



مطالعه رفتار فروریزش سازه‌های مخروطی چند سلولی و بهینه‌سازی آن‌ها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

سجاد پیرمحمد^{۱*} و سبحان اسماعیلی مرزداشتی^۲

^۱ استادیار، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

^۲ کارشناس ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۱۸

چکیده

در تحقیق حاضر، رفتار لهیدگی سازه‌های مخروطی چند سلولی تحت بارگذاری دینامیکی محوری بررسی شده است. این سازه‌ها مخروطی از دو جداره داخلی و بیرونی تشکیل شده است که توسط چند صفحه تقویتی به همدیگر متصل شده‌اند. سازه‌های مذکور در پنج نوع سطح مقطع مربعی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی، ده‌ضلعی و دایروی، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. قبل از انجام شبیه‌سازی‌های عددی، رفتار لهیدگی سازه‌های مذکور با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس-داین، نتایج عددی با نتایج آزمایش‌های تجربی صحت‌سنجی شدند. پس از حصول اطمینان از درستی مدل اجزاء محدود ایجادشده، شاخص‌های جذب انرژی ویژه (SEA) و بیشینه نیروی لهیدگی (F_{max}) برای همه سازه‌ها جهت پیدا کردن بهترین سازه از نقطه نظر عملکرد جذب انرژی محاسبه شدند. در ادامه با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، مقادیر بهینه ابعاد سازه‌های مذکور (شامل زاویه مخروط (θ) و نسبت اندازه جداره داخلی به اندازه جداره بیرونی (S)) به دست آورده شدند. سپس از میان سازه‌های بهینه‌شده، بهترین سازه به کمک روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس انتخاب گردید. نتایج نشان داد که سازه مخروطی دایروی دارای بهترین عملکرد با پارامترهای طراحی $\theta=3.94^\circ$ و $S=0.578$ بوده، بنابراین به عنوان بهترین جاذب انرژی معرفی گردیده است. در پایان اثر تورفتگی قسمت داخلی سازه (جداره داخلی و تقویتی) بررسی شد و نتایج نشان داد که تورفتگی جداره داخلی نتیجه مناسب‌تری دارد.

کلمات کلیدی: سازه مخروطی چند سلولی؛ بارگذاری دینامیکی محوری؛ شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک؛ روش تاپسیس.

Study on the Collapse Behavior of Multi-Cell Conical Structures and Their Optimization Using Artificial Neural Networks

S. Pirmohammad^{1,*}, S. Esmaili Marzdashti²

¹ Assist. Prof., Mech. Eng., Mohaghegh Ardabili Univ., Ardabil, Iran.

² M.Sc. Student, Mech. Eng., Mohaghegh Ardabili Univ., Ardabil, Iran.

Abstract

In the present research, the collapse behavior of multi-cell conical structures has been studied under axial dynamic loading. These conical structures consisted of two inner and outer walls which have been connected together by several plates as stiffeners. These structures were assumed to have five different cross-sections of square, hexagonal, octagonal, decagonal and circular. Before performing the numerical simulations using LS-DYNA, the numerical results were validated by experimental results. After ensuring correctness of the created finite element models, indicators of SEA and F_{max} were then computed for all the structures to find the best structure from the crashworthiness point of view. The artificial neural networks and genetic algorithm methods were used to obtain the optimized dimensions of the mentioned structures including θ (cone angle) and S (ratio of the inner wall size to the outer wall one). Among the optimized structures, the best structure was selected using the decision making method called TOPSIS. The multi-cell conical structure with circular cross-section having dimensions of $S=0.578$ and $\theta=3.94^\circ$, was found to perform the best in terms of crashworthiness capability. Effect of triggers (inner wall and stiffeners) was finally studied, and the results revealed that the triggering by inner wall had a suitable result.

Keywords: Multi-cell Conical Structure; Axial Dynamic Loading; Artificial Neural Networks and Genetic Algorithm; Optimization; TOPSIS Method

۱- مقدمه

لهیدگی و برخورد، شاخه‌ای از علم مکانیک ضربه است که واکنش قطعات مختلف را در برابر ضربات وارده (که توسط این قطعات جهت کاهش آسیب صورت می‌گیرد) مشخص می‌سازد. نمونه‌هایی از آن را می‌توان در صنایع خودرو، ریلی، هواپیما و هوافضا مشاهده کرد. افزایش تقاضا جهت ارتقا امنیت در وسایل نقلیه و مباحث مربوط به عملکرد فروریزش سازه‌ها باعث شده تا مجموعه تحقیقات منسجمی روی سازه‌های جاذب انرژی با مقاطع و جنس‌های مختلف صورت گیرد. این مطالعات شامل، تحقیقات تجربی و عددی روی سازه‌های با مقاطع دایروی، مربعی، مستطیلی و غیره [۹-۱۱] می‌باشند. حسینی و همکاران [۱۰] با انجام تحلیل‌های گسترده تجربی و عددی، تأثیر پارامترهای هندسی (ضخامت و ارتفاع سازه)، تنش تسلیم و شرایط مرزی را روی میزان نیروی لهیدگی سازه‌های چهارگوش بررسی کرده‌اند. زمانی و همکاران [۱۱]، با انجام تحقیقی روی سازه‌های چهارگوش، اثر تعداد ردیف سازه و ضخامت را بررسی کرده، دریافتند که تعداد ردیف سازه رابطه مستقیمی با جذب انرژی سازه داشته، دو برابر کردن ضخامت نیز، باعث افزایش ۴/۷ برابر جذب انرژی می‌شود. حسینی تهرانی و پیرمحمد [۱۲]، میزان جذب انرژی سازه‌های تک جداره مستقیم با مقاطع چندضلعی (مربعی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی و دایروی) را در حالت‌های بارگذاری محوری و مایل بررسی کرده، مشاهده کردند که مقاطع هشت‌ضلعی دارای پتانسیل زیادی جهت جذب انرژی تصادفات می‌باشند. ابراهیم‌ویج و جونز^۱ [۱۴-۱۳] جاذب‌های انرژی مربعی ساخته شده از فولاد را بررسی کرده، مکانیزم‌های چین‌خوردگی متقارن و نامتقارن را در فرایند لهیدگی مشاهده کردند. لنگس و هپورستد^۲ [۱۵]، جاذب‌های انرژی مربعی و دایروی را تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی مورد مطالعه قرار داده، نتیجه گرفتند که نیروی لهیدگی میانگین در حالت بارگذاری استاتیکی، بزرگ‌تر از حالت بارگذاری دینامیکی است؛ همچنین مکانیزم لهیدگی در مقاطع مربعی و دایروی مشابه هم می‌باشند. دامغانی نوری و همکاران [۱۶]، جاذب‌های استوانه‌ای ساخته شده از ورق-

های مشبک تحت بارگذاری محوری را مطالعه کرده، نتایج آن‌ها نشان داده است که ورق‌های مشبک به دلیل دارا بودن وزن کم و مکانیزم فروریزش کارآمد، دارای ظرفیت جذب انرژی بالایی هستند. در تحقیق دیگری، آذرخش و همکاران [۱۷]، رفتار لهیدگی و پاسخ انرژی جذب‌شده لوله‌های استوانه‌ای برنجی را با استفاده از آزمایش و مدل اجزاء محدود غیرخطی بررسی کردند. آن‌ها در این تحقیق، اثر پارامترهای مهم مانند، عیوب هندسی (گرادیان ضخامت و تغییر شکل موجی) شرایط مرزی، زاویه نیم رأس، زاویه برخورد، تقویت‌کننده‌های چند سلولی ستونی و سرعت برخورد را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه، به‌وضوح مزیت استفاده از لوله‌های استوانه‌ای برنجی را به‌عنوان جاذب انرژی بیان می‌کند. اخیراً، شجاعی‌فرد و همکاران [۱۸]، اثر پارامترهای مختلف هندسی و برخورد را روی رفتار لهیدگی پانل جانبی پلتفرم خودرو ملی، مورد تحلیل قرار داده‌اند.

تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهند که سازه‌های چند سلولی جدار نازک با احتساب وزنشان، دارای ظرفیت جذب انرژی قابل قبولی می‌باشند [۲۱-۱۹]. کیو و همکاران^۳ [۲۱]، پیرمحمد و اسماعیلی [۲۲] و پیرمحمد و همکاران [۲۳]، سازه‌های مستقیم را به‌صورت تک جداره و چند جداره بررسی کرده، دریافتند که سازه چند جداره کارآمدتر از سازه تک جداره است. نجفی و رئیس روحانی [۲۴] تحقیقاتی را جهت درک بهتر رفتار فروریزش سازه‌های جدار نازک چند سلولی تحت بارگذاری شبه استاتیکی انجام دادند و دریافتند که این سازه‌های چند سلولی، دارای عملکرد فروریزش مناسب‌تری نسبت به سازه‌های تک جداره مرسوم می‌باشند. حسینی-تهرانی و پیرمحمد [۲۵] کارهای عددی روی رفتار جذب انرژی سازه‌های جدار نازک دولایه آلومینیومی را تحت بارگذاری محوری و مایل انجام دادند و نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که سازه‌های جدار نازک دولایه، دارای رفتار لهیدگی بهتری نسبت به سازه‌های تک‌لایه جدار ضخیم است. از طرف دیگر، تحقیقات وسیعی نیز روی سازه‌های جدار نازک پر شده با فوم مانند فوم متالیکی [۲۷-۲۶] و پلیمری [۲۹-۲۸] انجام شده است. ژنگ و چنگ^۴ [۳۰] با انجام

³ Qiu et al⁴ Zhang and Cheng¹ Abramowicz and Jones² Langseth and Hopperstad

تقویتی به هم متصل شده‌اند. ابعاد هندسی این سازه‌ها با روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک بهینه شده و سپس بهترین سازه از نقطه نظر قابلیت جذب انرژی با استفاده از روش تصمیم‌گیری تاپسیس تعیین شده است.

۲- مدل‌سازی در نرم‌افزار ال‌اس-داین

در این تحقیق، رفتار لهیدگی سازه‌های مخروطی با سطح مقاطع مختلف مربعی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی، ده ضلعی و دایروی نشان داده شده در شکل ۱-الف و ۱-ب تحت بارگذاری دینامیکی محوری در نرم‌افزار اجزاء محدود ال‌اس-داین، مورد تحلیل قرار گرفته است. برای درک بهتر هندسه این سازه‌های مخروطی، برش طولی برای سطح مقطع دایروی در شکل ۱-ج نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که سازه‌های مخروطی بررسی شده در این تحقیق، از دو جداره داخلی و بیرونی تشکیل شده است که توسط چند صفحه تقویتی به همدیگر متصل شده‌اند. محیط جداره بیرونی در انتهای بزرگ برای کلیه سازه‌ها و همچنین تعداد صفحات تقویت‌کننده آن‌ها یکسان و به ترتیب برابر ۳۲۰ میلی‌متر و ۴ فرض شده است. همچنین طول و ضخامت این سازه‌ها یکسان و به ترتیب برابر با ۲۵۰ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که محدوده سرعت برخورد در بارگذاری‌های دینامیکی طبق پژوهش‌های انجام شده توسط محققان، بین ۰/۵ متر بر ثانیه تا ۵۰ متر بر ثانیه و برای جرم برخورد بین ۲۰ کیلوگرم تا ۸۰۰ کیلوگرم است. در پژوهش حاضر، جهت اعمال بار دینامیکی محوری از یک مکعب صلب با وزن ۵۰۰ کیلوگرم استفاده شد که با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به سازه‌های مذکور برخورد کرده، موجب لهیدگی ۸۰ درصد طول کل آن‌ها (۲۰۰ میلی‌متر) می‌شود (شکل ۱-الف را ببینید). شرایط مرزی به این صورت است که در قسمت برخورد با دیوار صلب مذکور کاملاً آزاد و انتهای دیگر سازه‌ها به یک مکعب صلب و ثابت، متصل و در همه جهتها مقید شده است. از روابط المان پوسته‌ای چهار گوش با پنج نقطه انتگرال‌گیری در راستای ضخامت برای کلیه سازه‌ها استفاده شده است. به‌منظور تشخیص اندازه المان مناسب در شبکه‌بندی سازه‌ها، تحلیل‌های همگرایی انجام گرفت؛ بنابراین اندازه آن‌ها برابر ۲×۲ میلی‌متر به دست آمد.

شبهه‌سازی‌های عددی نشان داده‌اند که بازدهی جذب انرژی سازه‌های چند سلولی حدود ۵۰ تا ۱۰۰ درصد بیشتر از سازه‌های پرشده با فوم هستند.

علاوه بر سازه‌های مستقیم، تحقیقات مختلفی نیز در سال‌های اخیر روی سازه‌های مخروطی شکل انجام شده است. برای مثال، ندف اسکویی و همکاران [۳۱] رفتار فروریزش و جذب انرژی پوسته‌های جدار نازک سرپسته مخروطی را به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند. حسینی‌تهرانی و پیرمحمد [۳۲]، رفتار جذب انرژی سازه نیم مخروطی با سطح مقطع مستطیلی را در حالت‌های بارگذاری محوری و مایل بررسی کرده، مشاهده کردند که سازه‌های مخروطی دارای پتانسیل زیادی جهت جذب انرژی تصادفات در مقایسه با سازه‌های مستقیم می‌باشند. آذرخش و همکاران [۳۳]، رفتار فروریزش سازه‌های مخروطی توخالی و تقویت شده با فوم را تحت بارگذاری محوری و مایل بصورت تجربی و عددی بررسی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که فوم تأثیر مثبتی در افزایش جذب انرژی دارد. در تحقیق دیگری، هنفنگ و همکاران^۱ [۳۴] حضور فوم در سازه‌های مخروطی دایروی و میزان جذب انرژی آن‌ها را مطالعه کرده، دریافتند که فوم باعث افزایش استحکام این سازه‌ها می‌شود. پیرمحمد و همکاران [۳۵]، اخیراً رفتار لهیدگی سازه‌های مخروطی دو سلولی با مقاطع مختلف را بررسی کرده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که حضور ورق تقویتی در افزایش جذب انرژی، بسیار حائز اهمیت است. نگال و تامبیراتمان^۲ [۳۶] رفتار جذب انرژی سازه‌های مستقیم و مخروطی تک جداره را با هم مقایسه کرده، بر بهتر بودن سازه‌های مخروطی صحنه گذاشته‌اند.

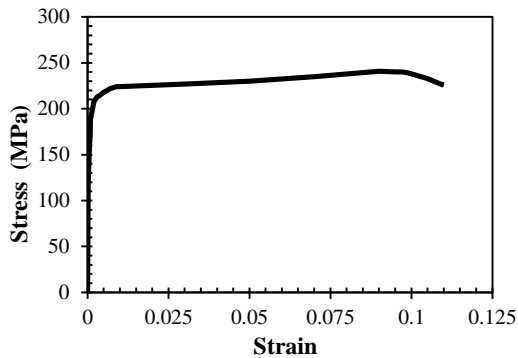
با مروری بر تحقیقات انجام شده در گذشته مشخص است که اغلب این تحقیقات روی سازه‌های مستقیم و مخروطی یک‌سلولی یا چند سلولی ساده بوده است. در تحقیق حاضر، رفتار جذب انرژی طرح جدید سازه‌های چند سلولی مخروطی با مقاطع مربعی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی، ده‌ضلعی و دایروی تقویت‌شده با صفحات داخلی تحت بارگذاری دینامیکی محوری، مورد بررسی قرار گرفته است. در حقیقت، این سازه‌ها دو جداره بوده که توسط صفحات

^۱ Hanfeng et al

^۲ Nagel and Thambiratnam



(الف)



(ب)

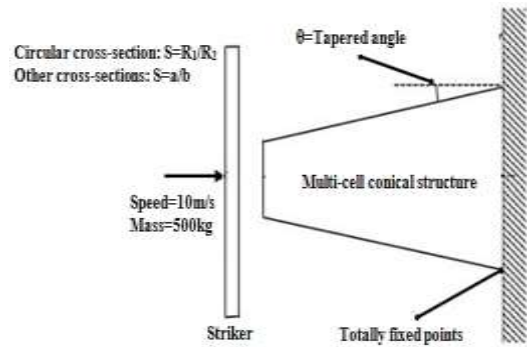
شکل ۲- الف) دستگاه آزمایش کشش و ب) نمودار تنش-کرتش آلیاژ آلومینیم AA6060 به دست آمده از آزمایش کشش

به شماره 024 با عنوان مدل پلاستیسیته خطی اصلاح شده بوده است. همچنین رفتار ماده مذکور در ناحیه الاستیک و پلاستیک حاصل از آزمایش کشش در شکل ۲ نشان داده شده است.

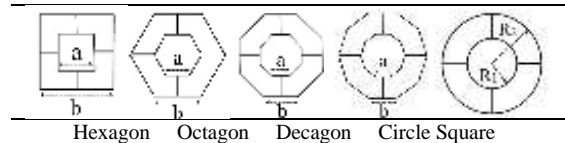
۳- صحت‌سنجی مدل‌سازی‌های عددی

جهت اطمینان از درستی نتایج تحلیل‌های عددی صورت-گرفته در نرم‌افزار ال‌اس-داینه، ابتدا آزمایش فروریزش شبه-استاتیکی^۱ (فشاری و محوری) روی سازه‌های دوجداره

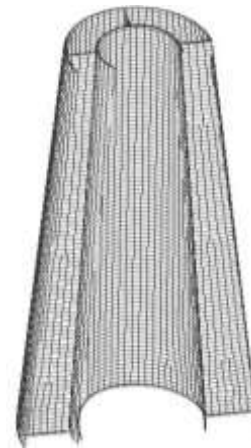
^۱ Quasi Static Loading



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱- الف) سازه مخروطی چند سلولی و مشخصات بارگذاری دینامیکی، ب) شکل سطح مقاطع و ج) برش طولی سازه مخروطی دایروی

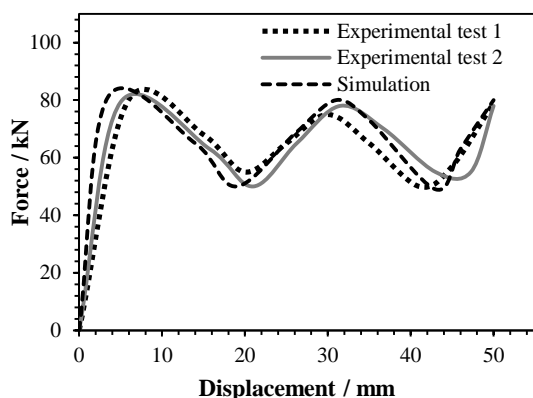
جهت تعریف تماس بین صفحه‌های صلب با سازه‌ها، قید تماسی سطح به سطح به کار گرفته شد، همچنین از قید تماسی اتوماتیک جهت جلوگیری از فرورفتن سازه در خودش استفاده شد. جنس ماده سازه‌های بررسی شده عبارت است از آلیاژ آلومینیم AA6060 که خواص مکانیکی آن به این صورت است: چگالی برابر ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت پوواسون برابر ۰/۳۳، مدول یانگ برابر ۶۸ گیگاپاسگال، تنش تسلیم برابر ۲۱۴ مگاپاسگال و استحکام کششی نهایی برابر ۲۴۱ مگاپاسگال است. کد ماده استفاده شده در نرم افزار



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳- الف) دستگاه آزمایش یونیورسال برای له کردن سازه‌ها (ب) الگوی تغییر شکل و (ج) نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی

دایروی با استفاده از دستگاه آزمایش یونیورسال نشان داده شده در شکل ۳-الف انجام گرفت. این دستگاه دارای دو قسمت فک بالایی و پایینی است که پس از گذاشتن نمونه آزمایشگاهی (سازه دوجداره دایروی) روی فک پایینی، صفحه صلب بالایی دستگاه به صورت کنترل جابجایی با سرعت ثابت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه به سمت پایین تغییر موقعیت داده، باعث فروریزش نمونه می‌شود. بدین ترتیب آزمایش لهیدگی سازه مذکور تحت بارگذاری شبه استاتیکی و محوری پس از گذاشتن نمونه روی فک پایینی دستگاه آزمایش یونیورسال و با حرکت رو به پایین فک بالایی صورت گرفت. سازه دوجداره دایروی مذکور دارای نسبت شعاع جداره داخلی به شعاع جداره بیرونی ۰/۵، شعاع جداره بیرونی ۲۳/۵ میلی‌متر، طول ۶۷ میلی‌متر و ضخامت ۱/۹ میلی‌متر بوده است. برای صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود، نتایج عددی می‌بایست حتی‌الامکان به نتایج تجربی نزدیک بوده، با آن تطابق داشته باشد تا مدلی دقیق و درست برای شبیه‌سازی فرایند لهیدگی در سازه‌ها بدست آید. در ادامه، سازه دوجداره مذکور در نرم‌افزار ال‌اس-داینا، مشابه شرایط آزمایش، مدل‌سازی و تحلیل گردید. شکل ۳-ب و شکل ۳-ج نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود شامل، الگوی سازه لهیده شده، منحنی نیرو-جابجایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است، سازه دوجداره دایروی لهیده شده حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی از نظر تعداد چین‌ها و شکل لهیدگی مشابه بوده، همچنین نمودار نیرو-جابجایی حاصل از نتایج تجربی و عددی شبیه هم می‌باشند. لذا می‌توان گفت که نتایج تحلیل‌های عددی تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایش تجربی دارند. لازم به ذکر است که جهت استفاده از نتایج تحلیل لهیدگی تحت بارگذاری شبه استاتیکی در تحلیل‌های عددی دینامیکی، تأثیر متغیرهای اینرسی و نرخ کرنش در حالت دینامیکی نیز بایستی لحاظ شود. با توجه به اینکه مواد آلومینیومی (که در این تحقیق استفاده شده است) حساسیت ناچیزی به نرخ کرنش دارند، لذا تأثیر نرخ کرنش قابل صرف نظر کردن است؛ بنابراین، تنظیمات مربوط به متغیرهای اینرسی در مدل‌سازی‌های دینامیکی صورت گرفته در تحقیق حاضر اعمال شده است.

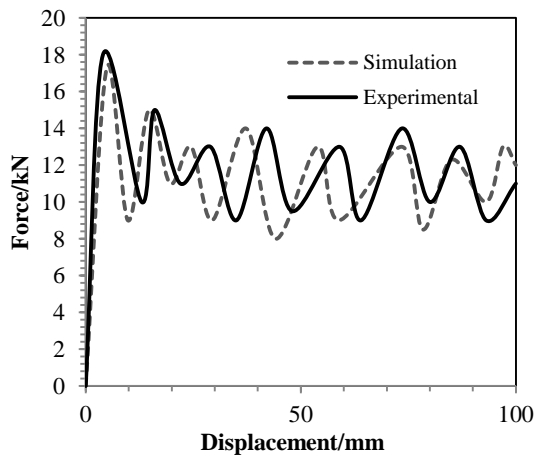


(الف)

آزمایش دینامیکی ال-اس-داینا



(ب)



(ج)

شکل ۴- الف) دستگاه سقوط آزاد چکش برای اعمال بارهای دینامیکی، ب) الگوی تغییر شکل و ج) نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی

جهت اطمینان بیشتر از درستی مدل‌سازی رفتار لهیدگی سازه‌ها در این تحقیق، آزمایش تجربی دیگری روی سازه مربعی تحت بارگذاری دینامیکی محوری انجام گرفت و در ال-اس-داینا شبیه‌سازی شد. شکل ۴-الف، دستگاه سقوط آزاد چکش^۱ برای اعمال بارگذاری دینامیکی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، یک جسم صلب با جرم ۱۱۰ کیلوگرم و ارتفاع ۲ متر به سمت سازه مورد آزمایش (سازه مربعی)، رها شده، موجب لهیدگی آن می‌شود. لازم به ذکر است که سرعت جسم صلب در لحظه برخورد به سازه مربعی، معادل ۱۳ متر بر ثانیه بوده است. دستگاه ضربه مذکور به یک دستگاه کامپیوتر متصل است که می‌توان رفتار لهیدگی سازه‌ها را استخراج کرد. ابعاد سازه مربعی ۳۰×۳۰ میلی‌متر به ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۸ میلی‌متر بوده است. شکل ۴-ب و شکل ۴-ج، نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در ال-اس-داینا را نمایش می‌دهد. مشخص است که نتایج الگوی سازه لهیده شده، منحنی نیرو-جابجایی به هم نزدیک می‌باشند؛ بنابراین می‌توان از مدل اجزاء محدود ایجاد شده در ال-اس-داینا برای شبیه‌سازی رفتار فروریزش سازه‌ها با سطح دقت قابل قبولی استفاده کرد.

۴- شاخص‌های فروریزش

جهت ارزیابی قابلیت جذب انرژی سازه‌های بررسی شده در این تحقیق، دو شاخص جذب انرژی ویژه (SEA) و بیشترین نیروی لهیدگی (F_{max}) به کار گرفته شده است. جذب انرژی ویژه به عنوان یک شاخص کلیدی برای اندازه‌گیری انرژی جذب شده توسط سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که توسط رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$SEA = \frac{EA}{m} = \frac{\int_0^{\delta} F(x) dx}{m} \quad (1)$$

در این رابطه، $F(x)$ نیروی لهیدگی لحظه‌ای در راستای محوری بوده، δ میزان جابجایی صفحه صلب برخورد کننده به سازه‌ها است که در این تحقیق برابر ۲۰۰ میلی‌متر فرض شده است. همچنین m برابر با جرم سازه است. شاخص بعدی بیشینه نیروی لهیدگی (F_{max}) بوده که در واقع بیشترین مقدار $F(x)$ است و یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای ایمنی

^۱ Free Fall Drop Hammer Machine

مرحله پنجم: بدست آوردن میزان فاصله هر گزینه تا ایده‌ال مثبت (S_i^+) و منفی (S_i^-)

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (6)$$

مرحله ششم: تعیین ضریب نزدیکی به هر یک از گزینه‌ها (C_i) :

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (7)$$

۶- بهینه‌سازی چند هدفه سازه‌های مخروطی چند

سلولی

یک شبکه عصبی مصنوعی، از سه لایه ورودی، خروجی و پردازش تشکیل می‌شود. هر لایه شامل، گروهی از سلول‌های عصبی (نورون) است که عموماً با کلیه نورون‌های لایه‌های دیگر در ارتباط هستند، مگر این که کاربر ارتباط بین نورون‌ها را محدود کند؛ ولی نورون‌های هر لایه با سایر نورون‌های همان لایه، ارتباطی ندارند. نورون کوچک‌ترین واحد پردازشگر اطلاعات است که اساس عملکرد شبکه‌های عصبی را تشکیل می‌دهد. یک شبکه عصبی، مجموعه‌ای از نورون‌هاست که با قرار گرفتن در لایه‌های مختلف، معماری خاصی را بر مبنای ارتباطات بین نورون‌ها در لایه‌های مختلف تشکیل می‌دهند. نورون می‌تواند یک تابع ریاضی غیرخطی باشد، در نتیجه یک شبکه عصبی که از اجتماع این نورون‌ها تشکیل می‌شود، نیز می‌تواند یک سامانه کاملاً پیچیده و غیرخطی باشد. در شبکه عصبی هر نورون به طور مستقل عمل می‌کند و رفتار کلی شبکه، برآیند رفتار نورون‌های متعدد است. به عبارت دیگر، نورون‌ها در یک روند همکاری، یکدیگر را تصحیح می‌کنند. نمودار جریان فرایند مسئله بهینه‌سازی صورت گرفته در تحقیق حاضر، در شکل ۵ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که شاخص‌های جذب انرژی ویژه (SEA) و بیشینه نیروی لهیدگی (F_{max}) برای مقایسه عملکرد لهیدگی سازه‌های مخروطی چند سلولی نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شده است. در فرایند مذکور، سعی می‌شود که SEA بیشینه و F_{max} (بدلیل مضر بودن مقدار این پارامتر بر سرنشینان) کمینه شوند. همچنین دو پارامتر طراحی S (نسبت اندازه جداره داخلی به اندازه

سرنشینان وسایل نقلیه محسوب می‌شود. کاهش سرعت (شتاب منفی در لحظه برخورد) باعث افزایش مقدار F_{max} شده، در ارزیابی قابلیت جذب انرژی سازه‌ها به عنوان عامل منفی شناخته می‌شود؛ بنابراین سازه با عملکرد بهتر، بایستی دارای بیشترین مقدار SEA و کمترین مقدار F_{max} باشد.

۵- روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس

به منظور انتخاب سازه با بهترین عملکرد فروریزش از میان سازه‌های مورد بررسی، روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس به کار گرفته شده است. روش تاپسیس، یکی از روش‌های قدرتمند در زمینه انتخاب بهترین گزینه (وقتی معیار انتخاب بیش از یک مورد وجود داشته باشد) از میان گزینه‌های مورد بررسی است. این روش برای انتخاب بهترین گزینه با وجود چند معیار مختلف، بطور گسترده توسط محققان استفاده می‌شود [۳۲-۳۳]. در تحقیق حاضر دو معیار SEA و F_{max} که در رفتار لهیدگی سازه‌ها عکس هم می‌کنند، در انتخاب سازه با عملکرد فروریزش بهتر لحاظ شده است. مراحل اجرای این روش در زیر آورده شده است.

مرحله اول: ایجاد ماتریس تصمیم‌گیری برای رتبه‌بندی شامل، m معیار به عنوان سطر ماتریس و n گزینه به عنوان ستون آن:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

مرحله دوم: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad (3)$$

مرحله سوم: در این مرحله وزن هر یک از فاکتورها مشخص می‌شود. در این راستا فاکتورهای دارای اهمیت بیشتر، از وزن بالاتری برخوردارند. در واقع ماتریس V_{ij} حاصل ضرب مقادیر استاندارد هر فاکتور در اوزان مربوط به خود است.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & \dots & w_n r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ w_1 r_{21} & \dots & w_n r_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

مرحله چهارم: تعیین راه حل ایده‌ال مثبت (A^+) و ایده‌ال منفی (A^-):

$$A^+ = \{(\max v_{ij} | j \in J), (\min v_{ij} | j \in J')\}$$

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$$

$$A^- = \{(\min v_{ij} | j \in J), (\max v_{ij} | j \in J')\}$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (5)$$

هایی از نورون‌های پنهان است که لایه‌های قبلی و بعدی را بهم متصل می‌کنند [۳۵]. انواع مختلفی از روش شبکه عصبی مصنوعی وجود دارد که می‌توان به دو نوع^۱ MLP و KSOFM^۲ اشاره کرد. در این تحقیق، از روش MLP برای آموزش شبکه بین داده‌های ورودی و خروجی استفاده شده است که مراحل طراحی آن به قرار زیر است:

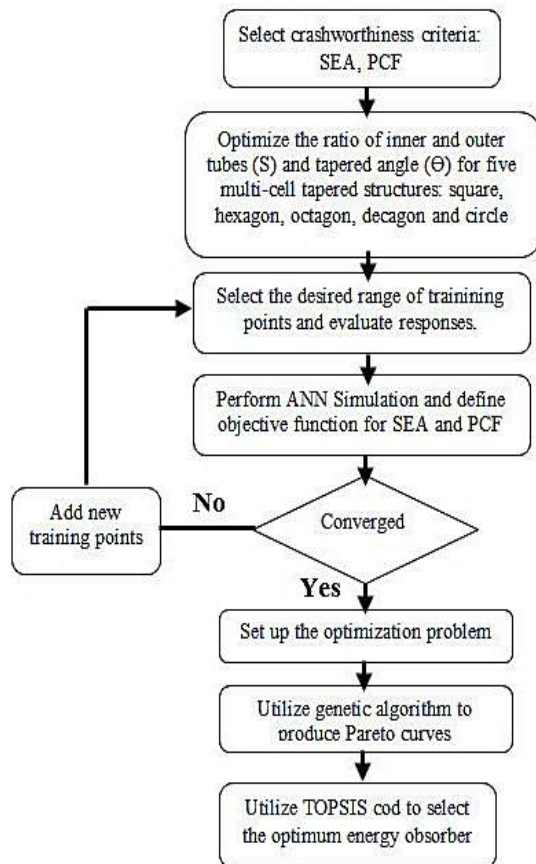
- مشخص نمودن داده‌های ورودی و خروجی به عنوان داده‌های پایه‌ای. داده‌های ورودی شامل، پارامترهای طراحی S (نسبت اندازه جداره داخلی به اندازه جداره بیرونی در محدوده $0.3 \leq S \leq 0.75$ و θ (زاویه مخروط در محدوده $2^\circ \leq \theta \leq 8^\circ$) می‌باشند. داده‌های خروجی نیز شامل، شاخص‌های لهیدگی جذب انرژی ویژه (SEA) و بیشینه نیروی لهیدگی (F_{max}) برای سازه‌های مخروطی چند سلولی با مقاطع مربعی، شش ضلعی، هشت ضلعی، ده ضلعی و دایروی تحت بارگذاری دینامیکی محوری می‌باشند (جدول ۱ را ببینید).

شایان ذکر است که یکی از مراحل مهم ایجاد شبکه عصبی مصنوعی، آموزش دادن این شبکه است. ساز و کار این مرحله به این صورت است که ابتدا سازه با ابعاد مشخصی (در محدوده پارامترهای طراحی) در ال‌اس-داینما شبیه‌سازی شده، شاخص‌های لهیدگی استخراج می‌گردد. این داده‌های ورودی و خروجی در ایجاد و ساخت شبکه استفاده شده تا اینکه بتواند شاخص‌های لهیدگی را برای مقادیر دیگر پارامترهای طراحی نیز پیش‌بینی کند. بر این اساس، تعدادی سازه با ابعاد مشخص در محدوده پارامترهای طراحی انتخاب گردید و در ال‌اس-داینما مورد تحلیل قرار گرفتند که در جدول ۱ نتایج آمده است. در ادامه، از داده‌های این جدول جهت ساخت شبکه‌های عصبی استفاده شده است.

- بی‌بعد کردن داده‌های خروجی (شاخص‌های لهیدگی جذب انرژی ویژه و بیشینه نیروی لهیدگی)، به طوری که عدد بزرگ‌تر برابر ۱ و عدد کوچک‌تر برابر ۱- شود و همچنین تقسیم‌بندی داده‌ها برای آموزش دادن شبکه و صحت‌سنجی. در این مطالعه از ۷۰٪ داده‌های جدول ۱

جداره بیرونی) و θ (زاویه مخروط) در مسئله بهینه‌سازی لحاظ شده است. محدوده لحاظ شده این پارامترهای طراحی، در رابطه ۸ آمده است. یادآوری می‌شود که یک جاذب انرژی خوب دارای ظرفیت جذب انرژی ویژه بالا و مقدار بیشینه نیروی لهیدگی کمتری است که این شرایط نیز در مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است.

$$2^\circ \leq \theta \leq 8^\circ \text{ \& } 0.3 \leq S \leq 0.75 \quad (8)$$



شکل ۵- نمودار جریان مسئله بهینه‌سازی سازه‌های مخروطی چند سلولی

برای انجام مسئله بهینه‌سازی، نیاز به تعیین توابع هدف (که ارتباط بین پارامترهای طراحی به عنوان ورودی و شاخص‌های لهیدگی به عنوان خروجی را مشخص می‌کند) است. شبکه عصبی مصنوعی، یک روش قدرتمند جهت تعیین توابع هدف است [۳۴]. همچنان که ذکر گردید، به طور کلی شبکه عصبی مصنوعی دارای سه لایه یعنی یک لایه از نورون‌های ورودی، یک لایه از نورون‌های خروجی و لایه-

¹ Multi-layer perceptron

² Kohonen self-organizing feature map

حل ساده جهت ارضای همه توابع هدف وجود ندارد. در تحقیق حاضر، از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه برای بهینه کردن پارامترهای طراحی θ و S مربوط به سازه‌های مخروطی چند سلولی با مقاطع مربعی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی، ده ضلعی و دایروی استفاده شده است. شکل ۷، نمودارهای پارتو به دست آمده از تلفیق روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک برای مقاطع بررسی شده را نشان می‌دهد. این نمودارها که بصورت SEA (شاخص سودمند) در برابر F_{max} (شاخص غیرسودمند) رسم شده‌اند، در حقیقت نقاط ایده‌آل، عملکرد بین هدف‌ها را نمایش می‌دهند که هر نقطه متناظر با مقادیر بهینه پارامترهای طراحی θ و S است. جهت یافتن بهترین نقطه از مجموعه نقاط مشخص شده در نمودارهای پارتو، از روش تاپسیس استفاده شده است که با پیاده‌سازی این روش، نقاط بهینه (P_{1-5}) برای پنج سطح مقطع بررسی شده، معرفی شده است (جدول ۲). شایان ذکر است که در پیاده‌سازی روش تاپسیس، وزن شاخص SEA برابر $0/6$ و شاخص F_{max} برابر $0/4$ در نظر گرفته شده است که آن هم به دلیل اهمیت بیشتر شاخص سودمند جذب انرژی ویژه در مسائل عملکرد جذب انرژی سازه‌ها است. نتایج نقاط بهینه که در جدول ۲ آورده شده است، نشان می‌دهد که با افزایش تعداد اضلاع سطح مقطع از مربعی تا دایروی، مقادیر زاویه مخروط θ و S (بطور کلی) کاهش می‌یابد. مشخصات نقاط بهینه تعیین شده برای مقاطع مختلف، شامل مقادیر θ و S و شاخص‌های SEA و F_{max} در جدول ۲ ارائه شده است. به منظور ارزیابی دقت نقاط پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی-الگوریتم ژنتیک، تحلیل‌های ال‌اس-داینای برای سازه‌های با ابعاد بهینه‌شده انجام گرفت که نتایج در جدول ۲ آورده شده است. در ادامه، این نتایج با یکدیگر مقایسه شده که درصد خطای آن‌ها نیز، در جدول مذکور ارائه شده است. مشاهده می‌شود که این خطا زیر 1% بوده که نشان از دقت بالای روش الگوریتم ژنتیک-شبکه عصبی ساخته شده است.

برای آموزش دادن شبکه و از 30% مابقی برای صحت-سنجی شبکه ساخته‌شده، استفاده گردیده است. شایان ذکر است که برای آموزش دادن شبکه از الگوریتم تکراری Levenberg-Marquardt استفاده شده است [۳۵].

- مشخص نمودن تعداد لایه‌ها، نورون‌ها و ارتباط آن‌ها. در شبکه ساخته شده یک لایه ورودی، دو لایه مخفی (هر کدام با تعداد ۷ نورون و به صورت لگاریتمی^۱ و تانژانتی^۲) و یک لایه خروجی (با یک نورون به صورت تابع خطی^۳) تعریف شده است. قابل ذکر است که برای هر خروجی یک شبکه بصورت جدا طراحی شده است. به عبارت دیگر، برای هر سطح مقطع به دلیل داشتن دو خروجی (SEA, F_{max}) دو شبکه و برای همه سطح مقاطع بررسی شده، ده شبکه ساخته شده است.
- ارزیابی عملکرد شبکه ساخته شده توسط میانگین مربعات خطا (MSE^4) طبق رابطه (۹) است:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2 \quad (9)$$

که در آن Y'_i نتایج حاصل از ال‌اس-داینای، Y_i نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی ساخته شده، n تعداد داده‌ها (در اینجا ۱۶ عدد) را نشان می‌دهد. جهت صحت‌سنجی شبکه ساخته شده، میزان خطای مربعات (MSE) برای همه مقاطع محاسبه، در شکل ۶ ارائه شده است. از این شکل واضح است که شبکه‌های ساخته شده دارای دقت بسیار خوبی بوده، بنابراین می‌توان از شبکه‌های ساخته شده برای پیش‌بینی شاخص‌های خروجی با تغییر مقادیر پارامترهای طراحی استفاده کرد.

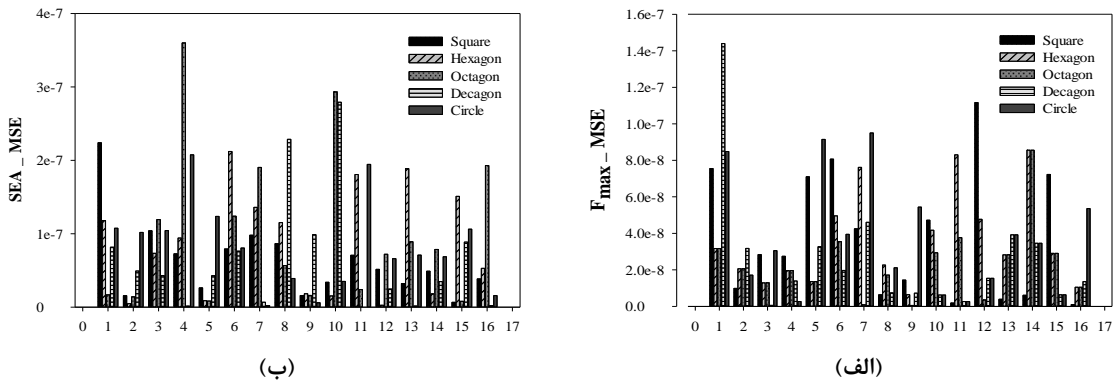
پس از ساختن شبکه عصبی MLP آموزش دیده جهت پیش‌بینی داده‌ها، اینک می‌توان تابع هدف بیشینه را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه به دست آورد. منظور از چند هدفه بودن بهینه‌سازی، تعداد شاخص‌های مطرح شده در مسئله بهینه‌سازی است. این شاخص‌ها عموماً عکس یکدیگر عمل می‌کنند؛ بطوری که ممکن است، بهبود یک هدف باعث بدتر شدن هدف دیگر شود؛ بنابراین یک راه-

¹ Logarithmic Sigmoids

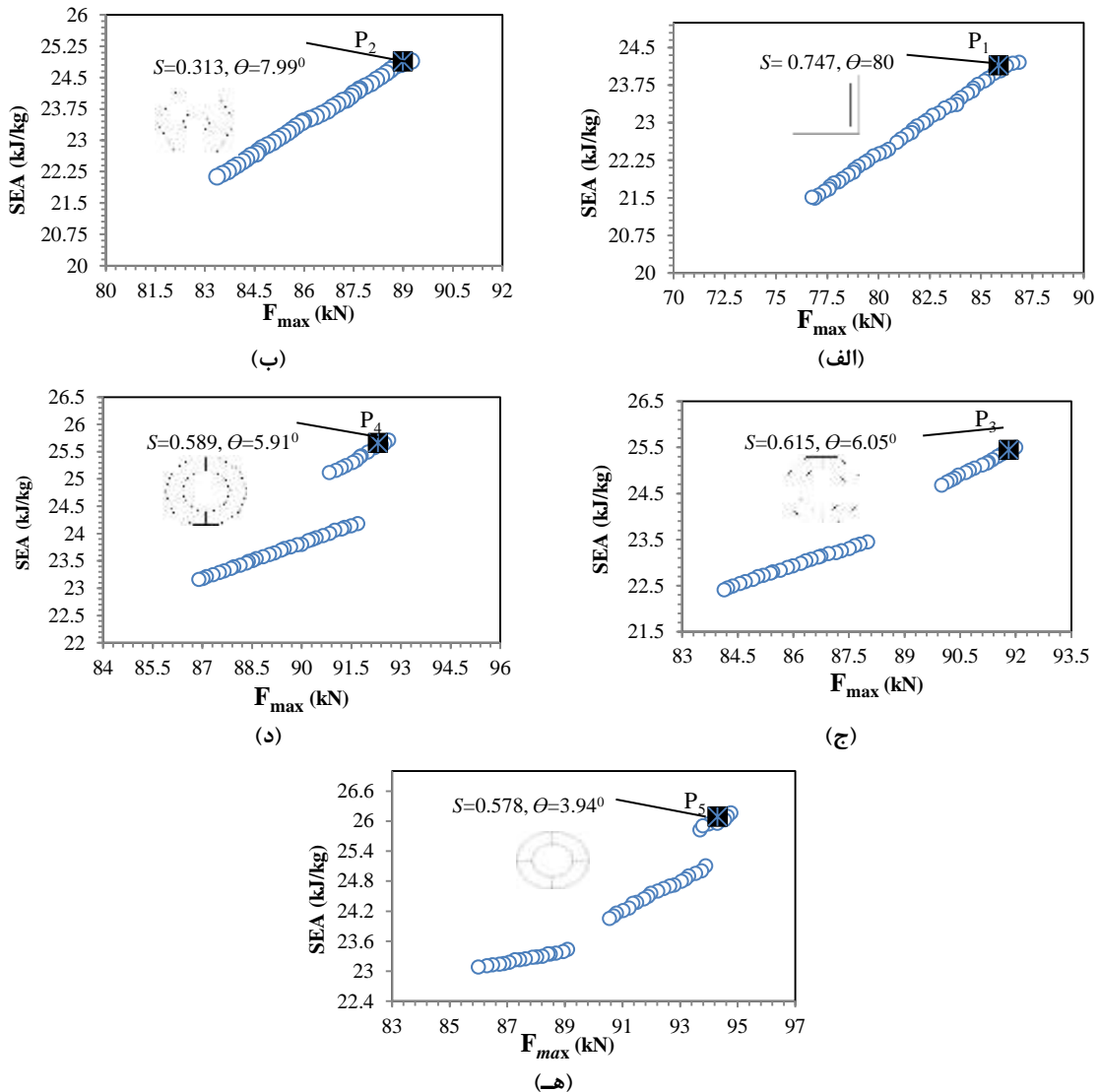
² Hyperbolic Tangent

³ Linear Function

⁴ Mean Square Error



شکل ۶- میانگین مربعات خطا (MSE) محاسبه شده برای سازه‌های مخروطی با مقاطع مختلف؛ الف) F_{max} و ب) SEA



شکل ۷- نمودارهای پارتو برای سازه‌های مخروطی چند سلولی با سطح مقطع‌های الف) مربعی، ب) شش ضلعی، ج) هشت ضلعی، د) ده ضلعی و ه) دایروی

جدول ۱- نتایج عددی سازه‌های مخروطی با مقاطع مختلف (و با مقادیر مختلف θ و S) استفاده شده در الگوریتم آموزش شبکه عصبی مصنوعی

شماره آزمایش	پارامتر θ	پارامتر S	مربعی		شش ضلعی		هشت ضلعی		ده ضلعی		دایروی	
			F_{max}	SEA	F_{max}	SEA	F_{max}	SEA	F_{max}	SEA	F_{max}	SEA
۱	۲	۰/۳	۲۱/۹۱	۱۱۲/۹۸	۲۲/۲۱	۱۱۵/۵۵	۲۲/۴۷	۱۱۶/۶۸	۲۳/۱۳	۱۱۷/۸۹	۲۳/۲۲	۱۱۷/۳۳
۲	۲	۰/۴۵	۲۰/۳۳	۱۰۶/۸۷	۲۰/۳۱	۱۱۰/۸۶	۲۲/۶۷	۱۱۴/۷۱	۲۳/۸۸	۱۱۴/۲۶	۲۳/۷۴	۱۱۳/۸۲
۳	۲	۰/۶	۲۰/۰۲	۹۸/۸۵	۱۸/۰۱	۱۰۶/۲۳	۲۳/۱۹	۱۱۳/۲۸	۲۴/۴۳	۱۱۳/۴	۲۴/۰۵	۱۰۹/۸۳
۴	۲	۰/۷۵	۲۱/۹۴	۱۱۲/۰۲	۲۱/۶۸	۱۱۶/۵۷	۲۰/۷۹	۱۱۴/۵۹	۲۱/۹	۱۱۵/۵۵	۲۱/۹۲	۱۱۱/۹۱
۵	۴	۰/۳	۲۲/۱۹	۹۸/۴۳	۲۲/۵	۱۰۳/۴۲	۲۲/۶۶	۱۰۳/۹۴	۲۳/۵۹	۱۰۹/۰۸	۲۴/۱۶	۱۰۱/۴۶
۶	۴	۰/۴۵	۲۰/۴۷	۹۳/۶۳	۲۰/۷۵	۹۵/۸۶	۲۲/۸۸	۱۰۰/۲۹	۲۴/۱۲	۱۰۷/۵۶	۲۴/۸۳	۱۰۰/۰۴
۷	۴	۰/۶	۱۸/۷۷	۸۵/۷۱	۱۸/۴	۸۹/۶۵	۲۳/۴۷	۹۸/۴۳	۲۴/۴۶	۱۰۵/۲۳	۲۶/۱۳	۹۶/۷۷
۸	۴	۰/۷۵	۱۸/۶۲	۱۰۲/۱۳	۲۲/۳۳	۱۰۶/۲	۲۱/۱۶	۱۰۸/۱۹	۲۲/۳۱	۱۰۶/۸۷	۲۴/۲۹	۹۹/۳۹
۹	۶	۰/۳	۲۲/۷۸	۹۱/۶۱	۲۳/۲۹	۹۴/۶۳	۲۴/۰۳	۹۷/۵۱	۲۴/۵۸	۹۹/۴۷	۲۲/۹۸	۹۷/۲۲
۱۰	۶	۰/۴۵	۲۰/۷۲	۸۱/۹۸	۲۱/۰۱	۸۶/۸۱	۲۴/۴۹	۹۵/۳۶	۲۴/۷۴	۹۶/۰۵	۲۴/۰۶	۹۰/۵۵
۱۱	۶	۰/۶	۱۹/۷۳	۸۷/۹۲	۱۹/۱۱	۸۰/۱۹	۲۵/۳۸	۹۱/۵۴	۲۵/۷۱	۹۲/۶۳	۲۵/۱۷	۹۳/۸۹
۱۲	۶	۰/۷۵	۲۲/۶۴	۸۸/۹۶	۲۳/۸۳	۹۹/۲۵	۲۲/۳۳	۹۴/۵۹	۲۲/۸۳	۱۰۱/۵۲	۲۱/۷۵	۹۷/۱۱
۱۳	۸	۰/۳	۲۲/۹۲	۸۸/۷۱	۲۴/۸۷	۸۹/۰۵	۲۲/۳۵	۹۱/۸۱	۲۲/۵۱	۹۷/۴۶	۲۲/۳۶	۹۵/۴۳
۱۴	۸	۰/۴۵	۲۱/۶	۷۷/۵۵	۲۳/۲۴	۸۵/۵۳	۲۲/۲	۸۷/۵۵	۲۳/۱۲	۹۱/۷	۲۳/۰۶	۸۹/۴۹
۱۵	۸	۰/۶	۲۰/۰۲	۷۲/۸۲	۱۹/۸۲	۸۷/۸۳	۲۳/۲۱	۸۳/۳۱	۲۴/۱۸	۸۶/۶۷	۲۳/۴۶	۸۵/۸۷
۱۶	۸	۰/۷۵	۲۳/۹۳	۸۶/۴۷	۲۳/۴۷	۸۸/۲	۱۹/۸	۹۰/۴۹	۲۱/۷۱	۹۵/۹۵	۲۱/۵۵	۹۱/۹۳

سازه). با توجه به نتایج آزمایش‌های تجربی در این تحقیق، لهیدگی سازه‌ها از بالای سازه (به عبارت دیگر، در محل برخورد دیوار صلب با سازه) شروع می‌شود، لذا تنظیمات شروع لهیدگی در تحقیق حاضر نیز، روی گزینه "لهیدگی از بالا" انجام گرفت.

همچنین تغییرات نیرو-جابجایی به‌دست آمده از تحلیل-های اجزاء محدود برای سازه‌های مذکور، در شکل ۸-ب آورده شده است. از این شکل واضح است که نیرو ابتدا با شیب تندی افزایش یافته، پس از رسیدن به مقدار بیشینه خود کاهش یافته (تشکیل چین اولیه را نشان می‌دهد) و سپس حول یک نیروی مشخصی نوسان می‌کند. هر نوسان

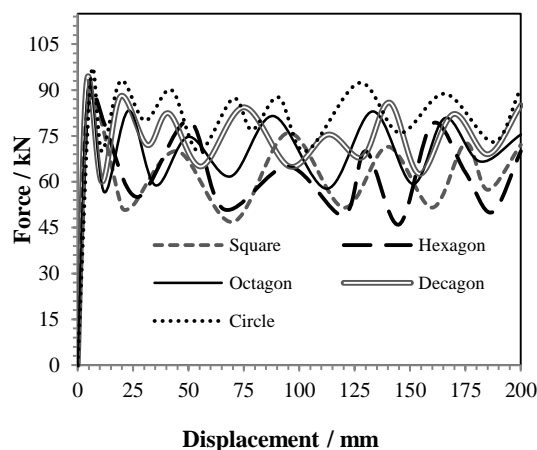
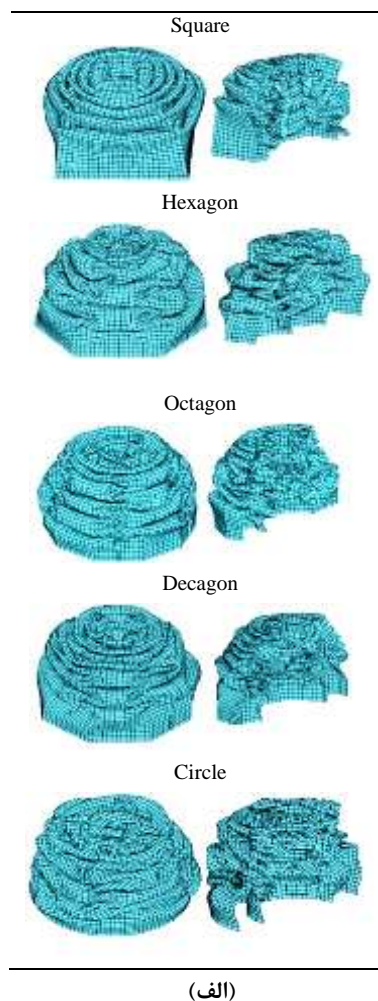
شکل ۸-الف الگوی فروریزش سازه‌های مخروطی چند سلولی بهینه شده (با ابعاد مشخص شده در جدول ۲) تحت بارگذاری محوری را نمایش می‌دهد. از این شکل مشخص است که الگوی فروریزش برای سازه مربعی بصورت آکاردئونی^۱ (حلقه‌ای^۲) و برای بقیه مقاطع بصورت الماسی^۳ است. لازم به ذکر است که در نرم‌افزار ال‌اس-داین‌ا‌امکان این وجود دارد که لهیدگی سازه‌ها از چه مکانی شروع شود (سه انتخاب لهیدگی از بالا، لهیدگی از پایین و لهیدگی از وسط

^۱ Concertina
^۲ Ring
^۳ Diamond

نیرو در حقیقت تشکیل یک چین را مشخص می‌کند. قابل ذکر است که هر چه میزان چین‌خوردگی سازه‌ها (به عبارت دیگر، تعداد نوسانات نیرو) بیشتر باشد، مقدار جذب انرژی ویژه افزایش یافته، نوسانات در نمودار نیرو-جابجایی بیشتر دیده می‌شود. برای مثال، از شکل ۸ مشخص است که تعداد چین (تعداد نوسان نیرو)، مقطع مربعی کمترین و مقطع دایروبیبیشترین است. سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی بیان‌کننده میزان جذب انرژی (EA) است. جا دارد اشاره شود که تفاوت اولین نیروی بیشینه با بقیه نیروهای بیشینه در نمودارهای نیرو-جابجایی برای سازه‌های مخروطی (بر عکس سازه‌های مستقیم)، کمتر است. به این دلیل که اولاً تشکیل چین اولیه دارای نیروی بیشینه بیشتری نسبت به چین‌های بعدی داشته، ثانیاً نیروی بیشینه وابسته به مساحت سطح مقطع سازه هنگام برخورد با جسم صلب برخوردکننده دارد؛ بنابراین در سازه‌های مخروطی به دلیل افزایش تدریجی مساحت سطح مقطع، اولین نیروی بیشینه تفاوت کمتری با بقیه نیروهای بیشینه دارد که می‌تواند از جمله مزایای سازه‌های مخروطی در مقایسه با سازه‌های مستقیم باشد.

در ادامه، جهت یافتن بهترین سازه (از لحاظ قابلیت جذب انرژی) از میان سازه‌های بررسی شده، روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس روی نتایج سازه‌های مخروطی بهینه‌شده پیاده‌سازی شد. ماتریس تصمیم‌گیری A_{ij} ، ماتریس وزن‌دهی V_{ij} و نتیجه تاپسیس در جدول ۳ ارائه شده است. در اینجا نیز وزن شاخص SEA برابر $0/6$ و شاخص F_{max} برابر $0/4$ در نظر گرفته شده است. نتایج تاپسیس نشان داد که سازه مخروطی چند سلولی دایروی با پارامترهای طراحی $\theta = 94^\circ$ و $S = 0/578$ بهترین جذب انرژی از میان سازه‌های بررسی شده است و مقاطع ده ضلعی، هشت‌ضلعی، شش‌ضلعی و مربعی در رتبه‌های بعدی می‌باشند. با توجه به روند رتبه‌بندی بر اساس تاپسیس می‌توان دریافت که با افزایش تعداد اضلاع سطح مقطع از مربعی تا دایروی، میزان عملکرد جذب انرژی افزایش یافته است.

به منظور مقایسه قابلیت جذب انرژی سازه مخروطی چند سلولی دایروی بهینه‌شده (با پارامترهای طراحی $\theta = 94^\circ$ و $S = 0/578$ با سازه مخروطی یک‌سلولی دایروی با شرایط وزن و قطر بیرونی یکسان، این سازه در ال‌اس-داینما مدل‌سازی گردید که نتایج نیرو-جابجایی، الگوی لهیدگی و



شکل ۸- نتایج اجزاء محدود برای سازه‌های مخروطی بهینه‌شده: الف) الگوی تغییر شکل و ب) نمودارهای نیرو-جابجایی

جدول ۳- نتایج روش تاپسیس: الف) ماتریس تصمیم‌گیری،
ب) ماتریس تصمیم‌گیری وزن‌دهی‌شده و ج) رتبه‌بندی
سازه‌های مخروطی با مقاطع مختلف

الف)		
سازه	SEA(kJ/kg)	F_{max} (kN)
مربعی	۲۴/۱۴	۲۵/۸۴
شش ضلعی	۲۴/۸۸	۸۸/۹۸
هشت ضلعی	۲۵/۴۵	۹۱/۸۰
ده ضلعی	۲۵/۶۶	۹۲/۳۲
دایروی	۲۶/۰۹	۹۴/۳۶

ب)		
سازه	SEA(kJ/kg)	F_{max} (kN)
مربعی	۰/۲۵۶۵	۰/۱۶۹۳
شش ضلعی	۰/۲۶۴۴	۰/۱۷۵۵
هشت ضلعی	۰/۲۷۰۳	۰/۱۸۱۰
ده ضلعی	۰/۲۷۲۶	۰/۱۸۲۰
دایروی	۰/۲۷۷۱	۰/۱۸۵۹

ج)		
سازه	ضریب نزدیکی	رتبه‌بندی
مربعی	۱/۷۰۳e-۵	۵
شش ضلعی	۰/۳۷۷۶۵	۴
هشت ضلعی	۰/۶۸۳۷۸	۳
ده ضلعی	۰/۷۷۲۳۸	۲
دایروی	۰/۹۹۹۹	۱

۷- کاستن نیروی بیشینه نیروی لهیدگی

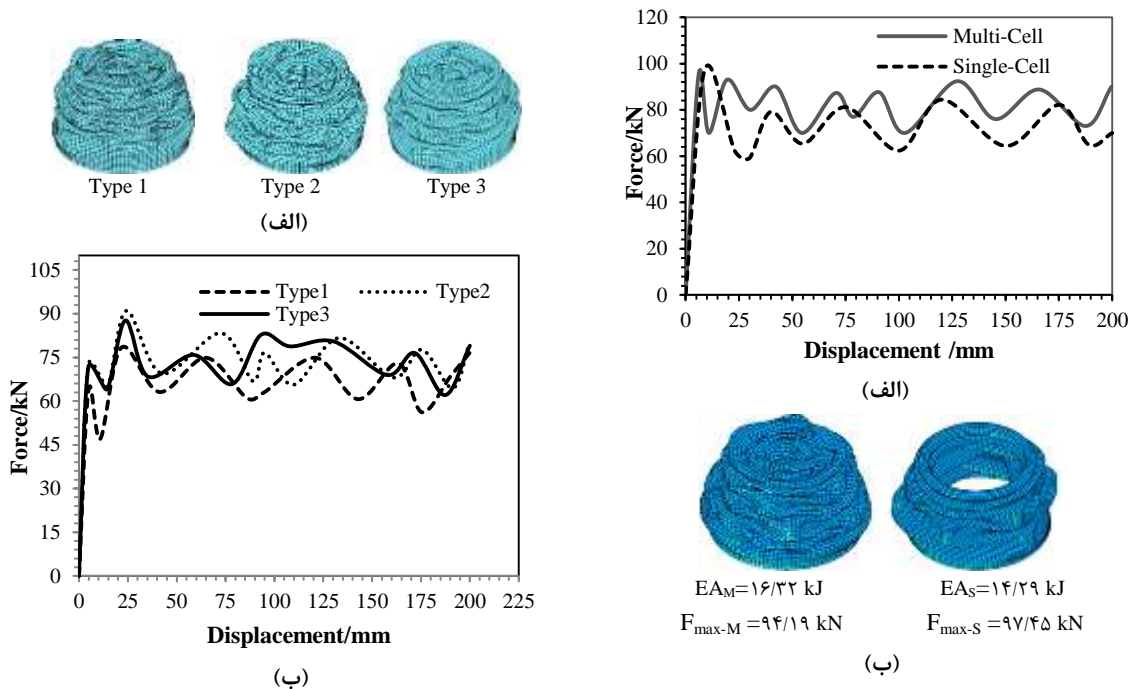
تحلیل‌های انجام شده در بخش فوق، مشخص کرد که سازه مخروطی چند سلولی بهینه‌شده با سطح مقطع دایروی (با مشخصات ابعادی $\theta=۳/۹۴^\circ$ و $S=۰/۵۷۸$)، بهترین جاذب انرژی است. در این بخش، سه نوع سازه مخروطی دایروی نشان داده شده در شکل ۱۰ مورد تحلیل قرار گرفته تا اثر تورفتگی قسمت داخلی سازه (جداره داخلی و تقویتی‌ها) بر شاخص‌های لهیدگی بررسی شود. هدف از انجام این تحلیل‌ها، کاهش میزان بیشینه نیروی لهیدگی بوده است. مطابق شکل ۱۰،

شاخص‌های فروریزش (میزان جذب انرژی SEA و بیشینه نیروی لهیدگی F_{max}) به همراه نتایج مربوط به سازه چند سلولی دایروی بهینه‌شده، در شکل ۹ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که جذب انرژی سازه مخروطی چند سلولی، ۱۵٪ بیشتر از سازه مخروطی یک‌سلولی است. ضمن اینکه پارامتر غیر مفید بیشینه نیروی لهیدگی (F_{max}) برای سازه مخروطی چند سلولی، مقداری کمتر از بیشینه نیروی لهیدگی برای سازه مخروطی یک‌سلولی است. لازم به ذکر است که به منظور هم‌وزن سازی سازه مخروطی یک‌سلولی با چند سلولی، ضخامت آن برابر ۳/۵۳ میلی‌متر محاسبه می‌شود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سازه‌های مخروطی چند سلولی پیشنهاد شده در این تحقیق، دارای قابلیت جذب انرژی بهتری نسبت به سازه‌های مخروطی مرسوم (یک - جداره) می‌باشند.

جدول ۲- نتایج ال‌اس-داینا و شبکه‌های عصبی مصنوعی
برای سازه‌های مخروطی بهینه‌شده: الف) SEA و ب) F_{max}
الف)

SEA(kJ/kg)					
نقاط بهینه	θ	S	شبکه عصبی	ال‌اس-داینا	خطا (%)
P ₁	۸	۰/۷۵۴	۲۴/۱۴	۲۴/۳۴	۰/۸۲۱
P ₂	۷/۹۹	۰/۳۱۳	۲۴/۸۸	۲۴/۹۳	۰/۲۰۱
P ₃	۶/۰۵	۰/۶۱۵	۲۵/۴۵	۲۵/۴۱	۰/۱۵۷
P ₄	۵/۹۱	۰/۵۸۹	۲۵/۶۶	۲۵/۷۲	۰/۲۳۳
P ₅	۳/۹۴	۰/۵۷۸	۲۶/۰۹	۲۶/۰۳	۰/۲۳۲

ب)					
F_{max} (kN)					
نقاط بهینه	θ	S	شبکه عصبی	ال‌اس-داینا	خطا (%)
P ₁	۸	۰/۷۵۴	۸۵/۸۴	۸۶/۴۱	۰/۶۵۹
P ₂	۷/۹۹	۰/۳۱۳	۸۸/۹۸	۸۹/۹۲	۱/۰۴۵
P ₃	۶/۰۵	۰/۶۱۵	۹۱/۸۲	۹۱/۶۸	۰/۱۵۲
P ₄	۵/۹۱	۰/۵۸۹	۹۲/۳۲	۹۲/۶۷	۰/۳۷۷
P ₅	۳/۹۴	۰/۵۷۸	۹۴/۳۶	۹۴/۱۹	۰/۱۸۲

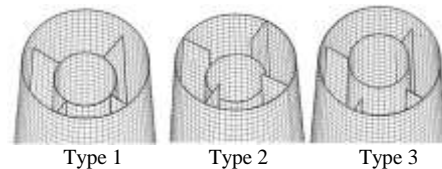


شکل ۹- الف) نمودارهای نیرو-جابجایی و ب) نتایج عددی برای سازه‌های مخروطی چند سلولی (سمت چپ) و یک-سلولی (سمت راست) دایروی

نتایج نمودارهای نیرو-جابجایی نشان می‌دهد که هرچه جداره‌های بیشتری به سمت داخل فرورفته باشند، میزان جذب انرژی و بیشینه نیروی لهیدگی بیشتر کاهش می‌یابد؛ بنابراین مطابق شکل ۱۲، در سازه نوع اول که هر دو جداره داخلی و صفحات تقویتی به اندازه ۱۰ میلی‌متر همزمان فرورفته‌اند، F_{max} و SEA دارای کمترین مقدار در مقایسه با سازه‌های دیگر بوده است. با پیاده‌سازی روش تاپسیس روی نتایج این تحلیل‌ها، مطابق جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت که بهترین سازه از نقطه نظر قابلیت جذب انرژی، همان سازه نوع دوم (Type 2) بوده، تورفتگی جداره داخلی نسبت به صفحات تقویتی نتیجه سودمندی روی عملکرد جذب انرژی داشته است.

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد جذب انرژی طرح جدید سازه‌های مخروطی چند سلولی با مقاطع مربعی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی، ده‌ضلعی و دایروی تحت بارگذاری دینامیکی محوری با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس-داینما ارزیابی شده است.

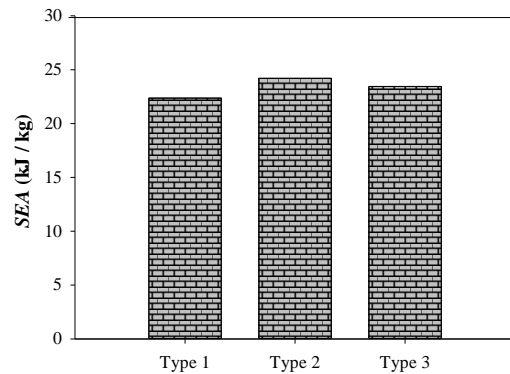


شکل ۱۰- سه نوع سازه مختلف برای کاهش بیشینه نیروی لهیدگی

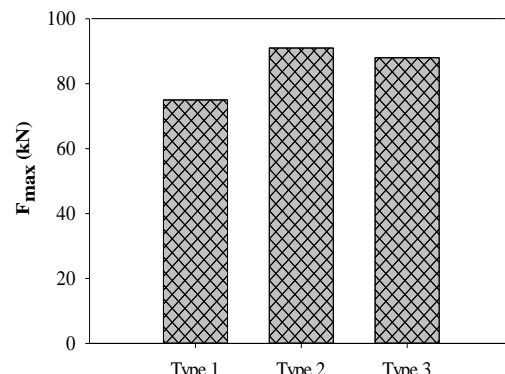
در سازه نوع اول (Type 1)، تورفتگی جداره داخلی و صفحات تقویتی یکسان و برابر ۱۰ میلی‌متر بوده، در سازه‌های نوع دوم (Type 2) و سوم (Type 3) به ترتیب تنها جداره داخلی (نه تقویتی‌ها) و تقویتی‌ها (نه جداره داخلی) به اندازه ۱۰ میلی‌متر داخل رفته‌اند. شرایط مرزی، شرایط برخورد و میزان لهیدگی سازه‌ها مشابه تحلیل‌های قبلی می‌باشند. این سازه‌ها در ال‌اس-داینما مشابه نکات مطرح شده در بخش ۲ تحلیل گردیده، نتایج مربوط به الگوی لهیدگی و نمودارهای نیرو-جابجایی در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. الگوی لهیدگی این سازه‌ها به صورت الماسی بوده، تغییرات نیرو-جابجایی نیز به این صورت است که اولین نیروی بیشینه (به دلیل وجود تورفتگی‌ها)، کمتر از دومی است.

با استفاده از روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک بهینه شدند. به این ترتیب که ابتدا شبکه‌های عصبی ایجاد شده با استفاده از نتایج ال-اس-داینا آموزش داده شدند و سپس به کمک شبکه‌های عصبی آموزش‌دیده و الگوریتم ژنتیک، نمودارهای پارتو استخراج گردیدند و در ادامه نقاط بهینه با پیاده‌سازی روش تاپسیس انتخاب گردید. سپس مجدداً روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس برای سازه‌های مخروطی بهینه‌شده با مقاطع فوق‌الذکر پیاده‌سازی گردید و نتایج نشان داد که سازه مخروطی چند سلولی با مقطع دایروی دارای بهترین عملکرد جذب انرژی در مقایسه با مقاطع دیگر است. مطابق نتایج اجزاء محدود، الگوی فروریزش برای سازه مربعی به صورت آکاردئونی و برای بقیه مقاطع به صورت الماسی بوده و همچنین، تفاوت اولین نیروی بیشینه با بقیه نیروهای بیشینه در نمودارهای نیرو-جابجایی برای سازه‌های مخروطی (برعکس سازه‌های مستقیم) کمتر بوده است که می‌تواند از جمله مزایای سازه‌های مخروطی در مقایسه با سازه‌های مستقیم باشد. در ادامه، نتایج بررسی‌ها نشان داد که جذب انرژی سازه مخروطی چند سلولی دایروی بهینه‌شده، ۱۵٪ بیشتر از سازه مخروطی یک‌سلولی دایروی با شرایط وزن و قطر بیرونی یکسان بوده است. ضمن اینکه پارامتر غیرمفید بیشینه نیروی لهیدگی (F_{max}) برای سازه مخروطی چند سلولی، مقداری کمتر از بیشینه نیروی لهیدگی برای سازه مخروطی یک‌سلولی بود. در پایان تحقیق، سه نوع سازه مخروطی با هدف کاهش میزان بیشینه نیروی لهیدگی مورد بررسی قرار گرفت. در این سازه‌ها، اثر تورفتگی قسمت داخلی سازه (جداره داخلی و تقویتی) بررسی شده است و نتایج نشان داد که سازه نوع دوم که در آن تنها جداره داخلی مقداری تورفتگی داشته است، نتیجه سودمندی روی عملکرد جذب انرژی داشته است.

جهت بررسی قابلیت جذب انرژی سازه‌های مذکور، دو شاخص جذب انرژی ویژه (SEA) و بیشینه نیروی لهیدگی (F_{max}) برای همه مقاطع با تحلیل‌های ال-اس-داینا محاسبه شدند. پس از اعتبارسنجی مدل‌سازی‌ها در ال-اس-داینا، پارامترهای طراحی θ (زاویه مخروط) و S (نسبت اندازه جداره داخلی به اندازه جداره بیرونی) سازه‌های مخروطی فوق



(الف)



(ب)

شکل ۱۲- نتایج اجزا محدود الف) SEA و ب) F_{max} برای سه سازه مختلف

جدول ۴- نتایج روش تاپسیس برای سه سازه مختلف

رتبه‌بندی	ضریب نزدیکی	سازه
۳	۰/۳۵۱۷۵	Type 1
۱	۰/۶۵۶۱۶	Type 2
۲	۰/۶۳۸۹۸	Type 3

۹- فهرست علائم

فاصله از ایده‌ال مثبت	A^+
فاصله از ایده‌ال منفی	A^-
ماتریس تصمیم	A_{ij}
ضخامت سازه (mm)	t
ضریب نزدیکی	C_i
سرعت برخورد (m/s)	V

- | | | |
|--|----------------------------------|-----------|
| [7] Tran T (2017) Crushing analysis under multiple impact loading cases for multi-cell triangular tubes. <i>Thin-Walled Structures</i> 113: 262-272. | جذب انرژی مخصوص (kJ) | SEA |
| [8] Tran T, Hou S, Han X, Nguyen NT, Chau MQ (2014) Theoretical prediction and crashworthiness optimization of multi-cell square tubes under oblique impact loading. <i>Int. Journal of Mechanical Sciences</i> 89: 177-193. | نیروی بیشینه برخورد (kN) | F_{max} |
| [9] Eyvazian A, Habibi MK, Hamouda AM, Hedayati R (2014) Axial crushing behavior and energy absorption efficiency of corrugated tubes. <i>Materials and Design</i> 54: 1028-1038. | جرم | m |
| [10] Hosseini S.V, Zamani J, Darvizeh A, Soleimani M (1385) Experimental and numerical analysis on the effect of geometrical and mechanical parameters on the collapse force of the square structures under axial loading (first part). <i>Aerospace Mechanics Journal</i> 2(2): 27-40 (In Persian). | نقطه بهینه | P |
| [11] Zamani J, Fakhri A, Ghamsari A.K (2008) Experimental Analysis of the folding force in thin wall extruded cells under quasi-static in-plane loading. <i>Materialwissenschaft und Werkstofftechnik Journal</i> 39(2): 176-182. | نسبت جداره داخلی به جداره بیرونی | S |
| [12] Hosseini-Tehrani P, Pirmohammad S. Collapse Study of A pair thin walled prismatic column subjected to oblique loads, <i>Int J Auto Eng</i> 1:267-279. | ماتریس نرمال | r_{ij} |
| [13] Abramowicz W, Jones N (1984) Dynamic axial crushing of square tubes. <i>Int J Mech Sci</i> 2(2):179-208. | معیار فاصله برای ایده‌ال مثبت | S_i^+ |
| [14] Abramowicz W, Jones N (1986) Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. <i>Int J Mech Sci</i> 4(4): 243-270. | معیار فاصله برای ایده‌ال منفی | S_i^- |
| [15] Langseth M, Hopperstad OS (1996) Static and dynamic axial crushing of square thin-walled aluminium extrusions. <i>Int J Mech Sci</i> 18 (7-8): 946-968. | شاخص وزن فاکتور | V_{ij} |
| [16] Damghani Nouri M, Hatami H, Ghodsbin Jahromi A (1394) Experimental Investigation of Expanded Metal Tube Absorbers under axial Impact Loading. <i>Modares Mechanical Engineering</i> . 15(1): 372-378 (In Persian). | زاویه‌ی شکل‌گیری مخروط | θ |
| [17] Azarakhsh S, Rahi A, Ghamarian A (1395) Experimental and numerical investigation of crushing of brass cylindrical tubes. <i>Journal of Solid and Fluid Mechanics</i> 6(2):181-196 (In Persian). | | |
| [18] Shojaeefard MH, Khalkhali A, Kalantari R (1394) Side panel of B-Class body in white vehicle design and side crash finite element simulation. <i>Journal of Solid and Fluid Mechanics</i> 5(3): 51-64. | | |
| [19] Chen W.G, Wierzbicki T (2001) Relative merits of single-cell, multi-cell and foam - filled thin-walled structures in energy absorption. <i>Thin-Walled Structures</i> 39(4): 287-306. | | |
| [20] Kim H.S (2002) New extruded multi-cell aluminum profile for maximum crash energy absorption and weight efficiency. <i>Thin-Walled Structures</i> 40(4): 311-327. | | |
- ۱۰- تقدیر و تشکر**
- این مقاله، حاصل طرح پژوهشی مصوب در دانشکده فنی به شماره ۱۵۴۱ بوده است که بدین وسیله نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی که تأمین مالی این طرح پژوهشی را بر عهده داشتند، کمال تشکر و امتنان را دارد.
- ۱۱- مراجع**
- [1] Alexander J.M (1960) An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axia loading. *Mech Appl Math* 13(1): 5-10.
 - [2] Pyrz M, Krzywoblocki M (2017) Crashworthiness optimization of thin-walled tubes using Macro Element Method and Evolutionary Algorithm. *Thin-Walled Structures* 112: 12-19.
 - [3] Esmaeili-Marzdashti S, Pirmohammad S, Esmaeili Marzdashti S (2017) Crashworthiness analysis of S-shaped structures under axial impact loading. *Latin American J of Solids and Structures* (In Press).
 - [4] Alizadeh Yazdi M, Zamani J, Darvizeh A, Darvizeh M, Liaghat Gh (1385) Experimental analysis of thin-walled mono-cell structures and investigation of the effect of geometrical parameters on the specific mean collapse load, First Congress on the Special Structures, Tehran, Iran (In Persian).
 - [5] Alizadeh Yazdi M, Darvizeh A, Liaghat Gh, Zamani J (1385) Experimental analysis on the effect of thin ratio on the mean collapse load and energy absorption of the thin-walled structures, First conference on the metals deformations, Tehran, Iran (In Persian).
 - [6] Zamani J, Darvizeh A, Zia Hagh M, Soleimani M (1387) Experimental analysis on the collapse load of the thin-walled extruded cell under axial quasi-static loading. *Modares Mechanical Engineering* 31(1): 91-102, 1387. (In Persian).

- [31] Naddaf Oskoueï A, Khodarahmi H, Sohrab M (1394) Experimental and Numerical Study of Conical Thin Shells Collapse under Dynamic Axial Loadings *Modares Mechanical Engineering* 15(7): 392-402 (In Persian).
- [32] Hosseini-Tehrani P, Pirmohamad S, Golmohamadi M (2008) Study on the collapse of tapered tubes subjected to oblique loads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal Automobile Engineering* 222: 2025-2039.
- [33] Azarakhsh S, Ghamarian A, Khodarahmi H (1395) Investigation of Axial and Oblique Crushing of Empty and Foam-Filled Conical Tubes under Clamped Boundary Condition. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 6(4): 139-159 (In Persian).
- [34] Hanfeng Y, Guilin W, Hongbing F, Qixiang Q, Xiangzheng K, Jiuru X, Zhibo L (2014) Multiobjective crashworthiness optimization design of functionally graded foam-filled tapered tube based on dynamic ensemble metamodel. *J of Mat and Des* 55: 747-757.
- [35] Pirmohammad S, Ekbatan MH, Esmaeili-Marzdashti S (2017) Crashworthiness of double-cell conical tubes with different cross-sections subjected to dynamic axial and oblique loads. *J of Central South University* (In Press).
- [36] Nagel G.M, Thambiratnam D.P (2004) A numerical study on the impact response and energy absorption of tapered thin-walled tubes. *Int Journal of Mech Sci* 46(2): 201-216.
- [37] Malek A, Nia B (2009) *Fundamentals of Design-Expert software*, 2th Eddition 93-110 Tehran: Afarinesh.
- [38] Marzbanrad J, Abdollahpour A (2009) Effects of the triggering of circular aluminum tubes on crashworthiness. *Int J of crashworthiness* 14(9): 591-599.
- [39] Demuth H, Beale M, Hagan M (2010) *Neural network tool box™ 6 user's guide*. the Math Works Website: The Math Works, Inc.
- [40] Schalkoff R.J (1997) *Artificial neural networks*. McGraw-Hill.
- [21] Qiu N, Gao Y, Fang J, Feng ZH, Sun G, Li Q (2015) Crashworthiness analysis and design of multi-cell hexagonal columns under multiple loading cases. *Finite Elements in Analysis and Design* 89: 89-101.
- [22] Pirmohammad S, Esmaeili Marzdashti S (2016) Crushing behavior of new designed multi-cell members subjected to axial and oblique quasi-static loads. *Thin-Walled Struct* 108: 291-304.
- [23] Pirmohammad S, Nikkhah H, Esmaeili-Marzdashti S (1395) Experimental and numerical study on the collapse behavior of double-walled tubes reinforced with inside ribs under dynamic axial loading. *Modaress Mechanical Engineering* 16(9): 347-358 (In Persian).
- [24] Najafi A, Rais-Rohani M (2011) Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell, multi-corner crush tubes. *Thin-Walled Struct* 49(1): 1-12.
- [25] Tehrani P.H, Pirmohammad S (2010) Study on Crashworthiness Characteristics of Several Concentric Thin Wall Tubes. *ASME 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis* 3(2): 12-14.
- [26] Hanssen A.G, Langseth M, Hopperstad O.S, (2000) Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *Int J of Impact Eng* 24(5): 475-507.
- [27] Hanssen A.G, Langseth M, Hopperstad O.S, (2000) Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler. *Int J of Impact Eng* 24(4): 347-383.
- [28] Aktay L, Toksoy A, Guden M (2006) Quasi-static axial crushing of extruded polystyrene foam-filled thin-walled aluminum tubes: Experimental and numerical analysis. *J of Mat and Des* 27(7): 556-565.
- [29] Ghamarian A, Zarei HR, Abadi MT (2011) Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes. *Thin-Walled Struct* 49(10):1312-1319.
- [30] Zhang X, Cheng G (2007) A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns *Int J of Impact Eng* 34(11): 1739-1752.