

طرح ابتکاری مدل معادل برای شبیه‌سازی فرایند جوشکاری

علی حیدری^{۱*}محمدرضا فروزان^۲سیدجعفر گلستانه^۳

* نویسنده مسئول: heidari@iaukhsh.ac.ir

چکیده

بسیاری از محققان بدلیل زمان و هزینه بالای شبیه‌سازی سه‌بعدی جوشکاری تنها به حل دوبعدی آن اکتفا می‌کنند. در این تحقیق با ارائه یک طرح ابتکاری (تعریف یک مدل معادل برای شبیه‌سازی جوشکاری)، تعداد المان‌ها و گره‌ها را کاهش داده و در نتیجه زمان حل را کاهش و تا حد زیادی مشکلات حل‌های سه‌بعدی را برطرف نموده‌ایم. شبیه‌سازی فرایند جوشکاری زیرپودری به کمک روش اجزاء محدود با تحلیل غیر کوپله حرارتی و مکانیکی در سه مرحله به انجام رسیده است. در مرحله اول از حل حرارتی تاریخچه دمایی مشخص شده و سپس در مرحله دوم توزیع فازهای متالورژیکی در نواحی ذوب و متأثر از جوشکاری محاسبه می‌شود. نهایتاً در مرحله سوم از حل مکانیکی، توزیع تنش به دست می‌آید که خاصیت ماده برای هر المان با توجه به فاز مشخص شده در مرحله دوم به آن اختصاص می‌یابد. یکی از مهمترین اهداف این شبیه‌سازی، بررسی تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری می‌باشد. مقایسه‌ای بین نتایج حرارتی حاصل شده از برنامه با نتایج متالوگرافی و آزمایشگاهی این تحقیق صورت گرفته است که گویای دقت بالای برنامه است.

واژه‌های کلیدی: فرایند جوشکاری، روش اجزاء محدود، مدل معادل، تنش پسماند

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- کارشناس ارشد، شرکت لوله و تجهیزات سدید، تهران

۱- مقدمه

جوشکاری ذوبی به عنوان یک روش اتصال در صنایع مختلف از جمله سازه‌های فلزی، لوله‌سازی و صنایع خودرو به طور گسترده کاربرد دارد. پیش‌بینی شرایط سازه پس از جوشکاری مانند تنش‌های پسماند و اعوجاج حاصل از جوش برای طراحان اهمیت زیادی دارد. مهمترین عوامل ایجاد تنش‌ها و کرنش‌های پسماند در این قطعات کرنش پلاستیک ایجاد شده در جسم به دلیل گرادیان دمای بالا و کرنش‌های ناشی از ایجاد استحاله‌های فازی در طی سیکل حرارتی می‌باشند. تنش پسماند اطراف جوش یکپارچگی سازه را از بین می‌برد و از طرفی تنش پسماند کششی بالا در نزدیک ناحیه جوش باعث ترد شدن، کاهش طول عمر سازه و بروز ترک خوردگی تششی^۱ در طول سرویس‌دهی می‌شود [۱]. بنابراین تخمین مقدار و توزیع تنش‌های پسماند جوشکاری امری ضروری تلقی می‌گردد. در گذشته محاسبه تنش‌های پسماند جوشکاری توسط روش‌های اندازه‌گیری تجربی صورت می‌گرفت که اغلب پرهزینه و زمان‌بر بودند. بنابراین در چند دهه اخیر محققان، تلاش‌های زیادی برای تعیین تنش‌های پسماند جوشکاری به کمک روش‌های تحلیلی از جمله روش اجزاء محدود نموده‌اند. اهمیت موضوع به حدی است که در بازه سالهای ۱۹۷۶ تا ۱۹۹۶ میلادی حدود ۹۲۰ مقاله علمی [۲] و در بازه سالهای ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۱ میلادی حدود ۵۵۰ مقاله علمی در رابطه با شبیه‌سازی جوشکاری به روش اجزاء محدود ارائه شده است [۳]. از جمله پیشنهادان این عرصه می‌توان به اندرسن [۴] اشاره نمود که در سال ۱۹۷۸ با استفاده از روش اجزاء محدود دو بعدی توزیع تنش پسماند در سطوح بالا و پایین صفحه پایه در نزدیکی جوش را طی فرایند جوشکاری زیرپودری^۲ بررسی کرد. وجود فرضیات متعدد که ناشی از امکانات آن زمان بود باعث شد تا وی تفاوت‌های قابل توجه‌ای بین نتایج عددی و مقادیر تجربی مشاهده نماید.

در سال ۱۹۸۳، گلداک [۵] یک مدل ریاضی از منبع حرارتی^۳ بر پایه توزیع گوسی چگالی توان ارائه کرد. در مدل‌های قبل از این، منبع به صورت دایره، کره یا بیضی در نظر گرفته می‌شود ولی از آنجائیکه در نتایج حاصل از این مدل‌ها، گرادیان دما در جلو منبع حرارتی به تندی نتایج تجربی نبود و همینطور گرادیان دما در انتهای منبع تندتر از نتایج تجربی بود، گلداک در مدل خود منبع را به صورت دو بیضی لحاظ کرد. از قابلیت‌های این مدل جدید می‌توان به مدل کردن جوش با نفوذ کم یا زیاد، جوش نامتقارن و جوش دو فلز غیر مشابه اشاره کرد. وی مدل خود را برای جوشکاری دو ورق تست کرد که نتایج حاصل با مقادیر تجربی تطابق خوبی داشتند. در حال حاضر اکثر محققان از مدل‌های تصحیح شده و توسعه یافته مبتنی بر مدل گلداک استفاده می‌کنند.

در سال ۱۹۹۵، روالنس [۶] جوشکاری دو ورق و لوله درز مستقیم به‌طور جداگانه را شبیه‌سازی کرد و تنش‌های پسماند آنها را با یکدیگر مقایسه کرد و نشان داد هرگاه خواص ماده اصلی، شرایط هندسی مانند ضخامت و پارامترهای جوشکاری یکی باشد نتایج به‌دست آمده از دو مدل مختلف بسیار به یکدیگر نزدیک است و تنها تنش پسماند عرضی در لوله در سطح پایینی یک افت دارد.

در سال ۲۰۰۱، ون [۷] جوشکاری زیرپودری چند پاسه لوله‌های جدار ضخیم را توسط نرم افزار ABAQUS به صورت دو بعدی و سه بعدی مدل کرد. وی تحلیل اجزاء محدود را تحت شرایط مختلف انجام داد و نتایج حاصل از آنها را با یکدیگر مقایسه کرد و همین‌طور اثر تنش و کرنش‌های پسماند حاصل از شکل‌دهی لوله قبل از جوشکاری را مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل نشان داد که در نظر گرفتن تنش و کرنش‌های حاصل از شکل‌دهی لوله قبل از جوشکاری، مخصوصاً برای برآورد هندسه اعوجاج مهم می‌باشد.

در سال ۲۰۰۲، چو [۸] یک مدل جدید برای در نظر گرفتن استحاله‌های فازی ارائه کرد و به کمک نرم‌افزار

۱- Stress corrosion cracking (SCC)

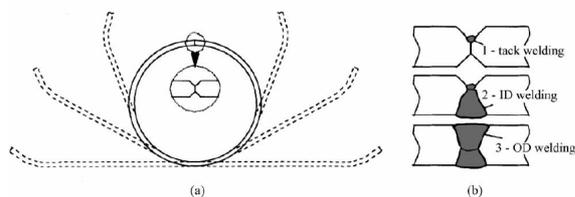
۲- Submerged arc welding (SAW)

۳- Heat source

این تحقیق با پیشنهاد طرح ابتکاری که معرفی یک مدل معادل می‌باشد تا حد زیادی مشکلات مربوط به زمان و هزینه‌های بالای شبیه‌سازی به‌خصوص در حل‌های سه‌بعدی برطرف شده است. حل حرارتی فرایند جوشکاری برای مدل دوبعدی و سه‌بعدی انجام شده و حل مکانیکی فرایند جوشکاری برای مدل دوبعدی انجام شده است.

۲- لوله درز جوش مستقیم

روش متداول در ساخت لوله‌های درز جوش مستقیم، روش U&O می‌باشد. این روش همان‌طور که در شکل (۱) نمایش داده شده است شامل دو مرحله می‌باشد. در مرحله اول ورق به صورت U و سپس به صورت O در می‌آید. در مرحله دوم، ابتدا توسط جوش تک^۲ شکل لوله حفظ می‌شود و بعد جوش داخلی و خارجی انجام می‌شود که هر کدام از این جوش‌ها می‌تواند شامل چند پاس باشد. با توجه به این که جوش تک نهایتاً در جوش خارجی محو خواهد شد و بر روی تنش پسماند نهایی تأثیری ندارد معمولاً در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته نمی‌شود [۷].



شکل (۱) تولید لوله به روش U&O: (a) شکل‌دهی لوله (b) جوشکاری درز لوله [۷]

۳- مدل اجزای محدود

در این تحقیق جوشکاری درز مستقیم لوله‌ای با قطر خارجی ۱۴۲۲/۴ میلیمتر و ضخامت ۱۹/۸ میلیمتر مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۲) هندسه سه‌بعدی مدل لوله را به همراه سیستم مختصات انتخاب شده نشان می‌دهد. طرح اتصال دو سر لوله و مشخصات ابعادی آن در شکل (۳) آمده است.

ABAQUS تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری قوس تنگستنی گازی را به‌دست آورد. وی این تحلیل را برای دو نوع ورق (فولاد کم کربن AISI ۱۰۲۰ و فولاد کربن متوسط AISI ۱۰۴۵) انجام داد و با مقایسه نتایج حاصل شده از روش عددی، با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اثر در نظر گرفتن استحاله‌های فازی بر روی تنش‌های پسماند، در فولاد با کربن متوسط و بالا قابل توجه می‌باشد ولی این اثر، در مورد فولاد کم کربن بسیار ناچیز است.

در سال ۲۰۰۴، چانگ [۹] آنالیز الاستیک-پلاستیک حرارتی به کمک روش اجزاء محدود را برای تحلیل رفتار ترمومکانیکی و برآورد تنش‌های پسماند در اتصالات لب به لب جوش شده مورد بررسی قرار داد. بعلاوه تنش‌های پسماند در سطح را توسط روش پراش پرتو X اندازه‌گیری و با نتایج اجزاء محدود مقایسه کرد. وی در برنامه خود از قابلیت تولد و مرگ المان‌ها برای مدل کردن جوش سه پاسه قوس تنگستنی با گاز محافظ استفاده کرده است.

در سال ۲۰۰۴، یاجیانگ [۱۰] توزیع تنش پسماند در اتصال جوش صفحات فولادی با استحکام بالا توسط نرم‌افزار ANSYS را مورد بررسی قرار داد. روش جوشکاری در این تحقیق، از نوع جوشکاری قوسی با گاز محافظ می‌باشد. روش اجزا محدود، وجود یک گرادین شدید تنش اطراف منطقه جوش را نشان داد. از بررسی نتایج مشخص گردید که تنش عمود بر امتداد جوشکاری اثر بیشتری روی ایجاد ترک نسبت به تنش در دو امتداد دیگر دارد.

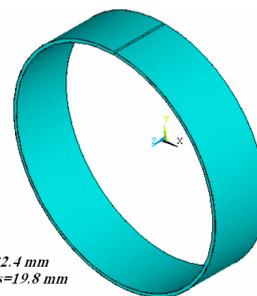
در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی فرایند جوشکاری زیر پودری در لوله‌های فولادی درز جوش مستقیم با استفاده از نرم‌افزار ANSYS در سه مرحله به انجام رسیده است. در مرحله اول از حل حرارتی تاریخچه دمایی مشخص شده و سپس در مرحله دوم به کمک کد تهیه شده توسط نویسندگان مقاله، توزیع فازهای متالورژیکی در نواحی ذوب و متأثر از جوشکاری محاسبه می‌شود. نهایتاً در مرحله سوم از حل مکانیکی، توزیع تنش به‌دست می‌آید که خاصیت ماده برای هر المان با توجه به فاز مشخص شده در مرحله دوم به آن اختصاص می‌یابد. در

۲- Tack welding

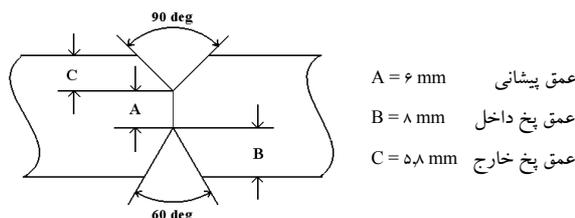
۱- X-ray diffraction (XRD)

فاصله بین الکترودهای AC و DC داخل، ۱۳ میلیمتر و برای الکترودهای خارج، ۱۲ میلیمتر است.

با توجه به تقارن مسئله برای شبیه‌سازی فرایند، تنها نیمی از جسم در نظر گرفته شده است. نحوه المان‌بندی برای مدل دوبعدی در شکل (۵) و برای مدل سه‌بعدی در شکل (۶) نمایش داده شده است. به علت وجود گرادیان شدید دما و تنش در ناحیه اطراف جوش، این ناحیه از اهمیت بالاتری برخوردار است به همین خاطر در این ناحیه از المان‌بندی ریزتر استفاده می‌کنیم. حداقل طول مورد نیاز برای لوله در حالت سه‌بعدی که بتواند نتایج یکنواختی در محدوده میانی در راستای طول لوله ایجاد کند با سعی و خطا حدود ۳۰۰ میلیمتر به دست آمده است که نتایج ارائه شده در قسمت‌های بعدی بر اساس این طول می‌باشد. صفحه میانی در راستای طول لوله را صفحه مرجع^۱ نام‌گذاری می‌کنیم و نتایج در حالت سه‌بعدی برای این صفحه ارائه می‌شود. صفحه مورد استفاده در مدل دوبعدی نیز حکم صفحه مرجع ما را دارد و مقایسه نتایج بین مدل دوبعدی و سه‌بعدی بر اساس نتایج این صفحه صورت می‌گیرد. با توجه به این که در طی زمان حل امکان تولید یا حذف المان‌ها وجود ندارد، باید تمامی المان‌ها در ابتدا تولید گردند. بنابراین برای مدل کردن ماده پرکننده در طی زمان جوشکاری از قابلیت تولد و مرگ المان‌ها کمک گرفته شده است.

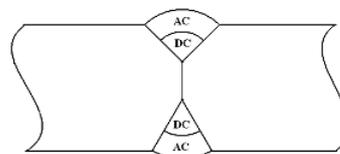


شکل (۲) هندسه سه‌بعدی مدل



شکل (۳) طرح اتصال دوسر لوله و مشخصات ابعادی

شکل (۴) وضعیت قرارگیری جوشها را نشان می‌دهد و همان‌طور که در شکل مشخص است جوش داخل و خارج هر کدام شامل جوش AC و DC می‌باشند.

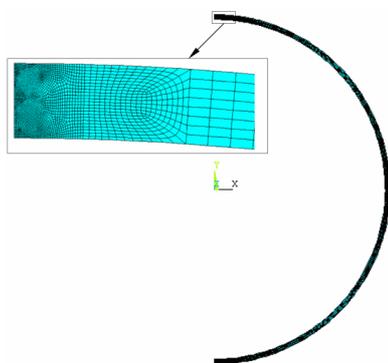


شکل (۴) وضعیت قرارگیری جوشها

بنابراین جوش‌ها با ترتیب AC، DC، AC داخل و مجدد DC، AC خارج داده می‌شوند. زمان بین جوش داخل و خارج بر اساس طرح عملی تولید لوله در کارخانه لوله و تجهیزات سدید لحاظ شده است تا بتوان نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با نتایج عملی مقایسه کرد. این زمان در برنامه بر اساس قطر لوله و سرعت جوشکاری به طور اتوماتیک محاسبه می‌شود. پارامترهای مربوط به جوش‌های داخلی و خارجی در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) پارامترهای جوشکاری برای هر جوش

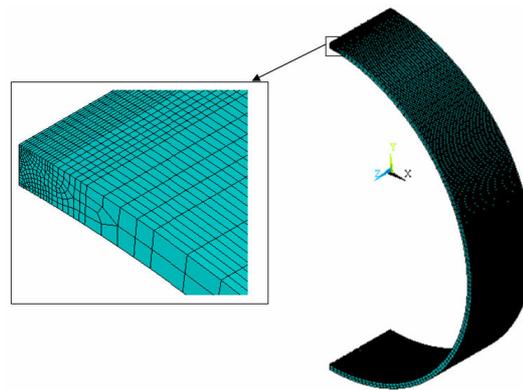
جوش	پارامترهای جوشکاری			
	ولتاژ (V)	جریان (A)	سرعت (cm/min)	قطر سیم جوش (mm)
AC داخل	۳۴	۶۵۰	۸۰	۳/۲
DC داخل	۳۰	۷۵۰	۸۰	۳/۲
AC خارج	۳۴	۷۰۰	۸۰	۴
DC خارج	۳۱	۱۱۰۰	۸۰	۳/۲



شکل (۵) المان‌بندی مدل دوبعدی

۱- Reference plane

هدایتی در دمای ذوب چهار برابر شده و برای در نظر گرفتن اثر گرمای نهان ذوب، ظرفیت گرمایی در دمای استحاله آستنیتی و دمای ذوب به ترتیب دو و شش برابر شده است [۱۲ و ۶۰-۱۴]. برای در نظر گرفتن اثرات تغییر حجم ماده در استحاله مارتنزیتی، مقدار α در بازه دمایی استحاله کاهش پیدا کرده است و مسلماً این مقدار کاهش برای استحاله‌های دیگر مانند بینیتی کاهش می‌یابد [۱۳]. همچنین کاهش تنش تسلیم در بازه دمایی استحاله مارتنزیتی اثر کرنش پلاستیک استحاله‌ای را در شبیه‌سازی لحاظ خواهد کرد و با توجه به سخت‌تر بودن فاز مارتنزیت نسبت به فازهای دیگر، تنش تسلیم برای این فاز مقدار بالایی دارد و برای دیگر فازها این مقدار کاهش می‌یابد [۱۳]. دیاگرام CCT مربوط به فولاد X۷۰ در شکل (۸) آورده شده است. مشخصات مربوط به این دیاگرام در جدول (۳) آمده است. در شبیه‌سازی برای مشخص شدن فاز در هر ناحیه بدین صورت عمل خواهد شد که در برنامه دیاگرام CCT با توجه به زمان سرد شدن جسم از دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد ($t_{8/5}$) به بازه‌هایی تقسیم خواهد شد که هر بازه مشخص کننده یک فاز یا ترکیبی از چند فاز است و در طی حل، مدت زمان $t_{8/5}$ محاسبه شده و با بررسی آن، بازه مربوطه مشخص و فاز تشخیص داده می‌شود.



شکل (۶) المان‌بندی مدل سه‌بعدی

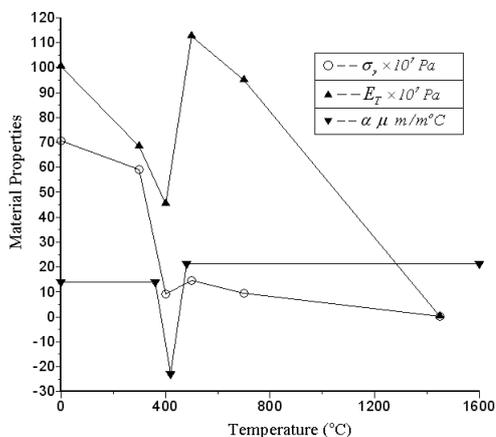
۴- خصوصیات ماده

جنس لوله X۷۰ API-5L می‌باشد که خواص مربوط به این فولاد بر اساس اعلام تولید کننده تهیه شده است. درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده این فولاد در جدول (۲) آمده است.

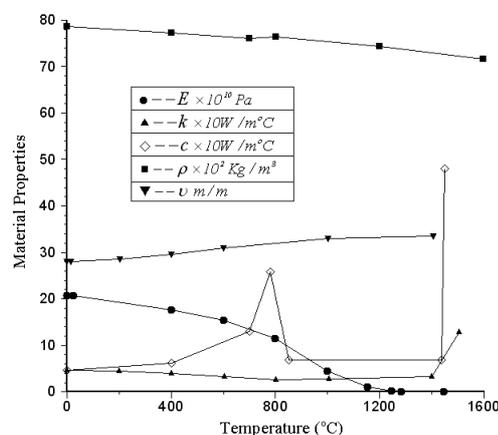
جدول (۲) درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده فولاد X۷۰ [۱۱]

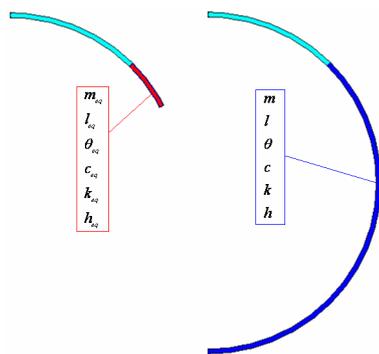
عنصر	C	Mn	Si	S	P
درصد وزنی	≤ 0.120	≤ 1.60	≤ 0.55	≤ 0.035	≤ 0.035

خواص مکانیکی و ترموفیزیکی فولاد تابعی از دما می‌باشد که در شکل (۷) نمایش داده شده است. ضریب انبساط حرارتی، مدول پلاستیسیته و تنش تسلیم برای استحاله صد در صد مارتنزیتی رسم شده است. با توجه به تغییرات زیاد این سه خاصیت نسبت به فاز تشکیل شده در هر ناحیه، شبیه‌سازی صورت گرفته در این تحقیق برای هر ناحیه با توجه به فاز آن، سه خاصیت مورد نظر را تغییر می‌دهد. برای در نظر گرفتن اثر جریان مذاب داخل حوضچه، ضریب انتقال حرارت

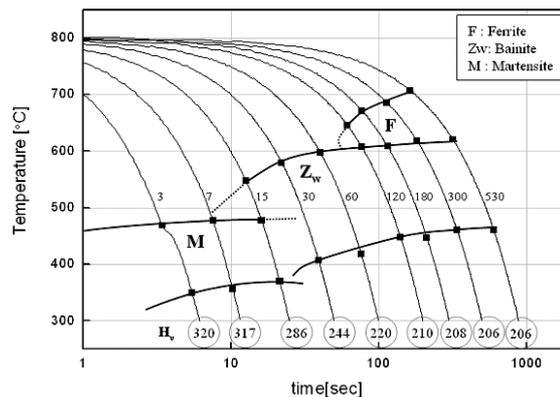


شکل (۷) خواص مکانیکی و ترموفیزیکی فولاد X۷۰ [۱۱]





شکل (۹) مدل کامل و مدل معادل



شکل (۸) دیاگرام CCT فولاد X۷۰ [۱۱]

جدول (۳) مشخصات دیاگرام CCT

API X-۷۰	دمای آستنیتی شدن	زمان نگهداری
	۱۳۵۰ °C	۵ ثانیه

با توجه به فاصله زیاد هر دو ناحیه، کامل و معادل از منطقه جوش، می‌توان فرض کرد که در هر دو ناحیه، تفاوت دمای سطح ابتدایی و انتهایی مشابه است و در نتیجه برای هر دو ناحیه ΔT را می‌توان یکسان در نظر گرفت. از طرفی باید هر دو ناحیه، گرمایی یکسانی جذب کنند بنابراین ظرفیت گرمایی معادل را می‌توان به کمک فرض بالا و رابطه (۱)، محاسبه کرد:

$$Q = mc\Delta T = m_{eq}c_{eq}\Delta T_{eq} \quad (۴)$$

$$c_{eq} = \frac{mc}{m_{eq}} = nc$$

همین‌طور انتظار می‌رود گرمای انتقالی از طریق هدایت و جابه‌جایی برای هر دو ناحیه یکسان باشد. لذا:

$$q_{cond} = k \frac{\Delta T}{l} = k_{eq} \frac{\Delta T_{eq}}{l_{eq}} \quad (۵)$$

$$k_{eq} = \frac{l_{eq}k}{l} = \frac{k}{n}$$

با فرض $T = T_{eq}$:

$$q_{conv} = hA(T - T_a) = h_{eq}A_{eq}(T_{eq} - T_a) \quad (۶)$$

$$h_{eq} = \frac{Ah}{A_{eq}} = nh$$

برای بررسی مدل معادل، تحلیل‌های دو بعدی جوشکاری از طریق هر دو مدل کامل و معادل صورت گرفته است. نحوه اعمال شرایط مرزی حرارتی و مکانیکی کاملاً مشابه بوده و به‌طور دقیق‌تر در قسمت‌های حل حرارتی و مکانیکی مورد بحث قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی از هر دو طریق نشان می‌دهد که نتایج حل حرارتی کاملاً بر هم منطبق است ولی در مورد نتایج حل مکانیکی وابسته به انتخاب زاویه θ و θ_{eq} درصد خطای متفاوتی داریم. برای محاسبه ماکزیمم درصد خطای نتایج حل

۵- مدل معادل

نتایج نشان می‌دهد که در ناحیه‌های دور از منطقه جوش مقادیر تنش پسماند ناچیز است و لذا تنش در این ناحیه‌ها اهمیت چندانی ندارد. بنابراین به کمک طرح مدل معادل، ناحیه بزرگ دور از منطقه جوشکاری با یک ناحیه کوچک جایگزین شده است. شکل (۹) مدل کامل و معادل را نمایش می‌دهد.

نسبت بین جرم دو ناحیه را با ضریب n تعریف می‌کنیم:

$$n = \frac{m}{m_{eq}} \quad (۱)$$

که جرم ناحیه اصلی حذف شده و m_{eq} جرم ناحیه معادل است. با توجه به ثابت بودن چگالی و ضخامت لوله در هر دو ناحیه، n نسبت بین طول کمان دو ناحیه نیز می‌باشد:

$$n = \frac{l}{l_{eq}} \quad (۲)$$

از طرفی چون شعاع کمان برای دو ناحیه یکسان است می‌توان n را به صورت نسبت بین زوایه روبروی کمان‌های دو ناحیه نوشت:

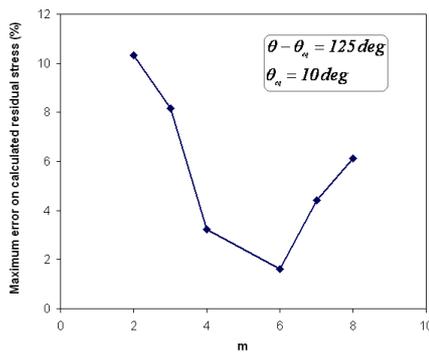
$$n = \frac{\theta}{\theta_{eq}} \quad (۳)$$

مسلماً برای حفظ فیزیک مسئله نیازمندیم که خواص معادلی برای این ناحیه تعریف کنیم و لذا در برنامه برای این ناحیه ضریب انتقال حرارت هدایتی معادل و ظرفیت گرمایی معادل و برای سطوح آن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی معادل در نظر گرفته می‌شود.

شرایط مکانیکی متفاوت دو مدل را می‌توان عامل کامل خطای نتایج حل مکانیکی دانست زیرا مدل کامل در راستای محیطی بسیار انعطاف پذیرتر از مدل معادل عمل می‌کند. لذا برای افزایش انعطاف پذیری در ناحیه معادل، ماده ارتوتروپیک تعریف می‌کنیم که تمامی خواص آن بجز مقدار مدول الاستیسیته در جهت θ (E_θ) مشابه ماده کامل باشد و برای کاهش E_θ ، آن را بر اساس مدول الاستیسیته واقعی (E) به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$E_\theta = \frac{E}{n^m} \quad (7)$$

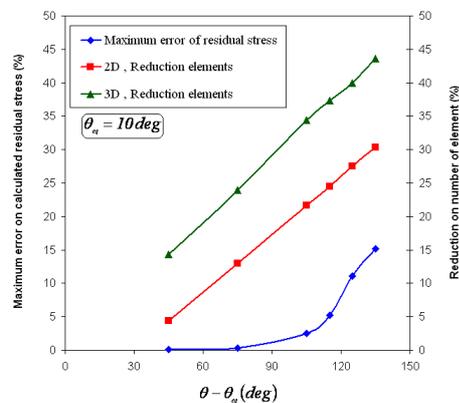
که m کمیت ثابتی است. برای به دست آوردن m ، شبیه‌سازی تحت مقادیر مختلف m انجام شده است (شکل ۱۲). این نمودار نشان می‌دهد که برای $m=6$ ، کمترین خطا را داریم. بدین صورت با لحاظ کردن ماده ارتوتروپیک برای ناحیه معادل مقدار خطا از ۱۱ درصد به ۱/۶ درصد کاهش می‌یابد.



شکل (۱۲) ماکزیمم درصد خطای تنش پسماند بر حسب m

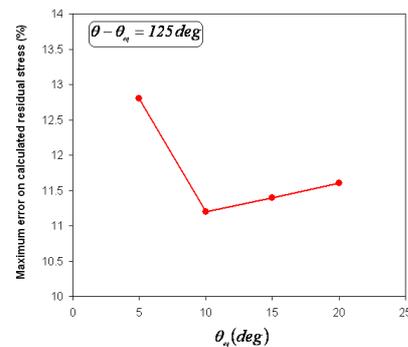
در قسمت‌های بعدی مقاله نتایج حاصل از درجه‌بندی $\theta - \theta_{eq} = 125 \text{ deg}$ ، $\theta_{eq} = 10 \text{ deg}$ و با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن ماده ارتوتروپیک به طور دقیق‌تر با مدل کامل مقایسه می‌شود. با این انتخاب n برابر ۱۳/۵ می‌باشد و تعداد المان مدل دوبعدی از ۳۴۵۸ به ۲۵۰۶ و برای مدل سه‌بعدی تعداد المان از ۳۱۳۸۸ به ۱۸۷۷۲ کاهش می‌یابد و این حاکی از اهمیت این روش در کاهش زمان حل مدل بخصوص سه‌بعدی می‌باشد. مزیت دیگر این طرح، کاهش زمان حل مدل دو بعدی و بهینه‌سازی بهتر پارامترهای مسئله می‌باشد. زیرا با کاهش زمان حل، امکان انتخاب نقاط اولیه بیشتری در مرحله بهینه‌سازی فراهم می‌شود.

مکانیکی، θ_{eq} را برابر ۱۰ درجه ثابت فرض کرده و شبیه‌سازی را برای چند $\theta - \theta_{eq}$ متفاوت انجام شده است (شکل ۱۰). منظور از ماکزیمم درصد خطای تنش پسماند، بزرگترین اختلاف نسبی بین تنش پسماند حاصل شده در مدل کامل و معادل می‌باشد. همان‌طور که از شکل مشخص است با افزایش $\theta - \theta_{eq}$ درصد کاهش المان افزایش می‌یابد و این اثر برای مدل سه‌بعدی به مراتب بیشتر است ولی از طرفی ماکزیمم درصد خطای تنش پسماند افزایش می‌یابد. البته بایستی توجه کرد که این مقادیر خطا بسیار کم و در حد قابل قبولی هستند. برای مثال حالتی که $\theta - \theta_{eq}$ برابر ۱۲۵ درجه باشد کاهش المان در حالت دوبعدی ۲۷/۵ درصد و در حالت سه‌بعدی ۴۰ درصد می‌رسد در حالی که ماکزیمم خطای تنش پسماند به ۱۱ درصد می‌باشد.



شکل (۱۰) ماکزیمم درصد خطای تنش پسماند و درصد کاهش المان در حالت دوبعدی و سه‌بعدی بر حسب $\theta - \theta_{eq}$

از طرفی برای یافتن θ_{eq} مناسب برای $\theta - \theta_{eq} = 125 \text{ deg}$ ، شبیه‌سازی را برای چند θ_{eq} متفاوت انجام شده و نتایج آن در شکل (۱۱) آورده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که برای θ_{eq} ، زاویه بهینه ۱۰ درجه می‌باشد و برای زاویه‌های بزرگتر از آن نیز خطا افزایش می‌یابد.

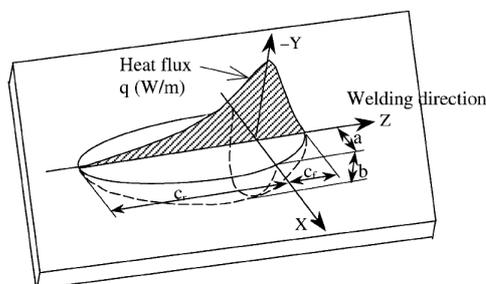


شکل (۱۱) ماکزیمم درصد خطای تنش پسماند بر حسب θ_{eq}

$$f_f = \frac{2c_f}{c_f + c_r} \quad (10)$$

$$f_r = \frac{2c_r}{c_f + c_r} \quad (11)$$

و بنابراین داریم $f_f + f_r = 2$.



شکل (۱۳) منبع حرارتی گُلداک [۱۲]

جدول (۳) ضرایب منبع حرارتی گُلداک برای هر جوش

ضرایب منبع حرارتی گُلداک بر حسب میلی‌متر				جوش
c_r	c_f	b	a	
۱۲/۸	۶/۴	۱۰	۸/۶	AC داخلی
۱۹/۲	۹/۶	۲/۹	۱۲/۹	DC داخلی
۱۵	۷/۵	۱۵/۷	۱۰	AC خارجی
۲۵/۶	۱۲/۸	۲/۹	۱۷/۱	DC خارجی

در شکل (۱۴) شرایط مرزی حرارتی برای مدل کامل و معادل نشان داده شده است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در سطوح مرکزی به علت تقارن صفر و در بقیه سطوح این ضریب برابر $10 (W/m^2K)$ لحاظ شده است. تنها برای سطوح ناحیه معادل این ضریب n برابر مقدار واقعی در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال حرارت تشعشی برای سطوح نزدیک به ناحیه جوش $20 (W/m^2K)$ لحاظ شده و با دور شدن از ناحیه جوش این مقدار کاهش می‌یابد تا نهایتاً به مقدار صفر برسد. از جمع ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و ضریب انتقال حرارت تشعشی، ضریب h نهایی به دست آمده و به مدل اعمال شده است. برای مثال در سطوح نزدیک به ناحیه جوش، مقدار h نهایی از جمع $10 (W/m^2K)$ (ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در این سطوح) و $20 (W/m^2K)$ (ضریب انتقال حرارت تشعشی در این

۶- حل حرارتی فرایند جوشکاری

در مواردی که سرعت جوشکاری نسبت به سرعت پخش حرارت در امتداد جوشکاری بسیار بیشتر است می‌توان از اثر شار حرارتی در امتداد جوش صرف نظر کرد یعنی $\partial T / \partial z = 0$. بدین ترتیب فرض مدل دو بعدی خواهد بود [۸ و ۴]. در شبیه‌سازی صورت گرفته، برای مدل دوبعدی حرارتی از المان Plane 55 و در مدل سه‌بعدی حرارتی از المان Solid 70 استفاده شده است. در حل سه‌بعدی، آنالیز حرارت در سه‌بعد انجام می‌گیرد و حرکت منبع حرارتی به صورت ناپیوسته مدل می‌گردد. در هر مرحله بارگذاری مرکز منبع حرارتی روی خط جوش به اندازه یک المان جلو می‌رود و تا مدت زمان مشخصی که با توجه به سرعت جوشکاری و طول المان تعیین می‌گردد، در آنجا ثابت می‌ماند.

توزیع حرارت جوشکاری در این تحقیق بر اساس منبع حرارتی گُلداک لحاظ شده است (شکل ۱۳). نصف جلو منبع، ربع یک منبع بیضوی و نصف عقب، ربع یک منبع بیضوی دیگر است [۵].

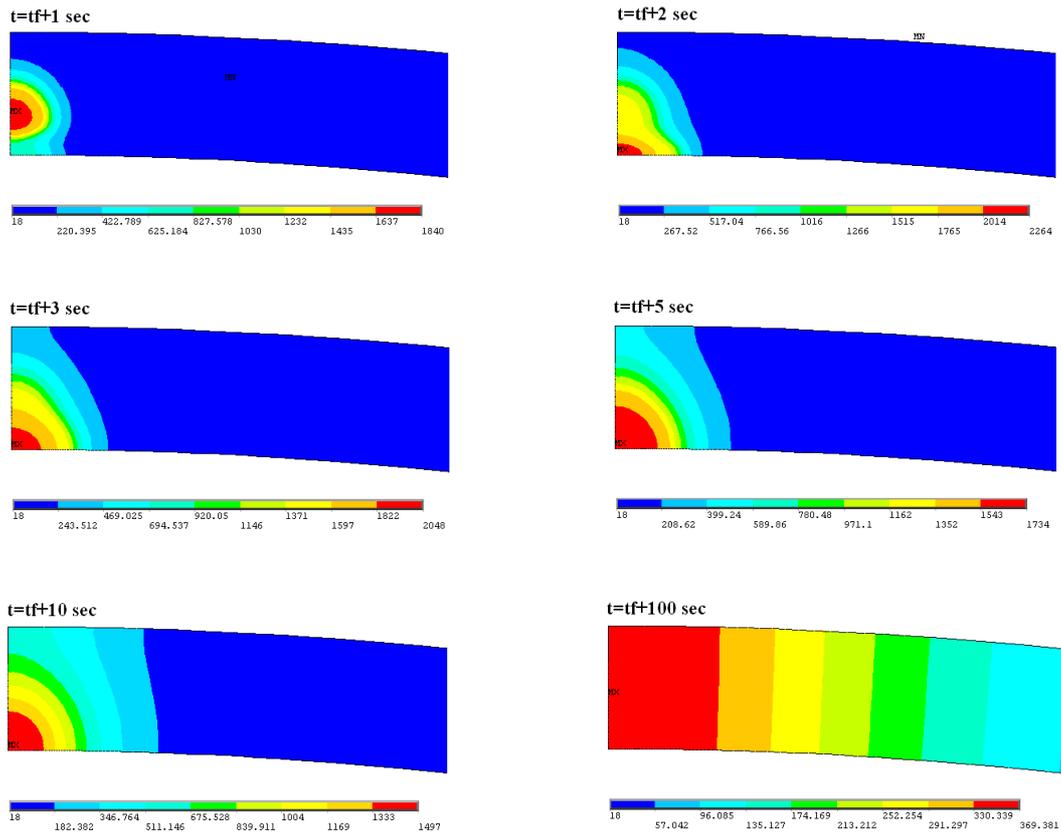
توزیع چگالی توان داخل ربع جلو به صورت زیر است:

$$q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c_f^2} \quad (8)$$

به طور مشابه توزیع چگالی توان داخل ربع عقب به صورت زیر است:

$$q_r(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c_r^2} \quad (9)$$

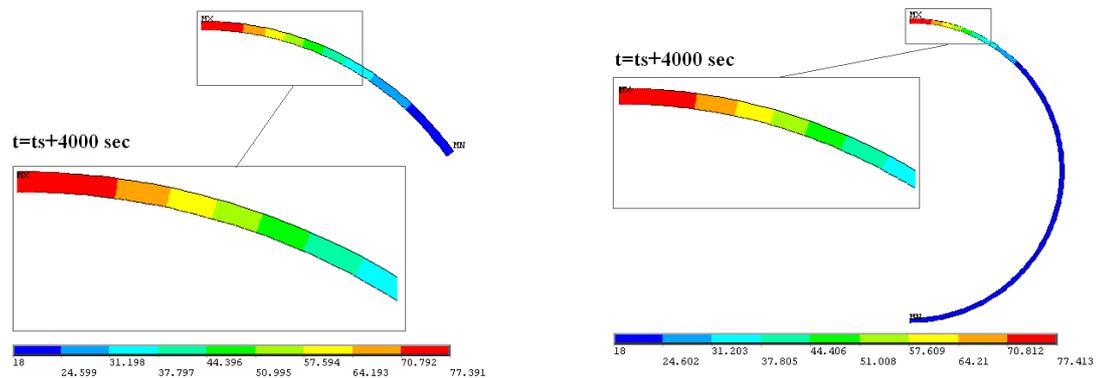
پارامترهای a, b, c ، می‌توانند مقادیر متفاوت در ربعهای جلو و عقب به خود بگیرند زیرا آنها مستقل هستند. در این روابط c_f و c_r به ترتیب مشخصه شعاع توزیع شار در ربع جلو و عقب منبع حرارتی هستند. ضرایب مربوط به این منبع حرارتی بر اساس پیشنهادات گُلداک و مشخصات جوشکاری در جدول (۳) آورده شده است. در این مدل، f_f و f_r توزیع توان حرارتی که به ترتیب در ربع جلو و عقب منبع حرارتی اثر می‌نماید را نشان می‌دهد و از روابط زیر می‌توان آنها را محاسبه کرد [۱۴].



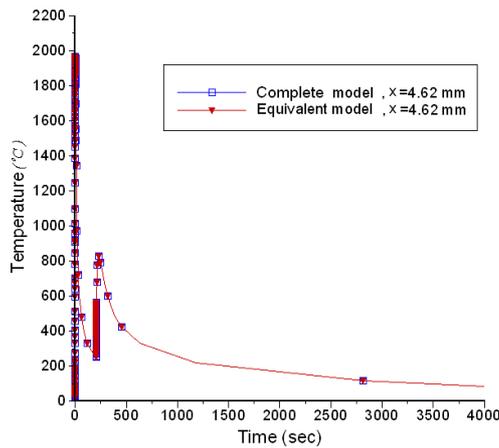
شکل (۱۶) توزیع دما برای زمان‌های بعد از شروع جوش داخل و قبل از شروع جوش خارج

تاریخچه دمایی را برای دو نقطه روی سطح داخلی برای هر دو مدل مقایسه کرده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است تطابق نتایج حل حرارتی مدل کامل و معادل تقریباً صد در صد می‌باشد.

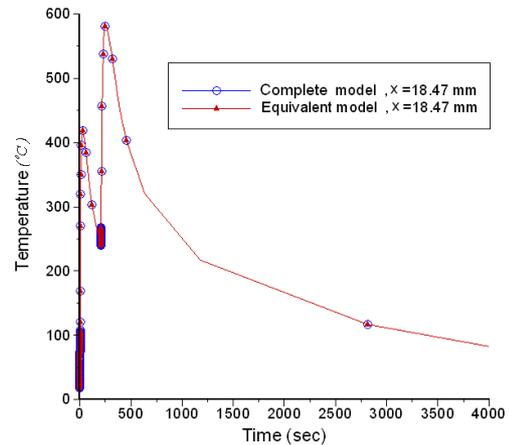
در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به مقایسه نتایج حل حرارتی مدل دوبعدی کامل و معادل پرداخته شده است. شکل (۱۷) توزیع دما را در زمان ۴۰۰۰ ثانیه بعد از شروع جوش خارج برای مدل دوبعدی کامل و معادل نمایش می‌دهد. شکل (۱۸)



شکل (۱۷) توزیع دما در زمان ۴۰۰۰ ثانیه بعد از شروع جوش خارج برای مدل دوبعدی کامل و معادل

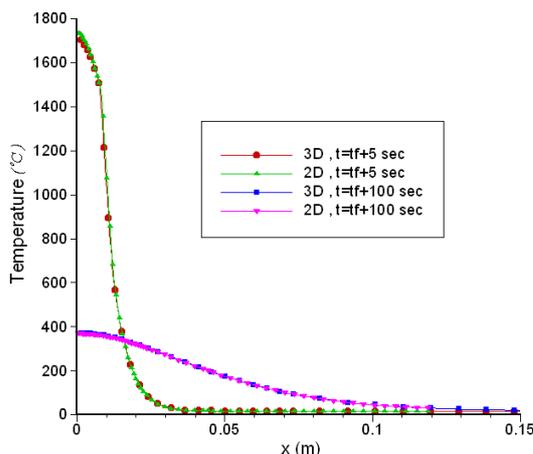


شکل (۱۸) تاریخچه دمایی برای دو نقطه روی سطح داخلی لوله برای مدل کامل و معادل



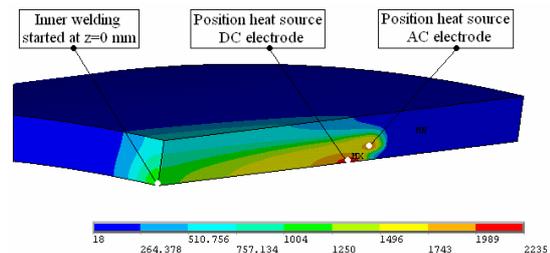
پایین تر از مدل سه بعدی باشد که این نشان می دهد علاوه بر جهت عرضی تا حدی انتقال حرارت هدایتی در جهت طولی نیز صورت می گیرد.

در شکل (۲۱) تاریخچه دمایی برای دو نقطه با فواصل مختلف نسبت به صفحه تقارن روی سطح داخلی برای مدل دوبعدی و سه بعدی رسم شده است. متناظر با جوش داخل و خارج یک افزایش دما در هر نقطه دیده می شود و همان طور که انتظار می رود، این افزایش برای نقاط نزدیک به محل جوشکاری بیشتر است. تفاوت اندک بین تاریخچه دمایی دو نقطه یکسان در مدل دوبعدی و سه بعدی را می توان بدلیل کم اهمیت بودن در نظر نگرفتن انتقال حرارت در جهت طولی دانست.



شکل (۲۰) دما در دو زمان متفاوت بر روی سطح داخلی برای مدل دوبعدی و سه بعدی بر حسب موقعیت X

شکل (۱۹) توزیع دما را در زمان عبور جوش داخل از صفحه مرجع برای مدل سه بعدی نمایش می دهد. موقعیت قرارگیری منبع حرارتی مربوط به جوش AC و DC در شکل مشخص شده است.



شکل (۱۹) توزیع دما در زمان عبور جوش داخل از صفحه مرجع

شکل (۲۰) دما را در دو زمان متفاوت بر روی سطح داخلی برای مدل دوبعدی و سه بعدی بر حسب موقعیت X نشان می دهند. مشاهده می شود که با گذشت زمان، دمای نقاط نزدیک به ناحیه جوش در سطح داخلی سریعاً کاهش می یابد در حالی که ممکن است شاهد افزایش دمای نقاط دورتر باشیم. نکته قابل توجه در این نمودار رخ دادن گرادیان بالای دما بر حسب موقعیت X در نزدیکی ناحیه جوش است. همچنین صرف نظر کردن از انتقال حرارت در جهت طولی برای مدل دوبعدی باعث شده است که دمای نقاط برای ناحیه نزدیک جوش در مدل دوبعدی بالاتر از مدل سه بعدی باشد و برای نقاط دور از این ناحیه، دما کمی

۹- حل ساختاری

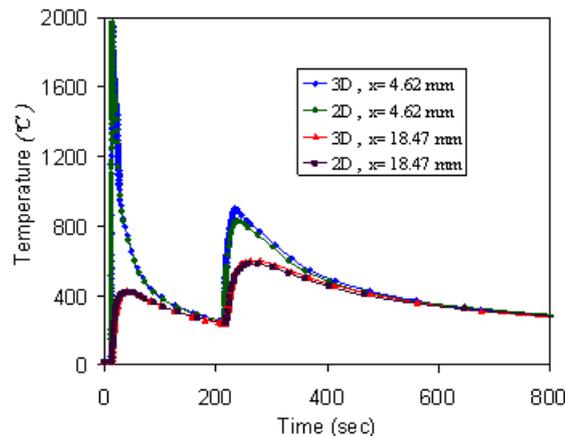
بعد از مشخص شدن ناحیه FZ و HAZ در برنامه نوبت به تعیین فازها درون این دو ناحیه می‌رسد و از آنجایی که ناحیه BASE تغییر فاز نمی‌دهد این ناحیه وارد حلقه محاسبات نمی‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۲۳) آمده است که نشان می‌دهد در ناحیه‌های FZ و HAZ، ترکیب فاز فریت و بینیت را داریم و درصد بینیت با دور شدن از صفحه تقارن کاهش می‌یابد. انتهای ناحیه A_۳ در این شکل در حقیقت همان انتهای ناحیه HAZ می‌باشد. لازم به ذکر است چون فولاد مربوطه در ناحیه BASE شامل فریت و درصد کمی پرلیت است در شکل تنها فاز فریت قید شده است.

نتایج حاصل از متالوگرافی نمونه نیز در شکل (۲۴) آمده است. در این شکل نتایج مربوط به چهار نقطه با فاصله متفاوت از صفحه تقارن و روی یک خط نشان داده شده است و چون نتایج در راستای ضخامت در هر ناحیه تغییر چندانی نمی‌کند از آوردن آنها خودداری شده است.



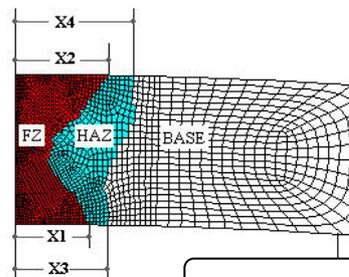
آزمایشگاهی

آزمایشگاهی	سه بعدی	دو بعدی	
۹	۹/۲۴	۹/۷	X1 (mm)
۱۲	۱۰/۲	۱۲/۱	X2 (mm)
۱۱	۱۲/۳	۱۲/۱۶	X3 (mm)
۱۵	۱۶/۰۷	۱۵/۵۳	X4 (mm)



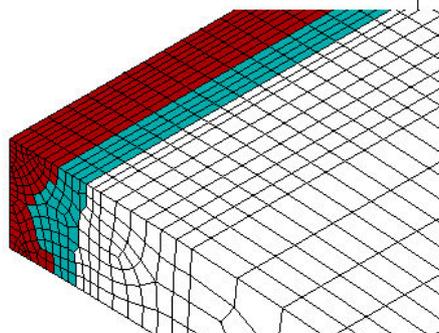
شکل (۲۱) تاریخچه دمایی برای دو نقطه مختلف روی سطح داخلی برای مدل دوبعدی و سه‌بعدی

در انتهای حل حرارتی، برنامه قادر خواهد بود منطقه ذوب (FZ) و منطقه متأثر از جوشکاری (HAZ) را مشخص نماید. نتایج حاصل از این کار برای مدل دوبعدی و سه‌بعدی در شکل (۲۲) با نتایج آزمایشگاهی از نظر کیفی و کمی مقایسه شده است. همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، صرف‌نظر کردن از انتقال حرارت در جهت طولی باعث شده است که پهنای FZ در حالت دوبعدی از سه‌بعدی بیشتر شود و برعکس، پهنای HAZ در حالت سه‌بعدی از دوبعدی بیشتر شود.



مدل دو بعدی

مدل سه بعدی



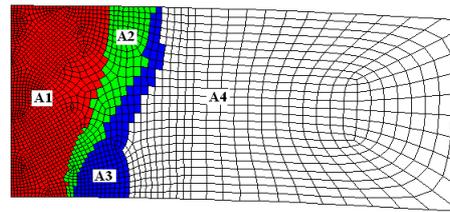
شکل (۲۲) منطقه ذوب و منطقه متأثر از جوشکاری برای سه مورد: مدل دوبعدی، سه‌بعدی و آزمایشگاهی

۱۰- نتایج حل مکانیکی

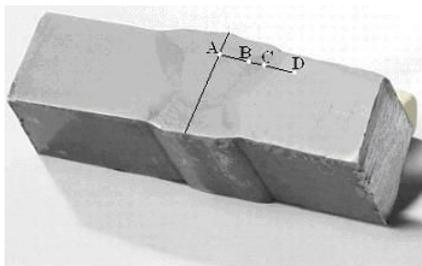
تنش عمود بر امتداد خط جوش را تنش پسماند عرضی و تنش موازی با امتداد خط جوش را تنش پسماند طولی نام گذاری می کنیم. شکل (۲۵) توزیع تنش پسماند عرضی و شکل (۲۶) توزیع تنش پسماند طولی را بعد از فرایند جوشکاری در حالت دوبعدی نشان می دهد.

بررسیهای ریز ساختاری کیفی توسط میکروسکوپ نوری بر روی نمونه نیز نشان می دهد که ساختار نمونه در منطقه BASE شامل فریت و درصد کمی پرلیت می باشد و در نواحی FZ و HAZ دانه های فریت و بینیت مشاهده می شود. درصد فاز بینیت در ناحیه FZ از HAZ بیشتر می باشد که این نتایج با نتایج حاصل از شبیه سازی مطابقت دارد.

ناحیه	درصد فریت	درصد بینیت
A1	۴۰	۶۰
A2	۶۰	۴۰
A3	۸۰	۲۰
A4	۱۰۰	۰



شکل (۲۳) فازهای به دست آمده از شبیه سازی



حدود موقعیت نقاط بررسی شده



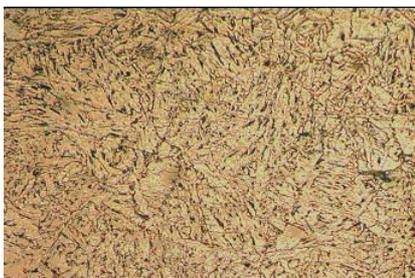
نقطه A (داخل ناحیه FZ) - بزرگنمایی ۲۰۰X



نقطه A (داخل ناحیه FZ) - بزرگنمایی ۵۰۰X



نقطه B (فصل مشترک ناحیه HAZ و FZ) - بزرگنمایی ۲۰۰X



نقطه C (داخل ناحیه HAZ) - بزرگنمایی ۵۰۰X

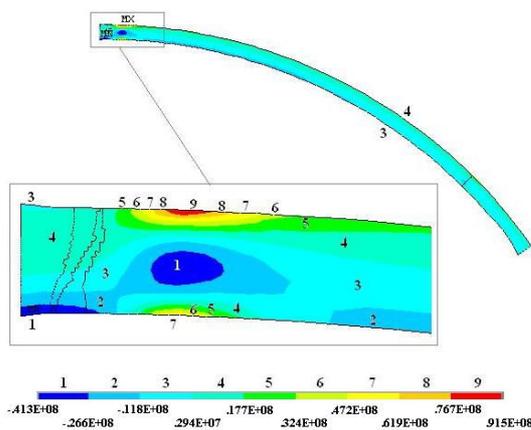


نقطه D (داخل ناحیه BASE) - بزرگنمایی ۵۰۰X

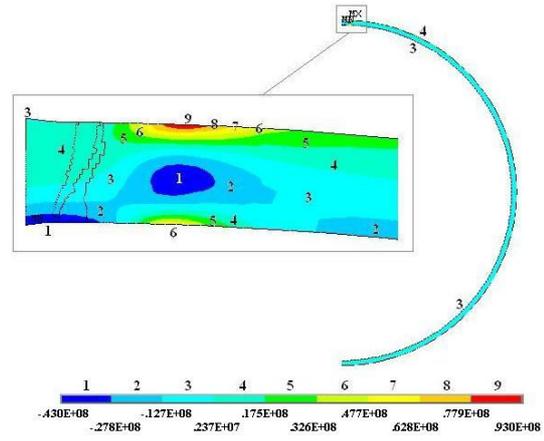
شکل (۲۴) نتایج حاصل از متالوگرافی نمونه

تنش‌های پسماند عرضی نسبت به تنش‌های پسماند طولی کمتر باشد. این موضوع در نتایج به خوبی مشهود است.

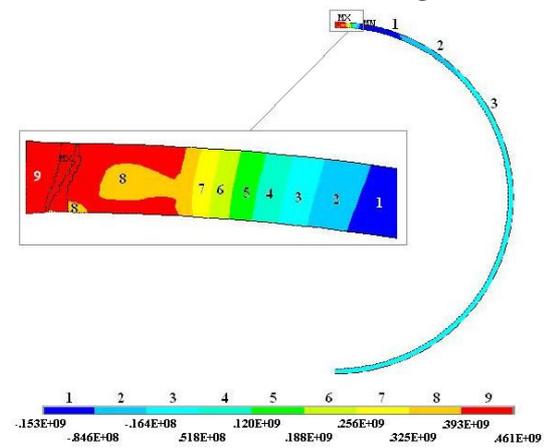
در شکل‌های (۲۷) الی (۳۰) به ارائه و مقایسه نتایج حاصل از مدل کامل و معادل پرداخته شده است. شکل‌های (۲۷) و (۲۸) توزیع تنش پسماند عرضی و طولی را برای مدل معادل با ماده ارتوتروپیک نمایش می‌دهند که این شکلها را می‌توان با شکل‌های (۲۵) و (۲۶) مقایسه کرد. برای مشخص شدن اثر در نظر گرفتن ماده ارتوتروپیک برای ناحیه معادل، مدل معادل به دو صورت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن ماده ارتوتروپیک در نظر گرفته شده است. نتایج تنش پسماند عرضی و طولی بر روی سطح خارجی برای هر دو مدل کامل و معادل (با ماده ارتوتروپیک و بدون ماده ارتوتروپیک) در شکل‌های (۲۹) و (۳۰) آورده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج مدل معادل با در نظر گرفتن ماده ارتوتروپیک برای ناحیه معادل انطباق بسیار خوبی با نتایج مدل کامل دارند و حداکثر خطا ۱/۶ درصد می‌باشد. از طرفی نتایج مدل معادل بدون در نظر گرفتن ماده ارتوتروپیک تنها در تنش‌های پسماند عرضی با مدل معادل با ماده ارتوتروپیک کمی تفاوت دارند و حداکثر خطا را به ۱۱ درصد می‌رساند. به همین دلیل در ماده ارتوتروپیک تنها E_{θ} تغییر کرده است.



شکل (۲۷) توزیع تنش پسماند عرضی برای مدل معادل (Pa) با ماده ارتوتروپیک



شکل (۲۵) توزیع تنش پسماند عرضی بعد از فرایند جوشکاری (Pa)



شکل (۲۶) توزیع تنش پسماند طولی بعد از فرایند جوشکاری (Pa)

به طور کلی در مورد تنش‌های پسماند طولی (محور z) شاهد تنش کششی بسیار بزرگی در نزدیک ناحیه جوش هستیم که دلیل این امر را مطابق نتایج حل حرارتی باید در وجود گرادیان بالای دما نسبت به جهات عمود بر آن (y و x) در نزدیکی ناحیه جوش دانست. البته در بخش‌های قبل مشخص شد که گرادیان حرارت در جهت y پس از مدتی به دلیل سهم کمتر انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به انتقال حرارت هدایتی در سرد کردن ناحیه جوش، ناچیز می‌گردد و لذا تنش‌های پسماند طولی تقریباً متغیری از x خواهد بود. در مورد تنش‌های پسماند عرضی (محور x) با توجه به ناچیز بودن گرادیان حرارت در جهت z، این تنشها فقط متأثر از گرادیان در جهت y است که خود در مقایسه با گرادیان حرارت در جهت x ناچیز می‌باشد لذا باید انتظار داشت

۱۱- نتیجه گیری

۱- انتقال حرارت هدایتی نقش بسیار مهمتری نسبت به انتقال حرارت جابجایی و تشعشع، در خنک سازی ناحیه جوش دارد.

۲- در تمامی موارد مورد مطالعه در این تحقیق که برگرفته از شرایط عملی جوشکاری لوله ها بود نسبت سرعت جوشکاری به سرعت انتقال حرارت هدایتی در امتداد جوش بسیار بیشتر می باشد لذا نتایج مدل دو بعدی انطباق بسیار خوبی با نتایج مدل سه بعدی دارد. این امر در بالا بردن سرعت شبیه سازی موثر است. این موضوع مشاهدات محققان قبلی مبتنی بر کفایت دقت تحلیل های دوبعدی فرایند جوشکاری را تأیید می کند.

۳- مدل معادل پیشنهاد شده در این تحقیق ضمن دارا بودن دقت بسیار مناسب، کارایی خوبی در کاهش زمان حل دارد. این مدل برای اولین بار پیشنهاد می گردد.

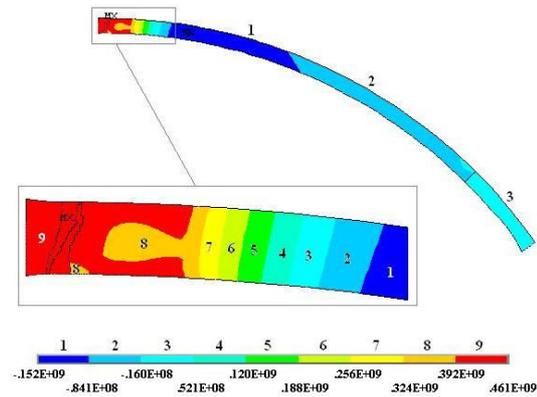
۴- با افزایش زاویه ای که معادل سازی می گردد درصد کاهش المان و ماکزیمم درصد خطای تنش پسماند افزایش می یابد.

۵- بیشینه درصد خطای تنش پسماند بر حسب زاویه معادل یک نقطه اکسترمم دارد که مقدار آن در این زاویه کمیته می شود. حداکثر خطای مشاهده شده برای این زاویه ۱۱ درصد می باشد.

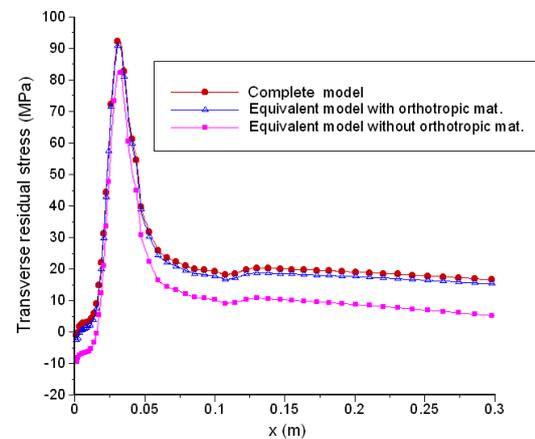
۶- با تعریف ماده ارتوتروپیک که برای اولین بار در این تحقیق بکار گرفته شده است ماکزیمم خطای تنش پسماند به ۱/۶ درصد کاهش می یابد.

۷- روی سطوح، ماکزیمم تنش پسماند عرضی در نزدیکی ناحیه جوش رخ می دهد و در نقاط دور از این منطقه مقدار این تنش تقریباً صفر می گردد.

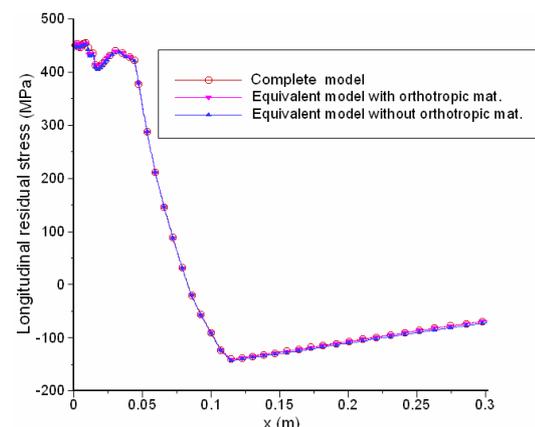
۸- در اطراف ناحیه جوش، تنش پسماند طولی کششی بسیار بزرگی حاصل می شود و با دور شدن از ناحیه جوش این مقدار کاهش می یابد.



شکل (۲۸) توزیع تنش پسماند طولی برای مدل معادل (Pa) با ماده ارتوتروپیک



شکل (۲۹) تنش پسماند عرضی بر روی سطح خارجی بر حسب موقعیت X (برای مدل کامل، معادل با ماده ارتوتروپیک و معادل بدون ماده ارتوتروپیک)



شکل (۳۰) تنش پسماند طولی بر روی سطح خارجی بر حسب موقعیت X (برای مدل کامل، معادل با ماده ارتوتروپیک و معادل بدون ماده ارتوتروپیک)

[۹] Chang P. H., Teng, T. L., Numerical and Experimental Investigations on the Residual Stresses of the Butt-Welded Joints, *Computational Materials Science*, Vol. ۲۹, ۲۰۰۴, pp. ۵۱۱-۵۲۲.

[۱۰] Yajiang, L., Juan, W., Maoai, C., Xiaoqin, S., Finite Element Analysis of Residual Stress in the Welded Zone of a High Strength Steel, *Bull. Mater. Sci.*, Vol. ۲۷, No. ۲, ۲۰۰۴, pp. ۱۲۷-۱۳۲.

[۱۱] حیدری، ع.، شبیه‌سازی ترکیبی فرایندهای جوشکاری، هایدروتست و کوئنچینگ لوله‌ها به منظور بررسی تنش‌های پسماند به کمک روش اجزاء محدود، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.

[۱۲] Gery, D., Long, H., Maropoulos, P., Effects of Welding Speed, Energy Input and Heat Source Distribution on Temperature Variations in Butt Joint Welding, *Journal of Materials Processing Technology*, ۲۰۰۵.

[۱۳] Rammerstorfer, F.G., Fisher, D.F., On Thermo-Elastic-Plastic Analysis of Heat-Treatment Process Including Creep and Phase Changes, *Computers and Structures*, Vol. ۱۳, ۱۹۸۱, pp. ۷۷۱-۷۷۹.

[۱۴] Lundback, A., CAD-support for heat input in FE-model, Computer Aided Design, Lulea University of Technology, Sweden, ۲۰۰۳.

[۱۵] Alberg, H., Material modeling for simulation of heat treatment, Division of Computer Aided Design, M.S. Thesis, Lulea University of Technology, ۲۰۰۳.

[۱۶] Kamamoto, S., Nihimori, T., Kinoshita S., Analysis of Residual Stress and Distortion Resulting from Quenching in Large low-alloy Steel Shafts, *Journal of Mechanical Science and Technology*, ۱۹۸۵, pp. ۷۹۸-۸۰۴.

فهرست علائم

c	ظرفیت گرمایی، $J/Kg^{\circ}C$
E	مدول الاستیسیته، Pa
E_T	مدول پلاستیسیته، Pa
k	ضریب انتقال حرارت هدایتی، $W/m^{\circ}C$
α	ضریب انبساط حرارتی، $m/m^{\circ}C$
ν	ضریب پواسون
ρ	چگالی، kg/m^3
σ_y	تنش تسلیم، Pa

مراجع

[۱] Taljat, B., Radhakrishnan, B., Zacharia, T., Numerical Analysis of GTA Welding Process with emphasis on Post-Solidification Phase Transformation effects on Residual Stresses, *Materials Science and Engineering*, Vol. A۲۴۶, ۱۹۹۸, pp. ۴۵-۵۴.

[۲] Mackerle, J., Finite Element Analysis and Simulation of Welding: a Bibliography (۱۹۷۶-۱۹۹۶), *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. ۴, ۱۹۹۶, pp. ۵۰۱-۵۳۳.

[۳] Mackerle, J., Finite Element Analysis and Simulation of Welding-an Addendum: a Bibliography (۱۹۹۶-۲۰۰۱), *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. ۱۰, ۲۰۰۲, pp. ۲۹۵-۳۱۸.

[۴] Andersson, B. A. B., Thermal Stresses in a Submerged-Arc Welded Joint Considering Phase Transformations, *Transactions of the ASME*, Vol. ۱۰۰, ۱۹۷۸, pp. ۳۵۶-۳۶۲.

[۵] Goldak, J., Chakravarti, A., Bibby, M., A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical Transactions B*, Vol. ۱۵B, ۱۹۸۴, pp. ۲۹۹-۳۰۵.

[۶] Roelens, J.B., Numerical simulation of some multipass submerged arc welding determination of the residual stresses and comparison with experimental measurements, *Welding in the world*, Vol. ۳۵, No. ۲, ۱۹۹۵, pp. ۱۷-۲۴.

[۷] Wen, S. W., Hilton, P., Farrugia, D. C. J., Finite Element Modeling of a Submerged Arc Welding Process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. ۱۱۹, ۲۰۰۱, pp. ۲۰۳-۲۰۹.

[۸] Cho, S. H., Kim, J. W., Analysis of Residual Stress in Carbon Steel Weldment incorporating Phase Transformations, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. ۷, No. ۴, ۲۰۰۲, pp. ۲۱۲-۲۱۶.