



ارزیابی تغییرات تنش پسماند طولی در راستای ضخامت در اتصال جوشی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶

محمد افتخاری^۱، مهدی احمدی نجف آبادی^۲ و محمدرضا فراهانی^{۳*}

^۱ دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران

^۲ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

^۳ دانشیار، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۰۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۱۱

چکیده

تنش‌های پسماند جوشی، به‌ویژه نوع طولی آن، نقشی اساسی در خستگی و شکست سازه‌ها دارند. عمده روش‌های اندازه‌گیری تنش-پسماند، دارای یک محدودیت بزرگ هستند که قابلیت اندازه‌گیری تنش‌پسماند در عمق قطعه را ندارند. در این پژوهش، از تلفیق روش شبیه‌سازی المان محدود و روش تجربی پراش پرتو ایکس به‌منظور ارزیابی تنش پسماند در عمق قطعه استفاده شد. تنش‌های پسماند جوش کاری تیگ دو ورق به ضخامت ۸ میلی‌متر و از جنس آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۸۶، به‌صورت تحلیل با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، به‌صورت تجربی توسط روش پراش پرتو ایکس در سطح قطعه صحنه‌سنجی شدند. مشاهده گردید که در خط مرکزی جوش، با افزایش عمق، تنش‌های پسماند طولی تا ۳۷ مگاپاسکال، کاهش و در ناحیه متأثر از حرارت و در فاصله ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متری از خط مرکزی جوش، نیز تا ۷۰ مگا پاسکال کاهش می‌یابد. در نقاط دورتر، همزمان با کاهش تنش‌های پسماند طولی، تنش‌های فشاری در عمق قطعه-کار ایجاد می‌شود. ادعا می‌شود که با توجه به چشم‌گیر بودن تغییرات تنش‌های پسماند در عمق قطعه، برای انجام تحلیل‌های دقیق‌تر، محاسبه تنش‌های پسماند در عمق قطعه ضروری است.

کلمات کلیدی: تنش پسماند جوش کاری؛ مدل‌سازی اجزای محدود؛ روش پراش پرتو ایکس؛ آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۸۶.

Evaluation of Longitudinal Residual Stress Variations Along the Thickness of Welded Joint of 5086 Aluminum Alloy

M. Eftekhari¹, M. Ahmadi Najafabadi², M. Farahani^{3,*}

¹ Ph.D. Student, School of Mechanical Engineering, Colleg of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

² Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran.

³ Assoc. Prof., School of Mechanical Engineering, Colleg of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

Welding residual stresses, especially longitudinal ones, have a significant role in the fatigue and fracture of the structures. The common residual stress measurement methods have an important restriction that they are incapable in measuring the residual stresses versus depth. In this study, the combination of FEM simulation and X-ray diffraction experimental method has been used for residual stress measurement along specimen depth. Residual stresses were induced by the TIG welding of two 5086 aluminum plates with a thickness of 8 mm. The welding process was simulated in Abaqus and then the simulation results were validated with X-ray diffraction ones. It was observed that in weld centerline, by increasing depth, maximum longitudinal residual stresses decreased by 37 MPa while this reduction in heat affected zone and in the distance of 10 to 25 mm from the weld centerline was 70 MPa. At farther points from the weld centerline, the longitudinal residual stresses decreased and the compressive residual stresses were formed in the specimen depths. With respect to significant variation of residual stress along the depths of the specimen, residual stress measurement along specimen depths seems to be necessary for performing accurate analysis.

Keywords: Welding Residual Stress; Finite Element Analysis; X-Ray Diffraction Method; 5086 Aluminum Alloy.

۱- مقدمه

امروزه شبیه‌سازی فرآیندهای تولید و اتصال، تبدیل به ابزاری اقتصادی و سودمند برای پیش‌بینی رفتار قطعاتی شده است که تحت بارهای حرارتی، استاتیکی و دینامیکی قرار دارند و امکان برآورد میزان تنش پسماند پس از انجام فرآیند را نیز مهیا نموده است. از اوایل دهه ۱۹۷۰، از ابزار شبیه‌سازی المان محدود، در امر جوش‌کاری استفاده شد. تعدادی از معروف‌ترین کارهایی که در این زمینه، تا اوایل سال ۱۹۹۰ انجام شدند، حاصل کار افرادی چون یدا و یاماگاکا [۱] و گلداک و همکاران [۲] است. برخی از محققان از مدل دوبعدی متقارن، برای شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند؛ برای مثال چنین ساده‌سازی‌هایی در کار یاجیانگ و همکاران [۳] قابل مشاهده است؛ آن‌ها تنش‌های پسماند در جوشکاری فولادهای با استحکام بالا را با استفاده از روش المان محدود بدست آوردند. این محققان در این کار از یک مدل دوبعدی متقارن کرنش صفحه‌ای^۱ برای شبیه‌سازی جوش‌کاری دو ورق به‌صورت لب‌به‌لب استفاده کردند. هدف از این ساده‌سازی‌ها، کاهش وقت و هزینه استفاده از مدل‌های سه‌بعدی بود. با وجود اینکه مدل‌های دوبعدی در پیش‌بینی تنش‌های پسماند، نتایج قابل قبولی ارائه دادند؛ ولی این مدل‌ها در تعیین تغییرشکل‌های سه‌بعدی قطعه مناسب نبودند. خواص ماده جوش‌کاری شده در کار محققانی چون سونگ و همکاران [۴]، به‌صورت الاستو-ویسکوپلاستیک^۲ مدل شده است و در کار افرادی دیگر مانند برنزا و همکاران [۵]، سخت‌شوندگی همگن^۳ نیز در نظر گرفته شده است. در کار دیگری از ناندان و همکاران [۶]، خواص مواد به‌صورت الاستو ویسکوپلاستیک^۴ شبیه‌سازی شده است. آلبرگ و برگلاند [۷]، پیرامون بحث خواص مواد، مدل‌های پلاستیک و ویسکو-پلاستیک را در شبیه‌سازی جوش با هم مقایسه کرد و استفاده از مدل‌های ساده پلاستیک را در مراحل مقدماتی، توصیه نمود، ولی مسلم است که در دماهای بالا مثل جوش‌کاری، ویسکوزیته تأثیر مهمی روی رفتار فلز دارد؛ بنابراین دلیل استفاده از مدل‌های ساده‌تر مثل الاستو-

پلاستیک^۵، صرفه‌جویی در هزینه و وقت شبیه‌سازی است. فریک و همکاران [۸]، تنش‌های پسماند در دو لوله از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی که به‌صورت لب‌به‌لب جوش‌کاری شده بودند، را با استفاده از روش المان محدود شبیه‌سازی کردند. آن‌ها برای شبیه‌سازی تنش از فرض رفتار الاستو-پلاستیک استفاده کردند و به نتایج خوبی رسیدند.

در برخی از مقالات، به‌خصوص در مقالات پیشین، تغییرات فازی در حین جوش‌کاری نادیده گرفته شده است و این خود بسته به نوع فاز به وجود آمده، مقدار خطای معینی ایجاد می‌کند؛ برای مثال مابلی و همکاران [۹]، تنش‌پسماند جوشی را در فولادهای با استحکام بالا اندازه گرفتند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات فازی (استحاله مارتنزیتی) در فولادهای آلیاژی و با استحکام، موجب کاهش مقدار تنش‌های پسماند می‌شود.

در طول سال‌های متمادی، محققان از مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی منبع حرارتی متحرک جوش‌کاری استفاده نموده‌اند؛ مانند مدل رزنتال^۶ که در آن پروفیل دمایی و سیستم مختصات همراه با منبع حرارتی حرکت می‌کند و یا مانند مدل پاوالک^۷ که در آن منبع حرارتی به‌صورت دیسک دایره‌ای با توزیع گوسی شار حرارتی، روی قطعه مدل می‌شود [۱۰]؛ ولی دو مدل معتبری که امروزه بیشترین کاربرد را در پژوهش‌ها دارد، عبارت است از مدل گلداک^۸ که در آن منبع حرارتی به‌صورت دو بیضی‌گون متحرک مدل می‌شود و در کار محققانی مانند فچینوتی و همکاران [۱۱] استفاده گردیده است و مدل دیگر، شامل اعمال یک شار حرارتی حجمی به‌صورت یکنواخت بین المان‌های جوش است که در پژوهش حاضر و مقالاتی مانند شوچن و همکاران [۱۲]، مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه در هر دو مدل گلداک و شار توزیع‌شده یکنواخت، میدان دمایی وابسته به زمان متفاوتی وجود دارد؛ ولی این اختلاف به‌طور قابل‌توجهی در ریشه^۹ جوش وجود دارد و با فاصله گرفتن از ناحیه جوش به‌سرعت از بین می‌رود. مقدار تنش پسماند بدست آمده از روش شار

⁵ Elastoplastic

⁶ Rosenthal

⁷ Pavalec

⁸ Goldak

⁹ Root

¹ Plane strain

² Viscose

³ Isotropic Hardening

⁴ Elasto Viscoplastic

تنش‌های پسماند عرضی است [۱۶]. تنش‌های پسماند طولی (که موازی خط جوش هستند) می‌توانند منجر به ایجاد ترک‌های عرضی در قطعه شوند. تنش‌های پسماند طولی، در مرکز جوش از نوع کششی شدید هستند؛ ولی در نواحی دورتر از مرکز جوش، از مقدار آن‌ها کاسته می‌شود [۱۷].

از آن‌جا که آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰ (با نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی عالی در آب دریا و قابلیت جوش‌کاری خوب) در صنایع مختلفی نظیر صنایع دریایی، هوافضا و ساخت مخازن تحت فشار استفاده می‌شود لذا در این صنایع، اتصال این آلیاژها با روش جوشکاری، از اهمیت بسزایی برخوردار است. به همین دلیل، این آلیاژ برای مطالعات این پژوهش انتخاب گردید [۱۸ و ۱۹].

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

بنا به مراجع مربوط به شبیه‌سازی فرآیند جوش‌کاری مانند [۲۰ و ۲۱]، به‌منظور ارائه مدلی معتبر برای شبیه‌سازی تنش پسماند لازم بود، ابتدا دو ورق با فرآیند جوش‌کاری به هم متصل شوند و سپس در یک مقطع معین از سطح قطعه، نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی راستی‌آزمایی شوند. در این پژوهش، دو ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۸۶، با درصد عناصر سازنده مندرج در جدول ۱ (حاصل از کوانتومتری) و خواص مکانیکی مندرج در جدول ۲ (حاصل از تست کشش)، به ابعاد ۱۵۰×۵۰ میلی‌متر و به ضخامت ۸ میلی‌متر تهیه شد. سائز کردن ورق‌ها و ایجاد پخ جوشکاری V- شکل با زاویه ۶۰ درجه، توسط ماشین‌کاری با دستگاه فرز انجام شد. شکل و اندازه شیار طبق استاندارد AWS

جدول ۱- درصد عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ آلومینیوم سری

۵۰۰۰ مورداستفاده

	Cu	Cr	Zn	Fe	Si	Mn	Mg	Al
فلز اصلی	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۶۰	۴/۲۵	

جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰

تنش تسلیم	تنش نهایی	ضریب پواسون	مدول
(MPa)	(MPa)		(GPa)
۲۲۶	۳۳۷	۰/۳۳	۷۱

توزیع‌شده یکنواخت، به مقدار جزئی با تنش پسماند بدست آمده از روش گلداک تفاوت دارد [۱۳]؛ همچنین در پژوهش‌های اخیر مربوط به شبیه‌سازی فرآیند جوش‌کاری مانند فانوس و همکاران [۱۴]، به‌منظور شبیه‌سازی اضافه شدن فلز پرکننده در حین جوش‌کاری، از روش تولد و مرگ المان‌ها^۱ استفاده شده که بیشتر نزدیک به واقعیت است [۱۵].

بسیاری از روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند، دارای این محدودیت بزرگ هستند که قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند را در عمق قطعه ندارند و تنها برای سطح و نواحی بسیار نزدیک به سطح مناسب هستند. در پژوهش حاضر، از تلفیق روش شبیه‌سازی المان محدود و روش تجربی پراش پرتو ایکس به‌منظور اندازه‌گیری تنش پسماند طولی در عمق قطعه استفاده شده است. در جریان این پژوهش، ابتدا تنش‌های پسماند حاصل از جوش‌کاری ذوبی به‌روش تیگ دو ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰ در نرم افزار آباکوس به صورت غیرکوپل (به صورت دو تحلیل مجزای حرارتی و مکانیکی) شبیه‌سازی گردید، سپس نتایج حاصل از هر دو روش شبیه‌سازی و پراش پرتو ایکس در مسیری معین واقع بر سطح قطعه با هم مقایسه شدند. درنهایت پس از تایید اعتبار نتایج شبیه‌سازی در سطح قطعه، نمودار توزیع تنش پسماند طولی جوش‌کاری در چند عمق مختلف، با استفاده از شبیه‌سازی به‌دست آمد. در پژوهش حاضر، از روش شار توزیع‌شده یکنواخت (به منظور شبیه‌سازی منبع متحرک جوش‌کاری)، روش تولد و مرگ المان‌ها (به منظور شبیه‌سازی اضافه شدن فلز پرکننده در حین جوش‌کاری) و انتخاب المان‌های مشخص برای تحلیل حرارتی و مکانیکی استفاده گردید که انتخاب ترکیب این پارامترهای شبیه‌سازی توانست شرایط جوش‌کاری این پژوهش را نزدیک‌تر به واقعیت و نتایج تجربی بدست آمده در سطح قطعه بیان کند. همچنین در این پژوهش به منظور تایید بیشتر مدل تهیه شده، از آنالیز حساسیت به اندازه‌ی مش و اعتبار سنجی نتایج تحلیل حرارتی با نتایج تجربی نیز استفاده شد. در این پژوهش به تنش‌های پسماند طولی جوش‌کاری توجه شده است زیرا در جوش‌ها، بیش‌ترین تنش‌های پسماند، در جهت طولی ایجاد می‌شود که بزرگی آن معمولاً حدود ۲ تا ۳ برابر

^۱ Element Death and Birth

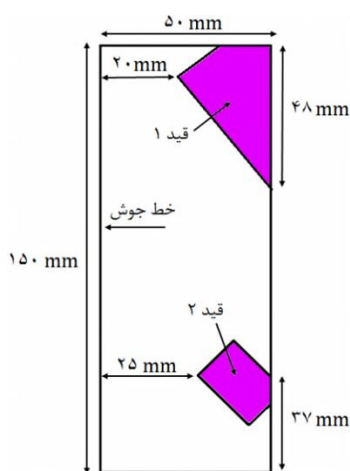
جدول ۳- پارامترهای جوشکاری

شماره پاس جوشکاری	شدت جریان (A)	ولتاژ (V)	قطبیت	سرعت جوشکاری (mm/s)
۱	۱۴۰	۱۵	AC	۰/۱۶۶
۲	۱۵۰	۱۵	AC	۰/۱۷۷

ابعاد و پخ قطعه اصلی صورت گرفت و هر بار قطعه بریده شد و عمق نفوذ جوش با اچ بررسی شد تا پارامترهای بهینه بدست آمد. هنگام جوش کاری از فیکسچری مطابق شکل ۲ به منظور مهار قطعه و ایجاد تنش پسماند بیشتر استفاده گردید. نقشه مکان اعمال فیکسچرها در شکل ۳ مشهود است. بعد از جوش کاری مشاهده شد که گردهای کوچک به ارتفاع ۰/۱۶ میلی متر پدید آمد که با استفاده از سنباده زنی نرم (که تولید تنش پسماند مازاد نمی کرد)، این گرده با سطح



شکل ۲- شرایط و قیدوبندهای جوش کاری

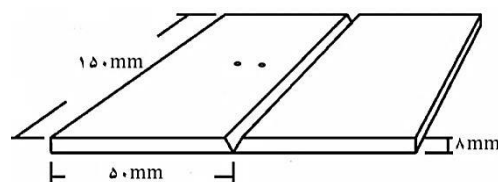


شکل ۳- نقشه‌ی مکان اعمال قیدها

D1.2/D1.2M [۲۲] انتخاب شد. در نهایت، قطعات پس از آماده‌سازی و قبل از انجام جوش کاری، در کوره تنش‌گیری شدند؛ به طوری که دیگر الگوی پراش ایکس آن‌ها، تحت زوایای شیب مختلف، تغییرات چندانی را نشان نمی‌داد. باید به این نکته هم توجه نمود که هنگام جوش کاری ذوبی بسیاری از مواد، نیز تنش‌های پسماند در محل خط جوش و مقداری دورتر از آن تحت دماهای بسیار بالای جوشکاری ذوبی آزاد می‌شوند.

همچنین بنا به [۲۳ و ۲۴]، در دو نقطه از سطح یکی از قطعات، به فواصل ۱۵ و ۲۰ میلی‌متری از خط جوش و روی محور تقارن عرضی ورق (شکل ۱)، به منظور مشاهده دما در حین جوش کاری، دو ترموکوپل (که از طرف دیگر به ترمومتر متصل شده بودند) نصب گردید. همان‌طور که در بخش نتایج تحلیل حرارتی آورده شده است، پس از مدل کردن و مش-زنی قطعه، دما و زمان سرد شدن قطعه در نقاط یا گره‌های موجود در محل نصب ترموکوپل با داده‌های ترمومتر و کرنومتر مقایسه گردیده است تا اعتبار مدل حرارتی مشخص شود. برای مشاهده تغییرات دما، از ترمومتر دیجیتالی لوترون^۱ با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس استفاده شد.

از روش جوش کاری تیگ یا جوش کاری با الکتروود تنگستنی و گاز محافظ آرگون که یکی از روش‌های مرسوم جوش کاری آلیاژهای آلومینیوم است، برای اتصال ورق‌ها به صورت لب‌به‌لب استفاده شد. بر اساس همان استاندارد AWS D1.2/D1.2M، فیلر ER5183 به منظور جوش کاری انتخاب شد و در نهایت جوش کاری با دستگاه پارس تیگ، جریان متناوب و در دو پاس، با پارامترهای موجود در جدول ۳ انجام شد. پارامترهای جدول ۳ با انجام جوش کاری با پارامترهای مختلف روی چند قطعه دیگر با همان جنس،



شکل ۱- تصویری از ابعاد ورق‌های آماده شده و محل نصب ترموکوپل‌ها

^۱ Lutron TM-946

قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مطابق بررسی انجام شده در آن مرجع، این فرض اثرگذاری ملموسی بر دقت نتایج شبیه‌سازی ندارد.

۲-۲-۲- شبیه‌سازی فلز پرکننده یا فیلر

در شبیه‌سازی فرآیند جوش کاری، به منظور شبیه‌سازی اضافه شدن فلز پرکننده، تکنیک‌های متفاوتی وجود دارد که یکی از این تکنیک‌ها، روش تولد و مرگ المان‌ها^۱ است (شکل ۵) که از متداول‌ترین تکنیک‌ها در این زمینه به شمار می‌رود. در این روش، ابتدا کلیه المان‌های فلز پایه و فلز جوش مدل می‌شوند، سپس المان‌های خط‌جوش که هنوز ایجاد نشده‌اند یا الکتروود جوش کاری به آن‌ها نرسیده است، حذف می‌شوند و یا به اصطلاح در حالت مرگ قرار می‌گیرند. المان‌های مرده پس از رسیدن منبع حرارتی، زنده و فعال می‌شوند و حرارت منبع به آن‌ها اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که در تحلیل مکانیکی نیز، المان‌ها همزمان با عبور منبع حرارتی ایجاد و به اصطلاح زنده می‌شوند [۱۵]. در این پژوهش نیز، از این تکنیک استفاده شده است.

۲-۲-۳- تئوری تحلیل حرارتی و مدل‌سازی انتقال

حرارت جوشکاری

گام مهم در تحلیل حرارتی فرآیند جوش کاری، شبیه‌سازی منبع حرارتی جوش کاری است. امروزه در شبیه‌سازی سه‌بعدی فرآیندهای ذوبی جوش کاری، به خصوص در مواقعی که ضخامت قطعه نسبت به سایر ابعاد آن خیلی کوچک نباشد، از اعمال شار حجمی به قطعه استفاده می‌شود. در این پژوهش نیز، شار حرارتی به صورت حجمی به قطعه جوش کاری اعمال شده است؛ این عمل بدین صورت انجام گرفت که یک شار توزیع شده حرارتی به صورت یکنواخت یا $DFLUX$ که طبق رابطه (۷) بدست آمد به المان‌های جوش یا ناحیه ذوب، در هرگام حرکت منبع حرارتی اعمال شد که متناسب با طول المان در راستای جوشکاری بود [۱۲].

$$DFLUX = \frac{\eta UI}{V} \quad (1)$$

^۱ Element Death and Birth

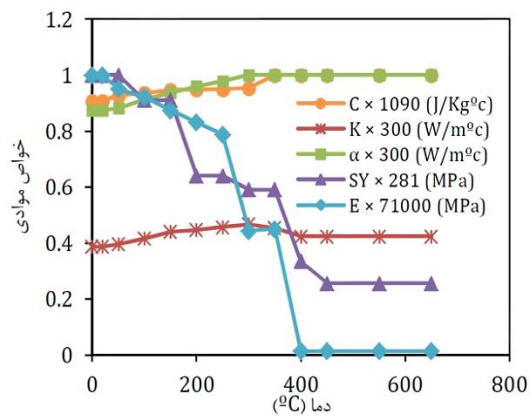
ورق هم‌ارتفاع شد؛ زیرا در اندازه‌گیری تنش با روش تجربی پراش پرتو ایکس، لازم بود که سطح قطعه هموار باشد تا از تفرق‌های ناخواسته پرتو ایکس جلوگیری شود.

۲-۲-۲- شبیه‌سازی تنش پسماند جوش کاری

۱-۲-۲- مدل‌سازی خواص مواد

شبیه‌سازی خواص مواد، همواره یکی از بخش‌های مهم و اولین مرحله در شبیه‌سازی جوش کاری محسوب می‌شود؛ زیرا در فرآیند جوش کاری ذوبی، با توجه به اینکه گستره دمایی بسیار وسیع است (در جوش کاری آلیاژ ۵۰۸۳ از دمای بالای ۶۰۰ درجه در حوضچه مذاب گرفته تا دمای نقاط بسیار دور از حوضچه مذاب که نزدیک به دمای اتاق هستند). لذا خواص مواد باید در دماهای مختلف برای نرم‌افزار معلوم باشد. خواصی که عبارتند از: خواص حرارتی مانند: گرمای ویژه (C)، ضریب هدایت حرارتی ماده (K)، چگالی (ρ)، دمای ذوب و دمای انجماد ماده است؛ همچنین برخی از خواص مکانیکی مواد مانند: مدول یانگ (E)، ضریب پواسون (ν)، تنش تسلیم (σ_y) و ضریب انبساط حرارتی (α) نیز برای شبیه‌سازی تنش پسماند جوشی لازم می‌باشند. همه خواص مذکور، وابسته به دما می‌باشند. خواص وابسته به دمای به کار رفته در شبیه‌سازی جوش جنس مورد بررسی در شکل ۴ مشهود است. دمای ذوب آلیاژ در محدوده ۵۷۰-۶۲۰ درجه سلیسیوس است [۲۵].

در نظر گرفتن حداقل استحکام برای فلز جوش در دماهای بالا (بالتر از ۴۰۰ درجه) برای همگرایی تحلیل المان محدود، امری ضروری است که در مرجع فوق، مورد استفاده



شکل ۴- خواص وابسته به دما [۲۵]

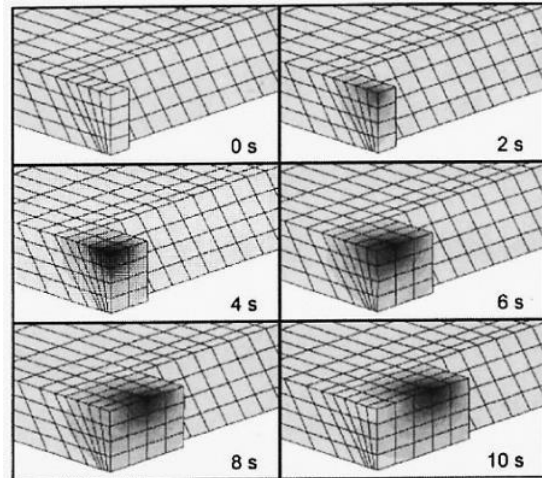
۲-۲-۴- مدل کردن قطعه و مش زنی آن

نخست مدلی با همان ابعاد قطعه اصلی در نرم افزار آباکوس ایجاد شد. از المان‌های نوع DC3D8 برای تحلیل حرارتی [۲۷] و از المان‌های نوع C3D8 برای تحلیل مکانیکی [۲۸] استفاده شد. سپس مدل، مش زنی گردید؛ ولی یکی از عواملی که همواره باید در شبیه‌سازی‌ها بررسی شود، بررسی اثر اندازه المان‌های مدل بر نتیجه مورد انتظار از شبیه‌سازی است که به آنالیز حساسیت اندازه مش معروف است؛ لذا مدل در چند مرحله، با اندازه المان مختلف مش‌زنی می‌شود و در هر مرحله، اندازه المان‌ها در موضع حساس مورد بررسی مانند منطقه جوش، کوچک‌تر از مرحله قبل ایجاد می‌شود و به اصطلاح المان‌ها را آن قدر کوچک می‌کنند تا نتیجه مورد انتظار از شبیه‌سازی تغییر چندانی نکند.

در این پروژه پنج نوع مش‌زنی در اندازه بزرگ تا اندازه کوچک روی مدل هندسی انجام شد. پارامتر مورد بررسی برای حساسیت مش، بیشینه دما در محل نصب نزدیک‌ترین ترموکوپل به خط جوش (در فاصله ۱۵ میلی متری از خط جوش (مشهود در شکل ۱) انتخاب شد [۱۸]. نتیجه بررسی در شکل ۶ مشهود است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بعد از تعداد ۱۰۵۰۰ المان روی هر ورق، تغییرات دمایی کم است و تغییرات، فقط در حد ۳ درجه سانتی‌گراد است که تأثیر خیلی کمی روی تنش پسماند می‌گذارد؛ لذا مدلی با تعداد ۱۰۵۶۰ المان و ۱۲۷۴۹ گره یا نقطه موجود روی هر ورق، برای شبیه‌سازی این پژوهش انتخاب شد که تصویر این مش روی هر ورق در شکل ۷ قابل مشاهده است. همان‌طور که در این شکل معلوم است، مش در ناحیه جوش و مناطق نزدیک به آن، ریزتر از مناطق دورتر زده شده است؛ زیرا در این مناطق، شیب حرارتی شدیدی وجود دارد. اندازه کوچک‌ترین المان برابر $2/5 \times 1 \times 1$ میلی‌متر مکعب که به ترتیب از چپ به راست برابر اندازه ضلع المان در راستای ضخامت قطعه، عرض قطعه و طول جوش است.

۲-۲-۵- تحلیل مکانیکی

همواره در شبیه‌سازی فرآیند جوش‌کاری، نیاز به دو تحلیل حرارتی و مکانیکی است. در تحلیل به روش کویل یا مستقیم، هر دو تحلیل حرارتی و مکانیکی همزمان با هم و در یک مرحله انجام می‌شود. در این تحلیل، نیاز به المان‌هایی با



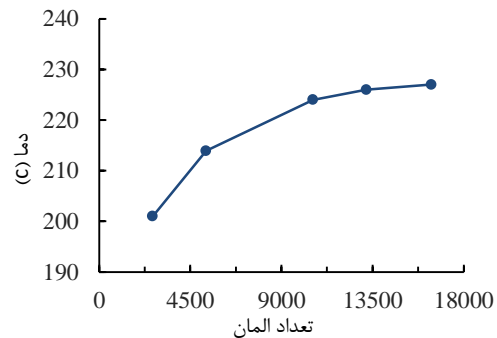
شکل ۵- تولد المان‌ها با حرکت منبع حرارتی جوش [۱۴]

در رابطه (۱)، U اختلاف پتانسیل قوس، I شدت جریان و η بازده قوس الکتریکی است که مقدار آن برای فرایند جوش‌کاری تیگ، ۰/۶ در نظر گرفته شد [۲۶]. و V حجم منبع حرارتی یا حجم المان‌های فعال جوش است. برای اندازه‌گیری V لازم بود، مرز ناحیه ذوب شده مشخص شود. بدین منظور از قطعه جوشکاری شده، یک نمونه متالوگرافی به طول ۲ سانتی‌متر شامل، هر سه ناحیه فلز جوش، HAZ و فلز پایه، به طوری که جوش در وسط آن قرار داشت، استخراج شد. بعد از استخراج نمونه، سطح مقطع بریده شده نمونه، ابتدا با سوهان و سپس با سمباده‌های مناسب، مسطح گردیده و در نهایت پولیش شد. پس از پولیش کردن سطح مقطع نمونه، این سطح به مدت ۳۰ ثانیه در محلول کلر^۱ اچ شد. پس از انجام اچ و متالوگرافی، با استفاده از اندازه‌گیری با کولیس مشاهده شد که عرض ناحیه فلز جوش روی هر ورق در حدود ۵/۵ میلی‌متر و عرض ناحیه HAZ روی هر ورق در حدود ۲/۱ میلی‌متر است. به این ترتیب حجم ناحیه ذوب شده و نیز مقدار V بدست آمد. در نهایت مقدار $DFLUX$ با توجه به رابطه (۱)، برای هر پاس جوش‌کاری با توجه به پارامترهای جوش‌کاری جدول ۳ محاسبه شد و به المان‌های جوشی در هر پاس جوش‌کاری اعمال گردید و در نهایت دما در نقاط مدل بدست آمد.

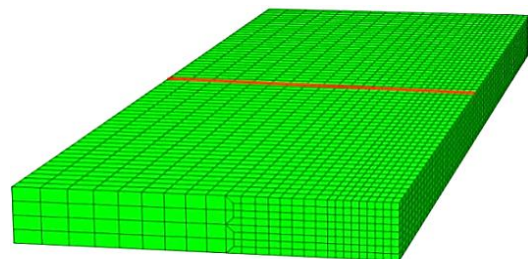
^۱ Keller

سپس برای انجام تحلیل مکانیکی، سابروتین دیگری نوشته شد که تحلیل مکانیکی را با فراخوانی تاریخچه دمایی ذخیره شده در فایل ODB مرحله قبل انجام می‌داد.

برای انجام تحلیل مکانیکی، لازم است که شرایط قیدوبند در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شود. بدین منظور همه نقاطی از مدل قطعه که در زیر محل قیدوبندها (نقشه قیدوبندها در شکل ۳) قرار داشت به دلیل صلابت بالای قیدها، در هر سه جهت طول، عرض و ضخامت قطعه مقید شدند. برای نقاط یا گره‌های موجود در صفحه تقارن اتصال دو قطعه جوش‌کاری شده (که به‌صورت صفحه‌ی موازی با راستای خط جوش قرار داشت)، ممانعت از حرکت در جهت عمود بر صفحه مذکور به‌عمل آمد. پس از شبیه‌سازی قیدها، نتایج تحلیل حرارتی وارد تحلیل مکانیکی شد و پس از حل المان محدود روابط تنش-کرنش مربوطه، تنش پسماند در نقاط مدل بدست آمد.



شکل ۶- نتایج آنالیز حساسیت اندازه‌ی مش



شکل ۷- نحوه‌ی مش‌زنی مدل قطعه‌ی مورد بررسی

۲-۳- اندازه‌گیری تنش پسماند طولی جوش‌کاری با

روش پراش پرتو ایکس

۲-۳-۱- تئوری اندازه‌گیری تنش پسماند با روش پراش

پرتو ایکس

رابطه اساسی در روش پراش پرتو ایکس، قانون براگ است که مطابق رابطه (۲) است.

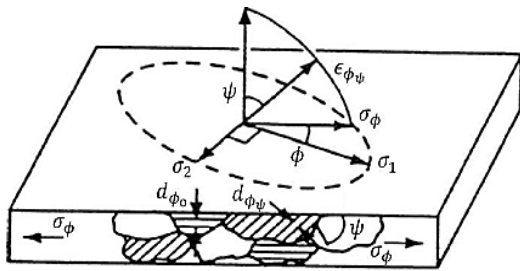
$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2)$$

در رابطه (۲)، n مرتبه انعکاس، λ طول موج پرتو ایکس، d فاصله بین صفحات کریستالی و θ زاویه انعکاس است.

در این روش، ابتدا سطح قطعه تحت تابش پرتو ایکس تک طول (طول موج ثابت) موج قرار می‌گیرد؛ سپس پرتوهای منعکس شده در جایی دریافت می‌شوند که با هم تداخل سازنده کرده، رابطه براگ را ارضا کنند و در نتیجه دارای بیش‌ترین شدت باشند و در آن محل یک پیک پراش مشاهده خواهد شد.

طبق رابطه براگ، در صورت بروز هر تغییری در فاصله صفحات کریستالی (d) تحت عواملی مانند تنش، زاویه انعکاس (θ) جابه‌جا خواهد شد. تیوب‌های تولید پرتو ایکس در واقع طیفی پیوسته‌ای از طول موج‌ها تولید می‌کنند که سه پرتو پراش‌زنی تک‌فام آن، $k\beta$ ، $k\alpha_1$ و $k\alpha_2$ نام دارند. البته با انجام فیلتراسیون تلاش می‌شود تا پرتو تک طول موج به

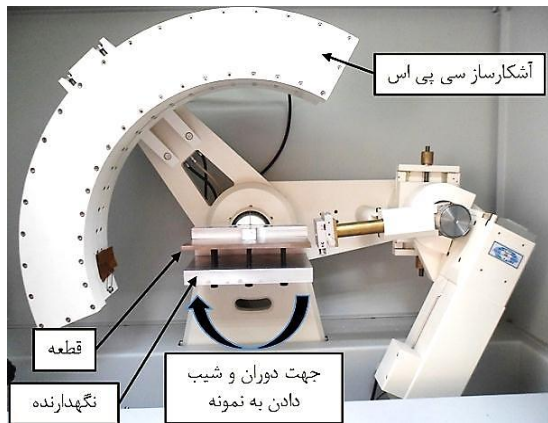
درجه آزادی بالاتر نسبت به المان‌های مورد نیاز در حل غیرمستقیم است. ماتریس‌های المان‌ها و بردارهای نیرو در این تحلیل، شامل تمام ترم‌های مورد نیاز می‌باشند. تحلیل به روش غیرکوپل یا غیرمستقیم در دو تحلیل مجزا انجام می‌شود، به این صورت که در تحلیل اول، تحلیل حرارتی انجام می‌شود و توزیع حرارت در نقاط مدل و در زمان‌های مختلف به‌دست می‌آید، سپس در تحلیل دوم که تحلیل مکانیکی است، دمایی نقاط یا گره‌ها که در تحلیل اول بدست آمد، به‌عنوان بارگذاری و ورودی تحلیل دوم به کار می‌رود؛ نتیجه تحلیل دوم می‌تواند تنش‌های پسماند جوش‌کاری و یا اعوجاج ناشی از جوش‌کاری باشد. از آن‌جاکه تحلیل غیرمستقیم در دو مرحله مستقل از هم انجام می‌شود، لذا انعطاف‌پذیری این روش بیشتر از روش حل مستقیم است و زمان حل مسئله نیز در این روش، کوتاه‌تر است. در ضمن، تحلیل غیرمستقیم نیاز به ظرفیت‌های سخت‌افزاری کامپیوتری کمتری نسبت به تحلیل مستقیم دارد [۱۸]. برای انجام تحلیل غیر کوپل در آباکوس، ابتدا در یک سابروتین جدا شار حرارتی، با مدل‌سازی شرایط انتقال حرارت، از روی قطعه عبور داده شد و نتایج آن که تاریخچه دمایی در نقاط مدل بود، توسط آباکوس در یک فایل ODB ذخیره شد.



شکل ۹- محور و جهات مورد استفاده در بحث پراش پرتو ایکس [۳۱]

۲-۳-۲- اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند طولی با روش پراش پرتو ایکس

به منظور اندازه‌گیری تنش پسماند طولی با روش پراش پرتو ایکس با هدف اعتبارسنجی نتایج روش شبیه‌سازی، از دستگاه پراش پرتو ایکس اکویناکس^۱ مدل ۳۰۰۰ که ساخت شرکت اینل^۲ است، مطابق شکل ۱۰ استفاده شد. این دستگاه یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین نوع دستگاه‌های پراش پرتو ایکس محسوب می‌شود؛ زیرا در ساخت آن از آشکارسازهای نوع جدید مکان ثابت سی پی اس^۴ نوع ۱۲۰ (دارای انحنای ۱۲۰ درجه و به شعاع انحنای ۲۵۰ میلی‌متر) استفاده شده است که سرعت و دقت کار را افزایش داده است.



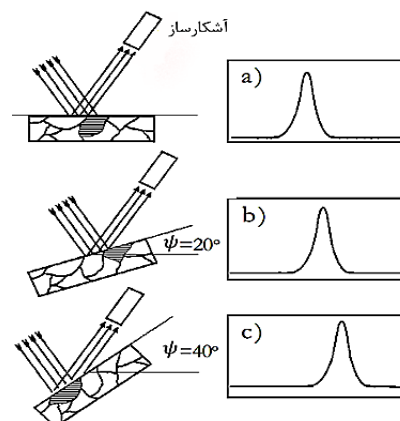
شکل ۱۰- دستگاه پراش پرتو ایکس مورد استفاده

¹ Equinox
² Inel
³ detector
⁴ CPS

سطح قطعه تابیده شود. در اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده از پیک‌های پراش دریافت شده با مقدار 2θ در حد ۱۲۰ درجه و بالاتر از آن توصیه شده است؛ زیرا در این زوایا، پیک‌های پراش دقت و شدت بالاتری دارند و نیز پرتو $k\beta$ از پرتوهای $k\alpha_1$ و $k\alpha_2$ فاصله می‌گیرد و دقت تشخیص مکان دقیق نوک پیک پراش بالاتر رفته، دیگر نیازی به استفاده از فیلتر برای حذف آن نمی‌باشد [۲۹]. وجود تنش پسماند در قطعه باعث می‌شود، چنانچه به قطعه در برابر پرتو ایکس، چندین بار تحت زاویه ψ شیب داده شود، در هر زاویه‌شیب، پیک مورد بررسی برای تعیین مقدار تنش پسماند، مطابق شکل ۸ مقداری جابه‌جا شود و در هر زاویه شیب، مقدار 2θ و d متفاوتی بدست آید [۳۰]. به همین دلیل، روال کار چنین است که به قطعه در برابر پرتو چندین بار شیب داده می‌شود. سپس در هر زاویه شیب، مقدار d اندازه گرفته شده و در آخر نمودار d بر حسب $\sin^2\psi$ رسم می‌شود و از شیب نمودار حاصل، در رابطه (۳) استفاده می‌شود تا تنش پسماند در هر جهت دلخواه ϕ بدست آید که در شکل ۹ مشخص است. رابطه (۳) از روابط الاستیسیته و اعمال شرط تنش صفحه‌ای به علت محدود بودن عمق نفوذ پرتو در ضخامت ماده و اندازه‌گیری تنش سطحی قطعه بدست آمده است.

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{d_{\phi 0}(1+\nu)} \times \frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2\psi} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسون، $d_{\phi 0}$ فاصله بین صفحات کریستالی در $\psi=0$ و $d_{\phi\psi}$ فاصله بین صفحات کریستالی در زاویه دلخواه ψ است [۳۱].

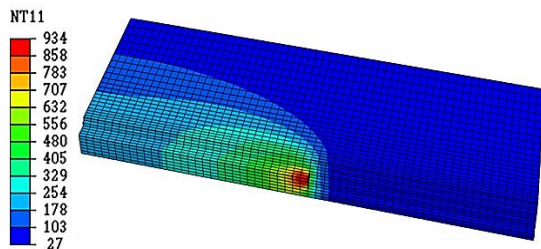


شکل ۸- شیب دادن به قطعه در برابر پرتو و جابه‌جایی پیک پراش [۳۰]

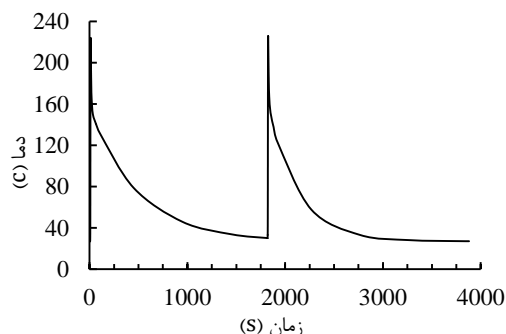
مثال در شکل ۱۱، توزیع دمایی در قطعه برحسب درجه سلسیوس، درست در زمانی که منبع حرارتی جوش کاری در پاس اول جوش کاری به نصف مسیر خود رسیده است، نشان داده شده است. با توجه به همین شکل، بیشینه دما، به علت حضور حرارت خود قوس جوشکاری، مقداری بیشتر از نقطه ذوب فلز پایه است که در واقعیت نیز چنین است.

در شکل ۱۲ تاریخچه دمایی بدست آمده از شبیه سازی، برای گره یا نقطه ای که در محل نزدیک ترین ترموکوپل به خط جوش (در ۱۵ میلی متری از خط جوش و روی محور تقارن عرضی و مشهود در شکل ۱) قرار دارد، نشان داده شده است. برای این نقطه، بیشینه دمای بدست آمده در هر دو پاس جوش کاری با استفاده از روش المان محدود، به همراه بیشینه دمایی که به صورت تجربی توسط ترمومتر با هدف اعتبارسنجی، اندازه گیری شده است و نیز زمان اندازه گیری شده برای سرد شدن این نقطه، به وسیله هر دو روش المان محدود و سنجش تجربی، در جدول ۵ آورده شده است.

مشاهده می شود که تطابق خوبی بین دماهای تجربی و شبیه سازی به چشم می خورد و بیشترین اختلاف دما در حد



شکل ۱۱- توزیع دما در پاس اول، در لحظه رسیدن منبع جوش کاری به نصف مسیر



شکل ۱۲- تاریخچه دمایی در محل اتصال نزدیک ترین ترموکوپل به خط جوش

این نوع آشکارسازها (همان شکل ۱۰)، این مزیت مهم را دارند که در مدت زمان کوتاه تری نسبت به آشکارسازهای قدیمی، همه پراش های صورت گرفته از سطح را به طور همزمان در طول انحنای خود دریافت می کنند که دیگر نیازی به حرکت آشکارساز برای دریافت پیک پراش نیست [۳۲]؛ همچنین این دستگاه دارای قدرت تفکیک خیلی بالایی است، قدرت تفکیک زاویه ای این دستگاه در حد ۰/۰۱ درجه است که بسیار بهتر از رنج پیشنهادی برای بحث اندازه گیری تنش پسماند (یعنی محدوده ۰/۲ - ۰/۵ درجه) است [۳۳]. سایر مشخصات و شرایط تنظیمی دستگاه پراش پرتو ایکس به منظور اندازه گیری تنش پسماند، در جدول ۴ آورده شده است.

۳- نتایج

۳-۱- نتایج تحلیل حرارتی

بعد از مقید نمودن قطعه، جوش کاری قطعات انجام شد. در حین جوش کاری، بیشینه دما در نقاط نصب ترموکوپل توسط

جدول ۴- مشخصات و شرایط تنظیمی دستگاه پراش پرتو ایکس مورد استفاده برای اندازه گیری تنش پسماند

مقدار و واحد	مشخصات دستگاه
$1/54059 [\text{Å}]$	طول موج پرتو $k\alpha_1$
$1/544426 [\text{Å}]$	طول موج پرتو $k\alpha_2$
۳۰ mA و ۴۰ kV	ولتاژ و جریان ژنراتور
۳۵۰ s	زمان هر پرتو دهی
مس	نوع تیوب
پیوسته	نوع تابش پرتو

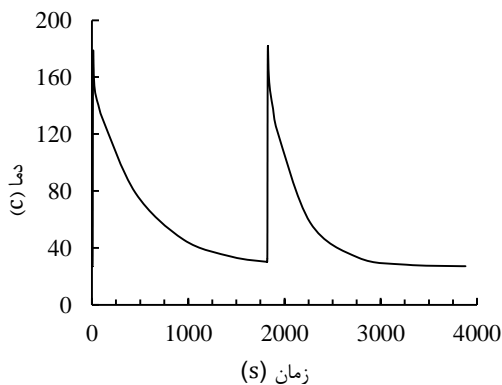
ترمومتر خوانده شد و زمان سرد شدن قطعه در نقاط اتصال ترموکوپل ها (شکل ۱)، از لحظه شروع جوش کاری تا رسیدن دمای قطعه به دمای محیط، توسط کرنومتر اندازه گیری شد؛ هدف از اندازه گیری این پارامترها، استفاده از آن ها برای اعتبارسنجی نتایج تحلیل حرارتی حاصل از شبیه سازی با نتایج تجربی بود. به منظور انجام تحلیل حرارتی از طریق شبیه سازی، پس از بدست آوردن مش بهینه (مشروح در بخش قبلی)، تحلیل حرارتی مطابق آنچه که در قسمت تئوری تحلیل حرارتی بیان شد، روی مدل انجام گرفت و توزیع دما و تاریخچه دمایی در نقاط مدل بدست آمد. برای

جدول ۶- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی در مکان

ترموکوپل دور از خط جوش				
شماره پاس جوش	بیشینه دما شبیه‌سازی (°C)	بیشینه دما از ترمومتر (°C)	زمان خنک شدن شبیه‌سازی (s)	زمان خنک شدن حاصله از کرنومتر (s)
۱	۱۷۹	۱۸۶	۱۸۱۹	۱۷۴۶
۲	۱۸۲	۱۹۰	۱۸۳۲	۱۷۷۱

جدول ۵- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی در مکان

ترموکوپل نزدیک به خط جوش				
شماره پاس جوش	بیشینه دما شبیه‌سازی (°C)	بیشینه دما از ترمومتر (°C)	زمان خنک شدن شبیه‌سازی (s)	زمان خنک شدن حاصله از کرنومتر (s)
۱	۲۲۴	۲۲۹	۱۸۱۹	۱۷۴۶
۲	۲۲۶	۲۳۲	۱۸۶۶	۱۷۹۳



شکل ۱۳- تاریخچه دمایی در محل اتصال دورترین ترموکوپل از خط جوش

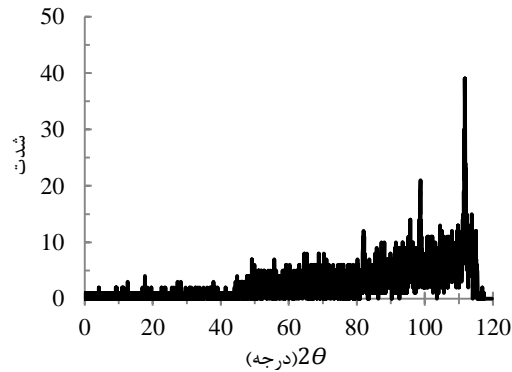
۳-۲- نتایج تحلیل مکانیکی

به منظور بررسی اعتبار تنش پسماند حاصل از شبیه‌سازی، روی سطح یکی از دو ورقی که روی آن ترموکوپل نصب شده بود و اندازه‌گیری‌های پراش پرتو ایکس هم روی آن ورق انجام شده بود، مقطع عرضی تقارن و منصف ورق یعنی مقطع مشخص شده با خط ضخیم در شکل ۷ انتخاب شد و پس از انجام تحلیل مکانیکی از طریق حل المان محدود و شبیه‌سازی، تنش پسماند در این مقطع بدست آمد که روی سطح قطعه واقع است که نتایج در شکل ۱۴ مشهود است. تحلیل مکانیکی به این شکل انجام شد که پس از انجام تحلیل حرارتی و بدست آمدن تاریخچه دمایی در نقاط مدل، این تاریخچه به عنوان ورودی، وارد تحلیل مکانیکی شد تا پس از حل المان محدود روابط تنش-کرنش، تنش پسماند در کل مدل قطعه بدست آید.

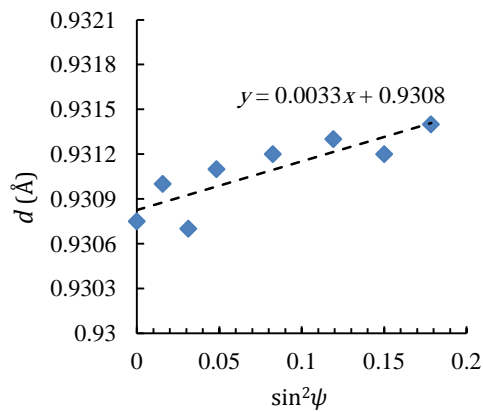
۶ درجه سلسیوس است که تأثیر خیلی محسوسی روی تنش پسماند نمی‌گذارد. طبق همین جدول ۵ در مورد تفاوت زمان سرد شدن در حالت شبیه‌سازی و تجربی نیز تطابق خوبی مشاهده می‌شود، هرچند ممکن است که تفاوت زمان سرد شدن‌ها در حالت شبیه‌سازی و تجربی به مقداری بیشتر از یک دقیقه برسد، ولی با توجه به شکل تاریخچه حرارتی در محل ترموکوپل اول (شکل ۱۲) مشاهده می‌شود که رفته‌رفته به هنگام سرد شدن و نزدیک شدن دمای این نقطه به دمای تعادل قطعه با محیط، حتی با وجود گذر زمان در حد ۱۰۰ ثانیه، تغییرات دمایی کمی (کمتر و یا در حد ۱ درجه سلسیوس) رخ داده است که واقعاً تأثیر ناچیزی روی تنش پسماند خواهد داشت؛ لذا تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی مشاهده گردید.

در شکل ۱۳ تاریخچه دمایی برای گره یا نقطه‌ای که در محل دورترین ترموکوپل از خط جوش (در ۲۰ میلی‌متری از خط جوش و روی محور تقارن عرضی و مشهود در شکل ۱) قرار دارد، نشان داده شده است. در این نقطه، اعتبار سنجی مدل المان محدود با نتایج تجربی، در جدول ۶ آورده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف دما در حد ۸ درجه سلسیوس است که بنا به توضیحات مربوط به جدول ۵ که پیش‌تر بیان شد، این تطابق و تطابق زمان‌های سرد شدن در هر دو پاس، در حد خوبی است. توجه شود که زمان خنک شدن در پاس اول برای هر دو ترموکوپل نزدیک و دور از خط جوش یکسان بوده، برابر مدت زمان بین شروع جوش کاری پاس اول تا شروع جوش کاری پاس دوم است. به همین جهت زمان خنک شدن آن‌ها در پاس اول، در جداول ۴ و ۵ یکسان درج شده است.

پسماند طولی در راستای عمق قطعه به دست آمد که در بخش بعدی، به بحث در مورد نتایج به دست آمده پرداخته شده است.



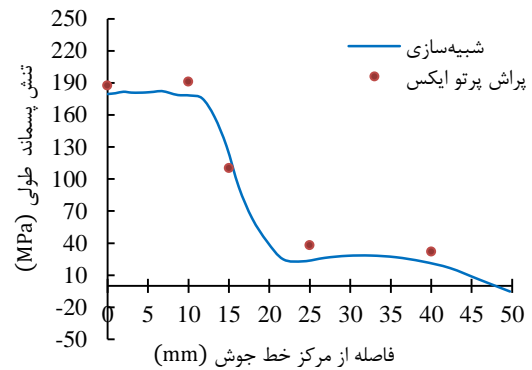
شکل ۱۵- آنالیز پراش به منظور انتخاب پیک پراش مناسب



شکل ۱۶- نمودار d بر حسب $\sin^2\psi$ برای نقطه‌ی واقع روی خط جوش

جدول ۷- نتایج پراش برای نقطه‌ی واقع روی خط جوش

شماره شیب	ψ (درجه)	$\sin^2\psi$	2θ (درجه)	d (آنگستروم)
۱	۰	۰	۱۱۱/۸۹۳	۰/۹۳۰۸
۲	۷/۳	۰/۰۱۵۷۰۸	۱۱۱/۸۷۵	۰/۹۳۱۰
۳	۱۰/۲	۰/۰۳۱۳۵۹	۱۱۱/۸۳۹	۰/۹۳۰۷
۴	۱۲/۷	۰/۰۴۸۳۳۲	۱۱۱/۸۷۵	۰/۹۳۱۱
۵	۱۶/۷	۰/۰۸۲۵۷۶	۱۱۱/۸۳۹	۰/۹۳۱۲
۶	۲۰/۲	۰/۱۱۹۲۳۱	۱۱۱/۸۷۵	۰/۹۳۱۳
۷	۲۲/۸	۰/۱۵۰۱۶۸	۱۱۱/۸۳۱	۰/۹۳۱۲
۸	۲۵	۰/۱۷۸۶۰۶	۱۱۱/۷۶۶	۰/۹۳۱۴



شکل ۱۴- تنش پسماند طولی حاصل از دو روش شبیه‌سازی و پراش پرتو ایکس

۳-۳- نتایج پراش پرتو ایکس

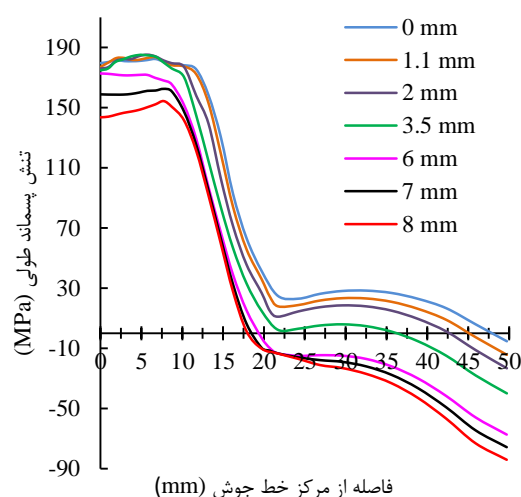
پس از انجام یک آزمون پراش روی قطعه، پیک پراش ظاهر شده در 2θ بین ۱۱۱ و ۱۱۲ درجه که دارای شدت و دقت کافی و از لحاظ مکانی نزدیک به ۱۲۰ درجه بود (شکل ۱۵)، برای بررسی انتخاب شد. همچنین به علت انجام فیلتراسیون قوی در دستگاه پراش مورد استفاده، دیگر نگرانی از حضور پرتو $k\beta$ و کاهش دقت اندازه‌گیری وجود نداشت. در هر نقطه مورد اندازه‌گیری تنش پسماند، به قطعه چندین بار تحت زاویه ψ در برابر پرتو ایکس، شیب داده شد که اطلاعات و نتایج بدست آمده برای نقطه روی خط جوش در جدول ۷ درج شده است. در نهایت نمودار d بر حسب $\sin^2\psi$ برای هر یک از نقاط مورد اندازه‌گیری تنش پسماند رسم شد و شیب نمودار حاصل، در رابطه (۳) استفاده گردید و مقدار تنش پسماند طولی محاسبه شد. نمودار d بر حسب $\sin^2\psi$ برای نقطه روی خط جوش، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۴، تنش پسماند طولی در ۵ نقطه واقع بر مقطع مورد مطالعه، با روش پراش پرتو ایکس اندازه‌گیری گردید؛ همچنین موقعیت مکانی هر نقطه و مقدار تنش پسماند طولی اندازه‌گیری شده با هر دو روش پراش پرتو ایکس و شبیه‌سازی و نیز اختلاف نتایج حاصله، در جدول ۸ درج شده است.

۳-۴- توزیع تنش پسماند طولی در اعماق قطعه

پس از تایید اعتبار نتایج مدل المان محدود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی تنش پسماند طولی، در ۷ عمق مختلف از سطح قطعه در شکل ۱۷ آورده شد و به این ترتیب، توزیع تنش

جدول ۸- نقاط اعتبارسنجی و تنش پسماند اندازه گیری شده با هر دو روش

فاصله نقطه از مرکز خط جوش (mm)	تنش پسماند طولی حاصل از روش پراش (MPa)	تنش پسماند طولی حاصل از روش شبیه سازی (MPa)	اختلاف نتایج (MPa)
۰	۱۸۷/۵	۱۸۰	۷/۵
۱۰	۱۹۱	۱۷۷/۲	۱۳/۸
۱۵	۱۱۰	۱۲۵	۱۵
۲۵	۳۷/۸	۲۴/۱	۱۳/۷
۴۰	۳۲	۲۰/۳	۱۲/۳



شکل ۱۷- تنش پسماند طولی حاصل از شبیه سازی در چند عمق مختلف از سطح قطعه

۴- بحث روی نتایج

با توجه به شکل ۱۴ و نتایج مندرج در جدول ۸، تطابق بسیار خوبی بین نتایج روش پراش پرتو ایکس و شبیه سازی، تا فاصله ۱۰ میلی متری از خط جوش دیده می شود. بنا به اچ انجام شده در پژوهش حاضر، محدوده شامل فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت یا HAZ در مجموع وسعتی در حد ۷/۶ میلی متر دارد و در مطالعات مربوط به عیوب جوشی و شرایط رشد آن ها بخصوص تحت تأثیر تنش پسماند، این منطقه بیشترین اهمیت را دارد (چون اولاً خطرناک ترین عیوب در این منطقه به وجود می آیند و ثانیاً بیشترین تنش های پسماند در این منطقه شکل می گیرد که این عیوب

را مستعد رشد می کند) و در جدول ۸ هم مشهود است که حتی در محدوده های بزرگتر از این منطقه (تا فاصله ۱۰ میلی متری از خط جوش)، هم تطابق خوبی بین نتایج دو روش مشاهده می شود. به طوری که اختلاف نتایج دو روش برای نقطه واقع در فاصله ۱۰ میلی متری از خط جوش، در حد ۱۳/۸ مگاپاسکال (معادل ۷/۲ درصد) بود. بهترین تطابق بین نتایج، برای نقطه واقع روی خط جوش مشاهده شد که میزان اختلاف در حد ۷/۵ مگاپاسکال (معادل ۴ درصد) بود. در نقطه واقع در فاصله ۱۵ میلی متری از خط جوش نیز، تطابق مطلوبی مشاهده شد؛ به طوری که میزان اختلاف نتایج روش شبیه سازی و پراش پرتو ایکس، در حد ۱۵ مگاپاسکال (معادل ۱۳/۶ درصد) بود. مناطق مهم در پژوهش حاضر تا نهایتاً فاصله ۲۰ میلی متری از خط جوش است که دارای تنش پسماند بیشتر از ۳۸ مگاپاسکال می باشند. در مناطق بین ۲۰ تا ۵۰ میلی متر از خط جوش، تنش های پسماند رفته رفته تا یک مقدار فشاری و منفی، افت پیدا می کنند و این مقدار تنش، خطر آن چنانی برای سازه ایجاد نمی کند. با توجه به شکل ۱۴ و نتایج مندرج در جدول ۸ مشاهده می شود که بیشترین مقدار اختلاف نتایج دو روش، در نقاط موجود در فاصله ۲۰ تا ۵۰ میلی متری از خط جوش در حد ۱۳/۷ مگاپاسکال است که نسبت به تنش تسلیم فلز پایه و جنس مورد مطالعه عدد کوچکی است.

با توجه به توضیحات قبلی و مقدار اختلاف نتایج دو روش شبیه سازی و پراش پرتو ایکس در نقاط مورد بررسی، اعتبار شبیه سازی پژوهش حاضر تایید گردید (روال تایید اعتبار مدل شبیه سازی پس از مقایسه با نتایج تجربی به دست آمده از سطح قطعه در جهت طولی جوشکاری، بر اساس روال کار جواد و صادقی [۲۰ و ۲۱] انجام شد و اعتبار مدل تایید شد) و با استناد بر آن، توزیع تنش پسماند طولی در راستای عمق قطعه در شکل ۱۷، با استفاده از شبیه سازی به دست آمد و بنا به همین شکل، نتایج تنش پسماند طولی به دست آمده در ۵ نقطه به فواصل مختلف از خط مرکزی جوش، در ۶ عمق مختلف، در جدول ۹ مشهود است.

بنا به شکل ۱۷ مشهود است که تنش های پسماند طولی در فاصله ۰ تا ۱۰ میلی متری از خط جوش، تا عمق ۳/۵ میلی متر، دارای مقادیر نسبتاً ثابتی هستند؛ ولی در عمق های بالاتر، اختلاف مقادیر تنش پسماند افزایش یافت. تنش های

از خط جوش، تنش‌های پسماند کششی موجود در این نواحی را به مقدار قابل توجهی تقلیل داد. انجام عملیات حرارتی تنش‌گیری نیز، باعث تقلیل مقدار تنش‌های پسماند می‌شود؛ ولی همزمان با کاهش تنش‌های پسماند کششی، تنش‌های پسماند فشاری (که در جلوگیری از خستگی، ایجاد و گسترش ترک اهمیت دارند) را نیز کاهش می‌دهد. شبیه‌سازی همچنین گویای آن بود که با افزایش عمق، مقدار تنش‌های پسماند کششی، کاهش و مقدار تنش‌های پسماند فشاری تا مقدار زیادی (در مناطق دورتر از فلز جوش) افزایش می‌یابد. در ادامه به برخی از عواملی اشاره می‌شود که باعث بروز اختلاف بین نتایج دو روش شبیه‌سازی و پراش پرتو ایکس شده است:

- ۱- ساده‌سازی‌هایی که در شبیه‌سازی‌ها فرض می‌شود: مثلاً دینامیک مذاب و تغییرات فازی در شبیه‌سازی‌ها (و نیز در این پژوهش) اغلب نادیده گرفته می‌شود، همچنین ماده، کاملاً ایزوتروپیک فرض می‌شود که در واقعیت چنین نیست.
- ۲- اگرچه انتخاب خواص حرارتی و مکانیکی ماده از مقالات و منابع معتبر، مقداری خطا با خود به همراه دارد، ولی این کار یک روال معمول در شبیه‌سازی جوش است؛ زیرا آزمون‌های تجربی برای بدست آوردن خواص حرارتی (مانند گرمای ویژه، ضریب انبساط حرارتی و...) و مکانیکی اغلب وقت‌گیر و نیازمند امکانات و هزینه بسیار می‌باشند.
- ۳- درشت بودن اندازه مش در نقاط دورتر از خط جوش (به دلیل کم‌اهمیت بودن این نقاط و کاهش زمان شبیه‌سازی) می‌تواند باعث ایجاد مقداری خطا در نتایج حاصل از المان محدود در نقاط دورتر از خط جوش شود.

- ۴- احتمال وجود خطاهایی در آزمون پراش پرتو ایکس: یکی از خطاهای اجتناب‌ناپذیر نتایج پراش پرتو ایکس، عدم تشخیص دقیق موقعیت قله پیک پراش است، نرم‌افزارهای پراش پرتو ایکس، با عبور دادن توابع معروفی مانند تابع گوسین از الگوی پیک ظاهر شده، تقریب‌زنی پروفیل پیک، موقعیت نوک پیک و 2θ آن را تعیین می‌کنند که طبیعتاً با مقداری خطا همراه است. همچنین فیلتر نکردن دقیق اشعه، منجر به ایجاد اشعه‌ای با چندین طول موج به جای اشعه تک طول موج شده، محاسبات و تشخیص محل پیک را با خطا مواجه می‌کند. دقت خود روش پراش پرتو ایکس نیز، در

پسماند طولی در فاصله ۰ تا ۱۰ میلی‌متر از خط جوش (که بالاترین میزان تنش پسماند کششی در این فاصله از خط جوش قرار داشت و خطرناک‌ترین منطقه از نظر شکست و خستگی محسوب می‌شد)، در اعماق مختلف، در گستره ۱۴۲ مگاپاسکال (عمق ۸ میلی‌متر) تا ۱۸۲ مگاپاسکال (عمق ۰ میلی‌متر) قرار داشت. در فاصله ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متری از خط جوش مشاهده شد که بیشترین اختلاف مقدار تنش پسماند طولی در اعماق مختلف، در حدود ۷۰ مگاپاسکال بود که محل آن در ۱۵ میلی‌متری از خط جوش قرار داشت (در این نقطه، طبق جدول ۹، مقدار تنش پسماند طولی در بازه‌ی ۶۰ مگاپاسکال، در عمق ۸ میلی‌متر، تا ۱۳۱ مگاپاسکال، در عمق ۰ میلی‌متر، قرار دارد).

همچنین مشاهده شد، در فاصله ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متری از خط جوش، بیشترین اختلاف مقدار تنش پسماند طولی در اعماق مختلف، در حدود ۸۰ مگاپاسکال بود که محل آن در ۵۰ میلی‌متری از خط جوش قرار داشت (در این نقطه، طبق جدول ۹، مقدار تنش پسماند طولی در بازه‌ی ۵- مگاپاسکال، در عمق ۰ میلی‌متر تا ۸۴- مگاپاسکال، در عمق ۸ میلی‌متر قرار دارد). در شکل ۱۷ مشهود است که در فاصله ۲۰ میلی‌متری از خط جوش و بعد از آن، در عمق‌های بالاتر از $3/5$ میلی‌متر، تنش‌های پسماند از نوع فشاری هستند؛ لذا این مناطق از نظر خستگی، رشد و ایجاد ترک ایمن می‌باشند. با توجه به توزیع تنش‌های پسماند در سطح و عمق، این امکان وجود دارد که با انجام ساچمه‌زنی در فاصله ۰ تا ۲۰ میلی‌متری

جدول ۹- مقایسه‌ی نتایج تنش پسماند طولی به دست آمده در ۵ نقطه به فواصل مختلف از خط مرکزی جوش،

در ۶ عمق مختلف

فاصله از خط جوش mm	تنش پسماند طولی (MPa) در					
	عمق ۰ mm	عمق ۲ mm	عمق ۳/۵ mm	عمق ۶ mm	عمق ۷ mm	عمق ۸ mm
۰	۱۸۰	۱۷۶	۱۷۵	۱۷۳	۱۵۹	۱۴۴
۱۰	۱۷۸	۱۷۷	۱۷۰	۱۵۲	۱۴۷	۱۴۲
۱۵	۱۳۱	۱۰۳	۸۴	۶۷	۶۳	۶۰
۲۰	۴۱	۲۷	۱۵	-۳	-۹/۵	-۱۰
۳۵	۲۷	۱۵	۱	-۲۲	-۲۷	-۳۳
۵۰	-۵	-۲۳	-۴۰	-۶۷	-۷۶	-۸۴

اندازه‌گیری تنش پسماند در حدود ۲۰ مگاپاسکال است [۳۴].

۵- در روش پراش پرتو ایکس، قطر اشعه تابیده شده بر سطح قطعه ۵ میلی‌متر بود؛ لذا روش پراش پرتو ایکس، میانگین تنش پسماند را در این محدوده می‌سنجید، حال آن‌که در روش شبیه‌سازی، تنش پسماند در گره‌ها یا نقاط مدل بدست می‌آید؛ لذا وجود مقداری خطا، اجتناب ناپذیر بود. توجه شود که همه روش‌های تجربی اندازه‌گیری تنش پسماند، در یک محدوده کوچک معینی از مساحت قطعه، میانگین مقدار تنش پسماند را در آن محدوده بدست می‌دهند و این ویژگی فقط مختص روش تجربی پراش پرتو ایکس نیست. با این وجود در مقالات، بارها برای اعتبارسنجی تنش پسماند حاصل از مدل‌سازی جوش کاری، از روش پراش پرتو ایکس استفاده شده است؛ مانند پژوهش [۳۵].

۶- اگرچه بعد از جوش کاری، گرده‌ی کوچکی به ارتفاع ۰/۶ میلی‌متر پدید آمد که با استفاده از سنباده‌زنی نرم (که تولید تنش پسماند مازاد نمی‌کرد)، این گرده با سطح ورق، هم‌ارتفاع شد تا از تفرق ناخواسته پرتو ایکس جلوگیری شود، ولی حذف همین گرده کوچک نیز می‌تواند مقدار کمی از تنش پسماند جوش کاری را آزاد کند. البته برای اندازه‌گیری تنش پسماند در موضع خط جوش با روش‌های تجربی اندازه‌گیری تنش پسماند (مانند التراسونیک، پراش پرتو ایکس و سوراخ کاری)، حذف گرده جوش اجتناب ناپذیر است و در مراجع جدیدی مانند [۱۵ و ۲۰] نیز این کار انجام شده است و با وجود حذف گرده‌های بزرگ‌تر از گرده پژوهش حاضر، باز هم تطابق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی تنش پسماند مشاهده شده است.

۱- شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش، قادر به پیش‌بینی پروفیل و شکل نمودار تنش پسماند و نیز مقادیر آن در راستای عمق قطعه است. در جریان مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج پراش پرتو ایکس، اعتبار شبیه‌سازی انجام شده تایید گردید. در این اعتبارسنجی، بهترین تطابق نتایج در نقطه روی خط جوش مشاهده گردید. اختلاف نتایج دو روش برای این نقطه، در حد ۷/۵ مگاپاسکال (معادل ۴ درصد) بود. در فواصل دورتر از خط جوش، اختلافی در حد ۱۳/۷ مگاپاسکال مشاهده گردید که نسبت به تنش تسلیم فلز پایه مقدار کوچکی محسوب می‌شد.

۲- پس از به‌دست آمدن توزیع تنش پسماند طولی در عمق قطعه مشاهده شد که این تنش‌ها تا فاصله ۱۰ میلی‌متری از خط جوش و در راستای ضخامت، تا عمق ۳/۵ میلی‌متر، دارای مقادیر ثابتی بودند، ولی در اعماق بیشتر، اختلاف مقادیر تنش پسماند افزایش یافت. توزیع تنش‌های پسماند طولی در فاصله ۰ تا ۱۰ میلی‌متری از خط جوش، در گستره ۱۴۲ مگاپاسکال (عمق ۸ میلی‌متر) تا ۱۸۲ مگاپاسکال (سطح قطعه) قرار داشت. در دو فاصله ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متری و ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متری از خط جوش، بیشترین اختلاف مقدار تنش پسماند طولی در اعماق مختلف، به ترتیب در حدود ۷۰ و ۸۰ مگاپاسکال بود. مشاهده شد که در فاصله ۲۰ میلی‌متری از خط جوش و دورتر از آن، در اعماق بیشتر از ۳/۵ میلی‌متر، تنش‌های پسماند از جنس فشاری بودند؛ لذا این مناطق از نظر خستگی، رشد و ایجاد ترک، ایمن بودند. همچنین شبیه‌سازی گویای آن بود که با افزایش عمق، مقدار تنش‌های پسماند کششی، کاهش و مقدار تنش‌های پسماند فشاری تا مقدار زیادی افزایش یافت که در مناطق دورتر از فلز جوش قابل مشاهده بود.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از تلفیق روش شبیه‌سازی المان محدود و روش تجربی پراش پرتو ایکس به‌منظور اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق قطعه استفاده شد. در واقع، پس از صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی با پراش پرتو ایکس در مسیری معین واقع بر سطح قطعه، نمودار توزیع تنش پسماند طولی جوش کاری در چند عمق مختلف، با استفاده از شبیه‌سازی به‌دست آمد. از پژوهش حاضر، نتایج زیر بدست آمد:

۶- مراجع

- [1] Ueda Y, Yamakawa T (1971) Analysis of thermal elastic-plastic stress and strain during welding by finite element method. Trans JWRI 2(2): 186-196.
- [2] Goldak J, Oddy A, Gu M, Ma W, Mashaie A, Hughes E (1992) Coupling heat transfer, microstructure evolution and thermal stress analysis in weld mechanics. Mechanical Effects of Welding, ed: Springer: 1-30.
- [3] Yajiang L, Juan W, Maoai C, Xiaoqin S (2004) Finite element analysis of residual stress in the

- [16] Steuwer A, Peel MJ, Withers PJ (2006) Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082: the effect of process parameters on residual stress. *Mater Sci Eng A* 441(1): 187-196.
- [17] Masubuchi K (1980) Analysis of welded structures: Residual stresses, distortion, and their consequences. 1st edn. Elsevier 33.
- [18] Eftekhari M (2014) Simulation of longitudinal residual stress in welded austenitic stainless steel plates and evaluation with x-ray diffraction and ultrasonic methods. MSc Thesis, Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran. (In Persian)
- [19] Park DH, Choi SW, Kim JH, Lee JM (2015) Cryogenic mechanical behavior of 5000-and 6000-series aluminum alloys: Issues on application to offshore plants. *Cryogenics* 68: 44-58.
- [20] Javadi Y, Akhlaghi M, Najafabadi MA (2013) Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates. *Mater Des* 45: 628-642.
- [21] Sadeghi S, Najafabadi MA, Javadi Y, Mohammadisefat M (2013) Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates. *Mater Des* 52: 870-880.
- [22] AWS Standard D1.6/D1.6M (2003) American Welding Society, Structural Welding Code - Aluminum, An American National Standard.
- [23] Jalili N (2014) Investigation of heat transfer in friction stir welding process with cooling flux. MSc Thesis, Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran. (In Persian)
- [24] Hasani M (2013) Evaluation of welding residual stress in austenite stainless steel using LCR ultrasonic waves. MSc Thesis, Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran. (In Persian)
- [25] Karimnia V, Sattari-Far I (2015) 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* 15(3): 377-386. (In Persian).
- [26] Pradip D, Joshi Y, Franche C (1994) Determination of gas tungsten arc welding efficiencies. *Exp Therm Fluid Sci* 9(1): 80-89.
- [27] Deng D, Murakawa H (2008) Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint. *Comput Mater Sci* 43(2): 353-365.
- [28] Jiang W, Zhang Y, Woo W (2012) Using heat sink technology to decrease residual stress in 316L welded zone of a high strength steel. *Bull Mater Sci* 27(2): 127-132.
- [4] Song J, Peters J, Noor A (2003) Sensitivity analysis of the thermomechanical response of welded joints. *Int J Solids Struct* 40(16): 4167-4180.
- [5] Branza T, Duchosal A, Fras G, Deschaux-Beaume F, Lours P (2004) Experimental and numerical investigation of the weld repair of superplastic forming dies. *J Mater Process Technol* 155: 1673-1680.
- [6] Nandan R, Roy G, Lienert T, DebRoy T (2006) Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel. *Scie Technology Weld Joining* 11(5): 526-537.
- [7] Alberg H, Berglund D (2003) Comparison of plastic, viscoplastic, and creep models when modelling welding and stress relief heat treatment. *Comput Methods Appl Mech Eng* 192(49): 5189-5208.
- [8] Fricke S, Keim E, Schmidt J (2001) Numerical weld modeling a method for calculating weld-induced residual stresses. *Nucl Eng Des* 206(2): 139-150.
- [9] Mabelly P, Bourges P, Pont G (2001) Effect of metallurgical transformations on weld residual stresses application to E690 steel grade. *Mar Struct* 14(4): 553-567.
- [10] Barroso A, Canas J, Picon R, Paris F, Mendez C, Unanue I (2010) Prediction of welding residual stresses and displacements by simplified models. Experimental validation. *Mater Des* 31(3): 1338-1349.
- [11] Fachinotti VD, Anca AA, Cardona A (2011) Analytical solutions of the thermal field induced by moving double ellipsoidal and double elliptical heat sources in a semi infinite body. *Int J Numer Method Biomed Eng* 27(4): 595-607.
- [12] Shugen X, Wang W, Chang Y (2014) Using FEM to predict residual stresses in girth welding joint of layered cylindrical vessels. *Int J Press Vessels Pip* 119: 1-7.
- [13] Stamenkovic D, Peric M (2011) Determination of Residual Stresses in Welded Pipes Using a Simplified Heat Source. *Rev Sci Tech* 61(1): 12-16.
- [14] Fanous IF, Younan MY, Wifi AS (2002) 3-D finite element modeling of the welding process using element birth and element movement techniques. *ASME Pressure Vessels Piping Div Publ PVP* 442: 165-172.
- [15] Javadi Y (2012) Residual Stress Evaluation through Thickness of an Austenitic Stainless Steel Welded Joint by using Ultrasonic Technique. PhD Thesis, Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran. (In Persian)

- [32] Pecharsky V, Zavalij P (2009) Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials. 2nd edn. Springer 69, New York.
- [33] Fitzpatrick M, Fry A, Holdway P, Kandil F, Shackleton J, Suominen L (2005) Determination of residual stresses by X-ray diffraction. p. 45.
- [34] Schajer GS (ed). (2013) Practical Residual Stress Measurement Methods. 1st edn. Wiley.
- [35] Akbari S, Miresmaeili R (2008) Experimental and numerical analyses of residual stress distributions in TIG welding process for 304L stainless steel. J Mater Process Technol 208(1): 383-394.
- stainless steel welding joint: Finite element simulation. Int J Press Vessels Pip 92: 56-62.
- [29] Eftekhari M, Najafabadi MA (2015) Evaluation of the Capability of Ultrasonic Method for Measuring Longitudinal Welding Residual Stress, by Validating with X-Ray Diffraction Method. Modares Mechanical Engineering 15(9): 1-10. (In Persian)
- [30] Hauk V (1977) Structural and residual stress analysis by nondestructive methods: Evaluation-Application-Assessment. Elsevier.
- [31] Hilly ME (1971) Residual stress measurement by X-ray diffraction. SAE J784a, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA: 19.