



ارائه مدل شبکه‌ی عصبی GMDH برای پیش‌بینی رفتار ورق‌های مثلثی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی

مجتبی حقگو^۱، توحید میرزابابای مستوفی^۲، مهساسادات میرعلینقی^۳ و هاشم بابایی^{۴*}

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

^۳ استادیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ورامین-پیشوا، ورامین، ایران

^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹

چکیده

هدف اصلی این مطالعه بررسی نسبت تغییر شکل مرکز جرم ورق مثلثی به ضخامت آن با استفاده از روش پردازش گروهی شبکه عصبی و مقایسه‌ی آن با نتایج تست‌های آزمایشگاهی انجام شده بر ورق نازک مثلثی با استفاده از سامانه چکش پرتابه‌ای است؛ هم‌چنین بررسی تغییر شکل نهایی و کرنش ایجاد شده در ورق و انرژی منتقل شده توسط ضربه ناشی از سقوط وزنه در دستور کار این مطالعه قرار دارد. برای بررسی تغییر شکل مرکز جرم ورق مثلثی از متغیرهای ورودی بدون بعد استفاده می‌شود. با ادغام روش‌های شبکه عصبی و اعداد بدون بعد، عبارت چندجمله‌ای مناسبی برای به دست آوردن تغییر شکل مرکز جرم ورق‌های مثلثی به دست می‌آید. روش جداسازی تک‌متغیره برای به دست آوردن بردار ضرایب زیرجملات شبکه عصبی پردازش گروهی استفاده می‌شود. روش جداسازی تک‌متغیره، عملکرد شبکه عصبی پردازش گروهی را برای مدل کردن فرایند پیچیده تغییر شکل ورق‌های مثلثی بهبود می‌دهد. بررسی نتایج به دست آمده از روش شبکه‌ی عصبی و مقایسه‌ی آن با داده‌های آزمایشگاهی تطابق قابل قبول مدل را نشان می‌دهد. از مهم‌ترین برجستگی‌های این روش، می‌توان به سادگی محاسبات و کارایی مناسب در مطالعات پارامتری بارگذاری ضربه‌ای اشاره کرد.

کلمات کلیدی: ورق مثلثی؛ هیدروفورمینگ؛ شبکه‌ی عصبی GMDH؛ بارگذاری ضربه‌ای؛ روش تجزیه مقادیر تکین.

Presenting GMDH-Type Neural Network Model to Predict the Response of Triangular Plates under Hydrodynamic Loading

M. Haghgoo¹, T. Mirzababaie Mostofi², M. Alinaghi³, H. Babaei^{4*}

¹ Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

² Asst. Prof., Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

³ Asst. Prof., Department of Chemistry, Faculty of Science, Islamic Azad University, Varamin-Pishva Branch, Varamin, Iran.

⁴ Assoc. Prof., Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

The aim of this study is investigating the center of mass deflection to thickness ratio of triangular plates using the GMDH-type neural networks and comparing it with results of laboratory tests performed on a narrow triangular plate using water-hammer apparatus. Also, the study focuses on the overall deformation, strain and impact transmission. Dimensionless input variables are used to investigate the center of mass deflection of triangular plate with changing variables. A simpler polynomial expression is derived using GMDH-type neural network and dimensionless number. The vector of coefficients of quadratic sub-expressions involved in GMDH-type networks is obtained by Singular Value Decomposition (SVD) method. SVD can improve the proficiency of GMDH-type networks to model the intricate process of deformation of triangular plates. Obtaining results by applying a GMDH model and comparing them with actual data indicates good agreement between model output and experimental data. The advantages of this approach are in the simplification of computation and convenient application to parametric study for impact behavior.

Keywords: Triangular Plate; Hydroforming; GMDH Neural Networks; Impact Loading; SVD.

۱- مقدمه

بررسی پاسخ دینامیکی ورق‌های فلزی بر اثر ضربه با توجه به کارائی بسیار زیادشان در سازه‌های مهندسی، مورد توجه محققان قرار گرفته است. براساس مشاهدات محققان، ممنوم منتقل شده به ورق با کاهش یافتن جرم ورق کاهش می‌یابد. مطالعات مقیاس پایین آزمایشگاهی، بستر مناسبی را برای مطالعه تاثیر سیال بر تغییر شکل سازه‌های تیر و ورق فراهم می‌آورد [۱ و ۲].

شکل‌دهی ورق با نیروی منتقل شده توسط آب، مزایای زیادی مثل کاهش یافتن برگشت فنری و بهبود شکل‌پذیری دارد [۳]. در این فرایند، بی‌ثباتی پلاستیک که به صورت گلوبی شدن رخ می‌دهد، بر مقدار تغییر شکل ورق تاثیر می‌گذارد [۴]. تحقیقات زیادی در زمینه تغییر شکل ورق با استفاده از نیروی منتقل شده توسط آب انجام شده است. گلین و همکاران [۵]، پارامترهای اصلی موثر بر فرایند کشش عمیق با آب را بررسی کردند. در مطالعات آنها، فشار وارد بر حفره و ورق‌گیرها بر اثر تغییر پارامترهای هندسی، مادی و سیال بررسی شد. زامپالونی و همکاران [۶]، فرایند هیدروفورمینگ برای شکل دادن ورق‌های آلومینیومی را بررسی کردند. استفاده از سیال در کار آنها برای نگهداری ورق در طول فرایند شکل‌دهی و به تاخیر انداختن خرابی قطعه بود. کوسینگ و همکاران [۷]، با استفاده از موج منتشر شده در لوله، شکل‌دهی ورق‌های دایره‌ای را مطالعه کردند. آنها اثر بارگذاری ضربه‌ای ناشی از موج را بر ورق مسی بررسی کردند و یک مدل تحلیلی برای بررسی تغییر شکل نقطه‌ی میانی ورق ارائه کردند. بابایی و همکاران [۸ و ۹]، رفتار ورق‌های دایره‌ای و مستطیلی بر اثر ضربه ناشی از آب را بررسی کردند. در مطالعه‌های انجام شده توسطشان، رفتار ورق‌های فلزی و غیرفلزی بر اثر ضربه آب ناشی از رهاسازی چکش از ارتفاع‌های مختلف بررسی شد. براساس مشاهدات آنها، با افزایش ارتفاع چکش تاثیرپذیری ورق‌های فولادی از نرخ کرنش افزایش یافت. در فرایند شکل‌دهی با نیروی منتقل شده توسط آب، مقدار تغییر شکل ورق، اهمیت زیادی دارد.

هر سیستم از روابط دقیق ریاضی تبعیت می‌کند که بین ورودی‌ها و خروجی‌هایش وجود دارد. روش‌های محاسبه نرم برای ارائه محاسبات نسبتاً دقیق از سیستم‌های پیچیده مورد

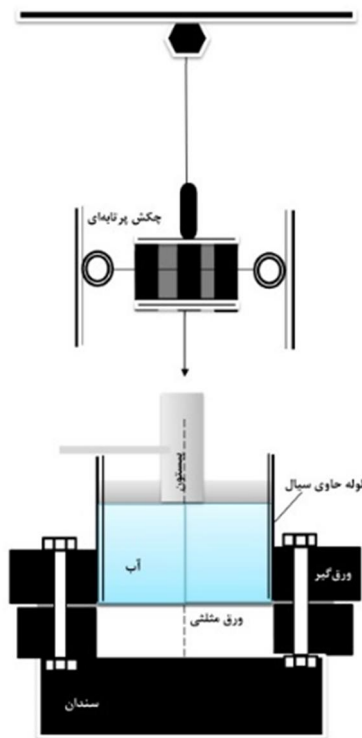
استفاده قرار می‌گیرند. مهم‌ترین انواع محاسبات نرم، منطق فازی، شبکه‌ی عصبی و الگوریتم ژنتیک هستند. از این روش‌های محاسبات نرم برای حل کردن سیستم‌های غیرخطی پیچیده استفاده می‌شود [۱۰ و ۱۱]. روش‌های متعددی برای استفاده از انواع مختلف محاسبات نرم پیشنهاد شده‌اند که از میان آنها روش GMDH، یک روش خودسازمان‌ده است که به وسیله‌ی آن، مدل‌های پیچیده قابل محاسبه هستند. از مهم‌ترین موارد استفاده از این الگوریتم، شناسایی الگو و محاسبه و پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده مرتبط با سیال واسط است.

این روش براساس یک دسته داده‌های چند ورودی و یک خروجی عمل می‌کند. روش GMDH برای اولین بار توسط ایوانکو [۱۲]، برای غلبه بر مشکلات حاکم بر حل مسائل مربوط به سیستم‌های پیچیده ارائه شد. ایده اصلی روش GMDH، ساختن یک تابع تحلیلی در یک شبکه پیش‌خور براساس تابع انتقال گره‌ای چهارتایی است. ضرایب این شبکه پیش‌خور توسط تکنیک رگرسیون به دست می‌آید. روش GMDH در مقایسه با روش شبکه عصبی، دارای طبیعت محدودتری است. در روش شبکه‌ی عصبی، واحد منطقی آستانه‌مانندی به صورت یک تابع انتقال خطی یا غیرخطی در مسیر خروجی قرار می‌گیرد. هر واحد وابسته به شرایط واحدهای دیگر فعل و انفعالات جدیدی را در ساختار شبکه‌ای به وجود می‌آورد. بازنشر خطا در مسیر خروجی برای به حداقل رساندن انحراف از مقادیر واقعی استفاده می‌شود. الگوریتم GMDH پس از بررسی تابع هدف اولیه، یک ترکیبی از جفت ورودی‌های مختلف را انتخاب می‌کند.

در سال‌های اخیر استفاده از چنین شبکه‌های خودسازمان‌ده‌ای باعث کاربرد موفق الگوریتم‌های GMDH در بسیاری از کاربردهای مهندسی و اقتصادی شده است. در این مطالعه، شبکه عصبی GMDH تغییر شکل ورق‌های مثلثی را مدل و پیش‌بینی می‌کند. عملکرد شبکه عصبی توسط روش SVD بهبود یافته است. روش SVD برای حل مسائل حداقل مربعات با معادلات تکین مناسب است. در ادامه، روش‌های SVD و GMDH، معادله‌ای را براساس داده‌های آزمایشگاهی برای محاسبه نسبت تغییر شکل ورق مثلثی به ضخامت آن پیش‌بینی می‌کنند. متغیرهای ورودی به صورت پارامترهای

یکنواخت فشار توسط آب بر سطح ورق موجب شکل‌گیری یکنواخت ورق می‌شود.

مزیت‌های این روش، ارزان بودن، ایمن بودن و کنترل مناسب بر فرایند شکل‌دهی است. از جمله‌ی مزیت‌های دیگر این روش، یک مرحله‌ای بودن فرایند شکل‌دهی است که زمینه‌ی کیفیت بالای شکل‌دهی و توزیع یکنواخت ضخامت را فراهم می‌آورد. به علاوه در این روش نیازی به ساختن قالب نیست و به علت پخش‌شدگی مناسب کرنش، عمق کشش محصول به مراتب بالاتر است. از دیگر ویژگی‌های مهم این سازوکار، می‌توان به توانایی ایجاد موج فشاری با شدت‌های مختلف برای بررسی پاسخ ورق بر اثر اعمال ضربه توسط آب اشاره کرد.



شکل ۱- شماتیک سامانه‌ی چکش پرتابه‌ای

۳- مطالعات تجربی

۳-۱- فرآیند انجام آزمایش

ورق‌های مورد آزمایش از جنس فولاد نرم St-13 و به ضخامت‌های ۱ و ۲ میلی‌متر هستند. ورق‌ها برای نصب در گیره باید سوراخ‌کاری شوند. از دو صفحه فولادی به ابعاد

بدون بعد برای به دست آوردن نسبت تغییر شکل ورق‌های مثلی به ضخامت‌شان به کار گرفته می‌شوند.

ورق‌های فلزی علاوه بر جهت عرضی، قابلیت انتقال موج‌های ضربه‌ای و ایمپالس را در جهت‌های شعاعی و محیطی دارند. مطالعه‌های قبلی پاسخ دینامیکی ورق‌های فلزی بر اثر ضربه مستقیم ناشی از جسم خارجی یا ایمپالس ناشی از انفجار را مورد مطالعه قرار دادند. استفاده از سیال واسط برای انتقال دادن موج ضربه‌ای برای تغییر شکل ورق، کمتر مورد توجه محققان بوده است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی نسبت تغییر شکل مرکز جرم ورق مثلی به ضخامت آن با استفاده از روش پردازش گروهی شبکه عصبی و مقایسه‌ی آن با نتایج تست‌های آزمایشگاهی انجام شده بر ورق مثلی با استفاده از سامانه چکش پرتابه‌ای است. بیشترین تغییر شکل عرضی ورق به صورت تابعی از ضخامت ورق و انرژی ضربه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- سازوکار فرآیند هیدروفرمینگ

شکل ۱ نشان‌دهنده سامانه‌ی چکش پرتابه‌ای است. این سامانه برای انجام آزمایش و بررسی تاثیر آب در انتقال نیرو به ورق استفاده شده است. سامانه‌ی چکش پرتابه‌ای شامل، یک جعبه برای نگهداری وزنه‌ها، بالابر برقی و دستگیره مغناطیسی برای رهاسازی وزنه‌ها است؛ همچنین از چهار ریل برای مهار کردن جعبه وزنه‌ها استفاده می‌شود. ریل‌ها با کمترین اصطکاک سامان‌دهی شده‌اند تا سقوط وزنه، شبیه‌سازی مناسبی از فرایند سقوط آزاد باشد.

انتقال انرژی با نرخ پایین، مبنای شکل‌دهی هیدرودینامیکی است. سامانه چکش پرتابه‌ای سازوکار مناسبی برای انتقال انرژی پتانسیل وزنه به ورق است. وزنه از یک ارتفاع معین رها شده و پس از طی کردن مسافتی و رسیدن به سرعت مناسب به صورت ضربه‌ای به پیستون برخورد می‌کند. سیال واسط وسیله‌ی انتقال انرژی جنبشی پیستون به ورق است. تغییر شکل ورق از طریق تبدیل انرژی جنبشی وزنه به فشار هیدرواستاتیکی سیال انجام می‌شود. این تغییر شکل در بازه‌ی میلی‌ثانیه انجام می‌شود. استفاده کردن از سیال واسط (آب) بین وزنه و ورق موجب انتقال فشار پیستون به صورت یکنواخت به آب می‌شود. توزیع

ورق به صورت دلخواه انتخاب شده و توسط دستگاه وایرکات در سه راستای مختلف برش‌هایی از ورق جدا می‌شوند. این شش نمونه مختلف در دستگاه تست کشش و در دمای اتاق کشیده می‌شوند و به این وسیله تنش تسلیم استاتیکی و تنش نهایی استاتیکی فولاد تعیین می‌شوند.

۳-۳- آزمایش‌های تجربی

در این بخش، پاسخ دینامیکی ورق با ضخامت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. ۱۵ سری تست بر ورق‌های مثلثی انجام شد. ۷ تست بر ورق ۱ میلی‌متری و ۸ تست بر ورق ۲ میلی‌متری انجام شد. ورق‌های فولادی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی تغییر شکل داده‌اند. نتایج تجربی مربوط به حداکثر خیز مرکز جرم ورق بر اثر تغییرات ضخامت ورق و انرژی انتقالی در جدول ۲ آورده شده است.

شکل ۲ نشان‌دهنده تغییر شکل ورق‌های مثلثی با ضخامت‌های ۱ و ۲ میلی‌متر است. ارتفاع رهاسازی چکش برای ورق ۱ میلی‌متر ۱ متر و برای ورق ۲ میلی‌متر ۲ متر است. مطابق شکل ۲، ورق با ضخامت بیشتر، تغییر شکل کمتری را داشته است. به صورتی که راس‌های مثلث تغییر شکل کاملی را نداشته‌اند. برخلاف ورق مثلثی با ضخامت ۲ میلی‌متر، ورق سبک‌تر به خوبی تغییر شکل پیدا کرده است. این در حالی است که انرژی منتقل شده به ورق ضخیم‌تر بیشتر بوده است. این شکل نشان‌دهنده نقش ضخامت در جابجایی نقاط مختلف ورق مثلثی است.

جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد به کار رفته در ورق‌های

مثلثی		
مدول الاستیسیته (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	چگالی (kg/m^3)
۲۱۰	۳۰۵	۷۸۶۱

۴- اصول کلی مدل‌سازی عددی

در مدل‌سازی عددی، اجزاء سیستم مجهول بوده و تنها ورودی و خروجی آن در دسترس است. در مدل‌سازی عددی، شناسایی سیستم مبتنی بر اطلاعات ورودی و خروجی مورد نظر است. حاصل این شناسایی، یک تابع تقریبی ریاضی است. این تابع چندجمله‌ای، رابطه‌ای میان ورودی‌ها و

۳۰۰ در ۴۰۰ میلی‌متر و با ضخامت ۲۰ میلی‌متر برای مهار ورق‌ها در ورق‌گیر استفاده می‌شود. برای اتصال ورق‌ها به ورق‌گیر از پیچ و مهره استفاده می‌شود. از سوراخی به شکل مثلث و با ابعاد قاعده ۲۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۰ میلی‌متر در وسط ورق‌گیر استفاده می‌شود. ورق‌گیر جلویی به حوضچه جوش می‌شود و ورق‌گیر پشتی روی سندان قرار می‌گیرد. حوضچه جوش شده به ورق‌گیر جلویی به سیلندری به صورت یکپارچه جوش داده می‌شود. حوضچه دارای ارتفاع ۵۰ میلی‌متر و سطح مقطعی مشابه سطح مقطع ورق‌گیر است. سیلندر فلزی دارای ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۱۰۰ و قطر خارجی ۱۱۰ میلی‌متر است. پس از اینکه ورق‌گیر توسط پیچ و مهره به ورق متصل شد، آب تا ارتفاع محل قرارگیری سوراخ تخلیه هوا ریخته می‌شود و با قرارگیری پیستون، سامانه آماده برخورد چکش می‌شود.

پیستون دارای میله‌ای به قطر ۵۰ میلی‌متر است. وزنه با استفاده از موتور الکتریکی تا ارتفاع مناسب بالا برده می‌شود و سپس توسط دستگیره مغناطیسی رها می‌شود. نیروی گرانش موجب شتاب‌گیری وزنه می‌شود. این انرژی جنبشی به پیستون منتقل می‌شود. موج ایجاد شده در لوله بر اثر برخورد وزنه به پیستون به صورت یک موج صفحه‌ای در سیلندر و حوضچه انتقال می‌یابد. با توجه به مشاهدات انجام شده، جرم وزنه نقش مهمی را در فشار ماکزیمم ایجاد شده دارد. سرعت چکش هنگام برخورد به پیستون در محدوده ۸-۰ متر بر ثانیه قرار دارد و این محدوده‌ی سرعت موجب به وجود آمدن فشار ماکزیمم بین ۶-۲ مگاپاسکال می‌شود. این فشار توسط فشارسنج ثبت شده است. ایمپالس منتقل شده به ورق به مقدار زیادی به جرم ورق بستگی دارد.

۳-۲- مواد و نمونه

با استفاده از تست کشش تک‌راستا خواص مکانیکی فولاد استفاده شده در این سری آزمایش‌ها مشخص می‌شود. جدول ۱ شامل، خواص نهایی فولاد از جمله مقدار تنش نهایی و تنش تسلیم است.

در این سری از آزمایش‌ها، هر ورق در سه راستای مختلف افقی، عمودی و اریب برش داده می‌شود و سپس مطابق با استاندارد ASTM-E8، تحت تست کشش تک‌راستا قرار می‌گیرد تا همگن بودن خاصیت ماده مشخص شود. دو

جدول ۲- نتایج تجربی

خیز ورق (mm)	انرژی (j)	جرم چکش (kg)	ارتفاع چکش (m)	ضخامت (mm)	کد آزمایش
۲۲/۵	۱۳۸۱	۷۰/۴	۲	۱	۱
۲۱/۹	۷۳۹	۱۰۰/۴	۰/۷۵	۱	۲
۲۱/۲	۱۰۳۶	۷۰/۴	۱/۵	۱	۳
۱۹/۵	۶۶۵	۹۰/۴	۰/۷۵	۱	۴
۱۹/۱	۴۹۳	۱۰۰/۴	۰/۵	۱	۵
۱۸/۹	۶۹۱	۷۰/۴	۱	۱	۶
۱۶/۳	۴۴۳	۹۰/۴	۰/۵	۱	۷
۱۶/۱	۲۴۶۲	۱۰۰/۴	۲۵۰	۲	۸
۱۵/۳	۱۹۷۰	۱۰۰/۴	۲۰۰	۲	۹
۱۵/۰	۱۴۷۷	۱۰۰/۴	۱۵۰	۲	۱۰
۱۴/۹	۱۷۲۷	۷۰/۴	۲۵۰	۲	۱۱
۱۴/۱	۹۸۵	۱۰۰/۴	۱۰۰	۲	۱۲
۱۴/۰	۱۳۸۱	۷۰/۴	۲۰۰	۲	۱۳
۱۳/۹	۱۰۳۶	۷۰/۴	۱۵۰	۲	۱۴
۱۱/۷	۶۹۱	۷۰/۴	۱۰۰	۲	۱۵

عمل شناسایی سیستم را می‌توان انجام داد که حاصل آن تقریب تابع f است که به موجب آن می‌توان به ازای بردار ورودی $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ مقدار خروجی \hat{y} را تقریب زد.

$$\hat{y} = \hat{f}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \quad (3)$$

آنچه به طور معمول به عنوان هدف مشترک روش‌های شناسایی سیستم مطرح است، کمینه کردن مجموع مربعات خطا به ازای N نمونه است.

$$\sum_{i=1}^N [\hat{f}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) - y_i]^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

که در آن تابع (\hat{f}) می‌تواند بصورت تابع خطی و یا غیر خطی از متغیرهای ورودی سیستم باشد.

خروجی و مدلی برای سیستم ارائه می‌کند [۱۳]. به طور کلی مسائل شناسایی سیستم بدین‌گونه مطرح می‌شود که فرض می‌کنیم که رابطه خروجی (y) ، یک سیستم ناشناخته با m ورودی آن به صورت رابطه (۱) است [۱۴].

$$y_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \quad (1)$$

با داشتن N نمونه از این داده‌های ورودی و خروجی، سیستمی همانند ماتریس زیر به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1m} & y_1 \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2m} & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} & x_{N2} & x_{N3} & \dots & x_{Nm} & y_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

تعداد $\binom{m}{2} = \frac{m(m-1)}{2}$ اند. از میان عصب‌های تولید شده، لزوماً بایستی تعدادی از آنها حذف گردند تا بدین وسیله از واگرایی شبکه جلوگیری بعمل آید. اصطلاحاً به اینگونه عصب‌های حذف شده، عصب مرده گفته می‌شود.

عصب‌هایی که برای ادامه و گسترش شبکه باقی می‌مانند، امکان دارند برای ایجاد فرم همگرایی شبکه و عدم ارتباط آنها با عصب لایه آخر حذف گردند که اصطلاحاً به آنها عصب غیر فعال می‌گویند. مجموع مربعات خطا (r_j^2) میان مقادیر خروجی واقعی (y_i) و خروجی عصب (y_{ij}^*) ملاک و معیاری برای حذف مجموعه‌ای از عصب‌ها در یک لایه است [۱۵].

$$r_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{ij}^*)^2}{\sum_{i=1}^N y_i^2} \rightarrow \min \quad (6)$$

در رابطه بالا $j \in \{1, 2, 3, \dots, C_m^2\}$ است که در آن m تعداد عصب‌های گزینش شده در لایه قبلی است.

نگاشتی که بین متغیرهای ورودی و خروجی توسط این نوع از شبکه‌های عصبی برقرار می‌شود، به صورت تابع غیر خطی ولترا، بفرم رابطه (۷) است [۱۶].

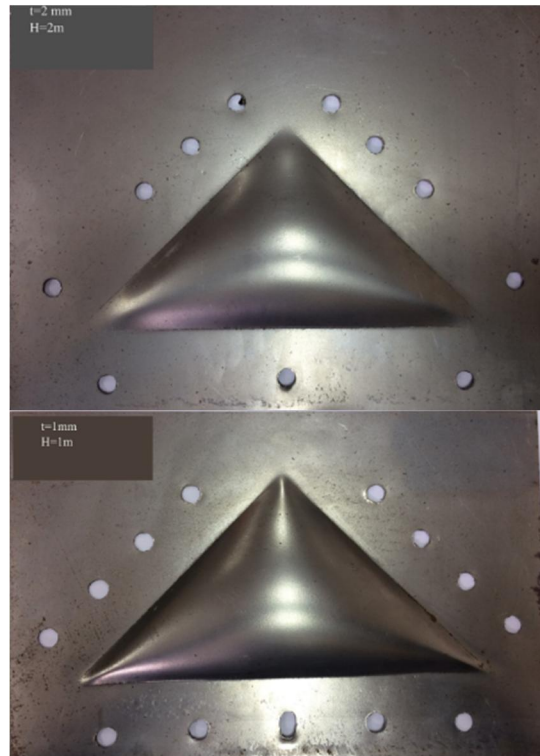
$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (7)$$

ساختاری را که برای عصب‌ها در نظر گرفته می‌شود، بصورت چند جمله‌ای دو متغیره درجه دوم، همانند رابطه (۸) است [۱۷].

$$y_i = f(x_{ip}, x_{iq}) = a_0 + a_1 x_{ip} + a_2 x_{iq} + a_3 x_{ip} x_{iq} + a_4 x_{ip}^2 + a_5 x_{iq}^2 \quad (8)$$

هدف در الگوریتم GMDH یافتن ضرایب ناشناخته a_0 است. تابع f در رابطه (۷) دارای شش ضریب مجهول است؛ لذا بایستی آنها را طوری تعیین کنیم که به ازای تمام نمونه‌های دو متغیره وابسته به سیستم $\{(x_{ip}, x_{iq}), i = 1, 2, \dots, N\}$ برقرار $\{y_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ خروجی مطلوب را بر اساس قاعده کمترین مربعات خطا پایه‌ریزی می‌کنیم [۱۸ و ۱۹].

$$\sum_{k=1}^N [(f(x_{ki}, x_{kj}) - y_i)^2] \rightarrow \min \quad (9)$$



شکل ۲- ورق‌های مثلثی تغییر شکل یافته با ضخامت‌های مختلف

۵- شبکه‌های عصبی GMDH

شبکه GMDH، شبکه‌ای خود سازمانده و یک سوپه است که از چندین لایه و هر لایه نیز از چندین عصب تشکیل شده است. تمامی عصب‌ها از یک ساختار مشابهی برخوردار می‌باشند، همگی آنها دارای دو ورودی و یک خروجی‌اند که در رابطه ۵ نشان داده شده است [۱۴].

$$y_{ik}^* = N(x_{i\alpha}, x_{i\beta}) = b^k + w_1^k x_{i\alpha} + w_2^k x_{i\beta} + w_3^k x_{i\alpha}^2 + w_4^k x_{i\beta}^2 + w_5^k x_{i\alpha} x_{i\beta} \quad (5)$$

در رابطه بالا $i = 1, 2, 3, \dots, N$ است که در آن N تعداد نمونه‌های ورودی و خروجی بوده و $(K = 1, 2, 3, \dots, C_m^2)$ و $\alpha, \beta \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$ است که در آنها m تعداد عصب‌های لایه قبلی است.

مقادیر وزنی براساس روش کمترین مربعات خطا محاسبه شده و سپس به عنوان مقادیر مشخص و ثابت داخل هر عصب جایگذاری می‌شوند. در این نوع از شبکه‌ها عصب‌های مرحله قبلی (m) عامل و یا مولد تولید عصب‌های جدید (به

ریاضی پیچیده خواهد شد [۲۸-۳۴]. به همین جهت متغیرهای ورودی و خروجی را به صورت فشرده و یا به عبارتی به صورت دسته‌های بی‌بعد [۳۵-۴۵] در نظر می‌گیریم.

$$Y = \frac{W_0}{t} \quad (۱۶)$$

$$X_1 = \frac{H}{t} \quad (۱۷)$$

$$X_2 = \frac{mV_0}{At\sqrt{\sigma_y\rho}} \quad (۱۸)$$

$$X_3 = \frac{E\sqrt{gH}}{\sigma_y C_w} \quad (۱۹)$$

بنابراین روابط فوق را می‌توان بصورت زیر در نظر گرفت.

$$Y = \frac{W_0}{t} = f(X_1, X_2, X_3) \quad (۲۰)$$

در این معادلات (X_1, X_2, X_3) داده‌های ورودی و Y داده‌ی خروجی شبکه است. جایجایی مرکز جرم ورق مثلثی با استفاده از چهار سری معادلات به دست می‌آید. ارتباط بین پارامترهای وابسته توسط این معادلات برقرار می‌شود. رابطه ریاضی این مدل به صورت رابطه (۲۱) است.

$$\frac{W_0}{t} = 3.372 + 0.7846U_1 - 0.4363U_2 - 1.592U_1^2 - 1.591U_2^2 + 3.211U_1U_2 \quad (۲۱)$$

در رابطه (۲۱)، پارامترهای U_1 و U_2 برای محاسبه جایجایی مرکز جرم ورق مثلثی استفاده می‌شوند که هر کدامشان وابسته به پارامترهای دیگری هستند.

$$U_1 = 1.434 - 2.065W_1 - 2.846W_2 + 2.404W_1^2 - 2.620W_2^2 + 5.032W_1W_2 \quad (۲۲)$$

$$U_2 = 2.308 + 0.3692W_1 + 0.1949W_3 - 0.1223W_1^2 - 0.1421W_3^2 + 0.2816W_1W_3 \quad (۲۳)$$

دسته‌ی سوم روابط مربوط به معادلاتی است که W_1 ، W_2 و W_3 را به Z_1 ، Z_2 و Z_3 مرتبط می‌کنند.

$$W_1 = -7.488 + 1.199Z_2 + 0.7957Z_3 + 0.003423Z_2^2 + 0.00613Z_3^2 - 0.03117Z_2Z_3 \quad (۲۴)$$

$$W_2 = -0.4292 + 1.013Z_1 + 0.0525Z_2 - 0.00325Z_1^2 + 0.02269Z_2^2 - 0.01517Z_1Z_2 \quad (۲۵)$$

با این شرایطی که بر مسئله حاکم است، بایستی دستگاه معادله‌ای را حل کنیم که دارای شش مجهول و N معادله است [۲۰].

$$\begin{cases} a_0 + a_1x_{1p} + a_2x_{1q} + \dots + a_5x_{1q}^2 = y_1 \\ a_0 + a_1x_{2p} + a_2x_{2q} + \dots + a_5x_{2q}^2 = y_2 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ a_0 + a_1x_{Np} + a_2x_{Nq} + \dots + a_5x_{Nq}^2 = y_N \end{cases} \quad (۱۰)$$

دستگاه معادله رابطه (۹) را می‌توان به فرم ماتریسی نیز نمایش داد.

$$Aa = Y \quad (۱۱)$$

که در آن

$$a = \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}^T \quad (۱۲)$$

و Y بردار مقادیر خروجی است.

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_N\} \quad (۱۳)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{1p} & x_{1q} & x_{1p}x_{1q} & x_{1p}^2 & x_{1q}^2 \\ 1 & x_{2p} & x_{2q} & x_{2p}x_{2q} & x_{2p}^2 & x_{2q}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{Np} & x_{Nq} & x_{Np}x_{Nq} & x_{Np}^2 & x_{Nq}^2 \end{bmatrix} \quad (۱۴)$$

برای حل معادله لازم است که شبه معکوس ماتریس غیر مربعی A محاسبه گردد. به همین خاطر برای محاسبه شبه معکوس ماتریس غیر عادی A ، از روش تجزیه مقادیر تکینه (SVD) استفاده می‌شود [۲۱-۲۶].

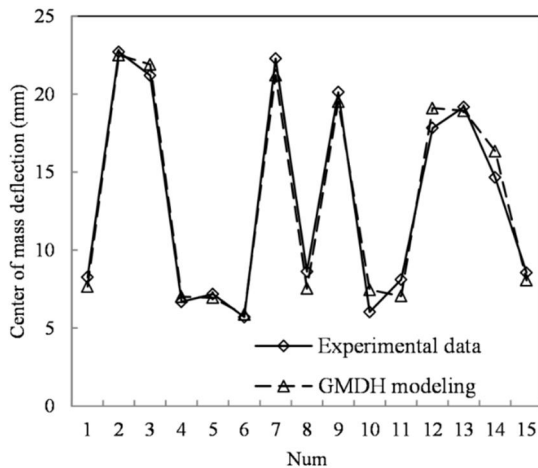
با بکار بردن نتایج تجربی در روش‌های مدلسازی شبکه‌های عصبی GMDH می‌توان میان پارامترهای مشخص شده که بصورت ورودی و خروجی دسته بندی شده‌اند، مدل عددی را استخراج نمود.

بر اساس بررسی‌های تجربی و تحلیل ساختار مکانیزم فرآیند شکل‌دهی هیدروفورمینگ ورق‌های مثلثی [۲۷].

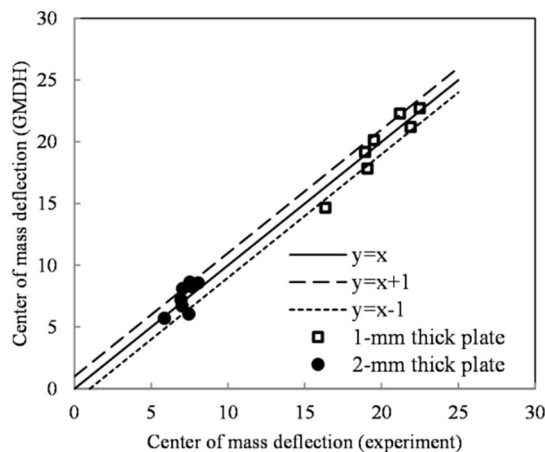
پارامترهای وابسته و موثر بر خیز مرکز جرم ورق W_0 عبارت خواهند بود از: ارتفاع چکش $H(m)$ ، ضخامت اولیه ورق $t(mm)$ ، جرم چکش $m(kg)$ ، سرعت چکش $V_0(m/s)$ ، سطح اولیه ورق $A_0(m^2)$ ، چگالی ورق $\rho(kg/m^3)$ ، تنش تسلیم استاتیکی ورق $\sigma_0(MPa)$ ، مدول الاستیسیته $E(Pa)$ ، چگالی آب $\rho_w(kg/m^3)$ و سرعت صوت در آب $C_w(m/s)$.

$$W_0 = f(H, t, m, V_0, A_0, \rho, \sigma_0, E, \rho_w, C_w) \quad (۱۵)$$

چون تعداد متغیرهای وابسته به فرایند نسبتاً زیاد است؛ لذا این مسئله منجر به ایجاد شبکه‌هایی نسبتاً حجیم با مدل



شکل ۳- مقایسه‌ی تغییر شکل مرکز جرم ورق‌های مثلثی



شکل ۴- مقایسه نتایج روش تجربی و روش مدل‌سازی

شکل ۴ برای نمایان شدن دقت و مقدار خطا مدل ارائه شده ترسیم شده است. مطابق این شکل تطابق خوبی بین نتایج مدل ارائه شده و مقادیر تجربی وجود دارد. بر این اساس، چندجمله‌ای پیش‌بینی شده براساس روش GMDH مدل مناسبی را برای تعیین خروجی مربوط به ورودی‌های مسئله ارائه می‌کند. به طوری که که حدوداً ۸۸٪ از نقاط در فاصله $\pm 1 \left(\frac{W_0}{H}\right)$ قرار دارند.

در شبکه‌های عصبی GMDH عصب‌های هر لایه با عصب مجاور مرتبط هستند [۲۲]. ساختار شبکه ایجاد شده در شکل ۵ به خوبی نشان‌دهنده‌ی ارتباط هر عصب با عصب‌های مجاور است. این شکل به خوبی وابستگی پارامترهای مرتبط به هم را در لایه‌های مختلف شبکه عصبی نشان می‌دهد.

$$W_3 = -3.297 + 1.503Z_1 + 0.0007867Z_3 + 0.1075Z_1^2 + 0.09102Z_3^2 - 0.2172Z_1Z_3 \quad (26)$$

که در آن

$$Z_1 = -2.715 + 3.196X_2 + 8.825X_3 + 0.07171X_2^2 - 0.3447X_3X_3 - 0.8927X_2X_3 \quad (27)$$

$$Z_2 = 0.0001175 + 0.04819X_1 + 0.000078X_3 + 0.000003X_1^2 - 0.000056X_3^2 - 0.0208X_1X_3 \quad (28)$$

$$Z_3 = 0.00027 + 0.00275X_1 + 0.00489X_2 + 0.000015X_1^2 + 0.0969X_2^2 - 0.002041X_1X_2 \quad (29)$$

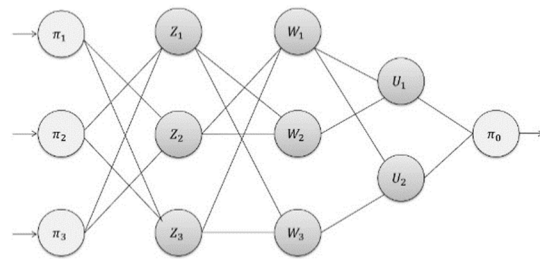
۶- نتایج و بحث

در این بخش، مقادیر پیش‌بینی شده توسط روش GMDH و نتایج تست‌های آزمایشگاهی با هم مقایسه شده‌اند. تاثیر پارامترهای موثر مختلفی مانند، ضخامت ورق و انرژی منتقل شده بر رفتار ورق مثلثی بررسی شده است.

برای روشن‌تر شدن میزان کیفیت و دقت مدل، مقادیر خروجی مدل همراه با مقادیر واقعی (تجربی) نسبت خیز مرکز جرم ورق به ضخامت $\frac{W_0}{t}$ ، به صورت دو نمودار مجزا در شکل ۳ ترسیم شده است.

براساس شکل ۳، انحراف داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی GMDH بسیار اندک است و این انحراف در بعضی از بخش‌ها به صفر می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی تطابق قابل قبول داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی است. این انحراف اندک با کاهش یافتن ضخامت ورق و جذب مقدار کمتری انرژی توسط ورق افزایش می‌یابد. این انحراف از مقادیر آزمایشگاهی برای ورق‌های نازک‌تر به خوبی در شکل نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده، بیشترین خطای نسبی تقریباً ۱۰٪ است و این مقدار برای ورق‌های ضخیم‌تر به کمتر از ۵٪ می‌رسد.

- [3] Gerdooei M, Dariani B. (2008) Strain-rate-dependent forming limit diagrams for sheet metals. Proc Inst Mech Eng B-J Eng 222(12): 1651-1659.
- [4] Safikhani A, Hashemi R, Assempour A (2008) The strain gradient approach for determination of forming limit stress and strain diagrams. Proc Inst Mech Eng B-J Eng 222(4): 467-483.
- [5] Gelin JC, Delassus P, Fontaine JF (1994) Experimental and numerical modelling of the effects of process parameters in the aquadraw deep drawing J Mater Process Tech 45(1): 329-334.
- [6] Zampaloni M, Abedrabbo N, Pournoghbat F (2003) Experimental and numerical study of stamp hydroforming of sheet metals. Int J Mech Sci 45(11):1815-1848.
- [7] Kosing O, Skews B (1998) An investigation of high-speed forming of circular plates in a liquid shock tube. Int J Imp Eng 21(9): 801-816.
- [8] 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)
- [9] 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.
- [10] Nariman-Zadeh N, Darvizeh A, Dadfarmai MH (2004) Design of ANFIS networks using hybrid genetic and SVD methods for the modelling of explosive cutting process. J Mater Process Tech 155: 1415-1421.
- [11] Besarati SM, Atashkari K, Jamali A, Hajiloo A, Nariman-Zadeh N (2010) Multi-objective thermodynamic optimization of combined Brayton and inverse Brayton cycles using genetic algorithms. Energ Convers Manage 51(1): 212-217.
- [12] Ivakhnenko AG (1971) Polynomial theory of complex systems. IEEE Trans Syst Man Cybern Syst (4):364-78.
- [13] Åström KJ, Eykhoff P (1971) System identification—a survey. Automatica 7(2):123-62.
- [14] Lee DW, Seo SW, Sim KB (2008) Online evolution for cooperative behavior in group robot systems. Int J Control Autom 6(2):282-287.
- [15] Farlow SJ (1984) Self-organizing methods in modeling: GMDH type algorithms. CrC Press.
- [16] Nariman-Zadeh N, Darvizeh A, Jamali A, Moeini A (2005) Evolutionary design of generalized polynomial neural networks for modelling and prediction of explosive forming process. J Mater Process Tech 164:1561-71.



شکل ۵- ساختار شبکه‌ای روش GMDH

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق، سامانه‌ی چکش پرتابه‌ای برای مطالعه تجربی تغییر شکل ورق مثلثی به کار گرفته شد. روش GMDH با تعیین مسیر مناسب از میان عصبها برای محاسبه تغییر شکل مرکز جرم ورق به کار گرفته شد. روش جداسازی تک‌متغیره برای به دست آوردن بردار ضرایب زیرجملات شبکه عصبی پردازش گروهی استفاده شد. این روش جایگزین مناسبی برای معادلات نرمال است که به بهبود عملکرد شبکه‌های GMDH می‌انجامد. بررسی نسبت تغییر شکل مرکز جرم ورق مثلثی به ضخامت آن با استفاده از روش پردازش گروهی شبکه عصبی و مقایسه‌ی آن با نتایج تست‌های آزمایشگاهی انجام شده تاییدی بر عملکرد قابل قبول روش GMDH است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده‌ی به حداقل رسیدن انحراف نتایج تحلیلی از نتایج تجربی با کوپل کردن الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف با روش‌های تجربی است؛ هم‌چنین نتایج نشان‌دهنده‌ی کارآمدی روش GMDH در مدل‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اساسی و مؤثر در پروسه بسیار پیچیده فرآیند شکل‌دهی‌اند. به همین سبب شبکه‌های عصبی GMDH را می‌توان به عنوان یک ابزار مناسب و قوی برای مدل‌سازی سیستم‌هایی که رفتار پیچیده‌ای دارند بکار برد.

۸- مراجع

- [1] Espinosa HD, Lee S, Moldovan N (2006) A novel fluid structure interaction experiment to investigate deformation of structural elements subjected to impulsive loading. Exp Mech 17(4): 805-824.
- [2] Palumbo G, Zhang SH, Tricarico L, Xu C, Zhou LX (2006) Numerical/experimental investigations for enhancing the sheet hydroforming process. Int J Mach Tool Manu 46(11): 1212-1221.

- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T (2019) Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin Wall Struct* 144: 106332.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [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 Mech Eng* 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] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T (2016) Modeling and prediction of fatigue life in composite materials by using singular value decomposition method. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 1464420716660875.
- [38] Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M (2019) Dynamic
- [17] Nariman-Zadeh N, Atashkari K, Jamali A, Pilechi A, Yao X (2005) Inverse modelling of multi-objective thermodynamically optimized turbojet engines using GMDH-type neural networks and evolutionary algorithms. *Eng Optimiz* 37(5):437-62.
- [18] Jamali A, Hajiloo A, Nariman-Zadeh N (2010) Reliability-based robust Pareto design of linear state feedback controllers using a multi-objective uniform-diversity genetic algorithm (MUGA). *Expert Syst Appl* 37(1): 401-413.
- [19] Ahmadi M, Ahmadi MA, Mehrpooya M, Rosen M (2015) Using GMDH neural networks to model the power and torque of a stirling engine. *Sustain* 7(2): 2243-2255.
- [20] Nariman-Zadeh N, Darvizeh A, Felezi M, Gharababaei H (2002) Polynomial modelling of explosive compaction process of metallic powders using GMDH-type neural networks and singular value decomposition. *Model Simul Mater Sc* 10(6): 727.
- [21] Gharababaei H, Nariman-Zadeh N, Darvizeh A (2010) A simple modelling method for deflection of circular plates under impulsive loading using dimensionless analysis and singular value decomposition. *J Mech* 26(3): 355-361.
- [22] Ahmadi MA, Golshadi M (2012) Neural network based swarm concept for prediction asphaltene precipitation due to natural depletion. *J Petrol Sci Eng* 98:40-49.
- [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] 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.
- [25] 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)
- [26] 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.
- [27] Jamali A, Babaei H, Nariman-Zadeh N, Ashraf Talesh 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.

- 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.
- [43] 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.
- [44] Mostofi TM, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part I: Experimental studies. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(1) 71-83.
- [45] 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.
- 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Mostofi TM, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H (2018) Closed-form analytical