



مطالعه تجربی و مدل‌سازی ریاضی تغییر شکل ورق‌های مستطیلی تحت بار ضربه‌ای

هاشم بابایی^{۱*}، علی جمالی^۲، توحید میرزابابای مستوفی^۳، سید حامد اشرف طالبش^۳^۱ استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت^۲ دانشیار، گروه مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت^۳ دانشجوی دکتری، گروه مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۴/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۹

چکیده

هدف از این پژوهش، مطالعه تجربی و مدل‌سازی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری ضربه‌ای با نرخ پایین توسط سامانه چکش پرتابه‌ای است. در بخش تجربی، برای بررسی رفتار مکانیکی ورق‌های فولادی و آلومینیومی نسبت به بار وارده، آزمایش‌هایی روی آن‌ها در سطوح انرژی متفاوت انجام می‌شود. بخش مدل‌سازی این تحقیق شامل، ارائه یک تابع صریح برای داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد، بر اساس پارامترهای بی‌بعد و همچنین طراحی و مدل‌سازی چند هدفی سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک است. به‌طور کلی هدف از مدل‌سازی، پیش‌بینی قابل اطمینان و رضایت‌بخش نسبت خیز مرکز ورق به ضخامت آن تحت بارگذاری ضربه‌ای است. برای اعتبار سنجی نتایج به‌دست‌آمده، مقایسه‌ای بین نتایج مدل‌سازی و داده‌های تجربی انجام می‌شود. بررسی خطای داده‌های آموزشی و پیش‌بینی بر اساس مجذور میانگین مربعات خطاها و ضریب تبیین نشان می‌دهد که نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی بهینه سیستم استنتاج فازی-عصبی، نسبت به مدل‌سازی ریاضی با روش تجزیه مقادیر منفرد به نتایج تجربی نزدیک‌تر است، با این تفاوت که در روش تجزیه مقادیر منفرد یک تابع ریاضی برای داده‌های تجربی ارائه می‌شود؛ بنابراین، استفاده از روش‌های مدل‌سازی ارائه‌شده برای نسبت خیز مرکز ورق به ضخامت آن تحت بارگذاری ضربه‌ای مطلوب است.

کلمات کلیدی: تغییر شکل پلاستیک؛ چکش پرتابه‌ای سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی؛ ورق مستطیلی.

Experimental Study and Mathematical Modeling of Deformation of Rectangular Plates under Impact Load

H. Babaei^{1,*}, A. Jamali², T. Mirzababaei Mostofi³, and S. H. Ahraf Talesh³¹ Assist. Prof., Dep. of Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran.² Assoc. Prof., Dep. of Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran.³ PhD Candidate, Dep. of Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

The purpose of this work is to perform an experimental study and also modeling the plastic deformation of rectangular plates under a low-rate impact loading by the drop hammer system. In the experimental section, some experiments are conducted on the rectangular plates with different levels of energy to survey the mechanical behavior of the steel and aluminum plates according to the applied load. The modeling section consists of presenting an explicit function for the experimental data by singular value decomposition (SVD) based on dimensionless parameters, and also the multi-objective modeling and design of the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) by genetic algorithm. Generally, the aim of modeling is a reliable and satisfactory prediction of the deflection-thickness ratio of plates under impact loads. A comparison is made between the modeling results and experimental data in order to validate the results. Investigation of the training and prediction data errors, which is based upon the root-mean-square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2), shows that the results of the optimal design of ANFIS are closer to the experimental results of mathematical modeling by the SVD method, with the exception that a mathematical function based on the experimental data is presented by the SVD method.

Keywords: Plastic Deformation; Drop hammer; Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System; Rectangular Plate.

۱- مقدمه

شکل‌دهی ورق‌های فلزی، همواره مورد توجه محققان و صنعت‌گران بوده است و به‌طور کلی، به دودسته شکل‌دهی با نرخ انرژی بالا و پایین تقسیم می‌شوند.

فرآیند شکل‌دهی با سرعت بالا، فرآیندی است که در آن مقدار زیادی انرژی در فاصله زمانی کوتاه آزاد می‌شود، لذا قطعه کار در برابر فشار زیادی قرار می‌گیرد. در روش شکل‌دهی با نرخ انرژی پایین، برای شکل‌دهی فلزات از یک جرم به‌عنوان ضربه زننده استفاده می‌شود. آنچه در این شیوه اهمیت دارد، آن است که سرعت جرم به هنگام ضربه زدن می‌تواند در حدود کمتر از ۹ متر بر ثانیه باشد. انرژی تولیدی در این روش، با انرژی تولیدشده به روش شکل‌دهی با سرعت بالا که در آن سرعت موج ضربه در حدود ۷۶۰۰ متر بر ثانیه است قابل قیاس نیست؛ بنابراین در روش شکل‌دهی با سرعت بالا فشار زیادی در مدت کوتاهی بر قطعه اعمال می‌شود [۱-۴].

در فرآیندهای شکل‌دهی با سرعت پایین، دستگاه چکش پرتابه‌ای، یکی از سامانه‌های پرکاربرد در این زمینه است که از آن برای شکل‌دهی ورق، تراکم پودر و جاذب‌های انرژی استفاده می‌شود. در این سامانه، با به‌کارگیری انرژی حاصل از منابعی که می‌تواند سبب رهاسازی چکش شود، شکل‌دهی صورت می‌گیرد. به‌عبارت‌دیگر در یک فرآیند کنترل‌شده فشار ناشی از موج ضربه روی قطعه کار منتقل می‌شود. یکی از نکات قابل توجه در استفاده از این سامانه، استفاده از سیال واسط است که این امکان را به کاربر می‌دهد تا شکلی متقارن به دلیل توزیع یکنواخت فشار را داشته باشد [۳، ۴].

در جدیدترین تحقیقات انجام شده با سامانه چکش پرتابه‌ای، به بررسی تجربی و تحلیلی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایروی و مستطیلی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی پرداخته شده است که در قسمت تحلیلی با استفاده از روش انرژی و روش لولای پلاستیک، روابطی برای حداکثر خیز مرکز ورق ارائه شده است [۳، ۴].

روش‌های مدل‌سازی و شناسایی سیستم‌ها در بسیاری از زمینه‌ها به‌منظور طراحی و پیش‌بینی رفتارهای نامشخص و پیچیده سیستم‌های با داده‌های ورودی و خروجی استفاده می‌شود [۵]. یکی از دلایل اصلی این پیشرفت را می‌توان در استفاده از روش‌های منطق فازی، شبکه‌های عصبی مصنوعی

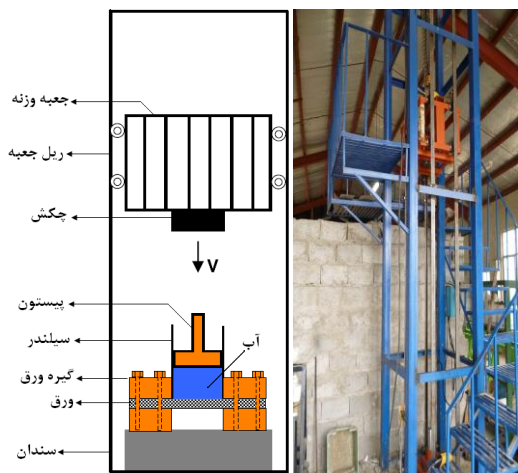
و الگوریتم‌های تکاملی دانست که به محاسبات نرم معروف هستند و توانایی زیادی در تحلیل سیستم‌های غیرخطی پیچیده و مسائل کنترل دارند [۶]. در میان این روش‌ها، سیستم‌های بر مبنای قوانین فازی به همراه منطق فازی به دلیل داشتن توانمندی در به دست آوردن مدل تقریبی از سیستم‌های پیچیده، زمینه بسیاری از تحقیقات بوده است [۷]. در مدل‌سازی چنین سیستم‌هایی به روش فازی با افزایش توابع عضویت در فضای ورودی، تعداد قواعد برای مدل‌سازی در ساختار مدل بسیار زیاد خواهد شد که منجر به ایجاد مشکلاتی می‌شود. به همین منظور، راه‌حلهایی جهت کاهش تعداد قواعد و طراحی یک مدل فازی ساده برای تقویت رفتار سیستم‌های غیرخطی و پیچیده توسط محققان صورت گرفته است [۸، ۹]. طراحی مدل‌های فازی از نوع سوگنو، به سبب سادگی تفسیر مدل ارائه شده توسط آن‌ها و دقت بالایشان به‌طور وسیعی در کنترل و مدل‌سازی سیستم‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۰]. 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 سوگنو توانایی خوبی در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده نشان داده است [۱۱].

در این مقاله، روش شکل‌دهی ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری ضربه‌ای با نرخ انرژی پایین توسط سامانه چکش پرتابه‌ای به‌صورت تجربی، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه در فرآیند شکل‌دهی حاضر از آب به‌عنوان سیال واسط استفاده شده است، پس می‌توان از این فرآیند بانام فرآیند شکل-دهی هیدرودینامیکی یاد کرد. علاوه بر بررسی‌های تجربی، 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 و همچنین روش تجزیه مقادیر منفرد برای به دست آوردن پارامترهای خطی خروجی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی به‌کاربرده شده است. مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی هیدرودینامیکی با در نظر گرفتن خطای آموزشی و خطای پیش‌بینی، به‌عنوان دو هدف طراحی بهینه ساختار سیستم استنتاج عصبی- فازی انجام شده است. ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش تجزیه مقادیر منفرد برای طراحی

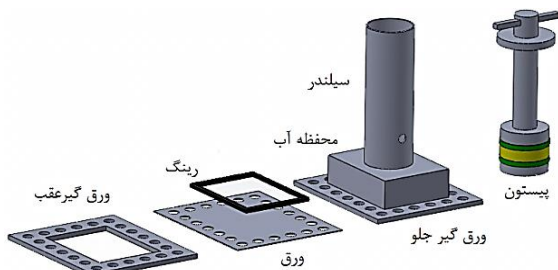
ورق است. پس از بستن صفحات بالایی و پایینی داخل سیلندر، آب تا ارتفاع بیش از محل قرارگیری شیر تخلیه هوا ریخته می‌شود و سپس با قرار دادن پیستون و فشار دادن آن به سمت پایین، تخلیه هوا صورت گرفته، سامانه آماده برخورد چکشی است که از ارتفاع معین پرتاب می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌گرفته، بیانگر مقدار حداکثر خیز مرکز ورق‌های فولادی و آلومینیومی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی توسط سامانه چکش پرتابه‌ای است که در آن اثر تغییرات جنس، ضخامت ورق و نیز تغییرات شرایط بارگذاری با توجه به تغییرات ارتفاع چکش پرتاب شده، در نظر گرفته شده است. تغییر ارتفاع چکش پرتاب شده، موجب افزایش انرژی انتقالی به ورق و به‌تبع آن تغییر نرخ سرعت تغییرشکل می‌شود.

در شکل ۳، نمونه‌ای از تغییرشکل پلاستیک ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی با دستگاه چکش پرتابه‌ای نشان داده شده است. در تصاویر نشان داده شده، هیچ‌گونه آثار تخریب ناشی از بارگذاری دیده نمی‌شود.



شکل ۱- دستگاه چکش پرتابه‌ای [۳، ۴]



شکل ۲- شماتیک اجزای سامانه شکل‌دهی

بهینه چند هدفی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی و یافتن مدلی برای فرآیند شکل‌دهی هیدرودینامیکی حاضر با استفاده از داده‌های ورودی- خروجی، مورد مطالعه قرار گرفته است.

تحقیق در مورد پیچیدگی قوانین فازی با در نظر گرفتن کمترین مقدار برای دو تابع هدف خطای مدل‌سازی و خطای پیش‌بینی صورت گرفته است. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق با نتایج حاصل از روش تجزیه مقادیر منفرد، نشان‌دهنده برتری قابل توجه پژوهش حاضر است.

۲- بررسی تجربی

یکی از سامانه‌های به‌کاررفته جهت شکل‌دهی ضربه‌ای ورق با سرعت پایین، سامانه چکش پرتابه‌ای است که در شکل ۱ نمایش داده شده است. عملکرد این سامانه بدین گونه است که انرژی پتانسیل ناشی از رهاسازی وزنه‌ای در ارتفاع مشخص به انرژی جنبشی پیستون تبدیل و به‌صورت بار ضربه‌ای به سیال به‌کار رفته در حوضچه جوش شده به سیلندر وارد می‌شود؛ به‌عبارت دیگر انرژی جنبشی پیستون به فشار هیدرودینامیکی در سیال تبدیل می‌شود و به‌تبع آن، ورق تغییرشکل می‌یابد. اجزای مختلف این سامانه و نحوه عملکرد آن در مرجع [۳، ۴]، به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

نمونه ورق‌های مورد آزمایش از جنس فولاد نرم و آلایژ آلومینیوم در ضخامت‌های متفاوت ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر است. در ابتدا، نمونه ورق‌ها به‌صورت مستطیلی در ابعاد 31×26 سانتی‌متر برش زده شده‌اند. مطابق شکل ۲، ورق‌های برش خورده جهت نصب در ورق گیرهای جلو و عقبی و همچنین مهار آن، سوراخ‌کاری شده است. سپس نمونه‌ها میان دو صفحه فولادی به ابعاد 31×26 سانتی‌متر و با ضخامت ۲۰ میلی‌متر قرار داده شده، به‌وسیله پیچ‌هایی مهار شده است که در پیرامون این صفحات تعبیه شده‌اند. شایان‌ذکر است که ورق گیر جلو به حوضچه‌ای به ابعاد 20×15 سانتی‌متر و سیلندری کاملاً صیقلی به قطر داخلی ۱۲ سانتی‌متر به‌صورت یکپارچه جوش داده شده است.

در وسط صفحه پایینی، سوراخی به ابعاد 20×15 سانتی-متر ایجاد شده است. این سوراخ‌ها برای اعمال بار هیدرودینامیکی روی ورق و در صفحه پایینی شکل‌گیری

جدول ۱- مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام شده

شماره آزمایش	جنس ورق	ضخامت ورق (mm)	ارتفاع وزنه (cm)	خیز مرکز ورق (mm)
۱	فولاد	۳	۲۸۰	۲۲/۰۵
۲	فولاد	۳	۲۵۰	۲۰/۲۷
۳	فولاد	۲	۲۵۰	۲۳/۹۸
۴	فولاد	۱	۲۵۰	۳۵/۶۰
۵	فولاد	۳	۲۲۵	۱۹/۴۲
۶	فولاد	۲	۲۲۵	۲۳/۶۸
۷	فولاد	۱	۲۲۵	۳۳/۸۵
۸	فولاد	۳	۲۰۰	۱۸/۱۳
۹	فولاد	۲	۲۰۰	۲۲/۴۷
۱۰	فولاد	۱	۲۰۰	۳۱/۰۶
۱۱	فولاد	۳	۱۷۰	۱۵/۰۶
۱۲	فولاد	۲	۱۷۰	۱۸/۲۰
۱۳	فولاد	۱	۱۷۰	۲۸/۹۷
۱۴	فولاد	۲	۱۵۰	۱۸/۱۰
۱۵	فولاد	۱	۱۵۰	۲۶/۸۱
۱۶	آلومینیوم	۱	۴۰	۲۶/۰۱
۱۷	آلومینیوم	۲	۴۰	۱۴/۱۰
۱۸	آلومینیوم	۲	۵۰	۱۷/۰۱
۱۹	آلومینیوم	۱	۳۵	۲۴/۴۱
۲۰	آلومینیوم	۲	۷۰	۲۲/۷۷
۲۱	آلومینیوم	۱	۲۵	۲۱/۷۷
۲۲	آلومینیوم	۲	۶۰	۱۸/۶۸
۲۳	آلومینیوم	۱	۱۵	۱۴/۱۲
۲۴	آلومینیوم	۲	۳۰	۱۰/۷۰
۲۵	آلومینیوم	۱	۲۰	۱۷/۴۹

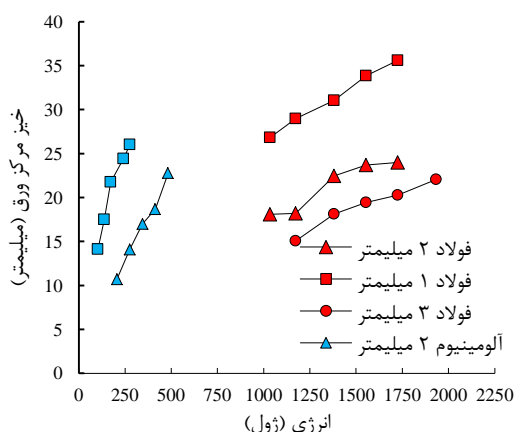
جدول ۲- خواص مکانیکی مواد

ماده	استحکام تسلیم استاتیکی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
فولاد	۲۸۹	۲۱۰
آلومینیوم	۱۲۶	۷۰

در جدول ۱ و ۲، به ترتیب نتایج آزمایش‌های انجام شده و خواص مکانیکی ورق‌های فولادی و آلومینیومی آمده است. شایان ذکر است که جرم چکش برابر با ۷۰/۴ کیلوگرم است. در شکل ۴، نمودار تغییرات خیز مرکز ورق برحسب انرژی منتقل شده از سامانه نشان داده شده است. در این نمودار، خیز مرکز ورق‌ها برحسب انرژی در ضخامت‌های متفاوت برای دو جنس مختلف فولاد و آلومینیوم به صورت تفکیک شده و متمایز ترسیم شده است. مطابق این نمودار، تأثیر جنس و ضخامت ورق بر میزان تغییر شکل کاملاً مشهود است و با افزایش انرژی انتقالی و همچنین کاهش ضخامت ورق، مقادیر خیز مرکز ورق افزایش می‌یابند. شیب تغییرات مقادیر خیز مرکز ورق در ورق‌های فولادی، نسبت به ورق‌های آلومینیومی به دلیل پایین‌تر بودن تنش جریان متوسط آلومینیوم نسبت به فولاد است.



شکل ۳- نمونه‌هایی از تغییر شکل ورق مستطیلی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی



شکل ۴- نمودار تغییرات خیز مرکز ورق نسبت به انرژی انتقالی

یک خروجی با M داده ورودی - خروجی، به صورت رابطه ۱ در نظر گرفته شده است.

$$y_i = f(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, M) \quad (1)$$

با استفاده از یک سیستم عصبی-فازی تطبیقی مقادیر خروجی به صورت زیر تقریب زده شده است، طوری که اختلاف خروجی‌های مدل شده در رابطه ۲ با خروجی‌های واقعی سیستم مطابق رابطه ۳ کمینه باشد.

$$\hat{y}_i = \hat{f}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, M) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^M [f(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}) - y_i]^2 \rightarrow \text{Min} \quad (3)$$

برای انجام این کار، مجموعه‌ای از قواعد از نوع سوگنو برای تقریب زدن خروجی یک سیستم n ورودی - یک خروجی طراحی می‌شوند. این قواعد را می‌توان به صورت رابطه ۴ نشان داد.

$$\text{Rule}_l = \text{IF } x_1 \text{ is } A_l^{(j_1)} \text{ AND } x_2 \text{ is } A_l^{(j_2)} \text{ AND } \dots, x_n \text{ is } A_l^{(j_n)} \text{ THEN } y = \sum_{i=1}^n w_i^l x_i + w_0^l \quad (4)$$

که $W^l = \{w_1^l, w_2^l, \dots, w_n^l, w_0^l\}$ و $j_i \in \{1, 2, \dots, r\}$ مجموعه پارامترهای خطی بخش آنگاه قواعد فازی است. مجموعه‌های فازی فضای ورودی مطابق رابطه ۵ تعریف شده‌اند.

$$A^{(i)} = \{A^{(1)}, A^{(2)}, A^{(3)}, \dots, A^{(r)}\} \quad (5)$$

تمامی این مجموعه‌ها در بازه $(i = 1, 2, \dots, n)$ به شکل توابع عضویت تعریف شده‌اند. بازه‌ها طوری انتخاب می‌شوند که مجموعه‌های فازی کامل باشند؛ یعنی برای هر $x_i \in [-\alpha_i, +\beta_i]$ یک $A^{(j)}$ در معادله (۵) وجود دارد که تابع عضویت آن صفر نباشد، $\mu_{A^{(j)}}(x_i) \neq 0$ اگر برای هر مجموعه فازی $A^{(j)}$ ، $j = 1, 2, \dots, r$ ، تابع عضویت گوسی به شکل رابطه ۶ تعریف شود، داریم:

$$\mu_{A^{(j)}}(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - \sigma_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (6)$$

که در آن پارامترهای تنظیم پذیر در فضای ورودی هستند. بدیهی است که تعداد این پارامترها $2nr$ است که n تعداد ورودی‌ها و r تعداد توابع عضویت بازای هر ورودی است. قواعد فازی که در رابطه ۴ نشان داده شده‌اند. روابط فازی در $U \times R$ هستند. با استفاده از استنتاج حاصل ضرب جبری ممدانی و سایر عملگرهای فازی مقدار f را می‌توان به صورت رابطه ۷ نمایش داد.

۳- استفاده از الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه

ANFIS

کاربرد الگوریتم ژنتیک برای طراحی مدل سیستم عصبی-فازی تطبیقی، ابتدا با به‌کارگیری $2nr$ مقدار حقیقی از پارامترهای تابع عضویت $\{c, \sigma\}$ که n تعداد ورودی‌ها و r تعداد توابع عضویت به ازای هر ورودی است، به صورت رشته-ای دودویی تعریف می‌شود؛ بنابراین هر دسته داده تولیدشده 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 آورده می‌شوند. 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؛ بنابراین در مسائل بهینه‌سازی چند هدفی، مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه به نام نقاط پارتو حاصل می‌شود که دارای برتری مطلقی نسبت به هم نیستند [۸]. معیار سنجش و انتخاب توابع عضویت بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک بر اساس مینیمم کردن چند هدفی توابع هدف انجام شده است که در اینجا عبارت‌اند از: خطای آموزشی و پیش‌بینی که بر اساس مجذور میانگین مربعات خطاها محاسبه و نیز به همراه آماره ضریب تبیین R^2 ارائه می‌شوند. در شروع روند تکامل تدریجی مقادیری برای پارامترهای مورد نظر سیستم به‌عنوان جمعیت اولیه بر طبق تعداد توابع عضویت که به صورت پیش‌فرض در این پژوهش برابر ۳ برای هر ورودی در نظر گرفته شده، به‌طور کاملاً تصادفی تولید و سپس با عملگرهای ژنتیکی نظیر پیوند و جهش تمامی جمعیت‌های موجود به همراه جمعیت‌های تولید شده در نسل‌های بعد در یک‌روند تکاملی تدریجی، به سمت جواب‌های بهینه متمایل می‌شوند.

۴- سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی

سیستم عصبی-فازی تطبیقی شامل، مجموعه‌ای از قواعد فازی از نوع سوگنو، نگاشتی از فضای ورودی به خروجی است در حقیقت روش شناسایی سیستم در اینجا پیدا نمودن یک تابع f است که بتواند به‌طور تقریبی رفتار تابع واقعی f را هر چه دقیق‌تر تقریب بزند. برای مثال، یک سیستم n ورودی -

با در نظر گرفتن ابعاد اصلی در هر یک از متغیرها و پیاده‌سازی قانون همگنی ابعادی، چهار گروه بی‌بعد مطابق روابط ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به دست می‌آید:

$$\pi_0 = \frac{\delta}{h} \quad (12)$$

$$\pi_1 = \frac{H}{h} \quad (13)$$

$$\pi_2 = \frac{m\sqrt{gH}}{Ah\sqrt{\sigma_y\rho}} \quad (14)$$

$$\pi_3 = \frac{E\sqrt{gh}}{\sigma_y C_w} \quad (15)$$

بنابراین روابط فوق را می‌توان به صورت رابطه ۱۶ در نظر گرفت:

$$\pi_0 = \frac{\delta}{h} = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3) \quad (16)$$

برای استخراج مدل، تابع f به شکل رابطه ۱۷ در نظر گرفته می‌شود:

$$\pi_0 = C \cdot (\pi_1)^\alpha \cdot (\pi_2)^\beta \cdot (\pi_3)^\gamma \quad (17)$$

ضرایب مجهول α ، β ، γ و C را در معادله فوق به گونه‌ای تعیین می‌شود که قاعده کمترین مربعات خطا برقرار باشد. با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین معادله ۱۷ و تعریف پارامتر η در معادله ۱۹، معادله ۱۸ ارائه می‌شود:

$$\ln(\pi_0) = \eta + \alpha \ln(\pi_1) + \beta \ln(\pi_2) + \gamma \ln(\pi_3) \quad (18)$$

$$\eta = \ln(C) \quad (19)$$

در نتیجه لازم است که دستگاه معادله جبری خطی (رابطه ۲۰) حل شود که شامل $K = 4$ مجهول و M معادله است، M تعداد زوج داده‌های ورودی- خروجی است و یا به عبارتی، تعداد آزمایش‌های انجام شده است.

$$\begin{cases} \eta + \alpha\zeta_{11} + \beta\zeta_{12} + \gamma\zeta_{13} = \zeta_{10} \\ \eta + \alpha\zeta_{21} + \beta\zeta_{22} + \gamma\zeta_{23} = \zeta_{20} \\ \dots \\ \eta + \alpha\zeta_{M1} + \beta\zeta_{M2} + \gamma\zeta_{M3} = \zeta_{M0} \end{cases} \quad (20)$$

که در آن ζ_{ij} و ζ_{i0} از روابط ۲۱ و ۲۲ حاصل شده است:

$$\zeta_{ij} = \ln(\pi_{ij}) \quad i = 1,2,3, \dots, M \quad j = 1,2,3 \quad (21)$$

$$\zeta_{i0} = \ln(\pi_{i0}) \quad i = 1,2,3, \dots, M \quad (22)$$

دستگاه معادله ۲۰ را که در آن $M \gg K = 4$ را می‌توان به شکل ماتریسی (معادله ۲۳) نمایش داد:

$$AX = Y \quad (23)$$

که در آن X ، Y و A از روابط ۲۴، ۲۵ و ۲۶ حاصل شده است:

$$X = [\eta \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T \quad (24)$$

$$Y = [\zeta_{10} \ \zeta_{20} \ \dots \ \zeta_{M0}]^T \quad (25)$$

$$f(X) = \sum_{l=1}^n p_x(X) y_l + D \quad (7)$$

که D تفاوت بین $f(X)$ و مقدار خروجی واقعی، γ است و p از رابطه ۸ بدست آمده است.

$$p_l(X) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i(j_i)}(x_i)}{\sum_{l=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i(j_i)}(x_i) \right)} \quad (8)$$

رابطه ۷ را می‌توان به صورت ماتریسی برای M داده ورودی- خروجی، $(x_i, y_i), (i = 1, 2, \dots, M)$ مطابق رابطه ۹ نشان داد.

$$Y = P \cdot W + D \quad (9)$$

که $P = [p_1, p_2, \dots, p_s]^T \in R^{M \times s}$ و $W = [w_1, w_2, \dots, w_s]^T \in R^{M \times s}$ عضو $(n+1)$ -امین عضو بردار w_i مطابق بخش آن گاه قواعد فازی مدل سوگنو است.

حل مستقیم معادله ۹ به سبب وجود نقاط منفرد با خطا همراه است. به همین سبب می‌توان از روش تجزیه مقادیر منفرد در حل این گونه دستگاه‌های معادلات خطی استفاده کرد.

۵- ارائه مدل بی‌بعد با روش تجزیه مقادیر منفرد

در مدل‌سازی با استفاده از روش تحلیل ابعادی، پارامترهای بی‌بعد $\pi = (\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_k)$ با استفاده از متغیرهای فیزیکی و حقیقی سیستم $\{y, X\} = \{y, x_1, x_2, \dots, x_n\}$ تشکیل می‌شود. رابطه بین پارامترهای بی‌بعد به صوت معادله ۱۰ توسط تابع f برقرار می‌شود [۱۲].

بر اساس بررسی‌های تجربی و تحلیل ساختار مکانیزم فرآیند شکل‌دهی هیدرودینامیکی ورق با استفاده از دستگاه چکش پرتابه‌ای، پارامترهای وابسته و مؤثر بر خواص نهایی قطعات ساخته‌شده، شامل جرم چکش m ، ارتفاع پرتابی چکش H ، ضخامت ورق h ، مساحت ورق A ، مدول الاستیسته ورق E ، چگالی ورق ρ ، شتاب گرانش g ، سرعت صوت در آب C_w و تنش تسلیم استاتیکی σ_y است (رابطه ۱۱). شایان ذکر است، مقدار سرعت صوت در آب برابر با ۱۴۸۲ متر بر ثانیه است.

$$W_0 = \hat{f}(m, h, H, A, E, g, C_w, \sigma_y, g) \quad (11)$$

استفاده شده است. با توجه به بهینه شدن پارامترهای توابع عضویت گوسی، تعداد قوانین فازی بر اساس تعداد توابع عضویت به دست آمده است. که برای هر ورودی برابر ۳ است، بنابراین، برای داده‌های با ۳ ورودی و خروجی فرآیند شکل‌دهی هیدرودینامیکی تعداد قوانین فازی نوع سوگنو برابر $3^3=27$ برای هر نمونه است. به منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی، داده‌ها به دودسته تقسیم شده‌اند که شامل، دسته داده‌های آموزشی و پیش‌بینی هستند؛ بنابراین، ۱۸ دسته داده برای آموزش شبکه و ۷ دسته داده دیگر برای پیش‌بینی خروجی شبکه استفاده شده است. در طی فرآیند به‌گزینی، تعداد جمعیت اولیه و احتمال پیوند و جهش و تعداد تکرار به ترتیب برابر، ۲۰۰، ۰/۷، ۰/۱ و ۳۰۰ انتخاب شده است. در شکل ۵، منحنی پارتو حاصل از بهینه‌سازی چند هدفی برای مدل‌سازی خروجی فرآیند شکل‌دهی هیدرودینامیکی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، تمامی نقاط پارتو از دید دو تابع هدف نسبت به هم غیر برترند. نقاط TE و PE نشان داده شده در شکل ۵ به ترتیب دارای کمترین خطای مدل‌سازی و خطای پیش‌بینی هستند. همان‌طور که در شکل مشخص است، با حرکت از نقطه TE به سمت نقطه PE، خطای مدل‌سازی افزایش و خطای پیش‌بینی کاهش می‌یابد. همچنین، نقطه بهینه TRE از بین تمامی نقاط پارتو به‌عنوان نقطه مصالحه طراحی انتخاب شده است، زیرا با وجود اینکه خطای مدل‌سازی و خطای پیش‌بینی آن به ترتیب، در مقایسه با نقاط TE و PE تغییر چندانی نکرده، با بررسی مقدار هر دو تابع هدف، می‌توان نتیجه گرفت که دارای بیشترین توازن از نظر کمتر کردن هم زمان خطاها است. مشخصات نقاط طراحی مهم تعیین شده برحسب مقادیر هر دو تابع هدف خطاهای آموزشی و پیش‌بینی در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین، در جدول ۳ به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با نتیجه روش تجزیه مقادیر منفرد مقادیر میانگین مربعات خطای مدل‌سازی و خطای پیش‌بینی برای مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی هیدرودینامیکی ارائه شده است.

همان‌طور که ذکر شد، برای تعداد توابع عضویت که برای هر ورودی برابر مقدار ثابت ۳ در نظر گرفته شده است، با بهینه شدن ضرایب توابع عضویت گوسی، توابع هدف

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \zeta_{11} & \zeta_{12} & \zeta_{13} \\ 1 & \zeta_{21} & \zeta_{22} & \zeta_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \zeta_{M1} & \zeta_{M2} & \zeta_{M3} \end{bmatrix} \quad (26)$$

حل معادله ۲۳ منوط به محاسبه معکوس ماتریس غیر مربعی A است. به همین جهت برای محاسبه شبه معکوس ماتریس A ، از روش تجزیه مقادیر منفرد (SVD) استفاده می‌شود.

در روش SVD، ماتریس غیرعادی A به حاصل ضرب یک ماتریس متعامد ستونی $U \in R^{M \times K}$ ، یک ماتریس قطری $W \in R^{K \times K}$ با عناصر مثبت یا صفر (مقادیر تکینه) و ترانهاد یک ماتریس متعامد $V \in R^{M \times K}$ تجزیه می‌شود، به طوری که معادله ۲۷ برقرار است:

$$A = U W V^T \quad (27)$$

(K تعداد گروه‌های مستقل و M تعداد نمونه‌های آزمایش است). هدف، انتخاب بهینه بردار ضرایب در معادله ۲۰ است که این امر مستلزم یافتن معکوس اصلاح‌شده ماتریس قطری W است. بدین منظور، معکوس عناصر قطر با تکینه‌های صفر یا نزدیک به صفر ($\frac{1}{w_j} = 0$) برابر صفر قرار داده می‌شوند، سپس بردار ضرایب بهینه شده مطابق رابطه ۲۸ به دست می‌آیند.

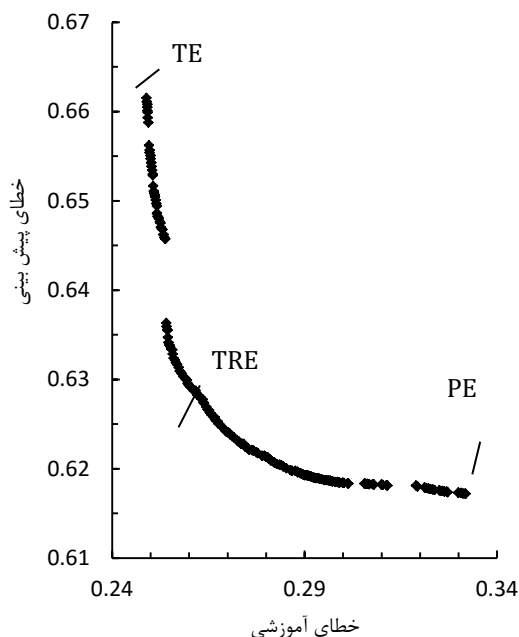
$$X = V \left[\text{diag} \left(\frac{1}{w_j} \right) \right] U^T Y \quad (28)$$

برای به دست آوردن یک مدل ساده (مشابه معادله ۱۶) برای فرآیند شکل‌دهی ورق مستطیلی، از داده‌های آزمایشگاهی انجام شده در این مقاله استفاده می‌شود. این داده‌ها با قرارگیری در معادلات ۱۲ تا ۱۵ به صورت داده‌های بی‌بعد تبدیل شده، سپس دستگاه معادله ۲۰ مطابق روابط ۱۷ و ۱۸ با گرفتن لگاریتم از آن‌ها تشکیل می‌شود. با توجه به رابطه ۲۸، مقادیر $\beta = 0.04$ ، $\alpha = 0.47$ ، $C = 0.00114$ و $\gamma = -2.15$ به دست می‌آیند. چگالی نسبی قطعات را می‌توان به صورت معادله ۲۹ ارائه کرد.

$$\frac{\delta}{h} = 0.00114 \left(\frac{H}{h} \right)^{0.47} \left(\frac{m\sqrt{gH}}{Ah\sqrt{\sigma_y \rho}} \right)^{0.04} \left(\frac{E\sqrt{gh}}{\sigma_y c_w} \right)^{-2.15} \quad (29)$$

۶- بحث و نتایج

در مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی ورق مستطیلی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی از ۲۵ دسته داده ورودی- خروجی آن به‌عنوان ورودی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی



شکل ۵- منحنی پارتو مربوط به تغییر شکل پلاستیک ورق مستطیلی

جدول ۳- مقادیر توابع هدف نقاط مهم طراحی فرآیند شکل‌دهی

خطای آموزش	خطای پیش‌بینی	
۰/۲۴۸۹	۰/۶۶۱۵	TE
۰/۲۶۵۷	۰/۶۲۶۱	TRE (نقطه مصالحه طراحی)
۰/۳۳۱۹	۰/۶۱۷۲	PE

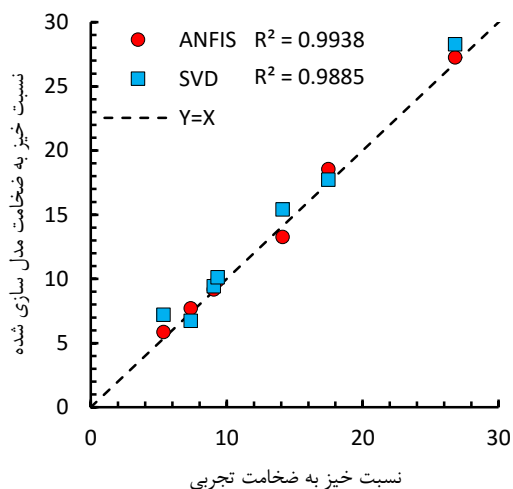
جدول ۴- ضرایب توابع عضویت بهینه داده‌های ورودی نقطه مصالحه

ضرایب بهینه	ورودی ۱	ورودی ۲	ورودی ۳
شماره ۱	۲۳۰/۹۰۲۱۸۷/۳	۰/۰۰۳۱۰/۰۰۸۷	۱/۰۴۴۰/۴۱۹
شماره ۲	۲۱۰۰/۲۰۴۱/۱	۰/۰۰۳۱۰/۰۰۲۵	۰/۵۸۴۰/۵۶۳
شماره ۳	۱۵۱۷/۷۰۲۳۳۱/۲	۰/۰۱۰۲۰/۰۰۳۵	۰/۴۱۸۰/۰۸۳

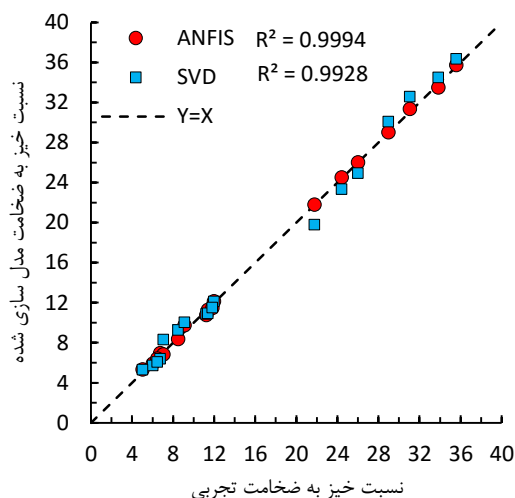
به صورت تدریجی به سمت کمترین خطای پیش‌بینی و آموزشی متمایل می‌شود.

مقایسه بین خروجی‌های حاصل از مدل سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی برای نقاط مصالحه طراحی TRE، روش تجزیه مقادیر منفرد و خروجی‌های تجربی در ۲۵ داده ورودی-خروجی فرآیند شکل‌دهی هیدرودینامیکی در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است.

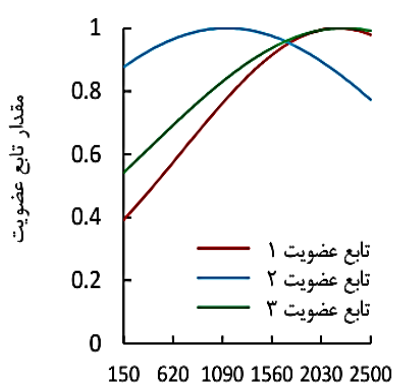
در روش سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی، انطباق خروجی‌های مدل شده، خروجی‌های تجربی برحسب معیار ضریب تبیین R^2 برابر ۰/۹۹۹ برای داده‌های آموزشی و ۰/۹۹۴ برای داده‌های پیش‌بینی بدست آمده است. همچنین در روش تجزیه مقادیر منفرد، انطباق خروجی‌های مدل شده و خروجی‌های تجربی برحسب معیار ضریب تبیین R^2 برابر ۰/۹۹۳ برای داده‌های آموزشی و ۰/۹۸۹ برای داده‌های پیش-بینی است. نتایج دو روش مدل‌سازی انجام شده برای فرآیند شکل‌دهی هیدرودینامیکی، نشان‌دهنده دقت بالا و توانایی ترکیب دوگانه الگوریتم ژنتیک و روش تجزیه مقادیر ویژه برای طراحی بهینه پارامترهای سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در طراحی و مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی هیدرودینامیکی است. کاملاً مشخص است که هم خطای مدل‌سازی و هم خطای پیش‌بینی مدل ارائه شده در این تحقیق به نتایج بهتری منجر شده، به خصوص این مورد را می‌توان در مورد خطای پیش‌بینی با وضوح بیشتری مشاهده کرد. دلیل آن را می‌توان در طراحی بهینه چند هدفی ساختار سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته جستجو کرد. با توجه به کم بودن خطای پیش‌بینی مدل ارائه شده در این تحقیق، می‌توان از آن به عنوان یک مدل کاملاً مناسب برای پیش‌بینی رفتار فرآیند شکل‌دهی هیدرودینامیکی ورق مستطیلی استفاده کرد. شکل ۸، توابع عضویت گوسی مربوط به نقطه مصالحه طراحی TRE را نشان می‌دهد. ضرایب بهینه توابع عضویت گوسی σ, c بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک با استفاده از رابطه ۷ با فرض تعداد تابع عضویت ۳ برای هر یک از داده‌های ورودی در بخش ورودی به سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی به منظور مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی هیدرودینامیکی در جدول ۴ محاسبه شده‌اند.



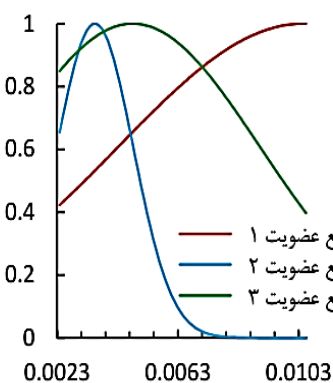
شکل ۷- مقایسه عملکرد خروجی مدل بهینه شده در پیش‌بینی



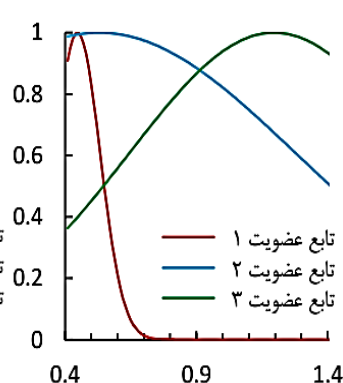
شکل ۶- مقایسه عملکرد خروجی مدل بهینه شده در آموزش



مقدار ورودی ۱



مقدار ورودی ۲



مقدار ورودی ۳

شکل ۸- شکل کلی توابع عضویت گوسی بهینه در نقطه مصالحه طراحی

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تغییر شکل پلاستیک ورق مستطیلی تحت بارگذاری ضربه‌ای توسط سامانه چکش پرتابه‌ای به صورت تجربی همراه با مدل‌سازی ریاضی مورد مطالعه قرار گرفت. از نوآوری‌های بخش تجربی پژوهش، می‌توان به شکل‌دهی ورق با استفاده از آب به عنوان سیال واسط اشاره کرد. مزیت‌های روش استفاده‌شده شامل سادگی، ارزان و کم‌خطر بودن آن است، در صورتی‌که کیفیت تغییر شکل ورق، مشابه سایر فرآیندهای شکل‌دهی است. شکل متقارن و گنبدی ورق در این فرآیند، نمایانگر توزیع یکنواخت فشار هیدروپنمایی در

سطح آن است. همچنین در بخش تجربی، ورق‌های آزمایشی از دو جنس متفاوت فولاد و آلومینیوم در نظر گرفته شد و با رهاسازی چکش از ارتفاع‌های مختلف، به بررسی رفتار مکانیکی ورق با جنس و ضخامت‌های مختلف پرداخته شد. در بخش مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی هیدروپنمایی در ابتدا از الگوریتم ژنتیک به‌طور همزمان برای انتخاب بهینه پارامترهای توابع عضویت گوسی در بخش ورودی و طراحی چند هدفی ساختار سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی با معیار کمترین خطاهای آموزشی و پیش‌بینی استفاده گردید. همچنین از روش تجزیه مقادیر منفرد برای تعیین ضرایب

- [5] Porkhial S, Salehpour M, Ashraf H, Jamali A (2015) Modeling and prediction of geothermal reservoir temperature behavior using evolutionary design of neural networks *Geothermics* 53: 320–327.
- [6] Deb AK (2011) Introduction to soft computing techniques: artificial neural networks, fuzzy logic and genetic algorithms. *Soft Computing in Textile Engineering*: 3-24.
- [7] Sugeno M, Kang GT (1988) Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems* 28: 15-33.
- [8] Marzbanrad J, Jamali A (2009) Design of ANFIS Networks Using Hybrid Genetic and SVD Method for Modeling and Prediction of Rubber Engine Mount Stiffness. *Iny J Automot Techn* 10(2) : 167-174.
- [9] Nariman-Zadeh N, Darvizeh A, Dadfarmi 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.
- [10] Takagi T, Sugeno M (1993) Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control. *Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems*: 387-403.
- [11] Jang JSR (1993) ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 23 :665-685.
- [12] 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.
- خطی بهینه قسمت آنگاه سیستم فازی استفاده شد. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل سازی با استفاده از سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در ترکیب همزمان با الگوریتم ژنتیک و روش تجزیه مقادیر منفرد، برتری این روش را نسبت به مدل سازی ریاضی تنها با استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد نشان می دهد.

۸- مراجع

- [1] Babaei H, Darvizeh A (2011) Investigation into the Response of Fully Clamped Circular Steel, Copper, and Aluminum Plates Subjected to Shock Loading. *Mech Based Des Struc* 39(4): 507-526.
- [2] Babaei H, Darvizeh A (2010) Experimental and analytical investigation of large deformation of thin circular plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Mech Based Des Struc* 38(2): 171-189.
- [3] Babaei H, Darvizeh, Alitavoli M, Mirzababaie Mostofi T (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)
- [4] 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)