

بررسی تجربی و عددی تأثیر سوراخ بر مشخصات فروپاشی مخروط‌های ناقص ته بسته تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

مربی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه نهاوند، نهاوند، ایران

صابر چهاردولی

مهدی کریمی*

هنگامه هادیان

چکیده

در این پژوهش، ویژگی‌های جذب انرژی مخروط‌های ته بسته فولادی که در حالات گوناگون سوراخ‌دار شده‌اند، تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی به دو صورت تجربی و عددی بررسی شده است. در بخش تجربی، پس از تهیه مخروط‌های آماده، آلیاژ فولاد سازنده تعیین شد. به منظور تعیین خواص مکانیکی، نمونه‌های دمبلی شکل به وسیله برش وایرکات از مخروط جدا شده و سپس منحنی تنش کرنش برای آن‌ها استخراج شد. شبیه‌سازی ساختارهای مخروطی به کمک نرم‌افزار المان محدود LS-Dyna و مقایسه آن‌ها با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی انجام شد و تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود داشت. در این پژوهش، ۴۸ حالت گوناگون بررسی و مشخصات فروپاشی آن‌ها استخراج و مقایسه شدند. در این ۴۸ حالت، سه زاویه برای یال مخروط، چهار ضخامت گوناگون و چهار آرایش متفاوت از نظر تعداد سوراخ گنجانده شده است و از این طریق رفتار مکانیکی جاذب‌های مخروطی ته بسته فولادی سوراخ‌دار، در حالات گوناگون، مطالعه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش تعداد سوراخ در بدنه جاذب‌ها، منجر به کاهش نیروی بیشینه و افزایش کارایی نیروی له‌شدگی می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده، جاذب‌های مخروطی سوراخ‌دار جایگزین مناسبی برای نمونه‌های مشابه بدون سوراخ هستند. **واژه‌های کلیدی:** جاذب انرژی سوراخ‌دار، مخروط ته‌بسته، LS-Dyna، بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری.

Experimental and Numerical investigation of the Hole Effect on Collapse Properties of End-capped Conical Tubes under Axial Quasi-static Loading

S. Chahardoli

Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

M. Karimi

Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

H. Hadian

Department of Industrial Engineering, Nahavand University, Nahavand, Iran

Abstract

In this study, the energy absorption characteristics of steel end-capped conical tubes, perforated in various states, under quasi-static axial loading have been studied both experimentally and numerically. In the experimental section, steel alloy was identified after making the ready cones. In order to determine the mechanical properties, dumbbell-shaped samples cut by wire-cut from the cones and tensile test was performed, then the stress-strain curves were obtained for them. The conical structures were simulated using finite element software LS-Dyna and the results were compared with data from experimental tests. There was good agreement between experimental and numerical results. In this paper, 48 various states were investigated and collapse features were extracted and compared. These 48 states include three angles for cone edge, four thicknesses and four different modes in terms of number of holes, so in this way mechanical behavior of perforated steel end-capped conical absorber in various states were studied. Studies show that increasing the number of holes in the absorber's body reduces the maximum force and leads to an increase in crush force efficiency. According to the results, perforated conical absorbers are a good alternative for the same samples with no holes.

Keywords: Perforated energy absorber, End-capped cone, LS-Dyna, Axial quasi-static loading.

۱- مقدمه

پیشرفت در صنایع حمل و نقل همواره با موانعی روبرو بوده است، یکی از آن‌ها صدماتی است که به سرنشینان، عابران و بدنه‌ی وسایل نقلیه حین تصادف با سرعت‌های بالا وارد می‌شود. اهمیت این موضوع باعث پیدایش نوع خاصی از سازه‌های مکانیکی تحت عنوان جاذب‌های انرژی جدارنازک شده است که نقش مهمی در کاهش خسارات ایفا می‌کنند. این سازه‌ها با تبدیل انرژی جنبشی وسایل در حال حرکت به تغییر شکل پلاستیک خسارات تصادف را تقلیل می‌دهند. جاذب‌های انرژی در تحقیقات زیادی هدف بسیاری از پژوهشگران بوده‌اند که در

ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود [۱ و ۲]. معمولاً آنچه در تصادف رخ می‌دهد ناگهانی و در زمان کوتاه است. لذا، بررسی فروپاشی جاذب‌های انرژی تحت بار ضربه‌ای یا دینامیکی کاری منطقی است. با این وجود بسیاری از محققان رفتار فروپاشی سازه‌های جدارنازک را تحت بار شبه‌استاتیکی بررسی می‌کنند، این موضوع تضادی با واقعیت ندارد زیرا جاذبی که در فروپاشی شبه‌استاتیکی نسبت به ساختارهای همجنس کارا تر باشد و انرژی بیشتری جذب کند معمولاً در بارگذاری ضربه‌ای هم برتری دارد. ساختاری بهینه‌تر است که انرژی بیشتری جذب کند. هندسه و فرآیند جذب انرژی در ساختارهای جدارنازک متنوع است و این باعث شده که تحقیق پیرامون این ساختارها موضوع بسیاری از

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m_karimi@basu.ac.ir

پژوهشگران باشد. از میان جاذب‌های معروف می‌توان به صفحات لانه زنبوری [۳]، ستون‌های با مقاطع مختلف (دایره‌ای، مربعی و...) [۴]، ستون‌های پر شده با فوم [۵]، جاذب‌های مخروطی و بسیاری دیگر اشاره کرد که هر کدام فرآیندهای فروپاشی متفاوتی دارد. برای جاذب‌های انرژی سه پارامتر مهم در انتخاب جاذب بهینه توسط مهندسی حمل و نقل وجود دارد، یکی میزان انرژی جذب شده بر واحد جرم^۱، دیگری نیروی بیشینه فروپاشی^۲ که معمولاً ابتدای فرآیند فروپاشی اتفاق می‌افتد و نهایتاً کارایی جاذب یا کارایی نیروی له‌شدگی^۳ که پارامتری از میزان پایداری ضربه در فرآیند برخورد است. آنچه در تحقیقات بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد این سه پارامتر است. غیر از این موارد صرفه‌ی اقتصادی و حجم جاذب نیز در انتخاب مؤثر است.

ماملایز و همکارانش در سال ۱۹۸۶ فرآیند فروپاشی جاذب‌های مخروطی با مقطع دایره‌ای را تحت بار محوری بررسی کردند، آن‌ها یک مدل تحلیلی ارائه دادند و با استفاده از نتایج عددی تأثیر نسبت لاغری (ضخامت مخروط به قطر متوسط) و نیز زاویه‌ی مخروط بر فرآیند فروپاشی بررسی شد، از آلومینیوم، فولاد کم کربن و مواد پلیمری PVC^۴ برای آزمایش‌های تجربی استفاده شد [۶]. در پژوهشی دیگر مخروط‌های ناقص از جنس پلیمرهای PVC با مقطع مربعی توسط ماملایز و همکارانش بررسی و الگوهای تغییر شکل و نمودارهای نیرو-جابجایی استخراج شد. آن‌ها از یک روش تحلیلی، نیروی متوسط فروپاشی^۵ را استخراج کردند که با نتایج تجربی مطابقت داشت [۷].

وارونگی به داخل و یا خارج مخروط‌های ته‌بسته در تعدادی از تحقیقات بررسی شده که از آن جمله می‌توان به کارهای القمدی و همکارانش [۸ و ۹]، الجاوی و همکارانش [۱۰] و نیز نیک‌نژاد و توسلی-منش اشاره کرد. نیک‌نژاد و توسلی-منش وارونگی محوری مخروط‌های ته‌بسته‌ی آلومینیومی تحت فشار فک با مقطع دایره‌ای و قطر کمتر از قطر کوچک مخروط را به صورت تحلیلی بررسی و منحنی‌های نیرو-جابجایی را برای وارونگی مخروط‌های ته‌بسته تحت بارگذاری شبه-استاتیکی به دست آوردند. آن‌ها برای صحت‌سنجی نتایج تحلیلی از آزمایش‌های تجربی استفاده کردند [۱۱].

در زمینه‌ی فروپاشی مخروط‌های ته‌بسته می‌توان به تحقیقات انجام شده در منابع [۱۲] تا [۱۴] اشاره کرد. بررسی رفتار مخروط‌های ناقص تنها منحصر به فلزات نیست، در زمینه‌ی کامپوزیت‌ها نیز جذب انرژی و فرآیند فروپاشی جاذب‌های کامپوزیتی بخشی از تحقیقات پژوهشگران بوده است که می‌توان به کارهای کاتریسان و همکارانش اشاره کرد [۱۵-۱۷]. یکی از تکنیک‌هایی که جهت کاهش نیروی بیشینه و افزایش جذب انرژی برای هندسه‌های مختلف جاذب‌ها استفاده شده، متغیر کردن ضخامت دیواره است. این موضوع در جاذب‌های مخروطی نیز انجام شده، که به برخی از پژوهش‌های انجام شده پرداخته می‌شود. ژانگ و همکارانش نوع خاصی از مخروط‌های ناقص با ضخامت دیواره‌ی متغیر را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند و نشان دادند که پوسته‌های مخروطی با ضخامت جداری متغیر جذب

انرژی بالاتر و نیروی بیشینه‌ی کمتری نسبت به ساختارهای معمولی دارند. آن‌ها در بررسی‌های خود از نرم‌افزار LS-Dyna استفاده کردند. نتایج استخراج شده از این نرم‌افزار تطابق خوبی با داده‌های تجربی داشت [۱۸]. یوانگ ژانگ و هوئی ژانگ نیز در تحقیقی فروپاشی مخروط‌های ناقص با ضخامت متغیر را تحت بارگذاری مایل و ضربه‌ای بررسی کردند. پژوهش آن‌ها به دو صورت تجربی و عددی (نرم‌افزار LS-Dyna) انجام شد [۱۹]. مخروط‌های با ضخامت تابعی متغیر^۶ توسط لی و همکارانش تحت بار ضربه‌ای و مایل بررسی شد. بارگذاری‌های ضربه‌ای در زوایای مختلف ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه انجام شدند، در این پژوهش نیز از LS-Dyna برای شبیه‌سازی استفاده شد [۲۰].

برخی از پژوهشگران با ایجاد ناپیوستگی‌های هندسی از جمله شیار [۲۱ و ۲۲]، ترک [۲۳]، انحنا و سوراخ [۲۴-۲۶] در بدنه میزان کاهش نیروی بیشینه در جاذب‌های انرژی را بررسی کرده‌اند. تأثیر ایجاد ناپیوستگی‌های هندسی مانند سوراخ و یا انحنا در بدنه‌ی جاذب توسط یین و نوریک مطالعه شد [۲۴]، آن‌ها مجموعه مقالاتی که به بررسی تأثیر ناپیوستگی‌های هندسی پرداخته‌اند را به طور کامل بررسی نمودند. نیک‌نژاد و همکارانش تأثیر سوراخ‌های دایره‌ای در بدنه‌ی جاذب‌های با مقطع مربعی و پر شده با فوم را تحت بار محوری بررسی نمودند [۲۵]. در تحقیقی دیگر علوی‌نیا و همکارانش تأثیر ایجاد آغازگرهای کمانش بر رفتار مکانیکی پوسته‌های با مقطع مربعی و تحت بار مایل را بررسی کردند. آغازگرهای کمانش با برش پنجره در گوشه-های پوسته‌ی مربعی ایجاد شدند [۲۶].

تاکنون پژوهشی که تأثیرات سوراخ بر مشخصات فروپاشی مخروط‌های ته‌بسته را بررسی کند انجام نشده است لذا تصمیم گرفته شد که به بررسی تأثیر ایجاد سوراخ بر پارامترهای فروپاشی مخروط‌های ته‌بسته پرداخته شود. در این راستا هندسه‌های مختلفی از مخروط‌های ته‌بسته‌ی سوراخ‌دار بررسی شد و تأثیر تعداد سوراخ، ضخامت پوسته و نیز یال مخروط بر مشخصات فروپاشی مشخص گردید. بررسی‌های عددی با نرم‌افزار LS-Dyna انجام شده است و برای اطمینان به صحت شبیه‌سازی از آزمایش‌های تجربی استفاده شد.

۲- مواد و آزمون‌ها

این پژوهش به دو صورت تجربی و عددی انجام شده است. به منظور انجام آزمایش‌های تجربی مخروط‌های ناقص ته‌بسته از بازار تهیه شده است. ضخامت، قطر کوچک و ارتفاع این مخروط‌ها به ترتیب ۰/۲، ۳۴ و ۷۰ میلی‌متر و زاویه‌ی یال ۱۰ درجه می‌باشد. نمونه‌ای از مخروط‌های تهیه شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- مخروط ته‌بسته فولادی

¹ Specific energy absorption or SEA

² Maximum force or F_m

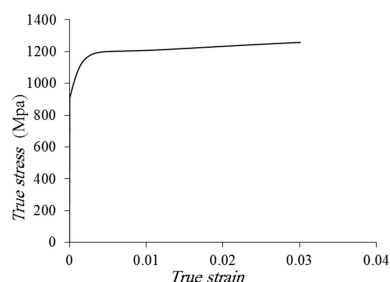
³ Crush force efficiency or CFE

⁴ Polyvinyl chloride

⁵ Average force or F_a

⁶ Functionally graded thickness

سطح اولیه‌ی نمونه‌ی دمبلی، تنش مهندسی به وجود می‌آید. می‌توان با توجه به روابط $\sigma_T = \sigma_E (1 + \epsilon_E)$ و $\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon_E)$ تنش - کرنش مهندسی را به تنش - کرنش حقیقی تبدیل کرد و منحنی حقیقی را به دست آورد. پانویس‌های E و T به ترتیب نشان دهنده‌ی مهندسی و حقیقی بودن کمیت مورد نظر است. شکل ۳ منحنی تنش کرنش حقیقی فولاد ۴۳۰ را با استفاده از داده‌های به دست آمده از خروجی سنسار نمایش می‌دهد.



شکل ۳- منحنی تنش-کرنش حقیقی فولاد ۴۳۰

مخروط‌ها با فرآیند کشش عمیق ساخته شده و تحت تغییر شکل-های بسیار بالا به شکل حاضر درآمده‌اند به گونه‌ای که یک ورق دایره-ای به یک مخروط تبدیل شده است، همین موضوع باعث به وجود آمدن کار سختی بالا در ماده شده و این بالا رفتن تنش نهایی را به دنبال دارد. از آنجا که در فرآیند کشش عمیق، ماده بخشی از نرمی خود را از دست داده و تردتر می‌شود لذا در نمونه‌ی گسیخته شده حالت گلوبی بوجود نیامده و الگوی شکست به مواد ترد نزدیک می‌شود. همچنین چون نمونه‌های دمبلی از ماده‌ی تغییر شکل یافته ساخته شده‌اند میزان کرنش کل کاهش چشمگیری داشته و از آنجا که میزان کرنش الاستیک نسبت به کرنش پلاستیک بسیار کم است انتظار می-رود که در نمودار مقدار ناچیزی را به خود اختصاص دهد. وجود انحنای در نمونه‌های دمبلی، نتایج را نسبت به حالت بدون انحنای متفاوت می-کند اما با توجه به اینکه ابعاد استاندارد ارائه شده در مرجع [۲۸] برای هر دو نوع قطعه‌ی انحنادار و بدون انحنای توصیه شده، تفاوت به وجود آمده ناچیز است. کرنش در منحنی شکل ۳ بدون واحد است. در جدول ۲ پارامترهای مکانیکی استخراج شده از منحنی شکل ۳ آمده است.

جدول ۲- خواص مکانیکی مستخرج از منحنی شکل ۳ برای فولاد ۴۳۰

ضریب الاستیسیته ^۳	تنش تسلیم ^۴	تنش نهایی ^۵	کرنش نهایی ^۶
۲۱۰ GPa	۹۲۰ MPa	۱۲۵۸ MPa	۰/۰۳

۳- شبیه‌سازی

از آنجا که بررسی ویژگی جاذب به صورت کاملاً تجربی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست، تصمیم گرفته شد که پارامترهای جذب به وسیله‌ی شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای که صحت آن‌ها با آزمایش-های تجربی قابل تأیید است استخراج شود. در این بخش به این موضوع پرداخته می‌شود. در این پژوهش، ۳ هندسه‌ی مختلف برای مخروط

نتایج آزمایش کوانتومتری فلز سازنده‌ی مخروط در جدول ۱ مشاهده می‌شود. با توجه به جدول ۱ ماده‌ی سازنده مطابق با منبع [۲۷]، فولاد ۴۳۰ می‌باشد. نرمی و شکل‌پذیری بالا نسبت به سایر آلیاژهای فولادی از ویژگی‌های این آلیاژ است که برای تغییر شکل‌های بدون پارگی مناسب است [۲۷].

جدول ۱- فولاد ۴۳۰ A: درصد وزنی عناصر فولاد ۴۳۰ [۲۷] B: نتایج

عنصر	A: آلیاژ ۶۱۰۱ [۲۷]	B: نتایج آزمایش کوانتومتری
C	ماکزیمم ۰/۱۲	۰/۰۶
Mn	ماکزیمم ۱	۰/۳۳
Si	ماکزیمم ۱	۰/۴۴
P	ماکزیمم ۰/۰۴	۰/۰۲
S	ماکزیمم ۰/۰۳	۰/۰۱
Cr	۱۶ تا ۱۸	۱۶/۵
Ni	ماکزیمم ۰/۵	۰/۱۱
Fe	باقیمانده	✓

برای تعیین خواص مکانیکی مواد، نمونه‌های دمبلی شکل مطابق استاندارد موجود در منبع [۲۸]^۱ از مخروط جدا شد و به وسیله‌ی دستگاه سنسار ۱۵ تن^۲ دانشگاه بوعلی سینا تحت آزمون کشش قرار گرفت، در شکل ۲ نمونه‌های دمبلی، قبل و بعد از آزمون کشش به همراه نحوه‌ی بسته شدن در دستگاه مشاهده می‌شوند.



A



B

شکل ۲- آزمون کشش A: نمونه‌های دمبلی، قبل و بعد از آزمون کشش B: نحوه قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه سنسار

دستگاه سنسار، نمودار نیرو-جابجایی را می‌دهد، از تقسیم جابجایی به طول اولیه‌ی نمونه‌ی دمبلی، کرنش مهندسی و از تقسیم نیرو بر

³ Young's modulus or E

⁴ Yield stress or σ_y

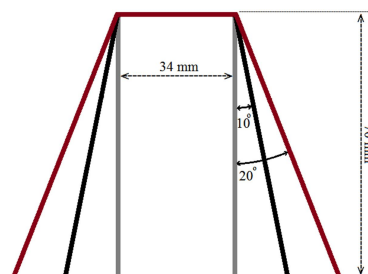
⁵ Ultimate stress or σ_U

⁶ Ultimate strain or ϵ_U

¹ ASTM E8/E8M-09

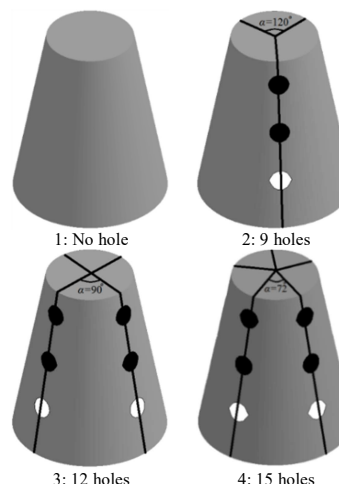
² STM-150 Cap.150 kN

(زوایای ۰، ۱۰ و ۲۰ درجه) بررسی شده است، مقاطع بریده شده در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۴- ابعاد هندسی مخروط‌های بررسی شده

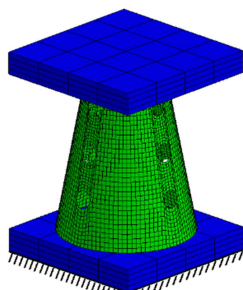
هر کدام از هندسه‌های شکل ۴ از نظر تعداد سوراخ در چهار حالت گوناگون بررسی شده است. شکل ۵ نشان دهنده تعداد حالات بررسی از نظر تعداد سوراخ (۰، ۹، ۱۲ و ۱۵) برای جاذب‌های با زوایای یال ۱۰ درجه است. حالت اول مربوط به جاذب بدون سوراخ، حالت دوم، جاذب با ۹ سوراخ و حالت‌های سوم و چهارم به ترتیب مربوط به ۱۲ و ۱۵ سوراخ است. سوراخ‌ها به شکل خطی روی بدنه‌ی جاذب قرار گرفته‌اند. در هر خط، سه سوراخ وجود دارد که در ارتفاع‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلیمتری از لبه‌ی پایینی قرار دارند، مطابق شکل ۵ زاویه‌ی بین ردیف‌ها ۱۲۰، ۹۰ و ۷۲ درجه و قطر همه‌ی سوراخ‌ها ۸ میلیمتر است. تاکنون ۱۲ حالت گوناگون ایجاد شده، هر کدام از این هندسه‌ها در چهار ضخامت (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۱ میلیمتر) بررسی شده‌اند، لذا مجموعاً ۴۸ حالت ($3 \times 4 \times 4 = 48$) بررسی شده است.



شکل ۵- حالات بررسی شده از نظر تعداد سوراخ برای زاویه یال ۱۰

شبیه‌سازی‌های این پژوهش با استفاده از کد المان محدود LS-Dyna انجام شده است، که داده‌های مورد نیاز آن مطابق شکل ۳ و جدول ۲ وارد نرم‌افزار^۱ شده است. المان‌ها به صورت پوسته‌ای با ابعاد 2×2 میلیمتر مربع تعریف شده‌اند. انتخاب ابعاد ۲ میلیمتری بعد از

بررسی اندازه‌های گوناگون جهت بی اثر کردن ابعاد المان بر مشخصات فروپاشی می‌باشد. شکل ۶ یک مخروط شبیه‌سازی شده با سوراخ‌هایی روی یال مخروط که بین تکیه‌گاه‌های صلب در بالا و پایین قرار دارد را نشان می‌دهد.



شکل ۶- مدل اجزا محدود با ۱۲ سوراخ روی بدنه‌ی مخروط

مطابق شکل تکیه‌گاه پایینی ثابت است و تکیه‌گاه بالایی به صورت شبه‌استاتیکی مخروط را تا رسیدن به حالت صلیبت کامل فشرده می‌کند. حالت صلیبت زمانی اتفاق می‌افتد که منحنی نیرو-جابجایی به صورت یکباره به سمت بی نهایت میل کند. بدین ترتیب جابجایی به صورت کنترل شده تا زمانی که نیرو به صورت ناگهانی بالا رود اعمال می‌شود تا جاذب دچار فروپاشی شود. برای تعریف اصطکاک بین فک‌ها و جاذب و نیز اصطکاک بین اجزای جاذب، ضرایب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی به ترتیب ۰/۳ و ۰/۲ وارد شده‌اند.

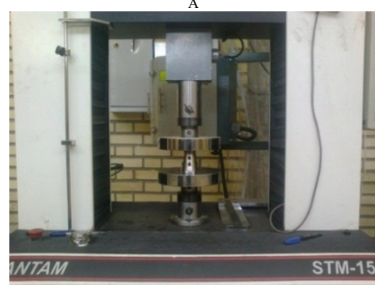
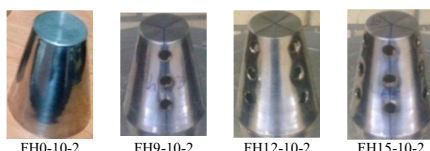
۳-۱- نتایج شبیه‌سازی

جدول ۳ مشخصات فروپاشی ۴۸ حالت شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. است. از سمت چپ، عدد اول نشانگر تعداد سوراخ‌هایی است که در بدنه جاذب ایجاد شده، عدد دوم زاویه یال مخروط، و نهایتاً عدد سوم ضخامت مخروط را بر حسب $10 \times \text{mm}$ نشان می‌دهد. مشخصات فروپاشی موجود در جدول ۳ از منحنی‌های نیرو-جابجایی استخراج شده‌اند. این مقادیر عبارتند از انرژی جذب شده، انرژی ویژه، نیروی بیشینه، نیروی متوسط، کارایی نیروی له‌شدگی (کارایی) و نهایتاً بازده لهیدگی. سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی انرژی جذب شده را نشان می‌دهد که از تقسیم آن بر جرم جاذب، انرژی ویژه به دست می‌آید. نیروی بیشینه، بیشترین نیرو در منحنی نیرو-جابجایی را نشان می‌دهد و نیروی متوسط، میانگین نیرو در منحنی نیرو جابجایی می‌باشد. از تقسیم نیروی متوسط به نیروی بیشینه، کارایی نیروی له شدگی و از تقسیم طول فروپاشی به طول اولیه، بازده لهیدگی به دست می‌آید. در نام‌گذاری این ساختارها از دو حرف FH و سه عدد استفاده شده

۳-۲- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی

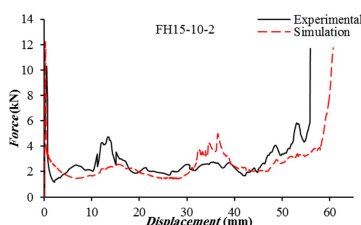
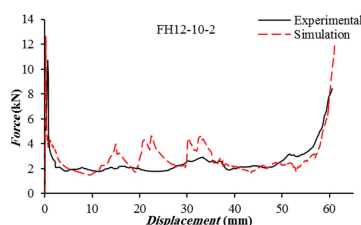
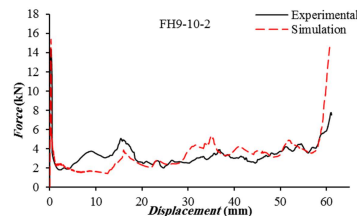
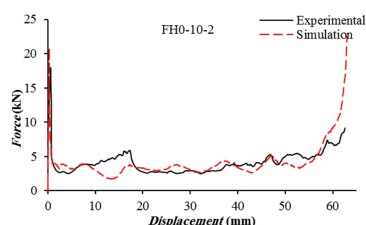
به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده در این بخش، جاذب‌هایی به وسیله‌ی دستگاه ستام به صورت محوری تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفتند (شکل ۷) و مشخصات فروپاشی برای آنها استخراج شد.

^۱ Mat-piecewise-linear-plasticity



شکل ۷- A: نمونه‌های تجربی B: نحوه قرارگیری نمونه‌ها در سنتام

نیرو-جابجایی یعنی مقادیر انرژی جذب شده، نیروی متوسط، کارایی نیروی له‌شدگی و نهایتاً بازده لهیدگی می‌گردد.



شکل ۸- منحنی‌های نیرو-جابجایی در نمونه‌های تجربی و نرم‌افزاری تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی

جدول ۳- مشخصات فروپاشی نمونه‌های شبیه‌سازی شده

کد نمونه	شده (ا)	انرژی جذب (ب)	انرژی ویژه (ب)	نیروی بیشینه (ک)	نیروی متوسط (د)	کارایی (ه)	بازده لهیدگی (و)	جرم (ز)
FH0-0-2	۲۸۳	۲۱/۶	۲۱/۴	۴/۸	۲۲/۵	۸۴	۱۳/۱	۱
FH0-0-4	۷۱۰	۲۷/۱	۴۷	۱۲/۶	۲۶/۸	۸۱	۲۶/۲	۲
FH0-0-6	۱۱۵۰	۲۹/۳	۷۱/۷	۲۰/۵	۲۸/۵	۸۰	۳۹/۳	۳
FH0-0-10	۲۵۹۱	۳۹/۶	۱۲۲/۸	۴۸/۹	۳۹/۸	۷۶	۶۵/۵	۴
FH0-10-2	۲۶۰	۱۴/۶	۲۰/۸	۴/۱	۱۹/۸	۹۰	۱۷/۸	۵
FH0-10-4	۷۵۱	۲۱/۱	۴۵/۹	۱۲/۵	۲۷/۲	۸۶	۳۵/۶	۶
FH0-10-6	۱۴۷۸	۲۷/۷	۷۰/۷	۲۴/۹	۳۵/۳	۸۵	۵۳/۴	۷
FH0-10-10	۳۱۴۱	۳۵/۳	۱۲۲/۴	۵۴	۴۴/۱	۸۳	۸۹	۸
FH0-20-2	۱۷۱	۷	۵/۶	۲/۹	۵۱/۲	۸۵	۲۴/۳	۹
FH0-20-4	۷۱۱	۱۴/۶	۲۶/۱	۱۱/۹	۴۵/۸	۸۵	۴۸/۶	۱۰
FH0-20-6	۱۷۱۸	۲۳/۶	۶۳/۴	۲۸/۵	۴۴/۹	۸۶	۷۲/۹	۱۱
FH0-20-10	۲۶۷۰	۲۲	۹۵/۶	۴۷	۴۹/۱	۸۱	۱۱۱/۵	۱۲
FH9-0-2	۱۷۴	۱۳/۳	۱۳/۲	۳/۲	۱۳/۹	۷۹	۱۳/۱	۱۳
FH9-0-4	۵۵۷	۲۱/۳	۳۳/۴	۱۰/۱	۳۰/۱	۷۹	۲۶/۲	۱۴
FH9-0-6	۹۵۵	۲۴/۳	۵۴/۵	۱۸/۴	۳۳/۸	۷۴	۳۹/۳	۱۵
FH9-0-10	۲۱۹۶	۳۳/۵	۹۵/۹	۴۳/۳	۴۵/۲	۷۲	۶۵/۵	۱۶
FH9-10-2	۲۰۲	۱۱/۳	۱۵/۳	۲/۳	۲۱/۸	۸۷	۱۷/۸	۱۷
FH9-10-4	۶۶۹	۱۸/۸	۳۶/۷	۱۱	۲۹/۹	۸۷	۳۵/۶	۱۸
FH9-10-6	۱۱۹۴	۲۴/۴	۵۸/۸	۲۰/۵	۳۴/۸	۸۳	۵۳/۴	۱۹
FH9-10-10	۲۸۳۰	۳۱/۸	۱۰۲/۵	۴۸/۱	۴۷	۸۴	۸۹	۲۰
FH9-20-2	۱۳۳	۵/۵	۴/۷	۲/۵	۵۲/۵	۷۸	۲۶/۳	۲۱
FH9-20-4	۶۶۵	۱۳/۷	۲۲/۵	۱۱	۴۸/۸	۸۷	۴۸/۶	۲۲
FH9-20-6	۱۲۱۹	۱۶/۷	۵۰	۲۰/۵	۴۰/۹	۸۵	۷۲/۹	۲۳
FH9-20-10	۲۶۸۵	۲۲/۱	۹۵/۶	۴۷/۱	۴۹/۳	۸۱	۱۱۱/۵	۲۴
FH12-0-2	۱۷۴	۱۳/۳	۱۰/۴	۳/۱	۲۹/۸	۸۰	۱۳/۱	۲۵
FH12-0-4	۵۲۰	۱۹/۸	۲۵/۴	۹/۷	۳۸/۳	۷۶	۲۶/۲	۲۶
FH12-0-6	۱۱۰۹	۲۸/۲	۴۰/۵	۲۰	۴۹/۳	۷۹	۳۹/۳	۲۷
FH12-0-10	۱۵۷۰	۲۴	۷۲/۲	۲۸/۵	۳۹/۴	۷۹	۶۵/۵	۲۸
FH12-10-2	۱۷۷	۹/۹	۱۲/۶	۲/۹	۲۲/۹	۸۷	۱۷/۸	۲۹
FH12-10-4	۵۸۸	۱۶/۵	۳۲/۴	۱۰	۳۰/۹	۸۴	۳۵/۶	۳۰
FH12-10-6	۱۰۴۶	۱۹/۶	۵۳/۷	۱۸	۳۳/۵	۸۳	۵۳/۴	۳۱
FH12-10-10	۲۷۳۶	۳۰/۷	۹۴	۴۷/۸	۵۰/۹	۸۲	۸۹	۳۲
FH12-20-2	۱۳۹	۷/۲	۵/۷	۲/۴	۲۳/۶	۸۲	۲۶/۳	۳۳
FH12-20-4	۵۶۶	۱۱/۶	۲۱/۹	۹/۶	۴۳/۷	۸۴	۴۸/۶	۳۴
FH12-20-6	۱۱۶۸	۱۶	۵۰	۲۰	۴۰	۸۳	۷۲/۹	۳۵
FH12-20-10	۳۰۳۲	۲۵	۹۲/۷	۵۰/۷	۵۴/۷	۸۵	۱۱۱/۵	۳۶
FH15-0-2	۱۴۸	۱۱/۳	۷/۴	۲/۷	۳۶/۵	۷۹	۱۳/۱	۳۷
FH15-0-4	۴۶۱	۱۷/۶	۲۱	۸/۵	۴۰/۷	۷۷	۲۶/۲	۳۸
FH15-0-6	۶۴۲	۱۶/۳	۳۴/۱	۱۱/۷	۳۴/۳	۷۸	۳۹/۳	۳۹
FH15-0-10	۱۷۷۴	۲۷/۱	۶۲/۱	۳۵/۲	۵۶/۷	۷۲	۶۵/۵	۴۰
FH15-10-2	۱۶۱	۹	۱۲/۲	۲/۶	۲۱/۸	۸۷	۱۷/۸	۴۱
FH15-10-4	۵۳۵	۱۵	۳۰/۶	۹/۴	۳۰/۶	۸۱	۳۵/۶	۴۲
FH15-10-6	۱۰۱۱	۱۸/۹	۵۰/۱	۱۷/۲	۳۴/۴	۸۴	۵۳/۴	۴۳
FH15-10-10	۲۸۵۳	۳۲/۱	۸۸/۲	۴۸/۱	۵۴/۵	۸۵	۸۹	۴۴
FH15-20-2	۱۱۳	۴/۷	۳/۹	۲	۵۲/۱	۸۰	۲۴/۳	۴۵
FH15-20-4	۴۹۸	۱۰/۲	۱۷/۴	۸/۴	۴۸/۳	۸۵	۴۸/۶	۴۶
FH15-20-6	۱۱۸۶	۱۶/۳	۴۹/۸	۱۹/۸	۴۹/۷	۸۶	۷۲/۹	۴۷
FH15-20-10	۲۸۶۵	۲۳/۶	۹۱/۷	۴۹/۲	۵۳/۷	۸۳	۱۱۱/۵	۴۸

در جدول ۴ مشخصات فروپاشی جاذب‌های FH9-10-، FH10-2، FH12-10-2 و FH15-10-2 در دو حالت تجربی و عددی با هم مقایسه شده‌اند. سوراخ‌ها به وسیله مته ایجاد شده‌اند و جهت اطمینان به نتایج تجربی از هر جاذب دو نمونه‌ی مشابه تحت آزمایش قرار گرفت.

در شکل ۸ نمودارهای نیرو-جابجایی و در شکل ۹ نمونه‌های فروریخته در حالت تجربی و عددی رسم شده‌اند. همچنین در شکل ۱۰ مراحل فروپاشی جاذب FH15-10-2 قابل ملاحظه است. با توجه به مقایسه‌ای که بین نتایج تجربی و عددی انجام شده تطابق خوبی بین شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی وجود دارد. مشاهده می‌شود که نمونه‌های تجربی نسبت به نمونه‌های نرم‌افزاری نیروی بیشینه پایین‌تری دارند. اختلاف در نیرو و به دنبال آن منحنی نیرو جابجایی منجر به ایجاد اختلاف در پارامترهای استخراج شده از منحنی

جدول ۴- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی

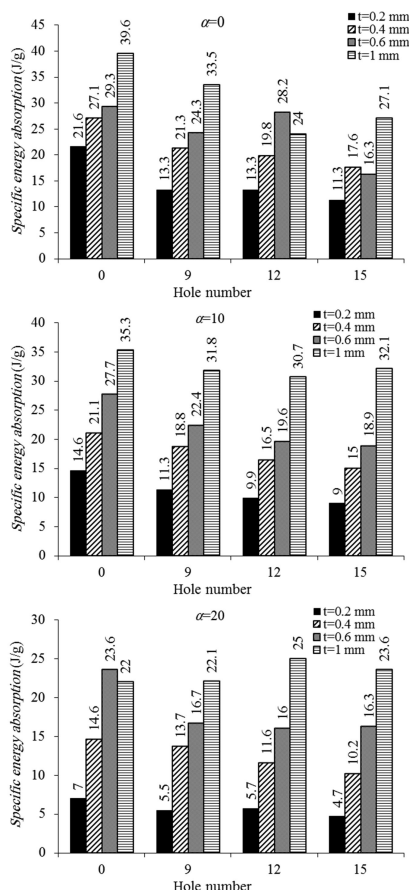
کد نمونه	انرژی جذب شده			نیروی پیشینه		
	$\bar{R}_{Tj}$ (N)	$\bar{R}_{Tj}$ (N)	$\bar{R}_{Tj}$ (N)	عددی (N)	اختلاف (%)	
FH0-10-2	۲۵۷/۸	۲۶۰	۰/۷	۲۰/۸	۱۵/۶	
FH9-10-2	۲۰۵/۴	۲۰۲	-۱/۶	۱۵/۳	۶/۳	
FH12-10-2	۱۵۶/۴	۱۷۷	۱۳	۱۲/۶	۱۷/۸	
FH15-10-2	۱۵۲/۲	۱۶۱	۵/۸	۱۲/۲	۱۸/۴	

۴- بحث و بررسی

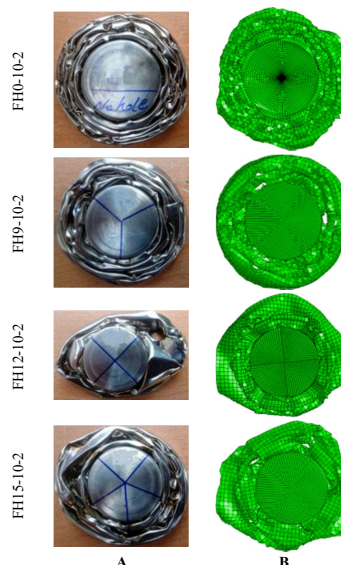
در این قسمت به بررسی نتایج به دست آمده در بخش شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. آنچه در ادامه می‌آید بررسی تغییرات داده‌های جدول ۳ به ازای تغییر پارامترهای گوناگون است. ابتدا به بررسی تأثیر تعداد سوراخ بر مشخصات فروپاشی پرداخته می‌شود و سپس تأثیر ضخامت و نیز نقش زوایه مخروط بر مشخصات فروپاشی بررسی می‌گردد.

۴-۱- بررسی تأثیر تعداد سوراخ

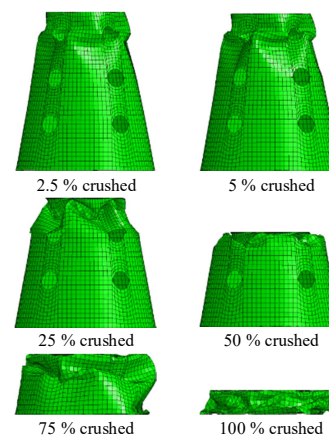
با توجه به نتایج جدول ۳ در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ تغییرات مشخصات فروپاشی بر حسب تغییرات تعداد سوراخ بررسی شده است. شکل ۱۱ تغییرات انرژی ویژه با تغییر تعداد سوراخ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در حالت کلی ایجاد سوراخ کم شدن جذب انرژی را به همراه دارد، این موضوع به این دلیل است که با ایجاد سوراخ، بخشی از محیط دایره در محل وقوع لولای پلاستیک کم شده و بنابراین در جایی که سوراخ‌ها وجود دارد محیط کمتری دچار لولای پلاستیک می‌شود و همین کاهش جذب انرژی را به دنبال دارد. هر چه تعداد سوراخ‌ها بیشتر شود محیط کمتر شده و جذب انرژی کاهش بیشتری خواهد داشت.



شکل ۱۱- تغییرات انرژی ویژه بر حسب تعداد سوراخ در زوایای مخروط متفاوت

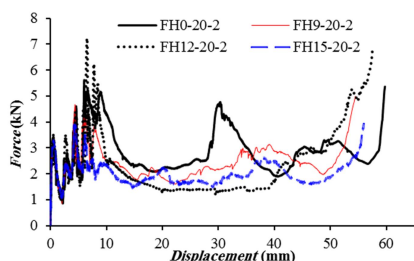


شکل ۹- نمونه‌های فروپاشی شده در هر دو حالت تجربی و عددی A: تجربی B: عددی



شکل ۱۰- مراحل فروپاشی نمونه‌ی FH15-10-2

دلیل این تفاوت، اختلاف بین نوع به هم پیوستگی اجزا در حالات تجربی و نرم‌افزاری است. همچنین از آنجا که نمونه‌های تجربی با استفاده از فرآیند کشش عمیق ساخته شده‌اند نوعی ناهمسانگردی صفحه‌ای در پوسته‌ها وجود دارد که در شبیه‌سازی‌ها منظور نشده است.



شکل ۱۳- منحنی نیرو جابجایی جاذب‌های با زاویه مخروط ۲۰ درجه و ضخامت ۰/۲ میلیمتر

در بحث کمانش ورق‌ها نیز در بارگذاری درون صفحه‌ای یک ورق، ایجاد سوراخ کم شدن نیروی بحرانی که نیروی بیشینه‌ی مورد نیاز برای کمانش اولیه‌ی ورق است را به دنبال دارد [۲۹]. این موضوع قابل تعمیم به جاذب‌های این پژوهش نیز می‌باشد. در بعضی موارد این روال صادق نیست مانند نمودار مربوط به زاویه‌ی ۲۰ درجه در شکل ۱۲ که با افزایش تعداد سوراخ از ۹ به ۱۲، نیروی بیشینه افزایش یافته است. این تغییر به این دلیل است که در جاذب‌های FH0-20-2، FH9-20-2، FH12-20-2 و FH15-20-2 نیروی بیشینه در ابتدای فرآیند فروپاشی اتفاق نیفتاده بلکه در میانه‌ی منحنی نیرو-جابجایی ظاهر شده است. این جاذب‌ها ابتدا از پایین منبسط و سپس از بالا فروبرخته می‌شوند، زاویه‌ی بالای مخروط و ضخامت پایین دلیل این نوع فروپاشی است. در شکل ۱۳ منحنی‌های نیرو-جابجایی جاذب‌های FH0-20-2، FH9-20-2، FH12-20-2 و FH15-20-2 مقایسه شده‌اند.

با توجه به شکل ۱۴ در حالت کلی افزایش تعداد سوراخ، افزایش کارایی را به دنبال دارد. این افزایش یک ویژگی مثبت محسوب می‌شود. از آنجا که کاهش نیروی بیشینه با ایجاد سوراخ بسیار محسوس است لذا طبق تعریف کارایی که از تقسیم نیروی متوسط بر نیروی بیشینه به دست می‌آید کاهش چشم‌گیر نیروی بیشینه نسبت به نیروی متوسط افزایش کارایی را به دنبال دارد.

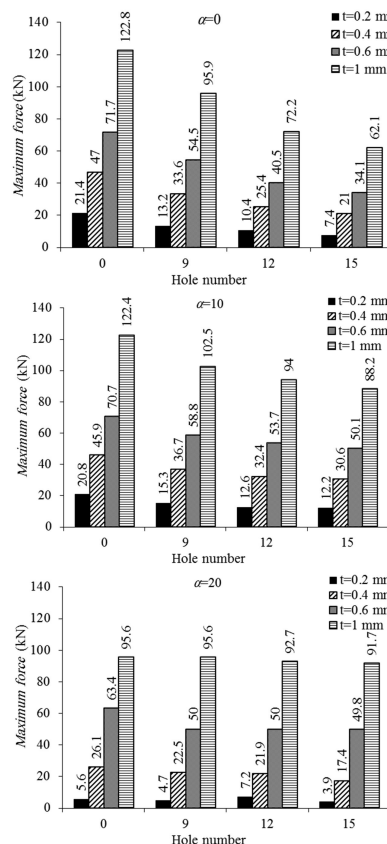
نمودارهای نیرو-جابجایی به همراه مراحل مختلف فروپاشی مخروط‌های FH0-10-2 و FH9-10-2 به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده‌اند، مشاهده می‌شود که در مورد مخروط‌های سوراخ شده، فروپاشی از محل سوراخ‌ها شروع می‌شود اما در مخروط بدون حفره فروپاشی از بالای مخروط است. کم شدن سطح مؤثر با ایجاد سوراخ دلیل این موضوع است.

۲-۴- بررسی تأثیر ضخامت

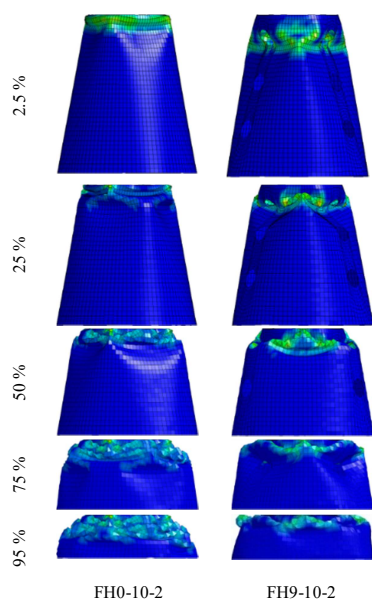
شکل‌های ۱۷ تا ۲۱ تأثیر ضخامت و نیز زاویه‌ی یال بر مشخصات فروپاشی را با توجه به داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۱۷ در حالت کلی افزایش ضخامت، افزایش انرژی ویژه را به دنبال دارد. جاذب‌های انرژی از طریق تبدیل انرژی جنبشی به انرژی پلاستیک منجر به کاهش صدمات وارده می‌شوند. انرژی جنبشی عمدتاً با ایجاد لولاهای پلاستیک در جسم اتلاف می‌شود. میزان انرژی که در هر لولا تلف می‌شود برابر حاصلضرب گشتاور خمشی و زاویه‌ی پیچش لولا می‌باشد.

البته در بعضی موارد ایجاد سوراخ الگوی فروبرزش را تغییر می‌دهد، که این موضوع می‌تواند کم‌تر شدن و یا بیشتر شدن جذب انرژی را نتیجه دهد. اگر تغییر الگو، انرژی را به میزان بالایی افزایش دهد به گونه‌ای که ضعف به وجود آمده ناشی از سوراخ را جبران کند جذب انرژی بیشتر خواهد شد. به عنوان مثال مشاهده می‌شود که برای زاویه-ی ۲۰ درجه از شکل ۱۱، افزایش تعداد سوراخ از ۹ به ۱۲ برای جاذب با ضخامت ۱ میلیمتر، نه تنها انرژی ویژه کمتر نشده بلکه بیشتر نیز شده است. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت جذب انرژی مخروط‌های سوراخ‌دار کمتر از مشابه بدون سوراخ است و با افزایش تعداد سوراخ‌ها جذب انرژی کمتر می‌شود.

با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که افزایش تعداد سوراخ کم شدن نیروی بیشینه را به دنبال دارد. کاهش اینرسی مهمترین عامل این رفتار می‌باشد. نیروی بیشینه‌ی جاذب‌های انرژی عمدتاً در ابتدای فرآیند فروپاشی اتفاق می‌افتد. این نیرو به دلیل تغییر شکل الاستیک اولیه‌ای است که در ابتدای فرآیند اتفاق می‌افتد. برای یک لوله‌ی معمولی دایره‌ای مطابق منبع [۴] افزایش شعاع که در واقع افزایش محیط است بیشتر شدن نیروی بیشینه را به همراه دارد؛ آنچه در جاذب‌های مخروطی سوراخ‌دار این پژوهش اتفاق می‌افتد کم شدن محیط و به دنبال آن کم شدن اینرسی در مقطعی از مخروط است که سوراخ‌ها در آن ایجاد شده‌اند و همین موضوع کم شدن نیروی بیشینه را به دنبال دارد.



شکل ۱۲- تغییرات نیروی بیشینه بر حسب تعداد سوراخ در زوایای مخروط متفاوت



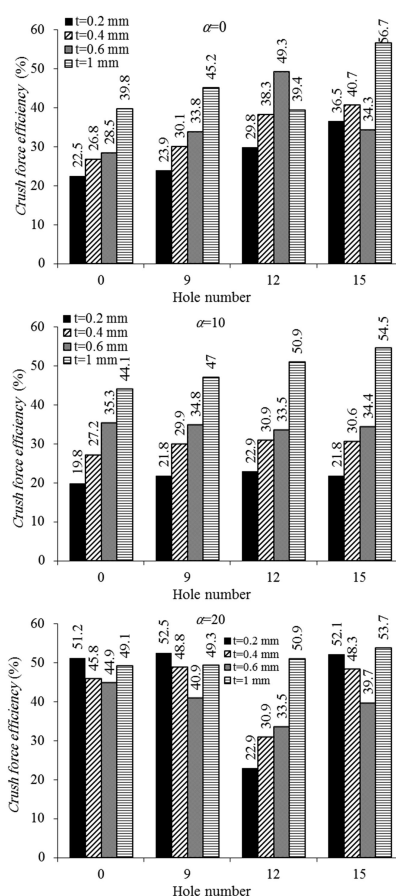
شکل ۱۶- مراحل فروپاشی جاذب‌های با زاویه مخروط ۱۰ درجه و ضخامت ۰/۲ میلی‌متر

با توجه به شکل ۱۹ افزایش ضخامت مخروط، افزایش نیروی بیشینه را به دنبال دارد. افزایش ممان اینرسی با افزایش ضخامت، این موضوع را توجیه می‌کند. شکل ۲۰ تغییرات کارایی نیروی له‌شدگی را برای گروه‌های H0، H9، H12 و H15 نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در زوایای ۰ و ۱۰ درجه افزایش ضخامت برای تمام گروه‌ها منجر به افزایش کارایی می‌گردد. اما در زاویه ۲۰، با افزایش ضخامت تا ۰/۶ میلی‌متر کارایی کاهش و بعد از آن افزایش می‌یابد.

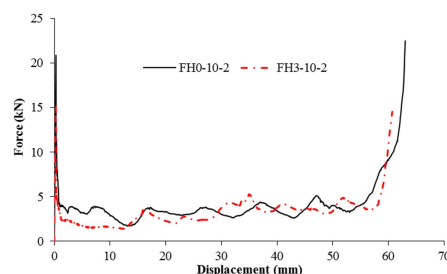
۴-۳- بررسی تأثیر زاویه‌ی یال

مطابق شکل ۱۷ با افزایش زاویه یال از ۰ به ۲۰ انرژی ویژه کاهش می‌یابد. زاویه‌ی چرخش لولا در یک استوانه‌ی معمولی ($\alpha=0$) با توجه به تئوری الکساندر [۳۰] برابر ۹۰ درجه است. حال آنکه با افزایش زاویه یال میزان چرخش لولا کمتر و لذا انرژی کمتری جذب خواهد شد. این موضوع دلیل کاهش انرژی ویژه با افزایش زاویه یال است.

مطابق شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که تغییرات نیروی بیشینه بر حسب زاویه یال، روند یکسانی ندارد، در جاذب‌های بدون سوراخ یعنی ساختارهای‌های گروه H0 افزایش زاویه‌ی یال کم شدن نیروی بیشینه را به دنبال دارد، این موضوع به دلیل تغییر الگوی فروپاشی جاذب در ابتدای فروپاشی است. به این معنا که با افزایش زاویه‌ی مخروط، فروپاشی اولیه از حالت چین خوردگی در بالای مخروط به انبساط از پایین تبدیل می‌شود. این موضوع در شکل ۱۴ نشان داده شد. در سایر ساختارها یعنی گروه‌های H9، H12 و H15 تغییرات وابسته به تأثیراتی است که ایجاد سوراخ بر الگوی فروپاشی دارد. مطابق شکل ۲۰ بین جاذب‌های یکسان از نظر ضخامت و تعداد سوراخ، عموماً جاذب‌های با زاویه‌ی یال ۱۰ درجه کمترین کارایی را دارند.

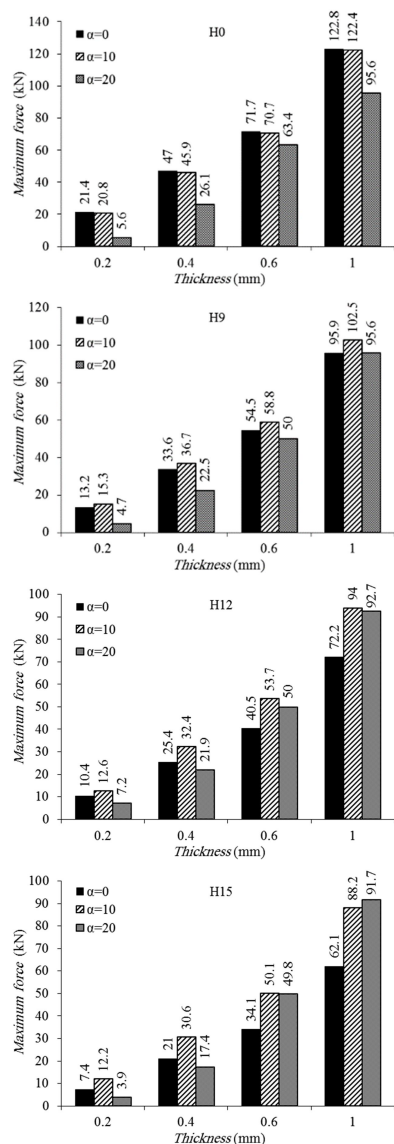


شکل ۱۴- تغییرات کارایی نیروی له‌شدگی بر حسب تعداد سوراخ در زوایای مخروط متفاوت



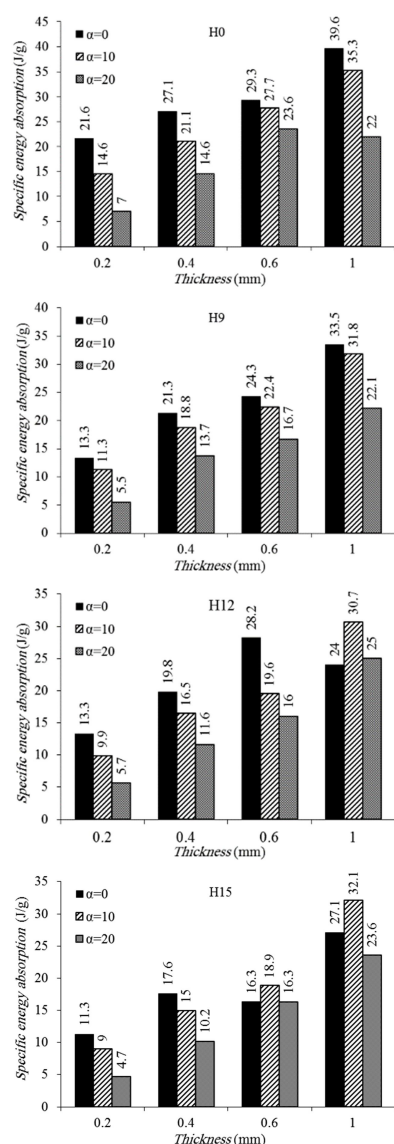
شکل ۱۵- منحنی نیرو-جابجایی جاذب‌های با زاویه مخروط ۱۰ درجه و ضخامت ۰/۲ میلی‌متر

گشتاور بر واحد طول جاذب‌های انرژی که مقطع دایره‌ای دارند برابر $\sigma_y t^2/4$ ($M=\sigma_y t^2/4$) است [۳۰]. از ضرب این مقدار در محیطی که لولای پلاستیک در آن ایجاد شده و پس از آن در زاویه چرخش، انرژی جذب شده به دست می‌آید، بنابراین افزایش انرژی با توان دوم ضخامت جداره اتفاق می‌افتد، از طرفی رابطه‌ی بین جرم و ضخامت خطی است، لذا انرژی ویژه که بیانگر انرژی بر واحد جرم است بیشتر می‌شود. شکل ۱۸ نشان دهنده‌ی منحنی‌های نیرو-جابجایی برای جاذب‌های با ضخامت‌های مختلف، بدون سوراخ و زاویه‌ی یال ۱۰ درجه است.

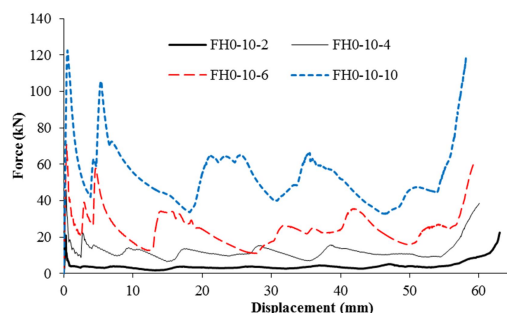


شکل ۱۹- تغییرات نیروی بیشینه بر حسب ضخامت در تعداد سوراخ متفاوت

در شکل ۲۱ منحنی نیرو-جابجایی برای جاذب‌های FH0-0-2، FH0-10-2 و FH0-20-2 نشان داده شده است. با توجه به این شکل، بالا بودن کارایی جاذب FH0-20-2 کاملاً واضح است. از آنجا که نیروی بیشینه‌ی اولیه‌ی پایینی برای فروپاشی جاذب FH0-20-2 لازم است لذا کارایی نیروی له‌شدگی بالاتری فراهم می‌شود.



شکل ۱۷- تغییرات انرژی ویژه بر حسب ضخامت در تعداد سوراخ متفاوت



شکل ۱۸- منحنی نیرو-جابجایی جاذب‌های با زاویه مخروط ۱۰ درجه و بدون سوراخ در ضخامت‌های گوناگون

۵- نتایج

با توجه به تأثیر گذاری سوراخ بر مشخصات فروپاشی جاذب‌های مخروطی ته بسته، در این پژوهش به بررسی تأثیرات ایجاد سوراخ در مخروط‌های ناقص ته بسته در حالات گوناگون پرداخته شد. بررسی‌ها به دو صورت تجربی و نرم‌افزاری انجام شد. در بررسی ۴۸ حالت گوناگون از نظر زاویه یال، ضخامت و آرایش سوراخ‌ها نتایجی به دست آمد که مهمترین آن‌ها در ادامه بر شمرده شده است.

- جذب انرژی مخروط‌های سوراخ‌دار کمتر از مشابه بدون سوراخ است و با افزایش تعداد سوراخ‌ها جذب انرژی کمتر می‌شود.

- کارایی جاذب‌های سوراخ‌دار از مشابه بدون سوراخ بیشتر است به گونه‌ای که افزایش تعداد سوراخ، افزایش کارایی را به دنبال دارد.

- در جاذب‌های انرژی سوراخ‌دار افزایش ضخامت، منجر به افزایش انرژی ویژه می‌شود.

- در جاذب‌های مخروطی بدون سوراخ، افزایش زاویه‌ی یال مخروط کم شدن نیروی بیشنه را به دنبال دارد.

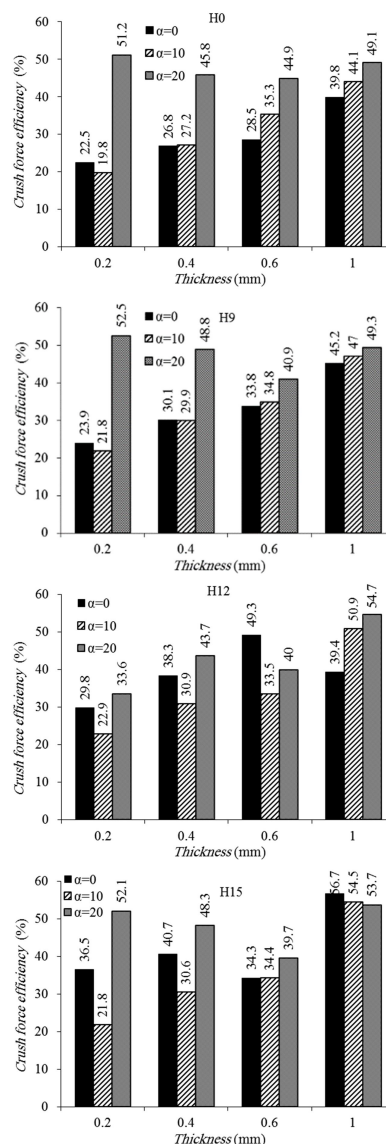
- با افزایش زاویه‌ی مخروط فروریزش اولیه از حالت چین خوردگی در بالای مخروط به انبساط از پایین تبدیل می‌شود.

- در زوایای یال ۰ و ۱۰ درجه افزایش ضخامت برای تمام گروه‌ها منجر به افزایش کارایی می‌گردد اما در زاویه یال ۲۰، با افزایش ضخامت تا ۰/۶ میلیمتر کارایی کاهش و بعد از آن افزایش می‌یابد.

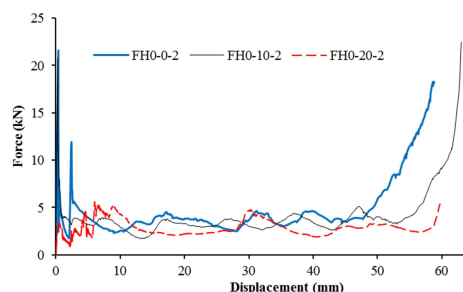
- در میان جاذب‌های یکسان از نظر ضخامت و تعداد سوراخ، جاذب‌های مخروطی با زاویه‌ی یال ۱۰ درجه کمترین کارایی را دارند.

۶- مراجع

- [1] Engineers S. O. A., *Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection in Frontal Collisions*: Society of Automotive Engineers, Michigan, 1990 .
- [2] Zhang X., Zhang H., Wen Z., Experimental and numerical studies on the crush resistance of aluminum honeycombs with various cell configurations, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 66, pp. 48-59, 2014 .
- [3] A. Alavi Nia A., Haddad Hamedani J., Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries, *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, No. 12, pp. 946-954, 2010 .
- [4] Yin H., Wen G., Liu Z., Qing Q., Crashworthiness optimization design for foam-filled multi-cell thin-walled structures, *Thin-Walled Structures*, Vol. 75, pp. 8-17, 2014 .
- [5] Mamalis A. G., Manolakos D. E., Saigal S., Viegelaht G., Johnson W., Extensible plastic collapse of thin-wall frusta as energy absorbers, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 28, No. 4, pp. 219-229, 1986 .
- [6] Mamalis A. G., Manolakos D. E., Viegelaht G. L., The axial crushing of thin PVC tubes and frusta of square cross-section, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 241-264, 1989 .
- [7] Alghamdi A. A. A., Reinversion of aluminium frustra, *Thin-Walled Structures*, Vol. 40, No. 12, pp. 1037-1049, 2002 .
- [8] Alghamdi A. A. A., Aljawi A. A. N., Abu-Mansour T. M. N., Modes of axial collapse of unconstrained capped frusta, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, No. 6, pp. 1145-1161, 2002 .
- [9] Aljawi A. A. N., Alghamdi A. A. A., Abu-Mansour T. M. N., Akyurt M., Inward inversion of capped-end frusta as impact energy absorbers, *Thin-Walled Structures*, Vol. 43, No. 4, pp. 647-664, 2005 .
- [9] Niknejad A., Tavassolimanesh A., Axial compression of the empty capped-end frusta during the inversion progress, *Materials & Design*, Vol. 49, pp. 65-75 , 2013 .
- [11] El-Sobky H., Singace A. A., Petsios M., Mode of collapse and energy absorption characteristics of constrained frusta under



شکل ۲۰- تغییرات کارایی نیروی له شدگی بر حسب ضخامت در تعداد سوراخ متفاوت



شکل ۲۱- منحنی نیرو-جابجایی جاذب‌های با ضخامت ۰/۲ میلیمتر و بدون سوراخ در زاویه یال‌های گوناگون

- axial impact loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, No. 3, pp. 743-757, 2001.
- [12] Akisanya A. R., Fleck N. A., Plastic collapse of thin-walled frusta and egg-box material under shear and normal loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, No. 7, pp. 799-808, 2006.
- [13] Ghamarian A., Zarei H. R., Abadi M. T., Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, No. 10, pp. 1312-1319, 2011.
- [14] Kathiresan M., Manisekar K., Manikandan V., Performance analysis of fibre metal laminated thin conical frusta under axial compression, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 12, pp. 3510-3519, 2012.
- [15] Kathiresan M., Manisekar K., Manikandan V., Crashworthiness analysis of glass fibre/epoxy laminated thin walled composite conical frusta under axial compression, *Composite Structures*, Vol. 108, pp. 584-599, 2014.
- [16] Kathiresan M., Manisekar K., Axial crush behaviours and energy absorption characteristics of aluminium and E-glass/epoxy over-wrapped aluminium conical frusta under low velocity impact loading, *Composite Structures*, Vol. 136, pp. 86-100, 2016.
- [17] Zhang X., Zhang H., Relative merits of conical tubes with graded thickness subjected to oblique impact loads, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 98, pp. 111-125, 2015.
- [18] Li G., Xu F., Sun G., Li Q., 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, pp. 68-83, 2015.
- [19] Hosseinipour S. J., Daneshi G. H., Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression, *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, No. 1, pp. 31-46, 2003.
- [20] A. Niknejad, Mojtaba Firouzi, Hamidreza Saadatfard, Experimental investigations on the folding process of polyurethane foam-filled aluminum columns with circular discontinuities, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 40 No. 4, pp. 359-367, 2016.
- [21] Alavi Nia A., Badnava H., Fallah Nejad K., An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 6, pp. 3594-3607, 2011.
- [22] Yuen S. C., Nurick G. N., The Energy-Absorbing Characteristics of Tubular Structures With Geometric and Material Modifications: An Overview, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 61, No. 2, pp. 1-15, 2008.
- [23] Niknejad A., Abedi M.M., Liaghat G.H., Zamani Nejad M., Foam-filled grooved tubes with circular cross-section under axial compression: a theoretical analysis, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 40, No. 3, pp. 155-167, 2016.
- [24] Alavi Nia A., Fallah Nejad K., Badnava H., Farhoudi H. R., 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.
- [25] *Stahlschlüssel: Key to Steel*: Verlag Stahlschlüssel, Germany, 1986.
- [26] ASTM. International, *ASTM E8/E8M - 09 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*: ASTM, 2009.
- [27] Ghannadpour S. A. M., Najafi A., Mohammadi B., On the buckling behavior of cross-ply laminated composite plates due to circular/elliptical cutouts, *Composite Structures*, Vol. 75, pp. 3-6, 2006.
- [28] Alexander J.M., An approximate analysis of the collapse of the thin cylindrical shells under axial loading, *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 13, pp. 10-15, 1960.