



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

رضا رجبیه‌فرد<sup>1</sup>، ابوالفضل درویشه<sup>2</sup>، مجید علی طاوولی<sup>3\*</sup>، حامد صادقی<sup>1</sup>، مجید مقدم<sup>4</sup>، ناصر نورزاده<sup>5</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

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

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

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

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

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

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 شهریور 1395

پذیرش: 06 آبان 1395

ارائه در سایت: 21 آذر 1395

کلید واژگان:

پوسته استوانه‌ای

توزیع ضخامت مختلف

ضربه محوری

جذب انرژی

کمانش پیشرونده

### چکیده

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 با توزیع‌های ضخامت ثابت و ضخامت متغیر ضربه قرار می‌گیرند و منحنی‌های تجربی نیروی محوری بر حسب زمان با استفاده از لودبیل به دست آورده می‌شوند، همچنین، برای شبیه‌سازی فرآیندهای ضربه از نرم‌افزار امان 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 مودهای متقارن و الماسی) به کمانش متقارن 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.

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

Reza Rajabiehfar<sup>1</sup>, Abolfazl Darvizeh<sup>2</sup>, Majid Alitavoli<sup>1\*</sup>, Hamed Sadeghi<sup>1</sup>, Majid Moghaddam<sup>1</sup>, Naser Noorzadeh<sup>3</sup>

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

Original Research Paper  
Received 06 September 2016  
Accepted 27 October 2016  
Available Online 11 December 2016

### Keywords:

Cylindrical shell  
Different thickness distribution  
Axial impact  
Energy absorption  
Progressive buckling

### ABSTRACT

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. 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 compared with uniform 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:

R. Rajabiehfar, A. Darvizeh, M. Alitavoli, H. Sadeghi, M. Moghaddam, N. Noorzadeh, An investigation into the behavior of cylindrical shells with different thickness distributions under axial quasi-static and impact loadings, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 269-280, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 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 می‌باشند [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 [10-5]، 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 می‌گردد که خواص ماده همراه با مشخصات هندسی، نوع کمانش پلاستیک دینامیکی یا کمانش پیشرونده دینامیکی را مشخص می‌نماید. همچنین پی‌برده می‌شود که پوسته‌های استوانه‌ای ساخته شده از ماده غیر حساس به نرخ کرنش، می‌توانند به صورت کمانش پلاستیک دینامیکی یا کمانش پیشرونده دینامیکی به ضربه محوری پاسخ دهند. درحالی‌که پوسته‌های استوانه‌ای ساخته شده از ماده حساس به نرخ کرنش فقط با کمانش پیشرونده دینامیکی به ضربه محوری پاسخ می‌دهند. لازم به ذکر است که در کمانش پلاستیک دینامیکی، قبل از گسترش جابجایی‌های شعاعی بزرگ، کل طول پوسته استوانه‌ای دچار چروکیدگی می‌گردد [6,5]. درحالی‌که در کمانش پیشرونده دینامیکی، چروک‌ها به صورت پشت سر هم ایجاد می‌شوند [6,5].

کمانش پلاستیک دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای تحت ضربه محوری سرعت بالا توسط فلورنس و گودبیر [3]، رجبیه فرد 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 [9-11,15]، که تاثیرات خواص ماده، هندسه پوسته، شرایط مرزی و بارگذاری بر روی انرژی جذب شده [9]، جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای ساخته شده از فولاد نرم<sup>1</sup> و فولاد استحکام بالا<sup>2</sup> [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 پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری می‌باشد. بنابراین، پیش‌بینی مقدار نیروی بیشینه که در مراحل اولیه فرآیند ضربه اتفاق می‌افتد حائز اهمیت است. کارازووا و همکاران [7,5] دو رابطه تحلیلی برای تخمین نیروی بیشینه ارائه نمودند. به هر حال، این معادلات نمی‌توانند نیروی بیشینه برای سرعت‌های 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 می‌گیرند، 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

<sup>1</sup> Mild steel

<sup>2</sup> High strength steel

بارگذاری محوری حائز اهمیت است، پوسته‌های استوانه‌ای شیاردار<sup>3</sup> [16-21]، پوسته‌های استوانه‌ای موجدار<sup>4</sup> [22-25]، پوسته‌های استوانه‌ای با حفره‌های دایروی [27,26]، پوسته‌های استوانه‌ای با توزیع ضخامت متغیر<sup>5</sup> [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 محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [16,21]. این 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 طول بلند که به صورت غیرمتمقارن کمانش می‌یابد به چندین پوسته استوانه‌ای با طول کوتاه‌تر که به صورت متمقارن کمانش می‌یابد [17]، تبدیل مود نامتمقارن به مود کانسترتینا<sup>6</sup> در پوسته‌های استوانه‌ای با طول بلندتر از طول بحرانی [17]، کنترل کردن و پایدار نمودن کل سازه با بخش جدار ضخیم پوسته استوانه‌ای [16]، شکل دادن چروک‌ها در ناحیه شیاردار [17,16] و بهبود دادن ویژگی‌های جذب انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین تاثیر فوم پلی‌آریتین<sup>7</sup> 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 اولیه جلوگیری می‌کنند. همچنین این مطالعه مشخص می‌نماید که در حالت استفاده از فوم ذکر شده، جذب انرژی ویژه تقریباً دو برابر می‌گردد.

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 می‌گیرند.

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 جرم<sup>8</sup> اعمال شده است. وجود این حفره‌های دایروی، مود کمانش پوسته‌های استوانه‌ای را تغییر می‌دهد که احتمال وقوع کمانش اولیه<sup>9</sup> حتی در پوسته‌های استوانه‌ای نسبتاً بلندتر نیز کاهش می‌یابد [26] و همچنین مشخص می‌گردد که عملکرد مطلوب می‌تواند با تنظیم تعداد ردیف حفره‌ها، تعداد حفره‌ها در هر ردیف و قطر هر حفره حاصل گردد [27].

پوسته‌های استوانه‌ای دایروی [29,28]، مربعی [30] و دایروی مخروطی<sup>10</sup> [31] با توزیع ضخامت متغیر در امتداد طولی، پوسته‌های استوانه‌ای مربعی [32] و چند سلولی<sup>11</sup> [33] با توزیع ضخامت متغیر در سطح مقطع و پوسته

<sup>3</sup> Tubes with circumferential grooves

<sup>4</sup> Corrugated tubes

<sup>5</sup> Functionally graded thickness tubes

<sup>6</sup> Concertina

<sup>7</sup> Polyurethane foam

<sup>8</sup> Drop hammer

<sup>9</sup> Euler buckling

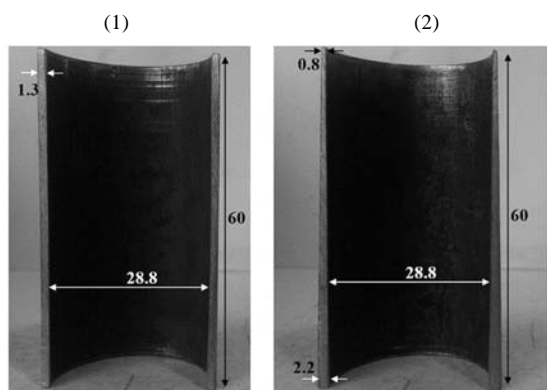
<sup>10</sup> Tapered circular

<sup>11</sup> Multi-cell

با توزیع ضخامت یکنواخت و پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت متغیر می‌باشد. 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 می‌پذیرد، نیرو در انتهای غیر بارگذاری شده پوسته و زمانیکه تست ضربه انجام می‌گیرد، نیرو در انتهای غیر تحت ضربه<sup>3</sup> پوسته به وسیله لودسیل اندازه‌گیری می‌شود. بدین صورت که تغییر ولتاژ ایجاد شده توسط نیروی اعمال شده به وسیله کرنش‌سنج‌های لودسیل اندازه‌گیری شده و ولتاژ بر حسب زمان اندازه‌گیری شده توسط یک تقویت‌کننده<sup>4</sup> تقویت می‌گردد و سپس توسط اسیلوسکوپ<sup>5</sup> ثبت می‌شود. 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)



**Fig. 2** A total view of the drop hammer apparatus

**شکل 2** نمای کلی از دستگاه سقوط آزاد جرم

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 تحت بارگذاری محوری شبه-استاتیکی و دینامیکی قرار گرفته‌اند در برخی مقالات از جمله [39-37,4] 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 می‌گیرند، نتایج حاصل از تئوری اصلاح شده الکساندر برای تغییر شکل‌های متقارن یا کانسرتینا تطابق نزدیکی با یافته‌های تجربی ایجاد می‌نماید. انتقال از خمش<sup>1</sup> به کمانش پیشرونده برای پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد که به صورت استاتیکی و دینامیکی تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، 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 می‌گردد که پوسته‌های استوانه‌ای، انرژی بیشتری را در بارگذاری 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 پوسته‌های استوانه‌ای با توزیع‌های ضخامت ثابت و ضخامت متغیر مقایسه گردیده‌اند. به منظور قابل مقایسه گردیدن نتایج مربوط به پوسته‌های 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 لودسیل<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> Un-impacted end

<sup>4</sup> Amplifier

<sup>5</sup> Oscilloscope

<sup>1</sup> Initial global bending

<sup>2</sup> Load cell

نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شده است. به منظور شبیه‌سازی 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 صریح<sup>1</sup> بر روی نمونه‌ها استفاده می‌گردد. پوسته و پرتابه به صورت اجسام شکل‌پذیر<sup>2</sup> و جامد<sup>3</sup> شبیه‌سازی گردیده‌اند، در چیدمان قطعات، با استفاده از قید<sup>4</sup> ایجاد شده، پرتابه به عنوان جسم صلب<sup>5</sup> در نظر گرفته می‌شود. نوع المان به کار رفته C3D8R و اندازه دانه‌بندی مش‌ها به منظور استقلال حل عددی از مش‌بندی و همگرا شدن جواب‌ها، 0.0005 در نظر گرفته شده است. با توجه به اندازه المان ذکر شده، تعداد المان‌ها برای پوسته با ضخامت ثابت، 67680 و برای پوسته با ضخامت متغیر، 78883 عدد بدست می‌آید. تماس بین کلیه سطوح به صورت تماس عمومی<sup>6</sup> در نظر گرفته شده است. لحظه برخورد پرتابه به پوسته شبیه‌سازی شده در "شکل 5" نشان داده شده است.

#### 4- نتایج 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 پوسته‌های استوانه‌ای با توزیع‌های ضخامت مختلف زمانیکه تحت بارگذاری‌های محوری شبه استاتیکی و ضربه‌ای قرار می‌گیرند، صورت پذیرفته است. نتایج مدل عددی به کمک نتایج تجربی صحت‌سنجی می‌گردند. سپس نتایج عددی جذب انرژی برای پوسته‌های استوانه‌ای تحت ضربه محوری ارائه می‌گردند. کلیه نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش از جنس فولاد می‌باشند. به منظور تعیین خواص مکانیکی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی، آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM E8 با استفاده از دستگاه تست کشش سنتام<sup>7</sup> 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-سیموند<sup>8</sup>، 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 ترتیب 6844 و 3.91 می‌باشند [40]. سپس می‌توان از تنش تسلیم دینامیکی بدست آمده در شبیه‌سازی فرآیند ضربه دینامیکی در نرم افزار آباکوس استفاده نمود.

$$\frac{Y_d}{Y_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \quad (1)$$

<sup>1</sup> Explicit

<sup>2</sup> Deformable

<sup>3</sup> Solid

<sup>4</sup> Constraint

<sup>5</sup> Rigid body

<sup>6</sup> General contact

<sup>7</sup> SANTAM

<sup>8</sup> Cowper-Symond

نهایت، ولتاژ بر حسب زمان با استفاده از ضریب تبدیل  $1\text{mv}=63.183\text{N}$  به نیرو بر حسب زمان تبدیل می‌گردد. شکل شماتیک تجهیزات اندازه‌گیری 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 دست‌آوردن سرعت در لحظه برخورد از سرعت‌سنج لیزری استفاده شده است.

#### 3- بررسی عددی

بررسی عددی پدیده ضربه محوری برای پوسته‌های استوانه‌ای با استفاده از

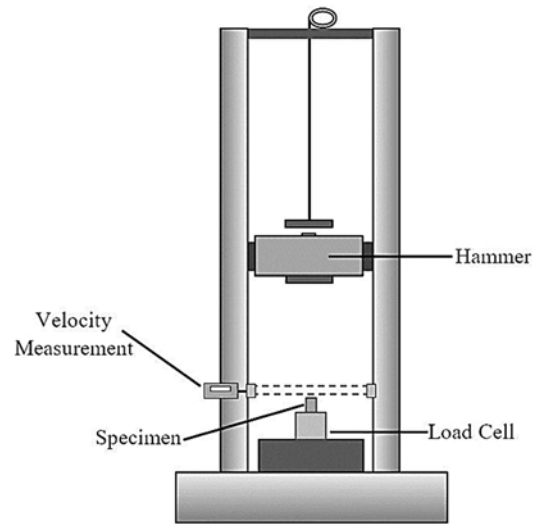


Fig. 3 Schematic diagram of the drop hammer

شکل 3 شکل شماتیک دستگاه سقوط آزاد جرم

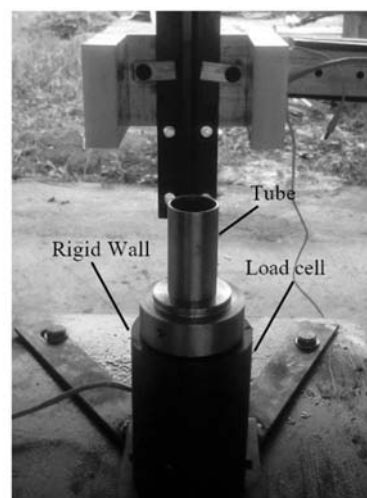


Fig 4. Stationary cylindrical shell on the load cell

شکل 4 پوسته استوانه‌ای بر روی لودسل

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 در امتداد طول پوسته افزایش می‌یابند، لذا انتظار این است که نیروی محوری در امتداد شعاع و ضخامت پوسته در امتداد طول پوسته افزایش می‌یابد. 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 سوم باشد که با توجه به منحنی نیروی محوری بر حسب زمان ارائه شده در "شکل 7" چنین است.

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

کوتاه‌شدگی‌ها و شکل‌های کمناش 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 کمناش تجربی و عددی از "شکل‌های 8 و 9" با یکدیگر، مشخص می‌گردد که تطابق خوبی بین آنها برقرار است.

#### 1-2-4- 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.

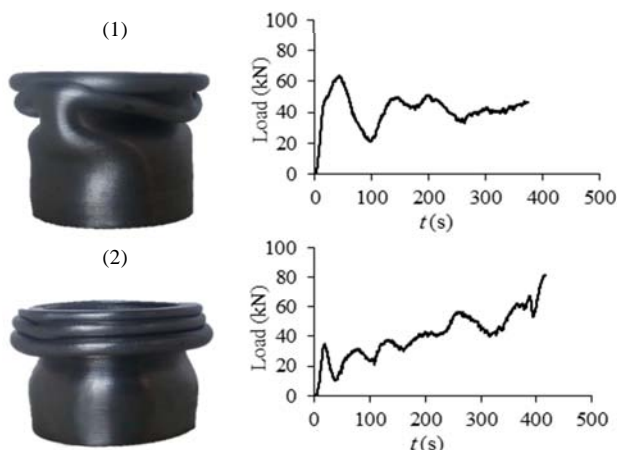


Fig. 7 Experimental buckling shapes and axial force-time curves for cylindrical shells with (1) uniform thickness and (2) functionally graded thickness distributions under axial quasi-static loading

شکل 7 شکل‌های کمناش و منحنی‌های نیروی محوری بر حسب زمان تجربی پوسته‌های استوانه‌ای با توزیع‌های (1) ضخامت یکنواخت و (2) ضخامت متغیر تحت بار محوری شبه استاتیکی



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

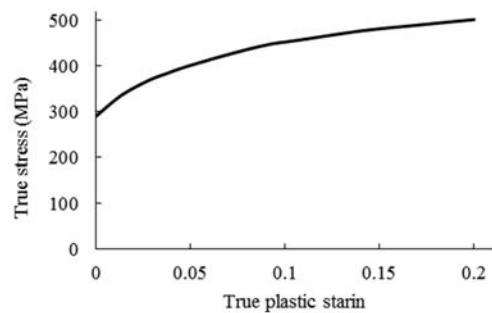


Fig. 6 True stress-true plastic strain curve

شکل 6 منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش پلاستیک حقیقی

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

شکل‌های کمناش و منحنی‌های تجربی نیروی محوری بر حسب زمان پوسته‌های استوانه‌ای با توزیع‌های ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت بار محوری شبه استاتیکی مطابق "شکل 7" ارائه گردیده است. با توجه به شکل‌های کمناش ارائه شده در "شکل 7"، مشخص می‌گردد که پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت یکنواخت تحت بار محوری شبه استاتیکی به صورت ترکیبی (ترکیبی از موده‌های متقارن و الماسی) دچار کمناش می‌گردد. با تغییر توزیع ضخامت پوسته از حالت یکنواخت به توزیع ضخامت متغیر، شکل کمناش از حالت ترکیبی به حالت کمناش متقارن پیشرونده انتقال پیدا می‌نماید.

با توجه به روابط ارائه شده توسط الکساندر [41]، آبراموویچ و جونز [42] و ویبزیکی 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 بزرگتر 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 می‌یابد، انتظار می‌رود که طول چروک‌های تشکیل شده در امتداد طول پوسته افزایش یابد. لازم به ذکر است که طول چروک بزرگتر منجر به جابه‌جایی شعاعی بزرگتر چروک می‌گردد. با مراجعه به "شکل 7"، مشخص می‌گردد که جابه‌جایی شعاعی (طول چروک) سه چروک تشکیل شده برای پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت متغیر، در امتداد طول پوسته افزایش یافته است.

همچنین با توجه به روابط ارائه شده توسط الکساندر [41]، آبراموویچ و

همچنین با بررسی "شکل 9" مشخص می‌شود که برای پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت متغیر، در تمامی سرعت‌ها کماتش پیشرونده دینامیکی ایجاد می‌گردد، بدین صورت که در سرعت 2.52 متر بر ثانیه کماتش پیشرونده با یک چروک و در سایر سرعت‌ها کماتش پیشرونده با دو چروک از انتهای با سطح مقطع کوچکتر ایجاد می‌گردد. مطابق با شکل‌های کماتش ارائه شده در "شکل 10" مشخص می‌گردد که با تغییر هندسه پوسته و ثابت ماندن دیگر پارامترها، تعداد چروک‌های کامل شده تحت تاثیر قرار می‌گیرد. همچنین در تمامی سرعت‌ها، پوسته با توزیع ضخامت متغیر نسبت به پوسته با توزیع ضخامت یکنواخت، یک چروک کامل شده بیشتر دارد. پوسته با توزیع ضخامت متغیر دارای یک چروک کامل شده در سرعت‌های 2.52، 3.41، 4.16 متر بر ثانیه و دو چروک کامل شده در سرعت‌های 4.76 و 5.22 متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین، پوسته با توزیع ضخامت یکنواخت دارای یک چروک کامل شده در سرعت‌های 4.76 و 5.22 متر بر ثانیه است. درحالی‌که در سرعت‌های دیگر دارای هیچ چروک کامل شده‌ای نمی‌باشد.

#### 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 میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد که این نیروی بیشینه باعث تشکیل یکی از چروک‌های شکل-های کماتش می‌گردد.

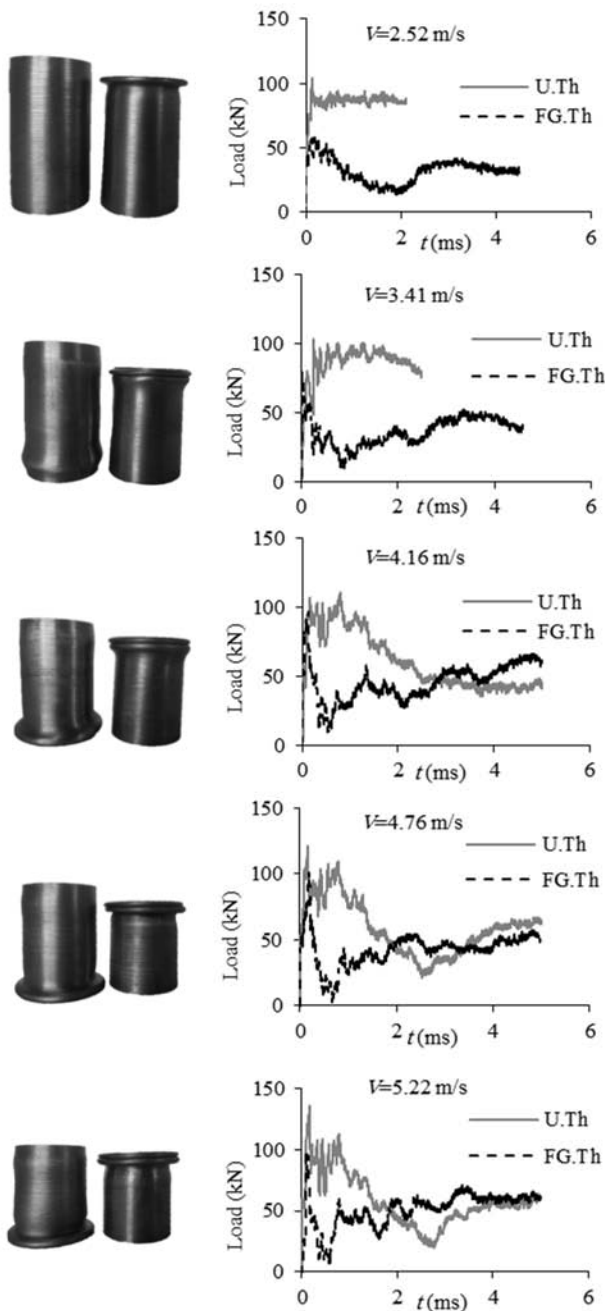
با توجه به رابطه تحلیلی ارائه شده در [45] برای تخمین نیروی میانگین لازم برای لهیدگی محوری پوسته‌های استوانه‌ای تحت ضربه محوری، نیروی میانگین با حاصلضرب ضخامت به توان 1.5 در شعاع میانی به توان 0.5 رابطه مستقیم دارد. بدین صورت که با افزایش مقدار حاصلضرب ضخامت به توان 1.5 در شعاع میانی به توان 0.5، نیروی میانگین بیشتری برای لهیدگی محوری پوسته‌های استوانه‌ای تحت ضربه محوری لازم می‌شود. 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 بیشینه افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که روابط تحلیلی ارائه شده توسط کارازووا و همکاران [7,5] برای تخمین نیروی بیشینه، برای سرعت‌های کمتر از 40 متر بر ثانیه دارای دقت کافی نمی‌باشد، ولی به هر حال روند تغییرات نیروی بیشینه را برای سرعت‌های کمتر از 40 متر بر ثانیه به درستی پیش‌بینی می‌نماید. با مراجعه به نتایج کوتاه‌شدگی 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 به ترتیب 1.03 و 14.92 میلی‌متر است. درحالی‌که ضخامت و شعاع میانی پوسته با توزیع ضخامت یکنواخت به ترتیب 1.3 و 15.05 میلی‌متر می‌باشد. لذا ضخامت و شعاع میانی پوسته با توزیع ضخامت یکنواخت از ضخامت و شعاع میانی پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت متغیر بیشتر است. پس انتظار می‌رود که نیروهای میانگین و بیشینه پوسته استوانه‌ای با

این امر منطبق با این حقیقت است که برای پوسته‌های استوانه‌ای تحت ضربه محوری، سرعت ضربه محوری بزرگتر منجر به کوتاه‌شدگی بزرگتری می‌گردد. با بررسی بیشتر نتایج کوتاه‌شدگی ارائه شده در جدول 1 برای پوسته استوانه-ای با توزیع ضخامت متغیر پی‌برده می‌شود که مقادیر کوتاه‌شدگی برای دو سرعت 4.76 و 5.22 متر بر ثانیه تقریباً ثابت می‌ماند. دلیل آن را با توجه به شکل‌های کماتش 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 می‌گردد. با مقایسه مقادیر کوتاه‌شدگی مربوط به پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت متغیر با مقادیر کوتاه‌شدگی پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت یکنواخت، پی برده می‌شود که پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت متغیر در تمامی سرعت‌ها، دارای مقادیر کوتاه‌شدگی بزرگتری است. در ادامه، دلیل این امر به طور نمونه برای سرعت 3.41 متر بر ثانیه توضیح داده می‌شود. لازم به ذکر است که در سرعت مذکور، چروک‌ها در 15 میلی-متر از طول قسمت بالای پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت متغیر تشکیل می‌گردد. 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 ویرزیبکی و همکارانش [43]، طول چروک در این قسمت 7.06 میلی‌متر تعیین می‌شود. در حالی‌که طول چروک پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت ثابت با توجه به رابطه ویرزیبکی و همکارانش [43]، 8.2 میلی‌متر است. لذا مشخص می‌گردد که طول چروک‌های تشکیل شده در 15 میلی‌متر از طول قسمت بالای پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت متغیر، تفاوت چندانی با طول چروک‌های تشکیل شده در پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت یکنواخت ندارد. از طرفی، اینرسی شعاعی کمتر (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 می‌گردد که این امر منجر به کوتاه‌شدگی بیشتر پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت متغیر در مقایسه با پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت یکنواخت تحت ضربه محوری 3.41 متر بر ثانیه می‌شود. 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.

#### 4-2-2- شکل‌های کماتش پوسته‌های استوانه‌ای با توزیع‌های ضخامت

##### یکنواخت و ضخامت متغیر تحت ضربه محوری

همچنان که قبلاً نیز گفته شد، شکل‌های کماتش 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 می‌گردد که شکل‌های کماتش ایجاد شده برای پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت یکنواخت در سرعت‌های 3.41 و 4.16 متر بر ثانیه، کماتش پیشرونده دینامیکی با یک چروک غالب می‌باشد که در سرعت‌های 4.76 و 5.22 متر بر ثانیه، این چروک کامل شده است.



**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

شکل 10 شکل‌های کمانش همراه با منحنی‌های نیروی محوری تجربی بر حسب زمان در سرعت‌های مختلف برای پوسته‌های استوانه‌ای با توزیع‌های ضخامت متغیر و ضخامت ثابت تحت ضربه محوری

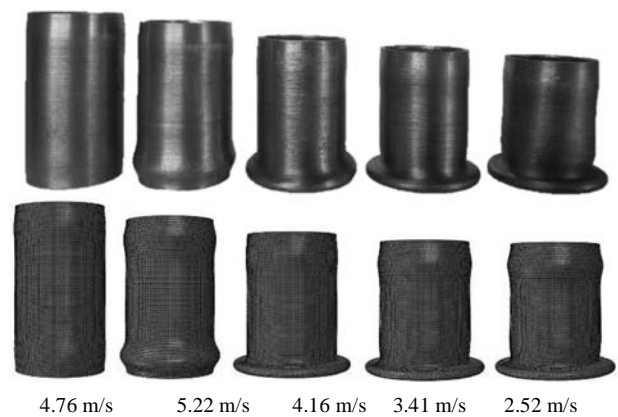
است، نیروهای میانگین و بیشینه پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت یکنواخت در تمامی سرعت‌ها بیشتر از نیروهای میانگین و بیشینه پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت یکنواخت در تمامی سرعت‌ها بیشتر از نیروهای میانگین و بیشینه پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت متغیر است.

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

جدول 1 نتایج کوتاه‌شدگی برای پوسته‌های استوانه‌ای با توزیع‌های ضخامت یکنواخت و ضخامت متغیر تحت ضربه محوری

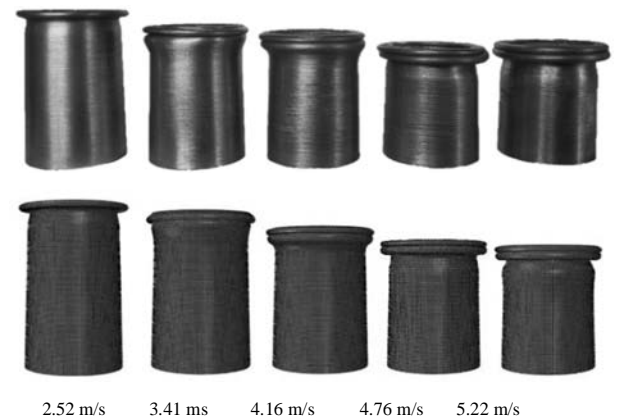
**Table 1** Shortening results for cylindrical shells with uniform thickness and functionally graded thickness distributions

کوتاه شدگی (mm)				سرعت (m/s)
پوسته با ضخامت متغیر		پوسته با ضخامت ثابت		
تجربی	عددی	تجربی	عددی	
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

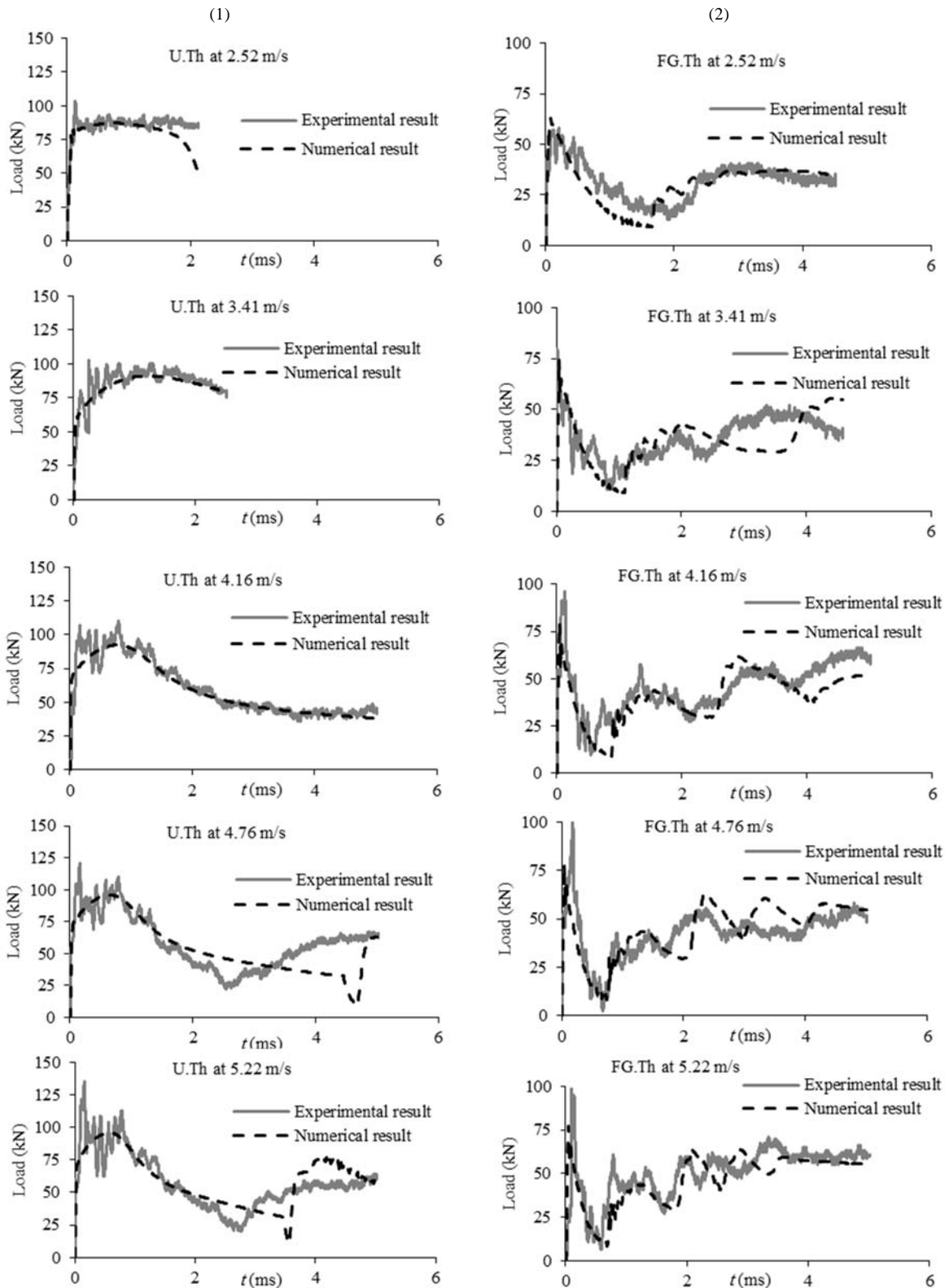


**Fig. 9** Experimental and numerical buckling shapes of cylindrical shell with functionally graded thickness distribution subjected to axial impact with different velocities

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

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

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 میلی ثانیه تا انتهای

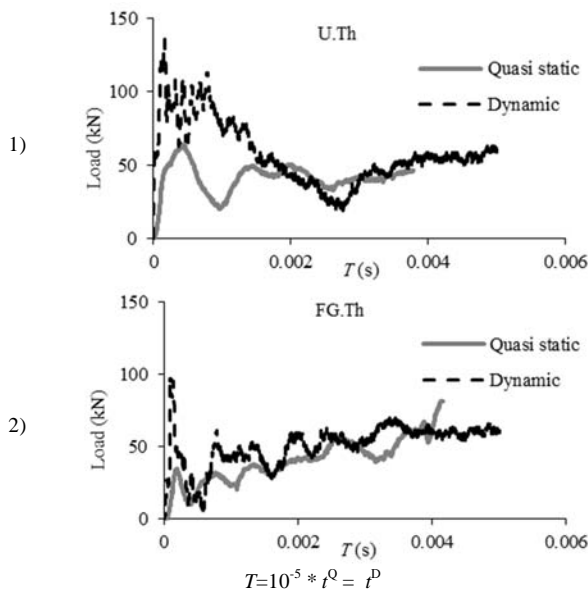


با توجه به این امر که اثر نرخ کرنش در فرآیند ضربه منجر به سفت‌تر شدن ماده می‌گردد، انتظار می‌رود که سطح نیروی ایجاد شده در فرآیند ضربه در مقایسه با بارگذاری شبه استاتیکی، بالاتر باشد. با توجه به "شکل 13"، پی برده می‌شود که سطح نیروهای محوری در پوسته‌های استوانه‌ای تحت بار ضربه‌ای محوری، بالاتر از سطح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

#### 4-5- 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 سرعت‌های 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 یکنواخت در تمامی سرعت‌ها تقریباً یکسان است. بعلاوه با توجه به نتایج جدول 2 و نمودار ارائه شده در "شکل 14"، 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.



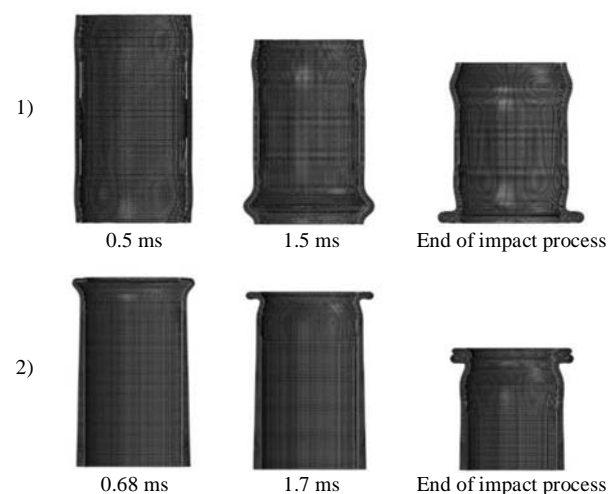
**Fig. 13** Comparing of the experimental axial force-time curves of cylindrical shells with (1) uniform thickness and (2) functionally graded thickness distributions subjected to axial quasi-static and impact loadings at velocity 5.22(m/s)

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

همچنین با توجه به "شکل 12"، یکی از دو چروک در بازه زمانی 0 تا 0.68 میلی‌ثانیه ایجاد گردیده است که این چروک در بازه زمانی 0.68 تا 1.7 میلی‌ثانیه تقریباً به حد نهای خود می‌رسد. از 1.7 میلی‌ثانیه تا انتهای فرآیند ضربه نیز چروک دوم شکل می‌گیرد. با مراجعه به منحنی نیروی محوری بر حسب زمان ارائه شده در "شکل 11" مشخص می‌گردد که نیروی میانگین تا زمان 1.7 میلی‌ثانیه 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 می‌یابد.

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

با مقایسه شکل‌های کمانش تجربی پوسته‌های استوانه‌ای با توزیع ضخامت ثابت تحت بار محوری شبه استاتیکی و بار محوری ضربه‌ای از "شکل‌های 7 و 8"، مشخص می‌گردد 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 ضربه‌ای از "شکل‌های 7 و 9"، مشخص می‌گردد که پوسته مذکور به هر دو نوع بار محوری اعمالی با کمانش متقارن پیش‌رونده پاسخ می‌دهد. با توجه به "شکل‌های 7 و 9"، اینگونه به نظر می‌رسد 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 می‌توان 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 الکساندر [41]، آبراموویچ و جونز [42] و ویرزبکی و همکارانش [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

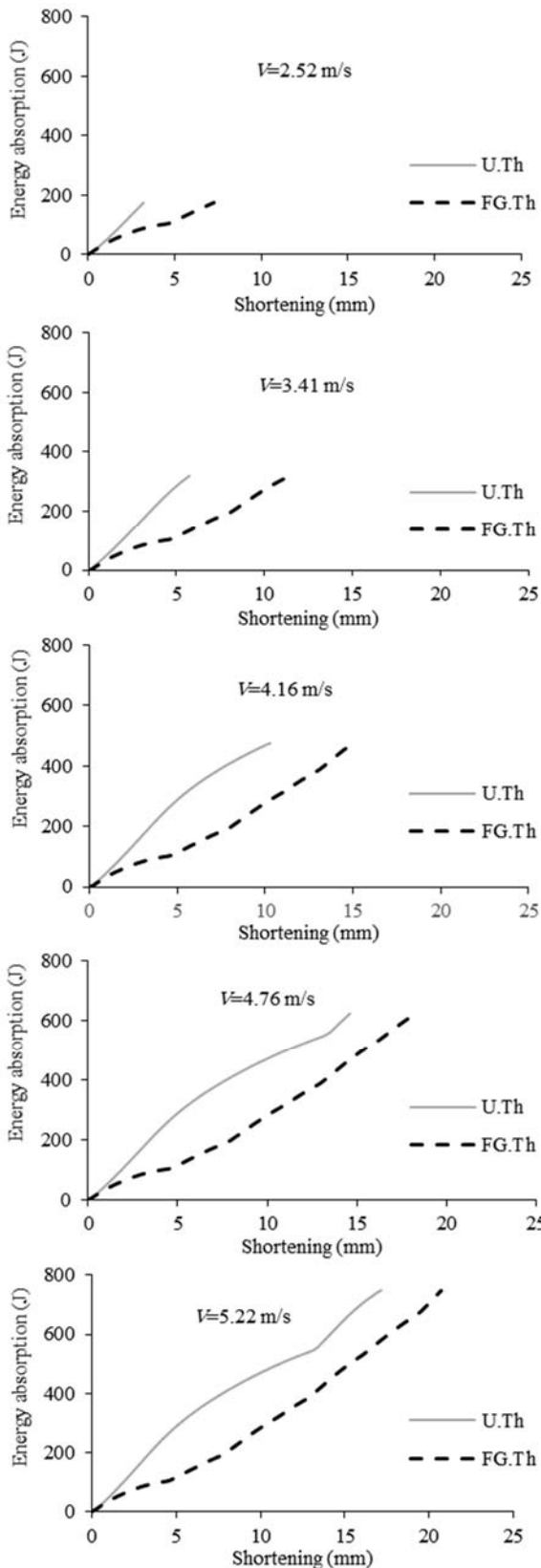


Fig. 14 Energy absorption versus shortening curves for same velocity and different thickness distribution

شکل 14 نمودارهای جذب انرژی بر حسب کوتاه‌شدگی برای سرعت یکسان و توزیع ضخامت مختلف

جدول 2 انرژی 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

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

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 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 جذب انرژی بهتری است.

### 5- نتیجه‌گیری

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 می‌تواند شکل کمانش را از کمانش ترکیبی (ترکیبی از مدهای متقارن و الماسی) به کمانش متقارن پیشرونده انتقال دهد، همچنین در بارگذاری محوری ضربه‌ای، تغییر در توزیع ضخامت پوسته می‌تواند تعداد چروک‌های 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 می‌گردد که نیروی میانگین لازم برای تشکیل چروک دوم در مقایسه با چروک اول بیشتر است. این امر بدان دلیل است که چروک دوم در مقایسه با چروک اول، در قسمتی از پوسته توسعه می‌یابد 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.

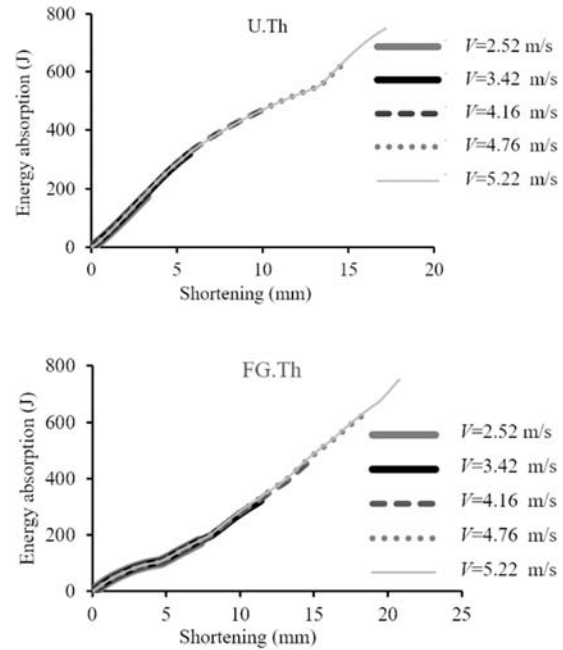
$Y_s$  تنش تسلیم استاتیکی

علایم یونانی

$\epsilon$  نرخ کرنش

### 7-مراجع

- [1] SE. Mirmohammadsadeghi, KH. Khalili, SY. Ahmadi, SJ. Hosseiniipour, 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. Rajabiehfarid, 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. Rajabiehfarid, 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, *Moades Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 281-288, 2015. (in Persian)
- [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. Mokhtarnezhad, 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 کماتش ترکیبی به بار محوری شبه استاتیکی پاسخ می‌دهد، درحالیکه در بارگذاری ضربه‌ای با کماتش متقارن پیش‌رونده دینامیکی تغییر شکل می‌یابد. لذا، تغییر در نرخ بارگذاری می‌تواند کماتش ترکیبی را به کماتش 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 می‌گردد، سطح نیروهای محوری در پوسته‌های استوانه‌ای تحت بار ضربه محوری، بالاتر از حالت بارگذاری 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 می‌ماند.

- 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 استوانه‌ای با توزیع ضخامت ثابت، جذب می‌نماید. لذا پوسته استوانه‌ای با توزیع ضخامت متغیر جاذب انرژی بهتری می‌باشد.

### 6- فهرست علایم

$t^D$  زمان فرایند ضربه (s)

$t^Q$  زمان فرایند شبه استاتیکی (s)

$Y_d$  تنش 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 فارسی)
- [36] S. Pirmohammad, H. Nikkhal, S. Esmaili, 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 فارسی)
- [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. Brodtkin, 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 crushing of circular tubes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 263-281, 1984.
- [45] N. Jones, *Structural impact*, Second Edition, pp. 340-342, Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [18] AG. Mamalis, GL. Viegelah, 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 Science 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 thick-walled 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 foam-filled 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 thin-walled tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 32, No.1, pp. 111-126, 1998.
- [27] A. Moradpour, M. Elyasi, S. Montazeri, Developing a new thin-walled 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.