

پیش بینی و تحلیل اثر پارامترهای فرآیند جوشکاری پرتو الکترونی بر هندسه جوش مبتنی بر منطق فازی

ریحانه اسمعیلی^۱، حسین وفایی نژاد^{۲*}، ابوالفضل رضایی بزاز^۳، بهروز بیدختی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد؛ r.esmaeili@alumni.um.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ hvafaeinezhad@um.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ bazaz-r@um.ac.ir

^۴ دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ beidokhti@um.ac.ir

* نویسنده مسئول: حسین وفایی نژاد

چکیده

کلمات کلیدی

جوشکاری پرتو الکترونی، منطق فازی، محاسبات نرم، هندسه جوش.

از آنجا که جوشکاری پرتو الکترونی از جوشکاری های پر هزینه و دارای تجهیزات گران بها است. حداقل آزمون و خطا در صنعت اهمیت بسیاری دارد. بنابراین به کمک مدلسازی منطق فازی در نرم افزار متلب می توان، پارامترهای بهینه برای دستیابی به عمق نفوذ مناسب را تعیین کرد. در نتیجه در صرف هزینه و زمان صرفه جویی خواهد شد. در مطالعه حاضر، با بررسی مطالعات پیشین به مدلسازی فرآیند جوشکاری پرتو الکترونی در نرم افزار متلب پرداخته شد. سپس با پارامترهای بهینه حاصل از مدلسازی، جوشکاری انجام شد. با مقایسه عمق نفوذ پیش بینی شده و عمق نفوذ نمونه جوشکاری شده، مطابقت مطلوبی مشاهده شد. در نتیجه به منظور دستیابی به عمق نفوذ معین می توان پارامترهای بهینه را با کمک مدلسازی تعیین کرد.

1- مقدمه

در صنایع مختلف، از جوشکاری به عنوان راه حلی برای اتصال اجزا، قطعات، سازه ها و تعمیرات قطعات آسیب دیده استفاده می شود. با توجه به اینکه نیازهای متفاوتی در صنایع وجود دارد، لذا تاکنون روش های متعدد جوشکاری ابداع شده اند. به طور کلی جوشکاری به دو صورت حالت مذاب و حالت جامد امکان پذیر است. در میان روش های حالت مذاب، امکان جوشکاری با منابع تامین حرارت مختلف وجود دارد. به طور مثال در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی از قوس حاصل از جریان الکتریکی برای ذوب فلز مورد نظر استفاده می شود. همچنین در فرآیند جوشکاری پرتو الکترونی، حرارت لازم برای ذوب قطعه کار توسط پرتو پر انرژی الکترونی تامین می شود. از آنجا که روش های متعدد جوشکاری، دارای پارامترهای مختلفی هستند [1]. تنظیمات مربوط به پارامترها به جهت دستیابی به جوشی با کیفیت اهمیت بسیار زیادی دارد. همچنین در اکثر فرآیندها تعیین پارامتر بر عهده اپراتور است، لذا امکان خطا انسانی و عدم موفقیت در ایجاد جوش مناسب، وجود دارد.

با توجه به اهمیت تاثیر پارامترهای جوشکاری بر خواص جوش، نیاز به کنترل دقیق و بهینه سازی پارامترهای جوشکاری است. فرآیند بهینه سازی پارامترها از طریق خطا و آزمایش، علاوه بر صرف زمان، هزینه مربوط به دستگاه، مواد و آزمون را به همراه دارد. بنابراین پیشنهاد می شود، فرآیند بهینه سازی با کمک محاسبات نرم انجام گیرد. سپس با تهیه چند نمونه آزمایشی، نتایج محاسبات نرم با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گیرد. در راستای این مهم، مطالعه ای به جهت جلوگیری از انتخاب تصادفی تکنیک محاسبات نرم، سه تکنیک رایج شامل منطق فازی^۱، تاگوچی^۲ و RSM را به منظور بهینه سازی فرآیند جوشکاری مورد مقایسه قرار داده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد، تکنیک منطق فازی با محدوده خطای 5/4 - 1/8 نسبت به تکنیک های تاگوچی (با محدوده خطا 33/54 - 0/79) و RSM (با محدوده خطا 12/3 - 0/72) مدلی قوی تر و به نتایج تجربی نزدیک تر است [2]. بنابراین در ادامه مطالعه حاضر، به بررسی تکنیک منطق فازی در مهندسی جوشکاری پرداخته خواهد شد. از کاربردهای منطق فازی در زمینه مهندسی جوش، می توان به پیش بینی خواص حاصل از جوشکاری اشاره کرد. در این راستا مطالعه ای به

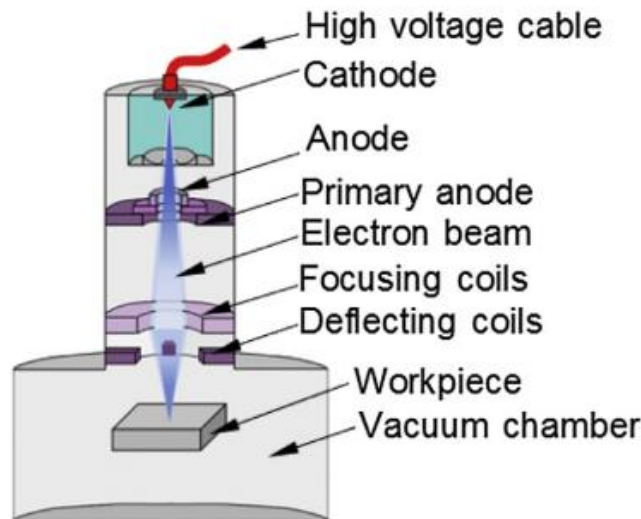
¹ Fuzzy Logic

² Taguchi

منظور بررسی تحلیل اثر پیش گرم و نرخ تغذیه سیم جوش بر ویژگی‌های هندسی جوش توپودری^۳ به مدلسازی با استفاده از منطق فازی پرداخته است. در این مطالعه برای مقایسه نتایج مدل فازی با نتایج تجربی، جوشکاری چندین نمونه با پارامترهای مختلف انجام شد. نتایج مقایسه بیانگر مقدار R2 برابر با 0/9909 است. این امر قابلیت منطق فازی برای پیش بینی هندسه جوش را تایید می‌کند [3]. در مطالعه دیگری از منطق فازی برای پیش بینی حرارت ورودی^۴ در جوشکاری تیگ^۵ استفاده شده است. بدین منظور با کمک نرم افزار متلب^۶ و پارامترهای فرآیند جوشکاری، حرارت ورودی مدل شد. سپس در نمودار رگرسیون^۷ با مشاهدات تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. مقدار R2 برای این مطالعه 0/9502 گزارش شد. در نتیجه منطق فازی روش موثری برای پیش بینی حرارت ورودی است [4].

استفاده از منطق فازی، به عنوان جایگزینی برای خطا و آزمایش مزایای متعددی از جمله صرفه جویی در زمان و هزینه را به همراه دارد [5]. لذا با توجه به اینکه یکی از روش‌های پیشرفته و پر هزینه در صنعت جوشکاری، جوش پرتو الکترونی است، در ادامه به مطالعات مربوط به منطق فازی برای فناوری جوشکاری پرتو الکترونی پرداخته خواهد شد.

جوشکاری پرتو الکترونی^۸ یکی از فناوری‌های نوین در صنعت جوش به شمار می‌رود. از مهم‌ترین مزایای فناوری جوشکاری پرتو الکترونی می‌توان به پهنای جوش باریک و عمق جوش زیاد اشاره کرد. در این فناوری از انرژی پرتو الکترون برای جوشکاری استفاده می‌شود. مطابق شکل 1، الکترون در اثر اختلاف ولتاژ بین کاتد و آند، تشکیل می‌شود. سپس الکترون با عبور از لنز متمرکز خواهد شد. لذا پرتویی از الکترون با سرعت زیاد و متمرکز شده از تفنگ^۹ دستگاه خارج شده و با قطعه کار^{۱۰} برخورد می‌کند. در اثر برخورد پرتو الکترونی پر سرعت به سطح قطعه کار، انرژی جنبشی الکترون به حرارت تبدیل می‌شود. این امر منجر به ذوب شدن قطعه کار فلزی خواهد شد. در نتیجه جوشکاری با حرارت ناشی از انرژی جنبشی الکترون‌ها انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است، فرایند جوشکاری پرتو الکترونی، به دلیل عدم انحراف الکترون از سطح قطعه کار، تحت خلا انجام می‌گیرد [6].



شکل 1: شماتیک دستگاه جوشکاری پرتو الکترونی [6].

از جمله پارامترهای مهم فرایند جوشکاری پرتو الکترونی می‌توان به ولتاژ شتاب، جریان پرتو الکترونی، سرعت جوشکاری، تمرکز پرتو، حرکت نوسانی پرتو اشاره کرد. در ادامه به هر یک از پارامترهای مهم اشاره خواهد شد:

- ولتاژ شتاب، ولتاژی بین کاتد و آند است. این ولتاژ، سرعت حرکت الکترون را تعیین می‌کند. به طور معمول مقدار ولتاژ شتاب از 60 تا 150 کیلوولت است [6].
- جریان پرتو الکترونی نیز تحت تاثیر ولتاژ شتاب تعیین می‌شود. به عبارتی در اثر افزایش ولتاژ شتاب، الکترون‌های بیشتری از کاتد کنده خواهد شد. لذا جریان پرتو الکترون افزایش می‌یابد. عملکرد پرتو به جریان پرتو الکترونی، وابستگی زیادی دارد. در نتیجه جریان پرتو الکترونی با توجه به جنس و ضخامت قطعه کار، دمای ذوب و غیره، باید تغییر یابد [6].

³ Fluxed Cored Arc Welding (FCAW)

⁴ Heat Input

⁵ Tungsten Inert Gas (TIG) welding

⁶ MATLAB Software

⁷ Regression Plot

⁸ Electron Beam Welding (EBW)

⁹ Gun

¹⁰ Workpiece

- سرعت جوشکاری در سیستم جوشکاری پرتو الکترونی، سرعت حرکت قطعه کار، را نشان می‌دهد. با افزایش سرعت جوشکاری، پهنای جوش، بسیار باریک و منطقه تحت تاثیر حرارت کوچک خواهد شد. اما با افزایش سرعت جوشکاری، باید جریان پرتو الکترون و ولتاژ شتاب افزایش یابد. در نتیجه این امر مصرف کاتد افزایش یافته و فرایند مقرون به صرفه نخواهد بود [6].
 - فوکوس پرتو الکترونی توسط لنزهای مغناطیسی درون تفنگ قابل تنظیم دارد. این پارامتر بر عملکرد پرتو موثر است [6].
 - نوسان پرتو الکترونی قابلیت حرکت پرتو با اشکال دایره، بیضی و ... را فراهم می‌کند. این پارامتر بر ایجاد سوراخ کلیدی^{۱۱} و تخلخل در ناحیه جوش موثر است [6].
- با توجه به مطالعات، پارامترهای مهم بیان شده و تاثیر هر یک از پارامترها، در ادامه به طراحی آزمایش فرایند جوشکاری پرتو الکترونی پرداخته خواهد شد.

2- مواد و روش

در مطالعه حاضر به بهینه‌سازی فرایند جوشکاری پرتو الکترونی سوپراپایز پایه نیکل پرداخته می‌شود. لذا در ابتدا به کمک نتایج مطالعات پیشین بهینه‌سازی پارامترهای فرایند انجام خواهد شد. سپس مطابق پارامترهای بهینه‌شده، جوشکاری قطعه کار انجام خواهد گرفت. پس از آزمون نمونه جوشکاری‌شده، نتایج تجربی با نتایج حاصل از مدلسازی مقایسه خواهد شد.

2.1- مدلسازی منطق فازی

به منظور مدلسازی منطق فازی از ابزار موجود در نسخه R2024a نرم افزار متلب استفاده شد. مطابق جدول 1، نوع سیستم استنتاج فازی^{۱۲}، Mamdani انتخاب شد. همچنین نوع عملکرد اعضای ورودی گوسی تعیین شد. سایر مشخصات انتخابی نیز در جدول 1 قابل مشاهده است. در ادامه مطابق جدول 2، پارامترهای ورودی شامل ولتاژ شتاب، جریان پرتو الکترونی و سرعت جوشکاری در نظر گرفته شد. همچنین پارامتر خروجی نیز هندسه جوش تعیین شد.

جدول 2: جزئیات مدل منطق فازی.

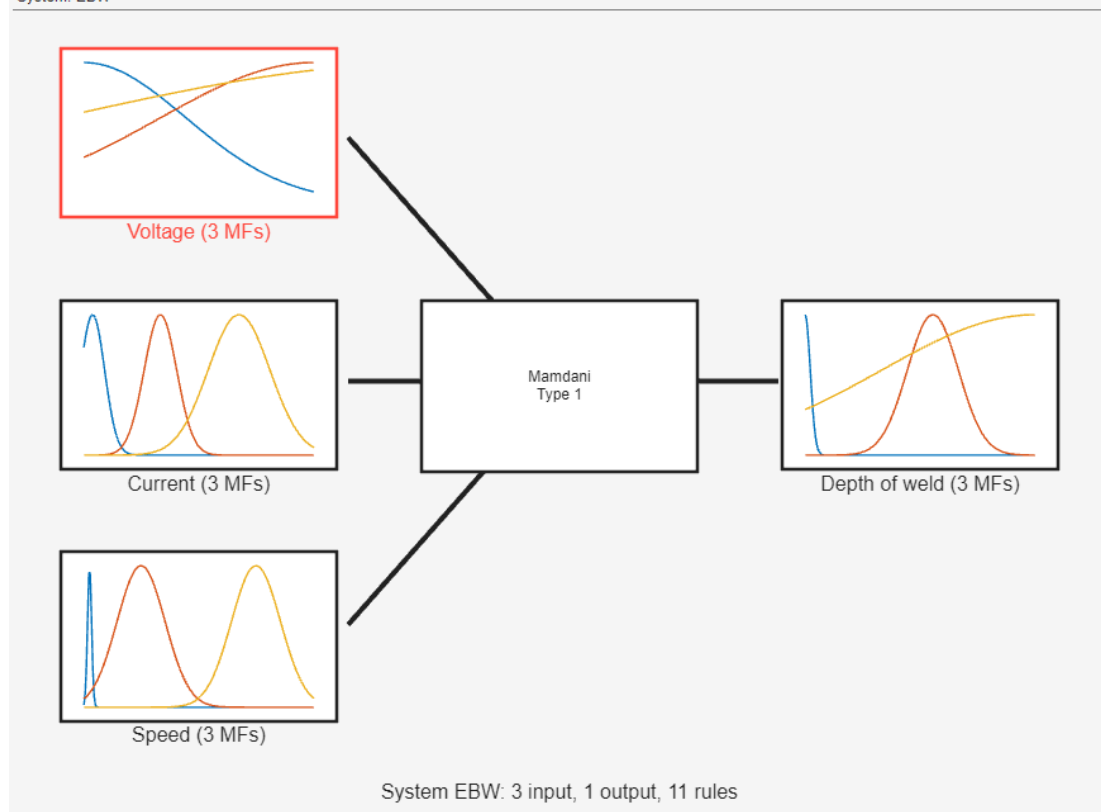
Type of fuzzy inference system (FIS)	Mamdani
Input/ output	3/ 1
Input membership function type	Gaussian
Output membership function type	Gaussian
Rule weight	1
Number of fuzzy rules	11
End method	Min
Implication method	Min
Aggregation method	Max
Defuzzification method	Centroid

مطابق شکل 2، ولتاژ شتاب در بازه (60 – 150)، جریان پرتو الکترونی در بازه (3 – 0.001) و سرعت جوشکاری در بازه (100 – 0.5) تعیین شد. همچنین عمق نفوذ جوش (پارامتر خروجی) در بازه (5 – 0.5) در نظر گرفته شد. همچنین بازه های در نظر گرفته شده برای هر یک از پارامترهای ورودی و خروجی در سه حالت کم، متوسط و زیاد تعریف شده اند.

¹¹ Key Hole

¹² Type of fuzzy inference system (FIS)

System: EBW



شکل 2: مدلسازی منطق فازی در نرم افزار متلب.

2.2- جوشکاری پرتو الکترونی

به منظور مقایسه نتایج مدل منطق فازی با نتایج تجربی، با استفاده از پارامترهای بهینه شامل ولتاژ شتاب 105 کیلو ولت، جریان پرتو الکترونی 1.5 الکترون ولت و سرعت جوشکاری 50 میلی‌متر بر ثانیه فرآیند جوشکاری پرتو الکترونی انجام شد. بدین منظور قطعه‌کاری با ابعاد 100×40 میلی‌متر از جنس سوپرآلیاژ اینکونل 718 تهیه شد. سپس به جهت عدم وجود اکسیداسیون، آلودگی و چربی در سطح قطعه‌کار، ابتدا به کمک سنباده 1000 سنباده‌کاری و سپس به کمک محلول استون تمیزکاری شد. در انتها با آب مقطر شست و شو داده شد. پس از آماده‌سازی قطعه‌کار، فرایند جوشکاری مطابق با جدول 2، اجرا شد.

جدول 2: پارامترهای جوشکاری پرتو الکترونی

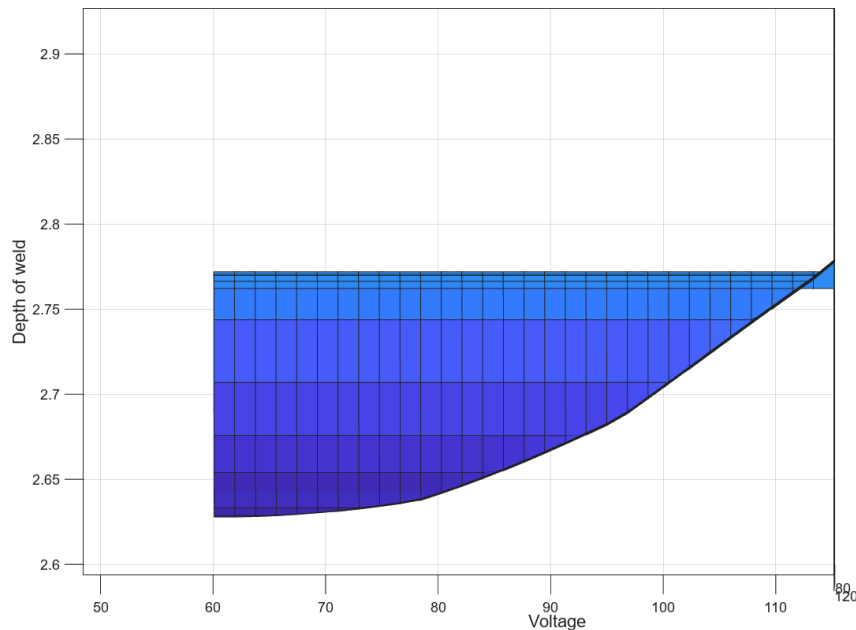
ولتاژ شتاب	105 کیلو ولت
جریان پرتو الکترونی	1.5 الکترون ولت
سرعت جوشکاری	50 میلی متر بر ثانیه
جریان	0.3 آمپر

2.3- آزمون متالوگرافی

پس از جوشکاری نمونه‌ای با ابعاد 20×20 میلی متر به وسیله وایرکات برش داده شد. سپس آزمون متالوگرافی بر روی نمونه برش خورده انجام شد. در این راستا نمونه با سنباده‌های 60، 80، 100، 120، 400، 600 و 1000 سنباده‌کاری شد. سپس به کمک محلول آلومینا پالیشکاری انجام شد. به منظور مشخص شدن نواحی جوش، نمونه تحت محلول حاوی 85٪ اتانول، 5٪ اسید نیتریک 65٪ و 10٪ اسید کلریدریک 37٪ به مدت 20 ثانیه اچ شد. سپس با آب مقطر شست و شو داد شد. پس از آن به کمک میکروسکوپ نوری تصاویر ماکروگرافی در بزرگنمایی $\times 10$ از نمونه تهیه شد. سپس با کمک نرم افزار Image J عمق جوش نمونه اندازه گیری شد.

3- نتایج و بحث

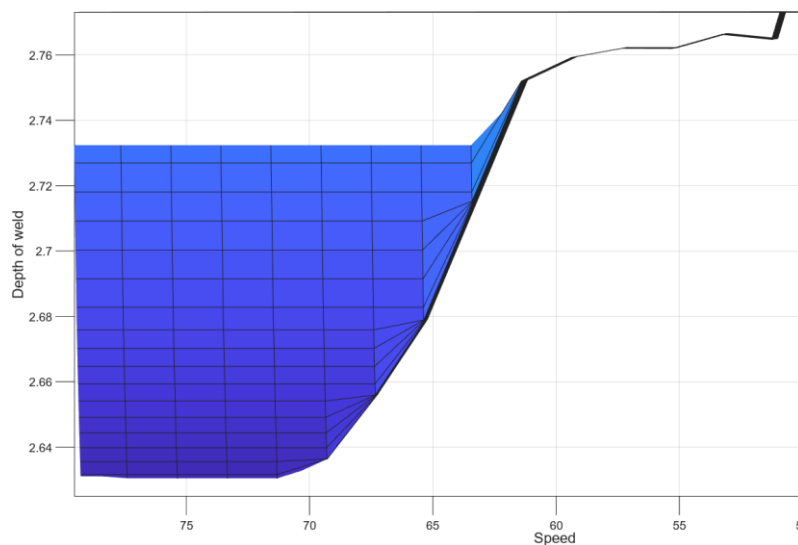
نتایج حاصل از مدلسازی منطق فازی، بیانگر اهمیت تاثیر ولتاژ شتاب، جریان پرتو الکترونی و سرعت جوشکاری بر عمق نفوذ حاصل از جوشکاری است. شکل 3، تاثیر ولتاژ شتاب بر عمق نفوذ حاصل از جوشکاری را نشان می دهد. در اثر افزایش ولتاژ شتاب، چگالی الکترون در پرتو الکترونی و به عبارتی جریان پرتو الکترونی، افزایش می یابد. لذا پرتو الکترونی تولیدشده، پراثری خواهد بود. در اثر تابش پرتو الکترونی پراثری بر سطح قطعه کار، عمق نفوذ حاصل از جوشکاری افزایش خواهد یافت. لذا با افزایش ولتاژ شتاب و در نتیجه آن افزایش جریان پرتو الکترونی، عمق نفوذ جوش افزایش می یابد.



شکل 3: تاثیر ولتاژ شتاب بر عمق نفوذ جوش.

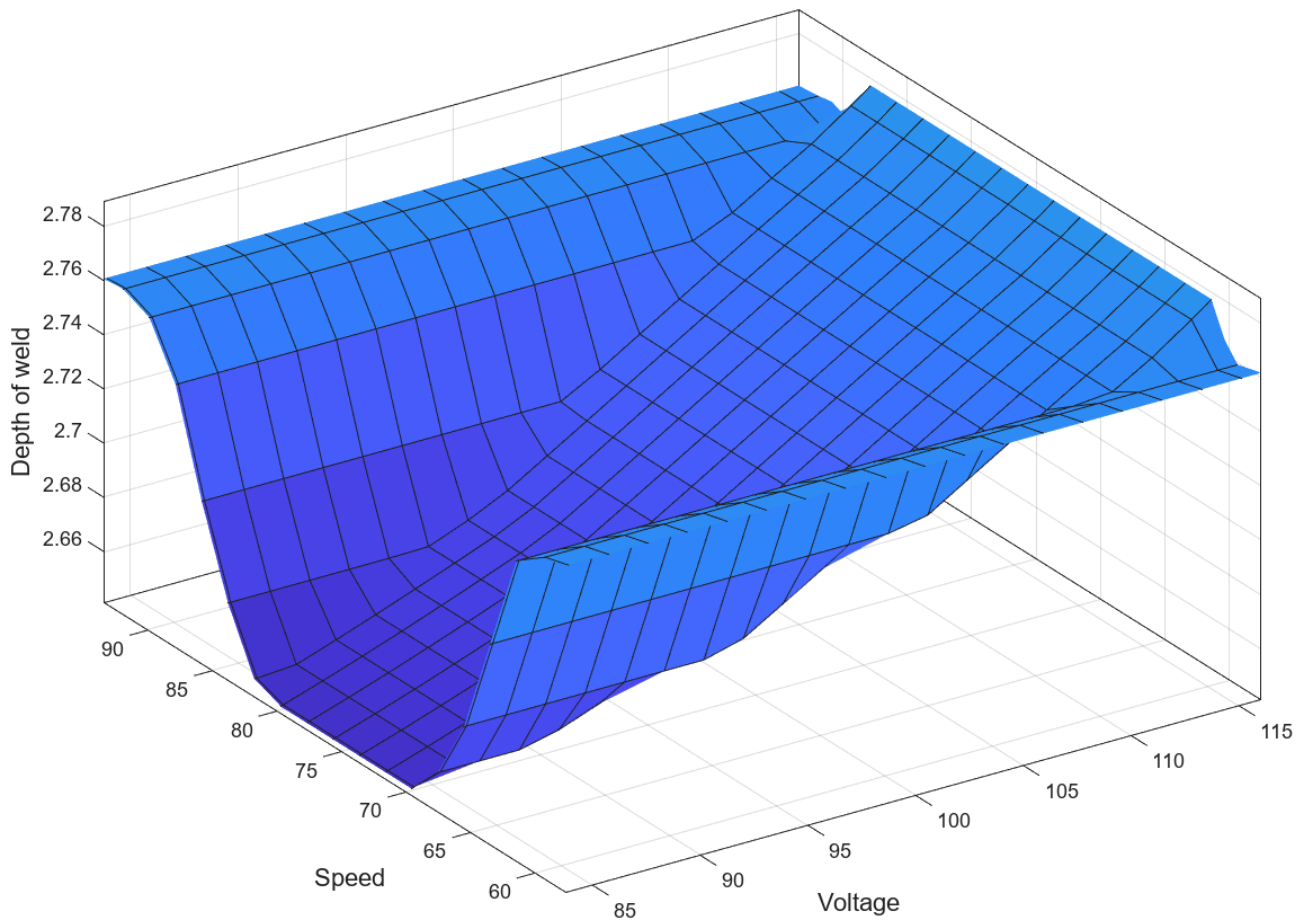
از طرفی سرعت جوشکاری عاملی دیگری بر اندازه عمق نفوذ است. با افزایش سرعت جوشکاری، زمان لازم برای برهمکنش پرتو الکترونی با سطح قطعه کار، کاهش می یابد. در نتیجه، انرژی کمتر به قطعه وارد می شود. به عبارتی حرارت ورودی به قطعه کار مطابق فرمول (1) کاهش می یابد. در نتیجه این امر عمق نفوذ قطعه، با افزایش سرعت جوشکاری، کاهش می یابد. لازم به ذکر است، در فرمول (1)، V ولتاژ شتاب، I جریان، K ضریب بازده و v سرعت جوشکاری را بیان می کند [7].

$$Q = \frac{V \times I \times K}{v} \quad (1)$$

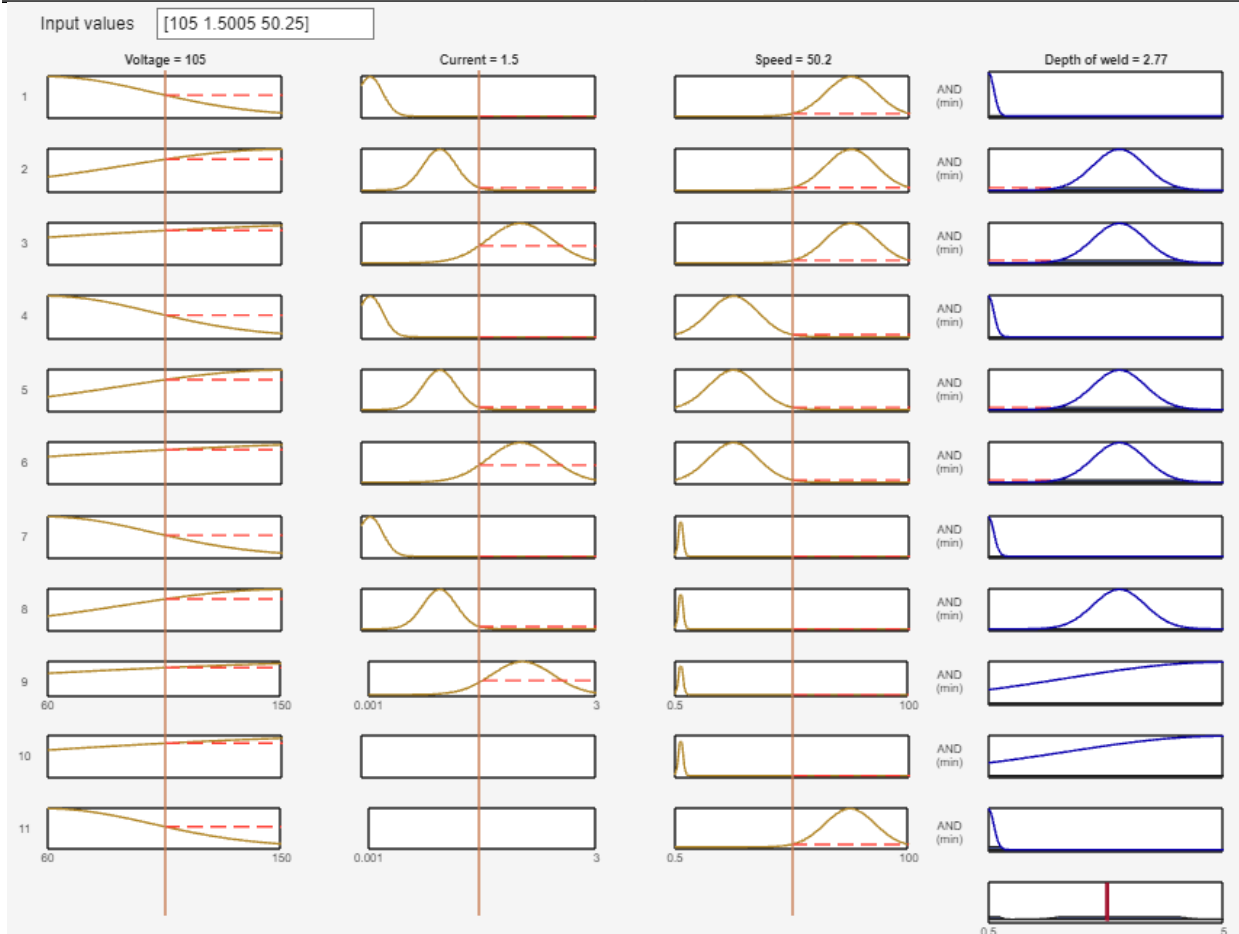


شکل 4: تاثیر سرعت جوشکاری بر عمق نفوذ جوش.

با توجه به اینکه ولتاژ شتاب و سرعت جوشکاری از مهم ترین پارامترهای موثر بر عمق نفوذ جوش است، در شکل 5، تاثیر متقابل دو پارامتر مذکور بر عمق نفوذ مشاهده می شود. از شکل 5 می توان دریافت، در سرعت های جوشکاری کمتر از 70 میلی متر بر ثانیه، با توجه به افزایش ولتاژ شتاب، عمق نفوذ جوش نیز افزایش می یابد. همچنین به جهت افزایش سرعت جوشکاری و صرفه جویی در زمان، می توان از ولتاژ شتاب بیش تر از 100 کیلو ولت استفاده کرد. همچنین برای دستیابی به عمق نفوذهای کمتر از 2 سانتی متر، باید سرعت جوشکاری 70 تا 80 میلی متر بر ثانیه و ولتاژ شتاب کمتر از 90 کیلو ولت تنظیم شود.



شکل 5: مدلسازی عمق نفوذ حاصل از جوشکاری پرتو الکترونی.



شکل 6: پارامترهای حاصل از بهینه سازی با منطق فازی.

در شکل 6 نیز پارامترهای بهینه شده جوشکاری پرتو الکترونی برای دستیابی به عمق نفوذ 2.77 سانتی متری پیشنهاد شده است. ولتاژ شتاب 105 کیلو ولت، جریان پرتو الکترونی، 1.5 الکترون ولت و سرعت جوشکاری 50.2 میلی متر بر ثانیه ارائه شده است. مطابق پارامترهای بهینه شده، فرایند جوشکاری انجام شد. شکل 7، تصویر ماکروگرافی نمونه حاصل از جوشکاری متالوگرافی شده را نشان می دهد. همچنین عمق جوش محاسبه شده با نرم افزار Image J بیانگر 2.88 سانتی متر است.



شکل 7: ماکروگرافی نمونه حاصل از جوش با بزرگنمایی 10×.

4- نتیجه و جمع‌بندی

هدف از مطالعه حاضر، بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر جوشکاری پرتو الکترونی بود. در این راستا براساس مطالعات پیشین پارامترهای مهم شناسایی شد. سپس مدلسازی منطق فازی فرایند جوشکاری پرتو الکترونی با سه پارامتر مهم شامل: ولتاژ شتاب، جریان الکترونی و سرعت جوشکاری در نرم افزار متلب انجام گرفت. با توجه به پارامترهای بهینه حاصل از مدلسازی، فرایند جوشکاری پرتو الکترونی بر روی سوپرآلیاژ اینکونل 718 انجام شد. در نتیجه با بررسی عمق نفوذ حاصل از جوشکاری مقدار عمق نفوذ نمونه 2.88 سانتی متر و عمق نفوذ پیش بینی شده در مدل منطق فازی 2.77 سانتی متر است. بنابراین مدلسازی انجام شده با نمونه مطابقت مطلوبی دارد.

5- مراجع

1. Sanati, S., Nabavi, S. F., Esmaili, R., & Farshidianfar, A. (2024). Laser wobble welding process: a review on metallurgical, mechanical, and geometrical characteristics and defects. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 11(3), 743-780.
2. Afabor, M., et al., Predictive modelling of TIG welding process parameters: A comparative study of Taguchi, fuzzy logic, and response surface methodology. *Nigerian Journal of Technology*, 2025. 44(1): p. 48-56.
3. Aloraier, A., et al., Analysis of the combined effects of preheating and welding wire feed rates on the FCAW bead geometric characteristics of 1020 steel using fuzzy logic-based prediction models. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 2025. 34(1): p. 20250067.
4. Pondi, P., J. Achebo, and A. Ozigagun, *Prediction of tungsten inert gas welding process parameters using design of experiment and fuzzy logic*. *Journal of Advances in Science and Engineering*, 2021. 4(2): p. 86-97.
5. Janasekaran, S., Yusof, F., Zin, H. M., Jamaludin, M. F., & Shukor, M. H. A. (2017). A fuzzy logic-based prediction model for fracture force using low-power fiber laser beam welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9), 3603-3610.
6. Fathi, M., & Lambrecht, M. (1995). EBFLATSY: A fuzzy logic system to calculate and optimize parameters for an electron beam welding machine. *Fuzzy sets and systems*, 69(1), 3-13.
7. Šimeková, B., Hodúlová, E., Kovačócy, P., Kovaříková, I., Sahul, M., Sahul, M., ... & Pixner, F. (2022). Influence of electron beam welding parameters on the microstructure formation and mechanical behaviors of the Ti and Ni dissimilar metals welded joints. *Metals*, 12(6), 894.