ICISE 2017
3rd International Conference on Industrial and Systems Engineering
13 & 14 Sep. 2017 • Ferdowsi University of Mashhad

سومین کنفرانس بین المللی
مهندسی صنایع و سیستم‌ها
۲۲ و ۲۳ شهریور ۱۳۹۶ • دانشگاه فردوسی مشهد

گواهی ارائه مقاله

بدین وسیله گواهی می‌شود مقاله زیر در

سومین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی صنایع و سیستم‌ها (ICISE 2017)

که در تاریخ ۲۲ و ۲۳ شهریور سال ۱۳۹۶ در دانشگاه فردوسی مشهد برگزار گردید، به صورت شفاهی ارائه شده است:

عنوان مقاله:

استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی ناحیه متاثر از حرارت در فرآیند جوشکاری با الکترود تنگستن آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲

نویسندگان:

فرهاد کلاهان، مسعود آزادی مقدم، فرید ایلچی، مریم طالبی

ضمن تشکر از نویسندگان مقاله، توفیق روزافزون ایشان را در عرصه‌های علمی از خداوند منان خواستاریم.

دکتر مجید سالاری
دبیر کنفرانس

دکتر حمیده ضیاکوشا
دبیر علمی کنفرانس

http://icise.um.ac.ir

ISC
Sponsored and Indexed by CIVILICA
We Respect the Science

استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی ناحیه متاثر از حرارت در فرآیند جوشکاری با الکترود تنگستن آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲

فرید ایلچی[۱]، مسعود آزادی مقدم[۲]، مریم طالبی[۳]، فرهاد کلاهان[۴]

[۱]کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد ساری؛ farid.eilchi@yahoo.com

[۲]دانشجوی دکترا، دانشگاه فردوسی مشهد؛ masoud_azadi88@yahoo.com

[۳]دانشجوی کارشناسی، موسسه آموزش عالی توس؛ maryam.talebi21@gmail.com

[۴]دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد؛ kolahan@um.ac.ir

چکیده

فرآیند جوشکاری با الکترود غیرمصرفی تنگستن و گاز محافظ که با عنوان جوشکاری تیگ نیز شناخته شده است، به سبب کیفیت بالای اتصال یکی از فرآیندهای پرکاربرد جوشکاری محسوب می‌شود. یکی از کاربردهای مهم این فرآیند در جوشکاری ورق‌های نازک می‌باشد. در این تحقیق اثر پارامترهای تنظیمی فرآیند جوشکاری تیگ که شامل: شدت جریان، فرکانس، سرعت و گپ می‌باشند بر ناحیه متاثر از حرارت که به عنوان یکی از مهمترین مشخصه‌های خروجی در نظر گرفته شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور ایجاد ارتباط دقیق بین پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند از مدل‌سازی رگرسیونی استفاده شده است. جهت گردآوری داده‌های مورد نیاز در انجام این تحقیق، ۲۷ آزمایش تجربی با بهره گیری از تکنیک طراحی آزمایشات و روش پاسخ سطح انجام شد. سپس انواع توابع رگرسیونی شامل خطی، درجه دوم و لگاریتمی بر این داده‌ها برازش داده شد. در مرحله بعد، اعتبار این مدل‌ها با استفاده از تحلیل واریانس مورد ارزیابی قرار گرفته و مدل مرتبه دوم که دارای برازش و دقت بالاتری است به عنوان مدل اصلح انتخاب گردید. سپس برای بهینه سازی از الگوریتم ازدحام ذرات، برای نیل به مشخصه‌ی خروجی مطلوب (ناحیه متاثر از حرارت) استفاده شد. مقایسه‌ی نتایج بهینه‌سازی با مقادیر واقعی نشانگر قابلیت بسیار خوب روش پیشنهادی در مدل‌سازی و بهینه‌سازی این فرآیند می‌باشد.

کلمات کلیدی

جوشکاری با الکترود غیر مصرفی تنگستن و گاز محافظ، ناحیه متاثر از حرارت، مدل‌سازی رگرسیونی، بهینه سازی، الگوریتم ازدحام ذرات

Using particle swarm optimization algorithm for heat affected zone optimization in TIG welding process of Al5052

Farid Eilchi[1], Masoud Azadi Moghaddam[2], Maryam Talebi[3], Farhad Kolahan[4]

[1]**M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Sari Branch**

[2]**Ph.D. Candidate, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad**

[3]**B.Sc. Student, Department of Industrial Engineering, Toos Institute of Higher Education**

[4]**Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad**

ABSTRACT

Tungsten Inert Gas (TIG) welding is one of the most popular welding processes due to its high quality joint. Joining thin sheet metals is one of the most important applications of this process. In this research, the effects of welding process parameters including: current, frequency, speed and gap of welding on the heat-affected zone (HAZ), one of the most important quality measures, have been investigated. To gather required data, a number of experiments have been performed based on response surface methodology of DOE technique. Then, using regression functions process modeling has been performed. After verification of models, the best model was selected. This model was used for optimization of process parameters in such a way that HAZ minimized. The comparisons between computational results and experimental data prove the proper performance of the proposed statistical analysis and optimization methods.

KEYWORDS

Tungsten Inert Gas (TIG) welding, heat affected zone (HAZ), regression modeling, optimization, particle swarm optimization (PSO) algorithm.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

۱- مقدمه

فرآیندهای جوشکاری از جمله روشهای پر کاربرد ایجاد اتصالات دائمی قطعات فلزی می‌باشند. در این میان، جوشکاری الکترود تنگستن با گاز محافظ یا تیگ[1] یکی از روشهای بسیار مهم جوشکاری است که به طور عمده برای ایجاد اتصالات با کیفیت بالا در فلزات سبک مانند آلومینیوم و تیتانیوم بکار می‌رود. از دیگر کاربردهای این تکنیک، جوشکاری مقاطع نازک و جوشکاری پاس ریشه در مخازن و لوله‌ها است [۱]. گاز محافظ در این روش معمولا 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 ورق-هایی از جنس آلیاژ ۵۰۵۲ به منظور بررسی تأثیر عامل‌های کنترلی جوشکاری تیگ بر ناحیه متاثر از حرارت[2] است. آلیاژ ۵۰۵۲ از گروه آلیاژهای کار سرد شده آلومینیوم-منیزیم سری ۵۰۰۰ است. این سری از آلومینیوم‌های کارشده دارای بالاترین استحکام را در بین آلیاژهای غیر قابل عملیات حرارتی هستند و به خاطر مقاومت بالا نسبت به خوردگی خصوصاً در محیطهای خورنده نمکی به عنوان سازه و جداره در صنایع دریایی مانند کشتی‌سازی، صنایع فراساحلی، بدنه قایق‌های سبک بسیار کاربرد دارد. همچنین به علت ضریب تبادل حرارت بالای این آلیاژ می توان از آن در ساخت مبدل‌های حرارتی و یا مخازن پخت در صنایع غذایی و شیمیایی بهره برد. به علت خاصیت انتقال حرارت بالای آلومینیوم و حساسیت آن به اکسید شدن در حرارت بالا جوشکاری تیگ به علت تمرکز حرارتی و استفاده از گاز محافظ گزینه مناسبی برای جوشکاری آن است [۲]. برای حذف لایه اکسیدی موجود بر سطح ورق و وجود منیزیم در این آلیاژ از جری ان متناوب در جوشکاری تیگ این فلز استفاده گردید. جدول ترکیب شیمیایی نمونه ورق که از طریق آزمایش طیف سنجی که با نام کوانتومتری شناخته می‌شود به دست آمده است در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲

مس	سیلسیوم	کروم	آهن	منیزیم
۰/۰۹	۰/۱۲۳	۰/۱۹	۰/۴	۲/۶۵۸

تاکنون تحقیقات زیادی برای مطالعه تأثیر پارامترهای جوشکاری و همچنین مدل‌سازی فرآیند جوش و بهینه‌سازی آن‌ها صورت گرفته است. کومار و همکارانش [۲]، به بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری تیگ پالسی بر روی خواص کششی ورق آلومینیومی پرداخته است. 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[3] برای چهار خروجی تنش تسلیم، تنش نهایی، افزایش طول و تنش تسلیم ناچ (درزدار) انجام گردیده است. درنهایت از مدل‌ها برای تفسیر تأثیر پارامترها بر خروجی‌ها استفاده گردیده است. ژوان و تانگ [۴]، از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای جوش تیگ ورق فولاد ضدزنگ S304 با ضخامت ۱/۵میلی‌متر استفاده کرده‌اند. 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 L16 تاگوچی طراحی شده‌اند. برای ایجاد تابع زیان که تمام خروجی‌ها را یکجا پوشش دهد و انجام بهینه‌سازیچندهدفه از روش وزن دهی به هریک از پارامترهای هندسهگرده جوش استفاده شده استکه 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 محافظ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر روی هندسه جوش می‌گذارند. بالاسوبرمانیان و همکاران [۵]، بر روی مدل‌سازی جوش الکترود تنگستن ورق از جنس آلیاژ تیتانیوم با ضخامت ۱/۶ میلی‌متر مطالعه صورت داده‌اند. 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 قرارگرفته‌اند سختی ناحیه جوش و اندازه دانه‌ها در ناحیه متأثر 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 مرکب 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. تارنگ و همکاران [۶]، از شبکه عصبی توسعه معکوس برای تعریف رابطه بین پارامترهای ورودی فرآیند جوش ورق

[1] Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)
[2] Heat Affected Zone
[3] Regression

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نازک آلومینیومی ۱۱۰۰ با ضخامت ۱/۶میلی‌متر که عبارت‌اند از سرعت جوش، آمپراژ جریان، سرعت تغذیه سیم جوش، درصد زمان تمیزکاری (قطبیت معکوس) از سیکل جوش و اندازه گپ بین الکترود ورق و خروجی‌های فرآیند پارامترهای هندسه گرده جوش (ارتفاع و عرض جلویی و پشتی گرده جوش) استفاده کرده‌اند. آن‌ها به منظور یافتن مقادیر بهینه از رابطه به دست آمده از این شبکه عصبی در الگوریتم تبرید تدریجی[۴] استفاده نمودند.

۲- روش پاسخ سطح

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 (۲) و برای کاهش هزینه و زمان آزمایشات طرح L27 انتخاب گردید.

جدول (۲) پارامترهای ورودی و سطوح در نظر گرفته شده

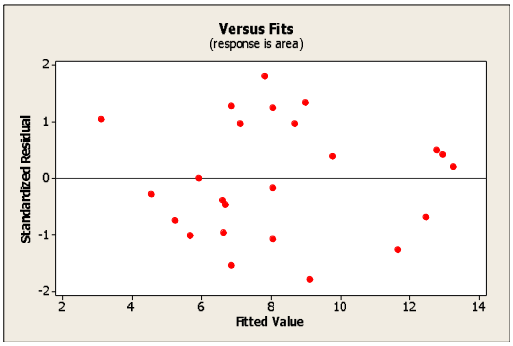
علامت مشخصه	پارامترهای ورودی	واحد	سطوح		
			+۱	۰	−۱
I	جریان	amper	۱۳۰	۱۲۰	۱۱۰
F	فرکانس	Hz	۱۱۵	۱۰۰	۸۵
S	سرعت	mm/min	۳۶۰	۳۰۰	۲۴۰
G	گپ	mm	۳/۵	۳	۲/۵

۳- مدل‌سازی و آنالیز نتایج

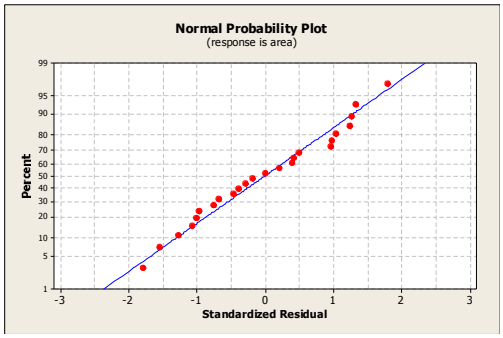
به‌منظور مدل‌سازی فرآیند جوشکاری تنگستن با گاز محافظ، توابع مختلف رگرسیونی، شامل توابع خطی، لگاریتمی و درجه دو بر داده‌های تجربی حاصل از آزمایشات، برازش داده شد. تهیه مدل‌های ریاضی و تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) در محیط نرم افزاری مینی تب صورت پذیرفت. جهت انتخاب مدل مناسب و همچنین تشخیص میزان موثر بودن هر پارامتر، سطح اطمینان ۹۵٪ تعیین گردید. نتایج محاسباتی و تحلیل های آماری نشان می دهند که مدل‌های مرتبه دوم، بهترین انطباق را بر فرآیند واقعی دارند. شکل نهایی مدل‌های درجه دوم، ارتباط دهنده پارامترهای ورودی به ناحیه متاثر از حرارت در رابطه (۱) آورده شده است.

$$HAZ=8.0745+2.398I-0.6549F-1.5865S-0.279G +1.1875I^2+0.4083F^2+0.1266S^2-1.8671G^2-0.9584IS +0.4354IG-0.4132FS \quad (۱)$$

به‌منظور اعتبار سنجی مدل‌های پیشنهادی از آزمون‌های مستقل بودن، هم واریانس بودن و نرمال بودن باقیمانده‌ها استفاده گردید. شکل (۱) توزیع باقیمانده‌های مربوط به مدل ناحیه متاثر از حرارت را نشان می‌دهد. در این نمودار به دلیل توزیع بدون شکل و یکنواخت باقیمانده-ها فرض مستقل بودن و هم واریانس بودن باقیمانده‌های این مدل کاملا تایید می‌شود. برای کنترل فرض نرمال بودن باقیمانده‌ها، نمودار احتمال در شکل (۲) ترسیم شده است.



شکل (۱): مستقل بودن و هم واریانس بودن باقیمانده‌ها



شکل (۲): نرمال بودن باقیمانده‌ها

در این نمودار با قرارگیری باقیمانده‌ها در اطراف خط ایده آل و

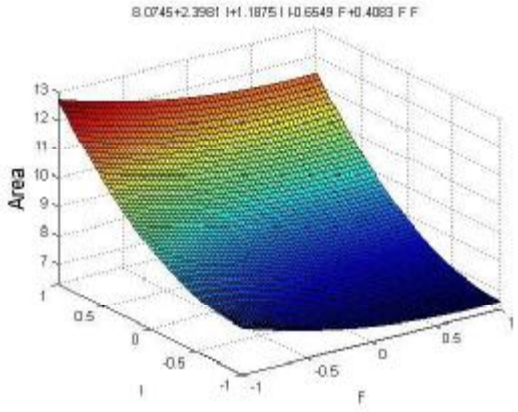
[4] Simulated Annealing (SA)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

همچنین بزرگتر بودن مقدار شاخص آماری (P-Value) از ضریب ریسک، نرمال بودن باقیمانده‌ها و انطباق خوب مدل بر فرآیند واقعی قابل تایید است.

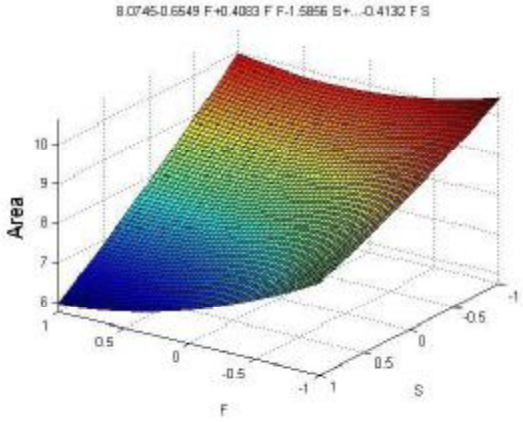
۴- بررسی تاثیر متقابل پارامترهای ورودی بر ناحیه متاثر از حرارت

در شکل (۳) تاثیر شدت جریان و فرکانس بر ناحیه متاثر از حرارت نشان داده شده است. این نمودار بیانگر تاثیر مستقیم افزایش شدت جریان بر افزایش مساحت ناحیه متأثر از حرارت است که علت آن افزایش حرارت ناشی از افزایش شدت جریان قوس و به تبع آن افزایش ناحیه‌ای که به دمایی نزدیک به دمای ذوب می‌رسد است. افزایش فرکانس با ناپایدار کردن قوس و کوتاه‌تر شدن نیم سیکل الکترود منفی، حرارت تولید شده قوس را کاهش می‌دهد. البته اثر کاهشی افزایش فرکانس در مقابل اثر افزایش ناشی از افزایش شدت جریان محدود است.



شکل (۳): اثر شدت جریان-فرکانس بر ناحیه متاثر از حرارت

در شکل (۴) می‌توان مشاهده نمود که در سرعت‌های پایین نسبت به سرعت‌های بالا افزایش فرکانس تأثیر چشمگیری بر کاهش مساحت ناحیه متأثر از حرارت دارد. در نمودار فرکانس- سرعت هیچ تداخلی بین اثر افزایش سرعت و افزایش فرکانس مشاهده نمی‌گردد.



شکل (۴): اثر فرکانس-سرعت بر ناحیه متاثر از حرارت

۵- بهینه سازی با به‌کارگیری الگوریتم ازدحام ذرات

جهت بهینه سازی متغیرهای تنظیمی جوشکاری تنگستن با گاز محافظ، از الگوریتم ازدحام ذرات[5] یا به اختصار (PSO) استفاده شده است. PSO یک الگوریتم تصادفی بر اساس جمعیت است که از شبیه-سازی رفتار اجتماعی گروه پرندگان مدل‌سازی شده است [۷]. در الگوریتم PSO تعدادی از موجودات وجود دارند، که به آن‌ها ذره گفته می‌شود و در فضای جستجوی تابعی که قصد کمینه کردن (و یا بهینه کردن) مقدار آن را داریم، پخش شده‌اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که در گذشته در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. همه‌ی ذرات جهتی برای حرکت انتخاب می‌کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می-شوند تا آن که جواب مورد نظر به دست بیاید. در واقع انبوه ذرات که مقدار کمینه‌ی یک تابع را جستجو می‌کنند، همانند دسته‌ای از پرندگان عمل می‌کنند که به دنبال غذا می‌گردند.

در مرحله‌ی ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله ی $t+1$ ام از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله‌ی قبلی ساخته می‌شوند. اگر z_j مولفه‌ی j ام از بردار z باشد، آن‌گاه روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عبارتند از :

$$v_j^i[t+1] = wv_j^i[t] + c_1 r_1 (x_j^{i,best}[t]-x_j^i[t]) + c_2 r_2 (x_j^{gbest}[t]-x_j^i[t]) \quad (۲)$$

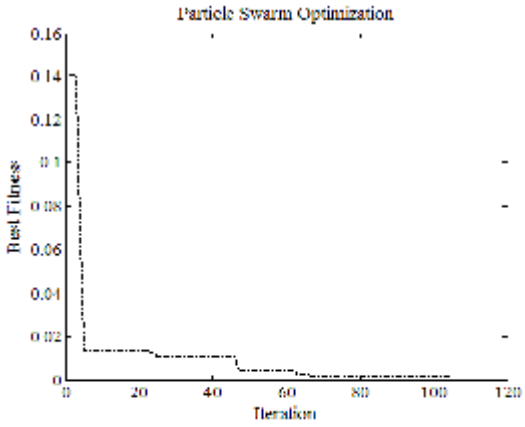
[5] Particle Swarm Optimization (PSO)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \qquad (۳)$$

در این روابط، w ضریب اینرسی، r_1 و r_2 اعدادی تصادفی در بازه (۰و۱) با توزیع یکنواخت و همچنین c_1 و c_2 ضرایب یادگیری هستند. r_1 و r_2 باعث می‌شوند. که نوعی گوناگونی در جوابها به وجود بیاید و به این نحو جستجوی کاملی روی فضا انجام پذیرد. c_1 ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل c_2 ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع می‌باشد.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی همزمان خروجی‌ها توسط الگوریتم ازدحام ذرات در جدول (۳) به نمایش درآمده است. در این الگوریتم یک تابع شایستگی ترکیبی برای تمام خروجی های مورد بررسی تعیین می‌شود و سعی می‌شود این تابع بهینه گردد. همچنین در شکل (۵) روند همگرایی الگوریتم به نمایش در آمده است.



شکل (۵): نمودار همگرایی الگوریتم PSO

۶- نتیجه گیری

کاربرد روش های جوشکاری در صنایع مختلف از یک طرف و تعدد پارامترهای تنظیمی در این روش‌ها از طرف دیگر، شناخت و بهینه سازی آن ها را از اهمیت خاصی برخوردار کرده است. در این راستا ابتدا با استفاده از مدل‌های رگرسیونی، ارتباط دقیق و معنادار بین پارامترهای ورودی و متغیر خروجی جوشکاری الکترود تنگستن برقرار گردیده است. مدل‌سازی فرآیند توسط برازش انواع توابع ریاضی شامل چند جمله ای خطی، درجه دوم و لگاریتمی بر داده‌های آزمایشگاهی موجود، انجام گرفته است. سپس بمنظور تعیین مدل اصلح 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 ناحیه متاثر از حرارت بخوبی پیش بینی نماید. در مرحله بعد روش مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات، جهت تعیین سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی برای رسیدن به هندسه گرده مورد نظر ارائه گردید. رویکرد پیشنهادی قادر است، با کمینه سازی یک تابع خطا، مقادیر مناسب پارامترهای فرآیند جوشکاری الکترود تنگستن را بنحوی تعیین نماید تا خروجی مورد انتظار شامل ناحیه متاثر از حرارت تامین گردد.

جدول (۳): نتایج بهینه سازی با الگوریتم PSO

روش بهینه سازی	سطوح بهینه				مشخصه‌ی خروجی	خروجی الگوریتم	آزمایشات عملی	مقدار خطا (٪)
	I	F	S	G				
الگوریتم PSO	۱۱۹	۱۰۸	۳۴۲	۲/۷	ناحیه متاثر از حرارت	۵/۹۹	۵/۵۴	۸/۱

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

۷- مراجع

[۲] دادخواه، سعید رضا؛ **مبانی جوشکاری قوس تیگ تحت پوشش گاز محافظ**، انتشارات تدبیر، تهران، ۱۳۸۴.

[۳] کوکبی، امیر حسین؛ **تکنولوژی جوشکاری**، انتشارات آزاده، تهران، چاپ هفتم، ۱۳۸۵.

[۴] Senthil Kumar, T, Balasubramanian, V, Sanavullah, M. Y., "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, 2007.

[۵] Juang, S. C and Tarng, Y. S., "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, 2002.

[۶] Balasubramanian, M, Jayabalan, V, Balasubramanian, V., "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, 2007.

[۷] Tarng, Y. S, Tsai, H. L, Yeh, S. S., "Modeling, optimization and classification of weld quality in tungsten inert gas welding. International Journal of Machine Tools and Manufacture", Journal of materials processing technology, vol. 39. 1427-1438, 1999.

[۸] James Kennedy and Russell Eberhart., "Particle Swarm Optimization. In Proceedings of the IEEE international conference on neural networks",1942–1948.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com