



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

<https://jmme.um.ac.ir>



Iron&Steel
Society of Iran

Optimization of Resistance Upset Butt Welding Parameters for Steel Rebars: A Study on Mechanical Properties and Microstructure

Research Article

Hoda Mirseifi¹, Hamed Ghohani Arab² , Mahmood Sharifitabar³

DOI: [10.22067/jmme.2025.92300.1192](https://doi.org/10.22067/jmme.2025.92300.1192)

1. Introduction

Resistance Upset Butt Welding (RUBW) is a vital solid-state process for joining steel rebars, offering high efficiency and strong bonds. However, achieving optimal weld quality necessitates precise control over process parameters. This study addresses the gap in comprehensive parameter optimization by systematically investigating the effects of welding current, upset pressure, and rebar diameter on mechanical properties and microstructure. The primary objective was to determine optimal parameters for superior weld quality using statistical design (CCD) and advanced optimization (PSO), coupled with microstructural analysis and computational validation via JMatPro software.

2. Materials and Methods

Steel rebars (12mm, 14mm, and 18 mm diameters) were cut to a length of 100 mm, and their end surfaces were prepared using a flat sander to ensure uniform contact and reduce contact resistance. The welding of the specimens was performed using a TECHNO TAK BM12 resistance upset welding machine, which allows for adjustment of the welding current in the range of 2850 to 9000 amper. The input voltage of the machine was kept constant at 380 V for all experiments. The welding pressure was selected within the range of 0.99 to 2.79 N/mm². The main process parameters included rebar diameter, welding current, and applied pressure. To investigate the effects of these parameters, a central composite design (CCD) method was employed, resulting in 20 experimental combinations. For tensile testing of the samples, specimens were prepared according to ASTM E8M standard. The tensile tests were conducted at room temperature with a crosshead speed of 2 mm/min. Figure 1 also shows images of the fracture surfaces of the base metal and welded metal rebars after

tensile testing. After inputting the ultimate tensile strength values of the welded specimens into the design of experiments software, the CCD-based predicted results, as presented in Table 3, were obtained and compared with the experimental data. Microstructural analysis was performed using optical microscopy to characterize the weld interface and heat-affected zone (HAZ). JMatPro software was employed to predict phase transformations, complementing experimental observations. Optimization was driven by both CCD-derived regression models and the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, with results compared for robustness.

3. Results and Discussion

The experimental findings demonstrated a significant impact of welding current, upset pressure, and rebar diameter on both UTS and elongation. ANOVA indicated a highly accurate quadratic model for UTS prediction and a suitable linear model for elongation. The optimization identified ideal parameters for 18 mm rebars as 8460 A current and 1.64 MPa pressure, yielding an impressive 628 MPa UTS and 25% elongation. The PSO algorithm effectively validated and reinforced the optimal parameter sets found through CCD, confirming their efficacy. Microstructural examination revealed fine acicular ferrite grains at the weld interface, contributing to enhanced properties. The HAZ displayed a coarser ferrite-pearlite structure, a typical response to the thermal cycle. JMatPro predictions of phase compositions closely aligned with the observed microstructures, validating the computational approach and enhancing the understanding of metallurgical transformations.

*Manuscript received February 24, 2025, Revised April 6, 2025, Accepted June 10, 2025.

¹ PhD Candidate, Civil Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

² Corresponding author: Associate Professor, Civil Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. Email: ghohani@eng.usb.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Materials Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

Table 1. Experimental ultimate strength and elongation values of welded samples compared with those predicted based on CCD method

Sampl es	Ultimate strength (experiment al) (MPa)	Ultimate strength (predicte d) (MPa)	Elongation (experiment al) %	Elongati on (predicte d) %
S1	574	573.53	20	19.91
S2	573	572.8	20	19.89
S3	572	5713.53	20	19.26
S4	574	573.38	20	19.93
S5	574	574.61	20	20.48
S6	601	601.52	22	21.97
S7	601	600.41	22	22.54
S8	602	602.4	23	22.61
S9	600	598.87	24	22.81
S10	601	601.48	22	22.24
S11	602	602.01	22	22.01
S12	603	603.8	20	21.71
S13	601	601.48	22	22.24
S14	602	601.81	22	22.24
S15	601	600.79	22	21.71
S16	619	618.48	23	23.83
S17	622	621.92	25	24.21
S18	622	622.87	24	23.31
S19	615	614.78	25	24.48
S20	620	620.53	24	24.64



Figure 1. Fracture surfaces of the rebars: (a) in the base metal, (b) in the weld

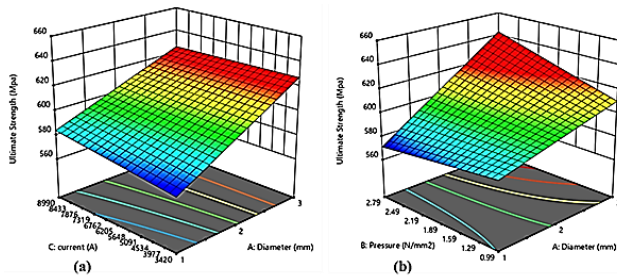


Figure 2. Effect of input parameters on the final strength of welded samples: (a) as a function of electrode diameter and

welding current; (b) as a function of electrode diameter and welding pressure.

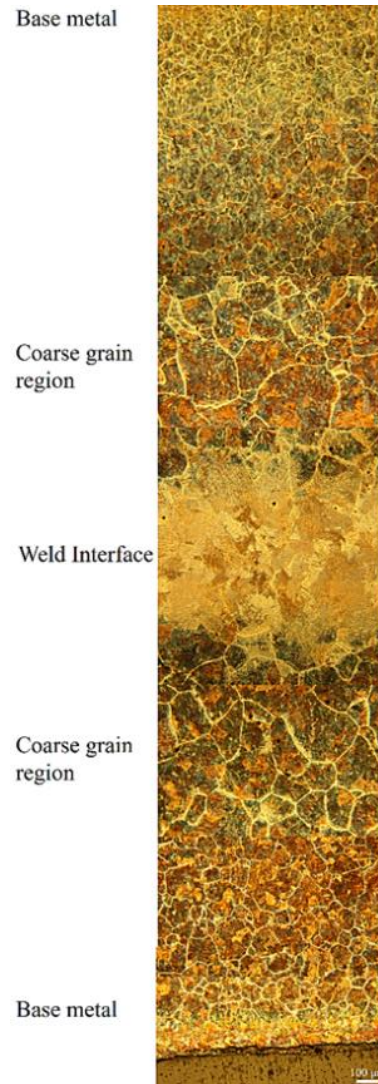


Figure 3. Optical micrograph showing the variation of microstructure in the RUBW joint interface of steel rebar with 12 in diameter.

4. Conclusion

This research successfully optimized Resistance Upset Butt Welding parameters for steel rebars, significantly improving joint mechanical properties. The integration of CCD and PSO proved highly effective in identifying optimal conditions, leading to maximum ultimate tensile strength and elongation. Microstructural analysis elucidated the formation of desirable phases (acicular ferrite) at the weld interface and provided insights into HAZ characteristics, corroborated by JMatPro. This study offers valuable practical guidelines for achieving high-quality steel rebar welds, with potential for further research into fatigue behavior and application to diverse steel grades.



بهینه‌یابی پارامترهای جوشکاری مقاومتی سربه‌سر میلگردهای فولادی: مطالعه خواص مکانیکی و ریزساختار*

مقاله پژوهشی

هدی میرسیفی^(۱) حامد قوهانی عرب^(۲) محمود شریفی تبار^(۳)

DOI: 10.22067/jmme.2025.92300.1192

چکیده پژوهش حاضر تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری مقاومتی سربه‌سر (RUBW) (Resistance upset butt welding) را بر اتصال میلگردهای فولادی با قطرهای مختلف بررسی می‌کند. ارزیابی‌های انجام شده شامل ریزساختار، استحکام کششی نهایی، درصد ازدیاد طول نسبی و سختی موضعی نمونه‌های جوش داده شده، هست. بهینه‌سازی پارامترها با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی (CCD) (Central Composite Design) و الگوریتم جمعیت ذرات (PSO) (Particle Swarm Optimization) انجام شد. حداکثر استحکام کششی نهایی ۶۲۸ مگاپاسکال و ازدیاد طول ۲۵ درصد در شرایط بهینه برای قطر میلگرد ۱۸ میلی‌متر، شدت جریان ۸۴۶۰ آمپر و فشار جوش ۱/۶۴ مگاپاسکال به دست آمد. تحلیل واریانس نشان داد که مدل درجه دوم برای استحکام کششی نهایی و مدل خطی برای ازدیاد طول نسبی، پیش‌بینی‌های دقیقی ارائه می‌دهند. از الگوریتم PSO برای تعیین پارامترهای ورودی بهینه استفاده شد و نتایج آن با روش CCD مقایسه گردید. نرم‌افزار JMatPro برای بررسی نوع فازها و مقایسه با مشاهدات تجربی به کار رفت. نتایج نشان داد که فصل مشترک دارای دانه‌های فریت سوزنی و ناحیه متأثر از حرارت دارای ریزساختار دانه‌درشت فریت - پرلیت است.

واژه‌های کلیدی جوش حالت جامد، طراحی آزمایش‌ها، پاسخ بهینه، توزیع سختی، تحلیل واریانس.

Optimization of Resistance Upset Butt Welding Parameters of Steel Rebars: A Study on Mechanical Properties and Microstructure

Hoda Mirseifi

Hamed Ghohani Arab

Mahmood Sharifitabar

Abstract This study investigates the effect of resistance upset butt welding (RUBW) process parameters on the joining of steel bars with different diameters. The conducted evaluations included microstructure, ultimate tensile strength (UTS), elongation, and localized hardness of the welded specimens. Parameter optimization was performed using Central Composite Design (CCD) and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms. The maximum ultimate tensile strength of 628 MPa and an elongation of 25% were achieved under optimal conditions for an 18-mm-diameter rebar, a welding current of 8460 A, and a welding pressure of 1.64 MPa. Analysis of variance showed that the quadratic model provided accurate predictions for ultimate tensile strength, while the linear model was accurate for elongation. The PSO algorithm was used to determine the optimal input parameters, and its results were compared with those from the CCD method. The JMatPro software was used to analyze the phase types and compared with experimental observations. The results showed that the joint interface contained needle-shaped ferrite grains and the heat affected zone exhibited a coarse-grained ferrite-pearlite microstructure.

Keywords Solid-state welding, Design of experiments, Optimal Response, Hardness distribution, Variance analysis.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۲/۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۳/۲۱ می‌باشد.

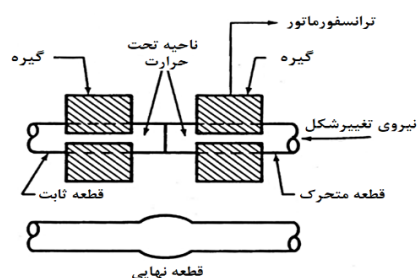
(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

(۳) دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

مقدمه

جوشکاری مقاومتی یک فرایند جوشکاری حالت جامد است. این فرایند شامل عبور جریان الکتریکی از قطعات است در هنگام تماس با یکدیگر و اعمال فشار. مقاومتی که جریان با آن مواجه می‌شود گرمای زیادی را در فصل مشترک اتصال به وجود می‌آورد که منطقه جوش را ایجاد می‌کند [1-3]. یکی از مزایای اصلی این روش جوشکاری، امکان ایجاد اتصالات با استحکام بالا و کیفیت مناسب بدون نیاز به مواد مصرفی مانند الکترود یا سیم‌جوش است. در طول فرایند جوشکاری، متغیرهای مهمی که بر فرایند جوشکاری تأثیر می‌گذارند عبارتند از مدت زمان گرمایش، شدت جریان الکتریکی مورد استفاده برای جوشکاری، فشار اعمال شده در حین گرمایش و اتصال قطعات [4-6]. بر اساس مطالعات انجام شده، جوشکاری مقاومتی مزایای متعددی از جمله اجرای سریع، تولید مقرون به صرفه، تجهیزات ساده، کنترل فرایند اجرا، حفظ خواص متالورژیکی میلگردها، و کیفیت مطلوب جوش را صرف نظر از سطح مهارت اپراتور ارائه می‌دهد. از این رو، این فرایند در صنایع مختلفی از جمله نصب قطعات خودرو، اتصال قطعات فولادی، اتصال آلیاژهای مختلف و همچنین مونتاژ قطعاتی که مواد مشابه یا غیر مشابه دارند، کاربرد پیدا کرده است [7]. شکل (۱) شمایی از جوشکاری مقاومتی سربسرم را نشان می‌دهد.



شکل ۱ شمایی از جوشکاری مقاومتی [7]

ساریکاواک و همکاران [8] جنبه‌های متالورژیکی و مکانیکی اتصالات سربسرم را بررسی کردند. خواص کششی و ویژگی‌های استحکام سه منطقه مختلف از جمله خط همجوشی، ناحیه تبلور مجدد و مناطق انتقال به طور جداگانه بررسی شدند. سانتاکوماری و همکاران [9] به بررسی فرایند جوش سربسرم ترکیبات تیتانیوم خالص تجاری و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ پرداختند. آن‌ها همچنین فرایند جوشکاری را با کمک شبیه‌ساز ترمومکانیکی گلیبل (Gleeble) شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که تشکیل ترکیبات بین‌فلزی در سطح مشترک به تغییرات قابل توجهی در ریزسختی

آلیاژ Ti/SS منجر می‌شود. تیرسلین و همکاران [10] با استفاده از داده‌های تجربی از آزمایش‌های تک‌محوری انجام شده در طیف وسیعی از دما به بررسی مدل ساختاری جدید برای فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L پرداختند. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی با دقت نسبتاً خوبی با داده‌های تجربی تطابق دارد. این تطابق در شرایطی بررسی شد که مواد تحت مسیرهای پیچیده بارگذاری حرارتی - مکانیکی قرار گرفته بودند.

رودریگوئز و همکاران [11] اثر افزایش دما بر اتصالات فولاد S355 J2 جوش داده شده به روش سربسرم را ارزیابی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که خواص اتصالات S355 پس از قرار گرفتن در معرض حرارت بسیار شبیه به مواد پایه است. کومار و همکاران [12] فرایندهای جوشکاری، ریزساختارها و خواص مکانیکی اتصالات جوش داده شده را بررسی کردند. بر اساس تجزیه و تحلیل ماکروگرافی، مشخص شد که ریزساختار اتصالات از مارتنزیت بدون بینیت تشکیل شده است. این مطالعه نشان داد که روش‌های پیشرفته جوشکاری جریان پالسی می‌توانند قطعات جوشی با کیفیت بالا تولید کنند. دونگ و همکاران [13] جوشکاری فولاد زنگ‌نزن فریتی AISI 444 (FSS) و خواص مکانیکی اتصالات را مطالعه کردند. در این تحقیق، اثرات پارامترهای فرایند و ظاهر جوش تجزیه و تحلیل شد. ویژگی‌های ریزساختاری ناحیه جوش و ناحیه متأثر از حرارت نیز بررسی شدند.

اگر چه جوشکاری مقاومتی سربسرم یکی از روش‌های صنعتی مؤثر برای اتصال میلگردهای فولادی است، اما مطالعات تجربی و تحلیلی محدودی بر بهینه‌سازی پارامترهای فرایند در ارتباط با خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصالات جوش تمرکز داشته‌اند. در سال‌های اخیر، مطالعاتی در زمینه استفاده از طراحی آزمایش‌ها و روش‌های هوشمند بهینه‌سازی برای جوشکاری مقاومتی انجام شده‌اند. برای مثال بائه و همکاران [14] از روش طراحی آزمایش مرکب مرکزی (CCD) برای بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بین آلیاژ آلومینیوم و فولاد گالوانیزه استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که جریان جوشکاری تأثیر بیشتری نسبت به زمان جوشکاری بر بار کششی برشی دارد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، اوتیمین و همکاران [15] از ترکیب الگوریتم‌های فراابتکاری مانند PSO و روش‌های آماری به منظور بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری مانند جریان، ولتاژ و نرخ جریان گاز بر میزان کربن، برای کاهش عیوب، ارتقای کیفیت جوش و دستیابی به صرفه‌جویی در هزینه‌ها استفاده کردند و با

امکان تنظیم شدت جریان در بازه ۲۸۵۰ تا ۹۰۰۰ آمپر را داراست. ولتاژ ورودی دستگاه در تمامی آزمایش‌ها ۳۸۰ ولت و ثابت در نظر گرفته شد. بازه فشار جوش بین ۰/۹۹ تا ۲/۷۹ نیوتن بر میلی‌متر مربع انتخاب شد. پارامترهای اصلی فرایند شامل قطر میلگرد، شدت جریان جوش، و فشار اعمالی بودند.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی میلگردهای فولادی مورد استفاده در این پژوهش را در مقایسه با استاندارد GOST 5781 ارائه می‌دهد. برای بررسی تأثیر این پارامترها، از روش طراحی آزمایش مرکب مرکزی (CCD) استفاده شد و ۲۰ ترکیب آزمایشی طراحی شد (جدول ۲). برای هر ترکیب پارامتر، سه نمونه ساخته شد و میانگین نتایج به عنوان داده نهایی تحلیل شد.

نتایج و بحث

فرایند طراحی آزمایش شامل مدل‌سازی و بهینه‌سازی متغیرهای ورودی است. هدف، افزایش کارایی خروجی در عین حفظ هزینه‌ها در یک سطح ثابت است. طراحی آزمایش‌ها روشی است با هدف کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای دستیابی به شرایط بهینه [17]. روش‌های مختلفی برای طراحی آزمایش‌ها در دسترس است که شامل طرح عاملی (Factorial design)، طرح با سطوح مختلف، طراحی پلیت - بورمن (Plate-Boorman)، روش تاگوچی، روش ترکیبی و روش سطح پاسخ می‌شوند. انتخاب و استفاده از یک طرح آزمایشی مناسب برای آزمایش‌های تحقیقاتی به عواملی مانند نوع فرایند، تعداد سطوح درگیر و نوع پارامترهای ورودی به کار گرفته شده بستگی دارد [18,19]. روش سطح پاسخ، با استفاده از رویکرد طراحی مرکب مرکزی، برتری خود را در پیش‌بینی عوامل پاسخ در میدان ایجاد کرده است. از جمله مزایای این روش می‌توان به میانگین خطای کمتر، درک بهتر از تأثیر عبارات‌های مرتبه دوم و اثرات متقابل عوامل، مشاهده سه‌بعدی تغییرات فاکتورهای پاسخ و غیره اشاره کرد [20,21].

از میان چندین روش موجود برای بهینه‌سازی فرایند، استفاده از طراحی مرکب مرکزی (CCD) برای شناسایی پارامترهای بهینه در جوشکاری انتخاب شده است. در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی برای پارامترهای فرایند جوشکاری با هدف افزایش استحکام نهایی نمونه‌های جوش داده شده و درصد ازدیاد طول نسبی آن‌ها ایجاد شد. هدف از این طرح‌ها بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که تحت تأثیر چندین متغیر مستقل (متغیر ورودی) قرار می‌گیرد. برای استخراج روابط مربوط به سطح پاسخ، اطلاعات ورودی از نتایج آزمون‌های تجربی استخراج شد.

ترکیب مدل‌سازی آماری قوی با تکنیک‌های فراابتکاری، بینش‌های کاربردی و ابزارهای عملی برای بهبود کیفیت جوش ارائه دادند. مطالعه آن‌ها همچنین بر اهمیت درک تعاملات پارامترها و تأثیرات آن‌ها بر خواص جوش تأکید داشت و پایه‌ای برای کنترل دقیق متغیرهای فرایند، کاهش عیوب و افزایش بهره‌وری فراهم کرد. همچنین راثو و همکاران [16] با ترکیب RSM و الگوریتم ژنتیک (GA) موفق به مدل‌سازی و پیش‌بینی دقیق پاسخ‌های جوشکاری در ورق‌های فولادی شدند. تحقیق حاضر به جوشکاری مقاومتی سربه‌سر برای اتصال میلگردهای فولادی برای استفاده در صنعت ساختمان می‌پردازد. از آنجا که تحقیقات زیادی در زمینه بررسی شرایط بهینه جوشکاری میلگردهای فولادی جوش داده شده به روش جوشکاری مقاومتی سربه‌سر انجام نشده است، مطالعه حاضر می‌تواند این شکاف تحقیقاتی را پر کند. بنابراین، در این تحقیق تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری مقاومتی سربه‌سر بر ریزساختار، استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول نسبی نمونه‌های جوش داده شده ارزیابی شده است. علاوه بر این، تأثیر هر یک از عوامل ورودی مانند شدت جریان جوشکاری، قطر میلگرد و فشار جوشکاری بر پاسخ بررسی شده است. به این منظور، از روش طراحی مرکب مرکزی (CCD) استفاده شد. از آنجا که انجام مجموعه‌ای جامع از آزمون‌ها زمان‌بر و پرهزینه است، زیرمجموعه‌ای از آزمایش‌ها به عنوان نمونه‌های نماینده با استفاده از روش CCD انجام شد و نتایج برون‌یابی شدند. بر اساس یافته‌های این آزمایش‌ها، تأثیر هر پارامتر فرایند بر پاسخ‌ها تعیین شد و از روش بهینه‌سازی جمعیت ذرات (PSO) برای تعیین شرایط بهینه استفاده شد. آزمون‌های سختی و آنالیز ریزساختاری نیز برای تشخیص نواحی مختلف در اتصال جوش داده شده انجام شد.

روش انجام آزمایش

در این پژوهش، از میلگردهای فولادی ساختمانی با قطرهای ۱۲، ۱۴ و ۱۸ میلی‌متر و به ترتیب با استحکام کششی نهایی ۵۶۷، ۵۹۹ و ۶۲۳ مگاپاسکال استفاده شد. هر میلگرد به طول ۱۰۰ میلی‌متر بریده شد و سطوح انتهایی آن‌ها برای حصول تماس یکنواخت و کاهش مقاومت تماس، توسط سنباده تخت آماده‌سازی شد.

جوشکاری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جوش مقاومتی فشاری مدل TECHNO TAK BM12 انجام شد. این دستگاه

جدول ۱ ترکیب شیمیایی میلگردهای جوش داده شده

Fe	Ni	Cr	S	P	Mn	Si	C	
Base	0.02	0.02	0.015-0.025	<0.003	0.9-0.98	0.23-0.27	0.34-0.36	ترکیب شیمیایی
-----	-----	Max 0.3	-----		0.8-1.2	-----	0.3-0.37	استاندارد GOST 5781

جدول ۲ شرایط ساخت نمونه‌ها بر اساس روش CCD

نمونه	قطر (mm)	شدت جریان (A)	فشار جوشکاری (N/mm ²)	نمونه	قطر (mm)	شدت جریان (A)	فشار جوشکاری (N/mm ²)
S1	12	3420	2.23	S11	14	6120	1.84
S2	12	5484	2.79	S12	14	6600	1.84
S3	12	4723	2.23	S13	14	5867	1.84
S4	12	5040	2.79	S14	14	5867	1.84
S5	12	3420	2.51	S15	14	6600	1.84
S6	14	5737	1.64	S16	18	8322	0.99
S7	14	5418	1.84	S17	18	8460	1.24
S8	14	5971	2.05	S18	18	8990	0.99
S9	14	5030	1.84	S19	18	7100	1.11
S10	14	5867	1.84	S20	18	8143	1.24

جدول ۳ استحکام و ازدیاد طول نمونه‌های جوش داده شده بر اساس نتایج تجربی و پیش‌بینی شده به روش CCD

نمونه	استحکام نهایی (تجربی) (MPa)	استحکام نهایی (پیش‌بینی شده) (MPa)	درصد ازدیاد طول نسبی (تجربی) %	درصد ازدیاد طول نسبی (پیش‌بینی شده) %
S1	574	573.53	20	19.91
S2	573	572.8	20	19.89
S3	572	571.53	20	19.26
S4	574	573.38	20	19.93
S5	574	574.61	20	20.48
S6	601	601.52	22	21.97
S7	601	600.41	22	22.54
S8	602	602.4	23	22.61
S9	600	598.87	24	22.81
S10	601	601.48	22	22.24
S11	602	602.01	22	22.01
S12	603	603.8	20	21.71
S13	601	601.48	22	22.24
S14	602	601.81	22	22.24
S15	601	600.79	22	21.71
S16	619	618.48	23	23.83
S17	622	621.92	25	24.21
S18	622	622.87	24	23.31
S19	615	614.78	25	24.48
S20	620	620.53	24	24.64

با استفاده از روش CCD مطابق جدول (۳) به دست آمدند. شکل (۲) نیز تصاویری از سطوح شکست فلز پایه و میلگردهای فلزی جوش داده شده بعد از آزمایش کشش را نشان می‌دهد.

تحلیل واریانس

برای تأیید دقت مدل‌ها از تحلیل واریانس استفاده شد. تحلیل واریانس مدل دوبعدی استحکام نهایی نمونه جوش داده شده در جدول (۴) نشان داده شده است. سطح معنی‌داری جملات با مقدار P تعیین می‌شود. اگر مقدار P کمتر از 0.05 باشد، نشان می‌دهد که جمله مربوط تأثیر قابل توجهی بر پاسخ دارد؛ در غیر این صورت، قابل توجه نیست [17]. جدول (۴) نشان می‌دهد که مقدار P برای مدل کمتر از 0.05 (کمتر از 0.001) است و نشان می‌دهد بهترین مدل برای این پاسخ به دست آمده است. در این مورد، مقدار P برای پارامتر قطر کمتر از 0.0001 است که نشان می‌دهد این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر روی پاسخ دارد. مقدار P برای شدت جریان و فشار جوش کمتر از 0.05 است که نشان دهنده تأثیر قابل توجه آن‌ها بر استحکام نهایی نمونه‌های جوش داده شده است.



شکل ۲ شکست میلگردها: (الف) فلز پایه (نمونه S3) و (ب) جوش (نمونه S4) آزمون کشش

به منظور انجام آزمون کشش بر روی نمونه‌های معرفی شده در جدول (۲)، نمونه‌های آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8M تهیه شدند. آزمایش کشش در دمای اتاق با سرعت حرکت فک 2 mm/min انجام شد. پس از وارد کردن مقادیر استحکام نهایی نمونه‌های جوش داده شده در نرم‌افزار طراحی آزمایش، نتایج استحکام نهایی نمونه‌های جوش داده شده

جدول ۴ نتایج تحلیل واریانس برای مدل سطح پاسخ دوبعدی مقاومت نهایی نمونه‌های جوش داده شده

منبع	جمع مربعات	df	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	
مدل	5494.67	9	610.52	1425.05	< 0.0001	معنی‌دار
قطر (D)	68.01	1	68.01	158.75	< 0.0001	
مقدار (P)	2.29	1	2.29	5.34	0.0435	
جریان (I)	6.95	1	6.95	16.22	0.0024	
DP	0.0095	1	0.0095	0.0222	0.0445	
DI	1.59	1	1.59	3.70	0.0833	غیر معنی‌دار
PI	0.5433	1	0.5433	1.27	0.0364	
D ²	1.64	1	1.64	3.84	0.0786	غیر معنی‌دار
P ²	0.0639	1	0.0639	0.1492	0.0674	غیر معنی‌دار
I ²	0.0293	1	0.0293	0.0684	0.0590	غیر معنی‌دار
باقی‌مانده	4.28	10	0.4284			
عدم تطابق	1.62	7	0.2311	0.2600	0.9354	غیر معنی‌دار
خطای خالص	2.67	3	0.8889			
مجموع	5498.95	19				

جدول ۵ نتایج تحلیل واریانس برای مدل خطی ازدیاد طول نسبی نمونه‌های جوش داده شده

منبع	جمع مربعات	df	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	
مدل	47.30	3	15.77	29.69	< 0.0001	معنی‌دار
قطر (D)	9.20	1	9.20	17.33	0.0007	
مقدار (P)	1.26	1	1.26	2.36	0.1436	غیر معنی‌دار
جریان (I)	2.76	1	2.76	5.19	0.0368	
باقی‌مانده	8.50	16	0.5311			
عدم تطابق	6.50	13	0.4998	0.7497	0.6940	غیر معنی‌دار
خطای خالص	2.00	3	0.6667			
مجموع	55.80	19				

نمونه‌های جوش داده شده بر اساس پارامترهای فرایند به دست آمدند:

$$300.23 + 7.2967D + 8.667P + 0.0429I + 3.539DP - 0.00484PI \quad (1)$$

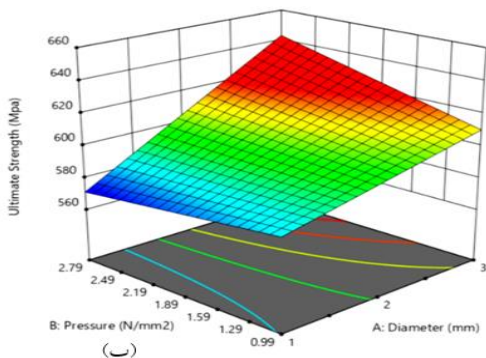
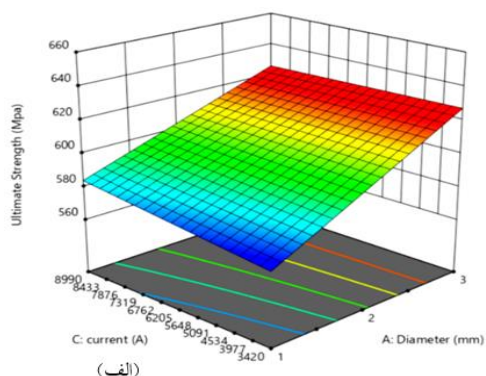
$$1.012 + 3.0118D - 0.00348I \quad (2)$$

علامت مثبت در معادلات بالا نشان دهنده اثر هم‌افزایی است در حالی که علامت منفی نشان دهنده اثر متضاد آن است. ضرایب مدل برای پاسخ‌ها با استفاده از روش تحلیل رگرسیون چندگانه (Multiple regression analysis) در روش سطح پاسخ (Response surface method) [18] تعیین شده است. مقادیر R^2 (ضریب تعیین) برای معادلات (۲) و (۳) به ترتیب $0.9992/6545$ و $0.8477/7287$ هستند که هر دو نشان دهنده برازش خوب داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل ارائه شده است. مقادیر R^2 تعدیل شده برای معادلات (۲) و (۳) به ترتیب $0.9985/6545$ و $0.8192/7287$ هستند. انحراف معیار معادلات (۲) و (۳) نیز به ترتیب 0.1093 و 0.033 است. هر چه مقدار R^2 به یک نزدیک‌تر باشد و انحراف معیار کوچک‌تر باشد، مدل بهتر خواهد بود و مقادیر پیش‌بینی شده به پاسخ واقعی نزدیک‌تر خواهند بود. این امر نشان می‌دهد که مقدار پیش‌بینی شده برای استحکام نهایی نمونه‌های جوش داده شده در مقایسه با ازدیاد طول نسبی نمونه‌های جوش داده شده دقیق‌تر و نزدیک‌تر به مقدار واقعی است (جدول ۶ و ۷).

مقدار F به عنوان شاخصی از قابلیت اطمینان مدل عمل می‌کند و تضمین می‌کند که تحت تأثیر داده‌های تصادفی قرار نمی‌گیرد. این معیار، اهمیت مدل و این احتمال را نشان می‌دهد که مدل تحت تأثیر نویز قرار گرفته است که تقریباً برابر با صفر است. علاوه بر این، مقدار F میزان تأثیر هر پارامتر بر پاسخ را تعیین می‌کند که نشان می‌دهد هر چه مقدار یک پارامتر بیشتر باشد، تأثیر آن بر روی پاسخ بیشتر خواهد بود [18]. مقدار F برای مدل در این مورد 0.1425 است. در این تحقیق قطر، شدت جریان و فشار جوش به ترتیب بیشترین تأثیر را بر استحکام نهایی نمونه‌های جوش داده شده از بین پارامترهای فرایند دارند.

نتایج تحلیل واریانس برای مدل خطی ازدیاد طول نسبی نمونه‌های جوش داده شده در جدول (۵) نشان داده شده است. در این پاسخ، مقدار P برای مدل کمتر از 0.05 (کمتر از 0.001) است که نشان می‌دهد بهترین مدل برازش برای این پاسخ به دست آمده است. در این حالت، مقدار P برای پارامتر قطر کمتر از 0.001 است که نشان می‌دهد این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر این پاسخ دارد. برخی از برهم‌کنش‌ها به دلیل اینکه مقدار P آن‌ها بیشتر از 0.05 است، معنی‌دار نیستند و بنابراین تأثیری در پاسخگویی ندارند. نتایج آماری به دست آمده حاکی از دقت مدل‌های فوق در پیش‌بینی استحکام نهایی نمونه‌های جوش داده شده و ازدیاد طول نسبی آن‌ها در محدوده متغیرهای مورد مطالعه است.

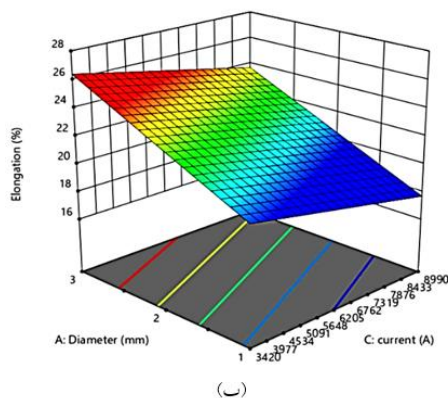
در نهایت، معادلات (۱) و (۲) به عنوان معادلات مدل با استفاده از روش CCD برای استحکام نهایی و ازدیاد طول نسبی



شکل ۳ تأثیر پارامترهای ورودی بر استحکام نهایی نمونه‌های جوش داده شده: (الف) برحسب پارامترهای قطر و شدت جریان جوشکاری، (ب) برحسب پارامترهای قطر و فشار جوشکاری

بررسی تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری بر ازدیاد طول نسبی نمونه‌های جوش داده شده

مطابق جدول (۵) قطر میلگرد تأثیر قابل توجهی ($P < 0.0001$) بر ازدیاد طول نسبی نمونه‌های جوش داده شده دارد. شدت جریان نیز تأثیر محسوسی بر پاسخ ذکر شده دارد در حالی که تأثیر فشار جوش ناچیز است. نتایج به دست آمده در شکل (۴) نشان می‌دهد که با افزایش قطر میلگرد فولادی و کاهش شدت جریان، ازدیاد طول نسبی نمونه‌های جوش داده شده به صورت خطی افزایش می‌یابد.



جدول ۶ مقدار انحراف استاندارد و ضریب تعیین برای استحکام نهایی

نمونه‌های جوش داده شده

0.9992	R^2	0.6545	انحراف معیار استاندارد
0.9985	R^2 تعدیل شده	598.95	میانگین
0.9938	R^2 پیش‌بینی شده	0.1093	C.V. %
107.8795	کفایت دقت		

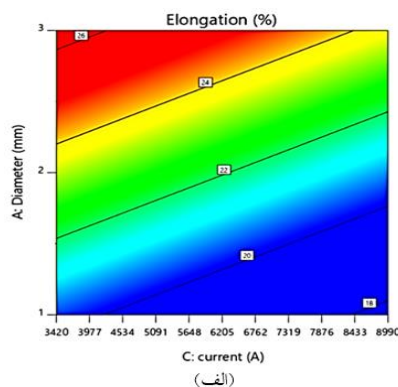
جدول ۷ مقدار انحراف استاندارد و ضریب تعیین برای ازدیاد طول نسبی

نمونه‌های جوش داده شده

0.8477	R^2	0.7287	انحراف معیار استاندارد
0.8192	R^2 تعدیل شده	22.10	میانگین
0.7595	R^2 پیش‌بینی شده	3.30	C.V. %
16.9314	کفایت دقت		

تأثیر پارامترهای جوشکاری بر استحکام نهایی

نمودارهای سه‌بعدی برای نشان دادن تأثیر پارامترهای فرایند بر روی استحکام نهایی نمونه‌های جوش داده شده، استفاده شده است. تجزیه و تحلیل واریانس نشان می‌دهد که هر سه پارامتر ورودی تأثیر قابل توجهی بر استحکام نهایی نمونه‌های جوش داده شده دارند. نمودار سطح پاسخ استحکام نهایی نمونه‌های جوش داده شده در شکل (۳) نشان داده شده است. در شکل (۳-الف) سطح پاسخ برای برهمکنش قطر میلگرد فولادی و شدت جریان در فشار جوش $1/89 \text{ N/mm}^2$ نشان داده شده است که با افزایش قطر میلگرد فولادی و شدت جریان، استحکام کششی نمونه‌های جوش داده شده افزایش می‌یابد. در شکل (۳-ب) اندرکنش قطر میلگرد فولادی و فشار جوش برای شدت جریان 6205 آمپر نشان داده شده که با افزایش قطر میلگرد فولادی و فشار جوش، استحکام نهایی نمونه‌های جوش داده شده به صورت خطی افزایش می‌یابد.



شکل ۴ نمایش اثر قطر میلگرد فولادی و شدت جریان بر ازدیاد طول نسبی نمونه جوش داده شده: (الف) نمای دوبعدی، (ب) نمای سه‌بعدی

شرایط بهینه، استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول نسبی نمونه جوش داده شده، زمانی که قطر میلگرد ۱۸ میلی‌متر، شدت جریان ۸۴۶۰ آمپر و فشار جوش ۱/۶۴ مگاپاسکال است، به ترتیب ۶۲۸ مگاپاسکال و ۲۵ درصد به دست می‌آید (شکل ۵). همان‌طور که از جداول (۸) و (۹) مشاهده می‌شود، مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده در محدوده میانگین پاسخ‌های تجربی و انحراف معیار ($\pm SD$) قرار می‌گیرند. بنابراین، طرح آزمایشی و پیش‌بینی‌های آن معتبر هستند.

بهینه‌یابی عوامل مؤثر بر روی افزایش استحکام نهایی و ازدیاد طول نسبی نمونه‌ها

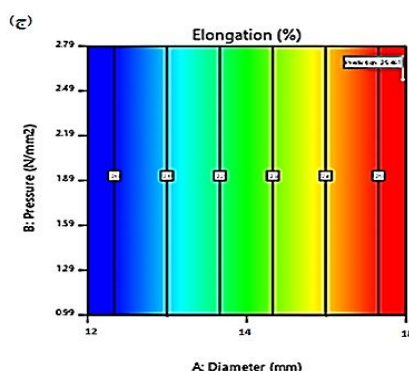
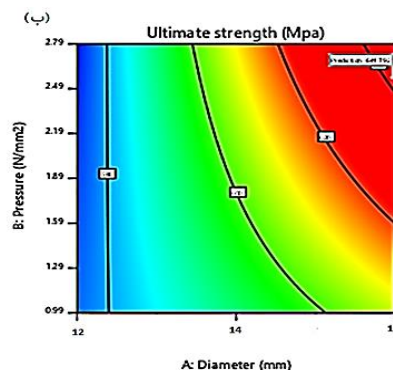
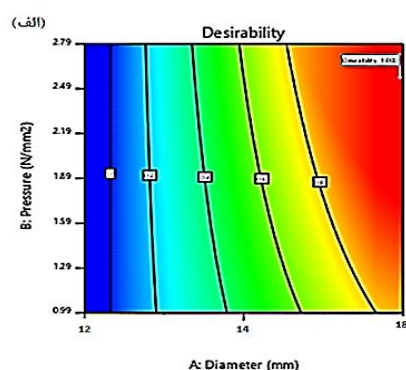
در این مرحله سطوح بهینه برای حداکثر پاسخ‌ها با استفاده از نرم‌افزار تعیین شد. سپس سه نمونه در این شرایط در آزمایشگاه برای اعتبارسنجی ساخته شد و نتایج به دست آمده وارد نرم‌افزار شد. جدول (۸) مراحل انجام این فرایند را نشان می‌دهد. شرایط سطح بهینه برای حداکثر استحکام نهایی و ازدیاد طول نسبی نمونه جوش داده شده در جدول (۹) نشان داده شده است. در

جدول ۸ آزمون اعتبارسنجی

نمونه	قطر (mm)	شدت جریان (A)	فشار جوش (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	ازدیاد طول (%)
۱	18	8460	1.64	628.88	25.83
۲	18	8460	1.64	627.67	24.78
۳	18	8460	1.64	627.97	25.11
میانگین				628.17	25.24
SD				0.63	0.54

جدول ۹ پاسخ بهینه

قطر، A (mm)	جریان، B (A)	فشار، C (N/mm ²)	استحکام نهایی (MPa)		ازدیاد طول (%)	
			پیش‌بینی شده	تجربی	پیش‌بینی شده	تجربی
18	8460	1.64	628	628.17 $\pm$ 0.63	25	25.24 $\pm$ 0.54



شکل ۵ (الف) نمودار کانتور تابع مطلوبیت بر حسب قطر میلگرد و فشار جوشکاری، (ب) نمودار کانتور استحکام نهایی اتصال جوش خورده بر حسب قطر میلگرد و فشار جوشکاری و (ج) نمودار کانتور تأثیر فشار جوشکاری و قطر میلگرد بر درصد ازدیاد طول نسبی

توسط ذره نام تا کنون را نشان می‌دهد و G_{best} بهترین موقعیت کلی یافت شده در مراحل قبلی است [23].

متغیرهای طراحی در این تحقیق که با اجزای موقعیت ذرات در روش مذکور مطابقت دارند عبارتند از قطر میلگردهای فولادی، شدت جریان جوشکاری و فشار جوش. نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم PSO در جدول (۱۰) ارائه شده است.

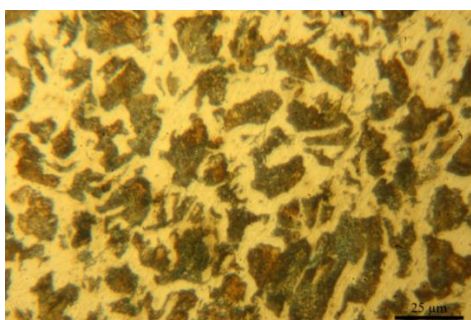
جدول ۱۰ مقادیر بهینه به دست آمده از اجرای الگوریتم PSO

قطر میلگرد (mm)	شدت جریان (A)	فشار جوش (MPa)
12	4929	2.7
14	5511	2.5
18	8898	1.4

استفاده از طراحی آزمایشی علاوه بر کاهش تعداد آزمایش‌ها، به کاهش هزینه و زمان آزمایش نیز منجر می‌شود و محدوده بهینه را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، از مقایسه نتایج بهینه CCD با نتایج بهینه PSO مشاهده می‌شود که پارامترهای ورودی بهینه در روش CCD در محدوده نتایج بهینه PSO قرار دارند.

بررسی ریزساختار

ریزساختار میلگرد فولادی نمونه S1 با مشخصات ذکر شده در جدول (۲) در شکل (۶) نشان داده شده است. ریزساختار شامل یک مرزخانه پیوسته جزایر فریت و پرلیت است. کسر حجمی فریت و پرلیت اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار Image J به ترتیب ۵۲٪ و ۴۸٪ بود که تقریباً با درصد وزنی فاز فریت و مخلوط پرلیت پیش‌بینی شده توسط نمودار فاز Fe-C (یعنی ۵۶ درصد وزنی فریت و ۴۴ درصد وزنی پرلیت) مطابقت دارد. شایان ذکر است از آنجایی که چگالی فریت و پرلیت کمی متفاوت است، درصد وزنی و درصد حجمی آن‌ها مشابه است.



شکل ۶ ریزساختار میلگرد فولادی S1

بهینه‌سازی عوامل افزایش استحکام نهایی و ازدیاد طول نسبی نمونه‌های جوش داده شده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات (PSO)

در شرایط رقابتی صنعتی، یافتن راه‌حل‌های بهتر همیشه ضروری است. برای این منظور محققان در زمینه‌های مختلف در طول سالیان متمادی روش‌های مختلف بهینه‌سازی را توسعه داده‌اند. بهینه‌سازی در واقع ابزار مناسبی برای یافتن بهترین شرایط راه‌حل در میان مجموعه شرایط ممکن است. بسته به نوع مسئله و فضای جستجو، روش‌های بهینه‌سازی مختلفی پیشنهاد می‌شود. کاربرد روش‌های گرادیان و همچنین رشد سریع حجم محاسباتی با افزایش تعداد پارامترها عملاً کاربرد آن‌ها را در مسائل بزرگ غیر ممکن کرده است. به همین دلیل، روش‌های بهینه‌سازی اکتشافی پدید آمده‌اند. بسیاری از این روش‌ها از عملکردهای موجود در طبیعت الهام گرفته شده‌اند مانند الگوریتم‌های کلونی مورچه‌ها (Ant colony algorithms)، الگوریتم‌های ژنتیک (Genetic algorithms)، شبیه‌سازی تبرید (Simulated annealing) و بهینه‌سازی جمعیت ذرات (PSO) [22]. روش PSO بر اساس جستجوی فضای راه‌حل قرار دارد. در این روش، به ترتیب مراحل تولید ماتریس موقعیت اولیه ذرات (X)، تولید ماتریس سرعت اولیه ذرات (V)، ارزیابی جمعیت و محاسبه برازش ذرات، به‌روزرسانی مقادیر $P_{best,i}$ (بهترین موقعیت فردی هر ذره) و $G_{best,i}$ (بهترین موقعیت کلی در جمعیت)، محاسبه سرعت‌های جدید ذرات، محاسبه موقعیت‌های جدید ذرات و در نهایت کنترل شرایط همگرایی انجام می‌شود. معادله اصلی این روش را می‌توان به صورت معادله (۳) بیان کرد [23].

$$V_t^i = \omega V_t^{i-1} + C_1 r_1 (P_{best,i} - X_t^{i-1}) + C_2 r_2 (G_{best,i} - X_t^{i-1}) \quad (3)$$

در این معادله ω ضریب اینرسی و C_1 و C_2 به ترتیب نشان دهنده ضرایب یادگیری فردی و اجتماعی هستند. این ضرایب نشان دهنده تأثیر بهترین راه‌حل یافت شده توسط هر ذره و بهترین راه‌حل کلی یافت شده بر روی سرعت ذره است. برای مقادیر C_1 و C_2 معمولاً یک عدد ثابت بین ۱/۵ و ۲/۵ انتخاب می‌شود. r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده (۰،۱) هستند و برای اطمینان از پایداری سیستم استفاده می‌شوند. V_t^i ، V_t^{i-1} و X_t^i به ترتیب نشان دهنده بردار سرعت در مرحله قبل، بردار سرعت در گام فعلی و بردار موقعیت در مرحله قبل برای ذره نام هستند. $P_{best,i}$ بردار بهترین موقعیت یافت شده

پایین‌تر است [26]. بنابراین، انتظار می‌رود که نواحی مختلف اتصال RUBW دارای ریزساختار منحصر به فرد باشند.

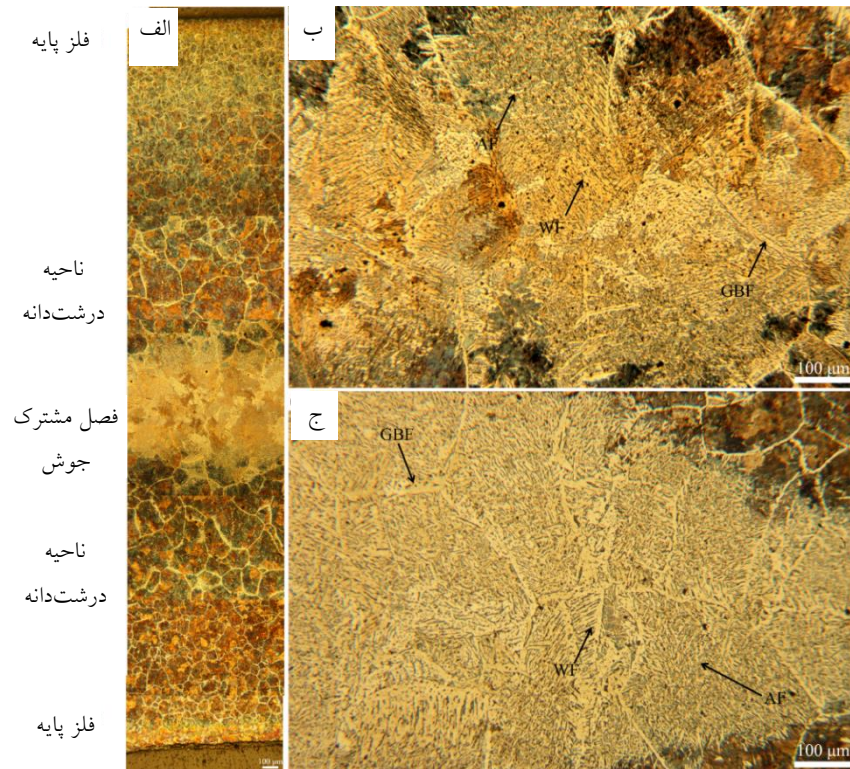
شکل (۷-الف) تغییر در ریزساختار ناحیه اتصال را در میلگرد با قطر ۱۲ میلی‌متر جوش داده شده با توان جوش ۴۰۰۰ و جابه‌جایی فک ۳۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. در هر دو طرف فصل مشترک جوش، رشد دانه رخ داد. با این حال، اندازه دانه با افزایش فاصله از سطح مشترک به سمت فلز پایه کاهش یافت. ریزساختار فلز پایه حاوی فریت مرزدانه همراه با جزایر پرلیت بود. قبلاً بیان شد که درصد حجمی فریت و پرلیت در فلز پایه به ترتیب ۵۲ و ۴۸ درصد بود. ریزساختار مشابهی نیز در ناحیه درشت دانه مشاهده شد. با این حال، کسر حجمی پرلیت تا ۷۳ درصد افزایش یافت در حالی که محتوای فریت به ۲۷ درصد کاهش یافت. تصاویر سطح مشترک جوش در دو میلگرد مختلف با قطر ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر به ترتیب در شکل‌های (۷-ب) و (۷-ج) نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که ریزساختار فصل مشترک به طور قابل توجهی تغییر کرده است. از دانه‌های فریت با مورفولوژی‌های مختلف از جمله فریت مرزدانه دگرریخت (AGBF) (Allotriomorphic grain boundary ferrite)، فریت ویدمن اشتاتن (WF) (Widmanstätten ferrite) و فریت بینیتی سوزنی (ABF) (Acicular bainitic ferrite) تشکیل شده است.

به منظور شناسایی دقیق‌تر ریزساختار فصل مشترک جوش، نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) بررسی شدند. شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) تصاویر FESEM از فلز پایه و منطقه متأثر از حرارت دانه‌درشت (CGHAZ) (Coarse grain heat affected zone) را به طور جداگانه نشان می‌دهند. هر دو منطقه از ریزساختار فریتی - پرلیتی تشکیل شده‌اند. با این حال، علاوه بر فریت مرزدانه (GBF)، فریت ویدمن اشتاتن (WF) نیز در منطقه CGHAZ شناسایی شد. علاوه بر این، در مقایسه با فلز پایه، فاصله بین لایه‌های فریت - سمیتیت در مخلوط پرلیت در ناحیه CGHAZ به میزان قابل توجهی کاهش یافت. این امر می‌تواند به دلیل سرعت بالای سرد شدن ناحیه جوش در طول فرایند اتصال باشد. از سوی دیگر، ریزساختار فصل مشترک جوش در هر دو میلگرد به طور قابل توجهی متفاوت بود. همان‌طور که در شکل‌های (۸-ج) و (۸-د) نشان داده شده است، تنها کسر حجمی کوچکی از پرلیت در زمینه فریت شناسایی شد. کسر حجمی محاسبه شده پرلیت بین ۵ تا ۷/۵ درصد متغیر بود که بسیار کمتر از مقدار آن در فلز پایه و مناطق CGHAZ بود.

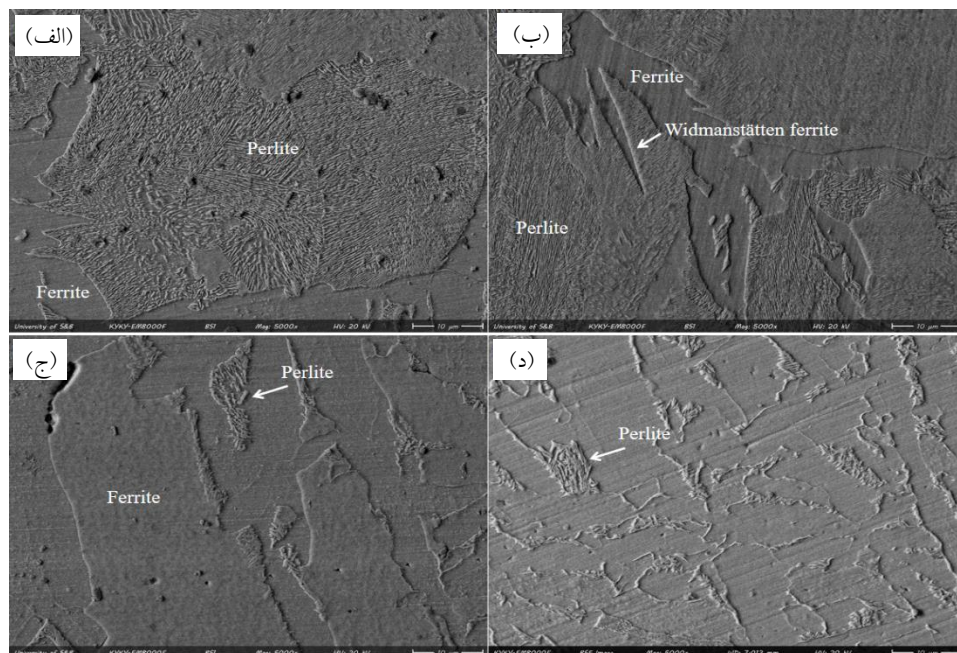
در حین جوش مقاومتی سربه‌سر، گرمای لازم برای فرایند اتصال از طریق عبور جریان الکتریکی از قطعات متصل به یکدیگر تولید می‌شود. این گرما توسط قانون ژول (Joule's Law) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Q = RI^2t \quad (۴)$$

که در آن Q گرمای ژول (J)، R مقاومت الکتریکی (اهم)، I جریان الکتریکی (A) و t زمان جوشکاری (s) است. افزایش تمام این پارامترها باعث تولید گرمای بیشتری در طول فرایند جوشکاری می‌شود. دو مقاومت الکتریکی اصلی شامل مقاومت تماسی (R_c) در سطح تماس دو قطعه و مقاومت حجمی (R_b) بین سطح قطعه و گیره‌ها در تولید گرما توسط گرمایش ژول نقش دارند. مقاومت تماس به عوامل زیادی مانند زبری سطح، فشار سطح تماس، سختی مواد و همچنین دمای نرم شدن مواد بستگی دارد [24]. در مراحل اولیه فرایند جوشکاری، مقدار مقاومت تماس به طور قابل توجهی بالاتر از مقاومت حجمی است. این امر بدین دلیل است که زبری سطح دو قطعه از تماس کامل بین آن‌ها جلوگیری می‌کند. بنابراین، سطح واقعی عبور جریان الکتریکی از سطح دو قطعه به طور قابل توجهی کمتر از سطح تماس اسمی است. در نتیجه، گرمای بیشتری در ناحیه تماس در مرحله اولیه جوشکاری تولید می‌شود. اعمال همزمان فشارهای جوشکاری باعث افزایش سطح تماس در سطوح تماس می‌شود. این امر باعث کاهش مقاومت تماس می‌شود. بنابراین، نقش مقاومت حجمی بر تولید گرما به تدریج غالب می‌شود. از طرف دیگر، گیره‌ها که جریان الکتریکی و فشار جوش را به قطعات وارد می‌کنند از جنس مس هستند و در حین جوشکاری با آب خنک می‌شوند. بنابراین، قطعات بین گیره‌ها به سرعت خنک می‌شوند. همه این عوامل باعث توزیع غیر یکنواخت دما در ناحیه مفصل می‌شود. سطوح تماس بالاترین دما را دارند که می‌تواند بالاتر از نقطه ذوب آلیاژ باشد، در حالی که حداکثر دمای تجربه شده توسط قطعات با حرکت از سطح تماس به سمت گیره‌ها کاهش می‌یابد. این نوع توزیع دما در جوش مقاومتی سربه‌سر ورق فولادی توسط کرسن و ریچاردسون [25] تأیید شد. آن‌ها از مدل المان محدود برای پیش‌بینی توزیع دما در این فرایند جوشکاری استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که حداکثر دمای به دست آمده در فصل مشترک با افزایش فاصله از سطح مشترک به شدت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، بابو و همکاران نشان دادند که سرعت سرد شدن فصل مشترک جوش بیشتر از مناطق با دمای



شکل ۷ (الف) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فصل مشترک جوش میلگرد فولادی با قطر ۱۲ و تصاویر با بزرگ‌نمایی بالاتر از فصل مشترک جوش در (ب) میلگرد با قطر ۱۲ میلی‌متر و (ج) میلگرد با قطر ۱۸ میلی‌متر



شکل ۸ تصاویر FESEM با بزرگ‌نمایی بالا در (الف) فلز پایه، (ب) منطقه CGHAZ، (ج) فصل مشترک جوش در میلگرد با قطر ۱۲ میلی‌متر و (د) فصل مشترک جوش در میلگرد با قطر ۱۸ میلی‌متر

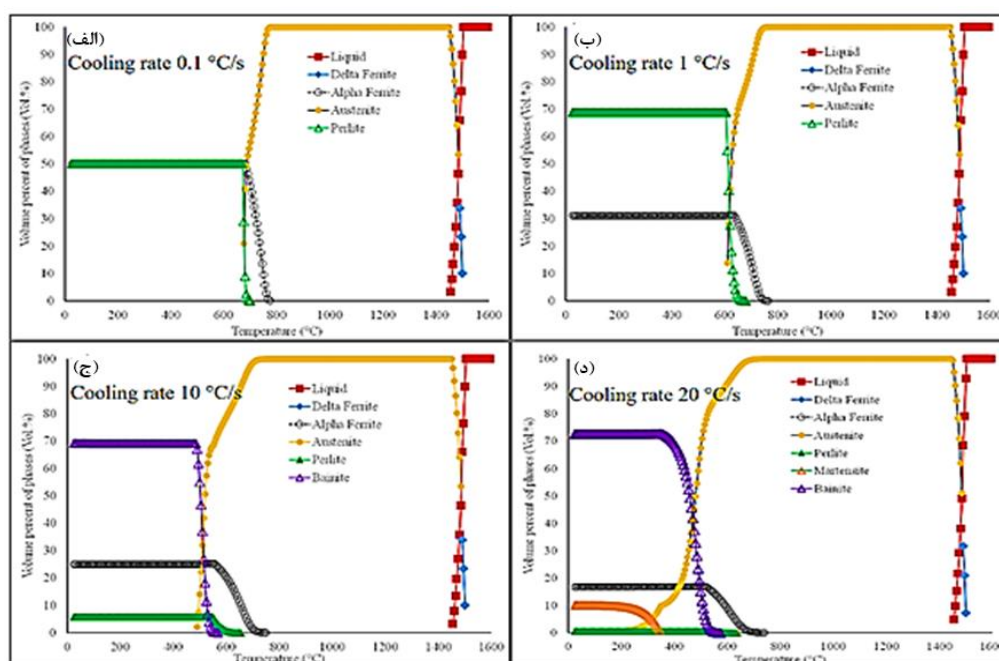
گرمایش در دمای بالا تأثیر زیادی بر توسعه ریزساختار جوش در فولادها خواهند داشت. در طول فرایند جوشکاری مقاومتی، قطعات در مدت زمان کوتاهی (یعنی کمتر از یک ثانیه تا چند

ریزساختار ناحیه جوش به شدت به چرخه حرارتی جوش بستگی دارد. هر دو سرعت گرمایش و سرمایش، حداکثر دمای تجربه شده توسط قطعات جوش داده شده و همچنین زمان

سرعت‌های خنک‌سازی، انجماد با تشکیل فاز دلتا فریت آغاز شد و از طریق واکنش پریکتیکی که منجر به تشکیل فاز آستنیت شد، پایان یافت. بنابراین به نظر می‌رسد که تغییر در سرعت سرمایش بین 0.1 تا 20°C/s تأثیر قابل توجهی بر مسیر انجماد نداشته باشد. با این حال، تبدیل فاز جامد آستنیت به شدت تحت تأثیر شرایط خنک‌کننده قرار گرفت. در سرعت خنک‌سازی بسیار کم (یعنی 0.1°C/s)، ریزساختار نهایی حاوی فریت پرویوتکتوئید و مخلوط پرلیت با کسرهای حجمی تقریباً مشابه بود. افزایش سرعت سرد شدن تا 1°C/s منجر به افزایش کسر حجمی پرلیت به فریت شد. هنگامی که سرعت خنک‌سازی به 10°C/s افزایش یافت، مخلوط پرلیت و بخش‌هایی از فریت با ساختار بینیتی جایگزین شدند. به نظر می‌رسد زمانی که سرعت سرمایش از یک مقدار بحرانی بالاتر می‌رود، تشکیل پرلیت سرکوب می‌شود. در عوض، فریت بینیتی تشکیل می‌شود. با افزایش سرعت سرد شدن تا 20°C/s ، ساختار پرلیتی تقریباً حذف شد و عمدتاً فاز بینیت سوزنی مشاهده گردید. با این حال، با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد و سرعت بالای سرمایش، احتمال تشکیل مقدار قابل توجهی فاز مارتنزیت در سطح مشترک جوش وجود دارد. در شبیه‌سازی نرم‌افزاری (JMatPro) سهم مارتنزیت کمتر پیش‌بینی شد، که ممکن است ناشی از مدل حرارتی یا پایگاه داده مورد استفاده باشد. مشاهدات ریزساختاری از افزایش سختی موضعی و حالت شکست ترد نیز این احتمال را تقویت می‌کند.

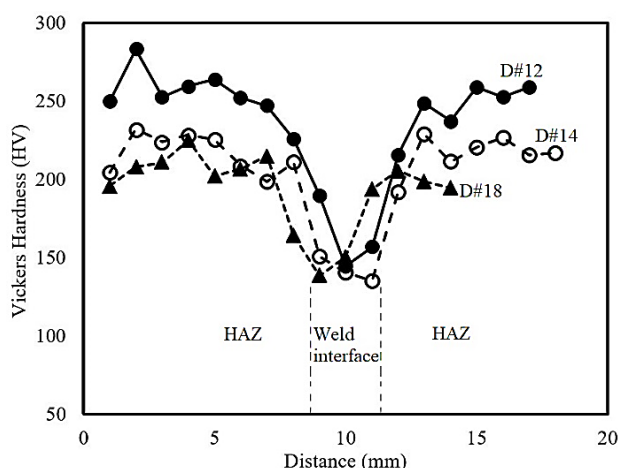
ثانیه) به حداکثر دما می‌رسند. بنابراین سرعت گرمایش ممکن است بین $100-1000^\circ\text{C/s}$ متفاوت باشد. تجربه حداکثر دما توسط قطعات نه تنها به فاصله منطقه مورد نظر تا فصل مشترک جوش بستگی دارد، بلکه به پارامترهای جوشکاری مانند جریان جوشکاری، ولتاژ، فشار جوشکاری، زبری سطح تماس و نوع ماده بستگی دارد. مطالعات نشان داده است که در طول جوشکاری فولادها، حداکثر دما می‌تواند به نقطه ذوب آلیاژ در سطح مشترک برسد [25]. علاوه بر این، بخش زیادی از فلز مذاب از فصل مشترک جوش با اعمال فشار در اطراف سطح مشترک دفع می‌شود. در نتیجه، یک اتصال حالت جامد رخ می‌دهد. در نهایت، ریزساختار ناحیه جوش در طول خنک شدن از دمای بالا ایجاد می‌شود و سرعت خنک‌سازی تأثیر زیادی بر تبدیل‌های فاز حالت جامد و ریزساختار حاصل دارد.

به منظور بررسی تأثیر چرخه حرارتی جوش بر توسعه ریزساختار در ناحیه اتصال، شکل‌گیری فازها با سرعت‌های خنک‌کننده متفاوت توسط نرم‌افزار JMat Pro شبیه‌سازی شد. در فرایند شبیه‌سازی از پایگاه داده چرخه جوش برای فولادهای عمومی استفاده شد. سرعت گرمایش 200°C/s ، حداکثر دما 1600°C و سرعت سرمایش بین 0.1 تا 20°C/s در نظر گرفته شد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل (۹) ارائه شده است. علاوه بر این، فازهای پیش‌بینی شده نهایی در ناحیه جوش پس از سرد شدن تا دمای اتاق در جدول (۱۱) ذکر شده است. در تمام



شکل ۹ اثر سرعت سرد شدن بر مسیر تبدیل فاز میلگرد فولادی توسط نمودارهای شبیه‌سازی شده: (الف) سرعت سرد شدن 0.1°C/s ، (ب) سرعت سرد شدن 1°C/s ، (ج) سرعت سرد شدن 10°C/s ، (د) سرعت سرد شدن 20°C/s

ضعیف‌ترین نقطه در نمونه جوش داده شده با جریان جوش ۷۱۰۰ آمپر و جابه‌جایی فک ۳۰ میلی‌متر بود (شکل ۱۱-ب). به عبارت دیگر، به نظر می‌رسد افزایش جریان جوشکاری نه تنها باعث افزایش حجم و ارتفاع برآمدگی ایجاد شده در اطراف محل اتصال می‌شود، بلکه استحکام کششی جوش را نیز بهبود می‌بخشد.



شکل ۱۰ توزیع سختی در اتصالات جوش مقاومتی سرب‌سر میلگردهای فولادی با قطرهای مختلف

تصاویر FESEM از سطوح شکست در شکل‌های (۱۱-ج) و (۱۱-د) نشان داده شده است. طبق شکل (۱۱-ج) وجود فرو رفتگی‌های ریز و گردنی شدن ناحیه شکست، حالت شکست نرم را در فلز پایه تأیید می‌کند. در مقابل، حضور سطوح شکاف‌دار با الگوهای رودخانه‌ای، شکست ترد در سطح اتصال جوش را به تصویر می‌کشد (شکل ۱۱-د). بر اساس نتایج آنالیز طیف‌سنجی پراکنده انرژی (EDS)، غلظت اکسیژن در سطح شکست کمتر از ۵ درصد وزنی بود. به عبارت دیگر، به نظر می‌رسد که اکسیداسیون فولاد در حین جوشکاری عامل اصلی شکست ترد در اتصال نبوده است. این نکته پذیرفته شده است که در آلیاژها، نوع حالت شکست به شدت تحت تأثیر اجزای ریزساختاری است. در فولادها، تشکیل فاز مارتنزیت یا ترکیبات میانی، مسئول شکست ترد هستند. از آنجایی که آلیاژ میلگرد هیچ عنصر آلیاژی خاصی نداشت، هیچ ترکیب میانی در ریزساختار تشکیل نمی‌شود. اگرچه داده‌های سختی‌سنجی نشان‌دهنده سختی نسبتاً پایین در سطح مشترک جوش هستند، اما در برخی نمونه‌ها با حرارت ورودی پایین، ویژگی‌های شکست ترد و مشاهدات ریزساختاری موضعی می‌تواند حاکی از حضور محدود فازهای

جدول ۱۱ پیش‌بینی فازهای دمای اتاق در ریزساختار میلگرد فولادی پس از خنک شدن با سرعت‌های خنک‌کننده مختلف

سرعت سرد کردن (°C/s)	درصد حجمی فازها			
	مارتنزیت	پرلیت	بینیت	فریت
0.1	---	50.1	---	49.9
1	---	68.8	---	31.2
10	---	69.2	5.8	25.0
20	12	70.3	0.7	17.0

خواص مکانیکی

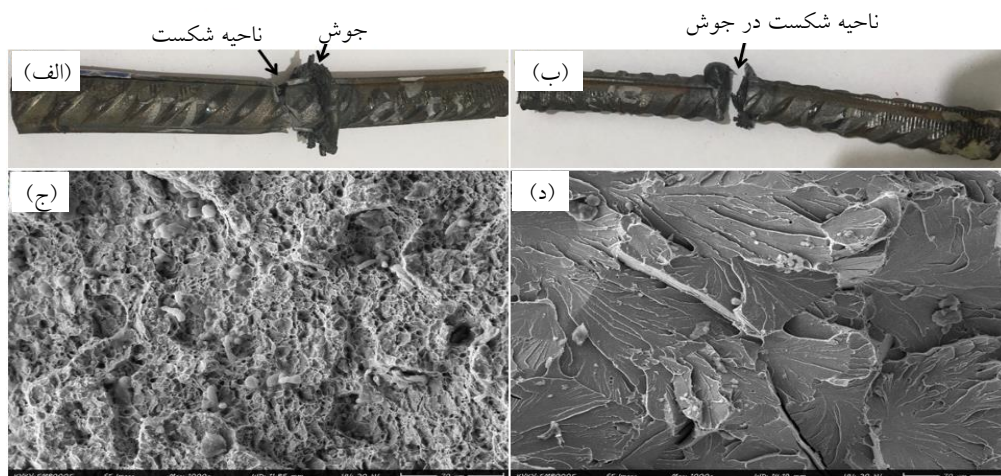
شکل (۱۰) تغییرات ریزسختی و یکرز را در اتصالات RUBW در میلگردهایی با قطر ۱۲، ۱۴، و ۱۸ میلی‌متر نشان می‌دهد. فصل مشترک دارای کمترین میانگین سختی (یعنی ۱۵۰-۱۳۰ HV) در هر سه نمونه بود که به سختی فریت در فلزات جوش فولاد کربنی ساده نزدیک است [27]. علاوه بر این، سختی در CGHAZ با ریزساختار فریتی - پرلیتی و کسر حجمی پرلیت بهبود یافت. سختی پایین در سطح اتصال جوش می‌تواند تأیید کند که ریزساختار این ناحیه عمدتاً از فاز فریت با مورفولوژی دگرریخت و سوزنی تشکیل شده است. وجود جزایر پرلیتی با کسر حجمی کم تأثیر قابل توجهی بر روی سختی سطح اتصال جوش نداشت. شایان ذکر است که در صورت تشکیل فاز مارتنزیت در فصل مشترک جوش، سختی به مقادیر بالاتری نسبت به آنچه در اینجا مشاهده شد، افزایش می‌یابد.

به منظور بررسی مکانیسم شکست نمونه‌های آزمایش کشش، دو نمونه از میلگرد با قطر ۱۸ میلی‌متر انتخاب شد. لازم به ذکر است که در مورد میلگرد ۱۲ میلی‌متری نیز نتایج مشابهی مشاهده شد. بنابراین، آن‌ها در اینجا گزارش نشده‌اند. تصاویر ناحیه شکست در شکل‌های (۱۱-الف) و (۱۱-ب) نشان داده شده‌اند. در نمونه جوش داده شده با جریان جوش ۸۴۶۰ آمپر و جابه‌جایی فک ۳۰ میلی‌متر، شکستگی در فلز پایه رخ داد که در شکل (۱۱-الف) نشان داده شده است. این موضوع نشان می‌دهد که استحکام نهایی اندازه‌گیری شده در این حالت مربوط به فلز پایه بوده است و نمی‌توان از آن برای ارزیابی استحکام واقعی جوش استفاده کرد. بنابراین در تحلیل استحکام جوش، فقط داده‌هایی که شکست در ناحیه جوش اتفاق افتاده است، معیار قضاوت قرار گرفتند. از سوی دیگر، فصل مشترک جوش

می‌دهد، به طوری که شکستگی در خارج از ناحیه جوش رخ داد. چقرمگی بالا احتمالاً مربوط به ماهیت فریت سوزنی است. ساختار فریت سوزنی نرم‌تر از ساختار پرلیت است. با این حال، زمانی که نمونه تحت تنش‌های کششی قرار می‌گیرد، دچار تغییر شکل می‌شود. وقتی فریت سوزنی وارد ناحیه تغییر شکل پلاستیک می‌شود، به دلیل فرایند کارسختی، استحکام آن افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ریزساختار در هم تنیده این فاز از رشد ترک‌ها جلوگیری می‌کند که این امر موجب افزایش چقرمگی فولاد می‌شود. در نتیجه، رشد ترک در ریزساختار فریت - پرلیت فلز پایه تسهیل می‌شود و مکان شکست را از سطح اتصال جوش به فلز پایه تغییر می‌دهد.

سخت مانند بینیت یا حتی مارتزیت در نواحی بسیار کوچک باشد. این موضوع می‌تواند به کاهش چقرمگی موضعی و آغاز شکست ترد کمک کرده باشد، هرچند این فازها گسترده یا غالب نبوده‌اند.

در جدول (۱۲) نتایج آزمایش‌های کشش بر روی نمونه‌های جوش داده شده و ماشین‌کاری شده ارائه شده است. نتایج به دست آمده از نمونه‌ها نشان می‌دهد که استحکام کششی نهایی هر دو نمونه تقریباً مشابه است. محل شکست در نمونه‌های ماشین‌کاری شده در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حتی پس از حذف برآمدگی از ناحیه اتصال، شکست در فلز پایه رخ داده است. این امر تأیید می‌کند که علی‌رغم سختی پایین ناحیه اتصال، این ناحیه چقرمگی بسیار خوبی از خود نشان



شکل ۱۱ شکستگی اتصال جوش در (الف و ج) فلز پایه، و (ب و د) ناحیه جوش

جدول ۱۲ نتایج آزمون کشش نمونه‌های جوش داده شده و ماشین‌کاری شده

نمونه	نمونه جوشکاری شده		نمونه ماشین‌کاری شده	
	استحکام نهایی (MPa)	ازدیاد طول (%)	استحکام نهایی (MPa)	ازدیاد طول (%)
S1	574	20	567	18
S6	622	24	615	23



شکل ۱۲ شکستگی اتصال جوش داده شده پس از ماشین‌کاری در فلز پایه

نتیجه گیری

جوشکاری مقاومتی سربه سر میلگردهای فولادی با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری بررسی شد. طراحی آزمایش جوشکاری مقاومتی با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی (CCD) برای بررسی اثرات قطر میلگردهای فولادی، شدت جریان جوشکاری و فشار جوش بر روی استحکام نهایی و ازدیاد طول نسبی نمونه های جوش داده شده انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:

۱. نتایج آماری به دست آمده نشان داد که مدل های فوق در پیش بینی استحکام کشش نهایی و ازدیاد طول نسبی نمونه های جوش شده در محدوده متغیرهای مورد مطالعه دقیق هستند. از آنجا که در برخی آزمون های کشش محل شکست در فلز پایه قرار داشت، داده های مربوط به این نمونه ها صرفاً به عنوان نشانه ای از عملکرد مناسب جوش در نظر گرفته شده اند، اما معیار مستقیم برای استحکام ناحیه جوش محسوب نمی شوند.
۲. بر اساس تحلیل واریانس، هر سه پارامتر فرایند تأثیر به سزایی بر استحکام کششی نهایی نمونه های جوش داده شده دارند، در حالی که قطر میلگرد فولادی و شدت جریان تأثیر محسوسی بر ازدیاد طول نسبی آن ها دارند.
۳. نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم بهینه سازی PSO نشان داد که شدت جریان بهینه و فشار بهینه جوش برای میلگرد فولادی با قطر ۱۲ میلی متر، به ترتیب ۴۹۲۹ آمپر و N/mm^2 ۲/۷، برای میلگرد فولادی با قطر ۱۴ میلی متر، ۵۵۱۱ آمپر و N/mm^2 ۲/۵، و برای میلگرد فولادی با قطر ۱۸ میلی متر، ۸۸۹۸ آمپر و N/mm^2 ۱/۴ است. بنابراین، با افزایش قطر میلگردهای فولادی، فشار جوشکاری کاهش می یابد در حالی که شدت جریان افزایش می یابد.
۴. بهینه سازی با استفاده از روش CCD در سطوح زیر رخ داد: قطر میلگرد ۱۸ میلی متر، شدت جریان ۸۴۶۰ آمپر و فشار جوش ۱/۶۴ مگاپاسکال. مقایسه نتایج بهینه CCD با نتایج بهینه PSO نشان می دهد که پارامترهای ورودی بهینه در روش CCD در محدوده نتایج بهینه PSO قرار می گیرند.

مراجع

- [1] S.-S. Kim, G.-I. Park, J.-W. Lee, J.-H. Koh, and C.-H. Park, "Effect of heat on the soundness of zircaloy-4 end cap closure using a resistance upset welding," *Journal of nuclear science and technology*, vol. 47, no. 3, pp. 262-268, 2010. <https://doi.org/10.1080/18811248.2010.9711953>

واژه نامه

Resistance upset butt welding	جوشکاری مقاومتی سربه سر
Central Composite Design	طراحی مرکب مرکزی
Particle Swarm Optimization	الگوریتم جمعیت ذرات
Gleeble	گلیبل
Factorial design	طرح عاملی
Plate-Boorman	پلیت - بورمن
Multiple regression analysis	تحلیل رگرسیون چندگانه
Response surface method	روش سطح پاسخ
Ant colony algorithms	الگوریتم های کلونی مورچه ها
Genetic algorithms	الگوریتم های ژنتیک
Simulated annealing	شبیه سازی تبرید
Joule's Law	قانون ژول
	فریت مرزدانه دگرریخت
Allotriomorphic grain boundary ferrite	
Widmanstätten ferrite	فریت ویدمن اشتاتن
Acicular bainitic ferrite	فریت بینیتی سوزنی
	منطقه متأثر از حرارت دانه درشت
Coarse grain heat affected zone	

تقدیر و تشکر

- [2] P. Kowalczyk, J. Sienicki, and A. Galińska, "The Mechanical Performance of Resistance Welded Thermoplastic Composite Double Overlap Joint Tested Under Static and Fatigue Loading," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 48, no. 3, pp. 1236-1247, 2024. <https://doi.org/10.1111/ffe.14529>
- [3] N. Shajan *et al.*, "Effect of Pearlite Banding and Weld Texture on Wheel Rim Failure in Resistance Upset Butt Welding," *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 12, no. 1, pp. 104-115, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13632-023-00930-w>
- [4] L. Chen, Z. Guo, C. Zhang, Y. Li, Y. Jia, and G. Liu, "Experiments and numerical simulations on joint formation and material flow during resistance upset welding of WC-10Co and B318 steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 296, p. 117164, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117164>
- [5] Q. Han, Y. Li, Y. Lu, and G. Wang, "Effect of corrosion on the fatigue crack propagation properties of butt weld with G20Mn5QT cast steel and Q355D steel in 3.5- wt% NaCl solution," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 46, no. 10, pp. 4020-4035, 2023. <https://doi.org/10.1111/ffe.14117>
- [6] J. Li, A. Vivek, and G. Daehn, "Improved properties and thermal stability of a titanium-stainless steel solid-state weld with a niobium interlayer," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 79, pp. 191-204, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.050>
- [7] M. Hamed, H. Eisazadeh, and M. Esmailzadeh, "Numerical simulation of tensile strength of upset welded joints with experimental verification," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 31, no. 5, pp. 2296-2304, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.011>
- [8] Y. Sarikavak, O. S. Turkbaz, and C. Cogun, "Influence of welding on microstructure and strength of rail steel," *Construction and Building Materials*, vol. 243, p. 118220, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118220>
- [9] A. Santhakumari, T. Senthikumar, G. Mahadevan, and N. Ramasamy, "Interface and microstructural characteristics of titanium and 304 stainless steel dissimilar joints by upset butt welding using a gleeble thermo mechanical simulator," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 26, pp. 7460-7470, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.098>
- [10] L. Thiercelin, F. Praud, F. Meraghni, and E. Fleury, "Thermally-activated hardening recovery in viscoplastic materials with kinematic hardening at high temperatures," *Mechanics of Materials*, vol. 180, p. 104636, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2023.104636>
- [11] D. Rodrigues, C. Leita, M. Balakrishnan, H. D. Craveiro, and A. Santiago, "Tensile properties of S355 butt welds after exposure to high temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 302, p. 124374, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124374>
- [12] K. S. Kumar and N. Arivazhagan, "An innovative pulsed current arc welding technology for armor steel: Processes, microstructure, and mechanical properties," *Materials Today Communications*, vol. 38, p. 108237, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108237>

- [13] Z. Dong *et al.*, "Study on microstructure characterization and mechanical properties of AISI 444 ferritic stainless steel joint by high-frequency pulse K-TIG welding," *Welding in the World*, vol. 68, no. 1, pp. 137-153, 2024. <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01637-w>
- [14] J.-H. Bae, Y.-D. Park, and M. Lee, "Optimization of welding parameters for resistance spot welding of AA3003 to galvanized DP780 steel using response surface methodology," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 585-593, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12239-021-0055-x>
- [15] A. Otimeyin, J. Achebo, and U. Frank, "Advanced Modeling and Optimization of Weldment Responses Using Statistical and Metaheuristic Techniques," *American Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 25-36, 2025. <http://dx.doi.org/10.11648/j.ajmme.20250901.13>
- [16] S. S. Rao, K. S. Arora, L. Sharma, and R. Chhibber, "Modelling and optimization of resistance spot weld responses using RSM-GA technique for DP590 steel sheets," *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, vol. 92, no. 3, pp. 453-466, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40010-022-00772-1>
- [17] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons, 2017.
- [18] R. H. Myers, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, "Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 97, no. 460, p. 1216, 2016. <https://doi.org/10.2307/1270613>
- [19] R. Kumar and M. Balasubramanian, "Application of response surface methodology to optimize process parameters in friction welding of Ti-6Al-4V and SS304L rods," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, no. 11, pp. 3625-3633, 2015. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(15\)63959-0](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(15)63959-0)
- [20] J. Wang, Y. Sun, X. Gao, M. S. Mannan, and B. Wilhite, "Experimental study of electrostatic hazard inside scrubber column using response surface methodology," *Chemical Engineering Science*, vol. 200, pp. 46-68, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.12.060>
- [21] M. H. Rahimi, M. Shayganmanesh, R. Noorossana, and F. Pazhuheian, "Modelling and optimization of laser engraving qualitative characteristics of Al-SiC composite using response surface methodology and artificial neural networks," *Optics & Laser Technology*, vol. 112, pp. 65-76, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.10.058>
- [22] A. P. Engelbrecht, *Computational intelligence: an introduction*. John Wiley & Sons, 2007.
- [23] M. Clerc, *Particle swarm optimization*. John Wiley & Sons, 2010.
- [24] J. Zwolsman, "Quality in Resistance Welding. An Analysis of the Process and Its Control," *Abington Publishing(UK)*, 1991, p. 100, 1991.
- [25] N. Kerstens and I. Richardson, "Heat distribution in resistance upset butt welding," *Journal of materials processing technology*, vol. 209, no. 5, pp. 2715-2722, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.015>
- [26] S. Babu, M. Santella, Z. Feng, B. Riemer, and J. Cohron, "Empirical model of effects of pressure and temperature on electrical contact resistance of metals," *Science and technology of welding and joining*, vol. 6, no. 3, pp. 126-132, 2001. <https://doi.org/10.1179/136217101101538631>

- [27] C. W. Ziemian, M. M. Sharma, and D. E. Whaley, "Effects of flashing and upset sequences on microstructure, hardness, and tensile properties of welded structural steel joints," *Materials & Design*, vol. 33, pp. 175-184, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.026>