

بهینه‌سازی عوامل موثر بر مقاومت به خوردگی در جوش لوله‌های فولادهای زنگ‌نزن سوپر دوفازی در فرایند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز به کمک طراحی آماری آزمایش

محمد یوسفیه^{۱*}؛ احمد ساعتچی^۲؛ مرتضی شمعانیان^۲

چکیده

در این پژوهش از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی عوامل موثر بر مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ‌نزن سوپر دوفازی در جوشکاری قوسی تنگستن - گاز از طریق جریان پالسی استفاده شده است. تحلیل واریانس بر روی داده‌های نسبت سیگنال به اختلال انجام گرفت. برای رسیدن به شرایط بهینه در تخمین بالاترین پتانسیل حفره‌دار شدن، مشخصه "هرچه بیشتر بهتر" انتخاب شد. در شرایط بهینه، پتانسیل حفره‌دار شدن $1/06$ ولت بوده که بسیار نزدیک به پتانسیل حفره‌دار شدن پیش‌بینی شده ($1/08$ ولت) به دست آمد. از میان چهار عامل در سه سطح، عوامل جریان پالس و جریان زمینه که به ترتیب با درصد تاثیر $66/28\%$ و $25/97\%$ هستند دارای بیشترین اثر بر مقاومت به خوردگی این نوع جوش‌ها هستند. در حالیکه اثر عوامل فرکانس پالس و مقدار زمان جریان پالس در یک دوره به مراتب کمتر از عوامل جریان پالس و جریان زمینه شد.

کلمات کلیدی: جوشکاری قوسی تنگستن - گاز، فولاد زنگ‌نزن، خوردگی، ریزساختار، طراحی آماری آزمایش، روش

تاگوچی

Optimization of the PCGTAW Process Parameters for Corrosion Protection of SDSS Weld Pipes by Using Design of Experiment Technique

M. Yousefieh, A. Saatchi, M. Shamanian

ABSTRACT

In this study, the parameters of PCGTAW process were optimized for the corrosion protection of SDSS weld pipes by Taguchi method. Analysis of variance is performed on the measured data and signal to noise ratios. The optimum conditions were found by this method. Under optimum conditions, pitting potential was predicted as $1.08 V_{SCE}$ that was very close to the observed value of $1.06 V_{SCE}$. Among the four factors and three levels tested, it was concluded that the pulse current had the most significant effect on the pitting potential and the background current had the next most significant effect. The effect of pulse frequency and % on time are less important when compared to the other factors.

KEYWORDS: Gus - tungsten arc welding, Stainless steel, Corrosion, Microstructure, Design of experiment, Taguchi method

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۶/۲۹

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۱۲/۲۴

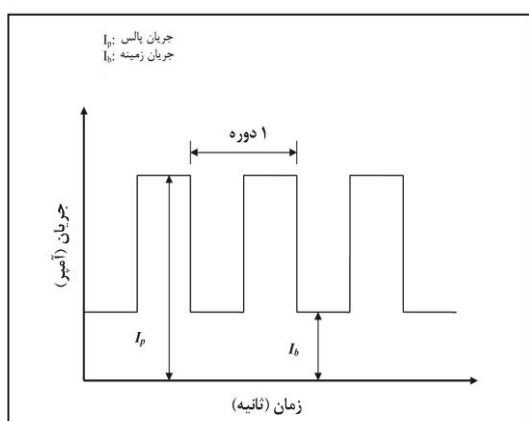
^{۱*} نویسنده مسئول و کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ m.yousefieh@ma.iut.ac.ir

^۲ استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ asaatchi@cc.iut.ac.ir

دانشیار، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ shamanian@cc.iut.ac.ir



اثر عوامل را به صورت مستقل از سایر عوامل می‌دهد [۵] [۶]. مراحل روش تاگوچی عبارتند از: تعیین مشخصه کیفی و تعیین عوامل طراحی، تعیین تعداد سطوح، انتخاب آرایه متعام مناسب، انجام آزمایش‌ها بر اساس آرایه متعام انتخاب شده، ارزیابی نتایج با استفاده از نسبت سیگنال به نویز^۲، تحلیل واریانس^۳، انتخاب سطوح بهینه عوامل، تصدیق شرایط بهینه با استفاده از آزمایش مورد تایید [۷].



شکل (۱): شمایی از عوامل جوشکاری پالس

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز پرکننده (بر حسب درصد وزنی)

عنصر	C	Mn	Cr	Ni	Mo	N
فلز پایه (UNS S32760)	۰/۰۳	۰/۸۲	۲۵/۷	۶/۳	۳/۴	۰/۲۳
فلز پرکننده (ER 2594)	۰/۰۳	۰/۷۳	۲۵/۹	۹/۲	۴/۲	۰/۲۲

۲- روش آزمایش

در این پژوهش از لوله‌های فولاد زنگ‌نزن سوپر دوفازی با ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شده است. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول (۱) آورده شده است. نمونه‌ها به وسیله فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با استفاده از جریان پالسی جوشکاری شده‌اند. برای محاسبه فازهای مختلف از نرم‌افزار ایمج تولز^۴ استفاده شد. آماده‌سازی اولیه نمونه‌ها به وسیله سنباده‌زنی با سنباده‌های ۸۰ تا ۲۴۰۰ انجام گرفت و سپس نمونه‌ها با آب مقطر و الکل شسته شدند. برای بررسی ریزساختار، نمونه‌ها با پودر آلومینا ۰/۳ میکرون پولیش شده و سپس به صورت الکتروشیمیایی در محلول 10M KOH در پتانسیل ۱/۵ ولت به مدت ۵ ثانیه اچ شدند. برای دیدن ریزساختار از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۶ که مجهز به سیستم طیف‌نگاری به روش تفکیک انرژی^۷ بود، استفاده شد.

ساختار فولادهای زنگ‌نزن سوپر دوفازی شامل ۵۰٪ فریت و ۵۰٪ آستنیت است. این فولادها به طور گسترده در خطوط لوله در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی و فرایندهای شیمیایی استفاده می‌شوند. شهرت این فولادها به دلیل ترکیبی از خواص آنها از جمله مقاومت به خوردگی بالا، خواص مکانیکی عالی و قابلیت جوش‌پذیری خوب است. خواص گفته شده هنگامی در فولادهای زنگ‌نزن سوپر دوفازی ایجاد می‌شود که نسبت فریت به آستنیت نزدیک به ۵۰:۵۰ بوده و سایر فازهای مضر مانند رسوبات نیتريد کروم و سیگما وجود نداشته باشند. اما در صورت کنترل نکردن دقیق شرایط، چندین استحاله در منطقه متاثر از حرارت و فلز جوش در طی جوشکاری و عملیات‌های بعد از آن رخ می‌دهد [۱]. بنابراین دستورالعمل‌های جوشکاری باید طوری تنظیم شوند تا نسبت فریت به آستنیت ۱:۱ بوده و فازهای مضر نیز تشکیل نشوند. این ترکیب با کنترل حرارت ورودی در محدوده ۰/۵-۲ KJ/mm تا حدودی به دست می‌آید [۲]. جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با استفاده از جریان پالسی^۱ در سال ۱۹۵۰ میلادی توسعه یافت. در این روش جریان جوشکاری از یک سطح بالا (جریان پالس) به سطح پایین (جریان زمینه) در یک فرکانس منظم برقرار می‌شود. جریان پالس باید به اندازه‌ای باشد که نفوذ کافی صورت گیرد، در حالی که جریان زمینه به اندازه‌ای برقرار می‌شود تا قوس پایدار بماند. شکل (۱) تعریفی از جریان پالس و زمینه را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. از جمله مزایای جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با استفاده از جریان پالسی در مقایسه با جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با جریان ثابت^۲ عبارتند از [۳] [۴]: پایداری بیشتر قوس، نسبت عمق به پهنای جوش بالاتر، کاهش تخلخل، پیچش کمتر، منطقه متاثر از حرارت کوچکتر، کنترل حرارت ورودی. مزایای گفته شده سبب بهبود خواص مکانیکی و خوردگی قطعات جوش می‌شود. تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی اثر عوامل جریان پالسی بر خواص خوردگی این جوش‌ها بسیار اندک است. همچنین تاکنون هیچ مطالعه سیستماتیک از تحلیل اثر عوامل جریان پالسی بر خواص خوردگی انجام نشده است. هدف این پژوهش بهینه‌سازی عوامل جوشکاری با استفاده از جریان ضربانی به کمک روش تاگوچی است تا خواص خوردگی مطلوب در لوله‌های جوشکاری شده به دست آید. روش تاگوچی به عنوان یک روش سیستماتیک در طراحی و تحلیل آزمایش‌ها برای بهبود مشخصات کیفی شناخته شده است. این روش امکان ارزیابی

برای بررسی رفتار خوردگی، آزمون پلاریزاسیون تافل به وسیله دستگاه پتانسیوستات EG&G مدل ۲۶۳A در محیط ۳/۵٪ کلرید سدیم انجام شد. الکتروود مرجع از نوع کالومل اشباع شده^۸ و الکتروود خنثی از نوع گرافیت استفاده شد. آزمون پلاریزاسیون پس از رهاسازی نمونه به مدت تقریبی ۱/۵ ساعت برای پایدار شدن پتانسیل خوردگی انجام شد. به این صورت که نمونه‌ها از مقدار ۲۵۰ میلی‌ولت زیر پتانسیل مدار باز و با نرخ روبش ۱ mV/s پلاریزه شدند. در این تحقیق از پتانسیل حفره‌دار شدن^۹ به عنوان معیاری از رفتار خوردگی استفاده شد. به طوری که هرچه پتانسیل حفره‌دار شدن در منحنی پلاریزاسیون بالاتر باشد، مقاومت به خوردگی بهتر است.

جدول (۱): عوامل و اندازه آن‌ها بر حسب سطوح مربوطه

عامل	علامت	سطح		
		۱	۲	۳
جریان پالس (A)	A	۱۰۰	۱۲۰	۱۴۰
جریان زمینه (A)	B	۵۰	۶۰	۷۰
مقدار زمان جریان پالس در یک دوره	C	۴۰	۶۰	۸۰
فرکانس پالس (Hz)	D	۱	۳	۵

جدول (۲): آرایه متعامد L_۹ با استفاده از روش تاگوچی [۸]

شماره آزمایش	عامل			
	D	C	B	A
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۲	۲	۲	۱
۳	۳	۳	۳	۱
۴	۳	۲	۱	۲
۵	۱	۳	۲	۲
۶	۲	۱	۳	۲
۷	۲	۳	۱	۳
۸	۳	۱	۲	۳
۹	۱	۲	۳	۳

۳- طراحی آزمایش بر اساس روش تاگوچی

طرح آزمایش در روش تاگوچی بر اساس عاملیل جزئی است. بنابراین تعداد آزمایش‌ها به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. انتخاب آرایه متعامد مناسب، بستگی به تعداد عوامل قابل کنترل و سطوح مورد نظر دارد. چهار عامل شامل جریان پالس، جریان زمینه، مقدار زمان جریان پالس در یک دوره^{۱۰} و

فرکانس پالس در سه سطح متفاوت به عنوان عوامل متغیر در جدول (۲) دیده می‌شوند. درجه آزادی کل در یک آرایه متعامد باید بیشتر از تعداد عوامل و یا حداقل برابر با آن باشد. در این مطالعه، درجه آزادی کل برابر با ۸ است. بر اساس طرح تاگوچی، آرایه متعامد (۳^۴) L_۹ به صورت آورده شده در جدول (۳) انتخاب گردید [۸]. با انتخاب آرایه متعامد (۳^۴) L_۹، تعداد آزمایش‌ها به عدد ۹ کاهش یافت. در حالی که اگر از روش عاملیل کامل استفاده شود، باید تعداد ۳^۴=۸۱ آزمایش انجام گیرد. شرایط بهینه بر اساس نتایج نسبت سیگنال به اختلال تعیین می‌شود. به‌طور کلی سه نوع نسبت سیگنال به اختلال را می‌توان با توجه به مشخصه کیفی مورد نظر انتخاب نمود که عبارتند از: هر چه بیشتر بهتر، هر چه کمتر بهتر و اندازه اسمی بهتر. بزرگ‌ترین نسبت سیگنال به اختلال مربوط به بهترین عملکرد است. از آنجا که هدف از این تحقیق دستیابی به بیشینه مقاومت به خوردگی در لوله‌های جوش فولاد زنگ‌نزن سوپر دوفازی است، بنابراین مشخصه کیفی هر چه بیشتر بهتر بر اساس معادله (۱) انتخاب شد [۵]:

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (1)$$

که هر کدام از نتایج به‌دست آمده و n تعداد آزمایش‌ها است. پس از محاسبه و ترسیم نسبت‌های سیگنال به اختلال متوسط برای عوامل مختلف در سطوح متفاوت، سطح بهینه برای هر عامل که دارای بزرگ‌ترین نسبت سیگنال به اختلال در سطوح آن عامل است، تعیین می‌شود. نسبت سیگنال به اختلال پیش‌بینی شده $[(S/N)_{\text{Predicted}}]$ که از سطوح بهینه استفاده می‌نماید از رابطه (۲) قابل محاسبه است [۹]:

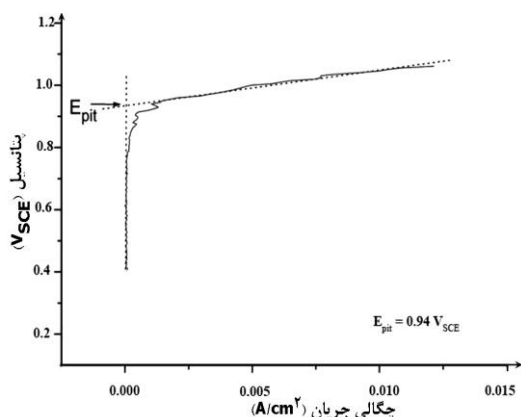
$$(S/N)_{\text{Predicted}} = (S/N)_m + \sum_{i=1}^p ((S/N)_i - (S/N)_m) \quad (2)$$

که $(S/N)_m$ میانگین کل نسبت سیگنال به اختلال، $(S/N)_i$ میانگین نسبت سیگنال به اختلال در سطح بهینه و p تعداد عوامل موثر در این فرایند جوشکاری است. پس از تعیین نسبت سیگنال به اختلال پیش‌بینی شده، پتانسیل حفره‌دار شدن پیش‌بینی شده را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) به‌دست آورد. در پایان آزمایش تایید بر اساس شرایط کاری بهینه و برای تصدیق مقادیر پیش‌بینی شده انجام خواهد شد. اگر نتایج پیش‌بینی شده تایید شوند، شرایط کاری بهینه قابل قبول است.

۴- نتایج و بحث

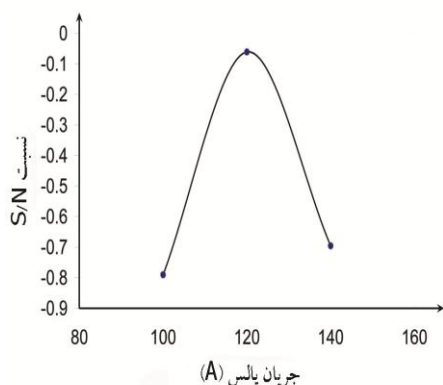
۴-۱- نتایج تاگوچی

نتایج به‌دست آمده از مقاومت خوردگی نمونه‌ها بر اساس



شکل (۲): نحوه تعیین پتانسیل حفره‌دار شدن

شکل‌های (۳) تا (۶) به ترتیب اثر عوامل جریان پالس، جریان زمینه، مقدار زمان جریان پالس در یک دوره و فرکانس پالس را بر نسبت‌های سیگنال به اختلال متوسط نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، شیب خطوط بین سطوح مختلف برای عوامل جریان پالس، جریان زمینه و فرکانس پالس یکسان نیست. بنابراین سطوح مختلف، اثرات متفاوتی بر روی مقاومت به خوردگی دارند. همچنین از این شکل‌ها می‌توان به این نکته پی برد که جریان پالس و جریان زمینه دارای بیشترین اثر بر روی مقاومت به خوردگی هستند. در حالی‌که اثرات فرکانس پالس و مقدار زمان جریان پالس در یک دوره به مراتب کمتر است. شیب خطوط بین سطوح مختلف در شکل‌های (۳) و (۴) تند است، بنابراین می‌توان دریافت که جریان پالس و جریان زمینه دارای بیشترین اثر بر روی مقاومت به خوردگی هستند. در حالی‌که با توجه به شکل‌های (۵) و (۶) اثرات فرکانس پالس و مقدار زمان جریان پالس در یک دوره به مراتب کمتر است.



شکل (۳): اثر جریان پالس بر نسبت سیگنال به اختلال

پتانسیل حفره‌دار شدن است که از منحنی‌های پلاریزاسیون آندی به دست آمده است. نحوه محاسبه پتانسیل حفره‌دار شدن از منحنی‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. مقادیر پتانسیل حفره‌دار شدن و نسبت‌های سیگنال به اختلال مربوط به هر آزمایش در جدول (۴) آورده شده است. برای ارزیابی اثر هر عامل بر روی مقاومت به خوردگی، نسبت سیگنال به اختلال برای هر عامل باید محاسبه شود. این نسبت برای یک عامل از میانگین نسبت‌های سیگنال به اختلال در سطوح مختلف به دست می‌آید که این مقادیر در هر سطح در جدول (۵) دیده می‌شود.

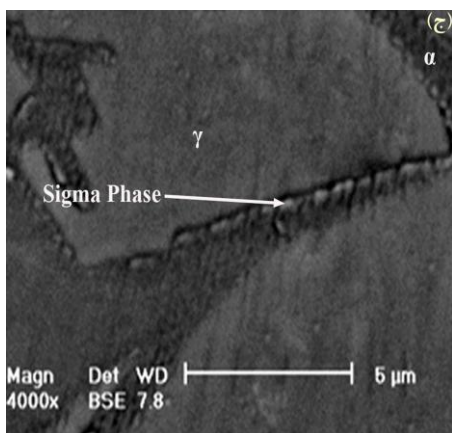
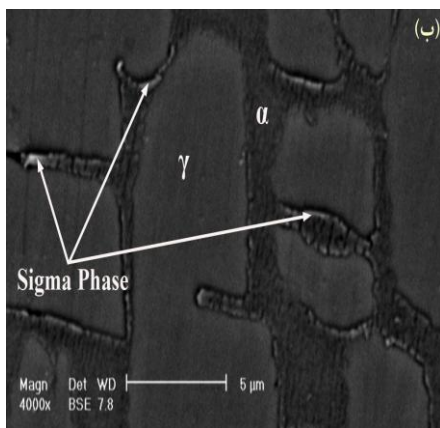
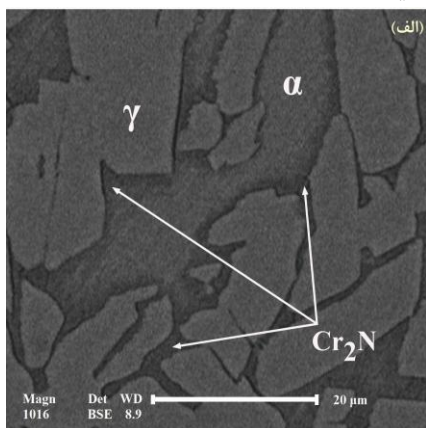
جدول (۳): نتایج آزمایش برای پتانسیل حفره‌دار شدن و نسبت‌های سیگنال به اختلال مربوطه

شماره آزمایش	جریان پالس (A)	جریان زمینه (A)	مقدار زمان جریان پالس در یک دوره	فرکانس پالس (Hz)	پتانسیل حفره‌دار شدن (ولت)	نسبت سیگنال به اختلال (dB)
۱	۱۰۰	۵۰	۴۰	۱	۰/۸۸	-۱/۱۱۰۳۵
۲	۱۰۰	۶۰	۶۰	۳	۰/۹۲	-۰/۷۲۴۲۴
۳	۱۰۰	۷۰	۸۰	۵	۰/۹۴	-۰/۵۳۷۴۴
۴	۱۲۰	۵۰	۸۰	۳	۰/۹۷	-۰/۲۶۴۵۷
۵	۱۲۰	۶۰	۴۰	۵	۱/۰۳	-۰/۲۵۶۷۴
۶	۱۲۰	۷۰	۶۰	۱	۰/۹۸	-۰/۱۷۵۴۸
۷	۱۴۰	۵۰	۶۰	۵	۰/۸۹	-۱/۰۱۲۲۰
۸	۱۴۰	۶۰	۸۰	۱	۰/۹۵	-۰/۴۴۵۵۳
۹	۱۴۰	۷۰	۴۰	۳	۰/۹۳	-۰/۶۳۰۳۴

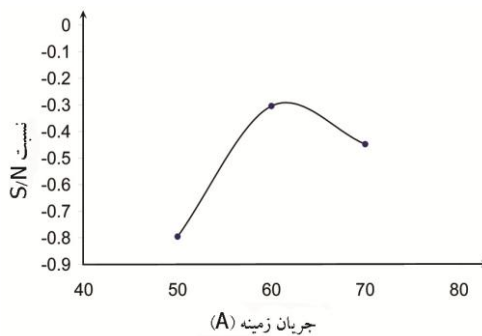
جدول (۴): مقادیر نسبت سیگنال به اختلال متوسط برای هر عامل در هر سطح (در هر ستون، سطح بهینه برای عامل مورد نظر به صورت عدد ضخیم نشان داده شده است)

سطح	عامل			
	D	C	B	A
۱	-۰/۴۹۴۶۴۸	-۰/۵۷۷۱۱۸	-۰/۷۹۵۷۰۴	-۰/۷۹۰۶۷۸
۲	-۰/۶۳۷۳۰۷	-۰/۵۳۹۷۱۷	-۰/۳۰۴۳۴۲	-۰/۰۶۱۱۰۰
۳	-۰/۴۱۵۸۴۵	-۰/۴۳۰۹۶۶	-۰/۴۴۷۷۵۴	-۰/۶۹۶۰۲۳

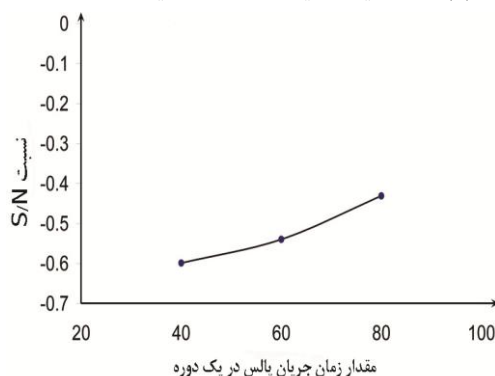
نشان می‌دهد: (الف) در شرایط آزمایش شماره ۱ که کم‌ترین پتانسیل حفره‌دار شدن (۰/۸۸ ولت) به دست می‌آید. (ب) در شرایط آزمایش شماره ۹ که پتانسیل حفره‌دار شدن متوسط (۰/۹۳ ولت) به دست می‌آید و (ج) در شرایط آزمایش شماره ۵ که بیش‌ترین پتانسیل حفره‌دار شدن (۱/۰۳ ولت) به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل (۷) الف دیده می‌شود، ریزساختار شامل رسوبات نیتریدی در مرز دانه‌های فریت/آستنیت است که به سمت فریت رشد کرده‌اند.



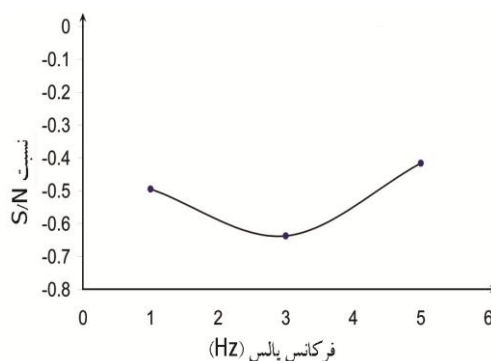
شکل (۷): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه‌های لوله جوشکاری شده در شرایط: (الف) آزمایش شماره ۱، (ب) آزمایش شماره ۹ و (ج) آزمایش شماره ۵



شکل (۴): اثر جریان زمینه بر نسبت سیگنال به اختلال



شکل (۵): اثر مقدار زمان جریان پالس در یک دوره بر نسبت سیگنال به اختلال



شکل (۶): اثر فرکانس پالس بر نسبت سیگنال به اختلال

اثر جریان پالس بر نسبت سیگنال به اختلال در شکل (۳) دیده می‌شود. نسبت سیگنال به اختلال متوسط تا رسیدن به یک قله در $I_p=120$ A افزایش می‌یابد. در واقع مقاومت به خوردگی بیشینه، در $I_p=120$ A به دست می‌آید. بر اساس جدول (۲)، این مقدار جریان پالس (120 A) در سطح ۲ قرار دارد. با افزایش جریان پالس از 120 A، نسبت سیگنال به اختلال متوسط کاهش می‌یابد. با کاهش نسبت سیگنال به اختلال متوسط، مقاومت به خوردگی نیز کاهش خواهد یافت. این کاهش را می‌توان مربوط به تشکیل رسوبات سیگما و نیتريد کروم دانست. همچنین کسر حجمی آستنیت و سیگما نیز اثر قابل توجهی در مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی دارد. شکل (۷) ریزساختار فلز جوش را در سه حالت مختلف

مقادیر بالای فریت (۶۸٪) در شکل (۷) الف به دلیل سرعت سرد شدن بالا در این شرایط است. اگر مقدار فریت بالا باشد، یک واکنش شدید رسوب گذاری نیتريد در طی سرد شدن رخ می‌دهد زیرا نیتروژن از حد حلالیت فریت عبور کرده و در نتیجه زمان کافی برای جداسازی در آستنیت ندارد. در اکثر موارد این نیتريدها سرشار از کروم هستند و به نظر می‌رسد که نیتريد کروم باشند [۱۰]. مقدار فریت بالا (۶۸٪) وجود رسوبات نیتريد کروم سبب کاهش مقاومت به خوردگی می‌شود. همچنین، ذرات نیتريد کروم مکان‌هایی برای جوانه‌زنی حفره هستند [۱۱].

در شکل (۷) ب، فاز سیگما در فصل مشترک فریت/آستنیت دیده می‌شود. تشکیل فاز سیگما در فولادهای زنگ‌نزن سوپردوفازی به‌وسیله تجزیه فریت از طریق یک استحاله یوتکتیک ایجاد می‌شود. همان‌طور که در شکل (۷) ب مشخص است، فاز سیگما به صورت مناطق سفید رنگ است. رسوب‌گذاری ترجیحی فاز سیگما از فریت به دلیل سرشار شدن عناصر کروم و مولیبدن در فریت است. تحلیل طیف‌نگاری به روش تفکیک انرژی که در جدول (۶) آورده شده است، وجود فاز سیگما در شکل (۷) ب را تایید می‌نماید. حرارت ورودی بالا و سرعت سرد شدن پایین در این شرایط سبب به وجود آمدن فاز سیگما با کسر حجمی حدود ۲۶٪ شده است. از طرفی، در این شرایط زمان انجام استحاله فریت به آستنیت به اندازه کافی بوده است تا مقدار آستنیت به حدود ۴۵٪ برسد. تحقیقات نشان می‌دهند که فاز سیگما به عنوان مکان‌هایی برای جوانه‌زنی حفره است، بنابراین رسوب فاز سیگما سبب کاهش مقاومت به خوردگی می‌شود [۱۲]. همان‌طور که در شکل (۷) ج دیده می‌شود، ریزساختار شامل رسوبات بسیار کمی از فاز سیگما در فصل مشترک فریت/آستنیت است. مقادیر آستنیت و سیگما در این شرایط به ترتیب برابر با ۴۳٪ و ۷/۸٪ است. این مقدار آستنیت بسیار نزدیک به میزان آستنیت ایده‌آل یعنی مقدار ۵۰٪ است. در واقع بالا بودن مقاومت به خوردگی در این شرایط را می‌توان به دلیل وجود آستنیت بالا و رسوبات کم سیگما دانست.

جدول (۶): ترکیب شیمیایی فازهای زمینه و سیگما با استفاده از تحلیل طیف‌نگاری به روش تفکیک انرژی (بر حسب درصد وزنی)

فاز	عنصر			
	کروم	مولیبدن	نیکل	آهن
آستنیت	۲۵/۳۶	۳/۲۹	۸/۶۴	۶۲/۷۱
فریت	۲۷/۸۶	۴/۷۲	۵/۸۱	۶۱/۶۱
سیگما	۳۲/۶۲	۹/۵۱	۵/۳۶	۵۲/۵۱

اثر جریان زمینه بر نسبت سیگنال به اختلال در شکل (۴) دیده می‌شود. در ابتدا با افزایش جریان زمینه از ۵۰ A به ۶۰ A، نسبت سیگنال به اختلال متوسط افزایش می‌یابد. در واقع مقاومت به خوردگی بیشینه، در $I_b=60$ A به دست می‌آید. بر اساس جدول (۲)، این مقدار جریان زمینه (۶۰ A) در سطح ۲ قرار دارد. با افزایش جریان زمینه از ۶۰ A به ۷۰ A، نسبت سیگنال به اختلال متوسط کاهش می‌یابد. با کاهش این نسبت، مقاومت به خوردگی نیز کاهش خواهد یافت. علت این کاهش را می‌توان مربوط به تشکیل رسوبات بین فلزی دانست که اثر زیادی در خواص خوردگی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی دارند. تحقیقات میشل پال در مورد فولادهای زنگ‌نزن دوفازی و مورا در مورد فولادهای زنگ‌نزن دوفازی UNS S31803 نیز نشان‌دهنده این موضوع است [۱۳] [۱۱].

شکل (۵) اثر مقدار زمان جریان پالس در یک دوره را بر نسبت سیگنال به اختلال نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، شیب خطوط بین سطوح مختلف تغییر چندانی نمی‌کند و تقریباً یکسان است. بنابراین مقدار زمان جریان پالس در یک دوره به عنوان یک عامل موثر در خواص خوردگی قطعات جوش این فولادها شناخته نمی‌شود. نسبت سیگنال به اختلال متوسط با افزایش مقدار زمان جریان پالس در یک دوره به صورت خطی افزایش می‌یابد. بنابراین مقاومت به خوردگی بیشینه در بالاترین سطح مقدار زمان جریان پالس در یک دوره (سطح ۳) به دست می‌آید. علت این موضوع را می‌توان به اثر مستقیم مقدار زمان جریان پالس در یک دوره بر تشکیل آستنیت دانست. در واقع با افزایش مقدار زمان جریان پالس در یک دوره، مقدار آستنیت نیز افزایش می‌یابد. بهترین خواص خوردگی در یک نسبت تعادلی بین فریت و آستنیت (۵۰:۵۰) به دست می‌آید [۱].

شکل (۶) بیانگر اثر فرکانس پالس بر نسبت سیگنال به اختلال است. با افزایش فرکانس پالس از ۱ Hz (سطح ۱) به ۳ Hz (سطح ۲)، نسبت سیگنال به اختلال متوسط به یک نقطه کمینه می‌رسد. هنگامی که فرکانس پالس به ۵ Hz افزایش می‌یابد، این نسبت به بالاترین مقدار خود می‌رسد. تعداد قله‌های جریان پالس در یک ثانیه به عنوان فرکانس پالس شناخته می‌شود [۱۴]. اثرات متفاوت فرکانس پالس بر نسبت سیگنال به اختلال را می‌توان به ریز یا خشن شدن ساختار دانه‌ها مربوط دانست [۱۵].

روش تاگوچی از نسبت سیگنال به اختلال برای مشخصه‌یابی کیفی استفاده می‌نماید. بزرگ‌ترین مقدار این نسبت بیانگر بهترین خواص خوردگی است. جدول (۴)

واریانس است. از آنجا که خطای واریانس برابر با صفر است، بنابراین SS'_p برابر SS_p است.

$$P_p(\%) = \frac{SS'_p}{SS_T} \times 100 \quad (7)$$

که P_p درصد اثر هر عامل است.

نتایج تحلیل واریانس در جدول (۸) آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، جریان پالس با درصد اثر ۶۶/۲۸٪ به عنوان موثرترین عامل در این فرایند جوشکاری بر خواص خوردگی لوله‌های جوش فولادهای زنگ‌نزن سوپر دوفازی است. جریان زمینه با درصد اثر ۲۵/۹۷٪ دومین عامل موثر در فرایند جوشکاری است. عامل فرکانس پالس با درصد اثر ۵/۰۴٪ و مقدار زمان جریان پالس در یک دوره با درصد اثر ۲/۷۱٪ به عنوان رتبه‌های بعدی موثر در فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با استفاده از جریان پالسی هستند.

جدول (۸): نتایج تحلیل واریانس

رتبه	درصد اثر (P)	واریانس (V)	جمع مربعات (SS)	درجه آزادی (f)	عامل
۱	۶۶/۲۸	۰/۰۰۵۷۰۰۰	۰/۰۱۱۴۰۰۰	۲	جریان پالس (A)
۲	۲۵/۹۷	۰/۰۰۲۲۳۳۳	۰/۰۰۴۴۶۶۷	۲	جریان زمینه (A)
۴	۲/۷۱	۰/۰۰۰۲۳۳۳	۰/۰۰۰۴۶۶۷	۲	مقدار زمان جریان پالس در یک دوره
۳	۵/۰۴	۰/۰۰۰۴۳۳۳	۰/۰۰۰۸۶۶۷	۲	فرکانس پالس (Hz)
	خطا
	۱۰۰		۰/۰۱۷۲۰۰۰	۸	مجموع

۳-۴- آزمایش تایید

آزمایش تایید به عنوان آخرین گام موثر در روش تاگوچی شناخته می‌شود. بعد از تعیین شرایط کاری بهینه، آزمایش تایید بر اساس سطوح بهینه مشخص شده انجام می‌گیرد و سپس با مقادیر پیش‌بینی شده مقایسه خواهد شد [۶]. بنابراین شرایط انجام آزمایش تایید همان شرایط کاری بهینه است که در جدول (۷) آورده شده است. جدول (۹) پتانسیل حفره‌دار شدن در آزمایش تایید و پتانسیل حفره‌دار شدن پیش‌بینی شده

نسبت‌های مربوط به هر آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین جدول (۵) نسبت سیگنال به اختلال متوسط را برای عوامل مختلف در سطوح مختلف نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۵)، بزرگ‌ترین نسبت در هر ردیف عمودی بیانگر سطح بهینه برای عامل موردنظر است. بنابراین A2, B2, C3 و D3 به ترتیب نشان دهنده بزرگ‌ترین مقدار برای عوامل A, B, C و D هستند. با توجه به جدول (۷)، بیانگر شرایط بهینه برای عوامل فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با استفاده از جریان پالسی هستند.

جدول (۷): شرایط کاری بهینه

شماره	عامل	سطح	مقدار
۱	جریان پالس (A)	۲	۱۲۰
۲	جریان زمینه (A)	۲	۶۰
۳	مقدار زمان جریان پالس در یک دوره	۳	۸۰
۴	فرکانس پالس (Hz)	۳	۵

۲-۴- نتایج تحلیل واریانس

از تحلیل واریانس می‌توان برای پی‌بردن به میزان اثر کمی عوامل مختلف فرایند جوشکاری بر خواص خوردگی لوله‌های جوشی فولادها استفاده نمود. چهار عامل مهم در تحلیل واریانس عبارتند از: جمع مربعات^{۱۱}، درجه آزادی^{۱۲}، واریانس^{۱۳} و درصد اثر عوامل^{۱۴}. عوامل گفته‌شده بر اساس معادلات (۳) تا (۷) محاسبه می‌شوند [۶] [۸]:

$$SS_T = \sum_i^m \eta_i^2 - \frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^m \eta_i \right]^2 \quad (3)$$

که SS_T نشان‌دهنده مجموع جمع مربعات، m تعداد کل آزمایش‌ها و η_i مقدار نسبت سیگنال به اختلال در آزمایش نام است.

$$SS_p = \sum_{j=1}^t \frac{(S_{\eta_j})^2}{t} - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m \eta_i \right)^2 \quad (4)$$

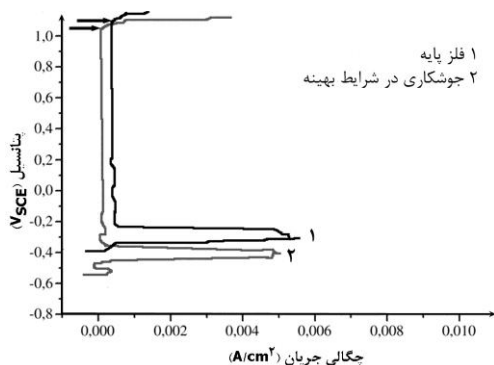
که SS_p نشان دهنده جمع مربعات عامل‌های A, B, C و D است. همچنین p نشان‌دهنده یکی از عوامل آزمایش شده، z سطح عامل p ، t میزان تکرار هر سطح عامل p و S_{η_j} مجموع نسبت‌های سیگنال به اختلال برای این عامل و سطح z است.

$$V_p(\%) = \frac{SS_p}{D_p} \times 100 \quad (5)$$

که V_p نشان‌دهنده واریانس عامل‌های مورد آزمایش و D_p درجه آزادی هر عامل است.

$$SS'_p = SS_p - D_p V_e \quad (6)$$

که SS'_p نشان‌دهنده جمع مربعات تصحیح شده و V_e خطای



شکل (۹): منحنی پلاریزاسیون از فلز پایه و نمونه جوش در شرایط بهینه

۵- خلاصه

در این پژوهش، از روش آماری طراحی آزمایش به کمک تاگوچی و برای بهینه‌سازی عوامل جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با استفاده از جریان پالسی برای رسیدن به بیشترین مقاومت به خوردگی در لوله‌های جوش فولاد زنگ‌نزن سوپرآلیاژ استفاده شد. جریان پالس، جریان زمینه، مقدار زمان جریان پالس در یک دوره و فرکانس پالس در سه سطح متفاوت به عنوان عوامل متغیر در نظر گرفته شدند. آرایه متعامد L_9 به کمک روش تاگوچی انتخاب گردید. برای تحلیل نتایج آزمایش از مشخصه کیفی هر چه بیشتر بهتر استفاده شد. نتایج به دست آمده از این تحقیق به صورت خلاصه عبارتند از:

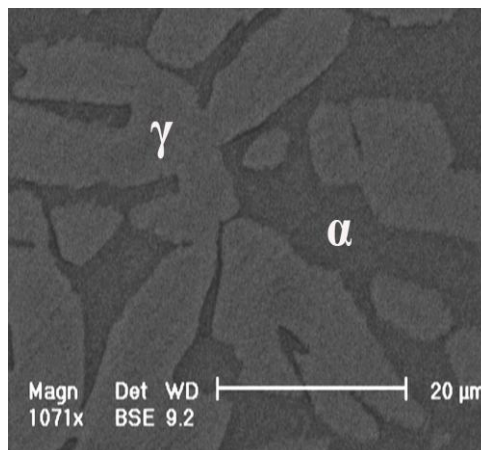
- در میان چهار عامل که در سه سطح قرار داشتند، جریان پالس و جریان زمینه به ترتیب بیشترین اثر را بر روی پتانسیل حفره‌دار شدن دارند. فرکانس پالس و مقدار زمان جریان پالس در یک دوره نیز در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

- درصد اثر جریان پالس، جریان زمینه، مقدار زمان جریان پالس در یک دوره و فرکانس پالس به ترتیب برابرند با: ۶۶/۲۸٪، ۲۵/۹۷٪، ۲/۷۱٪ و ۵/۰۴٪.

- شرایط کاری بهینه به این صورت به دست می‌آید: جریان پالس در سطح دوم (۱۲۰ A)، جریان زمینه در سطح دوم (A) ۶۰، مقدار زمان جریان پالس در یک دوره در سطح سوم (۸۰٪) و فرکانس پالس در سطح سوم (۵ Hz).

- آزمایش تایید در شرایط کاری بهینه انجام گرفت. در این شرایط پتانسیل حفره‌دار شدن برابر با ۱/۰۶ ولت بوده است. این مقدار بالاترین عدد به دست آمده در این تحقیق بوده و بسیار نزدیک به پتانسیل حفره‌دار شدن پیش‌بینی شده (۱/۰۸ ولت) است. بنابراین روش تاگوچی یک روش موثر و سیستماتیک برای بهینه‌سازی عوامل فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با استفاده از جریان پالسی برای رسیدن به بیشینه پتانسیل حفره‌دار شدن در قطعات جوش فولادهای

را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود پتانسیل حفره‌دار شدن برابر با ۱/۰۶ ولت در آزمایش تایید به دست آمد. همچنین بر اساس معادلات (۱) و (۲)، پتانسیل حفره‌دار شدن پیش‌بینی شده برابر با ۱/۰۸ ولت است که بسیار نزدیک به پتانسیل حفره‌دار شدن در آزمایش تایید است. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فلز جوش در آزمایش تایید در شکل (۸) آورده شده است.



شکل (۸): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه جوشکاری شده در آزمایش تایید در شرایط بهینه

جدول (۹): نتایج آزمایش تایید و مقایسه آن با پتانسیل حفره‌دار شدن پیش‌بینی شده

عوامل کنترل بهینه		
آزمایش شده	پیش‌بینی شده	سطح
$A_2B_2C_3D_3$	$A_2B_2C_3D_3$	پتانسیل حفره‌دار شدن (ولت)
۱/۰۶	۱/۰۸	

با توجه به شکل (۸) فقط فازهای فریت و آستنیت مشخص هستند و هیچ رسوب یا ترکیب بین فلزی دیده نمی‌شود. کسر حجمی آستنیت حدود ۴۸٪ است که بسیار نزدیک به مقدار آستنیت ایده‌آل یعنی ۵۰٪ است. منحنی‌های پلاریزاسیون آندی از فلز جوش در آزمایش تایید و فلز پایه در شکل (۹) آورده شده است. پتانسیل حفره‌دار شدن در شرایط جوشکاری بهینه در آزمایش تایید (۱/۰۶ ولت) بسیار نزدیک به پتانسیل حفره‌دار شدن در فلز پایه (۱/۱ ولت) است. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که از روش تاگوچی می‌توان به عنوان یک ابزار دقیق و موثر برای بهینه‌سازی عوامل جوشکاری پالسی استفاده نمود.

زنگ‌نزن سوپر دوفازی است.

σ	فاز سیگما
Cr_2N	فاز نیتريدکروم
D	درجه آزادی
E_{pit}	پتانسیل حفره‌دار شدن
P	درصد اثر عوامل
S/N	نسبت سیگنال به اختلال
SCE	الکتروود کالومل اشباع شده
SS	جمع مربعات
V	واریانس

۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بدین وسیله از همکاری صمیمانه شرکت نفت و گاز پارس و همچنین پرسنل کارگاهی و آزمایشگاهی دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۷- فهرست علائم

α	فاز فریت
γ	فاز آستنیت

۸- مراجع

- [۹] S. Kaytakoglu, et al., "Optimization of parametric performance of a PEMFC", Journal of Hydrogen Energy, No. 32, pp. 4418 - 23, 2007.
- [۱۰] J.C. Lippold, D.J. Kotecki; Welding metallurgy and weldability of stainless steels, John Wiley & Sons, 2005.
- [۱۱] V.S. Moura, et al., "Influence of microstructure on the corrosion resistance of the DSS UNS S31803", Materials Characterization, No. 59, pp. 1127 - 1132, 2008.
- [۱۲] V.M. Linton, et al., "Failure of a superduplex stainless steel vessel", Engineering Failure Analysis, No. 11, pp. 243 - 256, 2004.
- [۱۳] Michael Pohl, Oliver Storz, Thomas Glogowski, "Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel", Materials Characterization, No. 58, pp. 65 - 71, 2007.
- [۱۴] H. Tong, T. Ueyama, et al., "Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system", Science Technology Welding Joint, No. 6, pp. 203 - 208, 2001.
- [۱۵] A. Kumar, S. Sundarajan, "Optimization of pulsed TIG welding process parameters on mechanical properties of AA 5456 Aluminum alloy weldments", Materials and Design, No. 30, pp. 1288 - 1297, 2009.
- [۱] V. Muthupandi, et al., "Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steels", Materials Science and Engineering A, No. 358, pp. 9 -16, 2003.
- [۲] Practical guidelines for the fabrication of DSS, London, International Molybdenum Association, 1999.
- [۳] T. Senthil Kumar, V. Balasubramanian, M.Y. Sanavullah, "Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy", Materials and Design, No. 28, pp. 2080 - 2092, 2007.
- [۴] A.A. Gokhale, D.J. Tzavaras, H.D. Brody, Ecer GM, in: Proceedings of conference on grain refinement in casting and welds, St. Louis (MO), TMS-AIME, 1982. pp. 223-47.
- [۵] P.J. Ross; Taguchi techniques for quality engineering, New York, McGraw-Hill, 1998.
- [۶] C.Montgomery Douglas; Design and analysis of experiments, New York, John Wiley & Sons, 1997.
- [۷] M. Sadrzadeh, T. Mohammadi, "Sea water desalination using electro dialysis", Desalination, No. 221, pp. 440 - 447, 2008.
- [۸] S. Madhav Phadke; Quality engineering using robust design, NJ, Prentice Hall, 1989.

۹- زیر نویس‌ها

- ^۱ Pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW)
- ^۲ Constant current gas tungsten arc welding (CCGTAW)
- ^۳ Signal to noise ratio (S/N)
- ^۴ Analysis of Variance (ANOVA)
- ^۵ Image Tools
- ^۶ Scanning electron microscope (SEM)
- ^۷ Energy dispersive spectrometer
- ^۸ Saturated calomel electrode (SCE)
- ^۹ Pitting potential (E_{pit})
- ^{۱۰} % on time
- ^{۱۱} Sum of the square (SS)



^{۱۲} Degree of freedom (D)

^{۱۳} Variance (V)

^{۱۴} Percentage of the contribution (P)