

مدلسازی و بهینه سازی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ با استفاده از روش های آماری و الگوریتم تبرید تدریجی

فرهاد کلاهان
دانشیار گروه مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
مهدی حیدری
دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده:

روش جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ^۱ (GMAW) از فرآیندهای مهم در ایجاد اتصالات دائمی با کیفیت بالا در قطعات فلزی است. در فرآیندهای جوشکاری، هندسه و کیفیت اتصالات به میزان زیادی وابسته به مقادیر پارامترهای تنظیمی است. از جمله پارامترهای مهم تنظیمی می توان به ولتاژ، نرخ تغذیه سیم، نرخ جریان گاز، فاصله نازل تا صفحه و زاویه نازل نسبت به صفحه جوشکاری اشاره نمود. کیفیت جوش معمولاً توسط هندسه گرده جوش بیان می شود که خود شامل ارتفاع، پهنا و عمق نفوذ گرده جوش می باشد. در این مقاله، بر اساس داده های تجربی و با استناد بر رویکرد مدلسازی رگرسیون، روابط ریاضی دقیق بین پارامترهای ورودی جوشکاری و مشخصه های هندسه گرده جوش توسعه یافته است. سپس به کمک الگوریتم تبرید تدریجی بهترین مقادیر برای پارامترهای ورودی فرآیند، براساس مشخصه های مطلوب هندسه گرده جوش، تعیین شده اند. مقایسه نتایج بهینه سازی با مقادیر واقعی نشانگر قابلیت بسیار خوب روش پیشنهادی در مدلسازی و بهینه سازی جوشکاری GMAW می باشد.

کلمات کلیدی: مدلسازی آماری - جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ - بهینه سازی - الگوریتم تبرید تدریجی

Modeling and optimization of Gas Metal Arc Welding process using statistical methods and Simulated Annealing algorithm

F. Kolahan Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad
M. Hydari Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract:

Gas Metal Arc Welding (GMAW) using inert gas is an important welding process for making permanent joints in metal parts. The quality of joint in welding is usually expressed by weld bead geometry which includes bead height, width and penetration. Weld bead geometry and joint quality, in turn, depend on the welding parameter settings. In this paper, using regression modeling, the exact mathematical relationships between welding input parameters and weld bead geometry specifications have been established. Then, based on statistical analyses, the best and most fitted model has been selected. The proposed model in the present research has better fit and is simpler than those in related literature. In the second part of this paper, Simulated Annealing algorithm has been employed in order to determine the optimum set of welding parameters values. The comparison between optimization results and actual values demonstrates that the proposed procedure is quite capable in modeling and optimization of GMAW process.

Key words: Regression modeling, Gas Metal Arc Welding, Analysis of Variance, Optimization, Simulated Annealing algorithm

¹ Metal Inert Gas

۱- مقدمه

امروزه فرآیندهای جوشکاری نقش مهمی را در صنعت و تولید ایفا می‌کنند. در این میان جوشکاری با گاز محافظ، در زمره فرآیندهای پر کاربرد، برای ایجاد اتصالات با کیفیت بالا، محسوب می‌گردد. سرعت مناسب جوشکاری و دورریز کم مواد (الکتروود) از دیگر مزایای این روش هستند. در این تکنیک، مانند سایر روش‌های جوشکاری، کیفیت اتصال مستقیماً تحت تاثیر هندسه گرده جوش قرار دارد. بنابراین ایجاد یک گرده با مشخصات هندسی مطلوب (ارتفاع، پهنا و عمق نفوذ)، بسیار با اهمیت است. برای دستیابی به هندسه گرده مناسب، باید پارامترهای ورودی را به نحو مناسب تعیین کرد. در گذشته برای تعیین سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی فرآیند، معمولاً از تجربه کاربر و یا روش‌های مبتنی بر سعی و خطا استفاده می‌گردید. این روش‌ها علاوه بر دقت پایین، پر هزینه بوده و مستلزم صرف زمان زیادی می‌باشند. از این رو، اخیراً رویکردهای ریاضی و آماری برای این منظور پیشنهاد شده‌اند. رگرسیون خطی و غیر خطی، روش سطوح پاسخ^۲، و ابزارهای طراحی آزمایشات^۳ (DOE) از جمله این روش‌ها می‌باشند.

در این راستا، بانگ و همکاران [۱] معادله رگرسیون غیر خطی را بدست آورند که توسط آن ارتباط بین ضرایب همبستگی و انحراف استاندارد خطا در مورد جوشکاری قوس الکتریکی پیش بینی شده است. کیم و همکاران [۲] معادلات چند گانه خطی و غیر خطی برای مدلسازی جوشکاری خودکار قوس الکتریکی CO₂ ارائه دادند. این توابع، پارامترهای فرآیند جوشکاری را با مشخصه‌های هندسه گرده جوش ارتباط می‌دهند. کلاهان و حیدری [۳] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی فرآیند جوشکاری MIG را مدلسازی نموده و با استفاده از تحلیل‌های آماری بهترین مدل را ارائه دادند. در همین راستا، کانجی‌گاتی و همکاران [۴] بکمک داده‌های تجربی، رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی در جوشکاری GMAW^۴ را مطالعه نمودند. در تحقیق مزبور داده‌های مورد نیاز، به کمک رویکرد طراحی آزمایشات، برای فولاد استاندارد AISI ۱۱۱۰، گردآوری شده است. علی‌رغم تعداد قابل توجه آزمایشات، مدل‌های ایشان دارای ضریب همبستگی نسبتاً پایینی بوده و همچنین میزان و نحوه تاثیر پارامترهای تنظیمی را در خروجی‌های فرآیند نشان نمی‌دهند. با وجود انجام تحقیقات گسترده در زمینه مدلسازی و بهینه‌سازی جوشکاری، هنوز در بسیاری از مواقع نیاز به رویکرد جامعی بمنظور مدلسازی و بهینه‌سازی این گروه از فرآیندها

احساس می‌شود. بسیاری از مطالعات کنونی تنها تا مرحله مدلسازی فرآیند پیش رفته‌اند.

۲- طرح مسئله و ارائه مدل‌های ریاضی

در جوشکاری GMAW و سایر فرآیندهای جوشکاری، هندسه گرده جوش مستقیماً از مقادیر پارامترهای تنظیمی تاثیر می‌پذیرد. مهمترین پارامترهای تنظیمی شامل سرعت جوشکاری (S)، ولتاژ (V)، سرعت تغذیه سیم (F)، نرخ جریان گاز (G)، فاصله نازل تا سطح (D) و زاویه مشعل (A) می‌باشند. یکی از معیارهای مهم در ارزیابی کیفیت یک اتصال جوشکاری شده، هندسه گرده جوش است؛ که خود شامل ۳ مولفه ارتفاع^۵ (BH)، پهنا^۶ (BW) و عمق گرده^۷ (BP) جوش می‌باشد. هر گونه تغییری در پارامترهای تنظیمی باعث تغییر در مولفه‌های هندسه گرده جوش خواهد شد.

هدف اصلی در این بخش از تحقیق تعیین نوع و میزان تاثیر این پارامترها بر هندسه گرده جوش از طریق مدلسازی ریاضی است. بدین منظور از نتایج حاصل از آزمایشات تجربی استفاده شده است. بازه تغییرات مقادیر پارامترهای تنظیمی برای انجام آزمایشات در جدول ۱ نشان داده شده است [۴]. برای گردآوری داده‌های تجربی، ۶ پارامتر ورودی، هر کدام در دو سطح در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به خروجی‌های فرآیند (سه مولفه هندسه گرده جوش)، در هر مدل ریاضی سه معادله وجود خواهد داشت.

جدول ۱- سطوح پارامترهای ورودی فرآیند جوشکاری MIG

شماره	فاکتور	واحد	نماد	سطح	مقدار
۱	سرعت جوشکاری	cm/min	S	-	۲۵
				+	۴۵
۲	ولتاژ قوس الکتریکی	V	V	-	۲۶
				+	۳۰
۳	نرخ تغذیه سیم	m/min	F	-	۶
				+	۷
۴	نرخ جریان گاز	l/min	G	-	۱۴
				+	۱۸
۵	فاصله صفحه تا نازل	mm	D	-	۱۵
				+	۲۰
۶	زاویه مشعل	Degree	A	-	۷۰
				+	۱۰۰

^۴ Bead Height
^۵ Bead Width
^۶ Bead penetration

^۱ Surface Response Method
^۲ Design of Experiment
^۳ Gas Metal Arc Welding

۲-۱- اعتبار سنجی و مقایسه مدل‌ها

بمنظور مدلسازی فرآیند جوشکاری GMAW، سه تابع استاندارد درجه اول، درجه دوم و درجه سوم، بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شده‌اند. بمنظور ایجاد برازش بهتر در مدل‌های ریاضی رگرسیونی، از روش‌های مختلف آماری برای حذف جملات نامطلوب استفاده می‌شود. در این تحقیق، کلیه مدل‌های ارائه شده توسط روش "پسرو" اصلاح شده‌اند [۱۷]. این روش آماری با حذف پارامترهای نامطلوب، معادلات مورد نظر را تصحیح کرده و برازش بهتری را از فرآیند واقعی بدست می‌دهد. بمنظور اعتبار سنجی مدل‌های ریاضی و انتخاب مدل اصلاح، ضریب همبستگی آنها با یکدیگر مقایسه گردید. در جدول ۲، مقادیر ضرایب همبستگی برای هر سه مدل ارائه شده است. مقادیر جدول ۲ نشان می‌دهد مدل درجه سوم از انطباق بهتری برخوردار است. ضرایب همبستگی هر سه تابع در این مدل بالاتر از ۰.۸۵ بوده و رابطه قوی‌تری را بین پارامترهای تنظیمی و خروجی‌های فرآیند برقرار می‌کنند.

۳- بهینه‌سازی فرآیند

همانطور که در بخش اول مقاله تشریح شد، تنظیم همزمان ۶ متغیر ورودی فرآیند جوشکاری GMAW بصورتی که منجر به ایجاد یک هندسه دلخواه در گرده جوش شود، بسیار دشوار است. در واقع مسئله اصلی در اکثر کاربردهای عملی آن است که چگونه می‌باید سطوح پارامترهای تنظیمی فرآیند را انتخاب نمود تا به مقادیر مطلوب ارتفاع، پهنا و عمق نفوذ گرده جوش دست یافت. پس هدف یافتن روشی است که با دریافت مقادیر مطلوب ارتفاع، پهنا و عمق نفوذ گرده جوش، سطوح مناسب ۶ پارامتر ورودی را تعیین نماید. این امر مستلزم حل وارون و همزمان سه مدل مربوط به هندسه گرده جوش است.

در این مقاله با استفاده از الگوریتم تبرید تدریجی^۱، مسئله بهینه‌سازی همزمان پارامترهای تنظیمی حل شده است. دلیل استفاده از این الگوریتم سرعت بالا و سهوات برنامه‌نویسی آن در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مشابه است.

۳-۱ الگوریتم تبرید تدریجی (SA)

اصول ریاضی الگوریتم تبرید تدریجی اولین بار توسط متروپولیس^۲ در ۱۹۵۳ مطرح شد و سپس کیرپاتریک^۳ و کرنی^۴ آن را به صورت یک الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهاد کردند [۵، ۶]. ایده الگوریتم تبرید تدریجی برگرفته از اصول آنیل کردن فلزات یعنی تبرید تدریجی یک مذاب تا حالت جامد (دمای محیط) می‌باشد، بطوریکه که ساختار کریستالی فلز بصورت منظم و با حداقل سطح انرژی تشکیل گردد. در بهینه‌سازی توابع ریاضی مقادیر کمینه تابع هدف متناظر با سطوح انرژی پایین‌تر یک ماده در حال انجماد هستند. طبق اصول تبرید تدریجی، برای رسیدن به این مقادیر کمینه، کوچکترین تغییرات بصورت مرحله‌ای در جواب‌های مسئله مورد نظر صورت می‌گیرد. جزئیات کامل این روش و کاربردهای مختلف آن را می‌توان در تحقیقات مرتبط یافت (مثلاً [۹-۶]).

۳-۲ مثال عددی و نتایج حل

در اکثر کاربردهای صنعتی، هدف تعیین مقادیر پارامترهای تنظیمی فرآیند است بنحوی که هندسه مطلوب گرده جوش ایجاد شود. بدین منظور لازم است مدل‌های ارائه شده در بخش ۲-۱، بصورت وارون حل شوند. در این قسمت با استفاده از الگوریتم تبرید تدریجی، ۵ مثال عددی ارائه شده، و نتایج

جدول ۲- ضریب همبستگی توابع مختلف

مدل فرآیند	BP	BW	BH
چند جمله‌ای درجه اول	۰.۶۸	۰.۷۷	۰.۸۶
چند جمله‌ای درجه دوم	۰.۸۵	۰.۹۱	۰.۹۵
چند جمله‌ای درجه سوم	۰.۸۶	۰.۹۲	۰.۹۷

در اینجا با توجه به محدودیت حجم مقاله، مدل معادله درجه سوم که دارای بهترین برازش می‌باشد، ارائه شده است.

$$BH = 30.78664 - 0.89393 \times S - 0.92097 \times V - 0.41046 \times G + 0.22633 \times D - 0.1878 \times A + 0.0310 \times SV + 0.03336 \times SF + 0.01513 \times SG + 0.00301 \times SA + 0.00649844 \times VA + 0.05909 \times GF - 0.0305 \times DF - 0.00161 \times SVF - 0.00024 \times SGD - 0.00017 \times SVA - 0.00158 \times SGF + 0.00055 \times SDF + 0.00024 \times SAF \quad (1)$$

$$BW = -28.65226 + 1.03222 \times S + 1.52993 \times V - 0.05815 \times SV - 0.00087 \times DA + 0.0025 \times SVF + 0.00017 \times SVA - 0.00063 \times SAF \quad (2)$$

$$BP = 1.459 - 0.48949 \times V + 0.4132 \times D + 0.0708 \times A - 0.00295 \times DS + 0.05336 \times VF + 0.00663 \times VG + 0.00154 \times VA - 0.01444 \times AF - 0.00965 \times DG - 0.00274 \times DA + 0.00002 \times DAS \quad (3)$$

^۱ Simulated Annealing

^۲ Metropolis

^۳ Kirhpatric

^۴ Cerny

کد نویسی شده است. مولفه‌های هندسه گرده جوش به‌همراه مقادیر پارامترهای تنظیمی که توسط الگوریتم SA محاسبه شده‌اند، برای ۵ مثال حل شده در جدول ۳ ارائه شده است.

حاصل در مقابل داده‌های تجربی صحت‌گذاری شده‌اند. بمنظور مقایسه نتایج، مقادیر مطلوب مولفه‌های هندسه گرده جوش (ارتفاع، پهنا و عمق نفوذ) از میان آزمایشات تجربی انتخاب شده‌اند. الگوریتم پیشنهادی در محیط نرم افزار MATLAB

جدول ۳- نتایج محاسباتی توسط الگوریتم تبرید تدریجی

شماره آزمایش	ورودی‌های فرآیند جوشکاری که توسط الگوریتم بدست آمده‌اند					خروجی‌های فرآیند که توسط الگوریتم بدست آمده‌اند				
	S	V	F	G	D	A	BH	BW	BP	
۱	۴۵,۰۰	۳۰,۰۰	۶,۲۳	۱۷,۹۸	۱۵,۱۲	۷۵,۶۰	۲,۶۶	۸,۲۳	۱,۵۴	
۲	۲۵,۰۰	۲۶,۰۰	۶,۴۸	۱۴,۰۰	۱۵,۰۰	۷۰,۰۱	۴,۱۱	۸,۶۳	۲,۰۶	
۳	۳۴,۴۰	۲۷,۶۰	۶,۹۸	۱۴,۰۲	۱۷,۳۱	۷۰,۴۵	۳,۲۵	۹,۵۶	۲,۰۴	
۴	۲۵,۰۰	۲۹,۲۲	۶,۰۰	۱۴,۶۵	۲۰,۰۰	۸۰,۸۴	۳,۱۳	۱۱,۵۰	۱,۷۹	
۵	۳۹,۲۵	۲۹,۲۳	۶,۹۷	۱۶,۴۷	۱۹,۷۴	۷۰,۱۱	۲,۶۸	۹,۸۵	۲,۰۰	

مقایسه بین مقادیر مطلوب و مقادیر محاسبه شده توسط الگوریتم نیز نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی دارای عملکرد بسیار خوبی در بهینه‌سازی و تخمین پارامترهای تنظیمی برای رسیدن به خروجی‌های مورد نظر است.

بمنظور بررسی عملکرد رویکرد بهینه‌سازی پیشنهادی، نتایج محاسباتی توسط الگوریتم تبرید تدریجی با مقادیر مطلوب در جدول ۴ مقایسه شده‌اند. همانطور که در این جدول مشاهده می‌گردد، مجموع مربعات خطاها برای هر پنج آزمایش بسیار ناچیز بوده و بیشترین مقدار آن حدود ۰/۰۰۲ است. همچنین

جدول ۴- مقایسه نتایج محاسباتی توسط الگوریتم تبرید تدریجی و مقادیر مطلوب

شماره آزمایش	مقادیر مطلوب (mm)			مقادیر حاصل از الگوریتم تبرید تدریجی (mm)			درصد خطا (%)			مقادیر مجموع مربعات خطا
	BH	BW	BP	BH	BW	BP	BH	BW	BP	
۱	۲,۶۶	۸,۲۳	۱,۵۴	۲,۶۶	۸,۲۳	۱,۵۴	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰۴	$۲,۶۹ \times 10^{-۷}$
۲	۴,۲۱	۸,۶۰	۲,۰۵	۴,۱۱	۸,۶۳	۲,۰۶	۲,۵۱	۰,۳۴	۰,۹۰	۰,۰۰۲۳
۳	۳,۲۵	۹,۵۶	۲,۰۴	۳,۲۵	۹,۵۶	۲,۰۴	۰,۱۹	۰,۰۳	۰,۱۵	$۱,۰۵ \times 10^{-۷}$
۴	۳,۱۵	۱۱,۵۱	۱,۷۸	۳,۱۳	۱۱,۵۰	۱,۷۹	۰,۴۱	۰,۱۱	۰,۴۳	۰,۰۰۰۱
۵	۲,۶۸	۹,۸۵	۲,۰۰	۲,۶۸	۹,۸۵	۲,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	$۱,۱۸ \times 10^{-۹}$

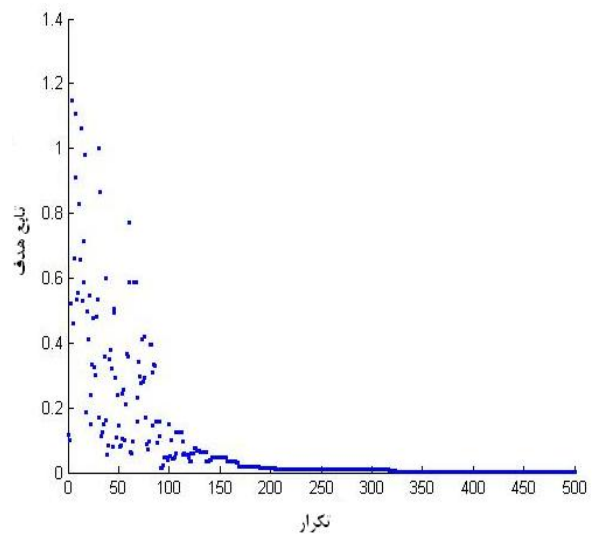
همانطور که در این نمودار نشان داده شده است، الگوریتم در این مدت ۵۰۰ تکرار داشته است؛ ولی در حدود ۳۵۰ تکرار به جواب نهایی همگرا شده است. این امر مبین سرعت بسیار بالای الگوریتم تبرید تدریجی در حل مسئله مورد نظر است.

سرعت محاسباتی یکی دیگر از معیارهای مهم ارزیابی عملکرد روش‌های بهینه‌سازی است. روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی در نمودار ۱ نشان داده شده است. نقاط نشان داده شده در این نمودار مقادیر تابع هدف (مجموع مربعات خطاها) در هر تکرار الگوریتم می‌باشند. زمان اجرای الگوریتم برای هر مسئله ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شده است.

راستا، برای اولین بار از الگوریتم تبرید تدریجی بعنوان روش بهینه‌سازی در روش جوشکاری مورد مطالعه، استفاده شد. نتایج محاسباتی مبین سرعت محاسباتی بسیار بالا و کیفیت خوب جواب‌های حاصل است. همچنین سهولت نسبی کد نویسی الگوریتم پیشنهادی، در مقایسه با سایر روش‌های مشابه بهینه‌سازی، می‌تواند بعنوان یکی دیگر از نقاط قوت رویکرد پیشنهادی باشد.

مراجع

- [1] Yang, L. J., Chandel, R. S., and Bibby, M. J., "An analysis of curvilinear regression equations for modeling the submerged-arc welding process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, pp.601–611, 1993
- [2] Kim, I.S., Son, J.S., Kim, I.G., Kim, J.Y., and Kim O.S., "A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic CO2 arc welding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.136, pp.139–145, 2003
- [۳] کلاهان، ف.، حیدری، م.، "مدلسازی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ با استفاده از روش های آماری و عددی"، نهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ساخت و تولید ایران، اسفند ۱۳۸۷
- [4] Ganjigatti, J. P., Pratihari, D. K., and RoyChoudhury, A., "Modeling of the MIG welding process using statistical approaches", *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, pp. 1166–1190, 2008
- [5] Metropolis M.C., "Simulated Annealing and I.E.T. Algorithm: Theory and Experiments" *Lmens-96-21*, June 1996
- [6] Kirkpatrick., Cerny., "Transportation Planning and Technology", 1029-0354, Vol.16, Issue 4, pp. 261 – 273, 1992
- [۷] حیدری، مهدی، "تعیین پارامترهای تنظیمی جوشکاری MIG/MAG توسط الگوریتم‌های هوشمند به منظور بهینه‌سازی هندسه جوش در صنایع انتقال گاز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۸
- [8] Sitarz S. Ant algorithms and simulated annealing for multicriteria dynamic programming. *Computers & Operations Research*, Vol. 36, pp.433 – 441, 2009.
- [9] Vasan A, Raju K.S., Comparative analysis of Simulated Annealing, Simulated Quenching and Genetic Algorithms for optimal reservoir operation. *Applied Soft Computing* Vol.9, pp. 274–281, 2009.



نمودار ۱- نمودار همگرایی در الگوریتم تبرید تدریجی

۴- نتیجه‌گیری

کاربرد وسیع روش‌های جوشکاری در صنایع مختلف از یک طرف و تعدد پارامترهای تنظیمی در این روش‌ها از طرف دیگر، شناخت و بهینه‌سازی آنها را از اهمیتی خاص برخوردار کرده است. تحقیق حاضر در ادامه مطالعات انجام شده در زمینه مدلسازی و بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری GMAW می‌باشد. در این راستا، ابتدا با استفاده از مدل‌های رگرسیونی، ارتباط دقیق و معنی‌دار بین پارامترهای ورودی و متغیرهای خروجی جوشکاری GMAW برقرار گردیده است. مدلسازی فرآیند توسط برازش انواع توابع ریاضی شامل چند جمله‌ای خطی، درجه دوم و درجه سوم بر داده‌های آزمایشگاهی موجود، انجام گرفته است. سپس بمنظور تعیین مدل اصلاح از بین این مدل‌ها، از معیار آماری ضریب همبستگی استفاده گردید. نتایج تحلیل‌های آماری مبین اینست که مدل درجه سوم انطباق بسیار خوبی بر شرایط واقعی داشته و قادر است نوع و میزان تاثیر پارامترهای تنظیمی را بر هندسه گرده جوش بخوبی پیش‌بینی نماید.

در مرحله دوم، روشی مبتنی بر الگوریتم تبرید تدریجی، بمنظور تعیین سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی برای رسیدن به هندسه گرده مورد نظر ارائه گردید. رویکرد پیشنهادی قادر است، با کمینه‌سازی یک تابع خطا، مقادیر مناسب پارامترهای فرآیند جوشکاری GMAW را بنحوی تعیین نماید تا خروجی‌های مورد انتظار شامل ارتفاع گرده، پهنا گرده و عمق نفوذ در گرده جوش تامین شوند. در این