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

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

Volume 8, Number 2, 2023



Prediction and optimization of weld geometry in gas metal arc welding (GMAW) using least squares support vector machine

M. R. Maraki[1] *, M. Mahmoodi[2], M. Yousefieh[3], Hadi Tagimalek[2]

1-Faculty of Materials and Metallurgy, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.
2-Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
3Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Received 30 December 2022 ; Accepted 16 February 2023

Abstract

In wire and arc additive manufacturing (WAAM) based on gas metal arc welding (GMAW) is one of the methods of manufacturing metal layer by layer. One of this method's basic steps is predicting the welding geometry created in each welding step. In the current research, an experimental study was conducted in this field considering the effective parameters of welding geometry. For this purpose, three parameters of voltage, welding speed, and wire feeding speed were considered as effective parameters on the welding geometry of the process. The width and height of the weld bead was selected as the answer according to the type and application of the research. The least squares support vector machine was used to model the welding geometry in the process. The results obtained from the regression (R^2) of train, test, validation, and total were 0.945, 0.793, 0.894, and 0.881 respectively. The comparison between the experimental data and the model data shows the significance of the proposed model.

Keywords: Wire and arc additive manufacturing, gas metal arc welding, welding geometry, least squares support vector machine, modeling

Corresponding Author: maraki@birjandut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هشتم، شماره2، پاییز و زمستان 1401



پیش‌بینی و بهینه‌سازی هندسه جوش در فرایند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ با استفاده از دستگاه بردار پشتیبان حداقل مربعات

محمدرضا مرکی[1*]، مسعود محمودی[2]، محمد یوسفیه[3]، هادی تقی ملک[2]

1- دانشکده مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

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

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

دریافت مقاله: 1401/10/9 ؛ پذیرش مقاله: 1401/11/27

چکیده

ساخت افزایشی قوس و سیم بر پایه جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ یکی از روش ساخت لایه به لایه فلزی است. از قدم‌های اساسی در این روش از ساخت قطعات پیش‌بینی هندسه جوش به وجود آمده در هر پاس از جوشکاری است. در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر روی هندسه جوش، مطالعه تجربی در این زمینه صورت گرفت. بدین منظور سه پارامتر ولتاژ، سرعت جوشکاری و سرعت تغذیه سیم به عنوان پارامترهای مؤثر بر هندسه جوش فرایند در نظر گرفته شدند و پارامترهای عرض گرده جوش و ارتفاع گرده جوش نیز از میان پارامترهای هندسه جوش با توجه به نوع و کاربرد پژوهش به عنوان پارامترهای خروجی انتخاب گردید. از ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات برای مدل‌سازی هندسه جوش در فرایند استفاده شد. نتایج حاصله از رگرسیون آموزش، آزمون، اعتبارسنجی و کل به ترتیب 0/945، 0/793، 0/894 و 0/881 بدست آمد. مقایسه بین داده‌های تجربی و داده‌های مدل به بیان معنی‌دار بودن مدل پیشنهادی می‌باشد.

کلمات کلیدی: ساخت افزایشی قوس و سیم، جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ، هندسه جوش، ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات، مدل‌سازی.

* پست الکترونیکی: maraki@birjandut.ac.ir

1- مقدمه

ساخت افزایشی به مجموعه‌ای از فناوری‌ها گفته می‌شود که قادر به تولید یک مدل فیزیکی از یک مدل رایانه‌ای با یک فرایند تولید لایه به لایه می‌باشد در مقایسه با روش‌های ساخت سنتی فنّاوری‌های ساخت افزایشی از قابلیت بالایی در ساخت قطعات پیچیده با استفاده از حداقل انرژی و حداقل ماده مصرفی برخوردار می‌باشد [1]. ساخت با بازنشانی لایه‌ها که

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

نمونه‌سازی سریع شناخته می‌شود به دلیل اینکه به‌طور مستقیم قادر به تولید نمونه‌های سه‌بعدی از محصولات می‌باشد به‌طور گسترده‌ای عمومیت یافته است. بسیاری از پژوهش‌های در دست انجام برای ساخت قطعات فلزی با کمک روش‌های ساخت افزایشی، بر روی ساخت توسط جوشکاری لیزر و ساخت توسط جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ متمرکز شده است [2]. جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ از زمینه‌های کاری متعددی برخوردار است. در این روش با حرارت ناشی از قوس ایجاد شده توسط اتصال سیم با قطعه کار و با تغذیه مداوم تحت حمایت گاز خنثی مانند هلیوم یا آرگون یا گاز فعال مانند دی‌اکسید کربن و یا تلفیقی از این گازها حوضچه جوش ایجاد و فرایند جوشکاری انجام می‌شود [3]. در این فرایند تداوم الکترود مصرفی، ناپیوستگی جوش کم، عدم وجود سرباره و خطر حرارتی کم در فلزپایه جزء مزایا محسوب شده که در این میان تداوم الکترود مصرفی مهم‌ترین مزیت است که باعث افزایش نرخ بهره‌وری می‌شود [4]. در بسیاری از فرایندها از جمله جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ، هزینه پژوهش‌های تجربی برای رسیدن به یک محدوده بهینه، بالا و زمان‌بر است. یکی از روش‌هایی که قادر به رفع این مشکل می‌گردد ایجاد مدل برای تنظیم ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی فرایند است.

لی و همکاران [5] با استفاده از تحلیل‌های رگرسیونی و روش تاگوچی مدل‌هایی برای پیش‌بینی گرده جوش بر پایه 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 لایه‌نشانی شده ایفا می‌کند. در پژوهش‌های مختلف وابستگی هندسه جوش با پارامترهای هندسه جوش به شکل معنادار بدست آمده است. خیانگ و همکاران[6] به بررسی تأثیر پارامترهای فرایند بر شکل ظاهر مولفه‌ها در گرده جوش در جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ پرداختند که نشان داد میزان جریان قوس یکی از عوامل موثر در شکل و هندسه جوش محسوب می‌شود پارامترهای فرایند به طور کامل بر اساس تجربیات یا استخراج از بانک‌های اطلاعاتی انتخاب می‌شوند. ساهیو [7] به بررسی رابطه متقابل پیچیده بین گرده جوش واقعی و پارامترهای مختلف جوشکاری، پیش‌بینی هندسه گرده‌های مناسب از طریق مدل‌سازی ریاضی پرداخت. تغییر مداوم پارامترهای جوشکاری در این مطالعه، از روش یادگیرنده رگرسیون برای مقایسه عملکرد مدل‌های پیش‌بینی‌کننده یادگیری ماشینی (ML) که شامل خطی هستند، استفاده کرد. رگرسیون(LR)، درخت رگرسیون(RT)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، مجموعه‌های درخت(ET)، رگرسیون فرایند گاوسی (GPR) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با استفاده از مجموعه داده بدست آمده در محدوده 1- تا 1+ مقیاس‌بندی و نرمال‌سازی کرد. آن برای تجسم بهتر حجم را به عنوان پارامترهای ورودی برای پیش بینی هندسه جوش در نظر گرفت. در نهایت، شاخص‌های آماری، بر روی تمامی مدل‌های توسعه‌یافته برای ارزیابی عملکرد آن‌ها انجام داد. بنابراین، مدل‌های درخت خوب و شبکه عصبی مصنوعی به بالاترین دقت پیش‌بینی 88 تا 91 درصد دست یافتند. مارتینز و همکاران[8] به بررسی رابطه متقابل غیرخطی بین پارامترهای اولیه و نهایی فرایند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ پرداختند. آن‌ها از یک تکنیک یادگیری ماشین در پردازش تصویر با تکنیک یادگیری عمیق، به مدل پیش‌بینی اعتبار بخشیدند. هدف آن‌ها ایجاد چارچوبی برای پیش‌بینی هندسه مهره جوش فرایند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ، با پیوستن به دو تکنیک یادگیری ماشین است. نتایج به‌دست‌آمده، اثربخشی این الگوریتم‌ها را برای پیش‌بینی و پتانسیل آن برای تحلیل آنی را نشان داد.

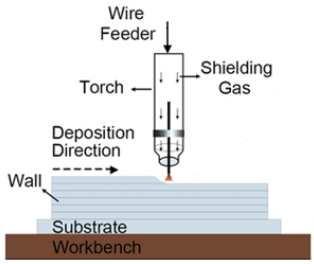
در این پژوهش تلاش گردیده تا با استفاده از روش حداقل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

مربعات ماشین بردار پشتیبان به عنوان یکی از رویکردهای شناخته شده داده کاوی عددی، بتوان مدلی کارا جهت آموزش، آزمون، اعتبارسنجی و ارزیابی رفتار غیرخطی قطره جوش که منجر هندسه جوش می‌شود ارائه نمود. با توجه به پیاده سازی مدل ارائه شده، با داده‌های آزمایشگاهی می‌توان از آزمایش دوباره جلوگیری کرد. چرا که شاخص‌های آماری نشان دهنده سازگاری و ناسازگاری می‌باشند. در پژوهش حاضر با انجام آزمایش‌های تجربی زمینه لازم برای تشکیل این مدل به وجود آمده است. در این پژوهش سرعت سیم، سرعت میز و ولتاژ به 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 شد. همچنین برای برقراری ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی فرایند از ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات استفاده گردید.

2- آزمایش‌های تجربی

هدف از پژوهش انجام شده پیش‌بینی و بهینه سازی هندسه گرده جوش در جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ برای کاربردهای ساخت افزایشی می‌باشد. به همین منظور در شکل(1) شماتیک فرایند ساخت افزایشی قوس و سیم بر پایه جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ نشان داده شده است. در این پژوهش از دستگاه 3arc401 برای جوشکاری به همراه سیستم تغذیه سیم Carry MIG 401 استفاده شد. در این آزمایش از سیم جوشکاری شرکت آما 40-18M با استاندارد DIN 8559، قطری برابر با 1/2 میلی‌متر و از جنس 90 درصد آهن استفاده شد.

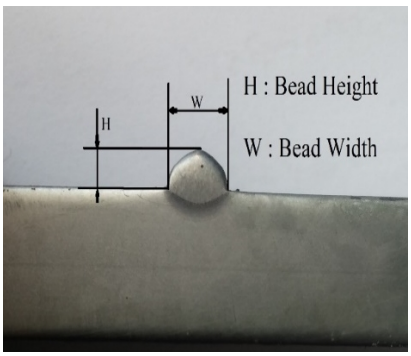


شکل 1- شماتیکی از فرایند ساخت افزایشی قوس و سیم بر پایه جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ

سرعت تغذیه سیم(الکترود)، ولتاژ و سرعت جوشکاری به عنوان پارامترهای ورودی مؤثر در ارتفاع و عرض گرده جوش مدنظر قرار گرفت. برای پارامتر ولتاژ چهار سطح، پارامتر سرعت جوشکاری چهار سطح و سرعت تغذیه سیم سه سطح در نظر گرفته شده است. پارامترها و مشخصات متغیرهای فرایندی در جدول(1) نشان داده شده است. تعداد آزمایش‌های با سطوح در نظر گرفته شده با استفاده از نرم افزار مینی تب و با روش تاگوچی طراحی آزمایش شد. لازم بذکر است جدول آزمایش‌های با استفاده از روش هوش مصنوعی مورد سنجش قرار گرفت و صرفا از روش تاگوچی جهت چیدمان آزمایش‌های استفاده شد. پس از انجام آزمایش‌ها قطعات از مقطع عرضی بریده و اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری این ابعاد با استفاده از کولیس ساعتی با دقت 0/02 میلی‌متر انجام گرفت که در شکل(2) قابل مشاهده می‌باشد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی انجام شده در جدول (2) آمده است.

جدول1- پارامترها و مشخصات متغیرهای فرایندی

ردیف	پارامترهای ورودی	کمیت	محدوده کاری
1	ولتاژ	ولت	32-17
2	سرعت تغذیه سیم	سانتی متر / دقیقه	253-210
3	سرعت جوشکاری	میلی‌متر / دقیقه	400-200



شکل2- تصویری از مقطع برش داده شده

3- مدل سازی دستگاه بردار پشتیبان حداقل مربعات

در سیستم‌های جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ به صورت خودکار ورودی‌های متعددی وجود دارند که می‌توان با کنترل آن‌ها خروجی را کنترل نمود [9].

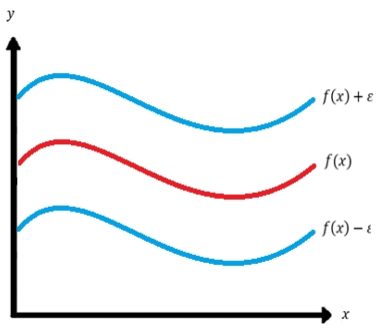
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

جدول2-نتایج آزمایش‌های تجربی

ردیف	پارامترهای ورودی			پاسخ‌ها	
	سرعت تغذیه سیم (سانتی متر بر دقیقه)	ولتاژ (ولت)	سرعت جوشکاری (میلیمتر بر دقیقه)	ارتفاع گرده جوش (میلی متر)	عرض گرده جوش (میلی متر)
۱	۲۱۰	۱۷	۳۱۵	۲,۰۴	۴,۶۶
۲	۲۱۰	۲۲	۳۱۵	۱,۶	۴,۷۴
۳	۲۱۰	۳۲	۳۱۵	۱,۲	۸,۲۶
۴	۲۳۱	۱۷	۲۵۰	۴,۱۲	۸,۹۲
۵	۲۳۱	۲۷	۲۰۰	۲,۷۴	۷,۹
۶	۲۳۱	۳۲	۳۱۵	۲,۰۸	۹,۷۴
۷	۲۳۱	۱۷	۲۵۰	۳,۷	۸,۲۴
۸	۲۵۲	۲۷	۲۰۰	۳,۲۶	۱۰,۱۲
۹	۲۵۲	۳۲	۲۰۰	۲,۸۲	۱۱,۹۲
۱۰	۲۵۲	۱۷	۲۰۰	۲,۹۲	۵,۶۸
۱۱	۲۵۲	۱۷	۲۵۰	۲,۴	۶,۲
۱۲	۲۱۰	۱۷	۴۰۰	۲,۰۶	۳,۸۲
۱۳	۲۱۰	۲۲	۲۰۰	۲,۲	۵,۸
۱۴	۲۱۰	۲۲	۲۵۰	۱,۵۲	۵,۷۸
۱۵	۲۱۰	۲۲	۴۰۰	۲,۰۶	۵,۸۲
۱۶	۲۱۰	۲۷	۲۰۰	۱,۹۴	۷,۲۳

بسیاری از روش‌ها برای مدل کردن رفتارهای فرایند مختلف جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ در زمینه تجزیه و تحلیل اثر پارامترهای موجود وجود دارد مثلاً روش‌های رگرسیون خطی، روش پاسخ سطح، شبکه عصبی مصنوعی و روش تاگوچی جزء این روش‌ها محسوب می‌شوند تا در زمینه بهینه‌سازی هندسه جوش به منظور دست‌یابی به بهترین حالت هندسه پارامترهای ورودی را در حالات مختلف آزمایش کنند [10]. با توسعه رباتیک در فرایند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و مکانیزه شدن فرایند تحولی ایجاد شد. جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ از نظر تولید قطعات از مزیت‌هایی چون حجم تولید بالا، قدرت رسوب بالا هزینه کمتر خرید برخوردار است [11و12].

ماشین بردار پشتیبان، یک ابزار یادگیری با نظارت است، که برای طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. این روش که در سال 1963، به‌وسیله ولادیمیر واپنیک ارائه شده، در سال‌های اخیر کارایی بهتری نسبت سایر روش‌ها، مانند شبکه‌های عصبی پرسپترون نشان داده است. یک سیستم طبقه‌بندی مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان، داده‌ها را با استفاده از توابع تصمیم‌گیری غیرخطی، به فضایی با ابعاد بالاتر برده و سپس آن‌ها را به صورت خطی تفکیک می‌نماید. این الگوریتم را می‌توان به منظور رگرسیون به صورت معادله (1)، بیان نمود، که در آن، f(x) تابعی با m متغیر است که قرار است تخمین زده شود و w بردار ضرایب، b بردار بایاس و ϕ، تابع کرنل می‌باشند.



شکل3- تابع f(x) و محدوده مجاز خطا

$$y = f(x) = \sum_{i=1}^{m} w_i \phi_i(x) + b_i = w^T \phi(x) + b \qquad (1)$$

به منظور تخمین تابع f(x) در این روش، W، B و پارامترهای تابع کرنل، می‌بایست برمبنای یک مجموعه از داده آموزشی به نحوی محاسبه شوند که کمترین خطای ممکن بر مبنای این مدل ایجاد گردد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

در محاسبه خطا یک محدوده مجاز (ϵ) در تخمین تابع وجود دارد. در شکل(3) تابع f(x) و محدوده مجاز خطا نشان داده شده است.

خطای رگرسیون با استفاده از ماشین بردار پشتیبان و با استفاده از تابع ضرر ε - غیرحساس واپنیک به صورت معادله (2) بیان می‌شود، که این مسئله در شکل(4) نشان داده شده است [13].

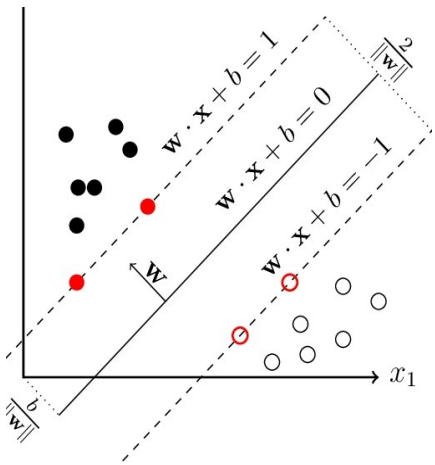
$$\xi = |y - f(x)|_\varepsilon = max\{0. |y - f(x)| - \varepsilon\} \quad (2)$$

در معادله (3) روش ماشین بردار پشتیبان کلاسیک، بردارهای w و b، با کمینه کردن تابع ریسک R(W) تحت قیود معادله (4)، برای مجموعه N داده آموزشی به دست می‌آیند [14].

$$\mathrm{R(w)} = \frac{1}{2}\|w\|^2 + C.\sum_{i=1}^{N}\xi_i \quad (3)$$

$$\text{Subject to: } y_i.(w^T\phi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i \ \mathrm{i} = 1, \dots, \mathrm{N} \quad (4)$$

کمینه کردن تابع R، در ماشین بردار پشتیبان کلاسیک، از طریق روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی مرتبه دوم صورت می‌گیرد، که لازمه آن، حجم محاسبات بالایی است. این نقطه ضعف در روش ماشین بردار پشتیبان با کمینه مربعات برطرف گردیده است، که بهینه‌سازی را از طریق حل یک مجموعه از معادلات خطی را به جای برنامه مرتبه دوم انجام می‌دهد [12].



شکل4- خطای رگرسیون در ماشین بردار پشتیبان[15]

در ماشین بردار پشتیبان با حداقل مربعات، در نهایت مسئله بهینه‌سازی به کمینه‌سازی تابع R(w) با قیود زیر، منتج می‌گردد:

$$L_\alpha(w.b.e) = \frac{1}{2}\|w\|^2 + \frac{C}{2}\sum_{i=1}^{N} e_i^2 - \sum_{i=1}^{N}\alpha_i\{\langle w.\varphi(x_i)\rangle + b + e_i - y_i\} \quad (6)$$

لاگرانژین این مسئله عبارت است از:

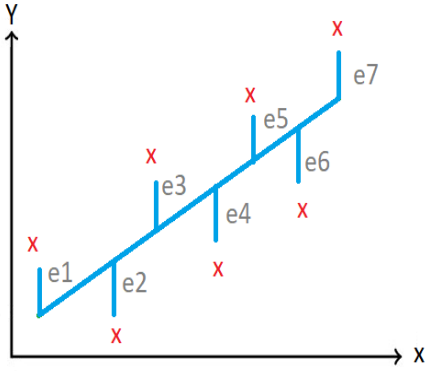
S.t. $y_i = \langle w.\varphi(x_i)\rangle + b + e_i$ که e_i متغیر خطای داده آموزشی iام، مطابق شکل(5) و $C \geq 0$ ثابت تنظیم است. که $\alpha_i \in R$ ضرایب لاگرانژ می‌باشند. مشتق‌گیری شرایط بهینگی زیر را نتیجه می‌دهد:

$$\frac{\partial L_\alpha(w.b.e)}{\partial w} = 0 \ \rightarrow \ \sum_{i=1}^{N}\alpha_i\varphi(x_i) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial L_\alpha(w.b.e)}{\partial b} = 0 \ \rightarrow \ \sum_{i=1}^{N}\alpha_i = 0$$

$$\frac{\partial L_\alpha(w.b.e)}{\partial e_i} = 0 \ \rightarrow \ \alpha_i = C\ .\ e_i\ .(i = 1\ldots.N)$$

$$\frac{\partial L_\alpha(w.b.e)}{\partial \alpha_i} = 0 \ \rightarrow \ \langle w.\varphi(x_i)\rangle + b + e_i - y_i = 0\ ,(i = 1\ldots.N)$$



شکل5- خطای تخمین در روش LSSVM

جایگذاری w و e در لاگرانژین، سیستم خطی Krause-Kuhn-Tucker conditions(KKT) زیر را نتیجه می‌دهد:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1_v^T \\ 1_v & \Omega + {}^{I}/_{C} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن: بردارهای 1 در N بوده و I ماتریس همانی با سایز N می‌باشد.

$$\Omega_{ki} = \langle\varphi(x_k).\varphi(x_i)\rangle \ \ k\ .\quad i = 1\ldots.N \quad (9)$$

طبق قضیه مرسر [16]، ضرب داخلی $\langle\varphi(x).\varphi(x_i)\rangle$ را می‌توان از طریق کرنل K(x,x_i) به صورت زیر بیان نمود.

$$\Omega_{ki} = \langle\varphi(x_k).\varphi(x_i)\rangle = K(x_k.x_i) \qquad k.i = 1\ldots.N \quad (10)$$

کرنل K(.,.) غالباً در الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با حداقل مربعات، معمولاً کرنل تابع پایه شعاعی گوسی، مورد استفاده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

قرار می‌گیرد. بنابراین، تخمین تابع بر مبنای الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با حداقل مربعات را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i K(x.x_i) + b \quad (11)$$

که α_i و b پاسخ‌های معادله 11 می‌باشند [17].

با توجه به معادله 11، با استفاده از ماشین بردار پشتیبان می‌توان بر مبنای مجموعه محدودی از اندازه‌گیری‌ها مدلی جهت پیش‌بینی هندسه گرده جوش ارائه نمود. در این مدل‌سازی، سرعت تغذیه سیم، ولتاژ و سرعت جوشکاری به عنوان پارامترهای ورودی و ارتفاع و عرض گرده جوش به عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. شکل(6) نمایی از این مدل را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی داده‌های ارتفاع و عرض گرده جوش، از جعبه ابزار ماشین‌های بردار پشتیبان حداقل مربعات در نرم‌افزار متلب استفاده گردید. جهت آموزش مدل و ارزیابی آن، داده‌های جدول (2) ارائه شده و مورد استفاده واقع گردیدند. از 16 داده، 13 داده جهت آموزش و 3 داده جهت ارزیابی استفاده شد. ورودی‌ها و خروجی‌ها در بازه 1- تا 1+، نرمالیزه شدند. برای نرمالیزه کردن داده‌ها از رابطه 12 استفاده شده است.

$$yn = 2 * \frac{y - \left(\frac{max+min}{2}\right)}{(max - min)} \quad (12)$$

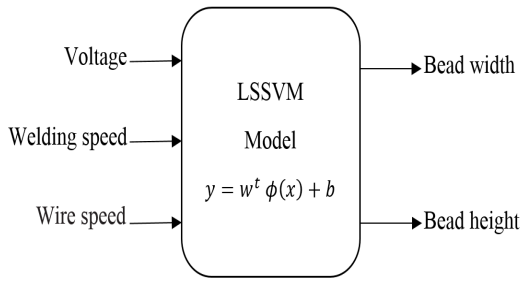
که در این رابطه به ترتیب مقدار بیشینه و کمینه در مجموعه داده‌ها برای هریک از ورودی‌ها یا خروجی می‌باشند. داده‌های خروجی به دست آمده، با استفاده از رابطه 13، به بازه اصلی خود بازگردانده شدند.

$$\hat{y} = y_p * \left(\frac{max - min}{2}\right) + \left(\frac{max + min}{2}\right) \quad (13)$$

در این رابطه، y_p مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل بر مبنای داده‌های نرمالیزه و $\hat{y}$ خروجی نهایی مدل می‌باشند.

4- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی در این بخش علاوه بر تحلیل نتایج مدل، در ابتدا تأثیر پارامترهای فرایند بر روی هندسه جوش مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودارهای تغییرات عرض گرده جوش و ارتفاع گرده جوش در شکل (7) نشان داده شده است. همان‌گونه که در نمودارهای نشان داده شده است با افزایش سرعت جوشکاری هر دو پارامتر هندسه گرده جوش با کاهش مواجه می‌شوند. در هر نمودار عدد اول نشان‌دهنده سرعت تغذیه سیم و عدد دوم مقدار ولتاژ را نشان می‌دهد. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد با افزایش مقدار ولتاژ مقدار ارتفاع گرده جوش کاهش می‌یابد و مقدار عرض گرده جوش افزایش می‌یابد.



شکل6- نمایی از ساختار مدل ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی ارتفاع و عرض گرده جوش

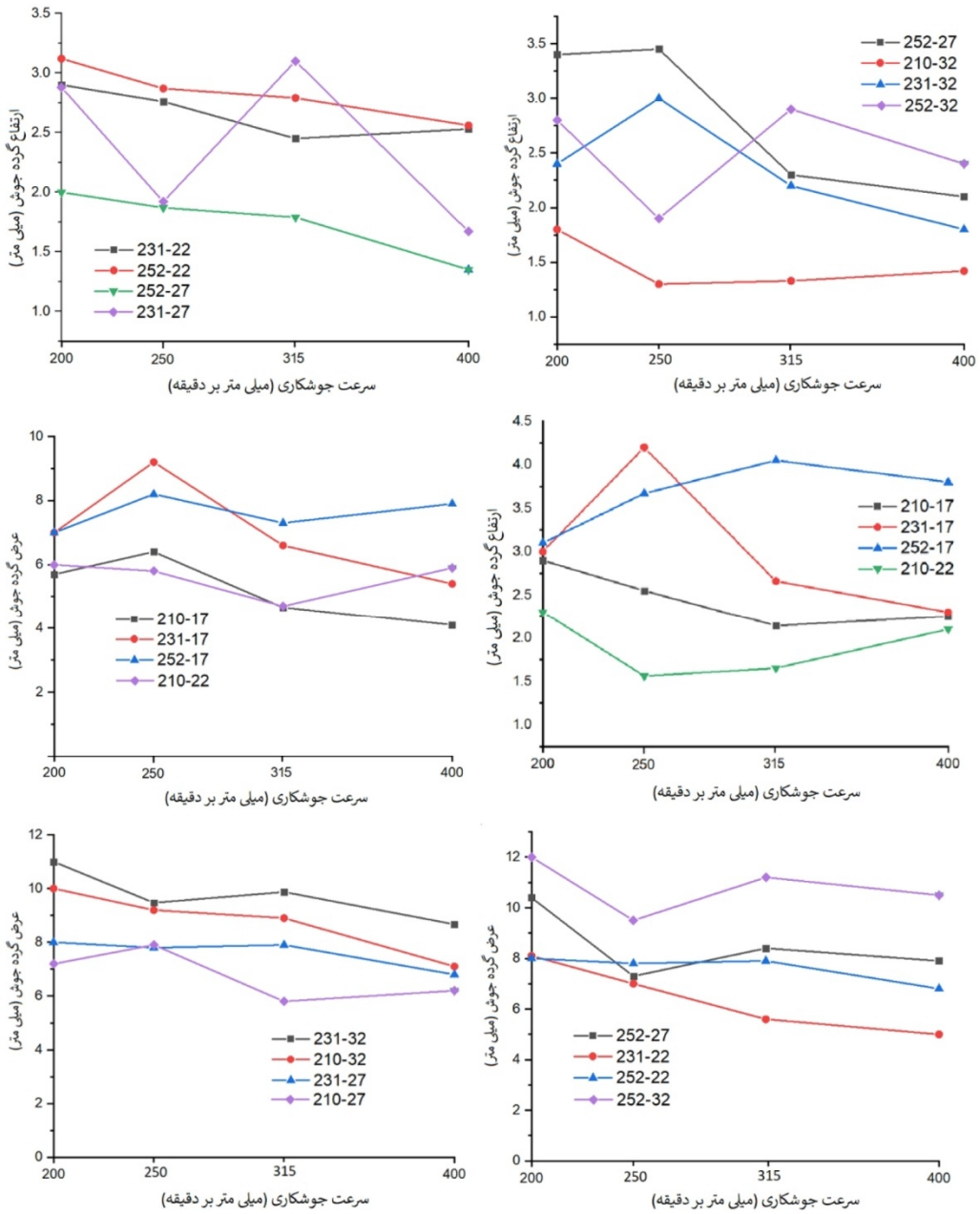
پس از پیاده‌سازی مدل ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات، جهت ارزیابی دقت مدل، شاخص‌های خطای مربعات میانگین خطا و جذر خطای میانگین مربعات که به ترتیب مطابق با معادلات 14 و 15 تعریف شد.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{N} \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (15)$$

در روابط فوق، y_i خروجی اندازه‌گیری شده و $\hat{y}_i$ خروجی پیش‌بینی شده توسط مدل می‌باشند. عملکرد ماشین بردار پشتیبان تا حد زیادی به انتخاب درست پارامترهای مدل و تابع کرنل وابسته است. در این پژوهش از توابع کرنل خطی، پایه شعاعی و چندجمله‌ای در ایجاد مدل برای هر یک از خروجی‌ها استفاده گردید و در این بین با استفاده از تابع کرنل پایه شعاعی جهت تخمین خروجی‌ها بهترین نتایج به دست آمد و پارامترهای مدل ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات و تابع کرنل، برای هر یک از دو خروجی انتخاب گردیدند. مقدار ثابت تنظیم C در تابع کرنل پایه شعاعی برابر 16603 و مقدار σ^2

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]



شکل7- نمودارهای ارتفاع گرده جوش B(H) و عرض گرده جوش B(W) در سرعت جوشکاری W(S).

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 بدست 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.

جداول(3 و 4) به ترتیب نتایج بدست آمده از مدل ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات و نتیجه عملکرد و رگرسیون الگوریتم برای هر مرحله را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

جدول 3- نتایج بدست آمده از مقادیر واقعی و مدل ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات

ردیف	ارتفاع گرده جوش (میلی متر)	پیش‌بینی ارتفاع گرده جوش (میلی متر)	عرض گرده جوش (میلی متر)	پیش‌بینی عرض گرده جوش (میلی متر)
۱	۲،۰۴	۱،۹۹	۴،۶۶	۴،۶۶۰
۲	۱،۶	۱،۵۹۹	۴،۷۴	۴،۷۳۹
۳	۱،۲	۱،۱۹۹	۸،۲۶	۸،۲۵۹
۴	۴،۱۲	۴،۱۱۹	۸،۹۲	۸،۹۱۹
۵	۲،۷۴	۲،۷۳۹	۷،۹	۷،۹۰۰
۶	۲،۰۸	۲،۰۸۰	۹،۷۴	۹،۷۳۹
۷	۳،۷	۳،۶۹۹	۸،۲۴	۸،۲۳۹
۸	۳،۲۶	۳،۲۶۰	۱۰،۱۲	۱۰،۱۱۹
۹	۲،۸۲	۲،۸۱۹	۱۱،۹۲	۱۱،۹۱۹
۱۰	۲،۹۲	۲،۹۱۹	۵،۶۸	۵،۶۸۰
۱۱	۲،۴	۲،۴۰۰	۶،۲	۶،۱۹۹
۱۲	۲،۰۶	۲،۰۶۰	۳،۸۲	۳،۸۲۰
۱۳	۲،۲	۲،۱۹۹	۵،۸	۵،۷۹۹
۱۴	۱،۵۲	۱،۵۲۰	۵،۷۸	۵،۷۸۰
۱۵	۲،۰۶	۲،۰۵۹	۵،۸۲	۵،۸۱۹
۱۶	۱،۹۴	۱،۹۴۰	۷،۲۳	۷،۲۳۰

جدول 4- نتیجه عملکرد و رگرسیون الگوریتم برای هر مرحله

	رگرسیون			
	آموزش	آزمون	اعتبارسنجی	کل
ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات	۰،۹۴۵	۰،۷۹۳	۰،۸۹۴	۰،۸۸۱

5-نتیجه‌گیری

به منظور کاربرد در روش ساخت افزایشی، در این پژوهش، به مدل‌سازی هندسه گرده جوش برحسب پارامترهای فرایند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ با پارامترهای ورودی ولتاژ، سرعت جوشکاری و سرعت تغذیه سیم با استفاده از ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات، به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند مدل‌سازی پرداخته شد. دقت مدل با معیارهای آماری استاندارد سنجیده شد. با توجه به این که معیار خطای جذر خطای میانگین مربعات محاسبه شده در مراحل آموزش و آزمون برای هر دو پارامتر عرض گرده جوش و ارتفاع گرده جوش مقدار بسیار کمی بدست آمد، مدل طراحی شده دارای دقت بالایی بوده و با توجه به نزدیک بودن این معیار در مراحل آموزش و آزمون، این مدل دارای قابلیت تعمیم بالایی می‌باشد. از ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات برای مدل‌سازی هندسه جوش در فرایند استفاده شد. نتایج حاصله از رگرسیون آموزش، آزمون، اعتبارسنجی و کل به ترتیب 0/945، 0/793، 0/894و 0/881 بدست آمد. مقایسه بین داده‌های تجربی و داده‌های مدل به بیان معنی‌دار بودن مدل پیشنهادی می‌باشد. از نتایج این مدل‌سازی می‌توان در پیش‌بینی و کنترل ضخامت لایه‌های به وجود آمده در فرایند ساخت افزایشی به کمک جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ بهره برد.

منابع

1- D. Yang, C. He, G. Zhang., forming characteristics of thin-wall parts by double electrode GMAW based additive manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 227, pp.153–160, 2016.

2- 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.

3- N. SV, *Modern Welding Technology. New Delhi*, Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd.; 1988.

4- M.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.

5- 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.

6- 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.

7- T. Saeheaw., Comparison of different supervised machine learning algorithms for bead geometry prediction in GMAW process, *Engineering Solid Mechanics*, Vol. 1, pp. 175-190, 2023.

8- R.T. Martínez, G.A. Bestard, A.M.A. Silva, S.C.A. Alfaro., Analysis of GMAW process with deep learning and machine learning techniques, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 62, pp. 695-703, 2021.

9- P. Wanjara, M. Brochu, M. Jahazi., Electron beam free-forming of stainless steel using solid wire feed, *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 2278–86, 2007.

10- Y. Song, S. Park, D. Choi, J. Haesung., 3D welding and milling: Part I-a direct approach for

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

freeform fabrication of metallic prototypes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 9, pp. 1063–1069, 2005.
11- C. Cortes, V. Vapnik, Support-vector networks. Machine Learning, Vol. 20, No. 3, pp. 273, 1995.
12- V. Kecman., *Learning and soft computing: support vector machines*, neural networks, and fuzzy logic models, MIT press, 2001.
13- A. Aryafar, R. Gholami, R. Rooki, F. Ardejani, Heavy metal pollution assessment using support vector machine in the Shur River, Sarcheshmeh copper mine, Iran. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 67(4), pp. 1191-1199, 2012.
14- F. Parrella, *Online support vector regression. A thesis presented for the degree of Information Science*, University of Genoa, Italy, 2007.
15- J. Suykens, T.V. Gestel, J.D. Brabanter, B.D. Moor, J. Vandewalle., *Least Squares Support Vector Machines*, 2002.
16- W. Scientific Pub, C. Singapore, C. Shawe, J. Taylor., An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods, *Cambridge university press*, 2002.
17- H. Wang, D. Hu, Comparison of SVM and LS-SVM for regression. In Neural Networks and Brain, ICNN&B'05. *International Conference on*, Vol. 1, pp. 279-283, 2005.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]