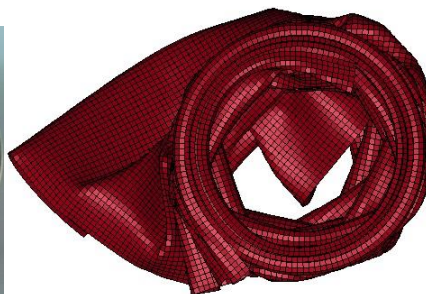
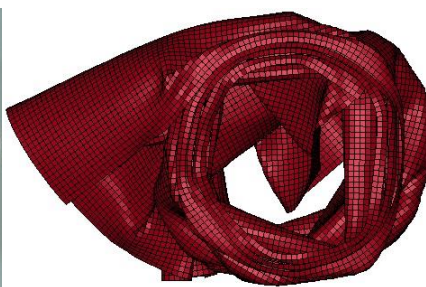
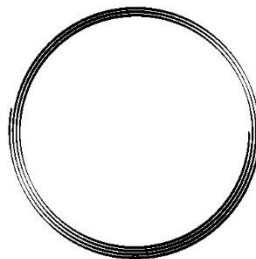




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του Κυρίτση Παναγιώτη-Αριστοτέλη

«Αξονική κατάρρευση μεταλλικών κελυφών πολλαπλού τοιχώματος
(σπειροειδούς διατομής) διαμορφωμένων με κυλινδρική κάμψη»

“Axial crushing of multi-walled (spiral cross-section) metallic shells fabricated
by roll bending”

Επιβλέπων: Δημήτριος Ε. Μανωλάκος (καθηγητής Ε.Μ.Π.)
Συνεπιβλέπων: Πρωτεσίλαος Κ. Κωστάζος (Δρ. Μηχ., Ε.ΔΙ.Π)

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η επίτευξη και ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής είναι αποτέλεσμα της αρωγής και συμπαράστασης όλου του προσωπικού του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Δημήτριο Μανωλάκο για τη πολύτιμη ενθάρρυνση και στήριξη του καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ευχαριστώ από καρδιάς τον κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, τις συμβουλές πάνω στην αριθμητική προσομοίωση, άλλα και το πλήθος γνώσεων που αποκόμισα κατά τη συνεργασία μαζί του. Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω τον κ.Κώστα Κερασιώτη για την αμέση βοήθεια του σε όποιο πρόβλημα αντιμετώπισα κατά την πειραματική διαδικασία και κυρίως τον κ. Νίκο Μελισσά για τις ατελείωτες ώρες επικοινωνιών συζητήσεων μαζί του σε τεχνικό και όχι μόνο επίπεδο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι λεπτότοιχες μεταλλικές δομές έχουν τεράστια εφαρμογή στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας για την προστασία ανθρώπων και κατασκευών σε καταστάσεις πρόσκρουσης, καθώς έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν τεράστια ποσά ενέργειας. Μελετήθηκε η συμπεριφορά μεταλλικών κελυφών πολλαπλού τοιχώματος, σπειροειδούς διατομής, τα οποία διαμορφώθηκαν με κυλινδρική κάμψη στην καμπτική μηχανή του εργαστηρίου. Η ευκολία στην προετοιμασίαν τους, η οικονομική αποδοτικότητα τους για μικρής κλίμακας παραγωγή, αλλά και η δυνατότητα τους να διαμορφωθούν σε ποικιλία σχημάτων και διατομών, τα καθιστά υποσχόμενα σχετικά με την ευρεία εφαρμογή τους σε πολλούς τομείς της μηχανικής. Τα κελύφη είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο και υποβλήθηκαν σε αξονική οιονεί στατική φόρτιση στη μηχανή δοκιμών του εργαστηρίου. Τα κελύφη που μελετώνται, διάφέρουν στην πρώτη περίπτωση ως προς το διαδοχικό αριθμό των σπειρών και στην δεύτερη, ως προς τη διαμετρή τους, έχοντας σταθερή ενεργή διατομή. Έγινε σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση και σχολιασμός επί αυτών. Παράλληλα, έγινε προσομοίωση της συμπεριφοράς κατάρρευσης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών πειραματικών διατομών με χρήση Κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων, LS-DYNA, καθώς και περαιτέρω διερεύνηση για ισοδύναμα κελύφη κλειστής διατομής με ίδια ενεργό διατομή. Πραγματοποιήθηκε συγκριτικός σχολιασμός μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων με την εξαγωγή ωφέλιμων συμπερασμάτων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: απορρόφηση ενέργειας, λεπτότοιχο κέλυφος, πολλαπλό τοίχωμα, σπειροειδής(ανοιχτή) διατομή, αξονική καταπόνηση, μοτίβο κατάρρευσης, Ls-Dyna, μοντελοποίηση, κυλινδρική κάμψη

ABSTRACT

Thin-walled metallic tubes are widely applied in vehicle engineering fields for safety protection of people or structures against impact event, as they can absorb a great amount of energy. The crushing behavior of multi-walled (spiral cross-section) metallic shells fabricated by roll bending, using a roll bending machine, is studied in this case. Since these tubes are easily prepared, cost-effective for small-scale production and flexible in both sectional shape and geometric parameters, they are quite promising to be applied widely in various engineering fields. Tubes are prepared by roll bending aluminum sheets and quasi-static axial crushing tests are then performed with universal material testing machine. Two types of tubes are investigated, with the first ones varying as far as the number of consecutive spirals is concerned, and the other ones differing in diameter, whilst having the same amount of effective cross section area. A comparison of the experimental results on each occasion along with a further discussion on them was conducted. Meanwhile, the Finite Element Code Ls-Dyna was employed to simulate the crushing behavior of certain typical shells, while further investigation was conducted for equivalent closed-section shells of the same effective cross section area. A detailed comparison of the obtained experimental and numerical results was conducted and useful concluding remarks were drawn.

KEYWORDS: energy absorption, thin-walled shell, multi-walled shell, spiral cross section, axial crushing, deformation mode, Ls-Dyna, modelling, roll bending

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1 : Θεωρητικό Μέρος

1.1	Εισαγωγή [1,2]	7
1.2	Σκοπός διπλωματικής εργασίας	8
1.3	Κυλινδρική Κάμψη.....	9
1.4	Δείκτες Crashworthiness	10
1.5	Αξονική κατάρρευση σωλήνων κυκλικής διατομής	11
1.6	Διαμόρφωση άκρων (triggering)	13

Κεφάλαιο 2 : Πειραματικό Μέρος

2.1	Δοκίμια	14
2.1.1	Δοκίμια σταθερής διαμέτρου, διαδοχικών ακεραίων σπειρών.....	16
2.1.2	Δοκίμια ίδιας ενεργής διατομής, διαφορετικών σπειρών/διαμέτρου	18
2.1.3	Χαρακτηριστικά-Μηχανικές Ιδιότητες Υλικού	20
2.2	Πειραματικός Εξοπλισμός	21
2.3	Συνθήκες Πειραμάτων	22

Κεφάλαιο 3: Πειραματικά Αποτελέσματα

3.1	Δοκίμια σταθερής διαμέτρου, διαδοχικών ακεραίων σπειρών.....	23
3.2	Δοκίμια ίδιας ενεργής διατομής, διαφορετικών σπειρών/ διαμέτρου	33
3.3	Σχολιασμός-Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων	55
3.3.1	Γενικές παρατηρήσεις	55
3.3.2	Δοκίμια σταθερής διαμέτρου, διαδοχικών ακεραίων σπειρών.....	55
3.3.3	Δοκίμια ίδιας ενεργής διατομής, διαφορετικών σπειρών/διαμέτρου	57
3.3.4	Συνολικά Σχόλια στα Πειραματικά Αποτελέσματα.....	58

Κεφάλαιο 4: Αριθμητική Προσομοίωση

4.1	Γενικά.....	59
4.2	Μοντελοποίηση της αξονικής κατάρρευσης των κελυφών σπειροειδούς διατομής	59
4.3	Περαιτέρω Διερεύνηση.....	75
4.4	Σχολιασμός-Σύγκριση Αποτελεσμάτων	82
4.4.1	Γενικά Σχόλια-Παρατηρήσεις.....	82
4.4.2	Σύγκριση Πειράματος-Μοντελοποίησης	82
4.4.3	Σχολιασμός μοντέλων κλειστής διατομής	82
4.4.4	Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων	84

Κεφάλαιο 5 : Συμπεράσματα

5.1	Συμπεράσματα.....	85
5.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	86

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	87
---------------------------	-----------

Κεφάλαιο 1 : Θεωρητικό Μέρος

Σύνοψη

Το παρακάτω κεφάλαιο αποτελείται από μια βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, καθώς επίσης και μια ανάλυση του σκοπού της διπλωματικής. Επίσης, θα παρουσιαστούν βασικά στοιχεία θεωρίας που αφορούν την κυλινδρική κάμψη και την αξονική κατάρρευση.

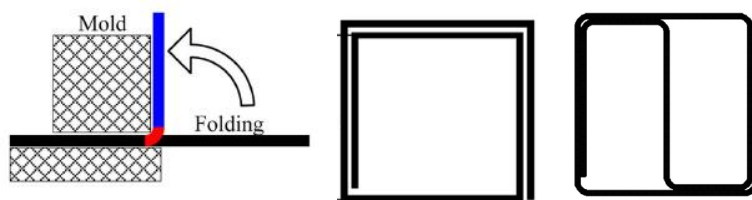
1.1 Εισαγωγή [1,2]

Για την ανασκόπηση που ακολουθεί, επιλέχθηκαν τα άρθρα των Xiong Zhang, Hui Zhang και Weijie Ren, τα οποία αποτελούν τη βασική και πιο πρόσφατη βιβλιογραφία, όσον αφορά την κατασκευή σωληνών μέσω της διαδικασίας της κάμψης.

Οι λεπτότοιχες μεταλλικές διατομές έχουν μεγάλη εφαρμογή στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας για την προστασία και ασφάλεια ανθρώπων και κατασκευών σε καταστάσεις πρόσκρουσης, καθώς έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν τεράστια ποσά ενέργειας ιδιαίτερα κατά την αξονική τους κατάρρευση [3]. Η εφαρμογή αυτή στις μέρες μας γίνεται ακόμα μεγαλύτερη, αφού ελαφρά υλικά όπως το αλουμίνιο βοηθούν στην εξοικονόμηση βάρους της όλης κατασκευής του αυτοκινήτου, το οποίο με τη σειρά του συνεπάγεται μείωση στις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα. Το τελευταίο ειδικά, με τους σύγχρονους αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς, αποκτά ειδική ισχύ.

Τα τελευταία χρόνια, οι επιστημονικές έρευνες επικεντρώνονται στην προσπάθεια αύξησης της αντοχής των σωληνών σε κρούση, με κύριο χαρακτηριστικό τη διαφοροποίηση των διατομών τους [3-11]. Πιο συγκεκριμένα, έχουν μελετηθεί περιπτώσεις σωληνών με πολλαπλές γωνίες [5-7], με αφρώδες υλικό στο εσωτερικό τους [12-14], με πολλαπλά κελύφη [15-18] και με μεταβλητό πάχος [19-22]. Ειδικότερα, οι δύο τελευταίες περιπτώσεις, έχει αποδειχθεί ότι αποτελούν την καλύτερη μέθοδο για την αύξηση της αποδοτικότητας των λεπτότοιχων διατομών σε αξονική καταπόνηση. Παρόλα αυτά, ένα σημαντικό και σύνθετο εμπόδιο για την εφαρμογή αυτών των μεθόδων είναι η δυσκολία και η πολυπλοκότητα που παρουσιάζεται στην κατασκευή τέτοιων δομών. Επίσης, η παραγωγή σωληνών αλουμινίου σε διάφορα σχήματα διατομής πραγματοποιείται μέσω της διαδικασίας της διέλασης [23]. Επομένως, οποιαδήποτε αλλαγή σε σχήμα και διάσταση, απαιτεί αλλαγή στο σχεδιασμό του καλουπιού.

Περίεργως, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα για τους σωλήνες που έχουν διαμορφωθεί μέσω της κάμψης μεταλλικών ελασμάτων. Τα ουσιαστικά πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου σωληνών είναι η ευκολία στην προετοιμασία τους, η οικονομική αποδοτικότητα τους σε παραγωγή μικρής κλίμακας και η ευελιξία τους όσον αφορά διαφορετικά σχήματα διατομών, αλλά και σε γεωμετρικές παραμέτρους. Το τελευταίο στοιχείο αποτελεί και το βασικό προτέρημα της διαδικασίας της κάμψης έναντι της διέλασης, καθώς υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής δομών υψηλής αποδοτικότητας, ευκολότερα και φθηνότερα, σαν κι αυτές που περιγράψαμε παραπάνω, είτε με πολλαπλά κελύφη, είτε με τη μεταβολή του πάχους.



Εικόνα 1.1 Απεικόνιση κάμψης (στραντζάρισμα) και σχέδιο διαμορφωμένων σωληνών πολλαπλού τοιχώματος και πολλαπλού κελύφους [1]

Παρ'όλα αυτά, οι συγκεκριμένοι σωλήνες εγείρουν κάποιους προβληματισμούς για τη συμπεριφορά τους κατά την αξονική καταπόνηση, καθώς πρόκειται για δομικά μέρη ανοιχτής διατομής. Ειδικότερα, οι Kotelko και Mania μελετώντας τη συμπεριφορά λεπτότοιχων δομών απλής ανοιχτής διατομής, διαμορφωμένων μέσω ψυχρής έλασης, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αυτές οι δομές είναι πάντα έτοιμες να παραμορφωθούν ακανόνιστα ή να καταρρεύσουν μέσω λυγισμού [24]. Εάν, όμως, τα μεταλλικά ελάσματα καμφθούν και διπλωθούν στη μορφή σωληνών κλειστής διατομής, τότε συναγωνίζονται τους συνηθισμένους σωλήνες, όπως επιβεβαιώνει ο Zhang μέσω των πειραμάτων και των υπολογιστικών μοντέλων του για την αντοχή σε κάμψη. Τέλος, επισημαίνει ότι η μοντελοποίηση και παραμετρική ανάλυση αποτυπώνει σε πολύ καλό βαθμό τη συμπεριφορά τέτοιων σωληνών σε σχέση με το πείραμα, εκτός από την περίπτωση που η κατασκευή μας παραμορφωθεί ακανόνιστα [2].

1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία μελετά την αξονική κατάρρευση μεταλλικών κελυφών πολλαπλού τοιχώματος (σπειροειδούς διατομής) διαμορφωμένων με κυλινδρική κάμψη, και ιδιαίτερα η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας τους σε οριζόντιες στατικές συνθήκες πειραματικά αλλά και με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων. Με τα πλεονεκτήματα της κατασκευής δοκιμίων με κάμψη να είναι πολλαπλά, όπως αναφέρθηκαν στην εισαγωγή, επιλέχθηκε η διαμόρφωση των δοκιμίων με κυλινδρική κάμψη καθώς το εργαστήριο διαθέτει κυλινδρική καμπτική μηχανή 3 ράουλων. Το αποτέλεσμα της διαμόρφωσης αυτής είναι η δημιουργία μιας σπειροειδούς διάταξης. Η σπειροειδής διάταξη επιλέχθηκε γιατί δεν είναι εύκολος ο εντοπισμός και η προμήθεια κελυφών με τόσο κοντινές (διαδοχικές) διαμέτρους και ίδια πάχη τοιχωμάτων, ώστε να εξασφαλίζεται η μηχανική αλληλεπίδραση τους κατά την κατάρρευσή τους, να έχουμε δηλαδή αλληλεπίδραση λοβών. Ενώ, στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτό εξασφαλίζεται, καθώς είναι σε άμεση επαφή τα διαδοχικά τοιχώματα μεταξύ τους. Και στην πιθανή περίπτωση όμως, που τα διαδοχικά τοιχώματα δεν είναι σε άμεση επαφή, έχουμε αλληλεπίδραση λόγω της σπειροειδούς διάταξης και της συνέχειας του υλικού.

Έτσι επιλέχθηκε η κατασκευή 2 σειρών δοκιμίων με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Δοκίμια σταθερής διαμέτρου αλλά διαδοχικών ακεραίων σπειρών
- Δοκίμια ίδιας ενεργής διατομής αλλά διαφορετικών σπειρών/διαμέτρου

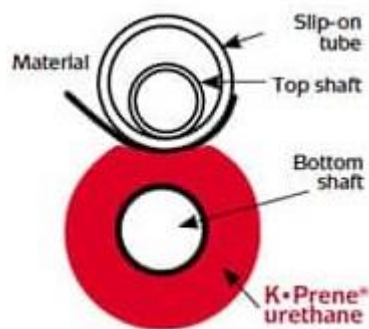
Οι σειρές αυτές έχουν ως σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των σπειροειδούς (ανοιχτής) διατομής στην ικανότητα απορρόφησης. Η σύγκριση και αξιολόγηση θα γίνει μεμονομένα για κάθε σειρά δοκιμίων. Τέλος, θα γίνει μοντελοποίηση συγκεκριμένων δοκιμίων από τις παραπάνω σειρές για τη μελέτη της συμπεριφοράς τους σε σχέση με το πείραμα, καθώς και περαιτέρω διερεύνηση

1.3 Κυλινδρική Κάμψη

Η κυλινδρική κάμψη αποτελεί ένα είδος κάμψης το οποίο χρησιμοποιείται για να προσδώσει καμπυλότητα σε ένα μεταλλικό έλασμα. Τα ελάσματα μπορούν να διαμορφωθούν με αυτό τον τρόπο κατά κύριο λόγο είτε σε κυλινδρικά, είτε σε κωνικά. Αλλά με τη διαφοροποίηση της ακτίνας καμπυλότητας, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας πληθώρας σχημάτων όπως για παράδειγμα η σπειροειδής διάταξη στο πειραμά. Η κάμψη αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια καμπτικών μηχανών (κουρμπαδόρων), όπου μεταλλικό έλασμα τοποθετείται μεταξύ των ράουλων της μηχανής και με κατάλληλη μετάθεση και περιστροφή επιτυγχάνεται η διαμόρφωση του ελάσματος [31]. Οι καμπτικές μηχανές, ανάλογα με τον αριθμό ράουλων που διαθέτουν, χωρίζονται σε 3 βασικές κατηγορίες :

- 2 ράουλων
- 3 ράουλων
- 4 ράουλων

Οι καμπτικές μηχανές 2 ράουλων αποτελούνται από ένα περιστρεφόμενο ράουλο μεγάλης διαμέτρου, επενδεδυμένο με ουρεθάνη, το οποίο κινείται κατακόρυφα και ένα σταθερό μεταλλικό ράουλο μικρής διαμέτρου στο πάνω μέρος.

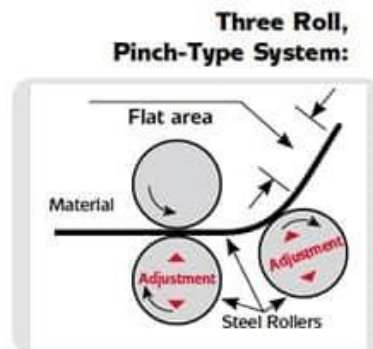


Εικόνα 1.2 Καμπτική Μηχανή 2 ράουλων [33]

Οι καμπτικές μηχανές 3 ράουλων με τη σειρά τους χωρίζονται σε 2 κατηγορίες :

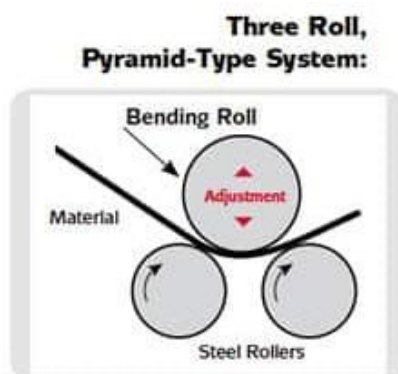
- Pinch-type
- Pyramid-type

Στις pinch-type καμπτικές μηχανές, το έλασμα συγκρατείται μεταξύ 2 κατακόρυφων ράουλων και με τη βοήθεια ενός τρίτου (ράουλο διαμόρφωσης) καθορίζεται η καμπυλότητα του τελικού ελάσματος.



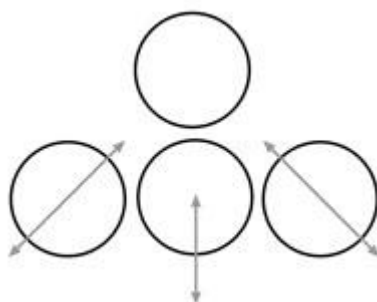
Εικόνα 1.3 Καμπτική μηχανή 3 ράουλων, pinch-type [33]

Στις pyramid-type καμπτικές μηχανές, έχουμε 2 στάθερα ράουλα στο κάτω μέρος και στο πάνω μέρος το περιστρεφόμενο ράουλο το οποίο μετακινείται κατακόρυφα.



Εικόνα 1.4 Καμπτική μηχανή 3 ράουλων, pyramid-type [33]

Οι καμπτικές μηχανές 4 ράουλων μοιάζουν αρκετά στη λειτουργία τους με τις μηχανές 3 ράουλων pinch-type, καθώς η μόνη τους διαφορά είναι η ύπαρξη ενός ράουλου διαμόρφωσης στην αρχή. Βέβαια, αυτή η διαφορά είναι και το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της μηχανής καθώς μπορεί να γίνει διαμόρφωση κι από τις 2 πλευρές [34].



Εικόνα 1.5 Καμπτική μηχανή 4 ράουλων [32]

1.4 Δείκτες Crashworthiness

Τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς ενός υλικού έναντι πρόσκρουσης ονομάζονται crashworthiness characteristics, και αποτελούν τη βάση για τη σύγκριση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας ενός υλικού μέσω της παραμόρφωσής του ή της θραύσης του [26]. Τα μεγέθη αυτά προσδιορίζονται μέσω των μετρήσεων που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια του πειράματος που διαμορφώνουν και την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και είναι τα εξής :

➤ Μέσο Φορτίο (Mean Crush Load) P_m

Αντιστοιχεί στο λόγο του αθροίσματος των επιμέρων μετρήσεων του φορτίου P_i προς το σύνολο των μετρήσεων n που ελήφθησαν

$$P_m [kN] = \frac{\sum_{i=1}^n P_i [kN]}{n}$$

➤ **Μέγιστο Φορτίο (Peak Crush Load) P_{max}**

Αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή φορτίου που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος

$$P_{max}[kN] = \max(P_i [kN])$$

➤ **Ενέργεια Απορρόφησης (Energy Absorption) E_{abs}**

Αντιστοιχεί στη συνολική ενέργεια που απορροφά το υλικό κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης. Η τιμή του μπορεί να βρεθεί μέσω του υπολογισμού του εμβαδού της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης.

$$E_{abs}[J] = \int_0^s P(s)[kN] ds[mm]$$

➤ **Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου (Crush Force Efficiency) CFE**

Αντιστοιχεί στο λόγο Μέσου Φορτίου P_m προς το Μέγιστο Φορτίο P_{max} και είναι επιθυμητό, ο λόγος αυτός, όσο είναι εφικτό, να τείνει στο 1.

$$CFE(\%) = \frac{P_m[kN]}{P_{max}[kN]} \times 100$$

➤ **Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (Specific Energy Absorption) SEA**

Αντιστοιχεί στο λόγο της συνολικής ενέργειας απορρόφησης E_{abs} του υλικού προς το ποσοστό της μάζας που έχει καταρρεύσει m_c .

$$SEA [J/gr] = \frac{E_{abs}[J]}{m_c[gr]}$$

1.5 Αξονική κατάρρευση σωλήνων κυκλικής διατομής

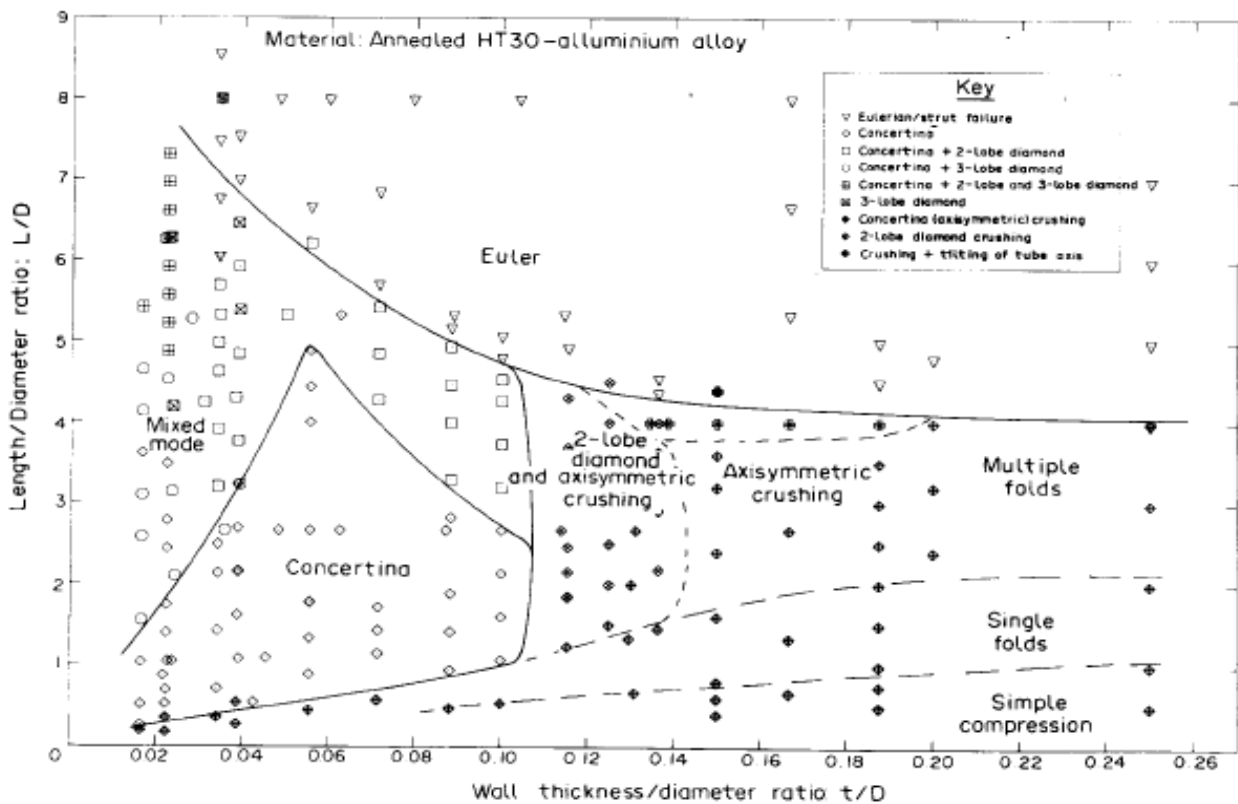
Όταν σε έναν κυκλικό λεπτότοιχο σωλήνα ασκείται αξονικό θλιπτικό φορτίο, καταρρέει με αξονοσυμμετρικό (εκτατός) ή μη συμμετρικό (μη-εκτατός) τρόπο που εξαρτάται από τον λόγο της διαμέτρου προς το πάχος του (D/t). Ο αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης είναι γνωστός και ως φουσαρμόνικα (concertina mode). Κατά τον σχηματισμό των εκτατών λοβών, παρατηρείται έκταση κατά πλάτος του δοκιμίου με αποτέλεσμα την αύξηση της τελικής διαμέτρου του δοκιμίου. Ο μη συμμετρικός τρόπος κατάρρευσης είναι γνωστός ως διαμάντι (diamond mode). Το μοτίβο κατάρρευσης διαμαντιού χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των περιφερειακών λοβών που στις περισσότερες περιπτώσεις κυμαίνεται μεταξύ δύο και πέντε [3]. Κάθε λοβός που σχηματίζεται έχει την ίδια δομή με τον προηγούμενο. Λόγω της αλλαγής της γεωμετρίας του υποβάθρου όμως, σχηματίζεται υπό μια γωνία σε σχέση με τον προηγούμενο. Η γωνία περιστροφής εξαρτάται από την μορφή του λοβού και υπολογίζεται βάσει του εξής τύπου :

$$\text{Γωνία Περιστροφής (rad)} = \frac{\pi}{v}, \text{ όπου } v \text{ ο αριθμός των λοβών}$$

Για συγκεκριμένες τιμές του (D/t) σε ένα σωλήνα, μπορεί η κατάρρευση να ξεκινήσει με μοτίβο δαχτυλιδιού και να αλλάξει σε μοτίβο διαμαντιού, δηλαδή, παρουσιάζουν έναν μικτό τρόπο κατάρρευσης. Βάση πολλών πειραμάτων με σωλήνες διαφόρων διαστάσεων, μπορεί να εξαχθεί ένα διάγραμμα κατάταξης του τρόπου κατάρρευσης [25] ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι. Σε γενικές γραμμές το μοτίβο κατάρρευσης διαμαντιού συμβαίνει για λόγο (D/t) μεγαλύτερο του 80. Για (D/t) μικρότερο του 50 και λόγο μήκους προς το πάχος (L/t) μικρότερο του 2, παρουσιάζεται το μοτίβο δαχτυλιδιού, ενώ για το ίδιο (D/t) αλλά με (L/t) μεγαλύτερο του 2 εμφανίζεται ο μικτός τρόπος κατάρρευσης. Τέλος, για κυλίνδρους με μεγάλο μήκος συμβαίνει ο λυγισμός τύπου Euler [3].



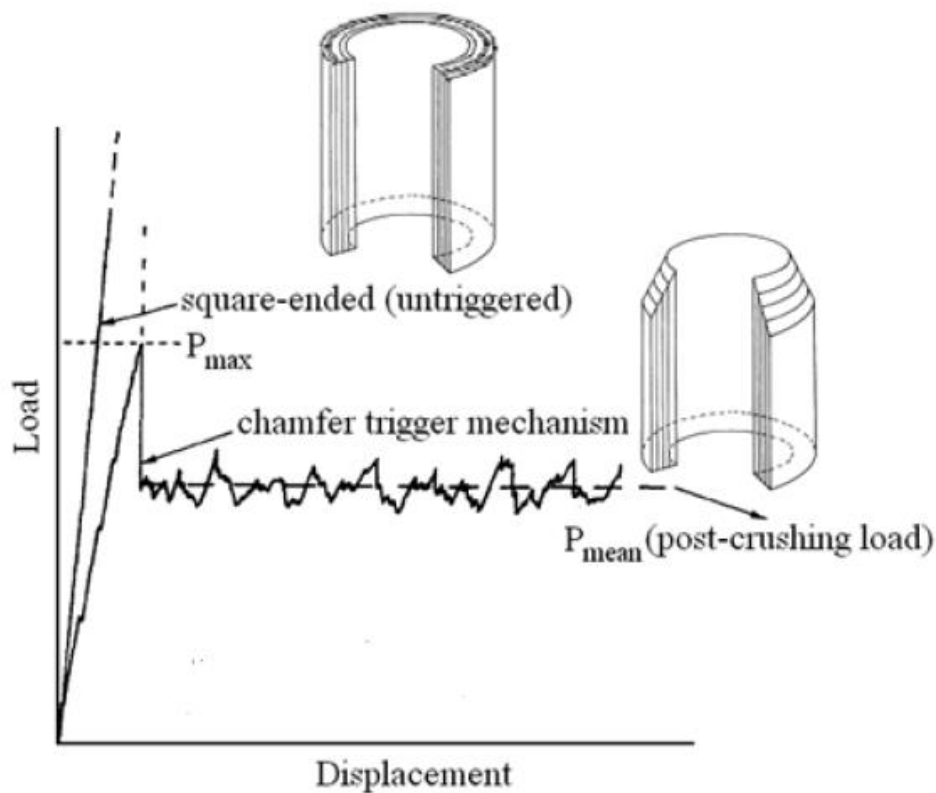
Εικόνα 1.6 Αξονοσυμμετρικός, Μη συμμετρικός και Μικτός τρόπος κατάρρευσης



Εικόνα 1.7 Διάγραμμα κατάταξης των μορφών κατάρρευσης (deformation mode) κυλινδρικών σωλήνων από κράμα αλουμινίου. [25]

1.6 Διαμόρφωση άκρων (triggering)

Ο μηχανισμός triggering είναι η διαδικασία κατά την οποία αφαιρείται προοδευτικά υλικό από το τοίχωμα του δοκιμίου για τη δημιουργία και διαμόρφωση ενός πιο "φιλικού" προς κατάρρευση αρχικού άκρου. Μέσω της διαμόρφωσης αυτής, επιτυγχάνονται καλύτερα χαρακτηριστικά ενεργειακής απορρόφησης. Πιο συγκεκριμένα, βοηθά στην επίτευξη ενός μικρότερου αρχικού φορτίου, το οποίο μεταφράζεται σε μεγαλύτερο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου CFE. Τέλος, μέσω της διαμόρφωσης αυτής δίνεται η δυνατότητα να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες κατάρρευσης ενός δοκιμίου μέσω λυγισμού [26].



Εικόνα 1.8 Διαγραμματική απεικόνιση μηχανισμού triggering [27]

Κεφάλαιο 2 : Πειραματικό Μέρος

Σύνοψη

Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής της εκάστοτε σειράς δοκιμών με τη μέθοδο της κυλινδρικής κάμψης (roll bending). Επίσης, επισημαίνεται η ονοματολογία και χαρακτηριστικά των δοκιμών, ο πειραματικός εξοπλισμός, καθώς και οι συνθήκες του πειράματος.

2.1 Δοκίμια

Τα χαρακτηριστικά και οι τελικές διαστάσεις των δοκιμών έγιναν σε συνεννόηση με τους επιβλέποντες καθηγητές. Τα δοκίμια είναι από αλουμίνιο πάχους $t=0,5$ mm. Η διαμόρφωση των δοκιμών έγινε με τη βοήθεια της κυλινδρικής καμπτικής μηχανής (κουρμπαδόρου) που βρίσκεται στο εργαστήριο. Πρόκειται για μηχανή κάμψης 3 ράουλων (3-roll bending machine pinch-type) της εταιρείας Optimum (εικ. 2.1-2.3), η οποία συγκρατείται σε μέγγενη.



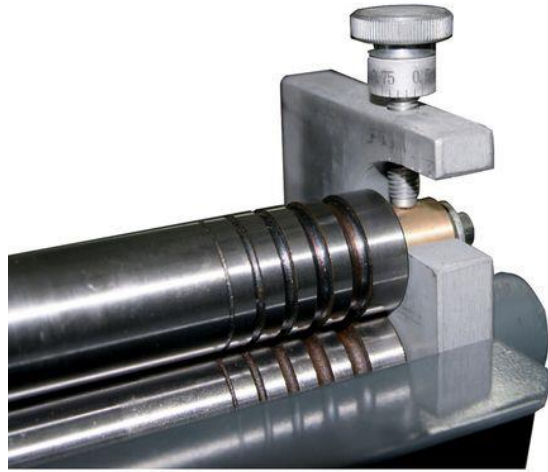
(a)



(b)



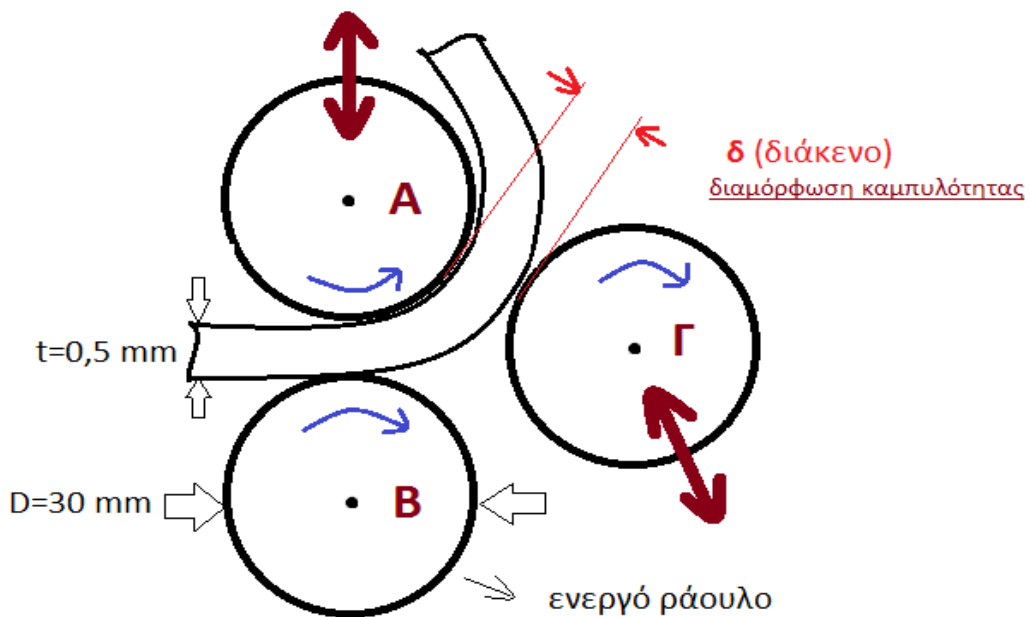
(c)



(d)

Εικόνα 2.1 Καμπτική Μηχανή Εργαστηρίου (a) Ισομετρική Όψη, (b) Πλάγια Προβολή, (c) Πλάγια Όψη, (d) Μετρητική Διάταξη για τη ρύθμιση της θέσης του ράουλου A

Η όλη κατασκευή μπορεί να απλοποιηθεί στο κάτωθι σχέδιο. Τονίζεται ότι το ράουλο Γ, μετά από την αρχική ρύθμιση του, παραμένει σταθερό καθ'όλη τη διάρκεια της κατασκευής των δοκιμίων για την αποφυγή πολύπλοκων ρυθμίσεων, συνεχή δηλαδή έλεγχο στη διαμόρφωση των επόμενων σπειρών. Το ράουλο A είναι αυτό το οποίο αλλάζει κάθε φορά στα πολλαπλάσια του πάχους του δοκιμίου για τη διαμόρφωση της εκάστοτε σπείρας (εικ.2.4).



Εικόνα 2.2 Σχεδιάγραμμα Πλάγιας Όψης της καμπτικής μηχανής κατά την κάμψη

2.1.1 Δοκίμια σταθερής διαμέτρου, διαδοχικών ακεραίων σπειρών

Η πρώτη σειρά δοκιμών αποτελείται από κελύφη σταθερής διάμετρου και διαδοχικών ακεραίων σπειρών και πιο συγκεκριμένα, μίας έως και πέντε. Η συγκεκριμένη σειρά δοκιμών δημιουργήθηκε με σκοπό να διασαφηνιστεί η σχέση των σπειρών με την ενέργεια απορρόφησης του κάθε κελύφους, και πιο συγκεκριμένα αν πολλαπλάσιες σπείρες συνεπάγονται πολλαπλάσια ενέργεια απορρόφησης. Όλα τα δοκίμια έχουν ύψος ίσο με 120 χιλιοστά, $H=120$ mm.

Αρχικά, γίνεται η ρύθμιση της καμπτικής μηχανής. Με δεδομένη την αρχική θέση του ράουλου Α στη θέση των 0,5 χιλιοστών (πάχος ελάσματος), ρυθμίζεται η απόσταση μεταξύ των ράουλων Α και Γ, δηλαδή το διάκενο, ίσο με 2 χιλιοστά, $\delta = 2$ mm. Η συγκεκριμένη τιμή επιλέχθηκε για λόγους απρόσκοπτης κατεργασίας κάμψης και στα επόμενα πάσα. Επίσης, με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μια αρχική καμπυλότητα/διάμετρο η οποία είναι καλή και για την τοποθέτηση των δοκιμών στα έμβολα της INSTRON ($\varnothing 150$). Στη συνέχεια, το έλασμα τοποθετείται ανάμεσα στα ράουλα Α, Β μέχρι να τερματίσει πάνω στο ράουλο Γ. Για καλύτερη συγκράτηση και κατ'επέκταση προώθηση του ελάσματος, μειώνεται η απόσταση Α-Β στα 0,45 χιλιοστά περίπου. Μετά περιστρέφεται ο μοχλός του ράουλου Β μέχρι την ολοκλήρωση της πρώτης σπείρας. Έπειτα, μεγαλώνει κάθε φορά η απόσταση Α-Β (εικ. 2.4) στο πολλαπλάσιο του πάχους για κάθε σπείρα και αντίστοιχα μειώνεται ελάχιστα για καλύτερη συγκράτηση.

Κατά τη διαμόρφωση μίας δοκιμαστικής σπείρας με διάκενο $\delta=2$ mm, μετρήθηκε μια διάμετρος περίπου ίση με 41mm. Με βάση αυτή τη διάμετρο, μπορεί να υπολογιστεί το θεωρητικό μήκος των ελασμάτων με τον τύπο, $L = n \times \pi \times D$, όπου n ο αριθμός των σπειρών.

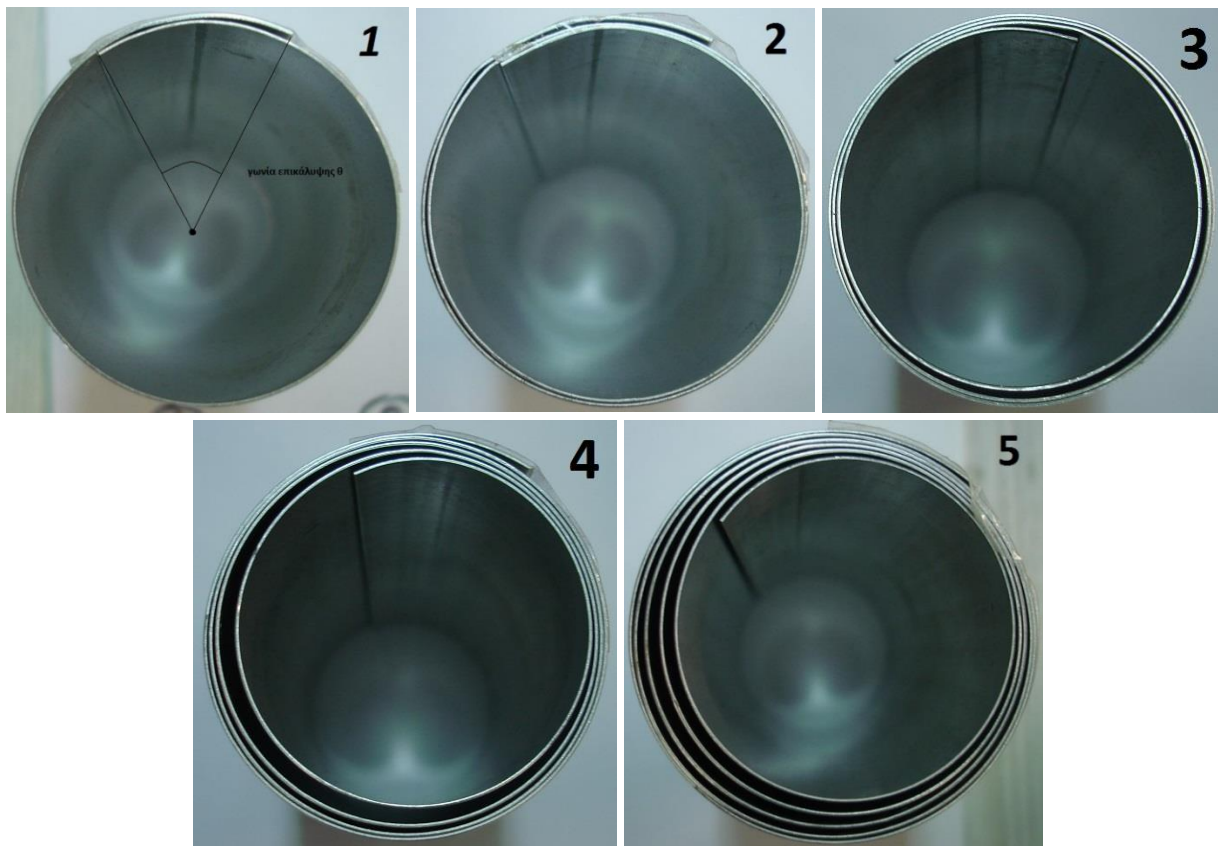
Σε όλα τα δοκίμια της πρώτης σειράς όμως, επιλέχθηκε μια επικάλυψη της τάξης των 30° μεταξύ της εσωτερικής και της τελικής εξωτερικής σπείρας. Ο λόγος που επιλέχθηκε η επικάλυψη ήταν για να μην υπάρχει σαφής ασυνέχεια όσον αφορά τη συνοχή υλικού στη διατομή μας. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται μια εικόνα περίπου κλειστής διατομής με ομοιόμορφη κατανομή υλικού. Για να συμβεί αυτό επιλέχθηκε ένα μήκος (B) σχετικά μεγαλύτερο από το υπολογισθέν για τον κάθε αριθμό σπειρών. Πραγματοποιείται κάμψη του ελάσματος μέχρι λίγο πριν την τελική σπείρα, στη συνέχεια απομακρύνεται το έλασμα από την καμπτική μηχανή και τέλος, μετράται με εύκαμπτη μετρητική ταινία το μήκος του ελάσματος (L') που υπολείπεται μέχρι τη συμπλήρωση της σπείρας. Το επιπλέον μήκος της επικάλυψης 30° είναι ίσο με $L/12$.

Με δεδομένο $L_{\Sigma\gamma\omega} = L' + L/12$, μπορεί να βρεθεί το μήκος που πρέπει να αποκοπεί στο ψαλίδι, όπου είναι ίσο με $B - L_{\Sigma\gamma\omega}$, για τη διαμόρφωση του τελικού μήκους ελάσματος. Τέλος, γίνεται επανατοποθέτηση του δοκίμιου στην καμπτική μηχανή και ολοκληρώνεται η κάμψη με την περιστροφή του μοχλού του ράουλου Β. Τα δοκίμια συγκρατήθηκαν με ταινία μετά το πέρας της κατεργασίας, μέχρι τη στιγμή της αξονικής κατάρρευσης στη μηχανή δοκιμών, με γωνία επικάλυψης λίγο μεγαλύτερη των 30° , ώστε αφού ελευθερωθούν και λόγω του spring back, να επιτευχθεί η επιθυμητή γωνία επικάλυψης 30° . Γι'αυτό το λόγο, στον πίνακα 1 έχουν καταγραφεί οι διάμετροι initial και final, οι οποίες αναφέρονται στα δοκίμια όταν είναι συγκρατημένα και ελεύθερα.

Έτσι διαμορφώθηκε ο κάτωθι πίνακας με τα χαρακτηριστικά της πρώτης σειράς δοκιμών, τα οποία ονοματίστηκαν βάσει των αριθμών σπειρών τους :

Δοκίμια	Μήκος Ελάσματος L (mm)	Μάζα m (gr)	Μέση διάμετρος D m (mm) initial		Μέση διάμετρος D m (mm) final		Υψος H (mm)	Πάχος ελάσματος t (mm)
			Εσωτερική	Εξωτερική	Εσωτερική	Εξωτερική		
1	155	24,5	41	42,7	45	46	120	0,5
2	300	47,6		44,3	43,7	46,8		
3	444	70,9		46	42,5	48		
4	592	94,1		47,8	41,7	49,1		
5	737	117		48,6	40,9	51,4		

Πίνακας 2.1: Διαστάσεις και Χαρακτηριστικά 1^{ης} Σειράς Δοκιμίων



(a)



(b)



(c)

Εικόνες 2.3 Όψεις 1^{ης} σειράς δοκιμών (α)Κατόψεις συγκρατημένων δοκιμών, (b)Ισομετρική Όψη συγκρατημένων δοκιμών, (c)Κατόψεις ελεύθερων δοκιμών

2.1.2 Δοκίμια ίδιας ενεργής διατομής, διαφορετικών σπειρών/διαμέτρου

Η δεύτερη σειρά δοκιμών αποτελείται από κελύφη με ίδια ενεργή διατομή, διαφοροποιώντας όμως την καμπυλότητα του ελάσματος μέσω του διακένου δ , το οποίο συντελεί σε διαφορετικό, όχι απαραίτητα ακεραίο, αριθμό σπειρών και διαμέτρου. Στην ουσία στόχος είναι η μελέτη της επίδρασης των σπειρών και της διαμέτρου στα πειραματικά μεγέθη, διατηρώντας όπως αναφέρθηκε την ενεργή διατομή σταθερή. Ως κέλυφος αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το δοκίμιο 3, καθώς στα δοκίμια 4 και 5 παρατηρείται το φαινόμενο της σφυρηλάτησης στο τέλος. Επίσης, έχοντας ως βάση των δοκιμών μας το μήκος των 444 χιλιοστών ($L_3=444$ mm) και με δεδομένη τη μέγιστη δυνατή διάμετρο του εμβόλου της INSTRON ($\varnothing 150$), υπάρχει η δυνατότητα να κατασκευαστεί δοκίμιο με 1 σπείρα και διάμετρο $D=120$ mm. Οπότε δεν υφίσταται κίνδυνος να χάσει επαφή το κέλυφος κατά τη φάση της συμπίεσης, το οποίο θα οδηγήσει σε λάθος μέτρηση.

Για τη ρύθμιση της μηχανής μας, με δεδομένο πια το μήκος ίσο με 444mm, πραγματοποιούνται αλλαγές στις τιμές του διάκενου δ (απόσταση ράουλων Α-Γ) ξεκινώντας από 1,5mm και φθάνοντας μέχρι τα 6,5mm, με βήμα 0,5mm. Αυτό οδηγεί σε διαφορετικές διαμετρους κελυφών, διαφορετικό αριθμό σπειρών και διαφορετικές επικαλύψεις. Η διαδικασία κατασκευής είναι παρόμοια με αυτή της πρώτης σειράς δοκιμών. Ορίζεται η αρχική απόσταση Α-Β στο πάχος του ελάσματος ($t=0,5$ mm), και μετά ρυθμίζεται το ράουλο Γ για την επίτευξη του επιθυμητού διάκενου δ . Αντίστοιχα με πριν, το ράουλο Γ μένει σταθερό μετά την αρχική ρύθμιση. Το έλασμα τοποθετείται στη μηχανή μέχρι να τερματίσει πάνω στο ράουλο Γ και μειώνεται η απόσταση Α-Β, όπως και πριν, στα 0,45 mm για καλύτερη συγκράτηση. Πραγματοποιείται περιστροφή του μοχλού του ράουλου Β για τη δημιουργία της πρώτης σπείρας και στη συνέχεια, αυξάνεται η απόσταση των ράουλων στα πολλαπλάσια του πάχους για την

ολοκλήρωση των επόμενων σπειρών. Σε αντίθεση με την πρώτη σειρά δοκιμίων, εδώ δε χρειάζεται η αποβολή περίσσειας υλικού στο τέλος γιατί το μήκος ελάσματος είναι δεδομένο.

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια μετρητικής ταινίας γίνεται μέτρηση της εσωτερικής και εξωτερικής διαμέτρου των δοκιμίων και χρησιμοποιώντας τον τύπο $L = n \times \pi \times D$, με γνωστό L, γίνεται γνωστός ο αριθμός των σπειρών του κάθε δοκιμίου. Τέλος, με χρήση μοιρογνωμόνιου, γίνεται μέτρηση τως γωνιών επικάλυψης.

Δοκίμια	Αρχικό διάκενο δ (mm)	Μάζα m (gr)	Μέση Διάμετρος D m (mm)		Γωνία Επικάλυψης θ (°)	Αριθμός Σπειρών n	Υψος Ελάσματος H (mm)	Μήκος Ελάσματος L (mm)
			Εσωτερική	Εξωτερική				
3.1	1,5	70,7	37,5	42	191	3,56	120	444
3.2	2	70,7	40	48	72	3,21		
3.3	2,5	70,7	45,5	53	320	2,87		
3.4	3	70,4	51	58	210	2,59		
3.5	3,5	70,6	58	62	125	2,36		
3.6	4	70,5	60	64	86	2,28		
3.7	4,5	70,9	68	74	350	1,99		
3.8	5	70,2	81	87	252	1,68		
3.9	5,5	70,9	94	100	180	1,46		
3.10	6	70,3	110,5	113	101	1,27		
3.11	6,5	70,7	118	120	62	1,19		

Πίνακας 2.2: Διαστάσεις και Χαρακτηριστικά 2^{ης} Σειράς Δοκιμίων



(a)



(b)

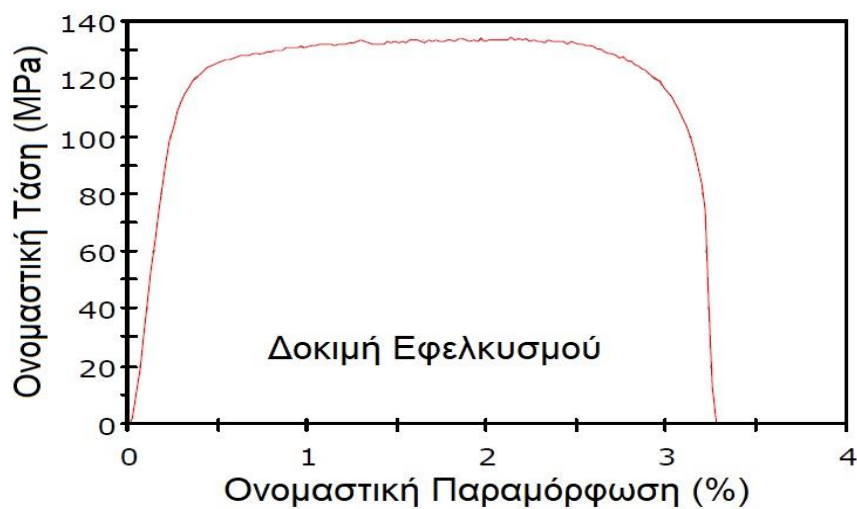
Εικόνα 2.4 Όψεις 2^{ης} σειράς δοκιμίων (a) Κάτοψη, (b) Ισομετρική Όψη

2.1.3 Χαρακτηριστικά-Μηχανικές Ιδιότητες Υλικού

Τα δοκίμια μας κατασκευάστηκαν από κράμα αλουμινίου. Τα κύρια χαρακτηριστικά του συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson ν	Πυκνότητα ρ (gr/cm³)
69	0,33	2,7

Ενώ η συνολική συμπεριφορά του αλουμινίου σε δοκιμή εφελκυσμού παρουσιάζεται στην καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων που ακολουθεί.



Εικόνα 2.5 Καμπύλη Τάσεων-Παραμορφώσεων του υλικού

Τονίζεται, επίσης, ότι η κάμψη γίνεται στη διεύθυνση έλασης του αλουμινίου. Επομένως, το έλασμα των κελυφών, λόγω της απαραίτητης κάμψης διαμόρφωσης, υπόκειται σε περαιτέρω κατεργασία (work-hardening) ανάλογα με την επιτευχθείσα καμπυλότητα. Οπότε, υπάρχει μια μικρή διαφορά στις τελικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού του κελύφους ανάλογα με τη διαμετρό του, γιατί μικρότερη διάμετρος σημαίνει μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας, άρα μεγαλύτερη καμπυλότητα και μεγαλύτερη κράτυνση. Επειδή, όμως, το πάχος του ελάσματος είναι πολύ μικρό ($t=0,5\text{mm}$) και η ακτίνα καμπυλότητας σχετικά μικρή, η διαφοροποίηση αυτή είναι σχεδόν αμελητέα.

2.2 Πειραματικός Εξοπλισμός

Τα πειράματα έλαβαν μέρος στην αίθουσα Μηχανικών Δοκιμών στον πρώτο όροφο του τομέα. Η αξονική καταπόνηση των δοκιμίων έγινε στην πρέσα δοκιμών *INSTRON 4482* του εργαστηρίου, ονομαστικού φορτίου 10 kN.



Εικόνα 2.6 Μηχανή δοκιμών *INSTRON 4482*

Η πρέσα αποτελείται από 3 κυρίως μέρη:

- Το πλαίσιο, μορφής Ο, το οποίο περιλαμβάνει τους οδηγούς, κατά μήκος των οποίων κινείται η κινητή κεφαλή, και την τράπεζα, όπου φιλοξενείται η κάτω πλάκα συμπίεσης .
- Την κινητή κεφαλή, όπου είναι εγκατεστημένο το δυναμόμετρο και πάνω σε αυτό στερεώνεται η πάνω πλάκα συμπίεσης
- Τον πίνακα ελέγχου, ο οποίος χρησιμοποιείται για το καλιμπράρισμα των αρχικών συνθηκών του πειράματος.

Τέλος, η πρέσα συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος μέσω κατάλληλου λογισμικού (bluehill) μας δίνει τα αποτελέσματα και τα απαραίτητα διαγράμματα του πειράματος. Επίσης, ορίζονται οι συνθήκες του πειράματος όπως η ταχύτητα πρόωσης της κινητής κεφαλής [26].



Εικόνα 2.7 Πειραματική Διάταξη στην αίθουσα μηχανικών δοκιμών του Τομέα Κατεργασιών του ΕΜΠ.

2.3 Συνθήκες Πειραμάτων

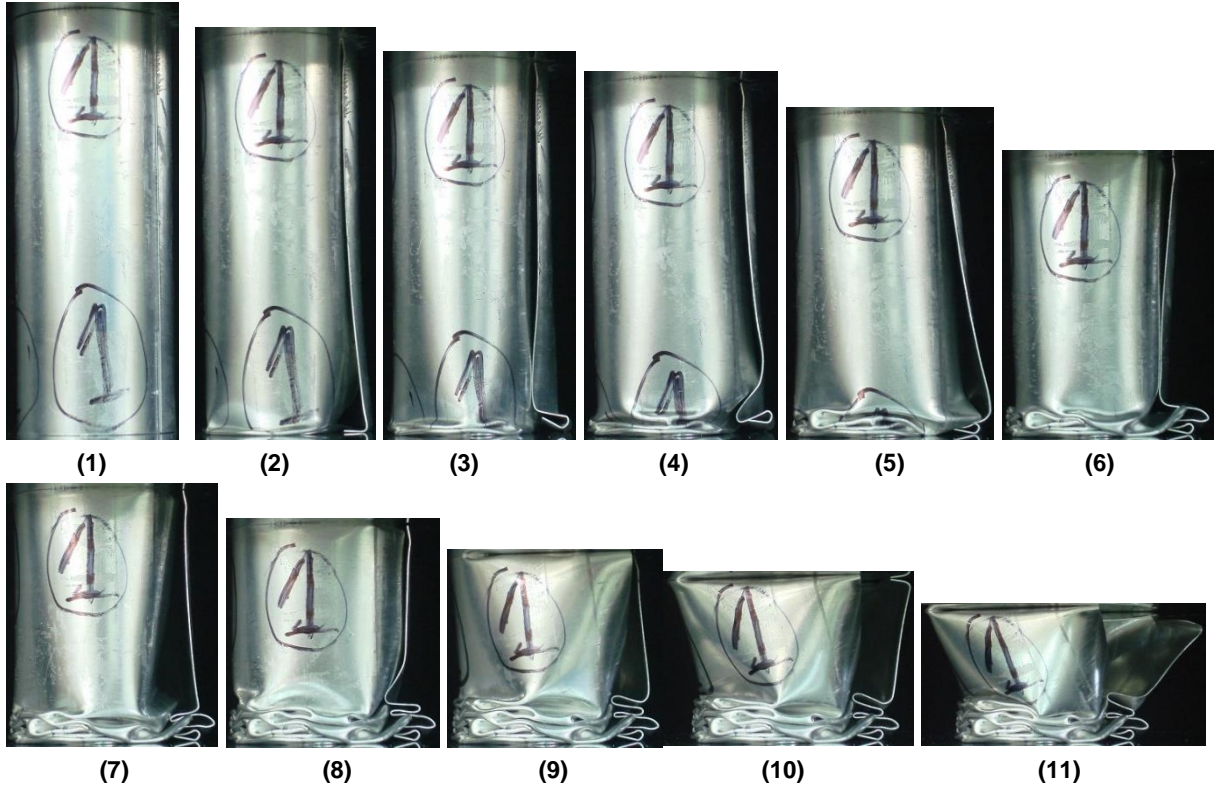
Τα δοκίμια συμπίεστηκαν κατά 80mm, στα 2/3 του συνολικού ύψους δοκιμίων. Η ταχύτητα φόρτισης ορίστηκε στα $20 \text{ mm}/\text{min}$, με τη διαδικασία να χαρακτηρίζεται οιοσεί στατική. Επίσης, κατά τη διάρκεια του πειράματος γίνονταν η λήψη φωτογραφιών ανά τακτά χρονικά διαστήματα για την απεικόνιση του τρόπου κατάρρευσης των δοκιμίων.

Κεφάλαιο 3: Πειραματικά Αποτελέσματα

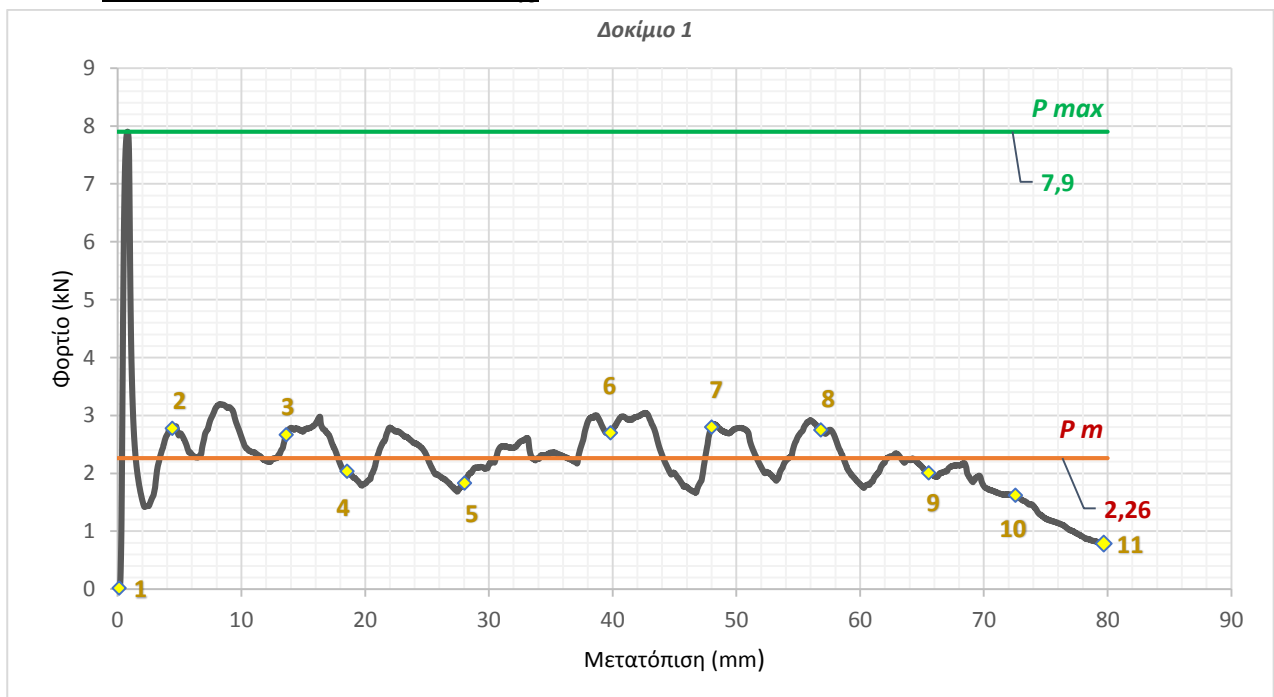
3.1 Δοκίμια σταθερής διαμέτρου, διαδοχικών ακεραίων σπειρών

➤ Δοκίμιο 1

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 24,5 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 2,26 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 7,9 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 181 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 11,08 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 28,63 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωση



Ανοψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



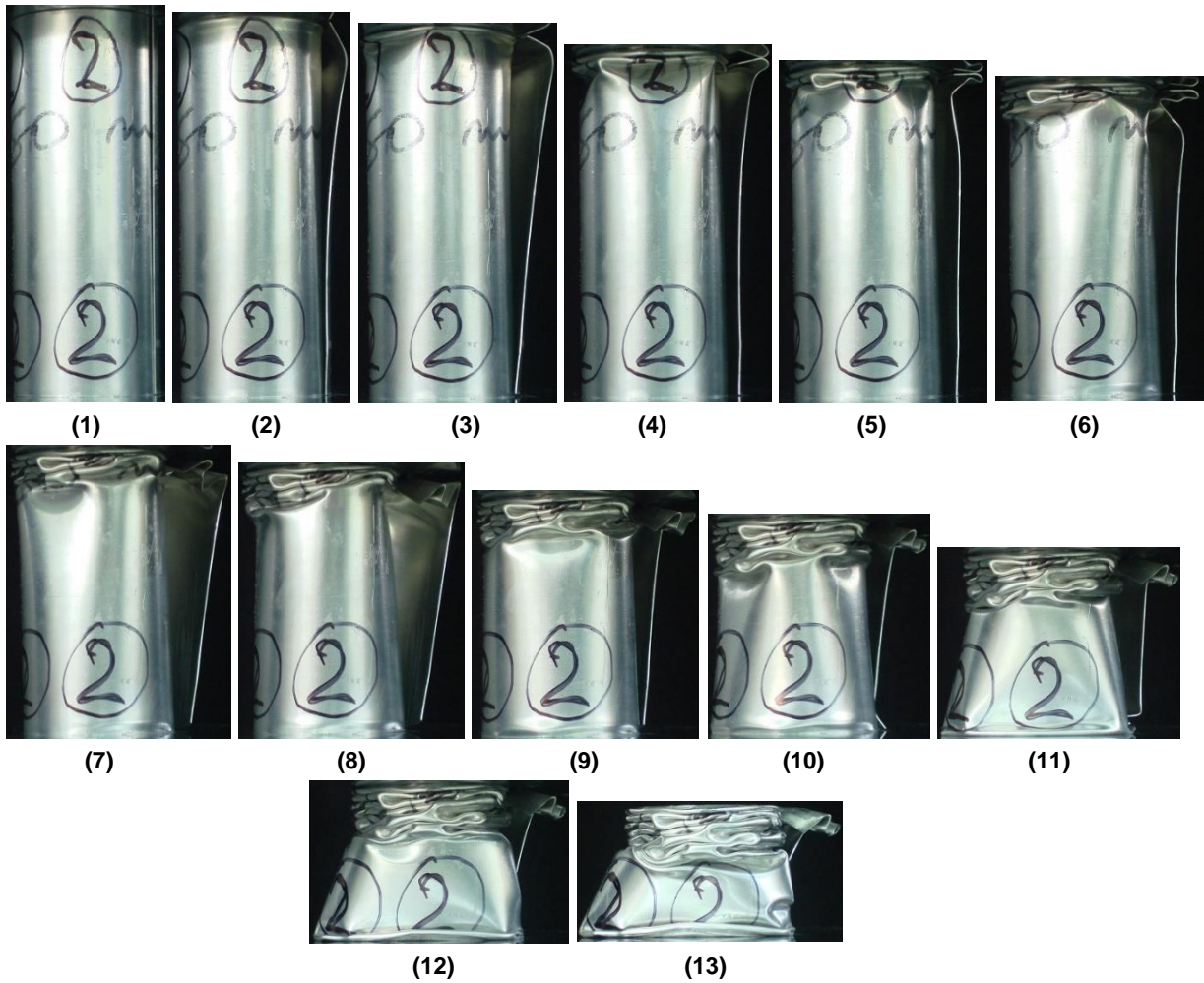
Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός - Τρόπος κατάρρευσης

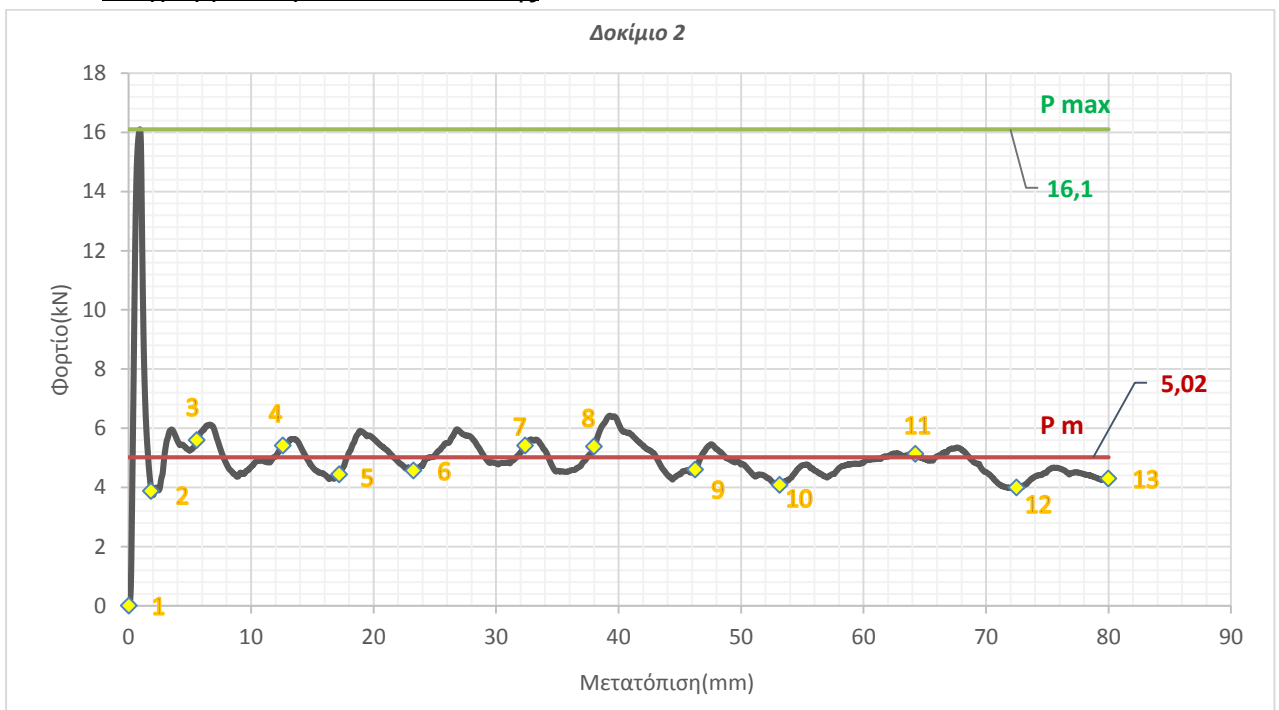
Η διαδικασία κατάρρευσης ξεκινάει με τη δημιουργία του πρώτου λοβού στο κάτω μέρος του δοκιμίου και συνεχίζεται με τη δημιουργία μη εκατών λοβών προς τα επάνω. Ο τρόπος κατάρρευσης μπορεί προσεγγιστικά να προσδιοριστεί ως μη αξονοσυμμετρικός, και πιο συγκεκριμένα ως 3-D, μοτίβου διαμαντιού. Τέλος, παρατηρούμε ότι μεταξύ των φάσεων 8-9, χάνεται η επαφή μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής σπείρας και αυτό οδηγεί στη σταδιακή μείωση του φορτίου όπως φαίνεται στο διάγραμμα, καθώς δε βοηθά στη δημιουργία λοβού.

➤ Δοκίμιο 2

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 47,6 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 5,02 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 16,1 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 401,5 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 12,65 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 31,17 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη



Άνωψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



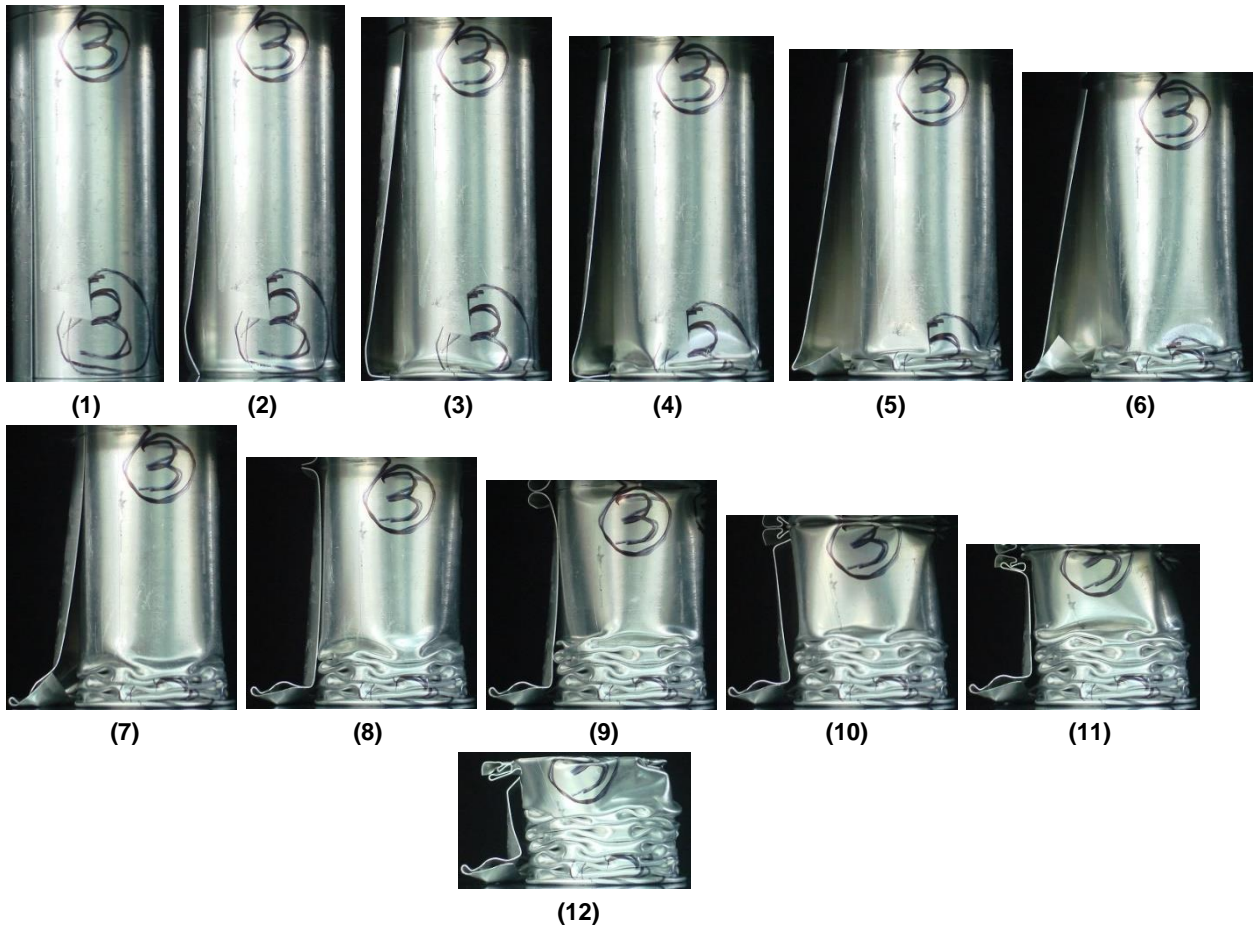
Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός -Τρόπος κατάρρευσης

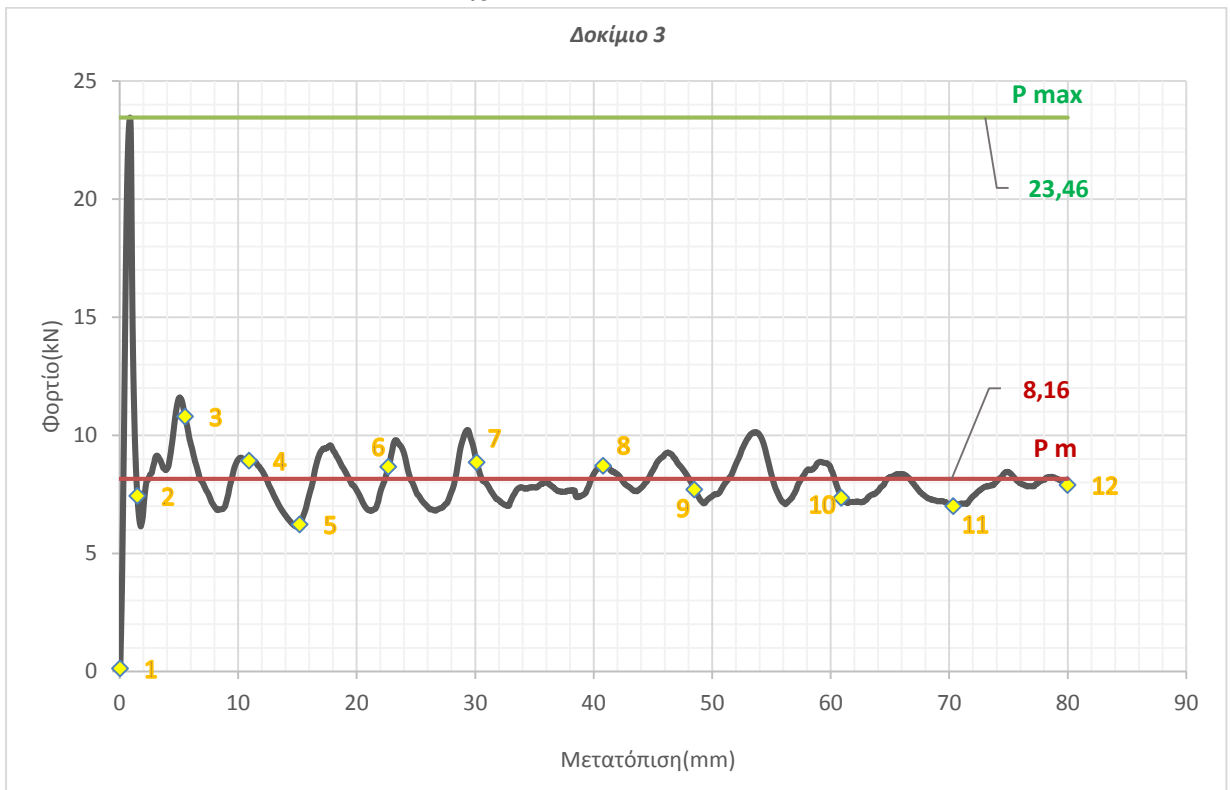
Το δοκίμιο 2 ανέπτυξε αρχικά μέτωπο κατάρρευσης στο πάνω μέρος, με τη δημιουργία των πρώτων μη εκατών λοβών. Ο τρόπος κατάρρευσης είναι μη αξονοσυμμετρικός και προσεγγίζει μοτίβο διαμαντιού, και πιο συγκεκριμένα 3-D. Όμως, κατά τη φάση της συμπίεσης από τα 25 χιλιοστά και μετά (στιγμιότυπο 6), έχουμε και τη δημιουργία ενός πλήρους μη εκατού λοβού στο κάτω μέρος του δοκιμίου. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι σε σχέση με το δοκίμιο 1 (μίας σπείρας) έχουμε αντίστοιχα διπλάσιο μέσο και μέγιστο φορτίο για διπλάσιες σπείρες.

➤ Δοκίμιο 3

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 70,9 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 8,16 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 23,46 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 652,47 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 13,8 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 34,77 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη



Άνωψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



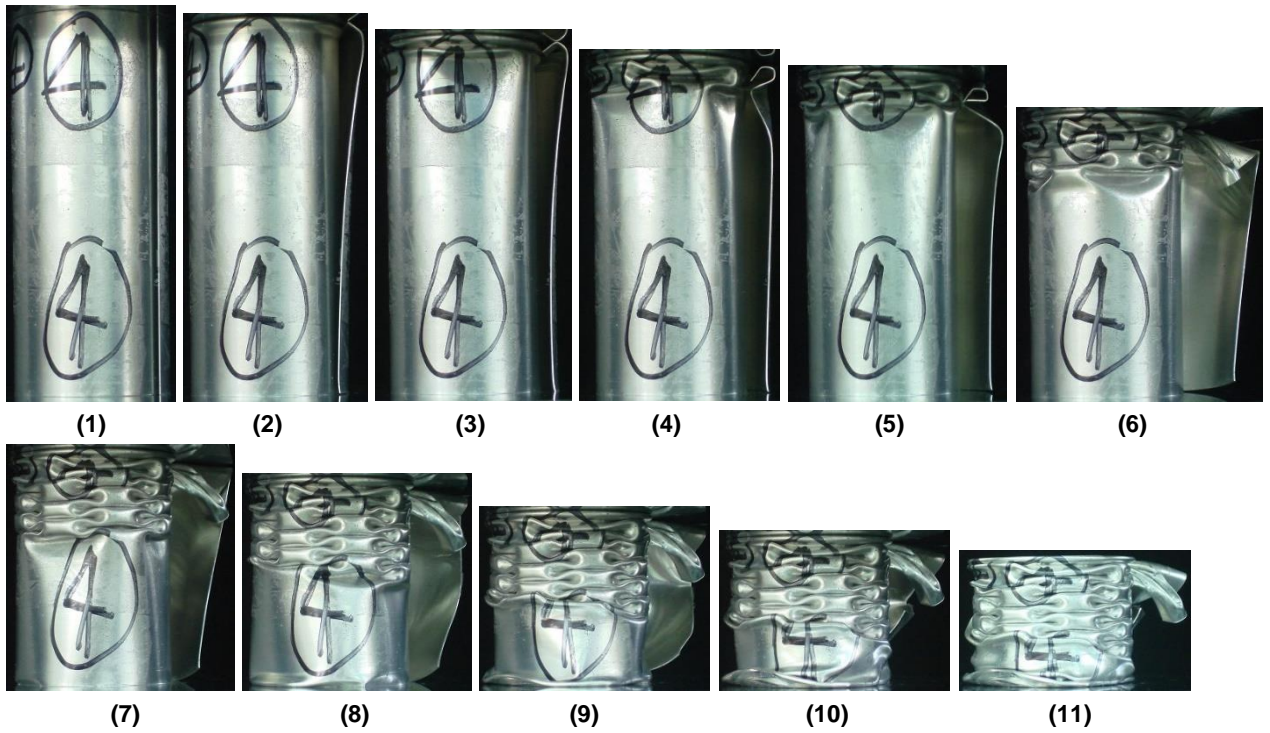
Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός - Τρόπος κατάρρευσης

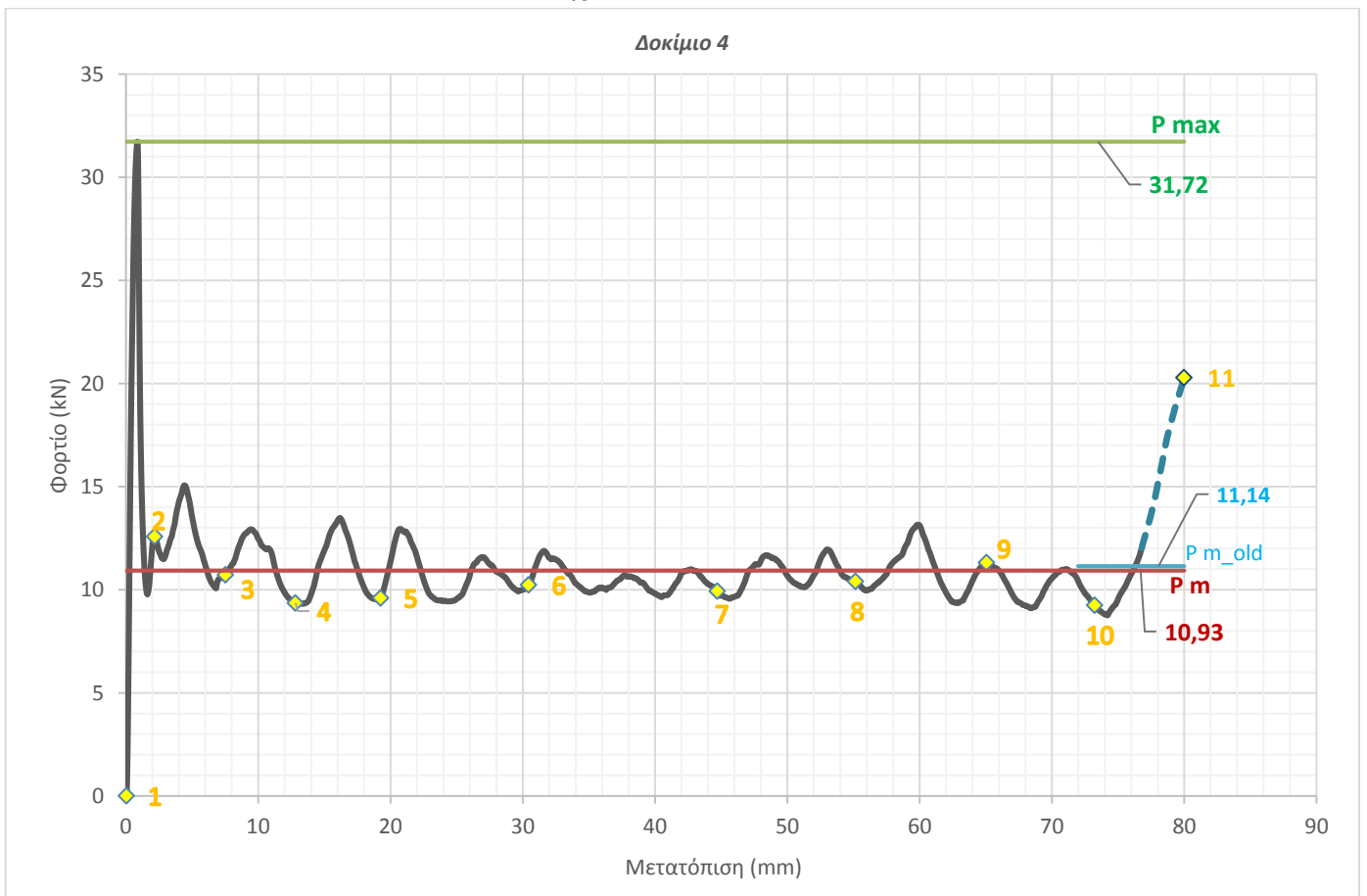
Η κατάρρευση του δοκιμίου ξεκινάει με τη δημιουργία του πρώτου λοβού στο κάτω μέρος και συνεχίζεται με τους υπόλοιπους μη εκτατούς λοβούς προς τα επάνω. Ο τρόπος κατάρρευσης είναι μη αξονοσυμμετρικός και πιο συγκεκριμένα ακολουθεί μοτίβο 4-D ,διαμαντιού. Αντίστοιχα με πριν, έχουμε τη δημιουργία 3 μη έκτατων λοβών στο επάνω μέρος του δοκιμίου μετά τα πρώτα 40 χιλιοστά συμπίεσης (στιγμιότυπο 7). Τέλος, σημειώνουμε ότι το μέγιστο φορτίο είναι τριπλάσιο για τριπλάσιο αριθμό σπειρών, ενώ και το μέσο φορτίο παρουσιάζει αντίστοιχη και καλύτερη συμπεριφορά σε αντιστοιχία με το δοκίμιο 1.

➤ Δοκίμιο 4

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 91,4 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 10,93 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 31,72 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 874,18 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 13,93 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 34,45 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη



Άνωψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



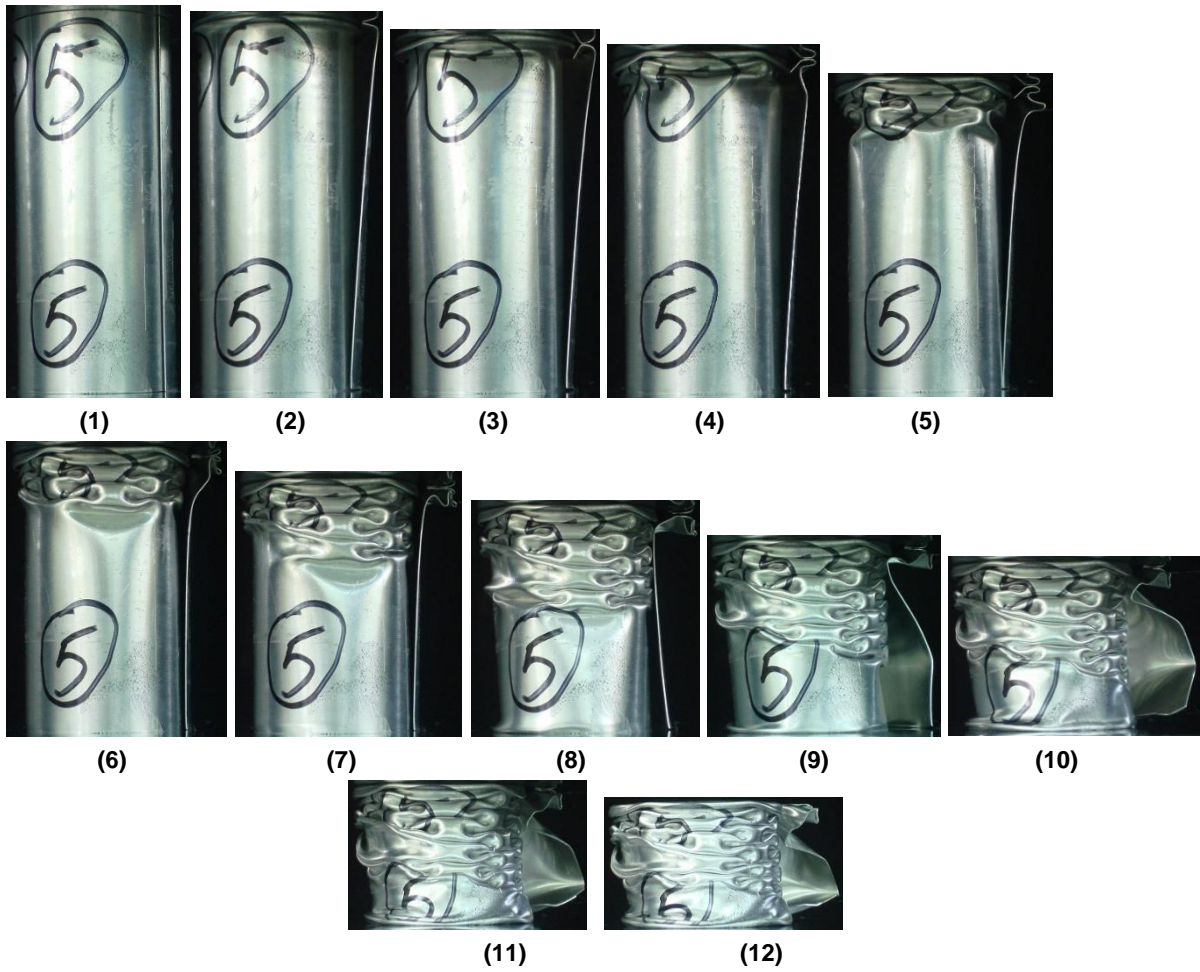
Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός -Τρόπος κατάρρευσης

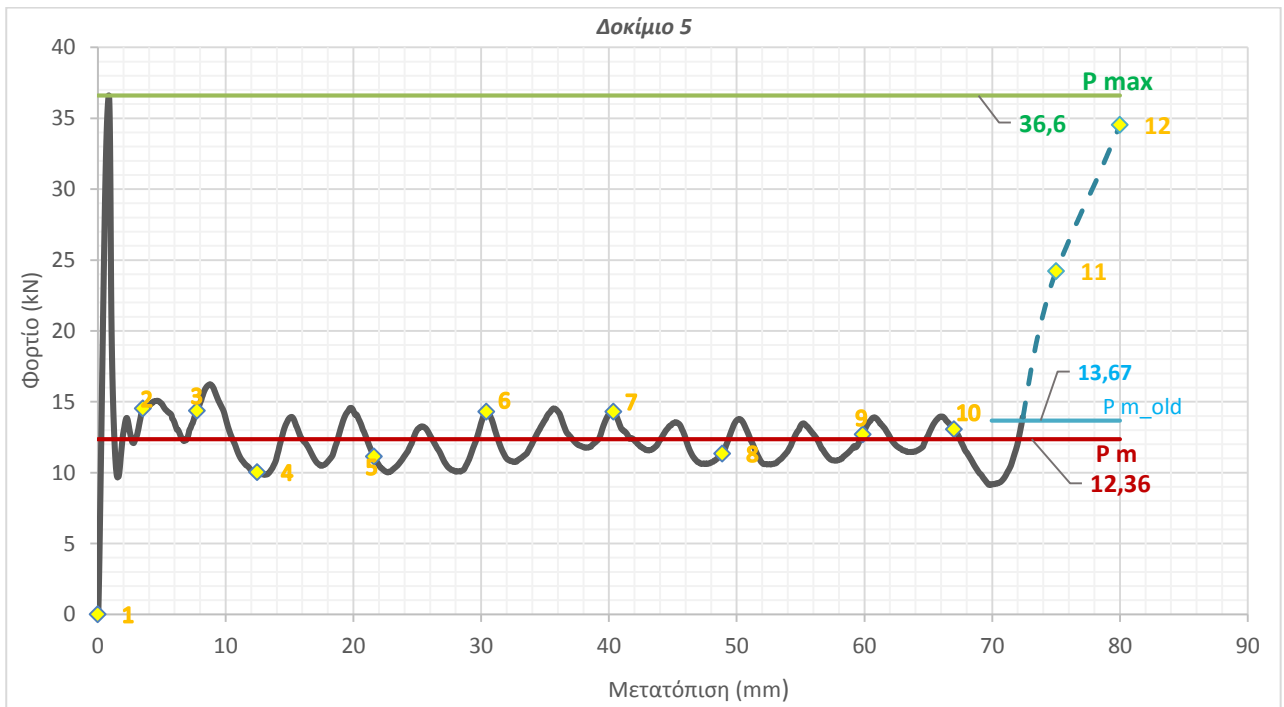
Το δοκίμιο 4 παρουσίασε αρχικό μέτωπο κατάρρευσης στο πάνω μέρος του, με τους 2 πρώτους λοβούς να είναι εκτατοί και ο τρόπος κατάρρευσης να χαρακτηρίζεται αξονοσυμμετρικός (concertina) για τα πρώτα 10 χιλιοστά συμπίεσης. Από τον τρίτο λοβό και ύστερα, έχουμε μη αξονοσυμμετρικό τρόπο κατάρρευσης, με τη δημιουργία μη εκτατών λοβών σε μοτίβο διαμαντιού, 4-D. Μετά τα 45 χιλιοστά συμπίεσης (στιγμιότυπο 7), έχουμε την ταυτόχρονη κατάρρευση του δοκιμίου στο κάτω μέρος του, το οποίο στο τέλος μας οδηγεί σε φαινόμενο σφυρηλάτησης, όπως φαίνεται κι από το διάγραμμα (μπλε διακεκομμένη γραμμή). Γι' αυτό το λόγο, αποφασίστηκε να πάρουμε υπόψιν μας το διάγραμμα για την εύρεση του μέσου φορτίου μέχρι ενός σημείου, που είναι σε αντιστοιχία με το ανώτατο όριο που έχει παρατηρηθεί στους δευτερεύοντες λοβούς, με την τελική διαφορά σε αυτή την περίπτωση να μην είναι τόσο μεγάλη. Τα μέσα και μέγιστα φορτία του δοκιμίου 4 σπειρών παραμένουν σε αντιστοιχία με αυτά της μίας, καθώς έχουμε σχεδόν τετραπλάσιες τιμές για τετραπλάσιες σπείρες.

➤ Δοκίμιο 5

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 117 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 12,36 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 36,6 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 998,65 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 12,67 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 33,75 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη



Άνωψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



Πλάγια Όψη (δεξιά)

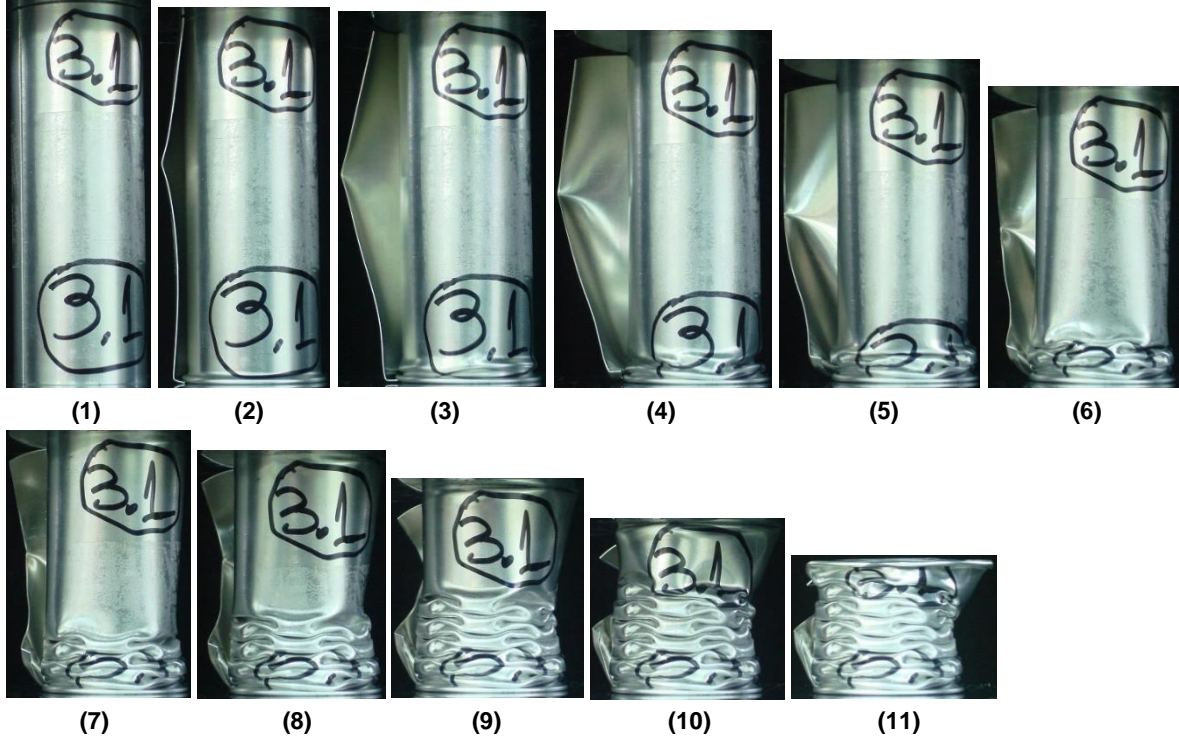
Σχολιασμός -Τρόπος κατάρρευσης

Το δοκίμιο 5 άρχισε να καταρρέει από πάνω αξονοσυμμετρικά με τη δημιουργία του πρώτου εκατοού λοβού. Στη συνέχεια όμως, ακολουθεί μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση με τη δημιουργία μη εκατών λοβών σε μοτίβο διαμαντιού, 4-D. Η κατάρρευση του δοκιμίου στο κάτω μέρος ξεκινάει μετά τα πρώτα 40 χιλιοστά συμπίεσης (στιγμιότυπο 7) και ολοκληρώνεται με τη δημιουργία 3 μη εκατών λοβών σε μοτίβο διαμαντιού, 4-D. Το δοκίμιο μας παρουσιάζει φαινόμενο σφυρηλάτησης στο τέλος και αντίστοιχα με πριν, ορίσαμε ένα τελικό σημείο στο διάγραμμα, σύμφωνα με το ανώτατο όριο των δευτερευόντων λοβών, για την εύρεση του μέσου φορτίου. Σε σχέση με το δοκίμιο 4, η διαφορά είναι μεγαλύτερη ανάμεσα σε μη διορθωμένο και διορθωμένο μέσο φορτίο καθώς είναι πιο έντονο το φαινόμενο της σφυρηλάτησης. Τέλος, το μέσο φορτίο για 5 σπείρες είναι σχεδόν πενταπλάσιο από το αντίστοιχο μιας σπείρας, αλλά δε συμβαίνει πια το ίδιο και για το μέγιστο φορτίο.

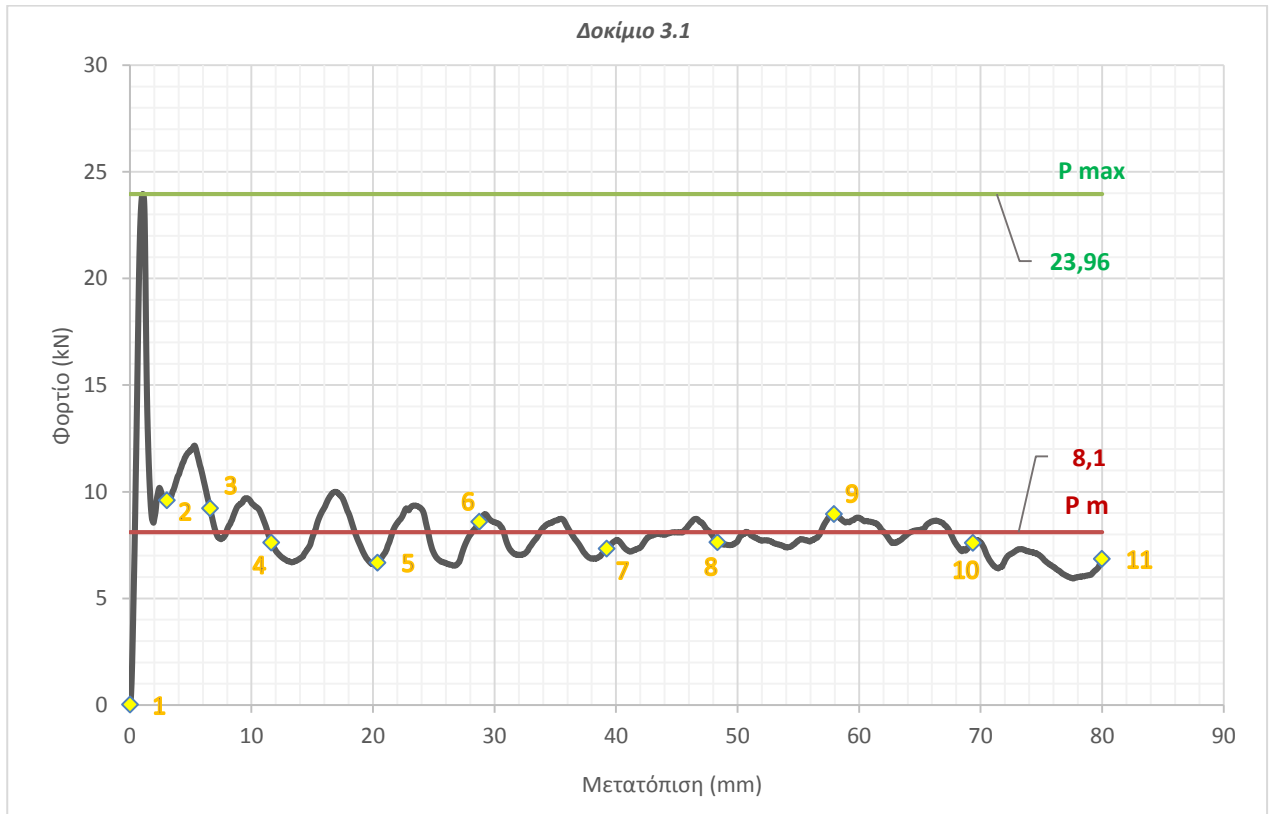
3.2 Δοκίμια ίδιας ενεργής διατομής, διαφορετικών σπειρών/ διαμέτρου

➤ Δοκίμιο 3.1

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 70,7 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 8,1 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 23,96 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 648,5 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 13,76 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 33,8 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη



Άνωψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



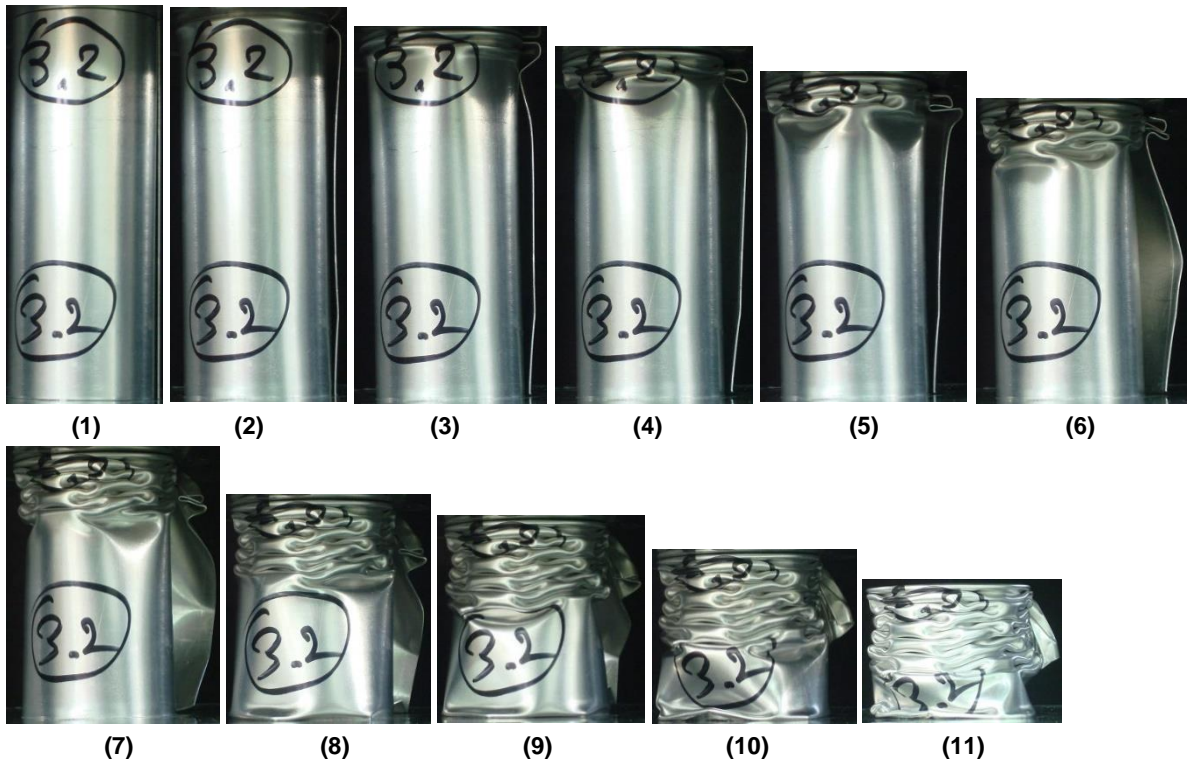
Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός - Τρόπος κατάρρευσης

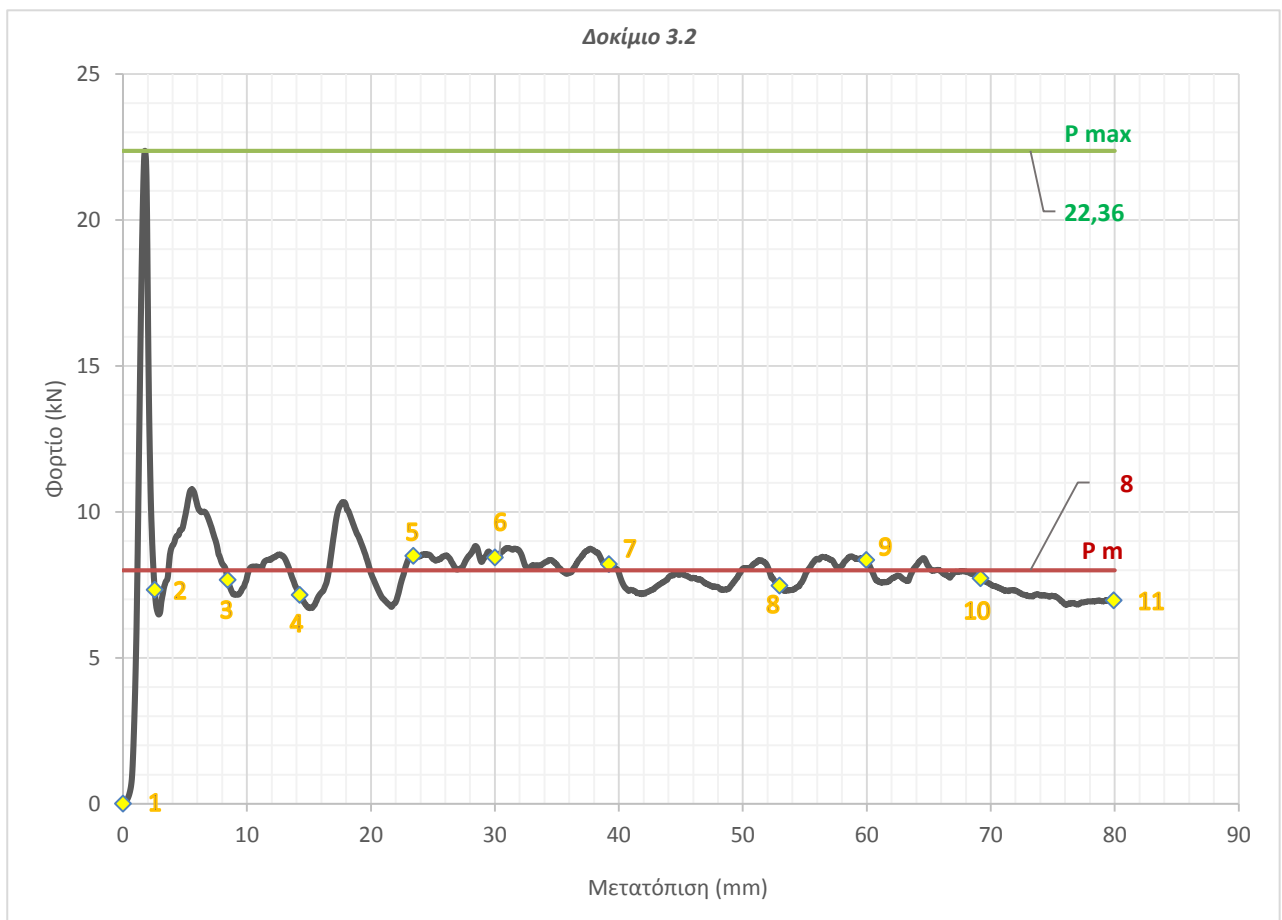
Το δοκίμιο 3.1 ανέπτυξε μέτωπο αξονοσυμμετρικής κατάρρευσης στο κάτω μέρος του με τη δημιουργία ενός εκτατού λοβού . Από το δεύτερο λοβό και έπειτα, έχουμε το σχηματισμό μη εκτατών λοβών μη αξονοσυμμετρικής κατανομής, σε μοτίβο διαμαντιού 4-D.

➤ Δοκίμιο 3.2

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 70,7 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 8 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 22,36 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 639,85 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 13,65 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 35,7 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτοψη



Άνοψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



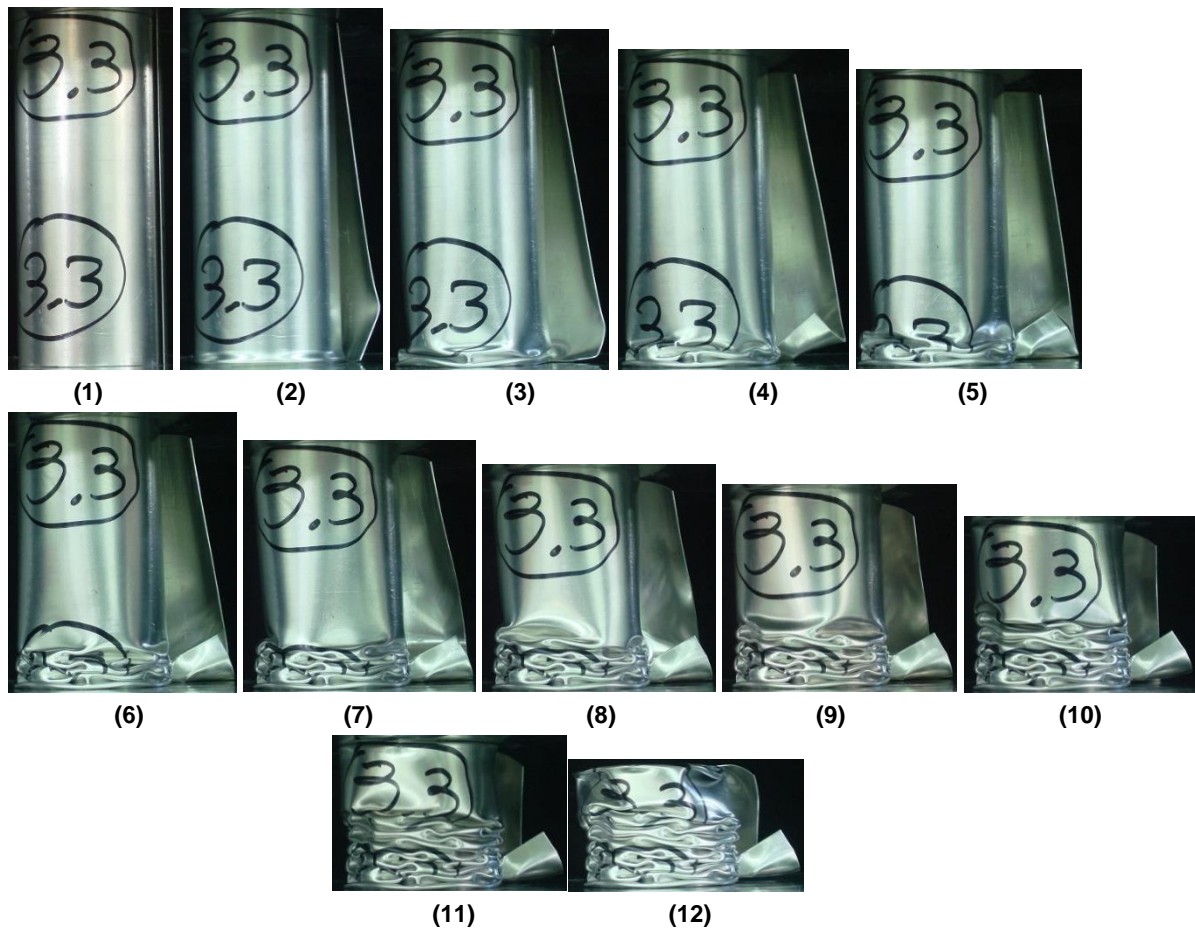
Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός -Τρόπος κατάρρευσης

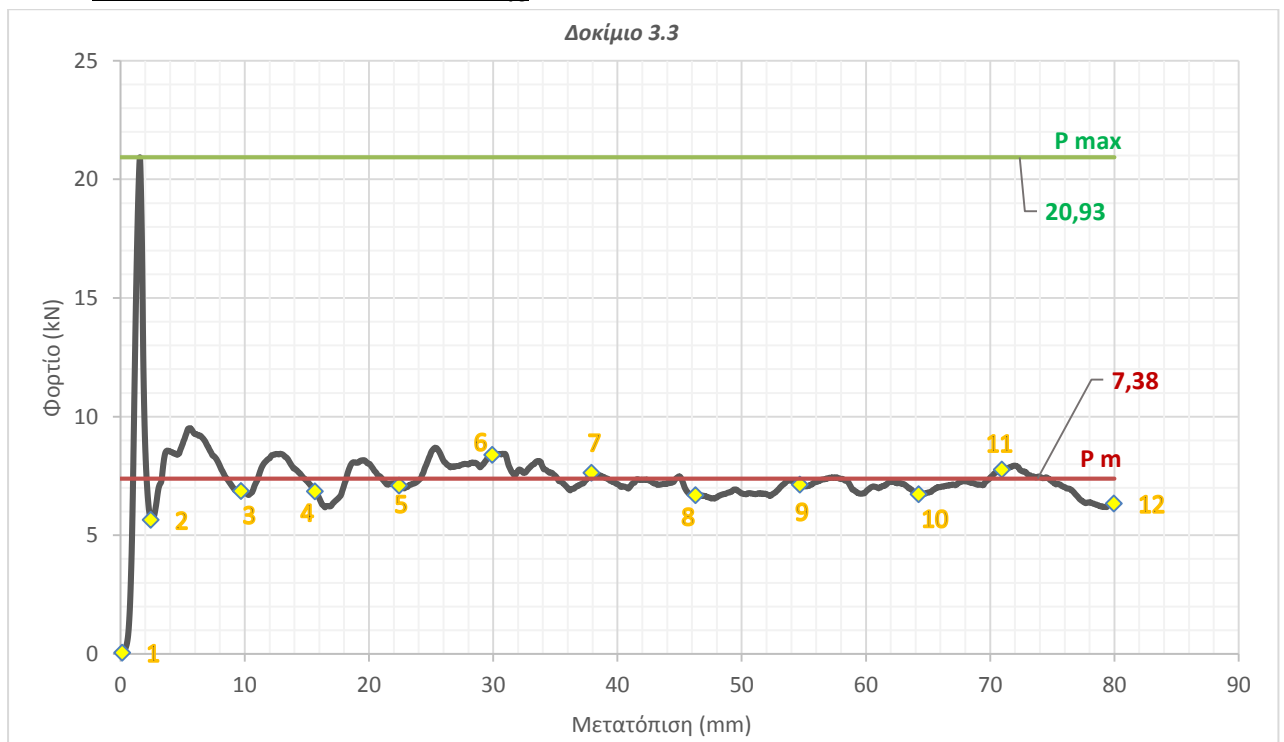
Η κατάρρευση του δοκιμίου ξεκινάει αξονοσυμμετρικά από πάνω με το σχηματισμό του πρώτου λοβού και συνεχίζεται μη αξονοσυμμετρικά από τον δεύτερο λοβό και ύστερα. Ο τρόπος κατάρρευσης μπορεί να χαρακτηριστεί μοτίβου διαμαντιού και πιο συγκεκριμένα 4-D. Μετά τα πρώτα 50mm συμπίεσης, έχουμε ταυτόχρονη κατάρρευση του κελύφους στο κατώ μέρος με τη δημιουργία ενός λοβού, μοτίβου διαμαντιού, 3-D.

➤ Δοκίμιο 3.3

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 70,7 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 7,38 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 20,93 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 590,9 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 12,5 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 35,29 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη

Άνωψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)

Πρόοψη

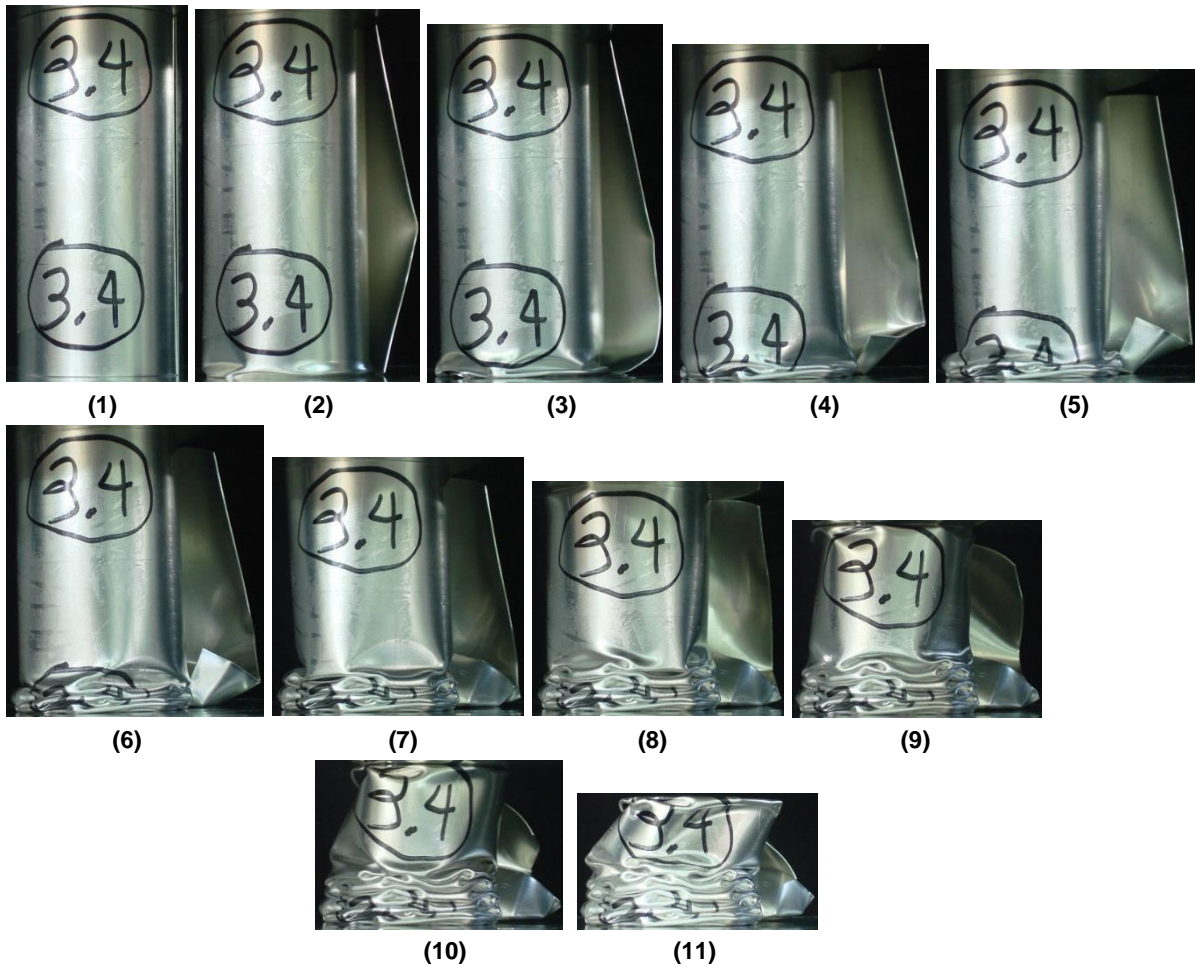
Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός - Τρόπος κατάρρευσης

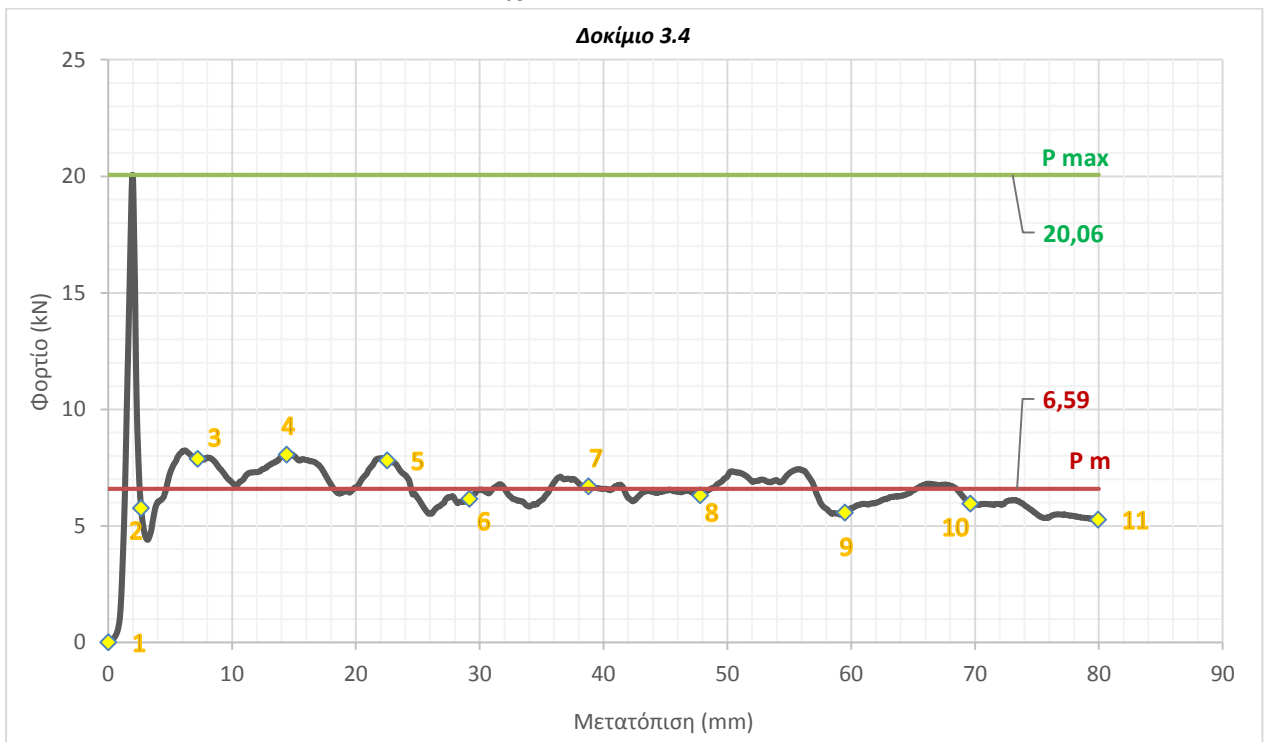
Το δοκίμιο 3.3 αναπτύσσει μέτωπο κατάρρευσης στο κάτω μέρος του με τη δημιουργία μη έκτατων λοβών που συνεχίζονται καθ'όλο το ύψος του δοκιμίου. Πρόκειται για μη αξοσυμμετρική κατάρρευση, που μπορεί να χαρακτηριστεί ως μοτίβου διαμαντιού, 4-D. Στα τελευταία 10mm συμπίεσης, έχουμε την ταυτόχρονη κατάρρευση του δοκιμίου από πάνω με το σχηματισμού ενός λοβού διαμαντιού, 3-D.

➤ Δοκίμιο 3.4

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 70,4 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 6,59 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 20,06 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 527,15 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 11,26 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 32,85 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη



Άνοψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



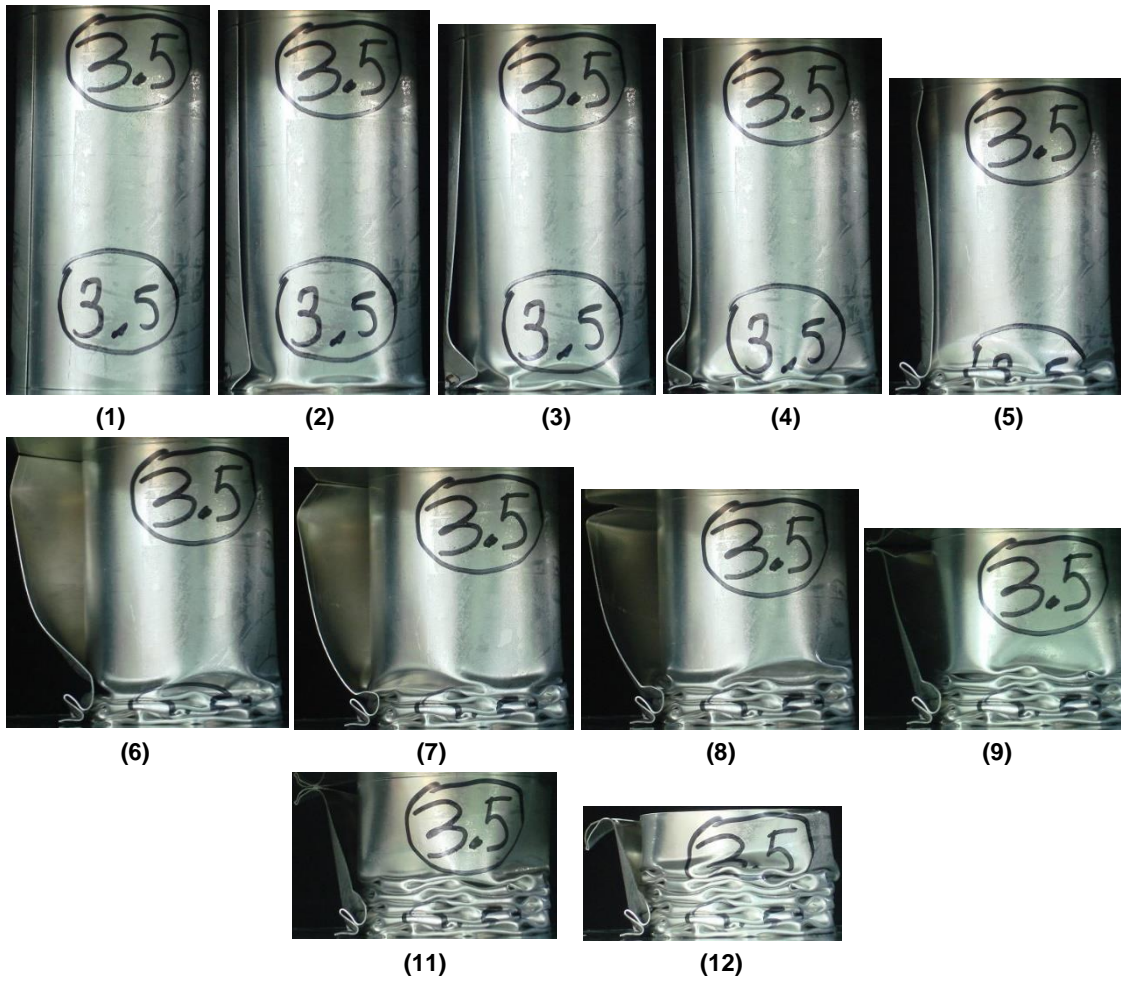
Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός -Τρόπος κατάρρευσης

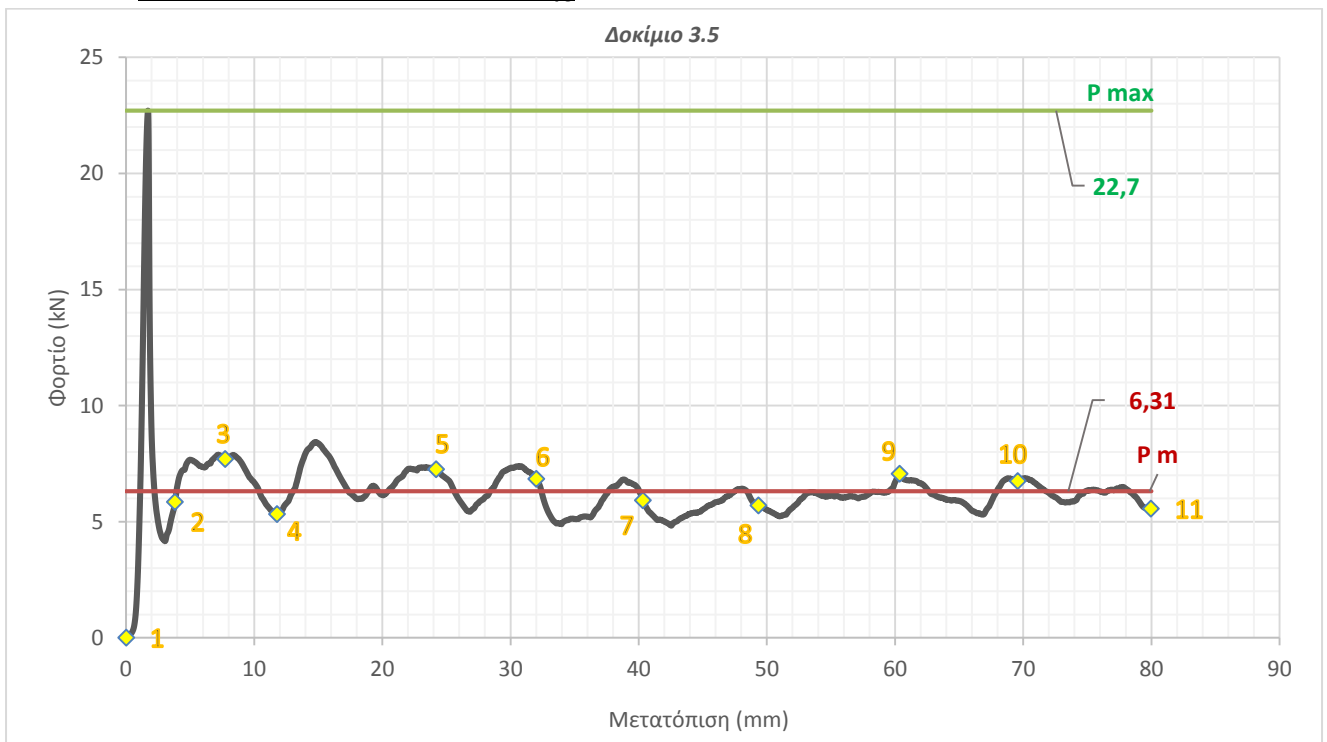
Το δοκίμιο 3.4 αρχίζει να καταρρέει μη αξονοσυμμετρικά στο κάτω μέρος του με τη δημιουργία ενός πρώτου λοβού μοτίβου διαμαντιού, 5-D και συνεχίζει με το σχηματισμό μη εκτατών λοβών τύπου διαμαντιού, 4-D έως το πέρας της συμπίεσης. Μετά τα πρώτα 50mm συμπίεσης, αρχίζει η κατάρρευση του δοκιμίου από πάνω με τη δημιουργία ενός λοβού μοτίβου διαμαντιού, 3-D, και παρατηρείται ένα φαινόμενο buckling μεγαλύτερης έκτασης με την αλλαγή της κλίσης του δοκιμίου, που οφείλεται στην μετατόπιση άξονα συμμετρίας του κελυφούς σε σχέση με τον άξονα φόρτισης.

➤ Δοκίμιο 3.5

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 70,6 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 6,31 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 22,7 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 504,8 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 10,68 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 27,8 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη



Άνωψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



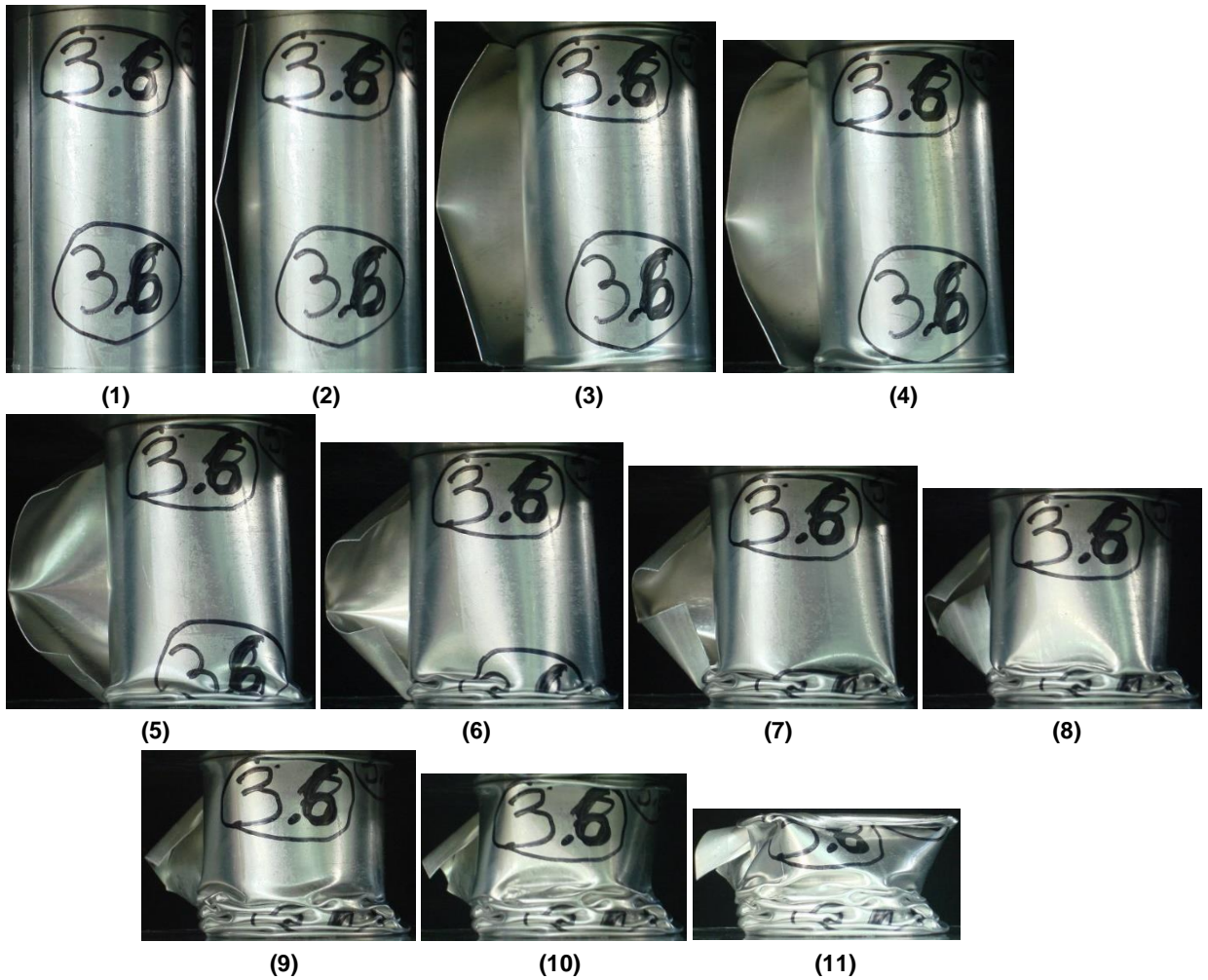
Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός -Τρόπος κατάρρευσης

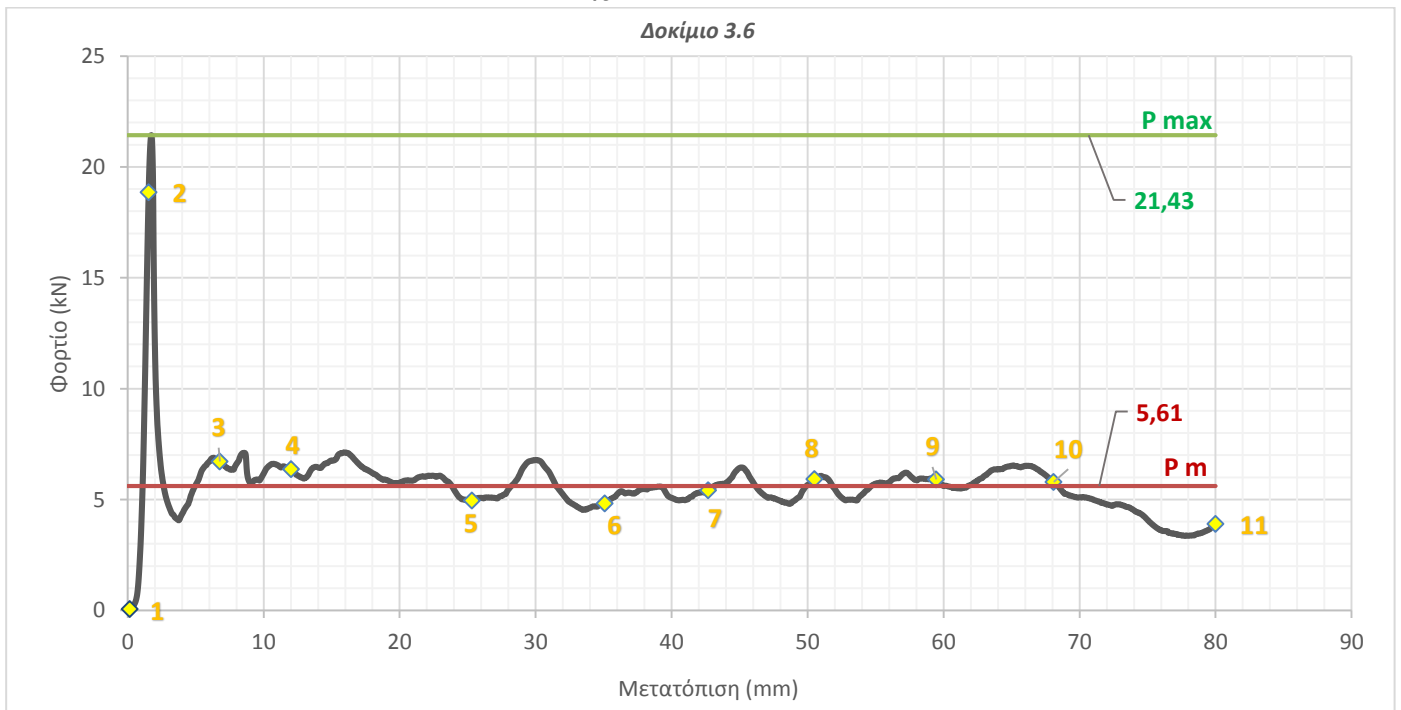
Το δοκίμιο 3.5 ανέπτυξε μέτωπο κατάρρευσης στο κάτω μέρος του με τη δημιουργία πολλαπλών λοβών και με το μοτίβο κατάρρευσής του να χαρακτηρίζεται ως μη-συμμετρικό, πιο συγκεκριμένα 5-D.

➤ Δοκίμιο 3.6

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 70,5 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 5,61 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 21,43 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 448,78 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 9,55 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 26,17 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη



Άνωψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



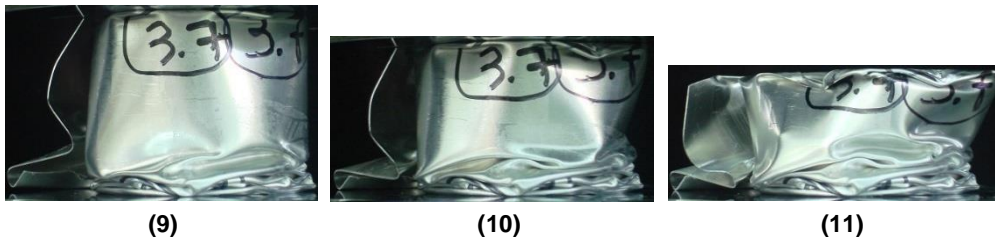
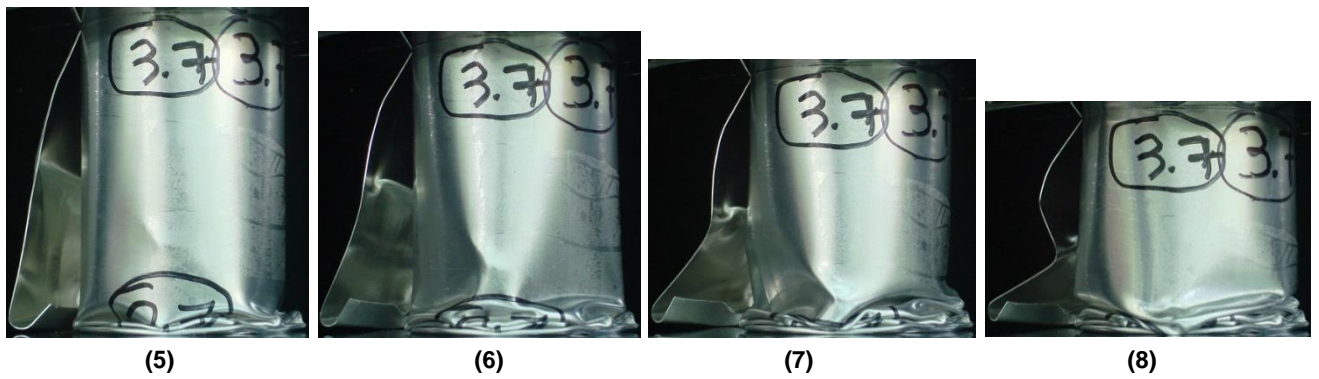
Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός -Τρόπος κατάρρευσης

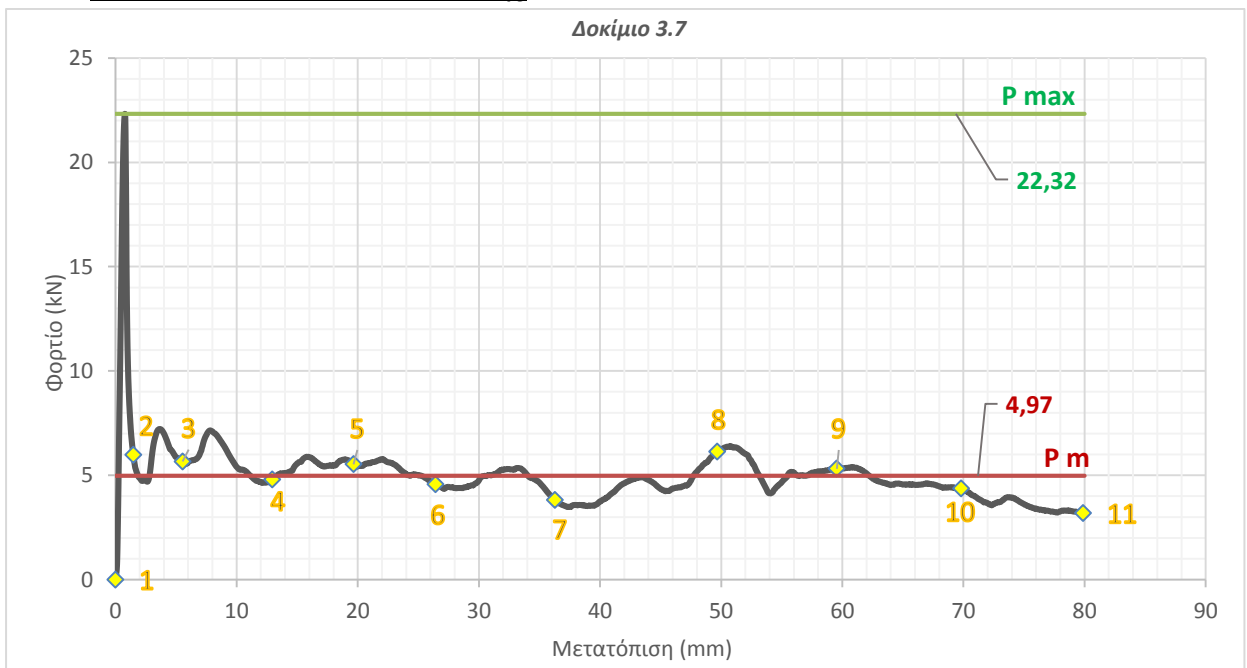
Η κατάρρευση του δοκιμίου 3.6 ξεκινάει από κάτω και έχουμε τη δημιουργία των πρώτων λοβών, μη εκατών, μοτίβου διαμαντιού 4-D. Στα τελευταία 10mm συμπίεσης, έχουμε τη κατάρρευση του δοκιμίου και στο πάνω μέρος του με τη δημιουργία ενός λοβού που προσεγγιστικά μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη εκατός 3-D.

➤ Δοκίμιο 3.7

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 70,9 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 4,97 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 22,32 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 398,15 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 8,46 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 22,3 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη



Άνωψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



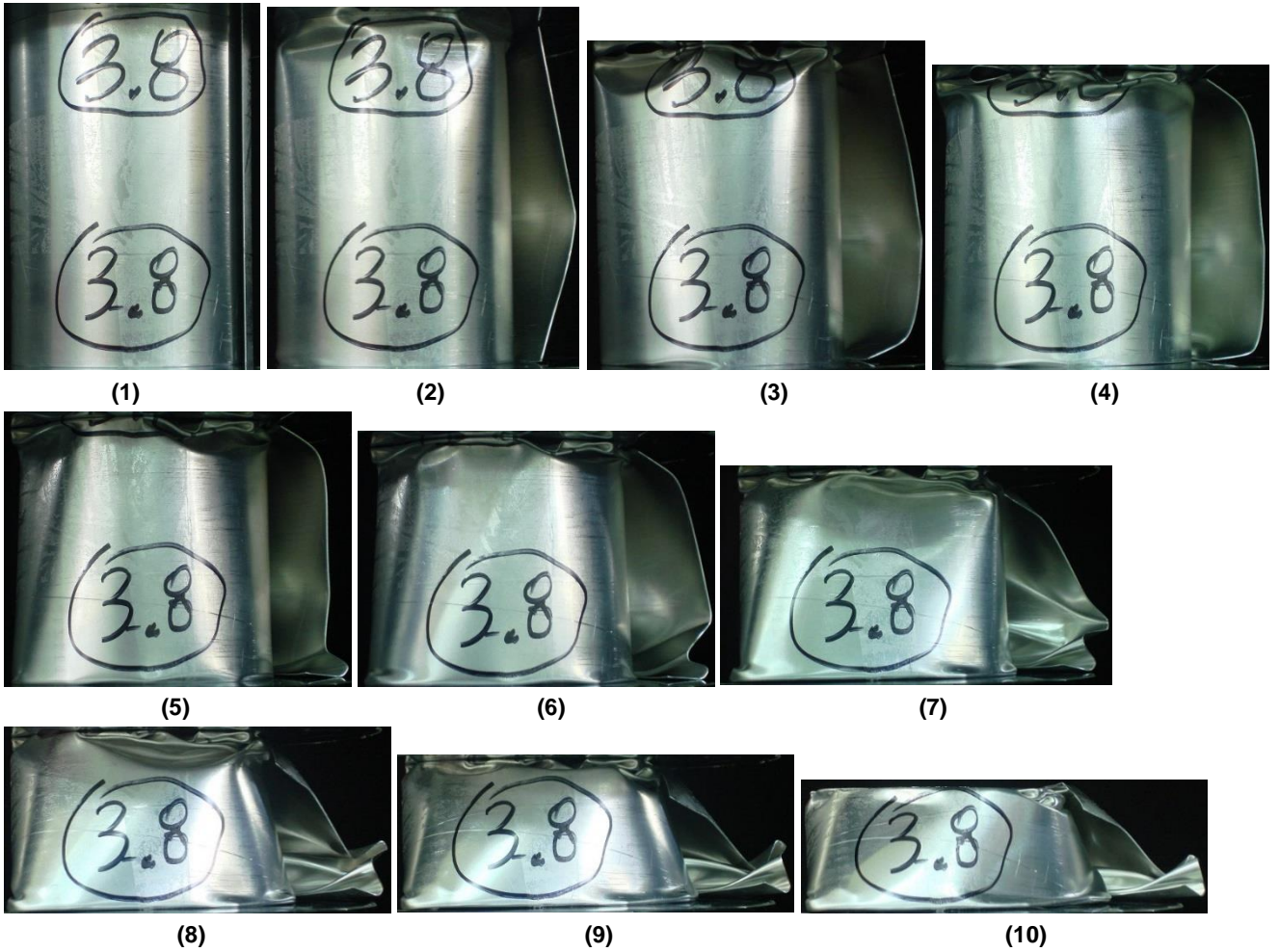
Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός -Τρόπος κατάρρευσης

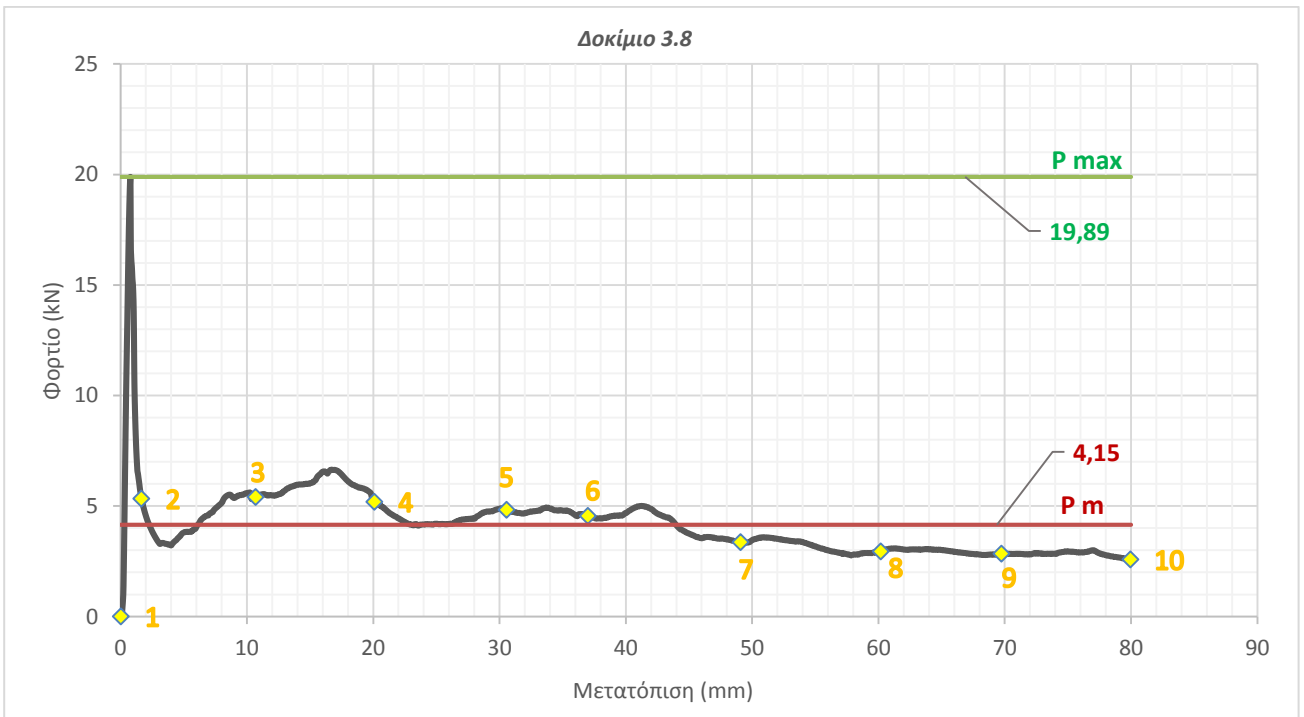
Το δοκίμιο 3.7 ανέπτυξε μέτωπο κατάρρευσης στο κάτω μέρος του με τη δημιουργία μη εκαταών λοβών, μοτίβου διαμαντιού 4-D. Μετά τα πρώτα 60mm συμπίεσης, παρατηρούμε τη ταυτόχρονη κατάρρευση του δοκιμίου από πάνω με τη δημιουργία ενός λοβού, μη εκαταού, μοτίβου 2-D.

➤ Δοκίμιο 3.8

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 70,2 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 4,15 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 19,89 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 332,23 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 7,08 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 20,88 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη



Άνωψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



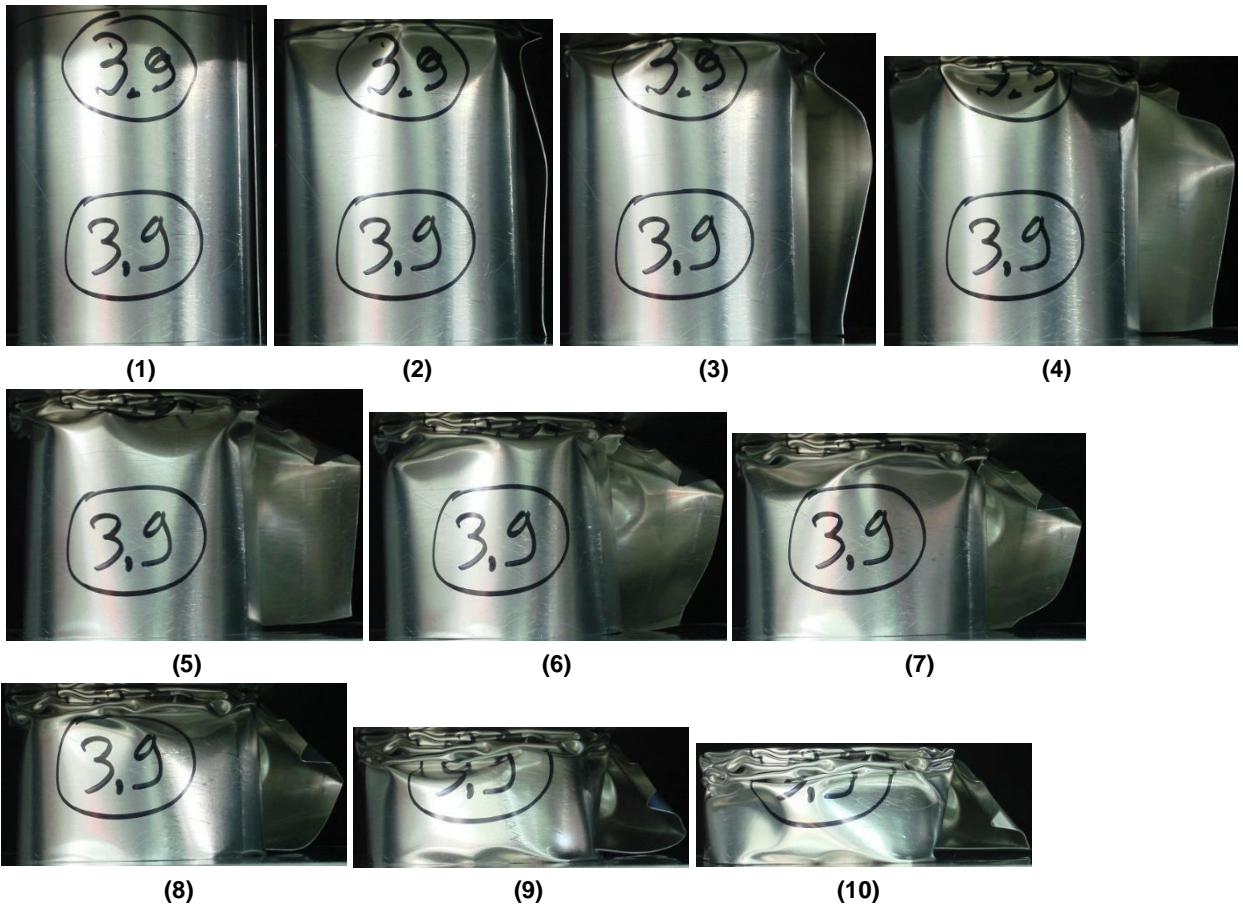
Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός -Τρόπος κατάρρευσης

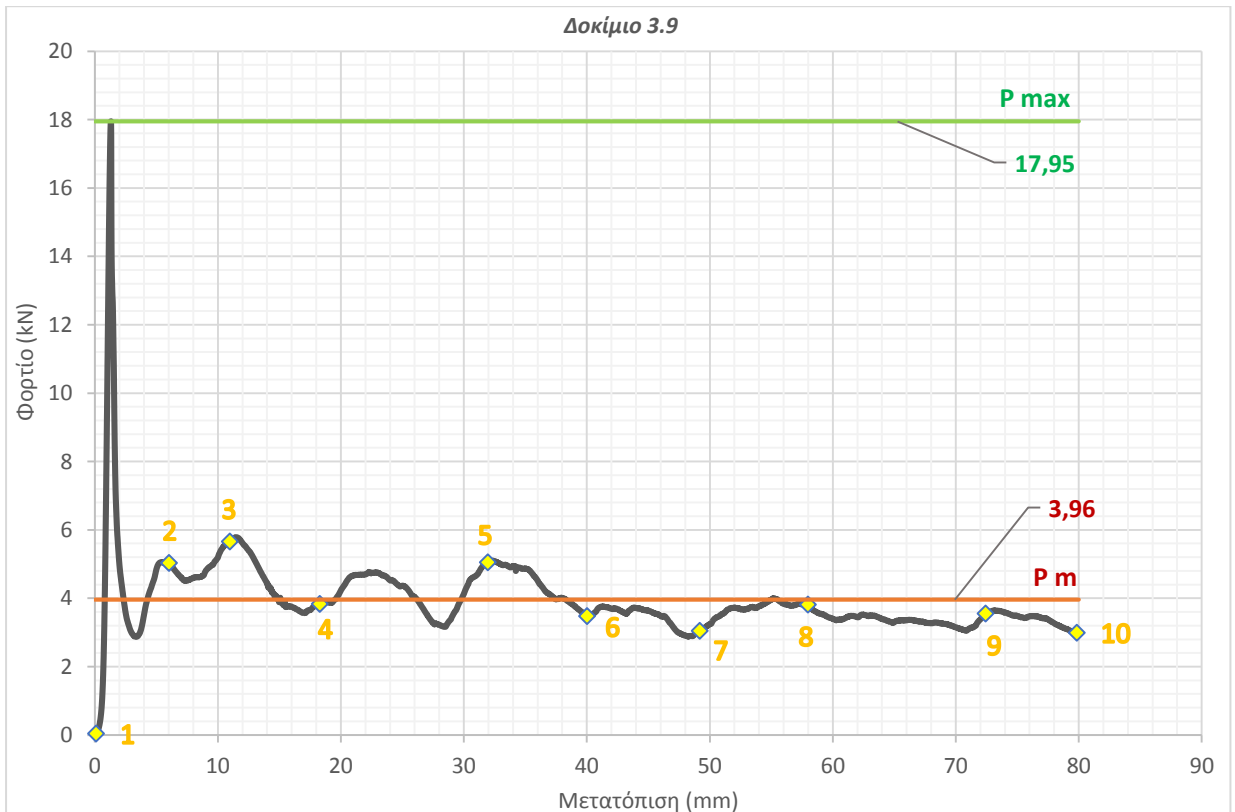
Το δοκίμιο 3.8 ξεκίνησε την κατάρρευση του από πάνω με το σχηματισμό των πρώτων λοβών, η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη συμμετρική, διαμαντιού 4-D. Μετά τα πρώτα 30mm συμπίεσης, έχουμε τη δημιουργία ενός λοβού, μοτίβου διαμαντιού 2-D, στο κάτω μέρος του δοκιμίου, ο οποίος συντελεί στη στρέβλωση του δοκιμίου μέσω της αλλαγής κλίσης του άξονα συμμετρίας του δοκιμίου σε σχέση με τον άξονα φόρτισης.

➤ Δοκίμιο 3.9

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 70,9 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 3,96 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 17,95 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 316,81 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 6,72 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 22,06 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη



Άνοψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός - Τρόπος κατάρρευσης

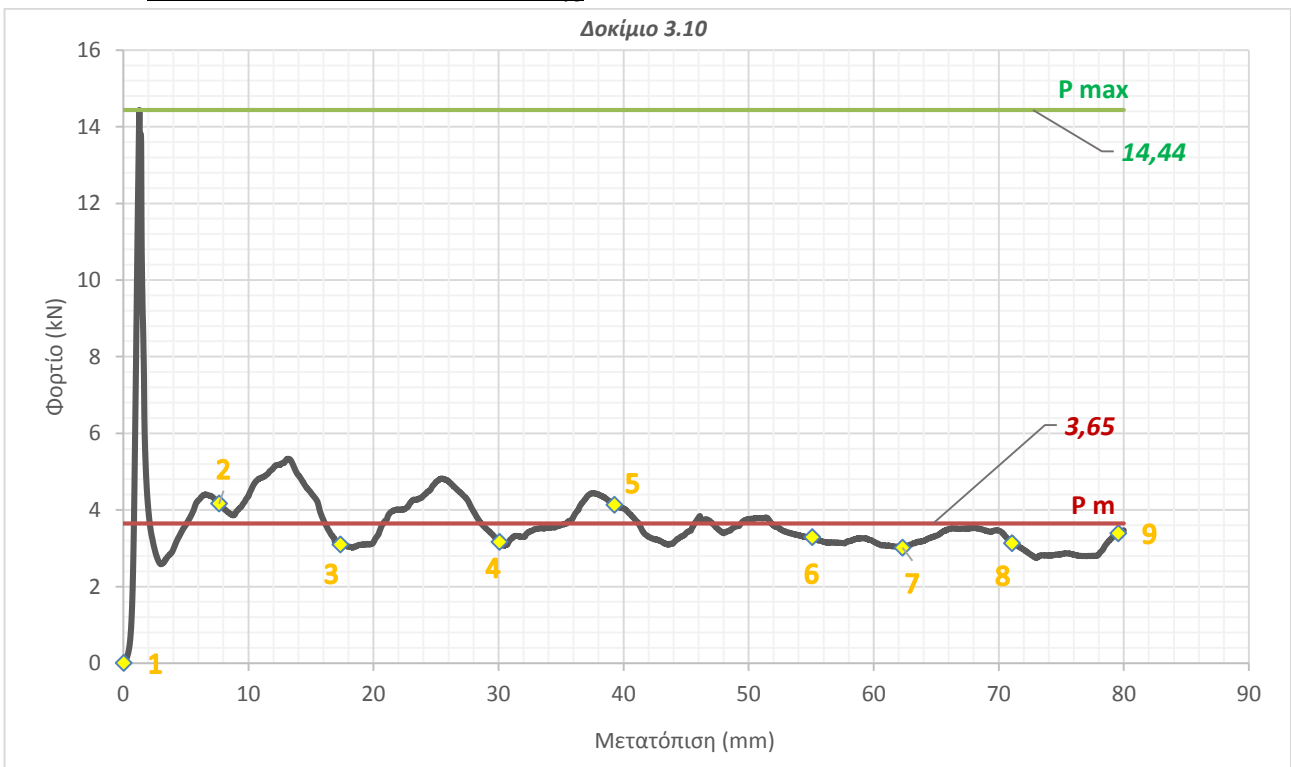
Το δοκίμιο 3.9 αρχίζει να καταρρέει μη συμμετρικά από πάνω με τους λοβούς να σχηματίζονται σε μοτίβο διαμαντιού, 5-D . Στα τελευταία 10mm συμπίεσης, παρατηρούμε μια μικρή ταυτόχρονη κατάρρευση του δοκιμίου στο κάτω μέρος με τον μη πλήρη όμως σχηματισμό ενός λοβού μοτίβου διαμαντιού 3-D.

➤ Δοκίμιο 3.10

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 70,3 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 3,65 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 14,44 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 291,75 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 6,19 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 25,26 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη



Άνωψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



Πίσω Όψη

Σχολιασμός - Τρόπος κατάρρευσης

Το δοκίμιο 3.10 ανέπτυξε μέτωπο κατάρρευσης στο κάτω μέρος του με το μοτίβο να χαρακτηρίζεται ως μη συμμετρικό, τύπου 5-D. Στα τελευταία 20mm βράχυνσης του δοκιμίου έχουμε τη σταδιακή κατάρρευση από πάνω. Η ύπαρξη όμως ελεύθερου άκρου οδηγεί στο άνοιγμα της διατομής και έτσι δεν μπορεί να ολοκληρωθεί ο σχηματισμός λοβού, διαμαντιού 5-D.

➤ Δοκίμιο 3.11

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



(1)

(2)

(3)



(4)



(5)



(6)



(7)

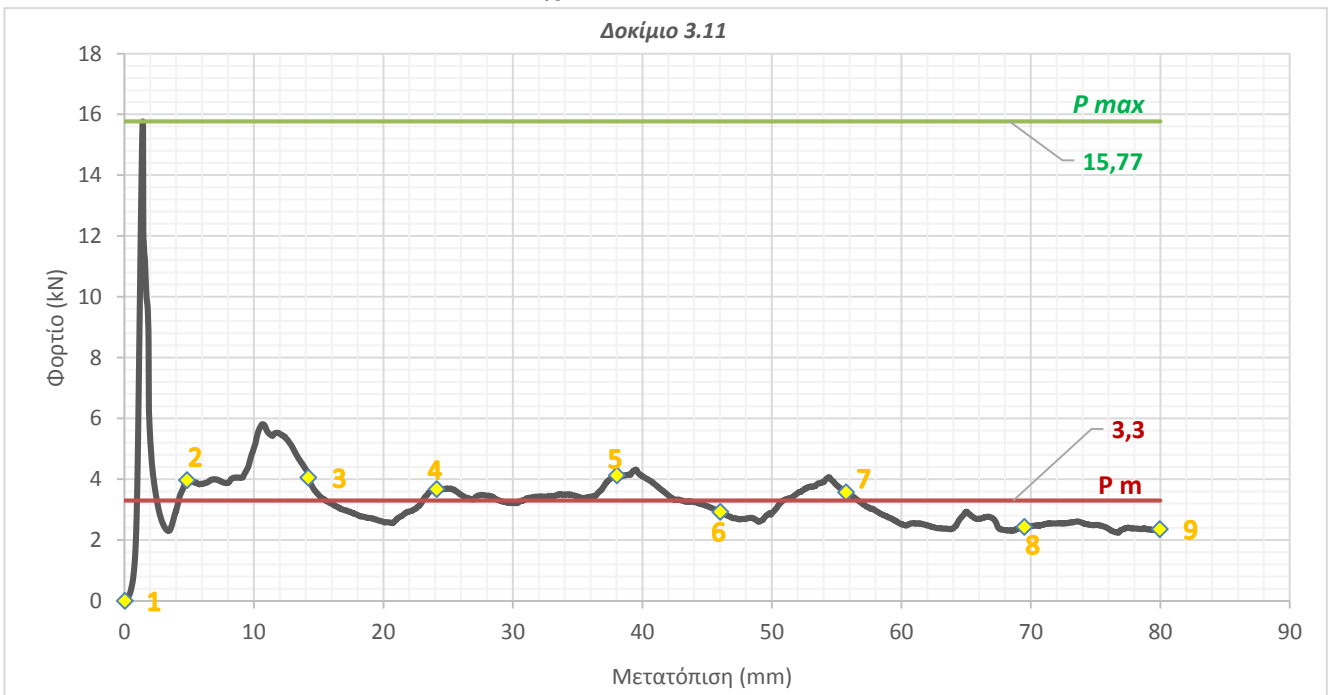


(8)



(9)

Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Δεδομένα και αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή Εμβόλου	$S_{max} = 80 \text{ mm}$
Μάζα	$m = 70,7 \text{ gr}$
Μέσο Φορτίο	$P_m = 3,3 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 15,77 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 264,2 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 5,6 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 20,94 \%$

Τελικές Όψεις Δοκιμίου



Κάτωψη

Άνωψη



Πλάγια Όψη (αριστερά)



Πρόοψη



Πλάγια Όψη (δεξιά)

Σχολιασμός - Τρόπος κατάρρευσης

Το δοκίμιο 3.11 αρχίζει να καταρρέει μη συμμετρικά από πάνω με τους λοβούς να σχηματίζονται προσεγγιστικά σε μοτίβο διαμαντιού, 5-D. Κι αυτό διότι μετά τα πρώτα 15mm βράχυνσης του δοκιμίου, η έξω σπείρα ανοίγει, άρα και η διατομή μας, με αποτέλεσμα το κέλυφος να αρχίσει να χάνει τη δομική του στιβαρότητα. Αυτό παράλληλα συντελεί εν τέλει στο σχηματισμό ημι-λοβού 4-D στο κάτω μέρος, ενώ παρατηρείται και η στρέβλωση προς το εσωτερικό της έσω σπείρας.

3.3 Σχολιασμός-Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων

3.3.1 Γενικές παρατηρήσεις

Η έναρξη της κατάρρευσης από το ένα (συνήθως) άκρο του κελύφους, που οδηγεί στον σχηματισμό και την περαιτέρω ανάπτυξη του μετώπου κατάρρευσης (crash-front), οφείλεται στον τοπικό λυγισμό (local buckling) του τοιχώματος στη συγκεκριμένη θέση, το οποίο υπόκειται σε τοπική κάμψη (local bending) από τις εσωτερικά κατευθυνόμενες δυνάμεις τριβής που ασκεί η πλάκα συμπίεσης στο άκρο/χείλος του κελύφους, που τείνει - λόγω της αξονικής συμπίεσης - να εκταθεί/ολισθήσει προς το εξωτερικό του (Εικ. 3.1). Επομένως, τα άκρα/χείλη του κελύφους δεν υπόκεινται μόνο σε αξονική συμπίεση, αλλά και σε τοπική κάμψη, που οδηγεί σε τοπικό λυγισμό και τον σχηματισμό του πρώτου λοβού (επίδραση συνοριακών συνθηκών).



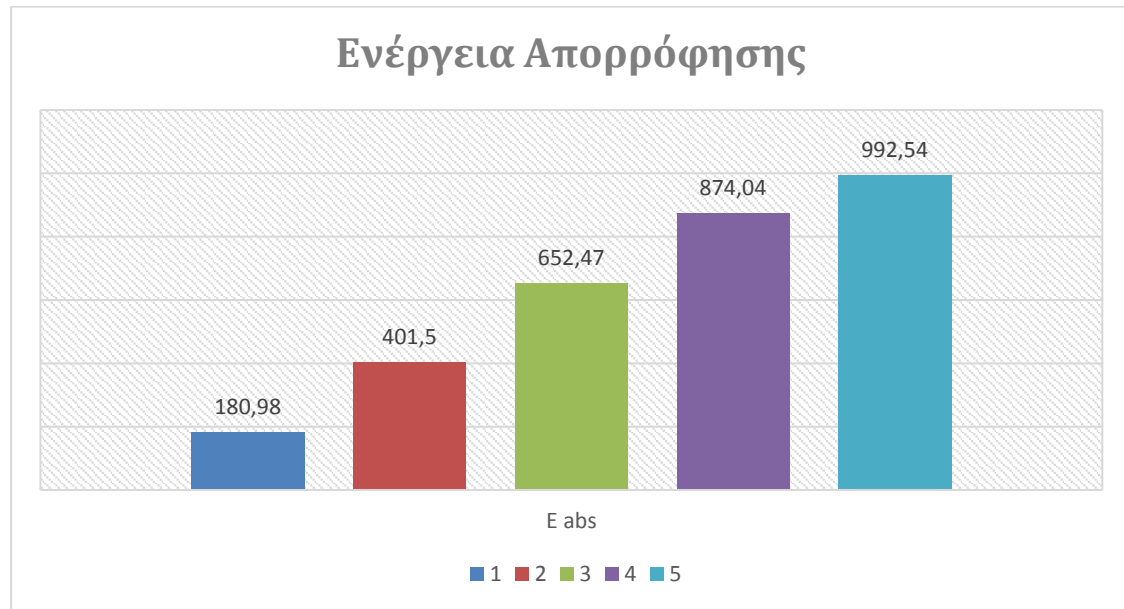
Εικόνα 3.1 Έναρξη κατάρρευσης στο (κάτω) άκρο του κελύφους

Επίσης, ήταν επιλογή η απουσία συνδετικών στοιχείων (πόντα,πριτσίνωμα) για τον περιορισμό του κελύφους στην εσωτερική και εξωτερική σπείρα. Ήταν επιθυμητή η μελέτη της συμπεριφοράς του δοκιμίου με ελεύθερη/ανοιχτή διατομή, καθώς ενδεχόμενα συνδετικά στοιχεία λειτουργούν ως triggering (ζώνες συγκέντρωσης τάσης), προκαθορίζοντας ζώνες πλαστικών αρμών.

3.3.2 Δοκίμια σταθερής διαμέτρου, διαδοχικών ακεραίων σπειρών

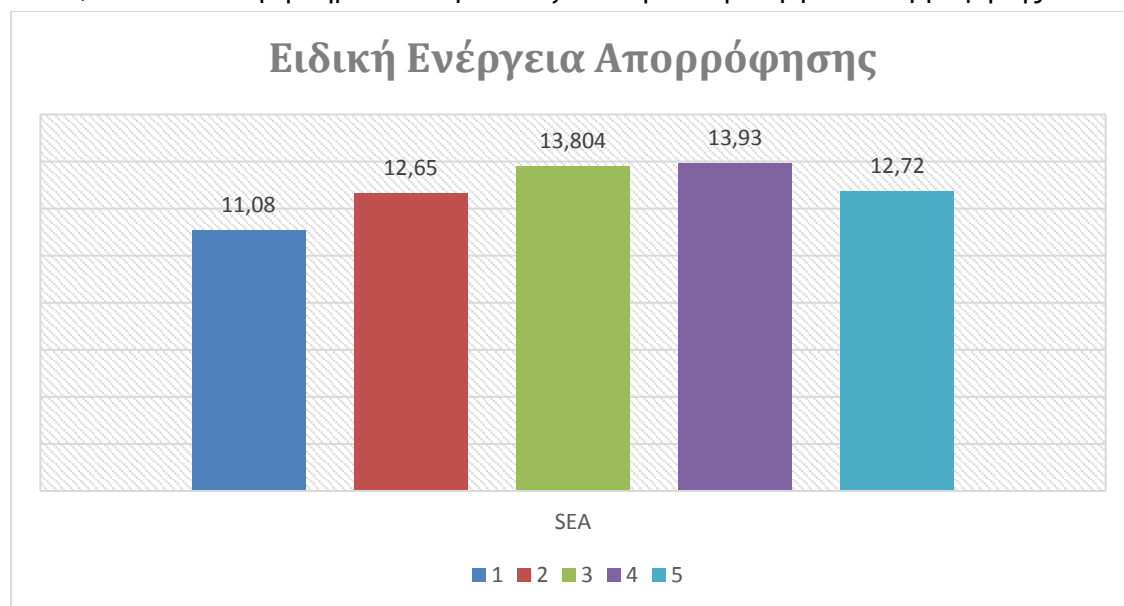
Σχετικά με τον τρόπο που κατέρρευσαν τα δοκίμια της συγκεκριμένης σειράς, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στα δοκίμια 3-5 έχουμε τη δημιουργία περισσότερων λοβών σε όλο το ύψος του κελύφους μέχρι την τελική συμπίεση, σε αντίθεση με τα δοκίμια 1 και 2. Κι αυτό συμβαίνει γιατί οι 3,4 και 5 σπείρες αντίστοιχα είναι αρκετές ώστε να προσφέρουν μια περισσότερο στιβαρή δομή, που προσεγγίζει την αντίστοιχη κλειστή και ενιαία διατομή. Επίσης, στα δοκίμια 1 και 2 χάνεται η δομική στιβαρότητα κοντά στα ορία και ανοίγει η διατομή, ενώ το πολλαπλό τοίχωμα των 3-5 διατηρείται παράλληλο καθ'όλο το μήκος διαδρομής του εμβόλου.

Όσον αφορά τη σύγκριση των δοκιμών βάσει των δεικτών crashworthiness, ιδιαίτερη σημασία έχει η μελέτη της συμπεριφορά της ενέργειας απορρόφησης σε σχέση με τον αριθμό σπειρών του κελύφους. Παράλληλα, ισχύει η ίδια μετατόπιση εμβόλου για κάθε περίπτωση, το οποίο σημαίνει ότι το αντίστοιχο διάγραμμα μέσου φορτίου θα έχει την ίδια συμπεριφορά. Περισσότερες σπείρες σημαίνουν περισσότερο υλικό, οπότε ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει και η ειδική ενέργεια απορρόφησης.



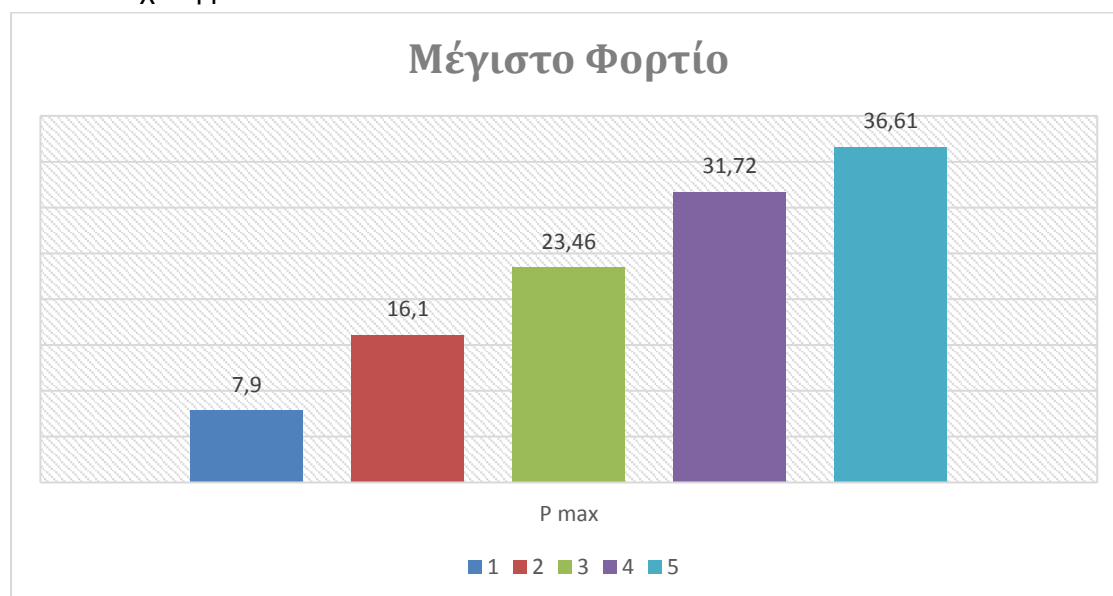
Εικόνα 3.2 Διάγραμμα Ενέργειας Απορρόφησης (E abs) βάσει του αριθμού σπειρών

Στο διάγραμμα της ενέργειας απορρόφησης βάσει των σπειρών, παρατηρούμε μια αυξητική τάση της ενέργειας με την αύξηση των σπειρών του κελύφους. Η τάση θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σχεδόν γραμμική, αλλά με το άνοιγμα της διατομής των 1, 2 κατά την καταρρεύση και το φαινόμενο σφυρηλάτησης που παρουσίασε το 5 στο τέλος και οδήγησε στη μεγάλη διόρθωση του μέσου φορτίου, δεν βοηθά στην εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Επίσης, περισσότερες σπείρες σημαίνουν περισσότερο υλικό, οπότε ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει και η ειδική ενέργεια απορρόφησης.



Εικόνα 3.3 Διάγραμμα Ειδικής Ενέργειας Απορρόφησης (SEA) βάσει του αριθμού σπειρών

Η ειδική ενέργεια απορρόφησης ακολουθεί κι αυτή αυξητική τάση σε σχέση με τις σπείρες για τα πρώτα 4 δοκίμια, με το 5 να παρουσιάζει μια πτώση καθώς είχαμε τη μεγάλη διόρθωση του μέσου φορτίου. Παρ' όλα αυτά, φαίνεται ξεκάθαρα μέσω του διαγράμματος, όπως τονίστηκε και παραπάνω, η έλλειψη δομικής στιβαρότητας των 1 και 2 σε σχέση με τα 3 και 4.

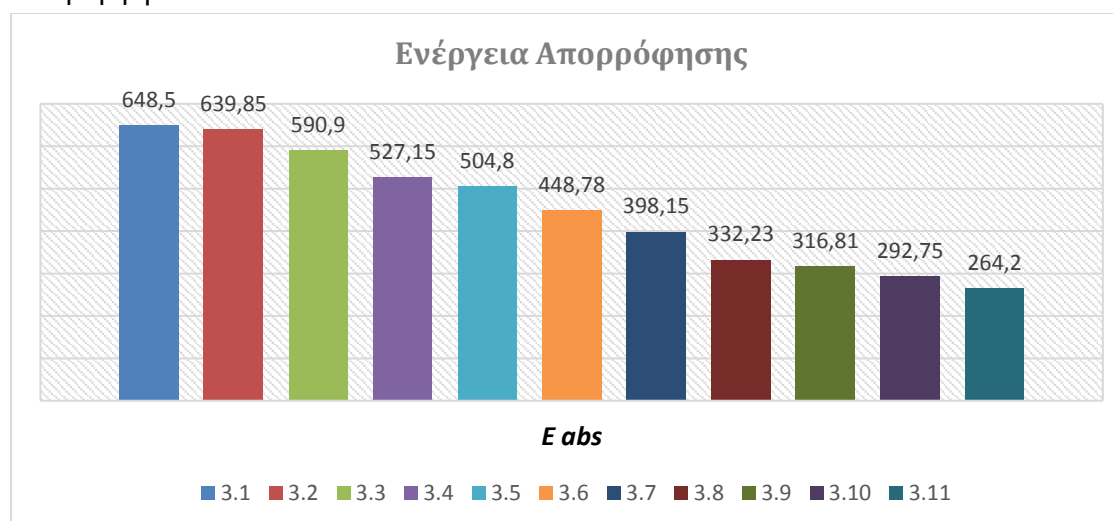


Εικόνα 3.4 Διάγραμμα Μέγιστου Φορτίου (P max) βάσει του αριθμού σπειρών

Τέλος, το μέγιστο φορτίο παρουσιάζει μια αυξητική τάση σε σχέση με την αύξηση των σπειρών του κελύφους. Για τα πρώτα 4 δοκίμια, αυτή η αύξηση είναι γραμμική.

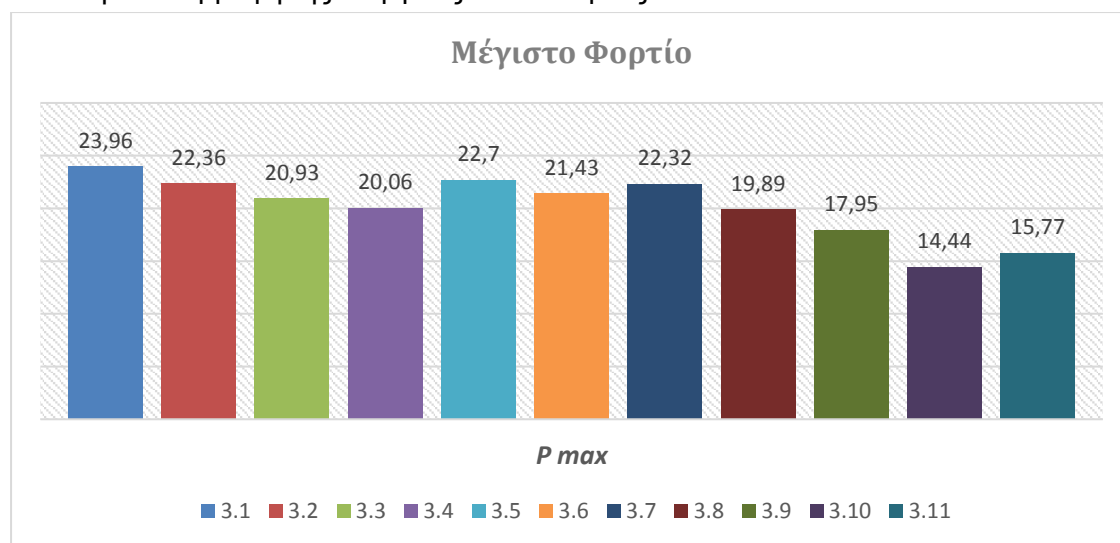
3.3.3 Δοκίμια ίδιας ενεργής διατομής, διαφορετικών σπειρών/διαμέτρου

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι δεδομένες η ίδια βράχυνση δοκιμίου και οι ίδιες μάζες δοκιμίων εφόσον έχουν ίδια ενεργη διατομή. Επομένως, τα διαγράμματα μέσου φορτίου, ενέργειας απορρόφησης και ειδικής ενέργειας απορρόφησης έχουν την ίδια μορφή.



Εικόνα 3.5 Διάγραμμα Ενέργειας Απορρόφησης (E abs) βάσει της διαμέτρου για ίδια ενεργή διατομή

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ενέργεια απορρόφησης αυξάνεται όσο μικραίνει η διάμετρος του κελύφους και αυξάνονται οι σπείρες. Με άλλα λόγια, η αύξηση του κενού μεταξύ του κελύφους και του κεντρικού άξονα φορτίσης δε συμβάλλει θετικά στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κελύφους.



Εικόνα 3.6 Διάγραμμα Μέγιστου Φορτίου (P_{max}) βάσει της διαμέτρου για την ίδια ενεργή διατομή

Όσον αφορά το μέγιστο φορτίο, θα έπρεπε θεωρητικά, με δεδομένη την ίδια ενεργή διατομή για κάθε δοκίμιο, να μετρώνται παρόμοιες τιμές σε κάθε περίπτωση. Στα δοκίμια 3.1-3.7 και οριακά στο 3.8 επικρατεί μια διακύμανση του αρχικού φορτίου μεταξύ των 20kN και 24kN, με την περίπτωση του 3.1 να είναι η καλύτερη όπως είναι λογικό. Οι διαφορές αυτές στα φορτία βέβαια δεν είναι μεγάλες και πιθανότατα οφείλονται στη πιθανή μη-τέλεια παραλληλότητα του ελάσματος λόγω της κοπής του στο ψαλίδι. Πιθανή διαφορά, επίσης, έγκειται στο αν πατάει καλύτερα η έξω ή έσω σπείρα. Σε περίπτωση που πατάει η έσω σπείρα καλύτερα, οδηγεί σε στρέβλωση την έξω σπείρα, άρα έχουμε μείωση του αρχικού φορτίου. Ενώ, σε περίπτωση που πατάει καλύτερα η έξω, έχουμε συγκράτηση της έσω σπείρας, άρα αύξηση του μέγιστου φορτίου. Τέλος, στην περίπτωση των δοκιμών 3.9-3.11, η ύπαρξη μόνο μίας πλήρους σπείρας δε βοηθάει στην ανάπτυξη μεγάλου φορτίου, όπως συνέβη και στο δοκίμιο 1 της 1^{ης} σειράς. Η δομή δεν είναι στιβαρή, με αποτέλεσμα να ανοίγει εύκολα η διατομή εφόσον δεν έχει γίνει χρήση συνδετικά στοιχεία.

3.3.4 Συνολικά Σχόλια στα Πειραματικά Αποτελέσματα

Στη σειρά δοκιμών 1-5, όπου η μέση διάμετρος ήταν περίπου σταθερή και αυξάνονταν διαδοχικά οι σπείρες, άρα και η ενεργός διατομή, η μονότονη αύξηση του μέσου φορτίου (και της ενέργειας απορρόφησης) που παρουσιάζεται, είναι αναμενόμενη γενικά λόγω της αυξανόμενης ενεργού διατομής.

Στην περίπτωση των δοκιμών 3.1-3.11, το μέσο φορτίο, η ενέργεια απορρόφησης αλλά και η ειδική ενέργεια απορρόφησης παρουσιάζουν συνεχή μείωση λόγω της διαδοχικής μείωσης του λόγου t/R (βλ. Κεφ. 5.1 «Συμπεράσματα»).

Οι πιο αξιόπιστοι δείκτες είναι το μέσο φορτίο, η ενέργεια απορρόφησης και η ειδική ενέργεια απορρόφησης, καθώς ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου καθορίζεται από το μέγιστο φορτίο, που εξαρτάται από τις εκάστοτε διαφορετικές συνθηκές και γεωμετρικές παραμέτρους.

Κεφάλαιο 4: Αριθμητική Προσομοίωση

4.1 Γενικά

Η αριθμητική προσομοίωση χωρίζεται σε δύο μέρη, το ένα αφορά τη μοντελοποίηση της πειραματικής διαδικασίας και το άλλο την περαιτέρω διερεύνηση. Για την μοντελοποίηση της αξονικής κατάρρευσης των κελυφών και την περαιτέρω διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων LS-Dyna (FE Code - processing) της Livermore Software Technology Corporation (LSTC) [29,30]. Πρόκειται για ευρύτατα διαδεδομένο προβλεπτικό εργαλείο στην ανάλυση, μεταξύ άλλων, της κατάρρευσης λεπτότοιχων κελυφών ως συστημάτων απορρόφησης ενέργειας σε συνθήκες πρόσκρουσης (crashworthiness). Για την προετοιμασία και κατασκευή των απαιτούμενων μοντέλων (pre-processing), καθώς και για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της επίλυσής τους (post-processing) χρησιμοποιήθηκε το σχετικό πρόγραμμα, LS-PrePost της ίδιας εταιρείας.

4.2 Μοντελοποίηση της αξονικής κατάρρευσης των κελυφών σπειροειδούς διατομής

Η μοντελοποίηση/διακριτοποίηση των εξεταζόμενων κελυφών υλοποιήθηκε με διδιάστατα τετραπλευρικά (τεσσάρων κόμβων) πεπερασμένα στοιχεία (4-node shell elements), λόγω του λεπτού πάχους του (πολλαπλού) τοιχώματός τους, στα οποία δόθηκε το αντίστοιχο πάχος του ελάσματος (0,5 mm). Η πυκνότητα του πλέγματος (mesh density) ήταν υψηλή, σχετικά προσαρμοσμένη στο λεπτό πάχος του τοιχώματος (οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν λίγο μεγαλύτερες από το πάχος του τοιχώματος), προκειμένου να προσομοιωθεί αντιπροσωπευτικά ο αναμενόμενος σχηματισμός πυκνών ζωνών υψηλής πλαστικής παραμόρφωσης (πολλαπλοί διαδοχικοί λοβοί μικρού μήκους). Επιλέχθηκε ο βασικός (default) τύπος shell στοιχείων του κώδικα (shell element formulation: 2), λόγω του διαπιστωμένου συνδυασμού αποτελεσματικότητας και οικονομίας σε υπολογιστικό χρόνο κατά την προσομοίωση τέτοιων περιπτώσεων. Ταυτόχρονα, και προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν ανακόλουθος/ασύμβατος τρόπος παραμόρφωσης των πεπερασμένων στοιχείων (hourglassing), ενεργοποιήθηκε στον κώδικα η σχετική επιλογή ελέγχου/πρόληψης τέτοιας απόκρισης. Οι πλάκες συμπίεσης (tooling) μοντελοποιήθηκαν με τρισδιάστατα εξαεδρικά (οκτώ κόμβων) πεπερασμένα στοιχεία (8-node solid elements) και επιλογή του βασικού (default) τύπου ανάλυσής τους (solid element formulation: 1). Επειδή, οι πλάκες συμπίεσης θεωρούνται πρακτικά απαραμόρφωτες (rigid body) και έτσι μοντελοποιούνται, ο τύπος (ανάλυσης) των στοιχείων τους στην προσομοίωση είναι άνευ σημασίας.

Η μοντελοποίηση απαραμόρφωτου σώματος εξασφαλίζεται με την απόδοση του μοντέλου υλικού “rigid material” στις πλάκες (εισάγονται οι ελαστικές σταθερές του χάλυβα), το οποίο καθιστά την επίλυση του συνολικού μοντέλου “οικονομικότερη” σε υπολογιστικούς πόρους. Επιπλέον, στις παραμέτρους του “rigid” υλικού εισάγονται οι βαθμοί ελευθερίας του αντίστοιχου τμήματος του μοντέλου: πλήρως δεσμευμένη η σταθερή (κάτω) πλάκα συμπίεσης και δυνατότητα κίνησης μόνο στη διεύθυνση της καταπόνησης για την κινούμενη (άνω) πλάκα συμπίεσης.

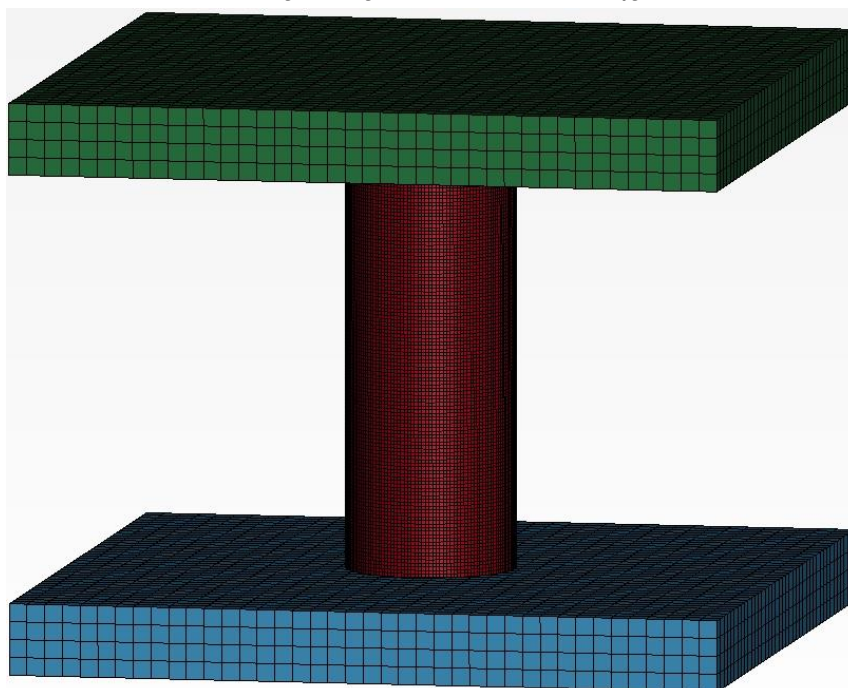
Το μοντέλο υλικού που χρησιμοποιήθηκε για τα κελύφη ήταν το “piecewise linear plasticity”, στο οποίο εισήχθησαν οι ελαστικές σταθερές (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson) και η πυκνότητα του αλουμινίου, ενώ η περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης δόθηκε με βάση την πειραματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του

υλικού (Εικ.2.5). Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού και στις τρεις διευθύνσεις του ελάσματος: 0° (διεύθυνση έλασης), 45° και 90°. Οι διαφορές μεταξύ των αντίστοιχων καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης ήταν αμελητέες, οπότε προτιμήθηκε εκείνη στις 45°, αφενός ως μεσοσταθμική, αφετέρου γιατί λόγω του ιδιαίτερα λεπτού πάχους του ελάσματος σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις των κελυφών αναμενόταν, και επιβεβαιώθηκε πειραματικά, ο μη αξονοσυμμετρικός (diamond) τρόπος κατάρρευσης με σχηματισμό κεκλιμένων πλαστικών αρμών (περί τις 45° σε σχέση με τον άξονα των κελυφών ή τη διεύθυνση έλασης).

Όσον αφορά στην ενδεχόμενη επίδραση της προηγούμενης κατεργασίας (κυλινδρική κάμψη) στις μηχανικές ιδιότητες του διαμορφωμένου ελάσματος (work hardening), αυτή θεωρήθηκε αμελητέα, καθώς:

- το πάχος του ελάσματος ήταν πολύ μικρό ($t=0,5$ mm),
- η καμπυλότητα των κελυφών ήταν συνολικά πολύ μικρή σε σχέση με το πάχος του ελάσματος
- η κράτυνση του υλικού, όπως φαίνεται από τη σχετική δοκιμή εφελκυσμού (Εικ. 2.5), ήταν αμελητέα, δηλ. το υλικό συμπεριφέρεται σχεδόν ως τέλεια πλαστικό (perfectly plastic)

Η μηχανική αλληλεπίδραση επαφής (contact) στη διεπιφάνεια μεταξύ των επιμέρους τμημάτων του μοντέλου (πλάκες συμπίεσης έναντι κελύφους) μοντελοποιήθηκε με την τυπική επιλογή “nodes to surface”, με την οποία αποτρέπεται η διείσδυση (penetration) των κόμβων (nodes) του παραμορφώσιμου κελύφους στην επιφάνεια (surface) πίεσης των απαραμόρφωτων πλακών. Επίσης, λόγω της αναμενόμενης αλληλεπίδρασης επαφής μεταξύ των διαφόρων ζωνών του κελύφους κατά την κατάρρευσή του με τον σχηματισμό λοβών, ενεργοποιήθηκε η επιλογή “single surface” για την αποτροπή αλληλοδιείσδυσης (interpenetration) των πεπερασμένων στοιχείων στις εν λόγω περιοχές του μοντέλου του κελύφους. Στις επιλογές “contact” εισάγονται επιπλέον και (τυπικές) τιμές συντελεστών τριβής.

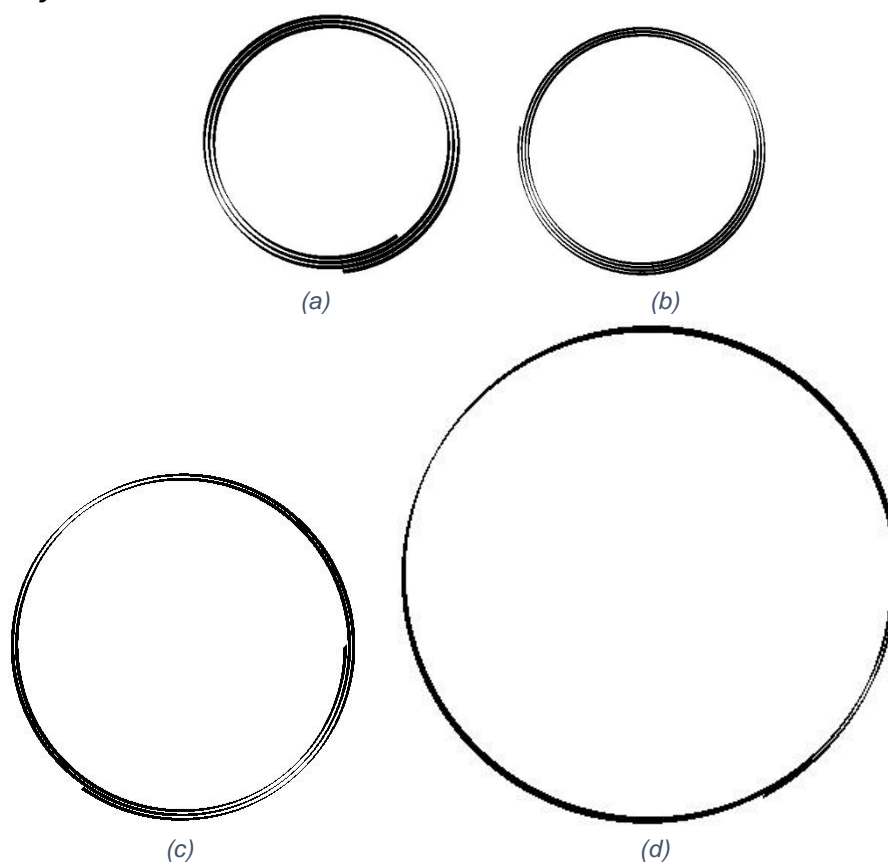


Εικόνα 4.1 Μοντέλο προσομοίωσης

Με την επιλογή “boundary prescribed motion rigid”, σε συνδυασμό με την επιλογή “define curve”, εισάγεται με ακρίβεια στο μοντέλο η ταχύτητα της κινούμενης πλάκας συμπίεσης. Λόγω του “explicit” σχήματος επίλυσης του κώδικα LS-Dyna, δόθηκε μεγαλύτερη τιμή (σταθερής 1m/s) ταχύτητας (time scaling) από την αντίστοιχη (ημι-στατική) πειραματική, προκειμένου η προσομοίωση να ολοκληρωθεί σε αποδεκτό χρονικό διάστημα. Ταυτόχρονα, στα αποτελέσματα της ανάλυσης, γινόταν έλεγχος του ενεργειακού ισοζυγίου (εσωτερική ενέργεια του συστήματος/μοντέλου σε σχέση με την κινητική ενέργειά του), προκειμένου να αποτραπεί η μετάπτωση της προσομοίωσης σε δυναμική καταπόνηση (αλλοίωση των ημι-στατικών συνθηκών με επίδραση αδρανειακών παραγόντων) [29,30].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιλεγμένα αντιπροσωπευτικά μοντέλα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (διαδοχικά στιγμιότυπα κατάρρευσης και τελικές όψεις του κελύφους, καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, χαρακτηριστικά μεγέθη αξιολόγησης της συμπεριφοράς του κελύφους: P_{max} , P_m , E_{abs} , CFE, SEA), τα οποία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Για τη μοντελοποίηση της πειραματικής διαδικασίας επιλέχθηκε ως κέλυφος αναφοράς (όπως και στην πειραματική διαδικασία) το δοκίμιο 3 και τρεις χαρακτηριστικές (δύο οριακές και η μέση), με βάση αυτό, διατάξεις διατομής, τα δοκίμια 3.1, 3.5 και 3.11. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μοντέλων των τεσσάρων αυτών διατομών είναι ουσιαστικά ίδια με εκείνα των αντίστοιχων πειραματικών δοκιμίων, με πολύ μικρές διαφοροποιήσεις, που οφείλονται στη γεωμετρικά εξιδανικευμένη σχεδίαση/κατασκευή των μοντέλων σε σχέση με την εργαστηριακή μορφοποίηση (κοπή ελάσματος και κυλινδρική κάμψη) των αντίστοιχων δοκιμίων της πειραματικής διαδικασίας.



Εικόνα 4.2 Κατόψεις μοντέλων κελυφών (a) Δοκ. 3 (b) Δοκ. 3.1 (c) Δοκ. 3.5 (d) Δοκ. 3.11

➤ Δοκίμιο 3

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



(1)



(2)



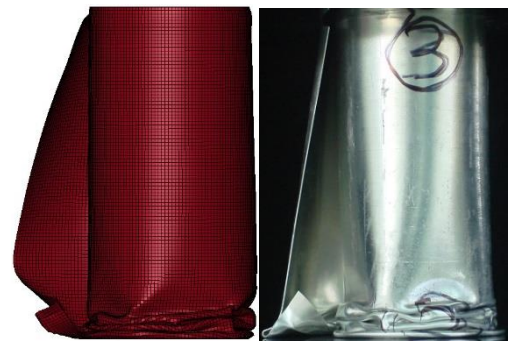
(3)



(4)



(5)



(6)



(7)



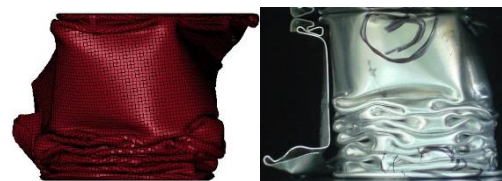
(8)



(9)



(10)

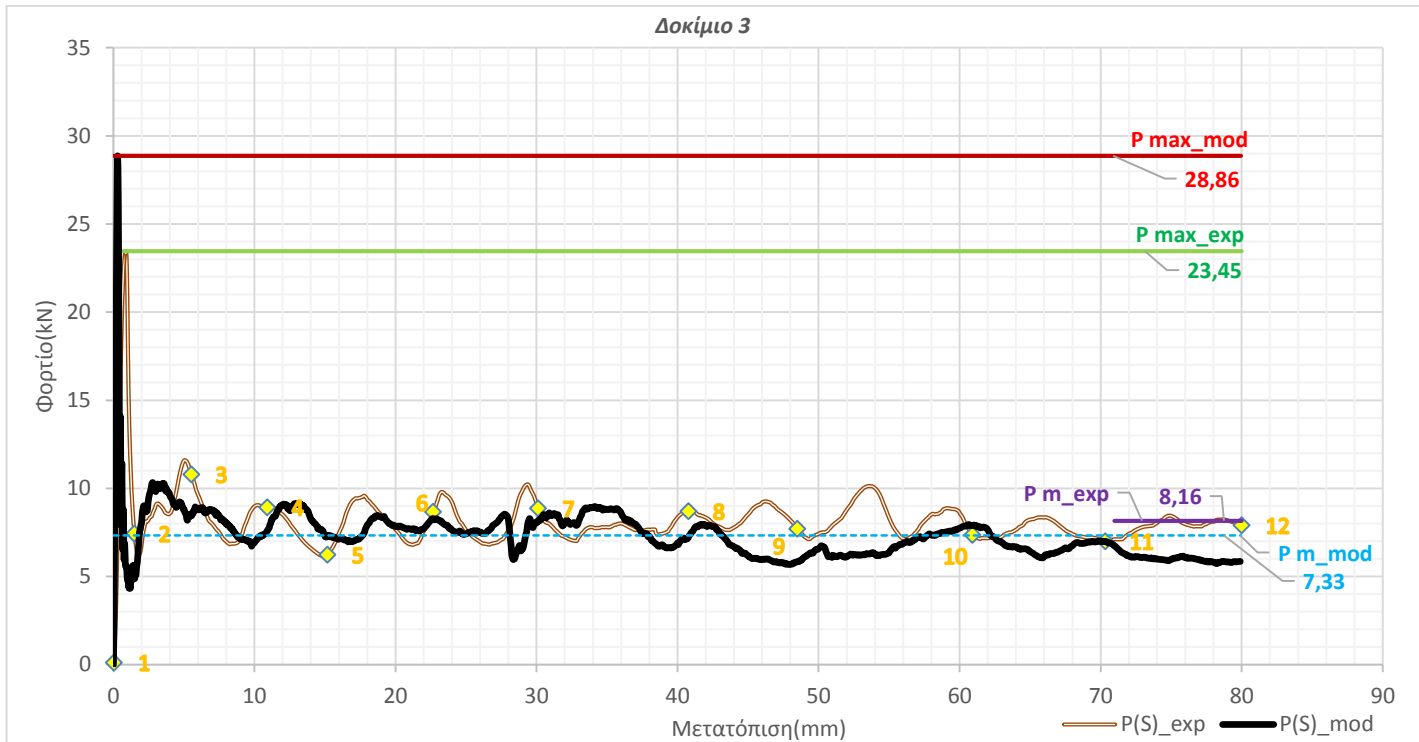


(11)



(12)

Συγκριτικό Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης

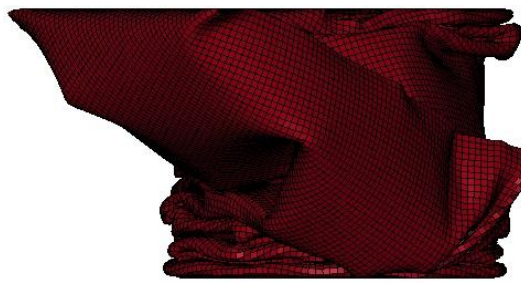


Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

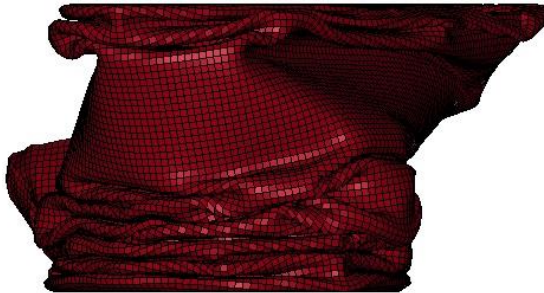
	Πείραμα	Προσομοίωση
Μέσο Φορτίο	$P_m = 8,16$ KN	$P_m = 7,33$ KN
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 23,46$ KN	$P_{max} = 28,86$ KN
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 652,47$ J	$E_{abs} = 586,5$ J
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 13,83$ J/gr	$SEA = 12,4$ J/gr
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 34,77$ %	$CFE = 25,4$ %

Τελικές Όψεις





Πλάγιες Όψεις



Ισομετρική Όψη

Σχολιασμός-Τρόπος κατάρρευσης

Παρατηρούμε ότι το αριθμητικό μοντέλο παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το δοκίμιο όσον αφορά τον τρόπο κατάρρευσης και τους δείκτες *crashworthiness*. Η κατάρρευση του μοντέλου ξεκινάει από κάτω και ο τρόπος κατάρρευσης είναι μη συμμετρικός, όπως και στο δοκίμιο. Η μόνη διαφορά έγκειται στο σχηματισμό μεγαλύτερου αριθμού λοβών στο δοκίμιο απ' ότι στο μοντέλο στο κάτω μέρος, όπως φαίνεται κι από τις φάσεις κατάρρευσης αλλά και το διάγραμμα. Αυτό βέβαια συμβαίνει γιατί το μοντέλο αρχίζει και καταρρέει ταυτόχρονα στο πάνω μέρος του (στιγμιότυπο 7) και οδηγεί στο σχηματισμό πλήρων μη-εκτατών λοβών εκεί. Σχετικά με τα συγκρίσιμα μεγέθη, διαπιστώνουμε ότι οι τιμές τους είναι παρεμφερείς με μόνη σημαντική διαφορά αυτή του μέγιστου φορτίου, η οποία επηρεάζει και το δείκτη ομοιομορφίας φορτίου. Η διαφορά αυτή του P_{MAX} πιθανότατα οφείλεται στις ιδανικές συνθήκες του πειράματος και την τέλεια παραλληλότητα του ελάσματος.

➤ Δοκίμιο 3.1

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης



(1)

(2)

(3)



(4)

(5)

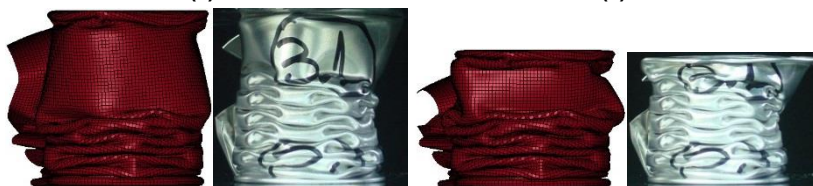
(6)



(7)

(8)

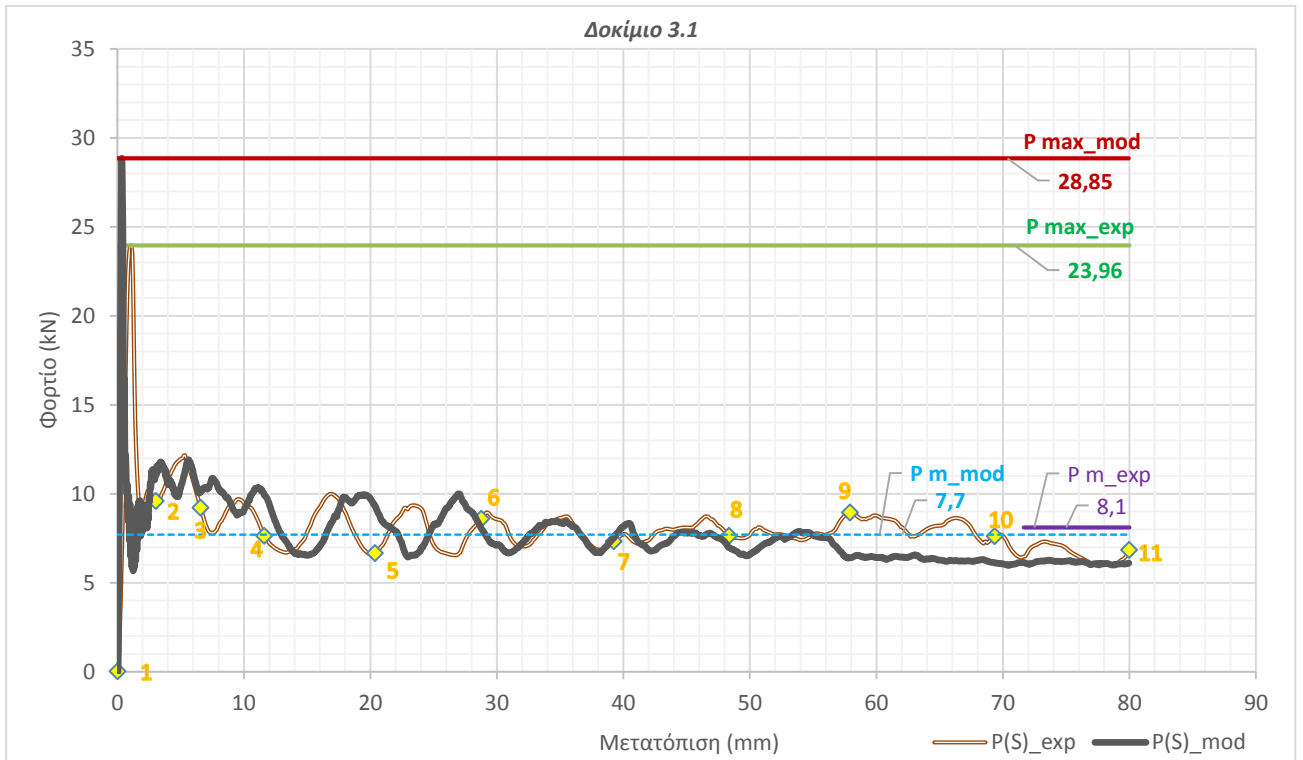
(9)



(10)

(11)

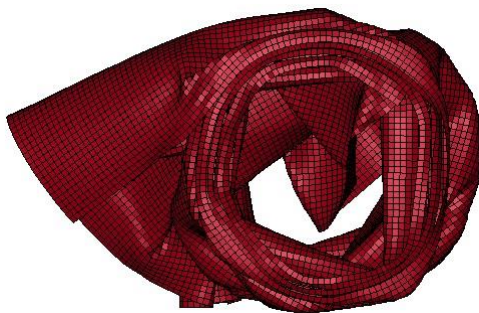
Συγκριτικό Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



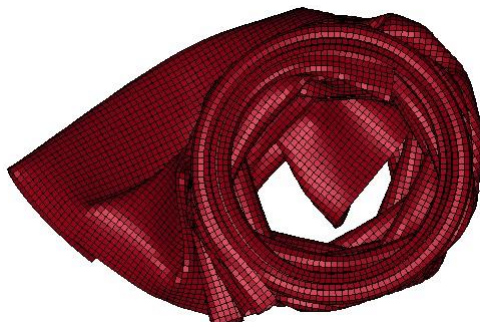
Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

	Πείραμα	Προσομοίωση
Μέσο Φορτίο	$P_m = 8,1 \text{ KN}$	$P_m = 7,7 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 23,96 \text{ KN}$	$P_{max} = 28,85 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 648,5 \text{ J}$	$E_{abs} = 616,44 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 13,76 \text{ J/gr}$	$SEA = 13,08 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 33,8 \%$	$CFE = 26,7 \%$

Τελικές Όψεις



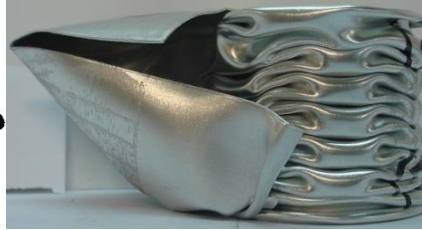
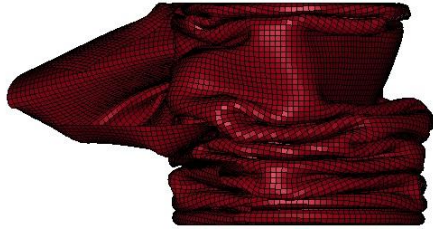
Κάτωψη



Ανοψη



Πλάγιες Όψεις



Ισομετρική Όψη

Σχολιασμός-Τρόπος κατάρρευσης

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό μέσω των προοδευτικών φάσεων κατάρρευσης, το συγκριτικό διάγραμμα αλλά και τις τελικές όψεις, το μοντέλο ακολουθεί σχεδόν τέλεια το πείραμα. Ο τρόπος κατάρρευσης και στις 2 περιπτώσεις είναι αρχικά συμμετρικός (άνοψη) με τη δημιουργία του πρώτου λοβού και στη συνέχεια μη-εκτατός, μοτίβου διαμαντιού, με τη δημιουργία πολλαπλών λοβών στο κάτω μέρος. Στα τελευταία 30mm συμπίεσης, έχουμε την ταυτόχρονη κατάρρευση του μοντέλου στο πάνω μέρος με τη δημιουργία 2 μη εκτατών λοβών, μοτίβου διαμαντιού, το οποίο οδηγεί και στην ελάχιστη μείωση του μέσου φορτίου (διάγραμμα). Εφόσον όμως ισχύει ίδια βράχυνση δοκιμίου και ίδια μαζά, παρατηρούνται και παρόμοιες τιμές στην ενέργεια απορρόφησης, αλλά και την ειδική ενέργεια απορρόφησης. Αντίστοιχα με πριν, η μόνη σημαντική διαφορά είναι αυτή του μέγιστου φορτίου, η οποία επηρεάζει και το δείκτη ομοιομορφίας φορτίου.

➤ Δοκίμιο 3.5

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



(1)

(2)

(3)



(4)

(5)

(6)



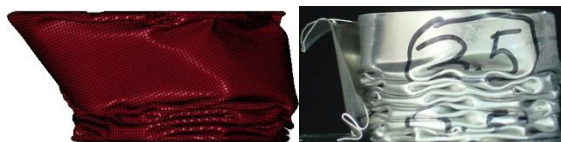
(7)

(8)



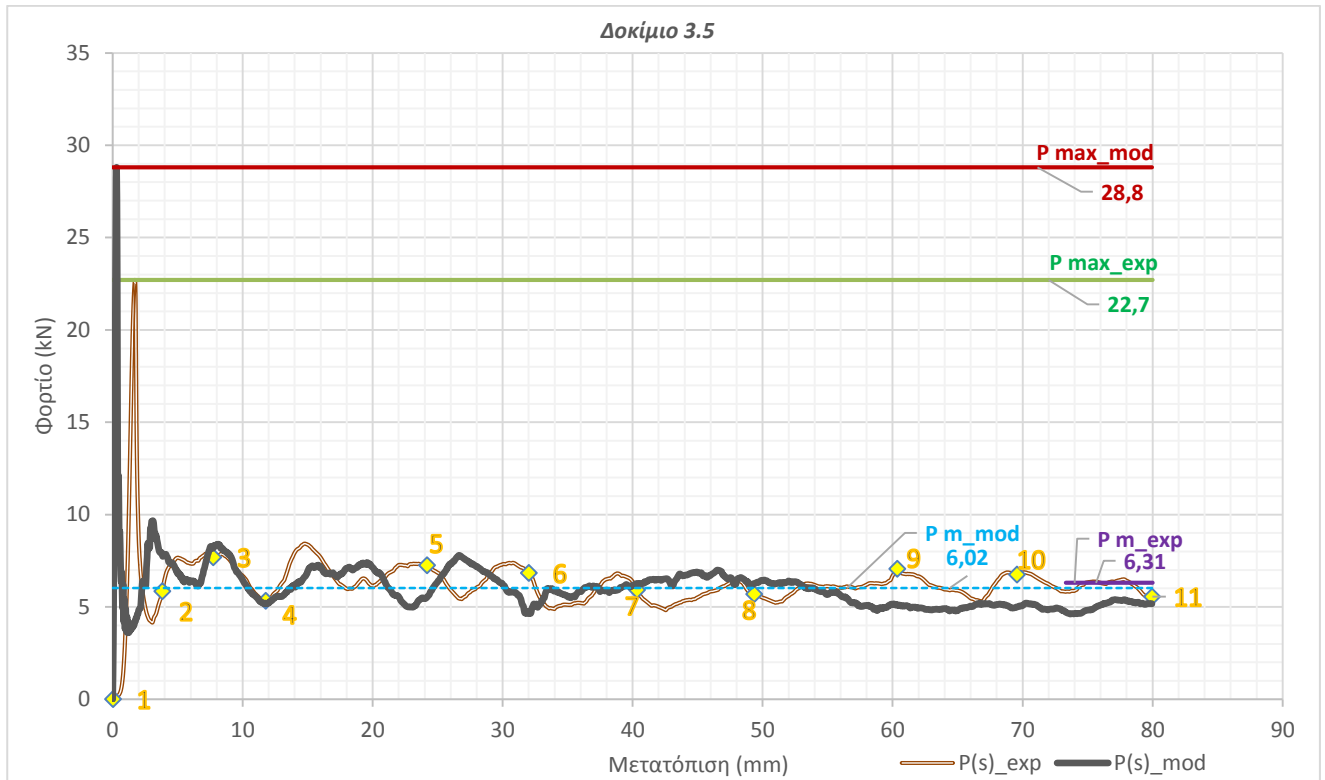
(9)

(10)



(11)

Συγκριτικό Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

	Πείραμα	Προσομοίωση
Μέσο Φορτίο	$P_m = 6,31$ KN	$P_m = 6,02$ KN
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 22,7$ KN	$P_{max} = 28,8$ KN
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 504,8$ J	$E_{abs} = 481,93$ J
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 10,68$ J/gr	$SEA = 10,2$ J/gr
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 27,8$ %	$CFE = 20,91$ %

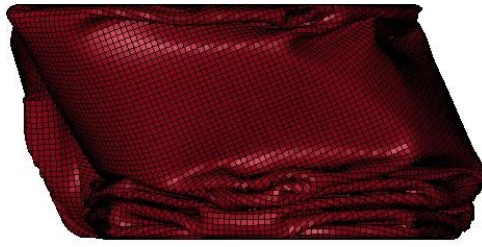
Τελικές Όψεις



Κάτωψη



Άνοψη



Πλάγιες Όψεις



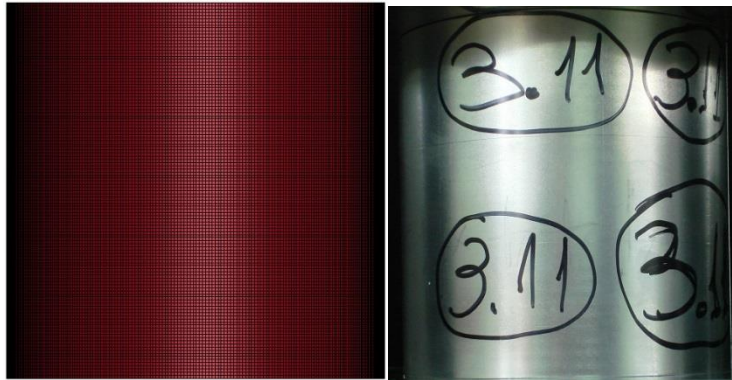
Ισομετρική Όψη

Σχολιασμός-Τρόπος κατάρρευσης

Και σε αυτή την περίπτωση, είναι αξιοσημείωτη η ομοιότητα που παρουσιάζει το μοντέλο με το πείραμα. Το δοκίμιο αναπτύσσει μέτωπο κατάρρευσης στο κάτω μέρος του, με τον τρόπο κατάρρευσης να χαρακτηρίζεται ως μη συμμετρικός, μοτίβου διαμαντιού. Σε αντίθεση βέβαια με το πείραμα, το μοντελό αρχίζει να καταρρέει ταυτόχρονα κι από πάνω μετά τα πρώτα 40mm βράχυνσης του δοκιμίου (στιγμιότυπο 7). Οι τιμές του μέσου φορτίου, ενέργειας απορρόφησης και ειδικής ενέργειας απορρόφησης παραμένουν σχεδόν ίσες, ενώ υπάρχει πάντα αυτή η διαφορά μεταξύ μέγιστου φορτίου και δείκτη ομοιομορφίας φορτίου.

➤ Δοκίμιο 3.11

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης



(1)



(2)



(3)



(4)



(5)



(6)



(7)

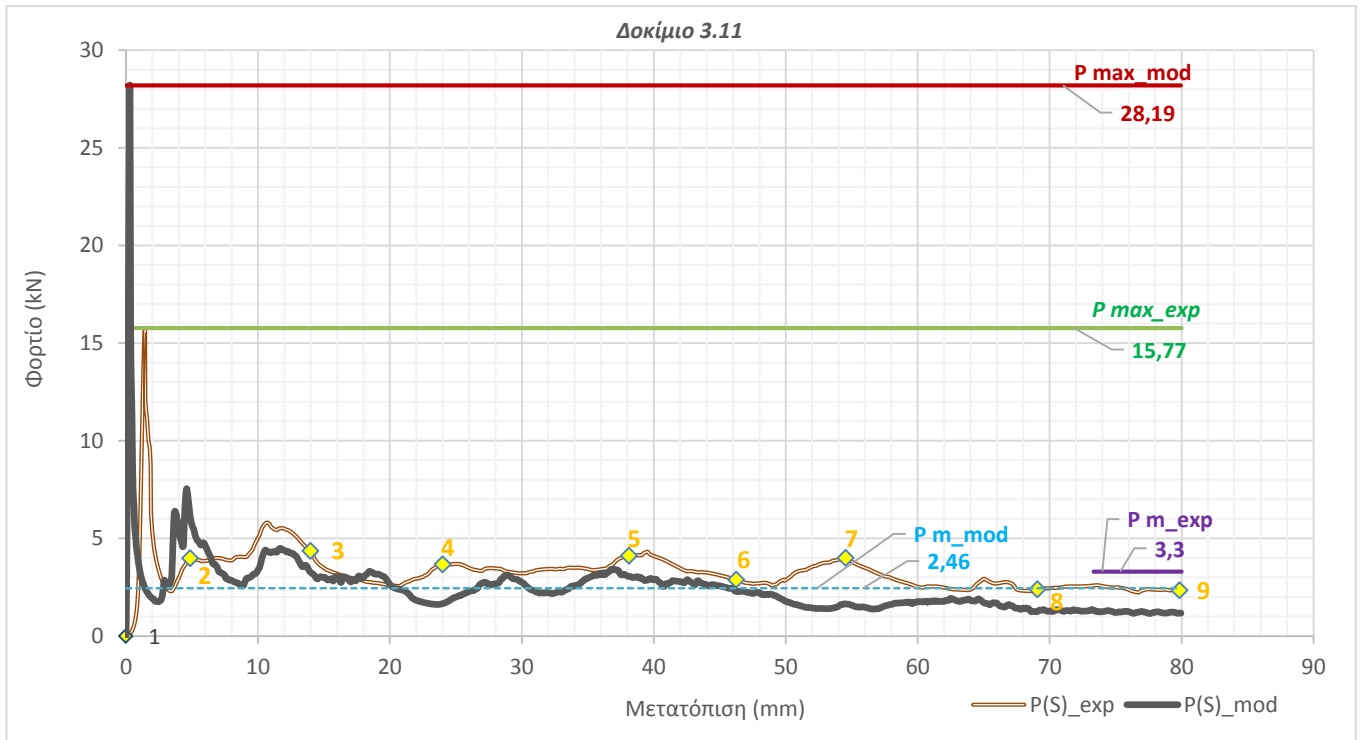


(8)



(9)

Συγκριτικό Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

	Πείραμα	Προσομείωση
Μέσο Φορτίο	$P_m = 3,3$ KN	$P_m = 2,46$ KN
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 15,77$ KN	$P_{max} = 28,19$ KN
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 264,2$ J	$E_{abs} = 196,44$ J
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 5,6$ J/gr	$SEA = 4,17$ J/gr
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 20,94$ %	$CFE = 8,71$ %

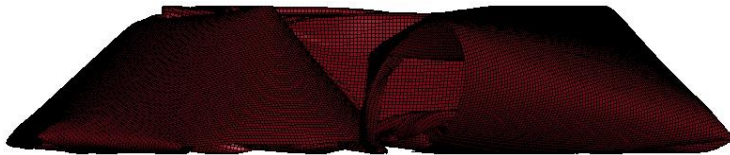
Τελικές Όψεις



Κάτωψη



Άνοψη



Πλάγιες Όψεις



Ισομετρική Όψη

Σχολιασμός-Τρόπος κατάρρευσης

Και σε αυτή την περίπτωση, το μοντέλο ακολουθεί πλήρως το πείραμα όπως φαίνεται κυρίως στις προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης των δοκιμών αλλά και τις τελικές οψεις. Τα δοκίμια αρχίζουν να καταρρέουν από πάνω ακολουθώντας μοτίβο διαμαντιού. Μετά τα πρώτα 20mm συμπίεσης, στο μοντέλο αλλά και στο πείραμα, παρατηρούμε το άνοιγμα της διατομής με αποτέλεσμα να χάνουν δοκιμη στιβαρότητα τα δοκίμια και να συντελούν στην ολίσθηση της έσω σπείρας. Οι τιμές του μέσου φορτίου παραμένουν κόντα, αλλά με μια μεγαλύτερη διαφοροποίηση σε σχέση με τα δοκίμια 3, 3.1, 3.5. Ενώ στην περίπτωση του μέγιστου φορτίου, είναι εμφανέστατη η διαφορά μεταξύ της μοντελοποίησης και της πραγματικότητας, καθώς η τιμή του μέγιστου φορτίου του μοντέλου είναι ίδια με αυτή των δοκιμών 3, 3.1, 3.5 εφόσον πρόκειται για ίδια ενεργό διατομή.

4.3 Περαιτέρω Διερεύνηση

Διατηρώντας ως κελύφη αναφοράς τα ισοδύναμα δοκίμια σπειροειδούς (ανοιχτής) διατομής, 3 και 3.1-3.11 (ίδια ενεργός διατομή 222 mm² σε όλα), και προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά ισοδύναμων (ίδια ενεργός διατομή) με αυτά κελυφών κλειστής διατομής (ενιαίο και σταθερό πάχος τοιχώματος) και να συγκριθεί με εκείνη των προαναφερθέντων κελυφών, μοντελοποιήθηκε η αξονική κατάρρευση τριών κυλινδρικών κελυφών με ίδια ενεργό διατομή 222 mm², ίδιο ύψος ίσο με 120 mm, άλλα 3 διαφορετικά πάχη.

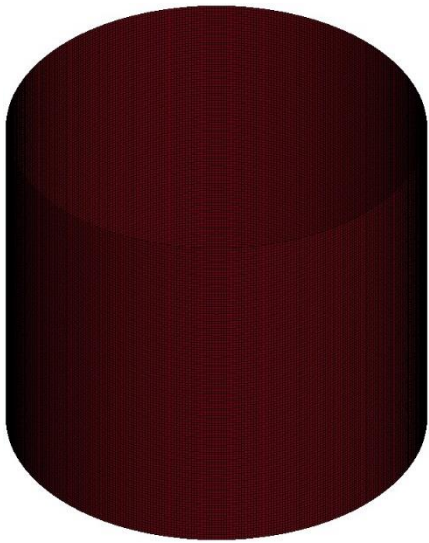
Πιο συγκεκριμένα:

- $t=0,5\text{mm}$ (κωδική ονομασία “3_closed_th-0,5”), με $d_m= 141,33\text{mm}$
- $t=1,5\text{mm}$ (κωδική ονομασία “3_closed_th-1,5”), με $d_m= 47,11\text{mm}$
- $t=2,5\text{mm}$ (κωδική ονομασία “3_closed_th-2,5”), με $d_m= 28,27\text{mm}$

Η διαδικασία μοντελοποίησης, σε όλες τις παραμέτρους της, ήταν πανομοιότυπη με εκείνη των σπειροειδών διατομών που προηγήθηκε. Η μόνη διαφοροποίηση αφορά στην πυκνότητα του πλέγματος των κελυφών, η οποία ελαττωνόταν (shell στοιχεία μεγαλύτερων διαστάσεων) με την αύξηση του πάχους του τοιχώματος του κελύφους, καθώς αναμενόταν αύξηση του μεγέθους (με μείωση του αριθμού) των λοβών κατάρρευσης που θα σχηματίζονταν. Η συγκεκριμένη επιλογή, όπως αναμενόταν, είχε επίσης ευνοϊκό αντίκτυπο στον υπολογιστικό χρόνο επίλυσης των συγκεκριμένων μοντέλων.

➤ Δοκίμιο 3_Κλειστής Διατομής (t=0,5mm)

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$S_1=0mm$ (1)



$S_2=10mm$ (2)



$S_3=20mm$ (3)



$S_4=30mm$ (4)



$S_5=40mm$ (5)



$S_6=50mm$ (6)



$S_7=60mm$ (7)

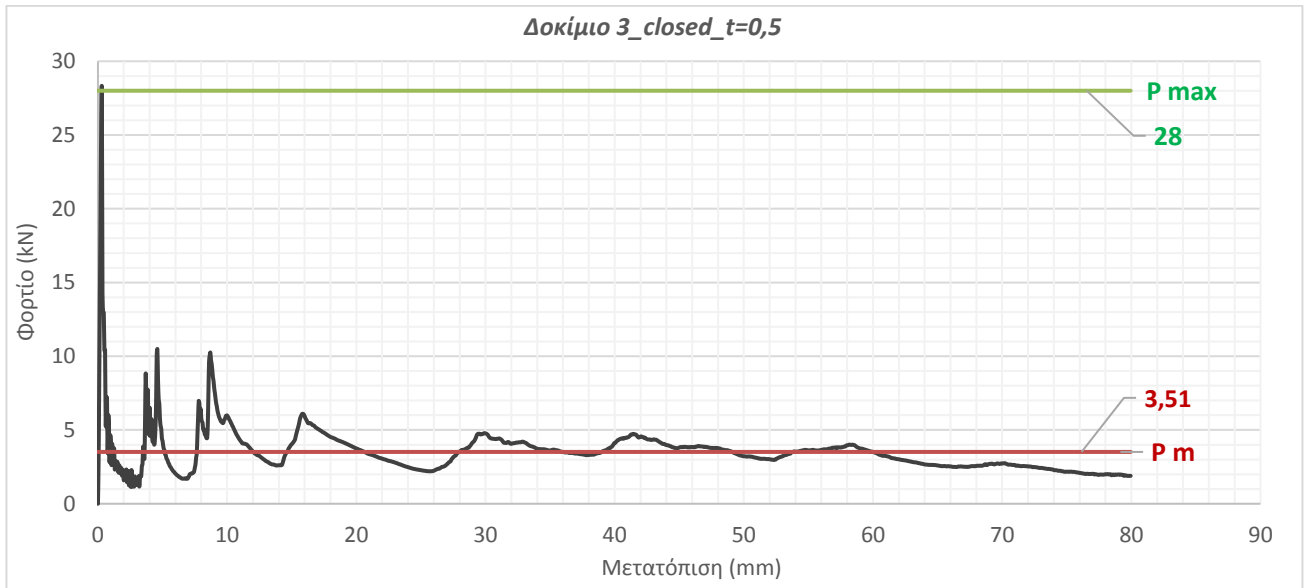


$S_8=70mm$ (8)



$S_9=80mm$ (9)

Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Πίνακας Αποτελεσμάτων

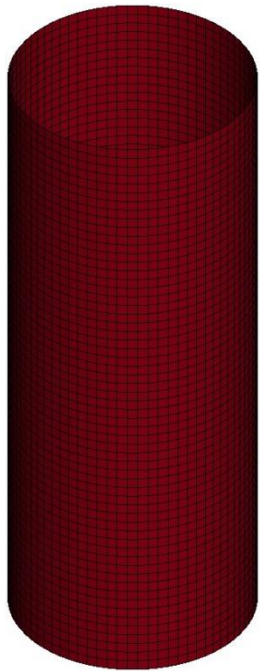
	Προσομοίωση
Μέσο Φορτίο	$P_m = 3,51$ κΝ
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 28$ κΝ
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 2811$ J
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	SEA = 5,98 J/gr
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	CFE = 12,5 %

Τελικές Όψεις

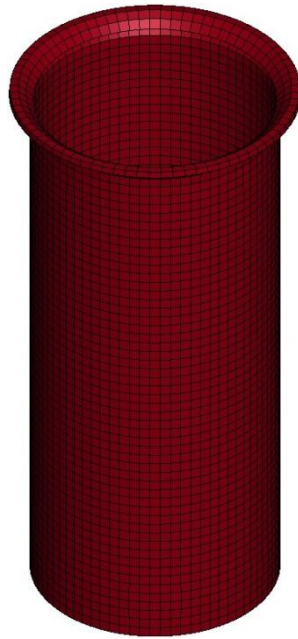


➤ Δοκίμιο 3_Κλειστής Διατομής (t=1,5mm)

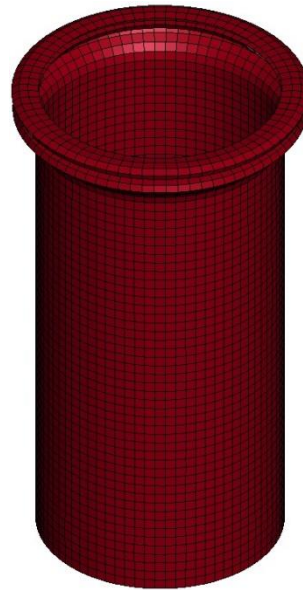
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$S_1=0mm$ (1)



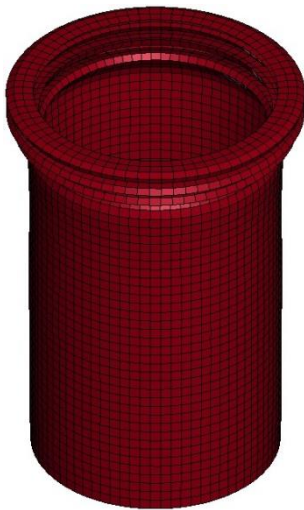
$S_2=10mm$ (2)



$S_3=20mm$ (3)



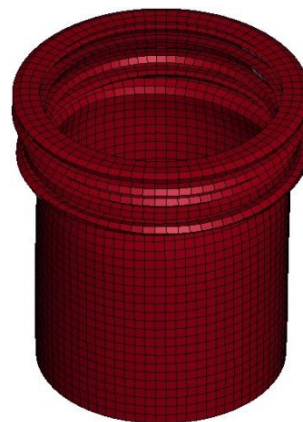
$S_4=30mm$ (4)



$S_5=40mm$ (5)



$S_6=50mm$ (6)



$S_7=60mm$ (7)

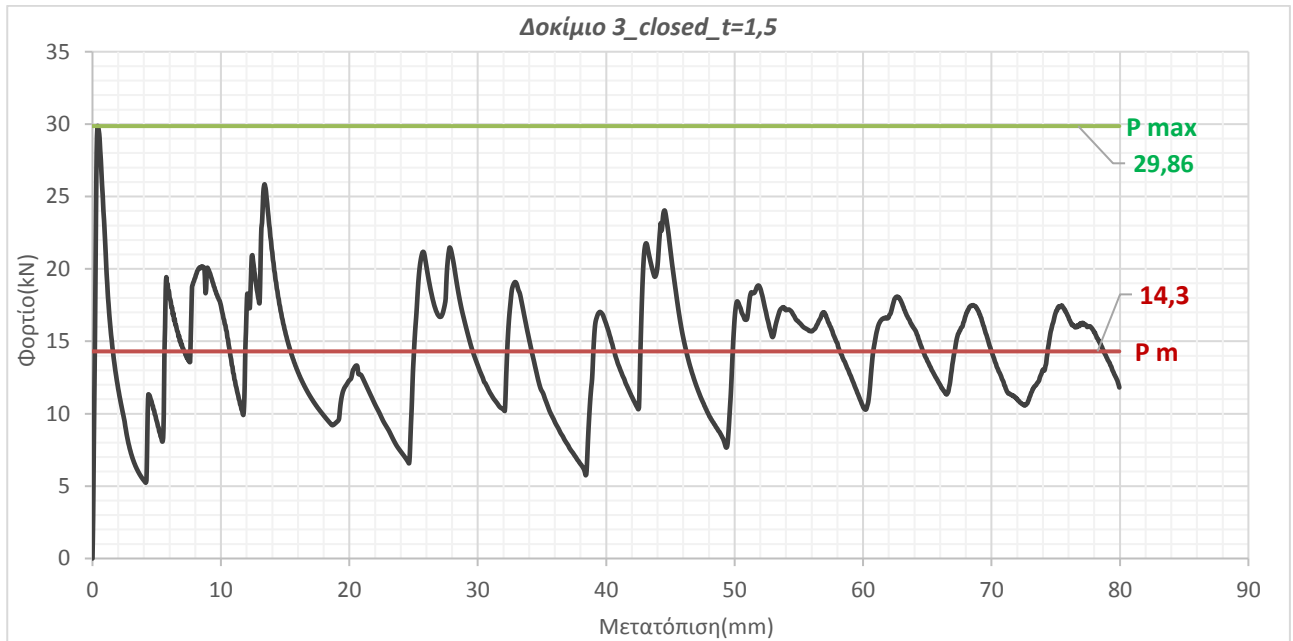


$S_8=70mm$ (8)



$S_9=80mm$ (9)

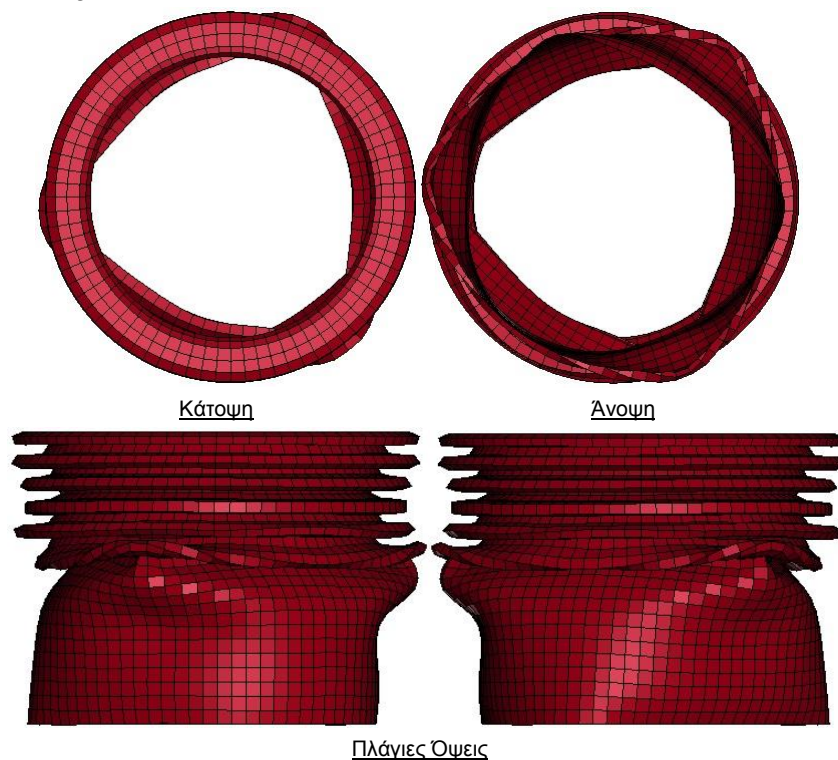
Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Πίνακας Αποτελεσμάτων

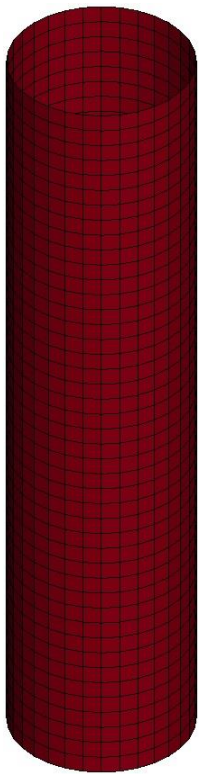
	Προσομοίωση
Μέσο Φορτίο	$P_m = 14,3 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 29,86 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 1144,19 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 24,34 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 47,9 \%$

Τελικές Όψεις

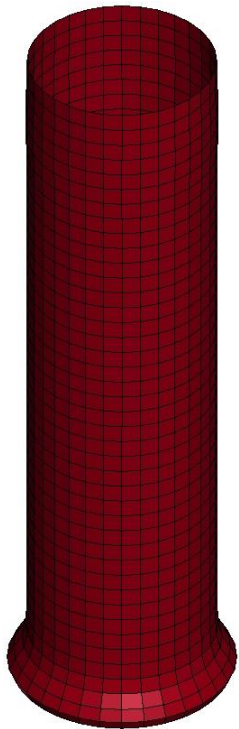


➤ Δοκίμιο 3_Κλειστής Διατομής (t=2,5mm)

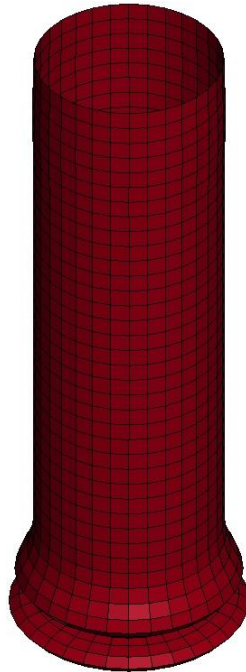
Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



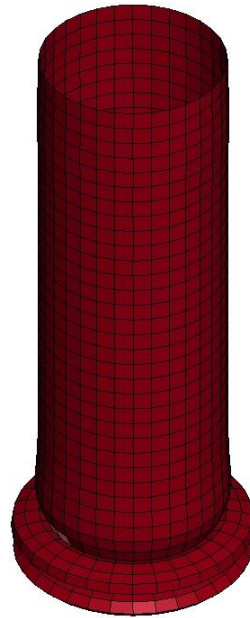
$S_1=0mm$ (1)



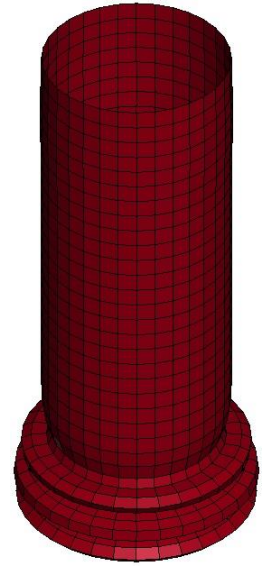
$S_2=10mm$ (2)



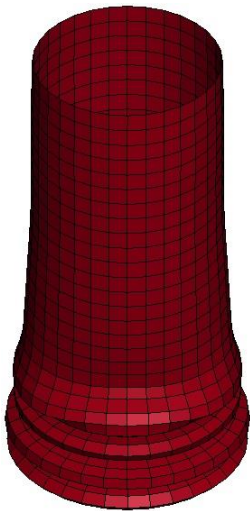
$S_3=20mm$ (3)



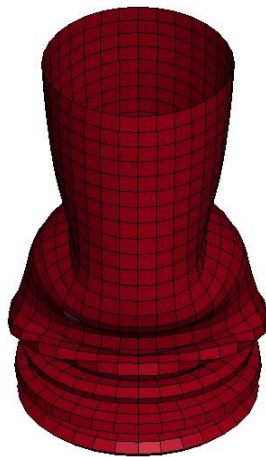
$S_4=30mm$ (4)



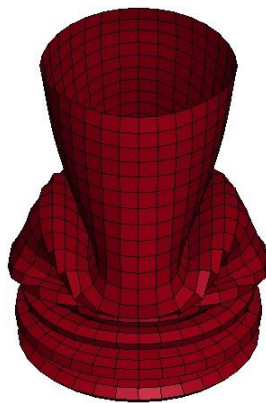
$S_5=40mm$ (5)



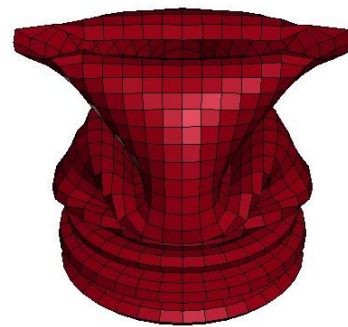
$S_6=50mm$ (6)



$S_7=60mm$ (7)

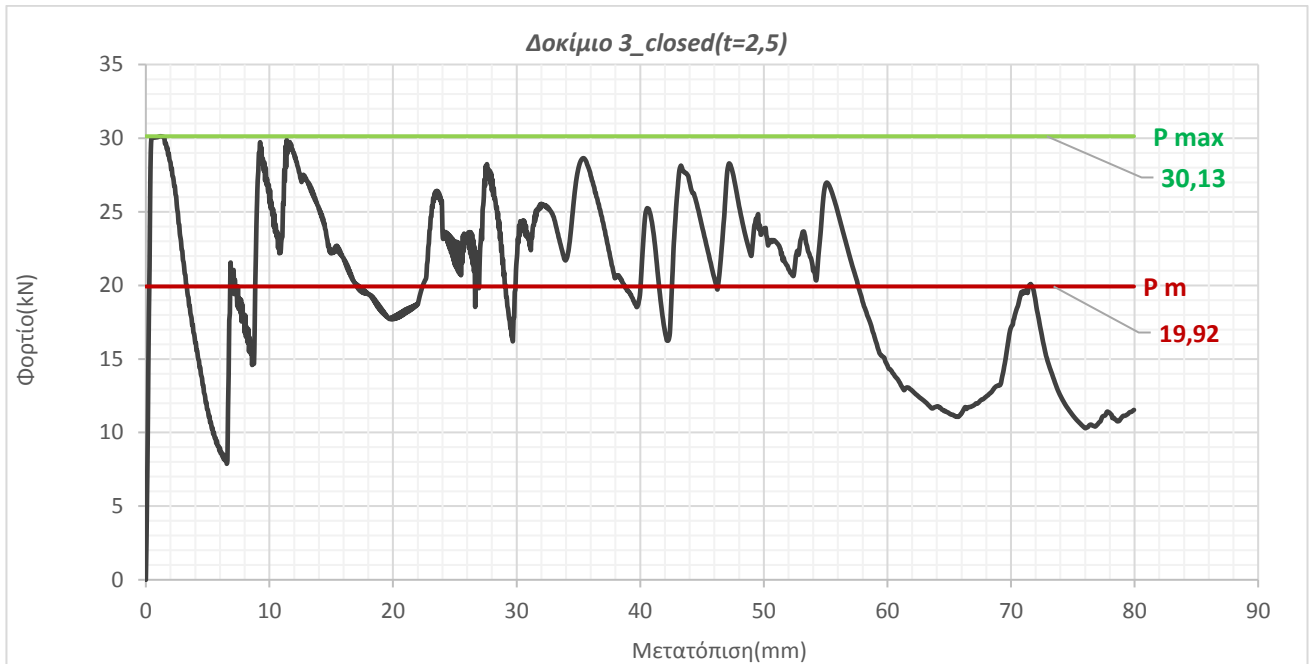


$S_8=70mm$ (8)



$S_9=80mm$ (9)

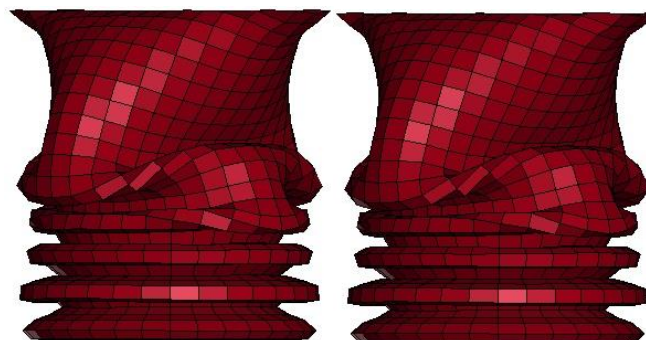
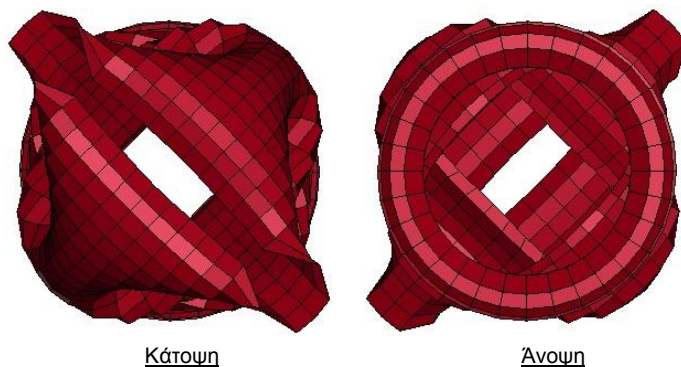
Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης



Πίνακας Αποτελεσμάτων

	Προσομοίωση
Μέσο Φορτίο	$P_m = 19,92 \text{ KN}$
Μέγιστο Φορτίο	$P_{max} = 30,13 \text{ KN}$
Ενέργεια Παραμόρφωσης	$E_{abs} = 1593,93 \text{ J}$
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	$SEA = 33,9 \text{ J/gr}$
Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου	$CFE = 66,2 \%$

Τελικές Όψεις



Πλάγιες Όψεις

4.4 Σχολιασμός-Σύγκριση Αποτελεσμάτων

4.4.1 Γενικά Σχόλια-Παρατηρήσεις

Ο συντελεστής τριβής μεταξύ των μετώπων/άκρων του κελύφους και των αντίστοιχων πλακών συμπίεσης επηρεάζει τα αποτελέσματα (πειράματος και μοντέλου), καθώς, λόγω της σπειροειδούς/ανοιχτής διατομής του κελύφους, αναμένεται σημαντική σχετική ολίσθηση λόγω - κυρίως - έκτασης των εξωτερικών τμημάτων των διατομών. Όσο λιγότερες σπείρες έχει το κέλυφος τόσο πιο εκτεταμένη είναι η σχετική ολίσθηση (ελαττωμένη στιβαρότητα διατομής)

4.4.2 Σύγκριση Πειράματος-Μοντελοποίησης

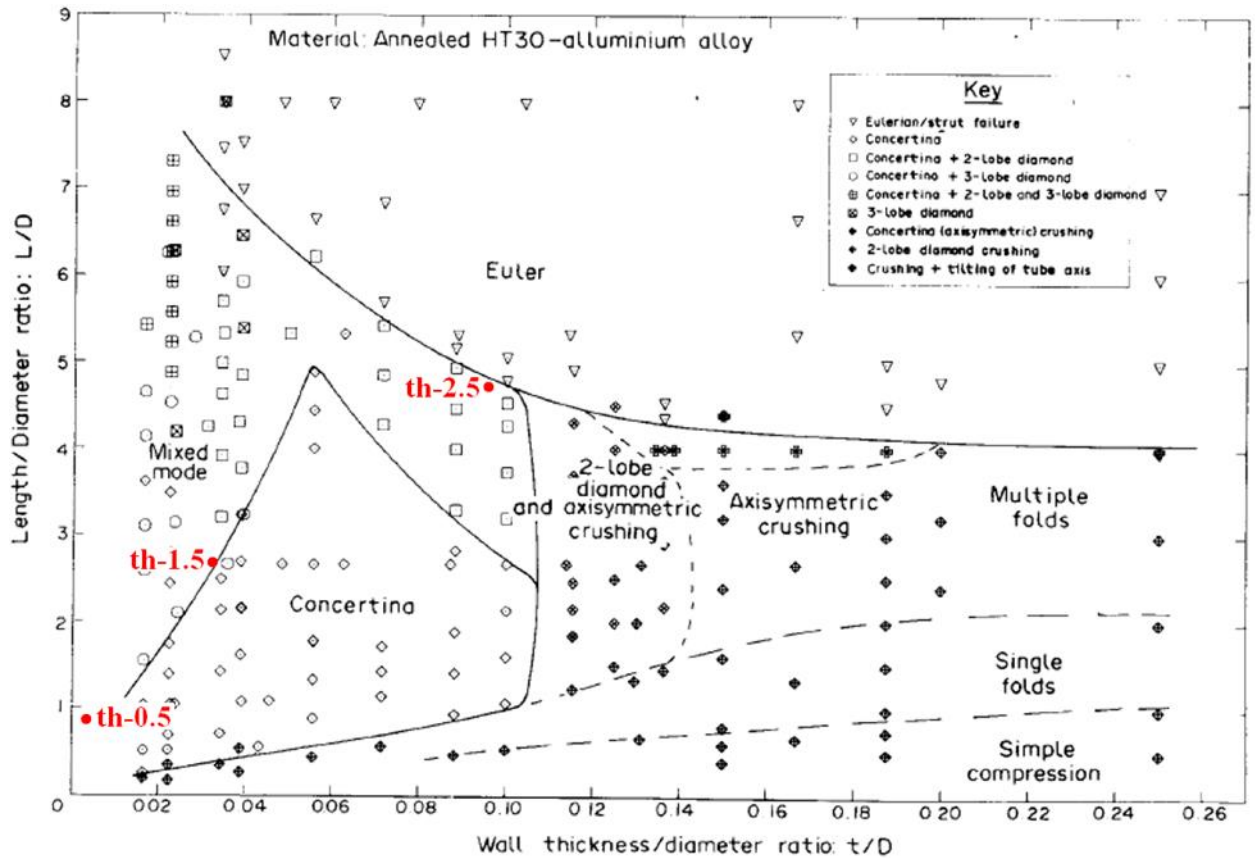
Όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρακολουθούν με ιδιαίτερα ικανοποιητικό τρόπο εκείνα των αντίστοιχων πειραματικών δοκιμών (Πιν. 4.1). Οι χαρακτηριστικοί δείκτες Crashworthiness, καθώς και τα μοτίβα κατάρρευσης που προέκυψαν από τα μοντέλα, παρουσιάζουν γενικά αξιοσημείωτη εγγύτητα με εκείνα των αντίστοιχων πειραματικών δοκιμών.

Οι μικρές αποκλίσεις που διαπιστώνονται οφείλονται κυρίως στο ότι τα μοντέλα προσομοίωσης, έναντι των πραγματικών πειραματικών δοκιμών, χαρακτηρίζονται από:

- Εξιδανικευμένες παραμέτρους σχεδιασμού (γεωμετρία τυπικής σπειροειδούς διατομής, ονομαστικές διαστάσεις),
- Τυπικές, ομοιόμορφες και συμμετρικές συνοριακές συνθήκες,
- Ομοιογένεια υλικού και μηχανικών ιδιοτήτων του
- Γενικές παραδοχές/υποθέσεις περί των βασικών παραμέτρων (κυρίως του υλικού) επιρροής στην απόκρισή τους.

4.4.3 Σχολιασμός μοντέλων κλειστής διατομής

Καθώς δεν ήταν δυνατόν να υπάρξουν διαθέσιμα δοκίμια (μορφοποιούνται με διέλαση - extrusion) ισοδύναμης ενεργού κλειστής διατομής ενιαίου πάχους (τοιχώματος) με τις συγκεκριμένες διαστάσεις και μηχανικές ιδιότητες υλικού, προκειμένου να γίνει πειραματική επαλήθευση των αντίστοιχων μοντέλων, χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα της Εικ. 4.3 για τη σύγκριση - τουλάχιστον - των μοτίβων κατάρρευσης μεταξύ των μοντέλων και (των αναμενόμενων) από ενδεχόμενα πειράματα. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζονται αποτελέσματα ιδιαίτερα εκτεταμένης πειραματικής εργασίας, που συνδέουν τους τρόπους κατάρρευσης κυλινδρικών κελυφών αλουμινίου με τις σχετικές διαστάσεις τους. Από τον εντοπισμό σε αυτό των συγκεκριμένων κελυφών των μοντέλων, προκύπτει ότι ο τρόπος κατάρρευσης σε καθένα από αυτά συνάδει με τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα. Φαίνεται ότι η μικτή μορφή κατάρρευσης (mixed mode), δηλαδή ο αξονοσυμμετρικός/εκτατός (concertina) ακολουθούμενος από τον μη αξονοσυμμετρικό/μη εκτατό (diamond) τρόπο κατάρρευσης, διέπει τη συνολική παραμόρφωση των κελυφών, όπως συνέβη και στα αντίστοιχα μοντέλα.



Εικόνα 4.3 Διάγραμμα κατάταξης των μορφών κατάρρευσης (deformation mode) κυλινδρικών σωλήνων από κράμα αλουμινίου. (εντοπισμός των κελυφών κλειστής/ενιαίας διατομής στο διάγραμμα) [25]

4.4.4 Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Δοκίμιο	Μέσο Φορτίο P_m [kN]	Μέγιστο Φορτίο P_{max} [kN]	Μάζα m [gr]	Ενέργεια Παραμόρφωσης E_{abs} [J]	Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης SEA [j/gr]	Συντελεστής Ομοιομορφίας Φορτίου CFE [%]
1	2,26	7,9	24,5	181	11,08	28,63
2	5,02	16,1	47,6	401,5	12,65	31,17
3	8,16	23,46	70,9	652,47	13,8	34,74
3_mod	7,33	28,86	70,9	586,5	12,4	25,4
4	10,93	31,72	94,1	874,18	13,93	34,45
5	12,36	36,6	117	998,64	12,67	33,75
3.1_exp	8,1	23,96	70,7	648,5	13,76	33,8
3.1_mod	7,7	28,85	70,7	616,44	13,08	26,7
3.2	8	22,36	70,7	639,85	13,65	35,7
3.3	7,38	20,93	70,7	590,9	12,5	35,29
3.4	6,59	20,06	70,4	527,15	11,26	32,85
3.5_exp	6,31	22,7	70,6	504,8	10,68	27,8
3.5_mod	6,02	28,8	70,6	481,93	10,2	20,91
3.6	5,61	21,43	70,5	448,78	9,55	26,17
3.7	4,97	22,32	70,9	398,15	8,46	22,3
3.8	4,15	19,89	70,2	332,23	7,08	20,88
3.9	3,96	17,95	70,9	316,81	6,72	22,06
3.10	3,65	14,44	70,3	291,75	6,19	25,26
3.11_exp	3,3	15,77	70,7	264,2	5,6	20,94
3.11_mod	2,46	28,19	70,7	196,44	4,17	8,71
3_closed_th-0,5	3,51	28		2811	5,98	12,5
3_closed_th-1,5	14,3	29,86		1144,19	24,34	47,9
3_closed_th-2,5	19,92	30,13		1593,93	33,9	66,2

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

Κεφάλαιο 5 : Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα

Γενικά, τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και εκείνα της προσομοίωσης συμφωνούν με τα αναλυτικά μοντέλα (και τις σχετικές πειραματικές δοκιμές επιβεβαίωσής τους) που έχουν διατυπωθεί τις τελευταίες δεκαετίες σχετικά με την αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων μεταλλικών κυλινδρικών κελυφών. Ως κοινό συμπέρασμα στα μοντέλα αυτά προκύπτει ότι το μέσο φορτίο κατάρρευσης, P_m , επομένως και η ενέργεια απορρόφησης, E_{abs} , εφόσον αναφερόμαστε σε ίδια συνολική βράχυνση των κελυφών, γενικά αυξάνονται με την αύξηση του σχετικού πάχους (relative thickness) t/R του κελύφους [28]. Εξομοιώνοντας - προκειμένου να θεωρηθεί ένα βασικό κοινό πεδίο σύγκρισης - το πολλαπλό τοίχωμα της σπειροειδούς/ανοιχτής διατομής των εξεταζόμενων στην παρούσα διπλωματική εργασία κελυφών με το αντίστοιχο/ισοδύναμο συνολικό ενιαίο πάχος, προκύπτει ξεκάθαρα η συγκεκριμένη εξάρτηση μεταξύ του μέσου φορτίου και του σχετικού (συνολικού ενιαίου) πάχους (βλ. Πιν. 4.1). Στα δοκίμια 1 έως 5 αυξάνεται διαδοχικά το πάχος του τοιχώματος, t με την αύξηση των σπειρών, διατηρώντας γενικά (όσο το επιτρέπουν τα εγγενή χαρακτηριστικά της διαδικασίας μορφοποίησης) ίδια τη μέση ακτίνα R , επομένως αυξάνεται το σχετικό πάχος t/R και αυξάνεται αντίστοιχα το μέσο φορτίο κατάρρευσης, P_m . Στα δοκίμια 3 και 3.1 έως 3.11, εφόσον διατηρήθηκε ίδια η ενεργός διατομή ($2\pi R t$), με τη διαδοχική αύξηση της μέσης ακτίνας R ελαττώνεται το πάχος t , επομένως ελαττώνεται το σχετικό πάχος t/R και ελαττώνεται αντίστοιχα το μέσο φορτίο κατάρρευσης, P_m . Οι ίδιες τάσεις της τιμής του μέσου φορτίου κατάρρευσης σε σχέση με το σχετικό πάχος του κελύφους παρατηρούνται και στα αντίστοιχα - μοντέλα προσομοίωσης των πειραματικών δοκιμών που παρουσιάστηκαν. Επίσης, προς επίρρωση της προαναφερθείσας γενικής διαπίστωσης, ανιπροσωπευτικά είναι και τα αποτελέσματα των περαιτέρω μοντέλων διερεύνησης για κυλινδρικά κελύφη ενιαίας κλειστής διατομής, στα οποία η ενεργός διατομή διατηρείται σταθερή (ίση με των δοκιμών 3 και 3.1 έως 3.11), ενώ διαφοροποιείται το πάχος του τοιχώματος με αντίστοιχη αντίστροφη μεταβολή της ακτίνας. Προκύπτει, χαρακτηριστικά, αύξηση του μέσου φορτίου κατάρρευσης με την αύξηση του σχετικού πάχους των κελυφών. Όσο, δηλαδή η μάζα του λεπτότοιχου μεταλλικού κυλινδρικού κελύφους συγκεντρώνεται εγγύτερα στον άξονά του (αυτό δηλώνει η ταυτόχρονη αύξηση του πάχους με τη μείωση της ακτίνας - άρα αύξηση του σχετικού πάχους - σε σταθερή ενεργό διατομή), τόσο το μέσο φορτίο κατάρρευσης αυξάνεται.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε (κυρίως με την αρωγή της μοντελοποίησης των συμπαγών/ενιαίου πάχους διατομών), φαίνεται ότι μια σπειροειδής (ανοιχτή, πλήρως ελεύθερη) διατομή είναι λιγότερο αποτελεσματική από την αντίστοιχη/ισοδύναμη κλειστή διατομή (ίδια ενεργός διατομή, ίδιο συνολικό/ενιαίο πάχος τοιχώματος, ίδια μέση ακτίνα). Αυτό οφείλεται στο ότι το κέλυφος της συμπαγούς διατομής παραμορφώνεται σε κάθε θέση (διατομή) κατά τον άξονα του με ομοιόμορφο και συνεχή τρόπο σε όλο το πάχος του τοιχώματος. Επιπλέον, η πλήρης ελευθερία των επιμέρους τοιχωμάτων της ανοιχτής διατομής να εκταθούν προς το εξωτερικό (λόγω του πολλαπλού τοιχώματος και των συνωριακών συνθηκών επαφής με τις πλάκες συμπίεσης), οδηγεί σε μείωση του λόγου t/R προϊούσης της κατάρρευσης, με αποτέλεσμα να μειώνεται το μέσο φορτίο. Όμως, διατηρώντας την ίδια ποσότητα (μάζα) ελάσματος, είναι δυνατή η κυλινδρική καμπτική διαμόρφωση κελύφους μικρότερης ακτίνας, και άρα μεγαλύτερου πάχους, με αποτέλεσμα την αύξηση του λόγου t/R και, ως εκ τούτου, του μέσου φορτίου. Η περαιτέρω έρευνα επί του θέματος (π.χ. σύνδεση

των επιμέρους τοιχωμάτων μια πλήρως ελεύθερης διατομής, βλ. Κεφ. 5.2 «Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα») θα οδηγήσει σε πιο ασφαλή συμπεράσματα και διαπιστώσεις.

Συνολικά, τα μοντέλα προσομοίωσης αποδίδουν σε πολύ καλό βαθμό τη συμπεριφορά των αντίστοιχων πειραματικών δοκιμών παρ'όλες τις μικρές διαφορές που οφείλονται κυρίως στις εξιδανικευμένες παραμέτρους σχεδιασμού. Τα μοτίβα κατάρρευσης, καθώς και τα χαρακτηριστικά μεγέθη ταιριάζουν ικανοποιητικά με το πείραμα.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Επίδραση της προηγηθείσας κατεργασίας κυλινδρικής κάμψης στη συμπεριφορά του υλικού (work-hardening) για ελάσματα μεγαλύτερου πάχους και μεγαλύτερης καμπυλότητας κάμψης σε συνδυασμό με διαφορετική κράτυνση και ολκιμότητα
- Επίδραση της διεύθυνσης της κυλινδρικής κάμψης στο κέλυφος σε σχέση με τη διεύθυνση έλασης του ελάσματος
- Άλλες καταπονήσεις/φορτίσεις: Κάμψη τριών σημείων (three-point bending), Πλευρική φόρτιση (lateral loading), Κρουστική φόρτιση (impact loading)
- Σύνδεση των ελεύθερων κατακόρυφων ακμών (εσωτερικής και εξωτερικής) με τον κορμό των διαδοχικών σπειρών (πριτσίνωμα, κόλληση κλπ.)
- Περαιτέρω μοντελοποίηση/παραμετρική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (διαστάσεις, σπείρες, πάχος τοιχώματος, υλικό)
- Μελέτη εναλλακτικών διατάξεων/διατομών (ανοιχτών)
- Εισαγωγή μηχανισμών triggering (κυρίως στο αρχικό επίπεδο έλασμα, αλλά και μετά την κυλινδρική κάμψη)

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Xiong Zhang, Hui Zhang, Weijie Ren, Axial crushing of tubes fabricated by metal sheet bending, *Thin-Walled Structures* 122 (2018) 252–263.
- [2] Xiong Zhang, Hui Zhang, Weijie Ren, Bending collapse of folded tubes, *International Journal of Mechanical Sciences* 117 (2016) 67–78.
- [3] G. Lu, T. Yu, *Energy Absorption of Structures and Materials*, CRC Press, Woodhead, Boca Raton, Cambridge, 2003.
- [4] Murray N, Khoo P. Some basic plastic mechanisms in the local buckling of thin-walled steel structures. *International Journal of Mechanical Sciences* 1981;23(12):703–13.
- [5] Kecman D. Bending collapse of rectangular and square section tubes, *International Journal of Mechanical Sciences* 1983;25(9–10):623–36.
- [6] Mamalis A, Manolakos D, Baldoukas A, Viegelaahn G. Deformation characteristics of crashworthy thin-walled steel tubes subjected to bending. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 1989;203(6):411–7.
- [7] Wierzbicki T, Recke L, Abramowicz W, Gholami T, Huang J. Stress profiles in thin-walled prismatic columns subjected to crush loading-II. Bending. *Computers & Structures* 1994;51(6):625–41.
- [8] Yu TX, Teh LS. Large plastic deformation of beams of angle-section under symmetric bending. *International Journal of Mechanical Sciences* 1997;39(7):829–39.
- [9] Kim TH, Reid SR. Bending collapse of thin-walled rectangular section columns. *Computers & Structures* 2001;79(20–21):1897–911.
- [10] Zhang Z, Liu S, Tang Z. Design optimization of cross-sectional configuration of rib-reinforced thin-walled beam. *Thin-Walled Structures* 2009;47(8–9):868–78.
- [11] Karagiozova D, Yu TX, Lu G. Transverse blast loading of hollow beams with square cross-sections. *Thin-Walled Structures* 2013; 62:169–78.
- [12] Hanssen A.G, Langseth M, Hopperstad O.S, Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Impact Engineering* 24 (2000) 475–507.
- [13] Hanssen A.G, Langseth M, Hopperstad O.S, Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Impact Engineering* 24 (2000) 347-383.
- [14] H.W. Song, Z.J. Fan, G. Yu, Q.C. Wang, A. Tobota, Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections, *International Journal of Solids & Structures* 42 (2005) 2575–2600.
- [15] A. Najafi, M. Rais-Rohani, Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell, multicorner crush tubes, *Thin-Walled Structures* 49 (2011) 1–12.
- [16] X. Zhang, H. Zhang, Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression, *Thin-Walled Structures* 68 (2013) 156–163.
- [17] Z. Tang, S. Liu, Z. Zhang, Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns, *Thin-Walled Structures* 62 (2013) 75–84.
- [18] X. Zhang, H. Zhang, Axial crushing of circular multi-cell columns, *International Journal Impact Engineering* 65 (2014) 110–125.
- [19] X. Zhang, Z. Wen, H. Zhang, Axial crushing and optimal design of square tubes with graded thickness, *Thin-Walled Structures* 84 (2014) 263–274.

- [20] G. Sun, F. Xu, G. Li, Q. Li, Crashing analysis and multiobjective optimization for thin-walled structures with functionally graded thickness, *International Journal Impact Engineering* 64 (2014) 62–74.
- [21] X. Zhang, H. Zhang, Z. Wang, Bending collapse of square tubes with variable thickness, *International Journal of Mechanical Sciences* 106 (2016) 107–116.
- [22] H. Zhang, X. Zhang, Crashworthiness performance of conical tubes with nonlinear thickness distribution, *Thin-Walled Structures* 99 (2016) 35–44.
- [23] C.P. Kohar, A. Zhumagulov, A. Brahme, M.J. Worswick, R.K. Mishra, K. Inal, Development of high crush efficient, extrudable aluminium front rails for vehicle light weighting, *International Journal of Impact Engineering* 95 (2016) 17–34.
- [24] M. Kotelko, R.J. Mania, Quasi-static and dynamic axial crushing of TWCF open-section members, *Thin-Walled Structures* 61 (2012) 115–120.
- [25] Andrews KRF, England GL, Ghani E, Classification of the axial collapse of circular tubes under quasi-static loading. *International Journal of Mechanical Sciences* 1983; 25:687–96.
- [26] Βενετσάνος Ο, Πειραματική διερεύνηση διπλοκέλυφου συστήματος απορρόφησης ενέργειας έναντι κρουστικής φόρτισης, Αθήνα: Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ; 2018.
- [27] Mamalis AG, Manolakos DE, Demosthenous GA and Ioannidis MB, *Crashworthiness of Composite Thin-Walled Structural Components*, Technomic Publishing Company, Lancaster, Pennsylvania, 1998.
- [28] Chen D-H, *Crush Mechanics of Thin-Walled Tubes*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 2016.
- [29] LS-DYNA Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, USA, 2017
- [30] LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, USA, 2017
- [31] http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/12-bending.pdf
- [32] <https://www.thefabricator.com/article/bending/a-rundown-on-rolling-machines>
- [33] <https://www.acrotechinc.com/art-of-bending/>
- [34] <http://www.webbcorporation.com/id2.html>
- [35] <https://www.stuermer-machines.com/brands/optimum/category/product/optimum-benders/bm-3-3244030/>