



## محاسبه و اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در لوله‌های فولاد زنگ‌نزن و بررسی تأثیر ضخامت دیواره بر توزیع تنش‌ها

مهران چرخ‌کی<sup>1</sup>، داود اکبری<sup>2\*</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 111-14115، daakbari@modares.ac.ir

### کلیدواژگان

تنش‌های پسماند  
ضخامت دیواره  
تحلیل اجزای محدود

### چکیده

در این مقاله رفتار مکانیکی-حرارتی فرایند جوش کاری ذوبی برای تعیین میزان اثر ضخامت دیواره بر بزرگی و توزیع تنش پسماند جوشی در جوش کاری لوله‌های فولاد زنگ‌نزن مورد بررسی قرار گرفته است. برای تأیید مدل از داده‌های تجربی جوش کاری لوله‌های فولادی که با روش کرنش‌سنجی سوراخ توسط دنگ بدست آمدند استفاده شده است. ارتباط خوبی بین نتایج المان محدود و داده‌های تجربی بدست آمد. نتایج نشان داد روش محاسباتی توسعه یافته در این مطالعه یک روش مؤثر برای پیش‌بینی تنش پسماند در جوش کاری لوله‌های فولاد زنگ‌نزن است. اثر ضخامت دیواره لوله روی تنش‌های پسماند جوش کاری در لوله‌های جوش داده شده بصورت لب به لب با استفاده از مدل المان محدود حاضر مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش ضخامت دیواره لوله، تنش‌های پسماند محوری کششی در سطح داخلی و محوری فشاری در سطح خارجی لوله فولاد زنگ‌نزن تقریباً تا 35 و 25 درصد کاهش یافته، ولی تنش‌های محوری فشاری در سطح داخلی و تنش‌های محوری کششی در سطح خارجی تغییر چندانی نکرده است. همچنین در لوله فولاد زنگ‌نزن با افزایش ضخامت دیواره تنش پسماند محیطی فشاری در سطح داخلی کمی افزایش اما تنش‌های محیطی کششی تغییر قابل توجهی نمی‌کنند. بطور کلی ضخامت دیواره بر اندازه و توزیع تنش پسماند محیطی لوله فولاد زنگ‌نزن تأثیر مهمی ندارد. همچنین در ضخامت‌های دیواره بالا تنش‌های پسماند محوری توزیع وسیع‌تری خواهند داشت.

## Evaluation and measurement of the residual stresses in stainless steel pipes and investigation of the effects of wall thickness on the stresses distribution

Mehran Charkhi, Davood Akbari\*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, daakbari@modares.ac.ir

### Keywords

Residual stresses  
Wall thickness  
FEM analysis

### Abstract

In this paper, thermo-mechanical behavior of the welding process was analyzed to determine the effect of wall thickness on the residual stress magnitude and distribution in the stainless steel pipes. In order to verify the model, experimental data for the steel pipes, obtained by Deng with deep hole drilling method, were utilized. Good agreement was observed between the finite element and experimental data. The results indicated that the developed computational method is an effective tool to predict the residual stress of similar weld joints. The present finite element model was developed in a butt-welded pipe to consider the effect of pipe wall-thickness. It was observed that by increasing the preheating temperature in the repair welded pipes, tensile axial residual stresses on the inner surface and compressive axial residual stresses on the outer surface of the stainless steel pipes decreased about 35 and 25 percent, but the compressive axial residual stresses on the inner surface and tensile stresses on the outer surface have small variation. Moreover, by increasing the wall thickness of pipe compressive hoop residual stresses on the inner surface on the stainless steel increased, but only a small variation was observed on the tensile hoop residual stresses. In general, there is no significant effect on the magnitude and distribution of hoop residual stresses on the inner surface of the stainless steel pipe. Also, high wall thickness will have wider distribution of axial residual stresses.

### 1- مقدمه

جوش کاری لوله‌های فولادی، اثرات نامطلوبی بر روی عمر خستگی، ایجاد شکست و خوردگی دارد. روش اجزای محدود بطور گسترده برای پیش‌بینی اندازه و توزیع تنش‌های پسماند استفاده می‌شود. پارامترهای مربوط به جوش کاری، شکل شیار

فولاد زنگ نزن بطور عمده در ساخت تجهیزات که نیاز به مقاومت در برابر خوردگی دارند و در صنایع نفت و گاز و سایر صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. تنش‌های پسماند ناشی از

Please cite this article using:

M. Charkhi, D. Akbari, Evaluation and measurement of the residual stresses in stainless steel pipes and investigation of the effects of wall thickness on the stresses distribution, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 61-68, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

هم‌چنین تنش‌های حرارتی در سازه‌های جوش‌کاری شده را نیز مدل‌سازی کرد [4].

لی و چانگ [5] به اثر قطر لوله روی تنش پسماند در جوش‌کاری محیطی لوله فولادی پرداختند. نتایج کار آنها نشان داد لوله با قطر کم اثر قابل توجهی روی تنش‌های پسماند محوری و محیطی دارد. آنالیز عددی و تجربی توسط موجیزوکی و همکاران [6] به منظور پیش‌بینی تنش پسماند در لوله‌های فولاد کربنی انجام گرفت. آنها برای صحت سنجی مدل‌های عددی، اندازه‌گیری تنش پسماند را با استفاده از روش پراش اشعه نوترونی انجام دادند. پنگ و هیسانگ [7] تنش پسماند در طول یک پاس جوش‌کاری قوس الکتریکی در صفحات فولادی را با استفاده از روش المان محدود پیش‌بینی کردند. هم‌چنین آنها اثر سرعت الکتروود، اندازه نمونه، قید و فیکسچر و پیش‌گرم را روی اندازه و توزیع تنش پسماند، مطالعه کردند. هم‌چنین بررسی عددی و تجربی توزیع دما و تنش پسماند ناشی از فرایند جوش‌کاری در اتصال دو ورق با ضخامت‌های متفاوت از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 321 توسط نخودچی و همکاران [8] انجام شد. نتایج کارشان نشان داد تنش‌های پسماند طولی در نزدیکی جوش دارای مقادیر کششی و با دور شدن از خط جوش به مقادیر فشاری هم می‌رسد. هم‌چنین مقادیر تنش‌های پسماند در ورق 6 میلی‌متری دارای مقادیر بیشتری هستند و ناحیه کششی روی این ورق بزرگ‌تر از ورق با ضخامت 10 میلی‌متر می‌باشد. اثر حرارت ورودی روی تنش‌های پسماند جوش در جوش‌کاری فولاد زنگ‌نزن 304 و فولاد کربنی A106، توسط اکبری و ستاری‌فر [9] بررسی شد. نتایج کارشان نشان داد که با تغییر حرارت ورودی حداکثر تنش‌های پسماند محیطی تفاوت چندانی نمی‌کند. با کاهش حرارت ورودی جوش حداکثر تنش فشاری محوری و محیطی در طرف فولاد زنگ‌نزن کاهش یافتند. با افزایش حرارت ورودی حداکثر تنش پسماند کششی در سطح خارجی فولاد زنگ‌نزن افزایش پیدا کرد. در جوش‌کاری فولادهای کربنی و زنگ‌نزن با کاهش حرارت ورودی توزیع تنش‌های پسماند در طرف فولاد زنگ‌نزن نسبت به طرف فولاد کربنی کاهش بیشتری داشتند. هم‌چنین حداکثر تنش‌های پسماند در طرف فولاد زنگ‌نزن ایجاد شدند که این باعث توزیع نامتقارن تنش‌ها شد. جوزف و همکاران [10] یک لایه آلیاژ اینکونل 82 را به منظور کاهش تنش‌های باقیمانده در اتصال غیرهمجنس بین فولاد فریتی Cr2.25-1Mo و فولاد زنگ‌نزن 316 نوع AISI بکارگرفتند. در این مطالعه، پروفایل‌های تنش پسماند در عرض اتصالات جوش با استفاده از روش پراش اشعه

جوش، نوع اتصال جوش، ضخامت قطعه و نوع هندسه برخی از فاکتورهای ساختاری هستند که روی تنش‌های پسماند در اتصالات جوشی اثر قابل توجهی دارند. در سال‌های اخیر، محققان روش‌های مختلفی از جمله عملیات حرارتی، چکش‌کاری، پیش‌گرم و استفاده از ارتعاشات را جهت کاهش تنش‌های پسماند جوش توسعه داده‌اند. هم‌چنین آزمایش‌های تجربی جهت مطالعه اثر عملیات حرارتی، ضخامت فلز فیلر، نرخ خنک شدن روی استحکام کششی و ریز ساختار لوله فولادی زنگ‌نزن بر روی تنش‌های پسماند تجزیه و تحلیل شده است [1].

در ابتدا، اتصالات بایستی ملزومات اولیه استحکام را دارا باشد، در حالیکه خواص ضد خوردگی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. تنش‌های پسماند و اعوجاج در نزدیکی خط جوش بعلت گرمایش موضعی در طول فرایند جوش‌کاری و خنک شدن سریع پس از آن رخ می‌دهد. در برخی موارد، تنش پسماند جوش می‌تواند اثر منفی روی خواص مکانیکی اتصالات مثل مقاومت به شکست خستگی داشته باشد. بنابراین تعیین اندازه و توزیع تنش پسماند جوش‌کاری در این گونه اتصالات بسیار مهم می‌باشد. هم‌چنین طبقه‌بندی اثر شرایط جوش‌کاری روی تنش پسماند مهم می‌باشد.

پارامترهای مختلفی ممکن است در اندازه و توزیع تنش‌های پسماند اثر بگذارند. در فرایند جوش‌کاری پارامترهای مربوط به خواص مواد و عوامل ساختاری اثر قابل توجهی بر اندازه و توزیع تنش پسماند دارند. پارامترهای فرایند شامل نوع فرایند جوش‌کاری، سرعت حرکت قوس، ولتاژ و جریان می‌باشند [2]. علاوه بر این با کنترل پارامترهای جوش‌کاری در حین انجام عملیات می‌توان، تنش‌های پسماند جوش را کاهش داد. انتخاب پارامترهای مناسب جوش‌کاری و طراحی اتصال، یک راه ساده و کارآمد برای کاهش تنش پسماند ناشی از جوش است. از طرفی کاهش تنش پسماند برای بسیاری از سازه‌های جوش‌کاری شده قابل اجرا نمی‌باشد. از این رو توسعه پارامترهای موجود برای پیش‌بینی دقیق تنش پسماند جوش جهت دستیابی به طراحی مناسب، ضروری است.

امروزه روش‌های عددی در محاسبه تنش پسماند سازه‌های جوش‌کاری شده می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند. بررسی‌های زیادی روی مدل‌سازی و تحلیل حرارتی در جوش انجام گرفته است و محققان به مطالعه اثر برخی از پارامترهای فوق در پیشینه حرارتی جوش پرداخته‌اند. در سال 1984، گلداک [3] یک روش جدید المان محدود جهت تعیین توزیع حرارتی جوش ارائه کرد. او از رویکرد شار حرارتی در مدل‌سازی استفاده کرد. او

مکانیکی بطور مستقل از یکدیگر و با المان‌هایی که درجه آزادی حرارتی دارند، انجام شد. در طول هر پاس جوش، تنش‌های حرارتی از اعمال توزیع درجه حرارت تعیین شده توسط مدل حرارتی به مدل مکانیکی محاسبه شد. جهت به‌روز کردن رفتار مدل مکانیکی قبل از اینکه نموی کوتاه<sup>2</sup> بعدی اضافه شود، تنش-های محاسبه شده در هر نمو کوتاه، به گره‌ها اضافه شدند. بدلیل غیرخطی بودن تحلیل مکانیکی فرایند جوش‌کاری، از روش نیوتن-رافسون استفاده شد. پارامترهای فرایند در جدول 1 و خواص وابسته به دما در فلزات پایه در شکل 1 ارائه شده است. در مطالعه حاضر جهت شبیه‌سازی پرشدن فلز جوش در حین جوش‌کاری از روش تولد و مرگ المان‌ها استفاده شده است. در این روش، المان‌های اولیه فلز پرکننده با اعمال یک ضریب خیلی کوچک به ماتریس سفتی‌شان، غیر فعال می‌شوند. المان‌های غیر فعال شده دوباره در حین جوش‌کاری با حرکت منبع حرارت جوش‌کاری و به‌صورت مرحله به مرحله فعال می‌شوند.

تحلیل حساسیت اندازه‌های شبکه‌بندی اجزای محدود برای اطمینان از مناسب بودن شبکه و اطمینان از عدم وابستگی نتایج به درجه شبکه‌بندی انجام پذیرفت. مدل المان محدود استفاده شده در این مدل‌سازی در شکل 2 نشان داده شده است.

جدول 1 پارامترهای فرایند جوش‌کاری

Table 1 Welding parameters

تعداد پاس	$I$ (A)	$v$ (mm/s)	$\eta$ (%)	$V$ (Voltage)
1	95	4	70	20
2	100	4	70	20/5
3	110	4	70	25

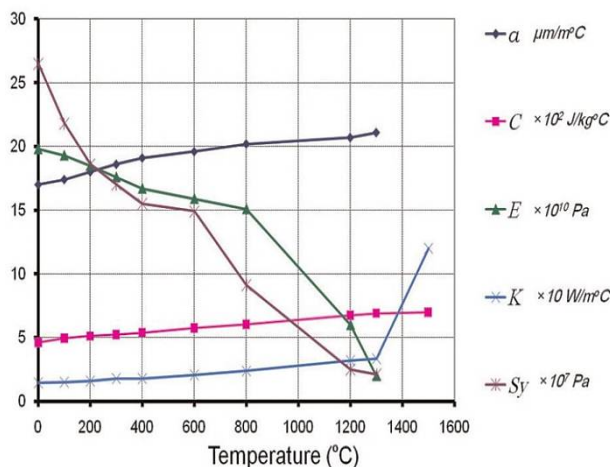


Fig. 1 Material properties of A240 TP 304 stainless steel [12]

شکل 1 خواص فولاد زنگ‌نزن A240 TP 304 [12]

ایکس مشخص شدند. نتایج کارشان نشان داد حداکثر تنش پسماند کششی در جوش‌کاری این نوع فولادها با لایه آلیاژ اینکونل 82 و بدون لایه با یکدیگر یکسان و تقریباً برابر با 350 MPa بود. تنش‌های پسماند کوچک‌تری در منطقه HAZ طرف فولاد فریتی با لایه آلیاژی نسبت به حالتی که فولاد فریتی بدون لایه بود، مشاهده شد. تنش پسماند در سطح مشترک بین فولاد فریتی و لایه که برابر 160 MPa بود بطور قابل توجهی کمتر از تنش در سطح مشترک بین فولاد فریتی و فلز جوش در اتصال بدون لایه که تقریباً 280 MPa بود، مشاهده شد. کریم‌نیا و ستاری‌فر [11] به بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر تنش‌های پسماند ناشی از جوش محیطی استوانه‌های جدار نازک از جنس آلیاژ آلومینیوم سری 5000 پرداختند. در ادامه به مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش پرداختیم. افزایش قطر خارجی، ضخامت، نرخ انرژی ورودی و استحکام تسلیم ماده باعث افزایش تنش پسماند محیطی و محوری می‌شود. عوامل خطی طول استوانه، تعداد خال جوش و ترتیب جوش‌کاری اثر معنی‌داری بر روی بیشینه تنش پسماند محیطی و محوری ندارد. هم‌چنین اثر قطر خارجی بر روی تنش پسماند محوری و محیطی یکسان ولی اثر عوامل ضخامت و نرخ انرژی ورودی بر روی تنش پسماند محوری بترتیب در حدود سه برابر و دو برابر اثر آنها بر روی تنش پسماند محیطی است.

با این حال تحقیقات بسیار محدودی اثر پارامتر ضخامت دیواره لوله و پارامترهای فرایند جوش‌کاری را بر اندازه و توزیع تنش‌های پسماند در جوش‌کاری فولاد زنگ‌نزن در نظر گرفته‌اند. در این مقاله لوله‌هایی از جنس فولاد زنگ‌نزن A240 TP304 بوسیله جوش‌کاری با پاس‌های مختلف با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی المان محدود مدل‌سازی شده و توزیع تنش پسماند بدست آمده است. با هدف کاهش تنش‌های پسماند جوش‌کاری از طریق انتخاب پارامترها و شکل مناسب اتصال، اثر پارامتر هندسی ضخامت دیواره، روی اندازه و توزیع تنش پسماند مورد بررسی قرار گرفت.

## 2- شبیه‌سازی المان محدود جوش

برای تحلیل تنش‌های پسماند از یک مدل سه بعدی کامل حرارتی و مدل هندسی با تقارن محوری<sup>1</sup> مکانیکی و از روش مدل‌سازی غیرکوپل برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی-حرارتی قطعات بهم جوش خورده، استفاده شده است. بنابراین جهت مشاهده پیشینه حرارتی فرایند جوش‌کاری، هم تحلیل حرارتی و هم تحلیل

<sup>2</sup> Increment<sup>1</sup> Axisymmetric

منبع حرارت برابر با دو برابر عرض جوش می‌باشد [3]. پیشنهادات مذکور در این مقاله استفاده شدند و برای مدل کردن حرکت منبع حرارتی یک زیربرنامه در مدل المان محدود نوشته شد.

ابعاد مقطع منبع حرارتی جوش کاری که با  $a$  و  $b$  و  $c$  نامگذاری شده‌اند، در شکل 3 نشان داده شده است. شکل 4 توزیع دما بعد از 104 ثانیه از شروع فرایند جوش کاری را نشان می‌دهد.

برای تحلیل مکانیکی به روش غیرکوپل، المان‌های حرارتی با المان‌های مکانیکی جایگزین شدند و تاریخچه دمایی محاسبه شده در تحلیل حرارتی بعنوان یک بار حرارتی در هر گام زمانی تحلیل مکانیکی اعمال شد. بنابراین در هر گام زمانی، تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی محاسبه شدند. کرنش کل در فرایند جوش کاری مجموع کرنش‌های الاستیک، پلاستیک و حرارتی و کرنش‌هایی که در نتیجه تغییرات حجمی ناشی می‌شوند، می‌باشد.

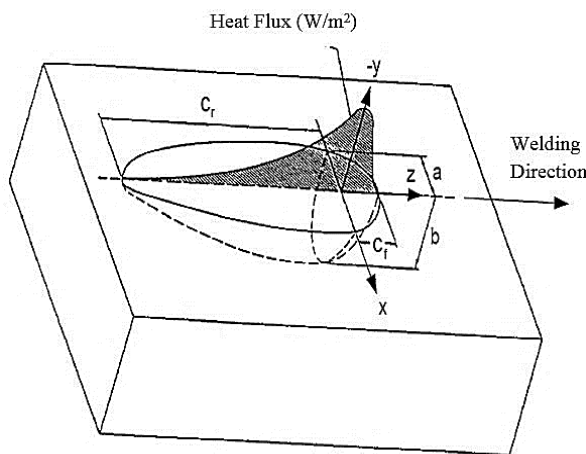


Fig. 3 Double ellipsoid heat source configuration

شکل 3 ابعاد مقطعی منبع حرارتی دو بیضی‌گون

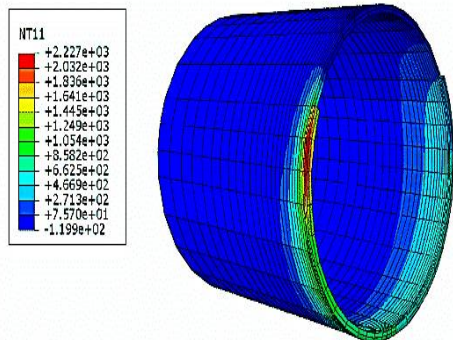


Fig. 4 Temperature distribution during the welding

شکل 4 توزیع دما حین فرایند جوش کاری

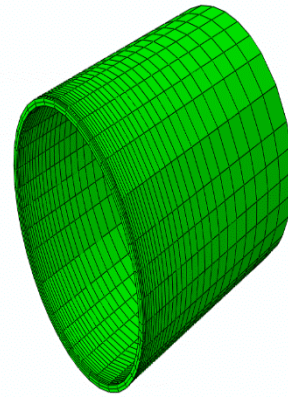


Fig. 2 Half of the finite element meshes for the welded pipes

شکل 2 نصف مش‌های المان محدود برای لوله‌های جوش داده شده

با توجه به تقارن هندسه در لوله مورد نظر فقط نیمی از اتصال مدل‌سازی شد و شرایط مرزی متقارن در سطح اتصال جوش در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی اجزای محدود، لوله‌ای به طول 200 میلی‌متر، قطر خارجی 219 میلی‌متر و ضخامت‌های 6، 8 و 13 میلی‌متر در نظر گرفته شد. به علت اینکه نیروها و تنش‌های پسماند داخلی در تعادل هستند، نیازی به استفاده از هیچ قید و شرایط مرزی خارجی در مدل نیست و تنها یک گره جهت جلوگیری از حرکت صلب، ثابت و فیکس شد.

در این مطالعه برای مدل کردن منبع حرارت حجمی فرایند جوش کاری قوس الکتریکی، توزیع حرارتی دو بیضی‌گون پیشنهاد شده توسط گلداک، استفاده شده است. توزیع منبع حرارتی گلداک که در شکل 3 نشان داده شده است، توسط معادلات (1) و (2) بیان می‌شود [3،9]:

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b c \pi^{3/2}} e^{(-3x^2/a_r^2)} e^{(-3y^2/b^2)} \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b c \pi^{3/2}} e^{(-3x^2/a_r^2)} e^{(-3y^2/b^2)} e^{(-3z^2/c^2)} \quad (2)$$

دو معادله بالا به ترتیب بخش‌های جلویی و انتهایی منبع گرمایی هستند. در این معادلات  $x$  و  $y$  و  $z$  به ترتیب مختصات مکان منبع حرارتی و  $f_r$  و  $f_f$  بیانگر کسر حرارت ورودی در نواحی جلویی و پشتی می‌باشند.  $Q$  توان منبع حرارتی جوش کاری است که می‌توان آن را از اطلاعات فرایند جوش کاری تجربی بدست آورد. اگر ابعاد سطح مقطع حوضچه‌ی جوش موجود نباشند، می‌توان از داده‌های تجربی ارائه شده توسط گلداک و همکاران استفاده کرد، که طبق این داده‌ها فاصله در مقابل منبع حرارت برابر با نیمی از عرض جوش و فاصله از پشت

دیواره مختلف اندازه‌گیری شد که نتایج در جدول 2 ارائه شده است. همه لوله‌ها قطر اسمی یکسان اما ضخامت متفاوت دارند. تحلیل المان محدود در همه نمونه‌ها با استفاده از مدلی که قبلاً شرح داده شد، انجام گرفته است.

از آنجا که محدوده ضخامت مدل‌ها متنوع است، اندازه المان در راستای ضخامت در هر مدل تغییر داده شد تا اندازه شبکه یکسانی برای تمامی مدل‌ها حاصل شود. با توجه به ضخامت‌های مختلف لوله‌ها در هر مدل، پارامترهای جوش کاری مانند جریان، ولتاژ و سرعت حرکت الکتروود ثابت در نظر گرفته نشدند. جهت شبیه‌سازی فرایند جوش کاری لوله‌های با ضخامت مختلف، حرارت ورودی هر پاس متناسب با حجم پاس در نظر گرفته شد که با استفاده از معادله (3) محاسبه شد.

$$Q = \eta UI/v \quad (3)$$

که  $\eta$  ضریب راندمان قوس،  $U$  ولتاژ قوس،  $I$  شدت جریان جوش کاری و  $v$  سرعت جوش کاری است. ضریب راندمان برای فرایند جوش کاری الکتروود دستی،  $0/7$  در نظر گرفته شد.

شکل 6 تنش‌های پسماند محوری در سطح داخلی سه لوله مختلف مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که بطور کلی، نزدیک خط جوش برای همه نمونه‌ها، تنش‌های پسماند کششی بزرگ مشاهده می‌شود. تنش‌های پسماند کششی محوری در نقاط دور از خط جوش کاهش یافته و به علت ماهیت خود تعادلی به تنش‌های پسماند فشاری تبدیل شدند.

در شکل 6 مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت دیواره لوله حداکثر تنش در لوله فولاد زنگ‌نزن کاهش می‌یابد. تنش‌های پسماند محوری فشاری در سطح داخلی با افزایش ضخامت دیواره کمی افزایش می‌یابد. این تنش‌ها نتیجه انقباض محیطی بعد از انجماد قطعات جوش داده شده به هم هستند که با پروفایل خمش در سراسر ضخامت لوله مطابقت دارد. علاوه بر این، لوله‌های ضخیم‌تر، توزیع تنش‌های پسماند فشاری محوری وسیع‌تری دارند. در لوله فولاد زنگ‌نزن با ضخامت‌های کم، تنش‌های پسماند محوری حول منطقه جوش ایجاد می‌شوند.

جدول 2 ضخامت‌های دیواره لوله در آنالیز عددی

شماره قطعه	استاندارد	قطر خارجی (mm)	اندازه اسمی لوله (in)	ضخامت دیواره (mm)
1	SCH.20	219	8	6
2	SCH.20	219	8	8
3	SCH.20	219	8	13

در تحلیل مکانیکی، خواص مکانیکی وابسته به دمای ماده مثل مدول یانگ، نسبت پواسون و ضریب انبساط حرارتی جهت محاسبه کرنش‌های حرارتی و الاستیک استفاده شدند. همچنین، استحکام تسلیم وابسته به دما با معیار فون میسر برای محاسبه کرنش‌های پلاستیک استفاده شد [13]. نوع المانی که برای مدل‌سازی حرارتی استفاده شد، قابلیت هدایت حرارتی سه بعدی دارد. این المان دارای هشت گره می‌باشد که هر گره دارای یک درجه آزادی (دما) و خواص مواد یکسان است. در مدل المان محدود تعداد 17392 المان از نوع C3D8R که با انتگرال‌گیری کاهش یافته و 19400 گره وجود دارد.

برای تأیید صحت مدل‌سازی المان محدود حاضر، در گام نخست، نتایج این تحلیل برای یک اتصال جوش لوله‌های فولادی با داده‌های اندازه‌گیری شده تجربی که توسط دنگ و موراکاوا [14] ارائه شده بودند، مقایسه شدند. بنابراین تحلیل المان محدود اتصال جوش لوله ساخته شده از فولاد SUS304 با پارامترهای مشابه استفاده شده توسط دنگ و موراکاوا انجام گرفت. باید به این نکته توجه کرد که SUS304 یک فولاد زنگ‌نزن آستنیتی است که تبدیل فاز حین جوش کاری ندارد. بین نتایج تجربی و المان محدود تطابق خوبی مشاهده شد، نشان داده شد که مدل المان محدود توسعه یافته می‌تواند تنش‌های پسماند جوش را در جوش کاری لوله‌های فولاد زنگ‌نزن بطور دقیق پیش‌بینی کند (شکل 5).

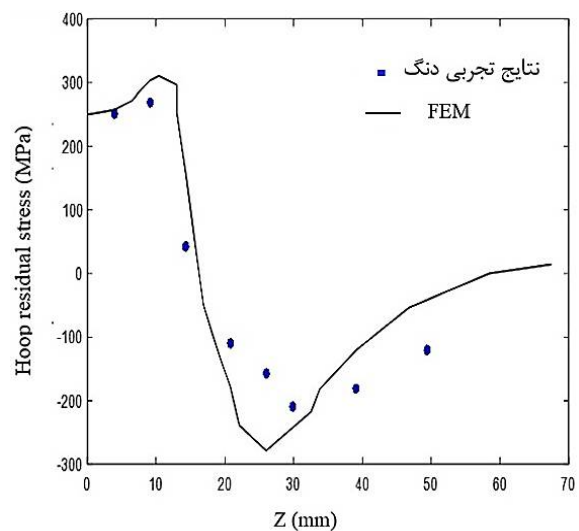


Fig. 5 Verifying the results of Deng experimental data and FEM

شکل 5 مقایسه نتایج تجربی دنگ و مدل‌سازی المان محدود انجام شده

### 3- بحث و نتایج

#### 3-1- اثر ضخامت

تنش‌های پسماند حاصل از جوش برای لوله‌هایی با سه ضخامت

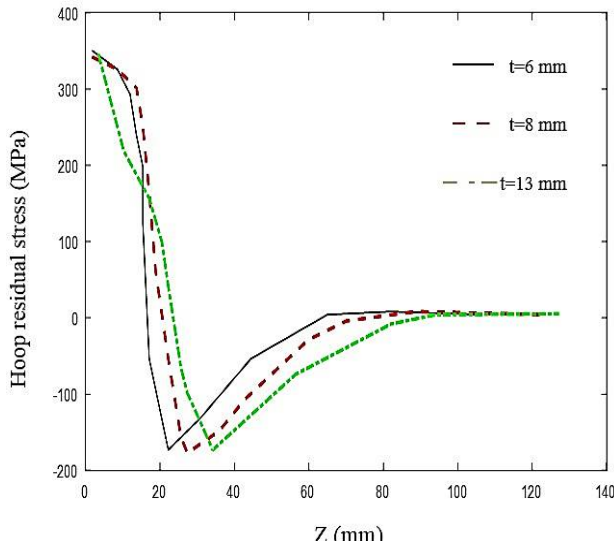


Fig. 7 Hoop residual stress in inner surface for the stainless steel pipes with different wall thickness

شکل 7 تنش پسماند محیطی در سطح داخلی برای لوله‌های فولاد زنگ‌نزن با ضخامت‌های مختلف

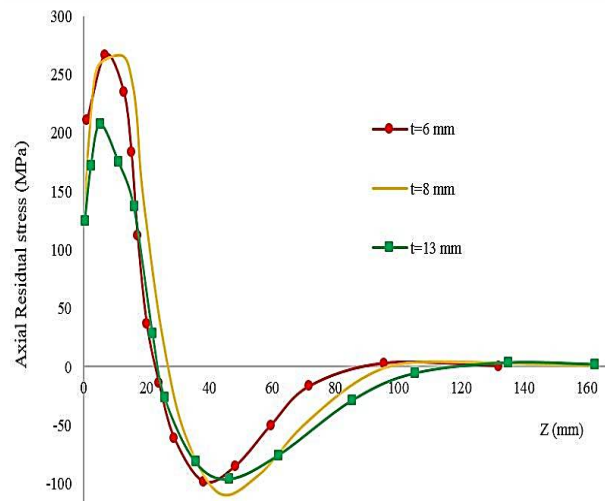


Fig. 6 Axial residual stress in inner surface for the stainless steel pipes with different wall thickness

شکل 6 تنش پسماند محوری در سطح داخلی برای لوله‌های فولاد زنگ‌نزن با ضخامت‌های مختلف

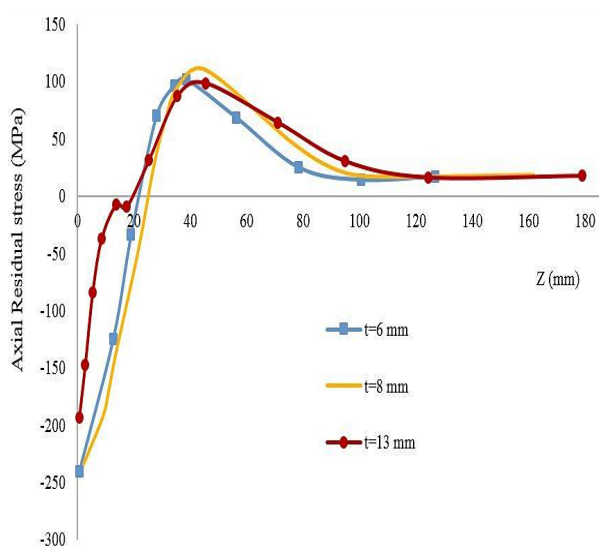


Fig. 8 Axial residual stress in outer surface for the stainless steel pipes with different wall thickness

شکل 8 تنش پسماند محوری در سطح خارجی برای لوله‌های فولاد زنگ‌نزن با ضخامت‌های مختلف

از این رو با بررسی المانی در سطح خارجی لوله از نظر تعادل نیرویی، تنش‌های حاصله نزدیک خط جوش فشاری و المان‌های داخلی تحت کشش خواهند بود. این موضوع در منابع نیز به همین شکل مشاهده و گزارش شده است [15]. همچنین مشاهده می‌شود در سطح خارجی لوله فولاد زنگ‌نزن ضخامت دیواره لوله اثر ناچیزی بر حداکثر تنش‌های پسماند کششی محوری دارد. در این نمونه، حداکثر تنش‌های پسماند محوری فشاری از 240- تا 195- مگاپاسکال در ضخامت 6 میلی‌متر تا 195-

مشاهده شد که تطابق خوبی بین نتایج المان محدود و نتایج تجربی بدست آمده توسط دنگ [14] وجود دارد.

توزیع تنش پسماند محیطی روی سطح داخلی لوله‌های فولاد زنگ‌نزن در شکل 7 نشان داده شده است. هر چند که برای تنش‌های محیطی نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود اما مقادیر حداکثر تنش پسماند محیطی از حداکثر تنش محوری بیشتر است. حداکثر تنش‌های کششی محیطی با افزایش ضخامت دیواره لوله تغییرات کمی دارد، اما تنش‌های فشاری محیطی در سطح داخلی با افزایش ضخامت دیواره لوله، کمی افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل 7 نشان داده شده است، اندازه تنش پسماند محیطی در سطح داخلی برای ضخامت‌های مختلف از 350 مگاپاسکال تا 180- مگاپاسکال متغیر است. اندازه تنش پسماند محیطی فشاری نسبت به کششی در سطح داخلی با افزایش ضخامت، تغییرات قابل توجهی دارد که حداکثر آن 170- مگاپاسکال برای لوله با ضخامت 13 میلی‌متر است. لوله با ضخامت 13 میلی‌متر توزیع تنش پسماند محیطی فشاری وسیع‌تری نسبت به ضخامت‌های کمتر دارد.

شکل 8 تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی لوله‌های فولاد زنگ‌نزن در طول راستای محوری را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که توزیع تنش‌های محوری در سطح خارجی تقریباً معکوس توزیع تنش‌های محوری در سطح داخلی هستند. در جوش کاری لوله‌ها ترکیب تنش‌های محوری و محیطی به گونه‌ای است که منطقه جوش شده متمایل به خمش به سمت داخل است.

$\bar{q}$  بردار شار حرارتی  
 $q$  منبع حرارت حجمی ( $\text{Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )  
 $U$  ولتاژ قوس (V)  
 $v$  سرعت فرایند جوش کاری ( $\text{ms}^{-1}$ )

#### علائم یونانی

$\varepsilon$  کرنش  
 $\sigma$  تنش پسماند (MPa)  
 $\eta$  ضریب راندمان قوس الکتریکی

#### زیرنویس‌ها

f جلو  
 r عقب

#### 6- مراجع

- [1] Tso-Liang T, Peng-Hsiang C and Wen-Cheng T. Effect of welding sequences on residual stresses. *Computers and Structures*, Vol. 81, No. 5, pp. 273–286, 2003.
- [2] C. Peng-Hsiang and T. Tso-Liang. Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-weld joints. *Computational Materials Science*, Vol. 29, No. 1, pp. 511–522, 2004.
- [3] J. Goldak, A. Chakravarti and M. Bibby. A new finite element model for welding heat source. *Metallurgical Transaction B*, Vol. 15, pp. 299–305, 1984.
- [4] J. Goldak, Modeling thermal stresses and distortions in welds, *Ohio: ASM International*, pp. 71–82, 1990.
- [5] Lee Chin-Hyung, Chang Kyong-Ho. Three-dimensional finite element simulation of residual stresses in circumferential welds of steel pipe including pipe diameter effects. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*; Vol. 487(1–2), No. 2, pp. 210–218, 2008.
- [6] Mochizuki M, Hayashi M and Hattori T. Numerical analysis of welding residual stress and its verification using neutron diffraction measurement. *Journal of Engineering Material Technologies*; Vol. 122, No. 1, pp. 98–104, 2000.
- [7] Peng-Hsiang C and Tso-Liang T. Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-weld joints. *Computational Materials Science*, Vol. 29, No. 2, pp. 511–522, 2004.
- [8] S. Nahkodchi, S. Akbari Iraj, A. Skokuhfar, H. Rezazadeh, Numerical and experimental study of temperature and residual stress in multi-pass welding of two stainless steel plates having different thicknesses, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 81–89, 2014. (In Persian)
- [9] D. Akbari, I. Sattari-Far, Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86, No. 11, pp. 769–776,

مگاپاسکال در ضخامت 13 میلی‌متر متغیر است. علاوه بر این، زمانیکه ضخامت دیواره لوله افزایش پیدا می‌کند، توزیع وسیع‌تری از تنش پسماند مشاهده می‌شود.

در همه‌ی نمونه‌ها، در خط مرکزی جوش تنش‌های پسماند محوری فشاری به بزرگی تقریباً 90 تا 100 درصد استحکام تسلیم لوله‌های فولاد زنگ‌نزن بهم جوش خورده حاصل شد، که با تغییر در ضخامت دیواره لوله تغییر محسوسی نمی‌کند.

#### 4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، یک مدل المان محدود برای محاسبه و اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در جوش کاری لوله‌ها از جنس فولاد زنگ‌نزن TP304 با روش جوش کاری قوس الکتریکی با تعداد پاس‌های مختلف توسعه داده شده است.

توزیع تنش پسماند به دست آمده در این پژوهش با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دنگ که برای لوله‌های سربه‌سر جوش داده شده از فولاد SUS304 ارائه شد، مقایسه شدند. رابطه خوبی بین نتایج المان محدود و داده‌های تجربی دنگ مشاهده شد. از این روش محاسباتی توسعه یافته در این مطالعه برای پیش بینی تنش پسماند در لوله‌های جوش داده شده از فولاد زنگ‌نزن جدار نازک، یک روش کارآمد خواهد بود. نتایج زیر را می‌توان بر اساس دستاوردهای این مطالعه بدست آورد.

- با افزایش ضخامت لوله، تنش‌های پسماند محوری کششی در سطح داخلی لوله‌های جوش داده شده از جنس فولاد زنگ‌نزن کاهش یافت.

- افزایش ضخامت دیواره لوله بر روی تنش‌های پسماند محوری فشاری در سطح داخلی و تنش‌های پسماند محوری کششی در سطح خارجی تأثیر مهمی ندارد.

- با افزایش ضخامت دیواره لوله تنش‌های محیطی فشاری در سطح داخلی افزایش یافتند.

- با افزایش ضخامت دیواره لوله توزیع تنش‌های پسماند فشاری وسیع‌تر می‌شوند.

#### 5- فهرست علائم

$a, b, c$  مقاطع منبع حرارتی جوش کاری  
 $c$  ظرفیت گرمای ویژه ( $\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ )  
 $f$  کسر حرارت ورودی  
 $I$  شدت جریان الکتریکی (A)  
 $Q$  حرارت ورودی ( $\text{Wm}^{-2}$ )

- Vessels and Piping*, Vol. 75, No. 1, pp. 11–25, 1998.
- [13] A. Paradowska, J. Price, R. Ibrahim, et al., The effect of heat input on residual stress distribution of steel welds measured by neutron diffraction, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 385–388, 2006.
- [14] Deng D and 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*, Vol. 37, No. 4, pp.269–277, 2006.
- [15] Sattari-Far, M.R. Farahani, Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86, No. 11, pp. 723-731, 2009.
- 2009.
- [10] A. Joseph, K. Raib-Sanjai, T. Jayakumara, N. Murugan, Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, No. 9, pp. 700–705, 2005.
- [11] V. Karimnia, I. Sattari-Far, Investigating the influence of effective parameters on the residual stresses in circumferentially arc welded thin walled cylinders of aluminum alloy series 5000, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 377-386, 2015. (In Persian فارسی)
- [12] B. Brickstad, B. Josefson, A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes, *International Journal of Pressure*