

بررسی عددی و تجربی توزیع تنشهای پسماند در اتصال جوش تجهیزات تحت فشار پوسته-تیوب

داریوش دانیالی^{۱*}، اسلام رنجبر نوده^۲

۱- کارشناس ارشد جوشکاری شرکت فولاد خوزستان، (پست الکترونیک: d.danyali@yahoo.com)

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (پست الکترونیک: islam_ranjbar@yahoo.com)

Numerical and experimental investigation of the residual stress distribution in shell-tube pressure vessels weld joint

D. Danyali^{1*}, E. Ranjbarnodeh²

1- Master of Science in Welding, Khozestan Steel Company, E-Mail: d.danyali@yahoo.com

2- Mining and metallurgical engineering department assistant professor, Amir Kabir of University

Technology, E-Mail: islam_ranjbar@yahoo.com

چکیده

اتصال جوش تیوب به صفحه تیوب از مقاطع بحرانی تجهیزات تحت فشار پوسته- تیوب محسوب می‌گردد. نشی و شکست دو مشکل رایج در این اتصال می‌باشند. تنشهای پسماند کششی ناشی از جوشکاری نقش مهمی در ایجاد این دو مشکل دارند. در این تحقیق از روش المان محدود به منظور پیش بینی مقدار و نحوه توزیع تنشهای پسماند در جوش تیوب به صفحه تیوب استفاده شده است. اتصال با یک پاس جوش گوشه ای محیطی، به روش جوشکاری قوسی تنگستنی با گاز محافظ، جوشکاری گردیده است. فرآیند جوشکاری به صورت دو بعدی با تقارن محوری، در نرم افزار ANSYS شبیه سازی شده و شار حرارتی ناشی از قوس جوشکاری بصورت تابعی از زمان، به شکل تابع گوسی، بوسیله یک زیر برنامه اعمال گردیده است. برای اعتبارسنجی به نتایج شبیه سازی، توزیع حرارتی در حین جوشکاری به کمک ترموگرافی و تنش پسماند با تکنیک کرنش سنجی سوراخ تحت عملیات حرارتی اندازه گیری شده است. حداکثر تنش پسماند بر اساس معیار تسلیم فون میز ۱۰۵ مگاپاسکال و حداکثر مقدار تنش پسماند بر اساس معیار شدت تنش ۱۱۵ مگاپاسکال، در ریشه اتصال مشاهده شده است. حداکثر اختلاف نتایج تحلیل حرارتی و تحلیل مکانیکی به روش المان محدود و تجربی، به ترتیب حدود ۱۱٪ و ۱۸٪ بوده است.

واژه‌های کلیدی: پوسته-تیوب، صفحه - تیوب، تجهیزات تحت فشار، تنش پسماند، روش المان محدود، ترموگرافی

Abstract

Tube-sheet to tube weld joint is a critical section in shell-tube pressure vessels. The leakage and failure are two common problems that happen in this joint. The tensile residual stresses associated with welding can play a major role in the mentioned problems. In the present study, residual stresses distribution is investigated by Finite Element Method and experimental tests. The joint includes a circumferential fillet weld in one pass by Gas Tungsten Arc Welding process. The thermo-mechanical behavior of the joint is simulated by a 2D axisymmetric model using a subroutine developed in ANSYS software. The thermography Method used to thermal analysis verification and the Whole Drilling Strain Gauge under Post Weld Heat Treatment used to mechanical analysis verification. The numerical and experimental results show that the residual stress as von Mises criteria is about 105 MPa and as stress intensity criteria is about 115 MPa in root of Tube-sheet to tube weld joint. Maximum difference between numerical and experimental results, in thermal analysis and mechanical analysis, is about 11% and 18% respectively.

Keywords: Shell-tube, Tube-sheet, Pressure vessels, Residual Stress, Finite Element Method, Thermography

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

و بررسی تاثیر جوشکاری بر مقدار تنش‌های پسماند در این نوع اتصال و اعتبار سنجی آن به روش تجربی استفاده شده است.

مواد و روش تحقیق

پیشینه تحقیق

بررسی تنش‌های حرارتی در جوشکاری از سال ۱۹۳۰ آغاز گردید و اولین نتایج آن در سال ۱۹۳۶ ارائه شد. در اوایل دهه ۱۹۷۰، محققان با استفاده از روش المان محدود و با انجام تحلیل‌های ترموالاستو - پلاستیک، به محاسبه میدان‌های حرارتی و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکار پرداخته اند (Masubuchi, 1980). اخیراً، روش‌های عددی برای پیش بینی مقادیر تنش پسماند مورد استفاده قرار گرفته است که بررسی مقدار و نحوه توزیع تنش پسماند را بسیار آسان تر کرده است که بر این اساس، مقالات زیادی را می توان مشاهده کرد که در آنها از روش المان محدود برای تحلیل فرایند جوشکاری استفاده شده است (پورمحمدی و همکاران، ۱۳۸۸).

از جمله ی این تحقیقات می توان به تاثیر حالت‌های مختلف جوشکاری بر تغییر شکل‌های جوشی و تغییر قطر لوله، اشاره کرد که نشان داده شده است که ترتیب جوشکاری می تواند تا حد زیادی مقدار اعوجاج پس از جوشکاری لوله‌ها را کاهش دهد. (Akbari & Sattari-Far, 2009)

در مطالعه ای دیگر تاثیر حرارت بر توزیع تنش پسماند در لوله‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن SUS304 را به روش المان محدود و تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است (Deng & Murakawa, 2006). مطابق اطلاع نویسندگان این مقاله، بر خلاف تحقیقات گسترده ای که در مورد شبیه سازی جوش لوله و ورق انجام شده است، در مورد جوشکاری اتصال تیوب - صفحه تیوب به عنوان یکی از مهمترین و حساس ترین تجهیزات دارای پوسته - تیوب، تحقیقات بسیار محدودی انجام گردیده است. در سال‌های اخیر، در زمینه شناسایی نقاط بحرانی و مستعد جوانه و رشد ترک در بویلرها شکل ۱ تحقیقات محدودی انجام گردیده است. (Shugen & Weiqiang, 2013)

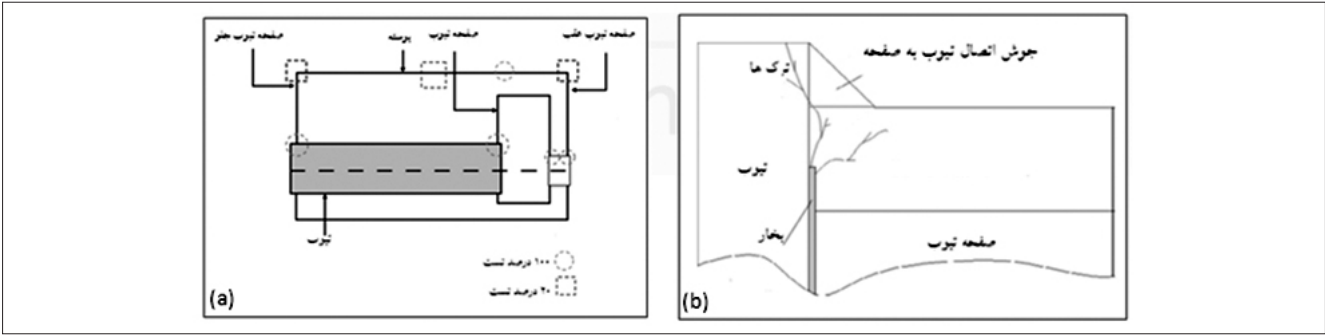
محدودیت تعداد روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های پسماند، هزینه زیاد اجرای روش‌های موجود و محدودیت اجرایی روش‌های موجود برای اتصالات با هندسه پیچیده نظیر اتصال جوش تیوب به صفحه تیوب در بویلرها باعث گردیده است که روش‌های جدیدی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند. در سال ۲۰۰۱ یک روش تجربی برای محاسبه تنش‌های پسماند بوسیله ایجاد سوراخ در جوش و اندازه‌گیری تنش‌های پسماند قبل و پس از انجام عملیات حرارتی ۴

یکی از مهمترین عوامل در تحلیل حوادث تجهیزات تحت فشار دارای پوسته - تیوب، بررسی وجود تنش‌ها بویژه تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری می‌باشد. تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری باعث از بین رفتن یکپارچگی سازه می‌گردند و نقش مهمی در ایجاد و رشد ترک خستگی، بخصوص در جوش‌های گوشه ای تحت بارگذاری‌های سیکلی دارند. (Tait & Press, 2001) ایجاد و گسترش ترک در جوش‌های تیوب به صفحه تیوب مشکل رایج تجهیزات تحت فشار دارای پوسته - تیوب می‌باشد. (Tait & Press, 2001) این ترک‌ها اغلب ناشی از جوشکاری، خستگی حرارتی ۱، خوردگی خستگی ۲ یا خوردگی موضعی ۳ می‌باشد (Tait & Coetzee & Shephed, 1994). به منظور جلوگیری از تاثیر مخرب تنش‌های پسماند کششی بر روی مقاطع جوشکاری شده، باید مقدار و چگونگی توزیع این تنش‌ها شناسایی گردیده و مقدار آنها به حداقل ممکن برسد یا در بهترین حالت به تنش‌های فشاری تبدیل شوند. (Tait & Press, 2001)

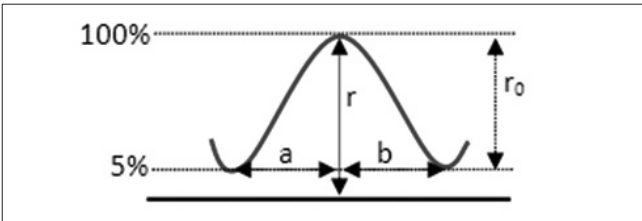
محاسبه مقدار تنش‌های پسماند می‌تواند به روش‌های تجربی، عددی و تئوری انجام گردد. محاسبه مقدار تنش پسماند کششی ناشی از جوشکاری بصورت تجربی، فرآیندی از نظر زمانی طولانی، از نظر ابعاد قطعه و طرح اتصال جوش دارای محدودیت اجرایی و همچنین نیازمند تجهیزات دقیق، حساس، گرانبیتم و پیشرفته می‌باشد. به دلایل ذکر شده استفاده از روش‌های شبیه سازی عددی برای پیش بینی مقدار و نحوه توزیع تنش‌های پسماند گسترش یافته است (مشایخی، هدایتی، ۱۳۹۰). پیش بینی مقدار تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری لوله‌ها، مرحله ی جدیدی از کاربرد روش المان محدود برای تجهیزات تحت فشار را مطرح نمود (پورمحمدی، کرمانپور، شمعیان، ۱۳۸۸). از جمله روش‌های تجربی می‌توان به روش‌های کرنش سنجی سوراخ (Rendler & Vigness, 1966) و کرنش سنجی سوراخ تحت عملیات حرارتی (Tait & Press, 2001) اشاره کرد.

از جمله تجهیزات مهم و بسیار حساس تحت فشار پوسته - تیوب، بویلرها می‌باشند. اتصال تیوب به صفحه تیوب یکی از نقاط حساس و بحرانی در بویلرها می‌باشد. این اتصال محل جداسازی حرارت، سیال هوای گرم و بخار می‌باشد و تاثیر زیادی در ایمنی بهره برداری از این تجهیزات دارد. این اتصال به روش انبساط تیوب، جوشکاری یا ترکیبی از این دو روش انجام می‌گردد که در سال‌های اخیر استفاده از روش جوشکاری برای این نوع اتصال، رایج تر و گسترده تر گردیده است (Shugen & Weiqiang, 2013).

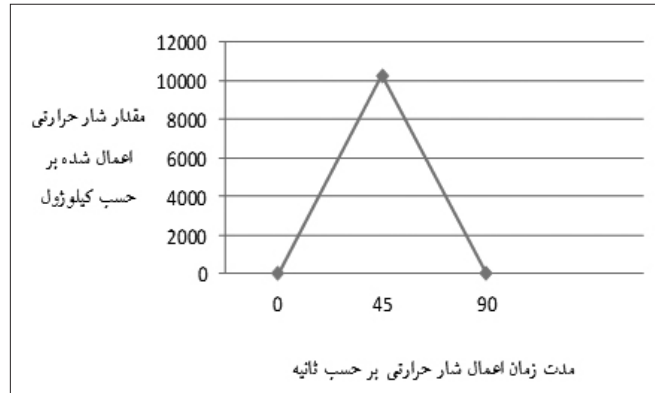
در این تحقیق از روش المان محدود برای پیش بینی مقدار و نحوه توزیع تنش‌های پسماند در جوش تیوب به صفحه تیوب بویلر



شکل ۱- شماتیک طرح اتصال: (a) نقاط حساس و بحرانی بویلر (b)، تشکیل ریز ترک‌ها در جوشهای اتصال تیوب به صفحه تیوب. (Tait & Press, 2001)



شکل ۲- شماتیکی از قوس جوشکاری بصورت تابع گوسین (This Study).



نمودار ۱- سیکل اعمال شار حرارتی حین جوشکاری (This Study).

در این معادله $q(r)$ مقدار شار حرارتی بر حسب W/m^2 است که حین فرآیند جوشکاری قوسی به شکل تابع گوسین، توزیع می‌شود. r فاصله سطح قطعه از مرکز قوس جوشکاری است. مقدار r متغییر بوده و تابع فاصله قوس از المانهای سطحی مقطع جوش می‌باشد. Q مقدار گرمای ورودی است که از معادله (۳) محاسبه می‌گردد:

$$Q = V.I.h \quad (3)$$

که در این معادله h ضریب راندمان جوشکاری، V ولتاژ جوشکاری و I جریان جوشکاری می‌باشد. در این تحقیق مقادیر، V و I به ترتیب $120A$ ، $10v$ و 0.85 در نظر گرفته شده اند. نمودار ۱، سیکل اعمال شار حرارتی حین جوشکاری را نشان می‌دهد.

r_0 شعاع دایره ای است که ۹۵ درصد کل شار حرارتی به آن اعمال می‌شود. با توجه به اینکه امکان تعیین مقدار دقیق r_0 میسر نمی‌باشد، قوس جوشکاری معولاً بصورت شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود و مقدار r_0 بصورت تقریبی از معادله (۴) محاسبه می‌گردد:

$$r_0 = [(a+b)/2] \quad (4)$$

در این تحقیق مقدار r_0 برابر 10mm در نظر گرفته شده است.

مدل هندسی و شبکه بندی

اگر چه در عمل جوشکاری بصورت سه بُعدی انجام می‌گردد، اغلب برای تحلیل جوش‌های محیطی از مدل دو بُعدی با تقارن محوری استفاده می‌گردد. اجرای مدل دو بُعدی سریع تر و ساده تر است (Deng & Murakawa, 2006) و (Soanes & Bell & Vibert, 2005). بنابراین در این تحقیق برای تحلیل حرارتی - سازه ای، از مدل دو بُعدی با تقارن محوری استفاده شده است.

در اتصال جوش تیوب به صفحه تیوب در بویلرهای صنعتی مورد مطالعه قرار گرفته است. (Tait & Press, 2001)

مواد و روش تحقیق المان محدود

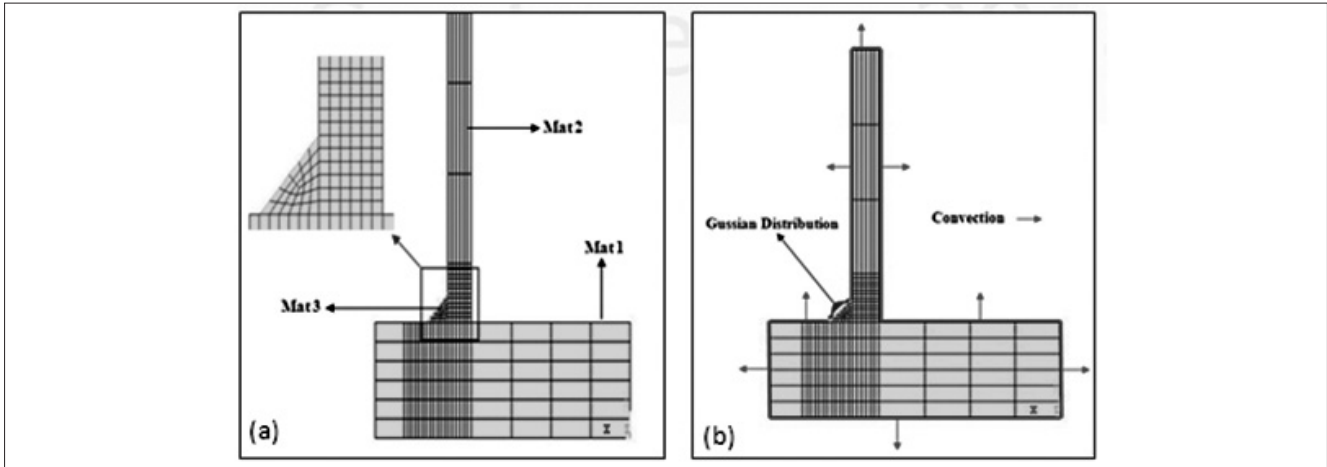
مدل حرارتی

معادله توزیع دما در حالت گذرا، بر اساس قانون فوریه بصورت زیر تعریف می‌شود:

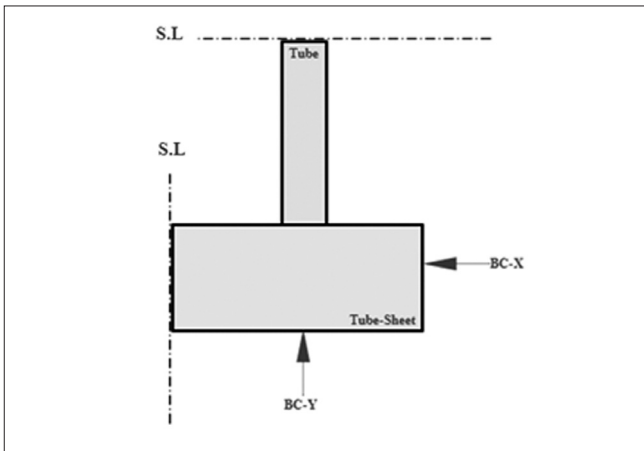
$$\rho.C_p(\partial/\partial t) = \partial/\partial X[K_x(dT/dX)] + \partial/\partial y[K_y(dT/dY)] + \partial/\partial Z[K_z(dT/dZ)] + Q \quad (1)$$

که در معادله (۱)، C_p گرمای ویژه بر حسب $J/Kg.^{\circ}K$ چگالی بر حسب kg/m^3 ، K ضریب هدایت حرارتی بر حسب $W/m.^{\circ}K$ ، Q مقدار حرارت ورودی بر حسب W و T درجه حرارت در هر لحظه از جوشکاری بر حسب $^{\circ}K$ می‌باشند. یکی از مهمترین مسائلی که تحقیقات گسترده ای روی آن انجام گرفته، یافتن معادله‌هایی برای اعمال شار حرارتی ه اعمال شده توسط قوس الکتریکی جوشکاری در محل اتصال می باشد. با توجه به توزیع حرارت جوشکاری قوسی بصورت تابع گوسین (مجذوبی، سیفی، علی اکبر، ۱۳۹۰)، معادله ای که در این مقاله برای اعمال شار حرارتی استفاده شده است، مطابق معادله (۲) می‌باشد (Lee & Chang, 2008):

$$q(r) = [3Q/(\pi r_0^2)] \exp[-3(r/r_0)^2] \quad (2)$$



شکل ۳- شبکه بندی و بارگذاری: (a) مدل بارگذاری حرارتی و شرایط مرزی حرارتی اعمال شده بر مدل (This Study).



شکل ۴- شماتیک شرایط مرزی مکانیکی اعمال شده بر مدل هندسی (This Study).

برای تحلیل حرارتی - سازه ای، یک بخش از اتصال تیوب به صفحه تیوب، مورد تحلیل المان محدود قرار گرفته است. برای شبکه بندی از المان حرارتی نوع Plane55، المان سطحی نوع Surf151 و در تحلیل مکانیکی از المان سازه ای نوع Plane82، و در مجموع از ۳۴۶ گره و ۳۰۳ المان در این شبکه بندی استفاده گردیده است.

شکل (a) ۳ هندسه و شبکه بندی طرح اتصال تیوب به صفحه تیوب را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود با نزدیک شدن به خط جوش، به دلیل وجود گرادیانهای حرارتی شدیدتر و در نتیجه نیاز به دقت بالاتر، از المانهای ریزتری استفاده شده است. انتخاب المانهای ریزتر در ناحیه نزدیک به محل اتصال این امکان را فراهم می‌آورد که تحلیل در این ناحیه از مدل با تمرکز بیشتری انجام گردد. در این تحقیق با توجه به پایین بودن ضخامت قطعات اتصال، پیشگرم انجام نگردید و دمای مقطع اتصال و قطعات قبل از شروع جوشکاری 300°K در نظر گرفته شده است. تبادل حرارتی از طریق همرفت برای تمام سطوح مرزی، بجز سطح مورد جوشکاری، در نظر گرفته شده است، شکل (b) ۳. با توجه به تماس سطح قطعه با هوای اطراف، انتقال حرارت بصورت طبیعی فرض گردیده است و مقدار ضریب انتقال حرارت همرفت 15W/m²k در نظر گرفته شده است (Lee & Chang, 2008).

مدل مکانیکی

در تحلیل مکانیکی، تاریخچه حرارتی به دست آمده از تحلیل حرارتی به عنوان یک بارگذاری حرارتی به المانهای سازه ای نوع Plane82 اعمال گردیده است. سپس تنشها و کرنشهای حاصله در هر بازه زمانی با استفاده از یک تحلیل الاستو-پلاستیک برای قطعه محاسبه شده است. این عملیات تا سرد شدن قطعه تا دمای محیط ادامه یافته است. مقادیر محاسبه شده پس از سرد شدن،

نشان دهنده تنشها و کرنشهای پسماند ناشی از جوشکاری هستند. شکل ۴ اعمال شرایط مرزی مدل مکانیکی را نشان می‌دهد. برای اعمال شرایط مرزی مدل مکانیکی، تغییر مکان صفحه تیوب، به دلیل صلیبیت زیاد، در جهت X و در جهت Y صفر لحاظ گردیده است. با توجه به شرایط واقعی در حین جوشکاری در صفحه تیوبهای هر دو طرف تیوب و تقارن محوری در حین جوشکاری، تقارن محوری مدل و شرایط مرزی تقارن محوری (S.L)، متناسب با شرایط واقعی بویلر، برای طرف دیگر تیوب و صفحه تیوب اعمال گردیده است.

مواد و روش تحقیق تجربی

ترکیب شیمیایی مواد

جدول ۱ ترکیب شیمیایی تیوب، صفحه تیوب و فیلر مورد استفاده در جوشکاری را نشان می‌دهد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده. (By Spectrometer analysis, As Esab manufacturer's data).

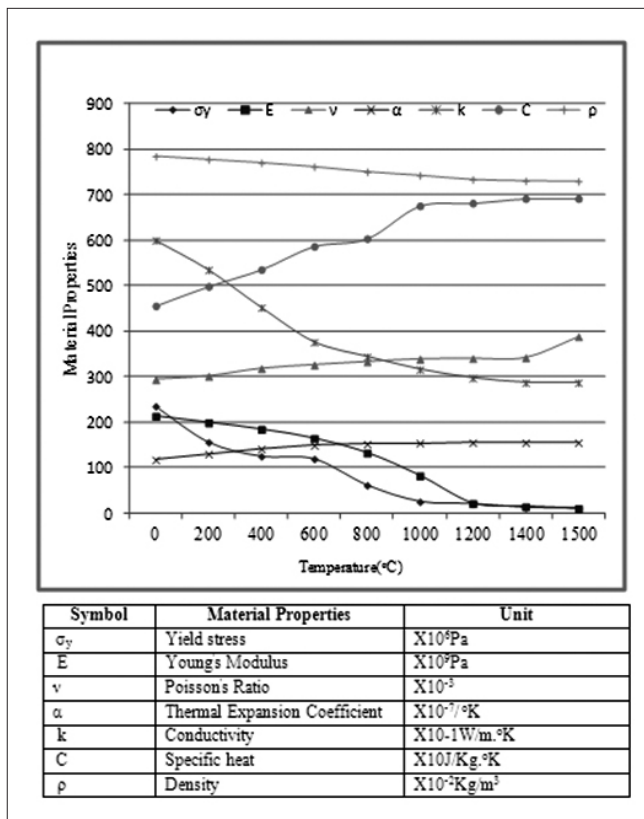
Material	Composition					
	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr
Tube:St35.8(1.0305)	≤0.17	≤0.35	0.40-0.80	≤0.030	≤0.040	-
Tube Sheet:17Mn4(1.0481)	≤0.20	≤0.20	0.90-1.50	≤0.030	≤0.025	≤0.30
Filler:ER70S-6(1.0421)	≤0.20	≤0.41	1.10	≤0.012	≤0.011	-

جدول ۲- ابعاد تیوب و صفحه تیوب (As measured).

Material	(m)Diameter	(m)Width	(m)Longitudinal	(mm)Thickness
Tube	51.8	-	200	3.2
Tube-sheet	-	80	80	12

جدول ۳- پارامترهای جوشکاری (As measured).

Pass No.	Process	Filler Metal		Current			Travel Speed (cm/min)	Gas Flow Rate (lit/min)
		Class	Dia. (mm)	Polarity	Amps	Volts		
1	GTAW	ER70S-6	2.4	DC-	120	10	5	15

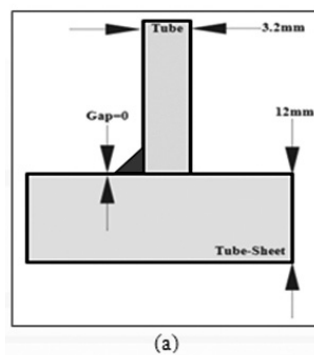


نمودار ۲- خواص ترموفیزیکی - مکانیکی مواد مورد استفاده در جوشکاری (Carbon Steel Handbook, 2007).

تجربی و تحلیل به روش المان محدود در نظر گرفته شده است.

روش انجام جوشکاری

یک پاس جوش به روش جوشکاری قوس تنگستنی با گاز محافظ، تحت شرایط و پارامترهای ذکر شده در جدول ۳ انجام



شکل ۵- طرح اتصال؛ (a) شماتیک، (b) واقعی (This Study).

ابعاد نمونه‌های جوشکاری

جدول ۲ ابعاد نمونه‌های مورد استفاده برای جوشکاری را نشان

می‌دهد.

پارامترهای جوشکاری

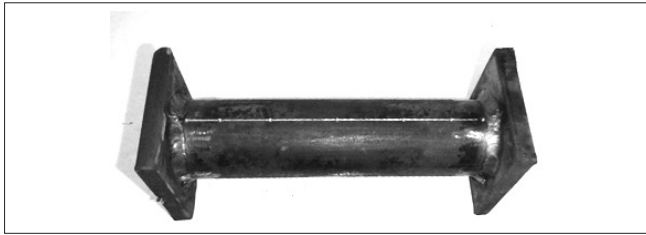
جدول ۳ پارامترهای جوشکاری انجام شده بر روی نمونه‌ها را

نشان می‌دهد.

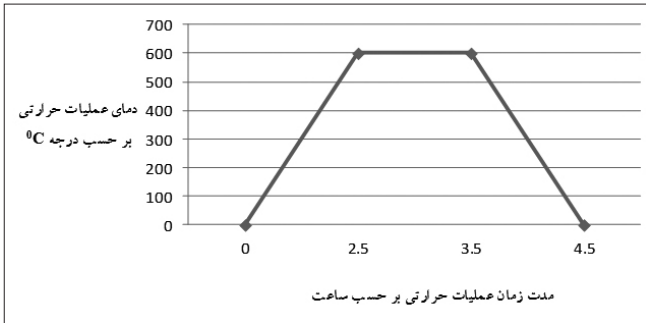
خواص ترموفیزیکی - مکانیکی مواد

با توجه به اینکه روش تحلیل المان محدود برای جوشکاری به صورت غیرخطی است، در نتیجه رفتار برخی خواص مواد تابع درجه حرارت می‌باشند. نمودار ۲ خواص ترموفیزیکی - مکانیکی مواد مورد استفاده در جوشکاری را نشان می‌دهد.

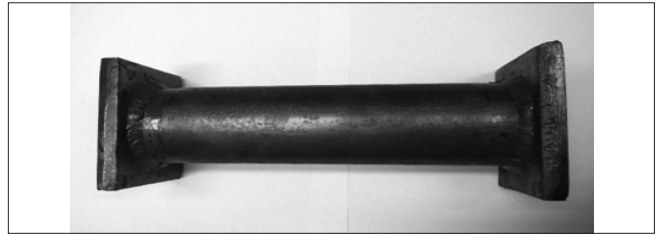
با توجه به نزدیکی خواص مواد مورد استفاده برای تیوب، صفحه تیوب و فیلر مورد استفاده برای جوشکاری، خواص ترموفیزیکی - مکانیکی مواد با تقریب نسبی بصورت نمودار ۲ در بررسی



شکل ۷- تصویری از نمونه سوراخکاری شده برای محاسبه تنش‌های پسماند (This Study).



نمودار ۳- سیکل عملیات حرارتی (This Study).



شکل ۶- تصویر نمونه پس از اتمام جوشکاری (This Study).

گردید. با توجه به پایین بودن ضخامت تیوب و صفحه تیوب، قبل از انجام جوشکاری، تیوب‌ها و ورق‌ها پیشگرم نشدند.

شکل ۶ تصویری از نمونه جوشکاری شده را نشان می‌دهد. این نمونه با همان شرایط واقعی که در هنگام تعویض تیوب بویلر بصورت عملی انجام می‌گردد، جوشکاری گردیده است و پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در حین تعمیر و تعویض تیوبها نیز در روش اجرایی این جوشکاری لحاظ گردیده است.

روش تجربی صحه گذاری بر نتایج تاریخچه حرارتی

برای اندازه‌گیری تاریخچه حرارتی بصورت تجربی، از دستگاه ترموگرافی استفاده گردید. برای این منظور دستگاه ترموگرافی مدل T8 مورد استفاده قرار گرفت. به کمک این دستگاه دمای نقاط مختلف اتصال و اطراف اتصال از زمان شروع جوشکاری تا بعد از عملیات جوشکاری و رسیدن دمای جوش و قطعه به دمای محیط، اندازه‌گیری گردید.

روش اجرایی صحه گذاری بر پروفایل جوش

برای اعتبارسنجی و صحه گذاری بر نتایج پروفایل جوش حاصل به روش المان محدود، از مقطع جوشکاری شده یک نمونه برای بررسی ماکروسکوپی تهیه گردید. مقطع تهیه شده، مورد پولیش قرار گرفت. مقطع پولیش شده به مدت ۳۰ دقیقه در محلول اچ ۷ با ترکیب شیمیایی حاوی ۵۰ میلی لیتر اسید کلریدریک ۳۷ درصد و ۵۰ میلی لیتر آب مقطر قرار گرفت. پس از اتمام زمان اچ، مقطع مورد بررسی ماکروسکوپی قرار گرفت.

روش اجرایی صحه گذاری بر نتایج تنش‌های پسماند

محاسبه تنش‌های پسماند بصورت قابل اعتماد بر روی جوش‌های گوشه ای اغلب دشوار و گاهی غیرقابل اجراست. برای این منظور بسیاری از روش‌های معروف وجود دارد که روش سوراخکاری از جمله این روش‌هاست. این تکنیک بر این اصل استوار است که اگر یک سوراخ در یک قطعه تحت تنش ایجاد گردد، ماده اطراف سوراخ تنش را انتقال می‌دهد که باعث جابجایی و حرکت سوراخ می‌گردد. هر چه این میزان تنش زیادتر باشد،

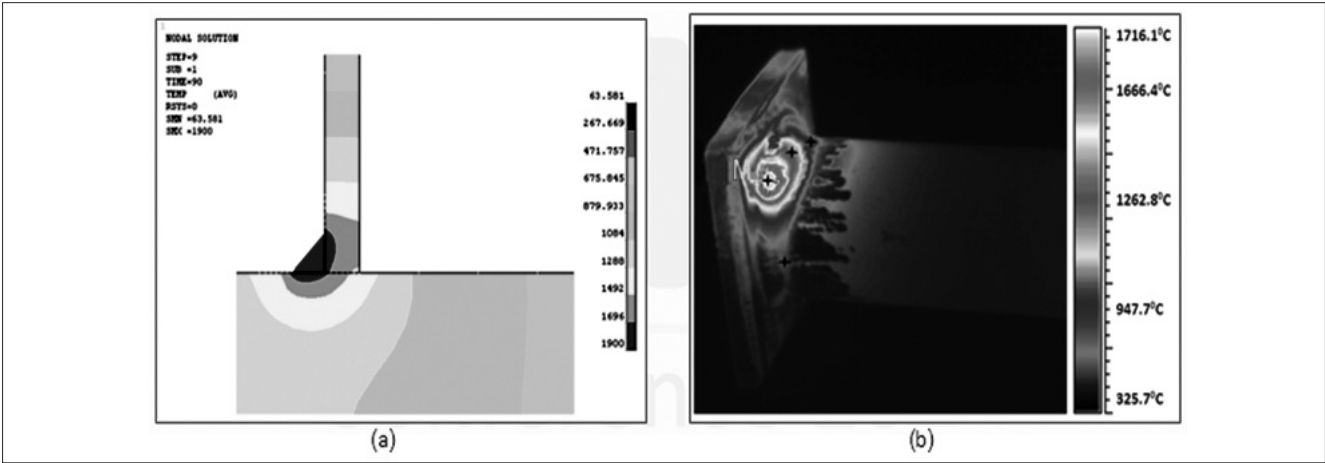
جابجایی سوراخ بیشتر خواهد بود. با تعیین میزان جابجایی سوراخ، مقدار کرنش و در نتیجه میزان تنش‌های پسماند محاسبه می‌گردند. بیشترین خطای این تکنیک در هنگام ایجاد سوراخ بوجود می‌آید (Tait et al., 1994). در این تحقیق تاثیر عملیات حرارتی در کاهش پتانسیل تنش‌های پسماند در هنگام جوشکاری تیوب به صفحه تیوب (در مرحله ساخت یا تعمیر) به عنوان مبنایی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند مورد استفاده قرار گرفته است. مته از جنس فولادهای تندبر ۸ به قطر ۲ میلی متر، سرعت دوران ۲۷۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی مته ۰/۰۵ میلی متر در دور بوده است. شکل ۷ تصویری از نمونه سوراخکاری شده را نشان می‌دهد.

پس از مته زنی، فواصل سوراخ‌ها بوسیله میکرومتر با دقت تا ۰/۰۲ میلی متر اندازه‌گیری و ثبت گردید. پس از اندازه‌گیری فواصل سوراخ‌ها، نمونه‌ها مطابق نمودار ۳ تحت عملیات حرارتی مربوطه قرار گرفتند (BS2790, 1992).

پس از اینکه دمای نمونه‌ها به دمای محیط رسید، فواصل سوراخ‌ها مجدداً با همان نحوه اندازه‌گیری قبل از عملیات حرارتی و بوسیله همان میکرومتر، اندازه‌گیری و ثبت گردید. با داشتن طول جدید و طول قبلی در فواصل مشخص، کرنش و سپس تنش پسماند طبق معادله (۴) محاسبه گردید (Lee & Chang, 2008):

$$\sigma_{xx} = [-E/(1-\nu^2)](e_x + \nu e_y) \quad (4)$$

که در این معادله σ_{xx} تنش پسماند طولی بر حسب Mpa، E مدول الاستیسیته بر حسب Mpa، ν نسبت پواسون، e_x کرنش طولی و e_y کرنش عرضی.



شکل ۸- (a) نتایج تاریخچه حرارتی ثبت شده حین جوشکاری: (a) روش المان محدود، (b) روش تجربی.

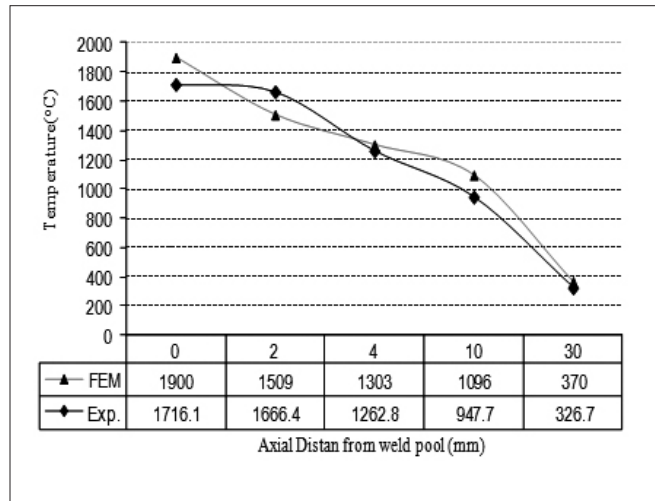
مقایسه نتایج تاریخچه حرارتی ثبت شده به روش المان محدود و بحث

از مقایسه شکل ۸(a) با شکل ۸(b) مشاهده می‌شود که نتایج تاریخچه حرارتی ثبت شده به روش المان محدود و تجربی دارای انطباق بسیار مناسبی هستند. همانگونه که مشاهده می‌شود بیشترین اختلاف درجه حرارت بین دو روش در حوضچه جوش می‌باشد. درجه حرارت حوضچه جوش ثبت شده به روش المان محدود و تجربی به ترتیب ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۷۱۶ درجه سانتی‌گراد است. یعنی اختلاف حدود ۱۰ درصد را نشان می‌دهد. این اختلاف می‌تواند ناشی از تغییرات خواص ترموفیزیکی مواد بصورت تابعی از درجه حرارت، تفاوت در مقدار ضریب هدایت حرارتی و ضخامت بسیار کم تیوب در محل اتصال باشد. به عبارت دیگر احتمالاً «پایین بودن ضخامت تیوب باعث گردیده است که در شرایط واقعی تبادل حرارتی با محیط بیشتر گردد.

با افزایش تبادل حرارتی در شرایط واقعی جوشکاری، دمای حوضچه مذاب مقدار کمتری ثبت گردیده است. بر این اساس نتایج حاصله از ثبت تاریخچه حرارتی با اصول تئوری انطباق منطقی و قابل قبولی داشته و در محدوده‌ی قابل قبول قرار دارد. در روش مشابه ای (مجدوبی و همکاران، ۱۳۹۰)، از روش ترموگرافی برای ثبت تاریخچه حرارتی استفاده کرده اند که نتیجه تحقیقات آنها نیز اختلاف حدود ۱۱ درصد را نشان می‌دهد که تایید کننده‌ی نتایج این تحقیق می‌باشد.

بررسی نتایج مقطع نیمرخ جوش حاصل به روش المان محدود و تجربی

پس از بارگذاری حرارتی مطابق با پارامترهای لحاظ شده در شرایط واقعی جوشکاری و اعمال شار حرارتی مطابق تابع توزیع گوسین، مقطع نیمرخ جوش ایجاد گردید. شکل ۹ نتایج مقطع نیمرخ



نمودار ۴- مقایسه نتایج توزیع حرارتی ثبت شده به روش المان محدود و تجربی حین جوشکاری.

نتایج و بحث

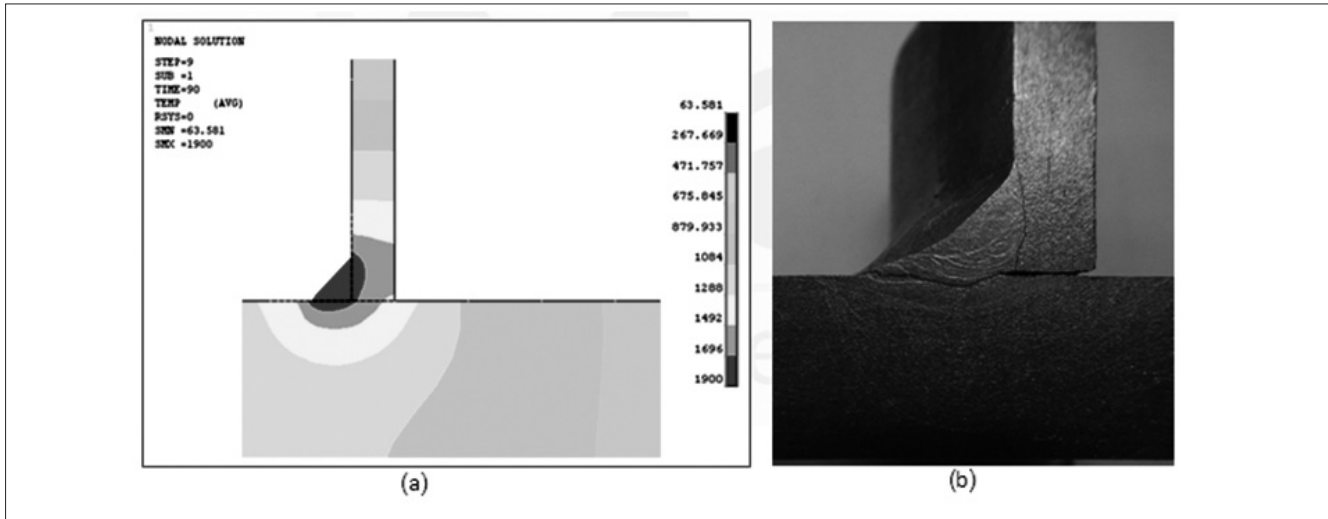
نتایج ثبت شده تاریخچه حرارتی به روش المان محدود و تجربی

به منظور اعتبارسنجی و صحت‌گذاری بر نتایج حاصل از روش المان محدود، تمام مراحل مورد نیاز در این تحقیق به روش تجربی انجام گردید. در این روش تجربی سعی شده است که تمام پارامترها، قیدها، شرایط مرزی و سایر عوامل موثر در هنگام ساخت یا تعویض تیوب‌های بویلر لحاظ گردد.

نتایج تاریخچه حرارتی ثبت شده به روش المان محدود

شکل ۸ نتایج تاریخچه حرارتی ثبت شده به روش المان محدود را نشان می‌دهند.

نمودار ۴ مقایسه نتایج توزیع حرارتی ثبت شده به روش المان محدود و تجربی حین جوشکاری را نشان می‌دهند.



شکل ۹- پروفایل جوش: (a) روش المان محدود، (b) روش تجربی.

مرحله قبل می‌باشند که می‌بایست با نتایج تجربی حاصله مقایسه گردند تا میزان انطباق نتایج بدست آمده از هر دو روش بررسی گردد. همانگونه که مشاهده می‌گردد، حداکثر مقدار تنش پسماند ۱۰۵ مگاپاسکال در ریشه اتصال می‌باشد.

نتایج محاسبه تنش‌های پسماند به روش تجربی

نمودار ۵ نتایج محاسبه تنش‌های پسماند به روش تجربی را نشان می‌دهد. مقادیر تنش پسماند ۸۵/۹۴ مگاپاسکال و ۴۹/۸ مگاپاسکال، به ترتیب در ریشه اتصال و پنجه جوش مشاهده می‌شود. نتایج تجربی در تحقیقات قبلی فقط بر روی لوله‌هایی با ضخامت بیشتر از ۶ میلی متر انجام شده است و انجام تکنیک کرنش سنجی سوراخ تحت عملیات حرارتی مطابق تحقیقات (Tait et al., ۱۹۹۴)، صورت گرفته است که نتایج منطقی و قابل قبولی حاصل گردیده است. استفاده از این تکنیک برای محاسبه تنش‌های پسماند، با توجه به نوع اتصال و ضخامت بسیار پایین آن دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد.

مقایسه نتایج محاسبه تنش‌های پسماند محوری به روش المان محدود و نتایج تجربی و بحث

همانگونه که نمودار ۵ نشان می‌دهد، محدوده ی تنش‌های پسماند محاسبه شده به روش المان محدود حداکثر ۱۰۵ مگاپاسکال و حداقل ۲۰/۷ مگاپاسکال می‌باشد. این مقادیر تنش پسماند در مقایسه با نتایج تحقیقات انجام شده قبلی (Akbari & Sattari-Far, 2009)، منطقی و قابل قبول می‌باشند. نتایج تجربی محاسبه تنش پسماند نشان دهنده ی حداکثر ۸۵/۹۴ مگاپاسکال و حداقل ۲۰/۷۴ مگاپاسکال می‌باشد. که در مقایسه با نتایج تحقیقات انجام شده قبلی (Tait & Press, 2001) و (مشایخی و هدایتی، ۱۳۹۰)، نتایج قابل قبولی هستند.

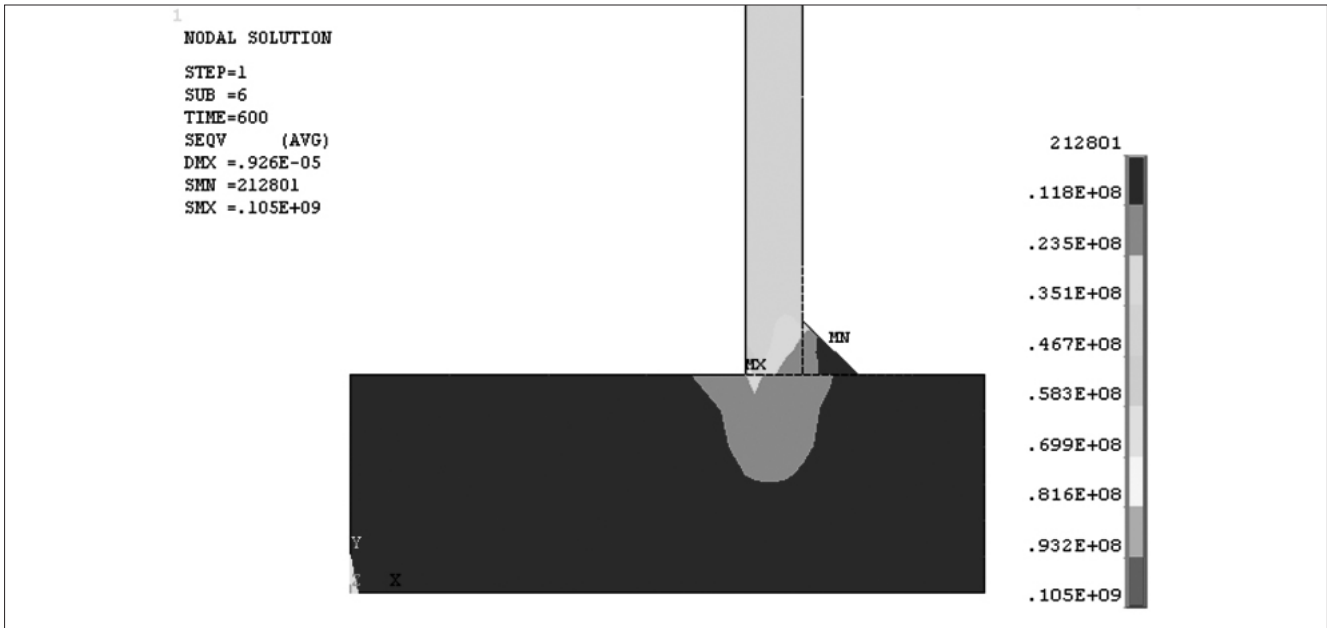
جوش حاصل از بارگذاری حرارتی به روش المان محدود را نشان می‌دهد. نتایج مقطع نیمرخ جوش به روش المان محدود نشان می‌دهد که مقدار نفوذ جوش در صفحه تیوب، تیوب و ریشه اتصال به ترتیب ۰/۷ میلی متر، ۱/۰۶ میلی متر و ۰/۵ میلی متر می‌باشد. نتایج تجربی مقطع نیمرخ جوش اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که مقدار نفوذ جوش در صفحه تیوب، تیوب و ریشه اتصال به ترتیب ۰/۸ میلی متر، ۱/۲ میلی متر و ۰/۵۵ میلی متر می‌باشد.

مقایسه نتایج مقطع نیمرخ جوش حاصل به روش المان محدود و تجربی و بحث

مقایسه نتایج مقطع نیمرخ جوش حاصل به روش المان محدود و تجربی نشان می‌دهد که اختلاف در مقدار نفوذ در صفحه تیوب، تیوب و ریشه اتصال به ترتیب حدود ۱۲ درصد، ۱۱ درصد و ۹ درصد می‌باشد. مقایسه این دو سری از نتایج مقطع نیمرخ جوش نشان می‌دهد بیشترین اختلاف در مقدار نفوذ جوش در صفحه تیوب می‌باشد که اختلافی حدود ۱۲ درصد را نشان می‌دهد. با وجود اینکه اتصال گوشه ای به دلیل طرح خاص آن کمتر مورد تحلیل المان محدود قرار گرفته است، نتایج این تحقیق قایل مقایسه با نتایج تحقیق دیگری نبوده اما این مقدار اختلاف انطباق بسیار خوبی بین روش المان محدود و روش تجربی نشان می‌دهد. مقدار اختلاف ۱۲ درصد هم می‌تواند ناشی از اختلاف ذکر شده در تاریخچه حرارتی و یا به دلیل هندسه خاص طرح اتصال گوشه‌ای باشد.

نتایج محاسبه تنش‌های پسماند محوری به روش المان محدود و تجربی

شکل ۱۰ شامل نتایج محاسبه تنش‌های پسماند محوری^۱ به روش المان محدود می‌باشد. این نتایج که در واقع حاصل بارگذاری



شکل ۱۰- مقدار و نحوه توزیع تنش‌های پسماند محوری به روش المان محدود.

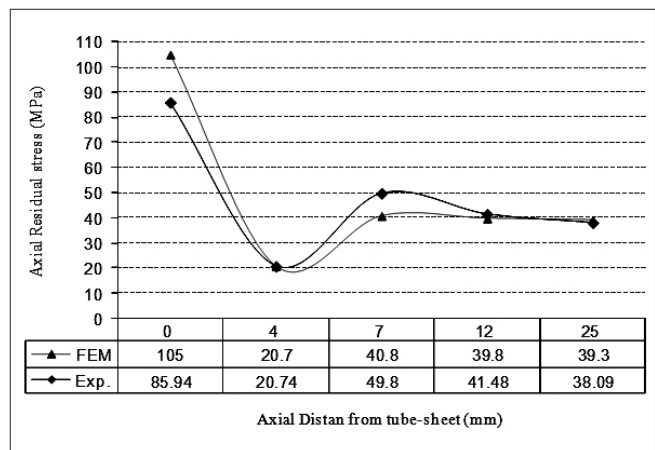
محدوده‌ی مجاز و قابل قبول قرار دارد. نتایج محاسبه تنش‌های پسماند به روش المان محدود، در روش‌های تحقیق مشابه نیز اختلافی در حدود ۱۲ درصد را بیان می‌نماید. مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی با اندازه گیری‌های تجربی، بیان گر دقت قابل قبول نتایج شبیه سازی المان محدود می‌باشد.

نتایج محاسبه تنش‌های پسماند محوری به روش المان محدود با معیار شدت تنش

شکل ۱۱ نتایج تحلیل المان محدود بر اساس معیار شدت تنش را نشان می‌دهد. بیشترین تنش پسماند محوری بر اساس معیار شدت تنش ۱۱۵ مگاپاسکال در ریشه اتصال مشاهده می‌شود.

نتیجه گیری

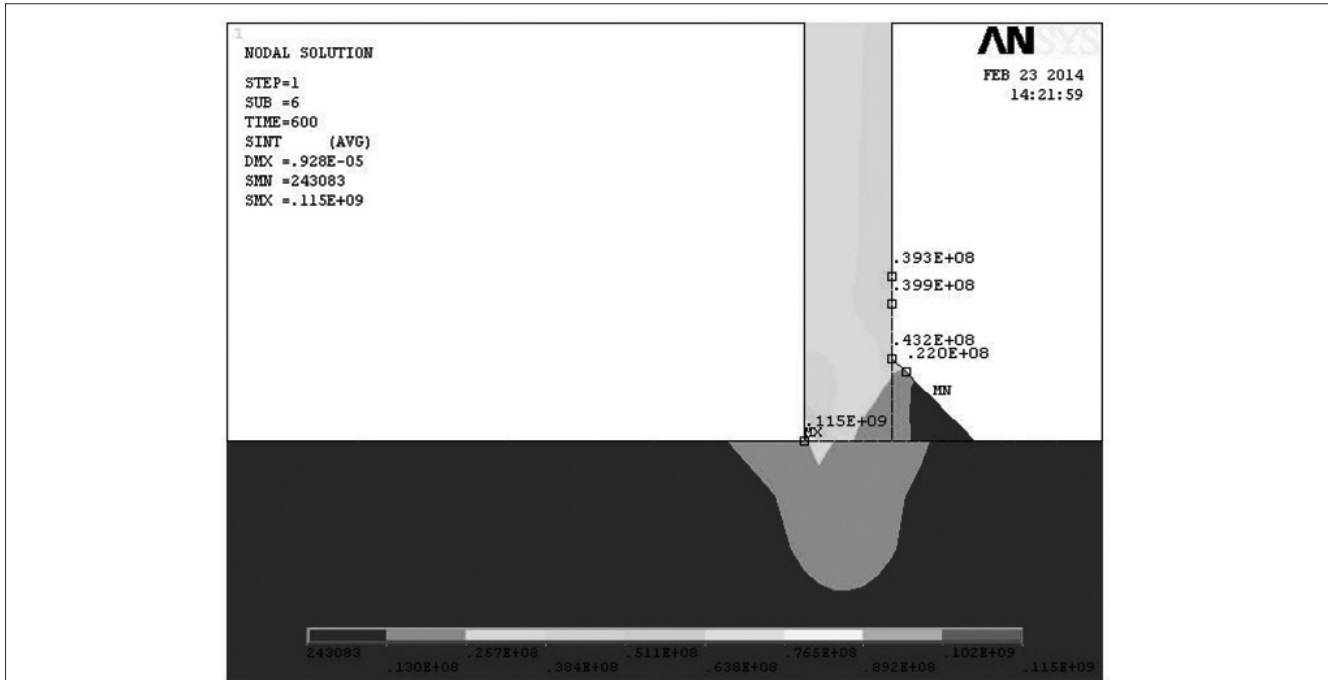
در این تحقیق پیش بینی مقدار و نحوه توزیع تنش‌های پسماند به روش المان محدود و تجربی، در جوش اتصال تیوب به صفحه تیوب بویلر بعنوان یکی از تجهیزات پوسته- تیوب، در سه بخش مورد مطالعه، تحقیق و بررسی قرار گرفت. بخش اول این تحقیق شامل نتایج تاریخچه حرارتی ثبت شده به روش المان محدود و تجربی می‌شود. با توجه به اینکه نتایج تحلیل حرارتی بعنوان بارگذاری ورودی در تحلیل مکانیکی برای پیش بینی مقدار و نحوه توزیع تنش‌های پسماند محسوب می‌شوند، دقت نتایج این بخش دارای اهمیت زیادی می‌باشد. بخصوص که استفاده از روش ترموگرافی، ایده جدیدی محسوب می‌گردد و مشکلات مربوط به روش استفاده از ترموکوپل را نداشته و نسبت به روش استفاده از



نمودار ۵- نتایج محاسبه تنش‌های پسماند محوری به روش المان محدود و تجربی.

در این تحقیق، معیار ارزیابی تنش‌های پسماند موثر (تنش فون میزز) و تمرکز اصلی بر روی نواحی با تمرکز تنش زیاد بوده است. شکل ۱۰ نحوه توزیع تنش‌های پسماند در اتصال تیوب به صفحه تیوب بویلر را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، بیشترین تنش پسماند در ریشه اتصال، مشاهده می‌گردد که تاییدی بر نتایج تحقیق انجام شده در مورد شروع جوانه زنی و رشد ترک از ریشه این نوع اتصال (Shugen & Weiqiang, 2013) می‌باشد.

مقایسه این دو دسته نتایج نشان می‌دهد که نتایج محاسبه تنش‌های پسماند به روش تجربی و المان محدود مطابقت مناسبی دارند. بیشترین اختلاف در نتایج این دو روش حدود ۱۸ درصد و کمترین مقدار آن ۲ درصد بوده است. این مقدار اختلاف در



شکل ۱۱- مقدار و نحوه توزیع نتایج محاسبه تنش‌های پسماند محوری با معیار شدت تنش به روش المان محدود.

تحت عملیات حرارتی استفاده شده است که در مقایسه با روشهای متداول محاسبه تنش‌های پسماند، نتایج قابل قبولی حاصل گردید.

خلاصه نتایج و دستاوردهای این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱- ریشه‌ی اتصال تیوب به صفحه تیوب و پنجه‌ی جوش حاصل، نقاط بحرانی اتصال بوده و ریشه‌ی اتصال دارای حداکثر تنش پسماند کششی محوری می‌باشد.

۲- محاسبه تنش‌های پسماند محوری در اتصال گوشه‌ای تیوب به صفحه تیوب با هندسه‌ای پیچیده و تیوب‌هایی با ضخامت بسیار کم، با استفاده از تکنیک کرنش سنجی سوراخ تحت عملیات حرارتی، دارای دقت مناسبی می‌باشد.

۳- با توجه به شناساس نقاط بحرانی اتصال، نتایج این تحقیق برای کمینه کردن تنش پسماند در سایر اتصال‌های حساس بویلر از جمله اتصال صفحه تیوب و کوره و اتصال صفحه تیوب و پوسته می‌تواند قابل توسعه باشد.

۴- نتایج این تحقیق برای کمینه کردن تنش پسماند در سایر تجهیزات تحت فشار دارای پوسته- تیوب از جمله مبدل‌های حرارتی، دیگ‌های آب گرم، دیگ‌های روغن داغ و هر نوع تجهیزاتی که دارای اتصال تیوب به صفحه تیوب باشد، می‌تواند قابل توسعه می‌باشد.

پی‌نوشت

- 1- Thermal Fatigue
- 2- Fatigue Corrosion

ترموکوپل که نیاز به سوراخکاری برای جایگذاری ترموکوپل دارد، روشی غیرمخرب، با دقتی مناسب و تایید شده بوسیله تحقیقات مشابه، محسوب می‌شود.

در بخش دوم این تحقیق، نتایج مقطع نیمرخ جوش حاصل به روش المان محدود و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. علیرغم هندسه‌ی پیچیده‌ی اتصال گوشه‌ای تیوب به صفحه تیوب، مقطع نیمرخ جوش حاصل از روش المان محدود تطابق بسیار خوبی با مقطع نیمرخ جوش حاصل از روش تجربی داشته و در مقایسه با نتایج تحقیقات مشابه دارای دقت بسیار خوبی می‌باشد. از جمله دلایل احتمالی که باعث گردیده مقطع نیمرخ جوش حاصل از روش المان محدود با پروفایل جوش واقعی مطابقت مناسبی داشته باشد، تعریف خواص مکانیکی و فیزیکی مواد بصورت تابعی از درجه حرارت و اعمال شار حرارتی به شکل تابع گوسین می‌باشد که با آنچه در حین اجرای جوشکاری قوسی اتفاق می‌افتد نزدیک تر است.

در بخش سوم این تحقیق، نتایج محاسبه تنش‌های پسماند به روش المان محدود و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. تنش‌های حاصل از روش المان محدود تطابق بسیار خوبی با تنش‌های حاصل از روش تجربی داشته و در مقایسه با نتایج تحقیقات مشابه، دارای دقت مناسبی می‌باشد. هندسه‌ی پیچیده‌ی اتصال گوشه‌ای تیوب به صفحه تیوب و ضخامت بسیار کم تیوب باعث می‌گردد که امکان استفاده از روشهای متداول اندازه‌گیری تنش‌های پسماند برای مقطع مورد نظر در این تحقیق، قابل اجرا نباشد. به همین دلیل در این تحقیق استفاده از تکنیک کرنش سنجی سوراخ

Dimensional thermal simulation and experimental investigation of GTAW circumferentially butt welded incoloy 800 Pipe". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 99, Pp. 295-303.

9-Lee, C.H., Chang, K.H. (2008). "Numerical investigation of residual stresses in strength-mismatched dissimilar steel butt welds, J.Strain Analysis". Vol. 43, Pp. 55-66.

10-Masubuchi, K. (1980). "Analysis of Welded Structures". Pergamon Press, New York.

11-Rendler N.J., Vigness I. (1966). "Hole drilling strain gauge method of measuring residual stresses, Experimental Mechanics". Vol. 6, Pp. 577-586.

12-Rybicki, E.F., Schmuser, D.W., Stonesifer, R.B., Groom, J.J. and Mishler, H.W. (1978). "A finite element method for residual stress in girth-butt welded pPipes". ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 100, Pp. 256-262.

13-Sattari-Far, I., Javadi, Y. (2008). "Influences of welding sequence on welding distortion in pipes". International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 85, Pp. 265-274.

14-Shugen, X., Weiqiang, W., Huadong, L. (2010). "The stress corrosion cracking of austenitic stainless steel heat exchange tubes, three cases study". ASME Pressure Vessels and Piping Division, Vol. 5, Pp. 335-343.

15-Shugen, X., Weiqiang, W. (2013). "Numerical investigation on weld residual stresses in tube to tube sheet joint of a heat exchanger". International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 101, Pp. 37-44.

16-Soanes TPT, Bell W, Vibert AJ. (2005). "Optimizing residual stresses at a repair in a steam header to tube plate weld". International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 82, Pp. 311-318.

17-Tait, R.B, Press, J. (2001). "Investigation An experimental study of the residual stresses, and their alleviation, in tube to tube-sheet welds of industrial boilers". Engineering Failure Analysis, Vol. 8, Pp. 15-27.

18-Tait, R.B., Coetsee CE, Shepherd RJ. (1994). "The effectiveness of PWHT for reduction of weld residual stresses using the air abrasive hole drilling technique". Society Experimental Mechanics, in Proceedings of the Fourth International Conference on Residual Stress, Vol. 6, Pp. 514-520.

3- Local Corrosion

4- Post Weld Heat Treatment

5- Heat Flux

6- Gaussian Function

7- Etch

8- High Speed Steel

9- Axial Residual Stresses

منابع و مراجع

۱- پورمحمدی، حسین؛ کرمانپور، احمد؛ شمعانیان، مرتضی. (۱۳۸۸). پیش بینی تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری قوسی لوله‌های سوپر آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ به روش المان محدود. استقلال، ۲۹، ۵۷-۳۹.

۲- مجدوبی، غلامحسین؛ سیفی، رحمن؛ علی اکبر، شاهد. (۱۳۹۰). بررسی تجربی و عددی توزیع دما و تعیین تنش‌های پسماند در جوشکاری ورق‌ها. مجله مدل سازی در مهندسی، ۲۷، ۶۰-۵۰.

۳- مشایخی، محمد؛ هدایتی، هادی. (۱۳۹۰). بررسی تاثیر ترتیب جوشکاری و فرایند هیدروتست بر تنش‌های پسماند جوشکاری در لوله‌های فولادی زنگ نزن SUS۳۰۴. نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، ۲۲، ۳۴-۱۷.

4- Akbari, D., Sattari-Far, I. (2009). «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, Pp. 769-776.

5-British Standards Institute, BS2790 (1992). "Design and manufacturing of shell boilers of welded construction".

6-Carbon Steel Handbook, (2007).

7-Deng D., Murakawa H. (2006). "Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements". Comp Mater. Sci., Vol. 37, No.3, Pp.269-277.

8-Kermanpur, A., Shamanian, M., Esfahani Yeganeh, V. (2008). "Three-