



بررسی تاثیر ترتیب جوشکاری بر تنش‌های پسماند و اعوجاج جوشکاری گشودگی در یک پوسته آلومینیومی

بهمن صمدی^۱، ایمان معصومی دهقی^{۲*} و حسن قائدعلی^۳

^۱ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان

^۲ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۳ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۱/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۴

چکیده

در این پژوهش، به بررسی جوشکاری گشودگی روی یک پوسته آلومینیومی و بررسی تاثیر ترتیب جوشکاری بر تنش‌های پسماند و اعوجاج بعد از جوشکاری به کمک شبیه‌سازی المان محدود در نرم افزار تحلیل گر آباکوس پرداخته شده و با شبیه‌سازی در نرم افزار سیسولد، نتایج این دو نرم‌افزار نیز مقایسه شده‌اند. همچنین با استفاده از داده‌های تجربی، به مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایش تجربی پرداخته شده است. نتایج نشان داده است که توزیع دمایی در نقاط مختلف مسیر جوشکاری یکنواخت نمی‌باشد که مهمترین عامل این رخداد، غیریکنواختی هندسه جوشکاری است. هرچه تعداد مراحل جوشکاری بیشتر شود، باز توسعه حرارتی و همچنین اختلاف بین پیک‌های حرارتی در موقعیت‌های مختلف بیشتر خواهد شد که این خود بر توسعه تنش‌های پسماند و همچنین اعوجاج بعد از جوشکاری اثر گذار خواهد بود. نتایج بررسی تنش‌های پسماند حاکی از آن است که هرچه تعداد ترتیب‌های جوشکاری بیشتر شود، پیک تنش‌های پسماند کاهش پیدا می‌کند و توزیع یکنواخت‌تری در تنش‌ها ایجاد می‌شود. موضوع حائز اهمیت در اعوجاج ایجاد شده در این سازه، میزان کشیدگی به داخل و همچنین تغییر مکان و تغییر شکل مسیر جوشکاری است. نتایج نشان می‌دهد که هرچه میزان اعوجاج در ناحیه جوش (کشیدگی به بیرون) بیشتر باشد، به همان نسبت میزان کشیدگی به داخل بیشتر خواهد بود.

کلمات کلیدی: ترتیب جوشکاری؛ المان محدود؛ تنش پسماند؛ اعوجاج.

Investigation of Sequence Effect on Welding Residual Stresses and Distortion in a Aluminum Shell Opening

B. Samadi¹, E. Masoumi Dehaghi^{2,*}, H. Ghaedali¹

¹ Master, Mech. Eng., Shahid Bahonar Univ., Kerman, Iran.

² Master, Mech. Eng., Amirkabir University of Technology., Tehran, Iran.

³ Master, Mech. Eng., Amirkabir University of Technology., Tehran, Iran.

Abstract

In this research, opening welding on an aluminum shell and investigating the effect of welding sequence on residual stresses and distortion after welding by finite element simulation have been investigated. Then, the results are compared in ABAQUS and SYSWELD. Using experimental data, simulation and experimental results are compared. The temperature distribution is not uniform in different area of the welding zone, the most important factor in this incident is the non-uniform welding geometry. Thermal retransmission and the difference between thermal pick in different situations increases with increase of welding steps, which will affect the development of residual stresses as well as distortion after welding. The peak of the residual stresses is reduced and more uniform distribution occurs as the number of welding sequences increases. Also, the amount of elongation will be greater, with the higher the distortion in the weld area.

Keywords: Welding sequence; Finite element; Residual stress; Distortion.

۱- مقدمه

خواص منحصر به فرد آلومینیوم همچون چگالی پایین، استحکام بالا و مقاومت به خوردگی، باعث کاربرد آن در زمینه‌های مختلف شده است. امروزه استفاده از آلیاژهای آلومینیوم در صنایع مختلف از جمله، ساخت تجهیزات هوایی، صنایع هسته‌ای، خودروسازی و ساخت مخازن تحت فشار افزایش پیدا کرده است که ناشی از این ویژگی‌های منحصر به فرد است. پوسته‌های آلومینیومی کاربرد بسیاری در این صنایع دارد [۱]. به منظور دسترسی به محفظه داخلی پوسته و انجام عملیاتی همچون بازرسی و تعمیرات، نیاز به وجود محلی برای دسترسی به داخل مخازن است. برای اینکار از گشودگی روی پوسته‌ها استفاده می‌شود. به طوریکه پس از انجام عملیات مورد نظر، گشودگی‌ها مجدداً به محل قبلی جوشکاری می‌شوند. در فرایند جوشکاری ذوبی به دلیل اعمال حرارت موضعی و تغییرات دمایی بالا، تنش‌های پسماند در اتصال ایجاد خواهد شد. این تنش‌ها بسته به موقعیت می‌توانند کششی یا فشاری باشند که اندازه آن‌ها در برخی نقاط در حد استحکام تسلیم است که می‌تواند بر استحکام خستگی و کمانش سازه موثر باشد [۲].

ولاگا و همکاران [۳] جوشکاری اتصال شاخه‌ای و تأثیر هندسه اتصال بر غیریکنواختی توزیع حرارتی و تنش‌های پسماند و اعوجاج از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ از طریق شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار سیسولد و همچنین مقایسه با نتایج تجربی را بررسی کردند. نتایج آنها حاکی از اختلاف دما در نقاط مختلف جوشکاری است که این به خاطر گسترش بیشتر توزیع حرارتی در سمت شاخه نسبت به لوله است که ناشی از غیریکنواختی هندسه اتصال است. در واقع عامل اصلی غیریکنواختی توزیع حرارتی، هندسه اتصال است که برخلاف هندسه‌هایی همچون، اتصال دولوله، نامتقارن و غیریکنواخت است. در تحقیق پنگ [۴] روش‌ها و راهکارهای کنترل اعوجاج جوشکاری قبل، در حین و بعد از فرآیند ارائه شده است. حمصی و همکاران [۵]، به بررسی تنش‌های پسماند ایجاد شده در جوشکاری اتصال لوله‌ای فولادکربنی و اعتبارسنجی به وسیله مقایسه با نتایج آزمایش تجربی

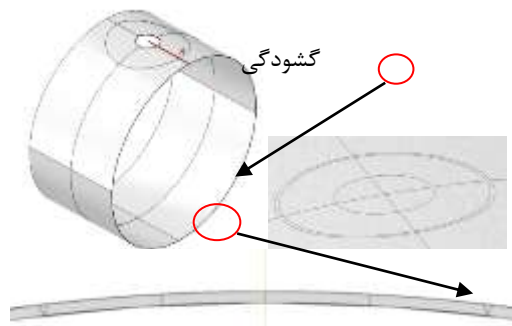
پرداخته که در آن تنش‌های پسماند از طریق روش اشعه ایکس به دست می‌آید. همچنین به منظور لحاظ کردن اثرات تغییرات فازی روی نتایج، از آنالیز کوپل حرارتی- مکانیکی- متالورژیکی در نرم افزار سیسولد استفاده کردند و از طریق مقایسه با آزمایش تجربی، داده‌های نرم افزاری را اعتبارسنجی کردند. وترسیلوان و همکاران [۶] اعوجاج ایجاد شده در اثر جوشکاری یک اتصال شاخه‌ای را از طریق شبیه‌سازی المان محدود و آزمایش تجربی بررسی کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن ۳ پاس برای جوشکاری، توزیع حرارتی و تاریخچه حرارتی ایجاد شده را ملاحظه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در پاس‌های بعدی اعوجاج افزایش پیدا کرده است که به خاطر افزایش میزان انباشت جوش و حرارت ورودی در مقطع است. فیو همکاران [۷] به بررسی تأثیر ترتیب جوشکاری بر توزیع تنش‌های پسماند و اعوجاج در یک اتصال سپری شکل به کمک شبیه‌سازی المان محدود پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که جوشکاری دو طرفه علاوه بر کاهش تغییر شکل عمودی و اعوجاج، باعث ایجاد تنش‌های پسماند نسبتاً کمتری خواهد شد. جیانگ و همکاران [۸]، مدل المان محدود جوشکاری ۶ پاسه به صورت گوشه نفوذ کامل نازل به مخزن استوانه‌ای از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ و تأثیر سه حالت برای ترتیب جوشکاری روی تنش‌های پسماند اتصال جوش چند پاسه را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که عوامل قیود هندسی، پخ جوشکاری و ترتیب جوشکاری، اثر کمتری روی بیشترین تنش پسماند دارد. همچنین پارامترهای دیگری مانند، دمای بین پاس و نرخ خنک‌کاری نیز پارامترهای موثرتری هستند. ستاری فر و فراهانی [۹]، روش المان محدود را برای تحلیل رفتار ترمومکانیکی و تنش‌های پسماند در جوش سربه سر لوله‌های فولادی مورد مطالعه قرار داده‌اند. تنش‌های پسماند با استفاده از روش کرنش‌سنجی سوراخ در سطح خارجی لوله‌ها اندازه‌گیری شده و با نتایج المان محدود مقایسه گردیده است. آن‌ها همچنین اثر شکل پخ و تعداد پاس‌ها روی تنش‌های پسماند را در این لوله‌ها بررسی نموده‌اند. مالک و همکاران [۱۰]، یک روش محاسباتی را برای آنالیز توزیع دما و تنش‌های پسماند حاصل، در حین جوشکاری استوانه‌های جدار نازک از جنس فولاد کم کربن ارائه نموده‌اند. مطالعات پارامتریک آن‌ها براساس شبیه سازی عددی انجام گرفته و اثر پارامترهای بحرانی فرآیند

¹ Opening

پسماند اولیه، بر روی تنش‌های پسماند ناحیه جوش اثرگذار است. نتایج نشان می‌دهد که در موقعیت‌هایی که تنش‌های پسماند فشاری هستند، حضور تنش‌های اولیه موجب افزایش حدود ۱۸۰ مگاپاسکالی تنش‌های پسماند می‌شود. این در حالی است که روی تنش‌های کششی تاثیر چندانی ندارند. با توجه شرایط هندسی خاص در این پژوهش، مهمترین نوآوری و هدف آن، بررسی تاثیر ترتیب‌های مختلف جوشکاری بر تنش‌های پسماند و اعوجاج در هندسه اتصال نازل به پوسته در جنس و ضخامت مشخص به کمک شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس است.

۲- تعریف مسئله

در این پژوهش شبیه‌سازی جوشکاری گشودگی روی یک پوسته با جنس آلومینیوم استحکام بالا سری ۵۰۰۰، با کد استاندارد AL-5456 انجام شده است. این آلیاژ جز آلیاژهای غیرقابل عملیات حرارتی بوده و کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف به خصوص صنایع هواپیمایی دارد. مشخصات هندسی پوسته و گشودگی، در جدول ۱ و هندسه مدل، در شکل ۱ نشان داده شده است. A فاصله مرکز گشودگی تا لبه طولی پوسته است.



شکل ۱- هندسه و محل اتصال گشودگی به پوسته.

لازم به ذکر است، جوشکاری به صورت تک پاسه و به روش قوس تنگستن^۴ انجام می‌شود.

جوشکاری بر روی تنش‌های پسماند جوشی بررسی شده است. مشایخی و هدایتی [۱۱] تاثیر ترتیب جوشکاری و هیدروتست بر تنش‌های پسماند جوشی در اتصال لوله‌های فولادی زنگ نزن از جنس ۳۰۴ را بررسی کردند. مدل‌سازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که تاثیر ترتیب جوشکاری بر توزیع تنش‌های پسماند در نقاط ابتدایی و انتهایی جوشکاری مشهود است. ضمن اینکه هیدروتست باعث کاهش تنش‌های پسماند به اندازه ۶۵٪ مقدار اولیه شده است. لیانگ و پنگ [۱۲] در بررسی تاثیر ترتیب جوشکاری بر تنش‌های پسماند، سه ترتیب جوشکاری پیوسته^۱، جوشکاری برگشتی^۲ و جوشکاری پرشی^۳، نتیجه گرفتند که تاثیر ترتیب جوشکاری بر تنش‌های پسماند ناچیز است. ستاری فر و جوادی [۱۳]، به بررسی اثر ترتیب جوشکاری بر اعوجاج در جوشکاری دولوله از جنس فولاد زنگ نزن به روش قوس تنگستن پرداختند. آن‌ها با بررسی ۹ ترتیب مختلف جوشکاری، نتیجه گرفتند که انتخاب ترتیب مناسب جوشکاری بر تغییر شکل‌های بعد از جوشکاری موثر خواهد بود. نتایج آن‌ها نشان دادند که برخلاف باور عمومی که با افزایش تعداد گام‌های جوشکاری، اعوجاج کاهش پیدا می‌کند، در شرایط خاصی در حالتی که جوشکاری با چهارگام صورت می‌گیرد، اعوجاج از حالت دوگام بیشتر است. معصومی و همکاران [۲] جوشکاری نازل به پوسته آلومینیومی را از طریق شبیه‌سازی عددی بررسی نموده و به بیان تاثیر فرآیند هیدروتست و هندسه اتصال بر تنش‌های پسماند و اعوجاج پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که تنش‌های پسماند در مدلی که ناحیه جوشکاری نسبت به سایر مدل‌ها به منطقه حاوی تمرکز تنش در محل اتصال نازل به پوسته نزدیک‌تر است، بیشتر می‌باشد. همچنین اعوجاج بعد از جوشکاری در مدلی که نازل به گلوبی پوسته جوشکاری شده، کمتر است. پارک و همکاران [۱۴] تاثیر تنش‌های پسماند اولیه طی پروسه ساخت، اعم از تنش‌های پسماند ناشی از عملیات حرارتی و یا تنش‌های باقیمانده ناشی از پروسه تولید ورق، بر روی تجمیع تنش‌های پسماند ایجاد شده بعد از جوشکاری آن‌ها پرداخته‌اند. حضور تنش‌های

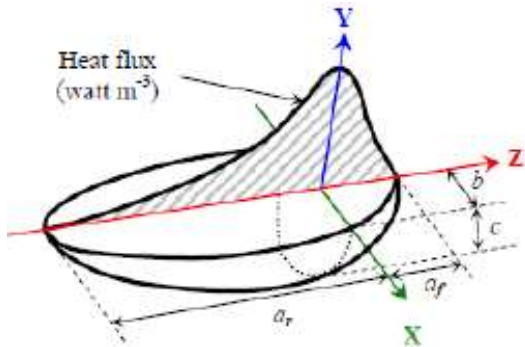
^۱ Progressive Welding

^۲ Back Step Welding

^۳ Jump Welding

^۴ TIG

که در آن ها a_h , b_h , c_{hf} و c_{hb} پارامترهای منبع حرارتی بیضی‌گون است. در این پژوهش، پارامترهای گلداک با توجه به ابعاد حوضچه جوش و همچنین مراجع دیگر انتخاب شده است که در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- منبع حرارتی دوبیضی‌گون گلداک [۱۵]

جدول ۲- پارامترهای گلداک

مقدار	پارامتر
۴	طول بیضی جلویی cf-(mm)
۱۲	طول بیضی عقبی cr-(mm)
۴	عرض منبع حرارتی a-(mm)
۲	عمق منبع حرارتی b-(mm)
۰/۵	سهم حرارت در بیضی جلویی ff-
۱/۵	سهم حرارت در بیضی عقبی fr-

اتلاف حرارتی به صورت تشعشع در دماهای بالا و در مجاورت جوش و به صورت همرفت در دماهای پایین تر لحاظ می‌شود. معادله (۳) معروف به مدل بریسکتاد ارائه شده است [۱۶]. در این معادله شرایط اتلاف حرارتی به صورت همرفتی و تشعشع از تمام سطوح وابسته به دما توسط ضریب انتقال حرارت h تعریف می‌شود. اگرچه بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد که خطای در نظر نگرفتن تشعشع در تحلیل حرارتی، کمتر از ۳ درصد است [۱۷].

جدول ۱- مشخصات هندسی گشودگی و پوسته

قطر	۱۲۵۰ میلی‌متر
طول	۷۴۰ میلی‌متر
ضخامت	۲ میلی‌متر
قطر گشودگی	۱۰۵ میلی‌متر
A	۳۳۰ میلی‌متر

۳- مدل‌سازی المان محدود

به منظور مدل‌سازی فرآیند جوشکاری، از شبیه‌سازی المان محدود به وسیله یک تحلیل غیرکوپل حرارتی- مکانیکی در نرم افزار آباکوس و تحلیل کوپل حرارتی- مکانیکی در نرم افزار سیسولد استفاده شده است. در تحلیل غیرکوپل ابتدا مدل‌سازی حرارتی با توجه به مدل حرارتی در نظر گرفته شده و خواص مواد و پارامترها و شرایط جوشکاری انجام شده، سپس برای تحلیل مکانیکی از نتایج مدل حرارتی به عنوان بار ورودی استفاده می‌شود. برای اعمال شارحرارتی از طریق حرکت منبع حرارتی در راستای جوشکاری، مدل‌های مختلفی ارائه شده است. در این پژوهش از مدل دوبیضی‌گون گلداک جهت مدل‌سازی منبع حرارتی استفاده شده است. در مدل گلداک، دو نیمه بیضی‌گون متفاوت برای ایجاد منبع حرارتی در نظر گرفته شده که شار حرارتی در هر نیمه بیضی‌گون با معادله متفاوتی بیان می‌شود. شکل ۲ مدل گلداک را نمایش می‌دهد. برای نقطه (x, y, z) روی بیضی‌گون اول در جلوی قوس جوشکاری، معادله شار حرارتی به صورت رابطه (۱) به می‌آید [۱۵]:

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} r_f Q}{a_h b_h c_{hf} \pi \sqrt{\mu}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_{hf}^2} - \frac{3y^2}{a_h^2} - \frac{3z^2}{b_h^2}\right) \quad (1)$$

و برای یک نقطه (x, y, z) در پشت قوس جوشکاری، معادله شارحرارتی به شکل رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} r_b Q}{a_h b_h c_{hb} \pi \sqrt{\mu}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_{hb}^2} - \frac{3y^2}{a_h^2} - \frac{3z^2}{b_h^2}\right) \quad (2)$$

جدول ۳- خواص فیزیکی وابسته به دما برای آلومینیوم سری ۵۴۵۶ [۱۸]

ظرفیت گرمایی ویژه (J/Kg°C)	ضریب هدایت حرارتی (w/m°C)	دما (°C)
۹۹۲	۱۱۶/۳	۲۱
۹۹۶/۷	۱۱۸/۹	۳۷
۱۰۰۳/۹	۱۲۲/۵	۶۵
۱۰۱۱	۱۲۶	۹۳
۱۰۱۸/۲	۱۲۹/۱	۱۲۱
۱۱۲۰	۱۳۲	۱۴۸
۱۰۳۲/۵	۱۳۴/۶	۱۷۶
۱۰۲۹/۷	۱۳۷	۲۰۴
۱۰۹۰	۱۳۷	۴۰۰

جدول ۴- خواص مکانیکی وابسته به دما برای آلومینیوم ۵۴۵۶ [۱۸]

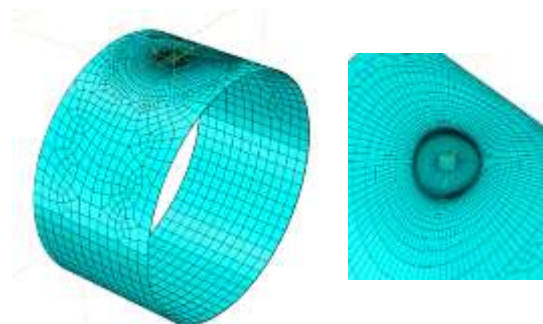
دما (°C)	مدول الاستیک (Pa)	تنش تسلیم (Mpa)	دما (°C)	ضریب انبساط حرارتی (1/°C)
۲۰	۷/۱ e10	۲۸۱	۲۰	۲/۳۸ e-5
۱۰۰	۶/۷۶ e10	۲۸۱	۳۷/۷	۲/۴ e-5
۱۵۰	۶/۵۵ e10	۲۵۶	۹۳/۳	۲/۴۸ e-5
۲۰۰	۶/۲۱ e10	۲۵۶	۱۴۸/۸	۲/۵۵ e-5
۲۲۰	۵/۹ e10	۱۸۰	۲۰۴	۲/۶۱ e-5
۲۶۰	۵/۵۹ e10	۱۸۰	۲۶۰	۲/۶۶ e-5
۳۱۵	۳/۱۵ e10	۱۶۶	۳۱۵	۲/۷۲ e-5
۳۷۰	۳/۲۰ e10	۱۶۶		
۵۷۰	۷ e7	۹۴		
۶۲۰	۷ e4	۹۴		

جدول ۵- پارامترهای جوشکاری

پارامتر	مقدار
جریان جوشکاری (آمپر)	۲۴۰
ولتاژ جوشکاری (ولت)	۱۸
سرعت جوشکاری (میلیمتر بر ثانیه)	۳

$$h = \begin{cases} 0.0668T \left(\frac{w}{m^2}\right) & 0 < T < 500^\circ C \\ 0.231T - 82.1 \left(\frac{w}{m^2}\right) & 500^\circ C < T \end{cases} \quad (3)$$

h ضریب انتقال حرارت و T دما می باشد؛ همچنین در جداول ۳ و ۴ به ترتیب خواص فیزیکی و مکانیکی وابسته به دما برای مواد به کاررفته نشان داده شده است. همچنین مدل موادی به صورت الاستیک-پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است. پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در مدل سازی منبع حرارتی بنابر اعلام صنعت، در جدول ۵ نشان داده شده است. این پارامترها به دلیل استفاده در شرایط واقعی آزمایشگاهی و تولید و با استفاده از دستورالعمل های جوشکاری^۱ مورد استفاده برای ساخت سازه، به کاربرده شده است. مدل المان محدود نیز، در شکل ۳ نشان داده شده است. به منظور حصول مش بهینه، از آنالیز حساسیت مش استفاده شده است. به طوریکه از تعداد المان ها حدود ۴۶۰۰۰ به بعد، تغییرات بیشترین دمای حوضچه جوش ناچیز است و این تعداد المان، به عنوان تعداد بهینه انتخاب می شود. نتایج آنالیز حساسیت در شکل ۴ نشان داده شده است.



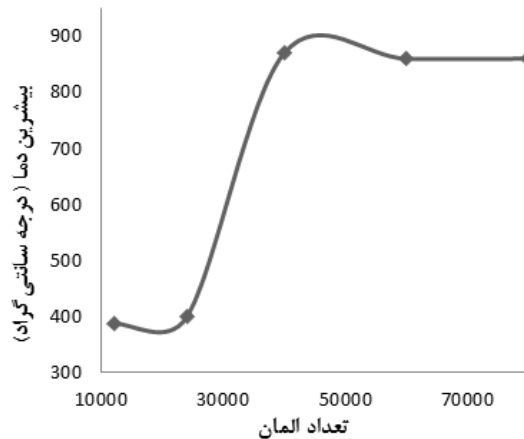
شکل ۳- مدل المان محدود

به منظور انجام تحلیل مکانیکی جهت استخراج تنش های پسماند و اعوجاج، از داده های حرارتی حاصل از تحلیل حرارتی به عنوان بار ورودی در یک تحلیل جداگانه استفاده شده است.

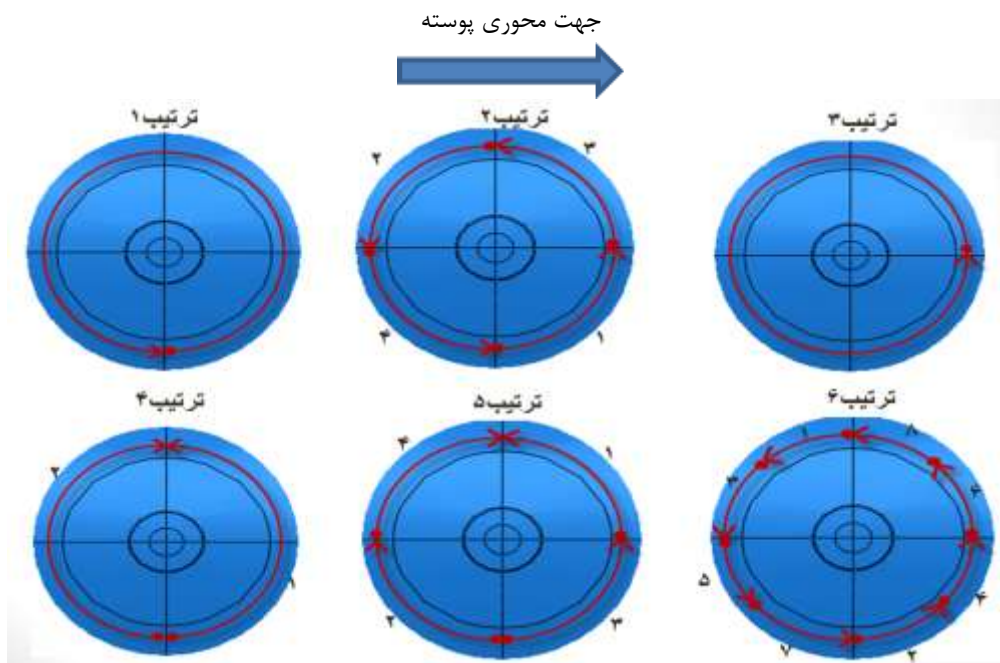
^۱ WPS

ترتیب‌های جوشکاری در نظر گرفته شده برای بررسی تأثیر آن‌ها روی تنش‌های پسماند و اعوجاج در شکل ۵ نشان داده شده است. انتخاب این ترتیب‌ها بر اساس پیشنهاد مراجع و صنعت مربوطه است. برای این کار نیاز به اعمال شرایط مرزی برای جلوگیری از حرکت صلب و همچنین تعیین شرایط واقعی کارگاهی است. به این منظور، شرایط مرزی مکانیکی طوری انتخاب شده است که:

- ۱- یک نقطه زیر پوسته مقید شده.
- ۲- چهار نقطه در چهار زاویه در پیشانی پوسته در جهت‌های غیر محوری به منظور ایجاد شرایط واقعی کارگاهی مقید شده است.



شکل ۴- آنالیز حساسیت مش

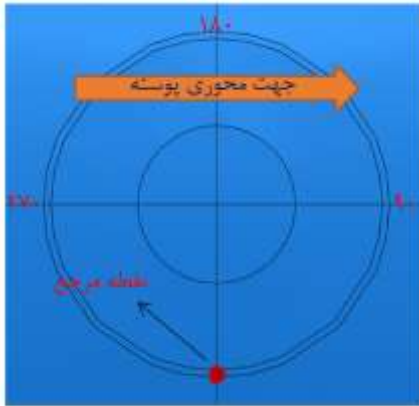


شکل ۵- ترتیب‌های مختلف جوشکاری

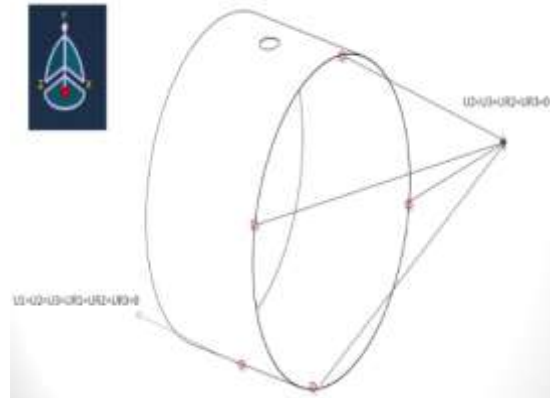
۴- بحث و نتایج

شکل ۸ توزیع حرارتی به دست آمده از شبیه‌سازی المان محدود فرآیند جوشکاری در ترتیب‌های جوشکاری را نشان می‌دهد. شکل ۹ تاریخچه حرارتی حاصل از شبیه‌سازی در ترتیب‌های مختلف را نشان می‌دهند. نقطه اندازه‌گیری، دارای موقعیت زاویه‌ای نسبت به نقطه مرجع است. نقطه مرجع شروع جوشکاری در ترتیب شماره ۱ است. موقعیت این نقطه در شکل ۷ نشان داده شده است.

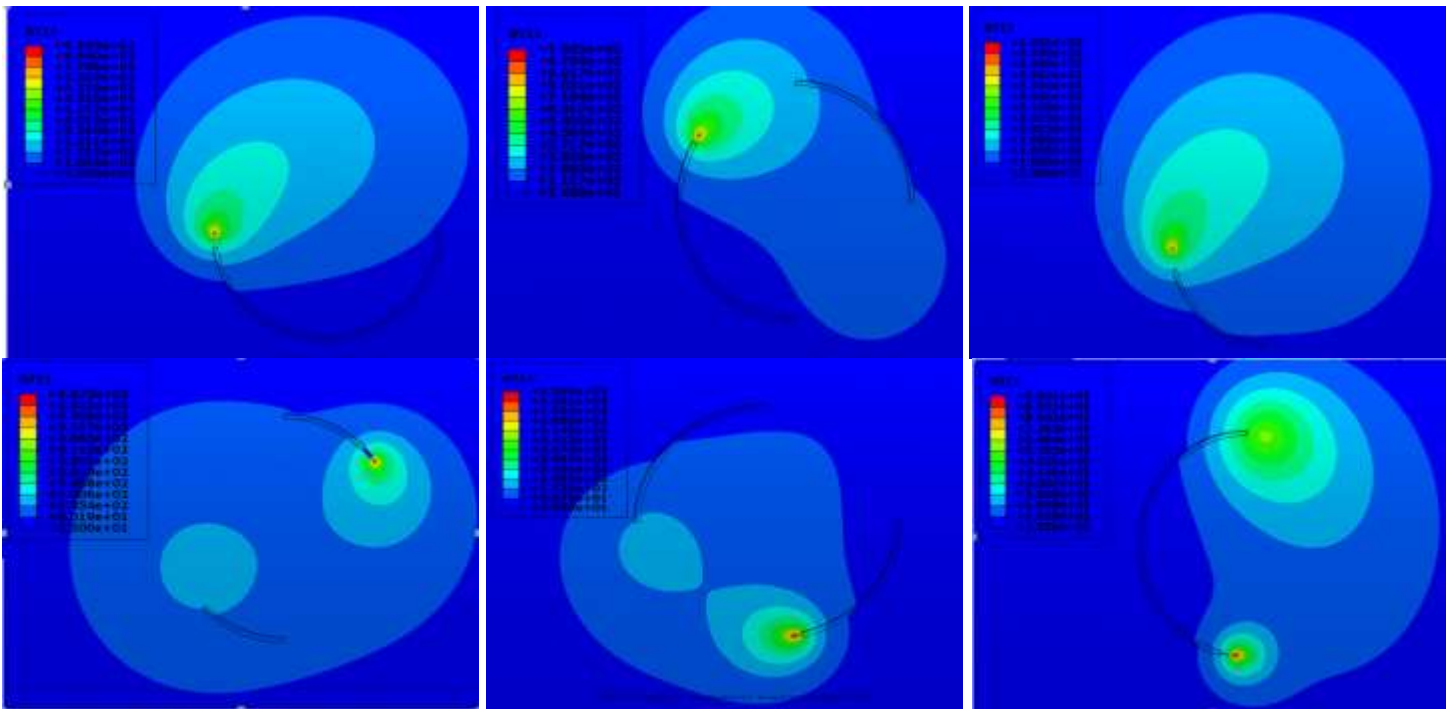
این شرایط مرزی در شکل ۶ نشان داده شده است. تحلیل در نرم افزار سوسولد با مشخصات هندسی، پارامترهای جوشکاری، مش‌بندی و در کل شرایط مشابه انجام شده است. تنها تفاوت در تحلیل در این نرم افزار، با توجه به نحوه تعریف ماده، اختلاف احتمالی خواص وارد شده و روش تحلیل (کوپل) است.



شکل ۷- موقعیت نقطه مرجع جهت اندازه‌گیری تاریخچه دمایی



شکل ۶- شرایط مرزی مکانیکی



شکل ۸- توزیع حرارتی در ترتیب‌های مختلف جوشکاری

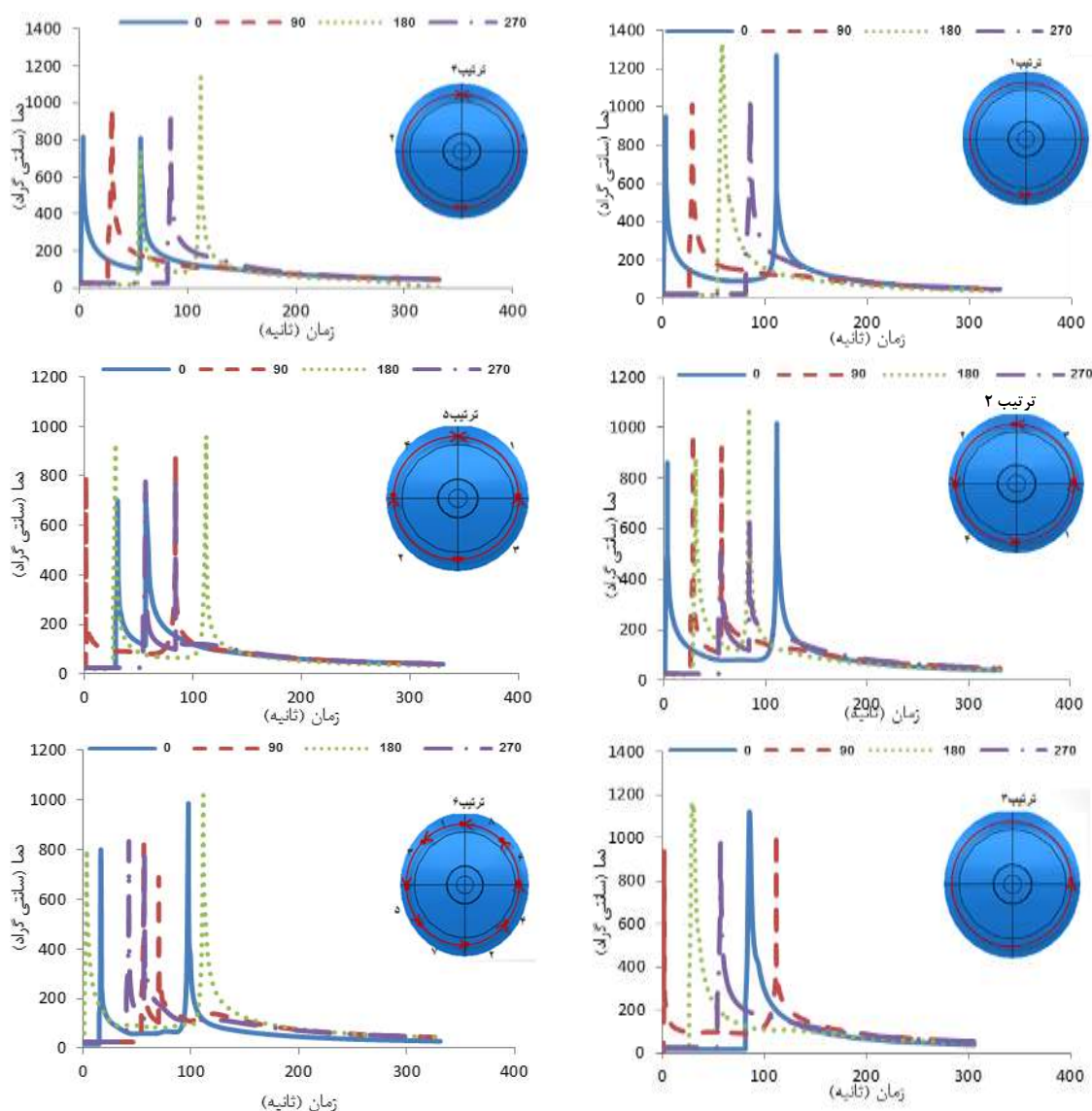
اتفاق می‌افتد. این در حالی است که طبعا در نقاطی که جوشکاری بنابر ترتیب انتخابی، شروع شده است، دما پایین است و با پیشرفت منبع حرارتی دما افزایش پیدا می‌کند. در ترتیب‌هایی که نقاط شروع و پایان یکسان است، دمای حالت نهایی از حالت اولیه بیشتر است. بالطبع هرچه تعداد مراحل جوشکاری بیشتر شود، باز توسعه حرارتی و همچنین اختلاف بین پیک‌های حرارتی در

همانگونه که از تاریخچه حرارتی به دست آمده مشخص است، توزیع دمایی در نقاط مختلف تعیین شده یکنواخت نمی‌باشد. با توجه به نتیجه‌ای که قبلا در مرجع [۳] به آن اشاره شده بود، مهمترین عامل این رخداد، غیریکنواختی هندسه جوشکاری و همچنین توزیع غیریکنواخت منبع حرارتی بیضوی در اثر غیریکنواختی اتصال در نقاط مختلف است. بیشترین دمای منبع حرارتی در موقعیت ۱۸۰ درجه

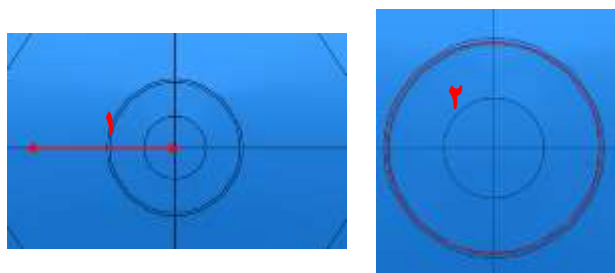
وجود دارد. دلیل عمده این اختلاف، تفاوت در نقطه شروع و پایان جوشکاری به دلیل تاثیرگذاری موقعیت جوشکاری بر شرایط اتلاف و انتقال حرارت و تعداد مراحل جوشکاری است.

برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند، از دو مسیر یکی روی خط جوش در سطح داخلی (مسیر ۱) و دیگری مسیری در جهت محوری پوسته (مسیر ۲) همانگونه که در شکل ۹ نشان داده، استفاده شده است.

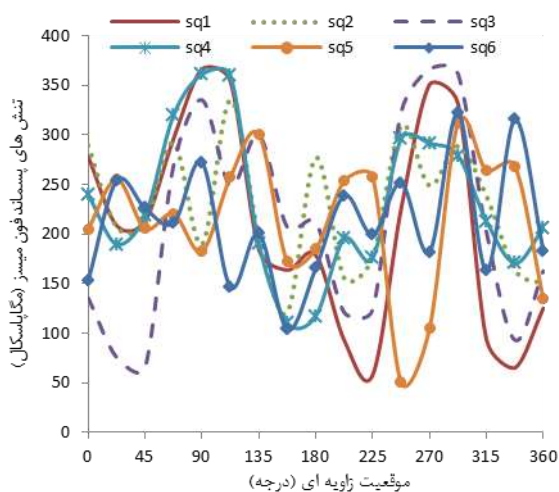
موقعیت‌های مختلف نیز بیشتر خواهد شد که این خود بر توسعه تنش‌های پسماند و همچنین اعوجاج بعد از جوشکاری اثر گذار خواهد بود. نتایج نشان می‌دهد که ترتیب شماره ۲، کمترین و ترتیب شماره ۶، بیشترین تعداد اختلاف بین پیک‌های دمایی را دارد؛ به طوری که در ترتیب ۲ یک اختلاف ۲۰ درجه سانتی‌گرادی و یک اختلاف ۱۶۰ درجه سانتی‌گرادی وجود دارد. این در حالی است که در ترتیب ۶، چهار اختلاف ۳۰۰ درجه سانتی‌گرادی، یک اختلاف ۴۰۰ درجه سانتی‌گرادی و یک اختلاف ۳۰ درجه سانتی‌گرادی



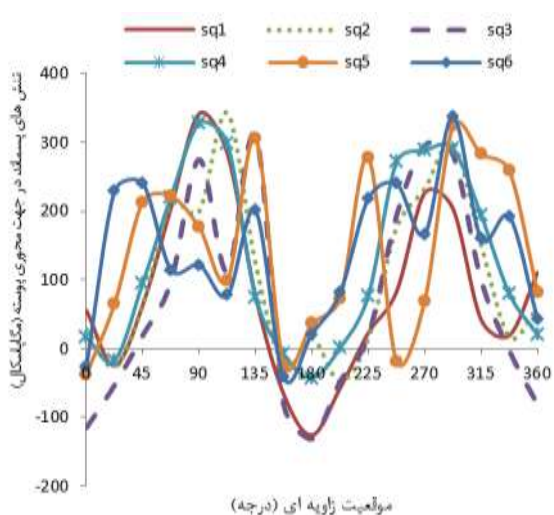
شکل ۹- تاریخچه حرارتی در ترتیب‌های مختلف جوشکاری



شکل ۱۰- مسیرهای اندازه گیری تنش‌های پسماند

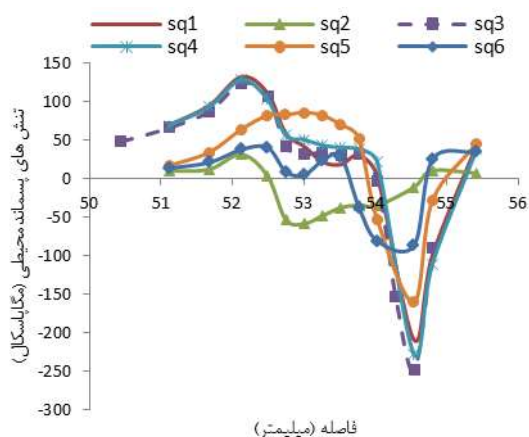


شکل ۱۱- مقایسه توزیع تنش‌های پسماند فون میسر روی مسیر ۱ در ترتیب‌های مختلف

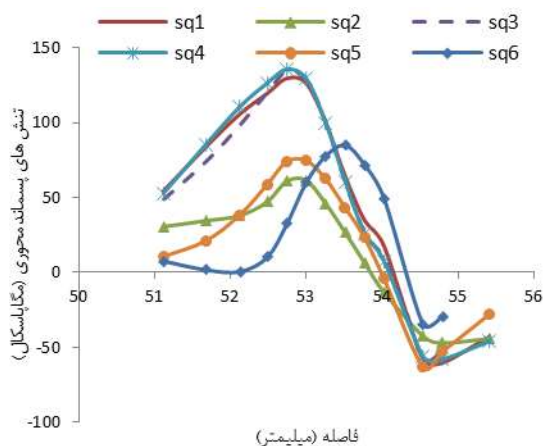


شکل ۱۲- مقایسه توزیع تنش‌های پسماند در جهت محوری روی مسیر ۱ در ترتیب‌های مختلف

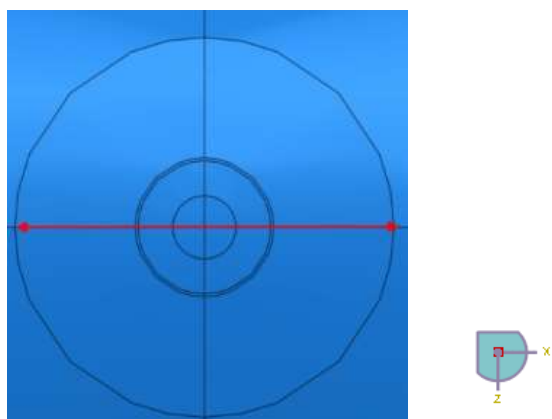
شکل ۱۱ مقایسه توزیع تنش‌های پسماند فون میسر در مسیر شماره ۱ برای ترتیب‌های مختلف جوشکاری برحسب موقعیت زاویه‌ای نسبت به نقطه مرجع را نشان می‌دهد. در ترتیب جوشکاری اول، بیشتر تنش‌های پسماند در موقعیت‌های ۹۰ و ۲۷۰ درجه نسبت به نقطه مرجع (در این ترتیب نقطه مرجع، نقطه شروع جوشکاری است) است. در ترتیب شماره ۳ نیز، بیشترین تنش‌های پسماند در همین موقعیت‌ها ایجاد شده است (در این ترتیب نقطه شروع جوش موقعیت ۹۰ نسبت به نقطه مرجع است). نتایج حاکی از آن است که هرچه تعداد ترتیب‌های جوشکاری بیشتر شود، پیک تنش‌های پسماند کاهش پیدا می‌کند و توزیع یکنواخت‌تری در تنش‌ها ایجاد می‌شود. به طوریکه در ترتیب ۱، اختلاف بیشترین و کمترین تنش ۳۰۰ مگاپاسکال، در ترتیب شماره ۶، ۲۱۵ مگاپاسکال است. به طور کلی بیشترین پیک تنش پسماند فون میسر مربوط به ترتیب ۱ و ۴ در موقعیت ۹۰ درجه و به مقدار ۳۶۰ مگاپاسکال و کمترین تنش پیک تنش پسماند فون میسر مربوط به ترتیب شماره ۵ و به مقدار ۵۰ مگاپاسکال است. شکل ۱۲ توزیع تنش‌های پسماند در راستای محوری پوسته در مسیر ۱ را نشان می‌دهد. در ترتیب‌های ۵ و ۶ پیک تنش‌های پسماند در موقعیت نزدیک ۲۷۰ درجه و ترتیب ۱ و ۲ و ۴ در موقعیت ۹۰ درجه از بقیه بیشتر و در حدود ۳۴۰ مگاپاسکال است. ترتیب ۳ کمتری پیک تنش‌های کششی و فشاری را دارد. کمترین پیک تنش‌های فشاری علاوه بر ترتیب ۳ در ترتیب ۱ و در موقعیت ۱۸۰ است. همچنین پیک‌های تنش کششی، تمایل بیشتری به حضور در موقعیت‌های ۹۰ و ۲۷۰ درجه دارند و در موقعیت ۱۸۰ و صفر، مقادیر کمتری از خود نشان می‌دهند. شکل ۱۳ توزیع تنش‌های پسماند محوری و



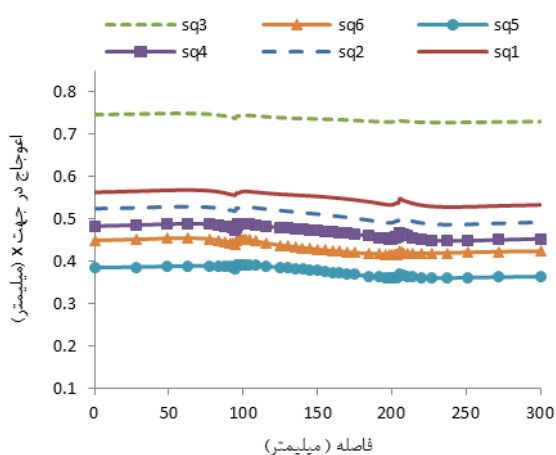
شکل ۱۴- مقایسه توزیع تنش‌های پسماند محیطی روی مسیر ۲ در ترتیب‌های مختلف



شکل ۱۳- مقایسه توزیع تنش‌های پسماند محوری روی مسیر ۲ در ترتیب‌های مختلف



شکل ۱۵- مسیر مورد نظر برای اندازه‌گیری اعوجاج



شکل ۱۶- مقایسه اعوجاج در جهت X

شکل ۱۴ توزیع تنش‌های پسماند محیطی در مسیر ۲ را نشان می‌دهند. شکل‌ها نشان می‌دهند که در هر دو نمودار، پیک تنش‌های کششی محوری و محیطی در ترتیب‌های ۱، ۴ و ۳ بیشتر است. هرچه تعداد مراحل جوشکاری بیشتر شود، پیک تنش‌های کششی نیز کاهش پیدا می‌کند که می‌تواند به سبب اعمال مجدد حرارت و آزادسازی تنش‌های پسماند حاصل از مراحل قبلی باشد. در هر دو حالت، کمترین تنش‌های پسماند مربوط به ترتیب شماره ۲ است؛ ضمن اینکه توزیع تنش در این ترتیب یکنواخت‌تر است. از نظر تنش‌های پسماند محوری بعد از ترتیب ۲، ترتیب ۵ و از نظر تنش‌های پسماند محیطی بعد از ترتیب ۲، ترتیب ۶، کمترین مقدار را دارا است.

به منظور بررسی اعوجاج، از یک مسیر مطابق شکل ۱۵ استفاده شده است و اعوجاج در سه جهت عمود بر هم اندازه‌گیری شده است.

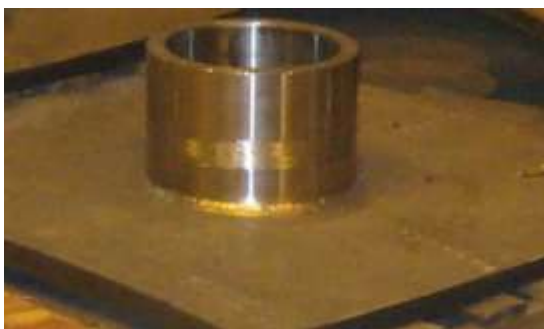
شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ به ترتیب، اعوجاج در جهت x ، y و z در مسیر مشخص شده در شکل ۱۴ را نشان می‌دهند. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که ترتیب شماره ۳، بیشترین اعوجاج در جهت محوری و ترتیب ۵ کمترین مقدار را دارد. افزایش تعداد مراحل جوشکاری، باعث کاهش اعوجاج در این مسیر شده است. در شکل ۱۷ بیشترین اعوجاج، در ترتیب ۶ و کمترین آن در ترتیب‌های ۱ و ۳ ایجاد شده است. این درواقع همان کشیدگی به داخل گشودگی است.

۵- آزمایش تجربی

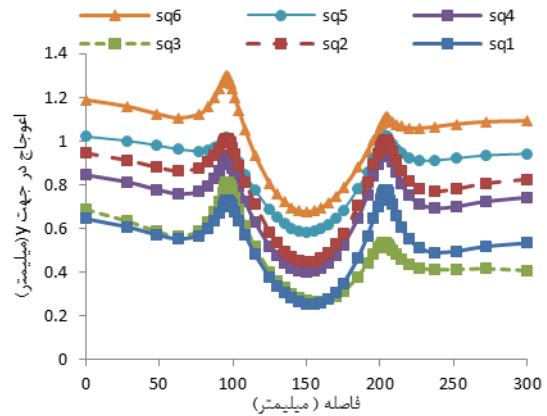
به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی اقدام به نمونه سازی شده است. به این منظور یک نازل به قطر بیرونی ۲۹۰ میلیمتر و ضخامت ۳۱/۷۵ میلیمتر به قطعی از یک مخزن به قطر ۷۵۰۰ میلیمتر و ضخامت ۲۵/۴ میلیمتر از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به روش های قوس تنگستن برای پاس های اولیه و الکترو دستی برای پاس های بعدی جوشکاری شده است و سپس تغییر مکان چند نقطه روی سطح بیرونی پوسته در راستای محیطی و محوری قبل و بعد از جوشکاری به کمک دستگاه اندازه گیری مختصات^۱ اندازه گیری و مقایسه شده است. شکل ۱۹ نمونه جوشکاری شده را نشان می دهد.

شرایط مشابه آزمایش تجربی، مورد شبیه سازی المان محدود قرار گرفته است تا نتایج شبیه سازی اعتبار سنجی گردد. شکل ۲۰ مسیرهای انتخابی جهت اندازه گیری تغییر مکان در دو روش تجربی و المان محدود را نشان می دهد. شکل ۲۱ مقایسه تغییر مکان نقاط مورد اندازه گیری در جهت محوری قطاع مخزن و شکل ۲۲، مقایسه تغییر مکان در جهت محیطی قطاع مخزن حاصل از اندازه گیری تجربی و المان محدود را نشان می دهد.

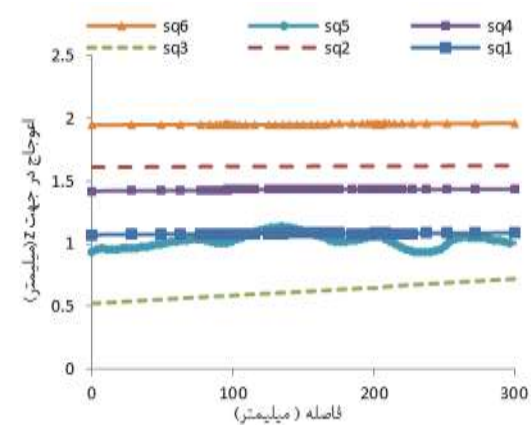
همانطور که پیداست، نتایج به دست آمده از شبیه سازی المان محدود در مورد تغییر مکان نقاط مورد اندازه گیری در جهات محوری و محیطی قطاع مخزن، به نتایج حاصل از اندازه گیری تجربی نزدیک است. به طوریکه حداکثر خطای



شکل ۱۹- نمونه جوشکاری شده نازل به قطعی از مخزن



شکل ۱۷- مقایسه اعوجاج در جهت Y

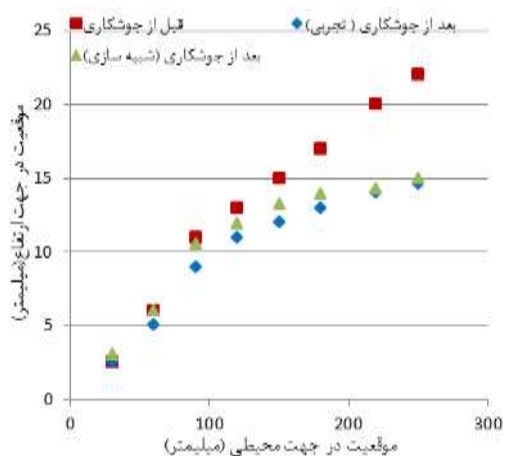


شکل ۱۸- مقایسه اعوجاج در جهت Z

در شکل ۱۸ بیشترین اعوجاج در ترتیب ۶ و کمترین آن در ترتیب ۳ اتفاق افتاده است؛ بنابراین در جهت های Z و Y افزایش تعداد مراحل جوشکاری باعث افزایش اعوجاج شده، ولی در جهت محوری پوسته باعث کاهش اعوجاج می شود.

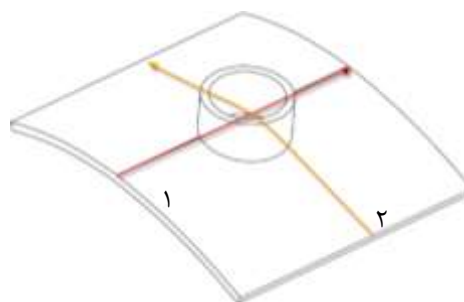
ترتیب جوشکاری بر اعوجاج به این نتیجه رسیدند که علی رغم باور عمومی مبنی بر اینکه افزایش تعداد مراحل جوشکاری موجب کاهش اعوجاج می شود، با این حال تحت شرایط خاصی، جوشکاری با ترتیبی که در آن مراحل جوشکاری بیشتر باشد (در اینجا ترتیب ۶ یا ۵)، اعوجاج بیشتری نسبت به جوشکاری با ترتیبی خواهد داشت که مراحل کمتری دارد (ترتیب ۱ یا ۳).

^۱ CMM



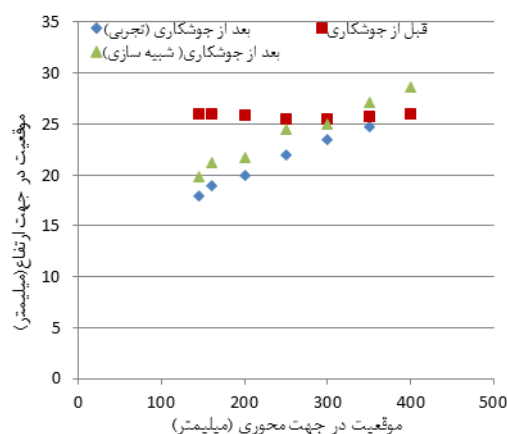
شکل ۲۲- مقایسه نتایج تجربی و المان محدود تغییر مکان نقاطی روی قطاع مخزن در جهت محیطی

ایجاد شده بین نتایج تجربی و المان محدود در جهت محوری، در حدود ۱۱٪ و در جهت محیطی، حدود ۱۶٪ است. همچنین مشخص است که بعد از جوشکاری، کشیدگی به سمت داخل وجود دارد که در نتایج شبیه سازی انجام شده در این پژوهش به آن اذعان شده است.



شکل ۲۰- مسیرهای انتخابی جهت اندازه گیری تغییر مکان (مسیر ۱: جهت محوری - مسیر ۲: جهت محیطی)

- توزیع دمایی در نقاط مختلف تعیین شده یکنواخت نمی‌باشد مهمترین عامل این رخداد، غیر یکنواختی هندسه جوشکاری و همچنین توزیع غیریکنواخت منبع حرارتی بیضوی در اثر غیریکنواختی اتصال در نقاط مختلف است.
- بیشترین دمای منبع حرارتی در موقعیت ۱۸۰ درجه نسبت به نقطه مرجع اتفاق می‌افتد.
- در نقاطی که جوشکاری بنابر ترتیب انتخابی، شروع شده است، دما پایین است و با پیشرفت منبع حرارتی دما افزایش پیدا می‌کند.
- در ترتیب‌هایی که نقاط شروع و پایان یکسان است، دمای حالت نهایی از حالت اولیه بیشتر است.
- هرچه تعداد مراحل جوشکاری بیشتر شود، بازتوسعه حرارتی و همچنین اختلاف بین پیک‌های حرارتی در موقعیت‌های مختلف نیز بیشتر خواهد شد؛ به طوری که در ترتیب ۲ یک اختلاف ۲۰ درجه سانتی‌گرادی و یک اختلاف ۱۶۰ درجه سانتی‌گرادی وجود دارد. این درحالی است که در ترتیب ۶، چهار اختلاف ۳۰۰ درجه سانتی‌گرادی، یک اختلاف ۴۰۰ درجه سانتی‌گرادی و یک اختلاف ۳۰ درجه سانتی‌گرادی وجود دارد.
- هرچه تعداد ترتیب‌های جوشکاری بیشتر شود، پیک تنش‌های پسماند کاهش پیدا می‌کند و توزیع یکنواخت‌تری در تنش‌ها ایجاد می‌شود. در



شکل ۲۱- مقایسه نتایج تجربی و المان محدود تغییر مکان نقاطی روی قطاع مخزن در جهت محوری

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر ترتیب جوشکاری بر تنش‌های پسماند و اعوجاج جوشکاری گشودگی پوسته آلومینیومی از طریق شبیه‌سازی المان محدود به کمک نرم افزار آباکوس و پرداخته شده است. به منظور اعتبارسنجی، از نتایج آزمایش تجربی استفاده شده است. به طور کلی نتایج زیر حاصل شده است:

هیدروتست بر تنش‌های پسماند در جوشکاری نازل به پوسته استوانه‌ای. شانزدهمین کنفرانس بین‌المللی انجمن هوافضا ایران، تهران.

- [3] Satish K, Velaga S, Arun Kumar A, Ravisankar S (2017) Weld characteristics of non-axisymmetrical butt welded branch pipe T-joints using finite element simulation and experimental validation. *Int J Pressure Vessels Piping* 150: 72-88.
- [4] Peng J (2011) Study on distortion control in nozzle welding of stainless steel pressure vessels. A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science in Mechanical Engineering Waterloo, Ontario, Canada.
- [5] Hemmesi K, Farajian M, Mirko B (2017) Numerical studies of welding residual stresses in tubular joints and experimental validations by means of X-ray and neutron diffraction analysis. *Eng Mater Des* 126: 339-350.
- [6] Vetrivelvan R, Devakumaran K, Athiya PS, Ravichandran G (2017) Transient out-of-plane distortion of multi-pass fillet welded tube to pipe T-joints. *Def Technol* 13: 77-85.
- [7] Fu MI, Lourenço M, Duan S, Estefen F (2016) Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures. *Mar Corros Offshore Struct Pap Symp* 46: 30-55.
- [8] Jiang W, Yahiaoui K (2012) Effect of welding sequence on residual stress distribution in a multipass welded piping branch junction. *Int J Pressure Vessels Piping* 95: 39-47.
- [9] Farahani MR, Sattari Far I (2009) Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt welded pipes. *Int. J. Pressure Vessels Piping*, 86, 723-731.
- [10] Qureshi M, Ullahdar EM, Khan N, Malik I (2008) Analysis of circumferentially arc welded thin walled cylinders to investigate the residual stress fields. *TWS* 1391-1401.
- [۱۱] مشایخی م، هدایتی هـ (۱۳۹۰) بررسی تأثیر ترتیب جوشکاری و فرآیند هیدروتست بر تنش‌های پسماند جوشی در لوله‌های فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴. نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک (۲) ۲۲.
- [12] Tso-Liang T, Peng-Hsiang C, Wen-Cheng T (2003) Effect of welding sequences on residual stresses. *Comput Struct* 81: 273-286.
- [13] Sattari-Far I, Javadi Y (2008) Influence of welding sequence on welding distortions in pipes. *Int J Pressure Vessels Piping* 85: 265-274.
- [14] Park J, Gyubaek A, Wanchuck W (2017) The effect of initial stress induced during the steel

ترتیب ۱ اختلاف بیشترین و کمترین تنش ۳۰۰ مگاپاسکال، در ترتیب شماره ۶، ۲۱۵ مگاپاسکال است.

- هرچه تعداد مراحل جوشکاری بیشتر شود، پیک تنش‌های کششی نیز کاهش پیدا می‌کند که می‌تواند به سبب اعمال مجدد حرارت و آزادسازی تنش‌های پسماند حاصل از مراحل قبلی باشد.
- در هر دو حالت کمترین تنش‌های پسماند مربوط به ترتیب شماره ۲ در یک مسیر به اندازه ۶۰ مگاپاسکال و در مسیری دیگر ۴۰ مگاپاسکال است. ضمن اینکه توزیع تنش در این ترتیب یکنواخت‌تر می‌باشد.
- افزایش تعداد مراحل جوشکاری باعث افزایش اعوجاج شده، ولی در جهت محوری پوسته باعث کاهش اعوجاج می‌شود. به طوریکه در حالتی با یک مرحله جوشکاری حداکثر اعوجاج در جهت محوری ۰/۷۵ میلیمتر و با ۵ مرحله جوشکاری حدود ۰/۴ میلیمتر است. در ضمن اختلاف میزان اعوجاج در حالتی با ۴ مرحله جوشکاری و ۸ مرحله جوشکاری ناچیز است.
- هرچه میزان اعوجاج در ناحیه جوش (کشیدگی به بیرون) بیشتر باشد، به همان نسبت میزان کشیدگی به داخل گشودگی بیشتر خواهد بود.
- علی‌رغم باور عمومی مبنی بر اینکه افزایش تعداد مراحل جوشکاری موجب کاهش اعوجاج می‌شود، با این حال تحت شرایط خاصی، جوشکاری با ترتیبی که در آن مراحل جوشکاری بیشتر باشد، می‌تواند اعوجاج بیشتری نسبت به جوشکاری با ترتیبی که مراحل کمتری دارد داشته باشد. برای مثال در جهت خاصی از پوسته، با ۸ مرحله جوشکاری میزان اعوجاج ۱/۳ میلیمتر و در یک مرحله جوشکاری حدود ۰/۷ میلیمتر است.

۷- مراجع

- [1] Mathers G (2002) *The Welding of aluminium and its alloys*. Woodhead Publishing Ltd.
- [۲] معصومی دهقی ا، قائد علی ح، صمدی ب، قادری (۱۳۹۵) بررسی عددی اعوجاج و تأثیر هندسه اتصال و فرآیند

[18] Kaufman JG (2008) Properties of aluminum alloys fatigue data and the effects of temperature, product form, and processing. ASME International.

[۱۹] کریم نیا و (۱۳۹۱) بررسی بزرگی و توزیع تنش‌های پسماند در جوش محیطی یک مخزن تحت فشار آلومینیوم استحکام بالا و استخراج روابط بر اساس پارامترهای هندسی. دانشکده مهندسی مکانیک، پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

manufacturing process on the welding residual stress in multi-pass butt welding. JNAOE 1-12.

[15] Akhlaghi JA, Golda MK (2005) Computational welding mechanics. Springer.

[16] Lindgren L (2001) modelling of residual stresses and deformation due to weldig. 5th International Seminar on Numerical Analysis of Weldability.

[۱۷] صمدیان ک (۱۳۹۰) بررسی تنش‌های پسماند جوشی در مخازن تحت فشار آلومینیوم استحکام بالا و استخراج روابط بر اساس پارامترهای هندسی. دانشکده مهندسی مکانیک، پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.