METALLURGICAL ENGINEERING
The Journal of Iranian Metallurgical and Materials Engineering Society

Autumn 2025, Volume 28, Nummber 3

Numerical Simulation and Experimental Observations of the Effect of Post-Weld Heat Treatment on the Microstructure and Hardness of API 5L X65 Steel

Naeim Minaee[1], *Hamid Reza Shahverdi[2], Reza Miresmaeili[3]

1- M.Sc. Student in Materials Engineering - Welding Metallurgy, Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University
2- Professor, Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University
3- Associate Professor, Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University

Citation: Minaee N, Shahverdi H.R, Miresmaeili R. Numerical Simulation and Experimental Observations of the Effect of Post-Weld Heat Treatment on the Microstructure and Hardness of API 5L X65 Steel, Metallurgical Engineering, 2025: 28(3): 154-164 https://doi.org/10.22076/me.2026.2106616.1434

https://doi.org/10.22076/me.2026.2106616.1434

ABSTRACT

In this study, the thermal-metallurgical behavior of the automatic TIG welding process and post-weld heat treatment (PWHT) at 600 °C for one hour on API 5L X65 high-strength low-alloy pipeline steel was investigated numerically and experimentally. For this purpose, a three-dimensional finite element model using Goldak's double-ellipsoid volumetric heat source was developed in SYSWELD software, and the temperature-dependent properties of the steel were defined. Parallel to the numerical study, actual samples were produced with identical welding parameters and, after applying PWHT, were subjected to metallography and Vickers microhardness tests according to the ASTM E384 standard. The results showed that the melt pool dimensions predicted in the numerical model (based on the 1500 °C melting boundary) with a depth of 2 mm and a width of 6.5 mm accurately match the actual weld cross-section. Additionally, the width and depth of the HAZ region in the simulation were in complete agreement with experimental samples. Evaluations indicated that the model predicts a peak hardness of 450 Vickers for the fusion zone, showing good agreement with the experimental value (460 Vickers). In the as-welded condition, due to the formation of unstable martensite, the hardness exceeds the critical limit of 400 Vickers (according to NACE MR0175/ISO 15156). After applying PWHT, the peak hardness uniformly decreases by approximately 100 units and reaches the safe range of 350 Vickers, which is caused by the tempering of martensite and redistribution of carbon. Ultimately, the consistency between numerical and experimental results confirms the accuracy of the developed model.

Keywords: API 5L X65 Pipeline Steel, Post-Weld Heat Treatment (PWHT), Thermo-Mechanical-Metallurgical Finite Element Simulation, SYSWELD, Vickers Hardness Profile, Experimental Validation.

Received: January 19, 2025 | Accepted: September 26, 2025

***Corresponding Author:**
Hamid Reza Shahverdi, PhD
Address: Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University
Tel: +98 (21) 82883307
E-mail: shahverdi@modares.ac.ir

شبیه‌سازی عددی و مشاهدات تجربی اثر عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر ریزساختار و سختی فولاد API 5L X65

نعیم مینایی[۱]، *حمیدرضا شاهوردی[۲]، رضا میراسمعیلی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مواد- متالورژی جوشکاری، بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشیار بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در این پژوهش، رفتار حرارتی-متالورژیکی فرآیند جوشکاری تیگ (TIG) اتوماتیک و عملیات حرارتی پس از جوشکاری (PWHT) در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت بر روی فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای خط لوله API 5L X65 به‌صورت عددی و تجربی بررسی شد. بدین منظور، یک مدل سه‌بعدی اجزای محدود با استفاده از منبع حرارتی حجمی دوبیضوی گلداک در نرم‌افزار SYSWELD توسعه یافت و خواص وابسته به دمای فولاد در آن تعریف شد. به‌موازات مطالعه عددی، نمونه‌های واقعی با پارامترهای جوشکاری یکسان تولید شدند و پس از اعمال PWHT، تحت آزمون‌های متالوگرافی و ریزسختی‌سنجی ویکرز مطابق با استاندارد ASTM E384 قرار گرفتند.

نتایج نشان داد که ابعاد حوضچه مذاب پیش‌بینی‌شده در مدل عددی (بر مبنای مرز ذوب ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) با عمق ۲ میلی‌متر و عرض ۵/۶ میلی‌متر، تطابق دقیقی با مقطع عرضی واقعی جوش دارد. علاوه بر این، عرض و عمق منطقه HAZ در شبیه‌سازی، انطباق کاملی با نمونه‌های تجربی داشت. ارزیابی‌ها نشان داد که مدل، پیک سختی ۴۵۰ ویکرز را برای ناحیه ذوب پیش‌بینی می‌کند که تطابق خوبی با مقدار تجربی (۴۶۰ ویکرز) نشان می‌دهد.در شرایط جوشکاری‌شده (پیش از عملیات حرارتی)، به دلیل تشکیل مارتنزیت ناپایدار، سختی از مرز بحرانی ۴۰۰ ویکرز (طبق استاندارد NACE MR0175/ISO 15156) فراتر می‌رود. پس از اعمال PWHT، پیک سختی به‌طور یکنواخت حدود ۱۰۰ واحد کاهش می‌یابد و به محدوده ایمن ۳۵۰ ویکرز می‌رسد که این امر ناشی از تمپر شدن مارتنزیت و بازتوزیع کربن است. در نهایت، هم‌خوانی بین نتایج عددی و تجربی، صحت مدل توسعه‌یافته را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: فولاد خط لوله API 5L X65، عملیات حرارتی پس از جوشکاری ، شبیه‌سازی حرارتی-مکانیکی-متالورژیکی اجزای محدود، SYSWELD، پروفیل سختی ویکرز، اعتبارسنجی تجربی.

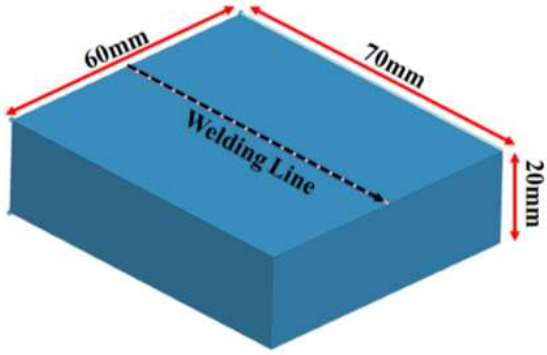
دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰ | پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

مقدمه

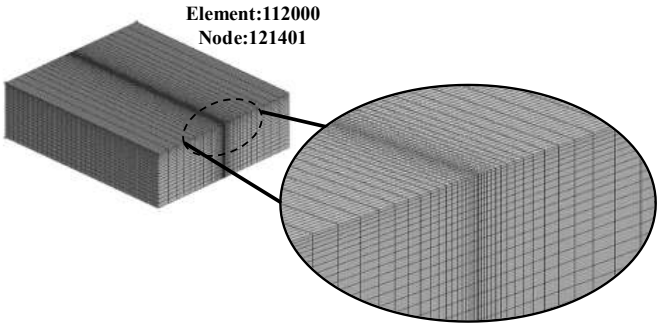
فولاد کم‌آلیاژی با استحکام بالا پایه API 5L X65 به دلیل دارا بودن ترکیب بهینه‌ای از استحکام مکانیکی، چقرمگی شکست در دماهای پایین، شکل‌پذیری و مقاومت به خوردگی، به عنوان متریال اصلی در ساخت و توسعه خطوط لوله انتقال نفت و گاز (اعم از خشکی و فراساحل)، مخازن ذخیره‌سازی و سازه‌های دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱–۶]. با این وجود، فرآیند جوشکاری ذوبی که شریان اصلی اتصال این لوله‌ها به شمار می‌رود، متریال X65 را در معرض سیکل‌های حرارتی شدید و ناگهانی قرار می‌دهد که منجر به ناهمگونی شدید ریزساختاری در ناحیه فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت[1] (HAZ) می‌شود[۳,۷–۹]. این غیریکنواختی حرارتی، چالش‌ها و مشکلات متعددی نظیر افت شدید چقرمگی ضربه در ناحیه درشت‌دانه[2] (CGHAZ)، ایجاد ناپیوستگی مکانیکی، تنش‌های پسماند کششی بالا و افزایش حساسیت سازه به ترک‌خوردگی‌های ناشی از هیدروژن[3] (HIC) و ترک‌خوردگی تنشی در محیط‌های ترش[4] (SSCC) را به همراه دارد[۳,۸–۱۰].

1 Heat-Affected Zone
2 Coarse-Grained Heat-Affected Zone
3 Hydrogen-Induced Cracking
4 Sulfide Stress Corrosion Cracking

* نویسنده مسئول:
دکتر حمید رضا شاهوردی
نشانی: بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس
تلفن: ۸۲۸۸۳۳۰۷ (۲۱) ۹۸+
پست الکترونیکی: shahverdi@modares.ac.ir



شکل۱: مدل هندسی قطعه فولادی X65 و موقعیت خط جوشکاری شبیه‌سازی‌شده در SYSWELD.



شکل۲: مدل مش‌بندی سه‌بعدی قطعه ؛ نمایش شبکه غیریکنواخت با مش بسیار ریز در مسیر خط جوش برای افزایش دقت محاسبات حرارتی.

طی سیکل‌های حرارتی جوشکاری، نرخ‌های سرمایش متفاوت در مجاورت خط ذوب باعث وقوع استحاله فازی در فاز آستنیت اولیه شده و ریزساختارهای متنوعی را در منطقه HAZ شکل می‌دهد[۱,۷] . در مناطقی با دمای پیک بالا و نرخ سرمایش سریع، به دلیل عدم فرصت کافی برای نفوذ کربن، فازهای سخت و شکننده‌ای همچون مارتنزیت لایه‌ای، باینیت بالایی/لایه‌ای و ترکیبات آستنیت-مارتنزیت[5] (M-A) تشکیل می‌شوند، حال آنکه با تنظیم نرخ سرمایش مناسب، فازهایی نظیر فریت سوزنی و فریت چندضلعی به همراه پرلیت پدید می‌آیند[۱۱] . تشکیل این فازها تأثیر مستقیم و تعیین‌کننده‌ای بر میزان سختی موضعی در نواحی مختلف جوش دارد، به‌طوری که حضور مارتنزیت و ترکیبات M-A با چگالی نابجایی بالا موجب افزایش شدید سختی در ناحیه CGHAZ و خط ذوب می‌شود، در حالی که فازهای فریتی و باینیتی تعدیل سختی و چقرمگی بیشتری را فراهم می‌سازند[۳,۴,۱۲].

اعمال عملیات حرارتی پس از جوشکاری[6] (PWHT) ، با آزادسازی تنش‌های پسماند و ایجاد پدیده تمپرینگ در فازهای سخت و ناپایدار مارتنزیتی و باینیتی، نقش کلیدی در بازتوزیع کربن و بازپخت نابجایی‌ها ایفا کرده و باعث کاهش معنادار سختی پیک و بهبود چقرمگی در HAZ می‌شود[۴,۱۳] . این فرآیند بهبود در شرایط حساس‌تر اهمیت می‌یابد، به‌ویژه زمانی که عملیات جوشکاری به روش انشعاب‌گیری یا جوشکاری حین بهره‌برداری روی خطوط لوله تحت فشار انجام می‌شود و عبور سیال پایه، نرخ سرمایش را به‌شدت افزایش می‌دهد[۱۳,۱۴]. در جوشکاری Hot tap، نرخ سرمایش فوق‌العاده سریع، سختی HAZ را به بالای مرزهای بحرانی رسانده و ترکیب این سختی بالا با تنش‌های کششی پسماند و هیدروژن نفوذپذیر، متریال را مستعد عیوب خطرناکی همچون ترک‌خوردگی سرد هیدروژنی، ایجاد ریزترک‌ها و شکست ترد می‌سازد[۱۴,۱۵]. علاوه بر پیش‌بینی سختی و فازها در مدل شبیه‌سازی شده گرادیان حرارتی در داخل لوله برای ما حائز اهمیت است. به ویژه داخل لوله که با سیال رونده در تماس می‌باشد. دمای داخل لوله نباید هنگام جوشکاری از حد مجاز عبور کند و شبیه‌سازی این پیک دمایی را می‌تواند پیش‌بینی کند.

لازم به ذکر است که با توجه به محدودیت‌های ایمنی و عملیاتی اجرای مستقیم فرآیند جوشکاری و عملیات حرارتی بر روی لوله در حال سرویس ، شبیه‌سازی عددی و آزمون‌های تجربی این پژوهش بر روی یک نمونه مجزا از همان جنس فولاد X65 و با پارامترهای جوشکاری و حرارتی مشابه شرایط واقعی انجام شده است. با توجه به چالش‌های یادشده، هدف اصلی شبیه‌سازی پیش‌بینی سختی، فازهای تشکیل شده و گرادیان حرارتی پس از جوشکاری و پیش‌بینی تاثیر PWHT روی این پارامترها می‌باشد .دراین پژوهش پیش‌بینی تاثیر PWHT به مدت ۱ ساعت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و همچنین شبیه‌سازی عددی فرآیند جوشکاری و عملیات حرارتی متناظر بر روی فولاد X65 است تا از طریق تعدیل ریزساختار و کاهش سختی موضعی در ناحیه متاثر از حرارت، از بروز عیوب و ترک‌های ساختاری جلوگیری به عمل آید. علاوه بر این، جهت اطمینان از دقت مدلسازی و پیش‌بینی‌های عددی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی شامل پروفیل سختی نواحی مختلف و ابعاد حوضچه مذاب با داده‌های تجربی به‌دست‌آمده مطابقت داده می‌شوند.

روش انجام پژوهش

شبیه‌سازی عددی

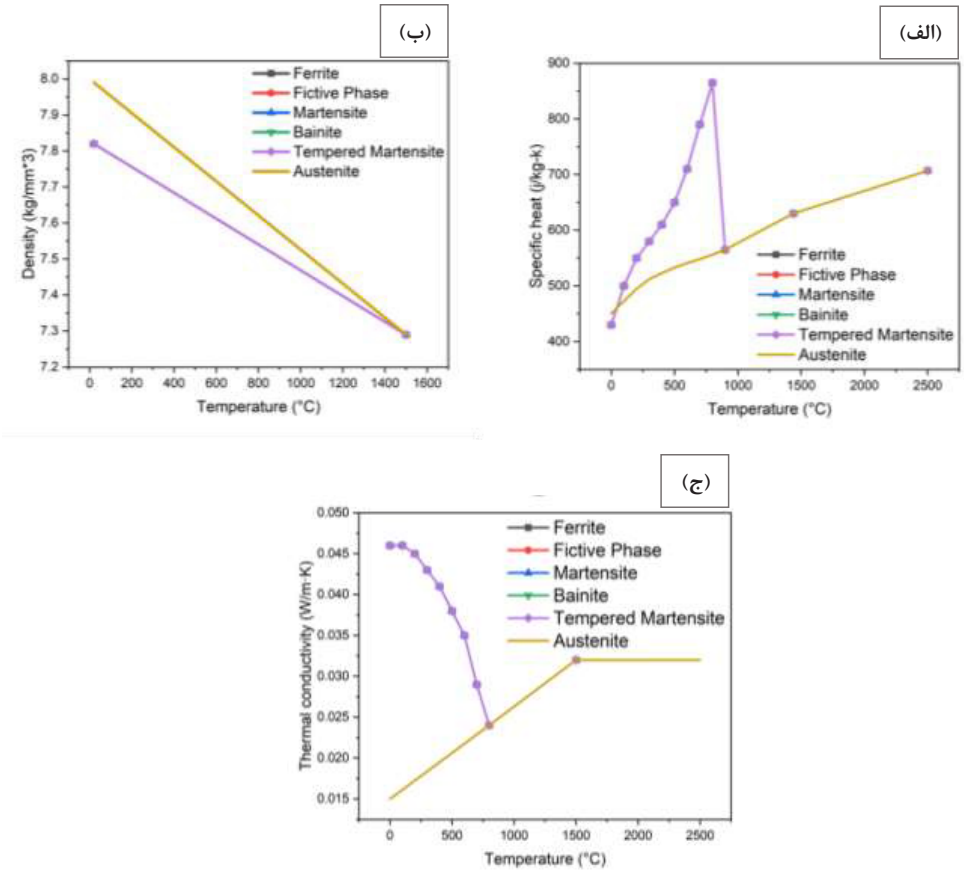
مدلسازی هندسی نمونه، خواص ماده و شرایط مرزی

جهت تحلیل توزیع حرارتی، پیش‌بینی شکل و ابعاد حوضچه مذاب و محاسبه پروفیل سختی حاصل از فرآیند جوشکاری و عملیات حرارتی پس از آن ، یک مدل عددی سه‌بعدی حرارتی در نرم‌افزار المان محدود SYSWELD توسعه داده شد.

5 Martensite-Austenite
6 Post-Weld Heat Treatment

جدول۱: آنالیز شیمیایی فولاد خط لوله API X65 مورد استفاده در آزمون تجربی و شبیه‌سازی

عنصر شیمیایی	کربن	منگنز	فسفر	سیلیسیم	گوگرد	نیوبیوم	وانادیوم
محدوده تقریبی	۰/۰۳	۱/۲۸	۰.۰۱۳	۰/۲	۰/۰۰۲	۰/۰۴	۰/۰۰۱
عنصر شیمیایی	مس	مولیبدن	آلومینیوم	نیکل	کروم	تیتانیوم	
محدوده تقریبی	۰.۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۳	۰.۰۱	۰/۰۴	۰/۰۱	



شکل۳: خواص حرارتی وابسته به دمای فازهای متالورژیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی حرارتی مستخرج از کتابخانه نرم افزار SYSWELD ؛ (الف) ظرفیت گرمایی ویژه، (ب) چگالی و (ج) ضریب هدایت حرارتی.

هندسه و ابعاد نمونه

مدل سه‌بعدی هندسی نمونه مطابق با ابعاد واقعی ورق از جنس فولاد X65 با ابعاد ۷۰ × ۶۰ × ۲۰ میلی‌متر مطابق شکل ۱ در محیط نرم‌افزار ایجاد گردید.

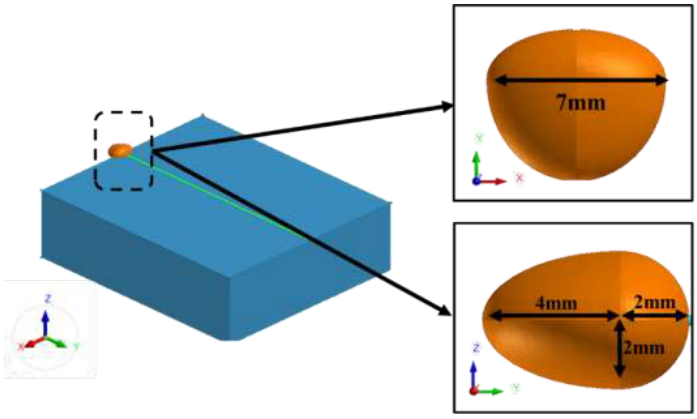
شبکه مش‌بندی

شبکه مش‌بندی مدل به‌گونه‌ای طراحی شد که در منطقه جوش و ناحیه HAZ به دلیل وجود گرادیان حرارتی شدید، از مش‌های بسیار ریز استفاده شد، در حالی که در نواحی دورتر از خط ذوب جهت بهینه‌سازی زمان محاسبات، اندازه المان‌ها به‌صورت تدریجی درشت‌تر گردید؛ تراکم و نحوه توزیع شبکه مش‌بندی در ناحیه جوش و HAZ در شکل ۲ نشان داده شده است.

خواص حرارتی وابسته به دما[۷]

خواص حرارتی فولاد API 5L X65 (شامل ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه، چگالی) به‌صورت وابسته به دما تا دمای ذوب در نرم‌افزارSYSWELD تعریف شدند؛ نمودار تغییرات این خواص حرارتی بر حسب دما در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است.انالیز شیمیایی فولاد X65 در جدول۱ آورده شده است.

7 Temperature-Dependent Properties



شکل۴: موقعیت و پارامترهای هندسی منبع حرارتی گلداک بر روی قطعه کار.

شرایط مرزی[8]

اتلاف حرارتی از تمامی سطوح خارجی نمونه به محیط اطراف از طریق مکانیسم‌های همرفت حرارتی و تشعشع با محیط در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد اعمال گردید.

شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری

مدل منبع حرارتی دو بیضوی گلداک[9]

برای مدلسازی شار حرارتی ورودی جوشکاری، از مدل منبع حرارتی حجمی دو بیضوی گلداک استفاده گردید؛ هندسه نحوه توزیع شار حرارتی این منبع در شکل ۴ ارائه شده است.
توزیع دانسیته توان حرارتی در نیمه جلویی و نیمه پشتی منبع حرارتی طبق روابط زیر تعریف شد[۸]:

$$\begin{cases} q_{f(x,y,z)} = \dfrac{6\sqrt{3}f_f Q}{\pi a_f bc\sqrt{\pi}} exp\left(-\dfrac{3x^2}{a_f}\right) exp\left(-\dfrac{3y^2}{b^2}\right) exp\left(-\dfrac{3z^2}{c^2}\right) \\ q_{f(x,y,z)} = \dfrac{6\sqrt{3}f_r Q}{\pi a_r bc\sqrt{\pi}} exp\left(-\dfrac{3x^2}{a_r}\right) exp\left(-\dfrac{3y^2}{b^2}\right) exp\left(-\dfrac{3z^2}{c^2}\right) \end{cases}$$

که در آن $Q=\eta IV$ توان ورودی به مدل، η بازده حرارتی قوس، I جریان جوشکاری، V ولتاژ قوس و پارامترهای a_f، a_r، b و c ابعاد هندسی منبع حرارتی گلداک هستند. منبع حرارتی با سرعت جوشکاری مشخص در امتداد خط جوش حرکت داده شد. تمامی پارامترهای حرارتی و هندسی مدلسازی عددی در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

شبیه‌سازی عملیات PWHT

پس از اتمام شبیه‌سازی سیکل حرارتی جوشکاری و خنک‌سازی تا دمای محیط، تحلیل حرارتی مرحله PWHT با اعمال سیکل گرمایش تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، نگهداری به مدت ۱ ساعت و خنک‌سازی در دمای محیط انجام شد.

رویه اجرای آزمون‌های تجربی

آماده‌سازی نمونه‌ها

ماده پایه مورد استفاده، فولاد کم‌آلیاژی API 5L X65 با ابعاد ۷۰ × ۶۰ × ۲۰ میلی‌متر بود. پیش از جوشکاری، سطوح نمونه‌ها سمباده‌زنی مکانیکی شده و با استون شستشو داده شدند.

فرآیند جوشکاری تیگ اتوماتیک

فرآیند جوشکاری با استفاده از دستگاه جوشکاری تیگ اتوماتیک انجام شد. چیدمان دستگاه جوشکاری تیگ اتوماتیک و مقطع جوش حاصله در شکل ۵ نشان داده شده است. پارامترهای عملیاتی جوشکاری شامل جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری طبق مقادیر مندرج در جدول ۲ برای اعتبار سنجی تنظیم و اعمال گردیدند.

عملیات حرارتی پس از جوشکاری

پس از اتمام جوشکاری و خنک‌شدن نمونه‌ها تا دمای محیط، نمونه‌های جوشکاری‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد درون کوره الکتریکی برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی قرار داده شدند. نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت (۶۰ دقیقه) نگهداری شدند. پس از اتمام زمان نگهداری، نمونه‌ها از کوره خارج شده و در هوای محیط تا دمای اتاق خنک شدند.

ارزیابی‌های آزمایشگاهی و آزمون‌ها

آماده‌سازی متالوگرافی

مقاطع عرضی عمود بر مسیر جوشکاری برش داده شدند. نمونه‌ها پس از مانت‌کاری سرد، با سمباده‌های سیلیسیم کاربرید از شماره ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ سمباده‌زنی شده و سپس با نمد و خمیر الماسه (۱ تا ۳ میکرون) پولیش گردیدند.
نمونه‌ها به مدت ۱۲۰ ثانیه (۲ دقیقه) در محلول نایتال[10] با غلظت ۵٪ غوطه‌ور و اچ شدند. سپس مقاطع عرضی به وسیله میکروسکوپ نوری مورد تصویربرداری قرار گرفت.

8 Boundary Conditions
9 Goldak's Double Ellipsoid Heat Source
10 Nital

آزمون ریزسختی‌سنجی ویکرز

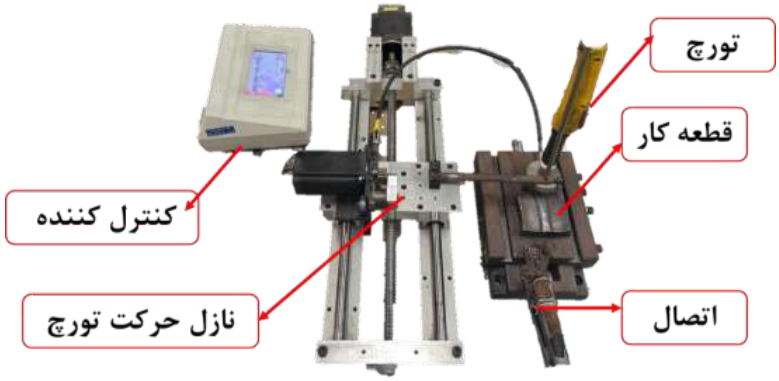
اندازه‌گیری سختی در نواحی فلز جوش ، HAZ و ماده پایه مطابق با استاندارد ASTM E384 انجام شد.این آزمون با دستگاه ریزسختی‌سنجی ویکرز تحت نیروی ۵۰۰ گرم (HV 0.5) و زمان مکث ۱۵ ثانیه بر روی مقاطع عرضی جوش صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمون‌های تجربی جوشکاری تیگ اتوماتیک فولاد کم‌آلیاژی با استحکام بالای API 5L X65 و عملیات PWHT به مدت ۱ ساعت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده و مورد تحلیل و اعتبارسنجی قرار می‌گیرد.

جدول۲: پارامترهای فرایند جوشکاری و مشخصات هندسی منبع حرارتی گلداک در شبیه‌سازی

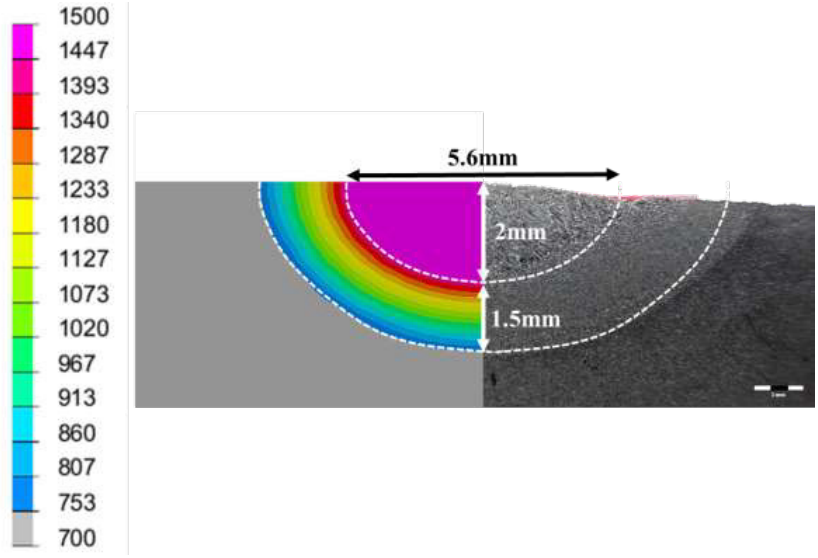
پارامتر	نماد	واحد	مقدار
جریان جوشکاری	I	A	۲۰۰
ولتاژ جوشکاری	U	V	۱۴
سرعت جوشکاری	v	mm/s	۵
حرارت ورودی	Q	j/mm	۵۶۰
شعاع بیضی عرضی	b	mm	۷
شعاع بیضی عمقی	c	mm	۲
شعاع طولی جلویی	a_f	mm	۲
شعاع طولی عقبی	a_r	mm	۴
نسبت انرژی	F_f/f_r	_	۱.۲
بازده حرارتی	η	_	۰/۷۵



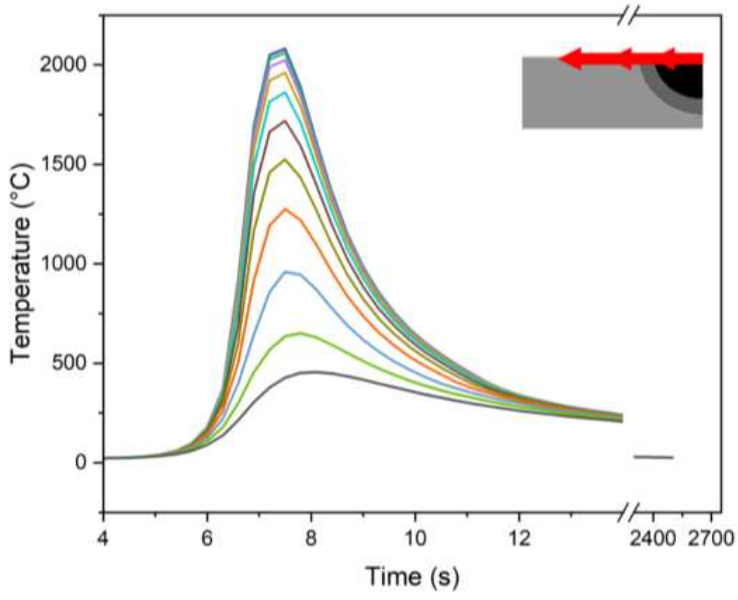
شکل۵: تصویر دستگاه و چیدمان تجهیزات جوشکاری اتوماتیک به همراه معرفی اجزای اصلی سیستم.

بررسی هندسه و ابعاد حوضچه مذاب و اعتبارسنجی مدل عددی

مطابقت هندسه و ابعاد حوضچه مذاب میان مدل المان محدود و مقطع عرضی واقعی جوش، اولین گام در تأیید صحت منبع حرارتی و شرایط مرزی اعمال‌شده در شبیه‌سازی است. در شکل ۶ مقطع عرضی حاصل از آزمون تجربی در کنار کانتور دمایی شبیه‌سازی‌شده منبع حرارتی دو بیضوی گلداک قرار داده شده است. همان‌طور که در این تصویر به وضوح مشخص است، مرز ذوب که در شبیه‌سازی عددی ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است، انطباق با مرز واقعی حوضچه مذاب در نمونه متالوگرافی‌شده دارد. مقادیر استخراج‌شده از تصویر نشان می‌دهد که عرض کل حوضچه مذاب معادل ۵/۶ میلی‌متر و عمق نفوذ منطقه ذوب برابر با ۲ میلی‌متر است. علاوه بر این، وسعت منطقه متأثر از حرارت نیز ۱/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. بررسی دقیق این ابعاد نشان‌دهنده هم‌خوانی و انطباق اندازه‌ها میان خروجی مدل شبیه‌سازی و نمونه واقعی است. این تطبیق هندسی به دلیل کالیبراسیون مناسب پارامترهای منبع حرارتی گلداک و اعمال ضریب بازده حرارتی واقعی فرآیند جوشکاری است. کنترل ورودی حرارت در جوشکاری اتوماتیک باعث شکل‌گیری حوضچه مذابی با نفوذ کامل و فاقد عیوب ذوبی نظیر ناپیوستگی یا سوختگی کنار جوش گردیده است.



شکل۶: تصویر هم‌پوشانی کانتور توزیع دما (سمت چپ) و تصویر ماکروسکوپی جوش واقعی (سمت راست)؛ تطابق دقیق خطوط خط‌چین با مرزهای خط ذوب و HAZ نهایی.



شکل۷: تاریخچه حرارتی و منحنی‌های دما-زمان در گره‌های مختلف مقطع عرضی اتصال؛ نمایش افت گرادیان دمایی و کاهش دمای پیک با دور شدن از مرکز حوضچه مذاب به سمت فلز پایه.

مطابق شکل ۷، نمودار تاریخچه حرارتی نشان می‌دهد که با دور شدن از مرکز حوضچه مذاب به سمت فلز پایه، دمای بیشینه به‌شدت کاهش می‌یابد. این شیب تند و نرخ سرمایش بسیار سریع در مجاورت خط ذوب، زمان لازم برای استحاله‌های تعادلی را سلب کرده و در نتیجه منجر به تشکیل فاز سخت و شکننده مارتنزیت در این ناحیه می‌گردد.

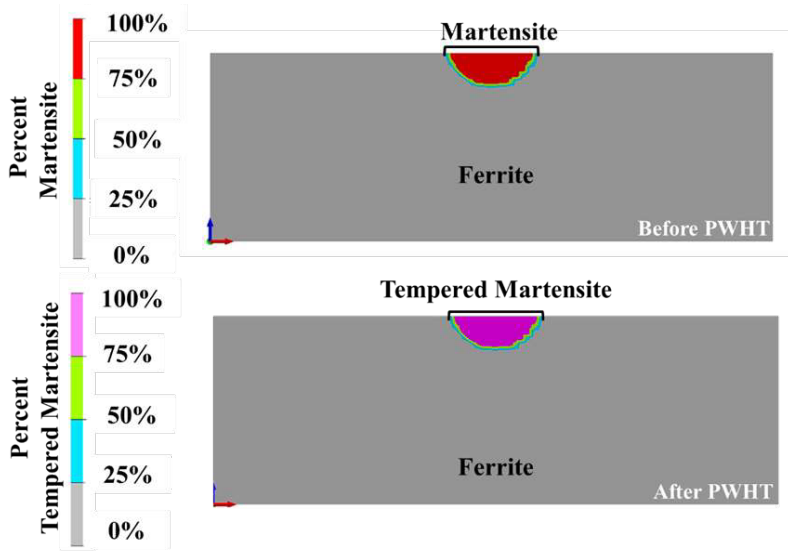
تحولات فازی و تغییرات ریزساختاری طی سیکل جوشکاری و PWHT

پیش از عملیات حرارتی یک ناحیه مارتنزیتی سخت در مرکز جوش و درون بستر فریتی وجود دارد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌کنید با اعمال عملیات حرارتی پس از جوشکاری، این ساختار اولیه به‌طور کامل تحت تأثیر حرارت قرار گرفته و دگرگون می‌شود. در نهایت خروجی شبیه‌سازی تأیید می‌کند که تمام فاز مارتنزیت ناحیه جوش به ریزساختار مطلوب و پایدارتر مارتنزیت تمپر شده تبدیل شده است.

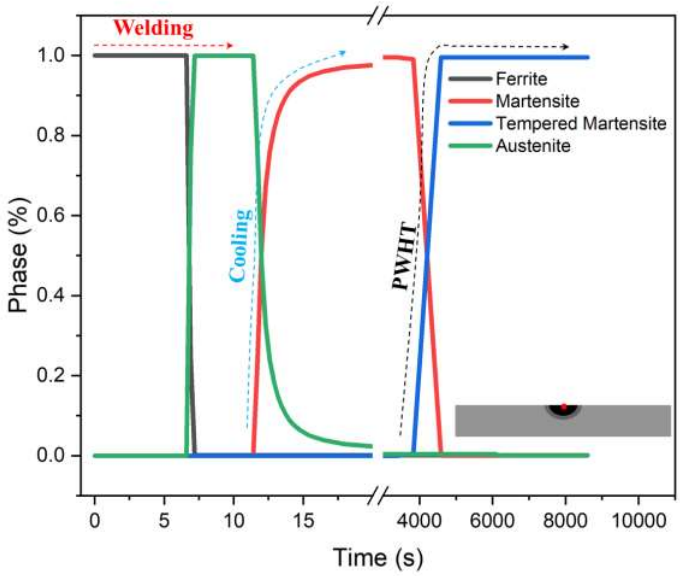
فرآیند جوشکاری و عملیات حرارتی متناظر، متریال را در معرض استحاله‌های فازی ترمودینامیکی پیچیده‌ای قرار می‌دهد. شکل ۹ نمودار تغییرات کسری فازها بر حسب زمان و دما را که از خروجی‌های نرم‌افزار استخراج شده است، نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۹، فرآیند تحولات فازی در سه مرحله اصلی رخ می‌دهد: مرحله گرمایش و آستنیته‌شدن که با حرکت منبع حرارتی و عبور دما از مرز بحرانی (بالای ۷۲۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد) است، ساختار اولیه فریتی-پرلیتی فولاد X65 کاملاً به فاز آستنیت تبدیل می‌شود. مرحله سرمایش پس از جوشکاری که طی سرمایش سریع پس از جوشکاری می‌باشد، آستنیت اولیه به دلیل عدم فرصت کافی برای نفوذ کربن و دیفوزیون اتمی، متحول شده و فازهای سخت و شکننده‌ای نظیر مارتنزیت را در ناحیه ذوب شکل می‌دهد. تشکیل مارتنزیت حاصل واکنش برشی بدون نفوذ است که موجب چگالی بسیار بالای نابجایی‌ها و شدیدترین تنش‌های شبکه کریستالی می‌شود. در مرحله PWHT ، انرژی اکتیواسیون لازم برای نفوذ کربن فراهم می‌شود. در این مرحله، فاز مارتنزیت ناپایدار تجزیه شده و به مارتنزیت تمپر شده تبدیل می‌گردد.

تحلیل کانتورهای سه‌بعدی و مقطعی توزیع سختی قبل و بعد از PWHT

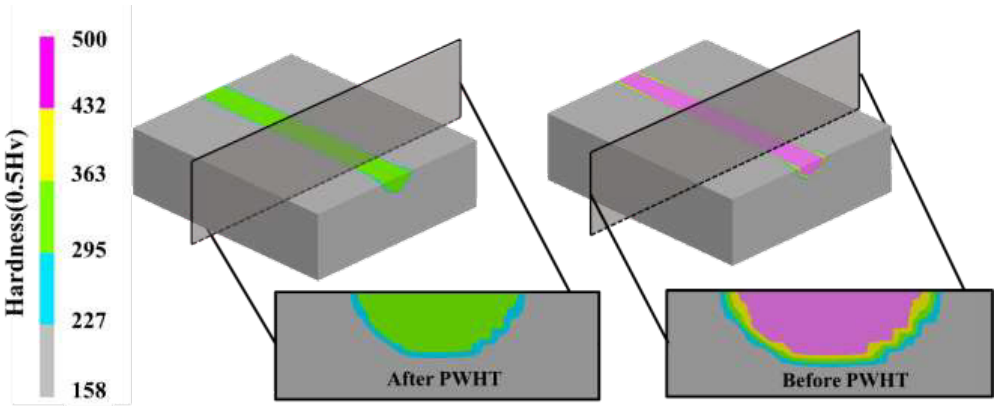
برای بررسی جامع پراکندگی سختی در کل حجم قطعه و مقطع عرضی جوش، کانتورهای سختی حاصل از شبیه‌سازی عددی در دو حالت قبل و بعد از عملیات حرارتی در شکل ۱۰ مقایسه شده‌اند. مطابق کانتورهای نشان‌داده‌شده در شکل ۱۰، قبل از عملیات حرارتی، یک ناحیه با تمرکز شدید سختی در ناحیه ذوب و HAZ مشاهده می‌شود. این تمرکز سختی بالا ناشی از تشکیل فازهای سخت مارتنزیتی در اثر نرخ سرمایش سریع جوشکاری است.پس از اعمال PWHT ، کانتورهای سختی افت محسوس و یکنواختی را در سراسر مقطع عرضی نشان می‌دهند. پدیده تمپرینگ و تعدیل ساختاری باعث کاهش تمرکز سختی موضعی در ناحیه ذوب و HAZ گردیده است.



شکل۸: کانتور پیش بینی شبیه‌سازی توزیع و کسر حجمی فازها در مقطع عرضی اتصال؛مقایسه کانتورهای فازی قبل و بعد از عملیات حرارتی؛ نشان‌دهنده استحاله صد درصدی ناحیه مارتنزیتی سخت به ساختار مطلوب مارتنزیت تمپر شده در بستر فریتی فلز پایه است.

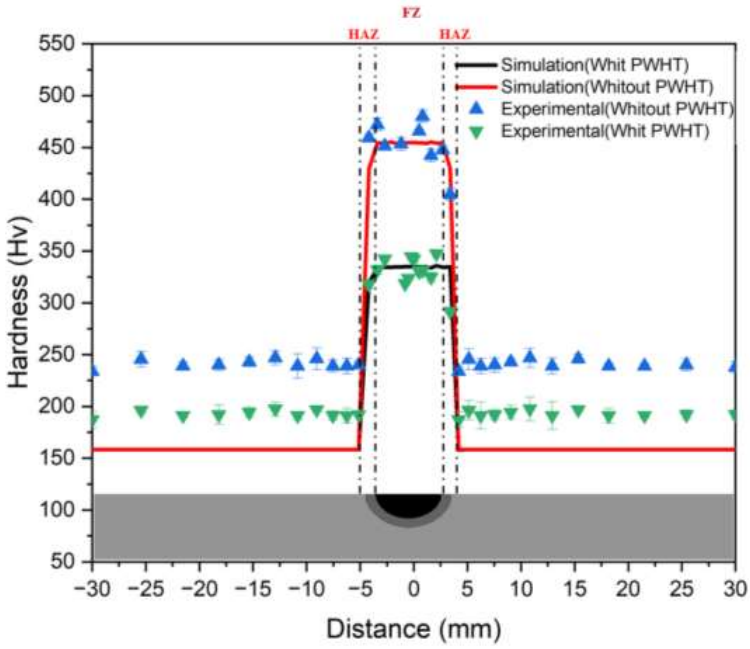


شکل۹: سینتیک دگرگونی فازی در نقطه مشخص‌شده از اتصال؛ تبدیل فریت به آستنیت حین حرارت‌دهی، تشکیل مارتنزیت طی سرمایش و تبدیل نهایی به مارتنزیت تمپر شده پس از اعمال PWHT.



شکل۱۰: کانتور سه‌بعدی و دوبعدی پروفیل سختی در منطقه جوش و HAZ؛ کاهش چشمگیر بیشینه سختی (از حدود ۴۵۰ به کمتر از ۳۵۰ ویکرز) پس از اعمال PWHT.

ارزیابی پروفیل‌های ریزسختی ویکرز (HV0.5) در امتداد مقطع عرضی جوش قبل و بعد از اعمال عملیات PWHT و تطبیق آن با خروجی‌های مدلسازی عددی در شکل ۱۱ به تصویر کشیده شده است.همان‌طور که در منحنی‌های مربوط به حالت قبل از عملیات حرارتی مشاهده می‌شود، یک پیک سختی شدید در منطقه ذوب رخ داده که مقادیر آن به محدوده ۴۵۰ ویکرز می‌رسد، در حالی که سختی ماده پایه در محدوده ۲۵۰ ویکرز قرار دارد و در مدل شبیه‌سازی ۱۶۰ در نظر گرفته شده است و این تفاوت در مدل شبیه‌سازی و مدل تجربی به علت تفاوت در اندازه دانه‌های قطعه کار و مدل شبیه‌سازی می‌باشد که در قطعه کار اندازه دانه ریزتر بوده و باعث افزایش سختی شده است و سختی در قطعه‌ای که عملیات حرارتی شده‌است پایین‌تر بوده و علت کاهش سختی بعد از عملیات حرارتی بزرگ‌تر شدن دانه می‌باشد. از دیدگاه متالوژیکی، این افزایش ناگهانی و غیریکنواخت سختی در ناحیه ذوب ناشی از نرخ سرمایش سریع طی سیکل حرارتی جوشکاری است که منجر به استحاله برشی آستنیت اولیه و تشکیل فازهای سخت و ناپایدار نظیر مارتنزیت تمپرنشده، با چگالی نابجایی بالای می‌شود. مطابق با استانداردهای بین‌المللی مانند NACE MR0175 / ISO 15156 و API 5L، وجود چنین پیک‌های سختی بالاتر از مرز بحرانی ۴۰۰ ویکرز، حساسیت سازه فولادی X65 را به عیوب ساختاری مهلک از جمله ترک‌خوردگی سرد هیدروژنی، ترک‌خوردگی تنشی در محیط‌های ترش و شکست ترد به‌شدت افزایش می‌دهد.پس از اعمال عملیات حرارتی PWHT ، منحنی‌های تجربی و عددی نشان‌دهنده افت معنادار و یکنواخت سختی درناحیه ذوب به میزان ۱۰۰ ویکرز کاهش یافت و به محدوده ایمن ۳۵۰ ویکرز رسید. این فرایند



شکل۱۱: توزیع سختی ویکرز (HV) بر حسب فاصله از مرکز خط جوش؛ اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی با داده‌های تجربی و نمایش میزان افت سختی پیک ناحیه جوش ناشی از اعمال PWHT.

نرم‌شوندگی موضعی به دلیل تأمین انرژی اکتیواسیون حرارتی لازم برای بازتوزیع کربن و وقوع پدیده تمپرینگ در فازهای سخت مارتنزیتی رخ می‌دهد که در نهایت منجر به رسوب کاربیدهای ریز و یکنواختی ریزساختار می‌گردد. انطباق فوق‌العاده نزدیک میان منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی المان محدود و داده‌های تجربی قبل و بعد از PWHT در شکل ۱۱، صحت مدل عددی را در پیش‌بینی رفتار حرارتی ، نرخ تمپرینگ و پروفیل سختی جوش فولاد API 5L X65 تأیید می‌سازد. نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی به‌دست‌آمده در این پژوهش شامل افت سختی ناحیه ذوب از ۴۵۰ به ۳۵۰ ویکرز و کاهش ۱۰۰ویکرز در ناحیه ذوب، همخوانی و انطباق با یافته‌های راویکیران و همکاران [۱۶]، تامکوف و روگالسکی [۱۴]و ژو و همکاران [۱۷] دارد. پژوهش‌های این محققان نیز تأیید می‌کند که اعمال عملیات حرارتی پس از جوشکاری موجب افت سختی در ناحیه ذوب می‌شود. این تطابق نتایج نشان می‌دهد که عملیات حرارتی اعمال‌شده با حذف تمرکز سختی موضعی و نگه‌داشتن آن در محدوده ایمن ، به‌طور مؤثر از بروز عیوب ناشی از سختی بالا جلوگیری به عمل می‌آورد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل جامع و کوپل‌شده اجزای محدود حرارتی–متالورژیکی–مکانیکی برای پیش‌بینی همزمان گرادیان دمایی، سینتیک تحولات فازی و توزیع سختی حاصل از فرآیند جوشکاری تیگ اتوماتیک و PWHT در فولاد پرکاربرد خط لوله API 5L X65 توسعه داده شد. این مدل با بهره‌گیری از منبع حرارتی حجمی دوبیضوی گلداک و خواص ترموفیزیکی وابسته به دما در نرم‌افزار SYSWELD، قادر به شبیه‌سازی کامل چرخه حرارتی جوشکاری، سینتیک استحاله‌های فازی (فریت ← آستنیت ← مارتنزیت ← مارتنزیت تمپرشده) و پیش‌بینی کمّی سختی موضعی در تمامی نواحی جوش، HAZ و فلز پایه است. صحت و دقت این مدل پیش‌بینی‌کننده به‌طور مستقل در سه سطح مجزا در برابر داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد:

- هندسه حوضچه مذاب: مرز ذوب پیش‌بینی‌شده توسط مدل (ایزوترم ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) با مقطع عرضی واقعی جوش تطابق داشت.
- سینتیک فازی: روند تحولات ریزساختاری پیش‌بینی‌شده توسط مدل (آستنیته‌شدن حین جوشکاری، تشکیل مارتنزیت طی سرمایش سریع و تبدیل نهایی به مارتنزیت تمپرشده پس از PWHT) با مشاهدات متالوگرافی هم‌راستا بود.
- پروفیل سختی: مقادیر سختی ویکرز پیش‌بینی‌شده، هم پیش از PWHT (پیک حدود ۴۵۰ ویکرز در ناحیه ذوب، فراتر از آستانه بحرانی ۴۰۰ ویکرز مطابق استانداردهای NACE MR0175/ISO 15156 و API 5L) و هم پس از آن (افت یکنواخت به محدوده ایمن)، انطباق بسیار نزدیکی با نتایج آزمون ریزسختی‌سنجی تجربی نشان داد.

این تطابق هم‌زمان و چندسطحی میان پیش‌بینی‌های عددی و داده‌های تجربی، اعتبار و قابلیت اطمینان بالای مدل توسعه‌یافته را به‌عنوان یک ابزار پیش‌بینی قدرتمند برای تحلیل رفتار حرارتی، متالورژیکی و مکانیکی جوش تأیید می‌کند. بر این اساس، مدل حاضر می‌تواند پیش از اجرای عملیات واقعی و پرمخاطره جوشکاری و PWHT بر روی خطوط لوله در حال سرویس (مانند عملیات Hot Tap)، به‌عنوان یک چارچوب طراحی و بهینه‌سازی قابل‌اعتماد برای تعیین دمای بهینه و زمان نگهداری PWHT مورد استفاده قرار گیرد؛ رویکردی که نیاز به آزمون‌های تجربی پرهزینه و پرریسک مستقیم بر روی لوله در سرویس را به حداقل می‌رساند.

References

[1] A. Tahaei, B. Bagheri, V. Mahmoud, A. Matia, M. Chiara, Microstructure and mechanical properties of weld joint in submerged arc welded API X65 steel pipeline, (2026) 2373–2384.
[2] Non-Destructive Monitoring of the Effect of Artificial Aging on API X65 Pipeline Welded Joints, 35 (2026) 6910–6922. https://doi.org/10.1007/s11665-025-12044-1.
[3] C. Zhu, Y. Yan, Y. Sun, Y. Liu, L. Xu, International Journal of Pressure Vessels and Piping The effect of abnormal base metal hardness on stress corrosion cracking susceptibility of coarse-grained heat-affected zone of X65 pipeline steel, 222 (2026).
[4] X. Wang, S. Lin, T. Jiao, J. Li, Z. Xie, C. Shang, Effect of acicular ferrite on microstructure stability and low-temperature impact toughness of simulated CGHAZ in X65 grade submarine pipeline steel, 44 (2026) 65–75.
[5] J. Ali-lavroff, E. Begovic, D. Boote, A. Egorov, M. Rodriguez, A. Salcedo, H. Seyffert, J. Souppez, L. Toshkov, N. Vladmir, F. Wang, SHIP AND OFFSHORE STRUCTURES, 2025.
[6] A. Cosham, N.P. Engineering, N. Tyne, The Development of Supplements to IGEM / TD / 1 Edition 6 and IGEM / TD / 13 Edition 2 for Hydrogen Service, (2022).
[7] D. Han, Y. Xiao, Y. Cheng, F. Wang, X. Liu, L. Xu, Y. Han, Effect of High-Pressure Natural Gas / Hydrogen Mixed Environment on the Fatigue Life of X65 Pipeline Steel Welded Joints, (2026) 4042–4055. https://doi.org/10.1111/ffe.70367.
[8] Y. Sun, S. Yu, B. Wang, L. Liu, E. Liu, T. Feng, Interface Microstructure and Mechanical Properties of Nickel / Steel Bimetal Composite Pipe Fabricated by Explosive Welding, (2024).
[9] S. Ramirez, H. Carreon, applied sciences Study of the Precipitation Process in Aging Steel Pipeline Weldments by Thermoelectric Power Means, (2018) 2–9. https://doi.org/10.3390/app8091489.
[10] E. Science, Effect of Welding Process Parameters on the Mechanical Properties of TIG and MIG Welds in HSS X65 Pipe-A Review Effect of Welding Process Parameters on the Mechanical Properties of TIG and MIG Welds in HSS X65 Pipe-A Review, (n.d.). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1322/1/012009.
[11] X. Fu, H. Yuan, Y. Xu, X. Li, L. Li, Z. Wang, B. Han, Comparative Study on Microstructure and Mechanical Properties of Fusion Zones in X65 / Ni825 Bimetallic Pipe Welds with Different Filler Metals, (2026) 1–19.
[12] J. Sun, N. Ma, D. Deng, J. Hensel, K. Dilger, Softening and hardening effects of welding on residual stresses of ultra-high strength steels, 43 (2026) 2974–2990.
[13] J. Vora, Investigation on mechanized pulsed GMAW process for sour-service pipeline welding, High Temp. Mater. Process. 45 (2026) 1–10. https://doi.org/10.1515/htmp-2025-0121.
[14] G. Rogalski, International Journal of Pressure Vessels and Piping Behavior of API 5L X65 pipeline steel in underwater wet welding conditions by applying temper bead welding technique, 220 (2026).
[15] K. Erxleben, S. Kaiser, M. Rhode, T. Kannengiesser, A. Kromm, In-service and repair welding of pressurized hydrogen pipelines – a review on current challenges and strategies, Weld. World 69 (2025) 3141–3164. https://doi.org/10.1007/s40194-025-02127-x.
[16] Y. Wang, L. Li, G. Lehnhoff, Crystallographic texture before and after post weld heat treatment of high-frequency electric resistance welded API X65 linepipe, (2026). https://doi.org/10.1177/02670836241309815.
[17] J. Sun, T. Nitschke-pagel, K. Dilger, Influence of temperature- and phase-dependent yield strength on residual stresses in ultra-high strength steel S960 weldments, (2021).