

تأثیر حرارت ورودی جوشکاری بر اعوجاج ورق F5۹۲A- کلدینگ شده با فولاد زنگ نزن سوپر داپلکس SAF۲۵۰۷ بوسیله نرم افزار SYSWELD

عباس کریمی کیسمی^۱، فرزاد فردانی^۲

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گرایش مهندسی ساخت در صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

^۲ سازمان صنایع دریایی گروه صنایع شهید قربانی، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گرایش متالورژی شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان.

چکیده

از فلزات پرکاربرد در ساخت مخازن تحت فشار می توان به فولادهای کم کربن با استحکام بالا اشاره کرد. به دلیل شرایط به شدت خورنده این محیط ها، برای افزایش مقاومت به خوردگی و طول عمر قطعات، سطح داخلی مخازن را توسط فولادهای زنگ نزن روکش دهی می کنند. یکی از روش های رایج روکش دهی توسط جوشکاری کلدینگ می باشد. از مشکلات عمده این روش اعوجاج ایجاد شده در قطعات به علت تعداد پاس های زیاد جوش و توزیع غیریکنواخت دما در منطقه جوشکاری شده نسبت به اطراف می باشد. اهداف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی بین میزان حرارت ورودی جوشکاری با میزان اعوجاج و شکل حوضچه جوش می باشد. از چهار حرارت ورودی متفاوت (متغیر با سرعت پیشروی جوشکاری) برای انجام عملیات جوشکاری استفاده شده است. جوش ها بصورت سی و شش پاس جوش در قالب سه لایه دوازده تایی بر روی ورقه های فولاد F5۹۲A- اعمال شده اند. جنس فلز پرکننده نیز فولاد زنگ نزن سوپر داپلکس SAF۲۵۰۷ می باشد. با استفاده از نرم افزار المان محدود SYSWELD، نمونه های مذکور مورد تحلیل حرارتی و مکانیکی قرار گرفته و نتایج در نمونه های مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که حرارت ورودی جوشکاری نمونه-۱ و نمونه-۲ (بترتیب j/mm ۲۱۲۵ و ۲۴۲۸) کمترین میزان اعوجاج را موجب می شوند اما بدلیل نفوذ کامل تر و مناسب نمونه-۲ نسبت به نمونه-۱، حرارت ورودی ۲۴۲۸j/mm بهترین گزینه برای کلدینگ این ورق تشخیص داده شد. در انتها نیز روش هایی برای کاهش اعوجاج پیش و در حین جوشکاری معرفی شد که روش های ایجاد قوس در قطعه و خنک کاری موضع جوش حین جوشکاری مناسب برای تحقیق پیش رو، تشخیص داده شد.

واژه های کلیدی: اعوجاج، کلدینگ، GTAW، شبیه سازی، SYSWELD

۱. مقدمه

کلدینگ، نوعی فرآیند جوشکاری است که در آن پاس‌هایی از جوش بر سطح قطعه نشانده می‌شود که این عمل به منظور بهبود خواص سطح و افزایش مقاومت به خوردگی، مقاومت به خزش، مقاومت به دمای ورودی و مقاومت به ضربه اشاره انجام می‌گیرد که در مجموع باعث افزایش عمر قطعات می‌گردد [۱]. این روش در صنایع مختلفی از جمله صنایع دفاع، صنایع پتروشیمی، هوا فضا صنایع هسته‌ای، صنایع دفاعی، کاغذ سازی و غیره کاربرد فراوان دارد [۲]. کلدینگ با لایه گذاری فولاد زنگ‌نزن یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای محافظت مخازن در برابر محیط خورنده می‌باشد [۳]. فولاد زنگ‌نزن SAF ۲۵۰۷ به دلیل مقاومت خوب در برابر خوردگی و همچنین عملکرد مناسب در دماهای بالای ۵۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، یکی از پرکاربردترین فولادها در لایه نشانی مخازن تحت فشار می‌باشد. فولاد کوانچ-تمپر شده A۵۹۲-F نیز به علت استحکام بالا و ساختار کم کربن آن به صورت گسترده‌ای در ساخت بدنه مخازن تحت فشار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. یک از نگرانی‌های اصلی در روش کلدینگ، تنش پسماند ایجاد شده در اثر انجام آن می‌باشد [۵]. توزیع دمای غیر یکنواخت در جریان جوشکاری قطعه سبب تولید یک سری اعوجاج از جمله اعوجاج کمانشی می‌گردد. اعوجاج مذکور نوعی تغییر شکل خارج از صفحه است که می‌تواند دقت ابعادی را کاهش دهد و باعث ناپایداری سازه خصوصاً در ورق‌ها گردد [۶]. حرارت متمرکز جوشکاری باعث افزایش حجم موضعی در قطعه کار می‌گردد اما از آنجایی که مناطق اطراف این موضع دمای پایین‌تری دارند از انبساط آن جلوگیری کرده و بنابراین ماده در این قسمت متورم می‌شود. چون دما در سطحی که تحت قوس گرم شده از سطح مخالف بالاتر است بنابراین حین سرد شدن، این سطح انقباض بیشتری را تجربه می‌کند که منجر به اعوجاج زاویه‌ای می‌گردد [۷]. اعوجاج خمشی طولی نیز به دلایل مشابه اعوجاج زاویه‌ای و به دلیل تفاوت میزان تنش کششی در یک سطح تحت جوشکاری نسبت به سطح مخالف آن، اتفاق می‌افتد [۸].

از آنجایی که روش‌های کاهش تنش پسماند جوشکاری هزینه بر هستند بهترین راه برای کاهش این تنش‌ها استفاده از پارامترهای بهینه جوشکاری می‌باشد. در این پژوهش سعی شده با بررسی چهار حرارت ورودی جوشکاری متفاوت، که متغیر با سرعت جوشکاری محاسبه شده‌اند، بهترین دمای ورودی برای انجام فرآیند کلدینگ برحسب کمترین اعوجاج و مناسب ترین شکل حوضچه مذاب انتخاب گردد. به دلیل دخیل بودن پارامترهای متعدد در جوشکاری روش تحلیل عددی، جایگزینی مناسب برای آزمایشات تجربی می‌باشد که در آن واحد، متغیرهای گوناگونی را در فرآیند شبیه سازی لحاظ می‌کند. در مطالعه حاضر از نرم افزار تخصصی در زمینه تحلیل فرآیند جوشکاری SYSWELD استفاده شده است. تحلیل‌ها به صورت مکانیکی و حرارتی انجام گردید و نتایج نمونه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مواد مصرفی و روش تحقیق

در این بخش ابتدا مواد مورد استفاده در تحقیق آورده شده است، سپس نوع فرآیند جوشکاری، شرایط قید گذاری و نمونه‌های حرارتی معرفی می‌گردد. در انتها هم مدل منبع حرارتی مورد استفاده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲. فلز پایه و الکتروود مصرفی

در این پژوهش از ورق فولاد کم کربن کوانچ-تمپر شده A۵۹۲-F به طول ۳۰۰، عرض ۲۲۰ و ضخامت ۳۰ میلی‌متر به عنوان فلز پایه مورد استفاده قرار گرفت. از الکتروود ER۲۵۹۴ نیز برای کلدینگ سطح فلز پایه استفاده شده است. در جدول ۱ و ۲ مشخصات شیمیایی و مکانیکی فلز پایه و فیلر آورده شده است.

جدول ۱- خواص شیمیایی A۵۹۲-F و ER۲۴۹۴ [۹] [۱۰]

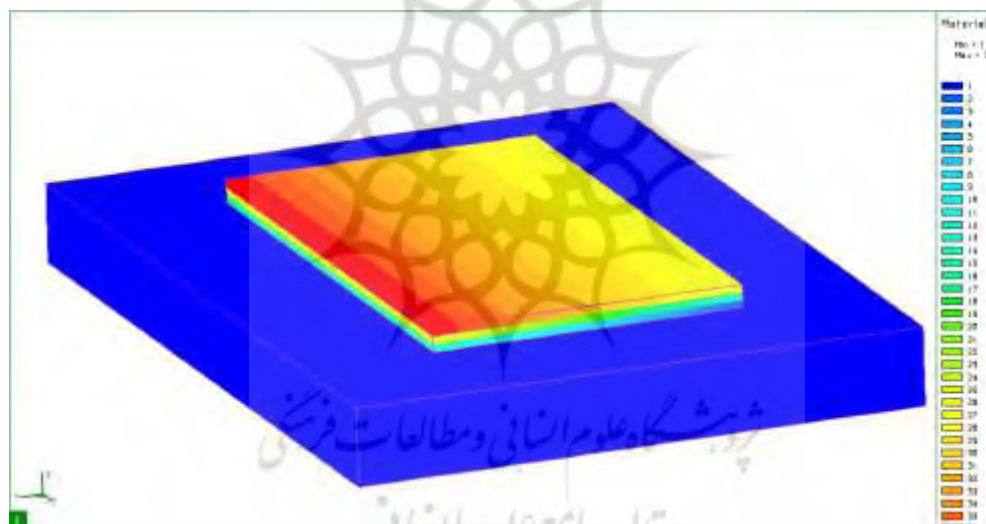
Fe	S	P	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	C	
بقیه	۰,۰۴	۰,۰۳۵	۰,۱۵- ۰,۳۵	۰,۶-۱,۰	۰,۴-۰,۶	۰,۷-۱,۰	۰,۴- ۰,۶۵	۰,۱-۰,۲	A۵۹۲-F
بقیه	۰,۰۲	۰,۰۳	۱,۰	۲,۵	۲,۵-۴,۵	۸,۰- ۱۰,۵	۲۴,۰- ۰,۲۷	۰,۰۳	ER۲۴۹۴

جدول ۲- خواص فیزیکی A۵۹۲-F و ER۲۴۹۴ [۹] [۱۰]

Elongation (%)	مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	
۱۶	۲۰۰	۶۹۰	A۵۹۲-F
۲۵≤		۶۵۰≤	ER۲۴۹۴

۲-۲. شرایط جوشکاری و مدل سازی

نمونه های مورد بررسی به صورت سه لایه جوشکاری که هر لایه شامل دوازده خط جوش است، در راستای طول جوشکاری شدند (شکل ۱). جوشکاری توسط فرآیند GTAW و با گاز محافظ آرگون و با قطبیت منفی (DCEN) انجام گرفته و از فلز پرکننده با قطر ۲,۴ میلیمتر استفاده شده است. شبیه سازی در چهار حرارت ورودی متفاوت (با تغییر سرعت جوشکاری) و با متغیرهای ذکر شده در جدول ۳ انجام شد.

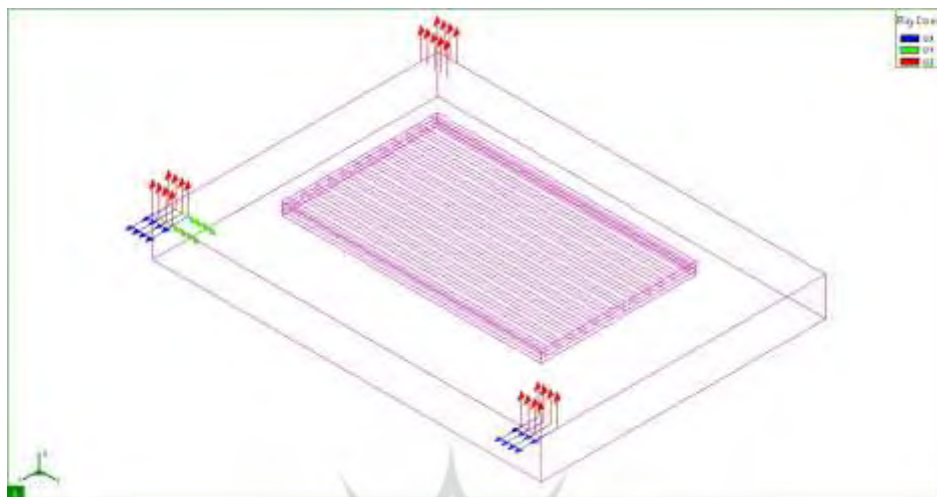


شکل ۱- مدل سازی انجام شده توسط نرم افزار SYSWELD و نحوه لایه گذاری

جدول ۳- نمونه های حرارتی مورد بررسی

مدل ها	فرآیند	ولتاژ (V)	جریان جوشکاری (A)	سرعت جوشکاری (mm/s)	حرارت ورودی (j/mm)	تعداد پاس
نمونه ۱- نمونه ۲- نمونه ۳- نمونه ۴-	GTAW	۱۷	۲۰۰	۱,۶	۲۱۲۵	۳۶
۱,۵				۲۲۶۶		
۱,۳				۲۶۱۵		
۱				۳۴۰۰		

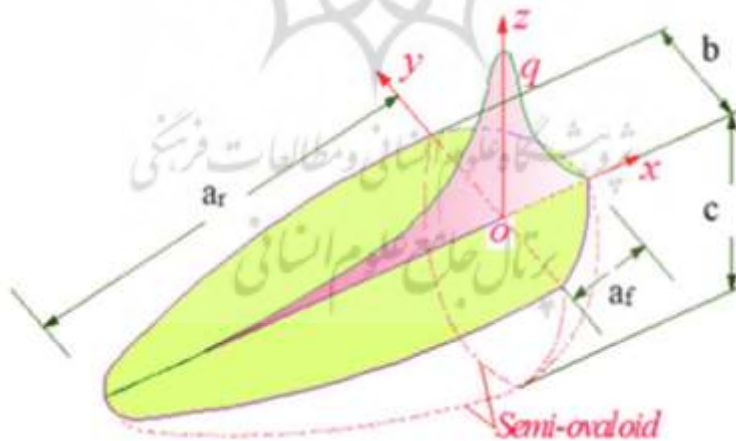
در شکل ۲ نحوه قید گذاری مدل نشان داده شده است. اگرچه این نوع قید گذاری بهترین نتیجه را برای کاهش اعوجاج نمی دهد اما بهترین مدل برای نمایش مقادیر اعوجاج می باشد. از آنجایی که محور اصلی این تحقیق دستیابی به اعوجاج ناشی از جوشکاری می باشد، بنابراین این کافی است که حرکت آزاد مدل محدود شود. این نوع قید گذاری را که از نظر استاتیکی معین می باشد و تنها از حرکت آزاد قطعه جلوگیری می کند، مدل بدون مهار^۱ می گویند.



شکل ۲- نحوه قید گذاری قطعه

۳-۲. مدل منبع حرارتی

مدل منبع حرارتی استفاده شده برای این شبیه سازی، مدل توزیع چگالی توانی دو بیضوی گلدک می باشد (شکل ۳)، که معادلات آن بصورت زیر می باشد:



شکل ۳- مدل منبع حرارتی استفاده شده در تحلیل ها [۱۱]

$$Q(x, y, z) = Q_f \exp\left(-\left(\frac{x^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right) \quad (1)$$

^۱ Unclamping

$$Q(x, y, z) = Q_r \exp\left(-\left(\frac{x^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right) \quad (2)$$

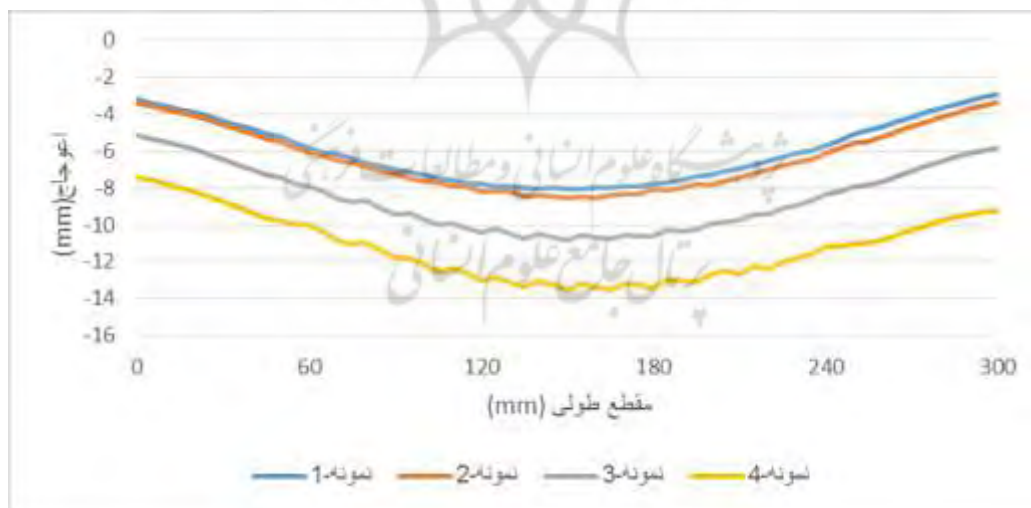
که Q_r و Q_f به ترتیب بیشترین مقدار چگالی انرژی در جلو و عقب مدل منبع حرارتی می باشد. a_r ، a_f ، b و c پارامترهای وابسته به تغییر شکل منبع حرارتی هستند [۱۲]. از مزایای نرم افزار SYSWELD مدل های تعریف شده منبع حرارتی بصورت پیش فرض در نرم افزار می باشد که با انتخاب روش جوشکاری و ورود متغیرهای جوشکاری محاسبات و مدل سازی منبع حرارتی را خود انجام می دهد و دیگر نیازی به کدنویسی های پیچیده مدل حرارتی ندارد.

۳. نتایج و بحث و بررسی

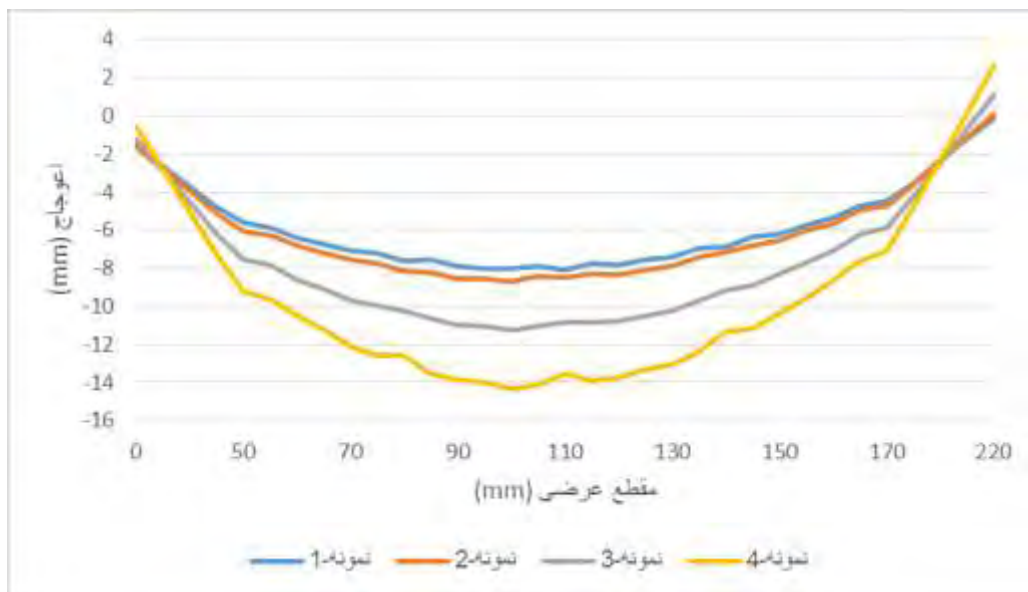
بعد از تکمیل تمامی موارد مورد تحلیل، نتایج بدست آمده از نمونه های مختلف با یکدیگر مقایسه و مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه مطلب به آن اشاره می شود.

۳-۱. تاثیر حرارت ورودی بر میزان اعوجاج

در نمودار ۱ و ۲ تاثیر حرارت ورودی مدل های مختلف بر میزان اعوجاج ناشی از کلدینگ در موضع میانی جوشکاری بترتیب در امتداد طول و عرض نمونه ارائه گردید. با توجه به نمودارها مشخص است که بیشترین میزان اعوجاج در مقطع میانی محل جوشکاری می باشد و این مقدار متناسب با افزایش میزان حرارت ورودی در نمونه های مختلف افزایش می یابد. از سوی دیگر علت افزایش شدید اعوجاج در مقطع میانی را ضخامت زیاد قطعه دانست که باعث توزیع و کاهش سریع دمای قطعه میگردد و این باعث می شود که تنش های پسماند بصورت موضعی در محل جوش افزایش یابد و اعوجاج در محل جوشکاری افزایش بیشتری داشته باشد.



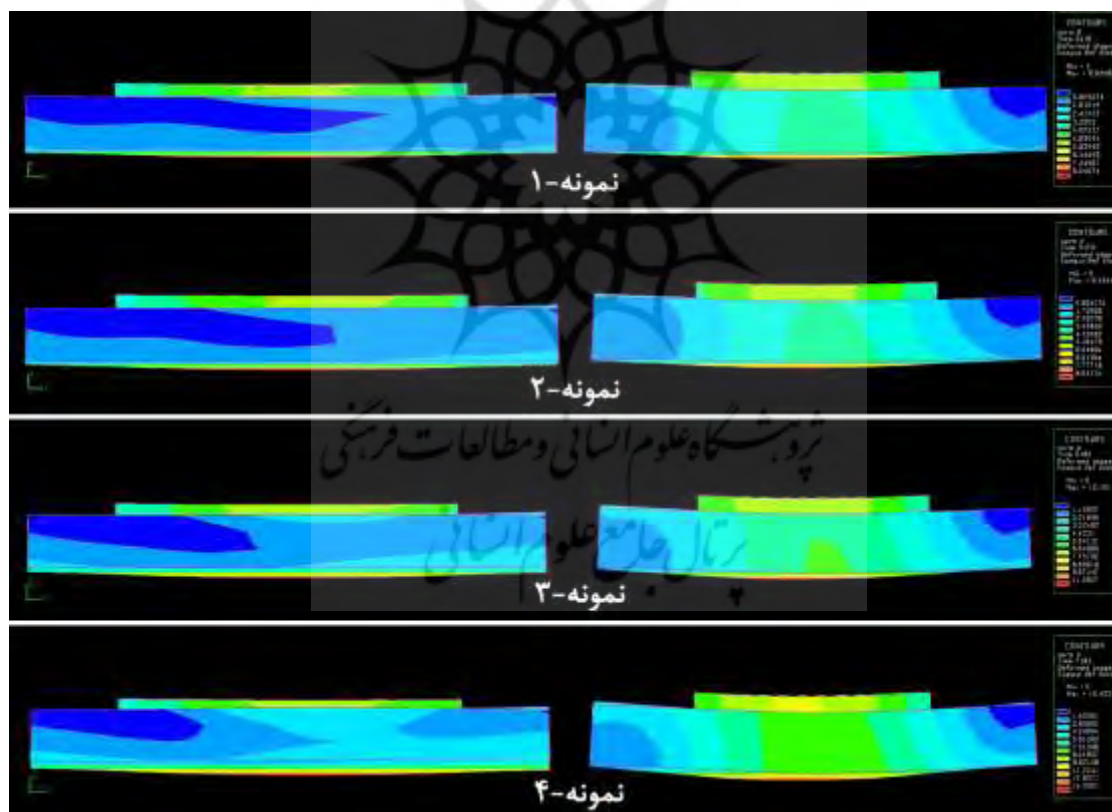
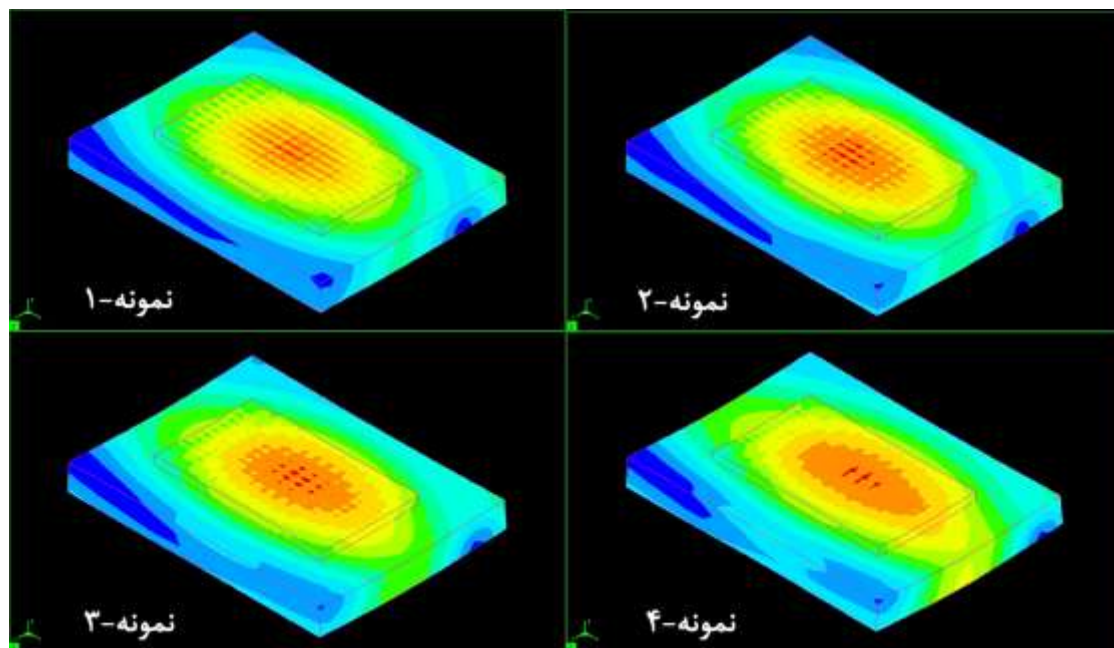
نمودار ۱- میزان اعوجاج در امتداد طول قطعه در مقطع میانی



نمودار ۲- میزان اعوجاج در امتداد عرض قطعه در مقطع میانی

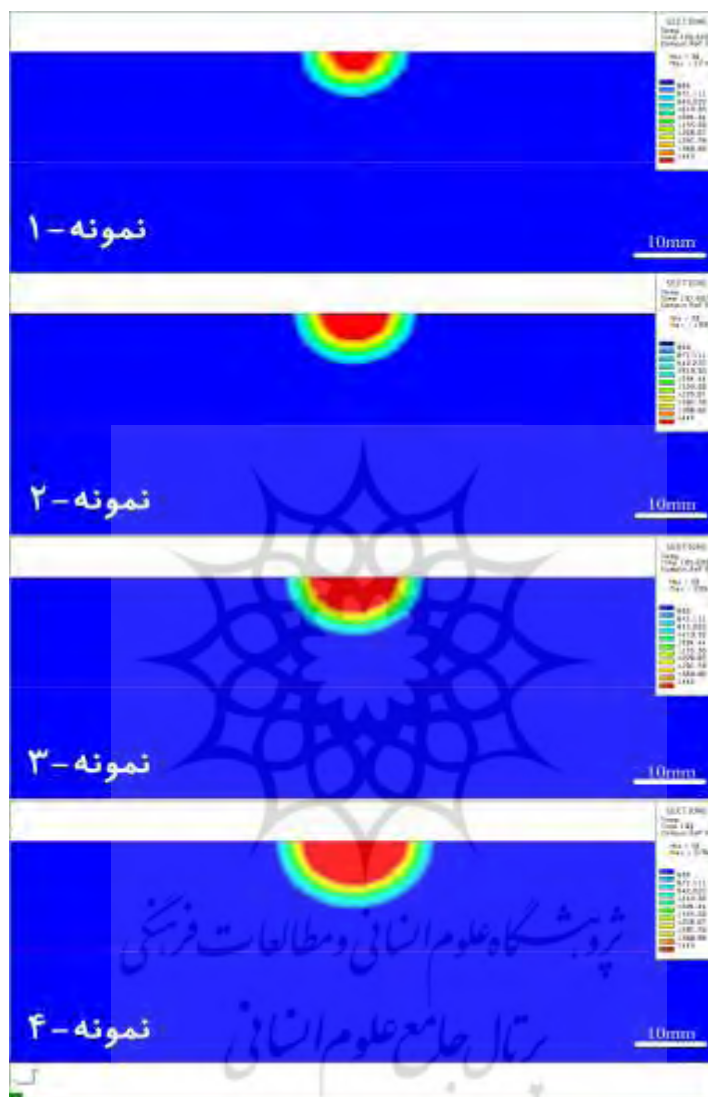
از طرفی اعوجاج تولید شده در کار حاضر به اعوجاج خمشی تولید شده در جوش های اتصالی بی تشبیه نیست. این اعوجاج به دلایل مشابه اعوجاج زاویه ای اتفاق می افتد که حاصل برآیند تنش ها در سطح بالایی نسبت به سطح پایینی ورق است. از آنجایی که توزیع دمایی غیر یکسان در ضخامت باعث توزیع تنش غیر یکسان می گردد، می تواند باعث حرکت قطعه بصورت خمش، در جهت طولی گردد. دلیل دیگر تولید اعوجاج خمشی می تواند قرار گرفتن خط جوش، خارج از محور خنصی در اتصالات باشد که در اینجا نیز بی تشابه به شرایط جوشکاری در روش لایه نشانی نیست [۱۳]. از آنجایی که تغییر شکل در قطعات جوشکاری حاصل از دو عامل اعوجاج زاویه ای و توزیع تنش پسماند در ضخامت ورق است. در فرآیند حاضر، اعوجاج زاویه ای به حرارت ورودی و ضخامت ورق حساسیت دارد در حالی که نیروی انقباضی طولی (تنش کششی در سطح رویی ورق)، اصولاً با میزالن حرارت ورودی مرتبط است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که اعوجاج تولید شده به هردو اعوجاج شبیه است و تلفیقی از آنها می باشد [۱۴].

برای درک بهتر اعوجاج خمشی طولی و اعوجاج زاویه ای ایجاد شده در نمونه ها، شمایی از توزیع اعوجاج پس از اتمام فرآیند کلدینگ در کل قطعه (شکل ۴) و مقاطع طولی و عرضی قطعه (شکل ۵) نشان داده شده است. همانطور که از اطلاعات نمودارها نتیجه شد، در این اشکال نیز مقادیر بیشتر اعوجاج در منطقه کلدینگ شده مشخص است.



۳-۲. تاثیر حرارت ورودی بر میزان نفوذ جوش و منطقه متأثر از حرارت

از نتایج قسمت قبل این نتیجه حاصل شد که هرچه دما ورودی فرآیند جوشکاری کمتر باشد در نتیجه شاهد اعوجاج کمتری در قطعه کار خواهیم بود، اما حرارت ورودی باید به اندازه‌ای باشد تا پاس جوش اعمال شده نفوذ مناسبی در قطعه کار داشته باشد تا اتصال مناسبی با قطعه کار ایجاد کند. در شکل ۳ اندازه حوضچه جوش و منطقه متاثر از حرارت برای چهار نمونه مورد بررسی، نشان داده شده است.



شکل ۶- نمایی از ناحیه مذاب جوشکاری و منطقه متاثر از حرارت

همانطور که از اشکال مشخص است با افزایش حرارت ورودی اندازه حوضچه مذاب افزایش می‌یابد. عرض پاس جوش در فرآیند شبیه سازی ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است بنابراین نزدیک‌ترین پهنای حوضچه مذاب به عرض پاس جوش بهترین اتصال را ایجاد می‌کند و آسیب کمتری به پاس‌های مجاور می‌رساند. با توجه به شکل، پهنای حوضچه مذاب برای نمونه‌های ۱ تا ۴ به ترتیب ۷، ۵، ۱۱، ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر می‌باشد. در نمونه-۱ ابعاد حوضچه مذاب بسیار کوچک است و اتصال ناقص و بی‌کیفیتی را حاصل می‌کند. در نمونه-۳ و نمونه-۴ نیز پهنای زیاد حوضچه مذاب باعث آسیب به قطعه و پاس‌های جوش جانبی می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که یکی از دلایل اعوجاج زیاد در دو نمونه آخر ذوب بیش از حد فلز پایه در

هنگام جوشکاری می باشد. با توجه به موارد ذکر شده بهترین نمونه از لحاظ ابعاد حوضچه مذاب و منطقه متاثر از حرارت نمونه-۲ می باشد.

۳-۳. راه کار های پیشگیری از اعوجاج

هدف این پژوهش بررسی تاثیر حرارت ورودی بر میزان اعوجاج در قطعات کلدینگ شده است که با توجه به نتایج بدست آمده بهترین میزان حرارت ورودی بر اساس سرعت جوشکاری مشخص گردید. با این حال برای دستیابی به کمترین میزان اعوجاج عوامل دیگری نیز دخیل هستند که بررسی مفصل آن ها خارج از بحث مقاله می باشد با این حال سعی شده مختصراً این عوامل عنوان شوند. روش های پیشگیری از اعوجاج به دو دسته پیش از جوشکاری، و در هنگام جوشکاری دسته بندی می شوند که در ادامه عنوان می شوند.

۳-۳-۱. روش های پیشگیری از اعوجاج پیش از جوشکاری

یکی از راه های کاهش اعوجاج ایجاد قوس در سمت مخالف محل جوشکاری می باشد. اینکار باعث ایجاد تنش پسماند در سمت مخالف محل جوشکاری می شود که به آرامی با نشان دادن پاس های جوش از میزان آن کاسته می شود و به حال اولیه بر می گردد [۱۵]. روش دیگر نحوه قید گذاری می باشد که با افزایش زمان قید گذاری و افزایش نیروی اعمالی توسط قیدها اعوجاج کاهش می یابد ولی خود می تواند باعث پیچش قطعه شود، بنابراین باید تناسب مناسبی برای زمان قید گذاری و نیروی اعمالی انتخاب نمود [۱۶].

۳-۳-۲. روش های پیشگیری از اعوجاج در هنگام از جوشکاری

روش های مختلف گرمایش قطعه حین جوشکاری از روش های کاهش اعوجاج در قطعه می باشد. با این وجود بر اساس گفته های استاندارد A592-F برای این قطعه گرمایش حین جوشکاری و قبل از آن نباید انجام شود. روش دیگر استفاده از خنک کاری در حین جوش می باشد که بصورت نازلی با فاصله کمی در پشت منبع جوش حرکت می کند و با جریان آب سرد موجب کاهش سریع دمای منطقه جوشکاری می شود [۱۷]. البته سرمایش سریع منطقه مذاب بر روی ساختار کریستالوگرافی منطقه مذاب تاثیر گذاشته که با توجه به هدف کلدینگ، باید استفاده از این روش در نظر گرفته شود. ترتیب پاس ها در جوشکاری روشی موثر و کم هزینه می باشد. بر اساس تحقیقات آقای زرگر، بهترین ترتیب جوشکاری از میانه قطعه به سمت انتهای آن می باشد که کمترین اعوجاج زاویه ای را نسبت به توالی های دیگر می دهد [۱۸].

روش های زیادی برای پیشگیری از اعوجاج در جوشکاری وجود دارد اما انتخاب هر کدام بسته به مشخصات قطعه، نوع فرآیند جوشکاری و محدودیت های موجود می باشد. به عنوان مثال برای پژوهش حاضر ایجاد قوس در قطعه و استفاده از ترتیب جوشکاری مناسب راه کارهایی مناسب رای کاهش اعوجاج می باشند.

۴. نتیجه گیری

۱- با افزایش حرارت ورودی جوشکاری، میزان اعوجاج تولید شده در ورق های لایه نشانی شده به مانند اتصالات جوش معمولی، افزایش می یابد.

۲- به دلیل ضخامت زیاد اکثر ورق هایی که لایه نشانی می شوند، سرعت کاهش دمای قطعه زیاد می باشد و تنش های پسماند در سطح قطعه تجمع بیشتری دارند. استفاده از روش سرمایش محل جوش در حین جوشکاری برای کاهش

اعوجاج در این مورد مناسب می باشد. اگرچه با توجه به تاثیر کاهش سریع دما بر ساختار کریستالوگرافی، با توجه محل مورد استفاده این قطعه روش مذکور می تواند اثرات خوب یا بدی داشته باشد.

۳- در کنار استفاده از دمای ورودی کمتر برای کاهش تنش پسماند، باید به نفوذ مناسب پاس جوش در قطعه کار توجه داشت. هرچه عرض حوضچه مذاب بیشتر باشد، اعوجاج بیشتری را شاهد خواهیم بود.

۴- بر اساس اطلاعات بدست آمده از تحلیل نمونه ها، دو نمونه ۱ و ۲ کمترین میزان اعوجاج حاصله را در بین نمونه ها داشتند. با توجه به حوضچه جوش بدست آمده از این دو نمونه مشخص گردید که نفوذ نمونه ۲ بصورت کامل تری انجام شده است زیرا نفوذ ناقص و سطحی علاوه بر اتصال نامناسب خود باعث افزایش اعوجاج در قطعه کار می شود. بر این اساس مناسب ترین دمای ورودی 2428 kJ/mm در نظر گرفته شد که با سرعت پیشروی جوشکاری $2,2 \text{ mm/s}$ بدست می آمد.

۵- با توجه به اینکه نمونه ۲ بهترین گزینه انتخاب شد، با این حال برای عملی شدن این لایه نشانی باید اعوجاج به نزدیکی صفر برسد به این منظور راه کارهایی برای کاهش اعوجاج قبل و در حین جوشکاری معرفی شد که از روش های مناسب برای این پژوهش ایجاد قوس اولیه در قطعه و روش سرمایه گذاری موضعی در حین جوشکاری اشاره نمود.

۶- در صورتیکه شرایط جوشکاری و مشخصات منبع حرارتی برای نرم افزار SYSWELD به درستی تعریف شود، می تواند به عنوان یک نرم افزار تخصصی شبیه سازی فرآیند جوشکاری جایگزین مناسبی برای نرم افزارهای تحلیل گر مشابه باشد.

۵. مراجع

- Pradeep GR, Ramesh A and Durga Prasad B.(۲۰۱۰), "A review paper on hardfacing processes and materials", International Journal of Engineering Science and Technology. ۲(۱۱): ۶۵۰۷-۱۰.
- هارونی، م. شمعانیان، م. (۱۳۸۷)، " بررسی ریزساختاری پوشش NiNi, NiNi-TiC ایجاد شده با روش GTAW"، نهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، ۱-۲ آبان.
- Katsuyama J, Udagawa M and Nishigawa H.(۲۰۱۰), "Evaluation of weld residual stress near the cladding and j-weld in reactor pressure vessel head for the assessment of PWSCC behavior", E-journal of advanced maintenance Vol۲, japan safety research center,japan, ۵۰-۶۴.
- Pezeshkian R.M, Shafaiepour S.(۲۰۱۵), "Heat input effects on microstructure quenched and tempered steel ASTM A۵۱۷ to stainless steel AISI ۳۱۶L", Journal of Welding and Joining Vol. ۳۳, No. ۱.
- Navid N, Hosseinzadeh F, Kowal J.(۲۰۱۳), "residual stress measurement in a stanless steel clad ferritic plate using the cantour method", Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, July ۱۴-۱۸, Paris, France.
- Deng D, Zhou Y, Bi T, Liu X.(۳۱۱۳) "Experimental and numerical investigations of welding distortion induced by CO₂ gas arc welding in thin-plate bead-on joints". Materials & Design., ۳۱:۵۲:۷۲۰-۹.
- Farhat HA.(۲۰۰۷), "Effects of multiple wires and welding speed on the microstructures and properties of submerged arc welded X۸۰ steel". University of Saskatchewan.
- Radaj D.(۲۱۱۲), "Heat effects of welding: temperature field, residual stress, distortion". Scholarly article for Springer Science & Business Media; Dec ۶.

۹. American Welding Society.(۱۹۹۲),“AWS A۵,۹: Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods”, December ۳۳.
۱۰. ASTM International.(۲۱۱۸),“ASTM A۵۹۲F: Standard Specification for High-Strength Quenched and Tempered Low-Alloy Steel Forged Parts for Pressure Vessels”, May ۲۵.
۱۱. سالاری ج.(۱۳۹۷),“تأثیر پیشگرم و پسگرم بر تنشهای پسماند و اعوجاج در جوش سبونی فولادی”. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، آبان ماه.
۱۲. Gietka T, Ciechacki K, Kik T.(۲۱۱۶),” Numerical simulation of duplex steel multipass welding”. Arch. Metall. Mater., Vol. ۶۱, No ۴, p.
۱۳. جورابباف، .. (۱۳۹۵). “تحلیل اعوجاج و ارزیابی سبختار میکروسکوپی . قهای فولاد . باده کربنی روکشکاری شده به روش جوشکاری GMAW”. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، شهریورماه.
۱۴. Hirai S, Nakamura I.(۱۹۹۵),” Research on angular change in fillet welds. Ishikawajima Review”. Apr; ۵۹(۶۸).
۱۵. Feng Z.(۲۰۰۵),”Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Mechanism”, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge , pp ۲۸۲-۲۸۴.
۱۶. Shenk T, Richardson I.M, Kraska M, Ohnimus S.(۲۰۰۹),”Influence of clamping on distortion of welded S۳۰۵ T-joints”, Journal of Sci.Tech.Welding and joining, ۳۶۹-۳۷۳.
۱۷. Li J, Guan Q, W.Shi Y, Guo D.L.(۲۰۰۴),“Stress and distortion mitigation technique for welding titanium alloy thin sheet”, Journal Sci.Tech.Welding and joining. ۴۵۱-۴۸۸.
۱۸. Zargar S.H, Farahani M, Kazem M, Givi B.(۲۱۱۶),” Numerical and experimental investigation on the effects of submerged arc welding sequence on the residual distortion of the fillet welded plates”, Journal of Engineering Manufacture. ۳۳۰ ۶۵۴-۶۶۱.