نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال هفتم، شماره1، بهار و تابستان 1400، صفحه 127-119

بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی موثر بر چقرمگی در فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی

محمد یوسفیه

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

(دریافت مقاله: 1400/05/10؛ پذیرش مقاله: 1400/06/20)

چکیده

در این مقاله به کمک روش تاگوچی، پارامترهای موثر بر چقرمگی فولادهای زنگ‌نزن سوپردوفازی در جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی بهینه‌سازی شده است. برای دستیابی به شرایط بهینه به منظور رسیدن به حداکثر چقرمگی، مشخصه کیفی هرچه بیشتر بهتر مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل نتایج تاگوچی نشان داد برای رسیدن به شرایط بهینه به منظور دستیابی به حداکثر چقرمگی در قطعات جوش فولاد زنگ نزن سوپردوفازی باید سرعت چرخشی ابزار برابر 500 rpm، سرعت جوشکاری برابر 60mm/min، فشار اولیه برابر 70MPa و زاویه ابزار با قطعه کار برابر 3 درجه باشد. در شرایط بهینه، چقرمگی حاصل از آزمایش 61 J به دست آمد که با تقریب خوبی نزدیک به چقرمگی پیش‌بینی شده (58J) بود. همچنین آنالیز واریانس برروی نتایج نسبت سیگنال به نویز (S/N) انجام شد. با توجه به نتایج آنالیز واریانس، پارامتر سرعت چرخشی ابزار با درصد تاثیر 64% موثرترین پارامتر بر چقرمگی در جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی فولادهای زنگ نزن سوپردوفازی شناخته شد. از طرفی پارامترهای سرعت جوشکاری (با درصد تاثیر 17%)، فشار اولیه (با درصد تاثیر16%) و زاویه ابزار نسبت به قطعه کار (با درصد تاثیر 3%) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین بررسی سطح مقطع شکست نمونه‌ها در آزمایش ضربه اثبات کرد نمونه ای که کمترین چقرمگی را در آزمایش ضربه داشت دارای مورفولوژی از نوع کلیویج و در نتیجه شکست ترد بود. این در حالی بود که مورفولوژی سطح شکست نمونه مورد آزمایش در شرایط بهینه (با دارا بودن بالاترین چقرمگی در این تحقیق= 61 J) دارای دیمپل‌های ریز و عمیق به مقدار زیاد بود. وجود دیمپل‌های ریز و عمیق به مقدار زیاد نشان دهنده شکست نرم و نهایتا رسیدن به بالاترین چقرمگی بود.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، فولاد زنگ نزن، بهینه سازی.

Optimization of friction stir welding parameters for toughness in super duplex stainless steel

M. Yousefieh

Department of Metallurgy and Materials Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

(Received 1 August 2021 ; Accepted 11 September 2021)

Abstract

In this paper, using the Taguchi method, the parameters affecting the toughness of super duplex stainless steels in friction stir welding were optimized. In order to achieve optimal conditions, maximum toughness, the quality characteristic was used as the higher the better. Analysis of Taguchi results showed that in order to achieve optimal conditions in super duplex stainless steel weldments must have a tool rotational speed of 500 rpm, a welding speed of 60 mm / min, an initial pressure of 70 MPa and a tool tilt angle with the workpiece is equal to 3 degrees. Under optimal conditions, the toughness obtained from the confirmation test was 61 J, which was very close to the predicted toughness (58 J). Analysis of variance was also performed on the results of signal to noise (S/N) ratio. According to the results of analysis of variance, the tool rotational speed parameter with an influence percentage of 64% was the most effective parameter on toughness in friction stir welding of super duplex stainless steels. On the other hand, the parameters of welding speed (with an influence percentage of 17 %), initial 2 pressure (with an influence percentage of 16%) and tool tilt angle to the workpiece (with an influence percentage of 3%) were in the next ranks. Also, SEM micrographs from

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m.yousefieh@semnan.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.10.1]

fracture surface of the samples in the impact test proved that the sample that had the least toughness in the impact test had a cleavage morphology and as a result, brittle fracture. This was while the morphology of the fracture surface of the tested sample under optimal conditions (with the highest toughness in this study = 61 J) had a large amount of fine and deep dimples. The presence of these dimples in large quantities indicated ductile fracture and eventually reaching the highest toughness.

Keywords: Friction stir welding, Stainless steel, Optimization.

1- مقدمه

فولادهای زنگ نزن سوپردوفازی به طور وسیعی در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی و فرایندهای شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فولادها نام خود را از ریز ساختارشان در دمای محیط گرفته‌اند که شامل دو فاز فریت و آستنیت هستند. در نتیجه این ریزساختار ترکیبی از مجموع خواص فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فریتی حاصل می شود [1و 2].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نوعی فرایند جوشکاری حالت جامد بوده که در آن از یک ابزار مصرف نشدنی از جنس سخت‌تر از فلز مورد جوشکاری، که دارای حرکت همزمان دورانی و خطی است استفاده می‌شود. از مهمترین مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مقایسه با فرایندهای جوشکاری حالت مذاب می توان به اعوجاج و تنش پسماند کمتر و همچنین دمای پایین تر اشاره نمود [3و 4].

تحقیقات مختلفی بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی و حرارتی بر روی آلیاژهای مختلف در جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی انجام شده است. به عنوان مثال یوسفیه و همکاران [5] نقش دما را در جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی فولاد زنگ نزن دوفازی بررسی کرده‌اند. آن‌ها ابتدا تخمین دما را در دامنه تعریف دمای اندازه گیری شده در فواصل مختلف از مرکز منطقه اختلاط به وسیله تابع درونیاب لاگرانژ چند متغیره، مدل‌سازی کرده و سپس از دو روش برونیابی خطی و روش رگرسیون خطی چندگانه برای تخمین دما در خارج از بازه و درمرکز منطقه اختلاط استفاده کرده‌اند.Pitchipoo و همکاران [6] نیز به نتایج قابل قبولی در آلیاژهای دیگر (به غیر از فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی) در زمینه بهینه سازی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی از جمله زاویه ابزار با قطعه کار دست یافته اند. Babu و همکاران [7] و همچنین Zhang و همکاران [8] خواص مکانیکی اتصالات آلومینیوم را در FSW بررسی کرده اند. آن‌ها ادعا کرده اند که خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم با افزایش سرعت چرخشی ابزار تحت تاثیر قرار می گیرد. در تحقیق دیگری پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی در آلیاژهای آلومینیوم-اسکاندیم که به روش FSW جوشکاری شده اند به وسیله روش تاگوچی بهینه سازی شده است [9]. صفری و همکاران [10] پارامترهای جوشکاری اصطکاکی– اغتشاشی را برای دستیابی به بیشینه استحکام شکست در فولاد IF بهینه‌سازی کرده‌اند. همچنین Yousefieh و همکاران [11] پارامترهای موثر بر جوشکاری قوسی تنگستن-گاز به کمک جریان پالسی بر روی فولادهای زنگ نزن دوفازی را بهینه سازی کرده اند. آن‌ها توانسته‌اند به کمک روش تاگوچی به حداکثر مقاومت به خوردگی در قطعات جوش فولادهای زنگ نزن دوفازی دست یابند.

روش تاگوچی به عنوان یک روش سیستماتیک در طراحی و تحلیل آزمایش‌ها برای بهبود مشخصات کیفی شناخته شده است. اکثر روش‌های طراحی آزمایش (DOE) کارکرد تقریبا یکسانی دارند. اما از مزایای روش طراحی آزمایشات تاگوچی می‌توان به کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌ها، امکان بررسی متغیرهای کیفی یا کمی با سطوح مختلف، تعیین سهم متغیرها، امکان تخمین نتایج در شرایط بهینه، امکان تخمین نتایج در سطوح دلخواه، تعیین سهم اثرات متقابل در نظر گرفته شده برای متغیرها و امکان بدست آوردن همزمان شرایط بهینه برای چندین تابع پاسخ اشاره نمود، اما عدم بررسی کلیه اثرات متقابل در بعضی از مواقع می‌تواند از معایب این روش باشد [11و 12]. یکی از اهداف این تحقیق بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی – اغتشاشی به کمک روش تاگوچی است تا چقرمگی مطلوب در ورق‌های جوشکاری شده به‌دست آید.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.10.1]

جدول 1- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن سوپردوفازی (برحسب درصد وزنی).

عنصر	C	Mn	Cr	Ni	Si	Mo	N	P
فلز پایه (UNS S32760)	۰/۰۳	۰/۸۲	۲۵/۷	۶/۳	۰/۹۳	۳/۴	۰/۲۳	۰/۰۲

جدول 2- پارامترهای طراحی و سطوح مربوطه.

پارامتر	علامت	سطح		
		۱	۲	۳
سرعت چرخشی ابزار (rpm)	A	۲۵۰	۵۰۰	۷۵۰
سرعت جوشکاری (mm/min)	B	۳۰	۶۰	۹۰
زاویه ابزار با قطعه کار (°)	C	۲	۲/۵	۳
فشار اولیه (MPa)	D	۳۰	۵۰	۷۰

همچنین در این تحقیق به کمک آنالیز واریانس درصد تاثیر هر پارامتر در فرایند FSW در قطعات جوش فولاد سوپردوفازی مشخص شده است. مراحل روش تاگوچی عبارتند از: تعیین مشخصه کیفی و تعیین پارامترهای طراحی، تعیین تعداد سطوح، انتخاب ماتریس ارتوگونال مناسب، انجام آزمایش‌ها بر اساس ماتریس ارتوگونال انتخاب شده، ارزیابی نتایج با استفاده از نسبت سیگنال به نویز، انتخاب سطوح بهینه پارامترها، تایید شرایط بهینه با استفاده از آزمایش تایید [11].

2- مواد و روش تحقیق

در تحقیق حاضر از ورق‌های فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی (UNS S32760) استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول (1) آورده شده است.

طرح آزمایش در روش تاگوچی بر اساس فاکتوریل جزیی است. انتخاب ماتریس ارتوگونال مناسب، وابسته به تعداد پارامترهای قابل کنترل و سطوح موردنظر دارد. چهار پارامتر شامل فشار اولیه، سرعت چرخشی ابزار، سرعت جوشکاری و زاویه ابزار با قطعه کار در سه سطح مختلف به عنوان پارامترهای متغیر انتخاب شدند (جدول 2). در نمونه‌هایی که بالاتر و پایین تر از سطوح انتخاب شده در این تحقیق جوشکاری شدند عیوبی مانند نقص تونلی مشاهده شد. به عنوان مثال در نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت‌های چرخشی ابزار 200 rpm و 800 rpm (بالاتر و پایین‌تر از سطوح انتخابی در این تحقیق) نقص تونلی مشاهده شد. شرایط جوشکاری سرد (در سرعت چرخشی ابزار کم) در سرعت چرخشی ابزار 200 rpm حاکم است و با افزایش سرعت جوشکاری این شرایط تشدید می‌شود. در واقع در سرعت چرخشی ابزار 200 rpm، انرژی ورودی به مواد در حال سیلان و دما به اندازه کافی بالا نیست و در نتیجه نقص تونلی در منطقه‌ی اختلاط به دلیل دمای پایین ظاهر شد. از طرفی در سرعت چرخشی ابزار بالا (سرعت چرخشی ابزار 800 rpm)، اختلاط نامناسب باعث تشکیل نقص تونلی شد. از آنجایی که در سرعت چرخشی ابزار 800 rpm دمای منطقه‌ی اختلاط به اندازه‌ی کافی بالاست، لذا پایین بودن دما نمی‌تواند عامل ایجاد نقص تونلی در این نمونه باشد. بنابراین نقص تونلی در این نمونه‌ها به دلیل اختلاط نامناسب است، که این شرایط با افزایش سرعت جوشکاری تشدید شد.

در نتیجه سطوح 250، 500 و 750 rpm به عنوان سطوح مناسب برای پارامتر سرعت چرخشی ابزار انتخاب شدند. درجه آزادی کل در یک ماتریس ارتوگونال باید بیشتر از تعداد پارامترها و یا حداقل برابر با آن باشد. در این تحقیق، درجه آزادی کل برابر با 8 است. با توجه به طرح تاگوچی، ماتریس ارتوگونال L9 (34) به صورت آورده شده در جدول (3) انتخاب شد. با انتخاب ماتریس ارتوگونال L9 (34)، تعداد آزمایش‌ها به عدد 9 کاهش یافت. در حالی که اگر از روش فاکتوریل کامل استفاده شود، باید تعداد 81=34 آزمایش انجام شود. ورق های فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی بر اساس طرح تاگوچی و با توجه به ماتریس ارتوگونال L9 (34) تحت جوشکاری اصطکاکی– اغتشاشی قرار گرفتند. محل اتصال تمامی نمونه‌ها قبل از جوشکاری به وسیله محلول 5 درصد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.10.1]

جدول 3- ماتریس ارتوگونال L9، نتایج آزمایش ضربه و نسبت های S/N.

شماره آزمایش	پارامتر				چقرمگی (J)	نسبت S/N مربوطه
	سرعت چرخشی ابزار (rpm)	سرعت جوشکاری (mm/min)	زاویه ابزار با قطعه کار (°)	فشار اولیه (MPa)		
۱	۲۵۰	۳۰	۲	۳۰	۴۵	۳۳,۰۶۴۳
۲	۲۵۰	۶۰	۲/۵	۵۰	۴۹	۳۳,۸۰۳۹
۳	۲۵۰	۹۰	۳	۷۰	۵۱	۳۴,۱۵۱۴
۴	۵۰۰	۳۰	۲/۵	۷۰	۵۳	۳۴,۴۸۵۵
۵	۵۰۰	۶۰	۳	۳۰	۵۵	۳۴,۸۰۷۳
۶	۵۰۰	۹۰	۲	۵۰	۵۲	۳۴,۳۲۰۱
۷	۷۵۰	۳۰	۳	۵۰	۴۴	۳۲,۸۶۹۱
۸	۷۵۰	۶۰	۲	۷۰	۵۰	۳۳,۹۷۹۴
۹	۷۵۰	۹۰	۲/۵	۳۰	۴۳	۳۲,۶۶۹۴

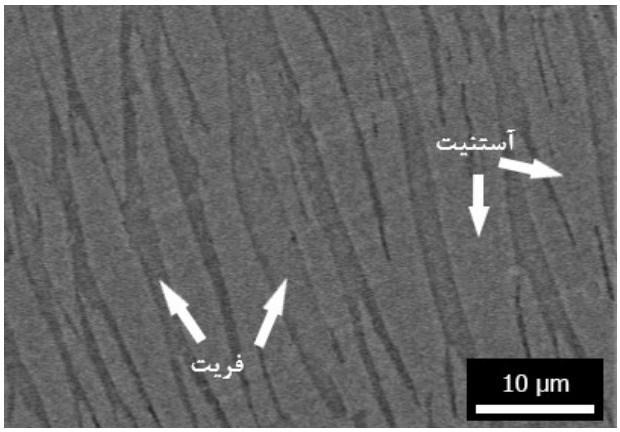
اسید نیتریک و 95 درصد آب مقطر، اکسیدزدایی و چربی زدایی شده و سپس توسط الکل تمیزکاری شدند.

آماده‌سازی اولیه نمونه‌ها به‌وسیله سنباده‌زنی با سنباده‌های 80 تا 2400 انجام گرفت و سپس نمونه‌ها با آب مقطر و الکل شسته شدند. برای بررسی ریزساختار، نمونه‌ها با پودر آلومینا 0/3 میکرون پولیش شده و سپس به صورت الکتروشیمیایی در محلول 10M KOH در پتانسیل 1/5 ولت به مدت 5 ثانیه اچ شدند. برای مشاهده ریزساختار و همچنین بررسی سطح شکست نمونه‌های حاصل از آزمایش ضربه از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) که مجهز به سیستم طیف‌نگاری به روش تفکیک انرژی بود، استفاده شد. به منظور بررسی چقرمگی از آزمایش ضربه شارپی با نمونه‌های با شیار v و بر مبنای استاندارد ASTM E23 استفاده شد [13]. آزمایش ضربه شارپی در دمای اتاق انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- ریزساختار اولیه، نتایج تاگوچی و مورفولوژی سطح شکست

شکل(1) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار اولیه فولاد زنگ نزن سوپردوفازی را نشان می‌دهد. ریز ساختار فولاد زنگ نزن سوپردوفازی شامل فازهای آستنیت و فریت است. جزایر روشن رنگ آستنیت در زمینه پیوسته فریت قرار گرفته‌اند.



شکل 1- ریزساختار فولاد زنگ نزن سوپردوفازی

به‌طورکلی سه نوع نسبت سیگنال به نویز (S/N) را می‌توان با توجه به مشخصه کیفی مورد نظر انتخاب کرد که عبارتند از: اندازه اسمی بهتر (NB)، هر چه بیشتر بهتر (HB) و هرچه کمتر بهتر (LB). بزرگ‌ترین نسبت S/N مربوط به بهترین عملکرد است. با توجه به اینکه هدف از این پژوهش رسیدن به حداکثر چقرمگی در ورق‌های جوش فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی است، لذا مشخصه کیفی هر چه بیشتر بهتر(HB) بر مبنای معادله (1) انتخاب شد [11و 14]:

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

که Y_i هر کدام از نتایج به‌دست آمده و n تعداد آزمایش‌ها است. در این تحقیق انرژی ضربه‌به دست آمده در آزمایش ضربه شارپی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.10.1]

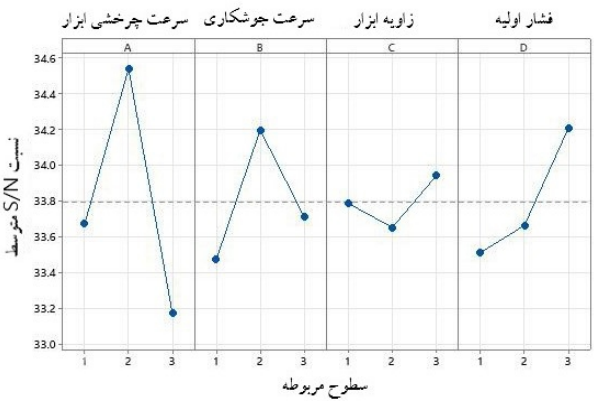
جدول 4- نسبت S/N متوسط برای هر پارامتر در هر سطح.

سطح	پارامتر			
	A	B	C	D
	سرعت چرخشی ابزار	سرعت جوشکاری	زاویه ابزار با قطعه کار	فشار اولیه
۱	۳۳/۶۷	۳۳/۴۷	۳۳/۷۹	۳۳/۵۱
۲	۳۴/۵۴	۳۴/۲۰	۳۳/۶۵	۳۳/۶۶
۳	۳۳/۱۷	۳۳/۷۱	۳۳/۹۴	۳۴/۲۱

به عنوان معیاری از چقرمگی در نظر گرفته شده است. نتایج چقرمگی و مقادیر S/N مربوط به هر آزمایش در جدول (3) آورده شده است. برای ارزیابی اثر هر پارامتر بر روی چقرمگی، نسبت S/N برای هر پارامتر باید محاسبه شود. این نسبت برای یک پارامتر از میانگین نسبت‌های S/N در سطوح مختلف به‌دست می‌آید که این مقادیر در هر سطح در جدول(4) آورده شده است.

پس از محاسبه نسبت‌های S/N متوسط برای پارامترهای متفاوت در سطوح مختلف، سطح بهینه برای هر پارامتر که دارای بزرگ‌ترین نسبت S/N در سطوح آن پارامتر است، تعیین می‌شود. همانطور که در جدول(4) مشاهده می‌شود، در هر ستون، سطح بهینه برای پارامتر مورد نظر به صورت عدد ضخیم و مورب نشان داده شده است. برای پارامتر سرعت چرخشی ابزار، سطح 2 دارای بیشترین نسبت S/N متوسط است، بنابراین سرعت چرخشی ابزار برابر 500 rpm به عنوان سطح بهینه برای این پارامتر شناخته شد. همچنین برای پارامتر سرعت جوشکاری، حداکثر نسبت S/N متوسط در سطح 2 به دست آمد، در نتیجه سرعت جوشکاری برابر 60 mm/min به عنوان سطح بهینه در این پارامتر است. در مورد پارامتر زاویه ابزار با قطعه کار، بیشترین مقدار S/N متوسط در سطح 3 به دست آمده است، لذا سطح بهینه برای پارامتر زاویه ابزار با قطعه کار 3 درجه بود. نهایتا در مورد پارامتر فشار اولیه، سطح 3 دارای بیشترین نسبت S/N متوسط بود، در نتیجه فشار اولیه 70 MPa به عنوان سطح بهینه برای این پارامتر معرفی شد. همان طور که در جدول(4) مشاهده می شود A2، B2، C3 و D3 به ترتیب نشان دهنده بزرگ‌ترین مقدار برای پارامترهای A، B، C و D هستند.

بنابراین، A2B2C3D3 بیانگر شرایط بهینه برای پارامترهای جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی هستند. شکل(2) تاثیر پارامترهای مختلف را بر نسبت S/N متوسط نشان می‌دهد. در مورد پارامترهای سرعت چرخشی و سرعت جوشکاری، نسبت S/N متوسط تا رسیدن به یک پیک در سرعت چرخشی 500 rpm و سرعت جوشکاری 60 mm/min افزایش یافته است. در واقع حداکثر چقرمگی، در سطح دوم از پارامترهای سرعت چرخشی ابزار و سرعت جوشکاری به‌دست آمد. با افزایش سرعت چرخشی ابزار از 500 rpm و سرعت جوشکاری از 60 mm/min، نسبت S/N متوسط کاهش یافته است. با کاهش نسبت سیگنال به اختلال متوسط، چقرمگی نیز کاهش خواهد یافت.



شکل 2- تاثیر پارامترهای مختلف فرایند بر نسبت S/N متوسط

در مورد پارامتر زاویه ابزار با قطعه کار، نسبت S/N متوسط تا رسیدن به یک کمینه در زاویه ابزار 2/5 درجه کاهش یافته است. در نتیجه حداقل چقرمگی، در سطح دوم از پارامتر زاویه ابزار یعنی 2/5 درجه به‌دست آمد. با افزایش زاویه ابزار به 3 درجه، نسبت S/N متوسط افزایش یافته و به بیشینه مقدار خود رسیده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.10.1]

جدول 5- دلتا (Δ) برای پارامترهای مختلف.

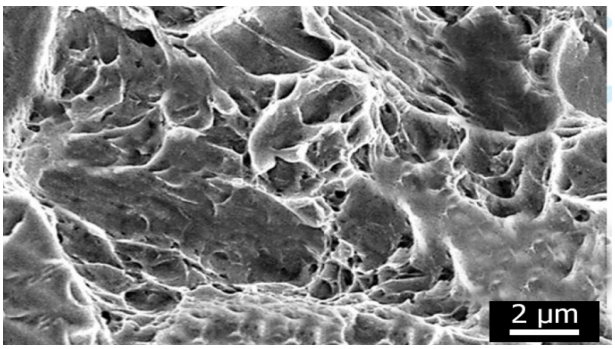
	پارامتر			
	سرعت چرخشی ابزار	سرعت جوشکاری	زاویه ابزار با قطعه کار	فشار اولیه
پارامتر دلتا (Δ)	۱/۳۷	۰/۷۲	۰/۲۹	۰/۶۹
رتبه	۱	۲	۴	۳

در واقع حداکثر چقرمگی، در سطح سوم از پارامتر زاویه ابزار یعنی 3 درجه به‌دست آمده است. پارامتر فشار اولیه رفتار متفاوتی نسبت به سایر پارامترها دارد. به طوری‌که با افزایش فشار اولیه از سطح 1 (30 MPa) به سطح2 (50 MPa) و در ادامه به سطح 3 (70 MPa)، نسبت S/N متوسطبه طور مستمر افزایش یافته است. به طوری‌که کمترین نسبت S/N متوسط در سطح 1 و بیشترین نسبت S/N متوسط در سطح 3 به دست آمده است. بنابراین حداکثر چقرمگی در سطح سوم از پارامتر فشار اولیه یعنی 70 MPa به دست آمد.

همچنین همانطور که در شکل(2) مشاهده می‌شود شیب خطوط بین سطوح مختلف برای پارامترهای سرعت چرخشی، سرعت جوشکاری و زاویه ابزار با قطعه کار یکسان نیست. بنابراین می‌توان گفت سطوح مختلف در این پارامترها، اثرات متفاوتی بر چقرمگی در قطعات جوش فولادهای زنگ نزن سوپردوفازی دارند. از طرفی مشاهده می شود که تغییر شیب خطوط در پارامتر سرعت چرخشی ابزار بسیار تند است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر سرعت چرخشی ابزار بیشترین تاثیر را بر چقرمگی در فرایند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی برای فولادهای زنگ نزن سوپردوفازی دارد.

پارامتر دلتا (Δ) در جدول(5) اختلاف بین حداکثر و حداقل میانگین نسبت‌های S/N در سطوح مختلف برای یک پارامتر است. هرچه دلتا برای یک پارامتر بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده مهم‌تر بودن پارامتر مورد نظر نسبت به سایر پارامترها است. در واقع دلتا تاثیر پارامترهای موثر بر فرایند را به صورت کیفی بیان می‌کند. با توجه به جدول(5)، بزرگ‌ترین دلتا (Δ=1/37) مربوط به پارامتر سرعت چرخشی ابزار است. لذا سرعت چرخشی ابزار مهمترین پارامتر بر چقرمگی قطعات جوش فولاد زنگ نزن سوپردوفازی است. سرعت جوشکاری با دلتای برابر 0/72 در رتبه دوم و فشار اولیه با دلتای برابر 0/69در رتبه سوم اهمیت قرار دارد. نهایتا زاویه ابزار با قطعه کار دارای کمترین دلتا (Δ=0/29) و در نتیجه در رتبه چهارم اهمیت قرار گرفت.

شکل‌های(3 و 4) به ترتیب تصاویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه‌های ضربه برای آزمایش‌های شماره 9 (دارای کمترین مقدار چقرمگی=J 43) و شماره 5 (دارای بیشترین مقدار چقرمگی =J 55) را نشان می‌دهد. در شکل(3) به وضوح مورفولوژی از نوع کلیویج که نشان دهنده شکست ترد است مشاهده می‌شود. به همین دلیل در آزمایش شماره 9 کمترین مقدار چقرمگی به دست آمده است. در شکل(4) ترکیبی از موفولوژی از نوع کلیویج همراه با دیمپل‌های با اندازه متوسط دیده می شود. این مورفولوژی سطح شکست بیانگر ترکیبی از شکست نرم و ترد است. وجود دیمپل‌ها در تصویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه ضربه در آزمایش شماره 5 دلیلی بر بالاتر بودن چقرمگی در این نمونه نسبت به نمونه آزمایش شماره 9 است.



شکل 3- تصویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه ضربه در آزمایش شماره 9

3-2- آنالیز واریانس (ANOVA)

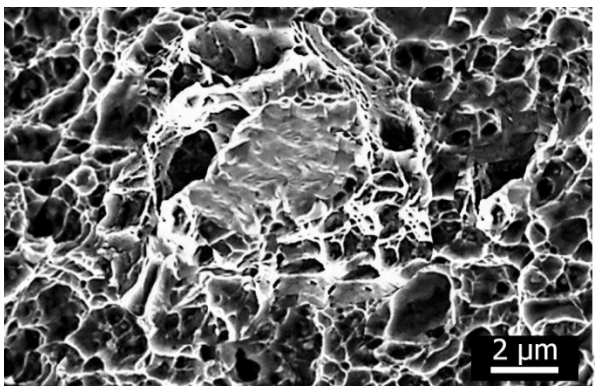
تحلیل SN تنها نشان می‌دهد کدام پارامتر اثر بیشتری بر فرایند دارد و تاثیر پارامتر را به صورت کیفی تحلیل می‌کند، اما آنالیز واریانس میزان این اثر را ارزیابی و به‌صورت کمی بیان می‌کند. در واقع ANOVA یک روش آماری برای تخمین کمی در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.10.1]

جدول 6- نتایج آنالیز واریانس.

پارامتر	DOF	واریانس	جمع مربعات	درصد تاثیر	رتبه
سرعت چرخشی ابزار	۲	۴۵/۴۴۴	۹۰/۸۸۹	۶۴	۱
سرعت جوشکاری	۲	۱۲/۴۴۳	۲۴/۸۸۷	۱۷	۲
زاویه ابزار با قطعه کار	۲	۲/۱۱۱	۴/۲۲۲	۳	۴
فشار اولیه	۲	۱۱/۴۴۵	۲۲/۸۹۰	۱۶	۳
خطا	۰	۰	۰	۰	
مجموع	۸		۱۴۲/۸۸۸	۱۰۰	

نسبت توزیع هر پارامتر است [11و 15]. آنالیز واریانس بر اساس مراحل چهارگانه و معادلات اشاره شده در منابع [11و 12] انجام شد. نتایج آنالیز واریانس در جدول(6) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، سرعت چرخشی ابزار با درصد تاثیر برابر 64% به عنوان موثرترین پارامتر در فرایند FSW بر چقرمگی قطعات جوش فولادهای زنگ نزن سوپردوفازی شناخته شد. سرعت جوشکاری با در صد تاثیر 17% دومین پارامتر موثر در فرایند FSW می‌باشد. پارامتر فشار اولیه با درصد تاثیر 16% و زاویه ابزار با قطعه کار با درصد تاثیر 3% به عنوان رتبه‌های بعدی موثر در فرایند FSW شناخته شدند.



شکل 4- تصویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه ضربه در آزمایش شماره 5

3-3- آزمایش تایید

آزمایش تایید با توجه به سطوح بهینه مشخص شده انجام و سپس با مقادیر پیش بینی شده مقایسه شد. همچنین نسبت S/N پیش بینی شده [(S/N)Predicted] که از سطوح بهینه پارامترهای FSW استفاده می‌کند بر اساس معادله (2) محاسبه شد [11و 16]:

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

که $(S/N)_m$ میانگین کل نسبت S/N، $(S/N)_i$ میانگین نسبت S/N در سطح بهینه و p تعداد پارامترهای موثر در فرایند FSW است. نهایتا پس از تعیین نسبت S/N پیش بینی شده، چقرمگی پیش‌بینی شده با استفاده از معادله (1) به‌دست آمد.

جدول (7) چقرمگی پیش بینی شده و چقرمگی در آزمایش تایید را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود چقرمگی برابر J 61 در آزمایش تایید به دست آمد. از طرفی با توجه به معادلات (1) و (2)، چقرمگی پیش بینی شده برابر J 58 حاصل شد که با تقریب خوبی نزدیک به چقرمگی در آزمایش تایید است. چقرمگی به دست آمده در آزمایش تایید که در شرایط بهینه انجام شده است بالاترین مقدار چقرمگی به دست آمده در این تحقیق است.

شکل(5) تصویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه ضربه در آزمایش تایید و در شرایط بهینه را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود مورفولوژی در حالت بهینه همراه با دیمپل‌های (Dimples) ریز و عمیق به مقدار زیاد است. این مورفولوژی نشان دهنده شکست نرم است و به همین دلیل بالاترین مقدار چقرمگی در شرایط بهینه (چقرمگی برابر J 61)

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

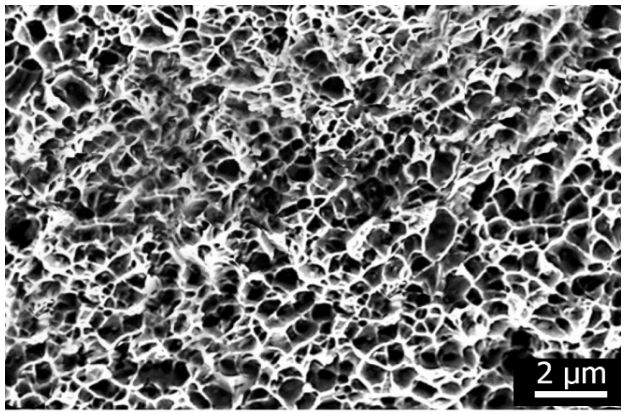
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.10.1]

جدول 7- نتایج چقرمگی در آزمایش تایید و پیش‌بینی شده (در سطوح بهینه $A_2B_2C_3D_3$).

	آزمایش شده	پیش‌بینی شده
S/N مربوطه	۳۵/۷۰۶۵	۳۵/۲۶۸۵
چقرمگی (J)	۶۱	۵۸

در این تحقیق به دست آمده است.

با توجه به نتایج فوق می توان نتیجه گرفت که روش تاگوچی یک روش مناسب جهت طراحی آزمایش در فرایند جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی در فولادهای زنگ نزن سوپردوفازی است به طوری که تحت شرایط بهینه می توان به حداکثر چقرمگی دست یافت.



شکل 5- تصویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه ضربه در آزمایش تایید

4- نتیجه گیری

در این تحقیق از روش تاگوچی جهت بهینه سازی پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی جهت دستیابی به حداکثر چقرمگی در قطعات جوش فولاد زنگ نزن سوپردوفازی استفاده شد. چهار پارامتر شامل سرعت چرخشی ابزار، سرعت جوشکاری، فشار اولیه و زاویه ابزار با قطعه کار در سه سطح مختلف انتخاب شدند. با توجه به تعداد پارامترها و سطوح در نظر گرفته شده، ماتریس ارتوگونال L9 که شامل نه آزمایش بود انتخاب شد. نتایج زیر از این تحقیق به دست‌آمد:

- نتایج تاگوچی و آنالیز واریانس نشان داد که پارامتر سرعت چرخشی ابزار با درصد تاثیر 64% به عنوان مهم‌ترین پارامتر در فرایند FSW در قطعات جوش فولاد زنگ نزن سوپردوفازی است. همچنین پارامتر سرعت جوشکاری با درصد تاثیر 17% در رتبه دوم، پارامتر فشار اولیه با درصد تاثیر 16% در رتبه سوم و زاویه ابزار با قطعه کار با درصد تاثیر 3% در رتبه بعدی قرار گرفتند.

- با تحلیل نتایج شرایط بهینه برای دستیابی به بالاترین چقرمگی در این قطعات جوش بدین صورت حاصل شد: سرعت چرخشی ابزار (500 rpm)، سرعت جوشکاری (60 mm/min)، فشار اولیه (70 MPa) و زاویه ابزار با قطعه کار (3 درجه).

- بررسی سطح مقطع شکست نمونه‌ها در آزمایش ضربه نشان داد نمونه‌ای که کمترین چقرمگی را داشت دارای مورفولوژی از نوع کلیویج و در نتیجه شکست از نوع ترد بود، در حالی‌که نمونه بهینه که بالاترین چقرمگی در این تحقیق را داشت، دارای دیمپل‌های ریز و عمیق به مقدار زیاد بود. این مورفولوژی نوید بخش شکست نرم و دلیلی بر دستیابی به بالاترین چقرمگی (61 J) در این تحقیق بود.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه سمنان کمال تشکر و قدردانی را دارم.

منابع

1- Yang, C., Jeyaprakash, N., Hsu, Y., "Applicability of non-destructive laser ultrasound and non-linear ultrasonic technique for evaluation of thermally aged CF8 duplex stainless steel", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 193, p. 104451, 2021.

2- اهل سرمدی، م.، شمعانیان، م.، عطاپور، م.، ادریس، ح. و بهجت، ا.، "بررسی رفتار خوردگی فلز پایه و مقاطع جوش ذوبی فولاد سوپردوفازی UNS S32750"، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال سوم، شماره 1، ص ص 21-28، 1396.

3- صفری، م.و دیلمی‌عضدی، ح.، "بررسی تجربی شکل‌پذیری

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.10.1]

ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده بسیار نازک فولاد IF با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی"، **نشریه** علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال 6، شماره 2، ص ص53-63، 1399.

4- Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering R*, Vol. 50, pp. 1–78, 2005.

5- یوسفیه، م. و جباری، ا.، "مدل‌سازی دما در جوشکاری اصطکاکی- اختلاطی فولاد زنگ نزن دوفازی به‌وسیله روش‌های لاگرانژ چند متغیره، برونیابی خطی و رگرسیون خطی چندگانه"، **نشریه** علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال 6، شماره 2، ص ص 65-76، 1399.

6- Pitchipoo, P., et al., "Friction stir welding parameter optimization using novel multi objective dragonfly algorithm", *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 4, Issue 4, pp. 460-467, 2021.

7- Babu, S., Elangovan, K., Balasubramanian, V., Balasubramanian, M. "Optimizing friction stir welding parameters to maximize tensile strength of AA2219 aluminum alloy joints", *Metals and Materials International*, Vol. 15, pp. 321–330, 2009.

8- Zhang, Z., Xiao, B.L., Ma, Z.Y. "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 2219Al–T6 joints", *Journal of Materials Science*, Vol. 47, pp. 4075–4086, 2012.

9- Yousefieh, M., Tamizifar, M., Boutorabi, S.M.A. *et al.*, "An investigation on the microstructure, texture and mechanical properties of an optimized friction stir-welded ultrafine-grained Al–0.2 wt% Sc alloy deformed by accumulative roll bonding", *Journal of Materials Science*, Vol. 53, pp. 4623–4634, 2018.

10- صفری، م.، مستعان، ح. و بختیاری، آ.، "بهینه‌سازی متغیرهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با هدف دستیابی به استحکام شکست بیشینه"، *نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران*، سال 2، شماره 1، ص ص 32-48، 1395.

11- Yousefieh, M., Shamanian, M., Saatchi, A., "Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 782-788, 2011.

12- Yousefieh, M., Tamizifar, M., Boutorabi, S.M.A. et al., "Taguchi Optimization on the Initial Thickness and Pre-aging of Nano-/Ultrafine-Grained Al-0.2 wt.%Sc Alloy Produced by ARB", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 25, pp. 4239–4248, 2016.

13- Annual Book of ASTM Standards, Designation E-23-94b, p 137, 1995.

14- Beg, S., "Taguchi and Plackett–Burman Designs in Pharmaceutical Product Development", In: Beg S. (eds) Design of Experiments for Pharmaceutical Product Development. Springer, Singapore, 2021.

15- Palani, P.K., Chithambaram, K., Rajeswari, B., "Optimization of Particle Size of Teak Wood Saw Powder Using Taguchi Method" In: Mohan S., Shankar S., Rajeshkumar G. (eds) Materials, Design, and Manufacturing for Sustainable Environment. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Singapore, 2021.

16- Bhaskar Mutyalu, K.,Venkatrami Reddy, V.,Uma Maheswara Reddy, S.,Lakshmi Prasad, K., "Effect of machining parameters on cutting forces during turning of EN 08, EN 36 & mild steel on high speed lathe by using Taguchi orthogonal array", *Materials Today: Proceedings*, In Press, Corrected Proof, Available online 12 July 2021.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.10.1]