

بهینه‌سازی عملکرد درهم شکستگی تیوب‌های جدار نازک اس شکل با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک

ساره اسماعیلی مرزدشتی^۱، سبجان اسماعیلی مرزدشتی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه مونترال، کانادا

^۲ کارشناس ارشد، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران

*مسئول مکاتبات: sobhanesmaeili90@gmail.com

چکیده

واژگان کلیدی

سازه‌های اس شکل
جذب انرژی
روش کپراس
شبکه عصبی
الگوریتم ژنتیک

در این مقاله به مطالعه رفتار جذب انرژی سازه‌های تک جداره‌ای اس - شکل با هشت سطح مقطع مختلف از جمله مثلث، مربع، شش ضلعی، هشت ضلعی، دایروی، مستطیلی، لوزی و بیضوی تحت بارگذاری دینامیکی محوری پرداخته شده است. این سازه‌ها در صنعت حمل و نقل به دلیل شکل هندسی مخصوصشان در جاهایی که محدودیت مکانی ایجاب می‌کند مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدلیل نسبت استحکام به وزن بالای آلومینیوم، جنس سازه‌های ذکر شده در این پژوهش از مواد آلومینیومی در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی سازه‌های ذکر شده در نرم‌افزار المان محدود ال اس- داینا صورت می‌پذیرد. جهت رتبه‌بندی عملکرد جذب انرژی سازه‌ها از روش تصمیم‌گیری کپراس استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که سازه‌ی اس شکل با سطح مقطع مستطیلی نسبت به مابقی سطوح رتبه‌ی بالاتری را در عملکرد درهم شکستگی به خود اختصاص می‌دهد. در انتها برخی از پارامترهای طراحی سازه-ی معرفی شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی می‌شوند.

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۳/۱۴

تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۳/۲۱

۱ مقدمه

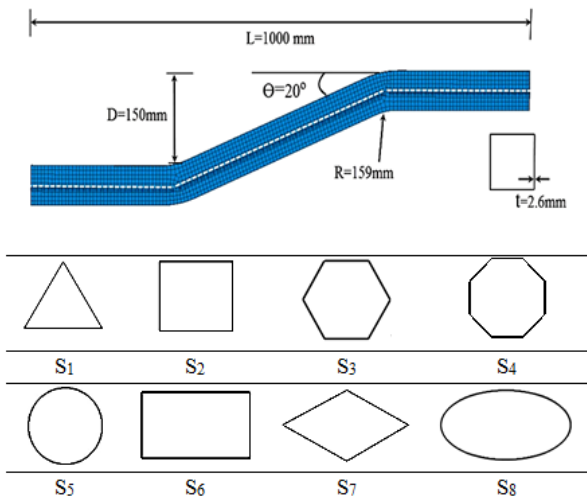
عملکرد در هم شکستگی یک وسیله نقلیه بستگی به توانایی ساختار آن در جذب بیشتر انرژی جنبشی طی فرایند ضربه دارد. این انرژی ناشی از تصادفات، توسط سازه‌هایی به نام ضربه‌گیرها جذب می‌شود. جهت افزایش ایمنی ساختار سازه‌ها در وسایط نقلیه و توانایی آن‌ها در جذب انرژی بیشتر همراه با کاهش بیشینه نیروی لهیدگی به مطالعه و بررسی رفتار لهیدگی و ارزش درهم شکستگی سازه‌های تیبوی پرداخته شده است.

الکساندر (۱۹۶۰) برای اولین بار میزان جذب انرژی سازه-های جدار نازک استوانه‌ای شکل را تحت بارگذاری محوری محاسبه کرد و مکانیزم چین‌خوردگی را در فرایند جذب انرژی معرفی کرد [۱]. احکامی و همکاران (۱۹۹۰) و ابه و همکاران (۱۹۹۰) مطالعات عددی و تجربی روی تیوب‌های اس شکل تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی انجام داده‌اند [۲، ۳]. در این پژوهش تقویت سطح مقطع سازه‌ها جهت افزایش جذب انرژی در هنگام فرایند ضربه نیز بررسی شده است. کیم و وایزبیک (۲۰۰۴) طی یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی ساختارهای اس شکل، در تحقیقشان به طرح‌هایی از سازه‌های به کار رفته در بدنه خودرو اشاره کرده‌اند و همچنین تحقیقاتی روی افزایش استحکام ساختار سازه‌های اس شکل جهت افزایش عملکرد جذب انرژی انجام داده‌اند [۴]. ژنگ و سیگال (۲۰۰۷) مطالعاتی از تأثیر ساختارهای تقویتی بکار رفته در سطح مقاطع مختلف در طول فرایند لهیدگی انجام داده و دریافتند که حضور تقویتی‌ها نسبت به عدم حضور آن

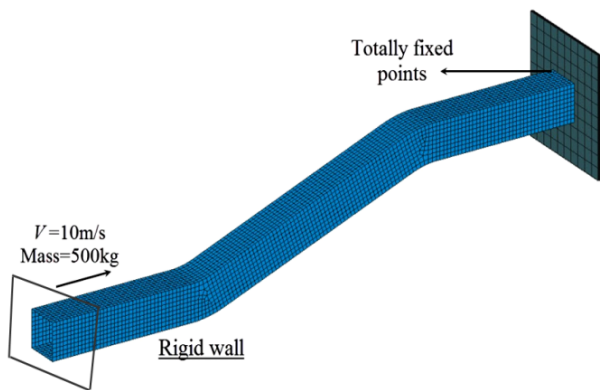
میزان انرژی ناشی از ضربه را بیشتر جذب می‌کنند [۵].

حسینی تهرانی و نیک احد (۲۰۰۶) در مطالعاتشان دریافتند که تعویض جنس مواد بکار رفته در سازه‌ها، عموماً دارای تأثیرگذاری بیشتری نسبت به تغییر ساختاری سازه‌ها در افزایش ارزش درهم شکستگی دارد [۶، ۷]. الماراکبی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی سازه‌های اس شکل با سطح مقطع مربعی، مستطیلی، شش ضلعی و هشت ضلعی با دو جنس استیل و آلومینیوم پرداخته‌اند. سپس همین مقاطع را همراه با صفحات تقویتی در دو نوع جنس متفاوت مورد تحلیل عددی قرار داده‌اند. آن‌ها در تحقیقشان همچنین عملکرد جذب انرژی در حضور صفحات تقویتی مختلف را نیز بررسی کرده‌اند [۸]. هان و یامازاکی (۲۰۱۳) با استفاده از روش طراحی آزمایشات به بهینه‌سازی برخی از پارامترهای طراحی بکار رفته در ساختار سازه‌های اس شکل و مطالعات پارامتری از تأثیر عملکرد پارامترهای هندسی بر روی عملکرد جذب انرژی سازه‌ها پرداخته‌اند [۹]. کیم (۲۰۰۲) در تحقیقش تیوب‌های اس شکل پر شده از فوم آلومینیومی را مورد آزمایش قرار داد. از الگوی تغییر شکل یافته تیوب‌های اس شکل می‌توان دریافت که استفاده از فوم یک راه حل خوب در تحکیم بخشیدن به این گونه سازه‌ها می‌باشد [۱۰].

در راستای پژوهش‌های صورت گرفته، در این تحقیق به بررسی عملکرد جذب انرژی، تأثیر تعداد اضلاع سطح مقطع تماسی و تأثیر کشیدگی در سطح مقطع در سازه‌های تک جداره‌ای اس شکل در هشت سطح مقطع مثلث، مربع، شش ضلعی، هشت ضلعی، دایروی، مستطیلی، لوزی و بیضوی صورت پرداخته شده است. برای مقایسه‌ی عملکرد درهم شکستگی سازه‌ها



شکل ۲: هندسه‌ی سطح مقطع سازه‌های اس شکل



شکل ۳: شماتیک از مدل المان محدود تحت بارگذاری دینامیکی - محوری

ماده‌ای که برای سازه‌های بررسی شده لحاظ شد عبارت است از آلیاژ آلومینیم AA6060-T4 که خواص مکانیکی آن به این صورت می‌باشد: چگالی برابر ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت پواسون برابر ۰/۳۳، مدول یانگ برابر ۶۳۰۰۰ مگا-پاسکال، تنش تسلیم برابر ۸۰ مگا پاسکال و استحکام کششی نهایی برابر ۱۷۳ مگا پاسکال می‌باشد. همچنین نمودار تنش- کرنش ماده مذکور که از طریق آزمون کشش بدست آمده است در جدول ۱ بیان شده است. کد ماده استفاده شده در نرم‌افزار به شماره ۰۲۴ با عنوان مدل پلاستیسیته خطی اصلاح شده^۲ می‌باشد.

جدول ۱: تغییرات تنش- کرنش آلومینیم AA6060-T4

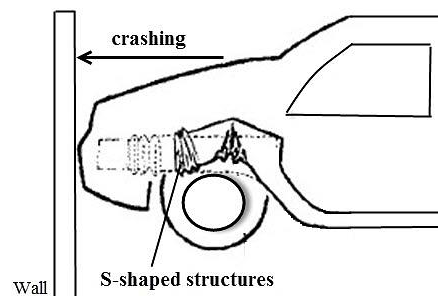
تنش MPa	کرنش پلاستیکی -
۵۶	۰
۷۱	۰/۰۲۲
۱۲۶	۰/۰۲۵
۱۴۳	۰/۰۵
۱۴۶	۰/۰۷۵
۱۵۲	۰/۱
۱۵۶	۰/۱۵

در هنگام مواجهه با بارگذاری دینامیکی مدل شده در نرم‌افزار ال اس- داینا از شاخص‌های لهیدگی جذب انرژی، بیشینه نیرو لهیدگی و ضریب بازدهی نیروی لهیدگی استفاده می‌شود. در ادامه از روش تصمیم‌گیری کپراس برای معرفی بهترین سازه از لحاظ عملکرد جذب انرژی بالا و روش بهینه‌سازی شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای بهینه نمودن پارامترهای طراحی در سازه‌های اس شکل استفاده شده است.

۲ مدل المان محدود

سازه‌های اس شکل با توجه به شکل خاصی که دارند در جاهایی که محدودیت مکانی ایجاد می‌کند یا باعث تداخل با مابقی اجزای مرتبط با خود نشوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند مطابق شکل ۱ از این سازه‌ها به عنوان ضربه‌گیرهای ذخیره‌ساز در مباحث جاذب‌های انرژی در وسایل نقلیه از جمله ساختار اتومبیل مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از پارامترهای هندسی دخیل در طراحی این گونه سازه‌ها شامل پارامترهای L طول تیوب، D عرض منحنی درون سازه‌ای، θ زاویه‌ی منحنی درون سازه‌ای و t ضخامت سازه می‌باشند. مقدار عددی پارامترهای هندسی در نظر گرفته شده در این مقاله با سطح مقطع مثالی، مربعی، پنج ضلعی، شش ضلعی، هشت ضلعی، دایره، مستطیلی، لوزی و بیضی (S_{1-8}) در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۱]. دلیل انتخاب این هشت سطح مقطع، بررسی تأثیر تعداد اضلاع سازه‌ها در عملکرد جذب انرژی حین فرایند ضربه می‌باشد. محیط سطح مقطع همه‌ی این هشت سازه‌ی ذکر شده یکسان و برابر ۲۴۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

نرم‌افزار اجزاء محدود ال اس- داینا جهت شبیه‌سازی سازه‌های نشان داده شده در شکل ۲ به کار گرفته شده است. مطابق شکل ۳ جهت اعمال بار دینامیکی محوری به این سازه‌ها، از یک مکعب صلب با وزن ۵۰۰ کیلوگرم استفاده شده که با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به سازه‌های مذکور برخورد کرده و موجب لهیدگی ۳٪ طول کل آن‌ها (۱۰۰۰ میلی‌متر) می‌شود. شرایط مرزی به این صورت است که تیوب اس شکل در قسمت برخورد با دیوار صلب مذکور کاملاً آزاد و انتهای دیگر آن به یک مکعب صلب و ثابت، متصل و در همه جهت‌ها مقید شده است. در کلیه قسمت‌های مختلف سازه‌های بررسی شده از روابط المان پوسته‌ای چهارگوش، نوع بلیچکوک-تسای^۱ با پنج نقطه انتگرال‌گیری در راستای ضخامت استفاده شده است. جهت تعیین اندازه المان مناسب در شبکه‌بندی سازه‌ها، تحلیل-های همگرایی انجام گرفت و در نهایت اندازه آن‌ها به صورت $7mm \times 7mm$ میلی‌متر انتخاب گردید.

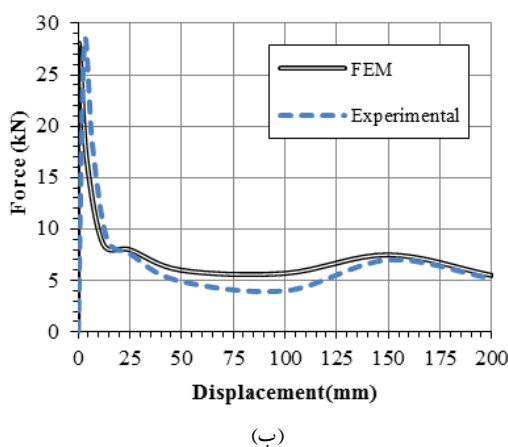
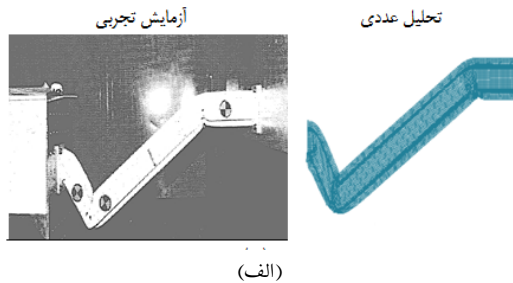


شکل ۱: سازه‌های اس شکل تحت جاذب‌های انرژی

¹Belytschko-Lin-Tsay

²MODIFIED-PIECEWISE-LINEAR-PLASTICITY

جذب انرژی، نیاز به روشی است که با توجه به شاخص‌های ذکر شده در مقاله، سازه‌ها را رتبه‌بندی کرده و بهترین طرح پیشنهادی ارائه شده از لحاظ جذب خوب انرژی را معرفی نماید. بنابراین از روش کپراس در این تحقیق استفاده شده است [۱۳، ۱۴]. در ادامه ترتیب مراحل اجرای این روش بیان شده است.



شکل ۴: (الف) الگوی تغییر شکل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی و (ب) نمودار نیرو-جابجایی

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری به صورت رابطه زیر که شامل m معیار در سطر ماتریس و n گزینه در ستون آن می‌باشد. این ماتریس در واقع همان ماتریس داده‌ها می‌باشد.

$$X = [X_{ij}]_{mn} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

گام دوم: عبارت است از بی‌بعد کردن ماتریس تصمیم‌گیری به صورت زیر:

$$R' = [r_{ij}]_{mn} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} \quad (5)$$

گام سوم: وزن دهی به هر کدام از شاخص‌ها بر طبق اهمیت آن. قابل ذکر است که در این نوع وزن دهی منحصر به فرد، شاخص‌ها به صورت دوتایی به‌طور هم‌زمان با هم مقایسه می‌شوند و تعداد مراحل قیاس این شاخص‌ها با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$N = \left(\frac{n(n-1)}{2} \right) \quad (6)$$

در این مقایسه، به معیار مهم‌تر عدد ۳ و به معیار کم اهمیت عدد ۱ اختصاص داده می‌شود. همچنین اگر دو معیار دارای ارزش یکسان داشته باشند، عدد ۲ به هر دو آن‌ها تعلق می‌گیرد. این روند برای همه معیارهای مقایسه شده،

۳ مقایسه‌ی عملکرد فروریزش سازه‌های جاذب انرژی

۱.۳ شاخص‌های لهیدگی

برای ارزیابی عملکرد فروریزش سازه‌های اس شکل تحت بارگذاری محوری از سه شاخص اصلی به نام‌های جذب انرژی^۱ (EA)، ضریب بازدهی نیروی لهیدگی^۲ (CFE) و بیشترین نیروی لهیدگی^۳ (PCF) استفاده می‌گردد. جذب انرژی به عنوان یک شاخص کلیدی برای اندازه‌گیری انرژی جذب شده مورد استفاده قرار می‌گیرد که با استفاده از فرمول (۱) از محاسبه‌ی مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی حاصل از لهیدگی سازه‌ها محاسبه می‌شود.

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

در این فرمول بالا $F(x)$ نشان‌گر نیروی لهیدگی لحظه‌ای در راستای محوری است. به δ مقدار لهیدگی طولی سازه گفته می‌شود که در این مقاله به اندازه ۳۰۰ میلی‌متر ۱۰۰۰ میلی‌متر طول اولیه تیوب است که برابر ۳۰٪ لهیدگی کامل سازه در نظر گرفته شده است. در ادامه بیشترین نیروی لهیدگی^۴ (PCF) به عنوان بیشترین مقدار $F(x)$ ، یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها جهت افزایش صدمات حین فرایند ضربه می‌شود. میانگین نیروی لهیدگی^۵ (MCF) به عنوان یک شاخص کلیدی از فرمول (۲) بدست می‌آید:

$$MCF = \frac{\int_0^{\delta} F(x) dx}{\delta} \times 100 \quad (2)$$

بازدهی نیروی لهیدگی (CFE) به عنوان یک نسبت میانگین نیرو به بیشترین نیرو از فرمول (۳) محاسبه می‌گردد. شایان ذکر است که مقادیر EA و CFE به عنوان شاخص سودمند که باعث بهبود در عملکرد فروریزش سازه‌ها و PCF به عنوان شاخص غیرسودمند معرفی می‌گردد

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \times 100 \quad (3)$$

۲.۳ آزمون تجربی

یک نمونه سازه اس-شکل مربعی ساده‌ی اکستروژن شده با طول بازوی ۱۵۰ میلی‌متر، طول کلی ۱۰۰۰ میلی‌متر، زاویه‌ی درون منحنی $\theta = 15^\circ$ و عرض منحنی $D = 194$ میلی‌متر تحت بارگذاری شبه استاتیکی محوری قرار گرفته و به اندازه‌ی ۲۰۰ میلی‌متر در آن ایجاد لهیدگی شده است [۱۲]. برای صحت سنجی می‌بایست نتایج عددی حتی الامکان به نتایج تجربی نزدیک بوده و با آن تطابق داشته باشد. با انجام شبیه‌سازی متعدد این تطابق در نمودارهای نیرو جابجایی و مد تغییر شکل مطابق شکل ۴ حاصل گردیده است.

۳.۳ روش تصمیم‌گیری چند معیاره‌ی کپراس

برای انتخاب تیوب با بهترین عملکرد فروریزش از بین سازه‌های ذکر شده در این مقاله و با توجه به شاخص‌های منفی و مثبت از لحاظ بهبود در وضعیت

¹Energy Absorption ²crushing force efficiency ³Peak crushing force ⁴Peak crushing force ⁵Mean Crushing Force

سودمندتر خواهد بود [۱۲]. با بررسی نمودارهای نیرو-جابجایی به استخراج شاخص‌های مهم که در این مقاله ذکر شده‌اند، پرداخته می‌شود. با محاسبه‌ی مقدار اوج و سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی حاصل از لهیدگی هر سازه، معیار بیشترین نیروی لهیدگی (PCF) و جذب انرژی (EA) را می‌توان محاسبه نمود. همچنین از حاصل تقسیم بیشترین نیروی لهیدگی به میانگین نیروی لهیدگی مطابق با نمودار نیرو و جابجایی هر سازه، شاخص بازدهی نیروی لهیدگی (CFE) بدست می‌آید.

شاخص‌های لهیدگی برای هر یک از سازه‌های ذکر شده در این مقاله در شکل‌های ۷ به صورت نمودار ستونی نمایش داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۶الف که مربوط به شاخص جذب انرژی است، می‌توان دریافت که تیوب مربعی (S_7) با جذب انرژی ۴/۳۱۲ کیلوژول نسبت به سازه‌ی مستطیلی (S_6) با جذب انرژی ۴/۱۵ کیلوژول و همچنین سازه‌ی دایروی (S_5) با جذب انرژی ۳/۹۶ کیلوژول نسبت به سازه‌ی بیضی (S_8) با مقدار جذب انرژی ۳/۸۵ انرژی را بیشتر جذب می‌کنند. بنابراین می‌توان دریافت که ایجاد کشیدگی در سطح مقطع سازه‌ها برای مثال از مربع به مستطیل یا از دایره به بیضی، باعث کاهش جذب انرژی و بیشینه نیروی لهیدگی می‌شود به طوری که نرخ کاهش PCF از EA بیشتر است. طبق نمودار شکل ۷الف روابط جذب انرژی برای این هشت سازه به صورت: $S_8 > S_7 > S_6 > S_5 > S_4 > S_3 > S_2 > S_1$ می‌باشد. این رابطه بدین معناست که با افزایش تعداد اضلاع سطح مقطع تماسی از سازه S_1 تا S_4 میزان جذب انرژی هنگام فرایند ضربه افزایش می‌یابد؛ بنابراین سازه S_5 در میان سازه‌های بدون اثر کشیدگی (S_{1-5}) و سازه‌ی S_8 در میان سازه‌های با اثر کشیدگی (S_{6-8}) به سبب داشتن کمترین اضلاع تماسی دارای پایین‌ترین میزان جذب انرژی می‌باشند.

مطابق نمودار شکل ۷ب رابطه‌ی بیشینه نیروی لهیدگی به صورت: $S_5 > S_7 > S_6 > S_8 > S_1 > S_4 > S_3 > S_2$ می‌باشد. با توجه به این رابطه می‌توان نتیجه گرفت که سازه‌های بدون ضلع مانند سازه‌ی S_8 در میان سازه‌های با اثر کشیدگی (S_{6-8}) و سازه S_5 در میان سازه‌های بدون اثر کشیدگی (S_{1-5}) دارای بیشترین بیشینه نیروی لهیدگی می‌باشند. شکل ۷ج تغییرات معیار ضریب بازدهی نیروی لهیدگی برای هشت سازه‌ی ذکر شده در این مقاله را نشان می‌دهد که از طریق فرمول (۳) محاسبه می‌شود. بیشترین مقدار ضریب بازدهی نیروی لهیدگی متعلق به سازه‌ی مستطیلی S_6 می‌باشد. یک جاذب انرژی خوب لازم است که جذب انرژی و ضریب بازدهی نیروی لهیدگی بالا و بیشترین نیروی لهیدگی کمتری را از خود نشان دهد تا آسیب وارد شده را به خوبی کاهش دهد. در این مطالعه برای انتخاب سازه‌های جدار نازک با بهترین عملکرد قابلیت جذب انرژی و با توجه به وجود شاخص بیش از یک مورد، نیاز به روش تصمیم‌گیری چند معیاره بوده که روش کپراس برای این منظور انتخاب گردید. اصول پیاده‌سازی این روش توضیح داده شد و اکنون روش مذکور بر روی نتایج حاصل از نرم‌افزار ال‌اس-داینای پیاده‌سازی شده و در نهایت رتبه هر کدام از سازه‌ها از نظر قابلیت جذب انرژی مشخص شده است. با توجه به چگونگی وزن دهی در روش کپراس وزن مربوط به معیارها جذب انرژی و بیشینه نیروی لهیدگی به سبب اهمیت

تکرار می‌شود و سپس مجموع همه امتیازات کسب شده برای هر شاخص از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\sum_{i=1}^m w_{ij} = W_j \quad (7)$$

گام چهارم: محاسبه ماتریس بی‌بعد وزن دهی شده از طریق رابطه زیر:

$$D = [y_{ij}]_{mn} = r_j \times W_j \quad (8)$$

گام پنجم: جمع کردن مقادیر سودمند و غیر سودمند هر ستون با یکدیگر طبق رابطه (۹):

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^n y_{-ij} \quad (9)$$

گام ششم: محاسبه مقدار پارامتر حق تقدم

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-i} \min \sum_{i=1}^n S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^n (S_{\min}/S_{-i})} \quad (10)$$

گام هفتم: محاسبه مقدار U_j که قابلیت طرح‌های پیشنهادی را بیان می‌کند. بیشترین مقدار آن ۱۰۰٪ بوده و به بهترین طرح جاذب انرژی اختصاص می‌یابد. در رابطه زیر Q_{\max} در واقع بزرگترین مقدار Q_i می‌باشد.

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{\max}} \times 100 \quad (11)$$

۴ نتایج تحلیلی از عملکرد جذب انرژی سازه‌ها

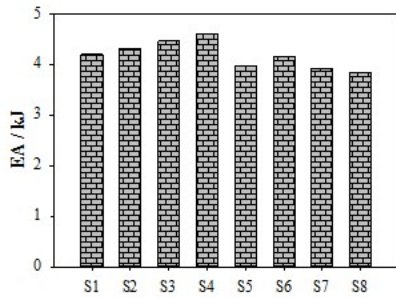
پاسخ به رفتار لهیدگی و مد تغییر شکل این هشت سازه که شامل سطح مقاطع مثلث، مربع، شش ضلعی، هشت ضلعی، دایره، مستطیل، لوزی و بیضی می‌باشند تحت بارگذاری دینامیکی محوری در شکل ۵ نشان داده شده است. برای بررسی و محاسبه‌ی جذب انرژی سازه‌ها و اینکه حین اعمال فرایند لهیدگی چه رفتاری از خود نشان می‌دهند، نمودارهای نیرو-جابجایی آن‌ها نیز در شکل ۶ رسم گردیده است.

همان‌طور که گفته شد میزان لهیدگی ۳۰۰ میلی‌متر از ۱۰۰۰ میلی‌متر طول تیوب اس شکل در نظر گرفته شده است که برابر ۳۰٪ لهیدگی کامل سازه است. با توجه به نوع لهیدگی سازه‌ها می‌توان به دو نوع خمش سراسری^۱ و تا شوندگی پی در پی^۲ اشاره نمود. در سازه‌های ذکر شده در شکل ۲ به دلیل وجود منحنی درون سازه‌های لهیدگی به صورت خمش سراسری بوده و بر تا شوندگی پی در پی غالب است. نمودارهای نیرو-جابجایی این نوع لهیدگی بدین صورت است که نیرو بعد از رسیدن به نقطه‌ی اوج خود ناگهان شیب تندی همراه با چین‌های کوچک کاهش می‌یابد.

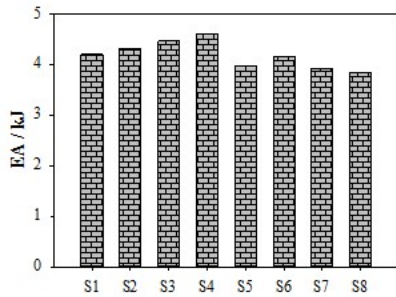
وزن از جمله معیارهای مهم در مباحث جاذب‌های انرژی بشمار می‌رود ولی در این پژوهش به سبب یکسان بودن جنس و محیط سطح مقطع سازه‌های ذکر شده در شکل ۲، وزن سازه‌ها با هم برابر است. در مباحث جاذب‌های ذخیره‌ساز انرژی وزن به عنوان یک شاخص غیر سودمند معرفی می‌گردد و هرچه میزان وزن جاذب‌های انرژی کمتر باشد کارایی آن‌ها بهتر و

¹Global binding ²Progressive folding

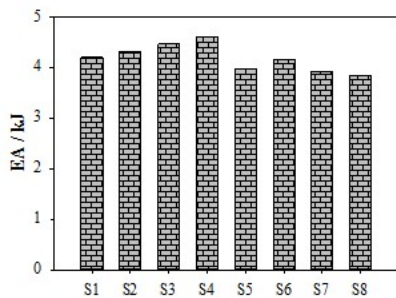
بیشتر برابر ۴۱۷٪ و برای بازدهی نیروی لهیدگی برابر ۱۶۷٪ می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

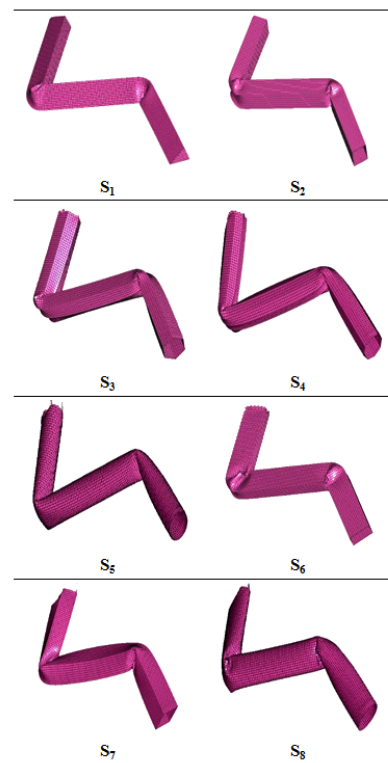
شکل ۷: نمودار ستونی (الف) جذب انرژی (ب) بیشینه نیروی لهیدگی (ج) بازدهی نیروی لهیدگی

مطابق جدول ۲ پس از پیاده سازی روش کپراس، رتبه‌بندی سازه‌ها به صورت $S_5 > S_8 > S_3 > S_1 > S_7 > S_2 > S_4 > S_6$ می‌باشد. نتایج به این موضوع اشاره دارد که از بین تیوب‌های اس شکل با سطح مقاطع مثلث، مربع، مستطیل، شش ضلعی، هشت ضلعی، دایره، بیضی و لوزی، با شرایط پارامترهای طراحی و وزن یکسان تیوب اس شکل با مقطع مستطیلی نسبت به مابقی سازه‌ها از عملکرد جذب انرژی بالاتری در حین فرایند ضربه دینامیکی برخوردار است.

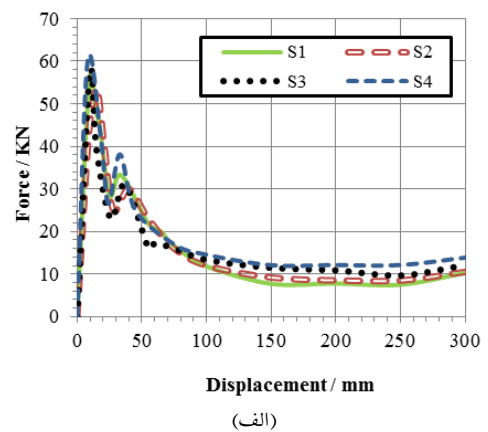
۵ بهینه‌سازی چند هدفه

۱.۵ شبکه عصبی

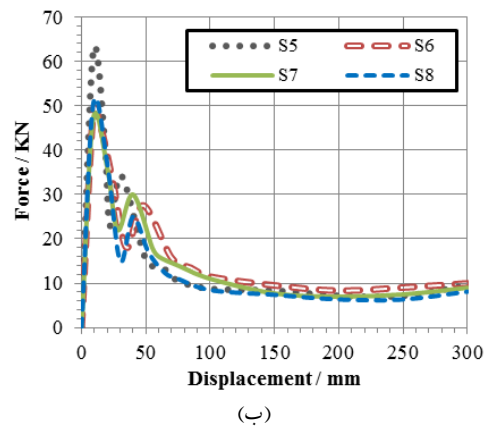
در قسمت قبل با پیاده‌سازی روش کپراس مشخص گردید که سازه‌ی اس شکل مستطیلی (S_5) نسبت به مابقی سازه‌ها از عملکرد جذب انرژی بالاتری برخوردار است و حال در این بخش می‌بایست برخی از پارامترهای طراحی سازه‌ی اس شکل مستطیلی با استفاده از روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک بهینه شوند.



شکل ۵: الگوی تغییر شکل تیوب‌های جدار نازک اس شکل تحت بارگذاری دینامیکی - محوری



(الف)



(ب)

شکل ۶: نمودار نیرو جابجایی (الف) سازه‌های S_{1-4} و (ب) سازه‌های S_{5-8}

جدول ۲: نتیجه‌ی کپراس

سازه	رتبه	پارامتر رتبه‌بندی	مقادیر سودمند	مقادیر غیرسودمند
		U_i	$S+$	$S-$
S_1	۵	۹۵/۹۲	۰/۰۹۴	۰/۰۳۰۴
S_2	۳	۹۶/۱۲۹	۰/۰۹۶	۰/۰۳۱۵
S_3	۶	۹۵/۶۵۴	۰/۰۹۷۲	۰/۰۳۳۳
S_4	۲	۹۶/۵۶۲	۰/۰۹۹	۰/۰۳۴۳
S_5	۸	۸۴/۲۲	۰/۰۸۴	۰/۰۳۶۳
S_6	۱	۱۰۰	۰/۰۹۶۹	۰/۰۲۷۶
S_7	۴	۹۵/۹۹	۰/۰۹۱۸	۰/۰۲۷۷
S_8	۷	۹۳/۱۰۳	۰/۰۸۹	۰/۰۲۸۶

آموزش شبکه بین داده‌های ورودی و خروجی استفاده شده است که مراحل طراحی آن به قرار زیر می‌باشد:

- مشخص نمودن داده‌های ورودی و خروجی به عنوان داده‌های پایه‌ای مطابق جدول ۳. داده‌های ورودی شامل پارامترهای طراحی a (طول مستطیل)، b (عرض مستطیل)، D (فاصله‌ی انحرافی درون سازه‌ای)، θ (زاویه‌ی منحنی درون سازه‌ای) و t (ضخامت) و داده‌های خروجی نیز شامل شاخص‌های لهیدگی جذب انرژی (EA)، بیشینه نیروی لهیدگی (PCF) و وزن سازه (W) می‌باشند.

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 ال اس-داینا مورد تحلیل قرار گرفتند و شاخص‌های لهیدگی آن‌ها استخراج گردید که در جدول ۳ نتایج آن آمده است. در ادامه، از داده‌های این جدول جهت ساخت شبکه‌های عصبی استفاده شده است.

- بی‌بعد کردن داده‌های خروجی (شاخص‌های لهیدگی جذب انرژی، وزن سازه 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 ۳ برای آموزش دادن شبکه و از ۳۰٪ مابقی برای صحت‌سنجی شبکه ساخته‌شده، استفاده گردیده است.

- 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^۲ و تانژانتی^۳) و یک لایه خروجی (با یک نورون به صورت تابع خطی^۴) تعریف شده است. قابل ذکر است که برای هر خروجی یک شبکه به صورت جدا طراحی شده است؛ بنابراین به سبب داشتن سه شاخص لهیدگی (جذب انرژی، وزن سازه و بیشینه نیروی لهیدگی) سه شبکه به طور جداگانه طراحی شده است.

- ارزیابی عملکرد شبکه‌ی ساخته شده توسط همبستگی بین داده‌ها واقعی و آموزش دیده شبکه می‌باشد. مطابق شکل ۹ این همبستگی بین داده‌های واقعی و داده‌های آموزش دیده با استفاده از شبکه عصبی به وضوح مشخص است.

۲.۵ الگوریتم ژنتیک

پس از ساختن شبکه عصبی MLP آموزش دیده جهت پیش-بینی 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 به طوری که ممکن است بهبود یک هدف باعث بدتر شدن هدف دیگر شود؛ بنابراین یک راه‌حل ساده جهت ارضای همه توابع هدف وجود ندارد. از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه، می‌توان به الگوریتم ژنتیک [۱۷] و الگوریتم پیس [۱۸] و ... اشاره نمود.

یک شبکه عصبی مصنوعی، از سه لایه ورودی، خروجی و پردازش تشکیل می‌شود. 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. نمودار جریان فرایند مسئله بهینه‌سازی صورت گرفته در تحقیق حاضر در شکل ۸ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است به سبب یکسان بودن وزن سازه‌ها طی تغییر برخی از پارامترهای طراحی، شاخص‌های جذب انرژی (EA)، بیشینه نیروی لهیدگی (PCF) و وزن سازه (W) در مسئله بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فرایند مذکور، سعی می‌شود که EA، بیشینه و PCF و W (به دلیل مضر بودن مقدار این پارامتر بر سرنشینان کمینه شوند [۱۱]). همچنین پنج پارامتر طراحی a (طول مستطیل)، b (عرض مستطیل)، D (فاصله‌ی انحرافی درون سازه‌ای)، θ (زاویه‌ی منحنی درون سازه‌ای) و t (ضخامت) در مسئله بهینه‌سازی لحاظ شده است. شروط مسئله‌ی بهینه‌سازی در عبارت (۱۲) نشان داده شده است.

$$\text{Maximize } f_1 = EA(a, b, D, \theta, t)$$

$$\text{Minimize } f_2 = PCF(a, b, D, \theta, t)$$

$$\text{Minimize } f_3 = W(a, b, D, \theta, t) \quad (12)$$

$$30 \leq a \leq 70$$

$$75 \leq b \leq 135$$

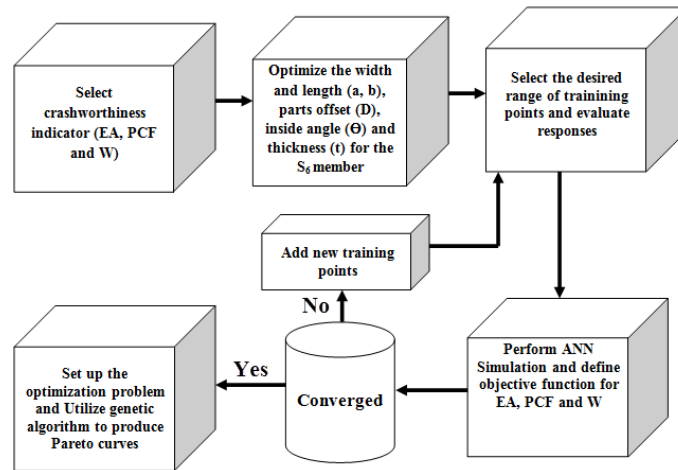
$$150 \leq D \leq 300$$

$$20 \leq \theta \leq 50$$

$$1 \leq t \leq 3$$

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) می‌باشد. شبکه عصبی مصنوعی یک روش قدرتمند جهت تعیین توابع هدف می‌باشد [۱۵] 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 لایه‌هایی از نورون-های پنهان که لایه‌های قبلی و بعدی را به هم متصل می‌کند، می‌باشد [۱۶]. در این تحقیق از روش MLP^۱ برای

¹Multi-layer perceptron ²logarithmic sigmoids ³Hyperbolic tangent ⁴Linear Function



شکل ۸: نمودار گردش بهینه‌سازی فروریزش برای سازه بهینه

در تحقیق حاضر از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه برای بهینه کردن پارامترهای طراحی t و θ ، D ، b ، a که مربوط به سازه‌ی اس شکل مستطیلی می‌باشد، استفاده شده است. مطابق با مسئله بهینه‌سازی عبارت (۱۲) در شکل ۱۰ نمودارهای پارتو به دست آمده از تلفیق روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک برای مقطع مستطیلی را نشان می‌دهد. نمودارها پارتو با شاخص‌های جذب انرژی - بیشینه نیروی لهیدگی در شکل ۱۰ - الف، جذب انرژی - وزن در شکل ۱۰ ب و بیشینه نیروی لهیدگی - وزن در شکل ۱۰ ج رسم شده‌اند، درحقیقت این شکل‌ها نقاط ایده‌آل عملکرد بین هدف‌ها را نمایش می‌دهند که هر نقطه متناظر با مقادیر بهینه پارامترهای طراحی t ، θ ، D ، b ، a می‌باشد.

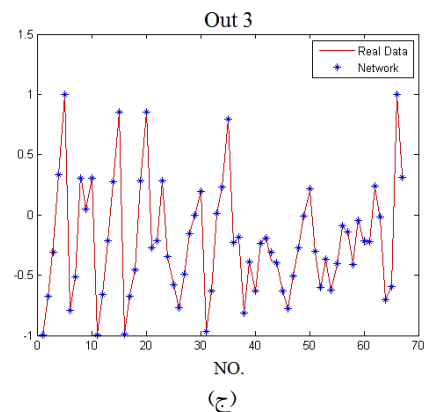
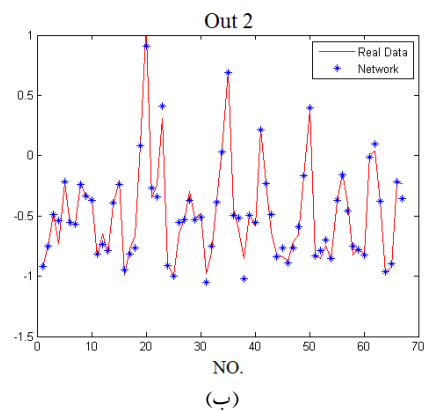
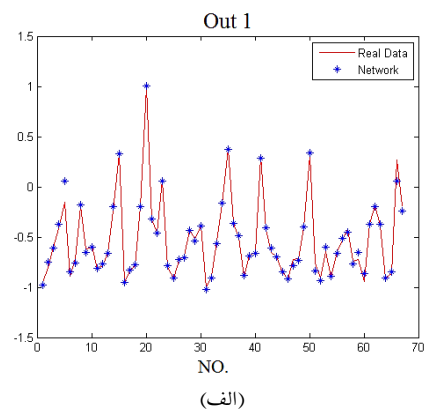
جهت یافتن بهترین نقطه از مجموعه نقاط مشخص شده در نمودارهای پارتو، از روش کپراس استفاده شده است که با پیاده‌سازی این روش، نقطه‌ی بهینه φ معرفی می‌گردد. شایان ذکر است که در پیاده‌سازی روش کپراس، وزن هر سه شاخص EA، PCF و W به دلیل اهمیت یکسان و برابر 0.333 می‌باشد. مطابق روش کپراس بهینه‌ترین پارامترهای طراحی t و θ ، D ، b ، a برای سازه‌ی اس شکل مستطیلی (S_6) به ترتیب برابر:

$38/7$ میلی‌متر، $78/5$ میلی‌متر، $188/25$ میلی‌متر، 27 درجه، $1/7$ میلی‌متر می‌باشد. همچنین شاخص‌های لهیدگی EA، PCF و W متناظر با این پارامترهای طراحی بهینه به ترتیب برابر: $4/4$ کیلوژول، $8/9$ کیلو نیوتن و $1/1$ کیلوگرم محاسبه شده‌اند.

۶ نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج بدست آمده از بررسی جذب انرژی سازه‌های اس شکل با هشت سطح مقطع مختلف از جمله مثلث، مربع، شش ضلعی، هشت ضلعی، دایروی، مستطیلی، لوزوی و بیضوی تحت بارگذاری دینامیکی محوری را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- جذب انرژی سازه‌های اس شکل با تعداد اضلاع سطح مقطع سازه‌ها رابطه مستقیم دارد هرچه تعداد اضلاع در سازه‌های تک جداره بیشتر باشد جذب انرژی بیشتر است.



شکل ۹: نمودار صحه‌گذاری داده‌های واقعی و داده‌های آموزش دیده شده برای (الف) جذب انرژی، (ب) بیشینه نیروی لهیدگی و (ج) وزن سازه

جدول ۳: نتیجه‌ی کپراس

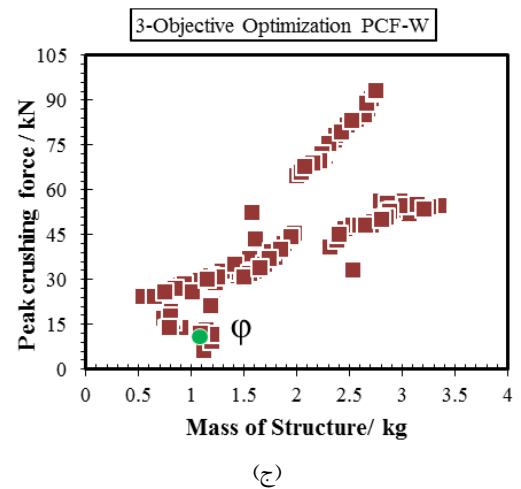
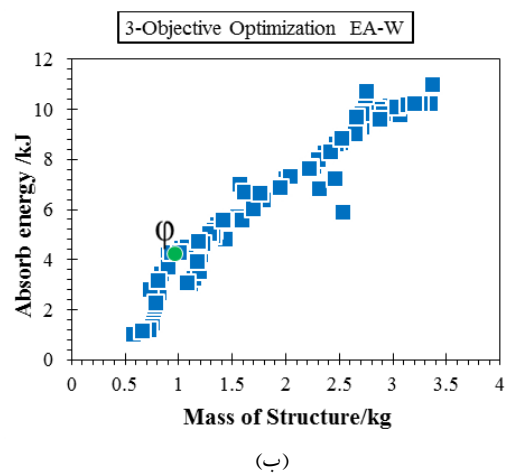
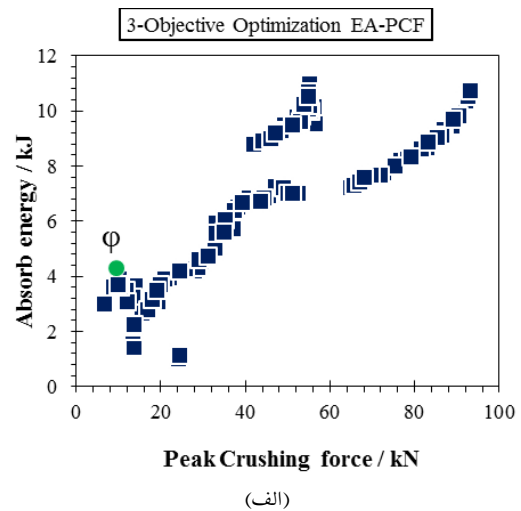
شماره	طول (a) mm	عرض (b) mm	عرض منحنی (D) mm	زاویه منحنی (θ) (°)	ضخامت (t) mm	بیشینه نیروی لهدگی kN	جذب انرژی kJ	وزن kg
۱	۳۰	۷۵	۱۵۰	۲۰	۱	۱۱/۶	۰/۷۰۱	۰/۵۸
۲	۴۰	۹۰	۱۷۵	۲۵	۱/۵	۲۳/۱۳	۱/۶۴۶	۱/۰۹
۳	۵۰	۱۰۵	۲۲۵	۳۵	۲	۴۰/۲۷	۲/۹۶۷	۱/۷۸
۴	۶۰	۱۲۰	۲۷۵	۴۵	۲/۵	۲۴/۳۳	۴/۱۷۵	۲/۶۷
۵	۷۰	۱۳۵	۳۰۰	۵۰	۳	۵۷/۵۶	۵/۸۲۲	۳/۷۲
۶	۳۰	۱۳۵	۱۵۰	۲۰	۱	۳۴/۱۳	۱/۱۲۳	۰/۹۱
۷	۴۰	۱۲۰	۱۷۵	۲۵	۱/۵	۳۵	۲/۲۵۵	۱/۳۴
۸	۵۰	۱۰۵	۲۲۵	۳۵	۲	۵۶/۷۲	۵/۶۰۵	۲/۶۷
۹	۶۰	۹۰	۲۷۵	۴۵	۲/۵	۴۹/۸۷	۲/۸۲۴	۲/۲۳
۱۰	۷۰	۷۵	۳۰۰	۵۰	۳	۴۷/۴۳	۲/۹۹۷	۲/۶۳
۱۱	۳۰	۷۵	۳۰۰	۲۰	۱	۱۶/۹۳	۱/۵۷۳	۰/۵۹
۱۲	۴۰	۹۰	۲۷۵	۲۵	۱/۵	۲۹/۵۴	۱/۷۹	۱/۱۱
۱۳	۵۰	۱۰۵	۲۲۵	۳۵	۲	۱۸/۳۷	۲/۵۴۴	۱/۸۲
۱۴	۶۰	۱۲۰	۱۷۵	۴۵	۲/۵	۴۵/۴	۵/۳۴	۲/۵۷
۱۵	۷۰	۱۳۵	۱۵۰	۵۰	۳	۵۸/۶۳	۸/۹۶	۳/۴۹
۱۶	۳۰	۷۵	۱۵۰	۵۰	۱	۷/۳	۰/۷۰۵	۰/۵۹
۱۷	۴۰	۹۰	۱۷۵	۴۵	۱/۵	۲۱/۲۳	۱/۴۶۱	۱/۱۱
۱۸	۵۰	۱۰۵	۲۲۵	۳۵	۲	۲۸/۵۲	۱/۸۰۴	۱/۴۴
۱۹	۶۰	۱۲۰	۲۷۵	۴۵	۲/۵	۷۷/۶۲	۵/۵۳	۲/۵۷
۲۰	۷۰	۱۳۵	۳۰۰	۲۰	۳	۱۳۷/۶	۱۳/۲۴	۳/۴۹
۲۱	۳۰	۷۵	۱۵۰	۲۰	۳	۴۸/۹۴	۴/۷۲۲	۱/۷۴
۲۲	۴۰	۹۰	۱۷۵	۲۵	۲/۵	۵۶/۱۴	۳/۹۴	۱/۸۲
۲۳	۵۰	۱۰۵	۲۲۵	۳۵	۲	۹۲/۳۸	۷/۲۴۵	۲/۶۱
۲۴	۶۰	۱۲۰	۲۷۵	۴۵	۱/۵	۱۲/۸۷	۱/۶۴۳	۱/۶۲
۲۵	۷۰	۱۳۵	۳۰۰	۵۰	۱	۶/۲۹	۰/۹۹۱	۱/۲۴
۲۶	۳۰	۱۳۵	۳۰۰	۲۰	۱	۳۰	۲/۱۰۳	۰/۹۴
۲۷	۳۰	۱۲۰	۲۷۵	۲۵	۱/۵	۳۷/۱۸	۲/۳۹۷	۱/۳۷
۲۸	۴۰	۱۲۰	۲۲۵	۴۵	۲	۵۲/۳	۴/۰۳	۱/۹۱
۲۹	۵۰	۹۰	۱۷۵	۴۵	۲/۵	۳۸/۱۵	۳/۵۳۸	۲/۱۴
۳۰	۶۰	۷۵	۱۵۰	۵۰	۳	۴۰/۳۲	۴/۳۲۲	۲/۴۶
۳۱	۷۰	۷۵	۳۰۰	۵۰	۱	۱۰/۵۴	۰/۴۰۴	۰/۶۳
۳۲	۳۰	۹۰	۲۷۵	۴۵	۱/۵	۱۹/۲	۱/۱۱۹	۱/۱۶
۳۳	۴۰	۱۳۵	۳۰۰	۳۵	۲	۴۸/۰۸	۳/۳۵۸	۲/۱۷
۳۴	۵۰	۱۲۰	۱۷۵	۲۵	۲/۵	۷۵/۸۲	۵/۷۵	۲/۵۱
۳۵	۷۰	۱۳۵	۱۵۰	۲۰	۳	۱۱/۱۸	۹/۲۴۴	۳/۴
۳۶	۳۰	۷۵	۱۵۰	۵۰	۳	۴۳/۳۱	۴/۴۸۵	۱/۷۸
۳۷	۴۰	۹۰	۱۷۵	۴۵	۲/۵	۳۱/۳۷	۳/۵۹	۱/۸۶
۳۸	۵۰	۱۰۵	۲۲۵	۴۵	۱	۱۵/۹۵	۱/۱۳۲	۰/۸۷
۳۹	۶۰	۱۲۰	۲۷۵	۲۵	۱/۵	۳۹/۸۳	۲/۴۷۴	۱/۵۴
۴۰	۷۰	۱۳۵	۳۰۰	۲۰	۱	۳۳/۷۸	۲/۶۳	۱/۱۶
۴۱	۳۰	۷۵	۳۰۰	۲۰	۳	۸۹/۷	۸/۷۷	۱/۷۹
۴۲	۴۰	۹۰	۲۷۵	۲۵	۲/۵	۵۷/۶۵	۴/۰۶۵	۱/۸۵
۴۳	۵۰	۱۰۵	۲۲۵	۳۵	۲	۳۰/۵۳	۲/۶۵۱	۱/۵۵
۴۴	۶۰	۱۲۰	۱۷۵	۴۵	۱/۵	۱۸/۵	۲/۳۲۳	۱/۵۴
۴۵	۷۰	۱۳۵	۱۵۰	۵۰	۱	۱۶/۸۱	۱/۳۲۸	۱/۱۶
۴۶	۳۰	۱۳۵	۱۵۰	۵۰	۱	۱۴/۶	۰/۹۱۵	۰/۹۳
۴۷	۴۰	۱۲۰	۱۷۵	۴۵	۱/۵	۲۲/۱۶	۲/۱۹	۱/۳۷
۴۸	۶۰	۹۰	۲۲۵	۳۵	۲	۲۹	۲/۲۴۳	۱/۷۲
۴۹	۶۰	۹۰	۲۷۵	۲۵	۲/۵	۶۰/۳۵	۴/۲۷۱	۲/۱۴
۵۰	۷۰	۷۵	۳۰۰	۲۵	۳	۹۷/۰۳	۸/۸۱۸	۲/۴۷
۵۱	۷۰	۱۲۰	۲۲۵	۵۰	۱/۵	۱۷/۴۵	۱/۹۵	۱/۶۷
۵۲	۶۰	۷۵	۳۰۰	۳۵	۱/۵	۱۶	۱/۰۱	۱/۲
۵۳	۵۰	۱۳۵	۱۵۰	۳۵	۱/۵	۲۳/۲۷	۲/۷	۱/۵۶
۵۴	۴۰	۹۰	۲۷۵	۵۰	۱/۵	۱۵/۳۶	۱/۰۳	۱/۱۷
۵۵	۳۰	۱۰۵	۱۷۵	۲۰	۲	۴۷/۳۴	۲/۷	۱/۵
۵۶	۴۰	۷۵	۲۷۵	۳۵	۳	۶۲/۶۵	۳/۴۴	۲/۰۲
۵۷	۵۰	۱۲۰	۱۷۵	۳۵	۲	۴۶/۴	۴/۱۶	۱/۹۳
۵۸	۶۰	۷۵	۱۵۰	۴۵	۲	۱۷/۹۳	۲/۱۴	۱/۵۳
۵۹	۷۰	۱۰۵	۳۰۰	۴۵	۲	۲۱	۲/۱۸۵	۲/۱۱
۶۰	۶۰	۹۰	۲۲۵	۵۰	۲	۱۸/۵۵	۰/۷۸۵	۱/۷۶

سودمند و غیر سودمند، بهترین جاذب انرژی از بین سازه‌های ذکر شده در این مقاله، سازه با سطح مقطع مستطیلی معرفی گشت که با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک، برخی از پارامترهای طراحی این سازه معرفی شده بهینه گردید.

- با افزایش پارامترهای فاصله و زاویه‌ی درون منحنی (D, θ) سازه‌های اس شکل، خمش کلی در لهیدگی سازه‌ها بیشتر رخ داده و میزان جذب انرژی و بیشینه نیروی لهیدگی کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] J.M. Alexander, An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axia loading, *Mechanical Applied Math*, Vol 13(1), pp. 5-10, 1960.
- [2] Y. Ohakami, K. Takada, K. Motomura, M. Shimamura, Collapse of thin-walled curved beam with closed-hat section—Part 1: Study on collapse characteristics, *SAE Paper* 1990; 10.4271-1900460.
- [3] K. Abe, K. Nishigaki, S. Ishivama, M. Ohta, M Takagi, curved beam with closed-hat section—part 2: Simulation by plane plastic hinge model, *SAE Technical Paper*, Vol, 10: 4271-900461, 1990.
- [4] H.S. Kim, T. Wierzbicki, Closed-form solution for crushing response of three-dimensional thin-walled S frames with rectangular section, *International Journal of Impact Engineering*, vol, 30(1), pp. 87-112, 2004.
- [5] C. Zhang, A. Saigal, Crash behavior of a 3D S-shape space frame structure. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol, 191, pp. 256-259, 2007.
- [6] P. Hosseini-Tehrani, M. Nikahd, Effects of ribs on S-frame crashworthiness, *Proceeding of IMech E Part D: Journal of Automobil Engineering*, Vol, 220 (12), pp. 1679-1689, 2006.
- [7] P. Hosseini-Tehrani, M. Nikahd, Two materials S-frame representation for improving crashworthiness and lightening, *Thin-Walled Structures*, Vol, 44(4), pp. 407-414, 2006.
- [8] A. Elmarakbi, Y.X. Long, J. MacIntyre, Crash analysis and energy absorption characteristics of S-shaped longitudinal members, *Thin-Walled Structure*, Vol, 68, pp. 65-74, 2013.
- [9] J. Han, K. Yamazaki, Crashworthiness optimization of S-shape square tubes, *International Journal Vehicle Design*, Vol, 31(1), pp 72-85, 2013.
- [10] H.S. Kim, New extruded multi-cell aluminum profile for maximum crash energy absorption and weight efficiency, *Thin-walled Structure*, Vol, 40 (4), pp. 311-27, 2002.
- [11] A. Khalkhali, Best compromising crash worthiness design of automotive S-rail using TOPSIS and modified NSGAI, *Journal of Central South University of Technology*, Vol, 22, pp. 121-133, 2015.
- [12] Quasi-Static Collapse of Spot-Welded, Thin-Walled Curved Beams, TB-03-TWCB-1 Revised: April 2007
- [13] G. Zheng, S. Wu, G. Sun, G. Li, Q. Li, Crushing analysis of foam-filled single and bitubal polygonal thin-walled tubes, *International Journal Mechanical Science*, Vol, 87, pp. 226-240, 2014.



شکل ۱۰: نمودار پارتو برای بهینه‌سازی سه هدفه از سازه‌ی اس شکل مستطیلی: (الف) EA-PCF، (ب) EA-W، (ج) PCF-W

- با ایجاد کشیدگی در سازه‌ها از مربعی به مستطیلی و یا از دایروی به بیضی میزان جذب انرژی و بیشینه نیروی لهیدگی کاهش می‌یابد.
- به بیان روش کپراس ایجاد کشیدگی در سازه‌ها باعث بهبود در عملکرد درهم شکستگی سازه‌ها می‌شود. چرا که نرخ کاهش بیشینه نیروی لهیدگی به عنوان یک عامل غیر سودمند از جذب انرژی به عنوان یک عامل سودمند بیشتر است.
- با پیاده‌سازی روش کپراس با در نظر گرفتن بیش از یک مورد شاخص

- [14] S. Pirmohammad, S. Esmaili Marzdashti, Crushing behavior of new designed multi-cell members subjected to axial and oblique quasi-static loads, *Thin-Walled Structure*, Vol. 108, pp. 291-304, 2016.
- [15] H. Demuth, M. Beale, M. Hagan, *Neural network tool box™ 6 user's guide* the Math Works Website: The Math Works, Inc, 2010.
- [16] R.J. Schalkoff, *Artificial neural networks* McGraw-Hill, 1997.
- [17] X. Liao, Q. Li, X. Yang, W. Zhang, W. Li, Multiobjective optimization for crash safety design of vehicles using stepwise regression model, *Structural and Multi disciplinary Optimization*, Vol, 35, pp. 561-569, 2008.
- [18] D. Liu, K.C. Tan, C.K. Goh, W.K. Ho, A multi objective memetic algorithm based on particles warm optimization, *IEEE Trans Syst*, Vol, 37, pp. 42-50, 2007.