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

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

Volume 12, Number 1, 2026



Influence of welding process and joint geometry on mechanical and microstructural properties of St37 blade-to-shaft joints

M. R. Sheikhmohseni, S. Ansari Lale, S. M. A. Boutorabi*
School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Received 10 May 2026 ; Accepted 16 June 2026

Abstract

This study presents a comparative evaluation of SMAW and GMAW welding processes for blade-to-shaft joints in St37 steel industrial mixers operating in lead-processing environments. The effects of welding process selection and joint geometry modification on the microstructural and mechanical properties of the welded joints were investigated. The results showed that the use of the GMAW process reduced the average heat-affected zone (HAZ) width from 1532 μm to 871 μm, corresponding to a 43.1% reduction compared to SMAW. In addition, the ultimate tensile strength increased from 376 MPa for SMAW joints to 400 MPa for GMAW joints, representing a 6.4% improvement. Microhardness measurements revealed an increase in the average HAZ hardness from 145 HV to 160 HV, corresponding to a 10.3% increase. Microstructural examinations also revealed noticeable differences in the characteristics of the weld metal and HAZ produced by the two welding processes. The findings indicate that the combination of GMAW and optimized joint geometry can improve the mechanical performance and reliability of blade-to-shaft joints in industrial mixers.

Keywords: St37 Steel, Industrial Agitator, Mechanical Performance, Joint, Fusion Welding.

*Corresponding Author: S. M. A. Boutorabi, boutorabi@iust.ac.ir.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دوازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1405



بررسی تأثیر فرایند جوشکاری و هندسه اتصال بر خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصالات پره به شفت St37

محمدرضا شیخ محسنی، سینا انصاری لاله، سیدمحمدعلی بوترابی *

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران.

دریافت مقاله: 1405/02/20 ؛ پذیرش مقاله: 1405/03/26

چکیده

این پژوهش به ارزیابی تطبیقی فرایندهای جوشکاری SMAW و GMAW بر اتصالات پره به شفت همزن‌های صنعتی از جنس فولاد St37 مورد استفاده در محیط‌های سربی می‌پردازد. به‌منظور بهبود عملکرد اتصال، اثر فرایند جوشکاری و اصلاح هندسه اتصال بر ریزساختار و خواص مکانیکی نواحی جوش بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از فرایند GMAW پهنای متوسط ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) را از 1532 به 871 میکرومتر کاهش داد که معادل 43/1 درصد کاهش نسبت به SMAW است. همچنین استحکام کششی نهایی اتصال از 376 مگاپاسکال در نمونه SMAW به 400 مگاپاسکال در نمونه GMAW افزایش یافت که بهبود 6/4 درصدی را نشان می‌دهد. نتایج آزمون میکروسختی نیز افزایش میانگین سختی HAZ از 145 به160 HV را نشان داد که معادل 10/3 درصد افزایش سختی است. بررسی‌های ریزساختاری تفاوت محسوسی در ویژگی‌های ناحیه جوش و HAZ دو فرایند آشکار کرد. نتایج نشان می‌دهد انتخاب فرایند GMAW همراه با اصلاح هندسه اتصال می‌تواند موجب بهبود خواص مکانیکی و افزایش قابلیت اطمینان اتصالات پره به شفت در همزن‌های صنعتی شود.

کلمات کلیدی: فولادSt37، همزن صنعتی، عملکرد مکانیکی، اتصال، جوشکاری ذوبی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: سیدمحمدعلی بوترابی،boutorabi@iust.ac.ir.

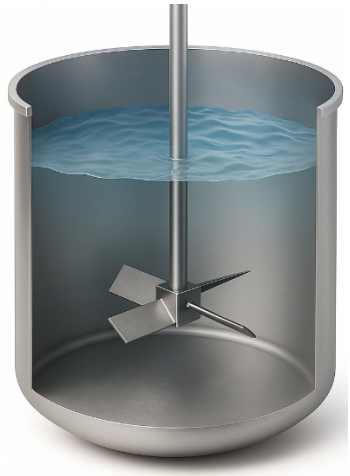
1- مقدمه

همزن‌های صنعتی از تجهیزات حیاتی در فرایندهای شیمیایی و معدنی هستند که عملکرد آن‌ها در محیط‌های سختی مانند مذاب سرب، مستقیماً بر بهره‌وری و هزینه‌های عملیاتی تأثیرگذار است [1]. فولاد کم‌کربن St37 به دلیل توازن میان خواص مکانیکی و اقتصادی، گزینه‌ای رایج برای ساخت پره‌های همزن است؛ با این حال، حساسیت این فولاد به عیوبی نظیر ترک و تخلخل در حین جوشکاری، پایداری سازه را در برابر بارهای دینامیکی و محیط‌های خورنده با چالش مواجه می‌کند [2]. تخریب زودهنگام این قطعات نه‌تنها موجب توقف خط تولید، بلکه باعث بروز مخاطرات ایمنی و افت کیفیت محصول می‌گردد [3]؛ لذا تحلیل مکانیزم‌های شکست و بهینه‌سازی روش‌های اتصال در این تجهیزات ضرورت دارد. بررسی و تحلیل این موضوع می‌تواند نقش مؤثری در افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات، کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود پایداری فرایندهای صنعتی ایفا کند. در شکل(1) شماتیک شبیه

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

سازی شده جهت درک بهتر از همزن‌های صنعتی آورده شده است. در شکل(2)، نمای شفت و پره‌های همزن واقعی پس از پایان سیکل کاری ارائه شده است تا با مدل تئوری پیشین قابل‌مقایسه باشد.



شکل1- طرحواره‌ای از اجزای اصلی همزن صنعتی شامل شفت و پره‌های مورد مطالعه.



شکل2- تصاویری از پره‌های همزن مورد مطالعه. الف- نمای کلی از شفت و پره‌های همزن، ب- نمای نزدیک از پره‌ها و شیوه اتصال پره‌ها به شفت.

در پژوهشی که توسط کومار و همکاران [4] انجام شد، تأثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری (PWHT) بر روی فولاد کم آلیاژ 42CrMo4 (معادل EN19) با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی با الکترود پوشش‌دار (SMAW) مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه به طور خاص به چگونگی تأثیر پارامترهای جوشکاری و عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی قطعات جوش‌خورده پرداخته است. یافته‌های این تحقیق در درک رفتار مکانیکی اتصالات SMAW بر روی مواد مشابه با پره‌های همزن صنعتی و همچنین ارزیابی اثرات احتمالی عملیات حرارتی پس از جوشکاری، حائز اهمیت است. این دانش می‌تواند مبنایی برای بهینه‌سازی فرایند جوشکاری و بهبود کیفیت اتصالات در کاربردهای صنعتی فراهم آورد.

در تحقیق دیگری که به بررسی جوشکاری اتصالات ناهمجنس پرداخته شده است، خواص جوش‌های حاصل از اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی (مانند 314L/316L) به فولاد زنگ نزن دوبلکس با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی با الکترود پوشش‌دار (SMAW) مورد ارزیابی قرار گرفته است [5]. این مطالعه بر چالش‌ها و ویژگی‌های منحصر به فرد جوشکاری موادی با ساختارها و خواص متفاوت تمرکز دارد و به انتخاب فلز پرکن مناسب و پارامترهای جوشکاری برای دستیابی به اتصالات قوی و بادوام اشاره می‌کند. درک این جنبه‌ها می‌تواند برای تحلیل چالش‌های احتمالی در جوشکاری پره‌های همزن صنعتی، به‌ویژه اگر از آلیاژهای پیچیده یا ترکیبی استفاده شده باشد، راهگشا باشد.

مطالعه‌ای توسط لی و همکاران [6] به بررسی تأثیر تخلخل بر رفتار خستگی اتصالات لب‌پُر در ورق‌های فولادی با استحکام بالا که با فرایند جوشکاری قوسی با گاز انجام شده است، پرداخته است. این تحقیق نشان می‌دهد که عیوب رایج در جوشکاری GMAW، مانند تخلخل، می‌توانند به طور قابل توجهی بر خواص مکانیکی و طول عمر اتصالات، به‌ویژه تحت بارهای خستگی، تأثیر منفی بگذارند. نتایج این مطالعه بر اهمیت کنترل دقیق پارامترهای فرایند GMAW برای به حداقل رساندن عیوب و اطمینان از کیفیت جوش تأکید دارد و مقایسه‌ای با چالش‌ها و مزایای احتمالی این روش نسبت به SMAW در مطالعه حاضر ارائه می‌دهد.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

تحقیقات انجام شده توسط ال و همکاران [7] بر روی فولادهای کربن-منگنز با استحکام بالا، نقش حیاتی پارامترهای فرایند جوشکاری SMAW را در دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب مورد بررسی قرار داده است. این مطالعه با تمرکز بر تأثیر پارامترهایی چون گاز محافظ و تنظیمات فرایند، نشان داد که چگونه این عوامل می‌توانند بر عمق نفوذ جوش و درنتیجه بر استحکام نهایی اتصالات تأثیر بگذارند. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری در فرایند SMAW برای پره‌های همزن صنعتی به کار گرفته شود، به ویژه در مواردی که نیاز به دستیابی به عمق نفوذ خاص و اطمینان از یکپارچگی ساختاری در اتصالات جوشی است.

مطالعه عقیلی و عبید [8] به بررسی اثرات عملیات حرارتی پس از جوشکاری (PWHT) بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد 4130 پرداخته است. فولاد 4130 به دلیل خواص مکانیکی مطلوب، در بسیاری از کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و نتایج این تحقیق می‌تواند بینش ارزشمندی در خصوص چگونگی بهبود این خواص از طریق PWHT ارائه دهد. این پژوهش نشان می‌دهد که چگونه عملیات حرارتی مناسب می‌تواند تنش‌های پسماند را کاهش داده و چقرمگی و استحکام فولاد جوش‌خورده را بهبود بخشد. درک این مکانیزم‌ها برای تعیین پارامترهای بهینه آزمون‌های مکانیکی در پروژه حاضر، که شامل ارزیابی استحکام و دوام پره‌های همزن صنعتی است، اهمیت بالایی دارد.

با وجود مطالعات گسترده بر روی پارامترهای فرایندی، بررسی چالش‌های عملیاتی در تجهیزات دوارِ سنگین که در محیط‌های با چگالی بالا فعالیت می‌کنند، همچنان به‌عنوان یک شکاف پژوهشی جدی باقی مانده است. چگالی بالای سرب (حدود $10.6 g/cm^3$) و گشتاور ناشی از مقاومت سیال، بارهای مکانیکی شدیدی را به ریشه جوش در محل اتصال پره به شفت وارد می‌کند که در طراحی‌های سنتیِ فاقد آماده‌سازی لبه (پخ‌زنی)، منجر به تمرکز تنش و شکست‌های زودهنگام می‌گردد [9]. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف رفع این چالش، به بررسی تطبیقی دو فرایند جوشکاری SMAW و GMAWدر کنار ارزیابی اثر هندسه اتصال می‌پردازد. نوآوری اصلی این تحقیق در تحلیل همزمان پارامترهای متالورژیکی و اصلاح طراحی اتصال (بر اساس استاندارد AWS D1.1) جهت پیشگیری از شکست‌های ناشی از بارهای هیدرواستاتیک است. در این راستا، با شناسایی عیوب طراحی‌های رایج و ارائه یک مدل اتصال اصلاح‌شده، بهبود خواص مکانیکی و تحولات ریزساختاری مورد تحلیل قرار گرفته است که یافته‌های آن نه‌تنها راهکاری عملی برای افزایش طول عمر همزن‌های صنعتی ارائه می‌دهد، بلکه دیدگاهی جامع در خصوص انتخاب فرایند بهینه جهت دستیابی به حداکثر نفوذ و سلامت جوش فراهم می‌سازد.

2- مواد و روش‌ها

2-1-آماده‌سازی قطعات

در این پژوهش، اثر آماده‌سازی اتصال بر خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصالات پره به شفت از فولاد کم‌کربن St37 مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها از فولاد St37 با توجه به خواص مکانیکی مطلوب، هزینه مقرون‌به‌صرفه و قابلیت جوشکاری بالا انتخاب شدند. این فولاد به‌طور گسترده در صنایع مختلف، از جمله در ساخت تجهیزات صنعتی و به‌ویژه در همزن‌های مورد استفاده در فرایندهای تصفیه مذاب سرب کاربرد دارد [10]. ابعاد نمونه‌ها 80x100x30 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

به‌منظور انجام مقایسه دقیق و کاهش اثر عوامل ناخواسته، تمامی نمونه‌ها تحت شرایط یکسان آماده‌سازی و جوشکاری شدند. در این پژوهش، سه سری نمونه شامل دو نمونه جوشکاری‌شده با فرایند SMAW و یک نمونه جوشکاری‌شده با فرایند GMAW مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین مطابق شکل(3و4) اثر آماده‌سازی لبه‌ها بر کیفیت اتصال با مقایسه حالت‌های دارای آماده‌سازی استاندارد و بدون آماده‌سازی، مطابق با استاندارد AWS D1.1بررسی شد. فرایند آماده‌سازی قطعات شامل مراحل زیر بود:

-پخ‌زنی (Beveling) مناسب لبه‌های قطعات به‌منظور ایجاد شرایط بهینه برای جوشکاری و فراهم کردن هندسه مناسب

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

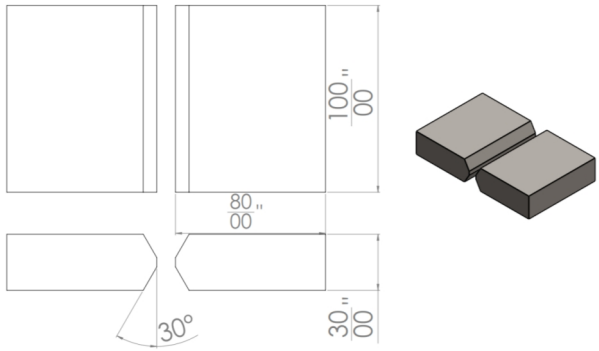
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

برای نفوذ جوش.

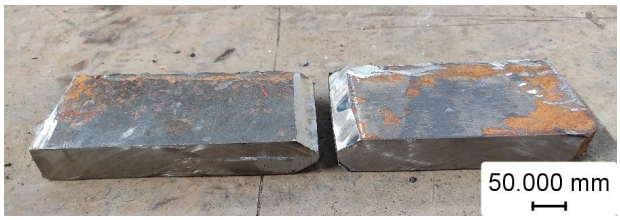
-تمیزکاری سطوح جوشکاری با استفاده از برس سیمی و حلال‌های مناسب جهت حذف زنگ‌زدگی، اکسیدها و ناخالصی‌های سطحی.

-تنظیم پارامترهای جوشکاری شامل شدت جریان، ولتاژ، سرعت حرکت و انتخاب نوع الکترود/سیم جوش متناسب با فرایند SMAW یاGMAW.

این مراحل با هدف ایجاد شرایط یکنواخت آزمایش و فراهم کردن امکان تحلیل اثر فرایند جوشکاری و شرایط آماده‌سازی بر ویژگی‌های نهایی اتصال انجام شد.



شکل 3- طرحواره ابعاد و اندازه قطعات مورد استفاده برای آماده‌سازی فرایند جوشکاری (بر حسب میلی‌متر).



شکل 4-قطعات آماده‌سازی‌شده برای انجام فرایند جوشکاری مطابق با استاندارد AWS D1.1.

2-2-پارامترهای جوشکاری

همان‌طور که در جدول(1) نشان داده شده است، در این پژوهش، سه نمونه جوشکاری به‌منظور بررسی اثر فرایند جوشکاری و شرایط آماده‌سازی لبه اتصال مورد ارزیابی قرار گرفتند. این نمونه‌ها شامل دو حالت جوشکاری با فرایند SMAW (با و بدون انجام عملیات پخ‌زنی و آماده‌سازی لبه‌ها) و یک نمونه جوشکاری‌شده با فرایند GMAW به‌عنوان حالت مرجع بودند. در فرایندSMAW، جوشکاری با استفاده از الکترود E6013 با قطر 4 میلی‌متر و تحت شرایط جریان 150 آمپر و ولتاژ 14 ولت انجام شد. یکی از نمونه‌ها بدون آماده‌سازی لبه‌ها و نمونه دیگر با اعمال آماده‌سازی استاندارد مطابق با الزامات AWS D1.1 جوشکاری گردید.

نمونه مرجع با استفاده از فرایند GMAW تحت شرایط جریان 180 آمپر و ولتاژ 18 ولت، با استفاده از سیم‌جوش ER4018 با قطر 1,2 میلی‌متر و تحت حفاظت گاز CO_2 جوشکاری شد. در این نمونه، آماده‌سازی لبه‌ها به‌صورت کامل و مطابق استاندارد انجام شد. پارامترهای جوشکاری به‌گونه‌ای انتخاب شدند که امکان مقایسه اثر نوع فرایند و شرایط آماده‌سازی اتصال بر رفتار مکانیکی و ریزساختاری فراهم گردد.

جدول1- پارامترهای کلیدی فرایندهای جوشکاری مورد استفاده در پژوهش.

فرایند جوشکاری	تعداد نمونه	جریان (A)	ولتاژ (V)	فلز پرکن	قطر فلز پرکن (mm)	نوع اتصال
SMAW	2	150	14	E6013	4	لب به لب
GMAW	1	180	18	ER4018	1,2	لب به لب

2-3-برشکاری

پس از اتمام عملیات جوشکاری، به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای بررسی ریزساختاری و ارزیابی کیفیت اتصال، برش مقطعی با استفاده از روش تخلیه الکتریکی (EDM - Wire Cut) انجام شد (شکل 5). در این پژوهش از دستگاه وایرکات CNC شارمیلز سوئیس مدل CHARMILLES ROBOFIL 440 استفاده گردید. این روش به دلیل دقت بالا و حداقل اثر حرارتی، امکان برش نمونه‌ها بدون ایجاد تغییرات متالورژیکی قابل توجه در ناحیه جوش را فراهم می‌سازد [11].

به‌کارگیری این روش موجب حفظ شرایط واقعی ریزساختار در ناحیه جوش و نواحی متاثر از حرارت (HAZ) شده و از ایجاد اعوجاج حرارتی یا تغییرات ناخواسته در ساختار جلوگیری می‌کند. پس از انجام برش، نمونه‌های آماده‌شده جهت انجام آزمون‌های متالوگرافی و بررسی ریزساختار مورد استفاده قرار

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

گرفتند.



شکل5- نمایی از برشکاری قطعات جوشکاری شده جهت مطالعه ریزساختار.

2-4-متالوگرافی

برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها، مقطع جوش ابتدا به‌صورت مرحله‌ای با استفاده از کاغذهای سمباده با مش‌های 800، 1000، 2000 و 3000 آماده‌سازی و پولیش اولیه شد. سپس به‌منظور حذف آثار ناشی از سایش و دستیابی به سطح آینه‌ای، پولیش نهایی با استفاده از پودر آلومینا با اندازه ذره 0/2 میکرون انجام گرفت. تمامی مراحل آماده‌سازی متالوگرافی مطابق با استاندارد ASTM E3 [12]انجام شد. پس از آماده‌سازی سطح، نمونه‌ها به‌منظور آشکارسازی ریزساختار فلز جوش، فلز پایه و ناحیه متاثر از حرارت(HAZ)، با محلول نایتال 2% به مدت 5 ثانیه اچ شدند. این فرایند امکان مشاهده واضح ریزساختار و بررسی تغییرات متالورژیکی ناشی از فرایند جوشکاری را فراهم نمود.

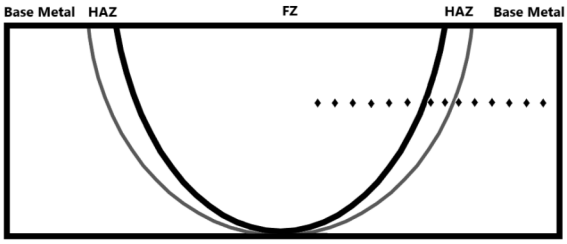
2-5-مطالعه ریزساختار

به‌منظور بررسی ریزساختار و تحلیل نواحی مختلف اتصال جوشی، از میکروسکوپ‌های استریو و نوری استفاده شد. در این پژوهش، نواحی شامل فلز پایه (BM) ناحیه جوش (WM) و منطقه متاثر از حرارت (HAZ) مورد بررسی میکروسکوپی قرار گرفتند.مشاهدات ماکرو و میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ استریو مدل Correct Microscopes – SAACO و میکروسکوپ نوری متالورژیکی مدل AMADA MX6R Upright Metallurgical Microscope انجام شد. بررسی‌ها در بزرگنمایی‌های 100 برابر، 200 برابر و 500 برابر انجام گرفت تا امکان تحلیل دقیق تغییرات ریزساختاری در نواحی مختلف اتصال فراهم شود. این ارزیابی با هدف بررسی تغییرات ریزساختاری ناشی از فرایندهای مختلف جوشکاری و شرایط آماده‌سازی اتصال، شناسایی عیوب احتمالی و تحلیل ارتباط بین ریزساختار و خواص مکانیکی نهایی انجام شد.

2-6-آزمون ریزسختی سنجی

آزمون ریزسختی‌سنجی به‌منظور تهیه پروفیل سختی در نواحی فلزپایه، ناحیه متاثر از حرارت و فلز جوش انجام شد. همان‌گونه که در شکل (6) نشان داده شده است، اندازه‌گیری‌ها به‌صورت خطی از فلز پایه به سمت فلز جوش و در امتداد میانه مقطع اتصال انجام گرفت.

اندازه‌گیری‌ها با فاصله 200 میکرون بین نقاط و تحت بار 1 نیوتن (HV0.1) با استفاده از دستگاه میکروسختی‌سنج Koopa MH4انجام شد. سپس بر اساس داده‌های حاصل، پروفیل تغییرات سختی بر حسب فاصله از خط جوش ترسیم گردید. این روش امکان ارزیابی تغییرات موضعی سختی در نواحی مختلف اتصال و بررسی اثر فرایند جوشکاری و شرایط آماده‌سازی بر توزیع سختی را فراهم نمود.



شکل6- نمایش مسیر اجرای آزمون سختی‌سنجی برای تعیین پروفیل سختی بر روی مقاطع عرضی نمونه‌های مورد مطالعه.

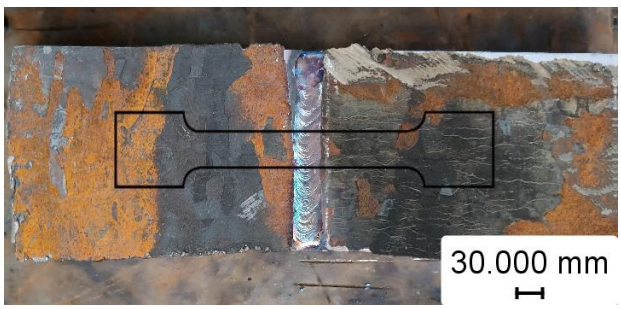
2-7-آزمون کشش

آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 [13] به‌منظور ارزیابی رفتار مکانیکی و تعیین استحکام کششی نهایی اتصالات جوشی انجام شد. برای بررسی مستقیم استحکام ناحیه جوش، نمونه‌ها به‌گونه‌ای طراحی و آماده‌سازی شدند که خط جوش در مرکز طول گیج قرار گیرد (شکل 7). با توجه به ضخامت نسبتاً زیاد قطعات (30 میلی متر)، هندسه نمونه‌ها ابتدا با استفاده از

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

نرم‌افزار AutoCAD طراحی شد. سپس فایل طراحی‌شده جهت برشکاری با روش واترجت به اپراتور مربوطه ارسال گردید و نمونه‌های آزمون مطابق هندسه استاندارد آماده شدند.آزمون کشش با استفاده از دستگاه آزمون کشش یونیورسال مدل-TB 30Tبا ظرفیت 30 تن و تحت بارگذاری تک‌محوره تا لحظه شکست انجام شد (شکل 8). نرخ بارگذاری (سرعت جابجایی کراس‌هد) برابر با 1 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. این نرخ مطابق با الزامات استاندارد ASTM E8 و با هدف انجام آزمون در شرایط شبه‌استاتیکی انتخاب شد. در حین آزمون، پارامترهای مکانیکی شامل حد تسلیم (YS)، استحکام کششی نهایی (UTS) و درصد ازدیاد طول (El%) استخراج و برای نمونه‌های مختلف مقایسه گردید. همچنین سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمون مورد بررسی قرار گرفت تا نوع گسیختگی (نرم یا ترد) تعیین شود.

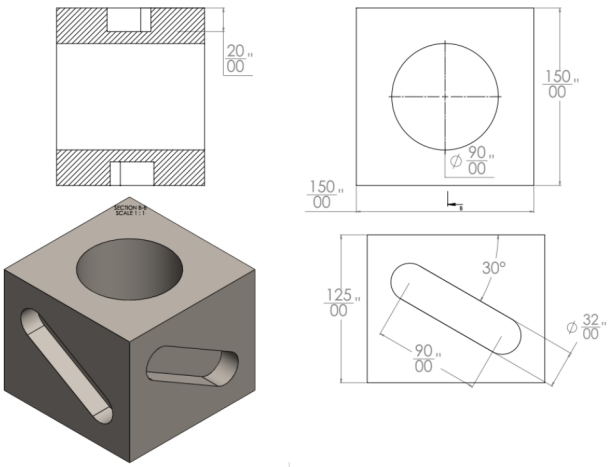


شکل7- نحوه برش قطعات جوشکاری شده مطابق استاندارد جهت آزمون مکانیکی.

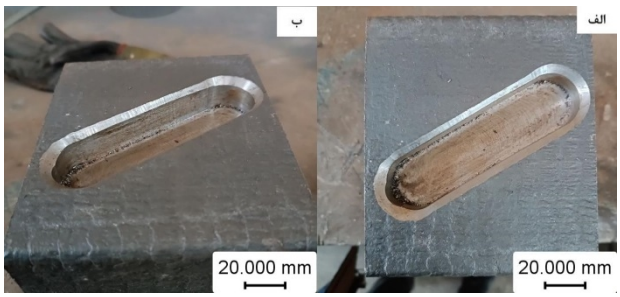
8-2-طراحی اتصال

پس از انتخاب فرایند و تعیین پارامترهای بهینه جوشکاری، طراحی اتصال پره به شفت با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks و بر اساس الزامات طراحی صنعتی اصلاح گردید (شکل 9). هدف از این بازطراحی، بهبود شرایط انتقال تنش و افزایش یکپارچگی اتصال جوشی بود. در طراحی جدید، یک شیار هم‌ضخامت با پره در مقطع چهارپهلو ایجاد شد به‌گونه‌ای که پره به عمق 20 میلی‌متر در داخل شیار قرار گیرد. سپس ناحیه تماس به‌صورت جوش پیوسته در پیرامون اتصال تکمیل گردید (شکل 10). این اصلاح هندسی با هدف بهبود توزیع تنش در ناحیه اتصال، افزایش سطح درگیری مکانیکی و کاهش تمرکز تنش و احتمال گسیختگی موضعی انجام شد.


شکل8- تصویر بارگذاری آزمون کشش بر روی قطعات مورد مطالعه.



شکل9- نمایش بصری و شبیه‌سازی شده جزئیات هندسی اتصال شفت به پره، با ابعاد بر حسب میلی‌متر.



شکل10- نمای شیار ایجادشده در ناحیه اتصال پره به شفت.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

3-نتایج و بحث

3-1-بازرسی غیرمخرب جوش

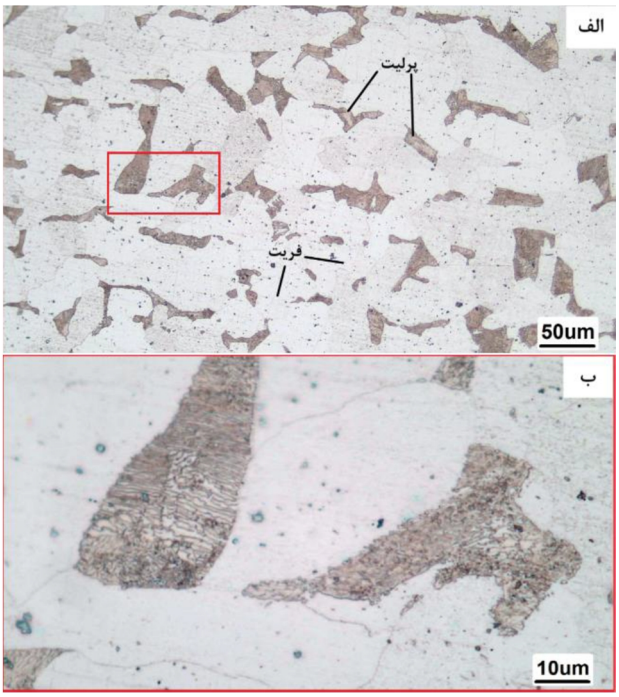
همان‌گونه که در شکل(11) نشان داده شده است، فرایند جوشکاری با رعایت پارامترهای بهینه اولیه به‌منظور دستیابی به اتصالی مطلوب، عاری از ترک و بدون حساسیت به عیوب داخلی انجام شد. نتایج بازرسی غیرمخرب چشمی (VT) و آزمون مایعات نافذ (PT) نیز صحت این موضوع را تأیید کردند.



شکل 11-نمای جوش ایجادشده در ناحیه اتصال قطعات مورد مطالعه.

3-2-بررسی ریزساختار

در شکل(12) ریزساختار فلز پایه فولاد St37 ارائه شده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، فولادهای ساده کربنی به‌علت مقدار پایین کربن و نیز وجود عناصر آلیاژی محدود در ترکیب شیمیایی، در شرایط تعادلی عمدتاً دارای ساختار BCC و مورفولوژی غالب فریت هستند. با این حال، شرایط عملیات حرارتی شامل دما و همچنین نرخ‌های گرم و سرد کردن نقش تعیین‌کننده‌ای در نوع انجماد، اندازه دانه‌های فریت و در نتیجه مورفولوژی فازی ایفا می‌کند [14]. بر پایه مشاهدات متالوگرافی، فولاد St37 دارای دانه‌های هم‌محور فریت است و فاز پرلیت به‌صورت نواحی/مناطق بین دانه‌های فریت مشاهده می‌شود. همچنین تصاویر نوری در بزرگ‌نمایی 100X، لایه‌ها و مورفولوژی پرلیت را به‌خوبی نمایش می‌دهند.



شکل12- تصویر میکروسکوپ نوری فلز پایه از جنس St37 الف- تصویر با بزرگنمایی x20 ب- بزرگنمایی x100 لایه‌های ساختار پرلیت.

ناحیه متأثر از حرارت که بدون تغییر شکل پلاستیک، تحت تأثیر حرارت جوشکاری قرار گرفته، شامل سه بخش است: ناحیه استحاله جزئی، ناحیه اصلاح دانه، و ناحیه درشت‌دانه [15]. میزان حرارت ورودی مستقیماً بر ابعاد HAZ اثر می‌گذارد. اگرچه دما در این ناحیه باعث ذوب نمی‌شود، اما تغییرات قابل توجهی در ریزساختار و خواص ماده ایجاد می‌کند [15]. ناحیه جزئی استحاله‌یافته (B) در شکل(13) ناحیه‌ای است که دمای پیک آن بالاتر از دمای بحرانی مؤثر پایین A_{c1} و پایین‌تر از دمای بحرانی مؤثر بالا A_{c3} قرار دارد؛ ازاین‌رو، این بخش در محدوده‌ی دوفازی آستنیت + فریت واقع می‌شود. در طی گرم‌شدن، مجموعه‌های پرلیت اولیه در دماهای بالاتر از A_{c1} به آستنیت تبدیل شده و تا حدی به درون فریت اولیه نفوذ می‌کنند؛ سپس در حین سردشدن، ساختار حاصل عمدتاً به فریت ریز و پرلیت ریز تبدیل می‌شود. ناحیه اصلاح دانه C در شکل(13) بخشی است که دمای پیک آن از A_{c3} بالاتر می‌رود. در این ناحیه، آستنیت در حین گرم‌شدن جوانه‌زنی می‌کند، اما فرصت رشد قابل‌توجهی ندارد. در نتیجه، هنگام سردشدن، این آستنیت به دانه‌های ریز فریت و پرلیت تبدیل می‌شود.

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

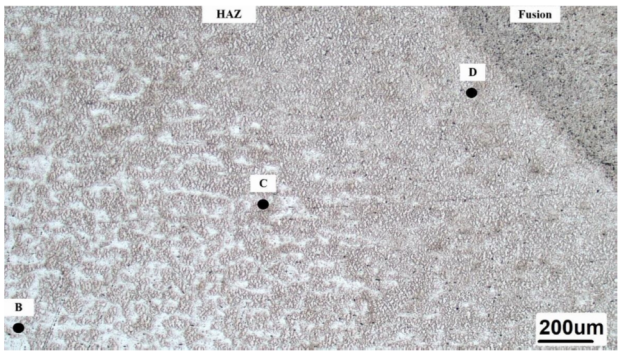
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

در ناحیه درشت‌دانه (D) شکل(13)، دمای پیک به‌طور محسوسی بالاتر از A_{c3} است؛ بنابراین دانه‌های آستنیت فرصت رشد بیشتری پیدا می‌کنند. در طی سردشدن سریع و به دلیل اندازه بزرگ دانه‌ها، فریت می‌تواند به‌صورت صفحه‌ای از مرزدانه‌ها رشد کند که به آن فریت ویدمن‌اشتاتن گفته می‌شود. به‌طور کلی، در هر سه ناحیه، با افزایش شدت جریان، رشد دانه‌ها بیشتر می‌شود [15].

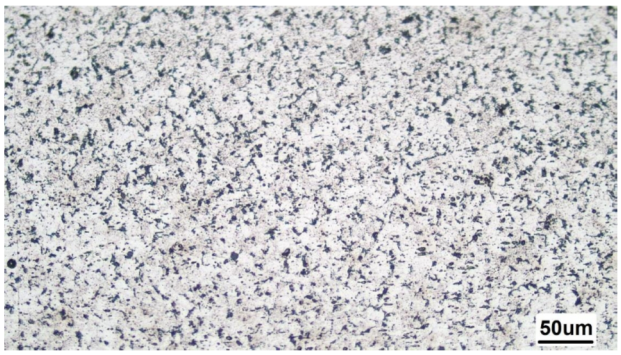
فلز جوش فولاد St37 که با استفاده از الکترود E6013 و فرایند SMAWجوشکاری شده، همانطور که در تصویر 14 مشاهده می‌شود، از نظر متالورژیکی عمدتاً دارای ساختار فریتی-پرلیتی است. بخش‌های روشن در تصویر نشان دهنده فریت و نواحی تیره تر پراکنده، نمایانگر پرلیت هستند. فریت که فاز اصلی در این ساختار است، به دلیل ترکیب کم‌کربن و حضور مقادیر جزئی از عناصر آلیاژی در الکترود، ساختاری نرم و چقرمه دارد که موجب افزایش انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ترک خوردگی می‌شود. پرلیت، که ترکیبی از لایه‌های فریت و سمنتیت (Fe_3C) است، استحکام را بالا می‌برد اما در مقایسه با فریت، انعطاف‌پذیری کمتری دارد. ترکیب این دو فاز موجب می‌شود که فلز جوش تعادلی مطلوب بین چقرمگی و استحکام مکانیکی داشته باشد. نبود مارتنزیت به دلیل ترکیب کم‌کربن و سرعت پایین سرد شدن، موجب بهبود استحکام و چقرمگی جوش شده است.

3-3-مقایسه فرایند جوشکاری GMAW و SMAW

ریزساختار فلز جوشکاری شده با فرایند GMAW عمدتاً از فریت سوزنی تشکیل شده است، به‌جز در نواحی محدودی در مجاورت مرزهای دانه که فریت مرزدانه‌ای مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل(15) نشان داده شده است، افزایش میزان دی‌اکسید کربن (Co_2) در گاز محافظ، منجر به افزایش فاز فریت سوزنی می‌گردد. دلیل این پدیده، افزایش پتانسیل اکسیداسیون حوضچه جوش و در نتیجه تشکیل آخال‌های غیرفلزی است. این آخال‌ها (عمدتاً اکسیدهای عناصری نظیر Ti و Mn) به عنوان محل‌های جوانه‌زنی ناهمگن عمل می‌کنند. وجود این ذرات در داخل دانه‌های آستنیت اولیه، انرژی فعال‌سازی لازم برای تشکیل فریت را کاهش داده و باعث می‌شود که فریت به جای رشد در مرزهای دانه، به صورت سوزن‌های درهم‌تنیده در مرکز دانه‌ها جوانه بزند. این ساختارِ ریز و تقسیم‌شده، مسیر جوانه زنی و رشد ترک را دشوار کرده و منجر به بهبود همزمان استحکام و چقرمگی ضربه در اتصالات GMAW می‌گردد [15].



شکل13- تصویر منطقه HAZ حوضچه جوش فرایند GMAW و بررسی مناطق مختلف HAZ.

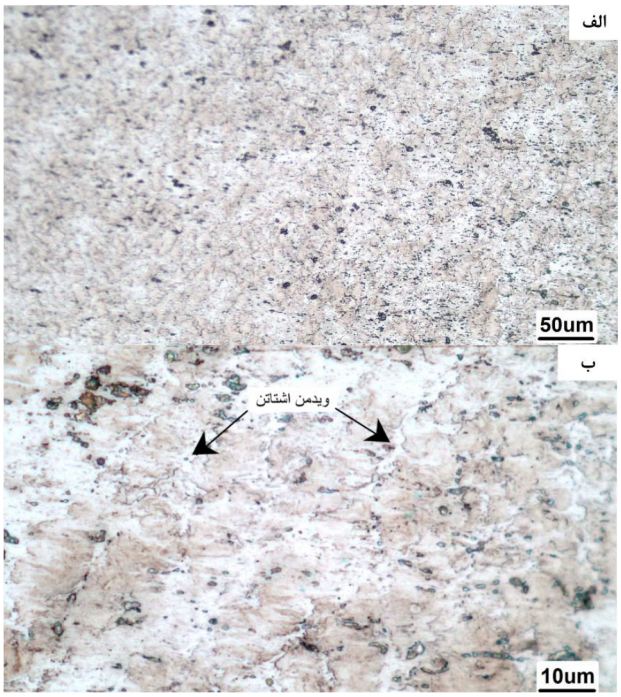


شکل14- تصویر ریزساختار فلز جوش حاصل از فرایند جوشکاری SMAW توسط میکروسکوپ نوری.

وجود فریت سوزنی در فلز جوش GMAW می‌تواند نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی اتصال ایفا کند. این ریزساختار به دلیل ماهیت درهم‌تنیده، اندازه ریزدانه و افزایش تعداد مرزدانه‌ها، مقاومت بیشتری در برابر حرکت نابجایی‌ها و انتشار ترک ایجاد می‌کند و معمولاً با استحکام و چقرمگی بالاتر همراه است. همچنین، مشخص شده است که افزایش Co_2 در گاز محافظ، عمق حوضچه جوش را افزایش می‌دهد. این امر به دلیل افزایش دمای قوس رخ می‌دهد، زیرا Co_2 پتانسیل تفکیک

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

و یونیزاسیون بالاتری نسبت به آرگون دارد. در نتیجه، افزایش Co_2 منجر به افزایش حرارت ورودی و حوضچه جوشی عمیق‌تر می‌شود [15].



شکل15- الف- تصویر فلز جوش حاصل از فرایند جوشکاری GMAW
ب- تصویر فلز جوش با بزرگنمایی بیشتر X100 توسط میکروسکوپ نوری.

افزایش Co_2 در گاز محافظ می‌تواند به دلایل زیر باعث کاهش آخال‌ها و تخلخل‌ها در جوش شود:

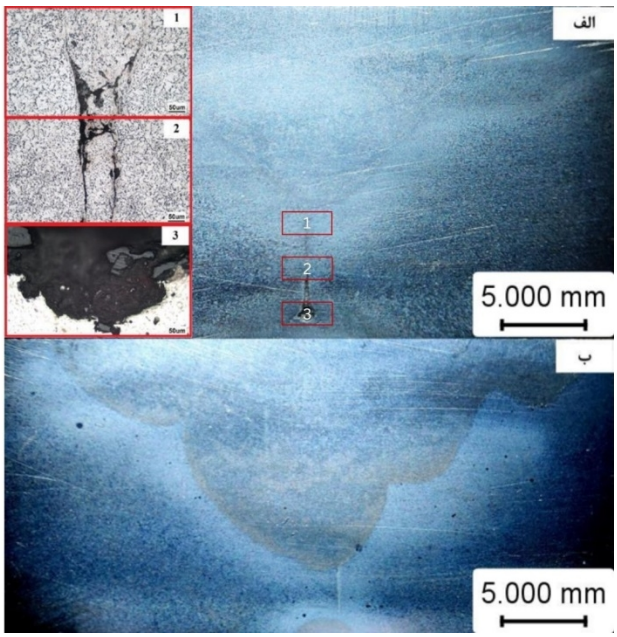
-بهبود خاصیت محافظت گاز: Co_2 به دلیل یونیزاسیون بهتر نسبت به آرگون، پایداری قوس را بهبود می‌بخشد. این امر منجر به کنترل بهتر دمای قوس و فرایند جوشکاری شده و می‌تواند میزان آخال‌ها و تخلخل‌ها را کاهش دهد.

-پوشش بهتر روی سطح جوش: Co_2 به‌عنوان گاز محافظ، می‌تواند به‌طور مؤثری از ورود ناخالصی‌ها به حوضچه جوش جلوگیری کرده و فرایند اکسیداسیون را کاهش دهد، که این امر به کاهش تشکیل آخال‌های اکسیدی کمک می‌کند.

-کاهش سرعت سرد شدن: گازهای حاوی Co_2 با افزایش دمای قوس و حرارت ورودی، به تشکیل ریزساختار یکنواخت‌تر کمک کرده و از تشکیل تخلخل‌ها جلوگیری می‌کنند.

-کمک به حذف گازهای محلول: Co_2 با ویژگی‌های شیمیایی خود می‌تواند در حذف گازهای محلول مانند هیدروژن و اکسیژن از حوضچه جوش مؤثر باشد، که این امر احتمال ایجاد تخلخل‌های ناشی از این گازها را کاهش می‌دهد.

همان‌طور که در شکل(16) مشاهده شد، در دو فرایند جوشکاری متفاوت، به دلیل نزدیکی نقطه ذوب و ترکیب شیمیایی مشابه بین فلزات پرکننده و فلز پایه، منطقه مخلوط نشده‌ای تشکیل نگردید. در فرایند SMAW، به دلیل توان انرژی پایین‌تر، عمق حوضچه جوش نسبت به فرایند GMAW کمتر است. با این حال، در فرایند GMAW با گاز محافظ Co_2 ، به دلیل تمرکز حرارتی بالا و انرژی یونیزاسیون زیاد، حرارت ورودی بیشتری تولید می‌شود که موجب پایداری بهتر قوس و در نتیجه، تشکیل حوضچه جوش با عمق بیشتر می‌گردد [2]. حتی در تصاویر(16-الف)، مشهود است که ریشه جوش و شیار ایجاد شده توسط جوشکاری SMAW به‌طور کامل پر نشده است؛ اما در بررسی‌های چشمی و میکروسکوپ نوری از قطعه جوشکاری شده با فرایند GMAW، هیچ عیب یا پرنشدگی مشاهده نمی‌شود. در میان فازهای مختلف فریت (مانند فریت ویدمن‌اشتاتن و فریت چندضلعی)، فریت سوزنی بالاترین چقرمگی را داراست. ماهیت قفل‌شونده این فاز، همراه با اندازه ریزدانه‌های آن، بیشترین مقاومت را در برابر رشد ترک از طریق شکست ترد فراهم می‌آورد [12].



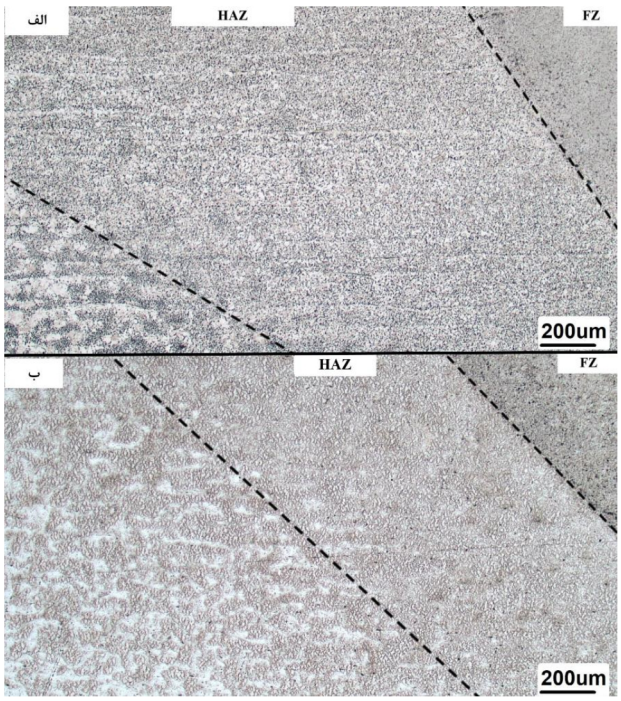
شکل16- تصاویر هندسه حوضچه جوش در دو فرایند جوشکاری، الف- جوشکاری با فرایند SMAW، ب- جوشکاری با فرایند GMAW.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

مقایسه HAZ جوشکاری فولاد کربن St37 با SMAW و GTAW تفاوت‌های قابل‌توجهی را در ابعاد، ریزساختار و خواص متالورژیکی نشان می‌دهد. SMAW به دلیل حرارت ورودی بالاتر، نرخ انتقال حرارت کمتر و کنترل ضعیف‌تر، HAZ پهن‌تری ایجاد می‌کند که منجر به تغییرات ریزساختاری گسترده‌تری در فلز پایه می‌شود. در HAZ فرایند SMAW، رشد بیشتر دانه‌های آستنیتی به دلیل زمان طولانی‌تر در معرض حرارت، منجر به تشکیل ساختارهای فریتی-پرلیتی درشت‌تر و کاهش احتمالی استحکام و چقرمگی می‌شود [16]. در مقابل، GTAW با تمرکز حرارتی بالاتر، HAZ باریک‌تری ایجاد کرده و رشد دانه‌ها را کنترل می‌کند. هر دو فرایند نواحی مشابهی (درشت‌دانه، بازتبلور، استحاله جزئی) در HAZ تشکیل می‌دهند، اما این نواحی در SMAW وسیع‌تر هستند. کنترل بهتر GTAW، HAZ کوچک‌تر، ریزتر و با خواص مکانیکی یکنواخت‌تری ایجاد می‌کند که برای کاربردهای دقیق ارجح است [17]. با توجه به شکل(17)، تفاوت پهنای ناحیه متأثر از حرارت در دو فرایند جوشکاری SMAW و GMAW به وضوح قابل مشاهده است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که میانگین پهنای HAZ در نمونه جوشکاری شده با فرایند SMAW حدود 1532 میکرومتر و در نمونه جوشکاری شده با فرایند GMAW به طور میانگین 871 میکرومتر است. این اختلاف بیانگر تأثیر نوع فرایند جوشکاری بر میزان نفوذ حرارت و گستره ناحیه حرارتی در فلز پایه است. کاهش پهنای HAZدر فرایند GMAW نشان‌دهنده محدود شدن اثر چرخه حرارتی جوشکاری و کنترل بهتر رشد دانه‌ها در نواحی مجاور جوش است. در نتیجه، انتظار می‌رود خواص مکانیکی فلز پایه در نواحی نزدیک به جوش بهتر حفظ شده و میزان نرم‌شدگی ناشی از عملیات جوشکاری کاهش یابد.

از سوی دیگر، فولادهای مورد استفاده در این اتصال بر پایه اصول ترمودینامیکی طراحی و تولید شده‌اند. فرایند نورد گرم که روی این فولادها اعمال می‌شود، منجر به ایجاد تراکم بالایی از نابجایی‌ها در ساختار میکروسکوپی آن‌ها شده که نقش مهمی در افزایش استحکام مکانیکی ایفا می‌کند [18]. اما هنگام جوشکاری، حرارت وارد شده به نواحی مجاور جوش موجب نرم‌شدگی در ناحیه HAZ می‌شود. این پدیده عمدتاً ناشی از بازیابی و تبلور مجدد است که در اثر حرارت رخ می‌دهد [19]. هرچه پهنای HAZ بیشتر باشد، میزان نرم‌شدگی افزایش یافته و در نتیجه احتمال کاهش استحکام و تخریب قطعه در نواحی متأثر از حرارت جوش بیشتر خواهد شد.



شکل17- تصویر از پهنا HAZ تشکیل شده از فرایندهای جوشکاری الف)SMAW، ب) GMAW، توسط میکروسکوپ نوری.

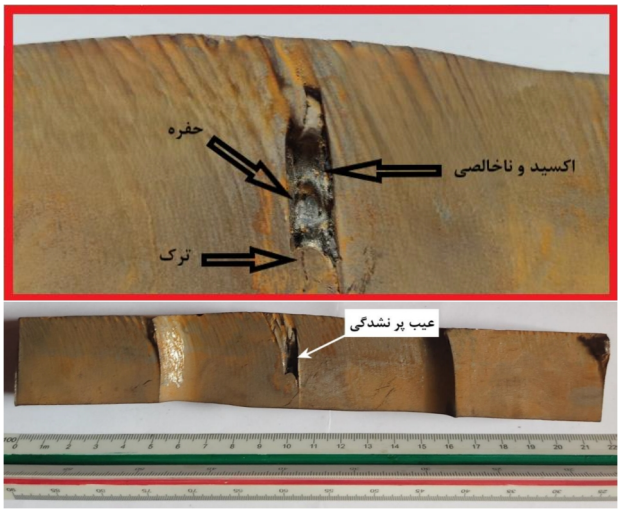
3-4-آزمون کشش

جهت آزمون کشش پس از برش مقطعی نمونه‌های جوشکاری‌شده با وایرکات، در یکی از نمونه‌ها پرنشدگی کامل ریشه جوش در شکل(18) مشاهده شد. این عیب، که به نام Lack of Root Penetration شناخته می‌شود، معمولاً ناشی از عدم نفوذ کافی مذاب به انتهای درز و در نتیجه آماده‌سازی نامناسب لبه‌ها یا زاویه نادرست اتصال است [2]. چنین نقصی موجب افت شدید خواص مکانیکی جوش و احتمال شکست زودهنگام در آزمون کشش می‌شود.

در شکل(19)، نمودار تنش-کرنش مربوط به نتایج آزمون کشش قطعات جوشکاری‌شده به روش SMAW در دو حالتِ دارای آماده‌سازی لبه و فاقد آماده‌سازی لبه ارائه شده است. این

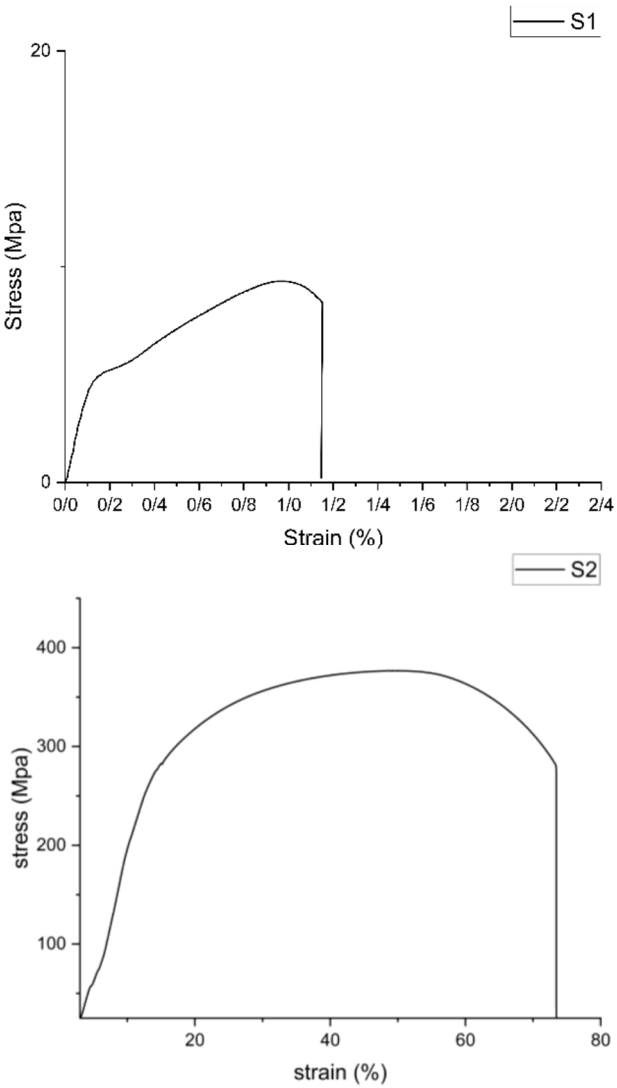
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

نمودار اطلاعات کلیدی مانند استحکام کششی نهایی(UTS) ، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول نسبی و درصد کاهش سطح مقطع را برای ارزیابی خواص مکانیکی اتصال جوش فراهم می‌کند. در جدول(2) نتایج آزمون کشش دو نمونه جوشکاری‌شده با فرایند SMAW نشان می‌دهد که اختلاف معناداری میان آن‌ها وجود دارد. نمونه S2 با طراحی بهینه اتصال و پخ‌زنی استاندارد در فرایند SMAW، استحکام کششی نهایی 376 مگاپاسکال داشته، در حالی‌که نمونه S1 بدون آماده‌سازی مناسب و پخ‌زنی استاندارد، تنها 3/9 مگاپاسکال را نشان داده است. این تفاوت، نقش کلیدی طراحی اتصال و آماده‌سازی پیش از جوشکاری را در ارتقای خواص مکانیکی اتصال تأیید می‌کند.



شکل 18- نمای مقطع عرضی نمونه جوشکاری شده پس از وایرکات، که ناحیه دارای عیب پرنشدگی کامل در ریشه جوش را نشان می‌دهد.

در تصاویر (20-الف و 20-ب)، وضعیت نمونه بعد از آزمون کشش نمایش داده شده است که نتایج آن نشان می‌دهد نمونه S1 پس از آزمون، تغییر شکل قابل‌توجهی نداشته است. با این حال، بررسی تصاویر نشان می‌دهد که به دلیل آماده‌سازی نامناسب لبه‌ها و عدم رعایت پخ‌زنی استاندارد، نفوذ جوش در تمام طول درز ناقص بوده و این امر موجب افت عملکرد مکانیکی نمونه گردیده است. در نتیجه، فضای خالی در ریشه اتصال باقی مانده و استحکام مکانیکی به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است.



شکل19- نمودار تنش-کرنش نمونه‌های آزمون کشش جوشکاری با فرایند SMAW، S1-نمونه آماده سازی لبه‌ای نشده، S2- نمونه آماده سازی لبه‌ای شده.

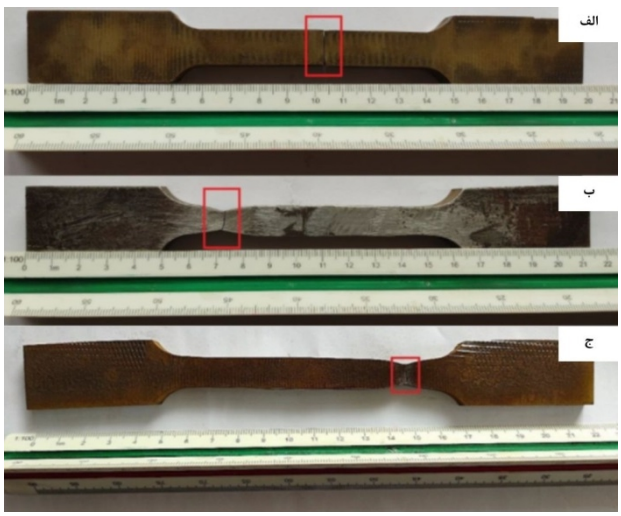
جدول2- مشخصات آزمون کشش نمونه‌های جوشکاری شده با فرایند SMAW، S1- نمونه بدون آماده سازی لبه قطعه، -S2 نمونه با آماده سازی لبه قطعه.

نمونه	وضعیت	ضخامت نمونه (mm)	نرخ کشش (mm/min)	استحکام کشش (Mpa)	ازدیاد طول (%)
S1	فاقد آماده سازی قبل جوش	20	1	9/3 ±7	0/9 ±6
S2	آماده سازی قبل جوش	20	1	5 376±	16 ±4

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

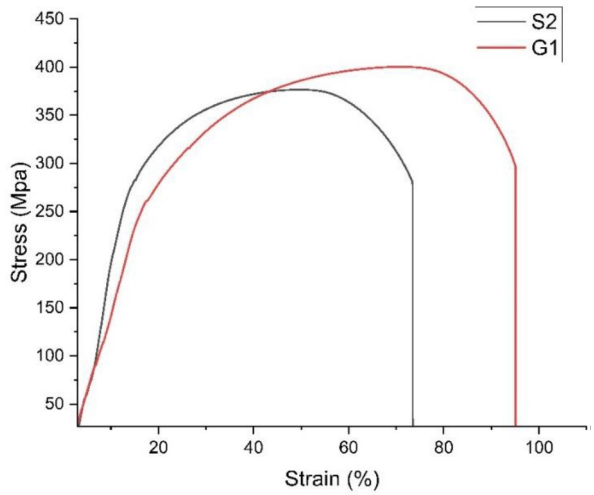
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

نمونه S2، به دلیل آماده‌سازی دقیق لبه‌ها و پخزنی استاندارد، نفوذ کامل و یکنواخت جوش داشته و استحکام کششی بالایی را کسب کرده است. در مقابل، در نمونه S1، تمرکز تنش در محل اتصال ضعیف منجر به ترک‌خوردگی و شکست زودهنگام شده است. مشاهدات پس از شکست نشان می‌دهد که نمونه S1 دچار جدایش اتصال شده که حاکی از ضعف پیوستگی و عدم همجوشی کامل است. در مقابل، نمونه S2 مقاومت کششی بالایی از خود نشان داده و قبل از شکست، پدیده گلویی شدن و شکست نرم رخ داده است. شکست نرم به دلیل قابلیت پیش‌بینی زمان شکست، در صنایع حائز اهمیت است و از بروز خسارات جلوگیری می‌کند. این مقایسه، اهمیت آماده‌سازی صحیح قبل از جوشکاری را در دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب برجسته می‌کند و تأیید می‌نماید که آماده‌سازی نامناسب می‌تواند حتی با پارامترهای جوشکاری صحیح، عملکرد اتصال را مختل کند.



شکل20- قطعات آزمون کشش بعد از انجام آزمون، الف- قطعه جوشکاری شده SMAW بدون آماده‌سازی و پخزنی (S1)، ب- قطعه جوشکاری شده SMAW با استاندارد آماده‌سازی و پخزنی (S2) و ج- قطعه جوشکاری شده GMAW با استاندارد آماده سازی و پخزنی (G1).

نمونه بهینه SMAW (با آماده‌سازی استاندارد لبه‌ها) انتخاب شد و سپس فرایند به GMAW تغییر یافت. سایر پارامترها (نوع اتصال، جنس فلز پایه، ضخامت، آماده‌سازی لبه‌ها) ثابت نگه داشته شدند تا تنها متغیر، نوع فرایند جوشکاری باشد. در شکل(20-ج) نمونه بعد از آزمون کشش آورده شده است. این رویکرد، مقایسه‌ای علمی را برای ارزیابی تفاوت‌های ذاتی دو فرایند فراهم می‌کند. مطابق شکل(21) و جدول(3)، نتایج آزمون کشش بیانگر آن است که نمونه‌های جوشکاری‌شده به روش GMAW در مقایسه با SMAW از استحکام کششی نهایی (400 مگاپاسکال)، ناحیه تغییر شکل پلاستیک گسترده‌تر و درصد ازدیاد طول بالاتری برخوردارند که نشان‌دهنده شکل‌پذیری و عملکرد مکانیکی مطلوب‌تر این فرایند است. وقوع شکست در فلز پایه و دور از ناحیه جوش نیز مؤید کیفیت بالای اتصال و استحکام مناسب جوش است. بهبود خواص مکانیکی مشاهده‌شده در نمونه GMAW را می‌توان با نتایج ریزساختاری این نمونه مرتبط دانست. همان‌گونه که در شکل(15) مشاهده شد، تشکیل فریت سوزنی در فلز جوش موجب افزایش تعداد مرزدانه‌ها و ایجاد موانع مؤثر در برابر حرکت نابجایی‌ها و رشد ترک گردیده است. این موضوع با افزایش استحکام کششی نهایی نمونه GMAW نسبت به نمونه SMAWو همچنین وقوع شکست در فلز پایه به جای ناحیه جوش مطابقت دارد و بیانگر کیفیت متالورژیکی مناسب اتصال است.



شکل21- نمودار تنش-کرنش نمونه‌های آزمون کشش: G1- GMAW، S2- SMAW.

جدول3- مشخصات آزمون کشش نمونه‌های جوشکاری شده: S2- SMAW، G1- GMAW.

نمونه	ضخامت نمونه(mm)	نرخ کشش(mm/min)	استحکام کششی(Mpa)	ازدیاد طول(%)
S2	20	1	376 ±5	16 ±4
G1	20	1	400 ±5	17 ±5

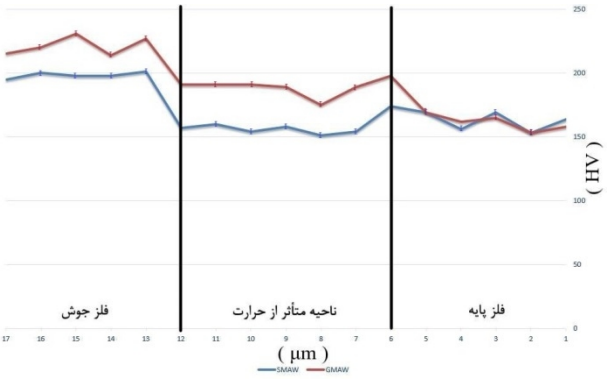
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

3-5-آزمون ریز سختی سنجی

آزمون ریز سختی‌سنجی ویکرز با بار 1 نیوتن (1 HV) بر روی نمونه‌های جوشکاری شده انجام شد. این آزمون با هدف سنجش تغییرات سختی در فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش صورت گرفت. نمونه‌ها پس از برش، سوهان‌کاری و پرداخت با سمباده‌های نرم تا دستیابی به سطح صاف، به صورت خطی از فلز پایه به سمت مرکز فلز جوش مورد سنجش قرار گرفتند. نتایج آزمون سختی‌سنجی ویکرز در شکل(22) نشان داد که سختی فلز پایه در هر دو فرایند SMAW و GMAW ثابت (حدود 160-170 HV) باقی مانده است. اما در ناحیه HAZ، سختی با افت بیشتری در SMAW (حدود 145 HV) نسبت به GMAW (حدود 160 HV) همراه بوده است. این افت ممکن است ناشی از فرایندهای متالورژیکی مانند بازیابی و تبلور مجدد باشد. نتایج آزمون ریزسختی با مشاهدات ریزساختاری ارائه‌شده در شکل‌های(15 و 17) همخوانی مناسبی دارند. پهنای کمتر HAZ در نمونه GMAW و تشکیل ریزساختار فریت سوزنی در فلز جوش، موجب حفظ سختی در نواحی مجاور جوش شده است. در مقابل، پهنای بیشتر HAZ در فرایند SMAW شرایط مناسب‌تری برای رشد دانه‌ها و نرم‌شدگی موضعی فراهم کرده که به صورت کاهش سختی در این ناحیه مشاهده می‌شود.

توزیع سختی در فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت در دو فرایند مذکور، به‌طور مستقیم تحت تأثیر تفاوت در انرژی ورودی و نرخ سرمایش قرار دارد. در فرایند GMAW، به دلیل تمرکز بالای قوس الکتریکی و پایداری بیشتر پارامترهای جوشکاری، نرخ سرمایش در حوضچه مذاب افزایش یافته که این امر با محدود کردن زمان رشد دانه‌ها، منجر به تشکیل ریزساختاری ریزدانه و افزایش چگالی مرزدانه‌ها می‌گردد؛ بر همین اساس، مقادیر سختی بالاتری در این فرایند ثبت شده است [20،15]. در مقابل، در فرایند SMAW به دلیل توزیع حرارتی گسترده‌تر و نرخ سرمایش پایین‌تر، شرایط برای رشد دانه‌ها و ایجاد فازهای درشت‌دانه فراهم شده که این پدیده کاهش استحکام موضعی و افت مقادیر سختی را در مقایسه با فرایند GMAW به‌دنبال داشته است [22،21].



شکل22- نمودار سختی سنجی ویکرز با دو فرایند جوشکاری مختلف، SMAW و GMAW.

4-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بهینه‌سازی اتصال پره به شفت در همزن‌های صنعتی از طریق ارزیابی همزمان هندسه اتصال و فرایند جوشکاری بررسی شد. یافته‌های کلیدی و نوآورانه این تحقیق عبارت‌اند از:

-اثر متقابل هندسه و فرایند: انطباق آماده‌سازی لبه‌ها با استاندارد AWS D1.1، برخلاف حالت بدون آماده‌سازی، نه‌تنها عیوب ریشه را حذف کرد، بلکه پتانسیل فرایند GMAW را در دستیابی به نفوذ کامل در ضخامت‌های بالا به فعلیت رساند.

-برتری متالورژیکی GMAW: فرایند GMAW به دلیل تمرکز حرارتی بالاتر و نقش اکسیدکنندگی کنترل‌شده گاز محافظ (Co_2)، منجر به تشکیل فریت سوزنی (Acicular Ferrite) در داخل دانه‌ها شد. این در حالی است که در فرایند SMAW، ساختار غالب، فریت مرزدانه‌ای و پرلیت با دانه‌های درشت‌تر بود.

-بهبود خواص مکانیکی: ریزساختار حاصل از فرایند GMAW (فریت سوزنی) به همراه کاهش پهنای ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)، منجر به افزایش همزمان استحکام و تکرارپذیری خواص مکانیکی در مقایسه با الکترود پوشش‌دار (SMAW) گردید.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]

برای پایداری همزن‌های صنعتی در محیط‌های با چگالی بالا (مانند سرب مذاب)، ترکیب آماده‌سازی لبه طبق AWS D1.1 و فرایند GMAW به عنوان راهکار بهینه جهت دستیابی به بالاترین کیفیت متالورژیکی و مکانیکی پیشنهاد می‌شود.

منابع

1-Atiemo Obeng VA, Calabrese RV, Penney WR, editors. Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice. 2nd ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2021.

2-Cary HB, Helzer SC. Modern Welding Technology. 7th ed. Hoboken (NJ): Pearson; 2019.

3-Towler G, Sinnott RK. Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design. 3rd ed. Oxford: Butterworth Heinemann; 2022.

4-Kumar, M, Aggarwal, A, Khokhar, V. Effect of Heat Treatment & Effect of Pwht on Low Alloy Steel 42CrMo4 (EN19) Using Smaw Process. International Journal of Scientific Development and Research; 2018.

5-Nevhutalu, L. W. PROJECT: NSC 422 Properties of dissimilar welds between austenitic stainless steel 314L/316L and lean duplex stainless steel 2001.

6-Lee, K, Lee, S, Kim, D. Effect of Porosity on the Fatigue Behavior of Gas Metal Arc Welding Lap Fillet Joint in GA 590 MPa Steel Sheets. Applied Sciences. 2018;8(4):241.

7-El-Dakhakhni EA, El-Bitar AAH, Zaid AMH. Effect of Shielding Gas and Welding Parameters on the Mechanical Properties of High-Strength Carbon-Manganese Steel Welds Produced by Shielded Metal Arc Welding (SMAW). J. Mater. Eng. Perform. 2018 Jun;27(6):2880-2891. doi: 10.1007/s11665-018-3458-2.

8-Al-Aqeeli HM, Obeid HM. Effect of Post-Weld Heat Treatment (PWHT) on the Mechanical Properties and Microstructure of 4130 Steel Welds. Mater. Sci. Appl. 2014 Oct;5(12):958-967.doi: 10.4236/msa.2014.512098.

9-American Welding Society. AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code—Steel. Miami (FL): American Welding Society; 2020.

10-Callister WD, Rethwisch DG. Materials Science and Engineering: An Introduction. 9th ed. New York: John Wiley & Sons; 2014.

11-Kalpakjian S, Schmid SR. Manufacturing Engineering and Technology. 7th ed. Boston: Pearson; 2014.

12-M. Ebrahimnia, M. Goodarzi, M. Nouri, and M. Sheikhi, “Study of the effect of shielding gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37-2 in gas metal arc welding,” Mater. Des., vol. 30, no. 9, pp. 3891–3895, 2009.

13-ASTM. ASTM E8/E8M-21: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International; 2021.

14-Tipler AR, Bellwood PA. Elements of Metallurgy and Engineering Alloys. 1st ed. Reading, MA: Addison-Wesley; 1991.

15-Sindo Kou, Welding Metallurgy, 2nd Editio. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

16-Davis JR, editor. ASM Handbook, Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering. Materials Park (OH): ASM International; 2011.

17-Ali M, et al. Influence of heat input on the mechanical characteristics, corrosion and microstructure of ASTM A36 steel welded by GTAW technique. PLOS ONE. 2023;18(10): e0293330.

18-Totten GE, Howes MAH, Inoue T, editors. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. Materials Park (OH): ASM International; 2019.

19-Lippold JC. Welding Metallurgy and Weldability. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2015.

20-Prasad K, Dwivedi DK. Some investigations on microstructure and mechanical properties of submerged arc welded HSLA steel joints. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008;36(5-6):475-483.

21-Magudeeswaran G, Balasubramanian V, Madhusudhan Reddy G. Effect of welding processes and consumables on high cycle fatigue life of armored grade quenched and tempered steel joints. Materials & Design. 2014;59:230-239.

22-Kah P, Suoranta R, Martikainen J. Advanced gas metal arc welding processes. Reviews on Advanced Materials Science. 2013;35(1):28-44.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.25]