



## بهینه‌سازی سازه جاذب انرژی ضد بالارونده در قطارهای شهری با استفاده از

### مدل‌سازی شبکه عصبی RBF و الگوریتم ژنتیک چند هدفه

مه‌ری ایزانلو<sup>۱</sup>، ابوالفضل خلخالی<sup>۲\*</sup> و مجید شهرویی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

### چکیده

بهبود ایمنی مسافران در برخورد قطارها نیازمند طراحی وسایل نقلیه ریلی با قابلیت جذب انرژی کارآمد است. سازه‌های جاذب انرژی در انتهای واگن‌ها نصب می‌شوند، نقش حیاتی در مدیریت انرژی ضربه ایفا می‌کنند. این پژوهش به بررسی عملکرد یک سازه جاذب انرژی متشکل از لوله مخروطی و صفحه ضد بالارونده تحت بارگذاری خارج از مرکز می‌پردازد. با استفاده از روش نمونه‌گیری هم‌رسانی، ۱۰۰ مدل هندسی با مقادیر مختلف پارامترهای طراحی لوله مخروطی (شعاع، ضخامت و زاویه مخروط) ایجاد شد و فرآیند لهیدگی شبه‌استاتیکی به کمک شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس تحلیل گردید. شاخص‌های کلیدی عملکرد (SEA و Fmax) استخراج گردید. با توجه به هزینه محاسباتی بالا، از یک مدل جایگزین مبتنی بر شبکه توابع پایه شعاعی (RBF) با دقت بالا ( $R^2 = 0.98$ ) استفاده شد. بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم NSGA-II جبهه پارتو را آشکار کرد که مصالحه بین اهداف متعارض را نشان می‌دهد. اعتبارسنجی با شبیه‌سازی اجزای محدود، اختلاف نسبی کمتر از ۲٪ برای SEA و Fmax در طرح بهینه به روش کمترین فاصله را نشان داد که دقت و قابلیت اطمینان چارچوب پیشنهادی را تأیید می‌کند. این یافته‌ها مؤید قابلیت و اتکاپذیری چارچوب پیشنهادی به عنوان راهنمایی مؤثر برای طراحی بهینه جاذب‌های انرژی در صنعت ریلی است.

**کلمات کلیدی:** سازه جاذب انرژی، ضد بالارونده، شبکه توابع پایه شعاعی، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چند هدفه.

## Optimization of Anti-Climb Energy-Absorbing Structures in Urban Trains Using RBF Neural Network Modeling and the Multi Objective Genetic Algorithm

Mehri Izanloo<sup>1</sup>, Abolfazl Khalkhali<sup>2\*</sup>, Majid Shahravi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Faculty of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Faculty of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Faculty of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

Enhancing passenger safety during train collisions requires the design of railway vehicles with efficient energy absorption capacity. Energy-absorbing structures installed at the ends of cars play a vital role in managing impact energy. This research investigates the performance of an energy-absorbing structure comprising a conical tube and an anti-climber plate under eccentric loading. Using the Hammersley sampling method, 100 geometric models with varying design parameters for the conical tube (radius, thickness, and cone angle) were created, and their quasi-static crushing process was analyzed via Finite Element (FE) simulation in Abaqus. Key performance indicators, namely Specific Energy Absorption (SEA) and Maximum Crushing Force (Fmax), were extracted. Due to high computational costs, a high-accuracy ( $R^2 = 0.98$ ) surrogate model based on a Radial Basis Function (RBF) network was employed. Multi-objective optimization using the NSGA-II algorithm revealed the Pareto front, illustrating the trade-off between the conflicting objectives. Validation through FE simulation showed a relative difference of less than 2% for both SEA and Fmax in the optimal design selected by the minimum distance method, confirming the accuracy and reliability of the proposed framework. These findings verify the capability and dependability of the proposed framework as an effective guide for the optimal design of energy absorbers in the railway industry.

**Keywords:** Energy Absorbing Structure, Anti-Climber, Radial Basis Function (RBF) Network, Genetic Algorithm, Multi-objective Optimization.

## ۱- مقدمه

با وجود مزایای قطارها در جابجایی مسافر و کالا، پدیده بالارفتن واگن بر روی واگن دیگر از جمله خطرناک‌ترین پیامدهای ممکن در سوانح ریلی محسوب می‌شود. از این‌رو، چگونگی اتلاف کارآمد انرژی ناشی از برخورد و تبدیل آن به تغییرشکل پلاستیک، به‌ویژه برای واگن‌های پیشرو، به موضوعی تحقیقاتی در حوزه ایمنی ریلی تبدیل شده است. با این حال، تغییرشکل‌های بزرگ ناشی از فرآیند لهیدگی، پیش‌بینی رفتار سازه‌های جاذب انرژی را با چالش مواجه می‌سازد. مطالعه و توسعه سازه‌های جاذب انرژی ضد بالارونده که در جلوی واگن پیشرو نصب می‌شوند، با هدف بهبود ایمنی غیرفعال و کاهش خطر پدیده بالارفتن، از اهمیت بالایی برخوردار است. این جاذب‌های انرژی در وسایل نقلیه ریلی شهری علاوه بر تأمین الزامات عملکردی در برخوردهای محوری، باید از مقاومت کافی در برابر برخوردهای خارج از مرکز برخوردار بوده و خطر بالارفتن را نیز به حداقل برسانند. مکانیزم عملکرد این سازه به این صورت است که در هنگام برخورد، انرژی ضربه را جذب کرده و تغییر شکل می‌دهد و همزمان، بارهای طولی را به قاب انتهایی واگن منتقل می‌کند. در نهایت، این دستگاه با جذب انرژی، از تغییرشکل سازه‌های اصلی واگن در مراحل اولیه برخورد جلوگیری می‌کند [۱ و ۲].

مطالعات لیانا و استرینگ [۳] نشان داد که افزودن یک دستگاه ضد بالارونده تغییرشکل‌پذیر و یک کوپلر فشاری به لکوموتیو، علاوه بر عملکرد مطلوب در جذب انرژی برخورد، احتمال رویداد بالارفتن را نیز کاهش می‌دهد. سیمیک و همکاران [۴] عناصر سیستم ایمنی غیرفعال وسایل نقلیه راه آهن را در یک برخورد مورد مطالعه قرار دادند. وانی و جایچاندیش [۵] یک دستگاه ضد بالارونده با ساختار دندانه‌های مثلثی از آلایژ آلومینیوم معرفی کردند و عملکرد ضد بالارونده در آن را بررسی کردند. گائو و همکاران [۶] عملکرد جذب انرژی یک سیستم جاذب انرژی فعال-غیرفعال با یک ضد بالارونده قابل تغییر شکل را از طریق تحقیقات تجربی تجزیه و تحلیل کرد. ژو و همکاران [۷] مکانیزم کمانش عمودی یک سیستم ضد بالارونده را مطالعه کردند. نتایج

پژوهش آن‌ها نشان داد که جرم وسیله نقلیه، سرعت بالاروی و ناهم‌محوری اولیه، عوامل اسایی مؤثر بر این مکانیزم هستند. نورفی و همکاران [۸] با اصلاح سیستم ضد بالارونده موجود، عملکرد سیستم جذب انرژی در وسیله نقلیه ریلی سبک شهری را بهبود بخشیدند. آن‌ها چندین طرح جایگزین برای ساختار پایه پیشنهاد کرده و با انجام شبیه‌سازی‌های عددی، پیکربندی بهینه سیستم ضد بالارونده را تخمین زدند. این فرآیند بهینه‌سازی با به‌کارگیری روش‌های طراحی قوی پشتیبانی شد. در نهایت، پیکربندی بهینه با استفاده از روش تاگوچی تعیین و تأثیر متغیرهای کنترل شده بر عملکرد سیستم نیز با روش تحلیل واریانس<sup>۱</sup> مورد تحلیل قرار گرفت.

در برخورد واقعی قطار، یک ناهم‌محوری اولیه عمودی بین سیستم‌های ضد بالارونده برخورد شده اجتناب‌ناپذیر است، که می‌تواند ناشی از ارتفاع بیش از حد قطار، سایش چرخ، تفاوت بار عمودی و تلرانس‌های تولید باشد. در نتیجه، در سناریوی برخورد قطار، یک انحراف عمودی اولیه ۴۰ میلی‌متر نیز در استاندارد EN15227 [۹] در نظر گرفته شده است.

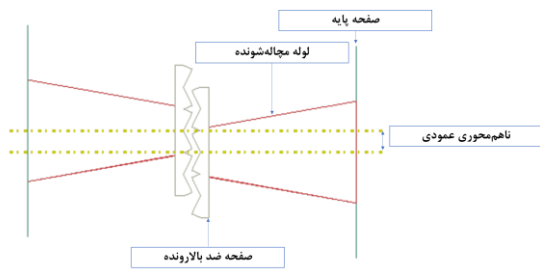
لوله‌های مخروطی به‌دلیل ساختار خود، از جاذب‌های انرژی مؤثر به‌شمار می‌روند که قابلیت تغییرشکل کنترل‌شده تحت بارهای محوری و مایل را دارا می‌باشند. این مشخصه، مقاومت در برابر ضربه را افزایش داده و در عین حال، مزیت وزن پایین آن‌ها حفظ می‌شود؛ این ویژگی‌ها، لوله‌های مخروطی را برای کاربردهای گوناگون در سامانه‌های جذب انرژی ایده‌آل می‌سازد. مطالعات اخیر، پیکربندی‌ها و مواد مختلفی را با هدف بهینه‌سازی عملکرد این لوله‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند که در آن‌ها بر پارامترهایی نظیر هندسه، خواص مواد و شرایط بارگذاری تمرکز شده است. محمد شریف و همکاران [۱۰] در مطالعه‌ای جامع به بهینه‌سازی مخروط‌های جدار نازک برای جذب انرژی ضربه پرداختند. از طراحی آزمایش‌ها با روش Box-Behnken برای کاهش تعداد تحلیل‌ها، و از روش سطح پاسخ<sup>۲</sup> برای ساخت مدل‌های جایگزین استفاده کردند. در نهایت، بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک انجام شد. نتایج نشان داد که پارامترهای تنش تسلیم ماده، ضخامت و زاویه نیمه‌رأس تأثیر زیادی بر جذب انرژی دارند. همچنین مشخص شد که کاهش زاویه نیمه‌رأس منجر به تغییر شکل بیشتر و جذب انرژی بالاتر می‌شود و افزایش ضخامت (تا یک

<sup>2</sup> Response Surface Method (RSM)<sup>1</sup> ANOVA

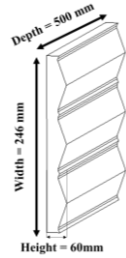
معرفی کردند که نشان می‌دهد بهینه‌سازی هندسی چگونه می‌تواند همزمان، بارهای اولیه را کاهش داده و بازدهی جذب انرژی را حفظ کند. این مدل جدید از یک مکانیزم وارونگی مشابه تلسکوپ بهره می‌برد که محدودیت‌های طراحی‌های سنتی را برطرف می‌کند. در این سازه، تحت بارگذاری محوری، اجزای جاذب وارونه شده و به سمت یکدیگر حرکت می‌کنند و انرژی را از طریق انقباض محیطی دیواره لوله تلف می‌نمایند. همچنین با استفاده از یک مطالعه پارامتری، اثرات هندسه را بررسی کرده و نشان دادند که انتخاب دقیق ابعاد می‌تواند به‌طور قابل توجهی باعث کاهش بارهای اولیه شود، بدون آن‌که جذب انرژی ویژه کاهش یابد. آذرخش و قمریان [۱۵] به‌طور خاص به بررسی رفتار فروریزش و جذب انرژی لوله‌های مخروطی جدارنازک با دو انتهای گیردار تحت بارهای محوری و مایل پرداخت. پژوهش آن‌ها که با به‌کارگیری همزمان روش اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی انجام شد، نشان داد که اگرچه با افزایش زاویه بارگذاری، بار میانگین خردشدگی و انرژی جذب‌شده به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد، اما این لوله‌های مخروطی در مقایسه با لوله‌های استوانه‌ای، عملکرد برتری در شرایط بارگذاری مایل از خود نشان می‌دهند. نتایج این مطالعه همچنین آشکار ساخت که پرکردن لوله‌های مخروطی با فوم پلی‌یورتان، نه تنها الگوی فروریزش را به حالت مطلوب‌تر و متقارن محوری تغییر می‌دهد، بلکه ظرفیت جذب انرژی به‌ویژه تحت بارهای مایل را نیز افزایش می‌دهد. افزون بر این، مشخص شد که افزایش زاویه نیمه‌رأس مخروط (در محدوده مورد مطالعه) می‌تواند موجب بهبود جذب انرژی ویژه شود. بهروان و همکاران [۱۶] رویکرد نوآورانه‌ای را برای بهبود عملکرد جاذب‌های استوانه‌ای ارائه کردند. آن‌ها تأثیر فشار داخلی هوا را به عنوان یک پارامتر طراحی کلیدی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها که با بهره‌گیری از شبیه‌سازی المان محدود و بهینه‌سازی با الگوریتم تکامل زمانی به دست آمد، نشان داد که با ایجاد تراکم داخلی بدون کم شدن قابلیت جذب وزن جاذب را کاهش داد و عملکرد طرح بهینه به‌دست‌آمده نسبت به نمونه بدون تراکم بیش از ۳۳ درصد بهبود می‌یابد. همچنین محمودی و همکاران [۱۷] با استفاده

حد بهینه) جذب انرژی را افزایش می‌دهد. احمد و همکاران [۱۱] به بررسی عملکرد لوله‌های مخروطی پرشده با فوم تحت بار ضربه‌ای مایل پرداختند. یافته‌های آنان نشان داد که این لوله‌ها در مقایسه با انواع خالی، جاذب‌های انرژی برتری محسوب می‌شوند. مهم‌ترین مزیت لوله‌های پرشده با فوم، حفظ بهتر ظرفیت جذب انرژی با افزایش زاویه بارگذاری بود. به‌طور مشخص، وجود فوم زاویه بحرانی انتقال از فروریزش پیشرونده به کم‌انرژی کلی را به‌طور قابل توجهی از ۱۳-۱۵ درجه به ۱۷-۱۹ درجه افزایش می‌داد. در بین پارامترهای مؤثر، زاویه بارگذاری بیشترین تأثیر را بر انرژی جذب‌شده داشت و پس از آن به ترتیب ضخامت جداره و زاویه نیمه‌رأس قرار گرفتند. نکته حائز اهمیت دیگر این بود که استفاده از زوایای نیمه‌رأس بزرگ‌تر از ۵ درجه به‌طور کامل از وقوع کم‌انرژی کلی جلوگیری می‌کرد. این پژوهش در نهایت لوله‌های مخروطی پرشده با فوم را به عنوان گزینه‌ای کارآمد و قابل اعتماد برای جذب انرژی در شرایط بارگذاری مایل، به‌ویژه در کاربردهای مرتبط با ایمنی خودرو معرفی نمود.

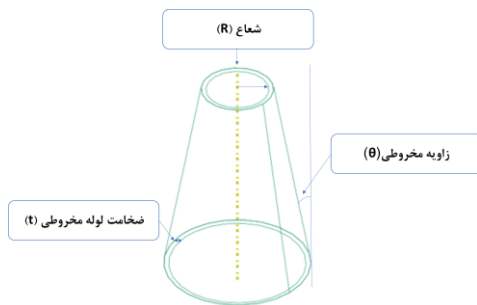
ژائو و همکاران [۱۲] قابلیت‌های جذب انرژی لوله‌های مخروطی چندبخشی با زوایای اتصال مختلف را بررسی کردند و دریافتند که این زوایا تأثیر قابل توجهی بر بازدهی جذب انرژی دارند. به‌طور خاص، زوایای بیشتر از ۱۰ درجه باعث کاهش بازدهی شده و منجر به منحنی نیرو-جابجایی «نزولی» می‌شوند. احمدی و عسگری [۱۳] به بررسی تأثیر ساختار موج‌دار بر خواص جذب انرژی لوله‌های مخروطی تحت بارهای محوری و مایل شبه‌استاتیکی پرداختند. در این پژوهش، بر مزایای لوله‌های مخروطی دیواره‌نازک در جذب انرژی، به‌ویژه به‌دلیل مقاومت در برابر ضربه و کارایی بالا در برخوردهای مایل تأکید شد. آن‌ها با به‌کارگیری تحلیل المان محدود، هندسه‌های موج‌دار مختلف را مطالعه کرده و اثرات آن‌ها را بر نیروی فشاری اولیه و جذب انرژی ویژه ارزیابی نمودند. صحت‌سنجی مدل از طریق آزمایش‌های تجربی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای آلومینیومی ساده و موج‌دار صورت گرفت. یافته‌ها حاکی از آن بود که لوله‌های مخروطی موج‌دار در مقایسه با نمونه‌های ساده، از کارایی برتر در جذب انرژی برخوردارند و به‌ویژه، جذب انرژی ویژه را در شرایط بارگذاری مایل به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشند. آذرخش و همکاران [۱۴] یک جاذب انرژی مخروطی تلسکوپی جدید



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱- (الف) مدل المان محدود سیستم جاذب انرژی ضد بالارونده با آفست عمودی ۴۰ میلی‌متر (ب) نمایش سه بعدی صفحه ضد بالارونده (ج) نمایش سه بعدی لوله مچاله‌شونده مخروطی

خواص مکانیکی الاستیک صفحه ضد بالارونده و لوله‌های مخروطی در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، برای لوله‌های مخروطی از یک مدل رفتاری پلاستیک غیرخطی استفاده شد. مقادیر تنش- کرنش مربوط به این مدل در جدول ۲ نمایش داده شده است [۱۷].

جدول ۱- خواص مکانیکی الاستیک

ضریب پواسون	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (Mpa)
۰٫۳	۷۸۹۰	۲۰۶

از الگوریتم سیستم ذرات ارتعاشی<sup>۱</sup> به بهینه‌سازی هندسه مخروط پرداختند و نشان دادند که وجود فشار داخلی در یک جاذب مخروطی بهینه‌شده می‌تواند ظرفیت جذب انرژی را تا ۱۶ درصد افزایش دهد. این بهبود عملکرد علاوه بر افزایش کارایی جاذب، با تغییر حالت فروریزی به الگوی متقارن تر و کاهش شوک اولیه، ایمنی و راحتی بیشتری را به ارمغان می‌آورد.

در این مقاله، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بر خروجی‌های مختلف، تحلیل شبه‌استاتیکی انجام می‌شود. ابتدا با استفاده از روش هم‌رسانی، ۱۰۰ مدل هندسی مختلف از سازه جاذب انرژی شامل لوله مخروطی و صفحه ضد بالارونده ارائه می‌گردد. سپس این مدل‌ها در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده و رفتار مچاله‌شدن آن‌ها تحت بارگذاری غیر هم‌مرکز مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به هزینه‌های محاسباتی بالا و رفتار غیرخطی سازه، از یک مدل جایگزین مبتنی بر شبکه توابع پایه شعاعی (RBF) استفاده شد. در ادامه، بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم NSGA-II بر اساس مدل‌های RBF انجام گرفت و در نهایت، پاسخ‌های بهینه به‌دست‌آمده مورد ارزیابی قرار گرفتند.

## ۲- مدل‌سازی اجزای محدود

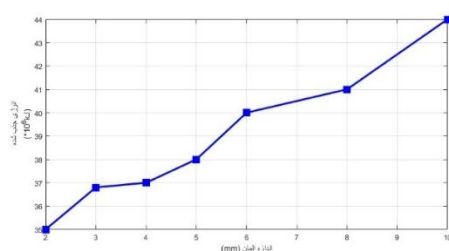
در این مقاله، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، مدل اجزای محدود از دو بخش متقارن تشکیل شده است:

(الف) یک سیستم جاذب انرژی ثابت و مقید شده در یک انتها (ب) یک سیستم جاذب انرژی متحرک که با سرعت ۱۰۰۰ میلی‌متر بر ثانیه به سمت بخش ثابت حرکت می‌کند.

هر دو سیستم شامل اجزای اصلی لوله‌های مچاله‌شونده، صفحه ضد بالارونده و پایه نگهدارنده می‌باشند. مطابق با الزامات استاندارد EN15227 برای شبیه‌سازی برخورد قطار، یک انحراف عمودی اولیه به مقدار ۴۰ میلی‌متر در مدل در نظر گرفته شده است.

<sup>۱</sup> Vibrating Particle System Algorithm

میلی‌متر به وضوح مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن پایدارترین رفتار و تعادل مناسب بین دقت نتایج و هزینه محاسباتی، اندازه مش ۴ میلی‌متر به عنوان اندازه بهینه برای کلیه شبیه‌سازی‌های لوله‌های مخروطی انتخاب گردید. در مورد صفحه ضد بالارونده، با توجه در نظر گرفتن تنها رفتار الاستیک برای این جزء، از المان‌های مکعبی با اندازه ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. همچنین، صفحات صلب به کاررفته در پایه‌ها با اندازه المان درشت‌تر معادل ۲۰ میلی‌متر مش‌بندی شدند.



شکل ۲- بررسی استقلال از مش

در این مقاله، با به‌کارگیری روش طراحی آزمایش‌های هم‌رسلی، ۱۰۰ شبیه‌سازی شبه‌استاتیکی از سازه جاذب انرژی انجام شد. در این شبیه‌سازی‌ها، اثر نرخ کرنش ماده در نظر گرفته نشد. در یک تحلیل شبه‌استاتیکی، هدف شبیه‌سازی فرآیند در کوتاه‌ترین بازه زمانی ممکن است، به‌گونه‌ای که نیروهای اینرسی در طول آن ناچیز باقی بمانند. برای اطمینان از قرارگیری زمان شبیه‌سازی در محدوده قابل قبول، معمولاً از مقیاس‌دهی جرم و اعمال سرعت بارگذاری بالا استفاده می‌شود. در این زمینه دو معیار اساسی وجود دارد: اول آنکه کل انرژی جنبشی سیستم باید در مقایسه با کل انرژی داخلی جذب‌شده در طول فرآیند لهیدگی، بسیار ناچیز باشد. دوم آنکه منحنی پاسخ نیروی فروریزش-جابه‌جایی باید مستقل از سرعت بارگذاری باشد [۱۹-۲۱]. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، معیار تعادل انرژی - که مبتنی بر نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی است - به‌خوبی برقرار است. به‌عبارت دیگر، انرژی جنبشی در مقایسه با انرژی داخلی ناچیز بوده که این موضوع، صحت انجام شبیه‌سازی شبه‌استاتیکی را تأیید می‌کند.

جدول ۲- روابط تنش-کرنش پلاستیک برای لوله [۱۷]

کرنش پلاستیک	تنش (MPa)
۰/۰۲۲	۲۸۰/۴۳
۰/۰۲۶	۳۱۲/۸۱
۰/۰۳۲	۳۳۸/۰۱
۰/۰۵	۴۰۸/۲۷
۰/۰۸	۴۴۲/۶۴
۰/۱۱	۴۷۱/۶۵
۰/۱۷	۴۹۰/۲۱
۰/۲۱	۴۹۴/۰۲

برای شبیه‌سازی سطوح تماسی صفحه ضد بالارونده، صفحات تکیه‌گاهی و دو سر لوله‌های مچاله شونده، از نوع قید تای<sup>۱</sup> استفاده شده است. این نوع قیدگذاری باعث می‌شود که تغییرات نیرو در حین فرآیند فروریزش به دلیل عدم لغزش بین سطوح، کاملاً نرم و پایدار باشد. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، برای تعریف برخورد بین سطوح از الگوریتم تماس کلی با ضریب اصطکاک ۰/۳ استفاده شده است. همچنین، در شبیه‌سازی‌های مربوط به لوله جاذب انرژی، علاوه بر شرایط تکیه‌گاهی، از قید تای برای اتصال صفحه ضد بالارونده و لوله نیز بهره گرفته شده است.

برای المان‌بندی، از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. المان پوسته چهاروجهی S4R با ادغام کاهش‌یافته برای شبیه‌سازی لوله مچاله‌شونده انتخاب شده است. به منظور تعیین اندازه بهینه مش، تحلیل همگرایی با تغییر اندازه المان در بازه ۲ تا ۱۰ میلی‌متر انجام شد. مطابق شکل (۲)، نتایج نشان می‌دهد که در محدوده مش ۳ تا ۵ میلی‌متر، انرژی جذب‌شده با تغییراتی کمتر از ۳ درصد نسبتاً پایدار است که حاکی از همگرایی نتایج در این محدوده می‌باشد. به‌ویژه در اندازه مش ۴ میلی‌متر، انرژی جذب‌شده ۳۷ کیلوژول محاسبه گردید. نقطه مربوط به اندازه مش ۲ میلی‌متر، به دلیل مش‌بندی بسیار ریز و اثرات عددی مرتبط با افزایش مصنوعی صلبیت محلی، انحراف بیشتری را نشان می‌دهد. با این حال، این انحراف تأثیری در انتخاب اندازه بهینه مش ندارد، چرا که پایداری و همگرایی مشخص نتایج در محدوده ۳-۵

<sup>۱</sup> Tie

الف - جذب انرژی ویژه (SEA)<sup>۱</sup>: این پارامتر که از مهم‌ترین معیارهای کارایی جاذب‌ها محسوب می‌شود، بیانگر میزان انرژی جذب‌شده به ازای واحد جرم سازه است و با رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌گردد.

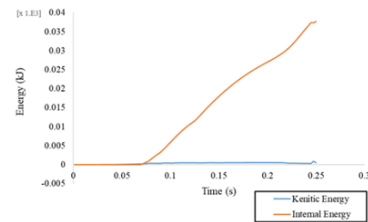
$$TEA = \int P d\delta \quad (1)$$

$$SEA = \frac{TEA}{m} \quad (2)$$

که در رابطه ۱، P نیروی مچالگی در راستای محوری و  $\delta$  جابجایی در راستای محوری می‌باشد. در واقع، برای محاسبه انرژی جذب‌شده کل، باید سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی را محاسبه نمود. هدف، بیشینه‌سازی این پارامتر است تا انرژی ضربه ناشی از برخورد به مؤثرترین شکل ممکن و با کمترین وزن افزوده مستهلک گردد.

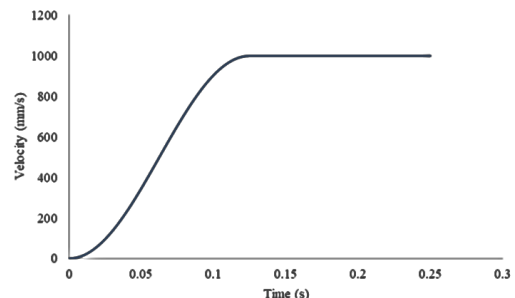
ب- بیشترین نیروی مچالگی<sup>۲</sup>: این پارامتر بیانگر حداکثر نیرویی (Fmax) است که در راستای محوری به سازه وارد می‌شود و شاخصی حیاتی برای ارزیابی سطح بارگذاری منتقل‌شده به سازه اصلی واگن است. در طراحی جاذب‌های انرژی، هدف، کمینه‌سازی این پارامتر در عین حفظ کارایی قابل قبول است که به دلایل زیر حائز اهمیت می‌باشد:

- حفظ یکپارچگی سازه‌ای: نیروهای فشاری بسیار بالا می‌توانند منجر به کماتش، تغییر شکل‌های پلاستیک گسترده یا حتی شکست در قاب انتهایی واگن و دیگر اجزای حساس سازه شوند که خود عاملی برای تشدید خسارت است.
  - بهبود ایمنی سرنشینان: Fmax بالا مستقیماً با شتاب منفی بزرگ و ناگهانی مرتبط است که خطر آسیب‌های جدی جانی را برای مسافران افزایش می‌دهد. کنترل این نیرو، شتاب وارده را محدود می‌کند.
  - کاهش احتمال پدیده‌های ثانویه خطرناک: یک Fmax کنترل‌شده و پایین، از تشدید پدیده‌های ناخواسته‌ای مانند بالارفتن واگن یا انحراف از مسیر که می‌توانند پیامدهای حادثه را وخیم‌تر کنند، جلوگیری می‌نماید.
- مسئله بهینه‌سازی در این مقاله به صورت یک مسئله دوهدفه‌ی متضاد فرمول‌بندی شده است: حداکثرسازی جذب



شکل ۳- مقایسه انرژی داخلی و جنبشی در شبیه‌سازی شبه استاتیک

در تحلیل‌های شبه‌استاتیکی، به منظور جلوگیری از اعمال ناگهانی موج تنش به قطعه، از روش‌های افزایش تدریجی بار در ابتدای تحلیل استفاده می‌شود. در این پژوهش، با به‌کارگیری تابع Smooth Step در نرم‌افزار آباکوس، بارگذاری به صورت تدریجی اعمال شده است. در این روش، سرعت بارگذاری در بازه‌ی زمانی ۰،۱۲۵ ثانیه‌ی اولیه، با شیبی ملایم از صفر به مقدار نهایی خود افزایش می‌یابد و سپس تا پایان تحلیل، در این مقدار ثابت نگه داشته می‌شود. نمودار مربوط به این شرایط بارگذاری در شکل (۴) ارائه شده است [۲۲].



شکل ۴- بارگذاری Smooth

#### ۱-۲- پارامترهای ارزیابی قابلیت جذب انرژی

از پارامترهای متعددی برای ارزیابی عملکرد جاذب‌های انرژی استفاده می‌شود که انتخاب و اولویت‌دهی آن‌ها مستقیماً بر اهداف ایمنی و کارایی طراحی تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش، تمرکز بر دو شاخص کلیدی جذب انرژی ویژه (SEA) و بیشینه نیروی فشاری (Fmax) قرار دارد که نمایانگر دو جنبه مکمل و متعارض در طراحی هستند.

<sup>۲</sup> Maximum Crush Force

<sup>۱</sup> Specific Energy Absorption (SEA)

برای نمونه‌گیری یکنواخت از یک ابرمکعب واحد استفاده می‌نماید. این نقاط سپس از طریق یک تابع توزیع تجمعی احتمالی معکوس تبدیل شده تا مجموعه نمونه‌های مورد نیاز برای هر متغیر را تولید نمایند. نتایج حاصل از این روش، پوشش بهینه‌ای از محدوده توزیع همراه با حداقل تعداد نقاط نمونه را فراهم می‌کند [۲۲-۲۴].

در مجموع، ۱۰۰ مدل اجزای محدود بر اساس نمونه‌های تولیدشده توسط روش هم‌رسلی طراحی و شبیه‌سازی شدند. ماتریس طراحی نهایی در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر متغیرهای طراحی به‌گونه‌ای توزیع شده‌اند که تمامی نواحی فضای طراحی را به‌طور یکنواخت پوشش دهند. به‌عنوان مثال، ضخامت (t) در بازه ۴ تا ۱۰ میلی‌متر، شعاع (R) در محدوده ۵۰ تا ۱۱۰ میلی‌متر و زاویه مخروطی ( $\theta$ ) در محدوده ۰ تا ۱۵ درجه به‌طور سیستماتیک تغییر کرده‌اند. این پوشش یکنواخت امکان ساخت مدل‌های جایگزین دقیق را فراهم می‌سازد.

انرژی ویژه (SEA) و حداقل‌سازی بیشینه نیروی فشاری (Fmax). یافتن راه‌حلی که به‌طور هم‌زمان هر دو معیار را تا حد امکان بهبود بخشد، منجر به طراحی جاذب‌های انرژی می‌شود که نه‌تنها در مستهلک کردن انرژی کارآمد هستند، بلکه از نظر انتقال بار به سازه اصلی و ایمنی سرنشینان نیز عملکردی قابل اطمینان و برتر دارند.

## ۲-۲- طراحی نقاط نمونه با استفاده از روش هم‌رسلی

روش نمونه‌گیری هم‌رسلی<sup>۱</sup> به عنوان یکی از روش‌های کارآمد در طراحی آزمایش‌ها شناخته می‌شود. پژوهش‌های متعددی در زمینه روش‌های نمونه‌گیری تصادفی انجام شده که هدف اصلی آن‌ها کاهش تعداد نقاط طراحی نمونه، در کنار حفظ دقت و قابلیت اطمینان در توزیع احتمالی است. روش شبه-مونت کارلو که توسط دیویکار و همکاران [۲۳] توسعه داده شده، نسخه تکامل‌یافته‌ای از روش مونت کارلو ساده محسوب می‌شود. این الگوریتم که با نام نمونه‌گیری دنباله‌ای هم‌رسلی شناخته می‌شود، به عنوان یک روش نمونه‌گیری با کارایی بالا به طور گسترده مورد تأیید پژوهشگران قرار گرفته است. روش HSS از نقاط هم‌رسلی که اعداد شبه-تصادفی تولید می‌کنند،

جدول ۳- ماتریس طراحی به روش هم‌رسلی

شماره آزمون	پارامترهای طراحی			پاسخ شبیه‌سازی اجزای محدود	
	t mm	R mm	$\theta$ deg	SEA kJ/kg	Fmax kN
۱	۴	۵۰	۰	۰/۸۲	۲۸۷/۸۲
۲	۷	۸۰	۷/۵	۲/۲۱	۸۲۹/۹۰
۳	۵.۵	۶۵	۳/۸	۱/۵۳	۴۸۶/۱۱
۴	۸/۵	۹۵	۱۱/۲	۳/۰۷	۱۱۷۲/۶۶
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
۹۸	۹/۹	۱۰۸/۶	۱۴/۵	۳/۴۸	۱۱۷۲/۶۶
۹۹	۴/۱	۵۱/۴	۰/۲	۰/۸۵	۲۹۷/۵۸
۱۰۰	۷/۱	۸۱/۴	۷/۷	۲/۳۱	۸۶۰/۲۱

<sup>1</sup> Hammersley Sampling Sequence (HSS)

### ۳- مدل‌سازی با شبکه توابع پایه شعاعی

شبکه توابع پایه شعاعی (RBF) یک روش قدرتمند برای تقریب توابع چندمتغیره با کارایی محاسباتی بالا است. این روش به‌ویژه برای مسائل بهینه‌سازی مهندسی که شامل شبیه‌سازی‌های پرهزینه‌المان محدود هستند، بسیار مناسب است [۲۵].

#### ۳-۱- ساختار شبکه توابع پایه شعاعی

مطابق شکل (۵) شبکه RBF از سه لایه تشکیل شده است:

- لایه ورودی: متغیرهای طراحی شامل ضخامت لوله مخروطی (t)، شعاع (R) و زاویه مخروطی ( $\theta$ )
- لایه پنهان: توابع پایه شعاعی
- لایه خروجی: جذب انرژی ویژه (SEA) و بیشینه نیروی فشردگی (Fmax) نیروی مچالگی



شکل ۵- ساختار شبکه توابع پایه شعاعی

#### ۳-۲- جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های مورد نیاز این پژوهش شامل متغیرهای طراحی (ضخامت t، شعاع R، زاویه  $\theta$ ) و پاسخ‌های خروجی (جذب انرژی ویژه SEA و بیشینه نیروی فشردگی Fmax) حاصل از ۱۰۰ تحلیل اجزای محدود به‌عنوان ورودی به الگوریتم داده شد. به منظور بهبود همگرایی و پایداری عددی مدل، پاسخ‌های خروجی با استفاده از روابط (۳) و (۴)، در محدوده [۰، ۱] نرمال‌سازی شدند:

$$SEA_{norm} = \frac{SEA - SEA_{min}}{SEA_{max} - SEA_{min}} \quad (3)$$

$$Fmax_{norm} = \frac{Fmax - Fmax_{min}}{SEA_{max} - Fmax_{min}} \quad (4)$$

این فرآیند نرمال‌سازی موجب می‌شود تمامی متغیرها در یک محدوده یکسان قرار گیرند که این امر منجر به بهبود پایداری عددی، افزایش سرعت همگرایی و جلوگیری از تسلط متغیرهایی با مقادیر عددی بزرگ‌تر در فرآیند آموزش مدل می‌شود.

### ۳-۳- تقسیم‌بندی داده‌ها و اعتبارسنجی

برای ارزیابی قابلیت تعمیم‌پذیری مدل و جلوگیری از بیش‌برازش<sup>۱</sup>، داده‌های موجود به‌صورت تصادفی به دو مجموعه مستقل تقسیم‌بندی شدند: مجموعه آموزش شامل ۸۰ درصد داده‌ها برای ساخت مدل و مجموعه آزمون شامل ۲۰ درصد داده‌ها برای ارزیابی عملکرد مدل بر روی داده‌های دیده‌نشده. به منظور اطمینان از تکرارپذیری فرآیند تقسیم‌بندی، از یک مقدار اولیه ثابت<sup>۲</sup> با مقدار ۴۲ در تابع تولید اعداد تصادفی استفاده شد. سپس با به‌کارگیری تابع randperm، یک دنباله تصادفی از اندیس‌های داده‌ها ایجاد گردید. این رویکرد تضمین می‌کند که تقسیم‌بندی داده‌ها در تمامی اجراهای متوالی، که به صورت یکسان انجام پذیرد و نتایج حاصل از سناریوهای مختلف آموزشی و آزمون، کاملاً قابل مقایسه و اطمینان‌بخش باشند.

### ۳-۴- مدل‌سازی شبکه توابع پایه شعاعی

در این مقاله، از شبکه توابع پایه شعاعی به‌عنوان یک مدل دقیق برای تقریب رابطه بین متغیرهای طراحی و پاسخ‌های مهندسی استفاده شد. مدل‌سازی با بهره‌گیری از تابع fitrgp در محیط نرم‌افزار متلب و با انتخاب هسته گاوسی مربعی انجام پذیرفت. این هسته به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی سطوح پاسخ پیچیده و رفتارهای غیرخطی موجود در مسائل جذب انرژی، انتخاب شد. برای دستیابی به دقت مطلوب در پیش‌بینی هر یک از خروجی‌های کلیدی شامل جذب انرژی ویژه (SEA) و بیشینه نیروی فشردگی (Fmax)، مدل‌های جداگانه‌ای آموزش داده شد. مدل RBF برای تقریب توابع پاسخ به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$\hat{f}(X) = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|X - X_i\|) + b^T X + c \quad (5)$$

که در آن:

- $\hat{f}(X)$ : مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل RBF برای ورودی X، در این پژوهش دو مقدار  $\hat{f}_{SEA}(X)$  و  $\hat{f}_{Fmax}(X)$  به‌عنوان خروجی نهایی مدل در بهینه‌سازی استفاده می‌شود.

<sup>2</sup> Seed

<sup>1</sup> Overfitting

تضمین می‌کند که مولفه نویز ( $\sigma_n^2$ ) تنها به واریانس هر نقطه نسبت به خودش  $k(x, x)$  افزوده شود و در محاسبه کوواریانس بین نقاط مختلف  $k(x, x')$  نقشی نداشته باشد. این امر منجر به ایجاد یک مدل روند گاوسی پایدار می‌شود که قادر است هم عدم قطعیت ذاتی در مشاهدات (نویز) و هم الگوی کلی تابع (سیگنال) را به طور همزمان مدل کند.

#### ۴-۳- ارزیابی مدل RBF

ارزیابی کارایی مدل RBF برای اطمینان از دقت بالاتر نتایج بهینه‌سازی ضروری است. در این بخش، از روش تحلیل خطا برای بررسی دقت مدل استفاده می‌شود که شامل خطای مطلق متوسط نسبی (RAAE)<sup>۱</sup>، و ضریب تعیین ( $R^2$ )<sup>۲</sup> را در بر می‌گیرد [۲۶]. این دو پارامتر با استفاده از روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند:

$$RAAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}|} \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

که در این رابطه،  $\hat{y}_i$  نشان‌دهنده مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل مبتنی بر شبکه عصبی RBF و  $y_i$  نشان‌دهنده مقدار واقعی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مدل اجزای محدود مربوطه است.

#### ۴- بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک چند هدفه

در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف متعارض، دستیابی به مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه (جبهه پارتو) که بیانگر مصالحه‌های ممکن بین آن اهداف است، امری ضروری می‌باشد. برای این منظور، الگوریتم‌های فراابتکاری متعددی مانند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه<sup>۳</sup> [۲۷]، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط<sup>۴</sup> [۲۱] و الگوریتم چرخه آب<sup>۵</sup> [۲۸] توسعه یافته‌اند که هر کدام با مکانیزم‌های متفاوتی به دنبال یافتن جبهه پارتو با پوشش و تنوع مناسب هستند.

- $n$ : تعداد نقاط آموزشی مورد استفاده در ساخت مدل (در این مقاله ۸۰ در نظر گرفته شده است).
- $X=[t, R, \theta]^T$ : بردار سه‌بعدی متغیرهای طراحی شامل ضخامت، شعاع و زاویه مخروطی.
- بخش غیرخطی  $\sum_{i=1}^n w_i \phi(\|X - X_i\|)$  مسئول یادگیری رفتارهای غیرخطی سیستم می‌باشد.
- $w_i$ : وزن‌های مدل.
- $\phi(r)$ : تابع پایه شعاعی (کرنل).
- $X_i$ : ترکیب خطی توابع پایه شعاعی حول مراکز
- هر جمله  $\phi(\|X - X_i\|)$  میزان شباهت نقطه  $X$  به مرکز  $X_i$  را اندازه‌گیری می‌کند.
- بخش خطی  $b^T X + c$ ، برای مدل‌سازی روند کلی خطی موجود در داده‌ها به کار رفته است و  $b$  و  $c$ ، پارامترهای مدل خطی می‌باشند.
- تابع کرنل نمایی مربعی از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$k(x, x') = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{1}{2}(x - x')^T M (x - x') + \sigma_n^2 \delta_{xx'}\right) \quad (6)$$

که در آن:

- $\sigma_f^2$  (واریانس سیگنال): این پارامتر دامنه کلی تغییرات توابع پیش‌بینی شده را کنترل می‌کند. مقادیر بزرگ‌تر آن نشان‌دهنده توانایی مدل برای پوشش نوسانات بزرگ‌تر در مقادیر خروجی (نظیر SEA و Fmax) است.
- ماتریس مقیاس خودکار  $M$ : حساسیت مدل به تغییرات در هر یک از متغیرهای طراحی را تعیین می‌کند.
- $(x - x')^T M (x - x')$ : این عبارت یک فاصله وزن‌دار بین دو نقطه  $x$  و  $x'$  در فضای طراحی محاسبه می‌کند که اهمیت هر متغیر طراحی را از طریق ماتریس  $M$  در نظر می‌گیرد.
- $\sigma_n^2$  (واریانس نویز): این پارامتر میزان نویز یا عدم قطعیت ذاتی در داده‌های آموزشی را مدل می‌کند. مقادیر بزرگ‌تر برای آن نشان‌دهنده داده‌های با نویز بیشتر یا دارای عدم قطعیت بیشتر است.
- $\delta_{xx'}$  (تابع دلتای کرونگر):

این تابع تنها زمانی مقدار ۱ دارد که  $x' = x$  (یعنی نقطه یکسان باشد) و در غیر این صورت صفر است. این عبارت

<sup>4</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

<sup>5</sup> Water Cycle Algorithm (WCA)

<sup>1</sup> Average Absolute Error

<sup>2</sup> Decision Coefficient

<sup>3</sup> Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

تعیین ( $R^2$ ) بیش از ۰,۹ است و نشان‌دهنده برازش بسیار عالی مدل و توانایی آن در پیش‌بینی دقیق مقادیر خروجی است. مقادیر RAAE برای SEA، ۰/۰۱۷ و Fmax، ۰/۰۱۸ می‌باشد. این نتایج به‌طور کامل نشان می‌دهد که مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی RBF از دقت بالایی برخوردارند.

جدول ۵- مقادیر پارامترهای ارزیابی RBF

تابع هدف	RAAE	$R^2$
SEA	۰/۰۱۷	۰/۹۸
Fmax	۰/۰۱۸	۰/۹۷

#### ۲-۴- جبهه پارتو و طرح‌های بهینه

برای ارزیابی کیفیت جبهه پارتو به‌دست‌آمده، از دو معیار پرکاربرد هایپروالوم و فاصله ازدحام استفاده شده است [۳۰]. شاخص هایپروالوم (Hypervolume): این شاخص، حجمی از فضای هدف را که توسط جبهه پارتو پوشش داده می‌شود، اندازه‌گیری می‌کند و معیاری ترکیبی از همگرایی و تنوع مجموعه راه‌حل‌ها ارائه می‌دهد. مقادیر بالاتر این شاخص نشان‌دهنده کیفیت بهتر است.

شاخص فاصله ازدحام (Spacing): این شاخص یکنواختی توزیع راه‌حل‌ها را در طول جبهه پارتو ارزیابی می‌کند. این معیار با محاسبه انحراف معیار فاصله نقاط از نزدیک‌ترین همسایه خود، یکنواختی توزیع را می‌سنجد. مقادیر پایین‌تر این شاخص مطلوب‌تر هستند.

مقادیر کمی این شاخص‌ها برای جبهه پارتو به‌دست‌آمده، در جدول ۶ گزارش شده است. مقدار هایپروالوم (۰/۷۲) نشان‌دهنده همگرایی و تنوع خوب مجموعه راه‌حل‌ها است. مقدار پایین شاخص فاصله ازدحام (۰/۰۱۲) حاکی از توزیع یکنواخت راه‌حل‌ها است.

جدول ۶- ارزیابی کیفیت جبهه پارتو

شاخص	مقدار
هایپروالوم	۰/۷۲
فاصله ازدحام	۰/۰۱۲

شکل (۵) جواب‌های پارتو را در فضای اهداف طراحی نشان می‌دهد. رابطه بین تغییرات SEA و Fmax به صورت مستقیم است؛ به طوری که افزایش SEA همواره منجر به افزایش

در این مقاله، از الگوریتم NSGA-II که توسط دیب و همکاران [۲۹] به عنوان یک الگوریتم سریع توسعه یافته، برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. این انتخاب به دلیل سابقه موفق، کارایی بالا و قابلیت اطمینان این الگوریتم در یافتن جبهه‌های پارتو با کیفیت، به ویژه در مسائل با فضای طراحی پیوسته مانند مسئله حاضر، صورت گرفته است. مکانیزم‌های کلیدی NSGA-II شامل مرتب‌سازی غیرمسلط برای طبقه‌بندی راه‌حل‌ها، فاصله ازدحام برای حفظ تنوع در جبهه پارتو، و اپراتورهای ژنتیک (تقاطع و جهش) برای کاوش فضای طراحی می‌باشد [۳۰].

در ادامه با استفاده از مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی RBF به عنوان توابع هدف، فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک NSGA-II انجام شد. جزئیات پارامترهای این الگوریتم در جدول ۴ نشان داده شده است. مسئله بهینه‌سازی دو هدفه به صورت رابطه (۹) فرمول‌بندی شده است تا ماکزیم نیروی فشاری (Fmax) به حداقل رسیده و جذب انرژی ویژه (SEA) به حداکثر برسد:

$$\begin{cases} \text{Minimize } F(x) = [-SEA, F_{\max}(x)]^T \\ \text{Subject to } x = [t, R, \theta]^T \\ 4 \leq t \leq 10 \\ 50 \leq R \leq 110 \\ 0 \leq \theta \leq 15 \end{cases} \quad (9)$$

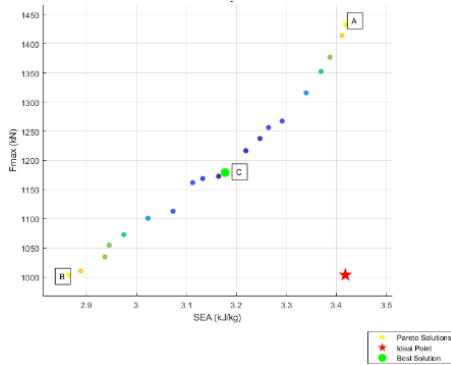
جدول ۴- جزئیات پارامترهای الگوریتم NSGA-II

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت	۶۰
تعداد نسل‌ها	۱۰۰
تعداد کل ارزیابی‌ها	۶۰۰۰
احتمال تقاطع	۰/۸
تعداد نقاط پارتو نهایی	۲۱
احتمال جهش	۰/۰۸

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- دقت مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی RBF

مقادیر RAAE و  $R^2$  برای شاخص‌های SEA و Fmax با استفاده از روابط (۸) تا (۹) محاسبه شده و در جدول ۵ نشان داده شده است. از نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌شود که مقدار ضریب



شکل ۵- جواب‌های پارتو در فضای اهداف طراحی

به منظور اعتبارسنجی نتایج بهینه‌سازی، مدل‌های اجزای محدود سه طرح بهینه پارتو در آباکوس توسعه داده شد و با پاسخ‌های بهینه مقایسه گردید. پاسخ‌های آن‌ها توسط منحنی‌های نیرو-جابجایی و رفتار لهدگی در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج بهینه‌سازی مقایسه شده است (جدول ۷). برای طرح A که بر حداکثر کردن SEA تمرکز دارد، اختلاف نسبی برای SEA و Fmax به ترتیب تنها ۳،۱۳ درصد و ۰،۶۸ درصد است. برای طرح B که بر حداقل کردن Fmax تمرکز دارد این اختلاف ۴،۳۷ درصد برای SEA و ۰،۸۸ درصد برای Fmax می‌باشد. برای طرح C (طرح متعادل)، اختلاف‌ها در پایین‌ترین سطح خود قرار دارند و به ترتیب ۱،۸۶ درصد و ۱،۷۹ درصد برای SEA و Fmax هستند. خطاهای نسبی بین نتایج شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به اندازه کافی کوچک هستند که این موضوع به طور کامل نشان می‌دهد مدل بهینه‌سازی چندهدفه ایجاد شده در این مقاله از دقت بالایی برخوردار است و می‌تواند به عنوان راهنما برای طراحی بهینه جاذب‌های انرژی مخروطی با صفحه ضد بالارونده در ادامه کار باشد.

**ملاحظات کاربردی و ساخت:** مقادیر بهینه ارائه شده برای پارامترهای طراحی (مانند نقطه  $\theta = 10.9^\circ$ ,  $R = 93.7\text{mm}$ ,  $t = 8.8\text{mm}$ ) حاصل فرآیند بهینه‌سازی عددی با دقت اعشاری بالا هستند. این دقت برای آموزش مدل جایگزین و کشف دقیق محدوده بهینه ضروری است. با این حال، برای پیاده‌سازی عملی این طرح‌ها، مقادیر نهایی باید با در نظر گرفتن ملاحظات ساخت، استانداردهای صنعتی (مانند استانداردهای ورق‌های فولادی) و تolerانس‌های ماشینکاری اصلاح و به نزدیک‌ترین مقادیر قابل اجرا گرد شوند. برای مثال، یک زاویه  $10/9$  درجه

می‌شود. برای دستیابی به حداکثر مقدار SEA، می‌توان از نقطه A در جواب‌های پارتو به عنوان راه‌حل بهینه برای تعیین پارامترهای طراحی مطلوب استفاده کرد. برای دستیابی به حداقل مقدار Fmax برای سازه، نقطه B از جواب‌های پارتو می‌تواند به عنوان راه‌حل بهینه برای طراحی سازه جاذب انرژی در نظر گرفته شود. علاوه بر این، تأثیر SEA و Fmax بایستی به طور جامع در نظر گرفته شود. به منظور دستیابی به راه‌حلی که تعادل بهینه‌ای بین این دو هدف متضاد برقرار نماید، از معیار کمترین فاصله اقلیدسی نرمال‌شده استفاده شده است [۲۶]. در این روش پس از نرمال‌سازی مقادیر هر تابع هدف، فاصله اقلیدسی هر نقطه از نقطه ایده‌آل — که در آن همزمان بالاترین مقدار SEA و پایین‌ترین مقدار Fmax تحقق می‌یابد — محاسبه می‌گردد. معیار مذکور که در رابطه (۱۰) ارائه شده است، برای تعیین نقطه مصالحه بهینه بین بهینه‌سازی SEA و کمینه‌سازی Fmax به کار گرفته شده است.

$$D_k = \sqrt{\left(\frac{SEA^k - SEA^{ideal}}{SEA^{max} - SEA^{min}}\right)^2 + \left(\frac{F_{max}^k - F_{max}^{ideal}}{F_{max} - F_{max}^{min}}\right)^2} \quad (10)$$

که در آن:

$D_k$ : فاصله اقلیدسی نرمال‌شده نقطه  $k$ ام از نقطه ایده‌آل

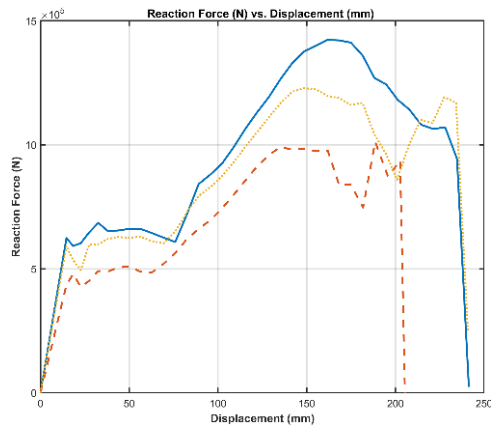
$SEA^{ideal}$ : مقدار ایده‌آل جذب انرژی ویژه  $(\text{Max}(SEA))$

$F_{max}^{ideal}$ : مقدار ایده‌آل جذب انرژی ویژه  $(\text{Min}(F_{max}))$

$SEA^k$  و  $F_{max}^k$ : مقادیر مربوط به نقطه  $k$ ام در جبهه پارتو

مقادیر max و min مربوط به گستره تغییرات هر هدف بهینه در جبهه پارتو می‌باشند.

نقطه‌ای که دارای کمترین مقدار  $D_k$  باشد، به عنوان راه‌حل بهینه مصالحه انتخاب می‌شود. بر این اساس، نقطه C به عنوان راه‌حل متعادل معرفی می‌گردد. این نقطه تعادل مطلوبی بین عملکرد جذب انرژی و ملاحظات ایمنی برقرار ساخته و برای طراحی عمومی سیستم جاذب انرژی در قطار شهری توصیه می‌شود. به طور خاص، SEA جاذب انرژی نسبت به سطح Fmax اندازه‌گیری شده در سمت چپ نقطه C برتر است.



شکل ۷- نمودار نیروی عکس‌العمل-جابجایی تحلیل اجزای محدود برای نقاط بهینه پارتو (A, B, C)

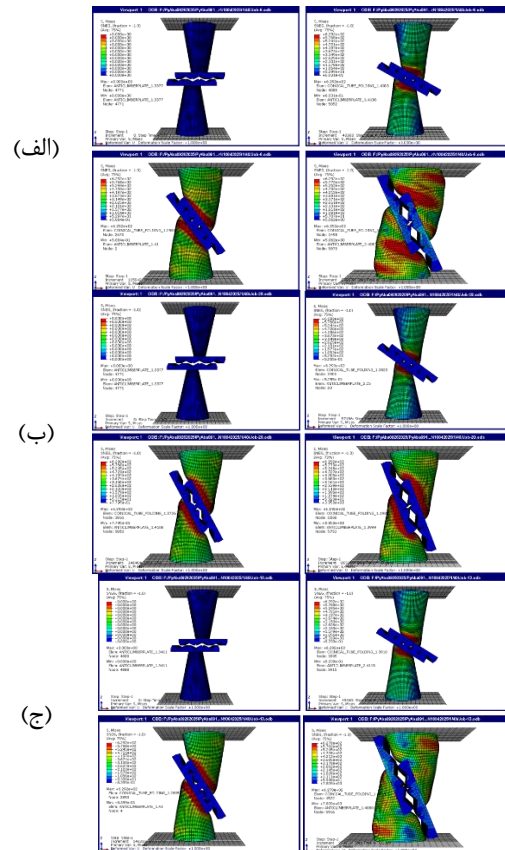
### ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه کارآمد برای طراحی سازه جاذب انرژی ضد بالارونده متشکل از لوله‌های مخروطی و یک صفحه ضد بالارونده ارائه شد. با بهره‌گیری از روش نمونه‌گیری هم‌سلی، مدل‌سازی دقیق اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس، و جایگزینی آن با یک مدل جایگزین دقیق مبتنی بر شبکه توابع پایه شعاعی (RBF)، چارچوبی قوی برای کاهش هزینه‌های محاسباتی و مدیریت رفتار غیرخطی سازه ایجاد گردید. الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌سازی هم‌زمان دو هدف متعارض — حداکثرسازی جذب انرژی ویژه (SEA) و حداقل‌سازی بیشینه نیروی فشردگی (Fmax) — به کار گرفته شد. نتایج، جبهه بهینه پارتو را به وضوح نمایش داد و سه طرح برجسته (نقاط A، B و C) برای کاربردهای مختلف شناسایی شد:

- نقطه A برای حداکثر کردن جذب انرژی.
- نقطه B برای حداقل کردن نیروی فشردگی.
- نقطه C به عنوان طرح متعادل با استفاده از معیار "کوتاه‌ترین فاصله".

اعتبارسنجی نهایی با شبیه‌سازی مستقیم این طرح‌های بهینه در آباکوس انجام پذیرفت. مقایسه نتایج، تطابق بسیار خوب و خطای نسبی کم بین پیش‌بینی‌های مدل RBF و نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود را نشان داد. این موضوع صحت و قابلیت اطمینان روش پیشنهادی را تأیید می‌کند. رویکرد ترکیبی به کار گرفته شده — شامل طراحی آزمایش‌های

می‌تواند به ۱۱ درجه، یک ضخامت ۸/۸ میلی‌متر به ورق استاندارد ۹ میلی‌متری و یک شعاع ۹۳/۷ میلی‌متر در فرآیندهای تولید دقیق (مانند CNC) قابل دستیابی است. این تطبیق، اگرچه ممکن است باعث تغییرات جزئی در عملکرد شود، اما قابلیت اطمینان و صرفه اقتصادی طراحی نهایی را تضمین می‌کند.



شکل ۶- رفتار لهدگی نقاط طراحی بهینه: (الف) نقطه A (ب) نقطه B (ج) نقطه C

وسایل نقلیه ریلی و کاهش خطر پدیده خطرناک بالارفتن مورد استفاده قرار گیرد.

عددی، مدل سازی جایگزین دقیق و بهینه سازی چندهدفه — ابزاری قدرتمند و قابل اعتماد برای طراحی بهینه سازه های جاذب انرژی پیچیده در صنعت حمل و نقل ریلی فراهم می آورد و می تواند به طور مؤثری در بهبود ایمنی غیرفعال

جدول ۷- مقایسه نتایج بهینه سازی با نتایج شبیه سازی عددی

	متغیرهای طراحی بهینه			پاسخ بهینه سازی		پاسخ شبیه سازی اجزای محدود		اختلاف نسبی	
	t mm	R mm	$\theta$ deg	Fmax kN	SEA kJ/kg	Fmax kN	SEA kJ/kg	Fmax %	SEA %
A	۸/۶	۹۵/۱	۱۰/۱	۱۴۳۲/۹۵	۳/۴۱	۱۴۲۳/۲۴	۳/۵۲	۰/۶۸	۳/۱۳
B	۹	۹۴/۵	۱۲/۸	۱۰۰۳/۳۹	۲/۸۶	۱۰۱۲/۳۲	۲/۷۴	۰/۸۸	۴/۳۷
C	۸/۸	۹۳/۷	۱۰/۹	۱۱۷۹/۷۱	۳/۱۷	۱۲۰۱/۲۴	۳/۲۳	۱/۷۹	۱/۸۶

- [10] Ahmad Z, Thambiratnam DP, Tan AC (2010) Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading. *Int J Impact Eng* 37(5): 475–488.
- [11] Zhao T, Lin Q, Chen J, Guan S (2024) Energy-absorbing performance of multi-segmented conical tubes with different connections. *Proc Inst Mech Eng Part D J Automob Eng* 239(13).
- [12] Ahmadi A, Asgari M (2018) Efficient crushable corrugated conical tubes for energy absorption considering axial and oblique loading. *Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci* 233(11): 3917–3935.
- [13] Azarakhsh S, Rezvani MJ, Maghsoudpour A (2023) Experimental and numerical study of telescopic conical energy absorber under inversion process. *Mech Based Des Struct Mach* 52(6): 3210–3228.
- [14] Azarakhsh S, Ghamarian A (2017) Collapse behavior of thin-walled conical tube clamped at both ends subjected to axial and oblique loads. *Thin Wall Struct* 112: 1–1.
- [15] Beharvan AH, Seyedkashi SMH, Sheikhi Azqandi M (2023) Optimum Design and Construction of Cylindrical Energy Absorber under Internal Pressure using Time Evolutionary Optimization Algorithm. *Modares Mech Eng* 23(01): 45–55.
- [16] Mohammadi A, Sheikhi Azqandi M, Rahnama S (2025) Designing of conical energy absorber with internal pressure by enhanced vibrating particle system algorithm. *Iran J Mater Form* 12(2): 29–41.
- [17] Choi WM, Kwon TS, Jung HS, Kim JS (2012) Influence of impact velocity on energy absorption characteristics and friction coefficient of expansion tube. *Int J Crashworthiness* 17(6): 621–629.
- [18] Santosa SP, Wierzbicki T, Hanssen AG, Langseth M (2000) Experimental and numerical studies of

## مراجع

- [1] Xu K, Xu P, Yang C, Wang T, Li B, Che Q, Huang Q (2020) Crashworthiness optimization for the rectangular tubes with axisymmetric and uniform thicknesses under offset loading. *Struct Multidisc Optim* 62: 957–977.
- [2] Guan W, Yu Y, Gao G (2021) Crashworthiness performance and multi-objective optimization of a combined splitting circular tube energy absorber under eccentric impact for subway vehicles. *Int J Impact Eng* 158: 04006.
- [3] Llana P, Stringfellow R (2011) Preliminary finite element analysis of locomotive crash-worthy components. In: *ASME 2011 Rail Transportation Division Fall Technical Conference*, pp 23–33.
- [4] Simic G, Lucanin V, Milkovic D (2006) Elements of passive safety of railway vehicles in collision. *Int J Crashworthiness* 11(4): 357–369.
- [5] Vani A, Jayachandriah B (2015) Crashworthiness of a railway vehicle to reduce overriding effect by using ABAQUS software. *Int J Eng Sci Invent Technol* 4(7): 14–22.
- [6] Zhou H, Mei M, Zhang J et al. (2021) Investigations on the vertical buckling of railway vehicle's anticlimber. *Int J Crashworthiness* 26(2): 171–181.
- [7] Ihsan MN, Santosa SP, Gunawan L, Budiwantoro B (2022) Design and optimization of anti-climber device for light rail transit crash energy management system. *Int J Crashworthiness* 28(5): 664–675.
- [8] BS EN 15227 (2020) Railway applications: crashworthiness requirements for railway vehicle bodies.
- [9] Sheriff NM, Gupta NK, Velmurugan R, Shanmugapriyan N (2008) Optimization of thin conical frusta for impact energy absorption. *Thin Wall Struct* 46(6): 653–666.

- [25] Wang D, Xie C, Wang S (2021) An adaptive RBF neural network-based multi-objective optimization method for lightweight and crashworthiness design of cab floor rails using fuzzy subtractive clustering algorithm. *Struct Multidisc Optim* 63: 915–928.
- [26] Guan W, Gao G (2023) Crashworthiness analysis of shrink circular tube energy absorbers with anti-climbers under multiple loading cases. *Mech Adv Mater Struct* 30(7): 1453–1469.
- [27] Xie S, Li H, Yang C, Yao S (2018) Crashworthiness optimisation of a composite energy-absorbing structure for subway vehicles based on hybrid particle swarm optimisation. *Struct Multidisc Optim* 58: 2291–2308.
- [28] Eskandar H, Sadollah A, Sheikhi Azqandi M, Rahnama S (2024) Multi-objective optimization of composite laminate stacking considering mechanical properties using water cycle algorithm. *Adv Comput Des* 9(4): 327–346.
- [29] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T (2002) A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans Evol Comput* 6(2): 182–197.
- [30] Zitzler E, Knowles J, Thiele L (2008) *Lecture Notes in Computer Science*, vol 5252. Springer, Berlin, Heidelberg.
- foam-filled sections. *Int J Impact Eng* 24(5): 509–534.
- [19] Wang D, Xu P, Yang C, Yao S, Liu Z (2023) Crashworthiness performance of gradient energy-absorbing structure for subway vehicles under quasi-static loading. *Electron Res Arch* 31(6): 3568–3593.
- [20] Xu P, Wang D, Yao S (2021) Multi-objective uncertain optimization with an ellipsoid-based model of a centrally symmetrical square tube with diaphragms for subway. *Struct Multidisc Optim* 64: 2789–2804.
- [21] Arjomandi Rad M, Khalkhali A (2018) Crashworthiness multi-objective optimization of the thin-walled tubes under probabilistic 3D oblique load. *Mater Des* 156: 538–557.
- [22] Diwekar UM, Kalagnanam JR (2004) Efficient sampling technique for optimization under uncertainty. *AIChE J* 43(2): 440–447.
- [23] Hinkelmann K, Kempthorne O (2008) *Design and Analysis of Experiments: Introduction to Experimental Design*. Wiley, New York.
- [24] Fang JG, Sun GY, Qiu N, Kim NH, Li Q (2017) On design optimization for structural crashworthiness and its state of the art. *Struct Multidisc Optim* 55: 1091–1119.