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

چکیدہ

پژوهش حاضر تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری مقاومتی سربهسر (RUBW)^۱ بر اتصال میلگردهای فولادی با قطرهای مختلف را بررسی می کند. ارزیابیهای انجامشده شامل ریزساختار، استحکام کششی نهایی، درصد ازدیاد طول نسبی، و سختی موضعی نمونههای جوش داده شده است. بهینهسازی پارامترها با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی (CCD)^۲ و الگوریتم جمعیت ذرات (PSO)^۳ 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 بهدست آمد. تحلیل واریانس نشان داد که مدل درجه دوم برای استحکام کششی نهایی و مدل خطی برای ازدیاد طول نسبی، پیشبینیهای دقیقی ارائه میدهند. الگوریتم PSO برای تعیین پارامترهای ورودی بهینه استفاده و نتایج آن با روش CCD مقایسه شد. نرمافزار IMatPro 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 فازها و مقایسه با مشاهدات تجربی به کار رفت. نتایج نشان داد که فصل مشترک دارای دانههای فریت سوزنی و ناحیه متأثر از

كلمات كليدى: جوش حالت جامد؛ طراحي آزمايشات؛ پاسخ بهينه؛ توزيع سختى؛ تحليل واريانس

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

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

۱– مقدمه

جوشکاری مقاومتی یک فرآیند جوشکاری حالت جامد است. این فرآیند شامل عبور جریان الکتریکی از قطعات در هنگام تماس با یکدیگر و اعمال فشار است. مقاومتی که جریان با آن مواجه میشود گرمای زیادی را در فصل مشترک اتصال ایجاد می کند که منطقه جوش را ایجاد می کند [۳–۱]. یکی از مزایای اصلی این روش جوشکاری، امکان ایجاد اتصالات با استحکام بالا و کیفیت مناسب بدون نیاز به مواد مصرفی مانند الکترود یا سیم جوش است. در طول فرآیند جوشکاری، متغیرهای مهمی که بر فرآیند جوشکاری تأثیر می گذارند عبارتند از مدت زمان گرمایش، شدت جریان الکتریکی مورد استفاده برای جوشکاری، فشار اعمال شده در حین گرمایش و اتصال قطعات [۶–۴]. بر اساس مطالعات انجام شده، جوشکاری مقاومتی مزایای متعددی از جمله

¹ Resistance upset butt welding

^r Central Composite Design

^r Particle Swarm Optimization

اجرای سریع، تولید مقرون به صرفه، تجهیزات ساده، کنترل فرآیند اجرا، حفظ خواص متالورژیکی میلگردها، و کیفیت مطلوب جوش را صرفنظر از سطح مهارت اپراتور را ارائه میدهد. از این رو، این فرآیند در صنایع مختلفی از جمله نصب قطعات خودرو، اتصال قطعات فولادی، اتصال آلیاژهای مختلف و همچنین مونتاژ قطعاتی که مواد مشابه یا غیرمشابه دارند، کاربرد پیدا کرده است [۷]. شکل ۱ شمایی از جوشکاری مقاومتی سربهسر را نشان میدهد.



شکل ۱. شمایی از جوشکاری مقاومتی [۷]

ساریکاواک و همکاران [۸] جنبههای متالورژیکی و مکانیکی اتصالات سربهسر را بررسی کردند. خواص کششی و ویژگیهای استحکام سه منطقه مختلف از جمله خط همجوشی، ناحیه تبلور مجدد، و مناطق انتقال بهطور جداگانه بررسی شدند. سانتاکوماری و همکاران [۹] به بررسی فرآیند جوش سربهسر ترکیبات تیتانیوم خالص تجاری و فولاد زنگنزن ۳۰۴ پرداختند. آنها همچنین فرایند جوشکاری را با کمک شبیهساز ترمومکانیکی گلیبل^۱ شبیهسازی کردند. نتایج نشان داد که تشکیل ترکیبات بینفلزی در سطح مشترک به تغییرات قابلتوجهی در ریزسختی آلیاژ Ti/SS منجر میشود. تیرسلین و همکاران [۱۰] 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 نسبتا خوبی با دادههای تجربی تطابق دارد. این تطابق در شرایطی بررسی شد که مواد تحت مسیرهای پیچیدهی بارگذاری حرارتی- مکانیکی قرار گرفته بودند.

مردریگوئز و همکاران [۱۱] اثر افزایش دما بر اتصالات فولاد 22 S35S جوش داده شده به روش سربه سر 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 [۱۲] فرآیندهای 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 [۱۳] جوشکاری فولاد زنگنزن فریتی (FSS) A44 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.

اگرچه جوشکاری مقاومتی سربهسر یکی از روشهای صنعتی مؤثر برای اتصال میلگردهای فولادی است، اما مطالعات تجربی و تحلیلی محدودی بر بهینهسازی پارامترهای فرآیند 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 [۱۴] 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 [۱۵] از ترکیب الگوریتمهای فراابتکاری مانند. حریان کاهش عیوب، ارتقای کیفیت جوش و دستیابی به صرفه جویی در هزینها استفاده کردند و با 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 فرآیند، کاهش عیوب و افزایش بهرهوری فراهم کرد. همچنین رائو و همکاران [۱۶] با ترکیب RSM و الگوریتم ژنتیک (GA) موفق به مدلسازی و پیشبینی دقیق پاسخهای جوشکاری در ورقهای فولادی شدند.

تحقیق حاضر به جوشکاری مقاومتی سربه سر برای اتصال میلگردهای فولادی برای استفاده در صنعت ساختمان می پردازد. از آنجا که تحقیقات زیادی در زمینه بررسی شرایط بهینه جوشکاری میلگردهای فولادی جوش داده شده به روش جوشکاری مقاومتی سربه سر انجام نشده است، مطالعه حاضر می تواند این شکاف تحقیقاتی را پر کند. بنابراین، در این تحقیق تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری مقاومتی سربه سر بر ریز ساختار، استحکام کششی نهایی، و ازدیاد طول نسبی نمونه های 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 مجموعه ای جامع از آزمون های زمان پر و پرهزینه است، زیرمجموعه ای از آزمایش ها به عنوان نمونه های نماینده با استفاده از روش (CCD) انجام شد و نتایج برون یابی شدند. بر اساس یافته های این آزمایش ها، تأثیر هر پارامتر فرآیند بر پاسخها تعیین شد و از روش بهینه سازی جمعیت ذرات (PSO) برای تعیین شرایط بهینه استفاده شد. آزمون های سختی و آنالیز ریز ساختاری نیز برای تشخیص نواحی

۲- 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 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 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 ۱/۹۹ تا ۲/۷۹ نیوتن بر میلیمتر مربع انتخاب شد. پارامترهای اصلی فرآیند 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 و ۲۰ ترکیب آزمایشی طراحی شد (جدول ۲). برای هر ترکیب پارامتر، سه نمونه ساخته و میانگین نتایج به عنوان داده نهایی تحلیل شد.

		c	ووش داده شد	ئردهای ج	میایی میلگ	تركيب شي	جدول ۱:	
Fe	Ni	Cr	S	Р	Mn	Si	С	
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

فشار جوشکاری (N/mm²)	شدت جریان (A)	قطر (mm)	نمونه	فشار جوشکاری (N/mm²)	شدت جریان (A)	قطر (mm)	نمونه
1.84	6120	14	S11	2.23	3420	12	S 1
1.84	6600	14	S12	2.79	5484	12	S2
1.84	5867	14	S13	2.23	4723	12	S 3
1.84	5867	14	S14	2.79	5040	12	S4
1.84	6600	14	S15	2.51	3420	12	S5
0.99	8322	18	S16	1.64	5737	14	S 6

جدول ۲. شرایط ساخت نمونهها بر اساس روش CCD

1.24	8460	18	S17	1.84	5418	14	S 7
0.99	8990	18	S18	2.05	5971	14	S 8
1.11	7100	18	S19	1.84	5030	14	S 9
1.24	8143	18	S20	1.84	5867	14	S10

۳- نتایج و بحث

فرآیند 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 [۱۷]. روشهای مختلفی برای طراحی آزمایشها در دسترس است که شامل طرح عاملی^۱، طرح با سطوح مختلف، طراحی پلیت – بورمن^۲، روش تاگوچی، روش ترکیبی، و روش سطح پاسخ میشوند. انتخاب و استفاده از یک طرح آزمایشی مناسب برای آزمایشهای تحقیقاتی به عواملی مانند نوع فرآیند، تعداد سطوح درگیر و نوع پارامترهای ورودی به کار گرفته شده بستگی دارد [۱۹، ۱۸]. 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 عبارتهای مرتبه دوم و اثرات متقابل عوامل، مشاهده سهبعدی تغییرات فاکتورهای پاسخ، و غیره اشاره کرد [۲۱, ۲۰].

از میان چندین روش موجود برای بهینهسازی فرآیند، استفاده از طراحی مرکب مرکزی (CCD) برای شناسایی پارامترهای بهینه در جوشکاری انتخاب شده است. در این مقاله، یک مدل بهینهسازی برای پارامترهای فرآیند 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 می گیرد. برای استخراج روابط مربوط به سطح پاسخ، اطلاعات ورودی از نتایج آزمونهای تجربی استخراج شد.

۱–۳ آزمون کشش

جهت 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 ۲ mm/min ۲ انجام شد. پس از وارد کردن مقادیر استحکام نهایی نمونههای جوش داده شده در نرمافزار طراحی آزمایش، نتایج استحکام نهایی نمونههای جوش داده شده 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 می دهد.

		• • •		
درصد ازدیاد طول	درصد ازدیاد طول نسبی	استحكام نهايى	استحکام نهایی (تجربی)	نمونه
(پیش بینی شا	(تجربی)	(پیشبینیشده)	(MPa)	
%	%	(MPa)		
19.91	20	573.53	574	S 1
19.89	20	572.8	573	S2
19.26	20	571.53	572	S 3
19.93	20	573.38	574	S 4
20.48	20	574.61	574	S5
21.97	22	601.52	601	S 6
22.54	22	600.41	601	S 7
22.61	23	602.4	602	S 8
22.81	24	598.87	600	S 9

CCD	، روش	شده به	يشبينى	جربی و پ	نتايج ت	ساس	ه شده بر ا	جوش داد	نمونەھاى	طول	ازدياد	ستحكام و	_ ۱.۳	جدول	,
-----	-------	--------	--------	----------	---------	-----	------------	---------	----------	-----	--------	----------	-------	------	---

¹ Factorial design

^r Plate-Boorman

22.24	22	601.48	601	S10
22.01	22	602.01	602	S11
21.71	20	603.8	603	S12
22.24	22	601.48	601	S13
22.24	22	601.81	602	S14
21.71	22	600.79	601	S15
23.83	23	618.48	619	S16
24.21	25	621.92	622	S17
23.31	24	622.87	622	S18
24.48	25	614.78	615	S19
24.64	24	620.53	620	S20

ل شكست



شكل ۲. شكست ميلگردها: الف) فلز پايه(نمونه S3) و ب) جوش (نمونه S4)

۲-۳ تحليل واريانس

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 معنی داری جملات با مقدار P تعیین می شود. اگر مقدار P کمتر از ۲۰۰۵ باشد، نشان می دهد که جمله مربوطه تأثیر قابل توجهی بر پاسخ دارد در غیر این صورت، قابل توجه نیست [۱۷]. جدول ۴ نشان می دهد که مقدار P برای مدل کمتر از ۲۰/۰۵ (کمتر از ۲۰/۰۱) است و نشان می دهد بهترین مدل برای این پاسخ به دست آمده است. در این مورد، مقدار P برای پارامتر قطر کمتر از ۲۰/۰۱ است، که نشان می دهد این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر روی پاسخ دارد. مقدار P برای شدت جریان و فشار جوش کمتر از ۲۰/۰۱ است، که نشان می دهد این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر روی پاسخ دارد. مقدار P برای شدت جریان و فشار جوش کمتر از ۲۰/۰۰

مقدار F به عنوان شاخصی از قابلیت اطمینان مدل عمل می کند و تضمین می کند که تحت تأثیر دادههای تصادفی قرار نمی گیرد. این معیار اهمیت مدل و احتمال اینکه مدل تحت تأثیر نویز قرار گرفته است را نشان می دهد که تقریبا برابر با صفر است. علاوه بر این، مقدار F میزان تأثیر هر پارامتر بر پاسخ را تعیین می کند، که نشان می دهد هر چه مقدار یک پارامتر بیشتر باشد، تأثیر آن بر روی پاسخ بیشتر خواهد بود [۱۸].مقدار F برای مدل در این مورد ۰/۱۴۲۵ است. در این تحقیق از بین پارامترهای فرآیند، قطر، شدت جریان و فشار جوش به ترتیب بیشترین تأثیر را بر استحکام نهایی نمونههای جوش داده شده 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 ۰/۰۵ (کمتر از ۰/۰۰۱) است که نشان میدهد بهترین مدل برازش برای این پاسخ به دست آمده است. در این حالت، مقدار P برای پارامتر قطر کمتر از ۰/۰۰۱ است که نشان میدهد این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر این پاسخ دارد. برخی از برهم کنشها به دلیل اینکه مقدار P آنها بیشتر از ۰/۰۵ است، معنیدار نیستند و بنابراین تأثیری در پاسخگویی ندارند. نتایج آماری بهدست آمده حاکی از دقت مدلهای فوق در پیش بینی استحکام نهایی نمونههای جوش شده و زدیاد طول نسبی آنها در محدوده متغیرهای مورد مطالعه است.

منبع	جمع مربعات	df	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	
مدل	5494.67	9	610.52	1425.05	< 0.0001	معنىدار
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	غيرمعنىدا
PI	0.5433	1	0.5433	1.27	0.0364	
D^2	1.64	1	1.64	3.84	0.0786	غيرمعنىد
P2	0.0639	1	0.0639	0.1492	0.0674	غيرمعنىد
J ²	0.0293	1	0.0293	0.0684	0.0590	غيرمعنىد
باقيمانده	4.28	10	0.4284			
عدم تطابق	1.62	7	0.2311	0.2600	0.9354	غيرمعنىدا
خطای خالص	2.67	3	0.8889			C J ^{<i>n</i>}
مجموع	5498.95	19				

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

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

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

در نهایت، معادلات ۱ و ۲ به عنوان معادلات مدل با استفاده از روش CCD برای استحکام نهایی و ازدیاد طول نسبی نمونههای جوش داده شده بر اساس پارامترهای فرآیند به دست آمدند:

(۱) = 300.23 + 7.2967D + 8.667P + 0.0429I + 3.539DP - 0.00484PI (۱)

(۲) = 1.012 + 3.0118D - 0.00348I (۲)

علامت مثبت در معادلات بالا نشان دهنده اثر هم افزایی است در حالی که علامت منفی نشان دهنده اثر متضاد آن است. ضرایب مدل برای پاسخها با استفاده از روش تحلیل رگرسیون چندگانه^۱ در روش سطح پاسخ^۲ [۱۸] تعیین شده است. مقادیر R² (ضریب تعیین) برای معادلات ۲ و ۳ به ترتیب ۵۹۹۹۲±۰/۶۵۴۵ و ۸/۲۲۷۲±۰/۷۲۸۷ هستند که هر دو نشان دهنده برازش خوب دادههای تجربی و مقادیر پیش بینی شده توسط مدل ارائه شده است. مقادیر R² تعدیل شده برای معادلات ۲ و ۳ به ترتیب خوب دادههای تجربی و مقادیر پیش بینی شده توسط مدل ارائه شده است. مقادیر R² تعدیل شده برای معادلات ۲ و ۳ به ترتیب مقدار P۹۸۵/۶۵۴۵±۰/۰ و ۸/۱۹۲۲±۰/۷۲۸۷ هستند. انحراف معیار معادلات ۲ و ۳ نیز به ترتیب ۱۰۹۳۰ و ۰/۱۰۹۳ است. هرچه مقدار R² به یک نزدیک تر باشد و انحراف معیار کوچک تر باشد، مدل بهتر خواهد بود و مقادیر پیش بینی شده به پاسخ واقعی نزدیک تر خواهند بود. این نشان می دهد که مقدار پیش بینی شده برای استحکام نهایی نمونههای جوش داده شده در مقایسه با از دیاد طول نسبی نمونه های جوش داده شده دقیق تر و نزدیک تر به مقدار واقعی است (جدول ۶ و ۷).

¹ Multiple regression analysis

^r Response surface method

=		-	
0.9992	R ²	0.6545	انحراف معيار استاندارد
0.9985	R² تعدیلشدہ	598.95	میانگین
0.9938	R² پیشبینیشدہ	0.1093	C.V. %
107.8795	كفايت دقت		

جدول ۶. مقدار انحراف استاندارد و ضریب تعیین برای استحکام نهایی نمونههای جوش داده شده

جدول ۷. مقدار انحراف استاندارد و ضریب تعیین برای ازدیاد طول نسبی نمونههای جوش داده شده

• • • • • •	J. O	, <u> </u> ,	
انحراف معيار استاندارد	0.7287	R ²	0.8477
میانگین	22.10	R² تعدیلشدہ	0.8192
C.V. %	3.30	R² پیشبینیشده	0.7595
		كفايت دقت	16.9314

۳–۳ تأثیر پارامترهای جوشکاری بر استحکام نهایی

نمودارهای سهبعدی برای نشان دادن تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی استحکام نهایی نمونههای جوش داده شده، استفاده شده است. تجزیه و تحلیل واریانس نشان می دهد 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 ۱۸۹۹ N/mm نشان داده شده که با افزایش قطر میلگرد فولادی و شدت جریان، استحکام کششی نمونههای جوش داده شده افزایش می یابد. در شکل ۳ (ب)، اندرکنش قطر میلگرد فولادی و فشار جوش برای شدت جریان ۵ ۶۲۰ آمپر نشان داده شده که با افزایش قطر میلگرد فولادی و فشار جوش، استحکام نهایی نمونههای جوش داده شده به صورت خطی افزایش می یابد.



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

۴–۳ بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند 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 ذکرشده 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 می یابد.



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

۵-۳ بهینه یابی عوامل مؤثر بر روی افزایش استحکام نهایی و ازدیاد طول نسبی نمونه ها در این مرحله سطوح بهینه برای حداکثر پاسخها با استفاده از نرمافزار تعیین شد. سپس ۳ نمونه در این شرایط در آزمایشگاه برای اعتبارسنجی ساخته 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 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). همان طور که از جداول ۸ و ۹ مشاهده میشود، مقادیر پاسخ پیشبینی شده در محدوده میانگین پاسخهای تجربی و انحراف معیار (St) قرار می گیرند. بنابراین، طرح آزمایشی و پیشبینیهای آن معتبر هستند.

قط شدت جيان فشارحيش استحكام ندار اندياد طما	diani	-
فطر الملك جريان فسار جوش استخدم تهديني اردياه طون		
(%) (MPa) (MPa) (A) (mm)		_
25.83 628.88 1.64 8460 18	۱	
24.78 627.67 1.64 8460 18	۲	
25.11 627.97 1.64 8460 18	٣	
25.24 628.17	میانگین	
0.54 0.63	SD	_
جدول ۹. پاسخ بهینه		
ا فشار، C استحکام نهایی ازدیاد طول	جريان، B	قطر، A
(%) (MPa) (N/mm ²)	(A)	(mm)
پیشبینیشده تجربی پیشبینیشده تجربی		
25.24±0.54 25 628.17±0.63 628 1.64	8460	18

۶–۳ 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 می شود. کاربرد روش های گرادیان و همچنین رشد سریع حجم محاسباتی با افزایش تعداد پارامترها عملا کاربرد آن ها را در مسائل بزرگ غیرممکن کرده است. به همین دلیل، روش های بهینه سازی اکتشافی پدید آمده اند. بسیاری از این روش ها از عملکردهای موجود در طبیعت الهام گرفته شده اند، مانند الگوریتم های کلونی مورچه ها^۱، الگوریتم های ژنتیک (GA)^۲، شبیه سازی تبرید (SA)^۳، و بهینه سازی جمعیت ذرات (PSO) [۲۲]. روش PSO بر اساس جستجوی فضای راه حل 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، به روزرسانی مقادیر *ابه و به*ترین موقعیت فردی هر ذره) و *Bbest, ا* (بهترین موقعیت کلی در جمعیت)، محاسبه سرعت های جدید ذرات، محاسبه موقعیت های جدید ذرات، و در نهایت کنترل شرایط همگرایی انجام می شود. معادله اصلی این روش را می توان به صورت معادله ۳ بیان کرد [۳۲].







$$V_t^i = \omega V_t^{i-1} + C_1 r_1 \left(P_{\text{best},i} - X_t^{i-1} \right) + C_2 r_2 \left(G_{\text{best},i} - X_t^{i-1} \right)$$
(7)

در این معادله، ۵ ضریب اینرسی، و C₁ و C₂ به ترتیب نشاندهنده ضرایب یادگیری فردی و اجتماعی هستند. این ضرایب نشاندهنده تأثیر بهترین راهحل یافت شده توسط هر ذره و بهترین راهحل کلی یافت شده بر روی سرعت ذره است. برای مقادیر

[\] Ant colony algorithms

^r Genetic algorithms

" Simulated annealing

 $C_2 = C_1$ معمولا یک عدد ثابت بین ۱/۵ و ۲/۵ انتخاب میشود. ۲۱ و ۲2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده (۰،۱) هستند و برای اطمینان از پایداری سیستم استفاده میشوند. $V_t^{i} + V_t^{i-1} + V_t^{i}$ به ترتیب نشاندهنده بردار سرعت در مرحله قبل، بردار سرعت در مرحله قبل، بردار سرعت در گام فعلی، و بردار موقعیت در مرحله قبل برای ذره i مه هستند. $P_{best,i}$ بردار بهترین موقعیت یافت شده توسط در i م تاکنون را نشان میدهد و G_best به تریب نشان میده در مراحله قبل بردار سرعت در مرحله قبل بردار سرعت در گام فعلی، و بردار موقعیت در مرحله قبل برای ذره i مه هستند. مراحل قبلی است (۲۳ مه می شوند تا مراحل قبل برای ذره i مه مراحل قبل برای در مراحل قبلی است (۲۳ مه می مواند) به تراد مراحل قبلی است (۲۳ مه می مواند) بردار موقعیت یافت شده توسط در مراحل قبلی است (۲۳ م

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.

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

جدول ۱۰. مقادیر بهینه به دست آمده از اجرای الگوریتم PSO

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

۲-۳ بررسی ریزساختار



شکل ۶. ریزساختار میلگرد فولادی S1

در حین جوش مقاومتی سربهسر، گرمای لازم برای فرآیند اتصال از طریق عبور جریان الکتریکی از قطعات متصل به یکدیگر تولید میشود. این گرما توسط قانون ژول^۱ بهصورت زیر نوشته میشود: (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 فرآیند جوشکاری می شود. دو مقاومت الکتریکی اصلی شامل مقاومت تماسی (R) در سطح تماس دو قطعه و مقاومت حجمی (R) 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 [۲۴]. در مراحل اولیه فرآیند 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 آن ها جلوگیری می کند. بنابراین، سطح واقعی عبور جریان الکتریکی از

' Joule's Law

سطح دو قطعه بهطور قابل توجهی کمتر از سطح تماس اسمی است. در نتیجه، گرمای بیشتری در ناحیه تماس در مرحله اولیه جوشکاری تولید می شود. اعمال همزمان فشارهای جوشکاری باعث افزایش سطح تماس در سطوح تماس می شود. این امر باعث کاهش مقاومت تماس می شود. این امر این امر باعث کاهش مقاومت تماس می شود. از طرف دیگر، گیرهها که جریان الکتریکی و فشار جوش را به قطعات وارد می کنند از جنس مس هستند و در حین جوشکاری با آب خنک می شود. بنابراین، نقش مقاومت حجمی بر تولید گرما به تدریج غالب می شود. از طرف دیگر، گیرهها که جریان الکتریکی و فشار جوش را به قطعات وارد می کنند از جنس مس هستند و در حین جوشکاری با آب خنک می شود. بنابراین، قطعات وارد می کنند از جنس مس هستند و در حین جوشکاری با آب خنک می شود. بنابراین، قطعات بین گیره ا به سرعت خنک می شوند. همه این عوامل باعث توزیع غیریکنواخت دما در ناحیه مفصل می شود. بنابراین، قطعات بین گیره ا به سرعت خنک می شوند. همه این عوامل باعث توزیع غیریکنواخت دما در ناحیه مفصل می شود. بنابراین، قطعات بین گیره ا به سرعت خنک می شوند. همه این عوامل باعث توزیع غیریکنواخت دما در ناحیه مفصل می شود. بنابراین، قطعات بین گیره ا به سرعت خنک می شوند. همه این عوامل باعث توزیع غیریکنواخت دما در ناحیه مفصل می شود. بنابراین، قطعات بین گیره ای می این این عوامل باعث توزیع مدا کم دمای تجربه شده توسط قطعات مرکت از سطح تماس به سمت گیره اکا که می ابد. این نوع توزیع دما در جوش مقاومتی سربه سر ورق فولادی توسط کرستن و ریچاردسون [۲۵] تأیید شد. آنها از مدل المان محدود برای پیش بینی توزیع دما در این فرآیند جوشکاری استفاده کردند. آن ها نشان دادند که حداکثر دمای به دست آمده در فصل مشترک با افزایش فاصله از سطح مشترک به شدت کاهش می یابد. علاوه بر این، بابو و همکاران نشان دادند که سرعت سرد شدن فصل مشترک جوش بیشتر از مناطق با دمای پایین تر مرام باین از می سرعلان می می برد. باین از ماطق با دمای پایین تر می یابراین، انتظار می رود که نواحی مختلف اتصال RUBW دارای ریزساختار منحصربه 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 جابجایی 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. قبلا 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 دگر ریخت (AGBF)^۱، فریت ویدمن اشتاتن (WF)^۲، و فریت بینیتی سوزنی (ABF)^۳ تشکیل شده است.

¹ Allotriomorphic grain boundary ferrite

^v Widmanstätten ferrite

^{*} Acicular bainitic ferrite



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

به منظور شناسایی دقیق ر ریزساختار فصل مشترک جوش، نمونه ها 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 دانه درشت (CGHAZ)^۱ را به طور جداگانه نشان می دهند. هر دو منطقه از ریزساختار فریتی-پرلیتی تشکیل شده اند. با این حال، علاوه بر فریت مرزدانه (GBF) فریت و فریت و یدمن اشتاتن (WF) نیز در منطقه از ریزساختار فریتی-پرلیتی تشکیل شده اند. با این حال، علاوه بر فریت مرزدانه (GBF) فریت و فریت و یدمن اشتاتن (WF) نیز در منطقه از ریزساختار فریتی-پرلیتی تشکیل شده اند. با این حال، علاوه بر فریت مرزدانه (GBF) فریت و فریت و یدمن اشتاتن (WF) نیز در منطقه از ریزساختار فریتی-پرلیتی تشکیل شده اند. با این حال، علاوه بر فریت مرزدانه (GBF) فریت و منات را می و استاتن (WF) نیز در منطقه از ریزساختار فریتی کاهش یافت. این امر میتواند به دلیل سرعت بالای سرد مستنیت 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 فرآیند اتصال باشد. از سوی دیگر، ریزساختار فصل مشتر ک جوش در هر دو میلگرد به طور قابل توجهی معنوب می یافت. این امر میتواند به دلیل سرعت بالای سرد شدن ناحیه جوش در طول فرآیند اتصال باشد. از سوی دیگر، ریزساختار فصل مشتر ک جوش در هر دو میلگرد به طور قابل توجهی متفاوت بود. همان طور که در شکلهای ۸(ج) و ۸(د) نشان داده شده است، تنها کسر حجمی کوچکی از پرلیت در زمینه فریت متفاوت بود. همان طور که در شکلهای ۸(ج) و ۸(د) نشان داده شده است، تنها کسر حجمی کوچکی از پرلیت در زمینه فریت متفاوت بود. کسر حجمی محاسبه شده پرلیت بین ۵ تا ۲۵/۷ درصد متغیر بود که بسیار کمتر از مقدار آن در فلز پایه و مناطق متفاوت.

ریزساختار ناحیه جوش به شدت به چرخه حرارتی جوش بستگی دارد. هر دو سرعت گرمایش و سرمایش، حداکثر دمای تجربهشده توسط قطعات جوش داده شده و همچنین زمان گرمایش در دمای بالا تأثیر زیادی بر توسعه ریزساختار جوش در فولادها خواهند داشت. در طول فرآیند جوشکاری مقاومتی، قطعات در مدت زمان کوتاهی (یعنی کمتر از یک ثانیه تا چند ثانیه) به حداکثر دما می رسند. بنابراین سرعت گرمایش ممکن است بین C/s^{° ۱۰۰} - ۱۰۰۰ متفاوت باشد. تجربه حداکثر دما توسط قطعات نه تنها به فاصله منطقه موردنظر 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 می تواند به نقطه ذوب آلیاژ در سطح مشترک برسد [۲۵]. علاوه بر این، بخش زیادی از فلز مذاب از فصل مشترک جوش با اعمال فشار در اطراف سطح مشترک دفع می شود. در نتیجه، یک اتصال حالت جامد رخ می دهد. در نهایت،

[\] Coarse grain heat affected zone

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.



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

به منظور بررسی تأثیر چرخه حرارتی جوش بر توسعه ریزساختار در ناحیه اتصال، شکل گیری فازها با سرعتهای خنک کننده متفاوت توسط نرمافزار JMat Pro شبیهسازی شد. در فرآیند شبیهسازی از پایگاه داده چرخه جوش برای فولادهای عمومی استفاده شد. سرعت گرمایش C/s °C/s ، حداکثر دما C° ۱۶۰۰، و سرعت سرمایش بین ۰/۱ تا C/s° ۲۰ در نظر گرفته شد. نتایج این شبیهسازیها در شکل ۹ ارائه شده است. علاوه بر این، فازهای پیش بینی شده نهایی در ناحیه جوش پس از سرد شدن تا دمای اتاق در جدول ۱۱ ذکر شده است. در تمام سرعتهای خنکسازی، انجماد با تشکیل فاز دلتا فریت آغاز شد و از طریق واکنش پریتکتیکی که منجر به تشکیل فاز آستنیت شد، پایان یافت. بنابراین، به نظر می سد که تغییر در سرعت سرمایش بین ۰/۱ تا 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 C/s° ۰/۱)، ریزساختار نهایی حاوی فریت پرویوتکتوئید و مخلوط پرلیت با کسرهای حجمی تقریبا مشابه بود. افزایش سرعت سرد شدن تا C/s ۱ منجر به افزایش کسر حجمی پرلیت به فریت شد. هنگامی که سرعت خنکسازی به ۲/۵° ۱۰ 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 می شود. با افزایش سرعت سرد شدن تا C/s° ۲۰، ساختار پرلیتی تقریبا حذف شد و عمدتا 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 می کند.



۰/۱°C/s شکل ۹. اثر سرعت سرد شدن بر مسیر تبدیل فاز میلگرد فولادی توسط نمودارهای شبیهسازی شده (الف) سرعت سرد شدن (ب) سرعت سرد شدن S/2° ۱ (ج) سرعت سرد شدن C/s (د) سرعت سرد شدن (c/s) ۲۰° ۲۰

، دمای اتاق در ریزساختار میلگرد فولادی پس از خنک شدن با سرعتهای خنک کننده مختلف	ٔ. پیشبینی فازهای	جدول ۱۱
---	-------------------	---------

	نا	بجمى فازه	سرعت سردكردن		
-	مارتنزيت	بينيت	پرلیت	فريت	(°C/s)
	-		50.1	49.9	0.1
_			68.8	31.2	1
		69.2	5.8	25.0	10
	12	70.3	0.7	17.0	20

۸-۳ خواص مکانیکی

شکل ۱۰ تغییرات ریزسختی ویکرز را در اتصالات RUBW در میلگردهایی با قطر ۱۲، ۱۴، و ۱۸ میلیمتر نشان میدهد. فصل مشترک دارای کمترین میانگین سختی (یعنی ۱۵ – ۱۳۰) در هر سه نمونه بود که به سختی فریت در فلزات جوش فولاد کربنی ساده نزدیک است [۲۷]. 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 عمدتا از فاز فریت با مورفولوژی دگر ریخت و سوزنی تشکیل شده است. وجود جزایر پرلیتی با کسر حجمی کم تأثیر قابلتوجهی 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 میابد.

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 جابجایی 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 اندازه گیریشده در این حالت مربوط به فلز پایه بوده و نمیتوان از آن برای ارزیابی استحکام واقعی جوش استفاده کرد. بنابراین در تحلیل استحکام جوش، فقط دادههایی که شکست در ناحیه جوش اتفاق افتادهاند، معیار قضاوت قرار گرفتند.

میلیمتر بود (شکل ۱۱(ب)). به عبارت دیگر، به نظر میرسد افزایش جریان جوشکاری نه تنها باعث افزایش حجم و ارتفاع برآمدگی ایجادشده در اطراف محل اتصال میشود، بلکه استحکام کششی جوش را نیز بهبود میبخشد.



شکل ۱۰. توزیع سختی در اتصالات جوش مقاومتی سربهسر 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 فرورفتگیهای ریز و گردنی شدن ناحیه شکست، حالت شکست نرم را در فلز پایه تأیید می کند. در مقابل، حضور سطوح شکاف دار با الگوهای رودخانهای، شکست ترد در سطح اتصال جوش را به تصویر می کشد (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 می سد 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 نمی شود. اگرچه پایین، ویژگیهای شکست ترد و مشاهدات ریزساختاری موضعی می تواند حاکی از حضور محدود فازهای سخت مانند بینیت یا پایین، ویژگیهای شکست ترد و مشاهدات ریزساختاری موضعی می تواند حاکی از حضور محدود فازهای سخت مانند بینیت یا باشد، هرچند این فازها گسترده یا غالب نبودهاند.

در جدول ۱۲، نتایج آزمایشهای کشش بر روی نمونههای جوش داده شده و ماشین کاری شده ارائه شده است. نتایج به دست آمده از نمونهها نشان می دهد که استحکام کششی نهایی هر دو نمونه تقریبا مشابه است. محل شکست در نمونههای ماشین کاری شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می شود که حتی پس از حذف برآمدگی از ناحیه اتصال، شکست در فلز پایه رخ داده است. این امر تأیید می کند که علی رغم سختی پایین ناحیه اتصال، این ناحیه چقرمگی بسیار خوبی از خود نشان می دهد، به طوری که شکستگی در خارج از ناحیه جوش رخ داد. چقرمگی بالا احتمالا مربوط به ماهیت فریت سوزنی است. ساختار فریت سوزنی نرمتر از ساختار پرلیت است. با این حال، زمانی که نمونه تحت تنشهای کششی قرار می گیرد، دچار تغییر شکل می شود. وقتی فریت سوزنی وارد ناحیه تغییر شکل پلاستیک می شود، به دلیل فرآیند کار سختی، استحکام آن افزایش می یابد. علاوه بر این، ریز ساختار در هم تنیده این فاز از رشد تر کها جلوگیری می کند که این امر موجب افزایش چقرمگی فولاد می شود. در نتیجه، رشد ترک در ریز ساختار فریت -پرلیت فلز پایه تسهیل می شود و مکان شکست را از سطح اتصال جوش به فلز پایه تغییر می دهد.



۴- نتیجهگیری

جوشکاری مقاومتی سربهسر 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 نمونههای جوش داده شده انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:

و صدر بوس بر روی ست عام به یی و رویه عرق سبی عبوه علی بوس عنه منه میه می می و ازدیاد طول نسبی نمونه های 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 صرفا به عنوان نشانه ای از عملکرد مناسب جوش در نظر گرفته شده اند، اما معیار مستقیم برای استحکام کاری سای می از مون های کشش محل شکست در فلز پایه قرار داشت، داده های مربوط به این نمونه ها صرفا 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 فرآیند تأثیر بسزایی بر استحکام کششی نهایی نمونههای جوش داده شده دارند، در حالی که قطر میلگرد فولادی و شدت جریان تأثیر محسوسی بر ازدیاد طول نسبی آنها دارند. ۳) نتایج بهدست آمده از اجرای الگوریتم بهینه سازی PSO نشان داد که شدت جریان بهینه و فشار بهینه جوش برای میلگرد فولادی با قطر ۱۲ میلیمتر، به ترتیب ۴۹۲۹ آمپر و ۲/۷ N/mm²، برای میلگرد فولادی با قطر ۱۴ میلیمتر، ۵۵۱۱ آمپر و ۲/۵ N/mm²، و برای میلگرد فولادی با قطر ۱۸ میلیمتر، ۸۹۹۸ آمپر و ۱/۴ N/mm² است. بنابراین، با افزایش قطر میلگردهای فولادی، فشار جوشکاری کاهش مییابد در حالی که شدت جریان افزایش مییابد.

۴) بهینهسازی با استفاده از روش CCD در سطوح زیر رخ داد: قطر میلگرد ۱۸ میلیمتر، شدت جریان ۸۴۶۰ آمپر، و فشار جوش ۱/۶۴ مگاپاسکال. مقایسه نتایج بهینه CCD با نتایج بهینه PSO نشان میدهد که پارامترهای ورودی بهینه در روش CCD در محدوده نتایج بهینه PSO قرار می گیرند.

۵) ریزساختار از جزایر فریت و پرلیت با مرزهای دانه پیوسته تشکیل شده است و ریزساختار فصل مشترک بهطور قابلتوجهی تغییر کرده است. دانههای فریت با مورفولوژیهای مختلف از جمله فریت مرزدانه (GBF)، فریت ویدمن اشتاتن (WF) و فریت بینیتی سوزنی (ABF) شناسایی شدند.

۶) تغییرات ریزسختی ویکرز نشان داد که سطح اتصال مشترک کمترین میانگین سختی (یعنی HV -۱۳۰ HV) را دارد.

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.
- [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*, 2024.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [7] M. Hamedi, 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.
- [8] Y. Sarikavak, O. S. Turkbas, and C. Cogun, "Influence of welding on microstructure and strength of rail steel," *Construction and Building Materials*, vol. 243, p. 118220, 2020.
- [9] A. Santhakumari, T. Senthilkumar, 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.
- [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.
- [11] D. Rodrigues, C. Leitao, 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.
- [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.
- [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.

- [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.
- [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.
- [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.
- [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*. John Wiley & Sons, 2016.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.

واژه نامه

Resistance upset butt welding	جوشكارى مقاومتى سربەسر
Central Composite Design	طراحي مركب مركزي
Particle Swarm Optimization	الگوريتم جمعيت ذرات
Gleeble	گليبل
Factorial design	طرح عاملي
Plate-Boorman	پلیت – بورمن
Multiple regression analysis	تحليل رگرسيون چندگانه
Response surface method	روش سطح پاسخ
Ant colony algorithms	الگوريتمهاي كلوني مورچهها
Genetic algorithms	الگوريتمهاي ژنتيک
Simulated annealing	شبیەسازى تبريد
Joule's Law	قانون ژول
Allotriomorphic grain boundary ferrite	فريت مرزدانه دگر ريخت
Widmanstätten ferrite	فريت ويدمن اشتاتن
Acicular bainitic ferrite	فريت بينيتى سوزنى

Coarse grain heat affected zone

منطقه متأثر از حرارت دانه درشت