

## Simulation of heat transfer in gas tungsten arc welding of stainless steel type 304

\*Mostafa Jafarzadegan<sup>1</sup>, Reza Taghiabadi<sup>2</sup>, Mohammad Ammar Mofid<sup>3</sup>

1- Assistant professor of materials science, Faculty of engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.

2- Associate professor of materials science, Faculty of engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.

3- Assistant professor of materials science, Department of Petroleum, Mining and Material Engineering, Faculty of engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

**Citation:** Jafarzadegan M, Taghiabadi R, Ammar Mofid M. Simulation of heat transfer in gas tungsten arc welding of stainless steel type 304. Metallurgical Engineering 2020; 23(1): 74-83 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.122979.1284>

**doi:** <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.122979.1284>

### ABSTRACT

In this paper, the distribution of temperature and thermal cycle in gas tungsten arc welding of stainless steel 304 is studied. The welding operation was performed under different heat inputs of 540 and 782 kJ/mm on the plates with 2 mm thickness. The Abaqus software was employed for simulation. The volumetric heat distribution, according to the double ellipsoidal (Goldak) model, was considered as the heat source of the welding and DFLUX subroutine was coded by FORTRAN. The simulation results were compared with the Rosenthal and Adams models and experimental results. The simulation results with both heat inputs are well compatible with the cross section dimensions of the welds, while the Rosenthal model predicts a smaller welds' pool size. The temperature-time curves obtained from the simulation and Rosenthal model have considerable differences but their predicted cooling time and rate in the temperature range of 800 to 500 °C, especially in heat input of 782 kJ/mm, are close to each other (the difference is less than 7.2%). The results also showed that the maximum temperature of the regions farther from the fusion boundary in Adams model is predicted higher than that of simulation and Rosenthal model, while the results of simulation and Rosenthal model are closer to each other.

**Keywords:** Temperature simulation; Abaqus; Rosenthal model; Adams model; GTAW.

Received: 12 March 2020 | Accepted: 31 October 2020

■ ..... ■

\* **Corresponding Author:**

**Mostafa Jafarzadegan, PhD**

**Address:** Faculty of engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.

**Tel:** +98 (28) 33901186

**E-mail:** jafarzadegan@eng.ikiu.ac.ir

## شبیه‌سازی انتقال حرارت در جوشکاری قوس تنگستن با گاز محافظ فولاد زنگ نزن ۳۰۴

\*مصطفی جعفرزادگان<sup>۱</sup>، رضا تقی‌آبادی<sup>۲</sup>، محمدعمار مفید<sup>۳</sup>

- ۱- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.  
 ۲- دانشیار گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.  
 ۳- استادیار گروه مهندسی نفت معدن و مواد دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

## چکیده

در این مقاله توزیع دما و چرخه حرارتی در GTAW فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ مورد بررسی قرار گرفته است. جوشکاری با دو حرارت ورودی مختلف ۵۴۰ و ۷۸۲ kJ/mm بر روی ورق‌هایی با ضخامت ۲ mm انجام شد. نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. توزیع حرارت جوشکاری به صورت حجمی و بر اساس مدل بیضی دوگانه (گلدک) در نظر گرفته شد و زیرروال DFLUX به زبان فرترن کدنویسی شد. نتایج شبیه‌سازی در پیش‌بینی اندازه حوضچه جوش‌ها، با مدل‌های تحلیلی روزنتال و نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی در هر دو حرارت ورودی با ابعاد مقطع عرضی جوش‌ها سازگاری مناسبی دارند در حالی که مدل روزنتال اندازه جوش‌های کوچکتری را پیش‌بینی می‌کند. منحنی‌های دما-زمان حاصل از شبیه‌سازی و مدل روزنتال تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر دارند ولی زمان و سرعت سرد شدن تخمین‌زده شده توسط آنها در محدوده دمایی ۸۰۰ تا ۵۰۰ °C به ویژه در حرارت ورودی ۷۸۲ kJ/mm به هم نزدیک است (اختلاف کمتر از ۷/۲٪). نتایج همچنین نشان داد که دمای حداکثر در نواحی دورتر از مرز ذوب در مدل آدامز بیش از شبیه‌سازی و مدل روزنتال پیش‌بینی می‌شود در حالی که نتایج شبیه‌سازی و مدل روزنتال به یکدیگر نزدیک‌تر هستند.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی دما؛ آباکوس؛ مدل روزنتال؛ مدل آدامز؛ GTAW.

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۲ | پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰

## ۱. مقدمه

یا مدل‌های تحلیلی موجود درباره انتقال حرارت در جوشکاری استفاده نمود (۱-۳).

معادله کلی انتقال حرارت از طریق رسانش سه‌بعدی و گذرا به این صورت است (با در نظر گرفتن ماده همسانگرد):

معادله ۱

$$\rho C \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + G$$

که در آن  $k$  ضریب رسانش حرارتی،  $\rho$  چگالی،  $C$  ظرفیت حرارتی ویژه،  $T$  دما،  $t$  زمان،  $G$  نرخ تولید حرارت در واحد حجم در داخل ماده و  $(x, y, z)$  مختصات مکانی سیستم هستند. شرایط اولیه به صورت  $T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)$  و شرایط مرزی با در نظر گرفتن همرفت بر روی سطح (صرفنظر از تشعشع) به صورت زیر تعریف می‌شود:

امروزه از روش‌های مختلف جوشکاری برای اتصال‌دهی بسیاری از سازه‌ها و قطعات مهندسی استفاده می‌شود و قسمتی از هزینه‌های ساخت آنها مربوط به جوشکاری می‌باشد. در این میان کنترل پارامترهای جوشکاری به منظور دستیابی به جوش با کیفیت و خواص مناسب اهمیت فراوانی دارد. در بسیاری از مواد، کنترل نامناسب پارامترهای جوشکاری منجر به افزایش حرارت ورودی به جوش شده و ساختار جوش و به خصوص ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. حرارت ورودی زیاد اغلب باعث افت خواص جوش و HAZ می‌شود که از دلایل عمده آن، می‌توان به رشد دانه زیاد، تنش‌های پسماند، اعوجاج یا رسوب ترکیبات مضر و ترد اشاره کرد. همچنین برای پیش‌بینی یا درک ریزساختار و تنش‌های پسماند در جوش‌ها، آگاهی از چرخه دمایی ماده در حین جوشکاری ضروری است. بدین منظور می‌توان از شبیه‌سازی و

\* نویسنده مسئول:

دکتر مصطفی جعفرزادگان

نشانی: قزوین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد.

تلفن: ۳۳۹۰۱۱۸۶ (۲۸) ۰۹۸+

پست الکترونیکی: jafarzadegan@eng.ikiu.ac.ir

معادله ۲

$$k \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial T}{\partial y} + m + k \frac{\partial T}{\partial z} + h(T - T_{\infty}) = 0$$

در معادله ۲،  $h$  ضریب همرفت،  $T_{\infty}$  دمای محیط و  $l$  و  $m$  و  $n$  کسینوس‌های زوایای جهت عمود بر سطح با سه محور مختصات هستند (۴). حل تحلیلی معادلات فوق برای شکل‌های هندسی و شرایط مرزی یا تولید حرارت خاص معمولاً ممکن نیست و استفاده از روش‌های حل عددی ضروری است (۵، ۶). شبیه‌سازی به روش اجزای محدود یکی از روش‌های کارآمد بر اساس روش‌های حل عددی است که در حل مسائل جوشکاری نیز از آن استفاده می‌شود. در این روش نیاز به مشخص کردن مدل ریاضی برای منبع حرارتی (قوس الکتریکی) است. در مدل‌های ساده، منبع حرارتی به صورت نقطه‌ای یا خطی در نظر گرفته شده است ولی مدل‌های بعدی، منبع حرارتی را به صورت دایره، کره و بیضی در نظر گرفتند. مدل دایره‌ای، منبع حرارتی را به صورت سطحی در نظر می‌گیرد که باعث ایجاد خطای زیاد در محاسبه دمای HAZ به خصوص در نقاط به منبع خواهد شد. مدل منبع حرارتی به شکل کره، اگرچه منبع حرارتی سه‌بعدی فرض می‌شود ولی با شیب حرارتی زیاد در جلوی منبع حرارتی که در نتایج تجربی اندازه‌گیری شده است، تطابق خوبی ندارد. گلدان مدلی از منبع حرارتی به صورت دو بیضی پیشنهاد داد که دارای قابلیت‌های زیادی برای شبیه‌سازی جوش‌های نامتقارن، غیرهمجنس و با نفوذ کم یا زیاد است. توانایی این مدل برای تخمین دما به‌ویژه در نقاط نزدیک به جوش بیشتر از سایر روش‌ها است. این مدل توزیع حرارت را در سه‌بعد و به صورت اکسپونانسیل تشریح می‌کند. در ادامه مدل توزیع حرارت گلدان ارائه شده برای شبیه‌سازی در جوشکاری توضیح داده شده است.

در مدل توزیع حرارت بیضی دوگانه، حرارت ورودی بین دو بیضی در جلو و عقب نسبت به مرکز منبع حرارتی تقسیم می‌شود. این مدل، حرارت ورودی از طریق قوس الکتریکی به جوش را به صورت حرارت تولید شده در داخل ماده در نظر می‌گیرد. توزیع چگالی حرارتی  $q$  ( $W/m^3$ ) در قسمت جلویی منبع حرارتی به این صورت است:

معادله ۳

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3(z+v(\tau-t))^2}{c_r^2}\right)$$

در معادله فوق،  $Q$  حرارت ورودی جوشکاری را نشان می‌دهد که از طریق فرمول  $Q = \eta VI$  با ولتاژ ( $V$ ) و جریان جوشکاری ( $I$ ) و بازده قوس ( $\eta$ ) ارتباط دارد.  $\tau$  ضریبی برای نشان دادن مرکز منبع حرارتی در زمان صفر (شروع جوشکاری) است.

توزیع چگالی حرارتی در قسمت عقبی منبع حرارتی از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

معادله ۴

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3(z+v(\tau-t))^2}{c_r^2}\right)$$

کسرهای  $f_r$  و  $f_f$  به ترتیب نشان‌دهنده حرارت ورودی در قسمت جلویی و عقبی است ( $f_r + f_f = 2$ ). پارامترهای  $c_f$  و  $c_r$  مربوط به نیم بیضی در جلو و عقب مرکز منبع حرارتی هستند. شکل و اندازه مدل حرارتی توسط پارامترهای بیضی مشخص می‌شود (۷). توافق خوبی بین اندازه واقعی و محاسبه شده حوضچه جوش گزارش شده است هنگامی که پارامترهای بیضی حدود ۱۰٪ کمتر از مقدار واقعی انتخاب شود (۸). رابطه بین  $f_r$  و  $f_f$  به این صورت محاسبه می‌شود (۹):

معادله ۵

$$f_f = \frac{2c_f}{c_f + c_r} \quad \text{و} \quad f_r = \frac{2c_r}{c_f + c_r}$$

محققان نتایج استفاده از مدل بیضی دوگانه را در پیش‌بینی دما در جوشکاری مواد مختلف موفقیت‌آمیز گزارش کرده‌اند (۱۰-۱۲). مدل‌های ویژه‌ای نیز برای مدل کردن منبع حرارتی در برخی شرایط خاص جوشکاری (مثل وقتی که عمق نفوذ زیاد است) گزارش شده است. به عنوان مثال محققان نتایج استفاده از مدل منبع حرارتی تخم‌مرغی شکل و مدل بیضی دوگانه را در جوش GTAW و لیزر موفق دانسته‌اند (۱۳). لازم به ذکر است که مدل کردن قوس الکتریکی و سیلان سریع مایع در حوضچه جوش بسیار پیچیده است و مدل‌های ارائه شده معمولاً برای تخمین دما در نواحی اطراف حوضچه جوش بکار می‌روند. به دلیل سرعت سیلان مواد در داخل حوضچه جوش، دمای آن را می‌توان تقریباً یکنواخت در نظر گرفت که در حدود چند صد درجه سانتیگراد بالاتر از دمای ذوب ماده تحت جوشکاری است (۸).

علاوه بر شبیه‌سازی که مستلزم محاسبات زیادی است، محققان با در نظر گرفتن فرض‌های مختلف برای ساده‌سازی و حل معادله انتقال حرارت در جوشکاری تلاش کردند. در این میان، روزنتال مدلی برای پیش‌بینی دما در جوشکاری ارائه کرد که در آنها انتقال حرارت نسبت به منبع حرارتی در قطعه‌ای با طول کافی، پایدار یا شبه پایدار فرض می‌شود. در مدل روزنتال فرض‌های زیر برای تحلیل حرارت در جوشکاری در نظر گرفته شده است: جریان حرارت حالت پایدار، منبع حرارتی نقطه‌ای، حرارت نهان ذوب قابل چشم‌پوشی، خواص حرارتی ثابت، عدم اتلاف حرارت از سطح قطعه کار و عدم وجود همرفت در حوضچه جوش (۱۴). در مدل روزنتال برای

سطحی برای جوشکاری آماده شدند. ورق‌ها به صورت لب به لب و بدون فلز پرکننده و تحت گاز محافظ آرگون با دبی جوشکاری ۱۰ lit/min جوشکاری شدند. برای بررسی اثر حرارت ورودی، دو نمونه تحت حرارت ورودی مختلف تهیه شد. در نمونه اول جوشکاری با ولتاژ ۱۴ V و جریان ۲۶۸ A و با سرعت متوسط حدود ۴/۸ mm/s انجام شد (حرارت ورودی ۷۸۲ kJ/s). نمونه دوم با ولتاژ ۱۲ V و جریان ۱۳۶ A و سرعت متوسط جوشکاری ۳/۰ mm/s تحت جوشکاری قرار گرفت (حرارت ورودی ۵۴۰ kJ/s). لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی و مدل‌های تحلیلی نیز از همین پارامترهای جوشکاری تجربی استفاده شد.

### مدل‌های تحلیلی روزنتال و آدامز

در این تحقیق از دو مدل تحلیلی روزنتال و آدامز برای پیش‌بینی دما در جوشکاری فولاد ۳۰۴ استفاده شد و نتایج آنها با نتایج تجربی و شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفت. بدین منظور برای محاسبه منحنی‌های دما-زمان و همچنین رسم منحنی‌های هم‌دما از کدنویسی با نرم‌افزار Matlab استفاده شد. در مدل روزنتال و آدامز مقادیر متوسط ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه و چگالی فولاد ۳۰۴ به ترتیب مقادیر ثابت متوسط  $k = 24.9 \frac{W}{m.K}$ ،  $C_p = 587 \frac{J}{kg.K}$  و  $8000 \frac{kg}{m^3}$  در نظر گرفته شدند (۱۴).

### شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس

برای محاسبه چرخه حرارتی جوش‌ها علاوه بر مدل‌های روزنتال و آدامز، از شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار آباکوس نیز استفاده شد. برخلاف اکثر مدل‌های تحلیلی، در نرم‌افزار آباکوس خواص حرارتی و چگالی را می‌توان وابسته به دما تعریف کرد. تعریف خواص حرارتی به صورت وابسته به دما بر روی نتایج شبیه‌سازی تأثیر زیادی دارد (۱۵). از معادله ۹ برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی (برحسب  $\frac{W}{m.K}$ ) استفاده شد (۱۶، ۱۷).

معادله ۹

$$k_s = 10.33 + 15.4 \times 10^{-3} T - 7.0 \times 10^{-7} T^2; T: 298 - 1633$$

$$k_{sH} = 355.93 - 1968 \times 10^{-3} T; T: 1644 - 1672$$

$$k_l = 6.6 + 12.14 \times 10^{-3} T; T \geq 1793$$

برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه فولاد ۳۰۴ (برحسب  $\frac{J}{kg.K}$ ) از معادله ۱۰ استفاده شد (۱۶):

معادله ۱۰

$$C_p = 0.443 + 2 \times 10^{-4} T - 8 \times 10^{-10} T^2$$

از آنجایی که چگالی فولاد ۳۰۴ از دمای محیط تا دمای

ورق‌های نازک، دما (T) به این صورت محاسبه می‌شود:

معادله ۶

$$\frac{2\pi(T - T_0)kg}{Q} = \exp\left(\frac{Vx}{2\alpha}\right) K_0 \left(\frac{Vr}{2\alpha}\right)$$

در معادله ۶،  $T_0$  دمای قطعه قبل از جوشکاری،  $k$  ضریب رسانش حرارتی،  $g$  ضخامت قطعه کار،  $Q$  حرارت منتقل شده به قطعه کار،  $V$  سرعت حرکت،  $\alpha$  نفوذپذیری حرارتی قطعه ( $\alpha = \frac{k}{\rho C}$ ): ضریب رسانش حرارتی  $k$  تقسیم بر چگالی  $\rho$  و حرارت ویژه قطعه  $C$ ،  $K_0$  تابع بسل اصلاح شده نوع دوم از مرتبه صفر و  $r$  فاصله شعاعی از مبدأ است ( $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ). مدل روزنتال دما در ورق‌های ضخیم را به صورت زیر پیش‌بینی می‌کند:

معادله ۷

$$\frac{2\pi(T - T_0)kR}{Q} = \exp\left(\frac{-V(x - Vt + R)}{2\alpha}\right)$$

در معادله ۷،  $R$  فاصله شعاعی از مبدأ و برابر با  $R = \sqrt{x^2 + y^2}$  است.

مدل آدامز نیز برای محاسبه دمای حداکثر در فواصل مختلف از مرز ذوب ارائه شده است. طبق معادله آدامز دمای نقاط اطراف حوضچه جوش به فاصله  $Y$  از مرز ذوب از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

معادله ۸

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{\sqrt{2\pi e} \rho C d Y}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

در رابطه فوق،  $T_p$  دمای حداکثر،  $e = 2.718$  (پایه لگاریتم طبیعی) و  $T_m$  دمای ذوب (لیکوئیدوس) فلز تحت جوشکاری است (۱۴).

مدل‌های تحلیلی مانند روزنتال و آدامز برای محاسبه توزیع دما در جوشکاری استفاده می‌شوند ولی هر یک از آنها محدودیت‌هایی داشته و نیازمند صحت‌سنجی با نتایج تجربی هستند. با این حال به نظر می‌رسد با استفاده از شبیه‌سازی با مدل گلداک در جوشکاری می‌توان تخمین مناسب‌تری از دمای جوش و HAZ به دست آورد. در این مقاله نتایج شبیه‌سازی GTAW فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ تحت دو حرارت ورودی مختلف با مدل‌های تحلیلی روزنتال و آدامز و نتایج تجربی مورد مقایسه و بحث قرار گرفته است.

## ۲. مواد و روش تحقیق

### جوشکاری GTAW

در این تحقیق جوشکاری GTAW بر روی ورق‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به ضخامت ۲ mm انجام شد. ابتدا ورق‌ها با ابعاد  $50 \times 150 \times 2$  mm برش خورده و پس از تمیزکاری

ضلع مختلف ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵/۰ mm انتخاب شدند (تعداد المان‌ها از ۳۰۰ به ۱۵۷۵۰۰ افزایش یافت). زمان پردازش برای المان‌های ۴ میلی‌متری در حدود یک ربع ساعت و برای المان‌های ۰/۴ میلی‌متری در حدود دو ساعت و نیم بود.

### ۳. نتایج و بحث

#### حساسیت به اندازه مش در شبیه‌سازی

برای بررسی همگرایی جواب شبیه‌سازی انتقال حرارت در جوشکاری، ابتدا المان‌های مکعب مستطیلی با ابعاد  $4 \times 4 \times 2$  mm (به دلیل محدودیت ضخامت ۲ mm در راستای ضخامت ورق یک ضلع المان را نمی‌توان بیش از ۲ mm در نظر گرفت) با توزیع یکنواخت در سراسر قطعه انتخاب شد و سپس المان‌های مکعبی با اندازه‌های ضلع مختلف ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵/۰ mm انتخاب شدند (تعداد المان‌ها از ۳۰۰ به ۱۵۷۵۰۰ افزایش یافت). شکل ۱ دمای حداکثر در خط مرکزی جوش و فاصله ۴ mm دورتر از خط مرکزی (در سطح بالایی ورق) بر اساس اندازه ضلع المان در دو نمونه تحت حرارت ورودی مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در نمونه ۱، دمای خط مرکزی جوش با المان ۴ میلی‌متری بیش از  $7000$  K محاسبه شده ولی با کاهش اندازه المان کاهش می‌یابد. روند همگرایی دما در اثر کاهش اندازه مش در فاصله ۲ mm از خط مرکزی نیز وجود دارد. دما در فاصله ۴ دورتر از خط مرکزی (نزدیک به مرز ذوب) نوسان کمتری دارد و با کاهش اندازه المان از ۴ به ۰/۴ mm، از حدود  $2136$  K به  $1670$  K می‌رسد؛ این دما نزدیک به نقطه ذوب فولاد ۳۰۴ بوده و با نتایج تجربی انطباق مناسبی دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش اندازه المان، دما در فواصل مختلف از خط مرکزی همگرا می‌شود. اختلاف حداکثر دما بین دو المان با اندازه ۰/۴ mm و ۵/۰ mm در خط مرکزی جوش و فاصله ۴ میلی‌متری در نمونه ۱ به ترتیب حدود ۱/۵ و ۲ درصد است. روند همگرایی جواب‌ها با کاهش اندازه دانه در نمونه ۲ نیز مشاهده می‌شود. اختلاف نسبی حداکثر دمای بدست آمده در نمونه ۲ با اندازه المان ۵/۰ mm و ۰/۴ mm در خط مرکزی و ۴ میلی‌متری خط مرکزی به ترتیب حدود ۳/۳ و ۱/۷ درصد است. با توجه به مطالب ذکر شده، اندازه المان ۰/۴ mm برای شبیه‌سازی انتخاب شد تا علاوه بر دستیابی به دقت مطلوب، در هزینه محاسبات نیز صرفه‌جویی شود.

#### منحنی‌های دما-زمان

مدل‌های تحلیلی انتقال حرارت در جوشکاری ورق‌های نازک و ضخیم با یکدیگر تفاوت دارد. در جوشکاری ورق‌های نازک انتقال حرارت به صورت دوبعدی در نظر گرفته می‌شود در حالی که در ورق‌های ضخیم، انتقال حرارت را به صورت سه‌بُعدی در نظر می‌گیرند به طوری که شار حرارت هم از طرف حوضچه

ذوب تغییر چندانی ندارد، در شبیه‌سازی با آب‌کوس نیز مقدار چگالی ثابت  $8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  برای این ماده در نظر گرفته شد. ابعاد هندسی ورق در شبیه‌سازی آب‌کوس مشابه با شرایط تجربی  $50 \times 150 \times 2$  mm انتخاب شد. پارامترهای مدل بیضی دوگانه گلداک و جوشکاری در زیرروال DFLUX و به زبان فرترن کدنویسی شد. ابعاد بیضی دوگانه برای نمونه اول و دوم به ترتیب  $a=3.8, b=2, c_f=3.8, c_r=7$  mm و  $a=2.27, b=1.4, c_f=2.27, c_r=4.5$  mm و مقدار ضریب راندمان قوس نیز ۵۰٪ انتخاب شد. مقادیر  $a$  و  $b$  با توجه به مقطع عرضی جوش تعیین شدند و مقادیر  $c_f, c_r$  با توجه به مقادیر توصیه شده (۸) و سعی و خطا انتخاب شدند. گرمای نهان ذوب  $290$  kJ/kg و دمای سالیدوس و لیکوئیدوس فولاد ۳۰۴ به ترتیب  $1697$  K و  $1727$  K تعریف شد (۱۶).

در زیرروال DFLUX ولتاژ، شدت جریان و سرعت جوشکاری مشابه شرایط تجربی تعریف شد. در این زیرروال مقدار متوسط حرارت ورودی در هر بازه زمانی (Increment) باید مشخص باشد. مقدار متوسط حرارت ورودی روی محدوده زمانی کوتاه انتخابی (۱ s)، از طریق انتگرال‌گیری محاسبه و در زیرروال DFLUX وارد شد (۱۸). مقدار انتگرال مذکور از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

معادله ۱۱

$$\int_{t_1}^{t_2} q(x, y, z, t) dt = \frac{6\sqrt{3}fQ}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \frac{-\sqrt{\pi}c}{2\sqrt{3}v} \left[ \text{erf}\left(\frac{\sqrt{3}(x-vt_2)}{c}\right) - \text{erf}\left(\frac{\sqrt{3}(x-vt_1)}{c}\right) \right]$$

در شبیه‌سازی شرایط اولیه به صورت دمای  $293$  K در تمام ورق و شرایط مرزی همرفت برای تمامی سطوح در نظر گرفته شد. ضریب همرفت با هوای محیط ( $T_{\infty} = 293$  K) مطابق با سایر تحقیقات،  $h = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}}$  در نظر گرفته شد (۱۲، ۱۹). به دلیل این که تشعشع اثر کمی بر چرخه حرارتی جوش دارد و جریان گرما عمدتاً بوسیله هدایت صورت می‌گیرد (۸) از تعریف تشعشع (به دلیل غیرخطی شدن شدید مسأله) چشمپوشی شد. همچنین گزارش شده است که اعمال همرفت-تشعشع به سطح بالایی اثر کمی بر چرخه حرارتی جوش دارد (۸).

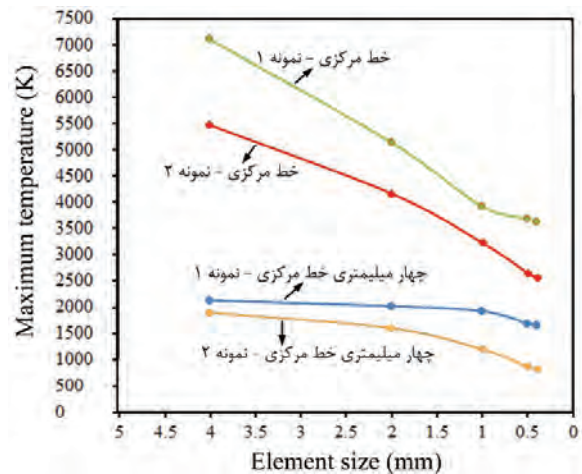
المان‌ها در نرم‌افزار آب‌کوس از نوع DC3D8 (المان آجری خطی با ۸ گره) انتخاب شدند توزیع المان‌ها به صورت یکنواخت در سراسر قطعه انتخاب شد. حل معادلات نیز توسط حلگر آب‌کوس به صورت تکرار شونده و نیوتنی انجام شد. برای بررسی همگرایی جواب‌ها، ابتدا المان‌های مکعب مستطیلی با ابعاد  $4 \times 4 \times 2$  mm با توزیع یکنواخت در سراسر قطعه انتخاب شد و سپس المان‌های مکعبی با اندازه‌های

معادله ۱۲

$$\tau = d \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_0)}{H_{net}}}$$

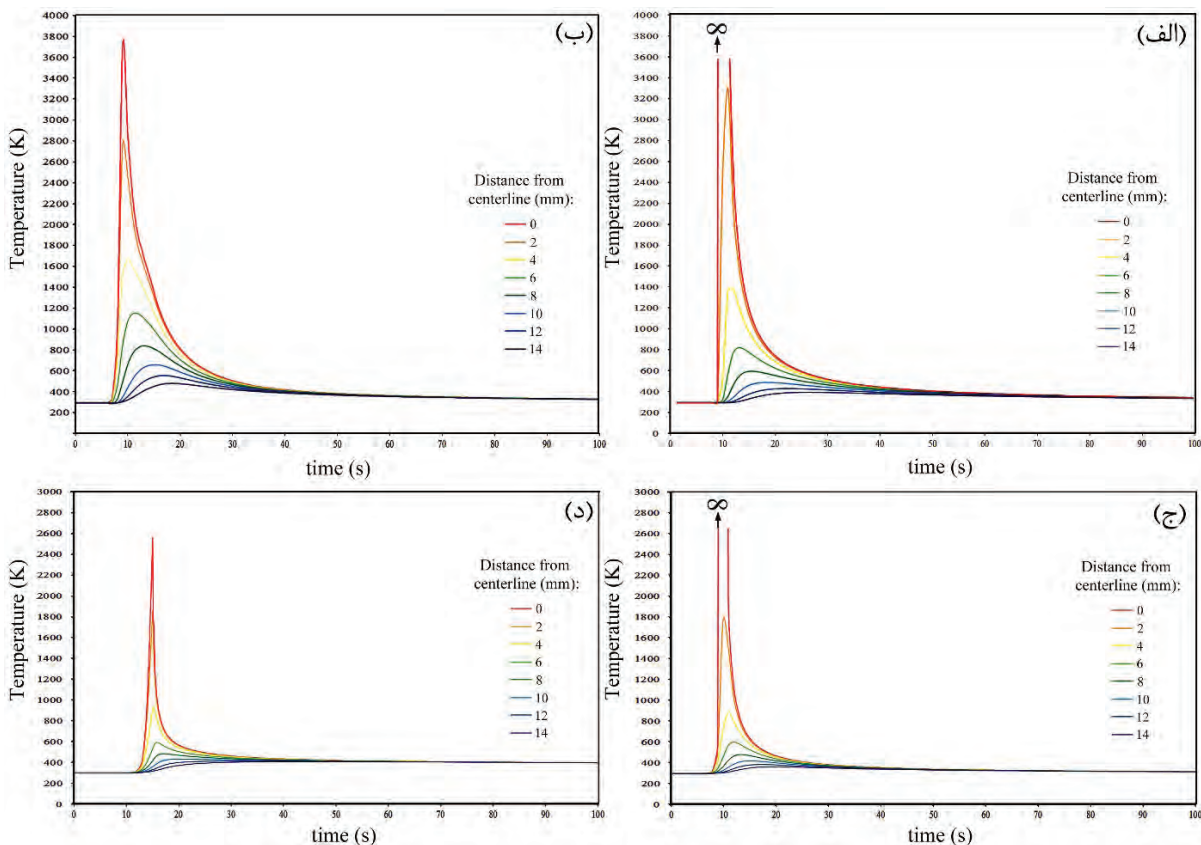
در رابطه فوق،  $d$  ضخامت ورق،  $\rho$  چگالی فلز پایه،  $C$  حرارت ویژه فلز پایه،  $H_{net}$  حرارت ورودی در واحد طول،  $T_0$  دمای اولیه و  $T_c$  دمایی است که نرخ سرد شدن از آن محاسبه می‌شود. در اینجا  $T_c$  برابر با  $1727 \text{ K}$  (دمای لیکوئیدوس فولاد ۳۰۴) در نظر گرفته شد. برای شرایط این تحقیق، مقدار  $\tau$  حدود  $0.24$  می‌شود و بنابراین ورق نازک محسوب می‌شود. با وجود این، نتایج مدل روزنتال برای ورق‌های نازک با واقعیت تفاوت زیادی دارد و علیرغم انتظار، مدل روزنتال سه‌بعدی نتایج واقعی تری تولید می‌کند.

منحنی‌های دما برحسب زمان در نقاطی با فواصل مختلف از خط مرکزی جوش در شکل ۲ نشان داده شده است. این منحنی‌ها امکان محاسبه سرعت گرم شدن و سرد شدن را در نقاط مختلف امکان‌پذیر می‌کنند. دستیابی به این منحنی‌ها برای محاسبه تغییرات فازی، رشد دانه‌ها و رسوبات اهمیت بسیاری دارد ولی روش‌های تجربی امکان اندازه‌گیری دما در همه نقاط به‌ویژه در داخل ماده را ندارد، بنابراین استفاده از شبیه‌سازی در این زمینه بسیار ضروری است. با توجه به



شکل ۱. اثر اندازه المان بر دمای حداکثر حاصل از شبیه‌سازی در فواصل مختلف از خط مرکزی نمونه ۱ (حرارت ورودی  $782 \text{ kJ/s}$  و نمونه ۲ (حرارت ورودی  $540 \text{ kJ/s}$ ).

جوش به سمت پایین ورق و هم در جهت جانبی خط جوش صورت می‌گیرد. اگر ضخامت نسبی ورق که یک کمیت بدون بعد است بزرگتر از  $0.9$  باشد، ورق را ضخیم در نظر می‌گیرند و هنگامی که کمتر از  $0.6$  باشد، ورق نازک است. محاسبه ضخامت نسبی ورق ( $\tau$ ) طبق رابطه زیر صورت می‌گیرد ( $20$ ):



شکل ۲. منحنی‌های دما-زمان نقاط با فواصل مختلف نسبت به خط مرکزی جوش حاصل از (الف) مدل روزنتال با حرارت ورودی  $782 \text{ kJ/s}$ ، (ب) شبیه‌سازی با حرارت ورودی  $782 \text{ kJ/s}$ ، (ج) مدل روزنتال با حرارت ورودی  $540 \text{ kJ/s}$  و (د) شبیه‌سازی با حرارت ورودی  $540 \text{ kJ/s}$ .

جدول ۱. مقایسه سرعت و زمان تقریبی سرد شدن بین دماهای ۸۰۰ تا ۵۰۰ °C در شبیه‌سازی و مدل روزنتال.

اختلاف شبیه‌سازی با روزنتال (%)	سرعت سرد شدن (°C/s)		$\Delta t_{8-5}$ (s)		فاصله از خط مرکزی (mm)	
	روزنتال	شبیه‌سازی	روزنتال	شبیه‌سازی		
۴/۸	۸۳/۵	۷۹/۶	۳/۵۹	۳/۷۷	۰	نمونه ۱ (حرارت ورودی ۷۸۲ kJ/s)
۷/۲	۸۳/۳	۷۷/۳	۳/۶۰	۳/۸۸	۲	
۲/۵	۷۸/۱	۷۶/۱	۳/۸۴	۳/۹۴	۴	
۲۴/۵	۲۰۹/۸	۲۷۷/۸	۱/۴۳	۱/۰۸	۰	نمونه ۲ (حرارت ورودی ۵۴۰ kJ/s)
۲۴/۳	۲۰۸/۳	۲۷۵/۲	۱/۴۴	۱/۰۹	۲	

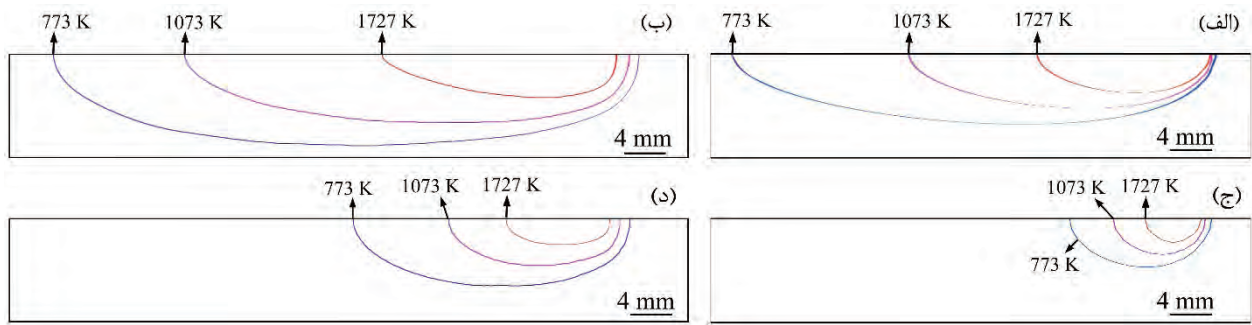
در این فولاد می‌باشند. تشکیل کاربید کروم در فولاد ۳۰۴ که غالباً در مرزخانه‌های آستنیت رخ می‌دهد منجر به کاهش کروم در مجاورت مرزخانه‌ها می‌شود؛ این پدیده به نام حساس شدن معروف است. عنصر کروم در این فولادها باعث تشکیل لایه محافظ می‌شود و کاهش آن باعث افزایش خوردگی می‌گردد (۲۴). حساس شدن علاوه بر ترکیب شیمیایی فولادهای آستنیتی زنگ‌نزن به سرعت سرد شدن در جوشکاری بستگی دارد (۲۵). در جلوی منبع حرارتی منحنی‌های هم‌دما به یکدیگر نزدیک هستند که نشان‌دهنده سرعت گرم شدن زیاد در جلوی منبع حرارتی است در حالی که در پشت منبع حرارتی، منحنی‌های هم‌دما فاصله بیشتری از یکدیگر پیدا می‌کنند که نشان‌دهنده سرعت کم سرد شدن این نواحی پس از عبور منبع حرارتی است. در شکل ۳ (ب) منحنی‌های هم‌دما در سطح ورق و در نزدیکی مرکز جوش حاصل از شبیه‌سازی آباکوس مربوط به نمونه ۱ نشان داده شده است. منحنی‌های هم‌دما برای همان دماهای فوق رسم شده‌اند. لازم به ذکر است که منحنی‌های هم‌دما در سطح زیرین ورق نیز مشابه سطح بالای است با این تفاوت که محدوده نواحی مذکور اندکی کوچک‌تر می‌شوند. همانطور که دیده می‌شود نتایج شبیه‌سازی آباکوس و مدل روزنتال مربوط به نمونه ۱ (شکل ۳ (الف) و (ب)) سه‌بعدی اختلافاتی در پیش‌بینی منحنی‌های هم‌دما دارند. از جمله طول نواحی تحت تأثیر دمای یکسان در شبیه‌سازی بیش از نواحی مدل روزنتال بوده و همچنین عرض ناحیه HAZ تخمین زده شده در شبیه‌سازی بیشتر از مدل روزنتال است. با وجود این، علیرغم این که ورق نازک انتخاب شده است و انتقال حرارت حول منبع حرارتی تقریباً به صورت دوبعدی است ولی نتایج مدل روزنتال دوبعدی با نتایج شبیه‌سازی آباکوس و مدل روزنتال سه‌بعدی بسیار تفاوت دارد. مدل روزنتال دوبعدی طول و عرض ناحیه جوش HAZ را بسیار بزرگ‌تر و دور از واقعیت تخمین می‌زند و به همین دلیل در اینجا ارائه نشده است.

منحنی‌های شکل ۲، می‌توان مشاهده کرد که شبیه‌سازی با استفاده از مدل بیضی دوگانه، سرعت گرم شدن زیادی برای نواحی نزدیک به مرکز جوش پیش‌بینی می‌کند همانطور که در تحقیقات تجربی گزارش شده است. در جوشکاری قوسی، سرعت گرم شدن در حدود چند صد و سرعت سرد شدن در حدود چند ده درجه سانتیگراد بر ثانیه (و حتی بیشتر) گزارش شده است (۲۱، ۲۲).

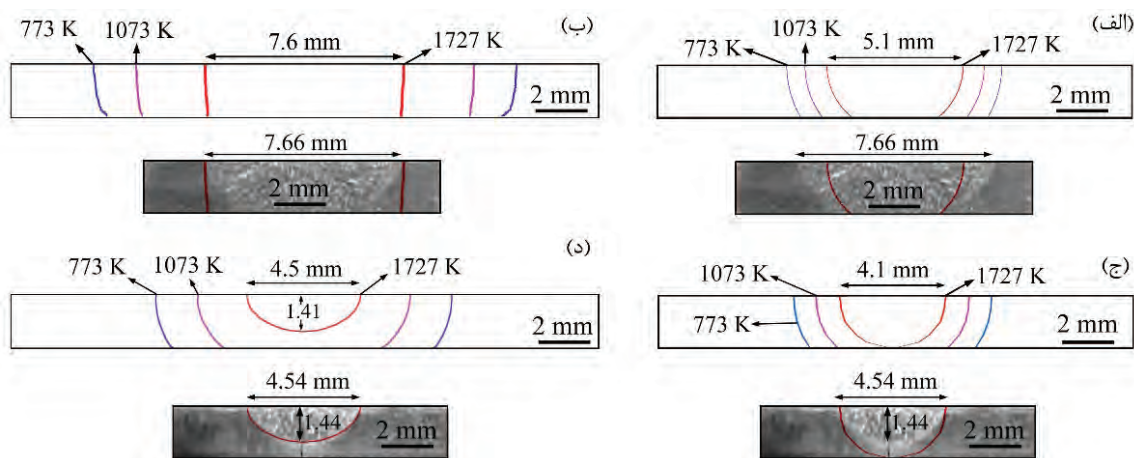
محاسبه زمان و سرعت سرد شدن جوش‌ها بین دماهای ۸۰۰ تا ۵۰۰ °C در فولادها اهمیت زیادی دارد (۲۳) که برای محاسبه آنها در شبیه‌سازی و مدل روزنتال می‌توان از منحنی‌های شکل ۲ برای نقاط مختلف جوش استفاده کرد. نتایج سرعت و زمان سرد شدن در محدوده دماهای مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود منحنی‌های دما-زمان شکل ۲ (الف) و (ب) از نظر پیش‌بینی حداکثر دما به‌ویژه در نقاط نزدیک به خط مرکزی جوش تفاوت نسبتاً قابل ملاحظه‌ای با هم دارند ولی از نظر سرعت و زمان تقریبی سرد شدن بین دماهای ۸۰۰ تا ۵۰۰ °C نتایج شبیه‌سازی و مدل روزنتال مربوط به نمونه ۱ بسیار به هم نزدیک هستند و اختلاف به کمتر از ۷/۲ درصد می‌رسد. در نمونه ۲ (شکل ۲ (ج) و (د)) اختلاف بین نتایج سرعت و زمان سرد شدن بین مدل روزنتال و شبیه‌سازی بیشتر بوده و حداکثر اختلاف در زمان سرد شدن حدود ۲۴/۵ درصد است.

### منحنی‌های هم‌دما در عرض و سطح ورق

در شکل ۳ داده‌های شبیه‌سازی آباکوس و مدل روزنتال نشان داده شده‌اند. در شکل ۳ (الف) نتایج مدل روزنتال برای جریان حرارت سه‌بعدی نیمه‌پایدار در قطعه نیمه‌بینه‌ای (بسیار بزرگ و ضخیم) دارای منبع حرارت متحرک ارائه شده است. منحنی‌های هم‌دما مربوط به دماهای ۷۷۳، ۱۰۷۳ و ۱۷۲۷ K هستند. دمای ۱۷۲۷ K دمای لیکوئیدوس فولاد ۳۰۴ و دماهای ۷۷۳ و ۱۰۷۳ K دماهای تقریبی تشکیل کاربید کروم



شکل ۳. منحنی‌های هم‌دما در سطح ورق حول مرکز منبع حرارتی در (الف) مدل روزنتال با حرارت ورودی ۷۸۲ kJ/s، (ب) شبیه‌سازی آباکوس با حرارت ورودی ۷۸۲ kJ/s، (ج) مدل روزنتال با حرارت ورودی ۵۴۰ kJ/s و (د) شبیه‌سازی آباکوس با حرارت ورودی ۵۴۰ kJ/s.



شکل ۴. منحنی‌های هم‌دما در مقطع عرضی ورق حول مرکز منبع حرارتی در (الف) مدل روزنتال با حرارت ورودی ۷۸۲ kJ/s، (ب) شبیه‌سازی آباکوس حرارت ورودی ۷۸۲ kJ/s، (ج) مدل روزنتال با حرارت ورودی ۵۴۰ kJ/s و (د) شبیه‌سازی آباکوس حرارت ورودی ۵۴۰ kJ/s. در زیر هر قسمت مقطع عرضی جوش‌ها برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی و روزنتال نشان داده است.

می‌توان ناشی از سرد شدن بیشتر ورق جوشکاری شده از سطح زیرین در تماس با میز کار دانست. در حرارت ورودی کمتر، مدل روزنتال حوضچه جوشی به عرض ۴/۱ و عمق ۲ mm پیش‌بینی می‌کند (شکل ۴ ج) در حالی که عرض و عمق جوش واقعی ۴/۵۴ و ۱/۴۴ mm اندازه‌گیری شده است. با این وجود، شبیه‌سازی نتایج بهتری ارائه می‌دهد و عرض و عمق جوش را در حدود ۴/۵ و ۱/۴۱ mm تخمین می‌زند که به نتایج تجربی بسیار نزدیک است.

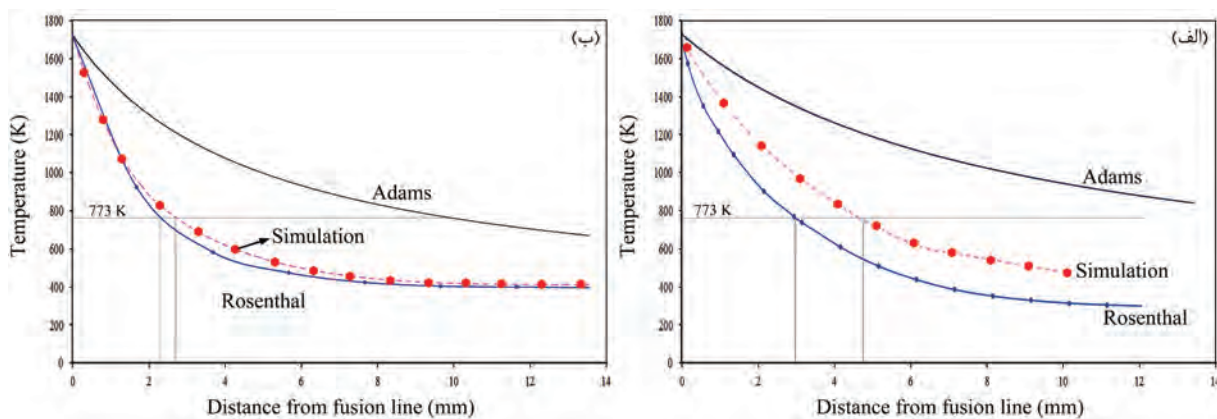
### دمای حداکثر

برای پیش‌بینی یا تفسیر تغییرات متالورژیکی در هر نقطه از ماده در نزدیکی حوضچه جوش به‌ویژه HAZ، دانستن دمای حداکثر در آن نقطه ضروری است. شکل ۵ (الف) نتایج مدل آدامز با حرارت ورودی یکسان با نمونه ۱ را نشان می‌دهد که دمای حداکثر را بر اساس فاصله از مرز ذوب مشخص می‌کند. در شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی و مدل روزنتال نیز دیده می‌شوند که جهت مقایسه با مدل آدامز اصلاح شده‌اند تا دمای حداکثر

شکل ۳ (ج) و (د) نتایج مدل روزنتال و شبیه‌سازی با حرارت ورودی یکسان با نمونه ۲ را نشان می‌دهد. در اینجا نیز مدل روزنتال حوضچه جوش کوچک‌تری نسبت به شبیه‌سازی تخمین می‌زند و نواحی تحت دمای بالاتر از ۷۷۳ K در پشت منبع حرارتی در راستای جوش را کوچک‌تر از شبیه‌سازی نشان می‌دهد ولی عرض نواحی تحت تأثیر حرارت تفاوت کمتری با یکدیگر دارند.

شکل ۴ منحنی‌های هم‌دما در مقطع عرضی ورق‌ها حاصل از شبیه‌سازی و مدل روزنتال را نشان می‌دهد. برای مقایسه با نتایج تجربی، مقطع عرضی جوش‌ها نیز در شکل ۴ اضافه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ (الف) مشاهده می‌شود عرض ناحیه ذوب و سایر نواحی در مدل روزنتال کمتر از واقعیت تخمین زده شده است. عرض جوش در مدل روزنتال ۵/۱ mm تخمین زده شده در حالی که عرض واقعی جوش ۷/۶۶ mm اندازه‌گیری شده است. عرض ناحیه ذوب در بالای حوضچه جوش در شبیه‌سازی (شکل ۴ ب)) بسیار نزدیک به مقدار واقعی است (۷/۶ mm) اگرچه در پایین ورق، شکل حوضچه واقعی با نتایج شبیه‌سازی تفاوت دارد. این تفاوت را





شکل ۵. حداکثر دما در ماده برحسب فاصله از مرز ذوب در شبیه‌سازی و مدل‌های روزنتال و آدامز: (الف) حرارت ورودی ۷۸۲ kJ/s و (ب) حرارت ورودی ۵۴۰ kJ/s.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق جوشکاری GTAW بر روی ورق‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در دو حرارت ورودی مختلف انجام شد و شبیه‌سازی دما به‌وسیله نرم‌افزار آباکوس انجام شد. نتایج شبیه‌سازی با مدل‌های تحلیلی روزنتال و آدامز و همچنین مقطع عرضی جوش‌ها مقایسه شد:

۱. منحنی‌های دما-زمان در شبیه‌سازی و مدل روزنتال در فواصل مختلف از خط مرکزی جوش، سرعت‌های گرم‌شدن و سردشدن و همچنین دمای حداکثر متفاوتی را پیش‌بینی می‌کنند؛ با وجود این، در محدوده دماهای ۸۰۰ تا ۵۰۰ °C اختلاف نسبی سرعت سرد شدن و زمان سرد شدن در شبیه‌سازی و مدل روزنتال با حرارت ورودی ۷۸۲ kJ/mm کمتر از ۷/۲٪ و با حرارت ورودی ۵۴۰ kJ/mm کمتر از ۵/۲۴٪ است.
۲. عرض و عمق جوش با حرارت ورودی ۷۸۲ kJ/mm به ترتیب ۷/۶۶ و ۲ mm است. مدل روزنتال این مقادیر را ۵/۱ و ۲ mm تخمین می‌زند در حالی که شبیه‌سازی مقادیر ۷/۶ و ۲ mm پیش‌بینی می‌کند که به واقعیت بسیار نزدیک است. در نمونه با حرارت ورودی ۵۴۰ kJ/mm مقدار عرض و عمق جوش به ترتیب ۴/۵۴ و ۱/۴۴ mm اندازه‌گیری شد. مدل روزنتال مقادیر مذکور را ۴/۱ و ۲ mm نشان می‌دهد ولی شبیه‌سازی مقادیر صحیح‌تر ۴/۵ و ۱/۴۱ mm را پیش‌بینی می‌کند.
۳. دمای حداکثر پیش‌بینی شده برای نواحی دورتر از مرز ذوب در مدل آدامز بیشتر از شبیه‌سازی و مدل روزنتال است. دماهای پیش‌بینی شده بین مدل روزنتال و شبیه‌سازی به یکدیگر نزدیک‌تر هستند به‌ویژه در نمونه با حرارت ورودی ۷۸۲ kJ/mm.
۴. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نتایج شبیه‌سازی در تخمین اندازه حوضچه جوش از مدل روزنتال بسیار صحیح‌تر است.

را بر اساس فاصله از مرز ذوب نشان دهند. همان‌طور که دیده می‌شود دمای حداکثر تخمین زده شده توسط مدل آدامز بالاتر از شبیه‌سازی و مدل روزنتال بوده و بنابراین ناحیه HAZ پیش‌بینی شده توسط این مدل بیش از دو روش دیگر است. نتایج شبیه‌سازی و مدل روزنتال به یکدیگر نزدیک‌تر و از مدل آدامز دورتر هستند. طبق مدل آدامز نواحی‌ای با فاصله بیش از ۱۴ mm دورتر از مرز ذوب نیز دمای بالاتر از ۷۷۳ K را تجربه می‌کنند اما این مقدار برای شبیه‌سازی در حدود ۴/۷ mm و در مدل روزنتال در حدود ۳ mm است. در شکل ۵ (ب) نتایج مدل‌های آدامز و روزنتال و شبیه‌سازی با حرارت ورودی ۵۴۰ kJ/s ارائه شده‌اند. مشابه شکل (الف) در اینجا نیز مدل آدامز دمای حداکثر بیشتری در نقاط دورتر از مرز ذوب نسبت به شبیه‌سازی و مدل روزنتال پیش‌بینی می‌کند. نتایج شبیه‌سازی و مدل روزنتال در اینجا بسیار به یکدیگر نزدیک است. عرض نواحی دورتر از مرز ذوب در معرض دماهای بیش از ۷۷۳ K در شبیه‌سازی و مدل روزنتال به ترتیب ۲/۷ و ۲/۳ mm پیش‌بینی شده در حالی که مدل آدامز این مقدار را در حدود ۱۰ mm تخمین می‌زند.

با توجه به اختلاف نتایج شبیه‌سازی و مدل‌های تحلیلی، نیاز به تأیید بیشتر نتایج به وسیله اندازه‌گیری منحنی‌های دما-زمان در نقاط مختلف قطعه می‌باشد. اگرچه این کار از نظر عملی برای تمامی نقاط به ویژه در داخل حوضچه جوش ممکن نیست. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی برای پیش‌بینی میدان دما در جوشکاری از مدل روزنتال قدرتمندتر بوده ولی هزینه محاسبات در شبیه‌سازی بیشتر است. لازم به ذکر است که تعیین برخی پارامترها از جمله پارامترهای مربوط به هندسه بیضی دوگانه و ضریب بازدهی قوس الکتریکی نیز در شبیه‌سازی اهمیت دارد و منجر به نتایج صحیح‌تر خواهد شد. همچنین استفاده و یا توسعه مدل‌های پیچیده‌تر و مدل‌های نیمه‌تحلیلی می‌تواند هزینه محاسبات مربوط به شبیه‌سازی را کاهش دهد و در بهبود پیش‌بینی میدان دما در جوشکاری مؤثر باشد.

## References

- [1] Pittner A, Weiss D, Schwenk C, Rethmeier M. Fast Temperature Field Generation For Welding Simulation and Reduction Of Experimental Effort. *Welding in the World*. 2011;55(9):83-90.
- [2] Venkateswarlu K, P Nanda K, RaviKumar PS. Finite Element Simulation of Temperature Distribution, Distortion and Residual Stresses of Dissimilar Welded Joints. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5:11933-40.
- [3] Perret W, Schwenk C, Rethmeier M. Comparison of analytical and numerical welding temperature field calculation. *Computational Materials Science*. 2010;47:1005-15.
- [4] Nithiarasu P, Lewis RW, Seetharamu KN. *Fundamentals of the finite element method for heat and mass transfer*. United Kingdom: John Wiley & Sons; 2016.
- [5] Ismail MIS, Afieq WMA. Thermal Analysis on a Weld Joint of Aluminium Alloy in Gas Metal Arc Welding. *Advances in Production Engineering & Management*. 2016;11:29-37.
- [6] Bergheau JM, Fortunier R. *Finite Element Simulation of Heat Transfer*. New Jersey: Wiley; 2008.
- [7] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. *Metallurgical Transactions B*. 1984;15B:299-305.
- [8] Goldak JA, Akhlaghi M. *Computational Welding Mechanics*. Boston, MA: Springer; 2005.
- [9] Tafarroj MM, Kolahan F. A comparative study on the performance of artificial neural networks and regression models in modeling the heat source model parameters in GTA welding. *Fusion Engineering and Design*. 2018;131:11-118.
- [10] Zubairuddin M, Albert SK, Vasudevan M, Mahadevan S, Chaudhari V, Suri VK. Numerical simulation of multi-pass GTA welding of grade 91 steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;27:87-97.
- [11] Velaga SK, Ravisankar A. Finite element based parametric study on the characterization of weld process moving heat source parameters in austenitic stainless steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2017;157:63-73.
- [12] Zhang M, Zhou Y, Huang C, Chu Q, Zhang W, Li J. Simulation of Temperature Distribution and Microstructure Evolution in the Molten Pool of GTAW Ti-6Al-4V Alloy. *Materials*. 2018, 1-16.
- [13] Yadaiah N, Bag S. Development of egg-configuration heat source model in numerical simulation of autogenous fusion welding process. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014;86:125-38.
- [14] Kou S. *Welding Metallurgy*. Second Edition ed. New Jersey: Wiley; 2003.
- [15] Zhu XK, Chao YJ. Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation. *Computers & Structures*. 2002;80:967-76.
- [16] Valencia JJ, Quedest PN. Thermophysical Properties. In: Stefanescu DM, editor. *ASM Handbook*. 15. United States of America: ASM International; 2008. p. 468-81.
- [17] Mills KC, Li YSZ, Brooks RF. Equations for the Calculation of the Thermo-physical Properties of Stainless Steel. *ISIJ International*. 2004;44(10):1661-8.
- [18] Abaqus 6.14 User Subroutines, Reference Guide: DFLUX User subroutine to define nonuniform distributed flux in a heat transfer or mass diffusion analysis.
- [19] Yeh RH, Liaw SP, Yu HB. Thermal analysis of welding on aluminum plates. *Journal of Marine Science and Technology*. 2003;11(4): 20-13.
- [20] *Welding science and technology*. In: Jenney CL, O'Brien A, editors. *AWS welding handbook*. 1. United States of America: American Welding Society; 2001. p. 87-112.
- [21] Poorhaydari K, Patchett BM, Ivey DG. Estimation of Cooling Rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness. *Welding Journal*. 2005;October:149-s-55-s.
- [22] Zhang Y, Ma TJ, Xie HX, Tan YM, Li PY. Estimating the Cooling Rates of a Spot Welding Nugget in Stainless Steel. *Welding Journal*. 2012;91:247s-51s.
- [23] Arora A, Roy GG, DebRoy T. Cooling rate in 800 to 500 oC range from dimensional analysis. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2010;15(5):423-7.
- [24] Lippold JC, Kotecki DJ. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*: Wiley-VCH; 2005.
- [25] Suresh G, Parida PK, Bandi S, Ningshen S. Effect of carbon content on the low temperature sensitization of 304L SS and its corrosion resistance in simulated ground water. *Materials Chemistry and Physics*. 2019;226:184-94.