ماهنامه علمى پژوهشى





mme.modares.ac.ir

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.27.2

بررسی رفتار پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت مختلف تحت بارگذاریهای محوري شبه استاتیکی و ضربهای

رضا رجبيهفرد1، ابوالفضل درويزه2، مجيد على طاولى3، حامد صادقى1، مجيد مقدم4، ناصر نورزاده5

1 - دانشجوى دكترا، مهندسي مكانيك، دانشگاه گيلان، رشت

2 - استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرانزلی

3 - دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

4 - دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، داشگاه گیلان، رشت

5- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی احرار، رشت

* رشت، صندوق پستى tavoli@guilan.ac.ir ،3756-41635

چکیدہ	اطلاعات مقاله
جحیده در این مقاله، رفتار پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت ثابت و ضخامت متغیر تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی به صورت تجربی و تحت ضربه محوری به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت ثابت و ضخامت متغیر مورد بررسی، از جنس فولاد و دارای قطر داخلی، طول و وزن یکسان میباشند. پوستههای استوانهای به وسیله دستگاه سقوط آزاد جرم تحت ضربه قرار میگیرند و منحنیهای تجربی نیروی محوری بر حسب زمان با استفاده از لودسل به دست آورده میشوند، همچنین، برای شبیهسازی فرآیندهای ضربه از نرمآفزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. تاثیر توزیع ضخامت بر میزان کوتاهشدگی، انرژی جذب شده، شکل کمانش و منحنی نیروی محوری بر حسب زمان پوستههای استوانهای مورد بررسی قرار گرفته است. پی برده میشود که در بارگذاری محوری شبه استاتیکی، تغییر در توزیع ضخامت پوسته میتواند شکل کمانش را از کمانش ترکیبی (ترکیبی از موهای متقارن و الماسی) به کمانش متقار	اطلاعات مقاله مقاله پژوهشی کامل دریافت: 16 شهریور 1395 ارائه در سایت: 21 آذر 1395 <i>کلید واژگان:</i> توزیع ضخامت مختلف نبید محوری
پیشرونده انتقال دهد. همچنین در بارگذاری محوری ضربهای، تغییر در توزیع ضخامت پوسته میتواند تعداد چروکهای کامل شده را تحت تاثیر قرار دهد. بررسیها حاکی از آن است که در شرایط انرژی ضربه یکسان، پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر، با کوتاهشدگی بیشتر، انرژی تقریباً یکسانی را در مقایسه با پوسته استوانهای با توزیع ضخامت ثابت جذب مینماید و نیروهای میانگین و بیشینه کمتری را به سازه تحت حفاظت انتقال میدهد، لذا پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر جاذب انرژی بهتری است. مشخص میشود که تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی برقرار است.	جذب انرژی کمانش پیشرونده

An investigation into the behavior of cylindrical shells with different thickness distributions under axial quasi-static and impact loadings

Reza Rajabiehfard¹, Abolfazl Darvizeh², Majid Alitavoli^{1*}, Hamed Sadeghi¹, Majid Moghaddam¹, Naser Noorzadeh³

1- Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Bandar Anzali, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Ahrar Institute of Technology & Higher Education, Rasht, Iran.

*P.O.B. 3756-41635, Rasht, Iran, tavoli@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	Abstract
Original Research Paper Received 06 September 2016 Accepted 27 October 2016 Available Online 11 December 2016	In this paper, the behavior of cylindrical shells with uniform thickness and functionally graded thickness distributions subjected to axial quasi-static loading is investigated experimentally and subjected to axial impact is investigated experimentally and numerically. Steel cylindrical shells with uniform thickness and functionally graded thickness distributions have the same inner diameter, length and weight.
Keywords: Cylindrical shell Different thickness distribution Axial impact Energy absorption Progressive buckling	Cylindrical shells are impacted by the drop hammer apparatus and experimental axial force-time curves are obtained by using a load cell; in addition, impact simulations are done by Abaqus finite element software. The effect of thickness distributions on the shortening, energy absorption, buckling shape and axial force-time curve of cylindrical shells is investigated. It is found that for axial quasi-static loading, a change in thickness distribution of cylindrical shell is able to convert the buckling shape from mixed buckling (a combination of axisymmetric and diamond modes) to progressive buckling, also for axial impact loading, a change in thickness distribution of cylindrical shell can affect the number of complete folds. The studies also suggest that at the same impact energy, functionally graded thickness distribution cylindrical shell absorbs approximately the same energy with more shortening and transforms less mean load and peak load to under protected specimen, thus, functionally graded thickness distribution cylindrical shell is a better energy absorption specimen. Good agreement is found between the experimental and numerical results.

Please cite this article using:

1- مقدمه

پوستههای استوانهای جدار نازک به دلیل سبکی، ظرفیت جذب انرژی بالا، طول کوتاهشدگی بلند و نسبت جذب انرژی به وزن بالا، از جمله مهمترین سیستمهای جذب انرژی می باشند [1]. لذا، رفتار پلاستیک دینامیکی پوستههای استوانهای جدار نازک تحت ضربه محوری به عنوان یکی از مهمترین زمینهها در دو دهه گذشته مورد بررسی قرار گرفته است [2].

رفتار کمانش پلاستیک پوستههای استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت تحت ضربه محوری سرعت بالا، سرعت پایین و بارگذاری شبه استاتیکی به صورت تجربی [4,3]، عددی [10]، تجربی و عددی [11]، تئوری [12-14] و تئوری و تجربی [15] توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

با بررسی رفتار دینامیکی پوستههای استوانهای تحت ضربه محوری سرعت بالا از دیدگاه انتشار موج تنش [5]، مشخص می گردد که خواص ماده همراه با مشخصات هندسی، نوع کمانش پلاستیک دینامیکی یا کمانش پیشرونده دینامیکی را مشخص مینماید. همچنین پیبرده می شود که پوستههای استوانهای ساخته شده از ماده غیر حساس به نرخ کرنش، می توانند به صورت کمانش پلاستیک دینامیکی یا کمانش پیشرونده دینامیکی به ضربه محوری پاسخ دهند. در حالیکه پوستههای استوانهای ساخته شده از ماده حساس به نرخ کرنش فقط با کمانش پیشرونده دینامیکی به ضربه محوری پاسخ می-دهند. لازم به ذکر است که در کمانش پلاستیک دینامیکی، قبل از گسترش جابجاییهای شعاعی بزرگ، کل طول پوسته استوانهای دچار چروکیدگی می-گردد [6,5]، در حالیکه در کمانش پیشرونده دینامیکی، چروکها به صورت پشت سر هم ایجاد می شوند [6,5].

کمانش پلاستیک دینامیکی پوستههای استوانهای تحت ضربه محوری سرعت بالا توسط فلورنس و گودییر [3]، رجبیهفرد و همکاران [14,13] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقالات، نتایج کوتاهشدگی، زمان اعمال ضربه و شکل کمانش پوستههای استوانهای گزارش شده است.

ویژگیهای جذب انرژی پوستههای استوانهای در گستره وسیعی مورد مطالعه قرار گرفتهاند که برخی از آنها عبارتند از [9-15،11]، که تاثیرات خواص ماده، هندسه پوسته، شرایط مرزی و بارگذاری بر روی انرژی جذب شده [9]، جذب انرژی پوستههای استوانهای ساخته شده از فولاد نرم¹ و فولاد استحکام بالا² [10]، جذب انرژی پوستههای استوانهای با سطح مقطعهای مختلف (دایروی، مربعی، مستطیلی، شش گوشه، مثلثی، هرمی و مخروطی) [11] و جذب انرژی پوستههای استوانهای مربعی پر شده با فوم [15] مورد بررسی قرار گرفته است.

نیروی بیشینه اولیه، یکی از مهمترین پارامترها در بررسی رفتار پوسته-های استوانهای تحت بارگذاری محوری میباشد. بنابراین، پیشبینی مقدار نیروی بیشینه که در مراحل اولیه فرآیند ضربه اتفاق میافتد حائز اهمیت است. کارازووا و همکاران [75] دو رابطه تحلیلی برای تخمین نیروی بیشینه ارائه نمودند. به هر حال، این معادلات نمیتوانند نیروی بیشینه برای سرعت-های ضربه کمتر از 40 متر بر ثانیه را با دقت کافی پیشبینی نمایند. لذا، با بررسی تاثیر پارامترهای مختلف مانند خواص ماده، هندسه پوسته و سرعت ضربه بر روی نیروی بیشینه پوستههای استوانهای که تحت ضربه محوری قرار می گیرند، رابطهای تقریبی برای تخمین نیروی بیشینه در سرعتهای کمتر از 40 متر بر ثانیه توسط چن و یوشیجیما [8] ارائه شد.

به منظور بهبود دادن ویژگیهایی که برای پوستههای استوانهای تحت

بارگذاری محوری حائز اهمیت است، پوستههای استوانهای شیاردار³ [16-12]، پوستههای استوانهای موجدار⁴ [22-25]، پوستههای استوانه^ای با حفرههای دایروی [27,26]، پوستههای استوانهای با توزیع ضخامت متغیر⁵ [28-34]، پوستههای استوانهای مخروطی [35]، پوستههای استوانهای دو جداره تقویت شده با ورقههای داخلی [36] مورد استفاده قرار میگیرند.

پوستههای استوانهای شیاردار تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی توسط محققين مختلفي مورد بررسي قرار گرفته است [16,1-21]. اين پوستهها به منظور کنترل رفتار لهیدگی و جذب انرژی با تنظیم فاصله بین شیارها [1]، تبدیل پوستههای استوانهای جدار ضخیم به چندین پوسته استوانهای جدار نازک با طول کوتاهتر [19،16]، تبدیل پوسته استوانهای با طول بلند که بهصورت غیرمتقارن کمانش می یابد به چندین پوسته استوانهای با طول كوتاهتر كه به صورت متقارن كمانش مى يابد [17]، تبديل مود نامتقارن به مود کانسرتینا⁶در پوستههای استوانهای با طول بلندتر از طول بحرانی [17]، کنترل کردن و پایدار نمودن کل سازه با بخش جدار ضخیم پوسته استوانه ای [16]، شکل دادن چروکها درناحیه شیاردار [17,16] و بهبود دادن ویژگیهای جذب انرژی مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین تاثیر فوم پلیاریتِین ۲ دارای استحکام پایین و چگالی پایین بر جذب انرژی پوستههای استوانهای شیاردار به صورت تحلیلی و تجربی توسط درویزه و همکاران [20] مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی مشخص مینماید که شیارها از کمانش اویلری جلوگیری میکنند. همچنین این مطالعه مشخص مینماید که در حالت استفاده از فوم ذکر شده، جذب انرژی ویژه تقریباً دو برابر می گردد.

رفتار پوستههای استوانهای موجدار تحت بارگذاری محوری به صورت تجربی [23,22] و عددی [25,24] بررسی شده است. بارگذاری محوری شبه استاتیکی و ضربهای به ترتیب در [23,22] و [25,24] اعمال شده است. پوستههای استوانهای موجدار به دلایلی همچون ایجاد تغییر شکلهای پلاستیک در فواصل از پیش تعیین شده [22]، بهبود منحنی نیرو جابجایی از لحاظ یکنواختی [23,22]، کاهش نیروی بیشینه اولیه [24,23]، بهینه نمودن ظرفیت جذب انرژی [22]، بهبود خواص جذب انرژی [24] و پیشبینی و کنترل مود شکست [23] مورد استفاده قرار می گیرند.

پوستههای استوانهای از جنس آلومینیوم و فولاد نرم با حفرههای دایروی تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی [27,26] و بارگذاری محوری ضربهای [27] مورد بررسی قرار گرفتهاند که بارگذاری ضربهای توسط دستگاه سقوط آزاد جرم⁸ اعمال شده است. وجود این حفرههای دایروی، مود کمانش پوسته-های استوانهای را تغییر میدهد که احتمال وقوع کمانش اویلری⁹ حتی در پوستههای استوانهای نسبتاً بلندتر نیز کاهش مییابد [26] و همچنین مشخص می گردد که عملکرد مطلوب میتواند با تنظیم تعداد ردیف حفرهها، تعداد حفرهها در هر ردیف و قطر هر حفره حاصل گردد [27].

¹⁰ پوستههای استوانهای دایروی [29,28]، مربعی [30] و دایروی مخروطی ¹⁰ [31] با توزیع ضخامت متغیر در امتداد طولی، پوستههای استوانهای مربعی [32] و چند سلولی¹¹ [33] با توزیع ضخامت متغیر در سطح مقطع و پوسته

¹ Mild steel

² High strength steel

³ Tubes with circumferential grooves

⁴ Corrugated tubes ⁵ Functionally graded thickness tubes

^oConcertina

⁷ Polyurethane foam

⁸ Drop hammer

⁹ Euler buckling

⁰ Tapered circular

¹¹ Multi-cell

استوانهای مربعی با توزیع فوم به صورت متغیر در امتداد عرضی و توزیع ضخامت متغیر در امتداد عرضی [34] به منظور بهبود جذب انرژی و دیگر پارامترهای لهیدگی مورد مطالعه قرار گرفتهاند.

پاسخ پوستههای استوانهای هنگامی که تحتبار گذاری محوری شبه-استاتیکی و دینامیکی قرار گرفتهاند در برخی مقالات از جمله [37,4-39] مقایسه شدهاند. نتایج تجربی پوستههای استوانهای دایروی از جنس فولاد تحت بارگذاری محوری استاتیکی و دینامیکی توسط آبراموویچ و جونز به دست آورده شدهاند [4] و با نتایج حاصل از روابط تئوری و تجربی مقایسه گردیدهاند. این مطالعه بیانگر آن است که با در نظر گرفتن طول لهیدگی موثر و اعمال نرخ کرنش در پوستههای استوانهای که به وسیله دستگاه سقوط آزاد جرم تحت ضربه قرار می گیرند، نتایج حاصل از تئوری اصلاح شده الکساندر برای تغییر شکلهای متقارن یا کانسرتینا تطابق نزدیکی با یافتههای تجربی ایجاد مینماید. انتقال از خمش¹ به کمانش پیشرونده برای پوستههای استوانهای از جنس فولاد که به صورت استاتیکی و دینامیکی تحت بارگذاری قرار می گیرند، توسط آبراموویچ و جونز [37] مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه تجربی و عددی پوستههای استوانهای از جنس آلومینیوم تحت بارگذاری محوری استاتیکی و دینامیکی به وسیله گالیب و لیمام [38] مشخص مینماید که سطح نیروی دینامیکی به صورت قابل ملاحظهای بالاتر از سطح نیرو در بارگذاری استاتیکی است. ولمورگان و مورالیکانان ویژگیهای جذب انرژی پوستههای استوانهای با سطح مقطعهای مختلف تحت بارگذاری محوری استاتیکی و دینامیکی را مورد بررسی قرار دادهاند [39]. مشخص می-گردد که پوستههای استوانهای، انرژی بیشتری را در بار گذاری ضربهای نسبت به بارگذاری استاتیکی جذب مینمایند.

در کارهای گذشته، رفتار پوستههای استوانهای با توزیع ضخامت متغیر تحت بارگذاری محوری با نرخ کرنش پایین (بارگذاری شبه استاتیکی) و بارگذاری محوری با نرخ متوسط (بارگذاری ضربهای) با یکدیگر مقایسه نشده است. لذا در این مقاله، رفتار پوستههای استوانهای از جنس فولاد با توزیعهای ضخامت ثابت و ضخامت متغیر تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی به صورت تجربی و تحت ضربه محوری به وسیله دستگاه سقوط آزاد جرم به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تجربی پوستههای استوانهای با توزیع ضخامت یکسان تحت بارگذاری محوری با نرخ کرنش پایین (بارگذاری شبه استاتیکی) و نرخ کرنش متوسط (بارگذاری ضربهای) با یکدیگر مقایسه گردیدهاند. همچنین، در هر کدام از بارگذاریهای محوری شبه استاتیکی و دینامیکی، نتایج مربوط به پوسته های استوانه ای با توزیع های ضخامت ثابت و ضخامت متغیر مقایسه گردیدهاند. به منظور قابل مقایسه گردیدن نتایج مربوط به یوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت ثابت و ضخامت متغیر، این پوستهها با قطر داخلی، طول و وزن یکسان برای آزمایش تجربی آماده شدهاند. برای شبیهسازی فرآیندهای ضربه از نرمافزار المان محدود آباکوس استفاده شده است و منحنیهای تجربی نیرو محوری بر حسب زمان با استفاده از لودسل² به دست آورده شدهاند.

2- بررسی تجربی

ضخامت، قطر داخلی و طول هر یک از پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر در "شکل 1" نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که "U.Th" و "FG.Th" به ترتیب بیانگر پوسته استوانهای

با توزیع ضخامت یکنواخت و پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر می-باشد. همچنین، جرم تقریبی تمامی پوستههای استوانهای استفاده شده 68 یا 70 گرم میباشد. قابل ذکر است که پوستههای مذکور از جنس فولاد نرم میباشند که در ابتدا دارای ضخامت 3 میلیمتر بوده که با روتراشی به ابعاد مورد نظر رسیدهاند.

جهت بررسی تجربی رفتار پوستههای استوانهای تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی، از دستگاه تست فشار با سرعت بارگذاری 5 میلیمتر بر دقیقه و تحت ضربه محوری، از دستگاه سقوط آزاد جرم در موسسه آموزش عالی احرار رشت استفاده شده است. نمای کلی از دستگاه سقوط آزاد جرم مطابق "شکل 2" میباشد.

زمانیکه بارگذاری شبه استاتیکی صورت می پذیرد، نیرو در انتهای غیر بارگذاری شده پوسته و زمانیکه تست ضربه انجام می گیرد، نیرو در انتهای غیر تحت ضربه³ پوسته به وسیله لودسِل اندازه گیری می شود. بدین صورت که تغییر ولتاژ ایجاد شده توسط نیروی اعمال شده به وسیله کرنش سنجهای لودسِل اندازه گیری شده و ولتاژ بر حسب زمان اندازه گیری شده توسط یک تقویت کننده⁴ تقویت می گردد و سپس توسط اسیلوسکوپ⁵ ثبت می شود. در



Fig. 1 Thickness, inner diameter and length of cylindrical shells with (1)uniform thickness and (2)functionally graded thickness distributions (All dimensions are in millimeters (mm))

شکل 1 ضخامت، قطر داخلی و طول پوستههای استوانهای با توزیعهای (1)ضخامت یکنواخت و (2)ضخامت متغیر (همه ابعاد بر حسب میلیمتر بیان شدهاند)



g. 2 A total view of the drop nammer apparatus **شکل 2** نمای کلی از دستگاه سقوط آزاد جرم

¹ Initial global bending

² Load cell

³ Un-impacted end

⁴ Amplifier

⁵Oscilloscope

نهایت، ولتاژ بر حسب زمان با استفاده از ضریب تبدیل 1mv=63.183N به نیرو بر حسب زمان تبدیل می گردد. شکل شماتیک تجهیزات اندازه گیری نیرو برای دستگاه سقوط آزاد جرم در "شکل 3" نمایش داده شده است.

در دستگاه سقوط آزاد جرم، وزنه به جرم 55 کیلوگرم از ارتفاع معینی رها میشود و با برخورد محوری به پوسته استوانهای ساکن، پوسته را تحت ضربه قرار میدهد. شایان ذکر است که پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر از انتهای با سطح مقطع کوچکتر تحت ضربه قرار میگیرد. در "شکل 4" نمایی از پوسته استوانهای ساکن عمود بر سندان ضربه نمایش داده شده است. شایان ذکر است که جنس جرم برخوردکننده، فولاد VCN150 (AISI4340) سختکاری شده انتخاب شده است تا در مقابل ضربه مقاومت داشته باشد. همچنین قابل ذکر است که جهت به دست آوردن سرعت در لحظه برخورد از سرعتسنج لیزری استفاده شده است.

3- بررسی عددی

بررسی عددی پدیده ضربه محوری برای پوستههای استوانهای با استفاده از



Fig. 3 Schematic diagram of the drop hammer

شکل 3 شکل شماتیک دستگاه سقوط آزاد جرم



Fig 4. Stationary cylindrical shell on the load cell شکل 4 پوسته استوانهای بر روی لودسل

نرمافزار المان محدود آباکوس انجام شده است. به منظور شبیه سازی فرآیند ضربه، پوسته به همراه پرتابه و یک صفحه صلب مدل گردیدهاند و سپس پوسته در بخش چیدمان قطعات، میان صفحه صلب و پرتابه قرار میگیرد. از تحلیل دینامیکی به روش صریح¹ بر روی نمونهها استفاده میگردد. پوسته و پرتابه به صورت اجسام شکلپذیر² و جامد³ شبیه سازی گردیدهاند، در چیدمان قطعات، با استفاده از قید⁴ ایجاد شده، پرتابه به عنوان جسم صلب⁵ در نظر گرفته میشود. نوع المان به کار رفته SDR و اندازه دانه بندی مشها به منظور استقلال حل عددی از مشیندی و همگرا شدن جوابها، 2000 در پوسته با ضخامت ثابت، 67680 و برای پوسته با ضخامت متغیر، 78883 عدد بدست میآید. تماس بین کلیه سطوح به صورت تماس عمومی⁶ در نظر گرفته شده است. لحظه برخورد پرتابه به پوسته شبیه سازی شده در "شکل گرفته شده است. است.

4- نتايج و بحث

در ابتدا، شکلهای کمانش و منحنیهای نیروی محوری بر حسب زمان تجربی پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت بار محوری شبه استاتیکی ارائه گردیده است و سپس کوتاهشدگیها، شکلهای کمانش و منحنیهای نیروی محوری بر حسب زمان پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت بار محوری ضربهای به صورت تجربی و عددی در سرعتهای مختلف ارائه شده است. مقایسهای بین نتایج شکل کمانش و نیروی محوری یوستههای استوانهای با توزيعهای ضخامت مختلف زمانيكه تحت بارگذاریهای محوری شبه استاتیکی و ضربهای قرار می گیرند، صورت پذیرفته است. نتایج مدل عددی به کمک نتایج تجربی صحهسنجی می گردند. سپس نتایج عددی جذب انرژی برای پوسته های استوانه ای تحت ضربه محوری ارائه می گردند. کلیه نمونه های مورد استفاده در آزمایش از جنس فولاد می باشند. به منظور تعیین خواص مكانيكى پوستههاى استوانهاى فولادى، آزمايش كشش طبق استاندارد ASTM E8 با استفاده از دستگاه تست کشش سنتام⁷ در دانشگاه آزاد اسلامی مرکز لشت نشاء انجام شده و منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش پلاستیک حقیقی ماده در "شکل 6" نمایش داده شده است. چگالی، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون برای پوستههای فولادی به ترتیب 7939 کیلوگرم بر متر مکعب، 200 گیگاپاسکال و 0.3 میباشند. با توجه به حساس بودن رفتار پلاستیک مواد فولادی به نرخ بارگذاری، میتوان به کمک رابطه کوپر-سیموند⁸، رابطه (1)، تنش تسلیم دینامیکی فولاد را به ازای هر نرخ کرنش دلخواه بدست آورد. ضرایب ثابت D و q در رابطه کوپر -سیموند برای فولاد به ترتيب 6844 و 3.91 مىباشند [40]. سپس مىتوان از تنش تسليم دینامیکی بدست آمده در شبیهسازی فرآیند ضربه دینامیکی در نرم افزار آباكوس استفاده نمود.

$$\frac{Y_d}{Y_s} = \mathbf{1} + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \tag{1}$$

- ³ Solid
- ⁴ Constraint
- ⁵ Rigid body ⁶ General contact
- ⁷ SANTAM
- 8 Cowper-Symond



Fig. 5 a view of longitudinal section in the moment that stationary tube is impacted by striking mass in Abaqus

شکل 5 نمایی برش خورده از مقطع طولی پوسته استوانهای ساکن در لحظه برخورد پرتابه در آباکوس



شکل 6 منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش پلاستیک حقیقی

1-4- شکلهای کمانش و منحنیهای تجربی نیروی محوری بر حسب زمان پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت بار محوری شبه استاتیکی

شکلهای کمانش و منحنیهای تجربی نیروی محوری بر حسب زمان پوسته-های استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت بار محوری شبه استاتیکی مطابق "شکل 7" ارائه گردیده است. با توجه به شکل-های کمانش ارائه شده در "شکل 7"، مشخص می گردد که پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت تحت بارمحوری شبه استاتیکی به صورت ترکیبی (ترکیبی از مودهای متقارن و الماسی) دچار کمانش می گردد. با تغییر توزیع ضخامت پوسته از حالت یکنواخت به توزیع ضخامت متغیر، شکل کمانش از حالت ترکیبی به حالت کمانش مقارن پیشرونده انتقال پیدا می میاید.

با توجه به روابط ارائه شده توسط الکساندر [41]، آبراموویچ و جونز [42] و ویرزبیکی و همکارانش [43] برای طول چروک، مشخص است که طول چروک با حاصلضرب شعاع در ضخامت پوسته رابطه مستقیم دارد، بدین صورت که هر چه حاصلضرب شعاع در ضخامت پوسته انرگتر باشد، طول چروک تشکیل شده بزرگتر خواهد بود. در مورد پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر، که مقدار حاصلضرب شعاع در ضخامت پوسته در امتداد طول پوسته افزایش می یابد، انتظار می ود که طول چروکهای تشکیل شده در امتداد طول پوسته افزایش یابد. لازم به ذکر است که طول چروک بزرگتر منجر به جابه جایی شعاعی بزرگتر چروک می گردد. با مراجعه به "شکل 7"، مشخص می گردد که جابه جایی شعاعی (طول چروک) سه چروک تشکیل شده برای پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر، در امتداد طول پوسته افزایش یافته است.

همچنين با توجه به روابط ارائه شده توسط الكساندر [41]، آبراموويچ و

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1395، دورہ 16، شمارہ 12

جونز [44] برای نیروی میانگین لازم برای تشکیل چروک در پوستههای استوانهای تحت بار محوری شبه استاتیکی، نیروی میانگین لازم برای تشکیل چروک در پوستههای استوانهای با شعاع و ضخامت پوسته رابطه مستقیم دارد. پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت دارای شعاع و ضخامت ثابت در امتداد طول پوسته میباشد. لذا انتظار میرود که نیروی محوری در حین تشکیل چروک در بارگذاری محوری شبه استاتیکی پوسته استوانهای با توزیع ضخامت ثابت، روند نسبتاً یکنواختی را طی نماید که با توجه به منحنی نیروی محوری بر حسب زمان ارائه شده در "شکل 7" چنین است. همچنان که قبلاً نیز در مورد پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر ذکر گردید، مقادیر شعاع و ضخامت پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر ذکر گردید، نیروی محوری بر حسب زمان ارائه شده در "شکل 7" چنین است. همچنان مقادیر شعاع و ضخامت پوسته در امتداد طول پوسته افزایش مییابند، لذا نظرار این است که نیرو روند صعودی داشته باشد. بدین صورت که نیروی میانگین لازم برای تشکیل چروک اول کمتر از نیروی میانگین لازم برای تشکیل چروک دوم و نیروی میانگین لازم برای تشکیل چروک دوم کمتر از نیروی میانگین لازم برای تشکیل چروک سوم باشد که با توجه به منحنی نیروی میانگین لازم برای تشکیل چروک سوم باشد که با توجه به منحنی نیروی میانگین لازم برای تشکیل چروک دوم کمتر از نیروی میانگین ایزم برای تشکیل چروک دوم کمتر از نیروی میوری بر حسب زمان ارائه شده در "شکل 7" چنین است.

4-2- نتایج کوتاه شدگی و شکل کمانش پوسته های استوانه ای با توزیع های ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت بار محوری ضربه-ای

کوتاهشدگیها و شکلهای کمانش تجربی و عددی برای پوستههای استوانهای ذکر شده در سرعتهای مختلف به ترتیب در جدول 1 و "شکل 8" و "شکل 9" ارائه گردیدهاند. با مقایسه نتایج تجربی و عددی کوتاهشدگی از جدول 1 با یکدیگر و با مقایسه شکلهای کمانش تجربی و عددی از "شکلهای 8 و 9" با یکدیگر، مشخص می گردد که تطابق خوبی بین آنها برقرار است.

4-2-1- نتایج کوتاهشدگی پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت بار محوری ضربهای

همچنان که از نتایج ارائه شده در جدول 1 و "شکلهای 8 و 9" مشخص است، برای هر کدام از پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر، میزان کوتاهشدگی، با افزایش سرعت افزایش مییابد.



Fig. 7 Experimental buckling shapes and axial force-time curves for cylindrical shells with (1)uniform thickness and (2)functionally graded thickness distributions under axial quasi-static loading شکل 7 شکلهای کمانش و منحنیهای نیروی محوری بر حسب زمان تجربی پوستههای استوانهای با توزیعهای (1)ضخامت یکنواخت و (2) ضخامت متغیر تحت بار محوری شبه استاتیکی

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-01

273

این امر منطبق با این حقیقت است که برای پوسته های استوانهای تحت ضربه محوری، سرعت ضربه محوری بزرگتر منجر به کوتاه شدگی بزرگتری می گردد. با بررسی بیشتر نتایج کوتاه شدگی ارائه شده در جدول 1 برای پوسته استوانه-ای با توزیع ضخامت متغیر پیبرده می شود که مقادیر کوتاه شدگی برای دو سرعت 4.76 و 5.22 متر بر ثانيه تقريباً ثابت ميماند. دليل آن را با توجه به شکلهای کمانش ارائه شده در "شکل 9" میتوان توضیح داد. از این شکل مشخص است، انرژی اضافهتر سرعت 5.22 متر بر ثانیه نسبت به سرعت 4.76 متر بر ثانیه با افزایش جابهجاییهای شعاعی قسمت چروک نشده پوسته استوانهای جذب می گردد. با مقایسه مقادیر کوتاه شدگی مربوط به پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر با مقادیر کوتاه شدگی پوسته استوانهای با توزيع ضخامت يكنواخت، پی برده میشود كه پوسته استوانهای با توزيع ضخامت متغیر در تمامی سرعتها، دارای مقادیر کوتاه شدگی بزرگتری است. در ادامه، دلیل این امر به طور نمونه برای سرعت 3.41 متر بر ثانیه توضیح داده می شود. لازم به ذکر است که در سرعت مذکور، چروک ها در 15 میلی-متر از طول قسمت بالای پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر تشکیل می گردد. ضخامت معادل و شعاع میانی معادل 15 میلیمتر از طول قسمت بالای پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر، به ترتیب 0.975 و 14.89 میلیمتر است که با توجه به رابطه ویرزبیکی و همکارانش [43]، طول چروک در این قسمت 7.06 میلیمتر تعیین می شود. در حالیکه طول چروک پوسته استوانهای با توزیع ضخامت ثابت با توجه به رابطه ویرزبیکی و همکارانش [43]، 8.2 میلیمتر است. لذا مشخص می گردد که طول چروکهای تشکیل شده در 15 میلیمتر از طول قسمت بالای پوسته استوانه ای با توزیع ضخامت متغیر، تفاوت چندانی با طول چروکهای تشکیل شده در پوسته استوانهای با توزيع ضخامت يكنواخت ندارد. از طرفي، اينرسي شعاعي كمتر (جداره نازکتر منجر به اینرسی شعاعی کمتر میشود) پوستههای استوانهای با توزیع ضخامت متغیر در 15 میلیمتر از طول قسمت بالای پوسته مذکور در مقایسه با پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت، منجر به توسعه راحتتر چروکها در این پوسته می گردد که این امر منجر به کوتاه شدگی بیشتر پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر در مقایسه با پوسته استوانهای با توزيع ضخامت يكنواخت تحت ضربه محورى 3.41 متر بر ثانيه مى شود. همچنان که از "شکل 9" مشخص است، برای پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر تحت ضربه محوری با سرعت 3.41 متر بر ثانیه، دو چروک شکل گرفته که یکی از آنها کامل شده است. در حالیکه اینرسی شعاعی بالا مانع از توسعه چروکها در پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت تحت ضربه محوری با سرعت 3.41 متر بر ثانیه شده است. همچنان که از "شکل 9" مشخص است، دو چروک خیلی ملایم در نزدیکی دو انتهای پوسته مذکور ایجاد شده است.

2-2-4- شکلهای کمانش پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت ضربه محوری

همچنان که قبلاً نیز گفته شد، شکلهای کمانش تجربی و عددی پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت ضربه محوری با سرعتهای مختلف به ترتیب در "شکلهای 8 و 9" نمایش داده شده است. با بررسی "شکل 8" مشخص می گردد که شکلهای کمانش ایجاد شده برای پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت در سرعتهای 3.41 و 4.16 متر بر ثانیه، کمانش پیشرونده دینامیکی با یک چروک غالب می باشد که در سرعتهای 4.76 و 5.22 متر بر ثانیه، این چروک کامل شده است.

همچنین با بررسی "شکل9" مشخص میشود که برای پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر، در تمامی سرعتها کمانش پیشرونده دینامیکی ایجاد می گردد، بدین صورت که در سرعت 2.52 متر بر ثانیه کمانش پیشرونده با یک چروک و در سایر سرعتها کمانش پیشرونده با دو چروک از انتهای با سطح مقطع کوچکتر ایجاد می گردد. مطابق با شکلهای کمانش ارائه شده در "شکل 10" مشخص می گردد که با تغییر هندسه پوسته و ثابت ماندن دیگر پارامترها، تعداد چروکهای کامل شده تحت تاثیر قرار می گیرد. همچنین در تمامی سرعتها، پوسته با توزیع ضخامت متغیر نسبت به پوسته با توزیع ضخامت یکنواخت، یک چروک کامل شده در سرعتهای 2.52 متر بر ثانیه متر بر ثانیه و دو چروک کامل شده در سرعتهای 4.56 و 2.52 متر بر ثانیه می باشد. همچنین، پوسته با توزیع ضخامت یکنواخت دارای یک چروک کامل می باشد. همچنین، پوسته با توزیع ضخامت یکنواخت دارای یک چروک کامل می باشد. همچنین، پوسته با توزیع ضخامت یکنواخت دارای یک چروک کامل می باشد. در سرعتهای 4.76 و 2.52 متر بر ثانیه است. در حالیکه در سرعتهای دیگر دارای هیچ چروک کامل شده ایت. در حالیکه در سرعتهای

3-4- منحنیهای نیروی محوری بر حسب زمان پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت ثابت و ضخامت متغیر تحت ضربه محوری

منحنیهای نیروی محوری تجربی بر حسب زمان و عددی پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت ضربه محوری با سرعتهای مختلف در "شکل 10" نمایش داده شده است که در تمامی موارد انطباق خوبی بین نتایج تجربی و عددی برقرار است. همچنین، پی برده میشود که در تمامی سرعتها نیروی بیشینه اولیه برای پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت ثابت و متغیر در بازه زمانی 0 تا 2 میلی ثانیه اتفاق میافتد که این نیروی بیشینه باعث تشکیل یکی از چروکهای شکل-های کمانش می گردد.

با توجه به رابطه تحلیلی ارائه شده در [45] برای تخمین نیروی میانگین لازم برای لهیدگی محوری پوستههای استوانهای تحت ضربه محوری، نیروی میانگین با حاصلضرب ضخامت به توان 1.5 در شعاع میانی به توان 0.5 رابطه مستقیم دارد. بدین صورت که با افزایش مقدار حاصلضرب ضخامت به توان 1.5 در شعاع میانی به توان 0.5، نیروی میانگین بیشتری برای لهیدگی محوری پوسته های استوانه ای تحت ضربه محوری لازم می شود. همچنین با توجه به روابط تحلیلی ارائه شده توسط کارازووا و همکاران [7,5] برای تخمین نیروی بیشینه اولیه، مشخص میگردد که نیروی بیشینه با حاصلضرب ضخامت در شعاع میانی رابطه مستقیم دارد. بدین صورت که با افزایش مقدار حاصلضرب ضخامت در شعاع میانی، مقدار نیروی بیشنه افزایش مى يابد. لازم به ذكر است كه روابط تحليلى ارائه شده توسط كارازووا و همکاران [7,5] برای تخمین نیروی بیشینه، برای سرعتهای کمتر از 40 متر بر ثانیه دارای دقت کافی نمی باشد، ولی به هر حال روند تغییرات نیروی بیشینه را برای سرعتهای کمتر از 40 متر بر ثانیه به درستی پیشبینی می-نماید. با مراجعه به نتایج کوتاه شدگی ارائه شده در جدول 1، مشخص است که تغییر شکل پلاستیک در 20 میلیمتر از طول قسمت بالای پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر اتفاق میافتد که ضخامت و شعاع میانی معادل این قسمت بهترتیب 1.03 و 14.92 میلی متر است، در حالیکه ضخامت و شعاع مياني پوسته با توزيع ضخامت يكنواخت به ترتيب 1.3 و15.05 ميلي-متر مىباشد. لذا ضخامت و شعاع ميانى پوسته با توزيع ضخامت يكنواخت از ضخامت و شعاع میانی پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر بیشتر است. پس انتظار می رود که نیروهای میانگین و بیشینه پوسته استوانهای با



Fig. 10 Experimental buckling shapes together with force-time curve at different velocities for cylindrical shells with uniform thickness and functionally graded thickness distributions subjected to axial impact **10** شكل 10 شكل 10 شكل همراه با منحنىهاى نيروى محورى تجربى بر حسب زمان در سرعتهاى مختلف براى پوستههاى استوانهاى با توزيعهاى ضخامت متغير و ضخامت ثابت تحت ضربه محورى

است، نیروهای میانگین و بیشینه پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت در تمامی سرعتها بیشتر از نیروهای میانگین و بیشینه پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت در تمامی سرعتها بیشتر از نیروهای میانگین و بیشینه پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر است.

منحنیهای نیروی محوری بر حسب زمان پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر در "شکل 11" ارائه گردیده است و همچنین شکلهای کمانش عددی این پوسته استوانهها در سرعت 5.22 متر بر ثانیه در "شکل 12" ارائه گردیده است. همانطور که از این شکلها
 Table 1 Shortening results for cylindrical shells with uniform thickness

 and functionally graded thickness distributions

(mm) کوتاہ شدگی				
خامت متغير	، ثابت پوسته با ضخامت متغير		پوسته با ض	سرعت (m/s)
تجربى	عددى	تجربى	عددى	(11/8)
7.8	7.22	1.8	3.19	2.52
13	11.39	4.4	5.18	3.41
15.5	14.99	9.8	10.27	4.16
20.1	18.31	13.4	14.60	4.76
20.2	20.74	16.2	17.16	5.22



Fig. 8 Experimental and numerical buckling shapes of cylindrical shell with uniform thickness distribution subjected to axial impact with different velocities

شکل 8 شکلهای کمانش تجربی و عددی پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت تحت ضربه محوری با سرعتهای مختلف



Fig. 9 Experimental and numerical buckling shapes of cylindrical shell with functionally graded thickness distribution subjected to axial impact with different velocities

شکل 9 شکلهای کمانش تجربی و عددی پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر تحت ضربه محوری با سرعتهای مختلف

توزیع ضخامت یکنواخت بیشتر از نیروهای میانگین و بیشینه پوسته استوانه-ای با توزیع ضخامت متغیر تحت انرژی ضربه محوری یکسان باشد.

منحنیهای نیروی محوری بر حسب زمان تجربی برای پوستههای استوانهای تحت ضربه محوری در سرعتهای یکسان و توزیع ضخامتهای مختلف در "شکل 10" ارائه گردیده است. همچنان که از این شکل مشخص



Fig. 11 Comparing of the experimental and numerical axial force-time curves for cylindrical shells with (1) uniform thickness and (2)functionally graded thickness distributions at different velocities

شکل 11 مقایسه منحنیهای نیروی محوری بر حسب زمان تجربی و عددی برای پوستههای استوانهای با توزیعهای (1)ضخامت یکنواخت و (2) ضخامت متغیر در سرعتهای مختلف

> مشخص است، هر دو چروک پوسته با ضخامت ثابت در بازه 0 تا 0.5 میلی -ثانیه ایجاد گردیده است. این دو چروک در بازه زمانی 0.5 میلیثانیه تا انتهای

فرآیند ضربه رشد مینمایند که یکی از دو چروک به حد نهایی خود رسیده و تبدیل به چروکی کامل میگردد.

همچنین با توجه به "شکل 12"، یکی از دو چروک در بازه زمانی 0 تا 0.68 میلی ثانیه ایجاد گردیده است که این چروک در بازه زمانی 0.68 تا 1.7 میلی ثانیه تقریباً به حد نهایی خود می سد. از 1.7 میلی ثانیه تا انتهای فرآیند ضربه نیز چروک دوم شکل می گیرد. با مراجعه به منحنی نیروی محوری بر حسب زمان ارائه شده در "شکل 11" مشخص می گردد که نیروی میانگین تا زمان 1.7 میلی ثانیه کمتر از نیروی میانگین متعلق به بازه زمانی 1.7 میلی ثانیه تا انتهای فرآیند ضربه است. این امر به این دلیل است که چروک دوم در مقایسه با چروک اول، در قسمتی از پوسته با ضخامت و شعاعی میانی بزرگتر توسعه می یابد.

4-4- مقایسه شکلهای کمانش و منحنیهای نیروی محوری تجربی بر حسب زمان پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغير تحت بار محوري شبه استاتيكي و بار محوري ضربهاي با مقایسه شکلهای کمانش تجربی یوستههای استوانهای با توزیع ضخامت ثابت تحت بار محوری شبه استاتیکی و بار محوری ضربهای از "شکلهای 7 و 8"، مشخص می گردد که پوسته استوانهای مذکور با کمانش ترکیبی به بار محوری شبه استاتیکی پاسخ میدهد، درحالیکه این پوسته با کمانش متقارن پیشرونده دینامیکی به ضربه محوری اعمالی پاسخ میدهد. با مقایسه شکل-های کمانش تجربی پوستههای استوانهای با توزیع ضخامت متغیر تحت بار محوری شبه استاتیکی و بار محوری ضربه ای از "شکل های 7 و 9"، مشخص می گردد که پوسته مذکور به هر دو نوع بار محوری اعمالی با کمانش متقارن ییشرونده یاسخ می دهد. با توجه به "شکل های 7 و 9"، اینگونه به نظر می-رسد که طول دو چروک کامل شده برای بار ضربه محوری اعمالی با سرعت 5.22 متر بر ثانیه، با طول دو چروک (چروکهای اول و دوم از بالا) تشکیل شده برای بار محوری شبه استاتیکی اعمالی یکسان باشد. به عبارت دیگر می توان گفت که طول چروکهای تشکیل شده در قسمتهای یکسان از پوسته، مستقل از نرخ کرنش بوده و با یکدیگر برابرند که این امر در تطابق با روابط ارائه شده توسط الكساندر [41]، آبراموويچ و جونز [42] و ويرزبيكي و همكارانش [43] قرار دارد.



Fig. 12 Numerical buckling shapes of cylindrical shells with (1)uniform thickness and (2) functionally graded thickness distributions under axial impact at velocity 5.22 (m/s)

شکل 12 شکلهای کمانش عددی پوستههای استوانهای با توزیعهای (1)ضخامت یکنواخت و (2) ضخامت متغیر تحت ضربه محوری در سرعت 5.22 متر بر ثانیه

با توجه به این امر که اثر نرخ کرنش در فرآیند ضربه منجر به سفت تر شدن ماده می گردد، انتظار می رود که سطح نیروی ایجاد شده در فرآیند ضربه در مقایسه با بارگذاری شبه استاتیکی، بالاتر باشد. با توجه به "شکل 13"، پی برده می شود که سطح نیروهای محوری در پوستههای استوانهای تحت بار ضربهای محوری، بالاتر از سطح نیروهای محوری در پوستههای استوانهای تحت بار محوری شبه استاتیکی است.

5-4- جذب انرژی عددی پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت ضربه محوری

نتایج عددی جذب انرژی پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر در سرعتهای مختلف مطابق جدول 2 ارائه شده است. همچنین نمودار جذب انرژی بر حسب کوتاهشدگی عددی در سرعت-های یکسان و توزیع ضخامتهای مختلف مطابق "شکل 14" ارائه شده است و نمودار جذب انرژی بر حسب کوتاهشدگی عددی برای پوستههای استوانهای با توزیع ضخامت یکسان در سرعتهای مختلف در "شکل 15" نمایش داده شده است. مطابق نتایج ارائه شده در جدول 2 مشخص میگردد که جذب انرژی پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر در مقایسه با جذب انرژی پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر در مقایسه با جذب انرژی انرژی پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت در تمامی سرعتها تقریباً یکسان است. بعلاوه با توجه به نتایج جدول 2 و نمودار ارائه شده در "شکل بلا"، جذب انرژی هر دو پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر با افزایش سرعت افزایش مییابند که این امر از ابتدا نیز قابل پیشبینی بود.

با توجه به نمودارهای ارائه شده در "شکل 15" پی برده میشود که با افزایش سرعت در توزیع ضخامت یکسان، شیب منحنی جذب انرژی تقریباً ثابت میماند. به عبارت دیگر، رفتار منحنی جذب انرژی در توزیع ضخامت یکسان و سرعتهای مختلف تقریباً یکسان است.



Fig. 13 Comparing of the experimental axial force-time curves of cylindrical shells with (1) uniform thickness and (2) functionally graded thickness distributions subjected to axial quasi-static and impact loadings at velocity 5.22(m/s)

شکل 13 مقایسه منحنیهای نیروی محوری تجربی بر حسب زمان برای پوستههای استوانهای با توزیعهای (1)ضخامت یکنواخت و (2) ضخامت متغیر تحت بارگذاری-های محوری شبه استاتیکی و ضربه در سرعت 5.22 متر بر ثانیه



Fig. 14 Energy absorption versus shortening curves for same velocity and different thickness distribution و شكل 14 نمودارهاى جذب انرژى بر حسب كوتاهشدگى براى سرعت يكسان و توزيع ضخامت مختلف

جنبشی اولیه و جذب انرژی عددی پوستههای استوانهای با توزیعهای

ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت ضربه محوری با سرعتهای مختلف **Table 2** Impact energy and numerical energy absorption for cylindrical shells with uniform thickness and functionally graded thickness distributions under axial impact at different velocities

انرژی جذب شده(J)			
پوسته با	پوسته با	انرژی برخورد(J)	سرعت(m/s)
ضخامت متغير	ضخامت ثابت		
173.20	171.23	174.62	2.52
317.92	317.24	319.71	3.41
473.40	473.32	475.82	4.16
620.56	619.63	623.02	4.76
746.03	747.13	749.26	5.22

با دقت در "شکل 14" پی برده میشود که پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر انرژی تقریباً یکسانی را در کوتاهشدگی بیشتر نسبت به پوسته استوانه-ای با توزیع ضخامت یکنواخت جذب مینماید، همچنین با توجه به "شکل 10" قبلاً گفته شد که نیروهای میانگین و بیشینه پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر در مقایسه با پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت کمتر است. لذا، در حالت کلی میشود گفت که پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر در مقایسه با پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت ضخامت متغیر در مقایسه با پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت با کمتر است. لذا، در حالت کلی میشود گفت که پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر در مقایسه با پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت با کوتاهشدگی بیشتر، انرژی تقریباً یکسانی را جذب مینماید و نیروهای میانگین و بیشینه کمتری را به سازه تحت حفاظت انتقال میدهد. بنابراین پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر در مقایسه با پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت جاذب انرژی بهتری است.

5- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، رفتار پوستههای استوانهای با توزیعهای ضخامت ثابت و ضخامت متغیر تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی به صورت تجربی و تحت ضربه محوری به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است که با توجه به بررسی انجام شده، موارد ذیل حاصل گردیده است:

- -در شرایط انرژی ضربهای یکسان، کوتاهشدگیهای مربوط به پوستههای استوانهای با توزیع ضخامت متغیر بیشتر از پوستههای با ضخامت یکنواخت میباشد.
- -در بارگذاری محوری شبه استاتیکی، تغییر در توزیع ضخامت پوسته می-تواند شکل کمانش را از کمانش ترکیبی (ترکیبی از مودهای متقارن و الماسی) به کمانش متقارن پیشرونده انتقال دهد، همچنین در بارگذاری محوری ضربهای، تغییر در توزیع ضخامت پوسته میتواند تعداد چروک-های کامل شده را تحت تاثیر قرار دهد.

با توجه به منحنیهای نیروی محوری مربوط به پوستههای استوانهای با توزیع ضخامت متغیر تحت بارگذاریهای محوری شبه استاتیکی و دینامیکی مشخص می گردد که نیروی میانگین لازم برای تشکیل چروک دوم در مقایسه با چروک اول بیشتر است. این امر بدآن دلیل است که چروک دوم در مقایسه با چروک اول، در قسمتی از پوسته توسعه می یابد که دارای ضخامت و شعاعی میانی بزرگتری است.

-در شرایط انرژی ضربهای یکسان، نیروهای میانگین و بیشینه پوسته استوانهای با توزیع ضخامت ثابت بیشتر از پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر میباشد.

رضا رجبیهفرد و همکاران

 $Y_{\rm s}$ تنش تسلیم استاتیکی

7-مراجع

- SE. Mirmohammadsadeghi, KH. Khalili, SY. Ahmadi, SJ. Hosseinipour, Experimental and finite element simulation investigation of axial crushing of grooved thin-walled tubes, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 77, No. 9, pp. 1627-43, 2015.
- [2] D. Karagiozova, Dynamic buckling of elastic-plastic square tubes under axial Impact-I, stress wave propagation phenomenon, *International Journal of Impact Engineering*; Vol. 30, No. 2, pp. 143-66, 2004.
- [3] AL. Florence, JN. Goodier, Dynamic plastic buckling of cylindrical shells in sustained axial compressive flow, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, No. 1, pp. 80-86, 1968.
- [4] W. Abramowicz, N. Jones, Dynamic axial crushing of circular tubes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 263-281, 1984.
- [5] D. Karagiozova, N. Jones, Influence of stress waves on the dynamic progressive and dynamic plastic buckling of cylindrical shells, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, No. 38, pp. 6723-49, 2001.
- [6] D. Karagiozova, N. Jones, On dynamic buckling phenomena in axially loaded elastic- plastic cylindrical shells, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 37, No. 7, pp. 1223-38, 2002.
- [7] D. Karagiozova, M. Alves, N. Jones, Inertia Effects in axisymmetrically deformed cylindrical shells under axial impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 10, pp. 1083-115, 2000.
- [8] DH. Chen, K. Ushijima, Estimation of the initial peak load for circular tubes subjected to axial impact, *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, No. 7, pp. 889-98, 2011.
- [9] D. Karagiozova, N. Jones, Dynamic effects on buckling and energy absorption of cylindrical shells under axial impact, *Thin-Walled Structures*, Vol. 39, No. 7, pp. 583-610, 2001
- [10] YS. Tai, MY. Huang, HT. Hu, Axial compression and energy absorption characteristics of high-Strength thin-walled cylinders under impact load, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 53, No. 1, pp. 1-8, 2010.
- [11] A. Alavi Nia, JH. Hamedani, Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries, *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, No. 12, pp. 946-54, 2010.
- [12] U. Lepik, On plastic buckling of cylindrical shells struck axially with a mass, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 33, No. 2, pp. 235-46, 1998.
- [13] R. Rajabiehfard, A. Darvizeh, M. Darvizeh, R. Ansari, M. Alitavoli, H. Sadeghi, Theoretical and experimental analysis of elastic-plastic cylindrical shells under two types of axial impacts. *Thin-Walled Structures*, Vol. 107, No. 10, pp. 315-326, 2016.
- [14] R. Rajabiehfard, A. Darvizeh, M. Darvizeh, R. Ansari, H. Sadeghi, effects of boundary and loading conditions on the dynamic plastic buckling of cylindrical shells under axial impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 281-288, 2015. (in Persian فارسی)
- [15] A. Niknejad, MM. Abedi, GH. Liaghat, M. Zamani Nejad, absorbed energy by foam-filled quadrangle tubes during the crushing process by considering the interaction effects, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 376-391, 2015.
- [16] S. Salehghaffari, M. Tajdari, M. Panahi, F. Mokhtarnezhad, attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading, *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, No.6, pp. 379-90, 2010.
- [17] F. Mokhtarnezhada, S. Salehghaffaria, M. Tajdari, Improving the crashworthiness characteristics of cylindrical tubes subjected to axial compression by cutting wide grooves from their outer surface, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 14, No. 6, pp. 601-11,2009.



Fig. 15 Energy absorption versus shortening curves for cylindrical shells with (1) uniform thickness and (2) functionally graded thickness distributions at different velocities

شکل 15 نمودارهای جذب انرژی بر حسب کوتاهشدگی برای پوستههای استوانهای با توزیعهای (1) ضخامت یکنواخت و (2) ضخامت متغیر در سرعتهای مختلف

- -پوسته استوانهای با توزیع ضخامت یکنواخت با کمانش ترکیبی به بار محوری شبه استاتیکی پاسخ میدهد، درحالیکه در بارگذاری ضربهای با کمانش متقارن پیشرونده دینامیکی تغییر شکل مییابد. لذا، تغییر در نرخ بارگذاری میتواند کمانش ترکیبی را به کمانش متقارن پیشرونده دینامیکی تغییر دهد.
- -طول چروکهای تشکیل شده در قسمتهای یکسان از پوسته، مستقل از نرخ بارگذاری بوده و با یکدیگر برابرند (طول چروک فقط تابع هندسه پوسته استوانهای است).
- -به دلیل اثر نرخ کرنش در فرآیند ضربه که منجر به سفتی ماده می گردد، سطح نیروهای محوری در پوستههای استوانهای تحت بار ضربه محوری، بالاتر از حالت بار گذاری شبه استاتیکی است.
- با افزایش سرعت در توزیع ضخامت یکسان، شیب منحنی جذب انرژی تقریباً ثابت میماند. به عبارت دیگر، رفتار منحنی جذب انرژی در توزیع ضخامت یکسان و سرعتهای مختلف تقریباً ثابت می ماند.
- -در شرایط انرژی ضربهای یکسان، پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر با کوتاهشدگی بیشتر و انتقال کمتر نیروهای میانگین و بیشینه به سازه تحت محافظت، انرژی تقریباً یکسانی را در مقایسه با پوسته استوانه-ای با توزیع ضخامت ثابت، جذب مینماید، لذا پوسته استوانهای با توزیع ضخامت متغیر جاذب انرژی بهتری می،اشد.

6- فهرست علايم

- (s) زمان فرایند ضربه t^D
- (s) زمان فرایند شبه استاتیکی t^{Q}
 - . *Y_d تن*ش تسلیم دینامیکی

- [32] X. Zhang, Z. Wen, H. Zhang, Axial crushing and optimal design of square tubes with graded thickness, *Thin-Walled Structures*, Vol. 84, No. 11, pp. 263-74, 2014.
- [33] J. Fang, Y. Gao, G. Sun, G. Zheng, Q. Li, Dynamic crashing behavior of new extrudable multi-cell tubes with a functionally graded thickness, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 103, No. 11, pp. 63–73, 2015.
- [34] J. Fang, Y. Gao, X. An, G. Sun, Chen J, Li Q, Design of transversely-graded foam and wall thickness structures for crashworthiness criteria, *Composites Part B*, Vol. 92, No. 5, pp. 338-349, 2016.
- [35] A. Naddaf Oskouei, H. Khodarahmi, M. Sohrabi, Experimental and numerical study of conical thin shells collapse under dynamic axial loadings, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 392-402, 2015. (in Persian نفار سی)
- [36] S. Pirmohammad, H. Nikkhah, S. Esmaeili, Experimental and numerical study on the collapse behavior of double walled tubes reinforced with inside ribs under dynamic axial loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 347-358, 2016. (in Persian نفرسی)
- [37] W. Abramowicz, N. Jones, Transition from initial global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, No. 5-6, pp. 415-437, 1997.
- [38] D. Al Galib, A. Limam, Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 42, No. 8, pp. 1103-1137, 2004.
- [39] R. Velmurugan, R. Muralikannan, Energy absorption characteristics of annealed steel tubes of various cross sections in static and dynamic loading, *Latin American Journal of Solides and Structures*, Vol. 6, No. 4, pp. 385-412, 2009.
- [40] Li. Guangyao, Xu. Fengxiang, Sun. Guangyong, Li. Qing, A comparative study on thin-walled structures with functionally graded thickness (FGT) and tapered tubes withstanding oblique impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 77, No. 3, pp. 68-83, 2015.
- [41] JM. Alexander, An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading, *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 13, No. 1, pp. 10-15, 1960.
- [42] W. Abramowicz, N. Jones, Dynamic progressive buckling of circular and square tubes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 243-270, 1986.
- [43] T. Wierzbicki, SU. Bhat, W. Abramowicz, D. Brodkin, Alexander, revisited-A two for progressive crushing of tubes, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 29, No. 24, pp. 3269-3288, 1992.
- [44] W. Abramowicz, N. Jones, Dynamic axial crashing of circular tubes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 263-281, 1984.
- [45] N. Jones, *Structural impact*, Second Edittion, pp. 340-342, Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

- [18] AG. Mamalis, GL. Viegelahn, DE. Manolakos, W. Johnson, experimental investigation into the axial plastic collapse of steel thin-walled grooved tubes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp.117-126. 1986.
- [19] A. Darvizeh, M. Darvizeh, R. Ansari, A. Meshkinzar, Analytical and experimental investigations into the controlled energy absorption characteristics of thick-walled tubes with circumferential grooves, *Journal of Mechanical Sience and Technology*, Vol. 28, No 10, pp. 4199-4212, 2014.
- [20] A. Darvizeh, M. Darvizeh, R. Ansari, A. Meshkinzar. Effect of low density, low strength polyurethane foam on the energy absorption characteristics of circumferentially grooved thickwalled circular tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 71, No 10. pp. 81-90, 2013.
- [21] A. Niknejad, MM. Abedi, GH. Lighat, M. Zamani Nejad, Prediction of the mean folding force during the axial compression in foam-filled grooved tubes by theoretical analysis, *Materials and Design*, Vol 37, No. 5, pp. 144-151, 2012.
- [22] AA. Singace, H. El-Sobky. Behavior of axially crushed corrugated tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 39, No. 3, pp. 249-68, 1997.
- [23] A. Eyvazian, MK. Habibi, AM. Hamouda, R. Hedayati, Axial crushing behavior and energy absorption efficiency of corrugated tubes, *Materials and Design*, Vol. 54, No. 2, pp. 1028-38, 2014.
- [24] Z. Liu, W. Hao, J. Xie, J. Lu, R. Huang, Z. Wang, Axial-impact buckling modes and energy absorption properties of thin-walled corrugated tubes with sinusoidal patterns, *Thin-Walled Structures*, Vol. 94, No. 2, pp. 410–423, 2015.
- [25] C. Kılıçaslan, Numerical crushing analysis of aluminum foamfilled corrugated single- and double-circular tubes subjected to axial impact loading, *Thin-Walled Structures*, Vol. 96, No. 8, pp. 82–94, 2015.
- [26] NK. Gupta, Some aspects of axial collapse of cylindrical thinwalled tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 32, No.1, pp. 111-126, 1998.
- [27] A. Moradpour, M. Elyasi, S. Montazeri, Developing a new thinwalled tube structure and analyzing its crushing performance for AA 60601 and mild steel under axial loading, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 69, No. 05, pp. 1107–1117, 2016.
- [28] R. Gumruk, A numerical investigation of dynamic plastic buckling behavior of thin-walled cylindrical structures with several geometries, *Thin-Walled Structures*, Vol. 85, No. 10, pp. 388-397, 2014.
- [29] F. Xu, Enhancing material efficiency of energy absorbers through graded thickness structures, *Thin-Walled Structures*, Vol. 97, No. 12, pp. 250-265, 2015.
- [30] G. Sun, F. Xu, G. Li, Q. Li, Crashing analysis and multiobjective optimization for thin-walled structures with functionally graded thickness, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 64, No. 2, pp. 62-74, 2014.
- [31] X. Zhang, H. Zhang, Z. Wen, Axial crushing of tapered circular tubes with graded thickness, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 92, No. 3, pp. 12-23, 2015.