



Simulation of the Residual Stresses Distribution in Girth Weld of Gas Transmission Pipeline

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sabokrouh M.¹ PhD,
Farahani M.R.*² PhD

How to cite this article

Sabokrouh M, Farahani M.R. Simulation of the Residual Stresses Distribution in Girth Weld of Gas Transmission Pipeline. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(1): 223-228.

¹Engineering Faculty, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran

²Mechanical Engineering School, Engineering college, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering School, North Kargar Avenue, Tehran, Iran. Postal Code: 1439957131
Phone: +98 (21) 61119956
Fax: +98 (21) 88013029
mrfarahani@ut.ac.ir

Article History

Received: May 21, 2018

Accepted: October 23, 2018

ePublished: January 01, 2019

ABSTRACT

The weld residual stresses decrease the design stress in gas transportation pipelines. In this paper, two X70 steel pipes of 56 inch outside diameter were firstly girth welded. Experimental hole drilling test was conducted to evaluate the residual stress distribution in this joint. Then, the finite element simulation of the welding process was performed to evaluate the residual stress distribution precisely. The numerical results were verified by comparison with the obtained experimental measurements. The qualitative results achieved match properly with the experimental results. Simulation results (with a difference about 15% compared to experimental results) evaluated the maximum residual stress in hoop direction of pipe's external weld metal. The experimental data showed that the maximum tensile residual stress was located on the center line of the weld gap on the pipe outer surface alongside with the pipe hoop direction. Moreover, the maximum compressive (hoop and axial) residual stresses occurred on the pipe inner surface in heat affected zone. The variations of the hoop residual stresses on the inner and outer surfaces of the pipe had similar trend with tensile distribution at the center line of the weld gap. However, these stresses showed different trends (tensile stress on the outer surface, and compressive stress on the inner surface) with distancing from the weld center line.

Keywords Simulation; Residual Stress; Multi Pass Girth Weld; Hole Drilling; Gas Pipeline

CITATION LINKS

[1] Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel [2] On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70 [3] Residual stresses in welded structures [4] Validated residual stress profiles for fracture assessments of stainless steel pipe girth welds [5] A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes [6] Experimental study of the weld microstructure properties in assembling of natural gas transmission pipelines [7] Residual stress distribution depending on welding sequence in multi-pass welded joints with X-shaped groove [8] Finite element modelling of a submerged arc welding process [9] Finite element simulation of multipass welding: Full three-dimensional versus generalized plane strain or axisymmetric models [10] Finite Element Predictions of Temperature Distributions in a Multipass Welded Piping Branch Junction [11] Numerical Analysis of Welding Residual Stress and Its Verification Using Neutron Diffraction Measurement [12] Numerical weld modeling - a method for calculating weld-induced residual stresses [13] Effects of the weld groove shape and geometry on residual stresses in dissimilar butt-welded pipes [14] A new finite element model for welding heat sources [15] Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method [16] Measurement of residual stresses by the hole-drilling* strain gage method [17] Numerical and experimental investigation on the effects of submerged arc welding sequence on the residual distortion of the fillet welded plates

شبیه‌سازی توزیع تنش‌های پسماند در جوش سربه‌سر خطوط انتقال گاز طبیعی

مجید سبک‌روح PhD

دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات، ایران

محمدرضا فراهانی * PhD

گروه مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

وجود تنش‌های پسماند باعث کاهش مقدار تنش طراحی مجاز در خطوط انتقال گاز می‌شود. در این مقاله ابتدا دو قطعه لوله فولادی X70 با قطر ۵۶ اینچ به روش دستی جوشکاری شد. سپس آزمون تجربی کرنش‌سنجی سوراخ برای ارزیابی توزیع تنش‌های پسماند در این اتصال انجام شد. در ادامه، شبیه‌سازی المان محدود فرآیند جوشکاری برای ارزیابی دقیق توزیع تنش‌های پسماند در این اتصال انجام شد که نتایج آن با مقایسه با نتایج تجربی صحت‌گذاری شد. نتایج کیفی به‌دست‌آمده به میزان مناسبی با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. نتایج شبیه‌سازی (با اختلاف ۱۵٪ نسبت به نتایج تجربی) حداکثر تنش پسماند را در راستای محیطی درز جوش خارجی لوله ارزیابی نمود. نتایج تجربی نشان داد که حداکثر تنش پسماند کششی در مرکز ناحیه جوش و در راستای محیطی سطح خارجی لوله به وجود آمده است. همچنین حداکثر تنش پسماند فشاری در راستاهای محیطی و محوری سطح داخلی لوله در منطقه متأثر از حرارت جوش قرار دارد. تغییرات تنش‌های پسماند محیطی در سطوح داخل و خارج لوله رفتارهای مشابه داشته و این تنش‌ها در مرکز ناحیه جوش به‌صورت کششی است. اما با فاصله‌گرفتن از مرکز ناحیه جوش رفتاری متضاد (در سطح خارج لوله به‌صورت کششی و در سطح داخل آن به‌صورت فشاری) مشاهده شد.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی، تنش‌های پسماند، جوش سربه‌سر لوله، کرنش‌سنجی سوراخ، لوله انتقال گاز

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۳۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۱

*نویسنده مسئول: mrfarahani@ut.ac.ir

۱- مقدمه

روش اصلی و بدون جایگزین در اتصال لوله‌ها به هم و ایجاد یک خط لوله فولادی، جوشکاری محیطی است که به‌صورت خودکار یا دستی انجام می‌شود^[1]. تنش‌های پسماند به آن دسته از تنش‌ها اطلاق می‌شود که پس از انجام عملیات خاصی در جسم باقی بمانند و ناشی از بارگذاری خارجی نباشند. تنش‌های پسماند در حالت خودتعدالی بوده و برآیند نیروها و زوج نیروهای حاصل از این تنش‌ها صفر است^[2]. به‌علت اثرات قابل توجه تنش‌های پسماند بر کارایی سازه، باید این تنش‌ها در انجام تحلیل‌های ایمنی مد نظر قرار گیرند. در اتصالات استوانه‌ای، جهات طولی، عرضی و ارتفاع با جهات محیطی، محوری و شعاعی نشان داده می‌شوند. انقباض محیطی در این نوع جوشکاری باعث ایجاد خمش محوری در استوانه و تغییر شکل زاویه‌ای در عرض جوش باعث ایجاد تنش‌های محوری می‌شود^[3]. این مساله تاثیر فراوانی بر توزیع تنش‌های پسماند در این نوع از جوشکاری دارد. بررسی رفتار حین سرویس خطوط لوله انتقال گاز در حوزه تنش‌های بزرگ پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری، مستلزم شناسایی توزیع این تنش‌ها است^[4]. کرنش‌سنجی سوراخ به‌عنوان یک روش نیمه‌مخرب با گستره کاربرد حدود ۲۲٪، مرسوم‌ترین روش اندازه‌گیری تنش پسماند است و برای تعیین تنش پسماند در نزدیک سطح جسم به کار می‌رود. این روش شامل نصب کرنش‌سنج، ایجاد یک سوراخ در نزدیکی کرنش‌سنج‌ها و اندازه‌گیری کرنش‌های آزاد شده است^[5].

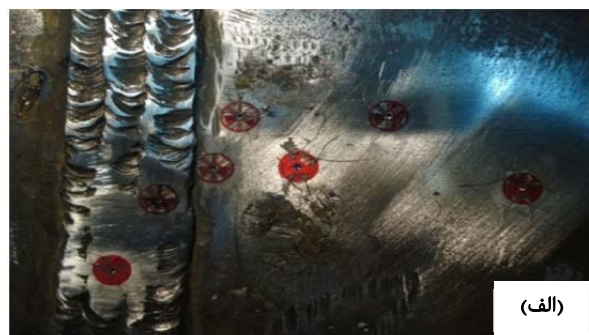
با توجه به نیمه‌مخرب بودن روش کرنش‌سنجی سوراخ و بسیاری از

آزمون‌های مورد استفاده برای ارزیابی تنش‌های پسماند و محدودیت‌های روش‌های غیرمخرب، نیاز به شبیه‌سازی برای تخمین مقادیر این تنش‌ها در زمان بهره‌برداری به‌شدت احساس می‌شود. به‌دلیل اهمیت بالای پیش‌بینی توزیع تنش‌های پسماند جوشی، مطالعات متنوعی در این زمینه انجام شده است^[6]. موجیزوکی و همکاران از روش تحلیل کرنش پایه‌ای برای تخمین تنش‌های پسماند در لوله فولاد کربنی استفاده و نتایج تحلیل را با نتایج اندازه‌گیری عملی با پراش پرتوی ایکس مقایسه کردند. نتایج تحلیل آنها همخوانی خوبی با نتایج تجربی پژوهش دیگری^[7] داشت. ون و همکاران از تحلیل دو بُعدی برای مدل‌سازی جوشکاری در لوله‌ای با ضخامت ۱۹ میلی‌متر استفاده کرده‌اند^[8]. جیانگ و همکاران مدل کامل سه‌بُعدی را برای تعیین میدان حرارتی در جوش اتصال لوله‌ها بررسی کردند، اما در تحقیق آنها تنش‌های پسماند محاسبه نشده است^[9]. همچنین جیانگ و همکاران به بررسی کامل چگونگی توزیع دما در یک اتصال چندپاسه بین لوله‌های جدار ضخیم پرداختند^[10]. در مدل‌سازی آنها از روش جدیدی برای مش‌بندی منطقه پیچیده اتصال دو لوله به هم استفاده شد. چندین متغیر مرتبط با جوش همچون خواص مواد وابسته به دما، اتلاف حرارتی به‌صورت همرفت و نیز اثر گرمای نهان ذوب در این مدل‌سازی لحاظ شده است. موجیزوکی و همکاران تنش‌های پسماند را در اتصال سربه‌سر لوله‌ها بررسی کردند^[11]. آنها دریافتند که روش تحلیل ترموالاستو-پلاستیک، تنش‌ها را اندکی بالاتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. فریک و همکاران تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری سربه‌سر لوله‌هایی از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی را با استفاده از روش المان محدود به دست آوردند^[12]. در این کار تحلیل غیرمستقیم ترمومکانیکال با فرض رفتار الاستو-پلاستیک برای محاسبه تنش‌های پسماند به کار گرفته شد. آنها به این نتیجه رسیدند که تنها پاس‌های لایه آخر جوشکاری تعیین‌کننده میزان و چگونگی توزیع تنش‌های پسماند جوشی هستند. اکبری و همکاران در سال ۲۰۱۲ اثر طرح اتصال و تعداد پاس‌ها را بر جوش سربه‌سر اتصال غیرهمجنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی-کربنی بررسی کردند^[13]. طبق یافته‌ها، تاثیر تغییر طرح اتصال بر تنش‌های پسماند محوری در لوله فولاد کربنی بیشتر از لوله فولاد زنگ‌نزن آستنیتی است. فرآیند جوشکاری باعث افزایش دمای ناحیه جوش و مناطق اطراف آن می‌شود و با عبور منبع حرارتی از آن محل، دما سریعاً کاهش می‌یابد. گرمایش موضعی و به‌دنبال آن سرد شدن باعث تغییرات حجمی می‌شود که خود، منبع ایجاد تنش‌ها و تغییر شکل‌های پسماند جوشی است. این گرم شدن غیریکنواخت باعث می‌شود تا هر جزء ماده متناسب با تغییرات دمایی اعمال شده بر آن منبسط شود، لذا تنش‌هایی در قطعه ایجاد می‌شود. برابری تنش‌های پسماند کششی با مقدار استحکام تسلیم، به برقراری همزمان قید مقابل انقباض حرارتی آزاد و بزرگ‌تری کرنش انقباض حرارتی از کرنش تسلیم ماده بستگی دارد. شرط اول تابعی از هندسه و سفتی و شرط دوم تابعی از خواص مواد است. اولین مرحله در حل یک مساله جوشکاری، مدل‌سازی و تحلیل حرارتی فرآیند است. در این مرحله با تعریف شرایط حرارتی با استفاده از روابط بنیادی انتقال حرارت گذرا، دمای گره‌های مدل محاسبه می‌شود. در تحلیل مکانیکی، تاریخچه دمایی به‌دست‌آمده از تحلیل حرارتی، به‌عنوان بارگذاری حرارتی به معادلات تحلیل مکانیکی وارد می‌شود. تنش و کرنش حرارتی در هر مرحله زمانی محاسبه می‌شود و حالت نهایی تنش پسماند با انباشته شدن تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی ایجاد

استفاده شده است. برای انجام کلیه این تحلیل‌ها از نرم‌افزار المان محدود (ANSYS) استفاده شده است (الگوریتم نیوتن-رافسون). همچنین فرض شده است که حین جوشکاری خزش اتفاق نمی‌افتد، زیرا مواد تنها برای مدت‌زمان اندکی تحت دمای بالا قرار دارند.



شکل (۱) جوشکاری سربه‌سر لوله



(الف)



(ب)

شکل (۲) آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ؛ (الف) سطح خارجی (ب) سطح داخلی

جدول (۱) تنش پسماند در سطح خارجی لوله

تنش پسماند محوری (N/mm ²)	تنش پسماند محیطی (N/mm ²)	فاصله از مرکز خط جوش (mm)
-۶۸	۳۱۸	۰
-۴	۲۱۷	۸
۹۶	-۲۴	۱۹
۱۱۸	-۱۳	۲۵
۱۳۷	۶۷	۳۷
۱۲۹	۹۵	۵۸
۱۰۷	۸۲	۹۰

جدول (۲) نتایج نقاط ارزیابی تنش پسماند در سطح داخلی لوله

تنش پسماند محوری (N/mm ²)	تنش پسماند محیطی (N/mm ²)	فاصله از مرکز خط جوش (mm)
-۸۱	۱۹۱	۰
-۱۳۵	-۱۳۹	۲۴
-۱۲۲	-۱۱۷	۵۷

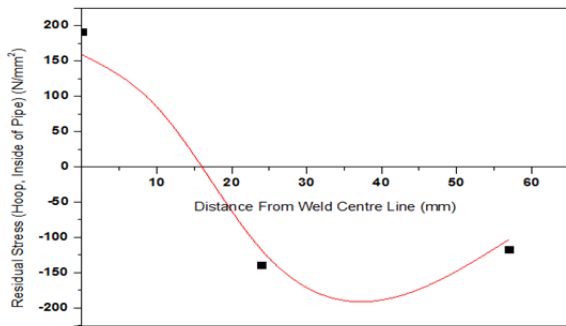
می‌شود. با توجه به بالابودن شیب حرارتی در نواحی نزدیک به خط مرکزی باید از درجه‌مش‌بندی ریزتر استفاده شود. در مدل‌سازی، ورود حرارت به قطعه کار را می‌توان به‌صورت ترکیبی از شار حرارتی سطحی و تولید حرارت حجمی در نظر گرفت. یک مدل ریاضی برای اعمال فلاکس حرارتی سطحی- حجمی روی قطعه کار، مدل دوبیضی گلداک است [14]. این مدل متشکل از دو ربع بیضی جداگانه است که اولی در جلو و دومی در دنباله حرارت قرار گرفته است. مدل‌سازی نحوه اضافه‌کردن فیلر مساله بسیار پیچیده‌ای در مدل‌کردن فرآیند جوشکاری است. در مدل‌سازی جوش می‌توان از روش تولد و مرگ المان‌ها استفاده کرد. در این روش 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. المان‌ها پس از رسیدن منبع حرارتی زنده می‌شوند. در مرحله تحلیل مکانیکی نیز المان‌ها هم‌زمان با عبور منبع حرارتی زنده می‌شوند.

این مطالعه برای اولین بار روی خطوط قطر ۵۶ اینچ خطوط انتقال گاز طبیعی ایران انجام شد. با توجه به نیمه‌مخرب‌بودن آزمون کرنش‌سنجی سوراخ، امکان استفاده از آن در خطوط عملیاتی انتقال گاز میسر نیست، بنابراین به‌دست‌آوردن یک مدل شبیه‌سازی مناسب که بتواند این تنش‌ها را در منطقه جوش و متأثر از حرارت با دقت قابل قبولی ارزیابی نماید، می‌تواند در افزایش زمان و کیفیت سرویس‌دهی موثر باشد. بنابراین جوشکاری روی نمونه آزمایشگاهی (کاملاً مشابه با خطوط عملیاتی خطوط انتقال گاز طبیعی ایران) براساس دستورالعمل جوشکاری شرکت ملی گاز انجام شد و توسط آزمون نیمه‌مخرب کرنش‌سنجی سوراخ براساس استاندارد مربوطه آزمون کرنش‌سنجی سوراخ انجام گرفت.

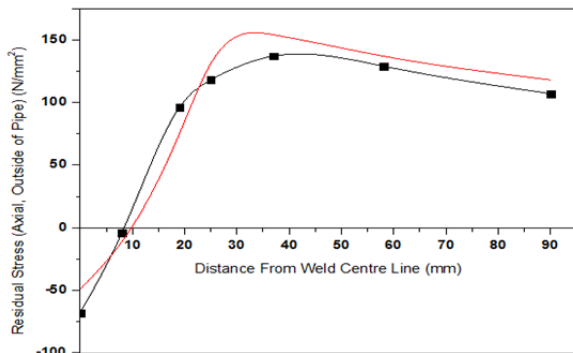
۲- جوشکاری و آزمون تجربی

جوشکاری روی دو قطعه ۵۰ سانتی‌متری لوله فولادی مارپیچ X70 با قطر ۵۶ و ضخامت ۰/۷۸۰ اینچ براساس استاندارد در ۹ پاس شامل پاس ریشه، گرم، پرکن و سطح و به‌ترتیب با سه قطر الکتروود ۳/۲، ۴ و ۵ از ریشه تا سطح، توسط جوشکاری قوسی الکتروود دستی پوشش‌دار صورت گرفت. شکل ۱ جوش سربه‌سر محیطی را نشان می‌دهد. آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ براساس استاندارد و دستورالعمل مشخص انجام شد [15, 16]. آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ در منطقه متأثر از حرارت و فولاد پایه روی سطح خارجی لوله به‌ترتیب در فواصل ۴، ۱۰، ۲۲، ۴۳ و ۷۵ میلی‌متر از لبه جوش انجام شد. سپس آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ روی سطح داخلی لوله به‌ترتیب در فواصل ۲۲ و ۵۵ میلی‌متر از لبه جوش و نقطه آخر روی پاس جوش انجام شد. شکل ۲ آزمون کرنش‌سنجی سوراخ در سطوح خارجی و داخلی را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

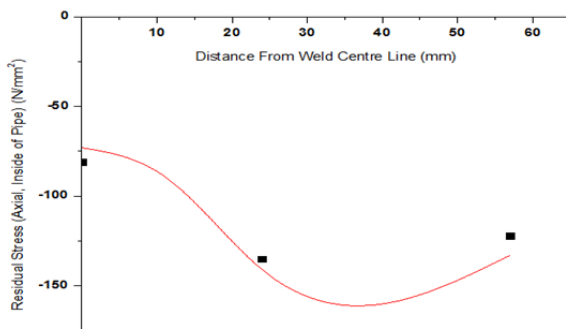
در مدل‌سازی‌های انجام‌شده به‌منظور تخمین تنش‌های پسماند از تحلیل ترموالاستیک- پلاستیک به روش غیرمستقیم استفاده شده است. این روش شامل یک تحلیل حرارتی و به‌دنبال آن یک تحلیل مکانیکی است. در بخش تحلیل حرارتی، ورودی‌های اصلی معادلات حاکم به سیستم و شرایط مرزی و خروجی آن تاریخچه دمایی گره‌های مدل المان محدود است که به‌عنوان یکی از ورودی‌های تحلیل مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. در بخش تحلیل مکانیکی نیز پس از حل معادلات المان محدود حاصل، مقادیر تنش و جابه‌جایی گره‌ها محاسبه شد. برای مدل‌سازی از خواص حرارتی و مکانیکی فولاد X70 (به‌صورت تابعی از دما)



نمودار ۲) توزیع تنش‌های محیطی در سطح داخلی



نمودار ۳) توزیع تنش‌های محوری در سطح خارجی

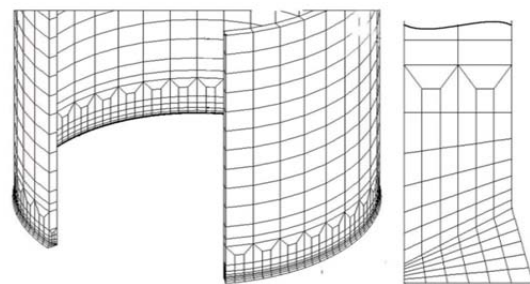


نمودار ۴) توزیع تنش‌های محوری در سطح داخلی

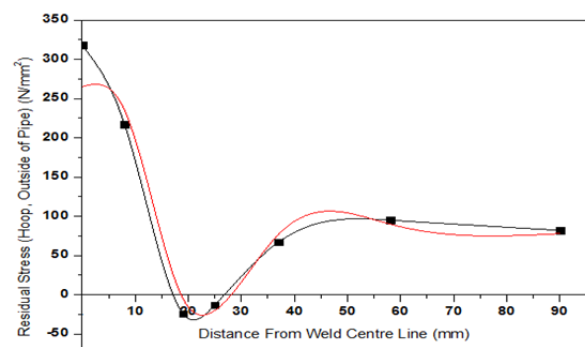
۳- بحث و بررسی

طبق نتایج، مقدار قابل توجهی از تنش‌های پسماند کششی محیطی (در راستای موازی جوش) روی سطح خارجی لوله ایجاد شده است. این تنش در مرکز ناحیه جوش (پاس وسط) برابر با ۳۱۸ مگاپاسکال از نوع کششی بوده که بیش از ۶۰٪ استحکام تسلیم ناحیه جوش (۵۰۵ مگاپاسکال) است. در سطح داخلی، تنش پسماند کششی منطقه جوش برابر با ۱۹۱ مگاپاسکال است و حدود ۴۰٪ کاهش نسبت به نقطه متناظر سطح خارجی لوله را نشان می‌دهد. در نمودار ۱، توزیع تنش‌های محیطی در سطح خارجی لوله نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این نمودار از لحاظ کیفی با نمودار اسپلین عبوری از داده‌های تجربی همخوانی قابل قبولی دارد. این نمودار در ناحیه جوش، تنش‌های پسماند را کششی ارزیابی می‌نماید. علاوه بر این تنش‌های پسماند در منطقه متاثر از حرارت از حالت کششی به فشاری تبدیل می‌شود (از نظر کمی مکان تغییر حالت نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی کمتر از ۴ میلی‌متر تفاوت دارد) و سپس دوباره به حالت کششی تغییر می‌یابد. این نواحی بسیار نزدیک به منحنی اسپلین گذرنده از نقاط آزمون کرنش‌سنجی سوراخ است. از نظر کمی نیز نتایج

برای انجام مش‌بندی صحیح، تحلیل حساسیت مش، انجام و برای شبیه‌سازی ورود مذاب و اضافه‌شدن فیلر به مجموعه از روش تولد و مرگ المان‌ها استفاده شده است. برای مدل‌سازی از مدل سه‌بعدی حرارتی و دو‌بعدی مکانیکی استفاده شده است. مدل المان محدود آن در شکل ۳ قابل مشاهده است. در تحلیل حرارتی از Solid 70 المان ۳۲۸۰۰ با ۵۰۴۰۰ گره و در تحلیل مکانیکی از المان ۴۰۸ plane 42 با ۴۹۶ گره استفاده شده است. با توجه به قطر زیاد لوله و بالابودن زمان تحلیل مکانیکی (درجه غیرخطی بالاتر) و با در نظر گرفتن این که آزمون کرنش‌سنجی سوراخ در یک برش خاص از لوله انجام گرفته است، از مدل دو‌بعدی برای تحلیل مکانیکی استفاده شد. به منظور انجام تحلیل حرارتی از مدل سه‌بعدی استفاده شد. تحلیل مکانیکی مدل نیز با در نظر گرفتن یک مقطع طولی از لوله و با استفاده از فرض تقارن محوری به صورت دو‌بعدی و با استفاده از تحلیل غیرکویل انجام شده است. در این شبیه‌سازی، متغیرهای جوشکاری در ۹ پاس مطابق با شرایط واقعی آزمون تجربی و راندمان حرارتی ۷۰٪ لحاظ شده است. به منظور در نظر گرفتن اثر اغتشاش مذاب در تحلیل حرارتی، ضریب انتقال حرارت ماده در دمای بالا (۲ برابر نقطه ذوب) در نظر گرفته شده است. برای مدل‌کردن عبور الکتروود از یک مقطع خاص، شار حرارتی با توزیع چهار خطی مطابق با مدل گلداک اعمال شد. گرمای نهان ناشی از تغییر فاز حالت مایع با استفاده از مفهوم آنتالپی لحاظ شد [17]. اتلاف حرارتی همرفت نیز به صورت ثابت در کلیه سطوح آزاد نمونه در نظر گرفته و دمای محیط ۱۸°C فرض شد. در نمودارهای ۱-۴ با استفاده از المان محدود، توزیع تنش‌های محیطی و محوری به ترتیب در نواحی مختلف جوش، منطقه متاثر از حرارت و فولاد پایه سطوح داخلی و خارجی لوله نشان داده شده است. به منظور ارزیابی نتایج حاصل از تحلیل المان محدود، مقادیر محاسبه‌شده با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری تجربی (با استفاده از آزمون کرنش‌سنج سوراخ) مقایسه شده‌اند. در این نمودارها نتایج تنش پسماند تجربی با استفاده از منحنی اسپلین مرتبط و حداکثر اختلاف بین نتایج تجربی و عددی، حدود ۲۱٪ مشاهده شده است.



شکل ۳) مدل المان محدود لوله



نمودار ۱) توزیع تنش‌های محیطی در سطح خارجی

درصد کاهش قدر مطلق تنش پسماند محوری از تنش پسماند محیطی ارزیابی شده به‌وسیله شبه‌سازی نسبت به نتایج حاصل از آزمون تجربی کرنش‌سنجی سوراخ، در مرکز درز جوش سطح خارجی لوله بیشتر است. اما با توجه به این که قدر مطلق مقادیر تنش پسماند محوری در سطح خارجی لوله زیر ۱۰۰ مگاپاسکال است، اهمیت این افزایش تفاوت نسبت به تنش پسماند محیطی زیاد قابل توجه نیست. نمودار شبه‌سازی همانند آزمون تجربی، حداکثر تنش پسماند را در ناحیه جوش ارزیابی می‌نماید، اما بر خلاف نتایج تجربی، شیب تغییر تنش‌های پسماند محوری در ناحیه جوش ملایم‌تر است. شایان ذکر است که با افزایش فاصله از خط جوش، نتایج شبه‌سازی و تجربی روندی همگرا پیدا می‌نمایند. در نمودار ۴، توزیع تنش‌های محوری در سطح داخلی لوله نشان داده شده است. با توجه به محدود بودن تعداد نقاط آزمون تجربی (همانند تنش پسماند محیطی)، تنها می‌توان در نقاط مشخصی نتایج شبه‌سازی را مورد بررسی قرار داد. از نظر کیفی در نواحی جوش منطقه متاثر از حرارت و فولاد پایه، نتایج حاصل از شبه‌سازی همانند نتایج آزمون تجربی فشاری است. از نظر کمی نیز نتایج حاصل قابل توجه است. در نقطه آزمون‌های صفر، ۲۴ و ۵۷ میلی‌متر از مرکز درز جوش، نتایج تنش‌های پسماند حاصل از شبه‌سازی به‌ترتیب برابر با ۶۳-، ۱۵۶- و ۱۴۷- مگاپاسکال است. اختلاف این مقادیر با نتایج حاصل از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ به‌ترتیب ۱۸، ۲۱- و ۲۵- مگاپاسکال است. در مرکز درز جوش، قدر مطلق تنش پسماند حاصل از شبه‌سازی، ۲۲٪ از تنش پسماند حاصل از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ کمتر است. بنابراین اختلاف درصد تنش پسماند محوری ارزیابی شده به‌وسیله شبه‌سازی و آزمون تجربی در مرکز درز جوش پاس‌های سطح و ریشه تقریباً مشابه است. کم‌تر بودن نتایج به‌دست‌آمده از شبه‌سازی نسبت به نتایج آزمون تجربی، اهمیت استفاده از آزمون‌های تجربی را تایید می‌نماید.

۴- نتیجه‌گیری

به نظر می‌رسد علی‌رغم وجود متغیرهای زیاد تاثیرگذار بر فرآیند جوشکاری، شبه‌سازی برای تخمین توزیع این تنش‌ها می‌تواند موثر باشد. روند کیفی متناسب نتایج شبه‌سازی و تجربی، موید استفاده از این روش به‌منظور تخمین مقدار و روند توزیع تنش‌های پسماند است. این نتایج را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱- قدر مطلق کلیه تنش‌های پسماند محیطی و محوری ارزیابی شده به‌وسیله شبه‌سازی کمتر از نتایج حاصل از نتایج تجربی است. بنابراین استفاده از آزمون‌های تجربی برای به‌دست‌آوردن نتایج کمی دقیق‌تر اجتناب‌ناپذیر است.

۲- از لحاظ کیفی، نمودار توزیع تنش‌های پسماند محیطی و محوری در سطح خارجی لوله با نمودار اسپلین عبوری از داده‌های تنش‌های پسماند حاصل از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ همخوانی قابل قبولی دارد.

۳- از لحاظ کیفی، نمودار توزیع تنش‌های محیطی و محوری سطح داخلی لوله همانند نتایج آزمون تجربی است.

۴- مشابه با آزمون تجربی، حداکثر تنش‌های پسماند به‌دست‌آمده از شبه‌سازی در درز جوش و راستای محیطی سطح خارجی لوله بوده و مقدار آن ۱۵٪ کمتر از نتایج تجربی است.

۵- تنش‌های پسماند محیطی با فاصله‌گرفتن از مرکز ناحیه جوش، رفتاری متضاد (در سطح خارج لوله به‌صورت کششی و در سطح داخل آن به‌صورت فشاری) دارد.

به‌دست‌آمده قابل توجه است. در نقطه آزمون‌های صفر، ۸، ۱۹، ۲۵، ۳۷، ۵۸ و ۹۰ میلی‌متر از مرکز درز جوش، نتایج تنش‌های پسماند حاصل از شبه‌سازی به‌ترتیب برابر با ۲۲۷، ۲۲۵، ۶، ۳۹-، ۸۷، ۱۳۴ و ۷۸ مگاپاسکال است. اختلاف این مقادیر با نتایج حاصل از آزمون تجربی کرنش‌سنجی سوراخ به‌ترتیب برابر با ۹۱-، ۳۸، ۳۰، ۲۶-، ۲۰، ۴۹ و ۴- مگاپاسکال است. در مرکز درز جوش، تنش پسماند حاصل از شبه‌سازی، ۲۹٪ از تنش پسماند به‌دست‌آمده از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ کمتر است. نمودار شبه‌سازی همانند آزمون تجربی، حداکثر تنش پسماند را در ناحیه جوش ارزیابی می‌نماید، اما بر خلاف نتایج تجربی، مقدار حداکثر آن در مرکز درز جوش نبوده است و تقریباً در ناحیه‌ای در مرز پاس‌های کنار و وسط پاس سطح قرار دارد. در مجموع حداکثر تنش پسماند محیطی به‌دست‌آمده از شبه‌سازی در سطح خارجی لوله، ۱۵٪ کمتر از نتایج تجربی است. علاوه بر محدودیت‌های فنی، فرض‌های ساده‌کننده شبه‌سازی می‌تواند بر روند این تغییر موثر باشد. شایان ذکر است با افزایش فاصله از خط جوش، نتایج شبه‌سازی و تجربی روندی همگرا پیدا می‌نمایند. در نمودار ۲، توزیع تنش‌های محیطی در سطح داخلی لوله نشان داده شده است. با توجه به محدود بودن محل‌های آزمون تجربی تنها می‌توان نتایج شبه‌سازی را در نقاط مشخصی بررسی کرد. از نظر کیفی در منطقه جوش، نتایج حاصل از شبه‌سازی همانند نتایج آزمون تجربی کششی است. در منطقه متاثر از حرارت و فولاد پایه نیز نتایج شبه‌سازی و تجربی، تنش‌های پسماند محیطی را به‌صورت فشاری ارزیابی می‌نماید. از نظر کمی نیز نتایج حاصل قابل توجه است. در نقطه آزمون‌های صفر، ۲۴ و ۵۷ میلی‌متر از مرکز درز جوش، نتایج تنش‌های پسماند حاصل از شبه‌سازی به‌ترتیب برابر با ۱۰۳-، ۱۳۷، ۸۹- مگاپاسکال است. اختلاف این مقادیر با نتایج حاصل از آزمون تجربی کرنش‌سنجی سوراخ به‌ترتیب برابر با ۵۴-، ۳۶ و ۲۸ مگاپاسکال است. در مرکز درز جوش، تنش پسماند حاصل از شبه‌سازی، ۲۸٪ از تنش پسماند حاصل از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ کمتر است. بنابراین اختلاف درصد تنش پسماند محیطی حاصل از شبه‌سازی و آزمون تجربی، در مرکز درز جوش پاس‌های سطح و ریشه بسیار مشابه است. کم‌تر بودن نتایج حاصل از شبه‌سازی نسبت به نتایج آزمون تجربی، اهمیت استفاده از آزمون‌های تجربی را تایید می‌نماید. در نمودار ۳، توزیع تنش‌های محوری در سطح خارجی لوله نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، این نمودار (همانند نمودار توزیع تنش‌های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله) روندی مشابه از لحاظ کیفی با نمودار اسپلین عبوری از داده‌های تجربی دنبال می‌کند. این نمودار در ناحیه جوش، تنش‌های پسماند را فشاری ارزیابی می‌نماید. علاوه بر این تنش‌های پسماند در منطقه پاس کنار سطح از حالت فشاری به کششی تبدیل شده است. از نظر کمی، مکان تغییر حالت نتایج شبه‌سازی و آزمون تجربی تنش پسماند کمتر از ۲ میلی‌متر تفاوت دارد. این نواحی بسیار نزدیک به منحنی اسپلین گذرنده از نقاط آزمون کرنش‌سنجی سوراخ است. از نظر کمی نیز نتایج به‌دست‌آمده قابل توجه است. در نقطه آزمون‌های صفر، ۸، ۱۹، ۲۵، ۳۷، ۵۸ و ۹۰ میلی‌متر از مرکز درز جوش، نتایج تنش‌های پسماند حاصل از شبه‌سازی به‌ترتیب برابر با ۴۱-، ۱۱-، ۷۵، ۱۴۱، ۱۷۴ و ۱۵۷ مگاپاسکال است. اختلاف این مقادیر با نتایج حاصل از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ به‌ترتیب ۲۷، ۷-، ۲۱-، ۲۳، ۳۷، ۲۸ و ۱۱ مگاپاسکال است. در مرکز درز جوش، قدر مطلق تنش پسماند حاصل از شبه‌سازی، ۴۰٪ از تنش پسماند به‌دست‌آمده از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ کمتر است. بنابراین

8- Wen S, Hilton P, Farrugia DCJ. Finite element modelling of a submerged arc welding process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;119(1-3):203-209.

9- Jiang W, Yahiaoui K, Hall F, Laoui T. Finite element simulation of multipass welding: Full three-dimensional versus generalized plane strain or axisymmetric models. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2005;40(6):587-597.

10- Jiang W, Yahiaoui K, Hall F. Finite Element Predictions of Temperature Distributions in a Multipass Welded Piping Branch Junction. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2005;127(1):7-12.

11- Mochizuki M, Hayashi M, Hattori T. Numerical Analysis of Welding Residual Stress and Its Verification Using Neutron Diffraction Measurement. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1999;122(1):98-103.

12- Fricke S, Keim E, Schmidt J. Numerical weld modeling- a method for calculating weld-induced residual stresses. *Nuclear Engineering and Design*. 2001;206(2-3):139-150.

13- Akbari D, Farahani MR, Soltani N. Effects of the weld groove shape and geometry on residual stresses in dissimilar butt-welded pipes. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2012;47(2):73-82.

14- Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*. 1984;15(2):299-305.

15 ASTM Standard E837-13a. Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method [Internet]. West Conshohocken: ASMT International; 2008 [cited 2018 November 10]. Available from: <https://www.astm.org/Standards/E837.htm>.

16- Vishay Precision Group. Measurement of residual stresses by the hole-drilling* strain gage method [Internet]. Wendell NC: Micro-Measurements; 2010 [cited 2018 November 10]. Available from: <http://www.vishaypg.com/docs/11053/tn503.pdf>

17- Hakkak Zargar S, Farahani MR, Besharati Givi MK. Numerical and experimental investigation on the effects of submerged arc welding sequence on the residual distortion of the fillet welded plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*. 2016;230(4):654-661.

تشکر و قدردانی: از همکاری مرکز پژوهش کاربردی جوش و آزمون‌های غیرمخرب دانشگاه تهران قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: گواهی می‌شود در نگارش این مقاله کلیه اصول اخلاق در مهندسی رعایت شده است.

تعارض منافع: گواهی می‌شود در نگارش این مقاله هیچ تعارضی در منافع نویسندگان وجود ندارد.

سهم نویسندگان: مجید سبک‌روح (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۵۰٪)؛ محمدرضا فراهانی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۵۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

1- Hashemi SH, Mohamaadyani D. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2012;98:8-15.

2- Hashemi SH, Mohamaadyani D, Pouranvari M, Mousavizadeh SM. On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2009;32(1):33-40.

3- Leggatt RH. Residual stresses in welded structures. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2008;85(3):141-151.

4- Bouchard PJ. Validated residual stress profiles for fracture assessments of stainless steel pipe girth welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2007;84(4):195-222.

5- Brickstad B, Josefson BL. A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1998;75(1):11-25.

6- Sabokrouh M, Hashemi SH, Farahani MR. Experimental study of the weld microstructure properties in assembling of natural gas transmission pipelines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*. 2017;231(6):1039-1047.

7- Mochizuki M, Hayashi M, Hattori T. Residual stress distribution depending on welding sequence in multi-pass welded joints with X-shaped groove. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 1999;122(1):27-32.