



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δ. Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ  
ΜΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ

ΝΤΑΣΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, 2014

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στη σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Σκοπός της εργασίας είναι η πειραματική μελέτη του τρόπου κατάρρευσης των μεταλλικών κελυφών, τετραγωνικής, ορθογωνικής και κυκλικής διατομής, σε πλευρική φόρτιση με δεισοδυτή.

Ευχαριστώ ιδιαίτερος τον επιβλέποντα την εργασία καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου τη μελέτη και τη διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας. Επίσης ευχαριστώ τον Δρ. Μηχ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο (ΕΔΙΠ) για την βοήθειά του στην εκτέλεση των πειραμάτων, την καθοδήγησή του και την εποικοδομητική συνεργασία κατά την εκπόνησή της.

Ντάσιος Δημήτριος

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη μελέτη της κατάρρευσης σωλήνων τετραγωνικής, ορθογωνικής και κυκλικής διατομής με τοιχώματα λεπτού πάχους. Τα δοκίμια υπόκεινται σε πλευρική φόρτιση με κυλινδρικό δεισδυτή, ο οποίος εφαρμόζεται στο μέσον της έδρας του δοκιμίου. Ο χαρακτήρας της είναι πειραματικός και μελετά τον μηχανισμό απορρόφησης ενέργειας σε διαφορετικές διατομές. Η προετοιμασία των δοκιμίων και η πειραματική διαδικασία έλαβαν χώρα στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, (κτίριο Ξ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Το κείμενο χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη, το θεωρητικό και αυτό που έχει να κάνει με την πειραματική διαδικασία και διερεύνηση:

Στο πρώτο μέρος (**ΚΕΦ.1**) γίνεται μια γενική αναφορά στη θεωρία πλευρικής κατάρρευσης δοκιμίων ορθογωνικής και κυκλικής διατομής με λεπτά τοιχώματα. Περιγράφονται οι βασικοί όροι κατάρρευσης και η θεωρία των πλαστικών αρμών σε κυκλικές διατομές.

Στο δεύτερο μέρος (**ΚΕΦ.2**) περιγράφεται η πειραματική διαδικασία. Γίνεται παρουσίαση των δοκιμίων, της μορφής που αυτά έχουν, της διαδικασίας κατασκευής τους καθώς και του δεισδυτή. Επιπλέον περιγράφεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διαδικασία, καθώς και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες έγιναν τα πειράματα.

Στη συνέχεια (**ΚΕΦ.3**) γίνεται η παρουσίαση όλων των πειραματικών αποτελεσμάτων. Για κάθε δοκίμιο το οποίο συμπίεστηκε παρουσιάζονται οι φάσεις κατάρρευσης, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης, οι τελικές όψεις του δοκιμίου και γίνεται μια περιγραφή του μηχανισμού με τον οποίο κατέρρευσαν τα δοκίμια.

Ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα (**ΚΕΦ.4**). Γίνεται γενική σύγκριση αλλά και σύγκριση με βάση παραμέτρους που έχουν επιλεγεί.

Τέλος (**ΚΕΦ.5**) ακολουθούν κάποια συμπεράσματα, που προέκυψαν από τα πειράματα και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τη συγγραφή της εργασίας και την κατανόηση του αντικειμένου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Κεφάλαιο 1</b>	σελ .5
Γενικά περί πλευρικής κατάρρευσης κελυφών ως συστημάτων απορρόφησης ενέργειας	5
Θεωρία πλευρικής κατάρρευσης	7
Σωλήνες κυκλικής διατομής	7
Η θεωρία των πλαστικών αρμών σε κυκλικές διατομές	12
<b>Κεφάλαιο 2</b>	
Πειραματική διαδικασία	16
<b>Κεφάλαιο 3</b>	22
Παρουσίαση πειραμάτων	22
Αποτελέσματα πειραμάτων	23
Δοκίμιο 1.50x30x2-Per-Edge	23
Δοκίμιο 2.50x30x2-Per-Flat	27
Δοκίμιο 3.F50x2-Per	30
Δοκίμιο 4.F50x2-Par	33
Δοκίμιο 5.50x50x2-Per	35
Δοκίμιο 6.40x40x2-Per	39
Δοκίμιο 7.30x30x2-Per	42
Δοκίμιο 8.50x30x2-par-edge	45
Δοκίμιο 9.50x30x2-par-flat	49
Δοκίμιο 10.50x50x2-par	52
Δοκίμιο 11.40x40x2-par	55
Δοκίμιο 12.30x30x2-par	58
<b>Κεφάλαιο 4</b>	61
Έκθεση αποτελεσμάτων	61
Ενέργεια παραμόρφωσης/απορρόφησης	62
Μέγιστο φορτίο	65
Μέσο φορτίο	67

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	69
<b>Κεφάλαιο 5</b>	70
Συμπεράσματα	70
<b>Βιβλιογραφία</b>	71

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΙΑ

### ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΚΕΛΥΦΩΝ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα μεταλλικά κελύφη συχνά υφίστανται υψηλά φορτία που μπορούν να προκαλέσουν κατάρρευση/αστοχία. Η ικανότητα τους να απορροφούν ενέργεια με την πλαστική τους παραμόρφωση, αποτελεί σημείο ενδιαφέροντος σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές προστασίας έναντι πρόσκρουσης (crashing – worthiness) [1]. Οι σωλήνες συχνά χρησιμοποιούνται ως τεχνολογικές συσκευές απορρόφησης ενέργειας και πρέπει να μπορούν να σταματήσουν μια κινούμενη μάζα σε ένα ελεγχόμενο στάδιο παραμόρφωσης [4].

Στόχος μας είναι να εξετάσουμε τη συμπεριφορά κελυφών ορθογωνικής, τετραγωνικής και κυκλικής διατομής σε πλευρική φόρτιση και να παρατηρήσουμε τον τρόπο κατάρρευσής τους. Σε μία δοκιμή πλευρικής καταπόνησης, η ενέργεια η οποία απορροφάται από το δοκίμιο κατά τη διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσής του μπορεί να υπολογιστεί με εμβαδομέτρηση του χωρίου κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου – βράχυνσης δοκιμίου (μετατόπισης).

Αρχικά το κέλυφος παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά, μέχρι μία μέγιστη τιμή  $P_{max}$ . Το μέγεθος της μέγιστης αυτής τιμής εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Με την προσέγγιση της τιμής αυτής το φορτίο εμφανίζει απότομη πτώση.

Καθώς συνεχίζεται η παραμόρφωση, η μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης της κατασκευής και τις συνθήκες φόρτισης. Ο μηχανισμός κατάρρευσης των κελυφών, αναπτύσσεται με την εμφάνιση μη εκτατών λοβών, μέσω σταθερών και κινητών πλαστικών αρμών [12].

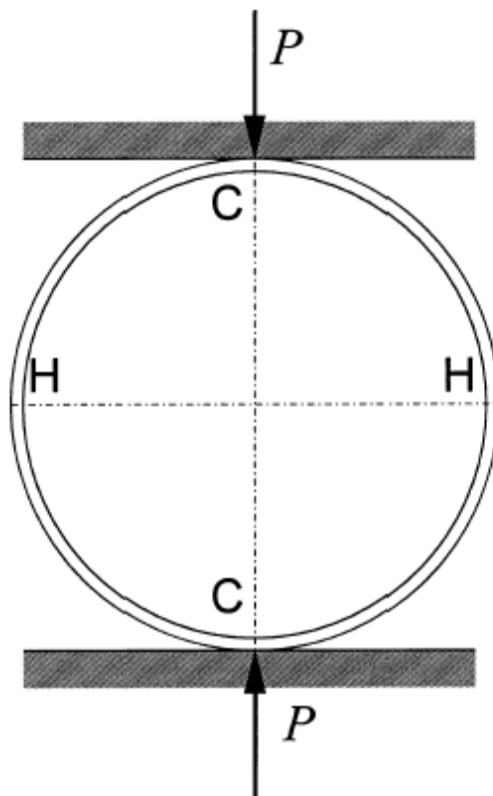
Το ληφθέν διάγραμμα πλευρικού φορτίου – μετατόπισης εμβόλου (βράχυνσης κελύφους) έχει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ ανώτατων και κατώτατων ορίων, όπου κάθε φορά το ανώτατο όριο αντιστοιχεί στην έναρξη μιας αναδίπλωσης. Εξαιτίας της συνεχούς πλαστικής παραμόρφωσης των λεπτότοιχων δοκιμίων, απορροφάται σημαντικό ποσό ενέργειας.

Η επιθυμητή συμπεριφορά των στοιχείων απορρόφησης ενέργειας είναι να μην αναπτύσσονται υψηλές δυνάμεις, και το μέσο φορτίο να μένει υψηλό. Με αυτό τον τρόπο οι δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα είναι οι ελάχιστες και η ενέργεια απορροφάται σταθερά και προοδευτικά δίχως να έχουμε μεγάλες αυξομειώσεις φορτίων.

## ΘΕΩΡΙΑ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

### Σωλήνες κυκλικής διατομής

Η συμπεριφορά ενός λεπτότοιχου σωλήνα κυκλικής διατομής που συμπιέζεται πλευρικά μεταξύ δύο άκαμπτων, επίπεδων, παράλληλων πλακών, στο αρχικό στάδιο απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1. Σχηματική απεικόνιση πλευρικής φόρτισης σωλήνα [11]

Τα πρώτα σημεία επαφής βρίσκονται στα άκρα της διαμέτρου CC και το τοίχωμα του σωλήνα συμπεριφέρεται σαν κυκλικό τόξο, που παραμορφώνεται ελαστικά. Όσο το φορτίο τείνει προς την κρίσιμη τιμή, ξεκινά η πλαστική ροή: το πρώτο ζεύγος πλαστικών αρμών δημιουργείται στα τμήματα CC και σε μικρό χρονικό διάστημα ένα δεύτερο ζεύγος εμφανίζεται στα άκρα της διαμέτρου HH. Από τώρα και στο εξής οι μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες και η απόσταση μεταξύ των πλακών μειώνεται προοδευτικά. Οι πλαστικές περιοχές επεκτείνονται στο τοίχωμα

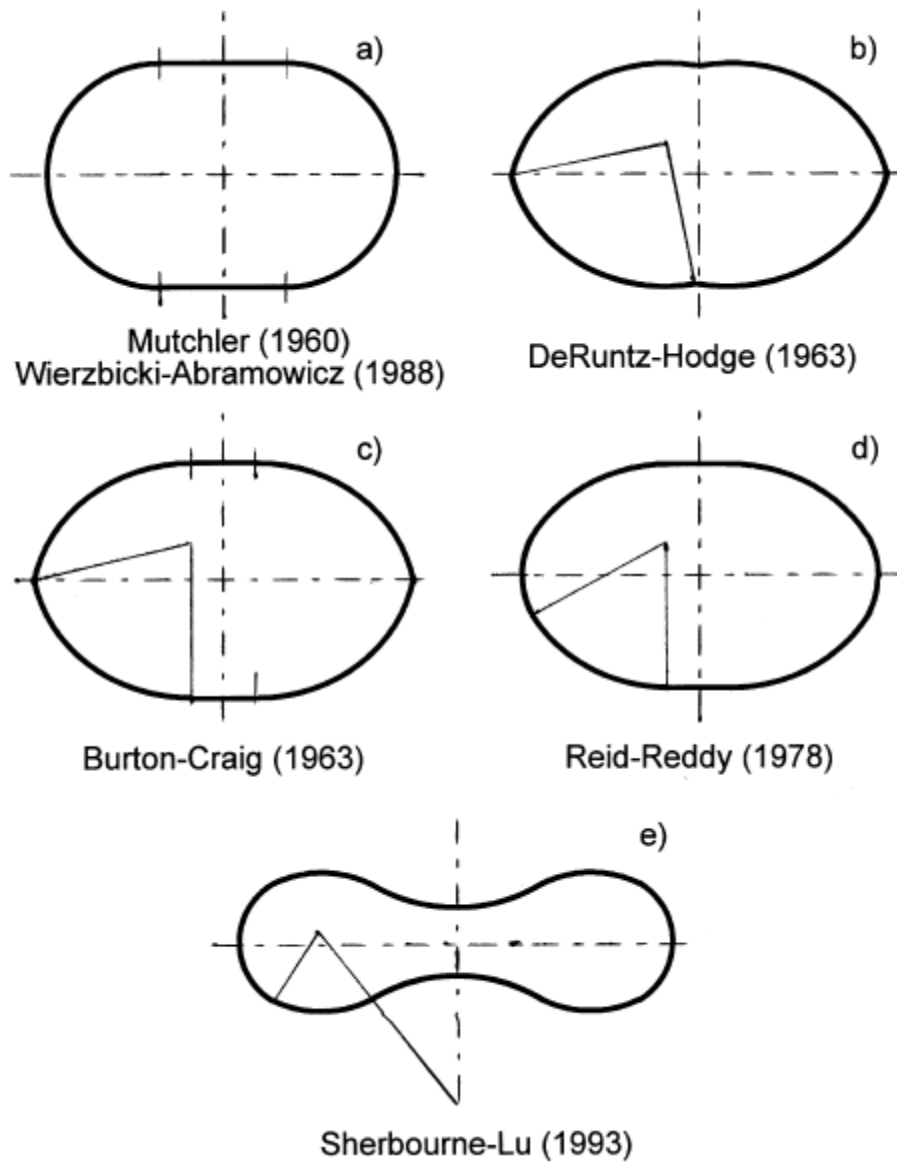


του σωλήνα και οι ζώνες επαφής αυτών των τοίχων γίνονται σχεδόν επίπεδες, ενώ προκαλείται κάμψη πέραν των σημείων ΗΗ.

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές θεωρητικές μελέτες σχετικά με την πλευρική κατάρρευση κυλινδρικών κελυφών και κάθε μια από αυτές αφορά σε διαφορετικό τύπο αναλυτικών μοντέλων. Οι πιο διαδεδομένες είναι των:

- a) Mutchler [3] και Wierzbicki, Abramowicz [7]
- b) DeRuntz και Hodge [4], [10]
- c) Burton και Craig [8], [10]
- d) Reid και Reddy [6]
- e) Sherbourne και Lu [9]

Τα μοντέλα παραμόρφωσης που διατυπώθηκαν στις μελέτες τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.2



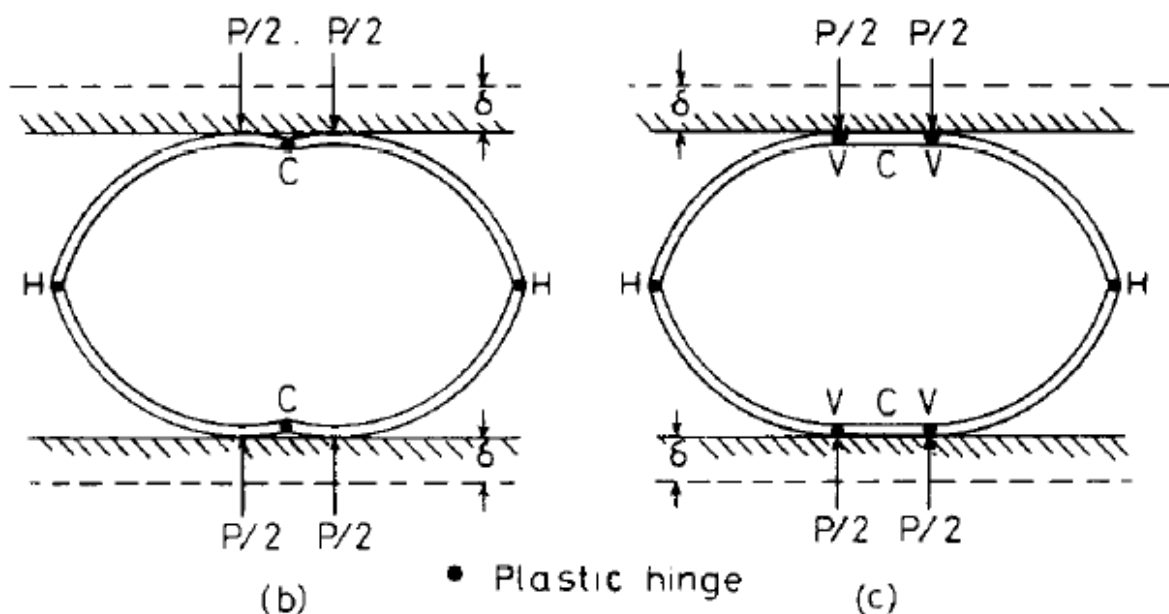
Σχήμα 1.2 Θεωρητικά μοντέλα πλευρικής συμπίεσης κυλινδρικών σωλήνων [11]

Από το Σχήμα 1.2 προκύπτει το συμπέρασμα ότι υπάρχουν δύο κοινά χαρακτηριστικά σε όλα τα μοντέλα. Πρώτον, η μέση γραμμή της διατομής θεωρείται καμπύλη δοκός που υφίσταται λυγισμό και έτσι προκύπτει ένα μονοδιάστατο πρόβλημα. Δεύτερον, η ελαστική συμπεριφορά είναι αμελητέα και λαμβάνεται υπόψη μόνο η πλαστική παραμόρφωση.

Τα μοντέλα παρουσιάζουν τις εξής διαφορές:

Υπάρχουν ασυνέχειες κατά την περιστροφή των πλαστικών αρμών σε δύο ή τέσσερα σημεία [μοντέλα (b) και (c)] ή παραμορφωμένα σχήματα με λείες όψεις [μοντέλα (a), (d) και (e)].

Στο Σχήμα 1.3 οι αρμοί των μοντέλων (b) και (c) είναι περισσότερο εμφανείς.



Σχήμα 1.3 (b) Μοντέλο DeRuntz και Hodge, (c) Μοντέλο Burton και Craig [9]

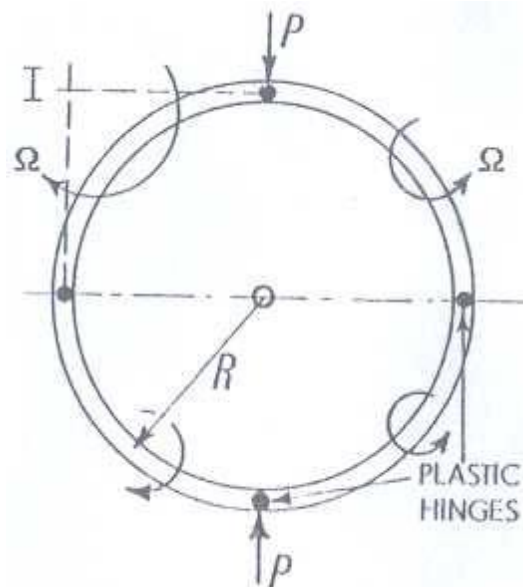
Στο μοντέλο (a) το παραμορφωμένο προφίλ σχηματίζεται από δύο κυκλικά τόξα, των οποίων η ακτίνα μειώνεται προοδευτικά κατά την συμπίεση. Αυτά τα τόξα ενώνονται με ευθεία τμήματα. Στο μοντέλο (e) εντοπίζεται παραμόρφωση σε όλα τα τεταρτημόρια και διαμορφώνονται τρία κυκλικά τόξα. Συνεπώς και στις δύο αυτές περιπτώσεις το υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση παντού.

Στα μοντέλα (a), (c) και (d) μέρη των τοιχωμάτων του σωλήνα γίνονται επίπεδα εξ' αιτίας της επαφής τους με τις πλάκες. Στο μοντέλο (b) ο σωλήνας παραμορφώνεται σαν μηχανισμός (τα τέσσερα κυκλικά τόξα διατηρούν την αρχική ακτίνα τους) και συμβαίνει πλαστική παραμόρφωση μόνο στους αρμούς. Επιπλέον στο μοντέλο (e) δεν υπάρχουν επίπεδα τμήματα.

Για τα μοντέλα (d) και (e) πρέπει να συνυπολογιστεί η εργοσκήρυση του υλικού, κάτι που δεν θα ληφθεί υπόψη στα υπόλοιπα.

## Η θεωρία των πλαστικών αρμών σε κυκλικές διατομές

Ένας κυκλικός δακτύλιος μέσης ακτίνας  $R$ , που δεν είναι πολύ λεπτός ούτε πολύ εύκαμπτος, όταν φορτίζεται από διαμετρικό φορτίο  $P$ , θα οδηγηθεί σε πλαστική κατάρρευση μόνο εφόσον έχουν σχηματισθεί τέσσερις αρμοί, οι οποίοι θα του επιτρέψουν να συμπεριφέρεται σαν μηχανισμός (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4 Σωλήνας κυκλικής διατομής πριν την πλαστική κατάρρευση [5]

Αναμένεται η εμφάνιση των πλαστικών αρμών στις θέσεις που εφαρμόζονται οι μέγιστες ελαστικές καμπτικές ροπές. Είναι φανερό ότι αν το κέντρο του δακτυλίου  $O$  παραμένει σταθερό, τότε κατά την κατάρρευση τα τέσσερα άκαμπτα τμήματα που βρίσκονται μεταξύ των αρμών, περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$  γύρω από το στιγμιαίο κέντρο  $I$  και οι δυνάμεις  $P$  κινούνται προς το κέντρο του δακτυλίου με ταχύτητα  $R \cdot \Omega$ . Άρα το ποσοστό του έργου κατά την είσοδο είναι  $2P \cdot R \cdot \Omega$  και το ποσοστό του πλαστικού έργου απωλειών είναι  $8M_p \cdot \Omega$ . Έτσι έχουμε [5]:

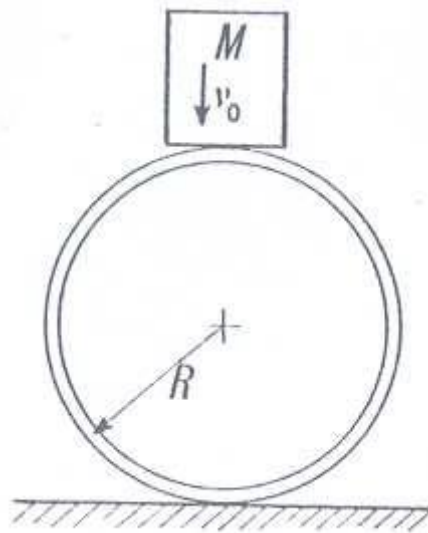
$$2P \cdot R \cdot \Omega = 8M_p \Omega$$

$$P = 4M_p/R$$

Στην περίπτωση που μία μεγάλη μάζα  $M$  κινούμενη με χαμηλή ταχύτητα νο συγκρουσθεί με κυκλικό δακτύλιο μικρής μάζας διαμέτρου  $D$ , στηριζόμενου σε επίπεδη πλάκα, η επίδραση της αδράνειας στο δακτύλιο μπορεί να παραληφθεί. Τότε όλη η κινητική ενέργεια της μάζας χρησιμοποιείται για την πλαστική παραμόρφωση του κυλίνδρου. Η διαμετρική συμπίεση  $\Delta D$ , δεδομένου ότι η ποσότητα  $\Delta D/D$  δίνεται από [5]:

$$4M_P \Delta D / (D/2) = 1/2 M V_0^2$$

$$\Delta D = M V_0^2 D / 16M_P$$



Σχήμα 1.5 Πρόσκρουση μάζας  $M$  με δακτύλιο διαμέτρου  $D$ . [5]

Η επιβράδυνση της μάζας  $M$  είναι  $P/M$ , ο χρόνος πλαστικής πρόσκρουσης είναι  $M v_0 / P = M v_0 R / 4M_P$  και η αυξομείωση της πίεσης που ασκείται στον δακτύλιο θα γίνει της τάξεως δευτέρου βαθμού.

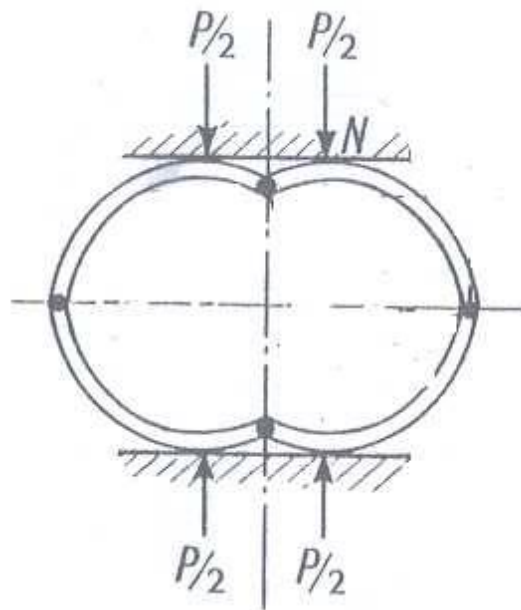
Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έχουν δείξει ότι προκειμένου να μην εμποδιστεί η κυματική μετάδοση της τάσης και άλλων μορφών απώλειας ενέργειας, είναι θεμιτό να υποθέσουμε ότι το 85% της διαθέσιμης κινητικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την παραγωγή πλαστικού έργου.

Όταν η οιονεί στατική κρούση ενός δακτυλίου, που συμβαίνει μεταξύ άκαμπτων, παράλληλων επιφανειών είναι συνεχόμενη, τότε προφανώς το κρουστικό

φορτίο αυξάνεται με τη μείωση της κάθετης διαμέτρου του δακτυλίου. Μία ένδειξη της δύναμης σε σχέση με την αναμενόμενη κατακόρυφη μετατόπιση φαίνεται στο Σχήμα 1.6. Οι αρχικοί τέσσερις πλαστικοί αρμοί δημιουργούνται μεν, αλλά το σημείο ή τα σημεία εφαρμογής του φορτίου που συμπιέζει τον δακτύλιο διαιρούν το φορτίο σε  $P/2$ . Κάθε τεταρτημόριο του δακτυλίου υποτίθεται ότι περιστρέφεται ενώ εξακολουθεί να είναι άκαμπτο.

Δουλεύοντας όπως παραπάνω, για το τεταρτημόριο προκύπτει ότι [5]:

$$P \cdot N \cdot I \cdot \Omega = 2M_p \cdot \Omega \quad \text{ή} \quad P = 4 M_p / N I$$

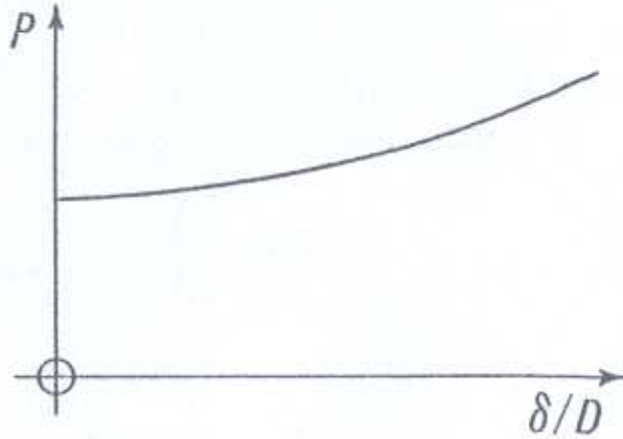


Σχήμα 1.6 Κατάρρευση κυκλικού δακτυλίου που συμπιέζεται από άκαμπτες, παράλληλες πλάκες [2],[5].

Συμβολίζουμε με  $\delta$  τη συνολική μετατόπιση των τοιχωμάτων του σωλήνα:

$$NI^2 = (D^2 - \delta^2) / 4, \text{ οπότε [5]:}$$

$$P/(4M_p/R) = 1 / [1 - (\delta/D)^2]^{1/2}$$



Σχήμα 1.7 [5]

Η καμπύλη που αντιστοιχεί στη εξίσωση (20), φαίνεται στο Σχήμα 1.7 και ισχύει για  $0 \leq \beta \leq \pi/4$ . Αν λάβουμε υπόψη την δύναμη της τριβής  $\mu P/2$  οι εξισώσεις (19) και (20) λαμβάνουν τις ακόλουθες μορφές [5]:  $(P \cdot NI \cdot \Omega / 2) + (\mu P \cdot MI \cdot \Omega / 2) = 2M_p$ . Ο Και  $(P / 4M_p/R) = 1 / [1 - (\delta/D)^2]^{1/2} + \mu(1 - \cos\beta)$

Γενικά η επίδραση της τριβής θα είναι μικρή για κάθε πραγματικό υλικό, όμως η εργοσκήρυνση στους αρμούς θα είναι μεγαλύτερης σημασίας. Για την παραπάνω δοθείσα λύση έχουμε υποθέσει ότι θα σχηματιστούν δύο καμπύλες στο δακτύλιο, η μία στην κορυφή του και η άλλη στο κάτω μέρος κοντά στις πλάκες που τον συμπιέζουν.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας θα γίνει περιγραφή των δοκιμών, της μηχανής (πειραματική διάταξη) στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα, της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε και των συνθηκών κάτω από τις οποίες έγιναν.

Τα δοκίμια ήταν αλουμινένια και για την κατασκευή τους χρειάστηκε να κοπούν λεπτότοιχοι σωλήνες κυκλικής, τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής.

Χρησιμοποιήθηκαν 12 δοκίμια, 6 με τετραγωνική, 4 με ορθογωνική και 2 με κυκλική διατομή, με διαφορετικό ύψος και πλάτος. Με βάση τις διαστάσεις της διατομής των σωλήνων επιλέχθηκε μήκος δοκιμών  $L=100$  mm και πάχος τοιχώματος 2 mm για όλα τα δοκίμια. Τα ονόματα των δοκιμών καθώς και οι διαστάσεις τους παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Αριθμός Δοκιμίου	Ταυτότητα Δοκιμίου	Διατομή	Προσανατολισμός Διεισδυτή	Διεύθυνση φόρτισης	Εξωτερικό Ύψος (mm)	Εξωτερικό Πλάτος (mm)	Εξωτερική Διάμετρος (mm)	Μήκος Διείσδυσης δt(mm)
1	50x30x2-per-edge	Ορθ/κή	per	edge (κατά μήκος της μεγάλης πλευράς: 50mm)	50	30		40
2	50x30x2-per-flat	Ορθ/κή	per	flat (κατά μήκος της μικρής πλευράς: 30mm)	30	50		20
3	50x2-per	Κυκλική	per				50	40
4	50x2-par	Κυκλική	par				50	40
5	50x50x2-per	Τετρ/κή	per		50	50		40
6	40x40x2-per	Τετρ/κή	per		40	40		30
7	30x30x2-per	Τετρ/κή	per		30	30		20
8	50x30x2-par-edge	Ορθ/κή	par		50	30		40
9	50x30x2-par-flat	Ορθ/κή	par		30	50		20
10	50x50x2-par	Τετρ/κή	par		50	50		40
11	40x40x2-par	Τετρ/κή	par		40	40		30
12	30x30x2-par	Τετρ/κή	par		30	30		20

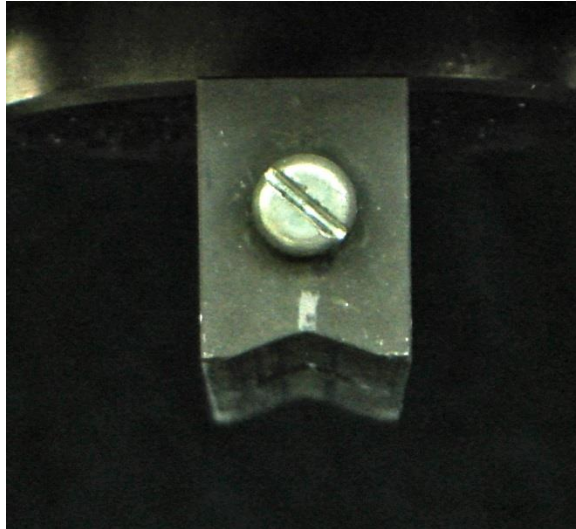
Σχήμα 2.1: Ονοματολογία Δοκιμίων

Η πλευρική φόρτιση των λεπτότοιχων σωλήνων πραγματοποιήθηκε στη μηχανική πρέσα (κοχλία) δοκιμών INSTRON 4482 ονομαστικού φορτίου 100 kN (10tn) του εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.



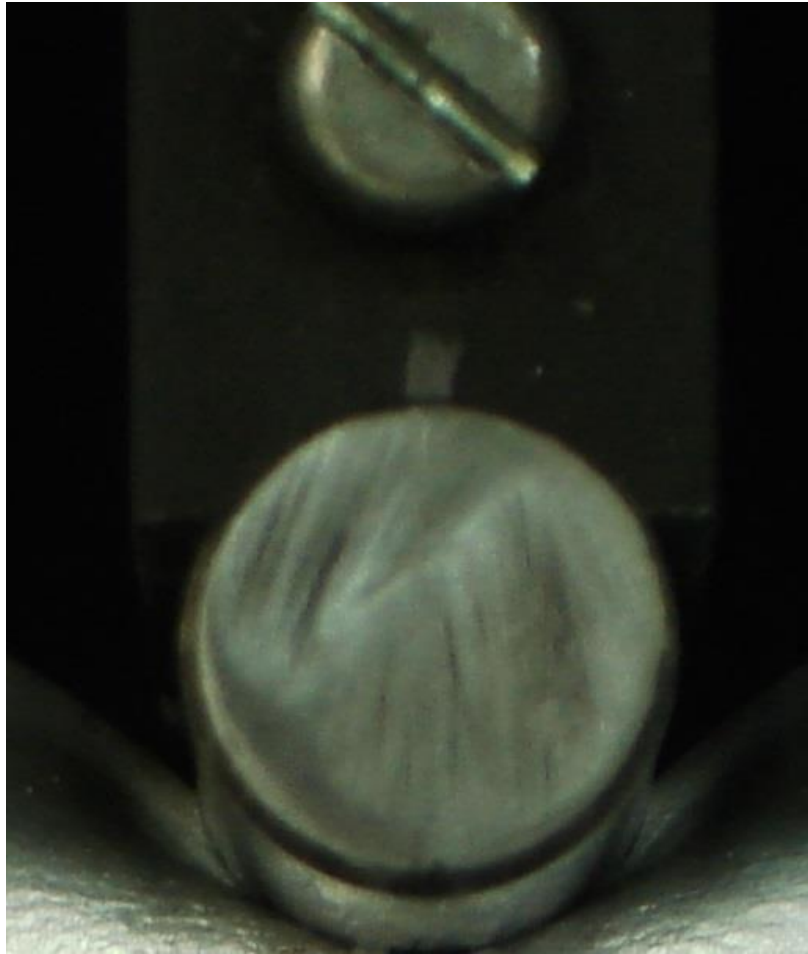
Σχήμα 2.2: Κυρίως σώμα πρέσας INSTRON

Στην πρέσσα έγινε ειδική εφαρμογή σφήνας στήριξης του διεισδυτή, πλάτους 16mm.



Σχήμα 2.3: Εργαλείο θλίψης προσαρμοσμένο στη μηχανική πρέσα INSTRON

Όλα τα πειράματα έγιναν με τον ίδιο κυλινδρικό διεισδυτή, μήκους  $L=100$  mm και διαμέτρου  $D=13$  mm.



Σχήμα 2.4: Κυλινδρικός δεισδυτής

Ανάλογα με την διεύθυνση του δεισδυτή ως προς τον άξονα του δοκιμίου, χρησιμοποιούμε τις ορολογίες *per* (perpendicular) κάθετα, και *par* (parallel) παράλληλα. Ακόμα ανάλογα με την διεύθυνση φόρτισης *flat* (κατά μήκος της μικρής πλευράς) και *edge* (κατά μήκος της μεγάλης πλευράς).

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε με την απόλυτη ευθυγράμμιση των δοκιμίων με τον δεισδυτή, έτσι ώστε σε κάθε περίπτωση το σημείο επαφής των δύο να βρίσκεται στο μέσον του μήκους του δοκιμίου.

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων η ταχύτητα συμπίεσης του εμβόλου ήταν ίση με 10mm/min. Τα πειράματα διεξήχθησαν υπό στατικές συνθήκες.

Μετρήθηκε και καταγράφηκε η ελάττωση του μεγέθους των δοκιμίων καθώς και η διακύμανση του φορτίου, κάνοντας χρήση του συνεργαζόμενου λογισμικού

καταγραφής και ανάλυσης δεδομένων, σε συνδεδεμένο Η/Υ. Τα δοκίμια επιλέχτηκε να συμπιεστούν ανάλογα με το αρχικό τους ύψος, (50mm,40mm, 30mm) ώστε το τελικό τους ύψος να καταλήξει 10mm.

Καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας των πειραμάτων με μηχανή δοκιμών λαμβάνονταν φωτογραφίες, προκειμένου να καταστεί δυνατή η απεικόνιση και η καλύτερη περιγραφή της καταπόνησης των δοκιμίων σε διαφορετικές φάσεις.

Κάθε πείραμα διαρκούσε περίπου **3 min**. Με την ολοκλήρωση ενός πειράματος, απομακρυνόταν το δοκίμιο και γινόταν αποθήκευση της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης που παρείχε η μηχανή, αλλά και των λοιπών αποτελεσμάτων που προέκυπταν.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν αναλυτικά με φωτογραφίες κατά τη διάρκεια των συμπίεσεων καθώς και χρήσιμα αποτελέσματα όπως το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης η ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{abs}$ , το μέγιστο  $P_{max}$  και μέσο φορτίο  $P_m$  και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE.

Όπου, το μέγιστο φορτίο  $P_{max}$  υπολογίζεται εύκολα από την μέγιστη τιμή όλων των μετρήσεων που λήφθηκαν μετά το πέρας των πειραμάτων:

$$P_{max} \text{ (kN)} = \text{Max}(P_i \text{ (kN)})$$

Το μέσο φορτίο  $P_m$  υπολογίζεται από το άθροισμα όλων των φορτίων  $P_i$  που λήφθηκαν από το πείραμα, αν το διαιρέσουμε με το πλήθος των μετρήσεων  $n$ . Στην περίπτωση μας μετά από κάθε δοκιμή είχαμε τη δυνατότητα να παίρνουμε σαν μετρήσεις ανά χρονικό διάστημα 0.05 sec. Έτσι η ζητούμενη εξίσωση είναι:

$$P_m \text{ (kN)} = \sum P_i \text{ (kN)} / n$$

Η συνολική ενέργεια που απορροφάται από την αξονική κατάρρευση των δοκιμών υπολογίζεται στο πέρας της δοκιμής από το φορτίο, σύμφωνα με τον τύπο:

$$E_{absorbed} = \int P \cdot d\delta \text{ όπου:}$$

$P$ : το φορτίο συμπίεσης του εμβόλου

$\delta$ : η κατακόρυφη μετατόπιση του εμβόλου

Στην περίπτωση μας η ενέργεια παραμόρφωσης υπολογίζεται ως το γινόμενο του μέσου φορτίου  $P_m$  με την τελική μετατόπιση του εμβόλου  $\delta_t$  από την παρακάτω εξίσωση:

$$E_{absorbed} \text{ (kJ)} = P_m \text{ (kN)} \cdot \delta_t \text{ (mm)} / 1000$$

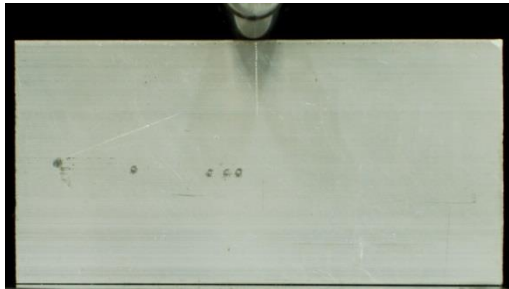
Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE) υπολογίζεται ως ο λόγος του μέσου  $P_m$  προς το μέγιστο φορτίο  $P_{max}$  σύμφωνα με την σχέση:

$$\text{CFE (\%)} = P_m \text{ (kN)} / P_{max} \text{ (kN)}$$

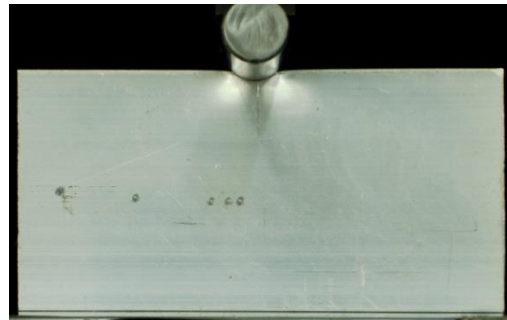
## Αποτελέσματα Πειραμάτων

### ΔΟΚΙΜΙΟ 1.50x30x2-Per-Edge

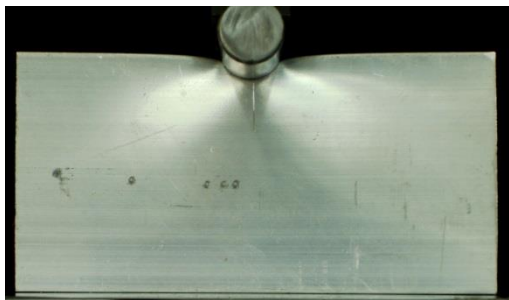
#### Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



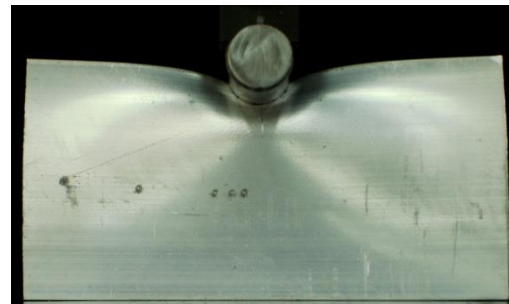
[1] disp=0 mm



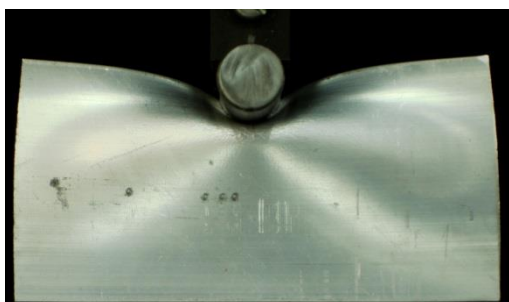
[2] disp=2.6 mm



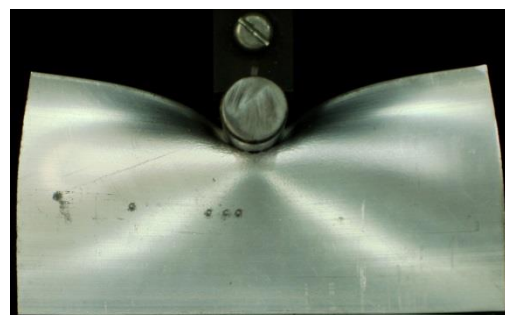
[3] disp=6.0 mm



[4] disp=9.9 mm

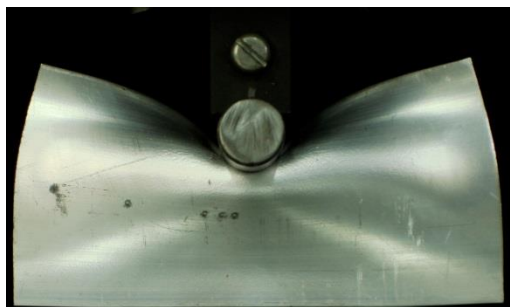


[5] disp=13.6 mm

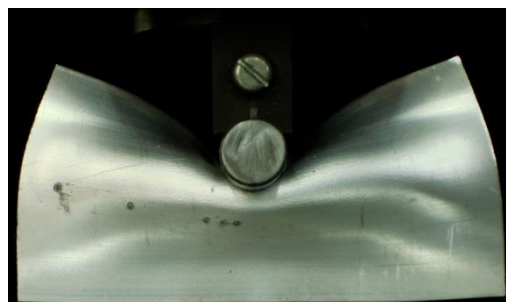


[6] disp=17.5 mm

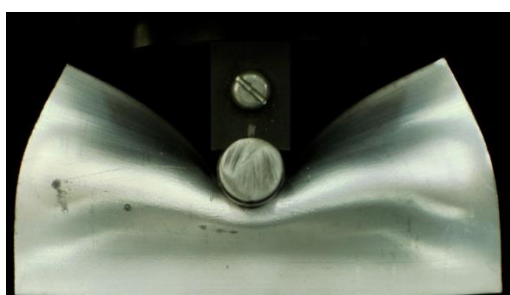




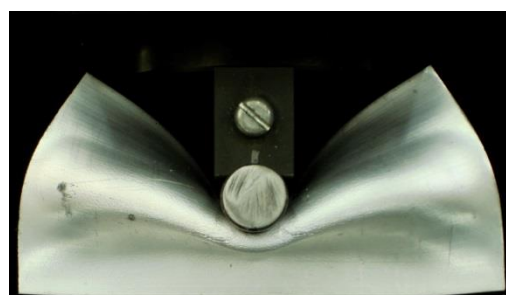
[7] disp=23.3 mm



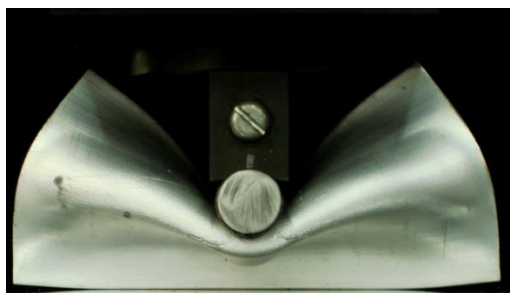
[8] disp=27.9 mm



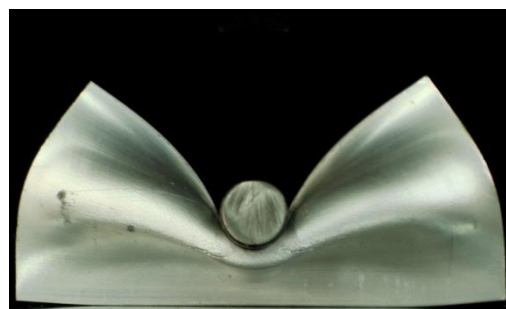
[9] disp=31.9 mm



[10] disp=37.2 mm

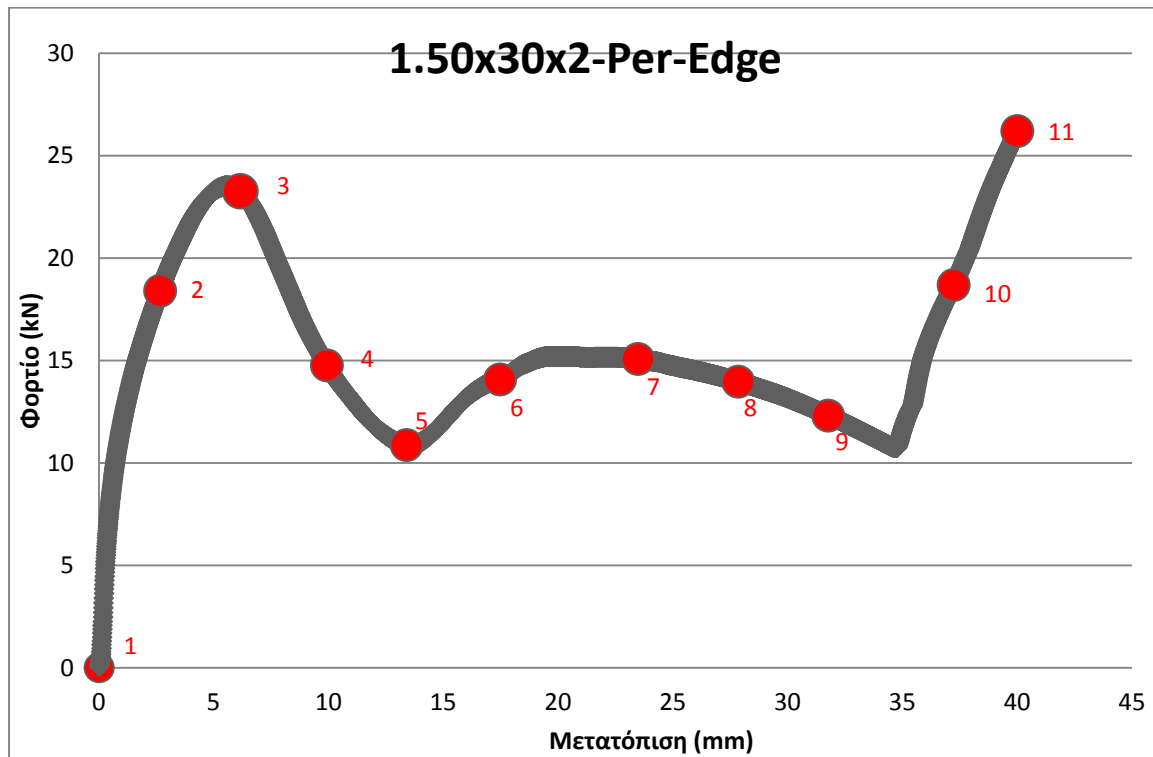


[11] disp=40.0 mm



[12] Χώρις έμβολο

### Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



1.50x30x2-Per-Edge	
Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_{max}$ :	26.3 (kN)
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_m$ :	15.3 (kN)
Ολική απορροφούμενη ενέργεια $E_{abs}$ :	615 (J)

### Σχολιασμός-Παρατηρήσεις:

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς, μέχρι περίπου το στιγμιότυπο [3] (μετατόπιση =5.0 mm, βλ. διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης ), κατά την έναρξη της διείσδυσης. Στο διάστημα αυτό αναπτύσσεται η επαφή μεταξύ διεισδυτή και κελύφους, ενώ η παραμόρφωση παραμένει τοπική (στην γειτονιά της επαφής:denting).

Στη συνέχεια η παραμόρφωση/κατάρρευση διαδίδεται σε όλη τη διατομή (global buckling) και εξελίσσεται εμπλέκοντας ευρύτερα τμήματα του κελύφους εκατέρωθεν του διεισδυτή, καθώς ο τελευταίος βυθίζεται περαιτέρω στο κέλυφος.

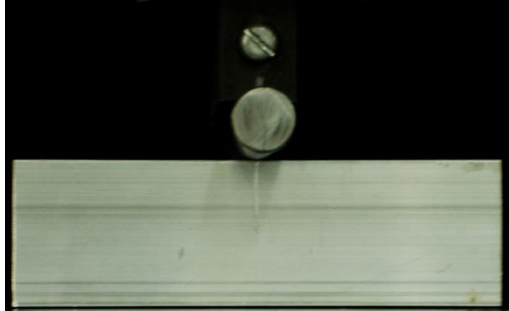
Μετά από διείσδυση 35 mm ο διαθέσιμος χώρος για περαιτέρω κατάρρευση του κελύφους έχει περιοριστεί στο ελάχιστο, οπότε η διαδικασία συνεχίζεται ουσιαστικά με τη μορφή συμπίεσης συμπαγούς υλικού (bulk deformation). Αυτό αποτυπώνεται με τη ραγδαία αύξηση του φορτίου στο συγκεκριμένο διάστημα διείσδυσης (35-40 mm, βλ. διάγραμμα).

Ενδεικτικές της υψηλής παραμόρφωσης στο στάδιο αυτό είναι οι διαμήκεις εξωτερικές ρωγμές που δημιουργούνται στο κέλυφος (στιγμιότυπα 10-11).

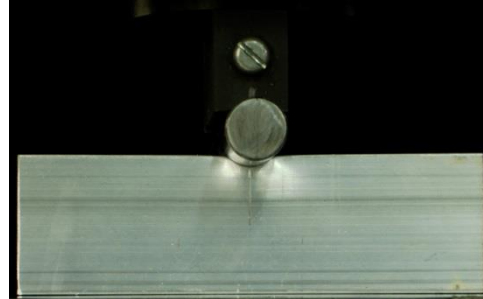
Ελαφρύ σφήνωμα του διεισδυτή παρατηρείται στο τέλος της καταπόνησης.

**ΔΟΚΙΜΙΟ 2.50x30x2-Per-Flat**

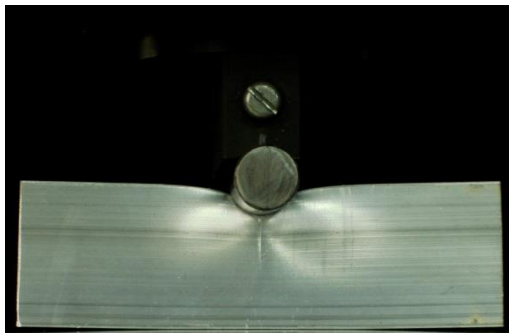
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



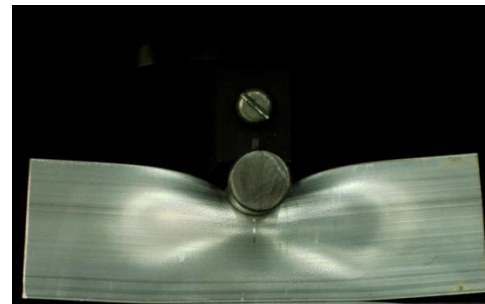
**[1] disp=0 mm**



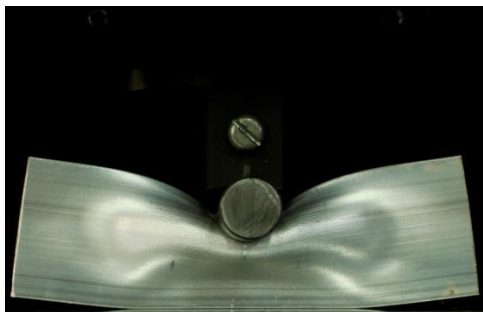
**[2] disp=2.9 mm**



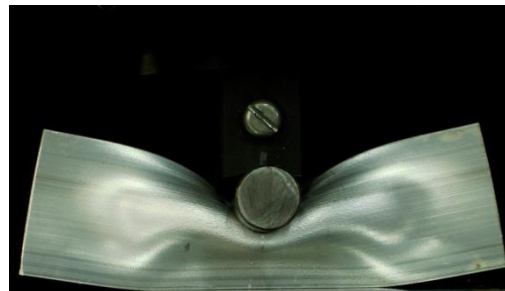
**[3] disp=7.0 mm**



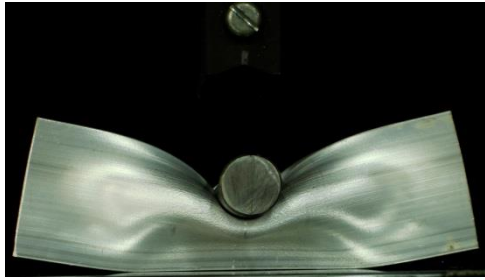
**[4] disp=11.9 mm**



**[5] disp=16.3 mm**

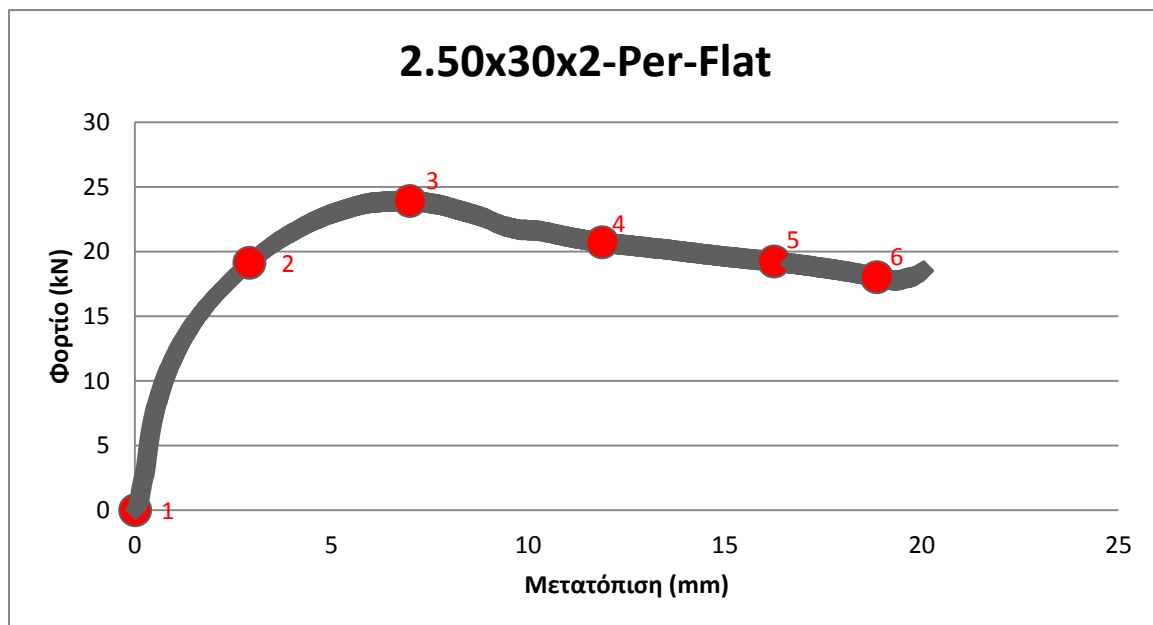


**[6] disp=18.9 mm**



[7] disp=20 mm (Χώρις έμβολο)

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



2.50x30x2-Per-Flat	
Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_{max}$ :	23.9 (kN)
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_m$ :	19.6 (kN)
Ολική απορροφούμενη ενέργεια $E_{abs}$ :	393 (J)

### Σχολιασμός-Παρατηρήσεις:

Στο συγκεκριμένο πείραμα το φορτίο αυξάνει συνεχώς μέχρι περίπου το στιγμιότυπο [3] (μετατόπιση =7.0 mm, βλ. διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης ), κατά την έναρξη της διείσδυσης. Στο διάστημα αυτό αναπτύσσεται η επαφή μεταξύ διεισδυτή και κελύφους, ενώ η παραμόρφωση παραμένει στην γειτονιά της επαφής (denting).

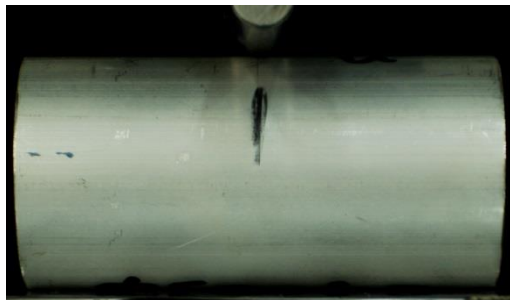
Στη συνέχεια η παραμόρφωση/κατάρρευση διαδίδεται σε όλη τη διατομή (global buckling) και εξελίσσεται εμπλέκοντας ευρύτερα τμήματα του κελύφους εκατέρωθεν του διεισδυτή καθώς ο τελευταίος βυθίζεται περαιτέρω στο κέλυφος.

Λόγω μικρότερου βάθους διείσδυσης δεν έχουμε άνοδο της καμπύλης, δηλαδή το κέλυφος δεν πρόλαβε να περιέλθει στην κατάσταση συμπίεσης συμπαγούς υλικού (στιγμιότυπο [6] ).

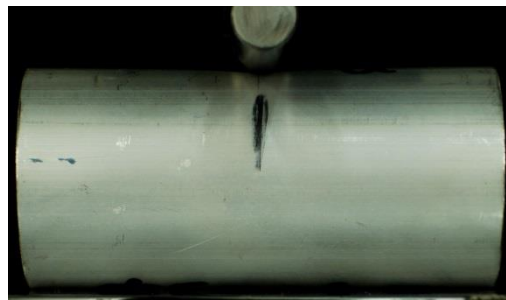
Δεν παρατηρείται σφήνωμα του διεισδυτή στο τέλος της καταπόνησης.

**ΔΟΚΙΜΙΟ 3.F50x2-Per**

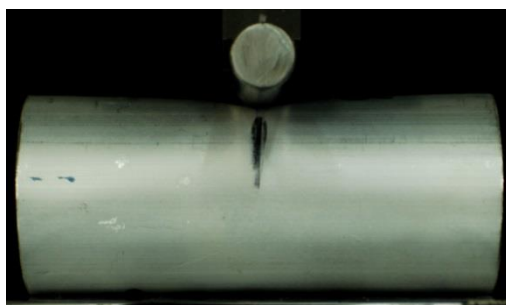
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



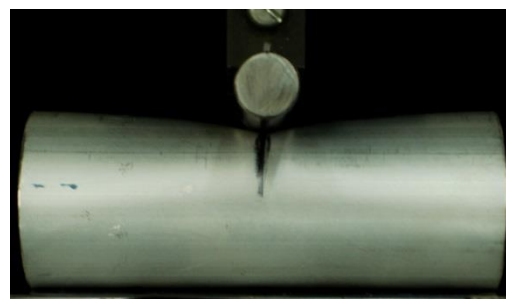
**[1] disp=0 mm**



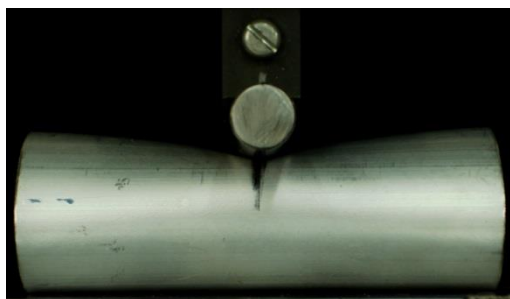
**[2] disp=3.7 mm**



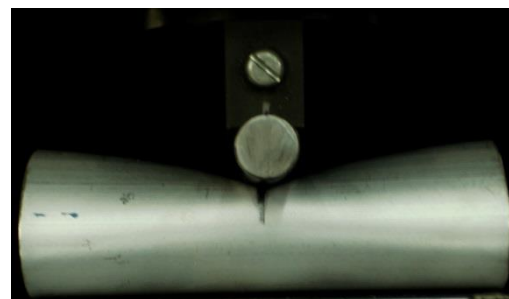
**[3] disp=9.9 mm**



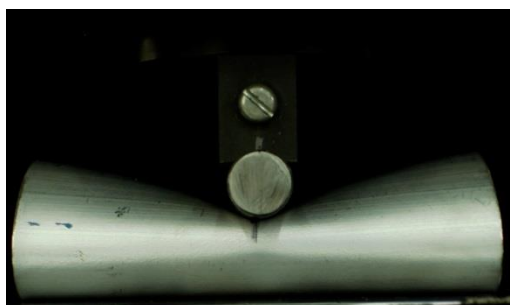
**[4] disp=16.4 mm**



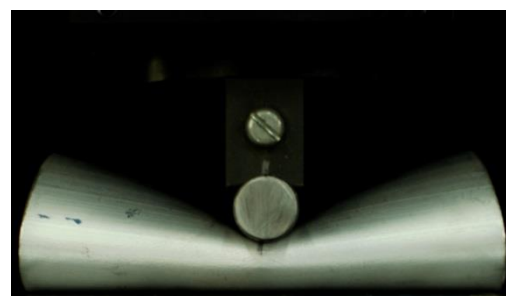
**[5] disp=22.1 mm**



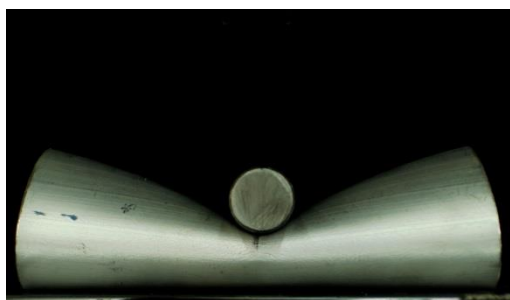
**[6] disp=27.4 mm**



**[7] disp=34.1 mm**

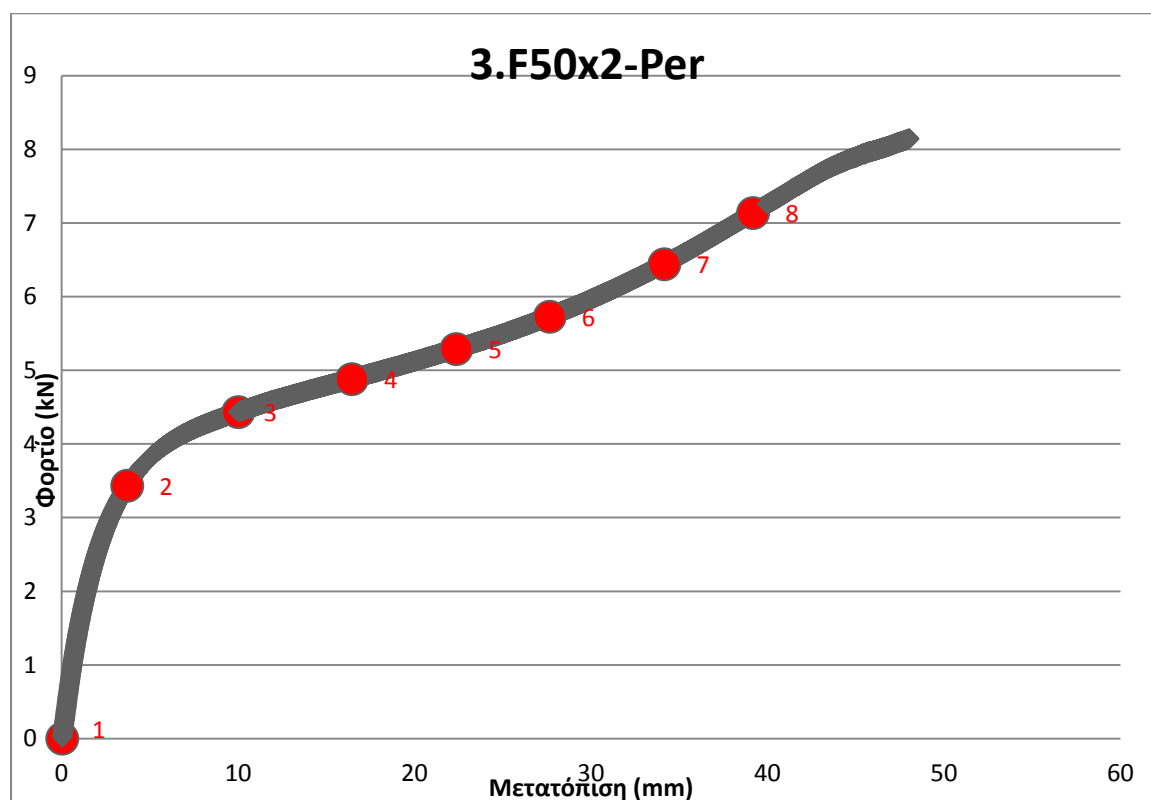


**[8] disp=40 mm**



[9] (Χώρις έμβολο)

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



3.F50x2-Per	
Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_{max}$ :	8.1 (kN)
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_m$ :	5.5 (kN)
Ολική απορροφούμενη ενέργεια $E_{abs}$ :	220 (J)



### Σχολιασμός-Παρατηρήσεις:

Το φορτίο αυξάνεται συνεχώς καθώς όλο και μεγαλύτερο τμήμα της καταπονούμενης διατομής εισέρχεται στη διαδικασία παραμόρφωσης.

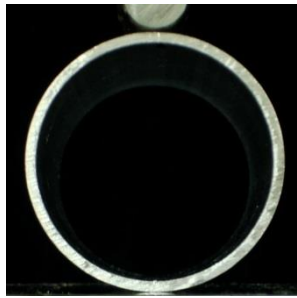
Στο διάστημα 0-10 mm αναπτύσσεται η επαφή μεταξύ διεισδυτή και κελύφους, ενώ η παραμόρφωση παραμένει στην γειτονιά της επαφής (denting).

Στη συνέχεια η παραμόρφωση/κατάρρευση διαδίδεται σε όλη τη διατομή (global buckling) και εξελίσσεται εμπλέκοντας ευρύτερα τμήματα του κελύφους εκατέρωθεν του διεισδυτή καθώς ο τελευταίος βυθίζεται περαιτέρω στο κέλυφος (16.4 mm ).

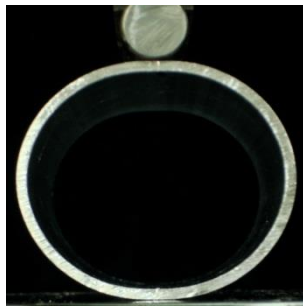
Η κατάρρευση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 40 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας χωρίς να παρατηρηθεί σφήνωμα του διεισδυτή στο τέλος της καταπόνησης.

**ΔΟΚΙΜΙΟ 4.F50x2-Par**

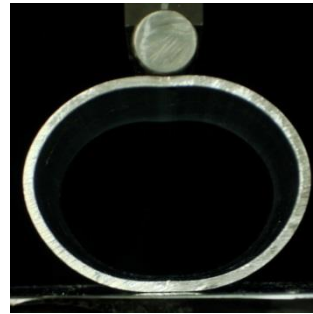
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



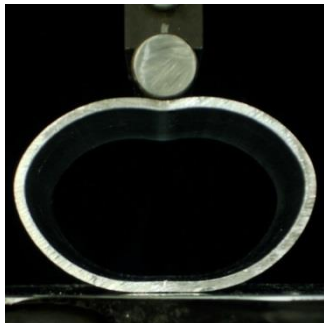
[1] disp=0 mm



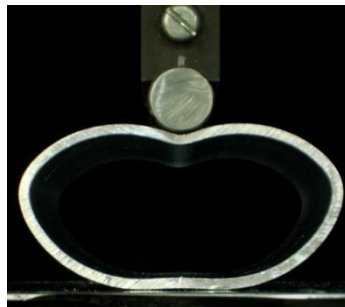
[2] disp=4.4 mm



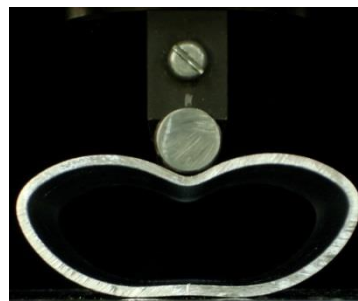
[3] disp=7.9 mm



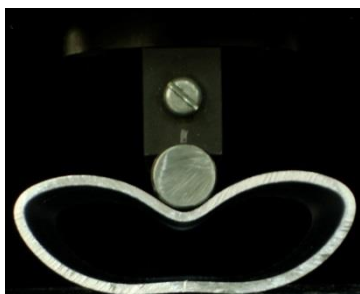
[4] disp=12.5 mm



[5] disp=19.7 mm



[6] disp=26.5 mm

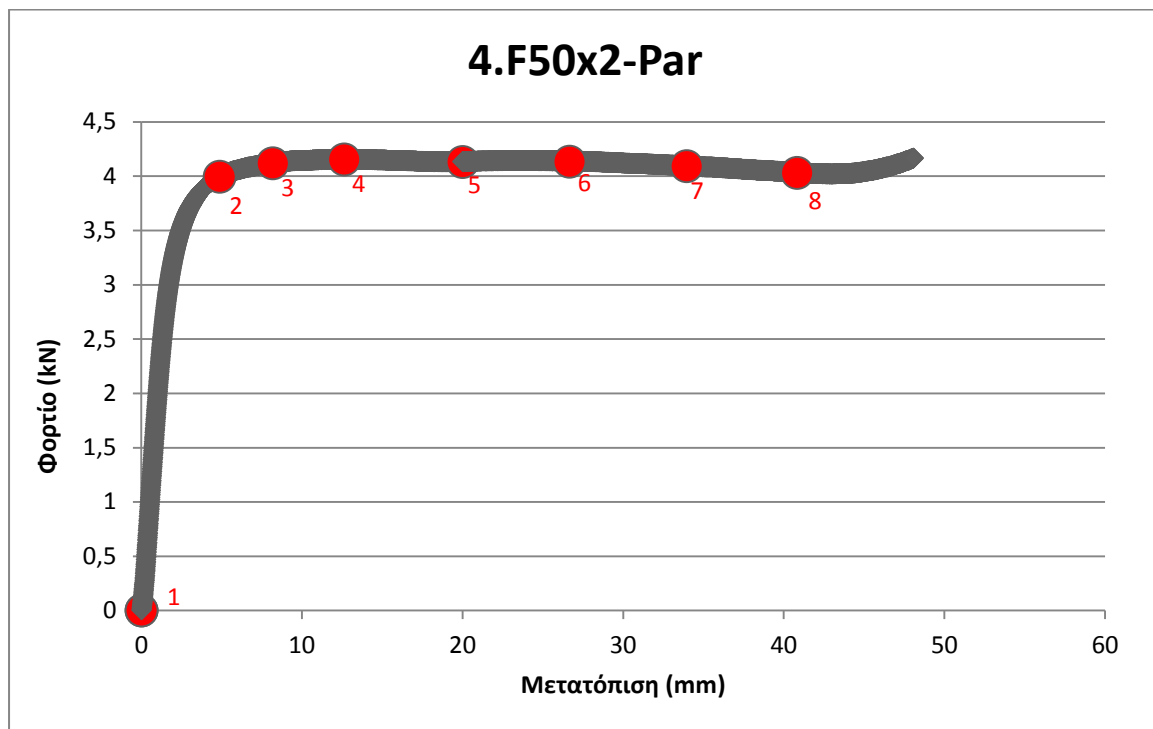


[7] disp=33.5 mm



[8] disp=40 mm (Χώρις έμβολο)

### Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



4.F50x2-Par	
Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_{max}$ :	4.1 (kN)
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_m$ :	3.9 (kN)
Ολική απορροφούμενη ενέργεια $E_{abs}$ :	156 (J)

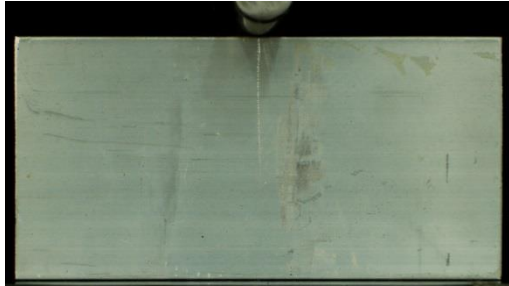
### Σχολιασμός-Παρατηρήσεις:

Στο συγκεκριμένο πείραμα έχουμε ομοιόμορφη συνεχόμενη κατάρρευση όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα και αποτυπώνεται ανάγλυφα στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Παρατηρείται ταυτόχρονος σχηματισμός λοβών, κατά το στιγμιότυπο [4] καθώς ο διεισδύτης βυθίζεται περαιτέρω στο κέλυφος.

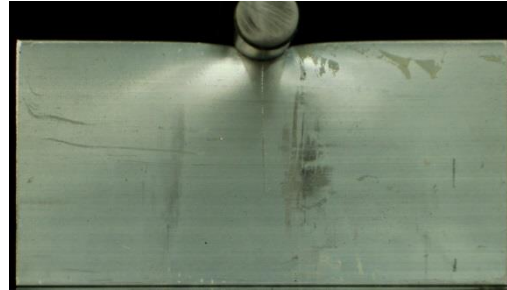
Η κατάρρευση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 40 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας χωρίς να παρατηρηθεί σφήνωμα του διεισδυτή στο τέλος της καταπόνησης.

**ΔΟΚΙΜΙΟ 5.50x50x2-Per**

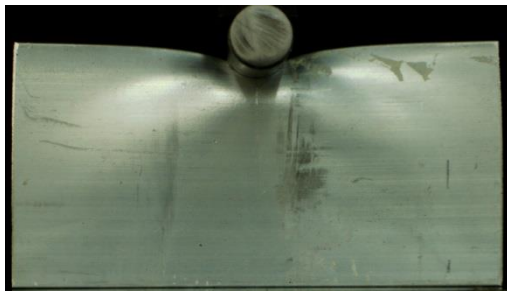
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



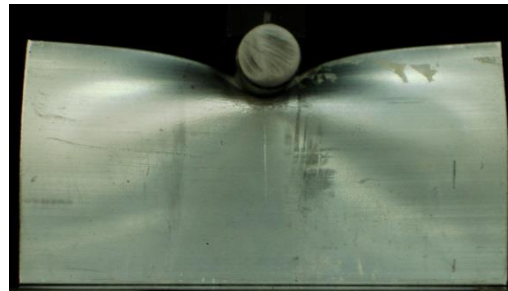
**[1] disp=0 mm**



**[2] disp=4.6 mm**



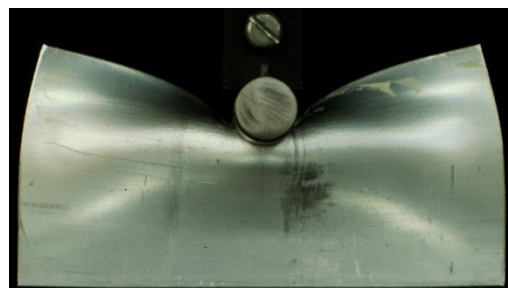
**[3] disp=7.8 mm**



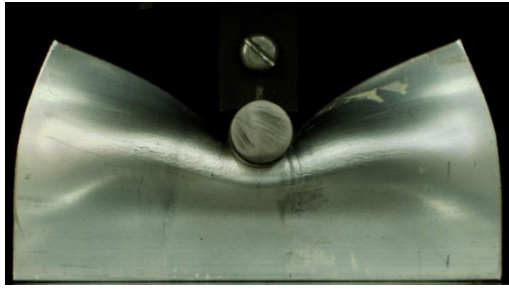
**[4] disp=12.0 mm**



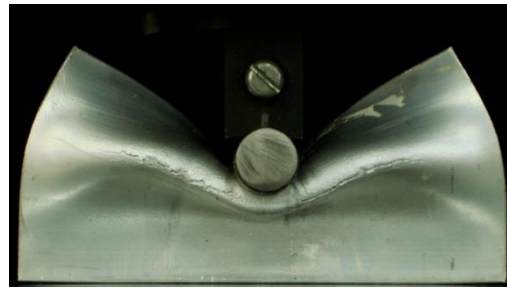
**[5] disp=15.6 mm**



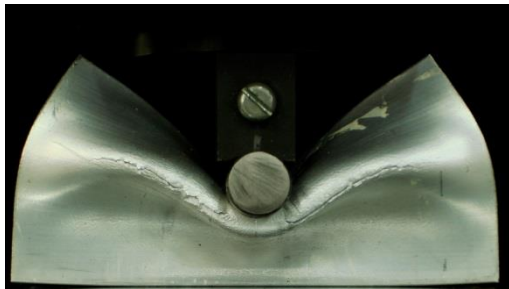
**[6] disp=21.6 mm**



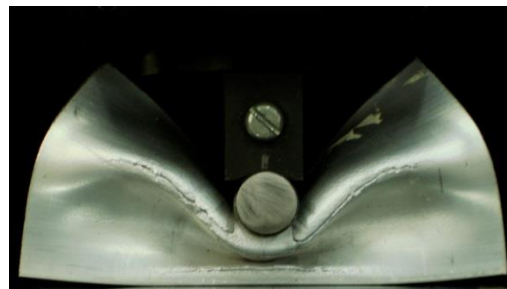
[7] disp=27.2 mm



[8] disp=32.3 mm



[9] disp=36.1 mm

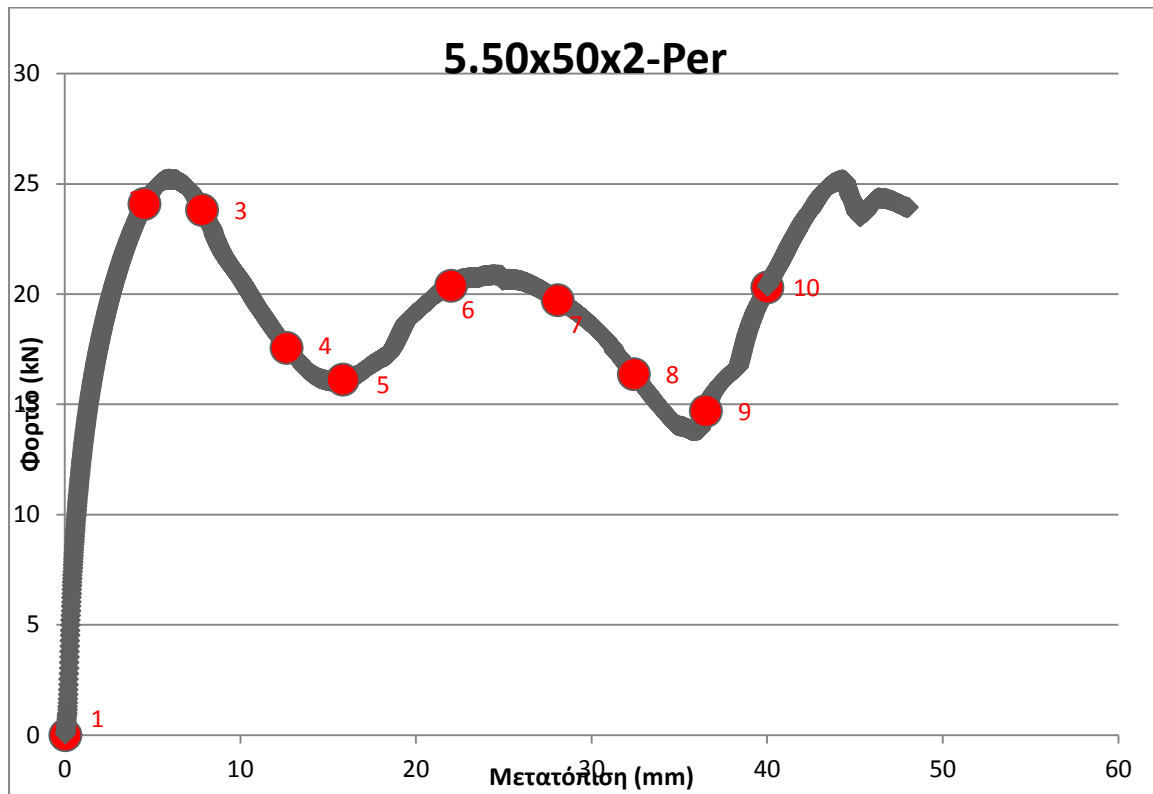


[10] disp=40 mm



[11] disp=40 mm (Χώρις έμβολο)

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



5.50x50x2-Per	
Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_{max}$ :	25.2 (kN)
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_m$ :	19.4 (kN)
Ολική απορροφούμενη ενέργεια $E_{abs}$ :	776 (J)

### Σχολιασμός-Παρατηρήσεις:

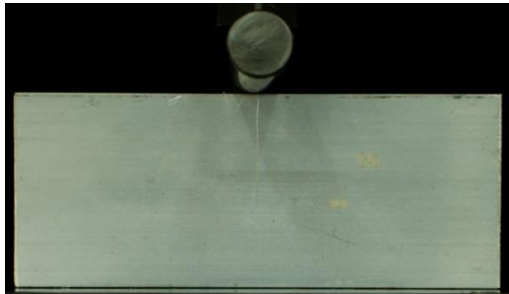
Το φορτίο αυξάνει συνεχώς καθώς κατά την κατάρρευση ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό των διατομών όπου αλληλεπιδρούν συμμετέχει στη διαδικασία συμπίεσης.

Μετά τα 13 mm δημιουργία μη έκτακτου λοβού και στα 27mm δημιουργία πλαστικών αρμών και εμφάνιση ρωγμών σε αυτούς.

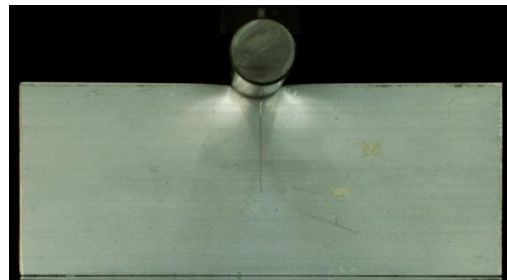
Στα 35 mm παρατηρείται ανύψωση του φορτίου λόγω επαφής του σφηνοειδή στηρικτή του διεισδυτή με την άνω έδρα του δοκιμίου

Η κατάρρευση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 40 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας και παρατηρείται ελάχιστη σφήνωση του διεισδυτή.

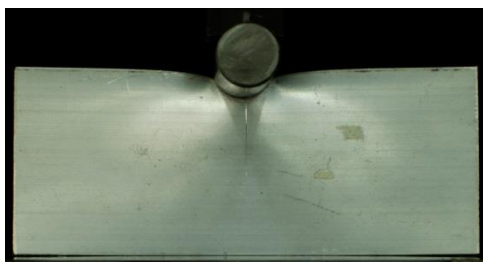
**ΔΟΚΙΜΙΟ 6.40x40x2-Per**  
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



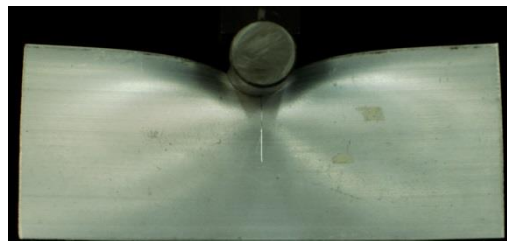
[1] disp=0 mm



[2] disp=3.5 mm



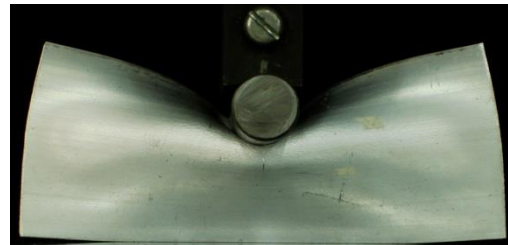
[3] disp=6.7 mm



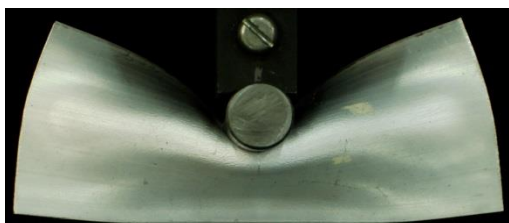
[4] disp=10.7 mm



[5] disp=15.6 mm



[6] disp=20.4 mm

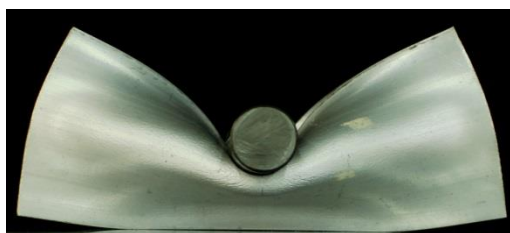


[7] disp=25.9 mm



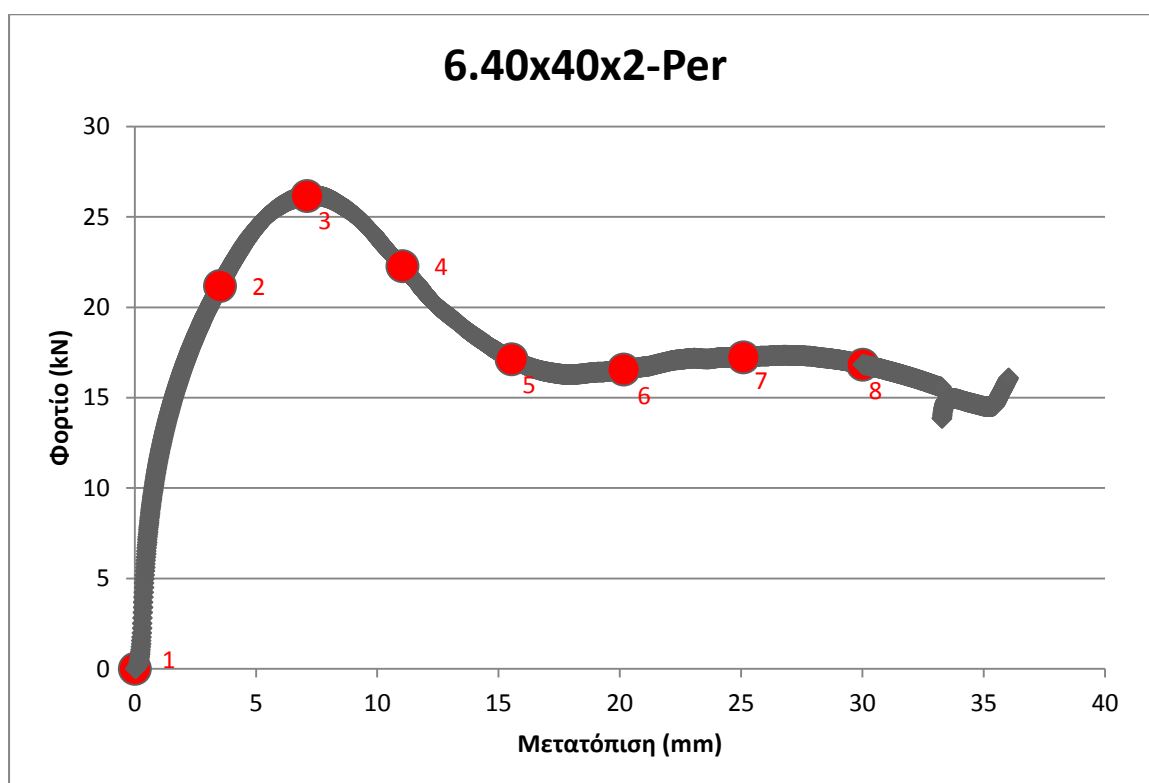
[8] disp=30 mm





[9] (Χώρις έμβολο)

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



6.40x40x2-Per	
Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_{max}$ :	26.2 (kN)
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_m$ :	18.3 (kN)
Ολική απορροφούμενη ενέργεια $E_{abs}$ :	549 (J)

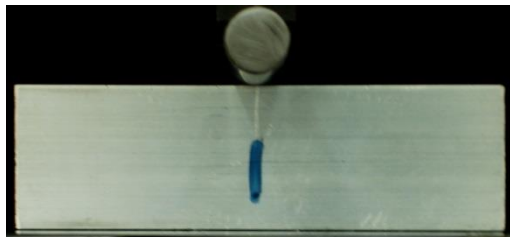
### Σχολιασμός-Παρατηρήσεις:

Το Φορτίο αυξάνει συνεχώς μέχρι περίπου το στιγμιότυπο [3] (μετατόπιση = 6.7 mm, βλ. διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης ), κατά την έναρξη της διείσδυσης. Στο διάστημα αυτό αναπτύσσεται η επαφή μεταξύ διεισδυτή και κελύφους, ενώ η παραμόρφωση παραμένει στην γειτονιά της επαφής (denting).

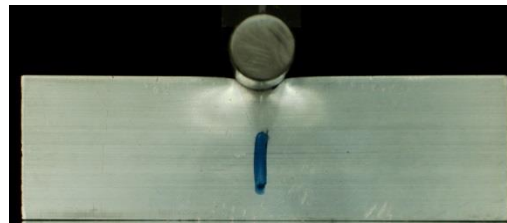
Στη συνέχεια η παραμόρφωση/κατάρρευση διαδίδεται σε όλη τη διατομή (global buckling) και εξελίσσεται εμπλέκοντας ευρύτερα τμήματα του κελύφους εκατέρωθεν του διεισδυτή καθώς ο τελευταίος βυθίζεται περαιτέρω στο κέλυφος.

Μετά από διείσδυση 35 mm η καμπύλη αρχίζει να έχει τάση ανόδου χωρίς να προλάβει το κέλυφος να περιέλθει σε συμπαγούς υλικού (bulk deformation) στιγμιότυπο 9.

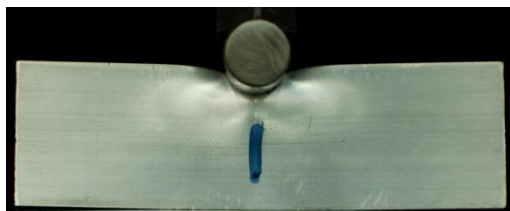
**ΔΟΚΙΜΙΟ 7.30x30x2-Per**  
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



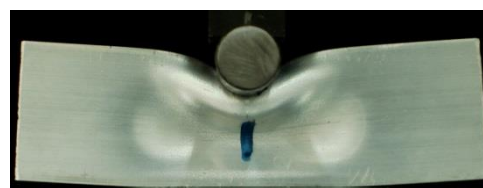
[1] disp=0 mm



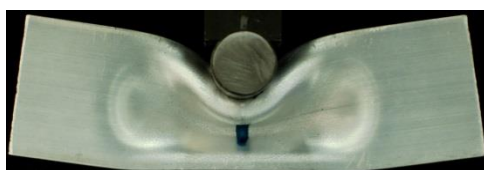
[2] disp=3.2 mm



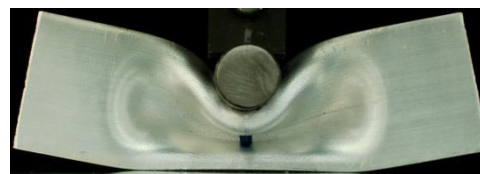
[3] disp=6.6 mm



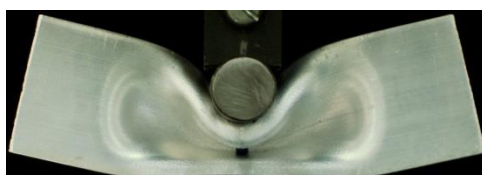
[4] disp=10.7 mm



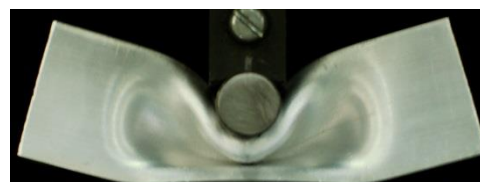
[5] disp=14.9 mm



[6] disp=17.2 mm



[7] disp=18.4 mm

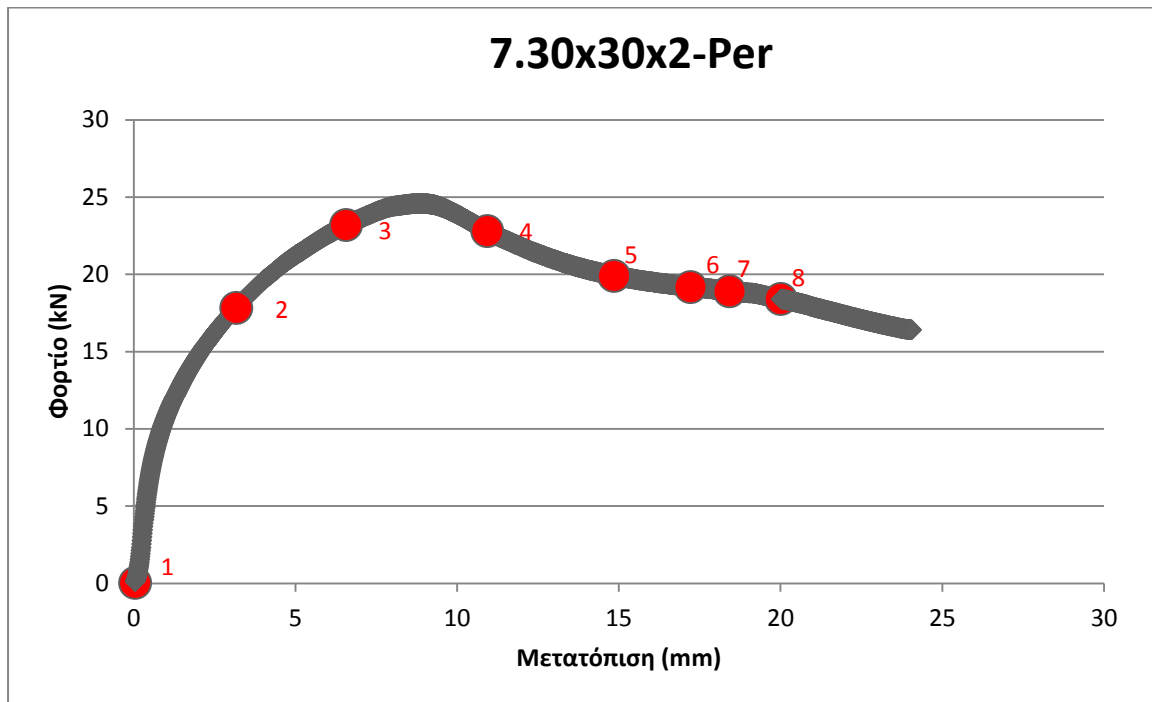


[8] disp=20 mm



[9] (Χώρις έμβολο)

### Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



7.30x30x2-Per	
Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_{max}$ :	24.5 (kN)
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_m$ :	19.3 (kN)
Ολική απορροφούμενη ενέργεια $E_{abs}$ :	386 (J)

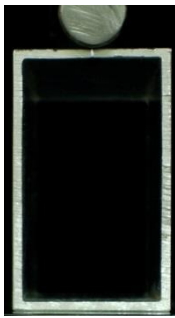
### Σχολιασμός-Παρατηρήσεις:

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς μέχρι περίπου το στιγμιότυπο [3] (μετατόπιση =6.6 mm, βλ. διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης ), κατά την έναρξη της δεισδυσσης. Στο διάστημα αυτό αναπτύσσεται η επαφή μεταξύ δεισδυτή και κελύφους, ενώ η παραμόρφωση παραμένει στην γειτονιά της επαφής (denting).

Στη συνέχεια η παραμόρφωση/κατάρρευση διαδίδεται σε όλη τη διατομή (global buckling) και εξελίσσεται εμπλέκοντας ευρύτερα τμήματα του κελύφους εκατέρωθεν του δεισδυτή καθώς ο τελευταίος βυθίζεται περαιτέρω στο κέλυφος.

Μετά από δεισδυση 20 mm παρατηρείται πως υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω κατάρρευση του κελύφους. Παρατηρήθηκε σφήνωμα του δεισδυτή στο μπροστινό μέτωπο του δοκιμίου.

**ΔΟΚΙΜΙΟ 8.50x30x2-Par-Edge**  
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



[1] disp=0 mm



[2] disp=2.1 mm



[3] disp=5.2 mm



[4] disp=8.3 mm



[5] disp=13.4 mm



[6] disp=17.7 mm



[7] disp=19.9 mm



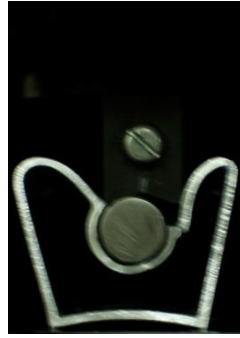
[8] disp=25.3 mm



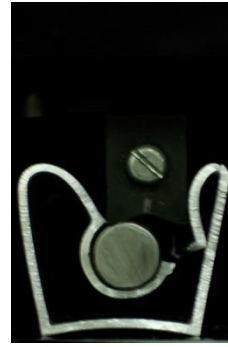
[9] disp=30.6 mm



[10] disp=35.1 mm



[11] disp=36.7 mm

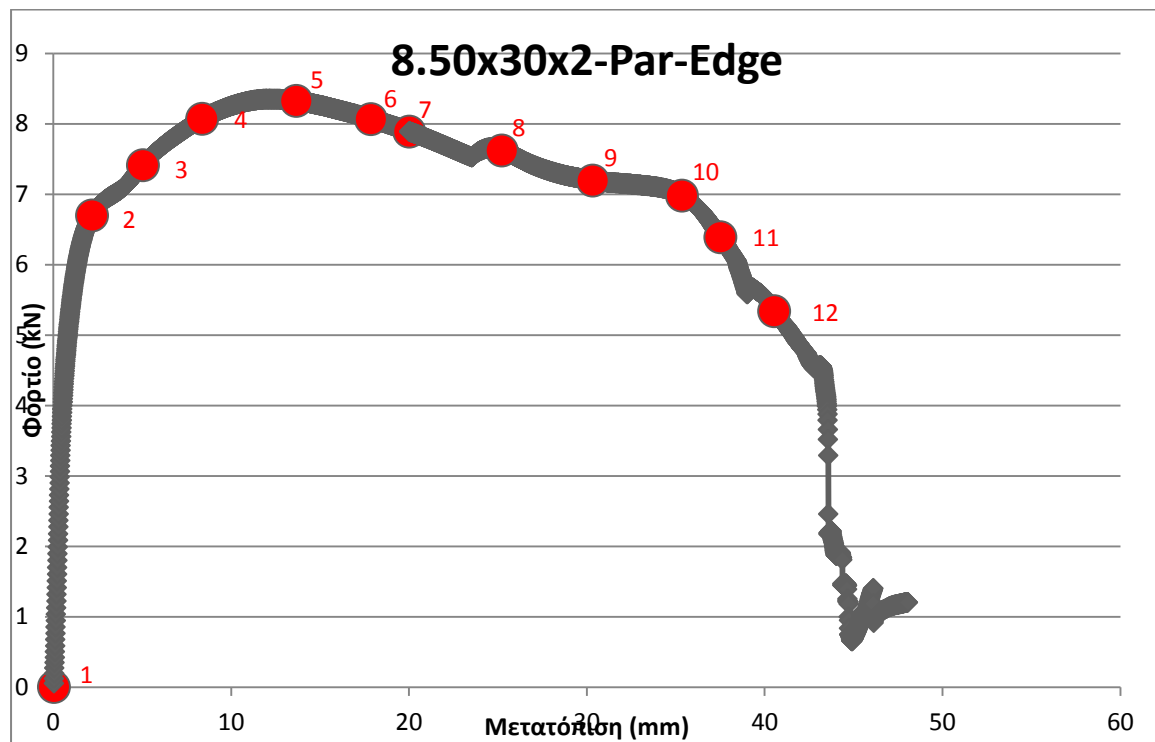


[12] disp=40 mm



[13] (Χώρις έμβολο)

### Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



8.50x30x2-Par-Edge	
Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_{max}$ :	8.3 (kN)
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_m$ :	6.6 (kN)
Ολική απορροφούμενη ενέργεια $E_{abs}$ :	264 (J)

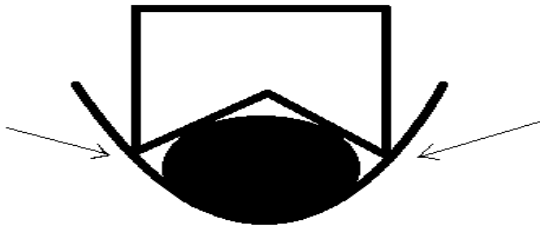


### Σχολιασμός-Παρατηρήσεις:

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς μέχρι περίπου το στιγμιότυπο [3] (μετατόπιση =5.2 mm, βλ. διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης ), κατά την έναρξη της δεισδυσσης. Στο διάστημα αυτό αναπτύσσεται η επαφή μεταξύ δεισδυτή και κελύφους, ενώ η παραμόρφωση παραμένει στην γειτονιά της επαφής (denting).

Στη συνέχεια η παραμόρφωση/κατάρρευση διαδίδεται σε όλη τη διατομή (global buckling) και εξελίσσεται εμπλέκοντας ευρύτερα τμήματα του κελύφους εκατέρωθεν του δεισδυτή καθώς ο τελευταίος βυθίζεται περαιτέρω στο κέλυφος.

Στο σημείο 7 (19.9 mm) παρατηρείται περιορισμένη επαφή της σφήνας στήριξης του δεισδυτή με την παραμορφωμένη άνω έδρα του δοκιμίου.

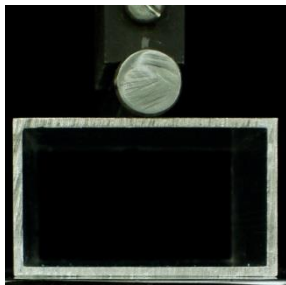


---

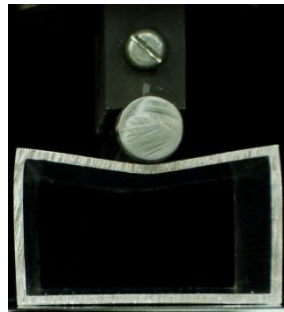
Στα 32 mm εμφανίζεται διαμήκης εξωτερική ρωγμή άνω δεξιά, ενώ στα 35.5 mm έχουμε ολική διαμήκη ρωγμή στην άνω δεξιά ακμή (αρχική) του δοκιμίου.

Η κατάρρευση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 40 mm, όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας

**ΔΟΚΙΜΙΟ 9.50x30x2-Par-Flat**  
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



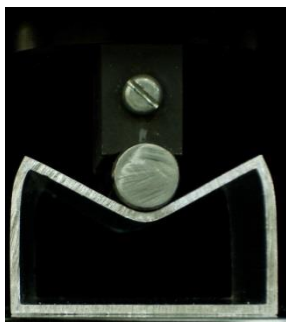
[1] disp=0 mm



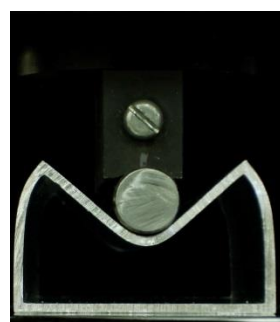
[2] disp=2.8 mm



[3] disp=7.4 mm



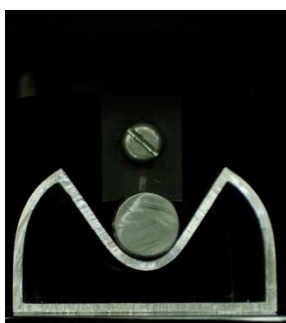
[4] disp=10.7 mm



[5] disp=15.1 mm



[6] disp=17.6 mm

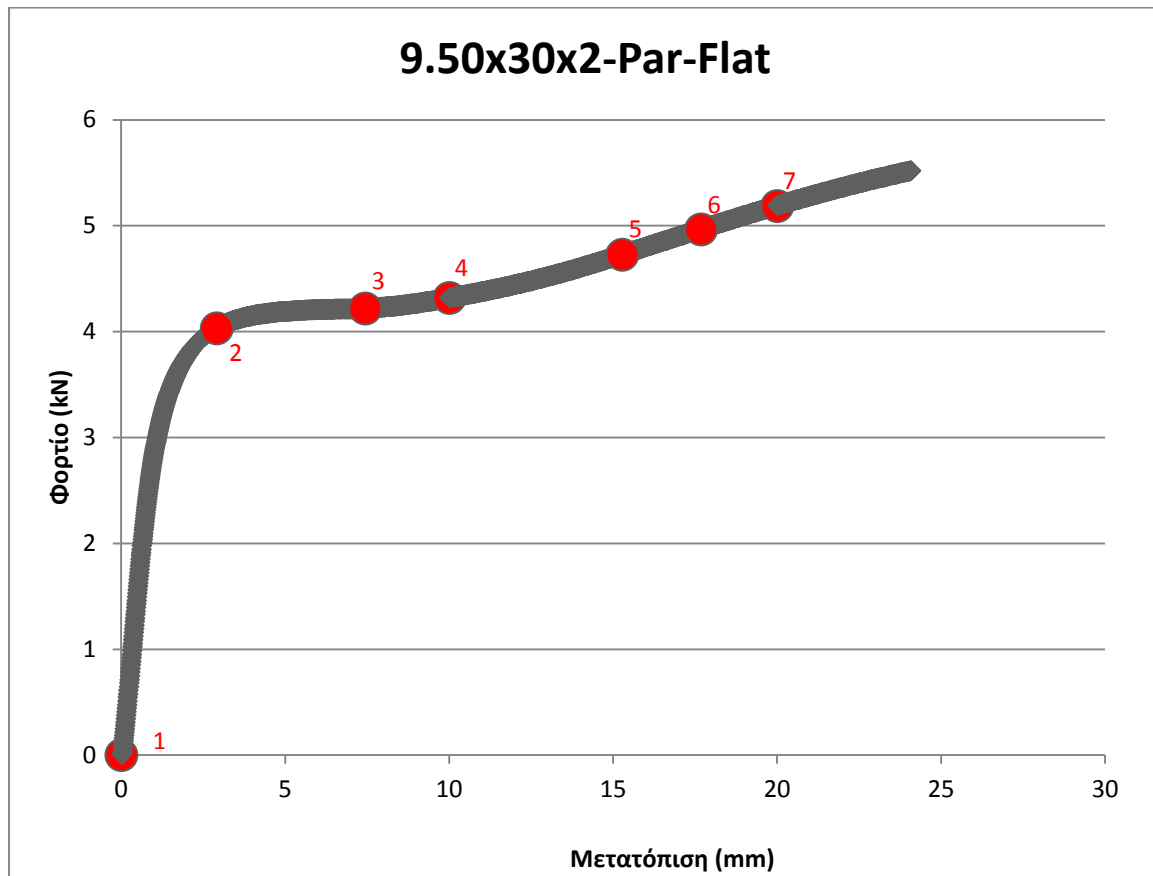


[7] disp=20 mm



[8] (Χώρις έμβολο)

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



9.50x30x2-Par-Flat	
Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_{max}$ :	5.5 (kN)
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_m$ :	4.4 (kN)
Ολική απορροφούμενη ενέργεια $E_{abs}$ :	88 (J)

### Σχολιασμός-Παρατηρήσεις:

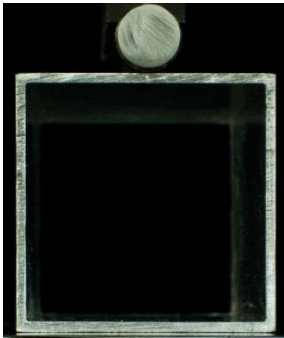
Στο συγκεκριμένο πείραμα παρατηρήθηκε ομαλός τρόπος κατάρρευσης όπως αποτυπώνεται ανάγλυφα στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης.

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς μέχρι περίπου το στιγμιότυπο [3] (μετατόπιση =7.4 mm, βλ. διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης ), κατά την έναρξη της διείσδυσης. Στο διάστημα αυτό αναπτύσσεται η επαφή μεταξύ διεισδυτή και κελύφους, ενώ η παραμόρφωση παραμένει στην γειτονιά της επαφής (denting).

Στη συνέχεια έχουμε τον ταυτόχρονο σχηματισμό λοβών (στιγμιότυπο [ 4] ) και ολοκλήρωση της κατάρρευσης όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 20 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας χωρίς να παρατηρηθεί σφήνωμα του διεισδυτή.

**ΔΟΚΙΜΙΟ 10.50x50x2-Par**

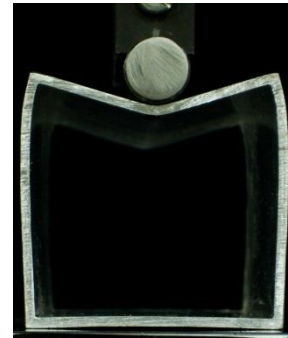
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



[1] disp=0 mm



[2] disp=3.1 mm



[3] disp=6.5 mm



[4] disp=10.1 mm



[5] disp=13.6 mm



[6] disp=17.0 mm



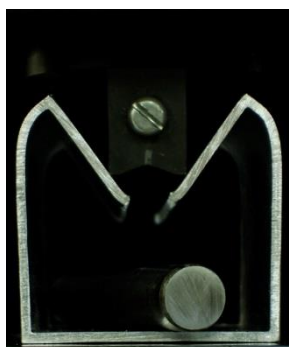
[7] disp=20.1 mm



[8] disp=22.7 mm



[9] disp=25.8 mm

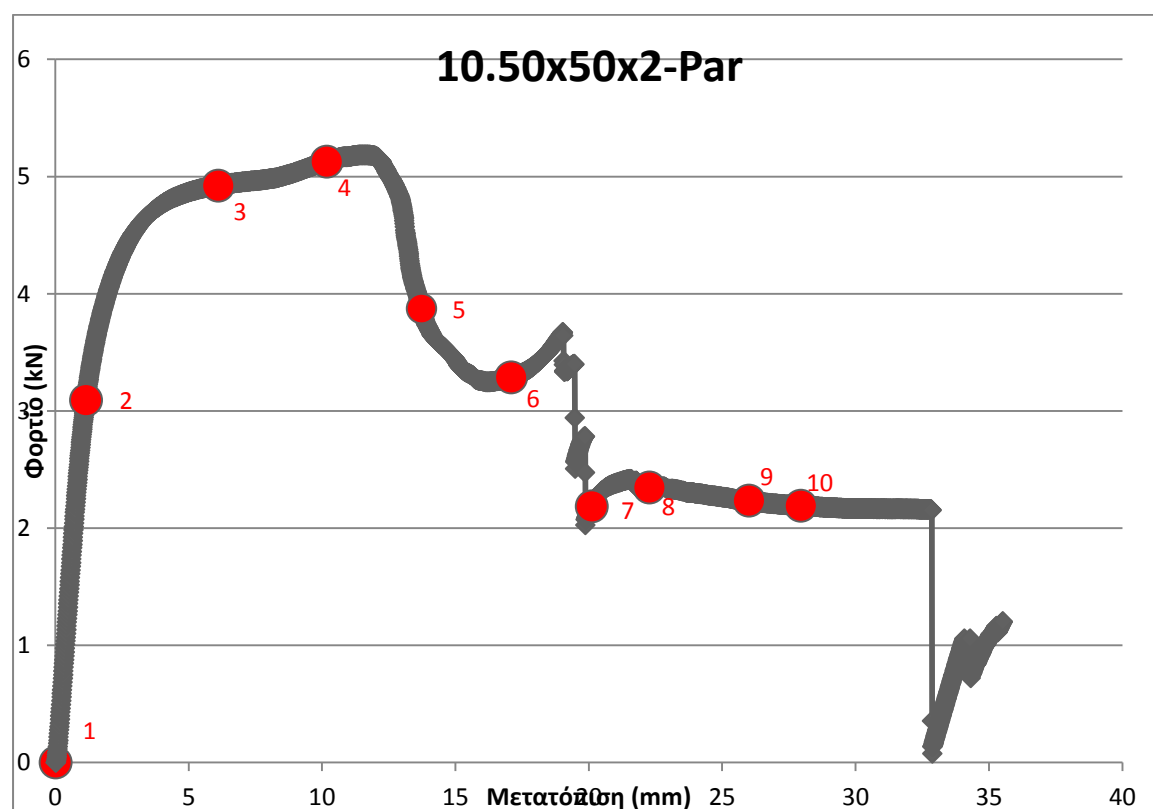


[10] disp=27.8 mm



[11] (Χώρις έμβολο)

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



10.50x50x2-Par	
Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_{max}$ :	5.1 (kN)
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_m$ :	3.2 (kN)
Ολική απορροφούμενη ενέργεια $E_{abs}$ :	128 (J)

### Σχολιασμός-Παρατηρήσεις:

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς μέχρι περίπου το στιγμιότυπο [3] (μετατόπιση =6.5 mm, βλ. διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης ), κατά την έναρξη της δεισδυσης. Στο διάστημα αυτό αναπτύσσεται η επαφή μεταξύ δεισδυτή και κελύφους, ενώ η παραμόρφωση παραμένει στην γειτονιά της επαφής (denting).

Στα 10mm εμφανίζεται διαμήκης εξωτερική ρωγμή (στην εφελκυόμενη περιοχή), στην άνω έδρα του δοκιμίου πάνω στη γραμμή επαφής με το δεισδυτή.

Στα 15.5-16.5 mm έχουμε ολοκλήρωση της ρωγμής σε όλο το πάχος του τοιχώματος και διαχωρισμό της άνω έδρας του δοκιμίου.

Το φορτίο στη συνέχεια προκύπτει από την επαφή με τον δεισδυτή των δύο διαχωρισμένων μισών της άνω έδρας.

Λήξη μέτρησης (τελευταία φωτογραφία) στα 27.8 mm όπου έχουμε απότομη κάθοδο και μηδενισμό του φορτίου, όταν ο κυλινδρικός δεισδυτής πέρασε μέσα στη διατομή.

Ακολουθεί ελαστική επαναφορά του κελυφούς.

**ΔΟΚΙΜΙΟ 11.40x40x2-Par**

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



[1] disp=0 mm



[2] disp=2.7 mm



[3] disp=6.1 mm



[4] disp=10.3 mm



[5] disp=13.0 mm



[6] disp=17.1 mm



[7] disp=19.9 mm



[8] disp=23.2 mm



[9] disp=27.1 mm



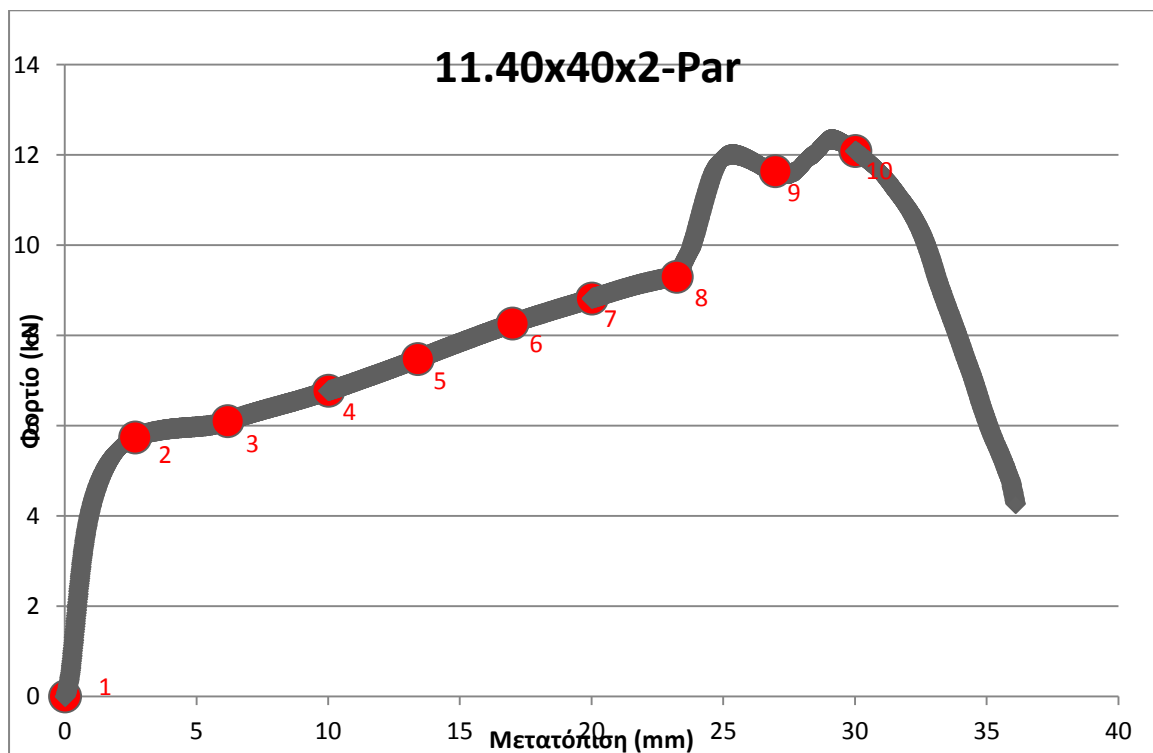


[10] disp=30 mm



[11] (Χώρις έμβολο)

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



11.40x40x2-Par	
Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_{max}$ :	12.3 (kN)
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_m$ :	8.2 (kN)
Ολική απορροφούμενη ενέργεια $E_{abs}$ :	246 (J)

### Σχολιασμός-Παρατηρήσεις:

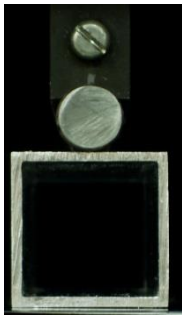
Το φορτίο αυξάνει συνεχώς μέχρι περίπου το στιγμιότυπο [8] (μετατόπιση =23.2 mm, βλ. διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης).

Στο σημείο αυτό έχουμε ανύψωση φορτίου λόγω επαφής του σφηνοείδη στηρικτή του διεισδυτή με την άνω έδρα (παραμορφωμένη) του δοκιμίου.

Μετά τα 25 mm παρατηρείται η δημιουργία πλαστικών αρμών και εξωτερική ρωγμή σε αυτούς δηλαδή έχουμε πτώση φορτίου.

Η κατάρρευση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 30 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας.

**ΔΟΚΙΜΙΟ 12.30x30x2-Par**  
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



[1] disp=0 mm



[2] disp=2.1 mm



[3] disp=5.9 mm



[4] disp=8.7 mm



[5] disp=12.7 mm



[6] disp=16.1 mm



[7] disp=18.2 mm

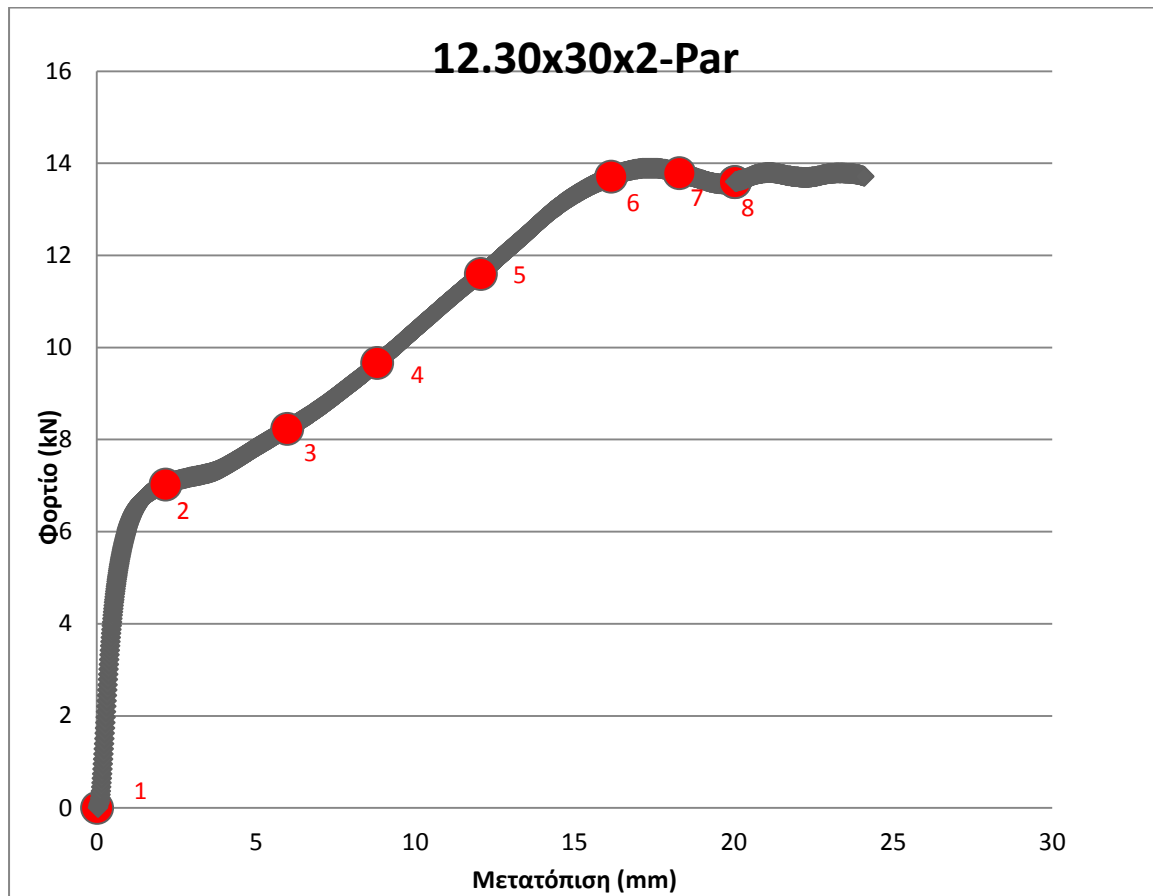


[8] disp=20 mm



[9] (Χώρις έμβολο)

### Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



12.30x30x2-Par	
Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_{max}$ :	13.8 (kN)
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο $P_m$ :	10.8 (kN)
Ολική απορροφούμενη ενέργεια $E_{abs}$ :	216 (J)

### Σχολιασμός-Παρατηρήσεις:

Στο συγκεκριμένο πείραμα παρατηρήθηκε ομαλός τρόπος κατάρρευσης όπως αποτυπώνεται ανάγλυφα στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης.

Το φορτίο αυξάνει συνεχώς μέχρι περίπου το στιγμιότυπο [3] (μετατόπιση =2.1 mm, βλ. διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης ), κατά την έναρξη της διείσδυσης. Στο διάστημα αυτό αναπτύσσεται η επαφή μεταξύ διεισδυτή και κελύφους, ενώ η παραμόρφωση παραμένει στην γειτονιά της επαφής (denting).

Στη συνέχεια έχουμε τον ταυτόχρονο σχηματισμό λοβών (στιγμιότυπο [ 4] ) και ολοκλήρωση της κατάρρευσης όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 20 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας χωρίς να παρατηρηθεί σφήνωμα του διεισδυτή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΕΚΘΕΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας έχει σκοπό να μελετήσει πώς επηρεάζει η γεωμετρία και η θέση του δεισδυτή, τον τρόπο κατάρρευσης των δοκιμίων. Αρχικά θα σχολιάσουμε τον τρόπο κατάρρευσης για όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν και στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων εξετάζοντας το μέγιστο  $P_{max}$  (Peak crush load) και μέσο φορτίο  $P_m$  (Mean crush load), καθώς επίσης την ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{abs}$  (Total energy absorption) και τον δείκτη ομοιομορφίας φορτίου **CFE**.

Ο τρόπος υπολογισμού των παραπάνω παραμέτρων παρουσιάστηκε αναλυτικά σε προηγούμενη παράγραφο και οι τιμές τους παρατίθενται ξεχωριστά για κάθε δοκίμιο στο παρακάτω πίνακα.

Η σύγκριση / αξιολόγηση μέσω των παραμέτρων θα γίνει αρχικά για όλα τα δοκίμια και στη συνέχεια ανάλογα διεύθυνση του δεισδυτή με τον άξονα του δοκιμίου, κάθετα (εγκάρσια) ή παράλληλα.

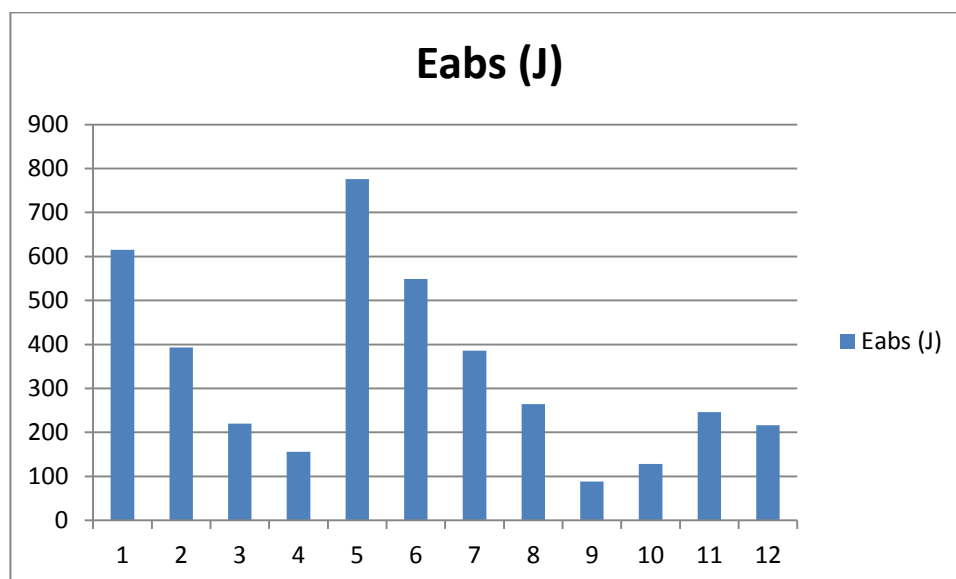
Δοκίμιο	Διεύθυνση Δεισδυτή	$P_{max}$ (kN)	$P_m$ (kN)	$E_{abs}$ (J)	CFE(%)
1	Per	26.3	15.3	615	0.58
2	Per	23.9	19.6	393	0.82
3	Per	8.1	5.5	220	0.67
4	Par	4.1	3.9	156	0.95
5	Per	25.2	19.4	776	0.76
6	Per	26.2	18.3	549	0.69
7	Per	24.5	19.3	386	0.78
8	Par	8.3	6.6	264	0.79
9	Par	5.5	4.4	88	0.8
10	Par	5.1	3.2	128	0.62
11	Par	12.3	8.2	246	0.66
12	Par	13.8	10.8	216	0.78

Πιν.4.1 Συνοπτικά αποτελέσματα δοκιμίων

## ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Όσον αφορά τον τρόπο κατάρρευσης των δοκιμίων, στο τρίτο κεφάλαιο σχολιάζεται η κατάρρευση των δοκιμίων σύμφωνα με τις φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων και την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης.

## ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ/ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ



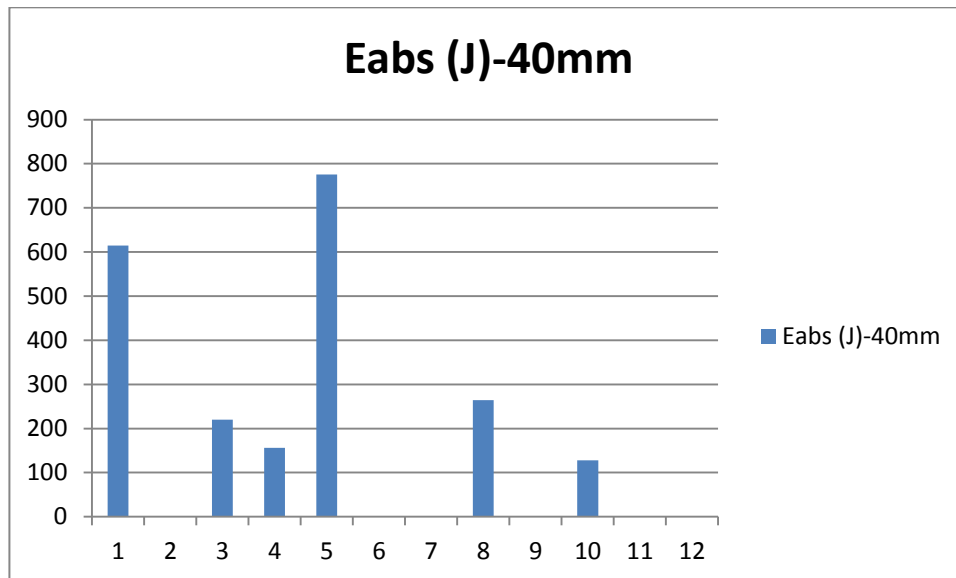
Σχήμα 4.2 : Διάγραμμα ενέργειας παραμόρφωσης όλων των δοκιμίων

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως στα δοκίμια που ο άξονας τους και η διεύθυνση του διεισδυτή ήταν κάθετα, η ενέργεια παραμόρφωσης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτά που ήταν παράλληλα.

Τα δοκίμια τετραγωνικής διατομής παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη τιμή και στη συνέχεια τα δοκίμια ορθογωνικής.

Παρατηρείται πως στα δοκίμια κυκλικής διατομής η ενέργεια δεν ξεπερνά τα 250 KJ ,πολύ μικρότερη από αυτή των δοκιμίων ορθογωνικής και κυκλικής διατομής.

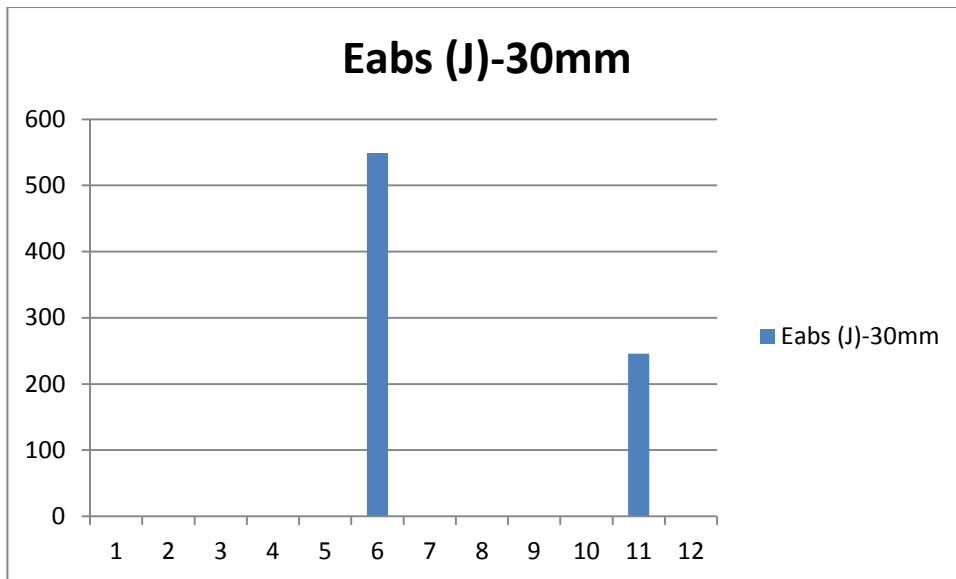
Στη συνέχεια συγκρίνουμε την ενέργεια παραμόρφωσης για συγκεκριμένο μήκος διείδυσης.



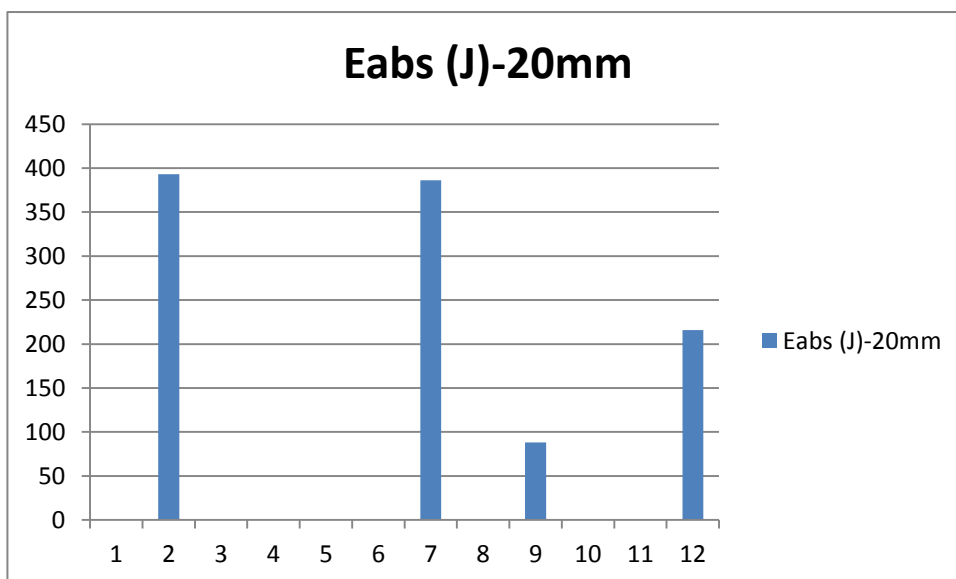
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ενέργειας παραμόρφωσης δοκιμίων μήκους διείδυσης 40 mm

Παρατηρούμε πως τα δοκίμια τετραγωνικής διατομής έχουν την μεγαλύτερη τιμή κοντά στα 800 J. Στο δοκίμιο 10 αντί για μήκος διείδυσης 40 mm έχουμε 30 mm εξαιτίας του τρόπου κατάρρευσης, εμφάνιση ρωγμής και μηδενισμό του φορτίου.



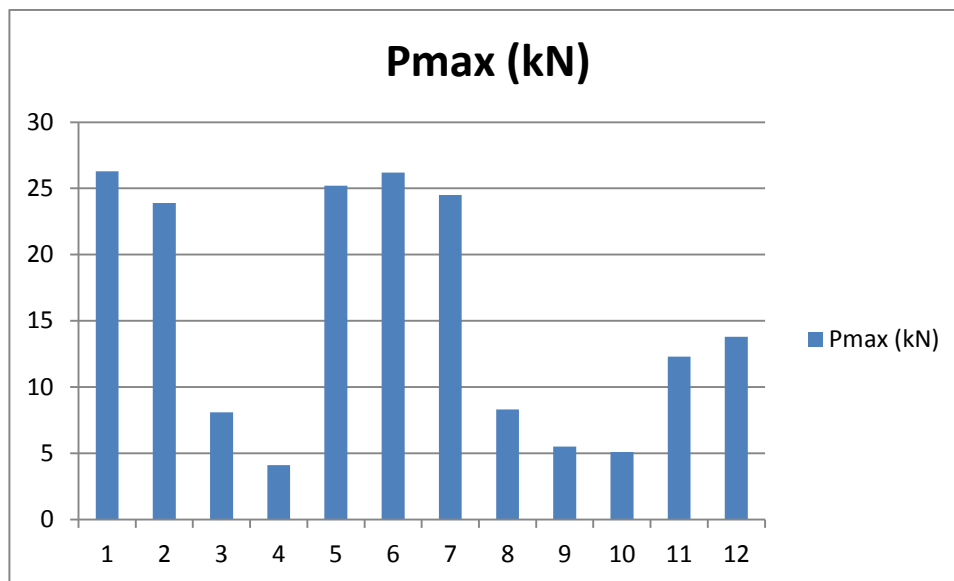


Σχήμα 4.4 : Διάγραμμα ενέργειας παραμόρφωσης δοκιμίων μήκους διείδυσης 30 mm



Σχήμα 4.5 : Διάγραμμα ενέργειας παραμόρφωσης δοκιμίων μήκους διείδυσης 20 mm

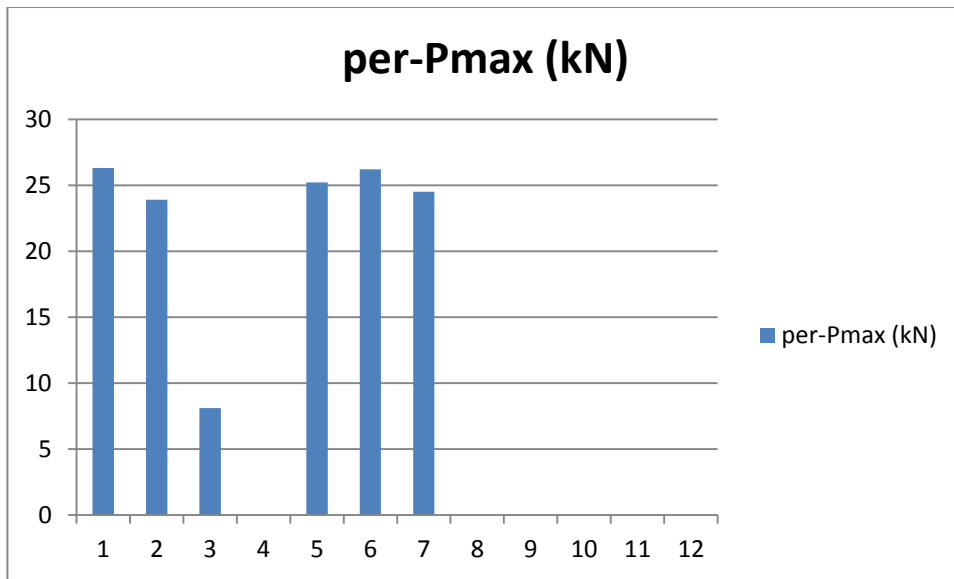
## ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ



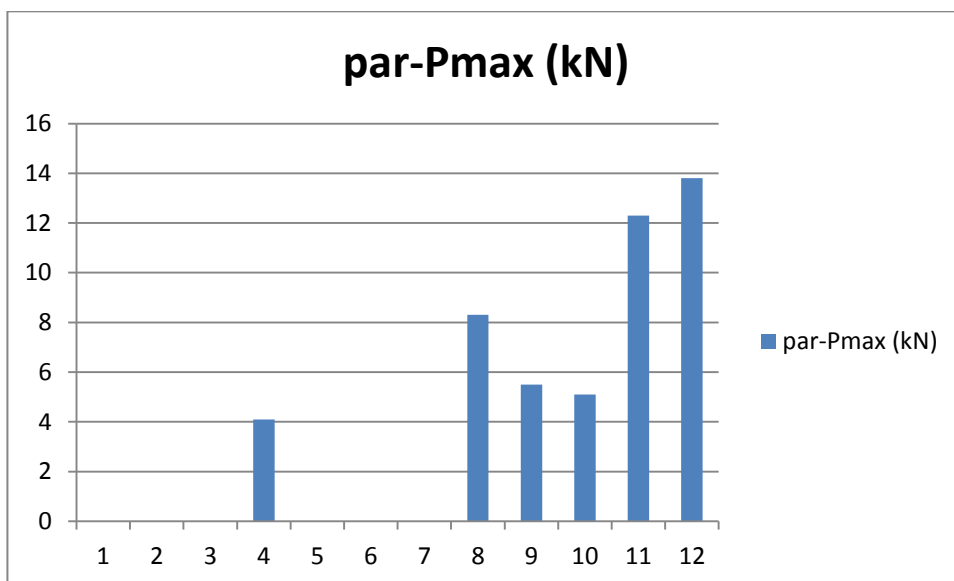
Σχήμα 4.6 : Διάγραμμα μέγιστου φορτίου δοκιμίων

Όσον αφορά το μέγιστο φορτίο των δοκιμίων, βλέπουμε πως αυτά που συμπίεστηκαν κάθετα (άξονα και διεισδυτής), παρουσιάζουν μια ομοιομορφία, με τις τιμές να βρίσκονται κοντά στα 25 kN ενώ σε αυτά που βρίσκονταν παράλληλα, οι τιμές διαφέρουν ανάλογα με τους διαστάσεις τους, χωρίς να ξεπερνούν τα 15 kN. Η τοποθέτηση του διεισδυτή κάθετα κάνει την κατασκευή πιο στιβαρή καθώς έχουμε την μεταβίβαση φορτίων κατευθείαν στα κατακόρυφα τοιχώματα του δοκιμίου. Αντίθετα όταν τοποθετείται παράλληλα, το φορτίο μεταβιβάζεται πρώτα στο οριζόντιο τοίχωμα κάνοντας την κατασκευή πιο ενδοτική.

Μεγάλη διαφορά τους τιμές παρουσιάζουν τα δοκίμια κυκλικής διατομής που βρίσκονται πολύ χαμηλότερα, κάτω από τα 10 kN.

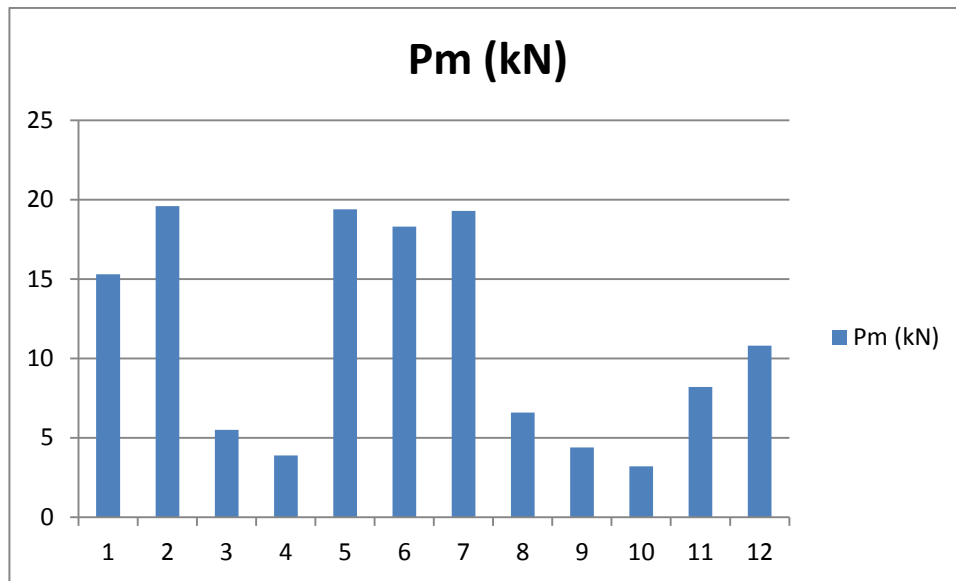


Σχήμα 4.7 : Διάγραμμα μέγιστου φορτίου των δοκιμών που ο άξονας τους και η διεύθυνση του διεισδυτή ήταν κάθετα



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα μέγιστου φορτίου των δοκιμών που ο άξονας τους και η διεύθυνση του διεισδυτή ήταν παράλληλα

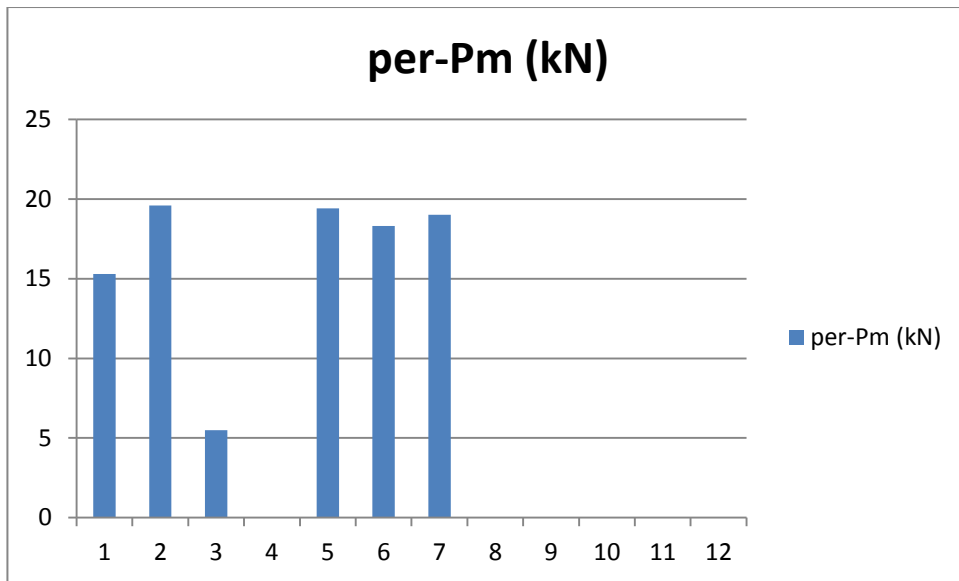
## ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ



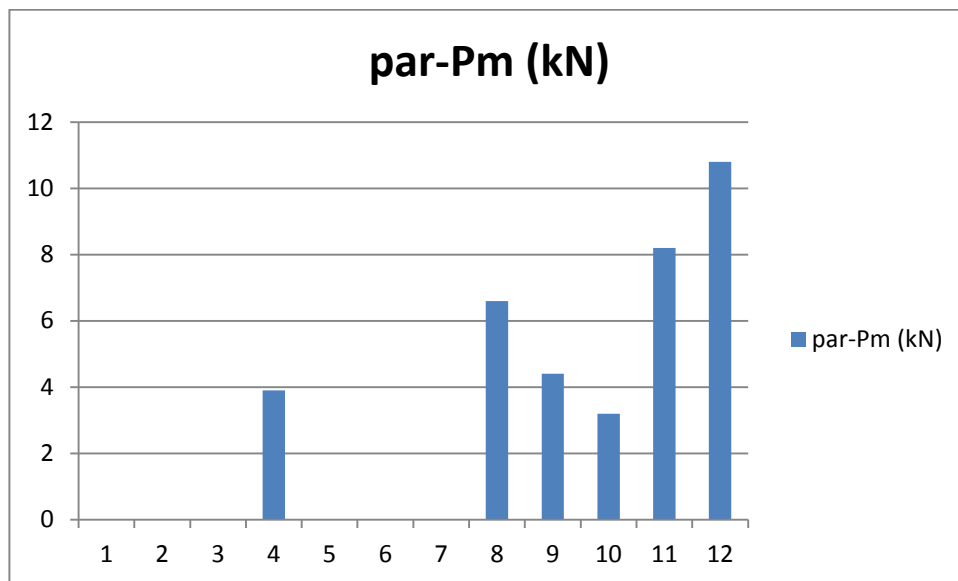
Σχήμα 4.9 : Διάγραμμα μέσου φορτίου όλων των δοκιμίων

Όπως στο μέγιστο φορτίο έτσι και για το μέσο φορτίο μπορούμε να πούμε πως τα δοκίμια που συμπίεστηκαν κάθετα με τον δεισδυτή παρουσιάζουν μια ομοιομορφία, με τις τιμές τους να βρίσκονται κοντά στα 20 kN ενώ σε όσα βρίσκονταν παράλληλα, οι τιμές τους διαφέρουν ανάλογα με τους διαστάσεις τους χωρίς να ξεπερνούν τα 11 kN.

Μεγάλη διαφορά τους τιμές παρουσιάζουν τα δοκίμια κυκλικής διατομής που βρίσκονται πολύ χαμηλότερα κάτω τους 5 kN.

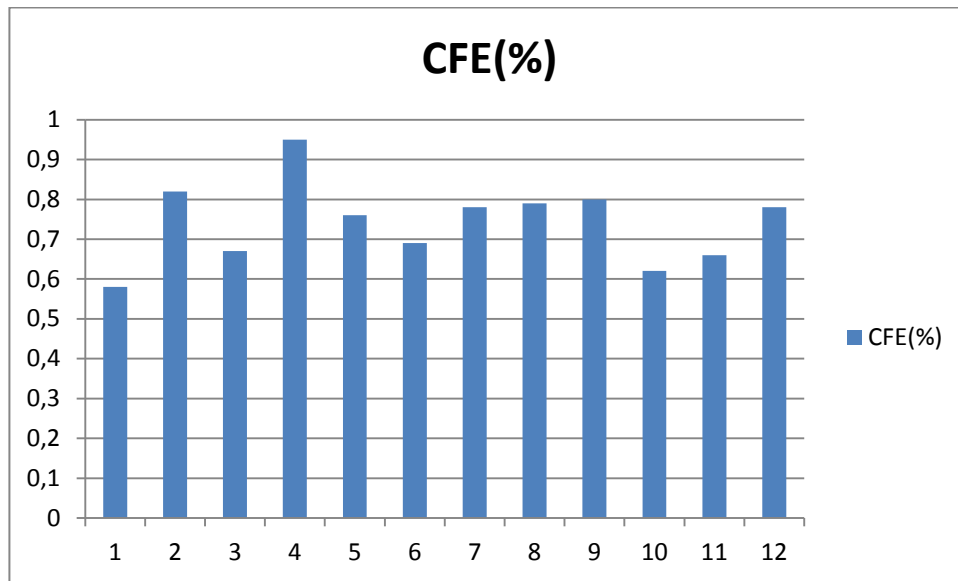


Σχήμα 4.10 : Διάγραμμα μέσου φορτίου των δοκιμών που ο άξονας τους και η διεύθυνση του διεισδυτή ήταν κάθετα



Σχήμα 4.11 : Διάγραμμα μέσου φορτίου των δοκιμών που ο άξονας τους και η διεύθυνση του διεισδυτή ήταν παράλληλα

## ΔΕΙΚΤΗΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (CFE)



Σχήμα 4.12 : Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου

Όσο πιο κοντά στην μονάδα πλησιάζει ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου τόσο πιο ομαλή, ελεγχόμενη και προοδευτική είναι η κατάρρευση του κελύφους από την εκκίνηση της. Στην περίπτωση μας οι τιμές κυμαίνονται κοντά στο 0.8 με την κυκλική διατομή να εμφανίζει την υψηλότερη τιμή 0.95. Αναμενόμενο, καθώς δεν υπάρχουν κατακόρυφα τοιχώματα ώστε να μειωθεί απότομα το φορτίο μετά τον αρχικό λυγισμό τους. Στα κυλινδρικά δοκίμια η διατομή εμπλέκεται σε παραμόρφωση/κατάρρευση βαθμιαία και διαδοχικά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα δοκίμια που μελετήθηκαν οι τρόποι κατάρρευσης είναι ομαλοί, ελεγχόμενοι και προοδευτικοί, ενώ τα απορροφούμενα ποσά ενέργειας είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά, αφού οι καμπύλες του φορτίου συμπίεσης προκύπτουν ομαλές (χωρίς τις διακυμάνσεις των περιπτώσεων αξονικής καταπόνησης κελυφών) και μονότονα αυξανόμενες.

Η κατάρρευση κελυφών σε πλευρική φόρτιση με δεισδυτή προκαλεί ενδιαφέρον διερεύνησης κελυφών διαφορετικού υλικού, όπως και χρησιμοποίησης διαφορετικής γεωμετρίας δεισδυτή.

Επιπλέον ενδιαφέρον θα είχε και η ενσωμάτωση μοντελοποίησης τους με κώδικες πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να αποδοθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η κατάρρευσή τους.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Watson AR, Reid SR, Johnson W. Large deformations of thin-walled circular tubes under transverse loading–III. International Journal Of Mechanical Sciences 1976, 18, 501-509.
- [2] Watson AR, Reid SR, Johnson W. Large deformations of thin-walled circular tubes under transverse loading–II. International Journal Of Mechanical Sciences 1976, 18, 387-397.
- [3] Mutchler LD. Energy absorption of aluminum tubing. Transactions of ASME, Journal of Applied Mechanics 1960, 27, 740-743.
- [4] DeRuntz JA, Hodge PG. Crushing of a tube between rigid plates. Transactions of ASME, Journal of Applied Mechanics 1963, 30, 391-395.
- [5] Johnson W. Impact Strength of Material. London, Arnold, 1972.
- [6] Reid SR, Reddy TY. Effect of strain hardening on the lateral compression of tubes between rigid plates. International Journal of Solids and Structures 1978, 14, 213-225.
- [7] Wierzbicki, T, Abramowicz W. Manual Of Crashworthiness Engineering, 1988 (Center for Transportation Studies, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts)
- [8] Burton R.H, Craig J.M. An investigation into the energy absorbing properties of metal tubes loaded in the transverse direction. BSc report, University of Bristol, Bristol, 1963.
- [9] Sherbourne A.N, Lu F. Strain hardening in the moving hinge method. Int. J. Solids and Structs, 1993, 30, 3475-3489.
- [10] A. R. Watson, S. R. Reid, W. Johnson and S. G. Thomas. Large Deformations Of Thin Walled Circular Tubes Under Transverse Loading – II. University of Manchester Institute of Science and Technology, Sackville Street, Manchester, England. Int. J. mech. Sci. Pergamon Press, 1976. Vol 18, pp. 387-397
- [11] M. Avalle and L. Goglio (Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy). Static Lateral Compression Of Aluminium Tubes: Strain Gauge Measurements And Discussion Of Theoretical Models (the Ms was received on 12 June 1996 and was accepted for publication on 23 May 1997).Journal Of Strain Analysis Vol 32 No 5, 335-343



- [12] D. Karagiozova, Marcilio Alves. Dynamic Elastic Plastic Buckling Of Structural Elements
- [13] Δ. Ε. Μανωλάκος. Σημειώσεις του μαθήματος: Κατεργασίες Ι, 5ου εξαμήνου Σχολής Μηχαν.Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- [14] Αθαν. Γ. Μάμαλης. Κατεργασίες των υλικών Ι, Αθήνα 1998, εκδόσεις ΕΜΠ
- [15] Gayan Rathnaweera, Yvonne Durandet, Dong Ruan, Shigeaki Kinoshita. Characterizing the Material Properties of a Tube from a Lateral Compression Test, 30 Oct 2011
- [16] Sebastian Lipa. Comparative Experimental-Numerical Study Into Tubular Energy Absorbers Under Lateral Crushing Load
- [17] N.K. Gupta, G.S. Sekhon, P.K. Gupta. A study of lateral collapse of square and rectangular metallic tubes, 23 March 2005
- [18] Abbas Niknejad, Seyed Ali Elahi , Gholam Hossein Liaghat. Experimental investigation on the lateral compression in the foam-filled circular tubes ,25 Oct. 2011
- [19] Spyros A. Karamanos, Kyros P. Andreadakis. Denting of internally pressurized tubes under lateral loads 25 July 2006
- [20] N.K. Gupta, G.S. Sekhona, P.K. Gupta. Study of lateral compression of round metallic tubes, 30 May 2001
- [21] A.Baroutaji, E.Morris, A.G.Olab. Quasi-static response and multi-objective crashworthiness optimization of oblong tube under lateral loading
- [22] Ram Ranjan Sahu, Pramod Gupta. Comparative Large deformations studies on circular tubes, ISSN 0976 – 4399
- [23] G. Lu. A Study Of The Crushing Of Tubes By Two Indenters,1993 Pergamon Press Ltd
- [24] Πασχαλίδου Φωτεινή. Μελέτη Πλευρικής Καταπόνησης Σύνθετων Κατασκευών Απο Σωληνοτούς Δομικούς Φορείς, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. , ΑΘΗΝΑ, 2013
- [25] Χαραλαμπόπουλος Χρήστος. Μελέτη της συμπεριφοράς έναντι κρούσεων κελυφών λεπτού πάχους με φλάντζα και ενισχυμένων με πολυμερικό αφρό: Πειραματική και αριθμητική προσομοίωση, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π. , ΑΘΗΝΑ 2010