



بررسی عددی و تجربی تأثیر ترتیب جوشکاری بر توزیع تنش پسماند در اتصال تیوب به تیوب شیت مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله با چیدمان مثلثی

رضا شیبانی^۱، امین ربیعی زاده^{۲*}، رضا جاهدی^۱، مهرداد محمدی^۱

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲- گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: amin.rabiezadeh@iau.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری نقش تعیین‌کننده‌ای در شروع ترک و کاهش قابلیت اطمینان مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله، به‌ویژه در ناحیه اتصال تیوب به تیوب‌شیت، ایفا می‌کنند. با وجود مطالعات متعدد عددی در این حوزه، اثر هم‌زمان فاصله تیوب‌ها و ترتیب جوشکاری در چیدمان مثلثی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش، یک مدل عددی سه‌بعدی مبتنی بر تحلیل کوپل حرارتی-سازه‌ای برای پیش‌بینی توزیع تنش‌های پسماند در اتصالات تیوب به تیوب‌شیت توسعه داده شده است. فرایند جوشکاری قوسی تنگستنی با گاز محافظ با در نظرگیری یک پاس جوش گوشه‌ای محیطی مدل‌سازی شده و شار حرارتی قوس به‌صورت یک تابع گوسی وابسته به زمان، از طریق زیربرنامه اختصاصی در نرم‌افزار آباکوس اعمال گردیده است. نوآوری اصلی مدل ارائه‌شده، امکان بازتولید دقیق توالی‌های مختلف جوشکاری و بررسی اثر برهم‌نهی حرارتی و سازه‌ای ناشی از آن‌ها بر تنش‌های پسماند نهایی است. نتایج عددی نشان می‌دهد که تغییر ترتیب جوشکاری، بدون اعمال هیچ‌گونه عملیات تنش‌زدایی یا تغییر در پارامترهای فرایندی، می‌تواند منجر به بازتوزیع قابل توجه میدان تنش و کاهش تنش‌های پسماند کششی تا حدود ۹۷٪ در چیدمان مثلثی شود. برای اعتبارسنجی، توزیع دمایی حین جوشکاری به‌وسیله ترموگرافی مادون قرمز و تنش‌های پسماند با روش پراش اشعه ایکس اندازه‌گیری شده که تطابق مناسبی با نتایج عددی نشان می‌دهند. چارچوب عددی توسعه‌یافته می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای بهینه‌سازی ترتیب جوشکاری و افزایش عمر بهره‌برداری مبدل‌های حرارتی صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.	مقاله پژوهشی دریافت: ۲۰ اردیبهشت ۱۴۰۵ پذیرش: ۲۲ مرداد ۱۴۰۵
	کلیدواژگان: تنش پسماند ترتیب جوشکاری شبیه‌سازی عددی تحلیل حرارتی-سازه‌ای

An experimental and numerical study on the influence of welding sequence on residual stress distribution in triangular-layout tube-to-tubesheet joints of shell and tube heat exchangers

Reza Sheibani¹, Amin Rabiezadeh^{2*}, Reza Jahedi¹, Mehrdad Mohammadi¹

1- Department of Mechanical Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

2- Department of Materials Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

* Corresponding Author's Email: amin.rabiezadeh@iau.ac.ir

Article Information	Abstract
Original Research Paper Received: 10 May 2026 Accepted: 13 August 2026	Welding-induced residual stresses play a critical role in crack initiation and reduced reliability of shell-and-tube heat exchangers, particularly in tube-to-tubesheet joints. Despite extensive numerical investigations in this field, the combined effect of tube spacing and welding sequence in triangular tube layouts has not yet been systematically examined. In this study, a three-dimensional numerical model based on a coupled thermo-mechanical analysis is developed to predict the residual stress distribution in tube-to-tubesheet joints. The gas tungsten arc welding (GTAW) process is modeled considering a single-pass circumferential fillet weld, and the arc heat input is applied as a time-dependent Gaussian heat flux via a dedicated user subroutine implemented in ABAQUS. The primary novelty of the proposed model lies in its ability to accurately reproduce various welding sequences and to evaluate the resulting thermo-mechanical superposition effects on the final residual stress field. Numerical results indicate that modifying the welding sequence alone, without applying any stress-relief treatment or altering process parameters, can lead to a significant redistribution of stresses and a reduction of tensile residual stresses by up to 97% in the triangular tube arrangement. For validation purposes, the transient temperature field during welding is measured using infrared thermography, while residual stresses are experimentally determined by X-ray diffraction. A good agreement is observed between the numerical predictions and experimental measurements. The developed numerical framework provides an effective tool for optimizing welding sequences and enhancing the service life of industrial heat exchangers.
Keywords: Residual Stress Welding Sequence Numerical Simulation Thermo-Mechanical Analysis	

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Sheibani R, Rabiezadeh A, Jahedi R, Mohammadi M. An experimental and numerical study on the influence of welding sequence on residual stress distribution in triangular-layout tube-to-tubesheet joints of shell and tube heat exchangers. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2026 Feb 20;12(12):15-31. doi: 10.22034/ijme.2026.575347.2164 [In Persian]

۱- مقدمه

مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله از تجهیزات پرکاربرد صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی هستند و قابلیت اطمینان آن‌ها نقش مهمی در تداوم بهره‌برداری واحدهای صنعتی دارد [۱]. در این تجهیزات، اتصال تیوب به تیوب‌شیت به دلیل تمرکز تنش، سیکل‌های حرارتی و شرایط خوردنده، یکی از نواحی مستعد خستگی و ترک‌خوردگی ناشی از خوردگی تنش است [۲]. جوشکاری این اتصال، با وجود تأمین استحکام و آب‌بندی، میدان پیچیده‌ای از تنش‌های پسماند ایجاد می‌کند که ممکن است تنش‌های کاری را تشدید کرده و عمر بهره‌برداری تجهیز را کاهش دهد [۳]. بنابراین، شناخت عوامل مؤثر بر توزیع این تنش‌ها برای طراحی و ساخت ایمن‌تر مبدل‌های حرارتی ضروری است. تنش‌های پسماند جوشکاری تابع خواص ترمومکانیکی مواد، هندسه و قیود اتصال و پارامترهای فرایند، از جمله حرارت ورودی و توالی جوشکاری است [۴]. روش‌هایی مانند پراش اشعه ایکس [۵]، حفاری سوراخ و پراش نوترون برای اندازه‌گیری این تنش‌ها به کار می‌روند؛ با این حال، هزینه بالا، محدودیت‌های اجرایی و دشواری دسترسی به نواحی داخلی، کاربرد آن‌ها را در بسیاری از اتصالات صنعتی محدود می‌کند. روش اجزای محدود امکان پیش‌بینی میدان دمایی، تنش‌های پسماند و تغییرشکل‌های ناشی از جوشکاری را فراهم می‌کند و به عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل سازه‌های جوشکاری شده شناخته شده است [۶]. از این رو، استفاده از این روش برای شبیه‌سازی جوشکاری و ارزیابی تنش‌های پسماند در اتصالات پیچیده تجهیزات تحت فشار گسترش یافته است [۷]. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی با استفاده از روش‌های عددی و تجربی، تنش‌های پسماند و عملکرد اتصالات تیوب به تیوب‌شیت را از جنبه‌های مختلف بررسی کرده‌اند. سوانز و همکاران [۸] و ژو و همکاران [۹] با استفاده از مدل‌های دوبعدی، تنش‌های پسماند اتصالات صفحه لوله و تیوب به تیوب‌شیت را بررسی کردند؛ ژو و همکاران [۹] همچنین اثر حرارت ورودی، دمای پیش‌گرمایش و فاصله میان تیوب و حفره تیوب‌شیت را بر توزیع تنش‌ها ارزیابی کردند. سریواستاوا و همکاران [۱۰] و شن و همکاران [۱۱] به ترتیب نقش روش و هندسه جوشکاری و تمرکز تنش در ریشه اتصال را بررسی کردند. ابراهیم [۱۲]، فرهی و همکاران [۱۳] و ویی و لینگ [۱۴] با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیل حرارتی-سازه‌ای، اثر شکست، هندسه و نوع اتصال جوشی یا منبسط‌شده را بر تنش‌های پسماند، اعوجاج، نیروی بیرون کشیدگی و عمر خستگی ارزیابی کردند. لئو و همکاران [۱۵] اثر جوشکاری تعمیری و ونگ و همکاران [۱۶] تأثیر جوشکاری بر تنش تماس پسماند در ناحیه منبسط شده را با استفاده از روش‌های عددی و تجربی بررسی کردند. ون و همکاران [۱۷] با ترکیب مدل‌سازی سه‌بعدی و اندازه‌گیری پراش اشعه ایکس، توزیع تنش‌های پسماند را پیش‌بینی و اعتبارسنجی کردند؛ هتوت و همکاران [۱۸] نیز با توسعه یک روش آزمایش خستگی، رفتار شکست اتصال را بررسی کردند. سافودن و همکاران [۱۹]، تکودن و همکاران [۲۰] و هان و همکاران [۲۱] به ترتیب اثر پارامترهای فرایند، شرایط انبساط و هندسه اتصال را بر کیفیت جوش، عملکرد اتصال و توزیع تنش‌های پسماند بررسی کردند. با این حال، بررسی نظام‌مند اثر فاصله تیوب‌ها و ترتیب جوشکاری بر برهم‌کنش حرارتی و مکانیکی اتصالات مجاور همچنان محدود است. این خلأ، ضرورت توسعه یک مدل سه‌بعدی برای ارزیابی هم‌زمان اثر چیدمان تیوب‌ها و توالی جوشکاری بر توزیع نهایی تنش‌های پسماند را نشان می‌دهد.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر فاصله تیوب‌ها و ترتیب جوشکاری بر توزیع تنش‌های پسماند در اتصالات تیوب به تیوب‌شیت یک مبدل حرارتی پوسته و لوله با چیدمان مثلی انجام شده است. فرایند جوشکاری قوسی تنگستنی با گاز محافظ با در نظر گرفتن یک پاس جوش گوشه‌ای محیطی، به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و میدان دمایی و تنش‌های پسماند با استفاده از تحلیل حرارتی-سازه‌ای غیرکوپل محاسبه شده‌اند. نوآوری پژوهش در مدل‌سازی صریح توالی‌های مختلف جوشکاری و ارزیابی برهم‌نهی حرارتی و مکانیکی اتصالات مجاور، با هدف شناسایی ترتیب مناسب جوشکاری، نهفته است. مدل عددی نیز با استفاده از داده‌های حاصل از ترموگرافی مادون قرمز و اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراش اشعه ایکس اعتبارسنجی شده است.

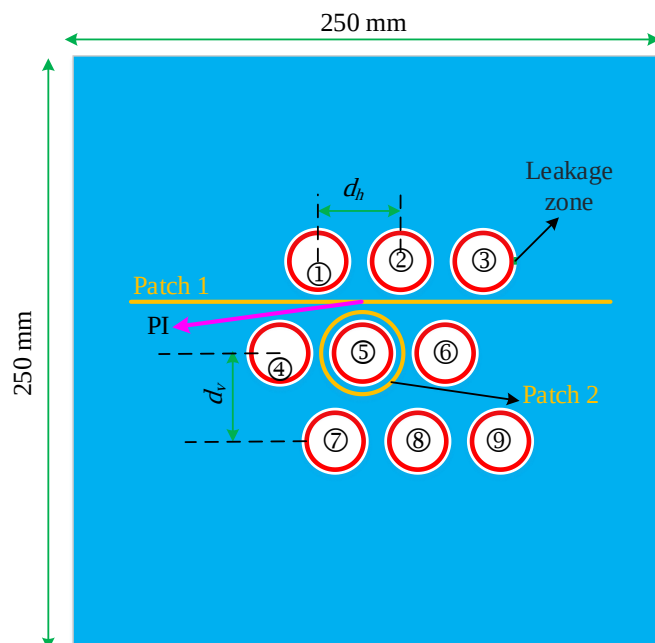
۲- تست‌های تجربی

در شکل ۱ نمونه‌های اتصال تیوب-به-تیوب شیت ساخته شده چیدمان مثلی نشان داده شده است. ابعاد هندسی نمونه‌های ساخته شده به همراه خطوط اندازه‌گیری تنش پسماند در شکل ۲ نشان داده شده است. ضخامت، عرض و طول تیوب شیت به ترتیب برابر 20 mm، 250 mm و 250 mm می‌باشد. فاصله طولی و عرضی لوله‌ها از یکدیگر به ترتیب برابر dh و dv می‌باشد که در این تحقیق متغیر در نظر گرفته می‌شوند. طول، قطر و ضخامت لوله‌ها به ترتیب برابر 100 mm، 19.05 mm و 1.65 mm در نظر گرفته شده است. پس از انجام

جوشکاری ارتفاع اتصال جوش برابر 4.6 mm می‌باشد. گپ بین تیوب و تیوب شیت برابر 0.12 mm می‌باشد. از روش جوشکاری تیگ یا جوشکاری با الکتروود تنگستنی و گاز محافظ آرگون که یکی از روش‌های مرسوم جوشکاری تیوب و تیوب شیت است، برای اتصال تیوب به تیوب شیت بوسیله دستگاه جوشکاری اتوماتیک اوربیتال استفاده شد. در این فرایند، هد جوشکاری با سرعت کنترل شده در امتداد مسیر محیطی اتصال تیوب به تیوب شیت حرکت کرد. استفاده از دستگاه اوربیتال امکان کنترل سرعت حرکت مشعل و نرخ تغذیه سیم پرکننده را در طول مسیر جوش فراهم کرد. جوشکاری بدون پیش گرمایش و در دمای محیط (25°C) انجام شد. متال پایه از فولاد ضدزنگ^۱ SS304 و فلز پرکننده جوش^۲ ER308 با قطر 1.6 mm می‌باشد. شیار جوش 45° می‌باشد و به دقت قبل از جوشکاری تمیز شد. جریان جوشکاری، ولتاژ و سرعت جوشکاری به ترتیب برابر 9 V، 135 A و 1.9 mm/s می‌باشد. نرخ تغذیه سیم پرکننده برابر با 1 mm/s در نظر گرفته شد. براساس پارامترهای ثبت شده، توان الکتریکی قوس برابر با 1215 W و حرارت ورودی اسمی برابر با 6.39 kJ/cm محاسبه شد فاصله زمانی بین شروع جوشکاری دو تیوب متوالی برابر با 50 s بود؛ این بازه شامل اجرای جوش تیوب جاری و فاصله خنک کاری تا آغاز جوشکاری تیوب بعدی است. در شکل ۳ سطح مقطع ماکروسکوپی جوش نشان داده شده است.



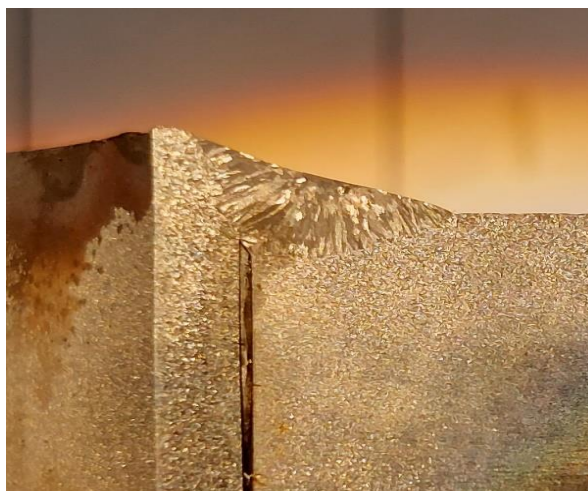
شکل ۱ نمونه اتصال تیوب-به-تیوب شیت با آرایش مثلثی ساخته شده



شکل ۲ ابعاد هندسی به همراه نامگذاری لوله‌ها و خط اندازه‌گیری تنش پسماند

¹ Stainless Steel

² Filler Metal



شکل ۳ تصویر سطح مقطع جوش اتصال تیوب-به-تیوب‌شیت

۱-۲- اندازه‌گیری تنش پسماند با روش پراش پرتو ایکس

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی فرایند جوشکاری، تنش‌های پسماند سطحی در ناحیه اتصال تیوب به تیوب‌شیت با استفاده از روش پراش پرتو ایکس^۱ (XRD) اندازه‌گیری شد. این روش به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌های غیرمخرب برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند سطحی، بر پایه اندازه‌گیری تغییر فاصله بین صفحات بلوری در اثر تنش‌های درون ساختمانی است و به‌طور گسترده در ارزیابی تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری به‌کار گرفته می‌شود. انجام آزمون‌ها مطابق با استاندارد ASTM E915 و همچنین دستورالعمل‌های ارائه‌شده در استاندارد EN 15305 صورت گرفت که به‌طور خاص روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از پراش پرتو ایکس را تشریح می‌کنند. رابطه اساسی در روش پراش پرتو ایکس، قانون براگ است که به صورت زیر می‌باشد.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (۱)$$

که در آن n مرتبه انعکاس، λ طول موج پرتو ایکس، d فاصله بین صفحات کریستالی و θ زاویه انعکاس است. در این روش، ابتدا سطح قطعه تحت تابش پرتو ایکس تک طول (طول موج ثابت موج) قرار می‌گیرد. سپس پرتوهای منعکس شده در جایی که با هم تداخل سازنده کرده و رابطه براگ را ارضا کنند و در نتیجه دارای بیشترین شدت باشند، دریافت می‌شوند و در آن محل یک پیک پراش مشاهده خواهد شد. بنابراین بر اساس رابطه براگ، در صورت بروز هر تغییری در فاصله صفحات کریستالی d ، تحت عواملی مانند تنش، زاویه انعکاس، جابه‌جا خواهد شد. تیوب‌های تولید پرتو ایکس در واقع طیفی پیوسته از طول موج‌ها تولید می‌کنند که سه پرتو پراش تک فام آن $k\alpha_1$ ، $k\alpha_2$ نام دارند. البته با انجام فیلتراسیون تلاش می‌شود تا پرتو تک طول موج به سطح قطعه تابیده شود در اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده از پیک‌های پراش دریافت شده با مقدار 2θ در حد 120° درجه و بالاتر از آن توصیه شده است؛ زیرا در این زوایا پیک‌های پراش دقت و شدت بالاتری دارند [۲۲].

وجود تنش پسماند در قطعه سبب می‌شود که چنانچه به قطعه در برابر پرتو ایکس چندین بار شیب داده شود در هر زاویه شیب، پیک مورد بررسی برای تعیین مقدار تنش پسماند مقداری جابه‌جا شود و در هر زاویه شیب مقدار 2θ و d متفاوتی به دست آید. به همین دلیل روال کار چنین است که به قطعه در برابر پرتو چندین بار شیب داده می‌شود. سپس در هر زاویه شیب، مقدار d اندازه گرفته شده و در آخر نمودار d برحسب $\psi \sin^2$ رسم می‌شود. از شیب نمودار حاصل، در رابطه (۲) استفاده می‌شود تا تنش پسماند در هر جهت دلخواه به دست آید.

$$\sigma_\phi = \frac{E}{d_{\phi 0}(1 + \nu)} \times \frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} \quad (۲)$$

در رابطه بالا، E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسون، $d_{\phi 0}$ فاصله بین صفحات کریستالی در $\psi = 0$ و $d_{\phi\psi}$ فاصله بین صفحات کریستالی در زاویه دلخواه است.

^۱ X-ray Diffraction

در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری تنش پسماند طولی از دستگاه پراش پرتو ایکس اکویناکس^۱ مدل 3000 ساخت شرکت اینتل استفاده شد. این دستگاه دارای قدرت تفکیک زاویه‌ای در 0.01° که بسیار بهتر از رنج پیشنهادی برای بحث اندازه‌گیری تنش پسماند (یعنی محدوده 0.5° - 2° درجه) است [۲۳]. شرایط آزمایش بر روی دستگاه پراش پرتو ایکس طبق جدول ۱ برای اندازه‌گیری تنش پسماند تنظیم شد و آزمایش بر روی نقاط مختلف نمونه‌ها انجام گرفت.

جدول ۱ تنظیمات دستگاه پراش اشعه ایکس برای تنش پسماند

تعداد مراحل	اندازه هر گام	زاویه اتمام آنالیز (2θ)	زاویه شروع آنالیز (2θ)	زمان هر مرحله (sec)	پهنای پرتو تابیده شده	مشخصات ژنراتور	آند تیوب	طول موج پرتو $k\alpha_1$	طول موج پرتو $k\alpha_2$
16	0.05	140.256	131.025	1.2	0.15 (mm)	40 (mA)-40 (kV)	Cu	1.54543	1.53065

برای اندازه‌گیری تاریخچه حرارتی به صورت تجربی، از دستگاه ترموگرافی استفاده گردید. بدین منظور دستگاه ترموگرافی غیرتماسی Avio-Infrared Camera مورد استفاده قرار گرفت. این دوربین دارای قابلیت تصویربرداری در دماهای 40°C - 1500°C ، رزولوشن 0.08°C در دمای 30°C و دامنه طیفی آن $8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$ است. به کمک دستگاه دمای نقاط مختلف اتصال و اطراف آن از زمان شروع جوشکاری تا بعد از عملیات جوشکاری و رسیدن دمای جوش و قطعه به دمای محیط اندازه‌گیری شد. سرعت تصویربرداری برابر با 30 Hz تنظیم شد.

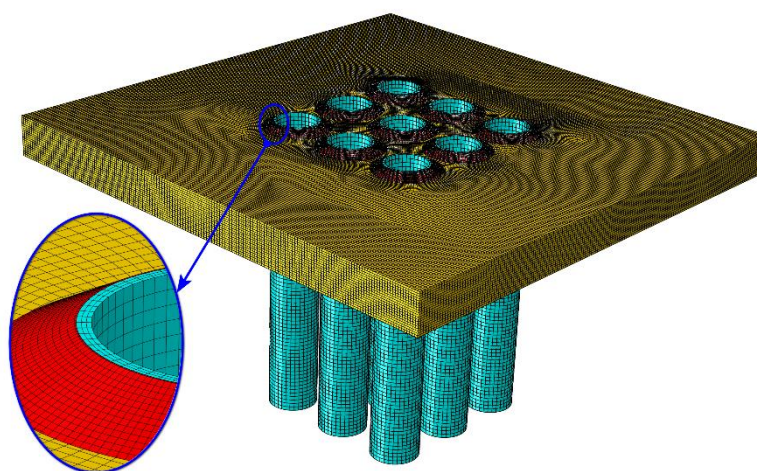
۳- مدل‌سازی المان محدود

به‌منظور پیش‌بینی دقیق میدان دمایی و توزیع تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری در اتصال تیوب به تیوب‌شیت مبدل حرارتی پوسته و لوله با چیدمان مثلثی، یک مدل سه‌بعدی المان محدود مبتنی بر تحلیل حرارتی-سازه‌ای غیرکوپل توسعه داده شد. در این رویکرد، ابتدا تحلیل حرارتی گذرا برای شبیه‌سازی چرخه حرارتی جوشکاری انجام شده و سپس تاریخچه دمایی حاصل به‌عنوان ورودی به تحلیل سازه‌ای منتقل گردید تا تنش‌های پسماند نهایی محاسبه شوند. این روش به‌دلیل پایداری عددی و دقت مناسب، به‌طور گسترده در شبیه‌سازی فرایندهای جوشکاری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

هندسه مدل شامل ناحیه‌ای نماینده از تیوب‌شیت، متشکل از چند تیوب مجاور با آرایش مثلثی متناظر با هندسه واقعی مبدل حرارتی است. انتخاب این ناحیه نماینده، ضمن کاهش هزینه محاسباتی نسبت به مدل‌سازی کامل تیوب‌شیت، امکان لحاظ کردن صریح برهم‌کنش‌های حرارتی و مکانیکی میان اتصالات جوشی مجاور و بازنمایی واقع‌بینانه‌تر رفتار ناحیه اتصال را فراهم می‌کند. به‌منظور شبیه‌سازی اثر توالی جوشکاری، از اعمال تقارن هندسی صرف‌نظر شده و مراحل جوشکاری برای هر یک از توالی‌های مورد بررسی، مطابق با ترتیب واقعی، در مدل اعمال شده‌اند. اتصال تیوب به تیوب‌شیت به‌صورت یک پاس جوش گوشه‌ای محیطی مدل‌سازی شده و ماده فلز پایه و فلز جوش با در نظرگیری خواص وابسته به دما تعریف شدند. تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS انجام شده و برای مدل‌سازی انتقال حرارت از المان‌های سه‌بعدی حرارتی مناسب و برای تحلیل سازه‌ای از المان‌های سه‌بعدی سازه‌ای متناظر استفاده گردید. شبیه‌سازی فرایند جوشکاری با روش کوپلینگ غیرمستقیم انجام شد. در مرحله نخست، یک تحلیل حرارتی گذرا برای محاسبه میدان دمایی اجرا گردید و دماهای گرهی حاصل از این تحلیل در مرحله دوم به‌عنوان ورودی تحلیل مکانیکی مورد استفاده قرار گرفتند. مدل عددی شامل بخشی از تیوب‌شیت به‌همراه چند تیوب مجاور با آرایش مثلثی بوده و به‌منظور نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی، از تقارن هندسی صرف‌نظر شد. برای مدل‌سازی ناحیه اتصال از المان‌های سه‌بعدی با قابلیت بازنمایی مناسب رفتار حرارتی و مکانیکی استفاده شد. خواص ترموفیزیکی و مکانیکی مواد، شامل رسانندگی حرارتی، گرمای ویژه، ضریب انبساط حرارتی، مدول الاستیسیته و تنش تسلیم، به‌صورت تابعی از دما لحاظ شد تا رفتار واقعی ماده در طول فرایند جوشکاری به‌طور دقیق بازتولید شود. رفتار مکانیکی ماده با مدل الاستو-پلاستیک همراه با کرنش‌سختی ایزوتروپیک و وابسته به دما در نظر گرفته شد.

¹ Equinox

به دلیل وجود گرادیان‌های دمایی و تنش‌های زیاد در اطراف خط جوش، از مش‌بندی غیر یکنواخت در مدل اجزای محدود استفاده شد. بر این اساس، نواحی فلز جوش، مجاورت اتصال و منطقه متأثر از حرارت با المان‌های ریزتر مش‌بندی شدند. با افزایش فاصله از محل اعمال منبع حرارتی، به دلیل کاهش تغییرات دما و تنش، اندازه المان‌ها به تدریج افزایش یافت. این راهبرد ضمن حفظ دقت محاسبات در نواحی بحرانی، موجب کاهش هزینه محاسباتی مدل شد. نحوه‌ی مش‌بندی اجزاء محدود نمونه در شکل ۴ ارائه شده است که مدل نهایی شامل ۴۵۲۰۰۰ المان سه بعدی هشت گره‌ای از نوع C3D8R است. با در نظر گرفتن پیشینه دمایی مربوط به نقاط روی نمونه به عنوان شاخص سنجش همگرایی جواب، این تعداد المان با اختلاف حدود ۳٪ با تعداد المان بیشتر، پاسخ قابل قبولی را ارائه می‌نمایند. خواص مکانیکی و فیزیکی وابسته به دما برای متال پایه AISI 304 در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، شکل ۵ فلوجارت مراحل مختلف شبیه‌سازی اجزاء محدود فرایند جوشکاری را نشان می‌دهد.



شکل ۴ مدل مش‌بندی شده اتصال جوشی تیوب-به-تیوب شیت

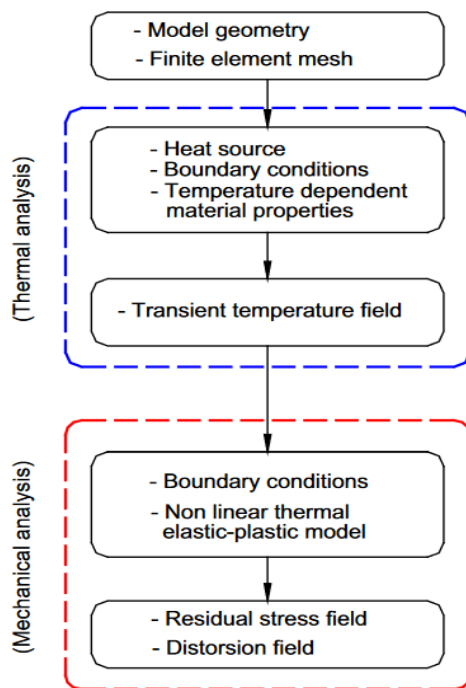
جدول ۲ خواص مکانیکی و حرارتی وابسته به دمای فلز پایه AISI 304 [۲۴، ۲۵]

خواص حرارتی ماده					خواص مکانیکی ماده				
T (°C)	C _p (J/kg.K)	λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	ν	σ _y base (MPa)	σ _y weld (MPa)	E _T /E	α×10 ⁻⁶ /°C
0	462	14.5	7900	198.5	0.294	265	460	0.013	17.0
100	496	15.2	7880	193.0	0.295	218	367	0.013	17.4
200	512	16.3	7830	185.0	0.301	186	264	0.012	18.0
300	525	17.9	7790	176.0	0.310	170	209	0.011	18.6
400	540	18.0	7750	167.0	0.318	155	152	0.011	19.1
600	577	20.8	7660	159.0	0.326	159	65	0.010	19.6
800	604	23.9	7560	151.0	0.333	91	20	0.005	20.2
1200	676	32.2	7370	60.0	0.339	25	20	0.003	20.7
1300	692	33.7	7320	20.0	0.342	21	20	0.003	21.1
1500	700	120	7320	10.0	0.388	10	20	0.001	21.6

تحلیل حرارتی یک تحلیل سه‌بعدی انتقال حرارت است. در این تحلیل معادله‌ی انتقال حرارت حاکم به صورت رابطه زیر است:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (3)$$

که در آن ρ چگالی ماده، c_p ظرفیت گرمایی ویژه، T دمای ماده در هر لحظه، k رسانایی حرارتی، v سرعت حرکت جوش، و Q نرخ حرارت تولیدی درونی می‌باشد. با توجه به معادله‌ی فوق خواصی از ماده که برای تحلیل حرارتی مورد نیاز هستند چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه و رسانایی حرارتی می‌باشند که در ادامه برای ماده‌ی مورد استفاده در این کار آورده شده‌اند.

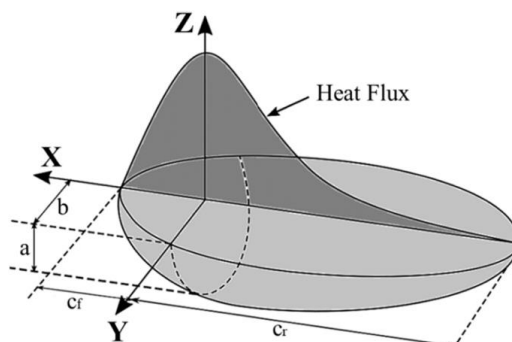


شکل ۵ فلوجارت مراحل مختلف شبیه سازی جوشکاری تیوب-به-تیوب شیت

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، یک مدل منبع حرارتی بیضی دوگانه پیشنهاد شده توسط گلداک برای شبیه‌سازی تولید گرما از قوس متحرک جوشکاری استفاده شد. شار حرارتی توزیع شده در هر گره با معادله گلداک محاسبه می‌شود که از روابط زیر به دست می‌آید:

$$q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q_w}{abc_1\sqrt{\pi}} e^{-3\frac{x^2}{a^2}} e^{-3\frac{y^2}{b^2}} e^{-3\frac{[z-vt-z_0]^2}{c_1^2}} \quad (4)$$

که در آن Q_w شار حرارتی کل ورودی که تابعی از ولتاژ، جریان و کیفیت جوش است. a ، b و c ثابت‌های ابعادی مدل گلداک می‌باشد. ff و fr به ترتیب ضریب توزیع حرارتی در نیمه جلویی و پشتی می‌باشد [۲۶].



شکل ۶ مدل منبع حرارتی بیضی دوگانه گلداک

منبع حرارتی بیضی دوگانه با استفاده از زیرروال کاربر DFLUX در ABAQUS که توسط برنامه FORTRAN کامپایل شده است، پیاده‌سازی شد. بر اساس قانون‌های نیوتن و Boltzmann-Stefan، اتلاف حرارت توسط جابجایی (q_c) و تشعشعی (q_r) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$q_c = -h_c(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

$$q_r = -\varepsilon_0\sigma_0[(T_s + 273)^4 - (T_\infty + 273)^4] \quad (6)$$

که در آن h_c ضریب انتقال حرارت، T_s دمای سطح، T_∞ دمای محیط، ε_0 emissivity و σ_0 ثابت Boltzmann-Stefan می‌باشد.

برای تحلیل مکانیکی و محاسبه تنش پسماند به روش غیرکوپل، المان‌های حرارتی با المان‌های مکانیکی جایگزین شدند و تاریخچه دمایی محاسبه شده در تحلیل حرارتی به عنوان یک بار حرارتی در هر گام زمانی تحلیل مکانیکی اعمال شد. در این روش، میدان دمایی گذرا حاصل از تحلیل حرارتی به تحلیل مکانیکی منتقل شده و پاسخ مکانیکی شامل تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از بارگذاری حرارتی در هر گام زمانی محاسبه می‌شود [۹]. بنابراین در هر گام زمانی، تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی محاسبه شدند. با توجه به ماهیت آستنییتی فولاد زنگ‌نزن AISI 304 و عدم وقوع تغییر فاز حالت جامد در فلز پایه و فلز جوش، کرنش ناشی از تغییر فاز در تحلیل مکانیکی در نظر گرفته نشده است [۲۷]. کرنش کل در فرایند جوشکاری به صورت مجموع کرنش‌های الاستیک، پلاستیک و حرارتی تعریف می‌شود:

در تحلیل مکانیکی الاستیک-پلاستیک، کرنش کل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{ts} \quad (7)$$

که در آن ε_e ، ε_p و ε_{ts} به ترتیب نشان‌دهنده کرنش الاستیک، کرنش پلاستیک و کرنش حرارتی هستند. کرنش الاستیک بر اساس قانون هوک ایزوتروپیک و با در نظرگیری تغییرات وابسته به دما در مدول یانگ و نسبت پواسون محاسبه می‌شود. کرنش حرارتی با استفاده از ضریب انبساط حرارتی وابسته به دما تعیین می‌شود. مدل پلاستیک وابسته به نرخ بر مبنای معیار تسلیم Mises، خواص مکانیکی وابسته به دما و مدل سخت‌شوندگی مناسب جهت شبیه‌سازی رفتار بارگذاری و باربرداری ناشی از سیکل حرارتی جوشکاری برای محاسبه کرنش‌های پلاستیک استفاده شده است [۲۸].

۴- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و اندازه‌گیری‌های تجربی برای ارزیابی اثر فاصله تیوب‌ها و ترتیب جوشکاری بر توزیع تنش‌های پسماند در اتصال تیوب به تیوب‌شیت با چیدمان مثلثی ارائه و تحلیل می‌شود. ابتدا صحت مدل حرارتی از طریق مقایسه میدان دمایی عددی با داده‌های ترموگرافی بررسی شده و سپس نتایج مربوط به توزیع تنش‌های پسماند و تأثیر پارامترهای مورد مطالعه تحلیل می‌گردد. در ادامه با انجام تحلیل‌های پارامتری، اثر پارامترهای فاصله طولی تیوب‌ها، dh ، فاصله عرضی تیوب‌ها، dv و ترتیب جوشکاری تیوب‌ها بر روی توزیع تنش پسماند و اعوجاج تیوب شیت مطالعه می‌شود. نتایج بر روی مسیر ۱ و مسیر ۲ نشان داده شده بر روی شکل ۲ ارائه می‌شود. در جدول ۳ نام‌گذاری نمونه‌های تحت بررسی ارائه شده است.

جدول ۳ نامگذاری نمونه‌های تحت بررسی

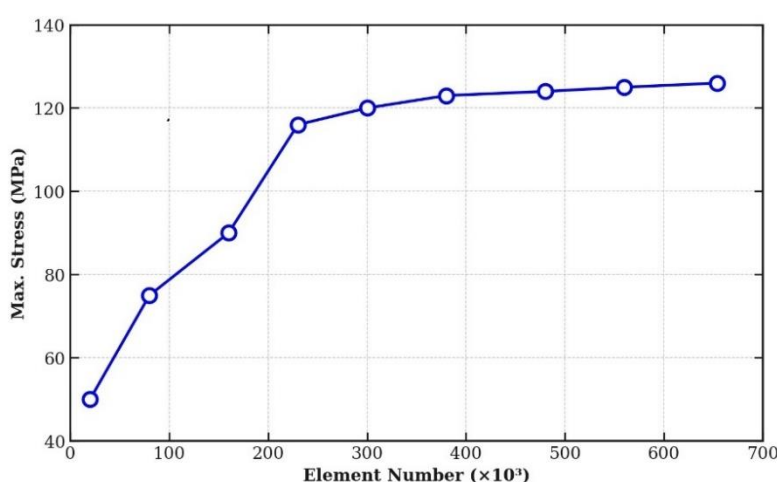
شناسه	توالی جوشکاری	dh (mm)	dv (mm)
No.01	2-4-3-1-5-6-7-8-9	32	32
No.02	(Type I)	32	38
No.03		38	38
No.04	5-3-1-2-6-8-7-4-9	32	32
No.05	(Type II)	32	38
No.06		38	38
No.07	1-3-6-2-5-4-8-9-7	32	32
No.08	(Type III)	32	38
No.09		38	38
No.10	8-1-2-6-7-9-3-4-5	32	32
No.11	(Type IV)	32	38
No.12		38	38

۴-۱- بررسی استقلال از شبکه

اندازه المان یکی از عوامل مؤثر بر دقت و هزینه محاسباتی تحلیل اجزای محدود است. کاهش اندازه المان‌ها و افزایش تعداد آن‌ها معمولاً موجب بهبود دقت حل می‌شود؛ با این حال، تعداد درجات آزادی، زمان محاسبات و منابع سخت‌افزاری موردنیاز را نیز افزایش می‌دهد. از این‌رو، بررسی استقلال از شبکه با هدف تعیین اندازه مشی انجام می‌شود که ضمن تأمین دقت مورد نظر، از نظر هزینه محاسباتی نیز مناسب باشد. به منظور بررسی همگرایی مش و ارزیابی استقلال نتایج از شبکه، حداکثر تنش ایجاد شده در مدل Case-I به عنوان پارامتر

¹ Path

ارزیابی انتخاب شد. برای این منظور، مدل با اندازه المان‌های ۱۰، ۵، ۲ و ۱ میلی‌متر مش‌بندی و تحلیل شد. مقادیر حداکثر تنش متناظر با این اندازه المان‌ها به ترتیب برابر با ۳۴، ۱۱۰، ۱۲۰ و ۱۲۵ مگاپاسکال به دست آمد. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کاهش اندازه المان از ۱۰ به ۵ میلی‌متر موجب افزایش حداکثر تنش از ۳۴ به ۱۱۰ مگاپاسکال شده است. این تغییر قابل توجه نشان می‌دهد که شبکه با اندازه المان ۱۰ میلی‌متر از دقت کافی برای محاسبه حداکثر تنش برخوردار نیست. با کاهش بیشتر اندازه المان از ۵ به ۲ میلی‌متر، مقدار حداکثر تنش از ۱۱۰ به ۱۲۰ مگاپاسکال افزایش یافته است؛ درحالی‌که با کاهش اندازه المان از ۲ به ۱ میلی‌متر، مقدار تنش از ۱۲۰ به ۱۲۵ مگاپاسکال رسیده است. بنابراین، با ریزتر شدن شبکه، میزان تغییرات پاسخ کاهش یافته و نتایج به مقدار تقریباً ثابتی نزدیک شده‌اند. بر اساس نتایج بررسی همگرایی، با افزایش تعداد المان‌ها تا حدود ۶۵۴ هزار المان، مقدار حداکثر تنش به حدود ۱۲۵ مگاپاسکال نزدیک شده است. از این‌رو، شبکه با اندازه المان ۱ میلی‌متر و حدود ۶۵۴ هزار المان برای انجام تحلیل‌های بعدی پژوهش انتخاب شد. استفاده از این شبکه، با وجود هزینه محاسباتی بیشتر نسبت به شبکه‌های درشت‌تر، موجب کاهش وابستگی نتایج به اندازه مش و افزایش اطمینان به نتایج تحلیل می‌شود.



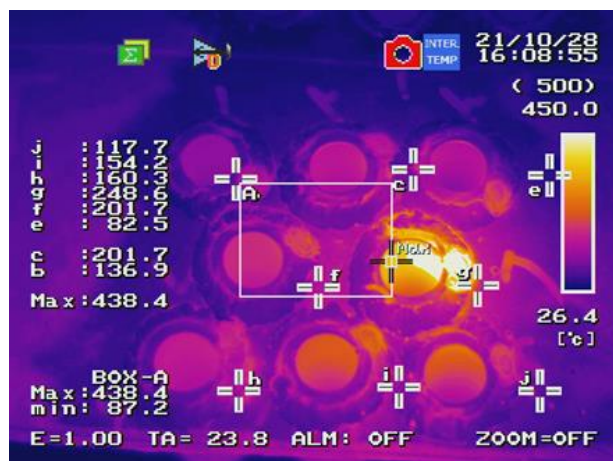
شکل ۷ فرایند آنالیز همگرایی

۲-۴-۲ اعتبار سنجی

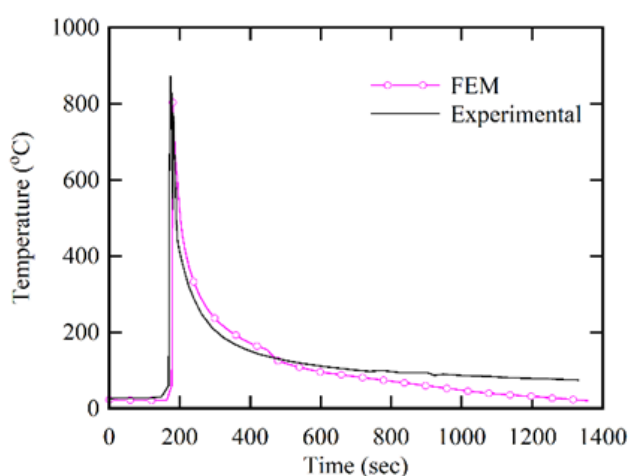
جهت اعتبارسنجی مدل المان محدود نتایج استخراج شده از این مدل با نتایج به دست آمده از تست‌های آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. اعتبار سنجی در دو مرحله انجام گرفته است. ابتدا نتایج به دست آمده از تنش‌های پسماند مقایسه شده است. سپس نتایج اندازه‌گیری دما مورد بررسی قرار گرفته است. این نتایج به ازای دو موقعیت A و B نشان داده شده در شکل ۴، اندازه‌گیری شده است. شکل ۸ مقایسه‌ی تاریخیچه زمانی تغییرات دمای دو نقطه به دست آمده از روش شبیه‌سازی شده و ترموگرافی را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی انطباق نسبتاً خوبی با نتایج تجربی داشته و آهنگ گرم شدن و سرد شدن در هر دو حالت به هم نزدیک هستند. همچنین، نتایج تنش پسماند در این دو نقطه در جدول ۴ بیان شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل المان محدود ارائه شده دقت مطلوبی دارد و حداکثر خطای تنش پسماند در دو موقعیت A و B به ترتیب برابر ۵.۱٪ و ۲.۶٪ می‌باشد. همچنین، حداکثر خطای مدل عددی در حدود ۹.۳٪ به دست آمده است. به علت وجود عدم قطعیت‌ها، این مقدار خطای مدل المان محدود در محدوده قابل قبولی است.

جدول ۴ مقایسه تنش پسماند مدل المان محدود و نتایج تجربی

موقعیت	نتایج تجربی (MPa)	FEM (MPa)	خطا (%)
نقطه A	118.9	223.2	5.1%
نقطه B	182.4	185.3	2.6%



(الف)



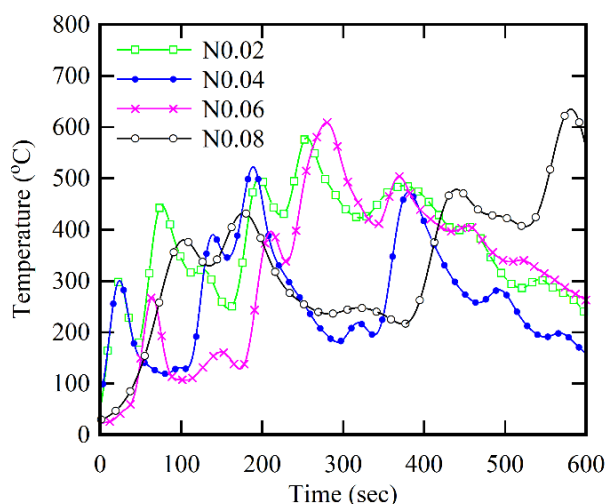
(ب)

شکل ۸ (الف) نمونه‌ای از تصویر ترموگرافی، (ب) مقایسه‌ی تاریخچه زمانی تغییرات دمای به دست آمده از روش عددی و ترموگرافی

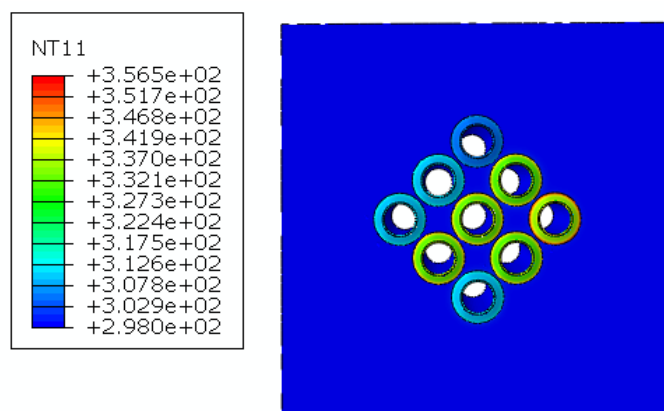
۴-۳- شبیه‌سازی حرارتی

در این بخش به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی توزیع دما در تیوب شیت پرداخته می‌شود. بدین منظور فاصله تیوب‌ها $dh=32$ mm و $dv=38$ mm ثابت در نظر گرفته شده و دمای اولیه تمام اجزای مدل برابر با 25°C (دمای محیط) در نظر گرفته شد. منبع حرارتی با سرعت 1.9 mm/s در امتداد مسیر محیطی اتصال حرکت داده شد. براساس مقادیر تجربی جریان و ولتاژ، توان الکتریکی قوس برابر با 1215 W محاسبه شد. اتلاف حرارت از سطوح آزاد مدل از طریق همرفت و تشعشع به محیطی با دمای 25°C اعمال گردید و جوشکاری تیوب‌ها به صورت متوالی مدل‌سازی و فاصله زمانی میان شروع اعمال منبع حرارتی برای دو تیوب متوالی برابر با 50 s در نظر گرفته شد. در فاصله بین پایان جوشکاری یک تیوب و آغاز تیوب بعدی، مدل تحت شرایط خنک‌کاری همرفتی و تشعشعی قرار داشت و تنها تأثیر ترتیب جوشکاری تیوب‌ها بر روی تاریخچه دمایی مطالعه شد. در حین جوشکاری دمای منطقه جوش به سرعت بالا می‌رود و تقریباً بلافاصله به دمای ذوب می‌رسد. دما بلافاصله پس از حذف منبع حرارت شروع به کاهش می‌کند و به دلیل وجود انتقال حرارت رسانشی، دما از منطقه جوش به همسایگی جوش منتقل می‌شود. نتایج تاریخچه زمانی روی موقعیت PI شکل ۲ در شکل ۹ برای چیدمان مثلثی تیوب‌ها نشان داده شده است. همچنین، در شکل ۱۰ کانتور توزیع دما برای No.04 نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که ترتیب تأثیر بسیار قابل ملاحظه‌ای بر روی تاریخچه زمانی دمای تیوب شیت دارد. به عنوان مثال حداکثر دمای نقطه PI چیدمان مثلثی برای سناریوهای N0.02، N0.04، N0.06 و N0.08 به ترتیب برابر 579°C ، 522°C ، 609°C و 635°C به دست می‌آید. بنابراین، سناریوی N0.08 بیشترین دما و سناریوی N0.04 کمترین دما را در نواحی نزدیک تیوب‌ها ایجاد می‌کند. در این حالت، حداکثر دمای سناریوی N0.08 در حدود ۲۱ درصد بیشتر از حداکثر دمای به دست آمده از سناریوی N0.02 می‌باشد. از اینرو تفاوت

تاریخچه دمایی سناریوهای مختلف را می‌توان به تفاوت در ترتیب اعمال منابع حرارتی، فاصله زمانی و مکانی جوش‌های متوالی و میزان فرصت خنک‌شدن بین آن‌ها نسبت داد. در سناریوهایی که جوش‌های قبلی در مجاورت نقطه مورد بررسی قرار می‌گیرند، دمای اولیه ناحیه برای پاس بعدی افزایش یافته و در نتیجه تجمع حرارت بیشتری رخ می‌دهد [۲۹]. این امر، اهمیت ترتیب جوشکاری را به منظور دستیابی به کمترین تنش پسماند آشکار می‌سازد [۳۰]. بنابراین در مدل حاضر، سناریوی No.08 بیشترین و سناریوی No.04 کمترین دمای بیشینه را نشان می‌دهد.



شکل ۹ تاریخچه زمانی موقعیت PI به ازای ترتیب‌های مختلف جوشکاری تیوب در آرایش مثلی شکل

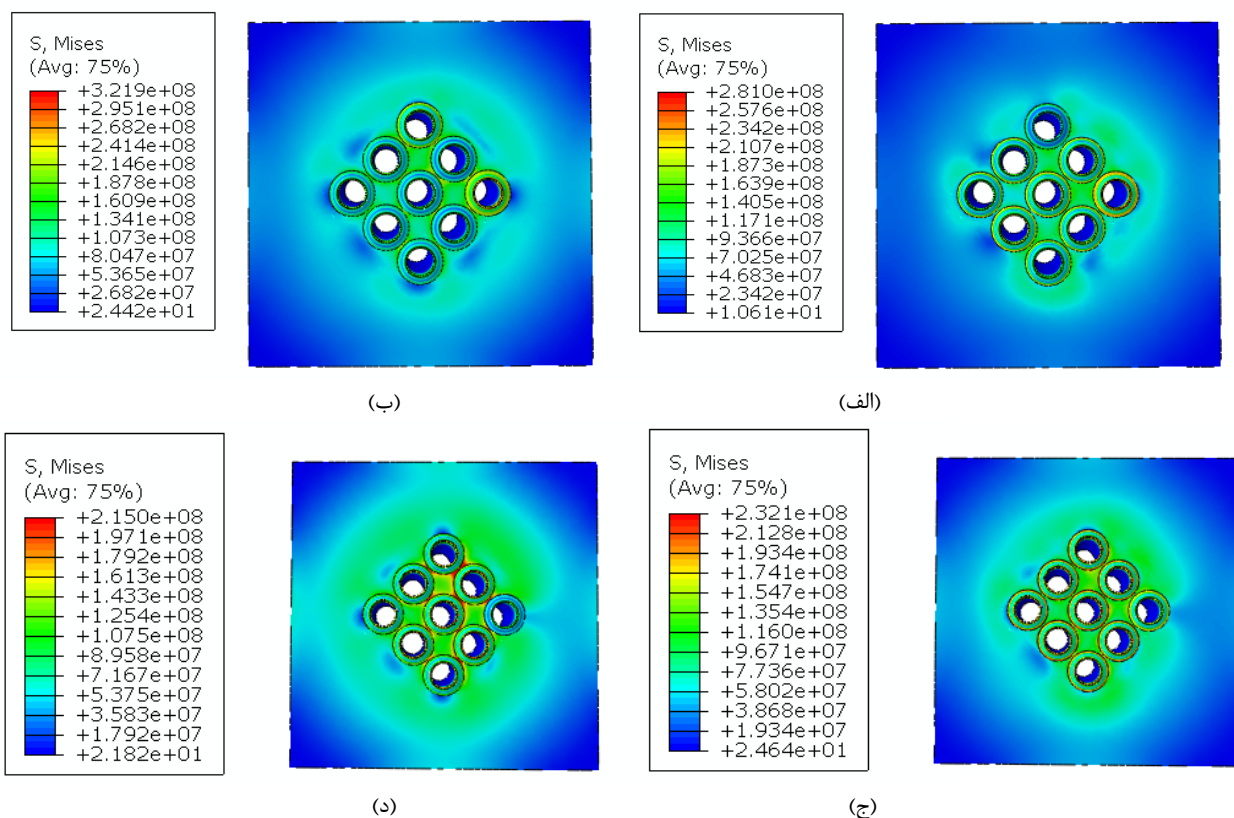


شکل ۱۰ کانتور توزیع دما در نمونه شماره ۴

۴-۴- شبیه‌سازی تنش پسماند

پس از انجام تحلیل حرارتی و با استفاده از نتایج آن به عنوان ورودی در تحلیل مکانیکی، تحلیل‌های مکانیکی به منظور محاسبه تنش‌های پسماند تیوب شیت انجام پذیرفت. نتایج حرارتی به عنوان بار حرارتی به مدل مکانیکی وارد شده‌اند تا تحلیل رفتار الاستیک-پلاستیک مواد انجام شود. در این مرحله، مدل تجربی جانسون-کوک به منظور توصیف دقیق رفتار مکانیکی فولاد تحت تغییرات دما و نرخ کرنش‌های متفاوت به کار گرفته شده است. این مدل امکان پیش‌بینی تغییر شکل‌های پلاستیک و توزیع تنش‌ها را به صورت گذرا فراهم می‌کند. این تنش‌ها نمایانگر بارهای داخلی بدون حضور بار خارجی هستند و نقش مهمی در دوام و عملکرد اتصالات جوشی دارند. در شکل ۱۱ کانتور توزیع تنش پسماند برای سناریوهای مختلف تحت بررسی در چیدمان مثلی نشان داده شده است. اثر ترتیب جوشکاری بر تنش‌های پسماند را می‌توان از غیر توالی جوشکاری موجب تغییر در توزیع میدان حرارتی و نحوه توسعه کرنش‌های پلاستیک ناشی از سیکل‌های حرارتی شده و در نتیجه مقدار و محل تنش‌های پسماند ایجاد شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد پس از سرد شدن فلز جوش،

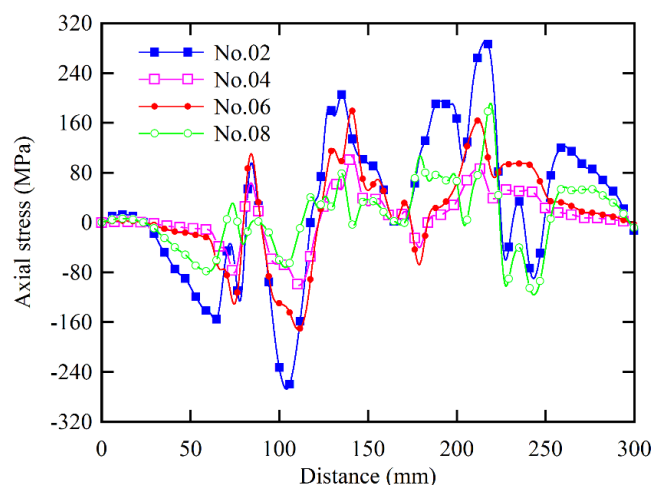
انقباض حرارتی که به دلیل وجود قیود مکانیکی اتصال به صورت آزاد رخ نمی‌دهد، باعث ایجاد تنش‌های کششی و فشاری پسماند در ناحیه جوش و اطراف آن می‌شود [۲۹]. از آنجا که توالی جوشکاری، زمان و مکان اعمال حرارت را تغییر می‌دهد، میزان تجمع حرارت، نرخ سرد شدن و الگوی انقباض حرارتی نیز تغییر کرده و این موضوع باعث تغییر در توزیع و مقدار بیشینه تنش پسماند می‌شود [۳۱]. معمولاً دو نوع حرکت در حین جوشکاری فلزات می‌تواند منجر به تغییر شکل پلاستیک و ایجاد تنش‌های پسماند در فلز شود. حرکت در راستای محور لوله و به سمت خط مرکزی جوش و حرکت به سمت ریشه جوش. حرکت دوم در جوشکاری تیوب به تیوب شیت‌ها، باعث ایجاد انقباض محیطی در فلز جوش و ناحیه مجاور آن و در نتیجه بروز پدیده‌ای به نام اثر شریان‌بند^۱ می‌شود [۹]. هر دو نوع حرکت فوق در باعث می‌شوند تا ترتیب جوشکاری تأثیر زیادی بر روی تنش‌های پسماند قطعه بگذارد. علاوه بر این، با توجه به اینکه جوشکاری هر تیوب باعث ایجاد تنش پسماند در قطعه می‌شود، بنابراین تغییر در ترتیب جوشکاری باعث می‌شود که مقدار و موقعیت تنش پسماند ایجاد شده در تیوب شیت به شدت تحت تأثیر قرار گیرد [۳۰].



شکل ۱۱ کانتور توزیع تنش‌های پسماند به ازای سناریوهای مختلف جوشکاری تیوب به تیوب شیت با چیدمان مثلی برای سناریوهای الف) شماره ۲، ب) شماره ۴، ج) شماره ۶ و د) شماره ۸

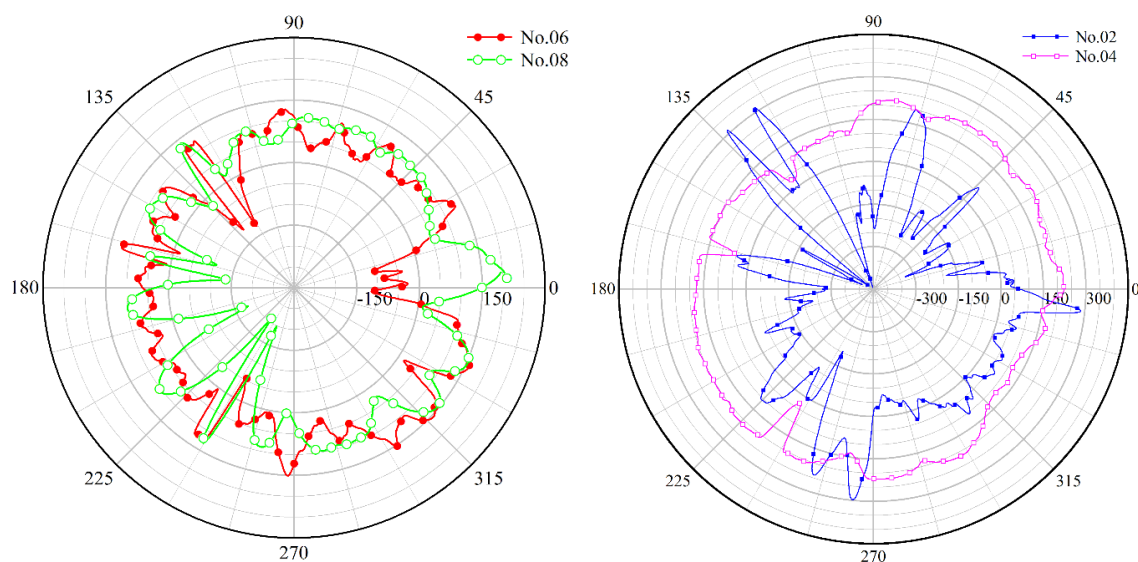
به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر ترتیب جوشکاری بر تنش پسماند، در شکل ۱۲ تنش پسماند در طول مسیر ۱ برای چیدمان مثلی و سناریوهای مختلف جوشکاری نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در طول این مسیر هم تنش‌های پسماند کششی و هم فشاری در تیوب شیت ایجاد می‌شود. بر اساس نتایج شکل ۱۲، برای چیدمان مثلی کمترین تنش پسماند کششی با مقدار ۱۰۶ MPa در سناریوی شماره ۴ و بیشترین تنش فشاری با مقدار ۲۶۷ MPa در سناریوی شماره ۲ به وجود می‌آید. با توجه به اینکه تنش‌های پسماند کششی عمدتاً باعث ایجاد ترک در تیوب شیت‌ها می‌شوند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در صورت انتخاب صحیح ترتیب جوشکاری، چیدمان مثلی بهترین گزینه برای جوشکاری تیوب‌شیت‌ها می‌باشد.

^۱ Tourniquet Effect



شکل ۱۲ تغییرات تنش پسماند طولی در راستای مسیر شماره ۱ چیدمان مثلثی با سناریوهای مختلف جوشکاری

شکل ۱۳ توزیع تنش‌های پسماند محیطی^۲ در طول مسیر تعریف شده مسیر ۲ را برای چهار سناریوی مختلف جوشکاری را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تنش پسماند محیطی طولی که دارای هر دو ماهیت فشاری و کششی می‌باشد، در ناحیه جوش شدت بیشتری دارد که با دور شدن از این ناحیه از شدت آن کاسته می‌شود. با توجه به اثرگذاری تیوب‌های همسایه؛ این تنش در زوایای مختلف اطراف تیوب در نظر گرفته شده، تغییر ماهیت داده و حالت کششی به خود می‌گیرد و دوباره شروع به کاهش و به مقدار صفر میل کرده و مجدداً حالت فشاری به خود می‌گیرد. در سناریوی شماره ۶، تنش پسماند محیطی طولی اکثراً به صورت فشاری می‌باشد که به لحاظ رشد ترک بسیار مطلوب می‌باشد. در مقابل بیشترین تنش پسماند محیطی طولی کششی مربوط به سناریوی شماره ۴ همواره کششی بوده که در تیوب‌شیت‌ها نامطلوب است.



شکل ۱۳ توزیع تنش پسماند محیطی در امتداد مسیر شماره ۲ برای سناریوهای مختلف جوشکاری تیوب شیت با چیدمان مثلثی

در جدول ۵ حداکثر تنش پسماند کششی و فشاری برای سناریوهای مختلف تحت بررسی آمده است. در این جدول تأثیر فاصله بین تیوب‌ها، چیدمان تیوب‌ها و همچنین ترتیب جوشکاری تیوب‌ها بر روی مقادیر تنش پسماند قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله بین تیوب‌ها تنش‌های پسماند کاهش می‌یابد. به عنوان مثال با افزایش فاصله تیوب‌ها از ۳۲ میلی‌متر به ۳۸

¹ Distribution

² Circumferential

میلی‌متر، حداکثر تنش کششی و فشاری به ترتیب در حدود ۱۴ درصد و ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. مهم‌ترین نوع ترک خوردگی در لوله‌ها ترک خوردگی تنش است و نوع تنش‌های مؤثر در این تخریب، تنش‌های کششی‌اند. این تنش‌های کششی ممکن است به صورت تنش پسماند در فلز وجود داشته باشد که از مراحل ساخت و تولید همراه قطعه شده است. بنابراین، در مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله، تنش‌های پسماند کششی مخرب‌ترین نوع تنش‌ها هستند.

با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که برای چیدمان مثلی ترتیب جوش مدل ۳ منجر به بیشترین تنش‌های پسماند کششی می‌شود. همچنین، مشاهده می‌شود که بهترین ترتیب جوشکاری تیوب‌ها به لحاظ دستیابی به حداقل تنش پسماند برای چیدمان مثلی ترتیب جوشکاری مدل ۲ می‌باشد که در آنها تنش‌های پسماند به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر می‌باشد. با انتخاب مناسب ترتیب جوشکاری می‌توان تنش‌های پسماند کششی را تا حدود ۹۷٪ کاهش داد.

جدول ۵ حداکثر تنش پسماند کششی و فشاری برای سناریوهای مختلف تحت بررسی

شناسه	توالی جوشکاری	dh (mm)	dv (mm)	چیدمان مثلی	
				Min.	Max.
No.01	2-4-3-1-5-6-7-8-9 (Type I)	32	32	-285	+224
No.02		32	38	-261	+291
No.03		38	38	-250	+118
No.04	5-3-1-2-6-8-7-4-9 (Type II)	32	32	-100	+102
No.05		32	38	-108	+120
No.06		38	38	-126	+119
No.07	1-3-6-2-5-4-8-9-7 (Type III)	32	32	-306	+312
No.08		32	38	-115	+191
No.09		38	38	-231	+184
No.10	8-1-2-6-7-9-3-4-5 (Type IV)	32	32	-188	+196
No.11		32	38	-164	+153
No.12		38	38	-158	+120

با توجه به ثابت بودن پارامترهای اصلی فرایند جوشکاری در تمامی حالات بررسی شده، کاهش تنش‌های پسماند کششی ناشی از تغییر ترتیب جوشکاری را می‌توان به تفاوت در تاریخچه ترمومکانیکی ایجاد شده در اتصال نسبت داد. اگرچه میزان انرژی ورودی تعیین‌کننده شدت میدان حرارتی ایجادشده در فرایند جوشکاری است، اما توالی اعمال حرارت نقش مهمی در نحوه توزیع دما، توسعه کرنش‌های حرارتی و تکامل میدان تنش در طول فرایند دارد [۳۰]. در یک ترتیب جوشکاری مناسب، توزیع حرارت در ناحیه اتصال متعادل‌تر شده و گرادیان‌های دمایی و قیود حرارتی موضعی کاهش می‌یابد؛ در نتیجه، عدم سازگاری ناشی از انبساط و انقباض حرارتی محدود شده و توسعه کرنش‌های پلاستیک موضعی کاهش می‌یابد. همچنین، سیکل‌های حرارتی ایجادشده توسط پاس‌های متوالی می‌توانند موجب بازتوزیع بخشی از کرنش‌های پلاستیک ایجادشده در مراحل اولیه و تغییر در توزیع تنش‌های کششی در نواحی بحرانی شوند [۲۹]. بنابراین، نتایج شبیه‌سازی حاضر نشان می‌دهد که ترتیب جوشکاری، حتی در شرایط ثابت بودن پارامترهای فرایند، می‌تواند از طریق تغییر مسیر انتقال حرارت و نحوه تکامل تغییر شکل پلاستیک، نقش قابل توجهی در کنترل مقدار و توزیع تنش‌های پسماند ایفا کند.

۴-۵- نتایج سختی سنجی

سختی سنجی به عنوان یکی از مهم‌ترین تست‌های مکانیکی است که برای تعیین مقاومت مواد در برابر تغییر شکل دائمی استفاده می‌شود. البته سختی‌سنجی می‌تواند اطلاعاتی در مورد تغییرات سختی در مناطق مختلف یک ماده پس از فرایندهای حرارتی یا مکانیکی ارائه دهد. این تغییرات سختی می‌توانند نشان‌دهنده تغییرات ریزساختاری، میزان کرنش سختی و وضعیت ترمومکانیکی مناطق مختلف اتصال پس از فرایند جوشکاری باشند [۳۲]. با توجه به اینکه، هر دو پدیده از سازوکارهای ترمومکانیکی مشترک حاکم بر فرایند جوشکاری ناشی می‌شوند. گرادیان‌های شدید دمایی، تغییر شکل پلاستیک موضعی و افزایش چگالی نابجایی‌ها را به دنبال دارند که

به‌طور هم‌زمان موجب کرنش‌سختی و ایجاد تنش‌های پسماند ناشی از انقباض حرارتی مقید می‌شوند. نواحی با سختی بالاتر معمولاً با نواحی دارای تغییرات بیشتر ناشی از فرایند جوشکاری و در نتیجه تغییرات قابل توجه‌تر در میدان تنش پسماند همراه هستند، زیرا هر دو پدیده تحت تأثیر تغییر شکل پلاستیک و انرژی کرنشی ذخیره‌شده در ماده قرار دارند. در حالی که سختی سنجی به تنهایی نمی‌تواند تنش‌های پسماند را اندازه‌گیری کند، می‌تواند به عنوان یک ابزار مکمل در تحلیل و تفسیر نتایج اندازه‌گیری تنش‌های پسماند مفید باشد [۲۹].

نتایج سختی‌سنجی برای نمونه‌های شماره ۴ و شماره ۸، در جدول ۶ ارائه شده است. این نتایج نشان از تأثیر مستقیم پارامترهای فرایندی، از جمله چیدمان تیوب‌ها و ترتیب جوشکاری در هر نمونه را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر به دست آمده موارد زیر حاصل می‌شود. بعد از عملیات جوشکاری میزان سختی نسبت به سختی اولیه افزایش یافته است که این نشان دهنده افزایش تنش پسماند در نمونه‌های جوشکاری شده می‌باشد. نسبت افزایش سختی در نمونه‌های شماره ۸ نسبت به نمونه‌های شماره ۴ بیشتر می‌باشد. این افزایش سختی را می‌توان به تغییرات ریزساختاری ناشی از چرخه حرارتی جوشکاری، نرخ سردشدن موضعی و تفاوت تاریخچه حرارتی ناشی از چیدمان تیوب‌ها و ترتیب جوشکاری آن‌ها نسبت داد.

جدول ۶ نتایج سختی سنجی نمونه‌های مختلف

موقعیت اندازه‌گیری	ماده اولیه (HB)	نمونه ۰۴ پس از جوشکاری (HB)	نمونه ۰۸ پس از جوشکاری (HB)
نقطه ۱	170	188	205
نقطه ۲	171	188	207
نقطه ۳	173	189	205
میانگین	171.3	188.3	205.6

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر سناریوهای مختلف ترتیب جوشکاری بر پاسخ حرارتی، توزیع تنش‌های پسماند و تغییرات سختی اتصال تیوب به تیوب‌شیت با استفاده از تحلیل سه‌بعدی حرارتی-مکانیکی غیرکوپل بررسی شد. مهم‌ترین نتایج پژوهش به شرح زیر ارائه می‌شوند:

- ترتیب جوشکاری تأثیر معناداری بر بیشینه دمای اتصال داشت. بیشینه دمای محاسبه‌شده برای سناریوهای No.02، No.04، No.06 و No.08 به ترتیب برابر با ۵۷۹، ۵۲۲، ۶۰۹ و ۶۳۵ درجه سانتی‌گراد بود. بنابراین، بازه تغییرات بیشینه دما میان سناریوهای بررسی‌شده به ۱۱۳ درجه سانتی‌گراد رسید که بیانگر حساسیت پاسخ حرارتی اتصال به توالی اجرای جوش‌ها است.
- سناریوی No.04 مطلوب‌ترین پاسخ حرارتی را در میان حالات بررسی‌شده ایجاد کرد. بیشینه دمای این سناریو ۵۲۲ درجه سانتی‌گراد بود که در مقایسه با سناریوهای No.02، No.06 و No.08 به ترتیب حدود ۹/۸، ۱۴/۳ و ۱۷/۸ درصد کمتر است. همچنین، بیشینه دمای سناریوی No.08 حدود ۲۱/۶ درصد بیشتر از No.04 به دست آمد؛ از این‌رو، توزیع مناسب‌تر ورودی حرارتی در No.04 موجب محدودشدن تجمع حرارتی در اتصال شد.
- تغییر ترتیب جوشکاری علاوه بر مقدار تنش پسماند، محل تمرکز تنش‌های کششی را نیز تغییر داد. مقایسه سناریوها نشان داد که بیشترین دمای ایجادشده الزاماً تنها معیار انتخاب ترتیب مناسب نیست و ارزیابی هم‌زمان میدان دما و مؤلفه‌های تنش پسماند ضروری است. در میان حالت‌های مطالعه‌شده، سناریوی No.04 کمترین بیشینه تنش پسماند کششی را ایجاد کرد و بر مبنای معیار کنترل تنش کششی، مناسب‌ترین سناریو شناخته شد.
- میانگین سختی ماده خام برابر با ۱۷۱/۳ HB بود و پس از جوشکاری در سناریوهای No.04 و No.08 به ترتیب به ۲۰۵/۶ و ۱۸۸/۳ HB افزایش یافت که بیانگر افزایش ۲۰ و ۹/۹ درصدی است. سختی بیشتر در سناریوی No.08، تأثیر ترتیب جوشکاری بر پاسخ سختی اتصال را نشان می‌دهد.
- برتری سناریوی No.04 صرفاً به مجموعه شرایط و سناریوهای بررسی‌شده در این پژوهش محدود است. این سناریو با ایجاد کمترین بیشینه دما و کمترین بیشینه تنش پسماند کششی، مناسب‌ترین عملکرد تلفیقی را ارائه کرد؛ بنابراین، انتخاب هدفمند

ترتیب جوشکاری می‌تواند بدون تغییر در هندسه اتصال یا پارامترهای اصلی فرایند، به‌عنوان راهکاری عملی برای کاهش تجمع حرارتی و کنترل تنش‌های پسماند اتصال تیوب به تیوب‌شیت به کار گرفته شود.

- تمرکز تنش‌های پسماند کششی در ناحیه جوش و مجاورت آن، اتصال تیوب به تیوب‌شیت را به یک محدوده بالقوه آسیب‌پذیر تبدیل می‌کند. این تنش‌ها ممکن است با بارهای بهره‌برداری هم‌افزا شده و استعداد آغاز ترک و کاهش دوام اتصال را افزایش دهند؛ هرچند ارزیابی مستقیم خستگی و رشد ترک خارج از دامنه پژوهش حاضر بوده است.

References

- [1] Rahman MA. Comprehensive strategies for addressing tube and tubesheet joint leaks in shell-and-tube heat exchangers. *Heat Transfer Engineering*. 2026 Jan 2;47(1):1-9. doi: 10.1080/01457632.2024.2427313
- [2] Jin Z, Li X. Failure analysis and preventative measures on cracking of tube-to-tubesheet joints of the large-scale heat exchanger. *Engineering Failure Analysis*. 2024 Sep 1;163:108630. doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.108630
- [3] Rahman MA. Enhancing reliability in shell and tube heat exchangers: establishing plugging criteria for tube wall loss and estimating remaining useful life. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2024 Jun;24(3):1083-95. doi: 10.1007/s11668-024-01934-6
- [4] Saffiudeen MF, Swaminathan V, Mohammed FT, Syed A, Alamri YA. Investigating the Influence of Post-Weld Heat Treatment on Carbon Steel Tube-to-Tubesheet Welds in Heat Exchanger. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2025 Dec;78(12):266. doi: 10.1007/s12666-025-03755-z
- [5] Tamimi AA, Thekkuden DT, Mourad AH, Alkhedher M. Investigation of mechanical and metallurgical properties of commercially pure titanium grade 2 tube-to-tubesheet joints. *Scientific reports*. 2025 Jul 1;15(1):21964. doi: 10.1038/s41598-025-08261-2
- [6] Yoganathan R, Siva Shanmugam N, Ramanathan A. Non-destructive evaluation of tube-to-tube sheet roller expanded joint quality using magnetic coercive force measurements. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2024 Jun;33(12):5925-36. doi: 10.1007/s11665-023-08350-1
- [7] Pourreza M, Bouzid AH, Benfriha K. Innovative 3D FE modeling of mechanical rolling in tube-to-tubesheet joints: A comparative analysis with hydraulic expansion. In *Pressure Vessels and Piping Conference 2025* Jul 20 (Vol. 89053, p. V002T02A027). American Society of Mechanical Engineers.
- [8] Soanes TP, Bell W, Vibert AJ. Optimising residual stresses at a repair in a steam header to tubeplate weld. *International journal of pressure vessels and piping*. 2005 Apr 1;82(4):311-8. doi: 10.1016/j.ijpvp.2004.08.009
- [9] Xu S, Wang W. Numerical investigation on weld residual stresses in tube to tube sheet joint of a heat exchanger. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2013 Jan 1;101:37-44. doi: 10.1016/j.ijpvp.2012.10.004
- [10] Srivastava D, Chadha U, Gunreddy N, Saini NK, Matara NN, Machindar O, Mishra UV, Khanna M, Kishore SR, Selvaraj SK. A brief review on the Tube-to-Tube plate welding process. *Materials Today: Proceedings*. 2022 Jan 1;64:870-82. doi: 10.1016/j.matpr.2022.05.397
- [11] Shen K, Zhang Z, Jiang W, Luo Y, Su H, Zhang Y. Generation of compressive residual stress at the root of tube-to-tubesheet welded joints in a heat exchanger. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2022 Dec 1;200:104848. doi: 10.1016/j.ijpvp.2022.104848
- [12] Ibrahim SE. Impact of fatigue on tube-to-tubesheet welded joints in heat exchanger. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2022 Aug;22(4):1631-6. doi: 10.1007/s11668-022-01457-y
- [13] Farrahi GH, Minaii K, Chamani M, Mahmoudi AH. Effect of residual stress on failure of tube-to-tubesheet weld in heat exchangers. *International Journal of Engineering*. 2019 Jan 31;32(1). doi: 10.5829/ije.2019.32.01a.15
- [14] Wei XL, Ling X. Investigation of welded structures on mechanical properties of 304L welded tube-to-tubesheet joints. *Engineering Failure Analysis*. 2015 Jun 1;52:90-6. doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.03.003
- [15] Luo Y, Jiang W, Chen D, Wimpory RC, Li M, Liu X. Determination of repair weld residual stress in a tube to tube-sheet joint by neutron diffraction and the finite element method. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2018 Apr 1;140(2):021404. doi: 10.1115/1.4039069
- [16] Wang HF, Sang ZF, Widerra GE. The effect of the welding on the residual contact stress in the expanded zone of expanded-welded tube-to-tubesheet joints. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2011 Jan;133. doi: 10.1115/1.4005252
- [17] Wan Y, Jiang WC, Gao JB. Weld Residual Stress in Tube to Tube Sheet Joints of a Heat Exchanger by Experimental and Finite Element Simulation. *Applied Mechanics and Materials*. 2017 Jan 20;853:306-10. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.853.306

- [18] Htut TT, Tanaka S, Ma D, Okada J, Honnami M, Shinoda K, Abe M, Katayama T. Fatigue fracture investigation of a tube-to-tubesheet welded joint. *Engineering Structures*. 2023 May 15;283:115908. doi: [10.1016/j.engstruct.2023.115908](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115908)
- [19] Saffiudeen MF, Mohammed FT, Syed A. Comparative study of tube to tubesheet welding qualification on heat exchanger. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2022 Dec;69(1):57. doi: [10.1186/s44147-022-00099-z](https://doi.org/10.1186/s44147-022-00099-z)
- [20] Thekkuden DT, Mourad AH, Bouzid AH, Sherif MM. Investigation of expansion percentages and groove inclusions on the performance of welded, expanded, welded-expanded tube-to-tubesheet joints. *Journal of materials research and technology*. 2023 Jan 1;22:2078-92. doi: [10.1016/j.jmrt.2022.12.045](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.045)
- [21] Han XM, Tan JZ, Wang RQ, Yin WH. A study on welding residual stress in elliptical tube to tube sheet joint of a phthalic anhydride switch condenser. *Procedia Engineering*. 2015 Jan 1;130:544-51. doi: [10.1016/j.proeng.2015.12.262](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.262)
- [22] Marola S, Bosia S, Veltro A, Fiore G, Manfredi D, Lombardi M, Amato G, Baricco M, Battezzati L. Residual stresses in additively manufactured AlSi10Mg: Raman spectroscopy and X-ray diffraction analysis. *Materials & Design*. 2021 Apr 1;202:109550. doi: [10.1016/j.matdes.2021.109550](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109550)
- [23] Fitzpatrick ME, Fry AT, Holdway P, Kandil FA, Shackleton J, Suominen L. Determination of residual stresses by X-ray diffraction. *Measurement Good Practice Guide No. 52*. Teddington: National Physical Laboratory; 2005.
- [24] Vakili-Tahami F, Ziaei-Asl A. Numerical and experimental investigation of T-shape fillet welding of AISI 304 stainless steel plates. *Materials & design*. 2013 May 1;47:615-23. doi: [10.1016/j.matdes.2012.12.064](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.064)
- [25] Venkatkumar D, Ravindran D. 3D finite element simulation of temperature distribution, residual stress and distortion on 304 stainless steel plates using GTA welding. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016 Jan;30(1):67-76. doi: [10.1007/s12206-015-1208](https://doi.org/10.1007/s12206-015-1208)
- [26] Gu Y, Li YD, Yong Y, Xu FL, Su LF. Determination of parameters of double-ellipsoidal heat source model based on optimization method. *Welding in the World*. 2019 Mar 8;63(2):365-76. doi: [10.1007/s40194-018-00678-w](https://doi.org/10.1007/s40194-018-00678-w)
- [27] Deng D, Murakawa H. Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint. *Computational Materials Science*. 2008 Aug 1;43(2):353-65. doi: [10.1016/j.commatsci.2007.12.006](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.12.006)
- [28] Muránsky O, Hamelin CJ, Patel VI, Luzin V, Braham C. The influence of constitutive material models on accumulated plastic strain in finite element weld analyses. *International Journal of Solids and Structures*. 2015 Sep 1;69:518-30. doi: [10.1016/j.ijsolstr.2015.04.032](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.04.032)
- [29] Teng TL, Chang PH, Tseng WC. Effect of welding sequences on residual stresses. *Computers & structures*. 2003 Mar 1;81(5):273-86. doi: [10.1016/s0045-7949\(02\)00447-9](https://doi.org/10.1016/s0045-7949(02)00447-9)
- [30] Deng D, Murakawa H. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements. *Computational materials science*. 2006 Sep 1;37(3):269-77. doi: [10.1016/j.commatsci.2005.07.007](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.07.007)
- [31] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical transactions B*. 1984 Jun;15(2):299-305. doi: [10.1007/BF02667333](https://doi.org/10.1007/BF02667333)
- [32] Kou S. Work-hardened materials. *Welding metallurgy* 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA. 2003:343-51.