



سازگی مشخصات مکانیکی و متالوژیکی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ به کمک روش‌های آماری و الگوریتم هوشمند تبرید تدریجی

محمد صادقی اول شهر^{۱*}، فرهاد کلاهان^۲، محسن مربایان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، H.Sadeghi@ymail.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- بازرس ارشد جوشکاری، شرکت گاز استان خراسان رضوی

شماره ۲۶۳۰

در این تحقیق به بهینه‌سازی دو پارامتر مهم چقرمگی و عرض ناحیه متأثر از حرارت در جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ (GMAW) پرداخته شده است. در این راستا پارامترهای ولتاژ، نرخ تغذیه الکترود، سرعت جوشکاری، نرخ جریان گاز و درصد ترکیب گاز محافظ به عنوان ورودی در نظر گرفته شده‌اند. آزمایشات بر روی ورق‌های فولاد 5L-X42، مورد کاربرد در خطوط انتقال گاز، و بر اساس رویکرد تاگوچی (Taguchi)، صورت پذیرفته است. در ابتدا با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، انواع مدل‌های خطی، درجه دوم و لگاریتمی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شده است. سپس کیفیت مدل‌ها با استفاده از آزمون‌های آماری بررسی گردیده است. در مرحله بعد با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) پارامترهای تأثیرگذار فرآیند مشخص شده‌اند. در نهایت با استفاده از الگوریتم فراابتکاری تبرید تدریجی (SA) به مسئله بهینه‌سازی پرداخته شده است. نتایج محاسباتی نشان دهنده عملکرد بسیار خوب مدل‌ها و الگوریتم پیشنهادی در بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری می‌باشد.

کلمات کلیدی: جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ - عرض ناحیه متأثر از حرارت - چقرمگی - مدل‌سازی - الگوریتم تبرید تدریجی.



دوازدهمين كنفرانس مهندسي ساخت و توليد ايران

۶-۸ دی‌ماه ۱۳۹۰

بهينه‌سازي مشخصات مکانیکی و متالورژیکی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ به

کمک روش‌های آماری و الگوریتم هوشمند تبرید تدریجی

محمد صادقی اول شهر^{۱*}، فرهاد کلاهان^۲، محسن مربایان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، H.Sadeghi@ymail.com

۲- دانشیار دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- بازرس ارشد جوشکاری، شرکت گاز استان خراسان رضوی

چکیده

در این تحقیق به بهینه‌سازی دو پارامتر مهم چقرمگی و عرض ناحیه متأثر از حرارت در جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ (GMAW) پرداخته شده است. در این راستا پارامترهای ولتاژ، نرخ تغذیه الکتروود، سرعت جوشکاری، نرخ جریان گاز و درصد ترکیب گاز محافظ به عنوان ورودی در نظر گرفته شده‌اند. آزمایشات بر روی ورق‌های فولاد 5L-X42، مورد کاربرد در خطوط انتقال گاز، و بر اساس رویکرد تاگوچی (Taguchi)، صورت پذیرفته است. در ابتدا با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، انواع مدل‌های خطی، درجه دوم و لگاریتمی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شده است. سپس کیفیت مدل‌ها با استفاده از آزمون‌های آماری بررسی گردیده است. در مرحله بعد با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) پارامترهای تأثیرگذار فرآیند مشخص شده‌اند. در نهایت با استفاده از الگوریتم فراابتکاری تبرید تدریجی (SA) به مسئله بهینه‌سازی پرداخته شده است. نتایج محاسباتی نشان دهنده عملکرد بسیار خوب مدل‌ها و الگوریتم پیشنهادی در بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ - عرض ناحیه متأثر از حرارت - چقرمگی - مدل‌سازی - الگوریتم تبرید تدریجی.

۱- مقدمه

محافظ بر روی استحکام کششی و استحکام نهایی اتصال تأثیری ندارد. سرنیواسا راو و همکارانش [۳]، تأثیر پنج پارامتر نرخ تغذیه سیم، ضخامت ورق، فرکانس، جریان پایه و نسبت سرعت تغذیه سیم به سرعت جوشکاری را بر روی هندسه گرده جوش، عمق نفوذ و درصد برآمدگی گرده جوش بررسی نمودند. مشاهده شد که دو پارامتر نرخ تغذیه سیم و نسبت نرخ تغذیه به سرعت جوشکاری به ترتیب تأثیرگذارترین فاکتورها بر روی عمق نفوذ و درصد برآمدگی گرده هستند. گولنک و همکارانش [۴]، تأثیر ترکیب‌های متفاوت دو گاز محافظ هیدروژن و آرگون را در جریان‌های مشخص بر روی فولاد ضد زنگ بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار هیدروژن، چقرمگی جوش نیز افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش مقدار هیدروژن به دلیل بالا رفتن دما، اندازه دانه‌ها نیز در ریزساختار افزایش می‌یابد. کوریا و همکارانش [۵]، با استفاده از روش پاسخ سطح و الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی عرض گرده، ارتفاع گرده و عمق نفوذ جوش پرداختند. بدین منظور پارامترهای ولتاژ، سرعت جوشکاری و

امروزه، جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ^۱ (GMAW) با توجه به خصوصیات منحصر به فرد خود چون نفوذ مناسب، تطبیق پذیری بالا، اعوجاج کم و فابلیت استفاده در سیستم‌های جوشکاری اتوماتیک به عنوان یکی از پرکاربردترین فرآیندهای ساخت در صنعت محسوب می‌شود. به طور کلی خصوصیات اتصال تحت تأثیر تعداد زیادی از پارامترهای جوشکاری است لذا بررسی اهمیت و نحوه تأثیر این پارامترها برای رسیدن به کیفیت جوش مطلوب امری ضروری است [۱]. در این راستا، لیاو و همکارانش [۲]، تأثیر پارامتر جنس الکتروود و ترکیب گاز محافظ را بر روی نرخ پاشیدن قطرات مذاب، ترکیب شیمیایی جوش و استحکام کششی اتصال بررسی نمود. نتایج نشان داد در جوشی که از الکتروود توپر استفاده شده نسبت به الکتروود یکپارچه نرخ پاشیدن کمتری اتفاق می‌افتد. همچنین ترکیب گاز

¹ Gas Metal Arc Welding (GMAW)

نرخ تغذیه سیم را به عنوان عوامل متغیر در نظر گرفتند. آن‌ها از میزان درصد تحذب (تقسیم ارتفاع به عرض گرده) به عنوان معیار بهینه‌سازی برای ابعاد گرده جوش استفاده نمودند.

علیرغم انجام تحقیقات گسترده در زمینه مدل‌سازی و بهینه‌سازی جوشکاری، بدلیل وابستگی زیاد فرآیند به شرایط مسئله از قبیل نوع طرح اتصال، وضعیت جوشکاری، ضخامت و جنس ورق‌ها، هنوز در بسیاری از مواقع نیاز به رویکرد جامعی بمنظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند مذکور احساس می‌شود. در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های تجربی اخذ شده، مدل‌های ریاضی مناسبی برای فرآیند جوشکاری GMAW طراحی و پیشنهاد می‌گردد. به منظور تعیین ارتباط بین متغیرهای ورودی و مشخصات خروجی جوش، انواع توابع رگرسیونی بر داده‌های موجود برازش داده شده است. این مدل‌ها اطلاعاتی را در زمینه درک بهتر فرآیند و اثرات پارامترهای ورودی بر خروجی‌ها فراهم می‌آورند. سپس با انجام تحلیل‌های آماری لازم، بهترین مدل‌ها انتخاب می‌شوند. در مرحله بعد، مدل‌های پیشنهادی بعنوان تابع هدف در الگوریتم تبرید تدریجی برای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲- طراحی آزمایشات و اخذ نتایج

بمنظور گردآوری داده‌های مورد نیاز، تعدادی آزمایش بر اساس رویکرد طراحی آزمایشات^۱ و روش تاگوچی^۲ در قالب آرایه متعامد L₂₅، طراحی و انجام شده است [۶]. در این روند پارامترهای ولتاژ (V)، نرخ تغذیه سیم (F)، سرعت جوشکاری (S)، نرخ جریان گاز (FR) و ترکیب گاز محافظ (GT)، به عنوان ورودی در نظر گرفته شده‌اند. جدول ۱ سطوح انتخابی و پارامترهای ورودی را نشان می‌دهد. همچنین عرض ناحیه متأثر از حرارت^۳ به همراه میزان مقاومت به ضربه^۴ (چقرمگی) به عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱- پارامترهای ورودی و سطوح انتخابی

پارامتر	ولتاژ (v)	سرعت تغذیه (m/min)	سرعت جوشکاری (cm/min)	نرخ جریان گاز محافظ (l/min)	ترکیب گاز محافظ (%CO ₂)
نشانه	V	F	S	FR	GT
سطح اول	۲۶	۱۲	۱۸	۱۵	۵
سطح دوم	۲۸	۱۳	۲۲/۵	۲۰	۱۰
سطح سوم	۳۰	۱۴	۲۷	۲۵	۱۵
سطح چهارم	۳۲	۱۵	۳۱/۵	۳۰	۲۰
سطح پنجم	۳۴	۱۶	۳۶	۳۵	۲۵

گاز محافظ مصرفی در این تحقیق ترکیبی از دو گاز آرگون و دی‌اکسیدکربن است. برای ترکیب دو گاز از دستگاه ترکیب کننده مدل

۳- مدل‌سازی فرآیند

هدف اصلی در این بخش تعیین نوع و میزان تاثیر پارامترهای ورودی بر متغیرهای پاسخ است. بدین منظور به کمک میانمایی رگرسیونی و سه تابع استاندارد خطی، درجه دوم و لگاریتمی، مدل‌های مختلف بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شده است. شکل کلی این توابع به ترتیب در روابط ۱ تا ۳ آمده است.

$$Y_1 = b_0 + \sum b_i X_i \quad (1)$$

$$Y_2 = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

$$Y_3 = b_0 + \exp(\sum b_i X_i) \quad (3)$$

در ادامه به منظور اعتبارسنجی و انتخاب مدل‌های برتر، از آزمون‌های آماری استفاده می‌شود. در گام اول معنی‌دار بودن مدل‌ها بررسی می‌گردد. برای این منظور از ابزار آماری آنالیز واریانس^۵ استفاده شده است. سطح اطمینان برای مسئله حاضر برابر ۹۵٪ انتخاب گردیده، لذا برای معنی‌دار بودن مدل‌ها باید مقدار F بدست آمده از آنالیز واریانس از مقدار جدول استاندارد توزیع F، بیشتر باشد [۷].

مطابق جدول ۲، تمام مدل‌ها به جز مدل خطی میزان مقاومت به ضربه، دارای مقدار F^۶، بیشتر از توزیع استاندارد بوده و لذا در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار می‌باشند.

⁵ Nital

⁶ Macro Etch Test

⁷ Analysis of Variance

⁸ F Value

¹ Design of experiments

² Taguchi method

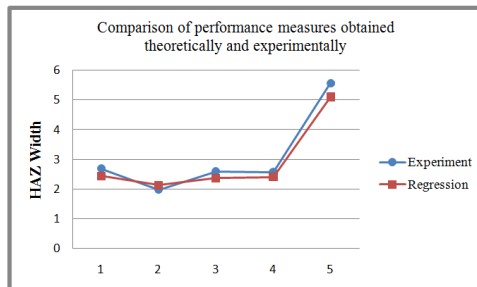
³ Heat Affected Zone (HAZ)

⁴ Toughness

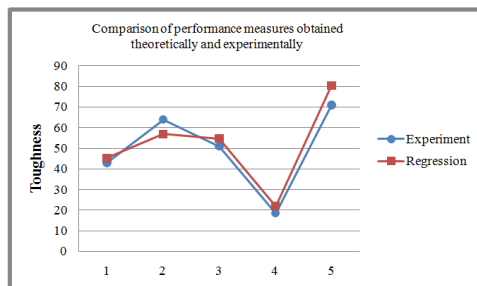
$$\begin{aligned} \text{HAZ} = & 3.66 + 0.247 \times S - 0.611 \times \text{FR} + 53.6 \times \text{GT} \\ & - 0.00445 \times S^2 + 0.00564 \times \text{FR}^2 + 28.4 \times \text{GT}^2 \\ & - 0.00247 \times V \times F + 0.0110 \times V \times \text{FR} \\ & - 1.37 \times V \times \text{GT} - 0.631 \times S \times \text{GT} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{TG} = & 355 - 20.4 \times V - 10.1 \times S + 7.93 \times \text{FR} \\ & - 1.46 \times F^2 + 0.221 \times S^2 + 0.0650 \times \text{FR}^2 \\ & - 782 \times \text{GT}^2 + 1.64 \times V \times F - 0.325 \times V \times \text{FR} \\ & + 37.0 \times V \times \text{GT} - 36.7 \times F \times \text{GT} - 13.3 \times S \times \text{GT} \end{aligned} \quad (5)$$

در مرحله پایانی با استفاده از آزمایشات جدید طراحی شده (پنج آزمایش)، میزان دقت مدل‌های انتخابی در تخمین متغیر پاسخ بررسی شده است. شکل‌های ۱ و ۲، مقایسه‌ای بین مقادیر تخمین زده شده در مقابل مقدار واقعی، برای متغیرهای خروجی عرض ناحیه متاثر از حرارت و میزان مقاومت به ضربه را نشان می‌دهند. نقاط دایره شکل در نمودار مربوط به مقادیر آزمایش شده و نقاط مستطیل شکل مربوط به مقادیر برازش شده است.



۱- مقایسه‌ای بین مقادیر تخمین زده شده در مقابل مقدار واقعی برای عرض ناحیه متاثر از حرارت



۲- مقایسه‌ای بین مقادیر تخمین زده شده در مقابل مقدار واقعی برای میزان مقاومت به ضربه

بر اساس نتایج بدست آمده میانگین درصد خطا برای مدل‌های عرض ناحیه متاثر از حرارت و میزان مقاومت به ضربه به ترتیب برابر ۸/۰۷ و ۱۱/۱۵ می‌باشد. فرآیند جوشکاری با گاز محافظ دارای پارامترهای کنترلی زیاد و دامنه تغییرات وسیعی است. بنابراین نمی‌توان به طور قطع خروجی یک فرآیند جوشکاری را با دقت بسیار بالا تخمین زده و پیش‌بینی نمود و لذا درصد خطای محاسبات کاملاً قابل قبول به نظر می‌رسد. لازم به ذکر است که تهیه مدل‌های ریاضی و تحلیل‌های

جدول ۲- مقادیر F بدست آمده برای معادلات برازش شده

توزیع استاندارد	متغیر پاسخ	
	میزان مقاومت به ضربه (TG)	عرض ناحیه متاثر از حرارت (HAZ)
خطی	۲/۰۹	۱۲/۴۷
مرتبه دوم	۸/۶۶	۱۲/۷۶
لگاریتمی	۲/۹۵	۹/۶۱

برای بررسی معنی دار بودن هر یک از جملات مدل‌ها، از معیار دیگری به نام احتمال عدم قطعیت^۱ استفاده می‌گردد [۷]. با توجه به سطح اطمینان مسئله، مقدار احتمال عدم قطعیت برابر ۰/۰۵ خواهد بود و لذا جملاتی از مدل که دارای احتمال بیشتر از این مقدار باشند باید به صورت مرحله‌ای از مدل حذف شوند. برای حذف مرحله‌ای از روش پس‌رو^۲ استفاده شده است.

یکی دیگر از معیارهای مهم برای ارزیابی دقت و کیفیت مدل‌های برازش شده، ضریب همبستگی^۳ است. این ضریب، میزان وابستگی بین متغیرهای ورودی و خروجی یک سیستم را تعیین می‌نماید. هر چه این مقدار به سمت یک میل کند، نشان دهنده وابستگی بیشتر بین متغیرهای ورودی و خروجی خواهد بود [۸]. مقدار ضریب همبستگی سه گروه مدل ارائه شده، در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- ضریب همبستگی مدل‌های برازش شده

متغیر پاسخ	میزان مقاومت به ضربه (%)	عرض ناحیه متاثر از حرارت (%)
مدل خطی	۵۹/۵۸	۸۷/۵۷
مدل درجه دوم	۹۷/۴۶	۹۸/۱۸
مدل لگاریتمی	۶۰/۰۸	۸۴/۶۷

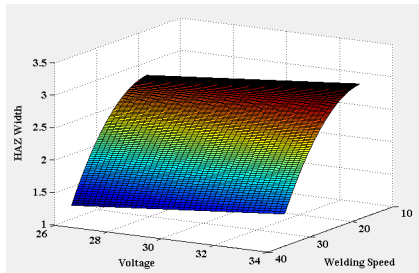
با توجه به جدول ۳، مشاهده می‌شود که مدل‌های درجه دوم بالاترین ضریب همبستگی را در میان سایر مدل‌ها دارا بوده و انطباق بهتری را بر داده‌های تجربی نشان می‌دهند. ضرایب همبستگی این مدل‌ها برای هر دو متغیر پاسخ، بالاتر از ۰/۹۷ می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت، حداقل ۰/۹۷ از تغییرات متغیرهای پاسخ توسط مدل‌ها قابل پیش‌بینی است. شکل نهایی مدل‌های درجه دوم اصلاح شده (حذف جملات بی‌اثر توسط روش پس‌رو) در روابط ۴ و ۵ ارائه گردیده است.

¹ P Value

² Backward Elimination

³ Correlation Coefficient

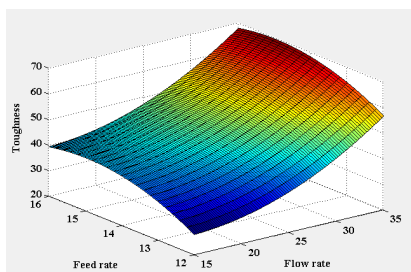
سطح استفاده می‌گردد و با به کارگیری مدل‌های استخراجی و رسم منحنی‌های سه‌بعدی به کمک نرم‌افزار Matlab به تحلیل تأثیر متقابل پارامترهای ورودی بر روی هر یک از خروجی‌ها پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که برای هر متغیر پاسخ، با توجه به آنالیز واریانس انجام گرفته در بخش قبل، تنها نموداری از ترکیب دو پارامتر مهم فرآیند رسم می‌گردد. شکل ۵، نحوه‌ی اثرگذاری سرعت و ولتاژ را در نرخ تغذیه 14 m/min ، نرخ جریان گاز 25 l/min و با ترکیب گاز محافظ 15% دی-اکسید کربن بر روی عرض ناحیه متأثر از حرارت نشان می‌دهد.



۵- نحوه‌ی اثرگذاری سرعت و ولتاژ بر روی عرض ناحیه متأثر از حرارت

منطقه متأثر از حرارت فضایی در اطراف فلز جوش است که به دلیل دمای بالای حوضچه دچار تغییرات متالورژیکی می‌شود [۹]. در منحنی فوق مشخص است در سرعت‌های ثابت، با افزایش ولتاژ، به دلیل افزایش پهنای قوس الکتریکی، میزان عرض این ناحیه نیز افزایش می‌یابد. همچنین اگر مقدار سرعت جوشکاری نیز کاهش پیدا کند، میزان حرارت حوضچه به دلیل افزایش حجم مذاب تا حدی افزایش می‌یابد که منجر به افزایش بیشتر عرض ناحیه متأثر از حرارت می‌گردد. مطابق نمودار، میزان تغییرات خروجی به واسطه‌ی تغییرات سرعت در مقابل ولتاژ بسیار بیشتر است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سرعت در مقابل ولتاژ از اهمیت و تأثیر بیشتری برخوردار است.

شکل ۶، نحوه‌ی اثرگذاری نرخ تغذیه سیم و نرخ جریان گاز را در ولتاژ 30 (V) ، سرعت 27 (cm/min) و با ترکیب گاز محافظ 15% دی‌اکسید کربن بر روی میزان مقاومت به ضربه جوش نشان می‌دهد.



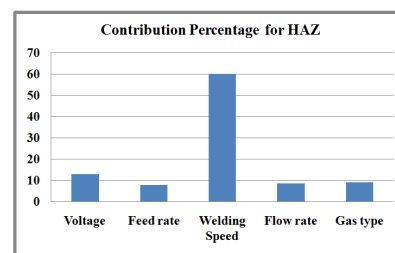
۶- نحوه‌ی اثرگذاری نرخ تغذیه سیم و نرخ جریان گاز بر روی میزان مقاومت به ضربه جوش

مطابق شکل فوق مشخص است که با افزایش هم‌زمان نرخ جریان گاز محافظ و نرخ تغذیه سیم، میزان جذب انرژی یا در واقع میزان

آماری انجام شده در محیط نرم‌افزار آماری MINITAB صورت پذیرفته است. با استفاده از مدل‌های ارائه شده، می‌توان نوع و نحوه تأثیر پارامترهای تنظیمی را بر خروجی‌های فرآیند تعیین نمود.

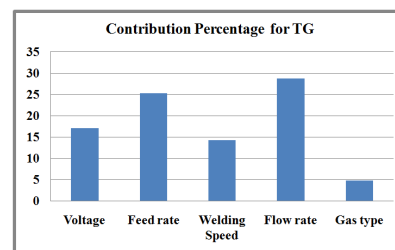
۴- آنالیز واریانس

برای شناخت بیشتر پارامترهای جوشکاری، بررسی میزان تأثیرگذاری هر پارامتر بر خروجی، امری ضروری می‌باشد. با دانستن چنین اطلاعاتی می‌توان درک بهتری از فرآیند پیدا کرده و زمینه بهتری را برای اجرای صحیح فرآیند جوشکاری فراهم نمود. برای این منظور از ابزار آماری آنالیز واریانس^۱ و درصد توزیع استفاده شده است. شکل‌های ۳ و ۴، میزان درصد توزیع پارامترهای ورودی را به ترتیب برای عرض ناحیه متأثر از حرارت و چقرمگی نشان می‌دهند.



۳- درصد توزیع پارامترها برای عرض ناحیه متأثر از حرارت

مطابق نمودار فوق، مشاهده می‌گردد که پارامتر سرعت جوشکاری بیشترین تأثیر را بر عرض ناحیه متأثر از حرارت دارد. همچنین پارامتر ولتاژ و ترکیب گاز، به ترتیب در مکان‌های بعدی قرار می‌گیرند. پارامتر نرخ تغذیه سیم نیز کم‌ترین تأثیر را بر روی خروجی دارد.



۴- درصد توزیع پارامترها برای میزان مقاومت به ضربه

مطابق شکل ۴، مشاهده می‌گردد که پارامتر نرخ جریان گاز بیشترین تأثیر را بر میزان مقاومت به ضربه جوش دارد. همچنین پارامتر نرخ تغذیه سیم و ولتاژ، به ترتیب در مکان‌های بعدی قرار می‌گیرند. پارامتر ترکیب گاز نیز کم‌ترین تأثیر را بر روی خروجی دارد.

۵- تأثیر متقابل پارامترها

با شناخت نحوه‌ی اثرگذاری پارامترهای ورودی می‌توان درک بهتری از فرآیند بدست آورد. بدین منظور، در این بخش از منحنی‌های

¹ Contribution Percentage

تکرارها، این دما مطابق رابطه ذیل با نرخ سرمایش^۳ مشخص، به تدریج کم می‌شود.

$$C_{k+1} = \alpha \times C_k \quad (7)$$

نرخ سرمایش (α) معمولاً بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۹ انتخاب می‌گردد. مطابق بحث فوق، احتمال انتخاب جواب‌های بدتر با افزایش تعداد حرکت‌ها کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، در ابتدای جستجو، نقش طبیعت تصادفی الگوریتم در پذیرش همسایگی جدید بیشتر از نقش طبیعت قطعی آن است. ولی با پیشرفت جستجو، حرکت‌ها غالباً بر اساس بهبود تابع هدف انجام شده و نقش طبیعت تصادفی الگوریتم در پذیرش جواب جدید کاهش می‌یابد. جزئیات بیشتر این الگوریتم و برخی از کاربردهای آن را می‌توان در ادبیات موضوع یافت [۱۰].

ناحیه متأثر از حرارت منطقه‌ای است که در آن دما کمتر از دمای ذوب قطعه است اما به دلیل حرارت زیاد، ساختار متالورژیکی قطعه دچار تغییرات شدیدی می‌شود. در این منطقه، به دلیل حرارت زیاد معمولاً دانه بندی درشت‌تر از حد نرمال بوده و باعث ایجاد سختی کمتر از حد معمول قطعه می‌گردد. عرض کمتر این ناحیه موید حرارت ورودی کمتر و نیز تغییرات کمتر ساختار است. از آنجا که اکثر حالات شکست جوش در این منطقه اتفاق می‌افتد واضح است که برای رسیدن به شرایط مطلوب جوش باید عرض این ناحیه را کمینه نمود. همچنین آزمایش ضربه میزان مقاومت جوش در برابر ایجاد ترک یا رشد ترک و یا هر دو این عوامل را نشان می‌دهد، لذا برای این پارامتر نیز شرایط بهینه‌سازی است که میزان چقرمگی یا مقاومت به ضربه حداکثر باشد [۹].

در این مقاله با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم تبرید تدریجی، سطوح پارامترهای تنظیمی جوشکاری به نحوی تعیین می‌شوند تا شرایط مطلوب بحث شده در بالا برای دو خروجی بدست آید. در این راستا، از حل معکوس مدل‌های ارائه شده در قالب یک تابع خطا استفاده شده است. در فرآیند بهینه‌سازی، مشخصه‌های خروجی مطلوب با مقادیر محاسبه شده توسط الگوریتم، مقایسه می‌شوند. معیار بهینه‌سازی کمینه شدن تابع هدف یا مجموع مربعات خطای این دو مقدار است. این مینیمم‌سازی به کمک الگوریتم (SA) و کدنویسی در نرم افزار MATLAB صورت گرفته است. تابع مجموع مربعات خطاها مطابق رابطه (۸) تعریف می‌شود.

$$EF = \omega_1 \frac{(HAZ_d - HAZ_p)^2}{HAZ_p^2} + \omega_2 \frac{(TG_d - TG_p)^2}{TG_p^2} \quad (8)$$

در رابطه فوق، پارامترهایی که با اندیس (d) مشخص شده‌اند مقادیر مطلوب خروجی‌ها بوده و پارامترهای با اندیس (p) مقادیر محاسبه شده توسط الگوریتم (با استفاده از مدل‌های ۴ و ۵) می‌باشند. همچنین ω_i ها، وزن یا اهمیت نسبی هر یک از خروجی‌ها هستند.

مقاومت به ضربه به حداکثر خود می‌رسد. همچنین کم‌ترین مقدار جذب انرژی، در سطوح پایین نرخ تغذیه و نرخ جریان گاز اتفاق می‌افتد. در واقع به احتمال زیاد با افزایش نرخ تغذیه سیم و گاز محافظ، ضمن افزایش حجم مذاب و نفوذ کامل جوش در طرح اتصال، حوضچه به صورت کامل از اتمسفر محافظت می‌شود و احتمال پدیده تخلخل و مک کم می‌شود و در نتیجه جوش سالم‌تر و بهتری ایجاد می‌شود که منجر به بالا رفتن میزان مقاومت به ضربه می‌شود.

تا کنون نحوه اثرگذاری دو به دوی پارامترها بر هر یک از خروجی‌ها بررسی شد. اما از آنجا که تأثیر دیگر پارامترها ممکن است منجر به ایجاد نتیجه نهایی متفاوتی در خروجی شود، باید تأثیر تمام پارامترها را به صورت هم‌زمان بر خروجی بررسی نمود. با توجه به اینکه این امر به صورت گرافیکی ممکن نیست در بخش بعد با استفاده از روش بهینه‌سازی پیشنهادی به حل دقیق‌تر مسئله پرداخته می‌شود.

۶- بهینه‌سازی فرآیند

الگوریتم تبرید تدریجی^۱ یک جستجوگر همسایگی است که در اواسط دهه ۸۰ میلادی برای حل مسائل غیر خطی و پیچیده بهینه‌سازی شکل گرفت [۱۰]. این الگوریتم یک تکنیک جستجوی تصادفی است که از فرآیند متالورژیکی آنیل کردن فلزات الهام گرفته شده است. در آنیل کردن، یک فلز گداخته شده به آهستگی تبرید می‌شود. کاهش تدریجی دما موجب ایجاد ساختار بلوری منظم و عاری از عیب در ماده شده و سطح انرژی آن را به حداقل می‌رساند. بنابراین کاهش تدریجی دما بعنوان یک الزام در این فرآیند مطرح است. در تکنیک بهینه‌سازی تبرید تدریجی نیز از همین اصل برای کمینه‌سازی مقدار تابع هدف استفاده شده است. ماهیت عملکرد این الگوریتم به این صورت است که برای هر حرکت، یک همسایگی جدید به صورت تصادفی تولید و ارزیابی می‌شود. حرکت به این جواب در دو وضعیت انجام خواهد یافت: (۱) جواب جدید از جواب فعلی بهتر باشد و (۲) مقدار تابع احتمال حرکت^۲ از یک عدد تصادفی از دامنه (0,1] بزرگ تر باشد؛ در غیر این صورت جستجوگر جواب جدیدی را تولید و ارزیابی خواهد کرد. این حرکت گام به‌گام تا ارضای شرط توقف الگوریتم (تعداد تکرارها، زمان محاسبات، و ...) ادامه می‌یابد. مقدار تابع احتمال حرکت هر بار از رابطه ۶ بدست می‌آید.

$$P_r = \exp\left(-\frac{\Delta E}{C_k}\right) \quad (6)$$

در این رابطه ΔE اختلاف مقدار تابع هدف بین جواب فعلی و جواب جدید است. اندیس k تعداد تکرارها و C_k پارامتر کنترلی موسوم به دما است. معمولاً در ابتدای جستجو، مقدار دمای اولیه (C_0)، بزرگ انتخاب می‌شود، به طوری که الگوریتم شانس بیشتری برای حرکت به جواب‌های غیربهبود دهنده داشته باشد؛ اما با افزایش تعداد

¹ Simulated Annealing (SA)

² Transition probability

³ Cooling Rate

نتایج حاصل از بهینه‌سازی برای مسئله مورد نظر، در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- سطوح بهینه برای خروجی های وزن دهی شده

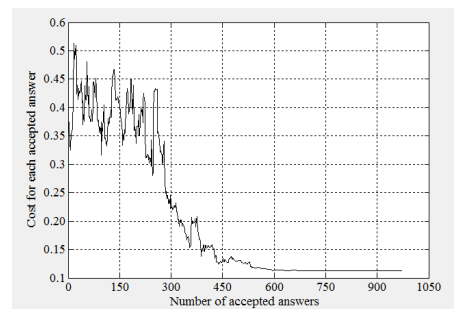
Output	V	F	S	FR	GT	HAZ	TG
$\omega_1 = 1, \omega_2 = 0$	۳۴	۱۶	۳۶	۲۰	۲۵	۰/۸	-
$\omega_1 = \omega_2 = 0.5$	۲۶	۱۶	۳۶	۳۰	۵	۰/۹	۹۱
$\omega_1 = 0, \omega_2 = 1$	۳۴	۱۶	۱۸	۳۵	۲۵	-	۹۹

همانگونه که از نتایج محاسباتی مشاهده می‌شود، با انتخاب سطوح پارامترهای تنظیمی که توسط الگوریتم (SA) محاسبه شده‌اند، در حالت تک هدفه، میزان عرض ناحیه حرارت دیده کمتر از یک میلی‌متر و میزان چقرمگی نیز برابر ۹۹ ژول بدست می‌آید. همچنین در حالت بهینه‌سازی دو معیاره، حالت بینابینی برای دو خروجی معرفی شده است. شکل ۷، روند همگرایی الگوریتم به سمت جواب بهینه را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود الگوریتم دارای نرخ همگرایی بسیار مناسبی بوده و در کمتر از ۷۰۰ تکرار به سمت جواب نهایی همگرا شده است.

ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر روی خروجی دارد. در مرحله دوم، با استفاده از مدل‌های برازش شده تأثیر متقابل پارامترها بر روی هر یک از خروجی‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که در سرعت‌های ثابت، با افزایش ولتاژ، میزان عرض ناحیه متأثر از حرارت افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش سرعت جوشکاری، عرض افزایش می‌یابد. برای میزان چقرمگی با افزایش هم‌زمان نرخ جریان گاز محافظ و نرخ تغذیه سیم، میزان جذب انرژی یا در واقع میزان مقاومت به ضربه به حداکثر خود می‌رسد. در مرحله پایانی با استفاده از الگوریتم تبرید تدریجی و مدل‌های برازش شده، شرایط بهینه برای حالت تک هدفه و چندگانه تعیین گردید. برای حالت بینابین که هر دو پارامتر خروجی دارای اهمیت یکسان باشند شرایط بهینه به صورت $V1F5S5FR4GT1$ بدست آمد. نتایج محاسباتی ارائه شده و نحوه همگرایی الگوریتم تبرید تدریجی، نشان دهنده عملکرد خوب و دقت بالای روش پیشنهادی در حل اینگونه مسائل است.

مراجع

- [1] K. Weman and G. Lindén, "MIG welding guide", CRC Press, 2006.
- [2] M. T. Liao and W. J. Chen, "A Comparison of Gas Metal Arc Welding with Flux-Cored Wires and Solid Wires Using Shielding Gas," *The Int. J. of Adv. Manuf. Tech.*, vol. 15, pp. 49-53, 1999.
- [3] P. Rao, et al., "Effect of process parameters and mathematical model for the prediction of bead geometry in pulsed GMA welding," *The Int. J. of Adv. Manuf. Tech.*, vol. 45, pp. 496-505, 2009.
- [4] B. Gülenç, et al., "Experimental study of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in MIG welding of austenitic stainless steel," *Int. J. of Hydrogen Energy*, vol. 30, pp. 1475-1481.
- [5] D. S. Correia, et al., "Comparison between genetic algorithms and response surface methodology in GMAW welding optimization," *J. of Mat. Proc. Tech.*, vol. 160, pp. 70-76, 2005.
- [6] R., Roy "A primer on the taguchi method", Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [7] S. Chatterjee and A. S. Hadi, "Regression analysis by example", Wiley-Interscience, 2006.
- [8] D. C. Montgomery and G. C. Runger, "Applied Statistics and Probability for Engineers", John Wiley & Sons, 2010.
- [9] S. Kou, "Welding metallurgy", Wiley-Interscience, 2003.
- [10] P.J.M. Laarhoven, E.H.L. Aarts, "Simulated Annealing: Theory and Applications", Kluwer Academic Pub., 1998.



۷- روند همگرایی الگوریتم به سمت جواب بهینه

۴- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر در ادامه مطالعات انجام شده در زمینه جوشکاری GMAW بر روی خانواده فولادهای API 5L-X42، مورد استفاده در خطوط انتقال گاز، صورت گرفته است. در این راستا سه هدف مهم مد نظر بوده است. در مرحله اول، پس از اخذ نتایج به کمک روش تاگوچی، با استفاده از مدل‌های رگرسیونی مختلف، ارتباط دقیق و معنی‌داری بین پارامترهای ورودی و متغیرهای خروجی فرآیند برقرار گردید. در این خصوص آزمون‌های آماری نشان دادند که مدل‌های درجه دوم (با ضریب همبستگی بیش از ۹۷٪) بهترین انطباق را بر فرآیند واقعی جوشکاری GMAW، دارا می‌باشند. در مرحله بعد، با کمک ابزار آماری تحلیل واریانس مشخص شد که، پارامتر سرعت جوشکاری و ولتاژ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر عرض ناحیه متأثر از حرارت دارد. پارامتر نرخ تغذیه سیم نیز کمترین تأثیر را بر روی خروجی دارد. در مورد میزان مقاومت به ضربه جوش نیز، پارامتر نرخ جریان گاز و نرخ تغذیه سیم به