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

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

Volume 8, Number 1, 2022



Study on microstructure and mechanical properties of laser welded joints of 1.7225 steel

H. Gorji, S. M. Barakat, S.R. Shoja Razavi, S.S. Babaie Sangetabi, M. Erfanmanesh

Faculty of Materials & Manufacturing technology, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Received 18 April 2022 ; Accepted 21 June 2022

Abstract

The aim of the present study is to investigate the mechanical and microstructural properties of 1.7225 steel in laser welding process using Nd:YAG pulsed laser device and then to determine the optimal focal length relative to the part in the welding area. After welding, microstructural characterization, microhardness and tensile tests were performed. Evaluations showed that the optimal focal length for welding of steel sheet 1.7225 with a thickness of 1 mm, it was about 9 mm and the focus was 1 mm below the surface of the part. Due to the high thermal concentration and cooling rate in laser welding, a completely martensitic microstructure has been observed in the molten and heat-affected regions of all specimens. In this alloy, the hardness of the base metal is 310±10 HV. After welding, the hardness of the sample with the optimal focal length has reached 625±10 HV in the heat affected zone and 730±10 HV in the melting zone. Also, the results of tensile test showed that the tensile properties of the sample with the optimal focal length were almost similar to the base steel and fracture was observed in the base steel region.

Keywords: Laser Welding, 1.7225 steel, Focal Length, Microstructure, Hardness..

Corresponding Author: m.barekat@mut-es.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هشتم، شماره1، بهار و تابستان 1401



مطالعه روی ریزساختار و خواص‌مکانیکی ناحیه جوش لیزری فولاد 1/7225

حمیدرضا گرجی، سیدمسعود برکت، سیدرضا شجاع رضوی، سیدسجاد بابایی سنگتابی، محمد عرفان‌منش

مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1401/01/29 ؛ پذیرش مقاله: 1401/03/31

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، بررسی خواص‌مکانیکی و ریزساختاری فولاد 1/7225 در فرایند جوشکاری لیزری با استفاده از دستگاه لیزر پالسی Nd:YAG و سپس تعیین فاصله کانونی بهینه نسبت به قطعه، در ناحیه جوش است. پس از جوشکاری، مشخصه‌یابی ریزساختاری، ریزسختی‌سنجی و آزمون کشش انجام شد. ارزیابی‌های انجام گرفته نشان داد، فاصله کانونی بهینه برای جوشکاری ورق فولاد 1/7225 با ضخامت یک میلی‌متر، حدود 9 میلی‌متر بوده به طوری که کانون در یک میلی‌متر زیر سطح قطعه قرار دارد. با توجه به تمرکز حرارتی و نرخ سرمایش بالا در جوشکاری لیزری، ریزساختار مارتنزیتی، در نواحی ذوبی و متاثر از حرارت نمونه‌ها مشاهده شد. در این آلیاژ، میزان سختی فلزپایه HV 10 ± 310 بود که پس از جوشکاری سختی نمونه با فاصله کانونی بهینه در ناحیه متاثر از حرارت به HV 10 ± 625 و در ناحیه ذوبی به HV 5 ± 730 رسیده است. همچنین، نتایج آزمون کشش نشان داد که خواص کششی نمونه با فاصله کانونی بهینه، تقریباً مشابه با فولادپایه بوده و شکست در ناحیه فولاد پایه مشاهده شده است.

کلمات کلیدی: اتصال جوشکاری لیزری، فولاد 1/7225، فاصله کانونی، ریزساختار، سختی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m.barekat@mut-es.ac.ir

1- مقدمه

فولاد 1,7225 جزو فولادهای مخصوص آلیاژی در دسته بندی استاندارد DIN محسوب می‌شوند. در برخی از مراجع [1]، این فولاد را بدلیل نزدیک بودن محدوده ترکیب شیمیایی آن به فولادهای HSLA، جزو فولادهای HSLA دسته‌بندی می‌کنند. از طرفی دیگر، فولادهای HSLA در هفت گروه دسته‌بندی شده‌اند، که هر کدام از این گروه‌ها با توجه به عناصر آلیاژی مختلف اضافه شده دارای خواص متفاوتی هستند. از این رو بررسی خواص این فولادها پس از انجام عملیات‌های مختلف همانند جوشکاری، به دلیل اطمینان از عدم افت خواص مکانیکی از اهمیت بالای برخوردار است [2].

از میان تمامی فرایندهای جوشکاری، جوشکاری لیزری مزایای متعددی از جمله کاهش یا حذف اصلاحات بعد از جوشکاری، ایجاد جوش باریک با کیفیت بالا، اتصال قطعاتی با جنس و

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]

ضخامت‌های مختلف، محدودکردن ناحیه متاثر از حرارت و تنش‌های حرارتی کم، سرعت جوشکاری بالا و اثرات ناچیز پاشش مذاب و امکان جوشکاری اتوماتیک را نسبت به سایر روش‌های جوشکاری دارد [3]. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در مورد خواص ناحیه جوش فرایندهای مختلف جوشکاری، دستگاه لیزر فیبری و Nd:YAG منجر به ایجاد خواص جوش بسیار بهتری نسبت به سایر دستگاه‌های لیزر خواهند شد [4]. از این رو تحقیقات زیادی در رابطه با بررسی ریزساختاری و خواص مکانیکی این فولادها در عملیات جوشکاری انجام گرفته است. در اکثر تحقیقات انجام گرفته در زمینه جوشکاری لیزری میزان سختی و استحکام ناحیه جوش به دلیل سرعت سردشدن بالا در روش جوشکاری لیزری افزایش یافته است. افزایش سرعت سردشدن باعث ایجاد تنش‌های‌پسماند در قطعه شده است. سرعت سردشدن در لیزر CO_2 کمتر از لیزر Nd:YAG است [6،5]. در ناحیه متاثر از حرارت در صورتی که ریزساختار فلزپایه مارتنزیت باشد، به دلیل تمپرشدن مارتنزیت، نرمی ناحیه متاثر از حرارت رخ داده و سختی کاهش خواهد یافت. ولی در صورتی‌که ریزساختار فلزپایه غیر از مارتنزیت باشد، به دلیل تشکیل مارتنزیت در ناحیه متاثر از حرارت میزان سختی در این ناحیه افزایش خواهد داشت و میزان نرمی ناحیه متاثر از حرارت به حجم مارتنزیت فلزپایه و حرارت ورودی وابسته است [7]. همچنین، افزایش سرعت جوشکاری موجب افزایش نرخ سردشدن و در نتیجه ریزترشدن دانه‌ها، کاهش ضخامت ناحیه متاثر از حرارت و کاهش انعطاف‌پذیری می‌شود. سرعت جوشکاری و استحکام کششی با هم رابطه عکس و توان با استحکام‌کششی رابطه مستقیم دارند. در جوشکاری لیزری پالسی به دلیل روشن و خاموش‌شدن دستگاه جهت تولید پالس، میزان گرادیان دما افزایش و نرخ رشد دانه کاهش می‌یابد [8]. تحقیقات نشان داد که دستگاه جوش لیزری فیبری و Nd:YAG با توجه به تمرکز حرارتی بیشتر، باعث ایجاد ریزساختار مناسب‌تر و در نتیجه حصول جوش با کیفیت‌تر نسبت به سایر دستگاه‌های جوشکاری لیزری خواهند شد [9]. در مطالعات قبلی انجام گرفته روی جوشکاری لیزری فولادها پارامترهایی نظیر نرخ سیلان گاز محافظ، محل قرارگیری فاصله کانونی و قطر پرتو به عنوان پارامترهای ثابت و توان، سرعت جوشکاری، فاصله کانونی و ضخامت نمونه به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده است. از طرفی دیگر، مطالعاتی در مورد تاثیر تغییر محل قرارگیری فاصله کانونی لیزر بر خواص ناحیه جوش فولاد HSLA در فرایند جوشکاری لیزری انجام نگرفته است. بررسی مطالعات انجام شده حاکی از آن است که، در داخل و خارج از کشور تحقیقی در رابطه با ارزیابی خواص جوش لیزر Nd:YAG فولاد 1/7225 انجام نگرفته است. با توجه به خواص مهم فولادهای HSLA، از جمله استحکام خستگی و مقاومت به سایش مناسب، استحکام و انعطاف‌پذیری بالا، کاربرد فراوانی در تولید مته‌های حفاری، قالب‌های مورد استفاده در صنایع، قطعات و ادوات نظامی دارد. از این رو بررسی خواص جوش این فولاد از اهمیت بالایی برخودار است. این فولاد با توجه به نوع عملیات حرارتی می‌تواند دارای ریزساختارهای مختلفی از جمله مارتنزیت، فریت، پرلیت، بینیت و یا تلفیقی از آن‌ها باشد که هر کدام از این ریزساختارها دارای خواص ویژه خود هستند. باتوجه به سختی‌پذیری این فولاد در صورت افزایش سرعت سرد شدن، امکان ایجاد ریزساختار کاملاً مارتنزیتی در این فولاد وجود دارد [10]. با توجه به مطالعات انجام شده در رابطه با جوشکاری لیزری فولادهای HSLA پارامترهای متغیر در این تحقیقات غالبا توان، سرعت جوشکاری و قطر پرتو بوده و پارامترهای ثابت نیز نرخ گاز محافظ و فاصله کانونی بوده است. هدف از این پژوهش بررسی خواص‌مکانیکی و ریزساختاری فولاد 1/7225 در فرایند جوشکاری لیزری با استفاده از دستگاه لیزر پالسی Nd:YAG و سپس تعیین پارامترهای بهینه به منظور جوشکاری لیزری این فولاد و همچنین تعیین محل قرارگیری فاصله کانونی نسبت به قطعه، جهت حصول خواص مناسب در ناحیه جوش لیزری است.

2-روش تحقیق

2-1- مواد اولیه

در این تحقیق از فولاد 1/7225 با ترکیب شیمیایی مشخص شده در جدول(1) که توسط دستگاه طیف نگاری نشر جرقه‌ای

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]

جدول 1- نتایج آنالیز طیف نگاری نشر جرقه‌ای (درصد وزنی).

C	P	S	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
۰/۴۳۲	۰/۰۲۲	۰/۰۳۴	۰/۲۷۵	۰/۸۵۰	۰/۹۳۰	۰/۱۸۶	مابقی

جدول2- پارامترهای مورد استفاده در جوشکاری لیزری ورق‌های فولاد 1/7225.

کد نمونه‌ها	سرعت جوشکاری (mm/min)	محل قرارگیری فاصله کانونی
LW10	۱۲۰	روی سطح بالایی
LW11	۱۲۰	۱ mm بالاتر از سطح
LW12	۱۲۰	۱ mm زیر سطح

جدول3-نتایج آزمون کشش نمونه‌های پایه و جوشکاری شده.

نمونه	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ازدیاد طول (٪)
فلز پایه	۷۱۰	۴۹۰	۱۳
LW10	۶۴۰	۴۱۰	۹
LW11	۴۶۰	۲۸۰	۵
LW12	۶۸۰	۴۶۰	۱۲

بدست آمده، استفاده شد. جهت تهیه ورق‌هایی به ضخامت 1 میلی‌متر در ابعاد 100×100میلی‌متر، قطعه‌ای به ابعاد 100 × 100 ×400 میلی‌متر با استفاده از دستگاه وایرکات، برش داده شد. پس از برشکاری به منظور چربی‌زدایی و حذف آلودگی‌ها از سطح نمونه‌ها، نمونه‌ها توسط استون و برس نرم شستشو داده شد.

2-2- عملیات جوشکاری

جهت جوشکاری لیزری ورق‌های فولاد 1/7225، از دستگاه جوشکاری لیزری ND:YAG پالسی مدل IQL20 مستقر در دانشگاه صنعتی مالک اشتر با توان خروجی 400 وات، فاصله کانونی 9 میلی‌متر نرخ گاز محافظ 20 لیتر بر دقیقه و قطر پرتو 0/9 میلی‌متر استفاده شده است. بدین منظور ابتدا ورق‌های فولادی در فیکسچر بصورت لب به لب قرار گرفته و محکم شدند. نمونه‌ها تحت سرعت جوشکاری ثابت 120 میلی‌متر بر دقیقه و محل قرارگیری فاصله کانونی متغییر در جدول(2) به‌صورت تک پاس جوشکاری لیزری شدند.

2-3- بررسی‌های ریزساختاری

برای بررسی مقاطع عرضی نمونه‌های جوشکاری شده ابتدا نمونه‌ها توسط وایرکات، برش داده شده و سپس نمونه‌ها مانت سرد شدند. سطح مقطع نمونه‌ها سنباده‌زنی و سپس با محلول آلومینا و آب پولیش شدند. از محلول نیتال 2% برای اچ کردن نمونه‌های جوشکاری شده، استفاده شد. ریزساختار نمونه‌ها با میکروسکپ نوری مدلOLYMPUS-PME3 و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی بنیاد علوم کاربردی رازی مدل TESCAN ونحوه توزیع عناصر در ناحیه جوش توسط طیف‌سنج اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی سطوح شکست نمونه‌ها در آزمون کشش از میکروسکپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل FEI-Quanta مجهز به دستگاه آنالیز طیف‌سنج اشعه ایکس مدل EDS Sillicon Drift 2017 واقع در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شد. به منظور تعیین فازهای موجود در فولاد پایه، از دستگاه پراش پرتو ایکس مدل AW-XDM300 ساخت شرکت مبین پرتو مستقر در شهرک

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]

علوم تحقیقاتی اصفهان استفاده شده است. برای این آزمایش، از آند مسی با α λ=1/54 استفاده شده، که در آن برای شناسایی فازهای فریت (Fe-α) و سمنتیت (Fe_3C) به ترتیب از کارت‌های مرجع ICOD با کدهای: 01-087-0722 و 00-023-1113 در نرم افزار Xpert Highscore Plus بهره برده شده است.

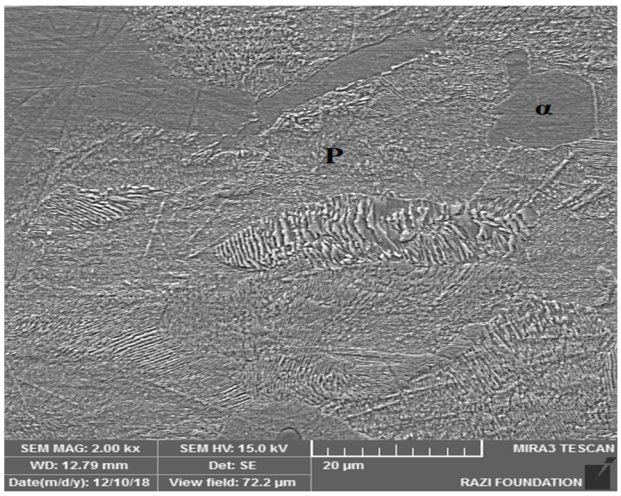
2-4- ارزیابی خواص مکانیکی

آزمون ریزسختی سنجی با استفاده از دستگاه Zwick با بار اعمالی 100 گرم و زمان 15 ثانیه به صورت پروفیل در عرض ناحیه جوش در 19 نقطه انجام گرفت. فاصله بین هر دو نقطه 200 میکرومتر تنظیم شد. به منظور اطمینان از نتایج آزمون، سه پروفیل سختی با فاصله مشخص از لبه نمونه‌ها انجام گرفته شد. در ابتدا نمونه‌های منتخب توسط وایرکات مطابق با استاندارد ASTM E8 به نحوی که خط جوش در وسط نمونه کشش قرار گیرد، بریده شدند. آزمون کشش در دمای محیط توسط دستگاه کشش مدل HOUSNSFEEILD H50KS انجام شد. این آزمون در دمای محیط و با سرعت حرکت فک 1 میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است.

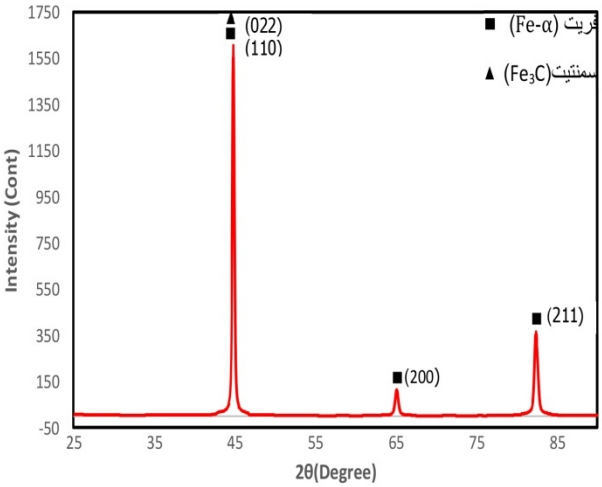
3-نتایج و بحث

3-1- ریزساختار فلزپایه

ریزساختار فلزپایه در شکل (1) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ریزساختار فولاد 1/7225 شامل فازهای فریت (α) و پرلیت (P) است. این فولاد با توجه به عملیات حرارتی متفاوت، می‌تواند ریزساختار فریت و پرلیت، مارتنزیت و بینیت یا تلفیقی از این فازها را داشته باشد. حضور ریزساختار تعادلی فریت و پرلیت در فولاد 1/7225 نشان از انجام عملیات آنیل و نرخ سرمایش آهسته دارد [11]. معمولا از فولاد آنیل‌شده با ریزساختار فریت و پرلیت به‌منظور جلوگیری از ایجاد منطقه افت سختی و کاهش خواص جوش استفاده می‌شود. به‌منظور مشخصه‌یابی فولاد 1/7225 و اطمینان از عدم حضور ریزساختارهای دیگری به غیر از فریت و پرلیت، آنالیز پراش پرتو ایکس انجام گرفت.



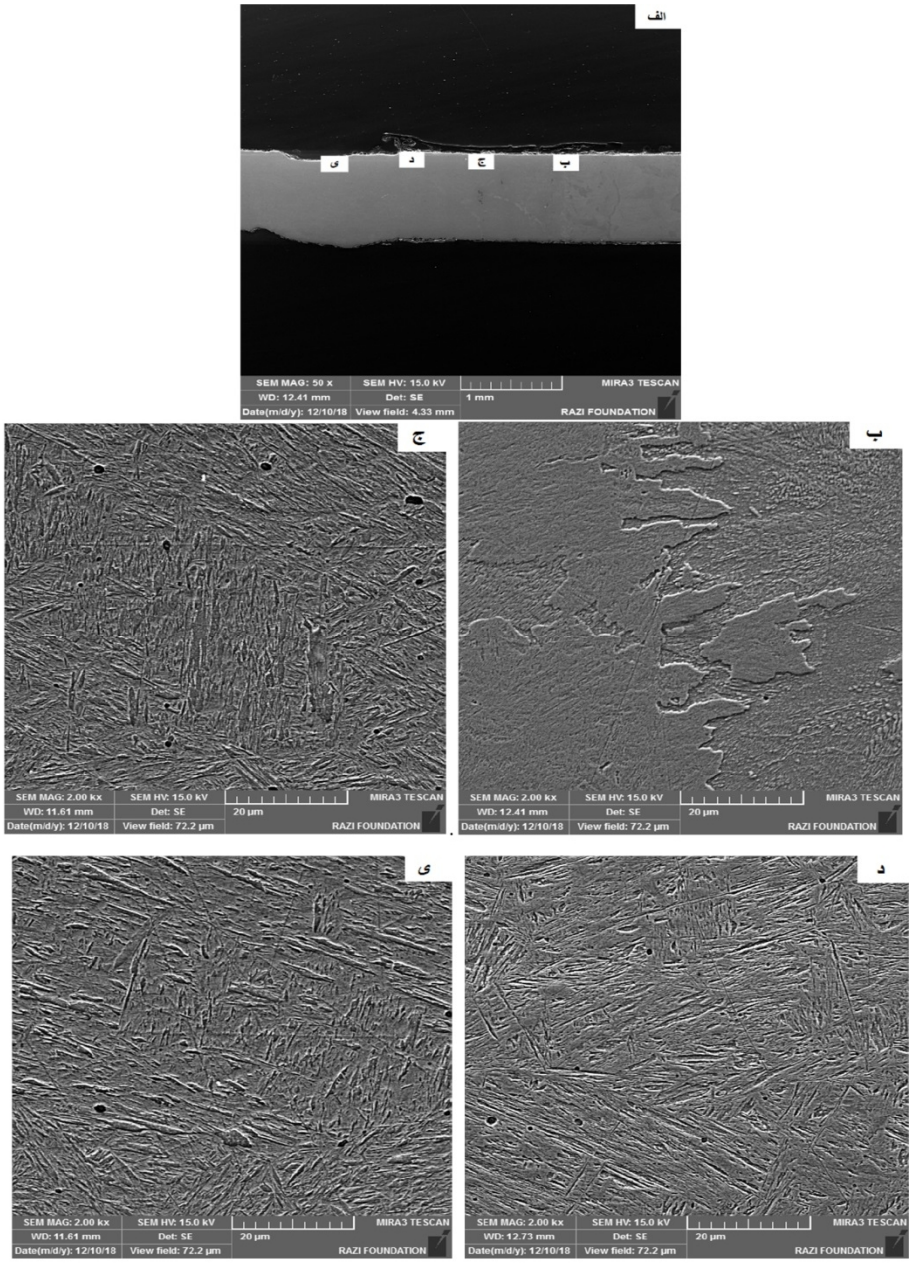
شکل1- تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی از ریزساختار فولادپایه 1/7225.



شکل2- الگوی پراش پرتو ایکس فولاد پایه 1/7225.

مطابق شکل(2) که الگوی پراش پرتو ایکس از فولاد پایه را نشان می‌دهد، فقط پیک‌های مربوط به فازهای فریت و سمنتیت مشاهده می‌شود. حضور پیک‌های سمنتیت و فریت حاکی از آن است که یکی از فازهای تشکیل شده در فولاد پایه، فاز پرلیت بوده است. با توجه به تعداد بیشتر پیک‌های فریت در الگوی پراش پرتو ایکس نسبت به پیک سمنتیت و ریزساختار قابل مشاهده در شکل(1)، با قطعیت می‌توان بیان کرد که ریزساختار غالب فولاد 1/7225 در حالت آنیل شده، فریتی- پرلیتی است. از طرفی دیگر، در آنالیز پراش پرتو ایکس فازهای زیر 5 درصد قابل شناسایی نیستند، که احتمال حضور جزیی فازهای دیگری

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]



شکل3-تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی نواحی مختلف نمونه LW10

الف- ناحیه جوش، ب- فصل‌مشترک ناحیه جوش و فلزپایه، ج و د- ناحیه متاثر از حرارت، ی- ناحیه ذوبی.

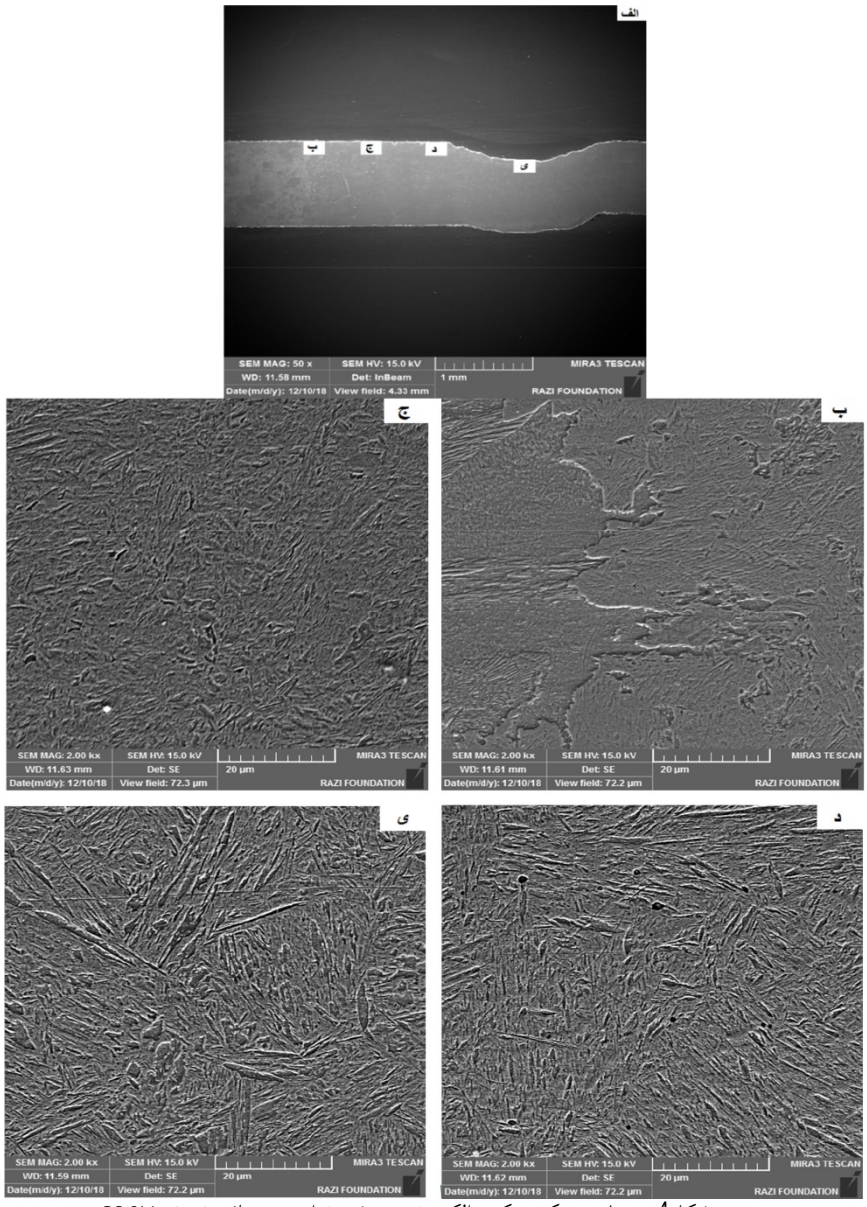
نیز در ریزساختار وجود دارد. اما با بررسی تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی فاز جدیدی مشاهده نشده است.

3-2- ارزیابی ریزساختار ناحیه جوش

شکل(3) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی در نواحی مختلف جوش لیزری نمونه LW10 را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در فصل‌مشترک فولادپایه و ناحیه‌جوش مطابق شکل(3-ب)، ریزساختار از فریت-پرلیت به مارتنزیت به‌صورت پیوسته تغییر می‌کند و اثری از ریزترک ناشی از خواص متفاوت ریزساختارهای فریت-پرلیت و مارتنزیت در این ناحیه مشاهده نمی‌شود. همچنین، در ناحیه متاثر از حرارت دو منطقه با ریزساختار کاملاً مارتنزیتی تشکیل‌شده است. در منطقه نزدیک به ناحیه ذوبی، تیغه‌های ظریف مارتنزیت تشکیل می‌شود (شکل3-د)، این در حالی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]



شکل4- تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی نواحی مختلف نمونه LW11

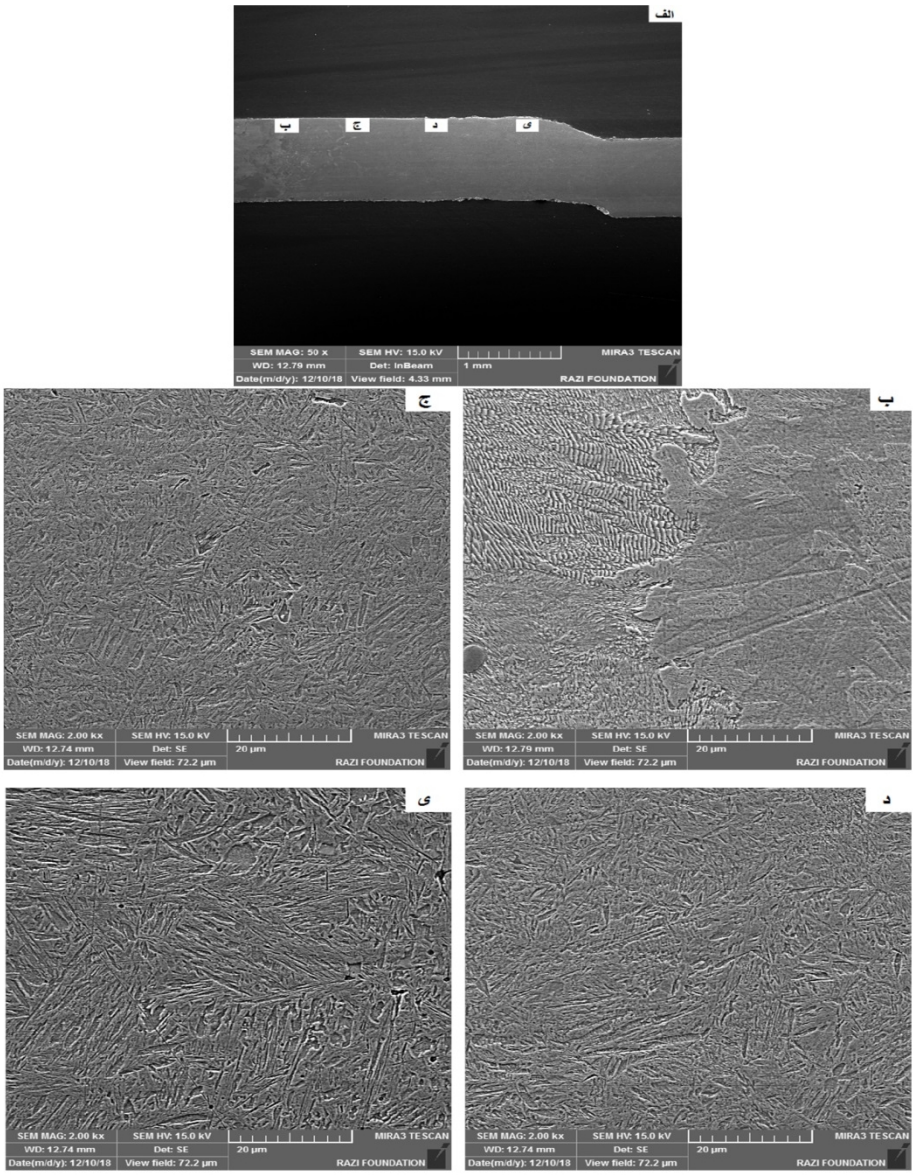
الف- ناحیه جوش، ب- فصل مشترک ناحیه جوش و فلز پایه، ج و د- ناحیه متاثر از حرارت، ی- ناحیه ذوبی.

است که در منطقه دوم که فاصله بیشتری از ناحیه ذوبی دارد، تیغه‌های ظریف مارتنزیت امکان رشد پیدا کرده (افزایش ضخامت و طول تیغه‌ها) و دسته تیغه‌های بسیار خشن مارتنزیتی را در این منطقه تشکیل می‌دهد (شکل 3-ج). میزان رشد تیغه‌های مارتنزیتی به میزان تمرکز حرارتی که تعیین‌کننده سرعت سردشدن است، بستگی دارد[12].

در ناحیه ذوبی (شکل4-ی) نیز ریزساختار مارتنزیتی با تیغه‌های ظریف قابل رویت است. شکل (4) تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی در نواحی مختلف جوش لیزری نمونه LW11 را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در تمامی نواحی اعم از ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه‌ذوبی ریزساختار مارتنزیتی با جهت‌گیری متفاوت تیغه‌ها دیده می‌شود.

در فصل مشترک ناحیه جوش و فولادپایه ریزساختار فریت و پرلیت به‌طور آهسته به مارتنزیت استحاله می‌یابند، بطوری‌که ریزترک حاصل از تغییر فاز در این ناحیه دیده نمی‌شود. همچنین، در ناحیه متاثر از حرارت نمونه LW11، دو منطقه با ریزساختار مارتنزیتی دارای تیغه‌های ظریف مشاهده می‌گردد. بطوری‌که، در منطقه نزدیک به ناحیه‌ذوبی (شکل 4-د)، طول و ضخامت تیغه‌های مارتنزیت به میزان کمی نسبت به منطقه دیگر

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]



شکل5- تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی نواحی مختلف نمونه LW12

الف- ناحیه جوش، ب- فصل مشترک ناحیه جوش و فلزپایه، ج و د- ناحیه متاثر از حرارت، ی- ناحیه ذوبی.

(شکل4-ج) افزایش یافته است. در ناحیه ذوبی نیز (شکل 4-ی) ریزساختار مارتنزیتی با دسته تیغه‌های بسیار خشن (دارای طول و ضخامت بیش‌تر نسبت به سایر نواحی) دیده می‌شود.

با بررسی شکل(5) مشخص شد، در ناحیه‌جوش نمونه LW12 ریزساختار فقط شامل فاز مارتنزیتی است. بطوری‌که، در فصل‌مشترک فولاد پایه و ناحیه جوش ریزساختار به‌صورت پیوسته به مارتنزیت تبدیل شده و تغییر ناگهانی ساختار در این ناحیه دیده نمی‌شود.

وجود تغییر ناگهانی ریزساختار در این ناحیه باعث امکان ایجاد ترک به دلیل خواص متفاوت ساختارها می‌شود [12]. ناحیه متاثر از حرارت از دو منطقه تشکیل‌شده و در هر دو منطقه ریزساختار ماتنزیتی با تیغه‌های ظریف مشاهده می‌گردد.

با توجه به تصاویر شکل (6-پ،6-ت)، تیغه‌های مارتنزیت دو منطقه تقریباً از لحاظ طول و ضخامت شبیه به هم می‌باشند. در ناحیه‌ذوبی طول تیغه‌های مارتنزیت نسبت به ناحیه متاثر از حرارت، افزایش یافته است. تیغه‌های مشاهده شده در تمامی نواحی از ضخامت کمی برخوردار هستند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]



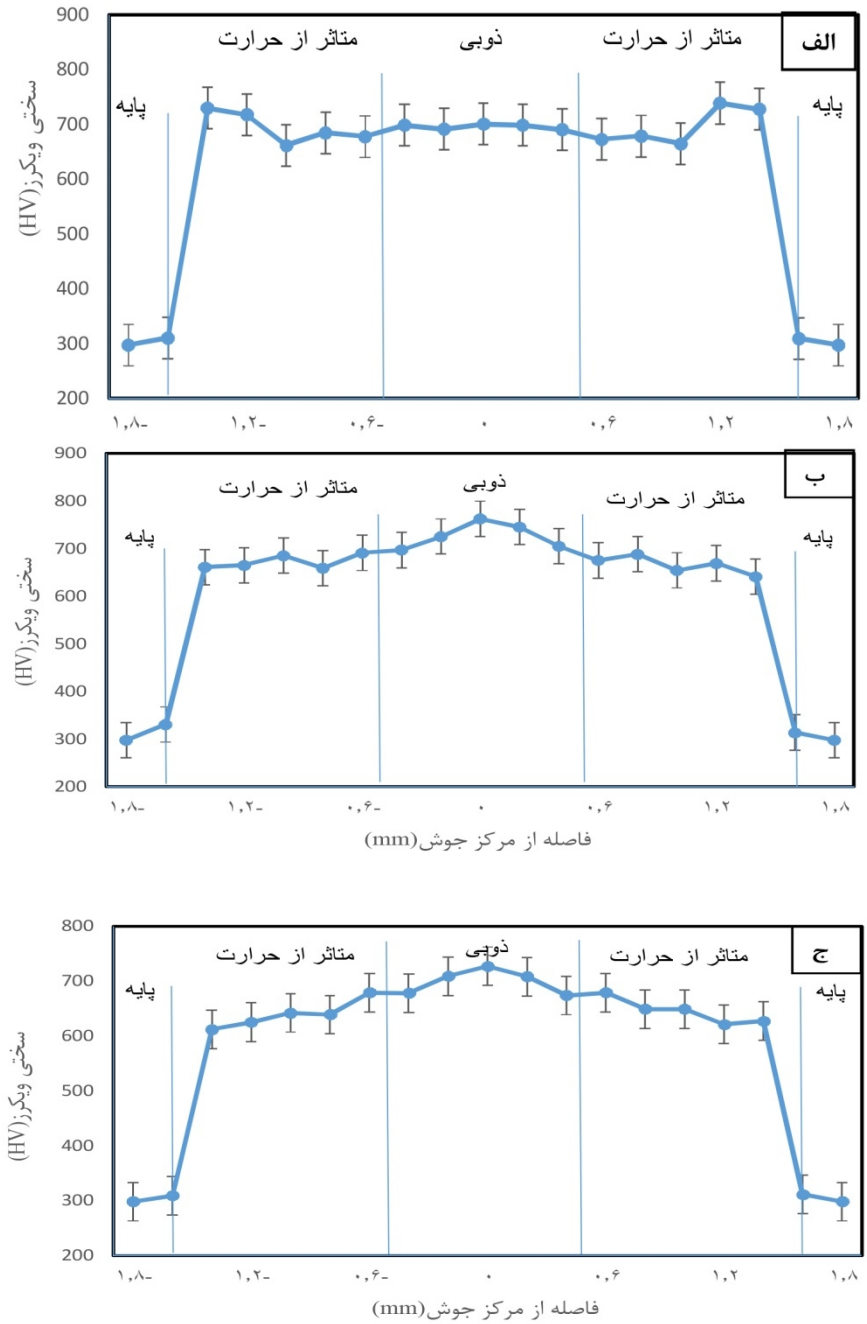
شکل6- نتایج آنالیز EDS الف- نمونهLW10 ب- نمونه LW11.ج- نمونه LW12.

با قرارگیری کانون بر روی سطح نمونه در مقایسه با قرارگیری آن در فاصله دورتر از سطح، میزان تمرکز حرارتی و دنبـــال آن سرعت سردشدن افزایش پیدا خواهد کرد. با این وجود قرارگیری کانونی بر روی سطح نمونه باعث ایجاد ناپایداری و امکان ایجاد تخلخل در ناحیه‌جوش خواهد شد [14].

با مقایسه ناحیه متاثر از حرارت نمونه‌های LW10 و LW11 مشاهده می‌شود که نمونه LW10 تمرکز حرارتی بیشتر و سرعت سردشدن بیشتر نسبت به نمونه LW11 دارد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]



شکل7- پروفیل سختی در عرض ناحیه جوش الف- نمونهLW10 ، ب- نمونه LW11، ج- نمونه LW12..

حضور تیغه‌های خشن مارتنزیت در ناحیه ذوبی و تیغـه‌های ظریف در ناحیه متاثر از حرارت به دلیل عدم تمرکز حرارتی رخ می‌دهد [15]، که این امر در ریزساختار نمونه LW11 مشاهده می‌شود. همچنین، قرارگیری کانون در 1 میلی‌متر بالای سطح منجر به کاهش تمرکز حـــرارتی و در نتیجه کاهش سرعت سرد شدن نسبت به نمونه LW10 شده است.

کاهش سرعت سردشدن باعث انتقال حرارت بیشتر به سایر نواحی و امکان رشد تیغه‌های مارتنزیت می‌گردد. در حالت قرارگیری نقطه کانونی در سطح پایینی قطعه (1 میلی‌متر زیرسطح)، بیشترین نفوذ و تمرکز حرارتی رخ داده است. قرارگیری کانون در 1 میلی‌متر زیر سطح باعث بالاترین تمرکز حرارتی می‌شود [14].

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]

حرارت متمرکز وارده به قطعه باعث افزایش سرعت سردشدن و جلوگیری از انتقال حرارت به سایر نقاط قطعه کار شده، از تشکیل فازهای مضر نظیر تیغه‌های خشن مارتنزیت جلوگیری می‌کند. با حرکت از سمت فلزپایه به سمت ناحیه ذوبی ریزساختار کاملاً مارتنزیتی تشکیل شده، که با نزدیک‌شدن به ناحیه ذوبی تیغه‌های مارتنزیت از ریز به درشت تغییر پیدا می‌کند. به‌دلیل تمرکزحرارتی بالا عرض مناطق مختلف ناحیه جوش نسبت به سایر نمونه‌های جوشکاری لیزری شده، کاهش یافته است. با توجه به تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه‌ها، مشاهده می‌شود، که در ناحیه جوش تمامی نمونه‌های جوشکاری لیزری شده، ریزساختار کاملاً مارتنزیتی حضور دارد. سرعت سردشدن بالا در جوشکاری لیزری با استفاده از دستگاه لیزر Nd:YAG و سختی‌پذیری مناسب فولاد 1/7225 به دلیل حضور عناصر کربن، کرم و منگنز در ترکیب شیمیایی، باعث تشکیل فاز مارتنزیت در ناحیه جوش خواهد شد. بطوری‌که، در اکثر مطالعاتی که توسط دستگاه‌های لیزر Nd:YAG و فیبری انجام شده، چنین ریزساختاری گزارش شده است [16،17،18].

باببررسی‌نتایج‌طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس که به‌صورت خطی در عرض ناحیه جوش نمونه‌های جوشکاری لیزری شده انجام گرفته است، مطابق شکل(6) مشخص شد که با توجه به تغییرات یکنواخت خطوط مربوط به درصد وزنی هر عنصر و عدم تغییر چشمگیر در روند این خطوط، در حین جوشکاری لیزری هیچ‌گونه تغییراتی در توزیع عناصر آلیاژی در نمونه‌ها رخ نداده، جدایش عناصرآلیاژی مشاهده نمی‌شود. تمرکز حرارتی بالای پرتو لیزر و سرعت انجماد بالا در جوشکاری لیزری، منجر به ایجاد ریزساختار مارتنزیتی و در نتیجه آن عدم زمان کافی برای نفوذ عناصر آلیاژی و عدم تغییر موضعی ترکیب شیمیایی شده و با توجه به دلایل ذکر شده جدایش عناصر آلیاژی مشاهده نشده است.

3-3-بررسی خواص مکانیکی

3-3-1- ریزسختی

شکل(7) نتایج آزمـون ریزسختی مربوط به نمـونه‌های LW10، LW11 و LW12 را نشان می‌دهد. برای نمونه LW10 (شکل 7 -الف)، سختی فلز پایه در حدود HV 10 ± 310 می‌باشد. در ناحیه متاثر از حرارت این نمونه سختی تا HV 10 ± 730 افزایش و سپس عدد سختی به‌صورت ناگهانی به HV 10 ± 665 کاهش می‌یابد. سپس روند سختی به صورت یکنواخت تغییر یافته و عدد سختی در ناحیه ذوبی به HV 5 ± 720 می‌رسد. مطابق نتایج ارائه شده در شکل(7 –ب) از آزمون ریزسختی سنجی در سطح مقطع نمونه LW11 سختی فولاد پایه HV 10±310 بوده و این عدد در ناحیه متاثر از حرارت به HV 5±680 می‌رسد و حدوداً یکنواخت به‌صورت صعودی تغییر پیدا کرده و در ناحیه ذوبی عدد سختی به‌صورت ناگهانی و با شیب تند به HV 5±760 تغییر می‌یابد. بررسی نتایج ریزسختی سنجی در سطح مقطع نمونه LW12 در شکل(7-ج) حاکی از آن است که سختی در فولاد پایهHV10±310 می‌باشد. با ورود به ناحیه متاثر از حرارت عدد سختی به HV 10±625 می‌رسد و روند افزایش سختی به‌صورت یکنواخت و بدون تغییرات ناگهانی طی شده، عدد سختی در ناحیه ذوبی HV 5±730 می‌باشد. بررسی پژوهش‌ها حاکی از آن است که سختی فولاد 1/7225 در صورت حضور ریزساختار فریت پرلیتHV 8±316 خواهد بود [19] و سختی بدست آمده برای فولاد پایه حاضر نیز در این محدوده قرار می‌گیرد. با توجه به تمرکز حرارتی بالا در فرایند جوشکاری لیزری و سرعت سردشدن بالا، در ناحیه‌جوش ریزساختار مارتنزیتی به وجود آمده که باعث مشاهده سختی بالا در ناحیه‌جوش تمامی نمونه‌ها نسبت به فولاد پایه شده است [20، 18، 15]، این امر در پروفیل سختی تمامی نمونه‌های جوشکاری لیزری شده مشاهده می‌شود. میزان تمرکز حرارتی و سرعت سردشدن در صورت قرارگیری کانون پرتو لیزر روی سطح نمونه در مقایسه با قرارگیری آن در 1 میلی‌متر زیر سطح (نمونه LW12) افزایش و در مقایسه با نمونه LW11 کاهش می‌یابد. تمرکز پرتو لیزر در روی سطح منجر به ایجاد حفره کلید ناپایدار خواهد شد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]

تیغه‌های ظریف مارتنزیت که در ناحیه متاثر از حرارت تشکیل شده‌اند، به دلیل حرارت منتقل شده، رشد کرده و باعث ایجاد تیغه‌های خشن و طویل شده است. میزان عرض مناطق مختلف ناحیه جوش به دلیل افزایش تمرکز حرارتی نسبت به نمونه LW12 افزایش یافته است. میزان حرارت منتقل‌شده به سایر نواحی با میزان تمرکز حرارتی رابطه عکس دارد. قرارگیری فاصله کانونی بالای نمونه، باعث کاهش بیشتر تمرکز حرارتی نسبت به سایر نمونه‌ها گردیده، این امر منجر به انتقال بیشتر حرارت به سایر نواحی جوش نسبت به نمونه‌های دیگر شده و عرض نواحی ذوبی و متاثر از حرارت در مقایسه با سایر نمونه‌ها بیشتر بوده است. کاهش سرعت سردشدن منجر به تشکیل تیغه‌های مارتنزیتی بسیار خشن در ناحیه ذوبی (با طول زیاد) می‌شود [14،15]. قرارگیری کانون به میزان 1 میلی‌متر زیر سطح، منجر به تمرکز حرارتی بالاتر در هنگام جوشکاری نمونه LW12 نسبت به سایر نمونه‌های دیگر گردیده است. این امر باعث سرعت سردشدن بیشتر و کاهش میزان انتقال حرارت به سایر نواحی شده که در نتیجه کاهش عرض نواحی در سطح مقطع این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها مشاهده شده است.

3-3-2- خواص کششی

در جدول (3) نتایج آزمون کشش نمونه‌های جوشکاری لیزری شده و پایه ارائه شده است. استحکام کششی، استحکام تسلیم و میزان ازدیاد طول نمونه فولاد پایه به ترتیب 710MPa، 490MPa و13% می‌باشد که این اعداد پس از جوشکاری لیزری در نمونه LW10 به‌ترتیب به 640MPa، 410MPa و9%، در نمونه LW11 به‌ترتیب به 460MPa، 280MPa و 5% و در نمونه LW12 نیز به‌ترتیب به 680MPa، 460MPa و 12% تغییر یافته است. نمونه LW12 از لحاظ استحکام کششی، استحکام تسلیم، کاهش سطح مقطع پس از شکست و میزان تغییر طول و انعطاف‌پذیری تقریباً نزدیک به نمونه پایه می‌باشد و این نمونه بهترین رفتار و کیفیت جوش را نسبت به سایر نمونه‌های جوشکاری لیزری شده داشته است. حضور دسته تیغه‌های بسیار خشن مارتنزیت در ریزساختار ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه ذوبی نمونه‌های LW10 و LW11، منجر به افزایش غیرمتعارف سختی و تردی در این نواحی شده، که در طی انجام آزمون کشش تمرکز تنش در این نواحی ایجاد شده و شکست نمونه‌ها در این نواحی اتفاق افتاده است، که این امر نشان از کیفیت پایین جوش لیزری در این نمونه‌ها دارد. شکست نمونه کشش در ناحیه فولاد پایه نشان از کیفیت بالای جوش دارد [15]. تشکیل مارتنزیت خشن در ریزساختار منجر به ایجاد مناطق تمرکز تنش شده و در آزمون کشش شکست در این ناحیه رخ می‌دهد [13]. کاهش انعطاف‌پذیری پس از جوشکاری به‌دلیل تشکیل حجم بالای فاز مارتنزیت در ناحیه جوش می‌باشد [21،22]. عدم تغییر محسوس نتایج آزمایش کشش نمونه جوشکاری شده با نمونه پایه، نشان از خواص مناسب نمونه جوشکاری شده دارد [23]، در این تحقیق نمونه LW12 خواص کششی تقریباً مشابه با فولاد پایه داشته و نسبت به سایر نمونه‌ها از کیفیت جوش بالایی برخودار می‌باشد.

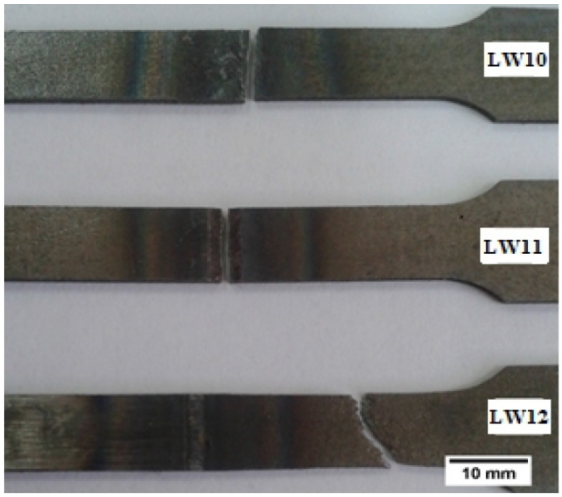
3-3-3-شکست نگاری

مطابق شکل(8) شکست نمونه‌ها LW10، LW11 و LW12 در آزمون کشش به ترتیب در ناحیه متاثر از حرارت، ناحیه ذوبی و فلزپایه رخ داده است. به منظور تعیین محل شکست نمونه‌ها از تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی در سطح مقطع نمونه‌ها استفاده شد. شکست نمونه‌های LW10 و LW11 در ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه ذوبی، نشان از کیفیت پایین جوش دارد و با توجه به نتایج ارائه شده در ارزیابی ریزساختار و سختی، محل شکست نمونه‌ها در آزمون کشش دقیقاً در محل‌هایی بوده که تیغه‌های بسیار خشن مارتنزیتی تشکیل شده و سختی در این نواحی به‌صورت ناگهانی افزایش یافته است. شکست نمونه در ناحیه فلز پایه نشان از کیفیت بالای جوش دارد [15,22].

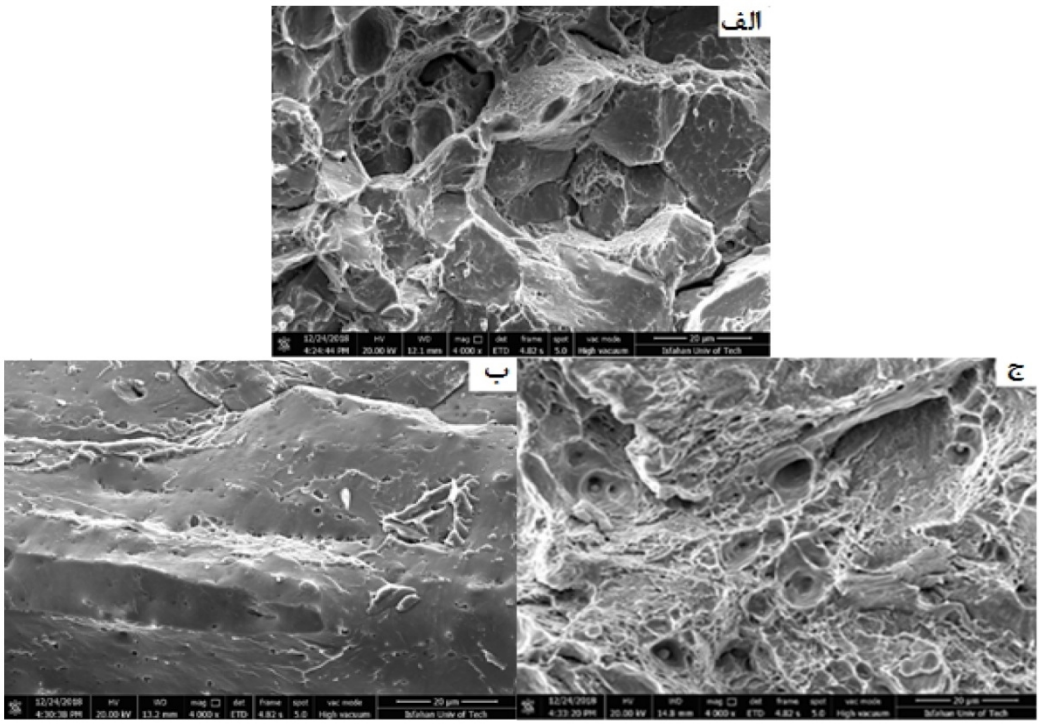
به منظور بررسی سطح شکست نمونه‌های در آزمون کشش و تعیین نوع شکست، سطح شکست نمونه با میکروسکپ الکترونی روبشی در شکل(9) مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل(9-ب) که مربوط به سطح شکست نمونه LW11 بوده، به دلیل عدم مشاهده دیمپل‌ها شکست از نوع ترد بوده است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]



شکل8- تصویر ناحیه شکست نمونه‌های جوشکاری لیزری شده پس از آزمون کشش.



شکل9- تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های جوشکاری شده پس از آزمون کشش
الف-LW10، ب- LW11، ج-LW12 .

با بررسی تصاویر شکست مربوط به نمونه LW10 و LW12 مشخص گردید که، با توجه به تعداد کم دیمپل‌ها در سطح شکست نمونه LW10 نسبت به سطح شکست نمونه LW12، شکست نمونه LW12 نرم‌تر از نمونه LW10 می‌باشد. همچنین قطر دیمپل‌ها در نمونه LW10 نسبت به نمونه LW12 بزرگتر است. حضور فرورفتگی‌های فنجانی شکل در نواحی سطح شکست نمونه‌ها، نشان از شکست نرم دارد [15,24,25].

قطر دیمپل با استحکام تسلیم و کششی رابطه عکس دارد، بدین معناکه با کاهش استحکام تسلیم و کششی قطر دیمپل‌ها در سطح شکست افزایش می‌یابد [26].

4-نتیجه‌گیری

- مشاهدات ریزساختاری حاکی از آن است که با توجه به تمرکز حرارتی و سرعت سردشدن بالا در فرایند جوشکاری

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]

لیزری و میزان سختی‌پذیری مناسب فولاد در ناحیه جوش تمامی نمونه‌ها ریزساختار کاملاً مارتنزیتی تشکیل‌شده است.

- با افزایش فاصله کانون از سطح نمونه، میزان تمرکز حرارتی کاهش و میزان حرارت منتقل‌شده به نواحی افزایش یافته که این امر منجر به رشد تیغه‌های مارتنزیت و تشکیل تیغه‌های خشن مارتنزیت در منطقه ذوبی و منطقه متاثر از حرارت شده است. تشکیل این تیغه‌ها در هرکدام از مناطق به محل قرارگیری کانون بستگی دارد.

- نتایج آزمون ریزسختی‌سنجی حاکی از آن است که در نمونه LW12 افزایش سختی با روند مشخص از فلزپایه (310±10HV) به سمت ناحیه متاثر از حرارت (10± 625) و ناحیه ذوبی (730±5 HV) بوده و در نمونه‌های LW10 و LW11 به ترتیب افزایش سختی در ناحیه متاثر از حرارت (730 ±10 HV) و ذوبی (760 ± 5 HV) مشاهده شد.

- نتایج آزمون کشش حاکی از آن است استحکام کششی و تسلیم و میزان ازدیاد طول نمونه LW12 به ترتیب 680 MPa و 460MPa و 12% بوده و این نمونه رفتار بسیار مشابه نسبت به سایر نمونه با فولاد پایه داشته (710MPa و 490MPa و13%) و شکست این نمونه در آزمون کشش در ناحیه فولاد پایه و نمونه LW10 در ناحیه متاثر از حرارت و نمونه LW11 در ناحیه ذوبی رخ داده است.

منابع

1-Kashefi, M., et al.,"Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Mo40 Steel in Ferrite-Martensite dual phase and quenched tempered condition", Journal of New Materials, 2018, 77-88.

2-Verlinden, B, et al.,"Thermo- mechanical processing of metallic materials", Elsevier LTD, First Edition, Amesterdam, (2007).

3-جان ویلسون و ج.ف.ب هاوکز، **لیزر اصول و کاربردها**، ترجمه دکتر عباس بهجت، انتشارات دانشگاه یزد، اصفهان (1381).

4-High- Strength structural and high strength low alloy steels, Properties and selection: Iron, Steels and High Performance alloys, ASM Handbook, ASM International (1990) 389-423.

5-Xu, W., et al.," Microstructure and fatigue performance of single and multiple linear fiber laser welded DP980 dual-phase steel", Materials Science and Engineering A, 2012, 553:p. 51– 58.

6-Xia, M., et al.," Effects of Heat Input and Martensite on HAZ Softening in Laser Welding of Dual Phase Steels", ISIJ International, 2008, 48:p.809-814.

7-Pang, Q., et al.," Microstructure and properties of hot-rolled high strength bainitic steel by laser welding", Materials and Design, 2015, 87:p. 363–369.

8-Sowards. J., et al.," Low-cycle fatigue behavior of fiber-laser welded, corrosion resistant, high-strength low alloy sheet steel", Materials & Design, 2017,121: p. 393–405.

9-Kim, C., et al.," A study on the CO_2 laser welding characteristics of high strength steel up to 1500 MPa for automotive application", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2010, 39:p. 79-86.

10- علی سالمی گلعذانی، امیر عبدالله زاده و مجید میرزایی، مقایسه خواص مکانیکی ریز ساختار مارتنزیت بازگشت داده شده و ریزساختار فریت-بینیت-مارتنزیت در فولاد 42CrMo4، ماهنامه مهندسی مکانیک مدرس1 (1389) 76-63.

11-Arivazhagan,N., et al.," Investigation on AISI 304 Austenitic Stainless Steel to AISI 4140 Low Alloy Steel Dissimilar Joints by Gas Tungsten Arc, Electron Beam and Friction Welding", Materials and Design, 2011, 32:p. 3036-3050.

12-Parkes, D., et al.," Microstructure and fatigue properties of fiber laser welded dissimilar joints between high strength low alloy and dual-phase steels", Materials and Design, 2013, 51: p. 665–675.

13- Saha, D., et al.,"Microstructure properties correlationin fiber laser welding of dual-phase and HSLA steels", Materials Science and Engineering A, 2014, 607:p. 445–453.

14-رضا شجاع رضوی و محمد عرفان منش، **فراوری مواد با لیزر**، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، 1394.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]

15-Guo, W., et al.," Microstructure and mechanical properties of laser welded S960 high strength steel", Materials and Design, 2015, 85:p. 534–548.

16- Kou, S., "Welding metallurgy", 2nd edition. Hoboken(NJ): John Wiley& SonsInc,2003.

17-Porter, D., " Phase transformations in metals and alloys". 2nd edition, Boca Ratton (FL): Taylor & Francis Group ,1992.

18-Parkes,. D., "Tensile properties of fiber laser welded joints of high strength low alloy and dual-phase steels at warm and low temperatures", Materials and Design, 2014, 56:p.193–199.

19- Subhash Chander, G.,"Influence of Process Parameters on Impact Toughness and Hardness of Dissimilar AISI 4140 and AISI 304 Continuous Drive Friction Welds", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64: p.1445-1457.

20-Coelho, R., "Induction-assisted laser beam welding of a thermomechanically rolled HSLA S500MC steel: a microstructure and residual stress assessment", Materials Science and Engineering A, 2013, 578:p. 125–133.

21-Ramesh,M., "Structure – properties evaluation in laser beam welds of high strength low alloy steel", Materials Today: Proceedings, 2, 2015:p. 2532–2537.

22-Oyyaravelu, R., " Metallurgical and Mechanical properties of Laser welded High Strength Low Alloy Steel", Journal of Advanced Research , 2016, 7:p. 463-472.

23-Xu, WD, "Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints", Materials and Design, 2013, 43:p. 373–383.

24-Guo, WL,. "Comparison of microstructure and mechanical properties of ultra-narrow gap laser and gas-metal-arc welded S960 high strength steel", Optics and Lasers in Engineering, 2017,91:p. 1–15.

25-Liu,Y., "Strain rate dependent deformation and failure behavior of laser welded DP780 steel joint under dynamic tensile loading", Materials Science & Engineering A, 2015, 627:p. 296–305.

26-Xian. K,, " A Review of Fracture Toughness Testing and Evaluation Using SENT Specimens", International Pipeline Conference, Canada ,2014.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.5.3]