

# بررسی عددی تاثیر فاصله‌ی لوله‌های جدار نازک متداخل بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی آنها

علی علوی نیا<sup>۱</sup> و حامد خدابخش<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> لوله‌های جدار نازک، رفتار مکانیکی، جذب انرژی، بارگذاری ضربه‌ای، LS-DYNA</p>	<p>در این مقاله، تاثیر فاصله‌ی لوله‌های جدار نازک متداخل بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی آنها از طریق شبیه‌سازی با نرم‌افزار اجزاء محدود LS-DYNA بررسی شده‌است. با شبیه‌سازی دو لوله متداخل جدار نازک استوانه‌ای از جنس‌های آلومینیوم و فولاد تحت بار محوری ضربه‌ای، رفتار جذب انرژی لوله‌ها با افزایش فاصله آنها مورد بررسی قرار گرفته‌است و فاصله بهینه‌ی لوله‌ها برای بیشینه کردن مقدار جذب انرژی به دست آمده‌است. نتایج این تحقیق نشان داد که لوله‌های آلومینیومی در هر دو مدل مادی استفاده شده در تحلیل، در یک فاصله تقریباً مشخص و یکسانی از هم دارای بیشترین مقدار جذب انرژی شدند که این فاصله تقریبی همان فاصله ۴ تا ۵ میلی‌متری بین دو لوله بود و تعداد چین خوردگی لوله‌ها نیز در این فاصله‌ها دارای بیشترین مقدار بود. ولی لوله‌های فولادی در هر دو مدل مادی در فواصل متفاوتی از هم دارای بیشترین مقدار جذب انرژی شدند اما تعداد چین خوردگی‌ها در این فاصله‌ها ثابت و بدون تغییر بود و مچاله‌شدگی و رفتار کاملاً متفاوتی نسبت به لوله‌های آلومینیومی از خود نشان دادند.</p>

محوری و جانبی عنوان اصلی مطالعات خارجی و داخلی وسیعی در دهه‌های اخیر بوده‌است.

در سال ۲۰۱۲ تارلوچان<sup>۲</sup> و رامش<sup>۳</sup> بررسی تجربی جامعی روی پاسخ سازه‌های ساندویچی کامپوزیت<sup>۴</sup> در برابر فشار شبه‌استاتیکی انجام دادند. آنها پارامترهای له‌شدگی یعنی بیشینه نیرو، جذب انرژی لهیدگی، نیروی متوسط لهیدگی و بازده نیروی لهیدگی انواع گوناگون سازه‌های ساندویچی کامپوزیت را در یک سری آزمون‌های فشار محوری مورد بررسی قرار دادند [۱]. در سال ۲۰۱۰ جونز<sup>۵</sup> بر روی جذب انرژی سازه‌ها و قطعات تحت بارگذاری شدید که می‌توانند از ضربه‌ی انفجار و سایر

## ۱- مقدمه

توسعه و تحلیل سازه‌های جاذب انرژی یکی از مباحث مهم مطرح‌شده در مکانیک ضربه است. لوله‌های آلومینیومی جدار نازک که اعضای با بیشترین میزان جذب انرژی هستند، با ابعاد و اشکال مختلف به طور گسترده در ساختمان خودروها قابل استفاده هستند. هنگام طراحی چنین سازه‌هایی مطالعه رفتار مکانیکی، جذب انرژی و مچاله‌شدگی آنها ضروری است و لوله‌های تحت بارگذاری

\*پست الکترونیک نویسنده مسئول: khodabakhsh\_hamed@yahoo.com

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد

اسلامی تاکستان

<sup>۲</sup>Tarlochan

<sup>۳</sup>Ramesh

<sup>۴</sup>composite sandwich

<sup>۵</sup>Jones

کردند. شکل‌های رایج تغییرشکل به هنگام فشردگی جانبی و محوری، که به صورت دندانه شدگی و وارونگی بودند، در نظر گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان داد که ظرفیت جذب انرژی لوله‌های فشرده شده‌ی جانبی می‌تواند به وسیله سوق دادن لوله‌ها به حالت دیگری از تغییر شکل که مستلزم تشکیل لوله‌های خمیری است، افزایش داده شود [۵]. در سال ۲۰۰۶ مهدی<sup>۵</sup> و همکاران یک برنامه چهارمرحله‌ای به منظور بهبود انرژی جذب شده در بارگذاری محوری برای سازه‌های جاذب انرژی ساخته شده از لوله تاشو کامپوزیت اجرا کردند. آن‌ها در این چهارمرحله رفتار شکست، بهترین موقعیت قرارگیری، اندازه‌گیری مواد و بهینه‌سازی شکل هندسی سطح مقطع را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تجربی مزایای بالقوه‌ی قوی بهینه‌سازی توزیع مواد را نشان داد [۶]. در سال ۲۰۰۶ موریس و همکارانش هر دو روش عددی و تجربی را برای سیستم‌های تودرتوی لوله‌ها همراه با محدودیت‌های جانبی عمودی و مایل که تحت فشار جانبی شبه‌استاتیکی بودند مورد بررسی قرار دادند. لوله‌ها از جنس فولاد نرم بودند و از نرم‌افزار ANSYS برای شبیه‌سازی آن‌ها استفاده شده بود. نتایج نشان داد که این محدودیت‌های جانبی عمودی و مایل می‌تواند به افزایش ظرفیت جذب انرژی چنین سیستم‌هایی کمک کنند [۷]. در سال ۲۰۰۳ آبراموویچ<sup>۶</sup> اجزای سازه‌های کلیدی از اکثر وسایل نقلیه حمل‌ونقل را به‌عنوان اجزای جدارنازک طراحی کرد. در طی یک رویداد تصادف تعدادی از اجزای سازه‌ای باید حفظ شوند. در همان زمان اجزای دیگر باید انرژی ضربه را به‌شیوه‌ی کنترل شده‌ای مستهلک کنند تا سرعت وسیله نقلیه را به حد ایمنی مورد نیاز کاهش دهد [۸]. در سال ۲۰۰۱ القمدی<sup>۷</sup> به بررسی اشکال رایج جاذب‌های انعطاف‌پذیر و حالت‌های مختلف تغییرشکل آن‌ها پرداخت. اشکال رایج شامل لوله‌های استوانه‌ای، لوله‌های مربعی، فروستا، استروتس<sup>۸</sup>، هانی‌کام‌ها و صفحات ساندویچی بودند. همچنین حالت‌های رایج تغییرشکل برای لوله‌های استوانه‌ای شکستگی محوری، دندانه‌ای شدن جانبی، خمیدگی جانبی، واژگونی و شکافتگی بود [۹]. در سال ۱۳۹۱ علوی‌نیا و فرشاد اثر هندسه مقطع (دایره، شش-

رویدادهای دینامیکی مختلف به‌وجود بیایند، تمرکز کرد. او خواص دینامیکی فولادهای با استحکام بالا را به طور خلاصه مورد بحث قرار داد زیرا آن‌ها متداول‌تر از فولاد نرم و آلیاژ آلومینیوم برای جذب انرژی سازه‌ها و دیگر قطعات پیشنهاد شده بودند. او تاثیر بارگذاری محوری ضربه‌ای برای لوله‌های جدارنازک با چندین شکل مقطع و ساخته شده از مواد مختلف را توسط نرم‌افزار اجزاءمحدود LS-DYNA بررسی و جذب انرژی آن‌ها را با نتایج تجربی مقایسه کرد [۲]. در سال ۲۰۰۸ اولابی<sup>۱</sup> و همکارانش چیدمانی از لوله‌های تودرتوی دایره‌ای از جنس فولاد نرم (DIN 2393) را که در اثر بارگذاری دینامیکی دچار له‌شدگی جانبی شده‌اند مورد بررسی قرار دادند. آزمایشی همراه با محدوده‌ی سرعت‌های ضربه‌ای بین ۳ تا ۵ m/s با استفاده از برخورد جرم ثابت سقوط کننده بر روی نمونه انجام گرفت. رفتار لهیدگی و قابلیت جذب انرژی آن‌ها به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA تحلیل شد. نتایج به دست آمده از تحلیل عددی با نتایج تجربی مقایسه شد و این نتایج نشان داد که جذب انرژی حالت چیدمان بهینه شده‌ی لوله‌ها بیشتر از حالت چیدمان استاندارد لوله‌ها است [۳]. در سال ۲۰۰۸ اولابی و همکارانش له‌شدگی جانبی دینامیکی را برای سیستم‌های لوله‌ای مستطیلی تودرتو از جنس فولاد نرم (DIN 2393) به وسیله دستگاه ضربه زوویچ- روبیل<sup>۲</sup> انجام دادند. آزمایش‌ها در محدوده‌ی سرعت‌های ضربه بین ۳ تا ۵ m/s اجرا شد که با استفاده از برخورد جرم ثابت در یک نمونه تحت تاثیر جاذبه به دست آورده شده بود. علاوه بر کار تجربی، شبیه‌سازی عددی نیز با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA انجام شد و رفتار لهیدگی و قابلیت جذب انرژی آن‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و نتایج روش عددی با داده‌های تجربی مقایسه شد [۴]. در سال ۲۰۰۷ اولابی و همکارانش مروری داشتند بر جاذب‌های انرژی در شکل لوله‌هایی که در مواد آن‌ها عمدتاً از فولاد نرم و یا آلومینیوم استفاده شده بود. اشاره‌ی مختصری هم به انواع جاذب‌های انرژی به شکل فروستا<sup>۳</sup> و دیگر انواع مواد و سازه‌های جاذب انرژی مثل کامپوزیت‌ها و هانی‌کام‌ها<sup>۴</sup>

<sup>۵</sup>Mahdi<sup>۶</sup>Abramowicz<sup>۷</sup>Alghamdi<sup>۸</sup>struts<sup>۱</sup>Olabi<sup>۲</sup>Zwick-Roell<sup>۳</sup>frusta<sup>۴</sup>honeycombs

فروریزش انتقال یافته و نیروی کمانش اولیه و جذب انرژی افزایش یافته است [۱۴]. در سال ۱۳۸۷ عباس نیا و همکارانش نوع جدیدی از مستهلک کننده های انرژی را معرفی کردند. این مستهلک کننده ها به شکل حلقه های فولادی متحدالمرکز ساخته شده و در سازه های بادبندی به منظور بالا بردن شکل پذیری و جذب انرژی قابل نصب بودند. هنگام زلزله، عضو مستهلک کننده قسمت قابل توجهی از انرژی ورودی به سازه را با ورود به مرحله غیرخطی و تشکیل مفاصل خمیری خمشی، مستهلک کرده و بدین صورت از کمانش اعضای مهاربندی جلوگیری کرده یا آن را به تعویق می انداخت. نتایج نشان داد که منحنی های هیستریزس<sup>۲</sup> به دست آمده حاکی از آن است که عضو پیشنهادی می تواند به عنوان یک عضو جاذب انرژی و همچنین یک فیوز جهت کنترل کمانش یک بادبند عمل کند، ضمن آن که شکل پذیری لازم را نیز تأمین نماید [۱۵]. در سال ۱۳۸۵ خلخالی و همکارانش نتایج به دست آمده از آزمایش های انجام شده در دانشگاه گیلان را، جهت ارائه مدل ریاضی براساس شبکه عصبی نوع GMDH برای میزان جذب انرژی توسط جاذب های انرژی با مقطع مربعی، استفاده کردند. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش، همچنین نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی با نتایج به دست آمده از مدل، بیانگر مدل سازی موفق در این فرایند بود [۱۶].

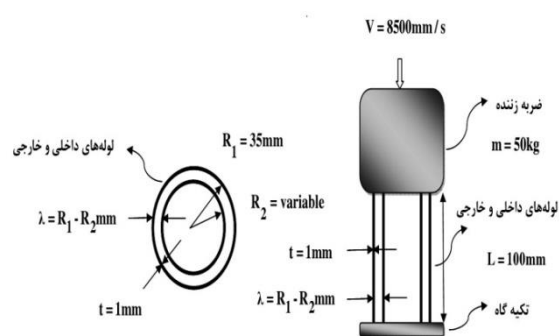
در باره ی لوله های جدارنازک جاذب انرژی و رفتار مکانیکی آن ها کارهای بسیار زیادی در خارج داخل انجام شده است، اما در باره ی موضوع مورد مطالعه ی این مقاله قبلا هیچ کاری انجام نشده است. در این مقاله، تاثیر فاصله ی لوله های جدارنازک متداخل بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی آن ها از طریق شبیه سازی با نرم افزار اجزاء محدود LS-DYNA بررسی شده است. با شبیه سازی دو لوله متداخل جدارنازک استوانه ای از جنس آلومینیوم و فولاد، رفتار و ویژگی های جذب انرژی لوله ها با افزایش فاصله آن ها تحت بارگذاری محوری ضربه ای مورد بررسی قرار گرفته و فاصله بهینه ای که در آن مقدار جذب انرژی بیشترین مقدار را دارد، به دست آمده است.

ضلعی و مربع) بر رفتار مکانیکی مقاطع جدارنازک با و بدون فوم فلزی تحت تاثیر بارهای محوری شبه استاتیکی را به صورت تجربی بررسی کردند. لوله های مورد بررسی و فوم مورد استفاده از جنس آلومینیوم بودند. نتایج نشان داد که مقطع دایره دارای بیشترین مقدار نیروی متوسط و جذب انرژی بوده و از طرفی فوم آلومینیومی نیز باعث بالا رفتن میزان جذب انرژی و بالا رفتن مقدار نیروی میانگین شده است [۱۰]. در سال ۱۳۹۰ رحمانی و لحمی لوله هایی با سطوح مقطع متفاوت را در نحوه اتصال لوله داخلی و خارجی مورد بررسی قرار دادند. در این مدل، رفتار مواد ایزوتروپیک<sup>۱</sup> مورد استفاده صلب- پلاستیک کامل در نظر گرفته شد و مجموع انرژی با ملاحظه خمیدگی و تغییر- شکل پوسته در طول فرایند چین خوردگی محاسبه گردید. نتایج شبیه سازی نشان داد که همخوانی زیادی بین سطح مقطع هندسی و پاسخ لهیدگی در لوله وجود دارد [۱۱]. در سال ۱۳۸۹ مرزبان راد و جندقی شاهی انواع مدل های تئوری فروریزش متقارن لوله های جدارنازک را در حالت بارگذاری محوری شبه استاتیکی معرفی و معادلات مربوط به نیروی متوسط لهیدگی و طول چین خوردگی را بر اساس یک ساختار یکسان استخراج کردند تا امکان مقایسه مدل ها با یکدیگر فراهم شود. در نهایت، بهترین مدل به منظور تخمین طول چین خوردگی و نیروی متوسط لهیدگی انتخاب و درصد خطا را در هنگام برآورد تعیین کردند [۱۲]. در سال ۱۳۸۹ برادران دهقان پور دو لوله تودرتو با مشخصات یکسان اما با شرایط بارگذاری متفاوت تحت بار شبه استاتیکی یکسان را مورد بررسی قرار دادند که میزان انرژی جذب شده توسط هر حالت به وسیله نرم افزار LS-DYNA بررسی شده و آزمایش های تجربی نیز برای بررسی دقت نتایج، انجام شده بود. نتایج حاصل از بررسی ها بیانگر آن بود که در شرایط یکسان ذکر شده، جذب انرژی سیستم های مرکب از مجموع جذب انرژی سیستم های منفرد بیشتر بود [۱۳]. در سال ۱۳۸۷ علوی- نیا و همکارانش بر روی لوله های استوانه ای فلزی به عنوان یکی از انواع ضربه گیرهای مکانیکی مطالعه کردند و با شیاردار کردن جداره این سازه ها تاثیر شیارهای محیطی را بر روی لهیدگی و قابلیت جذب انرژی آن ها بررسی کردند. آن ها نشان دادند با افزایش فاصله شیارها، شیوه

<sup>2</sup>hystsys<sup>1</sup>isotropic

## ۲- شبیه‌سازی

دو نوع مدل مادی نیز برای لوله‌ها در نظر گرفته شده‌است که یکی مدل مادی جانسون- کوک<sup>۱</sup> و دیگری مدل مادی خمیری تکه‌تکه خطی<sup>۲</sup> است. قطر لوله‌ی خارجی ثابت بوده و قطر لوله‌ی داخلی به‌طور متوالی در هر تحلیل دو میلی‌متر کاهش داده شده و انرژی جذب شده و رفتار مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفته‌است و فاصله‌ی از دو لوله که در آن جذب انرژی بیشترین مقدار خود را دارد به دست آمده‌است. با توجه به محدوده‌ی تغییر قطر لوله‌ی داخلی، جنس لوله‌ها و مدل‌های مادی در نظر گرفته شده، تعداد ۴۰ حالت مختلف بررسی شده- است. در شکل (۱) نمایی از هندسه‌ی سازه به نمایش در- آمده‌است.



شکل ۱: هندسه سازه

### ۲-۲- مدل اجزاء محدود

برای شبیه‌سازی اولین حالت لوله‌ها دو استوانه‌ی تودرتو با شعاع‌های ۳۵ و ۳۴ میلی‌متر و ارتفاع‌های ۱۰۰ میلی‌متر رسم شده و سپس دو استوانه‌ی ترسیم شده با المان ۷×۷ میلی‌متر مش‌بندی شده‌است. یک مکعب با طول و عرض و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر رسم شده که نقش جسم ضربه‌زننده را ایفا کرده‌است، سپس مکعب ترسیم شده نیز با المان ۷۵×۷۵ میلی‌متر مش‌بندی شده‌است. یک مکعب مستطیل با طول و عرض ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر رسم شده که نقش تکیه‌گاه پایین را ایفا کرده-

نرم‌افزار اجزاء محدود LS-DYNA یکی از نرم‌افزارهای کاربردی و تخصصی در بسیاری از رشته‌های فنی مانند مکانیک، عمران، هوا-فضا و غیره است که برای تحلیل مسائل مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و از بارزترین شاخصه‌های آن قابلیت تحلیل بارگذاری‌های دینامیکی و ضربه‌ای است. نسخه نرم‌افزار مورد استفاده در این مقاله LS-DYNA-971 است.

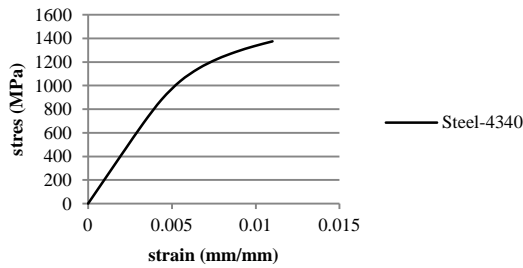
در این تحقیق، لوله‌های استوانه‌ای متداخل از جنس‌های آلومینیوم و فولاد تحت بار محوری ضربه‌ای قرار گرفته‌اند و انرژی جذب شده و رفتار مکانیکی آن‌ها با تغییر فاصله بین این لوله‌ها بررسی شده‌است و فاصله‌ی بهینه‌ای که در آن فاصله، میزان جذب انرژی سازه دارای بیشترین مقدار است، تعیین گردیده‌است.

### ۲-۱- هندسه سازه

سازه‌های مورد مطالعه به صورت دو لوله‌ی استوانه‌ای هم- مرکز جدارنازک هستند که قطر لوله خارجی ۷۰ میلی‌متر، قطر لوله داخلی به صورت متغیر از ۶۸ تا ۵۰ میلی‌متر، ضخامت لوله‌ها ۱ میلی‌متر و ارتفاع لوله‌ها ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. ابعاد جسم ضربه‌زننده به صورت یک مکعب به ضلع ۱۵۰ میلی‌متر و ابعاد صفحه تکیه- گاهی به صورت یک مکعب مستطیل با طول، عرض و ارتفاع ۱۵۰×۱۵۰×۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. سرعت برخورد جسم ضربه‌زننده ۸/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده‌است. جنس لوله‌ها Aluminum-2024- T351 و Steel-4340 بوده و جنس جسم ضربه‌زننده و صفحه تکیه‌گاهی Steel-4340 است. با توجه به ابعاد و جنس مورد نظر برای جسم ضربه‌زننده جرم آن برابر با ۵۰ کیلوگرم است. لازم به ذکر است که انتخاب ابعاد نمونه‌ها بر اساس وجود مصالح مورد نیاز در بازار، حذف امکان کمانش کلی (اولری) سازه‌ها و توجه به مقالات منتشرشده قبلی در این زمینه بوده‌است. در ضمن، جرم (۵۰ کیلوگرم) و سختی جسم ضربه‌زننده هم طوری در نظر گرفته شده‌است که انرژی جنبشی آن بسیار بیشتر از جذب انرژی باشد.

<sup>۱</sup>Johnson-Cook

<sup>۲</sup>piecewise linear plasticity



Steel-4340(ب)

شکل ۲: رفتار تنش- کرنش مربوط به سازه‌های آلومینیومی و فولادی [۱۸ و ۱۷]

مدل مادی موردنظر برای ضربه‌زنده و تکیه‌گاه با توجه به صلبیت آن‌ها از نوع مدل مادی صلب<sup>۱</sup> انتخاب شده‌است. برای لوله‌ها از دو مدل مادی جانسون- کوک و خمیری تکه‌تکه خطی استفاده شده‌است. مدل مادی جانسون- کوک با لحاظ کردن اثرات کار سختی<sup>۲</sup>، نرخ کرنش<sup>۳</sup> و درجه حرارت، کاربرد فراوانی در شبیه‌سازی مسائل ضربه و انفجار دارد [۱۹]. معادله جانسون- کوک به صورت معادله (۱) نوشته می‌شود [۲۰]:

$$\sigma = (A + B \varepsilon^n)(1 + C \ln \varepsilon_p^m)(1 - T^*)^m \quad (1)$$

در رابطه بالا  $\varepsilon$  کرنش موثر پلاستیک<sup>۴</sup>،  $\varepsilon_p^*$  نرخ کرنش پلاستیک و  $A$ ،  $B$ ،  $C$ ،  $m$  و  $n$  نیز ثوابت معادله‌ی جانسون- کوک هستند. مقدار  $T^*$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (2)$$

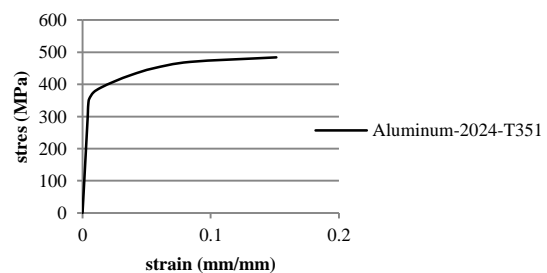
در رابطه بالا  $T$  دمای آزمایش،  $T_{room}$  دمای اتاق و  $T_{melt}$  دمای ذوب فلز است. مقادیر ضرائب مربوط به معادله‌ی جانسون- کوک برای آلومینیوم و فولاد در جدول (۲) آورده شده‌است [۲۱].

است و سپس با المان ۷۵×۷۵ میلی‌متر مش‌بندی شده- است.

خواص مکانیکی جسم ضربه‌زنده و صفحه تکیه‌گاهی که از جنس Steel-4340 و خواص مکانیکی لوله‌ها که از جنس Aluminum-2024-T351 و Steel-4340 هستند در جدول (۱) و نمودارهای تنش- کرنش مربوط به این دو جنس نیز در شکل (۲) آورده شده- است [۱۸ و ۱۷].

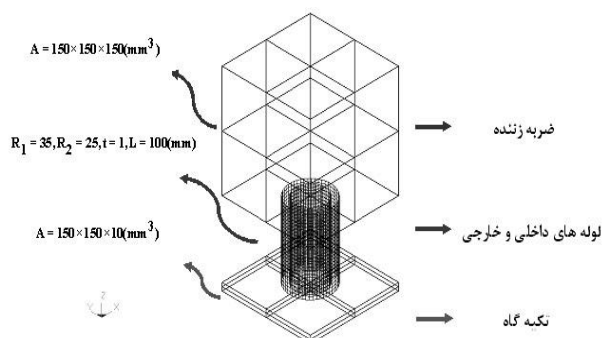
جدول ۱: خواص مکانیکی Steel-4340 برای ضربه‌زنده و تکیه‌گاه و خواص مکانیکی Aluminum- Steel-4340 برای لوله‌ها [۱۸ و ۱۷]

	$\rho(\text{ton} / \text{mm}^3)$	$E(\text{MPa})$	$\nu$	$G(\text{MPa})$	$S_y(\text{MPa})$	$C_p(\text{J} / \text{ton} \cdot ^\circ\text{C})$
Steel-4340 for Press and Support	14.81e-9	2e5	0.28	8e4	710	4.75e8
Steel-4340 for Pipes	7.85e-9	2e5	0.28	8e4	710	4.75e8
Aluminum-2024-T351 for Pipes	2.7e-9	7e4	0.3	2.6e4	324	8.75e8



Aluminum-2024-T351 (الف)

<sup>1</sup>rigid  
<sup>2</sup>work hardening  
<sup>3</sup>strain rate  
<sup>4</sup>effective plastic strain



شکل ۳: مدل اجزاء محدود در (R2=25mm), LS-DYNA

با توجه به ابعاد و خواصی که برای ضربه‌زننده در نظر گرفته شده جرم ضربه‌زننده در شبیه‌سازی‌های انجام شده برابر ۵۰ کیلوگرم است. اکنون با کاهش متوالی ۱ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر شعاع لوله داخلی و افزایش فاصله بین دو لوله و شبیه‌سازی‌های پی‌درپی، قابلیت جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفته و فاصله بهینه‌ای که در آن جذب انرژی بیشترین مقدار خود را دارد به دست آمده است. در این شبیه‌سازی‌ها نمودارهای انرژی- زمان، نیرو- جابه‌جایی، جذب انرژی و درصد جذب انرژی برای ۴ حالت تعیین و مقایسه شده است. همچنین، نحوه مچاله- شدگی و چین‌خوردگی نیز برای این ۴ حالت بررسی شده است.

## ۲-۲- پایداری و صحت شبیه‌سازی‌ها

برای نشان دادن پایداری شبیه‌سازی‌ها از نظر مناسب بودن اندازه المان‌ها، یک حالت از شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده و با تغییر اندازه المان‌ها، پاسخ سازه مدنظر قرار گرفته است. این بررسی برای نمونه Da1 که مربوط به یک تک لوله به قطر ۱۵۰ میلی‌متر تحت بارگذاری دینامیکی است انجام شده که در آن، تغییرات انرژی مخصوص سازه برای هفت اندازه مختلف المان مقایسه شده است؛ نتایج عددی این بررسی در جدول (۳) و شکل (۴) ارائه شده است.

جدول ۲: ضرایب معادله‌ی جانسون- کوک برای آلومینیوم و فولاد [۲۱]

	A(MPa)	B(MPa)	C	m	n	T <sub>melt</sub> (°K)
Aluminum-2024-T351	264.75	426.09	0.015	1	0.34	638
Steel-4340	792.19	509.51	0.014	1.03	0.26	1427

خاصیت صلبیت<sup>۱</sup> برای ضربه‌زننده و تکیه‌گاه و خاصیت پوسته<sup>۲</sup> برای لوله‌ها با ضخامت ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

نوع تماس بین دو لوله با یکدیگر، ضربه‌زننده و تکیه‌گاه از نوع تماس سطح‌به‌سطح<sup>۳</sup> و برای تماس هر لوله با خودش از نوع تماس منفرد<sup>۴</sup> استفاده شده است.

برای اعمال شرایط مرزی، ضربه‌زننده در تمام جهات به جز جهت Z (قائم) و صفحه تکیه‌گاهی در تمام جهات مقید شده و لبه پایین لوله‌ها به صورت گیردار (تمام درجات آزادی آن متناظر با شرایط آزمایش صلب شده است) در نظر گرفته شده است. با توجه به نوع بارگذاری محوری ضربه‌ای، برای ضربه‌زننده فقط در جهت Z سرعتی برابر با ۸۵۰۰ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

در انتها یک سری پارامترهای مخصوص برای تحلیل مسئله از قبیل مدت زمان اجرای مسئله یا مدت زمان برخورد و تعداد تقسیمات زمانی در نظر گرفته شده است. در شکل (۳) نمایی از مدل اجزاء محدود سازه آورده شده است.

<sup>1</sup>solids

<sup>2</sup>shells

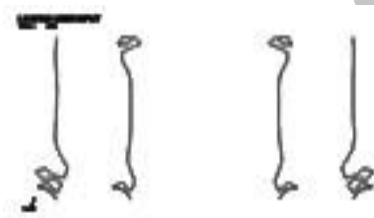
<sup>3</sup>automatic surface to surface

<sup>4</sup>automatic single surface

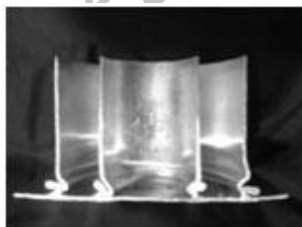
که در آزمایش‌های تجربی اندکی تفاوت در هندسه نمونه-ها وجود دارد اما با توجه به یکسان بودن شرایط این تفاوت اندک قابل اغماض است. نتایج عددی و نحوه‌ی تغییر شکل مربوط به دو نمونه‌ی Da2 و Da3 به ترتیب، در جدول (۴) و شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است.

جدول ۴: مقایسه‌ی نتایج عددی شبیه‌سازی و آزمایش تجربی نمونه‌ی Da2 و Da3 تحت بارگذاری دینامیکی برای تایید صحت شبیه‌سازی‌ها

Sample Code	Type	R <sub>1</sub> - R <sub>2</sub> (mm)	SAE(kJ / kg)
Da <sub>2</sub>	Simulation	25	30.713
	Experimental	25	32.229
	Error(%)	-	4.703
Da <sub>3</sub>	Simulation	45	29.625
	Experimental	45	31.783
	Error(%)	-	6.789



(الف)

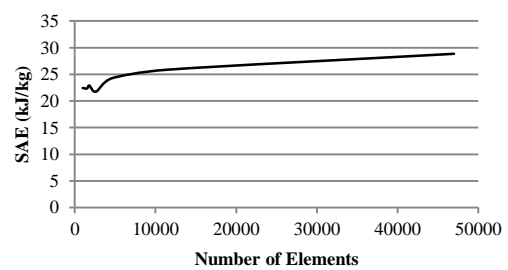


(ب)

شکل ۵: مقایسه‌ی نحوه‌ی تغییر شکل نمونه Da2 تحت بار-گذاری دینامیکی در حالت شبیه‌سازی و آزمایش تجربی: (الف) شبیه‌سازی (ب) آزمایش تجربی

جدول ۳: مقایسه‌ی نتایج عددی تغییرات انرژی مخصوص نسبت به اندازه‌ی المان‌های لوله برای نمونه Da1 جهت تایید پایداری شبیه‌سازی‌ها

Sample Number Code	of Size Elements (mm)	of Number Elements	SAE (kJ / kg)
Da <sub>1</sub>	7*7	980	22.434
	6*6	1520	22.434
	5*5	1800	22.895
	4*4	2640	21.762
	3*3	4650	24.294
	2*3	11500	25.875
	1*1	47000	28.852



شکل ۴: تغییرات انرژی مخصوص نسبت به اندازه‌ی المان‌های لوله برای نمونه Da1

با توجه به نتایج به دست آمده، با درشت در نظر گرفتن المان‌ها (کم شدن تعداد المان‌ها) اختلاف نتایج بالا رفته است، از طرفی با ریز در نظر گرفتن المان‌ها هر چند تفاوت جواب‌ها کمتر شده و انرژی مخصوص اندکی زیاده‌تر شده است اما زمان محاسبات توسط نرم‌افزار بسیار زیاد شده است. برای همین با توجه به این که بیش از اندازه درشت یا ریز گرفتن المان‌ها تغییر چندانی در تغییرات انرژی مخصوص ندارد یک حالت بهینه شده‌ای مد نظر قرار گرفته و شبیه‌سازی‌ها بر اساس آن حالت انجام شده است که این حالت همان حالتی است که اندازه المان‌ها به-صورت المان مربعی به ضلع ۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

همچنین برای مشخص کردن صحت شبیه‌سازی‌ها حالت‌های خاصی از شبیه‌سازی‌ها را مدنظر قرار داده و برای این حالت‌ها آزمایش تجربی نیز انجام شده است تا با مقایسه‌ی نتایج عددی مربوط به این حالت‌ها بتوان صحت شبیه‌سازی‌ها را تعیین کرد. قابل ذکر است

برابر ۴ میلی‌متر باشد و در این شعاع تعداد چین خوردگی - ها از شعاع‌های دیگر بیشتر است. در فاصله ذکر شده برای دو لوله، مجموع جرم دو لوله ۰/۱۱۰۱۲۹ کیلوگرم، مجموع جرم مچاله‌شده دو لوله ۰/۰۳۹۴۰۸ کیلوگرم، انرژی درونی دو لوله ۱۷۹۸/۳۶ ژول، نیروی ماکزیمم وارد بر دو لوله ۷۵۳۶۵/۴ نیوتن و تعداد چین خوردگی دو لوله ۶ چین شده است. مقدار SAE برابر با ۴۵۶۳۴/۳۸۸۹۵ ژول بر کیلوگرم به دست آمده است که در حقیقت مقدار SAE به میزان ۱۰/۷۸ درصد نسبت به حالت اولیه دو لوله که در آن فاصله‌ی بین دو لوله صفر بود افزایش پیدا کرده است.



(الف)



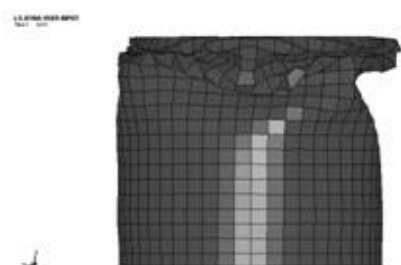
(ب)

شکل ۶: مقایسه‌ی نحوه‌ی تغییرشکل نمونه Da3 تحت بار - گذاری دینامیکی در حالت شبیه‌سازی و آزمایش تجربی: الف) شبیه‌سازی ب) آزمایش تجربی

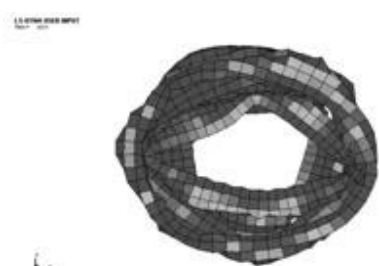
با توجه به نحوه‌ی تغییرشکل و نتایج عددی مربوط به شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تجربی دو نمونه مورد نظر تحت بارگذاری دینامیکی، مشاهده شده است که نحوه‌ی تغییرشکل مربوط به شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تجربی نمونه‌ها به صورت قابل قبولی تطابق دارند و در نتایج عددی نیز هرچند درصد اختلاف جذب انرژی بین شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تجربی نمونه‌ها کم نیست اما با توجه به این که این نمونه‌ها در حالت تجربی جوشکاری شده و به کار بردن جوشکاری درز لوله‌ها تمرکز تنشی در درز لوله‌ها ایجاد کرده است، بدیهی است با مدلی که در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده و لوله‌ها بدون درز است از بابت نتایج عددی و نحوه‌ی تغییرشکل تفاوت دارد و نتایج را تحت تاثیر قرار داده است، اما به دلیل ناگزیری در روش ساخت تجربی و اعمال نکردن تمرکز تنش درز لوله‌ها در شبیه‌سازی‌ها، این تفاوت نتایج قابل توجیه است.

### ۳- نتایج و بحث

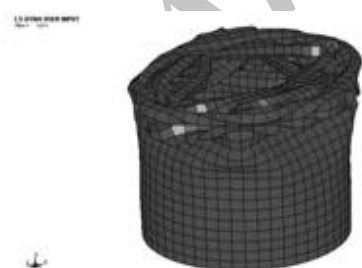
اولین حالت مورد بررسی برای لوله‌هایی از جنس آلومینیوم با مدل مادی جانسون- کوک است که نتایج آن در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، بالاترین جذب انرژی برای حالتی است که شعاع لوله داخلی برابر ۳۰ میلی‌متر باشد یعنی فاصله‌ی دو لوله



الف) صفحه y-z

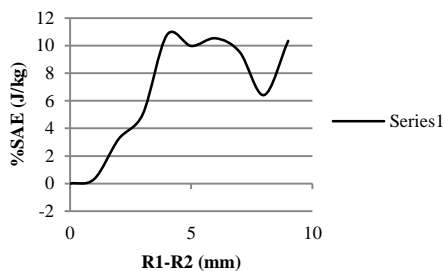


ب) صفحه y-x

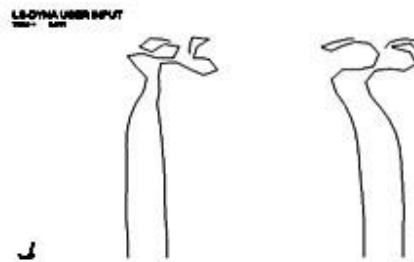


ج) ایزومتریک





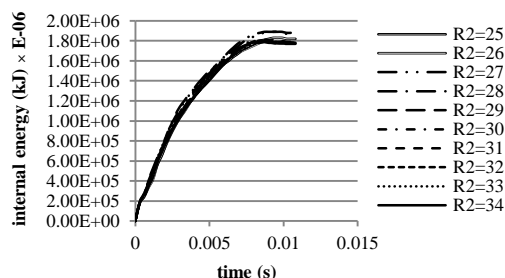
د) نمودار درصد تغییر انرژی داخلی بر جرم تغییرشکل یافته بر حسب افزایش فاصله  
شکل ۸: نتایج تحلیل عددی سازه آلومینیومی با مدل مادی جانسون-کوک



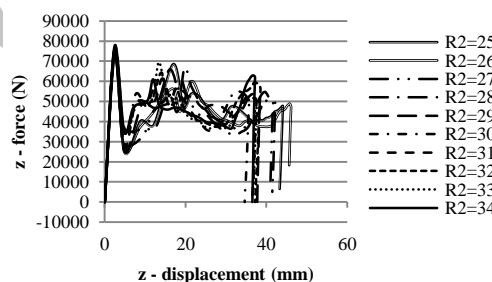
د) برش صفحه Y-Z

شکل ۷: نحوه تغییرشکل سازه آلومینیومی با مدل مادی جانسون-کوک، (R2=25mm)

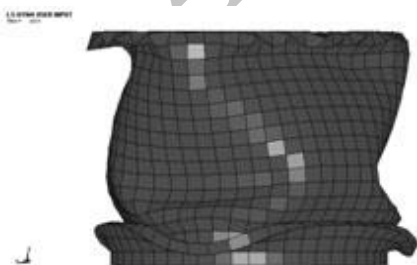
دومین حالت مورد بررسی برای لوله‌هایی از جنس آلومینیوم با مدل مادی خمیری تکه‌تکه خطی است که نتایج آن در شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده‌است. بر اساس این نتایج، بالاترین جذب انرژی برای حالتی است که شعاع لوله داخلی برابر ۲۹ میلی‌متر باشد یعنی در حقیقت فاصله‌ی دو لوله برابر ۵ میلی‌متر باشد و در این شعاع تعداد چین‌خوردگی‌ها از شعاع‌های دیگر بیشتر است. در فاصله ذکر شده برای دو لوله، مجموع جرم دو لوله ۰/۱۰۸۴۳۴ کیلوگرم، مجموع جرم مچاله‌شده دو لوله ۰/۰۳۳۱۸۱ کیلوگرم، انرژی درونی دو لوله ۱۷۹۵/۹۵ ژول، نیروی ماکزیمم وارد بر دو لوله ۹۵۳۰۹/۹ نیوتن و تعداد چین‌خوردگی دو لوله ۶ چین شده‌است. مقدار SAE برابر با ۵۴۱۲۵/۸۵۵۱۵ ژول بر کیلوگرم به‌دست آمده‌است که در حقیقت مقدار SAE به‌میزان ۱۶/۱۵ درصد نسبت به حالت اولیه دو لوله که در آن فاصله‌ی بین دو لوله صفر بود افزایش پیدا کرده‌است.



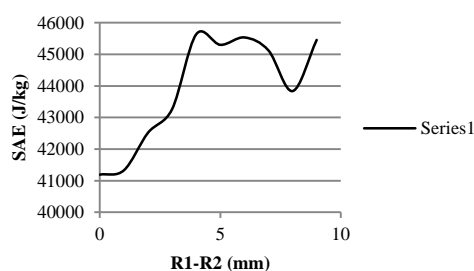
الف) مقایسه نمودارهای انرژی زمان با افزایش فاصله



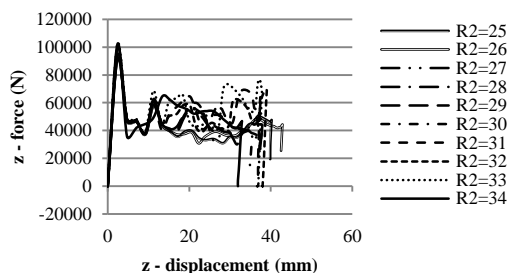
ب) مقایسه نمودارهای نیرو جابه‌جایی با افزایش فاصله



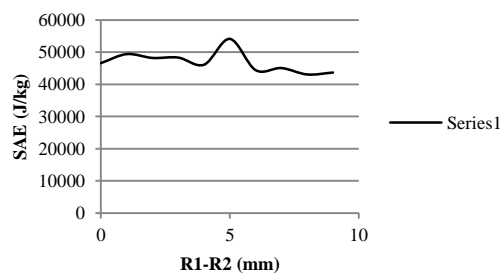
الف) صفحه Y-Z



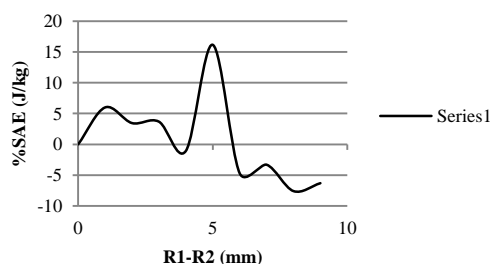
ج) نمودار انرژی داخلی بر جرم تغییرشکل یافته بر حسب افزایش فاصله



ب) مقایسه نمودارهای نیرو جابه‌جایی با افزایش فاصله



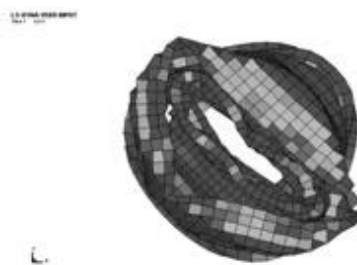
ج) نمودار انرژی داخلی بر جرم تغییر شکل یافته بر حسب افزایش فاصله



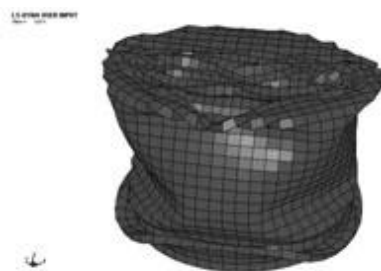
د) نمودار درصد تغییر انرژی داخلی بر جرم تغییر شکل یافته بر حسب افزایش فاصله

شکل ۱۰: نتایج تحلیل عددی سازه آلومینیومی با مدل مادی خمیری تکه‌تکه خطی

سومین حالت مورد بررسی برای لوله‌هایی از جنس فولاد با مدل مادی جانسون-کوک است که نتایج آن در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، بالاترین جذب انرژی برای حالتی است که شعاع لوله داخلی برابر ۲۷ میلی‌متر باشد یعنی در حقیقت فاصله‌ی دو لوله برابر ۷ میلی‌متر باشد ولی برای تمام شعاع‌ها تعداد چین خوردگی‌ها برابر شده‌است. در فاصله ذکر شده برای دو لوله، مجموع جرم دو لوله ۰/۳۰۵۴۱۱ کیلوگرم، مجموع جرم مچاله‌شده دو لوله ۰/۰۴۴۳۹۲ کیلوگرم، انرژی درونی دو لوله ۱۹۸۲/۴۱ ژول، نیروی ماکزیمم وارد بر دو لوله ۱۹۸۲۷۱ نیوتن و تعداد چین-



ب) صفحه Y-X

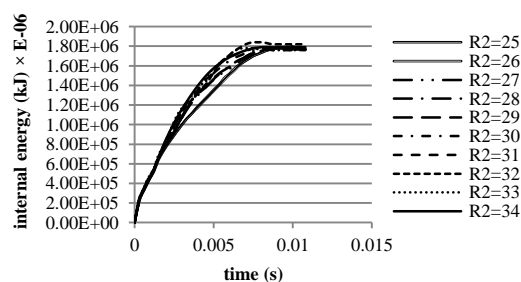


ج) ایزومتریک

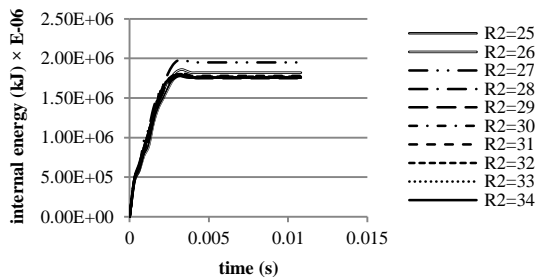


د) برش صفحه Y-Z

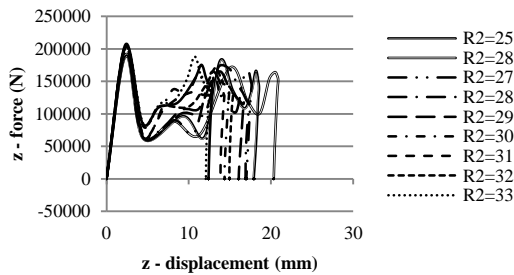
شکل ۹: نحوه تغییر شکل سازه آلومینیومی با مدل مادی خمیری تکه‌تکه خطی، (R2=25mm)



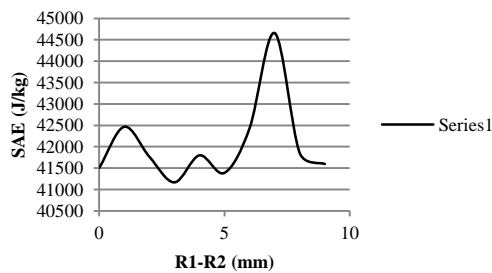
الف) مقایسه نمودارهای انرژی زمان با افزایش فاصله



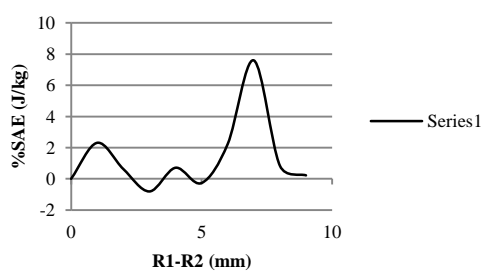
الف) مقایسه نمودارهای انرژی-زمان با افزایش فاصله



ب) مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی با افزایش فاصله



ج) نمودار انرژی داخلی بر جرم تغییر شکل یافته بر حسب افزایش فاصله



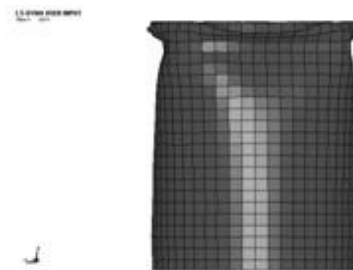
د) نمودار درصد تغییر انرژی داخلی بر جرم تغییر شکل یافته بر حسب افزایش فاصله

شکل ۱۲: نتایج تحلیل عددی سازه فولادی با مدل مادی

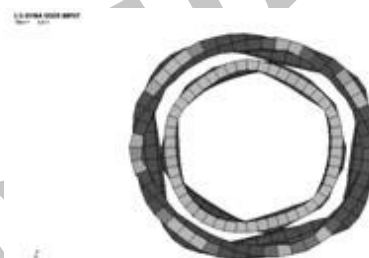
جانسون-کوک

چهارمین حالت مورد بررسی برای لوله‌هایی از جنس فولاد با مدل مادی خمیری تکه‌تکه خطی است که نتایج آن در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، بالاترین جذب انرژی برای حالتی است که شعاع لوله داخلی برابر ۳۲ میلی‌متر باشد یعنی در

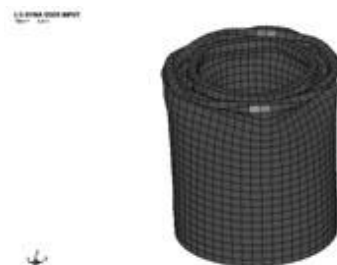
خوردگی دو لوله ۲ چین شده است. مقدار SAE برابر با ۴۴۶۵۶/۹۲۰۱ ژول بر کیلوگرم به دست آمده است که در حقیقت مقدار SAE به میزان ۷/۶۰ درصد نسبت به حالت اولیه دو لوله که در آن فاصله‌ی بین دو لوله صفر بود افزایش پیدا کرده است.



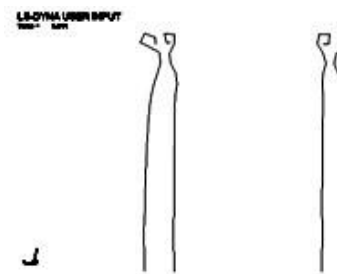
الف) صفحه y-z



ب) صفحه y-x

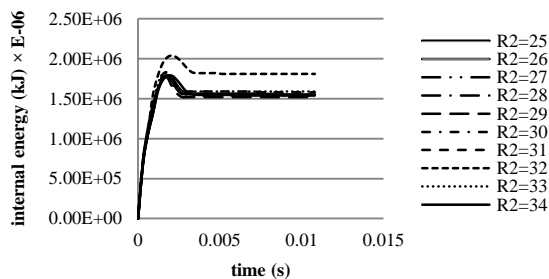


ج) ایزومتریک

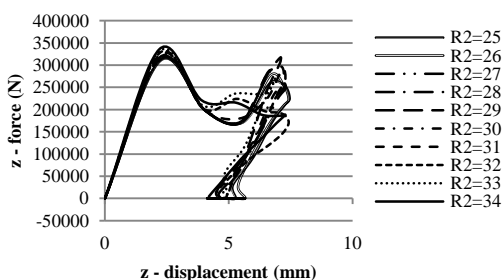


د) برش صفحه y-z

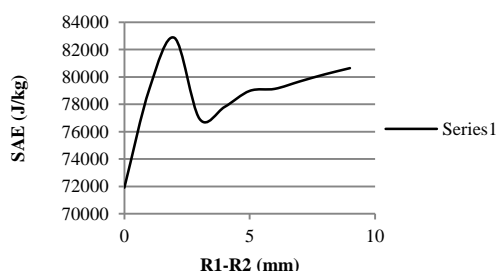
شکل ۱۱: نحوه تغییر شکل سازه فولادی با مدل مادی جانسون-کوک، (R2=25mm)



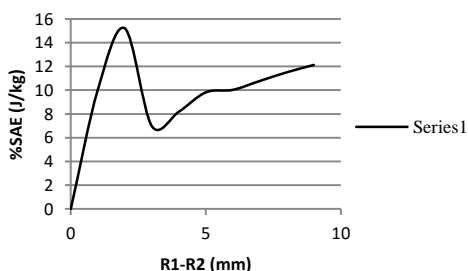
الف) مقایسه نمودارهای انرژی زمان با افزایش فاصله



ب) مقایسه نمودارهای نیرو جابه‌جایی با افزایش فاصله



ج) نمودار انرژی داخلی بر جرم تغییر شکل یافته بر حسب افزایش فاصله



د) نمودار درصد تغییر انرژی داخلی بر جرم تغییر شکل یافته بر حسب افزایش فاصله

شکل ۱۴: نتایج تحلیل عددی سازه فولادی با مدل مادی خمیری تکه‌تکه خطی

به دلیل نرم بودن جنس آلومینیوم چین-خوردگی‌های بیشتری ایجاد شده‌است و این چین-

حقیقت فاصله‌ی دو لوله برابر ۲ میلی‌متر باشد ولی برای تمام شعاع‌ها تعداد چین‌خوردگی‌ها برابر شده‌است. در فاصله ذکر شده برای دو لوله، مجموع جرم دو لوله ۰/۳۳۰۰۴۱ کیلوگرم، مجموع جرم مچاله‌شده دو لوله ۰/۰۲۴۶۲۳ کیلوگرم، انرژی درونی دو لوله ۲۰۴۰/۰۴ ژول، نیروی ماکزیمم وارد بر دو لوله ۳۲۷۲۹۸ نیوتن و تعداد چین‌خوردگی دو لوله ۱ چین شده‌است. مقدار SAE برابر با ۸۲۸۵۰/۹۹۲۹ ژول بر کیلوگرم به‌دست آمده‌است که در حقیقت مقدار SAE به‌میزان ۱۵/۲۱ درصد نسبت به حالت اولیه دو لوله که در آن فاصله‌ی بین دو لوله صفر بود افزایش پیدا کرده‌است.



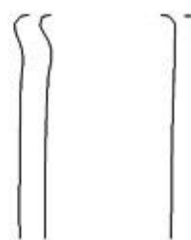
الف) صفحه y-z



ب) صفحه y-x



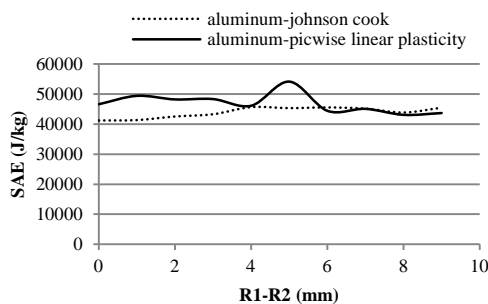
ج) ایزومتریک



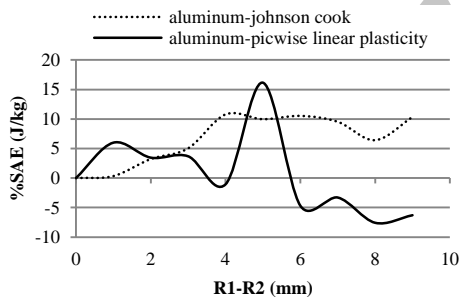
د) برش صفحه y-z

شکل ۱۳: نحوه تغییر شکل سازه فولادی با مدل مادی خمیری تکه‌تکه خطی، (R2=25mm)

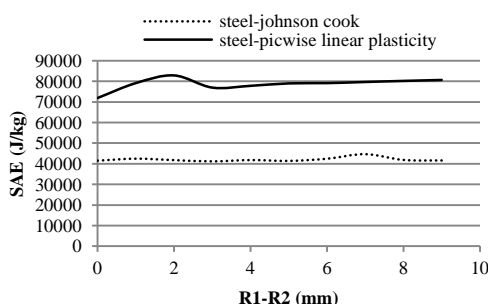
ماده شباهت دارد. در نهایت از آنچه تا کنون به دست آمد در شبیه‌سازی‌هایی که جرم جسم ضربه‌زننده در حدود ۵۰ کیلوگرم، سرعت برخورد در حدود ۸/۵ متر بر ثانیه، ارتفاع لوله‌ها در حدود ۱۰۰ میلی‌متر، شعاع لوله‌ها در حدود ۳۵ میلی‌متر، ضخامت لوله‌ها در حدود ۱ میلی‌متر، تعداد المان‌بندی لوله‌ها در حدود ۷ میل در ۷ میل، جنس لوله‌ها از آلومینیوم و مدل مادی لوله‌ها از نوع خمیری تکه‌تکه خطی باشند آن شبیه‌سازی‌ها قابل استناد بوده و نتایج واقعی‌تری دارند و میزان جذب انرژی و نوع مجاله‌شدگی در آن‌ها بهتر قابل تحلیل و بررسی هستند. نتایج به دست آمده از حالت‌های مورد بررسی در جدول (۵) خلاصه شده‌است.



الف) مقایسه نمودارهای انرژی داخلی بر جرم تغییرشکل یافته بر حسب افزایش فاصله دو لوله برای ۲ حالت



ب) مقایسه نمودارهای درصد تغییر انرژی داخلی بر جرم تغییرشکل یافته بر حسب افزایش فاصله دو لوله برای ۲ حالت

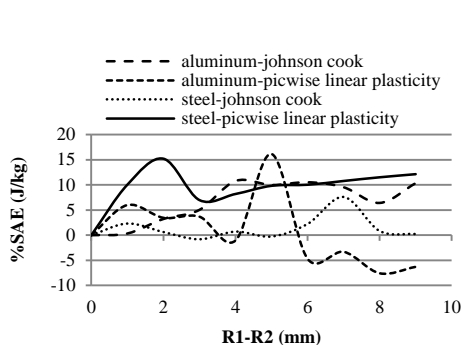


ج) مقایسه نمودارهای انرژی داخلی بر جرم تغییرشکل یافته بر حسب افزایش فاصله دو لوله برای ۲ حالت

خوردگی‌های متعدد باعث شده که جذب انرژی با افزایش فاصله‌ی لوله‌ها به صورت معقولی تغییر کند و در یک فاصله‌ی مشخصی به بیشترین مقدار خود برسد. برای لوله‌های فولادی به دلیل سخت بودن جنس فولاد چین-خوردگی‌های کمتری ایجاد شده‌است و این چین-خوردگی‌های محدود باعث شده که جذب انرژی با افزایش فاصله‌ی لوله‌ها به صورت غیر معقولی تغییر کند و در یک فاصله‌ی نامشخصی به بیشترین مقدار خود برسد. همچنین در هر دو مدل مادی میزان جذب انرژی جنس آلومینیوم نسبت به جنس فولاد بیشتر است و از طرفی با توجه به دو مدل مادی در نظر گرفته شده برای این دو جنس به خاطر این که در عمل مدل مادی خمیری تکه‌تکه خطی بیشتر از مدل مادی جانسون-کوک به حالت واقعی ماده شباهت دارد پس نتایج به دست آمده از مدل مادی خمیری تکه‌تکه خطی قابل استنادتر است. در نهایت با توجه به دلایل و توجیحات فیزیکی ذکر شده راجع به جنس، مدل مادی، نوع تغییرشکل و میزان جذب انرژی بهترین حالت مورد نظر جنس آلومینیوم با مدل مادی خمیری تکه‌تکه خطی است.

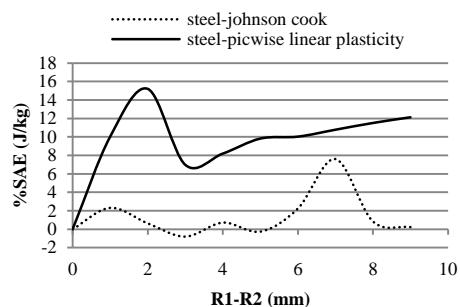
#### ۴- نتیجه‌گیری و جمع بندی

در نهایت با مقایسه‌ی جذب انرژی و درصد جذب انرژی ۴ حالت مورد بررسی، نتایج در شکل (۱۵) خلاصه شده‌است. با توجه به مقایسه کلی نتایج به دست آمده، نتیجه‌گیری شده‌است که لوله‌های با جنس آلومینیومی در هر دو مدل مادی در یک فاصله تقریباً مشخص و یکسانی از هم دارای بیشترین مقدار جذب انرژی شده‌اند که این فاصله تقریبی همان فاصله ۴ تا ۵ میلی‌متری بین دو لوله بوده و تعداد چین‌خوردگی لوله‌ها نیز در این فاصله‌ها دارای بیشترین مقدار است. لوله‌های فولادی در هر دو مدل مادی در فواصل متفاوتی از هم دارای بیشترین مقدار جذب انرژی شده‌اند و تعداد چین‌خوردگی‌ها نیز در این فاصله‌ها ثابت و بدون تغییر است و مجاله‌شدگی و رفتار کاملاً متفاوتی نسبت به لوله‌های آلومینیومی از خود نشان داده‌اند. همچنین در هر دو مدل مادی میزان جذب انرژی لوله‌های با جنس آلومینیومی نسبت به لوله‌های با جنس فولادی بیشتر بوده و در عمل نیز مدل مادی خمیری تکه‌تکه خطی بیشتر از مدل مادی جانسون-کوک به حالت واقعی

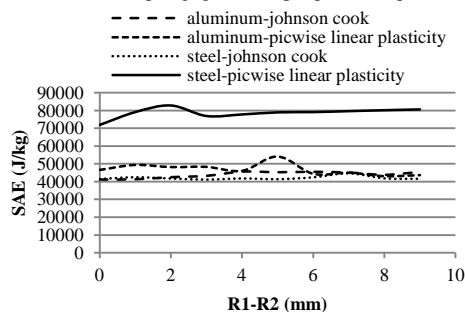


شکل ۱۵: مقایسه نتایج تحلیل عددی برای تمام حالت‌های بررسی شده

(و) مقایسه نمودارهای درصد تغییر انرژی داخلی بر جرم تغییر شکل یافته بر حسب افزایش فاصله دو لوله برای هر ۴ حالت



(د) مقایسه نمودارهای درصد تغییر انرژی داخلی بر جرم تغییر شکل یافته بر حسب افزایش فاصله دو لوله برای ۲ حالت



(ه) مقایسه نمودارهای انرژی داخلی بر جرم تغییر شکل یافته بر حسب افزایش فاصله دو لوله برای هر ۴ حالت

جدول ۵: خلاصه‌ی نتایج به‌دست آمده از حالت‌های مورد بررسی

	$R_1 - R_2$ (mm)	$M_1 + M_2$ (kg)	$m_1 + m_2$ (kg)	F(N)	E(J)	SAE(J / kg)	%SAE(J / kg)	$\lambda$
Aluminum Johnson-Cook	4	0.110129	0.039408	75365.4	1798.36	45634.38895	10.78	6
Aluminum Picwise Linear Plasticity	5	0.108434	0.033181	95309.9	1795.95	54125.85515	16.15	6
Steel Johnson-Cook	7	0.305411	0.044392	198271	1982.41	44656.9201	7.60	2
Steel Picwise Linear Plasticity	2	0.330041	0.024623	327298	2041.04	82850.09929	15.21	1

## ۵- مراجع

- [1] Tarlochan, F. and Ramesh, S., (2012), "Composite sandwich structures with nested inserts for energy absorption application", Composite Structures, No. 94, pp. 904-9016.
- [2] Jones, N., (2010), "Dynamic energy absorption and perforation of ductile structures", International Journal of Pressure Vessels and Piping, No. 87, pp. 482-492.
- [3] Olabi, A.G., Morris, E., Hashmi, M.S.J. and Gilchrist, M.D., (2008), "Optimised design of nested circular tube energy absorbers under lateral impact loading", International Journal of Mechanical Sciences, No. 50, pp. 104-116.
- [4] Olabi, A.G., Morris, E., Hashmi, M.S.J. and Gilchrist, M.D., (2008), "Optimised design of nested oblong tube energy absorbers under lateral impact loading", International Journal of Impact Engineering, No. 35, pp. 10-26.

- [5] Olabi, A.G., Morris, E. and Hashmi, M.S.J., (2007), "Metallic tube type energy absorbers: A synopsis", *Thin-Walled Structures*, No. 45, pp. 706-726.
- [6] Mahdi, E., Sultan, H., Hamouda, A.M.S., Omer, A.A. and Mokhtar, A.S., (2006), "Experimental optimization of composite collapsible tubular energy absorber device", *Thin-Walled Structures*, No. 44, pp. 1201-1211.
- [7] Morris, E., Olabi, A.G. and Hashmi, M.S.J., (2006), "Analysis of nested tube type energy absorbers with different indenters and exterior constraints", *Thin-Walled Structures*, No. 44, pp. 872-885.
- [8] Abramowicz, W., (2003), "Thin-walled structures as impact energy absorbers", *Thin-Walled Structures*, No. 41, pp. 91-107.
- [9] Alghamdi, A.A.A., (2001), "Collapsible impact energy absorbers: an overview", *Thin-Walled Structures*, No. 39, pp. 189-213.
- [۱۰] علوی نیا، ع. و فرشاد، ع.، (۱۳۹۱)، "بررسی تجربی اثر هندسه‌ی مقطع بر جذب انرژی مقاطع جدارنازک با و بدون فوم فلزی"، بیستمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه شیراز، صفحات ۴-۱.
- [۱۱] رحمانی، ر. و لحمی، س.، (۱۳۹۰)، "بررسی ویژگی‌های جذب انرژی و نیروی لهیدگی در لوله‌های جاذب انرژی چندسلولی تحت بار شبه-استاتیکی در نرم‌افزار LS-DYNA"، اولین کنفرانس ملی شبیه‌سازی سیستم‌های مکانیکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، صفحات ۴-۱.
- [۱۲] مرزبان‌راد، ج. و جندقی شاهی، و.، (۱۳۸۹)، "مقایسه مدل‌های تئوری فروریزش متقارن لوله‌های جدارنازک تحت بار محوری با استفاده از نتایج تجربی"، نخستین همایش منطقه‌ای مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، صفحات ۵-۱.
- [۱۳] دهقان‌پور، س. و دهقان‌پور، س.، (۱۳۸۹)، "بررسی تجربی و عددی جذب انرژی و تغییر شکل‌های خمیری لوله‌های مرکب"، هیجدهمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه صنعتی شریف، صفحات ۶-۱.
- [۱۴] علوی نیا، ع.، صدقی، م. و اخوان، ح.، (۱۳۸۷)، "تأثیر فاصله شیارهای محیطی بر ضربه‌گیری لوله‌های استوانه‌ای تحت بار محوری"، شانزدهمین کنفرانس سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، صفحات ۵-۱.
- [۱۵] عباس‌نیا، ر.، احمدی، ر. و مؤگانی، ا.، (۱۳۸۷)، "بررسی تحلیلی تأثیر دو حلقه فولادی متحدالمرکز بر شکل‌پذیری مهاربندهای هم‌محور"، اولین کنفرانس بین‌المللی مقاوم‌سازی لرزه‌ای، دانشگاه تبریز، صفحات ۹-۱.
- [۱۶] خلخالی، ا.، درویزه، ا.، سلیمانی، م.، نریمان‌زاده، ن. و زمانی، ج.، (۱۳۸۵)، "مدل‌سازی میزان جذب انرژی سلول جدارنازک با سطح مقطع مربع با استفاده از شبکه عصبی چندجمله‌ای و الگوریتم ژنتیک"، چهاردهمین کنفرانس سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، صفحات ۸-۱.
- [17] <http://www.springerimages.com>
- [18] <http://www.keytometals.com>
- [۱۹] لیاقت، غ. و زمانی، ا.، (تابستان ۱۳۸۵)، "ساخت لوله‌های دوجداره فولاد کربنی- فولاد زنگ‌نزن"، مجله علمی/پژوهشی مواد پراثری، سال اول، شماره ۲.
- [20] Lstc, Ls-Dyna., (June 2002), "Non-Linear Dynamic Analysis Of Structures In Three Dimensions", Version 971, Theoretical Manual, Live More Software Technology Corporation.
- [21] Zukas, J.A., Wiley, J. and Sons, (1990), "High velocity impact dynamics", Inc., New York, pp. 210.