

ماهنامه علمى پژوهشى

ے، مکانیک مدر س



mme.modares.ac.ir

مطالعه اثر هندسه طرح اتصال برتوزیع تنش پسماند و دما در قطعات جوشکاری شده از جنس فولاد زتگ نزن

ابراهيم ناطقي 1، عبد الحميد گرجي ولوكلا^{2°}

1 - دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد ساری، ساری 2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل * بابل، صندوق يستى hamidgorji@nit.ac.ir ،47148 - 71167

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در جوشکاری چند پاسه شیاری، توزیع و مقدار تنش های پسماند و اعوجاج حاصل از آن به عوامل متعددی همچون: پارامترهای وابسته به فرآیند جوشکاری، خواص مکانیکی مواد و قید و بند بستگی دارد. در این پژوهش ابتدا توزیع دمای حاصل از فرآیند جوشکاری سه نمونه با طرحهای هندسی متفاوت توسط ترموکوپلهایی ثبت شده است. هر یک از نمونهها شامل دو ورق با ضخامت یکسان از جنس فولاد زنگنزن A316	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 22 مرداد 1394 پذیرش: 25 شهریور 1394 ا بائد در بارتن 21 مرم 1394
میباشند که به روش جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود تنگستنی با طرحهای اتصال گوشه شیاری نیم جناقی و جناقی باشکاف و پیشانی ریشه و نیم جناقی بدون شکاف و پیشانی ریشه براساس یک دستورالعمل رویه جوشکاری، جوش شدند. برای یک نمونه تنش پسماند ایجاد شده ابتدا به روش غیرمخرب امواج ماورایصوت عرضی و پس از برش قسمت عمودی (ورق بدون شیار) جهت استقرار دریل دستگاه کرنش سنج توسط روش نیمه مخرب کرنش سنجی سوراخ اندازه گیری شد. برای دو طرح هندسی دیگر جهت جلوگیری از تخریب قطعات فقط از	کلید واژگان: کلید واژگان: طرح اتصال تنش پسماند کرنش سنجی سوراخ
روش ماورای صوت استفاده شده است. سپس هر سه طرح در نرم افزار اجزای محدود سیموفکت ولدینک مدلسازی شده و نتایج حاصل از ان با اندازه گیری تجربی دما و تنش پسماند مقایسه شده است. مقایسه نشان میدهد مقادیر عددی و اندازه گیری تجربی تطابق خوبی با یکدیگر دارند و نتایج مدلهای المان محدود دارای اعتبار میباشد. نتایج این تحقیق نشان میدهد که تغییر هندسه طرح اتصال موجب تغییرات قابل توجه در توزیع و مقدار بیشینه تنش پسماند عرضی می گردد، ولی اثر چندانی در بیشینه تنش پسماند طولی ندارد.	المان محدود روش امواج ماورای صوت عرضی

Study on the effect of weld configuration geometry to distribution of residual stress and temperature in the welded parts of stainless steel

Ebrahim Nateghi¹, Abdolhamid Gorji Volukola^{2*}

1- Department of Engineerig, Islamic Azad University, Sari, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Nooshirvani University of Technology, Babol, Iran

* P.O.B. 123456789, Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

ABSTRACT

Original Research Paper Received 13 August 2015 Accepted 16 September 2015 Available Online 13 October 2015

Keywords: Joint Configuration **Residual Stress** Holedrilling Finite element Ultrasonic transvers wave method

In multi-pass groove welding, residual stress distribution, value and associated distortion are dependent on several factors, including the welding process-dependent parameters, mechanical properties of materials and fixtures. In present study, temperature distribution of three welding processes with different geometric designs are registered by the K type thermocouple. Each of the samples contains the same stainless steel plate A316 thickness that was welded based on welding procedure specification with gas tungsten arc welding method, with groove corner joints single bevel without gap and bevel face, single and double bevel with gap and bevel face. Created residual stress on a sample was initially measured by nondestructive ultrasonic transverse waves method. After cutting the vertical part (plate without groove), for hole drilling device installation purposes, the aforementioned stress was measured by the semi-destructive hole drilling method. While for two other geometrical designs only ultrasonic method has been used to prevent parts from being destroyed. All three aformentioned designs were modeled in Simufact welding finite element code (FE) and results were compared with experimental temperature and residual stress measurements. The comparison shows that experimental measurements and numerical values match with each other well, highlighting a reasonable validation of finite element models resutls. Current research results show that changing the geometry of the weld configuration has a significant effect on changes in the distribution and maximum value of transvers residual stress, but negligible influence on maximum longitudinal residual stress.

غیریکنواخت حرارتی که سبب بهوجود آمدن یک گرادیان تنش حرارتی و 1 - مقدمه انبساط و انقباض بر روی قطعه می شود، ایجاد می گردند. علاوه بر این تفاوت تنشهای پسماند حاصل از جوشکاری و برشکاری به علت گسترش

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

E. Nateghi, A. Gorji Volukola, Study on the effect of weld configuration geometry to distribution of residual stress and temperature in the welded parts of stainless steel, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 11, pp. 105-116, 2015 (In Persian)

خواص مکانیکی اعم از الاستیک و پلاستیک در فلز جوش، فلز پایه و منطقه متاثر از حرارت نیز میتواند موجب تشدید تنش پسماند و اعوجاج گردد. تنش پسماند موجب عدم مونتاژ صحیح و کارکرد مناسب به سبب تغییرات دائمی شکل و ابعاد و کاهش استحکام خستگی، شکست ترد و ترک تنش خوردگی¹ قطعات حاصل از جوشکاری میگردد. عوامل متعددی مانند خواص مواد، شدت جریان، ولتاژ، قطر الکترود یا فیلر، مشخصات هندسی طرح اتصال، ترتیب و تعداد پاسها، حالت جوشکاری، دمای پیشگرم و بین پاسی، وجود و نوع قید و بند بر تنشهای پسماند در جوشهای چند پاسه اثرگذار است [1].

استفاده از مدلسازی المان محدود و اعتبارسنجی آن با روشهای تجربی به منظور پیشبینی توزیع دما، تنش پسماند و اعوجاج ناشی از جوشکاری برای طراحی و ساخت قطعات متداول میباشد [6-2]. بررسی مقدارهای تنش پسماند قطعات صنعتی به علت ابعاد و وزن بالا و بعضا آثار مخرب برخی آزمونها روی قطعات که سبب هزینه هنگفت بازسازی و تعمیر آنها میشود، محدودیتهایی دارد. به این منظور از قطعات آزمایشگاهی که شرایط جوشکاری آنها تا حدود زیادی مشابه قطعه اصلی باشد و همچنین مشخصات دما و تنش پسماند مورد نیاز در طراحی قطعه اصلی در مورد آنها قابل اندازه گیری باشد، استفاده می شود. متناظر کردن نتایج نمونه های آزمایشگاهی به قطعه صنعتی جوشکاری شده در شرایط واقعی مرحله نهایی ارزیابی و طراحی قطعات خواهد بود [7]. از سه روش مخرب، نیمه مخرب و غیرمخرب برای اندازه گیری تنش پسماند استفاده می شود. روش های ایجاد شکاف² و کانتور³ از نوع مخرب هستند. کرنش سنجی سوراخ⁴ روشی نیمه مخرب است. روشهای انکسار اشعه نوترونی، اشعه ایکس و امواج ماورای صوت غیرمخرب هستند. روش ماورای صوت جهت مقاصد آزمایشهای کیفتی، بازبینی و اندازه گیری به کار میرود [8-10]. در این روش یک مولد امواج ماورای صوت را با فرکانس بالا ایجاد کرده و در محیط مورد نظر منتشر می کند. این امواج مسیری را طی کرده و توسط یک دریافت کننده که ممکن است همان مولد موج باشد، موج برگشتی دریافت می شود. با استفاده از این روش میتوان تنشهای موجود قطعه را در راستاهای گوناگون بررسی نمود [11-11]. طرح اتصال گوشه شیاری در مراحل نصب و مونتاژ نهایی قطعات به صورت گسترده استفاده می شود و با توجه به تنشهای اعمالی در این حالت، اهمیت بررسی تنش پسماند و همچنین اعوجاج دو چندان می شود. در پژوهش های گذشته اندازه گیری تنش پسماند با روش امواج ماورای صوت عمدتا با استفاده از امواج طولی شکسته بحرانی⁶ روی اتصالات لب به لب انجام شده است [11-16]. استفاده از حداقل دو پراب که مستلزم عبور از روی خط جوش به منظور اسکن مناطق فلز جوش و متاثر از حرارت میباشد و همچنین دسترسی به دو طرف قطعه کار برای اندازه گیری تنش در کل ضخامت آن در تکنیک امواج طولی ضروری است. همچنین ابعاد پرابهای موجود از محدودیتهایی است که عملا استفاده از این روش را در طرح اتصال گوشه شیاری غیرممکن میسازد. در روش کرنشسنجی سوراخ که برای اندازه گیری تنش پسماند در عمقهای مختلف به کار میرود نیز محدودیت فضای این طرح اتصال مانع نزدیک شدن دریل به خط جوش و نواحی اطراف آن برای سوراخ کاری شده و در نتیجه این تکنیک را نیز غیرکاربردی می سازد و استفاده از امواج عرضی در روش ماورای صوت را اجتناب نايذير مي كند.

ستاریفر و فراهانی اثر شکل شیار و تعداد پاسهای جوشکاری را روی بیشینه و توزیع تنش پسماند در اتصالات لب به لب لولههای فولادی به کمک مدل المان محدودی که با روش تجربی کرنش سنجی سوراخ اعتبار سنجی شده، بررسی کردند نتایج آنها نشان داد پارامترهای فوق روی مقادیر و توزیع تنش-های پسماند محوری و محیطی اثرگذار است [1]. نخودچی و همکاران توزیع تنش پسماند و دما را در فرآیند جوشکاری چند پاسه ورقهای فولاد زنگ نزن با ضخامت های غیریکسان، به روش عددی المان محدود و روش تجربی کرنش-سنجی سوراخ بررسی کردند نتایج تطابق قابل قبولی را بین روشهای عددی و تجربی نشان داد [5]. کریمنیا و ستاریفر اثر عوامل موثر بر تنش پسماند ناشی از جوش محیطی استوانههای جدار نازک از جنس آلومینیوم سری 5000 را که با مدل المان محدودی که با روش کرنشسنجی سوراخ اعتبارسنجی شده بود، جهت طراحی آزمایش تاگوچی استفاده کردند. نتیجه بررسی آنها نشان داد استحکام تسلیم ماده تاثیر گذارترین عامل بر بیشینه تنش پسماند محوری و محیطی است [6]. جوادی و همکاران در پژوهشهای مختلف تنش پسماند را به کمک روش ماورای صوت امواج طولی شکسته در زاویه بحرانی اول در اتصال جوشی لب به لب لولههای غیر همجنس جوشکاری شده با الکترود تنگستنی [12]، لولههای همجنس فولاد زنگ نزن جوشکاری شده با روش زیرپودری [13] و ورق های هم جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی جوشکاری شده به روش زیرپودری [14] اندازه گیری کردند و با مدل المان محدودی که قبلا با روش کرنش سنجی سوراخ تائید شده بود، اعتبار سنجی نمودند. در مورد لوله-های غیرهم جنس جوشکاری شده با الکترود تنگستنی به این نتیجه رسیدند که انطباق نسبى بين نتايج روش امواج ماوراي صوت و المان محدود وجود داشته و بیشترین اختلافها مربوط به ناحیه متاثر از حرارت است. در مورد لولههای هم جنس فولاد زنگ نزن جوشکاری شده با روش زیرپودری نشان داده شد که حداکثر تنش پسماند کششی در جوش پشت کمتر از جوش اصلی است. با بررسیهای مربوط به ورقهای همجنس فولاد زنگ نزن آستنیتی جوشکاری شده به روش زیر پودری به این نتیجه رسیدند که؛ به دلیل تفاوت اندک در مشخصات جوشکاری لوله با صفحه مورد استفاده برای اندازه گیری ثابت آکستوالاستیک خطای نسبتا بالایی در ارزیابی تنش فلز جوش و ناحیه متاثر از حرارت به وجود آمده است.

صادقی و همکاران [15] توزیع تنش پسماند را با روش آنالیز المان محدود در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اتصال لب به لب ورقهای آلومینیومی شبیهسازی کردند. صحت نتایج شبیهسازی آنها با روش کرنش سنجی سوراخ تائید شد. آنها همچنین تنشهای پسماند را به کمک روش ماورای صوت امواج طولی شکسته اندازه گیری کردند و به کمک نتایج آنالیز المان محدود اعتبار نتایج روش ماورای صوت تایید شد. آنها دریافتند با استفاده از پرابهای فرکانس بالا تطابق بین نتایج ماورای صوت و المان محدود افزایش مییابد. همچنین نتایج حاصل از تنش پسماند مدل

المانمحدود در 2 میلیمتری از سطح دارای خطای کمتری نسبت به نتایج به
دست آمده از روش کرنشسنجی سوراخ است. آذری و همکاران [17] تنش
پسماند را به کمک روش امواج ماورای صوت عرضی برای ورقهای غیر-
همجنس فولاد زنگ نزن و فولاد کربنی جوشکاری شده سنجیده و با نتایج
المان محدود مقایسه کردند. بررسی نشان داد، به علت عدم در نظر گرفتن
تغییرات فازی (تشکیل مارتنزیت) در مورد نمونه فولاد کربنی انطباق مناسبی
بین نتایج روش ماورای صوت با نتایج مدل المانمحدود وجود ندارد و در
مورد فولاد زنگ نزن یافتههای روش ماورای صوت انطباق مناسبی با نتایج
روش المان محدود دارد.

1- Stress Corrosion Cracking(SCC)

2-Slitting

3- Contour

4- Hole driling

5- Longitudinal critical refracted

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

واسانتهجرا و همکاران [18] اثر دو فرآیند جوشکاری با الکترود تنگستنی و گاز محافظ مخلوط و خالص را بر توزیع تنش پسماند و اعوجاج ورقهای فولادی زنگ نزن در سه طرح هندسی اتصال لب به لب شیاری بررسی کردند. آنها برای اندازه گیری تنش پسماند از روش امواج ماورای صوت طولی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد در حالتی که طرح اتصال بدون پخ و فرآیند جوشکاری با الکترود تنگستنی و گاز محافظ مخلوط باشد کمترین مقدارهای تنش پسماند کششی، اعوجاج، اندازه دانه و مقدار فریت حاصل خواهد شد.

2- روش تحقيق

در این پژوهش اثر هندسه طرح اتصال بر تنش پسماند اتصال گوشه شیاری سه نمونه جوشکاری شده که در مخازن ذخیره مایعات و مخازن تحت فشار در صنایع غذایی و دریایی و پتروشیمی به کار میرود، مورد بررسی قرار گرفت. هر کدام از نمونهها شامل دو پلیت فولادی زنگ نزن آستنیتی A316 با ابعاد 200×200×100×300×10 ميلىمتر مىباشند. نمونەھا با طرحهای اتصال نیم جناقی بدون پیشانی و فاصله ریشه و نیم جناقی و جناقی با پیشانی و فاصله ریشه 1 میلیمتر و زاویه پخ 45 درجه که در دو پاس با فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود تنگستنی تحت محافظت گاز آرگون¹ به هم جوش شدند. جوشکاری مطابق یک دستورالعمل که براساس استاندارد انجمن مهندسان مكانيك آمريكا² [19] نوشته شده است، انجام شد (جدول 1). جهت سهولت در نگارش، طرحهای هندسی نیم جناقی بدون شکاف و پیشانی ریشه با نام طرح 1 و نیم جناقی با شکاف و پیشانی ریشه طرح 2 و جناقی با شکاف و پیشانی ریشه به نام طرح 3 شناخته خواهند شد (شکل 1). منظور از محور جوش در این پژوهش، محور X می باشد، ابعاد نمونه ها مطابق شکل 2 می باشد. برای طرح 1 علاوه بر اندازه-گیری تنش با روش ماورای صوت از روش کرنشسنجی سوراخ نیز استفاده شده است. جهت جلوگیری از ایجاد آثار مخرب برش قطعه جهت انجام کرنشسنجی و آثار نیمه مخرب سوراخکاری پس از آن، روی طرحهای 2 و 3 كرنش سنجى سوراخ انجام نشده و فقط از روش ماوراى صوت براى سنجش تنش پسماند استفاده شده است. با توجه به این که عدم جفت شدگی یکی از عوامل اصلی بهوجود آمدن خطا در اندازه گیری زمان در روش ماورای صوت مى باشد، لايه رسوب باقى مانده از فرآيند توليد ورق فولاد زنگ نزن از روى آن به کمک سمبادهزنی بسیار نرم و پرداختکاری به گونهای که حداقل برداشت از فلز ورق صورت گیرد، انجام شد [10]. برای صحتسنجی نتایج حرارتي مدل المان محدود، دما از ابتداي فرآيند جوشكاري تا 3600 ثانيه پس از آن به کمک چهار ترموکوپل در نقاط مشخص شده برای هر سه طرح اندازه گیری می شود (شکل 3). اثر هندسه طرح اتصال بر مقدار بیشینه و توزیع تنش پسماند طرحها با استفاده از روش غيرمخرب امواج ماوراي صوت و المان محدود بررسی میشود. به دلیل این که سوراخهای روش کرنشسنجی اثراتی روی ورق باقی میگذارد که موجب اختلال در ازمون ماورای صوت میشود، روش ماورای صوت قبل از کرنشسنجی در مورد طرح 1 انجام شده است.

اطلاعات³ استفاده می شود (در این مورد از ترمو کوپل نوع k با غلاف استفاده شد). دستگاه ثبت کننده اطلاعات و محل قرار گیری ترمو کوپل ها در چهار نقطه روی سطح دو صفحه فولادی در شکل 3 نشان داده شده است.

4 - اندازه گیری تنش پسماند به روش کرنشسنجی سوراخ

جهت اندازه گیری تجربی تنش پسماند به منظور اعتبار سنجی مدل المان -محدود طرح 1 از روش کرنشسنجی سوراخ براساس استاندارد شماره ای 837 انجمن تست و مواد آمريكا⁴ استفاده شد [20]. كرنش سنج مورد استفاده از نوع A بوده و ساخت کمپانی تیامال⁵ ژاپن با شماره اف آر اس 11-2⁶ مىباشد. از تكنيك اندازه گيرى يكنواخت⁷ جهت كرنشسنجى استفاده می شود. در این روش یک سوراخ کوچک با قطر مشخص توسط دریل با سرعت بالا با ابزاری به شکل مخروط برعکس روی سطح قطعه در مرکز كرنشسنج با رعايت دستورالعمل هايي ايجاد مي شود (شكل 4). با آزاد شدن تنشهای اطراف سوراخ، کرنش با حسگرهای اطراف سوراخ سنجیده و ثبت می شود. می توان در هر مرحله از سوراخ کاری تغییرات تنشهای ماکزیموم و مینیموم و تنشهای اصلی و زاویه بین آنها را در راستای ضخامت براساس روابط موجود در استاندارد اندازه گیری کرد. در این پژوهش کرنشسنجی روی صفحه فلزی دارای شیار طرح 1 در سه نقطه انجام شد (شکل 5). جهت دسترسی به مناطق مختلف جوش صفحه بدون شیار در مجاورت پخ برش شد. جهت جلوگیری از اعمال تنش اضافی در هنگام برش کاری از اره نواری همراه با خنککاری آب صابون به نحوی که پیشروی ابزار برش در کمترین حالت و سرعت حركت ابزار بالاترین حالت ممكن باشد (جهت تولید حداقل دما)، استفاده شده است.

_	جدول 1 دستورالعمل رویه جوشکاری				
-	پاس پرکن	پاس ریشه	پارامترجوشکاری		
	2	1.6	قطر فيلر (mm)		
	130	90	شدت جریان (A)		
	24	20	ولتاژ (٧)		
	8 - 10	5 - 8	سرعت تغذيه (mm s ^1)		
	Config 3 ر اتصال آنها	Config تجربی و روش	g 2 Config 1 شکل 1 مقاطع نمونههای		
	200		+10 + 45° 2 10 + 10 + 45° + 10 + 45°		



3- Data logger 4- ASTM E837 5- TML 6- FRS-2-11 7- Uniform Measurment Method 3 - اندازه گیری تغییرات دما بر حسب زمان برای اطمینان از درستی عوامل در نظر گرفته شده در بخش حرارتی که ورودیهای بخش مکانیکی مدلسازی المان محدود است، تعیین تغییرات دمای قطعهها براساس زمان بایستی انجام گردد. برای این هدف از ترموکوپلهای با کارکرد دمایی بالا به همراه یک دستگاه ثبت کننده

1- Gas Tungsten Arc Welding(GTAW) 2- ASME

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11



شکل 3 دستگاه ثبت کننده دما و نحوه اتصال ترموکوپلها به صورت تجربی (ابعاد به میلیمتر است)



شکل 4 استقرار دریل کرنشسنجی



شکل 5 اتصال کرنشسنجها به ورق دارای شیار طرح 1 (ابعاد به میلیمتر است)



به عنوان بار حرارتی ورودی آنالیز مکانیکال خواهد بود. به علت وجود گرادیانهای شدید حرارتی در مناطق جوش و متاثر از حرارت، تا ناحیه 25 میلیمتری محور جوش از المانهای ریزتری استفاده شده است و در نواحی دورتر از این مناطق به ابعاد المانها افزوده می شود (شکل 6). برای تعیین ابعاد مش مناسب از پارامتر دمای حداکثر جوشکاری بر روی مرکز خط جوش استفاده شد. تا زمانی که ابعاد المانها به ترتیب در جهات طول، عرض و ارتفاع 0.7، 1 و 0.8 میلیمتر انتخاب شد در حالی که تعداد المانهای طرحهاي1، 2 و3 به ترتيب برابر 51674، 50836 و 49952 بود، دماي حداکثر تغییر بیشتر از 3 درصد نداشت. این ابعاد المان برای هردو آنالیز مکانیکال و حرارتی انتخاب شد. در صورت فعالسازی آنالیز مکانیکال، همان مشبندی حرارتی به عنوان ورودی آنالیز مکانیکال خواهد بود. علاوه بر این در نمونههای آزمایشگاهی از دو خال جوش در اتصال صفحه شیار زده به صفحه بدون شیار و یک گیره نگهدارنده در صفحه فولادی بدون شیار استفاده شده است. خال جوشها و گیره نگهدارنده مدلسازی شده و به عنوان سه جزء به شبیهسازی المان محدود وارد شده و تا پایان زمان آنالیز جوشکاری روى سطح قطعه باقى مىمانند. برعكس المان هاى جوش اصلى كه فقط در زمان مربوط به خود فعال می شوند، المان های خال جوش از ابتدا تا انتها فعال باقی میمانند. همچنین المانهای مربوط به گیره قابل زمانبندی برای فعالسازی میباشد که در این پژوهش مانند المانهای خال جوش از ابتدا تا انتهای فرآیند فعال است. در این شبیهسازی المانهای هشت نقطهای بریک² مورد استفاده قرار گرفت. از حل گر نیوتن رافسون تکرار شونده و گامهای زمانی کاملا مشابه برای هر سه هندسه استفاده شده است.

خواص فولاد زنگ نزن A316 که به عنوان فلز پایه و ER316 به عنوان فلز جوش در حالت جوشکاری با گاز محافظ و الکترود تنگستنی است، در شکل 7 نشان داده شده است [21-23]. چگالی و گرمای ذوب و به ترتیب برابر 7966 نشان داده شده است 256400 و محدوده ذوب ماده 1450-1400درجه سانتی گراد است که در طول آنالیزهای حرارتی و مکانیکال ثابت می باشند.

برای شبیهسازی عددی تنش پسماند حاصل از فرآیند جوشکاری باید انتقال حرارت، ارزیابی ریزساختار و تنش حرارتی را با هم در نظر گرفت. عوامل موثر در حرارت ورودی شامل قوس، فعل و انفعالات مواد و دینامیک سیالات در حوضچه مذاب جوش است که در این میان رفتار دینامیکی سیال مذاب بررسی نشده است. از دیدگاه حرارتی مکانیکی، حرارت ورودی میتواند به عنوان توزیع انرژی حجمی یا سطحی در نظر گرفته شود، در این صورت اثر جریان سیال که منجر به توزیع یکنواخت دما در منطقه ذوب شده می-شود، به سادگی از طریق افزایش رسانایی حرارتی که بیش از دمای ذوب گرفته شده، محاسبه میشود. انتقال حرارت در مواد جامد به کمک معادلههای (1)، (2) و (3) توصیف میشود:

$(k\nabla T) \cdot n = q(T, t) \text{ on } \partial\Omega_q$	(2)
$T = T_{\rm p}(t)$ on $\partial \Omega_t$	(3)
(1)، (2) و (3)، <i>k ،H،</i> ρ وT به ترتیب چگالی، آنتالپی، رسانایی	در معادلات ا
ا هستند. <i>Q</i> معرف منبع حررارت داخلی است. <i>n</i> بردار عمود به	حرارتی و دم
دامنه Ω و q چگالی شار گرما است که روی دما و زمان مدل	سمت خارج
ل دمایی تکیه دارد و T _p یک درجه حرارت معین است. گرمای	همرفتى تبادا
. منبع حرارت داخلی ارائه شده است. در این مطالعه الگوی منبع	ورودى توسط
ضی گون گلداک استفاده شده است [6] و [24].	حرارت دو بيم

شکل 6 مش بندی المان محدود، (بزرگ نمایی مش بندی در ناحیه مشخص شده) 5- **شبیه سازی المان محدود فر آیند جو شکاری** برای شبیه سازی جو شکاری طرح های 1، 2 و 3 مطابق شکل 6 مدل سه بعدی در نرم افزار سیموفکتولدین گ¹ وارد شده است. فر آیندهای ترمومکانیکال جو شکاری به کمک آنالیز غیر کوپل شبیه سازی می شوند. در

آنالیز غیرکوپل، ابتدا تغییرات دما برحسب زمان تعیین می گردد و این نتایج

2- Brick

1- Simufact welding

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

و تشعشع از تمام سطوح غیر از سطح تقارن صورت می گیرد. به کمک رابطه-های (10) و (11) ضریب ترکیبی انتقال حرارت از ضرایب همرفتی و تشعشع محاسبه می گردد [26]: (10) $q_{bc} = h(T - T_{amb}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{amb}^4)$ $h_{total} = h + \varepsilon \sigma (T + T_{amb}) \cdot (T^2 + T_{amb}^2) = 2$ (11)که در آن q_{bc} حرارت اتلاف شده (W/m^3)، h ضریب همرفتی و برابر است، r قابلیت تشعشع جسم، σ ثابت بولتزمن، T دمای جسم $\theta W/m^{2}$ °C دمای محیط میباشد. تحلیل مکانیکال از نتایج تحلیل حرارتی که T_{amb} تغییرات دما برحسب زمان را برای گرههای موجود بیان میکند به عنوان ورودی بار دمایی استفاده می کند. در تحلیل مکانیکال الاستیک-پلاستیک، کرنش کل از رابطه (12) به دست میآید: $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{th}$ (12) که در آن ε_{ii}^{th} کرنش الاستیک، ε_{ii}^{p} کرنش پلاستیک و ε_{ii}^{th} کرنش حرارتی میباشد. برای یک ماده همسانگرد تنش با رابطه (13) بیان میشود: $\sigma_{ij} = C^{e}_{ijkl} (\varepsilon_{ij} - \varepsilon^{p}_{ij} - \varepsilon^{th}_{ij})$ (13)که در آن C_{ijkl} ماتریس سفتی الاستیک ماده میباشد. برای بهدست آوردن تنش باید کرنشهای مورد نظر بهدست آیند. بدین منظور باید خواص مكانيكي جسم از جمله مدول الاستيك، ضريب يواسون، خواص يلاستيك و ضریب انبساط حرارتی (جهت محاسبه کرنش حرارتی) وارد تحلیل گردند. پس از این مرحله نتایج تغییرات دما برحسب زمان برای بهدست آوردن کرنش و متعاقب آن تنش به کار گرفته خواهند شد.

6- اندازه گیری تنش پسماند به روش ماورای صوت 6-1- تأثیر حالت تنش بر سرعت موج ماورای صوت

تغییر حالت¹ موج ماورای صوت تنها در صورتی رخ میدهد که موج با زاویه نسبت به خط عمود برسطح جدا کننده دو محیط انتشار برخورد کند. اگر جهت انتشار بر جهت ارتعاش موج عمود باشد، موج از نوع عرضي محسوب و اگر جهت انتشار با جهت ارتعاش موازی باشد از نوع طولی محسوب می شود. اگر موجی با زاویه صفر درجه (عمود بر سطح جدا کننده دو محیط) برخورد کند بدون تغییر در حالت آن بدون توجه به این که نوع موج طولی یا عرضی باشد، تا برخورد به فصل مشترک بعدی به حرکت خود در محیط دوم ادامه خواهد داد و پس از برخورد با فصل مشترک محیط بعدی به علت اختلاف مقاومت صوتی² بخشی از امواج منعکس و مقداری از آن عبور خواهد کرد. این پژوهش با استفاده از پراب نرمال (زاویه صفر درجه) امواج عرضی انجام شده است، به همین دلیل تغییر حالت موج رخ نخواهد داد. با توجه به جهت بارگذاری و انتشار و ارتعاش موج و جهتهای اصلی میتوان پنج حالت موج در نظر گرفت که اندیس اول جهت انتشار و اندیس دوم جهت ارتعاش را بیان می کنند در شکل a-9 امواج با اندیس 31، 13 و 32 از نوع عرضی و امواج با اندیس 11 و 33 طولیاند. چون سرعت موج در ماده ایزوتروپ در تمام جهات یکسان است، می توان این گونه بیان کرد که تغییر سرعت موج ماورای صوت تابعی از کرنشهای الاستیک ماده است. اثر کرنش بر تغییر سرعت امواج ماورای صوت در شکل b-b نشان داده شده است، همان طور که مشاهده می شود بیشترین اثر تغییر کرنش روی موج طولی است که جهت انتشار آن همراستای جهت کرنش است و بعد از آن، موج عرضی که جهت قطبیت³ آن همراستا با کرنش اعمالی است.



شکل 8 مدل منبع حرارتی دو بیضی گون گلداک [6]

(1	ريشه طرح	(ياس)	گلداک	مدل	های	یار امتر	2,	جدوا
· ·		0		0	0	5		J

مقدار	پارامتر گلداک
3.3	طول نیم بیضی جلویی (mm)
5.5	طول نیم بیضی عقبی (mm)
2.5	عرض منبع حرارت (mm)
4	عمق منبع حرارت (mm)

همان طور که در شکل 8 نشان داده شده است نیمه جلویی منبع حرارت ربع یک بیضی گون است و نیمه پشتی نیز ربع دیگر آن است. معادلات گلداک برای منبع حرارتی جلو و عقب به ترتیب براساس روابط (4) و (5) بیان می-شود [6]:

Front:
$$q_f(x, y, z) = \frac{\mathbf{6} \cdot \sqrt{\mathbf{3}} \cdot f_f \cdot Q}{b \cdot d \cdot a_f \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{(-\frac{3x^2}{a_f^2})} \cdot e^{(-\frac{3y^2}{b^2})} \cdot e^{(-\frac{3z^2}{d^2})}$$
 (4)

$$\operatorname{Rear:} q_r(x, y, z) = \frac{\mathbf{6} \cdot \sqrt{\mathbf{3}} \cdot f_r \cdot Q}{b \cdot d \cdot a_r \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{(-\frac{3x^2}{a_r^2})} \cdot e^{(-\frac{3y^2}{b^2})} \cdot e^{(-\frac{3z^2}{d^2})}$$
(5)

در معادلات (4) و (5)، $d_r e_r e_r a_f e_r b$ ، $d_r e_r e_r a_f$ ابعادی مدل گلداک بوده و به ترتیب برابر عمق منبع حرارتی، نصف عرض منبع، طول نیم بیضی جلویی و پشتی هستند، $f_r e_f e_r e_f$ به ترتیب فاکتور توزیع حرارت نیمه جلویی و پشتی هستند و براساس معادلات (6) و (7) بیان می شوند:

$$f_f = 2/(1 + \frac{a_r}{a_f})$$
(6)

$$f_r = 2/(1 + \frac{\alpha_r}{a_r}) \tag{7}$$

Mode conversion
 Acoustic impedance
 Polarizasion

بین ضریبهای توزیع حرارت رابطه (8) برقرار است: $f_f + f_r = 2$ (8) پارامترهای ابعادی منبع جوشکاری مربوط به یک نمونه تجربی در جدول 2 آورده شده است. بازده قوس جوشکاری در تنظیمات مربوط به مشخصات منبع جوشکاری برای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود تنگستنی 70% در نظر گرفته شده است [25]. $Q = V \cdot I$ (9) که V ولتاژ و I شدت جریان جوشکاری است. ضرایب انتقال حرارت همرفتی

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

(شکل10). براساس مشخصات فنی پراب، جهت قطبیت همراستای سوکت موجود در پراب است. به منظور افزایش قدرت تفکیک نواحی نزدیک سطح ² که با کاهش همپوشانی منطقه مرده³ (به علت وجود امواج مخرب که از ارتعاش در خلاف جهت ضخامت کریستال پراب تولید می شود) با نواحی سطحی مرتبط است و همچنین کاهش اثرات ناشی از کوپلنت، پراب با كفشكهاى خط تاخيرى قابل تعويض انتخاب شد [32]. اين كفشك از جنس پلی متیل متاکریلات با نام تجاری پلکسی گلاس است. جهت اطمینان از جفتشدگی کامل، استفاده از کویلنت تولیدی سازنده یراب مناسب می-باشد و به صورت جایگزین می توان کویلنتهای با ویسکوزیته بالا را (مانند چسب کاغذ دیواری که در این پژوهش از آن استفاده شده است) به کار گرفت [32]. به منظور کاهش اثرات ترکنندگی قبل از اینکه سرعتها محاسبه شوند، پراب در جای خود چند بار چرخانده می شود تا کوپلنت کاملا سطح کفشک را تر کند و جفتشدگی کامل انجام شود. از یک مکانیزم محور - لغزنده مربوط به یک دستگاه فرز برای دستیابی به مختصات موردنظر مطابق شکل 11 استفاده شده است. شاخصی نیز برای چرخش محوری 90 درجه برای دستیابی به دو قطبیت عمود و موازی خط جوش در آن لحاظ شده است. جهت کاهش اثرات غیریکنواختی لایه کویلنت، فشار اعمالی بر پراب 2 مگاپاسکال است [8] که توسط محور عمودی دستگاه فرز به انتهای پراب انتقال می یابد و از ارتفاع یکنواخت اکوها در نقاط مختلف نمونهها می-توان دریافت که فشار به صورت مساوی اعمال شده است. دستگاه ماورای صوت كراتكرامر با يالسر دو حالته 200 و500 ولت است و دقت نمايش تاخیر در پراب برابر 0.001 میکروثانیه می باشد. همچنین دستگاه ماورای صوت دارای قابلیت کالیبراسیون اتوماتیک و نمایش سرعت با دقت 0.1 متر بر ثانیه می باشد. این مشخصه نمایش به افزایش دقت در محاسبات رابطه (18) منجر خواهد شد. به کمک حالت کالیبراسیون اتوماتیک سرعت مورد نظر در قطبیت مدنظر با توجه به ثابت بودن ضخامت سنجیده می شود و سمت راست رابطه (18) قرار می گیرد.

4-6- بهدست آوردن مشخصات الاستیک و آکوستیک مواد

برای استفاده از رابطه (18) جهت اندازه گیری مقدار تنش پسماند نیاز به فرضیات و تحلیلهای اضافی است. تنشها به موازات خطوط جوش (تنش طولی) در حین جوشکاری بسیار بیشتر از تنشهای عمود بر خط جوش (تنشهای عرضی) است. بنابراین با ناچیز در نظر گرفتن تنشهای عرضی می توان نتیجه گرفت مقدار عددی سمت چپ معادله برای هر نقطه متناسب با مقدار تنش طولی در آن نقطه است. برای استفاده از رابطه (18) باید از فلز جوش و فلز پایه و منطقه متاثر از حرارت نمونههای استانداردی تهیه گردد و متعاقبا تنشرزدایی گردند و سپس مورد آزمون کشش قرار گیرند پس از آن به کمک موج عرضی با دو قطبیت عمود بر جهت بار و با رسم نمودار تنش-سرعت، مقدار عددی عبارت ($(4\mu + n)/(8\mu^2)$ قابل محاسبه است. در این



شکل 11 تجهیزات ماورای صوت و میز مختصات

2-6- اثر آكستوالاستيسيته

در صورتی که ماده همسانگرد باشد ثابتهای الاستیک موردنیاز برای توصیف اثر آکستوالاستیسیته به دو ثابت مستقل λ و μ و سه ثابت مستقل I, m و N که ثابتهای الاستیک مرتبه سوم ماده هستند، کاهش مییابند. λ و μ رفتار الاستیک جسم را در اولین تقریب (قانون هوک) توصیف میکنند. در مهندسی خواص الاستیک بیشتر به وسیله مدول یانگ (E) و مدول برشی (G) توصيف مي شوند [7] و [27-31]: $G = \mu$

$$E = \mu (3\lambda + 2\mu) / (\lambda + \mu)$$

حل معادلات موج به سه رابطه منجر می شود، یکی برای انتشار امواج خالص طولي و دو معادله براي امواج عرضي خالص که هر کدام در يک جهت کرنش قطبیت یافتهاند، به این صورت که تفاضل سرعتهای عرضی آنها با این فرض که سرعتهای اولیه متفاوت است، به روابط (16) و (17) منجر می-شود:

$$(v_{ij}/v_{0ij}) - (v_{ik}/v_{0ik}) = (4\mu + n) \cdot (\varepsilon_j - \varepsilon_k)/(4\mu)$$
(16)

کرنشها با استفاده از قانون هوک می توانند با تنش جایگزین شوند: (17) $(\varepsilon_j - \varepsilon_k) = (\sigma_j - \sigma_k)/(2\mu)$ $(v_{ij}/v_{0ij}) - (v_{ik}/v_{0ik}) = (4\mu + n) \cdot (\sigma_j - \sigma_k)/(8\mu^2)$ (18) رابطه (18) مبنای محاسبات اندازه گیری سرعت در ضخامت ثابت است که مورد استفاده برای اندازه گیری تنش پسماند در این پژوهش خواهد بود. 6-3- تجهيزات اندازه گيري ترنسدوسر مورد استفاده در این پژوهش از نوع امواج عرضی با فرکانس 4 مگاهرتز و قطر اسمی 6 میلیمتر، ساخت شرکت تروسونیک می باشد

	•	-	-	-
و برای تبدیل	ِ دسترس نمیباشد	، چنین شرایطی در	فرض شده	بژوهش
ه استفاده شده	ٍ فرضيات ساده کنند	، به مقادیر عددی از	كيفى تنش	نوصيف
ىرعتھاي اوليه	ست رابطه (18) به س	طور تکمیل سمت را،	7،6]. به منغ	ست [{
ىليات نورد مى-	دهایی که محصول عم	ه این که در اکثر پلیت	ت. با توجه با	ياز است
، و این خاصیت	ود بر آن متفاوت است	در جهات نورد و عمو	واص نمونه	باشند خ
یه را برای این	د، باید دو سرعت اوا	ِایصوت اثر می گذار	ت موج ماور	بر سرع
تهای اولیه به	سی به ورق خام سرء	د. با توجه به دستر،	ازهگیری کر	مادہ اند

2- Near Surface Resolution 3- Dead zone

1- Trusonic

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11

110

(15)



(a ،مقایسه دادههای تجربی و نتایج المانمحدود ترموکوپلهای طرح a ،1) ترموکوپل a ،1) ترموکوپل b ،1) ترموکوپل a ،2) ترموکوپل b

رعت اندازه گیری شده در دو پلاریزاسیون عمود بر هم طرح آ	جدول 3 س
--	----------

36	20	6	فاصله از محور جوش (mm)
3138	3137.3	3134.3	سرعت موازی با محور جوش (ms ⁻1)
3192.2	3191.1	3193.3	سرعت عمود بر محور جوش (ms ^-1)
-19.7	-39.5	229.4	مقدار عددی رابطه (18) (MPa)

با توجه به شکلهای 12، 13 و 14 بیشینه دمایی مربوط به ترموکوپل شماره 1 طرح 1 در پاس دوم جوشکاری است که با توجه به نزدیکی آن به خط جوش دمای حدود 1350 درجه سانتی گراد را ثبت نموده است، این مقدار برای طرح 2 حدود 1180 درجه سانتی گراد و برای طرح 3 حدود 1050 درجه سانتی گراد است. بیشینه دمای ثبت شده مربوط به ترموکوپل شماره 2 برای طرح 1 حدود 910 درجه سانتی گراد است، این مقدار برای طرح 2 حدود 855 درجه سانتی گراد و برای طرح 3 حدود 790 درجه سانتی گراد است. دمای ثبت شده حداکثر ترموکوپل شماره 3 برای طرحهای

کمک حالت کالیبراسیون اتوماتیک دستگاه در نقاط دور از خط جوش که مقدار تنش پسماند کوچک است یا در قطعه قبل از جوشکاری که می تواند به عنوان نمونه عاری از تنش در نظر گرفته شود، اندازه گیری می شود. در این پژوهش سرعت موج با قطبیت موازی و عمود بر خط جوش به ترتیب (m/s) 3138.9 و (m/s) و 1318.7 اندازه گیری شده است. مقادیر µ=G و n نیز از پژوهشهای بلاهسن و لو [11] و لیدبتر [33] قابل استخراج است. (گیگاپاسکال657- n= و گیگا پاسکال4*G=*82) پس از هر بار محاسبه مقادیر سرعت توسط دستگاه، پراب به اندازه 90 درجه چرخیده شده و در این قطبیت نیز سرعتها اندازه گیری می شود. با توجه به عبور موج عرضی از کل ضخامت قطعه و همچنین تغییرات حالت تنش در عمقهای مختلف، مي توان اين گونه بيان كرد كه؛ تنش پسماندي كه به كمك روش امواج عرضی اندازه گیری می شود متوسط تنشهای پسماند نقاطی است که با پرتو ماورای صوت همپوشانی دارند [8]. به منظور کاهش عدم قطعیتهای ذاتی دستگاه و همچنین کاهش اثرات ترکنندگی کوپلنت، آزمایش سه بار تکرار شده و در آزمایشها هر نقطه پنج بار بررسی شد. نمونهای از نقاط مورد بررسی در جدول 3 نشان داده شده و تحلیل نهایی براساس مقادیر متوسط دادهها انجام شده است.

7- بحث و بررسی نتایج

در این بخش ابتدا جهت اعتبارسنجی مدل المان محدود طرح 1 که شامل دو بخش تحلیل حرارتی و مکانیکی است از دادههای ترموکوپلها برای قسمت حرارتی و از روشهای کرنشسنجی سوراخ و ماورای صوت در بخش مکانیکی استفاده میشود. جهت اعتبارسنجی نتایج مدل المان محدود طرحهای 2 و 3 در قسمت حرارتی از ترموکوپل و در قسمت مکانیکی از روش ماورای صوت استفاده شده است. ضریب انتقال حرارت فلزات از هوا بیشتر است که منجر به افزایش دمای پروفیل حرارتی در فلزات میشود. با توجه به این که در مرحله آغاز و پایان جوشکاری به علت وجود لبه در ابتدا و انتها، اختلاف دماهای بزرگ بین المانهای مجاور وجود دارد. این اختلاف با حرکت منبع حرارتی در جهت جوشکاری به تدریج بسیار اندک میشود و فرآیند تنش پسماند در مسیر خط مرکزی عمود بر محور جوش خواهد شد. به همین دلیل مسیر خط مرکزی عمود بر محور جوش خواهد شد. به پسماند انتخاب شد.

7-1- اعتبارسنجي قسمت حرارتي مدل المان محدود

اطلاعات دمایی ثبت شده به وسیله ترموکوپلها و نتایج حاصل از مدل المانمحدود مربوط به طرحهای 1، 2 و 3 در شکلهای 12، 13 و14 نشان داده شده است. با توجه به اینکه شبیهسازی المان محدود جوشکاری در3600 ثانیه انجام شده است و عملا پس از 1000 ثانیه قطعه به حدود

ساعلی کراه است. مالای بلک ساله عنا کر کریکو کوپل سالاه و برای کر ایک
1، 2 و3 به ترتیب 700 درجه سانتی گراد، 620 درجه سانتی گراد و 590
درجه سانتیگراد است. با توجه به اینکه بار حرارتی اعمال شده در پاس اول
پس از شروع پاس دوم همچنان در قطعه جوشکاری وجود دارد، دمای ثبت
شده توسط ترموکوپلها در پاس دوم جوشکاری بالاتر از دمای پاس اول است.
در واقع پاس دوم جوشکاری با دمای بین پاسی حاصل از پاس اول آغاز
می شود. این دما در فرآیند جوشکاری اهمیت بالایی دارد و موجب تغییرات
در ریزساختار و سختی قطعه میگردد و در اکثر دستورالعملهای تایید شده
جوشکاری تغییر دمای بینپاسی از محدوده مجاز سبب بیاعتباری آن
مىشود [19].

دمای محیط میرسد و همچنین برای نشان دادن مناسب تر تغییرات دما نسبت به زمان همه نمودارها تا 1000 ثانیه را نشان می دهند. با مقایسه بین نتایج تطابق خوبی مشاهده می شود. چون جو شکاری در دو پاس انجام شده و این که فاصله زمانی بین پاسی 2.5 دقیقه است، دو صعود در نمودار مشاهده می شود. روند صعود و نزول نمودار مربوط به نقاط مورد بررسی، به دور یا نزدیک شدن منبع حرارتی گلداک مرتبط است. خطای جزعی مربوط به نوسان در سرعت حرکت مشعل و فیلر جو شکاری و همچنین دقیق نبودن شدت جریان نمایش داده شده منبع جو شکاری و ضرایب انتقال حرارت با توجه به شرایط محیطی است.

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11



شکل 14 مقایسه دادههای تجربی و المانمحدود ترمو کوپلهای طرح3، a) ترموکوپل 1، d) ترموکوپل 2، c) ترموکوپل 3 d) ترموکوپل 4

سوراخ کاری تا عمق 2 میلی متری در سه نقطه با گامهای 0.25 میلی متری در هشت مرحله انجام و کرنشهای 2، ٤، ٤ و ٤ اندازه گیری شد. جهت محاسبه مقدار تنشها از یک کد محاسباتی براساس روابط موجود در استاندارد انجمن تست و مواد آمریکا استفاده شده است [20]. مقدار بیشینه نتایج تجربی در فاصله 20 میلی متری از محور جوش 60 مگاپاسکال فشاری اندازه گیری شد و در نقاط بعدی با فاصله گرفتن از محور جوش، مقادیر روند کاهشی دارند به نحوی که در فاصله 20 و 55 میلی متری شدی تشکی متری تشکی از محور جوش، مقادیر روند کاهشی دارند به نحوی که در فاصله 20 و 55 میلی متری تشکی تنش به ترتیب 41 مگاپاسکال و 11 مگاپاسکال فشاری اندازه گیری شد. منازی اندازه گیری شد. و در نقاط بعدی با فاصله گرفتن متری تنش به ترتیب 41 مگاپاسکال و 11 مگاپاسکال فشاری اندازه گیری شد. مین متای متری تشکی 51 مقایسه بین نتایج المان محدود و کرنش سنجی را نشان می دهد. مشخص تشکی 81 زمت مقدار آن در نزدیکی محور جوش برابر مقدار ۵0 مگاپاسکال است، این تنشیها از محور جوش تا حدود 12 میلی متری از آن به صورت کششی است و محاکثر مقدار آن در نزدیکی محور جوش برابر مقدار حداکثر متان کال است، این مقدار بین کششی متری تشی است و میلی متری از آن به صورت کششی است و مقدار بین است و 30 مگاپاسکال است. این



شکل 13 مقایسه دادههای تجربی و المانمحدود ترمو کوپلهای طرح2، a) ترموکوپل 1، b) ترموکوپل 2، c) ترموکوپل 3 d) ترموکوپل 4

تفاوت دمای بیشینه طرحها را میتوان به اختلاف هندسی آنها نسبت داد. با توجه به این که در طرح شماره 1 حوضچه جوش با محیط اطراف به علت عدم وجود شکاف ریشه تنها از بالای شیار ارتباط دارد، در رابطه (15) سهم ضرایب انتقال حرارت همرفتی و تشعشع کمتر از طرحهای 2 و 3 است و این مساله موجب کاهش انتقال حرارت طرح 1 نسبت به دو طرح دیگر میشود که به نوبه خود به ثبت دماهای بالاتری منجر شده است. اختلاف دمایی بین طرحهای 2 و 3 به مساحت بالاتر سطحهای انتقال حرارت طرح 3 مرتبط است. علاوه بر این حجم حوضچه مذاب طرح 3 نسبت به طرحهای 1 و 2 به ترتيب برابر 52% و 51.5% كمتر است. بنابراين ثبت دماي بالاتر ترموكويل-های طرح1 نسبت به طرحهای 2 و3 قابل توجیه است. برای ترموکوپل شماره 4 طرحها که روی ورق بدون شیار در فاصله 20 میلیمتری از محور جوش قرار دارد نیز همانند سایر ترموکوپلها دمای ثبت شده در پاس دوم به دلایل ذکر شده بالاتر است. همچنین میزان دمای ثبت شده در ترموکوپل 4 طرحها به طور قابل ملاحظهای کمتر است، که با توجه به عدم مجاورت مستقیم با حوضچه مذاب و فاصله بیشتر نسبت به سایر ترموکوپلها با آن و این که انتقال حرارت رسانایی از حوضچه مذاب به دو قسمت بالا و پایین ورق بدون شيار صورت مي گيرد، قابل توجيه است. 2-7- اعتبارسنجي قسمت مكانيكال مدل المان محدود طرح 1 جهت اعتبارسنجي مدل المان محدود طرح 1 از روش كرنشسنجي سوراخ استفاده شد.

om.

from mme	ور فلز
nloaded	غه
[Dow	ت
	ى
6.2]	بار
15.11.1	ىد.
).1394.	ى
027594(
001.1.1	
R: 20.1	11
DO	

نشان میدهد فلز پایه تا فاصله حدود 12 میلیمتری در ناحیه کرنش سختی قرار
دارد و فلز جوش در ناحیه الاستیک قرار دارد. همچنین استحکام کششی بالاتر فلز
جوش نسبت به فلز پایه دلیلی بر بالاتر بودن تنش پسماند کششی در وسط قطعه
ست [5]. با دور شدن از فاصله 12 میلیمتری از محور جوش مقدار تنش به سمت
فشاری شدن میل میکند، تنشها در فاصله حدود 17 میلیمتر با بیشینه فشاری
41 مگاپاسکال است. پس از این نقطه با فاصله از منبع حرارت ورودیهای بار
حرارتی کم شده و به تبع آن کاهش مقدار تنش پسماند تا مقادیر اندک رخ میدهد.
روند کششی و فشاری مذکور نشان میدهد در صورت وجود نداشتن بارگذاری
خارجی مقادیر تنش پسماند در قطعه تعادلی است.

112

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11



7-3-نتایج حاصل از اندازه گیری تنش پسماند به روش ماورای صوت طرح 1 برای طرح 1 مقدارهای تنش پسماند براساس فاصله از محور خط جوش به روش ماورای صوت در 12 نقطه اندازه گیری شده است. این نتایج میانگین تنش پسماند اندازه گیری شده نقاطی است که موج ماورای صوت عرضی از آنها عبور می کند (در روش امواج عرضی کل ضخامت قطعه محل عبور پرتو صوتی است). بنابراین برای اعتبارسنجی نتایج شبیهسازی المان محدود با روش ماورای صوت باید میانگین تنش پسماند المانهای داخل پروفیل پرتو را محاسبه کرد. با توجه به این که در خط مرکزی پرتو بیشترین انرژی را دارد [32]، مركز دايره كريستال پراب به عنوان شاخص سنجش قرار گرفته است. جهت محاسبه متوسط تنش پسماند المانهای داخل پروفیل پرتو صوتی کدی نوشته شده است. در کد محاسبتی با توجه به ابعاد پروفیل پرتو صوتی که شامل زاویه واگرایی پرتو نیز میباشد [32]، میانگین تنش پسماند مربوط به المانهایی را که با پرتو هم پوشانی دارند محاسبه می شود. مقدارهای اندازه گیری شده ماورای صوت در فاصله 6 میلیمتری از محور جوش با مقدار كششى 201.4 مگاپاسكال است. با توجه به اين كه استحكام تسليم فلز جوش از فلز پایه بالاتر است تنشها از نوع کششی هستند. در فاصله 11 میلیمتری مقدار کششی 115.2 مگاپاسکال اندازه گیری شد. در فاصله 20 میلیمتری مقدار متوسط تنشها فشاری شده و 49.5 مگاپاسکال ثبت شده است. در نقاط بعدی مورد بررسی روند تغییرات نتایج روش المان محدود و ماورای صوت تقریبا منطبق برهم می باشند. با توجه به این که فلز پایه و

منطقه متاثر از حرارت و فلز جوش استحکام تسلیم متفاوتی نسبت به هم دارند، میتوان علت این تغییرات را به تفاوت سهم فلز جوش و فلز پایه و منطقه متاثر از حرارت در ضخامت مورد بررسی میانگین تنش پسماند نسبت داد. به نحوی که در جایی که سهم فلز جوش در نقاط مورد بررسی بالاتر است عمدتا تنشها کششی و با کاهش سهم فلز جوش و افزایش سهم منطقه متاثر از حرارت تنشها به صورت فشاری هستند. همچنین در جایی که سهم فلز پایه نسبت به منطقه متاثر از حرارت بالاتر است روند کششی شدن تنش فلز پایه نسبت به منطقه متاثر از حرارت بالاتر است روند کششی شدن تنش یفاری آغاز خواهد شد و در نقاط دور از محور جوش به علت دوری از منبع و خرارت جوشکاری مقدارهای تنش پسماند به سمت صفر میل می کند، که با یافتههای نخودچی و همکاران انطباق دارد [5]. با توجه به شکل 16 تطابق نسبتا خوبی از نظر توزیع و مقدارهای تنش پسماند متوسط بین نتایج المان

7-4-1عتبارسنجی قسمت مکانیکال مدل المان محدود طرح 2 مقادیر تنش پسماند میانگین با توجه به اندازه گیری سرعت امواج عرضی ماورای صوت در دو قطبیت عمود و موازی خط جوش و استفاده از رابطه (18) برای طرح 2 محاسبه شد. اولین و بیشترین مقدار تنش کششی در فاصله 6 میلی متری با مقدار 167 مگاپاسکال است. در فاصله 11 میلی متری از محور جوش مقدار تنش 60 مگاپاسکال فشاری اندازه گیری شد و پس از این نقطه اندازه تنش پسماند فشاری روند کاهشی دارد و در فواصل دورتر از توجه به شکل محور جوش به علت اثر کم منبع حرارت مقدارها به صفر میل می کند. با توجه به شکل 71 مشخص است روند کاهشی دارد و در فواصل دورتر از توجه به شکل 71 مشخص است انطباق مناسبی بین نتایج المان محدود و فشاری تنش های می می در محور جوش مقدار تا در کم منبع حرارت مقدارها به صفر میل می کند. با محور جوش به علت اثر کم منبع حرارت مقدارها به صفر میل می کند. با محور جوش به علت اثر کم منبع حرارت مقدارها به صفر میل می کند. با محور جوش دادد. همان گونه که در شکل 71 مشخص است روند کششی و شماری تشهای طولی تا حدود زیادی مشابه طرح 1 است، با این تفاوت که در فشاری تشاری تفیرات در قسمی متری محمو از محور موند کششی و نتایج المان محدود و فشاری تنشهای طولی تا حدود زیادی مشابه طرح 1 است، با این تفاوت که در نقاطی قشاری تنایج المان محدود در مناری تشهای طولی تا حدود زیادی مشابه طرح 1 است، با این تفاوت که در نقاطی هستند که سهم فلز جوش در میانگین تنش محاسبه شده بیشتر است.



مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11



شکل 19 مقایسه تنشهای پسماند طولی طرحهای 1، 2 و3 a) عمق 0.5 میلیمتر،



7-6- بررسی هندسه طرح اتصال بر تنش پسماند جهت بررسی اثر هندسه طرحهای 1، 2 و 3 بر تنش پسماند از مدل المان محدود اعتبارسنجی شده در مراحل قبل استفاده شده است. ابتدا تنشهای یسماند طولی و سیس تنشهای یسماند عرضی در عمقهای مشابه بررسی شده و در ادامه تنش موثر در سه طرح اتصال مقایسه خواهد شد. همانطور که ذکر شد؛ تنش یسماند ناشی از گرادیان تنش حرارتی و بر همکنش مواد نسبت به هم می باشد. بنابراین نقاطی که نرخ انتقال حرارت بالاتری داشته باشند، دارای گرادیان حرارتی بالاتری میباشند. هرچه اختلاف دمای بین محیط و جسم بالاتر باشد براساس معادلههای شماره 14 و 15 بار حرارتی بالاتری ایجاد خواهد شد و به تبع آن در معادلههای 16 و 17 به ترتیب مقدار کرنش و تنش یسماند بالاتری حاصل خواهد شد. لذا در بررسی تنش یسماند از دو سری نقطه که در مجاورت با محیط اطراف باشند و یا در مجاورت نواحی بین یاسهای 1 و 2 طرحها باشند جهت نشان دادن بهتر تغییرات تنش پسماند استفاده شد. در شکل 19 مقایسه تنشهای پسماند طولی در چهار عمق نشان داده شده است. با توجه به ساختار هندسی طرح 1 سهم فلز جوش در مختصات مورد بررسی آن بیشتر از مختصات مشابه در دو طرح دیگر است. همچنین تبادل حررتی سطح جوش یاس پرکن طرح 1 به علت مساحت بالاتری که در مجاورت با محیط دارد، بیشتر است. بنابراین مقدار تنش پسماند در عمقهای نزدیک به سطح طرح 1 بیشتر از دو طرح دیگر است. در مورد طرحهای 2 و 3 مقادیر تنش در آغاز مسير تقريبا برابر هم ميباشد(شكل a- 19). شكل b- 19 تنش در عمق 3 میلیمتری از سطح طرحها را نشان میدهد. با توجه به این که شروع نمودار طرح 3 مربوط به پاس اول جوشکاری می باشد و همچنین به علت این که یاس اول طرح 3 نرخ انتقال حرارت بالاتری نسبت به سایر طرحها دارد (چون از دو سمت بالا و پایین پاس اول جوشکاری با هوای محیط در تماس است، دارای اتلاف حرارتی بالاتری میباشد و همچنین حجم حوضچه جوش آن کمتر میباشد و به تبع آن بار حرارتی ورودی کمتر میباشد) به عبارتی عامل تاثیر-گذار در بالاتر بودن شروع تنش پسماند در این عمق، بالاتر بودن سرعت سرد شدن نقاط مربوط به این عمق طرح 3 در فاصله زمانی بین پاسی است. شکل c- 19 مربوط به تنشهای طولی عمق 6 میلیمتر طرحها میشود. در این عمق شروع نقاط مورد بررسي طرح 1 و 2 مربوط به نواحي بين پاس ريشه و پرکن میباشد که با توجه به نحوه انتقال حرارت پاس ریشه طرح 2 که در فاصله زمانی بین دو پاس از دو طرف سطح بالایی و پایینی آن انجام می شود، مقدار تنش پسماند آن از طرح 1 بالاتر است. طرحهای 1 و 2 در این نقاط وارد ناحیه کرنش سختی خواهند شد. شکل d- 19 مربوط به نقاط واقع در عمق 9.5 میلی متری طرحها است، مشخص است این عمق برای طرح 3 به نقاط نزدیک به سطح پاس2 مربوط میباشد و برای طرح 2 مربوط به نقاط پاس ریشه است که در این نقاط مقدار تنش از استحکام تسلیم فلز جوش فراتر می-رود، در این ناحیهها فلز جوش وارد کرنشسختی می شود. مقایسه تنش پسماند

متوسط طولی برای سه طرح 1، 2 و 3 در شکل 20 نشان داده شده است. R 11 36 88 144 Distance from weld axis (mm) -40 -80 همان طور که درشکل 20 مشخص است تفاوت چندانی در تغییرات متوسط **شكل** 20 مقايسه تنشهاي پسماند متوسط طولي تنش پسماند طولی طرحهای 1، 2 و 3 مشاهده نمی شود. در نقاط نزدیک به بیشترین گستردگی مناطق دارای تنش پسماند طولی مربوط به طرح 1 و سطح بالایی قطعه، بیشترین تنش پسماند طولی مربوط به طرح 1 میباشد در کمترین آن مربوط به طرح 3 است. تنشهای پسماند عرضی مربوط به چهار حالی که در نقاط نزدیک سطح پایینی طرح 1 دارای کمترین مقدار تنش و عمق مختلف طرحهای 1، 2 و 3 در شکل 21 نشان داده شده است. طرح 3 دارای بیشترین مقدار است. در نقاط میانی طرح 3 دارای کمترین مقدار مشخص است که بیشترین تنش پسماند فشاری و کششی در عمق 0.5 تنش طولی میباشد. با مقایسه طرح 1 و 2 میتوان دریافت که به جز نقاط میلی متری از سطح بالایی مربوط به طرح 3 است و کمترین آنها مربوط به نزدیک به سطح بالایی در سایر حالات میزان تنش پسماند طولی طرح 2 از طرح 1 است (شكل a-21).

مہندسی مکانیک مدرس، بہمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

طرح 1 بالاتر است[1] و [5].



طرح 1 رخ داده است. در شکل 22 متوسط تنشهای عرضی طرحهای 1، 2 و 3 براساس فاصله از محور جوش با هم مقایسه شدهاند. بیشترین تنش کششی مربوط به طرح 1 و بیشترین تنش فشاری عرضی مربوط به طرح 3 می باشد.

شکل 23 کانتورهای تنش موثر طرحهای 1، 2 و 3 را به صورت مقطع عرضي درخط مركزي عمود برمحور جوش نشان ميدهد. مطابق شكل 23 بیشینه تنشهای یسماند طرحهای 1 و 2 به علت حجم حوضچه مذاب و بار حرارتی ورودی تقریبا برابر، یکسان است. تنش پسماند بیشینه طرح 3 به علت کم بودن ابعاد منابع حرارتی پاسهای اول و دوم و به تبع آن کاهش بار حرارتی ورودی از دو طرح دیگر کمتر است.

8- نتيجه گيري

در این پژوهش به بررسی اثر هندسه طرح اتصال بر توزیع تنش پسماند و دما به کمک شبیهسازی المانمحدود فرآیند جوشکاری ورقهای فولاد زنگ نزن A316 که با سه هندسه طرح اتصال مختلف و پارامترهای مشابه جوشکاری به هم جوش شدند، پرداخته شد. جهت اعتبارسنجی قسمت حرارتی شبیهسازی از ترموكوپلهاى نصب شده به طرحها به همراه دستگاه ثبت اطلاعات دمايي استفاده شد. برای صحتسنجی قسمت مکانیکی طرح 1 از دو روش تجربی امواج ماورای صوت عرضی و کرنش سنجی سوراخ استفاده شد. جهت جلوگیری از ایجاد آثار مخرب روی قطعه از روش غیرمخرب امواج ماورای صوت عرضی برای اعتبار سنجی قسمت مکانیکی مدل المان محدود طرحهای 2 و 3 استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل دستاوردهای این تحقیق عبارتند از:

1. بیشینه دمای ثبت شده طرح 1 بالاتر از طرحهای 2 و 3 است و نمودارهای توزیع دمای طرحها از نظر صعود و نزول و شکل کلی مطابق مراجع [6،5] و [34] است.

2. مقادیر بیشینه فشاری تنش پسماند طولی برای هر سه طرح اتصال تقریبا برابر است و روند تغییرات تنش پسماند طولی در قسمت فشاری هر سه طرح اتصال مشابه هم مي باشد كه درمراجع [5،1] و [12-14] به اثبات رسیدہ است.

3. بیشینه کششی تنش پسماند طولی طرح 3 مربوط به عمق 9.5 میلی-متری است که با یافتههای مرجع [1] انطباق دارد و مقدار بیشینه تنش کششی برای طرح 1 و 2 مربوط به عمق 6 میلیمتر است که شامل نواحی بین پاسی است.



این اختلاف با توجه به تفاوت ابعاد سطوح انتقال حرارت و ماهیت هندسی ورودي قابل توجيه است. در عمق 3 مىلەرمتر از

بیشترین تنش پسماند عرضی کششی و فشاری مربوط به طرح 2 و کمترین
مقدار کششی مربوط به طرح 3 است (شکل b-21). در شکل c-21 که
مربوط به نقاط واقع در عمق 6 میلیمتری از سطح میباشد. تنش عرضی
کششی بیشینه مربوط به طرح 1 و تنش عرضی بیشینه فشاری در طرح 2
رخ میدهد. کمترین مقدارهای تنش فشاری و کششی در این عمق مربوط به
طرح 3 است. با مقایسه تنشهای عرضی طرحها در عمق 9.5 میلیمتری از
سطح که در شکل d-d نشان داده شده، مشخص است بیشترین تنش
پسماند عرضی کششی مربوط به طرح 2 و تنش عرضی فشاری بیشینه در

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

- [13] Y. Javadi, H. S. Pirzaman, M. H. Raeisi, and M. A. Najafabadi, "Ultrasonic inspection of a welded stainless steel pipe to evaluate residual stresses through thickness", *Materials & Design*, Vol. 49, pp. 591-601, 2013.
- [14] Y. Javadi, M. Akhlaghi, and M. A. Najafabadi, "Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates", *Materials & Design*, Vol. 45, pp. 628-642, 2013.
- [15] S. Sadeghi, M. A. Najafabadi, Y. Javadi, and M. Mohammadisefat, "Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates", *Materials & Design*, Vol. 52, pp. 870-880, 2013.
- [16] Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, V. Trufiakov, and P. Mikheev, "Expert system for fatigue assessment and optimization of welded elements", *short paper Proceedings of the Third World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, Buffalo, New York, USA, May 17-21, Vol. 2, pp. 469-471, 1999.
- [17] K. Azari, M. Ahmadi Najafabadi, and Y. Javadi, "Using nondestructive ultrasonic method to Residual stress measurment", *11th Iranian conference on maniufacturing engineering*, Tabriz, A-10-38-2, 2010 (in Persian).
- [18] P. Vasantharaja, M. Vasudevan, and P. Palanichamy, "Effect of welding processes on the residual stress and distortion in type 316LN stainless steel weld joints", *Manufacturing Processes*, http:// dx. doi. org/ 10. 1016/j. jmapro. 2014. 09. 004, 2014.
- [19] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec IX "*Qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operatores*", 56-3934, New York, NY 10016-5990, 2007.
- [20] ASTM Standard, "*E837-08 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-drilling Strain-gage Method*", in ASMT international, West Conshohocken, PA, ed, 2008.
- [21] L. ZhangQin, L. YongBing, W. YaSheng, and C. GuanLeng, "Numerical analysis of a moving gas tungsten arc weld pool with an external longitudinal magnetic field applied", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, pp. 288-295, 2005.
- [22] Hand book of High temperature characteristic of stainless steels, *A Designer's Handbook Series*, N 9004, A. I. a. S. Institute, ed.
- [23] WELDING GUIDE, BOHLER. Welding Products, ed. 2010.
- [24] H. Moein, and I. Sattarifar, "Different finite element techniques to predict welding residual stresses in aluminum alloy plates", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, pp. 679-689, 2014.
- [25] R. Singh, *Applied Welding Engineering Processes*, Codes and Standards, 2011.
- [26] M. Ghassabzadeh, H. Ghassemi, and M. Nahali, "Study of welding temperature history by dual reciprocity boundary element method", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, pp. 95-103, 2011 (in Persian).
- [27] F. D. Murnaghan, "Finite deformations of an elastic solid", *American Journal of Mathematics*, pp. 235-260, 1937.
- [28] D. S. Hughes and J. Kelly, "Second-order elastic deformation of solids", *Physical Review*, Vol. 92, p. 1145, 1953.
- [29] R. M. Bergman and R. A. Shahbender, "Effect of Statically Applied Stresses on the Velocity of Propagation of Ultrasonic Waves", *Journal of Applied Physics*, Vol. 29, pp 1736-1738, 1958.
- [30] R. W. Benson and V. J. Realson, "Acoustoelasticity", *Product Engineering*, Vol. 30, pp. 56-62, 19 59.
- [31] R.E. Green Jr., "Ultrasonic Investigation of Mechanical Properties", *Treatise on Materials Science and Technology*, H. Herman (ed.), Academic Press, New York and London Vol. 3, pp. 73-126, 1973.
- [32] Handbook of NDT Evaluation Level I-III, Revision ion of NASA, *General DynamicsNDT Training Series The Industry Standard for Basic NDT Training*, 2008.
- [33] H. M. Ledbetter, "Stainlesssteel elastic constants at low temperatures",

4. تغییرات تنش پسماند عرضی نسبت به تنش پسماند طولی در اثر تغییر هندسه طرح اتصال بالاتر است. بیشینه کششی متوسط تنش پسماند عرضی مربوط به طرح اتصال 1 میباشد. برای هر سه طرح اتصال با دور شدن از خط جوش مقدارهای تنش پسماند عرضی تغییراتی مشابه دارند.

5. ابعاد مناطق دارای تنش پسماند طولی کششی برای تمام عمقهای مورد بررسی طرح 1 بیشتر از دو طرح دیگر است. همچنین ابعاد مناطق دارای تنش پسماند کششی عرضی طرح 1 به ترتیب از طرح 2 و 3 بیشتر است.
6. کمترین مقدار تنش موثر مربوط به طرح 3 میباشد. مقدار تنش موثر برای طرحهای 1 و 2 بیشینه تنش موثر در پاس اول و برای طرح 3 در پاس دوم رخ میدهد. در طرح 3 مقدار تنش موثر و گستردگی مناطق دارای تنش پسماند کششی و همچنین حجم حوضچه مذاب (ملاحظات اقتصادی) نسبت به دو طرح دیگر کمتر است.
بنابراین طرح 3 نسبت به دو طرح دیگر جهت اهداف طراحی در اولویت خواهد بود.

9- مراجع

- [1] I. Sattarifar and 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, pp. 723-731, 2009.
- [2] A. Yaghi, T. H. Hyde, A. A. Becker, W. Sun, and J. A. Williams, "Residual stress simulation in thin and thick-walled stainless steel pipe welds including pipe diameter effects", *International Journal of Pressure Vessels* and Piping, Vol. 83, No. 11–12, pp. 864-874, 11, 2006.
- [3] S. J. Lewis, H. Alizadeh, C. Gill, A. Vega, H. Murakawa, W. El-Ahmar, P. Gilles, D. J. Smith, and C. E. Truman, "Modelling and measurement of residual stresses in autogenously welded stainless steel plates: Part1–fabrication and modelling", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86, No. 12, pp. 798-806, 12, 2009.
- [4] B. Brickstad, and B. L. Josefson, "A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, No. 1, pp. 11-25, 1, 1998.
- [5] S. Nakhodchi, I. Saleh Akbari, A.shokuhfar, and 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).
- [6] V. Karimnia, and I. Sattarifar, "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).
- [7] M. C. Smith, P. J. Bouchard, M. Turski, L. Edwards, and R. J. Dennis, "Accurate prediction of residual stress in stainless steel welds", *Computational Materials Science*, Vol. 54, No. 0, pp. 312-328, 3, 2012.
- [8] N. S. Rossini, M. Dassisti, K. Y. Benyounis, and A. G. Olabi, "Methods of measuring residual stresses in components", *Materials & Design*, Vol. 35, No. 0, pp. 572-588, 3, 2012.
- [9] V. Hauk, Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods Evaluation - Application - Assessment - Elsevier Science, ISBN: 0 444 82476 6, Germany, 1997.
- [10] G. S. Schajer, *Practical Residual Stress Measurement Methods*, First Edition. Edited by John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [11] F. Belahcene and J. Lu, "Determination of residual stress using critically

- Journal of Applied Physics, Vol. 52, no. 3, pp.1587-1589, 1981.
- [34] M. J. Attarha, and I. Sattari-Far, "Study on welding temperature distribution in thin welded plates through experimental measurements and finite element simulation", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 4, pp. 688-694, 4, 1, 2011.
- refracted longitudinal waves and immersion mode", *Journal of Strain Analysis*, Vol. 37(1), pp. 13-20, 2002.
- [12] Y. Javadi, M. Akhlaghi, and M. A. Najafabadi, "Nondestructive Evaluation of Welding Residual Stresses in Dissimilar Welded Pipes", *Journal Nondestructiv Evaluation*, Vol. 32, pp. 177-187, 2013.

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11