نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره2، پاییز و زمستان1398، صفحه 75-61

تحلیل دما و تنش در اتصال لوله ای جوش صلیبی با استفاده از نرم افزار Simufact Welding

نبرد حبیبی * **، حسن اسکندری**

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی دانشگاه کردستان، سنندج

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۴ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۳)

چکیده

اتصالات لوله‌ای جوشکاری شده به دلیل کارایی بالا در مقابل فشار، خمش و پیچش به‌طورگسترده ای در اتصالات سازه‌های متنوعی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند.سازه‌های جوشکاری شده جزو قسمت‌های اصلی کشتی‌ها، ساختمان‌ها، پل‌ها، لوله‌های انتقال‌گاز، مجراهای فشار و تجهیزات انتقال قدرت در صنایع کشتی سازی، ساختمان سازی، نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاه‌ها می‌باشند. نمونه ای از اتصالات جوشی لوله ای، اتصال صلیبی می باشد که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی‌کارحاضربررسی‌توزیع حرارت وتنش‌های پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری سه مرحله ای دریک اتصال صلیبی از جنسSt52 با استفاده از نرم افزار تخصصی Simufact Welding می باشد. فرآیند جوشکاری شامل سه مرحله جوشکاری با الکترود دستی است. مدل اجزاء محدود شامل خواص حرارتی و مکانیکی فلز پایه و فلزجوش به صورت‌تابعی از دما است. همچنین‌از ابزارهای پیشرفته مدل‌سازی مانند انطباق شبکه در طول فرایند و شبکه بندی سازگار با محل جوشکاری، تولد و مرگ المان وحرکت منبع‌حرارتی‌استفاده شده است. شبیه سازی نشان داد که تنش‌های پسماند قابل‌توجهی در اتصال بعد از جوشکاری ایجاد می‌شود. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که نتایج عددی و اندازه‌گیری‌های تجربی تطابق خوبی با یکدیگر دارد و مدل موجود می‌تواند پیش‌بینی‌خوبی از توزیع دما و تنش‌پسماند در این فرآیند جوشکاری داشته باشد.

کلمات کلیدی: شبیه سازی جوش، منبع حرارتی، شبکه بندی انطباقی و سازگار، Simufact Welding، توزیع دما، تنش‌پسماند.

Stress and temperature analysis in tubular x-joints using simufact welding

N. Habibi*, H. Eskandari

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Iran

(Received 5 September 2018 ; Accepted 24 May 2019)

Abstract

Welded tubular joints are widely used in various industry structures for high efficiency subjected to pressure, bending and twisting.Welded structures are the main parts of structures, buildings, bridges, gas pipes, pressure vessels and power transmission equipment in the ship building, construction, oil, gas, petrochemical industries and power plants.A sample of pipe-welded joints is a X-tubular joint that has been investigated in this study.The main objective of the

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: n.habibi@uok.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

present work is to investigate the heat transfer and residual stress caused by the three-stage welding process in X-tubular joint made of St52 using Simufact Welding software.The welding process involves three welding steps using arc welding. The finite element model contains the thermal and mechanical properties of base metal and welding metal as a function of temperature.Also, advanced modeling tools such as mesh adaptation during the process and meshing compatible with the welding site, the birth and death technique of the element and the source of heat transfer have been used.Welding simulation showed that significant residual stresses were created in the joint after welding. Comparison of the results shows that the numerical results and empirical measurements are in good agreement with each other and the existing model can provide a good prediction of temperature distribution and stress control in this welding process.

Keywords: Welding simulation, Adaptive and compatible mash, Simufact welding, Temperature distribution, Residual stress.

1- مقدمه

به طورکلی جهت تهیه یک اتصال فولادی از جوشکاری قوس الکتریکی می‌توان استفاده نمود. شبیه سازی جوشکاری به علت پدیده های مکانیکی و متالوژیکی و بر هم کنش گرمایی در طول فرآیند جوشکاری کار ساده ای نیست. بیشترین تلاش در جوشکاری برای رسیدن به ترکیبی درست از پارامترهای جوشکاری می باشد تا به وسیله ی آن بتوان بهترین اتصال را ایجاد کرد [۱]. جوشکاری بسته به قطر و ضخامت لوله می‌تواند به صورت یک پاسه ویا چند پاسه انجام شود. با افزایش قطر و ضخامت دیواره ی لوله، تعداد پاس های جوشکاری افزایش می یابد. مشکلی که در جوشکاری چند پاسه پیش می‌آید، مشکل تغییرشکل و تنش‌های پسماندی است که پس ازجوشکاری چند پاسه و در اثر برهم کنش گرمایی به وجود می آید. در سال های اخیر مدل های ترمومکانیکی مناسب برای جوشکاری ارایه شده است [۲,۳]. در طی سه دهه گذشته، با تکامل قابلیت های محاسباتی، روش عددی المان محدود خود را به عنوان یک ابزار جایگزین و قابل قبول برای پیش بینی تنش های باقی مانده ی جوشکاری و تغییرشکل‌ها و توزیع حرارت در جوشکاری ثابت کرده است [۴و۵]. شبیه‌سازی اجزای محدود برای فرآیند جوشکاری می‌تواند به سه دسته تقسیم شود:

- شبیه سازی هایی که در آن اثرپارامترهای فرآیند جوشکاری (ورودی گرما، ضخامت، توالی جوش و غیره) [۶و۷] بررسی می شود.
- شبیه سازی هایی که استراتژی عددی جدید [۸-۱۱] برای رسیدن به نتایج با دقت قابل قبول، با زمان کمتر محاسباتی استفاده می شود.
- شبیه سازی هایی که در آن پارامترهای ورودی اجزای محدود (اندازه یشبکه، نوع جزء، مدل منبع گرما، خواص مواد و مدل های مواد و غیره) [۱۲-۱۴] تغییر داده می شوند تا تاثیرآن ها بر تنش ها و تغییرشکل ها را بررسی کنند.

شبیه سازی در هر صورت، امروزه در صنعت از محبوبیت ویژه‌ای برخوردار شده است و یکی از نرم افزارهای محبوب و در دسترس در زمینه ی نرم افزار Simufact Welding است. این نرم افزار یک نرم افزار کاملاً تخصصی جهت تحلیل و بهینه‌سازی فرآیندهای جوشکاری می باشد که بسیاری از محققان وشرکت های خودروسازی مانند BMW، مرسدس بنز، پورشه و آئودی جهت پیش بینی اعوجاج های ناشی از فرایند جوشکاری مورد استفاده قرار می گیرد[۱۵و۱۶]. در این نرم افزار با توابع ومراجع متعدد و انواع ورودی های تخصصی ازجمله توانایی کنترل فواصل ربات های جوشکاری با اصلاح توالی جوشکاری، سرعت جوشکاری، میزان حرارت ورودی، زمان توقف جوشکاری، ابزار بست جهت مهار قطعات و غیره روبرو هستیم که مسیر را برای برنامه ریزان ومهندسین جهت بهینه سازی کاربردهای جوشکاری هموار می‌کند [۱۷]. بررسی جوشکاری اتصالات لوله‌ای با ضخامت های مختلف و با فرآیندهای جوشکاری مختلف در مطالعات به صورت گسترده‌ای انجام گرفته است [۱۹-۲۲] همچنین مطالعات مفیدی در زمینه ی اتصالات لوله ای T شکل انجام گرفته است [۲۳-۲۶]. هدف از این مطالعه بررسی توزیع حرارت در طول

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جوشکاری و تنش های باقیمانده در یک اتصال X شکل می‌باشد. نتایج تنشی این شبیه سازی با نتایج تجربی[۲۹] اعتبارسنجی‌می شود.

2- شبیه سازی اتصال لوله ای در نرم افزار

2-1- مدل‌سازی مواد

فولادهای آلیاژی معمولاً در ساخت سازه به منظور کاهش ضخامت، وزن و همچنین به دلیل خواص عالی از جمله قابلیت جوش پذیری خوب، مقاومت عالی و مقاومت در مقابل خوردگی همواره کاربرد دارد [۲۷]. ماده‌ای که در این شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می گیرد فولاد St52 که فولادی با مقاومت بالا و کم آلیاژ می باشد و به طور گسترده درساختمان‌ها، پل ها، سازه های دریایی و فراساحلی مورد استفاده قرار می گیرد. این فولاد، فولادی با کربن متوسط می‌باشد که البته تنش تسلیم این فولاد بسته به ضخامت می‌تواند از ۳۵۰ تا ۳۹۰ مگاپاسکال متفاوت باشد. مقاومت کششی وتنش نهایی آن به ترتیب می تواند از ۴۹۰ تا ۶۳۰ مگاپاسکال و۵۶۰ تا ۶۲۰ مگاپاسکال می تواند متفاوت باشد.

در جدول(۱) خواص حرارتی و مکانیکی و تحلیل شیمیایی انجام شده از این فولاد که به صورت تجربی اندازگیری شده است، آورده شده است[۲۹]. از تغییرات نسبت پواسون با تغییر دما صرف‌نظر شده است. برای شبیه‌سازی گرده جوش نیز از خواص الکترود مورد استفاده، برای شبیه‌سازی ماده پرکننده استفاده‌شده است.

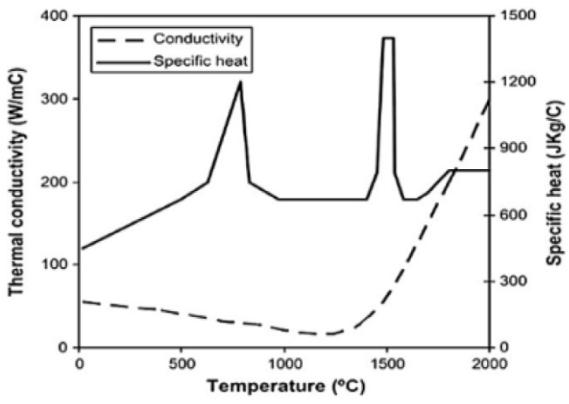
در نرم افزار Simufact Welding یک پایگاه داده از پیش تعریف شده از مواد مختلف در مورد خواص حرارتی و مکانیکی برای اهداف شبیه سازی وجود دارد. همچنین کاربران قادر به ایجاد پایگاه داده جدید از مواد می باشند. پس داده های موجود از خواص مکانیکی و حرارتی و شیمیایی براساس جدول(۱) و شکل‌های(۱و۲) به نرم افزار داده شد.

2-2-مدل سازی اتصال و شبکه بندی مدل

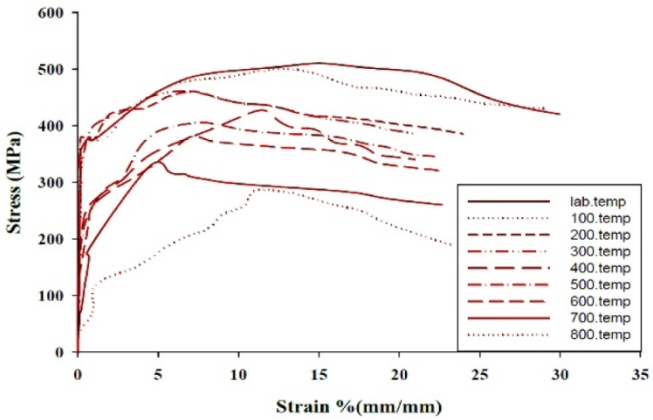
نحوه ی مدل سازی فرآیند جوشکاری به انتخاب مدل هندسی بستگی دارد. انتخاب مدل هندسی برای مدل سازی جوش به هندسه اصلی نمونه مورد بررسی، طبیعت شرایط مرزی و دقت مورد نیاز بستگی دارد. با استفاده از نرم افزار Solid work هندسه اولیه اتصال مدل سازی شد و با توجه به اینکه مدل

جدول۱- خواص مکانیکی وحرارتی و درصد تحلیل شیمیایی St-52 برحسب درصد[۲۹]

خواص مکانیکی و حرارت و درصد تحلیل شیمیایی محصول بر حسب درصد										
شماره حرارت	کربن	منگنز	سیلیسیم	فسفر	گوگرد	مس	نیکل	مولیبدن	وانادیم	بقیه عناصر
k ۷۲۲۷۵	۰/۱۷	۰/۶۱	۰/۲۰۴	۰/۰۱۰	۰/۰۰۷	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۲۸
St۵۲	تنش نقطه تسلیم ۳۵۵ MPa			مقاومت کششی ۵۱۰ MPa (۵۲۰۰ $\frac{Kg}{Cm^2}$)			(٪) تغییرطول ۳۳/۹		HRB (سختی) ۷۸	



شکل۱- تغییرات خواص حرارتی St52 با دما [۲۹]



شکل۲- منحنی‌های‌تنش وکرنش‌تحت دما برای St52 [۲۹]

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

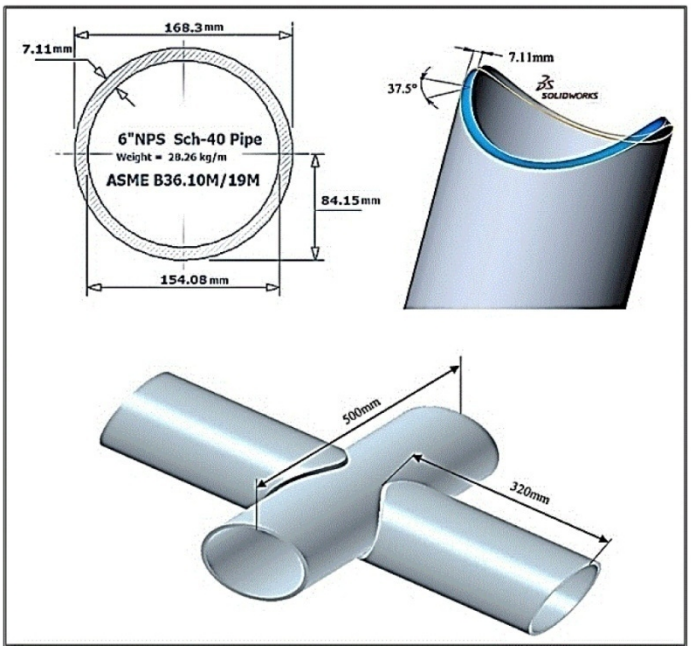
از دو شاخه فرعی ویک شاخه اصلی تشکیل شده است، لازم است جهت مونتاژ دقیق شاخه فرعی و اصلی محل اتصال بر روی شاخه ی فرعی به صورت استاندارد پخ ایجاد شود. در شکل(۳) هندسه ی مدل مشاهده می شود.

شبکه بندی یکی ازمهم ترین بخش های هرشبیه سازی می‌باشد. تولید شبکه یا مش بندی، تقسیم دامنه به تعدادی تقسیمات کوچکتر است که با هم تداخل ندارند. شبکه بندی اولیه مدل در نرم افزارMSC Apex Grizzly انجام شد. ابتدا طرح اتصال اولیه را از نرم افزارSolid work به نرم افزارMSC انتقال داده می‌شود وبا استفاده ازامکانات بخش شبکه بندی نرم‌افزار، ابتدا اندازه المان ها تعیین می‌گردد و سپس تنظیمات کلی شبکه بندی انجام می شود. نوع المان نیز باید تعیین شود، نرم افزار Simufact Welding می‌تواند با سه نوع المان حجم متفاوت (چهاروجهی، پنج وجهی و شش وجهی) کار کند [۱۸]. به دلیل تغییرات شدید دما و تنش در نزدیکی جوش، شبکه بندی در این قسمت باید ریزباشد، اما هرچه که از منطقه تحت تاثیر حرارت جوش دورتر می‌شوید، ضرورت وجود شبکه ریز کاهش می یابد. اغلب بهتر است که مناطق بحرانی مدل به صورت محلی شبکه بندی شود و آن مناطق با شبکه بندی ریزتر (پالایش محلی) می‌شود.

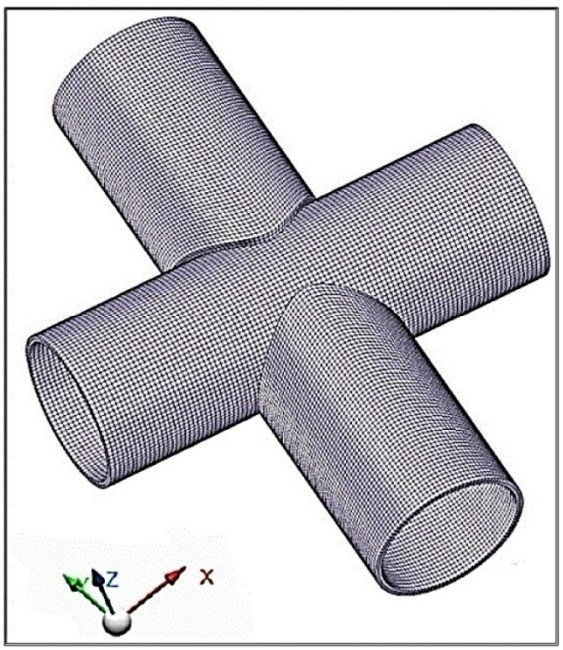
به عنوان یک جایگزین می توان از انطباق شبکه در طول فرآیند، ارائه شده توسطSimufact Weldingاستفاده کرد که در طول اجرای فرآیند شبکه بندی مناطق اطراف جوش و خود جوش نیز به بهترین شکل ممکن تصحیح شده به طوری که کیفیت المان‌ها از حدی پایین تر نیاید. در این پژوهش از انطباق شبکه در طول فرایند استفاده شده است و شبکه بندی به صورت سازگار با محل انجام می شود.

در شکل(۴) شبکه بندی اولیه ی مدل آورده شده است. در این پژوهش ازالمان شش وجهی خطی جهت شبکه بندی استفاده می‌شود. در شبکه بندی سازگار، شبکه بندی ریز اطراف جوش با الکترود جوشکاری حرکت می کنند. به عبارت دیگر در هر زمان المان هایی که داخل حوضچه مذاب هستند (وکمی اطراف آن) شبکه بندی ریز می شوند. با انتخاب سطح انطباق مورد نظر این اصلاح وسازگاری می تواند طبق سه معیار انجام شود.

- طبق اختلاف دمای المان های هم جوار جوش، با مقدار دلخواه انطباق شبکه انجام می شود.
- طبق تنش معادل، المان های هم جوار جوش، با مقدار تنش دلخواه انطباق شبکه انجام می شود.
- مطابق منبع حرارتی المان‌های هم جوار جوش، منبع حرارتی



شکل۳- مدل سازی اولیه و مشخصات هندسی مدل



شکل۴- شبکه بندی اولیه مدل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

با مقیاس دلخواه انطباق شبکه انجام می شود.

در این پژوهش اطراف منطقه جوشکاری انطباق شبکه باسطح دو و معیار سه برای اجزاء اصلاح انجام شده است و به دلیل انتخاب شبکه بندی مناسب در بخش ایجاد هندسه جوش، لازم به انطباق شبکه برای ماده پرکننده نیست. در مدل حاضر، تکنیک تولد و مرگ المان به‌کارگرفته شده است. بـرای این‌کار المان‌های‌گرده جوش که در گام اول غیرفعال هستند، درمرحله جوشکاری به‌مدل اضافه‌می‌شوند. شکل(۵) شماتیک این تکنیک را نشان می دهد. در شکل(۶) نیز شبکه‌بندی اطراف محل جوشکاری سه پاسه نمایش داده شده است.

2-3- اقدامات قبل از فرآیند جوشکاری

قبل از شروع فرایند جوشکاری وتحلیل در نرم افزار، مراحلی جهت وضوح شبیه سازی در نرم افزار تعریف می شود. اولین مرحله مشخص نمودن تعداد اجزاء، تکیه گاه ها، ثابت کننده‌ها، گیره ها یا قیود و روبات های جوشکاری می باشد.اجزاء در واقع به هندسه هایی که به همدیگر جوش می شوند،گفته می‌شود. بعد از مشخص نمودن مرحله ی اول، مدل هندسی از قبل آماده شده با شبکه بندی اولیه به نرم افزار انتقال داده می‌شود و مونتاژ می گردد، سپس هندسه ی جوش تعریف می‌شود. هندسه ی جوش به صورت شبکه بندی شده تولید می شود که با توجه به درخواست کاربر، مقدار ریز شدن شبکه‌بندی قابل تغییر است و همچنین شبکه بندی اطراف جوش با توجه به نیاز به صورت اتوماتیک در فرآیند جوشکاری در ۱۰ رده برای هندسه ی اجزاء وجوش قابل تغییر وتنظیم است. البته قبل ازتعریف هندسه جوش، لازم است منبع حرارتی با توجه به پارامترهای جوشکاری،گ ُرده جوش و یا عرض منبع حرارتی، شبیه سازی شود.

2-4- تعیین منبع حرارتی و ابعاد آن

پیش بینی نتایج‌اعوجاج و تـنش‌های پسماند در نرم افزارهای شبیه سازی بستگی زیادی به صحت مـدل منبع حرارتی جوش دارد. در این نرم افزار از منبع حرارتی هایی استفاده می‌شود که برای بیش از۳۰ سال مورد آزمایش وتایید قرار گرفته‌اند. مدل های حرارتی قابل دسترس در این نرم افزار مدل حرارتی لیزر و توزیع چگالی بیضی گون دوگانه (گلداک) می باشد، همچنین این امکان وجود دارد که خواص منبع حرارتی دلخواه با خصوصیات دلخواه را توسط زبان برنامه نویسی فرترن برای مقاصد دلخواه در نرم افزار تعریف کرد، مدل پیشنهادی برای جوشکاری قوس الکتریکی توسط نرم افزار مدل گلداک است [۱۸]. جهت ارزیابی صحت نتایج حاصل، نتایج حاصل از شبیه سازی را می‌توان با نتایج حاصل از اندازه گیری تجربی مقایسه کرد، که در اکثراً مواقع مدل فرم دو بیضوی گلداک با اعمال گرمای نهان ذوب و در نظر گرفتن شار حرارتی به صورت تمام حجمی، بهترین نتایج را برای جوشکاری قوس الکتریکی خواهد داشت. در این مدل به علاوه اینکه تابع بیضی‌گون توزیع گاؤسی، چگالی‌توان را در برخورد قوس درجهت مستقیم مدل می‌کند و هم توزیع گاؤسی انرژی را درحرکت فلز مذاب، مدل می نماید. گلداک مدل خودرا برای جوشکاری دو ورق آزمایش کرد و نتایج حاصل با مقادیر تجربی تطابق خوبی داشتند. درحال حاضر اکثر محققان از مدهای تصحیح شده وتوسعه یافته مبتنی برمدل گُلداک استفاده می کنند.شکل(۷) شماتیکی ازاین منبع را نشان می دهد که توسط گلداک در سال ۱۹۸۴ ارایه شده است[۲۸]. برای بدست آوردن توزیع مناسب گرما در مسیر جوشکاری باید منبع حرارت دارای ابعاد مشخص باشد و همچنین منبع حرارتی بر روی مسیر جوشکاری کالیبره باشد، دراین نرم افزار منبع حرارتی به آسانی قابل تجسم و تا رسیدن به ابعاد مورد نظر قابل اصلاح می باشد. البته بعد از رسیدن به ابعاد مورد نظر برای منبع حرارتی می توان مجدد منبع حرارت را کالیبره کرد. به صورت پیشنهادی می توان از توصیه نرم افزار برای تخمین شعاع توزیع شار حرارتی در نیمه جلویی و عقب الکترود، عرض منبع حرارتی و عمق منبع حرارتی نیز استفاده کرد.با توجه به شکل حرارت ورودی در دو ناحیه، یکی در جلوی مرکز قوس و دیگری در قسمت پشت مرکز قوس، طبق رابطه‌های (۱ و۲) به مدل اعمال شده است. رابطه (۱) مقدار

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

شار حرارتی در نیمه جلویی الکترود و رابطه (۲) شارحرارتی در نیمه پشتی الکترود می باشد. علاوه بر ابعاد منبع حرارتی، می‌توان مشخصات عمومی جوشکاری از جمله نوع جوشکاری، موقعیت جوشکاری، ضخامت قطعاتی که به هم جوش می‌شوند، نوع الکترود، قطر الکترود و غیره را تعریف کرد. در قسمت مشخصات جوشکاری نیز می توان سرعت جوشکاری، ولتاژ جوشکاری، جریان جوشکاری و یا میزان حرارت ورودی را تعریف کرد.

$$q(x.y.z.t) = \frac{6\sqrt{3}f_f\eta Q}{a_f bc\pi\sqrt{\pi}}.e^{-3((x^2/b^2)+(y^2/c^2+(z+v(\tau-t))^2/a_f{}^2))} \quad (۱)$$

$$q(x.y.z.t) = \frac{6\sqrt{3}f_r\eta Q}{a_r bc\pi\sqrt{\pi}}.e^{-3((x^2/b^2)+(y^2/c^2+(z+v(\tau-t))^2/a_r{}^2))} \quad (۲)$$

$$Q = \eta UI \quad (۳)$$

و همچنین ثابت های f_r و f_f برحسب فرآیند جوشکاری به صورت معادلات(۴و ۵) بدست می آید.

$$f_r = \frac{2}{(1+\frac{a_f}{a_r})} \quad (۴)$$

$$f_f = \frac{2}{(1+\frac{a_r}{a_f})} \quad (۵)$$

در این روابط q نرخ شار حرارتی و پارامترهای a .b .c ابعاد حوضچه ی مذاب جوش هستند که می توانند مقادیر متفاوت در جلو و عقب به خود بگیرند،زیرا آنها مستقل هستند. a_r وa_f شعاع توزیع شار حرارتی در نیمه جلویی وعقب الکترود هستند،U ولتاژ جوشکاری، I جریان جوشکاری و η راندمان جوشکاری است. x.y.z محورهای مختصات جهت مشخص نمودن فاصله از مرکز محور مختصات که همان مرکز قوس است. بین ضریب های توزیع حرارت رابطه ی زیر برقرار است.

$$f_f + f_r = 2 \quad (۶)$$

2-5- شبیه سازی و شبکه بندی جوش

در این پژوهش، جوشکاری در سه پاس انجام شد و به طورهمزمان با ایجاد هندسه جوش می توان نوع شبکه بندی جوش را نیز مشخص کرد. شبکه بندی جوش توسط نرم افزار در سه سطح درشت، متوسط وخوب می تواند اجرا شود که در مطالعه حاضر از شبکه بندی مناسب استفاده شده است.جهت ساخت اتصال از روش جوشکاری قوسی با الکترود پوشش‌دار استفاده شد. پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در نرم‌افزار برای سه پاس جوش در جدول(۲) آمده است. با توجه به اینکه زمان جوشکاری به طول هندسه جوش و سرعت جوشکاری دارد. بر اساس رابطه(۷) اگر t زمان جوشکاری وl طول هندسه جوش وV سرعت جوشکاری باشد، می توان زمان جوشکاری برای هر پاس را محاسبه کرد.البته در نرم افزار با دادن اطلاعات طول هندسه جوش و سرعت جوشکاری، برای هر پاس جوش زمان جوشکاری توسط نرم افزار محاسبه می‌شود. شکل(۸) هندسه ی جوش سه پاسه در دو طرف اتصال صلیبی را نشان می دهد.

$$t = \frac{l}{V} \quad (۷)$$

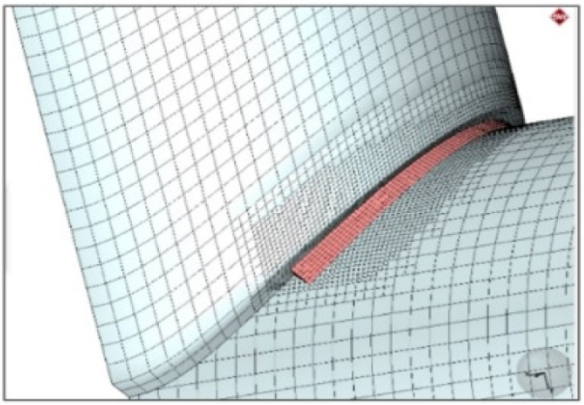
با در نظر گرفتن بازده جوشکاری ۸۰ درصد برای جوشکاری قوس الکتریکی، گرمای خالص ورودی در هر پاس از جوشکاری را می توان توسط رابطه (۸) محاسبه کرد، این مقدار توسط نرم افزار محاسبه و در تحلیل مورد استفاده قرار می گیرد.

$$Q = \eta Q_{nominal} = \frac{\eta UI}{V} \quad (۸)$$

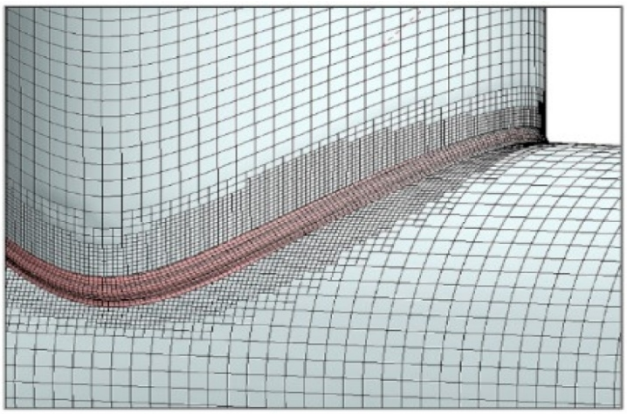
2-6- شرایط مرزی حرارتی و مکانیکی

شرایط در مرزهای قطعه را به روش‌های گوناگون، حرارتی و مکانیکی‌می‌توان تعریف نمود. هم‌چنین، قیود متفاوتی‌که برقطعه در هنگام جوشکاری و سرد شدن قطعه عمل می‌کنند، اثر بسزایی براعوجاج و توزیع تنش پسماند ایجاد شده بر قطعه دارند. در این نرم افزار، شرایط مرزی مکانیکی به صورت تکیه‌گاه‌ها، ثابت کننده ها، گیره ها یا قیود واتصالات محلی می‌تواند تعریف شود. تکیه گاه عضوی است که اجزاء برروی آن به صورت صحیح که قابلیت حرکت داشته باشند، قرار می‌گیرند. یک ثابت کننده مانع از حرکت اجزاء می شود. البته می‌توان با ثابت کردن گره هایی بر روی جسم، ثابت کننده را در جهات خاص تعریف کرد و هندسه‌ای برای آن در نظر نگیرید.

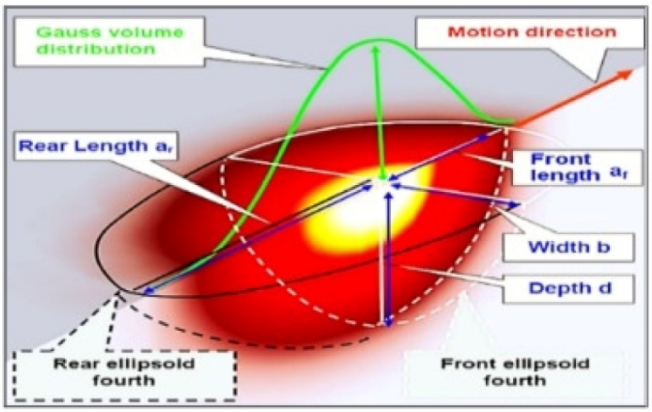
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

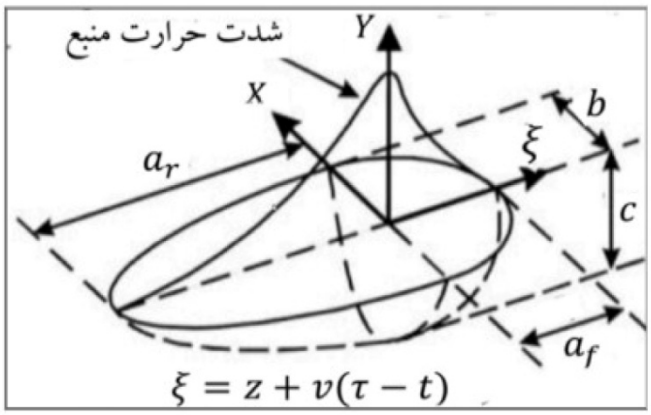


شکل۵- تکنیک تولد و مرگ المان و اصلاح شبکه بندی با حرکت الکترود



شکل۶- انطباق و سازگاری شبکه برای سه پاس جوشکاری





شکل ۷- مدل توزیع چگالی توان بیضی گون دوگانه [۱۸و۳۰]

گیره‌ها در این نرم افزار می توانند به روش های مختلفی مورد استفاده قرارگیرند. درحالت اول می توانند به صورت یک فنر عمل کنند و یک نیروی مخالف به صورت ثابت و یا متغیر به سطح اعمال کنند و همچنین این نیرو می‌تواند در مختصات تعریف شده و یا تشخیص توسط نرم افزار اعمال شود. در حالت دوم، گیره به طور مستقیم با اعمال یک نیروی قائم به سطح ممکن است دو جزء را به هم بفشارد و یا به یک یاتاقان محکم کند و همچنین این نیرو نیز می تواند در مختصات تعریف شده و یا تشخیص توسط نرم افزار اعمال شود. درحالت سوم، یک گیره می تواند به صورت متحرک تعریف شود. برای گیره‌های متحرک، سختی تعریف نمی شود. برای تعریف یک گیره متحرک باید هندسه گیره را ساخت و در نرم‌افزار وارد نمود و در نهایت زمان شـروع حرکت و موقعیت حرکت را تنظیم کرد.

اگر هیچ‌گونه قیدی بر اتصال جوشکاری شده درحین جوشکاری وخنک شدن قطعه اعمال نشود، تنش‌ها باعث اعوجاج قطعه می شوند. شکل(۹) شرایط مرزی مکانیکی اعمال شده به مدل سه بعدی اتصال صلیبی را نشان می دهد. برای تحلیل حرارتی و رسیدن به توزیع دما، شرایط مرزی تعریف می شوند و اطلاعاتی از قبیل خصوصیات فیزیکی ماده که وابسته به دما هستند، نیز مشخص شوند. باتوجه به رابطه‌های (۹ الی ۱۲) وشرایط مرزی، اطلاعاتی که به عنوان ورودی موردنیاز است، عبارتند از دمای اولیه که برابر دمای محیط است، مقادیرضریب‌حرارت‌جابجایی‌وتابشی، خصوصیات فیزیکی وابسته به دما از قبیل ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمای‌ویژه‌و چگالی. در رابطه‌های(۱۲-۹) h_{conv} ضریب انتقال حرارت همرفتی وT_∞ دمای‌محیط است. ضریب انتقال حرارت همرفتی به‌شرایط محیطی مانند سرعت هوا در محل جوشکاری

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول۲- پارامترهای جوشکاری سه پاسه برای اتصال صلیبی از جنس فولادSt52 [۲۹].

پاس جوشکاری	قطر الکترود مصرفی (میلیمتر)	ولتاژ جوشکاری (ولت)	جریان جوشکاری (آمپر)	سرعت جوشکاری ($\frac{\text{میلیمتر}}{\text{دقیقه}}$)	بازده جوشکاری (درصد)
اول	۳/۲	۲۵	۸۰-۱۴۰	۳۰-۴۵	۸۰
دوم	۳/۲	۲۲	۱۱۰-۱۵۰	۶۰-۸۰	۸۰
سوم	۳/۲	۲۲	۱۱۰-۱۵۰	۹۵-۱۶۰	۸۰

$$q_{con} = h_{conv}(T - T_\infty) \quad (۹)$$

$$q_{rad} = h_{rad}(T - T_\infty) \quad (۱۰)$$

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma F(T^2 + T_\infty^2)(T + T_\infty) \quad (۱۱)$$

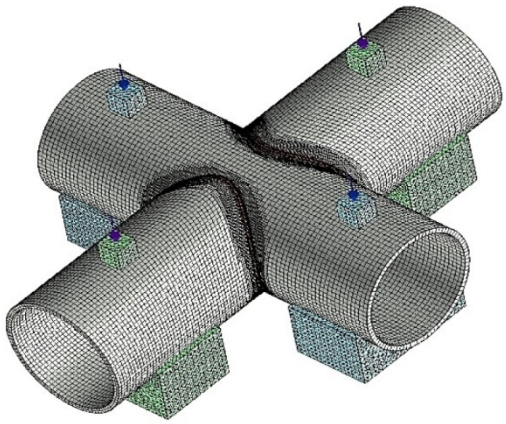
$$h_{eq} = h_{conv} + h_{rad} \quad (۱۲)$$

بستگی دارد و اثر قابل توجهی برخنک شدن قطعه دارد. h_{rad} ضریب انتقال حرارت تشعشعی، εضریب انتشار، σ ثابت استفان بولتزمن و F ضریب شکل یا فاکتور سطح و h_{eq} ضریب انتقال حرارت معادل است. علاوه بر وابستگی به دمای سطح، تشعشع از سطح قطعه به شرایط سطح مانند صیقلی بودن رنگ قطعه بستگی دارد.



شکل۸- هندسه جوش سه پاسه در دو طرف اتصال صلیبی

هر قدر سطح صیقلی‌تر و روشن‌تر باشد، ضریب انتشار و در نتیجه اتلاف حرارت تشعشعی بیشتر است.ضریب تشعشع که با ε نمایش داده می شود برای فولاد St52 برابر۰/۶۶ و برای ماده پرکننده ۰/۴۳ در نظر گرفته شده است. دمای اولیه محیط ۲۷ درجه ی سانتی گراد می‌باشد بنابراین دمای اولیه قطعات لوله نیز برابر با دمای اولیه محیط در نظر گرفته شده است، این مقدار برای ماده ی پرکننده ۱۵۲۰ درجه سانتی گراد لحاظ شده است.

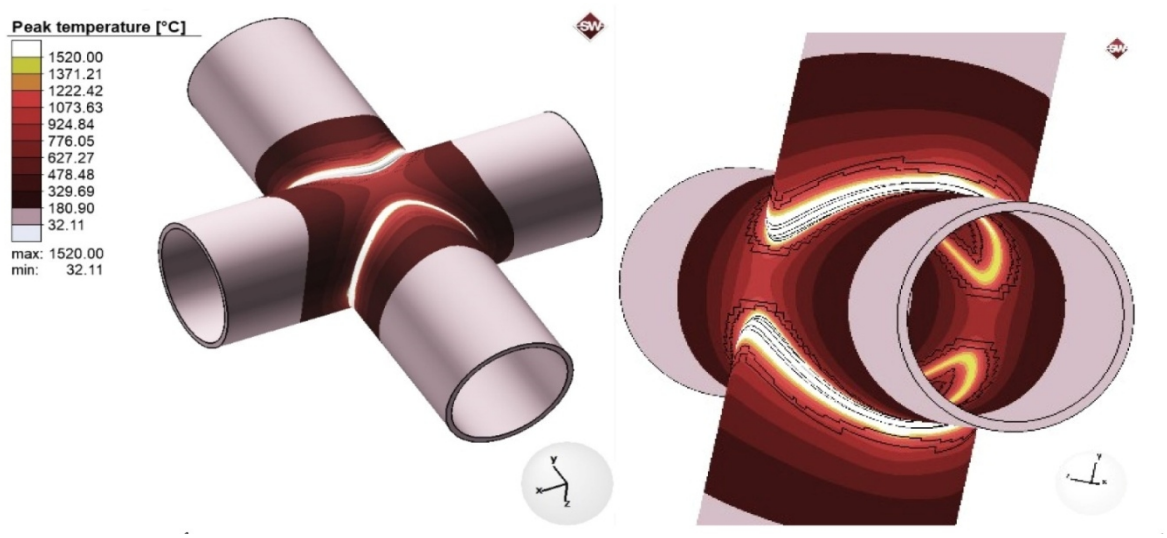


شکل ۹- شرایط مرزی مکانیکی بر روی مدل سه بعدی اتصال صلیبی

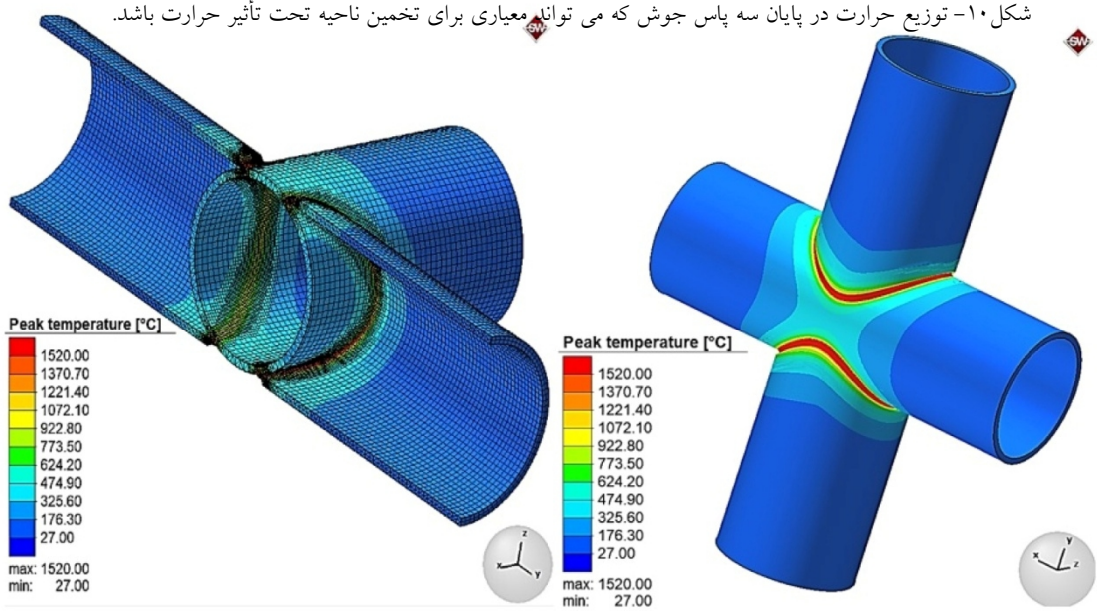
3- نتایج و بحث

توزیع حرارت می تواند برای تخمین منطقه تحت تأثیر حرارت جوشکاری مورد استفاده قرار گیرد. تخمین این ناحیه قابل اهمیت است به این دلیل که ساختار متالوژیکی در اثر حرارت ناشی از جوشکاری به صورت چشمگیری در این ناحیه دچار تغییر می شود و به مقدار قابل توجهی مقاومت این منطقه کاهش می دهد و در نتیجه مکانی برای ایجاد و رشد ترک‌های خستگی ایجاد می شود. از روی کانتورهای دما در شبیه سازی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل۱۰- توزیع حرارت در پایان سه پاس جوش که می تواند معیاری برای تخمین ناحیه تحت تأثیر حرارت باشد.



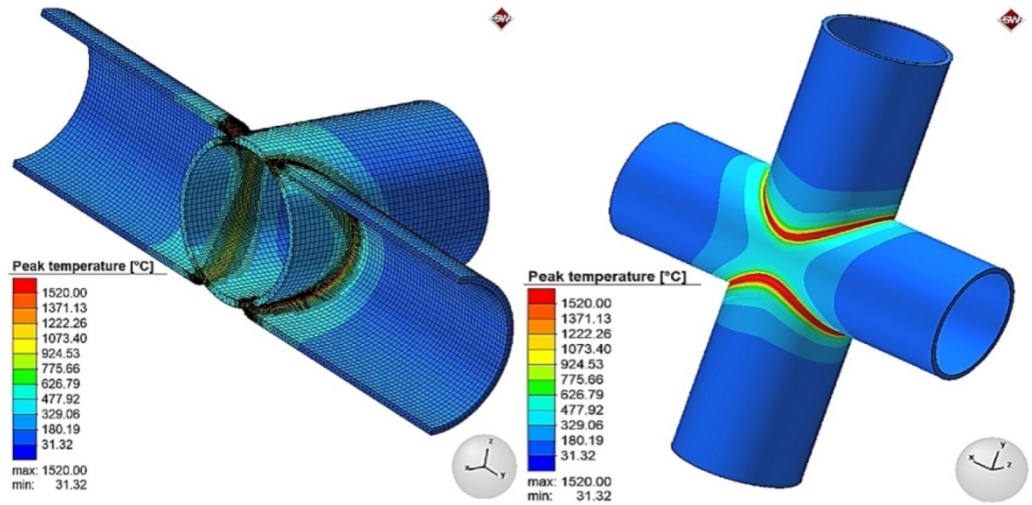
شکل۱۱- توزیع درجه حرارت حین جوشکاری برای پاس اول جوشکاری

این ناحیه قابل تشخیص است. در این ناحیه بر اثر اعمال شار حرارتی می تواند حداقل دمایی در حدود ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه داشته باشد. از نتایج می توان دریافت که این ناحیه در تقریبا نیمی از ضخامت عضواصلی و تمام ضخامت عضو فرعی در محل پای جوش تشکیل می شود. شکل(۱۰) توزیع حرارت در پایان سه پاس جوش را نشان می‌دهد.

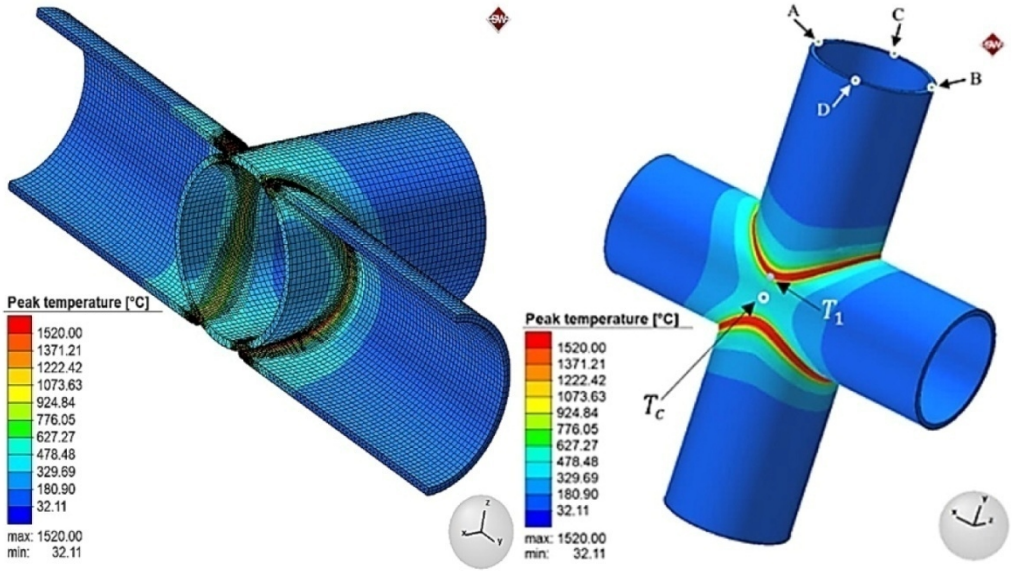
با توجه به نتایج تحلیل حرارتی و اینکه در جوشکاری قوس الکتریکی دستی، با الکترودهای پوشش‌دار امکان تمرکز حرارت حرارت دریک نقطه وجود دارد وسعت ناحیه ی تحت تأثیر حرارت حدود ۴ تا ۵ میلی متر در هر سه پاس می باشد. وسعت و گستردگی ناحیه متاثر از حرارت می تواند به عوامل زیادی همچون روش جوشکاری، سرعت جوشکاری، درجه حرارت پیش گرم، تعداد پاس ها، ابعاد قطعه، جنس فلز پایه و متغیرهای جوشکاری می تواند بستگی داشته باشد.

شکل های (۱۱ الی ۱۳) کانتور توزیع درجه حرارت را حین جوشکاری برای سه پاس جوش در اتصال صلیبی نشان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل۱۲- توزیع درجه حرارت حین جوشکاری برای پاس دوم جوشکاری

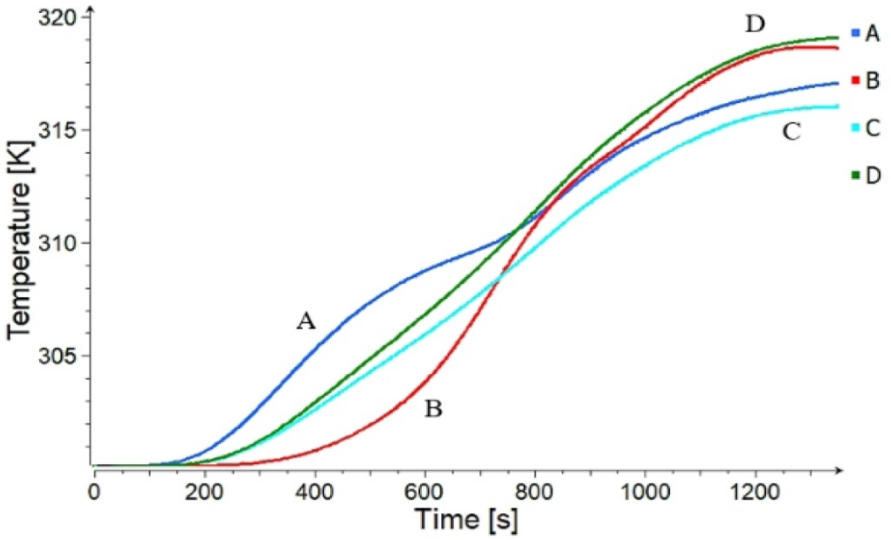


شکل ۱۳- توزیع درجه حرارت حین جوشکاری برای پاس نهایی (سوم)

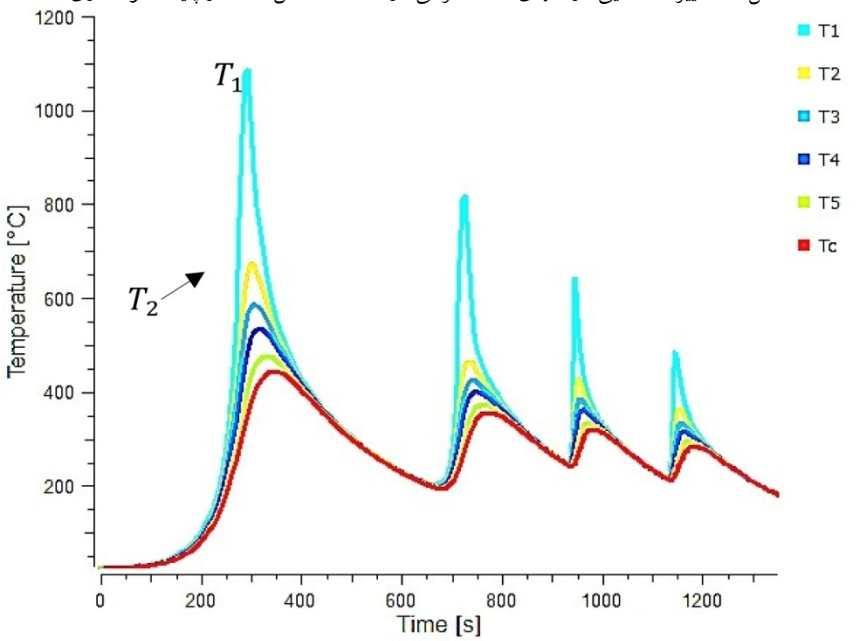
می‌دهد. همچنین شکل(۱۴) تغییرات دمایی در انتهای شاخه فرعی در نقاط مشخص شده را نشان می‌دهد که میزان تغییرات آن درحین جوشکاری طبق نمودار برای نقطه A بین ۳۰۰ تا ۳۱۷ درجه کلوین و برای نقطه B بین ۳۰۰ تا ۳۱۸ درجه کلوین و برای نقطه C بین ۳۰۰ تا ۳۱۶ درجه کلوین و برای نقطه D بین ۳۰۰ تا ۳۱۹ درجه کلوین می باشد.

برای هر پاس جوشکاری زمانی برای خنک کاری در نظر گرفته شده است. زمانی که دمای قطعه بیش از پیشینه دمای بین پاسی است، لازم است زمان کافی به قطعه جوشکاری شده داده شود تا دمای قطعه به محدوده‌ی دمای پیش گرم و بین پاسی باز گردد، این زمان در واقع زمان خنک کاری است. در استانداردها برای مواد مختلف با توجه به شرایط موجود، مواردی از جمله دمای قبل ازجوشکاری یا پیش گرم، دمای بین پاسی و پس گرمایش یا تنش زدایی تعریف می شود. شکل(۱۵)، توزیع دما در حین جوشکاری از ریشه ی جوش تا مرکز شاخه اصلی (T_c) را نشان می دهد. در نواحی نزدیک به خط جوش، به طور مثال در ریشه جوش دما تا حدود ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد می رسد و در مرکز شاخه اصلی دما تا

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل۱۴-تغییرات دمایی در انتهای شاخه فرعی در نقاط مشخص شده در پایان جوشکاری

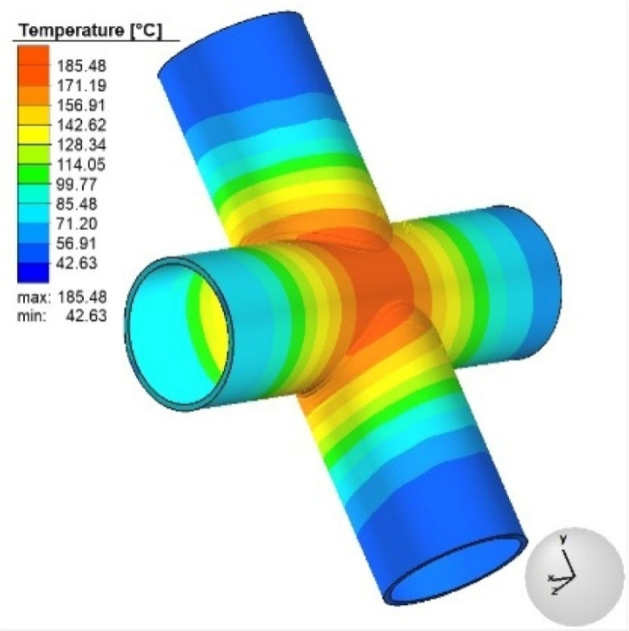


شکل۱۵- منحنی گرمایش- سرمایش نقاطی ازریشه جوش به سمت مرکزشاخه اصلی (T_c) در پایان جوشکاری

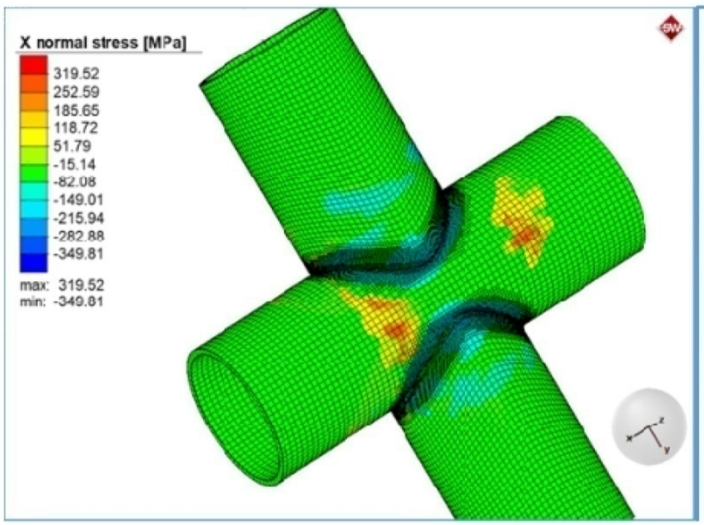
حدود ۴۴۴ درجه کاهش می یابد. در واقع نقاط دورتر ازخط جوش، تغییرات زیادی را تحمل نمی کنند. از روی شیب صعودی منحنی دما –زمان درحین جوشکاری نسبت به لحظه سردشدن، که منحنی روند نزولی را طی می کند، می توان مشاهده نمود که سرعت افزایش دما در حین جوشکاری از سرعت افت دما بعد از جوشکاری بیشتر است. در نقاط دور از خط جوش، مقدار دما کاهش می یابد.

ولی درنقاط نزدیک به خط جوش، مقدار بیشینه دما و نیز شیب منحنی دما-زمان بیشترمی شود.شکل(۱۶) روند خنک کاری را تا ۱۴۸ ثانیه بعد از اتمام پاس نهایی جوشکاری نشان می دهد و این خنک کاری ادامه می‌یابد تا در نهایت محل جوشکاری شده و اتصال با محیط هم دما شود.در عملیات جوشکاری، بعد از مرحله خنک کاری، تنش هایی در آن باقی می‌ماند که تنش‌های پسماند نام دارند.

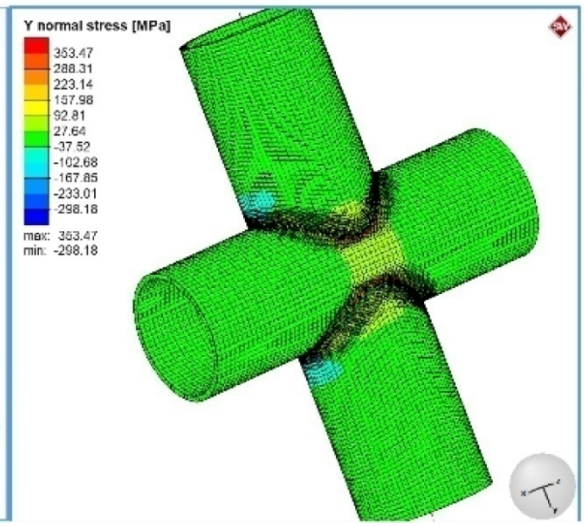
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل۱۶- روند خنک کاری نهایی (زمان ۱۴۸ ثانیه بعد از اتمام جوشکاری پاس سوم)



شکل۱۸- توزیع تنش در راستای Xدر اتصال جوشی



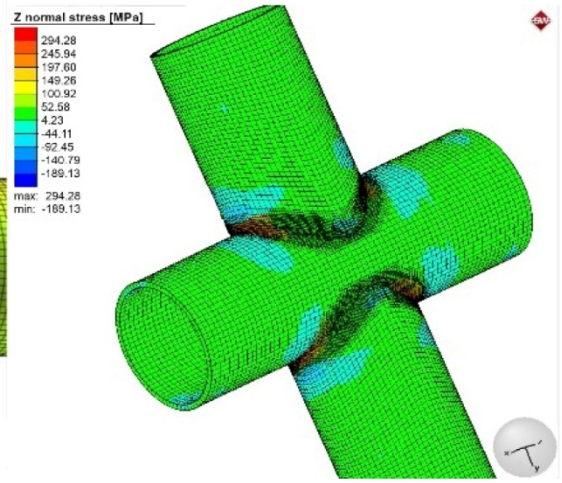
شکل۱۷-توزیع تنش در راستای Yدر اتصال جوشی

اندازه ی تنش های پسماند گاهی بسیار زیاد و نزدیک به تنش تسلیم ماده است و این موضوع مشکل اصلی استفاده از جوشکاری است. نقش تنش های پسماند در یک جسم به اندازه تنش های مکانیکی مهم است. در شکل های(۱۷ الی ۲۲) مولفه های تنش در اتصال جوشی نشان داده شده است.

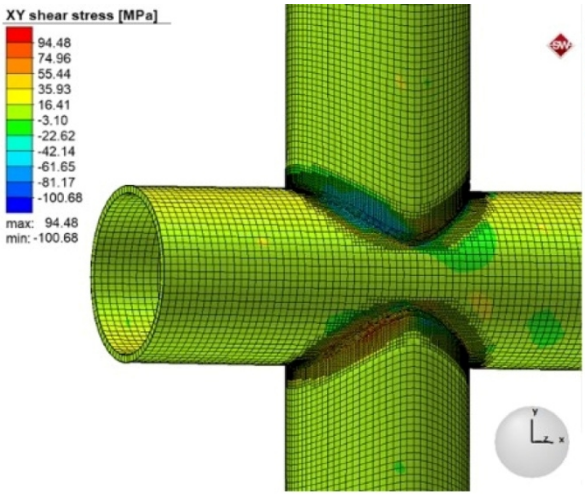
با افزایش تعداد پاس و انجام پاس جدید در ناحیه جوش و گرمادادن دوباره ناحیه جوشکاری شده تنش های به وجودآمده درپاس های قبل آزاد شوند و پاس جدید باعث بوجودآمدن تنش‌های گرمایی جدیدی می شود. بااین حال، در تمام پاس‌ها، این تنش ها در محدوده ای خاص قرار می گیرندو حداکثر مقدار آن با هر پاس تغییر می کند. اگر قبل از استفاده از این قطعات به روشی این تنش ها رها شوند، این فرآیند را تنش‌زدایی می گویند.

با دقت قابل قبولی می توان تنش های ناشی از بارگذاری های خارجی را اندازه گیری کرد، اما پیش بینی تنش‌های پسماند حاصل از فرآیند جوشکاری کار آسانی نیست. با در نظرگرفتن پارامترهای جوشکاری، شرایط جوشکاری، خواص متالورژیکی و مکانیکی و همچنین خواص حرارتی مواد و استفاده از

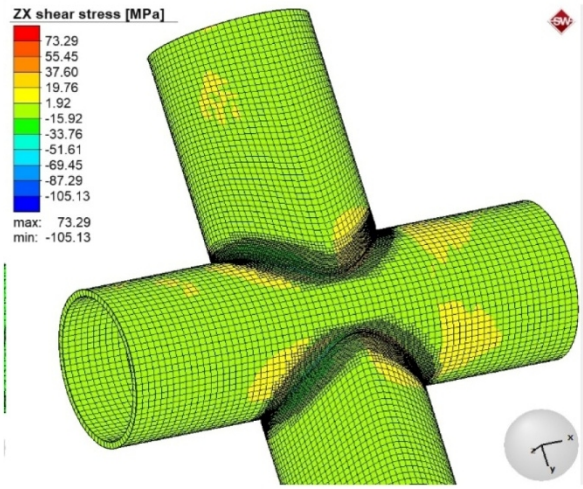
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



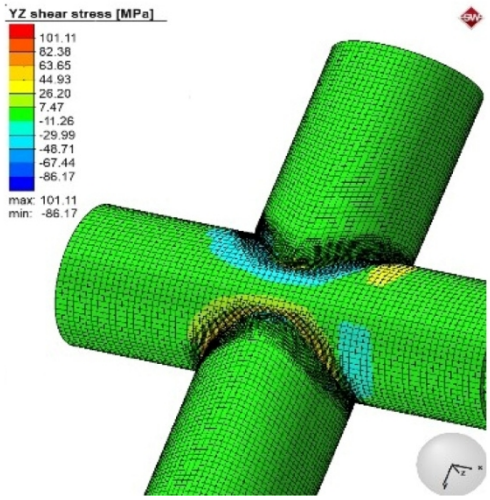
شکل۱۹- توزیع تنش در راستای Z در اتصال جوشی



شکل۲۰-توزیع تنش برشی (τ_{xy}) در اتصال جوشی



شکل۲۱-توزیع تنش برشی (τ_{zx}) در اتصال جوشی



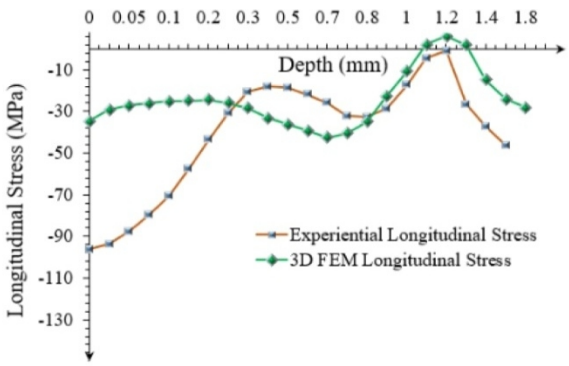
شکل۲۲-توزیع تنش برشی (τ_{yz}) در اتصال جوشی

نرم‌افزارSimufact Welding، جوشکاری را شبیه سازی نمود و با دقتی قابل قبول تنش های پسماند را پیش بینی و با نتایج تجربی مقایسه نمود. درشکل‌های (۲۳ الی ۲۶) نمودار نتایج نرم افزاری اندازه گیری تنش در فاصله ی ۵ میلی متری از ریشه جوش با نتایج تجربی [۱] مقایسه شد و نتایج قابل قبولی بدست آمده است. البته بین نتایج تجربی و نرم افزاری اختلاف هایی از لحاظ کششی بودن و یا فشاری بودن تنش وجود دارد و این می تواند به دلیل خطای اندازه گیری تنش پسماند، عملیات سنگ زنی جهت تمیز کاری بین دو پاس در جوشکاری تجربی باشد. اختلاف های هر چند کوچک در پارامترهای جوشکاری، شرایط جوشکاری، خواص متالوژیکی و مکانیکی و خواص حرارتی مواد نیز می تواند بر دقیق بودن نتایج تاثیر گذار باشد.

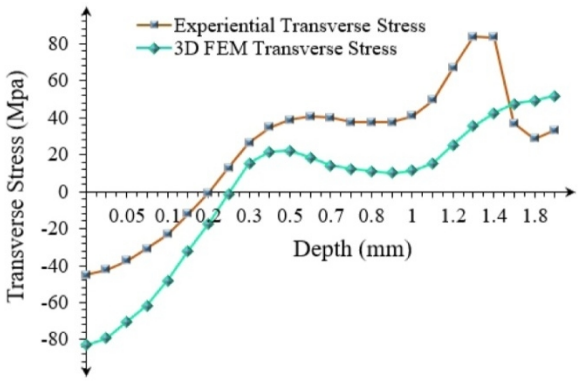
باتوجه به انتخاب تعداد المان، مقدارگرمای ورودی، طرز اعمال شار حرارتی، سرعت جوشکاری، مقدار تنش تسلیم، مدول الاستیسیته ماده ومدول پلاستیسیته می تواند برمقدار و توزیع تنش تأثیر بگذارد. در شکل(۲۵) تنش پسماند بر حسب فاصله از مرکز جوش بر روی سطح شاخه فرعی نشان داده شده است.

نمودار تنش پسماند، نشان می‌دهد که توزیع تنش در جوش و نزدیک جوش کششی و با دور شدن از خط مرکزی جوش تنش ها به سمت فشاری شدن پیش می‌روند.

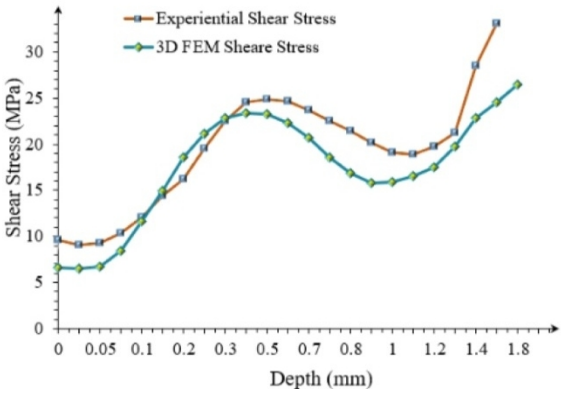
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



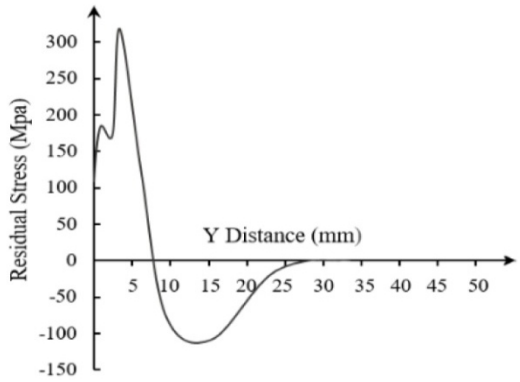
شکل۲۳–مقایسه نتیجه تنش پسماند طولی (در راستای محورY) از مدل سازی با نتیجه تجربی



شکل۲۴– مقایسه نتیجه تنش پسماند عرضی (در راستای محور X) برحسب فاصله از سطح از مدل سازی با نتیجه تجربی



شکل ۲۵–مقایسه نتیجه تنش پسماند برشی از مدل سازی با نتیجه تجربی



شکل۲۶– تنش پسماند بر حسب فاصله ازخط جوش برحسب فاصله از سطح عضوفرعی بر روی سطح عضو فرعی

4- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این کار تحقیقاتی را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱– در نواحی نزدیک به خط جوش،در ریشه جوش دما تا حدود ۱۱۰۰درجه سانتی گراد می رسد و در مرکز شاخه اصلی دما تا حدود ۴۴۴ درجه کاهش می یابد. در واقع نقاط دورتر ازخط جوش، تغییرات زیادی را تحمل نمی کنند. ازروی شیب صعودی منحنی دما–زمان در حین جوشکاری نسبت به لحظه سردشدن، مشاهده می‌شودکه سرعت افزایش دما در حین جوشکاری ازسرعت افت دما بعد از جوشکاری بیشتر است.

۲– با افزایش تعداد پاس و انجام پاس جدید در ناحیه جوش و گرما دادن دوباره ناحیه جوشکاری شده تنش‌های به وجودآمده درپاس‌های قبل آزاد می‌شوند و پاس جدید باعث بوجود آمدن تنش‌های گرمایی جدیدی می‌شود. بااین‌حال، در تمام پاس‌ها، این تنش‌ها در محدوده‌ای خاص قرار می‌گیرندوحداکثر مقدارآن با هر پاس تغییر می‌کند.

۳–بین نتایج تجربی و نرم افزاری (اندازه‌گیری تنش در فاصله ۵ میلی‌متری از ریشه جوش با نتایج تجربی) اختلاف‌هایی از لحاظ کششی بودن و یا فشاری بودن تنش وجود دارد و این می‌تواند به دلیل خطای اندازه گیری تنش پسماند، عملیات سنگ زنی جهت تمیز کاری بین دو پاس در جوشکاری تجربی باشد. اختلاف‌های هر چند کوچک در پارامترهای جوشکاری، شرایط جوشکاری، خواص متالوژیکی و مکانیکی و خواص حرارتی مواد نیز می‌تواند بر دقیق بودن نتایج تاثیر گذار باشد.

۴–باتوجه به انتخاب تعداد المان، مقدار گرمای ورودی، چگونگی اعمال شارحرارتی، سرعت جوشکاری، مقدار تنش تسلیم، مدول الاستیسیته ماده ومدول پلاستیسیته می‌تواند بر مقدار و توزیع تنش تأثیر بگذارد. نمودار تنش پسماند بر حسب فاصله ازمرکز جوش بر روی سطح شاخه فرعی نشان می‌دهد که توزیع تنش در جوش و نزدیک جوش کششی و با دور

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

شدن از خط مرکزی جوش تنش‌ها به سمت فشاری شدن پیش می‌روند.

منابع

[1] Islam, M., and Buijk, A., Rais-Rohani, M., and Motoyama,k., "Simulation-based numerical optimization of arc welding process for reduced distortion in welded structures",Finite Elements in Analysis and Design, Vol.84, pp. 54–64, 2014.

[2] Mandal, N.R., "Welding and distortion control", UK: Alpha ScienceInternational Ltd, 2004.

[3] Ayjwat,A.,and Bhatti, Zuheir.Barsoum.,and Hidekazu,Murakawa.,and Imad,Barsoum.,"Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion",Materials and Design,Vol 65,pp. 878–889, 2015.

[4] Mackerle, J.,"Finite element analysis and simulation of welding: a bibliography (1976–1996)",Model Simul Mater Sci Eng, Vol. 4,pp.501–33, 1996.

[5] Mackerle, J.,"Finite element analysis and simulation of welding – an addendum: a bibliography (1996–2001)",Model Simul Mater Sci Eng, Vol. 10, pp. 295–318, 2002.

[6] Seyyedian-Choobi, M., and Haghpanahi, M., Sedighi, M.,"Effect of welding sequenceand direction on angular distortions in butt-welded plates",J Strain Anal EngDes, Vol. 47 (1),pp. 46–54, 2011.

[7] Teng, T.L., and Chang, P.H., and Tseng. W.C.,"Effect of welding sequences on residual stresses",Comput Struct, Vol. 81(5), pp. 273–86, 2003.

[8] Liang, W., and Murakawa, H.,"An inverse analysis method to estimate inherentdeformations in thin plate welded joints", Mater Des, Vol. 40, 190–198, 2012.

[9] Bachorski, A., and Painter, M.J., and Smailes, A.J., and Wahab, M.A.,"Finite-element prediction ofdistortion during gas metal arc welding using the shrinkage volume approach",J Mater Process Technol, Vol. 92-93, pp. 405–409, 1999.

[10] Bhatti, A.A., and Barsoum, Z.,"Development of efficient three-dimensional weldingsimulation approach for residual stress estimation in different welded joints",JStrain Anal Eng Des,Vol. 47(8), pp. 539–552, 2012.

[11] Bhatti, A.A., and Barsoum, Z., and Khurshid, M.,"Development of a finite element simulationframework for the prediction of residual stresses in large welded structures",Comput Struct, Vol. 133, 1–11, 2014.

[12] Barsoum, Z., Lundback, A.,"Simplified FE welding simulation of fillet welds-3D effects on the formation residual stresses",Eng Fail Anal,Vol. 16(7), 2281–2289, 2009.

[13] Lindgren, L.E., and Haggblad H.A., and Mcdill. J.M.J., Oddy, A.S.,"Automatic remeshing for three-dimensional simulation of welding finite element",Comput Methods Appl Mech Eng,Vol. 147, pp. 401–409, 1997.

[14] Heinze, C., and Schwenk, C., and Rethmeier, M.,"Influences of mesh density and transformation behavior on the result quality of numerical calculation of welding induced distortion",Simul Model Pract Theory, Vol. 19(9), pp.1847–1859, 2011.

[15] William.Perret.and Christopher.Schwenk,and Michael. R. Ethmeier., and Thate, R. Raphael., and Uwe, Alber., "Case Study for Welding Simulation in the Automotive Industry", Weldingin the World, Vol. 55 (11-12), pp. 89-98, 2011.

[16] William, Perret."Welding Simulation of Complex Automotive Welded Assembly-Possibilities and Limits of the Application of Analytical Temperature Field Solutions", ISBN3981594401 BAM, 184 pages, 2013.

[17] "Simufact welding", http://www.simufact.de/ en/solutions/ sol_weld. Html, 2015.

[18] MSC. Simufact Welding V6, Simufact-Info Sheet-Heat Source Geometry& Simufact-Info Sheet-User SubroutineandInfo Sheet-Meshing.

[19] Dar, N.U., and Qureshi, E.M., and Hammouda, M.M.I.,"Analysis of weld induced residual stresses and distortions in thin walled cylinders",J Mech Sci Technol, Vol. 55, pp. 1118–1131, 2009.

[20] Yu, C.L., and Chen. Z.P., and Wang, Ji.and Yan, Shun-juan., and Yang. Li-Cai., "Effect of weld reinforcement on axial plastic buckling of welded steel cylindrical shells", J ZhejiangUniv-Sci A, Vol. 13 (3), pp. 79-90, 2011.

[21] Sagalevich, V.M., and Shvetsov, V.A., and Baumana, N.E.,"Distortion in welding circumferential seams in thin walled shells",England: Welding production, The Welding Institute, 1970.

[22] Ohsawa, M., and Nakajma, H., and Nagai. A., and Minechisa, S.,"Distortion of thick cylinder weldsby narrow groove MIG Welding Manufacturing Technology Centre",Technical Research Institute IIW Doc, pp. 1035–1083, 1983.

[23] Sinha, P.K., and Islam, R., and Prasad, C., and Kaleem, M.,"Analysis of residual stresses and distortions in girth-welded carbon steel pipe",Int J Recent Technol Eng, Vol. 2 (2), pp. 192-199, 2013.

[24] Vetri, Selvan. R., and Sudharsanam, V., and Raju, N., and Ravichandran, G., and Suresh, S.,"Analysis of angular distortion in header to nipple welding using FEM",International symposium on joining of materials, 2012.

[25] Vetri, Selvan. R., and Uings, R., and Sudharsanam, V., and Raju, N., and Ravichandran, G.,"Out-of-plane distortion analysis of thick walled large size circular component",International Welding Symposium (IWS-2K14), 2014.

[26] Mrvar, P., Medved, J., Kastelic, S.,"Welding sequence definition using numerical calculation", WeldJournal, 2011.

[27] Khurshid, M., and Barsoum, Z., and Mumtaz, N.A., "Ultimate strength and failuremodes for fillet welds in high strength steels", Materials and
Design, 40, pp. 36-42, 2012.

[28] Goldak, J.A., and Chakravati, A., and Bibby, M., "A new finite element model for welding heat sources",Metallurgical Transactions B, Vol. 15B,pp. 229-305, 1984.

[29] Habibi, N., "Fatigue Analysis of repaired welded joints",PHD Thesis, Solid Mechanical Engineering, Bu-ali Sina University, 2011.

[30] Piotr,Lacki., Konrad, Adamus., "Numerical simulation of the electron beam welding process",Computers and Structures, 89, pp. 977–985,2011.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]