

تحلیل حرارتی و مکانیکی جوشو راه های کاهش تنش های پسماند ناشی از جوشکاری

فرزاد شهابیان^۱، مسلم مصباح^۲

چکیده

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. در این مقاله با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ANSYS و انجام تحلیل حرارتی و مکانیکی جوش، تاثیر بعضی از پارامترها در جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه محاسبات انجام شده نشان می دهد که کم کردن سرعت جوشکاری در کاهش تنش های پسماند تاثیر چندانی ندارد، اما پیش گرمایش می تواند باعث کاهش تنش ها به میزان بیش از ۲۰ درصد گردد. رعایت ترتیب مناسب در اجزای لایه های جوشکاری نیز می تواند تا ۲۵ درصد مقادیر تنش ها را کاهش دهد.

واژه های کلیدی

تنش های پسماند جوشکاری، تغییر شکل های پسماند جوشکاری، تحلیل حرارتی جوش، تحلیل مکانیکی جوش.

Thermal and Mechanical Welding Analysis and Decreasing Methods of Welding Residual Stresses

F. Shahabiyan; M. Mesbah

ABSTRACT

In welding process, stresses after cooling, which remain in body, are called residual stresses. Sometimes, the magnitude of stresses is high and reduces the strength of welded pieces, moreover, they cause crack in the weld. To predict welding residual stresses, it is necessary to do thermal and mechanical analysis.

In this paper, some parameters which influence the welding using ANSYS software are investigated. Results show that even by decreasing the travel speed of torch, it makes no differences in the amount of residual stresses, but preheating causes decreasing the produced stresses about 22 percentages. Suitable welding sequences also, decreases residual stresses up to 25 percentages.

KEYWORDS

Welding Residual Stresses, Welding Residual Distortions, Thermal and Mechanical Welding Analysis

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد: fshahabianm@yahoo.com

^۲ کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.



این تحقیق یک جوش دایره‌ای به روی یک دیسک متقارن مدل شده بود. نتایج بدست آمده از مدل حرارتی، تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های تجربی نداشت و از میان نتایج تنش، فقط مقدار تنش بیشینه با مقادیر آزمایشگاهی همخوانی داشت [۲]. دیگر مور [۳]، حساسیت نتایج حاصل از تحلیل حرارتی را نسبت به شبکه‌بندی و گام‌های زمانی، مورد بررسی قرار داد.

در مرجع [۴] یک مدل اجزای محدود برای جوشکاری لب به لب دو ورق فولادی ارایه و خواص مواد وابسته به دما در نظر گرفته شد. اگر چه مدل حرارتی تطابق خوبی با دماهای تجربی در بیرون ناحیه برگرفته از حرارت به نام تفتیده داشت، اما تنش‌های پسماند محاسبه شده بسیار بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود. ریپیکی [۵]، در مقاله‌ای که در سال ۱۹۸۰ منتشر کرد، مدلی برای محاسبه دما و تنش‌های پسماند در یک لوله با جوش دو لایه محیطی بر اساس یک منبع حرارتی نقطه‌ای متحرک ارایه داد. دماهای محاسبه شده نسبت به دماهای اندازه‌گیری شده، حداکثر دارای ۹ درصد اختلاف برای لایه اول و ۱۷ درصد اختلاف برای لایه دوم بودند. در مرجع [۶] که در سال ۱۹۸۱ انتشار یافت، برای محاسبه تنش در یک ورق با جوش لب به لب، از روش اجزای محدود استفاده گردید. در این کار با در نظر گرفتن سرعت جوشکاری و گرمای ورودی به عنوان متغیر چنین نتیجه‌گیری شد که در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد به دلیل کرنش‌های کششی عرضی زیاد ممکن است ترک‌ها تکثیر شوند. در سال‌های اخیر تلاش زیادی برای ارایه مدل‌های ترمومکانیکی مناسب برای جوشکاری شده است [۷]، [۸]، [۹]. در این مدل‌ها خواص مواد به صورت وابسته به دما و دارای خاصیت سخت‌شوندگی ایزوتروپیک - سینماتیک در نظر گرفته شده است. با توجه به تطابق خوب نتایج گزارش شده با داده‌های آزمایشگاهی، در مقاله حاضر از مراجع فوق برای مدل‌سازی و کنترل صحت محاسبات استفاده شده است.

در عملیات جوشکاری، بعد از مرحله سرد شدن جسم، تنش‌هایی در آن باقی می‌ماند که به آنها تنش‌های پسماند می‌گویند. این تنش‌ها مهمترین عاملی هستند که باعث ضعیف شدن اتصالات جوش و ناکارایی آنها در تحمل طولانی مدت بارها، می‌شوند. علاوه بر این، تنش‌های پسماند اثرات نامناسبی بر مقاومت کمانشی اعضای فشاری دارند. از این رو مهندسين، علاقمند به داشتن دانش کاملی از نحوه توزیع تنش‌های پسماند در سرتاسر جوش و روش‌های تغییر آن می‌باشند. انتخاب روند جوشکاری مناسب که بتواند این تنش‌ها را به حداقل ممکن کاهش دهد، نیز از دیگر علاقه‌های ایشان است.

روش‌های تجربی اندازه‌گیری تنش‌های پسماند علاوه بر هزینه بالا، در بعضی از موارد نیازمند عملیات سوراخکاری و یا مقطع زنی در قطعه جوش داده شده بوده که فقط مقدار تنش را در سوراخ‌های ایجاد شده و یا در قطعات جدا شده بدست می‌دهد. پیشرفت روش‌های تجربی غیر مخرب اگرچه توانست تا مقداری این کاستی‌ها را جبران کند، ولی نتوانست جوابگوی تمامی نیازهای موجود باشد. همزمان با پیشرفت روش‌های عددی نظیر اجزای محدود، امکان تحلیل و محاسبه تنش‌های پسماند به صورت بهتری فراهم گردید. بررسی کارهای انجام شده نشان می‌دهد که در باره نحوه کاهش این تنش‌ها و اصلاح روش‌های جوشکاری هنوز جای کار وجود دارد. در این مقاله با انجام تحلیل حرارتی و مکانیکی جوش، تنش‌های پسماند محاسبه شده است. برای این کار از نرم افزار اجزای محدود ANSYS استفاده شده و با انجام تحلیل‌هایی اثر عوامل مختلف از قبیل سرعت جوشکاری، شرایط تکیه گاهی، پیش گرمایش و توالی جوش روی کاهش تنش‌های پسماند مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تاریخچه

سابقه تحلیل حرارتی و مکانیکی تنش‌های پسماند جوش به سال ۱۹۲۰ برمی‌گردد. در این سال روزنتال یک روش تقریبی برای حل معادله دیفرانسیل حرارت گذرا در جوشکاری ارایه داد [۱]. میرز با استفاده از فرضیات ساده‌کننده‌ای توانست محدودیت‌های روش پیشنهادی روزنتال را بر طرف کند [۱]. در سال‌های اخیر روش اجزای محدود به عنوان ابزاری قوی برای تحلیل جوش مورد توجه واقع شده است. مقاله هیبیت و مارکل که در سال ۱۹۷۸ منتشر شد اولین گام در استفاده از روش اجزای محدود برای پیش‌بینی تنش‌های پسماند جوش است. در

۳- تحلیل حرارتی جوش

برای بدست آوردن تنش‌های پسماند جوشکاری ابتدا احتیاج به یک تحلیل حرارتی است. معادله هدایت حرارتی گذرا با در نظر گرفتن اثرات ظرفیت حرارتی عبارتست از:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] + Q(\phi) = \rho c(\phi) \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

در این رابطه، c گرمای ویژه، ρ چگالی، $K(\phi)$ ، $Q(\phi)$ و ϕ به



بارگذاری در تحلیل دوم استفاده می‌شود. پس از آن مساله به چند گام تقسیم شده و در هر گام از توزیع دمای بدست آمده از تحلیل حرارتی، بعنوان بار حرارتی استفاده شده و تحلیل مکانیکی انجام می‌پذیرد.

۵- نتایج تحلیل با نرم افزار ANSYS

در این مقاله با استفاده از نرم افزار ANSYS، تاثیر عوامل مختلف بر روی تنش های پسماند حاصل از عملیات جوشکاری بررسی شده است. برای ارزیابی صحت مدل سازی، ابتدا یکی از نمونه‌های مرجع [۹] شبیه سازی و نتایج محاسبات با یکدیگر مقایسه گردید. همانطورکه در شکل (۱) دیده می‌شود بیشینه و تاریخچه مقادیر بدست آمده برای تنش با یکدیگر سازگاری مناسبی دارد.

در ادامه، تاثیر عوامل مختلف از قبیل سرعت جوشکاری، شرایط تکیه گاهی، پیش گرمایش و توالی جوش بر روی تنش های پسماند حاصل از عملیات جوشکاری بررسی شده است. مدل شبیه سازی شده شامل یک جوش شیاری برای اتصال لب به لب دو قطعه ورق به عرض ۲۰ سانتیمتر، طول ۱۵ سانتیمتر، ضخامت ۱ سانتیمتر و زاویه شیار ۶۰ درجه بوده است (شکل (۲-الف)). با توجه به متقارن بودن هندسه قطعه، فقط نیمی از مدل در نظر گرفته شده است.

برای اعمال شرایط مرزی در صفحه تقارن، در تحلیل حرارتی جلوی هر گونه اتلاف انرژی گرفته شده و در تحلیل مکانیکی درجات آزادی انتقالی بسته و درجات آزادی دورانی باز گذاشته شده است.

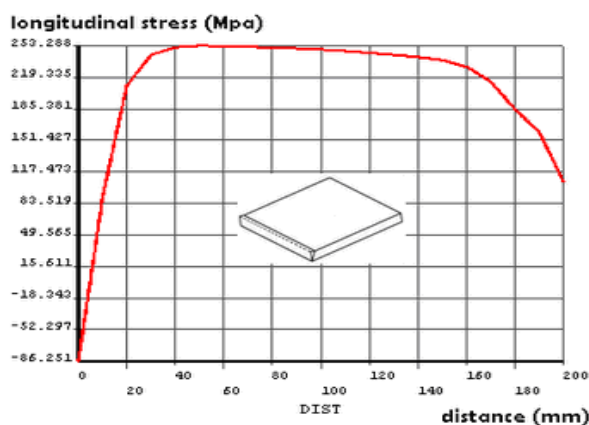
ترتیب ضریب هدایت گرمایی، نرخ تولید گرمای داخلی و دما می‌باشند.

از این تحلیل، گرادیان حرارتی قطعه طی فرایند جوشکاری و سرد شدن پس از آن بدست می‌آید. در تحلیل حرارتی خواص ماده همراه با زمان تغییر می‌کند و پارامتر زمان نقش مهمی در تحلیل دارد. در مدلسازی جوش، تعیین مدت زمان و گام های زمانی تحلیل با توجه به سرعت جوشکاری انتخابی تعیین می‌گردد. فرضیات انجام گرفته در این تحقیق عبارتند از:

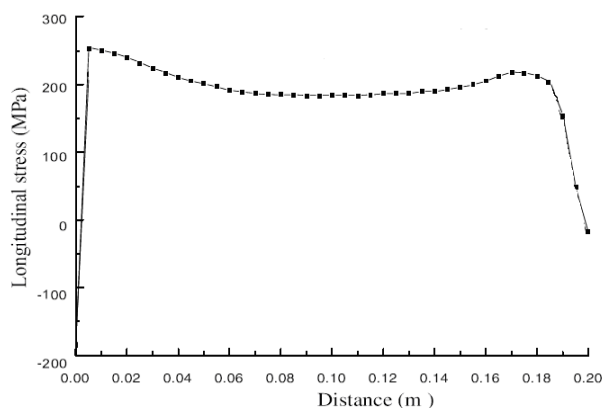
- ۱- دمای هوای اطراف قطعه چه در اطراف جوش و چه در نقاط دیگر، یکسان در نظر گرفته شده است.
 - ۲- خواص وابسته به دما به صورت داده‌های گسسته برای نرم‌افزار تعیین شده و نرم افزار تغییرات خواص بین نقاط داده شده را بصورت خطی در نظر می‌گیرد.
 - ۳- نرخ حرارت ورودی ثابت فرض شده و از تغییر آن طی پیشرفت جوشکاری چشم پوشی شده است.
 - ۴- تغییرات حجمی طی فرایند تغییر فاز نادیده گرفته شده است.
 - ۵- خواص الکتروود مصرفی با خواص فلز پایه یکسان فرض شده است.
- بدیهی است با حذف هر یک از فرضیات یاد شده مساله پیچیده و خود موضوع تحقیق جداگانه‌ای خواهد بود.

۴- تحلیل مکانیکی جوش

پس از تحلیل حرارتی، برای بدست آوردن تنش ها و تغییر شکل های پسماند بایستی یک تحلیل مکانیکی صورت گیرد. برای این کار، از نتایج بدست آمده از تحلیل اول بعنوان



(ب)



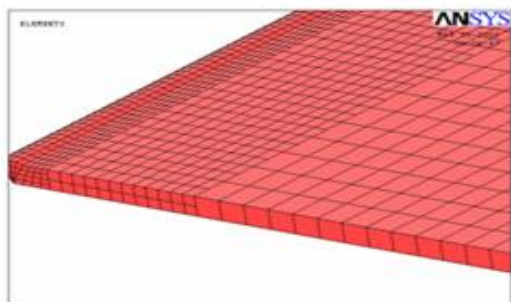
(الف)

شکل (۱): تنش پسماند در امتداد خط جوش، (الف) - مرجع [۹] و (ب) - مقاله حاضر

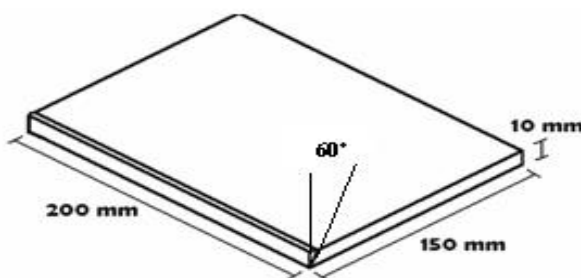
میز و یا زمین قرار گرفته، استفاده کرد. به منظور بدست آوردن نتایج دقیق در منطقه اعمال حرارت، لازم است تا اجزای این ناحیه به قدر کافی ریز باشد (شکل ۲-ب).

هدف مقاله حاضر بررسی تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری در شرایط معمول است. از این رو، جوشکاری از نوع معمول در ساختمان سازی و فلز پایه از نوع فولادهای ساختمانی در نظر گرفته شده است. مشخصات منبع حرارتی و خواص فولاد در جدول های (۱) و (۲) آورده شده است.

برای ایجاد مدل دقیقی از فرایند جوشکاری که در آن ماده پرکننده بطور پیوسته به شیار جوش اضافه می‌گردد، از یک نوع شبکه اجزای محدود متغیر با زمان (شبکه دینامیکی) استفاده می‌شود. برای انجام این کار از قابلیت نرم افزار مورد استفاده تحت عنوان تولد و مرگ اجزاء استفاده شده است. برای شبیه سازی هر چه بهتر شرایط عملی فرض شده که قطعه بر روی زمین (میز کار) قرار گرفته است. برای این کار اجزای تماسی (contact) به کار برده شده است. از این نوع اجزاء می‌توان در شرایطی که قطعه بدون هر گونه مهاربندی بر روی



(ب)



(الف)

شکل (۲): هندسه مدل و شبکه بندی قطعه

جدول (۱): مشخصات منبع حرارتی [۱۰]

نوع جوشکاری	نوع الکتروود	قطر الکتروود (D)	اختلاف پتانسیل (B)	شدت جریان (I)	سرعت جوشکاری (V)	ضریب بازده	نوع جریان	وضعیت جوشکاری	دمای محیط
SMAW	B۶۰۱۳	۴/۸mm	۲۵V	۲۱۰A	۵ mm/s	۷۵%	DCSP	تخت	۲۰°C
							یکسو با قطبیت مستقیم		

جدول (۲): خواص فولاد [۱۰]

دما (C)	تنش حد جاری شدن (MPa)	ضریب پواسون	ضریب الاستیسیته (GPa)	ضریب هدایت همرفت (W/M ^۲ C)	ضریب انبساط طولی (۱۰ ^{-۶} ۱/C)	گرمای ویژه (J/KgC)	ضریب انتقال حرارت (W/mc)
۰	۲۸۵	۰/۳	۲۰۰	۴	۱۰	۳۲۰	۶۵
۲۰۰	۲۶۵	۰/۳۴	۱۹۶	۶	۱۰	۳۲۸	۵۵
۴۰۰	۲۳۵	۰/۳۸	۱۹۲	۷/۵	۱۱/۵	۳۳۷	۴۵
۶۰۰	۲۰۵	۰/۴۲	۱۸۰	۹	۱۳	۳۴۲	۳۵
۸۰۰	۱۶۵	۰/۴۶	۱۵۰	۱۰/۵	۱۴/۵	۳۸۴	۲۵
۱۰۰۰	۱۲۵	۰/۴۹۹	۱۲۰	۱۱/۷۵	۱۶	۴۴۲	۲۰
۱۴۰۰	۴۵	۰/۴۹۹	۶۰	۱۳/۱۵	۱۶	۵۲۶	۹۵
۱۸۰۰	۲۵	۰/۴۹۹	۴۲	۱۴/۲۵	۱۶	۵۳۶	۱۴۵
۲۲۰۰	۱۵	۰/۴۹۹	۴۰	۱۴/۸۵	۱۶	۵۴۶	۱۴۵

× چگالی: ۷۸۵۰ (Kg/m^۳) و گرمای نهان ذوب: ۲۷۴۰۰۰ (J/Kg)



۵-۱- تاثیر سرعت جوشکاری

افزایش سرعت جوشکاری می تواند تغییر حجم فلز پایه تحت تاثیر حرارت را کاهش داده و در نتیجه انقباض و اعوجاج های ناشی از آن را تحت تاثیر قرار دهد. اگر سرعت جوشکاری به اندازه کافی کم باشد آنگاه قسمت های جوش داده شده از فاصله نه چندان دور در پشت قوس جوش فرصت سرد شدن خواهند داشت. گفتنی است که در عمل، سرعت خیلی کم و خیلی زیاد امکان پذیر نمی باشد. سرعت خیلی کم باعث خواهد شد که ماده پرکننده جوش دارای پیوستگی کافی نباشد و سرعت خیلی بالا باعث می شود که ماده پرکننده جوش بطور کامل درز جوش را پر نکند. در این قسمت، سه سرعت متفاوت برای جوشکاری به کار رفته است. سرعت های جوشکاری بررسی شده عبارتند از:

حالت الف: ۲/۵ mm/s، حالت ب: ۵ mm/s و حالت ج: ۷/۵ mm/s.

در جدول (۳)، بیشینه تنش های پسماند طولی (در امتداد خط جوش)، عرضی (در امتداد عمود بر خط جوش) و معادل (فون میزس) در سرعت های جوشکاری متفاوت آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود کم کردن سرعت جوشکاری تاثیر چندانی بر کاهش تنش های پسماند ندارد. به عنوان مثال، تنش پسماند معادل در حالتی که سرعت جوشکاری ۳ برابر شده است، فقط ۵/۵ درصد افزایش داشته است.

جدول (۳): بیشینه تنش های پسماند در سرعت های جوشکاری

متفاوت			
سرعت جوشکاری	۲/۵ mm/s	۵ mm/s	۷/۵ mm/s
تنش طولی (MPa)	۲۴۵	۲۴۷	۲۵۴
تنش عرضی (MPa)	۱۲۸	۱۴۵	۱۵۲
تنش معادل (MPa)	۲۲۹	۲۴۲	۲۵۳

۵-۲- تاثیر شرایط تکیه گاهی

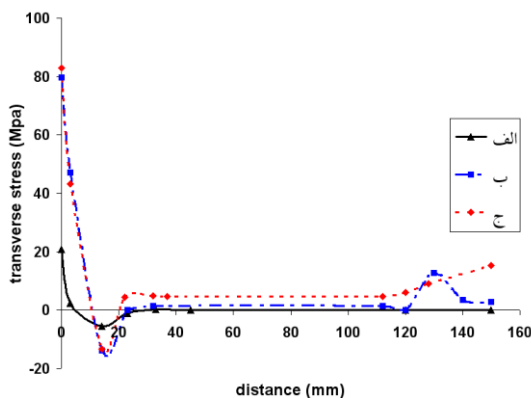
در کارگاه ها برای جلوگیری از حرکت صفحه ها و ثابت قرار گرفتن لبه ها نسبت به یکدیگر، از گیره استفاده می شود. اگر قطعه بر روی میز جوشکاری قرار داشته باشد آن را با یک گیره ثابت و دائمی مهار می کنند. این گونه گیره ها را می توان با گیردار فرض کردن دو انتهای قطعه شبیه سازی نمود.

روش دیگر برای مهار قطعات، استفاده از گیره c شکل است. برای مدلسازی این گونه گیره ها می توان در محل اتصال گیره به قطعه، درجات آزادی انتقالی در مدل اجزای محدود را به صورت مقید تعریف کرد. در جدول (۴) انواع شرایط مرزی مورد بررسی، آورده شده است.

جدول (۴): شرایط مرزی مورد بررسی

نام مدل	شرایط مهاری (مرزی)	نوع مدل کردن
الف	استفاده از میز جوشکاری	استفاده از المان های contact
ب	استفاده از گیره c شکل	بستن درجات آزادی انتقالی در قسمتی از انتهای صفحه
ج	استفاده از گیره صلب	بستن درجات آزادی انتقالی و دورانی در انتهای صفحه

در شکل (۳) نمودار تنش پسماند عرضی در مقطع میانی صفحه نشان داده شده است. با توجه به نمودار دیده می شود که در حالت الف، تنش پسماند عرضی از فاصله ۳۰ میلی متری به بعد صفر می شود در حالی که در حالت ب و ج تا آخر ادامه دارد. در این بین بیشینه مقدار تنش در انتهای نمودار برای حالت ب در محل اتصال گیره است و در حالت ج در تمام لبه انتهایی صفحه. در ضمن حداکثر تنش عرضی پسماند بر روی خط جوش برای مدل های مهار شده به شدت افزایش یافته است.



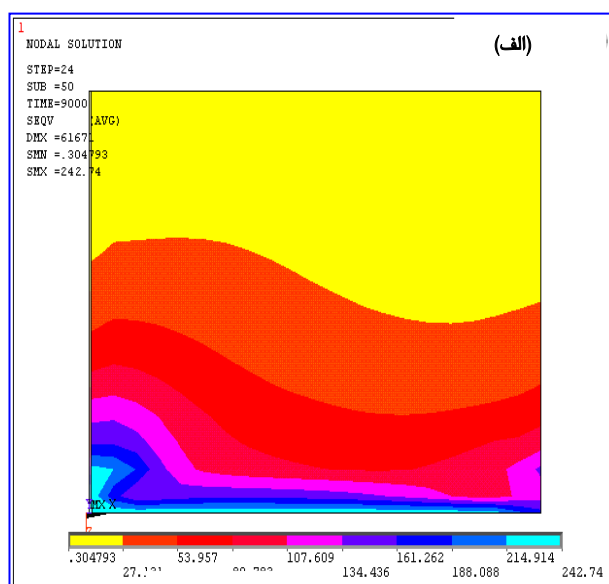
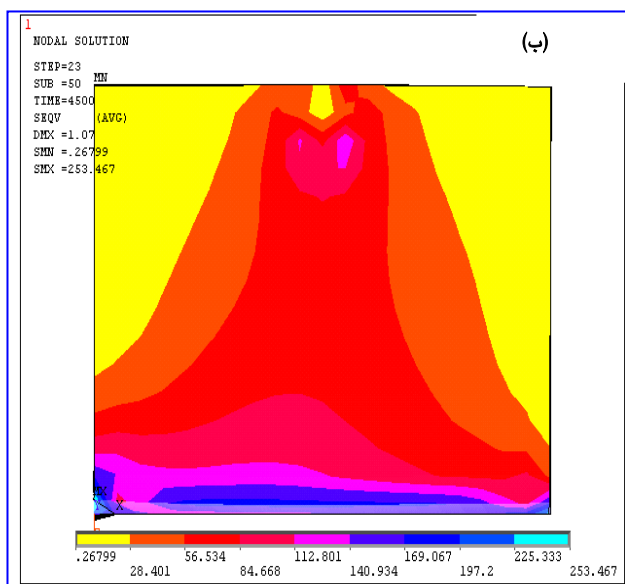
شکل (۳): نمودار تنش پسماند عرضی در مقطع میانی صفحه برای مدل های الف، ب و ج

شکل (۴) نیز توزیع تنش های پسماند معادل را نشان می دهد. در حالت الف در نیمه انتهایی صفحه مقدار آن نزدیک صفر است ولی در حالت مهار شده توزیع تنش ها تا انتهای صفحه ادامه دارد در این بین مقادیر تنش در حالت ج بطور یکنواخت تری در انتهای صفحه توزیع شده ولی در حالت ب در اطراف محل اتصال گیره به صفحه تمرکز تنش داشته و در پشت آن و در گوشه ها تنش صفر است.

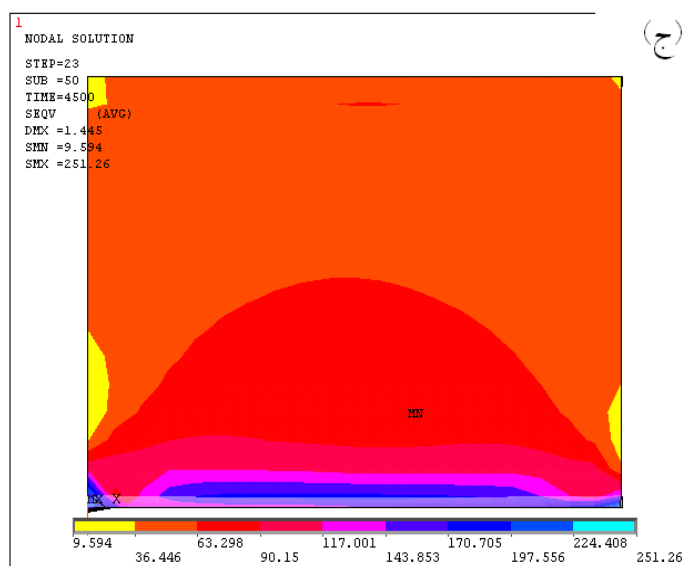
تنش های پسماند و تغییر شکل های پسماند با یکدیگر نسبت معکوس دارند، در واقع اگر قطعات در هنگام جوشکاری مهار شوند، از تغییر شکل نهایی قطعه به مقدار زیادی کاسته خواهد شد و اگر جوشکاری بدون مهار بندی انجام گردد، در انتها تنش های کمتری در قطعه باقی خواهد ماند. این واقعیت در جدول (۵) مشاهده می شود. در این جدول مقایسه ای بین

تغییر شکل همراه با افزایش تنش های پسماند بوده است. به عنوان مثال استفاده از گیره C شکل، بیشینه تنش ها را ۴/۵ درصد افزایش داده است.

تنش های معادل و تغییر شکل ها صورت گرفته است. همانطور که مشاهده می شود، با استفاده از گیره می توان تغییر شکل ها را به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش داد. این کاهش برای مدل ب ۶۰/۵ درصد و برای مدل ج ۶۶ درصد می باشد. البته این کنترل



(ب)



(ج)

شکل (۴): توزیع تنش پسماند معادل بر روی صفحه برای مدل های الف، ب و ج

جدول (۵): بیشینه تنش ها و تغییر شکل های پسماند برای مدل های الف، ب و ج

ج	ب	الف	
۱/۰۰۵	۱/۱۷	۲/۹۵۹	تغییر شکل (mm)
۲۵۲	۲۵۲	۲۴۲	تنش معادل (MPa)

استفاده قرار گیرد:

۳-۵- پیش گرمایش

الف- برای کاهش سرعت انجماد در گذر از محدوده فاز

عمل پیش گرمایش به یکی از دلایل زیر ممکن است مورد



الف	ب	ج
تنش طولی (MPa)	۲۴۴	۱۹۱
تنش عرضی (MPa)	۱۳۰	۱۱۸
تنش معادل (MPa)	۲۲۱	۱۸۹

علاوه بر کاهش تنش ها یکی از مهمترین مزایای پیش گرمایش، کاهش سرعت سرد شدن قطعه است. برحسب ترکیبات شیمیایی ورق، برای یک درجه حرارت مشخص، یک سرعت خنک شدن بحرانی وجود دارد که اگر سرعت واقعی بزرگتر از آن باشد، ترک در زیر نوار جوش بوجود می آید. این درجه حرارت مشخص بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد است و سرعت سرد شدن را در هنگامی که قطعه ۲۰۰ درجه سانتیگراد حرارت دارد، مورد بررسی قرار می دهند [۱۱]. در جدول (۷) تاریخچه حرارتی سرد شدن قطعه در بازه حرارتی ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد برای سه حالت یاد شده آورده شده است و در انتها نیز سرعت سرد شدن متوسط در این بازه درج گردیده است. همانطور که مشاهده می شود سرعت سرد شدن برای حالت ج به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. در حالت ب ۶۱ درصد و در حالت ج ۷۸ درصد کاهش دیده می شود.

دگرگونی (برای فولاد نرمه معمولی ۷۲۰ تا ۹۹۰ درجه سانتیگراد) به منظور جلوگیری از تردی از یک سو و افزایش شکل پذیری نوار جوش و ناحیه تفتیده در فلز پایه از سوی دیگر.

ب- برای کاهش سرعت سرد شدن در محدوده ۲۰۰ درجه سانتیگراد برای اجازه دادن به خروج هر گونه هیدروژن جذب شده به مصالح جوش و ناحیه تفتیده در فلز پایه.

در این قسمت تاثیر پیش گرمایش با ۳ دمای متفاوت بررسی شد و نتایج بدست آمده از هر تحلیل با هم مقایسه گردید. در حالت الف مدل بدون پیش گرمایش تحلیل شد. در حالت ب مدل ۷۵ درجه سانتیگراد و در حالت ج ۱۵۰ درجه سانتیگراد پیش گرم شد. مقایسه ای بین تنش های پسماند حاصل در جدول (۶) انجام شده است. همان طور که مشاهده می شود، گرم کردن قطعه به میزان ۱۵۰ درجه سانتیگراد تنش های طولی را ۲۲/۶۷ درصد و تنش های معادل را ۲۱/۹ درصد کاهش می دهد.

جدول (۶): بیشینه تنش ها و تغییر شکل های پسماند برای حالت های الف، ب و ج

جدول (۷): مقادیر تاریخچه حرارتی بین درجه حرارت ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد

حالت الف		حالت ب		حالت ج	
زمان (Sec)	دما (C)	زمان (Sec)	دما (C)	زمان (Sec)	دما (C)
۲۹/۰۰۰	۳۳۷/۲۱۱	۳۴۸/۴۷۴	۴۵/۲۶۱	۳۲۶/۴۲۴	۷۶/۲۷۰
۴۰/۰۰۰	۳۲۷/۹۴۴	۳۴۰/۷۷۹	۴۶/۵۲۱	۳۱۰/۵۱۱	۸۵/۶۰۳
۴۱/۰۰۰	۳۱۹/۳۷۵	۳۲۷/۳۸۵	۴۹/۰۴۳	۲۹۷/۴۵۱	۹۴/۹۳۶
۴۱/۸۸۷	۳۱۲/۲۵۷	۳۰۹/۷۰۱	۵۲/۰۶۸	۲۹۱/۰۲۸	۱۰۰/۰۰
۴۲/۷۷۵	۳۰۵/۵۶۹	۲۹۰/۴۱۱	۵۸/۵۲۰	۲۸۰/۶۲۷	۱۰۹/۷۸
۴۴/۰۰۰	۲۹۷/۰۳۹	۲۶۹/۸۰۶	۶۶/۰۶۶	۲۷۱/۷۱۸	۱۱۹/۵۶
۴۵/۲۲۵	۲۸۹/۱۳۹	۲۵۰/۴۳۳	۷۵/۳۹۹	۲۵۲/۴۵۵	۱۴۸/۸۹
۴۶/۴۵۰	۲۸۱/۸۳۸	۲۳۵/۱۷۱	۸۴/۷۳۲	۲۳۱/۳۹۹	۱۹۵/۹۵
۴۸/۹۰۰	۲۶۹/۱۰۷	۲۲۲/۷۸۵	۹۴/۰۶۶	۲۱۲/۵۹۱	۲۵۷/۴۸
نرخ سرمایش = ۶/۵۴ (C/Sec)		نرخ سرمایش = ۲/۵۱ (C/Sec)		نرخ سرمایش = ۱/۴۴ (C/Sec)	

حتی ممکن است موجب شود که تنش ها همدیگر را خنثی سازند و بدین ترتیب باعث کاهش چشم گیری در مقدار تنش های بجا مانده خواهد شد. در اینجا اثر جهت های مختلف جوشکاری در یک جوش شیار سی لایه (شکل ۵) مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه نتایج بدست آمده با هم مقایسه گردیده اند. در شکل (۶) توالی های مختلف مورد بررسی برای این جوش سه لایه نشان داده شده است.

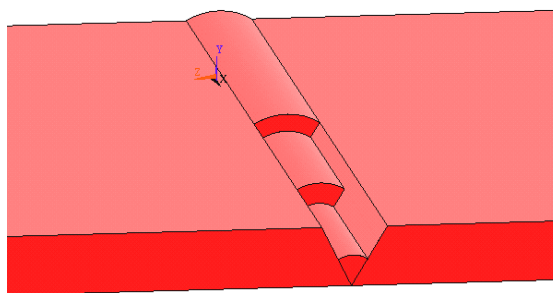
۵-۴- توالی جوش

با استفاده از ترتیب و توالی مناسب جوشکاری، می توان از میزان تغییر شکل ها و تنش ها به مقدار زیادی کاست. به طور مثال با استفاده از جوش دو طرفه بجای جوش یک طرفه می توان از تغییر شکل مضاعف جلوگیری کرد. به طور کلی هر گونه ایجاد تقارن در منطقه جوش باعث می شود که بیشینه تنش در هر لایه جوشکاری در یک نقطه متمرکز نگردد و یا

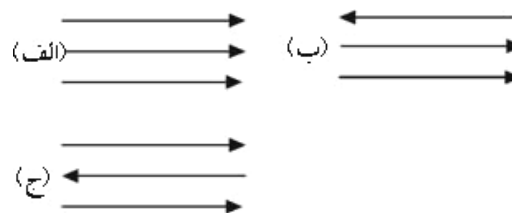
مقاوم‌تر استفاده شده است. خواص این فولاد در جدول (۹) آورده شده است.

جدول (۸): مشخصات تحلیل

تعداد اجزاء	تعداد گره	کمترین طول جزء	کمترین گام زمانی	تعداد گام ها
۲۲۴۴	۱۲۲۷۹	۵ (mm)	۰/۵ (Sec)	۲۶۴

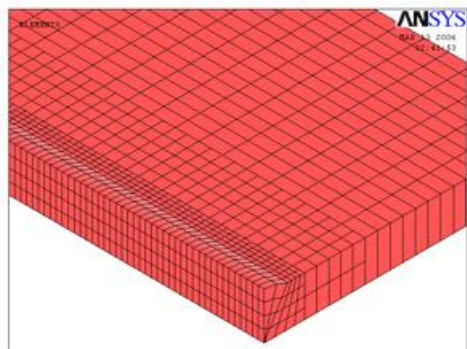


شکل (۵): جوش سه لایه در اتصال لب به لب شیاری



شکل (۶): توالی های مورد بررسی برای جوش سه لایه

مشخصات تحلیل در جدول (۸) ذکر گردیده و شبکه بندی قطعه نیز در شکل (۷) نشان داده شده است. در این قسمت از فولادی



شکل (۷): شبکه بندی قطعه

جدول (۹): خواص فلز پایه برای جوش سه لایه [۱۰]

دما (C)	تنش حد جاری شدن (MPa)	ضریب پواسون	ضریب الاستیسیته (GPa)	ضریب هدایت همرفت (W/M ^۲ C)	ضریب انبساط طولی (۱۰ ^{-۶} (۱/C))	گرمای ویژه (J/KgC)	ضریب انتقال حرارت (W/mc)
۰	۲۵۰	۰/۳	۲۱۰	۴	۱۲	۳۰۰	۶۵
۲۰۰	۲۴۰	۰/۳۴	۱۹۶	۶	۱۲	۳۰۴	۵۵
۴۰۰	۲۳۰	۰/۳۸	۱۹۲	۷/۵	۱۲	۳۱۷	۴۵
۶۰۰	۲۰۵	۰/۴۲	۱۸۰	۹	۱۲/۸	۳۴۳	۳۵
۸۰۰	۱۶۵	۰/۴۶	۱۵۰	۱۰/۵	۱۴/۷	۳۸۴	۲۵
۱۲۰۰	۸۵	۰/۴۹۹	۹۰	۱۲/۵۵	۱۶	۵۲۱	۲۰
۱۴۰۰	۴۵	۰/۴۹۹	۶۰	۱۳/۱۵	۱۶	۵۲۶	۹۵
۱۸۰۰	۲۵	۰/۴۹۹	۴۲	۱۴/۲۵	۱۶	۵۳۶	۱۴۵
۲۲۰۰	۱۵	۰/۴۹۹	۴۰	۱۴/۸۵	۱۶	۵۴۶	۱۴۵

چگالی (Kg/m^۳) ۷۸۷۰ و گرمای نهان ذوب: (J/Kg) ۲۴۷۰۰۰

مقادیر بیشینه تنش در هر لایه در جدول (۱۰) آورده شده است که از مقایسه آنها می توان به تاثیر این روش در کاهش تنش های پسماند پی برد. همان طور که ملا حظه می شود، جوشکاری به ترتیب حالت ج می تواند تنش های پسماند معادل را تا ۲۵ درصد کاهش دهد.

جدول (۱۰): مقادیر بیشینه تنش های پسماند برای

توالی های جوشکاری مختلف

حالت ج	حالت ب	حالت الف	
۲۵۰	۲۶۹	۲۸۹	حداکثر تنش طولی (MPa)
۱۲۶	۱۴۷	۱۵۶	حداکثر تنش عرضی (MPa)



Anderson, B., "Thermal Stresses in a Submerged Arc Welded Joint Considering Phase Transformations", Welding Research Council Bulletin 367, 1979.

Rybicki, E. and Mishler, h. w.; "A Finite Element Model for Residual Stresses and Deflections in Girth Butt Welded Pipe", Welding Research Council Bulletin 377, 1980.

Anderson, B. and Karlsson, L.; "Thermal Stresses in Large Butt-Welded Plates", Thermal Stresses Journal, Vol. 4, pp.491-500, 1981.

Olden, E. and Leggatt, R.; "Modelling of Residual Stresses of Girth Welds in Pipes ", Journal of Welding Institute, p.p.65-71, June 2000.

Teng, T. L.; Chang, P. H. and Tseng, W. Ch.; "Effect of Welding Sequences on Residual Stresses ", Journal of Chung Cheng Institute of Technology, p.p.19-30, May 2002.

Liu, S. X. and Chan, C. J.; "Simulation of Residual Stresses in a V-groove Welding", Institute of Physics Publishing, p.p. 235-244, April 2004.

ASTM, "Specification for Structural Steel", American Society for Testing and Materials, 1988.

طاحونی، ش؛ راهنمای جوش و اتصالات جوش، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، نشر توسعه ایران، تهران، ۱۳۸۰.

[۴]	۲۰۳	۲۶۰	۲۷۱	حداکثر تنش معادل (MPa)
-----	-----	-----	-----	------------------------

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار ANSYS و انجام تحلیل های پی در پی حرارتی و مکانیکی، تاثیر عوامل مختلف در نحوه توزیع و مقدار بیشینه تنش های پسماند و راه های کاهش اثرات نامطلوب این تنش ها مورد بررسی قرار گرفت. بعضی از نتایج مهم حاصل عبارتند از:

۱- کاهش سرعت جوشکاری تاثیر چندانی بر کاهش تنش ها ندارد. علاوه بر آن سرعت جوشکاری از مقدار معینی نمی تواند پایین تر باشد.

۲- استفاده از گیره برای مهار قطعات هرچند جلوی تغییر شکل های ناخواسته را تا میزان زیادی (۶۰ درصد) می گیرد ولی باعث افزایش تنش های پسماند می گردد. لذا بجای استفاده از آنها بهتر است، قطعات را قبل از جوشکاری طوری مونتاژ کرد که پس از جوشکاری به شکل دلخواه درآیند و بدین وسیله از افزایش تنش نیز جلوگیری کرد.

۳- با استفاده از روش پیش گرمایش، بیشینه تنش ها تا ۲۲ درصد کاهش می یابد. پیش گرمایش علاوه بر کاهش تنش ها باعث پایین آمدن سرعت سرد شدن قطعه نیز می گردد و کاهش سرعت سرد شدن از شکل گیری ترک در جوش جلوگیری می کند. به عنوان مثال با پیش گرم کردن قطعه تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد می توان سرعت سرد شدن را بیش از ۷۰ درصد کاهش داد.

۴- جهت جوشکاری لایه ها در جوش های چند لایه، بر مقدار و توزیع تنش های پسماند تاثیر می گذارد. در این بین یک ترتیب مناسب می تواند بیشینه تنش ها را تا ۲۵ درصد کاهش دهد. لازم به ذکر است که این روش از هزینه کمتری نسبت به پیش گرمایش برخوردار است.

۷- مراجع

[۱] Tekrival, P.; Stitt, M.; Mazumdw, J.; "Finite Element Modeling of Heat Transfer for Gas Tungsten Arc Welding", Metal Construction, p.p. 599-606, Oct 1996.

[۲] Hibbit, D. and Marcal, V.; "A Numerical Thermo-Mechanical Model for the Welding and Subsequent Loading", Computers and Structures, Vol. 3, p.p.1145-1173, 1978.

[۳] DeGarmo, E. P.; Meriam, J. L. and Johanssen, F.; "The Effect of Weld Length Upon the Residual Stresses of Unstrained butt welds", Welding Journal, Vol. 25, pp.325-338, 1978.

