



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Δρ.ΜΗΧ. ΠΡΩΤΕΣΙΛΑΟΣ Κ. ΚΩΣΤΑΖΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ ΜΕ
ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ**

ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΓΡΙΛΛΙΑΣ

ΑΘΗΝΑ 25/02/2024

Ευχαριστίες,

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου, στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον επιβλέποντα της πτυχιακής εργασίας μου, τον Δρ.Μηχ. Πρωτεσίλαο Κ. Κωστάζο (ΕΔΙΠ) για την πολύτιμη βοήθειά του, την καθοδήγησή του και την εποικοδομητική συνεργασία κατά την εκπόνησή της.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	6
Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή – Βιβλιογραφία.....	8
1.1 Πρόλογος.....	8
1.2 Εισαγωγή.....	8
Κεφάλαιο 2 : Δείκτες συμπεριφοράς κατάρρευσης κελυφών (crash worthing characteristics)- Συγκέντρωση τάσεων	18
2.1 Δείκτες crashsworthiness.....	18
2.2 Συγκέντρωση τάσεων γύρω από ασυνέχειες τοιχωμάτων.....	20
Κεφάλαιο 3 : Κατεργασία δοκιμίων.....	23
Κεφάλαιο 4 : Αξονική συμπίεση δοκιμίων	28
Γενικά στοιχεία - Θεωρητική πρόβλεψη	28
Δοκίμια 1	29
Δοκίμιο 1.α	29
Δοκίμιο 1.β.....	31
Σύγκριση - παρατηρήσεις.....	33
Δοκίμια 2	34
Δοκίμιο 2.α	34
Δοκίμιο 2.β.....	36
Σύγκριση- παρατηρήσεις.....	38
Δοκίμια 3	39
Δοκίμιο 3.α	39
Δοκίμιο 3.β.....	41
Σύγκριση - παρατηρήσεις.....	43
Δοκίμια 4	45
Δοκίμιο 4.α	45
Δοκίμιο 4.β.....	47
Σύγκριση - παρατηρήσεις.....	49
Δοκίμια 5	50
Δοκίμιο 5.α	50
Δοκίμιο 5.β.....	52
Σύγκριση - παρατηρήσεις.....	54
Δοκίμια 6	55
Δοκίμιο 6.α	55
Δοκίμιο 6.β.....	57
Σύγκριση - παρατηρήσεις.....	59

Δοκίμια 7	60
Δοκίμιο 7.α	60
Σύγκριση – παρατηρήσεις	64
Γενική σύγκριση δοκιμίων	66
Κεφάλαιο 5 : Παρατηρήσεις - Προτάσεις	70
5.1 Γενικές παρατηρήσεις	70
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	70
Βιβλιογραφία.....	73

Περίληψη

Στην εργασία μελετώνται λεπτά κελύφη κυλινδρικής διατομής από χάλυβα με οπές και χωρίς οπές υπό αξονική φόρτιση. Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μία ανασκόπηση της βιβλιογραφίας. Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρία. Στο 3^ο κεφάλαιο ακολουθεί η διαδικασία κατεργασίας για την δημιουργία των δοκιμίων. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και τα διαγράμματα πίεσης μετατόπισης, πλήθος φωτογραφιών από τις δοκιμές και σχολιασμός αυτών. Τέλος, παρουσιάζονται οι παρατηρήσεις, τα συμπεράσματα και οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων. Επιπροσθέτως, γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο1 : Εισαγωγή – Βιβλιογραφία.

1.1 Πρόλογος

Γιατί μελετάτε η κρουστική αξονική κατάρρευση κελυφών με ατέλειες στο σώμα τους; Τα δομικά στοιχεία μιας προστατευτικής κατασκευής (είτε σε όχημα, είτε σταθερής) συνδέονται μεταξύ τους για τη δημιουργία της. Αυτό σημαίνει ότι στο σώμα τους έχουν διαμορφωμένες τις απαραίτητες ατέλειες (οπές) δια των οποίων γίνεται η σύνδεσή τους. Άρα, σε πραγματικές συνθήκες η πλέον συνήθης μορφή των δομικών στοιχείων μιας προστατευτικής κατασκευής είναι αυτή με τις αναγκαίες διαμορφωμένες οπές (ατέλειες). Γίνεται μελέτη των ατέλειες απλής γεωμετρίας με στόχο την μείωση του αρχικού μέγιστου φορτίου και την δημιουργία μίας ελεγχόμενης και προοδευτικής θλίψης.

1.2 Εισαγωγή

Στην εποχή μας, το ενδιαφέρον για ασφαλή και οικονομικά μεταφορικά μέσα είναι έντονο. Και αυτό γιατί τα οχήματα εκτός από εξυπηρέτηση που προσφέρουν στο χρήστη, μπορούν να προκαλέσουν και μεγάλα ατυχήματα, αλλά και μεγάλες καταναλώσεις ενέργειας από τις οποίες επιβαρύνεται και ο χρήστης, αλλά πολύ περισσότερο το περιβάλλον. Οι έρευνες που γίνονται κυρίως από τις αυτοκινητοβιομηχανίες, αποβλέπουν στη βελτίωση προϊόντων όσον αφορά την μείωση βάρους, την ανάγκη για αντίσταση σε διάβρωση και την ικανότητα όσον το δυνατόν μεγαλύτερης απορρόφησης ενέργειας σε στατικές και δυναμικές καταπονήσεις. Αυτές οι παράμετροι συνέκλιναν με την επιθυμία να βελτιωθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα των οχημάτων μέσω της εφαρμογής πιο ελαφρών κατασκευών από τις βιομηχανίες αυτοκίνητου. Έτσι, άρχισαν να χρησιμοποιούνται εκτεταμένα ελαφρά υλικά όπως το αλουμίνιο και τα σύνθετα προς αντικατάσταση των παραδοσιακών χαλύβδινων κατασκευών παρόλο που ο χάλυβας έχει μεγάλη παραμορφωσιμότητα σε σύγκριση με το αλουμίνιο. Για να δημιουργήσουμε πολύπλοκα μέρη χρησιμοποιούμε διαδικασίες όπως άσκηση θλιπτικών φορτίων και αξονική συμπίεση σωλήνα, ώστε να επιτευχθεί η μορφή του τελικού συστατικού μέρους. Οι ανάγκες π.χ. για σύνθετες διαμορφώσεις και επίτευξη γεωμετριών, η σχέση επιμήκυνσης, όπως και η δυνατότητα για μέγιστη παραμόρφωση έχουν αυξηθεί συνεχώς τα

τελευταία χρόνια, όπου υπάρχει αναλυτική αναφορά στην βιβλιογραφία [17],[15].

Σε μία δοκιμή αξονικής καταπόνησης η ενέργεια η οποία απορροφάται από το δοκίμιο κατά την διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσής του μπορεί να υπολογιστεί με εμβαδομέτρηση του χωρίου κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου – βράχυνσης δοκιμίου(μετατόπισης). Αρχικά το κέλυφος παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά, μέχρι μία μέγιστη τιμή P_{max} . Το μέγεθος της μέγιστης αυτής τιμής εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Με την προσέγγιση της τιμής αυτής το φορτίο εμφανίζει απότομη πτώση. Καθώς συνεχίζεται η παραμόρφωση, η μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης της κατασκευής και τις συνθήκες φόρτισης.

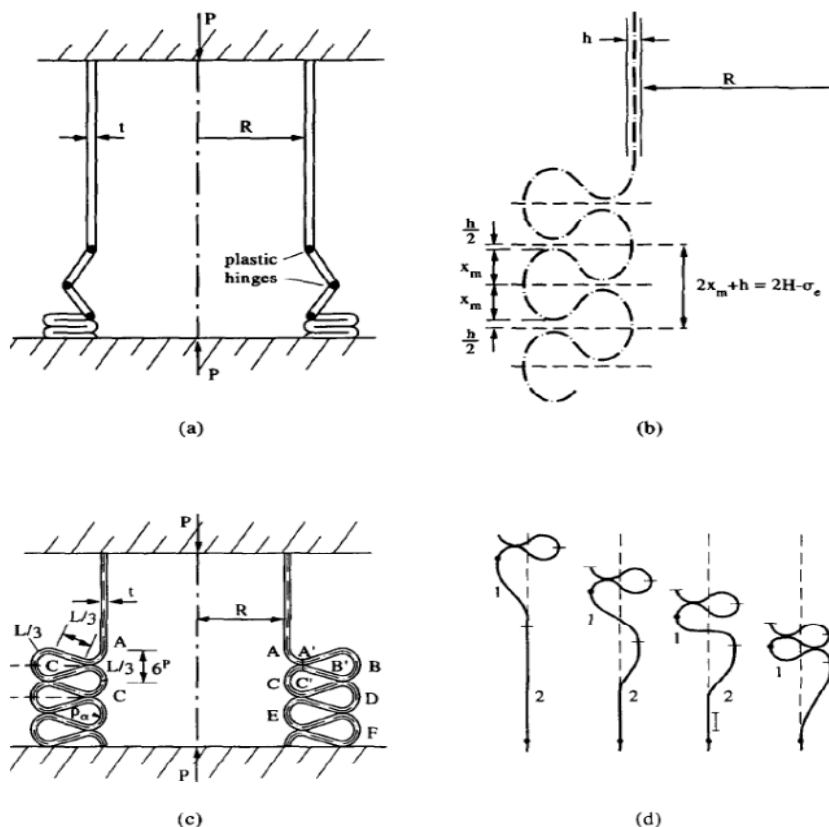
Γενικώς, για την καταγραφή της ικανότητας προς απορρόφηση ενέργειας ενός αξονικά καταπονούμενου κελύφους λαμβάνεται ως μέγεθος μέτρησης και σύγκρισης η ειδική ενέργεια απορρόφησης.

Προσεγγιστικές θεωρητικές υποθέσεις έχουν αναπτυχθεί για στατικές και δυναμικές κάμψεις. Μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται εάν ληφθεί υπόψη η επιρροή της παραμόρφωσης υλικού, η επίδραση της απόστασης θλίψης και η ευαισθησία στις δυναμικές φορτίσεις.

Θα εξετάσουμε πειραματικά δεδομένα και θεωρητικές υποθέσεις για αξονική συμπίεση σε λεπτότοιχους κυλινδρικούς σωλήνες. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως δυναμική προοδευτική κάμψη για να ξεχωρίζει από την δυναμική πλαστική κάμψη που αναπτύσσει υψηλότερες ταχύτητες σύγκρουσης έχοντας σχέση με εγκάρσιες αδρανείς επιπτώσεις. Η αξονική προοδευτική θλίψη σωλήνων έχει πρόσφατα κερδίσει περισσότερη προσοχή όσον αφορά τη χρήση στο σχεδιασμό κρουστικών συσκευών απορρόφησης ενέργειας όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία στο [13]. Οι σωλήνες που δέχονται αξονικά φορτία μορφοποιούνται είτε αξονοσυμμετρικά (αρμονικά ή δακτυλίδι) τύπου πτυχής ή μη- αξονοσυμμετρικά (διαμάντι ή λοβού) τύπου πτυχής εξαρτώμενα κυρίως από την διάμετρο του σωλήνα και το πάχος του τοιχώματος δηλ. από το λόγο D/t όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία βλ. [10],[2],[3],[4]. Γι' αυτή την επίδραση έχουν γράψει ο Mallock 1908, Foppl 1926, Geckeler 1928, Horton 1966, Allan 1968, Johnson 1977, Sobel και Newman 1980, Andrews 1983, Abramowicz και Jones 1984,1986. Επίδραση του μήκους σωλήνα και του πάχους L/t και του λόγου D/t κατά τον τρόπο θλίψης ερευνήθηκε από τον Andrew 1983 και παρουσίασε ένα κεφάλαιο ταξινόμησης σχετίζοντας αυτές τις μεταβλητές. Σχετικά λεπτοί σωλήνες κανονικά επιδεικνύουν πτυχές τύπου

διαμαντιού(καρό) και παχύτεροι σωλήνες γενικά μορφοποιούνται με ομαλό τρόπο.

Σε κάποιες περιπτώσεις λεπτοί σωλήνες αρχικά μορφοποιούνται σε ομαλό τύπο πτυχής πριν μετατραπούν σε τύπο διαμαντιού(καρό) όπως αναφέρονται αναλυτικά [6],[11],[14],[19],[21]. Μετά την προσπάθεια του Alexander 1960 να εκτιμήσει αναλυτικά το μέσο θλιπτικό φορτίο ενός αξονικά θλιβόμενου σωλήνα που μορφοποιείται με ομαλό τρόπο όπως αναφέρεται στο [5]. Κάποιοι ερευνητές εργάστηκαν με τον μηχανισμό κινηματικής θλίψης του Alexander και επικεντρώθηκαν στον επαναπροσδιορισμό κάποιων παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του μέσου θλιπτικού φορτίου (Johnson 1972, Andronicou και Walker 1981, Amdahl και Soreide 1981). Άλλοι προσπάθησαν να βελτιώσουν το μοντέλο του Alexander σε μια προσπάθεια να παράγουν μια πιο ρεαλιστική πτύχωση όπως αναφέρεται στο [21].(Wierzbicki και Bhat 1984, Abramowicz και Jones 1986,Grzebieta 1990).



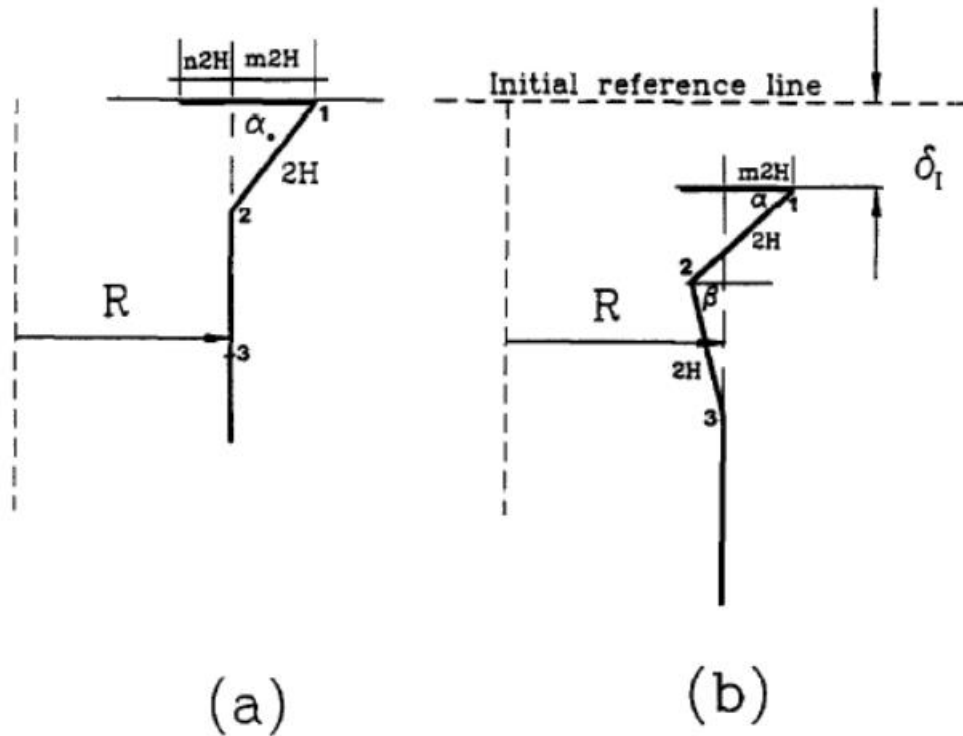
Εικόνα 1 : Διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας που προταθήκαν για μοντελοποίηση του κανονικού τρόπου θλίψης σύμφωνα με τον α) Alexander(1960) b) Abramowicz και Jones(1986) c) Grzebieta(1990) d) Wierzbicki(1992).

[11]

Όλα αυτά τα μοντέλα θεωρούν μόνο ακτινική εκτόπιση του τοιχώματος του σωλήνα προσπαθώντας να επιτύχουν ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο πτύχωσης. Αναφορά για αναλυτικά μοντέλα για συμπεριφορά πλαστικής θλίψης έχουν

παρουσιάσει μεταξύ άλλων ο Jones 1989 [11] και Singace 1994. Πειράματα έχουν δείξει πως το τοίχωμα σωλήνα σε αξονοσυμμετρική μορφοποίηση απλώνεται μερικά εσωτερικά και εξωτερικά από την γενέτειρα του σωλήνα.

A. A. Singace and H. ElSobky



Εικόνα 2 : Η μορφοποίηση μιας εσωτερικής πτυχής: α) κρίσιμη θέση μιας εξωτερικής πτυχής β) η πρώτη φάση της επακόλουθης εσωτερικής πτυχής [11].

- Είδη παραμορφώσεων και δημιουργία λοβών βλ. [4], [5], [19]:

Μη εκτατοί λοβοί: Σύμφωνα με αυτό το είδος παραμόρφωσης, το δοκίμιο που καταρρέει περιέχει δυο είδη αρμών τους 3D και 2D μη εκτατούς λοβούς. Σε τριγωνική μορφή όπου η κάθε άρθρωση διαφέρει κατά $\pi/3$ ενώ υπάρχει και η καρό μορφή σε (diamond) σχήμα όπου η κάθε άρθρωση διαφέρει κατά $\pi/4$.

Εκτατοί λοβοί: Αυτό το είδος παραμόρφωσης χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό κυκλικού τύπου αναδίπλωσης συμμετρικό ως προς κάθετο άξονα συμμετρίας περιστροφής του δοκιμίου με αποτέλεσμα τους κυλινδρικούς δακτυλίους (rings) που σχηματίζονται κατά την εκτατή κατάρρευση των κυλινδρικών δοκιμίων.

Ανάμικτου τύπου λοβοί: Αυτός ο τύπος κατάρρευσης, αποτελεί συνδυασμό ενός ή περισσοτέρων αρχικά σχηματισμένων αξονοσυμμετρικών λοβών, οι οποίοι ακολουθούνται από μη εκτατούς λοβούς καθώς προχωράει η κατάρρευση του δοκιμίου. Αν συνδυαστούν κατάλληλα οι δυο προηγούμενοι τύποι θα επιφέρουν το αποτέλεσμα των ανάμικτων λοβών.



Εικόνα 3: Δοκίμια 1,2,3 που απεικονίζουν εκτατό, μη εκτατό και ανάμεικτο τρόπο κατάρρευσης των δοκιμίων αντίστοιχα.

1.3 Ανασκόπηση της Βιβλιογραφίας

Στην εργασία των Guler, Cerit, Bayram, Gerceker, Karakaya [1] μελετήθηκε η συμπεριφορά συνθλίψεως σε ευθύ και κωνικά λεπτότοιχα κελύφη-δομές. Καθορίστηκε συστηματικά για θλίψη διαφόρων τύπων και διερευνήθηκε συγκριτικά για αξονική σύνθλιψη. Οι κύριες παράμετροι στο σχεδιασμό των δομών αυτών είναι η γεωμετρία, το πάχος του τοιχώματος. Μελετήθηκαν αρκετές διατομές κυκλικές, τετράγωνες, εξαγωνικές. Στις προσομοιώσεις τα δοκίμια ήταν σταθερά στην μία άκρη και δέχθηκαν σύνθλιψη από στερεό τοίχωμα. Τα τοιχία αυτά είχαν καθορισμένη μάζα και ταχύτητα δίνοντας την απαιτούμενη ενέργεια. Μετά από προσομοιώσεις σύγκρουσης τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας λήφθηκαν από κάθε δοκίμιο που είχε διαφορετικές διατομές πάχους στοιχείου. Σ' όλες τις περιπτώσεις οι σωλήνες συνθλίφθηκαν σταδιακά. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι ο τετραγωνικού διατομής απορροφητήρας έχει μικρότερη αποτελεσματικότητα συνθλίψεως μεταξύ των τριών γεωμετριών. Η αποτελεσματικότητα βρέθηκε να είναι μεγαλύτερη για κυκλικό απορροφητήρα με πάχος τοιχώματος 2mm.

Ομοίομορφα λεπτοί κύλινδροι και κόλουροι κυκλικοί κώνοι από χαμηλού άνθρακα σιδήρου υποβλήθηκαν σε αξονική φόρτιση σε αυξημένους ρυθμούς παραμόρφωσης από τους Mamalis, Johnson, Viegelaahn [3]. Αρχικά

αξονοσυμμετρικοί δακτύλιοι αναπτύχθηκαν σε μη συμμετρικά σχέδια με σχήμα διαμαντιού (ελλειπτικά τρίγωνα, τετράγωνα) . Όσο προχωρούσε η φόρτιση αρχικά, παρατηρήθηκαν μη συμμετρικά διαμαντοειδή σχέδια λυγισμού που χαρακτηρίζαν τρόπους κατάρρευσης κόλουργων κώνων.

Πειραματική έρευνα διεξήχθη από τους Cheng, Altenhof, Li για να συγκριθούν τα χαρακτηριστικά σύνθλιψης και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Τρεις διαφόρων τύπων ασυνέχειες δηλαδή κυκλικών διατρητών και ελλειπτικών οπών δημιουργήθηκαν στις προεξοχές που είχαν μήκος 200 mm ονομαστικό εύρος 38,1mm και πάχος τοιχείου 3,15mm. Επιπλέον, μελετήθηκαν τρία διαφορετικά κύρια μήκη αξόνων 7,14 ,10,72 και 14,29 mm για τρεις διαφορετικούς λόγους μηκών των σχισμών και ελλειπτικών ασυνεχειών . Βρέθηκε με την εισαγωγή ενακτήρων σύνθλιψης στα δομικά στοιχεία, ότι παράχθηκε ένας τρόπος παραμόρφωσης που διαχωρίζει και κόβει αντί για καθολική παραμόρφωση λυγισμού που παρατηρήθηκε σε δείγματα χωρίς ασυνέχεια. Το μέγιστο φορτίο συνθλίψεως μειώθηκε με την ενσωμάτωση throughhole ενακτήρων σύνθλιψης εντός του φάσματος 5,2%-18,5%. Η συνολική απορρόφηση ενέργειας εντός του εύρους ήταν 26,6-74,6%. Η πιο σημαντική βελτίωση σημειώθηκε στην αποτελεσματικότητα δύναμης σύνθλιψης η οποία αυξήθηκε εντός του 54,5-95,8%. Για δείγματα με ασυνέχειες που είχαν μήκος κύριου άξονα 7.14mm το μέγιστο φορτίο σύνθλιψης και η συνολική απορρόφηση ενέργειας ήταν ανεξάρτητα της εναρκτήριας γεωμετρίας και του λόγου μηκών. Εντούτοις για δείγματα που είχαν ασυνέχειες με κύρια μήκος άξονα 10,72 και 14,29mm και λόγο μηκών 3 ήταν εμφανής μία γεωμετρική επιρροή στο μέγιστο φορτίο σύνθλιψης και τη συνολική απορρόφηση ενέργειας.

Δοκιμές ημιστατικής σύνθλιψης πραγματοποιήθηκαν από τους Arnold, Altenhof [4] τετραγωνικών διατομών σωληνοειδών δοκιμίων με και χωρίς την παρουσία ασυνεχειών. Διερευνήθηκε η διαχείριση φορτίου και τα χαρακτηριστικά απορροφήσεως ενέργειας αυτών των στοιχείων. Τα σωληνοειδή γεωμετρικά σχήματα που επιλέχθηκαν ήταν μήκη σωλήνων (200,300 mm) πάχος στοιχείου 3.15 mm και ονομαστικό εύρος πλευράς 38.1 mm .Είχαν παραμέτρους τέτοιες με αποτέλεσμα προβλεπόμενη καθολική κατάρρευση λυγισμού υπό φορτίο συνθλίψεως. Κεντρικά ευρισκόμενες κυκλικές οπές που είχαν τοποθετηθεί στα δύο αντίθετα στοιχεία των σωλήνων χρησιμοποιήθηκαν ως εναρκτήρες σύνθλιψης για να αρχίσει η διαδικασία πλαστικής κατάρρευσης. Οπές με διαμέτρους 7,1mm και 14,2mm. Επιπροσθέτως, στην σταδιακή κατάρρευση παρατηρήθηκαν τρόποι-μέθοδοι κατάρρευσης που περιλαμβάνουν δημιουργία ρωγμών και διαχωρισμών. Οι τρόποι κατάρρευσης και η απορρόφηση ενέργειας της δοκιμής σύνθλιψης βρέθηκαν να εξαρτώνται σε μεγάλο μέρος από υλικές ιδιότητες και σε μικρότερο βαθμό από τη διάμετρο της ασυνέχειας. Σημαντικές αυξήσεις στην

αποτελεσματικότητα της δύναμης σύνθλιψης με μέγιστο 22%, παρατηρήθηκαν για τα γεωμετρικά σχήματα με μικρότερο μήκος σωλήνα. Παρόλα, αυτά η παρουσία κυκλικής ασυνέχειας εντός των σωλήνων 300mm υποβάθμισε ελαφρώς την αποτελεσματικότητα της δύναμης σύνθλιψης σε σύγκριση με σωληνοειδή στοιχεία ίδιου μήκους χωρίς ασυνέχεια. Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας αυξήθηκε ουσιωδώς για όλα τα δείγματα που περιείχαν κυκλικές ασυνέχειες σε σχέση με δείγματα χωρίς εκκινητές σύνθλιψης. Με την προσθήκη ασυνέχειας η απορρόφηση ενέργειας βελτιώθηκε για τα δείγματα με μήκος 200mm αλλά μειώθηκε ελαφρώς για τα στοιχεία με μήκος 300mm.

Στην εργασία των AljawiAbd-Rabou και Asiri [21] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο πειραματικής μελέτης όσο και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων πάνω σε ελαστικές-πλαστικές τετράγωνες χαλύβδινες σωλήνες που υποβλήθηκαν σε δυναμικές αξονικές φορτίσεις σύνθλιψης. Οι εξεταζόμενες σωλήνες είναι γεμισμένες με αφρούς ή χωρίς αφρούς. Λεπτομερείς στοιχεία των διαδικασιών παραμόρφωσης εξετάζονται με τη χρήση των μη γραμμικών λειτουργιών του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABACUS. Παρουσιάζονται τα τυπικά ιστορικά παραμόρφωσης μόνο χαλύβδινων σωλήνων και οι καμπύλες φορτίου-συμπίεσης των σωλήνων αυτών. Για δοκιμές αξονικής φόρτισης σύγκρουσης οι σωλήνες δημιουργήθηκαν και κατασκευάστηκαν επιτόπου. Στην εργασία αναφέρεται καλή συμφωνία μεταξύ των πεπερασμένων στοιχείων με τις πειραματικές για δυναμική φόρτιση σύγκρουσης. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων επεκτείνεται για να καλύψει την δυναμική φόρτιση σύγκρουσης.

Η επίδοση απορρόφησης ενέργειας αξιολογήθηκε από τους Lee, Hahn, Rhee, Jae-EungOh [5] με τη χρήση δοκιμών σύνθλιψης που προσομοιώθηκαν με H/Y και δοκιμών ημιστατικών δοκιμών θλιπτικής παραμόρφωσης. Για μια πειραματική δοκιμή παραμόρφωσης και τη προσομοίωση αυτής διεξήχθησαν για 7 δείγματα προεξεχόντων σωλήνων επί των οποίων εισήχθησαν διάφορων τύπων triggering βαθουλωμάτων. Τα δεδομένα της δοκιμής διερευνήθηκαν μέσω της παρατήρησης του τρόπου παραμόρφωσης μέγιστης δύναμης απώθησης και απορροφούσας ενέργειας. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι τα αποτελέσματα σε H/Y συσχετίζονταν καλά με την λειτουργία θλιπτικής παραμόρφωσης υποδεικνύοντας έτσι ότι 14 η προσομοίωση ήταν χρήσιμη για την αξιολόγηση της απορροφηθείσας ενέργειας. Όταν αυτά τα triggering βαθουλώματα εισήχθησαν στα σημεία αναδίπλωσης που προϋπολόγισε η προσομοίωση με H/Y, η απορρόφηση ενέργειας μπορούσε να βελτιωθεί.

Τα δείγματα που κατά το ήμισυ είχαν βαθουλώματα απορροφούσαν πιο αποτελεσματικά από δείγματα πλήρως βαθουλωμένα. Από την άλλη πλευρά όταν triggering βαθουλώματα ίδιας συχνότητας εισήχθησαν χωρίς να ληφθεί υπόψη το μέγιστο σημείο της κυματομορφής επήλθε ανομοιόμορφη

παραμόρφωση, μαζί με ολική λύγιση και μειωμένη απορρόφηση ενέργειας διότι οι ενέργειες κατά τη λύγιση δεν απορροφούνται τόσο αποτελεσματικά όσο και η αναδίπλωση.

Στην εργασία του Reid [11] εξετάζονται χαρακτηριστικά μεγάλου αριθμού μεταλλικών συστατικών μερών που προτείνονται ως απορροφητήρες ενέργειας εστιάζοντας την προσοχή μας σε τρόπους ή μέθοδος παραμόρφωσης που πηγάζουν από την αξονική συμπίεση των μεταλλικών σωλήνων. Σταδιακός λυγισμός, αναστροφή και διαχωρισμός συζητιούνται-μελετώνται και αναγνωρίζονται-ταυτοποιούνται, τομείς για μελλοντική εργασία. Επίσης, περιγράφεται ο λυγισμός λεπτότοιχων τετραγωνικών σωλήνων που είναι γεμισμένες με αφρό πολυουρεθανίου. Γίνεται επίσης, αναφορά σε πρόσφατες δουλειές με θέμα πάνω στα κυτταρικά υλικά που τονίζει την επιρροή της αδράνειας σε αξονικά συμπιεσμένους σωλήνες και σε διατάξεις σωλήνων. [8]Μια σειρά δοκιμών αξονικής σύνθλιψης πραγματοποιήθηκε από τους Abramowicz και Jones σε χαλύβδινα κυκλικά κυλινδρικά κελύφη που έχουν είτε στατικό είτε δυναμικό φορτίο. Οι δοκιμές συγκρίνονται με διάφορες θεωρητικές προβλέψεις και εμπειρικές σχέσεις. Μια τροποποιημένη εκδοχή της θεωρητικής ανάλυσης για αξονοσυμμετρικές παραμορφώσεις concertina δίνει καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα όταν εξετάζεται ή υπολογίζεται η ισχύουσα απόσταση σύνθλιψης και εφόσον η επιρροή της ευαισθησίας του συντελεστή καταπόνησης υλικού διατηρείται στην περίπτωση της δυναμικής σύνθλιψης.

Κατά την διάρκεια σύγκρουσης πρέπει να απορροφάται σημαντική ποσότητα ενέργειας από τα κινητικά συστήματα διάχυσης ενέργειας μέσω υλικής πλαστικής παραμόρφωσης. Τέτοια συστήματα είναι λεπτότοιχοι χαλύβδινοι σωλήνες εγκατεστημένες σε συγκεκριμένα σημεία του κορμού του οχήματος για να μειώνουν την ποσότητα δυνάμεων που μεταφέρονται σε όσους είναι εντός του απαιτούμενου ορίου ασφάλειας και να ελαχιστοποιείται η ζημία στο φορτίο. Η εργασία αυτή των Mamalis, ManolakosSpentzas, Ioannidis, Koutroubakis, Kostazos [19] ασχολείται με τη βελτίωση των χαρακτηριστικών απόκρισης των δομικών συστατικών μερών με την ενσωμάτωση γεωμετρικών ασυνεχειών υπό μορφή κυκλικών οπών. Η ασυνέχεια σ' αυτές παίζει το ρόλο εναρκτήρων σύγκρουσης που μπορούν να επηρεάσουν την αξονική κατάρρευση διασφαλίζοντας σταθερή διαδικασία κατάρρευσης και μειώνοντας το αρχικό μέγιστο φορτίο. Αναφέρονται τα αποτελέσματα πειραματικής προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων σε τετραγωνικούς χαλύβδινους σωλήνες με κυκλικές ασυνέχειες που υπόκεινται σε ημιστατικά αξονικά φορτία. Τα σωληνοειδή δείγματα της δοκιμής κατασκευάστηκαν από σωλήνες S355 μαλακού χάλυβα και δοκιμάστηκαν κάτω από διάφορα σχήματα ασυνεχειών για διάμετρο οπής και τοποθεσία. Το προτεινόμενο αριθμητικό

μοντέλο που χρησιμοποιεί τον κώδικα LS-DYNA και πιο συγκεκριμένα τα πεπερασμένα στοιχεία 15 επαληθεύτηκε με την χρήση αποτελεσμάτων δοκιμών από την αξονική φόρτιση και βρέθηκε να συμφωνεί σε καλό βαθμό με τα πειραματικά δεδομένα.

Οι Hsu και Jones [10] έχουν διεξάγει δοκιμές ημιστατικής και δυναμικής αξονικής σύνθλιψης σε κυκλικά λεπτότοιχα τμήματα αποτελούμενα από τρία υλικά: ανοξείδωτο χάλυβα 304, κράμα αλουμινίου 6063-T6 και μαλακό χάλυβα. Οι δοκιμές κανονίστηκαν έτσι ώστε να διερευνώνται οι μεταβάσεις τρόπου κατά την διάρκεια της σύνθλιψης μετά από πρόσκρουσης των λεπτότοιχων σωλήνων. Τα τρία υλικά επιλέχθηκαν για τα διακριτά ξεχωριστά χαρακτηριστικά τους όπως είναι οι ιδιότητες ευαισθησίας συντελεστή καταπόνησης και η έντονη ενδοτράχυνση. Τα κελύφη ανοξείδωτου χάλυβα, κράματος αλουμινίου και μαλακού χάλυβα έχουν μέσου βαθμού λόγο διαμέτρου προς πάχος $2R/H$ του 22, 33,26 αντιστοίχως και εξετάστηκαν σε εύρος διαφορετικών αξονικών μηκών που περιλάμβαναν τόσο τις καταστάσεις αστοχίας κλασσικού προοδευτικού λυγισμού και καθολικής κάμψης. Οι δοκιμές διεξήχθησαν με τυποποιημένη ενέργεια 9KJ με μερικές δοκιμές να επαναλαμβάνονται σε υψηλότερη ενέργεια 18 KJ. Τα κελύφη προσκρούστηκαν με ταχύτητες έως 13,4m/sec με μάζες έως 502 κιλών. Στερεότυπες μέθοδοι κατάρρευσης αναπτύχθηκαν στους σωλήνες και τα σχετιζόμενα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν με προηγούμενες μελέτες για το μαλακό χάλυβα. Αναφέρονται επίσης, αποτελέσματα δοκιμών για τον ημιστατικό και δυναμικό εφελκυσμό στα υλικά και ταυτοποιούνται οι αναλογίες κρίσιμης λεπτότητας κατά την μετάβαση μεταξύ των δύο κύριων καταστάσεων αστοχίας. Το αποτέλεσμα της ενδοτράχυνσης, του ποσοστού παραμόρφωσης καθώς και των αποτελεσμάτων αδράνειας λόγω των μεμονωμένων χαρακτηριστικών των τριών υλικών διερευνώνται.

Ο Alghamdi [7] στην εργασία του εξετάζει τα κοινά σχήματα των απορροφητήρων ενέργειας που δύναται να καταρρεύσουν και τους διάφορους τρόπους παραμόρφωσης των πιο συχνών από αυτών. Τα κοινά σχήματα είναι οι κυκλικοί σωλήνες, τετράγωνοι, κολουροί κώνοι, κυψελίδες και πλάκες τύπου sandwich. Οι κοινοί τρόποι-μέθοδοι παραμόρφωσης για τους κυκλικούς σωλήνες περιλαμβάνουν αξονική σύνθλιψη, εγκάρσια βαθουλώματαεσοχές, εγκάρσιο ίσιωμα, αναστροφή και διαχωρισμό. Τα μη καταρρευσίμα συστήματα όπως οι εξωθήσεις οδηγοί ή επεκτάσεις σωλήνων θεωρούνται ότι είναι πέραν του σκοπού της μελέτης αυτής.

Η εργασία του Olabi, Morris, Hashmi, [9] παρουσιάζει μία γενική θεώρηση των απορροφητήρων ενέργειας σε μορφή σωλήνων στους οποίους το υλικό που χρησιμοποιείται είναι κατά το πλείστον ο μαλακός χάλυβας και το αλουμίνιο. Δίνεται σύντομη περίληψη για τους απορροφητήρες ενέργειας τύπου

κόλουρων κώνων. Οι κοινοί τρόποι παραμόρφωσης είναι η εγκάρσια και αξονική συμπίεση. Τα βαθουλώματα και η αναστροφή εξετάζονται. Περιγράφονται θεωρητικές αριθμητικές και πειραματικές μέθοδοι που βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς των συσκευών υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης. Αν και υφίστανται άλλες μορφές υλικών και δομών που απορροφούν ενέργεια όπως σύνθετα υλικά και τα κυψελοειδή θεωρείται ότι αυτά είναι εκτός της παρούσης εργασίας. Παρόλο αυτά δίνεται σύντομη περιγραφή των υλικών αυτών. Ελπίζουμε ότι το άρθρο αυτό θα παρέχει μια χρήσιμη πλατφόρμα για τους ερευνητές και τους μηχανικούς σχεδιασμού ώστε να αποκτήσουν χρήσιμη εικόνα για την πρόοδο που σημειώθηκε κατά τις 16 τελευταίες λίγες δεκαετίες στον τομέα των απορροφητήρων ενέργειας σωληνοειδούς τύπου. 84 δυναμικές δοκιμές σε λεπτότοιχους τετράγωνους χαλύβδινους σωλήνες που έχουν δύο διαφορετικές διατομές με $c/h=30.25$ και $c/h=32.18$ και διάφορα μήκη συνθλίφθηκαν σε σφύρα από τους Abramowicz και Jones [17]. Η θεωρητική μελέτη προβλέπει τέσσερις τρόπους παραμόρφωσης που διέπουν τη συμπεριφορά της παραμέτρου c/L για διάφορα εύρη. Νέες ασυμμετρικές μέθοδοι παραμόρφωσης προβλέφθηκαν θεωρητικά και επιβεβαιώθηκαν στις πειραματικές δοκιμές. Αυτές οι ασυμμετρικές μέθοδοι προκαλούν κλίση ενός κελύφους που οδηγεί σε κατάρρευση κατά την έννοια του Euler ακόμα και για σχετικά κοντά κελύφη. Ισχύουσα απόσταση σύνθλιψης εξετάζεται στην θεωρητική ανάλυση μαζί με την επίδραση της ευαισθησίας του ρυθμού καταπόνησης του υλικού, πράγμα το οποίο είναι σημαντικό για το χάλυβα ακόμα και αν τα φορτία είναι ημιστατικά. Οι απλές εξισώσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία για τον σχεδιασμό των αξονικά συντεθλιμμένων τετράγωνων κελυφών έχουν εύλογη συμφωνία μετά τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 2 : Δείκτες συμπεριφοράς κατάρρευσης κελυφών (crash worthing characteristics)- Συγκέντρωση τάσεων

2.1 Δείκτες crashworthiness

Η μελέτη της ικανότητας των υλικών στην απορρόφηση ενέργειας μέσω της παραμόρφωσης ή ολοκληρωτικής τους θραύσης, βαθμονομείται βάσει μίας σειράς μεγεθών (crashs worthiness characteristics). Τα εν λόγω μεγέθη προσδιορίζονται βάσει της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης, κατά την πειραματική δοκιμή των υλικών.

Ενέργεια απορρόφησης- Energy absorption (E_{abs})

Η ενέργεια απορρόφησης (E_{abs}) εκφράζει την συνολική ενέργεια που απορροφήθηκε από το υλικό μέσω πλαστικής παραμόρφωσης σε συνθήκες πρόσκρουσης. Η τιμή του εν λόγω μεγέθους, προκύπτει μέσω του υπολογισμού του εμβαδού που εμπεριέχεται κάτω από την καμπύλη ασκούμενου φορτίου-μετατόπισης του προς μελέτη υλικού.

$$E_{abs} = \int_0^x F(x) dx$$

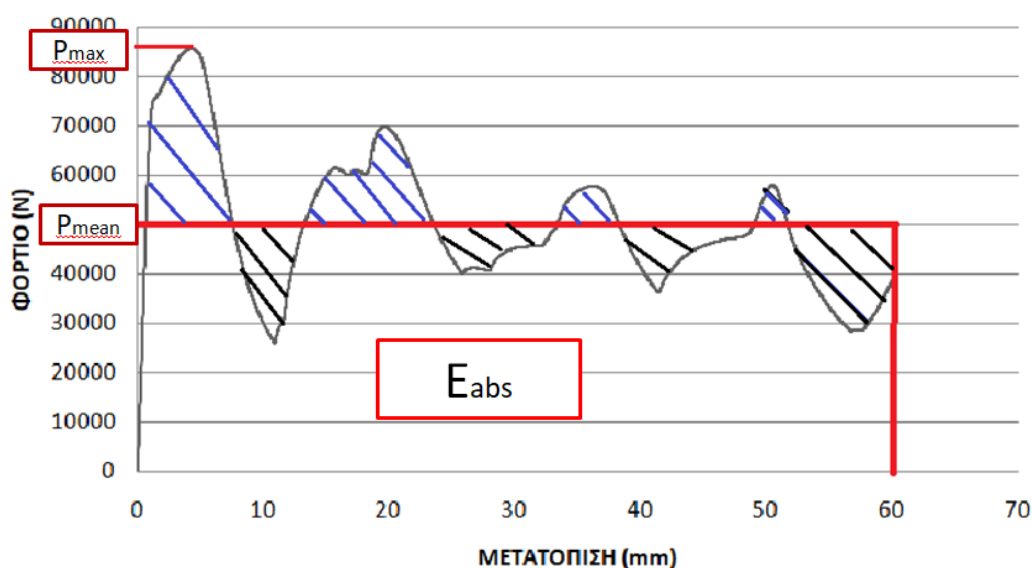
Όπου: E_{abs} (Joule), F (KN), X (mm)

Μέσο φορτίο (P_{mean})

Αντιστοιχεί, στον λόγο της ενέργειας απορρόφησης προς τη μετατόπιση (βράχυνση) που υπέστη το δοκίμιο κατά την διάρκεια επιβολής φορτίου $P_{mean} = \frac{E_{abs}}{S_{max}}$. Υψηλή τιμή του μέσου φορτίου, αντιστοιχεί σε μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για δεδομένη παραμόρφωση.

Μέγιστο φορτίο- Peakcrushforce (PCF) ή P_{max}

Αντιστοιχεί στην υψηλότερη τιμή φορτίου κατά τη διάρκεια μίας δοκιμής.



Εικόνα 4: Επεξήγηση των παραπάνω μεγεθών.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το εμβαδόν του E_{abs} υπολογίζεται με αυτόν τον τρόπο διότι η P_{mean} είναι έτσι χαραγμένη ώστε το εμβαδόν που είναι σκιαγραφημένο με μπλε να είναι ίσο με το εμβαδόν που είναι σκιαγραφημένο με μαύρο.

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου **Crush Force Efficiency (CFE)**

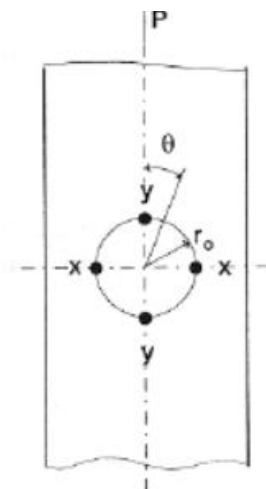
Προκύπτει μέσω του λόγου του μέσου φορτίου (P_{mean}) προς το μέγιστο φορτίο P_{max} $CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}}$. Στόχο αποτελεί, ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου να τείνει στο ένα. Ο λόγος εντοπίζεται στο ότι, μια πολύ υψηλή τιμή μεγίστου φορτίου (σε σχέση με το μέσο) σε πραγματικές συνθήκες πρόσκρουσης θα μπορούσε να αποβεί μοιραίο για τους επιβαίνοντες ενός οχήματος, ασχέτως με την συνολική ενεργειακή απορρόφηση της κατασκευής [12].

Ειδική ενέργεια απορρόφησης-**Specific Energy Absorption (SEA) ή W_s**

Ορίζεται ως, ο λόγος της ενέργειας που απορροφά ένα υλικό (E_{abs}), κατά την κατάρρευσή του προς το τμήμα της καταρρέουσας μάζας (m_c) του υλικού που έχει αστοχήσει, η μάζα m_c (gr). Είναι σημαντικός ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας απορρόφησης διότι δεν διαμορφώνει την ποιότητα ενός δοκιμίου μόνο η ενέργεια απορρόφησης του, αλλά έχει και πολύ σημαντικό ρόλο και το βάρος του.

2.2 Συγκέντρωση τάσεων γύρω από ασυνέχειες τοιχωμάτων.

Σε όλες τις μηχανολογικές κατασκευές έχουμε να αντιμετωπίσουμε το φαινόμενο, εγκοπές, οπές και άλλες διαμορφώσεις να επηρεάζουν σημαντικά την λειτουργική συμπεριφορά του κομματιού, τις εμφανιζόμενες τάσεις αλλά και την αντοχή του. Παρακάτω θα εξετάσουμε πως οι οπές επιδρούν στο σημείο αστοχίας του κομματιού όπως και την κατανομή τάσεων στην περιοχή των οπών όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία στο [6].



Εικόνα 5: Οπή σε κυλινδρικό δοκίμιο[6].

Αρχικά θα εξετάσουμε πως μια κυκλική οπή εμφανίζει συγκέντρωση τάσεων γύρω της. π.χ σε ένα έλασμα με οπή που φορτίζεται μόνο αξονικά εφελκυστικά ή θλιπτικά με ομοιόμορφο φορτίο P . Καταστρώνουμε τις εξισώσεις ισορροπίας των τάσεων όπου καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως εξαρτάται από το λόγο $(\frac{r_0}{r})$ όπου το r_0 είναι η ακτίνα της οπής, ενώ το r είναι η απόσταση από το κέντρο της οπής, όπου $r > r_0$. Η γωνία θ , είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα της φόρτισης και της διεύθυνσης των τάσεων κατά φορά τέτοια όπως δηλώνεται στο επόμενο σχήμα:

Οι τάσεις αποδεικνύεται ότι μειώνονται δραστικά πέρα από την περιφέρεια της οπής, και πιο συγκεκριμένα κατά τη σχέση (r_0^2/r^2) ή (a^2/r^2)

Πολύ σημαντικό είναι για την περιφέρεια της οπής, ότι οι τάσεις εκεί γίνονται μέγιστες με κατανομή:

$$\sigma = \sigma_{\theta\theta} = p(1 - 2\cos 2\theta)$$

Οι τιμές στις οποίες περιορίζονται οι τάσεις γύρω από την οπή είναι:

$\sigma = 3p$, για $\theta = \pi/2$, και για $\theta = 3\pi/2$ (σε διεύθυνση κάθετη προς την αξονική διεύθυνση της φόρτισης),

$\sigma = -p$, για $\theta=0$, και για $\theta=\pi$ (κατά τη διεύθυνση της αξονικής φόρτισης).

Το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται συγκέντρωση τάσεων (ένεκα των ρωγμών που ενδεχομένως θα εμφανιστούν στο δοκίμιο στην περιοχή της οπής), και οι μεγαλύτερες τάσεις σε σχέση με τη μέση τιμή τάσεων p , είναι αυτές που θα οδηγήσουν το δοκίμιο στην κατάρρευσή του.

Στο σχήμα της προηγούμενης σελίδας, τα σημεία X , X' , στα τεταρτημόρια της οπής είναι τα πλέον ευάλωτα για ρωγμάτωση σε εφελκυσμό του ελάσματος, διότι οι τάσεις που αναπτύσσονται εκεί είναι τρεις φορές μεγαλύτερες από την τιμή της μέσης τάσης p .

Αντίθετα, αν ο εφελκυσμός του ελάσματος που φέρει την οπή, μετατραπεί σε θλίψη του ελάσματος (όπως και στην περίπτωση των δοκιμίων μας), οπότε η μέση τιμή τάσης είναι $-p$, τότε η μέγιστη τάση θα εφαρμοστεί στα σημεία X , X' , τα οποία είναι τα πλέον ευάλωτα για να προκαλέσουν την ρωγμάτωση του ελάσματος.

Το πρόβλημα της γραμμής παραγωγής Boeing 737.

Η εμφάνιση ρωγμών σε μεταλλικές επιφάνειες αναμφίβολα ξεκινάει από την περιοχή όπου η μεταλλική επιφάνεια παρουσιάζει την μικρότερη αντοχή και το υλικό γίνεται ασθενές. Αν εφαρμοστεί ικανή τάση στην περιοχή αυτή, ακόμα και το ισχυρότερο μέταλλο θα καταρρεύσει. Αυτό το φαινόμενο αυξάνεται έως και δέκα φορές περισσότερο, όταν στην μεταλλική επιφάνεια υπάρχουν μία ή και περισσότερες οπές.

Αν η οπή έχει κατασκευαστεί με κανονικό τρόπο, δεν θα εμφανιστεί κανένα πρόβλημα στη μεταλλική επιφάνεια που την περιέχει, παρά μόνο όταν μια ικανή δύναμη ή τάση εφαρμοστεί στην επιφάνεια αυτή, και αναπτυχθεί συγκέντρωση τάσεων στην περιφέρεια και γύρω από την οπή.

Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζει και η εταιρεία Boeing για τα αεροσκάφη της τύπου Boeing 737, είναι ότι τα αεροσκάφη της γενικά αποτελούνται από εξαιρετικά μεγάλο αριθμό οπών στα διάφορα μέρη τους, όχι μόνο στα συνδετικά σημεία των διαφορετικών τμημάτων και μερών του αεροσκάφους, αλλά και σε άλλες θέσεις, ώστε να μετατρέπεται το αεροσκάφος σε ελαφρύτερη κατασκευή. Όμως σε ένα τέτοιου τύπου αεροσκάφος που υπάρχουν σχεδόν περισσότερες από ένα εκατομμύριο οπές, η κάθε μια από αυτές αποτελεί και ένα επικίνδυνο σημείο εμφάνισης ρωγμών στο αεροσκάφος, εάν εφαρμοστούν ικανές τάσεις στην περιφέρειά της.

Αφού, σήμερα τα αεροσκάφη πρέπει να έχουν οπές παντού στα διάφορα μέρη τους, παρόλο που με τον τρόπο αυτό καθιστούν τις μεταλλικές τους επιφάνειες επιρρεπείς σε ρωγματώσεις και ασθeneίες σε συγκεντρώσεις τάσεων γύρω από τις οπές, θα πρέπει να επινοηθούν τρόποι ώστε να αυξηθεί η αντοχή του υλικού στα σημεία αυτά.

Μια ενδιαφέρουσα άποψη της εταιρείας είναι η εξής: Όταν δημιουργούμε με κανονικό τρόπο μια οπή συνήθως καθαρίζουμε την επιφάνεια και το εσωτερικό της οπής από τμήματα υλικού που έχουν απομείνει ή που προεξέχουν. Αν όμως επιπλέον δημιουργούσαμε την οπή στην μεταλλική επιφάνεια με τα χείλη προς τα έξω, αυτό που θα πετυχαίναμε είναι ότι θα είχαμε είκοσι φορές μεγαλύτερη αντοχή του υλικού από την κανονική, στην περιοχή της οπής. Έτσι, προδιαμορφώνουμε την δομή της οπής, ώστε τα άτομα που την αποτελούν να πιέζονται διαρκώς κοντά το ένα στο άλλο, και έτσι να ισχυροποιείται η συνοχή του υλικού. Υπάρχει μια μόνιμη τάση που κρατάει τα άτομα σταθερά το ένα κοντά στο άλλο. Έτσι όταν θα εφαρμοστούν εξωτερικά φορτία, αυτά θα προσπαθήσουν να διαχωριστούν τα άτομα και να δημιουργήσουν ρωγμή στο υλικό, αλλά όμως τώρα θα πρέπει να υπερνικήσουν πρώτα τη σημαντική σε μέγεθος μόνιμη τάση του υλικού στην περιοχή της οπής, πράγμα δύσκολο και δείχνει ότι αυξήθηκε η αντοχή του υλικού στην περιοχή της οπής.

Επίσης, η εταιρεία Boeing θεωρεί ότι έχει αναπτύξει την ιδανικότερη πατέντα για το παραπάνω πρόβλημα, κατά την οποία χρησιμοποιείται ένα ειδικό μεταλλικό χιτώνιο το οποίο τοποθετείται και εφαρμόζει απολύτως εσωτερικά σε κάθε οπή, και την καθιστά απολύτως ασφαλή σε εξωτερικές φορτίσεις.

Στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, θα ασχοληθούμε με τις τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από τις οπές που έχουμε κάνει στα δοκίμιά μας, και το πως αυτές συντελούν στην εκάστοτε κατάρρευση από αξονική θλίψη για το κάθε δοκίμιο χωριστά.

Κεφάλαιο 3 : Κατεργασία δοκιμίων

Η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων για τη μετέπειτα θλίψη τους ξεκίνησε με ένα σωλήνα μεγάλου μήκους και διαμέτρου 34mm, και πάχους τοιχώματος 2 mm που είναι από υλικό χάλυβα. Επειδή στο πείραμα θα γίνει θλίψη σε δεκατέσσερα δοκίμια των 100 mm άρα τοποθετείται το μηχάνημα σταθερά να κόβει στα 100 mm.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά δοκιμίων.

	Ύψος δοκιμίων	Εξωτερική διάμετρος δοκιμίων	Πάχος κελύφους	Υλικό
Δοκίμια	100 mm	34mm	2mm	Χάλυβας

Έπειτα τοποθετείται ο σωλήνας για κοπή και πακτώνεται με μια τύπου μέγγενη ώστε να είναι σταθερός και παράλληλος πάντα με το δάπεδο ώστε να γίνει επίπεδο το σημείο τομής. Παρακάτω παρουσιάζεται η μέγγενη και η τοποθέτηση του σωλήνα.

Έπειτα ξεκινάει η τομή των σωλήνων όπου γίνεται με μία παλινδρομική κίνηση ενός σιδεροπρίονου. Ο ρυθμός της παλινδρόμησης του σιδεροπρίονου δίνεται από το χειριστή όπως και ο χρόνος της κατεργασίας. Δεν πρέπει να γίνει με πολύ γρήγορο ρυθμό ώστε η κοπή να γίνει ομοιόμορφη, να είναι λείο και ίσο επίπεδο σε όλη του την περιφέρεια



Εικόνα 6: Μέγγενη για σταθεροποίηση του δοκιμίου, παλινδρομική κίνηση σιδεροπρίονου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την κοπή σωλήνων στην επαφή του σιδηροπρίονου με τον σωλήνα χρησιμοποιείται λιπαντικό ώστε να γίνει καλύτερη η κοπή, όπου το λιπαντικό αποτελείται από 50% λάδι και 50% νερό. Δεν επιλέχτηκε λιπαντικό μόνο με λάδι διότι είναι πολύ παχύρευστο.

Έπειτα από κάθε κοπή του σωλήνα μέσω της μέγγηνς ξεσφίγγεται ο σωλήνας και τοποθετείται πάλι για να κοπεί στα 10 εκατοστά και ξαναγίνεται η σύσφιξη του ώστε να παραμείνει σταθερός και στην επόμενη κοπή.

Στα δοκίμια όπου δημιουργούνται, υπάρχουν κάποια μικρα απομινάρια / απόβλητα που έχουν δημιουργηθεί κατά την κοπή. Αυτά τα ελάσματα είναι απαραίτητο να αποκολληθούν από τους σωλήνες διότι κατά την τοποθέτηση τους στην πρέσα υπάρχει μεγάλη πιθανότητα σφάλματος άφου δε θα είναι όλοι λείοι παράλληλοι και ομοιόμορφοι.



Εικόνα 7: Απομινάρια/απόβλητα υλικού κατά την αρχική κοπή των δοκιμίων.

Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η λείανση. Αυτό επιτυγχάνεται χειροκίνητα μέσω των λιμών αρχικά για την αφαίρεση των μεγάλων αποβλήτων και έπειτα του γυαλόχαρτου.

Η λείανση στην εξωτερική πλευρά και στην από πάνω γίνεται με τη χρήση λίμας ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου ενώ στην εσωτερική πλευρά γίνεται με την χρήση της κυλινδρικής λίμας.

Τέλος γίνεται η χρήση του γυαλόχαρτου σε όλες της πλευρές.

Αφού τελειώσει αυτό το στάδιο τότε ξεκινάει το στάδιο των οπών. Οι οπές θα γίνονται στα 50 mm (δηλαδή στο κέντρο του δοκιμίου) και στα 80mm από την βάση του δοκιμίου ύψος. Για την εύρεση του ακριβούς σημείου όπου θα γίνονται οι οπές χρησιμοποιείται το παχύμετρο και χαράζεται με την αιχμηρή πλευρά του μία ευθεία ώστε να γίνει σε ακριβές σημείο η οπή.

Οι οπές κατασκευάζονται αντιδιαμετρικά , δηλαδή με μία κίνηση του μοχλού ανοίγουμε δύο οπές, επίσης είναι διατεταγμένες σε θέσεις ίσες γωνίες μεταξύ τους και οπές που βρίσκονται σε διαφορετική ύψος μεταξύ τους βρίσκονται στην ίδια γενέτηρα.

Για να γίνουν ακριβείς και συμμετρικά οι οπές στο δοκίμιο δηλαδή όταν έχουμε σε ένα επίπεδο, τέσσερις ή έξι οπές χρησιμοποιήθηκε ένα μοιρογνωμόνιο όπου με τη χάραξη μίας ευθείας πάνω στο δοκίμιο απεικονίζουμε το ακριβές σημείο όπου θα γίνει η οπή.

Οι οπές γίνονται με τρυπάνι όπου είναι πακτωμένο στο έδαφος ώστε να γίνουν ακριβείς. Η διάμετρος της οπής είναι 7 mm. Μετά από ζύγιση των δοκιμίων παρατηρήθηκε ότι το υλικό που αποβάλετε για κάθε οπή είναι περίπου 0,16 g.

Στο τρυπάνι υπάρχει μία μέγγενη όπου εκεί τοποθετείται το δοκίμιο και συσφίγγεται ώστε να παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια της δημιουργίας της οπής. Στην κάτω μεριά της φωτογραφίας φαίνεται ο μοχλός όπου συσφίγγει και ξεσφίγγει τη μέγγενη.

Η κίνηση του τρυπανιού γίνεται χειροκίνητη με τη χρήση ενός μοχλού. Η μόνη κίνηση που είναι ελεύθερη είναι η κατακόρυφη κάνοντας έτσι τις οπές να γίνονται ακριβείς.



Εικόνα 8: Κατεργασία για την διένεξη οπών στα δοκίμια.

Ομοίως με πριν, μετά το δημιουργία των οπών θα υπάρχουν κάποια απόβλητα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό κομμάτι του δοκιμίου όπου πρέπει να αφαιρεθούν διότι μπορεί να δημιουργήσει σφάλμα στις μετέπειτα μετρήσεις. Αυτά τα ελάσματα αφαιρέθηκαν χειροκίνητα με την βοήθεια των λιμών αλλά και με την κεφαλή από το τρυπάνι που εφάρμοζε στην οπή.



Εικόνα 9 : Απομάκρυνση σχηματισθέντων αποβλήτων .

Έπειτα από αυτή την διαδικασία τα δοκίμια είναι έτοιμα για τη μελέτη τους ως προς την θλίψη τους, όπου έχουν δημιουργηθεί δύο δοκίμια σε κάθε μια περίπτωση όπου παρουσιάζεται παρακάτω. Επίσης έγινε και ζύγιση του κάθε δοκιμίου, όπου η διαφορά ανάμεσα στα πανομοιότυπα δοκίμια είναι μηδαμινές.

Πίνακας 2: Επεξήγηση οπών ανά δοκίμιο.

Αριθμός δοκιμίων	Αριθμός οπών	Αριθμός οπών σε ύψος 50 mm	Αριθμός οπών σε ύψος 80 mm (από την βάση)	Βάρος δοκιμίων (gr) (για 1 δοκίμιο σε κάθε περίπτωση)
2	0	-	-	127.2
2	2	-	2	126.9
2	4	-	4	126.6
2	6	-	6	126.2
2	4	2	2	126.6
2	8	4	4	125.9
2	12	6	6	125.3



Εικόνα 10: Τελική διαμόρφωση των δοκιμίων για την μελέτη της αξονικής συμπίεσης τους



Εικόνα 11: Τελική διαμόρφωση των δοκιμίων για την μελέτη της αξονικής συμπίεσης τους.

Κεφάλαιο 4 : Αξονική συμπίεση δοκιμίων

Γενικά στοιχεία - Θεωρητική πρόβλεψη

Η θλίψη των δοκιμίων γίνεται σε πρέσα όπου ο χειριστής επιλέγει το ρυθμό όπου θα θλίβεται το δοκίμιο αλλά και το ποσοστό που θέλουμε να το θλίψουμε. Στο συγκεκριμένο πείραμα η θλίψη των σωλήνων γίνεται κατά 60% δηλαδή από 100 mm , τα δοκίμια θα γίνουν 40 mm και ο χρόνος όπου θα γίνει αυτή η θλίψη θα είναι τρία λεπτά.

Αρχικά θα γίνει μια πρόβλεψη σχετικά με το τι περιμένουμε να αλλάξει ανάλογα με τα δοκίμια.

Στην πρώτη περίπτωση όπου το δοκίμιο είναι χωρίς οπές αυτό σημαίνει ότι δεν έχει δεχτεί κάποια κατεργασία άρα θα είναι το δοκίμιο όπου θα δέχεται τη μεγαλύτερη αξονική δύναμη ώστε να γίνει η θλίψη του. Η δημιουργία των λοβών δεν ξεκινάει σε μία συγκεκριμένη θέση διότι η θλίψη γίνεται με πολύ μικρή ταχύτητα. Σε επόμενο δοκίμιο όπου έχουμε δημιουργήσει οπές σε ίδιο ύψος στα 80 mm, τότε προφανώς οι ιδιότητες του δοκιμίου έχουν αλλάξει και θα δέχεται μικρότερη καταπόνηση σε σχέση με το δοκίμιο που δεν έχει καμία οπή. Η αρχή κατάρρευσης του δοκιμίου άρα και η δημιουργία λοβού θα ξεκινήσει στο σημείο όπου είναι οι οπές, διότι σε εκείνο το σημείο το υλικό μας έχει δεχτεί ήδη κατεργασία άρα είναι πιο ευάλωτο σε δυνάμεις. Με την ίδια λογική θα είναι όταν οι οπές γίνουν τέσσερις και έξι.

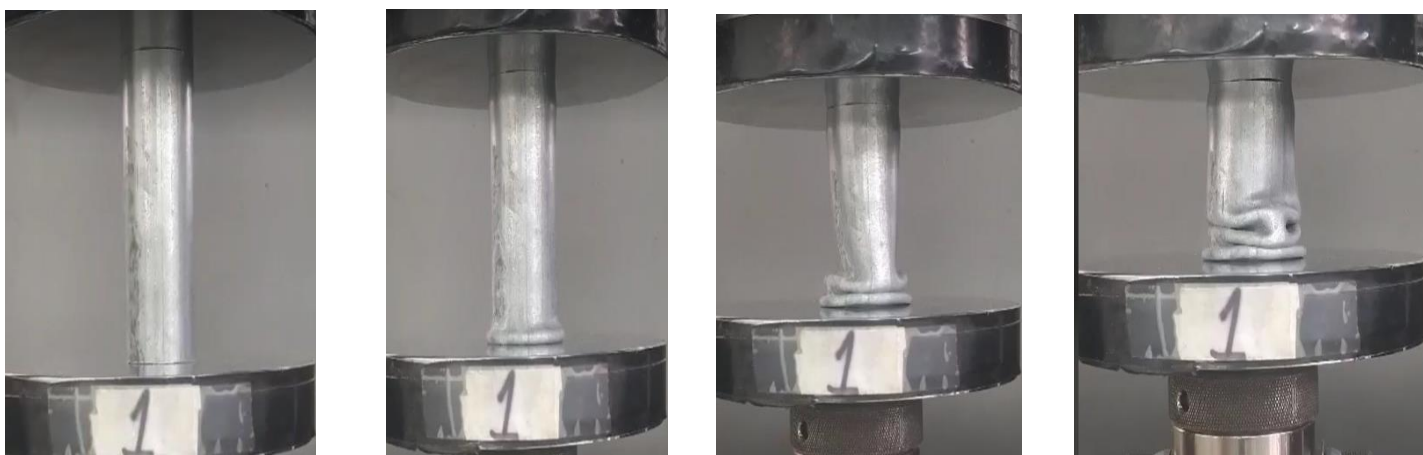
Όταν υπάρχουν οπές σε δύο επίπεδα του δοκιμίου τότε θα γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και πριν, δηλαδή όσες περισσότερες οπές υπάρχουν τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η αξονική δύναμη όπου πρέπει να ασκηθεί ώστε να γίνει η θλίψη του δοκιμίου. Σε αυτή την περίπτωση η δημιουργία λοβών θα ξεκινήσει σε ένα από τα δύο επίπεδα όπου υπάρχουν οι οπές. Επίσης, μεταξύ ίδιων δοκιμίων δεν περιμένουμε μεγάλη διάφορα στις αξονικές δυνάμεις όπου θα τους ασκηθούν ώστε να γίνει η θλίψη τους. Οι διαφορές μεταξύ των ίδιων δοκιμίων υπάρχουν διότι στην πραγματικότητα δεν έχουμε πανομοιότυπο δοκίμιο επειδή σε μερικά σημεία μπορεί να έχουν μικρή διαφορά στην κατεργασία τους ή να έχει διάβρωση το υλικό.

Θα γίνει αρχικά σύγκριση των ίδιων δοκιμίων και στην συνέχεια γενική σύγκριση όλων των δοκιμίων.

Δοκίμια 1

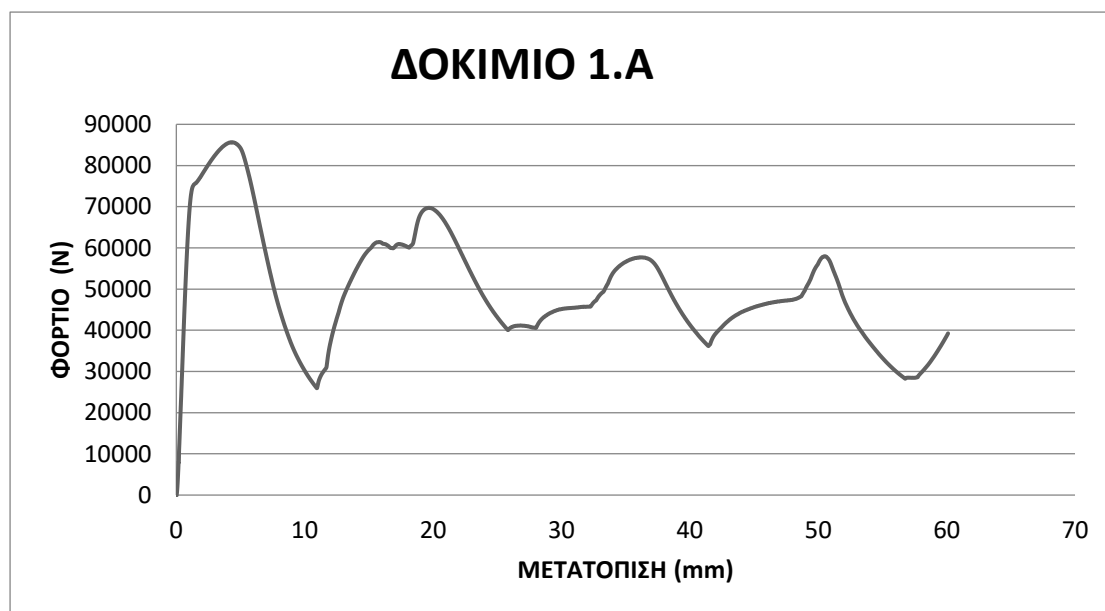
Δοκίμιο 1.α

Το δοκίμιο 1.α είναι το δοκίμιο όπου δεν υπάρχει καμία οπή. Παρακάτω παρουσιάζονται πέντε θέσεις (στιγμές) του δοκιμίου όπου γίνεται η θλίψη του.



Εικόνα 12: Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου .(0 mm,15mm ,30mm, 45mm).

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει στο κάτω μέρος.



Διάγραμμα 1 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης .

1η Φάση.

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Ολοκλήρωση πρώτου λοβού και δημιουργία δεύτερου μη εκτατού λοβού.

3η Φάση.

Παρατηρείται ολοκλήρωση του τρίτου λοβού που είναι μη εκτατός.

Το τελικό δοκίμιο μετά από την ολοκλήρωση της θλίψης είναι το παρακάτω :



Εικόνα 13: Δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της θλίψης.

4η Φάση.

Παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί 4 λοβοί όπου ο πρώτος είναι εκτατού λοβού και οι επόμενοι τρεις είναι μη εκτατού λοβού.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: **60 mm**

Το μέγιστο φορτίο **$P_{max} = 85.65KN$**

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι **$E_{abs} = 2990 J$**

Το μέσο φορτίο **$P_{mean} = 49.76KN$**

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.58$$

$$\text{Ειδική ενέργεια απορρόφησης } W_S = \frac{E_{abs}}{m_c} = 23,5 \frac{J}{gr}$$

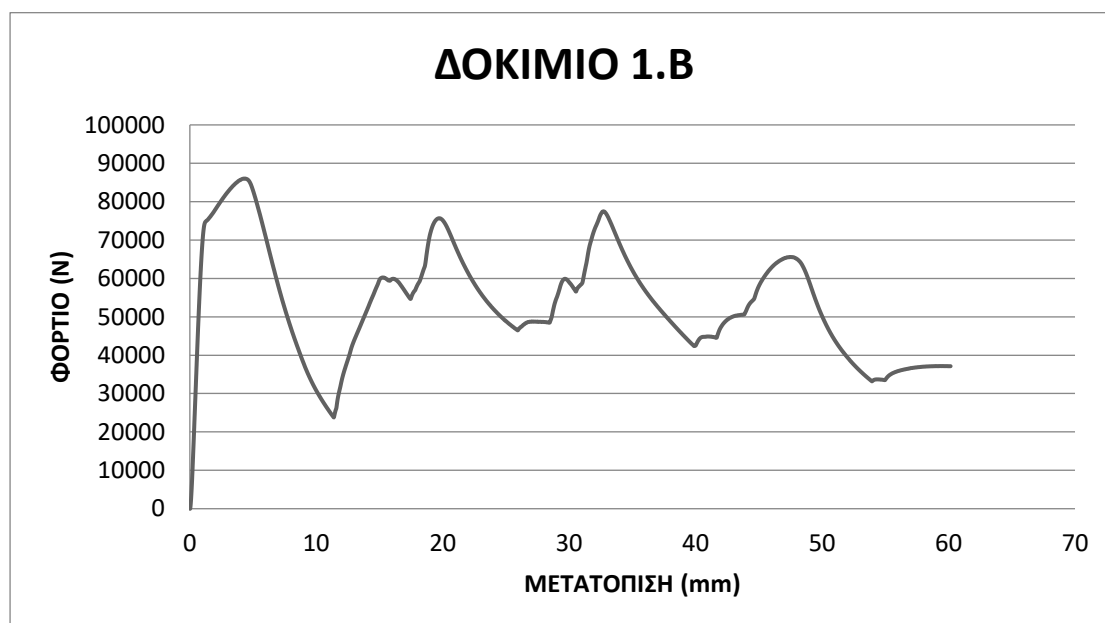
Δοκίμιο 1.β

Το δοκίμιο 1.β είναι πανομοιότυπο με το 1.α και θα μελετηθεί αν έχουν την ίδια συμπεριφορά κατά την θλίψη τους.



Εικόνα 14: Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου .(0 mm,15mm ,30mm, 45mm).

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει στο πάνω μέρος του.



Διάγραμμα 2 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης .

1η Φάση

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Ολοκλήρωση πρώτου λοβού και δημιουργία δεύτερου εκτατού λοβού

3η Φάση.

Δημιουργία τρίτου λοβού μη εκτατού.

Το τελικό δοκίμιο μετά από τη θλίψη είναι το παρακάτω.



Εικόνα 15 : Δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της θλίψης.

4η Φάση.

Παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί τέσσερις λοβοί όπου οι πρώτοι δύο είναι εκτατού λοβού και οι επόμενοι δυο είναι μη εκτατού λοβού.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου : **60 mm**

Το μέγιστο φορτίο **$P_{max} = 86.03 \text{ KN}$**

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι **$E_{abs} = 3217.5 \text{ J}$**

Το μέσο φορτίο **$P_{mean} = 53.53 \text{ KN}$**

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.62$$

$$\text{Ειδική ενέργεια απορρόφησης } W_s = \frac{E_{abs}}{m_c} = 25.29 \frac{\text{J}}{\text{gr}}$$

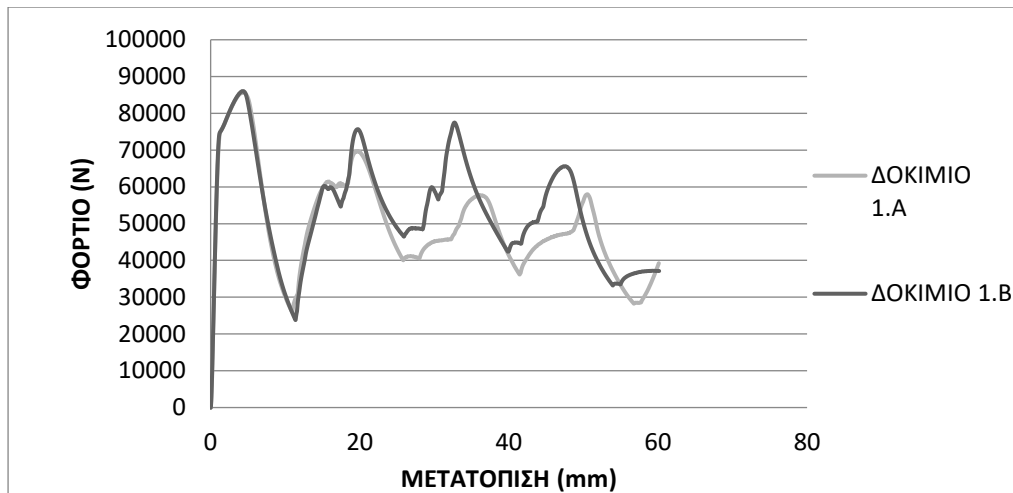
Σύγκριση - παρατηρήσεις

Παρατηρείται ότι παρότι τα δύο δοκίμια έχουν ίδια χαρακτηριστικά η θλίψη τους έχει μεγάλες διαφορές. Αρχικά το πρώτο δοκίμιο αρχίζει η θλίψη του από την κάτω μεριά ενώ το δεύτερο δοκίμιο από την πάνω μεριά. Δεύτερον, στην πρώτη περίπτωση παρατηρείται ότι μόνο ο πρώτος λοβός είναι τύπου εκτατού και οι υπόλοιποι είναι τύπου διαμάντι ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι δύο πρώτοι λοβοί είναι τύπου εκτατού λοβού και οι υπόλοιποι είναι τύπου διαμάντι. Το γεγονός ότι η θλίψη τους δεν είναι πανομοιότυπη οφείλεται στο ότι μπορεί να μην έχουν επεξεργαστεί με τον ίδιο τρόπο κατά την δημιουργία τους ή να έχει γίνει κάποια διάβρωση. Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης παρατηρείται ότι μέχρι το δεύτερο λοβό που σχηματίζεται, η θλίψη είναι πανομοιότυπη ενώ από το δεύτερο λοβό μέχρι και την λήξη της θλίψης χρειάστηκε μεγαλύτερη δύναμη για τη θλίψη του πρώτου δοκιμίου. Παρόλα αυτά η αυξομείωση της δύναμης για τη θλίψη των δοκιμίων γίνεται με ανάλογη συμπεριφορά και στα δύο δοκίμια.

Πίνακας 3 : Σύγκριση αποτελεσμάτων για πανομοιότυπα δοκίμια.

	ΔΟΚΙΜΙΟ 1.A	ΔΟΚΙΜΙΟ 1.B
P_{max} (KN)	85.65	86.03
P_{mean}(KN)	49.76	53.53
CFE	0.58	0.62
$W_s \left(\frac{J}{gr} \right)$	23.52	25.29
E (J)	2990	3217.5

Συγκρίνοντας κάποιες χαρακτηριστικές τιμές των δύο δοκιμίων παρατηρήθηκε ότι για την θλίψη του δοκιμίου 1.β χρειάστηκε με περισσότερη ενέργεια, μεγαλύτερη μέση δύναμη, μεγαλύτερη μέγιστη δύναμη και η ομοιομορφία του φορτίου έχει καλύτερη κατανομή στο 1.β.



Διάγραμμα 3 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης για δύο πανομοιότυπα δοκίμια.

Δοκίμια 2

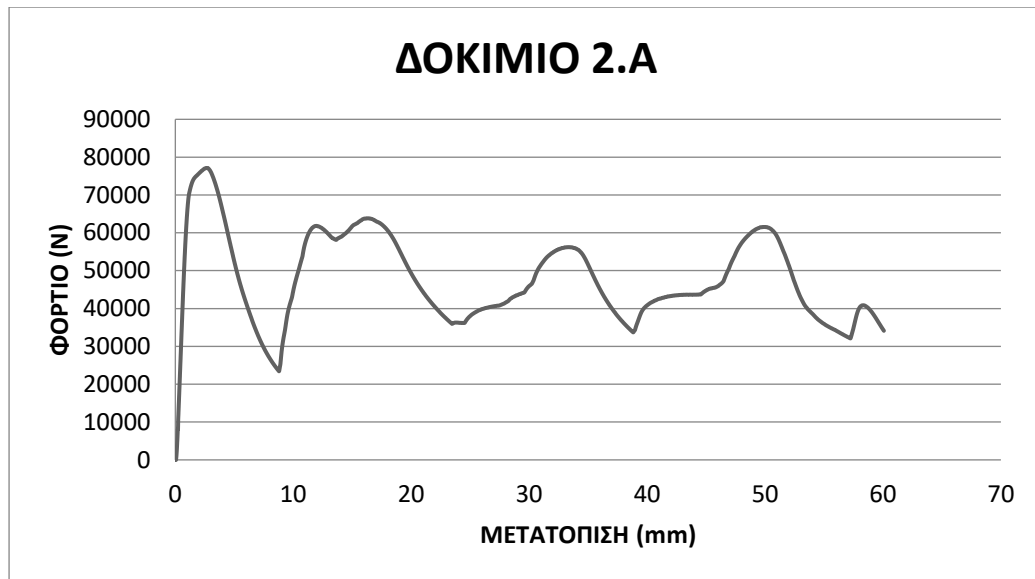
Δοκίμιο 2.α

Σε αυτή την περίπτωση για γίνει σύγκριση των δοκιμίων που έχει δυο οπές σε ύψος 8 cm και με γωνία 180 μοιρών μεταξύ τους. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση θα παρουσιαστεί η παραμόρφωση του δοκιμίου σε κάποιες θέσεις (στιγμές).



Εικόνα 16: Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου .(0 mm,15mm ,30mm, 45mm).

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει στο πάνω μέρος του.



Διάγραμμα 4 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης .

1η Φάση

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Ολοκλήρωση πρώτου λοβού και δημιουργία δεύτερου μη εκτατού λοβού.

3η Φάση

Παρατηρείται δημιουργία τρίτου λοβού ο οποίος είναι μη εκτατός.

Το τελικό δοκίμιο μετά από τη θλίψη είναι το παρακάτω:



Εικόνα 17 : Δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της θλίψης.

4η Φάση.

Παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί 4 λοβοί όπου ο πρώτος είναι εκτατού λοβού και οι επόμενοι τρεις είναι μη εκτατοί λοβοί.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 77.14KN$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E_{abs} = 2864 J$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 47.69KN$

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.62$$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης $W_s = \frac{E_{abs}}{m_c} = 22.51 \frac{J}{gr}$

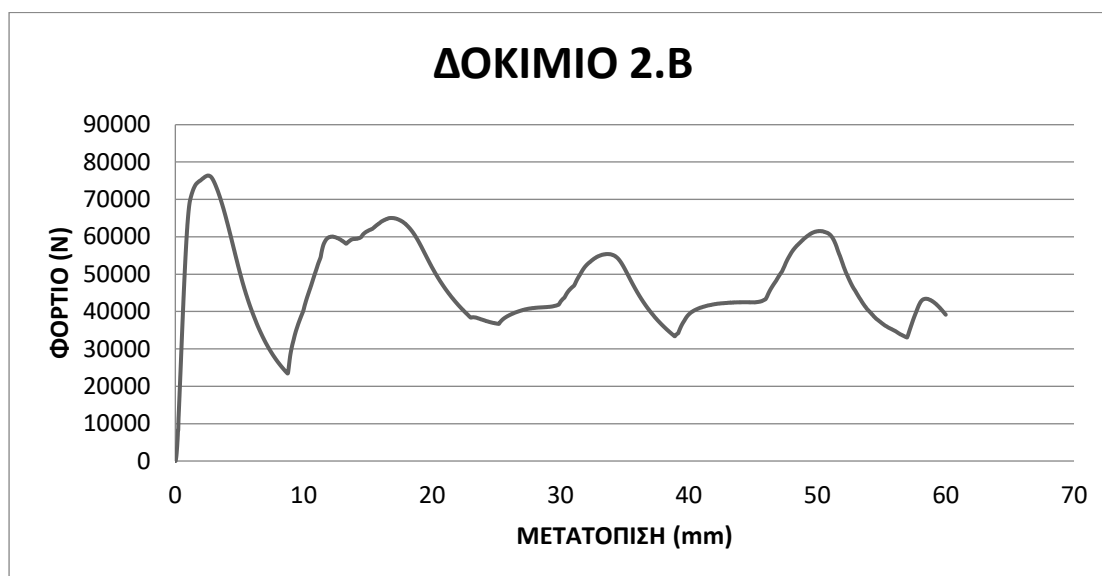
Δοκίμιο 2.β

Το δοκίμιο 2.β είναι πανομοιότυπο με το 2.α και θέλουμε να μελετήσουμε αν έχουν την ίδια συμπεριφορά κατά την θλίψη τους.



Εικόνα18: Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου .(0 mm,15mm ,30mm, 45mm).

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει στο πάνω μέρος του.



Διάγραμμα 5 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης .

1η Φάση

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Ολοκλήρωση πρώτου λοβού και δημιουργία δεύτερου μη εκτατού λοβού.

3η Φάση.

Παρατηρείται ολοκλήρωση του τρίτου μη εκτατού λοβού.

Το τελικό δοκίμιο μετά από την θλίψη είναι το παρακάτω:



Εικόνα 19: Δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της θλίψης

4η Φάση.

Παρατηρείται η δημιουργία τεσσάρων λοβών όπου ο πρώτος είναι εκτατού λοβού και οι επόμενοι τρεις είναι μη εκτατού λοβού.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 76.38KN$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E_{abs} = 2843.56 J$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 47.40KN$

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.62$$

$$\text{Ειδική ενέργεια απορρόφησης } W_s = \frac{E_{abs}}{m_c} = 22.41 \frac{J}{gr}$$

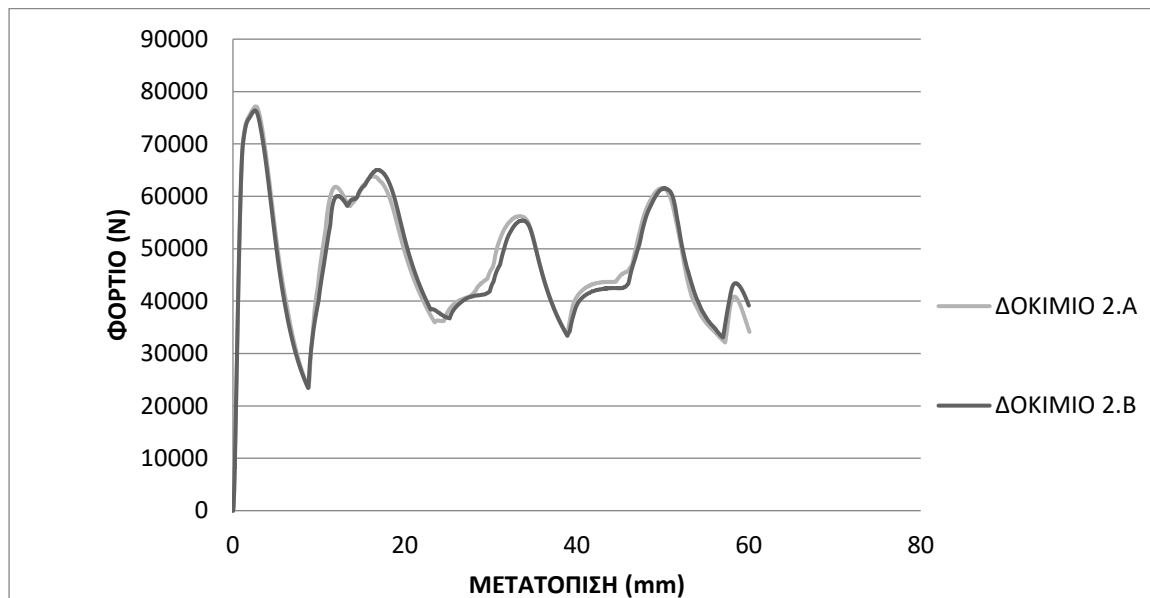
Σύγκριση- παρατηρήσεις

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι τα δύο δοκίμια έχουν την ίδια συμπεριφορά κατά τη θλίψη τους, δηλαδή και τα δύο ξεκινούν τη θλίψη τους από το σημείο που είναι πιο ασταθές και έχει δεχτεί την κατεργασία δηλαδή το σημείο όπου έχουν δημιουργηθεί οι οπές. Επίσης, παρατηρείται ότι οι λοβοί που δημιουργούνται είναι ίδιου τύπου και ίσοι σε αριθμό(τέσσερις) και δημιουργούνται τις ίδιες χρονικές στιγμές. Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης παρατηρούμε ότι είναι πανομοιότυπα δηλαδή χρειάστηκε την ίδια δύναμη καθόλη τη διάρκεια της θλίψης του δοκιμίου και σε όλες τις χρονικές στιγμές.

Πίνακας 4: Σύγκριση αποτελεσμάτων για πανομοιότυπα δοκίμια.

	ΔΟΚΙΜΙΟ 2.A	ΔΟΚΙΜΙΟ 2.B
P_{max} (KN)	77.14	76.38
P_{mean} (KN)	47.69	47.40
CFE	0.62	0.62
$W_s \left(\frac{J}{gr}\right)$	22.51	22.41
E (J)	2864	2843.56

Συγκρίνοντας κάποιες χαρακτηριστικές τιμές των δύο δοκιμών παρατηρείται ότι όλοι οι δείκτες που έχουμε βρει είναι πολύ κοντά μεταξύ τους και είναι ακριβώς αυτό που περιμέναμε να συμβεί αφού τα δύο δοκίμια είναι πανομοιότυπα.

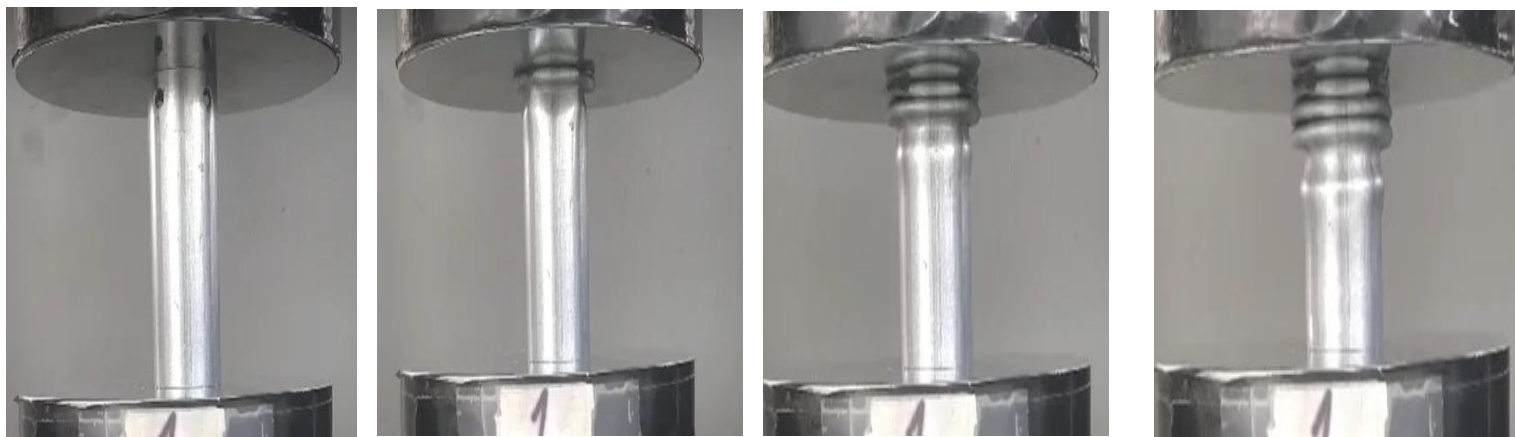


Διάγραμμα 6: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης για 2 πανομοιότυπα δοκίμια .

Δοκίμια 3

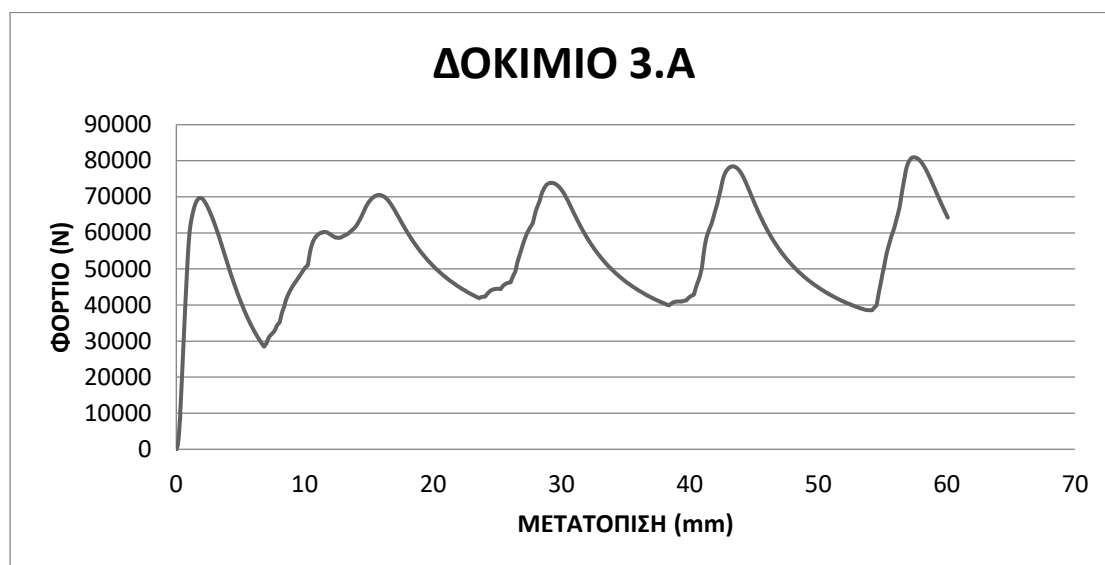
Δοκίμιο 3.α

Σ' αυτή την περίπτωση μελετώνται τα δοκίμια με τέσσερις οπές σε ύψος 8 mm και διαφέρουν η μία με την άλλη κατά 90° .



Εικόνα 20: Δοκίμιο την χρονική στιγμή α) $t=0\text{sec}$ β) $t=45\text{ sec}$ γ) $t=90\text{ sec}$ δ) $t=135\text{ sec}$.

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει στο πάνω μέρος του.



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

1η Φάση

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Δημιουργία και του δεύτερου εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας 3 εκτατού λοβού.

3η Φάση.

Παρατηρείται ολοκλήρωση του τρίτου εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας τέταρτου εκτατού λοβού.

Παρακάτω φαίνεται η τελική μορφή που πήρε το δοκίμιο μετά από το πέρας των τριών λεπτών.



Εικόνα 21: Δοκίμια μετά την ολοκλήρωση της θλίψης.

4η Φάση.

Παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί 4 λοβοί όπου είναι όλοι εκτατοί. Επίσης, παρατηρείται η αρχή δημιουργίας ενός πέμπτου λοβού.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 80.96KN$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E_{abs} = 3251 J$

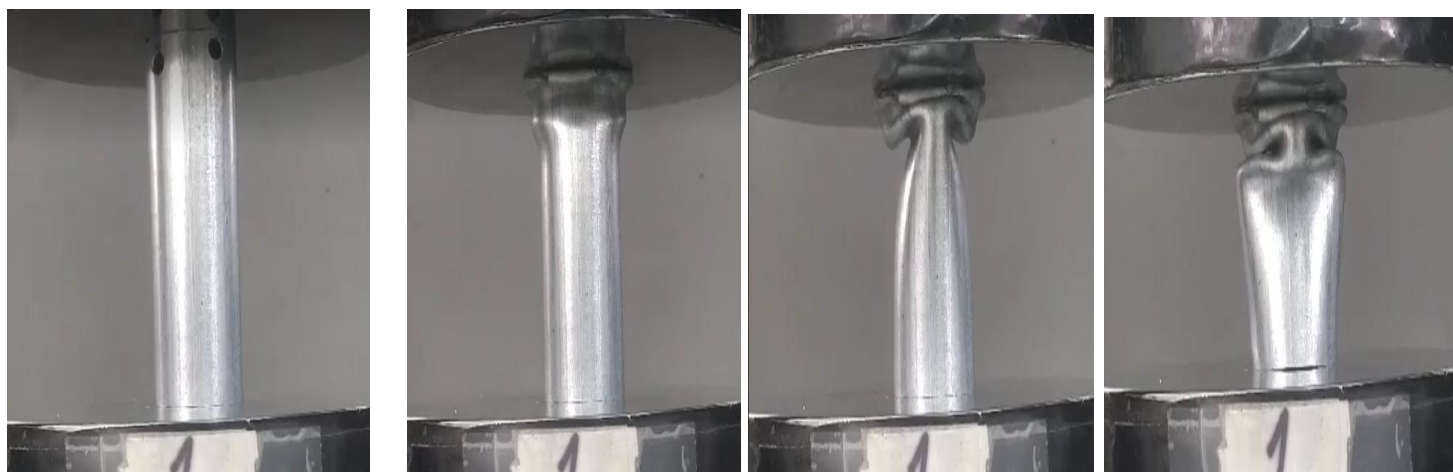
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 54.12KN$

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.67$$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης $W_s = \frac{E_{abs}}{m_c} = 25.68 \frac{J}{gr}$

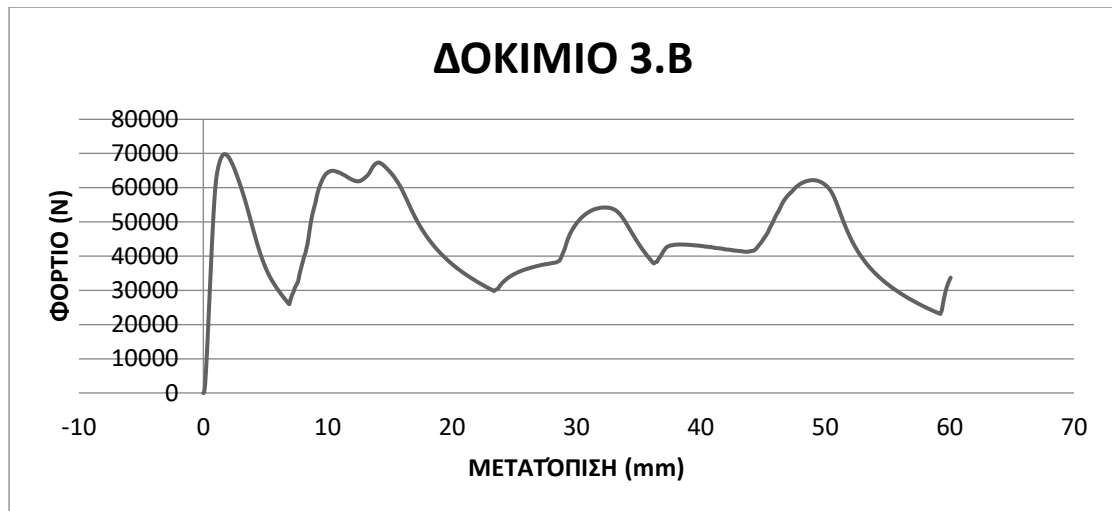
Δοκίμιο 3.β

Το δοκίμιο 3.β είναι πανομοιότυπο με το 3.α και θα μελετηθεί αν έχουν την ίδια συμπεριφορά κατά τη θλίψη τους.



Εικόνα 22 :Δοκίμιο την χρονική στιγμή α) $t=0sec$ β) $t=45 sec$ γ) $t=90 sec$ δ) $t=135 sec$.

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει στο πάνω μέρος του.



Διάγραμμα 8 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης .

1η Φάση

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Δημιουργία δευτέρου λοβού, τύπου μη εκτατού.

3η Φάση.

Παρατηρείται ολοκλήρωση του τρίτου λοβού τύπου μη εκτατού.

Παρακάτω φαίνεται η τελική μορφή που πήρε το δοκίμιο μετά από το πέρας των τριών λεπτών.



Εικόνα 23 : Δοκίμια μετά την ολοκλήρωση της θλίψης.

4η Φάση.

Παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί 4 λοβοί. Ο πρώτος λοβός είναι εκτατού τύπου ενώ οι επόμενοι 3 είναι μη εκτατού τύπου.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Διαδρομή εμβόλου: **60 mm**

Το μέγιστο φορτίο **$P_{max} = 69.83KN$**

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι **$E_{abs} = 2713.7 J$**

Το μέσο φορτίο **$P_{mean} = 45.18KN$**

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.65$$

$$\text{Ειδική ενέργεια απορρόφησης } W_s = \frac{E_{abs}}{m_c} = 21.44 \frac{J}{gr}$$

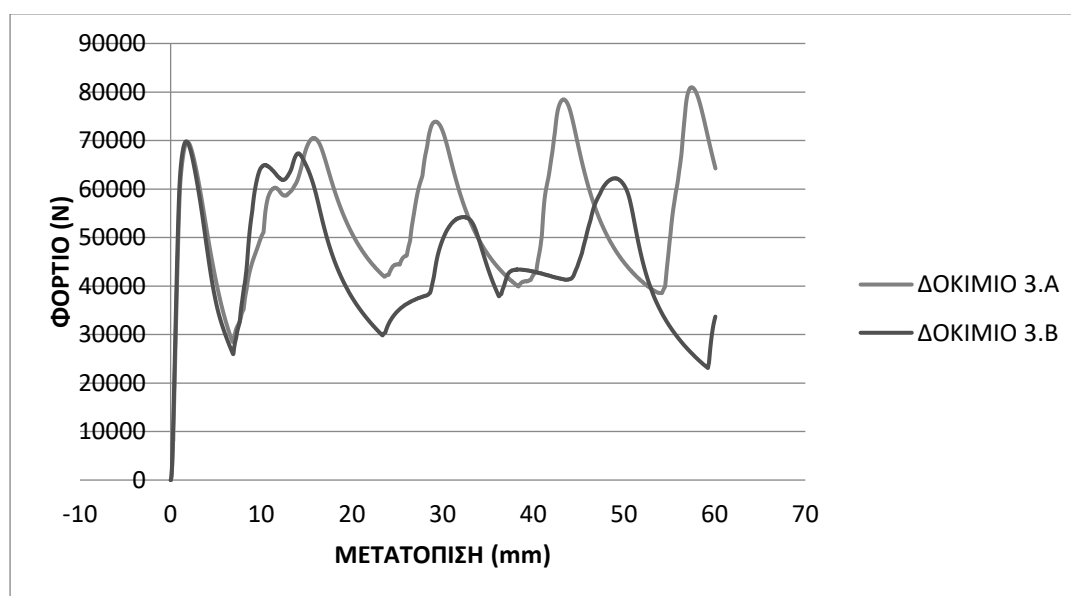
Σύγκριση - παρατηρήσεις

Παρατηρείται ότι και στα δύο δοκίμια ξεκινάει η δημιουργία λοβού τους από το σημείο που έχει γίνει η κατεργασία. Στο πρώτο δοκίμιο έχουμε δημιουργία τεσσάρων λοβών και αρχή δημιουργίας ενός πέμπτου ενώ στο δεύτερο δοκίμιο έχουμε δημιουργία τεσσάρων λοβών. Παρόλο που οι δύο σωλήνες έχουν ίδια χαρακτηριστικά η θλίψη τους έχει μεγάλες διαφορές. Στην πρώτη περίπτωση όλοι οι λοβοί είναι τύπου εκτατού, στην δεύτερη περίπτωση παρατηρείται ότι μόνο ο πρώτος λοβός είναι τύπου εκτατού και οι υπόλοιποι είναι τύπου διαμάντι. Το γεγονός ότι η θλίψη τους δεν είναι πανομοιότυπη οφείλεται στο ότι μπορεί να μην έχει γίνει σωστά η κατεργασία. Αυτό φαίνεται και στις φωτογραφίες με τις αρχικές οπές των δοκιμίων. Επίσης ότι έχουν διαφορετική συμπεριφορά τα δύο δοκίμια κατά την θλίψη τους παρατηρείται και στο διάγραμμα όπου η κατανομή της δύναμης με τη μετατόπιση δεν συνάδουν.

Πίνακας 5 : Σύγκριση αποτελεσμάτων για πανομοιότυπα δοκίμια.

	ΔΟΚΙΜΙΟ 3.A	ΔΟΚΙΜΙΟ 3.B
P_{max} (KN)	80.96	69.83
P_{mean} (KN)	54.12	45.18
CFE	0.67	0.65
W_s ($\frac{J}{gr}$)	25.68	21.44
E (J)	3251	2713.7

Συγκρίνοντας κάποιες χαρακτηριστικές τιμές των δύο δοκιμών παρατηρείται ότι για το δοκίμιο 3.A έχει μεγαλύτερη μέγιστη και μέση πίεση και χρειάστηκε περισσότερη ενέργεια για τη θλίψη του. Ο Δείκτης ομοιομορφίας είναι πολύ κοντίνος και στις δύο περιπτώσεις.

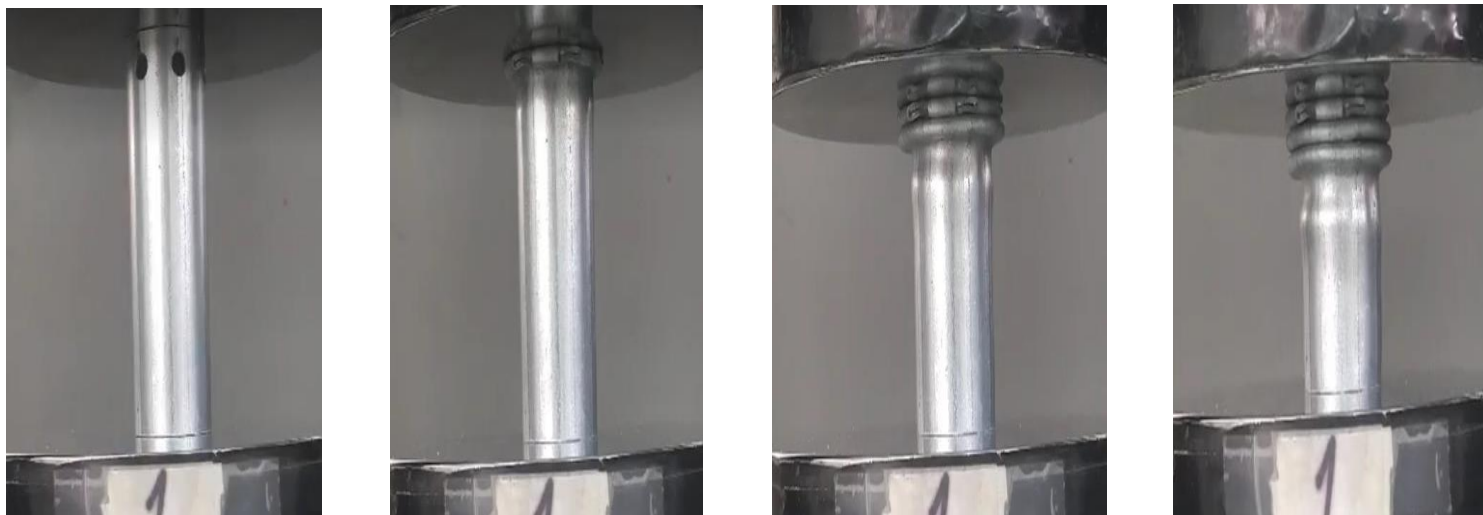


Διάγραμμα 9: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης για δύο πανομοιότυπα δοκίμια .

Δοκίμα 4

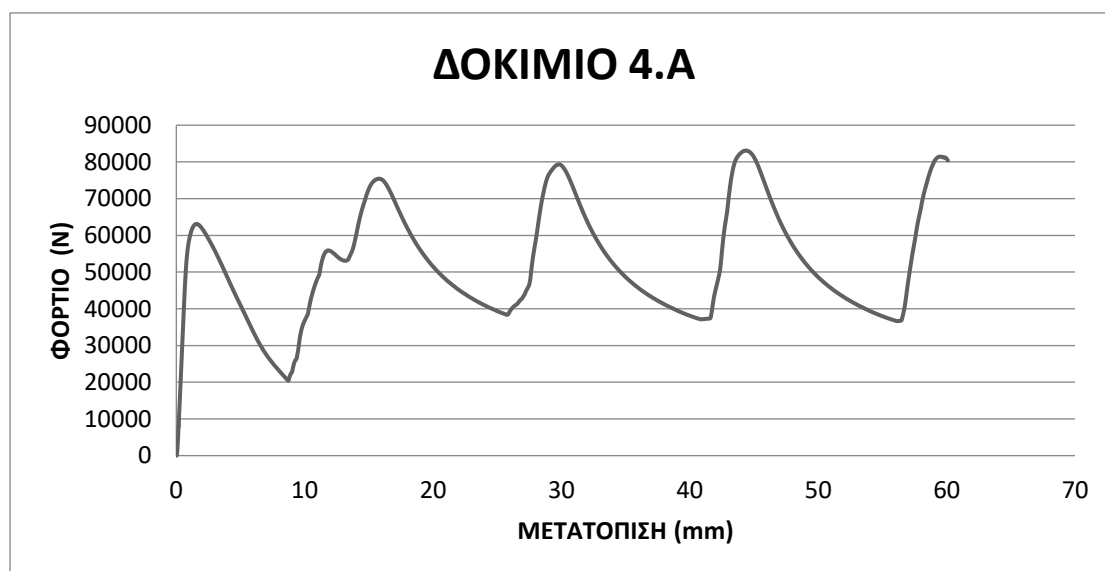
Δοκίμιο 4.α

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται σύγκριση των δοκιμών με έξι σπές, που η μία σπή σε σχέση με την άλλη έχει διαφορά 60 μοιρών και είναι σε ύψος 80 mm, θα παρουσιαστεί η παραμόρφωση του δοκιμίου σε κάποιες χρονικές στιγμές.



Εικόνα 24: Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου .(0 mm,15mm ,30mm, 45mm).

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει στο πάνω μέρος του.



Διάγραμμα 10 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης .

1η Φάση

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Δημιουργία δευτέρου εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας τρίτου λοβού.

3η Φάση.

Παρατηρείται ολοκλήρωση του τρίτου εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας τέταρτου λοβού.

Παρακάτω φαίνεται η τελική μορφή που πήρε το δοκίμιο μετά από το πέρας των τριών λεπτών.



Εικόνα 25: Δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της θλίψης.

4η Φάση.

Παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί 4 λοβοί όπου είναι όλοι εκτατοί. Επίσης φαίνεται η αρχή δημιουργίας ενός πέμπτου λοβού.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 83.07 \text{ KN}$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E_{abs} = 3127.3 \text{ J}$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 52.07 \text{ KN}$

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.63$$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης $W_s = \frac{E_{abs}}{m_c} = 23.77 \frac{\text{J}}{\text{gr}}$

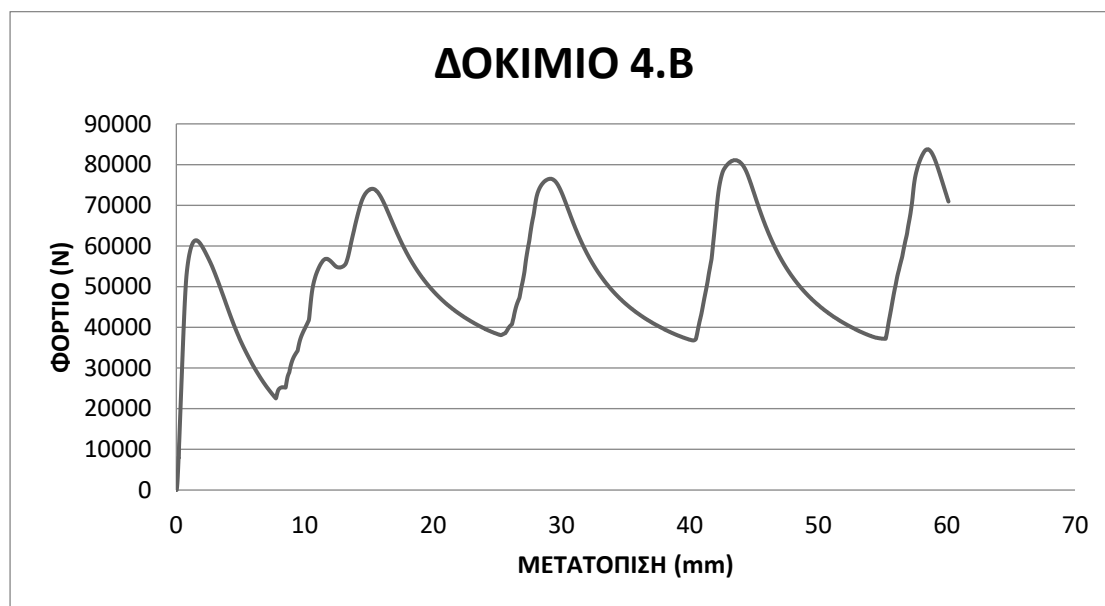
Δοκίμιο 4.β

Το δοκίμιο 4.β είναι πανομοιότυπο με το 4.α και θέλουμε να μελετήσουμε αν έχουν την ίδια συμπεριφορά κατά την θλίψη τους.



Εικόνα 26: Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου (0 mm, 15mm, 30mm, 45mm).

Παρατηρείται ότι το μοντέλο του δοκιμίου αρχίζει να καταρρέει στο πάνω μέρος του.



Διάγραμμα 11 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης .

1η Φάση

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Δημιουργία και του δεύτερου εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας τρίτου εκτατού λοβού

3η Φάση.

Παρατηρείται ολοκλήρωση του τρίτου εκτατού λοβού και αρχή δημιουργίας τέταρτου λοβού.

Παρακάτω φαίνεται η τελική μορφή που πήρε το δοκίμιο μετά από το πέρας των τριών λεπτών.



Εικόνα 27: Δοκίμια μετά την ολοκλήρωση της θλίψης

4η Φάση.

Παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί 4 λοβοί όπου είναι όλοι εκτατοί. Επίσης παρατηρούμε την αρχή δημιουργίας ενός πέμπτου λοβού.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 83.73 \text{ KN}$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E_{abs} = 3131.62 \text{ J}$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 52.16 \text{ KN}$

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.62$$

$$\text{Ειδική ενέργεια απορρόφησης } W_s = \frac{E_{abs}}{m_c} = 24.80 \frac{J}{gr}$$

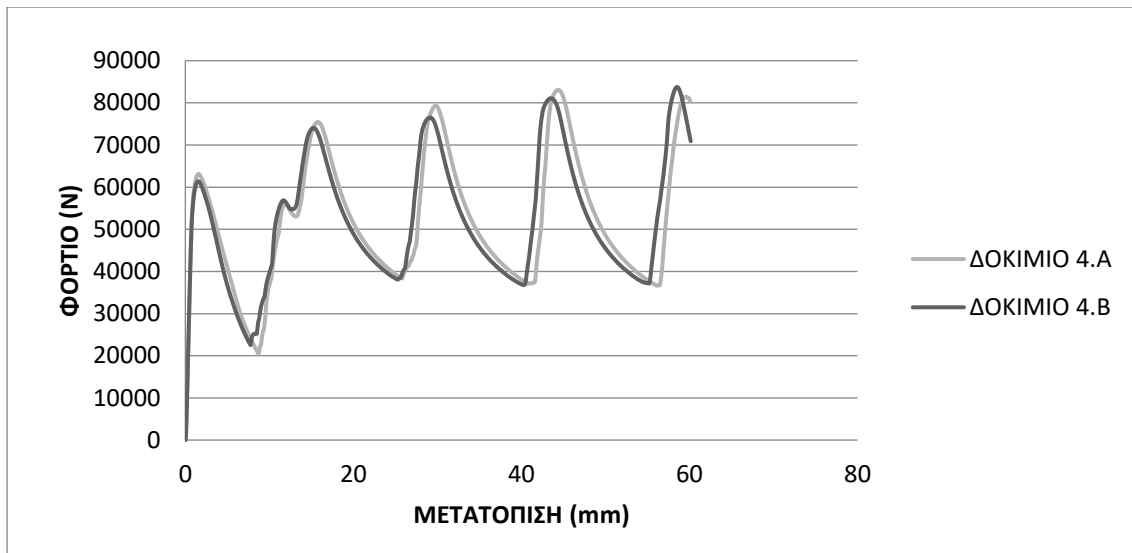
Σύγκριση - παρατηρήσεις

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι τα δύο δοκίμια έχουν την ίδια συμπεριφορά κατά την θλίψη τους. Δηλαδή και τα δύο ξεκινάνε την θλίψη τους από το σημείο που είναι πιο ασταθές δηλαδή το σημείο όπου έχουν κάνει τις οπές. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι λοβοί που δημιουργούνται είναι ίδιου τύπου και ίσοι σε αριθμό (τέσσερις) και δημιουργούνται τις ίδιες χρονικές στιγμές.

Πίνακας 6 : Σύγκριση αποτελεσμάτων για πανομοιότυπα δοκίμια.

	ΔΟΚΙΜΙΟ 4.A	ΔΟΚΙΜΙΟ 4.B
P_{max} (KN)	83.07	83.73
P_{mean}(KN)	52.07	52.16
CFE	0.63	0.62
W_s	24.77	24.80
E (KN mm)	3127.30	3131.62

Συγκρίνοντας κάποιες χαρακτηριστικές τιμές των δύο δοκιμών παρατηρούμε ότι όλοι οι δείκτες που έχουμε βρει είναι πολύ κοντά μεταξύ τους και είναι ακριβώς αυτό που περιμέναμε να συμβεί αφού τα δύο δοκίμια είναι πανομοιότυπα.

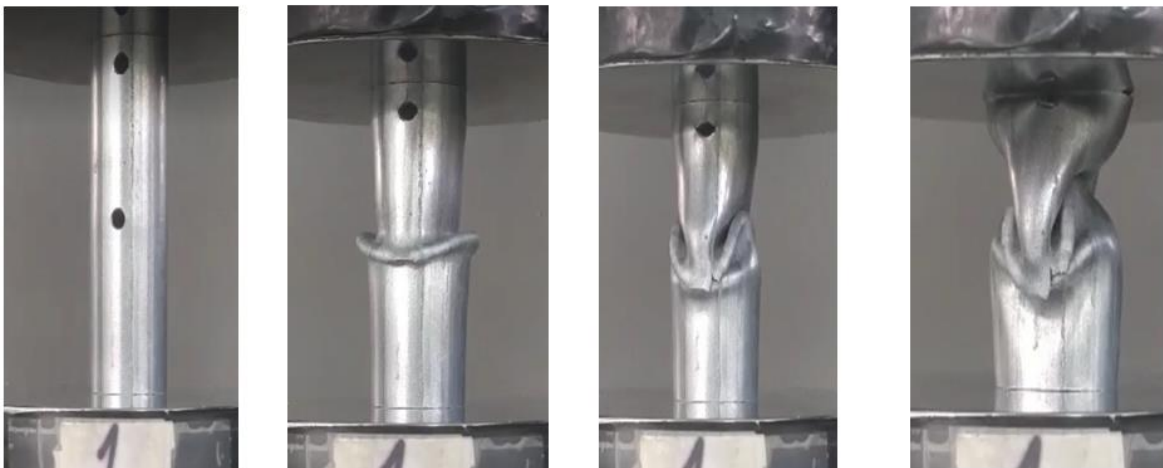


Διάγραμμα 12: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης .

Δοκίμια 5

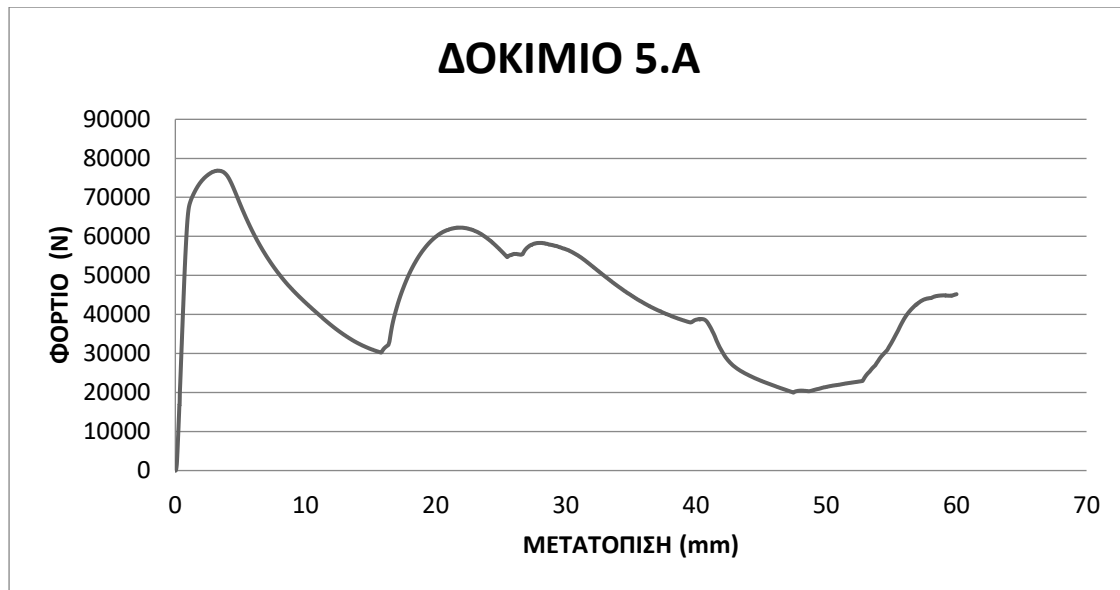
Δοκίμιο 5.α

Σε αυτή την περίπτωση για γίνει σύγκριση των δοκιμών που έχει 4 οπές όπου οι δύο είναι οπές είναι σε ύψος δεκατοστά και έχουν μεταξύ τους γωνία 180 μοιρών ενώ οι άλλες 2 είναι σε ύψος στα 5 εκατοστά και έχουν γωνιά μεταξύ τους 180 μοίρες. Θα παρουσιαστεί η παραμόρφωση του δοκιμίου σε κάποιες χρονικές στιγμές.



Εικόνα 28 : Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου .(0 mm,15mm ,30mm, 45mm).

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει στο μέσο του ύψους του.



Διάγραμμα 13 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

1η Φάση.

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού μη εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Δημιουργία δεύτερου λοβού τύπου μη εκτατού.

3η Φάση.

Αρχή δημιουργίας τρίτου λοβού.

Παρακάτω φαίνεται η τελική μορφή που πήρε το δοκίμιο μετά από το πέρας των τριών λεπτών.



Εικόνα 29: Δοκίμια μετά την ολοκλήρωση της θλίψης.

4η Φάση.

Παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί τρεις λοβοί μη εκτατού τύπου.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 76.83 \text{ KN}$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E_{abs} = 2636.75 \text{ J}$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 43.96 \text{ KN}$

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.57$$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης $W_s = \frac{E_{abs}}{m_c} = 20.83 \frac{\text{J}}{\text{gr}}$

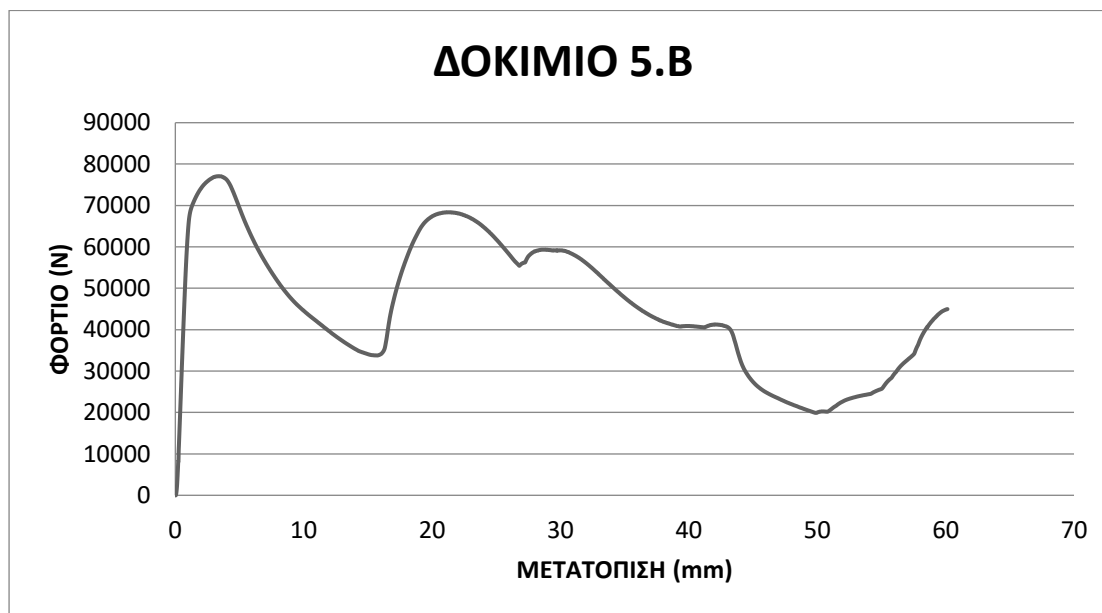
Δοκίμιο 5.β

Γίνεται η δεύτερη δοκιμή για πανομοιότυπο δοκίμιο ώστε να συγκριθεί αν οι συμπεριφορές τους κατά τη θλίψη μοιάζουν.



Εικόνα 30: Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου (0 mm, 15mm, 30mm, 45mm).

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει στο μέσο του ύψους του.



Διάγραμμα 14 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

1η Φάση.

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού μη εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Δημιουργία δεύτερου λοβού μη εκτατού τύπου.

3η Φάση.

Αρχή δημιουργίας τρίτου λοβού.

Παρακάτω φαίνεται η τελική μορφή που πήρε το δοκίμιο μετά από το πέρας των τριών λεπτών.



Εικόνα 31: Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου. (0 mm, 15mm, 30mm, 45mm).

4η Φάση.

Παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί 3 λοβοί όπου είναι όλοι μη εκτατοί.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 77.07 \text{ KN}$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E_{abs} = 2760.1 \text{ J}$.

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 45.95 \text{ KN}$

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.59$$

$$\text{Ειδική ενέργεια απορρόφησης } W_s = \frac{E_{abs}}{m_c} = 21.80 \frac{\text{J}}{\text{gr}}$$

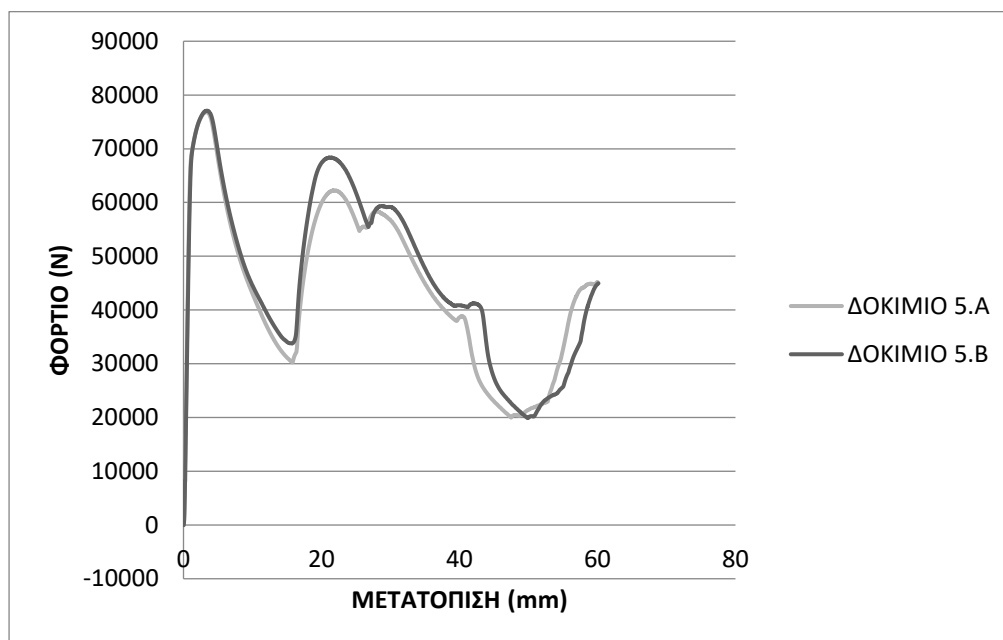
Σύγκριση - παρατηρήσεις

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι τα δύο σωληνάκια έχουν την ίδια συμπεριφορά κατά τη θλίψη τους, δηλαδή και τα δύο ξεκινούν τη θλίψη τους από το σημείο που είναι πιο ασταθές (σε ύψος 5 εκατοστών) το σημείο όπου έχουν γίνει οπές. Επίσης, παρατηρείται ότι οι λοβοί που δημιουργούνται είναι ίδιου τύπου(μη εκτατού) και ίσοι σε αριθμό (τρεις) και δημιουργούνται τις ίδιες χρονικές στιγμές. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και στο διάγραμμα όπου οι καμπύλες δύναμης- μετατόπισης για τα δυο δοκίμια σχεδόν συμπίπτουν.

Πίνακας 7 : Σύγκριση αποτελεσμάτων για πανομοιότυπα δοκίμια.

	ΔΟΚΙΜΙΟ 5.A	ΔΟΚΙΜΙΟ 5.B
$P_{max} \text{ (KN)}$	76.83	77.07
$P_{mean} \text{ (KN)}$	43.96	45.95
CFE	0.57	0.59
$w_s \left(\frac{\text{J}}{\text{gr}} \right)$	20.83	21.80
$E \text{ (J)}$	2636.75	2760.1

Συγκρίνοντας κάποιες χαρακτηριστικές τιμές των δύο δοκιμών παρατηρούμε ότι όλοι οι δείκτες που έχουμε βρει είναι πολύ κοντά μεταξύ τους και είναι ακριβώς αυτό που περιμέναμε να συμβεί αφού τα δύο δοκίμια είναι πανομοιότυπα.



Διάγραμμα 15: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης για δύο πανομοιότυπα δοκίμια.

Δοκίμια 6

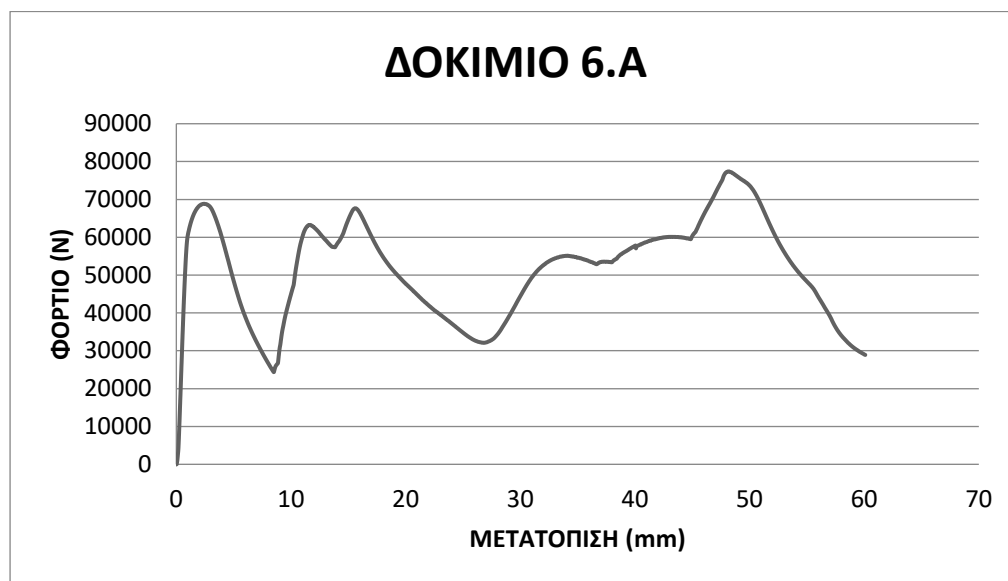
Δοκίμιο 6.α

Σε αυτή την περίπτωση για να γίνει σύγκριση των δοκιμών που έχει οκτώ οπές όπου οι τέσσερις είναι οπές σε ύψος 80 mm και έχουν μεταξύ τους γωνία 90 μοιρών ενώ οι άλλες τέσσερις είναι σε ύψος πέντε εκατοστών και έχουν γωνία μεταξύ τους 90 μοίρες, θα παρουσιαστεί η παραμόρφωση του δοκιμίου σε κάποιες χρονικές στιγμές.



Εικόνα 32: Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου. (0 mm, 15mm, 30mm, 45mm).

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει στο πάνω μέρος του ύψους του.



Διάγραμμα 16 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

1η Φάση.

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Δημιουργία δεύτερου λοβού, μη εκτατού τύπου.

3η Φάση.

Δημιουργία τρίτου λοβού, εκτατού τύπου.

Παρακάτω φαίνεται η τελική μορφή που πήρε το δοκίμιο μετά από το πέρας των τριών λεπτών



Εικόνα 33: Δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της θλίψης

4η Φάση.

Παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί πέντε λοβοί όπου οι δυο πάνω είναι εκτατού τύπου και οι τρεις κάτω είναι τύπου διαμάντι.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 77.4KN$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E_{abs} = 3100.5 J$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 51.61KN$

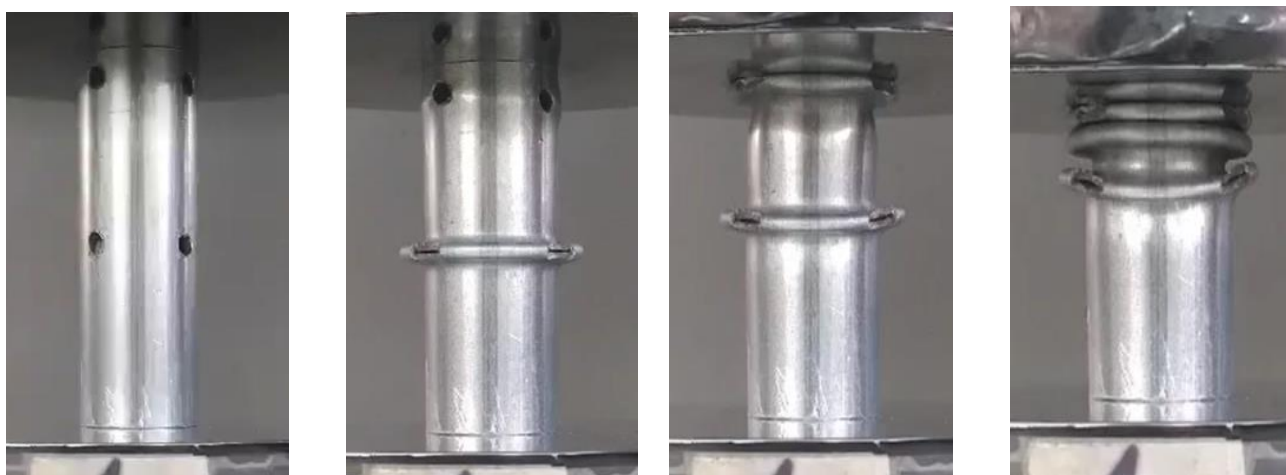
$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.67$$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης $W_s = \frac{E_{abs}}{m_c} = 24.62 \frac{J}{gr}$

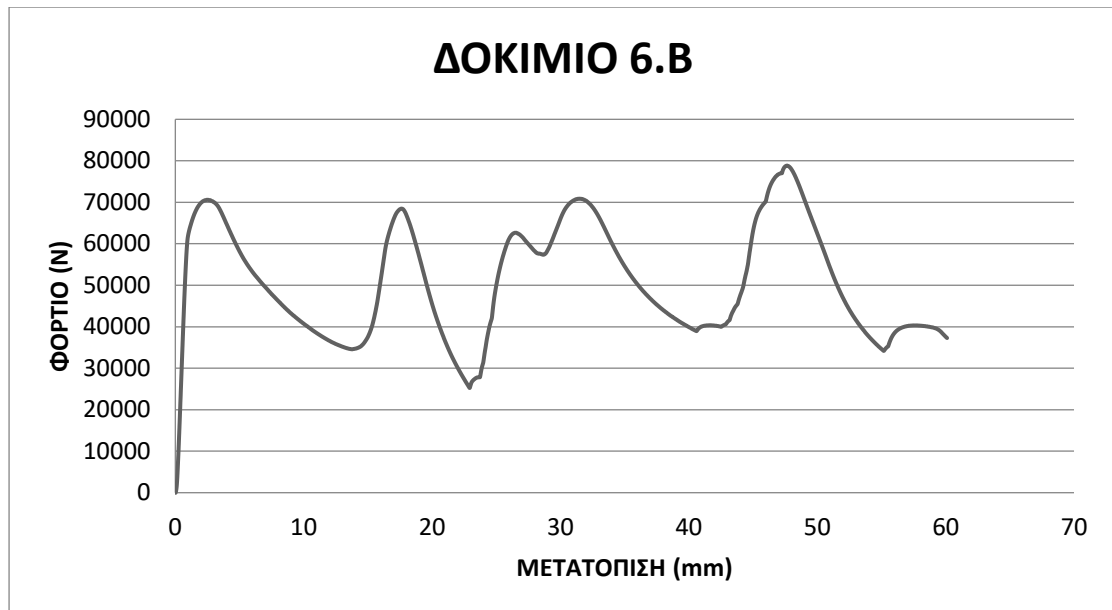
Δοκίμιο 6.β

Γίνεται η δεύτερη δοκιμή για πανομοιότυπο δοκίμιο ώστε να συγκριθεί αν οι συμπεριφορές τους κατά τη θλίψη μοιάζουν.

Παρατηρείται ότι το μοντέλο του δοκιμίου αρχίζει να καταρρέει στη μέση του ύψους του.



Εικόνα 34: Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου (0 mm, 15mm, 30mm, 45mm).



Διάγραμμα 17: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

1η Φάση.

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Δημιουργία δεύτερου εκτατού λοβού.

3η Φάση.

Δημιουργία τρίτου εκτατού λοβού.

Παρακάτω φαίνεται η τελική μορφή που πήρε το δοκίμιο μετά από το πέρας των τριών λεπτών



Εικόνα 35: Δοκίμια μετά την ολοκλήρωση της θλίψης

4η Φάση.

Παρατηρούμε ότι έχουν δημιουργηθεί 4 λοβοί όπου οι τρεις είναι εκτατού τύπου και ένας είναι μη εκτατού τύπου.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 78.84KN$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E_{abs} = 3039 J$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 59.6KN$

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.64$$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης $W_S = \frac{E_{abs}}{m_c} = 24.12 \frac{J}{gr}$

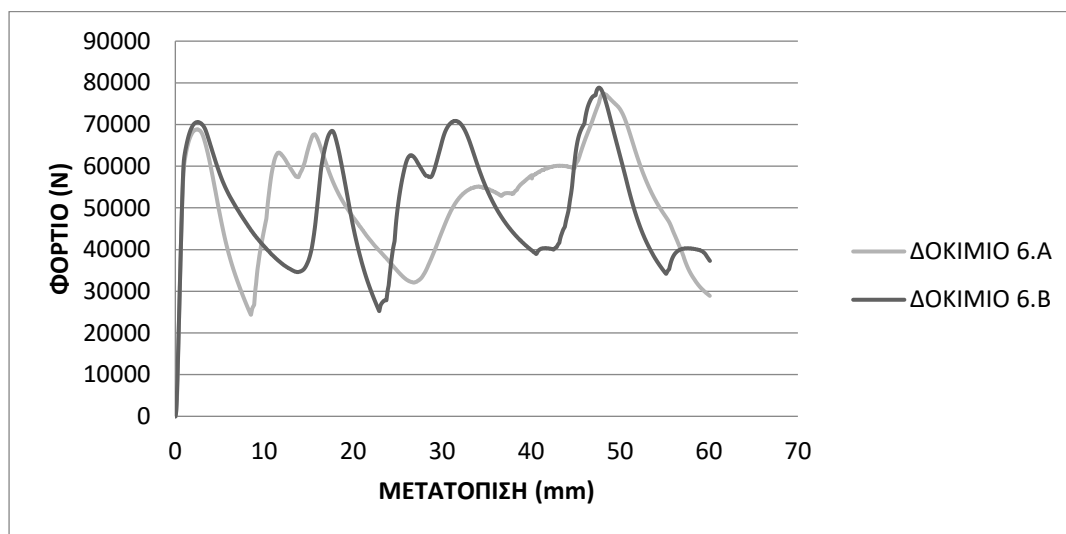
Σύγκριση - παρατηρήσεις

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι τα δύο σωληνάκια έχουν διαφορετική συμπεριφορά στη θλίψη τους. Στην πρώτη περίπτωση δημιουργούνται πέντε λοβοί όπου οι δύο πάνω είναι λοβοί εκτατού τύπου και οι τρεις κάτω είναι λοβοί μη εκτατού τύπου ενώ στη δεύτερη περίπτωση έχουμε δημιουργία τεσσάρων λοβών όπου οι τρεις πάνω είναι εκτατοί λοβοί και ο ένας κάτω είναι λοβός μη εκτατού τύπου.

Πίνακας 8 : Σύγκριση αποτελεσμάτων για πανομοιότυπα δοκίμια.

	ΔΟΚΙΜΙΟ 6.A	ΔΟΚΙΜΙΟ 6.B
P_{max} (KN)	77.4	78.84
P_{mean} (KN)	51.61	59.6
CFE	0.68	0.64
W_S	24.62	24.12
E (KN mm)	3100.5	3039

Συγκρίνοντας κάποιες χαρακτηριστικές τιμές των δύο δοκιμίων παρατηρείται ότι το δοκίμιο 6.B έχει μεγαλύτερη μέγιστη και μέση πίεση αλλά χρειάστηκε λιγότερη ενέργεια για την θλίψη του σε σχέση με το 6.A.

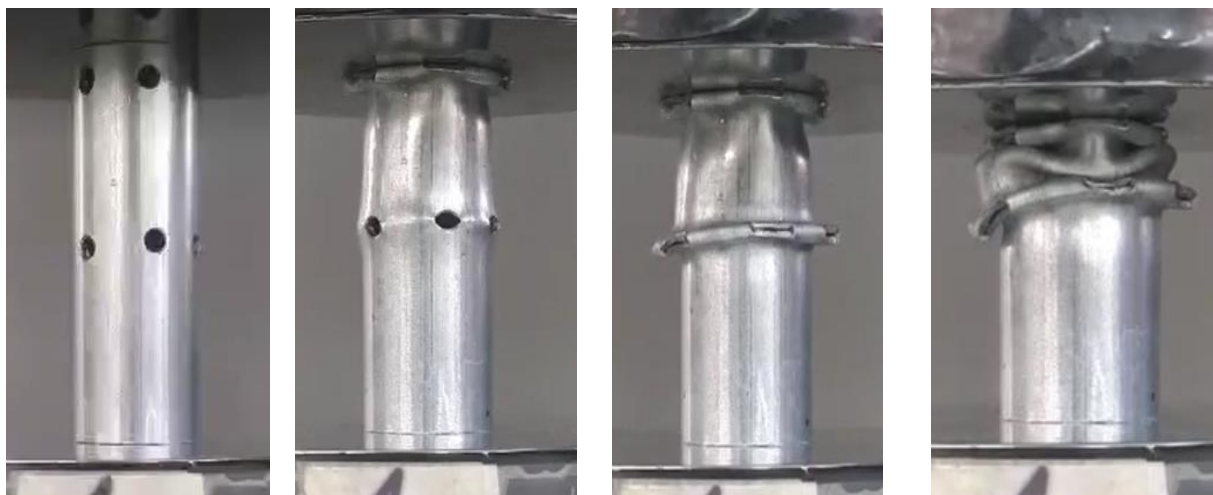


Διάγραμμα 18: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης για δύο πανομοιότυπα δοκίμια.

Δοκίμια 7

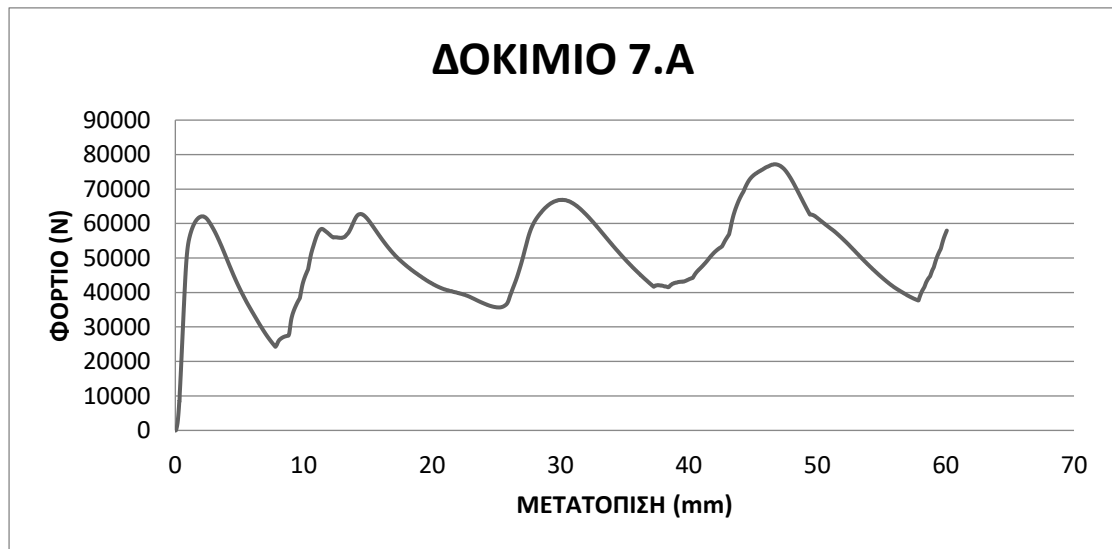
Δοκίμιο 7.α

Σε αυτή την περίπτωση για να γίνει σύγκριση των δοκιμίων που έχει δώδεκα οπές όπου οι έξι είναι οπές σε ύψος 80mm και έχουν μεταξύ τους γωνία 60 μοιρών ενώ οι άλλες έξι είναι σε ύψος 50 mm και έχουν γωνιά μεταξύ τους 60 μοίρες , θα παρουσιαστεί η παραμόρφωση του δοκιμίου σε κάποιες χρονικές θέσεις (στιγμές).



Εικόνα 36: Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου .(0 mm,15mm ,30mm, 45mm).

Παρατηρείται ότι το μοντέλο του δοκιμίου αρχίζει να καταρρέει στο πάνω μέρος του.



Διάγραμμα 19 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

1η Φάση.

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Δημιουργία δεύτερου εκτατού λοβού.

3η Φάση.

Δημιουργία τρίτου λοβού μη εκτατού τύπου.

Παρακάτω φαίνεται η τελική μορφή που πήρε το δοκίμιο μετά από το πέρας των τριών λεπτών.



Εικόνα 37: Δοκίμια μετά την ολοκλήρωση της θλίψης

4η Φάση.

Παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί τέσσερις λοβοί εκ των οποίων οι τρεις είναι τύπου εκτατού και ο ένας είναι μη εκτατού.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 77.19 \text{ KN}$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E_{abs} = 3046.9 \text{ J}$

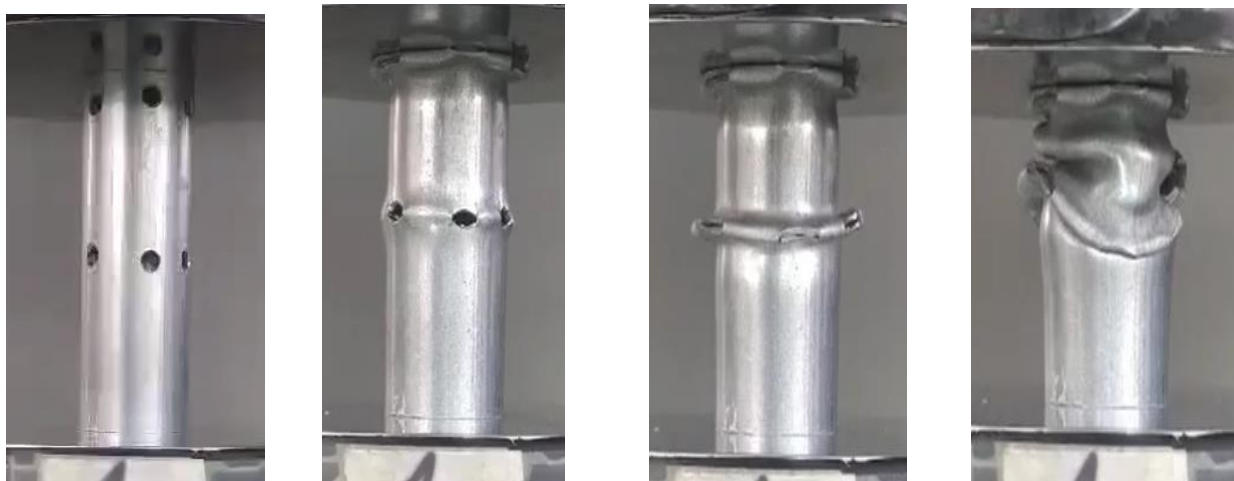
Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 50.73 \text{ KN}$

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.66$$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης $W_s = \frac{E_{abs}}{m_c} = 24.32 \frac{\text{J}}{\text{gr}}$

Δοκίμιο 7.β

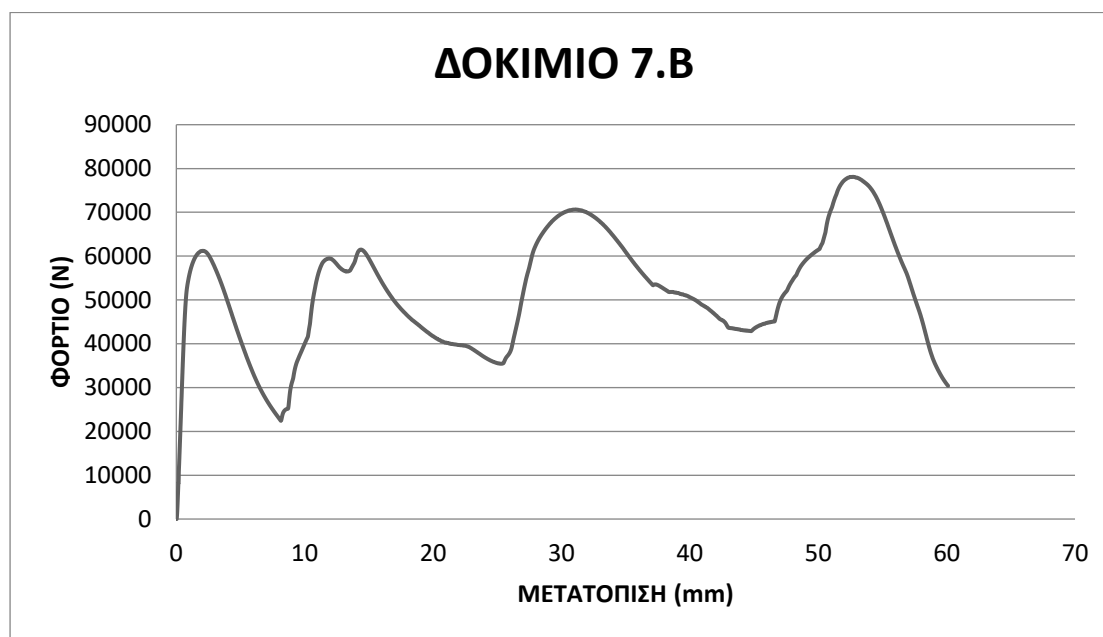
Γίνεται η δεύτερη δοκιμή για πανομοιότυπο δοκίμιο ώστε να δούμε αν οι



συμπεριφορές τους κατά τη θλίψη μοιάζουν.

Εικόνα 38: Στιγμιότυπα από διαφορετικές θέσεις κατά την συμπίεση του δοκιμίου .(0 mm,15mm ,30mm, 45mm).

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει στο πάνω μέρος του.



Διάγραμμα 20 : Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης .

1η Φάση.

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται η δημιουργία αρχικού εκτατού λοβού.

2η Φάση.

Δημιουργία δεύτερου εκτατού λοβού.

3η Φάση.

Δημιουργία τρίτου λοβού, μη εκτατού τύπου.

Παρακάτω φαίνεται η τελική μορφή που πήρε το δοκίμιο μετά από το πέρας των τριών λεπτών.



Εικόνα 39: Δοκίμια μετά την ολοκλήρωση της θλίψης

4η Φάση.

Παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί τέσσερις λοβοί όπου οι δύο είναι εκτατοί και οι άλλοι δύο είναι λοβοί μη εκτατού τύπου.

Από τα στοιχεία που πάρθηκαν από την πρέσα, βρέθηκε:

Το μέγιστο φορτίο $P_{max} = 78.1 \text{ KN}$

Η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε για την αξονική κατάρρευση του δοκιμίου είναι $E_{abs} = 3115 \text{ J}$

Το μέσο φορτίο $P_{mean} = 51.85 \text{ KN}$

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = 0.66$$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης $W_s = \frac{E_{abs}}{m_c} = 24.86 \frac{\text{J}}{\text{gr}}$

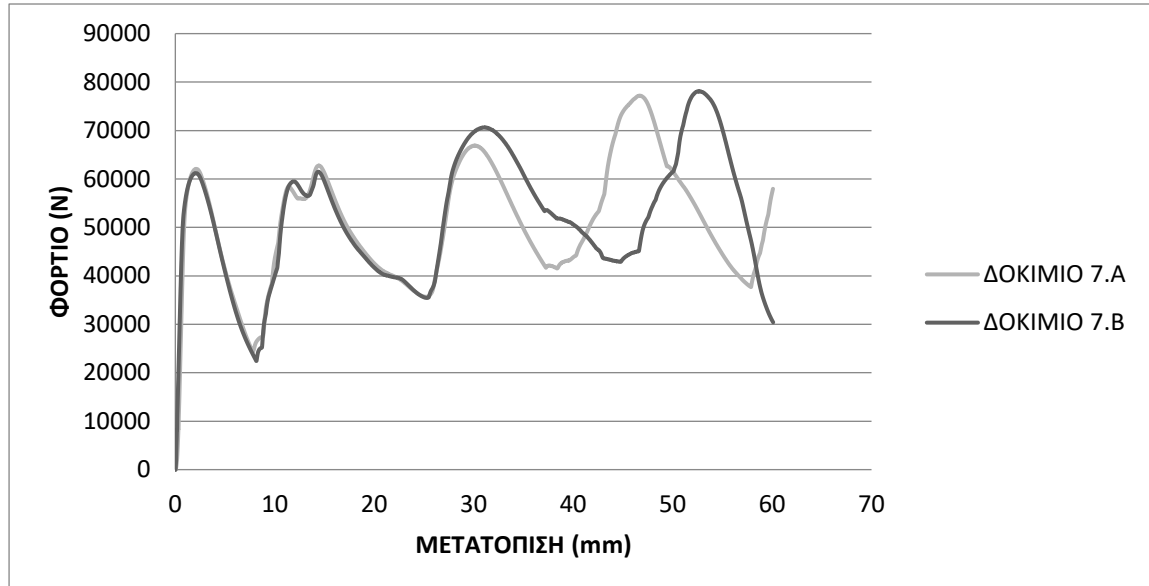
Σύγκριση – παρατηρήσεις

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι δεν έχουν την ίδια συμπεριφορά κατά την θλίψη τους. Ξεκινούν τη θλίψη τους από το σημείο που είναι πιο ασταθές δηλαδή το σημείο όπου έχουν κάνει τις οπές. Μέχρι και τη θλίψη των πρώτων 30 cm παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι η κατανομή της πίεσης είναι ίδια και στα δυο δοκίμια ενώ μετά αλλάζει. Ως προς τους λοβούς στο δοκίμιο 7.A έχουμε τέσσερις λοβούς όπου οι τρεις είναι εκτατού τύπου και ένας είναι μη εκτατού τύπου ενώ στο δοκίμιο 7.B έχουν δημιουργηθεί τέσσερις λοβοί όπου οι δύο λοβοί είναι εκτατού τύπου και οι άλλοι δύο είναι μη εκτατού τύπου.

Πίνακας 9 : Σύγκριση αποτελεσμάτων για πανομοιότυπα δοκίμια.

	ΔΟΚΙΜΙΟ 7.A	ΔΟΚΙΜΙΟ 7.B
$P_{max} \text{ (KN)}$	77.19	78.1
$P_{mean} \text{ (KN)}$	50.73	51.85
CFE	0.66	0.66
$W_s \left(\frac{\text{J}}{\text{gr}} \right)$	24.32	24.86
$E \text{ (J)}$	3046.9	3115

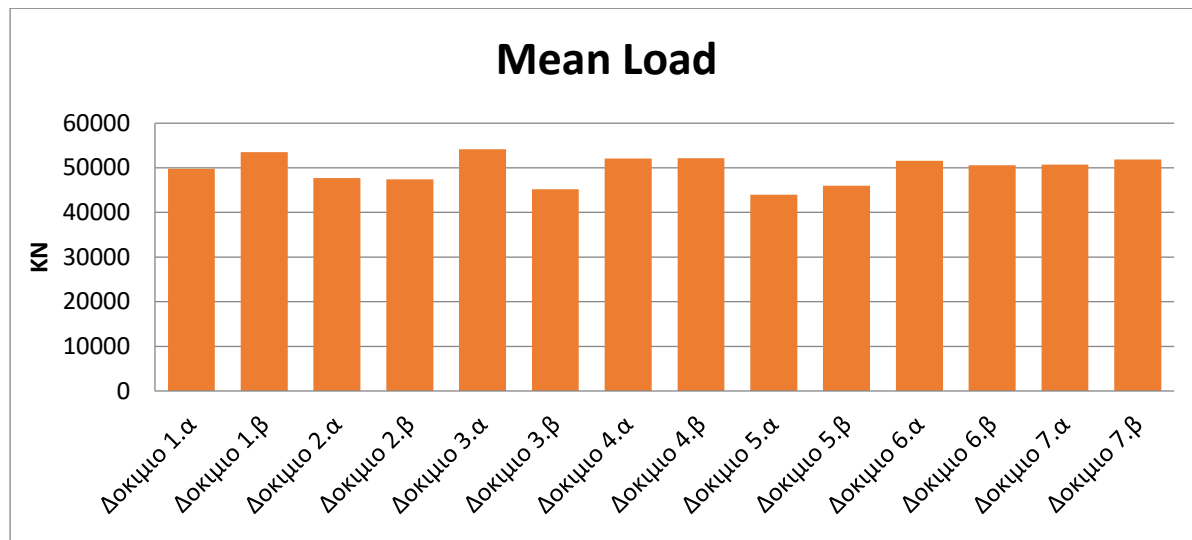
Συγκρίνοντας κάποιες χαρακτηριστικές τιμές των δύο δοκιμών παρατηρείται ότι όλοι οι δείκτες που έχουν βρεθεί είναι πολύ κοντά μεταξύ τους και είναι το αναμενόμενο αποτέλεσμα αφού τα δύο δοκίμια είναι πανομοιότυπα.



Διάγραμμα 21: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης για δύο πανομοιότυπα δοκίμια .

Γενική σύγκριση δοκιμών

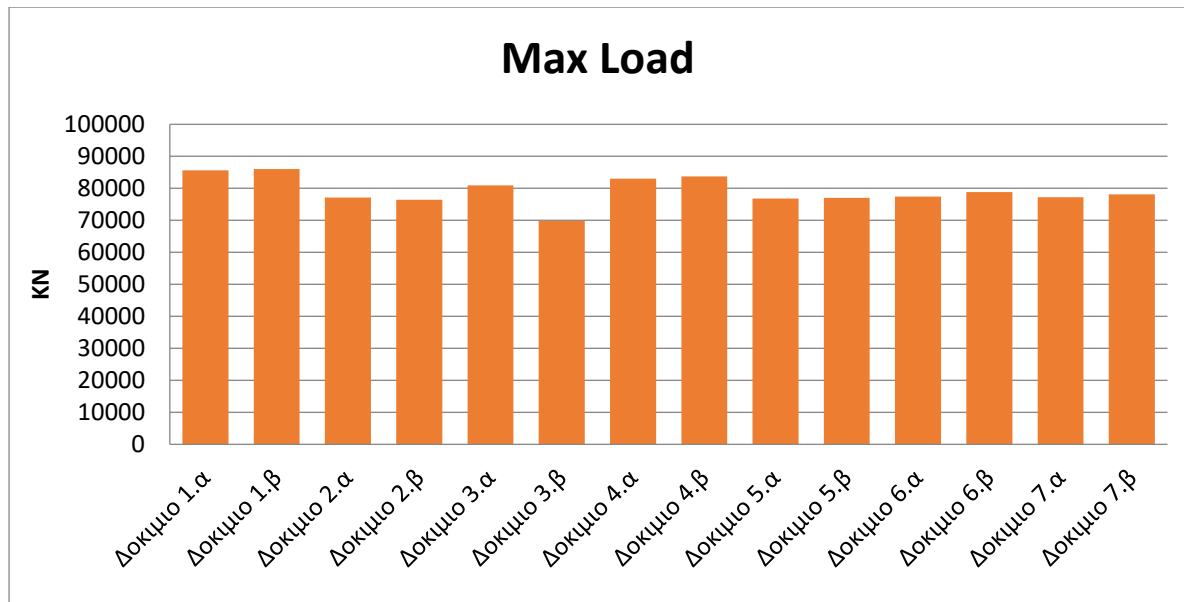
- Το συγκριτικό γράφημα μέσου φορτίου (P_{mean}) για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



Γράφημα 1 : Γράφημα σύγκρισης μέσου φορτίου για όλα τα δοκίμια.

Το δοκίμιο που εμφανίζει το μέγιστο μέσο φορτίο, άρα και τη μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης κατά την αξονική του κατάρρευση, είναι το δοκίμιο 3.α (δοκίμιο με τέσσερις οπές όπου είναι σε ύψος 8 εκατοστών και γωνία μεταξύ τους 90 μοίρες), ενώ το δοκίμιο που εμφανίζει το ελάχιστο μέσο φορτίο, άρα και μικρότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης κατά την κατάρρευσή του είναι το δοκίμιο 5.α (δοκίμιο με 4 οπές όπου οι δύο είναι σε ύψος 8 εκατοστών και γωνία 180 μοιρών μεταξύ τους και οι άλλες δύο είναι σε ύψος 5 εκατοστών και γωνία 180 μοιρών μεταξύ τους).

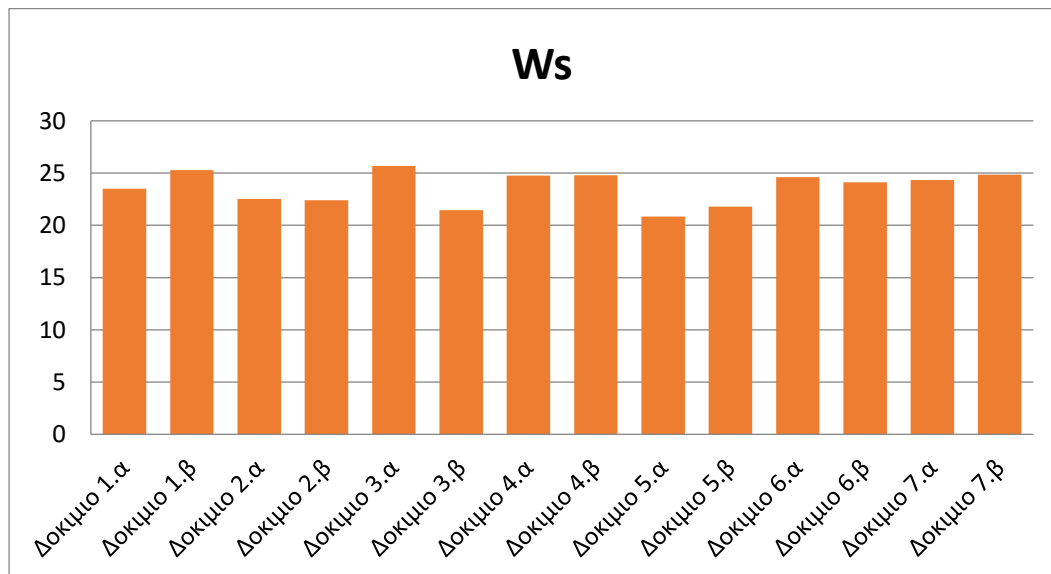
- Το συγκριτικό γράφημα μέγιστου φορτίου (P_{max}) για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



Γράφημα 2: Γράφημα σύγκρισης μέγιστου φορτίου για όλα τα δοκίμια.

Το δοκίμιο που εμφανίζει το μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο, άρα το δοκίμιο που έχει την μεγαλύτερη αντοχή μέχρι να ξεκινήσει η κατάρρευσή του είναι το 1.Β όπου είναι πολύ λογικό διότι είναι το δοκίμιο που δεν του έχει γίνει κατεργασία. Το δοκίμιο που αντέχει λιγότερο μέχρι να αρχίσει να καταρρέει είναι το 3.β (είναι το δοκίμιο με τέσσερις οπές σε ύψος 8 εκατοστών και διάφορα οπών 90 μοίρες).

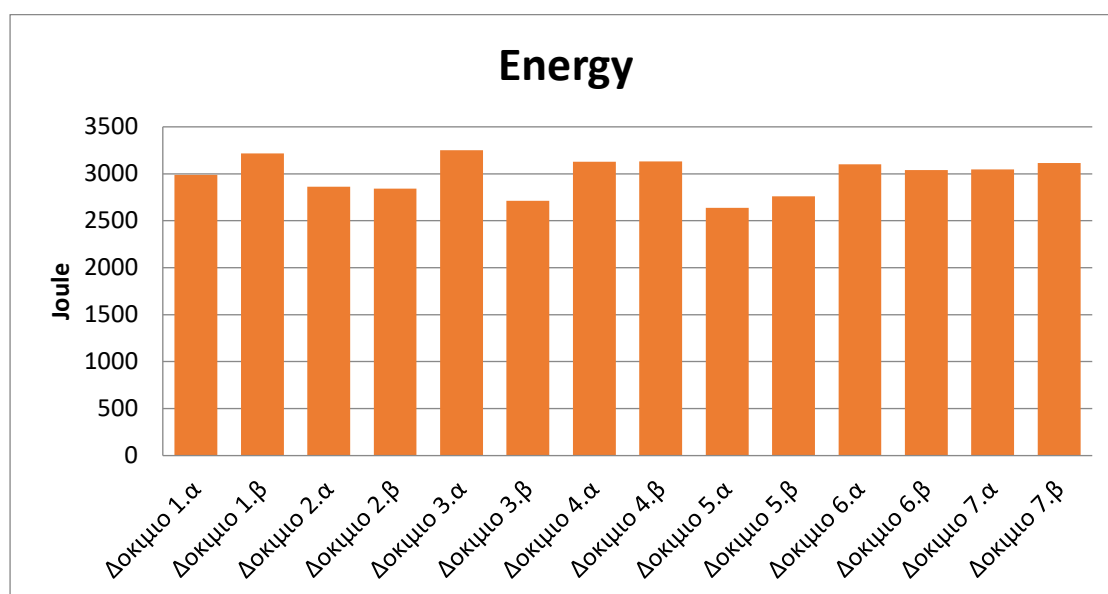
- Το συγκριτικό γράφημα W_s για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



Γράφημα 3 : Γράφημα W_s για όλα τα δοκίμια.

Το δοκίμιο που εμφανίζει το μέγιστο W_s είναι το δοκίμιο 3.α παρότι που και σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ διαφορετικό με το 3.β. Επίσης σταθερό και υψηλό W_s έχουν τα 4.α και 4.β. Το χαμηλότερο W_s δηλαδή τα δοκίμια όπου δεν σε αναλογία με το βάρος τους αντέχουν την μικρότερη απορρόφηση ενέργειας είναι τα δοκίμια 5.

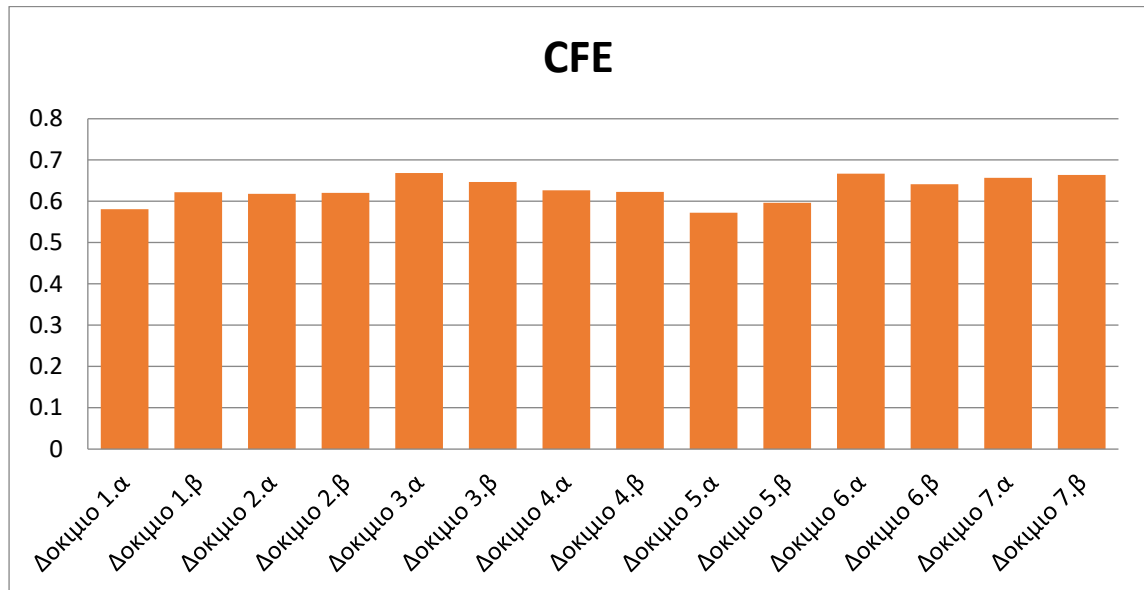
- Το συγκριτικό γράφημα της ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



Γράφημα 4 : Γράφημα της ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης για όλα τα δοκίμια.

Το δοκίμιο που εμφανίζει τη μέγιστη ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης είναι το 3.α (είναι το δοκίμιο με τέσσερις οπές σε ύψος 8 εκατοστών και διάφορα οπών 90 μοίρες μεταξύ τους), ενώ το δοκίμιο που εμφανίζει την ελάχιστη είναι το 5.α (δοκίμιο με 4 οπές όπου οι δύο είναι σε ύψος 8 εκατοστών και γωνία 180 μοιρών μεταξύ τους και οι άλλες δύο είναι σε ύψος 5 εκατοστών και γωνία 180 μοιρών μεταξύ τους).

- Το συγκριτικό γράφημα CFE για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



Γράφημα 5 : Γράφημα CFE για όλα τα δοκίμια.

Το δοκίμιο που εμφανίζει το μέγιστο δείκτη ομοιομορφίας φορτίζεται το 6.α (δοκίμιο με οκτώ οπές όπου οι 4 είναι σε ύψος 8 εκατοστών και γωνία 90 μοιρών μεταξύ των οπών και οι άλλες τέσσερις είναι σε ύψος 5 εκατοστών και γωνία 90 μοιρών μεταξύ τους), ενώ το δοκίμιο που εμφανίζει την ελάχιστη είναι το 5.α (δοκίμιο με 4 οπές όπου οι δύο είναι σε ύψος 8 εκατοστών και γωνία 180 μοιρών μεταξύ τους και οι άλλες δύο είναι σε ύψος 5 εκατοστών και γωνία 180 μοιρών μεταξύ τους).

Κεφάλαιο 5 : Παρατηρήσεις - Προτάσεις

5.1 Γενικές παρατηρήσεις

1. Το είδος κατάρρευσης που παρατηρήθηκε ουσιαστικά σε όλες σχεδόν τις δοκιμές ήταν ο τύπος της παραμόρφωσης με εμφάνιση μη εκτατών λοβών, όπου το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει σε κάποια θέση της καθ' ύψος διατομής που περιλαμβάνει ατέλεια ή οπή.
2. Στις περισσότερες σειρές πειραμάτων έχουμε μη εκτατό τρόπο κατάρρευσης ή μικτό τρόπο κατάρρευσης των κελυφών.
3. Παρατηρείται ότι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις στα δοκίμια έχουν σχηματιστεί τέσσερις λοβοί.
4. Μεγάλη διαφορά σε όμοια δοκίμια παρατηρούμε στα 3.α και 3.β, τα οποία ενώ έχουν ίδια χαρακτηριστικά, η ενέργεια που χρειάστηκαν είναι πολλή διαφορετική για τη θλίψη τους, και αυτό οφείλεται στην απόκλιση της θέσης των οπών κατά την κατεργασία.
5. Όπως προβλέφθηκε το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης (αρχικό) παρατηρήθηκε στα πλήρη - αλώβητα δοκίμια.
6. Στην παρούσα μελέτη, οι θέσεις των ασυνεχειών στο τοίχωμα του κελύφους (προ)επιλέχτηκαν με βάση τη γεωμετρία και τις διαστάσεις του (βλ. πρώτη πρόταση για περαιτέρω έρευνα, στη συνέχεια)

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

1. Μεγαλύτερη ποικιλία και συνδυασμός ατελειών (γεωμετρία και θέσεις ατελειών) με ανάδραση από τρέχοντα αποτελέσματα, για περαιτέρω στοχευμένη παραμετρική μελέτη: Συνολικά, το μοτίβο κατάρρευσης (μορφή, αριθμός και μέγεθος λοβών) ενός κελύφους διέπεται από τη γεωμετρία και τις σχετικές διαστάσεις του (ομοιομορφία διατομής καθ' ύψος, γεωμετρία διατομής, σχέση διαστάσεων διατομής και πάχους

τοιχώματος). Επομένως, η λεπτομερής χαρτογράφηση της τελικής μορφής κατάρρευσης του ατόφιου αέριου κελύφους (χωρίς ασυνέχειες τοιχώματος), σε συνδυασμό με την στοχευμένη επέμβαση (δημιουργία ασυνεχειών) στις κρίσιμες θέσεις του τοιχώματος θα διαθέσουν περισσότερες πληροφορίες για την κατάλληλη διαχείριση του, ανά περίπτωση εφαρμογής (έλεγχος \ βελτίωση των επιμέρους χαρακτηριστικών κατάρρευσης του κελύφους).

2. Σύγκριση συμπεριφοράς μεταξύ στατικής και δυναμικής καταπόνησης (Διαφορετικά αρχικά ύψη μάζας πρόσκρουσης, συνεπώς διαφορετική αρχική κινητική ενέργεια.)
3. Διαφορετικό υλικό κελυφών (πολυμερές, σύνθετο)
4. Αριθμητική προσομοίωση με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Αφού γίνει επαλήθευση των μοντέλων μέσω των πειραματικών ευρημάτων, δίνεται η δυνατότητα για πολυάριθμες δοκιμές κελυφών και συνθηκών σε επίπεδο μοντελοποίησης (χρήση του κώδικα ως προβλεπτικού εργαλείου).

Βιβλιογραφία

- [1] Mehmet A Guler, Muhammed E Cerit, Bertan Bayram , Bora Gerceker & EmRah Karakaya The effect of geometrical parameters on the energy absorption characteristics of thin walled structures under axial impact, *15*, pp. 377-390, 2010.
- [2]w. Abramowicz and T. Wierzbicki , ON THE CRUSHING MECHANICS OF THIN-WALLED STRUCTURES, *J. Appl. Mech.*, 50, 1983.
- [3]w. Abramowicz, SIMPLIFIED CRUSHING ANALYSIS OF THIN-WALLED COLUMNS AND BEAMS, *Eng. Translations*, 29, pp 5-26, 1981.
- [4] w. Abramowicz, THE EFFECTIVE CRUSHING DISTANCE IN AXIALLY COMPRESSED THIN-WALLED METAL COLUMNS, Warsaw, Poland, Polish Academy of Sciences, Institute for Fundamental Technological Research. , Volume 1, Issue 3, pp 309-317, 1983.
- [5] J. M. ALEXANDER, *AN APPROXIMATE ANALYSIS OF THE COLLAPSE OF THIN CYLINDRICAL SHELLS UNDER AXIAL LOAD*.ALEXANDER, *Q. J. Mech., appl. Math.* 13, pp 10-15, 1960.
- [6] William L. Co, *STRESS CONCENTRATION AROUND A SMALL CIRCULAR HOLE IN THE HIMAT COMPOSITE PLATE* , NASA Technical Memorandum 86038, 1999.
- [7] H. Abbas, Venkatesha, CONSIDERATIONS IN STRAIGHT FOLD ANALYSIS OF THIN TUBES UNDER AXIAL COMPRESSION, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 31, Issue 8, pp 1039-1053, September 2005.
- [8] Aljawi, M. ABd-Rabou and S. Asiri, Finite element and experimental analysis of square tubes under dynamic axial crushing, pp 24-28, 2004.
- [9] Johnson, W. & Mamalis, *CRASHWORTHINESS OF VEHICLES*, Mechanical Engineering Publications, London, 1978.
- [10] W. Johnson, P. D. Soden and S. T. S. Ai-Hassani, INEXTENSIONAL COLLAPSE OF THIN-WALLED TUBES UNDER AXIAL COMPRESSION, 12, pp 317-330, 1977.
- [11] Abramowicz W, Jones N., AXIAL CRUSHING OF CIRCULAR TUBE , *Dynamic Int J Impact Engineering*, 2, pp 263-281, 1984.
- [12] S.S Hsu N Jones, Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminium alloy tubes *International journal of crashworthiness*, pp 195-217, 2004.
- [13] W. ABRAMOWICZ and N. JONES, DYNAMIC AXIAL CRUSHING OF CIRCULAR TUBES, *Int. J. Impact Engng.*, 2, pp 263-281, 1984.
- [14] Mamalis A G, Johnson W. THE QUASI-STATIC CRUMPLING OF THIN WALLED CIRCULAR CYLINDERS AND FRUSTA UNDER AXIAL COMPRESSION, *Int J Mech Sci*, 25:713–32, 1983.

- [15] Mamalis AG, Manolakos DE, Viegelahn GL, DEFORMATION CHARACTERISTICS OF CRASHWORTHY COMPONENTS, Viegelahn GL. Dusseldorf: Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 18, Nr. 62, 1989.
- [16] Mamalis, A. G., Viegelahn, G. L., Manolakos, D. E. & Johnson, EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO THE AXIAL PLASTIC COLLAPSE OF STEEL THIN-WALLED GROOVED TUBES, W. Int. J. Mech. Sci., 28, pp 219, 1986.
- [17] Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Saigal, S., Viegelahn, G. L. & Johnson, EXTENSIBLE PLASTIC COLLAPSE OF THIN-WALL FRUSTA AS ENERGY ABSORBERS, W. Int. J. Mech. Sci., 28, pp 219, 1986.
- [18] J. Marsolek, H.-G. Reimerdes, ENERGY ABSORPTION OF METALLIC CYLINDRICAL SHELLS WITH INDUCED NON-AXISYMMETRIC FOLDING PATTERNS, Received 24 October 2003.
- [19] N.K. Gupta, H. Abbas B, AXISYMMETRIC AXIAL CRUSHING OF THIN FRUSTA, Aligarh Muslim University, Volume 36, Issue 3, pp 169- 179, March 2000.
- [20] Olabi Edmund Morris, M.S.J. Hashmi, Metallic tube type energy absorbers: A synopsis A.G. Thin-walled structures, 45, pp 706-726, 2002.
- [21] T. WIERZBICKI and S. U. BHAT, A MOVING HINGE SOLUTION FOR AXISYMMETRIC CRUSHING OF TUBES , International Journal of Mechanical Sciences, Volume 28, Issue 3, pp 135-151, 1986.
- [22] P. K. Kostazos, Συστήματα απορρόφησης ενέργειας: Ανάλυση κατασκευών λεπτού πάχους από σύνθετα υλικά, Αθήνα 2013.
- [23] P. K. Kostazos, The effect of the implementation of circular holes as crush initiators to the crushing characteristics of mild steel square tubes: experimental and numerical simulation, 2009.