



مطالعه‌ای بر عملکرد بالستیکی ساختارهای تک‌لایه و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه کرووی صلب: بررسی تجربی و مدل‌سازی

محسن آئینی^۱، توحید میرزابابای مستوفی^۲، مصطفی سیاح بادخور^۲ و هاشم بابایی^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹

چکیده

در مقاله حاضر، به بررسی تجربی و مدل‌سازی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های تک‌لایه و چندلایه فلزی آلومینیومی، فولادی و یا ترکیبی از فولاد و آلومینیوم تحت ضربه پرتابه کرووی صلب پرداخته شده است. برای انجام آزمون‌های تجربی، هشت نوع لایه‌بندی مختلف در نظر گرفته شد و نمونه‌ها در محدوده سرعت ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه تحت ضربه پرتابه قرار گرفتند؛ همچنین، مدل‌سازی این فرآیند با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی با بکار بردن الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه چند هدفی با تقسیم داده‌ها به دو بخش داده‌های آموزش و پیش‌بینی به کار برده شد. به منظور ارتقا عملکرد سیستم عصبی-فازی، از الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه پارامترهای توابع عضویت گوسی در بخش ورودی و روش تجزیه مقادیر ویژه برای محاسبه بردار ضرایب خطی در بخش نتایج استفاده شد. روند طراحی بهینه و مدل‌سازی با در نظر گرفتن تعداد ۳ تابع عضویت برای هر یک از ۳ داده آزمایشگاهی ورودی انجام شد. سنجش دقت مدل پیشنهادی با استفاده از ضریب تعیین و میانگین مجذور مربعات خطای داده‌های آموزشی و پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: عملکرد دینامیکی؛ پرتابه صلب؛ ساختار چندلایه؛ مدل‌سازی؛ هدف فلزی.

A Study on the Ballistic Performance of Single-Layered and Multi-Layered Structures Impacted by Spherical Rigid Projectile: Experimental Investigation and Modelling

M. Aeini¹, T. Mirzababaie Mostofi², M. Sayah Badkhor², H. Babaei^{3*}

¹ MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

² Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

³ Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

In the current study, an experimental investigation and modelling of the large plastic deformation of single-layered and multi-layered metallic targets made of either aluminum alloy or mild steel or a combination of these materials impacted by a rigid spherical projectile were presented. To conduct experiments, eight different layering configurations were considered under various impact velocities from 42 to 158 m/s. Also, the modeling of this process was employed by the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System using a multi-objective design of the genetic algorithm by dividing data into two parts, training and prediction sets. To improve the ability of the system, the genetic algorithm was used for the optimal design of Gaussian membership function parameters in the antecedent part, and the singular value decomposition method was employed for calculation of linear coefficient vectors in the consequent part. The procedure of optimal designing and modeling was performed by considering three membership functions for each of the three experimental inputs. The accuracy of proposed model was assessed by the coefficient of determination and root-mean-square error for training and prediction data sets.

Keywords: Dynamic Performance; Rigid Projectile; Multi-Layered Structure; Modelling; Metallic Target.

۱- مقدمه

مکانیک ضربه با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه فتاور ی، در سال‌های اخیر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است. با افزایش سرعت پردازش داده‌ها در کامپیوترها، پیشرفت‌ها در زمینه نفوذ نیز سرعت بیشتری به خود گرفته است. پایه و اساس هر علمی در مهندسی به بررسی‌های تجربی، عددی و تحلیل بهینه مربوط است. با داشتن روابط بهینه، امکان داشتن پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و کامل‌تر از فرآیند نفوذ پرتابه در اهداف خواهیم داشت. پدید نفوذ پرتابه در اهداف فلزی و غیرفلزی و مکانیسم تغییر شکل آن، یکی از مهم‌ترین مسائلی است که امروزه مورد توجه محققان به‌ویژه در حوزه مکانیک دفاعی قرار گرفته است؛ بنابراین، ارزیابی رفتار پلاستیک و همچنین مکانیسم تخریب اهداف فلزی یا غیرفلزی با جنس‌های مختلف تحت ضربه پرتابه با هندسه دماغه‌های مختلف بسیار مهم است [۱-۴].

در سال ۲۰۰۴ یو و شین [۵]، به بررسی نفوذ مایل در هدف دولایه فولادی با استفاده از نرم‌افزار المان حدود اتوداین پرداختند. پرتابه مورد بررسی آن‌ها از جنس آلیاژ تنگستن بود. در سال ۲۰۰۴ لیاقت و همکاران [۶]، یک مدل اصلاحی برای نفوذ پرتابه‌ها بر اساس مدل وودوارد ارائه کردند. آن‌ها در اصلاحات خود، مقدار زاویه تشکیل مخروط سرامیکی، مقاومت سرامیک و مقدار سایش پرتابه را در نظر گرفتند.

در سال ۲۰۰۵ لیانگ و همکارانش [۷]، برای نفوذ در اهداف چندلایه به‌وسیله پرتابه‌های تخت یک روش تحلیلی ارائه کردند. آن‌ها در روش خود از قوانین بقای انرژی و بقای اندازه حرکت و استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده از تحلیل آن‌ها با تجربی مطابقت خوبی داشت. در سال ۲۰۰۷ گاپتا و همکاران [۸]، به بررسی تجربی و عددی فرآیند نفوذ توسط پرتابه‌های با دماغه‌های متفاوت را در اهداف آلومینیومی با ضخامت‌های متفاوت پرداختند. در این بررسی آن‌ها تأثیر شکل هندسه دماغه پرتابه بر مقدار نفوذ را تعیین کردند.

در سال ۲۰۱۱ فلورس-جانسون و همکاران [۹]، با به‌کارگیری نرم‌افزار تجاری المان محدود ال اس داینبا به بررسی عددی عملکرد بالستیک ورق‌های فلزی تک‌لایه، دولایه و سه لایه تحت ضربه با پرتابه APM2 با کالیبر ۷/۶۲

میلی‌متر در محدوده سرعت ۷۷۵ تا ۹۵۰ متر بر ثانیه پرداختند. در این سری از شبیه‌سازی‌ها، ورق‌ها از جنس فولاد، آلومینیوم و یا ترکیبی از این مواد در نظر گرفته شدند. نتایج عددی به‌دست آمده نشان داد که ساختارهای تک‌لایه دارای عملکرد بالستیک بهتر نسبت به ساختارهای چندلایه ساخته شده از همان ماده هستند؛ همچنین مشخص شد که ساختارهای دولایه با ورق جلویی نازک از جنس آلومینیوم و ورق عقبی ضخیم از جنس فولاد، نشان دهنده مقاومت بیشتری نسبت به صفحات فولادی چندلایه با چگالی سطحی مشابه هستند. این پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که اهداف چندلایه با استفاده از مواد مختلف فلزی برای بهبود عملکرد بالستیک و صرفه‌جویی در وزن باید مورد بررسی قرار گیرد.

در سال ۲۰۱۲، دنگ و همکاران [۱۰]، به بررسی تجربی رفتار بالستیک ساختارهای تک، دو، سه، چهار و شش لایه فلزی تحت ضربه پرتابه با دماغه نیمکره‌ای پرداختند. در این تحقیق، سرعت حد بالستیک برای هر ساختار چندلایه برآثر مطالعات روی فاصله بین لایه‌ها، تعداد، جهت و ضخامت لایه‌ها بر مقاومت بالستیک به دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که اهداف نازک تک‌لایه نسبت به ساختارهای چندلایه در زمانی که پاسخ غالب اهداف تک‌لایه به‌صورت گود افتادگی و باد کردن است، دارای عملکرد بالستیکی بهتری بوده و سرعت حد بالستیک ساختارهای چندلایه با افزایش تعداد از لایه‌ها افزایش می‌یابد. این در حالی است که این عملکرد همچنان نسبت به ساختارهای تک‌لایه ضعیف‌تر است. در سال ۲۰۱۳ دنگ و همکاران [۱۱]، در ادامه فعالیت‌های خود به بررسی تجربی عملکرد بالستیکی ساختارهای فولادی ساختارهای تک، دو، سه و چهار لایه فولادی تحت ضربه پرتابه با دماغه مخروطی پرداختند. در این سری از آزمایش‌ها، ساختارهای چندلایه در ترکیب‌های مختلف با ضخامت کلی یکسان در نظر گرفته شدند. در این تحقیق، سرعت حد بالستیک برای هر ساختار چندلایه برآثر مطالعات روی فاصله بین لایه‌ها، تعداد، ترتیب و ضخامت لایه‌ها بر مقاومت بالستیک به دست آمد. نتایج نشان داد که اگر ضخامت کل کمتر از یک مقدار خاص باشد، اهداف تک‌لایه نازک دارای سرعت حد بالستیک بیشتری نسبت به اهداف چندلایه هستند و سرعت محدود

تجربی و عددی پاسخ دینامیکی سازه آلومینیومی AA2014-T652 به ضخامت ۱۵ میلی‌متر تحت تأثیر ضربه پرتابه کروی در محدوده سرعت ۸۰۰ تا ۱۳۰۰ متر بر ثانیه پرداختند. پرتابه‌های کروی با قطر ۱۰ میلی‌متر از جنس فولاد سخت و آهن نرم از درون یک تفنگ با لوله‌ای به قطر ۳۰ میلی‌متر پرتاب شد.

با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که تحقیقات بسیار مناسب و زیادی در زمینه فرآیند نفوذ در اهداف تک‌لایه فلزی و یا حتی ساختارهای کامپوزیتی انجام شده؛ اما مطالعه روی اهداف چندلایه فلزی تحقیقات محدود بوده و نمی‌توان یک نتیجه جامع و کامل گرفت؛ بنابراین انجام مطالعات آزمایشگاهی روی ساختارهای فلزی تک‌لایه و چندلایه تحت ضربه پرتابه به منظور مطالعه پارامترهای مختلف، بررسی اثرگذاری آن‌ها و همچنین ارائه یک تابع صریح از مشخصات فیزیکی سیستم‌ها و فرآیندها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ورودی و خروجی می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد [۱۶-۲۵]. شایان توجه است که در تحقیقات انجام شده توسط محققان، تاکنون مطالعه‌ای روی مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند نفوذ پرتابه در اهداف چندلایه فلزی و شناسایی پارامترهای مؤثر بر آن نیز انجام نگرفته است. با توجه به توضیحات ارائه شده، مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش آزمایشگاهی شامل، بررسی تغییر شکل پلاستیک و همچنین مکانیسم تخریب ساختارهای تک‌لایه و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه کروی صلب در محدوده سرعت اولیه ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه با انجام ۶۵ آزمون ضربه در هشت گروه‌بندی مختلف برای ساختار است؛ همچنین نوآوری این تحقیق در بخش مدل‌سازی شامل، ارائه یک مدل بهینه با استفاده از ترکیب سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی و الگوریتم ژنتیک است. به این منظور، از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب بهینه ضرایب توابع عضویت، یعنی یافتن پارامترهای غیرخطی گوسی هر تابع عضویت با در نظر گرفتن قید مقدار مشخص برای هر ورودی در بخش مدل‌سازی استفاده می‌شود؛ همچنین روش کمترین مربعات خطا برای به دست آوردن پارامترهای خطی خروجی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی به کار برده می‌شود.

بالستیک اهداف چندلایه با افزایش تعداد لایه‌ها کاهش می‌یابد. اگرچه، اهداف تک‌لایه با ضخامت متوسط، سرعت‌های حد بالستیک پایین‌تری نسبت به اهداف چندلایه را فراهم می‌کنند.

در سال ۲۰۱۴ تیواری و همکاران [۱۲]، به بررسی تجربی و المان محدود عملکرد بالستیک اهداف نازک آلومینیومی تحت تأثیر شرایط مرزی مختلف گیرداری پرداختند. در این تحقیق، از تفنگ گازی برای انجام آزمایش‌ها و همچنین نرم‌افزار تجاری المان محدود آباکوس برای شبیه‌سازی استفاده شد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده از مدل ماده الاستو-ویسکوپلاستیک جانسون-کوک انجام شد. ورق‌های آلومینیومی H12-1100 با قطر آزاد و ضخامت به ترتیب ۲۵۵ و ۱ میلی‌متر تحت ضربه پرتابه‌های سر تخت و مخروطی قرار داده شد. شرایط مرزی ورق‌ها با تغییر منطقه گیردار در طول محیط با میزان ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۰/۱۰۰ در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها همراه شد. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی‌ها برای مقایسه پاسخ ورق‌هایی با ۰/۵۰ و ۰/۷۵ گیرداری پیوسته با نمونه‌هایی با دو و سه منطقه متناوب ناپیوسته ۰/۲۵ گیردار انجام شد. نتایج نشان داد که تغییرات در شرایط مرزی تأثیر ناچیزی در حالت شکست هدف داشته است. در سال ۲۰۱۵ اقبال و همکاران [۱۳]، به بررسی تجربی و المان محدود اثر نسبت قطر هدف به قطر پرتابه بر عملکرد بالستیک ورق‌های آلومینیومی نازک و مکانیسم شکست آن پرداختند. شبیه‌سازی‌های عددی در مقادیر مختلف ۳/۶، ۵، ۷/۹، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ برای نسبت قطر هدف به قطر پرتابه انجام شد. نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان داد که افزایش اولیه نسبت قطر هدف به قطر پرتابه از ۳/۶ به ۱۰، اثر قابل توجهی بر سرعت حد بالستیک به خصوص در پرتابه‌های سر تخت دارد. در سال ۲۰۱۶ الک و همکاران [۱۴]، به بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی سوراخ‌شدن ورق‌های نازک فولادی توسط پرتابه‌های استوانه‌ای فولادی پرداختند. در این مطالعه، یک تحقیق تجربی جامع انجام و داده‌های مربوط به سامانه آزمایشی و تجهیزات اندازه‌گیری گزارش شد. نشان داده شد که شبیه‌سازی‌های انجام شده مکانیسم‌های اصلی فرآیند نفوذ مانند فرورفتگی، باد کردن و پلاگینگ را به درستی تولید می‌کند. در سال ۲۰۱۷ شارما و همکاران [۱۵]، به بررسی

۲- مطالعه آزمایشگاهی

با توجه به آنچه در پیشینه تحقیق بیان شد، در این بخش هدف آن است تا بتوان دید بهتری نسبت به تحلیل رفتار ورق‌های فلزی تک‌لایه و چندلایه با جنس‌های مختلف آلومینیومی و فولادی تحت ضربه پرتابه کروی صلب پیدا کرد. به‌طور جزئی‌تر، هدف بخش تجربی این تحقیق این است تا بتوان میزان تغییر شکل پلاستیک (عمق نفوذ) و همچنین مکانیسم تخریب ورق‌های تک‌لایه، دو‌لایه و سه‌لایه آلومینیومی، فولادی و ساختارهای ترکیبی فلزی تحت ضربه پرتابه صلب با سرعت‌های اولیه مختلف از به دست آورد.

در این تحقیق، فرآیند نفوذ پرتابه در اهداف فلزی تک‌لایه و چندلایه توسط یک سامانه آزمایشگاهی تک‌مرحله‌ای به نام تفنگ گازی انجام شده است که تصویر آن در شکل ۱ ارائه گردید.

سامانه آزمایشگاهی فوق‌الذکر شامل چندین بخش اصلی مانند مخزن ذخیره هوا ۲۰۰ بار جهت پرتاب گلوله، لوله شش متری با سطح داخلی کاملاً صیقلی در قطرهای داخلی مختلف از ۳/۸ میلی‌متر تا ۱۸/۸ میلی‌متر، سامانه اندازه‌گیری سرعت اولیه گلوله قبل و پس‌از آن و همچنین یک استند چرخان برای نگهداشتن نمونه‌های آزمایشگاهی جهت برخورد نرمال و با زاویه گلوله است. مکانیسم پرتاب گلوله این سامانه شامل یک مخزن کامپوزیتی از گازی فشرده‌شده به حجم ۲ لیتر، شیر سولنئوید ۲/۲ (Co-ax valve KB 15) با ظرفیت ۲۵۰ بار به‌منظور تحریک و سریع آزادسازی گلوله و حس‌گر فشار ۲۴ ولت (XML-F600D2025) است. در این تحقیقات، سرعت پرتابه با فشار نیتروژن در سیلندر کامپوزیتی گازی اداره می‌شود. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت پرتابه، دو جفت لیزر بافاصله ۱۵ سانتی‌متر بین آنها قبل از نمونه قرار دارد. با تغییر فشار نیتروژن در سیلندر کامپوزیتی، سرعت پرتابه تا ۱۵۸ متر بر ثانیه تغییر می‌یابد. پس از پشیرانش، پرتابه کروی با جرم ۲۵/۱ گرم و قطر ۱۸/۲۹ میلی‌متر در کل مسیر خود به سمت محفظه مهار حرکت می‌کند.

نمونه ورق‌های مورد آزمایش از جنس فولاد نرم (St-13) و آلیاژ آلومینیوم (Al-1100) در ضخامت‌های متفاوت ۲ و ۳ میلی‌متر برای هدف‌های تک‌لایه و ۱+۱ و ۱+۱+۱ میلی‌متر

به ترتیب برای هدف‌های دو‌لایه و سه‌لایه تهیه شد. در ابتدا نمونه ورق‌ها به‌صورت مربعی در ابعاد ۱۴۰×۱۴۰ میلی‌متر مربع برش زده شدند. ورق‌های برش خورده جهت نصب در نگاه‌دارنده‌های جلویی و عقبی با ناحیه شکل‌گیری ۹۰×۹۰ میلی‌متر مربع، سوراخ‌کاری (با قطرهای ۱۲/۵ میلی‌متر) شدند. هندسه نمونه آزمایشی و نحوه برخورد گلوله با نمونه به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

خواص مکانیکی مواد فلزی مورد استفاده در این مجموعه آزمایشی از انجام آزمون کشش تک‌محوره روی نمونه‌های آماده شده از ورق‌هایی از جنس فولاد نرم (St13) و آلیاژ آلومینیوم (Al-1100) تعیین شده است. برای بررسی همگن بودن مواد، از هر ورق در سه راستای مختلف افقی، عمودی و اریب نمونه‌هایی را برش زده و سپس تحت آزمایش کشش با شرایط کاملاً یکسان قرار داده شد. برای تعیین تنش تسلیم استاتیکی و تنش نهایی استاتیکی، از هر ضخامت، دو نمونه آزمایشگاهی تهیه شد. در انجام آزمایش، نمونه‌ها با سه سرعت ۵، ۱۰ و ۱۵ (میلی‌متر بر دقیقه) تحت کشش قرار گرفته‌اند. با توجه به طول اولیه نمونه‌ها (۵۰ میلی‌متر)، سه نرخ کرنش با مقادیر $1.67 \times 10^{-3} s^{-1}$ ، $3.33 \times 10^{-3} s^{-1}$ و $5 \times 10^{-3} s^{-1}$ اعمال شد. مقادیر تنش نهایی و تنش تسلیم برای هر نوع جنس در جدول ۱ درج شده است. لازم به ذکر است که برای ورق‌های فولادی و آلومینیومی در ضخامت‌های متفاوت، منحنی تنش و کرنش کاملاً مشابه و منطبق بر یکدیگر هستند، لذا نمودارها برحسب ضخامت ورق تفکیک نشده‌اند.

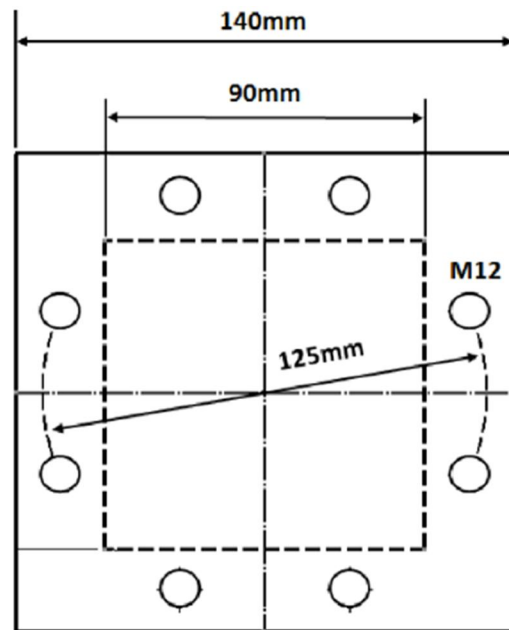


شکل ۱- تصویر سامانه تفنگ گازی دانشگاه گیلان

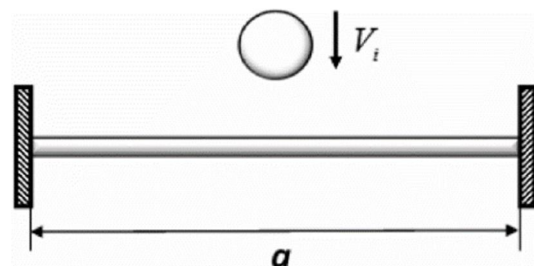
در اهداف تک‌لایه و چندلایه با ۳ ورودی، با در نظر گرفتن ۳ تابع عضویت برای هر ورودی و مقایسه بین مدل به‌دست‌آمده و خروجی آزمایشگاهی انجام می‌شود. روند تکامل تدریجی در ابتدا با تولید تصادفی جمعیت اولیه از پارامترهای تابع عضویت گوسی، یعنی $\{C, \sigma\}$ شروع می‌شود. به این منظور، تعداد ۶۲ دسته داده ایجاد شده به‌صورت رشته‌ای دودویی برای هر جمعیت که به‌عنوان جمعیت‌های اولیه وارد روند بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک می‌شوند. تعداد توابع عضویت به ازای هر ورودی یکسان در نظر گرفته می‌شوند که در نتیجه آن، هر دسته داده تولید شده در این مجموعه توسط عملگرهای ژنتیکی با یکدیگر ادغام یا ترکیب می‌شوند. به این ترتیب، ضرایب توابع عضویت پس از انجام فرآیند تکامل تدریجی به جواب بهینه نزدیک می‌شوند. بسیاری از مسائل مهندسی به دلیل داشتن بیش از یک تابع هدف در اغلب موارد با چند تابع هدف که در تضاد یا ناهم‌سویی با یکدیگرند سروکار دارند که باید به‌صورت هم‌زمان بهینه شوند. بهینه‌سازی هم‌زمان توابع هدف منجر به مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه خواهد شد که به‌عنوان نقاط پارتو نامیده می‌شوند که در آن نقاط به‌دست آمده دارای برتری مطلقی نسبت به یکدیگر از دید تمام توابع هدف مورد نظر نیستند. سنجش و انتخاب توابع عضویت بهینه شده، بر اساس کمینه کردن توابع هدف است که در اینجا برحسب خطای آموزشی و پیش‌بینی در نظر گرفته شده‌اند که بر اساس مجذور میانگین مربعات خطاها محاسبه می‌شوند که به همراه آماره ضریب تعیین R^2 به‌عنوان شاخصی برای مقایسه نتایج در نظر گرفته می‌شوند. تعداد توابع عضویت در نظر گرفته شده در این تحقیق ابتدا برابر ۳ تابع عضویت برای هر ورودی است که با ایجاد مقادیری برای پارامترهای در نظر گرفته شده سیستم برای جمعیت اولیه خواهد بود که به‌عنوان شروع روند تکامل تدریجی در نظر گرفته خواهد شد. در ادامه، روند تولید جمعیت‌های نسل‌های بعدی توسط عملگرهای ژنتیکی پیوند و جهش ادامه خواهد داشت که در یک روند تکاملی تدریجی به سمت جمعیت بهینه سوق پیدا خواهد کرد.

۴- سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی

مدل ANFIS، ترکیبی از شبکه عصبی و سیستم‌های فازی شامل مجموعه‌ای از قواعد فازی از نوع سوگنو است.



شکل ۲- هندسه نمونه



شکل ۳- نحوه برخورد گلوله با نمونه

جدول ۱- خواص مکانیکی مواد

ماده	ضخامت ورق (mm)	میانگین تنش تسلیم استاتیکی (MPa)	میانگین تنش نهایی (MPa)
فولاد نرم	۳ و ۲،۱	۲۸۱	۴۳۲/۶
آلومینیوم	۳ و ۲،۱	۱۱۹	۱۲۵/۱

۳- طراحی بهینه توسط الگوریتم ژنتیک

در این مقاله به‌منظور طراحی بهینه مدل پیشنهادی، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک از اصول روند تکامل تدریجی طبیعی در مسائل بهینه‌سازی سیستم‌ها استفاده می‌کند. طراحی مدلی بهینه سیستم عصبی-فازی تطبیقی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای فرآیند نفوذ پرتابه

عضویت استفاده شده در این تحقیق به فرم گوسین است که به صورت رابطه (۱) نشان داده می‌شود [۱۷-۱۹]:

$$\mu_{A^{(j)}}(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - c_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (1)$$

• لایه ۲- در این بخش از ضرب توابع عضویت به ازای ورودی‌ها و توابع عضویت هر ورودی صورت می‌گیرد که به آن رول‌های مجموعه گفته می‌شود [۱۷-۱۹].

$$L_2 = w_i = \mu_{A_i} \times \mu_{B_i} \quad (2)$$

• لایه ۳- لایه ۳ از تقسیم هر رول در مجموع کل رول به دست می‌آید [۱۷-۱۹].

$$L_3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_1^n w_i} \quad (3)$$

که در آن n، تعداد ورودی سیستم است.

• لایه ۴- خروجی لایه ۴ ترکیب خطی از ضرایب خروجی و خروجی لایه ۳ است که به ازای هر رول تعدادی برابر (n + 1) دارد [۱۷-۱۹].

$$L_4 = \bar{w}_i \times f_i = \bar{w}_i (a_i x_1 + b_i x_2 + c_i) \quad (4)$$

که در آن a, b, c ضرایب خروجی هستند.

• لایه ۵- این لایه برابر مجموع خروجی‌هایی است که از لایه ۴ به دست آمده است [۱۷-۱۹].

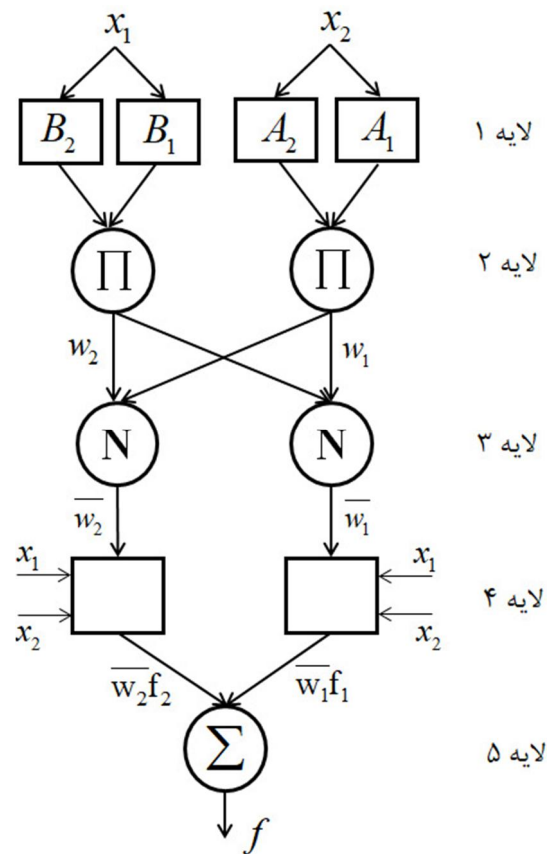
$$L_4 = \sum \bar{w}_i f_i \quad (5)$$

در نهایت، نگاشتی از مدل به دست آمده نسبت به خروجی آزمایشگاهی به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید [۱۷-۱۹]

$$Y = P \times W + D \quad (6)$$

که D، تفاضل خطای بین خروجی مدل شده و خروجی داده‌های آزمایشگاهی خواهد بود. پارامترهای دیگر تعریف شده در بالا عبارت خواهند بود از $P = [p_1, p_2, \dots, p_s]^T \in R^{M \times S}$ و $W = [w_1, w_2, \dots, w_s]^T \in R^{M \times S}$ و $S = N(n + 1)$ برابر هر عضو (n + 1) از بردار w_i که مطابق با بخش آنگاه قواعد فازی از مدل TSK است؛ همچنین، حل معادله ۶ به منظور به دست آوردن خروجی مدل شده از داده‌های آزمایشگاهی فرآیند نفوذ پرتابه در اهداف فلزی توسط روش کمترین مقادیر ویژه منفرد در حل دستگاه‌های معادلات خطی استفاده می‌شود.

به این ترتیب، مدل عصبی-فازی نگاشتی از فضای ورودی به خروجی را انجام می‌دهد. سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی از دو بخش پارامترهای غیرخطی ورودی و پارامترهای خطی خروجی تشکیل شده است که با استفاده از روش فازی تاکاگی-سوگنو و قوانین اگر-آنگاه فازی به یکدیگر اتصال پیدا کرده‌اند. ساختار کلی سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی در پنج لایه تقسیم می‌شوند که مطابق شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- ساختار کلی ANFIS [۲۶ و ۲۷]

متطابق شکل ۴، با در نظر گرفتن x_1 و x_2 به عنوان ورودی سیستم فازی، روند طراحی سیستم عصبی-فازی تطبیقی به ترتیب مطابق لایه‌های مختلف نشان داده در زیر توضیح داده می‌شود:

• لایه ۱- بخش ورودی بخش فازی ANFIS است که به صورت تابع ریاضی به شکل تابع عضویت قابل بیان است که دارای انواع مختلف است.

چندلایه به ترتیب به صورت رابطه (۷) و (۸) بیان می‌شود [۴]:

$$\frac{W_0}{H_t} = f\left(\frac{LB}{Hd}, \frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}, \frac{1}{\eta}\right) \quad (7)$$

$$\frac{W_0}{H_t} = f\left(\frac{LB}{Hd}, \frac{\rho_{eq} V_0^2}{\sigma_{0,eq}}, \frac{1}{\eta_{eq}}\right) \quad (8)$$

که L و B طول و عرض نمونه، H_t ضخامت کل سازه، d قطر پرتابه کروی، V_0 سرعت اولیه پرتابه، ρ چگالی ماده، σ_0 تنش تسلیم ماده فلزی، η نرخ کرنش است. در این روابط عدد بی‌بعد اول مربوط به هندسه ساختار می‌شود؛ عدد بی‌بعد دوم، انرژی وارد برسازه همراه با خواص مکانیکی ساختار فلزی را شامل می‌شود و در نهایت اعداد بی‌بعد سوم، مربوط به نرخ کرنش ورق فلزی است. شایان توجه است که برای ساختارهای چندلایه از مفهوم ساده مهندسی میانگین استفاده شده برای هر نوع لایه‌بندی مقادیر میانگین چگالی، تنش تسلیم و نرخ کرنش لحاظ شده است. پیشتر از روش تحلیل ابعادی بر مبنای اعداد بی‌بعد برای بررسی رفتار ورق‌های مستطیلی و دایره‌ای تحت بار ضربه‌ای حاصل از انفجار نیز استفاده شده بود [۳۲-۴۶].

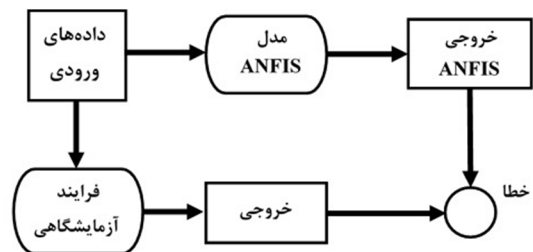
۶- بحث و نتایج

۶-۱- نتایج تجربی

به منظور بررسی تغییر شکل و مکانیسم تخریب ساختارهای تک‌لایه و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه کروی صلب در محدوده سرعت اولیه ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه، ۶۵ نمونه آزمایشگاهی در هشت گروه‌بندی مختلف، مطابق با جدول ۲ طراحی و ساخته شده‌اند. نمادهای هر آزمایش مربوط به مواد مورد استفاده، نحوه لایه‌بندی و ضخامت کل اهداف است، به طوری که: AI، آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰؛ St، فولاد نرم ST-13؛ M، ساختار تک‌لایه؛ D، ساختار دولایه؛ TR، ساختار سه‌لایه؛ TRM؛ ساختار سه‌لایه غیر هم‌جنس؛ T: ضخامت لایه.

در جدول ۳، کلیه داده‌ها و نتایج کارهای آزمایشگاهی انجام گرفته روی نمونه‌های تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه فولادی و آلومینیومی جمع‌آوری شده است. نتایج به دست آمده در مجموعه آزمایش‌های انجام گرفته، نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ساختارهای تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه تحت ضربه

همان‌طور که در بخش توضیحات روش بهینه‌سازی اشاره شد، معیار سنجش و انتخاب پارامترهای بهینه توابع عضویت که با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید، بر پایه کمینه کردن توابع هدف در نظر گرفته شده انجام می‌شود. توابع هدف در نظر گرفته شده به ترتیب، خطای آموزشی و خطای پیش‌بینی میزان خطا در بخش دیگری از داده‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شده خواهند بود که محاسبه معیار این خطاها توسط مجذور میانگین مربعات خطاها محاسبه شده و همراه با آماره ضریب تعیین R^2 مقایسه می‌شوند. الگوریتم کلی از دیاگرام بلوکی روند مدل‌سازی و طراحی بهینه فرآیند آزمایشگاهی، توسط روش سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- دیاگرام بلوکی شمای کلی از روند مدل‌سازی

۵- ارائه ورودی و خروجی‌های مدل بر مبنای

اعداد بی‌بعد

فرآیند نفوذ پرتابه صلب کروی در اهداف فلزی تک‌لایه و چندلایه از تعدادی دسته داده آزمایشگاهی ورودی-خروجی تشکیل شده است. این دسته داده‌های آزمایشگاهی مطابق شکل ۵، به‌عنوان ورودی سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی برای مدل‌سازی و رابطه بین ورودی‌ها و خروجی سیستم بکار برده شده است. برای پیشنهاد ورودی و خروجی‌های این سیستم، از مفهوم تحلیل ابعادی و اعداد بی‌بعد استفاده شده است. در تحلیل ابعادی رفتار پلاستیک این ساختارها، هندسه ورق و پرتابه، خواص مکانیکی ورق، سرعت اولیه پرتابه و حساسیت ماده به نرخ کرنش برای هر دو ساختار تک‌لایه در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نکات ذکر شده و مطابق با تحلیل ابعادی مسئله، رابطه بیشترین خیز دائمی به ضخامت آن برای ساختارهای تک‌لایه و

جدول ۲- گروه‌بندی نمونه‌های آزمایشی

تعداد آزمایش	سرعت اولیه آزمایش (m/s)	گروه آزمایشی	شماتیک ساختار
۸	۱۳۵، ۱۲۰، ۱۰۸، ۸۴، ۴۵ ۱۵۴ و ۱۵۱، ۱۴۵	Al-M-T3	
۶	۹۰، ۸۹، ۷۳، ۶۶، ۴۲ ۱۰۱	Al-M-T2	
۹	۱۳۸، ۱۱۴، ۹۷، ۶۶، ۴۴ ۱۵۵ و ۱۵۲، ۱۴۸، ۱۴۴	St-M-T3	
۸	۱۴۰، ۱۱۸، ۹۶، ۷۴، ۴۴ ۱۵۶ و ۱۵۰، ۱۴۳	St-M-T2	
۶	۱۰۲، ۸۹، ۸۶، ۷۴، ۴۴ ۱۰۳	Al-D-T1	
۷	۱۴۴، ۱۳۸، ۱۲۰، ۷۳، ۴۴ ۱۵۸ و ۱۵۱	St-D-T1	
۴	۱۵۰ و ۱۳۷، ۱۲۵، ۱۱۸	Al-TR-T1	
۷	۱۴۶، ۱۴۴، ۱۲۰، ۶۶، ۴۴ ۱۵۶ و ۱۵۲	St-TR-T1	
۶	۱۳۸، ۱۲۷، ۱۱۹، ۶۶ ۱۴۹ و ۱۴۲	TRM-SAS-T1	
۵	۱۳۸، ۱۲۸، ۱۲۱، ۶۶ ۱۴۳	TRM-ASA-T1	

پرتابه گروی صلب در محدوده سرعت اولیه ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه است که در آن اثر تغییرات جنس ورق، ضخامت لایه، نحوه لایه‌بندی ساختارها و همچنین تغییرات مقدار انرژی جنبشی وارد شده یا همان سرعت گلوله قبل از برخورد بر میزان تغییر شکل و مکانیسم تخریب ساختارها بررسی شده است. نتایج جدول ۳ به‌صورت زیر طبقه‌بندی می‌شود:

✓ برای مواردی که سرعت ضربه زننده ۴۴ متر بر ثانیه و ضخامت کل ساختار ۲ و ۳ میلی‌متر است؛ بیشترین خیز هدف فولادی دولایه و سه‌لایه تقریباً ۱/۱۶ برابر بزرگ‌تر از هدف فولادی تک‌لایه است. این مقدار برای هدف فولادی دولایه در حدود ۵۷/۵٪ در مقایسه با هدف آلومینیومی کوچک‌تر است؛ همچنین، این مقدار با اضافه کردن یک لایه به ساختار فولادی تک‌لایه، به ۶۲/۵٪ تغییر می‌یابد.

✓ برای حالتی که سرعت ضربه زننده ۶۶ متر بر ثانیه باشد، این نتیجه حاصل می‌شود که ترتیب لایه‌بندی Al-St-Al ۱/۲۲ برابر بیشتر از لایه‌بندی St-Al-St تغییر شکل می‌دهد.

✓ برای حالتی که سرعت ۱۲۰ و ۱۴۴ متر بر ثانیه است، خیز اهداف فولادی سه‌لایه به ترتیب ۰/۷۶ و ۱/۱۳ برابر بیشتر از اهداف فولادی دولایه و تک‌لایه است؛ همچنین، نفوذ کامل برای اهداف فولادی تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه رخ نمی‌دهد.

جدول ۳- نتایج تجربی

کد نمونه آزمایشی	ضخامت کل (mm)	سرعت اولیه (m/s)	انرژی جنبش (J)	خیز (mm)
Al-M-T3-1	۳	۴۵	۲۵/۴	۴/۵
Al-M-T3-2	۳	۸۴	۸۸/۶	۹/۳
Al-M-T3-3	۳	۱۰۸	۱۴۶/۴	۱۲/۲
Al-M-T3-4	۳	۱۲۰	۱۸۰/۷	۱۳/۵
Al-M-T3-5	۳	۱۳۵	۲۲۸/۷	۱۵/۳
Al-M-T3-6	۳	۱۴۵	۲۶۳/۹	۱۷/۸
Al-M-T3-7	۳	۱۵۱	۲۸۶/۲	۱۸/۸

پارگی	۲۹۷/۷	۱۵۴	۳	Al-M-T3-8
۵/۸	۲۲/۱	۴۲	۲	Al-M-T2-1
۱۰/۱	۵۴/۷	۶۶	۲	Al-M-T2-2
۱۱/۱	۶۶/۹	۷۳	۲	Al-M-T2-3
۱۴/۱	۹۹/۴	۸۹	۲	Al-M-T2-4
۱۴/۲	۱۰۱/۷	۹۰	۲	Al-M-T2-5
۲	۲۴/۳	۴۴	۳	St-M-T3-1
۳/۱	۵۴/۷	۶۶	۳	St-M-T3-2
۵/۴	۱۱۸/۱	۹۷	۳	St-M-T3-3
۶/۶	۱۶۳/۱	۱۱۴	۳	St-M-T3-4
۸/۳	۲۳۹	۱۳۸	۳	St-M-T3-5
۸/۶	۲۶۰/۲	۱۴۴	۳	St-M-T3-6
۹/۱	۲۷۴/۹	۱۴۸	۳	St-M-T3-7
۹/۴	۲۹۰	۱۵۲	۳	St-M-T3-8
۱۰	۳۰۱/۵	۱۵۵	۳	St-M-T3-9
۳/۱	۲۴/۳	۴۴	۲	St-M-T2-1
۶/۳	۶۸/۸	۷۴	۲	St-M-T2-2
۸/۱	۱۱۵/۷	۹۶	۲	St-M-T2-3
۱۰/۲	۱۷۴/۷	۱۱۸	۲	St-M-T2-4
۱۱/۶	۲۴۶	۱۴۰	۲	St-M-T2-5
۱۲/۳	۲۵۶/۶	۱۴۳	۲	St-M-T2-6
۱۲/۸	۲۸۲/۴	۱۵۰	۲	St-M-T2-7
۱۳/۲	۳۰۵/۴	۱۵۶	۲	St-M-T2-8
۶/۳	۲۴/۳	۴۴	۲	Al-D-T1-1
۱۱/۷	۶۸/۷	۷۴	۲	Al-D-T1-2
۱۳/۸	۹۲/۸	۸۶	۲	Al-D-T1-3
۱۴/۴	۹۹/۴	۸۹	۲	Al-D-T1-4
۱۶/۶	۱۲۰/۶	۱۰۲	۲	Al-D-T1-5
پارگی	۱۳۳/۱	۱۰۳	۲	Al-D-T1-6
۳/۶	۲۴/۳	۴۴	۲	St-D-T1-1
۶/۵	۶۶/۹	۷۳	۲	St-D-T1-2
۱۰/۹	۱۸۰/۷	۱۲۰	۲	St-D-T1-3

۱۱/۸	۲۳۹	۱۳۸	۲	St-D-T1-4
۱۲/۹	۲۶۰/۲	۱۴۴	۲	St-D-T1-5
۱۳/۳	۲۸۶/۲	۱۵۱	۲	St-D-T1-6
۱۴	۳۱۳/۳	۱۵۸	۲	St-D-T1-7
۱۵/۴	۱۷۴/۷	۱۱۸	۳	Al-TR-T1-1
۱۷	۱۹۶/۱	۱۲۵	۳	Al-TR-T1-2
۱۸/۹	۲۳۵/۶	۱۳۷	۳	Al-TR-T1-3
پارگی	۲۸۲/۴	۱۵۰	۳	Al-TR-T1-4
<hr/>				
۲/۳	۲۴/۳	۴۴	۳	St-TR-T1-1
۴/۳	۵۴/۷	۶۶	۳	St-TR-T1-2
۸/۳	۱۸۰/۷	۱۲۰	۳	St-TR-T1-3
۹/۷	۲۶۰/۲	۱۴۴	۳	St-TR-T1-4
۱۰/۳	۲۶۷/۵	۱۴۶	۳	St-TR-T1-5
۱۰/۷	۲۹۰	۱۵۲	۳	St-TR-T1-6
۱۱	۳۰۵/۴	۱۵۶	۳	St-TR-T1-7
<hr/>				
۵/۲	۵۴/۷	۶۶	۳	TRM-SAS-T1-1
۹/۶	۱۷۷/۷	۱۱۹	۳	TRM-SAS-T1-2
۱۰/۲	۲۰۲/۴	۱۲۷	۳	TRM-SAS-T1-3
۱۱/۲	۲۳۹	۱۳۸	۳	TRM-SAS-T1-4
۱۱/۷	۲۵۳/۱	۱۴۲	۳	TRM-SAS-T1-5
۱۲/۵	۲۷۸/۶	۱۴۹	۳	TRM-SAS-T1-6
<hr/>				
۶/۴	۵۴/۷	۶۶	۳	TRM-ASA-T1-1
۱۲	۱۸۳/۷	۱۲۱	۳	TRM-ASA-T1-2
۱۲/۵	۲۰۵/۶	۱۲۸	۳	TRM-ASA-T1-3
۱۳/۸	۲۳۹	۱۳۸	۳	TRM-ASA-T1-4
۱۴	۲۵۶/۶	۱۴۳	۳	TRM-ASA-T1-5

افزایش خیز با نمو نمایی کاهشی در محدوده ۲٪ تا ۹٪ در بازه سرعت اولیه ۴۲ تا ۱۰۳ متر بر ثانیه می‌شود. این درحالی است که افزایش تعداد لایه در ساختار فولادی با ضخامت کل ۲ میلی‌متر منجر به افزایش خیز با نمو نمایی کاهشی در محدوده ۶٪ تا ۱۶٪ در بازه سرعت اولیه ۴۴ تا ۱۵۶ متر بر ثانیه می‌شود.

به‌طور کلی، نتایج تجربی ارائه شده را می‌توان این‌گونه جمع‌بندی کرد که افزایش تعداد لایه در ساختار فولادی با ضخامت کل ۳ میلی‌متر منجر به افزایش خیز با نمو نمایی کاهشی در محدوده ۱۰٪ تا ۱۵٪ در بازه سرعت اولیه ۴۴ تا ۱۵۵ متر بر ثانیه می‌شود؛ همچنین، افزایش تعداد لایه در ساختار آلومینیومی با ضخامت کل ۲ میلی‌متر، منجر به

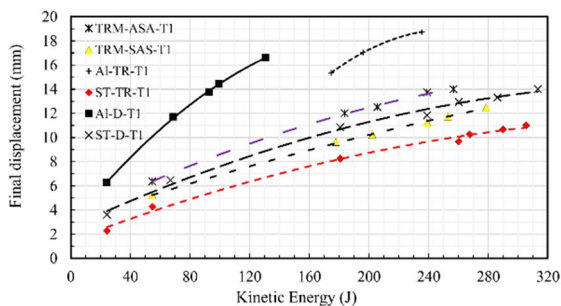
نهایی یا همان بیشترین خیز دائمی با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد؛ همچنین می‌توان مشاهده کرد که چیدمان لایه‌بندی Al-St-Al، مقاومت خمشی کمتری نسبت به صفحات فولادی تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه نشان می‌دهد. این در حالی است که آرایش لایه‌بندی St-Al-St، مقاومت خمشی بیشتری نسبت به St-M-T2 و St-D نشان می‌دهد.

در شکل ۷، نمونه‌هایی از تغییر شکل ساختارهای تک‌لایه و چندلایه تحت ضربه پرتابه کرووی صلب در محدوده سرعت اولیه ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه نشان داده شده است.

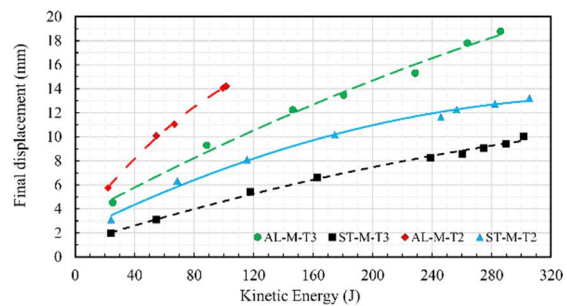
بیشترین خیز دائمی ساختار برحسب انرژی جنبشی گلوله برای اهداف مختلف در شکل ۶ ترسیم شده است. در این شکل، یک تابع چندجمله‌ای روی داده‌های تجربی به‌منظور ایجاد ارتباطی بین بیشترین خیز دائمی نمونه و انرژی جنبشی برازش شده است که در جدول ۴ ذکر شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که بیشترین خیز دائمی ساختار به ترتیب با افزایش و کاهش سرعت ضربه زننده و ضخامت هدف افزایش می‌یابد، همان‌طور که به دلیل افزایش انرژی جنبشی اولیه و همچنین افزایش توانایی جذب انرژی در اهداف ضخیم‌تر پیش‌بینی می‌شد؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد که در صورت ثابت بودن ضخامت کل هدف، جابجایی

جدول ۴- منحنی‌های درجه دوم برازش برای مقادیر بیشترین خیز دائمی نمونه برحسب انرژی جنبشی

هندسه	کد	منحنی برازش شده	R^2
تک‌لایه	Al-2	$W_0 = -5E-04Ek^2 + 0.16Ek + 2.4$	۱
	Al-3	$W_0 = -5E-05Ek^2 + 0.07Ek + 3.2$	۰/۹۹
	St-2	$W_0 = -8E-05Ek^2 + 0.06Ek + 2.0$	۰/۹۹
دولایه	St-3	$W_0 = -3E-05Ek^2 + 0.04Ek + 1.1$	۱
	Al-2	$W_0 = 4E-04Ek^2 + 0.15Ek + 2.8$	۱
	St-2	$W_0 = -7E-05Ek^2 + 0.06Ek + 2.6$	۰/۹۹
سه‌لایه	Al-3	$W_0 = 0.0006Ek^2 + 0.29Ek - 17.8$	۱
	St-3	$W_0 = -5E-05Ek^2 + 0.05Ek + 1.5$	۰/۹۹
سه‌لایه ترکیبی	Al-St-Al	$W_0 = -7E-05Ek^2 + 0.06Ek + 3.3$	۱
	St-Al-St	$W_0 = -3E-05Ek^2 + 0.04Ek + 3.1$	۱



(ب)

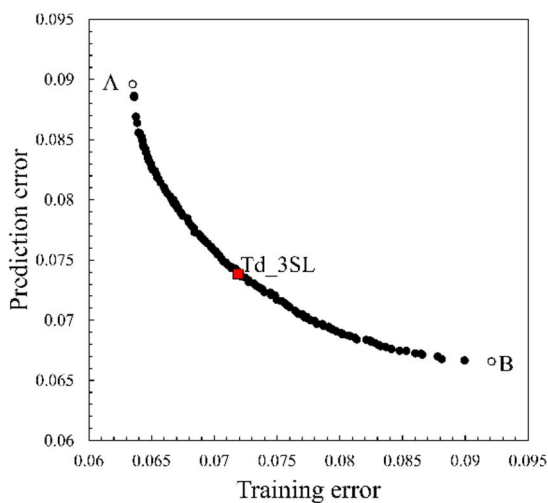


(الف)

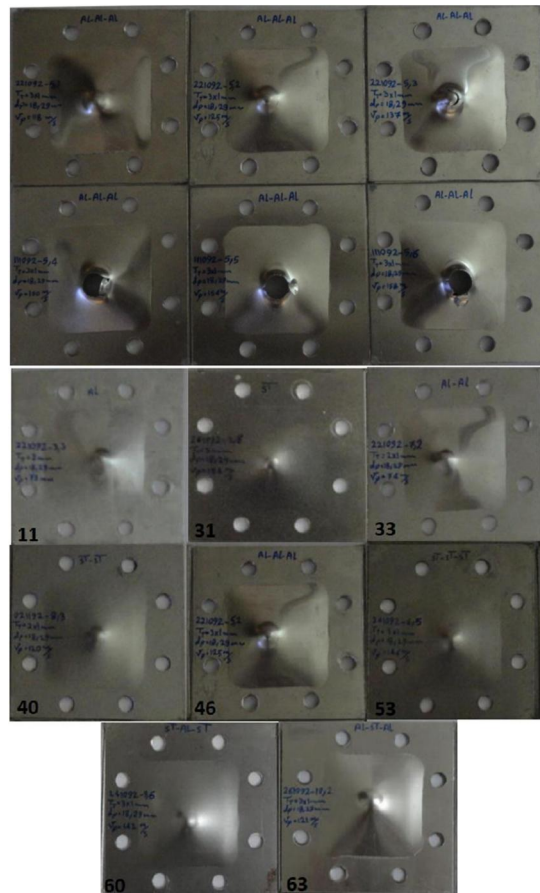
شکل ۶- منحنی بیشترین خیز دائمی نمونه برحسب انرژی جنبشی؛ (الف) ساختار تک‌لایه و (ب) ساختار چندلایه

سنجش دقت جمعیت‌های ایجاد شده در ورودی به سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی و انتخاب توابع عضویت برای رسیدن به بهترین جواب توسط الگوریتم ژنتیک با توجه به کمینه کردن خطاهای بر اساس توابع هدف در نظر گرفته شده مجذور میانگین مربعات که این توابع عبارت‌اند از: خطاهای آموزشی و پیش‌بینی. تنظیمات اولیه در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی چند هدفی توسط الگوریتم ژنتیک به ترتیب عبارت خواهند بود از: تعداد ۱۲۰ جمعیت اولیه تولیدشده تصادفی، احتمال پیوند و جهش در ادامه روند بهینه‌سازی به ترتیب ۰/۷، ۰/۱ و تعداد تکرار ۲۰۰ خواهد بود.

شکل ۸ منحنی مقدار خطای پیش‌بینی برحسب خطای آموزشی موسوم به منحنی پارتو را نشان می‌دهد. از میان نقاط به دست آمده بعضی از این نقاط دارای ویژگی‌های منحصربه‌فرد از جنبه‌هایی خواهند بود که به آن‌ها اشاره خواهد شد. مطابق شکل واضح است که با حرکت از نقطه A به سمت نقطه B، خطای مربوط به آموزش شبکه افزایش می‌یابد. در مقابل، این افزایش خطا منجر به کم شدن خطای پیش‌بینی خواهد شد. به عبارتی می‌توان گفت که در منحنی پارتو نشان داده شده با بهتر شدن جواب یک تابع هدف، عملکرد تابع هدف دیگر، باعث بدتر شدن جواب از دید نقطه دیگر خواهد شد؛ در نتیجه نقطه A نماینده کمترین خطا از دید خطای آموزشی سیستم و نقطه B، نمایانگر کمینه خطای پیش‌بینی خواهد بود.



شکل ۸- منحنی پارتو مربوط به ساختار تک لایه

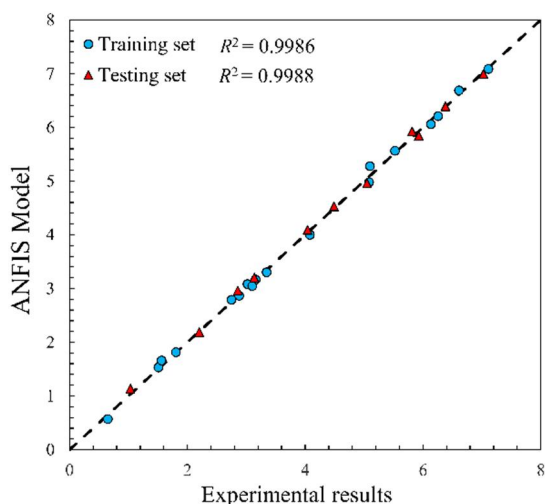


شکل ۷- نمونه‌هایی از ورق‌های تغییر شکل یافته و پاره شده

۲-۶- نتایج مدل‌سازی و بهینه‌سازی

۲-۶-۱- طراحی بهینه ساختار تک لایه

در این بخش ابتدا فرآیند مدل‌سازی برای سیستم با تعداد ۳ تابع عضویت برای هر ورودی ارائه شده است. همان‌طور که اشاره شد، فازی سازی سیستم عصبی- فازی در بخش ورودی توسط تابع عضویت گوسی انجام شده است. بعد از تعیین پارامترهای الگوریتم ژنتیک، ابتدا برای مدل‌سازی فرآیند ساختار تک لایه، با توجه به سه متغیر طراحی به‌عنوان ورودی سیستم و در نظر گرفتن ۳ تابع عضویت گوسی به‌منظور داشتن کمترین تعداد قانون و کمترین پیچیدگی سیستم برای هر ورودی، تعداد کل ۲۹ قانون در سیستم عصبی- فازی برای ۱۸ داده ورودی انتخاب شده جهت آموزش مدل و ۱۱ داده ورودی انتخاب شده، جهت پیش‌بینی مدل حاصل از نتایج شبیه‌سازی به دست خواهد آمد. معیار



شکل ۹- مقایسه مقادیر خروجی مدل شده و خروجی داده‌های آزمایشگاهی برای ساختار تک‌لایه

در این شکل، ضریب همبستگی بالای ۰.۹۹ برای خروجی مدل شده توسط ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش SVD با سیستم عصبی- فازی به ازای هر دو توابع عضویت در نظر گرفته شده برحسب خروجی نمونه آزمایشگاهی، دقت بالای مدل را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۰ توابع عضویت گوسی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک در بخش ورودی سیستم عصبی- فازی تطبیقی برای نقاط طراحی معرفی شده در منحنی پارتو برای هر ۳ داده ورودی و به ازای هر ۳ تابع عضویت برای یک از متغیرهای ورودی در بازه صفر تا یک نشان داده شده است. پارامترهای بهینه σ و c ، توابع عضویت گوسی در بخش ورودی سیستم عصبی- فازی برای هر ۲ نقطه طراحی در نظر گرفته شده برای هر یک از داده‌های واقع در بخش ورودی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در جدول ۶ نشان داده شده است. در این جدول، به خوبی مقادیر پارامترهای بهینه توابع عضویت گوسی در بخش ورودی نشان داده شده که قابلیت مقایسه با حالت ساختار چندلایه را دارد.

۶-۲-۲- طراحی بهینه ساختار چندلایه

فرآیند مدل‌سازی برای طراحی بهینه ساختار چندلایه نیز در این بخش با در نظر گرفتن تعداد ۳ تابع عضویت برای هر ورودی به دست می‌آید و در نهایت مقایسه نتایج مدل‌سازی سیستم عصبی- فازی با الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. به این

نقاط مشخص شده در منحنی پارتو به‌عنوان نقاط بهینه‌ای هستند که می‌توانند به‌عنوان جواب طراحی بهینه توسط طراح انتخاب گردند. برای داشتن و انتخاب یک نقطه از منحنی‌های پارتو به‌عنوان جواب منحنی بالا، انتخاب نقطه‌ای مهم است که بتواند از دید هر دو تابع هدف مقبول‌تر باشد. به این ترتیب مطابق شکل، نقطه Td_3SL به دلیل داشتن توازن بیشتر در نسبت خطای دو تابع هدف آموزشی و پیش‌بینی به‌عنوان نقاط طراحی مورد بررسی برای مدل به‌دست آمده از تابع عضویت ۳ انتخاب شدند. مشخصات نقاط طراحی مدل‌سازی فرآیند نفوذ پرتابه صلب در اهداف فلزی تک‌لایه برای نقاط بهینه مشخص شده در شکل‌های بالا برحسب مجذور میانگین مربعات خطاها برای داده‌های آموزشی و پیش‌بینی در جدول ۵ نشان داده شده است.

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مقادیر خطاها برحسب توابع هدف در نظر گرفته شده در این کار برای ۳ تابع عضویت با پیچیدگی محاسبات بیشتر، دارای دقت بالاتری نسبت به تابع عضویت و مدل به‌دست آمده از جعبه ابزار متلب است.

مقایسه بین خروجی‌های حاصل از مدل به‌دست آمده از ترکیب سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی و الگوریتم ژنتیک به ترتیب برای نقطه طراحی در نظر گرفته شده Td_3SL و خروجی‌های تجربی فرآیند نفوذ پرتابه صلب در اهداف فلزی تک‌لایه برای ۱۸ دسته داده برای آموزش شبکه و ۱۱ دسته داده در نظر گرفته شده برای پیش‌بینی داده‌های مدل شده آزمایشگاهی در شکل ۹ نشان داده شده است.

جدول ۵- مقادیر جواب‌های بهینه طراحی ساختار تک‌لایه

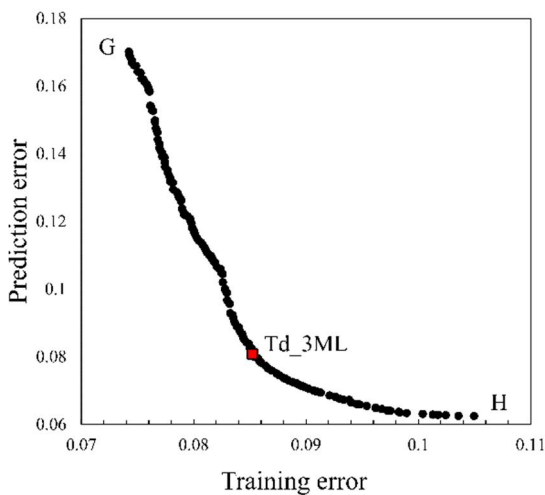
خطای آموزشی	خطای پیش‌بینی	
۰/۰۶۳	۰/۰۸۹	نقطه A
۰/۰۹۲	۰/۰۶۷	نقطه B
۰/۲۰۷	۰/۴۰۷	نقطه Td_3SL
۰/۱۶۴	۰/۱۸۹	ANFIS در متلب

جدول ۶- پارامترهای توابع عضویت نقطه Td-3SL

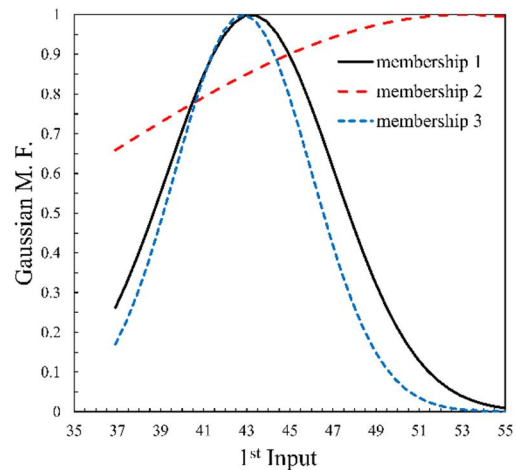
ورودی	تابع عضویت اول	تابع عضویت دوم	تابع عضویت سوم
۱	۴۳/۳۰۲/۸۴۷	۵۳/۱۷۰/۱۱/۷۴	۴۲/۸۴۰/۳/۱۵۲
۲	۰/۶۳۶۰/۴۸	۰/۰۰۲۱۸/۳۵۹	۰/۲۵۵۰/۴۴۲
۳	۳/۱۰۶۴۷/۸۳	۱/۷۳۷۰/۱/۶۳۷	۶/۱۰۶۳۹/۵۲۶

ترتیب، برای طراحی بهینه ساختار چندلایه با ۲۱ داده ورودی جهت آموزش مدل و ۱۲ داده ورودی جهت پیش‌بینی شبکه طراحی شده، تعداد قوانین فازی برابر ۲۷ قانون خواهد بود.

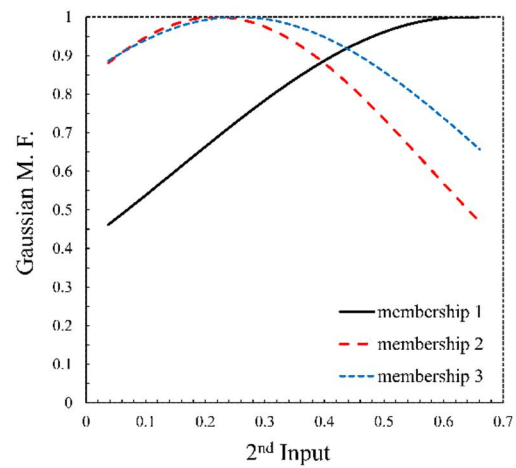
منحنی پارتو مربوط به خطای آموزشی و خطای پیش‌بینی به‌صورت شکل ۱۱ به دست می‌آید. همان‌طور که در بخش قبل به‌صورت کامل توضیح داده شد، از آنجایی که بهبود در یکی از توابع هدف، منجر به بدتر شدن تابع یا توابع هدف دیگر می‌شود، برای مسائل با بیش از یک تابع هدف برخلاف مسائل به‌صورت تک‌هدفی که منجر به یک نقطه اکسترمم در حل مسئله خواهد شد، مجموعه‌ای از نقاط طراحی به‌عنوان جواب خواهیم داشت. مطابق شکل ۱۱، نقاط G و H برای منحنی پارتو با ۳ تابع هدف نقاط ابتدایی و انتهایی منحنی مذکور خواهند بود که در بخش قبل توضیح داده شد. هر یک از این نقاط به‌تنهایی به‌عنوان نقاط بهینه از دید هر تابع هدف، به‌صورت تک‌هدفی محسوب می‌شوند.



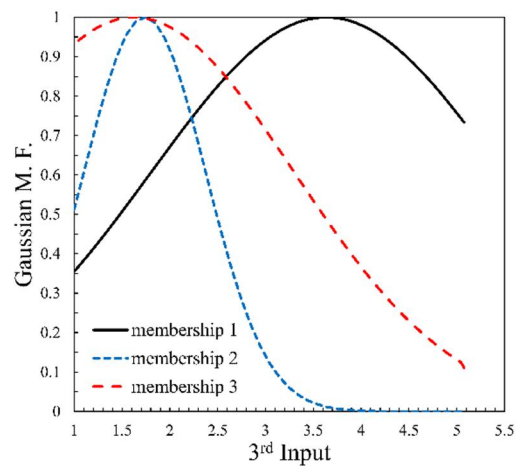
شکل ۱۱- منحنی پارتو مربوط به ساختار چندلایه



(الف)

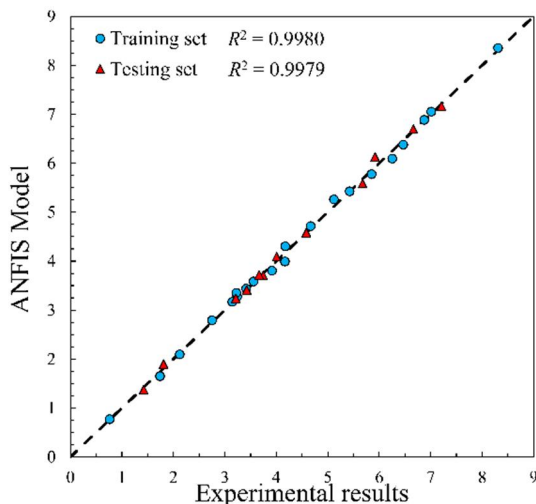


(ب)



(ج)

شکل ۱۰- شکل توابع عضویت گوسی برای نقاط طراحی به ازای توابع عضویت مختلف برای ساختار تک‌لایه



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر خروجی مدل شده و خروجی داده‌های آزمایشگاهی برای ساختار چندلایه

شکل توابع عضویت از نوع گوسین بهینه شده در بخش ورودی سیستم عصبی- فازی تطبیقی توسط الگوریتم ژنتیک برای نقطه طراحی Td_3ML در شکل ۱۳، برای هر ۳ داده ورودی به ترتیب با تعداد ۳ تابع عضویت نشان داده شده است. بازه مقادیر به دست آمده برای ضرایب عضویت بین صفر تا یک رسم خواهند بود که در واقع همان شماتیکی از شکل توابع عضویت گوسی است که به عنوان نگاشتی از ورودی‌های الگوریتم ژنتیک به متغیر و مقادیر زبانی قابل خواهد بود.

پارامترهای بهینه توابع عضویت گوسی به ترتیب σ و c به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک برای هر ۳ ورودی در نظر گرفته شده برای هر یک از داده‌های واقع در بخش ورودی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی، در جدول ۸ نشان داده شده است. این پارامترهای بهینه مربوط به نقاط طراحی Td_3ML است. در این جدول، به خوبی مقادیر پارامترهای بهینه توابع عضویت گوسی در بخش ورودی نشان داده شده که قابلیت مقایسه با حالت ساختار تک‌لایه را دارد.

۷- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، به منظور بررسی تغییر شکل و مکانیسم تخریب ساختارهای تک‌لایه و چندلایه فلزی تحت ضربه پرتابه

نقاط به دست آمده در منحنی پارتو نقاطی هستند که هر یک دارای ویژگی‌هایی هستند که می‌توانند به عنوان نقاط بهینه مورد بررسی قرار بگیرند. با توجه به توضیحات داده شده در انتخاب یک نقطه طراحی از هر منحنی پارتو، نقطه Td_3ML برای توابع عضویت با تعداد ۳ برای هر ورودی انتخاب شده است. به عبارت دیگر، این نقاط دارای عملکردی مطلوب‌تری نسبت به هریک از توابع هدف خطای آموزش و خطای پیش‌بینی از دید داشتن مطابقت بیشتری در داشتن میزان خطای متناسب با یکدیگر نسبت به نقاط دیگر به دست آمده در منحنی پارتو از دید هر دو تابع هدف هستند.

مشخصات نقاط بهینه مدل‌سازی فرآیند نفوذ پرتابه در ساختار چندلایه برای نقاط بهینه مشخص شده در شکل‌های بالا برای نقاط طراحی بهینه به دست آمده همراه با ANFIS جعبه‌ابزار متلب را برحسب مجذور میانگین مربعات خطاها برای ۳۳ داده‌های آموزشی و پیش‌بینی در جدول ۷ نشان داده شده است. مقایسه میزان انطباق خروجی مدل ریاضی و نتایج تجربی برای هر دو جواب به دست آمده با تعداد سه تابع عضویت را نشان می‌دهد.

مقایسه بین خروجی‌های حاصل از مدل به دست آمده از ترکیب سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی و الگوریتم ژنتیک به ترتیب برای نقطه طراحی در نظر گرفته شده Td_3ML و خروجی‌های تجربی فرآیند نفوذ پرتابه صلب در اهداف فلزی تک‌لایه برای ۲۱ دسته داده برای آموزش شبکه و ۱۲ دسته داده در نظر گرفته شده برای پیش‌بینی داده‌های مدل شده آزمایشگاهی، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ضریب همبستگی بالای ۰.۹۹٪ برای هر دو دسته داده در نظر گرفته شده برای خطاهای آموزش و پیش‌بینی برحسب خروجی داده‌های آزمایشگاهی ساختار چندلایه دقت بالای مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول ۷- مقادیر جواب‌های بهینه طراحی ساختار چندلایه

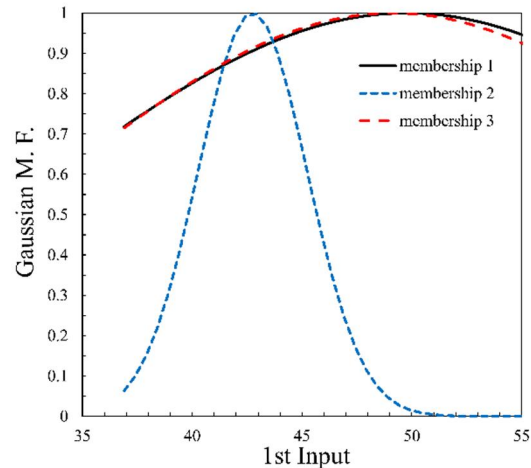
نقاط بهینه	خطای آموزشی	خطای پیش‌بینی
نقطه G	۰/۰۷۵	۰/۱۷۳
نقطه H	۰/۱۰۵	۰/۰۶۶
نقطه Td_3ML	۰/۰۸۵	۰/۰۸۱

جدول ۸- پارامترهای توابع عضویت نقطه Td_3ML

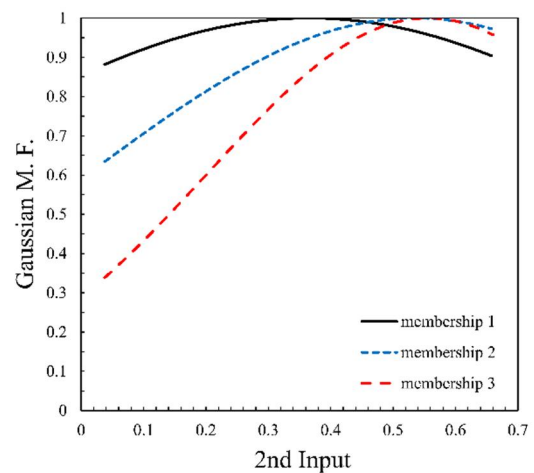
ورودی	تابع عضویت اول	تابع عضویت دوم	تابع عضویت سوم
۱	۴۹/۷۶،۱۵/۸۱	۴۲/۷۴،۲/۴۸	۴۹/۱۲،۱۴/۹۲
۲	۰/۳۶۴۸،۰/۶۵۱۴	۰/۵۳۵۱،۰/۵۲۱	۰/۵۵۶۱،۰/۳۵۲
۳	۳/۷۰۶،۰/۲/۷	۱/۴۷۷۲،۳/۶۶۲	۳/۲۳۷۹،۳/۳۵

کروی صلب در محدوده سرعت اولیه ۴۲ تا ۱۵۸ متر بر ثانیه، ۶۵ نمونه آزمایشگاهی در هشت گروه‌بندی مختلف، طراحی و ساخته شد. نتایج تجربی به‌دست آمده به‌صورت زیر طبقه‌بندی می‌شود: (۱) برای مواردی که سرعت ضربه زننده ۴۴ متر بر ثانیه و ضخامت کل ساختار ۲ و ۳ میلی‌متر است؛ بیشترین خیز هدف فولادی دولایه و سه‌لایه تقریباً ۱/۱۶ برابر بزرگ‌تر از هدف فولادی تک‌لایه است. این مقدار برای هدف فولادی دولایه در حدود ۵۷/۵٪ در مقایسه باهدف آلومینیومی کوچک‌تر است؛ همچنین، این مقدار با اضافه کردن یک‌لایه به ساختار فولادی تک‌لایه، به ۶۲/۵٪ تغییر می‌یابد، (۲) برای حالتی که سرعت ضربه زننده ۶۶ متر بر ثانیه باشد، این نتیجه حاصل می‌شود که ترتیب لایه‌بندی Al-St-Al ۱/۲۲ برابر بیشتر از لایه‌بندی St-Al-St تغییر شکل می‌دهد (۳) برای حالتی که سرعت ۱۲۰ و ۱۴۴ متر بر ثانیه است، خیز اهداف فولادی سه‌لایه به ترتیب ۰/۷۶ و ۱/۱۳ برابر بیشتر از اهداف فولادی دولایه و تک‌لایه است.

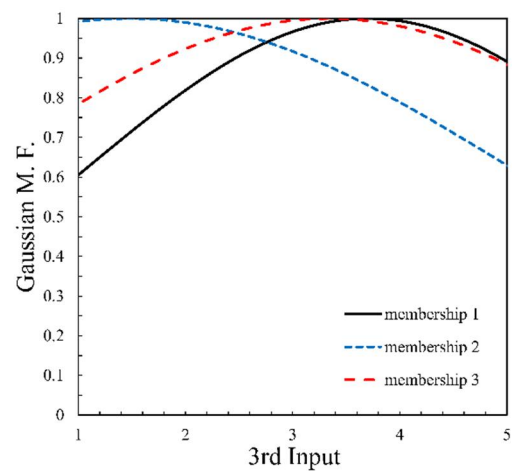
ترکیب دوگانه الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه پارامترهای ورودی سیستم استنتاج فازی و روش تجزیه مقادیر ویژه برای محاسبه ماتریس معکوس بخش خروجی منجر به نتایج مطلوبی در طراحی و مدل‌سازی شد؛ همچنین، بررسی نتایج به‌دست آمده از جعبه‌ابزار متلب و روش پیشنهادی نشان داد که ترکیب استفاده شده در طراحی بهینه مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی، دارای دقت و قابلیت بالاتری به‌ویژه در پیش‌بینی داده‌های آموزش دیده نسبت به روش مورد استفاده در متلب دارد. بهینه‌سازی سیستم عصبی-فازی به‌صورت چندهدفی منجر به چندین نقطه بهینه در منحنی پارتو شد که دارای عملکرد مطلوب از دید هر دو تابع هدف در نظر گرفته شده، خطای آموزشی و



(الف) ورودی اول



(ب) ورودی دوم



(ج) ورودی سوم

شکل ۱۳- شکل توابع عضویت گوسی برای نقاط طراحی به ازای توابع عضویت مختلف برای ساختار چندلایه

- [10] Deng Y, Zhang W, Cao Z (2012) Experimental investigation on the ballistic resistance of monolithic and multi-layered plates against hemispherical-nosed projectiles impact. *Mater Des* 41:266-81.
- [11] Deng Y, Zhang W, Cao Z (2013) Experimental investigation on the ballistic resistance of monolithic and multi-layered plates against ogival-nosed rigid projectiles impact. *Mater Des* 44:228-39.
- [12] Tiwari G, Iqbal MA, Gupta PK, Gupta NK (2014) The ballistic resistance of thin aluminium plates with varying degrees of fixity along the circumference. *Int J Impact Eng* 74:46-56.
- [13] Iqbal MA, Tiwari G, Gupta PK, Bhargava P (2015) Ballistic performance and energy absorption characteristics of thin aluminium plates. *Int J Impact Eng* 77:1-5.
- [14] Elek PM, Jaramaz SS, Micković DM, Miloradović NM (2016) Experimental and numerical investigation of perforation of thin steel plates by deformable steel penetrators. *Thin Walled Struct* 102:58-67.
- [15] Sharma P, Chandel P, Bhardwaj V, Singh M, Mahajan P (2018) Ballistic impact response of high strength aluminium alloy 2014-T652 subjected to rigid and deformable projectiles. *Thin Walled Struct* 126:205-19.
- [16] Sanchez E, Shibata T, Zadeh, LA (1997) Genetic algorithms and fuzzy logic systems: Soft computing perspectives. World Scientific.
- [17] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan TA (2002) A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans Evol Comput* 6(2): 182-97.
- [18] Karaboga D, Kaya E (2018) Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey. *Artif Intell Rev*, 1-31.
- [19] Jang JS (1993) ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Sys Man Cybern* 23(3): 665-685.
- [20] Mitra S, Hayashi Y (2000) Neuro-fuzzy rule generation: survey in soft computing framework. *IEEE T Neural Networ* 11(3): 748-768.
- [21] Lin CJ, Xu YJ (2006) A hybrid evolutionary learning algorithm for TSK-type fuzzy model design. *Math Comput Model* 43(5-6): 563-581.
- [22] Saepullah A, Wahono RS (2015) Comparative analysis of mamdani, sugeno and tsukamoto method of fuzzy inference system for air conditioner energy saving. *J Intell Syst* 1(2): 143-147.
- خطای پیش‌بینی بود. با توجه به اینکه هیچ‌یک از نقاط بهینه به‌دست‌آمده در منحنی پارتو برتری مطلق از دید هر دو تابع هدف بر نقطه دیگر ندارند، هر یک از این نقاط دارای قابلیت انتخاب به‌عنوان نقطه طراحی را با توجه به نیاز طراحی مسئله دارند. درنهایت با توجه به معیار توضیح داده شده نقطه طراحی به‌عنوان جواب بهینه ارائه شد.

۸- مراجع

- [1] Hosseinzadeh S, Mostofi TM, Babaei H (2019) Experimental investigation of spot welding process on metallic targets impacted by flat and conical projectiles. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(3): 39-49. (In Persian)
- [2] Badkhor MS, Vahedi K, Oskouei AN (2019) Presenting a modified theory and analytical investigation of projectile penetration into ceramic - metal semi-infinite targets. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(2): 31-45. (In Persian)
- [3] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2017) Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin Walled Struct* 107: 257-265.
- [4] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S (2017) On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin-Walled Struct* 112: 118-124.
- [5] Yoo YH, Shin H (2004) Protection capability of dual flying plates against obliquely impacting long-rod penetrators. *Int J Impact Eng* 30(1): 55-68.
- [6] Liaghat GH, Malekzadeh A (1999) A modification to the mathematical model of perforation by Dikshit and Sundararajan. *Int J Impact Eng* 22(5): 543-50.
- [7] Liang CC, Yang MF, Wu PW, Teng TL (2005) Resistant performance of perforation of multi-layered targets using an estimation procedure with marine application. *Ocean Eng* 32(3-4): 441-68.
- [8] Gupta NK, Iqbal MA, Sekhon GS (2007) Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates. *Int J of Solids Struct* 44(10):3411-39.
- [9] Flores-Johnson EA, Saleh M, Edwards L (2011) Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *Int J Imp Eng* 38(12):1022-32.

- [34] Babaei H, Mostofi TM, Namdari-Khalilabad M, Alitavoli M, Mohammadi K (2017) Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling. *Powder Tech* 315: 171-81.
- [35] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E (2017) On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part E J Process MechEng* 231(5): 939-950.
- [36] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T (2016) New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 1464420716654195.
- [37] Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M (2019) Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 233(7): 1449-1471.
- [38] Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T (2019) Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin Wall Struc* 144: 106332.
- [39] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2015) Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates under hydrodynamic loads. *Journal of Modares Mechanical Engineering* 15(4): 361-368. (In Persian)
- [40] Babaei H, Darvizeh A, Alitavoli M, Mostofi TM (2015) Experimental and analytical investigation into plastic deformation of circular plates subjected to hydrodynamic loading. *Journal of Modares Mechanical Engineering* 15(2): 305-312. (In Persian)
- [41] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water hammer shock loading. *Proc Inst Mech Eng-Part E: J Process Mech Eng* 231(3): 490-496.
- [42] Babaei H, Mostofi TM, Sadraei SH (2015) Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical. *Struct Eng Mech* 56(4): 535-548.
- [43] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2015) Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation. *Proc Inst Mech Eng-Part C J Mech Eng Sci* 0954406215614336.
- [23] Baghban A, Jalali A, Shafiee M, Ahmadi MH, Chau KW (2019) Developing an ANFIS-based swarm concept model for estimating the relative viscosity of nanofluids. *Eng Appl Comput Fluid Mech* 13(1): 26-39.
- [24] Aliev RA, Guirimov BG, Fazlollahi B, Aliev RR (2009) Evolutionary algorithm-based learning of fuzzy neural networks. Part 2: Recurrent fuzzy neural networks. *Fuzzy Sets Syst* 160(17): 2553-2566.
- [25] Panapakidis IP, Dagoumas AS (2017) Day-ahead natural gas demand forecasting based on the combination of wavelet transform and ANFIS/genetic algorithm/neural network model. *Energy* 18: 231-245.
- [26] Jamali A, Babaei H, Nariman-Zadeh N, Ashraf Taleh SH, Mirzababaie Mostofi T (2016) Multi-objective optimum design of ANFIS for modelling and prediction of deformation of thin plates subjected to hydrodynamic impact loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 1464420716660332.
- [27] Mostofi TM, Badkhor MS, Ghasemi E (2019) Experimental investigation and optimal analysis of the high-velocity forming process of bilayer plates. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(3) 65-80. (In Persian)
- [28] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D (2019) Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. *Int J Impact Eng* 125: 93-106.
- [29] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M (2017) The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling. *Thin Walled Struct* 118:1-11.
- [30] Mostofi TM, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part II: Analytical and empirical modelling. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(2) 15-29. (In Persian)
- [31] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M, Saeidinejad A (2017) Experimental investigation and dimensionless analysis of forming of rectangular plates subjected to hydrodynamic loading. *J Appl Mech Tech Phys* 58(1):139-47.
- [32] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2015) Study on the response of circular thin plate under low velocity impact. *Geomech Eng* 9(2): 207-218.
- [33] Babaei H, Mostofi T.M, Alitavoli M, Darvizeh A (2016) Empirical Modelling for Prediction of Large Deformation of Clamped Circular Plates in Gas Detonation Forming Process. *Exp Tech* 40 (6): 1485-1494.

- fully clamped thin quadrangular plates due to uniform and localized impulsive loading. *Thin-Walled Struct* 123: 48-56.
- [46] Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation. *Strain* 53(4): e12235.
- [44] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M (2016) Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behavior of fully clamped thin quadrangular plates. *Thin-Walled Struct* 109: 367-376.
- [45] Mostofi TM, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H (2018) Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending strains on the dynamic plastic behaviour of