E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 11, Number 1, 2025

Numerical analysis of factors affecting thermal distribution and residual stress in pulsed Nd:YAG laser welding of 316 L stainless steel

S. A. Hosseini , S. A. A. Akbari Mousavi*
School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received 20 February 2025 ; Accepted 25 April 2025

Abstract

In this study, 1 mm thick austenitic stainless steel 316L sheets were used for experimental testing. The experimental welding process was carried out using a Nd:YAG pulsed laser welding machine, and the welding simulation was performed using the SYSWELD software with a three-dimensional model for thermodynamic and mechanical analysis. The simulation results showed over 90% correlation with the experimental results. Analysis of experimental and numerical data revealed that at a constant voltage of 440 volts, decreasing the welding speed from 2 to 0.5 mm/s increased the overlap rate of pulses from 67% to 93% and the maximum average power density (EPPD) from 5963 to 21831 W/mm². Additionally, increasing the voltage from 440 to 480 volts at a constant speed of 1 mm/s raised the heat input from 114 to 138 J/mm and the weld depth from 0.56 to 0.66 mm. Due to the high cooling rate, the grain size of the weld metal became finer than the base metal (63% reduction in grain size). Two phases, austenite and ferrite, were observed in the weld metal, and the solidification mode was predicted to be FA.With an increase in welding speed from 0.5 mm/s to 2 mm/s at a constant voltage of 440 volts, the maximum tensile residual stress increased from 96 to 260 MPa due to reduced pulse overlap (from 93% to 67%), uneven heat distribution in the part, and the generation of thermal stresses. Furthermore, increasing the welding voltage from 440 to 480 volts at a constant speed of 1 mm/s caused the maximum tensile residual stress to rise from 124 to 152 MPa. The maximum hardness of the weld metal increased from 180 to 215 Vickers as the welding speed rose due to the prevention of carbon diffusion and an increased growth rate. However, with an increase in welding voltage and heat input (from 57 to 69 J/mm), the hardness decreased from 225 to 215 Vickers due to a reduction in thermal gradients and grain growth.

Keywords:Residual stress, pulsed laser welding, 316L austenitic stainless steel, Finite Element Method.

*Corresponding Author: S. A. A. Akbari Mousavi, akbarimusavi@ut.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال یازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1404

تجزیه و تحلیل عددی عوامل مؤثر بر توزیع حرارتی و تنش پسماند جوشکاری لیزر Nd:YAG ضربانی فولاد زنگ نزن آستنیتی 316 L

سید علی حسینی، سید علی‌اصغر اکبری موسوی *

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1403/12/02 ؛ پذیرش مقاله: 1404/02/05

چکیده

در این پژوهش، از ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316 L با ضخامت 1 میلی‌متر برای انجام آزمایش استفاده شد. فرایند تجربی جوشکاری توسط دستگاه جوش لیزر ضربانی Nd:YAG و فرایند شبیه‌سازی جوشکاری توسط نرم‌افزار SYSWELD و مدل سه‌بعدی برای تحلیل ترمودینامیکی و مکانیکی انجام شد. نتایج شبیه‌سازی تطابق بالای 90 درصد را با نتایج تجربی نشان داد. تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی و عددی نشان داد که در ولتاژ ثابت 440 ولت، با کاهش سرعت جوشکاری از 2 به 0,5 میلی‌متر بر ثانیه، میزان همپوشانی ضربان‌ها از 67% به 93% و چگالی توان بیشینه متوسط (EPPD) از 5963 به 21831 وات بر میلی‌متر مربع افزایش یافت و با افزایش ولتاژ از 440 به 480 ولت در سرعت ثابت 1 میلی‌متر بر ثانیه، حرارت ورودی از 114 به 138 ژول بر میلی‌متر و عمق جوش از 0,56 به 0,66 میلی‌متر افزایش پیدا کرد. ساختار فلز جوش به واسطه سرعت انجماد بالا دانه ریزتر از فلز پایه شد (63% کاهش اندازه‌دانه). در فلز جوش دو فاز آستنیت و فریت مشاهده شد و حالت انجماد نیز به صورت FA پیشبینی شد. با افزایش سرعت جوشکاری از 0,5 mm/s به 2 mm/s در ولتاژ ثابت 440 ولت، بیشینه تنش پسماند کششی از 96 به 260 MPa به واسطه کاهش همپوشانی ضربان‌ها (از 93% به 67%)، توزیع غیریکنواخت حرارت در قطعه و ایجاد تنش‌های حرارتی، افزایش یافت. همچنین افزایش ولتاژ جوشکاری از 440 به 480 ولت در سرعت ثابت 1 mm/s، باعث افزایش بیشینه تنش پسماند کششی از 124 به 152 مگاپاسکال شد. بیشینه سختی فلز جوش با افزایش سرعت جوشکاری از 180 به 215 ویکرز به دلیل جلوگیری از نفوذ کربن و افزایش نرخ رشد افزایش یافت. با افزایش ولتاژ جوشکاری و افزایش حرارت ورودی (از 57 به 69 ژول بر میلی‌متر) سختی از 225 به 215 ویکرز به دلیل کاهش شیب حرارتی و رشد دانه‌ها کاهش یافت.

کلمات کلیدی: تنش پسماند، جوشکاری لیزر ضربانی، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316 L، روش المان محدود (FEM).

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: سید علی‌اصغر اکبری موسوی، akbarimusavi@ut.ac.ir.

1- مقدمه

فولاد زنگ‌نزن استنیتی 316L یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین آلیاژهای فولاد زنگ‌نزن در صنایع مختلف به شمار می‌رود. این نوع فولاد به دلیل ترکیب شیمیایی خاص خود، به‌ویژه وجود مولیبدن، مقاومت بالایی در برابر خوردگی و اکسیداسیون دارد. فولاد 316L به طور ویژه در محیط‌های خورنده و شرایط سخت مورد استفاده قرار می‌گیرد و به‌عنوان یک گزینه ایده‌آل برای کاربردهای دریایی، شیمیایی و غذایی شناخته می‌شود.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

ترکیب شیمیایی فولاد 316L شامل حدود 16-18 درصد کروم، 10-14 درصد نیکل و 2-3 درصد مولیبدن است. این ترکیب به فولاد ویژگی‌هایی نظیر مقاومت عالی در برابر خوردگی، دماهای بالا و تنش‌های مکانیکی می‌دهد. به‌علاوه، درجه "L" در نام این آلیاژ نشان‌دهنده محتوای کربن پایین آن است که باعث بهبود قابلیت جوشکاری و کاهش خطر تشکیل دانه‌های کاربید در فرایندهای حرارتی می‌شود [1و2].

جوشکاری یکی از مهم‌ترین و بنیادی‌ترین فرایندهای ساخت و تولید در صنایع مختلف به شمار می‌رود. این فرایند به معنای اتصال دائمی دو یا چند قطعه فلزی از طریق ذوب و انجماد مواد پایه است. جوشکاری نه‌تنها در صنایع سنگین مانند ساختمان‌سازی، خودروسازی و هوافضا کاربرد دارد، بلکه در صنایع سبک و حتی در تولید مصنوعات هنری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. باوجود مزایای بی‌شمار جوشکاری، این فرایند معایب خاصی نیز دارد که می‌تواند بر کیفیت نهایی محصول تأثیر بگذارد. به‌عنوان مثال هندسه اتصال به دلیل ماهیت ناهمگن اتصالات جوش داده شده و نواحی با ریزساختارهای متفاوت، تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی مخصوصاً رشد ترک‌های خستگی دارد[3].

همچنین تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری نیز از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار بر خواص مکانیکی قطعات می‌باشد که این تنش‌ها می‌توانند ناشی از انقباض ناهمگون مواد در حین سرد شدن، تغییرات دما، و یا عدم تعادل در توزیع حرارت به واسطه تفاوت در فرایندهای جوشکاری، متغیرهای هر فرایند وعوامل دیگر باشند. همانطور که پرورش و همکاران در تحقیقات خود به اندازه‌گیری تنش پسماند در جوشکاری GTAW فولاد زنگ نزن AISI 304 با استفاده از روش آلتراسونیک پرداختند. در این پژوهش، تأثیر متغیرهای مختلف جوشکاری ضربانی مورد بررسی قرار گرفت. شرایط بهینه جوشکاری با کمترین تنش پسماند بر اساس آنالیز S/N تعیین گردید و مشخص شد که جریان جوشکاری مؤثرترین متغیر و پس از آن زمان ضربان و بسامد ضربان در اولویت قرار دارند. همچنین مشخص شد که حرارت ورودی نقش بسزایی در میزان تنش پسماند دارد و با افزایش حرارت ورودی، میزان تنش پسماند نیز افزایش می‌یابد[4].

جیانگ و همکاران[5]، تأثیر متغیرهای مختلف فرایند جوشکاریGTAW مانند انرژی جوشکاری، سرعت جوشکاری، و موقعیت شروع جوشکاری بین لایه‌ها را بر تنش‌های پسماند در لوله‌های فولاد زنگ‌نزن 316L با استفاده از مدل سه بعدی المان محدود مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل شبیه‌سازی المان محدود با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد و میانگین انحراف تنش‌های پسماند محوری و محیطی کمتر از 30 مگاپاسکال بود. انرژی جوشکاری تأثیر قابل توجهی بر شیب تنش دارد و مقادیر بالای تنش عرضی در محدوده 859,3 تا 1007,4 ژول بر میلی‌متر مشاهده شد. سرعت جوشکاری بالا منجر به افزایش تنش عرضی شد و تغییرات آن تأثیر کمتری بر تنش طولی و الگوی کلی توزیع تنش داشت.

لیانگ و همکاران[6] نیز در پژوهش خود به بهینه‌سازی متغیرهای جوشکاری لیزری ضربانی و طراحی دهانه تنش ثابت جهت کاهش تغییر شکل در فولاد زنگ‌نزن فریتی فوق نازک پرداختند. در این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی‌های المان محدود و روش تجربی، اثرات توان لیزر، سرعت جوشکاری، بسامد ضربان و دهانه تنش ثابت ناشی از گیره‌ها را بر تغییر شکل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب بهینه متغیرهای جوشکاری، توان لیزر 600 وات، سرعت جوشکاری 10 میلی‌متر بر ثانیه و بسامد پالس 10 هرتز می‌باشد. همچنین مشخص شد که دهانه تنش ثابت اعمال شده توسط گیره‌ها تأثیر قابل توجهی بر میدان‌های تنش-کرنش و جابجایی دارد، به طوری که تنش پسماند از 267 مگاپاسکال در دهانه 5 میلی‌متر به 189 مگاپاسکال در دهانه 20 میلی‌متر کاهش یافت، در حالی که مقدار جابجایی افزایش یافت. در نهایت، دهانه تنش 5 میلی‌متر به عنوان حالت بهینه شناسایی شد که سطح جوش صاف و بدون نقصی ایجاد می‌کند.

المسلامی و همکاران[7] نیز در تحقیق خود به بررسی تنش پسماند در جوشکاری لیزری خودزا (autogenous) و

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

جوشکاری لیزری با شکاف باریک (NGLW) در صفحات فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L با ضخامت 10 میلی‌متر پرداختند. همچنین از مدل‌سازی اجزای محدود برای درک بهتر تأثیر تاریخچه حرارتی بر تنش‌های پسماند در روش NGLW بهره گرفتند. نتایج نشان داد که تکنیک NGLW در مقایسه با جوشکاری لیزری خودزا با توان بالا، منجر به کاهش قابل توجهی در مقدار بیشینه تنش‌های پسماند کششی می‌شود. همچنین، توان لیزر تأثیر زیادی بر مقدار بیشینه تنش پسماند دارد، در حالی که سرعت جوشکاری تأثیر بیشتری بر عرض ناحیه تحت تنش‌های کششی در NGLW نشان می‌دهد.

در پژوهش افا[8] به بررسی بهینه‌سازی متغیرهای جوشکاری لیزری برای آلیاژهای AZ31B و T6-6061 با استفاده از روش سطح پاسخ، الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی پرداخته شد. این پژوهش نشان داد که سرعت‌های جوشکاری بالاتر مدت زمان قرار گرفتن در معرض حرارت شدید پرتو لیزر را کاهش می‌دهند و در نتیجه مواد سریع‌تر خنک می‌شوند. سرعت گرمایش و سرمایش می‌تواند بر ساختار دانه و استحاله‌های فازی تأثیر بگذارد و تغییرات در ریزساختار می‌تواند به ایجاد تنش‌های پسماند در منطقه متاثر از حرارت (HAZ) کمک کند. علاوه بر این، نرخ خنک‌سازی افزایش یافته به نوبه خود باعث ایجاد تنش‌های پسماند فشاری می‌شود. افزایش توان پرتو نیز منجر به گرادیان‌های دمایی و تنش‌های حرارتی بالاتر شد که تنش‌های معادل را افزایش داد. این اثر ناشی از افزایش انرژی ورودی می‌باشد که باعث انبساط حرارتی اتصالات جوش داده شده و ایجاد تنش تغییر فاز هنگام تغییر ماده از حالت جامد به مایع در اثر حداکثر دما می‌شود.

خواص مواد نیز نقش مهمی در تعیین توزیع تنش پسماند در ساختارهای جوش داده شده دارند. خواص مواد می‌توانند به طور قابل توجهی بر بزرگی، جهت، و توزیع تنش‌های پسماند تأثیر بگذارند. ضریب انبساط حرارتی یکی از عوامل کلیدی در ایجاد تنش‌های پسماند است. ضریب انبساط حرارتی بالای ماده، در طول فرایند جوشکاری انجماد، منجربه انقباض بیشتری می‌شود که موجب ایجاد تنش‌های کششی پسماند بزرگی می‌شود. همچنین استحکام تسلیم نیز روی مقدار تنش پسماند تأثیرگذار می‌باشد. بزرگی حداکثر تنش پسماند کششی اغلب به استحکام تسلیم ماده جوش یا ماده پایه نزدیک است. اگر کرنش حرارتی در طول خنک شدن پس از جوشکاری بزرگتر از کرنش تسلیم باشد، تنش‌های پسماند با اندازه تسلیم ممکن است رخ دهند این موضوع به ویژه در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی مانند نوع 316 صادق است، جایی که کرنش حرارتی می‌تواند بیش از ده برابر بیشتر از کرنش تسلیم باشد. در فولادهای کربن منگنز، کرنش حرارتی تقریباً پنج برابر بیشتر از کرنش تسلیم است و معمولاً منجر به تنش‌های پسماند با اندازه تسلیم می‌شود[9]. علاوه بر موارد فوق تغییرات فازی که در طول سرد شدن پس از جوشکاری رخ می‌دهند نیز می‌توانند به طور قابل توجهی بر تنش‌های پسماند تأثیر بگذارند.

روش جوشکاری نیز به طور قابل توجهی بر تنش پسماند تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، در هر فرایند جوشکاری، گرم شدن و انبساط ماده در ناحیه جوش و سپس سرد شدن و انقباض آن منجر به ایجاد تنش پسماند می‌شود. هنگامی که فلز جوش سرد می‌شود، منقبض شده و باعث ایجاد تنش پسماند کششی، به ویژه در جهت طولی در امتداد خط جوش می‌شود. این تنش کششی در خط جوش با تنش فشاری تعادلی در نواحی دورتر از منطقه جوش همراه است. جوشکاری زیرپودری (SAW)، معمولاً دارای حرارت ورودی بسیار بالایی است. این حرارت ورودی بالا منجر به ناحیه ذوب بزرگتری و در نتیجه، عرض بیشتر ناحیه تنش پسماند کششی می‌شود. اگرچه ممکن است مقدار بیشینه تنش کششی بین روش‌های مختلف تفاوت چندانی نداشته باشد، اما عرض ناحیه تنش کششی در جوش SAW به طور قابل توجهی بیشتر است. این امر می‌تواند منجر به تنش پسماند کششی بیشتر شود. جوشکاری قوسی فلزی با گاز محافظ (GMAW) معمولاً حرارت ورودی کمتری نسبت به SAW دارند. در نتیجه، تنش پسماند کمتری نیز در مقایسه با SAW ایجاد می‌کنند. جوشکاری GMAW ضربانی به دلیل حرارت ورودی کنترل‌شده‌تر، می‌تواند بهبود قابل توجهی در کاهش تنش پسماند نسبت به SAW داشته باشد. تنش پسماند

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

در CMT (انتقال فلز سرد) و GMAW ضربانی تقریباً مشابه است. جوشکاری لیزری (هم لیزر خالص و هم لیزر هیبریدی) کمترین میزان اعوجاج را تولید می‌کند. این امر عمدتاً به دلیل حرارت ورودی بسیار پایین و ناحیه ذوب و ناحیه HAZ کوچک در این فرایندها است. از نظر تنش پسماند، جوشکاری لیزری منجر به یک قله تنش کششی باریک و بالا می‌شود. جوشکاری لیزری در مقایسه با جوشکاری معمولی، تنش‌های پسماند کمتری ایجاد می‌کند. حرارت ورودی پایین‌تر معمولاً منجر به عرض کمتر ناحیه تنش پسماند کششی و در نتیجه اعوجاج کمتر می‌شود. جوشکاری لیزری به دلیل حرارت ورودی بسیار پایین، کمترین اعوجاج را دارد. مقدار بیشینه تنش کششی ممکن است بین روش‌های مختلف تفاوت چندانی نداشته باشد، اما عرض ناحیه آن به طور قابل توجهی متفاوت است و با حرارت ورودی رابطه مستقیم دارد[10و11].

با وجود تنش‌های پسماند کمتر فرایند جوش لیزر نسبت به سایر روش‌ها، تنش‌های پسماند به‌شدت به متغیرهای جوشکاری لیزر مانند توان لیزر، سرعت جوشکاری، نوع مواد و الگوی حرارتی بستگی دارند. انتخاب نادرست این متغیرها می‌تواند باعث افزایش تنش‌های پسماند و در نتیجه بروز مشکلات جدی در کیفیت نهایی محصول شود؛ بنابراین، درک عمیق از رابطه بین متغیرهای جوشکاری لیزر و تنش‌های پسماند برای بهینه‌سازی فرایند و دستیابی به نتایج مطلوب ضروری است.

امروزه یکی از روش‌های امیدوارکننده برای بررسی فرایندهای جوشکاری روش‌های عددی و المان محدود است که یکی از مزایای اصلی استفاده از روش المان محدود و روش‌های عددی، توانایی آن‌ها در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده می‌باشد. درحالی‌که روش‌های تجربی معمولاً نیازمند زمان، هزینه و منابع قابل توجهی هستند، روش‌های عددی می‌توانند با استفاده از مدل‌های ریاضی، رفتار سیستم‌ها را به طور دقیق شبیه‌سازی کنند. در نهایت، استفاده از روش‌های عددی و المان محدود به محققان این امکان را می‌دهد که نتایج خود را به راحتی مستند کنند. این امر نه‌تنها باعث تسهیل در فرایند تحقیقاتی می‌شود، بلکه به توسعه دانش علمی کمک شایانی می‌کند. علاوه بر این، روش المان محدود (FEM) یک روش مؤثر برای مطالعه تکامل تنش پسماند در طول فرایند جوشکاری می‌باشد.

همان‌طور که جیانگ و همکاران[12] در تحقیق خود از صفحات ضخیم جوشکاری شده با ضخامت 50 تا 100 میلی‌متر از جنس ماده اصلی EH47 و ماده پرکننده SF-36E استفاده کردند. روش‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل مدل‌سازی اجزاء محدود (FEM) با استفاده از یک مدل دو بعدی کرنش صفحه تعمیم‌یافته (GPS) همراه با مدل سخت‌شوندگی ترکیبی و اندازه‌گیری‌های پراش نوترونی برای ارزیابی توزیع تنش‌های پسماند در ضخامت بود. نتایج اصلی این تحقیق نشان می‌دهد که مدل GPS با مدل سخت‌شوندگی ترکیبی پیشنهادی، همبستگی دقیقی با اندازه‌گیری‌های پراش نوترونی نشان داد و قادر به شبیه‌سازی دقیق تنش‌های پسماند در صفحات ضخیم بود. تنش‌های پسماند کششی قابل توجهی در لایه‌های سطحی و ریشه جوش مشاهده شد و این تنش‌ها به تدریج به سمت وسط کاهش می‌یافتند. برای تنش عرضی، تنش‌های کششی قابل توجهی در سطوح بالا و پایین فلزجوش ایجاد شد. برای تنش طولی، حداکثر تنش کششی در سطح جوش قرار داشت و همچنین یک بیشینه تنش در عمق 0,89 برابر ضخامت صفحه یافت شد.

کیانگ و همکاران[13] نیز در پژوهش خود به بررسی تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری در اتصالات لب به لب با ضخامت‌های نابرابر از فولاد با عملکرد بالا Q500qE پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش‌های حفاری سوراخ و کانتور، تنش‌های پسماند اولیه در ماده پایه و تنش‌های ناشی از جوشکاری در اتصال را اندازه‌گیری کرده و سپس فرایند جوشکاری را با در نظر گرفتن تنش‌های اولیه به کمک نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی نموده‌اند. مقایسه نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نشان‌دهنده تطابق خوبی است و یافته‌ها حاکی از وجود تنش‌های کششی بالا در ناحیه جوش و تغییر آن به تنش‌های فشاری با دور شدن از جوش است، ضمن آنکه تنش‌های پسماند اولیه تأثیر قابل توجهی بر توزیع تنش در مناطق دور از

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

جوش دارند. در پژوهش صفری و همکاران نیز، در پژوهش خود به بررسی و شبیه‌سازی عددی و تجربی فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد AISI 1075 پرداخته و تأثیر متغیرهای مختلف جوشکاری را بر خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصالات جوشکاری شده مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی، تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی بدست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد. نتایج شبیه سازی و تجربی در خصوص تأثیر جریان جوشکاری بر اندازه دکمه جوش و تغییر حالت شکست همخوانی داشت. صحت نتایج شبیه سازی عددی توسط نتایج تجربی تأیید شد. همچنین نتایج تجربی و شبیه سازی در خصوص ارتباط بین قطر دکمه جوش و نیروی برشی حداکثر، تطابق مناسبی وجود داشت. نتایج شبیه سازی، توزیع دمایی در ورق‌ها و الکترودها در مراحل مختلف فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، از جمله مرحله اعمال جریان و مرحله سرد شدن را به خوبی نشان می‌دهند. علاوه بر این، شبیه سازی مستقیماً ریزساختار را پیش‌بینی نمی‌کند، اما توزیع دمایی شبیه‌سازی شده می‌تواند به درک تحولات ریزساختاری کمک کند، که با مشاهدات متالورژیکی مطابقت دارد. شبیه سازی توزیع تنش‌های پسماند در انتهای مرحله اعمال جریان جوشکاری را نشان می‌دهد[14].

در پژوهش دینگ و همکاران[15] به تأثیر توالی جوشکاری و شرایط مرزی بر تنش پسماند و تغییرشکل در جوش‌های سپری گوشه فولاد DH36 پرداخته شد. آن‌ها با استفاده از روش‌های تجربی و عددی به مطالعه الگوهای حرارتی، تنش‌های پسماند و تغییرشکل‌های ناشی از جوشکاری متوالی و همزمان دوسویه پرداختند. روش شبیه‌سازی تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی داشت. یافته‌ها نشان می‌دهند که توالی جوشکاری به طور قابل توجهی بر میزان و توزیع تنش و تغییرشکل پسماند اثر می‌گذارد، در حالی که شرایط مرزی به طور عمده بر تغییرشکل پسماند تأثیرگذار است و تأثیر کمی بر تنش پسماند دارد. در نهایت، این تحقیق نشان می‌دهد که جوشکاری همزمان دوسویه و اعمال شرایط مرزی مناسب می‌تواند به کاهش تنش و تغییرشکل پسماند و بهبود کیفیت جوش منجر شود.

تحقیقاتی نیز به تأثیر درصد همپوشانی ضربان‌های جوش لیزر ضربانی بر هندسه و ابعاد جوش پرداختند مانند ایشاک و همکاران [16] که در پژوهش خود به بررسی تأثیر متغیرهای جوشکاری لیزر ضربانی از جمله همپوشانی ضربان‌ها (PO)، توان بیشینه (PP)، مدت زمان ضربان (PD) و نرخ تکرار ضربان (PRR) بر هندسه جوش فولاد با استفاده از لیزر فیبر کم توان می‌پردازد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد. افزایش درصد همپوشانی ضربان منجر به نفوذ عمیق‌تر می‌شود که به دلیل افزایش نفوذ مؤثر و اثر پیش‌گرمایش ناشی از همپوشانی ضربان‌ها می‌باشد.

همپوشانی زیاد ضربان می‌تواند ظاهر جوش را نامناسب کرده و احتمال ایجاد عیوبی مانند بریدگی را افزایش دهد، در حالی که همپوشانی کم ممکن است منجر به نفوذ ناکافی و تخلخل شود. این مطالعه همچنین نشان داد که توان بیشینه و مدت زمان ضربان بر انرژی و در نتیجه بر عرض و عمق جوش تأثیرگذار هستند، در حالی که بسامد ضربان تأثیر معناداری بر هندسه جوش در شرایط ثابت همپوشانی ندارد. به طور کلی، همپوشانی ضربان با تأثیر بر نفوذ مؤثر و ایجاد اثر پیش‌گرمایش، نقش مهمی در تعیین عمق جوش ایفا می‌کند.

همچنین در پژوهش دیگر صوفی زاده و همکاران [17] به بررسی جوشکاری غیرمشابه فولادهای زنگ نزن AISI 316L و فولادهای AISI 4340 با استفاده از لیزر ضربانی Nd:YAG پرداختند. در این مقاله نشان داده شده است که افزایش بسامد لیزر منجر به افزایش همپوشانی ضربان‌ها می‌شود و این امر به نوبه خود عمق و عرض جوش را افزایش می‌دهد. در شرایطی که همپوشانی ضربان‌ها از 90% فراتر می‌رود، جوشکاری لیزری ضربانی رفتاری مشابه جوشکاری پیوسته از خود نشان می‌دهد. همچنین، عامل همپوشانی به طور مستقیم بر توان متوسط و حرارت ورودی تأثیرگذار است. علاوه بر این آن‌ها نشان دادند که برای دستیابی به نفوذ کامل در جوشکاری لیزری ضربانی، می‌توان از همپوشانی بالاتر با چگالی توان بیشینه متوسط و سرعت‌های متوسط استفاده کرد. تاکنون تحقیقات بسیاری به بررسی عوامل مختلف جوشکاری بر تنش‌های پسماند پرداخته

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

شده است، اما هنوز خلاءهایی در تأثیر میزان همپوشانی ضربان‌های لیزر بر تنش پسماند و درک بهتر چگونگی تأثیر متغیرهای جوشکاری به ویژه سرعت و ولتاژ جوشکاری بر خواص جوش وجود دارد که نیازمند بررسی‌های بیشتر جهت دستیابی به قطعات جوشکاری شده با خواص مکانیکی مطلوب می‌باشد. در نتیجه هدف از این پژوهش، بررسی دقیق‌تر رابطه بین متغیرهای جوشکاری لیزر ضربانی به ویژه میزان همپوشانی ضربان‌ها و تأثیر آن‌ها بر ابعاد جوش و خواص مکانیکی فولاد 316L به کمک روش المان محدود است که می‌تواند بینشی عمیق‌تر درباره تأثیرات این متغیرها بر روی خواص نهایی مواد فراهم کند و راهکارهایی برای بهبود کیفیت جوش‌ها ارائه دهد.

2- روش آزمایش

2-1- مواد اولیه

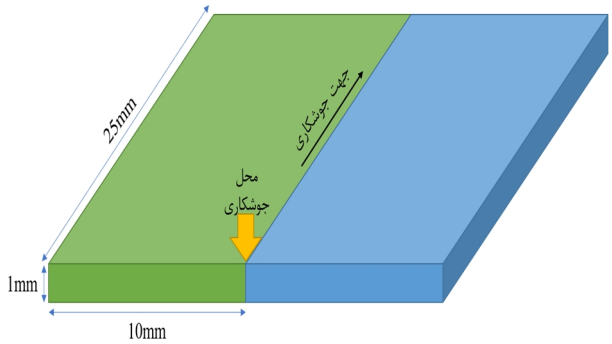
در این پژوهش از آلیاژ فولاد زنگ‌نزن 316L مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها به‌صورت ورق با ضخامت 1 میلی‌متر به ابعاد 1×10×25 میلی‌متر توسط کاتر برش داده شد و جهت انجام جوشکاری و رفع آلودگی‌های سطحی با محلول استون شسته شد. ترکیب شیمیایی به‌دست‌آمده از آزمایش کوانتومتری از این آلیاژ در جدول (1) آورده شده است.

2-2- تجهیزات و آزمون جوشکاری

نمونه‌ها مطابق با شکل (1) به صورت لب به لب کنار هم قرار گرفتند و جوشکاری توسط دستگاه جوشکاری لیزر Nd:YAG ضربانی با توان متوسط 100 وات در راستای طولی به فاصله 10 میلی‌متر از کناره‌ها در راستای خط مرکزی، در بسامد ثابت 8 هرتز، پهنای زمانی ثابت 4 میلی‌ثانیه، جریان محافظ گاز ارگون با دبی 15 میلی‌متر بر دقیقه و متغیرهایی که در جدول (2) آورده شده است، انجام شد.

2-3- بررسی‌های ریزساختاری

بعد از فرایند جوشکاری، به منظور بررسی‌های ریزساختاری مقطع جوش، نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM E3 در راستای مقطع عرضی جوش برش داده شدند و بعد برش مانت شدند. سپس با استفاده از سنباده شماره 400 تا 3000 سنباده زنی شدند. برای دستیابی به سطح صاف جهت حکاکی، سطح نمونه‌ها به کمک خمیر الماسه صیقل‌کاری شدند. برای حکاکی الکتریکی از دو روش استفاده شد. روش اول برای بررسی ابعاد و هندسه جوش از اسید اگزالیک با نسبت 10 گرم پودر اسید اگزالیک و 90 میلی‌لیتر آب مقطر با ولتاژ 6 ولت به مدت 25 ثانیه استفاده شد. روش دوم برای بررسی ریزساختاری از محلول 60 درصد اسید نیتریک و 40 درصد آب با ولتاژ 1 ولت به مدت 4 دقیقه (با کاتد هم‌جنس) استفاده شد. بررسی ریزساختاری و هندسه جوش با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد و برای تجزیه و تحلیل تصاویر میکروسکوپی از نرم‌افزار کلمکس (Clemex) بهره‌گیری شد. همچنین برای بررسی ترکیب شیمیایی حوضچه جوش و عناصر و فازهای این ناحیه تحلیل شیمیایی EDS و طیف سنجی پراش پرتو پرتو ایکس (XRD) انجام گرفت و نتایج حاصل از XRD توسط نرم افزار High Score Plus تجزیه و تحلیل شد.



شکل1- طرح‌واره پیکربندی لب به لب جوش لیزر

2-4- آزمون‌های مکانیکی

جهت بررسی خواص مکانیکی آلیاژ 316L نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM-E8M توسط دستگاه ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی برش خورده شد و آزمون کشش انجام شد. طرح‌واره نمونه‌های آزمون کشش در شکل (2) نمایش داده شده و نتایج حاصل از این آزمون در جدول (3) آورده شده است. جهت دستیابی به به سختی جوش نمونه‌ها و بررسی تأثیر متغیرها بر سختی با توجه به کوچک بودن منطقه جوش از

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

جدول 1- ترکیب شیمیایی آلیاژ فولاد زنگ‌نزن 316 L

عنصر	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
ترکیب شیمیایی	پایه	0/013	0/53	1/53	0/030	0/004	17/1	2/06	10/3	0/04

جدول2- متغیرهای اعمالی جوشکاری لیزر

نمونه	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm/s)	توان متوسط (W)	حرارت ورودی (J/mm)
V440S0.5	440	0,5	114	228
V440S1	440	1	114	114
V440S2	440	2	114	57
V460S0.5	460	0,5	126	252
V460S1	460	1	126	126
V460S2	460	2	126	63
V480S0.5	480	0,5	138	276
V480S1	480	1	138	138
V480S2	480	2	138	69

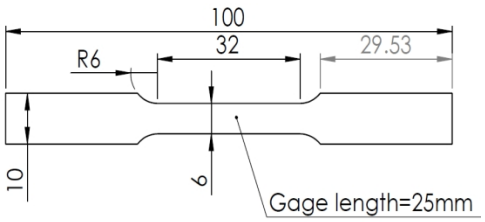
آزمون ریزسختی سنجی استفاده شد. ریزسختی در جهت عمود بر سطح مقطع عرضی جوش از مناطقی که به‌صورت شماتیک در شکل (3) آمده است با بار 100 گرم انجام شد. و نتایج حاصل از آن گزارش شد.

2-5- مدل شبیه‌سازی

برای تحلیل توزیع دما و سرعت انجماد در ناحیه اتصال جوش و پیش‌بینی خواص مکانیکی و تغییر شکل آن، از یک مدل سه‌بعدی ترمومکانیکی با استفاده از نرم‌افزار SYSWELD بهره‌برداری شد. در این شبیه‌سازی، هر صفحه به ابعاد 1×10×25 میلی‌متر در نظر گرفته شده است که در شکل (4) نمایش داده شده است.

تأثیر منبع حرارتی در ناحیه همجوشی و ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) غالب خواهد بود. به‌منظور افزایش دقت و پیش‌بینی مناسب‌تر خواص حرارتی، اندازه مش در نزدیکی خط مرکزی جوش به‌صورت ظریف‌تر و در انتهای صفحه به‌صورت درشت‌تر انتخاب شد تا زمان محاسبات کاهش یابد.

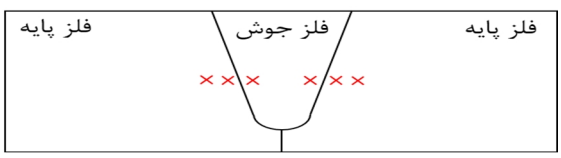
مدل طراحی شده شامل 18260 مش و 14175 گره می‌باشد. سپس داده‌های ترمودینامیکی و مکانیکی آن استخراج و گزارش شد.



شکل2- طرح‌واره نمونه آزمون کشش مطابق با ASTM-E8M

جدول3- خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن 316L

درصد ازدیاد طول (%)	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)
73	640	340



شکل3-طرح‌واره ریز سختی سنجی جوش و فلز پایه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

برای طراحی مدل منبع حرارتی از منبع حرارتی سه‌بعدی گاوسی (منبع حرارتی مخروطی شکل) برای تجزیه و تحلیل حرارتی فرایند جوشکاری لیزر مورد استفاده قرار گرفته است که طرح‌واره این منبع حرارتی در شکل (5) نشان داده شده است. روابط مربوط به منبع حرارتی گاوسی سه‌بعدی در زیر شرح داده شده است [18].

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{\eta P} \quad (1)$$

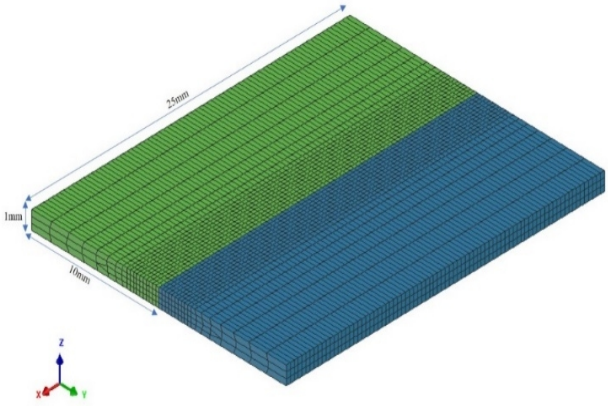
$$q(r,z) = \frac{9\eta p e^3}{\pi H(e^3-1)(r_e^2+r_e r_i+r_i^2)} exp(-\frac{3r^2}{r_0^2}) \quad (2)$$

$$r^2 = (x-x_0)^2 + (y-y_0-vt)^2 \quad (3)$$

$$r_0 = r_e - \frac{(r_e-r_i)(Z_e-Z)}{Z_e-Z_i} \quad (4)$$

$$r_0 = r_e - \frac{(r_e-r_i)(Z_e-Z)}{Z_e-Z_i} \quad (5)$$

در معادلات فوق، Q نشان‌دهنده توان مؤثر لیزر، P نشان‌دهنده توان لیزر، و η ضریب بازده انرژی است. q(r,z) به توزیع چگالی شار حرارتی در فاصله از موقعیت مرکزی r، در صفحه H، با ارتفاع z اشاره دارد. H ارتفاع منبع حرارت است، e یک ثابت طبیعی است، r_e و r_i به ترتیب شعاع‌های سطح بالایی و پایینی منبع حرارت هستند و r_0 نشان‌دهنده حداکثر شعاع مشخصه منبع حرارت در صفحه مختصات z است. z_e نشان‌دهنده فاصله عمودی بین سطح قطعه‌کار و سطح بالایی منبع گرما، z_i نشان‌دهنده فاصله عمودی بین سطح قطعه‌کار و سطح پایین منبع حرارت، v نشان‌دهنده سرعت جوش است و t زمان جوشکاری است.

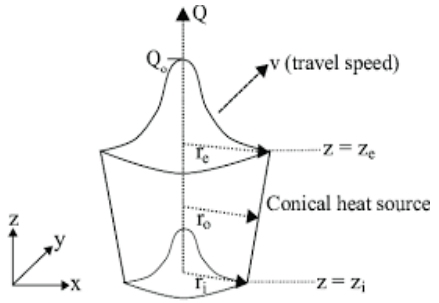


شکل4- مدل المان محدود در پیکربندی اتصال لب به لب برای فرایند جوشکاری لیزر

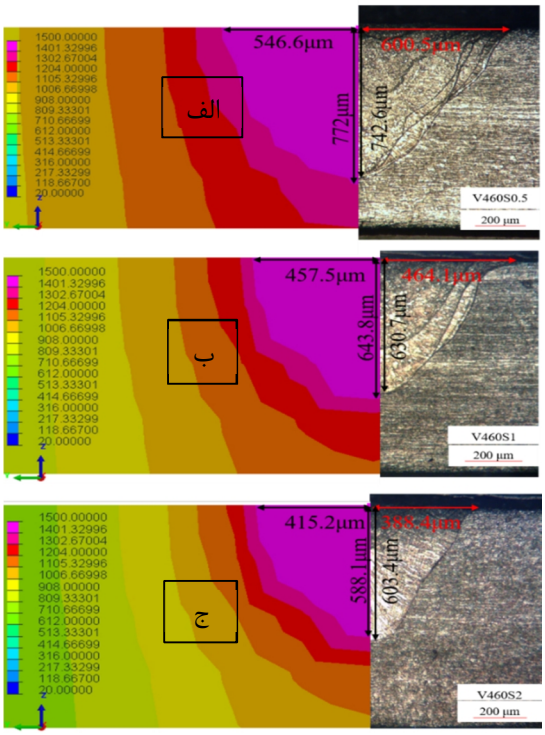
3- نتایج و بحث

3-1- تأثیر متغیرهای جوشکاری بر ابعاد جوش

شکل(6) مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی را برای سه نمونه منتخب همراه با مناطق دمایی خط جوش و اطراف آن را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه سازی با دقت بیش از 90 درصد و میانگین خطای کمتر از 4 درصد تطابق بالایی با نتایج تجربی دارد. این مقدار خطا می‌تواند ناشی از در نظر نگرفتن تأثیر ضربان و درصد روی هم افتادگی ضربان‌ها و همچنین اثر گاز محافظ، کالیبره نبودن دستگاه جوشکاری و خطا در محاسبه ابعاد باشد.



شکل5-طرح‌واره مدل مخروطی منبع حرارتی برای پیش‌بینی هندسه جوش و توزیع دما [18]



شکل6- مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی برای نمونه‌های الف - V460S0.5، ب - V460S1، ج - V460S2

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

شکل(7) نمودار تأثیر سرعت و ولتاژ جوشکاری بر پهنای جوش و عمق نفوذ برای داده‌های تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. طبق‌شکل(7-الف‌و7-ب) با افزایش سرعت جوشکاری و کاهش ولتاژ، پهنای جوش و عمق نفوذ کاهش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که در سرعت‌های کمتر شیب نمودار به دلیل زمان بیشتر برای تعامل پرتو لیزر و ماده بیشتر است.

در جوشکاری لیزرضربانی یکی از فاکتورهای تأثیر گذار بر شکل و مورفولوژی جوش میزان هم‌پوشانی فلزجوش حاصل از ضربان لیزر است. درصد همپوشانی و انرژی توان مؤثر از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$PO = 1 - \frac{v}{D \times f} \quad (6)$$

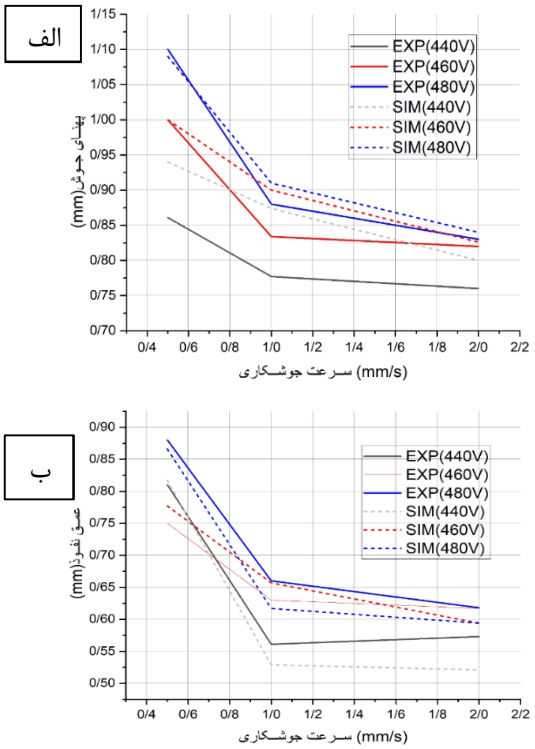
$$F = \frac{1}{1 - PO} \quad (7)$$

$$EPPD = F \times PPD \quad (8)$$

که در آن PO نشان دهنده درصدهم پوشانی ضربان، v سرعت جوشکاری، f تعداد ضربان در واحد زمان (بسامد)، D قطراثر پرتو لیزر، F شاخص همپوشانی، EPPD چگالی توان بیشینه مؤثر و PPD چگالی توان بیشینه (حداکثر توان بیشینه در طول یک ضربان این مقدار از تقسیم توان بیشینه بر مساحت اثر لیزر بر روی سطح نمونه محاسبه می‌شود) [19].

با توجه به ثابت بودن دیگر متغیرهای جوشکاری، مشاهده می‌شود که افزایش سرعت جوشکاری منجر به کاهش میزان همپوشانی ضربان‌ها می‌شود. این امر موجب کاهش چگالی توان بیشینه مؤثر (معادله 8) که مستقیما بر انرژی وارده بر نمونه تأثیر گذار است می‌شود. از این رو همپوشانی کمتر، باعث کاهش حرارت ورودی شده و در نتیجه به کاهش عمق نفوذ و پهنای جوش ختم می‌شود.

بنابراین هر چه سرعت جوشکاری کمتر باشد انرژی بیشتری به ماده منتقل می‌شود و در نتیجه، عمق نفوذ و عرض جوش افزایش می‌یابد. در مقابل، در سرعت‌های بالا زمان اعمال انرژی پرتو لیزر کوتاه‌تر است و انرژی کمتری به ماده منتقل می‌شود. علاوه بر این در سرعت‌های جوشکاری بالاتر، حرارت کمتری فرصت دارد تا از ناحیه جوش به قسمت‌های دیگر قطعه منتقل شود. در نتیجه، حرارت بیشتری در ناحیه جوش باقی می‌ماند و هدر رفت حرارت کاهش می‌یابد. اصطلاحاً در این شرایط هدر رفت حرارت از طریق سازوکار هدایت کمتر می‌شود. از این جهت بازدهی حرارت نیز بیشتر است. همچنین با افزایش ولتاژ، عمق نفوذ و پهنای جوش افزایش می‌یابد. این به علّت آن است که ولتاژ رابطه مستقیمی با توان لیزر و حرارت ورودی دارد و با افزایش ولتاژ، انرژی وارده بر قطعه نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، پهنای جوش و عمق نفوذ افزایش می‌یابد.



شکل7- اثر سرعت جوشکاری و ولتاژ جوشکاری بر (الف) پهنای جوش و (ب) عمق نفوذ

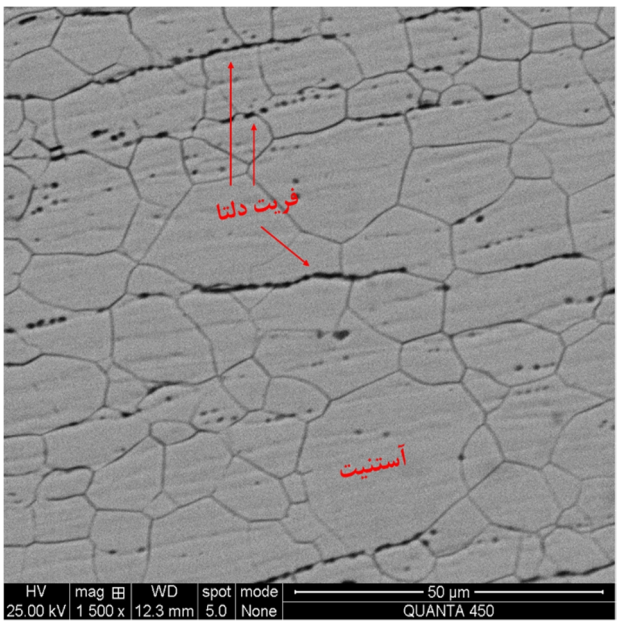
3-2- بررسی‌های فازی و ریزساختاری ناحیه جوش و فلزپایه

شکل(8) تصویر SEM فلز پایه را نشان می‌دهد. فلزپایه دارای ساختار کاملاً آستنیتی به همراه نوارهای فریت دلتا می‌باشد. این فریت می‌تواند از جدایش عناصر فریت‌زا (مانند کروم) در فرایند نورد گرم و در راستای نورد و در هنگام انجماد و فراوری‌های ترمومکانیکی تشکیل شده باشد. این فریت‌ها می‌توانند مکان‌های ترجیحی برای رسوب کاربید و فاز سیگما

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

باشند [20].

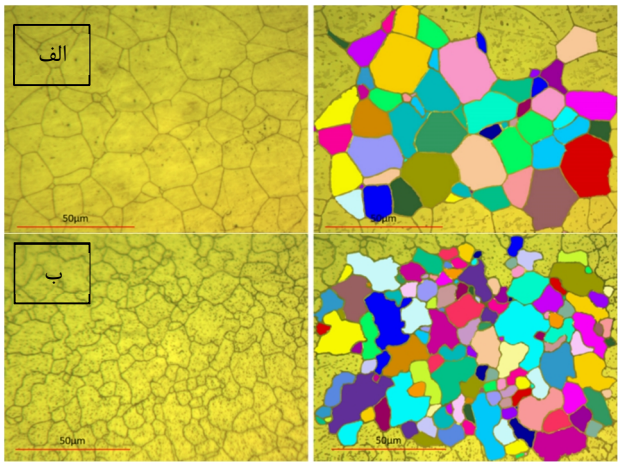
شکل(9) مقایسه اندازه دانه ناحیه جوش و فلزپایه را با استفاده از نرم‌افزار کلمکس نشان می‌دهد. از مقایسه اندازه دانه مرکز جوش و فلز پایه، طبق استاندارد ASTM E112-10 عدد اندازه دانه فلز جوش 11,64 و فلز پایه 10,30 بدست آمد. مطابق با این استاندارد میانگین اندازه دانه فلزجوش 5.66µm و فلز پایه 9.04µm بدست آمد. این بررسی نشان می‌دهد که ساختار مرکز جوش نسبت به فلز پایه ظریف‌تر و ریزدانه‌تر شده است که تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی قطعه خواهد داشت.



شکل8-تصویر SEM فلز پایه

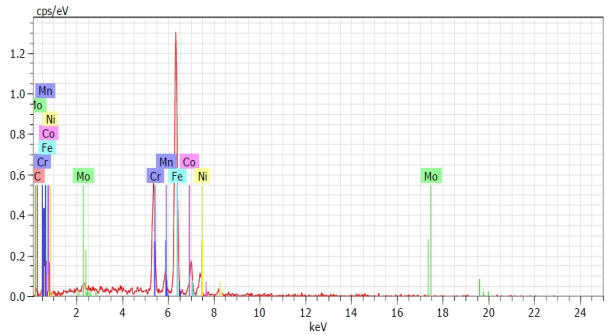
مطابق با این استاندارد میانگین اندازه دانه فلزجوش 5.66µm و فلزپایه 9.04µm بدست آمد. این بررسی نشان می‌دهد که ساختار مرکز جوش نسبت به فلزپایه ظریف‌تر و ریزدانه‌تر شده است که تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی قطعه خواهد داشت.

در جوشکاری لیزری، حرارت ورودی به ناحیه جوش معمولاً بسیار متمرکز و بالا است. این حرارت متمرکز باعث ذوب سریع و عمیق فلزپایه و ایجاد ناحیه‌ای با دماهای بسیار بالا می‌شود. وقتی که این ناحیه با فلز سرد مجاور خود در تماس است به سرعت سرد می‌شود و به دلیل سرعت گرمایش و سرمایش بالا فرصت کافی برای رشد دانه فراهم نمی‌شود و ساختار دانه ریزتر می‌شود.



شکل9- تصویر میکروسکوپی نوری و مقایسه اندازه دانه الف- فلز پایه و ب- فلز جوش نمونه V480S0.5

شکل(10) نتایج آنالیز EDS نقطه‌ای را برای نمونه جوش V480S0.5 نشان می‌دهد. اطلاعات EDS مشخصه‌ای از پروفایل ترکیبی فولاد زنگ نزن 316L با قلّه‌های غالب آهن و کروم در کنار هم را به نمایش می‌گذارد.



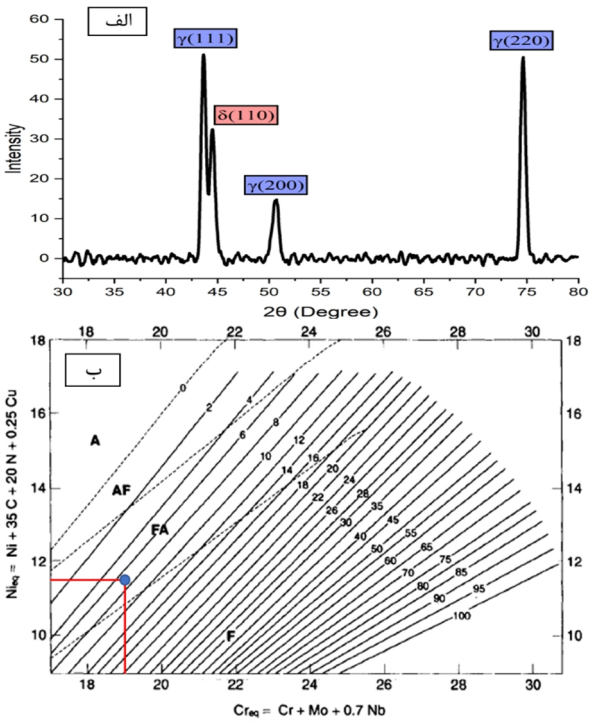
شکل10- نتایج حاصل از EDS نقطه ای مرکز جوش نمونه V480S0.5

شکل(11-الف) نتایج حاصل از XRD را نشان می‌دهد. این نمودار بیشینه‌های قوی مربوط به فاز آستنیت را در زوایای 43.709°، 50.624° و 74.626° نشان می‌دهد. این زوایا با ساختار شبکه کریستالی FCC آستنیت مطابقت دارند. همچنین، یک بیشینه در زاویه 44.598° مشاهده می‌شود که به فاز فریت با ساختار شبکه کریستالی BCC نسبت داده شده است.

این نشان می‌دهد که فلزجوش عمدتاً از فاز آستنیت و فریت تشکیل شده است. با توجه به این شکل، فلزجوش دارای دو فاز آستنیت و فریت می‌باشد. شکل(11-ب) نمودار WRC-1992 را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار و نسبت کروم به نیکل معادل، حالت ساختار فلزجوش شامل فاز فریت و

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

آستنیت است. حالت انجماد بصورت FA و مقدار فریت نزدیک به 7 درصد تخمین زده می‌شود که با نتایج حاصل از XRD مطابقت دارد. برای تشخیص فاز آستنیت به کمک نرم افزار High Score Xpert از کد مرجع 96-431-3212 و برای تشخیص فاز فریت از کد مرجع 96-431-3475 استفاده شد. شکل(9) تصویر SEM از خط مرکزی جوش را نشان می‌دهد. همانطور که در آن شکل مشخص است، رشد اپیتکسیال در جوش رخ داده است. در جوشکاری ذوبی، دانه‌های فلزپایه و یا فلز جامد در خط ذوب به‌عنوان زمینه جوانه‌زنی عمل می‌کند. به این دلیل که فلز مذاب در تماس مستقیم با فلز جامد قرار دارد و به طور کامل این دانه‌ها را تر می‌کند، بلورها از فلز مذاب برروی این دانه‌ها جوانه می‌زنند. این فرایند منجر به شروع رشد در جهت بلوری دانه‌های زمینه می‌شود به این فرایند رشد و جوانه‌زنی هم بافته می‌گویند. نکته رشد هم بافته یکسان بودن ترکیب و ساختار بلوری فلزمذاب حوضچه جوش و فلزجامد می‌باشد[21].



شکل 11-الف- الگوی از پراش پرتو ایکس فلز جوش فولاد 316 L
ب- نمودار WRC-1992 برای تعیین حالت انجماد و تخمین میزان فریت جوش [20].

3-3- تأثیر متغیرهای جوشکاری بر خواص مکانیکی

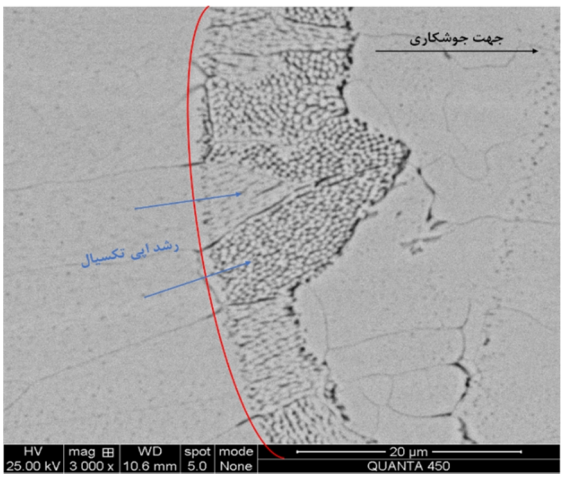
شکل(13-الف) تأثیر سرعت جوشکاری بر تنش پسماند با استفاده از داده‌های شبیه سازی را نشان می‌دهد. همانطور که در تصویر دیده می‌شود، افزایش سرعت جوشکاری از 0/5 به 1 باعث افزایش بیشینه تنش پسماند کششی از 96MPa به 124MPa می‌شود. همچنین زمانی که سرعت جوشکاری از 1 به 2 افزایش می‌یابد بیشینه تنش پسماند کششی به 261MPa می‌رسد. علاوه بر افزایش مقدار تنش پسماند کششی، باعث توزیع غیریکنواخت‌تر تنش خواهد شد. در سرعت‌های جوشکاری بالاتر میزان همپوشانی ضربان‌ها کاهش می‌یابد. همپوشانی ضربان‌ها منجر به پیش‌گرمایش ناشی از ضربان‌های قبلی می‌شود. پیش‌گرمایش باعث کاهش شیب حرارتی شده و توزیع حرارت یکنواخت‌تر می‌شود. همچنین همپوشانی بیشتر نرخ سرمایش را کاهش می‌دهد، از این رو منجربه کاهش تنش‌های کششی ناشی از انقباض حرارتی می‌شود. علاوه بر این ضربان‌های بعدی باعث حرارت دهی مجدد به ضربان‌های قبلی شده و مقداری از تنش پسماندها را آزاد می‌کند. به همین علّت افزایش سرعت جوشکاری به دلیل کاهش میزان همپوشانی باعث افزایش میزان تنش پسماند می‌شود. علاوه بر این حرارت فرصت کافی برای توزیع یکنواخت‌تر در قطعه را پیدا نمی‌کند؛ حرارت در نواحی جوش متمرکز شده و یک گرادیان حرارتی شدیدتر در منطقه جوشکاری ایجاد می‌شود که می‌تواند موجب تنش‌های حرارتی بیشتری می‌شود. پس از جوشکاری ناحیه جوش به‌سرعت سرد می‌شود و در نتیجه انقباض بیشتری را تجربه می‌کند درحالی‌که نواحی اطراف آن ممکن است این انقباض را محدود کنند که منجر به ایجاد تنش‌های کششی می‌شود.

در شکل(13-الف و 13-ب) مشاهده می‌شود که تنش پسماند کششی در ناحیه HAZ بیشتر از مرکز جوش است. با قاطعیت نمیتوان گفت که علّت این افت تنش پسماند کششی در مرکز جوش نسبت به HAZ چیست. اما این پدیده به عوامل مختلفی می‌تواند بستگی داشته باشد که ناشی از فرایند غیریکنواخت گرمایش و سرمایش در حین جوشکاری است. جوشکاری یک

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

فرایند با چرخه حرارتی بسیار غیریکنواخت است. مرکز جوش به بالاترین دما می‌رسد و ذوب می‌شود. ناحیه HAZ ، منطقه‌ای مجاور جوش است که به دمای بالا (اما نه به اندازه دمای ذوب) می‌رسد و در نتیجه آن، ساختار متالورژیکی آن تغییر می‌کند. در حین گرمایش، مرکز جوش و HAZ هر دو منبسط می‌شوند. با این حال، مناطق سردتر اطراف مانع از انبساط آزادانه این نواحی گرم می‌شوند. پس از اتمام جوشکاری و شروع سرد شدن، مرکز جوش و HAZ منقبض می‌شوند. دوباره، مواد سردتر اطراف از انقباض آزادانه این نواحی جلوگیری می‌کنند. این محدودیت‌های مکانیکی اعمال شده توسط مواد سردتر، منجر به ایجاد تنش‌های پسماند در نواحی گرم شده می‌شود. هنگامی که تنش پسماند به استحکام تسلیم ماده برسد، تغییر شکل مومسان رخ می‌دهد. در حین جوشکاری، نواحی با دمای بالا استحکام تسلیم کمتری دارند. با این حال، پس از سرد شدن، استحکام تسلیم در مناطق مختلف تغییر می‌کند. ممکن است در ناحیه HAZ به دلیل تغییرات ساختاری، استحکام تسلیم بالاتری نسبت به مرکز جوش (به ویژه پس از ذوب و انجماد مجدد) ایجاد شود. با افزایش حرارت ورودی جوشکاری، بیشینه تنش در مرکز جوش کاهش می‌یابد، در حالی‌که تنش در HAZ افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که حرارت ورودی بیشتر می‌تواند منجر به توزیع مجدد تنش و افزایش سطح تنش در HAZ شود. به دلیل توزیع حرارت و محدودیت‌های اعمال شده، ممکن است تنش‌های پسماند نهایی در HAZ به مقدار بالاتری نسبت به مرکز جوش برسند.

شکل (13-ب) تأثیر ولتاژ جوشکاری بر تنش پسماند با توجه به داده‌های شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشینه تنش پسماند کششی در 440V، 460V و 480V به ترتیب برابر 124MPa، 135MPa و 153MPa می‌باشد. با افزایش ولتاژ توزیع تنش پسماند تغییر می‌کند و مقدار تنش پسماند کششی ناحیه جوش افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به رابطه ولتاژ با حرارت ورودی ارتباط داد به طوری که افزایش ولتاژ باعث افزایش حرارت ورودی در ناحیه جوشکاری می‌شود. حرارت ورودی بالاتر باعث ایجاد گرادیان حرارتی شدیدتری در ناحیه جوش و HAZ می‌شود. این گرادیان حرارتی منجر به انبساط و انقباض غیریکنواخت می‌گردد. حرارت ورودی بالاتر، میزان انقباض را افزایش داده و در نتیجه تنش پسماند کششی بزرگتری ایجاد می‌کند. همچنین حرارت ورودی بالاتر معمولاً منجر به ایجاد HAZ بزرگتری می‌شود. تنش پسماند به طور عمده در اطراف ناحیه جوش و HAZ متمرکز است. بنابراین، HAZ بزرگتر می‌تواند ناحیه وسیع‌تری را تحت تأثیر تنش پسماند قرار دهد.



شکل12-تصویر SEM از سطح جوش نمونه V480S0.5

نتایج حاصل از ریز سختی سنجی نمونه‌ها در سرعت ثابت 2 میلی‌متر بر ثانیه و ولتاژ ثابت 480 ولت در شکل(14) رسم شده است. شکل(14-الف و14-ب) نشان می دهد که سختی در مرکز جوش بیشتر از فلزپایه است. سختی فلزپایه180 ویکرز بدست آمد. می‌توان گفت افزایش سختی مرکز جوش به دلیل انجماد سریع فلزجوش و ساختار ظریف‌تر این ناحیه نسبت به فلزپایه رخ‌داده است همان‌طور که در شکل(9) بررسی شد که اندازه دانه فلز جوش نسبت به فلز پایه کوچک‌تر است.

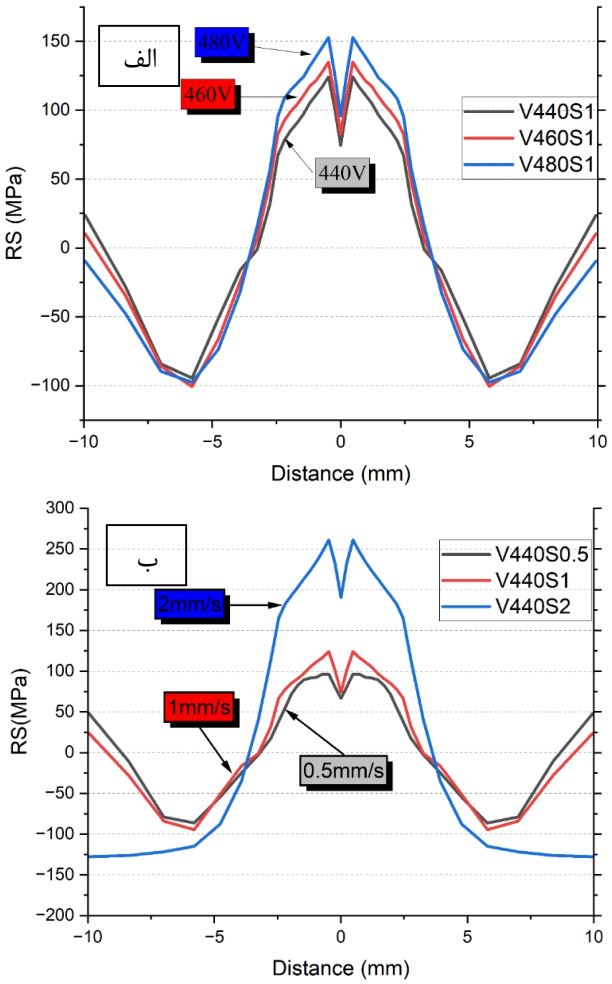
درشکل(14-الف) مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت از 1mm/s به 2mm/s بیشینه سختی ناحیه جوش از 190 به 215 ویکرز افزایش پیدا می‌کند. افزایش سختی نواحی جوش داده شده با سرعت های جوشکاری بالاتر ناشی پدیده‌های متالورژیکی مرتبط با تکامل ریزساختاری می‌باشد.

در سرعت‌های آهسته‌تر، قرار گرفتن در معرض حرارت طولانی مدت منجر به نفوذ کربن و بازپخت HAZ را می‌دهد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

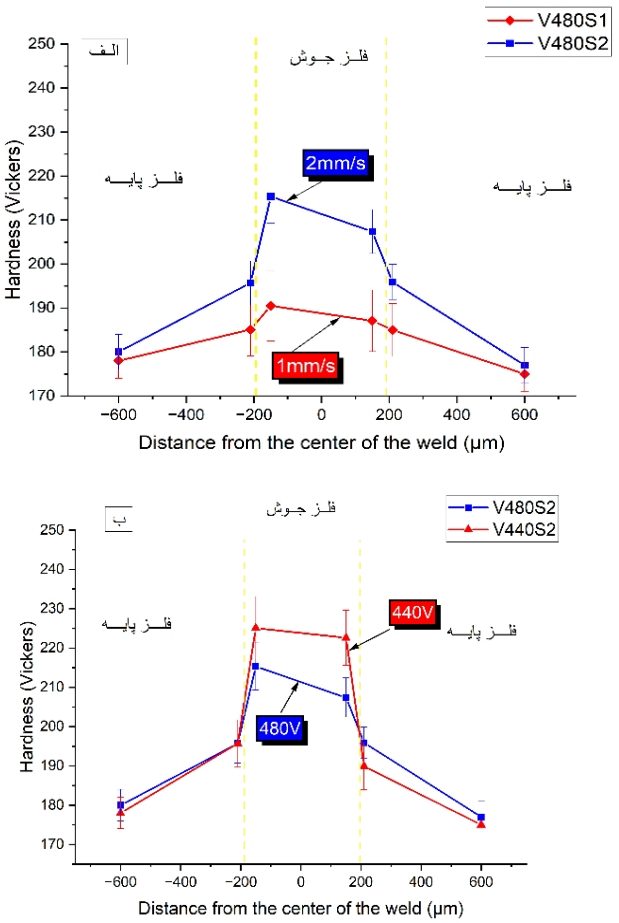
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

سرعت‌های جوشکاری بالاتر این اثر را به حداقل می‌رساند و سختی را حفظ می‌کند. به علاوه، افزایش سرعت جوشکاری باعث کاهش حرارت ورودی و همچنین افزایش نرخ حرکت جبهه انجماد یا نرخ رشد (R) می‌شود از اینرو حاصل ضرب G×R (G شیب حرارتی) افزایش می‌یابد و ساختار ظریف‌تری را حاصل می‌شود.



شکل13-اثر الف- سرعت و ب- ولتاژ جوشکاری بر توزیع تنش پسماند.

در شکل(14-ب) نیز دیده می‌شود با افزایش ولتاژ از 440 ولت به 480 ولت در سرعت ثابت 2 میلی‌متربرثانیه باعث کاهش بیشینه سختی از 225 ویکرز به 215 ویکرز در ناحیه جوش می‌شود. علّت کاهش سختی این است که، افزایش ولتاژ منجر به افزایش حرارت ورودی و در نتیجه کاهش نرخ سرد شدن می‌شود. این شرایط زمان کافی برای رشد دانه‌ها در دوره انجماد جوش را فراهم می‌کند. به بیان دیگر افزایش ولتاژ منجر به افزایش حرارت ورودی به نمونه می‌شود و افزایش حرارت ورودی باعث کاهش گرادیان حرارتی (G) می‌شود و در سرعت‌های ثابت رشد (R)، نرخ G×R کاهش می‌یابد و منجر به ساختار درشت تر می‌شود. بنابراین، علّت کاهش سختی جوش ناشی از افزایش ولتاژ، کاهش سرعت سرد شدن و در نتیجه بزرگتر شدن اندازه دانه‌های ریزساختار جوش می‌باشد.



شکل14-ریزسختی نمونه‌ها در مقطع عرضی الف- ولتاژ ثابت 480 ولت و ب- سرعت ثابت 2 میلی‌متر بر ثانیه

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آزمایش جوشکاری توسط دستگاه جوش لیزر ضربانی Nd:YAG بر روی ورق فولاد زنگ‌نزن 316L به ضخامت 1 میلی‌متر در ولتاژ و سرعت جوشکاری متغیر از نوع اتصال لب به لب انجام شد. همچنین در بحث شبیه‌سازی از مدل منبع حرارتی مخروطی با موفقیت برای تجزیه تحلیل حرارتی و مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

این پژوهش بدین شرح می‌باشد:

- نتایج هندسه جوش حاصل از شبیه‌سازی با میانگین خطای نزدیک 4 درصد انطباق بالایی با نتایج تجربی داشت و روش شبیه سازی به خوبی ابعاد و شکل حوضچه جوش را پیش‌بینی نمود.
- افزایش سرعت جوشکاری از 0.5mm/s به 2mm/s باعث کاهش همپوشانی از93% به 67%، کاهش چگالی توان بیشینه مؤثر از $5963W/mm^2$ به $21831W/mm^2$ و کاهش حرارت ورودی از 228J/mm به 52J/mm می‌شود که باعث کاهش کاهش عمق نفوذ از 0.81mm به 0.57mm و پهنای جوش از 0.86mm به 0.76mm شد.
- افزایش ولتاژ از 440V به 480V به واسطه افزایش حرارت ورودی از 114J/mm به 138J/mm باعث افزایش عمق نفوذ از 0.56mm به 0.66mm و پهنای جوش از 0.78mm به 0.88mm هم در نتایج تجربی و هم داده‌های شبیه‌سازی شد.
- میانگین اندازه دانه مرکز جوش 5.66µm و فلزپایه 9.04µm بدست آمد. دلیل این امر سرعت بالای انجماد فرایند جوش لیزر می‌باشد که ساختار ظریف‌تر با اندازه دانه کوچک‌تر را در فلزجوش نسبت به فلزپایه موجب می‌شود.
- نتایج حاصل از آزمون پراش پرتو ایکس و نمودار WRC-1992 نشان داد که ساختار فلزجوش دارای دو فاز آستنیت و فریت است و حالت انجماد از نوع FA و میزان فریت 7 درصد تخمین زده می‌شود.
- نتایج شبیه سازی نشان داد که افزایش سرعت جوشکاری از 0,5 به 2 میلی‌متر برثانیه در ولتاژ ثابت 440 ولت باعث افزایش بیشینه تنش پسماند کششی از 96 مگاپاسکال به 261 مگاپاسکال شد.
- با توجه به نتایج شبیه سازی افزایش ولتاژ جوشکاری از 440 ولت به 480 ولت در سرعت ثابت 1 میلی‌متر بر ثانیه باعث افزایش 22,5 درصدی بیشینه تنش پسماند کششی شد.
- به‌طورکلی سختی فلزجوش به دلیل اندازه‌دانه‌های ریزتر، بیشتر از فلز پایه بدست آمد. و مقدار سختی فلزپایه 180 ویکرز بود.
- با توجه به داده‌های تجربی افزایش ولتاژ از 440 ولت به 480 ولت در سرعت ثابت 2 میلی‌متربرثانیه باعث کاهش بیشینه سختی از 225 ویکرز به 215 ویکرز در ناحیه جوش شد.
- افزایش سرعت جوشکاری از 1 میلی‌متر به 2 میلی‌متر بر ثانیه در ولتاژ ثابت 480 ولت، باعث افزایش بیشینه سختی از 190 ویکرز به 215 ویکرز در ناحیه جوش شد.

منابع

1-Varmaziar S, Atapour M, Hedberg Y. *Effect of filler metal on microstructure and corrosion behavior of welded AISI 316L using GTAW process*. Journal of Welding Science and Technology of Iran 8(1):2022.

2-Wang Z, Paschalidou EM, Seyeux A, Zanna S, Maurice V, Marcus P. *Mechanisms of Cr and Mo Enrichments in the Passive Oxide Film on 316L Austenitic Stainless Steel.* Front Mater. 2019 Sep 24;6

3-Sedmak A, Hemer A, Sedmak SA, Milović L, Grbović A, Čabrilo A, et al. *Welded joint geometry effect on fatigue crack growth resistance in different metallic materials.* Int J Fatigue. 2021 Sep 1;150

4-Parvaresh A, Sabet H, Roohnia M. *Measuring of Residual Stress in TIG Welding of the AISI 304 Stainless Steel by Ultrasonic Method.* Journal of Welding Science and Technology of Iran. 2022.

5-X. Jiang, W. Wang, C. Xu, J. Li, and J. Lu, *Effect of Process Parameters on Welding Residual Stress of 316L Stainless Steel Pipe*, Materials, vol. 17, no. 10, May 2024.

6-Su, J. Li, K. Zhu, F. Xing, X. Qiu, and J. Liang, *Optimization of Laser Welding Parameters and Fixed Stress Span Design to Minimize Deformation in Ultra-Thin Ferritic Stainless Steel*, Metals (Basel), vol. 15, no. 3, p. 325, Mar. 2025.

7-A. S. Elmesalamy *et al.*, *Measurement and modelling of the residual stresses in autogenous and narrow gap laser welded AISI grade 316L stainless steel plates*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 147, pp. 64–78, Nov. 2016.

8-D. A. Efa, *Laser Beam Welding Parametric Optimization for AZ31B and 6061-T6 Alloys: Residual*

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]

Iran 2015.
15-H. Ding, W. Zhang, Z. Zhang, D. Yin, W. He, and D. Xie, *Influence of welding sequences and boundary conditions on residual stress and residual deformation in DH36 steel T-joint fillet welds*, Thin-Walled Structures, vol. 204, Nov. 2024.
16- K. I. Yaakob, M. Ishak, and S. R. A. Idris, *The effect of pulse welding parameters on weld geometry of boron steel using low power fibre laser*, Journal of Mechanical Engineering and Sciences, vol. 11, no. 3, pp. 2895–2905, Sep. 2017.
17- A. R. Sufizadeh and S. A. A. Akbari Mousavi, *Investigation of Nd:YAG pulsed laser dissimilar welding of AISI 4340 and AISI 316L stainless steels on weld geometry and mechanical properties*, Mechanics and Industry, vol. 18, no. 5, 2017.
18-Agarwal G, Gao H, Amirthalingam M, Hermans M. *Study of solidification cracking susceptibility during laser welding in an advanced high strength automotive steel*. Metals (Basel). 2018 Sep 1;8(9).
19- H. Chmelkov and H. ebestov, *Pulsed Laser Welding, Nd YAG Laser*. InTech, Mar. 09, 2012.
20-Lippold, John C., and Damian J. Kotecki. 2005. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*.John Wiley & Sons, 2005.
21-KOU, Sindo. *Welding metallurgy*. A John Wiley & Sons Inc, 2003.
Stress and Temperature Analysis Using a CCD, GA and ANN, Opt Laser Technol, vol 175, Aug. 2024.
9-Leggatt RH. *Residual stresses in welded structures.* International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2008 Mar;85(3):144–51.
10-Vemanaboina H, Babu MM, Prerana IC, Gundabattini E, Yelamasetti B, Saxena KK, et al. *Evaluation of residual stresses in CO2 laser beam welding of SS316L weldments using FEA.* Mater Res Express. 2023 Jan 1;10(1).
11-Colegrove P, Ikeagu C, Thistlethwaite A, Williams S, Nagy T, Suder W, et al. *Welding process impact on residual stress and distortion.* Science and Technology of Welding and Joining. 2009 Nov;14(8):717–25.
12-Jiang W, Woo W, Wan Y, Luo Y, Xie X, Tu ST. *Evaluation of through-thickness residual stresses by neutron diffraction and finite-element method in thick weld plates.* Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME. 2017 Jun 1;139(3).
13-Qiang B, Xie Q, Lei D, Yang H, Wu J, Qin T, et al. *Investigation into welding residual stress of high-performance-steel Q500qE welded-joint.* J Constr Steel Res. 2025 Jan 1;224.
14-Safari M, Mostaan H. *Experimental and Numerical Investigation of Microstructural Evolutions, Mechanical Properties and Fracture Mode of AISI 1075 Resistance Weld.* Journal of Welding Science and Technology of

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.18]