

ISME2019-1100

## مدل سازی و بهینه سازی هندسه‌ی گرده‌ی جوش با به کارگیری تکنیک طراحی آزمایشات و الگوریتم تبرید تدریجی

(مطالعه موردی نیروگاه سیکل ترکیبی فردوسی مشهد)

### مسعود آزادی مقدم

دانشجوی دکترا، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، کارشناس مکانیک نیروگاه سیکل ترکیبی فردوسی مشهد  
فرهاد کلاهان

دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
حمید دلیر

تکنسین نیروگاه سیکل ترکیبی فردوسی مشهد

تنگستن با گاز محافظه‌ی تیگ<sup>۱</sup> یکی از روش‌های بسیار مهم جوشکاری است که به طور عمده برای ایجاد اتصالات با کیفیت بالا در فلزات سبک مانند آلومینیوم و تیتانیوم و فولادهای زنگ-زن بکار می‌رود. از دیگر کاربردهای این تکنیک، جوشکاری مقاطع نازک و جوشکاری پاس ریشه در مخازن و لوله‌ها است [۱] و [۲]. گاز محافظه در این روش معمولاً گاز خنثی آرگون یا ترکیبی از این گاز با هلیم است که برای محافظت از حوضچه مذاب ایجاد شده توسط الکترود غیر مصرفی تنگستن استفاده می‌شود. در حین جوشکاری گاز خنثی، هوا را از ناحیه جوشکاری بیرون رانده و از اکسیده شدن الکترود جلوگیری می‌کند. در جوشکاری تیگ الکترود فقط برای ایجاد قوس بکار برده می‌شود و در صورت نیاز از سیم جوش بعنوان فلز پرکننده استفاده می‌گردد. در تحقیق پیش رو مطالعه فرآیند جوش الکترود تنگستن ورق‌هایی از جنس آلیاژ AISI304L به منظور بررسی تأثیر عامل‌های کنترلی جوشکاری تیگ بر پارامترهای هندسه گرده جوش<sup>۲</sup> است. این سری از آلیاژ به خاطر مقاومت بالا نسبت به خوردگی در اتصالات نیروگاهی بسیار کاربرد دارد. همچنین به علت ضریب تبادل حرارت بالای این آلیاژ می‌توان از آن در صنایع غذایی و شیمیایی بهره برد. به علت خاصیت انتقال حرارت بالای آن و حساسیت آن به اکسید شدن در حرارت بالا جوشکاری تیگ به علت تمرکز حرارتی و استفاده از گاز محافظه گزینه مناسبی برای جوشکاری آن است.

چکیده  
فرآیند جوشکاری الکترود غیر مصرفی با گاز محافظه (تیگ) به سبب کیفیت بالای اتصال یکی از فرآیندهای پرکاربرد جوشکاری محسوب می‌گردد. یکی از کاربردهای مهم این فرآیند در جوشکاری ورق‌های نازک است. در این پژوهش به منظور ایجاد ارتباط دقیق بین پارامترهای ورودی (شدت جریان، فرکанс، سرعت و گپ) و خروجی‌های فرآیند (ارتفاع به عرض جلو و ارتفاع به عرض پشت) از مدل سازی رگرسیونی استفاده شد. برای گرداوری داده‌های مورد نیاز برای مدل سازی از تکنیک پاسخ سطح استفاده شد. در این راستا انواع توابع رگرسیونی شامل خطی، درجه دوم و لگاریتمی بر این داده‌ها برآش داده شد. اعتبار مدل‌های ارایه شده با استفاده از تحلیل واریانس مورد ارزیابی قرار گرفت و مدل مرتبه دوم که دارای برآش و دقت بالاتری است به عنوان مدل نهایی انتخاب گردید. برای بهینه سازی مدل‌های اصلاح انتخاب شده از الگوریتم تبرید تدریجی استفاده شد. مقایسه نتایج بهینه سازی با مقادیر واقعی نشانگر قابلیت بسیار خوب روش پیشنهادی در مدل سازی و بهینه سازی جوشکاری تیگ می‌باشد.

واژگان کلیدی: مدل سازی رگرسیونی، جوشکاری تنگستن با گاز محافظه، بهینه سازی، الگوریتم تبرید تدریجی

### مقدمه

فرآیندهای جوشکاری از جمله روش‌های پرکاربرد ایجاد اتصالات دائمی قطعات فلزی می‌باشند. در این میان، جوشکاری الکترود

<sup>1</sup> Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)  
<sup>2</sup> Bead Geometry

ورق از جنس آلیاژ تیتانیوم با ضخامت ۱/۶ میلی‌متر مطالعه قرار گرفت [5]. پارامترهای کنترلی بررسی شده عبارت‌اند از جریان اوج، جریان پایه، فرکانس و درصد زمان اعمال جریان اوج در یک سیکل. جوشکاری بدون استفاده از ماده پرکننده و تحت محافظت گاز آرگون خالص صورت گرفته است. خروجی‌هایی که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته‌اند سختی ناحیه جوش و اندازه دانه‌ها در ناحیه متاثر از حرارت است. در این تحقیق از روش سطوح پاسخ برای مدل‌سازی و یافتن سطوح بهینه پارامترهای کنترلی جوش استفاده گردیده است و ترکیب آزمایشات بر اساس طرح مرکزی چرخشی انتخاب گردید. هدف از بهینه‌سازی در این مقاله افزایش میزان سختی و کاهش اندازه دانه‌ها (برای کاهش حساسیت به ترک گرم) در محل جوش بود که با مقادیری که از روش سطوح پاسخ به دست آمده به این هدف دست یافته است.

#### روش پاسخ سطح و طراحی آزمایشات

هدف اصلی طراحی آزمایشات مطالعه‌ی ارتباط بین پاسخ به عنوان یک متغیر وابسته و پارامترهای ورودی می‌باشد. در این روش علاوه بر بررسی تاثیر هر پارامتر، اثرات متقابل بین هر پارامتر نیز در نظر گرفته می‌شود. طراحی آزمایشات روشی جهت حداقل‌سازی تعداد آزمایشات برای رسیدن به شرایط بهینه است. برای استخراج روابط مربوط به پاسخ سطح داده‌های ورودی از نتایج آزمایشات تجربی استخراج می‌شوند. برای مدل‌سازی سعی بر انجام حداقل تعداد آزمایشات تجربی می‌باشد تا در زمان و هزینه صرفه‌جویی شود. در این تحقیق از روش پاسخ سطح جهت تعیین تعداد آزمایشات استفاده شده است. که برای هر یک از پارامترهای ورودی سه سطح در نظر گرفته شد جدول (1) و برای کاهش هزینه و زمان آزمایشات طرح L<sub>27</sub> انتخاب گردید [6].

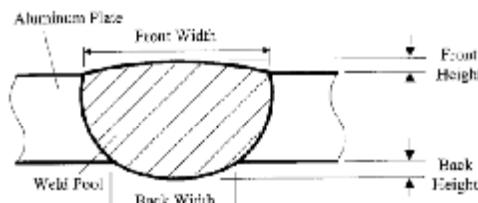
جدول (1) پارامترهای ورودی و سطوح در نظر گرفته شده

سطح			واحد	پارامترهای ورودی	علامت مشخصه
-1	0	+1			
110	120	130	ampere	جریان	I
85	100	115	Hz	فرکانس	F
240	300	360	mm/min	سرعت	S
2/5	3	3/5	mm	گپ	G

#### مدل‌سازی و آنالیز نتایج

بمنظور مدل‌سازی فرآیند جوشکاری تنگستن با گاز محافظه، توابع مختلف رگرسیونی، شامل توابع خطی، لگاریتمی و درجه دو بر داده‌های تجربی حاصل از آزمایشات، برآش داده شد. تهیه مدل‌های ریاضی و تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) در

از ورق با جنس مذکور با ضخامت کم اکثراً به عنوان پوسته و جداره در تجهیزاتی که ذکر شد استفاده می‌گردد، به همین دلیل اتصالاتی جوش این ورق‌ها باید حتی‌الامکان با ورق هم سطح بوده و نیاز به عملیات پرداخت مانند سنگ زنی برای حذف برجستگی ناشی از گرده جوش در آن‌ها وجود نداشته باشد. برای نیل به این هدف پارامترهای هندسه گرده جوش باید در بازه مورد قبول قرار داشته باشند. پارامترهای هندسه گرده جوش در شکل (1) به نمایش در آمده است.



شکل (1) نمایش پارامترهای هندسه گرده جوش

تاکنون تحقیقات زیادی برای مطالعه تأثیر پارامترهای جوشکاری و همچنین مدل‌سازی فرآیند جوش و بهینه‌سازی آن‌ها صورت گرفته است. در تحقیقی تأثیر پارامترهای جوشکاری تیگ پالسی بر روی خواص کششی مورد بررسی قرار گرفت [3]. در این پژوهش به کمک طرح آزمایش عاملی کامل، اثر جریان اوج، جریان پایه، فرکانس پالس و درصد روشنایی قوس بررسی گردیده است. پس از اخذ نتایج مدل‌سازی به کمک مدل‌های رگرسیونی<sup>3</sup> برای چهار خروجی تنش تسلیم، تنش نهایی، افزایش طول و تنش تسلیم ناج (درزدار) انجام گردیده است. درنهایت از مدل‌ها برای تفسیر تأثیر پارامترها بر خروجی‌ها استفاده گردیده است. در تحقیقی از روش تاگوجی برای بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای جوش تیگ ورق فولاد ضدزنگ S304 با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر استفاده شد [4]. پارامترهای کنترلی مورد بررسی در این تحقیق عبارت‌اند از گپ بین الکترود و ورق، دبی جریان گاز، آمپراژ جریان و سرعت خطی جوش که ترکیبات مختلف این پارامترها بهصورت آرایه L<sub>16</sub> تاگچی طراحی شده‌اند. برای ایجاد تابع زیان که تمام خروجی‌ها را یکجا پوشش دهد و انجام بهینه‌سازی چنددهدفه از روش وزن دهی به هریک از پارامترهای هندسه گرده جوش استفاده شده است که در آن به ارتفاع پشتی و عرض جلویی ضریب ۰/۴ و به ارتفاع جلویی و عرض پشتی ضریب ۰/۱ تخصیص داده شده است. بر اساس نتایج آنالیز واریانس تغییر در مقادیر پارامتر سرعت جوش، گپ قوس، آمپراژ جریان و نرخ جریان گاز محافظه به ترتیب بیشترین تأثیر را بر روی هندسه جوش می‌گذارند. در پژوهشی مدل‌سازی جوش الکترود تنگستن

<sup>3</sup> Regression

## بررسی تأثیر متقابل پارامترهای ورودی بر ارتفاع به عرض جلویی گرده جوش

در شکل (2) قسمت الف تأثیر شدت جریان و فرکانس بر ارتفاع به عرض جلویی به نمایش در آمده است. تجزیه تحلیل نمودار بیانگر این موضوع است که تغییرات فرکانس نقش چندانی در تغییرات عدد نسبت ارتفاع به عرض جلویی ندارد، بالعکس افزایش شدت جریان را طبقه مستقیمی با افزایش این نسبت دارد. افزایش شدت جریان با افزایش حرارت اعمال شده به حوضچه مذاب باعث افزایش بیش از حد حرارت مذاب فلز و خمیری شدن ناحیه وسیع‌تری از اطراف حوضچه مذاب می‌شود، این پدیده خود تحت تأثیر نیروی کشش ثقلی باعث ایجاد فرورفتگی بیشتر در محل خط جوش و به تبع آن افزایش فاصله گرده تا سطح فوقانی ورق که ارتفاع گرده جوش است می‌گردد. در این میان باریک شدن قوس ناشی از افزایش فرکانس جریان توان تأثیر بر این پدیده را ندارد. همچنین در شکل (2) قسمت ب اثر سرعت جوشکاری و گپ بر روی خروجی نشان داده شده است، که افزایش نسبت ارتفاع به عرض جلویی با شبکه ملامیم با افزایش گپ همراه است. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش سرعت جوشکاری نسبت ارتفاع به عرض جلویی کاهش می‌باید که علت آن کاهش میزان حرارت اعمال شده به محل جوش به دلیل کاهش زمان حرارت دهی قوس بر واحد طول خط جوش است.

## بررسی تأثیر متقابل پارامترهای ورودی بر ارتفاع به عرض پشتی گرده جوش

در شکل (3) الف مشاهده می‌شود با افزایش سرعت مقدار حرارت اعمال شده بر قطعه به دلیل زمان کوتاه‌تر تماس قوس بر آن کاهش می‌باید. با نگاه دقیق‌تر به این روابط می‌توان مشاهده کرد که اثر کاهنده افزایش سرعت با افزایش شدت جریان کمرنگ می‌گردد، زیرا با افزایش حرارت ناشی از جریان‌های بالای قوس زمان تماس قوس نقش کمتری بر انرژی حرارتی وارد به قطعه ایفا خواهد کرد. در شکل (3) قسمت ب عدم تأثیر محسوس افزایش فرکانس بر کاهش ارتفاع به عرض ناحیه جوش و تأثیر چشمگیر افزایش سرعت بر این خروجی را نشان می‌دهد.

در ادامه مدل‌های اصلاح انتخاب شده با به کارگیری الگوریتم تبرید تدریجی بهینه خواهند شد.

محیط نرم افزاری مینی تب صورت پذیرفت. جهت انتخاب مدل مناسب و همچنین تشخیص میزان موثر بودن هر پارامتر، سطح اطمینان 95% تعیین گردید. نتایج محاسباتی و تحلیل‌های آماری نشان می‌دهند که مدل‌های مرتبه دوم، بهترین انتبار را بر فرآیند واقعی دارند. شکل نهایی مدل‌های درجه دوم، ارتباط دهنده پارامترهای ورودی به دو خروجی ارتفاع به عرض جلو و ارتفاع به عرض پشت در روابط (1) و (2) آورده شده است.

$$Fr = 0.0864 + 0.0416I - 0.000198F - 0.03376S + 0.00208G + 0.0125I^2 + 0.0081F^2 - 0.0222S^2 + 0.0043G^2 - 0.00432IF + 0.0059IS + 0.0047IG - 0.00217FS - 0.00444SG \quad (1)$$

$$Br = 0.15526 + 0.02546I - 0.0248F - 0.0429S + 0.0061G + 0.0105I^2 + 0.01228F^2 - 0.0382S^2 + 0.0069G^2 + 0.0221IF + 0.03388IS + 0.00516FS - 0.0053SG \quad (2)$$

صحت روابط تجربی با استفاده از تکنیک آنالیز واریانس بررسی می‌شود. در صورتیکه مقدار P بدست آمده کمتر از 0/05 باشد، در سطح اطمینان مورد نظر (95%)، پارامتر موثر نظر موثر خواهد بود. جداول (2) و (3) نتایج مربوط به آنالیز واریانس مدل‌های ارائه شده را نشان میدهد. همچنین ضریب همبستگی مدل ارتفاع به عرض جلویی 98/58 و برای مدل ارتفاع به عرض پشت 96/13 می‌باشد که هر چه این ضریب همبستگی به عدد 1 نزدیک تر باشد مدل از دقت بیشتری برای پیش‌بینی نتیجه آزمایشات برخوردار است.

جدول (2) آنالیز واریانس مدل ارتفاع به عرض جلویی

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P
مدل	13	0/05486	0/00422	134/64	0
خطای باقیمانده	12	0/00037	0/0003		
مجموع	25				
$R^2=99/32$		$R^2_{pred}=96/64$		$R^2_{adj}=98/58$	

جدول (3) آنالیز واریانس مدل ارتفاع به عرض پشتی

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P
مدل	12	0/06267	0/00522	48/64	0
خطای باقیمانده	11	0/00118	0/0001	-	-
مجموع	23	-	-	-	-
$R^2=98/15$		$R^2_{pred}=93/4$		$R^2_{adj}=96/13$	

بهینه سازی فرآیند با بکارگیری الگوریتم تبرید تدریجی الگوریتم تبرید شبیهسازی شده یک الگوریتم برای بهینه سازی مسائل گستته است. در این الگوریتم تصمیم گیری این به این صورت است که برای هر حرکت، یک همسایگی جدید به صورت تصادفی تولید و ارزیابی می شود. اگر جواب جدید از جواب فعلی بهتر باشد یا مقدار تابع احتمال از یک عدد تصادفی بین صفر و یک بزرگتر باشد حرکت به سمت جواب جدید انجام می شود در غیر این صورت الگوریتم جواب جدید را تولید و حرکت به این جواب با توجه به این شرایط فوق مجدداً ارزیابی خواهد شد. این حرکت گام به گام تا ارضی شرط توقف الگوریتم (تعداد تکرارها، زمان محاسباتی، ...) ادامه می یابد. مقدار تابع احتمال حرکت از رابطه زیر محاسبه می شود [7].

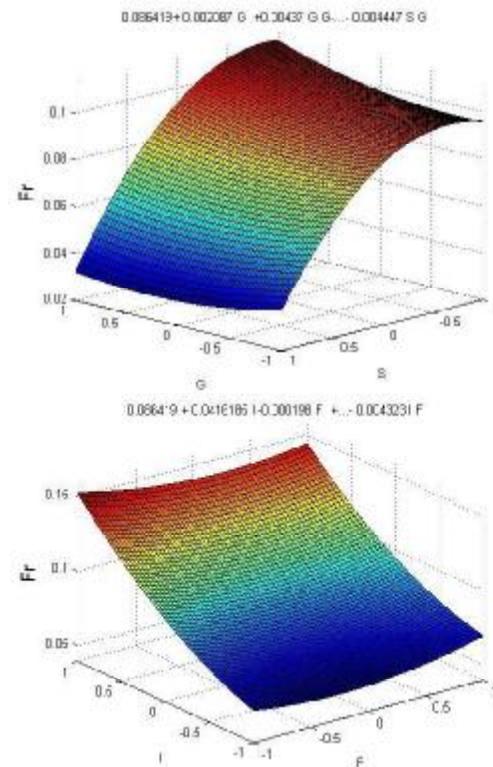
$$P = \text{Exp}\left(\frac{-\Delta Z}{T_K}\right) \quad (5)$$

در این رابطه  $\Delta Z$  تفاضل انرژی نقطه هدف و نقطه فعلی است. هچنین  $T$  دمای سیستم می باشد. برای اینکه الگوریتم شانس بیشتری برای حرکت به جوابهای غیر بهبود دهنده به منظور جلوگیری از گیر افتادن در بهینه های محلی را داشته باشد معمولاً در ابتدای جستجو، مقدار دمای اولیه بزرگ انتخاب می شود. اما با افزایش این حرکت ها، این دما طبق رابطه نرخ سرمایش به تدریج کاهش می یابد به عبارت دیگر با پیشرفت جستجو، حرکت ها غالباً بر اساس بهبود تابع هدف انجام شده و نقش طبیعت تصادفی الگوریتم در پذیرش جواب جدید کاهش می یابد.

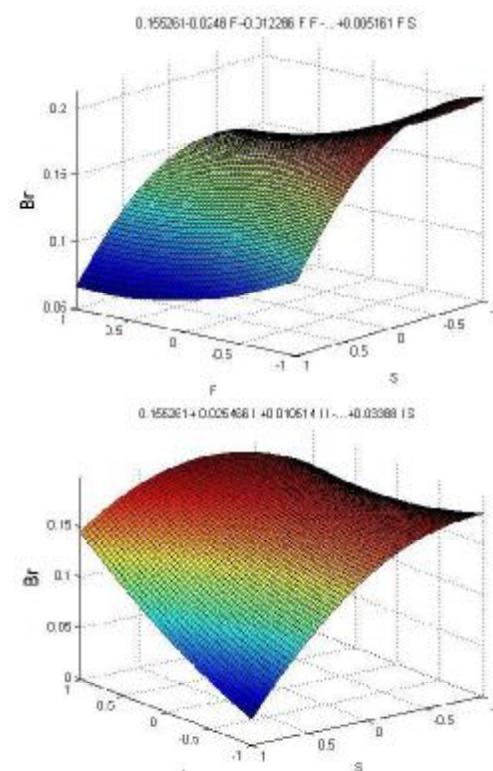
نتایج حاصل از بهینه سازی همزمان خروجی ها توسط الگوریتم تبرید تدریجی در جدول (5) به نمایش در آمده است. در این الگوریتم یک تابع شایستگی ترکیبی برای تمام خروجی های مورد بررسی تعیین می شود و سعی می شود این تابع بهینه گردد.

جدول (5) نتایج بهینه سازی همزمان دو خروجی

مقادیر خطای (%)	آزمایشات عملی	خروچی الگوریتم	مقادیر خروچی	طوح بهینه			
				G	S	F	I
7/5	0/08	0/074	ارتفاع به عرض جلو				118
4/6	0/13	0/124	ارتفاع به عرض پشت	2/6	325	113	



شکل(2) اثر پارامترهای ورودی بر ارتفاع به عرض جلویی



شکل(3) اثر پارامترهای ورودی بر ارتفاع به عرض پشتی

## تقدیر و قدردانی

در اینجا لازم است مراتب تقدیر از آقای مهندس پریپور، مدیریت محترم نیروگاه سیکل ترکیبی فردوسی مشهد را به- خاطر راهنمایی‌هایشان به عمل آوریم.

## مراجع و منابع

- [1] دادخواه، سعید رضا، ۱۳۸۴، مبانی جوشکاری قوس تیگ تحت پوشش گاز محافظه، تهران، انتشارات تدبیر
- [2] کوکبی، امیر حسین، ۱۳۸۵، تکنولوژی جوشکاری، چاپ هفتم، تهران، انتشارات آزاده

[3] Senthil Kumar, T, Balasubramanian, V, Sanavullah, M. Y. (2007). Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminiumalloy. Journal of Materials & Design. vol. 28. 2080-2092

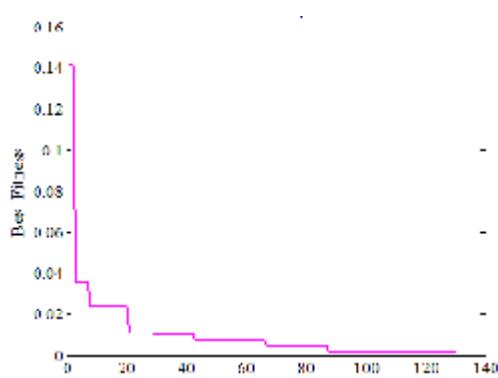
[4] Juang, S. C and Tarn, Y. S. (2002). Process parameter selection for optimizing the weld pool geometry in the tungsten inert gas welding of stainless steel. Journal of materials processing technology. vol. 122. 33-37

[5] Balasubramanian, M, Jayabalan, V, Balasubramanian, V. (2007). Response surface approach to optimize the pulsed current gas tungsten arc welding parameters of Ti- 6Al- 4V titanium alloy. Journal of Metals and Materials International. vol. 13. 335-344

[6] Tarn, Y. S, Tsai, H. L, Yeh, S. S. (1999). Modeling, optimization and classification of weld quality in tungsten inert gas welding. International Journal of Machine Tools and Manufacture. vol. 39. 1427-1438

[7] Kirkpatrick, G.J. and Vecchi D D, Optimization by simulated annealing, Science, 220 (5), 1983, pp.671-680.

بررسی نتایج بهینه‌سازی حاکی از این موضوع است که با استفاده از مقادیر پیشنهادی الگوریتم تبرید تدریجی می‌توان با حداقل اختلاف به اعداد مطلوب برای نسبت ارتفاع به عرض جلویی و پشتی به صورت همزمان دست یافت. نزدیکی اعداد پیش‌بینی شده برای نقطه بهینه ترکیبی با نتایج اندازه‌گیری شده در نمونه‌های آزمایشات صحت سنجی این نقاط حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم به کار گرفته شده در حل مسئله مورد نظر دارد. در شکل (4) روند همگرایی الگوریتم تبرید تدریجی به سمت جواب مطلوب باحدود 130 تکرار نشان داده شده است.



شکل (4) نمودار همگرایی الگوریتم تبرید تدریجی

## بحث و نتیجه‌گیری

کاربرد روش‌های جوشکاری در صنایع مختلف از یک طرف و تعدد پارامترهای تنظیمی در این روش‌ها از طرف دیگر، شناخت و بهینه‌سازی آن‌ها را از اهمیت خاصی برخوردار کرده است. در این راستا ابتدا با استفاده از مدل‌های رگرسیونی، ارتباط دقیق و معنادار بین پارامترهای ورودی و متغیرهای خروجی جوشکاری تیگ برقرار گردیده است. مدل‌سازی فرآیند توسط پرازش انواع توابع ریاضی شامل چند جمله‌ای خطی، درجه دوم و لگاریتمی بر دادمهای آزمایشگاهی موجود، انجام گرفته است. سپس بمنظور تعیین مدل اصلاح از بین این مدل‌ها، از معیار آماری ضریب همبستگی استفاده گردید. نتایج تحلیل های آماری مبین این است که مدل درجه دوم انطباق با شرایط واقعی داشته و قادر است نوع و میزان تاثیر پارامترهای تنظیمی را بر هندسه گرده جوش بخوبی پیش بینی نماید. در مرحله بعد روش مبتنی بر الگوریتم تبرید تدریجی، جهت تعیین سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی برای رسیدن به هندسه گرده مورد نظر ارائه گردید. رویکرد پیشنهادی قادر است، با کمینه سازی یک تابع خطی، مقادیر مناسب پارامترهای فرآیند جوشکاری تیگ را بنحوی تعیین نماید تا خروجی‌های مورد انتظار شامل ارتفاع به عرض جلو و ارتفاع به عرض پشت تامین گردد.