



بررسی تجربی و تحلیل بهینه فرآیند شکل‌دهی سرعت بالا ورق‌های دولایه

توحید میرزابابای مستوفی^{۱*}، مصطفی سیاح بادخور^۱ و عرفان قاسمی^۲

^۱ مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۶

چکیده

هدف از این مقاله بررسی تجربی و مدل‌سازی عددی تغییر شکل پلاستیک ساختارهای دولایه فلز-پلیمر تحت بار انفجار مخلوط گازی است. بدین منظور، در بخش تجربی از سامانه شکل‌دهی انفجار گاز، جهت انجام ۴۰ آزمایش با شرایط آزمایشگاهی مختلف استفاده شده است. نتایج تجربی شامل، تأثیر میزان ایمپالس، ضخامت ورق فلزی و روکش پلی‌اوره و چگالی سطحی بر بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه است. در بخش مدل‌سازی، طراحی بهینه چند هدفی داده‌های آموزش و ارزیابی قابلیت پیش‌بینی مدل به‌دست‌آمده با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) و الگوریتم ژنتیک انجام شده است. در ادامه روند بهینه‌سازی چند هدفی از دید دو تابع هدف، مجموعه‌ای از نقاط غیر برتر بهینه به نام منحنی پارتو تشکیل شد که به عنوان نقاط طراحی محسوب شدند. کاربرد الگوریتم ژنتیک به منظور طراحی بهینه پارامترهای توابع عضویت گوسی در بخش ورودی و روش کمترین مربعات برای محاسبه بردار ضرایب خطی، بخش نتایج ساختار فازی-عصبی است. سنجش میزان دقت مدل پیشنهاد شده با مقایسه مجموعه داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل شده با استفاده از آماره‌های ضریب تبیین (R^2) و میانگین مجذور مربعات خطای داده‌های آموزشی و پیش‌بینی، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: تغییر شکل پلاستیک؛ شکل‌دهی سرعت بالا؛ ورق دولایه؛ سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی؛ الگوریتم ژنتیک.

Experimental Investigation and Optimal Analysis of the High-Velocity Forming Process of Bilayer Plates

T. Mirzababaie Mostofi^{1,*}, M. Sayah Badkhor¹, E. Ghasemi²

¹ Lecturer, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

² MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

Abstract

The objective of this paper is an experimental investigation and numerical modelling of large plastic deformation of metallic-polymeric bilayer plates under gas mixture detonation load. For this, gas detonation forming apparatus was used in the experimental section to perform 40 experiments under various experimental conditions. The experimental results include the effect of impulse value, thickness of the metal plate and polymeric coating and areal density on the maximum permanent transverse deflection of bilayer plates. In the modelling section, multi-objective optimal design of training data and evaluation the prediction capability of the obtained model has been achieved by adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and genetic algorithm. In proceeding of multi-objective optimization procedure from the aspect of two objective functions, a set of optimum non-dominated points, namely, Pareto front was constructed considering as designing points. The application of the genetic algorithm is the optimum design of Gaussian membership function parameters in preceding and least square method for calculation of linear coefficient vectors in the consequent part of the neuro-fuzzy structure. The evaluation of the accuracy of the proposed model has been investigated by comparing the experimental results with modeling data sets using the coefficient of determination (R^2) and root-mean-square error for training and prediction data sets.

Keywords: Plastic Deformation; High-Velocity Forming; Bilayer Plate; Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System; Genetic Algorithm.

۱- مقدمه

فرآیند شکل‌دهی با سرعت‌بالا، فرآیندی است که در آن مقدار زیادی انرژی در فاصله زمانی کوتاه آزاد می‌شود، لذا قطعه کار در برابر فشار زیادی قرار می‌گیرد [۱-۴]. روش‌های شکل‌دهی با سرعت‌بالا شامل، شکل‌دهی با خرج انفجاری، انفجار مخلوط گازها، الکترومغناطیسی و الکتروهیدرولیکی است. با توجه به مزایا و معایب که در روش‌های شکل‌دهی سرعت پایین [۵] ذکر شده وجود دارد، اما روش‌های شکل‌دهی با سرعت‌بالا [۶-۸]، به دلیل کوتاه بودن زمان تولید، هزینه پایین فرآیند و تولید قطعات پیچیده در یک مرحله، همواره مورد توجه محققین بوده است. فرآیند شکل‌دهی با روش انفجار مخلوط گازها، نتیجه یک فرآیند شیمیایی گرمازا میان یک ماده سوختنی و عامل اکسیدکننده است که با تولید گرما و تغییر شیمیایی مواد اولیه همراه می‌شود. پس از ایجاد شوک ناشی از انفجار، فشار دینامیکی باعث تغییر شکل جسم می‌شود. در دهه اخیر تحقیقات به نسبت خوبی در این زمینه انجام شده است [۹-۳۲]. هرچند به دلیل نوین بودن آن، تحقیقات بسیار اندکی در زمینه شکل‌دهی ورق با استفاده از این روش ارائه شده و تاکنون تحقیقی روی ساختارهای فلزی تقویت شده یا ساختارهای فلز-پلیمر صورت نگرفته است.

در زمینه شکل‌دهی ساختارهای فلزی تقویت شده با لایه پلی‌اوره با خرج انفجاری، مهم‌ترین تحقیقات بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ گزارش شده است. در سال ۲۰۱۰، امینی و همکارانش به بررسی تجربی رفتار دینامیکی و مدهای شکست ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای فولادی (DH-36) و ورق‌های دولایه فولاد-پلی‌اوره تحت بارگذاری دفعی پرداختند. در آزمایش‌های انجام‌گرفته، یک پالس فشار آنی از طریق آب یا ماده پلی‌اورتان نرم به ورق فولادی وارد شده که بارگذاری شوک با فشار ۸۰ MPa در مدت زمان ۵۰ μs را شبیه‌سازی می‌کند. به‌طور کلی، هدف این گروه تحقیقاتی از انجام این سری از آزمایش‌های تجربی، بررسی اهمیت موقعیت نسبی روکش پلی‌اوره با توجه به جهت بارگذاری بود. به‌عنوان مثال، آن‌ها بررسی کردند که پاشش روکش پلی‌اوره روی لایه جلویی، موجب کمتر شدن اثر تخریبی بار دفعی می‌شود یا پاشش آن روی لایه عقبی فولادی، عملکرد بهتری دارد. نتایج تجربی به‌دست‌آمده نشان داد که استفاده از

روکش پلی‌اوره به‌عنوان لایه عقبی، می‌تواند تأثیر بسزایی روی پاسخ ورق‌های فولادی تحت بار دفعی از هر دو منظر جذب انرژی و کاهش اثرات مخرب بارگذاری داشته باشد [۲۴-۲۷].

در سال ۲۰۱۳، به‌منظور بررسی اثر پوشش پلی‌اوره بر مقاومت انفجاری ورق‌های فولادی نرم، آکلند و همکارانش مطالعاتی تجربی و عددی انجام دادند. در تحقیقات تجربی، ورق‌های فولادی مربعی با و بدون پوشش پلی‌اوره تحت بارگذاری دفعی غیریکنواخت قرار داده شدند. در این سری از آزمایش‌ها، روکش پلیمری بر سطح عقبی نمونه فلزی اعمال شده بود. ضخامت این لایه‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده بود که هر یک از نمونه‌های آزمایشی، چگالی سطحی معادل با $4/7 \text{ g/cm}^2$ در ناحیه شکل‌گیری داشت. نتایج تجربی نشان داد که میزان تغییر شکل ورق با افزایش هم‌زمان ضخامت روکش پلی‌اوره و کاهش ضخامت ورق فولادی افزایش می‌یابد؛ همچنین، ثبت تغییر شکل گذرای ورق با دوربین‌های سرعت‌بالا نشان داد که به علت انبساط هاپپر الاستیک روکش پلی‌اوره، جدایش این پوشش در یک ناحیه دایره‌ای شکل رخ می‌دهد و تغییر شکل گذرای آن تقریباً دو برابر نمونه فولادی بدون روکش پلیمری است [۲۸].

در سال ۲۰۱۶، تران و همکاران به بررسی عددی نحوه تغییر شکل و مکانیسم شکست ساختار کامپوزیتی چندلایه الاستومر با FRP تحت بار انفجاری با استفاده از تئوری شکست هاشین پرداختند. یک لایه نازک الاستومر (پلی‌اوره)، به قسمت عقبی ساختار اعمال شد تا میزان آسیب وارد شده به چندلایه‌های کامپوزیتی را کاهش دهد. جدایش بین لایه‌های ساختار کامپوزیتی با استفاده از المان‌های چسب سه‌بعدی با رفتار دوخطی لحاظ شد. تاریخچه تغییر شکل‌های پیش‌بینی شده، ارزیابی الگوهای آسیب الیاف/زمینه و لایه‌لایه‌شدگی بین چندلایه‌ها در ساختارهای کامپوزیتی موردنظر مشاهده و مقایسه شد. نتایج به‌دست‌آمده از مدل عددی، نشان‌دهنده کاهش مؤثر میزان بار دفعی منتقل‌شده به لایه عقبی ساختار و کاهش لایه‌لایه‌شدگی ضمن حفظ سفتی کلی بود که این موضوع را می‌توان از نقش‌های کلیدی لایه الاستومر در بهبود عملکرد قلمداد کرد [۲۹].

در سال ۲۰۱۷، رمینکوو و همکارانش به بررسی تغییر شکل پلاستیک سه نوع ورق فولادی شامل، فولاد نرم، فولاد

ترکیب الگوریتم یادگیری شبکه عصبی و منطق فازی به منظور نگاشتی از فضای ورودی به خروجی با استفاده از دانش بشری استفاده می‌کند؛ همچنین، با توجه به توانایی در ترکیب قدرت زبانی یک سیستم فازی با قدرت عددی یک شبکه عصبی به طور گسترده برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی بسیاری از مسائل مهندسی استفاده شده است [۳۹ و ۴۰]. سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی با ارائه سیستمی مبتنی بر قوانین اگر-آنگاه فازی برای ارتباط بخش غیرخطی ورودی به بخش خطی خروجی و نگرشی بر پایه مدل فازی سوگونو، توانایی خوبی در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده نشان داده است [۴۱].

با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که تمامی مطالعات در زمینه شکل‌دهی ساختارهای فلز- پلیمر با استفاده از خرج‌های انفجاری بوده و تحقیقات انجام- شده با روش انفجار مخلوط گازها محدود به ورق‌های فلزی دایره‌ای و مستطیلی است [۳-۳۲]؛ لذا انجام مطالعات آزمایشگاهی روی ساختارهای فلزی شده با روکش پلیمری به منظور مطالعه پارامترهای مختلف و بررسی اثرگذاری آن‌ها، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. شایان توجه است که در تحقیقات انجام شده توسط محققان، تاکنون مطالعه‌ای روی مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی انفجار مخلوط گازها و شناسایی پارامترهای موثر بر آن نیز انجام نگرفته است. با توجه به توضیحات ارائه شده، مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش آزمایشگاهی شامل، بررسی رفتار پلاستیک ساختارهای فلز- پلیمر با ضخامت‌های مختلف لایه فلزی و پلیمری تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها و در بخش مدل‌سازی شامل، ارائه مدلی برای فرآیند شکل‌دهی ساختارهای دولایه با روش انفجار مخلوط گازها با استفاده از داده‌های ورودی- خروجی است که از ترکیب روش بهینه- سازی الگوریتم ژنتیک و روش کمترین مربعات خطا برای طراحی بهینه بخش‌های مختلف سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی استفاده می‌شود. 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

با مقاومت بالا و فولاد زنگ نزن تحت بار دفعی یکنواخت با استفاده از انفجار خرج‌های کروی نیترومتان پرداختند. همچنین آنها در تعدادی آزمایش دیگر، ورق‌های فولادی مذکور با پوشش پلی‌اوره و کامپوزیتی تحت بار دفعی غیریکنواخت قرار داده شد. در طی هر آزمایش، منحنی‌های فشار-زمان انفجار و جابجایی ورق‌های فولادی اندازه‌گیری شد. در این سری از آزمایش‌ها، نتایجی را برای کالیبراسیون مدل‌های عددی و ساده‌سازی مدل‌های تجربی به منظور پیش‌بینی بارهای انفجار و پاسخ دینامیکی ساختار ارائه کرد [۳۰].

مدل‌سازی فرآیندها و شناسایی سیستم‌ها با بکار بردن داده‌های ورودی- خروجی، یکی از زمینه‌های مورد بررسی در بسیاری از تحقیقات بوده است. روش‌های شناسایی سیستم در بسیاری از شاخه‌های علوم مهندسی به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتارهای پیچیده و مبهم این سیستم‌ها، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ورودی و خروجی استفاده می‌شود. به این ترتیب، یکی از دلایل اصلی این پیشرفت سریع را می‌توان استفاده از محاسبات نرم دانست [۳۳]. یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر جهت پیش‌بینی فرآیندهای فیزیکی که دارای روابط کاملاً غیرخطی میان پارامترهای تأثیرگذار و درعین‌حال از پیچیدگی زیادی برخوردار هستند، استفاده از سیستم‌های هوشمند شامل، شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی و استفاده از تکنیک‌های ترکیبی این سیستم‌ها با روش‌های بهینه‌سازی است [۳۴]. شبکه ANFIS برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ ارائه شد که سیستمی مبتنی بر قوانین اگر-آنگاه فازی با استفاده از سیستم استنتاج فازی بر مبنای قواعد اگر- آنگاه فازی نوع TSK برای ارتباط بخش غیرخطی ورودی به بخش خطی خروجی سیستم است [۳۵ و ۳۶]. بررسی جامع از الگوریتم- های تولید قوانین عصبی-فازی با محاسبات نرم در سال ۲۰۰۰، توسط میترا انجام شد. این مراحل شامل، استخراج و بهبود در تولید قوانین فازی با استفاده از مجموعه‌های فازی شامل، اطلاعات قابل دسترس از دانش بشری بوده است [۳۷]. طراحی مدل‌های فازی از نوع سوگونو، به سبب سادگی تفسیر مدل ارائه شده توسط آن‌ها و دقت بالا به طور وسیعی در کنترل و مدل‌سازی سیستم‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳۸]. سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS)، از

جهت شکل‌دهی آزاد ساختارهای فلز-پلیمر و اعمال بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها، از سامانه آزمایشی دانشگاه گیلان استفاده شده است که تصویر آن در شکل ۱ نشان داده شده است. این سامانه آزمایشی شامل، چهار بخش اصلی است: (۱) واحد اشتعال (۲) شیر کنترل گاز (۳) واحد سیستم اندازه‌گیری فشار (۴) واحد شکل‌دهی.

دست آوردن پارامترهای خطی خروجی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی به‌کاربرده می‌شود.

۲- مطالعه تجربی

در سال‌های اخیر استفاده از فن ریخته‌گری پاششی یک لایه ماده پلیمری روی ورق فولادی جهت افزایش عملکرد دینامیکی و مقاومت شکست آن علاقه‌مندان زیادی را جذب کرده است [۲۷-۳۰]. با توجه به ادبیات تحقیق، به نظر می‌رسد که در میان پلیمرهای موجود، پلی‌اوره یک انتخاب خوب با خواص منحصربه‌فرد مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی جهت افزایش مقاومت شکست در ورق‌های فلزی است. این پلیمر می‌تواند طیف گسترده‌ای از خواص مکانیکی، از لاستیک نرم تا پلاستیک سخت بسته به ویژگی‌های شیمیایی آن را نمایش دهد. دمای انتقال شیشه پلی‌اوره کمتر از ۵۰- درجه سانتی‌گراد بوده که خیلی پایین‌تر از حد معمول دمای عملکرد است [۴۲]. این الاستومر به‌طور گسترده در صنعت ریخته‌گری در فرم جامد مانند، تونل‌ها، پل‌ها، سقف‌ها، مخازن ذخیره‌سازی و کشتی‌های حمل‌ونقل، استفاده می‌شود. علاوه بر صنعت ریخته‌گری، اخیراً این ماده به‌منظور افزایش مقاومت ساختمان‌ها، وسایل نقلیه و سازه‌ها در برابر نیروهای ضربه‌ای و انفجاری مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به توضیحات ارائه شده و با توجه به اینکه این ماده پلیمری به‌راحتی به سطوح فلزی متصل می‌شود و در زمان بسیار کوتاهی به عمل می‌آید، لذا در این تحقیق از روکش پلی‌اوره با پاشش گرم جهت بهبود تقویت ورق‌های آلومینیومی در برابر بار انفجاری استفاده شده است. مشخصات فنی قبل و بعد از ترکیب این ماده که از شرکت سپنتا سروین سازه پارس تهیه شده در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است [۳۱].

در بخش تجربی از این تحقیق، هدف آن است تا بتوان با افزودن لایه پلی‌اوره، از به وجود آمدن مدهای تخریب در ورق‌های آلومینیومی پیش‌گیری کرد و آستانه تحمل بار دفعی اعمال‌شده بر این ساختارها را افزایش داد؛ همچنین یکی دیگر از اهداف این تحقیق، بررسی تاثیر ضخامت‌های مختلف لایه فلزی و پلیمری بر پاسخ دینامیکی ساختارهای فلز-پلیمر تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها است تا بتوان یک بانک اطلاعاتی جامع تجربی تهیه کرد.

جدول ۱- مشخصات فنی قبل از ترکیب ماده پلی‌اوره [۳۱]

جزء دوم	جزء اول	
ایزوسیانات آروماتیک	پلی آمین	شرح شیمیایی
مایع	مایع	حالت فیزیکی
$> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	$> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	نقطه اشتعال
زرد	زرد (بدون رنگ‌دانه)	رنگ
۱/۱۴	۱/۱	چگالی (kg/m^3)
۱/۱۰	۰/۹۸	۶۰ $^{\circ}\text{C}$
۸۰۰	۴۷۵	۲۰ $^{\circ}\text{C}$
۴۵۰	۲۵۰	۳۰ $^{\circ}\text{C}$
۲۰۰	۹۰	۵۰ $^{\circ}\text{C}$
۱۲۰	۶۵	۶۰ $^{\circ}\text{C}$

جدول ۲- مشخصات فنی ترکیب نهایی ماده پلی‌اوره [۳۱]

ویژگی	توضیحات
حالت فیزیکی	غشاء جامد الاستومتری
رنگ	طوسی، آبی، قرمز و بژ
سختی	۵۵ D
چگالی	$950\text{ (kg/m}^3\text{)}$
	حداکثر کشیدگی
	٪۲۲۵
خواص مکانیکی	مقاومت کششی (MPa)
	۱۶/۲
	استحکام پارگی (N/mm^2)
	۱۰۰



شکل ۱- سامانه انفجار مخلوط گازها

پیشین توسط نویسنده مسئول این تحقیق، ارائه شده است [۲۱ و ۲۲].

با توجه به توضیحات ارائه شده، پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ۴۰ ساختار فلز-پلیمر در هشت گروه‌بندی مختلف از نظر ضخامت و چگالی سطح یعنی؛ E-AI-1-PU-3، I-AI-1.5-PU-4، H-AI-2-PU-4، G-AI-2-PU-3، F-AI-1-PU-4، J-AI-1.5-PU-6، K-AI-2.5-PU-6 و L-AI-2.5-PU-5 تحت پنج بارگذاری با فشارهای قبل از انفجار متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است در این ساختارها، لایه جلویی و عقبی به ترتیب از جنس ورق آلومینیومی و ماده پلیمری پلی‌اوره در نظر گرفته شده است. همان‌طور که پیشتر ذکر شد، تمرکز کارهای تجربی انجام‌گرفته در این سری از آزمایش‌ها، بر میزان اثربخشی افزایش ضخامت لایه فلزی و پلیمری بر مقاومت دینامیکی ساختار دولایه فلز-پلیمری و افزایش آستانه تحمل بار دفعی ورق‌های نازک آلومینیومی است.

۳- نتایج تجربی

در جدول ۳، کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ساختارهای دولایه فلز-پلیمر ارائه شده است. لازم به توضیح است که در جدول ۳، میزان شدت نیروی اعمالی یا ایمپالس از طریق انتگرال‌گیری عددی از فاز مثبت منحنی فشار-زمان ثبت‌شده توسط حس‌گر پیزوالکتریک فشار

واحد اشتعال این سامانه شامل، سیلندرهاى ذخیره گاز اکسیژن و استیلن و یک محفظه احتراق ۶ لیتری از جنس فولاد ضدزنگ است که توسط گازهای اکسیژن و استیلن پر می‌شود. این محفظه احتراق، دارای یک شیر تخلیه جهت خارج کردن گازهای موجود در سیلندر نیز است. در بخش دوم، به‌منظور تنظیم میزان فشار قبل از انفجار هر یک از گازهای ورودی، از شیرهای کنترل گاز استفاده می‌شود. مخلوط گاز در انتهای بسته محفظه احتراق، توسط یک سیستم جرقه زن منفجر می‌شود. واحد سیستم اندازه‌گیری فشار شامل، یک مانومتر به‌منظور اندازه‌گیری میزان فشار واردشده داخل محفظه احتراق قبل از انفجار، یک حس‌گر فشار پیزوالکتریک به‌منظور ثبت فشار پس از انفجار اعمالی بر سطح نمونه، یک سیستم تقویت‌کننده یا آمپلی‌فایر جهت تقویت سیگنال‌های دریافتی از حس‌گر پیزوالکتریک و یک سامانه ثبت داده‌های دینامیکی برای ذخیره نمودار فشار-زمان از حس‌گر پیزوالکتریک است [۲۱-۲۳].

نمونه ساختارهای فلز-پلیمر مورد آزمایش، از ترکیب ورق فلزی از جنس آلومینیوم (Al-1100) در ضخامت‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی‌متر با لایه پلی‌اوره در ضخامت‌های تشکیل‌شده است. شایان توجه است که نمونه‌های آزمایشی در ابعاد ۳۹۰×۳۴۵ میلی‌متر مربع برش زده شدند. لازم به توضیح است که خواص مکانیکی ورق‌های فلزی در تحقیقات

۴۱/۸	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	H-19	محاسبه شده است. نتایج به دست آمده در مجموعه آزمایش‌های انجام گرفته روی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری، نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی نمونه‌ها است که در آن اثر تغییرات ضخامت ورق آلومینیومی و روکش پلیمری و تغییرات مقدار ایمپالس یا به عبارتی افزایش انرژی انتقالی به ورق و به تبع آن تغییر نرخ سرعت تغییر شکل، بررسی شده است.
۴۸/۳	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	H-20	
۲۰/۸	۰/۱۵	۰/۲	۱۹/۱	I-21	
۳۱/۴	۰/۳۵	۰/۳	۲۸/۱	I-22	
۳۶/۱	۰/۲۵	۰/۳۵	۳۲/۳	I-23	
۴۷/۱	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	I-24	
پارگی	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	I-25	
۱۸/۷	۰/۱۵	۰/۲	۱۹/۱	J-26	
۲۸/۵	۰/۳۵	۰/۳	۲۸/۱	J-27	
۳۲/۹	۰/۲۵	۰/۳۵	۳۲/۳	J-28	
۴۳/۰	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	J-29	
۵۰/۸	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	J-30	
۱۴/۵	۰/۱۵	۰/۲	۱۹/۱	K-31	
۲۲/۲	۰/۳۵	۰/۳	۲۸/۱	K-32	
۲۵/۵	۰/۲۵	۰/۳۵	۳۲/۳	K-33	
۳۳/۶	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	K-34	
۳۹/۸	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	K-35	
۱۳/۳	۰/۱۵	۰/۲	۱۹/۱	L-36	
۲۰/۶	۰/۳۵	۰/۳	۲۸/۱	L-37	
۲۲/۸	۰/۲۵	۰/۳۵	۳۲/۳	L-38	
۳۱/۲	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	L-39	
۳۷/۲	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	L-40	

جدول ۳ - نتایج کارهای تجربی

شماره آزمایش	ایمپالس (N·s)	فشار اکسیژن (bar)	فشار استیلن (bar)	بیشترین خیز دائمی (mm)
E-1	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۳۴/۲
E-2	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۴۷/۴
E-3	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	پارگی
E-4	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	پارگی
E-5	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	پارگی
F-6	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۳۰/۱
F-7	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۴۲/۱
F-8	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۴۸/۱
F-9	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	پارگی
F-10	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	پارگی
G-11	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۲۱/۹
G-12	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۳۰/۷
G-13	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۳۵/۵
G-14	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	۴۶/۸
G-15	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	پارگی
H-16	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۱۹/۸
H-17	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۲۷/۳
H-18	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۳۱/۸

۳-۱- گستره تغییر شکل ساختارهای فلز-پلیمر

در این بخش به بیان مشاهدات تجربی در مورد گستره یا مدهای تغییر شکل ساختارهای دولایه فلز-پلیمری پرداخته شده است. بررسی مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که در طول ۴۰ آزمایش، تمامی ساختارها به غیر از ۷ نمونه سطوح

۳-۲- تاثیر ضخامت لایه فلزی و پلیمری

اکنون پس از بررسی و تشریح مدهای تغییر شکل پلاستیک ساختارهای دولایه فلز-پلیمری به تحلیل نتایج تجربی کمی به دست آمده پرداخته می‌شود؛ لذا در این بخش تأثیر تغییر پارامترهای تجربی مانند، افزایش میزان ایمپالس، افزایش ضخامت ورق فلزی و روکش پلی‌اوره و اثر افزایش چگالی سطحی بر بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه فلز-پلیمر، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به همین منظور در شکل ۳، نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای فلز-پلیمر برحسب ایمپالس، نمایش داده شده است.

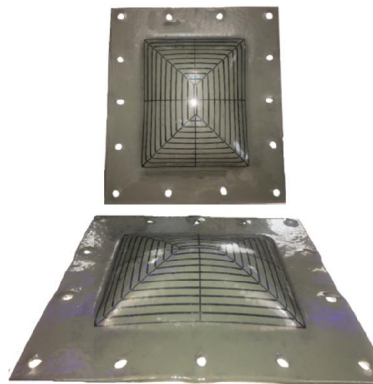
در شکل ۳، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری با بالا رفتن سطح انرژی انتقالی، به صورت تدریجی افزایش می‌یابد و در حالت کلی، ایمپالس و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی دارند. یکی از نکات جالب در رفتار ساختارهای فلز-پلیمر تحت بار انفجار مخلوط گازها برخلاف ساختارهای دولایه فلزی و مشابه با ساختارهای تک‌لایه فلزی، این است که تغییر شکل پلاستیک این ساختارها در یک مرحله با نرخ‌های افزایشی مختلف رخ می‌دهد. همان‌طور که در نواحی دایره‌ای قرمز و آبی‌رنگ در شکل ۳ نشان داده شده، در ایمپالس‌های پایین، دو گروه آزمایشی H و I که تقریباً دارای چگالی سطحی یکسان دارند، دارای خیزهای دائمی تقریباً برابر هستند؛ اما در ایمپالس‌های بالاتر، ساختار H مقاومت بیشتری در برابر بار دفعی دارد، بنابراین؛ این نتیجه حاصل می‌شود که استفاده از رویه‌های پلی‌اوره در ایمپالس‌های پایین، کمک شایانی به مقاومت سازه در برابر بار انفجاری ضمن پایین نگه‌داشتن جرم سازه می‌کند؛ همچنین در این نمودار، مقادیر خیز دائمی ساختارهای فلز-پلیمر برحسب ایمپالس برای گروه‌های آزمایشی مختلف به صورت منحنی درجه یک برازش شده‌اند. توابع برازش در جدول ۴ بیان شده است. با توجه به اینکه در گروه‌های آزمایشی E و F تعداد داده‌های تجربی برابر با ۳ یا کمتر از آن است، لذا نتایج منحنی‌های برازش شده برای این دو گروه ارائه نشده است.

به‌منظور درک و توضیح بهتر میزان اثربخشی، استفاده از روکش پلی‌اوره و تغییر ضخامت آن بر بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه فلز-پلیمری، در شکل ۴، نمودارهای ستونی

مختلفی از تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ یا همان مد اول، تغییر شکل را نشان دادند. نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل ساختارهای فلز-پلیمری، در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این مجموعه آزمایشی، پروفیل تغییر شکل ورق آلومینیومی تقویت‌شده با روکش پلی‌اوره نیز، به صورت دومی شکل یا محدب بوده و این بیان‌گر آن است که بار دفعی تولیدشده، به صورت کاملاً یکنواخت بر سطح ساختار دولایه فلز-پلیمری وارد می‌شود. نتایج حاصل شده از شکل ۲ را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- در نمونه‌های پاره نشده، هیچ‌گونه جدایشی بین روکش پلیمری و ورق آلومینیومی رخ نمی‌دهد.
- ناحیه دومی شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای کاملاً گیردار حرکت می‌کند.
- سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ‌گونه تغییر شکل غیر الاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آن‌ها پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ‌گونه کشیدگی نشده‌اند.
- نازک شدگی در طول مرزهای گیردار مشابه با ورق‌های تک‌لایه و دولایه مشهود است و این نشان‌دهنده تأثیر و عمل نیروهای کششی غشایی است.
- لولاهای پلاستیک در امتداد خط‌های قطری کشیده شده روی نمونه از گوشه‌های ساختار تا مرکز آن گسترش می‌یابد.



شکل ۲- ساختارهای فلز-پلیمر بعد از اعمال بار دفعی

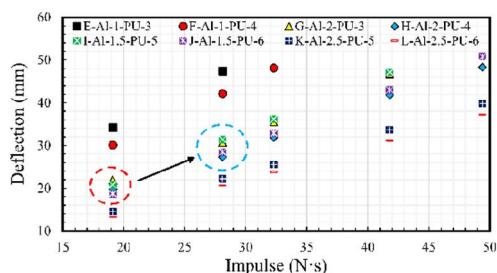
تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری برحسب ایمپالس نمایش داده شده است.

مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی I-AI-1.5-PU-5 و J-AI-1.5-PU-6 نشان می‌دهد که افزایش ۲ و ۰/۵ میلی-متری ضخامت روکش پلیمری و ورق آلومینیومی در مقایسه با لایه‌بندی‌های E-AI-1-PU-3 و F-AI-1-PU-4، به ترتیب منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری به میزان ۳۹/۲٪ و ۳۷/۹٪ در ایمپالس N·s ۱۹/۱، و ۳۳/۸٪ و ۳۲/۳٪ در ایمپالس N·s ۲۸/۱ می‌شود و آستانه تحمل ساختار فلز-پلیمر را به ترتیب تا ایمپالس N·s ۴۱/۸ و ۴۹/۴ بالا می‌برد. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای دو لایه‌بندی K-AI-2.5-PU-5 و L-AI-2.5-PU-6 نشان می‌دهد که افزایش ۲ و ۰/۵ میلی-متری ضخامت روکش پلیمری و ورق آلومینیومی در مقایسه با لایه‌بندی‌های H-AI-2-PU-4 و G-AI-2-PU-3، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری به میزان ۳۳/۸٪ و ۳۲/۸٪ در ایمپالس N·s ۱۹/۱، ۲۷/۷٪ و ۲۴/۵٪ در ایمپالس N·s ۲۸/۱، ۲۸/۲٪ و ۲۵/۳٪ در ایمپالس N·s ۴۱/۸ می‌شود و آستانه تحمل ساختار G-AI-2-PU-3 را تا ایمپالس N·s ۴۹/۴ بالا می‌برد.

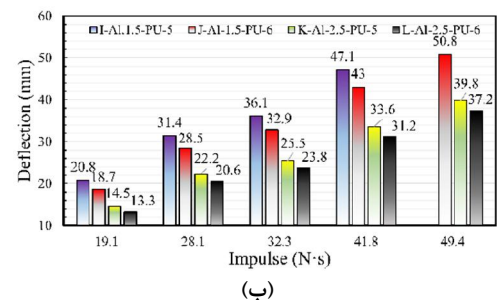
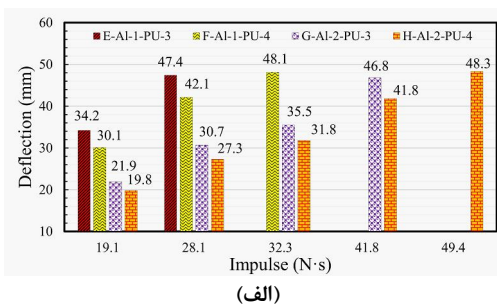
این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی I-AI-1.5-PU-5 و K-AI-2.5-PU-5 نشان می‌دهد که افزایش ۱ میلی‌متری ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با روکش پلیمری به ضخامت ۵ میلی‌متر به میزان ۳۰/۳٪، ۲۹/۴٪، ۲۹/۳٪ و ۲۸/۷٪ به ترتیب در ایمپالس‌های N·s ۱۹/۱، N·s ۲۸/۱ و N·s ۳۲/۳ می‌شود. مقایسه بیشتر نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی E-AI-1-PU-3 و F-AI-1-PU-4 بیان‌گر آن است که افزایش ضخامت روکش پلیمری، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با ورق آلومینیومی ۱ میلی‌متر [۲۱ و ۲۲] به میزان ۱۱/۹٪ و ۱۱/۱٪ به ترتیب در ایمپالس‌های N·s ۱۹/۱ و N·s ۲۸/۱ می‌شود. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای دو لایه‌بندی E-AI-1-PU-3 و G-AI-2-PU-3 نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با روکش پلیمری به ضخامت ۳ میلی‌متر به میزان ۳۵/۹٪ و ۳۵/۲٪ به ترتیب در ایمپالس‌های

جدول ۴- منحنی‌های درجه اول برازش شده

مشخصات آزمایش	منحنی برازش شده	R^2
G-AI-2-PU-3	$W_0 = 1.10I + 0.39$	۰/۹۹۷
H-AI-2-PU-4	$W_0 = 0.96I + 0.98$	۰/۹۹۸
I-AI-1.5-PU-5	$W_0 = 1.16I - 1.24$	۰/۹۹۹
J-AI-1.5-PU-6	$W_0 = 1.06I - 1.38$	۰/۹۹۹
K-AI-2.5-PU-5	$W_0 = 0.84I - 1.39$	۰/۹۹۹
L-AI-2.5-PU-6	$W_0 = 0.79I - 1.62$	۰/۹۹۹

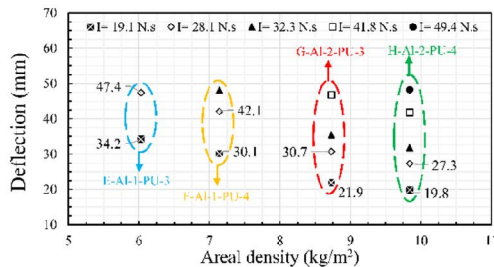


شکل ۳- تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای فلز-پلیمر برحسب ایمپالس

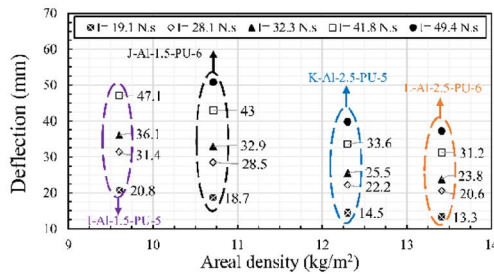


شکل ۴- نمودار ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای فلز-پلیمر برحسب ایمپالس

کاهش برای مراحل دوم و سوم، یعنی زمانی که چگالی سطحی به ترتیب از $10/7 \text{ kg/m}^2$ به $12/3 \text{ kg/m}^2$ و از $12/3 \text{ kg/m}^2$ به $13/4 \text{ kg/m}^2$ تغییر می‌کند، برابر است با $2/2 \text{ mm} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ و $5/9 \text{ mm} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ همچنین برای هنگامی که نمونه‌های آزمایشی تحت بارگذاری دفعی با مقادیر پیش فشار $P_{O_2} = 0.35 \text{ bar}$ و $P_{C_2H_2} = 0.25 \text{ bar}$ قرار دارند، این مقادیر به ترتیب برابر است با $2/9 \text{ mm} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ ، $4/7 \text{ mm} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ و $1/53 \text{ mm} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$.



(الف)



(ب)

شکل ۵- تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز-پلیمری برحسب چگالی سطحی

۴- ترکیب الگوریتم ژنتیک با ANFIS

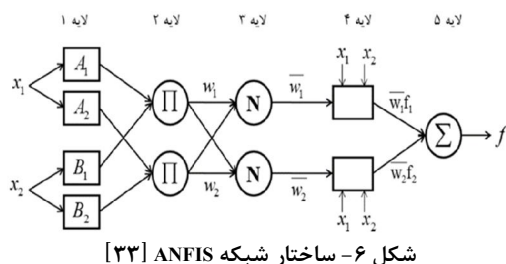
الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش بهینه‌سازی تصادفی است که از اصول حاکم بر ژنتیک طبیعی برای حل مسایل بهینه‌سازی استفاده می‌کند. کاربرد الگوریتم ژنتیک به منظور طراحی مدلی بهینه از سیستم عصبی-فازی تطبیقی برای فرآیند شکل‌دهی ساختارهای دولایه فلز-پلیمر با روش انفجار مخلوط گازها با ۵ ورودی، ابتدا با در نظر گرفتن ۲ تابع عضویت گوسی برای هر ورودی خواهد بود؛ در نتیجه، با تولید جمعیت اولیه بصورت تصادفی از پارامترهای تابع عضویت

$19/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ و $28/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ می‌شود؛ همچنین، مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای دو لایه‌بندی G-Al-2-PU-3 و H-Al-2-PU-4 نشان می‌دهد که افزایش ضخامت روکش پلیمری، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متر به میزان $9/6\%$ ، $11/1\%$ ، $10/4\%$ و $10/7\%$ به ترتیب در ایمپالس‌های $19/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ ، $28/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ و $32/3 \text{ N}\cdot\text{s}$ می‌شود. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی F-Al-1-PU-4 و H-Al-2-PU-4 نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری با روکش پلیمری به ضخامت ۴ میلی‌متر به میزان $34/2\%$ ، $35/2\%$ و $33/9\%$ به ترتیب در ایمپالس‌های $19/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ ، $28/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ و $32/3 \text{ N}\cdot\text{s}$ می‌شود. مقایسه بیشتر نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزودن روکش پلیمری با ضخامت‌های ۳ و ۴ میلی‌متر به ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متری به ترتیب موجب کاهش خیز دائمی ساختار به میزان $12/7\%$ و $21/1\%$ در ایمپالس $19/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ ، $22/3\%$ و $30/9\%$ در ایمپالس $28/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ و در نهایت $23/3\%$ و $31/3\%$ در ایمپالس $32/3 \text{ N}\cdot\text{s}$ شده است. لازم به توضیح است که برای ورق‌های آلومینیومی با ضخامت ۱ [۲۱ و ۲۲]، استفاده از روکش پلیمری ۳ و ۴ میلی‌متری، به ترتیب موجب $2/1$ و $2/4$ برابر کردن آستانه تحمل بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها شده است.

در شکل ۵، به‌منظور بررسی اثر چگالی سطحی بر مقاومت ساختارهای دولایه فلز-پلیمری، نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی برحسب چگالی سطحی نمایش داده شده است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش چگالی سطحی نمونه، باعث کاهش میزان تغییر شکل پلاستیک در هر شرایط بارگذاری می‌شود. به‌طور مثال در شکل ۵ ب، هنگامی که نمونه‌های آزمایشی تحت بارگذاری دفعی با مقادیر پیش فشار $P_{O_2} = 0.4 \text{ bar}$ و $P_{C_2H_2} = 0.3 \text{ bar}$ قرار دارند، با تغییر چگالی سطحی از $9/6 \text{ kg/m}^2$ به $10/7 \text{ kg/m}^2$ خیز دائمی ساختار از $47/1$ میلی‌متر به $43/0$ میلی‌متر کاهش می‌یابد. این بدان معناست که شیب کاهش خیز دائمی ساختار برحسب چگالی سطحی در مرحله اول، $3/7 \text{ mm} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ است. لازم به توضیح است که این شیب

عصبی تطبیقی را می‌توان به پنج لایه تقسیم کرد که به صورت کلی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- ساختار شبکه ANFIS [۳۳]

همانطور که در شکل ۶ مشخص شده، اگر x_1 و x_2 را به عنوان ورودی به سیستم در نظر گرفته شود، روند طراحی سیستم عصبی-فازی تطبیقی مطابق زیر و به ترتیب لایه‌های مختلف نشان داده توضیح داده می‌شود:

- لایه ۱. در واقع بخش فازی ANFIS است که بصورت توابع ریاضی در فرم تابع عضویت ظاهر می‌شود که انواع مختلف دارد. در این تحقیق برای تابع عضویت از فرم گوسین آن استفاده شده است که بصورت رابطه (۱) است.

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

- لایه ۲. همانطور که از شکل پیداست، از ضرب توابع عضویت بازای ورودی‌ها و توابع عضویت هر ورودی انجام می‌گیرد که به آن رول‌های مجموعه می‌گویند.

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

- لایه ۳. این لایه از تقسیم هر رول در مجموع کل رول‌ها بدست می‌آید.

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

n: تعداد ورودی به سیستم

- لایه ۴. خروجی در این لایه ترکیب خطی از ضرایب خروجی و لایه ۳ است که تعداد آن بازای هر رول برابر $(n + 1)$ است.

گوسی $\{c, \sigma\}$ در نظر گرفته شده در این تحقیق، تعداد ۲۰ دسته داده مجزای تصادفی به‌صورت رشته‌های دودویی برای هر جمعیت که به عنوان جمعیت‌های اولیه روند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده تعریف می‌شود. هر دسته داده تولید شده در این مجموعه با دسته داده‌های دیگر که شامل تعداد توابع عضویت یکسان به ازای هر ورودی هستند، توسط عملگرهای ژنتیکی مرتبط می‌شوند. در نتیجه پارامترهای توابع عضویت پس از انجام فرایند تکامل تدریجی به دست می‌آیند. در اکثر مسائل، بهینه‌سازی بیش از یک تابع هدف از اهمیت برخوردار است و معمولاً چند تابع هدف که در تضاد یا ناهم‌سویی با یکدیگر هستند، باید به‌طور همزمان بهینه شوند که منجر به مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه‌ای به عنوان نقاط پارتو بدست می‌آید که دارای برتری مطلقی نسبت به هم نیستند. معیار سنجش و انتخاب توابع عضویت بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک بر اساس مینیمم کردن چند هدفی توابع هدف هست که در اینجا عبارت‌اند از خطای آموزشی و پیش‌بینی که بر اساس مجذور میانگین مربعات خطاها محاسبه و به همراه آماره ضریب تبیین R^2 ارائه می‌گردند. همانطور که اشاره شد، شروع روند تکامل تدریجی با ایجاد مقادیری برای پارامترهای موردنظر سیستم، به‌عنوان جمعیت اولیه خواهد بود که بر طبق تعداد توابع عضویت که به‌صورت پیش‌فرض در این تحقیق برابر ۲ برای هر ورودی در نظر گرفته شده است که به‌طور کاملاً تصادفی تولید می‌شود. سپس، عملگرهای ژنتیکی نظیر، پیوند و جهش تمامی جمعیت‌های موجود و تولیدشده در یک‌روند تکاملی تدریجی بهبود می‌یابند.

۵- سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی

مدل ANFIS را می‌توان ترکیبی از شبکه عصبی و سیستم‌های فازی معرفی کرد. به عبارت دیگر، سیستم عصبی-فازی تطبیقی شامل، مجموعه‌ای از قواعد فازی از نوع سوگنو، نگاشتی از فضای ورودی به خروجی است. سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی از دو بخش تشکیل شده که عبارتند از: پارامترهای غیر خطی ورودی و پارامترهای خطی خروجی که با استفاده از روش TSK و قوانین اگر-آنگاه فازی به یکدیگر متصل شده‌اند. ساختار کلی سیستم استنتاج فازی -

۶- بحث و نتایج

فرآیند شکل‌دهی ساختارهای فلز-پلیمر با روش انفجار مخلوط گازها از ۳۳ دسته داده آزمایشگاهی ورودی- خروجی تشکیل شده است. این دسته داده‌های آزمایشگاهی مطابق شکل ۷، 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 استفاده شده است. در تحلیل ابعادی ساختارهای مستطیلی دولایه تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها نسبت به تحلیل ابعادی ورق‌های تک‌لایه کمیت‌های فیزیکی بیشتری وارد می‌شود. این کمیت‌ها شامل، خواص مکانیکی و حساسیت ماده به نرخ کرنش برای هر دولایه عقبی و جلویی است که باید در تحلیل رفتار پلاستیک ساختارهای دولایه در نظر گرفته شود. با توجه به نکات ذکر شده و مطابق با تحلیل ابعادی مسئله، رابطه بیشترین خیز دائمی هر کدام از لایه‌های جلویی و عقبی به ضخامت آن لایه برای ساختارهای مستطیلی دولایه تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها به‌صورت رابطه (۷) بیان می‌شود [۲۱-۲۳]:

$$\frac{W_0}{H_f} = f\left(\frac{L}{H_b}, \frac{B}{H_f}, \frac{\rho V_{0,b}^2}{\sigma_{0,b}}, \frac{\rho V_{0,f}^2}{\sigma_{0,f}}, \frac{1}{\xi_b}\right) \quad (7)$$

که در رابطه (۷) عدد بی‌بعد اول مربوط به هندسه ساختار می‌شود؛ اعداد بی‌بعد سوم و چهارم انرژی وارد بر سازه همراه با خواص مکانیکی ساختار فلز-پلیمر را شامل می‌شود و در نهایت اعداد بی‌بعد پنجم مربوط به نرخ کرنش ورق فلزی است. شایان توجه است که در این تحقیق از نرخ کرنش لایه پلیمر صرف نظر شده است.

فازی‌سازی سیستم عصبی- فازی در بخش ورودی توسط تابع عضویت گوسی انجام شده است. پارامترهای توابع عضویت گوسی بهینه شده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی بدست می‌آید که منجر به قوانین فازی بهینه بر اساس تعداد توابع عضویت خواهد شد. به این ترتیب که بازای ۵ داده ورودی و اختصاص دادن تعداد برابر با ۲ تابع عضویت برای هر ورودی، تعداد قوانین فازی نوع سوگنو برابر ۳۲ (۲^۵) برای هر جمعیت خواهد بود. معیار صحت‌سنجی جمعیت‌های تولید شده و ورودی به سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی و انتخاب

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

a, b, c: ضرایب خروجی

- لایه ۵. این لایه برابر مجموع خروجی‌هایی است که از لایه ۴ بدست آمده است.

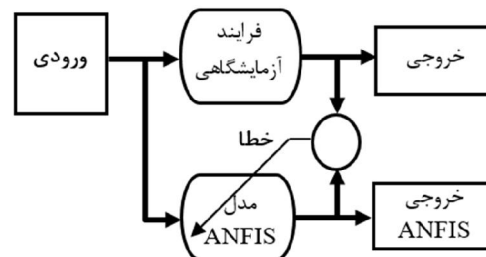
$$L_4 = \sum \overline{w}_i f_i \quad (5)$$

در انتها نگاشتی از مدل طراحی شده به خروجی آزمایشگاهی به‌صورت رابطه (۶) خواهد بود

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

که در آن D تفاضل و به عبارت دیگر، خطای بین خروجی مدل شده و خروجی داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همچنین در این رابطه، $P = [p_1, p_2, \dots, p_s]^T \in R^{M \times S}$ و $W = [w_1, w_2, \dots, w_s]^T \in R^{M \times S}$ هر عضو $(n+1)$ -امین عضو بردار W_i مطابق بخش آن‌گاه قواعد فازی مدل تاکاگی-سوگنو است. لازم به ذکر است، حل معادله ۶ به منظور بدست آوردن خروجی مدل شده داده‌های آزمایشگاهی فرآیند شکل‌دهی ساختار فلز-پلیمر با روش انفجار مخلوط گازها با استفاده از روش کمترین مربعات خطا در حل دستگاه‌های معادلات خطی استفاده شده است.

معیار سنجش و انتخاب توابع عضویت بهینه شده که توسط الگوریتم ژنتیک استفاده شده است، براساس مینیمم کردن تابع هدف در نظر گرفته شده انجام شد که در اینجا عبارت‌اند از: خطای آموزشی و خطای صحت‌سنجی در پیش‌بینی بخش دیگری از داده‌های آزمایشگاهی که براساس مجذور میانگین مربعات خطاها محاسبه شده است و نیز به همراه آماره ضریب تبیین R^2 ارائه می‌شوند. شکل ۷ نمای کلی از دیاگرام بلوکی روند مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی ورق با روش انفجار مخلوط گازها توسط روش سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی را نشان می‌دهد.



شکل ۷- دیاگرام بلوکی روند مدل‌سازی

c به دلیل داشتن توازن بیشتر نسبت به هر دو تابع هدف در مقایسه با نقاط دیگر به عنوان نقطه بهینه طراحی انتخاب می‌شود. مشخصات نقاط اشاره شده در بالا برحسب مقادیر هر دو تابع هدف خطاهای آموزشی و پیش‌بینی در جدول ۴ نشان داده شده است؛ همچنین، در جدول ۴ مقایسه مقادیر میانگین مربعات خطای مدل‌سازی و خطای پیش‌بینی برای مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی ساختارهای فلز-پلیمر با روش انفجار مخلوط گازها حاصل از این تحقیق با نتایج بدست آمده از جعبه ابزار متلب ارائه شده است که از روش کمترین مربعات و روش گرادپان استفاده می‌کند.

جدول ۴- مقادیر جواب‌های بهینه طراحی فرآیند شکل‌دهی

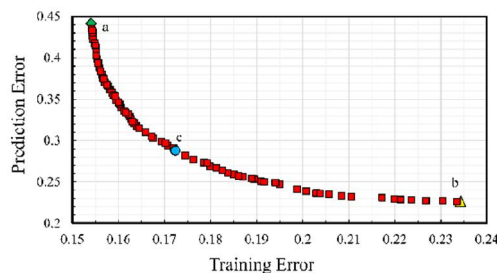
خطای آموزشی	خطای پیش‌بینی	
۰/۱۵۴	۰/۴۴۱	نقطه a
۰/۱۷۴۴	۰/۲۸۲	نقطه c
۰/۲۲۶۳۳	۰/۲۳۴	نقطه b
۰/۲۸۳۲	۱/۶۶۸۲	ANFIS در متلب

مقایسه بین خروجی‌های حاصل از مدل بدست آمده از ترکیب سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی و الگوریتم ژنتیک برای نقطه طراحی در نظر گرفته شده c و خروجی‌های تجربی در ۳۳ داده ورودی-خروجی فرآیند شکل‌دهی ساختارهای فلز-پلیمر با روش انفجار مخلوط گازها در شکل ۹ نشان داده شده است.

انطباق خروجی‌های مدل شده حاصل از روش ارائه شده در این تحقیق و خروجی‌های داده‌های تجربی برحسب معیار ضریب تبیین R^2 برابر ۰/۹۹۹۸ برای داده‌های آموزشی و ۰/۹۹۹۵ برای داده‌های پیش‌بینی بدست آمده است. نتایج روش مدل‌سازی انجام شده و مقایسه خطای مدل‌سازی و خطای پیش‌بینی، دقت بالا و توانایی ترکیب دوگانه الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه پارامترهای ورودی و روش کمترین مربعات برای محاسبه ماتریس معکوس بخش خروجی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در طراحی و مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی ساختارهای فلز-پلیمر با روش

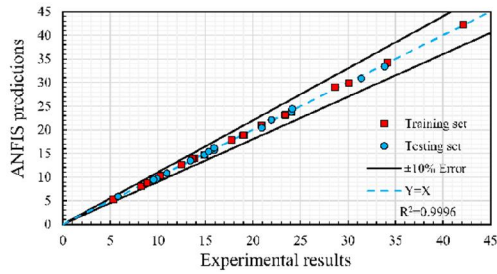
توابع عضویت برای رسیدن به بهینه‌ترین جواب توسط الگوریتم ژنتیک براساس مینیمم کردن چند هدفی توابع هدف در نظر گرفته شده که عبارتند از خطاهای آموزشی و پیش‌بینی است که با تقسیم داده‌های ورودی بین آنها بدست می‌آیند. در این تحقیق، تعداد ۱۹ دسته داده برای آموزش شبکه و ۱۴ دسته داده دیگر برای پیش‌بینی شبکه اختصاص داده شده است. سنجش خطاها براساس مجذور میانگین مربعات خطاها محاسبه می‌شوند و در نهایت آماره ضریب تبیین R^2 برای هر یک از داده‌های آموزشی و پیش‌بینی ارائه می‌شوند.

تنظیمات اولیه برای بهینه‌سازی چند هدفی توسط الگوریتم ژنتیک به این صورت خواهد بود که بعد از تعداد ۱۲۰ جمعیت اولیه تولید شده بصورت تصادفی، احتمال پیوند و جهش در ادامه روند بهینه‌سازی به ترتیب ۰/۷، ۰/۱ و ۰/۱ و تعداد تکرار ۲۰۰ انتخاب شده است. شکل ۸ منحنی پارتو حاصل از بهینه‌سازی چند هدفی برای مدل‌سازی خروجی فرآیند شکل‌دهی ساختارهای فلز-پلیمر با روش انفجار مخلوط گازها را نشان می‌دهد.



شکل ۸- منحنی پارتو مربوط به تغییر شکل ساختارهای دولایه فلز-پلیمر تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها

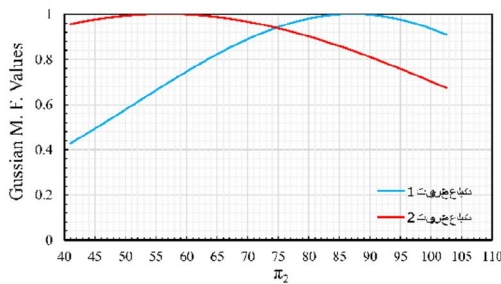
همانطور که اشاره شد، نقاط پارتو نشان داده شده در شکل از دید دو تابع هدف نسبت به هم غیر برتر هستند؛ یعنی برتری نقطه بهینه از دید یک تابع هدف در مقایسه با نقطه پارتو دیگر منجر به جوابی با خطای بیشتر نسبت به تابع هدف دیگر خواهد شد. در شکل ۵، نقاط a به عنوان کمترین خطای آموزش و b به عنوان کمترین خطای پیش-بینی حائز اهمیت هستند. از آنجایی که در این قسمت در نظر گرفتن شرایط هر دو تابع هدف دارای اهمیت است، نقطه



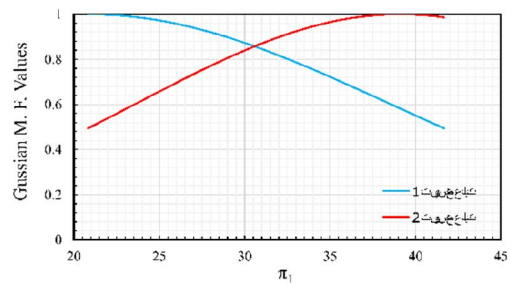
شکل ۹- مقایسه عملکرد خروجی مدل بهینه شده در پیش-بینی و آموزش سیستم

بینی و آموزش سیستم

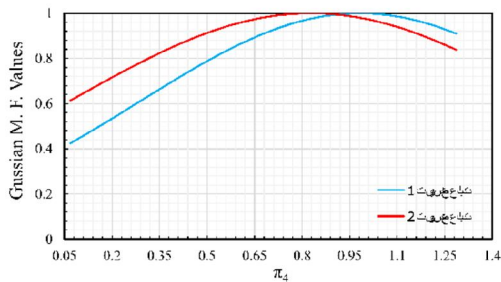
انفجار مخلوط گازها را نشان می‌دهد؛ همچنین، با عملکرد بهتر در بهبود کمینه کردن خطای پیش‌بینی مدل ارائه شده در این تحقیق نسبت به جعبه ابزار متلب، می‌توان از آن به‌عنوان یک مدل کاملاً مناسب برای پیش‌بینی رفتار فرآیند شکل‌دهی ساختارهای فلز-پلیمر با روش انفجار مخلوط گازها استفاده کرد. شکل توابع عضویت گوسی مربوط به نقطه طراحی c در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



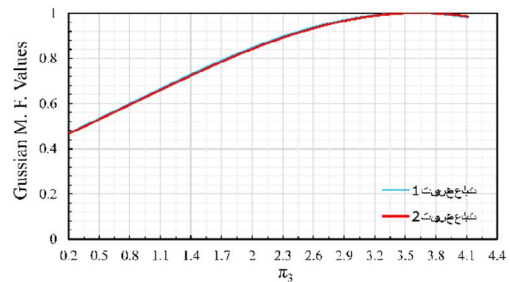
(ب)



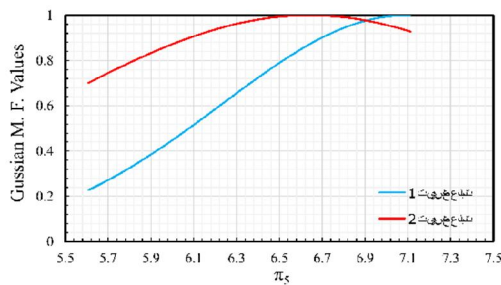
(الف)



(ت)



(پ)



(ث)

شکل ۱۰- شکل کلی توابع عضویت گوسی نقطه طراحی c

تعداد تابع عضویت ۲ برای هر یک از داده‌های در بخش ورودی به سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی به منظور

پارامترهای بهینه توابع عضویت گوسی بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک به ترتیب c, σ و با در نظر گرفتن

مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی ساختارهای فلز-پلیمر در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که ذکر شد، برای تعداد توابع عضویت که برای هر ورودی برابر مقدار ثابت ۲ در نظر گرفته شده است، با بهینه شدن ضرایب توابع عضویت گوسی، توابع هدف به‌صورت تدریجی به سمت کمترین خطای پیش‌بینی و آموزشی متمایل می‌شود.

جدول ۵- پارامترهای توابع عضویت نقطه C

ضرایب بهینه	تابع عضویت اول	تابع عضویت دوم
ورودی ۱	۲۰/۸۵۳۶، ۱۷/۵۴۲۲	۳۹/۱۲۱، ۱۵/۴۱۳۲
ورودی ۲	۸۷/۱۰۹۹، ۴۳/۴۳۴۶	۵۶/۴۵۰، ۱۵۱/۷۸۹۸
ورودی ۳	۳/۵۸۸۶، ۲/۷۵۴۸	۳/۶۳۴۳، ۲/۷۷۹۲
ورودی ۴	۰/۹۸۲، ۰/۶۹۷۸	۰/۸۲۸۷، ۰/۷۶۸۸
ورودی ۵	۷/۰۹۲۴، ۰/۸۶۲۶	۶/۶۳۹۵، ۱/۲۲۴۶

۲ و ۰/۵ میلی‌متری ضخامت روکش پلیمری و ورق K-AI-2.5-PU-6 و L-AI-2.5-PU-6 نشان می‌دهد که افزایش آلومینیومی در مقایسه با لایه‌بندی‌های G-AI-2-PU-3 و H-AI-2-PU-4، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز-پلیمری به میزان ۳۳/۸٪ و ۳۲/۸٪ در ایمپالس N·s ۱۹/۱، ۲۷/۷٪ و ۲۴/۵٪ در ایمپالس N·s ۲۸/۱، ۲۸/۲٪ و ۲۵/۲٪ در ایمپالس N·s ۳۲/۳، ۲۸/۲٪ و ۲۵/۴٪ در ایمپالس N·s ۴۱/۸ می‌شود و آستانه تحمل ساختار G-AI-2-PU-3 را تا ایمپالس N·s ۴۹/۴ بالا می‌برد.

در بخش مدل‌سازی، از ترکیب دوگانه الگوریتم ژنتیک و روش کمترین مربعات خطا استفاده شد که الگوریتم ژنتیک برای انتخاب بهینه پارامترهای توابع عضویت گوسی در بخش ورودی همراه با طراحی چند هدفی با معیار کمترین خطاهای آموزشی و پیش‌بینی و روش کمترین مربعات خطا برای تعیین ضرایب خطی بهینه در بخش نتایج ساختار سیستم فازی بکار برده شد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی با استفاده از سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در ترکیب همزمان با الگوریتم ژنتیک و روش کمترین مربعات خطا، نشان‌دهنده برتری این روش نسبت به سیستم فازی موجود در جعبه ابزار متلب است که ترکیب دوگانه با روش کمترین مربعات و روش گرادیان است.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تغییر شکل ساختارهای دولایه فلز-پلیمر تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها به‌صورت تجربی و عددی، مورد بررسی قرار گرفت. در بخش تجربی ۴۰ آزمایش با سامانه انفجار گاز انجام و از ماده پلی‌اوره به عنوان لایه تقویت‌کننده ورق فازی آلومینیوم استفاده شد. در این بخش تأثیر پارامترهایی مانند، لایه‌بندی‌های مختلف در ساختارهای دولایه فلز-پلیمر، ضخامت لایه‌های فلزی و پلیمری، میزان انرژی وارده و همچنین چگالی سطحی بر تغییر شکل پلاستیک ساختار مورد مطالعه قرار گرفت. مقایسه نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزودن روکش پلیمری با ضخامت‌های ۳ و ۴ میلی‌متر به ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متری به ترتیب موجب کاهش خیز دائمی ساختار به میزان ۱۲/۷٪ و ۲۱/۱٪ در ایمپالس N·s ۱۹/۱، ۲۲/۲٪ و ۳۰/۹٪ در ایمپالس N·s ۲۸/۱ و در نهایت ۲۳/۳٪ و ۳۱/۳٪ در ایمپالس N·s ۳۲/۳ شده است [۳۱]. برای دو لایه‌بندی I-AI-1.5-PU-5 و J-AI-1.5-PU-6 نتایج نشان می‌دهد که افزایش ۲ و ۰/۵ میلی‌متری ضخامت روکش پلیمری و ورق آلومینیومی در مقایسه با لایه‌بندی‌های E-AI-1-PU-3 و

۸- مراجع

- [1] Jones N (2010) Inelastic response of structures due to large impact and blast loadings. *J Strain Anal Eng Des* 45(6): 451-464.
- [2] Jones N (2014) Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact, dynamic pressure and explosive loadings. *Int J Impact Eng* 74: 3-15.
- [3] 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.

- by using gases mixture detonation. Proc Inst Mech Eng-Part C J Mech Eng Sci 0954406215614336.
- [16] Babaei H, Mostofi TM, 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.
- [17] 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.
- [18] Patil SP, Popli M, Jenkook V, Markert B (2016) Numerical modelling of the gas detonation process of sheet metal forming. J Phys Conf Ser 2016;734(3): 032099.
- [19] V. Jenkook, S. Patil, B. Markert (2016) Joining of tubes by gas detonation forming. J Phys Conf Ser 734(3): 032101.
- [20] Patil SP, Prajapati KG, Jenkook V, Olivier H, Markert B (2017) Experimental and numerical studies of sheet metal forming with damage using gas detonation process. Metals 7(12): 556-572.
- [21] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M. The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling. Thin Walled Struct 2017;118:1-11.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Amini MR, Isaacs JB, Nemat-Nasser S (2010) Experimental investigation of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads. Int J Impact Eng 37(1): 82-89.
- [25] Amini MR, Amirkhizi A, Nemat-Nasser S (2010) Numerical modeling of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads. Int J Impact Eng 37(1): 90-102.
- [26] Amini MR, Isaacs JB, Nemat-Nasser S (2010) Investigation of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments. Mech Mater 42(6): 628-639.
- [27] Amini MR, Simon J, Nemat-Nasser S (2010) Numerical modeling of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments. Mech Mater 42(6): 615-627.
- [4] 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 fully clamped thin quadrangular plates due to uniform and localized impulsive loading. Thin-Walled Struct 123: 48-56.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M (2018) Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl 1464420718760640.
- [9] Yaşar M (2004) Gas detonation forming process and modeling for efficient spring-back prediction. J Mater Process Tech 150(3): 270- 279.
- [10] Yaşar M, Demirci HI, Kadi I (2006) Detonation forming of aluminium cylindrical cups experimental and theoretical modelling. Mater Des 27(5): 397-404
- [11] Kleiner M, Hermes M, Weber M, Olivier H, Gershteyn G, Bach FW, Brosius A (2007) Tube expansion by gas detonation. Product Eng 1(1): 9-17.
- [12] Meybodi MK, Bisadi H (2009) Gas Detonation Forming by a Mixture of H₂+ O₂ Detonation. World Acad Sci Eng Tech 33: 55-58.
- [13] Meybodi MK, Aghazadeh BS, Bisadi H (2013) Efficient oxyhydrogen mixture determination in gas Detonation forming. Int J Mech Mechatron Eng 7: 1748-1754.
- [14] 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.
- [15] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2015) Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates

- [35] Jang JS (1993) ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Sys Man Cybern* 23(3): 665-685.
- [36] Takagi T, Sugeno M (1993) Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems*: 387-403.
- [37] Mitra S, Hayashi Y (2000) Neuro-fuzzy rule generation: survey in soft computing framework. *IEEE T Neural Networ* 11(3): 748-768.
- [38] Lin CJ, Xu YJ (2006) A hybrid evolutionary learning algorithm for TSK-type fuzzy model design. *Math Comput Model* 43(5-6): 563-581.
- [39] Wongsathan R, Seedadan I (2017) Artificial intelligence and ANFIS reduced rule for equivalent parameter estimation of PV module on various weather conditions utilize for MPPT. *Int J Renew Energ* 12(1): 38-55.
- [40] 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. *Energ* 18: 231-245.
- [41] Karaboga D, Kaya E (2018) Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey. *Artif Intell Rev*, 1-31.
- [42] Xue Z, Hutchinson JW (2007) Neck retardation and enhanced energy absorption in metal- elastomer bilayers. *Mech Mater* 39(5): 473-487.
- [28] Ackland K, Anderson C, Ngo TD (2013) Deformation of polyurea-coated steel plates under localised blast loading. *Int J Impact Eng* 51: 13-22.
- [29] Tran P, Ngo TD, Ghazlan A (2016) Numerical modelling of hybrid elastomeric composite panels subjected to blast loadings. *Compos Struct* 153: 108-122.
- [30] Remennikov A, Ngo T, Mohotti D, Uy B, Netherton M (2017) Experimental investigation and simplified modeling of response of steel plates subjected to close-in blast loading from spherical liquid explosive charges. *Int J Impact Eng* 101: 78-89.
- [31] Mostofi TM, Babaei H. (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part I: Experimental studies. *J Solid Fluid Mech* 9(1): 71-83.
- [32] Mostofi TM, Babaei H. (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part II: Analytical and empirical modelling. *J Solid Fluid Mech* 9(2): 15-29.
- [33] Sanchez E, Shibata T, Zadeh, LA (1997). *Genetic algorithms and fuzzy logic systems: Soft computing perspectives*. World Scientific.
- [34] Hopfield JJ (1982) Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *P Natl Acad Sci Usa* 79(8): 2554-2558.