



Numerical Simulation of Submerged Spiral Arc Welding on API X70 Gas Transmission Steel Pipe

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Rajabi M.¹ MSc,

Hashemi S.H.*¹ PhD

How to cite this article

Rajabi M, Hashemi S.H. Numerical Simulation of Submerged Spiral Arc Welding on API X70 Gas Transmission Steel Pipe. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(3):739-750.

ABSTRACT

Welding residual stresses decrease designing stress in natural gas transmission pipes with a large diameter under high internal pressure. The outside diameter and wall thickness of API X70 steel in this research are 142.3 and 1.98 centimeters. Hole drilling is the most common technique in order to measure residual stresses. Considering the large diameter of this pipe, its transportation to conduct a hole drilling test is a big problem so cutting a finite sample is desired. In this study, the standard dimension of this sample plate is analyzed, and simulation of the welding process is conducted. The residual stresses in different directions are obtained. Residual stresses for the thickness is presented for the first time. The results show that separating a finite sample with a size of 32×44 centimeters is appropriate to perform the hole drilling test. The location and amount of the maximum compressive and tensile residual stress are obtained, and variation in the hoop and longitudinal residual stresses on both internal and external surfaces of pipe samples are investigated. Also, validation of simulation results is performed by comparing with the experimental results of the residual stress in the same pipe on an industrial scale. The results showed that maximum residual stress in the inner surface of the pipe in the longitudinal direction was 460MPa (96 percent of yield stress) which was reduced to 200MPa (42 percent of yield stress) after the hydrostatic test. Because residual stress after the hydrostatic test is lower than the half of yield stress, the hole drilling technique is validated after the hydrostatic test.

Keywords Residual Stress; Spiral Welded Pipe; Hole Drilling; Natural Gas Transmission Steel Pipe; API X70

¹Mechanical Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran

Phone: -

Fax: -

shhashemi@birjand.ac.ir

Article History

Received: June 25, 2018

Accepted: May 23, 2019

ePublished: March 01, 2020

CITATION LINKS

[1] Residual stresses: Measurement by destructive testing [2] Experimental and numerical study of temperature distribution and determination of residual stresses due to welding of plates [3] Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes [4] Residual stress prediction in submerged arc welded spiral pipes [5] Numerical and Experimental study of temperature and residual stress in multi-pass welding of two stainless steel plates having different [6] Experimental determination of residual stresses in multi-pass girth welding of thermo-mechanical steel pipe [7] Application of pre-heating in the reduction of residual stress in the repair welds of steel pipes [8] Through-thickness welding residual stress and its effect on stress intensity factor for semi-elliptical surface cracks in butt-welded steel plate [9] Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel [10] Residual stress, part 1–measurement techniques [11] New joining technology for metal pipe in the construction industry [12] Simulation of the effect of a small break loss of coolant accident (SBLOCA) transient on Investigation of temperature and residual stresses field of submerged arc welding by finite element method and experiments [13] Recent Progress in residual stress measurement techniques [14] ASTM E837-13a, standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method [15] Effect of peak positioning method on accuracy of X-Ray diffraction residual stress measurement [16] Study of texture and microstructure evaluation of steel API 5L X70 under various thermomechanical cycles [17] C200-75: AWWA standard for steel water pipe 6 inches and larger [18] Material and equipment standard for line pipe, IPS-M-PI-190

شبیه‌سازی عددی جوشکاری زیرپودری مارپیچ در لوله فولادی انتقال گاز از نوع API X70

محمدرضا رجیبی رضآبادی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سیدحجت هاشمی* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری باعث کاهش تنش طراحی در خطوط لوله قطور و پر فشار انتقال گاز طبیعی می‌شود. لوله مورد بررسی از نوع API X70 با قطر خارجی و ضخامت و $142/3$ و $198/98$ سانتی‌متر است. برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در این لوله از آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ استفاده می‌شود. با توجه به ابعاد بزرگ لوله و اینکه حمل‌ونقل آن برای انجام آزمون کرنش‌سنجی سوراخ مشکل است جداسازی یک نمونه محدود از آن بسیار مناسب است. در پژوهش حاضر ابعاد این نمونه با ابعاد محدود بررسی می‌شود سپس شبیه‌سازی جوشکاری در نمونه جداسازی انجام و تنش‌های پسماند از جمله تنش پسماند به‌منظور ضخامت برای اولین بار ارائه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که جداسازی نمونه استاندارد با ابعاد 32×44 سانتی‌متر به‌منظور اندازه‌گیری تنش پسماند در لوله فولادی مطلوب است. موقعیت و میزان تنش پسماند کششی و فشاری بیشینه در لوله به دست آمده و تغییرات تنش‌های پسماند محیطی و طولی در سطوح داخلی و خارجی و در نواحی مختلف جوش بررسی می‌شود. همچنین صحت‌سنجی نتایج به دست آمده با نتایج اندازه‌گیری تنش پسماند در لوله از همین نوع فولاد با هندسه مشابه در مقیاس صنعتی انجام می‌شود. نتایج نشان داد که حداکثر تنش پسماند در سطح داخلی لوله در جهت طولی برابر 460 مگاپاسکال (96% تنش تسلیم) بوده و پس از آزمون فشار مایع ایستا به 200 مگاپاسکال (42% تنش تسلیم) تقلیل یافته است. به دلیل اینکه این مقدار کمتر از نصف تنش تسلیم است روش کرنش‌سنجی سوراخ پس از آزمون فشار مایع ایستا معتبر است.

کلیدواژه‌ها: تنش پسماند، جوشکاری مارپیچ لوله، کرنش‌سنجی سوراخ، لوله فولادی انتقال گاز، API X70

تاریخ دریافت: $1397/4/4$

تاریخ پذیرش: $1398/3/2$

*نویسنده مسئول: shhashemi@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

تنش پسماند (Residual stresses)، تنش‌ها است که پس از زوده‌شدن تنش اعمالی در یک جسم جامد در آن باقی می‌ماند. تنش پسماند می‌تواند ناشی از سازوکارهای گوناگون مانند تغییر شکل‌های ناکشسان، گرا دیان دما یا تغییرات سازه‌ای باشد. برای نمونه، گرمای ناشی از جوش ممکن است باعث انبساط موضعی شود. پس از پایان جوشکاری، ممکن است بخشی از بخش‌ها با سرعت بیشتری سرد شوند و انقباض بیشتری پیدا کنند. این پدیده منجر به ایجاد تنش پسماند محلی می‌شود^[1]. تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری باعث کاهش تنش طراحی در خطوط لوله قطور و پر فشار انتقال گاز طبیعی می‌شود.

معدوبی و همکاران، تنش‌های پسماند در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی را برای ورق ST-37 به ابعاد $13 \times 18 \times 25$ سانتی‌متر بررسی کردند و این تحلیل را در دو مرحله جداگانه حرارتی و مکانیکی انجام دادند^[2]. توزیع دما حین جوشکاری و بعد از آن با استفاده از روش اجزاء محدود و تحلیل حرارتی تعیین شد و نتایج تحلیل حرارتی با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه شد. تطابق قابل قبولی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده شده است. با توجه به متغیر بودن خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ماده نسبت به تغییرات دما، بررسی اثر این خواص بر توزیع تنش‌های پسماند از اهمیت خاصی برخوردار است. تاثیر شرایط گوناگون و تغییر متغیرهای مختلف جوشکاری مانند سرعت جوشکاری، وجود قید، رفتار ماده، ضخامت ورق و تعداد پاس‌های جوش بر مقادیر تنش‌های پسماند نیز بررسی شده است.

ستاری‌فر و فرهانی با استفاده از روش کرنش‌سنجی سوراخ و شبیه‌سازی، به بررسی تنش‌های پسماند در ناحیه درز جوش در لوله با قطر خارجی 32 سانتی‌متر و ضخامت 18 سانتی‌متر برای فولاد زنگ‌نزن AISI-304 پرداختند. جوشکاری از نوع تنگستن (Tungsten Inert Gas; TIG) و به‌صورت خودکار صورت گرفت. مشخص شد که هندسه شیار جوش و تعداد پاس‌های جوشکاری، تاثیر زیادی بر میزان و توزیع تنش‌های پسماند دارد. با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری، تنش‌های پسماند محیطی در مرکز درز جوش افزایش می‌یابد ولی تنش‌های پسماند طولی در این محل کاهش پیدا می‌کند^[3].

فرورزان و همکاران، به بررسی تنش‌های پسماند در درز جوش مارپیچ لوله‌ای از جنس API X70 پرداختند. برای قطر خارجی لوله $121/92$ و ضخامت $2/06$ سانتی‌متر، جوشکاری از نوع زیر پودری انجام شد. آزمون فشار مایع ایستا به متعادل‌شدن تنش‌های پسماند کششی کمک می‌کند و این آزمون در نرم‌افزار انسیس در دو مرحله مدل‌سازی شد. در مرحله اول جوشکاری مدل شد و در مرحله دوم آزمون فشار مایع ایستا روی لوله اعمال شد. شش کرنش‌سنج در سطح خارجی و شش کرنش‌سنج در سطح داخلی لوله به فاصله یک سانتی‌متر از هم نصب شد. تنش‌های پسماند در آزمایشگاه توسط روش کرنش‌سنجی سوراخ قبل و بعد از آزمون فشار مایع ایستا اندازه‌گیری شد و نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مطابقت خوبی با یکدیگر داشت^[4].

نخودچی و همکاران، توزیع دما و تنش پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری سه مرحله‌ای فولاد زنگ‌نزن از نوع AISI 321 را بررسی کردند. فرآیند جوشکاری شامل دو مرحله جوشکاری الکتروود دستی (Shielded Metal Arc Welding; SMAW) و یک مرحله جوشکاری با گاز محافظ و الکتروود تنگستن (Gas Tungsten Arc Welding; GTAW) است. نمونه‌هایی با ابعاد 20 در 20 سانتی‌متر که ضخامت یکی $6/0$ سانتی‌متر و دیگری 18 سانتی‌متر بود، استفاده شده است. جوشکاری با ضخامت غیریکسان و به دو روش تجربی و شبیه‌سازی تحلیل شد. جوشکاری سه مرحله‌ای ابتدا در آزمایشگاه

۳- معرفی لوله API X70 با درز جوش مارپیچ

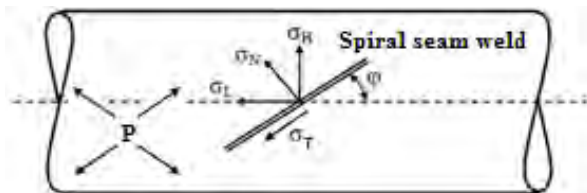
به‌طور کلی لوله‌های API با درز جوش مارپیچ از فولادهای کم‌کربن و میکروآلیاژ تولید می‌شوند. در این روش کلاف فولادی وارد دستگاه شکل‌دهی می‌شود و متناسب با قطر خارجی مورد نیاز لوله، به شکل مارپیچ تبدیل می‌شود [9]. جوشکاری زیر پودری (Submerged Arc Welding; SAW)، روش رایج برای جوشکاری درز جوش مارپیچ لوله‌ها است. عیب این روش ایجاد تنش پسماند زیاد در مجاورت درز جوش است [4]. جوشکاری درز جوش ابتدا در داخل و سپس در خارج لوله با دو یا سه مشعل جوش به روش زیر پودری با نرخ رسوب بالا برای ورق ضخیم انجام شده و لوله متناسب با طول مورد نیاز، بریده می‌شود. لوله‌های با درز جوش مارپیچ بر اساس استاندارد API با قطر خارجی ۵۰/۸ تا ۲۰۰ سانتی‌متر و با ضخامت جداره ۶/۰ تا ۲ سانتی‌متر و همچنین با طول ۸۰۰ تا ۱۸۰۰ سانتی‌متر تولید می‌شود.

۳-۱- تعریف مختصات برای لوله مارپیچ

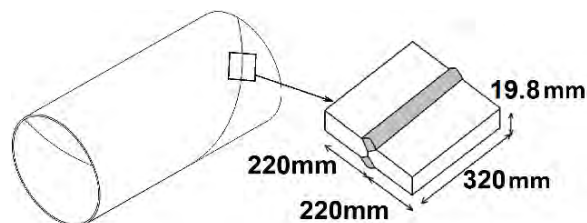
در شکل ۱، جهت‌گذاری تنش‌های پسماند در درز جوش مارپیچ لوله حاصل از فشار داخلی سیال نشان داده شده است [10]. تنش طولی، σ_H ، تنش محیطی، σ_N ، تنش عمود بر درز جوش و σ_T تنش مماس بر درز جوش است. در لوله‌های با درز جوش مارپیچ تنش عمودی وارد بر درز جوش به دو مولفه طولی و محیطی تقسیم‌بندی می‌شود؛ لذا این لوله‌ها سطح تنش کمتری نسبت به لوله‌های با درز جوش طولی دارند.

ابعاد و موقعیت نمونه مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. ابعاد هندسی به گونه‌ای تعیین می‌شود که درز جوش در قسمت میانی نمونه قرار گیرد. با توجه به قطر زیاد لوله، نمونه مسطح فرض می‌شود.

شماتیک شیار جوش برای لوله فولادی API X70 در شکل ۳ نشان داده می‌شود [9]. چیدمان مشعل پاس‌های داخلی و خارجی برای جوش زیر پودری لوله‌های مارپیچ نشان داده شده است.



شکل ۱) جهت‌گذاری تنش‌ها در درز جوش مارپیچ لوله [10]



شکل ۲) جداسازی نمونه از درز جوش مارپیچ لوله

انجام شد و توزیع دمای ناشی از فرآیند توسط ترموکوپل‌هایی ثبت شد. تنش‌های پسماند به‌صورت تجربی و با استفاده از روش کرنش‌سنجی سوراخ به‌دست آمد. سپس، فرآیند مذکور در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مدل‌سازی شد و نتایج آن با اندازه‌گیری‌های تجربی دما و تنش پسماند مقایسه شد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که نتایج عددی و اندازه‌گیری‌های تجربی تطابق خوبی دارد. مدل به‌وجودآمده می‌تواند پیش‌بینی مناسبی از توزیع دما و تنش پسماند در فرآیند جوشکاری سه مرحله‌ای داشته باشد، لذا این مدل قابل استفاده در طراحی و ارزیابی جوشکاری سازه است [5].

سیک‌روح و همکاران، جوشکاری محیطی دو لوله فولادی با درز جوش مارپیچ از جنس API X70 و قطر ۱۴۲/۳ و ضخامت ۱۹/۸ سانتی‌متر را انجام دادند. آزمون کرنش‌سنجی سوراخ در مرکز درز جوش روی سطوح خارجی و داخلی لوله صورت گرفت. هفت کرنش‌سنج در سطح خارجی و هفت کرنش‌سنج در سطح داخلی نصب شد. نتایج حاکی از آن است که تنش پسماند فشاری بیشینه هم در راستای محیطی و هم در راستای طولی در سطح داخلی لوله و در فاصله ۳ سانتی‌متر از مرکز درز جوش قرار دارد [6].

چرخشی و اکبری، اثر پیش‌گرم را بر کاهش تنش‌های پسماند در جوشکاری تعمیراتی لوله‌های فولادی بررسی کردند. لوله از جنس فولاد کربنی A106-B با قطر خارجی ۱۰۲/۳ و ضخامت ۵/۸ سانتی‌متر است. نتایج نشان داد که با افزایش پیش‌گرم، تنش‌های پسماند محوری کششی هم در سطح داخلی و هم در سطح خارجی لوله فولاد زنگ‌نزن و فولاد کربنی کاهش یافته است [7].

بین و همکاران تاثیر تنش‌های پسماند در راستای ضخامت را بر ضریب تمرکز تنش برای ترک سطحی نیمه بیضوی در ورق فولادی Q345qD با جوش لب به لب بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که تنش پسماند طولی در راستای ضخامت، باعث افزایش ضریب تمرکز تنش در نوک ترک می‌شود [8].

۲- شرح مساله

تنش پسماند در راستای ضخامت از این جهت مهم است که اعتبار آزمون کرنش‌سنجی سوراخ به آن بستگی دارد و تغییرات این تنش بایستی ناچیز باشد. همچنین، به‌منظور انجام آزمون کرنش‌سنجی سوراخ، تنش پسماند بیشینه بایستی کمتر از نصف تنش تسلیم ماده باشد [1]. بر این اساس اندازه‌گیری تجربی و شبیه‌سازی کامپیوتری برای تعیین مقدار و توزیع این تنش‌ها در لوله‌های جوشکاری شده اهمیت دارد. تنش‌های پسماند در راستای ضخامت در لوله‌های API X70 برای اولین بار در این مقاله گزارش می‌شود. وزن زیاد و ابعاد بزرگ لوله، همچنین عدم وجود نمونه استاندارد برای تعیین تجربی تنش پسماند در درز جوش لوله مشکل‌ساز است. با بررسی‌های انجام‌شده تاکنون در منابع موجود، ابعاد نمونه‌ای محدود از لوله برای تعیین تنش پسماند بررسی نشده است. در این پژوهش ابعاد استاندارد برای نمونه تعیین تجربی تنش پسماند تعیین شده و توزیع تنش‌های پسماند در راستای طولی، محیطی

می‌آید.

۳-۳- خواص جوش لوله API X70

به‌منظور مدل‌سازی از خواص حرارتی و مکانیکی فولاد API X70، به‌صورت تابعی از دما بر اساس جدول ۱ استفاده شده است [12]. خواص وابسته به دما به‌منظور انجام شبیه‌سازی جوش استفاده می‌شود. برای سایر دماها از میان‌یابی خطی استفاده شده است.

۴- انتقال حرارت در جوشکاری

توجه به نحوه شبکه‌بندی در ناحیه جوش و نواحی نزدیک به آن، بسیار مهم است. شیب حرارتی و تنش در نواحی نزدیک به خط مرکزی جوش بسیار بالا است؛ لذا شبکه‌بندی مدل در این قسمت‌ها باید به شکلی باشد که از درجه شبکه‌بندی ریزتری استفاده شود. انتقال حرارت از سطح جوش می‌تواند به دو روش جابجایی و تشعشع انجام شود [13-14]. برای تاثیر دادن تشعشع در شبیه‌سازی، از ضریب جابجایی معادل (h_{eq}) مطابق رابطه زیر استفاده می‌شود:

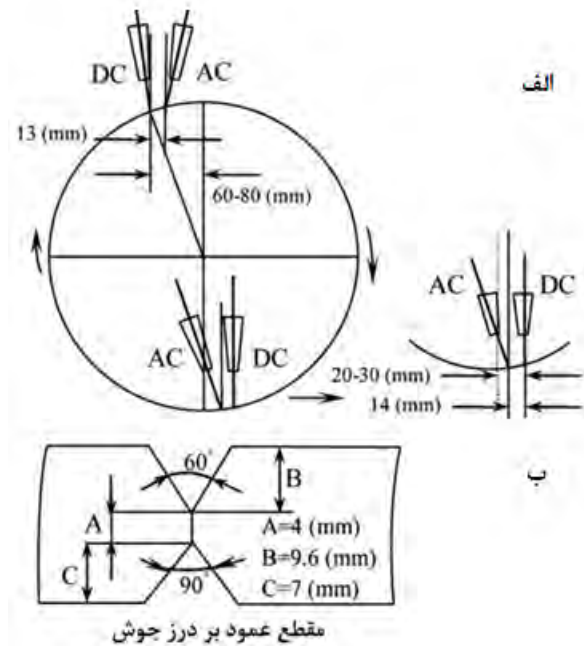
$$h_{eq} = h_c + h_r \begin{cases} 0.0668\theta & 0 \leq \theta \leq 500^\circ C \\ 0.231\theta - 82.1 & \theta > 500^\circ C \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه (۱) h_c و h_r به ترتیب تاثیر جابجایی و تشعشع است و θ بر حسب درجه سلسیوس است. از مهم‌ترین پارامترهای ورودی برای تحلیل حرارتی جوشکاری، مقدار انرژی حرارتی مورد نیاز و چگونگی توزیع این انرژی است. این دو پارامتر در ابعاد حوضچه مذاب جوش و ناحیه متأثر از حرارت، آهنگ خنک‌شدن و گرادیان دمایی در قطعات موثر خواهد بود.

انرژی حرارتی جوشکاری که از قوس الکتریکی وارد قطعه می‌شود از معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$Q = \eta \cdot V \cdot I \quad (2)$$

که V ولتاژ قوس، I شدت جریان و η بازده قوس الکتریکی است. پارامترهای جوشکاری در جدول ۲ نشان داده می‌شود [14]. بازده جوش زیر پودری معمولاً بیشتر از ۹۰٪ است و برای این نوع جوش، بازده ۹۵٪ مقداری مناسب است.



شکل ۳) نحوه جوشکاری درز جوش ماریپیچ برای لوله (الف): چیدمان مشعل‌های جوش و ب: هندسه شیار جوش [9]

۲-۳- شرایط جوشکاری برای لوله API X70

جوشکاری لوله API X70 توسط جوش زیر پودری در دو پاس در داخل و خارج انجام شده است. در جوش زیر پودری الکتروود و فلز پایه تحت لایه‌ای از گداز، ذوب می‌شود. این لایه، فلز جوش را از آلودگی حفظ می‌کند و باعث تمرکز حرارت در اتصال می‌شود [11]. گداز ایجاد شده وارد حوضچه مذاب شده، باعث اکسید شدن و تمیز شدن فلز جوش می‌شود. این گداز در نهایت به شکل لایه‌ای محافظ، سطح فلز جوش را پوشش می‌دهد. ابتدا پاس سطح پایینی و سپس سطح بالایی جوشکاری می‌شود. فاصله بین پاس‌های خارجی ۱/۳ سانتی‌متر و فاصله بین پاس‌های داخلی ۱/۴ سانتی‌متر است. فاصله بین پاس خارجی و داخلی ۱۹۶/۲ سانتی‌متر است که با تقسیم آن بر سرعت جوشکاری، فاصله زمانی ۱۳۱ ثانیه به‌دست

جدول ۱) خواص مکانیکی در دماهای مختلف برای فولاد API X70 [12]

| چگالی (kg m ⁻³) | ضریب انبساط حرارتی (10 ⁻⁶ K ⁻¹) | ضریب پواسون | مدول یانگ (GPa) | استحکام تسلیم (MPa) | گرمای ویژه (J kg ⁻¹ K ⁻¹) | ضریب هدایت حرارتی (W m ⁻¹ K ⁻¹) | دما (°C) |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------|--------------------|------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------|
| ۷۸۵۳/۱۹ | ۱۴/۰۷ | ۰/۲۸ | ۲۰۶/۸۷ | ۴۸۱ | ۴۶۱/۵۴ | ۴۵/۹۱ | ۱۸ |
| - | - | - | - | ۴۳۶ | - | ۴۴/۹۵ | ۲۰۰ |
| ۷۷۲۷/۶۶ | - | ۰/۲۹ | ۱۷۵/۹۵ | - | ۶۱۵/۳۸ | ۳۹/۸۷ | ۴۰۰ |
| - | ۲۱/۴۵ | ۰/۳۱ | ۱۵۴/۵۸ | ۲۲۰ | ۷۶۹/۲۳ | ۳۳/۶۱ | ۶۰۰ |
| ۷۶۱۰/۶۴ | - | - | - | ۱۱۰ | - | - | ۷۰۰ |
| ۷۶۴۲/۵۵ | - | ۰/۳۲ | ۱۱۴/۵۰ | - | ۱۸۲۳ | ۲۶/۰۴ | ۸۰۰ |
| - | - | ۰/۳۳ | ۴۴/۶۶ | - | ۶۸۰ | ۲۷/۱۳ | ۱۰۰۰ |
| ۷۴۲۹/۷۹ | - | ۰/۳۳ | ۲/۲۹ | - | - | - | ۱۲۰۰ |
| ۷۱۶۵/۹۶ | - | ۰/۳۴ | ۰/۱۰ | - | ۴۸۰۷/۶۹ | ۳۲/۱۶ | ۱۴۰۰ |

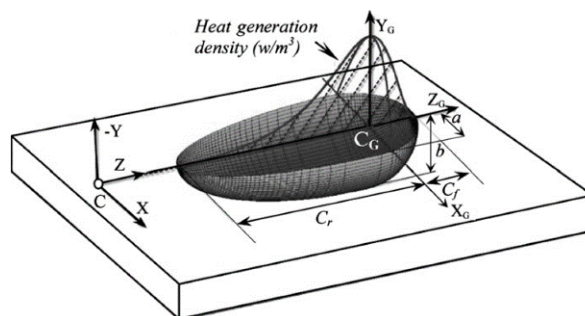
| محل جوشکاری | نوع | قطر مشعل جوش (سانتی‌متر) | شدت جریان (آمپر) | ولتاژ (ولت) | سرعت جوشکاری (سانتی‌متر بر دقیقه) |
|---------------|-----|--------------------------|------------------|-------------|-----------------------------------|
| جوشکاری داخلی | DC | ۰/۳۲ | ۷۵۰ | ۳۱ | ۹۰ |
| | AC | ۰/۳۲ | ۶۰۰ | ۳۵ | ۹۰ |
| جوشکاری خارجی | DC | ۰/۴ | ۱۰۵۰ | ۳۰ | ۹۰ |
| | AC | ۰/۳۲ | ۷۰۰ | ۳۳ | ۹۰ |

نزدیک‌کردن آن به حالت واقعی و تخمین مناسب حوضچه مذاب استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی جوشکاری می‌توان از روش تولد و مرگ المان‌ها (Element Birth And Death Technique) استفاده کرد. در روش تولد و مرگ المان‌ها، تمام المان‌ها اعم از آنهایی که متعلق به فلزات پایه یا فلز جوش هستند، در ابتدا مدل می‌شوند. سپس، المان‌هایی که از نظر زمانی وجود ندارند، در حالت مرگ قرار می‌گیرند. به‌منظور مرگ المان‌ها، ضریب سختی آنها را با یک ضریب کاهش‌ی شدید که بسیار کوچک است، غیرفعال می‌کنند. به این ترتیب بار المان‌های غیرفعال به صفر میل می‌کند، هر چند که هنوز نام آنها در جدول المان‌ها دیده می‌شود. به‌صورت مشابه جرم و انرژی المان‌های مرده (غیرفعال) نیز در مدل حساب نمی‌شود. این المان‌ها پس از رسیدن منبع حرارتی زنده (فعال) می‌شوند و حرارت منبع به آنها اعمال می‌شود. در مرحله تحلیل مکانیکی نیز المان‌ها با عبور منبع حرارتی زنده می‌شوند. از آنجا که خواص ماده به دما بستگی دارد، استحکام تسلیم و دیگر خواص مکانیکی بر حسب دما اعمال می‌شود. به‌عنوان حالت دیگر مدل‌سازی، فلز فیلر با استفاده از روش جداکردن، به جوش اضافه می‌شود. در این روش تمامی المان‌های فلز جوش فعال است، اما المان‌های فیلر قبل از اضافه‌شدن فیلر به اتصال در دمای بالایی نگهداری می‌شود، تا اینکه زمان تولد المان برسد [16].

۵- شبه‌سازی نمونه مورد بررسی

شبه‌سازی توسط نرم‌افزار آباکوس (Abaqus) انجام شد. فرض شده است که در حین جوشکاری خزش اتفاق نمی‌افتد، زیرا مواد تنها برای مدت زمان اندکی تحت دمای بالا قرار دارند. برای انجام شبکه‌بندی صحیح، تحلیل حساسیت شبکه (Mesh Sensitivity Analysis) انجام شده است. المان‌ها از نوع C3D8T انتخاب شد که این المان ۸ گره‌ای و به‌صورت کوپل دما و جابجایی است. با توجه به اینکه تعداد المان در نتایج موثر است، تحلیل حساسیت دما به تعداد المان برای مدل انجام داده شد. بیشینه دما در مرکز جوش و هنگام عبور منبع جوشکاری بر حسب تعداد المان در نمودار ۱ نشان داده می‌شود. با در نظر گرفتن حداقل ۴۰۰۰۰ المان نسبت به تعداد ۳۰۰۰۰ المان (۱۹۵۸ نسبت به ۱۹۵۰ درجه سلسیوس) اختلاف دما کمتر از ۴٪ می‌شود. با توجه به شکل ۵، در تحلیل حرارتی از ۴۰۰۰۰ المان با ۱۰۰۵۰۰ گره استفاده شده است. شبکه‌بندی مدل در شکل ۵ نشان داده می‌شود. اندازه تقریبی المان‌ها در مجاورت درز جوش، ۱/۱ سانتی‌متر است. در مدل‌های اولیه، مدل‌سازی کلاهک جوش (Weld Cap) لحاظ شد. نتایج نشان داد

یک مدل ریاضی برای اعمال شار حرارتی سطحی-حجمی به قطعه‌کار، مدل منبع حرارتی دو بیضی گلداک (Goldak) است [15]. این مدل متشکل از دو نیم بیضی جداگانه است که اولی در جلو و دومی در دنباله حرارت قرار گرفته است. مدل گلداک در شکل ۴ نشان می‌شود و تصویر هاشورخورده، نشان‌دهنده شار حرارتی در یک بعد (Z) است. متغیرهای a ، b ، C_f و C_r ثابت‌های مدل گلداک هستند. این ثابت‌ها باید به شکلی تنظیم شود که بیانگر دو ناحیه مهم جوش یعنی نواحی مذاب و ناحیه متأثر از حرارت باشد.



شکل ۴) مدل منبع حرارتی دو بیضی گلداک [15]

که در آن:

$$\begin{aligned} x_G &= x \\ y_G &= y \\ z_G &= z = vt \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، v سرعت جوشکاری، x ، y ، z فاصله نقطه دلخواه از مبدأ دستگاه مختصات هستند. x_G ، y_G ، z_G فاصله نقطه دلخواه از مبدأ دستگاه مختصات متحرک (C_G) هستند و به‌عنوان فاصله گلداک شناخته می‌شود. روابط زیر، توزیع حرارت را در بیضی‌های جلو و عقب مدل نشان می‌دهند:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3z^2}{c_f^2}} \quad (4)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3z^2}{c_r^2}} \quad (5)$$

f_f و f_r متغیرهای حرارتی را در جلو و عقب مدل نشان می‌دهند و به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

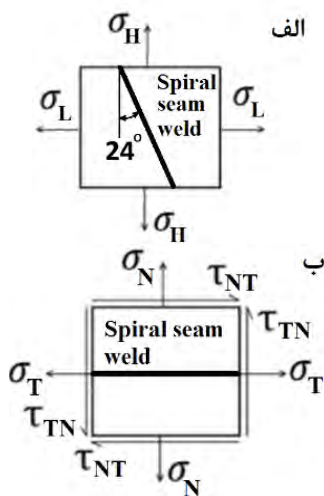
$$f_f + f_r = 2 \quad (6)$$

$$f_f = \frac{2c_f}{c_f + c_r} \quad (7)$$

$$f_r = \frac{2c_r}{c_f + c_r} \quad (8)$$

از روش گلداک برای بهینه‌کردن مدل حرارت ورودی به جوش و

مقدار ۰/۹۵ در نظر گرفته می‌شود که بر اساس پیشنهاد IPS [18] است. با استفاده از فشار آزمون فشار مایع ایستا (۱۲/۷MPa) می‌توان تنش محیطی (σ_H) ایجاد شده داخل لوله (۴۵۷/۰MPa) را به دست آورد. حین فرآیند آزمون فشار مایع ایستا، کرنش طولی صفر است. به منظور محاسبه تنش طولی ناشی از آزمون فشار مایع ایستا، شبیه‌سازی روی لوله با طول محدود و ساده با دو انتهای گیردار انجام شد و تنش طولی (σ_L) به دست آمد (۱۲۲/۷MPa). وضعیت تنش‌های وارد بر درز جوش ماریپیچ در شکل ۶ مشاهده می‌شود. تنش‌های به دست آمده در راستای نمونه چهارگوش نیستند. برای رفع این مشکل با استفاده از روابط تبدیل تنش، تنش‌های طولی و عرضی در راستای موازی و عمود بر راستای درز جوش تبدیل شد.



شکل ۶ توزیع تنش‌های پسماند روی نمونه چهارگوش، الف: تنش‌های طولی و محیطی و ب: تنش‌های وارد بر نمونه

با استفاده از روابط تبدیل تنش، تنش‌های ایجاد شده روی نمونه را می‌توان به دست آورد:

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \sigma_H \cos^2 \theta + \sigma_L \sin^2 \theta + \tau_{LH} \sin 2\theta \\ \sigma_N &= \sigma_H \sin^2 \theta + \sigma_L \cos^2 \theta - \tau_{LH} \sin 2\theta \\ \tau_{TN} &= \tau_{LH} \cos 2\theta - \frac{\sigma_L - \sigma_H}{2} \sin 2\theta \end{aligned} \quad (10)$$

با توجه به شکل ۶، $\theta = 24^\circ$ ، $\sigma_H = 457/0 \text{ MPa}$ ، $\sigma_L = 122/7 \text{ MPa}$ و $\tau_{SH} = \sigma_S = 0$ است. بارگذاری مکانیکی به دست آمده روی نمونه اعمال شد. به منظور انجام مدل‌سازی اجزاء محدود آزمون فشار مایع ایستا در دو مرحله پس از جوشکاری در نظر گرفته شد. در اولین مرحله، فشار داخلی به صورت خطی به مقدار مورد نظر (۱۲/۷ مگاپاسکال) رسانده می‌شود. در مرحله دوم، فشار داخلی به صورت خطی به صفر برمی‌گردد.

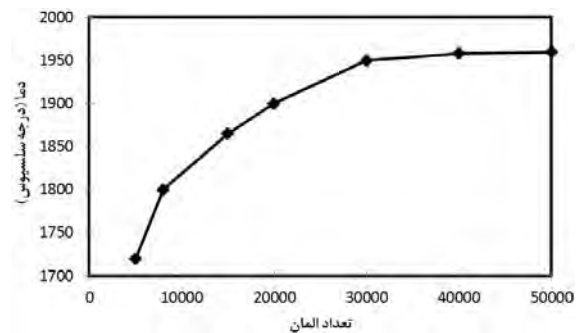
۷- راستی‌آزمایی تنش‌های پسماند طولی و محیطی

۷-۱- توزیع تنش پسماند در سطح خارجی لوله

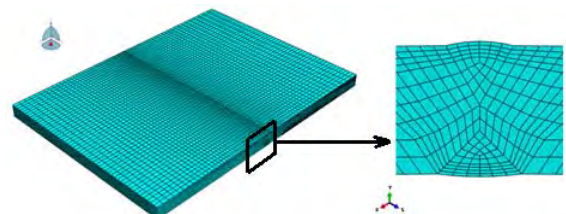
پس از شبیه‌سازی نمونه با سعی و خطا، ابعاد ۳۲×۴۴ سانتی‌متر نتایج قابل قبولی مشابه با نتایج مرجع [4] دارد. تنش‌های پسماند

که با افزایش پاس‌ها، میزان تنش‌ها نسبت به مدل بدون کلاهک جوش تفاوت چندانی نمی‌کند.

متغیرهای جوشکاری در شبیه‌سازی در ۲ پاس مطابق با شرایط واقعی آزمون تجربی است. برای مدل کردن عبور الکتروود از یک مقطع خاص، شار حرارتی با توزیعی چهار خطی مطابق با مدل گلاک اعمال شد. این مساله امکان ایجاد حوضچه مذابی نزدیک به واقعیت را ایجاد می‌نماید و لذا می‌توان بدون داشتن تعداد المان‌های زیاد در جهت ضخامت، به خوبی پاس‌های جوش را شبیه‌سازی نمود. نتایج حاصل از تحلیل حرارتی به خوبی این مطلب را ثابت می‌کند. گرمای نهان ناشی از تغییر فاز حالت مایع با استفاده از مفهوم آنتالپی لحاظ شد. اتلاف حرارتی همرفت نیز به صورت ثابت و با ضریب $15 \text{ W/m}^2\text{K}$ در کلیه سطوح آزاد نمونه در نظر گرفته شد و دمای محیط 18°C فرض شد. در زمان ۸ ثانیه پس از شروع هر پاس، مشعل جوش به قسمت میانی نمونه می‌رسد.



نمودار ۱) تغییرات دمای بیشینه در مرکز جوش بر حسب تعداد المان



شکل ۵) شبکه‌بندی المان محدود برای ناحیه جوش مدل

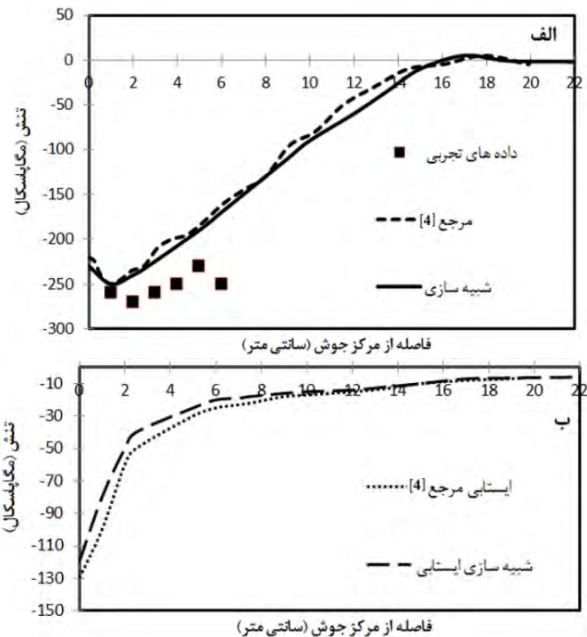
۶- آزمون فشار مایع ایستا (Hydrostatic test)

آزمون فشار مایع ایستا، آزمونی است که تحت آن لوله از داخل، تحت فشار قرار می‌گیرد. بر اساس استاندارد انجمن امور آب آمریکا (American Water Work Association; AWWA) [17] فشار آزمون فشار مایع ایستا از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \left(\frac{2\sigma_H t}{D_0} \right) = K \left(\frac{2\sigma_y t}{D_0} \right) \quad (9)$$

در رابطه (۹)، P حداقل فشار آزمون فشار مایع ایستا است. K نسبت تنش محیطی ناشی از آزمون فشار مایع ایستا به حداقل تنش تسلیم ماده $\left(\frac{\sigma_H}{\sigma_y} \right)$ است. D_0 قطر خارجی لوله و t ضخامت لوله است. بر اساس استاندارد، مقدار متوسط ۰/۷۵ برای K پیشنهاد می‌شود که این مقدار تنش پسماند را به میزان زیادی تغییر نمی‌دهد. حداقل مقدار پیشنهادی K برای لوله گاز ۰/۹۰ است. برای لوله مورد بررسی

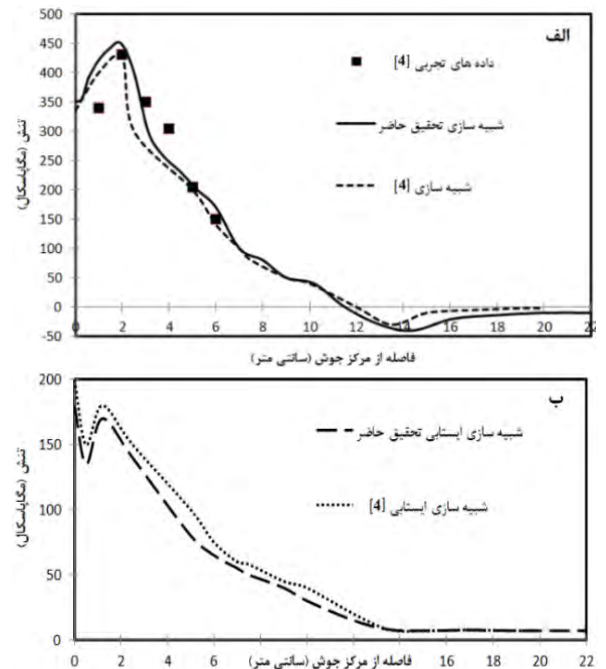
ذوبی اتفاق نیفتاده است؛ اما فولاد به‌صورت خمیری می‌شود. بنابراین فولاد پایه مجاور ناحیه جوش مقداری از صلبیت خود را از دست داده و رفتاری مشابه ناحیه جوش از خود نشان می‌دهد. همچنین با توجه به چرخه حرارتی شدید، وجود ساختار مارتنزیت و درشت‌دانه‌شدن ساختار فولاد در این ناحیه، اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین انتظار رفتاری بین نواحی جوش و فولاد پایه منطقی به نظر می‌رسد.



نمودار ۳) توزیع تنش پسماند عمودی در سطح خارجی لوله (الف: قبل از آزمون فشار مایع ایستا، ب: بعد از آزمون فشار مایع ایستا)

به‌طور کلی می‌توان گفت تنش‌های پسماند محیطی در سطح داخل لوله نسبت به سطح خارج آن را ناشی از متغیرهای جوشکاری، حرارت ورودی، تنش‌های باقی‌مانده از ساخت، زاویه و اندازه درز متفاوت جوش، شکل‌گیری کرنش‌های ماندگار ناشی از قرارگرفتن پاس ریشه، وجود فاز مارتنزیت و عدم تنش‌گیری در پاس سطح دانست^[۶]. وضعیت تنش‌های پسماند در سطح خارجی لوله و مقدار و موقعیت تنش پسماند بیشینه قبل و بعد از آزمون فشار مایع ایستا در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین مقایسه نتایج و تعیین میزان خطا برای تنش‌های پسماند مماسی و عمودی در سطح داخلی لوله در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی می‌تواند به علت نبود دقت لازم در نتایج آزمایشگاهی مرجع^[۴] و نصب غیرصحيح اندازه‌گیری‌ها و سایر موارد باشد. با توجه به اینکه سطح تنش‌های پسماند قبل از آزمون فشار مایع ایستا، بیشتر از نصف تنش تسلیم ماده است، روش کرنش‌سنجی سوراخ، دارای خطای قابل توجه است و این موضوع اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی را توجیه می‌کند. تغییرات تنش پسماند ناچیز در راستای ضخامت و همچنین مسطح فرض‌شدن مدل المان محدود، از دیگر دلایل اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی است.

مماسی (σ_T) و عمودی (σ_N) به‌دست آمد و با نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی این مرجع مقایسه شد. توزیع تنش‌های پسماند مماسی در سطح خارجی مدل در نمودار ۲ مشاهده می‌شود. پس از جوشکاری، از مرکز درز جوش در مدل تا فاصله حدود ۱۲ سانتی‌متری تنش‌ها کششی و از این فاصله تا لبه خارجی ورق در فاصله ۲۲ سانتی‌متری تنش‌ها فشاری است و نهایتاً به صفر می‌رسد. پس از آزمون فشار مایع ایستا، تنش در مرکز درز جوش از مقدار ۳۹۰ به ۱۸۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد (معادل ۵۴% کاهش). همچنین، تنش پسماند بیشینه در فاصله ۱۹/۴ سانتی‌متر از مرکز درز جوش از مقدار ۴۵۰ به ۱۸۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد (معادل ۶۰% کاهش).



نمودار ۲) توزیع تنش پسماند مماسی در سطح خارجی لوله (الف: قبل از آزمون فشار مایع ایستا، ب: بعد از آزمون فشار مایع ایستا)

توزیع تنش‌های پسماند عمودی در سطح خارجی مدل در نمودار ۳، نشان می‌دهد که در مرکز ناحیه جوش و ناحیه متأثر از حرارت تا فاصله حدود ۱۶ سانتی‌متر از مرکز درز جوش، تنش‌ها فشاری است. پس از این فاصله و در فلز پایه، تنش‌ها اندکی کششی می‌شود. پس از آزمون فشار مایع ایستا، تنش در مرکز درز جوش از مقدار ۲۳۰ به مقدار ۱۲۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد (معادل ۴۸% کاهش). همچنین، تنش پسماند بیشینه در فاصله ۱ سانتی‌متر از مرکز درز جوش از مقدار ۲۵۰ به مقدار ۱۲۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد (معادل ۵۲% کاهش). در ناحیه متأثر از حرارت جهت تنش‌های پسماند به‌صورت فشاری است. با توجه به صلبیت سازه و درنظرداشتن رفتار خودمعتادل‌شونده تنش‌های پسماند، تغییر جهت این تنش‌ها نسبت به ناحیه جوش، طبیعی به نظر می‌رسد. با توجه به کران‌های با جهت‌های مخالف بدیهی است که در ناحیه‌ای از این فاصله، تنش پسماند صفر شده و جهت تنش‌ها تغییر یافته است. ناحیه متأثر از حرارت از رفتار دوگانه‌ای پیروی می‌کند. در این ناحیه،

جدول ۳) وضعیت تنش‌های پسماند در سطح خارجی لوله (بر حسب مگاپاسکال)

| تنش پسماند | فاصله از مرکز درز جوش (سانتی‌متر) | | مقدار تنش پسماند | | تنش پسماند پس از آزمون فشار مایع ایستا | |
|------------------------|-----------------------------------|-------|------------------|-------|----------------------------------------|-------|
| | مماسی | عمودی | مماسی | عمودی | مماسی | عمودی |
| تنش پسماند بیشینه | ۱/۹ | ۱/۰ | ۴۵۰ | -۲۵۰ | ۱۸۰ | -۱۲۰ |
| تنش پسماند در مرکز جوش | - | - | ۳۹۰ | -۲۳۰ | ۱۸۰ | -۱۲۰ |

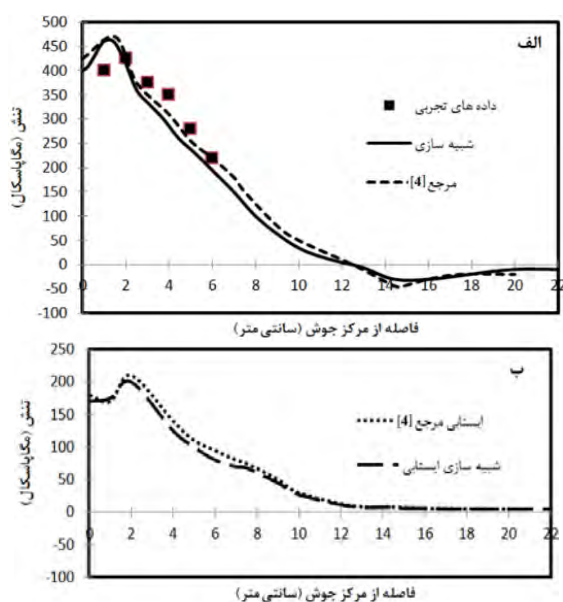
جدول ۴) مقایسه نتایج تنش پسماند مماسی در سطح خارجی لوله قبل از آزمون فشار مایع ایستا

| شماره کرنش‌سنج | موقعیت نسبت به مرکز درز جوش (سانتی‌متر) | تنش پسماند تجربی ^[۴] (مگاپاسکال) | تنش پسماند شبیه‌سازی ^[۴] (مگاپاسکال) | درصد خطا | تنش پسماند در تحقیق حاضر (مگاپاسکال) | درصد خطا |
|----------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|--------------------------------------|----------|
| ۱ | ۱ | ۳۴۰ | ۴۰۰ | ۱۵ | ۴۲۰ | ۲۴ |
| ۲ | ۲ | ۴۳۰ | ۴۲۵ | ۱ | ۴۵۰ | ۵ |
| ۳ | ۳ | ۳۵۰ | ۲۶۰ | ۲۶ | ۳۰۰ | ۱۴ |
| ۴ | ۴ | ۳۰۵ | ۲۲۵ | ۲۶ | ۲۵۰ | ۱۸ |
| ۵ | ۵ | ۲۰۵ | ۲۰۰ | ۲ | ۲۰۰ | ۲ |
| ۶ | ۶ | ۱۵۰ | ۱۴۰ | ۷ | ۱۷۰ | ۱۳ |

جدول ۵) مقایسه نتایج تنش پسماند عمودی در سطح خارجی لوله قبل از آزمون فشار مایع ایستا

| شماره کرنش‌سنج | موقعیت نسبت به مرکز درز جوش (سانتی‌متر) | تنش پسماند تجربی ^[۴] (مگاپاسکال) | تنش پسماند شبیه‌سازی ^[۴] (مگاپاسکال) | درصد خطا | تنش پسماند در تحقیق حاضر (مگاپاسکال) | درصد خطا |
|----------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|--------------------------------------|----------|
| ۱ | ۱ | -۲۶۰ | -۲۵۰ | ۴ | -۲۵۰ | ۴ |
| ۲ | ۲ | -۲۷۰ | -۲۳۵ | ۱۳ | -۲۴۰ | ۱۱ |
| ۳ | ۳ | -۲۶۰ | -۲۱۰ | ۱۹ | -۲۲۰ | ۱۵ |
| ۴ | ۴ | -۲۵۰ | -۱۹۸ | ۲۱ | -۲۰۰ | ۲۰ |
| ۵ | ۵ | -۲۳۰ | -۱۸۵ | ۲۰ | -۱۹۰ | ۱۷ |
| ۶ | ۶ | -۲۵۰ | -۱۶۰ | ۳۶ | -۱۷۰ | ۳۲ |

کشی ایجاد می‌نماید. بنابراین علاوه بر اثرات حرارت ورودی ناشی از عواملی همچون شدت جریان الکتریکی، اندازه قطر الکتروود و سرعت جوشکاری، تنش‌های اولیه ناشی از مراحل تولید نیز در میزان و اختلاف تنش‌های پسماند جوشی در سطوح داخل و خارج لوله تاثیرگذار است.



نمودار ۴) توزیع تنش پسماند مماسی در سطح داخلی لوله (الف: قبل از آزمون فشار مایع ایستا، ب: بعد از آزمون فشار مایع ایستا)

۲-۷- توزیع تنش پسماند در سطح داخلی لوله

توزیع تنش‌های پسماند مماسی در سطح داخلی مدل، نشان می‌دهد که پس از جوشکاری، از مرکز درز جوش تا فاصله حدود ۱۲/۵ سانتی‌متر، تنش‌ها کششی و از این فاصله تا لبه خارجی در فاصله ۲۲/۰ سانتی‌متری تنش‌ها فشاری است و نهایتاً به صفر می‌رسد (نمودار ۴). پس از آزمون فشار مایع ایستا، تنش در مرکز درز جوش از مقدار ۴۰۰ به مقدار ۱۷۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد (معادل ۵۸٪ کاهش). همچنین، تنش پسماند بیشینه در فاصله ۱/۴ سانتی‌متر از مرکز درز جوش از مقدار ۴۶۰ به مقدار ۲۰۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد (معادل ۵۷٪ کاهش).

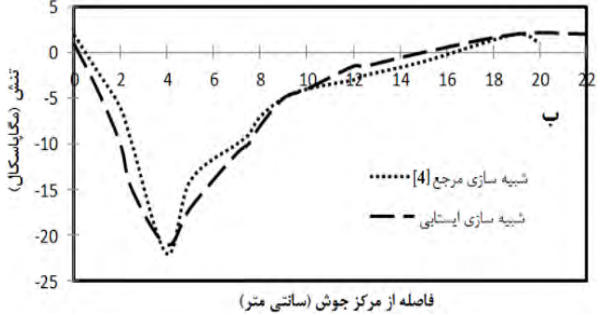
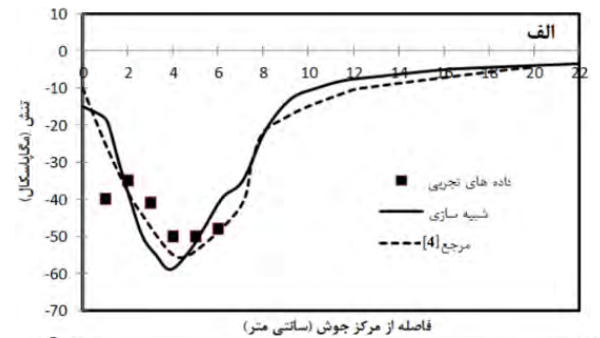
توزیع تنش‌های پسماند عمودی در سطح داخلی مدل در نمودار ۵ نشان می‌دهد که در مرکز ناحیه جوش و ناحیه متاثر از حرارت تا فاصله حدود ۱۶ سانتی‌متر از مرکز درز جوش، تنش‌ها فشاری است. پس از این فاصله و در فلز پایه تنش‌ها اندکی کششی می‌شود. پس از آزمون فشار مایع ایستا، تنش در فاصله ۲۲ سانتی‌متر از لبه ورق از مقدار ۱۵- به مقدار ۱ مگاپاسکال تغییر می‌کند. همچنین، تنش پسماند بیشینه در فاصله ۳/۸۸ سانتی‌متر از مرکز درز جوش از مقدار ۵۹- به مقدار ۲۱- مگاپاسکال کاهش می‌یابد (معادل ۶۵٪ کاهش). تفاوت در نتایج فلز پایه به دلیل وجود این تنش‌ها می‌تواند ناشی از فرآیند شکل‌دهی غلتکی به صورت مارپیچ به منظور تولید لوله باشد که در سطح داخلی تنش‌های فشاری و در سطح خارجی تنش‌های

وضعیت تنش‌های پسماند در سطح داخلی لوله و مقدار و موقعیت تنش پسماند بیشینه، قبل و بعد از آزمون فشار مایع ایستا نیز در جدول ۶ و مقایسه نتایج و تعیین میزان خطا برای تنش‌های پسماند مماسی و عمودی در سطح داخلی لوله در جدول‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

۸- نتایج حل گرمایی

کانتورهای سه‌بعدی درجه حرارت در زمان ۸ ثانیه پس از جوشکاری هر پاس نشان می‌دهد که با افزایش پاس‌ها میزان دما از ۱۹۰۷ درجه سلسیوس در پاس اول تا ۱۹۷۴ درجه سلسیوس در پاس آخر افزایش می‌یابد (شکل ۷).

همچنین توزیع درجه حرارت برای پاس‌های مختلف جوشکاری در زمان ۸ ثانیه پس از جوشکاری هر پاس نشان می‌دهد که پاس دوم در هر سطح از مدل، دمای بیشتری نسبت به پاس قبلی دارد (نمودار ۶)، دلیل این موضوع نیز فاصله زمانی کوتاه بین دو پاس در هر سطح است. به دلیل اینکه پاس‌های خارجی پس از پاس‌های داخلی انجام شده‌اند، توزیع دمای بیشتری نسبت به پاس‌های داخلی دارند.



نمودار ۵) توزیع تنش پسماند عمودی در سطح داخلی لوله (الف: قبل از آزمون فشار مایع ایستا، ب: بعد از آزمون فشار مایع ایستا)

جدول ۶) وضعیت تنش‌های پسماند در سطح داخلی لوله (بر حسب مگاپاسکال)

| تنش پسماند | مقدار تنش پسماند | | فاصله از مرکز درز جوش (سانتی‌متر) | | تنش پسماند پس از آزمون فشار مایع ایستا |
|------------------------|------------------|-------|-----------------------------------|-------|----------------------------------------|
| | عمودی | مماسی | عمودی | مماسی | |
| تنش پسماند بیشینه | -۵۹ | ۴۶۰ | ۳/۸ | ۱/۴ | ۲۱ |
| تنش پسماند در مرکز جوش | -۱۵ | ۴۰۰ | - | | ۱ |

جدول ۷) مقایسه نتایج تنش پسماند مماسی در سطح داخلی لوله قبل از آزمون فشار مایع ایستا

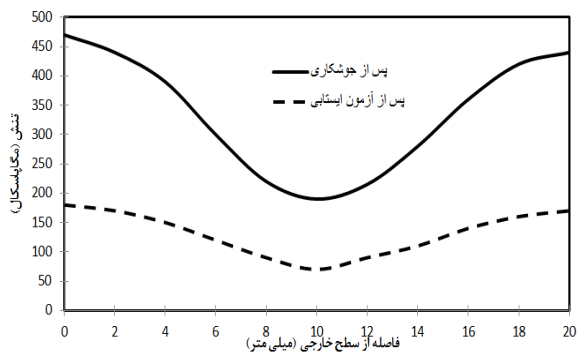
| شماره کرنش سنج | موقعیت نسبت به مرکز درز جوش (سانتی‌متر) | تنش پسماند تجربی ^[۴] (مگاپاسکال) | تنش پسماند شبیه‌سازی ^[۴] (مگاپاسکال) | درصد خطا | تنش پسماند در تحقیق حاضر (مگاپاسکال) | درصد خطا |
|----------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|--------------------------------------|----------|
| ۱ | ۱ | ۴۰۰ | ۴۶۰ | ۱۵ | ۴۶۰ | ۱۵ |
| ۲ | ۲ | ۴۲۵ | ۳۷۳ | ۱۲ | ۴۲۰ | ۱ |
| ۳ | ۳ | ۳۷۵ | ۳۴۰ | ۹ | ۳۳۰ | ۱۲ |
| ۴ | ۴ | ۳۵۰ | ۳۱۰ | ۱۱ | ۲۷۰ | ۲۳ |
| ۵ | ۵ | ۲۸۰ | ۲۵۵ | ۹ | ۲۴۰ | ۱۴ |
| ۶ | ۶ | ۲۲۰ | ۲۲۰ | ۰ | ۱۹۰ | ۱۴ |

جدول ۸) مقایسه نتایج تنش پسماند عمودی در سطح داخلی لوله قبل از آزمون فشار مایع ایستا

| شماره کرنش سنج | موقعیت نسبت به مرکز درز جوش (سانتی‌متر) | تنش پسماند تجربی ^[۴] (مگاپاسکال) | تنش پسماند شبیه‌سازی ^[۴] (مگاپاسکال) | درصد خطا | تنش پسماند در تحقیق حاضر (مگاپاسکال) | درصد خطا |
|----------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|--------------------------------------|----------|
| ۱ | ۱ | -۴۰ | -۲۵ | ۳۸ | -۱۹ | ۵۲ |
| ۲ | ۲ | -۳۵ | -۳۸ | ۹ | -۴۰ | ۱۴ |
| ۳ | ۳ | -۴۱ | -۴۸ | ۱۷ | -۵۳ | ۲۹ |
| ۴ | ۴ | -۵۰ | -۵۵ | ۱۰ | -۵۸ | ۱۶ |
| ۵ | ۵ | -۵۰ | -۵۴ | ۸ | -۵۰ | ۰ |
| ۶ | ۶ | -۴۸ | -۵۰ | ۴ | -۴۱ | ۱۵ |

با عنایت به اینکه لوله تحلیل شده جدار نازک است، مقادیر تنش‌های پسماند پس از آزمون فشار مایع ایستا در جهت ضخامت محدود و قابل چشم‌پوشی است. از سوی دیگر با توجه به چند پاسه‌بودن جوشکاری و توزیع مجدد تنش برای هر پاس در اثر حرارت پاس بعدی که به‌عنوان عملیات حرارتی بعد از جوش عمل می‌کند، همین مقدار اندک نیز کاهش می‌یابد و مقادیر مماسی و عمودی نیز متعادل می‌شود. بنابراین مقادیر بیشینه تنش‌های پسماند جوش روی سطوح داخلی و خارجی لوله به‌صورت نامتقارن اتفاق می‌افتد. دلیل نامتقارن بودن تنش‌ها در راستای ضخامت، فاصله زمانی و ترتیب متفاوت مشعل‌های جوش است. توزیع تنش فون میزس در راستای ضخامت پس از جوشکاری و سردشدن مدل در نمودار ۷ نشان داده شده است. این تنش به تمام مولفه‌های تنش بستگی دارد و در مرکز درز جوش و امتداد میانی ضخامت اندازه‌گیری شده است. کمترین میزان تنش‌های پسماند در مرکز ضخامت است و در نواحی نزدیک سطوح داخلی و خارجی بیشتر می‌شود. آزمون فشار مایع ایستا، تنش بیشینه در مرکز ضخامت را از ۲۰۰ به ۷۶ مگاپاسکال کاهش می‌دهد (معادل ۶۲٪ کاهش). تنش کششی بیشینه از مقدار ۴۶۰ به ۱۸۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد (معادل ۶۰٪ کاهش).

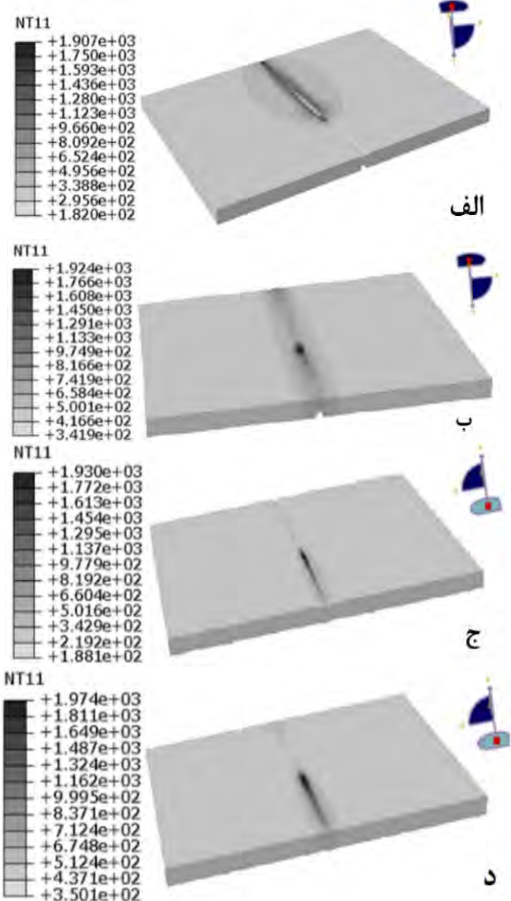
توزیع تنش در راستای ضخامت در نمودار ۸ نشان داده شده است. کمترین میزان تنش‌های پسماند در مرکز ضخامت است و پس از فاصله حدود ۸/۰ سانتی‌متر از این نقطه، اندکی کششی می‌شود. آزمون فشار مایع ایستا، تنش بیشینه در مرکز ضخامت را از مقدار ۱۸۰- به ۷۲- مگاپاسکال کاهش می‌دهد (معادل ۶۰٪ کاهش). تنش کششی بیشینه روی سطوح داخلی و خارجی اتفاق می‌افتد و از مقدار ۲۰ مگاپاسکال به ۸ مگاپاسکال کاهش می‌یابد (معادل ۶۰٪ کاهش).



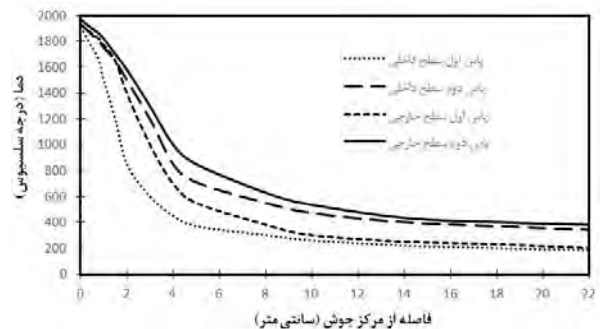
نمودار ۷) توزیع تنش فون میزس در راستای ضخامت و در مرکز درز جوش



نمودار ۸) توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت و در مرکز درز جوش (σ_z)



شکل ۷) توزیع دما در مدل ۸ ثانیه پس از جوشکاری هر پاس (الف): پاس اول سطح داخلی، ب: پاس دوم سطح داخلی، ج: پاس اول سطح خارجی، د: پاس دوم سطح خارجی



نمودار ۶) توزیع دما برای پاس‌های جوشکاری ۸ ثانیه پس از جوشکاری هر پاس

۹- تنش‌های پسماند در راستای ضخامت

روش کرنش‌سنجی سوراخ برای ارزیابی تنش‌های پسماند سطحی کاربرد دارد و تنش‌های عمقی با این روش قابل ارزیابی نیست. محدودیت دیگر روش کرنش‌سنجی سوراخ این است که قادر به ارزیابی تنش‌های پسماند در راستای ضخامت نیست. میزان تغییرات تنش‌های پسماند در راستای ضخامت در اعتبار روش کرنش‌سنجی سوراخ حائز اهمیت است [1]. تنش معادل فون میزس برای نمونه چهارگوش نشان داده شده در شکل ۷- ب، از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\sigma_e^2 = \sigma_T^2 + \sigma_N^2 - \sigma_{TN} + 3TNT^2 \quad (11)$$

جدول ۹ خلاصه وضعیت تنش‌های پسماند در راستای ضخامت نمونه را نشان می‌دهد. در این جدول موقعیت و مقدار تنش پسماند بیشینه و تنش پسماند در مرکز ضخامت مشاهده می‌شود. همچنین مقدار تنش‌های پسماند پس از پایان آزمون فشار مایع ایستا گزارش شده است.

جدول ۹) وضعیت تنش‌های پسماند در راستای ضخامت (بر حسب مگاپاسکال)

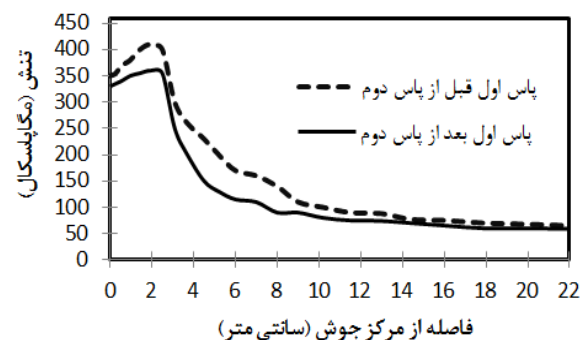
جوشکاری مشابه دارد. لذا به جای اندازه‌گیری تجربی تنش‌های پسماند روی لوله اصلی می‌توان از نمونه مستطیل‌شکل با حداقل ابعاد اشاره‌شده استفاده کرد. تنش پسماند عمودی بیشینه در مجاورت ناحیه متأثر از حرارت دیده می‌شود و در نقاط دور از این ناحیه، مقدار این تنش تقریباً صفر است. مقدار تنش پسماند مماسی کششی در مجاورت ناحیه جوش زیاد است و با دور شدن از این ناحیه مقدار آن کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه تنش تسلیم برای این فولاد در دمای محیط 481MPa و مقدار بیشینه تنش‌های پسماند پس از آزمون فشار مایع ایستا کمتر از 50% استاندارد روش کرنش‌سنجی سوراخ است؛ لذا آزمون کرنش‌سنجی سوراخ برای این لوله قابل انجام است. شدت تغییرات تنش‌های پسماند در راستای ضخامت در اعتبار روش کرنش‌سنجی سوراخ حائز اهمیت است. تنش‌های پسماند در جهت ضخامت برای اولین بار ارائه شده است و این اطمینان حاصل شد که بیشترین میزان تنش پسماند روی سطوح نمونه ایجاد می‌شود. آزمون فشار مایع ایستا، به میزان زیادی تنش‌های پسماند در جهت ضخامت را متعادل می‌نماید. کمترین میزان تنش پسماند در راستای ضخامت در مرکز ضخامت اتفاق می‌افتد و توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت در مرکز ضخامت فشاری است. نتایج زیر را می‌توان بر اساس دستاوردهای این پژوهش به‌دست آورد:

| تنش پسماند | مقدار تنش پسماند | فاصله از سطح خارجی (سانتی‌متر) | | مقدار تنش پسماند پس از آزمون فشار مایع ایستا |
|--------------------------|------------------|--------------------------------|---|----------------------------------------------|
| | | ۰ | ۳ | |
| تنش پسماند بیشینه | ۴۷۰ | ۰ | - | ۱۸۰ |
| تنش پسماند در مرکز ضخامت | ۱۹۰ | ۱ | ۱ | -۷۷ |

۱۰- تاثیر پاس پرکن بر پاس ریشه

با توجه به چند پاسه‌بودن جوشکاری، در اثر حرارت، پاس بعدی توزیع مجدد تنش ایجاد می‌شود و پاس پرکن به‌عنوان عملیات حرارتی برای پاس ریشه عمل می‌کند. این موضوع باعث کاهش مقادیر تنش پسماند در عمق قطعه می‌شود و در نتیجه حداکثر میزان تنش پسماند روی سطح پاس نهایی اتفاق می‌افتد. تنش پسماند مماس بر راستای جوش برای پاس اول قبل و بعد از جوشکاری پاس دوم در سطح داخلی مدل، نشان می‌دهد که تنش پسماند بیشینه در فاصله حدود $3/3$ سانتی‌متر از درز جوش از مقدار 405 به 350 مگاپاسکال (14%) کاهش پیدا کرده است (نمودار ۹). بیشترین میزان کاهش در تنش پسماند در فاصله $8/8$ سانتی‌متر از درز جوش از 150 به 100 مگاپاسکال رسیده است (معادل 34% کاهش).

- جوشکاری پاس پرکن اثر عملیات حرارتی برای پاس ریشه دارد.
- مقایسه کمی تنش‌های پسماند روی سطح داخلی و خارجی با نتایج مرجع [4] دلالت بر دقت مطلوب برنامه دارد.
- در مجاورت ناحیه جوش، تنش پسماند مماسی مقدار کششی بسیار بزرگی دارد و با دور شدن از ناحیه جوش این مقدار کاهش می‌یابد، دلیل این اتفاق را مطابق نتایج حل حرارتی باید در وجود گرادیان بالای دما در نزدیکی ناحیه جوش دانست.
- نزدیک ناحیه جوش، در تنش پسماند عمودی مقدار فشار بسیار بزرگی حاصل می‌شود و با دور شدن از ناحیه جوش این تنش روند افزایشی دارد.
- تنش پسماند عمودی در نواحی دور از جوش همچنان فشاری باقی می‌ماند.
- با دور شدن از ناحیه جوش، تنش پسماند مماسی و عمودی تقریباً ثابت می‌شود.
- بیشترین مقدار تنش پسماند مماسی در مدل، 8% کمتر از مقدار مشابه در نتایج آزمایشگاهی است.
- تنش پسماند عمودی در مدل با چشم‌پوشی از ناحیه نزدیک جوش روند نتایج آزمایشگاهی را طی می‌کند. احتمال می‌رود این اختلاف در ناحیه نزدیک جوش به علت نبود دقت لازم در نتایج آزمایشگاهی مرجع [4] و خطا در نصب باشد.
- با توجه به اینکه سطح تنش‌های پسماند قبل از آزمون فشار مایع ایستا بیشتر از نصف تنش تسلیم ماده است، روش کرنش‌سنجی سوراخ دارای خطای قابل توجهی است و این موضوع اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی را توجیه می‌کند.



نمودار ۹) تنش پسماند مماس بر راستای جوش در پاس اول سطح داخلی قبل و بعد از جوشکاری پاس دوم

۱۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مدل‌سازی جوشکاری زیر پودری با استفاده از نمونه چهارگوش با ابعاد بهینه 32×44 سانتی‌متر انجام شد. نتایج تحلیل حاضر همخوانی مناسبی با نتایج تجربی مرجع [4] برای فولاد و شرایط

- determination of residual stresses due to welding of plates. Journal of Modeling in Engineering. 2012;9(27):49-59. [Persian]
- 3- Sattari-Far I, Farahani MR. Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2009;86(11):723-731.
- 4- Forouzan MR, Mirfalah Nasiri SM, Mokhtari A, Heidari A, Golestaneh SJ. Residual stress prediction in submerged arc welded spiral pipes. Materials & Design. 2012;33:384-394.
- 5- Nakhodchi S, Shokuhfar A, Akbari Iraj S, Rezazadeh H. Numerical and Experimental study of temperature and residual stress in multi-pass welding of two stainless steel plates having different. Modares Mechanical Engineering. 2014;14(9):81-89. [Persian].
- 6- Sabokrouh M, Hashemi SH, Farahani MR. Experimental determination of residual stresses in multi-pass girth welding of thermo-mechanical steel pipe. Journal of Applied and computational Sciences in Mechanics. 2013;25(2 Suppl 10):111-120. [Persian]
- 7- Charkhi M, Akbari D. Application of pre-heating in the reduction of residual stress in the repair welds of steel pipes. Modares Mechanical Engineering. 2018;17(2):1-10. [Persian]
- 8- Qiang B, Yadong L, Yao C, Wang X. Through-thickness welding residual stress and its effect on stress intensity factor for semi-elliptical surface cracks in butt-welded steel plate. Engineering Fracture Mechanics. 2018;193:17-31.
- 9- Hashemi SH, Mohammadyani D. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2012;98:8-15.
- 10- Withers PJ, Bhadeshia HKDH. Residual stress, part 1 – measurement techniques. Materials Science and Technology. 2001;17(4):355-365.
- 11- Breakthrough Strategy Committee. New joining technology for metal pipe in the construction industry. Unknown City: Breakthrough Strategy Committee; 2003.
- 12- Nezamdost MR, Nekouie Esfahani MR, Hashemi SH, Mirbozorgi SA. Investigation of temperature and residual stresses field of submerged arc welding by finite element method and experiments. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;87(1-4):615-624.
- 13- Huang X, Liu Z, Xie H. Recent Progress in residual stress measurement techniques. Acta Mechanica Sinica. 2013;26(6):570-583.
- 14- ASTM International. ASTM E837-13a, standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method. Volume 03.01. West Conshohocken: ASTM International; 2013.
- 15- Sedighi M, Nezamzad R. Effect of peak positioning method on accuracy of X-Ray diffraction residual stress measurement. Experimental Techniques. 2016;40(1):295-302.
- 16- Masoumi M, Herculano LFG, Abreu HFGd. Study of texture and microstructure evaluation of steel API 5L X70 under various thermomechanical cycles. Materials Science & Engineering: A. 2015;639:550-558.
- 17- American Water Work Association. C200-75: AWWA standard for steel water pipe 6 inches and larger. Denver: AWWA; 1975.
- 18- Iranian Petroleum Standard. Material and equipment standard for line pipe, IPS-M-PI-190. 2nd Edition. Tehran: Iranian Petroleum Standards; 2004.

۱۰- پس از فرآیند فشار مایع ایستا، تنش پسماند مماسی کاهش می‌یابد، به طوری که مقدار بیشینه این تنش روی سطح خارجی (۶۰٪) و سطح داخلی (۵۷٪) کمتر شده است.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: محمدرضا رجبی رضآبادی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪); سیدحجت هاشمی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۵۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

فهرست علائم

| | |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>a.b.c</i> | مقاطع منبع حرارتی جوشکاری |
| <i>C</i> | ثابت مدل گلداک |
| <i>D</i> | قطر (سانتی‌متر) |
| <i>ff</i> | متغیر حرارتی در جلوی مدل گلداک |
| <i>fr</i> | متغیر حرارتی در عقب مدل گلداک |
| <i>h</i> | ضریب جابجایی ($Wm^{-2}C^{-1}$) |
| <i>hc</i> | ضریب انتقال حرارت جابجایی ($Wm^{-2}C^{-1}$) |
| <i>hr</i> | ضریب انتقال حرارت تشعشع ($Wm^{-2}C^{-1}$) |
| <i>I</i> | شدت جریان الکتریکی (A) |
| <i>k</i> | نسبت تنش محیطی ناشی از آزمون فشار مایع ایستا به حداقل تنش تسلیم ماده، ضریب هدایت گرمایی |
| <i>P</i> | فشار آزمون فشار مایع ایستا (MPa) |
| <i>Q</i> | شار حرارت ورودی (Wm^{-2}) |
| <i>t</i> | ضخامت (سانتی‌متر) |
| <i>v</i> | ولتاژ قوس (V)، ضریب لزجت سینماتیکی، سرعت جوشکاری |

علائم یونانی

| | |
|------------|------------------------------------------|
| α | زاویه نسبت به راستای اعمال بار |
| φ | زاویه مارپیچ (درجه) |
| θ | دما (درجه سانتی‌گراد)، زاویه اصلی (درجه) |
| σ | تنش پسماند (MPa) |
| σ_e | تنش معادل فون‌میزس |
| $l\sigma$ | تنش طولی |
| $H\sigma$ | تنش محیطی |
| $N\sigma$ | تنش عمود بر درز جوش |
| $T\sigma$ | تنش مماس بر درز جوش |
| τ | تنش برشی وارد بر نمونه |
| η | ضریب راندمان قوس الکتریکی |

زیرنویس‌ها

| | |
|----|-------------------|
| eq | معادل |
| G | مرکز دستگاه متحرک |
| O | خارجی |

منابع

- 1- Schajer GS. Residual stresses: Measurement by destructive testing. International Journal of Materials Science and Engineering. 2016;2(1):1-10.
- 2- Majzoubi GH, Seifi R, Ali-akbar S. Experimental and numerical study of temperature distribution and