

بهینه‌سازی عملکرد سازه جدارنازک فروریزی، در برخورد دینامیکی به روش طراحی آزمایش‌ها

نادر آریایی‌فر^۲

پژوهشگاه هوافضا

علی قمریان^۲

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۷/۱۰)

جمشید فضیلتی^۱

پژوهشگاه هوافضا

چکیده

در مقاله حاضر، فرایند بهینه‌سازی یک هندسه جدارنازک فروریزی جاذب انرژی بر مبنای روش طراحی آزمایش‌ها ارائه شده است. بهینه‌سازی برای بیشترین قابلیت جذب انرژی و کمترین شوک برخورد انجام شده است. بر این اساس، تعداد چهار پارامتر کنترل هندسه انتخاب شده است، که برای هر یک دو سطح مقداری پیش‌فرض مورد استفاده قرار داده شده است. در مجموع ۱۶ مدل عددی با هندسه متفاوت تهیه و رفتار فروریزی این هندسه‌ها به صورت مدل پوسته سه‌بعدی در نرم‌افزار LS-Dyna شبیه‌سازی شده است. مدل ماده مورد استفاده برای جاذب آلیاژ آلومینیومی، با رفتار الاستیک-پلاستیک است که مشخصات آن از آزمون کشش استخراج شده است. مدل عددی جاذب در مجاورت سطوح تکیه‌گاهی و نگرانداده و در برابر برخورد دینامیکی جرم متحرک با انرژی مشخص در راستای محوری تحلیل شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و بررسی براساس روش طراحی آزمایش‌ها به تعیین شکل و میزان اثرگذاری پارامترهای تغییر داده شده و ترکیب اثر آنها بر رفتار نمونه جاذب منتهی شده است. نشان داده شد که، اهمیت ضخامت سازه جاذب در رفتار آن قابل توجه است. همچنین، مشاهده شد که علاوه بر این که شعاع انحنا، در انتهای بسته هندسه عاملی مهم در تعیین مشخصات رفتار سازه جاذب است، بلکه بیشترین تاثیر را دارا است. علاوه بر این، برای تایید مدل عددی استفاده شده یک مساله شبه‌استاتیکی مشابه مورد تحلیل قرار داده شده است و با نتایج حاصل از آزمون آزمایشگاهی مقایسه شده است که هم‌خوانی مناسب نتایج کیفیت مناسب شبیه‌سازی را تایید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، بارگذاری محوری دینامیکی، سازه جدارنازک، انرژی جذب‌شده، طراحی آزمایش‌ها

Thin-Walled Impact Energy Absorber Optimization in Dynamic Loading using Design Of Experiment Approach

J. Fazilati

Aerospace Research Institute

A. Ghamarian

Young Researchers and Elite Club
Central Tehran Branch, Islamic Azad University

N. Ariaeifar

Aerospace Research Institute

(Received: 1/December/2014; Accepted: 2/October/2015)

ABSTRACT

In the present paper the optimization process of a thin-walled collapsible shock absorber geometry is performed using the well-known design of experiments method. The optimizing target parameters are the maximum energy absorption and the low impact shock. A number of four geometrical control parameters have been chosen in two different levels making a totally 16 different geometries. The collapse behavior of the absorber geometries then has been simulated using a full 3D shell element LS-Dyna numerical model with an elastic-plastic material behavior and some main absorbing characteristics extracted. The collapse behavior of the geometries is simulated under axial impact of a traveling mass with a presumed kinetic energy. A comparison between the different geometries can be performed to obtain the effectiveness of the control parameters and decide about the most effective ones. It has been shown that while the thickness of the crushable structure is an important factor, an increase in the radius of curvature at the end of the presumed geometry is the most effective parameter in absorber efficiency. A study also is performed to validate the numerical simulation process with conical absorber geometry under axial quasi-static loading. The comparison exhibited a very good agreement between the numerical finite element results and the data acquired from the experimental test that showed the validity of the simulation procedure.

Keywords: Optimization, Dynamic Axial Loading, Thin-Walled Structure, Absorbed Energy, Design of Experiment

۱ - استادیار (نویسنده پاسخگو)، jfazilati@ari.ac.ir

۲ - کارشناسی ارشد

۳ - کارشناسی

۱- مقدمه

پیشرفت‌های تکنولوژی باعث افزایش سرعت سامانه‌های محرک و در نتیجه افزایش احتمال اتفاقات ناگوار و صدمه به انسان، طبیعت و محیط زیست شده است. از این رو طراحی سازه‌ای که بتواند انرژی آزاد شده ناخواسته را به صورت برگشت‌ناپذیر و بدون تأثیر مخرب، اتلاف کند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سازه‌های جدار نازک یکی از انواع جاذب‌های انرژی هستند که امروزه کاربرد وسیعی در صنایع خودرو، ریلی، دریایی، هوایی و کپسول‌های فضایی سرنشین‌دار پیدا کرده است. این نوع سازه‌ها تحت بار اعمالی تغییرشکل‌های پلاستیک بزرگی تحمل نموده و در نتیجه سطح بالایی از انرژی را جذب می‌کنند. وزن و حجم کم، در دسترس بودن و صرفه اقتصادی مزیت‌های اصلی است که سبب شده رفتار این سازه‌ها تحت انواع مختلف بارگذاری در سال‌های متمادی مورد بررسی قرار گیرد.

رفتار فروریزش پوسته‌های جدارنازک تحت بارگذاری محوری به صورت تجربی از سال ۱۹۶۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. از دیدگاه تئوری، فروریزش پوسته‌ها تحت بارگذاری محوری بسیار پیچیده است. رفتار الاستیک-پلاستیک، کمناش اولیه در آغاز فروریزش، رفتار پلاستیک ماده و تغییرشکل بزرگ پس از کمناش، شرایط مرزی و غیره همگی پدیده‌هایی هستند که با در نظر گرفتن آنها نمی‌توان یک رابطه ساده و مستقیم برای نیرو و سایر عوامل لهیدگی ارائه نمود. تاکنون تعداد زیادی طرح تئوری برای این‌گونه مقاطع ارائه شده است [۴-۱] در همه آنها یک سینماتیک برای رفتار لهیدگی سازه در نظر گرفته شده است و با فرض رفتار ماده سازنده پوسته از نوع پلاستیک کامل، بر مبنای محاسبات بار حدی، برخی عوامل لهیدگی مانند نیروی متوسط فروریزش و طول چین به دست آمده است.

گوپتا^۱ و همکاران [۵] در سال ۱۹۹۷ فروریزش پوسته مخروطی با زاویه نیم‌رأس بزرگ را تحت اثر بارگذاری فشاری محوری شبه‌استاتیک بررسی کرده‌اند. در این مقاله برای پیش‌بینی منحنی تغییرات نیرو با جابه‌جایی و انرژی با جابه‌جایی، مدل تحلیلی ارائه شده که با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشته است. گوپتا و ونکاش^۲ [۶] در سال ۲۰۰۷ مطالعه آزمایشگاهی و عددی پوسته مخروطی جدارنازک را تحت اثر برخورد محوری ارائه داده‌اند. در این مطالعه فروریزش پوسته مخروطی آلومینیومی برای زاویه نیم‌رأس و

نسبت قطر به ضخامت متفاوت بررسی شده است. از آزمایش نمونه‌های مخروطی تاریخچه تغییرشکل، منحنی منحنی نیرو- جابه‌جایی، منحنی انرژی- جابه‌جایی و متوسط بار فروریزش حاصل شده است. در مدل شبیه‌سازی المان محدود نیز نوع ماده ویسکوپلاستیک انتخاب شد که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته است. محمد شریف^۳ و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۷ پوسته جدارنازک با هندسه مخروط ناقص را بر اساس میزان انرژی جذب‌شده در برخورد محوری بهینه‌سازی کرده‌اند. پوسته مخروطی بر اساس پارامترهای هندسی مانند قطر پایینی، ارتفاع، زاویه نیم‌رأس و خواص پوسته مخروطی به روش صفحه پاسخ^۴ بهینه‌سازی شده است. احمد^۵ و تامبیر اتنام^۶ [۸] در سال ۲۰۰۹ فروریزش لوله‌های مخروطی تقویت‌شده با فوم آلومینیومی را تحت بارگذاری شبه‌استاتیک بررسی کرده‌اند. در این مطالعه تأثیر پارامترهای مهم مانند ضخامت دیواره، زاویه نیم‌رأس و چگالی فوم بر فروریزش لوله‌های مخروطی پر شده با فوم بررسی شد. نتایج نشان داده است که لوله‌های مخروطی تقویت‌شده با فوم قابلیت جذب انرژی فروریزش را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. آکار^۷ و همکاران [۹] در ۲۰۱۱ مطالعه بر روی اثرات ضخامت و زاویه مخروط و نیز تعداد و شعاع انحنای شیارهای محیطی ایجاد شده بر رفتار فروریزشی و جذب انرژی نوع خاصی از المان‌های جاذب جدارنازک را ارائه کرده است. المان‌های موردنظر در مطالعه دارای هندسه‌ای مخروطی با انتهای باز و شیارهایی محیطی هستند. قمریان و ابدی [۱۰] در ۲۰۱۱ به بررسی عددی و آزمایشگاهی لوله‌های استوانه‌ای سر بسته تحت بارگذاری محوری پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان داده است که بیشینه نیروی اولیه لوله‌های سر بسته توخالی و تقویت‌شده با فوم ۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر از لوله‌های سرباز است. اثر چگالی فوم پلی‌یورتان بر لوله‌های مخروطی سر بسته در بارگذاری محوری توسط قمریان و همکاران [۱۱] بررسی شده است. در این تحقیق، آنالیز عددی فروریزش لوله‌های توخالی و تقویت شده با فوم به روش دینامیکی صریح انجام شده است. نتایج نشان داده که انرژی جذب‌شده توسط لوله‌های تقویت‌شده با فوم بیش از مجموع انرژی‌های قابل جذب در لوله توخالی و فوم پر شده به صورت مجزا است. قمریان و زارعی [۱۲] در سال

3 - Mohamed Sheriffa

4- Respond Surface

5 - Ahmad

6- Thambiratnam

7 - Acar

1 - Gupta

2 - Venkatesh

کاهش در شدت نیروی اولیه و نیروی بیشینه انجام گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، میزان الویت اثرگذاری پارامترها بر رفتار فروریزی نمونه جاذب با هندسه مورد بررسی و مقادیر قابل انتخاب متناظر با هندسه بهینه استخراج شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند در جهت تعیین بهترین هندسه جاذب مخروطی فروریزی با انتهای بسته برای حفاظت از سرنشینان در مقابل شوک ناشی از برخورد به‌کارگیری شود به‌صورتی که در عین جذب بیشترین مقدار ممکن انرژی، کمترین شوک را به سرنشین انتقال دهد.

۲- معرفی پارامترهای فروریزی جاذب‌های انرژی

به‌طور کلی برای بررسی کارایی جاذب‌های انرژی چند تعریف عمومی شامل موارد زیر وجود دارد:

بازده^۱ لهیدگی: نسبت طول لهیده شده جاذب‌های انرژی به طول اولیه آن است. هرچه این عامل بیشتر شود در ازای جذب مقدار انرژی ثابت نشان کم‌بودن نیروی میانگین و شتاب کاهشی حاصل از آن است که در راحتی سرنشین اثر مثبت دارد،

نیروی میانگین فروریزش^۲: نیروی فروریزش جاذب‌های انرژی از مشخصه‌های آنها محسوب می‌شود و عکس‌العمل آن موجب ایجاد شتاب کاهنده در وسیله‌ای می‌شود که جاذب‌های انرژی به آن متصل است. در صورتی که جاذب انرژی به سطح صلب برخورد کند نیروی فروریزش جاذب تعیین‌کننده شتاب مرکز جرم است. جاذب انرژی ایده‌آل آن است که مقدار متوسط نیروی فروریزی در زمان ضربه، ثابت و کوچک‌تر یا مساوی مقدار مجاز باشد. این پارامتر از نگاه دیگر نماینده میزان ظرفیت قابل جذب انرژی است و از تقسیم مقدار کل انرژی جذب شده بر مقدار کوتاه‌شدگی فروریزش محاسبه می‌شود،

نیروی اولیه^۳: اولین نیروی بیشینه که به نوعی نماینده نیروی اولیه کمانش ساختار جاذب و مقاومت آن پیش از شروع فروریزش است. این پارامتر به‌همراه بازده لهیدگی نشان‌دهنده میزان شتاب اولیه کاهشی یا شوک اولیه تغییر سرعت و کم‌تر بودن آن می‌تواند معیاری برای راحتی سرنشین محسوب شود،

۲۰۱۲ لوله‌های استوانه‌ای و مخروطی سربسته را به‌منظور یافتن هندسه‌ای با بیشینه انرژی ویژه جذب شده به‌روش صفحه پاسخ بهینه‌سازی کرده‌اند. قمریان و همکاران [۱۳] تحلیل عددی و آزمایشگاهی لوله‌های مخروطی با انتهای کروی تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان را مطالعه کردند که در آن اثر پارامترهای ابعادی مؤثر بر فرآیند فروریزش مورد بررسی قرار گرفته است. در همین سال قمریان و فارسی نیز رفتار سازه‌های جدارنازک ترکیبی را تحت بارگذاری محوری بررسی کردند [۱۴]. همچنین زارعی و قمریان [۱۵] رفتار فروریزش لوله‌های مخروطی و استوانه‌ای با انتهای کروی توخالی و تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان را تحت بارگذاری محوری مقایسه کرده‌اند. مشاهدات نشان داده است که تطابق قابل قبولی بین شیوه فروریزش، نمودار نیرو- جابه‌جایی و انرژی ویژه جذب شده بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. مؤلفان [۱۶] رفتار فروریزش چندین نمونه هندسه جدارنازک با انتهای بسته را در شرایط شبه‌استاتیکی فروریزش بررسی نموده‌اند. در نتیجه این مطالعه یک هندسه مخروطی با انتهای کروی به‌عنوان گزینه مناسب‌تر انتخاب و معرفی شده است. در همین رابطه، اثرات ایجاد قیود اضافی بر اصلاح ایرادات ساخت و رفتار فروریزش این هندسه نیز بررسی و ارائه شده است [۱۷]. عباسی و همکاران [۱۸] در ۲۰۱۵ مطالعه‌ای را بر روی ساختارهای جدارنازک استوانه‌ای با مقاطع مختلف چندضلعی محدب و مقعر در برابر برخورد محوری ارائه و در نهایت مناسب‌ترین شکل مقطع را از منظر انرژی برخورد و نیروی بیشینه محدود معرفی نموده است. مطابق با این پژوهش مقطع جدارنازک ۱۲ ضلعی غیرمحدب بهترین عملکرد را ارائه کرده است.

براساس مطالعات انجام‌شده، میزان جذب انرژی در سازه‌های جدارنازک وابستگی شدید به پارامترهای هندسی (ضخامت، ارتفاع، قطر مقطع، انحنا و ...)، مشخصات ماده (جنس، تنش حد تسلیم و ...) و مشخصات تحریک (شامل سرعت و زاویه بارگذاری) دارد [۸-۱۹]. در ادامه روند تحقیق، در مقاله حاضر، هندسه یک المان جاذب جدارنازک به‌شکل مخروط ناقص با انتهای بسته مدنظر قرار داده شده است و با بررسی حساسیت پاسخ آن در برابر ضربه برخورد نسبت به برخی پارامترهای هندسه، سطوح پاسخ مبتنی بر روش طراحی آزمایش‌ها استخراج شده است. براساس نتایج حاصل از بررسی که با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود حاصل شده است، بررسی بر روی میزان و نوع تغییرشکل و فروریزش ساختار جاذب و

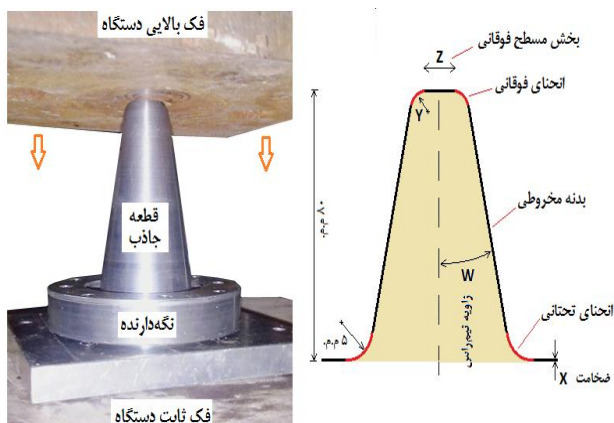
1- Stroke Efficiency

2- Average Crush Load

3- Initial Crush Load

نسبت به ضخامت گرده اولیه در بخش انحنای تحتانی مشاهده شد. قطر بزرگ نمونه‌های مخروطی (پایه) $43/6 \pm 0/4$ میلی‌متر، قطر کوچک در بخش فوقانی آن $15/2 \pm 0/5$ میلی‌متر و ارتفاع سازه مخروطی $80 \pm 0/5$ میلی‌متر بوده است. لازم به توضیح است که ابعاد نمونه مخروطی در این مطالعه با توجه به مرجع [۱۲] و محدودیت فضای عملکرد این جاذب‌های انرژی انتخاب شده است. به‌طور کلی فرآیند تولید پوسته‌های مخروطی دهانه بسته یک سرگیردار منجر به ایجاد دو انحنا در این گونه پوسته‌ها می‌شود، در این تحقیق مقدار شعاع انحنای فوقانی و تحتانی به ترتیب برابر ۲ و ۶ میلی‌متر است. این سازه پس از تعیین ابعاد هندسی و کنترل کیفیت فرآیند تولید، با اتصال به یک مجموعه نگه‌دارنده، بین دو صفحه تخت متصل به دستگاه یونیورسال قرار گرفته، با سرعت معینی در راستای محوری فشرده شد. شکل ۱ پوسته مخروطی انحنا دار را به همراه نگه‌دارنده یک سرگیردار آن تحت بارگذاری محوری نشان می‌دهد. پارامترهای هندسی مختلف المان جاذب در این شکل مشخص شده است.

شرایط بارگذاری شبه‌استاتیکی با انتخاب سرعت تغییرشکل محوری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه در حین فروریزش اعمال شد. نیروی محوری سبب ایجاد کمناش و فروریزش پوسته مخروطی شد و ارتفاع مخروط پس از چروک خوردن متوالی به حدود ۳۰ میلی‌متر کاهش یافت. مقدار نیروی لازم برای تغییرشکل پوسته در حین تغییرشکل اندازه‌گیری و از کلیه مراحل فروریزش نمونه آزمایشگاهی تصویربرداری شده است تا مدهای مختلف تغییرشکل پوسته مخروطی شناسایی شود.



شکل (۱): هندسه پوسته مخروطی دهانه بسته به همراه شرایط مرزی یک سرگیردار آن تحت بارگذاری محوری.

بیشینه نیرو^۱: حداکثر نیرو در جاذب‌های انرژی فروریزشی معمولاً مربوط به تغییرشکل الاستیک است که پس از آغاز تغییرشکل پلاستیک به سرعت کاهش می‌یابد. بیشتر بودن این نیرو می‌تواند نشان‌دهنده بالاتر بودن سطح شتاب تلقی شود. در بسیاری از موارد این تعریف با مفهوم نیروی اولیه هم‌پوشانی دارد و

انرژی ویژه^۲: حاصل تقسیم کل انرژی جذب‌شده توسط المان جاذب به جرم آن است و غالباً براساس ژول بر گرم بیان می‌شود. بالا بودن این پارامتر بیانی از میزان قدرت جذب سازه جاذب است اما، ارتباط مستقیمی با شتاب وارد بر سرنشین ندارد.

پارامترهای اشاره‌شده از یکدیگر مستقل نیستند. بنابراین نمی‌توانند هم‌زمان در شرایط مطلوب قرار داشته باشد چراکه برخی از این پارامترها برخلاف یکدیگر عمل می‌کنند. برای نمونه کاهش نیروی متوسط از دیدگاه کاهش شتاب مطلوب است اما این شرایط برای میزان انرژی ویژه ثابت به معنی کاهش افزایش طول فروریزش است که صورت مساله را تغییر می‌دهد. در این پژوهش هدف کاهش شتاب وارد به سرنشین بوده است؛ بنابراین میزان انرژی جذب‌شده ثابت در نظر گرفته شده است و از پارامتر جرم جاذب در راستای این هدف صرف نظر شده است. به همین دلیل پارامتر انرژی ویژه در ادامه مورد توجه قرار نگرفته است. بدیهی است در صورتی که هدف از بهینه‌سازی افزایش جذب انرژی باشد لازم است این پارامتر نیز لحاظ گردد.

۳- تحلیل آزمایشگاهی فروریزش سازه مخروطی یک سرگیردار

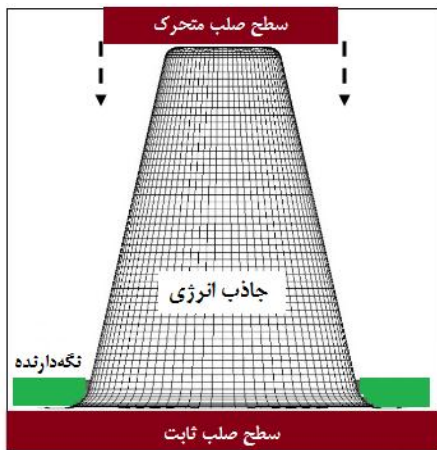
سازه‌های مخروطی جدارنازک جاذب انرژی به روش چرخ کاری^۳ دستی و از آلیاژ آلومینیوم نرم سری ۱۰۵۰ ساخته شده است. با استفاده از آزمایش کشش مشخصات مکانیکی این آلیاژ مطابق جدول ۱ استخراج شده است. ضخامت گرده اولیه آلومینیومی $1/8$ میلی‌متر انتخاب شد و المان مخروطی طی فرآیند چرخ کاری دستی تولید شد. ضخامت پوسته مخروطی ساخته شده پس از عملیات چرخ کاری در کلیه نقاط اندازه‌گیری شد که مقدار حداکثر کاهش ضخامت $0/2$ میلی‌متر

1- Maximum Crush Load

2- Specific Energy

3- Spinning

هر صفحه صلب ممکن است شش درجه آزادی شامل سه مولفه جابه‌جایی و سه مولفه دوران داشته باشند. در تحلیل فروریزش پوسته مخروطی سطح صلب تحتانی به فک ثابت دستگاه متصل است. پس کلیه درجات آزادی آن مقید می‌شود. از طرف دیگر، سطح صلب فوقانی به فک متحرک متصل است که کلیه درجات آزادی آن غیر از جابه‌جایی در راستای محور پوسته مقید شده است. نوع المان‌ها برای تحلیل اجزای محدود وابسته به هندسه نمونه و روش تحلیل است. برای ساخت مدل عددی از المان‌های پوسته با فرمولاسیون بلیچکو-تسای و اندازه شبکه ۱/۵ میلی‌متر استفاده شده است. تعداد واحد محاسباتی عددی برای مدل‌های مختلف متفاوت و در حدود ۵۷۰۰ المان بوده است.



شکل (۲): هندسه و بارگذاری مدل پوسته مخروطی یک‌سرگردار در شبیه‌سازی.

۴- نتایج تحلیل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

شکل ۳، نمونه‌ای از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی فروریزش محوری پوسته مخروطی را نشان می‌دهد که از کاهش ۶۸٪ (بازده لهیدگی) ارتفاع نمونه مشابه با شرایط آزمایشگاهی محاسبه شده است. هندسه تغییرشکل یافته نمونه شبیه‌سازی برای مقایسه در این شکل نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در هر دو حالت تعداد چین‌های داخلی و خارجی نمونه مخروطی برابر است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، فروریزش پوسته مخروطی از انتهای کوچک به‌صورت تاخوردن متقارن محوری آغاز شده و پشت سرهم ادامه می‌یابد.

جدول (۱): مشخصات مکانیکی و داده‌های تنش- کرنش

پلاستیک آلومینیم ۱۰۵۰.

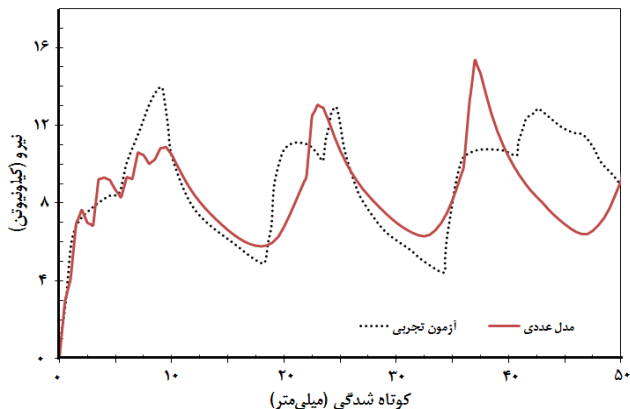
تنش پلاستیک (MPa)	کرنش پلاستیک (m/m)	چگالی (kg/m ³)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون	مدول الاستیک (GPa)
۸۳/۰	۰/۰	۲۷۸۰	۸۳	۰/۳	۵۷/۵
۸۸/۸	۰/۰۴				
۹۴/۵	۰/۰۸				
۱۰۰	۰/۱۲				
۱۰۳/۸	۰/۱۶				

۴- شبیه‌سازی فروریزش سازه مخروطی یک‌سرگردار

مدل عددی اجزای محدود به کمک نرم‌افزار LS-DYNA برای تحلیل فروریزش پوسته‌های مخروطی تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری در این تحقیق ارائه شده است. شکل ۲ شبه‌استاتیکی محوری در این تحقیق ارائه شده است. شکل ۲ هندسه و بارگذاری پوسته مخروطی یک‌سرگردار را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد. شبیه‌سازی برای نمونه کامل سه بعدی و بدون اعمال هیچ‌گونه شرایط تقارن انجام شده است.

رفتار غیرخطی مواد در تغییرشکل‌های بزرگ و اثر برخورد چروک‌های پوسته‌های مخروطی با یک‌دیگر یا با سطح فوقانی و تحتانی ابزار مدل‌سازی شده است تا شرایط تحلیل با شرایط آزمایشگاهی کاملاً منطبق باشد. شبیه‌سازی فروریزش با فرض صلب بودن سطوح مسطح ابزار در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی ارائه شده است. رفتار الاستیک-پلاستیک و مشخصات مکانیکی ماده آلومینیمی (آلیاژ ۱۰۵۰) پوسته‌های مخروطی برای استفاده در مدل عددی از جدول ۱ استخراج شده است. شرط مرزی تماسی برای جلوگیری از نفوذ نقاط مختلف پوسته مخروطی به داخل قطعات صلب و نگهدارنده و امکان لغزش پوسته مخروطی بر روی سطوح صلب تعریف شده است.

در این مطالعه بین سطح خارجی پوسته مخروطی با سطح صلب فوقانی و نگهدارنده شرط تماس از نوع Automatic Nodes to Surface تعریف شده است. برای شبیه‌سازی اصطکاکی و محدودسازی لغزش مقدار ضریب اصطکاک نوعی ۰/۱ استفاده شده است. [۱۱-۱۷] همچنین در این شبیه‌سازی شرط تماس سطوح خارجی و داخلی پوسته مخروطی با خودش پیش‌بینی شده است تا از نفوذ گره‌های ورق لوله مخروطی در حین چروک‌خوردگی آن جلوگیری شود.



شکل (۴): نتایج تجربی و مدل سازی نمودار نیرو- جابه جایی فروریزش پوسته مخروطی تحت بارگذاری محوری.

جدول (۲): نتایج تجربی و مدل سازی فروریزش پوسته مخروطی تحت بارگذاری محوری.

انرژی ویژه (J/g)	جذب انرژی (J)	میانگین نیرو (kN)	بیشینه نیرو (kN)	نیروی اولیه (kN)	نوع
۱۵/۶	۴۹۵	۹	۱۴/۰	۱۴/۰	تجربی
۱۵	۴۷۰	۸/۶	۱۵/۳	۱۱	شبیه سازی

جدول (۳): انتخاب سطوح کمی حداکثری و حداقلی برای پارامترهای مساله.

پارامتر (اختصار)	ضخامت (X)	شعاع انحنا فوقانی (Y)	قطر مسطح فوقانی (Z)	زاویه نیمراس (W)	ضریب ضایع
	(mm)	(mm)	(mm)	(deg)	
حد بالا	۲/۵	۷	۲۰	۱۳	۱
حد پایین	۱/۵	۳	۱۰	۷	-۱

۵- طراحی آزمایش های فروریزش سازه مخروطی یک سرگردار

راه شناخت پدیده ها، آزمایش و انجام آزمایش همواره متضمن هزینه و زمان است. از این رو انجام آزمایش ها به صورتی که با کمترین تعداد آزمون و صرف حداقل هزینه و زمان، بیشترین اطلاعات ممکن حاصل شود؛ امری ضروری است. هزینه و زمان هنگامی که تعداد عوامل اثرگذار بر پدیده مورد بررسی افزایش پیدا می کند به صورت تصاعدی زیاد می شود. روشی که به بهترین شکل اهداف ذکر شده را برآورده می سازد، روش طراحی آزمایش ها است. در این بخش، ابتدا مراحل انجام فرایند طراحی آزمایش ها به روش تاکوچی بیان شده سپس پارامترهای



شکل (۳): نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی پوسته مخروطی تحت بارگذاری محوری با بازده لهیدگی ۶۸ درصد.

شکل ۴ نمودار نیرو- جابه جایی فروریزش سه بعدی این نمونه مخروطی را براساس نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود، در شروع بارگذاری، نیرو به طور تقریباً خطی تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می یابد، این روند تغییر نیرو ناشی از رفتار الاستیک پوسته مخروطی تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کمانش است، با شروع کمانش سطح قاعده پوسته مخروطی، نیرو افت می کند که با تشکیل چین داخلی افزایش می یابد. تماس چروک سطح خارجی پوسته مخروطی با خودش و تکمیل چین موجب افزایش نیرو لهیدگی پوسته مخروطی می شود. افزایش جابه جایی صفحه صلب فوقانی باعث افزایش طول چین و در نتیجه افزایش نیروی وارد به صفحه صلب می شود، این افزایش طول به دلیل ناپایداری چین خارجی دوم ایجاد می شود که باعث تماس آن با صفحه صلب فوقانی می شود. به طور کلی در این فروریزش نیرو با تشکیل چین داخلی و خارجی به ترتیب افزایش و کاهش می یابد، در نتیجه منحنی نیرو- جابه جایی فروریزش همواره به صورت تناوبی است.

نتایج تجربی و شبیه سازی در جدول ۲ با یکدیگر مقایسه شده است. در این جدول پارامترهای مورد استفاده بر مبنای تعاریف بخش ۲ حاصل شده است. انرژی جذب شده از محاسبه سطح زیر منحنی نیرو- جابه جایی در تحلیل آزمایشگاهی و عددی استخراج شده است. مقایسه این مقادیر نشان می دهد، نتایج شبیه سازی مدل عددی ایجاد شده تا حد بسیار مناسبی با نتایج حاصل از آزمون تجربی هم خوانی دارد و قابل اعتماد است. خطای مدل برای محاسبه انرژی جذب شده نسبت به نتایج آزمایشگاهی کمتر از ۵ درصد است. بنابراین مدل عددی تهیه شده نتایجی نزدیک به واقعیت ارائه داده است و از این منظر قابل اعتماد و قابل استفاده است.

کل پوسته، قطر بخش مسطح در بالای نمونه و نیز زاویه نیم‌رأس بدنه مخروطی است. البته شایان ذکر است که برای تامین شرایط نصب، به‌ناچار بخش مسطحی در قسمت فوقانی وجود خواهد داشت. به‌همین دلیل شعاع بخش انتهایی را می‌توان شعاع انحنای فوقانی نامید. با توجه به قیود هندسی موجود برای شرایط استفاده از پوسته جدارنازک فروریزی در حال بررسی، طول کل هندسه ۸۰ میلی‌متر و مقداری ثابت در نظر گرفته شده است. بدیهی است با توجه به این‌که تغییر سایر پارامترها قیود موجود را مختل نمی‌کند می‌توان اثرات این تغییرات را در آزمایش‌ها بررسی نمود. بر این اساس اثرات تغییر چهار پارامتر ضخامت، قطر بخش مسطح در انتهای بسته مخروط (به اختصار قطر فوقانی)، نیم‌زاویه مخروط و شعاع انحنای فوقانی به عنوان عوامل تاثیرگذار انتخاب شده است. موقعیت هر پارامتر در شکل ۱ ارائه شده است. برای هر پارامتر انتخاب‌شده دو مقدار مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده که یک ضریب شاخص مثبت یا منفی یک به آن اختصاص داده شده است.

انتخاب محدودهٔ مقداری پارامترها براساس سابقه قبلی صورت گرفته است و به‌صورت صعودی ضریب شاخص مثبت و منفی یک به آنها اختصاص داده شده است. در این مساله از روش طراحی آزمایش فاکتوریلی تاگوچی استفاده شده است. در این روش تعداد کل آزمایش‌ها برابر با L^m است که در آن، L تعداد سطوح تغییر انتخاب شده و m تعداد پارامتر تغییرکننده مورد بررسی است. از آنجاکه تعداد پارامتر ورودی و سطوح انتخاب شده در طراحی آزمایش‌ها فروریزش جاذب‌های انرژی تحت بارگذاری محوری به ترتیب ۴ و ۲ در نظر گرفته شده است، تعداد کل طرح‌های مورد آزمایش برابر با ۱۶ نمونه است که عبارت از ترکیب‌های مختلف پارامترهای مورد بررسی است. جدول ۴ این ترکیب‌ها را با استفاده از ضرایب شاخص چهار پارامتر قابل کنترل ارائه کرده است. برای نمونه در سطر دوم این مجموعه هندسه‌ای با ترکیب با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر، شعاع انحنای فوقانی ۳ میلی‌متر، قطر بخش مسطح در مقطع بالایی هندسه (انتهای بسته نمونه) ۱۰ میلی‌متر و زاویه نیم‌رأس مخروطی ۱۳ درجه قرار گرفته است. در این جدول، ۱ و ۱- به ترتیب بیان‌گر بیشینه و کمینه هر پارامتر طراحی است. علاوه بر این، در این جدول، اثرات تداخلی پارامترهای ورودی بر یکدیگر شامل اثر دوتایی، سه‌تایی، و چهارتایی برای هر طرح قابل بررسی است که در آن، مقدار مثبت و منفی هر مورد از

فروریزش جاذب‌های انرژی تحت بارگذاری محوری با استفاده از این روش بررسی می‌شود.

۵-۱- انتخاب عوامل کنترلی و غیرکنترلی به‌همراه

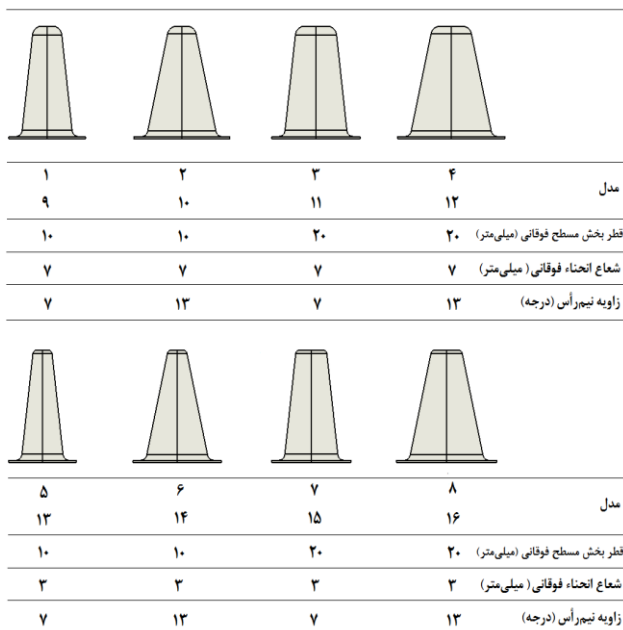
سطوح مربوطه

عوامل کنترلی روش در واقع پارامترهای ورودی و قابل تغییر در مساله هستند که به‌منظور رسیدن به شرایط بهینه در طول آزمایش‌ها برحسب سطوح انتخابی و ماتریس آزمایش‌ها تغییر می‌کنند. عوامل غیرکنترلی نیز به تمامی فاکتورهایی اطلاق می‌شود که باعث ایجاد تغییرات می‌شوند؛ اما برحسب شرایط در طی آزمایش‌ها ثابت فرض می‌گردند.

در روش ارائه‌شده توسط تاگوچی [۲۰] سطوحی از پارامترها که دارای بیشترین مقادیر سیگنال به نویز هستند (بدون توجه به نوع تابع زیان) به‌عنوان سطوح بهینه معرفی می‌شوند. در هر آزمایش تعدادی از متغیرها در اختیار است و با توجه به نیاز آزمایش در حال انجام تغییر داده می‌شود. به‌همین دلیل این متغیرها، متغیرهای قابل کنترل خوانده می‌شوند. عوامل قابل کنترل آن دسته از عواملی هستند که با چرخاندن یک شیر، تغییر جهت یک کلید، تغییر یک قطعه یا کم و زیاد کردن مقدار مواد و یا ... تغییر یابند. متغیرهای غیرقابل کنترل موجب ایجاد اختلال^۱ در فرآیند شده و امکان شناسایی متغیرهای قابل کنترل را کاهش می‌دهند. بنابراین شناسایی این متغیرها نیز دارای اهمیت است و باید نسبت به جمع‌آوری اطلاعات در مورد آنها اقدام شود. یکی از مهم‌ترین عواملی که باعث عدم توفیق روش طراحی آزمایش‌ها می‌شود، عدم شناسایی و جمع‌آوری اطلاعات درباره این نوع متغیرها است. ممکن است تعداد زیادی عوامل یا متغیر ورودی برای یک مساله شناسایی شود. استفاده از تمام پارامترها برای تصمیم‌گیری به تعداد زیاد آزمایش و افزایش هزینه اندازه‌گیری هرکدام از آنها منجر می‌شود که ممکن است فرایندی ناممکن باشد. بنابراین باید تعداد متغیرها را کاهش داد که الویت‌بندی یکی از راه‌هاست.

مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر میزان انرژی جذب‌شده فروریزش محوری پوسته‌های جدارنازک، هندسه است. در این میان پارامترهای دخیل در هندسه برای پوسته جدارنازک مخروطی با انتهای بسته که به‌عنوان شکل منتخب در نظر گرفته شده است [۱۴]، شامل ضخامت پوسته، شعاع انحنای فوقانی، ارتفاع

نیروی میانگین فروریزش نیز حاصل تقسیم انرژی فروریزش بر طول فروریزش است. شکل هندسی طرح‌های جاذب پس از فروریزش نیز در شکل ۶- الف و ب ارائه شده است که در همه موارد تغییر شکل تقریباً متقارن محوری بوده است.



شکل (۵): هندسه جاذب انرژی با تغییر پارامترهای ورودی طراحی آزمایش‌ها.

جدول (۴): ترکیب‌های ممکن از پارامترهای طراحی.

شماره مدل	مقدار پارامترهای طراحی			
	W	Z	Y	X
۱	-۱	-۱	-۱	-۱
۲	۱	-۱	-۱	-۱
۳	-۱	۱	-۱	-۱
۴	۱	۱	-۱	-۱
۵	-۱	-۱	۱	-۱
۶	۱	-۱	۱	-۱
۷	-۱	۱	۱	-۱
۸	۱	۱	۱	-۱
۹	-۱	-۱	-۱	۱
۱۰	۱	-۱	-۱	۱
۱۱	-۱	۱	-۱	۱
۱۲	۱	۱	-۱	۱
۱۳	-۱	-۱	۱	۱
۱۴	۱	-۱	۱	۱
۱۵	-۱	۱	۱	۱
۱۶	۱	۱	۱	۱

حاصل ضرب سطح انتخاب شده برای هر پارامتر در پارامتر دیگر حاصل می‌شود. به‌طور کلی، دریافت اطلاعات در مورد تداخل بین پارامترهای ورودی بسیار مفید است، این امر مشخص می‌کند که چگونه این تداخل‌ها بر اندازه خروجی تاثیر می‌گذارد.

در شکل ۵ نمای دوبعدی هندسه‌های حاصل برای جاذب انرژی با تغییر در ترکیب پارامترهای طراحی آزمایش‌ها (مطابق جدول ۴) نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در این روند، تعداد ۸ طرح با شعاع انحنای فوقانی، قطر بخش فوقانی و زاویه نیم‌رأس مخروط مختلف در دو ضخامت متفاوت (۱/۵ میلی‌متر برای مدل‌های ۱ تا ۸ و ضخامت ۲/۵ برای مدل‌های ۹ تا ۱۶) برای شبیه‌سازی تحت شرایط دینامیکی فروریزش محوری در نظر گرفته شده است. با استخراج نتایج مربوط به این نمونه‌ها، روش طراحی آزمایش‌ها قادر خواهد بود تصمیم‌سازی برای دستیابی به مناسب‌ترین هندسه نمونه را انجام دهد.

۵-۲- شبیه‌سازی مدل‌های طراحی آزمایش

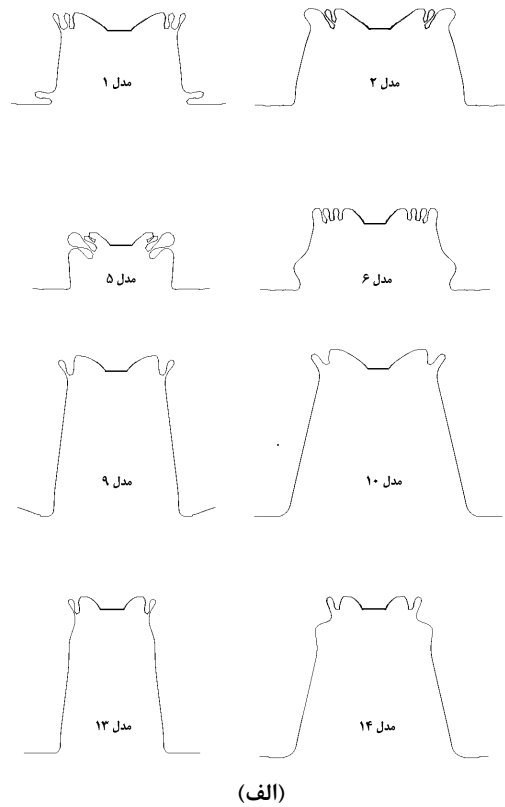
در شبیه‌سازی دینامیکی فروریزش پوسته‌های مخروطی، خواص مکانیکی پوسته مخروطی با نقاط تنش - کرنش پلاستیک آلومینیم ۱۰۵۰ ارائه شده در جدول ۱ در نرم‌افزار المان محدود معرفی شده است. شبیه‌سازی در شرایط دینامیکی برای سرعت برخورد معادل ۵ متر بر ثانیه یک ضربه‌زننده صلب به جرم ۳۱/۲۵ کیلوگرمی در نظر گرفته شده است. لازم به‌ذکر است که مسأله در شرایط سرعت اولیه تا زمان حدود ۱۵ میلی‌ثانیه حل شده و گام‌های زمانی حل از مرتبه حدود ۵۰ نانوثانیه بوده است.

۶- ارائه و بررسی نتایج طراحی آزمایش‌ها

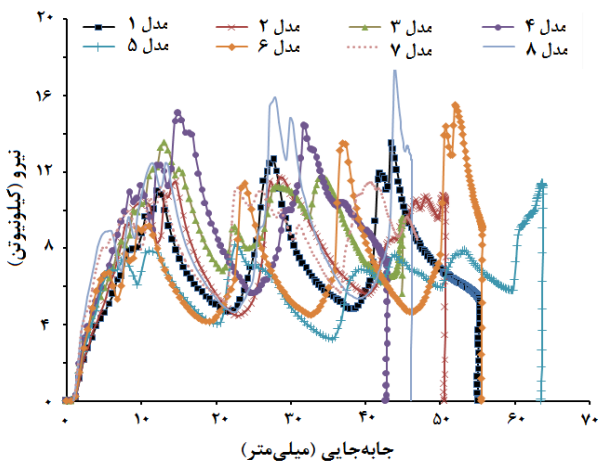
نتایج فروریزش طرح‌های جاذب براساس طراحی آزمایش‌ها تحت بارگذاری دینامیکی در جدول ۵ ارائه شده است. پارامترهای خروجی در این جدول شامل بیشینه طول فروریزش یا جمع‌شدگی ساختار، مقدار نیروی اولیه، مقدار بیشینه نیرو، انرژی جذب شده و متوسط نیروی فروریزش است. لازم به‌ذکر است که انرژی جذب شده در این فرایند برای بیشینه طول فروریزش در نظر گرفته شده است و برای همه نمونه‌ها تقریباً برابر با انرژی اولیه جرم برخوردکننده به‌دست آمده است.

جدول (۵): نتایج فروریزش طرح‌های جاذب تحت بارگذاری دینامیکی.

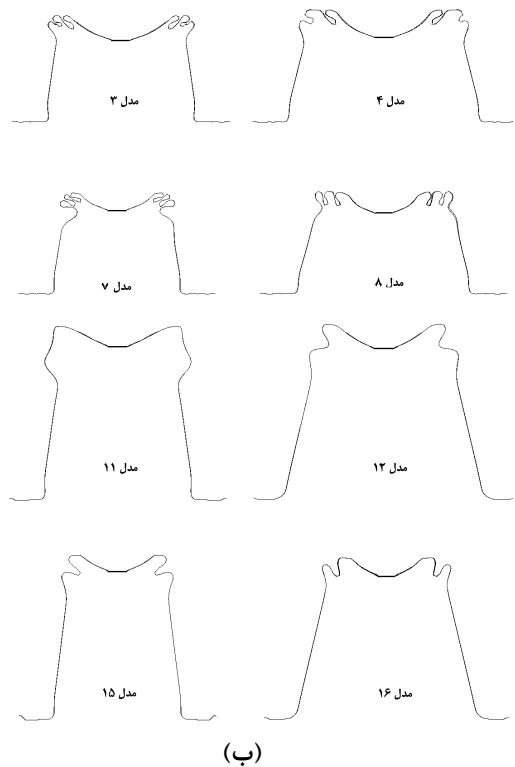
مدل شماره	کوتاه‌شدگی (mm)	نیروی اولیه (kN)	بیشینه نیرو (kN)	میانگین نیرو (kN)	انرژی ویژه (J/gr)
۱	۵۵	۱۱۰	۱۳/۵	۷/۰	۹/۴۶
۲	۵۱	۱۱/۵	۱۱/۷	۷/۶	۷/۴۹
۳	۵	۱۳/۵	۱۳/۵	۸/۶	۷/۱۶
۴	۴۳	۱۱/۳	۱۵/۱	۹/۰	۵/۹۵
۵	۶۴	۷/۸	۱۱/۴	۶/۱	۱۱/۹۷
۶	۵۶	۹/۲	۱۵/۵	۷/۰	۸/۸۵
۷	۴۷	۹/۹	۱۱/۴	۸/۳	۸/۵۷
۸	۴۶	۸/۹	۱۷/۴	۸/۴	۶/۸۳
۹	۲۹	۱۵/۵	۲۰/۴	۱۳/۱	۵/۶۳
۱۰	۲۸	۱۹/۷	۲۲/۷	۱۴/۰	۴/۵۰
۱۱	۲۱	۲۳/۵	۲۶/۵	۱۸/۵	۴/۲۹
۱۲	۲۱	۲۲/۱	۲۹/۴	۱۸/۹	۳/۵۷
۱۳	۳۱	۱۳/۹	۱۸/۲	۱۲/۵	۷/۱۹
۱۴	۳۰	۱۳/۲	۲۲/۰	۱۳/۰	۵/۳۲
۱۵	۲۴	۲۰/۲	۲۱/۷	۱۶/۱	۵/۱۴
۱۶	۲۵	۱۹/۳	۲۴/۷	۱۵/۴	۴/۰۹



نمودار نیرو-جاب‌جایی طرح‌های مختلف جاذب انرژی در شکل ۸-۷ ارائه شده است. آنچه به‌وضوح دیده می‌شود، تفاوت در بیشینه طول فروریزش هر طرح است و ظاهراً بیشترین تأثیر را تغییر ضخامت داشته است. به‌طوری که تفاوت بین کوتاه‌شدگی ۸ مدل اول با ۸ مدل دوم یعنی افزایش ضخامت از ۱/۵ به ۲/۵ میلی‌متر آشکارتر قابل مشاهده است.



شکل (۷): تغییرات نیرو با جاب‌جایی مدل‌ها با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر.



شکل (۶): طرح‌های جاذب انرژی پس از تغییر شکل برای ضخامت الف - ۱/۵ میلی‌متر و ب- ۲/۵ میلی‌متر.

اکنون نیاز است تغییرات پارامترهای خروجی (شامل طول کوتاه‌شدگی، نیروی اولیه، نیروی بیشینه، انرژی جذب‌شده و نیروی متوسط) با توجه به تغییرات سطوح انتخاب‌شده (مقدار +۱ و -۱) محاسبه شود. این امر تحت عنوان شیب تغییر در جدول‌های اشاره‌شده با استفاده از رابطه ذیل محاسبه شده است که در آن، P هریک از پارامترها یا هم‌افزایی آنهاست.

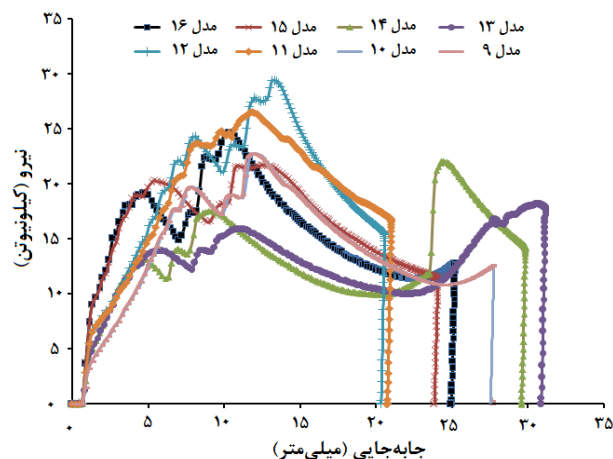
$$\text{شیب} = \frac{P(+1) - P(-1)}{(+1 - (-1))} \quad (1)$$

جدول ۷ شامل مقادیر محاسبه‌شده معیارها برای تاثیرات هم‌زمان دو پارامتری است. در جدول ۸ اثرات تلفیقی سه پارامتری بر معیارها محاسبه و ارائه شده است و در جدول ۹ نیز اثر تغییر هم‌زمان هر چهار پارامتر وجود دارد.

مقدار قدرمطلق شیب تغییرات برای هر معیار خروجی نسبت به تغییر در پارامتر یا مجموعه پارامترهای ورودی در جدول ۱۰ مرتب‌سازی شده است. این جدول نشان می‌دهد که کدام پارامتر یا ترکیب پارامترها در تغییر اندازه معیارهای مورد بررسی بیشترین تاثیر را دارد. براساس نتایج ارائه‌شده در این جدول، ضخامت (عامل X) مؤثرترین پارامتر بر هر چهار معیار مورد بررسی بوده است. پس از این عامل، شعاع انحناى فوقانی (عامل Y) بر نیروی اولیه اثرگذارتر است و قطر بخش مسطح فوقانی بر سه معیار میزان جمع‌شدگی، نیروی بیشینه و نیروی میانگین اثرگذارتر بوده است. در رتبه سوم اثرگذاری، اثر بیشتر عامل شعاع انحناى فوقانی بر میزان جمع‌شدگی و میانگین نیروی اثرگذار بوده است درحالی‌که زاویه نیم‌راس عامل اثرگذار بر نیروی بیشینه است. در انتهای فهرست، اثر هم‌زمان تغییرات چهار پارامتری بر نتایج قرار دارد که ظاهراً کمترین شدت اثرگذاری را داشته است. این موضوع به این معناست که به دلیل اختلاط آثار پارامترها، تغییر هم‌زمان هر چهار پارامتر نتیجه مشخص و قابل لمسی بر معیارهای طراحی نخواهد داشت. همین مقادیر در جدول ۱۱ با لحاظ علامت مثبت یا منفی ارائه شده است.

جداول ۱۰-۱۱ حاوی اطلاعات ارزشمندی از فرایند طراحی فروریزش جاذب انرژی تحت بارگذاری محوری است که مهم‌ترین موارد آن به شرح زیر بیان می‌شود:

الف- افزایش شعاع انحناى بالایی (افزایش در ضریب Y) بیشترین اثر را در کاهش نیروی میانگین دارد. به عبارت دیگر این عامل در کاهش شتاب متوسط توقف جرم متحرک موثرتر از سایر عوامل بوده است، ب- ضخیم‌تر شدن دیواره (تغییر



شکل (۸): تغییرات نیرو با جابه‌جایی مدل‌ها با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر.

با استفاده از مقادیر معیارهای محاسبه‌شده، میانگین مقداری معیارهای خروجی تحت تأثیر پارامترهای ورودی و همچنین اثرات توأمان آنها با یکدیگر قابل بررسی است. به عبارت دیگر، در این فرایند، پس از محاسبه هریک از پارامترهای خروجی برای طرح‌های جاذب، میانگین آنها براساس سطوح بیشینه و کمینه پارامتر ورودی محاسبه می‌شود. نتایج میانگین پارامترهای خروجی تحت تأثیر پارامترهای ورودی و همچنین اثر تلفیقی آنها با یکدیگر در جداول ۶-۹ ارائه شده است. برای نمونه در قسمت اول جدول ۶ میانگین مقادیر محاسبه‌شده معیارهای کوتاه‌شدگی، نیروی اولیه، نیروی بیشینه و نیروی میانگین برای تمام نمونه‌های دارای مقدار ضخامت ۱/۵ میلی‌متر (معادل با $X = -1$) و برای تمام نمونه‌های دارای ضخامت ۲/۵ میلی‌متر (معادل با $X = +1$) ارائه شده است و شیب تغییرات این معیارها به‌ازای تغییر این پارامتر محاسبه شده است. به همین ترتیب اثرات تغییر پارامترهای انحناى فوقانی، قطر بخش مسطح فوقانی و زاویه نیم‌راس نیز در این جدول ارائه شده است. مقادیر منفی در سطر شیب تغییر نشان می‌دهد که به‌ازای تغییر پارامتر از وزن -۱ به وزن +۱ کاهش در مقدار معیار اندازه‌گیری شده رخ داده است. با توجه به اطلاعات موجود در جدول ۴ مقدار منفی به معنی کاهش مقدار معیار با افزایش پارامتر خواهد بود. شایان ذکر است که، برای معیارهای در نظر گرفته‌شده، با توجه به اهداف طراحی به نظر می‌رسد افزایش کوتاه‌شدگی و کاهش در نیروی اولیه و نیروی بیشینه به دلیل اثر کاهش بر میزان شتاب اعمالی به جرم متحرک مطلوب و دارای الویت است.

جدول (۷): نتایج میانگین پارامترهای خروجی تحت اثر

هم‌زمان دو پارامتر ورودی.

پارامتر	کوتاه‌شدگی (m)	نیروی اولیه (N)	بیشینه نیرو (N)	میانگین نیرو (N)
$XY = -1$	۰/۰۳۸۸۹	۸۸/۱۴۵۸۵	۱۶/۱۹۳۳۹	۷۷/۱۱۷۸۶
$XY = +1$	۰/۰۳۸۰۲	۱۳/۱۴۲۵۰	۵۲/۱۷۵۳۷	۵۱/۱۱۱۸۲
شیب تغییر	-۰/۰۰۰۴۴	-۸۸/۱۶۷	-۸۲/۹۰۰	-۱۳/۳۰۲
$XZ = -1$	۰/۰۳۷۳۹	۱۳۲۴۹/۶۳	۱۷۵۸۴/۹۳	۱۰۸۸۲/۱۵
$XZ = +1$	۰/۰۳۹۵۳	۱۵۵۸۶/۳۸	۱۹۲۹۱/۷۶	۱۲۰۸۷/۱۳
شیب تغییر	۰/۰۰۱۰۷	۱۱۶۸/۳۸	۸۵۳/۴۱	۶۰۲/۴۹
$XW = -1$	۰/۰۳۷۶۴	۱۴۵۸۱/۳۸	۱۸۲۹۳/۳۷	۱۱۵۴۱/۲۹
$XW = +1$	۰/۰۳۹۲۷	۱۴۵۸۴/۶۳	۱۸۵۸۳/۳۲	۱۱۴۲۷/۹۹
شیب تغییر	۰/۰۰۰۸۱	۱۶۶/۶۳	۱۴۴/۹۷	-۵۶/۶۵
$YZ = -1$	۰/۰۳۸۷۳	۱۴۲۲۹/۱۰	۱۸۹۶۴/۷۰	۱۱۷۰۴/۴۸
$YZ = +1$	۰/۰۳۸۱۸	۱۴۵۰۷/۱۰	۱۷۹۲۹/۹۹	۱۱۲۶۴/۸۰
شیب تغییر	-۰/۰۰۰۲۸	۸۹/۱۰۰	-۵۰/۳۵	-۲۱۹/۸۴
$YW = -1$	۰/۰۳۸۴۸	۱۴۵۷۳/۵۰	۱۷۶۹۹/۹۱	۱۱۵۷۵/۷۱
$YW = +1$	۰/۰۳۸۴۳	۱۴۲۶۲/۵۰	۱۹۱۷۶/۷۸	۱۱۳۹۳/۵۷
شیب تغییر	-۰/۰۰۰۰۳	-۱۵۵/۵۰	۷۳۸/۴۴	-۹۱/۰۷
$ZW = -1$	۰/۰۳۷۶۰	۱۵۱۰۲/۲۵	۱۸۱۳۴/۹۷	۱۱۶۵۶/۵۴
$ZW = +1$	۰/۰۳۹۳۱	۱۳۷۳۳/۷۵	۱۸۷۴۱/۷۲	۱۱۳۱۲/۷۴
شیب تغییر	۰/۰۰۰۸۵	-۶۸۴/۲۵	۳۰۳/۳۷	-۱۷۱/۹۰

جدول (۸): نتایج میانگین پارامترهای خروجی تحت اثر

هم‌زمان سه پارامتر ورودی.

پارامتر	کوتاه‌شدگی (m)	نیروی اولیه (N)	بیشینه نیرو (N)	میانگین نیرو (N)
$XYZ = -1$	۰/۰۳۷۷۰	۱۴۲۶۱/۶۳	۱۸۷۵۹/۸۰	۱۱۷۸۶/۹۵
$XYZ = +1$	۰/۰۳۹۲۲	۱۴۵۷۴/۳۸	۱۸۱۱۶/۸۹	۱۱۱۸۲/۲۳
شیب تغییر	۰/۰۰۰۷۶	۱۵۶/۳۸	-۳۲۱/۴۵	-۳۰۲/۳۱
$XYW = -1$	۰/۰۳۸۲۰	۱۴۸۲۶/۱۳	۱۸۹۸۷/۲۵	۱۱۵۷۴/۵۹
$XYW = +1$	۰/۰۳۸۷۲	۱۴۰۰۹/۸۸	۱۷۸۸۹/۴۳	۱۱۳۹۴/۶۹
شیب تغییر	۰/۰۰۰۲۶	-۴۰۸/۱۳	-۵۴۸/۹۱	-۸۹/۹۵
$XZW = -1$	۰/۰۳۸۸۶	۱۴۴۸۰/۶۳	۱۸۷۸۵/۲۳	۲۳/۱۱۵۲۴
$XZW = +1$	۰/۰۳۸۰۶	۱۴۳۵۵/۳۸	۱۸۰۹۱/۴۶	۹۵/۱۱۴۳۴
شیب تغییر	-۰/۰۰۰۴۰	-۶۲/۶۳	-۳۴۶/۸۹	-۶۹/۴۹
$YZW = -1$	۰/۰۳۸۰۶	۱۴۰۶۷/۲۵	۱۸۶۱۶/۵۱	۱۱۵۶۷/۲۱
$YZW = +1$	۰/۰۳۸۸۵	۱۳۷۶۸/۷۵	۱۸۲۶۰/۱۷	۱۱۴۰۲/۰۷
شیب تغییر	-۰/۰۰۰۳۹	۳۵۰/۷۵	-۱۷۸/۱۷	-۸۲/۵۷

جدول (۹): نتایج میانگین پارامترهای خروجی تحت اثر

هم‌زمان چهار پارامتر ورودی.

پارامتر	کوتاه‌شدگی (m)	نیروی اولیه (N)	بیشینه نیرو (N)	میانگین نیرو (N)
$XYZW = -1$	۰/۰۳۸۶۹	۱۴۱۰۴/۸۸	۱۸۴۳۱/۳۱	۱۱۴۹۹/۱۴
$XYZW = +1$	۰/۰۳۸۲۲	۱۴۷۳۱/۱۳	۱۸۴۴۵/۳۸	۱۱۴۷۰/۱۴
شیب تغییر	-۰/۰۰۲۰۳	۳۱۳/۳	۷/۰۳	-۱۴/۵۰

افزایشی در ضریب (X) بیشترین اثر افزایشی را بر نیروی میانگین، نیروی بیشینه و نیروی اولیه و در نتیجه بر انرژی قابل جذب دارد. این پارامتر در عین حال سبب کاهش بازدهٔ لهیدگی (نسبت طول لهیده‌شده به طول کل) می‌شود، ج- افزایش قطر در بخش مسطح فوقانی (بزرگ‌تر شدن ضریب Z)، اثر افزایشی قابل توجه بر نیروی میانگین و سایر نیروها دارد و سبب افزایش شتاب کاهنده سرعت شده است. به‌عبارت دیگر، افزایش این عامل شوک پیش از توقف را بحرانی‌تر می‌کند و از این جهت در راستای اهداف طراحی ساختار این جاذب نیست، د- افزایش در زاویهٔ نیم‌رأس بخش مخروطی (بزرگ‌تر شدن ضریب W) اثر افزایشی بر نیروهای میانگین و بیشینه و اثر کاهشی بر نیروی اولیه دارد. به‌عبارت دیگر افزایش این زاویه و دهانه بازتر شدن مخروط قابلیت جذب انرژی را افزایش داده است و در عین حال شتاب کاهنده اولیه برخورد را کم‌تر می‌کند که امری مطلوب است و ه- از سوی دیگر تداخل هم‌زمان چهار پارامتر ورودی شامل ضخامت، زاویهٔ نیم‌رأس، قطر بخش مسطح فوقانی و شعاع انحناى فوقانی (ضریب XYZW) اثر قابل توجهی بر پارامترهای خروجی فروریزش ندارد و به‌نظر می‌رسد پارامترها اثر یک‌دیگر را خنثی می‌کنند.

بر این اساس برای دستیابی به بهترین شرایط، افزایش شعاع انحناى فوقانی و زاویه نیم‌رأس و کوچک‌تر شدن بخش مسطح بالایی و ضخامت تا جای ممکن پیشنهاد می‌شود. با این حال شایان ذکر است که افزایش زاویه نیم‌راس معادل با افزایش اختلاف قطر پایینی و بالایی است.

جدول (۶): نتایج فروریزش طرح جاذب تحت بارگذاری

دینامیکی.

پارامتر	کوتاه‌شدگی (m)	نیروی اولیه (N)	بیشینه نیرو (N)	میانگین نیرو (N)
$X = -1$	۰/۰۵۰۸۱	۱۰۳۹۰/۳۸	۱۳۶۷۹/۸۰	۷۶۴۷/۲۲
$X = +1$	۰/۰۲۶۱۰	۱۸۴۴۵/۶۳	۲۳۱۹۶/۸۹	۱۵۲۰۲/۱۵
شیب تغییر	-۰/۰۱۲۳۵	۴۰۲۷/۶۳	۴۷۵۸/۵۵	۳۷۱۷/۶۱
$Y = -1$	۰/۰۳۶۵۸	۱۶۰۲۲/۲۵	۱۹۰۹۳/۸۲	۱۲۱۰۶/۰۸
$Y = +1$	۰/۰۴۰۳۴	۱۲۸۱۳/۷۵	۱۷۷۸۲/۸۶	۱۰۸۶۳/۲۰
شیب تغییر	۰/۰۰۱۸۸	-۱۶۰۴/۲۵	-۶۵۵/۴۸	-۶۲۱/۴۳
$Z = -1$	۰/۰۴۲۹۳	۱۲۷۳۴/۷۵	۱۶۹۲۰/۵۴	۱۰۰۵۵/۰۶
$Z = +1$	۰/۰۳۳۹۸	۱۶۱۰۱/۲۵	۱۹۹۵۶/۱۴	۱۲۹۱۴/۲۲
شیب تغییر	-۰/۰۰۴۴۷	۱۶۸۳/۲۵	۱۵۱۷/۸۰	۱۴۲۹/۵۸
$W = -1$	۰/۰۳۹۵۵	۱۴۴۴۳/۵۰	۱۷۰۶۸/۹۷	۱۱۲۸۸/۶۳
$W = +1$	۰/۰۳۷۳۶	۱۴۳۹۲/۵۰	۱۹۸۰۷/۷۲	۱۱۶۸۰/۶۵
شیب تغییر	-۰/۰۰۱۰۹	-۲۵/۵۰	۱۳۶۹/۳۷	۱۹۶/۰۱

مدل عددی از یک هندسه جدارنازک مشابه در شرایط شبه‌استاتیکی ایجاد و رفتار فروریزش آن در برابر اعمال بار محوری شبیه‌سازی شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از آزمون عملی نشان داد شبیه‌سازی نتایجی با مطابقت مناسب با واقعیت ارائه می‌کند و استفاده از آن در تحلیل پارامتری توجیه‌پذیر و قابل قبول است.

۸- مراجع

- Alexander, J.M. "An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells Under Axial Loading", Quarterly J. Mechanics and Applied Mathematics., Vol. 13, pp. 11-16, 1960.
- Grzebieta, R.H. "An Alternative Method for Determining the Behavior of Round Stocky Tubes Subjected to Axial Crush Loads", Thin-Walled Struct., Vol. 9, pp. 66-89, 1990.
- Gupta, N.K. "Some Aspect of Axial Collapse of Cylindrical Thin-Walled Tubes", Thin-Walled Struct., Vol. 32, pp. 111-26, 1998.
- Feli, S. and Shokri, A. "Dynamic Progressive Buckling of Square Tubes under Axial Impact Loadings", Aerospace Mech. J., Vol. 5, No. 4, pp. 53-65, 2010 (in Persian).
- Gupta, N.K., Prasad Easwara, G.L. and Gupta, SK. "Plastic Collapse of Metallic Conical Frusta of Large Semi-Apical Angles", Int. J. Crashworthiness, Vol.2, pp. 349-66, 1997.
- Gupta, N.K., Venkatesh, "Experimental and Numerical Studies of Impact Axial Compression of Thin-Walled Conical Shells", Int. J. Impact Eng., Vol. 34, pp. 708-20, 2007.
- Mohamed Sheriffa, N., Gupta, N.K., Velmurugan, R. and Shanmugapriyan, N. "Optimization of Thin Conical Frusta for Impact Energy Absorption", Thin-Walled Struct., Vol. 46, pp. 653-66, 2008.
- Ahmad, Z. and Thambiratnam, D.P. "Crushing Response of Foam-Filled Conical Tubes under Quasi-Static Axial Loading", Materials and Design, Vol. 30, pp. 2393-403, 2009.
- Acar, E, Guler, M.A., Gerceker, B., Cerit, M.E. and Bayram, B. "Multi-objective Crashworthiness Optimization of Tapered Thin-Walled Tubes with Axisymmetric Indentations", Thin-Walled Struct., Vol.49, pp. 94-105, 2011
- Ghamarian, A. and Abadi, M.T. "Axial Crushing Analysis of End-capped Circular Tubes", Thin-Walled Struct., Vol. 49, pp. 743-52, 2011.
- Ghamarian, A., Zarei, H.R., Abadi, M.T. "Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-Filled End-Capped Conical Tubes", Thin-Walled Struct., Vol. 49, pp. 1312-9, 2011
- Ghamarian, A. and Zarei, H.R. "Crashworthiness Investigation of Conical and Cylindrical End-

جدول (۱۰): شیب تغییر پارامترهای خروجی تحت اثر تغییر در پارامترهای ورودی بدون لحاظ اثر علامت.

جمع‌شدگی (mm)	نیروی اولیه (N)	بیشینه نیرو (N)	میانگین نیرو (N)				
XYZW	۱۳/۰	XW	۳/۵	XYZW	۱۴		
YW	۱۳/۰	XYZW	۱۴۱	XZW	۴۹		
XYW	۱۶/۰	XW	۱۷۲	XYZ	۵۶		
XY	۳۴/۰	YW	۱۹۸	XZW	۸۲		
YZ	۳۸/۰	XYW	۳۲۶	YZW	۸۹		
YZW	۴۹/۰	YZ	۳۵۹	YW	۹۱		
XZW	۵۰/۰	XYW	۴۰۰	ZW	۱۷۱		
XYZ	۶۶/۰	ZW	۴۵۱	W	۱۹۶		
ZW	۷۵/۰	XZ	۷۰۴	YZ	۲۱۹		
XW	۹۱/۰	Y	۸۰۳	XY	۳۰۲		
W	۹۹/۰	YW	۸۸۶	XYZ	۳۰۲		
XZ	۱۱۱/۷	XY	۱۰۴۹	XZ	۶۰۲		
Y	۱۱۹۸	W	۱۲۳۰	Y	۶۲۱		
Z	۴۳۷	Z	۱۳۶۹	Z	۱۴۲۹		
X	۱۲/۴۵	X	۴۹۰۷	X	۳۷۱۷		

جدول (۱۱): شیب تغییر پارامترهای خروجی تحت اثر تغییر در پارامترهای ورودی با اثر علامت.

جمع‌شدگی (mm)	نیروی اولیه (N)	بیشینه نیرو (N)	میانگین نیرو (N)				
X	-۱۲/۴۵	Y	-۱۸۶۸	XY	-۱۰۴۹	Y	-۶۲۱
Z	-۴/۳۷	XY	-۴۳۲	Y	-۸۰۳	XYZ	-۳۰۲
W	-۰/۹۹	ZW	-۴۱۹	XYW	-۴۰۰	XY	-۳۰۲
XZW	-۰/۵۰	W	-۲۸۹	YZ	-۳۵۹	YZ	-۲۱۹
YZ	-۰/۳۸	XYW	-۱۴۳	YZW	-۳۲۶	ZW	-۱۷۱
XY	-۰/۲۴	XW	-۹۷	XZW	-۱۹۸	YW	-۹۱
XYZW	-۰/۱۳	XYZW	۴۸	XYZ	۱۷۲	XYW	-۸۹
YW	-۰/۱۳	YZW	۸۶	XYZW	۱۴۱	YZW	-۸۲
XYW	-۰/۱۶	YW	۱۰۸	XW	-۳/۵	XW	-۵۶
YZW	-۰/۴۹	XZW	۲۰۱	ZW	۴۵۱	XZW	-۴۹
XYZ	-۰/۶۶	YZ	۳۵۳	XZ	۷۰۴	XYZW	-۱۴
ZW	-۰/۷۵	XYZ	۴۲۰	YW	۸۸۶	W	۱۹۶
XW	-۰/۹۱	XZ	۹۰۳	W	۱۲۳۰	XZ	۶۰۲
XZ	۱/۱۷	Z	۱۴۱۸	Z	۱۳۶۹	Z	۱۴۲۹
Y	۱/۹۸	X	۴۲۹۲	X	۴۹۰۷	X	۳۷۱۷

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با هدف بهینه‌سازی رفتار جاذب برای انتقال حداقل شتاب کاهنده سرعت به سازه و سرنشین از روش طراحی آزمایش‌ها استفاده شد. چهار پارامتر هندسی برای المان جاذب مخروطی با انتهای بسته انتخاب شد و اثرات تغییر آنها در دو سطح برای برخورد دینامیکی یک جرم دارای سرعت اولیه به جاذب در راستای محوری مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج این بررسی، ضخامت بیشترین تاثیر را در رفتار سازه فروریزشی دارد؛ اما از نظر کارایی تغییرات افزایشی پارامتر شعاع انحنای فوقانی انتخاب کاملاً مؤثری است. همچنین، با هدف تایید مدل عددی ساخته شده و شبیه‌سازی انجام‌گرفته

- Capped Tubes under Quasi Static Crash Loading”, *Int. J. Crashworthiness*, Vol. 17, pp. 19-28, 2012.
13. Ghamarian, A., Zarei, H.R., Farsi, M.A. and Ariaeifar N. “Crashworthiness Investigation of the Empty and Foam-Filled Conical Tube with Shallow Spherical Caps”, *Strain*, Vol. 49, pp. 199–211, 2013.
 14. Ghamarian, A. and Farsi, M.A. “Experimental and Numerical Analysis of Collapse Behavior of Combined Thin Walled Structures under Axial Loading”, *Aerospace Mech. J.*, Vol.8, No.1, pp.99-109, 2012 (in Persian).
 15. Zarei, H.R. and Ghamarian, A. “Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-Filled Thin-Walled Circular Tubes with Shallow Spherical Caps”, *Experimental Mechanics*, Vol.54, pp. 115-26, 2014.
 16. Ghamarian, A., Fazilati, J. and Ariaeifar, N. “Numerical Simulation of Collapse of Thin-Walled Axisymmetric Elements under Axial Loading”, 13th Iranian Aerospace Conference, Tehran University, 2014 (in Persian).
 17. Abbasi, M., Reddy, S., Ghaffari-Nazari, A. and Fard, M. “Multiobjective Crashworthiness Optimization of Multi-Cornered Thin-Walled Sheet Metal Members” *Thin-Walled Struc.*, Vol.89, pp. 31-41, 2015.
 18. Fazilati, J. and Ghamarian, A. “A Study of Conical Thin-Walled Element Quasi Static Collapse with Extra Constraint”, 13th Iranian Aerospace Conference, Tehran University, 2014 (in Persian)
 19. Naddaf Oskouei, A., Khodarahmi H. and Rezvani M. “Dynamic Progressive Buckling of Circular Tubes under High Speed Axial Impact Loadings”, *Aerospace Mech. J.*, Vol. 9, No. 4 , pp. 17-33, 2014 (in Persian).
 20. Ross, P.J. “Taguchi Techniques for Quality Engineering, Second Ed.”, McGraw-Hill, 1996.