



مطالعه ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصالات لیزری غیرمشابه بین فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ و فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴ با هدف بهینه‌سازی نیروی شکست اتصالات

رضا مرادی^۱، فردین نعمت زاده^۱، حسین مستعان^۱، مهدی صفری^۲ و محمد روشنائی^۱

^۱ گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۵

چکیده

به منظور اتصال غیرمشابه میان ورق‌های فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ و فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴ از فرایند جوشکاری لیزر استفاده گردید. در ابتدا به مطالعات ریزساختاری، تحولات فازی و تغییرات خواص مکانیکی در اثر جوشکاری پرداخته شد. سپس، بهینه‌سازی پارامترهای فرایند جوشکاری لیزر با هدف بهبود خواص مکانیکی و با استفاده از روش‌های آماری انجام شد؛ بنابراین، از روش طراحی آزمایش رویه سطح با تکنیک مرکب مرکزی جهت بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر فرایند شامل، توان لیزر، سرعت جوشکاری و عمق فوکوس استفاده شد و پارامترهای بهینه با در نظر گرفتن پاسخی مانند نیروی شکست اتصالات، تعیین شدند. از آزمایش کشش تک‌محوره برای تعیین استحکام اتصالات و از میکروسکوپ نوری برای مشاهدات ریزساختاری و تغییر و تحولات فازی بهره گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش سرعت جوشکاری و افزایش توان لیزر میزان نیروی شکست اتصالات، حداکثر تا ۳۵۸۷ نیوتن افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج تغییرات ریزساختاری، رشد دانه‌ها و وجود کاربیدهای پراکنده در منطقه جوش مشاهده گردید؛ همچنین تأثیر حرارت ورودی ناشی از تغییر پارامترهای جوشکاری لیزر، روی پروفیل ریزسختی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج، حداکثر میزان سختی در منطقه جوش نمونه با حرارت ورودی کم به دست آمد که میزان آن در حدود ۳۳۲ ویکرز اندازه‌گیری شد.

کلمات کلیدی: جوشکاری لیزر ضربانی؛ فولادهای زنگ‌نزن فریتی؛ فولادهای زنگ‌نزن دوفازی؛ بهینه‌سازی.

An Investigation on the Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Laser Welded Joint between AISI 430 Ferritic Stainless Steel and AISI 2304 Duplex Stainless Steel in order to Optimize the Fracture Force of Joints

R. Moradi¹, F. Nematzadeh¹, H. Mostaan¹, M. Safari², M. Roshanaei¹

¹ Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Abstract

Dissimilar joint between AISI 430 ferritic stainless steel and AISI 2304 duplex stainless steel was made by laser welding process. At first, microstructural and phase evolutions and also changes in mechanical properties due to the welding process were investigated. Hence, mechanical properties of weld joints were optimized using statistical methods. For this purpose, response surface methodology based on central composite design was used in order to find the optimum values of laser power, welding speed and defocusing distance and to obtain the maximum value of fracture force of joints. Uniaxial tensile test and optical microscopy were used to study the mechanical properties and structural features of weld joints, respectively. It was found that the fracture force of weld joints increases by decrease in welding speed and laser power and the maximum fracture force reached to 3587 N. Regarding microstructural evolutions studies, grain growth and presence of dispersed carbides in the fusion zone were observed. Finally, the effect of heat input on the hardness profile was evaluated and discussed. According to the result, the maximum hardness was obtained in the weld metal of the sample with low heat input and it was measured at about 332 vickers.

Keywords: Pulsed Laser Welding; Ferritic Stainless Steel; Duplex Stainless Steel; Optimization.

۱- مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن دوفازی به عنوان جایگزین مناسب برای فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و آلیاژهای پایه نیکل به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. فولادهای زنگ‌نزن دوفازی در کاربردهایی استفاده می‌شوند که نیاز به استحکام بالا و مقاومت به خوردگی عالی باشد. این ترکیب مناسب خواص، سبب افزایش کاربرد این فولادها در صنایع نفت و گاز، صنایع شیمیایی و صنایع هسته‌ای شده است [۲]. این فلزات تقریباً به صورت کاملاً فریتی منجمد می‌شوند و ریزساختار آستنیتی- فریتی نهایی محصول استحاله حالت- جامد آستنیت است. فاز فریت موجب افزایش استحکام و بهبود مقاومت در برابر خوردگی تنشی در محیط حاوی یون- های کلر می‌شود، اگرچه موجب کاهش چقرمگی در دمای پایین می‌شود [۳ و ۴]. برای دستیابی به ریزساختار مطلوب به هنگام جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن دوفازی حرارت ورودی جوشکاری باید به دقت کنترل گردد. حرارت ورودی کم موجب درصد بالای فریت در ریزساختار شده و همچنین موجبات تشکیل نیتريد کروم را فراهم می‌آورد. از سوی دیگر حرارت ورودی بالا، موجب تشکیل فازهای مضر سیگما و چی می‌شود [۵ و ۶].

از طرف دیگر فولادهای زنگ‌نزن فریتی در مقایسه با فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، دارای هدایت حرارتی بالاتر، مقاومت به خوردگی تنشی بیشتر هستند و قیمت پایین‌تری نسبت به سایر فولادهای زنگ‌نزن دارند. ریزساختار فولاد زنگ‌نزن فریتی ممکن است، به طور کامل فریت یا شامل مخلوط فریت و مارتنزیت در مرزخانه‌های فریت باشد. ریزساختار کاملاً فریتی را می‌توان با جلوگیری از تشکیل آستنیت در دمای بالا به دست آورد؛ همچنین مارتنزیت موجود در مرزخانه می‌تواند توسط استحاله آستنیت حالت- جامد یا در آخرین مرحله از انجماد تشکیل شود که استحاله حالت جامد آستنیت در فولاد ۴۳۰ رایج است. یکی از مشکلات عمده در کاربرد صنعتی فولادهای زنگ‌نزن فریتی کاهش چقرمگی و انعطاف‌پذیری به دلیل حرارت ورودی بالا و رشد دانه‌ها در منطقه جوش است که دلیل آن حرارت ورودی بالا جوشکاری و رشد دانه‌هاست؛ همچنین امکان تشکیل برخی از فازهای بین‌فلزی از جمله، فاز سیگما در صورت قرارگیری فولاد زنگ‌نزن برای مدت‌زمان معین در محدوده دمایی

۶۵۰-۸۵۰ °C وجود دارد. با استفاده از فرایندهایی که شامل حرارت ورودی کمی هستند (نظیر جوشکاری پرتو لیزر) می‌توان رشد دانه‌ها و تشکیل فاز سیگما را کنترل کرد [۷ و ۸]. جوشکاری پرتو لیزر را می‌توان برای اتصال‌دهی اغلب فلزات به خودشان و فلزات غیرهمجنس به کار برد که از نظر متالورژیکی سازگار هستند. اتصالات غیرهمجنس فولادهای زنگ‌نزن به خصوص فولادهای زنگ‌نزن فریتی و آستنیتی به صورت وسیع در صنایع مختلفی شامل، پتروشیمی، مبدل‌های حرارتی، مخازن تحت فشار و صنایع هسته‌ای به کار برده می‌شود [۹]. عموماً جوشکاری مواد غیرمشابه به سبب تفاوت در خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی فلزات پایه چالش‌های بیشتری نسبت به جوشکاری مشابه دارد [۱۰]. با توجه به هزینه‌های بالای جوشکاری لیزر Nd:YAG، بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری از اهمیت بالایی برخوردار بوده و معمولاً کیفیت یک اتصال مانند خواص مکانیکی به طور مستقیم تحت تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر است. پاراباکاران و همکارانش [۱۱]، پارامترهای فرایند جوشکاری لیزر بین اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ و فولاد کم‌کربن ۱۰۱۸ را با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی بهینه‌سازی کردند. پس از بررسی نتایج، به دلیل تشکیل فاز مارتنزیت بهترین مقاومت کششی در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۹۶۰ °C به دست آمد. در تحقیق مشابهی که توسط ناگاجو و همکارانش [۱۲] انجام شد، ویژگی‌های هندسه جوش مانند عمق نفوذ، عرض جوش و استحکام کششی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ و فولاد کم‌کربن با استفاده از روش طراحی آزمایش فاکتوریل کامل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، افزایش سرعت جوشکاری، موجب کاهش حرارت ورودی گردید و عرض مهره جوش کاهش پیدا کرد. در پژوهشی دیگر، ریسگن و همکارانش [۱۳]، با استفاده از روش رویه پاسخ، تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر را روی حرارت ورودی، هندسه جوش، استحکام کششی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که در اتصال غیرمشابه میان فولاد DP ۶۰۰ و TRIP ۷۰۰، سرعت جوشکاری در مقایسه با سایر پارامترهای فرایند بیشترین تأثیر را در طول فرایند جوشکاری دارد. عمادی و همکارانش [۱۴]، ریزساختار و اتصال غیرمشابه اینکونل ۶۲۵ به فولاد زنگ‌نزن ۴۳۰ را با استفاده از

۲۳۰۴ و فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ به کمک خواص مکانیکی و متالورژیکی آنها مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌های انجام آزمایش

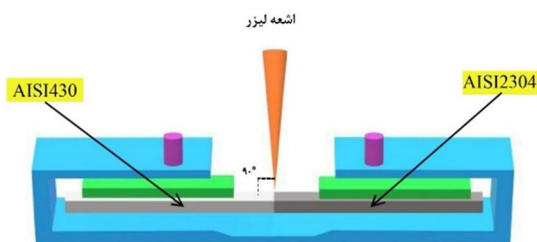
۲-۱- مواد و جوشکاری

در این مطالعه از ورق‌های فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ و فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴ با ابعاد $(80 \times 40 \times 1 \text{ mm}^3)$ به‌عنوان فلزات پایه استفاده گردید که ترکیب شیمیایی مواد پایه در جدول ۱ ارائه شده است. طرح اتصال به‌صورت لب‌به‌لب، مطابق شکل ۱ انجام گردید. به‌منظور اتصال از فرایند جوشکاری لیزر با منبع Nd:YAG با حداکثر توان متوسط ۲۸۰ وات استفاده شد. قبل از جوشکاری نمونه‌ها جهت حذف هرگونه آلودگی سطحی و لایه‌های اکسیدی، محل اتصال با استفاده از برس سیمی و استون چربی‌زدایی شد. در طول فرایند جوشکاری برای محافظت از حوضچه مذاب، گاز آرگون خالص مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۲ شرایط فرایند جوشکاری لیزر را نشان می‌دهد.

۲-۲- بررسی‌های ریزساختاری و آزمایش‌های تعیین

خواص مکانیکی

نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از دستگاه برش وایرکات از سطح مقطع عرضی خط جوش برش داده شدند. جهت



شکل ۱- شماتیک طرح اتصال مورد استفاده در فرایند جوشکاری پرتو لیزر

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلزات پایه بر اساس درصد وزنی عناصر (wt.%)

فلز پایه	C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P	Si	S	Fe
AISI 2304	۰/۰۳	۲۲	۰/۰۵	۲/۵	۰/۰۵	۳	۰/۰۴	۱	۰/۰۳	۷۱/۳
AISI 430	۰/۱۲	۱۷	-	۱	-	-	۰/۰۴	۱	۰/۰۳	۸۰/۸۱

لیزر Nd:YAG پالسی مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، سختی فلز جوش در نمونه‌ها از سمت فولاد زنگ‌نزن فریتی به سمت اینکونل ۶۲۵ افزایش یافت. علت آن می‌تواند ناشی از کاهش اندازه دانه و کاهش اندازه و نحوه توزیع کاربیدها در فلز جوش باشد که این پدیده ناشی از سرعت بالای انجماد در جوشکاری لیزر است؛ همچنین پاک‌منش و همکارانش [۱۵]، تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر پالسی Nd:YAG بدون فلز پرکننده را بر اتصال لبه روی هم فویل فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶، جهت کاربرد در پیل سوختی پلیمری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در توان و زمان روشنی پالس پایین به علت وجود عیب نفوذ ناقص، شکست از ریشه جوش اتفاق افتاد و استحکام برشی جوش ۴۹۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

بنا بر مطالعات و جستجوهای صورت‌گرفته توسط نویسندگان این مقاله مشخص گردید که مطالعات جامعی در رابطه با جوشکاری غیرمشابه فولادهای زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ و دوفازی ۲۳۰۴ توسط پرتوهای پرتوهای انتشار نیافته است؛ همچنین در منابع در رابطه با بهینه‌سازی اتصالات حاصل از پرتو لیزر روی این دسته از آلیاژها، مطالب گسترده‌ای وجود ندارد؛ لذا هدف از انجام این پژوهش، وجود خلا محسوس در بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر بر نیروی شکست اتصالات است. نوآوری این پژوهش، بررسی امکان اتصال موفقیت‌آمیز لیزری مناسب بین فولادهای زنگ‌نزن فریتی و دوفازی و دستیابی به پارامترهای بهینه فرایند با استفاده از مدل‌سازی ریاضی است. بر این اساس، در این پژوهش، پارامترهای مؤثر جوشکاری پرتو لیزر شامل، عمق فوکوس، سرعت جوشکاری و توان لیزر توسط روش طراحی آزمایش رویه سطح و به کمک نرم‌افزار Minitab بهینه‌سازی شدند. نیروی شکست به‌عنوان پاسخ متغیرهای جوشکاری انتخاب گردید و کیفیت اتصال غیرمشابه بین فولاد زنگ‌نزن دوفازی

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- ریزساختار

شکل (۳-الف) درشت ساختار نواحی مختلف اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ و فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴ را نشان می‌دهد. تصویر (۳-ب) ریزساختار فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ را نشان می‌دهد که شامل دانه‌های هم‌محور فریت همراه با رسوبات تیره کاربیدکروم در مرزدهانه‌ها است. تشکیل این رسوبات ناشی از عملیات آنیل قبلی است که علاوه بر آن دانه‌ها را به شکل هم‌محور درآورده است. همان‌طور که در تصویر (۳-ج) مشاهده می‌شود، ریزساختار فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴ حاوی فاز آستنیت (فاز روشن) در زمینه فریت (فاز تیره)، با نسبت تقریباً مساوی است. با توجه به اینکه این فولاد در شرایط کار شده استفاده گردیده است، کشیدگی دانه‌ها در جهت نورد قابل رؤیت است. در تصاویر (۴-الف) و (۴-د) ملاحظه می‌شود که در ناحیه متأثر از حرارت فولاد دوفازی، با افزایش حرارت ورودی ناشی از جوشکاری رشد دانه رخ داده است. در ناحیه متأثر از حرارت فولاد دوفازی میزان فاز فریت به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر از فاز آستنیت است. دلیل این امر این است که در ناحیه متأثر از حرارت، دما تا منطقه کاملاً فریتی بالا می‌رود و پس از سرد شدن حجم عمده ریزساختار به‌صورت فریتی تشکیل می‌شود. البته فاز آستنیت می‌تواند در مکان‌های مناسب مانند مرزدهانه‌های فریت جوانه‌زنی کند؛ چون تبدیل فاز فریت به آستنیت یک استحاله نفوذی و مستلزم گذشت زمان است، بنابراین استحاله به‌طور کامل انجام نمی‌شود.

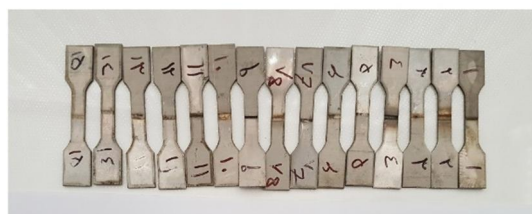
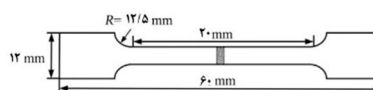
تصویر (۴-ب) مشخص می‌کند که منطقه جوش اتصال فلزات غیرمشابه فریتی و دوفازی شامل، دانه‌های درشت فاز فریت همراه با آستنیت سوزنی شکل در مرزدهانه‌های فریت است. به‌علاوه رسوبات ریز و پراکنده کاربیدکروم در منطقه جوش مشاهده گردید. بنابر آنچه در مورد انجماد فولادهای زنگ‌نزن دوفازی گزارش شده است و بر اساس مشاهدات صورت گرفته در این پژوهش، انجماد فلز جوش در این اتصال با شروع جوانه‌زنی فاز فریت آغاز شده است. بسته به ترکیب شیمیایی و سرعت سرد شدن، فاز فریت تا پایان انجماد نیز پایدار بوده و در دماهای به‌اندازه کافی بالا نیز به‌صورت پایدار باقی خواهد ماند؛ اما پس از گذر از دمای انحلال فریت، فاز فریت شروع به تجزیه کرده و استحاله تشکیل آستنیت آغاز

بررسی‌های ریزساختاری، سطح مقطع نمونه‌ها تا سنبله شماره ۲۵۰۰ سنبله‌زنی شده و سپس با استفاده از خمیر الماس با مش ۱ میکرون پولیش نهایی انجام گردید. برای حکاکی نمونه فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ از محلول ویلا^۱ طبق استاندارد (ASTM E 407-2015) استفاده شد و همچنین فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴ توسط محلول ۲۰٪ KOH در ولتاژ ۳ ولت و به مدت ۳۰ ثانیه تحت اچ الکترولیتی قرار گرفت. نمونه‌ها سپس توسط میکروسکوپ نوری، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند.

به علاوه آزمون ریزسختی‌سنجی (ویکرز^۲) جهت بررسی تغییرات سختی از منطقه جوش تا فلزات پایه با نیروی ۲۰۰ گرم و زمان اعمال نیروی ۸ ثانیه انجام شد. آزمون کشش نیز با آهنگ ۵ میلی‌متر بر دقیقه و در دمای محیط انجام گردید. هندسه نمونه کشش، در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- شرایط فرایند جوشکاری لیزر

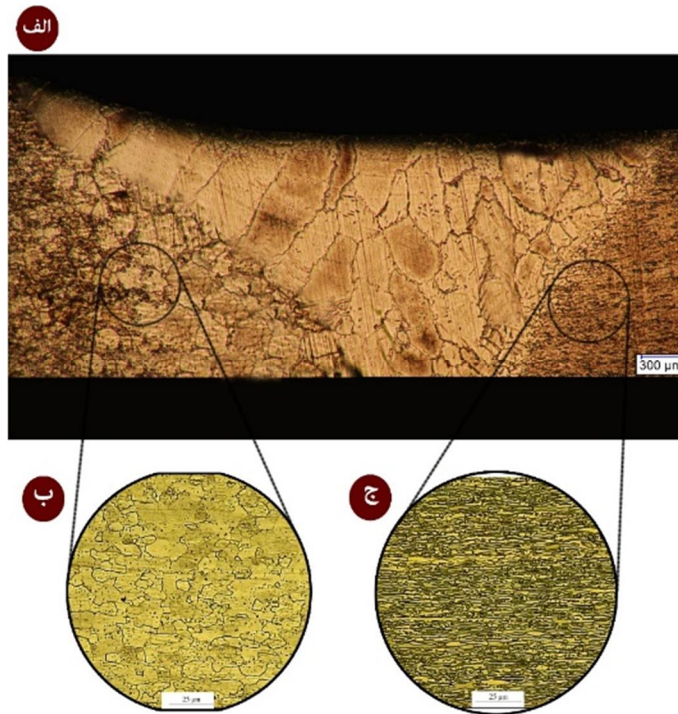
شماره	پارامتر	مقادیر پارامتر
۱	نوع لیزر	Nd:YAG
۲	طول موج	۱۰۶۴ nm
۳	فرکانس	۱۰ Hz
۴	نرخ دمش گاز	۱۰ L/min



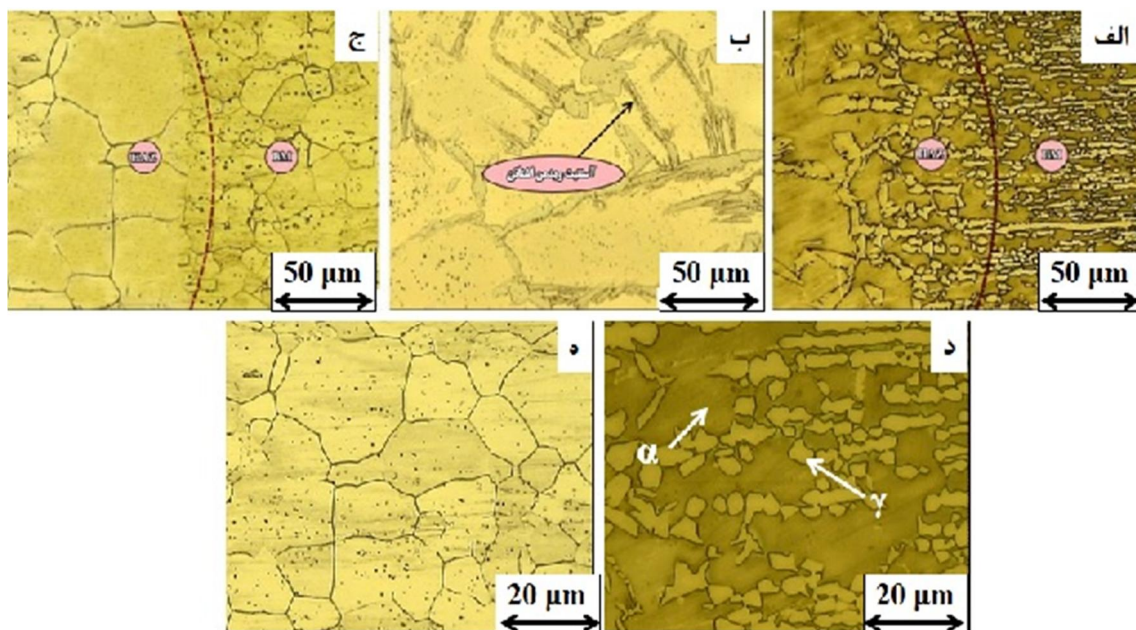
شکل ۲- هندسه نمونه کشش

^۱ Vilella

^۲ Vickers



شکل ۳- الف) تصویر میکروسکوپ نوری از درشت‌ساختار اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ و فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴، ب) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ و ج) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴



شکل ۴- الف) ناحیه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴، ب) ریزساختار فلز جوش، ج) ناحیه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ (د) تصویر با بزرگنمایی بالاتر از ناحیه HAZ فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴ و ه) تصویر با بزرگنمایی بالاتر از ناحیه HAZ فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰

آستنیت در دماهای پایین منجر به تشکیل این فاز با مورفولوژی ویدمن اشتاتن می‌شود. در تصویر (۴-ج) با بررسی میکروسکوپی مقطع عرضی جوش در طرف فولاد زنگ‌نزن فریتی مشخص می‌شود که اندازه دانه‌ها در ناحیه متأثر از حرارت به‌طور قابل‌توجهی بزرگ‌تر از فلز پایه است؛ بنابراین افزایش حرارت در این ناحیه منجر به رشد دانه‌ها می‌شود؛ همچنین با توجه به درشت‌ساختار، دانه‌ها در سمت فولاد دوفازی به‌صورت هم‌محور هستند، ولی در سمت فولاد زنگ‌نزن فریتی ستونی هستند. این تفاوت ساختار دانه‌ها احتمالاً به دلیل هدایت حرارتی متفاوت مواد است. هنگامی که هدایت فولاد زنگ‌نزن فریتی بالاتر است، نرخ شار حرارتی در جهت عمود بر جوش حداکثر خواهد بود، بنابراین دانه‌ها تمایل به رشد در این جهت داشته و باعث ایجاد دانه‌های ستونی می‌شوند [۱۶].

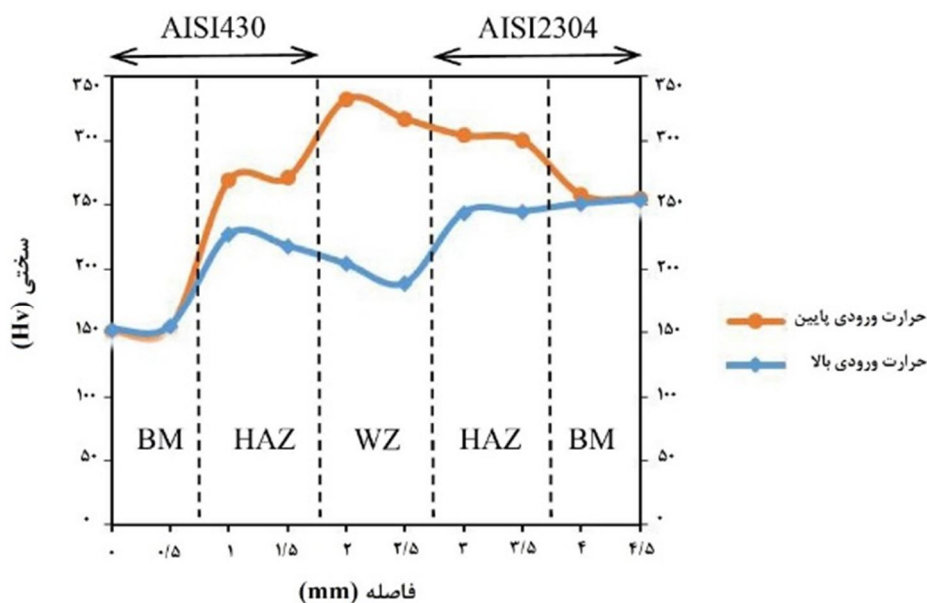
۲-۳- تغییرات سختی

برای بررسی رفتار سختی اتصال مورد مطالعه، از آزمایش ریزسختی ویکرز در سراسر سطح مقطع عرضی جوش در راستای طولی از یک فلز پایه به سمت فلز پایه دیگر استفاده شد. توزیع سختی در اتصالات با حرارت ورودی متفاوت در شکل ۵ نشان داده شده است. در نمونه با حرارت ورودی

می‌شود. این استحاله همان استحاله‌ای است که تعادل نهایی بین فریت و آستنیت و همچنین نحوه توزیع آستنیت را در فلز جوش تعیین می‌کند. ترتیب استحاله در فلز جوش مورد- مطالعه به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

مذاب ← فریت + مذاب ← فریت ← فریت + آستنیت

فلز جوش در نهایت به‌صورت دوفازی و مخلوطی از فریت به‌علاوه آستنیت است. از آنجا که انجماد با تشکیل فاز فریت آغاز می‌شود و آستنیت در انتهای انجماد حضور ندارد، فریت در حالت جامد و در دماهای به‌اندازه کافی بالا پایدار است. با شروع استحاله فریت به آستنیت در زیر دمای انحلال فریت، آستنیت در ابتدا در امتداد مرزدانه‌های فریت تشکیل می‌شود. این استحاله با فرایند جوانه‌زنی و رشد همراه بوده و منجر به پوشش کامل مرزدانه‌های فریت با فاز آستنیت می‌شود. مقدار زیادی از فاز آستنیت در حال تشکیل به‌صورت مورفولوژی ویدمن اشتاتن بوده و از مرزدانه‌های فریت به سمت درون دانه‌ها رشد خواهد نمود. علت تشکیل چنین مورفولوژی از فاز آستنیت این است که نسبت کروم معادل به نیکل معادل در فلز جوش اتصال غیرمشابه فولاد ۴۳۰ به فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴، به سبب درصد بالای کروم در فولاد ۴۳۰ افزایش می‌یابد. در اثر افزایش این نسبت (کروم معادل به نیکل معادل)، دمای تجزیه فریت به آستنیت کاهش یافته و لذا آستنیت در دمای پایین‌تری تشکیل می‌شود.



شکل ۵- پروفیل ریزسختی مقطع نمونه جوش با حرارت ورودی بالا و حرارت ورودی پایین

۳-۴- ماتریس طراحی آزمایش و تعیین مدل ریاضی طراحی آزمایش مرکب مرکزی با استفاده از ۳ فاکتور و ۳ سطح انجام شد. به منظور پیش‌بینی رابطه میان متغیرهای جوشکاری لیزر و نیروی شکست هر یک از اتصالات، از یک مدل ریاضی توسعه‌یافته بر پایه رگرسیون بهره گرفته می‌شود و خواهیم داشت:

$$F_{LBW} = f(P, S, F) \quad (1)$$

معادله رگرسیون مرتبه دوم استفاده شده برای پیش‌بینی مقادیر نیروی شکست اتصالات برابر خواهد بود با:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \sum_{j=2}^k b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

در معادله (۲)، Y به‌عنوان پاسخ مسئله است؛ همچنین x: مجموعه متغیرهای مستقل، b: مجموعه‌ای از ضرایب رگرسیون و ε نشان‌دهنده خطای مشاهده شده است [۱۹]. ماتریس طراحی آزمایش، شامل مقادیر متغیرها و نیروی شکست اتصالات که مربوط به هر شرایط جوشکاری است، در جدول ۴ نشان داده شده است.

به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزری از آنالیز واریانس استفاده شد. اگر مقدار P در آنالیز واریانس برای یک متغیر کمتر از ۵ درصد باشد، آن متغیر به‌عنوان یک متغیر تأثیرگذار در نیروی شکست جوش محسوب می‌شود [۲۰]. نتایج آنالیز واریانس برای نیروی شکست اتصالات در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، پس از تعیین ضرایب با اهمیت و حذف ضرایب بی‌اهمیت،

حداکثر با نزدیک شدن به منطقه جوش اندازه دانه‌ها افزایش یافته و باعث کاهش سختی در این مناطق می‌شود. حداکثر میزان سختی در منطقه جوش نمونه با حرارت ورودی کم ۳۳۲ ویکرز اندازه‌گیری شد. اگرچه در این حالت اندازه دانه‌های منطقه جوش بزرگ‌تر از فلزات پایه است، ولی سختی آن به دلیل وجود کاربیدهای ریز پراکنده و همچنین احتمال حضور فاز مارتنزیت در ریزساختار، بالاتر است [۸، ۱۷ و ۱۸].

۳-۳- طراحی آزمایش

در این مطالعه برای دستیابی به استحکام مناسب مقاطع جوش مدل‌سازی ریاضی انجام شد و بدین منظور از روش رویه پاسخ با تکنیک طراحی مرکب مرکزی استفاده گردید. با توجه به ارتباط میان خواص مکانیکی اتصالات و ریزساختار، هر متغیری که شرایط دمایی، سرعت سرد شدن و هندسه جوش را تحت تأثیر قرار دهد، می‌تواند خواص مکانیکی اتصالات را دچار تغییرات گسترده‌ای سازد. بنا بر آزمایش‌های اولیه صورت گرفته و اطلاعات موجود در منابع سه متغیر سرعت جوشکاری، توان لیزر و عمق فوکوس به‌عنوان عوامل اصلی کنترل‌کننده خواص مکانیکی اتصالات مطرح می‌باشند. چندین جوشکاری مقدماتی با تغییر یکی از پارامترها و ثابت نگه‌داشتن سایر متغیرها انجام شد و محدوده پارامترهای ورودی فرایند تعیین گردید که بتوان در آن محدوده اتصالاتی عاری از عیوب قابل رؤیت را به‌دست آورد. جدول ۳ شرایط و حدود تنظیمات مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۳- شرایط و حدود تنظیمات پارامترهای جوشکاری لیزر

شماره	پارامترهای فرایند	واحد	علامت	سطوح		
				کم	متوسط	زیاد
۱	توان لیزر	W	P	۱۲۰۰	۱۹۵۰	۲۷۰۰
۲	سرعت جوشکاری	m/min	S	۱	۳	۵
۳	عمق فوکوس	Mm	F	-۱	۰	۱

جدول ۴- ماتریس طراحی آزمایش به همراه نیروی شکست اتصالات

اطلاعات آزمایش	پارامترهای جوشکاری لیزر			نیروی شکست (N)
	P (Watt)	S (mm/s)	F (mm)	
شماره آزمایش				
۱	۱۲۰۰	۱	-۱	۲۶۰۰
۲	۲۷۰۰	۱	-۱	۳۵۸۷
۳	۱۲۰۰	۱	۱	۲۴۱۵
۴	۲۷۰۰	۱	۱	۲۸۸۶
۵	۱۲۰۰	۵	-۱	۱۷۸۹
۶	۲۷۰۰	۵	-۱	۳۰۲۵
۷	۱۲۰۰	۵	۱	۲۳۱۵
۸	۲۷۰۰	۵	۱	۳۲۹۰
۹	۱۲۰۰	۳	۰	۲۲۱۴
۱۰	۲۷۰۰	۳	۰	۳۱۴۶
۱۱	۱۹۵۰	۳	-۱	۲۷۱۹
۱۲	۱۹۵۰	۳	۱	۲۶۸۵
۱۳	۱۹۵۰	۱	۰	۳۱۲۵
۱۴	۱۹۵۰	۵	۰	۲۸۷۶
۱۵	۱۹۵۰	۳	۰	۲۶۹۰
۱۶	۱۹۵۰	۳	۰	۲۷۱۵
۱۷	۱۹۵۰	۳	۰	۲۷۲۵
۱۸	۱۹۵۰	۳	۰	۲۶۸۹
۱۹	۱۹۵۰	۳	۰	۲۷۱۰
۲۰	۱۹۵۰	۳	۰	۲۶۸۷

جدول ۵- نتایج آنالیز واریانس برای خروجی نیروی شکست اتصالات جوشکاری شده توسط پرتو لیزر

منبع	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Regression	۹	۲۹۱۹۱۰۳	۲۹۱۹۱۰۳	۳۲۴۳۴۵	۹۳/۸۲	۰
Linear	۳	۲۲۹۲۲۹۷	۲۷۱۸۶۹	۹۰۶۲۳	۲۶/۲۱	۰
P	۱	۲۱۱۶۹۲۰	۷۷۲۵۷	۷۷۲۵۷	۲۲/۳۵	۰/۰۰۱
S	۱	۱۷۳۷۱۲	۲۴۱۶۳۳	۲۴۱۶۳۳	۶۹/۹۰	۰
Square	۳	۱۲۸۹۲۳	۱۲۸۹۲۳	۴۲۹۷۴	۱۲/۴۳	۰/۰۰۱
F ²	۱	۲۲۴	۲۱۰۵۵	۲۱۰۵۵	۶/۰۹	۰/۰۳۳
S ²	۱	۱۲۲۴۳۳	۱۲۲۴۳۳	۱۲۲۴۳۳	۳۵/۴۲	۰
Interaction	۳	۴۹۷۸۸۳	۴۹۷۸۸۳	۱۶۵۹۶۱	۴۸/۰۱	۰
P×F	۱	۷۵۴۶۶	۷۵۴۶۶	۷۵۴۶۶	۲۱/۸۳	۰/۰۰۱
P×S	۱	۷۰۸۷۶	۷۰۸۷۶	۷۰۸۷۶	۲۰/۵۰	۰/۰۰۱
F×S	۱	۳۵۱۵۴۱	۳۵۱۵۴۱	۳۵۱۵۴۱	۱۰۱/۶۹	۰
Residual Error	۱۰	۳۴۵۷۰	۳۴۵۷۰	۳۴۵۷	-	-
Lack-of-Fit	۵	۶۶۵۴	۳۳۲۷۲	۳۳۲۷۲	۲/۶۵	۰/۱
Pure Error	۵	۱۲۹۷	۱۲۹۷	۲۵۹	-	-
Total	۱۹	۲۹۵۳۶۷۳	-	-	-	-

Pred R²=۸۹/۹۲

Adj R²= ۹۸/۸۳

گرفت که این نمودار در شکل ۶ نشان داده شده است. نمودار احتمال نرمال، بیانگر این موضوع است که باقیمانده‌ها با تقریب خوبی روی یک خط راست قرار می‌گیرند که دلالت بر توزیع نرمال خطاها دارد. ضریب تعیین، R²، به‌منظور مشخص نمودن میزان نزدیکی داده‌های حاصل از آزمایش به داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط رابطه ۳ تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد، مقدار R² برابر با ۹۸/۸۳٪ است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تطابق بسیار مناسبی بین مقادیر به دست آمده از آزمایش و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل ریاضی وجود دارد؛ همچنین با توجه به جدول آنالیز واریانس، Lack-of-Fit عامل مؤثری نیست. لازم به ذکر است، در آنالیز واریانس

می‌توان مدل ریاضی را برای پیش‌بینی ارتباط میان نیروی شکست و متغیرهای جوشکاری لیزر ارائه کرد.

$$F_{LBW} = 1901.66 + 1.11P - 515.48 S - 77.77 F^2 + 55.18 S^2 - 0.14 P \times F + 0.07 P \times S + 91.44 F \times S \quad (3)$$

۳-۵- اعتبارسنجی مدل ریاضی

اعتبار مدل ریاضی ارائه شده با رسم نمودار احتمال نرمال برای خروجی نیروی شکست اتصالات، مورد بررسی قرار

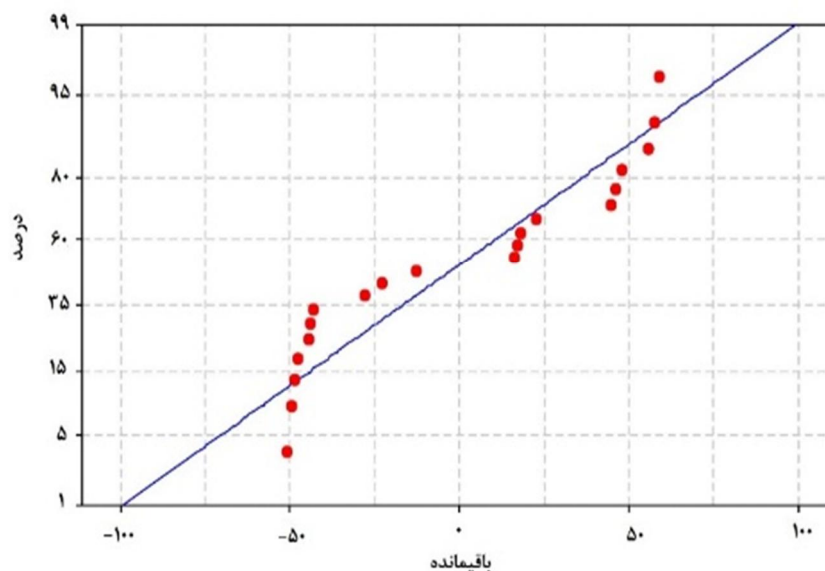
می‌شود که در میان متغیرها، سرعت جوشکاری و توان لیزر بیشترین تأثیر را بر مقادیر نیروی شکست جوش دارند؛ بنابراین متغیر دیگر، یعنی عمق فوکوس، تأثیر زیادی بر نیروی شکست اتصالات نمی‌گذارد و به‌عنوان متغیر کم اهمیت تلقی می‌شود. تأثیر هر یک از این متغیرها روی نیروی شکست اتصالات در شکل ۷ نشان داده شده است. با

بهترین وضعیت زمانی حاصل می‌شود که مدل رگرسیون مؤثر و عدم برازش غیرمؤثر باشد [۲۱ و ۲۲].

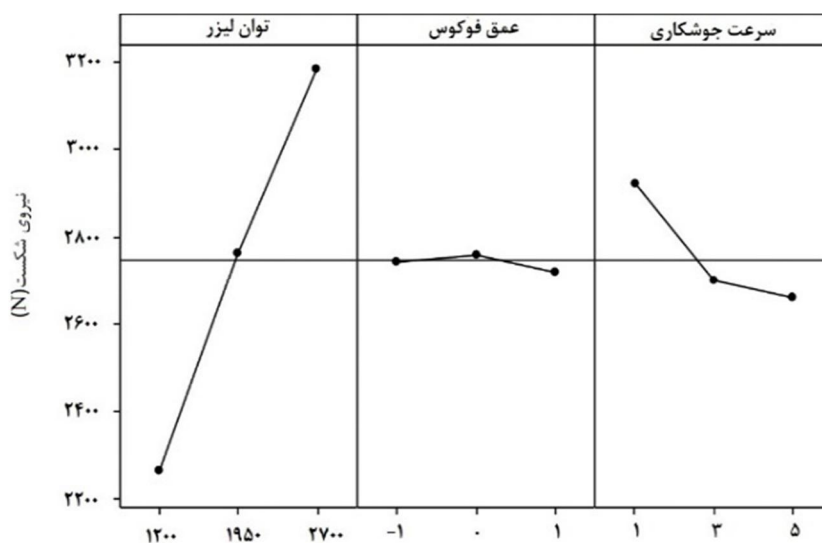
۳-۶- تحلیل نتایج

با تحلیل متغیرهای تأثیرگذار بر نیروی شکست اتصالات حاصل از پرتو لیزر و بررسی مدل ریاضی ارائه شده، مشخص

نمودار احتمال نرمال



شکل ۶- نمودار احتمال نرمال مربوط به نیروی شکست اتصالات جوشکاری شده توسط پرتو لیزر



شکل ۷- تأثیر متغیرهای سرعت جوشکاری، عمق فوکوس و توان لیزر بر میانگین نیروی شکست نمونه‌ها

خواص مکانیکی به دلیل افزایش حرارت ورودی ناشی از تغییر پارامترهای جوشکاری لیزری و نفوذ کامل مذاب در محل اتصال است. از طرف دیگر با توجه به تغییر و تحولات فازی، ریزساختار دوفازی شامل، دانه‌های درشت فاز فریت و آستنیت سوزنی شکل و کاربیدهای ریز و پراکنده در منطقه جوش مشاهده گردید. دانه‌ها در سمت فولاد دوفازی به صورت هم‌محور و در سمت فولاد فریتی به صورت ستونی تشکیل شدند. دانه‌ها در سمت فولاد دوفازی به صورت هم‌محور و در سمت فولاد فریتی به صورت ستونی تشکیل شدند. این تفاوت ساختار احتمالاً به دلیل هدایت حرارتی متفاوت فلزات پایه است. همچنین نتایج ریزسختی نشان داد که افزایش حرارت ورودی منجر به رشد دانه‌ها در منطقه جوش می‌شود؛ بنابراین میزان سختی در منطقه جوش کاهش می‌یابد.

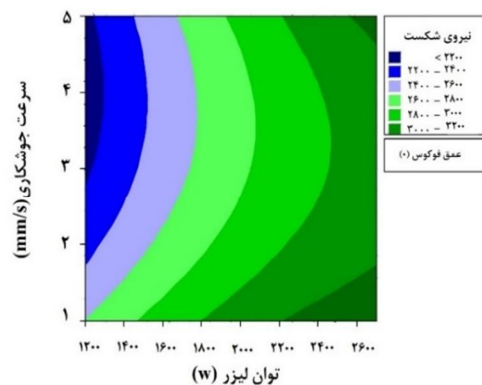
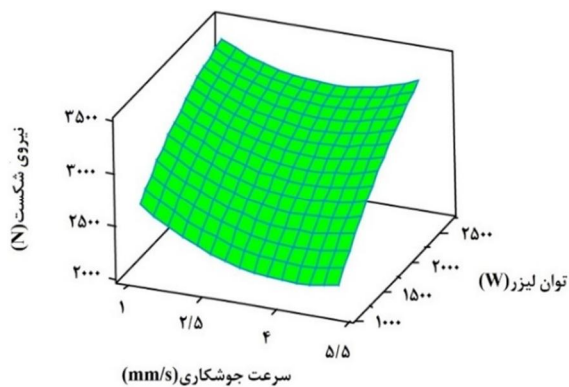
۵- منابع

- [1] Tan H, Wang Z, Jiang Y, Yang Y, Deng B, Song H, et al. (2012) Influence of welding thermal cycles on microstructure and pitting corrosion resistance of 2304 duplex stainless steels. Corros Sci 55: 368-377.
- [2] Luo J, Dong Y, Li L, Wang X (2014) Microstructure of 2205 duplex stainless steel joint in submerged arc welding by post weld heat treatment. J Manuf Process 16(1): 144-148.
- [3] Lippold JC, Kotecki DJ (2005) Welding metallurgy and weldability of stainless steels. John Wiley & Sons, New Jersey.
- [4] Nilsson JO (2014) Super duplex stainless steels. Mater Sci Technol 8(8): 685-700.

کاهش سرعت جوشکاری و افزایش توان لیزر مشاهده می‌شود که میزان نیروی شکست اتصالات افزایش می‌یابد و از طرف دیگر افزایش یا کاهش عمق فوکوس سبب تغییر قابل ملاحظه نیروی شکست اتصالات نمی‌شود. شکل ۸ منحنی هم تراز و نمودار پاسخ سه‌بعدی مربوط به تأثیر دو متغیر سرعت جوشکاری و توان لیزر بر نیروی شکست نمونه‌ها آورده شده است. با توجه به این نمودارها، بیشینه نیروی شکست اتصالات از طریق افزایش توان لیزر و کاهش سرعت جوشکاری حاصل می‌شود. به نظر می‌رسد که توان لیزر تأثیر زیادی روی نیروی شکست اتصالات دارد. در حقیقت افزایش توان لیزر منجر به افزایش حرارت ورودی شده و نفوذ کامل در محل اتصال را در پی دارد؛ بنابراین سبب بهبود مقدار پاسخ می‌شود. حرارت ورودی جوشکاری عامل مؤثری در تعیین هندسه جوش است. حرارت ورودی در جوشکاری پرتو لیزر به صورت متمرکز است؛ بنابراین نسبت عمق به عرض جوش افزایش می‌یابد و همچنین منجر به باریک شدن منطقه متأثر از حرارت، بهبود خواص مکانیکی و کاهش تنش‌های باقی‌مانده می‌شود [۲۳ و ۲۴].

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر بهینه‌سازی پارامترهای فرایند جوشکاری لیزر روی خواص مکانیکی و فیزیکی اتصالات غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ و فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴ مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج، کاهش سرعت جوشکاری و افزایش توان لیزر موجب افزایش میزان نیروی شکست اتصالات گردید. در واقع بهبود



شکل ۸- منحنی هم تراز و نمودار پاسخ سه‌بعدی تأثیرات سرعت جوشکاری و توان لیزر بر نیروی شکست اتصالات

- on weld geometry of 316L stainless steel using DOE. *J Adv Mater Eng* 36(4): 105-116.
- [16] Madhusudan Reddy G, Srinivasa Rao K (2009) Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar stainless steel electron beam and friction welds. *J Adv Manuf Technol* 45(9-10): 875-888.
- [17] Ramkumar KD, Chandrasekhar A, Singh AK, Ahuja S, Agarwal A, Arivazhagan N, et al. (2015) Comparative studies on the weldability, microstructure and tensile properties of autogeneous TIG welded AISI 430 ferritic stainless steel with and without flux. *J Manuf Process* 20: 54-69.
- [18] Saravanan S, Sivagurumanikandan N, Raghukandan K (2019) Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Nd: YAG laser welded super duplex stainless steel- numerical and experimental approach. *Optik(Stuttg)* 185: 447-455.
- [19] Hussein FI, Akman E, Genc Oztoprak B, Gunes M, Gundogdu O, Kacar E, et al. (2013) Evaluation of PMMA joining to stainless steel 304 using pulsed Nd:YAG laser. *Opt Laser Technol* 49: 143-152.
- [20] Liao H Te, Chen ZW (2013) A study on fiber laser micro-spot welding of thin stainless steel using response surface methodology and simulated annealing approach. *Int J Adv Manuf Technol* 67(5-8): 1015-1025.
- [21] Moradi M, Golchin E (2017) Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; statistical modelling and optimization. *Lat Am J Solids Struct* 14(3): 464-484.
- [22] Abdollahi H, Mahdavinejad R, Ghambari M, Moradi M (2014) Investigation of green properties of iron/jet-milled grey cast iron compacts by response surface method. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 228(4): 493-503.
- [23] Faraji AH, Moradi M, Goodarzi M, Colucci P, Maletta C (2017) An investigation on capability of hybrid Nd:YAG laser-TIG welding technology for AA2198 Al-Li alloy. *Opt Lasers Eng* 96: 1-6.
- [24] Aminzadeh A, Safari A, Parvizi A (2019) Experimental study of weld line displacement and drawing depth in TWBs steel sheets manufactured by laser and friction stir welding. *Modares Mechanical Engineering* 19(9): 2183-2192.
- [5] Tavares SSM, Pardal JM, Lima LD, Bastos IN, Nascimento AM, de Souza JA (2007) Characterization of microstructure, chemical composition, corrosion resistance and toughness of a multipass weld joint of superduplex stainless steel UNS S32750. *Mater Charact* 58(7): 610-616.
- [6] Muthupandi V, Bala Srinivasan P, Seshadri SK, Sundaresan S (2003) Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds. *Mater Sci Eng A* 358(1-2): 9-16.
- [7] Mostaan H, Nematzadeh F (2017) Micro laser welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Mechanical properties, magnetic characterization and texture evolution. *Int J ISSI* 14(2): 1-8.
- [8] Alizadeh-Sh M, Marashi SPH, Pouranvari M (2014) Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformations and mechanical properties. *Mater Des* 56: 258-263.
- [9] Verma J, Taiwade R V., Kataria R, Kumar A (2018) Welding and electrochemical behavior of ferritic AISI 430 and austeno-ferritic UNS 32205 dissimilar welds. *J Manuf Process* 34: 292-302.
- [10] Wu W, Hu S, Shen J (2015) Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of laser welded dissimilar joints between ferritic stainless steel and carbon steel. *Mater Des* 65: 855-861.
- [11] Prabakaran MP, Kannan GR (2019) Optimization of laser welding process parameters in dissimilar joint of stainless steel AISI316/AISI1018 low carbon steel to attain the maximum level of mechanical properties through PWHT. *Opt Laser Technol* 112: 314-322.
- [12] Nagaraju U, Gowd GH, Ahmad RMI (2018) Parametric analysis and evaluation of tensile strength for laser welding of dissimilar metal. *Mater Today Proc* 5(2): 7898-7907.
- [13] Reisgen U, Schleser M, Mokrov O, Ahmed E (2011) Optics & laser technology statistical modeling of laser welding of DP / TRIP steel sheets. *Opt Laser Technol* 1: 1-10.
- [14] Emadi M, Mostaan H, Rafiei M (2020) Evaluation of microstructure and corrosion behavior of dissimilar laser joint between Inconel 625 and AISI 430 ferritic stainless steel. *JWSTI* 5(2): 103-121.
- [15] Pakmanesh MR, Shamanian M, Asghari S (2018) Analysis of pulsed laser welding parameters effect