

بررسی تجربی و عددی توزیع دما و تعیین تنش‌های پسماند در جوشکاری ورق‌ها

غلامحسین مجذوبی^۱، رحمن سیفی^{۲*} و شاهد علی اکبر^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: جوشکاری، توزیع دما، تنش پسماند، کرنش سختی.</p>	<p>علی‌رغم مزایای قابل توجه روش‌های مختلف جوشکاری، تنش‌های پسماند حاصل از آن ضرری اجتناب ناپذیر در فرایندهای ساخت و تولید می‌باشد. در این مقاله، عوامل مؤثر در فرایند جوشکاری و ایجاد تنش پسماند ناشی از آن بررسی شده است. تحلیل در دو مرحله حرارتی و مکانیکی صورت می‌گیرد. در تحلیل حرارتی، توزیع دما در حین جوشکاری و بعد از آن با استفاده از روش المان محدود به دست آمده و با نتایج حاصل از روش آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تطابق قابل قبولی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. با توجه به تغییر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ماده با تغییر دما، بررسی اثر آنها بر توزیع تنش پسماند از اهمیت خاصی برخوردار است که در این مقاله به آن پرداخته شده است. تأثیر شرایط گوناگون و تغییر پارامترهای مختلف جوشکاری مانند سرعت جوشکاری، وجود قید، رفتار ماده، ضخامت ورق و تعداد پاس‌ها بر مقادیر تنش پسماند نیز بررسی شده است.</p>

۱- مقدمه

اندازه‌گیری مقادیر تنش پسماند و کنترل آن، ناگزیر از اهمیت بالایی برخوردار خواهد شد تا در گام بعد به وسیله روش‌های خاص بتوان تنش‌های پسماند موجود را کاهش داد، یا از بین برد.

در جوشکاری، تنش پسماند به علت گرم و سرد شدن قطعات در حین فرایند جوشکاری و تغییر فرم‌های برگشت ناپذیر به وجود می‌آید. زمانی که ماده در محل جوشکاری تحت تأثیر دماهای زیاد قرار می‌گیرد تنش‌های گرمایی در آن به وجود می‌آید. با اتمام فرایند جوشکاری و حذف منبع گرمایی، ماده دچار افت دما شده و تا دمای محیط سرد می‌شود. این گونه تغییر دما در مواد باعث تغییرات میکروساختاری و به تبع آن ایجاد تنش پسماند در قطعه می‌شود. دلایل دیگر ایجاد تنش پسماند در جوشکاری که می‌توان به آنها اشاره نمود عبارتند از تمرکز گرما در ناحیه جوش، تغییر فرم پلاستیک تولید شده در

جوشکاری روشی معتبر و مؤثر برای اتصال فلزات می‌باشد و به طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. علی‌رغم مزایای قابل توجه روش‌های مختلف جوشکاری از قبیل دسترسی آسان به آنها و استحکام زیاد قطعات در محل اتصال، ایجاد تنش‌های پسماند حاصل از آن ضرری اجتناب ناپذیر در فرایندهای ساخت و تولید می‌باشد. با توجه به نقش جوشکاری در صنعت و همچنین نیاز به ضریب ایمنی مطلوب اتصالات جوشی در صنایع مختلف از قبیل خودرو، پل سازی، سازه‌ها، مخازن تحت فشار و غیره، تلاش برای دستیابی به روش‌هایی برای

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: rseifi@basu.ac.ir

۱. استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

۳. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

فلز اصلی، تغییر فاز مایع به جامد و تغییر حجم ماده با توجه به نرخ سرد شدن متغیر در نواحی مختلف قطعه در حال جوشکاری.

تنش‌های پسماندی که داخل و اطراف اتصالات جوش ایجاد می‌شوند برای یکپارچگی و کارکردی که قطعات جوشکاری در اختیار قرار می‌دهند، مضر می‌باشند. تنش‌های پسماند کششی بزرگ ممکن است در ناحیه نزدیک جوش باعث ایجاد شکست‌های ترد، کاهش عمر خستگی و توسعه ترک‌هایی شوند که در اثر تنش‌های ناشی از خوردگی به‌وجود می‌آیند. تنگ و چانگ [۱] تحقیقی روی اثر تنش پسماند بر رشد ترک خستگی ماده بعد از عملیات جوشکاری انجام داده‌اند که طی آن با تحلیل الاستوپلاستیک، تنش پسماند تعیین شده است.

با توجه به توزیع غیر یکنواخت دما، ایجاد کرنش‌های حرارتی و تغییر فرم پلاستیک محلی ماده بعد از جوشکاری، مشکلات مهمی از قبیل شکست و کاهش استحکام کمانشی سازه به وجود می‌آید [۲]. از این رو، تحقیقات بسیاری در مورد تنش پسماند ناشی از جوشکاری صورت گرفته که در آنها به نحوه توزیع دما در جوشکاری، تنش پسماند، تأثیر آن بر عمر خستگی و تحلیل عمر خستگی تا شکست ماده پرداخته شده است. همچنین در بعضی مقالات، روش‌های تنش‌زدایی بعد از عملیات جوشکاری مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه، چو و همکاران [۳] تحقیقی روی اثر تنش‌زدایی با عملیات حرارتی پس از جوشکاری انجام داده‌اند. در بسیاری از مقالات، روش‌های تجربی و آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری تنش پسماند مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به حرکت منبع گرما، متمرکز شدن گرما در ناحیه جوش و همچنین وابسته بودن خصوصیات ماده به تغییرات دما، پیش‌بینی مقادیر دقیق تنش پسماند مشکل است. اولین سری تکنیک‌های اندازه‌گیری تنش پسماند شامل روش‌های غیر مخرب بود. برای نمونه، نوترون و روزنتال [۴ و ۵] تنش پسماند را به وسیله تکنیک تابش اشعه X اندازه‌گیری کردند. پانگ و پوکاس [۶] از سوراخ‌زنی و استفاده از کرنش‌سنج برای دستیابی

به تنش پسماند استفاده نموده‌اند. چو و همکاران [۷] تنش‌های پسماند جوشکاری را با امواج سوپرسونیک اندازه‌گیری کرده‌اند. کلارک و همکاران [۸] روش انکسار نوترون و نامکونگ و همکاران [۹] روش مغناطیسی را برای اندازه‌گیری تنش پسماند مورد استفاده قرار داده‌اند. اخیراً، روش‌های عددی نیز برای پیش‌بینی مقادیر تنش پسماند مورد استفاده قرار گرفته که اندازه‌گیری تنش پسماند را آسان‌تر کرده‌اند. در میان روش‌های عددی، المان محدود کارایی بیشتری دارد، زیرا کار با این روش ساده‌تر است، برای همه نوع مسئله‌ای قابل استفاده می‌باشد، هیچ محدودیتی در نوع شکل، هندسه و مواد ندارد و می‌توان از آن در همه شرایط استفاده کرد. بر این اساس، مقالات زیادی را می‌توان مشاهده کرد که در آنها از روش المان محدود برای تحلیل فرایند جوشکاری استفاده شده است.

در بعضی مقالات، توزیع دمای ناشی از جوشکاری با استفاده از روش المان محدود مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. ماهاپاترا و همکاران [۱۰] توزیع دمای ناشی از جوشکاری قوسی با فلز محافظ را مورد بررسی قرار داده است. دنگ و موراکاوا [۱۱] نیز میدان دمای حاصل از جوشکاری چند پاسه در لوله فولادی را نشان داده و تنش پسماند ناشی از آن را اندازه‌گیری نموده‌اند. اکبری و ستاری‌فر [۱۲] اثر جوشکاری دو نوع فولاد غیر یکسان را بررسی کردند. تنش پسماند در محل جوش بیشتر از تنش تسلیم فلز پایه تعیین گردید. تغییر میزان حرارت ورودی تأثیر چندانی بر تنش پسماند حداکثر ندارد. اثر تغییر فاز جامد بر تغییر حجم ماده و تنش تسلیم آن و در نهایت توزیع تنش پسماند بررسی شده است [۱۳]. توزیع دما و تنش در اتصالات غیرهمجنس بر اساس رفتار آنها در اتصال همجنس قابل پیش‌بینی نیست [۱۴].

۲- تحلیل حرارتی

برای تحلیل حرارتی قطعه در زمان جوشکاری می‌توان قطعه را به صورت یک حجم محدود با سطح S در نظر گرفت. طبق اصل بقای انرژی، معادله انتقال حرارت برای حجم مرزی مذکور را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$-\nabla \cdot \vec{q}(x, y, z, t) + Q(x, y, z, t) = \rho C \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن \vec{q} بردار شار حرارتی وارد بر سطح، Q مقدار گرمای ناشی از منبع داخلی، ρ چگالی، C ظرفیت گرمای ویژه و T دمای قطعه در هر لحظه می‌باشد. قانون فوریه برای شار حرارتی به صورت زیر است:

$$\vec{q} = -K \nabla T \quad (2)$$

با جایگذاری معادله (۲) در معادله (۱) و پس از ساده سازی، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = Q + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (3)$$

این رابطه یک معادله غیر خطی است و برای حل نیاز به شرایط مرزی و اولیه دارد. شرایطی که می‌توان برای معادله (۳) در نظر گرفت عبارتند از:

۱. دمای اولیه قطعه قبل از شروع جوشکاری، که برابر با دمای محیط می‌باشد. به عبارت دیگر:

$$T = T_{\infty} \quad \text{for } t = 0 \quad (4)$$

۲. یکی از مهمترین مسائلی که تحقیقات گسترده‌ای روی آن انجام گرفته، یافتن معادله‌ای برای شار حرارتی اعمال شده توسط قوس الکتریکی جوشکاری روی سطح قطعه می‌باشد. معادله‌ای که در این مقاله برای شار حرارتی در نظر گرفته شده، با توجه به توزیع گوسی به دست آمده است:

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi r_b^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_b^2}\right) \quad (5)$$

که در آن $q(r)$ مقدار شار حرارتی است که حین فرایند جوشکاری بر واحد سطح قطعه توزیع می‌شود و Q مقدار گرمای ورودی است که برابر $Q = \eta VI$ می‌باشد. در این رابطه، η ضریب بازدهی جوشکاری است و مقدار آن بسته به نوع جوشکاری به صورت تجربی به دست می‌آید، V ولتاژ، I جریان جوشکاری، r فاصله از مرکز قوس جوش و r_b شعاع دایره‌ای است که ۹۵٪ کل شار حرارتی به آن اعمال می‌شود. بر این اساس، برای شرط مرزی دوم می‌توان نوشت:

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = -q(r) \quad (6)$$

۳. با توجه به تماس سطح قطعه با هوای اطراف، انتقال حرارت از طریق جابجایی نیز صورت می‌گیرد. این تبادل حرارتی برای تمام سطوح حجم مرزی وجود دارد، بجز سطوحی که به هم جوش داده می‌شوند. از طرفی، حرارت ناشی از تشعشع قوس الکتریکی به صورت انتقال حرارت تابشی را نیز می‌توان برای تمامی سطوح در نظر گرفت. بر این اساس، معادلاتی که می‌توان برای این دو نوع انتقال حرارت نوشت عبارتند از:

$$q_c = h_c(T - T_{\infty}) \quad \text{برای انتقال حرارت جابجایی}$$

$$q_r = h_r(T - T_{\infty}) \quad \text{برای انتقال حرارت تشعشعی} \quad (7)$$

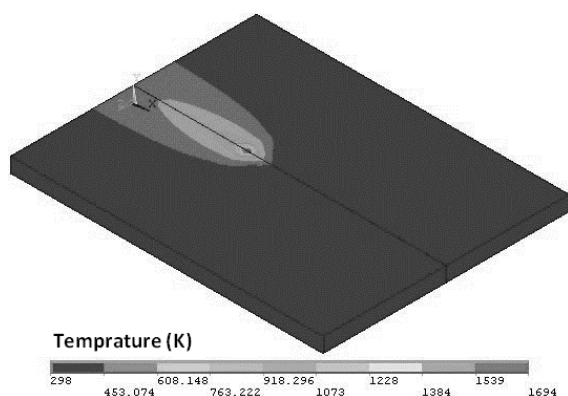
$$h_r = \sigma \varepsilon F (T^2 + T_{\infty}^2)(T + T_{\infty})$$

که در آنها q_c گرمای منتقل شده از طریق جابجایی، h_c ضریب هدایت گرمایی جابجایی، q_r گرمای منتقل شده از طریق تابش، h_r ضریب جابجایی گرمایی تابشی، σ ثابت استفان-بولتزمن، ε ضریب صدور و F ضریب شکل یا فاکتور سطح می‌باشد. بنابراین، معادله شرط مرزی سوم را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = -q_h, \quad -K \frac{\partial T}{\partial n} = -q_r \quad (8)$$

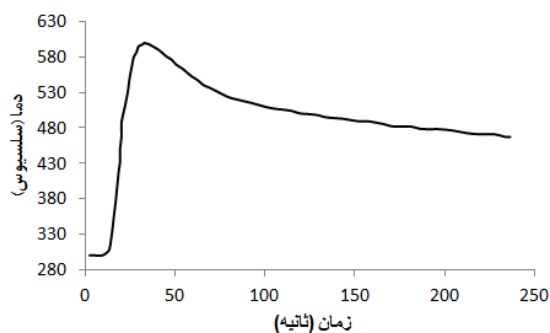
معادله انتقال حرارت جوشکاری را می‌توان با شرایط مرزی مذکور و استفاده از روش‌های حل عددی حل کرد. کافی است برای تحلیل حرارتی و رسیدن به توزیع دما، شرایط مرزی ذکر شده تعریف شوند و اطلاعاتی از قبیل

حاصل از حل عددی در حین عملیات جوشکاری به صورت نمونه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- توزیع دما در زمان جوشکاری

نمودار دما - زمان برای یک پاس جوشکاری و در نقطه میانی ورق که به اندازه یک سانتی‌متر از خط جوش فاصله دارد، توسط نرم‌افزار استخراج شده که در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

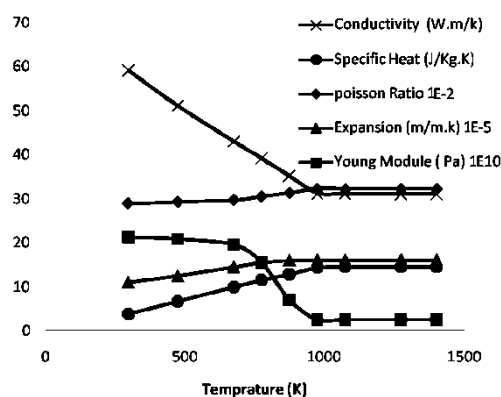


شکل ۳- نمودار دما- زمان برای نقطه $z=1\text{cm}$

۳- کار تجربی

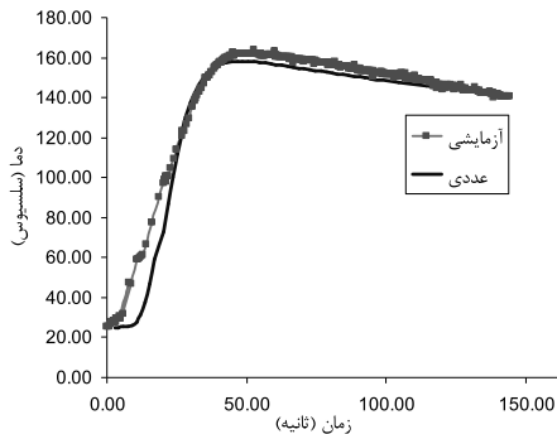
در روش تجربی، برای اندازه‌گیری دما از دستگاه ترمومتر لیزری مدل DT-885 استفاده شده است. این دستگاه قابلیت اتصال به کامپیوتر را دارد و می‌توان دماهای اندازه‌گیری شده را هم به صورت منحنی دما - زمان و هم در یک جدول دریافت کرد. دمای یک نقطه از قطعه از زمان شروع جوشکاری تا بعد از عملیات جوشکاری، یعنی زمانی که ورق سرد می‌شود، اندازه‌گیری گردید. منحنی

خصوصیات فیزیکی ماده که وابسته به دما هستند نیز مشخص شوند. بر این اساس، پس از انجام محاسبات و حل معادلات مربوطه توسط نرم‌افزار، توزیع دمای حاصل از شبیه‌سازی مدل جوشکاری شده را می‌توان مشاهده نمود. با توجه به معادلات و شرایط مرزی، اطلاعاتی که به عنوان ورودی مورد نیاز است عبارتند از دمای اولیه که برابر دمای محیط است، مقادیر ضریب حرارت جابجایی و تابشی (معادله ۸)، خصوصیات فیزیکی وابسته به دما از قبیل ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمای ویژه و چگالی (در معادله ۳) که مقادیر آنها در شکل ۱ آورده شده است. یکی از مهمترین نکات در شبیه‌سازی تحلیل حرارتی، تعریف شار حرارتی، معرفی گام‌ها و زمان اعمال شار به قطعه می‌باشد که از این طریق بتوان حرکت منبع گرمای جوشکاری را مدل کرد. این امر را می‌توان با المان‌بندی مناسب در مدل و نوشتن حلقه تکرار برای اعمال شار حرارتی با استفاده از معادله (۵) در تک تک المان‌های موجود روی خط جوش، شبیه‌سازی نمود.



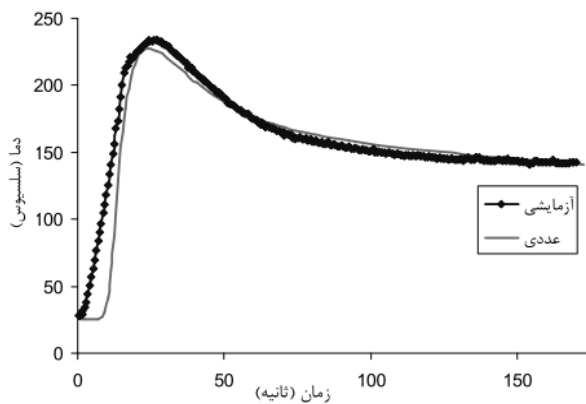
شکل ۱- نمودار خصوصیات ماده

ورق فلز مورد نظر از جنس فولاد ST-37 با چگالی 7860 kg/m^3 و جوشکاری از نوع GMAW با $\eta=0.7$ می‌باشد. برای مدل‌سازی، به علت تقارن، فقط نیمی از قطعه به صورت سه بعدی مدل می‌شود. سرعت جوشکاری 3.5 mm/s ، ضریب جابجایی حرارتی $15\text{ W/m}^2\text{ K}$ و دمای اولیه اتاق 298°K می‌باشد. در مرحله اول، جوشکاری قطعه در یک پاس انجام می‌شود. توزیع دمای



شکل ۶- منحنی دما - زمان در نقطه $z = -2/5$ cm

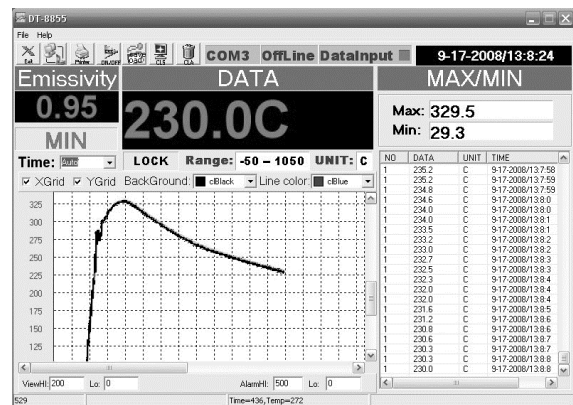
آزمایش سوم برای بررسی اثر سرعت جوشکاری صورت می‌گیرد. عملیات جوشکاری در این حالت با سرعت بیشتری انجام شده، به طوری که سرعت متناظر آن در حدود $5/5$ mm/s به دست آید. مقدار دما در فاصله یک سانتی‌متری از خط جوش اندازه گرفته شده است. منحنی‌های دما- زمان حاصل از آزمایش و حل عددی در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- نمودار دما - زمان در $z = -1$ cm و سرعت 5.5 mm/s

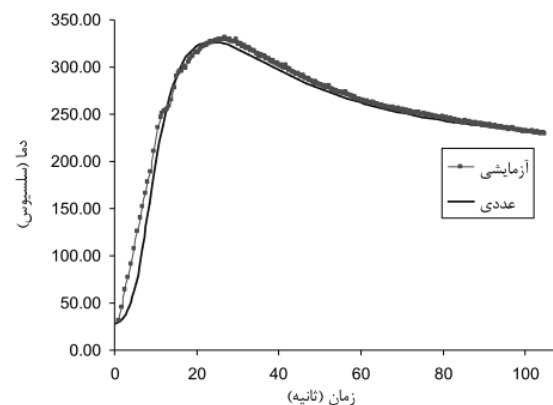
در شکل ۸، منحنی دما- زمان اندازه‌گیری شده برای سه نقطه مختلف در ورق نشان داده شده است. بالاترین منحنی مربوط به یک نقطه واقع در خط جوش است و دو منحنی دیگر مربوط به نقاطی می‌باشند که از خط جوش دورتر هستند. همان گونه که از شکل ۸ پیداست، هر چه به خط جوش نزدیکتر شویم مقدار بیشینه دما و شیب صعودی و نزولی منحنی بیشتر می‌شود.

دما - زمان اندازه‌گیری شده به صورت نمونه در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



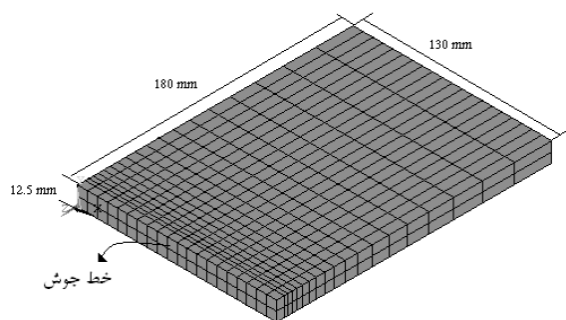
شکل ۴- نمودار دما- زمان حاصل از روش آزمایشگاهی

در شکل ۵، منحنی دما- زمان حاصل از حل عددی و اندازه‌گیری تجربی با هم مقایسه شده‌اند.

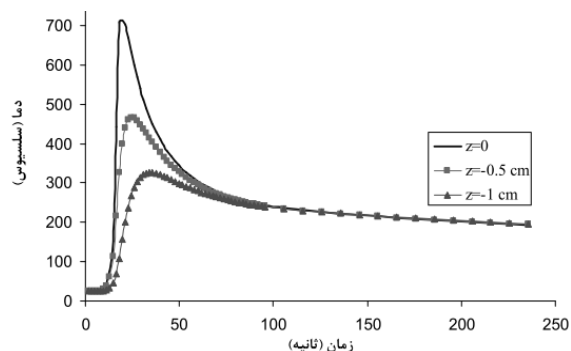


شکل ۵- منحنی دما - زمان حاصل از آزمایش و حل عددی در نقطه $z = 1$ cm

در آزمایش دوم، دما برای نقطه‌ای در فاصله $2/5$ سانتی‌متری از خط جوش و وسط خط طولی (راستای جوش) اندازه‌گیری می‌شود، تا اثر دور شدن از خط جوش بررسی شود. در شکل ۶، منحنی‌های دما- زمان حاصل از آزمایش و حل عددی نشان داده شده است.



شکل ۱۰- مدل المان محدود



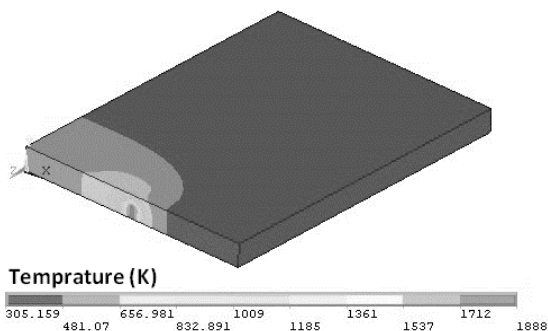
شکل ۸- نمودار دما- زمان در راستای عمود بر خط جوش

مشخصات مربوط به این فرایند در جدول ۱ و خصوصیات فیزیکی ماده در شکل ۱ آورده شده‌اند.

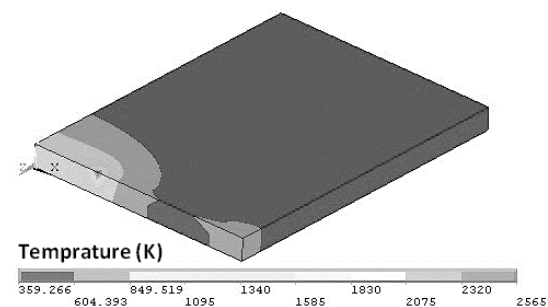
جدول ۱- مشخصات فرایند جوشکاری دو پاسه

پارامترهای جوشکاری		پاس اول	پاس دوم
سرعت جوشکاری	mm/s	۳/۰۸	۳/۳۳
ولتاژ (ولت)		۲۰	۲۲
جریان الکتریکی (آمپر)		۱۸۰	۲۲۰

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ توزیع دما و در شکل ۱۳ نمودار دما- زمان در جوشکاری دو پاسه مشاهده می‌شود.

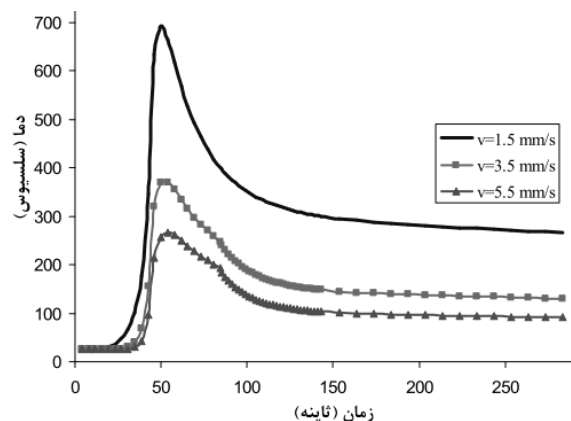


شکل ۱۱- کانتور توزیع دما در اواسط پاس اول جوشکاری



شکل ۱۲- کانتور توزیع دما در پاس دوم جوشکاری

از آنجا که تغییر مقدار سرعت جوشکاری بر جواب مسئله بسیار تأثیرگذار است، تحلیل برای سه سرعت مختلف در نقطه میانی انجام شده تا نتایج آنها با هم مقایسه شوند. در شکل ۹ منحنی‌های توزیع دما برای سه سرعت مختلف نشان داده شده‌اند.



شکل ۹- نمودار دما- زمان برای سه سرعت مختلف

۴- جوشکاری دو پاسه

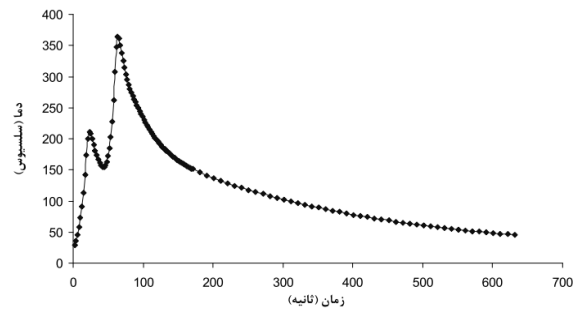
در ادامه، به بررسی شبیه‌سازی فرایند جوشکاری دو پاسه پرداخته شده است. یکی از تکنیک‌های شبیه‌سازی اضافه شدن ماده جوش در روش المان محدود استفاده از روش مرگ و تولد المان است. در این روش، تا قبل از اضافه شدن ماده جوش و رسیدن شار حرارتی به آن، المان‌ها غیر فعال هستند و با حرکت قوس الکتریکی و رسیدن به هر المان، آن المان فعال شده و شار حرارتی به آن اعمال می‌شود. در شکل ۱۰، مدل المان محدود قطعه نمایش داده شده است.

استفاده از نتایج حاصل از تحلیل حرارتی، مقادیر تنش پسماند به دست می‌آیند. مقادیر خصوصیات مکانیکی از قبیل ضریب یانگ و ضریب پواسون که در ماتریس سختی الاستیک $[D^e]$ (معادله ۱۰) قرار می‌گیرند و ضریب انبساط حرارتی که در معادله جزء کرنش (معادله ۱۱) قرار دارد را می‌توان در شکل ۱ مشاهده نمود.

برای تعیین مقدار جزء کرنش پلاستیک $\{d\varepsilon^p\}$ ، لازم است اطلاعاتی در مورد معیار سطح تسلیم ماده و نیز نوع کرنش سختی آن موجود باشد [۱۶]. آزمایش نشان می‌دهد که رفتار واقعی ماده حالتی بین دو نوع کرنش سختی ایزوتروپیک و سینماتیک است. اثر کرنش سختی بر توزیع تنش پسماند بررسی می‌شود.

یکی از مهمترین خصوصیات ماده که باید مشخص شود مقدار تنش تسلیم ماده در هر دما است. با تغییر دما در فرایند جوشکاری، مقدار تنش تسلیم ماده نیز در حال تغییر است. با حل مسئله برای مقادیر مختلف تنش تسلیم مشاهده شد که جواب‌های حاصل بسیار متغیر می‌باشند. به عبارت دیگر، مقادیر تنش تسلیم به ازای دماهای متفاوت، روی مقادیر حاصل تنش پسماند بسیار تأثیرگذار هستند. از این رو، مقادیر تنش تسلیم باید دقیقاً مشخص شوند.

در این مقاله، برای به دست آوردن مقادیر تنش تسلیم ماده در دماهای مختلف، ۶ نمونه استاندارد از فلز ST-37 تهیه شده و تحت آزمایش کشش قرار داده شدند. این کار با استفاده از دستگاه اینسترون طی ۶ مرحله آزمایش در ۶ دمای مختلف انجام شد. بدین ترتیب، مقادیر تنش تسلیم آنها اندازه‌گیری می‌شود. نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از این آزمایش‌ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. برای به دست آوردن مقادیر تنش تسلیم و مدول پلاستیسیته باید محدوده تقریبی کرنش به وجود آمده در حین جوشکاری را در نظر گرفت و منحنی تنش-کرنش ماده را تا آن محدوده رسم کرد که بتوان نقطه‌ای که در آن منحنی به تنش تسلیم می‌رسد و شیب منحنی بعد از



شکل ۱۳- نمودار دما زمان برای نقطه $z=1.5$ cm

۵- تحلیل تنش

همان طور که گفته شد، در فرایند جوشکاری، به علت نرخ بالای افزایش دما و پایین بودن تنش تسلیم در دماهای زیاد، ماده دچار کرنش پلاستیک می‌شود. بنابراین برای تحلیل رفتار ماده و محاسبه تنش پسماند نیاز به استفاده از روابط ترموالاستوپلاستیک می‌باشد:

$$[d\sigma] = [D^{ep}]\{d\varepsilon\} - [D^{th}]\{dT\} \quad (10)$$

که در آن $[D^{ep}]$ برابر مجموع $[D^e]$ و $[D^p]$ است که به ترتیب ماتریس سختی الاستیک و پلاستیک می‌باشند و $[D^{th}]$ ماتریس سختی حرارتی است. از آنجا که کرنش‌های ایجاد شده در جوشکاری تابعی از تاریخچه حرارتی و بارگذاری می‌باشند این معادله به صورت جزئی نوشته می‌شود [۱۵]. در معادله (۱۰)، $d\sigma$ جزء تنش، $d\varepsilon$ جزء کرنش و dT جزء دما می‌باشند.

مقدار $d\varepsilon$ را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

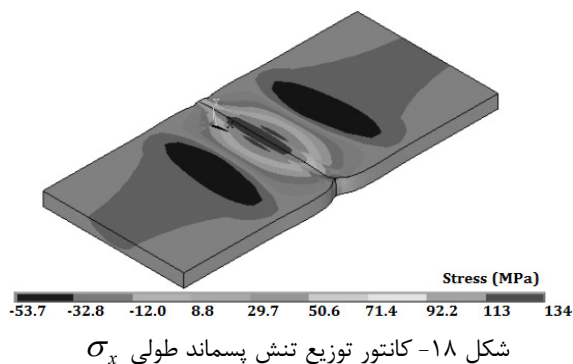
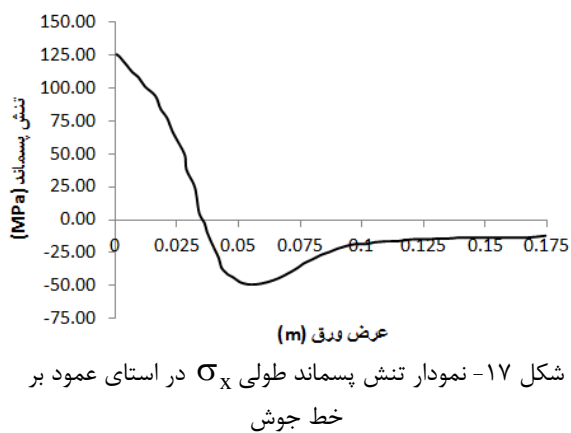
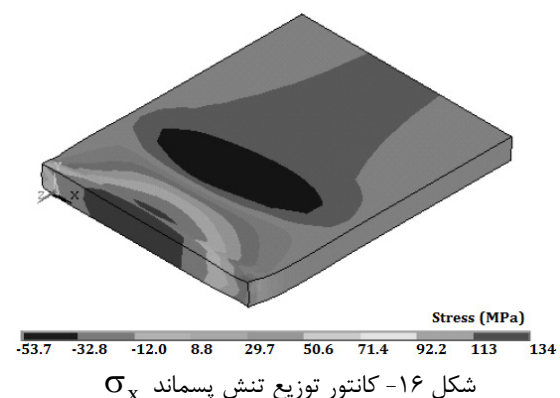
$$(11)$$

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\} + \{d\varepsilon^{th}\} + \{d\varepsilon^{ph}\} - \{\alpha\}dT - (T - T_{\infty})\{d\alpha\}$$

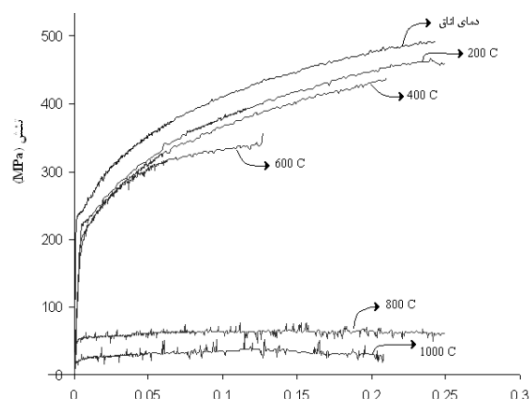
که در آن $\{d\varepsilon^e\}$ ، $\{d\varepsilon^p\}$ ، $\{d\varepsilon^{th}\}$ و $\{d\varepsilon^{ph}\}$ به ترتیب جزء کرنش الاستیک، پلاستیک، حرارتی و تغییر فاز و $\{\alpha\}$ ضریب انبساط حرارتی است که به علت وابستگی آنها به دما به صورت جزئی در معادله آورده شده‌اند.

برای حل عددی معادلات مربوط به تحلیل تنش کافی است خصوصیات مکانیکی ماده مشخص شوند. سپس با

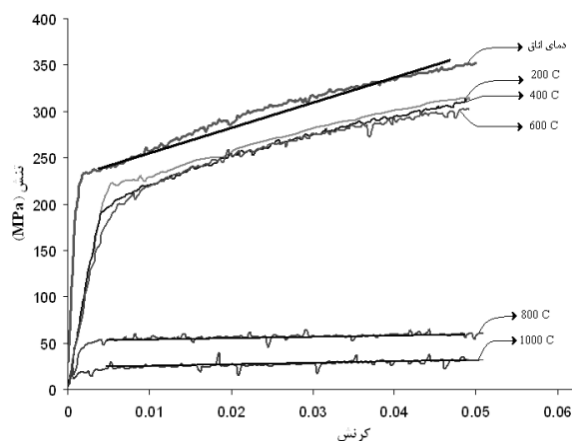
با ورود اطلاعات به نرم‌افزار می‌توان نتایج تنش پسماند به دست آمده را مشاهده نمود. در شکل ۱۶ مقادیر تنش پسماند طولی σ_x و در شکل ۱۷ نمودار تنش-مکان آن آورده شده‌اند. در این دو شکل، مقادیر تنش پسماند برای نصف قطعه و در شکل ۱۸ کل قطعه، یعنی دو ورق به هم جوش شده، مشاهده می‌شوند. تنش پسماند عرضی σ_z در راستای خط جوش در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



تسلیم را به دست آورد. این نمودار را می‌توان در شکل ۱۵ مشاهده نمود.

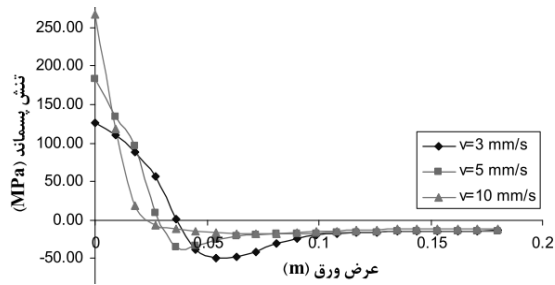


مقادیر تنش تسلیم را مستقیماً از دستگاه خوانده و برای به دست آوردن مدول پلاستیسیته ماده، کافی است شیب خطوط نشان داده شده در شکل ۱۵ را حساب کرده و به عنوان اطلاعات ورودی در برنامه قرار داد. در جدول ۲ مقادیر تنش تسلیم و مدول پلاستیسیته حاصل را می‌توان مشاهده نمود.

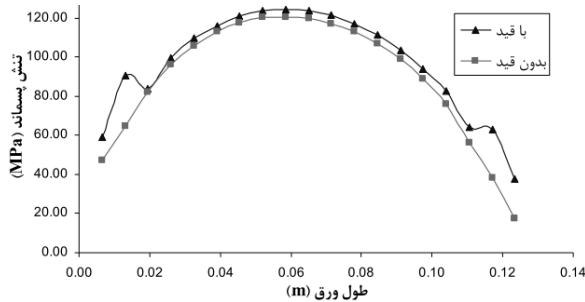


جدول ۲- مقادیر تنش تسلیم و مدول پلاستیسیته فولاد St-37

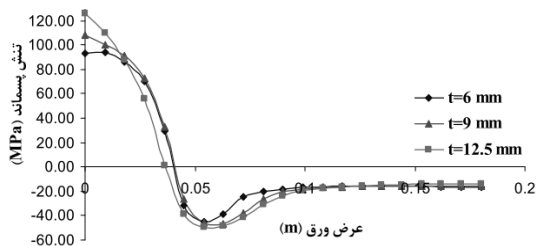
دما (درجه سلسیوس)	۲۳	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰
تنش تسلیم (MPa)	۲۳۷	۲۲۲	۲۰۳	۱۹۱	۵۳	۲۱
مدول پلاستیسیته (GPa)	۲/۸	۲/۲	۱/۷	۱/۴	۰/۱۷	۰/۱۵



شکل ۲۲- اثر تغییر سرعت بر مقادیر تنش پسماند



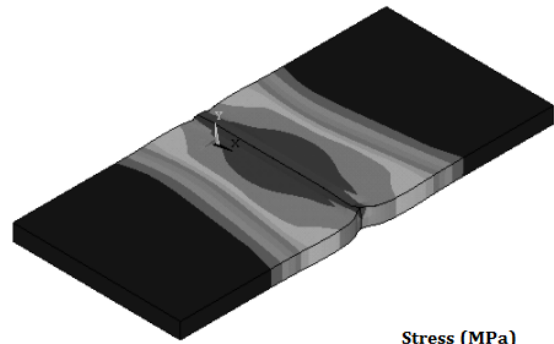
شکل ۲۳- اثر قید بر مقادیر تنش پسماند عرضی



شکل ۲۴- اثر ضخامت بر مقادیر تنش پسماند

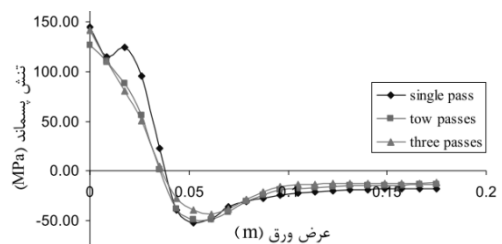
۶- بحث و نتیجه گیری

از روی شیب صعودی منحنی دما - زمان در حین جوشکاری نسبت به لحظه سرد شدن، که منحنی روند نزولی را طی می‌کند، می‌توان مشاهده نمود که سرعت افزایش دما در حین جوشکاری از سرعت افت دما بعد از جوشکاری بیشتر می‌باشد. در نقاط دور از خط جوش، مقدار دما کاهش می‌یابد. ولی در نقاط نزدیک به خط جوش، مقدار بیشینه دما و نیز شیب منحنی دما- زمان بیشتر می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به منحنی‌های حاصل از آزمایش مربوط به سرعت جوشکاری می‌توان مشاهده نمود که با افزایش سرعت، مقدار دما کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که هر چه سرعت

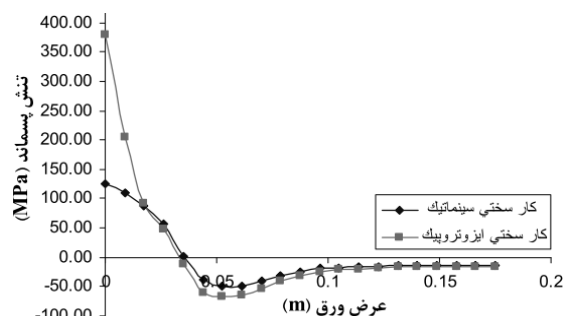


شکل ۱۹- کانتور توزیع تنش عرضی σ_z

در ادامه، به بررسی اثر پارامترهای مختلف جوشکاری بر مقادیر تنش پسماند پرداخته می‌شود. در شکل ۲۰، اثر تعداد پاس جوشکاری، در شکل ۲۱ اثر انتخاب کرنش سختی ایزوتروپیک و کرنش سختی سینماتیک، در شکل ۲۲ اثر تغییر سرعت، در شکل ۲۳ اثر وجود قید بر ورق و در شکل ۲۴ اثر ضخامت ورق بر مقادیر تنش پسماند آورده شده است.



شکل ۲۰- مقایسه جوشکاری تک پاس و چند پاس



شکل ۲۱- مقایسه مقادیر تنش پسماند برای دو حالت کار سختی ایزوتروپیک و سینماتیک

مقایسه نتایج حاصل برای دو حالت ایزوتروپیک و سینماتیک نشان می‌دهد که اولاً مقادیر تنش به وجود آمده در حالت ایزوتروپیک بیشتر از حالت سینماتیک می‌باشند و ثانیاً با مقایسه آن با جواب‌های حاصل از روش آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که حالت کرنش سختی سینماتیک به واقعیت نزدیکتر می‌باشد و جواب‌های ناشی از کرنش سختی ایزوتروپیک از جواب‌های واقعی دورتر می‌باشند. همان گونه که از شکل ۲۱ پیداست، تنش پسماند کششی برای حالت ایزوتروپیک بیشتر از حالت سینماتیک است. همچنین، تنش کششی در نزدیکی خط جوش از مقدار تنش تسلیم که 237 MPa است، بسیار بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که کرنش سختی ماده نمی‌تواند به طور کامل ایزوتروپیک باشد؛ ولی به حالت سینماتیک نزدیکتر است. به طور کلی، حالت واقعی ماده ترکیبی از کرنش سختی سینماتیک و ایزوتروپیک می‌باشد.

پهنای ناحیه تحت تنش پسماند کششی، با افزایش سرعت کمتر می‌شود. ولی به علت بی‌نظمی بیشتری که در سرعت زیاد به وجود می‌آید مقادیر تنش کششی به وجود آمده از مقادیر متناظرشان در سرعت‌های کم، کمتر می‌باشند. همچنین قید باعث ایجاد تنش‌های مضاعفی می‌گردد که جمع اثر آن با تنش‌های ناشی از جوشکاری منجر به افزایش تنش پسماند می‌شود. با افزایش ضخامت ورق، کناره‌های خط جوش دچار تنش بیشتری می‌شود. ولی ورق‌های با ضخامت کمتر در نقاط دور از خط جوش دارای مقادیر تنش پسماند بیشتری می‌باشند.

جوشکاری بیشتر شود، گرمای کمتری به قطعه وارد می‌شود؛ یا به عبارت دیگر، زمان کمتری برای اعمال حرارت به ناحیه تحت تأثیر گرما مورد نیاز می‌باشد. در مورد جوشکاری دو پاسه، مشاهده می‌شود که مقادیر دما در پاس دوم بیشتر از مقادیر معادل آن در پاس اول است. همان‌گونه که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، در راستای عمود بر خط جوش و در نزدیکی آن، مقادیر بزرگ تنش پسماند کششی به وجود می‌آیند و به تدریج و به سمت لبه‌های ورق تنش‌ها فشاری می‌شوند. در راستای موازی خط جوش (محور X ها) و در لبه‌های ورق، تنش‌ها فشاری هستند و در ناحیه مرکزی، تنش‌ها کششی می‌شوند. در نقطه زیر الکتروود، جایی که حوضچه مذاب تشکیل می‌شود، تنش‌ها فشاری‌اند و بعد از گذشتن الکتروود و عبور شار حرارتی از آن ناحیه، تنش‌ها به سمت کششی شدن پیش می‌روند.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل مشخص شد که انتخاب تعداد المان، مقدار گرمای ورودی، طرز اعمال شار حرارتی، سرعت جوشکاری، مقدار تنش تسلیم، ضریب یانگ ماده و مدول پلاستیسیته بر مقدار و توزیع تنش تأثیر دارند.

مقایسه تعداد پاس‌های مختلف در جوشکاری نشان داد که با افزایش تعداد پاس، تغییر چندانی در مقادیر تنش پسماند حاصل به وجود نمی‌آید و تقریباً نزدیک به یکدیگرند. انجام پاس جدید در ناحیه جوش و گرما دادن دوباره ناحیه جوشکاری شده باعث می‌شود تا تنش‌های به وجود آمده در پاس قبلی آزاد شوند و پاس جدید تنش‌های گرمایی جدیدی را ایجاد می‌کند. با این وجود، مقدار تنش پسماند در همه پاس‌ها محدوده معینی دارد.

۷-مراجع

- [1] Teng, T.L., Chang, P.H. (2004), "Effect of residual stresses on fatigue crack initiation life for butt-welded joints". Intl. J. Mater. Process. Technol., Vol. 145, pp. 325-335.
- [2] Teng, L., Lin, C.H. (1998), "Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds". Intl. J. Pres. Ves. Pip., Vol. 75, pp. 857-864.

- [3] Cho, J.R., Lee, B.Y., Moonb, Y.H., Van Tyne, C.J. (2004), "Investigation of residual stress and post weld heat treatment of multi-pass welds by finite element method and experiments". *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 155-156, pp. 1690-1695.
- [4] Norton, J.H., Rosenthal, D. (1944), "Stress measurement by X-ray diffraction". *Proc. Soc. Exp. Stress Anal.*, Vol. 1, No. 2, pp. 73-76.
- [5] Norton, J.H., Rosenthal, D. (1947), "Recent contributions to the X-ray method in the field of stress analysis". *Proc. Soc. Exp. Stress Anal.*, Vol. 5, No. 1, pp. 71-77.
- [6] Pang, H.L., Pukas, S.R. (1989), "Residual stress measurements in a crusi-form welded joint using hole drilling and strain gauges". *Strain*, Vol. 2, pp. 7-14.
- [7] Chu, S.L., Peukrt, H., Schnider, E. (1987), "Residual stress in a welded steel plate and their measurement using ultrasonic techniques". *MRL Bull. Res. Develop.*, Vol. 1, No. 2, pp. 45-50.
- [8] Clark, A.V., Moulder, J.C., Trevisan, R.E., Siewert, T.A., Mignogna, R.B. (1986), "Ultrasonic techniques for residual stress measurement in thin welded aluminum alloy plates". *Prog. Quant. NDE*, Vol. 5B, pp. 1461-1472.
- [9] Namkung, M., Utrata, D., Heyman, J.S., Allison, S.G. (1987), "Low-field magnetoacoustic residual stress measurement in steel". *Solid Mechanics Research for Quantitative Non-Destructive Evaluation*, The Netherlands, pp. 301-318.
- [10] Mahapatra, M.M., Datta, G.L., Pradhan, B. (2006), "Three-dimensional finite element analysis to predict the effects of shielded metal arc welding process parameters on temperature distributions and weldment zones in butt and one-sided fillet welds". *J. Eng. Manuf.*, Vol. 220, pp. 837-845.
- [11] Deng, D., Murakawa, H. (2006), "Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements". *Computat. Mater. Sci.*, Vol. 37, pp. 269-277.
- [12] Akbari, D., Sattari-Far, I. (2009). "Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints". *Intl. J. Pres. Ves. Pip.*, Vol. 86, pp. 769-776.
- [13] Lee, C.H., Chang, K.H. (2009), "Finite element simulation of the residual stresses in high strength carbon steel butt weld incorporating solid-state phase transformation". *Computat. Mater. Sci.*, Vol. 46, pp. 1014-1022.
- [14] Lee, C.H., Chang, K.H. (2012), "Temperature fields and residual stress distributions in dissimilar steel butt welds between carbon and stainless steels". *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 45-46, pp. 33-41.
- [۱۵] سیفی، ر. (۱۳۸۲). بررسی پارامترهای ترک در حوزه تنش پسماند ناشی از جوشکاری. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- [16] Be, H. (2005), "Computer modeling of weld joint microstructure and residual stress". Master Thesis, Carleton University, Ottawa, Canada.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF TEMPERATURE DISTRIBUTION AND DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES DUE TO WELDING OF PLATES

G.H. Majzoubi¹, R. Seifi^{2*} and S. Ali-akbar³

1. Professor, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan
2. Associate Professor, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan
3. MSc Graduated, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan

*Corresponding Author: rseifi@basu.ac.ir

ARTICLE INFO

Keywords:
Welding of Plates,
Temperature
Distribution,
Residual Stress,
Strain Hardening.

ABSTRACT

Despite of the significant advantages of different methods of welding, produced residual stresses is inevitable detriment in manufacturing processes. In this paper, effects of various factors on the welding process and residual stresses formation are investigated. Thermal and mechanical analysis is done in two stages. Thermal analysis is done using the finite element code and temperature distribution during and after welding is obtained and compared with the laboratory data. There are good agreement between numerical results and experimental data on temperature distribution and its maximum values. The mechanical and physical properties of material change with temperature. Their effects on the residual stress distribution are very important that it has been investigated in this article. The effects of various conditions and changes in several parameters such as welding velocity, existing of constraints, material behavior, thickness of plates and number of welding passes on the welding residual stress values are also investigated.
