



# Collapse Behaviour and Energy Absorption of Hemispherical and Conical Shells under Impact Loading Considering Different Damage Models

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Hoseini V.<sup>1</sup> MSc,  
Shariati M.\*<sup>1</sup> PhD,  
Mahdizadeh Rokhi M.<sup>2</sup> PhD

### How to cite this article

Hoseini V, Shariati M, Mahdizadeh Rokhi M. Collapse Behaviour and Energy Absorption of Hemispherical and Conical Shells under Impact Loading Considering Different Damage Models. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(6):1611-1623.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup>Mechanical & Mechatronics Engineering Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Postal Code: 9177948944  
Phone: +98 (51) 38806001  
Fax: -  
mshariati44@um.ac.ir

### Article History

Received: August 31, 2019  
Accepted: February 16, 2020  
ePublished: June 20, 2020

## ABSTRACT

In this research, the behavior of conical and hemispherical shells, made of steel and aluminum, respectively, subject to impact loading has been investigated using experimental and numerical methods. The energy absorption capacity of these adsorbers has been calculated and the effect of foam injection on the collapse behavior and energy absorption capacity of aluminum hemispherical shells has been determined. The effect of geometrical parameters on the collapse behavior and adsorption capacity of steel conical adsorbers has also been investigated. Numerical simulations have been performed using the Abaqus finite element software and the results have been compared with the results of the experiments. In Numerical analysis, three damage models, Johnson-Cook, GTN, and modified Rousselier have been used. The Johnson-Cook damage model is available in Abaqus software but the GTN and the modified Rousselier damage models have been created through programming in Abaqus software. The results show that the modified Rousselier damage model is more accurate than the other damage models. Also, in this research, the effect of thickness of conical shells on their efficiency has been investigated and it becomes clear that increasing the thickness of absorber increases efficiency. In addition, foam injection does not a positive effect on the hemispherical absorber performance.

**Keywords** Steel Conical Shell; Aluminum Hemispherical Shell; Foam; Energy Absorber; Damage Model

## CITATION LINKS

[1] Experimental and numerical analysis of complex thin-wall ... [2] An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under ... [3] Dynamic axial crushing of circular ... [4] Dynamic progressive buckling of circular and square ... [5] Comparative analysis of energy absorption and deformations of ... [6] Numerical and experimental investigation on ultimate strength of cracked cylindrical ... [7] Numerical and experimental investigations on buckling and control amount of l ... [8] Effect of stiffeners on crashworthiness of square aluminium columns considering ... [9] Numerical and experimental investigations of axial and oblique crushing of ... [10] Experimental and numerical investigation of crushing of brass cylindrical ... [11] Study on the collapse behavior of multi-cell conical structures and their ... [12] Comparison of energy absorption performance of multi-walled square and circular ... [13] Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of ... [14] Validation of constitutive models applicable to aluminium ... [15] Static and dynamic crushing of circular aluminium ... [16] Axial crushing of foam-filled tapered sheet metal ... [17] Axial crushing of foam-filled ... [18] Crashworthiness of aluminum extrusions subjected to ... [19] Square aluminum tubes subjected to oblique ... [20] Empty and foam-filled circular ... [21] Experimental and numerical studies of foam-filled ... [22] Predicting energy absorption in a ... [23] Optimization of foam filled spot-welded column for the ... [24] Crashworthiness optimization of foam-filled and ... [25] Experimental and numerical investigations of effects of section ... [26] Investigation of axial and oblique crushing of empty and foam-filled ... [27] The effect of stress triaxiality and strain-rate on the fracture characteristics of ... [28] An analysis of ductile rupture in notched ... [29] On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels ... [30] Characterization and simulation of mechanical behavior of ... [31] Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth ... [32] Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile ... [33] Influence of void nucleation on ductile ... [34] On localization in ductile materials containing spherical ... [35] Use of a modified Gurson model for the failure behaviour ... [36] Modification of the Gurson model for shear ... [37] Experimental and numerical investigation on ductile fracture ...

## رفتار فروریزش و جذب انرژی پوسته‌های مخروطی و نیم‌کروی در معرض ضربه با در نظر گرفتن مدل‌های آسیب مختلف

وحید حسینی MSc

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

محمود شریعتی\* PhD

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

مسعود مهدی‌زاده رخی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

### چکیده

در این تحقیق، با استفاده از روش‌های تجربی و عددی، رفتار پوسته‌های مخروطی‌شکل و نیم‌کروی به‌ترتیب از جنس فولاد و آلومینیوم، در معرض بارگذاری ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. ظرفیت جذب انرژی این‌گونه جاذب‌ها محاسبه و تاثیر تزیق فوم بر رفتار فروریزش و ظرفیت جذب انرژی پوسته‌های نیم‌کروی آلومینیومی تعیین شده است. همچنین تاثیر پارامترهای هندسی پوسته بر رفتار فروپاشی و ظرفیت جذب جاذب‌های مخروطی فولادی بررسی شده است. شبیه‌سازی‌های عددی از طریق نرم‌افزار المان‌محدود آباکوس انجام شده و نتایج به‌دست‌آمده از آنها با نتایج حاصل از آزمایش‌ها مقایسه شده است. در تحلیل‌های عددی از سه مدل آسیب جانسون-کوک، گارسون و روزالر اصلاح‌شده استفاده شده است. مدل آسیب جانسون-کوک در نرم‌افزار آباکوس موجود است، ولی مدل‌های آسیب گارسون و روزالر اصلاح‌شده از طریق زیرروال‌نویسی در محیط نرم‌افزار آباکوس ایجاد شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مدل روزالر اصلاح‌شده، دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌های آسیب دارد. تاثیر ضخامت پوسته‌های مخروطی بر بازده آنها نیز بررسی شد و مشخص شد که افزایش ضخامت، موجب افزایش بازده جاذب می‌شود. علاوه بر این، تزیق فوم تاثیر مثبتی بر عملکرد جاذب‌های نیم‌کروی ندارد.

**کلیدواژه‌ها:** پوسته مخروطی فولادی، پوسته نیم‌کروی آلومینیومی، فوم، جاذب انرژی، مدل آسیب

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۷

\*نویسنده مسئول: mshariati44@um.ac.ir

### مقدمه

با توسعه سیستم حمل‌ونقل و افزایش احتمال برخورد وسایل نقلیه با همدیگر یا با موانع مختلف، ایمن‌سازی آنها به‌منظور حفاظت از سرنشینان و تجهیزات بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است. یکی از راه‌کارهای طراحان و مهندسان استفاده از جاذب‌های انرژی در این وسایل است تا در هنگام تصادف بخش زیادی از نیروی واردشده به وسیله را مستهلک نمایند. به‌دلیل اهمیت وزن سازه به‌ویژه در وسایل نقلیه هوایی و سازه‌های هوافضا، یک پارامتر اصلی در طراحی این مستهلک‌کننده‌های انرژی، وزن آنها است. سازه‌های جدار نازک یکی از انواع رایج ضربه‌گیرها هستند که به‌دلیل وزن کم، استحکام و ظرفیت جذب انرژی بالا و قیمت پایین، کاربردهای وسیعی در صنعت حمل‌ونقل پیدا کرده‌اند. این

سازه‌ها تحت اثر نیروی ضربه‌ای تغییر شکل داده و انرژی جنبشی تجهیزات صرف فروریزش آنها خواهد شد. تحلیل فرآیند فروریزش سازه‌های جدار نازک برای تعیین ظرفیت جذب انرژی آنها و تغییرات نیرو یا شتاب اعمالی به تجهیزات در حین فروریزش سازه جدار نازک اهمیت فراوانی داشته و تاکنون محققین زیادی به تحلیل و طراحی بهینه این جاذب‌ها پرداخته‌اند[1]. در ادامه تعدادی از پژوهش‌های شاخص که در این زمینه انجام شده، بررسی می‌شوند.

رفتار شبه‌استاتیکی جاذب‌های انرژی جدار نازک استوانه‌ای شکل برای اولین بار توسط الکساندر[2] به‌صورت تحلیلی بررسی شد. آبرامویچ و جونز[3, 4] طرح تحلیلی الکساندر را تصحیح کردند و به بررسی عددی و چگونگی فروریزش جاذب‌های انرژی دایروی و مربعی‌شکل تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی پرداختند. علوی‌نیا و حامدانی[5]، به بررسی جاذب‌های انرژی با مقاطع مختلف از جمله دایروی، مربعی، مثلثی، شش‌ضلعی و هرمی‌مربع‌القاعده به‌صورت تجربی پرداختند. نتایج نشان داد که جاذب‌های با مقطع دایروی‌شکل، توانایی جذب انرژی بالاتر و میانگین انرژی بیشتری نسبت به سایر جاذب‌ها دارند. شریعتی و همکاران[6]، استحکام نهایی پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار را تحت بارگذاری مرکب به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که با افزایش قطر پوسته و ثابت‌ماندن ضخامت، بار کمانش افزایش می‌یابد. شریعتی و همکاران[7]، 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 نمودند. آله‌بخش و همکاران[8]، اثر تقویت‌کننده‌های طولی بر روی مقاومت ستون‌های آلومینیومی با مقطع مربعی در معرض بار ضربه‌ای را با استفاده از روش المان محدود بررسی و بهینه‌سازی سازه از نظر وزن را نیز انجام دادند. آذرخش و همکاران[9]، با استفاده از روش‌های تجربی و عددی، رفتار فروریزش پوسته‌های مخروطی دوجداره آلومینیومی را در معرض بار محوری بررسی کردند. آذرخش و همکاران[10]، همچنین رفتار لهدگی و مقدار انرژی جذب‌شده توسط لوله‌های استوانه‌ای برنجی را با استفاده از روش‌های تجربی و اجزا محدود غیرخطی مطالعه نمودند.

پیرمحمد و مرزدشتی[11, 12] رفتار لهدگی سازه‌های مخروطی چندسلولی تحت بارگذاری دینامیکی محوری را مطالعه کردند. سطح مقطع این سازه‌ها در پنج نوع متفاوت شامل مربع، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی، ده‌ضلعی و دایروی در نظر گرفته شده بود. شاخص‌های جذب انرژی ویژه و بیشترین نیروی لهدگی برای سازه‌ها به‌دست 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

ستون‌های مربعی را با فوم‌های لانه زنبوری آلومینیومی مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین دریافتند اگر بین پرکننده‌ها و جداره لوله‌ها اتصال مکانیکی برقرار باشد، میانگین بار تحمل‌شده توسط سازه بیش از لوله‌هایی است که با وجود پرشدگی در آنها این تماس برقرار نیست. کای و همکاران<sup>[22]</sup>، 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 شش‌ضلعی و مربعی بوده و تحت بار شبه‌استاتیکی تحلیل شدند. آنها نشان دادند که پرشدگی باعث تغییر در مدل تغییر شکل لوله‌ها از حالت لوزی‌گون به حالت تا شدگی جداره‌ها بر روی هم می‌شود. همچنین آنها نشان دادند که اثر چندین لوله کوچک‌تر داخل یک لوله بزرگ‌تر به‌جای استفاده از یک پرکننده سبب افزایش بار ضربه‌ای و جذب انرژی بیشتر می‌شود. آنها همچنین لوله‌ها را با ماده پلی‌استارن پر کردند و نشان دادند که این ماده دارای خواص جذب انرژی پایینی در مقایسه با فوم‌ها است.

شریعتی و همکاران<sup>[23]</sup> و الله‌بخش و همکاران<sup>[24]</sup>، با استفاده از تزریق فوم آلومینیومی نسبت مقاومت به وزن ستون‌های فولادی را در برابر بار ضربه‌ای افزایش دادند و پارامترهای هندسی بهینه را برای این سازه‌ها تعیین نمودند. ستون‌های تحلیل‌شده از اتصال ورقه‌های فولادی توسط جوش نقطه‌ای ساخته شده بودند.

علوی‌نیا و فرشاد<sup>[25]</sup> اثر هندسه مقطع و پرکننده فوم فلزی بر رفتار مکانیکی مقاطع جدار نازک تحت تأثیر بارهای محوری شبه‌استاتیکی را به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها سه نوع از مقاطع جدار نازک (دایره‌ای، شش‌ضلعی و مربعی) از جنس آلومینیوم ۱۲۰۰ به‌صورت توخالی و پرشده از فوم را تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی قرار داده و خصوصیات جذب انرژی آنها شامل نیروی بیشینه، نیروی متوسط لهیدگی، انرژی جذب‌شده و نحوه تغییر شکل را مطالعه کردند.

آذرخش و همکاران<sup>[26]</sup>، ظرفیت جذب انرژی و تغییر شکل لوله‌های آلومینیومی جدار نازک مخروطی توخالی و توپر با فوم پلی‌یورتان 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.

در این تحقیق رفتار پوسته‌های مخروطی فولادی و نیمه‌کروی آلومینیومی در معرض بارگذاری ضربه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر ابعاد پوسته‌ها و تزریق فوم بر ظرفیت جذب انرژی و تغییر شکل آنها بررسی شده است. در این تحقیق از هر دو روش آزمایشگاهی تجربی و عددی برای تعیین پاسخ جاذب‌ها به ضربه استفاده شده است. در روش عددی از سه مدل آسیب جانسون-کوک، گارسون و روزالر اصلاح‌شده به‌منظور مدل‌سازی فروریزش جاذب‌ها استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل‌های مختلف با یکدیگر و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

دایره شامل صفحات تقویتی که جداره‌ها را به همدیگر متصل کرده‌اند تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی به‌صورت 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.

تارلوچان و همکاران<sup>[13]</sup>، ساختار جاذب‌های جدار نازک را در برابر برخورد محوری و مایل به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. چندین نوع سطح مقطع مختلف تحت ضربه قرار گرفتند و با یکدیگر مقایسه شدند تا بهترین سطح مقطع برای جذب انرژی به‌دست آید. معیارهای مقایسه، جذب انرژی، سادگی و هزینه ساخت بود. نتایج آنها نشان داد که سطح مقطع مستطیلی به‌شکل قابل توجهی میزان جذب انرژی کمتری نسبت به سایر مقاطع دارد. همچنین مشاهده شد با افزایش طول جاذب در بیشتر سطح مقطع‌ها جذب انرژی افزایش می‌یابد. همچنین سطح مقطع‌های شش‌وجهی و هشت‌وجهی و دایروی بهترین هندسه‌ها به‌خاطر عملکرد خوب در جذب انرژی هر دو نوع ضربه مستقیم و مایل هستند.

فوم‌ها عموماً به‌عنوان یک متغیر طراحی در جاذب‌های انرژی به‌کار می‌روند. فوم چه به‌صورت فلزی و چه به شکل پلیمری به‌عنوان پرکننده در ساختارهای جدارنازک استفاده می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از فوم منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌شود<sup>[13]</sup>. اگر لوله‌های آلومینیومی یا فولادی به‌وسیله مواد سبکی چون فوم‌های سلول بسته پر شوند، اثرات متقابلی بین دیواره لوله‌ها و پرکننده‌ها به‌وجود می‌آید که میزان جذب انرژی آنها را افزایش می‌دهد. بارهای ضربه‌ای قابل تحمل توسط لوله‌های پرشده با فوم از مجموع بارهای ضربه‌ای قابل تحمل توسط فوم و لوله‌ها به‌تنهایی بیشتر است<sup>[14, 15]</sup>. راید و ردی<sup>[16]</sup>، مطالعات تجربی جامعی بر روی رفتار ضربه‌ای ستون‌های مربعی پرشده توسط فوم تحت بارگذاری دینامیکی و استاتیکی انجام دادند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که اندرکنش بین فوم‌ها و سطح داخلی لوله‌ها نقش مهمی در قابلیت ضربه‌پذیری و جذب انرژی لوله‌ها دارد. آنها به‌صورت تحلیلی نیز مساله را مورد مطالعه قرار دادند، اما اندرکنش بین سازه و فوم در نظر گرفته نشد. آبرامویچ و ورزیکی<sup>[17]</sup>، پژوهش جامعی در مورد رفتار تغییر شکل پلاستیک ستون‌های پرشده با فوم انجام دادند. ارتباط بین خم‌شدگی لوله‌ها و فشردگی فوم‌ها در مقاله آنها در نظر گرفته شد. مدل تئوری آنها نیز تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت.

ریس و همکاران<sup>[18, 19]</sup>، مطالعات عددی و تجربی گسترده‌ای بر روی رفتار لوله‌های توخالی و همچنین لوله‌های پرشده توسط فوم‌های فلزی که دارای سطح مقطع مربعی بودند و تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی مایل قرار داشتند، انجام دادند. کار آنها توسط برویک و همکاران<sup>[20]</sup>، برای لوله‌های دایروی گسترش یافت. سانتوسا و همکاران<sup>[21]</sup>، به‌طور عددی تأثیر پرشدگی

## مدل‌های آسیب

به منظور مدل‌سازی و تحلیل مساله در نرم‌افزار آباکوس نیاز به استفاده از مدل‌های آسیب است. مدل‌های آسیب را می‌توان به دو دسته کلی مدل‌های آسیب ماکروسکوپیک پیوسته (مدل‌های آسیب موجود در نرم‌افزار آباکوس) و مدل‌های آسیب ریزساختاری تقسیم‌بندی کرد.

## مدل‌های آسیب پیوسته

این مدل‌ها براساس متغیرهای حالت ماکروسکوپیک 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. این مدل‌ها از مدل‌های آسیب ریزساختار ساده‌تر هستند. در این مدل‌ها فلز نرم به صورت یک ماده پیوسته 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 معروف هستند، فرض می‌شود تاریخچه تغییر شکل پلاستیک ماده منجر به آسیب می‌شود. زمانی که متغیر آسیب از مقدار بحرانی‌اش بیشتر شود، شکست اتفاق می‌افتد. مقدار بحرانی متغیر آسیب برای هر ماده به تابع وزنی آن بستگی دارد و این تابع وزنی، تابعی از حالت تنش، دما، نرخ کرنش و غیره است [27].

## مدل آسیب جانسون-کوک

جانسون و کوک با در نظر گرفتن یک مدل برای شکست براساس آسیب انباشته، مدل اولیه‌شان را گسترش دادند. اجرای مدل جانسون-کوک در آباکوس نیازمند داشتن پارامترهای دیگری است. مدل آسیب جانسون-کوک براساس آسیب انباشته، مطابق با رابطه ۱ بیان می‌شود [27].

$$\epsilon^F = (D_1 + D_2 \exp [D_3 \frac{P}{\sigma_{eff}}]) (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}) (1 + D_5 T_H), \quad D = \sum \frac{\Delta \epsilon_{eff}^P}{\epsilon^F} \quad (1)$$

شکست زمانی اتفاق می‌افتد که  $D=1$ .  $\sigma_{eff}$  تنش موثر و  $P$  فشار موثر است.

این مدل مشابه با مدل استحکام تسلیم است که تاثیرات تنش سه‌محوری، نرخ کرنش و گرمای موضعی نیز در آن لحاظ شده است. مدل جانسون-کوک نیازمند به داشتن پنج ثابت ماده است. از اطلاعات به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی در نرخ کرنش‌های مختلف و سطوح مختلف تنش سه‌محوری برای به‌دست‌آوردن ثابت‌های موجود در معادله جانسون-کوک استفاده می‌شود [27]. برای استفاده از این مدل فقط به تعداد محدودی از ثوابت نیاز است، در حالی که برای استفاده از مدل‌های آسیب فلزات نرم نیاز به ثوابت بیشتری است [28].

براساس نتایج پژوهش میرزا و بارتون [27] مشخص می‌شود که کرنش شکست به تنش سه‌محوری  $\sigma_m / \sigma_e$  وابستگی زیادی دارد، در حالی که 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 معادله ۱ که از عبارت ارایه‌شده توسط هنکاک و مکنزی پیروی می‌کند نشان می‌دهد با افزایش تنش سه‌محوری، کرنش به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند [29]. در این تحقیق از ضرایب مدل آسیب جانسون-کوک که توسط ژوو و همکاران [30]، برای آلومینیوم ۶۰۶۳ به‌دست آمده، استفاده شده است.

## مدل‌های آسیب ریزساختار

ریزساختار فلزات پیچیده است و شامل دانه‌ها، ذرات فاز ثانویه، رسوبات و حفره‌ها است. برخلاف فرضیات مدل‌های آسیب ماکروسکوپیک، در مدل‌های آسیب ریزساختار ماده به صورت مجموعه‌ای از سلول‌های غیرهمگن فرض می‌شود. فرآیند انباشته‌شدن آسیب که منجر به شکست نرم می‌شود، در این مدل‌های آسیب بسیار پیچیده است. مشاهدات متالوژیکی نشان می‌دهد که شکست فلزات نرم اغلب با جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن ریز حفره‌ها تحت تنش‌های کششی یکنواخت شروع می‌شود. بنابراین مواد به صورت ساختاری متخلخل در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه دو مدل آسیب ریزساختار گارسون و روزالر اصلاح‌شده معرفی می‌شوند.

## مدل آسیب گارسون

در مکانیک محیط پیوسته، مدلی برای پلاستیسیته فلزات متخلخل توسط گارسون [31] ارایه شد و در سال ۱۹۸۴ سطح تسلیم اولیه آن توسط تورگارد و نیدلمن [32] و تورگارد [33] تصحیح شد. این معادله که به مدل گارسون-تورگارد-نیدلمن (GTN) یا همان، گارسون معروف است به صورت رابطه ۲ ارایه می‌شود [33].

$$\phi = \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma} \right)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left( \frac{q_2 \sigma_m}{2\sigma} \right), \quad (2)$$

$$1 - q_3 f^{*2} = 0$$

در این رابطه  $\sigma_{eq}$  تنش فون-میزز،  $\sigma_m$  تنش هیدرواستاتیکی،  $\sigma$  جریان تنش برای ماتریس مواد و  $f$  میزان رشد حفره‌ها را نشان می‌دهد. پارامترهای  $q_1$ ،  $q_2$  و  $q_3$  پارامترهای معرفی‌شده توسط تورگارد هستند [34]. طبق رابطه ۳،  $f^*$  تابعی است که آسیب ناشی از به هم پیوستن حفره‌ها را زمانی که حجم حفره به مقدار بحرانی  $f_c$  برسد نشان می‌دهد [33].

$$f^* = \begin{cases} f \\ f_c + k(f - f_c) \end{cases}, \quad (3)$$

بر طبق این معادله زمانی که  $f$  به مقدار بحرانی  $f_c$  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

جدول ۱) ابعاد پوسته‌های مخروطی (اعداد برحسب میلی‌متر)

نمونه	ضخامت	ارتفاع	قطر بزرگ	قطر کوچک
مخروط ۱	۰/۸	۱۹۸	۸۲	۵۱
مخروط ۲	۱	۱۵۰	۶۷	۵۱

جدول ۲) ابعاد پوسته‌های نیم‌کروی

نمونه	مقدار (میلی‌متر)
ضخامت	۱
ارتفاع	۱۰۴
قطر	۴۶

### خواص مکانیکی نمونه‌های آزمایش

با انجام آزمایش کشش بر طبق استاندارد ASTM-E8 خواص مکانیکی فلزات تشکیل‌دهنده نمونه‌ها تعیین شده است. آزمایش‌های کشش با یک دستگاه سروهیدرولیک در آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. تصویر دستگاه آزمایش در شکل ۱ و تصویر یکی از نمونه‌های استاندارد آزمایش‌شده به همراه هندسه و ابعاد نمونه‌های استاندارد در شکل ۲ نشان داده شده است. نمودار تنش- کرنش فولاد استفاده‌شده در جاذب‌های مخروطی در نمودار ۱ و نمودار تنش- کرنش آلومینیوم به‌کاررفته در جاذب‌های نیم‌کروی در نمودار ۲ نشان داده شده است.

فوم‌های مورد استفاده در این تحقیق به روش عامل فوم‌ساز با استفاده از اضافه‌کردن یک عامل تولیدکننده گاز به مذاب انجام می‌شود. عامل فوم‌ساز تحت تاثیر حرارت 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 به‌کاررفته در نمونه نیز با انجام آزمایش فشار استاندارد ASTM-E9 تعیین شد. نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش در نمودار ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱) تصویری از دستگاه آزمایش کشش

نرم‌افزار آباکوس وجود ندارد، برای استفاده از این مدل آسیب در نرم‌افزار از زیرروال‌نویسی یا سابروتین نویسی می‌بایست استفاده کرد. برای تعریف مدل آسیب GTN نیاز به چند پارامتر ورودی است که این پارامترها مربوط به جنس ماده مورد نظر می‌شود. در اینجا به‌منظور واردکردن پارامترهای ورودی برای مدل آسیب GTN از اطلاعات موجود در کار ژرو و همکاران<sup>[35]</sup>، استفاده شده است.

### مدل آسیب روزالر اصلاح‌شده

این مدل برای اولین بار توسط نیشون و هاجینسون 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 نشان‌دادن فرآیند آسیب ماده به‌کار گرفته شده است. اولین متغیر کرنش پلاستیک معادل  $p$  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 مطابق با رابطه ۴ میزان رشد آسیب را به تنش هیدرواستاتیکی مرتبط می‌کند<sup>[36]</sup>.

$$\phi = \frac{\sigma_{eq}}{p} - R(p) + Df\sigma_1 \exp\left(\frac{\sigma_m}{p\sigma_1}\right) = 0 \quad (4)$$

که در این رابطه  $\sigma = \sigma_d + \sigma_m I$  تانسور تنش کوشی،  $\sigma_d$  تنش دیویورتیک،  $\sigma_m$  تنش هیدرواستاتیکی،  $I$  تانسور واحد مرتبه دوم،  $\sigma_{eq}$  تنش معادل فون میز،  $\rho = 1 - f/(1 - f_0)$  چگالی نسبی،  $f$  متغیر آسیب یا گسترش حفره،  $f_0$  حجم اولیه حفره در ماده،  $R(p)$  تابع سختی ماده،  $p$  کرنش پلاستیک معادل و  $\sigma_1$  و  $D$  ثوابت ماده برای رابطه روزالر است. متغیر آسیب برای مدل آسیب روزالر اصلاح‌شده از رابطه ۵ به‌دست می‌آید<sup>[36]</sup>.

$$f = \frac{(D + k_w \omega(\sigma)) f_0}{(D + k_w \omega(\sigma) - Df_0) e^{-(D + k_w \omega(\sigma)) p} + Df_0} \quad (5)$$

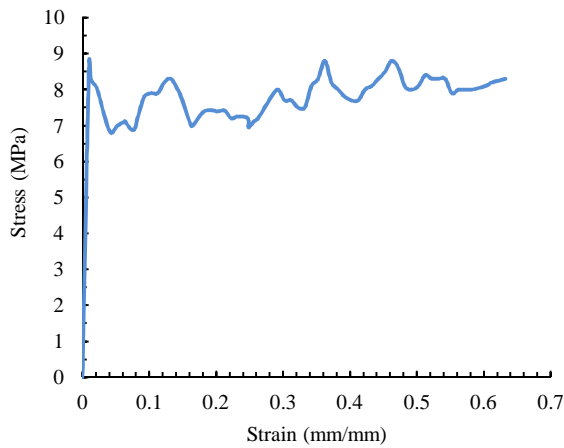
$\omega = \left(\frac{27j_3}{2\sigma_{eq}^3}\right)^2$

با توجه به اینکه مدل روزالر اصلاح‌شده جزو مدل‌های آسیب موجود در نرم‌افزار آباکوس نیست، برای واردکردن آن باید کدنویسی صورت بگیرد. ژرو و همکاران<sup>[37]</sup>، ضرایب مربوط به مدل روزالر اصلاح‌شده برای آلومینیوم 5052P-H34 را به‌دست آورده‌اند. از آنجایی که ضرایب مدل روزالر اصلاح‌شده برای آلیاژ ۶۰۰۰ وجود ندارد، در این تحقیق ضرایب مربوط به آلومینیوم 5052P-H34 مورد استفاده قرار گرفته است.

### مطالعه آزمایشگاهی

#### نمونه‌های آزمایش

نمونه‌های در نظر گرفته‌شده برای آزمایش شامل پوسته‌های مخروطی‌شکل فولادی، با ابعاد مختلف و همچنین پوسته‌های نیم‌کروی آلومینیومی، در دو حالت توخالی و پرشده با فوم پلیمری هستند. ابعاد نمونه‌های مخروطی در جدول ۱ و ابعاد نمونه‌های نیم‌کروی در جدول ۲ ارائه شده‌اند.



نمودار (۳) منحنی تنش- کرنش فوم

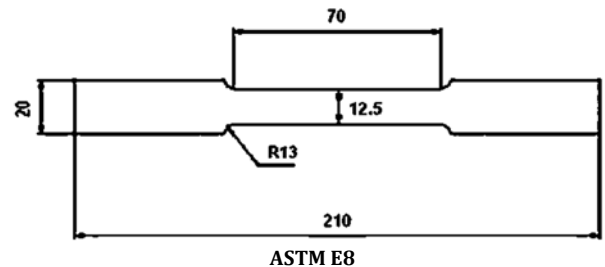
### بارگذاری نمونه‌ها

بارگذاری انجام شده بر روی جاذبها در تمامی آزمایشات از نوع بارگذاری ضربه‌ای است. آزمایش‌های ضربه انجام شده در این تحقیق توسط دستگاه آزمایش ضربه دانشگاه سمنان انجام گرفته است. این دستگاه دارای ستونی به ارتفاع ۲ متر و وزنه‌ای به ظرفیت ۲۵ کیلوگرم است. این دستگاه دارای سنسورهای شتاب‌سنج و نیروسنج برای اندازه‌گیری نیروی وارده بر تکیه‌گاه است. با تنظیم ارتفاع وزنه، سرعت آن هنگام برخورد به نمونه قابل محاسبه خواهد بود. تصویر کلی دستگاه در شکل ۳ نشان داده شده است.

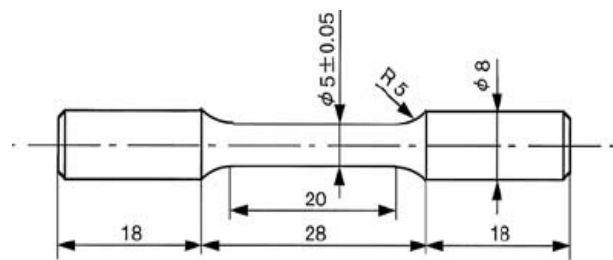
سنسور شتاب‌سنج و نحوه اتصال آن بر روی دستگاه نیز در شکل ۴ قابل مشاهده است. این شتاب‌سنج از نوع نظامی بوده و در هر میکروثانیه یک داده ارسال می‌کند. در تمامی آزمایش‌ها ارتفاع وزنه ۱ متر و مقدار وزنه نیز ۲۵ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. خروجی این دستگاه پس از پردازش داده‌های خام، نمودار نیروی وارده بر تکیه‌گاه برحسب طول لهیدگی نمونه یا همان جابه‌جایی وزنه است.



شکل (۳) تصویری از دستگاه آزمایش ضربه

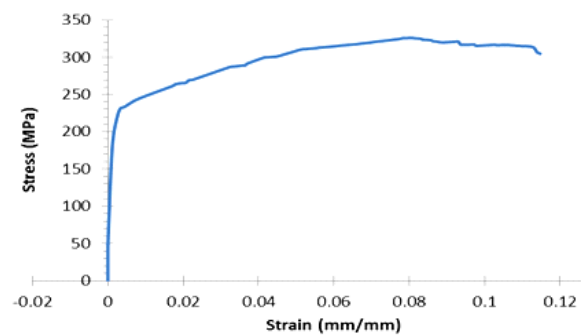


ASTM E8

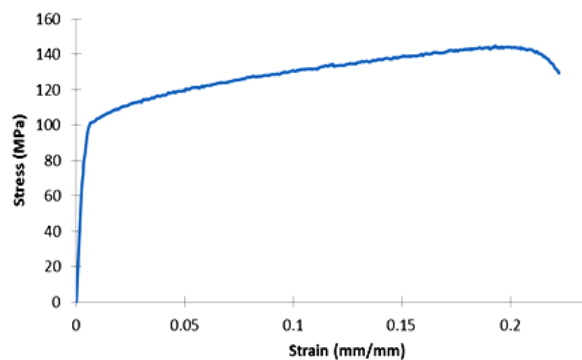


ASTM E9

شکل (۲) تصویر نمونه‌های استاندارد آزمایش کشش (ابعاد به میلی‌متر است)



نمودار (۱) منحنی تنش- کرنش نمونه فولادی



نمودار (۲) منحنی تنش- کرنش نمونه آلومینیومی

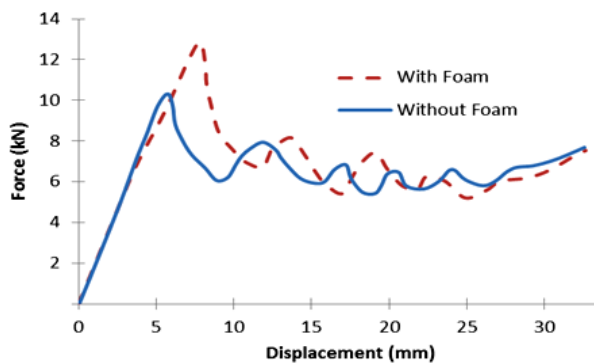


شکل ۶) جاذب نیم‌کروی توخالی؛ قبل از آزمایش (شکل راست) و بعد از آزمایش (شکل چپ)



شکل ۷) جاذب نیم‌کروی پرشده با فوم؛ قبل از آزمایش (شکل راست) و بعد از آزمایش (شکل چپ)

منحنی‌های نیرو-جابجایی برای پوسته‌های نیم‌کروی آلومینیومی در دو حالت بدون فوم و پرشده با فوم در نمودار ۴ ارائه شده‌اند. انرژی جذب‌شده توسط هر جاذب برابر با سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی است. بنابراین با مشاهده نمودار ۴ نتیجه می‌شود تزریق فوم ظرفیت جذب انرژی جاذب را اندکی افزایش می‌دهد. همچنین نیروی بیشینه قابل تحمل توسط جاذب، با تزریق فوم حدود ۲۲٪ افزایش پیدا می‌کند، اما نیروی عامل پس از نیروی بیشینه در هر دو حالت بدون فوم و پرشده با فوم تقریباً برابر است. پس می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از فوم در این نوع جاذب‌ها تاثیر چندان مثبتی در عملکرد آنها ندارد، زیرا از یک طرف نیروی ماکزیمم که یک عامل نامطلوب در طراحی جاذب است را افزایش داده و از طرف دیگر ظرفیت جذب انرژی در حالت پرشده با فوم افزایش چندانی نیافته است.



نمودار ۴) منحنی نیرو-جابجایی برای جاذب‌های نیم‌کروی



شکل ۴) موقعیت شتاب‌سنج روی دستگاه آزمایش

### نتایج حاصل از آزمایش‌های ضربه

جاذب‌های مخروطی فولادی ۱، ۲ و ۳ قبل و بعد از آزمایش ضربه در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. تصاویر قبل و بعد از آزمایش جاذب‌های نیم‌کروی توخالی و توپر نیز به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ به نمایش درآمده است.



(الف)



(ب)



(ج)

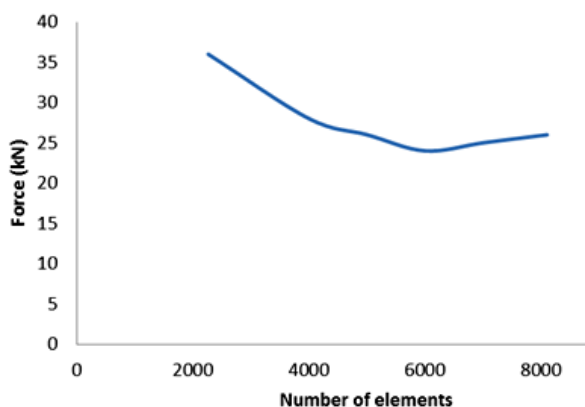


شکل ۵) الف) جاذب مخروطی ۱؛ قبل از آزمایش (شکل راست) و بعد از آزمایش (شکل چپ)، ب) جاذب مخروطی ۲؛ قبل از آزمایش (شکل راست) و بعد از آزمایش (شکل چپ)، ج) جاذب مخروطی ۳؛ قبل از آزمایش (شکل راست) و بعد از آزمایش (شکل چپ)

## تحلیل‌های عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

### مدل‌سازی و حل به روش اجزای محدود

در این پژوهش از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس برای مدل‌سازی و تحلیل‌های عددی استفاده شده است. جاذب‌ها روی یک تکیه‌گاه صلب قرار داده شده و از سمت دیگر یک صفحه صلب با سرعت محاسبه شده حاصل از سقوط آزاد وزنه به نمونه برخورد می‌کند. جرم متمرکز ۲۵ کیلوگرم که معادل وزن وزنه دستگه است، در مرکز این صفحه قرار گرفته است. از الگوریتم سطح به سطح برای مدل‌سازی تماس صفحه صلب و جاذب و از الگوریتم تماس عمومی برای تماس قسمت‌های مختلف جاذب‌ها با هم و نیز تماس بین جاذب و فوم استفاده شده است. ضریب اصطکاک نیز ۰/۲۵ در نظر گرفته شده که ضریب اصطکاک معمول فلز با فلز است. جاذب از سمت پایین کاملاً مقید است و از سمت بالا با صفحه صلب به صورت آزاد در تماس است. شبیه‌سازی آزمایش ضربه در مدت ۰/۰۱ ثانیه انجام شده است. شبکه‌بندی جاذب‌ها و فوم با استفاده از المان C3D8R انجام شده است. به منظور اطمینان از اینکه نتایج به دست آمده از تعداد اجزا مستقل است، ابتدا تحلیل حساسیت شبکه انجام شده است. در این تحلیل با بیشتر کردن تعداد المان‌ها یا به تعبیری ریزتر کردن اجزا 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 برحسب تعداد اجزا در نمودار ۶ نشان داده شده است.



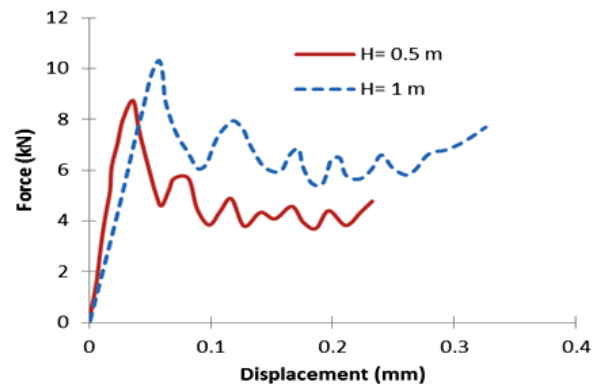
نمودار ۶) منحنی نیروی حداکثر برحسب تعداد اجزاء

### مقایسه نتایج تحلیل‌های عددی و تجربی

نمودارهای نیروی وارده بر تکیه‌گاه پایین برحسب میزان جابه‌جایی صفحه صلب یا همان میزان فشردگی جاذب از تحلیل‌های عددی به دست آمده است. از سه مدل آسیب مختلف در نرم‌افزار استفاده شده و نتایج حاصل با نتایج تجربی مقایسه شده است. این سه مدل شامل مدل آسیب جانسون-کوک، مدل آسیب گارسون و مدل روزالر اصلاح شده است. از این سه مدل، مدل آسیب جانسون-

به منظور بررسی تاثیر ضربه وارده به جاذب بر نیروی بیشینه قابل تحمل توسط جاذب‌های نیم‌کروی، آزمایش دیگری انجام شد. در این آزمایش وزنه ۲۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۰/۵ متر روی جاذب نیم‌کروی توخالی رها شد. منحنی نیرو- جابه‌جایی حاصل در نمودار ۵ نشان داده شده است. با دقت در نمودار ۵ درمی‌یابیم با کاهش ارتفاع وزنه به نصف، نیروی بیشینه تحمل شده توسط جاذب حدود ۱۷٪ کاهش می‌یابد. بنابراین نتیجه می‌شود نیروی بیشینه تحمل شده توسط جاذب علاوه بر جنس و ابعاد هندسی به انرژی ضربه وارده به آن نیز بستگی دارد.

منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی سایر جاذب‌ها، که از انجام آزمایش‌ها به دست آمده‌اند در بخش تحلیل‌های عددی ارایه و با منحنی‌های حاصل از این تحلیل‌ها مقایسه شده‌اند. با محاسبه نیروی میانگین و بیشینه نیرو، بازده هر جاذب که عبارت است از نسبت نیروی میانگین به نیروی بیشینه به دست می‌آید. مقادیر بازده برای هر جاذب در جدول ۳ ارایه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزودن فوم به پوسته‌های نیم‌کروی بازده آنها ۹٪ کاهش می‌یابد و از این نظر نیز حضور فوم تاثیر مثبتی بر این نوع جاذب‌ها ندارد. همچنین کاهش ضربه وارده در اثر کاهش ارتفاع وزنه، بازده جاذب نیم‌کروی را حدود ۹٪ کاهش می‌دهد. در جاذب‌های مخروطی اثر ضخامت بیش از سایر پارامترهای هندسی است و با افزایش ضخامت پوسته، بازده جاذب افزایش پیدا می‌کند.

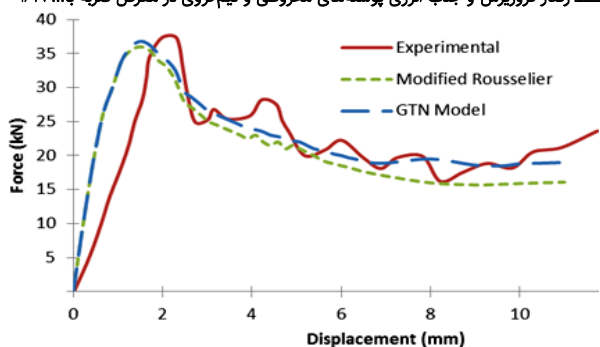


نمودار ۵) منحنی نیرو- جابه‌جایی برای جاذب‌های نیم‌کروی توخالی

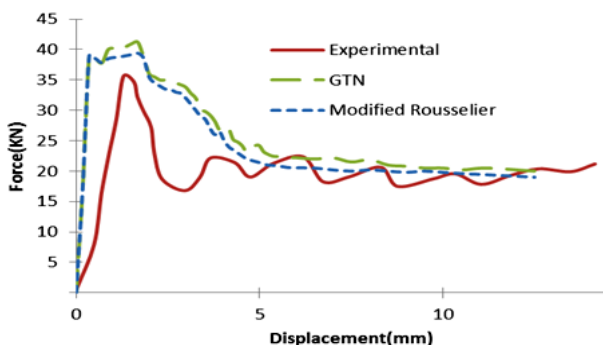
جدول ۳) نتایج بازده جاذب‌ها

نمونه	نیروی میانگین (N)	نیروی بیشینه (N)	بازده (%)
مخروط ۱	۲۲۸۸۷	۳۷۵۳۰	۶۰/۹
مخروط ۲	۲۲۴۶۰	۳۵۵۸۰	۶۳/۱
مخروط ۳	۱۱۹۸۸	۱۹۴۱۰	۶۱/۷
مخروط نیم‌کره توخالی	۶۶۱۰	۱۰۳۱۰	۶۴/۱
مخروط نیم‌کره پر شده با فوم	۷۱۱۰	۱۲۸۶۰	۵۵/۲
نیم‌کره در معرض ضربه کمتر	۴۸۶۰	۸۷۵۰	۵۵/۵

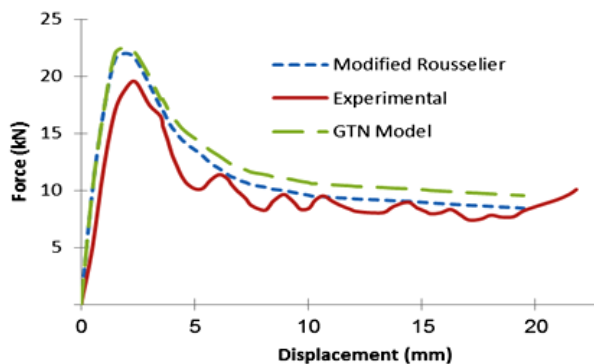




نمودار ۱۰) منحنی نیرو- جابه‌جایی جاذب مخروطی ۱ حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل عددی با مدل‌های آسیب گارسون و روزالر اصلاح‌شده



نمودار ۱۱) منحنی نیرو- جابه‌جایی جاذب مخروطی ۲ حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل عددی با مدل‌های آسیب گارسون و روزالر اصلاح‌شده



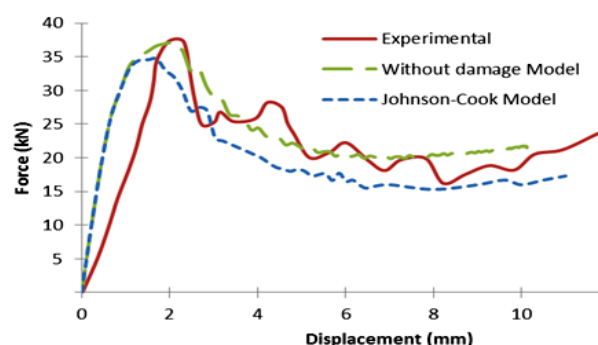
نمودار ۱۲) منحنی نیرو- جابه‌جایی جاذب مخروطی ۳ حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل عددی با مدل‌های آسیب گارسون و روزالر اصلاح‌شده

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل‌های آسیب ریزساختار روزالر اصلاح‌شده و گارسون از مدل پیوسته جانسون- کوک دقت بیشتری دارند. از دو مدل ریزساختار نیز مدل روزالر جواب‌های دقیق‌تری نسبت به مدل گارسون ارائه می‌دهد. همچنین با مشاهده نمودارها می‌توان دریافت که استفاده از مدل‌های ریزساختار نوسانات منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی را کاهش می‌دهد زیرا در این مدل‌ها ماده به‌صورت متخلخل در نظر گرفته شده و آسیب به‌صورت تدریجی در خصوصیات مکانیکی ماده اثر می‌گذارد، اما در مدل‌های پیوسته مانند مدل جانسون- کوک آسیب به‌صورت یک اُفت ناگهانی در خصوصیات ماده عمل می‌کند.

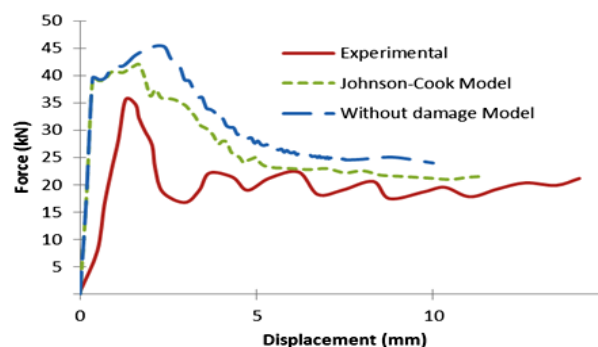
کوک در نرم‌افزار آباکوس موجود بوده و برای دو مدل دیگر زیرروال‌نویسی انجام شده است.

منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی جاذب‌های مخروطی ۱، ۲ و ۳ حاصل از تحلیل‌های عددی با مدل آسیب جانسون- کوک و بدون استفاده از مدل آسیب به‌ترتیب در نمودارهای ۷، ۸ و ۹ ارائه و با منحنی‌های حاصل از تحلیل تجربی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از مدل آسیب جانسون- کوک در تحلیل عددی، در بیشتر موارد منجر به نزدیک شدن نتایج عددی به مقادیر حاصل از آزمایش می‌شود.

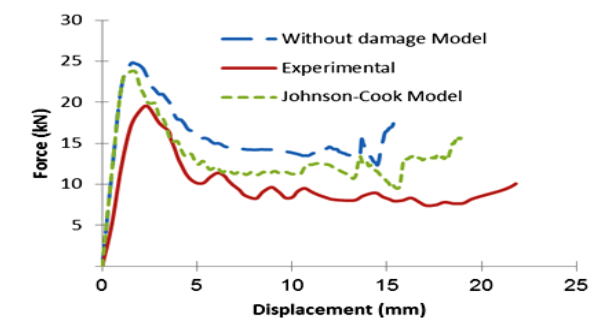
منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی جاذب‌های مخروطی ۱، ۲ و ۳ حاصل از تحلیل‌های عددی با مدل آسیب گارسون و مدل آسیب روزالر اصلاح‌شده به‌ترتیب در نمودارهای ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ارائه و با منحنی‌های حاصل از تحلیل تجربی مقایسه شده است.



نمودار ۷) منحنی نیرو- جابه‌جایی جاذب مخروطی ۱ حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل عددی با مدل آسیب جانسون- کوک و بدون استفاده از مدل آسیب

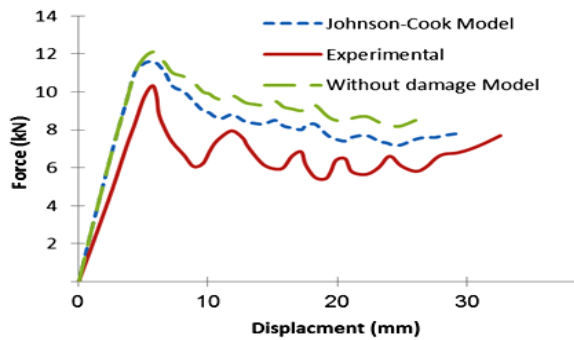


نمودار ۸) منحنی نیرو- جابه‌جایی جاذب مخروطی ۲ حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل عددی با مدل آسیب جانسون- کوک و بدون استفاده از مدل آسیب

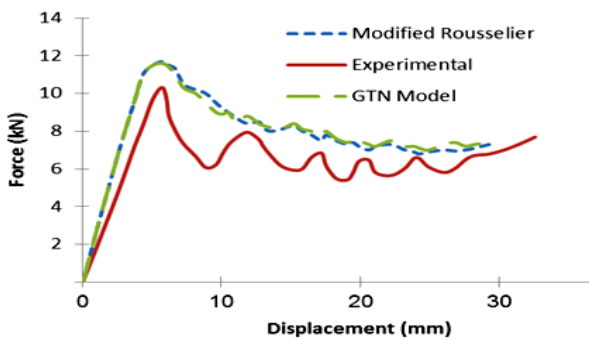


نمودار ۹) منحنی نیرو- جابه‌جایی جاذب مخروطی ۳ حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل عددی با مدل آسیب جانسون- کوک و بدون استفاده از مدل آسیب

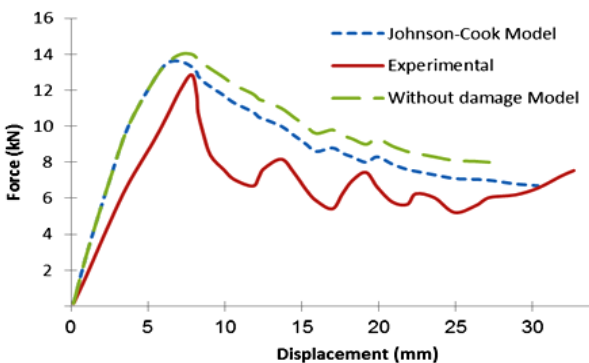
تغییر شکل جاذب نیم‌کروی توخالی در اثر ضربه به همراه کانتورهای تنش فون میزز حاصل از تحلیل عددی در شکل ۸ نشان داده شده و با نمونه تغییر شکل‌یافته در آزمایش مقایسه شده است.



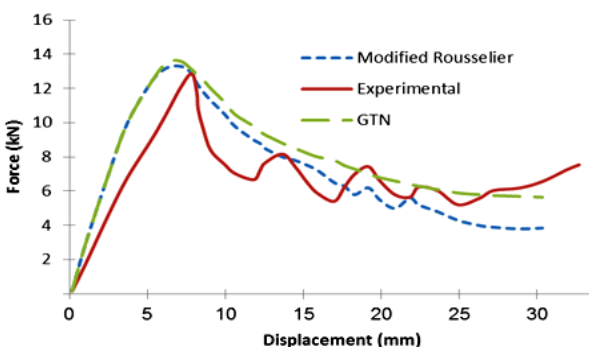
نمودار ۱۳) منحنی نیرو- جابه‌جایی جاذب نیم‌کروی توخالی حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل عددی با مدل آسیب جانسون- کوک و بدون استفاده از مدل آسیب



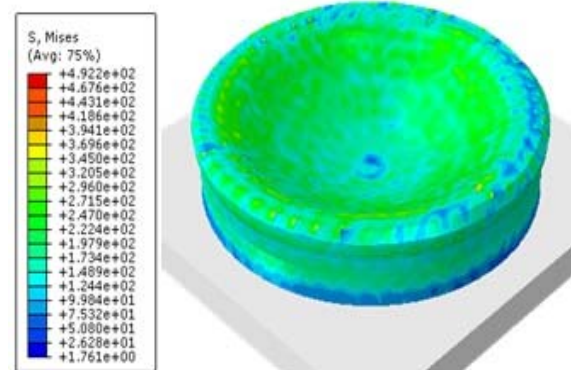
نمودار ۱۴) منحنی نیرو- جابه‌جایی جاذب نیم‌کروی توخالی حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل عددی با مدل‌های آسیب گارسون و روزالر اصلاح‌شده



نمودار ۱۵) منحنی نیرو- جابه‌جایی جاذب نیم‌کروی فوم‌دار حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل عددی با مدل آسیب جانسون- کوک و بدون استفاده از مدل آسیب



نمودار ۱۶) منحنی نیرو- جابه‌جایی جاذب نیم‌کروی فوم‌دار حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل‌های عددی با مدل‌های آسیب گارسون و روزالر اصلاح‌شده



شکل ۸) کانتورهای تنش ون میزز و تغییر شکل جاذب نیم‌کروی توخالی

منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی جاذب‌های نیم‌کروی توخالی حاصل از تحلیل‌های عددی با مدل آسیب جانسون- کوک در نمودار ۱۳ و با مدل‌های آسیب گارسون و روزالر اصلاح‌شده در نمودار ۱۴ ارایه و با منحنی‌های حاصل از تحلیل تجربی مقایسه شده است.

منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی جاذب‌های نیم‌کروی پر شده با فوم حاصل از تحلیل‌های عددی با مدل آسیب جانسون- کوک در نمودار ۱۵ و با مدل‌های آسیب گارسون و روزالر اصلاح‌شده در نمودار ۱۶ ارایه و با منحنی‌های حاصل از تحلیل تجربی مقایسه شده است.

برای جاذب‌های نیم‌کروی توخالی که در معرض ضربه ناشی از رهاشدن وزنه از ارتفاع ۵/۰متری قرار گرفتند، منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی حاصل از تحلیل‌های عددی با مدل آسیب جانسون- کوک در نمودار ۱۷ و با مدل‌های آسیب گارسون و روزالر اصلاح‌شده در نمودار ۱۸ ارایه و با منحنی‌های حاصل از تحلیل تجربی مقایسه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از مدل‌های آسیب موجب افزایش انطباق نتایج عددی و تجربی می‌شود. همچنین مدل‌های آسیب روزالر اصلاح‌شده و گارسون از مدل پیوسته جانسون- کوک دقت بیشتری دارند.

گارسون و روزالر اصلاح‌شده نسبت به مدل پیوسته جانسون-کوک نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهند.

۴- در بین مدل‌های ریزساختاری در بیشتر نمونه‌ها مدل روزالر اصلاح‌شده 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.

۵- با توجه به دشواری شبیه‌سازی توسط مدل‌های آسیب، می‌توان در مواردی که احتمال پارگی یا آسیب زیاد برای سازه وجود ندارد از شبیه‌سازی بدون استفاده از مدل آسیب استفاده کرد زیرا فقط در این حالت‌ها نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی بدون استفاده از مدل‌های آسیب به نتایج تجربی نزدیک است.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**سهم نویسندگان:** وحید حسینی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ محمود شریعتی (نویسنده دوم) روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ مسعود مهدی‌زاده رخی (نویسنده سوم) روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۰٪).

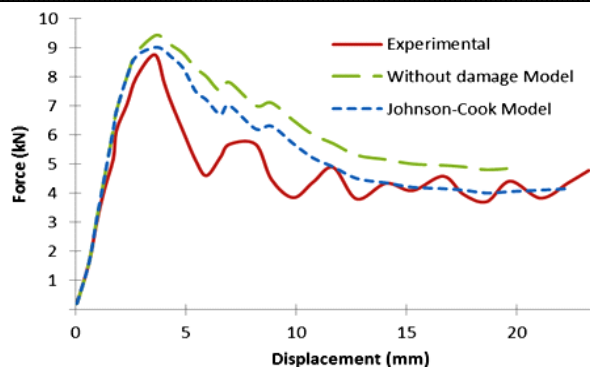
**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

#### فهرست علائم

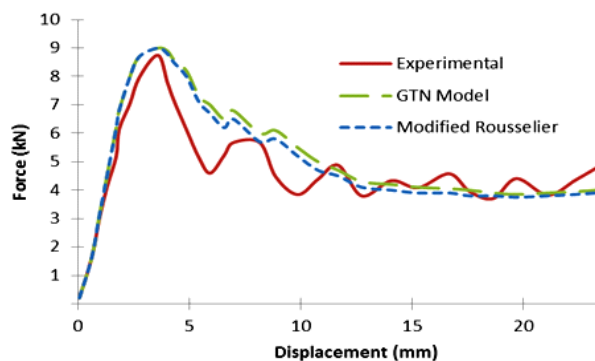
$E$	مدول یانگ
$F$	نیرو
$f$	پارامتر آسیب
$M$	جرم
$P$	فشار
$S$	زمان
$T$	دما
$V$	سرعت
$X$	جابه‌جایی
$\epsilon$	کرنش
$\dot{\epsilon}$	نرخ کرنش
$\mu$	ضریب اصطکاک
$\nu$	نسبت پواسون
$\rho$	چگالی
$\sigma$	تنش

#### منابع

- Ghomarian F. Experimental and numerical analysis of complex thin-wall structures on an axial crush. *Aerospace Mechanics Journal*. 2012;8(1):99-109. [Persian]
- Alexander J. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*. 1960;13(1):10-15.



نمودار ۱۷) منحنی نیرو- جابه‌جایی جاذب نیم‌کروی توخالی در معرض ضربه کمتر حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل‌های عددی با مدل آسیب جانسون-کوک و بدون استفاده از مدل آسیب



نمودار ۱۸) منحنی نیرو- جابه‌جایی جاذب نیم‌کروی توخالی در معرض ضربه کمتر حاصل از تحلیل تجربی و تحلیل‌های عددی با مدل‌های آسیب گارسون و روزالر اصلاح‌شده

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش ظرفیت جذب انرژی پوسته‌های مخروطی و نیم‌کروی توخالی و پرشده با فوم در معرض بارگذاری ضربه‌ای به‌صورت تجربی و عددی و با استفاده از مدل‌های آسیب مختلف 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 به‌صورت خلاصه در زیر بیان شده است:

۱- افزودن فوم پلیمری به پوسته‌های نیم‌کروی آلومینیومی منجر به افزایش ۲۴ درصدی بیشینه نیرو و ثابت‌ماندن نیروی عامل پس از آن شده که این امر بازدهی جاذب را ۹٪ کاهش می‌دهد. در واقع با وجود افزایش حداکثر نیرو، میزان جذب انرژی افزایش چندانی ندارد. بنابراین افزودن فوم به این نوع جاذب‌ها موجب بهبود عملکرد آنها نمی‌شود.

۲- حداکثر نیروی یک جاذب علاوه بر جنس و ابعاد هندسی آن به شدت ضربه وارده نیز بستگی دارد و با افزایش انرژی وارده به آن، نیروی بیشینه جاذب نیز افزایش می‌یابد.

۳- استفاده از مدل‌های آسیب در تحلیل‌های عددی نتایج دقیق‌تری به همراه دارد. در این بین مدل‌های آسیب ریزساختار

- Journal of Mechanical Sciences. 2002;44(9):1965-1984.
- 19- Reyes A, Langseth M, Hopperstad O. Square aluminum tubes subjected to oblique loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2003;28(10):1077-1106.
  - 20- Børvik T, Hopperstad O, Reyes A, Langseth M, Solomos G, Dyngeland T. Empty and foam-filled circular aluminium tubes subjected to axial and oblique quasistatic loading. *International Journal of Crashworthiness*. 2003;8(5):481-494.
  - 21- Santosa SP, Wierzbicki T, Hanssen AG, Langseth M. Experimental and numerical studies of foam-filled sections. *International Journal of Impact Engineering*. 2000;24(5):509-534.
  - 22- Kavi H, Toksoy AK, Guden M. Predicting energy absorption in a foam-filled thin-walled aluminum tube based on experimentally determined strengthening coefficient. *Materials & Design*. 2006;27(4):263-269.
  - 23- Shariati M, Allahbakhsh HR, Saemi J, Sedighi M. Optimization of foam filled spot-welded column for the crashworthiness design. *Mechanika*. 2010;83(3):10-16.
  - 24- Allahbakhsh HR, Shariati M, Saemi J. Crashworthiness optimization of foam-filled and empty spot-welded columns. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2010;4(12):6404-6411.
  - 25- Alavi Nia A, Farshad A. Experimental and numerical investigations of effects of section geometry and metallic foam filler on deformation and energy absorption characteristics of thin-walled tubes. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2014;4(1):51-63. [Persian]
  - 26- Azarakhsh S, Ghamarian A, Khodarahmi H. Investigation of axial and oblique crushing of empty and foam-filled conical tubes under clamped boundary condition. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2016;6(4):139-159. [Persian]
  - 27- Mirza M, Barton D, Church P. The effect of stress triaxiality and strain-rate on the fracture characteristics of ductile metals. *Journal of Materials Science*. 1996;31(2):453-461.
  - 28- Needleman A, Tvergaard V. An analysis of ductile rupture in notched bars. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1984;32(6):461-490.
  - 29- Hancock J, 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*. 1976;24(2-3):147-160.
  - 30- Zhu H, Qin C, Wang JQ, Qi FJ. Characterization and simulation of mechanical behavior of 6063 aluminum alloy thin-walled tubes. *Advanced Materials Research*. 2011;197-198:1500-1508.
  - 31- Gurson AL. 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*. 1977;99(1):2-15.
  - 32- Tvergaard V, Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metallurgica*. 1984;32(1):157-169.
  - 33- Tvergaard V. Influence of void nucleation on ductile shear fracture at a free surface. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1982;30(6):399-425.
  - 34- Tvergaard V. On localization in ductile materials containing spherical voids. *International Journal of Fracture*. 1982;18(4):237-252.
  - 35- Xu F, Zhao S, Han X. Use of a modified Gurson model for the failure behaviour of the clinched joint on Al6061 sheet. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials &*
  - 3- Abramowicz W, Jones N. Dynamic axial crushing of circular tubes. *International Journal of Impact Engineering*. 1984;2(3):263-281.
  - 4- Abramowicz W, Jones N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *International Journal of Impact Engineering*. 1986;4(4):243-270.
  - 5- Nia AA, Hamedani JH. Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries. *Thin-Walled Structures*. 2010;48(12):946-954.
  - 6- 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*. 2010;4(84):12-19.
  - 7- Shariati M, Davarpanah M, Chavoshan H, Allahbakhsh H. Numerical and experimental investigations on buckling and control amount of energy absorption of stainless steel 304L shells with various shapes under axial loading. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;14(3):60-68. [Persian]
  - 8- Allahbakhsh HR, Shariati M, Sedighi M. Effect of stiffeners on crashworthiness of square aluminium columns considering damage evolution. *Journal of Central South University*. 2013;20:599-607.
  - 9- Azarakhsh S, Rahi A, Derikvandi S, Ghamarian A. Numerical and experimental investigations of axial and oblique crushing of bitubular conical tubes under clamped boundary condition. *Aerospace Knowledge and Technology Journal*. 2017;6(1):67-79. [Persian]
  - 10- Azarakhsh S, Rahi A, Ghamarian A. Experimental and numerical investigation of crushing of brass cylindrical tubes. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2016;6(2):181-196. [Persian]
  - 11- Pirmohammad S, Esmaeili Marzdashti S. Study on the collapse behavior of multi-cell conical structures and their optimization using artificial neural networks. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2017;7(2):111-127. [Persian]
  - 12- Pirmohammad S, Esmaeili Marzdashti S. Comparison of energy absorption performance of multi-walled square and circular structures using copras method and optimization of circular structures using RSM. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2017;7(3):133-147. [Persian]
  - 13- Tarlochan F, Samer F, Hamouda A, Ramesh S, Khalid K. Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. *Thin-Walled Structures*. 2013;71:7-17.
  - 14- Hanssen A, Hopperstad O, Langseth M, Ilstad H. Validation of constitutive models applicable to aluminium foams. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2002;44(2):359-406.
  - 15- Hanssen AG, Langseth M, Hopperstad OS. Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Impact Engineering*. 2000;24(5):475-507.
  - 16- Reid S, Reddy T. Axial crushing of foam-filled tapered sheet metal tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1986;28(10):643-656.
  - 17- Abramowicz W, Wierzbicki T. Axial crushing of foam-filled columns. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1988;30(3-4):263-271.
  - 18- Reyes A, Langseth M, Hopperstad O. Crashworthiness of aluminum extrusions subjected to oblique loading: Experiments and numerical analyses. *International*

37- Zhao R, Zhao S, Guo J, Zhong B, Li J. Experimental and numerical investigation on ductile fracture mechanism of aluminium alloy using new modified model. *Materials Science and Technology*. 2015;31(3):303-309.

*Structures*. 2014;37(3):335-348.

36- Nahshon K, Hutchinson J. Modification of the Gurson model for shear failure. *European Journal of Mechanics-A/Solids*. 2008;27(1):1-17.