



مطالعه تجربی و عددی فروریزش پوسته‌های مخروطی جدار نازک تحت بار دینامیکی محوری

علیرضا نداف اسکوئی^{1*}، حسین خدارحمی²، مسلم سهرابی³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

* تهران، صندوق پستی 16535-187، anadaf@ihu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 اسفند 1393

پذیرش: 24 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 30 خرداد 1394

کلید واژگان:

رفتار فروریزشی

پوسته‌های مخروطی

مود الماسی

الگوی چهارضلعی

چکیده

در این مقاله مطالعه رفتار فروریزشی و جذب انرژی پوسته‌های جدار نازک سربسته مخروطی به صورت عددی و تجربی ارائه شده است. پوسته‌های مخروطی ناقص از جمله اجزایی هستند که در جذب انرژی حین یک فرایند ضربه، از سایر مقاطع عملکرد بهتری دارند. برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه ضربه‌زن سقوط آزاد و در بخش عددی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. در این مقاله تأثیر تغییر سرعت برخورد و جرم ضربه‌زن بر رفتار فروریزشی نمونه‌ها بررسی شده است. علاوه بر این با معکوس قرار دادن نمونه‌های مخروطی در برابر ضربه‌زن، اثر نحوه اعمال نیرو بر روی رفتار فروریزش آنها مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. همچنین مجموعه‌های چندتایی از مخروط‌ها به عنوان سیستم‌های جاذب انرژی به صورت عددی مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد تمامی نمونه‌ها با مود الماسی و الگوی چهارضلعی فروریزش می‌کنند و مطابقت خوبی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد. همچنین تأثیر تغییر ضخامت بیشترین اثرگذاری را روی رفتار فروریزش این پوسته‌ها دارد به طوری که با 20% کاهش ضخامت پوسته، بیشینه نیروی فروریزش 34/5% و نیروی متوسط فروریزش 39/3% کاهش پیدا کردند.

Experimental and numerical study of conical thin shells collapse under dynamic axial loadings

Alireza Naddaf Oskouei¹, Hossein Khodarahmi^{2*}, Moslem Sohrabi³

Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16535-187 Tehran, Iran, anadaf@ihu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 March 2015
Accepted 14 May 2015
Available Online 20 June 2015

Keywords:
Collapse Behavior
Conical Shells
Diamond Mode
Quadrilateral Pattern

ABSTRACT

A numerical and experimental study of the collapse and energy absorption behavior of thin-walled end capped conical shells under dynamic loading is presented in this paper. Among the structural components, the truncated conical shells whose energy absorption characteristics are better than others, are used. In order to carry out the designed tests, a drop hammer machine has been used. Also, in numerical part, Abaqus software capabilities have been applied. In this article, the effect of the velocity and mass of the hammer on the collapse behavior of these samples has been investigated. Moreover, by placing the cone reversely, the force effect on the collapse behavior is evaluated and analyzed. Also, the multiple sets of cones as energy absorbing system are analyzed numerically. For the samples, mode of collapse of diamond with quadrilateral pattern was obtained and very good agreement with experimental results was recorded. The results show that the change of wall thickness has the greatest influence on the collapse behavior of these shells. So that with a 20% reduction of shell thickness, maximum force had 34.5% and the average force collapse 39.3% reduction.

1- مقدمه

امروزه با پیشرفت علوم مشخص شده است در مواردی که کل سازه در برابر بارها و نیروهای وارده در شرایط کاری، کاملاً مقاوم و دارای تغییرشکل‌های کشسان است، وزن و به تبع آن هزینه ساخت سازه بسیار بالاست. برای جلوگیری از این موارد، از قطعاتی نسبتاً ارزان و قابل تعویض برای جذب

انرژی بارهای وارد بر سازه استفاده می‌شود که به آنها جاذب‌های انرژی گفته می‌شود. جاذب‌ها از جمله اجزایی هستند که در برخی سازه‌ها برای جذب انرژی جنبشی و تبدیل آن به صورت دیگری از انرژی استفاده می‌شوند. این جاذب‌ها به خصوص در سازه‌هایی که در معرض بار دینامیکی هستند کاربرد فراوان دارند. جاذب‌های انرژی سامانه‌هایی هستند که انرژی جنبشی را به

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کمانشی پوسته‌های مخروطی را بررسی کرده و بهترین نوع سطح مقطع از نظر تحمل بار کمانش را بدست آوردند. در تحلیل آنها سطح مقطع تمامی تقویت‌کننده‌ها با هم مساوی و برابر 60 mm^2 است. در این مقاله نشان داده شده است که بهترین مقطع برای بالا بردن بار کمانش، مقطع U شکل و بدترین مقطع T شکل است.

پوسته‌های مرکب از نیمکره و مخروط با ضخامت‌ها و ابعاد مختلف، هم به صورت شبه‌استاتیک و هم به صورت دینامیکی توسط گوپتا و همکارانش [15] مورد آزمایش قرار گرفتند. آنها همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی را به وسیله آزمایش‌های خود صحت‌سنجی نمودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد پوسته‌های کروی نسبتاً ضخیم هنگامی که بین دو صفحه موازی فشرده می‌شوند به صورت متقارن محوری و با یک تخت‌شدگی اولیه که در ادامه به صورت گشودگی به سمت داخل پیش می‌رود، تغییرشکل می‌یابند و انرژی غالباً در لولاهای پلاستیک تلف می‌شود.

رفتار لهیدگی و جذب انرژی لوله‌های مخروطی پر شده از فوم تحت بار ضربه‌ای مورب، توسط احمد و همکارانش [16] مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه آنها به منظور تعیین مقدار جذب انرژی توسط پوسته‌های مخروطی خالی و پر شده از فوم، تحت بار دینامیکی برای زوایای متغیر اعمال نیرو و هندسه‌های مختلف پوسته انجام شده است. آنها دریافتند چون پوسته‌های مخروطی پر شده از فوم قادر به تحمل بار ضربه‌ای مورب با حداقل کاهش در جذب انرژی هستند، می‌توانند به عنوان سازه‌هایی مؤثر در جذب انرژی به کار برده شوند. همچنین ضخامت پوسته بر روی نیروی متوسط لهیدگی و به تبع آن، بر روی جذب انرژی تأثیر زیادی دارد. نیک‌نژاد و توسلی‌منش [17] فرایند معکوس کردن مخروط‌های ته‌بسته را به صورت تجربی و تئوری مورد مطالعه قرار داده‌اند و نیروی محوری بر اساس جابجایی در طول فرایند معکوس شدن مخروط با روابط آنها پیش‌بینی شده است.

اخیراً نداف اسکوئی، خدارحمی و پاکیان بوشهری در یک تحقیق ابتکاری از قوطی‌های آب میوه موجود در بازار به عنوان سیستم‌های جاذب انرژی استفاده کردند. نمونه‌های آنها در دو نوع تک سرپوش و دو سرپوش تهیه شده و با دستگاه ضربه‌زن سقوط آزادی که آزمایش‌های صورت گرفته در همین مقاله نیز با آن انجام شده است، مورد آزمایش قرار دادند. آنها دریافتند که سرپوش باعث تقویت لبه‌های لوله شده و این لوله‌ها دارای جذب انرژی بیشتر در طول لهیدگی کمتر نسبت به سایر لوله‌هایی که قبلاً مورد آزمایش قرار گرفته بودند، هستند. همچنین در مقاله آنها بیان شده است که این جاذب‌ها دارای رفتار خطی در جذب انرژی نسبت به افزایش طول لهیدگی لوله هستند [18].

در این مقاله رفتار فروریزش و جذب انرژی مخروط‌های سربسته با زوایای نیم‌رأس کوچک به صورت عددی و تجربی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. تا قبل از این رفتار فروریزشی مخروط‌هایی با زوایای نیم‌رأس کوچک تحت بار دینامیکی محوری مورد بررسی قرار نگرفته بود. بنابر مرجع [6] که مخروط‌هایی با زوایای نیم‌رأس بزرگ را فقط به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده است، تأثیر تغییر ضخامت پوسته بر روی رفتار فروریزشی مخروط‌ها بسیار ناچیز است. اما همانگونه که در بخش نتایج آورده شده است در مخروط‌های با زوایای نیم‌رأس کوچک تأثیر تغییر ضخامت بر روی رفتار فروریزشی بیشترین اثرگذاری را دارد. همچنین با معکوس قرار دادن نمونه‌های مخروطی در برابر بارگذاری دینامیکی تأثیر نحوه اعمال بار بر روی رفتار فروریزشی این نوع جاذب‌ها، بحث و بررسی شده است. علاوه بر این

دیگر حالت‌های انرژی از قبیل انرژی تغییرشکل پلاستیک در مواد جامد تغییرشکل‌پذیر، تبدیل می‌کنند. فرایند تبدیل در تغییرشکل پلاستیک بستگی به مقدار و شیوه اعمال نیرو، سرعت اعمال نیرو، الگوهای تغییرشکل و خواص مواد مانند شکل‌پذیری¹ و چقرمگی² دارد [1]. لوله‌ها پوسته‌هایی توخالی هستند که به عنوان عمومی‌ترین و قدیمی‌ترین شکل جاذب‌های انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و اولین تحقیقات در این مورد توسط الکساندر صورت گرفته است. او توانست با ارائه الگوی فروریزشی که دارای سه لولای پلاستیک در یک چین‌خوردگی است، نیروی میانگین فروپاشی را محاسبه کند [2].

نداف اسکوئی، خدارحمی و رضوانی لوله‌های دایروی آلومینیومی را به صورت تجربی و تحلیلی با در نظر گرفتن اثرات اینرسی که تا قبل از آن اثرات اینرسی در نظر گرفته نشده بود، مورد مطالعه قرار دادند و مشخص شد سرعت و جرم ضربه‌زن که در مدل‌های تحلیلی قبلی برای محاسبه نیروی متوسط لهیدگی از آن صرف‌نظر شده بود، تأثیر زیادی بر نیروی متوسط فروریزش و میزان جذب انرژی در این لوله‌ها دارد. آنها همچنین دریافتند در محدوده خاصی از سرعت، کمانش پیش‌رونده دینامیکی و در سرعت‌های کمتر از آن محدوده، کمانش پلاستیکی دینامیکی رخ می‌دهد [3]. نیک‌نژاد و همکارانش برای محاسبه نیروی لحظه‌ای چین‌خوردگی در ستون‌های مربعی تک سلولی رابطه‌ای ارائه کردند. تطابق خوبی بین نتایج به دست آمده از حل تئوری آنها با نتایج تجربی مشاهده شد [4]. پوستلتوایت و میلز برای ارائه یک مدل آنالوگ کامل برای اتومبیل، تعدادی آزمایش به صورت شبه‌استاتیکی بر روی رفتار لهیدگی مخروط‌های ناقص با زوایای نیم‌رأس متفاوت انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که در ظرفیت جذب انرژی مخروط‌های با زوایای نیم‌رأس کوچک و استوانه‌های با قطر میانگین مشابه، اختلاف کمی وجود دارد. این تفاوت هنگامی که مخروط‌های با زوایای نیم‌رأس بزرگتر مورد استفاده قرار گرفتند، بیشتر می‌شود [5]. السوبکی و همکارانش [6] به منظور بررسی شرایط مرزی هندسی و اثرات عملیات حرارتی بر روی مودهای فروریزش و همچنین خصوصیات جذب انرژی مخروط‌های ناقص آلومینیومی با ابعاد هندسی مختلف آزمایش‌هایی را به صورت بارگذاری شبه‌استاتیک، انجام دادند. آنها دریافتند که در مخروط‌های ناقص با زوایای نیم‌رأس بزرگ، تأثیر تغییر در ضخامت دیواره کم اهمیت بود. همچنین مود غالب در فروریزش مخروط‌ها، الماسی یا ترکیبی بود و دریافتند که مقدار انرژی جذب شده متناسب با تعداد چین‌خوردگی‌هاست.

یک مطالعه مقایسه‌ای در مورد مودهای فروریزش، نیم‌کره‌ها و مخروط‌های با زاویه نیم‌رأس بزرگ، در دو حالت بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی توسط پراساد و گوپتا [7] انجام گرفت. لهیدگی متقارن محوری مخروط‌های جدار نازک، با در نظر گرفتن تغییر ضخامت، و همچنین تأثیر کرنش‌های جانبی در طی فرایند لهیدگی، با مدل چین‌های مستقیم، توسط حسینی و همکارانش [8] به صورت تئوری مدل شده است. این مدل به نحویست که این چین‌های مستقیم، برخی به سمت داخل و برخی به سمت خارج تا شده‌اند. علاوه بر این چندین تحقیق به صورت تئوری روی فروریزش پوسته‌های مخروطی انجام شده است [9-13]. اثر تقویت‌کننده‌های طولی بر کمانش پوسته‌های مخروطی توسط نداف اسکویی و کوچکی‌نژاد [14] به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. آنها تأثیر انواع سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها مانند مقطع U شکل، n شکل و مقطع T شکل بر روی بار

1- Ductility
2- Toughness

جدول 1 مشخصات هندسی نمونه‌ها

گروه	ارتفاع (cm)	قطر بالا (cm)	قطر پایین (cm)	زاویه نیم‌رأس (deg)	ضخامت (mm)
A	9/68	6/62	8/85	6/6	1
C	11/45	7/36	10	6/6	1/2

جدول 2 خواص مکانیکی نمونه‌ها

ویژگی مکانیکی	مدول یانگ	نسبت پواسون	تنش تسلیم	تنش نهایی	کرنش نهایی
مقدار	68 GPa	0/3	75 MPa	130 MPa	0/22

3- روش انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه ضربه‌زن سقوط وزنه استفاده شده است که در آن یک ضربه‌زن استوانه‌ای از درون لوله راهنما عبور کرده و روی نمونه‌ها سقوط می‌کند، شکل 4 نمای کلی این دستگاه را نشان می‌دهد. روش کار این دستگاه به صورت دستی است و با تغییر دادن ارتفاع سقوط ضربه‌زن سرعت برخورد قابل تغییر است، همچنین برای تغییر جرم ضربه‌زن وزنه‌هایی استوانه‌ای تهیه شدند تا هم جرم ضربه‌زن قابل تغییر باشد هم به واسطه استوانه‌ای بودن آنها، ضربه‌زن هنگام سقوط کج نشود و تا اتمام انرژی جنبشی خود عمود بر نمونه‌ها باقی بماند.

روی هر دو گروه از نمونه‌های مخروطی تعداد 6 آزمایش انجام شد که در برخی جرم ضربه‌زن ثابت است و در برخی دیگر سرعت برخورد ثابت نگه داشته شده است. به منظور دقت و صحت نتایج، آزمایش‌ها هر کدام سه مرتبه تکرار شدند، برای نام‌گذاری نمونه‌ها از حروف بزرگ لاتین به همراه یک عدد استفاده شده است که حرف لاتین نشانگر گروه و عدد همراه با آن نشانگر شماره آزمایش است.

4- شبیه‌سازی عددی فروریزش مخروط‌های ناقص ته‌بسته

نرم‌افزار غیرخطی آباکوس² با نسخه 6.12 و روش حل صریح³ برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. برای مدل‌سازی دستگاه ضربه‌زن سقوط آزاد، فقط ضربه‌زن و صفحه‌ی میز دستگاه مدل شدند و نمونه نیز پس از مدل شدن در مازول چیدمان قطعات، بین آنها قرار گرفته است. ضربه‌زن استوانه‌ای و صفحه‌ی میز به صورت صلب و از تکنیک اکستروژن و مخروط‌ها به صورت پوسته و از تکنیک دوران در مازول قطعات ایجاد شدند.

برای تعریف جنس مخروط‌ها، در مازول خصوصیات مواد مدول یانگ $E=68 \text{ GPa}$ ، تنش تسلیم $\sigma_y=75 \text{ MPa}$ و ضریب پواسون $\nu=0.3$ برای خواص الاستیک، نمودار تنش-کرنش حقیقی برای خواص پلاستیک تعریف شده است. همچنین در قسمت تعریف برهم‌کنش⁴، بین ضربه‌زن و نمونه و نیز بین نمونه و صفحه صلب شرایطی انتخاب شد تا از نفوذ نمونه در ضربه‌زن و سطح صلب جلوگیری شود.

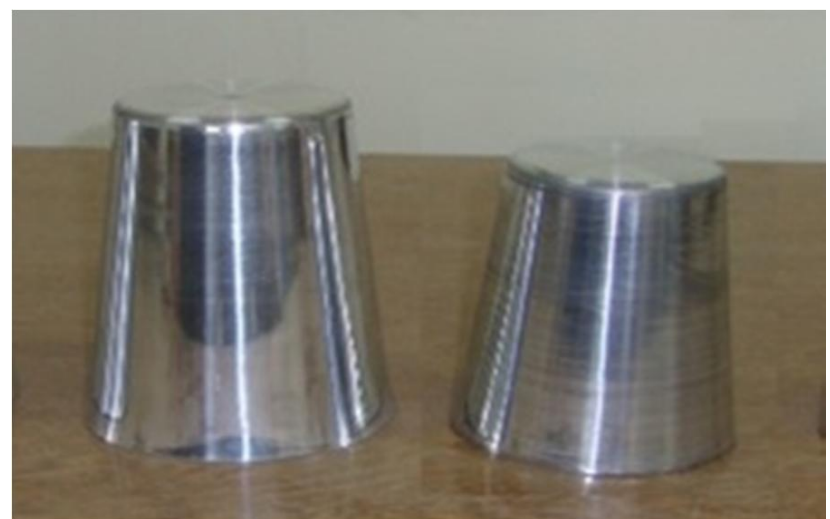
برای استقلال حل عددی از مش‌بندی، چندین شبیه‌سازی انجام شد تا اندازه مش مناسب که منجر به همگرایی جواب می‌شود، مشخص شود. مش‌بندی از 0/008 تا 0/0015 کوچک شد که در بازه 0/002 تا 0/0015 همگرایی در جواب برای طول لهیدگی و بیشینه نیروی فروریزش مشاهده شد. بنابراین المان‌بندی با اندازه مش 0/002 برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد. نوع المان بکار رفته در مخروط‌ها از نوع المان پوسته با کد S4R است که

مجموعه‌های چندتایی از مخروط‌های ناقص سربسته به صورت یک سیستم جاذب انرژی به صورت عددی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

2- معرفی نمونه‌ها

برای انجام آزمایش‌های تجربی دو گروه از مخروط‌های ناقص سربسته مورد آزمایش قرار گرفتند، در شکل 1 این مخروط‌ها نشان داده شده‌اند. همچنین در جدول 1 مشخصات هندسی این دو گروه ارائه شده است. برای شناسایی خواص مکانیکی ابتدا یکی از نمونه‌ها (لیوان کامل) با روش وایرکات و طبق استاندارد جنف¹ برش داده شده و تعداد سه نمونه استاندارد برای انجام تست کشش به آزمایشگاه فرستاده شد. پس از انجام آزمایش و مشخص شدن خواص مکانیکی، مشخص شد نوع آلیاژ به کار رفته در نمونه‌ها آلیاژ AA6061 است.

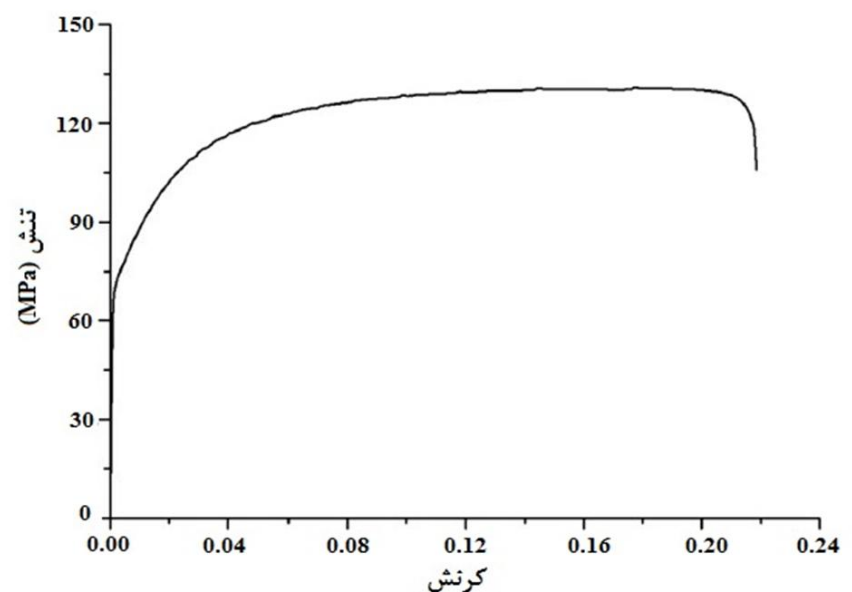
شکل 2 یکی از نمونه‌های استاندارد را بعد از تست کشش نشان می‌دهد. همچنین در شکل 3 منحنی تنش-کرنش برای این نمونه‌ها آورده شده است. در جدول 2 خواص مکانیکی به دست آمده برای نمونه‌ها، نشان داده شده است.



شکل 1 مخروط‌های ته‌بسته آلومینیومی



شکل 2 نمونه پس از آزمایش کشش ساده



شکل 3 منحنی تنش - کرنش مهندسی برای مخروط‌های آلومینیومی

2- Abaqus
3- Explicit
4- Interaction

5-1- نتایج آزمایش‌های تجربی

شرایط بارگذاری و نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مخروط‌های ته‌بسته آلومینیومی در جدول 3 آورده شده است.

با توجه به جدول 3 نمونه‌های A3 و A4 در شرایط یکسان بارگذاری هستند اما تفاوت این دو آزمایش در نحوه اعمال بار به آنهاست؛ به این صورت که نمونه A4 به صورت وارونه در برابر ضربه‌زن قرار داشته است و ضربه‌زن با انتهای باز آن برخورد کرده است.

در آزمایش‌های انجام شده مشاهده شد، فروریزش نمونه A4 نسبت به نمونه A3 مقداری نامنظم‌تر است. همچنین طول لهیدگی برای نمونه A3 بیشتر از نمونه A4 است. به نظر می‌رسد علت تفاوت طول لهیدگی برای این دو نمونه، در چگونگی انتقال نیروی ضربه به انتهای بسته مخروط باشد. با توجه به اینکه در هر دو حالت مخروط از انتهای بسته شروع به فروریزش کرده است، در حالت وارونه چون محل ضربه با محل تسلیم (در واقع همان محل شروع فروریزش) به اندازه ارتفاع مخروط فاصله دارد، در حین انتقال نیروی ضربه برای ایجاد فروریزش انتهای بسته، مقداری از این نیرو در دیواره مخروط تلف شده و خود این رویداد باعث شده تا نیروی کمتری به انتهای بسته مخروط برسد؛ لذا در حالت وارونه قرار دادن نمونه، طول لهیدگی کاهش یافته است.

منظور از الگوی چهارضلعی‌های متوالی این است که هنگام شروع فروریزش نمونه‌ها ابتدا انتهای بسته مخروط مقداری فروریزش کرده و پس از آن یک چهارضلعی ایجاد می‌شود. با پیشرفت لهیدگی و تکمیل این چهارضلعی اولیه، چهارضلعی بعدی با چرخش 45 درجه‌ای نسبت به چهارضلعی قبلی ایجاد می‌گردد و این عمل تا اتمام انرژی جنبشی ضربه‌زن و تکمیل فروریزش ادامه می‌یابد. به این ترتیب از نمای پایین این چهارضلعی‌ها هنگامی که روی هم می‌افتند به صورت هشت‌ضلعی دیده خواهند شد. توجه شود که هر چهارضلعی یک لایه چین‌خوردگی به حساب خواهد آمد. در شکل‌های 6 و 7 فروریزش الماسی با الگوی چهارضلعی‌های متوالی به ترتیب از نمای پایین و نمای روبرو برای نمونه A3 نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، از نمای پایین چهارضلعی‌های متوالی که روی هم افتاده‌اند به خوبی قابل مشاهده هستند. با ایجاد دو چهارضلعی یک هشت‌ضلعی به وجود می‌آید. همچنین در شکل 7 مود الماسی فروریزش پوسته مخروطی به همراه گوشه‌های چهارضلعی اولیه به



شکل 4 نمای کلی دستگاه ضربه‌زن سقوط آزاد

دارای چهار گره روی چهار رأس المان مربعی است و روش انتگرال‌گیری روی نقاط گوسی آن از نوع کاهش یافته است.

5- نتایج و بحث

در تمامی آزمایش‌ها مخروط‌های ناقص با مود الماسی و به صورت پیش‌رونده دینامیکی فروریزش کردند. هنگام برخورد ضربه‌زن با مخروط‌ها، ابتدا در انتهای بسته مقدار کمی فرورفتگی ایجاد شده سپس در محل پخ انتهای بسته مخروط، اولین چین به وجود می‌آید که اولین چهارضلعی را تشکیل می‌دهد. چین‌خوردگی‌ها از نمای پایین، به صورت لایه‌های چهارضلعی بر روی هم می‌افتند و این فرایند تا هنگامی که تمام انرژی جنبشی ضربه‌زن تلف شود، ادامه می‌یابد.

در شکل 5 فرورفتگی سرپوش مخروط از نمای بالا برای یکی از نمونه‌ها نشان داده شده است. هنگام برخورد ضربه‌زن با مخروط جاذب انرژی، چین‌خوردگی از محلی که تسلیم رخ می‌دهد شروع شده و در راستای محور مخروط به سمت انتهای بزرگتر مخروط ادامه می‌یابد. در شکل 5 به خوبی چهارضلعی اولیه و فروریزش اولیه انتهای بسته مخروط از نمای بالا قابل مشاهده است.



شکل 5 فرورفتگی در ناحیه انتهای بسته مخروط

نمونه	سرعت برخورد (m/s)	جرم ضربه‌زن (kg)	طول لهیدگی (mm)	طول لهیدگی (mm)	جرم نمونه (g)
A1	5	6/2	36/8	0/380	45/7
A2	5	8/2	56/8	0/587	45/7
A3	5	9/9	69/8	0/721	45/7
A4	5	9/9	58/8	0/607	45/7
A5	3	9/9	21/8	0/225	45/7
A6	4/22	9/9	46/8	0/483	45/7
C1	5	8/2	57/5	0/502	58/75
C2	5	10/8	59/5	0/520	58/75
C3	5	12/8	84/5	0/738	58/75
C4	3	9/9	29/5	0/258	58/75
C5	4/22	9/9	54/5	0/476	58/75
C6	5	9/9	68/5	0/598	58/75

توانسته‌اند انرژی جنبشی ضربه‌زن با جرم $6/2$ ، $8/2$ و $9/9$ kg که با سرعت 5 m/s با آنها برخورد کرده را از طریق اتلاف انرژی‌هایی مانند اصطکاک، تغییر شکل پلاستیک و اتلافات انرژی به صورت صدا، جذب نمایند.

در شکل 10 نمای پایین از این سه نمونه نشان داده شده است. در این شکل می‌توان تعداد لایه‌های چین‌خورده و همچنین الگوی فروریزش چهارضلعی نمونه‌ها را مشاهده نمود.

برای نمونه‌های گروه C نیز همان‌گونه که در شکل 11 مشاهده می‌شود، نمونه C1 با پنج، نمونه C2 با شش و نمونه C3 با هفت لایه چین‌خوردگی، انرژی جنبشی ضربه‌زن با جرم به ترتیب $8/2$ ، $10/8$ و $12/8$ kg را که سرعتش هنگام برخورد با نمونه‌ها برابر با 5 m/s بوده است، جذب نمایند.

همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود الگوی چهارضلعی فروریزش برای مخروط‌های این گروه به وضوح قابل دیدن است. به عنوان مثال در نمونه C2 تعداد هفت چهارضلعی ایجاد شده است که رئوس این چهارضلعی‌ها در حین ایجاد، خود نیز یک ضلع کوچک ساخته‌اند و باعث پدید آوردن دو مورد هشت‌ضلعی شده‌اند.

با توجه به جدول 3 نمونه A2 با A3، A5 با C4 و A6 با C5 از لحاظ شرایط بارگذاری یکسان هستند اما نسبت لهیدگی در آنها متفاوت است. برای توضیح این نسبت باید جذب انرژی مخروط‌ها نیز در نظر گرفته شده، سپس در مورد عملکرد جاذب بحث شود. با توجه به نمونه‌های فوق‌الذکر که جذب انرژی یکسانی دارند، می‌توان گفت نسبت لهیدگی در مخروط‌های گروه C نسبت به گروه A کوچکتر است. این مطلب نشان می‌دهد مخروط‌های گروه C از لحاظ نسبت لهیدگی جاذب‌های بهتری نسبت به مخروط‌های گروه A هستند.

یکی دیگر از ویژگی‌هایی که می‌توان با آن میان عملکرد جذب انرژی جاذب‌ها مقایسه انجام داد، جذب انرژی ویژه است. این ویژگی عبارتست از نسبت مقدار انرژی جذب شده به جرم ناحیه له‌شده [19]. هر چه این خاصیت برای جاذبی بزرگتر باشد آن جاذب مناسب‌تر است. در جدول 4 مقادیر جذب انرژی و جذب انرژی ویژه برای هر دو گروه آورده شده است.

با توجه به جدول 4، با یکسان بودن شرایط بارگذاری برای نمونه‌های گروه A و C نمونه‌های گروه C دارای جذب انرژی ویژه بیشتری هستند. به عنوان مثال نمونه‌های A2 و C1 دارای جذب انرژی یکسانی هستند، اما نمونه



شکل 10 نمای پایین از مود فروریزش الماسی با الگوی چهارضلعی‌های متوالی برای مخروط‌های گروه A



شکل 11 نمای پایین از مود فروریزش الماسی با الگوی چهارضلعی‌های متوالی برای مخروط‌های گروه C



شکل 6 نمای پایین از فروریزش با مود الماسی و الگوی چهارضلعی‌های متوالی



شکل 7 نمای روبرو از فروریزش با مود الماسی و الگوی چهارضلعی‌های متوالی

خوبی قابل مشاهده است.

در شکل 8 تأثیر تغییر جرم ضربه‌زن هنگامی که از $6/2$ به $9/9$ kg رسیده و سرعت برخورد ثابت و برابر 5 m/s بوده است، بر روی فروریزش مخروط‌های گروه A نشان داده شده است. همچنین در شکل 9 تأثیر تغییر جرم ضربه‌زن هنگامی که از $8/2$ به $12/8$ kg رسیده و سرعت برخورد ثابت و برابر 5 m/s بوده است، بر روی فروریزش مخروط‌های گروه C نشان داده شده است.

با توجه به جدول 3 می‌توان گفت با $59/7\%$ افزایش جرم ضربه‌زن طول لهیدگی برای مخروط‌های گروه A، $89/7\%$ رشد داشته است در حالی که با $56/1\%$ افزایش جرم ضربه‌زن طول لهیدگی برای مخروط‌های گروه C، 47% رشد داشته است. این مطلب نشان می‌دهد مخروط‌های گروه C در برابر افزایش جرم ضربه‌زن مقاومت بیشتری نسبت به مخروط‌های گروه A از خود نشان می‌دهند.

برای مخروط‌های گروه A، نمونه A1 با سه لایه چین‌خوردگی، نمونه A2 پنج لایه چین‌خوردگی و نمونه A3 با شش لایه چین‌خوردگی به ترتیب



شکل 8 تأثیر جرم ضربه‌زن بر مقدار لهیدگی مخروط‌های گروه A

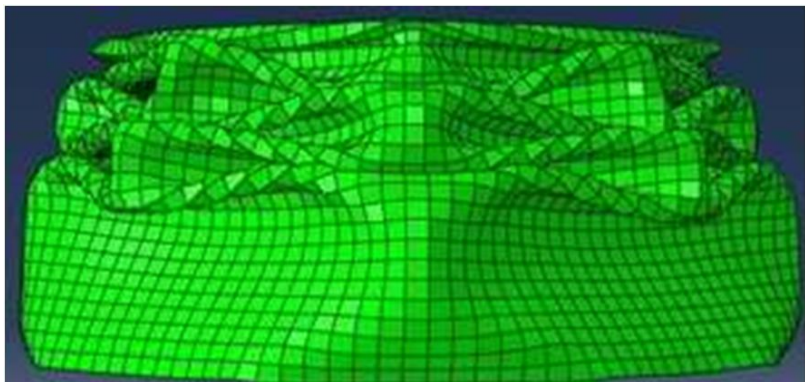


شکل 9 تأثیر جرم ضربه‌زن بر مقدار لهیدگی مخروط‌های گروه C

نیروی متوسط فروریزش را تعیین کرد که خود یک ویژگی برای مقایسه جاذب‌های انرژی است. در نمودار انرژی-جابجایی، انرژی جنبشی ضربه‌زن بر حسب طول لهیدگی مخروط رسم شده است که با مشاهده آن می‌توان مقدار انرژی جنبشی ضربه‌زن که جذب مخروط می‌شود را در طول‌های مختلف لهیدگی مشخص کرد. شکل 15 نمودار انرژی جنبشی ضربه‌زن بر حسب طول لهیدگی، برای نمونه A3 را نشان می‌دهد. به عنوان مثال همان‌طور که در شکل 15 قابل مشاهده است، نمونه A3 هنگامی که 22 mm فروریزش داشته است 34% (43/7 ژول) از انرژی جنبشی ضربه‌زن را جذب کرده است.



تجربی

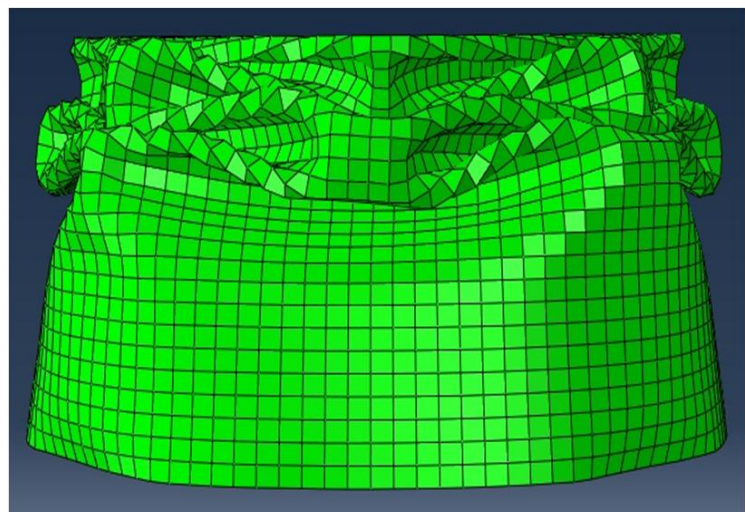


عددی

شکل 12 فروریزش نمونه A3



تجربی



عددی

شکل 13 فروریزش نمونه C5

نمونه	جذب انرژی (J)	جذب انرژی ویژه (J/g)
A1	77/5	4814
A2	102/5	4617
A3	123/7	4548
A4	123/7	5404
A5	44/5	3938
A6	88/1	4686
C1	102/5	5925
C2	135	3740
C3	160	5333
C4	44/5	8812
C5	88/1	5544
C6	123/7	5549

C1 نسبت به نمونه A2، 28% انرژی ویژه بیشتری جذب کرده است. بنابراین مخروط‌های گروه C در جذب انرژی عملکرد بهتری دارند. البته برای مقایسه رفتار فروریزشی جاذب‌ها بایستی ویژگی‌های دیگری را نیز بررسی کرد که در ادامه بحث خواهد شد.

5-2- نتایج عددی

5-2-1- تطابق حل عددی و تجربی

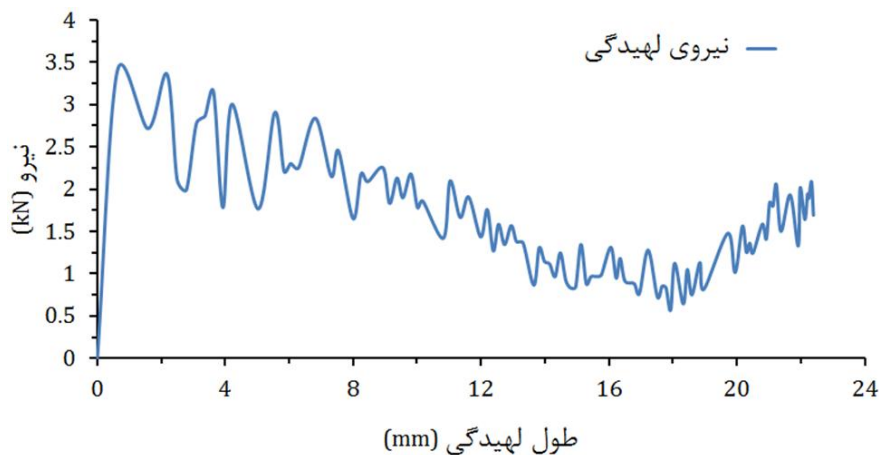
در شبیه‌سازی عددی نیز تمامی چین‌خوردگی‌ها به صورت الماسی و نامتقارن رخ داد. در شبیه‌سازی فرایند ضربه، هنگام برخورد ضربه‌زن با انتهای بسته نمونه‌ها، ابتدا مشابه آزمایش‌ها، در انتهای بسته مخروط یک گودی دایروی ایجاد می‌شود. پس از آن مخروط با تسلیم شدن در ناحیه پخ سرپوش شروع به فروریزش می‌کند. در شبیه‌سازی آزمایش‌ها نیز ابتدا یک چهارضلعی ایجاد می‌شود و با ادامه فرایند ضربه، در اثر انرژی جنبشی ضربه‌زن، فروریزش در امتداد محور مخروط به سمت انتهای باز به صورت پیشرونده ادامه می‌یابد. در شکل 12 فروریزش نمونه A3 از نمای روبرو برای دو حالت تجربی و عددی نشان داده شده است، همچنین فروریزش نمونه C5 از نمای روبرو در دو حالت تجربی و عددی در شکل 13 نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها نیز قابل استنباط است، تطابق بسیار خوبی میان نتایج تجربی و عددی وجود دارد.

همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود فروریزش الماسی نمونه‌های مخروطی به خوبی در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و تطابق زیادی با نتایج تجربی دارد. در شکل 14 فروریزش الماسی با الگوی چهارضلعی‌های متوالی نشان داده شده است. در قسمت 6 نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شده که نشانگر معتبر بودن حل عددی است.

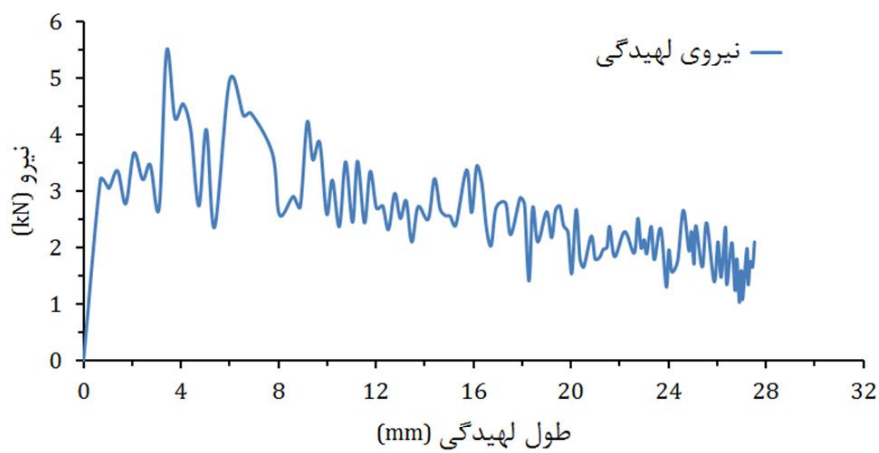
5-2-2- ارائه نتایج شبیه‌سازی عددی

در این قسمت نتایج عددی آزمایش‌های ضربه در قالب نمودارهای نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی ارائه خواهد شد. برای مقایسه رفتار فروریزش این دو گروه، دو نمونه A5 و C4 که در شرایط یکسان بارگذاری قرار داشته‌اند، انتخاب شده‌اند.

نمودار نیرو-جابجایی نشان می‌دهد که در هر مقدار لهیدگی پوسته، چه نیرویی وجود دارد. در این نمودار همچنین بیشینه نیروی لهیدگی قابل مشاهده است. سطح زیر این نمودار در واقع جذب انرژی توسط پوسته مخروطی است. با استفاده از مقدار جذب انرژی و مقدار لهیدگی می‌توان



شکل 16 نمودار نیرو-جابجایی نمونه A5



شکل 17 نمودار نیرو-جابجایی نمونه C4

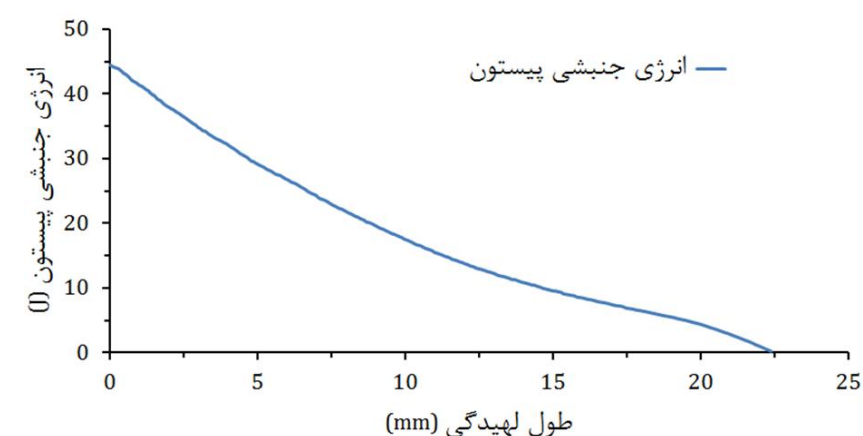
پس از محاسبه مقدار این نیرو برای نمونه‌های A5 و C4 به ترتیب برابر با 1/83 و 1/6 kN بود.

با توجه به شکل‌های 16 و 17 برای نمونه‌های A4 و C4 بیشینه نیرو به ترتیب 3/4 و 5/5 kN است. با توجه به این مقادیر می‌توان گفت افزایش ابعاد هندسی باعث افزایش نیروی بیشینه فروریزش در یک پوسته مخروطی با انتهای بسته می‌شود. بیشینه نیروی فروریزش در واقع بیشترین مقاومت پوسته در برابر بار اعمالی، جهت جلوگیری از تغییرشکل پلاستیک است.

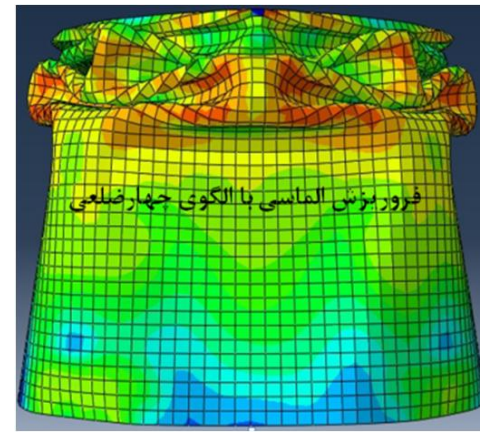
محاسبه سطح زیر نمودارهای نیرو-جابجایی (سطح زیر این نمودارها برابر با جذب انرژی توسط پوسته مخروطی است) توسط نرم‌افزار آریان¹ نسخه 3.1 انجام شده است. طریقه کار با این نرم‌افزار بسیار ساده بوده و فقط کافی است اطلاعات نقاط نمودارها را وارد کرده و نرم‌افزار مساحت زیر نمودار را محاسبه کرده و در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

در شکل 18 نمودار انرژی - جابجایی برای نمونه A5 و در شکل 19 نمودار انرژی - جابجایی برای C4 نشان داده شده است.

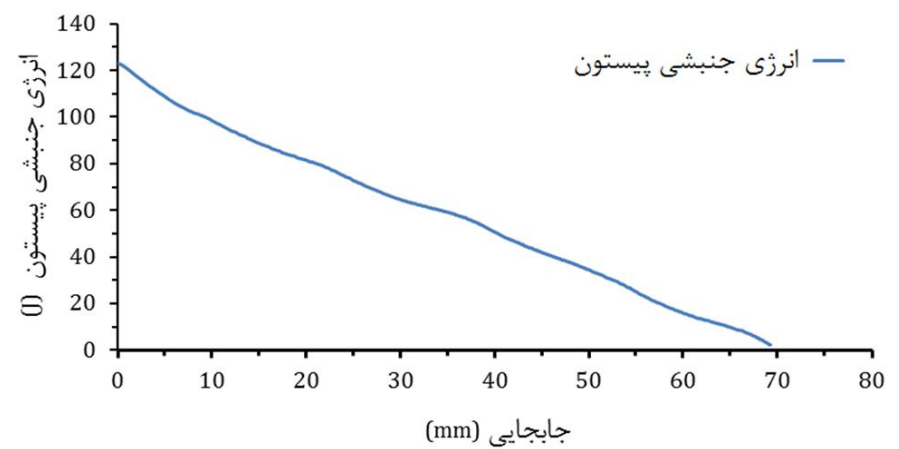
در نمودارهای نیرو-جابجایی می‌توان با استفاده از طول لهیدگی مقدار نیرو را بدست آورد و یا بالعکس، با توجه به نمودارهای نیرو-جابجایی برای



شکل 18 نمودار انرژی - جابجایی نمونه A5



شکل 14 فروریزش الماسی با الگوی چهارضلعی‌های متوالی



شکل 15 نمودار انرژی - جابجایی برای نمونه A3

شکل‌های 16 و 17 نمودارهای نیرو-جابجایی به ترتیب برای نمونه‌های A5 و C4 هستند. همان‌طور که از این نمودارها مشاهده می‌شود، برای دو نمونه A5 و C4 نمودارهای مشابهی دیده می‌شود، و در آنها یک بیشینه نیرو مشاهده می‌شود که پس از آن یک افت ناگهانی در مقدار نیروی فروریزش به وجود می‌آید. در جاذب‌های انرژی معمولاً بیشترین نیرو مربوط به تغییرشکل الاستیک است که پس از آن با تغییرشکل پلاستیک به طور ناگهانی کاهش می‌یابد [19]. در این مرحله در واقع همان فرورفتگی دایروی با مقدار کمی لهیدگی رخ داده است. پس از این مرحله، اولین چهارضلعی تشکیل می‌شود. در واقع بیشینه نیرو در این نمودارها برای ایجاد اولین چهارضلعی است. نیروی متوسط فروریزش یکی از مشخصه‌های جاذب انرژی است و عکس‌العمل آن موجب ایجاد شتاب کاهنده در وسیله‌ای شده که جاذب به آن متصل است. در صورتی که جاذب به سطح صلب برخورد کند نیروی متوسط فروریزش جاذب تعیین کننده شتاب مرکز جرم آن است. سرعت وسایل پس از برخورد بر اساس نیروی متوسط فروریزش و زمان برخورد قابل محاسبه است [19].

نیروی متوسط فروریزش یک معیار مناسب برای مقایسه ظرفیت جذب انرژی در پوسته‌های مخروطی است. سطح این نیرو پایین‌تر از نیروی ماکزیمم در نمودار نیرو-جابجایی است، و طبق رابطه (1) تعریف می‌شود:

$$P_{\text{mean}} = \frac{1}{\delta} \int P d\delta \quad (1)$$

انتگرال در رابطه (1) در واقع سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی است که معادل با جذب انرژی است و δt کل طول لهیدگی است. به بیان دیگر می‌توان گفت نیروی متوسط فروریزش انرژی جذب شده بر واحد طول است. همان‌طور که از تعریف آن می‌توان برداشت کرد، هر چه این نیرو بزرگتر باشد نشان می‌دهد که جاذب انرژی بیشتری بر واحد طول در خود جذب کرده است [20].

با استفاده از رابطه (1) و نمودارهای نیرو-جابجایی و طول‌های لهیدگی می‌توان نیروی متوسط فروریزش را برای نمونه‌های مختلف به دست آورد.

با هم مقایسه خواهند شد. برای این منظور نمودارهای نیرو-جابجایی ارائه خواهد شد تا تأثیر نحوه قرارگیری پوسته‌های مخروطی سربسته در معرض اعمال بار ضربه‌ای مشخص شود. شکل 21 منحنی‌های نیرو-جابجایی را برای این دو نمونه نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل 21 قابل مشاهده است، طول لهیدگی برای نمونه A3، 69/3 و برای نمونه A4، 57/88 mm است. بیشینه نیروی فروریزش برای نمونه A3، 5/66 و برای نمونه A4، 4/23 kN است. با این حساب با وارونه گذاشتن نمونه مخروطی سربسته در معرض اعمال بار ضربه‌ای، طول لهیدگی و بیشینه نیروی فروریزش کاهش یافته‌اند.

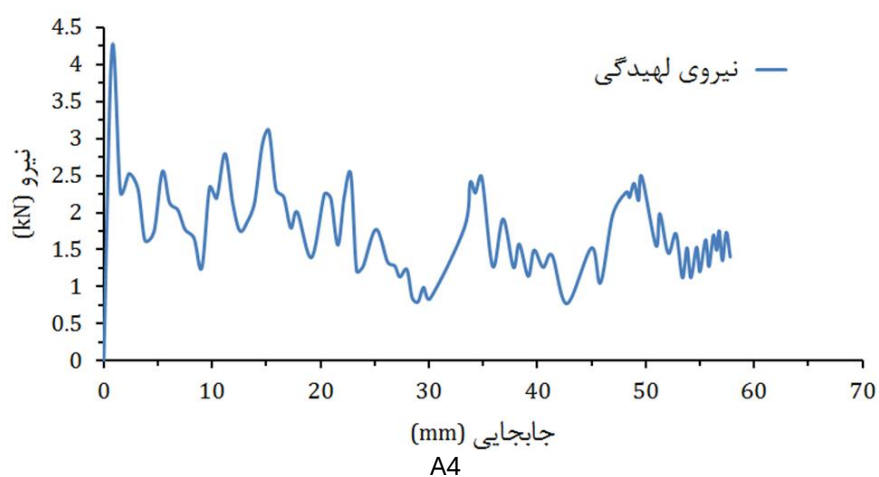
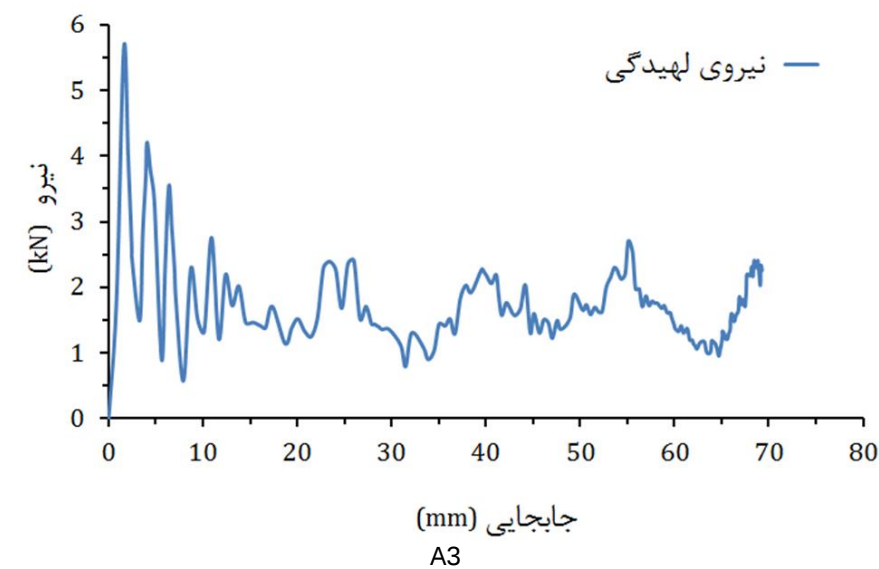
5-2-4- حذف سرپوش پوسته مخروطی و تأثیر آن بر رفتار فروریزش

در این قسمت با برداشتن سرپوش مخروط (پوسته مخروطی با دو انتهای باز)، به مطالعه عددی تأثیر این سرپوش بر رفتار فروریزش این پوسته‌های مخروطی پرداخته خواهد شد. برای این منظور نمونه C5 را در دو حالت تهبسته و تهباز با هم مقایسه شده تا تأثیر این سرپوش بر ویژگی‌های فروریزش این نمونه مشخص گردد. در شکل 22 نمای بالا و پایین برای فروریزش این نمونه در دو حالت تهباز و تهبسته نشان داده شده است.

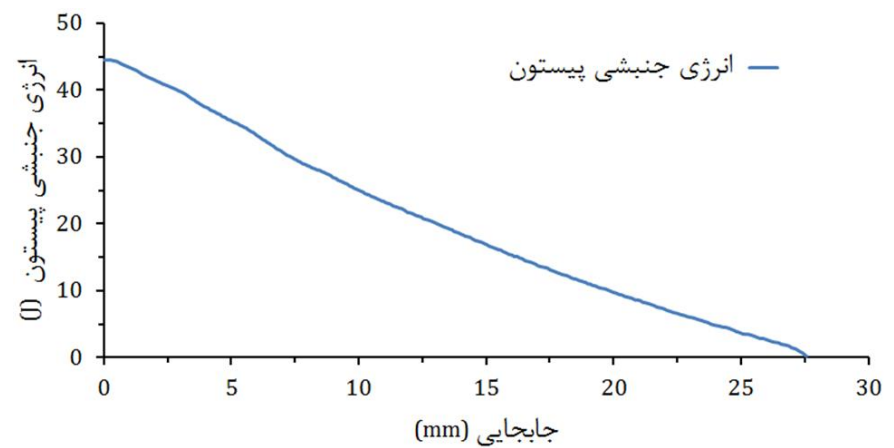
همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، با حذف سرپوش نمونه مخروطی الگوی فروریزش از چهارضلعی به پنج‌ضلعی تغییر می‌کند. در نمودار شکل 23 تأثیر این سرپوش بر بیشینه نیروی فروریزش و همچنین طول لهیدگی نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل 23 مشاهده می‌شود، با حذف سرپوش طول لهیدگی در حدود 28% کاهش یافته است اما بیشینه نیروی فروریزش تقریباً به میزان دو برابر افزایش یافته است.

با محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه C5 در دو حالت تهبسته و تهباز مشخص شد انرژی جذب شده در حالت تهبسته 93/5 و در



شکل 21 منحنی نیرو-جابجایی برای نمونه‌های A3 و A4



شکل 19 نمودار انرژی-جابجایی نمونه C4

این نمونه‌ها می‌توان گفت برای نمونه A5 بیشینه نیرو در طول لهیدگی mm 2/2 (9/8% کل طول لهیدگی) و برای نمونه C4 در mm 3/4 (12/4% کل طول لهیدگی) ثبت شده است.

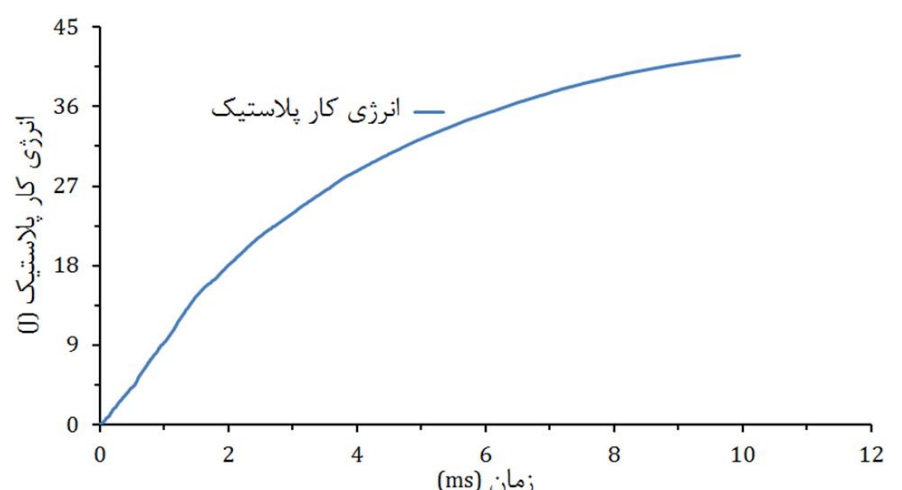
با توجه به نمودارهای انرژی-جابجایی برای نمونه‌های فوق‌الذکر نمونه A5 در طول لهیدگی mm 2/2، J 0/5 (1/1% کل انرژی جنبشی ضربه‌زن) و نمونه C4 در mm 3/4، J 0/1 (0/2% کل انرژی جنبشی ضربه‌زن) را جذب کرده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که بیشترین مقدار جذب انرژی در طول یک فرایند ضربه مربوط به تغییرشکل پلاستیک است. به بیان دیگر می‌توان گفت بیشتر انرژی جنبشی ضربه‌زن توسط کار پلاستیک جذب پوسته‌های مخروطی شده است و تغییرشکل الاستیک با بیشینه بار فروریزش، سهم اندکی در جذب انرژی جنبشی ضربه‌زن داشته است.

برای بهتر مشخص شدن این موضوع، در شکل 20 جذب انرژی توسط کار پلاستیک بر حسب زمان برای نمونه C4 نشان داده شده است. همان‌طور که گفته شد بیشترین جذب انرژی مربوط به تغییرشکل پلاستیک در جاذب است. برای جاذب C4 از مجموع 44/11 ژول انرژی جنبشی، مقدار 41 ژول آن توسط کار پلاستیک جذب شده است. این مقدار برابر با 92/9% از کل انرژی جذب شده است و از زمان صفر که میزان جذب انرژی کار پلاستیک صفر بوده شروع شده و با گذشت زمان افزایش یافته است.

با توجه به نمودار شکل 20 و توضیحات ارائه شده، می‌توان گفت در فرایندهای فروریزش پوسته‌های مورد مطالعه اتلاف انرژی و در واقع همان جذب انرژی از طریق کار پلاستیک بیشترین سهم را در بین اتلاف‌های انرژی در حین یک فرایند فروریزش دارد و ما بقی نظیر اتلاف از طریق صوت و گرما سهم بسیار کمی در جذب انرژی دارند.

5-2-3- وارونه قرار دادن پوسته مخروطی سربسته و اعمال بار ضربه‌ای به انتهای باز آن

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های A3 و A4 ارائه می‌شود و این نتایج



شکل 20 نمودار انرژی کار پلاستیک- زمان نمونه C4

دو حالت مشاهده می‌شود که اختلاف طول لهیدگی آنها 28% است در حالی که اختلاف جذب انرژی در دو حالت تنها 5% است. علت کم بودن اختلاف انرژی جذب شده در دو حالت ته‌بسته و ته‌باز مربوط به نمودار نیرو-جابجایی آنها می‌شود؛ به طوری که کاهش سطح زیر نمودار و به تبع آن جذب انرژی در حالت ته‌باز به خاطر کمتر بودن طول لهیدگی، به واسطه بالا بودن بیشینه نیرو در حالت ته‌باز، جبران شده و جذب انرژی در دو حالت تقریباً به هم نزدیک می‌شود.

5-2-5- تأثیر تغییر ابعاد هندسی بر روی ویژگی‌های جذب انرژی و فروریزش پوسته‌های مخروطی ته‌بسته

در این قسمت به بررسی تأثیر ابعاد هندسی بر روی ویژگی‌های جذب انرژی و فروریزش پوسته‌های مخروطی ته‌بسته پرداخته خواهد شد. برای این منظور تأثیر سه خصوصیت ضخامت، زاویه نیم‌رأس و قطر متوسط بر روی بیشینه بار این نوع از پوسته‌های آلومینیومی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای بررسی تأثیر هر کدام از این سه ویژگی هندسی بر روی ویژگی‌های جذب انرژی و فروریزش پوسته‌ها، دو حالت شبیه‌سازی شده است. در این بررسی‌ها نمونه C4 انتخاب شد و با تغییر ابعاد هندسی این نمونه، ویژگی‌های جذب انرژی و فروریزش آن مورد مطالعه عددی قرار گرفت.

5-2-5-1- تأثیر تغییر ابعاد هندسی پوسته بر بیشینه نیرو و نیروی متوسط فروریزش

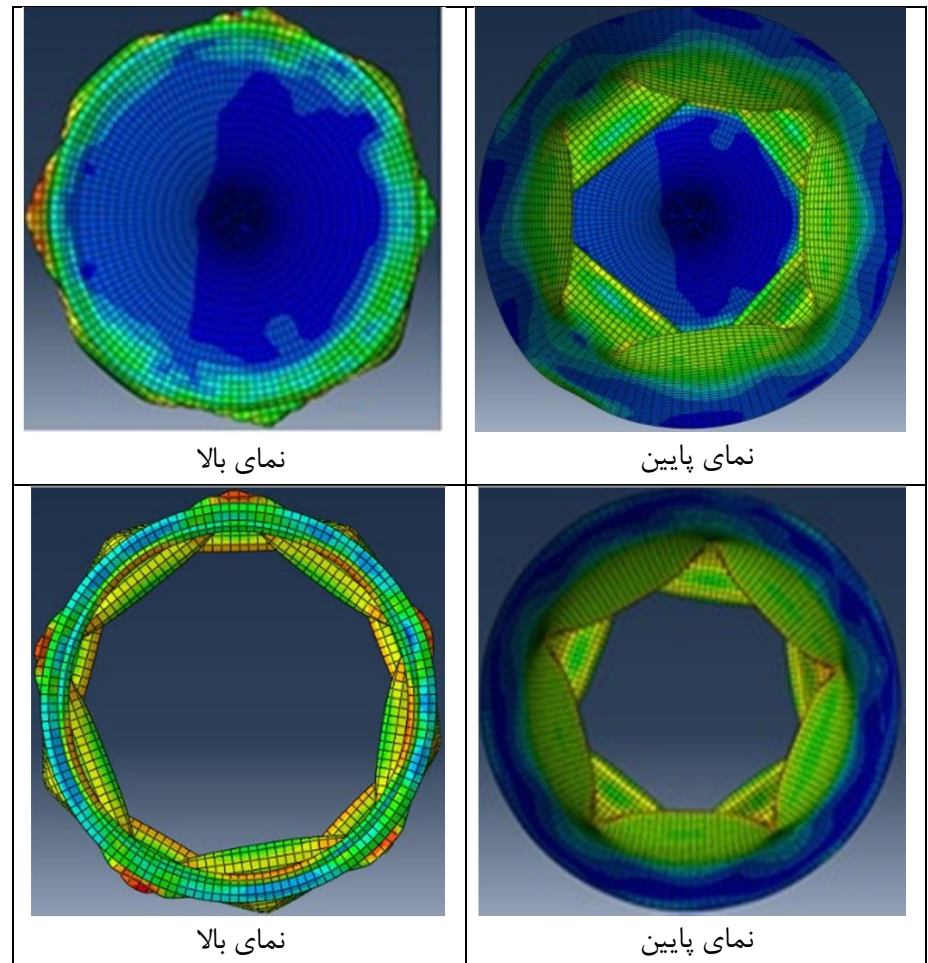
در جدول 5 تأثیر تغییر ابعاد هندسی بر بیشینه نیروی فروریزش و نیروی متوسط فروریزش آورده شده است.

در این قسمت از حل عددی با تغییر ابعاد نمونه‌های مخروطی اثر این ویژگی‌های هندسی بر رفتار فروریزشی پوسته‌های مخروطی مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به جدول 5 میزان تغییر ضخامت و قطر متوسط 20% اما میزان تغییر زاویه نیم‌رأس 40% است. چون در تحلیل عددی با تغییر 20 درصدی زاویه نیم‌رأس تأثیر بسیار کمی روی رفتار فروریزشی مشاهده شد لذا برای این ویژگی تغییر 40 درصدی انتخاب شده است تا در مورد تأثیر این ویژگی‌ها روی رفتار فروریزشی بهتر اظهار نظر شود.

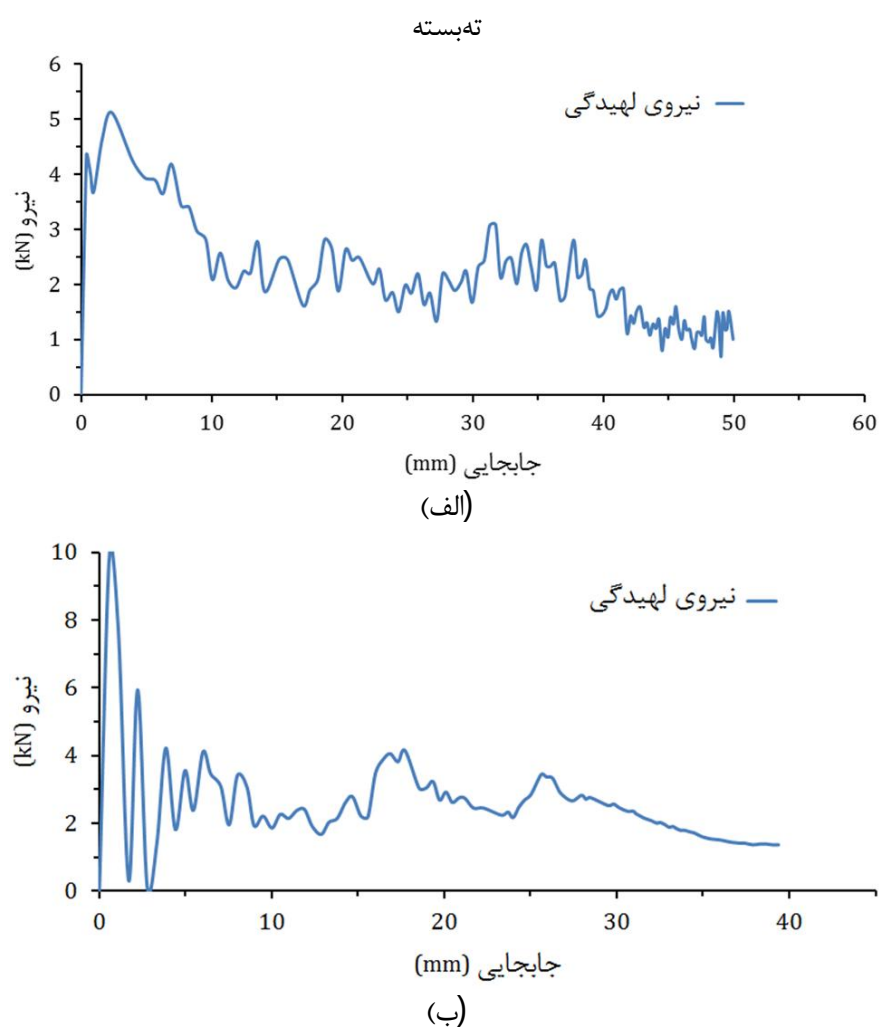
با توجه به جدول 5، تغییر در ضخامت پوسته دارای بیشترین تأثیر و تغییر در زاویه نیم‌رأس دارای کمترین تأثیر روی رفتار فروریزشی پوسته‌های مخروطی دارد. همانگونه که قابل مشاهده است طول لهیدگی در برابر تغییر ضخامت بیشترین تأثیرپذیری و جذب انرژی ویژه کمترین تأثیرپذیری را از خود نشان داده‌اند. می‌توان گفت علت این امر کاهش جرم پوسته در ازای کاهش ضخامت جداره پوسته است.

5-2-5-6- شبیه‌سازی سیستم‌های جاذب انرژی چندتایی از پوسته‌های مخروطی ناقص سربسته

در این بخش با کنار هم گذاشتن دو و سه پوسته مخروطی در کنار هم



شکل 22 نمای بالا و نمای پایین از فروریزش نمونه مخروطی C5 در دو حالت ته‌باز و

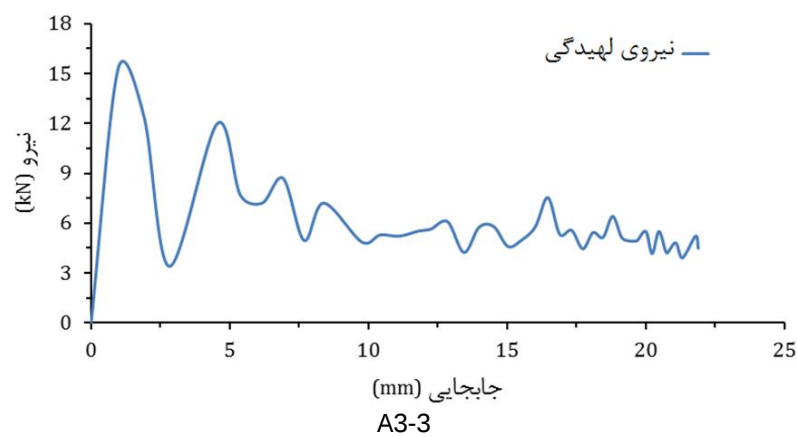
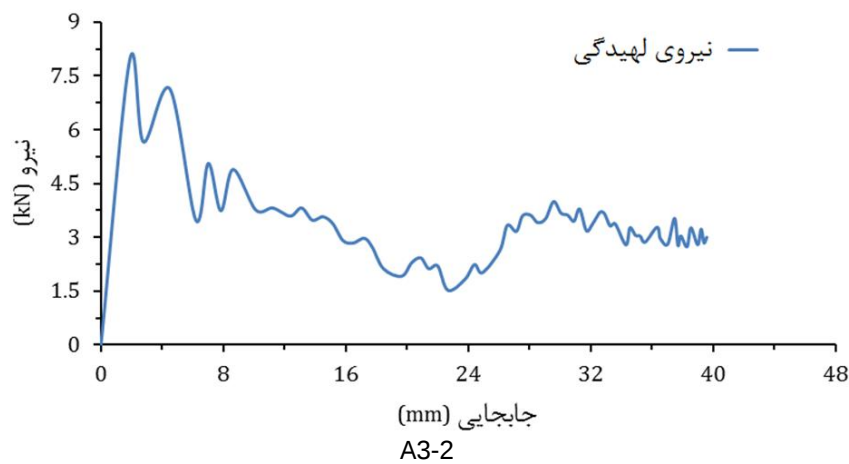


شکل 23 منحنی‌های نیرو-جابجایی نمونه C5 (الف) حالت ته‌بسته (ب) حالت ته‌باز

حالت ته‌باز ل 89 است. با توجه به نمودارهای نیرو-جابجایی برای این

جدول 5 تأثیر تغییر ابعاد هندسی بر رفتار فروریزشی

ویژگی هندسی	میزان تغییر	طول لهیدگی	بیشینه نیروی فروریزش	نیروی متوسط فروریزش	جذب انرژی ویژه
ضخامت	20% کاهش	65/4% افزایش	34/5% کاهش	39/3% کاهش	26/3% افزایش
قطر متوسط	20% افزایش	25/4% کاهش	9/1% افزایش	15/7% افزایش	15% کاهش
زاویه نیم‌رأس	40% افزایش	12/7% افزایش	18/2% کاهش	13/7% کاهش	5/4% افزایش



شکل 25 نمودارهای نیرو-جابجایی سیستم‌های جاذب انرژی

علت کاهش جذب انرژی ویژه سیستم‌های چندتایی نسبت به جاذب تکی را می‌توان جرم ناحیه له‌شده بیان نمود. برای توضیح بیشتر می‌توان گفت در عین حال که طول لهیدگی کاهش پیدا کرده است اما به واسطه قرارگیری جاذب‌ها در کنار هم، به تبع جرم له‌شده افزایش یافته و با توجه به در مخرج قرار گرفتن جرم ناحیه له‌شده در تعریف جذب انرژی ویژه، باعث افت جذب انرژی ویژه شده است.

6- مقایسه نتایج تجربی با شبیه‌سازی عددی

در این قسمت نتایج تجربی و عددی حاصل از این پژوهش با هم مقایسه خواهد شد. برای مقایسه نتایج، طول‌های لهیدگی و جذب انرژی که به صورت تجربی و عددی به دست آمده‌اند با هم مقایسه می‌شوند. این مقایسه در جدول 7 انجام گرفته است.

با توجه به جدول 7 بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و تجربی برای طول لهیدگی نمونه‌ها، مربوط به نمونه C6 و کمترین اختلاف بین نتایج تجربی و عددی مربوط به نمونه A3 است.

در جدول 8 بین جذب انرژی تجربی و عددی نمونه‌های A5 و C4 مقایسه صورت گرفته است.

7- نتیجه‌گیری

در تمامی آزمایش‌های صورت گرفته مود مشاهده شده، مود الماسی با الگوی فروریزش چهارضلعی بود.

با برداشته شدن سرپوش مخروط‌ها الگوی فروریزش از چهارضلعی به پنج‌ضلعی تبدیل شد. طول لهیدگی حدود 28% کاهش پیدا کرد همچنین بیشینه نیروی لهیدگی تقریباً دو برابر شده که این مطلب یک پیامد نامطلوب به حساب می‌آید. اما جذب انرژی تغییر آنچنانی نمی‌کند.

سیستم‌های جاذب انرژی شبیه‌سازی شده‌اند. برای این شبیه‌سازی از شرایط بارگذاری و هندسه نمونه A3 استفاده شده و نتایج آنها با نتایج نمونه A3 مقایسه شده تا تأثیر اضافه نمودن مخروط‌ها در کنار هم در برابر بار ضربه‌ای مشخص گردد.

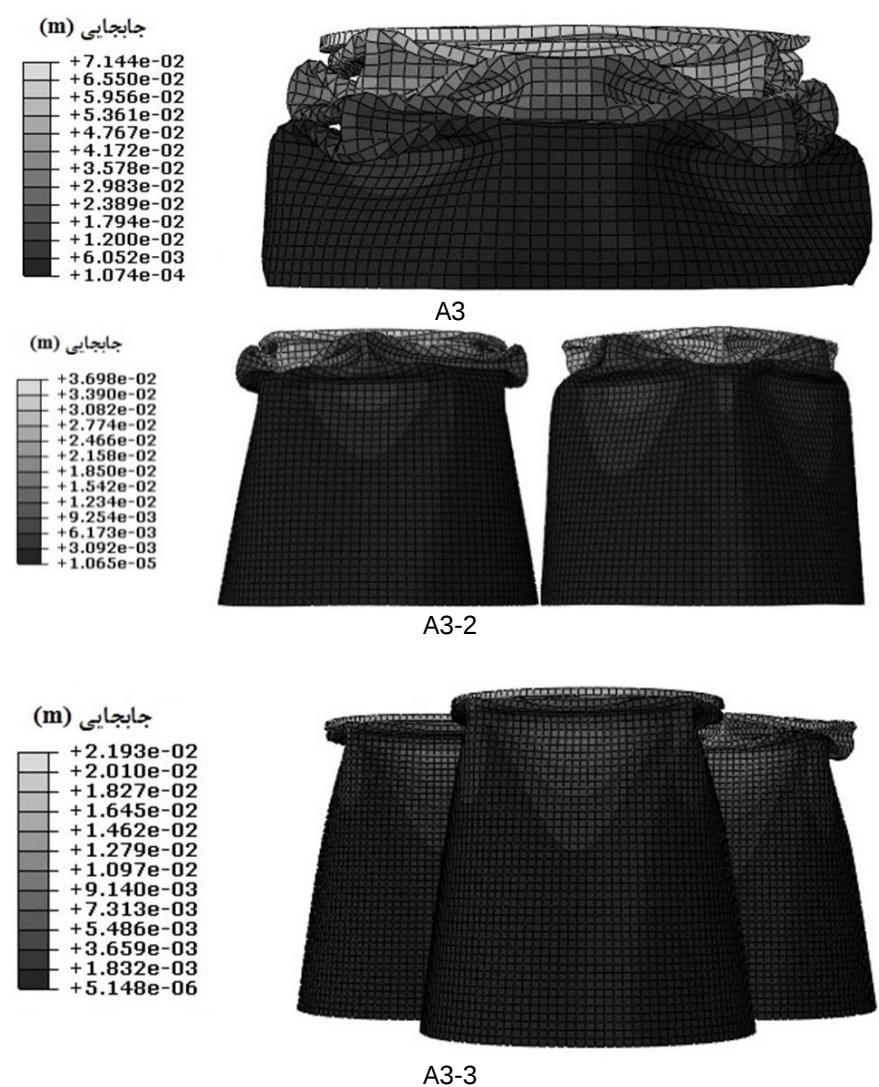
برای نام‌گذاری این نوع جاذب‌ها از حروف لاتین و عدد استفاده می‌شود. به عنوان مثال جاذب A3-2 در واقع جاذب انرژی شبیه‌سازی شده از دو نمونه A3 در کنار هم است.

در شکل 24 کانتور جابجایی برای این جاذب‌ها همراه با کانتور جابجایی نمونه A3 نشان داده شده است.

در شکل 25 نیز نمودارهای نیرو-جابجایی برای این جاذب‌ها نشان داده شده است.

همانطور که در نمودارهای شکل 25 قابل مشاهده است، با افزایش خطی تعداد پوسته‌های مخروطی، بیشینه نیروی فروریزش به صورت غیرخطی افزایش و طول لهیدگی نیز به صورت غیر خطی کاهش پیدا می‌کند. به این معنی که الزاماً نمی‌توان انتظار داشت با دو برابر شدن تعداد جاذب‌ها بیشینه نیروی فروریزش 2 برابر شود و یا اینکه طول لهیدگی نصف گردد.

در جدول 6 نتایج حاصل از شبیه‌سازی این جاذب‌های چندتایی آورده شده است. با توجه به جدول 6 می‌توان گفت مزیت سیستم‌های جاذب چندتایی نسبت به جاذب‌های تکی در طول لهیدگی است. به طوریکه با بیشتر شدن تعداد این جاذب‌ها در کنار هم، طول لهیدگی به شکل چشم‌گیری کاهش یافته است.



شکل 24 کانتور جابجایی سیستم‌های جاذب انرژی

جدول 6 نتایج شبیه‌سازی سیستم‌های جاذب انرژی چندتایی

نوع جاذب	بیشینه نیروی فروریزش	طول لهیدگی	بیشینه نیرو نسبت به جاذب A3	طول لهیدگی نسبت به جاذب A3	جذب انرژی ویژه نسبت به جاذب A3
دوتایی	7/9 kN	37 mm	39% افزایش	46% کاهش	20/7% کاهش
سه‌تایی	15/3 kN	22 mm	170% افزایش	68% کاهش	47/8% کاهش

جدول 7 مقایسه نتایج تجربی و عددی برای طول لهیدگی			
نمونه	طول لهیدگی تجربی (mm)	طول لهیدگی عددی (mm)	درصد خطای حل عددی
A1	36/8	33/8	8/1
A3	69/8	71/4	2/3
A5	21/8	22/4	2/7
C4	29/5	27/5	6/8
C5	54/5	58/5	7/3
C6	68/5	57/5	16

جدول 8 مقایسه نتایج تجربی و عددی در میزان جذب انرژی پوسته‌های مخروطی

سربسته			
نمونه	جذب انرژی در حل تجربی (i)	جذب انرژی در حل عددی (i)	درصد خطای حل عددی
A5	44/5	41/03	7/8
C4	44/5	44/11	0/88

با آزمایش‌های انجام شده بر روی این نمونه‌ها مشخص گردید فروریزش مخروط‌های سربسته در حالتی که ضربه‌زن با انتهای باز مخروط برخورد کند، نسبت به حالتی که مخروط به صورتی قرار بگیرد که ضربه‌زن با انتهای بسته برخورد کند، مقداری نامنظم‌تر است. اما بیشینه نیروی لهیدگی در حالت معکوس 25% کمتر است که خود به فروریزش دینامیکی پیشرونده پایدار کمک می‌کند. همچنین طول لهیدگی در حالت معکوس حدود 15% کاهش یافت که این پدیده نیز یک امتیاز به حساب می‌آید.

بیشینه نیروی فروریزش با ضخامت و قطر متوسط نسبت مستقیم، و با زاویه نیم‌رأس نسبت معکوس دارند.

جذب انرژی ویژه مخروط‌های با ابعاد بزرگتر نسبت به مخروط‌های با ابعاد کوچکتر (گروه C نسبت به گروه A) بیشتر است.

برخلاف مخروط‌های ناقص سربسته با زوایای نیم‌رأس بزرگ که تغییر ضخامت بر رفتار فروریزش تأثیر کمی دارد، در مخروط‌های مورد مطالعه که دارای زوایای نیم‌رأس کوچک هستند، تأثیر تغییر ضخامت بیشترین اثرگذاری را روی رفتار فروریزش این پوسته‌ها دارد. به طوری که با 20% کاهش ضخامت پوسته، بیشینه نیروی فروریزش 34/5% و نیروی متوسط فروریزش 39/3% کاهش پیدا کردند.

کنار هم قرار دادن تعداد بیشتری از نمونه‌های مخروطی در برابر بار ضربه‌ای، باعث افزایش بیشینه نیروی فروریزش شده و جذب انرژی ویژه نیز کاهش پیدا کرد. کاهش جذب انرژی ویژه یک نقص در مورد جاذب‌های انرژی است اما با کنار هم قرار دادن تعداد بیشتری از این پوسته‌ها در کنار هم کاهش چشم‌گیر طول لهیدگی مشاهده شد. البته باید گفت این کاهش علی‌رغم افزایش خطی تعداد پوسته‌های کنار هم، به هیچ عنوان خطی نیست.

8- فهرست علائم

A_{1,2,3,4,5,6} نمونه 1، 2، 3، 4، 5 و 6 گروه A از پوسته‌های مخروطی

C_{1,2,3,4,5,6} نمونه 1، 2، 3، 4، 5 و 6 گروه C از پوسته‌های مخروطی

E مدول یانگ (GPa)

P_{mean} نیروی متوسط فروریزش

علائم یونانی

δ_t طول لهیدگی

γ نسبت پواسون

σ_y تنش تسلیم

9- مراجع

- [1] A.A.A. Alghamdi, A.A.N. Aljawi, T.M.-N. Abu-Mansour, Modes of axial collapse of unconstrained capped frusta, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, pp. 1145–1161, 2002.
- [2] J.M. Alexander, An approximate analysis of collapse of thin-walled cylindrical shells under axial load, *Mechanical and Applied Mathematics*, Vol. 13, pp. 1-9, 1960.
- [3] A. Naddaf Oskouei, H. Khodarahmi, M. Rezvani, Dynamic progressive buckling of circular tubes under high speed axial impact loadings, *Mechanic and Aerospace*, Vol. 9, No. 4, pp. 17-33, 2014. (In Persian).
- [4] A. Niknejad, G.H. Liaghat, H. Moslemi Naeini, A.H. Behraves, Theoretical Calculation of the Instantaneous Folding Force in a Single-Cell Square Column under Axial Loading, *Modarres Mechanical Engineering*, Vol. 3, pp. 21-30, 2010. (In Persian).
- [5] H.E. Postlethwaite, B. Mills, Use of collapsible structural elements as impact isolators; automotive applications, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 5, pp. 58-73, 1970.
- [6] H. El-Sobky, A.A. Singace, M. Petsios, Mode of collapse and energy absorption characteristics of constrained frusta under axial impact loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 743-757, 2001.
- [7] G.L. Easwara Prasad, N.K. Gupta, An experimental study of deformation modes of domes and large-angled frusta at different rates of compression, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 400-415, 2005.
- [8] M. Hosseini, H. Abbas, N.K. Gupta, Change in thickness in straight fold models for axial crushing of thin-walled frusta and tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, pp. 98-108, 2009.
- [9] N.K. Gupta, H. Abbas, Axisymmetric axial crushing of thin frusta, *Thin-Walled Structures*, Vol. 36, pp. 169-179, 2000.
- [10] A.G. Mamalis, W. Johnson, The quasi-static crumpling of thin walled circular cylinders and frusta under axial compression, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 25, pp. 713-732, 1983.
- [11] H. Abbas, D.K. Paul, P.N. Godbole, Soft missile impact on rigid targets, *Soft missile impact on rigid targets*, Vol. 16, pp. 727-737, 1995.
- [12] H. Abbas, D.K. Paul, P.N. Godbole, Mathematical modeling of soft missile impact protective walls, *International Conference on Software Application in Engineering*, Vol. 6, pp. 577-588, 1989.
- [13] N.K. Gupta, G.L. Prasad, S.K. Gupta, Plastic collapse of metallic conical frusta of large semi-apical angles, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 2, pp. 349-366, 1997.
- [14] A. Naddaf Oskouei, A. Koochakinejad, Study on effect of cross-section rings at load reinforced cone shell buckling under axial load, in *The 15th Conference on Mechanical Engineering*, Tehran, Iran, 2007. (In Persian).
- [15] N.K. Gupta, N. Mohamed Sheriff, R. Velmurugan, Analysis of collapse behaviour of combined geometry metallic shells under axial impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 731-741, 2008.
- [16] Z. Ahmad, D.P. Thambiratnam, A.C.C. Tan, Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 475-488, 2010.
- [17] A. Niknejad, A. Tavassolimanesh, Axial compression of the empty capped-end frusta during the inversion progress, *Materials and Design*, Vol. 49, pp. 65-75, 2013.
- [18] A. Naddaf Oskouei, H. Khodarahmi, M. Pakian Booshehri, Numerical and Experimental Study of a Diamond Collapse of a Thin Wall Tube Energy-Absorber with Caps under Dynamic Axial Loading, *Modarres Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 169-178, 2015. (In Persian).
- [19] A. Ghamarian, M.A. Farsi, Experimental and numerical analysis of thin-walled structures combined axial collapse, *Journal of Mechanical Aerospace*, Vol. 8, No. 1, pp. 99-109, 2012. (In Persian).
- [20] A. Alavi Nia, A. Fallah Nejad, Effects of buckling initiators on mechanical behavior of thin-walled square tubes subjected to oblique loading, *Thin-Walled Structures*, Vol. 59, pp. 87-96, 2012.