

## مدل سازی و بهینه سازی برگشت فنری در فرآیند شکل دهی خزشی ورق های ترکیبی ماشینکاری شده آلومینیوم ۷۰۷۵ با بهره گیری از شبکه فازی - عصبی تطبیقی و الگوریتم ازدحام ذرات

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران  
 دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران  
 استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

امیر حسین ربیعی\*  
 مهدی صفری  
 وحید طهماسبی

### چکیده

شکل دهی ورق های ترکیبی ماشینکاری شده به واسطه وجود ضخامت های متفاوت دارای پیچیدگی های بیشتری نسبت به ورق های یکپارچه می باشد. وجود دو قسمت با ضخامت های متفاوت منجر ایجاد رفتارهای متفاوت شکل پذیری و به دنبال آن برگشت فنری متفاوت در آنها می شود. لذا بررسی برگشت فنری در قسمت های نازک و ضخیم ورق های ترکیبی ماشینکاری شده به منظور کمینه کردن آنها اهمیت بسزایی دارد. در این مقاله، یک سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی برای مدل سازی اثر پارامترهای مهم شامل زمان ( $T$ ) و دمای فرآیند ( $t$ ) برای پیش بینی درصد برگشت فنری ناحیه نازک ( $S_{thin}$ ) و ناحیه ضخیم ( $S_{thick}$ ) در ورق ترکیبی ماشینکاری شده که توسط فرآیند شکل دهی خزشی فرم دهی گردیده، استفاده شده است. همچنین در ادامه از مدل بدست آورده شده جهت بهینه سازی فرآیند شکل دهی خزشی با بهره گیری از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. به منظور مدل سازی رفتار فرآیند، آزمایش های تجربی بر روی فرآیند شکل دهی خزشی ورق های ترکیبی ماشینکاری شده صورت پذیرفته است. دقت مدل بدست آورده شده با استفاده از نمودارهای مختلف و همچنین بر اساس معیارهای  $RMSE$ ،  $MAE$ ،  $R$ ، و  $MAPE$  بررسی شده است. **واژه های کلیدی:** فرآیند شکل دهی خزشی، ورق ترکیبی ماشینکاری شده، برگشت فنری، شبکه ANFIS، الگوریتم ازدحام ذرات.

## Modeling and optimization of the spring-back in creep forming process of tailor machined blanks for aluminum alloy 7075 using adaptive neuro-fuzzy inference system and particle swarm algorithm

A. H. Rabiee  
 M. Safari  
 V. Tahmasbi

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

### Abstract

The forming of tailor machined blanks due to the different thicknesses is more complex than the monolithic sheets. The presence of two sections with different thicknesses leads to different formability behaviors and consequently their different spring-backs. Therefore, it is important to examine the spring-back in the thin and thick sections of tailor machined blanks in order to minimize the spring-back value. In this paper, an adaptive neural-fuzzy inference system is used to model the effect of important parameters to predict the percent of spring-back corresponding to the thin and thick sections on the creep age formed tailor machined blanks. In addition, the obtained model is used to optimize the creep forming process using particle swarm optimization algorithm. In order to model the process behavior, some experiments have been performed on the creep forming of tailor machined blanks. The accuracy of the obtained model is investigated using different figures as well as by the specific criteria  $RMSE$ ,  $MAE$ ,  $R$ , and  $MAPE$ .

**Keywords:** Creep forming process, Tailor machined blank, Spring-back, ANFIS network, Particle swarm algorithm.

نگرفته اند. حال آنکه ورق های ترکیبی تولید شده با چسب<sup>۲</sup> یا ورقهای ترکیبی ماشینکاری شده<sup>۳</sup> در مقایسه با ورق های ترکیبی جوشکاری شده، بسیار مناسب و مورد استفاده در صنایع مختلف می باشند و متاسفانه تحقیقات بسیار اندکی بر روی شکل پذیری آنها انجام شده است. فرآیند جوشکاری، ریز ساختارهای دقیق ایجاد شده در آلیاژهای آلومینیوم را خراب می کند. استفاده از ورق های ترکیبی ماشینکاری شده با توجه به کاهش وزنی که ایجاد می کنند سبب افزایش ظرفیت

### ۱- مقدمه

ورق های ترکیبی به مجموعه ای (ترکیبی) از ورق های فلزی با ضخامت و (یا) جنس و (یا) پوشش سطحی متفاوت اطلاق می شود. این ورق ها می توانند توسط فرایندهای جوشکاری، چسباندن و یا ماشینکاری تولید شوند. بر خلاف محبوبیت و کاربرد گسترده ورق های ترکیبی از نوع جوش<sup>۱</sup>، انواع دیگر این ورق ها خیلی مورد توجه قرار

<sup>2</sup> Tailor bonded blank  
<sup>3</sup> Tailor machined blank

<sup>1</sup> Tailor welded blank

حمل بار هواپیما می‌شود. یک ورق یکپارچه<sup>۱</sup> می‌تواند توسط فرآیند ماشینکاری دارای قسمت‌های مختلفی با ضخامت‌های متفاوت بشود. ورق ترکیبی که با استفاده از فرآیند ماشینکاری تولید شود تحت عنوان ورق ترکیبی ماشینکاری شده شناخته می‌شود. با استفاده از ورق‌های ترکیبی ماشینکاری شده، توزیع ماده در داخل قطعات سازه-ای مورد استفاده در صنایع هوایی بهبود می‌یابد و بنابراین تجهیزات ارزانتر، با مصرف سوخت کمتر و سبکتر قابل دستیابی خواهند بود. یکی از روش‌های نوین شکل‌دهی، فرآیند شکل‌دهی خزشی است که به دلیل بهبود خواص مکانیکی و کاهش هزینه‌های تولید در صنایع هواپیمایی، هوافضا، خودروسازی و نیروگاهی توسعه یافته است. این روش در مواردی استفاده می‌شود که ماده با فرآیندهای متداول شکل‌دهی سرد، وارد ناحیه پلاستیک نشده و یا تغییر شکل پلاستیک بسیار محدودی در آن ایجاد می‌گردد. شکل‌دهی خزشی بر اساس پدیده خزش و آزادسازی تنش در حین عملیات پیرسازی مصنوعی آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر رخ می‌دهد [۱]. در مقایسه با روش‌های شکل‌دهی معمولی، شکل‌دهی خزشی دارای مزایایی از جمله فرم‌دهی قطعات با تنش پسماند کمتر، کاهش هزینه‌های تولید و امکان تولید قطعات به صورت یکپارچه می‌باشد. در سالهای اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه شکل‌دهی خزشی انجام شده است. در سال ۲۰۱۹، لیو و همکاران [۲] به بررسی اثر استفاده از تقویت کننده در شکل‌دهی خزشی ورق‌هایی از آلیاژ آلومینیم 7B04 به صورت تجربی و عددی پرداختند. آنها همچنین یک مدل عددی جهت پیش‌بینی برگشت فنی، تحولات ریزساختاری و خواص مکانیکی توسعه دادند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش ارتفاع تقویت کننده کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۸، لیو و همکاران [۳] به بررسی اثر شکل‌دهی خزشی بر تحولات ریزساختاری، خواص مکانیک و رشد ترک خستگی در آلیاژ آلومینیم ۲۵۲۴ پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در محدوده تنشهای پایین، مشخصه‌های رسوب اثر مهمی بر عملکرد خستگی آلیاژهای آلومینیم شکل‌دهی شده با روش خزشی دارد. در سال ۲۰۱۸، لیو و همکاران [۴] به بررسی اثر تنشهای باقیمانده حاصل از ماشینکاری بر برگشت فنی ورق‌های شکل‌دهی شده به روش خزشی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که میزان تنشهای باقیمانده با کاهش ضخامت ورق تولید شده از روش ماشینکاری افزایش می‌یابد. همچنین تنشهای باقیمانده متناسب با مقدارشان می‌توانند تغییر شکل کلی نمونه‌های شکل‌دهی شده با روش خزشی را افزایش یا کاهش دهند. در سال ۲۰۱۹، لیو و همکاران [۵] به بررسی اثر چیدمان بین‌ها بر شکل قطعه تولید شده در فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای پراکنده با روش خزشی پرداختند. بدین منظور آنها یک روش نظری برای پیش‌بینی شکل قطعه و میدانهای تنش/کرنش ارائه کرده و دقت آن را با نتایج تجربی تایید نمودند. آنها همچنین اثر میدان تنش بر دقت شکل‌دهی قطعه با روش خزشی را بررسی نمودند. در سال ۲۰۱۷، یانگ و همکاران [۶] به بررسی اثر پیش‌فرم بر شکل‌دهی خزشی آلیاژ آلومینیم ۲۲۱۹ به صورت تجربی و نظری پرداختند. نتایج آنها نشان داد که ایجاد پیش‌فرم در آلیاژهای استحکام بالای آلومینیم تاثیر زیادی بر شکل‌پذیری

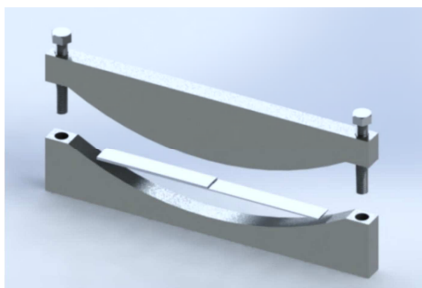
و خواص مکانیکی قطعات فرم‌دهی شده با روش شکل‌دهی خزشی دارد. در سال ۲۰۱۶، ارشادی خامنه و همکاران [۷] برگشت فنی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ در فرآیند شکل‌دهی خزشی را با استفاده از روش طراحی آزمایشات بهینه نمودند. آنها همچنین یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی مقدار برگشت فنی ارائه نمودند.

همانطور که از منابع اشاره شده پیداست و بر اساس مطالعات نویسندگان، تحقیقات انجام شده در زمینه بهینه‌سازی فرآیند شکل‌دهی خزشی بسیار اندک و محدود بوده است. با توجه به مطالعات نویسندگان، تا کنون گزارشی در رابطه با شکل‌دهی خزشی ورق‌های ترکیبی ماشینکاری شده ارائه نشده است. با توجه به این موضوع در این مقاله به بررسی شکل‌دهی خزشی ورق‌های ترکیبی ماشینکاری شده پرداخته می‌شود. شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی ماشینکاری شده به واسطه وجود ضخامت‌های متفاوت دارای پیچیدگیهای بیشتری نسبت به ورق‌های یکپارچه می‌باشد. وجود دو قسمت با ضخامت‌های متفاوت منجر ایجاد رفتارهای متفاوت شکل‌پذیری و به دنبال آن برگشت فنی متفاوت در آنها می‌شود. لذا بررسی برگشت فنی در قسمت‌های نازک و ضخیم ورق‌های ترکیبی ماشینکاری شده به منظور کمینه کردن آنها اهمیت بسزایی دارد. همچنین به منظور ایجاد انحنای یکنواخت در ورق ترکیبی شکل‌دهی شده، به حداقل رساندن اختلاف برگشت فنی در قسمت‌های نازک و ضخیم اهمیت بسیار زیادی دارد. بنابراین ارائه یک مدل کارآمد جهت به حداقل رساندن مقادیر برگشت فنی در قسمت‌های نازک و ضخیم ورق ترکیبی ماشینکاری شده و همچنین افزایش یکنواختی انحنای ورق‌های ترکیبی شکل‌دهی شده دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. در این مقاله برای نخستین بار از یک سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) برای مدل‌سازی اثر پارامترهای مهمی مانند دما و زمان در فرآیند شکل‌دهی خزشی ورق‌های ترکیبی ماشینکاری شده برای پیش‌بینی درصد برگشت فنی ناحیه با ضخامت کمتر و بیشتر استفاده شده است. تا کنون از این روش برای مطالعه رفتار برگشت فنی در شکل‌دهی خزشی استفاده نشده است. بدین منظور از نتایج آزمایش‌های انجام شده برای آموزش و تست سیستم استنتاج فازی بهره گرفته شده است. در این مدل مهمترین پارامترهای فرآیند شکل‌دهی خزشی شامل زمان و دمای فرآیند به عنوان پارامترهای ورودی و درصد برگشت فنی ناحیه نازک و ضخیم و همچنین اختلاف برگشت فنی نواحی نازک و ضخیم ورق ترکیبی ماشینکاری شده به عنوان خروجی در نظر گرفته شده‌اند.

## ۲- مواد و روش تجربی

به منظور انجام فرآیند شکل‌دهی خزشی، ورق‌های ترکیبی با استفاده از فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی آماده گردیده و در قالب مورد نظر جهت انجام فرآیند شکل‌دهی خزشی قرار داده می‌شوند. در شکل ۱، ابعاد ورق ترکیبی ماشینکاری شده و همچنین طرحواره مجموعه قالب مورد استفاده نشان داده شده است. لازم به ذکر است شعاع گوشه‌ها در محل تغییر ضخامت ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد. قالب استفاده شده از جنس فولاد St-37 می‌باشد. ماده اولیه مورد استفاده در این پژوهش ورق از جنس آلیاژ آلومینیم 7075-T6 به ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشد که

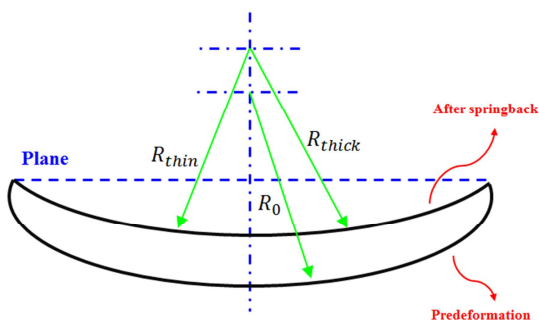
<sup>1</sup> Monolithic



شکل ۱- ابعاد ورق ترکیبی ماشینکاری شده و طرحواره مجموعه قالب مورد استفاده در فرآیند شکل‌دهی خزشی



شکل ۲- مجموعه قالب شکل‌دهی خزشی و نمونه ای از ورق‌های ترکیبی ماشینکاری شده که توسط فرآیند شکل‌دهی خزشی تولید شده



شکل ۳- طرحواره قطعه شکل‌دهی شده با فرآیند خزشی و برگشت فنری ایجاد شده در آن

در ساختار شبکه ANFIS، پنج لایه مختلف وجود دارد که این سیستم را به عنوان یک شبکه چند لایه‌ای معرفی می‌کند. یک نوع از این شبکه، سیستم فازی سوگنو با دو ورودی و یک خروجی می‌باشد که در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، این سیستم شامل دو ورودی  $x$  و  $y$  و خروجی  $f$  می‌باشد که با قوانین زیر مرتبط می‌شوند. قوانین مربوط به لایه‌ها به تفصیل در مرجع [۱۰] آورده شده‌است. اولین لایه در ساختار ANFIS شکل‌گیری سیستم فازی و لایه دوم بخش مقدم قواعد اگر آنگاه فازی را اجرا می‌کنند. لایه سوم مربوط به نرمال‌سازی توابع عضویت و لایه چهارم بخش تالی قواعد فازی را تشکیل می‌دهند. در نهایت آخرین لایه، خروجی شبکه را محاسبه می‌کند. با توجه به این، واضح است که لایه‌های اول و چهارم در ساختار ANFIS لایه‌های تطبیقی هستند که در

ضخامت نیمی از آن توسط فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی به اندازه ۱ میلی‌متر رسیده و ورق ترکیبی ماشینکاری شده ساخته می‌شود. فرآیند شکل‌دهی خزشی نیز در زمان و دماهای مختلف انجام شده و مقادیر برگشت فنری در نواحی نازک و ضخیم آن محاسبه می‌گردد. داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های مختلف در جدول ۱ لیست شده‌اند. در شکل ۲ مجموعه قالب شکل‌دهی خزشی و همچنین نمونه ای از ورق‌های ترکیبی ماشینکاری شده که توسط فرآیند شکل‌دهی خزشی تولید شده نشان داده شده است. به منظور اعمال بار یکسان در فرآیند شکل‌دهی خزشی مربوط به همه آزمایش‌ها، پیچهای قالب توسط یک گشتاورسنج بسته می‌شوند. به منظور اندازه‌گیری درصد برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم ورق ترکیبی شکل‌دهی شده با فرآیند شکل‌دهی خزشی با توجه به طرحواره شکل ۳، از روابط ۱ و ۲ استفاده می‌شود. به منظور اندازه‌گیری شعاع نمونه‌های شکل‌دهی شده با فرآیند شکل‌دهی خزشی، از یک دستگاه اندازه‌گیری مختصاتی<sup>۱</sup> استفاده می‌گردد. بدین منظور مختصات برخی از نقاط قطعه شکل‌دهی شده استخراج گردیده و سپس توسط نرم افزار مدلسازی شعاع مورد نظر محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است به منظور کاهش اثرات محل تغییر ضخامت ورق ترکیبی ماشینکاری شده بر رفتار شکل پذیری ورق ترکیبی ماشینکاری شده به واسطه عدم تماس بخش نازک ورق ترکیبی با سطح قالب، ورقی از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ و با ضخامت ۱ میلی‌متر بین قسمت نازک و سطح هندسی قالب قرار داده شد.

$$\text{Spring back thin (\%)} = ((R_{\text{thin}}/R_0) - 1) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Spring back thick (\%)} = ((R_{\text{thick}}/R_0) - 1) \times 100 \quad (2)$$

### ۳- سیستم عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS)

سیستم فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) از دو روش شبکه عصبی و منطق فازی استفاده می‌کند. هنگامی که این دو سیستم با یکدیگر ترکیب می‌شوند، می‌توانند به یک نتیجه مناسب دست یابند که شامل توانایی محاسباتی شبکه‌های عصبی و خرد فازی می‌شود. همانند دیگر سیستم‌های فازی، ساختار ANFIS از دو بخش مقدماتی و تالی تشکیل شده است که با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از قوانین به یکدیگر ارتباط دارند [۸، ۹].



<sup>1</sup> Coordinate measuring machine (CMM)

است. حالت ۱ به کمینه سازی مقدار برگشت فنری ناحیه نازک ورق پرداخته می‌شود. حالت ۲، کمینه برگشت فنری ناحیه ضخیم مورد نظر می‌باشد؛ و در نهایت حالت ۳، تابع هدف ترکیبی از مقادیر برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم و همچنین یکنواختی ورق (برابری برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم) می‌باشد. در ادامه توابع هدف هر یک از حالت‌های مورد نظر آورده شده است.

$$\text{Case 1: } J_1 = S_{\text{thin}} \quad (10)$$

$$\text{Case 2: } J_2 = S_{\text{thick}} \quad (11)$$

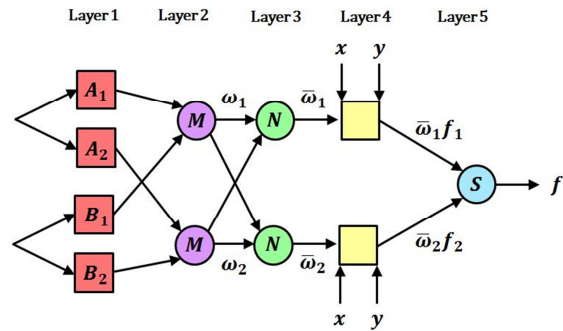
$$\text{Case 3: } J_3 = J_1 + J_2 + |J_1 - J_2| \quad (12)$$

که در توابع هدف تعریف شده،  $S_{\text{thin}}$  و  $S_{\text{thick}}$  به ترتیب درصد برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود، در بهینه‌سازی حالت سوم، ترم  $|J_1 - J_2|$  که کمینه شدن آن نشان دهنده یکنواختی ورق حین فرآیند شکل‌دهی خزشی می‌باشد، به تابع هدف اضافه شده است. هدف اصلی از تعریف تابع هدف سوم، کمینه سازی همزمان برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم و همچنین یکنواختی ورق می‌باشد. اگر تابع هدف سوم تنها شامل مؤلفه  $|J_1 - J_2|$  باشد در اینصورت ممکن است مقدار کمینه این تابع به ازای مقادیر بزرگی از برگشت فنری در نواحی نازک و ضخیم بدست آورده شود که این مطلوب نیست. در نتیجه نویسندگان با اضافه کردن توابع  $J_1$  و  $J_2$  بصورت همزمان کمینه سازی برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم و همچنین یکنواختی ورق در این نواحی را مورد توجه قرار می‌دهند. یکی از روش‌های بهینه سازی با وجود چند تابع هدف، حاصل جمع وزن‌دار تمامی توابع در قالب یک تابع هدف اصلی می‌باشد که در این مقاله از این روش استفاده شده است. لازم به ذکر است در اینجا به دلیل اهمیت برابر هر یک از مؤلفه‌های  $J_1$ ،  $J_2$  و  $|J_1 - J_2|$  ضریب وزنی برابر با یک برای هر یک از این مؤلفه‌ها در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است سیستم ANFIS و الگوریتم بهینه‌سازی بکارگرفته شده در مقاله حاضر، با کمک کدنویسی در نرم افزار MATLAB بکار گرفته شده‌اند.

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده

Sample	Time (hour)	Temperature (°C)	Spring-back of thin section (%)	Spring-back of thick section (%)
1	6	160	103.23	166.62
2	6	180	69.13	103.33
3	6	200	43.30	70.09
4	6	220	28.77	50.76
5	6	240	22.51	61.48
6	10	160	86.14	149.58
7	10	180	51.55	79.87
8	10	200	32.58	43.4
9	10	220	14.06	19.50
10	10	240	16.14	35.90
11	14	160	71.50	137.72

آن‌ها  $c_i$  و  $\sigma_i$  در لایه اول به عنوان پارامترهای مرتبط با توابع عضویت ورودی شناخته می‌شوند. در لایه چهارم نیز،  $r_i$ ،  $q_i$  و  $p_i$  پارامترهای تطبیقی هستند که با عنوان پارامترهای برآیند شناخته می‌شوند [۱۰].



شکل ۴- ساختار شبکه ANFIS

#### ۴- الگوریتم بهینه‌سازی ذرات

یکی از الگوریتم‌های نسبتاً جدید و کارآمد فراابتکاری، الگوریتم بهینه‌سازی ذرات است که بر پایه یک هوش جمعی عمل می‌کند. این نوع از هوش مصنوعی از تأثیر محلی و متقابل اعضای یک دسته یا گروه بر یکدیگر و همچنین بر محیط اطراف شکل می‌گیرد. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات که اولین بار توسط کندی<sup>۱</sup> و ابرهارت<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۵ ارائه شد، در حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته بسیار موفق عمل می‌کند [۱۱]. این الگوریتم ابتدا با گروهی از ذرات (به عنوان مثال گروهی از پرندگان یا ماهی‌ها) فرآیند حل مسئله را شروع می‌کند. هر یک از این ذرات با تعقیب دو مقدار "بهترین" در هر تکرار، موقعیت خود را به روز رسانی می‌کنند. یکی از این "بهترین" ها، بهترین راه حلی است که آن ذره تا آن لحظه کسب کرده است که آن را  $P_{\text{best}}$  می‌نامند. دومین "بهترین"، بهترین مقداری است که در فضای بهینه‌سازی و بین تمامی ذرات تا کنون پیدا شده است. به این علت که دومین مقدار بهترین بصورت عمومی شناخته می‌شود، به آن  $G_{\text{best}}$  می‌گویند. نحوه تغییر موقعیت و حرکت هر یک از ذره‌ها در دو جهت انجام می‌شود. یک حرکت به سمت بهترین موقعیتی می‌باشد که تا کنون ذره داشته است و حرکت دیگر به سوی بهترین جایگاهی است که بهترین ذره در همسایگی آن ذره دارد. در واقع هر یک از ذرات در فضای بهینه‌سازی به سوی یک میانگین وزنی از دو جهت گفته شده حرکت دارد. روابط اصلی و نحوه کارکرد الگوریتم بهینه‌سازی ذرات به تفصیل در مرجع [۱۱] آورده شده‌است.

در این مطالعه پس از مدل‌سازی رفتار فرآیند شکل‌دهی خزشی توسط سیستم ANFIS، به یافتن ورودی‌های بهینه سیستم (زمان و دمای فرآیند) به منظور دستیابی به کمترین میزان برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم پرداخته می‌شود. برای این منظور بسته به نوع تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، حالت‌های مختلفی در نظر گرفته شده

<sup>1</sup> Kennedy

<sup>2</sup> Eberhart

بایست بر اساس دانش خود، ترکیبی منطقی بین متغیرهای ورودی و خروجی سیستم فازی برقرار کند. یکی از مزیت‌های شبکه ANFIS عدم نیاز به چنین روندی برای تعیین توابع عضویت و قواعد اگر-آنگاه فازی می‌باشد.

**جدول ۲- قواعد اگر- آنگاه فازی برای مدل‌سازی درصد بازگشت فنری ناحیه نازک و ناحیه ضخیم**

	Number of Rules	Rule Description
Thin	Rule 1	If ( $t$ is $t$ MF1) and ( $T$ is $T$ MF1) then ( $S_{thin} = a_{1,1}.t + a_{1,2}.T + a_{1,3}$ )
	Rule 2	If ( $t$ is $t$ MF2) and ( $T$ is $T$ MF2) then ( $S_{thin} = a_{2,1}.t + a_{2,2}.T + a_{2,3}$ )
	Rule 3	If ( $t$ is $t$ MF3) and ( $T$ is $T$ MF3) then ( $S_{thin} = a_{3,1}.t + a_{3,2}.T + a_{3,3}$ )
	Rule 4	If ( $t$ is $t$ MF4) and ( $T$ is $T$ MF4) then ( $S_{thin} = a_{4,1}.t + a_{4,2}.T + a_{4,3}$ )
Thick	Rule 1	If ( $t$ is $t$ MF1) and ( $T$ is $T$ MF1) then ( $S_{thick} = b_{1,1}.t + b_{1,2}.T + b_{1,3}$ )
	Rule 2	If ( $t$ is $t$ MF2) and ( $T$ is $T$ MF2) then ( $S_{thick} = b_{2,1}.t + b_{2,2}.T + b_{2,3}$ )
	Rule 3	If ( $t$ is $t$ MF3) and ( $T$ is $T$ MF3) then ( $S_{thick} = b_{3,1}.t + b_{3,2}.T + b_{3,3}$ )
	Rule 4	If ( $t$ is $t$ MF4) and ( $T$ is $T$ MF4) then ( $S_{thick} = b_{4,1}.t + b_{4,2}.T + b_{4,3}$ )

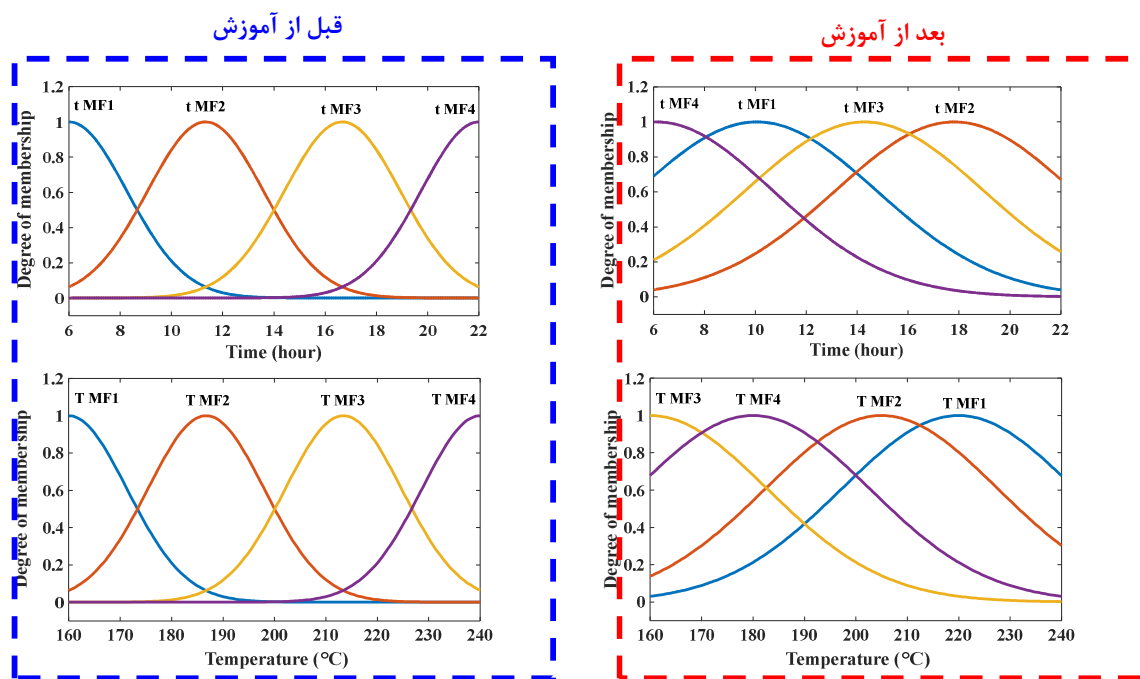
در نهایت از چند روش گرافیکی برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی استفاده شده‌است. شکل‌های ۵ و ۶، داده‌های واقعی و داده‌های تقریب زده شده توسط مدل ANFIS را بصورت همزمان نمایش می‌دهد. در این نمودارها، نشان‌های مثلثی شکل مربوط به داده‌های استفاده شده در بخش آموزش و نشان‌های دایره‌ای مربوط به داده‌های بخش تست شبکه هستند. همچنین میانی  $Y = T$  نیز مرجعی برای مشخص نمودن درستی مدل بدست آورده شده می‌باشد.

12	14	180	44.62	74.02
13	14	200	25.01	28.61
14	14	220	14.98	12.89
15	14	240	14.33	18.93
16	18	160	64.89	142.57
17	18	180	30.99	82.52
18	18	200	22.05	27.84
19	18	220	4.23	13.62
20	18	240	16.33	11.80
21	22	160	60.74	152.60
22	22	180	37.36	80.77
23	22	200	22.67	23.93
24	22	220	18.44	11.11
25	22	240	22.90	13.29

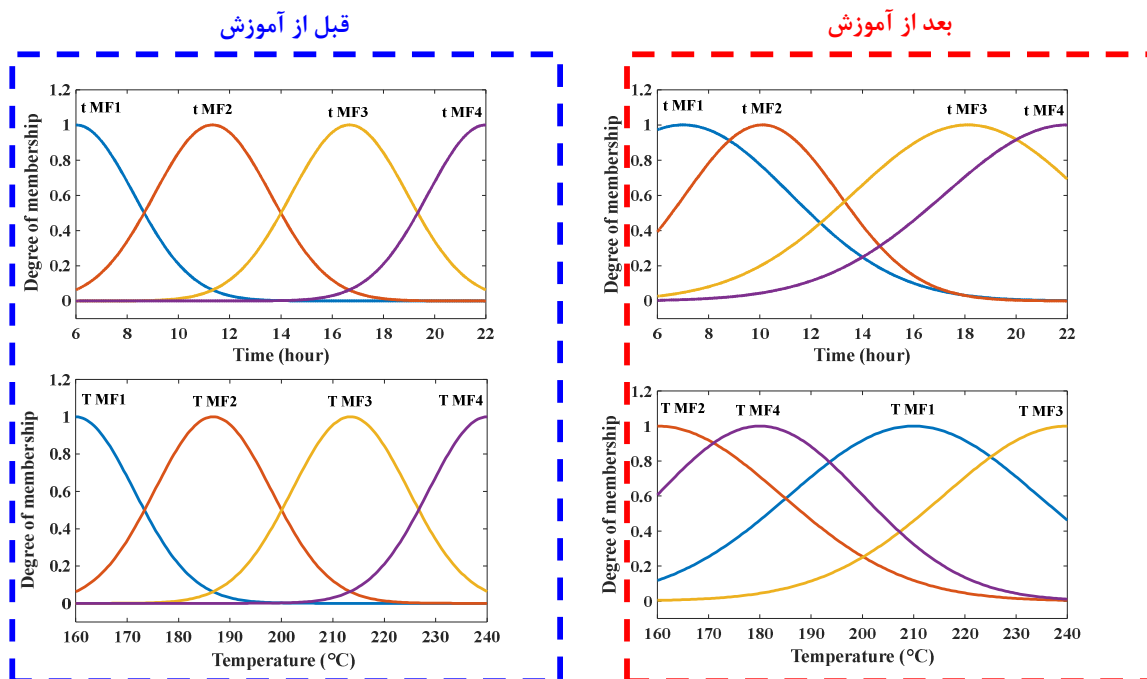
## ۵- نتایج و بحث

در این مطالعه از ۱۰۰ دوره<sup>۱</sup> برای آموزش شبکه بهره گرفته شده است. در مجموع تعداد ۲۵ داده آزمایشگاهی برای آزمایش و تست شبکه که شامل دو ورودی (زمان و دمای فرآیند شکل‌دهی خزشی) و دو خروجی (درصد برگشت فنری ناحیه نازک و ناحیه ضخیم)، وجود دارد. این مجموعه داده‌ها بصورت تصادفی به دو زیر مجموعه ۷۵ درصدی برای آموزش شبکه و ۲۵ درصدی برای تست شبکه تقسیم می‌شوند. متغیرهای ورودی با استفاده از توابع عضویت گوسی که با MF1-MF4 برای مدل‌سازی درصد برگشت فنری ناحیه با ضخامت کمتر و MF1-MF4 برای مدل‌سازی درصد برگشت فنری ناحیه با ضخامت بالاتر مشخص شده‌اند، فازی سازی می‌شوند. توابع عضویت گوسی مربوط به متغیرهای ورودی سیستم در حالت پیش فرض (قبل از آموزش) و پس از آموزش در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند. همچنین قواعد اگر آنگاه فازی میان متغیرهای ورودی و خروجی که پس از آموزش شبکه بدست می‌آیند نیز به منظور مدل‌سازی درصد برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم در جدول ۲ لیست شده‌اند.

قواعد تعریف شده در مقاله حاضر، بصورت پیش فرض و طبق روند از پیش تعیین شده‌ای است که در طراحی شبکه ANFIS لحاظ می‌شود [۱۰]. این قواعد شامل بخش مقدم و بخش تالی می‌باشند که در بخش مقدم هر یک از ورودی‌های شبکه به تابع عضویت متناظر با آن ورودی مرتبط شده و بخش تالی بصورت ترکیب خطی از متغیرهای ورودی تعریف می‌شوند. در اینجا تنها پارامترهای توابع عضویت ( $a_{1,1}, a_{1,2}, b_{1,1}, b_{1,2}, b_{1,3}, \dots$ ) هستند که در فرآیند آموزش شبکه بدست آورده می‌شوند (مقدار پارامترهای بدست آمده در این تحقیق در پیوست آورده شده است). در واقع در شبکه ANFIS نیاز به تحلیل فیزیکی در تعیین قواعد اگر-آنگاه فازی وجود ندارد. در حالیکه در سیستم‌های منطق فازی کلاسیک، فرد خبره حتماً می-



شکل ۵ - توابع عضویت قبل و بعد از آموزش برای مدل‌سازی بازگشت فنی ناحیه نازک

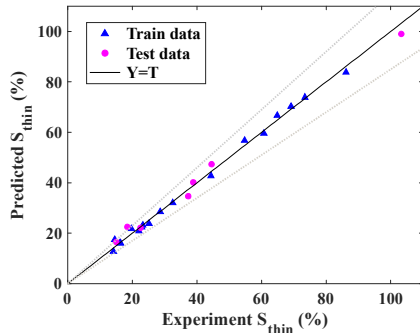


شکل ۶ - توابع عضویت قبل و بعد از آموزش برای مدل‌سازی بازگشت فنی ناحیه ضخیم

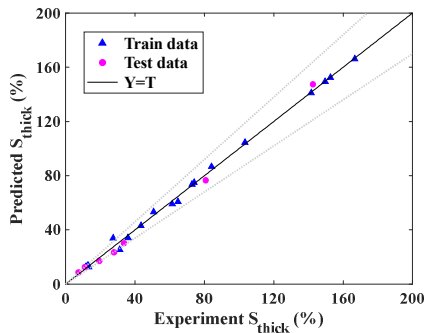
توانند معرف خطای مدل بدست آورده شده و به تبع آن دقت تخمین زده شده باشند.

معیارهای جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق بیان کننده اختلاف بین نتایج تخمین زده شده با نتایج واقعی (اندازه‌گیری شده) می‌باشند. هر چقدر این ضرایب به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده‌ی خطای کمتر (دقت بالاتر) مدل است. البته لازم به ذکر است که در معیار جذر میانگین مربعات خطا، به دلیل توان دوم موجود در رابطه، هر چقدر فاصله مقدار تخمین زده شده از مقدار واقعی بیشتر باشد، مقدار خطا افزایش بیشتری خواهد یافت.

ضریب همبستگی نشان دهنده‌ی همبستگی بین داده‌های حاصل از نتایج آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از پیش‌بینی شبکه ANFIS است. هر چه مقدار  $R$  به یک نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده‌ی نزدیکی بیشتر مقادیر برآورد شده به مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد. در نهایت معیار درصد میانگین خطای مطلق نمایش مناسبی از دقت مدل بدست آورده شده ارائه می‌دهد. در این معیار، مقدار خطای تخمین نسبت به مقدار واقعی بصورت درصد بیان می‌شود.



شکل ۷- داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه ANFIS برای مدل‌سازی برگشت فنری ناحیه نازک



شکل ۸- داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه ANFIS برای مدل‌سازی برگشت فنری ناحیه ضخیم

همانطور که مشاهده می‌شود، دقت شبکه ANFIS برای تخمین داده‌های بخش آموزش بسیار بالا می‌باشد (نشان‌های مثلثی بسیار نزدیک به خط میانی قرار گرفته‌اند). همچنین مشاهده می‌شود که مدل بدست آورده شده توانسته‌است با دقت بسیار بالایی داده‌های مربوط به بخش تست شبکه را نیز پیش‌بینی کند (نشان‌های دایره‌ای شکل نیز بسیار نزدیک به خط میانی هستند). اختلاف اندک مشاهده شده در اینجا می‌تواند به دلیل خطای موجود در نتایج آزمایشگاهی باشد. در ادامه، شکل‌های ۷ و ۸، مقادیر برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم ورق برای داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده در دو بخش آموزش و تست را نشان می‌دهند. در این نمودارها، خطوط با رنگ قرمز و بنفش به ترتیب مرتبط با داده‌های آزمایشگاهی مربوط به بخش آموزش و تست هستند. همچنین نشان‌های مثلثی و دایره‌ای شکل نیز به ترتیب مربوط به داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه ANFIS مرتبط با بخش آموزش و تست می‌باشند. همانطور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، شبکه ANFIS مطابق با داده‌های بخش آموزش می‌باشد (نشان-ها مثلثی مطابق با خطوط قرمز رنگ هستند). همچنین از بخش دوم نمودارها (بخش با رنگ بنفش) نیز مشخص می‌شود که شبکه بخوبی توانسته‌است، داده‌های مرتبط به بخش تست را نیز پیش‌بینی نماید.

در نهایت به منظور بررسی دقت مدل بدست آورده شده، از معیارهای آماری جذر میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup>، میانگین خطای مطلق<sup>۲</sup>، ضریب همبستگی<sup>۳</sup> و درصد میانگین خطای مطلق<sup>۴</sup> استفاده شده است. نحوه محاسبه این معیارها به ترتیب در روابط (۱۳-۱۶) ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (S_A - S_P)^2} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_A - S_P| \quad (14)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(S_A - \bar{S}_A)(S_P - \bar{S}_P)]}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (S_A - \bar{S}_A)^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n (S_P - \bar{S}_P)^2 \right]}} \quad (15)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{S_A - S_P}{S_A} \right| \quad (16)$$

که در این روابط،  $S_A$  مقدار برگشت فنری اندازه‌گیری شده برای نمونه  $i$ ام،  $S_P$  مقدار برگشت فنری تخمین زده شده توسط شبکه ANFIS برای نمونه  $i$ ام،  $\bar{S}_A$  میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و  $\bar{S}_P$  میانگین داده‌های تخمین زده شده هستند. برای بررسی دقت مدل، معیارهای آماری مذکور بصورت جداگانه برای بخش آموزش و تست به منظور مدل‌سازی مقادیر برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم ورق محاسبه و در جدول ۳ لیست شده‌اند. هر یک از این معیارها می-

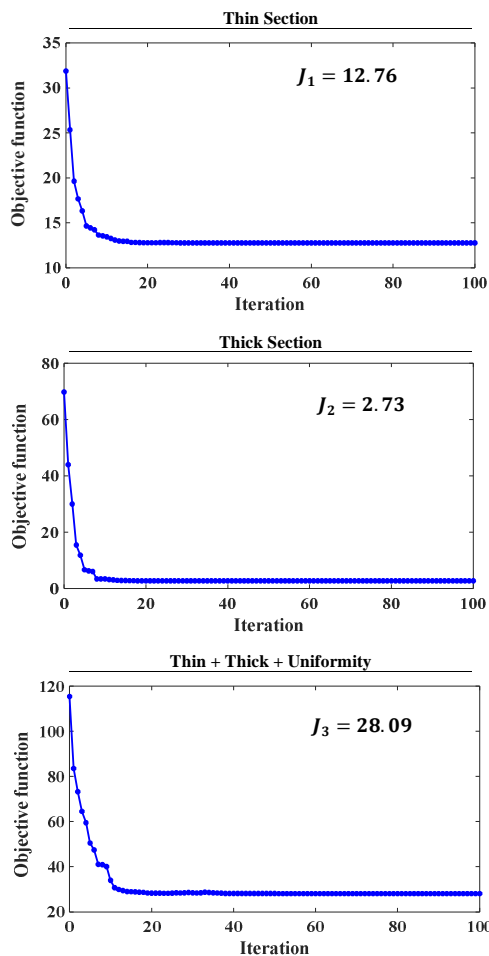
<sup>1</sup> Root mean square error (RMSE)

<sup>2</sup> Mean absolute error (MAE)

<sup>3</sup> Correlation factor (R)

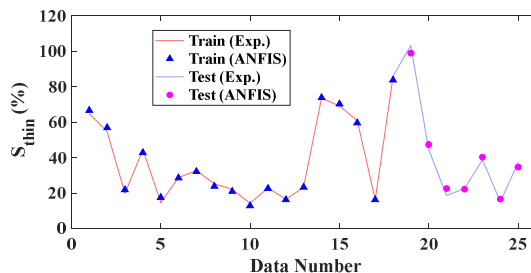
<sup>4</sup> Mean absolute percentage error (MAPE)

می‌باشند. در ادامه به معیارهای محاسبه شده در بخش تست شبکه که در جدول ۳ لیست شده‌اند، توجه می‌شود.

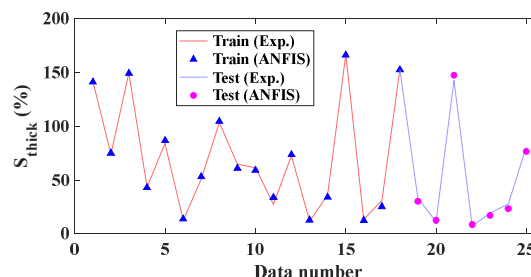


شکل ۱۱ - نحوه همگرایی توابع هدف در مراحل بهینه‌سازی

خطای  $RMSE$  و  $MAE$  برای داده‌های مربوط به بخش تست شبکه، مقادیر نسبتاً کوچکی می‌باشند. در ادامه با توجه به معیارهای  $R$  و  $MAPE$  مشخص می‌شود که مقادیر تخمین زده شده به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک می‌باشند. ضریب همبستگی برای بخش تست شبکه نیز بسیار نزدیک به یک هستند (حدود ۰/۹). همچنین درصد خطای  $MAPE$  نیز برای بخش تست شبکه کوچکتر از ۱۱ درصد هستند. در نتیجه می‌توان اینطور استنباط کرد که دقت مدل بدست آورده شده بسیار بالا می‌باشد. در اینجا مشاهده می‌شود که دقت مدل در تخمین مقدار برگشت فنری ناحیه نازک نسبت به ناحیه ضخیم بالاتر می‌باشد. نکته دیگر، خطای نسبتاً بیشتر شبکه (دقت نسبتاً کمتر شبکه) در بخش تست نسبت به بخش آموزش است. این موضوع کاملاً طبیعی می‌باشد زیرا که در بخش آموزش از تمامی داده‌های آموزش (۷۵ درصد کل داده‌ها) استفاده شده و مدل بگونه‌ای بدست آورده شده است که خروجی‌های شبکه کاملاً منطبق با داده‌های مورد استفاده باشند. در صورتیکه تست شبکه بر اساس داده‌های تست (۲۵ درصد مابقی داده) انجام شده و از این داده‌ها در بخش آموزش شبکه هیچ استفاده‌ای



شکل ۹- اختلاف داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده در دو بخش آزمایش و تست برای مدل‌سازی برگشت فنری ناحیه نازک



شکل ۱۰- اختلاف داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده در دو بخش آزمایش و تست برای مدل‌سازی برگشت فنری ناحیه ضخیم

جدول ۳- معیارهای  $RMSE$ ،  $MAE$ ،  $R$  و  $MAPE$  برای مدل-

سازی  $S_{thick}$  و  $S_{thin}$

		$RMSE$	$MAE$	$R$	$MAPE (%)$
$S_{thin}$	Train	1.412	1.141	0.998	4.020
	Test	2.775	2.428	0.992	7.785
$S_{thick}$	Train	2.584	1.839	0.997	5.222
	Test	3.401	3.112	0.990	10.830

از مقادیر لیست شده در جدول ۳ مشخص می‌شود که شبکه ANFIS در پیش‌بینی مقادیر برگشت فنری در فرآیند شکل‌دهی خنثی بسیار موفق عمل کرده‌است. ابتدا به بررسی نتایج مربوط به بخش آموزش پرداخته می‌شود. معیارهای  $RMSE$  و  $MAE$  برای بخش آموزش شبکه بسیار کوچک می‌باشند. البته این معیارهای به تنهایی برای ارزیابی مدل مناسب نیستند. در ادامه از معیارهای  $R$  و  $MAPE$  که مقدار خطا را نسبت به مقدار داده‌ها مشخص می‌کنند استفاده می‌شود. ضریب همبستگی  $R$  برای مدل‌سازی مقادیر برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم بسیار نزدیک به یک می‌باشند که این نشان دهنده دقت بسیار بالای مدل در بخش آموزش شبکه است. همچنین درصد خطای  $MAPE$  نیز در بخش آموزش برای نواحی نازک و ضخیم ورق به ترتیب برابر با ۴/۰۲۰ و ۵/۲۲ درصد می‌باشند. این موارد نشان دهنده دقت بالای مدل در بخش آموزش شبکه هستند. در واقع شبکه ANFIS بدست آورده شده بطور دقیق منطبق با داده‌های اندازه‌گیری شده است. اما دقت بالای مدل در بخش آموزش به تنهایی نشان دهنده دقت کلی مدل نیست. مدل حتماً می‌بایست با داده‌های کنارگذاشته شده در بخش تست (۲۵ درصد از داده‌ها) مورد ارزیابی قرار گیرد. در واقع از داده‌های بخش تست در آموزش شبکه هیچ استفاده‌ای نشده و این داده‌ها مختص به ارزیابی مدل بدست آورده شده



جدول ۴- ثوابت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

$N$	$n$	$w$	$c_0$	$c_1$	$c_2$
50	100	0.75	1	2	2

جدول ۵- مقادیر توابع هدف برای حالت‌های مختلف بهینه‌سازی

		Thin section	Thick section	Uniformity	Total
Objective function	Case 1: $J_1$	12.76	23.0551	10.2937	46.1101
	Case 2: $J_2$	18.31	2.73	15.58	36.62
	Case 3: $J_3$	14.04	14.04	0.00006	28.0895

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از شبکه ANFIS برای مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی خزشی بر اساس متغیرهای ورودی (زمان فرآیند  $t$ ، دمای فرآیند  $T$ ) و خروجی (مقدار برگشت فنری ناحیه نازک ورق  $S_{thin}$  و مقدار برگشت فنری ناحیه ضخیم ورق  $S_{thick}$ ) استفاده شده است. همچنین در ادامه از مدل بدست آمده جهت بهینه‌سازی متغیرهای ورودی جهت کمینه کردن مقدار برگشت فنری با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که شبکه ANFIS بدست آمده برای کاربرد حاضر بسیار کارآمد می‌باشد و به وسیله این سیستم می‌توان مقادیر برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم ورق را بر اساس تغییرات متغیرهای ورودی فرآیند شکل‌دهی خزشی پیش‌بینی نمود. ضریب همبستگی  $R$  برای مدل‌سازی مقدار برگشت فنری در بخش آموزش شبکه بسیار نزدیک به یک و همچنین در بخش تست شبکه در حدود ۰/۹۹ می‌باشد که این نشان دهنده‌ی تطابق بسیار خوب نتایج تخمین زده شده توسط شبکه با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. در مجموع میانگین خطای شبکه برای تخمین مقادیر برگشت فنری در بخش آموزش برابر با ۴/۶ درصد و در بخش تست برابر با ۹/۳ درصد می‌باشد. در ادامه در سه حالت مختلف، بهینه‌سازی فرآیند شکل‌دهی خزشی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مورد بحث قرار گرفته است. برای حالت ۱ که کمینه کردن برگشت فنری ناحیه نازک ورق مورد نظر بوده است، متغیرهای بهینه‌سازی یعنی زمان و دمای فرآیند به ترتیب از قرار  $T = 240^\circ C$  و  $t = 13.97$  hours بدست آمده است. با این متغیرها، مقدار برگشت فنری ناحیه نازک در حالت بهینه برابر با  $S_{thin} = 12.76\%$  شده است. برای حالت ۲ که کمینه کردن برگشت فنری ناحیه ضخیم مد نظر است، متغیرهای بهینه زمان و دمای فرآیند به ترتیب از قرار  $T = 217.5^\circ C$  و  $t = 18.58$  hours بدست آمده است. با این متغیرها، مقادیر برگشت فنری ناحیه ضخیم در حالت بهینه برابر با  $S_{thick} = 2.73\%$  شده است. در حالت ۳ که کمینه کردن مجموع برگشت فنری ناحیه نازک، برگشت فنری ناحیه ضخیم و یکنواختی ورق مد نظر می‌باشد، متغیرهای بهینه زمان و دمای فرآیند به ترتیب از قرار  $T = 237.25^\circ C$  و  $t = 15.94$  hours بدست آمده است. در این حالت مشاهده می‌شود مقادیر برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم برابر با یکدیگر  $S_{thin} = S_{thick} = 14.04\%$  هستند. در نتیجه برای حالت سوم علاوه بر کمینه کردن مقادیر برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم، یکنواختی ورق نیز از بین نرفته است.

نشده است. در نتیجه به دلیل وجود خطا در نتایج آزمایشگاهی، می‌توان این مقدار خطا را در تخمین انتظار داشت. در مجموع میانگین خطای شبکه برای تخمین مقادیر برگشت فنری در بخش آموزش برابر با ۴/۶ درصد و در بخش تست برابر با ۹/۳ درصد می‌باشد که این مقادیر در یک کار آزمایشگاهی، مقادیر کوچکی به حساب می‌آیند. این مقدار خطای کوچک به دلیل ماهیت تست‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

در ادامه نتایج مربوط به بهینه‌سازی فرآیند شکل‌دهی خزشی پرداخته می‌شود. همانطور که گفته شد، هدف کمینه کردن مقادیر برگشت فنری در نواحی نازک و ضخیم و همچنین یکنواختی ورق می‌باشد. از اینرو سناریوهای مختلفی برای مسئله بهینه‌سازی بر اساس توابع هدف تعریف شده در نظر گرفته شده که در بخش‌های قبل توضیح داده شد. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با توجه به مطالب بیان شده، در جدول ۴ لیست شده است. پس از انجام بهینه‌سازی برای حالت‌های مختلف، نمودار همگرایی توابع هدف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود برای حالت‌های بهینه‌سازی ۱، ۲ و ۳ با افزایش تکرارها، رفته رفته مقدار تابع هدف بهینه به مقدار نهایی همگرا شده است. در اینجا بطور تقریبی پس از ۱۰ تکرار نمودارها همگرا شده‌اند. در ادامه نتایج بهینه‌سازی در جدول ۵ لیست شده‌اند. در این جدول به منظور مقایسه نه تنها مقدار تابع هدف متناظر با هر یک از حالات سه گانه آورده شده است بلکه مقادیر توابع هدف دیگر نیز برای هر کدام ارائه شده است. برای حالت اول که کمینه کردن برگشت فنری ناحیه نازک ورق مورد نظر بوده است، متغیرهای بهینه‌سازی یعنی زمان و دمای فرآیند به ترتیب از قرار  $T = 240^\circ C$  و  $t = 13.97$  hours بدست آمده است. با این متغیرها، مقدار برگشت فنری ناحیه نازک در حالت بهینه برابر با  $S_{thin} = 12.76\%$  شده است که این مقدار نسبت به حالت‌های دیگر بهینه‌سازی، کمتر می‌باشد. برای حالت دوم که کمینه کردن برگشت فنری ناحیه ضخیم مد نظر است، متغیرهای بهینه زمان و دمای فرآیند به ترتیب از قرار  $T = 217.5^\circ C$  و  $t = 18.58$  hours بدست آمده است. با این متغیرها، مقادیر برگشت فنری ناحیه ضخیم در حالت بهینه برابر با  $S_{thick} = 2.73\%$  شده است که نسبت به حالت‌های دیگر بهینه‌سازی کمینه می‌باشد. همانطور که از مقادیر لیست شده در جدول ۵ مشاهده می‌شود، دیده می‌شود که یکنواختی ورق در حالت‌های بهینه‌سازی ۱ و ۲ بسیار ضعیف می‌باشد. این بدان معنا است که با بهینه‌سازی جداگانه هر یک از مقادیر برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم، یکنواختی فتر کاملاً از بین خواهد رفت. بدین منظور در حالت سوم بهینه‌سازی، ترم  $|J_1 - J_2|$  که معرف یکنواختی ورق می‌باشد به تابع هدف کل اضافه شده است. در حالت سوم که کمینه کردن مجموع برگشت فنری ناحیه نازک، برگشت فنری ناحیه ضخیم و یکنواختی ورق مد نظر می‌باشد، متغیرهای بهینه زمان و دمای فرآیند به ترتیب از قرار  $T = 237.25^\circ C$  و  $t = 15.94$  hours بدست آمده است. در این حالت مشاهده می‌شود که اگر چه مقادیر برگشت فنری نواحی نازک و ضخیم در کمترین حالت ممکن نمی‌باشد ولی این مقادیر برابر با یکدیگر  $S_{thin} = S_{thick} = 14.04\%$  هستند.

## ۶- پیوست

ماتریس‌های  $4 \times 3$   $a$  و  $3 \times 3$   $b$ : پارامترهای بخش تالی قواعد فازی برای مدل‌سازی درصد بازگشت فنری ناحیه نازک و ضخیم

$$a = \begin{bmatrix} -1.57 & -0.44 & 141.90 \\ 1.33 & 0.01 & -9.33 \\ -1.60 & -0.89 & 241.88 \\ -3.54 & -1.51 & 366.76 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} -3.63 & 0.84 & -116.63 \\ -3.96 & -0.82 & 362.00 \\ 0.18 & 0.49 & -110.33 \\ -0.92 & -3.68 & 766.15 \end{bmatrix}$$

## ۷- مراجع

- [1] Zhan L., Lin J. and Dean T., A Review of the Development of Creep Age Forming: Experimentation, Modelling and Applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.51(1), pp. 1-17, 2011.
- [2] Lyu F., Li Y., Huang X., Shi Z., Zeng Y. and Lin J., An Investigation of Creep Age Forming of Aa7b04 Stiffened Plates: Experiment and Fe Modelling. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.37, pp. 232-241, 2019.
- [3] Liu C., Liu Y., Li S., Ma L., Zhao X. and Wang Q., Effect of Creep Aging Forming on the Fatigue Crack Growth of an Aa2524 Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, Vol.725, pp. 375-381, 2018.
- [4] Li Y., Shi Z., Lin J., Yang Y.-L., Saillard P. and Said R., Effect of Machining-Induced Residual Stress on Springback of Creep Age Formed Aa2050 Plates with Asymmetric Creep-Ageing Behaviour. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.132, pp. 113-122, 2018.
- [5] Li Y., Shi Z., Rong Q., Zhou W. and Lin J., Effect of Pin Arrangement on Formed Shape with Sparse Multi-Point Flexible Tool for Creep Age Forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.140, pp. 48-61, 2019.
- [6] Yang Y., Zhan L., Shen R., Yin X., Li X., Li W., Huang M. and He D., Effect of Pre-Deformation on Creep Age Forming of 2219 Aluminum Alloy: Experimental and Constitutive Modelling. *Materials Science and Engineering: A*, Vol.683, pp. 227-235, 2017.
- [7] Khamneh M. E., Askari-Paykani M., Shahverdi H., Hadavi S. M. M. and Emami M., Optimization of Spring-Back in Creep Age Forming Process of 7075 Al-Alclad Alloy Using D-Optimal Design of Experiment Method. *Measurement*, Vol.88, pp. 278-286, 2016.
- [8] Hasheminejad S. M., Rabiee A. H. and Bahrami H., Active Closed-Loop Vortex-Induced Vibration Control of an Elastically Mounted Circular Cylinder at Low Reynolds Number Using Feedback Rotary Oscillations. *Acta Mechanica*, Vol.229(1), pp. 231-250, 2018.
- [9] Rabiee A. H., Regenerative Semi-Active Vortex-Induced Vibration Control of Elastic Circular Cylinder Considering the Effects of Capacitance Value and Control Parameters. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.32(12), pp. 5583-5595, 2018.
- [10] Jang J.-S., Anfis: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, Vol.23(3), pp. 66-72, 1993.
- [11] Kennedy J. and Eberhart R. (1995). Particle Swarm Optimization (Pso). *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia*.