E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 10, Number 1, 2024



Feasibility and determination of the characteristics of the replacement of arc and wire additive manufacturing process based on gas metal arc welding for the construction of bridges and metal structures: Approach of artificial intelligence algorithms

M. R. Maraki[1*], H. Tagimalek[2], M. Yousefieh[3*], A. Aghaeifar[4], A. Foorginejad[1]

1-Department of Materials Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.
2-Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
3-Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
4-Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Received 28 May 2023 ; Accepted 6 February 2024

Abstract

Society's great and growing demand for buildings and structures has created the need to apply new construction methods to shorten construction times, make buildings lighter, extend their useful life, and make them more earthquake-proof. In the long term, the new methods will lead to structural optimization, increased building performance, and the achievement of optimal operating conditions. New technologies are meeting society's increasing need for special structures more than ever. Additive manufacturing is based on gas metal arc welding as one of the fastest and most cost-effective manufacturing methods for primary metal structures. For this purpose, the three parameters voltage, wire feed speed, and welding speed were considered initial parameters affecting the width and height of the welding flux. To investigate the effects of the process, 16 experiments with input parameters were evaluated. The width and height of the sweat pollen were determined by experimental investigations. Subsequently, the resulting welding geometry is modeled using three numerical modeling methods, including intensive learning machines, relevence vector machine, and fuzzy logic. The comparison between the experimental data and the results of the three generated models shows that fuzzy logic comes closest to the experimental data of the welding geometry of the modeling methods. For example, the test data of the generative fuzzy model resulted in an average error for height and width of 0.667 and 0.5477, respectively, and a root mean square error for height and width of 0.0046 and 0.3, respectively, which expresses the generalization ability and reliability compared to other modeling methods in this process. Finally, a metal pattern of a special structure was produced based on arc and wire additive manufacturing based gas metal arc welding.

Keywords: Arc and wire additive manufacturing, metal structures, artificial intelligence algorithms, gas metal arc welding.

*Corresponding Author: M. R. Maraki,M. Yousefieh, m.yousefieh@semnan.ac.ir; maraki@birjand.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.21]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دهم، شماره1، بهار و تابستان 1403



امکان‌سنجی و مشخصه‌یابی جایگزینی روش ساخت افزایشی قوس و سیم مبتنی بر جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ برای ساخت پل و سازه‌های فلزی: رویکرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی

محمدرضا مرکی[1*]، هادی‌تقی‌ملک[2]، محمد یوسفیه[3*]، علیرضا آقائی‌فر[4]، ابوالفضل فورگی‌نژاد[1]

1-دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

2-دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

3-دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

4-بخش فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1402/03/07 ؛ پذیرش مقاله: 1402/11/17

چکیده

نیاز گسترده و روزافزون جامعه به ساختمان و سازه، ضرورت استفاده از روش‌های ساخت جدید به منظور افزایش سرعت ساخت، سبک‌سازی، افزایش عمر مفید و نیز مقاوم نمودن ساختمان‌ها در برابر زلزله را بیش از پیش مطرح ساخته است. روش‌های جدید، در دراز مدت موجب بهینه‌سازی سازه، افزایش ساخت و رسیدن به شرایط اجرایی مطلوب خواهد شد. نیاز روز افزون جوامع بشری به سازه‌های خاص توسط فناوری جدید بیشتر از پیش احساس می‌شود. ساخت افزایشی برپایه جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ به عنوان یکی از روش‌های ساخت سریع و کم‌هزینه برای سازه‌های اولیه فلزی است. بدین منظور سه پارامتر ولتاژ، سرعت تغذیه سیم و سرعت جوشکاری به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر عرض و ارتفاع گرده جوش به عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفته شده‌اند. برای بررسی اثرات فرایند، 16 آزمایش با پارامتر ورودی مورد ارزیابی قرار گرفت. با انجام آزمایش‌های تجربی نتایج عرض و ارتفاع گرده جوش تعیین شد. سپس هندسه جوش حاصله به سه روش مدل‌سازی عددی که شامل ماشین یادگیری شدید، ماشین بردار ارتباط و منطق فازی مدل‌سازی شده است. مقایسه بین داده‌های تجربی و خروجی سه مدل ایجادی نشان می‌دهد که نزدیک‌ترین نتایج به داده‌های تجربی هندسه جوش از روش‌های مدل‌سازی، منطق فازی دارا بوده است. به گونه‌ای که داده‌های آزمون مدل فازی ایجادی، خطای میانگین برای ارتفاع و عرض به ترتیب 0/667 و 0/5477 و جذر میانگین مربعات برای ارتفاع و عرض 0/0046 و 0/3 بدست آورده که بیان‌کننده قابلیت تعمیم و اطمینان بالا نسبت به دیگر روش مدل‌سازی در این فرایند است. در نهایت نمونه فلزی سازه خاص مبتنی برساخت افزایشی قوس و سیم برپایه جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ تولید شد.

کلمات کلیدی: ساخت افزایشی قوس و سیم، سازه‌های فلزی، الگوریتم‌های هوش مصنوعی، جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: محمدرضا مرکی، محمد یوسفیه، m.yousefieh@semnan.ac.ir; maraki@birjand.ac.ir

1- مقدمه

پل‌ها و سازه‌های فولادی گونه‌ای از سازه است که مصالح اصلی آن که برای تحمل بارها و انتقال آن‌ها به کار می‌رود از فولاد است. اتصالات به کار رفته در این‌گونه سازه‌ها از نوع جوشی، پرچی یا پیچ و مهره می‌باشد و بسته به گونه اتصالات، قطعات طرح شده و کنترل‌های مربوط بر روی آن‌ها انجام

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.21]

می‌شود. اکنون فولاد از مهم‌ترین مصالح برای ساخت ساختمان و پل و سایر سازه‌های ثابت است. اسکلت فولادی یا قاب فولادی اصطلاحی است که در ساختمان‌سازی به کار می‌رود. ساختمان‌هایی با اسکلت فولادی، از ستون‌های عمودی و تیرهای-I شکل افقی که به شکل شبکه‌های مستطیلی به هم وصل شده‌اند، تشکیل گردیده‌اند. این شبکه مستطیل شکل، وظیفه نگه‌داری طبقات، سقف‌ها و دیوارهایی را که به اسکلت ساختمان وصل شده‌اند، برعهده دارد. توسعه این فناوری، امکان ساخت آسمان‌خراش‌ها را فراهم کرده‌است. یکی از بزرگترین سازه‌های فلزی جهان برج ایفل است. ساخت برج ایفل دو سال و دو ماه طول کشید. 850 نفر در ساخت آن کار کرده‌اند. این برج از 18 هزار و 38 قطعه ساخته شده‌است و برای اتصال آن‌ها از 2 و نیم میلیون پیچ مهره و میخ پرچ استفاده شده‌است. ارتفاع برج 330 متر است. شکل(1) سازه‌ها و پل‌های شناخته‌شده در جهان که به تمام فلزی ساخته شده‌اند.



شکل 1- سازه‌ها و پل‌های تمام فلزی شناخته جهان.

نیاز روز افزون جوامع بشری به سازه‌های خاص توسط فناوری جدید بیشتر از پیش احساس می‌شود. ساخت افزایشی قوس و سیم برپایه جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ به عنوان یکی از روش‌های ساخت سریع و کم‌هزینه برای نمونه اولیه است. شکل(2) پل‌ها و سازه‌های واقعی ساخته توسط محققان در صنایع عمرانی توسط فرایند ساخت افزایشی قوس و سیم نشان داده شده است. ساخت افزایشی قوس و سیم اغلب توسط روش جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ، جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود غیرمصرفی و ... اجرا می‌شود. جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ یک فرایند جوشکاری چند منظوره بوده، که در آن الکترود به صورت مداوم به حوضچه جوش تغذیه می‌شود. حوضچه جوش ایجاد شده انتقال فلز با محافظت خارجی گاز بی‌اثر مانند آرگون را ممکن می‌سازد. این روش در سال 1900 ابداع و در سال 1950 به صورت صنعتی مورد استفاده قرار گرفت[1]. جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ یکی از انواع مختلفی از روش‌های جوشکاری در صنعت جوش محسوب می‌شود. انعطاف‌پذیری بالا، امکان جوشکاری در ضخامت‌های مختلف، قابلیت تولید بالا و امکان اجرای خودکار دلایلی بوده که این روش را نسبت به روش‌های دیگر جوشکاری متمایز می‌نماید[2]. عملیات جوشکاری نیازمند اپراتوری هست که مهارت و تجربه قابل‌توجه برای انتخاب مطلوب و ترکیب پارامترهای جوشکاری را داشته باشد. بدین منظور در صنایع امروزی، جایگزین کردن سیستم‌های الکترونیکی برای از بین بردن نیاز به اپراتور با مهارت بالا مطالعات زیادی انجام گرفته است. طی این مطالعات روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی و رسیدن به هندسه گرده‌ای که کیفیت و ثبات لازم را داشته باشد ایجاد شد. که توانایی ترکیب پارامترهای جوشکاری را برای رسیدن به هندسه گرده مطلوب را داشته باشد[3].



شکل2-پل‌ها و سازه‌های واقعی ساخته توسط محققان در صنایع عمرانی توسط فرایند ساخت افزایشی قوس و سیم.

سیستم‌های کنترل اتومات در فرایندهای صنعتی بنا به چندین دلیل قابل اهمیت می‌باشد. که شامل افزایش بهره‌وری، بهبود

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.21]

شرایط کاری و اطمینان از کیفیت بالای کالای تولیدی است. در میان تمام فرایندها یکی از روش‌های رایج جوشکاری قوس‌الکتریکی با گاز محافظ می‌باشد[4]. این فرایند به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله خطوط لوله گاز، پتروشیمی، ساختمان، خودرو و کشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرایند تداوم الکترود مصرفی، ناپیوستگی جوش کم، عدم وجود سرباره و خطر حرارتی کم در فلزپایه جزو مزایای آن روش محسوب می‌شود. که در این میان تداوم الکترود مصرفی مهم‌ترین مزیت آن است که باعث افزایش نرخ بهره‌وری می‌شود[5].

در صنایع بزرگ هزینه از اهمیت بالایی برخوردار است. و این عامل وابستگی کامل به تعیین متغیرهای جوشکاری در فرایند جوشکاری با محافظت گاز و ارتباط بین پارامترهای موجود و نحوه رسیدن به حالت مطلوب دارد از طرفی رسیدن به این خواسته وابسته به آزمایش‌های مکرر و صرف هزینه بالا بوده است. به همین منظور روش‌های مدل‌سازی عددی بیان شده‌اند که وابسته به روابط ریاضی به مدل کردن سیستم‌های صنعتی پرداختند تا نقطه‌ای بهینه بین پارامترهای ورودی و خروجی به دست آورند، که شبکه عصبی مصنوعی[6] و منطق فازی[7] جزو این روش‌ها هستند.

زانگ و همکاران[8] از جوشکاری قوس الکتریکی با گازمحافظ به عنوان ایجاد روشی برای رسوب لایه به لایه استفاده کرده‌اند. لی و همکاران[9] با استفاده از تحلیل‌های رگرسیونی و روش تاگوچی مدل‌هایی برای پیش‌بینی گرده جوش برپایه پارامترهای ورودی پیشنهاد دادند. در روش ساخت افزایشی توسط جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ نیز ارتباط بین هندسه جوش با پارامترهای ورودی فرایند توسط یک مدل باید برقرار گردد لذا به منظور تنظیم بهینه پارامترهایی که هندسه گرده جوش طراحی شده را ایجاد می‌نمایند، ارتباط بین پارامترهای متغیر فرایند و هندسه گرده جوش باید مورد مطالعه قرار گیرد. دلیل عمده این کار را می‌توان این موضوع دانست که هندسه گرده یک خط جوش، نقش عمده‌ای را در تعیین صافی سطح، ضخامت لایه و دقت ابعادی قطعات لایه نشانی شده ایفا می‌کند. در پژوهش‌های مختلف وابستگی هندسه جوش با پارامترهای هندسه جوش به شکل معنادار به دست آمده است. کلاهان و همکاران[10] مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند جوشکاری قوس الکتریکی با گازمحافظ را با استفاده از مدل رگرسیون‌و الگوریتم تبرید بر روی داده‌های تجربی برای توسعه مدل‌های ریاضی پیاده‌سازی کردند. مدل‌های توسعه یافته با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده بهینه‌سازی شده‌اند، نتایج محاسباتی حاصل از این روش نشان از کارآمد بودن این روش در تعیین پارامترهای جوشکاری دارد، به طوری که هندسه گرده‌ای با اندازه‌های مطلوب ایجاد شده است. یکی از تکنیک‌ها رگرسیون خطی چندگانه دقیق می‌باشد که در توسعه مدل‌های ریاضی برای پارامترهای هندسه گرده در جوشکاری با گازمحافظ تیگ کارایی دارد همچنین با استفاده از داده‌های آزمایشی مشابه، تلاش برای مدل‌سازی با استفاده ازBPNN شده و سپس الگوریتم GA همراه با شبکه عصبی بهینه‌سازی و پارامترهای فرایند مورد استفاده قرار گرفته است. خیانگ و همکاران[11] به بررسی تأثیر پارامترهای فرایند بر شکل ظاهر مؤلفه‌ها در گرده جوش در جوشکاری قوس الکتریکی با گازمحافظ پرداختند که نشان داد میزان جریان قوس یکی از عوامل مؤثر در شکل و هندسه جوش محسوب می‌شود پارامترهای فرایند به طور کامل براساس تجربیات یا استخراج از بانک‌های اطلاعاتی انتخاب می‌شوند. باید در نظر داشت که پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده با این روش ممکن است، اندازه مورد نظر برای گرده جوش را تولید نکند، بنابراین یک کار اصولی تولید مدل‌هایی است که ارتباط بین هندسه گرده جوش و متغیرهای فرایند را فراهم آورد.

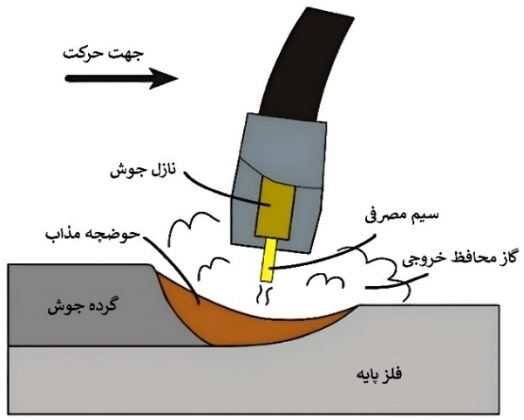
در پژوهش حاضر با انجام آزمایش‌های تجربی زمینه لازم برای تشکیل انواع مدل‌ها به وجود آمده است. در شکل(3) شماتیکی از فرایند جوشکاری قوس الکتریکی با گازمحافظ نشان داده شده است.

هدف از پژوهش انجام شده امکان‌سنجی و مشخصه‌یابی جایگزینی روش ساخت افزایشی قوس و سیم مبتنی بر جوشکاری قوس الکتریکی با گازمحافظ برای ساخت پل و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.21]

سازه‌های فلزی با رویکرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی است. در این تحقیق ولتاژ، سرعت تغذیه سیم و سرعت جوشکاری عنوان پارامترهای مؤثر ورودی فرایند در نظر گرفته شده‌اند و با توجه به ضروریات پژوهش پارامترهای ارتفاع و عرض گرده جوش به عنوان پارامترهای خروجی فرایند محسوب گردیده‌اند. همچنین برای برقراری ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی فرایند از روش‌های مدل‌سازی ماشین بردار ارتباط، ماشین یادگیری شدید و منطق فازی استفاده گردید. در این پژوهش به مدل‌سازی هندسه گرده جوش با سه روش معرفی‌شده پیش‌بینی کرده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. در نهایت سازه خاص سازگار با سه الگوریتم معرفی شده با روش ساخت افزایشی قوس و سیم برپایه جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ تولید شد.



شکل3- شماتیکی از جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ.

2- مواد و روش‌ها

با در نظر گرفتن هزینه تولید به عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در صنایع ساخت استفاده از فولادی که بار مالی خریداری مواد اولیه کمتری داشته باشد در اولویت تولید قرار می‌گیرد. بنا به دلیل در پژوهش حاضر از فولاد St37 به عنوان فلزپایه استفاده شده است. به همین منظور همان‌گونه که در شکل(4) نشان داده شده است از دستگاه تری آرک401 برای جوشکاری به همراه سیستم تغذیه سیم کری میگ 401 و از الکترود جوشکاری AMA 40-18M با استاندارد DIN 8559 و قطری برابر با 1/2 میلی‌متر و از جنس فولاد بوده که ساختار آن در جدول(1) نشان داده شده است. طی این آزمایش قطعاتی به ابعاد 5×10سانتی‌متر مکعب با جنس St37 با ضخامت 10 میلی‌متر استفاده شده است.



شکل 4- دستگاه جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ.

جدول 1- مشخصات شیمیایی فولاد فلزپایه.

عناصر	Fe	S	P	Mn	Si	C
ST37	پایه	0,005	0,019	0,49	0,1	0,102

جدول 2- مشخصات شیمیایی فولاد الکترود مصرفیAMA 40-18m .

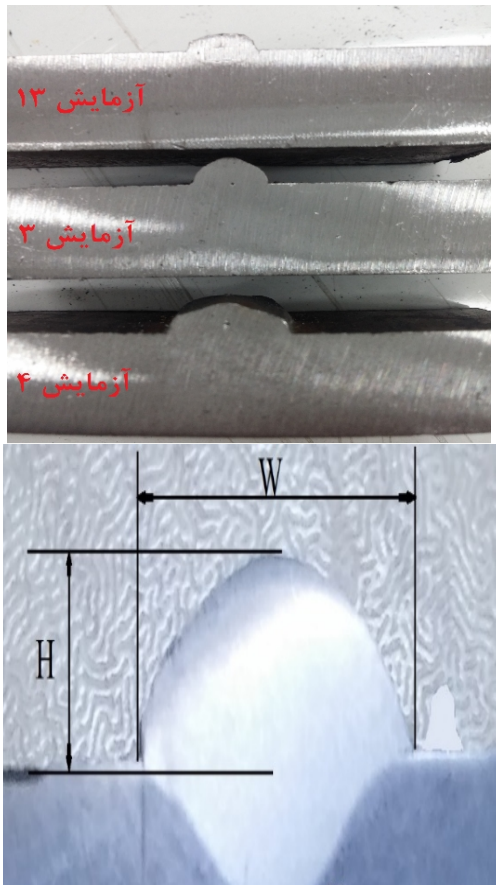
آهن	سیلیسیوم	پتاسیم	گوگرد	منگنز	کربن
پایه	1- 0,7	0,025	0,025	1,9-1,3	0,12

در این تحقیق سرعت تغذیه سیم (الکترود)، ولتاژ و سرعت جوشکاری به عنوان پارامترهای ورودی مؤثر در هندسه جوش قرار گرفته است و ارتفاع گرده و عرض گرده پارامترهای خروجی مدنظر می‌باشد. برای پارامتر ولتاژ چهارسطح، پارامتر سرعت جوشکاری چهارسطح و سرعت تغذیه سیم دو سطح در نظر گرفته شده است. برای اندازه‌گیری سرعت سیم خروجی از دهانه نازل میزان خروج سیم در یک زمان مشخص را اندازه‌گیری کرده و آن را در واحد زمان نسبت داده و مقدار سرعت خروجی با واحد سانتی‌متر بر دقیقه به دست می‌آید. به منظور تنظیم دقیق سرعت جوشکاری در این پژوهش از یک میز ماشین فرز اف پی 4 ام تبریز کمک گرفته شده است که از میان جدول حرکت پیشروی میز فرز از چهار وضعیت استفاده شد. داده‌ها و بازه‌های هر متغیر فرایند در جدول(3) قابل مشاهده می‌باشد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.21]

پس از انجام آزمایش‌ها قطعات به‌طور عمود به جوش بریده شد. در شکل(5) مقادیر اندازه‌گیری این ابعاد با استفاده از کولیس ساعتی با دقت 0/02 میلی‌متر انجام گرفته است و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی انجام شده در جدول شماره 3 آمده است.



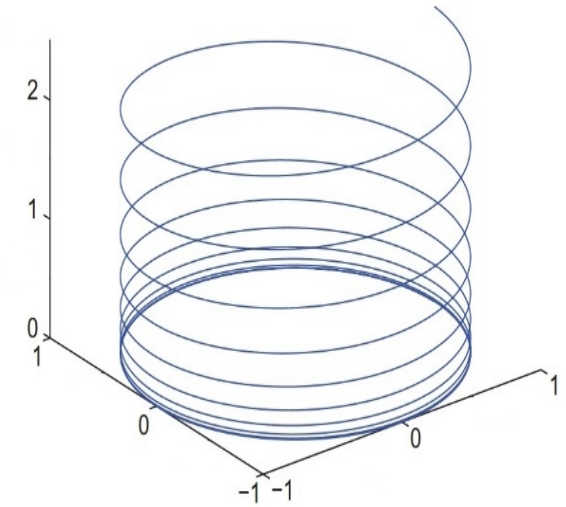
شکل 5- تصویری از مقطع برش داده شده.

3- نتایج

3-1- نتایج تجربی

در جدول(3) نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سه پارامتر ولتاژ، سرعت جوشکاری و سرعت سیم ورودی‌های آزمایش بوده که ارتفاع و عرض گرده جوش به عنوان تابعی از سه پارامتر ورودی تغییر می‌کند. براساس نتایج جدول(3) و مسیر حرکتی انبر جوشکاری نشان داده شده است (شکل 6).

نمونه فلزی تولیدی توسط مسیر حرکتی انبر جوشکاری در شکل(7) قابل مشاهده است.



شکل 6- مسیر طی شده توسط انبر جوشکاری جهت ساخت افزایشی قوس و سیم بر پایه جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ.



شکل 7- نمونه فلزی ساخته شده به روش ساخت افزایشی قوس و سیم بر پایه جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ.

3-2- انواع مدل

3-2-1- ماشین یادگیری شدید

یادگیری در لغت به معنای به دست آوردن دانش و فهم آن از طریق مطالعه، آموزش و تجربه برای بهبود عملکرد تعریف شده است. اما یادگیری ماشین عبارت است از این که چگونه می‌توان برنامه‌ای نوشت که از طریق تجربه یادگیری قبلی، عملکرد خود را بهتر کند. یادگیری ممکن است باعث تغییر در ساختار برنامه و یا داده‌ها شود[12].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.21]

جدول 3- نتایج آزمایش‌های تجربی.

ردیف	پارامترهای ورودی			پاسخ‌ها	
	ولتاژ (ولت)	سرعت جوشکاری (میلی متر بر دقیقه)	سرعت سیم (سانتی متر بر دقیقه)	ارتفاع گرده جوش (میلی متر)	عرض گرده جوش (میلی متر)
۱	۱۷	۲۰۰	۲۱۰	۲,۹۲	۵,۶۸
۲	۲۲	۲۰۰	۲۱۰	۲,۲۰	۵,۸۰
۳	۲۷	۲۰۰	۲۳۱	۲,۷۴	۷,۹۰
۴	۳۲	۲۰۰	۲۳۱	۲,۳۶	۱۱,۰۰
۵	۱۷	۲۵۰	۲۱۰	۲,۴۰	۶,۲۰
۶	۲۲	۲۵۰	۲۱۰	۱,۵۲	۵,۷۸
۷	۲۷	۲۵۰	۲۳۱	۱,۸۶	۷,۷۴
۸	۳۲	۲۵۰	۲۳۱	۲,۹۸	۹,۴۶
۹	۱۷	۳۱۵	۲۳۱	۲,۶۲	۶,۲۲
۱۰	۲۲	۳۱۵	۲۳۱	۲,۲۲	۱,۱۴
۱۱	۲۷	۳۱۵	۲۱۰	۱,۶۸	۵,۹۲
۱۲	۳۲	۳۱۵	۲۱۰	۱,۲۰	۸,۲۶
۱۳	۱۷	۴۰۰	۲۳۱	۲,۱۴	۴,۵۶
۱۴	۲۲	۴۰۰	۲۳۱	۲,۲۲	۴,۶۰
۱۵	۲۷	۴۰۰	۲۱۰	۱,۲۸	۶,۲۰
۱۶	۳۲	۴۰۰	۲۱۰	۱,۳۴	۶,۵۰

در تفاوت بین یادگیری انسان و ماشین می‌توان گفت انسان از طریق تعامل با محیط بیرونی یاد می‌گیرد اما از طریق نوشتن برنامه می‌توان به ماشین گفت که چه باید بکند، از طریق مثال‌های متعدد می‌توان ماشین را وادار به یادگیری نمود. ماشین می‌تواند از طریق تجربه محیط واقعی یاد بگیرید. هدف از یادگیری ماشین ساخت سیستم‌های کامپیوتری است که می‌تواند از تجربه خود عملی انطباق و یادگیری را اجرا کند. ماشین‌های یادگیری شدید یکی از روش‌های موفق اخیر در یادگیری ماشین، به خصوص برای انجام الگوی طبقه‌بندی است[13]. این روش در واقع یک الگوریتم جدید برای تک لایه‌های پنهان شبکه عصبی پیش‌خور بوده که دارای سرعت یادگیری بسیار بالا و عملکرد کلی خوبی دارا است[14]. در مقایسه با الگوریتم‌های یادگیری معمولی برای شبکه‌های عصبی که در شبکه‌های تکرار شونده نیاز به تنظیم پارامترها دارند، روش ماشین یادگیری شدید یک الگوریتم یادگیری در جهت شبکه عصبی پیش‌خور است که به صورت تصادفی گره‌های پنهان را انتخاب کرده و وزن خروجی شبکه عصبی پیش‌خور را به صورت آنالیز تحلیلی تعیین می‌کند [15].

در یادگیری ماشین جهت تخمین توابع وابسته به ورودی‌های زیاد و پیچیده، از شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. یکی از انواع شبکه‌های عصبی، شبکه عصبی پیشرو است. کاربرد این شبکه‌ها تخمین نگاشت‌های غیرخطی پیچیده از روی داده‌های ورودی است. علاوه‌براین، در مسائلی که حل آن‌ها با روش‌های قدیمی پارامتریک دشوار است، از این شبکه‌ها استفاده می‌گردد. پس انتشار الگوریتم یادگیری معروفی است که در شبکه عصبی پیشرو استفاده می‌شود. در این روش گرادیان‌ها با انتشار از خروجی محاسبه می‌شود. از مشکلاتی‌که در این شبکه‌ها وجود دارد می‌توان به مینیمم محلی، زمان آموزش طولانی و کند بودن اشاره کرد. هدف از ماشین یادگیری سریع حل این مسائل و مشکلات می‌باشد[16].

در شبکه عصبی پیشرو تک لایه پنهان برای N نمونه دلخواه (x, i, t) که در آن استاندارد با $\tilde{N}$ نود پنهان تابع فعالیت $g(x)$ به صورت رابطه (1) مدل می‌شود.

$$\sum_{i=1}^{\tilde{N}} \beta_{ig}(w_i x_i + b_i) = t_i \qquad (1)$$

در رابطه (1) Wi بردار وزن است که ورودی‌ها و i امین نـــود

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.21]

پنهان را به هم وصل می‌کند و B_i بردار وزن است که i امین نود پنهان را به نود خروجی متصل می‌کند. رابطه (1) را می‌توان به صورت (2) نوشت:

$$HB = T(Y) \quad (2)$$

که در این رابطه:

$$H=\begin{bmatrix} g(w_1X_1 + b_1) & \cdots & g(w_{\tilde{N}}x_1 + b_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(w_1 X_N + b_1) & \cdots & g(w_{\tilde{N}}x_n + b_{\tilde{N}}) \end{bmatrix} N \times \tilde{N} \quad (3)$$

$$B=\begin{bmatrix} B_1^T & T_1^T \\ \vdots & \vdots \\ B_{\tilde{N}}^T & T_N^T \end{bmatrix} N \times \tilde{N} \quad (4)$$

الگوریتم ماشین یادگیری سریع بیان می‌کند که در صورتی‌که تابع فعالیت مشتق‌پذیر نامتناهی باشد می‌توان W_i و b_i را به طور تصادفی انتخاب کرد. در این صورت شبکه عصبی تبدیل به یک سیستم خطی خواهد شد. در این سیستم خطی راه‌حل با کمترین میزان مربعات خطا به صورت رابطه (5) خواهد بود:

$$\hat{B} = H^{\dagger}T \quad (5)$$

در رابطه (4) H^T معکوس ماتریس موور-پنروز است. روش‌های زیادی برای یافتن معکوس ماتریس موور - پنروز وجود دارد. از این روش‌ها می‌توان به روش‌های مبتنی بر تکرار، ضرب متعامد، متعامدسازی و تجزیه مقدار منفرد اشاره کرد. روش متعامدسازی و مبتنی بر تکرار دارای محدودیت‌هایی هستند. زیرا در این روش‌ها از جستجو و تکرار استفاده شده که در ماشین یادگیری سریع از آن پرهیز می‌کنیم. روش ضرب متعامد زمانی استفاده می‌شود که H^T و H ماتریس تکین نبوده و به دلیل این محدودیت این روش در همه کاربردها استفاده نمی‌شود. به همین دلیلی در ماشین یادگیری سریع از روش تجزیه مقدار منفرد استفاده می‌شود. تاکنون توسعه‌های متعددی برای ماشین یادگیری سریع ارائه شده است[17].

3-2-2- ماشین بردار ارتباط

یادگیری ماشین به بررسی و ابداع الگوریتم‌های بر مبنای آن‌ها یک کامپیوتر می‌تواند یادگیری و پیش‌بینی را برمبنای مجموعه محدودی از داده انجام دهد. در این الگوریتم‌ها، مدلی برمبنای مجموعه‌ای از مشاهدات تشکیل شده و پیش‌بینی بر مبنای این مدل صورت می‌پذیرد. یادگیری با نظارت، زیرشاخه‌ای از یادگیری ماشین است که در آن یادگیری برمبنای مجموعه جفت ورودی-خروجی‌های اندازه‌گیری شده از یک تابع صورت پذیرفته و هدف یافتن مدلی برای آن تابع است. بدین منظور معمولاً مجموعه اندازه‌گیری‌ها به دو قسمت تقسیم شده، قسمتی از آن‌ها برای آموزش مدل و قسمت دیگر برای ارزیابی دقت آن استفاده می‌شوند[18]. در رگرسیون مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان، یک تابع به فرم معادله (6) بیان می‌گردد.

$$f(x) = y(x_i, w) = \sum_{i=1}^{N} w_i K(x, x_i) + w_0 \quad (6)$$

در رابطه فوق، W_i شامل وزن‌های مدل، K تابع کرنل و N تعداد نمونه‌های مورد استفاده جهت آموزش بوده و هدف یافتن وزن‌ها و پارامترهای تابع هسته به نحوی است که مدل ارائه شده برای پیش‌بینی تابع علاوه بر این که در نقاط آموزش کمترین اختلاف با مقادیر موجود از تابع را داشته باشد. همچنین انتظار می‌رود مدل به دست آمده در سایر نقاط نیز از قابلیت تعمیم خوبی برخوردار باشد. یکی از متداول‌ترین فرم‌های تابع هسته، تابع پایه شعاعی، مطابق با (7) است.

$$K(x, x_i) = exp(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2}) \quad (7)$$

از آنجا که عملکرد روش ماشین بردار پشتیبان برمبنای کمینه‌سازی ریسک ساختاری در کنار ریسک تجربی می‌باشد[19]، با استفاده از مدل‌سازی مبتنی بر این روش، معمولاً قابلیت تعمیم بالاتری را از روش‌هایی مانند شبکه‌های عصبی فراهم می‌گردد[20]. با این وجود، یادگیری مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان دارای چند نقطه ضعف نسبتاً مهم به شرح زیر می‌باشد [21].

- پیش‌بینی‌ها در ماشین بردار پشتیبان به صورت نقطه‌ای صورت پذیرفته و این روش فاقد تحلیل احتمالاتی می‌باشد. در حالت ایده آل، تخمین یک چگالی شرطی از خروجی‌ها $p(\frac{t}{x})$ نیز در پیش‌بینی مطلوب می‌باشد.
- در روش ماشین بردار پشتیبان، استفاده بسیاری از توابع هسته شده و تعداد توابع هسته مورد استفاده که برابر با تعداد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.21]

نمونه‌های موجود در بردار پشتیبان است، با افزایش سایز بانک اطلاعاتی آموزش به شدت افزایش می‌یابد.

- در روش ماشین بردار پشتیبان نیاز به محاسبه C ثابت تنظیم وε خطای حاشیه بوده که محاسبه آن‌ها نیازمند افزایش محاسبات و عدم تنظیم درست آن‌ها می‌تواند باعث یادگیری بیش از حد و در نتیجه کاهش قابلیت تعمیم گردد.

- تابع هسته مورد استفاده می‌بایست در شرایط مرسر صدق کند.

برای رفع مشکلات فوق، یک رویکرد کاملاً احتمالاتی به نام ماشین بردار ارتباط به وسیله مایک تیپینگ ارائه گردید. در این روش، ساختاری ساده مبتنی بر تحلیل بیزی و درست نمایی حاشیه‌ای ارائه شده است که علاوه بر رفع مشکلات مذکور، از تعداد بسیار کمتری از توابع هسته استفاده می‌کند[22].

در رابطه، μ و $\sum$ به ترتیب میانگین و واریانس این توزیع می‌باشند که به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$\mu = \sigma^{-2}\sum\varphi^T t \quad (8)$$

$$\sum = (\sigma^{-2}\varphi^T\varphi + A)^{-1} \quad (9)$$

در حقیقت فرایند یادگیری ماشین بردار رابطه‌ای یافتن مقدار بهینه این پارامترها است. در این فرایند بسیاری از ضرایب α_i به سمت بی‌نهایت میل کرده و ضریب وزن متناظر با آن‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود. لذا تعداد زیادی از توابع هسته در معادله حذف می‌گردند. به نمونه‌های موجود در بانک اطلاعات مورد استفاده جهت آموزش مدل که ضریب وزن آن‌ها صفر نمی‌باشد بردار ارتباط گفته می‌شود.

در انتها، با در نظر گرفتن پارامترهای بهینه به دست آمده، α_{MP} و σ^2_{MP} پیش‌بینی برای مقدار تابع در یک نقطه جدید برمبنای توزیع پسین وزن‌ها که با استفاده از این پارامترها به دست می‌آید محاسبه می‌گردد. با در نظر گرفتن ورودی جدید سیستم x^* برای خروجی می‌توان یک توزیع گاوسی به صورت رابطه(10) در نظر گرفت:

$$p(t^*|t) = N(t^*|y^*, \sigma_*^2) \quad (10)$$

که در رابطه فوق:

$$y^* = \boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x}^*) \quad (11)$$

$$\sigma_*^2 = \sigma_{MP}^2 + \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x}^*)^T \sum \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x}^*) \quad (12)$$

$$\varphi(\boldsymbol{x}^*) = [1, K(\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{x}_1), K(\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{x}_2), \dots, K(\boldsymbol{x}^*, \mathbf{x}_N)]^T \quad (13)$$

میانگین توزیع فوق، y^* به عنوان مقدار پیش‌بینی شده برای خروجی در نظر گرفته شده و واریانس این توزیع σ_*^2، معیاری از میزان عدم قطعیت در توزیع ارائه می‌نماید[23].

3-2-3- منطق فازی

منطق فازی توسط لطفی‌زاده در مقاله‌ای با عنوان سیستم‌های فازی به صورت رسمی معرفی شد [24]. لطفی‌زاده بیان کرد که تئوری کلاسیک بیش از حد بر روی دقت تأکید داشته و از این جهت با سامانه‌های پیچیده و دنیای واقعی چندان سازگاری ندارد [25]. منطق کلاسیک، هر چیزی را براساس یک سامانه دوتایی نشان می‌دهد (درست یا غلط، صفر یا یک)، اما در منطق فازی، درستی یا نادرستی هر چیزی با درجه عضویت نشان داده می‌شود که مقدار آن بین صفر و یک است.

منطق فازی یک منطق چند ارزشی و از روش‌های مدل کننده تصمیم‌گیری به روش انسانی است. در منطق کلاسیک، در محاسبات از متغیرهای عددی استفاده می‌شود ولی در منطق فازی برای دست‌یابی به نتایج مطلوب از متغیرهای زبانی استفاده می‌شود. سیستم‌های فازی شامل دو نوع، ممدانی و تاکاگی- سوگنو- کانگ است[26]. در این تحقیق، موتور استنتاج ممدانی به کار گرفته شده است. مقادیر ورودی‌های فازی پس از ورود به موتور استنتاج و با اعمال قوانین فازی موجود، به خروجی‌های فازی تبدیل می‌شوند. در پایان نیز خروجی‌های فازی با استفاده از روش غیرفازی‌سازی محاسبه مرکز جرم، به مقادیر خروجی زبری سطح تبدیل می‌شوند.

در قاعده فازی ممدانی اگر n تعداد ورودی و m تعداد قوانین فازی موجود در پایگاه قواعد باشد و همچنین A_i^l و B^l به ترتیب مجموعه‌های فازی ورودی‌ها و خروجی هستند که دارای توابع عضویت فازی و $\mu_{A_i^l}(x_i)$ $\mu_{B^l}(y)$ می‌باشند. در این مدل ابتدا ورودی‌های عددی در بخش فازی‌ساز به متغیرهای

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.21]

فازی با توابع عضویت فازی تبدیل می‌شود. سپس با توجه به ورودی‌های فازی شده ارزش یا توابع عضویت هرکدام از قواعد موجود در پایگاه قواعد فازی تعیین می‌شود. سپس با توجه به نوع استلزام موتور استنتاج این قواعد با هم ترکیب می‌شوند و خروجی موتور استنتاج محاسبه می‌شود[27]. خروجی موتور استنتاج نیز در قسمت غیرفازی‌ساز به متغیر عددی تبدیل می‌شود.

در سیستم تاکاگی- سوگنو- کانگ نیز قسمت اگر قواعد به صورت متغیر فازی و قسمت آنگاه قواعد از نوع غیرفازی می‌باشد و به صورت ترکیب خطی از ورودی‌های سیستم است. در این مدل نیز مثل مدل قبل ابتدا ورودی‌های عددی در قسمت فازی ساز به متغیرهای فازی تبدیل می‌شود. سپس وزن هر کدام از قواعد طبق رابطه (14) محاسبه می‌شود:

$$w^l = \prod_{i=1}^{n} \mu_{A_i^l}(x_i) , l = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

در انتها خروجی سیستم به صورت میانگین وزن‌دار از ورودی‌های سیستم، طبق رابطه (15) محاسبه می‌شود [28].

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^{m} y^l w^l}{\sum_{l=1}^{m} w^l} \quad (15)$$

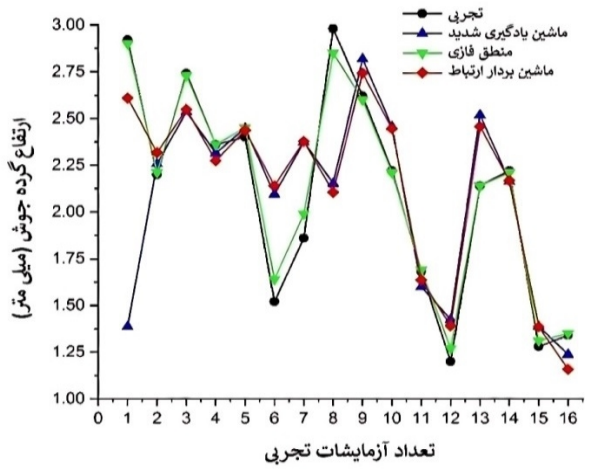
خطای نسبی در هریک سیستم‌های فازی برای پیش‌بینی‌ها از رابطه‌ی (16) به دست می‌آید:

$$\Delta A = |A - A_P| \ ، \ \frac{\Delta A}{A} = \text{خطای نسبی} \quad (16)$$

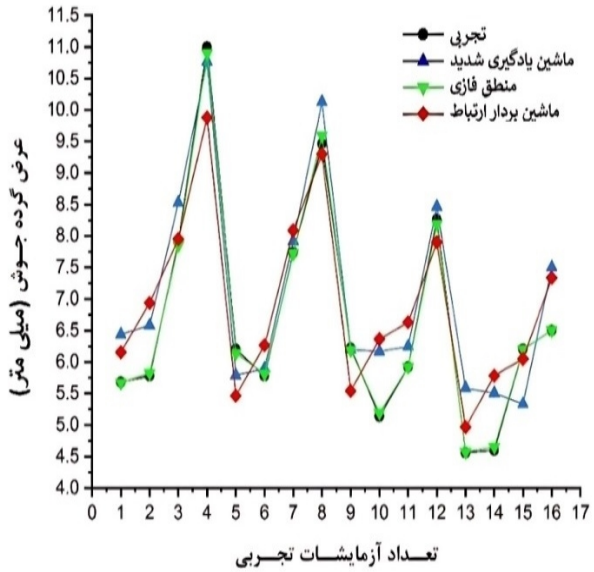
که در آن A، مقدار واقعی اندازه‌گیری شده و ΔA خطای مطلق در هر پیش‌بینی می‌باشد که از قدرمطلق اختلاف بین مقدار واقعی و مقدار پیش‌بینی شده مشخصه‌های هندسه شکاف (Ap) به دست می‌آید.

4-مقایسه نتایج مدل‌سازی با آزمایش‌های تجربی

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمـــایش‌های تجـربی در این بخش علاوه بر تحلیل نتایج مدل‌های ارائه شده، همان‌گونه که در نمودارهای(8 و9) نشان داده شده، خطوطی به عنوان خروجی مدل‌های ارائه شده رسم شده است که در نقاط مختلف نتایج یکسانی با داده‌های تجربی دارند ولی در این میان یکی از مدل‌های ارائه شده به نام منطق فازی نسبت به روش‌های دیگر دارای جواب بهتر و قابل تعمیم‌تر می‌باشد. پس از پیاده‌سازی مدل‌های ارائه شده در تمامی مدل‌های موجود نسبت به یافتن میانگین خطای موجود و جذر میانگین خطا تلاش‌هایی شد و جدول(4) مقایسه‌ای از نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد.



شکل 8- مقایسه داده‌های تجربی با خروجی انواع مدل‌های ارائه شده در ارتفاع گرده جوش



شکل 9- مقایسه داده‌های تجربی با خروجی انواع مدل‌های ارائه شده در عرض گرده جوش

عملکرد ماشین بردار پشتیبان تا حد زیادی به انتخاب درست پارامترهای مدل و تابع کرنل وابسته است. در این تحقیق از توابع کرنل خطی، پایه شعاعی و چندجمـــله‌ای در ایجـاد مـدل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.21]

جدول4-نتایج خروجی مدل مختلف برای پاسخ‌ها مورد نظر.

پاسخ های خروجی	انواع داده	نوع پاسخ آماری	مدل های هوش مصنوعی		
			منطق فازی	ماشین یادگیری شدید	ماشین بردار ارتباط
ارتفاع گرده جوش	آزمون	خطای میانگین	0.0677	0.3996	0.4117
	آزمون	جذر میانگین مربعات	0.0046	0.1597	0.1695
	آموزش	خطای میانگین	0.0274	0.0898	0.0998
	آموزش	جذر میانگین مربعات	0.0350	0.0081	0.0100
عرض گرده جوش	آزمون	خطای میانگین	0.5477	0.7793	0.9480
	آزمون	جذر میانگین مربعات	0.3000	0.6072	0.8987
	آموزش	خطای میانگین	0.2504	0.5766	0.7350
	آموزش	جذر میانگین مربعات	0.0627	0.3325	0.5402

برای هر یک از خروجی‌ها استفاده گردید و در این بین با استفاده از تابع کرنل پایه شعاعی جهت تخمین خروج‌ها بهترین نتایج به دست آمد و پارامترهای مدل ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات و تابع کرنل، برای هریک از دو خروجی انتخاب گردیدند. مقدار ثابت تنظیم C در تابع کرنل پایه شعاعی برابر 16603 و مقدار σ^2 برابر 0/33575 در نظر گرفته شدند.

با در نظر گرفتن جذر خطای مربعات میانگین خطا به عنوان شاخص ارزیابی عملکرد مدل در پیش‌بینی پارامترهای هندسه جوش، مقدار این شاخص در داده‌های آموزش مربوط به ارتفاع هندسه جوش 0/00027 به دست آمد و مقدار جذر مربعات میانگین خطا برای داده‌های آزمون 0/00025 محاسبه گردید. همچنین مدل شبکه بردار پشتیبان حداقل مربعات در پیش‌بینی عرض گرده جوش در داده‌های آموزش با در نظر گرفتن معیار جذر مربعات میانگین خطا از مقدار شاخص 0/00024 برخوردار است. مقدار همین شاخص در داده‌های آزمون 0/000315 بوده است.

5- نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش انجام شده امکان‌سنجی و مشخصه‌یابی جایگزینی روش ساخت افزایشی قوس و سیم مبتنی بر جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ برای ساخت پل و سازه‌های فلزی با رویکرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی است. در این تحقیق ولتاژ، سرعت تغذیه سیم و سرعت جوشکاری عنوان پارامترهای مؤثر ورودی فرایند در نظر گرفته شده‌اند و با توجه به ضروریات پژوهش پارامترهای ارتفاع و عرض گرده جوش به عنوان پارامترهای خروجی فرایند محسوب گردیده‌اند. همچنین برای برقراری ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی فرایند از روش‌های مدل‌سازی ماشین بردار ارتباط، ماشین یادگیری شدید و منطق فازی استفاده گردید. در این پژوهش به مدل‌سازی هندسه گرده جوش با سه روش معرفی‌شده پیش‌بینی کرده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. در نهایت سازه خاص سازگار با سه الگوریتم معرفی شده با روش ساخت افزایشی قوس و سیم بر پایه جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ تولید شد.

منابع

1-Maraki M, Mahmoodi M, Yousefieh M, Tagimalek H. Prediction and optimization of weld geometry in gas metal arc welding (GMAW) using least squares support vector machine. JWSTI 2023; 8 (2) :145-154 .

2-K. Li, Y. Zhang., Consumable double-electrode GMAW, Welding Journal, Vol. 87, pp. 11-17, 2008.

3-M. Anzehaee, M. Haeri., A new method to control heat and mass transfer to work piece in a GMAW process, Journal of Process Control, Vol. 22, pp. 1187-1102, 2012 .

4-. Huaming, Q. Xunpeng, H. Song, H. Zeqi, N. Mao ,. Geometry modeling of single track cladding deposited by high power diode laser with rectangular beam spot, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 100, pp. 38-46, 2018.

5-C. Kriesi, Q. Bjelland, M. Steinert., Fast and iterative prototyping for injection molding – a case study of rapidly prototyping, Procedia Manufacturing, Vol. 21, pp. 205-212, 2018.

6-B. Hosseinzadeh Samani, H. Hourijafari., Modeling and forecasting of energy consumption in food and processing industry using artificial neural networks,

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.21]

19-D. Meyer, F. Leisch, K. Hornik., The support vector machine under test. Neurocomputing, Vol. 55, pp. 169-186, 2003.
20-G. Krishnasamy, R. Paramesran, H. semi., supervised extreme learning machine, Neurocomputing, Vol. 207, pp. 560-567, 2016.
21-L. Yang, S. Zhang., A sparse extreme learning machine framework by continuous optimization algorithms and its application in pattern recognition, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 53, pp. 176-189, 2016.
22-L. Tapak, H. Mahjub, O. Hamidi, J. Poorolajal., Real-data comparison of data mining methods in prediction of diabetes in Iran. Healthc Inform Res, Vol. 19, pp. 85-177, 2013.
23-F.B. Khiabani, A. Ramezankhani, F. Azizi, F. Hadaegh, E.W. Steyerberg, D. Khalili., A tutorial on variable selection for clinical prediction models: feature selection methods in data mining could improve the results. J Clin Epidemiol, Vol. 71, pp. 76-85, 2016 .
24-H. Tagimalek, M.R. Maraki, M. Mahmoodi, H.K. Moghaddam, S. Farzad-Rik., Prediction of mechanical properties and hardness of friction stir welding of Al 5083/pure Cu using ANN, ICA and PSO model, SN Applied Sciences, Vol. 4, 102, 2022.
25-M. Sugeno., An introductory survey of fuzzy control, Information Sciences, Vol. 36, Issues 1-2, pp. 59-83, 1985.
26-S. Shakki, M.R. Zakerzadeh., Modeling and control of a shape memory alloy actuator using fuzzy sliding mode controller, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 353-360, 2016.
27-M. Salehpour, A. Jamali, A. Bagheri, N. Nariman zadeh., A new adaptive differential evolution optimization algorithm based on fuzzy inference system. Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 20, pp. 587-597, 2017.
28-S.A.H. Tabatabaei, A. Yousefi Koma, M. Ayati, S.S. Mohtasebi., Design and simulation of fuzzy-supervisory control system and an optimized three-dimensional fuzzy carrotchasing guidance algorithm for fixed-wing MAV, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 10-20, 2016 .
Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 6, pp. 16-22, 2015.
7-A. Zadeh, Fuzzy sets, Information and control, pp. 338-353, 1965.
8-Y.M. Zhang, Y. Chen, P. Li, A.T. Male., Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study, Journal of Material Process Technol, Vol. 135, pp. 57-347, 2003 .
9-W.C. Lee, C.C. Wei, S.C. Chung., Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, Issue. 11, pp. 2366–2374, 2014 .
10-F. Kollahan, M. Heidari., Modeling and optimization of MAG welding for gas pipelines using regression analysis and Simulated Annealing algorithm, Journal of Scientific & Industrial Research, Vol. 69, pp. 259-265, 2010.
11-J. Xiong, G. Zhang, J. Hu, L. Wu., Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 25, pp. 157–163, 2014.
12-H. Rong, Y. Ong, A. Tan., A fast pruned-extreme learning machine for classification problem, Neurocomputing, pp. 359-365, 2008 .
13-M. Yao, Z. Xu, Z. Wu, W. Dai., Incremental regularized extreme learning machine and its enhancement, Neurocomputing, pp. 11471155, 2016.
14-G.B. Huang, Q.Y. Zhu, C.K. Siew., Extreme learning machine: theory and applications, Neurocomputing, Vol. 70. No. 1, pp.489501, 2006.
15-G. Huang, et al., Trends in extreme learning machines: a review, Neural. 18. Networks, vol. 61, No. 1, pp. 32-48, 2015.
16-K. De Brabanter, P. KarsmaNers, F. Ojeda, C. Alzate, J. De Brabanter, K. PelcNmans, J. SuyNens., LS-SVMlab Toolbox User's Guide, ESAT-SISTA Technical Report, 10-146, 2011.
17-L. Wang, Support vector machines: theory and applications Springer Science & Business Media, Vol. 177, 2005.
18-D. J. MacKay, Bayesian interpolation. Neural computation, 4(3), 415-447, 1992 .

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.21]