نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال هفتم، شماره1، بهار و تابستان 1400، صفحه 117-107

مدل‌سازی و پیش‌بینی استحکام شکست قطعات جوشکاری شده با روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به‌وسیله الگوریتم بهینه‌سازی سیستم عصبی- فازی تطبیقی

مهدی صفری*، امیرحسین ربیعی، جلال جودکی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک.

(دریافت مقاله: 1400/05/10؛ پذیرش مقاله: 1400/06/20)

چکیده

روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای یکی از روش‌های موثر برای اتصال ورق‌های فلزی می‌باشد. تخمین نیروی شکست در قطعات جوشکاری شده از اهمیت بالایی برخوردار بوده و از روش‌های مختلفی برای یافتن نیروی شکست استفاده می‌شود. در این مقاله از یک سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (انفیس) برای تخمین و پیش بینی میزان استحکام قطعات جوشکاری شده استفاده می‌شود. برای این منظور با انجام یک طراحی آزمایش برای پارامترهای موثر فرایند شامل شدت جریان جوشکاری، زمان اعمال جریان، زمان خنک شدن و نیروی مکانیکی، نمونه‌های جوشکاری تهیه شد. ورق مورد استفاده در نمونه‌ها فولاد کربنی AISI 1060 می‌باشد. پس از انجام آزمون کشش استحکام نمونه‌ها بدست آمده و سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی آموزش و یادگیری در سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی پارامترهای بهینه مدل توسعه داده شده بدست آمد. 70 درصد داده‌های مربوط به استحکام نمونه‌ها برای آموزش سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی و 30 درصد باقیمانده برای بررسی صحت مدل ایجاد شده (بخش تست) مورد استفاده قرارگرفته است. دقت مدل بدست آمده با استفاده از نمودارهای مختلف و همچنین براساس معیارهای آماری جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق، ضریب تعیین و درصد میانگین خطای مطلق بررسی شده است. از نتایج بدست آمده مشخص می‌شود که شبکه انفیس در پیش‌بینی استحکام شکست قطعات جوشکاری شده توسط فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بسیار موفق عمل کرده‌است. در پایان مشاهده می‌شود که ضریب تعیین و درصد میانگین خطای مطلق برای تخمین استحکام شکست در بخش آموزش به ترتیب برابر با 0/99 و 0/48 درصد و در بخش تست برابر با 0/95 و 6/2 درصد می‌باشند.

کلمات کلیدی: جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، استحکام اتصال، شبکه سیستم عصبی- فازی تطبیقی، انفیس، الگوریتم آموزش و یادگیری.

Prediction of Weld Strength in Resistance Spot Welded Samples by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

M. Safari*, A. H. Rabiee, J. Joudaki

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak 38181-41167, Iran.

(Received 1 August 2021 ; Accepted 11 September 2021)

Abstract

Resistance Spot Welding (RSW) is one of the effective manufacturing processes used widely for joining sheet metals. Prediction of weld strength of welded samples has great importance in manufacturing and different methods are used by researchers to find the fracture force. In this article, the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) is utilized for prediction of joint strength in welded samples by RSW. A Design Of Experiments (DOE) is prepared according to effective process parameters includes welding current, welding cycle, cooling cycle and electrode force. The sheet

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m.safari@arakut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-09]

metal samples prepared from AISI 1060 carbon steel. Tensile test specimens are prepared and the tensile-shear strength of welded samples are measured. A model is developed according to ANFIS and trained according to teaching-learning based optimization algorithm. 70 % of test data used for network train and the remained 30 % used for access the accuracy of trained network. The accuracy of the trained network was assessed and the results show that the trained network can predict the joint strength with high accuracy. The determination factor (R^2) and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) are 0.99 and 0.48 % for trained data and 0.95 and 6.2% for test data.

Keywords: Resistance Spot Welding, RSW, Joint Strength, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS, Teaching-Learning Based Optimization.

1- مقدمه

روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای یکی از روش‌های مهم جوشکاری ورق‌های فلزی در صنعت می‌باشد که بوسیله دستگاه‌های خاص انجام می‌پذیرد و مکانیزم جوشکاری در این روش با بقیه روش‌های جوشکاری تفاوت مهمی دارد. در این روش دو ورق فلزی در بین دو الکترود قرار گرفته و یک نیروی مکانیکی به ورق‌ها وارد می‌شود با اعمال جریان الکتریکی بین دو الکترود، گرمای لازم جهت اتصال ورق‌ها ایجاد می‌گردد. این گرما ناشی از مقاومت الکتریکی در مقابل عبور جریان الکتریکی در محل بین دو ورق می‌باشد. از روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در صنایع مختلف از جمله خودروسازی [1] و کشتی سازی [2] استفاده می‌شود. با توجه به توسعه فولادهای مورد استفاده در صنعت خودروسازی، اهمیت جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای روز به روز افزون می‌گردد [3]. در برخی از خودروها، تعداد نقطه جوش‌ها تا عدد پنج‌هزار نقطه جوش گزارش شده است.

مطالعات فراوانی توسط محققین مختلف جهت بررسی جنبه‌های مختلف فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای انجام شده است. این مطالعات از دو جنبه برای نویسندگان در این مقاله اهمیت دارند:

تعیین پارامترهای موثر بر استحکام قطعات جوشکاری شده و توسعه مدل‌های تخمین استحکام جوش.

پورانوری و همکاران [1] به بررسی تاثیر اندازه قطر دکمه جوش بر مود شکست قطعات فولادی مورد استفاده در صنایع خودروسازی (فولادهای IF) پرداختند و تاثیر اعمال بار اضافه‌تر بر استحکام را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اعمال بار بیشتر منجر به تغییر مود شکست از حالت خارج شدن دکمه جوش به حالت جدایش بین ورق‌ها می‌شود. اندازه دکمه جوش تاثیر بسزایی در استحکام قطعات جوشکاری شده دارد. فدائی و خباز اقدم [4] به مطالعه اثرات تغییر پارامترهای مختلف جوش نقطه‌ای مقاومتی بر اندازه و شکل دکمه جوش در ورق‌های نازک از جنس فولاد AISI 1008 پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که شدت جریان الکتریکی مهمترین عامل تاثیرگذار بر نحوه تشکیل دکمه جوش است. همچنین افزایش قطر الکترود یا ضخامت ورق باعث افزایش ناحیه متاثر از گرما می‌شود، لذا مدت زمان و یا شدت جریان بیشتری برای جوشکاری لازم خواهد بود. صفری و جودکی[5] به بررسی جوشکاری ورق‌های IF بسیار نازک (0/67 mm ضخامت) بوسیله جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای پرداخته‌اند. نتایج ریزساختاری نشان داده است که با افزایش جریان جوشکاری اندازه دانه در منطقه ذوب افزایش می‌یابد و در منطقه متاثر از حرارت تبلور مجدد اتفاق افتاده و دانه‌های هم مرکز ایجاد می‌شود. بهترین استحکام در جریان 80 آمپر رخ می‌دهد و مد شکست به تدریج با افزایش شدت جریان از حالت شکست بین لایه‌ای به حالت پارگی همراه با کشش ورق تغییر می‌یابد.

صفری ومستعان [6 و 7] به مطالعه تجربی و مدل‌سازی عددی جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولاد پرکربن پرداخته‌اند. نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهد که جریان جوشکاری مهمترین پارامتر اثرگذار در فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی بوده و با افزایش جریان جوشکاری، اندازه دکمه جوش افزایش یافته و متناسب با آن مود شکست از حالت فصل مشترکی به محیطی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-09]

تغییر پیدا می‌کند و با افزایش جریان و به تبع آن افزایش اندازه ناحیه ذوب، ظرفیت تحمل نیرو توسط نقطه جوش‌ها افزایش می‌یابد. مقالات فوق نشان می‌دهند که پارامترهای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای اگر به درستی انتخاب شوند، یک جوش با کیفیت و با ریز ساختار مطلوب را ایجاد می‌نمایند. برای انتخاب مناسب پارامترهای جوشکاری باید دو نکته مدنظر قرار گیرد:

اول انتخاب پارامترهای موثر در جوشکاری شامل شدت جریان جوشکاری، نیروی جوشکاری زمان اعمال جریان و... که تعداد پارامترهای موثر بسته به دیدگاه محقق می‌تواند کاهش یا افزایش داشته باشد و دوم روش بهینه‌سازی و انتخاب پارامترهای بهینه. اغلب برای یافتن پارامترهای مناسب از مدل‌سازی المان محدود در نرم افزار انسیس یا آباکوس همراه با روش طراحی آزمایش [8 و 9] و یا نتایج تجربی[10] استفاده می‌شود یکی از مهمترین مشکلات در این زمینه انجام نشدن جوشکاری در برخی از حالات جوشکاری است و مشاهده می‌شود که از تعداد آزمایش طراحی شده، یک یا دو مورد بدلیل شرایط مشخص شده (به‌عنوان مثال جریان و زمان جوشکاری بالا و پاشش مذاب به بیرون و یا جریان و زمان جوشکاری پایین و عدم ذوب و جوش قطعات) قطعات به یکدیگر اتصال نیافته و دقت تحلیل‌های مبتنی بر رگرسیون را کاهش می‌دهند. محققین بسیاری بر روی دو موضوع ذکر شده به مطالعه پرداخته‌اند. پاتانیک و همکاران[11] به مطالعه پارامتریک و بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد AISI 1008 با کمک طراحی آزمایش تاگوچی پرداختند. پارامترهای جوشکاری جریان جوشکاری، نیروی الکترود و زمان جوشکاری انتخاب شده و خروجی نیز استحکام جوش و قطر دکمه جوش در نظر گرفته شده است و بهینه‌سازی به صورت همزمان برای هر دو پارامتر توسط روش تحلیل رابطه خاکستری و الگوریتم ژنتیک انجام شده و پارامترهای بهینه بدست آمده است. دهوالا و رونگ [12] به مطالعه اثر پارامترهای جوشکاری در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با چند نقطه جوش در فولاد گالوانیزه پرداختند. برای یافتن ماکزیمم استحکام اتصال از روش طراحی آزمایش تاگوچی تعداد 27 نمونه مختلف مشخص شده و پس از انجام آزمون کشش بر نمونه‌های جوشکاری شده، از محاسبه نسبت سیگنال به نویز برای تعیین پارامترهای موثر استفاده نموده‌اند. همچنین با استفاده از روش بهینه سازی ازدحام ذرات، شرایط بهینه جوشکاری و تعداد بهینه نقطه جوش برای دست‌یابی به بیشترین استحکام با دقت بالایی بدست آمد. بیرادر و دابادە [13] با استفاده از طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل به بررسی استحکام اتصال و کیفیت اتصال در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد کم کربن و فولاد ضد زنگ 304 پرداختند. از آنالیز واریانس برای تحلیل نتایج استفاده شد و آنالیز واریانس نشان داد که جریان جوشکاری بیشترین تاثیر و نیروی نگهداشتن قطعه (کلمپ) کمترین تاثیر را بر استحکام قطعات جوشکاری شده دارد. راویچاندران و همکاران [14] به بررسی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد AISI 1018 و فولاد ضد زنگ 430 پرداختند. برای یافتن رابطه میان پارامترهای موثر (زمان جوشکاری، زمان اعمال فشار، جریان جوشکاری و زمان نگهداشتن نمونه) بر استحکام و سختی نمونه‌های جوشکاری شده از روش رویه پاسخ استفاده شده است.

همانگونه که مروری بر مقالات نشان می‌دهد، مهمترین دغدغه در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای استحکام اتصال و مود شکست می‌باشد و مقالات فراوانی توسط محققین برای مواد مختلف جهت پیش‌بینی نوع شکست و استحکام اتصال مورد تحقیق قرار گرفته است. در این مقاله برای نخستین بار از یک سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (انفیس) برای مدل‌سازی اثر پارامترهای مهم در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای شامل جریان جوشکاری، زمان جوشکاری، زمان سرد شدن و نیروی اعمالی توسط الکترود برای پیش بینی استحکام اتصال استفاده شده است. نتایج بررسی نویسندگان نشان می‌دهد که تاکنون از این روش برای مطالعه رفتار و پیش‌بینی خروجی‌های مذکور در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای استفاده نشده است. بدین منظور از نتایج آزمایش‌های انجام شده برای آموزش و

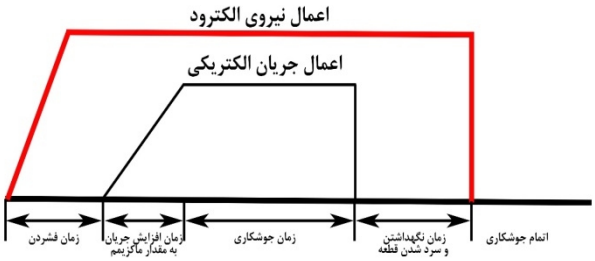
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-09]

تست سیستم استنتاج فازی بهره گرفته شده است. همچنین برای دست‌یابی به ساختار بهینه سیستم عصبی- فازی تطبیقی، از الگوریتم بهینه‌سازی آموزش و یادگیری بهره گرفته شده است.

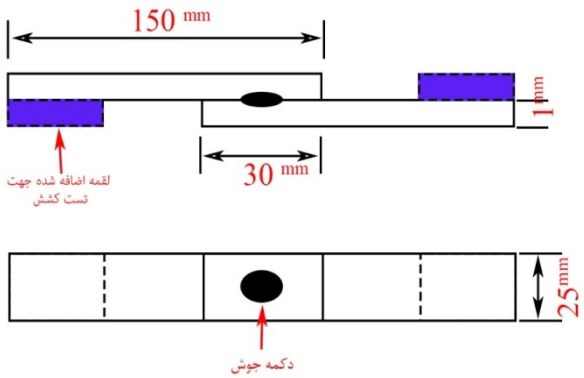
2-روش تجربی

برای انجام فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای از یک دستگاه اتوماتیک جهت انجام فرایند استفاده شده است حداکثر جریان قابل اعمال توسط این دستگاه 150kVA می‌باشد و کلیه پارامترها به صورت دیجیتال در دستگاه تنظیم می‌شود. از الکترودهای مس-کروم-زیرکونیوم به دلیل خواص رسانایی مناسب استفاده شده است و این الکترودها توسط گردش آب در بخش داخلی، خنک کاری می‌شوند. همچنین یک مکانیزم پنوماتیک وظیفه اعمال نیروی الکترودها را برعهده دارد. شکل(1) نحوه تغییرات نیروی الکترود و جریان الکتریکی در زمان جوشکاری را نشان می‌دهد. مهمترین پارامترهایی که در مسئله مورد بررسی در این مقاله جهت توسعه مدل سیستم فازی-عصبی تطبیقی انتخاب شده‌اند عبارتند از:

جریان الکتریکی، زمان جوشکاری، زمان نگهداشتن و سرد شدن قطعه و نیروی الکترود. ورق با ضخامت 1 mm از جنس فولاد AISI 1060 برای انجام جوشکاری انتخاب شده و به ابعاد $150\times25mm^2$ تهیه شده است و به‌وسیله دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای براساس پارامترهای مشخص شده در جدول (1) به یکدیگر اتصال داده شده‌اند. نمونه‌های جوشکاری شده مطابق شکل (2) آماده‌سازی شده و نمونه‌های تست کشش مطابق استاندارد ASTM E8/E8M [15] تهیه شده است و استحکام کششی- برشی نمونه‌ها توسط یک دستگاه تست کشش آزمایشگاهی اندازه گیری شده است. در شکل(3) نمونه‌های جوشکاری شده از فولاد AISI 1060 نشان داده شده است. پس از جوشکاری نمونه‌ها، در جدول (1) ورودی‌های در نظر گرفته شده به همراه نتایج آزمایش‌ها ارایه شده است. مقادیر متغیرهای خروجی برای هر 31 آزمایش نشان داده شده است. اعمال همزمان جریان الکتریکی و زمان جوشکاری بالا باعث پاشش مذاب به بیرون از منطقه جوشکاری می‌شود و در مقادیر پایین پارامترهای مذکور قطعات به یکدیگر متصل نمی‌شوند. لذا برای انتخاب مقادیر پارامترهای جدول (1)، ابتدا تعدادی تست اولیه انجام شده و محدوده جوش پذیری با توجه به مقادیر پارامترها بررسی شده است. همچنین در بسیاری از مقالات از جمله [16] نیز محدوده‌های مشابهی مشاهده شده است.



شکل1- نحوه زمان بندی اعمال نیروی الکترودها و جریان الکتریکی جهت انجام جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای.



شکل 2- ابعاد نمونه‌های جوشکاری شده با روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای.

شکل 3- نمونه‌های جوشکاری شده با روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-09]

جدول 1- آزمایش‌های انجام شده و مقادیر استحکام کششی نمونه‌های جوشکاری شده.

ردیف	جریان جوشکاری (kA)	زمان جوشکاری (cycle)	زمان سرد شدن (cycle)	نیروی الکترود (N)
1	7.8	25	12.5	1100
2	10.6	25	12.5	1100
3	7.8	25	12.5	1700
4	10.6	25	12.5	1700
5	7.8	35	12.5	1100
6	10.6	35	12.5	1100
7	7.8	35	12.5	1700
8	10.6	35	12.5	1700
9	7.8	25	37.5	1100
10	10.6	25	37.5	1100
11	7.8	25	37.5	1700
12	10.6	25	37.5	1700
13	7.8	35	37.5	1100
14	10.6	35	37.5	1100
15	7.8	35	37.5	1700
16	10.6	35	37.5	1700
17	6.4	30	25	1400
18	12	30	25	1400
19	9.2	30	25	800
20	9.2	30	25	2000
21	9.2	20	25	1400
22	9.2	40	25	1400
23	9.2	30	0	1400
24	9.2	30	50	1400
25	9.2	30	25	1400
26	9.2	30	25	1400
27	9.2	30	25	1400
28	9.2	30	25	1400
29	9.2	30	25	1400
30	9.2	30	25	1400
31	9.2	30	25	1400

3-مدل‌سازی هوشمند بهینه شده

3- 1- سیستم عصبی- فازی تطبیقی (انفیس)

سیستم فازی- عصبی تطبیقی (که از این پس در متن جهت اختصار "انفیس" نوشته خواهد شد) از دو روش منطق فازی و شبکه عصبی بهره می‌گیرد. همانند دیگر سیستم‌های فازی، ساختار انفیس از دو بخش مقدماتی و تالی تشکیل شده است که با مجموعه‌ای از قوانین به یکدیگر مرتبط می‌شوند. در ساختار شبکه انفیس، پنج لایه متمایز 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 (4) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (4) مشاهده می‌شود، این سیستم شامل دو ورودی x و y و خروجی f می‌باشد که با قوانین زیر مرتبط می‌شوند [17]:

قانون 1: اگر (x برابر با A_1) و (y برابر با B_1) باشند، آنگاه $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$ می‌شود.

قانون 2: اگر (x برابر با A_2) و (y برابر با B_2) باشند، آنگاه $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$ می‌شود.

در این سیستم، A_i و B_i مجموعه‌های فازی و f_i خروجی سیستم می‌باشند. همچنین، p_i، q_i و r_i پارامترهای طراحی هستند که هنگام پروسه یادگیری بدست می‌آیند. اگر خروجی هر لایه از شبکه انفیس با O_i^j (خروجی گره i اُم در لایه j اُم) در نظر گرفته شود، سپس می‌توان عملیات و توابع لایه‌های مختلف شبکه انفیس را همانند زیر توضیح داد:

لایه 1: در این لایه، هر گره برابر با یک مجموعه فازی است و خروجی آن گره در مجموعه فازی مربوطه، برابر با درجه عضویت متغیر ورودی است. پارامترهای هر گره، فرم تابع عضویت در مجموعه فازی گره را تعیین می‌کنند. از آنجایی‌که در این مطالعه، از توابع عضویت گوسین استفاده شده است، بنابراین:

$$\mu_{Ai}(x) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c_i}{\sigma_i}\right)^2} \quad (1)$$

که در آن، x مقدار ورودی هر گره و C_i و σ_i به ترتیب مرکز و پهنای توابع عضویت گوسین می‌باشند.

لایه 2: در این لایه، مقادیر سیگنال‌های ورودی به هر گره با یکدیگر ضرب می‌شوند و شدت آتش قاعده محاسبه می‌شود:

$$O_i^2 = \omega_i = \mu_{Ai}(x)\mu_{Bi}(y), \qquad i = 1, 2 \quad (2)$$

که در آن، μ_{Ai} درجه عضویت x در مجموعه فازی A_i و μ_{Bi} درجه عضویت y در مجموعه فازی B_i می‌باشند.

لایه 3: گره‌های این لایه، وزن نسبی قواعد را محاسبه می‌کنند که در آن w_i^n شدت آتش نرمال شده قاعده i اُم هستند.

$$O_i^3 = \omega_i^n = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2} \qquad i = 1, 2 \quad (3)$$

لایه 4: این لایه با نام لایه قواعد شناخته می‌شود که از ضرب شدت آتش نرمال شده (که در لایه قبل بدست آمده‌است) با خروجی سیستم فازی سوگنو بدست می‌آید.

$$O_i^4 = \omega_i^n f_i = \omega_i^n(p_ix + q_iy + r_i), \quad i = 1,2 \quad (4)$$

لایه 5: این لایه که آخرین لایه شبکه است از یک گره تشکیل شده که در آن تمام ورودی‌های گره با یکدیگر جمع می‌شوند:

$$O_i^5 = \sum_{i=1}^{2} \omega_i^n f = \frac{\omega_1 f_1 + \omega_2 f_2}{\omega_1 + \omega_2}, \quad i = 1,2 \quad (5)$$

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-09]

به‌طور خلاصه، اولین لایه در ساختار انفیس 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 انفیس لایه‌های تطبیقی هستند که در آن‌ها c_i و s_i در لایه اول به عنوان پارامترهای مرتبط با توابع عضویت ورودی شناخته می‌شوند. در لایه چهارم نیز q_i،r_i وp_i پارامترهای تطبیقی هستند که با عنوان پارامترهای برآیند شناخته می‌شوند [17]. به تازگی به منظور افزایش عملکرد سیستم انفیس از الگوریتم‌های بهینه سازی مختلفی مانند الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی آموزش و یادگیری یکی از جدیدترین و کارآمدترین روش‌های بهینه‌سازی می‌باشد که در مقاله حاضر از این الگوریتم به منظور بهینه‌سازی پارامترهای سیستم انفیس استفاده شده است.

3-2- الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری

این الگوریتم براساس تاثیری که یک معلم بر روی دانش‌آموزان در یک کلاس درسی تعریف شده است. در یک کلاس معلم فردی است که دارای بهترین مقدار باشد و سطح بالاتری نسبت به دیگر دانش‌آموزان داشته باشد و بتواند دانش‌آموزان را با دانش خود سهیم کند. به‌طور کلی در این الگوریتم از فرایند آموزش و یادگیری که در کلاس درس اتفاق می‌افتد الهام می‌گیرد. الگوریتم آموزش و یادگیری به دو فاز معلم و دانش‌آموز تقسیم می‌گردد [18 و 19].

فاز معلم: در فاز اول معلم از بین دانش آموزان انتخاب می‌شود و کسی است که اطلاعاتش از بقیه بیشتر و بهتر باشد. معلم سعی می‌کند تا میانگین کلاس را به سمت خود بکشاند. اما در واقعیت این امکان‌پذیر نمی‌باشد و همه دانش‌آموزان نمی‌تواند به سطح معلم برسند بلکه در نهاست سطح میانگین را جابجا می‌کنند و به میانگین M_2 خواهند رسید. در این حالت جامعه آماری جدیدی پدید می‌آید که میانگین آن M_2 و معلـم آن T_2 است. این روند در فاز اول آنقدر تکرار می‌شود تا به جمعیت بهتر یا بهینه برسند. در نمودار شکل (5-الف)، T_1 به عنوان معلم کلاس انتخاب شده و سعی می‌کند میانگین سطح کلاس یعنی M_1 را به سطح خودش برساند. رابطه ریاضی برای فاز معلم به صورت زیر خواهد بود:

$$X_{new} = X_{old} + r(X_{teacher} - T_f \times Mean) \quad (6)$$

که در آن r یک بردار تصادفی بین صفر و یک بوده که میزان موفقیت یک دانش آموز در درک مطلب یاد شده توسط استاد را نشان می‌دهد. همچنین T_f نشان دهنده ضریب موفقیت معلم با مقادیر {2،1} می‌باشد.

فاز دانش‌آموز: بعد از فاز معلم فاز دانش آموز اجرا می‌شود. دانش آموزان می‌توانند از یکدیگر نیز آموزش ببینند و بر روی یکدیگر تاثیر بگذارند. این تعامل باعث می‌شود که سطوح دانش آموزان ارتقا پیدا کند. با توجه به شکل (5-ب) دو دانش‌آموز به‌صورت تصادفی از میان جمعیت انتخاب خواهند شد. که در آن دانش آموز اول (X_i) می‌خواهد از دانش آموز دوم (X_j) آموزش ببیند، بسته به میزان نمره این دو دانش‌آموز دو حالت به وجود می‌آید:

حالت اول: اگر نمره X_i از X_j بدتر باشد. در حال که یک دانش‌آموز ضعیف (X_i) می‌خواهد از دانش‌آموز با نمرات بهتر (X_j) آموزش ببیند. رابطه ریاضی به صورت زیر خواهد بود:

$$X_{i,new} = X_i + r(X_j - X_i) \quad (7)$$

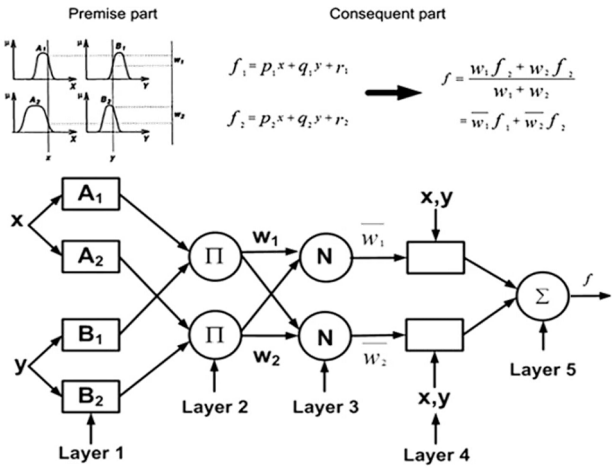
که r در این رابطه یک بردار تصادفی بین صفر و یک است و میزان موفقیت دانش آموز X_i در درک مطلب یاد شده را نشان می‌دهد.

حالت دوم: اگر نمرات X_i از X_j بهتر باشد. همانند حالت قبل است با این تفاوت که X_j از X_i می‌آموزد و رابطه ریاضی آن به صورت زیر است:

$$X_{i,new} = X_i + r(X_i - X_j) \quad (8)$$

دانستن این نکته ضروری است که در هر دو فاز معلم و دانش‌آموز با بدست آمدن $X_{i,new}$ جدید مقدار تابع هدف آن محاسبه می‌شود و اگر این مقدار از مقدار تابع هدف قدیمی بهتر بـاشد،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-09]



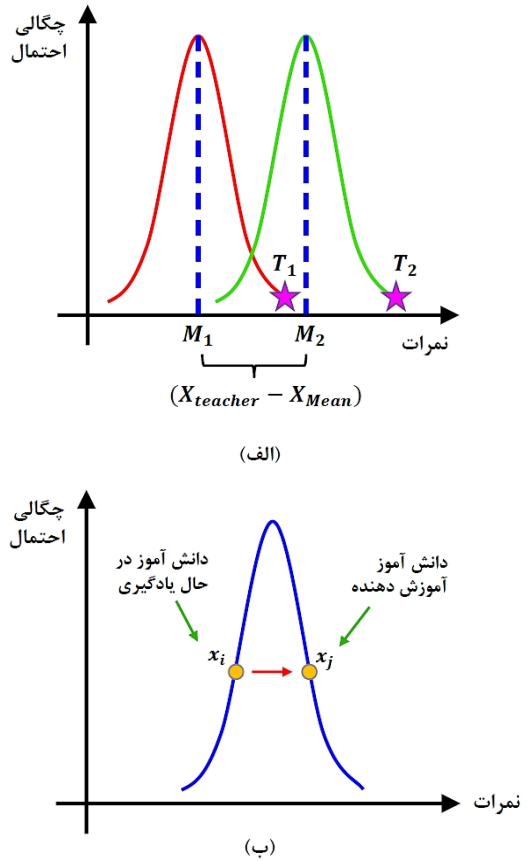
شکل 4- ساختار شبکه انفیس.

اطلاعات دانش آموز به روز می‌شود در غیر این صورت همان اطلاعات قدیمی بدون تغییر می‌ماند.

4- نتایج و بحث

در این مطالعه از تعداد 31 داده آزمایشگاهی برای آزمایش و تست شبکه که شامل چهار ورودی جریان جوشکاری، زمان جوشکاری، زمان سرد شدن و نیروی اعمالی توسط الکترود و یک خروجی (استحکام کششی- برشی نمونه‌های جوشکاری شده) می‌باشد، استفاده شده است. این مجموعه داده‌ها به‌صورت تصادفی به دو زیر مجموعه 70 درصدی برای آموزش شبکه و 30 درصدی برای تست شبکه تقسیم می‌شوند. تعداد و پارامترهای توابع عضویت ورودی و خروجی و همچنین قواعد اگرآنگاه فازی توسط الگوریتم بهینه‌سازی آموزش و یادگیری بهینه شده است. شکل (6)، توابع عضویت گوسین بهینه شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده برای چهار ورودی جریان جوشکاری، زمان جوشکاری، زمان سرد شدن و نیروی اعمالی توسط الکترود را نمایش می‌دهند.

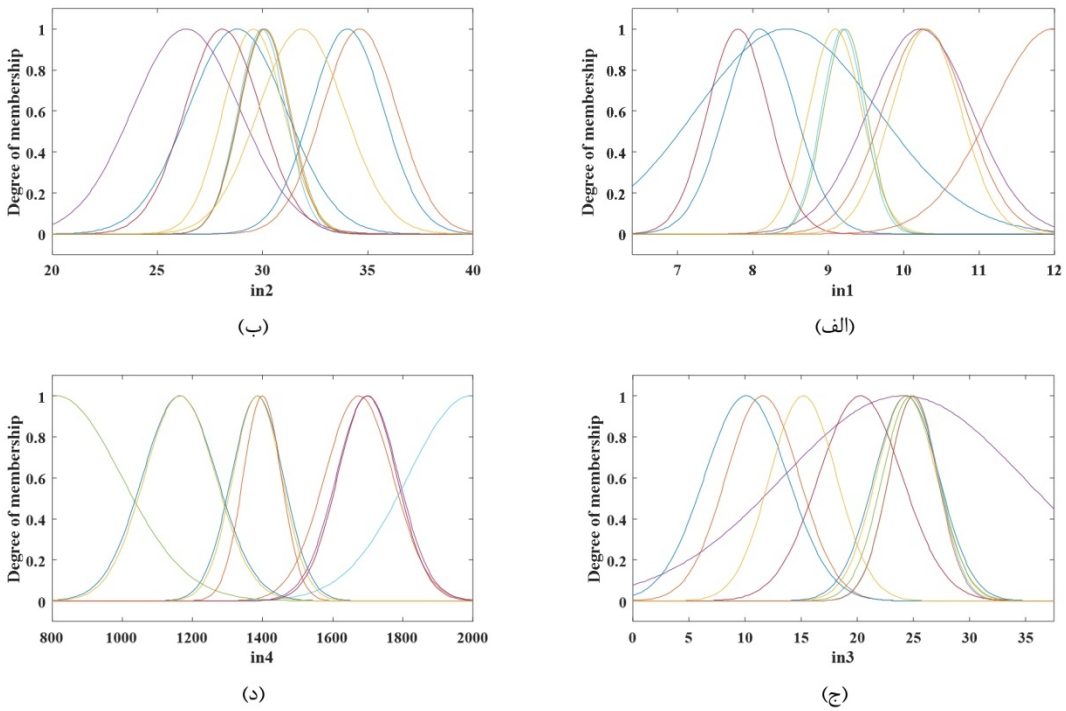
در سیستم‌های عصبی– فازی و یا عصبی– فازی–تطبیقی معمول و کلاسیک که در آن‌ها از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده نمی شود، توابع عضویت انتخاب شده برای سیستم فازی به صورت یکپارچه در کل محدوده متغیرهای ورودی پراکنده می‌شوند. از اینرو در اینگونه سیستم‌ها بدست آوردن مدل دقیق برای تقریب متغیرهای خروجی با استفاده از داده‌های محدود بسیار پیچیده یا حتی غیرممکن می‌باشد. این در حالی است که در این مقاله، همانطور که در شکل (6) مشاهده می‌شود، با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی، پارامترهای توابع عضویت (مرکز و پهنای توابع عضویت گوسین) به صورت بهینه محاسبه شده و الگوهای مختلفی را در شکل (6) پدید آورده‌اند.



شکل 5- الف- فاز معلم، ب- فاز دانش آموز.

برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی از روش گرافیکی استفاده شده است. شکل (7) داده‌های واقعی و داده‌های تقریب زده شده توسط مدل انفیس را به صورت همزمان نمایش می‌دهد. در این نمودارها، نشان‌های مربعی شکل مربوط به داده‌های استفاده شده در بخش آموزش و نشان‌های مثلثی مربوط به داده‌های بخش تست شبکه هستند. همچنین خط نیم‌ساز میانی (y=x) نیز مرجعی برای مشخص نمودن درستی مدل بدست آورده شده می‌باشد.

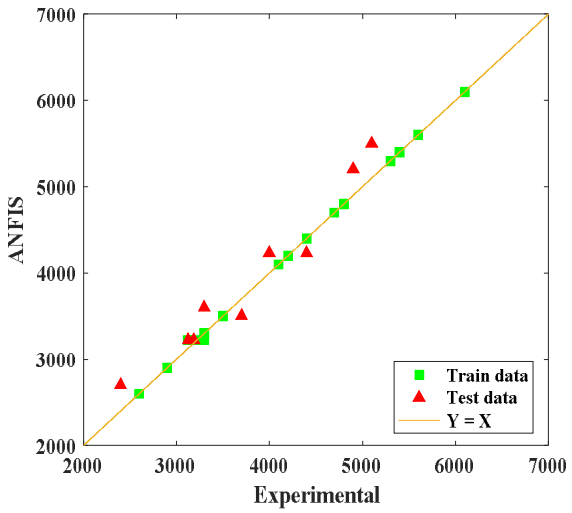
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-09]



شکل 6- توابع عضویت بهینه شده برای ورودی‌های الف-جریان جوشکاری، ب-زمان جوشکاری، ج-زمان سرد شدن و د- نیروی اعمالی توسط الکترود.

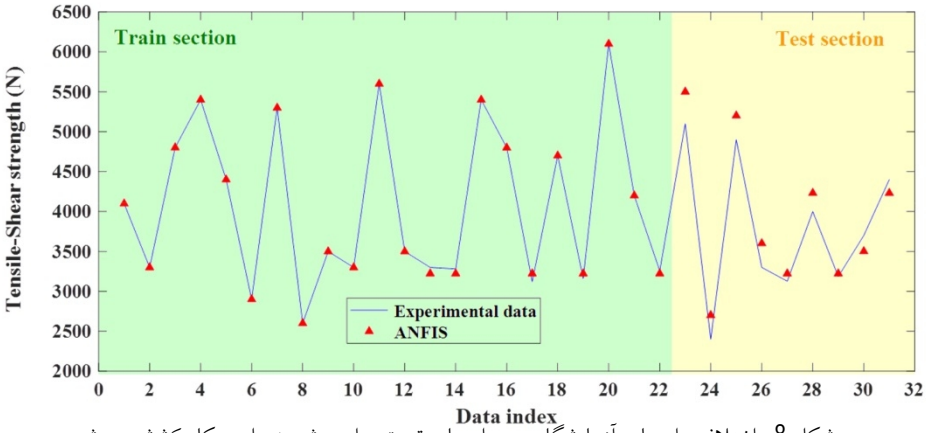
همانطور که مشاهده می‌شود، دقت شبکه انفیس برای تخمین داده‌های بخش آموزش برای تمامی خروجی‌ها بسیار بالاست. همچنین دیده می‌شود که دقت شبکه برای تخمین خروجی نیز بالا می‌باشد. در ادامه، شکل (8)، مقدار استحکام کششی-برشی نمونه‌های جوشکاری شده با فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای برای داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده توسط انفیس در دو بخش آموزش و تست را نشان می‌دهند. بخش آموزش با پس زمینه سبز و بخش تست با پس زمینه زرد مشخص شده‌اند. همانطور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، شبکه انفیس منطبق با داده‌های بخش آموزش برای تمامی خروجی‌ها می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که شبکه به‌خوبی توانسته است، داده‌های مرتبط به بخش تست را نیز پیش‌بینی نماید. در ادامه، شکل (9)، خطا و درصد میانگین خطای مطلق مربوط به بخش آموزش و تست را برای مدل‌سازی مقدار استحکام کششی-برشی نمونه‌های جوشکاری شده با فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای نشان می‌دهد. در این شکل نیز، بخش آموزش با رنگ پس زمینه سبز و بخش تست با رنگ پس زمینه زرد آورده شده است. مشاهده می‌شود.

که مقدار خطا برای تمامی خروجی‌ها، در بخش آموزش کمتر از بخش مربوط به تست می‌باشند. همچنین با مقایسه شکل‌های (8) و (9) دیده می‌شود که در بخش تست، هر داده تقریب زده شده‌ای که اختلاف بیشتری با داده واقعی دارد، دارای درصد میانگین خطای مطلق و همچنین خطای بیشتری نیز می‌باشد.

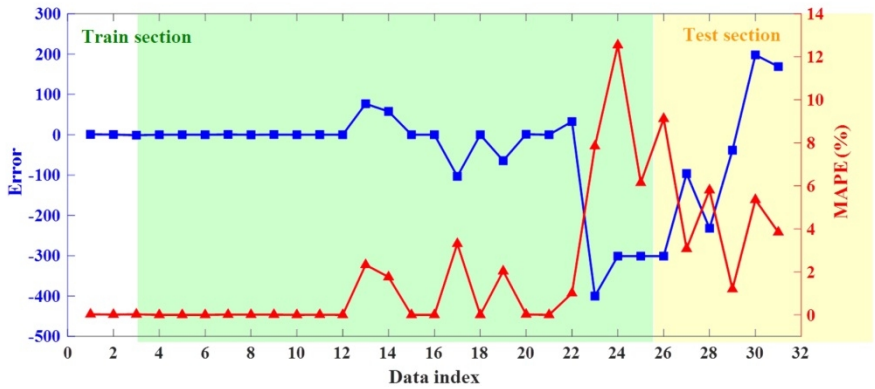


شکل 7- مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط انفیس.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-09]



شکل 8- اختلاف داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های تست برای پیش‌بینی استحکام کششی-برشی.



شکل 9- خطای داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های تست برای تقریب استحکام کششی-برشی.

همچنین در نمودارهای نشان داده شده در شکل (9) مشاهده می‌شود، در تعدادی از داده‌های بخش آموزش نیز، مقدار خطا و درصد میانگین خطای مطلق افزایش یافته است اگرچه همچنان این مقدار خطا در مقایسه با خطای داده‌های بخش تست اندک می‌باشد. در ادامه به منظور بررسی کمی دقت مدل بدست آورده شده، از معیارهای آماری جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق، ضریب تعیین و درصد میانگین خطای مطلق استفاده شده است. نحوه محاسبه این معیارها به ترتیب در روابط(9-12) ارایه شده است.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_A - O_P)^2} \quad (9)$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|O_A - O_P| \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(O_A - \bar{O}_A)(O_P - \bar{O}_P)]^2}{[\sum_{i=1}^{n}(O_A - \bar{O}_A)][\sum_{i=1}^{n}(O_P - \bar{O}_P)]} \quad (11)$$

$$\mathrm{MAPE} = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{O_A - O_P}{O_A}\right| \quad (12)$$

که در این روابط، O_A مقدار خروجی اندازه‌گیری شده برای نمونه iأم، O_p خروجی تخمین زده شده توسط شبکه انفیس برای نمونه iأم، $\bar{O}_A$ میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و $\bar{O}_p$ میانگین داده‌های تخمین زده شده هستند. برای بررسی دقت مدل، معیارهای آماری مذکور به صورت جداگانه برای بخش آموزش و تست محاسبه و در جدول (2) نمایش داده شده‌اند. هر یک از این معیارها می‌توانند معرف خطای مدل به دست آورده شده و به تبع آن دقت تخمین زده شده باشند.

از مقادیر لیست شده در جدول (2) مشخص می‌شود که شبکه انفیس به‌طور کلی در پیش‌بینی استحکام کششی-برشی نمونه‌های جوشکاری شده به روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای موفق عمل کرده است معیارهای RMSE و MAE به خصوص برای بخش آموزش بسیار کوچک هستند. البته این معیارها به تنهایی برای ارزیابی مدل مناسب نیستند. در ادامه از معیارهای R^2 و MAPE که مقدار خطا را نسبت به مقدار

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-09]

داده‌ها مشخص می‌کنند، استفاده می‌شود. ضریب همبستگی R^2 برای بخش آموزش بسیار بالا (نزدیک به یک) است که این نشان‌دهنده تطابق کامل داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های انفیس در بخش آموزش می‌باشد. ضریب تعیین برای بخش تست نیز بسیار بالا (برابر با 0/95) می‌باشد که این نشان دهنده دقت بالای مدل بدست آورده شده است.

جدول 2- معیارهای خطا RMSE، MAE، R^2 و MAPE برای مدل‌سازی انفیس.

	RMSE	*MAE*	R^2	*MAPE (%)*
Train	34	15	0.99	0.48
Test	250	228	0.95	6.2

در ادامه مشاهده می‌شود که خطای MAPE در بخش تست نسبت به بخش آموزش بالاتر می‌باشد. این موضوع کاملاً طبیعی می‌باشد زیراکه در بخش آموزش از تمامی داده‌های آموزش (70 درصد کل داده‌ها) استفاده شده و مدل به‌گونه‌ای به دست آورده شده است که خروجی‌های شبکه کاملاً منطبق با داده‌های مورد استفاده باشند. در صورتی‌که تست شبکه بر اساس داده‌های تست (30 درصد مابقی داده‌ها) انجام شده و از این داده‌ها در بخش آموزش شبکه هیچ استفاده‌ای نشده است. در نتیجه به دلیل وجود خطا در نتایج آزمایشگاهی، می‌توان این مقدار خطا را در تخمین انتظار داشت.

در انتها قابل ذکر است که ایجاد یک مدل شبکه مصنوعی که مبتنی بر آموزش شبکه توسعه داده می‌شود، فرایند پیچیده‌ای می‌باشد. یکی از مهمترین دلایل عدم دقت شبکه‌های مصنوعی مانند شبکه عصبی و شبکه انفیس به عدم قطعیت اولیه در نتایج تجربی آزمایشگاهی (ورودی شبکه) مربوط می‌باشد. لذا ورودی اولیه خود دارای عدم قطعیت می‌باشد که ناشی از خطا در اندازه‌گیری مقادیر استحکام در دستگاه تست کشش، خطای کالیبراسیون، همگن نبودن اولیه ورق‌های مورد استفاده و خطای اپراتور می‌باشد. تلاش محققین کنترل عوامل فوق جهت کاهش عدم قطعیت می‌باشد، با این حال درصدی از خطا همواره در ذات فعالیت‌های تجربی موجود است. مدل انفیس توسعه داده شده توانسته است با دقت 99 درصد بر داده‌های ورودی انطباق یابد، این موضوع باعث می‌شود که دقت تخمین در داده‌های تست که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند به مراتب بهبود یابد و تطابق 95 درصدی بر خروجی داشته باشد. لذا می‌توان انتظار داشت که اگر از شبکه مذکور جهت پیش بینی استحکام کششی-برشی قطعات جوشکاری شده به روش مقاومتی نقطه‌ای استفاده شود، با اطمینان 95 درصد اعداد دارای صحت می‌باشد.

5- نتیجه گیری

در این مقاله از شبکه انفیس بهینه شده توسط الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری برای مدل‌سازی فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای براساس متغیرهای ورودی شامل جریان جوشکاری، زمان جوشکاری، زمان سرد شدن و نیروی اعمالی توسط الکترود و یک خروجی (استحکام کششی-برشی نمونه‌های جوشکاری شده) استفاده شده است. مهمترین نتایج بدست آمده از این مطالعه به شرح ذیل است:

– شبکه انفیس بدست آمده برای کاربرد حاضر بسیار کارآمد بوده و به وسیله این سیستم می‌توان مقادیر استحکام کششی-برشی نمونه‌های جوشکاری شده را براساس تغییرات متغیرهای ورودی فرایند پیش بینی نمود.

– ضریب تعیین R^2 برای مدل‌سازی مقادیر استحکام کششی-برشی قطعات جوشکاری شده با فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در بخش آموزش و تست بسیار نزدیک به یک می‌باشد که این نشان دهنده تطابق بسیار خوب نتایج تخمین زده شده توسط شبکه با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

– ضریب تعیین R^2 و درصد میانگین خطای مطلق برای تخمین استحکام کششی-برشی نمونه‌های جوشکاری شده در بخش آموزش به ترتیب برابر با 0/99 و 0/48 درصد و در بخش تست برابر با 0/95 و 6/2 درصد می‌باشند.

منابع

1-Pouranvari, M., Asgari, H. R., Mosavizadch, S. M., Marashi, P. H. and Goodarzi, M., "Effect of Weld

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-09]

Nugget Size on Overload Failure Mode of Resistance Spot Welds," Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 12, pp. 217–225, 2007, doi: 10.1179/174329307X164409.

2-اویسی، م. بنی مصطفی عرب، ن. و پایگانه، غ.، "پیش بینی و بهینه سازی اندازه قطر دکمه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه ای بر ورق مورد استفاده در صنعت کشتی‌سازی با استفاده از طراحی آزمایشات"، اولین همایش ملی توسعه سواحل مکران و اقتدار دریایی جمهوری اسلامی ایران، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، 1391.

3-عشیری ر.، شمعانیان م.، سلیمی جزی ح.، دو پارک ی.، سلمانی م. "مروری بر چالش‌های فولادهای پیشرفته خودرویی در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای"، مجله علوم و فناوری جوشکاری ایران، دوره6، شماره 2، ص‌ص 27-13، 1399.

4-فدائی، ع. و خباز اقدم، ع.، "مطالعه پارامتری فرایند جوش‌کاری نقطه‌ای مقاومتی در نمونه‌هایی از جنس AISI 1008 با روش اجزای محدود"، *مجله مهندسی مکانیک*، دوره چهل و پنجم، ص‌ص21 -11، 1394.

5-Safari, M., and Joudaki J., "Experimental Investigation of Resistance Spot Welding of Ultrathin IF Steel Sheets," International Journal of Iron and Steel Society of Iran, Vol. 16, pp. 51–57, 2019.

6- صفری م.، مستعان ح.، "بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی تحولات ریزساختاری، خواص مکانیکی و مود شکست جوش مقاومتی فولاد AISI1075"، *مجله علوم و فناوری جوشکاری ایران*، دوره1، شماره 1، ص‌ص 49-38، 1394.

7- صفری م.، مستعان ح.، "جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولاد زنگ نزن 201 : ارتباط بین جریان جوشکاری، ریزساختار، خواص مکانیکی و مود شکست"، *مجله علوم و فناوری جوشکاری ایران*، دوره2، شماره 2، ص‌ص 105-92، 1395.

8-صدیقی، م.، نظری، ف. و افشاری، د.، "بررسی تاثیر پارامترهای جوشکاری بر اندازه دکمه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای آلیاژهای منیزیم"، *فصلنامه مدل‌سازی در مهندسی*، دوره 14، شماره 44، ص‌ص 10 -1، 1395.

9- Khodabakhshi, F., Kazeminezhad, M., and Kokabi, A.H., "Resistance spot welding of ultra-fine grained steel sheets produced by constrained groove pressing: Optimization and characterization," Materials Characterization, Vol. 69, pp. 71–83, 2012, doi: 10.1016/j.matchar.2012.04.011.

10- قندی آ.، شمعانیان م.، سلمانی م. "بررسی تحولات ساختاری در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد پیشرفته استحکام بالای DP590"، *مجله علوم و فناوری جوشکاری ایران*، دوره6، شماره 1، ص‌ص 65-57، 1399.

11- Pattanaik, A.K., Panda, S.N., Pal, K., and Mishra, D., "A Comparative Investigation to Process Parameter Optimization for Spot Welding Using Taguchi Based Grey Relational Analysis and Metaheuristics," Materials Today: Proceedings, Vol. 5, pp. 11408–11414, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.108.

12-Dhawale, P.A., and Ronge, B.P., "Parametric Optimization of Resistance Spot Welding for Multi Spot Welded Lap Shear Specimen to Predict Weld Strength," Materials Today: Proceedings, Vol. 19, pp. 700–707, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.756.

13-Biradar, A.K., and Dabade, B.M., "Optimization of Resistance Spot Welding Process Parameters in Dissimilar Joint of MS and ASS 304 Sheets," Materials Today: Proceedings, Vol. 26, pp. 1284–1288, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.256.

14-Ravichandran, P., Anbu, C., Meenakshipriya, B., and Sathiyavathi, S., "Process Parameter Optimization and Performance Comparison of AISI 430 and AISI 1018 in Resistance Spot Welding Process," Materials Today: Proceedings, Vol. 33, pp. 3389–3393, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.197.

15-American Society for Testing Materials. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials; ASTM E8/E8M-09; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2008.

16-Khuenkaew, T., and Kanlayasiri, K., "Resistance Spot Welding of SUS316L Austenitic/SUS425 Ferritic Stainless Steels: Weldment Characteristics, Mechanical Properties, Phase Transformation and Solidification," Metals, Vol. 9, pp. 710–726, 2019, doi: https://doi.org/10.3390/met9060710.

17-Jang, J.S., "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System," IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, Vol. 23, pp. 665–685, 1993, doi: 10.1109/21.256541

18-Rao, R.V., Savsani, V.J., and Vakharia, D., "Teaching–Learning-Based Optimization: A Novel Method for Constrained Mechanical Design Optimization Problems," Computer-Aided Design, Vol. 43, pp. 303–315, 2011, doi: 10.1016/j.cad.2010.12.015

19-Rao, R.V., Savsani, V.J., and Vakharia, D., "Teaching–Learning-Based Optimization: An Optimization Method for Continuous Non-Linear Large Scale Problems," Information sciences, Vol. 183, pp. 1–15, 2012, doi: 10.1016/j.ins.2011.08.006

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-09]