

# تحلیل تجربی و عددی جذب انرژی توسط لوله‌های آلومینیومی جدار ضخیم توخالی و پرشده با فوم با در نظر گرفتن مدل‌های آسیب متفاوت

وحید حسینی

محمود شریعتی\*

سید مهدی میرزابابائی

مسعود مهدی زاده رخی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

استادیار، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

## چکیده

در این تحقیق ظرفیت جذب انرژی در لوله‌های آلومینیومی جدار ضخیم توخالی و پر شده با فوم در معرض بارگذاری محوری براساس مدل‌های آسیب مختلف به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی نمونه‌ها و اعمال بارگذاری فشاری بر روی آنها با استفاده از یک دستگاه آزمایش سرو هیدرولیک Zwick انجام شده است. شبیه‌سازی‌های عددی از طریق نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شده و نتایج بدست آمده از آنها با نتایج حاصل از آزمایش‌ها مقایسه شده است. در تحلیل‌های عددی از سه مدل آسیب جانسون-کوک، گارسون و روزالر اصلاح شده استفاده شده است. در نهایت مشخص می‌شود مدل روزالر اصلاح شده دارای کمترین میزان خطا است. مدل آسیب جانسون-کوک در نرم‌افزار ABAQUS موجود است، ولی مدل‌های آسیب گارسون و روزالر اصلاح شده از طریق زیرروال نویسی در محیط نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شده‌اند. همچنین در این تحقیق تاثیر ضخامت و تزریق فوم بر ظرفیت جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی بررسی و مشخص می‌شود که افزایش ضخامت جاذب تاثیر بسیار زیادی بر انرژی جذب شده و نیروی قابل تحمل توسط جاذب دارد.

واژه‌های کلیدی: لوله جدار ضخیم، آلومینیوم ۶۰۰۰، فوم، جاذب انرژی، مدل آسیب، تحلیل تجربی.

## Experimental and Numerical Analysis of Energy Absorption of Hollow and Foam filled thick-wall Aluminum Tubes Considering Different Damage Models

V. Hoseini

M. Shariati

M. Mirzababae

M. Mahdizadeh Rokhi

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

Faculty of Mechanical And Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

## Abstract

In this research, the energy absorption capacity of hollow and filled foam thick-wall aluminum tubes under axial loading with a variety of damage models has been investigated empirically and numerically. Experiments to determine the mechanical properties of the specimens and to apply compressive loads on them were performed using a Zwick servohydraulic testing machine. Numerical simulations were performed using the Abaqus finite element software and the results were compared with the results of the experiments. In numerical analysis, three damage models, Johnson-Cook, Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) and modified Rousselier were used. Eventually it turned out that the modified Rousselier model has the least error. The Johnson-Cook damage model is available in Abaqus software but the Gurson-Tvergaard-Needleman and the modified Rousselier damage models were created through programming in Abaqus software. Also, in this research, the effect of thickness and foam injection on the energy absorption capacity of aluminum pipes was investigated and it becomes clear that increasing the thickness of absorber increases the absorbed energy and ultimate crushing force.

**Keywords:** Thick-wall tube, Aluminum 6000, Foam, Energy absorber, Damage model, Experimental analysis.

## ۱- مقدمه

کشتی با اسکله کاربرد دارند. سازه‌های جدار نازک یکی از انواع رایج ضربه‌گیرها هستند که به طور معمول در هندسه‌های ساده استوانه‌ای و مخروطی ساخته شده‌اند. این سازه‌ها ممکن است تحت اثر نیروی محوری دچار آسیب دیدگی شده و انرژی جنبشی تجهیزات صرف فروریزش آنها شود. طراحی فرآیند فروریزش سازه‌های جدار نازک برای تعیین ظرفیت جذب انرژی آنها و تغییرات نیرو یا شتاب اعمالی به تجهیزات در حین فروریزش سازه جدارنازک اهمیت زیادی داشته و محققین مختلف تاکنون این موضوع را بررسی نموده‌اند [۱].

الکساندر [۲] در سال ۱۹۶۰ برای اولین بار رفتار شبه استاتیکی جاذب‌های انرژی جدار نازک استوانه‌ای شکل را به صورت تحلیلی

امروزه جوامع وابستگی زیادی به سیستم حمل‌ونقل دارند. با افزایش تعداد خودروها، تعداد تصادفات نیز بر حسب احتمال افزایش می‌یابد. بنابراین تحقیق در زمینه طراحی بهینه‌ی جاذب‌های انرژی برای جذب انرژی در تصادفات به منظور حفاظت از سرنشینان از اهمیت بالایی برخوردار است. ضربه‌گیرهای مکانیکی که انرژی جنبشی را توسط کار پلاستیک جذب می‌کنند، از جمله ضربه‌گیرهای بازگشت‌ناپذیری هستند که در سامانه‌های حمل‌ونقل مانند آسانسور، اتومبیل، بالگرد، هواپیما و کشتی، تجهیزات حمل مواد هسته‌ای، حفاظت مخازن و سازه‌های ساحلی به منظور جذب انرژی برخورد

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mshariati44@um.ac.ir

بدست آورد. آبرامویچ و جونز [۳] طرح تحلیلی الکساندر را تصحیح کردند و به بررسی عددی و چگونگی فروریزش جاذب‌های انرژی دایروی و مربعی شکل تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی پرداختند. علوی‌نیا و همکاران [۴] به بررسی جاذب‌های انرژی با مقاطع مختلف از جمله دایروی، مربعی، مثلثی، شش ضلعی و هرمی مربع القاعده به صورت تجربی پرداختند. نتایج نشان داد که جاذب‌های با مقطع دایروی شکل، توانایی جذب انرژی بالاتر و میانگین انرژی بیشتری نسبت به سایر جاذب‌ها داشتند. شریعتی و رخی [۵] و [۶] با استفاده از روش‌های عددی و تجربی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای فولادی دارای گشودگی را در معرض بارگذاری محوری مطالعه کردند. شریعتی و همکاران [۷] استحکام نهایی پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار را تحت بارگذاری مرکب به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که با افزایش قطر پوسته و ثابت ماندن ضخامت، بار کمانش افزایش می‌یابد. شریعتی و همکاران [۸] به بررسی تجربی و عددی کمانش و کنترل میزان جذب انرژی پوسته‌های نیمه‌کروی، استوانه‌ای و مخروطی از جنس فولاد ضد زنگ، تحت بارگذاری محوری پرداختند. آنها همچنین تاثیر هندسه، ضخامت، ارتفاع، وجود شیار بر روی پوسته‌ها و فاصله شیارها از یکدیگر را بر روی بار کمانش و مقدار جذب انرژی توسط پوسته‌ها، بررسی نموده و مشاهده کردند که بیشترین مقدار جذب انرژی و بیشترین بار کمانش متعلق به استوانه بدون شیار است. الله‌بخش و همکاران [۹] اثر تقویت کننده‌های طولی بر روی مقاومت ستون‌های آلومینیومی با مقطع مربعی در معرض بار ضربه ای را با استفاده از روش المان محدود بررسی و بهینه سازی سازه از نظر وزن را نیز انجام دادند. آذرخش و همکاران [۱۰] رفتار لهیدگی و مقدار انرژی جذب شده توسط لوله های استوانه ای برنجی را با استفاده از روش‌های تجربی و اجزا محدود غیر خطی مطالعه کردند. پیرمحمد و مرزدشتی [۱۱] و [۱۲] رفتار لهیدگی سازه‌های مخروطی چند سلولی تحت بارگذاری دینامیکی محوری را مطالعه کردند. سطح مقطع این سازه‌ها در پنج نوع متفاوت شامل مربع، شش ضلعی، هشت ضلعی، ده ضلعی و دایروی در نظر گرفته شده بود. شاخص‌های جذب انرژی ویژه و بیشترین نیروی لهیدگی برای سازه‌ها بدست آمد و با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک مقادیر بهینه ابعاد سازه‌ها محاسبه شد. آنها همچنین عملکرد جذب انرژی سازه‌های دوجداره با مقطع مربع و دایره شامل صفحات تقویتی که جداره‌ها را به همدیگر متصل کرده‌اند تحت بارگذاری شبه استاتیکی به صورت محوری و مایل بررسی و بهترین سازه از نقطه نظر جذب انرژی را تعیین نمودند. آنها دریافتند سازه‌های دارای مقطع دایره قابلیت جذب انرژی بالاتری دارند. در جاذب‌های انرژی جدارضخیم که نسبت ضخامت به شعاع سطح میانی در آنها بیشتر از ۰/۰۵ است، آنچه غالباً باعث تخریب سازه در حین برخورد می‌شود، چین‌خوردگی همراه با پارگی ورق به دلیل ضخامت زیاد ورق در این نوع جاذب‌هاست. با افزایش ضخامت ورق، مقاومت جاذب انرژی در مقابل چین‌خوردگی بیشتر می‌شود و نهایتاً پدیده کمانش پیش‌رونده در این نوع جاذب‌ها رخ نمی‌دهد [۱۳]. مختارنژاد و همکاران [۱۴] به بررسی تجربی، تحلیلی و عددی خصوصیات جاذب‌های انرژی جدار ضخیم دایروی شکل به همراه شیارهای جانبی پرداختند. صالح غفاری و همکاران [۱۵] دو طرح جدید برای بهتر کردن خصوصیات جاذب‌های دایروی شکل تحت

بارگذاری شبه‌استاتیکی ارائه کردند. در طرح اول، حلقه آهنی صلب مانندی در بالای جاذب جاسازی شد. در طرح دوم آنها شیارهای پهنی بر روی سطح بیرونی جاذب جدار ضخیم ایجاد کردند. آنها نتیجه گرفتند که طرح‌های نشان داده شده، خصوصیات جاذب انرژی و همچنین نحوه فروریزش را تحت بارگذاری محوری بهبود می‌بخشد. فوم‌ها عموماً به عنوان یک متغیر طراحی در جاذب‌های انرژی به کار می‌روند. فوم چه به صورت فلزی و چه به شکل پلیمری به عنوان پرکننده در ساختارهای جدارنازک استفاده می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از فوم منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌گردد [۱۶]. اگر لوله‌های آلومینیومی یا فولادی به وسیله مواد سبکی چون فوم‌های سلول بسته پر شوند، اثرات متقابلی بین دیواره لوله‌ها و پرکننده‌ها به وجود می‌آید که میزان جذب انرژی آنها افزایش می‌یابد. بارهای ضربه‌ای قابل تحمل توسط لوله‌های پر شده با فوم از جمع بارهای ضربه‌ای فوم و لوله‌ها به تنهایی بیشتر است [۱۷]. ریس و همکاران [۱۸] مطالعات عددی و تجربی گسترده‌ای بر روی رفتار لوله‌های توخالی و همچنین لوله‌های پر شده توسط فوم‌های فلزی که دارای سطح مقطع مربعی بودند و تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی مایل قرار داشتند، انجام دادند. کار آنها توسط برویک و همکاران [۱۹] برای لوله‌های دایروی گسترش یافت. سانتوسا و همکاران [۲۰] به طور عددی تاثیر پرشدگی ستون‌های مربعی را با فوم‌های لانه زنبوری آلومینیومی مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین دریافتند اگر بین پرکننده‌ها و جداره‌ی لوله‌ها اتصال مکانیکی برقرار باشد، میانگین بار تحمل شده توسط سازه بیش از لوله‌هایی است که با وجود پرشدگی در آنها این تماس برقرار نیست. کاوی و همکاران [۲۱] به بررسی قابلیت جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی توخالی و لوله‌های آلومینیومی که درونشان با لوله‌های آلومینیومی کوچکتر و با فوم آلومینیومی پر شده بودند پرداختند. سطح مقطع لوله‌ها شش ضلعی و مربعی بودند و تحت بار شبه‌استاتیکی تحلیل شدند. آنها نشان دادند که پرشدگی باعث تغییر در مدل تغییر شکل لوله‌ها از حالت لوزی‌گون به حالت تاشدگی جداره‌ها بر روی هم می‌شود. همچنین آنها نشان دادند که اثر چندین لوله‌ی کوچکتر داخل یک لوله‌ی بزرگتر به جای استفاده از یک پرکننده سبب افزایش بار ضربه‌ای و جذب انرژی بیشتر می‌شود. آنها همچنین لوله‌ها را با ماده پلی استارن پر کردند و نشان دادند که این ماده دارای خواص جذب انرژی پایینی در مقایسه با فوم‌ها می‌باشد. شریعتی و همکاران [۲۲] و [۲۳] با استفاده از تزیق فوم آلومینیومی نسبت مقاومت به وزن ستون‌های فولادی را در برابر بار ضربه ای افزایش دادند و پارامترهای هندسی بهینه را برای این سازه‌ها تعیین نمودند. ستون‌های تحلیل شده از اتصال ورقه‌های فولادی توسط جوش نقطه‌ای ساخته شده بودند. علوی‌نیا و فرشاد [۲۴] اثر هندسه مقطع و پرکننده فوم فلزی بر رفتار مکانیکی مقاطع جدار نازک تحت تاثیر بارهای محوری شبه استاتیکی را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها سه نوع از مقاطع جدار نازک (دایره‌ای، شش ضلعی و مربعی) از جنس آلومینیوم ۱۲۰۰ به صورت توخالی و پر شده از فوم را تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی قرار داده و خصوصیات جذب انرژی آنها شامل نیروی بیشینه، نیروی متوسط لهیدگی، انرژی جذب شده و نحوه تغییرشکل را مطالعه کردند. آذرخش و همکاران [۲۵] ظرفیت جذب انرژی و تغییر شکل لوله‌های آلومینیومی جدار

آسیب برای هر ماده به تابع وزنی آن بستگی دارد و این تابع وزنی، تابعی از حالت تنش، دما، نرخ کرنش و غیره است. به عبارت دیگر مدل کرنش آسیب انباشته می‌تواند به صورت رابطه (۱) نوشته شود [۳۳].

$$D = \int_0^{\epsilon} f(\sigma, \epsilon, T, \dot{\epsilon}) \quad (1)$$

جانسون و کوک با در نظر گرفتن یک مدل برای شکست براساس آسیب انباشته، مدل اولیه‌شان را گسترش دادند. اجرای مدل جانسون-کوک در ABAQUS نیازمند داشتن پارامترهای دیگری است. مدل آسیب جانسون-کوک بر اساس آسیب انباشته، مطابق با رابطه‌ی (۲) است [۳۳].

$$\epsilon^F = \left( D_1 + D_2 \exp \left[ D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right] \right) (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}) \quad (2)$$

$$(1 + D_5 T_H), \quad D = \sum \frac{\Delta \epsilon_{eff}^p}{\epsilon^F}$$

شکست زمانی اتفاق می‌افتد که  $D=1$ . در این رابطه  $\sigma_{eq}$  تنش فون-میز،  $\sigma_m$  تنش هیدرواستاتیکی است. این مدل مشابه با مدل استحکام تسلیم است که تأثیرات تنش سه محوری، نرخ کرنش و گرمای موضعی نیز در آن لحاظ شده است. مدل جانسون-کوک نیازمند به داشتن ۵ ثابت ماده است.

از اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی در نرخ کرنش‌های مختلف و سطوح مختلف تنش سه محوری برای به دست آوردن ثابت‌های موجود در معادله جانسون-کوک استفاده می‌شود [۳۳]. برای استفاده از این مدل فقط به تعداد محدودی از ثوابت نیاز است، درحالی‌که برای استفاده از مدل‌های آسیب فلزات نرم نیاز به ثوابت بیشتری است [۳۴].

بر اساس نتایج [۳۳] مشخص می‌شود که کرنش شکست به سه محوری بودن تنش وابستگی زیادی دارد، درحالی‌که در نرخ کرنش‌های مختلف تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین آزمایش‌ها در دمای اتاق انجام شده است، بنابراین ثابت  $D_5$  برابر صفر می‌شود. اولین عبارت در معادله‌ی (۲) که از عبارت ارائه شده توسط هنکاک و مکزی پیروی می‌کند نشان می‌دهد با افزایش تنش سه محوری، کرنش به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند [۳۵].

ضرایب مدل آسیب جانسون-کوک توسط ژوو و همکاران [۳۶] برای آلومینیوم ۶۰۶۳ بدست آمده است و در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول ۱- ضرایب مدل جانسون-کوک برای آلومینیوم ۶۰۶۳ [۳۶]

$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
۰/۰۷۴۱۳	۰/۰۸۹۲	-۲/۴۴۱	-۴/۷۶	۰

## ۲-۲- مدل‌های آسیب ریزساختار

ریزساختار فلزات پیچیده است و شامل دانه‌ها، ذرات فاز ثانویه، رسوبات و حفره‌هاست. برخلاف فرضیات مدل‌های آسیب ماکروسکوپی، در مدل‌های آسیب ریز ساختار ماده به صورت مجموعه‌ای از سلول‌های غیرهمگن فرض می‌شود.

فرآیند انباشته شدن آسیب که منجر به شکست نرم می‌شود، در این مدل‌های آسیب بسیار پیچیده است. مشاهدات متالورژی نشان می‌دهد که شکست فلزات نرم اغلب با جوانه زنی، رشد و به هم پیوستن ریز حفره‌ها تحت تنش‌های کششی یکنواخت شروع می‌شود. بنابراین

نازک مخروطی توخالی و توپر با فوم پلی یورتان تحت بارگذاری محوری و مایل را با استفاده از روش‌های تجربی و عددی بررسی نموده و اثر شکل هندسی و فوم داخل پوسته بر میزان جذب انرژی ناشی از برخورد محوری و مایل را مطالعه کردند.

به منظور مدل‌سازی و تحلیل مسئله در نرم افزار نیاز به استفاده از مدل‌های آسیب است. یکی از مدل‌های آسیب رایج، مدل آسیب جانسون-کوک است که به طور وسیعی در شبیه‌سازی‌های برخورد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۶]. دیگر مدل آسیب رایج در این زمینه مدل آسیب گارسون-تورگارد-نیدلمن [۲۷ و ۲۸] است که برای شرح رشد و گسترش حفره‌ها در فلزات نرم استفاده می‌شود [۲۹]. استفاده از معیار آسیب برای فلزات نرم به معادله گسترش آسیب و در نظر گرفتن پارامترهای مناسب مثل پارامتر بارگذاری و غیره بستگی دارد [۳۰]. در سال ۲۰۰۱ روزالر مدل آسیبی را براساس نظریه مکانیک محیط پیوسته منتشر کرد [۳۱] که تحقیقات اخیر روی مدل روزالر نشان می‌دهد که این مدل به خوبی می‌تواند حالت شکست در آزمایش کشش میله‌های شیاردار را تخمین بزند [۳۲].

در این تحقیق تأثیر پارامترهایی مانند ضخامت و فوم بر ظرفیت جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی از جنس آلومینیوم ۶۰۰۰ به روش تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته و بیشترین نیروی فروریزش جاذب‌ها تعیین شده است. هدف دیگر از انجام این تحقیق، تعیین دقیق‌ترین مدل آسیب است به گونه‌ای که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی کمترین خطا را داشته باشد. در این تحقیق از سه مدل آسیب جانسون-کوک، گارسون و روزالر اصلاح شده برای تخمین تخریب در آزمایش فشار استفاده شده است. از این سه مدل، مدل آسیب جانسون-کوک در نرم‌افزار ABAQUS موجود بوده و برای دو مدل دیگر زیرروال نویسی انجام شده است.

## ۲- بررسی روابط ارائه شده برای مدل‌های آسیب

مدل‌های آسیب را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم بندی کرد: مدل‌های آسیب ماکروسکوپی پیوسته (مدل‌های آسیب موجود در نرم‌افزار ABAQUS) و مدل‌های آسیب ریزساختاری.

### ۲-۱- مدل‌های آسیب پیوسته

این مدل‌ها براساس متغیرهای حالت ماکروسکوپی ایجاد شده‌اند. چنین متغیرهای حالتی می‌توانند مولفه‌ای از تانسور تنش، تانسور کرنش، تغییرات آنها و گاهی اوقات دما و نرخ کرنش باشند. از آزمایش‌های مختلف مشخص شده است که فرآیند آسیب که منجر به شکست ناگهانی جسم می‌شود، به شدت به تاریخچه بارگذاری مرتبط است. بنابراین از برخی از این متغیرهای آسیب برای تعیین تاریخچه بارگذاری استفاده می‌شود. چنین مدل‌هایی از مدل‌های آسیب ریزساختار ساده‌تر هستند. در این مدل‌ها فلز نرم به صورت یک ماده پیوسته‌ی بدون خلل و فرج ایده‌آل‌سازی می‌شود. همچنین در مدل‌های آسیب پیوسته، آسیب به صورت یک متغیر جدا که مستقل از استحکام ماده است عمل می‌کند. در این مدل‌ها که به مدل‌های کرنش آسیب انباشته نیز معروف‌اند، فرض می‌شود که تاریخچه‌ی تغییر شکل پلاستیک ماده منجر به آسیب می‌شود. زمانی که متغیر آسیب از مقدار بحرانی‌اش بیشتر شود، شکست اتفاق می‌افتد. مقدار بحرانی متغیر

مواد به صورت ساختاری متخلخل در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه دو مدل آسیب ریز ساختار گارسون و روزالر اصلاح شده معرفی می‌شوند.

### ۲-۱-۲-۲ مدل آسیب گارسون (GTN)

در مکانیک محیط پیوسته، مدلی برای پلاستیسیته‌ی فلزات متخلخل توسط گارسون ارائه شد [۲۷]. در سال ۱۹۸۴ سطح تسلیم اولیه آن توسط تورگارد و نیدلمن تصحیح گردید [۲۸ و ۳۷]. این معادله که به مدل گارسون-تورگارد-نیدلمن یا همان گارسون معروف است به صورت رابطه (۳) ارائه می‌شود [۳۷].

$$\phi = \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y} \right)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left( \frac{q_2 \sigma_m}{2\sigma_y} \right) - (1 - q_3 f^{*2}) \quad (3)$$

در این رابطه  $\sigma_{eq}$  تنش فون-میزز،  $\sigma_m$  تنش هیدرواستاتیکی،  $\sigma_y$  تنش تسلیم ماده آسیب ندیده و  $f$  متغیر آسیب یا میزان گسترش حفره‌ها را نشان می‌دهد. پارامترهای  $q_1$ ،  $q_2$  و  $q_3$  پارامترهای معرفی شده توسط تورگارد هستند [۳۷]. طبق رابطه (۴)،  $f^*$  تابعی است که آسیب ناشی از به هم پیوستن حفره‌ها را زمانی که حجم حفره به مقدار بحرانی  $f_c$  برسد نشان می‌دهد [۳۷].

$$f^* = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + k(f - f_c) & f_c < f < f_F \\ f_U & f \geq f_F \end{cases} \quad (4)$$

$$k = \frac{f_U - f_c}{f_F - f_c}, \quad f_U = \frac{q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}}{q_3}$$

برطبق این معادله زمانی که  $f$  به مقدار بحرانی  $f_F$  برسد، ترک ظاهر می‌شود. هنگامی که  $f$  به  $f_U$  گسترش نهایی حجم حفره برسد، ماده قابلیت تحمل تنش را کاملاً از دست می‌دهد.

با توجه به اینکه مدل آسیب گارسون در بین مدل‌های آسیب نرم‌افزار ABAQUS وجود ندارد، برای استفاده از این مدل آسیب در نرم‌افزار از زیرروال نویسی می‌بایست استفاده کرد. سابروتین مورد استفاده در اینجا سابروتین Vumat است که برای تعریف مدل‌های پیچیده مواد و همچنین مدل‌هایی که در محیط گرافیکی نرم‌افزار وجود ندارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در Vumat نویسی ابتدا برای ماتریس مواد، خصوصیات الاستیک تعریف می‌شود سپس خصوصیات تسلیم و پلاستیک ماده تعریف شده و در نهایت برای نرم‌افزار تعریف می‌شود که اگر مقدار تنش از حد مجاز بیشتر شود شروع به حذف المان‌های مورد نظر کند. از کار پر مه و همکاران [۳۹] به منظور نوشتن معادلات و حل عددی آنها استفاده شده است.

برای تعریف مدل آسیب GTN نیاز به چند پارامتر ورودی است که این پارامترها مربوط به جنس ماده مورد نظر می‌شود. در اینجا از اطلاعات موجود در کار ژو و همکاران [۴۰] برای آلومینیوم 6061 به منظور وارد کردن پارامترهای ورودی برای مدل آسیب GTN استفاده شده است. در جدول ۲ ضرایب مربوط به آلومینیوم ۶۰۶۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۲- ضرایب مدل GTN برای آلومینیوم ۶۰۶۱ [۴۰]

$q_1$	$q_2$	$q_3$	$f_N$	$f_c$	$f_F$
۱/۵	۱	۲/۲۵	۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۲۵

### ۲-۲-۲-۲ مدل آسیب روزالر اصلاح شده

این مدل برای اولین بار توسط نیشون وهاچینسون پیشنهاد شد.

این مدل می‌تواند هر دو نوع شکست ناشی از کشش و برش را نشان دهد. از مدل سختی همسانگرد در این مدل آسیب استفاده شده است. دو متغیر آسیب داخلی برای نشان دادن فرآیند آسیب ماده بکار گرفته شده است. اولین متغیر کرنش پلاستیک  $\epsilon_p$  است و دیگری میزان گسترش حجم حفره  $f$  است که متغیر آسیب نامیده می‌شود. معادله آسیب روزالر شامل پتانسیل تسلیم، رابطه تنش-کرنش و تغییرات متغیر آسیب است. تابع پتانسیل تسلیم به صورتی که در رابطه (۵) نشان داده شده است، رابطه ای است که میزان رشد آسیب را به تنش هیدرواستاتیکی مرتبط می‌کند [۴۱].

$$\phi = \frac{\sigma_{eq}}{\epsilon_p} - R(\epsilon_p) + Df\sigma_1 \exp\left(-\frac{\sigma_m}{\epsilon_p\sigma_1}\right) \quad (5)$$

که در این رابطه  $\sigma_m$  تنش هیدرواستاتیکی،  $\sigma_{eq}$  تنش فون-میزز،  $\rho = (1-f)/(1-f_0)$  چگالی نسبی،  $f$  متغیر آسیب یا گسترش حفره،  $f_0$  حجم اولیه حفره در ماده،  $R(\epsilon_p)$  تابع سختی ماده،  $\epsilon_p$  کرنش پلاستیک معادل و  $\sigma_1$  و  $D$  ثوابت ماده برای رابطه روزالر است. متغیر آسیب برای مدل آسیب روزالر اصلاح شده به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید [۴۱].

$$f = \frac{(D + k_w \omega(\sigma)) f_0}{(D + k_w \omega(\sigma) - Df_0) e^{-(D+k_w \omega(\sigma)) \epsilon_p} + Df_0} \quad (6)$$

$$\omega = \left( \frac{72j_3}{2\sigma_{eq}^3} \right)^2$$

با توجه به اینکه مدل روزالر اصلاح شده جزو مدل‌های آسیب موجود در نرم‌افزار ABAQUS نیست، برای وارد کردن آن باید کدنویسی صورت بگیرد. از کار یوهانگ گوا و همکاران [۴۲] به منظور نوشتن معادلات و حل عددی آنها استفاده شده است. ژائو و همکاران [۴۳] ضرایب مربوط به مدل روزالر اصلاح شده برای آلومینیوم 5052P-H34 را بدست آورده‌اند. از آنجایی که ضرایب مدل روزالر اصلاح شده برای آلیاژ ۶۰۰۰ وجود ندارد، در این تحقیق ضرایب مربوط به آلومینیوم 5052P-H34 مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۳ ضرایب رابطه (۶) برای آلومینیوم 5052P-H34 آورده شده است [۴۳].

جدول ۳- ضرایب مدل روزالر اصلاح شده برای آلومینیوم 5052P-H34

$\sigma$ (MPa)	$D$	$f_0$	$k_w$
۱۷۷	۲	۰/۰۰۱	۲

## ۳- نتایج آزمایشگاهی

### ۳-۱-۱-۲ معرفی پارامترهای مربوط به جاذب انرژی

انرژی جذب شده ( $E_A$ ) هر جاذب توسط سطح زیر منحنی نیرو-جابه‌جایی طبق رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌گردد که در آن  $d$  مقدار جابه‌جایی نهایی و  $P$  مقدار نیروی محوری وارد شده به تکیه‌گاه است.

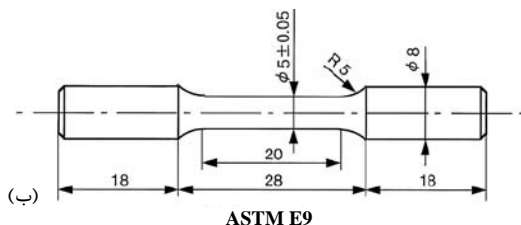
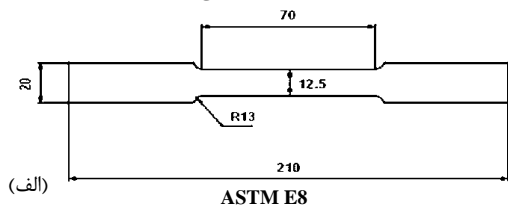
$$E_A = \int_0^d P(x) dx \quad (7)$$

نیروی میانگین فروریزش  $P_{av}$  در هر جاذب طبق رابطه‌ی (۸) برابر است با نسبت انرژی جذب شده توسط جاذب به مقدار جابه‌جایی. بازده هر جاذب (CFE)، نسبت نیروی میانگین فروریزش به حداکثر نیرو هست و از رابطه (۹) تعیین می‌شود [۱۶].

$$P_{av} = \frac{E_A}{d} \quad (8)$$



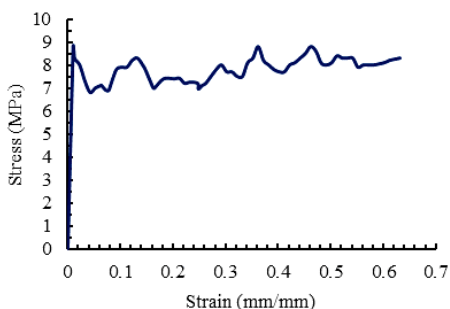
نمونه آلومینیومی



شکل ۲- نمونه های استاندارد آزمایش های الف) کشش و ب) فشار، ابعاد به میلی‌متر است.

آزمایش‌های فشار این پژوهش با دستگاه سرو هیدرولیک آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. ظرفیت این دستگاه ۲۵۰ کیلونیوتن معادل ۲۵ تن می‌باشد. نحوه بارگذاری این دستگاه به این شکل است که نمونه روی فک ثابت پایین قرار داده شده و فک بالای دستگاه با سرعت مشخص ثابت ۵ mm/min به سمت پایین حرکت کرده و دستگاه نمودار نیروی وارده بر تکیه‌گاه پایین را بر حسب جابه‌جایی فک بالا رسم می‌کند.

شرایط مرزی بین نمونه و دستگاه، بدون قید چسبندگی می‌باشد و سطح تماسی بین نمونه و دو فک دستگاه، می‌تواند نسبت به هم حرکت نمایند. شکل ۴ نحوه قرارگیری نمونه s2 روی دستگاه در حین آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار آزمایش فشار ساده فوم

$$CFE = \frac{P_{av}}{P_{max}} \quad (9)$$

$P_{max}$  بیشترین نیروی لازم برای ایجاد تغییر شکل دائم یا تخریب در قطعه است.

### ۲-۳- نمونه های آزمایش

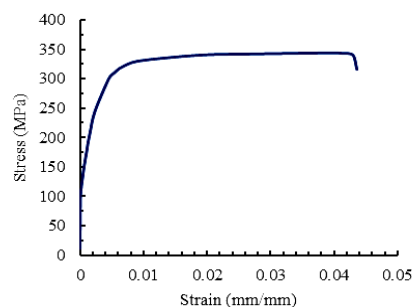
نمونه‌های انتخاب شده برای این آزمایش لوله‌های آلومینیومی از جنس آلومینیوم ۶۰۰۰ با قطر داخلی ۵۰ میلی‌متر و قطرهای خارجی ۵۴ و ۵۶ میلی‌متر هستند. ضخامت لوله‌ها ۲ و ۳ میلی‌متر هستند. لوله‌ی آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر در دو حالت خالی و پر شده با فوم آزمایش شده و لوله‌ی با ضخامت ۳ میلی‌متر تنها به صورت بدون فوم آزمایش شده است. ابعاد نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- ابعاد نمونه‌ها

نمونه	ارتفاع (mm)	قطر داخلی (mm)	قطر بیرونی (mm)	ضخامت (mm)	فوم
لوله‌ی s2	۹۸	۵۰	۵۴	۲	دارد
لوله‌ی s2f	۹۸	۵۰	۵۴	۲	ندارد
لوله‌ی s3	۹۸	۵۰	۵۶	۳	ندارد

### ۳-۳- خواص مکانیکی لوله‌ها

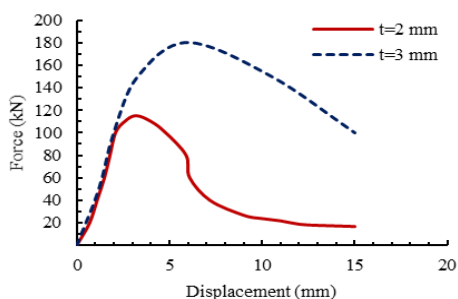
خواص مکانیکی آلومینیوم به کار رفته در لوله‌ها با انجام آزمایش کشش استاندارد ASTM-E8 تعیین گردید که نمودار آن در شکل ۱ نشان داده شده است. هندسه نمونه های استاندارد آزمایش شده نیز در شکل ۲ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه نمونه های آزمایش از طریق برش زدن و پرس کردن لوله‌ها تهیه شده اند مقداری از شکل پذیری نمونه‌ها به دلیل اعمال تغییر شکل پلاستیک کاهش یافته است. فوم‌های مورد استفاده در این تحقیق به روش عامل فوم‌ساز با استفاده از اضافه کردن یک عامل تولیدکننده گاز به مذاب انجام می‌شود. عامل فوم‌ساز تحت تأثیر گرما تجزیه می‌شود و گاز آزاد می‌کند که موجب ادامه یافتن فرآیند فوم‌سازی می‌شود. این فوم‌ها توسط مرکز جهاد دانشگاهی دانشگاه فردوسی مشهد با چگالی ۰/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب تولید شده‌اند. همچنین خواص مکانیکی فوم آلومینیومی به کار رفته در نمونه نیز با انجام آزمایش فشار استاندارد ASTM-E9 تعیین شد. نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. در تحلیل های عددی فوم به صورت یک ماده همگن و ایزوتروپ مدل‌سازی شده است.



شکل ۱- نمودار آزمایش کشش ساده آلومینیوم

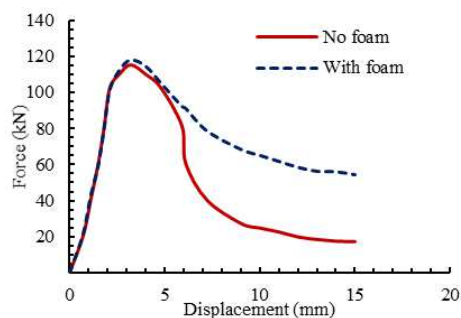


شکل ۷- لوله آلومینیومی s3: الف) قبل از آزمایش ب) بعد از آزمایش



شکل ۸- نمودار نیرو- جابه‌جایی برای لوله‌ها با ضخامت‌های ۲ و ۳ میلی‌متر

نمودار نیرو-جابه‌جایی مربوط به دو نمونه آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر که یکی بدون فوم و دیگری دارای فوم است، در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹- نمودار نیرو- جابه‌جایی دو نمونه‌ی پرشده با فوم و بدون فوم

همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن فوم تاثیر چندانی بر نیروی بیشینه نداشته و در واقع عامل نامطلوب در طراحی جاذب را افزایش چندانی نمی‌دهد. وجود فوم باعث می‌شود که برخلاف حالت بدون فوم، مقاومت دیواره لوله در برابر تغییر شکل‌های بزرگ بیشتر شود؛ در نتیجه نیروی عامل پس از رسیدن به بیشینه‌ی نیرو، افت شدید نکرده و ظرفیت جذب انرژی ۳۲٪ افزایش می‌یابد. بنابراین وجود فوم منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی جاذب می‌شود.

### ۴-۳- محاسبه‌ی بازده جاذب‌های لوله‌ای

مقادیر بازده برای هر جاذب در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور



شکل ۴- نحوه‌ی قرارگیری نمونه بین صفحات تخت

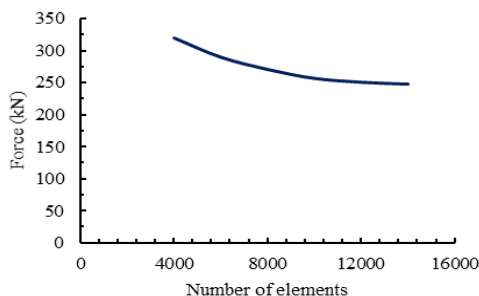


شکل ۵- لوله آلومینیومی s2: الف) قبل از آزمایش ب) بعد از آزمایش



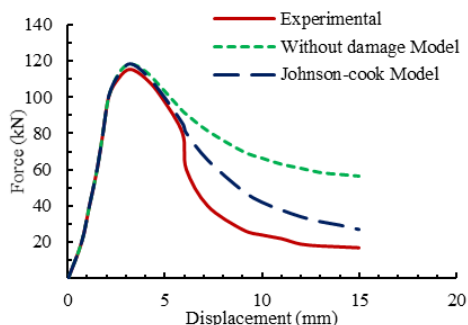
شکل ۶- لوله‌ی آلومینیومی پرشده با فوم (s2f): الف) قبل از آزمایش ب) بعد از آزمایش

تصویر نمونه‌ی آلومینیومی s2 قبل و بعد از آزمایش در شکل ۵، تصویر نمونه‌ی آلومینیومی لوله s2f پرشده با فوم قبل و بعد از آزمایش در شکل ۶ و تصویر نمونه‌ی آلومینیومی لوله s3 قبل و بعد از انجام آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. هدف از آزمایش این نمونه بررسی تاثیر ضخامت بر ظرفیت جذب انرژی و حداکثر نیروی قابل تحمل توسط لوله می‌باشد. نمودار شکل ۸ جذب انرژی را در دو لوله با ضخامت ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش ۱ میلی‌متر به ضخامت، بیشینه نیرو ۵۶٪ و میزان جذب انرژی ۱۲۰٪ افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰- نمودار نیروی حداکثر بر حسب تعداد اجزا

جانسون-کوک، مدل آسیب گارسون و مدل روزالر اصلاح شده. از این سه مدل، مدل آسیب جانسون-کوک در نرم‌افزار ABAQUS موجود بوده و برای دو مدل دیگر زیرروال نویسی انجام شده است. نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه s2 حاصل از تحلیل‌های عددی با مدل آسیب جانسون-کوک و بدون استفاده از مدل آسیب و تحلیل تجربی، در شکل ۱۱ ارائه شده است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که استفاده از مدل آسیب جانسون-کوک در تحلیل عددی باعث می‌شود نتایج عددی به مقادیر حاصل از آزمایش نزدیک شوند. همانطور که مشاهده می‌شود، چون نمونه تحت نیروی فشاری پاره می‌شود و شبیه‌سازی بدون مدل آسیب قادر به پیش‌بینی از هم گسیختگی نیست، نمودار حالت بدون آسیب خطای زیادی نسبت به حالت تجربی دارد. در واقع حالت بدون مدل آسیب، افت نیروی ناشی از گسیختگی را به درستی نشان نمی‌دهد.



شکل ۱۱- نمودار نیرو- جابه‌جایی برای نمونه s2

در شکل ۱۲ تغییر شکل نمونه‌های آلومینیومی s2 حاصل از حل عددی که یکی بدون استفاده از مدل آسیب و دیگری با استفاده از مدل آسیب جانسون-کوک حل گشته‌اند، ارائه شده است. همچنین در شکل ۱۳ نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه s2 حاصل از تحلیل‌های عددی با مدل آسیب گارسون و مدل آسیب روزالر اصلاح شده و تحلیل تجربی آورده شده است. مشاهده می‌شود نتایج حاصل از تحلیل عددی با مدل روزالر اصلاح شده با نتایج تجربی انطباق خوبی دارند. تغییر شکل نمونه‌های آلومینیومی s2 حاصل از حل عددی با استفاده از مدل آسیب روزالر اصلاح شده و حل تجربی نیز در شکل ۱۴ مقایسه شده است که نشان دهنده انطباق خوب بین نتایج عددی و تجربی است.

که مشاهده می‌شود، با افزودن فوم بازده جاذب ۱۵٪ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت جاذب از ۲ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر نیز بازده ۱۳٪ افزایش می‌یابد.

جدول ۵- مقادیر بازده جاذب‌های انرژی

نمونه	نیروی میانگین (N)	نیروی حداکثر (N)	بازده (%)
لوله‌ی S2	۵۲۹۷۵	۱۱۵۳۳۷	۴۵/۹
لوله‌ی S2F	۷۱۳۳۴	۱۱۸۰۲۱	۶۰/۴
لوله‌ی S3	۱۰۴۲۸۵	۱۷۹۲۹۱	۵۸/۱

## ۴- تحلیل عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

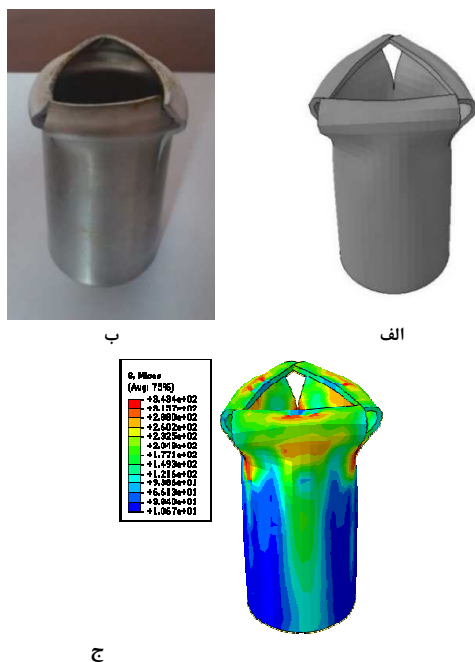
### ۴-۱- مدل‌سازی و حل به روش اجزای محدود

مدل‌سازی در این پژوهش به وسیله نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS انجام شده است. در نرم افزار لوله از سمت پایین روی یک تکیه‌گاه صلب قرار داده شده و از سمت دیگر با یک صفحه‌ی صلب با سرعت معین به سمت پایین جابه‌جا می‌شود. برای تعریف چگونگی تماس سطوح دو قطعه با یکدیگر یا تماس نواحی مختلف یک مدل با هم از قسمت Interaction module نرم افزار ABAQUS استفاده می‌شود. الگوریتم‌های مختلفی برای شبیه‌سازی تماس در این بخش تعبیه شده است. در این بخش برای تعریف نوع تماس صفحات با لوله و نیز تماس بین لوله و فوم از الگوریتم سطح به سطح (face to face) و برای تعریف تماس قسمت‌های مختلف لوله با هم از الگوریتم تماس با خود (self contact) نرم افزار استفاده شده است. ضریب اصطکاک بین سطوح در تماس نیز ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. با تعیین نوع تماس و انتخاب سطوح در تماس، نرم افزار به صورت خودکار تماس بین سطوح را در مرحله شبیه‌سازی و تحلیل در نظر می‌گیرد. لوله از سمت پایین و بالا با صفحه‌ی صلب به صورت آزاد در تماس است.

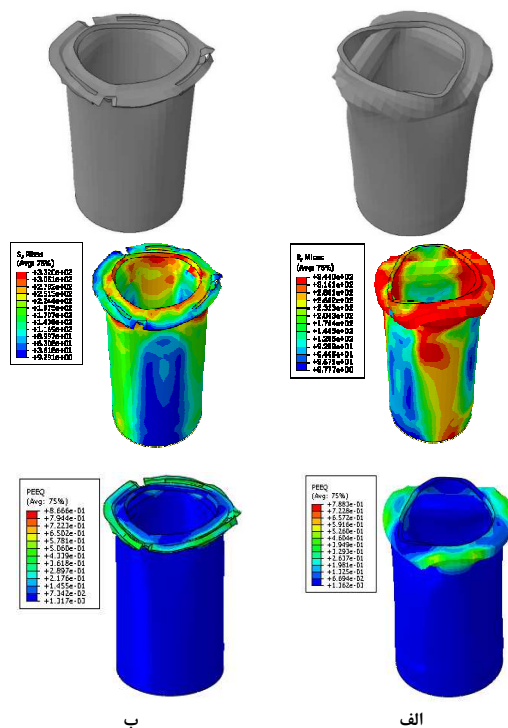
شبکه‌بندی لوله‌ها با استفاده از المان C3D8R و شبکه‌بندی فوم نیز با المان C3D8R انجام شده است. برای شبکه‌بندی لوله‌ها در راستای ضخامت قطعه از ۴ المان استفاده شده تا تأثیرات خطی‌سازی روی جواب‌های مسأله تأثیرگذار نباشد. به منظور اطمینان از اینکه نتایج به دست آمده از تعداد اجزای مستقل است، ابتدا تحلیل حساسیت شبکه انجام شده است. در این تحلیل با بیشتر کردن تعداد المان‌ها یا به تعبیری ریزتر کردن اجزای مقدار نیروی بیشینه ثبت شد و در نهایت بهترین حالت شبکه‌بندی که در آن جواب‌ها دارای کمترین خطا باشند به دست آمد. نمودار نیروی بیشینه بر حسب تعداد اجزای در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

### ۴-۲- نتایج مربوط به مدل‌های آسیب

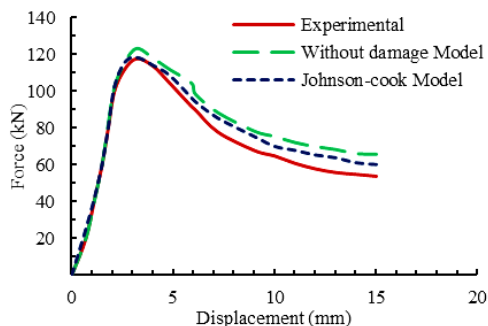
خروجی نرم‌افزار، نمودار نیروی وارده بر تکیه‌گاه پایین بر حسب میزان جابه‌جایی صفحه‌ی صلب یا همان میزان لهیدگی می‌باشد. از سه مدل آسیب مختلف در نرم افزار استفاده شده و نتایج حاصل با نتایج تجربی مقایسه شده است. این سه مدل عبارتند از مدل آسیب



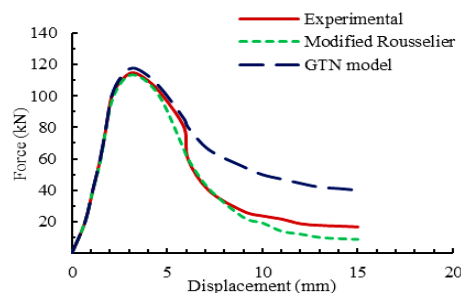
شکل ۱۴- تغییر شکل نمونه s2 حاصل از الف) تحلیل عددی با مدل آسیب روزالر اصلاح شده (ب) تحلیل تجربی (ج) تحلیل عددی همراه با کانتورهای تنش ون میزز



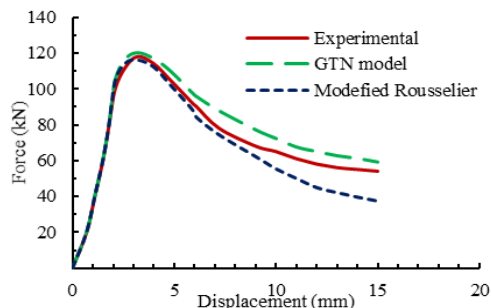
شکل ۱۲- تغییر شکل، کانتورهای تنش ون میزز و کانتورهای کرنش پلاستیک معادل نمونه s2 برای حالت الف) بدون مدل آسیب (ب) با مدل آسیب جانسون-کوک



شکل ۱۵- منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل‌های عددی با مدل جانسون کوک و بدون استفاده از مدل آسیب



شکل ۱۳- منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی برای نمونه s2 حاصل از تحلیل- های عددی با مدل‌های آسیب گارسون و روزالر اصلاح شده و تحلیل تجربی



شکل ۱۶- منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی برای نمونه s2f حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل‌های عددی با مدل‌های گارسون و روزالر اصلاح شده

همچنین می‌توان نتیجه گرفت مدل روزالر اصلاح شده نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد. منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی برای نمونه آلومینیومی پر شده از فوم s2f حاصل از تحلیل‌های تجربی و عددی با مدل آسیب جانسون-کوک و بدون استفاده از مدل آسیب در شکل ۱۵ ارائه شده است. نمودار شکل ۱۶ نیز منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی برای نمونه آلومینیومی پر شده از فوم s2f حاصل از تحلیل‌های تجربی و عددی با مدل آسیب گارسون و مدل آسیب روزالر اصلاح شده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود استفاده از مدل آسیب نتایج را بهبود می‌دهد. شکل ۱۷ تغییر شکل نمونه‌های آلومینیومی پر شده با فوم s2f حاصل از حل عددی بدون مدل آسیب و با مدل آسیب روزالر اصلاح شده را نمایش می‌دهد.

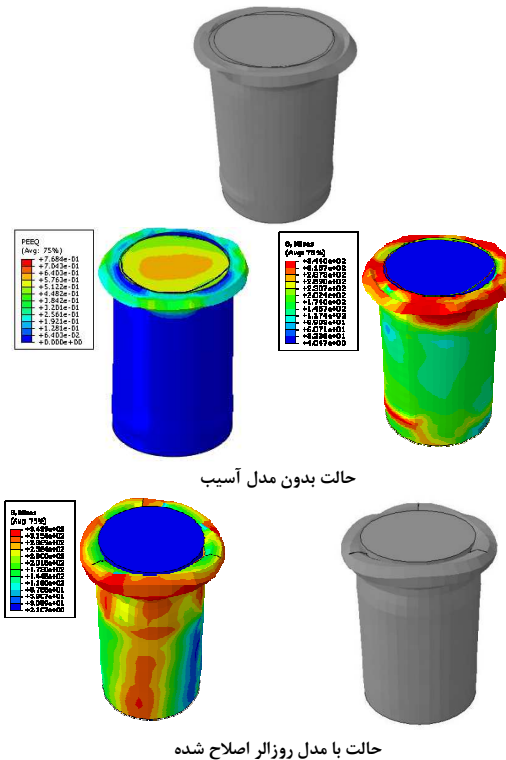


استفاده از مدل‌های آسیب مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بهترین مدل آسیب برخورد که کمترین خطا در مقایسه با نتایج تجربی را دارد تعیین شد. همچنین تاثیر عواملی مثل ضخامت جاذب و تزریق فوم بر میزان جذب انرژی جاذب بررسی شد. نتایج تحقیق به صورت خلاصه در زیر بیان شده است:

- افزودن فوم آلومینیومی به لوله‌های آلومینیومی منجر به افزایش ۳۲٪ جذب انرژی شده در حالیکه نیروی بیشینه، که عامل نامطلوبی محسوب می‌شود، افزایش چندانی پیدا نمی‌کند.
- به طور کلی پرکردن جاذب‌های جدارضخیم با فوم تاثیر چندانی بر بیشینه نیروی قابل تحمل توسط جاذب نخواهد داشت.
- افزایش ضخامت لوله آلومینیومی از ۲ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر منجر به افزایش ۵۶ درصدی بیشینه نیرو و افزایش ۱۲۰ درصدی جذب انرژی می‌شود. همچنین بازده جاذب نیز ۱۳٪ افزایش می‌یابد.
- استفاده از مدل‌های آسیب در تحلیل‌های عددی نتایج دقیق‌تری به همراه دارد. در بین مدل‌های ریزساختاری در بیشتر نمونه‌ها مدل روزالر اصلاح شده نسبت به مدل گارسون نتایج بهتری ارائه می‌دهد. زیرا در مدل گارسون رشد حفره‌ها تنها به تنش هیدرواستاتیکی مرتبط است و در رابطه آن عبارتی برای آسیب ناشی از برش در نظر گرفته نشده است.

## ۶- مراجع

- [۱] قمریان ع. و فارسی م. ع.، تحلیل آزمایشگاهی و عددی فروریزش محوری سازه‌های جدارنازک ترکیبی. فصلنامه علمی-پژوهشی مکانیک هوافضا، د. ۸، ش. ۱، ص ۹۹-۱۰۲، ۱۳۹۱.
- [2] Alexander J., An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading, *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 13, No. 1, pp. 10-15, 1960.
- [3] Abramowicz W. and Jones N., Dynamic progressive buckling of circular and square tubes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 243-270, 1986.
- [4] Nia A. A. and Hamedani J. H., 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.
- [5] Shariati M. and Rokhi M. M., Numerical and Experimental Investigations on Buckling of Steel Cylindrical Shells with Elliptical Cutout Subject to Axial Compression, *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, pp. 1251-1261, 2008.
- [6] Shariati M. and Rokhi M. M., Buckling of Steel Cylindrical Shells with an Elliptical Cutout, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 10, No 2, pp. 193-205, 2010.
- [7] Shariati M., Sedighi M., Saemi J., Eipakchi H., Allahbakhsh H., Numerical and experimental investigation on ultimate strength of cracked cylindrical shells subjected to combined loading, *Mechanika*, Vol. 4, No. 84, pp. 12-19, 2010.
- [۸] شریعتی م.، داورپناه م.، چاوشان ح. و الله بخش ح. ر.، تحلیل تجربی و عددی کماتش و کنترل میزان جذب انرژی پوسته‌های با هندسه‌های مختلف از جنس فولاد ضد زنگ SS304L تحت بار محوری. مهندسی مکانیک مدرس، د. ۱۴، ش. ۳، ص. ۶۰-۶۸، ۱۳۹۳.
- [9] Allahbakhsh H. R., Shariati M. and Sedighi M., Effect of stiffeners on crashworthiness of square aluminium columns considering damage evolution, *J. Cent. South Univ.*, Vol. 20, pp. 599-607, 2013.
- [۱۰] آذرخش س.، رهی ع. و قمریان ع.، بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار لهدیگی پوسته‌های استوانه‌ای برنجی. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، د. ۶، ش. ۲، ص. ۱۸۱-۱۹۶، ۱۳۹۵.



شکل ۱۷- تغییر شکل، کانتورهای تنش ون میزز و کانتورهای کرنش پلاستیک معادل نمونه s2f حاصل از تحلیل عددی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه آلومینیومی پر شده از فوم s2f به دلیل تخریب کمتر نسبت به حالت بدون فوم، جواب تحلیل‌های عددی بدون استفاده از مدل آسیب، اختلاف زیادی با نتایج تجربی و عددی دیگر ندارند، هرچند که استفاده از این مدل‌ها موجب کمتر شدن خطا می‌شود. در این بین مدل‌های آسیب ریزساختار گارسون و روزالر اصلاح شده نسبت به مدل پیوسته‌ی جانسون- کوک نتایج دقیق‌تری به دنبال دارند. زیرا مدل‌های آسیب پیوسته جسم را به صورت پیوسته و بدون خلل و فرج در نظر می‌گیرند. این ویژگی باعث می‌شود که در این مدل‌های آسیب، فرآیند آسیب مستقل از رفتار پلاستیک مواد در نظر گرفته شود. در واقع با گسترش آسیب در ماده خصوصیات پلاستیک مواد بدون تغییر باقی می‌ماند. بنابراین آسیب به صورت یک افت ناگهانی در خواص ماده رخ می‌دهد که این ساده‌سازی رفتار ماده را از واقعیت دور می‌کند. در حالی که در مدل‌های ریزساختار چون ماده به صورت متخلخل در نظر گرفته می‌شود، آسیب به صورت تدریجی با رشد حفره‌ها، به هم پیوستن آنها و شکل‌گیری حفره‌های بزرگتر در خصوصیات ماده اثر می‌گذارد. علت موفقیت مدل‌های ریزساختاری آن است که در این مدل‌ها تابع تسلیم جدیدی معرفی می‌شود که پلاستیسیته را به آسیب انباشته مرتبط می‌کند و از این طریق آسیب به صورت تدریجی اثر خود را در خصوصیات مکانیکی ماده نشان می‌دهد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ظرفیت جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی جدارضخیم در معرض بارگذاری محوری به صورت تجربی و عددی و با

- [26] Peirs J., Verleysen P., Van Paepegem W. and Degrieck J., Determining the stress-strain behaviour at large strains from high strain rate tensile and shear experiments, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 5, pp. 406-415, 2011.
- [27] Gurson A. L., Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media, *Journal of engineering materials and technology*, Vol. 99, No. 1, pp. 2-15, 1977.
- [28] Tvergaard V. and Needleman A., Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, *Acta metallurgica*, Vol. 32, No. 1, pp. 157-169, 1984.
- [29] Østby E., Thaulow C. and Zhang Z., Numerical simulations of specimen size and mismatch effects in ductile crack growth—Part I: Tearing resistance and crack growth paths, *Engineering fracture mechanics*, Vol. 74, No. 11, pp. 1770-1792, 2007.
- [30] Li H., Fu M., Lu J., Yang H., Ductile fracture: experiments and computations, *International journal of plasticity*, Vol. 27, No. 2, pp. 147-180, 2011.
- [31] Rousselier G., Dissipation in porous metal plasticity and ductile fracture, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 49, No. 8, pp. 1727-1746, 2001.
- [32] Lorentz E., Besson J. and Cano V., Numerical simulation of ductile fracture with the Rousselier constitutive law, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 197, No. 21, pp. 1965-1982, 2008.
- [33] Mirza M., Barton D. and Church P., The effect of stress triaxiality and strain-rate on the fracture characteristics of ductile metals, *Journal of materials science*, Vol. 31, No. 2, pp. 453-461, 1996.
- [34] Needleman A. and Tvergaard V., An analysis of ductile rupture in notched bars, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 32, No. 6, pp. 461-490, 1984.
- [35] Hancock J. and Mackenzie A., On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 24, No. 2-3, pp. 147-160, 1976.
- [36] Zhu H., Qin C., Wang J. Q. and Qi F. J., Characterization and simulation of mechanical behavior of 6063 aluminum alloy thin-walled tubes, *Advanced Materials Research*, Vol. 197-198, pp. 1500-1508, 2011.
- [37] Tvergaard V., Influence of void nucleation on ductile shear fracture at a free surface, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 30, No. 6, pp. 399-425, 1982.
- [38] Tvergaard V., On localization in ductile materials containing spherical voids, *International Journal of Fracture*, Vol. 18, No. 4, pp. 237-252, 1982.
- [۳۹] برمه م، حسینی پور س. ج. و جمشیدی اول ح، پارامترهای مدل خسارت GTN برای شبیه سازی شکست نرم در آلیاژ آلومینیوم-O 5083 *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها*، د. ۶، ش. ۱، ص. ۱۲۹-۱۴۲، ۱۳۹۵.
- [40] Xu F., Zhao S. and Han X., Use of a modified Gurson model for the failure behaviour of the clinched joint on Al6061 sheet, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 37, No. 3, pp. 335-348, 2014.
- [41] Nahshon K. and Hutchinson J., Modification of the Gurson model for shear failure, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 27, No. 1, pp. 1-17, 2008.
- [42] Guo J., Zhao S., Murakami R.-i. and Zang S., Experimental and numerical investigation for ductile fracture of Al-alloy 5052 using modified Rousselier model, *Computational Materials Science*, Vol. 71, pp. 115-123, 2013.
- [43] Zhao R., Zhao S., Guo J., Zhong B. and Li J., Experimental and numerical investigation on ductile fracture mechanism of aluminium alloy using new modified model, *Materials Science and Technology*, Vol. 31, No. 3, pp. 303-309, 2015.
- [۱۱] پیرمحمد س. و اسماعیلی مرزدشتی س.، مطالعه رفتار فروریزش سازه های مخروطی چند سلولی و بهینه سازی آن‌ها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها*، د. ۷، ش. ۲، ص. ۱۱۱-۱۲۷، ۱۳۹۶.
- [۱۲] پیرمحمد س. و اسماعیلی مرزدشتی س.، مقایسه عملکرد جذب انرژی سازه های چند جداره مربعی و دایروی با استفاده از روش کپراس و بهینه سازی سازه دایروی با استفاده از روش سطح پاسخ، *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها*، د. ۷، ش. ۳، ص. ۱۳۳-۱۴۷، ۱۳۹۶.
- [13] B. Wang B. and Lu G., Mushrooming of circular tubes under dynamic axial loading, *Thin-walled structures*, Vol. 40, No. 2, pp. 167-182, 2002.
- [14] Mokhtamezhad F., Salehghaffari S. and Tajdari M., Improving the crashworthiness characteristics of cylindrical tubes subjected to axial compression by cutting wide grooves from their outer surface, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 14, No. 6, pp. 601-611, 2009.
- [15] Salehghaffari S., Tajdari M., Panahi M. and Mokhtamezhad F., Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading, *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, No. 6, pp. 379-390, 2010.
- [16] Tarlochan F., Samer F., Hamouda A., Ramesh S. and Khalid K., Design of thin wall structures for energy absorption applications: enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces, *Thin-Walled Structures*, Vol. 71, pp. 7-17, 2013.
- [17] Hanssen A., Hopperstad O., Langseth M. and Ilstad H., Validation of constitutive models applicable to aluminium foams, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 44, No. 2, pp. 359-406, 2002.
- [18] Reyes A., Langseth M. and Hopperstad O., Square aluminum tubes subjected to oblique loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, No. 10, pp. 1077-1106, 2003.
- [19] Børvik T., Hopperstad O., Reyes A., Langseth M., Solomos G. and Dyngeland T., Empty and foam-filled circular aluminium tubes subjected to axial and oblique quasistatic loading, *International journal of crashworthiness*, Vol. 8, No. 5, pp. 481-494, 2003.
- [20] Santosa S. P., Wierzbicki T., Hanssen A. G. and Langseth M., Experimental and numerical studies of foam-filled sections, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 509-534, 2000.
- [21] Kavi H., Toksoy A. K. and Guden M., Predicting energy absorption in a foam-filled thin-walled aluminum tube based on experimentally determined strengthening coefficient, *Materials & design*, Vol. 27, No. 4, pp. 263-269, 2006.
- [22] Shariati M., Allahbakhsh H. R., Saemi J. and Sedighi M., Optimization of foam filled spot-welded column for the crashworthiness design, *Mechanika*, Vol. 83, No. 3, pp. 10-16, 2010.
- [23] Allahbakhsh H. R., Shariati M. and Saemi J., Crashworthiness Optimization of Foam-filled and Empty Spot-welded Columns, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 4, No. 12, pp. 6404-6411, 2010.
- [۲۴] علوی نیاع. و فرشاد ع.، بررسی تجربی و عددی تاثیر هندسه مقطع و فوم فلزی بر روی تغییر شکل و ویژگی های جذب انرژی لوله های جدارنازک، *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها*، د. ۴، ش. ۱، ص. ۵۱-۶۳، ۱۳۹۳.
- [۲۵] آذرخش س.، قمریان ع. و خدارحمی ح.، تحلیل فروریزش محوری و مایل پوسته های مخروطی توخالی و تقویت شده با فوم تحت شرایط مرزی گیردار، *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها*، د. ۶، ش. ۴، ص. ۱۳۹-۱۵۹، ۱۳۹۵.