

پیش‌بینی تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری قوسی لوله‌های سوپرآلیاژ اینکولوی ۸۰۰ به روش المان محدود

حسین پورمحمد*، احمد کرمانپور**، مرتضی شمعیان**
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۳/۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۸/۱۲/۱۹)

(GTAW)

چکیده -

واژگان کلیدی :

Prediction of Residual Stresses in Arc Welding of Incoloy 800H Pipes

H. Purmohamad, A. Kermanpur, and M. Shamanian

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

Abstract: *In this investigation, the thermal and residual stress distributions developed during the circumferential butt gas*

** - دانشیار

* - کارشناس ارشد

tungsten arc welding (GTAW) of Incoloy 800H pipes were simulated using the finite element method. A coupled thermo-structural model was developed in three dimensions using ANSYS software. A subroutine based on the Goldak model was added to the model to simulate the distribution of arc heat source. The plastic behaviour of the material was described by Von-Mises yield function and the bilinear kinematics hardening in the mechanical part of the model, which is sequentially coupled with the thermal one. In order to validate the coupled model, temperature distributions during welding and residual stresses distributions in the welded pipes were both measured using thermocouples and hole drilling method, respectively. Using this model, a process parameter study was performed for the process variables such as welding efficiency and the amount of heat input in each pass. The results showed a tension-compression distribution of the axial stresses through thickness from inside to outside surface of the pipe and a tensile distribution for the hoop stresses. Increasing the heat input by 36% increased the axial residual stresses along the weld centerline on the inner surface of pipe to 11%. The present simulation model is able to predict distributions of temperature and residual stresses during the GTAW process with a reasonable precision.

Keywords: Numerical Simulation, Finite element method, GTAW process, hole drilling method, Incoloy 800H

۱- مقدمه

امروزه از فرایندهای جوشکاری به طور گسترده‌ای در ساخت پلها، ساختمانها، کشتیها، سکوها، حفاری نفت، خطوط لوله، سفینه‌های فضایی، راکتورهای هسته‌ای و مخزنهای فشار بالا استفاده می‌شود. بسیاری از ساختارهای پیشرفته کنونی مانند راکت‌های فضایی، زیردریاییها و مخازن راکتورهای هسته‌ای را نمی‌توان بدون کاربرد تکنولوژی جوشکاری تولید کرد [۱].

در صورت عدم استفاده از فرایند مناسب و رعایت پارامترهای مربوطه، ساختارهای تولید شده عاری از عیب نخواهند بود. تنشهای پسماند و اعوجاج جوشکاری تقریباً جزو مهم‌ترین مسائلی است که در زمینه جوشکاری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به واسطه گرمای موضعی و سرد شدن نایک‌نواخت حاصل از جوشکاری، توزیع پیچیده‌ای از تنشهای پسماند در ناحیه اطراف اتصال ایجاد و اغلب باعث تغییر شکل و اعوجاج نامطلوب در سازه می‌شود [۲]. این تنشهای پسماند و اعوجاج باعث ایجاد ترک و عدم انطباق در ساختار می‌شوند. تنشهای پسماند کششی بالا در نواحی نزدیک جوش ممکن است منجر به شکست ترد، خستگی و یا خوردگی تنش شود و از طرفی تنشهای پسماند فشاری و اعوجاج اولیه ممکن است منجر به کاهش استحکام پیچشی اجزای ساختار شود [۱].

مقدار تنشهای پسماند را می‌توان به وسیله عملیات گرمایی بازپخت و با استفاده از فناوریهای مناسب حین عملیات جوشکاری بر مبنای کاهش حجم جوش کاهش داد. اما این روش گران‌قیمت است و اغلب به واسطه ابعاد بزرگ قطعات

مونتاژ شده و یا به خاطر تغییرات متالورژیکی که نتیجه عملیات گرمایی است، انجام نمی‌گیرد. از این‌رو پیش‌بینی میزان و میدان تنشهای پسماند در فرایند جوشکاری برای مهندسان طراح امری ضروری و حیاتی است. استفاده از روشهای تجربی و آزمایشگاهی در اندازه‌گیری تنشهای پسماند حداقل دارای دو عیب بارز است. اولاً این روشها عمدتاً گران‌قیمت و زمان‌بر هستند و نیازمند تجهیزات پیشرفته‌اند. ثانیاً برخی از این روشها مستلزم تخریب قطعه‌اند و برخی دیگر محدود به قطعات با هندسه ساده‌اند [۳]. به دلایل بالا استفاده از روشهای شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی تنشهای پسماند گسترش یافته است. برای پیش‌بینی توزیع گرما و تنش معمولاً از روش المان محدود^۱ (FEM) استفاده می‌شود. به کمک این روش می‌توان بسیاری از پدیده‌های فیزیکی مرتبط با جوشکاری را شبیه‌سازی کرد و اثر متغیرهای مختلف جوشکاری بر این پدیده‌ها و تنشهای پسماند را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار داد [۳-۷]. آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ یک سوپرآلیاژ پایه آهن آستنیتی است که کاربرد گسترده‌ای در صنایع شیمیایی و پالایشگاهها دارد. در موارد متعددی نیاز است که لوله‌هایی از جنس این آلیاژ به یکدیگر به صورت سربه‌سر جوشکاری شود. تنشهای پسماند حاصل از جوشکاری سربه‌سر لوله‌ها در جهت محوری بیشترین اثر را بر روی تخریب قطعه دارند. تنشهای پسماند محوری مهمترین مبحث در مورد شروع و پیشرفت ترکهای حاصل از خستگی و خوردگی تنش (SCC) هستند [۶ و ۸-۱۰]. از این‌رو بررسی تنشهای پسماند محوری در ناحیه جوش اهمیت خاصی دارد.

جدول ۱- مشخصات هندسی لوله‌های مورد استفاده (بر حسب mm).

استاندارد مورد استفاده	قطر خارجی	ضخامت
ASME SB-515	۶۰/۳±۰/۱۹	۵/۵۴±۰/۱۰

جدول ۲- ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ مورد استفاده.

Name	Standard	UNS No.	Fe	Ni	Ti	Cr	Al	Mn	Si	C	S
Incoloy800	ASME SB-407	N08810	39.5 Min	30.0-35.0	0.15-0.60	19.0-23.0	0.15-0.60	1.5 Max	1.0 Max	0.05-0.1	0.015 Max

جدول ۳- ترکیب شیمیایی و مشخصات سیم جوش ER NiCr-3.

Name	UNS No.	Fe	Ni	Cr	Ti	Al	Mn	Si	Nb	C	S	P
Inconel82	N06082	3.0	67.0 Max	18.0-22.0	0.75	0.3 Max	2.5-3.5	0.5	2.0-3.0	0.1 Max	0.015	0.03

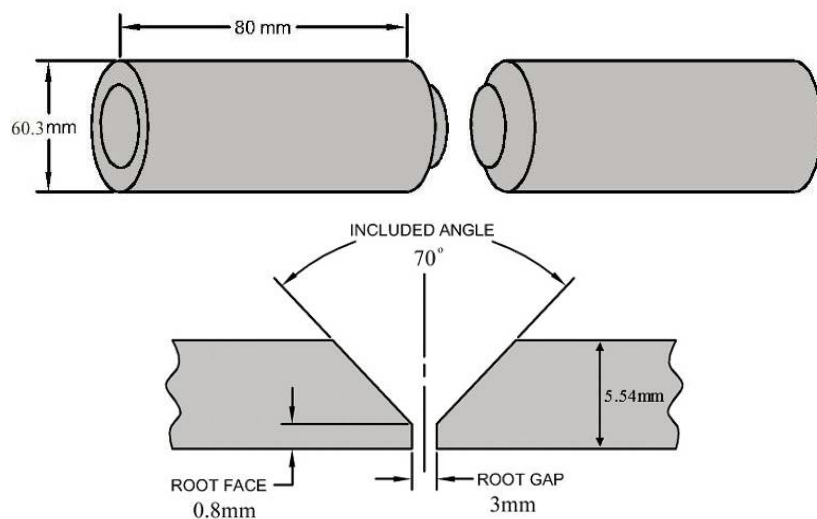
سرب‌سره به هم جوش داده شدند. طرح اتصال و مشخصات ابعادی پخ در شکل (۱) نشان داده شده است. جوشکاری نمونه‌ها به روش جوشکاری قوسی با الکترو تگستنی و گاز محافظ آرگون (GTAW)، تحت ولتاژ $10 \pm 1V$ و با قطبیت الکترو د منفی (DCEN) به صورت دو پاسه انجام شد. نوع حرکت مشعل به صورت استیرینگ^۴ یا صاف بوده است. پارامترهای جوشکاری در جدول (۴) آورده شده است. پیش از انجام جوشکاری، لوله‌ها و الکترودها پیش‌گرم نشدند. پیش از انجام جوشکاری، لوله‌ها در چهار نقطه به ترتیبی که در شکل (۲) نشان داده شده است، به هم جوش نقطه‌ای شدند [۱۳]. بر اساس استاندارد خال‌جوشها در موقعیت‌های روبه‌روی یکدیگر با زاویه 180° درجه نسبت به هم، به ترتیب شماره‌های نشان داده شده در شکل (۲) انجام شدند. جوشکاری در هر پاس به دو قسمت 180° درجه قسمت شد. جهت حرکت مشعل جوشکاری در مقطع عرضی لوله با دو پیکان، یکی در جهت ساعتگرد و دیگری در جهت پادساعتگرد که از شماره ۱ شروع و به شماره ۲ ختم می‌شوند، در شکل (۲) نشان داده شده است. در انجام جوشکاری سعی شد که جوشکاری با سرعت یکنواخت انجام شود و فاصله زمانی بین پاسهای اول و دوم برای همه نمونه‌ها یکسان باشد. از آنجا که طول جوش کوتاه

در این تحقیق نحوه توزیع گرما و تنشهای پسماند حاصل از جوشکاری سوپرآلیاژ اینکولوی 800° به روش قوس الکترو تگستنی^۲ (GTAW) به کمک تحلیل المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی شده است. بدین منظور برنامه‌ای به زبان پارامتری نرم‌افزار^۳ (APDL) برای مدل کردن حرکت منبع گرمایی در سیستم نوشته شده است. این مدل با استفاده از نتایج تجربی اندازه‌گیری شده دما و تنشهای پسماند اعتبارسنجی شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- جوشکاری نمونه‌ها

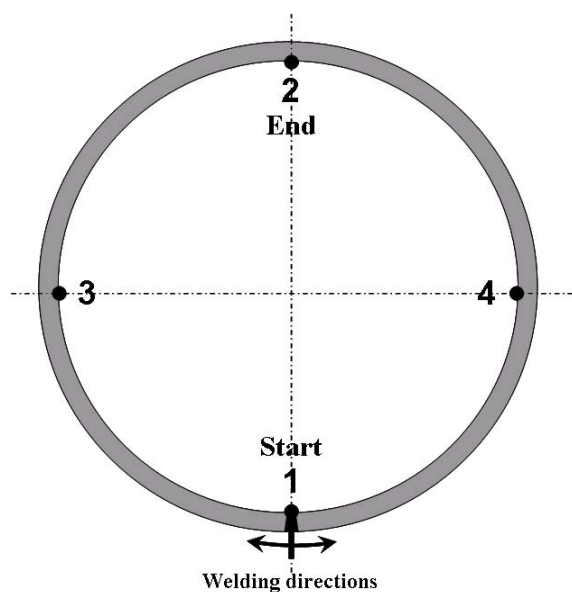
آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق سوپرآلیاژ اینکولوی 800° با مشخصات هندسی ارائه شده در جدول (۱) است. ترکیب شیمیایی این سوپرآلیاژ بر اساس استاندارد ASME در جدول (۲) داده شده است [۱۱]. ترکیب شیمیایی سیم‌جوش مورد استفاده که بر اساس استاندارد AWS دارای نام اختصاری ER NiCr-3 است، در جدول (۳) داده شده است [۱۲]. بر اساس جدول، این سیم‌جوش حاوی مقدار زیادی نیکل می‌باشد. برای تهیه نمونه‌ها، لوله‌هایی با طول 80 میلی‌متر، به صورت



شکل ۱- طرح اتصال و مشخصات ابعادی آن.

جدول ۴- پارامترهای جوشکاری نمونه‌ها.

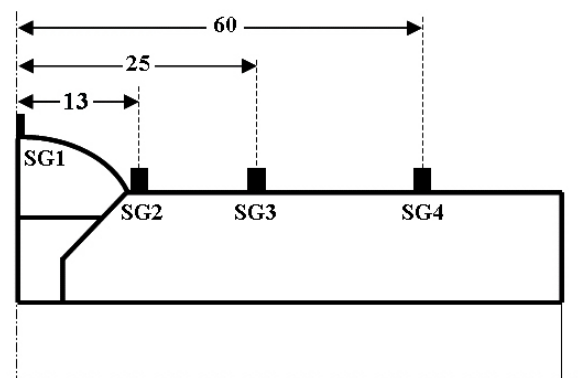
شماره نمونه	شماره پاس	I (A)	V (V)	V (mm/s)	گرمای ورودی خالص (J/mm/s)	قطبیت
S۱	۱	۸۰	۱۰	۰/۷۷	۱۰۳۸	DCEN
	۲	۸۰	۱۰	۰/۴۷	۱۷۰۲	DCEN
S۲	۱	۱۰۰	۱۰	۱/۰۳	۹۷۰	DCEN
	۲	۱۰۰	۱۰	۰/۷۹	۱۲۶۶	DCEN
S۳	۱	۱۲۰	۱۰	۱/۴۱	۸۵۱	DCEN
	۲	۱۲۰	۱۰	۱/۱۱	۱۰۸۱	DCEN



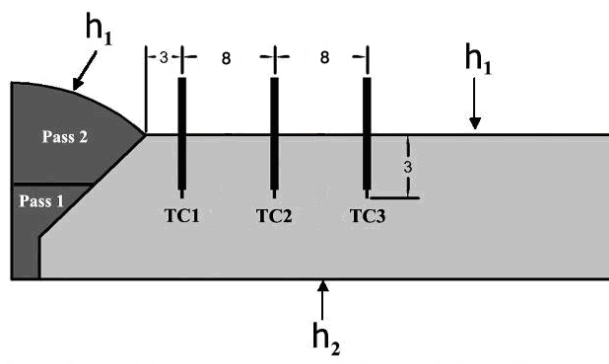
شکل ۲- شمایی از موقعیت جوشهای نقطه‌ای و جهت حرکت مشعل در هر پاس.

جدول ۵- زمانهای مربوط به مراحل مختلف جوشکاری (بر حسب ثانیه).

نمونه	پاس اول			بین دو پاس	پاس دوم		
S1	۱۰۰	۲۵	۱۰۰	۵۵	۲۰۰	۲۵	۲۰۰
S2	۷۵	۲۵	۷۵	۵۵	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
S3	۵۵	۲۵	۵۵	۵۵	۸۵	۲۵	۸۵



شکل ۴- شمایی از موقعیت قرارگیری رزت‌ها بر روی سطح بیرونی لوله (بر حسب میلی‌متر).



شکل ۳- شمایی از نحوه و محل قرارگیری ترموکوپل‌ها و شرایط مرزی (بر حسب میلی‌متر).

۲-۳- اندازه‌گیری تنشهای پسماند

تنشهای پسماند حاصل از جوشکاری، با استفاده از تکنیک کرنش‌سنجی سوراخ^۵ و بر اساس استاندارد ASTM E837 در شرایط پس از جوشکاری اندازه‌گیری شد [۱۵]. گنجیهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری میزان کرنشها از نوع روزت سه جزیی بود. برای به‌دست آوردن توزیع تنشهای پسماند محوری و شعاعی در امتداد خط عمود بر جوش، چهار رزت SG1، SG2، SG3 و SG4 به ترتیب با فاصله مشخص از خط مرکزی جوش در یک راستا نصب شدند. مطابق شکل (۴)، رزت اول در خط مرکزی جوش، رزت دوم در فاصله ۱۳mm از خط جوش، رزت سوم در فاصله ۲۵mm از خط جوش و رزت چهارم در فاصله ۶۰mm از خط جوش نصب شدند. به منظور بررسی اثر میزان گرمای ورودی بر میزان تنشهای پسماند، این آزمایش بر روی دو نمونه S1 و S3 انجام گرفت.

بوده به جای بیان سرعت جوشکاری از پارامتر زمان استفاده شد [۱۴]. در جدول (۵) زمان اندازه‌گیری شده برای پاسها و مراحل مختلف جوشکاری نمونه‌های S1، S2 و S3 ارائه شده است. برای حفاظت ریشه جوش، لوله‌ها از یک طرف به وسیله یک چسب کاغذی پهن مسدود شد و از طرف دیگر گاز آرگون توسط شیلنگی با دبی ۱۵ lit/min به داخل لوله دمیده شد.

۲-۲- ثبت تاریخچه دمایی

برای اندازه‌گیری توزیع دما در نقاط مختلف روی فلز پایه، تعداد ۳ ترموکوپل TC1، TC2 و TC3 در فواصل ۳، ۱۱ و ۱۹ میلی‌متر از خط جوش روی میله قرار داده شد. برای نصب ترموکوپل‌ها با مته‌ای با قطر ۱/۵ میلی‌متر، برابر با قطر غلاف فلزی ترموکوپل، سوراخهایی به عمق ۳ میلی‌متر در فواصل تعیین شده از خط جوش، در امتداد یک خط راست بر روی لوله ایجاد شد، شکل (۳).

۳- نظریه مدل

۳-۱- مدل گرمایی

توزیع دمایی گذرا و سه بعدی $T(x, y, z, t)$ مطابق معادله دیفرانسیلی براساس قانون فوریه در هدایت مطابق زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

که در آن k_x, k_y, k_z ضرایب هدایت گرمایی در جهات x, y و z ($Wm^{-1}K^{-1}$)، $\dot{Q}$ توان تولیدی در واحد حجم (Wm^{-3})، ρ دانسیته (kgm^{-3})، C_p گرمای ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$) و v سرعت نسبی قطعه (در اینجا در جهت x) (ms^{-1}) است. شرط اولیه عبارت است از:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \text{ for } (x, y, z) \quad (2)$$

شرایط مرزی ضروری یا به صورت دریکله:

$$T(x, y, z, t) = T_0 \quad (3)$$

یا به صورت طبیعی است:

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} - q + h_c (T - T_\infty) + \sigma \epsilon F (T^4 - T_r^4) = 0 \quad (4)$$

که در آن k_n هدایت گرمای عمود بر سطح، q شار گرمایی (Wm^{-2})، h_c ضریب انتقال گرمای جابه جایی ($Wm^{-2}K^{-1}$)، σ ثابت استفان-بولتزمن برای تشعشع ($5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$)، ϵ ضریب نشر، F ضریب شکل، T_∞ دمای محیط و T_r دمای منبع حرارتی تشعشعی است. وجود خواص ترموفیزیکی به همراه عبارت تشعشع در شرایط مرزی معادلات بالا این نوع تحلیل را بسیار غیرخطی می کند. تغییرات گرمایی حاصل از تشعشع را می توان با در نظر گرفتن ضریب انتقال گرمای معادل به صورت جابه جایی تبدیل کرد:

$$h_r = \sigma \epsilon F (T^2 + T_r^2) (T + T_r) \quad (5)$$

در کار حاضر از یک منبع گرمایی متحرک بر اساس مدل گلداک^۶ برای اعمال گرمای حاصل از مشعل در فرایند GTAW استفاده شده است. در این مدل منبع به صورت یک دوبیضی

نامتقارن است که قسمت جلوی حوضچه یک چهارم یک بیضی و قسمت عقب آب یک چهارم بیضی دیگر است. در این مدل نیاز به تعریف کسرهای f_f و f_r است که نشان دهنده کسری از گرمای کل است که به ترتیب به قسمت عقب و جلو حوضچه وارد می شود و داریم $f_f + f_r = 2$. تابع توزیع توان در قسمت جلویی حوضچه به صورت:

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2}\right) \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \exp\left(-\frac{3z^2}{c_f^2}\right) \quad (6)$$

و به طور مشابه برای قسمت عقبی حوضچه:

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2}\right) \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \exp\left(-\frac{3z^2}{c_r^2}\right) \quad (7)$$

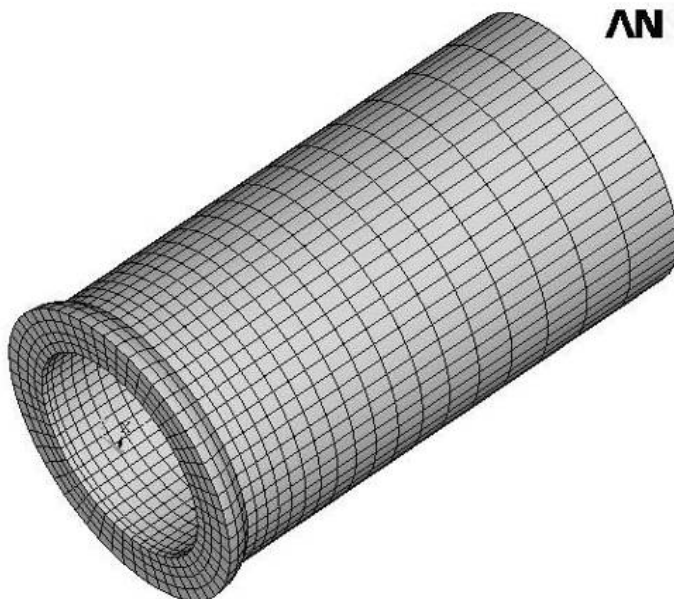
است. در دو معادله ۶ و ۷ متغیرهای a, b و c می توانند مقادیر متفاوتی در قسمت جلو و عقب حوضچه داشته باشند. از این رو متغیرهای مستقل محسوب می شوند. در واقع در جوشکاری فلزات نامشابه نیاز به تعریف دو دسته متفاوت و مستقل از این متغیرهاست [۱۶].

۳-۲- مدل مکانیکی

از آنجا که در طول فرایند جوشکاری هیچ استحاله فازی حالت جامد در فلز زمینه و فلز جوش رخ نمی دهد، از این رو نرخ کرنش کل به صورت معادله زیر بیان می شود:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p + \dot{\epsilon}^{th} \quad (8)$$

که در آن عبارتهای اول، دوم و سوم در سمت راست معادله به ترتیب بیان کننده نرخهای کرنش الاستیک، پلاستیک و گرمایی اند. کرنش الاستیک با استفاده از قانون هوک با در نظر گرفتن ضریب پواسون و مدول الاستیک وابسته به دما مدل شده است. رفتار پلاستیک ماده با در نظر گرفتن تابع تسلیم فونمایرز و کارسختی جنبشی دوطبقی مدل شده است. از آنجا که در فرایند جوشکاری، ماده تحت کرنشهای بالایی قرار نمی گیرد و



3D Thermal Simulation of GTAW Welding of Tubes

شکل ۵- نمایی از شبکه‌بندی مدل مورد استفاده در تحلیل گرمایی.

به وسیله کدنویسی در نرم‌افزار انسیس تهیه شد. با توجه به وجود تقارن، تنها نیمی از اتصال سربه‌سر مدل شد. نحوه المان‌بندی مدل و دستگاه محورهای مختصات در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با نزدیک شدن به خط جوش، به دلیل وجود گرادیانهای دمایی و تنش‌های شدیدتر و در نتیجه نیاز به دقت بالاتر، ازالمانهای ریزتری استفاده شده است. تعداد المانها در این مدل ۴۷۰۴ است. شبکه‌بندی در حل گرمایی و مکانیکی به صورت دستی انجام شده است. جنس فلز پرکننده، مشابه فلز پایه در نظر گرفته شده و در نتیجه خواص گرمایی و مکانیکی فلز جوش مشابه فلز پایه است. به منظور اضافه کردن فلز پرکننده، از خاصیت تولد و مرگ المانها استفاده شده است.

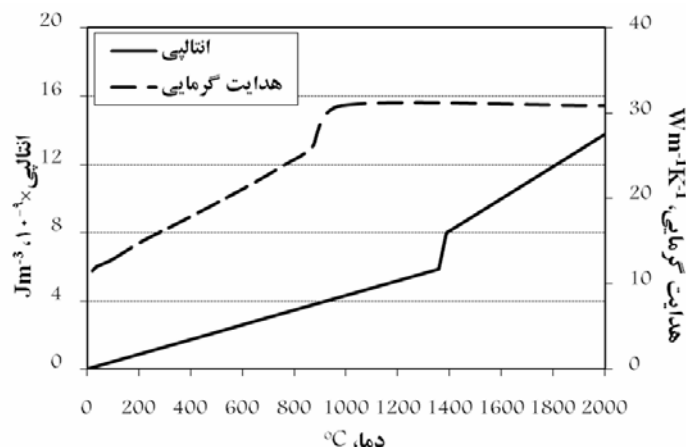
از آنجا که ماهیت تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری از نوع تنشهای گرمایی بوده و مستلزم در نظر گرفتن میدانهای گرمایی و سازه‌ای است، از این‌رو در این تحقیق تحلیل غیرکوپله انجام گرفته است. بدین صورت که نتایج حاصل از تحلیل گرمایی به عنوان بار ورودی در تحلیل مکانیکی وارد شده است.

تنها به دلیل گرم و سرد شدن، تحت تنشهای تناوبی فشاری-کششی قرار می‌گیرد، از این‌رو باید اثر باوشینگر به عنوان یک اثر مهم در نظر گرفته شود. در نتیجه حالت کارسختی جنبشی اهمیت بیشتری می‌یابد. در نهایت کرنش گرمایی با استفاده از ضریب انبساط گرمایی وابسته به دما محاسبه می‌شود.

۴- شبیه‌سازی فرایند

اگرچه یک مدل دو بعدی تقارن محوری^۷ نیازهای رایانه‌ای برای شبیه‌سازی فرایند را کاهش می‌دهد اما با محدود کردن تحلیل به یک بخش از هندسه کامل مدل، مشکلاتی در نتایج حاصل ایجاد می‌شود. تغییرات ناپایدار و بی‌ثبات تنشهای پسماند در محیط لوله به دلیل همپوشانی نواحی مجاور هم ناشی از حرکت قوس و اثرات نقاط شروع و پایانی فرایند جوشکاری، فرضیاتی را که در مدل دوبعدی در نظر گرفته می‌شود به مقدار قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین یک مدل دوبعدی قادر به پیش‌بینی دقیق توزیع تنشهای پسماند در جوشکاری سربه‌سر لوله‌ها نیست [۵].

در این تحقیق یک مدل سه‌بعدی به روش المان محدود و



شکل ۶- تغییرات خواص ترموفیزیکی بر حسب دما برای سوپرآلیاژ اینکولوی ۸۰۰.

۴-۱- تحلیل گرمایی

المان مورد استفاده در تحلیل گرمایی SOLID90 است که یک المان ۳ بعدی با ۲۰ گره و یک درجه آزادی حرارتی در هر گره است. بارهای مورد نظر را می‌توان بر روی گره‌ها و یا خود المان اعمال کرد. جابه‌جایی یا شار گرمایی و تشعشعی را می‌توان به عنوان بارهای سطحی روی سطوح المان و نرخ تولید گرما را به صورت بار حجمی روی گره‌ها اعمال کرد. یکی دیگر از ویژگیهای خاص این المان، دارا بودن خاصیت مرگ و تولد است. مدل منبع گرمایی مورد استفاده، مدل دو بیضی گلدک است که با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پارامتری نرم‌افزار اعمال شده است.

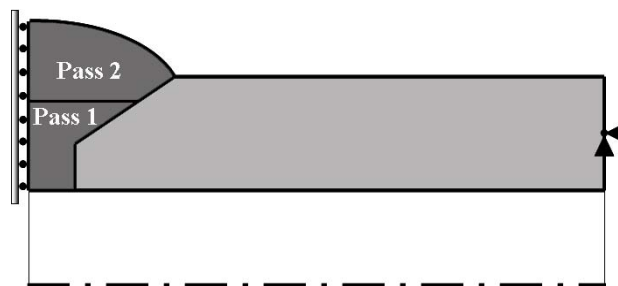
برای شرایط مرزی گرمایی در خط مرکزی جوش به دلیل تقارن شار صفر و در سایر سطوح خارجی لوله، هر دو حالت تشعشع و جابه‌جایی در نظر گرفته شده است. کاهش دما از طریق تشعشع در دماهای بالا و نزدیک قوس و از طریق جابه‌جایی در دماهای پایین و در مناطق دور از قوس حکمفرماست. با تعریف ضریب انتقال گرمای ترکیبی وابسته به دما، شرایط مرزی برای هر دو حالت تشعشع و جابه‌جایی تعریف می‌شود. این ضریب ترکیبی به صورت معادله زیر استفاده شده است [۷]:

$$\begin{aligned} h_1 &= 0.0668T \text{ Wm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C} & 0 < T < 500^{\circ}\text{C} \\ h_1 &= 0.231T - 82/1 \text{ Wm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C} & T > 500^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (9)$$

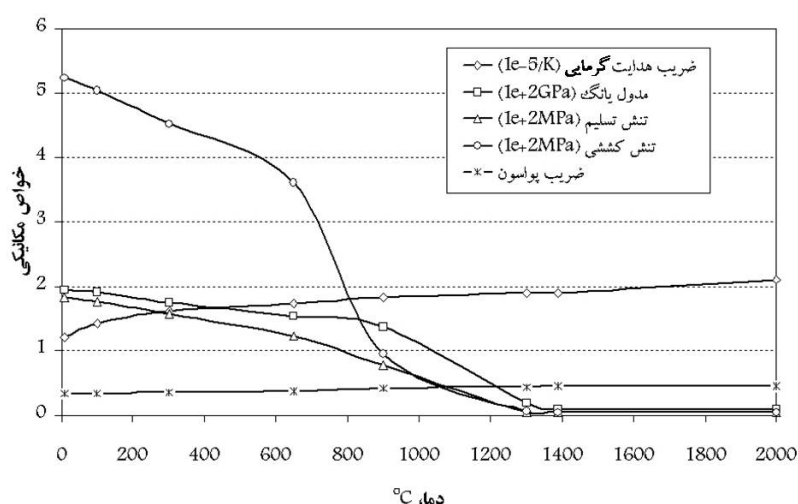
از آنجا که سطح داخلی لوله در تماس با گاز آرگون قرار دارد، از این رو مقدار ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی برای آن مقدار ثابت $h_2 = 20 \text{ Wm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}$ در نظر گرفته شده است. در شکل (۶) نمودار تغییرات خواص گرمایی فلز بر حسب دما آورده شده است. چگالی فلز مقدار ثابت 8000 Kg/m^3 در نظر گرفته شده است. محدوده تغییر فاز با تعریف منحنی انتالپی-دما مشخص شده است. برای در نظر گرفتن اتلاف گرمای حاصل از تلاطم فلز مذاب در حوضچه جوش، مقدار ضریب هدایت گرمایی در دماهای بالا و نزدیک دمای ذوب تقریباً دو برابر در نظر گرفته شده است [۵].

۴-۲- تحلیل مکانیکی

مدل المان محدودی که برای تحلیل مکانیکی به کار رفته مانند مدل گرمایی بوده است. در این قسمت از تحلیل، تاریخچه دمایی حاصل از تحلیل گرمایی به عنوان بار ورودی به مدل مکانیکی اعمال شده است. المان مورد استفاده در این قسمت المان SOLID95 بوده است. این المان شامل ۲۰ گره و سه درجه آزادی در هر گره شامل انتقال در جهات x ، y و z می‌باشد. المان مذکور جهت پلاستیسیته، خزش، تنش سختی، تغییرشکلها و کرنشهای زیاد سازگاری دارد. در این تحلیل برای اعمال رفتار تنش-کرنش، قانون سخت‌شوندگی جنبشی و معیار تسلیم فون مایز در نظر گرفته شده است.



شکل ۷- شماتیکی از شرایط مرزی مکانیکی در مدل به صورت دوبعدی.



شکل ۸- تغییرات خواص ترمومکانیکی بر حسب دما برای سوپرآلیاژ اینکولوی ۸۰۰.

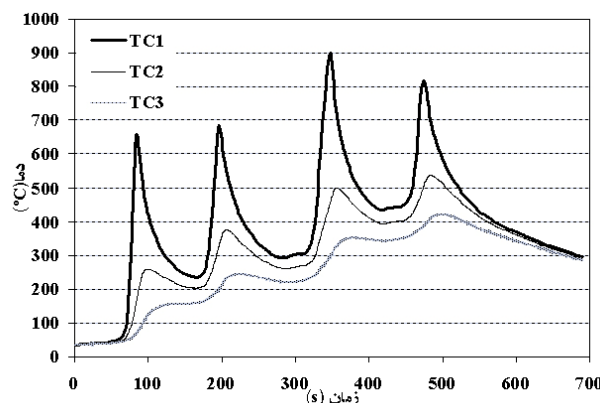
ترموکوپلهایی که بر روی سطح لوله‌ها نصب شدند، به‌دست آمده است. این تاریخچه دمایی مربوط به نمونه‌ای است که تحت ولتاژ ۱۰ و شدت جریان ۱۰۰ آمپر جوشکاری شده است، نمونه (S۲). منحنیهای نشان داده شده مربوط به ترموکوپلهای شماره ۱ تا ۳ است که به ترتیب در فواصل ۳، ۱۱ و ۱۹ میلی‌متر از خط کناری جوش قرار دارند. با توجه به نمودار ثبت شده توسط ترموکوپل شماره (۱)، دمای بین‌پاسی حدود 400°C است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با دور شدن از خط جوش بیشینه دمای ثبت شده توسط هر ترموکوپل به ترتیب از ترموکوپل ۱ تا ۳ کاهش می‌یابد. نقاط بیشینه در هر نمودار مربوط به زمانی است که مشعل به نزدیکترین فاصله ممکن با ترموکوپل مورد نظر رسیده است. از آنجا که ترموکوپلها در قسمت بالایی لوله قرار گرفته‌اند، نقاط بیشینه در هر نمودار مربوط به زمانی است که مشعل به انتهای مسیرهای

در شکل (۷) شرایط مرزی مدل مکانیکی نشان داده شده است. مطابق شکل مولفه‌های جابه‌جایی U_x ، U_y و U_z در ۸ گره انتهایی مدل لوله برابر صفر در نظر گرفته شده است. صفحه‌ای که از خط مرکزی جوش^۸ می‌گذرد، همان صفحه تقارن نمونه است که تنها یک طرف آن مدل شده است. بنابراین در صفحه تقارن $z=0$ مولفه جابه‌جایی در جهت z مقید شده است. در شکل (۸) تغییرات خواص مکانیکی فلز بر حسب دما آورده شده است.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- نتایج گرمایی تجربی

در شکل (۹) تاریخچه دمایی سه موقعیت روی لوله در طول فرایند جوشکاری مشاهده می‌شود. این نتایج به منظور اعتبارسنجی نتایج گرمایی حاصل از شبیه‌سازی توسط



شکل ۹- تاریخچه دمایی ثبت شده توسط سه ترموکوپل در فواصل تعیین شده از خط جوش برای نمونه S۲.

شبیه‌سازی در این شکلها نیز انطباق قابل قبولی بر یکدیگر دارند.

بر اساس تحقیقات انجام شده [۱۸-۲۰] ضریب هدایت گرما، مهمترین متغیری است که بر نحوه توزیع گرمای حاصل از جوشکاری اثر می‌گذارد. در کار حاضر مقدار ضریب هدایت گرمایی تا دمای ۹۸۲ درجه سانتیگراد از مراجع استخراج شده و برای دماهای بالاتر از طریق برونیابی تقریب زده شده است که می‌تواند باعث ایجاد خطا در نتایج شبیه‌سازی در مرحله سرد شدن شود.

با تعیین المانهایی از مدل که دمای آنها در هنگام عبور حوضچه جوش به بالای نقطه سالیدوس آلیاژ می‌رسد، می‌توان ابعاد حوضچه جوش را تقریب زد. البته در این حالت از اثرات انجماد ناتعادلی در توسعه منطقه جوش صرف نظر می‌شود. در این جا ضریب هدایت گرمایی در دماهای نزدیک نقطه ذوب به بالا، تقریباً دو برابر در نظر گرفته شده است.

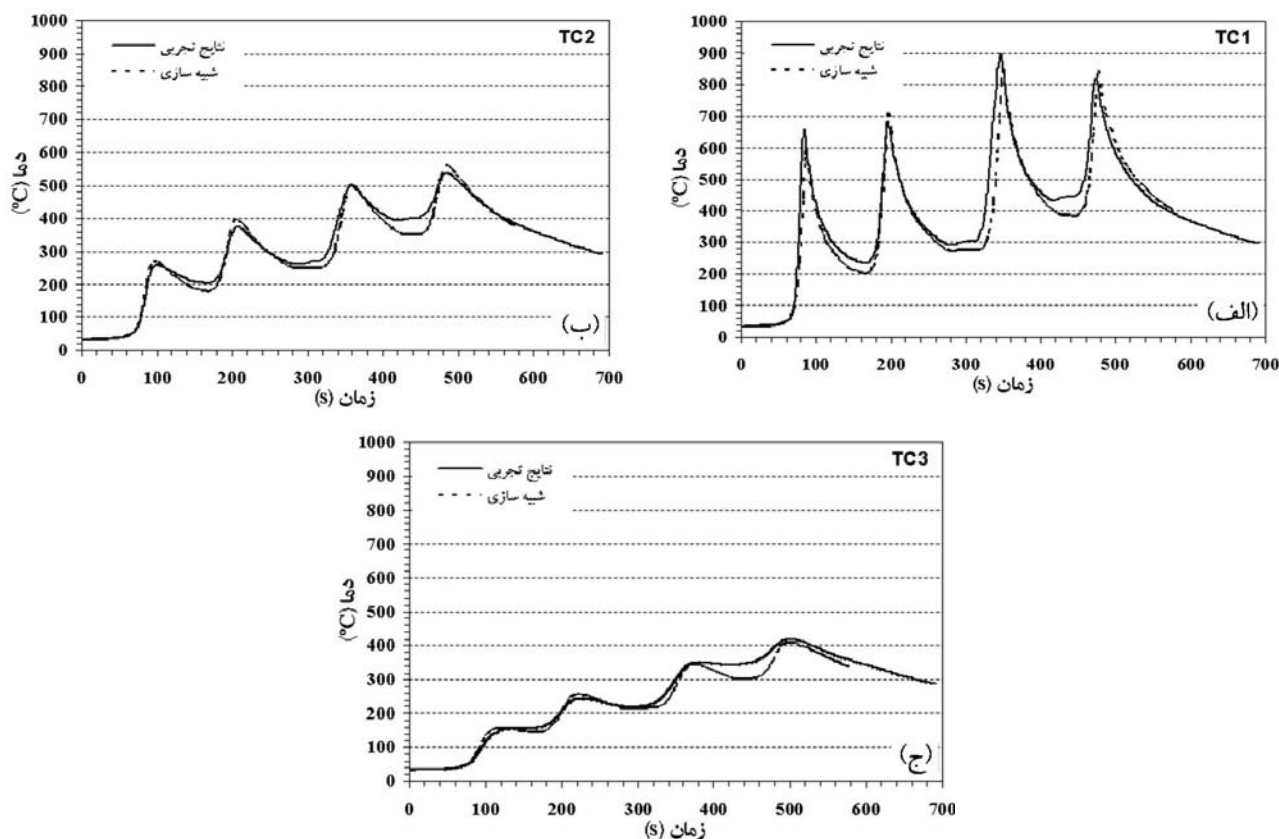
در شکل (۱۱-الف) سطح مقطع طولی مدل (سطح مقطع عرضی جوش) در یک مکان مشخص از مدل در هنگام عبور منبع گرمایی از آن در پاس اول (سمت چپ) و پاس دوم (سمت راست) نشان داده شده است. این شکل مربوط به مدلی است که با جریان ۱۰۰ آمپر شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است که در این شکل، المانهای پاس دوم نیز در پاس اول (سمت چپ شکل) دیده می‌شوند. در واقع این المانه، با توجه

نشان داده شده در جوشکاری هر نیمه از هر پاس می‌رسد. در نتیجه دو پیک اول مربوط به پاس اول و دو پیک دوم مربوط به پاس دوم هستند. همان‌گونه که در نمودار مشاهده می‌شود، بیشینه دما در پیک دوم نسبت به پیک اول و در پیک چهارم نسبت به پیک سوم بیشتر است. علت این را می‌توان افزایش دمای لوله در نیمه‌های اول هر پاس و در نتیجه افزایش بیشینه در نیمه‌های دوم آن دانست. البته ترموکوپل شماره (۱) این رفتار را نشان نمی‌دهد.

۲-۵- اعتبارسنجی مدل گرمایی

در شکلهای (۱۰-الف) تا (۱۰-ج) تاریخچه گرمایی گره‌هایی روی مدل که معادل با محل قرارگیری ترموکوپلها روی لوله‌اند با نتایج واقعی به‌دست آمده توسط ترموکوپلها مقایسه شده‌اند. در شکل (۱۰-الف) تاریخچه گرمایی ترموکوپل شماره (۱) که نزدیکترین ترموکوپل به حوضچه جوش است، برای هر دو حالت شبیه‌سازی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. چنانچه مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی انطباق نسبتاً خوبی با نتایج تجربی داشته و آهنگ گرم شدن و سرد شدن در هر دو حالت به هم نزدیک‌اند.

در شکلهای (۱۰-ب) و (۱۰-ج) نیز این مقایسه برای سایر ترموکوپلها و موقعیتهای معادل آنها بر روی مدل آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمودارهای تجربی و



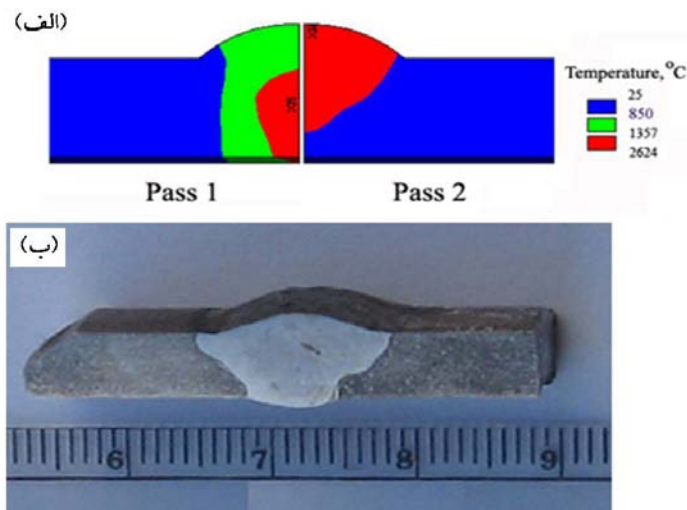
شکل ۱۰- مقایسه تاریخچه گرمایی ثبت شده توسط ترموکوپلها با نتایج حاصل از شبیه سازی در محل ترموکوپل شماره الف) ۱، ب) ۲ و ج) ۳.

جوشکاری نمونه ها، DC با قطبیت الکترو د منفی و راندمان آن ۶۰٪ در نظر گرفته شده است. همان گونه که در این شکلها مشاهده می شود، شکل حوضچه جوش به دلیل اعمال مدل منبع گرمایی گلداک به صورت دو بیضوی نامتقارن است. با توجه به این مدل، گرمای ورودی کاملاً به صورت حجمی در نظر گرفته شده است. برخی از محققان معتقدند که در جریان کمتر از ۲۰۰ آمپر توزیع گرما بیشتر به صورت سطحی و در بالاتر از آن گرما به صورت حجمی اعمال می شود [۱۱]. اما در این مراجع صحبتی از ضخامت قطعه به میان نیامده است. چنانچه ضخامت قطعه کم باشد در شدت جریانهای کمتر نیز گرمای ورودی می تواند باعث اغتشاش در حوضچه مذاب شود و بر انرژی گرمای ورودی اثر گذار باشد [۱۴].

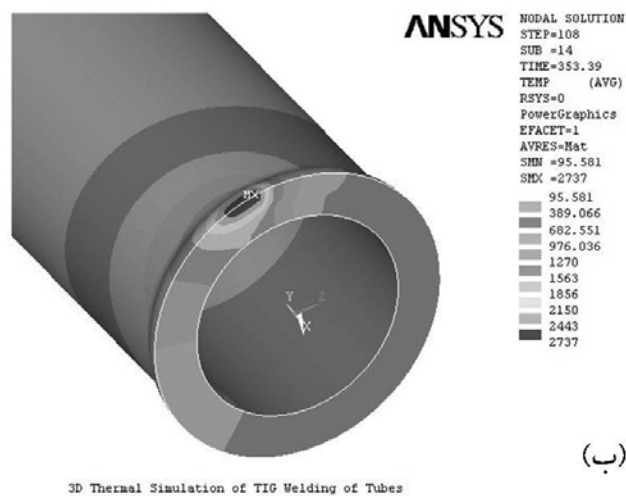
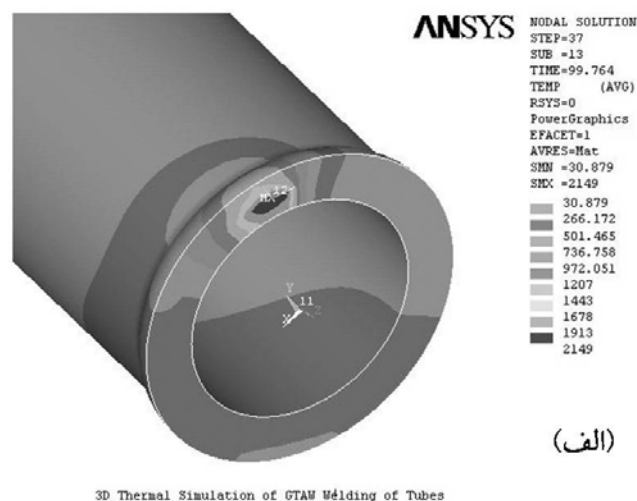
به تکنیک تولد و مرگ المانها، مرده اند. از این رو انرژی بسیار کمی برای آنها به کار گرفته شده است. در شکل (۱۱-ب) سطح مقطع عرضی جوش در نمونه S۲ مشاهده می شود. از مقایسه نتایج شبیه سازی با سطح مقطع عرضی جوش در نمونه واقعی مشاهده می شود که ابعاد حوضچه جوش در پاسهای اول و دوم در مدل و نمونه واقعی شباهت قابل قبولی با هم دارند.

۳-۵- نتایج شبیه سازی گرمایی

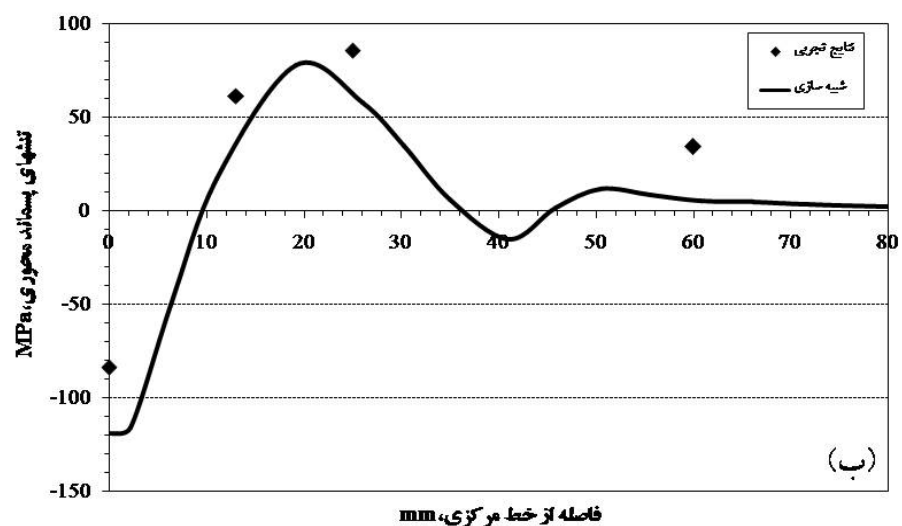
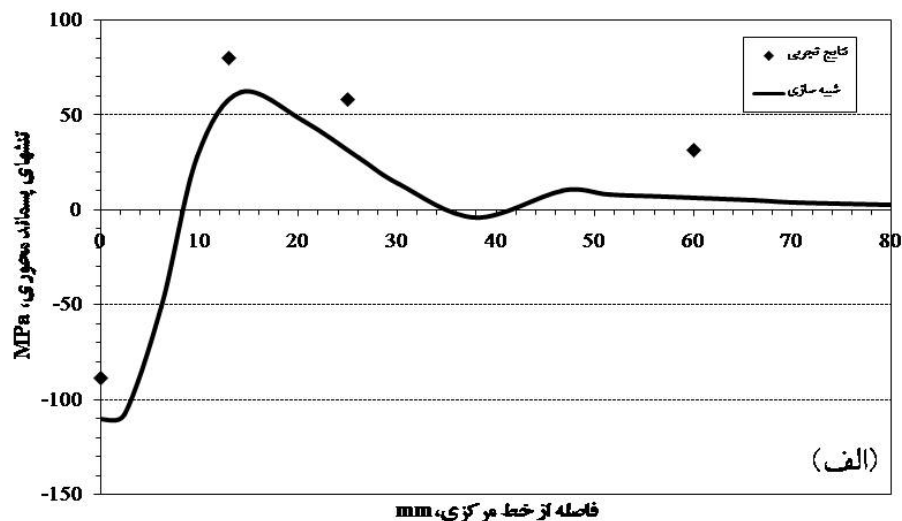
در شکلهای (۱۲-الف) و (۱۲-ب) چگونگی حرکت حوضچه جوش و نحوه توزیع دمایی حاصل از آن به ترتیب در پاس اول و پاس دوم نشان داده شده است. این نتایج مربوط به نمونه S۲ می باشد. نوع جریان با توجه به نحوه



شکل ۱۱- الف) توزیع دمایی در مقطع طولی مدل در قسمتی از پاس اول (سمت چپ) و پاس دوم (سمت راست) و ب) تصویر متالوگرافی سطح مقطع عرضی جوش در نمونه S۲.



شکل ۱۲- نحوه حرکت حوضچه و نحوه توزیع گرمایی حاصل از آن در زمانی از الف) پاس اول و ب) پاس دوم.

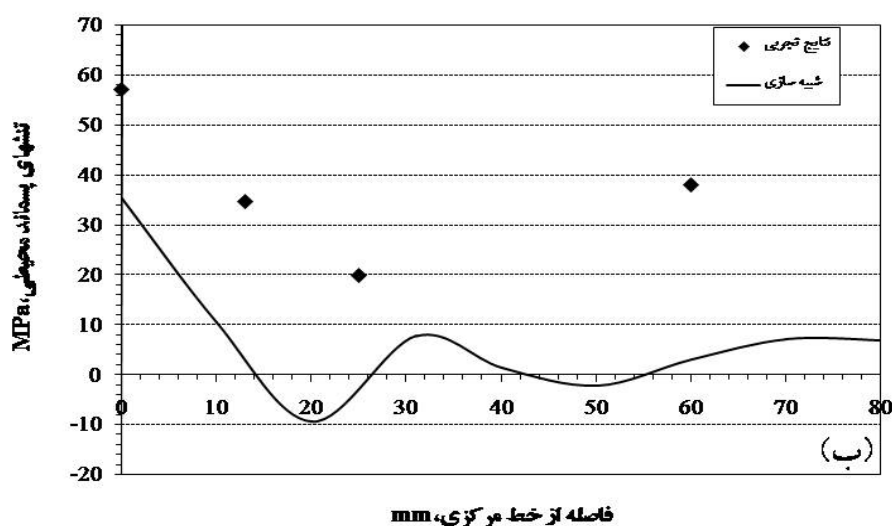
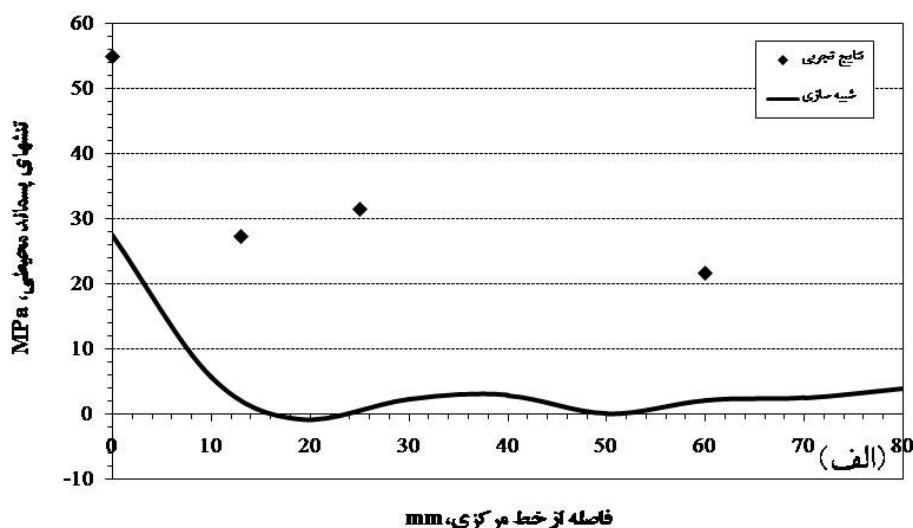


شکل ۱۳- نحوه توزیع تنش‌های پسماند محوری بر روی سطح بیرونی لوله در نمونه الف) S1 و ب) S3.

۴-۵- اعتبارسنجی مدل مکانیکی

در این قسمت، نتایج مکانیکی حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده به روش کرنش‌سنجی سوراخ برای لوله‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر مقایسه شده است. در شکل‌های (۱۳-الف) و (۱۳-ب) نحوه توزیع تنش‌های پسماند محوری و در شکل‌های (۱۴-الف) و (۱۴-ب) نحوه توزیع تنش‌های پسماند محیطی بر روی سطح بیرونی مدل در زاویه ۹۰ درجه از نقطه شروع جوشکاری و در راستای محور مدل به ترتیب برای نمونه‌های S1 و S3 نشان داده شده است. نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی تنش‌های پسماند در شرایط

فوق نیز در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق قابل قبولی با روند نتایج تجربی نشان می‌دهند. یکی از نکات مهم در استفاده از روش کرنش‌سنجی سوراخ، استفاده از مته‌ای با سرعت چرخش بسیار بالا در حدود ۴۰۰۰ دور بر دقیقه است. استفاده از مته‌های با دور پایین باعث ایجاد تنش‌های پلاستیک در اطراف سوراخ ایجاد شده می‌شود. از این رو، یکی از علل عدم تطابق نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی را می‌توان در استفاده از مته‌ای با سرعت ۱۷۰۰ دور بر دقیقه در کار حاضر دانست. با این



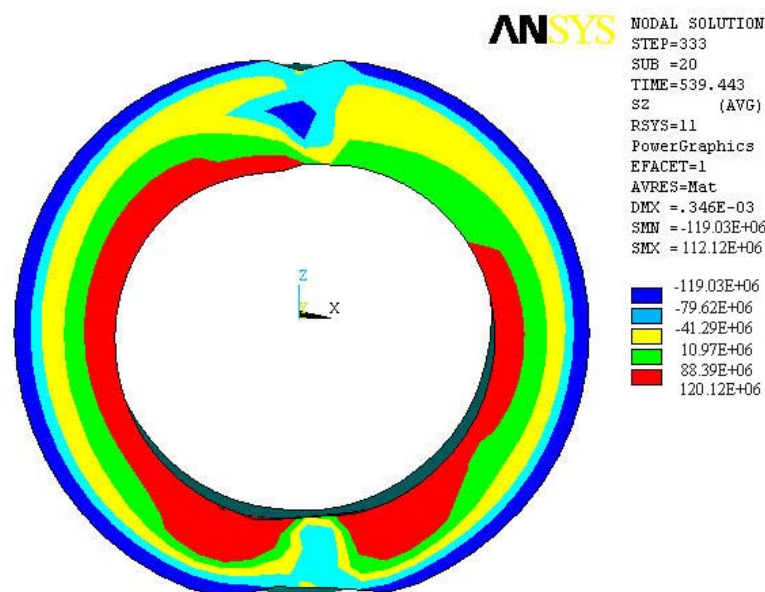
شکل ۱۴- نحوه توزیع تنشهای پسماند محیطی بر روی سطح بیرونی لوله در نمونه الف) S۱ و ب) S۳.

لوله از سمت داخل به بیرون دارای توزیعی کششی- فشاری است. روند تغییرات تنشهای پسماند محوری بر روی صفحه تقارن، در زاویه 90° نسبت به نقطه شروع جوشکاری در مدل، برای نمونه S۱ بر حسب فاصله نرماله، x/t ، در شکل (۱۶) نشان داده شده است. پارامتر t نشان دهنده ضخامت لوله و x فاصله شعاعی پیموده شده از سطح داخل به سمت سطح بیرونی است که از صفر تا t تغییر می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان این تنشها در سطح داخلی از مقدار کششی $120 \text{ MPa} +$ به مقدار فشاری $119 \text{ MPa} -$ بر روی سطح بیرونی تغییر می‌کند. خط راست نشان داده شده در این شکل، نشان‌دهنده نحوه

وجود، با توجه به شکلهای تطابق قابل قبولی خصوصاً در روند تغییرات تنشهای پسماند در دو حالت شبیه‌سازی و تجربی مشاهده می‌شود.

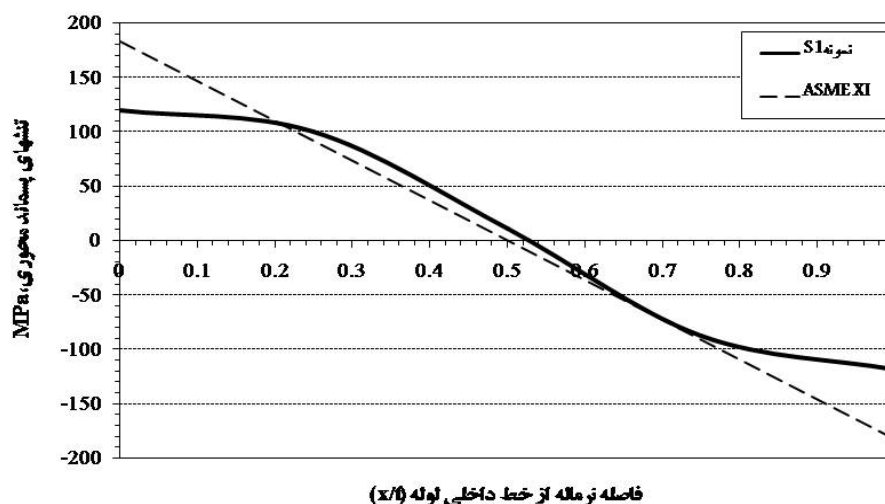
۵-۵- نتایج شبیه‌سازی مکانیکی

در شکل (۱۵) کانتور توزیع تنشهای پسماند محوری در خط مرکزی جوش بر روی صفحه تقارن مدل نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نحوه توزیع تنشها در نقاط آغاز و پایان هر نیم پاس از سایر قسمتها اندکی متفاوت است. به جزء نقاط فوق، تنشهای پسماند محوری در امتداد ضخامت



3D Mechanical Simulation of GTAW Welding of Tubes

شکل ۱۵- کانتور توزیع تنشهای پسماند محوری در امتداد ضخامت و در صفحه تقارن مدل برای نمونه S1.

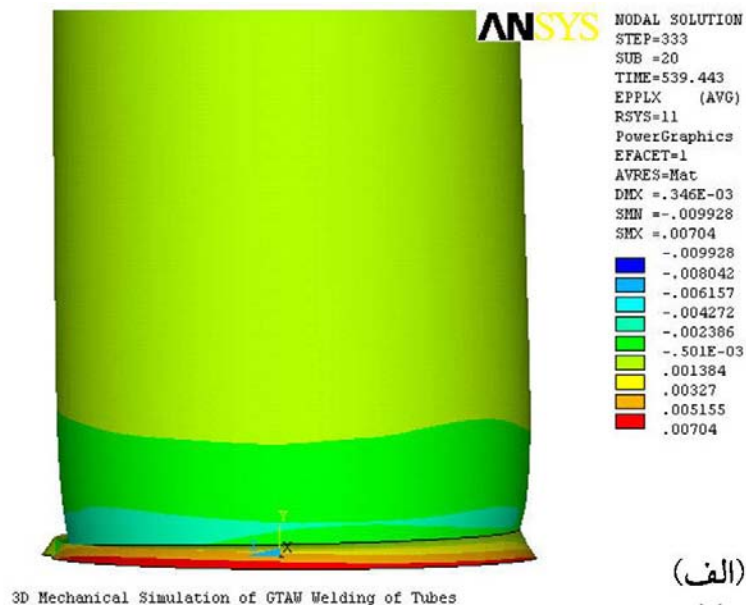


شکل ۱۶- نحوه توزیع تنشهای پسماند محوری حاصل از شبیه سازی در امتداد ضخامت و در صفحه تقارن مدل برای نمونه S1.

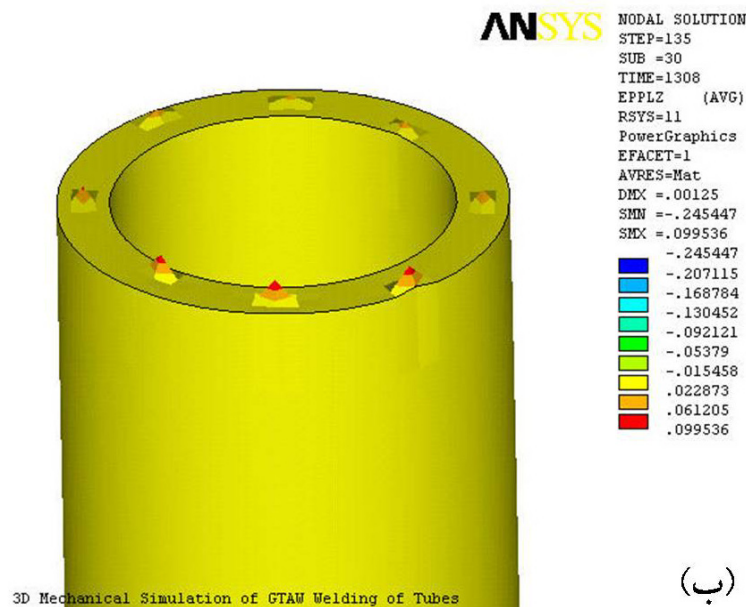
در راستای محور لوله و به سمت خط مرکزی جوش و حرکت به سمت ریشه جوش. حرکت دوم در جوشکاری سربه سر لوله ها، باعث ایجاد انقباض محیطی در فلز جوش و ناحیه مجاور آن و در نتیجه بروز پدیده ای به نام اثر شریان بند^۹ می شود. هر دو نوع حرکت فوق در نتایج شبیه سازی نیز مشاهده شدند. اثر شریان بند در شکل (۱۷-الف) نشان داده شده است. در این شکل فلز جوش و ناحیه مجاور آن با بزرگنمایی بالا مشاهده می شود.

توزیع تنشهای پسماند محوری در امتداد ضخامت است که توسط استاندارد ASME برای لوله هایی با ضخامت کمتر از ۲۵mm پیشنهاد شده است [۲۲]. همان طور که مشاهده می شود، تطابق قابل قبولی بین نتایج شبیه سازی و مقادیر پیشنهاد شده توسط ASME وجود دارد.

دو نوع حرکت در حین جوشکاری فلزات می تواند منجر به تغییر شکل پلاستیک و ایجاد تنشهای پسماند در فلز شود. حرکت



3D Mechanical Simulation of GTAW Welding of Tubes

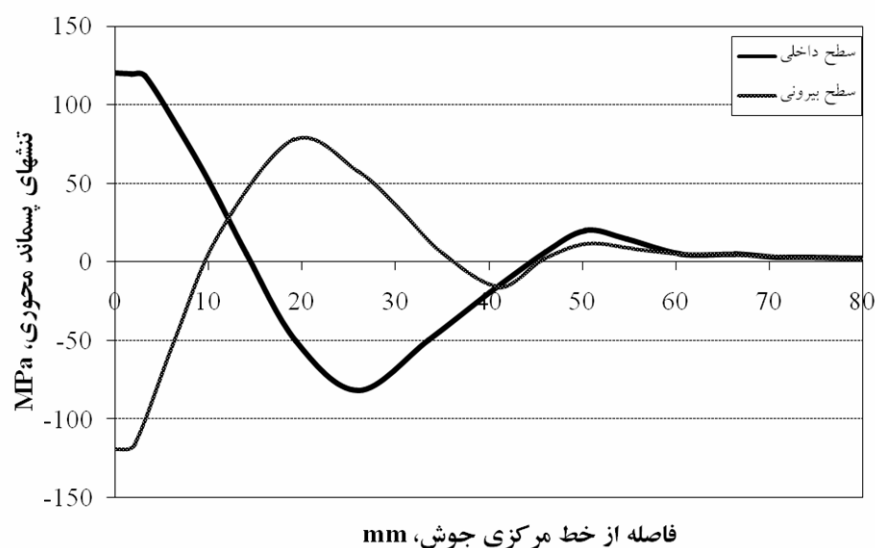


3D Mechanical Simulation of GTAW Welding of Tubes

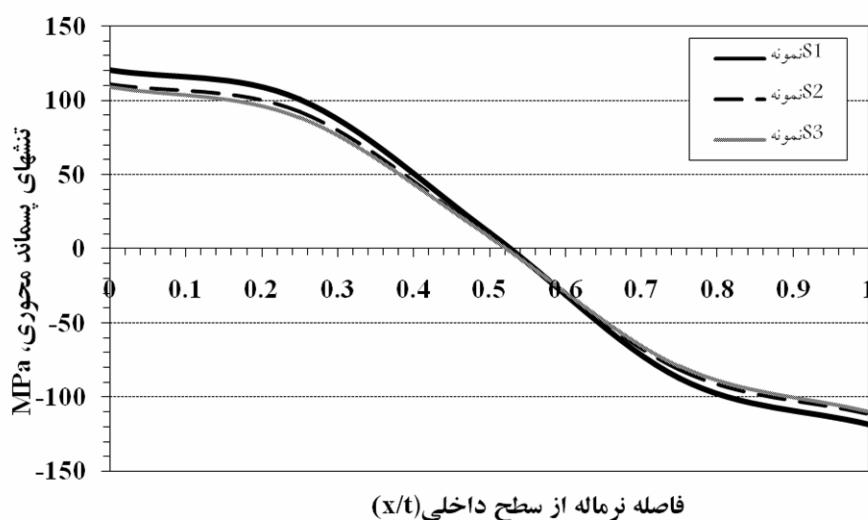
شکل ۱۷- (الف) انقباض محیطی در فلز جوش و ناحیه مجاور آن و (ب) انقباض محوری و حرکت فلز به سمت خط مرکزی جوش.

در شکل (۱۸) روند تغییرات تنشهای پسماند محوری روی سطوح داخلی و خارجی نمونه S۱ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنشهای پسماند محوری دارای توزیعی فشاری-کششی در سطح خارجی و توزیعی کششی-فشاری در سطح داخلی است. این نوع تغییرات نیز ناشی از حرکت فلز در حین جوشکاری است.

حرکت نوع اول که حرکت در راستای محور و در جهت عمود بر خط جوش و به سمت آن است نیز در شکل (۱۷-ب) مشاهده می‌شود. این شکل مربوط به قسمت انتهایی مدل است. نقاط با رنگ قرمز در این شکل همان نقاط با درجات آزادی صفر هستند که در شکل (۷) نشان داده شد. این نقاط و کانتور اطراف آنها نشان‌دهنده حرکت لوله به سمت خط مرکزی جوش است.



شکل ۱۸- روند تغییرات تنشهای پسماند محوری بر روی سطح داخلی و خارجی نمونه S۱.



شکل ۱۹- نحوه توزیع تنشهای پسماند محوری در امتداد ضخامت در سه نمونه S۱، S۲ و S۳.

۵-۶- اثر میزان گرمای ورودی بر تنشهای پسماند

یکی از متغیرهای مهم و تاثیرگذار بر روی میزان تنشهای پسماند، میزان گرمای ورودی است. تغییر در میزان گرمای ورودی موجب تغییر در تنشهای پسماند محوری و نتیجتاً تغییر در اندازه مجاز عیوب مانند ترکها می شود. در واقع تنشهای پسماند کششی کمتر در سطح داخلی لوله، باعث افزایش اندازه مجاز عیوب می شود. شکل (۱۹) منحنیهای نحوه توزیع تنشهای

پسماند محوری بر حسب فاصله نرماله شده در سه نمونه S۱، S۲ و S۳ را نشان می دهد. مطابق شکل روند تغییرات در هر سه نمونه مشابه یکدیگر است. مقدار مطلق تنشهای پسماند در سطح بیرونی و درونی برای نمونه S۱ بیشتر از نمونه های S۲ و S۳ است. علت این امر تفاوت در مقدار گرمای ورودی در نمونه هاست. گرمای ورودی در نمونه S۱ به مقدار قابل توجهی بیشتر از نمونه های S۲ و S۳ است.

۶- نتیجه گیری

- ۱- مقایسه نتایج شبیه سازی حاصل از مدل گرمایی با مقادیر تجربی نشان داد که مدل حاضر قادر به پیش بینی صحیح نحوه توزیع گرما حین جوشکاری لوله های سوپرآلیاژ اینکولوی ۸۰۰ است.
- ۲- در نظر گرفتن افزایش ضریب هدایت حرارتی در حالت مذاب با ضریب حدوداً ۲ برابر به منظور لحاظ کردن اثر تلاطم در حوضچه جوش، نتایج قابل قبولی را در پیش بینی عرض حوضچه جوش ارائه داد.

واژه نامه

- | | | |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| 1. finite element method | 4. string | 7. axisymmetric |
| 2. gas tungsten arc welding | 5. hole drilling method | 8. weld center line |
| 3. ANSYS parametric design language | 6. Goldak | 9. tourniquet effect |

مراجع

1. Masubuchi, K., *Analysis Of Welded Structures*, Pergamon Press, New York, 1980.
2. Feng, Zh., *Processes And Mechanisms Of Welding Residual Stress And Distortion*, Woodhead Publishing, 2005.
3. Sarkani, Sh., Tritchkov, V., and Michaelov, "G., An Efficient Approach For Computing Residual Stresses in Welded Joints," *Finite Element In Analysis And Design*, Vol. 35, pp. 247-268, 2000.
4. Messler Jr. RW, *Principles of Welding*, Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 181 – 215, 2004.
5. Lee, C. H. and Chang, K. H., "Three-Dimensional Finite Element Simulation of Residual Stresses in Circumferential Welds of Steel Pipe Including Pipe Diameter Effects," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 487, pp. 210-218, 2008.
6. Carvalho Silva, C., and Pereira Farias, J., "Non-Uniformity of Residual Stress Profiles in Butt-Welded Pipes in Manual Arc Welding, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 199, pp. 452-455, 2008.
7. Li, L, Renfu, W, Gang, X, and Xiangjun, M, "Numerical Simulation on Residual Stress Distribution of the Pipe-Plate Welding," *Key Engineering Materials*, Vol. 417-418, pp. 937-940, 2010.
8. Brickstad, B., and Josefson, B. L., "A Parametric Study Of Residual Stresses In Multy Pass Butt Welded Stainless Steel Pipes," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.75, pp. 11-25, 1998.
9. Law, M., Prask, H., Luzin, V., and Gnaeupel-Herold, T., "Residual Stress Measurements In Coil, Linepipe and Girth Welded Pipe," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 437, pp. 60-63, 2006.
10. Basavarajo, CH., "Simplified Analysis of Shrinkage in Pipe to Pipe Butt Welds," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 197, pp. 239-247, 2000.
11. ASME Standard SB-515, Specification for Welded UNS N08800, and UNS N08810, and UNS N08811 alloy tubes, Section II, 2001.
12. ASM Hand Book, Welding, Brazing, and Soldering, Vol.6, 9th Edition, ASM International, United State of America, 1981.
13. Hoobasar R., *Pipe Welding Procedures*, Industrial Press, Edition2, 2003.
۱۴. یگانه اصفهانی، و.، شبیه سازی عددی حرارتی ساختاری جوشکاری قوسی سوپرآلیاژ اینکولوی ۸۰۰، دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.
15. ASTM Standard E837-95, Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method, ASTM Standard, Vol.03.01, 1997.
16. Goldak, J., Chakaravarti, A. and Bibby, M., "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources," *Metallurgical Transactions B*, Vol. 15B, pp.299-305, 1984.
17. Brickstad, B., and Josefson, B. L., "A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-

- Welded Stainless Steel Pipes,” *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, Vol. 75, pp. 11-25, 1998.
18. Zhu, X. K., “Effects of Temperature-Dependent Material Properties on Welding Simulation,” *Computers and Structures*, Vol. 80, pp. 967-976, 2002.
 19. Little, G. H., and Kamtekar, A. G., “The Effect of Thermal Properties and Weld Efficiency on Transient Temperature During Welding,” *Computers and Structures*, Vol. 68, pp. 157-165, 1998.
 20. Komanduri, R., and Hou, Z. B., “Thermal Analysis of the Arc Welding Process: Part II. Effect of Variation of Thermophysical Properties with Temperature,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 32B, pp. 483-493, June 2001.
 21. Lu, M. and Kou, S., “Power and Current Distribution In Tungsten Arcs,” *Welding Journal*, pp. 29-33, 1988.
 22. ASME Section XI,” Task group for piping flaw Evaluation Pressure Vessel and Piping Codes.” *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 108, pp. 352-366, 1986.