



بهینه‌سازی پارامترهای فرایند جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی آلیاژ منیزیم AZ61

داود افشاری^{1*}، علی غفاری²، زهیر بارسوم³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

2- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

3- دانشیار، مهندسی خودرو، دانشگاه صنعتی سلطنتی سوئد، استکهلم

* زنجان، کدپستی 38791-45371 ، dafshari@znu.ac.ir

چکیده

هدف از این مطالعه بهینه‌سازی عملیات جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی آلیاژ منیزیم AZ61 جهت دستیابی به بیشینه اندازه دکه جوش و کاهش تنش‌های پسماند کششی در منطقه جوش می‌باشد. از آنجاییکه پایداری و استحکام یک سازه جوش کاری شده به شدت به ابعاد دکه جوش و تنش‌های پسماند ناحیه اتصال وابسته است؛ در این مطالعه با استفاده از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک پارامترهای ورودی عملیات جهت دستیابی به حداکثر اندازه دکه جوش و کمترین تنش‌های پسماند کششی در ناحیه اتصال بهینه‌سازی شده‌اند. در این مطالعه عملیات جوش نقطه‌ای مقاومتی به وسیله یک مدل المان محدود دوبعدی متقارن کوپل مکانیکی - الکتریکی - حرارتی شبیه‌سازی شده است. از مدل المان محدود به منظور پیش‌بینی ابعاد دکه جوش و میزان تنش‌های پسماند موجود در ناحیه اتصال استفاده شده است. به منظور اعتبار سنجی مدل، نتایج آن با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مقایسه شده و نتایج بدست آمده نشان داد که مدل المان محدود دارای قابلیت مطلوبی می‌باشد. مؤلفه‌های ورودی جهت بهینه‌سازی عبارتند از: شدت جریان الکتریکی، مدت زمان جوش کاری و نیروی الکتروود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک می‌توان برای بهینه‌سازی این فرایند جوش کاری استفاده نمود. همچنین حداکثر قطر دکه جوش 6/33 میلی‌متر و حداقل تنش پسماند کششی 228 مگاپاسکال با در نظر گرفتن شدت جریان 16 کیلو آمپر، زمان جوش کاری 16 سیکل و نیروی الکتروود 848 نیوتن به‌عنوان جواب بهینه بدست آمده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 خرداد 1397

پذیرش: 13 مرداد 1397

ارائه در سایت: آذر 1397

کلیدواژه‌ها:

جوش نقطه‌ای مقاومتی

بهینه‌سازی

تنش پسماند

دکه جوش

مدل المان محدود

Optimization of welding parameters in resistance spot welding of AZ61 Mg alloy

Davood Afshari^{1*}, Ali Ghaffari¹, Zuheir Barsoum²

1- Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2- Faculty of Vehicle Engineering, KTH, Stockholm, Sweden

* P.O.B. 38791-45371 Zanjan, Iran, dafshari@znu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 18 May 2018
Accepted 4 July 2018
Available Online December 2018

Keywords:

Resistance spot weld
Optimization
Residual stress
Nugget
Finite element

Abstract

The main purpose of this study is optimization of resistance spot welding of AZ61 Mg alloy to achieve maximum nugget size and minimum tensile residual stresses in welding area. Since the stability and strength of a welded structure is strongly dependent on the nugget size and the residual stresses, an integrated artificial neural networks and genetic algorithm is utilized to optimize the welding parameters. In this study, the resistance spot welding process is simulated by a 2D fully coupled structural-electrical-thermal finite element model. The finite element model is developed to predict of the nugget size and the residual stresses in the welding area. In order to validate the FE model, the results are compared with the obtained results from the experimental tests. The results show that the FE model has a good agreement with the experimental tests. The input parameters for optimization are: electrical current, welding time and electrode force. The results show that the integrated optimization algorithm is successful in determining the optimized welding parameters. Based on the optimization results, the maximum nugget size 6.33 mm and the minimum tensile residual stress 228 MPa are achievable by using 16kA, 16 Cycles and 848 N as current, welding time and electrode force respectively.

1- مقدمه

چگالی بالا دارد و به‌راحتی قابل بازیافت است. اگرچه جوش نقطه‌ای مقاومتی ورق‌های منیزیم نسبت به فولادها مشکل‌تر بوده و دارای پیچیدگی‌های فراوانی می‌باشد؛ جوش نقطه‌ای مقاومتی همچنان متداول‌ترین فرایند اتصال ورق‌های منیزیمی می‌باشد. فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی به علت داشتن نرخ

امروزه استفاده از آلیاژهای منیزیم به‌عنوان یکی از فلزات سبک در صنایع مختلف از قبیل هوافضا، هواپیمایی، خودرو دارای رشد چشمگیری می‌باشد. فلز منیزیم دارای چگالی 0/75 برابر چگالی آلومینیوم و 0/2 برابر چگالی فولاد است و نسبت استحکام به

Please cite this article using:

D. Afshari, A. Ghaffari, Z. Barsoum, Optimization of welding parameters in resistance spot welding of AZ61 Mg alloy, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 44-51, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ورق گالوانیزه، میرزایی و همکارانش پارامترهای جوش کاری را با استفاده از تحلیل واریانس⁴ و روش سطح پاسخ بهینه‌سازی کرده‌اند [5]. بی و همکارانش با استفاده از یک مدل رگرسیون متعامد غیرخطی چندگانه، فرایند جوش نقطه‌ای ورق‌های گالوانیزه را مدل سازی کرده و سپس به وسیله تحلیل واریانس بهینه‌سازی کردند [6]. همچنین به منظور بهینه‌سازی پارامترهای جوش کاری و افزایش استحکام مکانیکی اتصال، حمیدی نژاد و همکارانش از ترکیب یک مدل رگرسیون خطی با الگوریتم ژنتیک استفاده کرده اند [7].

بررسی مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد اگرچه پیش‌بینی ابعاد دکمه جوش و تنش‌های پسماند به وجود آمده در ناحیه جوش کاری و بهینه‌سازی پارامترهای جوش کاری در فولادها و آلیاژهای آلومینیوم بسیار مورد توجه قرار گرفته است؛ مطالعات چندانی در این زمینه در خصوص آلیاژهای منیزیم انجام نشده است. در این مطالعه ابتدا با استفاده از یک مدل المان محدود ابعاد دکمه جوش و توزیع تنش‌های پسماند در ناحیه اتصال در جوش نقطه‌ای مقاومتی آلیاژ منیزیم AZ61 پیش‌بینی شده است. در ادامه به وسیله دو شبکه عصبی مصنوعی اندازه دکمه جوش و بیشینه تنش‌های پسماند کششی در ناحیه اتصال بر حسب پارامترهای جوش کاری مدل شده اند. در پایان با استفاده از ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک پارامترهای بهینه فرایند جهت دستیابی به بیشینه ابعاد دکمه جوش و کمترین تنش پسماند کششی در ناحیه اتصال ارائه شده است.

2- روش آزمایش

در این مطالعه 9 دسته پارامتر جوش کاری جهت اتصال ورق‌های آلیاژ منیزیم AZ61 (جدول 1) با ابعاد $1.2 \times 25 \times 100$ میلی‌متر مطابق شکل 1 استفاده شده است. برای انجام فرایند جوش کاری از دستگاه نقطه‌جوش محصول شرکت نوین‌سازان با کنترلر CU08 و از الکتروود مسی تیپ A استفاده شده است. نتخاب پارامترهای مختلف جوش کاری جهت دستیابی به ابعاد مختلف دکمه جوش در نمونه‌ها می‌باشد. با استفاده از هر دسته پارامتر جوش کاری 3 نمونه آماده شده و قطر دکمه جوش برای تمامی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری اندازه گیری شده است. برای اندازه گیری تنش‌های پسماند در ناحیه اتصال دو نمونه انتخاب شده و تنش‌های پسماند در 6 نقطه (شکل 1) از هر

مناسب جوش کاری، کیفیت مناسب اتصالات و هزینه کم در صنعت به طور گسترده‌ای به ویژه در زمینه تولید وسایل نقلیه و وسایل الکترونیکی استفاده می‌شود [1].

در فرایند جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی، ابتدا در مرحله‌ای به نام فشرده سازی، به منظور ایجاد تماس خوب بین دو ورق یک بار استاتیک بر روی الکتروودها اعمال می‌شود. سپس با انتقال جریان الکتریکی، به دلیل وجود مقاومت الکتریکی در منطقه تماس سطح مابین ورق‌ها گرم می‌شود و ذوب در این منطقه رخ داده و دکمه جوش تشکیل می‌شود. سپس در مرحله نگهداری، جریان الکتریکی قطع می‌شود و الکتروودها که در تماس با آب هستند، اقدام به خنک کردن قطعه کار تحت بارگذاری مکانیکی می‌کنند. پس از آن، قطعه کار آزاد شده و در هوا خنک می‌شود. مانند سایر فرایندهای جوش کاری، وجود گرادیان حرارتی در منطقه اتصال منجر به ایجاد تنش‌های پسماند در ناحیه اتصال در این فرایند جوش کاری می‌شود.

مطالعات مختلف نشان داده که ابعاد دکمه جوش و تنش‌های پسماند در ناحیه اتصال، دو پارامتر مهم تعیین کننده رفتار مکانیکی اتصالات جوش نقطه‌ای هستند. بررسی پژوهش‌های پیشین بیانگر آن است که با افزایش ابعاد دکمه جوش استحکام مکانیکی در اتصال‌های جوش نقطه‌ای مقاومتی افزایش یافته است. همچنین وجود تنش پسماند کششی در اتصال‌های جوش کاری باعث کاهش عمر خستگی در این اتصال‌ها می‌شود. بنابراین دستیابی به پارامترهای بهینه جوش کاری جهت افزایش ابعاد دکمه جوش و کاهش تنش‌های پسماند کششی در ناحیه جوش دارای اهمیت بسیاری می‌باشد.

نوراسیاه و همکارانشان با استفاده از روش تاگوچی¹ و روش سطح پاسخ² به بررسی تاثیر پارامترهای جوش کاری در فرایند جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد کم کربن و بهینه‌سازی آن‌ها پرداختند [2]. ژاو و همکارانش به منظور بهبود کیفیت دکمه جوش و افزایش استحکام اتصال با استفاده از روش سطح پاسخ پارامترهای جوش کاری را در فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی در مقیاس کوچک³ بهینه‌سازی کرده‌اند [3]. همچنین در مطالعه‌ای به منظور مشخص نمودن زمان تعویض الکتروودهای جوش کاری در فرایند جوش نقطه‌ای، پارامترهای جوش کاری با استفاده ترکیبی از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است [4]. در مطالعه‌ای دیگر به منظور افزایش استحکام اتصال جوش

¹ Taguchi method

² Response surface methodology

³ Small scale resistance spot welding

⁴ Analysis of variance

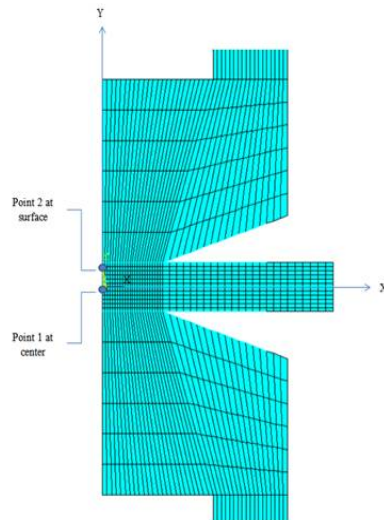


Fig. 2 The 2D Axi-symmetric finite element model

شکل 2 مدل المان محدود متقارن دو بعدی

3-2- شبکه عصبی

هر شبکه عصبی از یک لایه نرون ورودی به عنوان ورودی‌های سیستم، یک لایه نرون خارجی به عنوان خروجی‌های سیستم و یک یا چند لایه نرون میانی یا مخفی تشکیل شده است (شکل 3). تعداد نرون‌های لایه‌های اول و آخر شبکه عصبی به تعداد پارامترهای ورودی و خروجی سیستم وابسته است. اما تعداد لایه‌های میانی و تعداد نرونهای هر لایه میانی بستگی به نظر طراح و صحت خروجی‌های بدست آمده با پارامترهای خروجی واقعی سیستم دارد. تعداد لایه‌های میانی بطور معمول یک و یا در موارد خاص دو لایه می باشد و استفاده از تعداد لایه‌های بیش از دو لایه بندرت اتفاق افتاده و به هیچ عنوان توصیه نمی شود. استفاده از تعداد بیشتر لایه‌های میانی تنها زمان انجام محاسبات را افزایش می دهد.

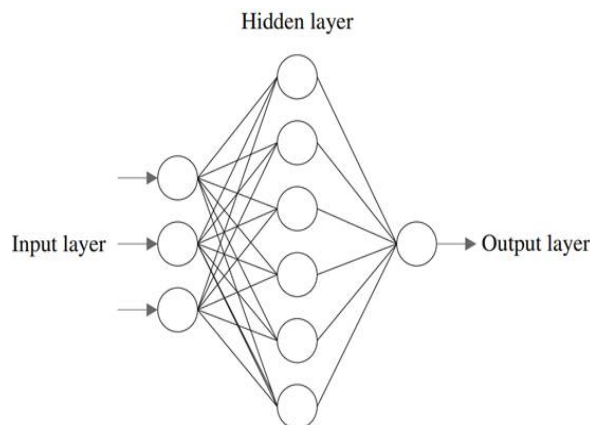


Fig. 3 The structure of an artificial neural network

شکل 3 ساختار یک شبکه عصبی مصنوعی

نمونه توسط روش پراش اشعه ایکس اندازه‌گیری شده است. از نتایج تجربی بدست آمده جهت اعتبار سنجی مدل المان محدود استفاده شده است.

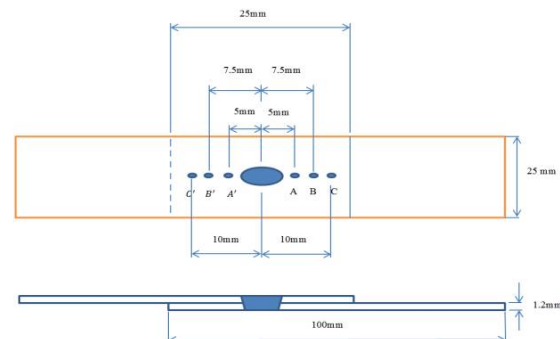


Fig. 1 The dimensions of welded joint and the location of residual stress measuring points

شکل 1 هندسه اتصال جوش و موقعیت نقاط هدف در اندازه‌گیری تنش پسماند

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ منیزیم AZ61

Table 1 Chemical compositions of AZ61 Mg alloy

Al (% wt)	Zn (% wt)	Mn (% wt)	Cu (% wt)	Si (% wt)	Fe (% wt)
6/37	0/67	0/21	0/04	0/08	0/004

3- روش تحقیق

3-1- مدل المان محدود

در این مطالعه از نرم‌افزار تجاری انسیس¹ 12.1 و محیط ای‌بی‌دی‌ال² برای شبیه‌سازی فرایند جوش نقطه‌ای آلیاژ منیزیم AZ61 استفاده شده است. برای شبیه‌سازی فرایند از یک مدل دوبعدی متقارن کوپل مکانیکی-الکتریکی-حرارتی استفاده شده است (شکل 2). با توجه به مدل متقارن در نظر گرفته شده تمامی روابط بکار گرفته شده بر اساس همین مدل متقارن دوبعدی می‌باشد. خواص ماده مورد مطالعه به‌صورت وابسته به دما تعریف شده است تا دقت مدل المان محدود بیشتر شود. همچنین برای رفتار مقاومت تماسی مواد از مدل ارائه شده توسط بابو [8] استفاده شده است. جهت پیش‌بینی توزیع دما و پیش‌بینی ابعاد دکمه جوش سیکل‌های پیش فشردن و جوش کاری شبیه‌سازی شده و ابعاد دکمه جوش بعد از مرحله جوش کاری اندازه‌گیری می‌شود. در ادامه سیکل مربوط به نگه داری و خنک کاری شبیه سازی شده و توزیع تنش‌های پسماند در نمونه‌های جوش کاری شبیه سازی شده است.

¹ ANSYS

² APDL

هدف از بهینه‌سازی پارامترهای جوش کاری دستیابی به بیشترین اندازه دکمه جوش که منجر به افزایش استحکام مکانیکی اتصال می‌شود در کنار کمترین تنش پسماند کششی ممکن در ناحیه اتصال می‌باشد. مقادیر ورودی جهت بهینه‌سازی از شبکه‌های عصبی مصنوعی استخراج شده‌اند. برای بهینه‌سازی باید یک تابع برازندگی تعریف شود و از آنجا که الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم کمینه ساز می‌باشد، ورودی‌ها باید به صورتی تعریف شوند که مقدار تابع برازندگی در کمینه حالت ممکن قرار گیرد. در این مطالعه جهت دستیابی به بیشترین اندازه دکمه جوش و کمینه تنش پسماند کششی در مرکز جوش از رابطه (4) بعنوان تابع برازندگی استفاده شده است.

$$\text{Min}M = \alpha R - \beta d \quad (4)$$

در این رابطه R بیشینه تنش پسماند کششی و d قطر دکمه جوش می‌باشد. ضریب α و β نیز ضرایب وزنی می‌باشند. دلیل علامت منفی برای ضریب β در تابع برازندگی، کاهش تابع با افزایش قطر دکمه جوش می‌باشد. تعیین ضرایب α و β بستگی به اهمیت هر کدام از فاکتورهای تنش پسماند کششی و قطر دکمه جوش دارد اما شرط زیر باید رعایت شود:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (5)$$

از آنجا که در این مطالعه تأثیر هر دو فاکتور تنش پسماند کششی و اندازه دکمه جوش یکسان در نظر گرفته شده است، رابطه بهینه‌سازی (6) بعنوان تابع برازندگی در الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

$$\text{Min}M = \frac{1}{2}R - \frac{1}{2}d \quad (6)$$

4- نتایج

4-1- اعتبار سنجی مدل المان محدود

برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از مدل المان محدود ارائه شده، اعتبارسنجی به وسیله نتایج حاصل از فعالیت‌های آزمایشگاهی در دو سطح مختلف صورت گرفته است. در مرحله اول از خروجی مدل المان محدود حاصل از آنالیز حرارتی-الکتریکی تا پایان سیکل جوش کاری استفاده شده است (شکل 4). به این ترتیب که نتایج مربوط به اندازه‌گیری هندسه دکمه جوش با نتایج اندازه‌گیری هندسه دکمه جوش به دست آمده از آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است. برای انجام این صحت‌سنجی از مقایسه نتایج 9 نمونه استفاده شده است و در جدول 2، درصد خطای نمونه‌های تجربی با خروجی‌های مدل المان محدود مقایسه شده است. خطای محاسبه شده به صورت

در این مطالعه از دو مدل مجزا شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی اندازه دکمه جوش و بیشینه تنش پسماند کششی در ناحیه جوش کاری در فرایند جوش نقطه‌ای مقاوم‌تی استفاده شده است. جهت ایجاد شبکه عصبی، نرم‌افزار متلب مورد استفاده قرار گرفته است. هر دو شبکه عصبی استفاده شده از نوع شبکه‌های پیش‌خور با الگوریتم پس انتشار خطا می‌باشند. برای آموزش هر دو شبکه از الگوریتم آموزشی لورنبرگ-مارکواد¹ با نرخ آموزش ثابت و برابر با 0/01 استفاده شده است. جهت تعیین کارایی شبکه عصبی نیز از تابع MSE (رابطه 1) استفاده شده است.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

که در این رابطه y مقدار واقعی و \hat{y} مقدار برآورد شده می‌باشد. به منظور تعیین ساختار شبکه و تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نرون‌ها در لایه‌های مخفی از روش سعی و خطا استفاده شده است. بدین ترتیب با سه ورودی پارامترهای جوش کاری: شدت جریان الکتریکی، مدت‌زمان جوش کاری، نیروی الکترودها و یک پارامتر خروجی برای هر مدل: اندازه دکمه جوش و بیشترین تنش پسماند کششی، ساختار شبکه عصبی مورد استفاده به وجود آمد. لازم به ذکر است به دلیل اینکه مقادیر نوسان پارامترهای ورودی مختلف بوده و دارای اختلاف زیادی نسبت به هم است جهت افزایش دقت و سرعت در آموزش شبکه عصبی مقادیر پارامترها در بازه بین 1 تا 2 نرمالیزه شده‌اند.

$$Pn = \frac{P - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} + 1 \quad (2)$$

در این رابطه Pn ورودی نرمالیزه شده، P_{\min} کمترین مقدار ورودی و P_{\max} بیشترین مقدار ورودی برای هر پارامتر می‌باشد. همچنین از رابطه (3) برای دی‌نرمالیزه کردن خروجی‌ها استفاده شده است.

$$P = \frac{Pn - 1}{P_{\max} - P_{\min}} + P_{\min} \quad (3)$$

3-3- الگوریتم ژنتیک

در این مطالعه از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس گردیده است. در الگوریتم ژنتیک، مجموعه‌ای از متغیرهای طراحی را توسط رشته‌هایی با طول ثابت یا متغیر کدگذاری می‌کنند که در سیستم‌های بیولوژیکی آن‌ها را کروموزوم یا فرد² می‌نامند [9].

¹ Levenberg-Marquardt
² Individual

پسماند ایجاد شده در مدل المان محدود با هم مقایسه شده‌اند. اندازه‌گیری تنش پسماند در نمونه‌های تجربی بر روی دو نمونه انجام شده است و نتایج آن در جدول 3 آورده شده است و با نتایج مدل المان محدود مقایسه شده است.

با بررسی خطای موجود بین نتایج تست تجربی و نتایج حاصل از مدل المان محدود مشخص شده که مدل المان محدود ارائه شده بخوبی توانایی پیش‌بینی تنش‌های پسماند ایجاد شده در ناحیه جوش کاری را دارا می‌باشد.

پس از انجام اعتبار سنجی و اطمینان از قابلیت پیش‌بینی ابعاد دکمه جوش و تنش پسماند ایجاد شده در ناحیه جوش کاری، با در نظر گرفتن 4 سطح برای شدت جریان الکتریکی (10، 12، 14 و 16 کیلوآمپر)، 4 سطح برای زمان جوش کاری (10، 12، 14 و 16 سیکل) و 3 سطح برای نیروی الکترو (848، 990 و 1130 نیوتن)، در مجموع 48 دسته پارامتر جوش کاری به منظور بررسی ابعاد دکمه جوش و تنش‌های پسماند در مدل المان محدود مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بدست آمده برای پیش‌بینی ابعاد دکمه جوش با محدوده ابعاد دکمه جوش توصیه شده $(3\sqrt{t}$ تا $6\sqrt{t}$) [10] مقایسه شدند و مشخص شد که از این تعداد 34 دسته پارامتر جوش کاری در محدوده قابل قبول قرار گرفته‌اند. این نتایج به عنوان ورودی‌های شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفت.

4-2- نتایج شبکه عصبی

آموزش شبکه عصبی برای پیش‌بینی اندازه دکمه جوش با استفاده از نتایج ابعاد دکمه جوش 30 دسته پارامتر جوش کاری و نتایج خروجی از مدل المان محدود با موفقیت انجام شد. جهت آزمایش و اعتبار سنجی شبکه عصبی، از 4 آزمایشی که در آموزش شبکه عصبی استفاده نشده بود استفاده گردید و مشخص شد نتایج تطابق بسیار خوبی با نتایج مدل المان محدود دارد.

جدول 3 مقایسه نتایج تنش‌های پسماند به‌دست‌آمده از تست‌های تجربی و مدل المان محدود در نقاط نمایش داده شده در شکل 1

Table 3 The comparison between the residual stresses obtained from the finite element model and the experimental test for the points

Sample	Experimental (MPa)			FE model (MPa)			Errors (%)			Average
	Point A&A	Point B&B	Point C&C	Point A&A	Point B&B	Point C&C	Point A&A	Point B&B	Point C&C	
1	126	41	14	114	38	14	9/4	6/4	1/4	5/7
2	110	46	15	98	42	14	11	9/6	5	8/4

illustrated in Fig. 1

میانگین 3 درصد است که نشان می‌دهد، آنالیز حرارتی-مکانیکی مدل المان محدود دارای دقت مطلوبی است و برای پیش‌بینی هندسه دکمه جوش در این مطالعه مناسب می‌باشد.

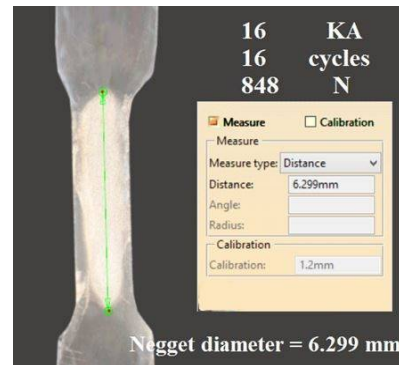


Fig. 4 The shape of the nugget in experimental test and FEM

شکل 4 تصویر دکمه جوش در تست تجربی و مدل المان محدود

جدول 2 مقایسه اندازه دکمه جوش حاصل از مدل المان محدود با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی

Table 2 The comparison between the nugget sizes obtained from the finite element model and the experimental tests

Sample	Nugget Diameter (mm)		% Error
	Exp	FEM	
1	3/65	3/74	2/47
2	5/96	5/90	-1/03
3	6/29	6/33	0/55
4	4/85	4/78	-1/38
5	5/13	5/07	-1/15
6	3/31	3/61	8/34
7	3/45	3/74	7/69
8	6/00	5/91	-1/51
9	6/15	6/34	2/94
Absolute Average %			≈3

در مرحله دوم از صحت سنجی، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش‌های پسماند نمونه‌های جوش کاری شده و نتایج تنش‌های

در این شکل مشخص است، الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده از ترکیب 2 شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک بوجود آمده است. 3 پارامتر جوش کاری: شدت جریان الکتریکی، زمان جوش کاری و نیروی الکتروود پس از نرمالیزه شدن وارد شبکه‌های عصبی شده و ابعاد دکمه جوش و بیشترین تنش پسماند کششی ناحیه اتصال توسط شبکه‌های عصبی پیش‌بینی می‌شود.

نتایج بدست آمده از شبکه‌های عصبی وارد الگوریتم ژنتیک شده و با استفاده از تابع برازندگی (رابطه 4)، پارامترهای جوش کاری بهینه جهت دستیابی به بیشترین قطر دکمه جوش و کمترین تنش پسماند کششی در فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی آلیاژ منیزیم AZ61 بدست می‌آید. شکل 10 بهترین پاسخ در هر نسل در مقایسه با مقدار میانگین را نشان می‌دهد؛ و شکل 11 نیز فاصله میانگین بین رشته‌های ژنتیک را ارائه می‌کند. مقادیر پارامترهای جوش کاری برای انجام بهینه جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی مدنظر در این مطالعه به صورت نرمالیزه شده در شکل 12 ارائه شده است.

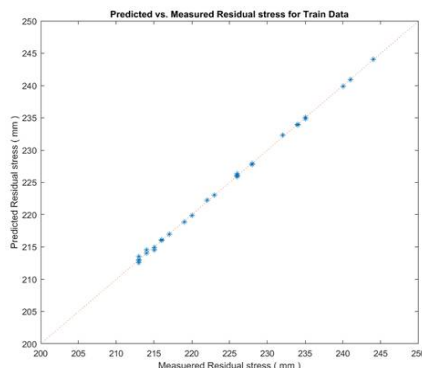


Fig. 7 The training results of the ANN for the tensile residual stress
شکل 7 نتایج حاصل از آموزش شبکه عصبی برای تنش پسماند کششی

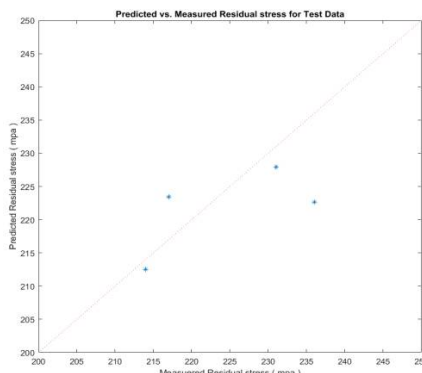


Fig. 8 The test results of the ANN for the tensile residual stress
شکل 8 نتایج حاصل از تست شبکه عصبی برای تنش پسماند کششی

نتایج آموزش و آزمایش شبکه عصبی در شکل‌های 5 و 6 ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که شبکه عصبی ارائه شده با دقت کمتر از 5 درصد قادر به پیش‌بینی اندازه دکمه جوش می‌باشد.

برای پیش‌بینی بیشینه تنش پسماند کششی در ناحیه جوش از یک شبکه عصبی مجزا استفاده شده است. آموزش شبکه عصبی جدید برای پیش‌بینی بیشینه تنش پسماند کششی نیز با استفاده از نتایج 30 دسته پارامتر خروجی از مدل المان محدود با موفقیت انجام شد. جهت آزمایش و اعتبار سنجی شبکه عصبی، از 4 آزمایشی که در آموزش شبکه عصبی استفاده نشده بود استفاده گردید و مشخص شد نتایج تطابق بسیار خوبی با نتایج مدل المان محدود دارد (کمتر از 3 درصد خطا). نتایج آموزش و آزمایش شبکه عصبی در شکل‌های 7 و 8 ارائه گردیده است.

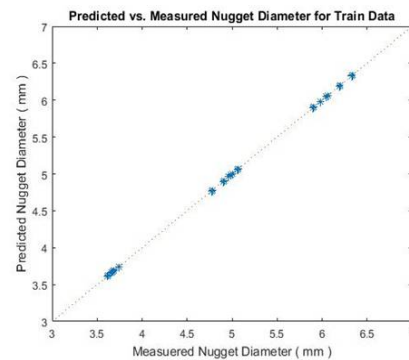


Fig. 5 The training results of the ANN for the nugget size
شکل 5 نتایج حاصل از آموزش شبکه عصبی برای دکمه جوش

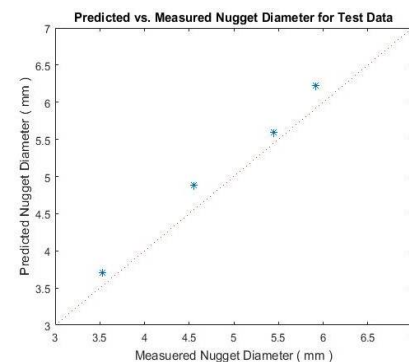


Fig. 6 The test results of the ANN for the nugget size
شکل 6 نتایج حاصل از تست شبکه عصبی برای دکمه جوش

3-4- نتایج الگوریتم ژنتیک

شکل 9 فلوجارت مورد استفاده در این مطالعه جهت بهینه‌سازی فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که

امکان دسترسی به بزرگ‌ترین اندازه دکمه جوش در کنار ایجاد کمترین تنش پسماند کششی در ناحیه جوش را میسر می‌کند.

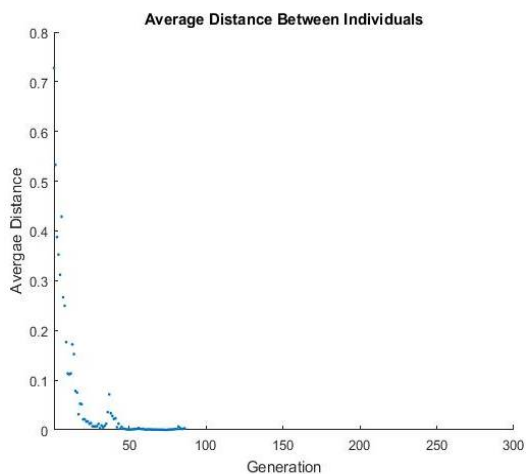


Fig. 11 The average distance in each generation
 شکل 11 میانگین فاصله مابین افراد در هر نسل

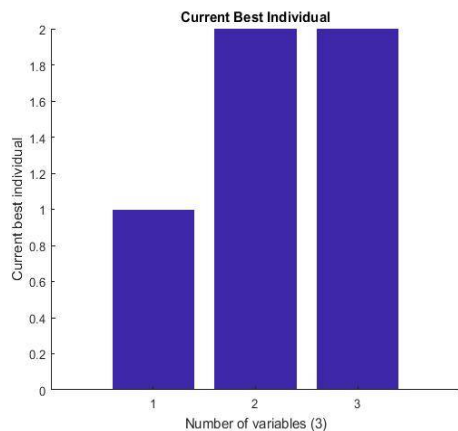


Fig. 12 The normalized welding parameters obtained from the optimization algorithm
 شکل 12 مقادیر نرمالیز شده پارامترهای جوش کاری حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی

جدول 4 مقادیر بهینه پارامترهای جوش کاری

Table 4 The optimized welding parameters

Welding Current (kA)	Welding Time (Cycles)	Electrode Force (N)	Residual stress (MPa)	Nugget Size (mm)
16	16	848	228	6/33

5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه پارامترهای جوش کاری شدت جریان الکتریکی، مدت زمان جوش کاری و نیروی الکتروودها به منظور دستیابی به بزرگترین ابعاد دکمه جوش در کنار داشتن پایین‌ترین مقادیر

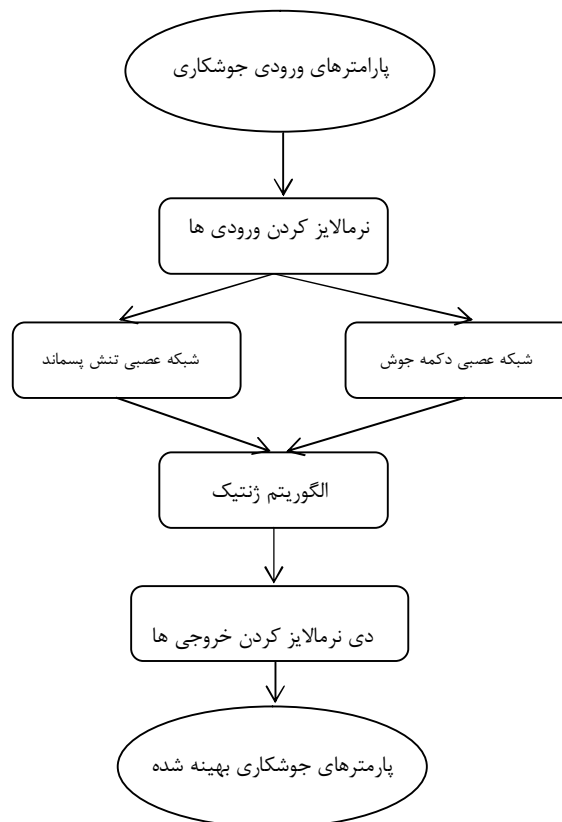


Fig. 9 The flowchart of the optimization algorithm
 شکل 9 فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی

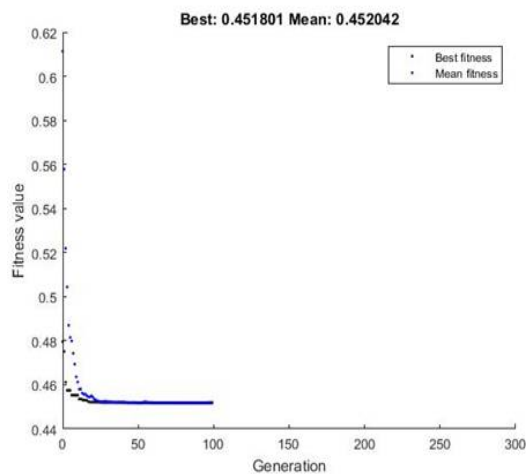


Fig. 10 The best fitness value in each generation
 شکل 10 مقادیر بهترین پاسخ در هر نسل

پس از بررسی نتایج و دی نرمالیزه کردن مقادیر خروجی، مقادیر اصلی پارامترها مشخص می‌شود. نتایج حاصل در جدول 4 ارائه شده است. نتایج به دست آمده برای پارامترهای جوش کاری مقادیر بهینه‌ای بوده و جوش کاری با این پارامترها

- [3] D. Zhao, Y. Wang, S. Sheng, Z. Ling, Multi-objective optimal design of small scale resistance spot welding process with principal component analysis and response surface methodology, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 25, pp. 1335-1348, 2014.
- [4] H. Pashazadeh, Y. Gheisari, M. Hamedi, Statistical modeling and optimization of resistance spot welding process parameters using neural networks and multi-objective genetic algorithm, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 27, pp. 549-559., 2016.
- [5] F. Mirzaei, H. Ghorbani, F. Kolahan1, Numerical modeling and optimization of joint strength in resistance spot welding of galvanized steel sheets, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 92, pp. 3489-3501, 2017.
- [6] L. Yi, L. Jinhe, X. Huibin, X. Chengzhi, L. Lin, Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet, *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 2547-2555, 2009.
- [7] S. M. Hamidinejad, F. Kolahan, A. H. Kokabi, The modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheets used in car body manufacturing, *Materials and Design*, Vol. 34, pp. 759-767, 2012.
- [8] S. S. Babu, M. L. Santella, Z. Feng, B. W. Riemer, J. W. Cohran, Empirical Model of Effects of Pressure and Temperature on Electrical Contact Resistance of Metals, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 6, pp. 126-132, 2001.
- [9] M. Sedighi, D. Afshari, Creep feed grinding optimization by an integrated GA-NN system, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 21, pp. 657-663, 2010.
- [10] *Weld button criteria, recommended practice for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel metal*, ANSI/AWS/SAE: USA, 1997.
- تنش پسماند کششی در فرایند جوش نقطه‌ای مقاوم‌تی آلیاژ منیزیم AZ61 بهینه‌سازی شده‌اند. برای پیش‌بینی ابعاد دکمه جوش و بیشینه تنش پسماند کششی در ناحیه اتصال از دو شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. جهت استخراج داده‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی از یک مدل المان محدود استفاده شده است. جهت افزایش دقت شبکه‌های عصبی پارامترهای ورودی به شبکه نرمالیزه شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه شده دارای دقت بالایی در پیش‌بینی ابعاد دکمه جوش و تنش پسماند کششی در ناحیه اتصال می‌باشند. در پایان با ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک پارامترهای جوش کاری بهینه‌سازی شده استخراج شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد از مدل بهینه‌سازی ترکیبی ارائه شده می‌توان بخوبی برای بهینه‌سازی این فرایند استفاده کرد. همچنین حداکثر قطر دکمه جوش 6/33 میلی‌متر و حداقل تنش پسماند کششی 228 مگاپاسکال با در نظر گرفتن شدت جریان 16 کیلو آمپر، زمان جوش کاری 16 سیکل و نیروی الکتروود 848 نیوتن بعنوان جواب بهینه بدست آمده است.

6- مراجع

- [1] S. Hassanifard, M. Zehsaz, The effects of residual stresses on the fatigue life of 5083-O aluminum alloy spot welded joints, *Procedia Engineering*, Vol. 2, pp. 1077-1085, 2010.
- [2] M. Norasiah, H. P. Yupiter, J. Roseleena, S. Kiyai, G. Tham, E. Haruman, Model development for quality features of resistance spot welding using multi-objective Taguchi method and response surface methodology, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 24, pp. 1175-1183, 2013.