



# تأثیر جنس ماده و شرایط جوشکاری بر مشخصه‌های جوش T شکل ورق‌های فولادی با استفاده از نتایج تجربی و مدل عددی

فرید وکیلی تهامی<sup>1\*</sup>، علی ضیائی اصل<sup>2</sup>، پیمان مجنون<sup>3</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

\* تبریز، صندوق پستی 5166614766، f\_vakili@tabrizu.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 06 دی 1394

پذیرش: 26 بهمن 1394

ارائه در سایت: 28 فروردین 1395

کلید واژگان:

جوش

مدل منبع حرارتی دو بیضی

به روز رسانی

نتایج تجربی

حل عددی

## چکیده

در این مقاله از داده‌های تجربی به منظور توسعه یک رابطه تحلیلی - تجربی برای منبع حرارتی دو بیضی جهت مدل کردن فرآیند جوشکاری در اتصال جوش T شکل از ورق‌های فولاد کربنی AISI 1020 و زنگ‌نزن AISI 304 استفاده شده است. از این مدل در برنامه کامپوتری مبتنی بر روش المان محدود برای شبیه‌سازی سه‌بعدی جوش دو ورق استفاده شده و میدان دمایی در محل جوش بدست آمده است. نتایج تجربی بصورت درجه حرارت نقاط مشخص که در حین جوشکاری توسط سیستم داده‌برداری کامپیوتری که بدین منظور طراحی و ساخته شده است، ذخیره می‌گردند. همچنین ضخامت لایه‌های جوش با ارزیابی ساختار کریستالی و سختی آنها تعیین و با نتایج مدل عددی مقایسه شده‌اند. با مقایسه داده‌های تجربی و نتایج حاصل از حل عددی، ضریب مدل عددی به کمک روش "به روز رسانی" تعیین شده است. اثر جنس ورق و شرایط جوشکاری نیز مورد بررسی قرار گرفته تا از عمومیت مدل اطمینان حاصل شود. این مدل می‌تواند جهت تعیین کیفیت جوش و ضخامت لایه تحت تأثیر حرارت و همچنین در بررسی احتمال فوران یا ترک گرم در حین جوشکاری مورد استفاده قرار گیرد. مزیت عمده مدل این است که تعداد ضرایب آن تنها به یک ضریب کاهش یافته و سایر ضرایب به پارامترهای فیزیکی و یا هندسی قطعات جوش مربوط می‌شوند. نتایج عددی حاصل از این مدل، نشان می‌دهند که اصلی‌ترین عوامل مؤثر در توزیع درجه حرارت اطراف جوش، ضریب هدایت حرارتی ورق‌ها، ضخامت، مقدار گرمای ورودی و سرعت جوشکاری می‌باشند.

## Effect of material and welding parameters on characteristics of T-shape weld of steel plates using experimental data and numerical model

Farid Vakili Tahami\*, Ali Ziaei Asl, Peyman Majnoun

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\* P.O.B. 5166614766 Tabriz, Iran, f\_vakili@tabrizu.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 27 December 2015

Accepted 15 February 2016

Available Online 16 April 2016

Keywords:

Welding

Double-Ellipsoidal Heat Source (DEHS)

Model updating

Experimental results

Numerical solution

## ABSTRACT

In this paper, experimental data have been used to develop a semi empirical relationship for double-ellipsoidal heat source to model the welding process of a T-shape fillet weld of carbon steel AISI 1020 and stainless steel 304. This model is used in a finite element based computer code to simulate the three dimensional welding process and obtain the temperature profile around the weldment. Experimental data in the form of temperature for certain points have been recorded during the welding process using a computerized data processing system which has been designed for this purpose. Also, the thickness of the weldment layers has been compared by observing their hardness and crystallography. By comparing experimental data with numerical result, the coefficient of the model has been determined using "model updating" process. The effects of material properties and welding parameters have been studied to insure the generality of the model. This model can be used to evaluate the quality of the welding and thickness of the heat affected zone as well as the risks during the welding process such as burn-through and hot cracking. The main advantage of this model is that the number of coefficients is reduced to only one parameter and the rest have been related to the physical and geometrical characteristics of the weld. Results of the numerical simulation obtained using this model show that the major factors which affect the temperature distribution around the weldment are material conductivity, plate thickness, input heating and welding speed.

## 1- مقدمه

جوش لب‌به‌لب، جوش T شکل و اتصالات صلیبی [1] مورد استفاده قرار می‌گیرد. چرخه گرمایش و خنک شدن در طول فرآیند جوشکاری و گرادین درجه حرارت و گسترش غیر یکنواخت انبساط و انقباض، منجر به تنش‌های حرارتی در محل جوش و اطراف آن می‌شود. همچنین، به دلیل درجه حرارت

جوش فیلت به طور گسترده در بدنه کشتی‌ها، سازه‌های مختلف، مخازن تحت فشار و سیستم‌های انتقال سیال استفاده می‌شود. این نوع جوش یک روش بسیار متداول اتصال عناصر مختلف در سازه‌ها می‌باشد و بصورت‌های

Please cite this article using:

F. Vakili Tahami, A. Ziaei Asl, P. Majnoun, Effect of material and welding parameters on characteristics of T-shape weld of steel plates using experimental data and numerical model, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 175-186, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بالای موضعی و گرادیان شدید درجه حرارت در جوشکاری، ممکن است مشکلات مختلفی در طول جوشکاری و پس از آن رخ دهد [2-4].

در بسیاری از موارد، مانند انشعاب گرم<sup>1</sup>، لازم است جهت ایجاد اتصالات T شکل، جوشکاری در حین کار انجام شود. این فرآیند نیز ممکن است باعث وقوع پدیده فوران<sup>2</sup> و یا ترک گرم شود که وقوع این پدیده‌ها همواره یک نگرانی عمده در صنعت می‌باشد [5]. از آنجایی که دلایل فیزیکی این مشکلات در فرآیند جوشکاری نهفته است، مطالعه و مدل کردن دقیق این پدیده بسیار اهمیت دارد. از سوی دیگر، پیش‌بینی توزیع دما در طول فرآیند جوشکاری و زمان خنک شدن با توجه به پیچیدگی روابط حاکم و تأثیر عوامل مختلف بسیار دشوار است. از این رو، استفاده از روش‌های عددی مانند شبیه‌سازی براساس المان محدود<sup>3</sup> محبوبیت قابل توجهی در مدل کردن عملیات جوشکاری در سه دهه گذشته داشته است که از نتایج آن می‌توان در پیش‌بینی عوامل نامطلوب از جمله ترک گرم و فوران استفاده کرد [6,7]. گرچه انجام اندازه‌گیری‌های تجربی در حین جوشکاری بسیار دشوار و پرهزینه است ولی با توجه به پیچیدگی فرآیند جوشکاری، لازم است از این داده‌ها به منظور توسعه یک مدل قابل اعتماد استفاده شود. از روش‌های عددی برای مطالعه جنبه‌های مختلف اتصالات جوشی نیز استفاده شده است. برای مثال کونگ و همکاران [8] رفتار مکانیکی اتصال جوش نقطه‌ای را به کمک روش عددی المان محدود بررسی کرده‌اند. همچنین از روش‌های عددی در محاسبه تنش‌های باقیمانده در منطقه جوش، که یکی از دغدغه‌های مهم در بررسی رفتار مکانیکی اتصالات جوشی می‌باشد، نیز استفاده شده است [9,10]. از آنجایی که شبیه‌سازی کامل فرآیندهای جوشکاری نیاز به محاسبات پیچیده و حجیم دارد، لذا استفاده از سیستم سخت‌افزاری پیشرفته و زمان تحلیل طولانی اجتناب ناپذیر است. بسیاری از کارهای تحقیقاتی اخیر، نیازهای محاسباتی را با استفاده از فرضیات ساده در شبیه‌سازی عددی کاهش داده‌اند [11,12]. این فرضیات عموماً نیاز محاسباتی را به قیمت از دست دادن دقت نتایج، کاهش می‌دهند و به همین دلیل، بیشتر مدل‌های ساده شده معمولاً به نتایج غیر واقعی منجر می‌شوند.

مدل‌های تحلیلی و عددی بسیاری برای اتصال جوش لب‌به‌لب پیشنهاد شده و پایگاه‌های داده زیادی در این مورد ایجاد شده است [13-16]. همچنین، کارهای تحقیقاتی محدودی که جوش‌های فیلت را توصیف می‌کنند در دسترس هستند [17,18]. به عنوان مثال، بارسم و لندبک [19] با استفاده از مدل المان محدود دوبعدی و سه‌بعدی فرآیند جوشکاری را شبیه‌سازی حرارتی و مکانیکی نمودند. به طور کلی، هر مدل دقیق باید خواص فیزیکی و مکانیکی وابسته به دمای مواد و همچنین میدان‌های سه‌بعدی دمای اطراف منبع حرارتی را در نظر بگیرد [20-22]. ناطقی و گرجی [23] توزیع دمای حاصل از فرآیند جوشکاری برای دو ورق به ضخامت‌های یکسان و از جنس فولاد زنگ‌نزن A316 را بررسی کردند. کریمی‌منش و همکاران [24] نیز تأثیر پارامترهای جوشکاری همچون حرارت ورودی و سرعت جوشکاری را بر مقاومت ضربه فولاد زنگ‌نزن 304L مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر این، به منظور اعتبارسنجی حل عددی، لازم است که نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شوند. به عنوان مثال اودی و مک‌دیل [5] یک مطالعه اکتشافی را بر روی جوشکاری مخازن تحت فشار با استفاده از تحلیل المان محدود سه‌بعدی حرارتی- مکانیکی انجام داده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی تحلیل المان

محدود را با نتایج آزمایشی مقایسه نمودند. در مطالعه حاضر یک سامانه آزمایشی<sup>4</sup> طراحی و ساخته شده است که قابلیت ثبت درجه حرارت نقاط مشخصی از اطراف محل جوش را در حین این عملیات دارد. داده‌ها پس از پردازش، جهت ثبت و رسم دیاگرام‌های مورد نیاز به کامپیوتر داده می‌شوند. به کمک این دستگاه و بر اساس داده‌های ذخیره شده، قابلیت پیش‌بینی توزیع درجه حرارت در محل جوش در شرایط مختلف فراهم می‌شود. در جهت تکمیل داده‌ها، عمق نفوذ ناحیه متأثر از درجه حرارت (HAZ)<sup>5</sup> بر اساس توزیع درجه حرارت، میکروگرافی و میکروسختی‌سنجی تعیین می‌شود. به منظور بررسی فرآیند جوشکاری اتصال فیلت T شکل، از ورق‌های زنگ‌نزن AISI 304 و فولاد کربنی AISI 1020 استفاده شده است. دلیل انتخاب این است که ضریب انتقال حرارت نقش مهمی در فرآیند جوش دارد و فولادهای کربنی بیشترین ضریب هدایت و فولادهای زنگ‌نزن کمترین ضریب هدایت حرارتی را در بین فولادهای صنعتی دارند. علاوه بر بررسی جنس، اثر ضخامت ورق و سرعت جوشکاری نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج تجربی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. سپس یک مدل عددی بر پایه روش المان محدود تدوین شده که در آن خصوصیات فیزیکی مواد، تابعی از درجه حرارت در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در این مدل عمل جوشکاری با روش تولد المان شبیه‌سازی شده و از معادله دو بیضوی (DEHS)<sup>6</sup> به منظور اعمال منبع حرارتی استفاده شده است. به منظور تعیین ضرایب معادله مذکور به کمک داده‌های تجربی از روش به‌روزرسانی<sup>7</sup> بهره‌گیری شده و در نهایت توسط این مدل توزیع درجه حرارت در اطراف محل جوش با جنس ورق و شرایط جوشکاری متفاوت به دست آمده و نتایج با داده‌های تجربی مستقل مقایسه شده‌اند. خاطر نشان می‌شود که از این مدل می‌توان نه تنها در پیش‌بینی شرایط جوشکاری و کیفیت آن استفاده نمود، بلکه در بررسی احتمال فوران یا ترک گرم نیز می‌تواند بکار برود.

## 2- روش انجام آزمایش تجربی

آزمایش‌ها به منظور ثبت درجه حرارت نقاط مشخص در حین جوشکاری انجام می‌شوند. در حین آزمایش، تاریخچه دمای نقاط خاص بر روی نمونه‌ها به طور مداوم در طول دوره‌های جوشکاری و خنک شدن، با استفاده از یک سیستم ذخیره و پردازش داده‌های آنالین با اتصال به کامپیوتر، اندازه‌گیری و ثبت شده است. همچنین عمق نفوذ ناحیه HAZ بر اساس توزیع درجه حرارت، میکروگرافی و میکروسختی‌سنجی تعیین می‌شود. در آزمایشات انجام شده ضخامت ورق‌ها و سرعت جوشکاری نیز تغییر داده شده تا از قابلیت سامانه در ثبت نتایج در شرایط مختلف جوشکاری اطمینان حاصل شود. آزمایشات بر روی اتصالات جوشی فیلت T شکل ورق‌های فولاد کربنی 1020 و زنگ‌نزن 304 به ضخامت‌های 5 و 6 و 8 میلیمتر انجام شده‌اند. به دلیل خواص برتر فولاد کربنی و زنگ‌نزن آستینیتی، از آنها به‌طور گسترده‌ای در صنعت استفاده می‌شود [25]. فولاد کربنی دارای بیشترین ضریب هدایت حرارتی (حدود 54 W/mK) و فولاد زنگ‌نزن دارای کمترین مقدار (حدود 12 W/mK) در میان فولادهای صنعتی می‌باشند. علاوه بر آن، همان‌طور که در شکل 1 دیده می‌شود، تغییرات ضریب هدایت با درجه

4- test rig  
5- Heat Affected Zone  
6- Double-Ellipsoidal Heat Source  
7- model-updating

1- hot-tapping  
2- burn-through  
3- finite element

نخست، ورق عمودی و ورق اصلی را از هر دو طرف روی هم "خال جوش" داده تا ورق عمودی بر روی ورق اصلی محکم شود. سپس جوش تک پاس یک طرفه برای هر نمونه با استفاده از فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی انجام می‌شود. دیاگرام شماتیک اتصال T شکل با ابعاد مورد نظر در شکل 2 نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر ضخامت، ورق‌هایی با ضخامت 5، 6 و 8 میلیمتر انتخاب شده‌اند.

برای هر دو آلیاژ قطر سیم جوش 2.5 میلیمتر بوده و اندازه پای جوش 5 میلیمتر می‌باشد. از آنجایی که پارامترهای مختلفی مثل مهارت جوشکار و غیره، بر شرایط جوشکاری تأثیر می‌گذارند که کنترل برخی از آنها بسیار دشوار است، برای هر نمونه مورد مطالعه چندین آزمایش در شرایط یکسان جهت تهیه مجموعه‌ای از داده‌ها انجام شده است. مقادیر متوسط مربوط به شرایط جوشکاری در جدول 3 داده شده است. به علت تفاوت مشخصات حرارتی جنس نمونه‌ها، برای بدست آوردن پای جوش یکسان در هر یک از آلیاژها، از سرعت‌های جوشکاری متفاوتی استفاده شده است.

جدول 2 درصد وزنی عناصر اصلی تشکیل دهنده فولادهای مورد استفاده

Table 1 Chemical composition of the steels

| Si % | S %  | P %  | Ni % | Mn % | Cr % | C %  | درصد وزنی عناصر |
|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| 0.4  | 0.01 | 0.02 | 8.9  | 1.95 | 18   | 0.06 | AISI 304        |
| 0.2  | 0.05 | 0.04 | -    | 1.03 | 0.03 | 0.2  | AISI 1020       |

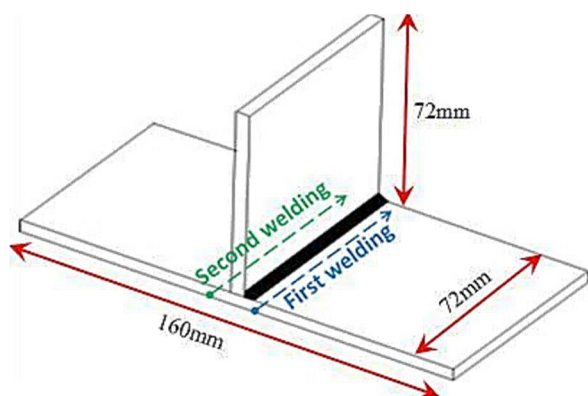


Fig. 2 Schematic figure of T-shape joint plate

شکل 2 شکل شماتیک جوش اتصال T شکل ورق

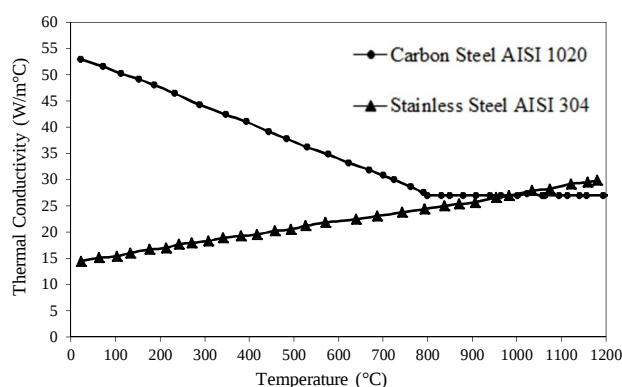


Fig. 1 Variation of the thermal conductivity for AISI 304 and AISI 1020 with temperature [28]

شکل 1 تغییرات ضریب هدایت فولاد زنگ‌زن 304 و فولاد کربنی 1020 با درجه حرارت [28]

حرارت برای دو آلیاژ مذکور روند متفاوتی دارد، بطوری‌که این ضریب در فولادهای زنگ‌زن با افزایش درجه حرارت، افزایش و در فولادهای کربنی کاهش می‌یابد. از آنجا که ضریب هدایت حرارتی یکی از مهمترین خصوصیات فیزیکی تأثیرگذار در توزیع درجه حرارت محل جوشکاری می‌باشد، لذا این دو آلیاژ نه تنها بخاطر کاربرد وسیع آنها در صنعت، بلکه به دلیل تأمین دامنه خاصیت مورد نظر انتخاب شده‌اند. خصوصیات مکانیکی آنها با درجه حرارت‌های مختلف در جدول 1 و ترکیبات شیمیایی این آلیاژها در جدول 2 ارائه شده‌اند.

## 2-1- فرآیند جوشکاری

روش جوشکاری انتخاب شده قوس الکتریکی دستی (MMAW)<sup>1</sup> و از سیم الکترودهای AWS E7018 و AWS 308L-17 پوشش داده شده با هسته روتیل<sup>2</sup> با قطر 2.5 میلیمتر به ترتیب برای ورق‌های فولاد کربنی AISI 1020 و زنگ‌زن AISI 304 استفاده شده‌است. این نوع الکترودها برای جوشکاری فولادهای کربنی و زنگ‌زن توسط AWS A5.4 / A5.4M توصیه می‌شوند [29]. به منظور حذف رطوبت، الکترودها در کوره به مدت 45 دقیقه قبل از جوشکاری پیش‌گرم می‌شوند. دلیل انتخاب این نوع جوشکاری "پای کار"<sup>3</sup> بودن آن و کاربرد گسترده آن در صنعت بخصوص در عملیاتی مانند انشعاب گرم می‌باشد.

جدول 1 خصوصیات حرارتی و مکانیکی فولاد زنگ‌زن 304 و فولاد کربنی 1020 بر حسب درجه حرارت [12,26,27]

Table 2 Temperature-dependent thermo-physical and mechanical properties for AISI 304 and AISI 1020 [12,26,27]

| ضریب پواسون | مدول یانگ (GPa) |          | تنش تسلیم (MPa) |          | چگالی (g/mm <sup>3</sup> ) |          | ضریب هدایت حرارتی (W/mm°C) |          | گرمای ویژه (J/g°C) |          | درجه حرارت (°C) |
|-------------|-----------------|----------|-----------------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|----------|--------------------|----------|-----------------|
|             | AISI 1020       | AISI 304 | AISI 1020       | AISI 304 | AISI 1020                  | AISI 304 | AISI 1020                  | AISI 304 | AISI 1020          | AISI 304 |                 |
| 0.294       | 210             | 198.5    | 380             | 265      | 0.785                      | 0.790    | 0.060                      | 0.0146   | 0.480              | 0.462    | 0               |
| 0.295       | 200             | 193.0    | 340             | 218      | 0.785                      | 0.788    | 0.050                      | 0.0151   | 0.500              | 0.496    | 100             |
| 0.301       | 200             | 185.0    | 315             | 186      | 0.780                      | 0.783    | 0.045                      | 0.0161   | 0.520              | 0.512    | 200             |
| 0.310       | 170             | 176.0    | 230             | 170      | 0.776                      | 0.779    | 0.038                      | 0.0179   | 0.650              | 0.525    | 400             |
| 0.318       | 80              | 167.0    | 110             | 155      | 0.760                      | 0.775    | 0.030                      | 0.0180   | 0.750              | 0.540    | 600             |
| 0.326       | 35              | 159.0    | 30              | 149      | 0.752                      | 0.766    | 0.025                      | 0.0208   | 1                  | 0.577    | 800             |
| 0.333       | 20              | 151.0    | 25              | 91       | 0.739                      | 0.756    | 0.026                      | 0.0239   | 1.2                | 0.604    | 1000            |
| 0.339       | 15              | 60.0     | 20              | 25       | 0.730                      | 0.737    | 0.028                      | 0.0322   | 1.4                | 0.676    | 1200            |
| 0.342       | 10              | 20.0     | 18              | 21       | 0.725                      | 0.732    | 0.037                      | 0.0337   | 1.6                | 0.692    | 1400            |
| 0.388       | 10              | 10.0     | 15              | 10       | 0.718                      | 0.732    | 0.037                      | 0.120    | 1.7                | 0.700    | 1500            |

1- Manual Metal Arc Welding  
2- Rutile  
3- On-site

جدول 3 شرایط جوشکاری برای دو ورق فولاد زنگ‌نزن 304 و فولاد کربنی 1020 در ضخامت‌های مختلف

Table 3 Welding conditions for AISI 304 and AISI 1020 plates with different thicknesses

| پای جوش<br>(mm) | سرعت جوشکاری<br>(mm/sec) | ولتاژ<br>(V) | جریان<br>(A) | ضخامت ورق<br>(mm) | جنس       | ردیف |
|-----------------|--------------------------|--------------|--------------|-------------------|-----------|------|
| 5               | 2.34                     | 28           | 90           | 5                 | AISI 304  | 1    |
| 5               | 2.34                     | 28           | 90           | 6                 | AISI 304  | 2    |
| 5               | 2.34                     | 28           | 90           | 8                 | AISI 304  | 3    |
| 5               | 1.75                     | 24           | 103          | 5                 | AISI 1020 | 4    |
| 5               | 1.64                     | 24           | 103          | 6                 | AISI 1020 | 5    |
| 5               | 1.37                     | 24           | 103          | 8                 | AISI 1020 | 6    |

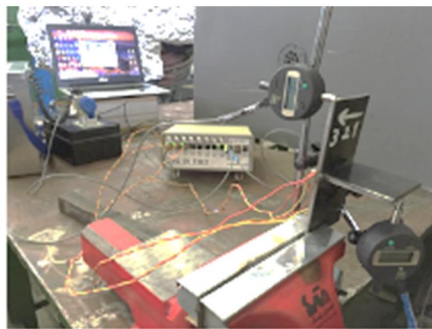


Fig. 5 Experimental rig

شکل 5 تجهیزات اندازه‌گیری

همان ابعاد نمونه آزمایشی ایجاد شده و حل عددی بر اساس روش المان محدود و به کمک کد کامپیوتری انسیس<sup>1</sup> انجام شده است. از آنجا که شبیه‌سازی عملیات جوشکاری بصورت عددی با لحاظ کردن شرایط مختلف و تولد المان‌ها در شبکه روند پیچیده‌ای دارد، زیر برنامه‌هایی تدوین و به نرم‌افزار انسیس معرفی شده‌اند. همچنین فرآیند جوشکاری با سرعت تعریف شده توسط معادله منبع حرارت دو بیضی به کمک این زیر برنامه‌ها به مدل معرفی شده‌اند. ابتدا کد کامپیوتری بر اساس دستورات نرم‌افزار انسیس تدوین شده است که ضریب کنوکسیون سطوح بیرونی را بر اساس شرایط مرزی تعیین شده ارائه می‌کند. همچنین بر اساس سرعت جوشکاری، خط جوش به 24 بلوک (هر بلوک به طول 2.5 میلیمتر که برابر قطر الکتروود می‌باشد) تقسیم‌بندی شده و در شبیه‌سازی فرآیند جوش بلوک‌های مذکور که حاوی چندین المان محدود هستند به تدریج زنده می‌شوند. عمل زنده شدن المان در حقیقت افزوده شدن آن به ماتریس سختی می‌باشد که بر اساس دستورالعمل‌های تعریف شده در نرم‌افزار انسیس انجام می‌گیرد.

شکل 6 مدل المان محدود را برای ورق به ضخامت 6 میلیمتر نشان می‌دهد. در منطقه جوش و اطراف آن، اندازه المان‌ها کوچک و به تدریج با دور شدن از منطقه جوش، اندازه المان‌ها درشت‌تر می‌شود. حداقل اندازه المان، تعداد گره‌ها و المان‌ها در جدول 4 ذکر شده است. در روش حل عددی، توزیع دما و تاریخچه آن توسط تحلیل حرارتی محاسبه می‌شوند. برای این منظور از خواص حرارتی- فیزیکی وابسته به درجه حرارت ارائه شده در جدول 2 استفاده شده‌اند.

### 3-1- معادلات حاکم در تحلیل حرارتی

در طول جوشکاری، معادله حاکم برای تحلیل انتقال حرارت گذرا برابر است با [12]:

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

1- ANSYS

## 2-2- اندازه‌گیری دما

جهت اندازه‌گیری درجه حرارت گذرا در طول فرآیندهای جوشکاری و خنک شدن، یک دستگاه ثبت اطلاعات (داده‌نگار) طراحی و ساخته شده که قابلیت ثبت و انتقال داده‌ها به کامپیوتر را دارد. داده‌نگار قادر به ثبت و ضبط 10 داده در هر ثانیه از طریق هشت کانال می‌باشد. سیستم اندازه‌گیری دما با استفاده از ترموکوپل‌های نوع K و بر اساس استاندارد ASTM E235/E235M-12 طراحی و ساخته شده است. ترموکوپل‌ها در نقاط مشخصی در زیر صفحه اصلی و در امتداد خط جوش مطابق شکل 3 متصل شده‌اند. ترموکوپل‌ها به ورق اصلی توسط سیستم جوش نقطه‌ای خازنی متصل شده و توسط اهم‌تر از کیفیت آن اطمینان حاصل شده است. در حین جوشکاری، دمای نقاط مورد نظر در هر 0.1 ثانیه اندازه‌گیری شده و داده‌ها تا زمانی که کل نمونه سرد و به درجه حرارت پایدار (تغییرات درجه حرارت کمتر از 0.1 °C/sec) برسند، ادامه می‌یابد. آرایش تجهیزات به صورت شماتیک در شکل 4 و تصویر آن در شکل 5 نشان داده شده‌اند.

## 3- روش حل عددی

به منظور شبیه‌سازی اتصال T شکل ورق‌ها، مدل المان محدود سه‌بعدی با

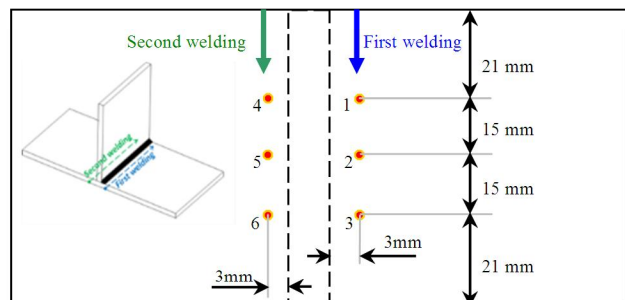


Fig. 3 Locations of the thermocouple joint-points at the lower surface of the main plate for temperature measurements

شکل 3 محل اتصال ترموکوپل‌ها به کف ورق اصلی به منظور اندازه‌گیری درجه حرارت در حین عملیات جوشکاری

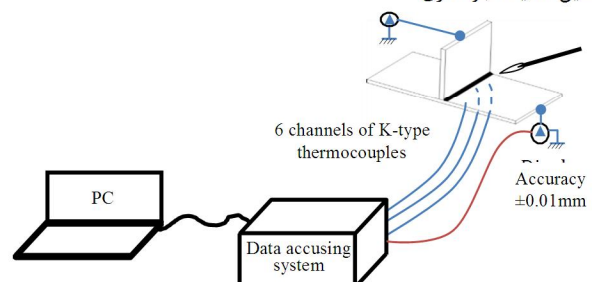


Fig. 4 Schematic diagram of the test rig for data recording during the welding of T-shape joint plates

شکل 4 شماتیک آرایش تجهیزات اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها برای اتصال ورق T شکل

به تأثیر سرعت جوشکاری، توان چگالی باید به صورت نامتقارن در جلو قوس و در پشت آن توزیع شود. بنابراین، گلداک و همکاران [21] منبع حرارتی دو بیضوی که اغلب برای تقریب فرآیندهای معمول جوشکاری بکار می‌رود را به صورت زیر پیشنهاد دادند:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{I \times V \times \eta \times f_f}{abc_f} e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-vt)^2}{c_f^2}\right)} \quad (6)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{I \times V \times \eta \times f_r}{abc_r} e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-vt)^2}{c_r^2}\right)} \quad (7)$$

که هر کدام به ترتیب برای منطقه جلو و عقب قوس جوش بکار می‌روند. با معرفی این ضرایب، عدم تقارن توزیع حرارت در جلو و عقب الکترود جوشکاری که در عمل نیز مشاهده می‌شود، مدل می‌گردد. در این معادلات به ترتیب  $q_f$  و  $q_r$  توزیع شار حرارتی،  $f_f$  و  $f_r$  ضریب توزیع کسری در جلو و عقب هستند و  $v$  سرعت جوشکاری است.  $a$ ،  $b$ ،  $c_f$  و  $c_r$  شعاع‌های جلو و عقب بیضوی می‌باشند که این بیضوی در حقیقت نشان دهنده میدان پخش حرارت در قطعات است. برای قسمت جلوی نیم‌بیضوی، گرمای داده شده برابر است با:

$$\begin{aligned} 2 \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty q_f(x, y, z) dx dy dz \\ = 2 \times \frac{6\sqrt{3}}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{Q f_f}{abc_f} \int_0^\infty e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c_f^2}\right)} dx dy dz \\ = \frac{1}{2} Q \cdot f_f \end{aligned} \quad (8)$$

انتگرال بالا را می‌توان بطور مشابه برای قسمت عقب نیز نوشت. از آنجا که  $Q = \eta IV = 0.5Q \cdot f_f + 0.5Q \cdot f_r = 0.5Q(f_f + f_r)$ ، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که  $f_f + f_r = 2$  با استفاده از رابطه منبع حرارتی دوبیضوی تعریف شده توسط معادلات (6) و (7) در معادله (1) و با فرض درجه حرارت همگن اولیه  $T_0$ ، میدان دما با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} T(x, y, z, t) = T_0 + \frac{3\sqrt{3}Q}{\pi\sqrt{\pi}} \\ \times \int_0^t \frac{\exp\left[\frac{3y^2}{12\kappa(t-t_0)+b^2} - \frac{3x^2}{12\kappa(t-t_0)+a^2}\right]}{\sqrt{[12\kappa(t-t_0)+a^2][12\kappa(t-t_0)+b^2]}} \\ \times [f_f A_f (1+B_f) + f_r A_r (1-B_r)] dt_0 \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن  $A_f$ ،  $A_r$  و  $B_f$  و  $B_r$  توابعی از  $z$ ،  $t$ ،  $t_0$ ،  $c_f$  و  $c_r$  هستند و  $\kappa = K/(\rho c)$  ضریب پخشندگی حرارتی است. این معادله درجه حرارت را در هر نقطه  $(x, y, z)$  در زمان  $t$  بدست می‌دهد که ناشی از منبع حرارتی واحد موجود در نقطه  $(x_0, y_0, z_0)$  در  $t_0$  می‌باشد. انتگرال معادله (9) بصورت تحلیلی قابل حل نبوده و می‌باید از روش‌های عددی برای این منظور بهره گرفت. مدل منبع حرارتی دوبیضوی بالا می‌تواند برای جوش‌های لب‌به‌لب ساده استفاده شود که در یک خط مستقیم روی یک ورق تخت افقی با الکترود عمود به ورق انجام می‌شوند. ضرایب مدل، وابسته به نوع جوش، هندسه و جنس آن می‌باشند. بنابراین لازم است که فرمولی برای هر جوش بطور خاص تدوین شود. وکیلی و ضیائی [29] تغییراتی در فرمول منبع حرارتی دوبیضوی داده‌اند تا بتوان اتصال T شکل ورق‌های فولادی با فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی را مدل نمود. در این تحقیق همچنین فرم معادله به نحوی تغییر داده شده است که ضرایب آن به یک ضریب کاهش یابد. علاوه بر آن این معادله جدید، حرکت منبع حرارتی را در مسیر جوش اتصال T شکل شبیه‌سازی می‌کند. پس از اعمال اصلاحات لازم، معادلات بصورت زیر تصحیح شده‌اند:

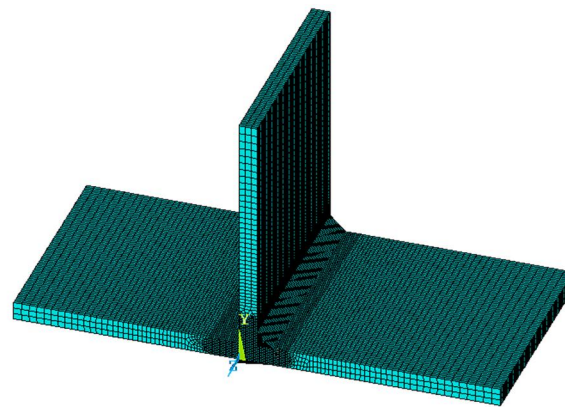


Fig. 6 Finite element model for the fillet weld of 6mm-thickness plates

شکل 6 مدل المان محدود اتصال T شکل ورق به ضخامت 6 میلیمتر

جدول 4 اندازه کوچک‌ترین المان و تعداد المان‌ها و گره‌ها برای شبکه المان محدود  
Table 4 The minimum element size, the number of nodes and elements in the numerical models

| ردیف | ضخامت ورق (mm) | کوچکترین اندازه المان (mm <sup>3</sup> ) | تعداد گره | تعداد المان |
|------|----------------|------------------------------------------|-----------|-------------|
| 1    | 5              | 0.5×0.5×1                                | 121045    | 105696      |
| 2    | 6              | 0.5×0.5×1                                | 167486    | 143695      |
| 3    | 8              | 0.5×0.5×1                                | 214817    | 183595      |

که در آن،  $\rho$  چگالی مواد،  $c$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $T$  دمای هر لحظه،  $t$  زمان،  $x$ ،  $y$  و  $z$  مختصات در سیستم مرجع و  $\nabla$  عملگر گرادیان فضایی است.  $\bar{q}$  بردار شار گرما و  $Q$  نرخ تولید حرارت داخلی است. همچنین معادله ساختاری شار حرارتی غیر خطی ایزوتروپیک (همسانگرد) فوریه برابر است با:

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

که در آن  $k$  ضریب هدایت (رسانندگی) حرارتی وابسته به دما است. بخاطر توان بالای چگالی جوشکاری، منبع حرارتی جوشکاری نه تنها در سطح قطعه کار، بلکه در جهت ضخامت نیز عمل می‌کند. بنابراین، باید آن را به عنوان یک توزیع حجمی در نظر گرفت. برای این منظور، یک معادله بیضوی پیشنهاد شده است [30]:

$$q(x, y, z) = q_m e^{(-Ax^2 - By^2 - Cz^2)} \quad (3)$$

که در آن  $q_m$  بیشینه مقدار توان چگالی در مرکز بیضی است  $A$ ،  $B$ ،  $C$  پارامترهای توزیع می‌باشند. از آنجایی که تراکم گرما در داخل نیم‌بیضوی توزیع شده است، داریم [30]:

$$\begin{aligned} Q = \eta IV = 4 \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty q(x, y, z) dx dy dz \\ = \frac{q_m \pi \sqrt{\pi}}{2\sqrt{ABC}} \end{aligned} \quad (4)$$

که  $I$  جریان الکتریکی،  $V$  ولتاژ،  $\eta$  بازده قوس جوشکاری و  $q_m = 2Q\sqrt{ABC}/\pi\sqrt{\pi}$  است. به منظور ارزیابی پارامترهای  $A$ ،  $B$  و  $C$ ، نیم محوره‌های بیضی  $a$ ،  $b$  و  $c$  به ترتیب در جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  تعریف می‌شوند به طوری که چگالی گرما در سطح بیضوی به  $0.05q_m$  برسد [30] که منجر به  $A = 3/a^2$  و  $B = 3/b^2$  و  $C = 3/c^2$  می‌شود. با جایگذاری در معادله (3)، توزیع نیم بیضوی بصورت زیر بدست می‌آید:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{I \times V \times \eta}{abc} e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)} \quad (5)$$

توزیع حرارت جوشکاری با این رابطه به صورت متقارن می‌باشد ولی با توجه

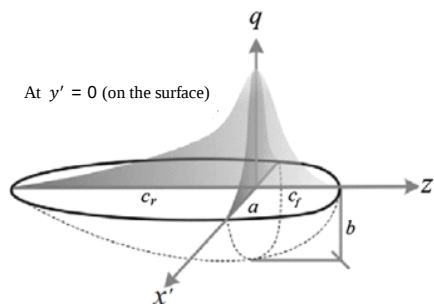


Fig. 8 Representation of the parameters to define heat source

شکل 8 معرفی پارامترهای بکار رفته در مدل حرارتی

#### 4- به روز رسانی مدل

مقایسه روابط (6) و (7) با روابط جدید پیشنهادی (10) و (11) نشان می‌دهد که در این روابط از تعداد پارامترهای کمتری برای مدل‌سازی حوضچه جوش استفاده شده است. به بیان دیگر ضرایب قبلی برای تعریف منطقه جوش:  $a$ ,  $b$ ,  $c_f$  و  $c_r$  با ضریب  $\lambda$  و پارامترهای هندسی حجم منطقه جوش ( $V_{\text{WeldBead}}$ ) و پای جوش ( $c$ ) جایگزین شده‌اند که از مقایسه نتایج تجربی بدست می‌آیند. به نظر می‌رسد مقدار پارامتر  $\lambda$  به شرایط جوش وابسته باشد. به منظور تعیین ضریب  $\lambda$  و مشخص نمودن اثرات عوامل مختلف در مقدار آن، از روش به روز رسانی مدل استفاده شده است. در ابتدا مقدار اولیه‌ای برای آن انتخاب شده و به کمک حل عددی بر مبنای روش مدل المان محدود، توزیع درجه حرارت برای نقاط مهم و مشخص بدست آمده و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. سپس یک برنامه کامپیوتری بهینه‌سازی تدوین شده که مقدار  $\lambda$  را برای حصول بهترین تطبیق با داده‌های تجربی تعیین کند، در این کد معیارهای ذیل مورد نظر قرار گرفته‌اند:

- درجه حرارت بیشینه در حوضچه جوش نباید بیش از 2500 و کمتر از 1500 درجه سانتیگراد باشد. این محدودیت بر مبنای اندازه‌گیری‌های تجربی و تبخیر فولاد در حوضچه مذاب جوش تعیین شده است [31].
- نتایج حاصل از حل عددی با اندازه‌گیری‌های تجربی تطبیق داشته باشد.
- هندسه و نفوذ مذاب و همچنین ضخامت HAZ با مشاهدات تجربی تطبیق داشته باشد. این عمل با مشاهده میکروگرافی منطقه جوش نشان داده شده در شکل 12 و همچنین میکروسختی‌سنجی ناحیه جوش انجام می‌شود.
- به منظور تعیین اثر عوامل مختلف شرایط جوشکاری مثل سرعت جوش، ضخامت ورق و جنس آن تغییر داده شده‌اند. از آنجا که در طیف فولادهای صنعتی پر کاربرد، فولاد زنگ‌نزن کمترین ضریب هدایت حرارتی و فولاد کربنی بیشترین ضریب هدایت حرارتی را دارند، از این دو آلیاژ در آزمایش‌های تجربی استفاده شده است.

مراحل انجام به روز رسانی مدل در فلوچارت شکل 9 نشان داده شده و نتایج حاصل از تکمیل مدل در جدول 5 ارائه شده‌اند.

#### 5- بحث و نتایج

##### 5-1- نتایج تجربی

همان‌طور که ذکر شد، در طول عملیات جوشکاری از تمامی نمونه‌ها اندازه‌گیری‌های لازم صورت گرفته است، ولی در اینجا به منظور حفظ اختصار، تنها دیاگرام‌های مربوط به جوش ورق‌های با ضخامت 6 میلیمتر ارائه شده‌اند. البته روند تغییرات برای سایر ورق‌ها نیز مشابه این مورد می‌باشد.

$$q_f(x, y, z, t) = (\lambda) \frac{I \times V \times \eta \times f_r}{V_{\text{WeldBead}}} \times e^{\left\{ \frac{[(x-x_0)+(y-y_0)]^2}{[c \times \sqrt{2}/2]^2} + \frac{[(x-x_0)-(y-y_0)]^2}{[c \times \sqrt{2}]^2} + \frac{(z-vt)^2}{[c \times \sqrt{2}]^2} \right\} (-3 \cos^2 \theta)} \quad (10)$$

برای  $z > vt$

$$q_r(x, y, z, t) = (\lambda) \frac{I \times V \times \eta \times f_r}{V_{\text{WeldBead}}} \times e^{\left\{ \frac{[(x-x_0)+(y-y_0)]^2}{[c \times \sqrt{2}/2]^2} + \frac{[(x-x_0)-(y-y_0)]^2}{[c \times \sqrt{2}]^2} + \frac{(z-vt)^2}{[c \times \sqrt{2}]^2} \right\} (-3 \cos^2 \theta)} \quad (11)$$

برای  $z < vt$

در این معادلات، ضریب  $\lambda$  از داده‌های تجربی بدست می‌آید و  $V_{\text{WeldBead}}$  حجم حوضچه جوش است.  $\theta$  زاویه بین  $x$  و  $x'$  مطابق شکل 7 می‌باشد. توصیف منطقه جوشکاری و پارامترهای بکار رفته در مدل حرارتی، همچنین جهت‌های طولی، عرضی و عمودی  $(x, y, z)$  در شکل 8 نشان داده شده‌اند. جوشکاری است. همچنین در این شکل، دوبیضی نامتقارن که معرف میدان پخش حرارتی در حین عملیات جوشکاری است، نشان داده شده است.

همانطور که در شکل‌های 7 و 8 نشان داده شده، اولین و دومین جمله از توان معادلات (10) و (11) بیانگر توزیع انرژی دو بیضی نامتقارن است. همچنین، تغییر موضع انتهای الکتروود و حرکت منبع حرارت با سرعت  $v$  بر حسب زمان با سومین جمله از نمای معادلات توصیف شده است. منبع حرارتی در حرکت، بر حسب دستگاه مختصات محلی تعریف می‌شود درحالی که شبکه‌بندی اجزاء محدود با دستگاه مختصات کلی ثابت مشخص می‌شود. پس از اعمال تغییر مختصات با توجه به جابجایی منبع حرارتی، شار حرارتی را می‌توان در هر نقطه در طول مسیر جوش محاسبه کرد. برای شبیه‌سازی اضافه شدن فلز جوش با زمان در اتصال T شکل در طول فرآیند جوشکاری از روش تولد المان یا معرفی المان‌های جدید به شبکه‌بندی استفاده شده است. در عین حال، بعد از اضافه شدن المان‌های جدید، شرایط مرزی انتقال حرارت نیز اصلاح شده و اثرات حرارتی ناشی از انجماد حوضچه جوش با در نظر گرفتن گرمای نهان ذوب مدل شده‌اند.

برای شبیه‌سازی شرایط مرزی حرارتی ترکیبی ناشی از دو حالت همرفت و تابش، از معادله ضریب انتقال حرارت وابسته به دمای زیر استفاده شده است [11]:

$$h = \begin{cases} 0.0668T \text{ (W/m}^2\text{°C)} & \text{وقتی } T \leq 500^\circ\text{C} \\ (0.231T - 82.1) \text{ (W/m}^2\text{°C)} & \text{وقتی } T \geq 500^\circ\text{C} \end{cases} \quad (12)$$

این شرط مرزی برای تمام سطوح آزاد مدل اتصالات T شکل از جمله سطوح ایجاد شده برای المان‌های تولد یافته در طول جوشکاری استفاده شده است.

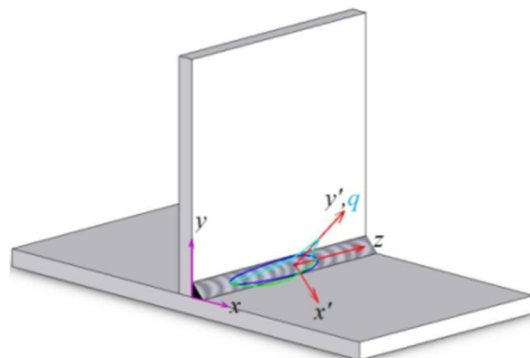
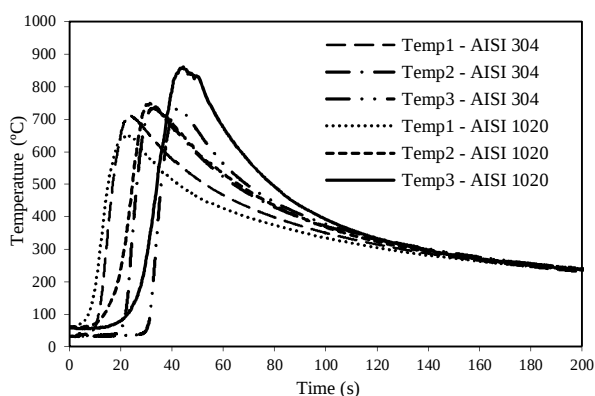


Fig. 7 Transformation of the coordinate system

شکل 7 نحوه انتقال محورهای مختصات

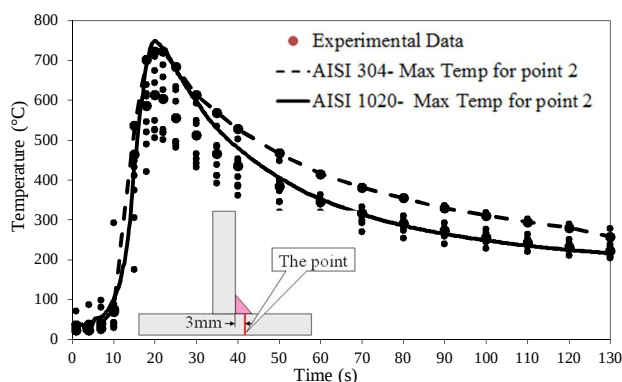
همان ابعاد می‌باشد. این تفاوت در رفتار حرارتی موجب تغییر در ساختار کریستالی اطراف جوش خواهد شد که به منظور مشاهده آن و برای نشان دادن نحوه تشکیل ناحیه فلز جوش و HAZ، مقطعی از جوش را برش داده و پس از جلا دادن و اچ<sup>1</sup>، از نفوذ فلز جوش و گستره منطقه HAZ با استفاده از میکروسکوپ اولیمپوس بی ایکس 60<sup>2</sup> با فلورسانس جیوه عکس‌برداری شده است. برای نمونه شکل 12 تصویر میکروگرافی از لایه‌های جوش را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود در منطقه حوضچه جوش دانه‌بندی لایه‌ای درشت بوده در حالیکه در منطقه HAZ به علت بالا رفتن درجه حرارت در فلز جامد از مقدار  $AC_3$  ساختار مجدداً کریستالیزه می‌شود.

شکل 13 سختی لایه‌های مختلف ناحیه جوش را برای فولاد زنگ‌نزن 304 و فولاد کربنی 1020 نشان می‌دهد. مقادیر سختی لایه‌ها به روش میکروسختی‌سنجی اندازه‌گیری شده است تا حتی در لایه‌های نازک (در حد میلیمتر) به تعداد نقاط مناسب سختی‌سنجی انجام گیرد. باید خاطرنشان شد که در این مقاله از روش میکروسختی‌سنجی نوپ استفاده شده است که می‌تواند سختی ریزدانه‌ها را با دقت مناسب اندازه بگیرد.



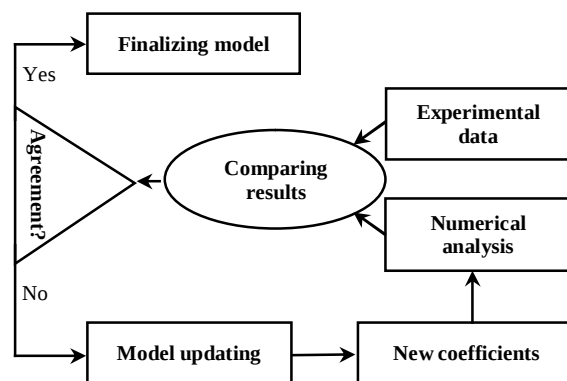
**Fig. 10** Experimentally measured temperature levels during the welding of AISI 304 and AISI 1020 plates with 6mm-thickness for the specified points

شکل 10 تغییرات درجه حرارت در حین جوشکاری ورق‌های زنگ‌نزن 304 و فولاد کربنی 1020 به ضخامت 6 میلیمتر در نقاط تعیین شده در کف ورق اصلی که به روش تجربی اندازه‌گیری شده است



**Fig. 11** Comparing the experimentally measured temperature levels during the welding and cooling periods for AISI 304 and AISI 1020 plates with 6mm-thickness for point 2

شکل 11 تغییرات درجه حرارت در حین جوشکاری ورق‌های زنگ‌نزن 304 و فولاد کربنی 1020 به ضخامت 6 میلیمتر در نقطه 2 در کف ورق اصلی که به روش تجربی اندازه‌گیری شده‌اند



**Fig. 9** Flowchart for the "model updating" procedure

شکل 9 فلوچارت مربوط به فرآیند انجام "به‌روز رسانی" مدل

جدول 5 ضرایب بدست آمده برای مدل عددی با استفاده از روش "به‌روز رسانی"

**Table 5** Coefficients for the numerical model obtained based on the "model updating" procedure

| پارامتر   | مقدار      | پارامتر            | مقدار            |
|-----------|------------|--------------------|------------------|
| $\lambda$ | 0.4545     | $c$                | 5mm              |
| $\eta$    | 0.75       | $a = c\sqrt{2}/2$  | $5\sqrt{2}/2$ mm |
| $f_f$     | 1.4        | $b = c\sqrt{2}$    | $5\sqrt{2}$ mm   |
| $f_r$     | 0.6        | $c_f = c\sqrt{2}$  | $5\sqrt{2}$ mm   |
| $\theta$  | $45^\circ$ | $c_r = 2c\sqrt{2}$ | $10\sqrt{2}$ mm  |

شکل 10 تغییرات درجه حرارت برای ورق‌های به ضخامت 6 میلیمتر از جنس فولاد زنگ‌نزن 304 و همچنین فولاد کربنی AISI 1020 در سه نقطه 1، 2 و 3 در امتداد جوش و در سطح زیرین ورق اصلی را نشان می‌دهد. با مقایسه درجه حرارت نقاط مشخص برای دو آلیاژ مذکور، ملاحظه می‌شود که درجه حرارت بیشینه نقطه 1 (نزدیک به ابتدای جوش - رجوع شود به شکل 3) برای ورق فولاد کربنی کمتر از ورق زنگ‌نزن می‌باشد در حالیکه در نقطه 2، درجه حرارت بیشینه تقریباً یکسان شده و در نقطه 3 درجه حرارت بیشینه در ورق فولاد کربنی بیشتر از ورق زنگ‌نزن می‌باشد. به همین دلیل انتظار می‌رود که ضخامت لایه HAZ در فولاد کربنی بیشتر باشد. علاوه بر آن، این شکل نشان می‌دهد که سرعت خنک شدن در ورق کربنی به علت ضریب هدایتی بالای آن بیشتر از ورق زنگ‌نزن است. همین روند در شکل 11 نیز مشاهده می‌شود که در آن مقادیر درجه حرارت اندازه‌گیری شده در نقطه 2 برای دو ورق به ضخامت 6 میلیمتر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود درجه حرارت بیشینه در فولاد کربنی به علت سرعت جوشکاری پایین‌تر، بیشتر است. در حالیکه به علت سرعت بالاتر خنک شدن در ورق فولاد کربنی، که ناشی از ضریب هدایت بیشتر آن نسبت به فولاد زنگ‌نزن می‌باشد، درجه حرارت برای آن ورق کاهش بیشتری دارد.

توزیع درجه حرارت در اطراف محل جوش و نرخ خنک شدن آن دو عامل اصلی می‌باشند که مورد توجه طراحان اتصالات جوشی هستند. عامل اول خطر وقوع فوران و دومی امکان ترک گرم را تعیین می‌کند. همچنین تنش‌های پسماند بعد از جوشکاری نیز به این دو عامل بستگی دارند.

شکل‌های 10 و 11 به ترتیب نشان می‌دهند که در ورق فولاد کربنی درجه حرارت نقطه مشخص شده (3) در کف ورق اصلی، حدود 160 درجه سانتیگراد بیشتر از ورق زنگ‌نزن می‌باشد. علاوه بر آن، این شکل‌ها نشان می‌دهند که سرعت خنک شدن در ورق فولاد کربنی بیشتر از ورق زنگ‌نزن با

شود. همانطور که در شکل 13 ملاحظه می‌شود، لایه‌های مختلف دارای سختی متفاوتی هستند که از مقادیر آنها می‌توان ضخامت نفوذ جوش و لایه HAZ را بدست آورد. برای مثال نفوذ جوش و لایه HAZ در فولاد زنگ‌نزن به ترتیب 0.5 و 1.6 میلیمتر می‌باشند در حالیکه در فولاد کربنی، ضخامت نفوذ جوش 0.5 میلیمتر و لایه HAZ تقریباً 2.3 میلیمتر می‌باشد که به دلیل بالا بودن ضریب هدایت حرارتی فولاد کربنی است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که روند تغییر سختی در لایه‌های مختلف جوش برای فولاد زنگ‌نزن 304 و فولاد کربنی 1020 متفاوت است که این امر به دلیل ساختار کریستالی و ترکیب متفاوت دوآلیاژ می‌باشد.

## 5-2- نتایج عددی و مقایسه آن با داده‌های تجربی

مشخصات و روش تدوین مدل عددی در قسمت دوم مقاله توضیح داده شده است و در این قسمت نتایج حاصل از حل عددی ارائه می‌گردد. یادآور می‌شود که با مقایسه نتایج عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده بصورت تجربی، ضرایب مدل اصلاح شده‌اند تا تطبیق قابل قبولی با یکدیگر داشته باشند. در این قسمت، برای جلوگیری از تکرار مطالب، تنها نتایج حاصل از حل عددی مربوط به ورق با ضخامت 6 میلیمتر ارائه شده است چرا که روند آنها مشابه نتایج بدست آمده برای ورق‌های با ضخامت‌های 5 و 8 میلیمتر می‌باشند. به منظور اطمینان از استقلال نتایج از مشخصات شبکه المان محدود ایجاد شده، تعداد المان‌ها افزایش یافته و جواب‌های حاصل از هر کدام با یکدیگر مقایسه شده تا از همگرایی آنها اطمینان حاصل شود. برای مثال در ورق 6 میلیمتر تعداد گره‌ها از 167486 به 1088147 عدد افزایش یافته است که با این تغییر، اندازه کوچک‌ترین المان از  $1 \times 0.5 \times 0.5$  میلیمتر به  $0.5 \times 0.25 \times 0.25$  میلیمتر کاهش یافته است و درجه حرارت بدست آمده برای نقاط گره‌ای از این دو مدل، حداکثر 3 درصد تفاوت دارند که این امر دلیل بر همگرایی نتایج دارد. شکل‌های 14 و 15 به ترتیب کانتورهای توزیع درجه حرارت در اطراف محل جوش در مقطع تهیه شده از نقطه 3 را برای فولاد زنگ‌نزن 304 و فولاد کربنی 1020 در ورق به ضخامت 6 میلیمتر نشان می‌دهند. این کانتورها به ترتیب در زمان‌های 26.1 و 36.7 ثانیه پس از شروع جوشکاری تهیه شده‌اند که در آنها درجه حرارت نقطه 3 بیشینه می‌باشد. با

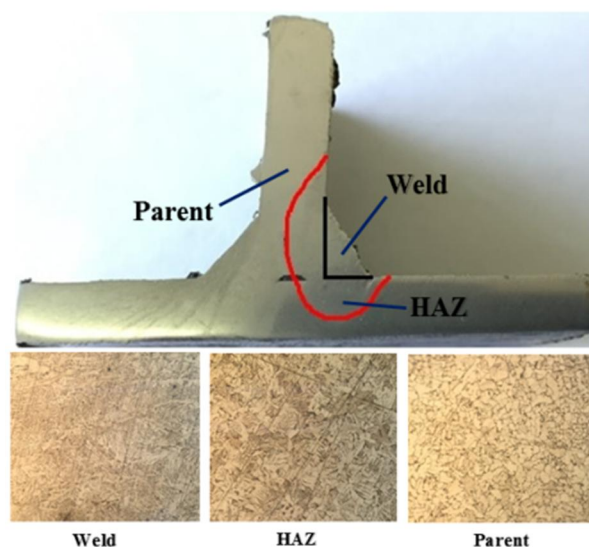


Fig. 12 An etched section of the weldment showing the weld-penetration and micrographs of the weld-zones for AISI 1020

شکل 12 مقطع اچ شده محل جوش، نشان‌دهنده عمق نفوذ و تصویر میکروگرافی نواحی جوش برای فولاد کربنی AISI 1020

همچنین مزیت عمده استفاده از سیستم نوپ این است که این روش به ناهمسانگردی نمونه به علت تقارن دوماحوری نوک فرو رونده حساس می‌باشد. علاوه بر آن همان طور که در شکل 13 ملاحظه می‌شود، برای مثال در لایه HAZ در فاصله تقریباً 150 میکرون، میکروسختی‌سنجی انجام شده است. در تمامی موارد اندازه‌گیری، طول اثر فرو رونده در قطعه، از 40 تا 80 میکرون می‌باشد. بنابراین سختی در دانه‌بندی و همچنین روند تدریجی تغییر آن در لایه‌های مختلف جوش تعیین شده است. دقت عمل میکروسختی‌سنجی به عواملی همچون وضعیت دندان، دقت بار اعمال شده، نحوه اعمال بار ضربه‌ای، وضعیت سطح نمونه، ضخامت نمونه، شکل نمونه، محل اثر و یکنواختی ماده بستگی دارد.

در مورد میکروسختی‌سنجی انجام شده در این پژوهش از دستگاه متالوکس 3 شرکت لیتز کشور آلمان<sup>1</sup> با وزنه 25 گرمی و با دقت  $\pm 0.01$  و زمان اعمال هر بارگذاری 10 ثانیه استفاده شده تا از اعمال ضربه اجتناب

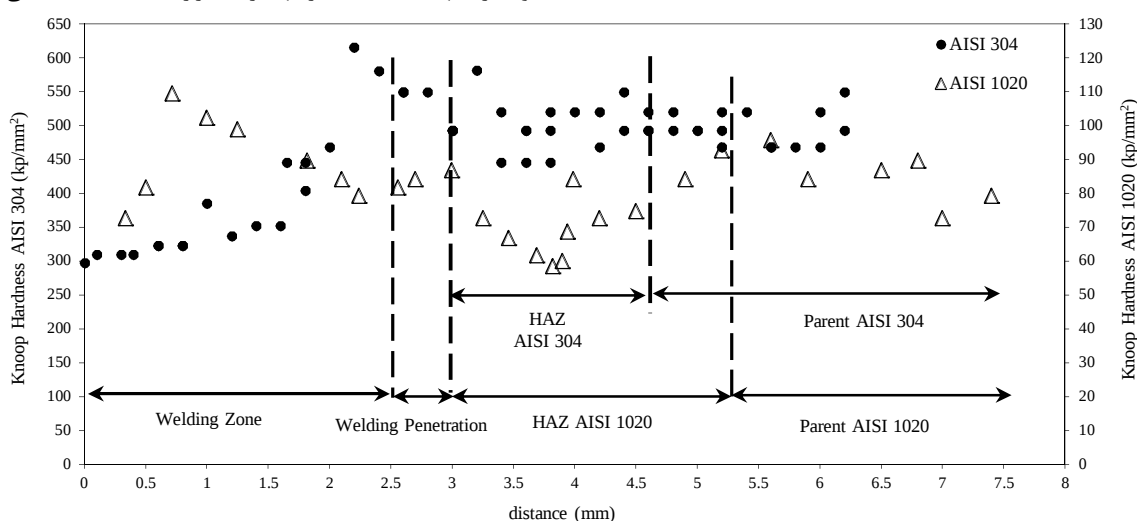
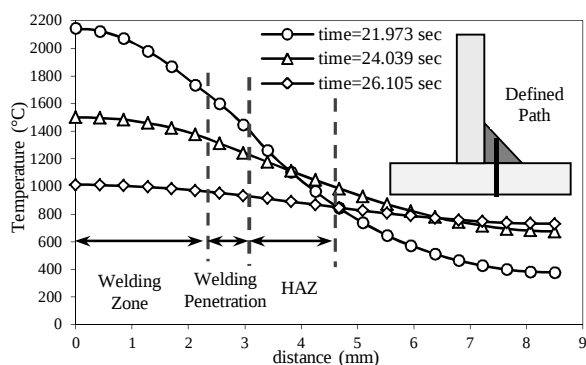


Fig. 13 Knoop-hardness of the weld layers for AISI 304 and AISI 1020 welded plates with 6mm-thickness

شکل 13 سختی‌سنجی نوپ در لایه‌های مختلف جوش برای ورق‌های فولادی AISI 304 و 1020 در ورق به ضخامت 6 میلیمتر

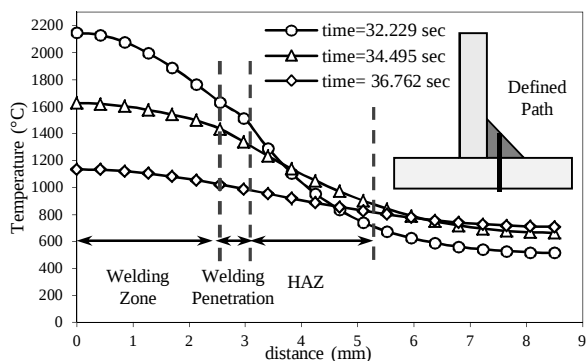
1- Metallux 3, Leitz Co, Germany

جوش به مقطع مورد نظر می‌رسد، ب) دو ثانیه پس از عبور الکترود از این مقطع و ج) در زمانی که درجه حرارت در کف ورق اصلی (نقطه 3) بیشینه می‌گردد، نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که برای هر دو ورق، 4 ثانیه پس از عبور الکترود، درجه حرارت کف ورق بیشینه می‌شود در حالیکه سرعت جوشکاری در فولادهای کربنی تقریباً نصف سرعت جوشکاری فولاد زنگ‌نزن می‌باشد. شایان ذکر است که علی‌رغم تفاوت خصوصیات دو آلیاژ، با توجه به اینکه درجه حرارت ذوب آنها تقریباً یکسان می‌باشد، به منظور رسیدن به اندازه حوضچه جوش یکسان و کیفیت جوشکاری مطلوب، سرعت جوشکاری به نحوی تنظیم می‌گردد که گرادیان درجه حرارت، تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد. همچنین در شکل‌های 16 و 17 مقدار ضخامت لایه‌های نفوذ جوش و HAZ بر اساس توزیع درجه حرارت بدست آمده‌اند. ضخامت ناحیه نفوذ جوش بر اساس درجه حرارت مذاب آلیاژها و ضخامت لایه HAZ بر اساس درجه حرارت  $AC_3$  تعیین شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود ضخامت ناحیه نفوذ جوش برای هر دو آلیاژ تقریباً یکسان است در حالیکه ضخامت ناحیه HAZ در فولاد کربنی بیشتر است. ضخامت لایه‌های مذکور با داده‌های حاصل از میکروسختی‌سنجی که در شکل 13 ارائه شده‌اند، تطبیق



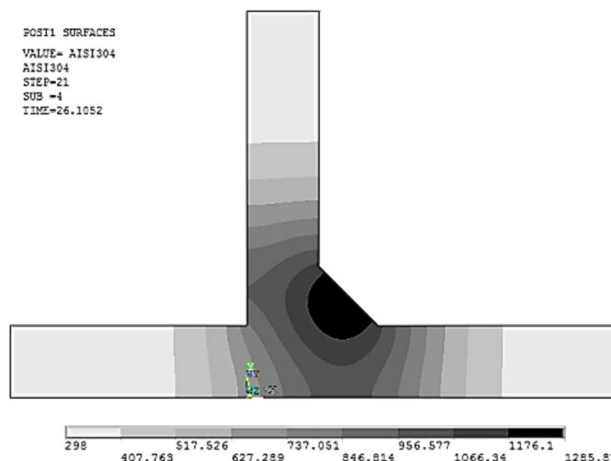
**Fig. 16** Temperature level during the welding of 6mm-304 plates at defined path in a section through point 3 when electrode passes this section, 2 seconds after and when temperature is maximum in point 3

شکل 16 تغییرات درجه حرارت در حین جوشکاری ورق زنگ‌نزن 304 به ضخامت 6 میلیمتر در مسیر نشان داده شده در مقطع عبوری از نقطه 3 در زمانی که الکترود از مقطع می‌گذرد، دو ثانیه پس از آن و زمان بیشینه شدن درجه حرارت در نقطه 3



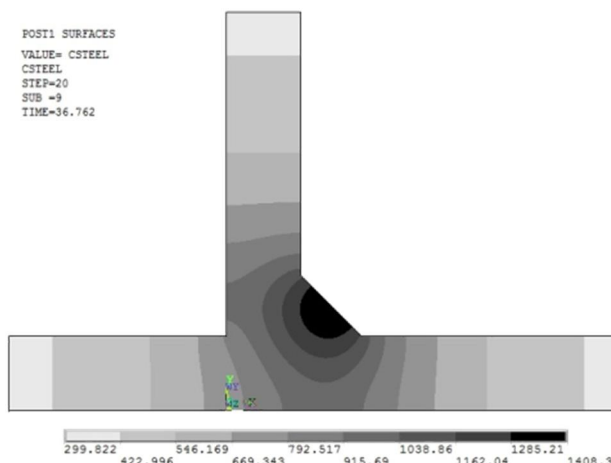
**Fig. 17** Temperature level during the welding of 6mm-1020 plates at defined path in section through point 3 when electrode passes this section, 2 seconds after and when temperature is maximum in point 3

شکل 17 تغییرات درجه حرارت در حین جوشکاری ورق فولادی 1020 به ضخامت 6 میلیمتر در مسیر نشان داده شده در مقطع عبوری از نقطه 3 در زمانی که الکترود از مقطع می‌گذرد، دو ثانیه پس از آن و زمان بیشینه شدن درجه حرارت در نقطه 3



**Fig. 14** Temperature contours during the welding of 6mm AISI 304 plates in section through point 3 when temperature at this point is maximum

شکل 14 کانتور توزیع درجه حرارت در محل جوش در مقطع عبوری از نقطه 3 برای ورق فولاد زنگ‌نزن 6 میلیمتری در زمانی که درجه حرارت در آن نقطه بیشینه است.



**Fig. 15** Temperature contours during the welding of 6mm AISI 1020 plates in section through point 3 when temperature at this point is maximum

شکل 15 کانتور توزیع درجه حرارت در محل جوش در مقطع عبوری از نقطه 3 برای ورق فولاد کربنی 6 میلیمتری در زمانی که درجه حرارت در آن نقطه بیشینه است.

توجه به تفاوت سرعت جوشکاری در فولاد زنگ‌نزن و فولاد کربنی، زمان رسیدن به درجه حرارت بیشینه نیز متفاوت است. در اثر عملیات جوشکاری، درجه حرارت با گرادیان زیاد در ضخامت ورق‌ها و همچنین در کف ورق اصلی افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند عواقب مهمی از قبیل بروز تنش‌های حرارتی در حین جوشکاری و حتی تنش‌های پسماند پس از دوره خنک شدن را به دنبال داشته باشد. از آنجا که این عوامل می‌توانند در عمل، موجب بروز فوران در حین جوشکاری و یا ترک گرم و غیره شوند، اهمیت مطالعه توزیع درجه حرارت در اطراف محل جوش بخصوص در حین عملیات جوشکاری آشکار می‌شود.

به منظور بررسی بیشتر، توزیع درجه حرارت در شکل‌های 16 و 17 برای مقطع مورد نظر در طول مسیر نشان داده شده، ارائه شده‌اند. در هر کدام از شکل‌ها، سه منحنی در سه زمان مختلف رسم شده است که مقدار درجه حرارت برای نقاط مسیر تعیین شده را به ترتیب در الف) لحظه‌ای که الکترود

میلیمتر، با افزایش سرعت جوشکاری از 1.75 به 2.05 میلیمتر بر ثانیه (افزایش 17 درصد) دمای نقطه مورد نظر 11 درصد کاهش یافته است. علاوه بر آن نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت ورق فولاد کربنی به 8 میلیمتر، درجه حرارت 35 درصد کاهش می‌یابد. لازم به توضیح است که به دلیل حفظ کیفیت جوش و رسیدن به ضخامت مناسب لایه نفوذ، افزایش یا کاهش سرعت جوشکاری بیشتر یا کمتر از آنچه که در جدول مذکور قید شده است، قابل وصول نمی‌باشد. همچنین مقایسه نتایج تجربی و عددی در این جدول نشان می‌دهد که مدل عددی قابلیت پیش‌بینی درجه حرارت نقاط مختلف جوش با خطای کمتر از 18 درصد برای فولاد زنگ‌زن و 11 درصد برای فولاد کربنی را دارد.

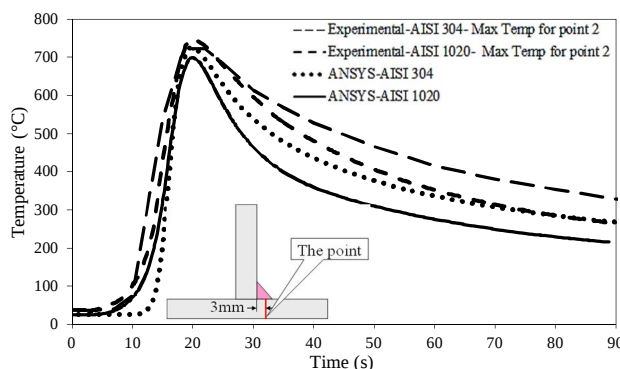
## 6- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی اثر جنس به عنوان عامل اصلی و همچنین سایر عوامل جوشکاری مانند ضخامت ورق، سرعت جوشکاری و مقدار حرارت ورودی در جوشکاری اتصال T شکل دو ورق، یک مدل عددی بر مبنای معادله دو بیضوی غیر متقارن تدوین و از آن در حل عددی به کمک نرم‌افزار المان محدود انسیس استفاده شده است. در جهت تعیین ضرایب معادله فوق، یک سامانه آزمایشی طراحی و ساخته شده که قابلیت ثبت درجه حرارت نقاط مختلف در محل جوش را در حین عملیات جوشکاری بصورت داده‌پردازی کامپیوتری دارد. با مقایسه داده‌های تجربی، ضرایب مدل به روش "به‌روز رسانی" تعیین شده‌اند. مزیت عمده مدل مذکور نه تنها تطبیق نتایج آن با داده‌های تجربی است بلکه تعداد ضرایب در آن نیز به حداقل رسیده است که کارایی مدل را به مراتب افزایش می‌دهد. آزمایش‌ها بر روی اتصالات جوشی فیلت T شکل ورق‌های فولادی کربنی 1020 و زنگ‌زن AISI 304 به ضخامت‌های مختلف انجام شده چرا که فولاد کربنی دارای بیشترین ضریب هدایت حرارتی و فولاد زنگ‌زن دارای کمترین مقدار آن در میان آلیاژهای فولادی پر کاربرد صنعتی می‌باشند. بدین ترتیب اثر جنس و ضخامت به همراه سرعت جوشکاری و حرارت ورودی در مدل لحاظ شده‌اند.

مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که این مدل قابلیت پیش‌بینی درجه حرارت نقاط اطراف جوش را با خطای کمتر از 18 درصد دارد. همچنین با استفاده از توزیع درجه حرارت بدست آمده، می‌توان ضخامت لایه‌های مختلف جوش را به خوبی پیش‌بینی کرد. برای مثال در ورق به ضخامت 6 میلیمتر، نفوذ جوش و لایه HAZ در فولاد زنگ‌زن به ترتیب 0.5 و 1.6 میلیمتر می‌باشند در حالیکه در فولاد کربنی،

خوبی دارند. همچنین در شکل 18، نتایج حاصل از حل عددی با درجه حرارت اندازه‌گیری شده در آزمایشات تجربی برای هر دو آلیاژ مقایسه شده است که تطبیق خوبی را نشان می‌دهند. در این شکل، مقایسه نرخ تغییرات درجه حرارت در اطراف جوش و در طول دوره خنک شدن که از طریق حل عددی و اندازه‌گیری تجربی بدست آمده‌اند، نشان‌گر بالا بودن سرعت خنک شدن در آلیاژ فولاد کربنی نسبت به فولاد زنگ‌زن می‌باشند. برای مثال در فولاد زنگ‌زن 304 درجه حرارت در کف ورق اصلی (نقطه 2) از مقدار بیشینه به 500 درجه سانتیگراد در 23 ثانیه کاهش می‌یابد در حالیکه در فولاد کربنی این زمان 13 ثانیه می‌باشد.

به منظور بررسی اثر ضخامت ورق در نتایج بدست آمده، اندازه‌گیری درجه حرارت در حین عملیات جوشکاری و نیز حل عددی برای ورق‌های با ضخامت 5 و 8 میلیمتر مشابه آنچه که در ورق به ضخامت 6 میلیمتر انجام شده، تکرار و نتایج حاصل مقایسه شده‌اند. بیشینه درجه حرارت ثبت شده برای نقطه مشخص شماره 2 (رجوع شود به شکل 3) در جدول 6 در شرایط مختلف جوشکاری نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت جوشکاری در ورق فولاد زنگ‌زن 304 به ضخامت 5 میلیمتر از 2.34 به 4.69 میلیمتر بر ثانیه (افزایش 100 درصد)، درجه حرارت 20 درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت ورق به 8 میلیمتر، درجه حرارت 39 درصد کاهش می‌یابد. در حالیکه برای ورق فولاد کربنی به ضخامت 5



**Fig. 18** Comparing the experimentally measured temperature levels and results for the numerical solutions at point 2 during the welding and cooling periods for 6mm- 304 and 1020 plates. شکل 18 مقایسه درجه حرارت حاصل از حل عددی و اندازه‌گیری تجربی برای نقطه 2 در کف ورق اصلی در حین جوشکاری ورق‌های 304 و 1020 به ضخامت 6 میلیمتر و دوره خنک شدن پس از آن.

**جدول 6** مقایسه دمای بیشینه در نقطه 2، بدست آمده از طریق اندازه‌گیری تجربی و حل عددی

**Table 6** Comparison of the maximum temperature at point No. 2 obtained using experiment measurement and numerical analysis

| Material  | Plate thickness (mm) | Welding speed (mm/s) | Temperature at point No. 2 (°C) |                        | Error percentage |
|-----------|----------------------|----------------------|---------------------------------|------------------------|------------------|
|           |                      |                      | 3D FEM                          | Experimental (average) |                  |
| AISI 304  | 5                    | 2.34                 | 893                             | 733                    | 18%              |
| AISI 304  | 5                    | 4.69                 | 747                             | 611                    | 18%              |
| AISI 304  | 6                    | 2.34                 | 725                             | 603                    | 16%              |
| AISI 304  | 8                    | 2.34                 | 500                             | 448                    | 10%              |
| AISI 1020 | 5                    | 1.75                 | 827                             | 824                    | 0.4%             |
| AISI 1020 | 5                    | 2.05                 | 745                             | 735                    | 1.4%             |
| AISI 1020 | 6                    | 1.64                 | 699                             | 623                    | 11%              |
| AISI 1020 | 8                    | 1.37                 | 501                             | 540                    | -7%              |

|           |                |
|-----------|----------------|
| f         | قسمت جلو بیضوی |
| m         | بیشینه مقدار   |
| r         | قسمت عقب بیضوی |
| weld bead | حوضچه جوش      |

## 9- مراجع

- [1] B. Mellor, R. Rainey, N. Kirk, The static strength of end and T fillet weld connections, *Materials & design*, Vol. 20, No. 4, pp. 193-205, 1999.
- [2] P. N. Sabapathy, M. A. Wahab, M. Painter, Numerical models of in-service welding of gas pipelines, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118, No. 1, pp. 14-21, 2001.
- [3] N. S. Shanmugam, G. Buvanashakaran, K. Sankaranarayanan, S. R. Kumar, A transient finite element simulation of the temperature and bead profiles of T-joint laser welds, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4528-4542, 2010.
- [4] R. Wang, J. Zhang, H. Serizawa, H. Murakawa, Study of welding inherent deformations in thin plates based on finite element analysis using interactive substructure method, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 9, pp. 3474-3481, 2009.
- [5] J. Mackerle, Finite element analysis and simulation of welding-an addendum: a bibliography (1996-2001), *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 295, 2002.
- [6] H. D. Hibbitt, P. V. Marcal, A numerical, thermo-mechanical model for the welding and subsequent loading of a fabricated structure, *Computers & Structures*, Vol. 3, No. 5, pp. 1145-1174, 1973.
- [7] D. Deng, FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 359-366, 2009.
- [8] X. Kong, Q. Yang, B. Li, G. Rothwell, R. English, X. Ren, Numerical study of strengths of spot-welded joints of steel, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 8, pp. 1554-1561, 2008.
- [9] C.-H. Lee, K.-H. Chang, Three-dimensional finite element simulation of residual stresses in circumferential welds of steel pipe including pipe diameter effects, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 487, No. 1, pp. 208, 218-210.
- [10] N. Murugan, R. Narayanan, Finite element simulation of residual stresses and their measurement by contour method, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 6, pp. 2067-2071, 2009.
- [11] B. Brickstad, B. Josefson, A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, No. 1, pp. 11-25, 1998.
- [12] D. Deng, H. Murakawa, Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements, *Computational materials science*, Vol. 37, No. 3, pp. 269-277, 2006.
- [13] G. Verhaeghe, *Predictive Formulae for Weld Distortion: A Critical Review*, First Published, pp. 16-18, England, Cambridge CBI, Woodhead Publishing, 1999.
- [14] C.-H. Lee, K.-H. Chang, Temperature fields and residual stress distributions in dissimilar steel butt welds between carbon and stainless steels, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 45, No. 1, pp. 33-41, 2012.
- [15] D. Deng, H. Murakawa, Prediction of welding residual stress in multi-pass butt-welded modified 9Cr-1Mo steel pipe considering phase transformation effects, *Computational Materials Science*, Vol. 37, No. 3, pp. 209-219, 2006.
- [16] S. Tsirkas, P. Papanikos, T. Kermanidis, Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 134, No. 1, pp. 59-69, 2003.
- [17] T.-L. Teng, C.-P. Fung, P.-H. Chang, W.-C. Yang, Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, No. 8, pp. 523-538, 2001.
- [18] D. Deng, W. Liang, H. Murakawa, Determination of welding deformation in fillet-welded joint by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, No. 2, pp. 219-225, 2007.

ضخامت نفوذ جوش 0.5 میلیمتر و لایه HAZ تقریباً 2.3 میلیمتر می‌باشد که این مقادیر با نتایج حاصل از حل عددی تطبیق خوبی دارند.

درجه حرارت نقاط یکسان در فولاد کربنی به علت سرعت جوشکاری پایین‌تر، بیشتر از فولاد زنگ‌نزن است در حالیکه به علت سرعت بالاتر خنک شدن در ورق فولاد کربنی، که ناشی از ضریب هدایت بیشتر آن نسبت به فولاد زنگ‌نزن می‌باشد، نرخ کاهش درجه حرارت برای آن ورق بیشتر است. برای مثال در فولاد زنگ‌نزن 304 درجه حرارت در کف ورق اصلی از مقدار بیشینه به 500 درجه سانتیگراد در 23 ثانیه کاهش می‌یابد در حالیکه در فولاد کربنی این زمان 13 ثانیه می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار ضخامت لایه HAZ که بر اساس توزیع درجه حرارت و نیز داده‌های تجربی بدست آمده است، در آلیاژ فولاد کربنی بیشتر از فولاد زنگ‌نزن می‌باشد.

از این مدل نه تنها در پیش‌بینی کیفیت جوش بلکه در ارزیابی عوامل مهمی چون تنش‌های حرارتی، فوران و ترک گرم می‌توان استفاده کرد که موضوع تحقیقات آینده می‌باشند.

## 7- تقدیر و تشکر

مؤلفین از مدیریت محترم مجتمع پتروشیمی تبریز جهت تأمین بودجه مالی و کارشناسان مجرب آن شرکت بخصوص آقایان مهندس موتابی، مهندس پورمنصوری و مهندس دهقانی برای فراهم نمودن امکانات لازم آزمایشی و ارائه مشاوره تخصصی در انجام آزمایش‌های تجربی نهایت تشکر و قدردانی را دارند.

## 8- فهرست علائم

|           |                                                                 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|
| A         | پارامتر توزیع                                                   |
| a         | شعاع جلو بیضوی (m)                                              |
| B         | پارامتر توزیع                                                   |
| b         | شعاع عقب بیضوی (m)                                              |
| C         | پارامتر توزیع                                                   |
| c         | ظرفیت گرمایی ویژه ( $\text{Jkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ )           |
| f         | ضریب توزیع کسری                                                 |
| h         | ضریب انتقال حرارت ( $\text{W(m}^2\text{)}^{-1}\text{°C}^{-1}$ ) |
| I         | جریان الکتریکی (A)                                              |
| K         | ضریب هدایت حرارتی ( $\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$ )            |
| Q         | نرخ تولید حرارت داخلی ( $\text{W(m}^3\text{)}^{-1}$ )           |
| $\bar{q}$ | بردار شار حرارتی ( $\text{W(m}^2\text{)}^{-1}$ )                |
| T         | درجه حرارت ( $\text{°C}$ )                                      |
| t         | زمان (sec)                                                      |
| V         | ولتاژ الکتریکی (volte)                                          |
| v         | سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )                                       |

## علائم یونانی

|           |                                           |
|-----------|-------------------------------------------|
| $\nabla$  | عملگر گرادیان فضایی                       |
| $\eta$    | بازده قوس الکتریکی                        |
| $\theta$  | زاویه بین محورهای مختصات طولی             |
| $\kappa$  | ضریب پخشندگی حرارتی ( $\text{kgm}^{-3}$ ) |
| $\lambda$ | ثابت تجربی                                |
| $\rho$    | چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )               |

## زیر نویس‌ها

- [25] D. Özyürek, An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 304L austenitic stainless steel, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 3, pp. 597-603, 2008 .
- [26] S. Nadimi, R. Khoushehmehr, B. Rohani, A. Mostafapour, Investigation and analysis of weld induced residual stresses in two dissimilar pipes by finite element modeling, *Journal of Applied Sciences*, Vol. 8, No. 6, pp. 1014-20, 2008 .
- [27] K. Masubuchi, *Analysis of welded structures: Residual stresses, distortion, and their consequences*: Elsevier, 2013 .
- [28] J. Outinen, O. Kaitila, P. Mäkeläinen, *High-temperature Testing of Structural Steel and Modelling of Structures at Fire Temperatures: Research Report*: Helsinki University of Technology, 2001 .
- [29] F. Vakili-Tahami, A. Ziaei-Asl, Numerical and experimental investigation of T-shape fillet welding of AISI 304 stainless steel plates, *Materials & Design*, Vol. 47, No. 1, pp. 615-623, 2013 .
- [30] C. S. Wu, *Welding thermal processes and weld pool behaviors*, First Edition, pp. 70-79, CRC Press/China Machine Press, China, 2011 .
- [31] T. Thorslund, F.-J. Kahlen, A. Kar, Temperatures, pressures and stresses during laser shock processing, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 39, No. 1, pp. 51-71, 2003 .
- [19] Z. Barsoum, A. Lundbäck, Simplified FE welding simulation of fillet welds-3D effects on the formation residual stresses, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 7, pp. 2281-2289, 2009 .
- [20] J. Goldak, M. Asadi, R. G. Alena, Why power per unit length of weld does not characterize a weld?, *Computational Materials Science*, Vol. 48, No. 2, pp. 390-401, 2010 .
- [21] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical transactions B*, Vol. 15, No. 2, pp. 299-305, 1984 .
- [22] M. Smith, P. Bouchard, M. Turski, L. Edwards, R. Dennis, Accurate prediction of residual stress in stainless steel welds, *Computational Materials Science*, Vol. 54, No. 4, pp. 312-328, 2012 .
- [23] E. Nateghi, V. A. Gorji, Study on the effect of weld configuration geometry to distribution of residual stress and temperature in the welded parts of stainless steel, *Modarres Mechanical Engineering Journal*, Vol. 15, No. 11, pp. 105-116, 2016.
- [24] M. K. Manesh, I. S. Far, H. Omidvar, Effects of arc heat input and welding speed on the cryogenic impact strength of type 304L austenitic stainless steel weld metal, *Modarres Mechanical Engineering Journal*, Vol. 15, No. 2, pp. 205-213, 2015.