



تحلیل حرارتی در اتصالات T شکل فرآیند جوشکاری قطعات غیر همجنس

عادل توابع^۱، احمد افسری^{۲*}، سید محمدرضا ناظم السادات^۳

۱- کارشناسی ارشد ساخت و تولید، گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

*Ah.Afsari1338@iau.ac.ir

ارسال: بهمن ماه ۱۴۰۱ پذیرش: فروردین ماه ۱۴۰۲

چکیده

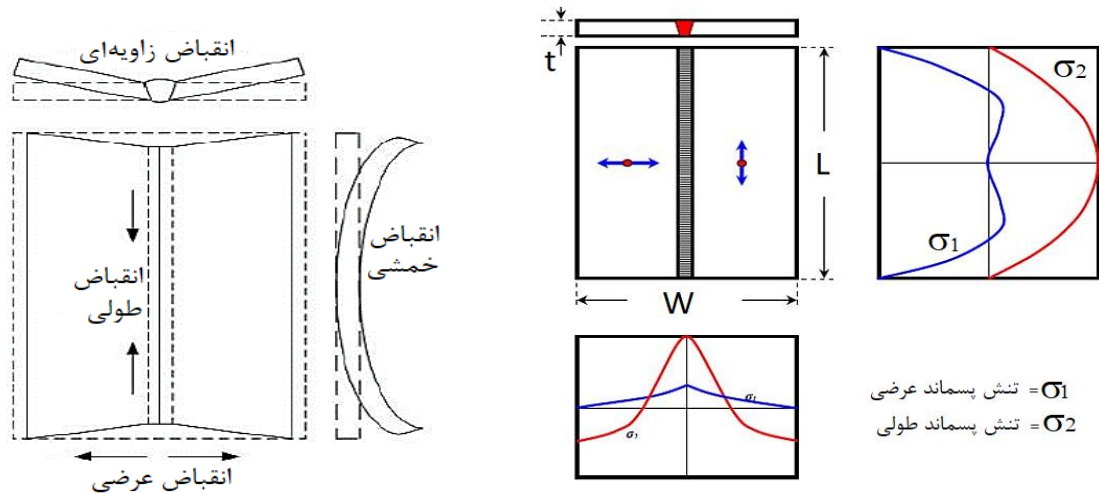
اتصال قطعات به روش جوشکاری به عنوان اتصال دائم می‌تواند نقش مهمی در صنایع مختلف ایفا کند. از طرفی اتصالات حاصل از جوشکاری قطعات غیرهمجنس با وجود قابلیت‌های مطلوبی که در تحمل بارهای خارجی دارند؛ اما دارای برخی محدودیت‌هایی نیز هستند که شناسایی و بررسی این محدودیت‌ها می‌تواند به استفاده هر چه بهتر این نوع اتصالات کمک نماید. در حالی که رفتار قطعات تحت تنش‌های حرارتی ناشی از فرآیند جوشکاری می‌تواند یکی از این محدودیت‌های این فرآیند باشد. بنابراین شرایط جوش قطعات غیرهمجنس در ناحیه تماس الکتروود و محل درز جوش، منجر به افزایش دمای قطعات در عملیات جوشکاری می‌گردد، که این افزایش دما می‌تواند به میزان قابل توجهی بر عملکرد مکانیکی جوش‌ها اثرگذار باشد. در این پژوهش، قطعاتی از جنس آلومینیم و فولاد کربنی با استفاده از روش جوشکاری برقی با الکتروود تنگستن غیرمصرفی تحت گاز محافظ (TIG) انجام گردید و برای بررسی اثر تنش حرارتی در فرآیند جوشکاری برای اتصالات مختلف از نرم‌افزار انسیس استفاده شد. جهت اطمینان از صحت داده‌های بدست آمده در روش مدل شبیه سازی، قطعاتی به صورت عملی نیز با شرایط مشابه به یکدیگر جوش داده شدند و نتایج بدست آمده با نتایج روش مدل شده مقایسه گردید. ابتدا رفتار یک ورق فولادی و سپس نقش عوامل مختلف بر عملکرد جوش با مدل سازی فرآیند برای یک لوله در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در پایان با توجه به نقش انکارناپذیر اتصالات T شکل در صنایع مختلف، توزیع حرارت و رفتار آن مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: فرآیند جوشکاری، اتصالات غیر هم جنس، تنش پسماند، تحلیل حرارتی.

۱- مقدمه

جوشکاری قوسی با الکتروود مصرف نشدنی تحت پوشش گازهای محافظ (TIG) یا به اختصار جوشکاری تیگ یک فرآیند جوشکاری برقی می‌باشد که قوس بین الکتروود تنگستنی (مصرف نشدنی) و حوضچه مذاب پدید می‌آید. این فرآیند جوشکاری با گاز محافظ و بدون کاربرد فشار صورت می‌گیرد. جوشکاری قوس تنگستنی را می‌توان با اضافه کردن فلز پرکننده و یا بدون آن به کار برد. در این فرآیند هیچ گونه سرباره‌ای وجود ندارد، بنابراین لازم است که الکتروود، پاله جوش، ناحیه جوشکاری شده و هم‌نین فلز پرکننده توسط گاز محافظ پوشش داده شوند تا از آلوده و اکسیده شدن آن‌ها جلوگیری گردد [۱].

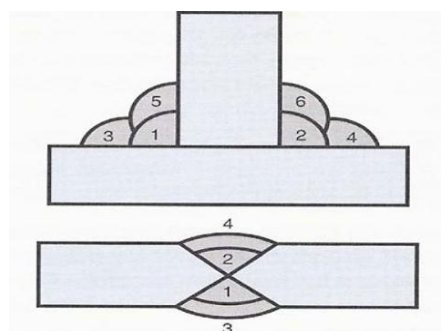
چنانچه فلز تحت گرمایش و سرمایش مهار شده باشد، دچار اعوجاج و تنش پسماند خواهد شد. این مشابه اتفاقی است که در اتصال جوشی و سازه جوشی رخ می‌دهد و باعث بروز اعوجاج و تنش پسماند در آن‌ها می‌گردد. عوامل متعددی در افزایش میزان اعوجاج و سطح تنش‌های پسماند در اتصال جوشی موثر هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به درجه مهار اتصال جوشی، طراحی اتصال جوشی، میزان پیشگرم، عملیات حرارتی پس از جوشکاری و غیره اشاره نمود. وجود تنش‌های پسماند می‌تواند در نهایت منجر به تغییر در شکل و اندازه سازه شود. همچنان تحقیقات نشان داده است که توزیع حرارت حین فرآیند جوشکاری یکنواخت نبوده بلکه از ناحیه حوضچه جوش شروع و به ناحیه اطراف ادامه می‌یابد. نمونه‌ای از تغییر فرم ناشی از وجود تنش‌های پسماند در سازه در شکل ۱ تغییر شکل سازه ناشی از تنش‌های پسماند در شکل ۲ نشان داده شده است [۲].



شکل ۲- تغییر فرم سازه ناشی از تنش‌های پسماند [۲]

شکل ۱- تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری [۲]

استفاده از ترتیب و توالی جوشکاری مناسب یکی از روش‌های کاهش اعوجاج حاصل از جوشکاری بدون نیاز به استفاده از مهارهای خارجی یا قید و بست است. همان‌طوری که بیان شد، فرآیندهای جوشکاری ذوبی به دلیل بازه حرارتی اعمالی به فلز پایه، موجب انبساط و انقباض و در نهایت اعوجاج اتصال می‌شوند. بنابراین کاهش حرارت ورودی به روش‌های گوناگون از راه‌های اصلی کاهش میزان انقباض و بروز اعوجاج است. یکی از روش‌های مرسوم در این زمینه استفاده از جوش‌های چند پاسی به جای تک پاسی با رعایت درجه حرارت بین پاسی می‌باشد. استفاده از جوش‌های چند پاسی علاوه بر کاهش حرارت ورودی، موجب فراهم آمدن امکان استفاده از توالی و ترتیب جوشکاری مناسب نیز می‌گردد [۳]. به این معنی که پاس‌ها و لایه‌های جوش به صورت متقابل در دو طرف اتصال جوشی ایجاد شده و تعادلی در میزان اعوجاج آن ایجاد می‌نمایند (شکل ۳).



شکل ۳- ترتیب و توالی جوشکاری [۲]

آلیاژهای آلومینیوم به واسطه خواص مناسب، به طور گسترده در صنایع مختلف بکار گرفته می‌شوند. روش‌های مختلفی برای جوشکاری آلومینیوم مورد استفاده قرار می‌گیرند. جوشکاری تیگ یکی از روش‌های مناسب برای این منظور است [۴]. آلومینیوم چنانچه در معرض هوای آزاد قرار گیرد، بر سطح آن لایه‌ای از اکسید تشکیل می‌شود که دمای ذوب آن در حدود ۱۹۸۲

درجه سانتی گراد است که به مراتب بیشتر از دمای ذوب آلومینیوم خالص (۱۳۱۵ درجه سانتی گراد) می باشد. وجود این لایه اکسید اگرچه می تواند مانع از تجمع رطوبت شود، اما شکل پذیری جوش را به میزان زیادی کاهش می دهد. به همین دلیل استفاده از پوشش گاز محافظ به منظور جلوگیری از تشکیل این لایه اکسیدی بسیار مفید خواهد بود. علاوه بر این، چگالی کم، نرخ خنک شوندگی بالا به همراه امکان انجام جوشکاری قوس الکتریکی به صورت افقی و عمودی باعث می شود که اجرای جوشکاری تیگ برای آلیاژهای آلومینیوم به مراتب بهتر از دیگر روش های جوشکاری از جمله جوشکاری ذوبی باشد [۵]. رفتار مکانیکی حرارتی فرآیند جوشکاری ذوبی برای تعیین میزان اثر هندسه لبه جوش بر اندازه و توزیع تنش پسماند در اتصالات غیرهمجنس تجزیه و تحلیل شده و نتیجه گرفته شده که با افزایش ضخامت دیواره لوله به خصوص در طرف فولاد کربنی تنش های پسماند محوری فشاری در سطح داخلی و تنش های پسماند محوری کششی در سطح خارجی افزایش می یابند [۶]. همچنین بررسی عددی و تجربی توزیع دما و تنش پسماند در فرآیند جوشکاری چند مرحله ای دو ورق از جنس فولاد زنگ نزن با ضخامت غیریکسان نشان می دهد که جوشکاری چند مرحله ای یکی از پرکاربردترین انواع جوشکاری در صنایع مختلف است و مقایسه نتایج بیانگر این است که نتایج عددی و اندازه گیری های تجربی تطابق خوبی با یکدیگر داشته و مدل به وجود آمده می تواند پیش بینی خوبی از توزیع دما و تنش پسماند در فرآیند جوشکاری داشته باشند [۷]. جوشکاری ذوبی معمولی فلزات غیر مشابه اغلب به دلیل خواص حرارتی - فیزیکی مختلف قطعات اتصال محدود می شود. در نتیجه، فازهای بین فلزی شکننده (IMC) ممکن است رخ دهد. استفاده از فرآیند جوشکاری تحت فشار مانند جوشکاری پالس مغناطیسی (MPW) خطر IMCها را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد [۸ و ۱۲]. تجزیه و تحلیل تنش های پسماند و اعوجاج در جوش های گوشه ای اتصال T شکل به طور گسترده در مهندسی کشتی و سازه های پل استفاده می شود. گرمایش موضعی حاصل از فرآیند جوشکاری و متعاقباً خنک شدن سریع، باعث ایجاد تنش پسماند کششی در نزدیکی پنجه اتصال T در جوش های گوشه ای می شود. جوشکاری تنش های حرارتی ایجاد می کند که همین موضوع باعث اعوجاج ساختاری می شود و بر مقاومت کماتس سازه های جوش داده شده تأثیر می گذارد [۹ و ۱۰]. جوشکاری گوشه ای قوس فلزی گازی (GMA) یکی از مهم ترین فرآیندهای اتصال فلزات به دلیل بهره وری بالا و سازگاری با اتوماسیون است. این فرآیند جوشکاری با هندسه اتصال V شکل پیچیده، سطح حوضچه جوش قابل تغییر شکل و اضافه شدن قطرات فلز داغ مشخص می شود [۱۱].

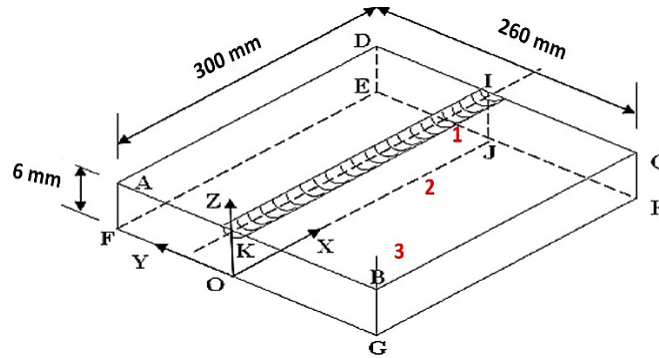
بنابراین تنش های پسماند ناشی از جوشکاری در بعضی از موارد مقادیر بسیار بالایی دارند و علاوه بر کاهش مقاومت قطعات جوش داده شده، می توانند باعث ایجاد ترک در جوش شوند. برای محاسبه این تنش ها لازم است که ابتدا یک تحلیل حرارتی برای بدست آوردن گرادیان حرارتی و سپس یک تحلیل مکانیکی از وضعیت حرارتی موجود به عنوان بارگذاری انجام شود که بررسی این موارد از اهداف این تحقیق می باشد.

۲- مواد و روش ها

جهت تحلیل حرارتی در اتصالات جوشکاری از پارامترهای ورودی جریان، ولتاژ، سرعت، ضخامت و جنس قطعه جوش شونده استفاده شده است. پس از تعیین پارامترهای ورودی و انجام عملیات در نقاط مشخص نتایج خروجی (توزیع دما) ثبت و اندازه گیری دما در روش عملی به وسیله دستگاه ترمومتر کالیبره شده انجام گردید. در این تحقیق از دستگاه رکتیفایر جوش ۲۵۰ آمپر و از مشعل با مشخصات هوا خنک ساز شرکت توسعه صنعت ایرانیان استفاده شده است، همچنین الکتروود تنگستنی سبز رنگ با فیلر کلاف آلومینیوم سیم جوش روسی و گاز محافظ با ترکیب ۸۰ درصد CO_2 و ۲۰ درصد Ar بکار گرفته شد. مشعل دستگاه جوشکاری تیگ که در بردارنده الکتروود تنگستن است، تحت زاویه ۷۵ در دست نگه داشته شده تا با شروع عملیات، قوس الکتریکی بین الکتروود و قطعه کار ایجاد گردد. از فلز پرکننده هم استفاده شد و آن را تحت زاویه ۱۵ درجه به وسیله مشعل جوشکاری گرم نموده و سپس به حوضچه مذاب خورنده شد. قطبیت را بر اساس نوع فلزی که جوش داده می شود باید مشخص گردد بطوری که اگر جنس قطعه از آلومینیوم باشد، جوشکاری با جریان متناوب (AC) و اگر از فولاد یا سایر فلزات باشد؛ آنگاه عملیات جوشکاری با

۱. Gas Metal Arc

استفاده از جریان مستقیم با قطبیت معکوس صورت خواهد پذیرفت. ابعاد قطعاتی که در عملیت جوشکاری و شبیه سازی بکار گرفته شده در شکل ۴ مشاهده می شود.



شکل ۴- ابعاد قطعاتی که در عملیت جوشکاری و شبیه سازی بکار گرفته شده

در این تحقیق ابتدا دو عدد ورق غیرهمجنس از جنس آلایژ آلومینیم ۵۰۵۲ و فولاد کربن S235JR هر کدام به ترتیب با طول، عرض و ضخامت ۱۵۰، ۱۳۰ و ۶ میلی متر برای اتصال لب به لب آماده گردید. جهت اطمینان، آزمایش کوانتومتری روی هر دو قطعه انجام گردید و مشخصات مکانیکی ورق فولادی و آلومینیومی مورد استفاده به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی ورق فولادی

مقدار	واحد	خاصیت مکانیکی
۵۱/۱	$w m^{-1} C^{-1}$	ضریب هدایت حرارتی
۴۵۰	$j k g^{-1} C^{-1}$	ظرفیت گرمایی ویژه
۰/۳	-	ضریب پواسون
۲۰۰	Gpa	مدول یانگ
۶/۵	$w m^{-2} C^{-1}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی
۷۸۹۴	$k g m^{-3}$	چگالی

جدول ۲= خواص مکانیکی آلومینیوم

مقدار	واحد	خاصیت مکانیکی
۱۳۸	$w m^{-1} C^{-1}$	ضریب هدایت حرارتی
۸۶۰	$j k g^{-1} C^{-1}$	ظرفیت گرمایی ویژه
۰/۳	-	ضریب پواسون
۷۰	Gpa	مدول یانگ
۶/۵	$w m^{-2} C^{-1}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی
۲۷۸۲	$k g m^{-3}$	چگالی

قطعات آماده سازی شده به یکدیگر تک بندنی گردید و سپس با استفاده از روش جوشکاری تیگ با جریان ۱۲۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ آمپر و با ولتاژ ثابت ۱۲ ولت، با سرعت جوشکاری ۶ میلی متر بر ثانیه و دمای محیط ۳۲ درجه سانتیگراد به یکدیگر جوش داده شدند و نتایج توزیع دما به وسیله دستگاه ترمومتر ثبت گردید. این عملیات جوشکاری برای مدت زمان ۵ و ۲۵ و ۵۰ ثانیه با فواصل مشخص از محل جوشکاری انجام گردید.

در این عملیات بررسی دما مطابق شکل ۴ در ۵، ۲۵ و ۵۰ ثانیه اول جوشکاری انجام شد که در جدول ۳ برای هر دو روش عملی و شبیه سازی شده ارائه شده است. جدول ۴ مقایسه دما با مقدار جریان ۱۲۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ آمپر برای هر دو روش شبیه سازی و عملی با ولتاژ ثابت ۲۰ ولت و سرعت ثابت جوشکاری برای مدت زمان ۲۰ ثانیه را نشان می دهد. در ادامه با توجه به بررسی تنش حرارتی در جوشکاری با اتصالات T شکل قطعات غیرهمجنس آلومینیم AL5052 با فولاد کربنی S235JR پرداخته شد، که ابعاد آن در شکل ۵ مشخص می باشد.

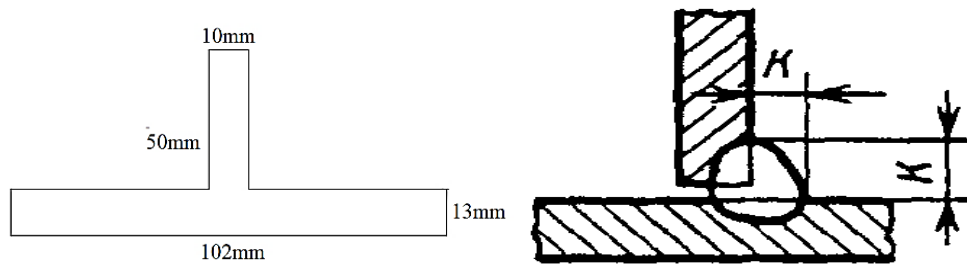
در اینجا به صورت عملی فرآیند جوشکاری بر روی سه نمونه انجام شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. در هر قطعه دو نقطه یکی به فاصله کمتری از خط جوش (۱ سانتی متر) قرار گرفته که در زمان های مختلف مورد ارزیابی و ثبت تغییرات دما قرار داده شد و دمای آن تا ۱۲۸ درجه سانتی گراد افزایش یافت (شکل ۴). مقایسه تغییرات دما مطابق شکل ۴ در نقطه اول نمونه A، نمونه B و نمونه C در جدول ۵ ارائه شده است. درحالی که نقطه دوم در فاصله بیشتری (۱۵ سانتی متر) از خط جوش در نظر گرفته شد و تغییرات دما در زمان های مختلف نیز ثبت گردید.

جدول ۳- ثبت دماهای اندازه گیری شده با ترمومتر در ۵، ۲۵ و ۵۰ ثانیه اول دو ورق لب به لب

نقطه ۳		نقطه ۲		نقطه ۱		وضعیت ثبت دماهای اندازه گیری شده با ترمومتر
عملی	شبه سازی	عملی	شبه سازی	عملی	شبه سازی	
۲۶۸	۴۷۴	۲۴۴	۲۴۰	۲۰	۲۰	در ۵ ثانیه اول
۴۴۰	۴۴۳	۲۳۰	۲۳۷	۲۰	۲۰	در ۲۵ ثانیه اول
۴۲۶	۴۲۶	۲۱۸	۲۲۰	۲۰	۲۰	در ۵۰ ثانیه اول

جدول ۴- مقایسه دما با تغییرات جریان در مدل شبه سازی با فرآیند عملی

مراحل جوش	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	سرعت (میلی متر بر ثانیه)	زمان (ثانیه)		دما (درجه سانتیگراد)
				شروع	خاتمه	
W01	۱۲۰	۱۲	۱۱	۰	۲۰	۲۸۶
W02	۱۴۰	۱۲	۱۱	۰	۲۰	۳۴۱
W03	۱۶۰	۱۲	۱۱	۰	۲۰	۳۹۳



شکل ۵- نحوه اتصال دو قطعه غیرهمجنس آلومینیم و فولاد کربنی با اتصال T شکل.



شکل ۶- نمونه های جوش داده با اتصال T شکل و برش داده شده جهت ارسال به آزمایشگاه مواد

مقایسه تغییرات دما در نقطه دوم نمونه A، نمونه B و نمونه C جدول ۶ ارائه شده است. همان طور که مشخص است به مراتب کمتر تحت تأثیر حرارت ناشی از فرآیند جوشکاری نسبت به نقطه اول قرار گرفته است. در نهایت مقایسه تغییرات دما در نقطه سوم نمونه A، نمونه B و نمونه C جدول ۷ ارائه گردیده است. در ادامه به منظور بررسی رفتار مواد مختلف تحت اثر حرارت ناشی از فرآیند جوشکاری، اتصال دو لوله غیر هم جنس از جنس آلایژ آلومینیم ۵۰۵۲ و فولاد کربن S235JR نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۵- مقایسه تغییرات دما در نقطه اول نمونه A، نمونه B و نمونه C

روش بررسی						زمان (ثانیه)	ردیف
نمونه C		نمونه B		نمونه A			
عملی	شبه سازی	عملی	شبه سازی	عملی	شبه سازی		
۱۱۸	۱۲۸	۱۲۵	۱۲۸	۱۲۵	۱۲۸	۰-۱۰	۱
۲۸	۲۵	۲۹	۲۵	۲۶	۲۵	۱۰-۲۰	۲
۲۵	۲۶	۲۵	۲۶	۲۴	۲۶	۲۰-۳۰	۳
۲۳	۲۴	۲۳	۲۴	۲۴	۲۴	۳۰-۴۰	۴
۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۰	۲۲	۴۰-۵۰	۵

جدول ۶- مقایسه تغییرات دما در نقطه دوم نمونه A، نمونه B و نمونه C

روش بررسی						زمان (ثانیه)	ردیف
نمونه C		نمونه B		نمونه A			
عملی	شبه سازی	عملی	شبه سازی	عملی	شبه سازی		
۱۱۸	۱۲۸	۱۲۵	۱۲۸	۱۲۵	۱۲۸	۰-۱۰	۱
۲۸	۲۵	۲۹	۲۵	۲۶	۲۵	۱۰-۲۰	۲
۲۵	۲۶	۲۵	۲۶	۲۴	۲۶	۲۰-۳۰	۳
۲۳	۲۴	۲۳	۲۴	۲۴	۲۴	۳۰-۴۰	۴
۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۰	۲۲	۴۰-۵۰	۵

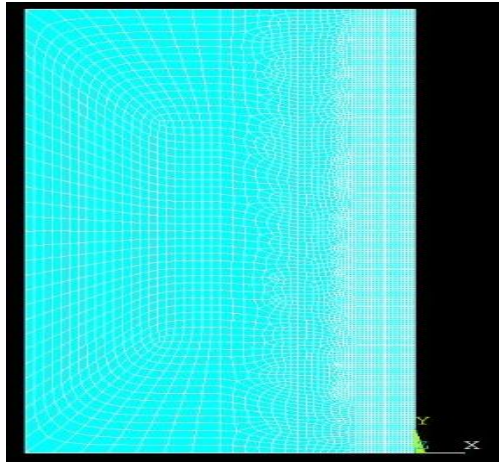
جدول ۷- مقایسه تغییرات دما در نقطه سوم نمونه A، نمونه B و نمونه C

روش بررسی						زمان (ثانیه)	ردیف
نمونه C		نمونه B		نمونه A			
عملی	شبه سازی	عملی	شبه سازی	عملی	شبه سازی		
۲۴	۲۵/۰۵	۲۳/۲	۲۵/۰۵	۲۵/۳	۲۵/۰۵	۰-۱۰	۱
۲۵/۵	۲۵/۱	۲۴/۷	۲۵/۱	۲۵/۵	۲۵/۱	۱۰-۲۰	۲
۲۷/۲	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۶/۴	۲۵/۵	۲۰-۳۰	۳
۲۹/۳	۲۵/۵	۲۵/۷	۲۵/۵	۲۸/۶	۲۵/۵	۳۰-۴۰	۴
۲۵/۵	۲۵	۲۴/۷	۲۵	۲۴	۲۵	۴۰-۵۰	۵

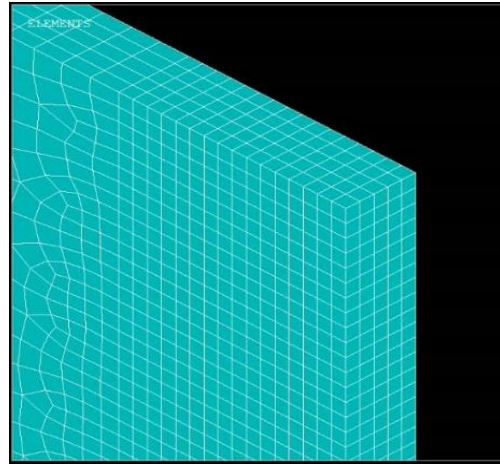
۳- بحث و نتایج

در این قسمت به بررسی رفتار اتصالات جوشی در شرایط کاری مختلف پرداخته خواهد شد. همان طور که بیان شد، در این قسمت رفتار یک جوش در اتصال دو ورق به روش عددی شبه سازی شده است و نتایج آن با مقادیر موجود مقایسه شده است. در گام بعدی حل مساله، شبکه مناسب بر روی ورق مطابق با شکل های ۷ و ۸ ایجاد شده است. همان طور که مشخص است در نواحی نزدیک به خط جوش به منظور افزایش دقت از شبکه های سازمان یافته و ریزتر استفاده شده است.

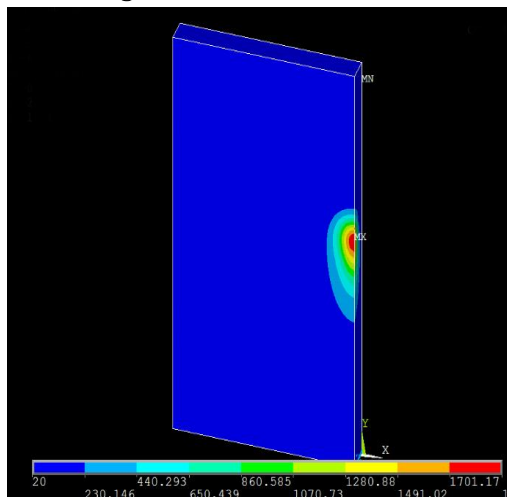
در شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱ نیز محل منبع حرارتی نشان داده شده است. همان طور که مشخص است طی شبه سازی انجام شده، حرکت منبع حرارتی از ابتدا تا انتهای مسیر به طور کامل در نظر گرفته شده است. همان طور که پیش تر گفته شد، به منظور اطمینان از صحت حل عددی انجام شده لازم است نتایج به دست آمده صحت سنجی شود. در شکل ۱۲ نمودار تغییرات دمایی به دست آمده از تحلیل عددی در نقطه ای از ورق با نتایج عملی به دست آمده مقایسه شده است. همانطور که مشخص است نتایج به دست آمده تحلیل عددی تطبیق بسیار مناسبی با نتایج عملی دارد که این امر نشان دهنده صحت و دقت مطلوب حل عددی انجام شده است. یکی از مراحل مهم دیگر که باید در تحلیل های عددی مد نظر قرار گیرد مطالعه شبکه بندی (مش بندی) است.



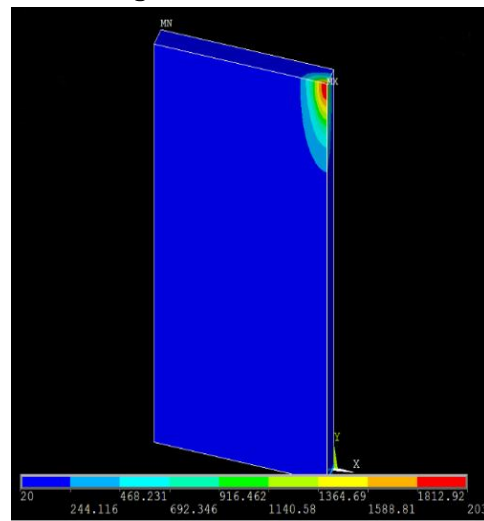
شکل ۸- نمای مقابل شبکه ایجاد شده بر سطح ورق



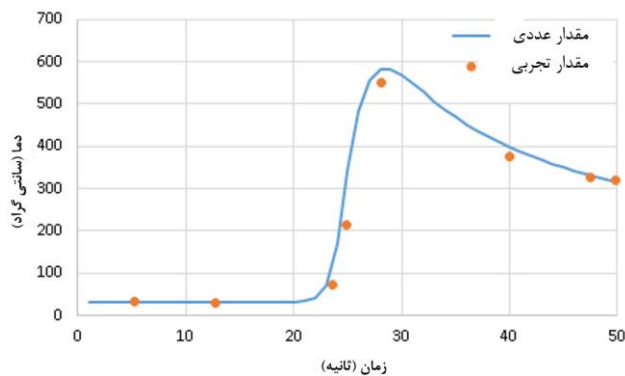
شکل ۷- نمای شبکه ایجاد شده بر سطح ورق



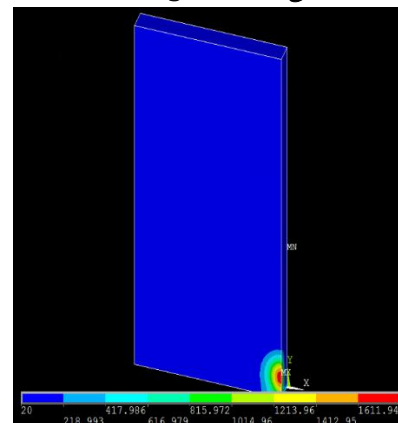
شکل ۱۰- توزیع حرارت در سطح ورق در زمان ۲۵ ثانیه



شکل ۹- توزیع حرارت در سطح ورق در زمان ۵ ثانیه

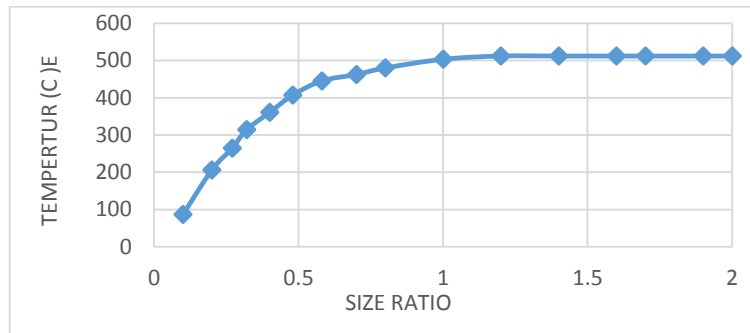


شکل ۱۲- مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل عددی با مقادیر عملی



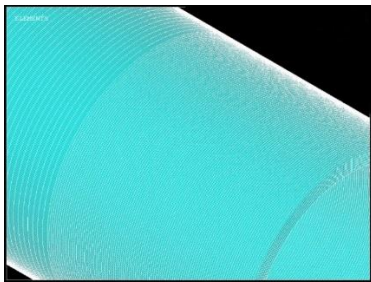
شکل ۱۱- توزیع حرارت در سطح ورق در زمان ۵۰ ثانیه

هدف از این تحلیل اطمینان از ریز بودن شبکه بندی به اندازه مناسب و همچنین بررسی استقلال نتایج از تعداد المان‌ها است. بدین منظور بیشینه دما در ورق مذکور به ازای اندازه المان‌های مختلف به دست آورده شد و نتایج آن در شکل ۱۳ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج به دست آمده در این بخش مشخص است، با ریزتر کردن اندازه‌های شبکه به نسبت ۱/۲ نتایج تقریباً تغییراتی را نشان نمی‌دهند که این امر همگرایی حل را نشان می‌دهد.

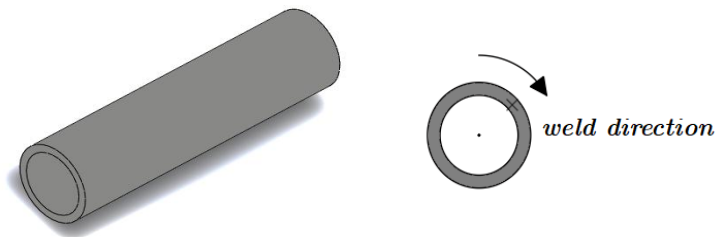


شکل ۱۳- بررسی اثر اندازه شبکه بر بیشینه دما

منبع برقی تامین کننده نیز یکی از این عوامل تاثیر گذار است. به منظور بررسی اثر جریان الکتریکی، لوله‌ای با ضخامت ۵، طول ۳۰۰ و شعاع ۶۰ میلی متر مطابق با شکل ۱۴ در نظر گرفته شده است و شبکه مناسب بر سطح آن مطابق با شکل ۱۵ ایجاد گردید.



شکل ۱۵- شبکه ایجاد شده بر سطح لوله



شکل ۱۴- نمای مدل لوله در نظر گرفته شده

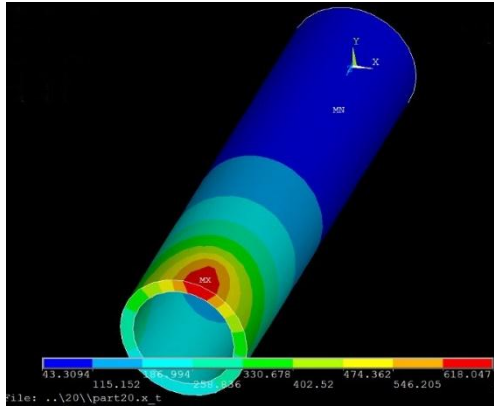
در ادامه سه جوش متفاوت بر سطح لوله مطابق با جدول ۶ شبیه سازی و مورد بررسی قرار گرفت. در این شبیه سازی تلاش شد تا توزیع دمایی در اطراف درز جوش تعیین شود که نتایج آن در شکل ۱۶ ارائه شده است.

جدول ۶- پارامترهای مدل سازی جوش در مدل لوله با جریان متغیر.

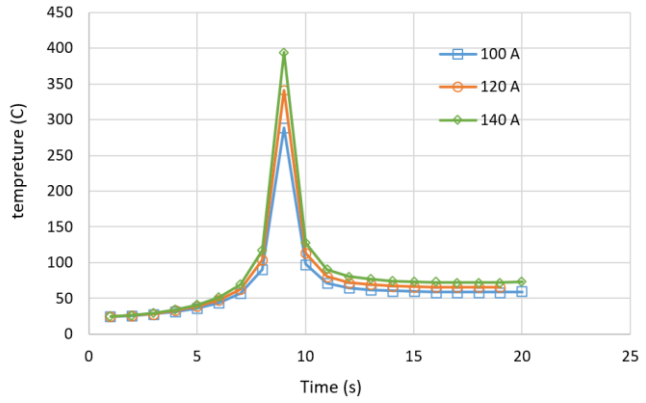
شماره جوش	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	سرعت (میلی متر بر ثانیه)	زمان جوشکاری (ثانیه)
۱	۱۲۰	۱۲	۱۱	۲۰
۲	۱۴۰	۱۲	۱۱	۲۰
۳	۱۶۰	۱۲	۱۱	۲۰

همان طور که در شکل ۱۶ مشخص است، افزایش توان منبع منجر به افزایش دمای بیشینه در نزدیکی درز جوش خواهد شد، به طوری که به ازای افزایش ۴۰ درصدی در جریان الکتریکی، تقریباً به میزان ۳۷ درصد افزایش بیشینه دما در مدل مشاهده شده است. این میزان از افزایش دما نقش تعیین کننده منبع تامین کننده در کیفیت و عملکرد جوش را نشان می دهد. افزایش دما می تواند منجر به افزایش تنش های پسماند در اتصال شود نیز شود.

در شکل های ۱۷ نیز توزیع دما بر سطح مدل نمایش داده شده است که همان طور که مشخص است دما در نزدیکی درز جوش نسبت به سایر نقاط بیشتر است. همچنین در این شکل ناحیه های ذوب، منطقه ذوب جزئی و ناحیه موثر از گرما به خوبی نشان داده شده است. همان طور که مشخص است در ناحیه ذوب دما به طور تقریبی تا ۶۲۰ درجه سانتی گراد افزایش یافته است.

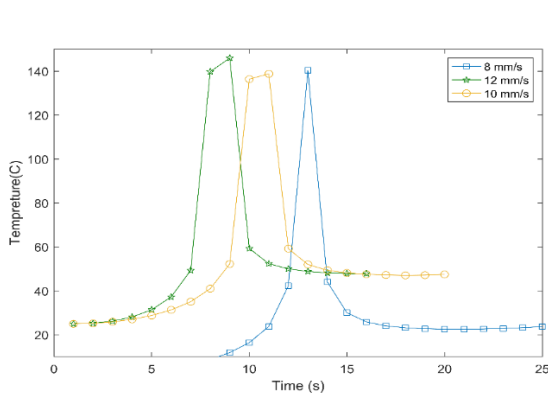


شکل ۱۷- توزیع دما بر سطح لوله در زمان ۳ ثانیه

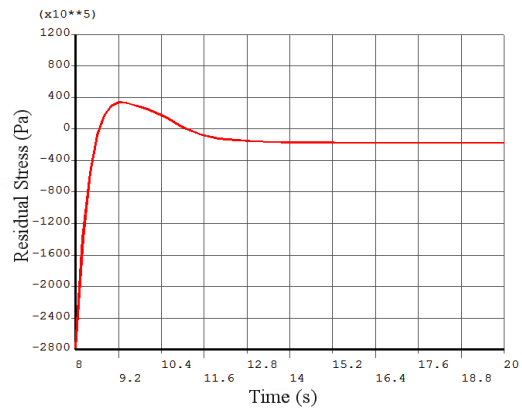


شکل ۱۶- تغییرات دما برای یک نقطه اطراف درز جوش با جریان متغیر

در شکل ۱۸ تغییرات تنش پسماند در اطراف درز جوش نشان داده شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش‌ها در ابتدا فشاری است اما با گذر زمان تنش‌ها کششی است و در فاصله مشخصی از درز جوش مقدار تنش به مقدار مشخصی خواهد رسید. در نهایت مقدار تنش پسماند به میزان تقریبی ۶۰ مگاپاسکال در حالت فشار رسیده است. این مقدار می‌تواند به میزان زیادی رفتار مکانیکی اتصال را تحت تاثیر قرار دهد و منجر به شکست اتصال در بارهای به مراتب کمتر از بارهای طراحی شود. همان‌طور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، با افزایش سرعت پیشروی زمان حل شبیه‌سازی کاهش یافته و همچنین بیشینه دما در محل افزایش یافته است. که این امر با توجه به افزایش سطح انرژی در زمان کوتاه‌تر قابل توجیه است.



شکل ۱۹- تغییرات دما برای یک نقطه اطراف درز جوش با سرعت متغیر



شکل ۱۸- مقادیر تنش پسماند در اطراف درز جوش

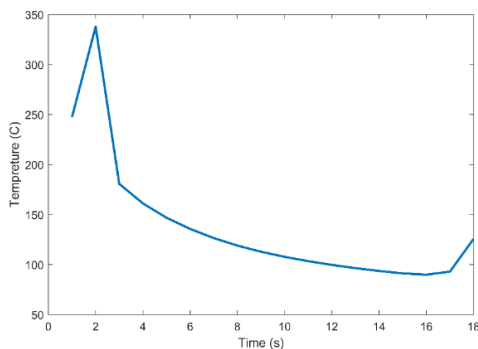
با توجه به این نتایج می‌توان گفت که علاوه بر شرایط منبع تامین کننده، نحوه اجرای جوشکاری نیز تاثیر بسزایی در عملکرد جوش خواهد داشت. لذا یکی از مسائل مهم در فرایند جوشکاری تعیین سرعت جوشکاری است چرا که این پارامتر می‌تواند نه تنها بر بیشینه دما اثر داشته باشد بلکه می‌تواند تنش‌های پس ماند در جوش را افزایش دهد. تغییرات بیشینه دما در یک نقطه در نزدیکی درز جوش به ازای سرعت پیشروی‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر در نظر گرفته شده در این حالت در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷- پارامترهای مدل سازی جوش در مدل لوله با سرعت متغیر

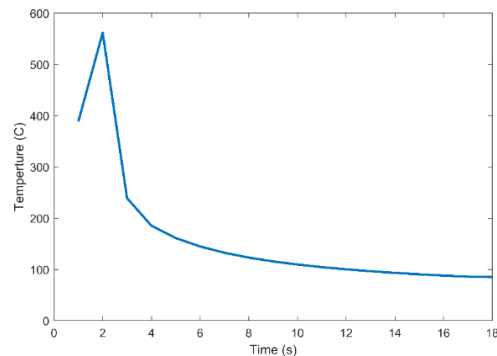
شماره جوش	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	سرعت (میلی‌متر بر ثانیه)	زمان جوشکاری (ثانیه)
۱	۱۶۰	۱۲	۸	۱۵
۲	۱۶۰	۱۲	۱۰	۱۹
۳	۱۶۰	۱۲	۱۲	۲۲

در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ دما در لوله‌های فولادی و آلومینیومی در بازه‌های زمانی مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج به دست آمده مشخص است بیشینه دما در لوله آلومینیومی به مراتب بیشتر از لوله فولادی است که این امر به دلیل بیشتر بودن ضریب هدایت حرارتی در آلومینیوم نسبت به فولاد است. بیشینه دما در ورق آلومینیومی تقریباً برابر با ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد است در

حالی که این مقدار در ورق فولادی برابر با ۳۴۵ درجه سانتی گراد است که این مقدار تقریباً ۴۰ درصد کمتر از بیشینه دما محاسبه شده برای فولاد است. این تفاوت دمای منجر به تفاوت در رفتار مکانیکی لوله نیز خواهد شد. به طور مثال کرنش‌های ناشی از این اختلاف دما در دو طرف لوله متفاوت خواهد بود و این امر لزوم در نظر گرفتن تنش‌های حرارتی در طراحی و نصب تکیه گاه‌ها را نشان می‌دهد.

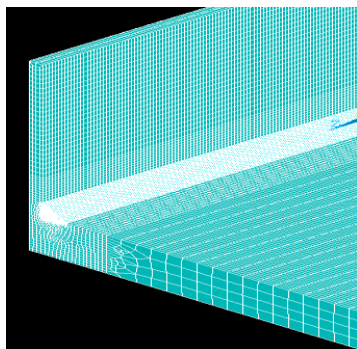


شکل ۲۱- تغییرات دما بر حسب زمان در لوله فولادی

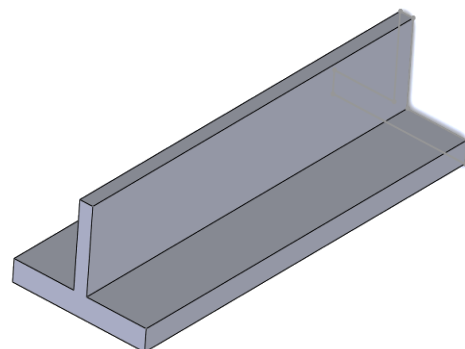


شکل ۲۰- تغییرات دما بر حسب زمان در لوله آلومینیومی

در ادامه شبیه سازی، رفتار یک اتصال T شکل مطابق با شکل ۲۲ مورد بررسی قرار گرفت. اتصالات T شکل به واسطه کارکرد وسیع و توانایی تحمل بار زیاد به میزان زیادی در صنایع مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند. شبکه مناسب بر روی مدل ایجاد گردید که در شکل ۲۳ نشان داده شده است و همان‌طور که مشخص است به منظور کاهش زمان حل و همچنین دقت محاسبات، تعداد المان‌ها در ناحیه خط جوش بسیار ریزتر انتخاب شده است. علاوه بر این به دلیل زیاد بودن گرادیان دما در این ناحیه افزایش تعداد المان‌ها منجر به افزایش دقت در محاسبات خواهد شد. توزیع دما در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با گذشت زمان، دما در کل سطح اتصال افزایش خواهد داشت که این امر می‌تواند منجر به تغییر شکل‌های دائم در اتصالات و ایجاد تنش‌های پسماند شود.

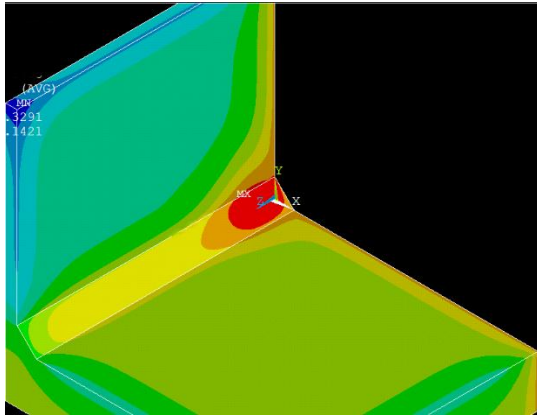


شکل ۲۳- نمای شبکه در اطراف درز جوش در اتصال T شکل

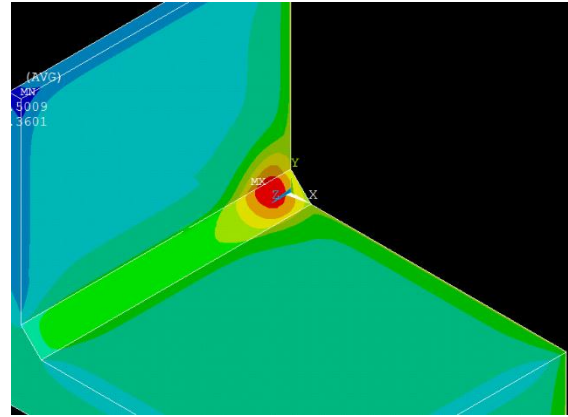


شکل ۲۲- نمای اتصال T شکل

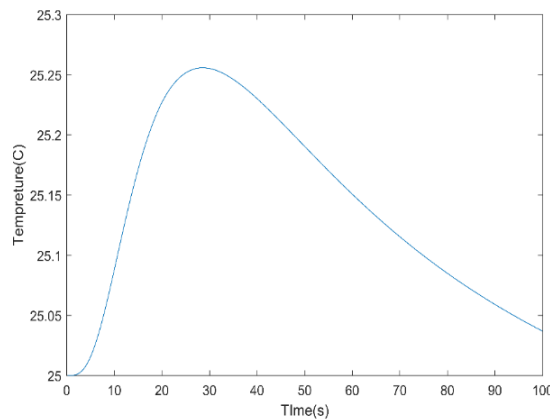
در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ کانتور توزیع دما در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با گذشت زمان، دما در کل سطح اتصال افزایش خواهد داشت که این امر می‌تواند منجر به تغییر شکل‌های دائم در اتصالات و ایجاد تنش‌های پسماند شود. در شکل‌های ۲۶ و ۲۷ نیز نمودار تغییرات دما در یک نقطه از محیط در زمان‌های مختلف نشان داده شده است.



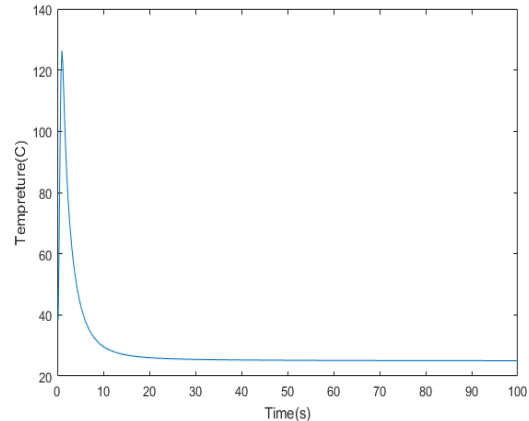
شکل ۲۵- توزیع دما در اتصال T شکل در زمان ۳۴ ثانیه



شکل ۲۴- توزیع دما در اتصال T شکل در زمان ۱۲ ثانیه



شکل ۲۷- تغییرات دما بر حسب زمان در نقطه B



شکل ۲۶- تغییرات دما بر حسب زمان در نقطه A

مطابق نمودار تغییر دمای نقطه A در شکل ۲۶، این نقطه با توجه به این که در فاصله کمتری از خط جوش (۱ سانتی متر) قرار گرفته است، بیشتر تحت تأثیر حرارت ناشی از فرآیند جوشکاری قرار گرفته و دمای آن تا ۱۲۸ درجه سانتی گراد افزایش یافته است. در حالی که در نمودار تغییر دمای نقطه B (شکل ۲۷)، این نقطه در فاصله بیشتری (۱۵ سانتی متر) از خط جوش قرار گرفته است و همان طور که مشخص است به مراتب کمتر تحت تأثیر حرارت ناشی از فرآیند جوشکاری قرار گرفته است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش فرآیند جوشکاری با لحاظ کردن اثر تنش حرارتی آن در اتصالات مختلف به روش عددی با استفاده از نرم افزار انسیس مورد بررسی قرار گرفت. در قدم نخست، با بررسی رفتار یک ورق فولادی صحت حل عددی انجام شده و همچنین تعداد شبکه لازم تعیین شد. در ادامه با مدل سازی جوش برای یک لوله نقش عوامل مختلف بر عملکرد جوش در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در پایان با توجه به نقش پررنگ اتصالات T شکل در صنایع مختلف، توزیع حرارت و رفتار آن مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج به دست آمده در این پژوهش به طور خلاصه به شرح زیر قابل ارائه است:

افزایش توان منبع منجر به افزایش دمای بیشینه در نزدیکی درز جوش خواهد شد، به ازای افزایش ۴۰ درصدی در جریان الکتریکی، تقریباً به میزان ۳۷ درصد بیشینه دما افزایش خواهد یافت.

تنش ها پسماند در اطراف لوله در ابتدا فشاری است اما با گذر زمان تنش ها کششی است و در فاصله مشخصی از درز جوش مقدار تنش به مقدار مشخصی خواهد رسید که این مقدار به میزان تقریبی ۶۰ مگا پاسکال و در حالت فشاری است.

با افزایش سرعت پیشروی بیشینه دما در محل افزایش یافته است. کاهش سرعت جوشکاری تأثیر چندانی بر کاهش تنش ها ندارد؛ علاوه بر آن سرعت جوشکاری از مقدار معینی نمی تواند پایین تر باشد.

در اتصال T شکل با توجه اجرای دو پاس جوش به طور هم‌زمان، سطح بیشتری از مدل تحت تأثیر حرارت ناشی از فرآیند جوشکاری قرار گرفته است.

۵- مراجع

۱. افسری احمد، ربیعی زاده امین، حیدری شاهین و صالحی یداله، (۱۳۹۹)، روش‌های تولید و کارگاه، انتشارات آوند اندیشه - شیراز.
2. Masubuchi, K. (2013). Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences (Vol. 33). Elsevier.
۳. صمدی محمدرضا، نوروزی‌فروشانی حسین، افشاری محمود، (۱۳۹۹)، فرآیندهای جوشکاری ذوبی، انتشارات کتاب شهر علم، جلد اول، تهران.
4. Seok, C. S., Suh, M. W., & Park, J. H. (1999). Investigation of welding residual stress of high tensile steel by finite element method and experiment. *KSME International Journal*, 13, 879-885.
5. Tschirner, P., Hillers, B., & Graser, A. (2002, October). A concept for the application of augmented reality in manual gas metal arc welding. In *Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (pp. 257-258). IEEE.
۶. چرخ‌مهران، و اکبری داود (۲۰۱۷). اثر هندسه لبه‌های اتصال بر تنش‌های پسماند در جوشکاری لوله‌های غیرهمجنس. *مهندسی مکانیک مدرس*, ۱۷(۷), ۳۰۷-۳۱۵.
۷. نخودچی سهیل، شکوه‌فر علی، صالح‌اکبری ایرج، رضازاده حسین. (۱۳۹۸). بررسی عددی و تجربی توزیع دما و تنش پسماند در فرآیند جوشکاری چند مرحله‌ای دو ورق از جنس فولاد زنگ‌نزن با ضخامت غیریکسان. *مهندسی مکانیک مدرس*, 14(9), 81-89.
8. Bellmann, J., Schettler, S., Schulze, S., Wagner, M., Standfuss, J., Zimmermann, M., ... & Leyens, C. (2021). Improving and monitoring the magnetic pulse welding process between dissimilar metals. *Welding in the World*, 65, 199-209.
9. Teng, T. L., Fung, C. P., Chang, P. H., & Yang, W. C. (2001). Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78(8), 523-538.
10. Perić, M., Tonković, Z., Rodić, A., Surjak, M., Garašić, I., Boras, I., & Švaić, S. (2014). Numerical analysis and experimental investigation of welding residual stresses and distortions in a T-joint fillet weld. *Materials & Design*, 53, 1052-1063.
11. Zhang, W., Kim, C. H., & DebRoy, T. (2004). Heat and fluid flow in complex joints during gas metal arc welding—part I: numerical model of fillet welding. *Journal of applied physics*, 95(9), 5210-5219.
۱۲. ربیعی زاده، امین، افسری، احمد، ارغوانی، و احمدی کیسی. (۲۰۱۶). اتصال همجنس و غیر همجنس آلیاژهای آلومینوم ۵۷۵۴ و ۶۰۶۳ به روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی. *فرآیندهای نوین در مهندسی مواد*, ۱۰(۲), ۸۵-۹۵.