Δοκίμιο	Ημιγωνία Δοκιμής	0°	30°	45°	60°	90°
Δοκίμιο 1 28X3mm	Διαδρομή εμβόλου $S$ (mm)	14,45	11,50	13,45	12,18	8,60
	Μέσο φορτίο $\bar{P}$ (kN)	6,24	11,49	10,12	8,61	15,20
	Ενέργεια απορρόφησης $E_{abs}$ (j)	90,20	131,97	135,93	104,98	130,86
Δοκίμιο 2 33X3mm	Διαδρομή εμβόλου $S$ (mm)	25,68	11,43	14,52	14,49	10,21
	Μέσο φορτίο $\bar{P}$ (kN)	6,10	9,01	8,38	7,38	12,04
	Ενέργεια απορρόφησης $E_{abs}$ (j)	156,84	103,13	121,70	107,07	123,02
Δοκίμιο 3 35X3mm	Διαδρομή εμβόλου $S$ (mm)	19,45	14,31	14,29	16,18	11,53
	Μέσο φορτίο $\bar{P}$ (kN)	5,70	8,34	7,53	6,83	10,50
	Ενέργεια απορρόφησης $E_{abs}$ (j)	110,95	119,40	107,46	110,51	121,08
Δοκίμιο 4 35X2mm	Διαδρομή εμβόλου $S$ (mm)	29,64	15,46	30,75	29,85	11,96
	Μέσο φορτίο $\bar{P}$ (kN)	2,89	4,10	4,83	4,11	4,91
	Ενέργεια απορρόφησης $E_{abs}$ (j)	85,96	63,41	148,57	122,89	58,79
Δοκίμιο 5 40X1,5mm	Διαδρομή εμβόλου $S$ (mm)	32,98	37,16	36,77	35,95	14,78
	Μέσο φορτίο $\bar{P}$ (kN)	1,31	1,85	1,95	1,48	2,13
	Ενέργεια απορρόφησης $E_{abs}$ (j)	43,48	69,06	71,67	53,32	31,60

### 3.2 Συμπεράσματα Πειραματικών Δοκιμών



Εικόνα 3.1 Συνοριακές συνθήκες φόρτισης

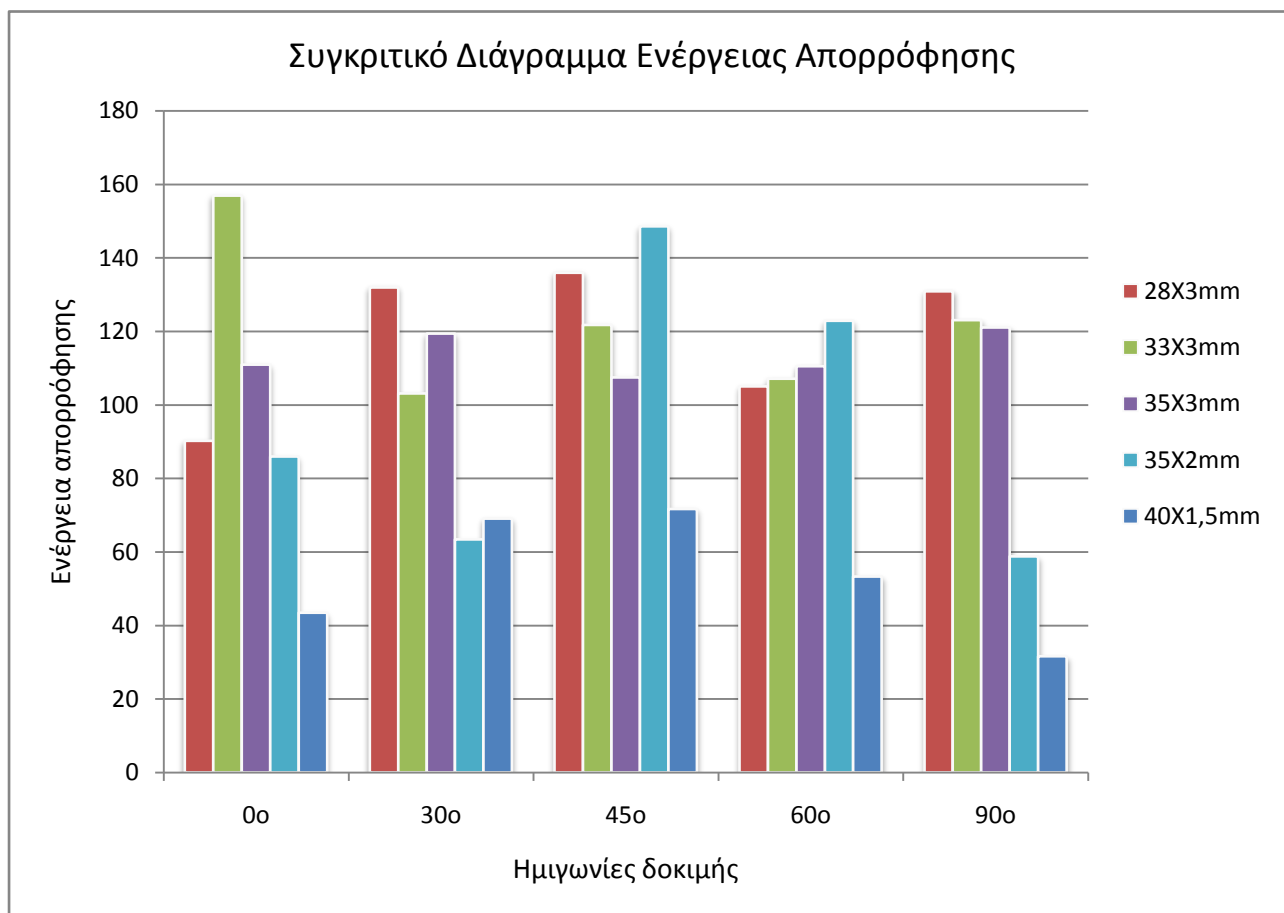
Όπως παρατηρούμε στα παραπάνω σκαριφήματα με κόκκινη τελεία παρουσιάζονται οι επαφές, οι οποίες η μία πάντα είναι με τον κυλινδρικό διεισδυτή (μικρότερης διαμέτρου από εκείνη των σωλήνων) παράλληλο στον άξονα του δοκιμίου ενώ η άλλες (μία, δύο ή τρεις κατά περίπτωση) είναι με τις επίπεδες στηρίξεις/περιορισμούς.

Λόγω της σχετικής γεωμετρίας δοκιμίου - διεισδυτή (διαφορετικού πρόσημου και απόλυτης τιμής καμπυλότητας) η πρώτη και εντονότερα σχηματιζόμενη πλαστική άρθρωση στον σωλήνα λαμβάνει χώρα στην επαφή με αυτόν λαμβάνοντας σχετικά σύντομα αρνητική καμπυλότητα, ενώ στις επίπεδες επαφές η παραμόρφωση είναι πιο ήπια και οδηγεί σε μείωση της καμπυλότητας (πλάτυνση) σωλήνα στις ζώνες αυτές.

Προϊούσης της καταπόνησης και υπό την επίδραση των άκαμπτων επαφών/στηρίξεων, ο διαθέσιμος για παραμόρφωση χώρος περιορίζεται και πλαστικές αρθρώσεις σχηματίζονται στις ζώνες της διατομής του σωλήνα που δεν είναι σε επαφή με τα εργαλεία συμπίεσης.

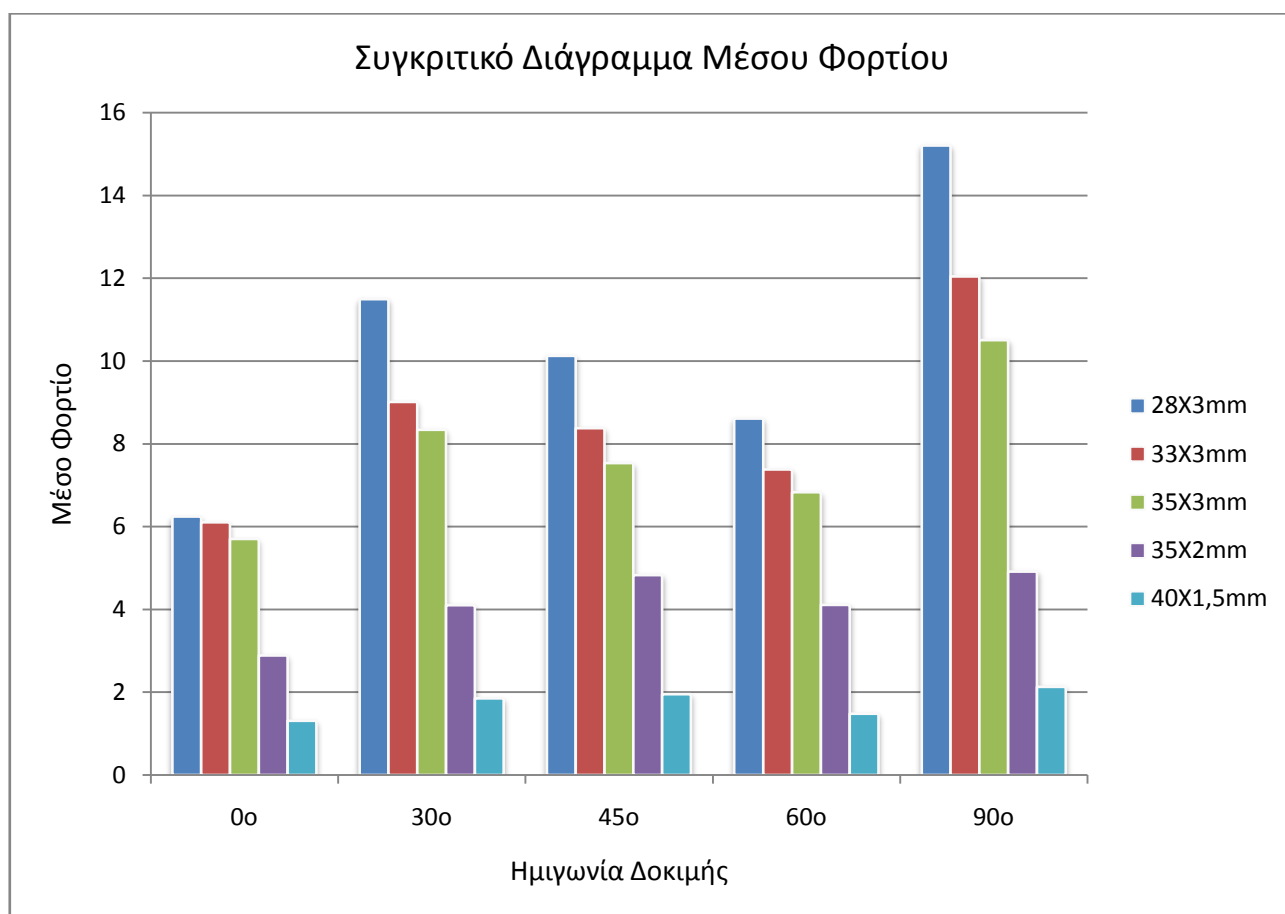
Ο έντονα πλαστικός αρμός με την αρνητική πλέον καμπυλότητα, που σχηματίζεται από τον διεισδυτή, αυξάνει συνεχώς την καμπυλότητά του (μειώνεται η ακτίνα καμπυλότητας) και οδηγείται στην αστοχία/θραύση. Αυτό αποτυπώνεται στην καμπύλη φορτίου - μετατόπισης με την κατιούσα πορεία της που ακολουθεί το πλατό. Διευρύνεται η ζώνη επαφής των εργαλείων συμπίεσης με τις αντίστοιχες ζώνες της διατομής του σωλήνα και μειώνεται η καμπυλότητα (πλάτυνση).

Η ημιγωνία  $\phi^\circ$  όσο μειώνεται τόσο πιο κατακόρυφα γίνονται τα περιοριστικά τοιχώματα και μειώνεται το περιθώριο ελεύθερης πλευρικής παραμόρφωσης. Αυξάνεται το απαιτούμενο για έναρξη πλαστικής παραμόρφωσης φορτίο ενώ η κλίση της καμπύλης του μειούμενου αμέσως μετά φορτίου αυξάνεται.



Εικόνα 3.2 Διάγραμμα Σύγκρισης Ενέργειας απορρόφησης

Αν και η ενέργεια απορρόφησης (Εικόνα 3.2) δεν μπορεί να συγκριθεί καθώς διαφέρουν οι μετατοπίσεις του εμβόλου και είναι διαφορετική επιφάνεια του κάθε διαγράμματος μας αποδίδει μια τελική - γενική πληροφορία για το πιο δοκίμιο (διάμετρος, πάχος) μπορεί να απορροφήσει περισσότερη ενέργεια μέχρι την κατάρρευσή- θραύση του.



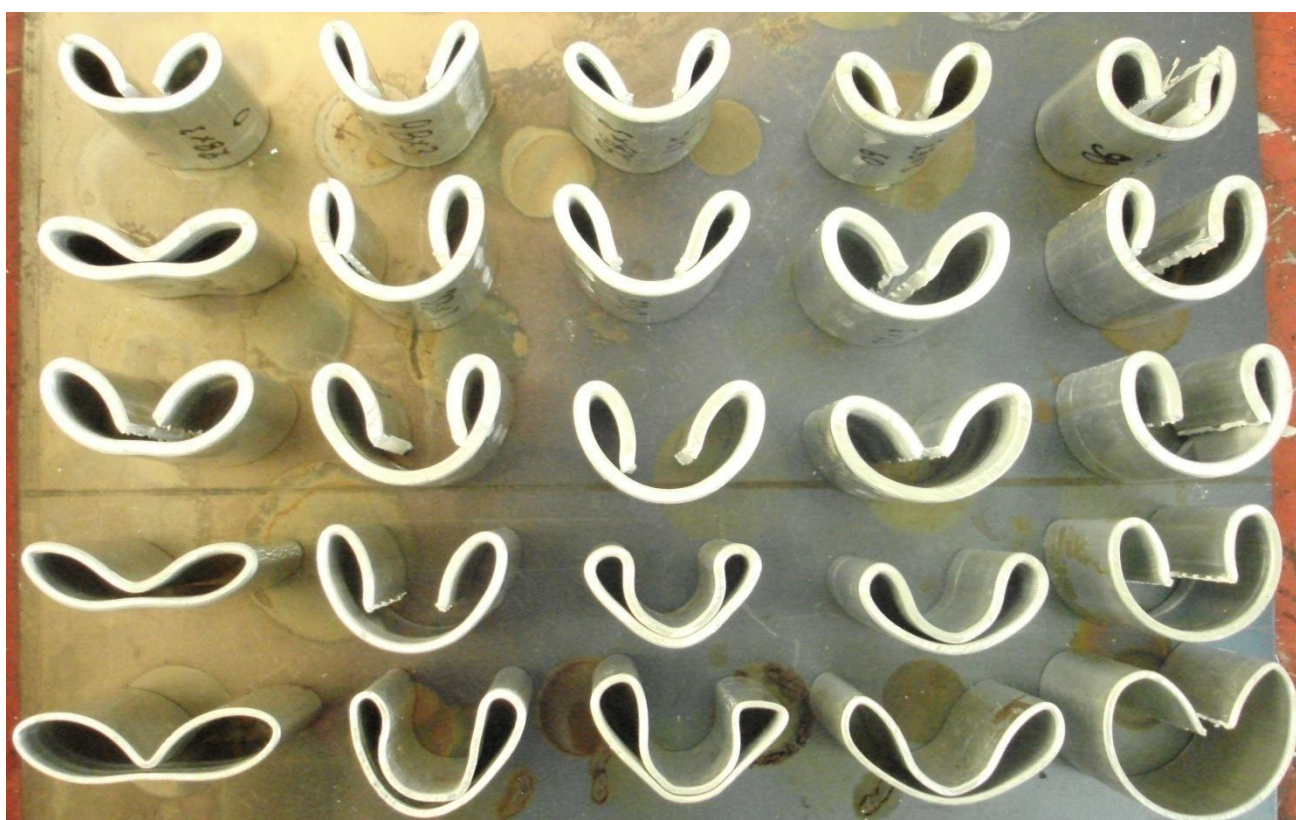
Εικόνα 3.3 Συγκριτικό Διάγραμμα Μέσου Φορτίου

Επίσης ένα συγκριτικό Διάγραμμα Στήλης Μέσου Φορτίου (Εικόνα 3.3) ως μια γενική πληροφορία του μέσου φορτίου θλίψης καθενός από τα δοκίμια για τις διάφορες περιοριστικές ημιγωνίες. Έχουμε μια τελική σύγκριση με βάση την πειραματική μας διαδικασία για το φορτίο του κάθε δοκίμιου σε σχέση με τα υπόλοιπα. Μονότονη τάση μείωσης του μέσου φορτίου καταπόνησης για τις ημιγωνίες περιορισμού 30°, 45° και 60° στα δοκίμια 1,2,3 (το ίδιο πάχος) δεδομένου ότι κάθε σημείο επαφής συνιστά ζώνη περιορισμού της παραμόρφωσης του κελύφους με κορύφωση την αύξηση του φορτίου στις 90ο με τις περισσότερες συνοριακές συνθήκες που αναλύθηκαν παραπάνω.





Εικόνα 3.4 Πλάγια όψη των δοκιμίων μετά το πέρας των πειραμάτων



Εικόνα 3.5 Άνοψη των δοκιμίων μετά το πέρας των πειραμάτων

### 3.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Λόγω της πολυπλοκότητας των σημερινών κατασκευών και της υψηλών απαιτήσεων ζήτησης επιβάλλεται η περαιτέρω διερεύνηση πιο σύνθετων και εξειδικευμένων κατασκευών προς μελέτη και πειραματισμό.

- Πειραματισμός με την γεωμετρία, το πάχος και τον αριθμό των δοκιμών σε σύνθετες διατάξεις με περιοριστικές συνθήκες.
- Γεωμετρία περιοριστικών συνθηκών
- Άκαμπτες (απαραμόρφωτα παρεμβλήματα) ή εύκαμπτες (χρήση αφρωδών υλικών) περιοριστικές συνθήκες
- Διεισδυτής διαφορετικής γεωμετρίας και διεύθυνσης
- Μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία και παραμετρική ανάλυση

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Ayad Arab Ghaidan, **"Specific Energy Absorbed Study Of Aluminum (2024-351T) Tubes Alloy Under Lateral Crush"**, Tikrit Journal of Eng. Sciences/Vol.18/No.3, 2011
2. A.A.A. Alghamdi, **"Collapsible impact energy absorbers: An Overview"**, Thin-Walled Structures 39,2001, p. 189–213
3. Sebastian Lipa, Maria Kotelko, **"Lateral Impact of Tubular Structure – Theoretical and Experimental Analysis"**, Part 1 – Investigation of Single Tube, Journal of theoretical And applied mechanics
4. Sebastian Lipa, Maria Kotelko, **"Numerical and experimental collapse analysis of tubular multi-member energy absorbers under lateral compression"**, Journal of theoretical and applied mechanics
5. A.G. Olabi, E. Morris, M.S.J. Hashmi, M.D. Gilchrist, **"Optimised design of nested oblong tube energy absorbers under lateral impact loading"**, International Journal of Impact Engineering 35, 2008, p. 10–26
6. Takashi YOKOYAMA, Akira SOEDA, **"Impact lateral compression of thin-walled circular Aluminum tubes"**, Aluminum Alloys, Vol. 3 2035
7. T. Yella Reddy, S. R. Reid, **"Lateral Compression of Tubes and Tube-Systems with Side Constraints"**, Int. Journal of Mech. Sci. 21, p. 187-199
8. Qi Chang, Yang Shu, Dong Fangliang, **"Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading"**, Thin-Walled Structures 59, 2012, p.103–19
9. N.K. Gupta, Atul Khullar, **"Lateral collapse of orthogonal non-orthogonal cross - layered arrays of square and rectangular tubes"**, Pergamon, 1993, p. 449-467
10. Dantel C. Brooker, **"A numerical study on the lateral indentation of continuously supported tubes"**, Journal of Constructional Steel Research 60, 2004, p.1177–1192
11. Jianhu Shen, Guoxing Lu, Dong Ruan, Cheng Chiang Seah, **"Lateral plastic collapse of sandwich tubes with metal foam core"**, International journal of mechanical sciences 91, 2015, p.99-109
12. R. Ramasamy, T.M.Y.S. Tuan Ya, **"Nonlinear finite element analysis of collapse and post-collapse behaviour in dented submarine pipelines"**, Applied Ocean Research 46, 2014, p.116-123

13. A.G. Olabi, Edmund Morris, M.S.J. Hashmi, **"Metallic tube type energy absorbers: A synopsis"**, Thin-walled Structures 45, 2007, p.706-726
14. M. Zeinoddini, M. Ezzati, G.A.R. Parke, **"Plastic buckling, wrinkling and collapse behaviour of dented X80 steel line pipes under axial compression"**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 38, 2015, p. 67-78
15. H. Kobayashi, M. Daimaruya, **"Dynamic and quasi-static lateral compression tests of ceramics tubes"**, Journal de Physique IV Colloque, 1994, 04 (C8), pp.C8-275-C8-280
16. Edmund Morris, A.G. Olabi, M.S.J. Hashmi, M.D Gilchrist, **"Experimental and numerical analysis of circular tube systems under quasi-static and dynamic loading"**
17. Witteman WJ., **"Improved vehicle crash worthiness design by control of the energy absorption for different collisions situation"**, Netherlands: Eindhoven University of Technology, 1999 PhD thesis
18. Gupta NK, Khullar A., **"Collapse load analysis of square and rectangular tubes subjected to transverse in plane loading"**, Thin Walled Struct. 21, 1995, p.345–58
19. F.Tarlochan , F.Samer, A.M.S.Hamouda, S.Ramesh, Karam Khalid, **"Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces"**, Thin-Walled Structures 71, 2013, p.7–17
20. Αθανασίου Γ. Μάμαλη, **" Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: Μεταλλικά τεχνικά Υλικά"**, Αθήνα 2007