

## بررسی تجربی و عددی تأثیر سوراخ و انحناى لبه بر ویژگی‌های فروپاشی جاذب‌های استوانه‌ای تحت بار محوری ضربه‌ای

علی علوی نیا<sup>۱\*</sup>، صابر چهاردولی<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۲ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۷	در این پژوهش، ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های استوانه‌ای آلومینیومی که در لبه و میانه‌ی آن‌ها سوراخ و یا انحنا وجود دارد به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. لوله‌ها تحت بارگذاری محوری و ضربه‌ای یک جسم صلب ۳۰ کیلوپی با سرعت‌های ۶ یا ۷ متر بر ثانیه قرار گرفتند. در آزمایش‌های تجربی ابتدا نوع آلیاژ و خواص مکانیکی لوله‌های آلومینیومی استخراج شدند، سپس چهار نمونه‌ی آزمایشگاهی به منظور تأیید صحت نتایج شبیه‌سازی تحت بارگذاری ضربه‌ای قرار گرفتند. بررسی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود LS-Dyna انجام شد که در مجموع ۱۳ حالت مختلف تحت بررسی قرار گرفت. در بحث و بررسی نتایج مشخص شد که ایجاد سوراخ در لبه و میانه‌ی پوسته‌های استوانه‌ای ضمن ثابت نگه داشتن انرژی جذب شده منجر به کاهش چشمگیر نیروی بیشینه و افزایش کارایی نیروی له‌شدگی در بارگذاری ضربه‌ای می‌شود. در حالت کلی با افزایش تعداد سوراخ‌ها، نیروی بیشینه کمتر و کارایی بیشتر می‌شود. مشاهده شد که در بارگذاری ضربه‌ای ایجاد انحنا در لبه منجر به کاهش نیروی بیشینه، کاهش انرژی جذب شده و افزایش کارایی می‌گردد به گونه‌ای که با افزایش شعاع انحناى لبه نیروی بیشینه و انرژی جذب شده کمتر و کارایی بیشتر می‌شود. در پایان برای هر کدام از دو نوع جاذب سوراخ‌دار و لبه خمیده، نمونه‌هایی معرفی شد. این جاذب‌ها می‌توانند جایگزین‌های مناسبی برای جاذب‌های استوانه‌ای معمولی این پژوهش باشند.

### واژگان کلیدی:

جاذب انرژی سوراخ‌دار،  
LS-Dyna،  
بارگذاری ضربه‌ای،  
جاذب لبه خمیده.

### ۱-مقدمه

ساختارهای جدار نازک مزیت بسیار مهمی در سبکی و جذب انرژی دارا هستند و به طور وسیعی در صنایع اتومبیل‌سازی، هوایی، حمل و نقل و نیز صنایع دفاعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ساختارها از طریق جذب انرژی به صورت تغییر شکل پلاستیک، مانع وارد شدن آسیب‌های قابل توجه به بدنه‌ی وسایل نقلیه‌ی زمینی، دریایی، هوایی

و نیز سرنشینان آن‌ها هنگام تصادف می‌شوند. به عنوان مثال، یک بدنه‌ی خالی اتومبیل عمدتاً از اجزاء جدار نازک تشکیل شده است که با روش‌های قالب‌گیری و شکل‌دهی ساخته شده است. در طول سالیان گذشته تحقیقات زیادی در مورد ویژگی‌های فروپاشی این نوع جاذب‌ها به صورت تجربی، تحلیلی و عددی انجام شده است که در این رابطه می‌توان به مراجع [۱-۳] و مواردی که بعد از این می‌آید

<sup>۱</sup> \* پست الکترونیک نویسنده مسئول: alavi1338@basu.ac.ir

۱. استاد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا

ترکیبی را به صورت آزمایشگاهی و عددی مطالعه کردند و اثرات افزودن درپوش بر رفتار فروپاشی ساختارهای جدارنازک استوانه‌ای و مخروطی را بررسی نمودند [۱۱]. در تحقیقی دیگر قمریان و ابدی فروریزش پوسته‌های استوانه-ای سربسته‌ی پرشده با فوم را تحت بارگذاری محوری و به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که پوسته‌های استوانه‌ای درپوش‌دار با کاهش نیروی اولیه، جاذب انرژی بهتری نسبت به پوسته-های استوانه‌ای بدون درپوش هستند [۱۲]. جندقی‌شاهی و مرزبان‌راد رفتار فروپاشی سازه‌های آلومینیومی جدارنازک با مقطع دایره‌ای و ضخامت دیواره‌ی متغیر را تحت بار محوری شبه‌استاتیکی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با تغییر ضخامت می‌توان جذب انرژی و نیروی بیشینه‌ی حین فروپاشی ساختارهای جدارنازک را بهبود بخشید [۱۳]. سانگ ساختارهای جدارنازک با پنجره‌هایی روی دیواره را بررسی کرد و اثرات ابعاد پنجره بر فروپاشی را مورد مطالعه قرار داد [۱۴]. سان و همکارانش نشان دادند که ستون‌های  $FGT^2$  در مقایسه با ستون‌های معمولی در بارگذاری ضربه‌ای مقدار انرژی ویژه<sup>۳</sup> بیشتری خواهند داشت و همچنین میزان نیروی بیشینه‌ی آن‌ها در مقایسه با ستون‌های معمولی همواره کمتر است [۱۵]. شریفی و همکارانش طی تحقیقی آزمایشگاهی نشان دادند که نازک کردن لبه‌ی پوسته‌های استوانه‌ای و نیز ایجاد اختلاف ارتفاع در جاذب‌های دولوله‌ای روش مناسبی برای کاهش نیروی بیشینه‌ی فروپاشی است [۱۶]. در تحقیقی دیگر علوی‌نیا و چهاردولی به بهینه‌سازی اختلاف ارتفاع ساختارهای متداخل سه لوله‌ای به منظور کاهش نیروی بیشینه و افزایش انرژی ویژه پرداختند [۱۷]. محمودی و همکارانش در یک بررسی عددی-تحلیلی نقش پخ زنی و تقسیم بندی مقطع بر بهبود ویژگی‌های جذب انرژی را مورد مطالعه قرار دادند [۱۸].

با توجه به اینکه بررسی فروپاشی محوری جاذب‌های سوراخ‌دار و جاذب‌های با لبه‌ی خمیده تاکنون تحت بار ضربه‌ای به صورت محدود بررسی شده است و تحقیقات پیرامون این موضوع کامل نیست آنچه در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد تأثیر نوع، تعداد و مکان نمونه‌هایی از ناپیوستگی هندسی بر ویژگی‌های فروپاشی ساختارهای

اشاره کرد. گودن و کوی از روش آزمایشگاهی، چین-خوردگی و رفتار لهیدگی لوله‌های دایروی تکی و نیز بسته‌های شش‌ضلعی و مربعی را که ترکیبی از این لوله‌های آلومینیومی بود، در دو حالت توخالی و پرشده از فوم آلومینیوم تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی بررسی کردند [۴]. در این تحقیق از فوم آلومینیوم با چگالی‌های مختلف استفاده شد. اولایی و همکارانش [۵] چیدمانی از لوله‌های تو در تو دایره‌ای از جنس فولاد نرم را که در اثر بارگذاری دینامیکی دچار له‌شدگی جانبی شده بودند را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های آن‌ها در محدوده سرعت‌های ضربه‌ای بین ۳ تا ۵ متر بر ثانیه با استفاده از برخورد جرم ثابت سقوط کننده بر روی نمونه انجام گرفت و رفتار لهیدگی و قابلیت جذب انرژی آن‌ها به صورت تجربی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار LS-Dyna تحلیل شد. آواله و چیان‌دوسی به بهینه‌سازی اجزای جاذب انرژی به کار رفته در سازه‌ی وسایل نقلیه پرداختند [۶]. یکی از مواردی که در تحقیقات به آن پرداخته شده است کم کردن میزان نیروی بیشینه‌ی فروپاشی و افزایش ظرفیت جذب انرژی ساختارهای جدارنازک می‌باشد. در این زمینه می‌توان به پژوهش‌هایی که در ادامه می‌آید اشاره کرد، این پژوهش‌ها عمدتاً جاذب‌های انرژی را تحت بار شبه‌استاتیکی بررسی کرده‌اند. ژانگ و همکارانش لهیدگی محوری لوله‌های استوانه‌ای را با اهرمی به عنوان آغازگر کمانش بررسی کردند. این آغازگر کمانش جهت کاهش نیروی اولیه لازم برای چین‌خوردگی در لوله‌های دایروی جدارنازک تحت بار محوری استفاده شد [۷]. علوی‌نیا و حداد تجزیه و تحلیلی مقایسه‌ای برای جذب انرژی و تغییر شکل ستون‌های جدارنازک با اشکال مختلف سطح مقطع از قبیل دایروی، مربعی، مستطیلی، شش‌ضلعی، سه‌گوش، هرمی و مخروطی به صورت تجربی و شبیه‌سازی انجام دادند [۸]. آکار و همکارانش طی تحقیقی مخروط‌های ناقصی را که به صورت متقارن کنگره‌ای شده بودند را با یک الگوریتم بهینه‌ساز چند هدفه بررسی کردند [۹]. شریعتی و ... بخش کمانش و پس‌کمانش پوسته‌های نیم‌کروی فولادی را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند و نیروی متوسط<sup>۱</sup> کمانش را برای آن‌ها به دست آوردند [۱۰].

<sup>1</sup> Average force or  $Fa$

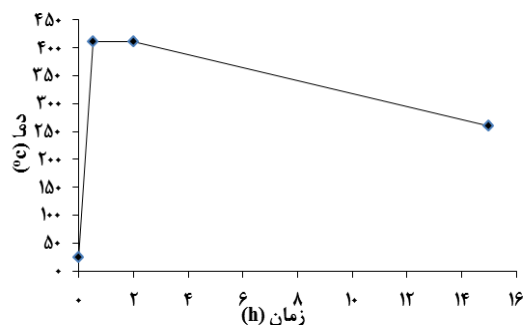
<sup>2</sup> Functionally graded thickness

<sup>3</sup> Specific energy absorption or  $SEA$

خواص مکانیکی استخراج شده از این منحنی در جدول ۲ قابل مشاهده است. در نهایت با استفاده از دستگاه سقوط وزنه ویژگی‌های جذب انرژی برخی از نمونه‌هایی که در بخش‌های بعد شبیه‌سازی می‌شوند به صورت تجربی به دست آمد.

جدول ۱- درصد وزنی عناصر لوله‌ی تهیه شده (تولید شده با روش اکستروژن<sup>۹</sup>)

عنصر	آلیاژ 6101 [18]	نتایج آزمایش کوانتومتری
Si	0.3 تا 0.7	0.42
Fe	ماکزیمم 0.5	0.1
CU	ماکزیمم 0.1	0.02
Mn	ماکزیمم 0.03	ناچیز
Mg	0.35 تا 0.8	0.51
Cr	ماکزیمم 0.03	ناچیز
Zn	ماکزیمم 0.1	0.01
بقیه عناصر (تکی)	ماکزیمم 0.03	✓
بقیه عناصر (مجموعاً)	ماکزیمم 0.1	✓
Al	باقیمانده	✓



شکل ۱- فرآیند گرمادهی و خنک‌کاری لوله‌ی آلومینیومی به منظور افزایش شکل‌پذیری

جدول ۲- خواص مکانیکی استخراج شده از منحنی بازپخت شده‌ی شکل ۳

مدول یانگ <sup>۱۰</sup>	تنش تسلیم <sup>۱۱</sup>	تنش نهایی <sup>۱۲</sup>	کرنش نهایی <sup>۱۳</sup>
69.92 GPa	44.01 MPa	96.15 MPa	0.27

جدارنازک استوانه‌ای تحت بار محوری ضربه‌ای است، که در ادامه به تشریح پژوهش و بحث در مورد نتایج به دست آمده پرداخته می‌شود.

## ۲- مواد و آزمون‌ها

در این قسمت مجموعه‌ای از آزمایش‌ها برای ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها انجام شده است. بدین منظور، از لوله‌های آلومینیومی بدون درز موجود در بازار ایران با ضخامت ۱/۲۳ و شعاع ۲۰ میلیمتر استفاده شد. در صورتی که لوله‌ها با ماشینکاری و یا رول کردن و سپس جوش دادن لبه‌ها به هم ایجاد می‌شدند، ضخامت‌ها و شعاع‌های دلخواه قابل ساخت بود اما عوامل گوناگونی از جمله دمای بالای جوشکاری و یا شیارهای ریز ناشی از تراشکاری، قطعه‌ی ساخته شده را تحت تأثیر قرار می‌داد، علاوه بر این‌ها ممکن بود قطعه‌ی ساخته شده، مقطع کاملاً دایره‌ای و ضخامت یکنواخت نداشته باشد. حال آنکه نمونه‌های تهیه شده در این پژوهش بدون درز هستند و این اطمینان وجود دارد که در تمام قسمت‌ها، ضخامت یکسان و مقطع کاملاً دایره‌ای است که همین امر باعث کم‌تر شدن خطای آزمایش می‌شود.

با استفاده از آزمایش کوانتومتری<sup>۴</sup> مشخص شد که آلیاژ لوله‌ی تهیه شده از بازار مطابق با منبع [۱۹] آلومینیوم ۶۱۰۱ با چگالی ۲۶۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد، نتایج آزمون کوانتومتری در جدول ۱ مشاهده می‌شود. با انجام آزمون‌های کشش اولیه مشخص شد که لوله‌ی تهیه شده نرمی کافی جهت تغییر شکل‌های بزرگ و بدون ترک را ندارد، لذا مطابق با منبع [۲۰] تحت عملیات بازپخت<sup>۵</sup> قرار گرفت. فرآیند بازپخت مطابق شکل (۱) انجام شد.

مطابق استاندارد ASTM E8/E8M-09 موجود در منبع [۲۱] با استفاده از وایرکات<sup>۶</sup> یا ماشینکاری به وسیله‌ی تخلیه‌ی الکتریکی (EDM<sup>۷</sup>) دو نمونه‌ی دمبلی از لوله‌ها جدا شد. این نمونه‌های دمبلی مطابق شکل (۲) با استفاده از دستگاه سن‌تام ۱۵ تن<sup>۸</sup> با سرعت ۲ میلیمتر بر دقیقه تحت کشش شبه‌استاتیکی قرار گرفتند و منحنی تنش کرنش حقیقی آن‌ها مطابق شکل (۳) استخراج گردید.

<sup>10</sup> Young's modulus or  $E$

<sup>11</sup> Yield stress or  $\sigma_y$

<sup>12</sup> Ultimate stress or  $\sigma_U$

<sup>13</sup> Ultimate strain or  $\epsilon_U$

<sup>4</sup> Quantometry

<sup>5</sup> Annealing

<sup>6</sup> Wire-cut

<sup>7</sup> Electrical discharge machining

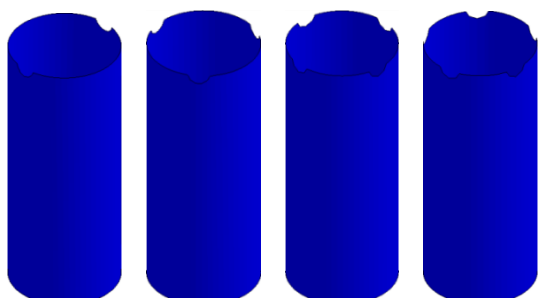
<sup>8</sup> STM-150 Cap.150 kN

<sup>9</sup> Extrusion

قسمت‌های نیم‌دایره‌ای با شعاع ۴ میلی‌متر از لبه‌ی جاذب-های معمولی بریده شود در لبه‌ها ناپیوستگی هندسی به وجود می‌آید. عددی که در کنار کد گروه آمده است تعداد نیم‌سوراخ‌ها را نشان می‌دهد که بین ۲ تا ۵ متغیر است. انتخاب شعاع ۴ میلی‌متر برای سوراخ بعد از بررسی اندازه-های گوناگون بوده است. در شعاع‌های بزرگ برای سوراخ، الگوی فروپاشی بسیار نامتقارن و جذب انرژی پایین است و در شعاع‌ها کم سوراخ کاهش نیروی بیشینه ناچیز است. انتخاب تعداد سوراخ نیز وضعیت مشابهی دارد، تعدا بالا منجر به کاهش بسیار بالای جذب انرژی می‌شود حال آنکه در تحقیق مورد نظر هدف کاهش نیروی بیشینه در عین ثابت نگه داشتن جذب انرژی است. اینطور می‌توان گفت که قطر و تعداد سوراخ بایستی با توجه به هندسه‌ی جاذب مورد استفاده انتخاب شود.

۳. نمونه‌های گروه HM با سوراخ‌های میانی، در این گروه نیم‌سوراخ‌های گروه HU با همان آرایش در ارتفاع ۵۰ میلیمتری به صورت سوراخ کامل ایجاد شده‌اند. عدد نمایش داده شده در کنار حروف HM تعداد سوراخ‌های ایجاد شده را نشان می‌دهد. موقعیت شعاعی سوراخ‌های گروه HM و HU در شکل (۵) نشان داده شده است.

۴. نمونه‌های گروه CU با لبه‌ی انحنا دار. به منظور بررسی تأثیر شعاع انحناء لبه بر ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های استوانه‌ای، لوله‌های معمولی با تغییر شعاع انحنای لبه به لوله‌هایی با شعاع انحناء اولیه تبدیل شدند. در شکل (۶) این روال مشاهده می‌شود. عدد کنار کد گروه نشان دهنده-ی شعاع انحناء لبه می‌باشد. شعاع انحنای لبه از ۵ تا ۲۰ که برابر شعاع لوله است تغییر می‌کند. به عنوان مثال CU-5 نشان دهنده‌ی ساختاری با لبه‌ی منحنی شکل و شعاع انحنای لبه‌ای ۵ میلی‌متر می‌باشد. انتخاب شعاع انحنای لبه نیز بر اساس شعاع جاذب انتخاب شده‌اند، این شعاع انحنای لبه بین ۰ تا ۲۰ میلی‌متر محدود است.

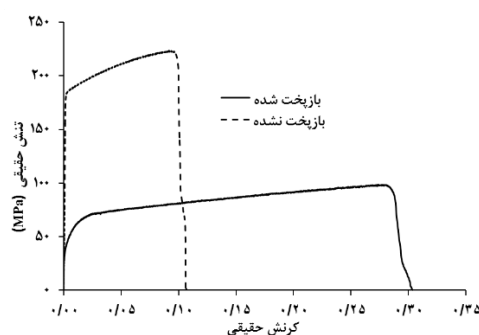


شکل ۴- جاذب‌های با حفره‌های لبه‌ای (گروه HU)



شکل ۲- نمونه‌های بریده شده با وایرکات و نحوه‌ی بستن در

سنتام



شکل ۳- نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم ۶۱۰۱ قبل و

بعد از بازپخت

### ۳- شبیه‌سازی

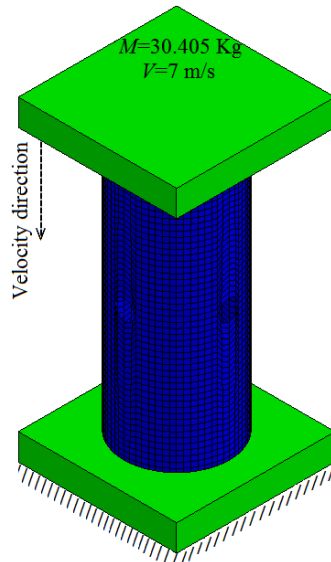
از آنجا که بررسی ویژگی جاذب‌های انرژی همراه با آغازگر کمانش به صورت کاملاً تجربی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست، تصمیم گرفته شد که پارامترهای جذب انرژی به وسیله‌ی شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای که صحت آن‌ها با استفاده از آزمایش‌های تجربی قابل تأیید است استخراج شود، در این بخش به این موضوع پرداخته می‌شود. تمامی جاذب‌هایی که در این تحقیق بررسی شده‌اند اعم از تجربی و نرم‌افزاری دارای شعاع ۲۰، ضخامت ۱/۲۳ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند. ارتفاع جاذب به گونه‌ای انتخاب شده است که اولاً کمانش کلی که مانع جذب انرژی است رخ ندهد، ثانیاً تعداد مناسبی چین‌خوردگی ایجاد شود و بتوان از این نظر همه سازه‌ها را با یکدیگر مقایسه نمود. نمونه‌های شبیه‌سازی شده به چهار دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند.

۱. استوانه‌ی معمولی

۲. نمونه‌های گروه HU با سوراخ‌های لبه‌ای، شکل (۴).

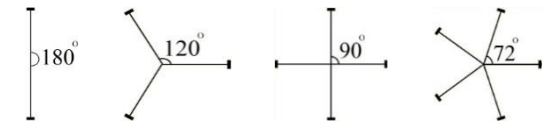
همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود در صورتی که

از آن بدون تغییر شکل باقی می ماند و نمی توان ظرفیت جاذب در جذب انرژی را تعیین نمود. اگر سرعت بالاتر از ۷ متر بر ثانیه باشد مازاد انرژی جنبشی ضربه زننده موجب ضربات متوالی بعدی شده و نهایتاً به صورت گرما تلف می شود و عملاً ربطی به جذب انرژی یک جاذب ندارد.

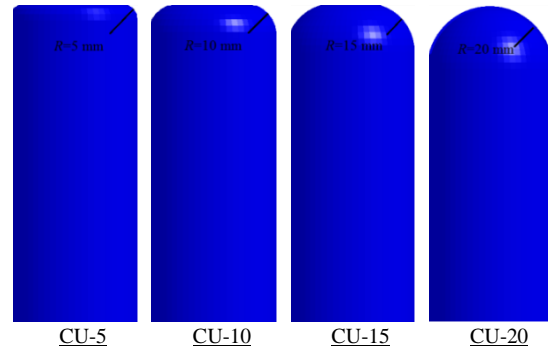


شکل ۷- مدل اجزاء محدود جاذب استوانه‌ای با چهار سوراخ میانی

ویژگی‌های منحنی تنش- کرنش حقیقی آلومینیوم ۶۱۰۱ بازپخت شده (شکل ۳) در مدل مادی نرم افزار LS-Dyna یعنی Mat-piecewise-linear-plasticity وارد شد. ضرایب کوپر-سایموند<sup>۱</sup> مطابق با منبع [۲۲] در نرم افزار وارد شدند. رابطه‌ی کوپر-سایموند مطابق معادله‌ی  $\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^q$  تعریف می شود که در آن  $\sigma'_0$  تنش تسلیم پلاستیک دینامیکی در نرخ کرنش پلاستیک تک محوره‌ی  $\dot{\epsilon}$  و  $\sigma_0$  تنش تسلیم پلاستیک استاتیکی است. D و q (ضرایب کوپر-سایموند) ثوابت معین وابسته به جنس ماده هستند که برای آلومینیوم به ترتیب، ۴ و ۶۵۰۰ می باشد. CONTACT-AUTOMATIC-SURFACE-TO-SURFACE و CONTACT-AUTOMATIC-SINGLE-SURFACE به ترتیب برای تعریف اصطکاک و تداخل بین فکها و جاذب و نیز جاذب با خودش در نظر گرفته شد که در هر دوی آنها ضرایب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی به ترتیب ۰/۳ و ۰/۲ وارد شدند. این ضرایب بعد از اعمال چندین ضریب مختلف به منظور حصول بیشترین تطابق بین نتایج تجربی و عددی به دست آمده اند. المانهای فکها از نوع Solid



شکل ۵- موقعیت شعاعی حفره‌ها در ساختار گروه‌های HU و HM



شکل ۶- جاذب‌های با لبه‌ی خمیده (گروه CU)

### ۳-۱- روش شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی ساختارهای این تحقیق از نرم افزار المان محدود LS-Dyna استفاده شد. در شکل ۷ یک نمونه طراحی شده در نرم افزار مشاهده می شود. مطابق شکل ضربه زننده‌ی صلب ۳۰/۴۰۵ کیلوگرمی با سرعت ۷ متر بر ثانیه به جاذبی که به صورت آزاد بر روی تکیه‌گاه ثابت قرار دارد و انتهای بالائی آن آزاد است برخورد می کند. با انجام شبیه‌سازی‌های اولیه برای جاذب‌های سالم و بدون حفره یا انحنای لبه (با ارتفاع ۱۰ سانتیمتر) مشخص شد که جاذب‌های مذکور در بارگذاری دینامیکی حداکثر تا ۶۵۰ ژول انرژی جذب می کنند. یعنی در صورتی که تحت ضربه‌ی یک جسم صلب با وزن و سرعت مشخص قرار بگیرند تنها ۶۵۰ ژول از انرژی جسم مذکور را جذب می کنند. حال اگر جرم ضربه زننده ۳۰/۴۰۵ کیلوگرم باشد و به این جسم سرعت ۷ متر بر ثانیه داده شود، انرژی جنبشی آن طبق رابطه‌ی  $K = \frac{1}{2}mv^2$  برابر ۷۴۵ ژول است. بعد از برخورد، ۶۵۰ ژول از این انرژی توسط لوله جذب می شود و انرژی باقی مانده با پایین و بالا شدن ضربه زننده به صورت متوالی تلف می شود. در این حالت این اطمینان وجود دارد که جاذب ۶۵۰ ژول انرژی را جذب می کند و بالاترین میزان فشردگی برای جاذب که معقول است و بیش از حد نیست حاصل می شود. حال اگر سرعت کم باشد (انرژی کمتر از ۶۵۰ ژول) جاذب به صورت کامل فشرده نمی شود و بخشی

<sup>۱</sup> Cowper-Symond's parameters

عبارتند از: ۱- انرژی، که انرژی جذب شده توسط جاذب در طول فروپاشی را نشان می‌دهد. ۲- نیروی بیشینه، که بیشترین میزان نیرو در منحنی نیرو-جابجایی است. ۳- بازده لهیدگی، که از تقسیم طول فروپاشی به طول اولیه جاذب به دست می‌آید. ۴- نیروی متوسط، که متوسط نیرو در منحنی نیرو جابجایی است. ۵- کارایی نیروی له‌شدگی (CFE)، که از تقسیم نیروی متوسط بر نیروی بیشینه به دست می‌آید [۱۷].

جدول ۵- مشخصات فروپاشی نمونه‌های جدول ۴

کد نمونه	انرژی جذب شده (J)	نیروی بیشینه (kN)	بازده لهیدگی (%)	نیروی متوسط (kN)	کارایی نیروی له‌شدگی (%)	نقطه شروع فروپاشی
Simple	608	14.1	82.4	7.4	52.5	فک ثابت
HU2	601	13.5	85.4	7	51.9	فک متحرک
HU3	547	12.8	80.5	6.8	53.1	فک متحرک
HU4	609	12.1	81.6	7.5	62	فک متحرک
HU5	618	11.7	82.2	7.5	64.1	فک متحرک
HM2	405	13.3	87.8	4.6	34.6	محل سوراخ
HM3	531	12.9	79.8	6.7	51.9	محل سوراخ
HM4	610	12.3	83.1	7.3	59.3	محل سوراخ
HM5	602	12.5	82.7	7.3	58.4	محل سوراخ
CU5	590	13.45	81.9	7.2	53.5	فک متحرک
CU10	596	11.53	82.3	7.2	62.4	فک متحرک
CU15	577	11.5	82.2	7	60.9	فک متحرک
CU20	585	10.85	83.2	7	64.5	فک متحرک

### ۳-۲- صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی

به منظور اطمینان از صحت شبیه‌سازی با نرم‌افزار LS-Dyna، تعدادی نمونه شکل (۸-الف) از جدول ۴ آماده شد و به وسیله‌ی دستگاه سقوط وزنه شکل (۸-ب) تحت آزمون ضربه قرار گرفتند. شکل (۹) نمونه‌های آماده شده برای صحت‌سنجی را در کنار دستگاه سقوط آزاد با ضربه‌زننده‌ی ۳۰/۴۰۵ کیلوگرمی را نشان می‌دهد. پس از

و به صورت صلب در نظر گرفته شدند. المان‌های جاذب‌ها به صورت Shell از نوع Belytscho-Tsay با ابعاد  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  انتخاب شدند، بدین ترتیب تعداد المان‌ها در یک جاذب ساده برابر با ۳۱۵۰ المان است. ابعاد  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  مطابق جدول ۳ پس از بررسی اندازه‌های گوناگون انتخاب شد. در صورتی که ابعاد کوچک‌تری انتخاب می‌شد تنها زمان شبیه‌سازی بالا می‌رفت و نتایج تغییری نمی‌کرد. برای پیدا کردن اندازه‌ی مناسب المان‌ها باید یک پارامتر را مد نظر قرار داد و نتایج را نسبت به آن پارامتر با یکدیگر مقایسه کرد این پارامتر می‌تواند بار بیشینه، بار متوسط و یا میزان جذب انرژی باشد. در این پژوهش از پارامتر میزان جذب انرژی برای به دست آوردن ابعاد مناسب المان استفاده شده است. اندازه المان‌ها از یک مقدار نسبتاً بالا شروع شده و تا یک اندازه‌ی مناسب کم می‌شود، در المانی که وابستگی انرژی جذب شده به ابعاد از بین می‌رود می‌توان آن المان را به عنوان المان بهینه انتخاب کرد. مشخصات نمونه‌های شبیه‌سازی شده در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

جدول ۳- تأثیر اندازه المان بر جذب انرژی

اندازه المان (mm)	5	4	3.5	3	2.5	2	1.5
انرژی جذب شده (J)	583	564	537	583	600	608	606

جدول ۴- مشخصات هندسی نمونه‌های شبیه‌سازی شده (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

کد نمونه	طول قسمت استوانه‌ای	شعاع سوراخ	محل- مرکز سوراخ*	شعاع انحناى لبه	طول کلی
Simple	100	-	-	-	100
HU2	100	4	96	-	100
HU3	100	4	96	-	100
HU4	100	4	96	-	100
HU5	100	4	96	-	100
HM2	100	4	50	-	100
HM3	100	4	50	-	100
HM4	100	4	50	-	100
HM5	100	4	50	-	100
CU5	95	-	-	5	100
CU10	90	-	-	10	100
CU15	85	-	-	15	100
CU20	80	-	-	20	100

\* نسبت به تکیه‌گاه پایینی

نتایج حاصل از فروپاشی ضربه‌ای در جدول ۵ قابل مشاهده است. پارامترهایی که در جدول ۵ نمایش داده شده‌اند

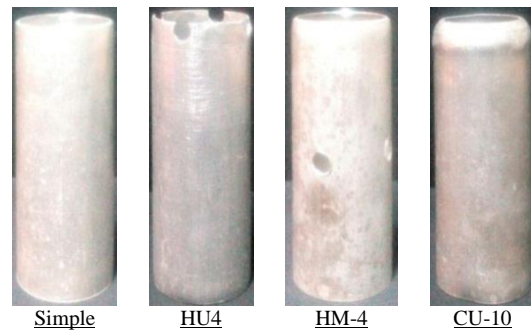


شکل ۹- نحوه‌ی قرار گیری نمونه‌ها در دستگاه سقوط وزنه

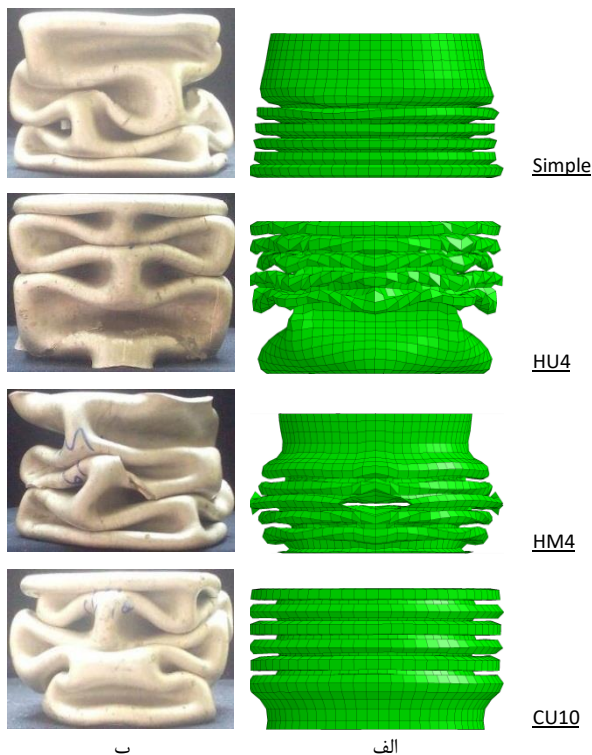
جدول ۶- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه‌های مشابه تحت ضربه‌ی وزنه‌ی ۳۰/۴۰۵ کیلوگرمی با سرعت اولیه‌ی ۶ m/s

الگوی فروریزش		طول نهایی			کد نمونه
تجربی	نرم-افزاری	اختلاف (%)	نرم-افزاری (mm)	تجربی (mm)	
مقارن	الماسی	-13	28.7	33	Simple
	الماسی	-16.1	26	31	HU4
	الماسی	-17.4	25.6	31	HM4
مقارن	الماسی	-6.2	24.4	26	CU10

فروپاشی نمونه‌ها، طول نهایی به عنوان معیاری برای صحت‌سنجی انتخاب شد. نتایج فروپاشی دینامیکی نمونه‌های آزمایشگاهی به همراه نمونه‌های شبیه‌سازی شده تحت برخورد وزنه‌ی ۳۰/۴۰۵ کیلوگرمی با سرعت ۶ متر بر ثانیه در جدول ۶ قابل مشاهده است (کم کردن سرعت نسبت به شکل (۷) در بخش ۳-۱ به منظور تسهیل امر مقایسه است زیرا در سرعت‌های بالا همه‌ی نمونه‌ها به صورت کامل فشرده می‌شوند و امکان مقایسه نتایج وجود ندارد اما در سرعت‌های پایین نمونه‌های قوی کمتر فشرده می‌شوند). در شکل ۱۰ نمونه‌های فروریخته شده نشان داده شده‌اند. قسمت الف مربوط به نمونه‌های عددی است و قسمت ب نمونه‌های تجربی را نشان می‌دهد.



الف



شکل ۱۰- مقایسه‌ی نمونه‌های تجربی و عددی بعد از فروریزش  
الف: نمونه‌های شبیه‌سازی ب: نمونه‌های تجربی



ب

شکل ۸- نمونه‌های آماده شده برای آزمایش تجربی  
الف: نمونه‌ها ب: دستگاه سقوط آزاد همراه با وزنه‌ها

نیروی بیشینه‌ی اولیه است. این موضوع به این علت است که وجود سوراخ‌های کوچک از طریق ایجاد ضعف موضعی در بدنه‌ی جاذب نیروی بیشینه‌ی اولیه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

جذب انرژی در فرآیند طولانی‌تری نسبت به نیروی بیشینه اتفاق می‌افتد و همه‌ی سطح پوسته در جذب تأثیرگذار است. بنابراین، ایجاد سوراخ‌هایی با مساحت ناچیز تأثیر چندانی بر فرآیند جذب انرژی نخواهد داشت. حتی در بعضی از مواقع جذب انرژی بیشتر می‌شود. افزایش جذب انرژی به دلیل تغییر الگوی فروپاشی است زیرا ایجاد سوراخ با تغییر الگوی فروریزش از متقارن به الماسی جذب انرژی پوسته‌ی معمولی را افزایش می‌دهد. لذا تغییرات ایجاد شده در شکل (۱۱-ب) قابل توجه‌اند. تغییر الگوی فروپاشی از متقارن به الماسی در شکل (۱۲) قابل مشاهده است.

شکل (۱۱-ج) نشان می‌دهد که نیروی متوسط با تغییر تعداد سوراخ تقریباً ثابت است، از طرفی مشاهده شد که افزایش تعداد سوراخ کم شدن نیروی بیشینه را به همراه دارد. لذا طبق تعریف کارایی نیروی له شدگی که از تقسیم نیروی متوسط بر نیروی بیشینه به دست می‌آید در شکل (۱۱-د) افزایش تعداد سوراخ، بیشتر شدن کارایی نیروی له شدگی را به دنبال دارد.

با مراجعه مجدد به شکل (۱۱) و مقایسه‌ی جاذب‌های با سوراخ‌های میانی و لبه‌ای مشاهده می‌شود که وجود سوراخ‌های لبه‌ای تأثیر بیشتری در کاهش نیروی بیشینه و افزایش کارایی دارد. لذا می‌توان گفت که جاذب‌های دارای سوراخ لبه‌ای در شرایط ایده‌آل‌تری از نظر کاربرد هستند و بهبود بیشتری در مشخصات جذب انرژی استوانه‌های ساده به وجود می‌آورند.

با توجه به شکل (۱۱) جذب انرژی، نیروی متوسط و کارایی در جاذب HM2 دارای یک کاهش ناگهانی است. با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که در جاذب HM2 نسبت به دیگر جاذب‌ها تعداد کمتری چین خوردگی به وجود می‌آید.

همین تعداد چین پایین باعث جذب انرژی کمتر نسبت به سایر جاذب‌ها می‌شود. زیرا جاذب‌های انرژی از طریق تبدیل انرژی جنبشی به کار 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

با توجه به جدول ۶ نتایج تجربی و عددی انطباق خوبی دارند. مشاهده می‌شود که طول نهایی در حالت تجربی بیشتر از حالت عددی است. این اختلاف ناشی از نوع داده‌های وارد شده به نرم‌افزار است. آنچه به عنوان تنش تسلیم و منحنی تنش-کرنش در نرم‌افزار وارد شده، داده‌هایی هستند که از کشش شبه‌استاتیکی شکل (۳) استخراج شده‌اند. در کشش دینامیکی (ضربه‌ای) اساساً تنش تسلیم و منحنی تنش کرنش در سطح بالاتری قرار دارند و همین موجب می‌شود که مواد تحت بار ضربه‌ای مقاوم‌تر باشند و سخت‌تر دچار تغییر شکل شوند، یعنی ماهیت مواد تحت بار شبه‌استاتیکی با ماهیتشان تحت بار ضربه‌ای متفاوت است. این موضوع برای صحت‌سنجی‌های این بخش نیز صادق است، در حالت عددی، ماهیت شبه‌استاتیکی آلیاژ ۶۱۰۱ آلومینیوم تحت بار ضربه‌ای قرار می‌گیرد در حالی که در حالت آزمایشگاهی ماهیت دینامیکی همین ماده تحت بار ضربه‌ای یکسان قرار می‌گیرد. بنابراین تغییر شکل نمونه‌های آزمایشگاهی کمتر است و این بیشتر بودن طول نهایی را برای نمونه‌های آزمایشگاهی به دنبال دارد.

#### ۴- بحث و بررسی

در بخش قبلی ویژگی‌های فروپاشی چند نوع از آغازگرهای کمانش استخراج شد. همانطور که گفته شد دو نوع روش استفاده شده است که در هر دوی آن‌ها بر روی لوله‌ی معمولی عملیاتی انجام شده تا لوله‌ای با آغازگر کمانش به وجود آید. در روش اول، با ایجاد سوراخ‌هایی در جداره‌ی لوله‌ی معمولی، لوله‌هایی با ناپیوستگی هندسی ساخته شده‌اند و در روش دوم، قسمت بالایی لوله‌های معمولی خم شده است. در ادامه تأثیر هر کدام از این دو، مورد بحث قرار می‌گیرد.

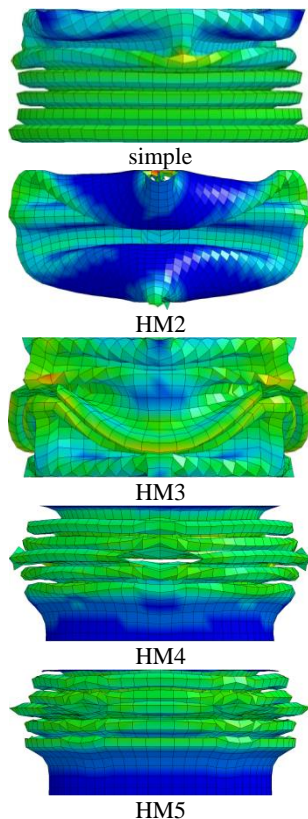
##### ۴-۱- بررسی تأثیر تعداد سوراخ

با توجه به جدول ۵ مشخص است که وجود سوراخ در لبه و یا در قسمت میانی جاذب‌های استوانه‌ی بر مشخصات فروپاشی تأثیرگذار است. لذا در این قسمت تأثیر ایجاد سوراخ بر مشخصات فروپاشی در مقایسه با نمونه‌ی ساده و بدون سوراخ بررسی می‌شود. شکل (۱۱) تغییرات مشخصات فروپاشی بر حسب تعداد سوراخ لبه‌ای و میانی را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۱۱-الف) عمده‌ترین نتیجه‌ای که ایجاد سوراخ در جاذب‌های معمولی به همراه دارد کم شدن میزان



که از تقسیم انرژی جذب شده به طول فروپاشی به دست می‌آید، کم بودن نیروی متوسط در جاذب HM2 قابل توجه است. در توجه کم شدن ناگهانی کارایی نیروی له-شدگی باید گفت در این حالت چون نیروی متوسط کاهش یافته اما نیروی بیشینه تغییر نکرده است پس کارایی نیروی له‌شدگی نیز کاهش می‌یابد.



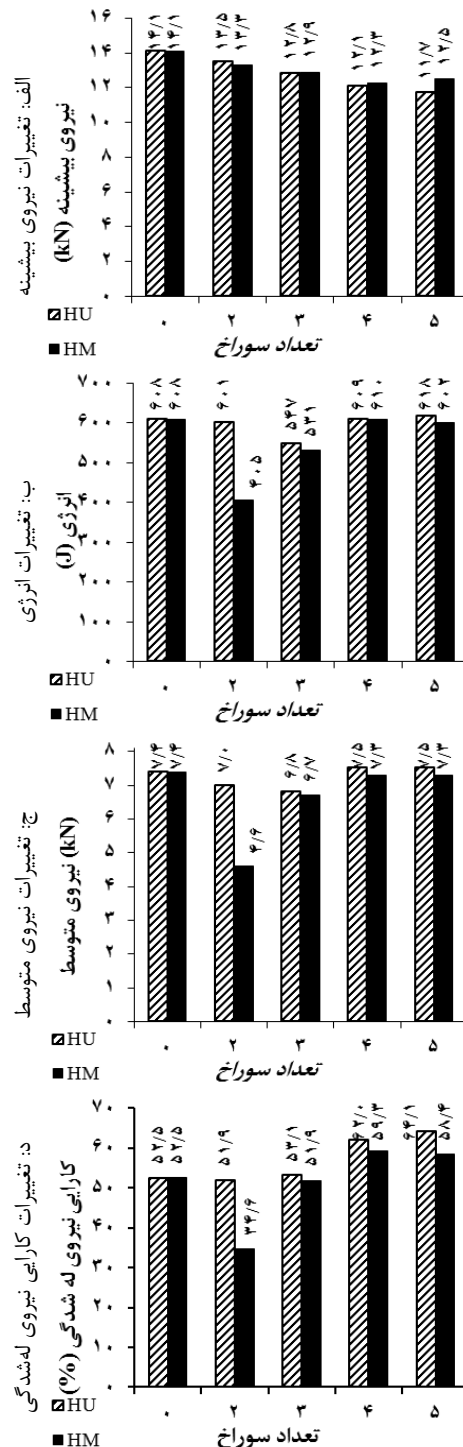
شکل ۱۲- مقایسه‌ی تعداد چین در جاذب‌های گروه HM

در شکل (۱۳) نمودارهای نیرو-جابجایی جاذب معمولی و جاذب HU-5 مقایسه شده است. این جاذب در مقایسه با سایر جاذب‌های بررسی شده‌ی شکل (۱۱)، کمترین نیروی بیشینه، بیشترین کارایی نیروی له‌شدگی و در عین حال بیشترین جذب انرژی را دارد. بیشتر شدن جذب انرژی در این جاذب به خاطر تأثیر گذاشتن سوراخ بر الگوی فروپاشی است.

#### ۴-۲- بررسی تأثیر شعاع انحنای لبه

در این بخش نتایج جدول ۵ برای جاذب‌های گروه CU در قالب نمودارهای شکل (۱۴) مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که جاذب‌های گروه CU در مقایسه با جاذب استوانه‌ای معمولی انرژی کمتری جذب می‌کنند، نیروی بیشینه و نیروی متوسط کمتری دارند اما میزان کارایی نیروی له‌شدگی برای این جاذب‌ها بیشتر

زاویه‌ی پیش‌لولا می‌باشد. گشتاور بر واحد طول جاذب-های انرژی که مقطع دایره‌ای دارند برابر  $M = \sigma_y t^2 / 4$  است [۲۳]، از ضرب این مقدار در محیطی که لولای پلاستیک در آن ایجاد شده (محیط چین خورده) و پس از آن در زاویه چرخش، انرژی جذب شده

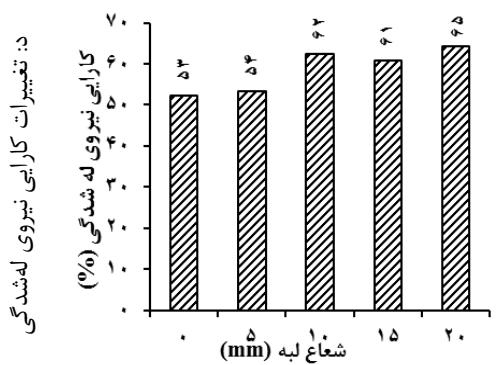
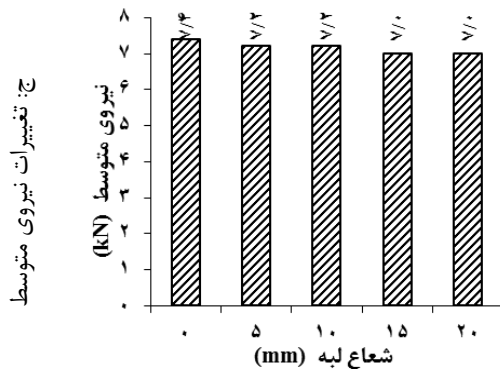
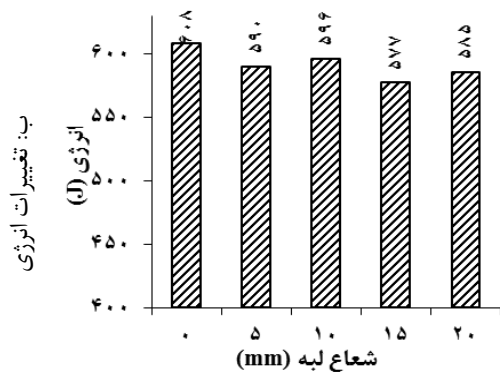
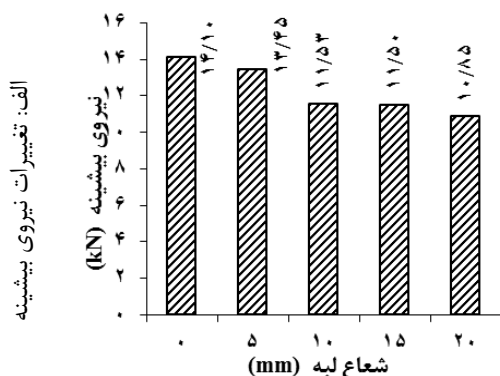


شکل ۱۱- تأثیر تعداد حفره بر ویژگی‌های جذب انرژی نمونه-

های گروه‌های HU و HM

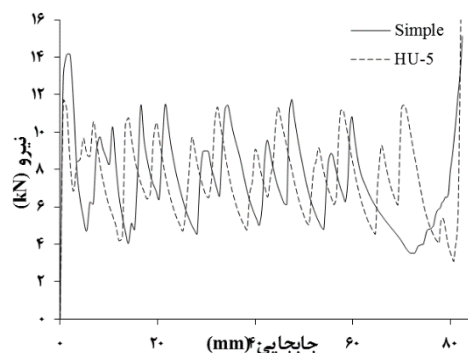
برای یک چین به دست می‌آید با توجه به نیروی متوسط

سطح مقطع بیشتری درگیر می‌شود و نیرو نیز افزایش می‌یابد؛ لذا در منحنی نیرو-جابجایی انتقال بیشینه‌ی نیرو به سمت راست، یعنی جایی که نیمکره بیشترین محیط خود را دارد، اتفاق می‌افتد. در شکل (۱۶) فرآیند فروپاشی جاذب CU-20 در موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۴- ویژگی‌های جاذب انرژی جاذب‌های گروه CU

است. در حالت کلی در صورت افزایش شعاع انحناى لبه میزان انرژی جذب شده، نیروی بیشینه و نیروی متوسط کمتر شده اما کارایی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در قسمت‌های بالایی جاذب‌های انحنا دار شعاع مقطع و در نتیجه محیط آن کم‌تر است انرژی کم‌تری در لولاهای پلاستیک تلف می‌شود لذا کم شدن انرژی جذب شده قابل توجه است. آنچه در این شکل بیشتر جلب توجه می‌کند کاهش میزان نیروی بیشینه شکل (۱۴- الف) و افزایش کارایی شکل (۱۴- د) با بیشتر شدن شعاع لبه است به گونه‌ای که افزایش شعاع لبه از صفر به ۲۰ میلیمتر در جاذب CU-20 منجر به کمتر شدن نیروی بیشینه به اندازه‌ی ۲۳ درصد و افزایش کارایی به اندازه‌ی ۲۳ درصد می‌گردد. اگرچه این جاذب در مقایسه با جاذب معمولی انرژی کمتری را جذب می‌کند (۴ درصد) اما میزان کاهش آن در مقایسه با کاهش نیروی بیشینه و افزایش کارایی قابل اغماض است.



شکل ۱۳- مقایسه‌ی منحنی نیرو-جابجایی جاذب ساده و جاذب HU-5

لذا می‌توان جاذب CU-20 را به عنوان یک جاذب ایده‌آل معرفی کرد. در حقیقت جاذب CU-20 جاذبی معمولی است که یک پوسته‌ی نیمکره‌ی روی آن قرار دارد که در بهبود مشخصات فروپاشی بسیار مؤثر است.

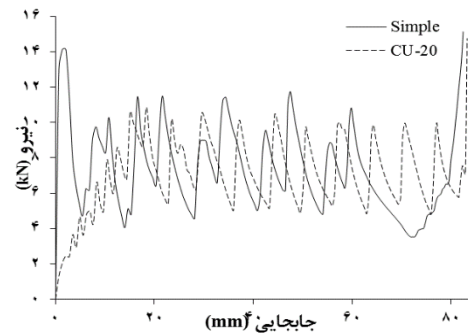
در شکل ۱۵ نمودارهای نیرو-جابجایی جاذب CU-20 که یک جاذب با کلاهک نیمکره‌ای است و جاذب معمولی مقایسه شده‌اند. شکل (۱۵) کمتر شدن نیروی بیشینه‌ی اولیه در جاذب کلاهک دار را به وضوح نشان می‌دهد. کم شدن نیروی بیشینه اولیه به این دلیل است که در جاذب نام برده اولین برخورد با قسمت بالایی نیمکره اتفاق می‌افتد که با توجه به پایین بودن مساحت آن قسمت، نیروی کمی برای تغییر شکل لازم است. با افزایش پیشروی ضربه زننده

## ۵- نتیجه‌گیری

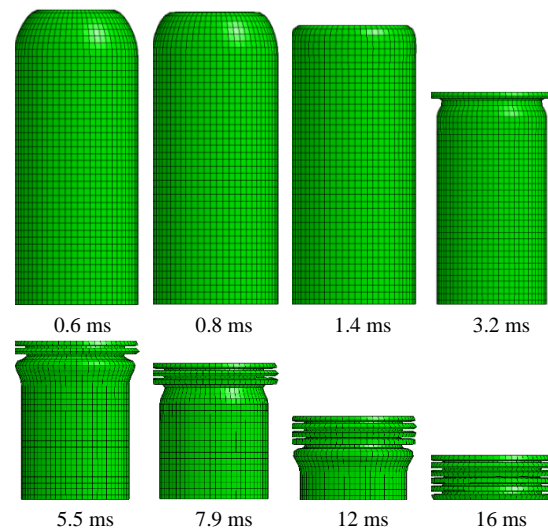
در این پژوهش تأثیر ایجاد سوراخ در پوسته‌های استوانه‌ای و نیز نقش ایجاد انحنا در لبه بر فروپاشی دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بار ضربه‌ای بررسی شده است. پژوهش به دو صورت تجربی و عددی انجام شد. بررسی‌های عددی با نرم‌افزار LS-Dyna و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی به کمک نمونه‌های آزمایشگاهی که تحت ضربه‌ی جسم صلب قرار گرفته‌اند تأیید شده است. عمده نتایج این پژوهش در ادامه به صورت موردی برشمرده شده‌اند.

۱- ایجاد سوراخ در جاذب‌های استوانه‌ای منجر به کاهش نیروی بیشینه و افزایش کارایی نیروی له شدگی می‌شود.  
 ۲- سوراخ‌های لبه‌ای نسبت به حفره‌های میانی در بهبود مشخصات فروپاشی جاذب‌های استوانه‌ای مؤثرترند.  
 ۳- با افزایش تعداد سوراخ‌های دایره‌ای در جاذب‌های استوانه‌ای نیروی بیشینه کمتر و کارایی بیشتر می‌شود.  
 ۴- ایجاد انحنا در لبه‌ی جاذب استوانه‌ای معمولی بهبود مشخصات فروپاشی را به دنبال خواهد داشت به گونه‌ای که با ایجاد انحنا، نیروی بیشینه کمتر و کارایی بیشتر می‌شود.  
 ۵- با افزایش شعاع انحنای لبه در جاذب‌های معمولی نیروی بیشینه کمتر و کارایی بیشتر می‌شود.

۶- در جاذب‌های استوانه‌ای با سوراخ لبه‌ای، جاذب HU-5 در مقایسه با جاذب معمولی نیروی بیشینه را به اندازه‌ی ۱۱ درصد کاهش و کارایی را به اندازه‌ی ۲۳ درصد افزایش می‌دهد. در جاذب‌های استوانه‌ای با لبه‌ی خمیده، جاذب CU-20 در مقایسه با جاذب معمولی نیروی بیشینه را به اندازه‌ی ۲۳ درصد کاهش و کارایی را به اندازه‌ی ۲۳ درصد افزایش می‌دهد.



شکل ۱۵- منحنی نیرو-جابجایی جاذب‌های ساده و CU-20 همانطور که در این بخش مشاهده شد جاذب‌های سوراخ‌دار و انحنا دار می‌توانند جایگزین مناسبی برای جاذب‌های استوانه‌ای معمولی باشند. در جاذب‌های استوانه‌ای با سوراخ لبه‌ای، جاذب HU-5 در مقایسه با جاذب معمولی نیروی بیشینه را به اندازه‌ی ۱۱ درصد کاهش و کارایی را به اندازه‌ی ۲۲ درصد افزایش می‌دهد. در جاذب‌های استوانه‌ای با لبه‌ی خمیده، جاذب CU-20 در مقایسه با جاذب معمولی نیروی بیشینه را به اندازه‌ی ۲۳ درصد کاهش و کارایی را به اندازه‌ی ۲۳ درصد افزایش می‌دهد. در هر دو جاذب، تغییرات انرژی جذب شده ناچیز است.



شکل ۱۶- مراحل متوالی فروپاشی جاذب CU-20 تحت بار ضربه‌ای محوری

## مراجع

- [1] W. Abramowicz, "The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns", International Journal of Impact Engineering, Vol. 1, No. 3, 1983, pp. 309-317.
- [2] W. Abramowicz, N. Jones, "Dynamic axial crushing of circular tubes", International Journal of Impact Engineering, Vol. 2, No. 3, 1984, pp. 263-281.
- [3] T. Wierzbicki, W. Abramowicz, "On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures", Journal of Applied

Mechanics, Vol. 50, No. 4a, 1983, pp. 727–734.

[4] M. Güden, H. Kavi, "Quasi-static axial compression behavior of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes", *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, No. 7, 2006, pp. 739–750.

[5] A. G. Olabi, E. Morris, M. S. J. Hashmi, M. D. Gilchrist, "Optimised design of nested circular tube energy absorbers under lateral impact loading", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 1, 2008, pp. 104–116.

[6] M. Avalle, G. Chiandussi, "Optimisation of a vehicle energy absorbing steel component with experimental validation", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, No. 4, 2007, pp. 843–858.

[7] X. W. Zhang, Q. D. Tian, T. X. Yu, "Axial crushing of circular tubes with buckling initiators", *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, No. 6–7, 2009, pp. 788–797.

[8] A. Alavi Nia, J. Haddad Hamedani, "Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries", *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, No. 12, 2010, pp. 946–954.

[9] E. Acar, M. A. Guler, B. Gerçeker, M. E. Cerit, B. Bayram, "Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations", *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, No. 1, 2011, pp. 94–105.

[10] M. Shariati, H. R. Allahbakhsh, "Numerical and experimental investigations on the buckling of steel semi-spherical shells under various loadings", *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, No. 8, 2010, pp. 620–628.

[11] A. Ghamarian, M. A. Farsi, "Experimental and numerical analysis of collapse behavior of combined Thin walled structures under axial loading", *Aerospace Research Institute*, Vol. 8, 2012, pp. 99–109.

[12] A. Ghamarian, M. Tahaye Abadi, "Axial crushing analysis of end-capped circular tube", *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, No. 6, 2011, pp. 743–752.

[13] V. Jandaghi Shahi, J. Marzbanrad, "Analytical and experimental studies on quasi-static axial crush behavior of thin-walled tailor-made aluminum tubes", *Thin-Walled Structures*, Vol. 60, 2012, pp. 24–37.

[14] J. Song, "Numerical simulation on windowed tubes subjected to oblique impact loading and a new method for the design of obliquely loaded tubes", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 54, 2013, pp. 192–205.

[15] 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, 2014, pp. 62–74.

[16] S. Sharifi, M. Shakeri, H. E. Fakhari, M. Bodaghi, "Experimental investigation of bitubal circular energy absorbers under quasi-static axial load", *Thin-Walled Structures*, Vol. 89, 2015, pp. 42–53.

[17] A. Alavi Nia, S. Chahardoli, "Optimizing the layout of nested three-tube structures in quasi-static axial collapse", *Thin-Walled Structures*, Vol. 107, 2016, pp. 169–181.

[18] A. Mahmoodi, M.H. Shojaeefard, H. Saeidi Googarchin, "Theoretical development and numerical investigation on energy absorption behavior of tapered multi-cell tubes", *Thin-Walled Structures*, Vol. 102, 2016, pp. 98–110.

[19] A. S. M. I. H. Committee, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special- Purpose Materials*, ASM Handbook Volume 2, 1990 .

[20] C. Reynolds Metals, *Aluminium Heat Treating: The Company*, 1958 .

[21] ASTM. International, ASTM E8/E8M - 09 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials: ASTM, 2009.

[22] N. Jones, Structural Impact: Cambridge University Press, 2011 .

[23] J.M. Alexander, "An approximate analysis of the collapse of the thin cylindrical shells under axial loading", Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 13, 1960, pp. 10–15.