



## بررسی المان محدود توزیع دما و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری تیگ پوسته کروی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V

سعید شاخصی<sup>۱\*</sup>، یاسین نظری<sup>۲</sup>، احمد حاتمی<sup>۱</sup>، محمد نوقابی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه فضای ایران، تهران

۲- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران

۳- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه فضای ایران، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۱۳۴۴۵-۷۵۴، s.shakhesi@isrc.ac.ir

### چکیده

ایجاد تنش‌های پسماند و اعوجاج از مهمترین موارد جوشکاری می‌باشد که تعیین مقادیر و توزیع آن‌ها اهمیت زیادی در طراحی سازه‌ها به خصوص در صنایع فضایی دارد. در این تحقیق، از روش المان محدود برای تحلیل رفتار حرارتی - مکانیکی ناشی از جوشکاری تیگ پوسته کروی استفاده شده است. پوسته کروی مورد مطالعه از جنس آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) و با ضخامت 2 میلی‌متر بوده است. مدل سازی فرایند جوشکاری، به صورت کوبیل غیرمستقیم حرارتی - مکانیکی صورت گرفت. جوشکاری تیگ براساس تغییرات مشخصه‌های شدت جریان و سرعت پیش روی جوش و در شش حالت مختلف بررسی شد و مقدار ولتاژ در همه حالت‌ها برابر با 12 ولت در نظر گرفته شد. توزیع دما، تنش‌های پسماند و اعوجاج ناشی از جوشکاری تیگ پوسته کروی تیتانیومی برای شش حالت مختلف جوشکاری استخراج و با یکدیگر مقایسه گردید. تأثیر مشخصه‌های شدت جوشکاری و سرعت جوشکاری بر اعوجاج و تنش‌های پسماند جوشکاری بررسی گردید. نتایج نشان داد که افزایش شدت جریان و کاهش سرعت پیش روی بیشترین تأثیر را روی تنش پسماند محیطی طولی دارد که میزان افزایش این تنش حداقل به ۴۴٪ برای کاهش سرعت پیش روی گردید. اعوجاج ناشی از جوشکاری نیز با افزایش شدت جریان و کاهش سرعت پیش روی حداقل مقدار ۱۳۲٪ افزایش را نشان داد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۴ شهریور ۱۳۹۵

پذیرش: ۳۱ شهریور ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۰۱ آبان ۱۳۹۵

کلید واژگان:

آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V)

جوشکاری تیگ

تنش‌های پسماند

روش المان محدود

پوسته کروی

## Temperature and Residual Stresses Distribution due to TIG Welding of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Spherical Shell by Finite Element Analysis

Saeid Shakhesi<sup>1\*</sup>, Yasin Nazari<sup>2</sup>, Ahmad Hatami<sup>1</sup>, Mohammad Noghabi<sup>3</sup>

1-Department of System Eng., Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

2- Aerospace Research Institute, Tehran, Iran.

3- Department of System Eng., Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

\*P.O.B. 13445-754, Tehran, Iran, s.shakhesi@isrc.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 04 September 2016

Accepted 21 September 2016

Available Online 22 October 2016

Keywords:

Titanium alloy (Ti-6Al-4V)

TIG welding

Residual stresses

Finite element method

Spherical shell

### ABSTRACT

ual stresses and distortion are of the main disadvantages of welding process which determining the amount and distribution of them have great importance in the design of structures, especially in the space industry. In this study, a finite element method is used to analyze the thermo-mechanical behavior of a spherical shell due to TIG welding. The spherical shell is made of titanium alloy (Ti-6Al-4V) with 2 mm thickness. The modeling of welding process is based on an uncoupled thermo-mechanical coupling. TIG welding is examined for six cases based on current intensity and welding progress speed setting the voltage on 12 V in all cases. Distribution of temperature and residual stresses caused by TIG welding of the titanium spherical shell have been extracted and compared among the six different cases. The effects of current intensity and welding progress speed on shell distortion and residual stress have been investigated. The results showed that increasing the current intensity and decreasing the welding progress speed have the most effects on longitudinal residual stresses which the amount of this increasing reached to %44 for decreasing the welding progress speed. Welding distortion increases to maximum %132 by increasing current and decreasing welding progress speed.

وجود مزایای قابل توجه، توزیع دما و ایجاد تنش‌های پسماند و اعوجاج حاصل از آن امری اختناب‌نایدیر، و تعیین مقادیر و شکل توزیع آن در طراحی سازه‌ها، خصوصاً سازه‌های فضایی از اهمیت بالایی برخوردار است. تیتانیوم و آلیاژهای آن با خواص منحصر به‌فردی مانند مقاومت به خوردگی و خستگی عالی، نسبت استحکام به وزن بالا و چرمگی خوب در صنایع هوافضا به عنوان

استفاده از مخازن کروی به عنوان مخازن سوت و اکسنده و همچنین مخازن‌های فضایی در صنایع هوافضا کاربرد گسترده‌ای دارد. برای ساخت مخازن کروی جدار نازک، از فرایند جوشکاری که متداول‌ترین و موثرترین روش اتصال قطعات مختلف به یکدیگر است، استفاده می‌شود. در این روش با

### ۱- مقدمه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. Shakhesi, Y. Nazari, A. Hatami, M. Noghabi, Temperature and Residual Stresses Distribution due to TIG Welding of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Spherical Shell by Finite Element Analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 143-153, 2016 (in Persian)

ترموالاستوپلاستیک پیش‌بینی و با روش انکسار اشعه ایکس به صورت عددی و تجربی مقایسه شده و نشان داده شده است که ماکریم م تنش پسماند کششی در حالت شیاردار U کمتر از حالت شیاردار V شکل است [6]. اکبری و ستاری فرنز اثر جوش کاری دو نوع فولاد را به صورت المان محدود بررسی کردند، که تنش پسماند در محل جوش بیشتر از تنش تسخیم فلز پایه تعیین گردید و همچنین تغییر میزان حرارت ورودی تاثیر چندانی بر حداکثر تنش پسماند نداشت [7]. ون‌یالی و همکاران در مقاله‌ای جوش اصطکاکی تیتانیوم را با استفاده از یک مدل ترمومکانیکی دو بعدی به صورت المان محدود بررسی کردند. نتایج این مقاله نشان داد که گرادیان دما در محل اتصال بسیار بالا بوده و دما در کمتر از یک ثانیه به مقدار 1000 درجه سانتیگراد می‌رسد. این اختلاف دمای بین مرکز جوش کاری و لبه کار موجب ایجاد اعوجاج در سازه گردید [8]. از طرفی تنش پسماند داخلی در جوش کاری اصطکاکی صفحات تیتانیوم با استفاده از روش کانتور توسط لیو و دانگ بررسی شد که نشان می‌دهد حداکثر تنش پسماند کششی در مرکز خط جوش قرار دارد و این تنش در راستای ضخامت یکنواخت نبوده و سطوح بالا و پایین از تنش کمتری نسبت به سطح داخلی برخوردار است [9]. لسینوسکی و آمبروزیاک هم در طی مطالعه‌ای جوش کاری اصطکاکی تیتانیوم-تنگستن را با روش المان محدود بررسی نمودند. در این مطالعه از تحلیل ترمومکانیک کوپل و همچنین مدل جانسون برای تعریف مواد استفاده شده است. بر طبق نتایج این مطالعه در ابتدا اختلاف دمای بسیاری در توزیع شعاعی دیده شده است که این اختلاف در طول فرآیند کمتر می‌شود [10].

با بررسی منابع مشخص شد که در گذشته کارهای زیادی بر روی جوش کاری ورق‌ها و تا حدودی لوله استوانه‌ای انجام شده است، که عمدتاً از جنس فولاد بوده است. در این مطالعه، به بررسی توزیع دما، تنش‌های پسماند و اعوجاج ناشی از جوش کاری تیگ در یک مخزن کروی از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V در هندسه کره و با شعاع، ضخامت، فشار و شرایط دمایی مشخص پراخته شده است.

## 2- توری حاکم بر مسئله

### 2-1- تحلیل حرارتی

برای تحلیل حرارتی قطعه در زمان جوشکاری، قطعه را می‌توان به صورت یک حجم محدود با سطح S در نظر گرفت. طبق اصل بقای انرژی، معادله انتقال حرارت برای حجم مزد کرو را می‌توان به صورت معادله (1) نوشت [11]:

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

که در آن،  $\bar{q}$  بردار شار حرارتی وارد بر سطح،  $Q$  مقدار گرمای ناشی از منبع داخلی،  $C$  چگالی،  $\rho$  ظرفیت گرمای ویژه و  $T$  دمای قطعه در هر لحظه می‌باشد. قانون فوریه برای شار حرارتی به صورت معادله (2) است:

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

با جای‌گذاری معادله (2) در معادله (1) و پس از ساده‌سازی، رابطه زیر حاصل می‌شود [12,11]:

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

این رابطه یک معادله غیرخطی است و برای حل نیاز به شرایط مزدی و اولیه دارد. شرایطی که می‌توان برای معادله (3) در نظر گرفت عبارتند از:

دماهی اولیه قطعه قبل از شروع جوش کاری، برابر با دمای محیط می‌باشد. به عبارت دیگر [11]:

یک ماده استراتژیک در بدنه و موتور هواپیماها و سفینه‌های فضایی کاربرد گسترده‌ای دارند [1]. چنان‌چه عناصر آلیاژی پایدار‌کننده فاز آلفا و فاز بتا در آلیاژ وجود داشته باشند، منجر به تولید ساختار دوفازی می‌گردد، که این آلیاژ را Ti-6Al-4V می‌نامند. در این آلیاژ وجود حدود 6 درصد آلومینیوم منجر به پایداری فاز آلفا و 4 درصد وانادیوم باعث پایداری فاز بتا می‌شود [2]. جوش کاری مخازن کروی دستورالعمل‌های خاصی دارد و تقسیم نامزون تنش‌های حرارتی و تنش‌های پسماند جوش کاری باعث به هم خوردن اتصال سایر قسمت‌ها و حتی ایجاد ترک در بعضی از قسمت‌های جوش شده، می‌گردد. همان‌گونه که در جدول 1 مشاهده می‌شود، جوش کاری تیتانیوم و آلیاژهای آن به روش‌های مختلفی از جمله جوش کاری قوس الکتریکی تنگستن با گاز خنثی<sup>1</sup> (تیگ)، جوش کاری قوس الکتریکی فلزی با گاز خنثی<sup>2</sup>، جوش کاری قوس الکتریکی پلاسما<sup>3</sup> و در نهایت جوش کاری باریکه الکترونی<sup>4</sup> انجام می‌پذیرد [3].

یکی از معایب جوش کاری ایجاد تنش‌های پسماند و اعوجاج است. تنش‌های پسماندی که در اثر جوش کاری ایجاد شده است، در شرایط عملی بسیار مهم و قابل توجه هستند. این تنش‌ها گاهی ممکن است بیشتر از حد الاستیک شده و سبب تغییر شکل پلاستیک شود. تنش پسماند باعث تغییر خواص مکانیکی ماده شده و سبب می‌شود که ماده به ترک حساس شود [3]. در این زمینه مطالعات عددی و تجربی زیادی صورت گرفته است. ومانابوینا و همکاران در مطالعه‌ای یک مدل شار حرارتی استوانه‌ای برای شبیه‌سازی فرآیند جوش کاری ورق فولاد SUS304 ارائه کرده‌اند که این مدل نسبت به مدل گاووسی دارای دقت بیشتری است. از نتایج این مقاله در مطالعات پارامتریک برای کاهش اعوجاج در سازه استفاده شده است [4]. در تحقیق دیگری یک روش المان محدود براساس نرمافزار Quick Welder برای شبیه‌سازی میدان دمایی و توزیع تنش پسماند در لوله‌های SUS304 توسط دنگ و کیوشیما ارائه شده است، که نتایج نشان می‌دهد تنش‌های محوری و شعاعی در نزدیکی محل ابتدا و انتهای جوش دارای گرادیان شدیدی بوده و به طور محسوسی با محدوده پایایی جوش کاری متفاوت است [5]. همچنین اثر هندسی جوش بر توزیع تنش پسماند توسط اکبری موسوی و میراسماعیلی روی این نوع فولاد توسط یک تحلیل سه بعدی و با استفاده از معادلات بقای

جدول 1 مشخصات روش‌های جوش کاری مورد استفاده برای آلیاژهای تیتانیوم [3]

Table 1 Specification of welding methods used for titanium alloys [3]

GTAW	GMAW	PAW	EB	حال
محده‌ده ضخامت (اینج)	تا 3 اینچ			
1/32-1/4	1/4-3	1/8-3/8		
سهولت جوش کاری	علی	خوب	خوب	خوب
نیاز به شیار برای اتصال	همیشه	خیر	خیر	غالبا
اتوماتیک با دستی	اتوماتیک	هر دو	هر دو	هر دو
خواص مکانیکی	نسبتاً خوب	علی	علی	نسبتاً خوب
کیفیت اتصال	علی	علی	علی	علی
هزینه تجهیزات	بالا	در حد	در حد	بالا
نیاز به فیلر	همیشه	گاه‌گاهی	خوب	متوسط
اعوجاج	بالا	بالا	بالا	بالا
	پایین	پایین	پایین	پایین

<sup>1</sup> Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

<sup>2</sup> Gas Metal Arc Welding (GMAW)

<sup>3</sup> Plasma Arc Welding (PAW)

<sup>4</sup> Electron Beam (EB)

برای یک ماده همسانگرد تنش و کرنش طبق رابطه (12) به یکدیگر وابسته است [15,11].

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}^e (\varepsilon_{ij}^e - \varepsilon_{ij}^p - \varepsilon_{ij}^{th}) \quad (12)$$

که در آن  $C_{ijkl}^e$  ماتریس سفتی الاستیک ماده می‌باشد. همان‌طور که مشخص است برای به دست آوردن تنش باید کرنش‌های موردنظر به دست آورده باشد. برای این منظور باید خواص مکانیکی از جمله نسبت پواسون، مدول الاستیک، خواص پلاستیک و ضریب انبساط حرارتی وارد تحلیل گردد.

### 3- شبیه‌سازی المان محدود

#### 1-3 - مدل‌سازی

برای ساخت کره از جوش کاری دو نیم که به صورت لب به لب به یکدیگر استفاده شده است. به دلیل تقارن کره و برای کاهش زمان محاسبات، مدل مورد مطالعه در این تحقیق نیم‌کره‌ای به قطر خارجی 600 میلی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر خواهد بود.

جنس مدل از آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V می‌باشد. لذا با توجه به این‌که خواص متالورژیکی مواد با تغییرات دما، تغییر می‌کنند، به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر نیاز است که، خواص مناسب با دمای ماده مورد استفاده قرار بگیرد. از بین این خواص استحکام تسلیم و مدول الاستیسیته بیشترین تاثیر را دارا هستند. سایر خواص تاثیر شدیدی بر روی نتایج مدل‌سازی ندارند [18]. خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) براساس استاندارد ASM در دماهای مختلف، در "شکل‌های 1 و 2" نشان داده شده است [19]. مدل‌سازی المان محدود توانایی پیش‌بینی توزیع دما و تنش پسماند ناشی از فرایند جوش کاری تیگ را با دقت بالا دارد. در این تحقیق مدل‌سازی به صورت کوبیل غیرمستقیم حرارتی - مکانیکی انجام شده است. این مدل‌سازی شامل یک تحلیل حرارتی و یک تحلیل مکانیکی موردنظر است که نتایج تحلیل حرارتی به عنوان ورودی برای تحلیل مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد که این کار موجب کاهش زمان لازم جهت مدل‌سازی می‌گردد [20].

مشبندی مدل که در "شکل 3" مشاهده می‌شود پس از انجام آنالیز حساسیت مش بدست آمده است، که شامل حدود 22000 المان از نوع المان C3D8 می‌باشد. همچنین در خط جوش و منطقه نزدیک به خط جوش از مش‌بندی ریزتری استفاده می‌شود. از طرفی مش‌بندی هر دو تحلیل یکسان

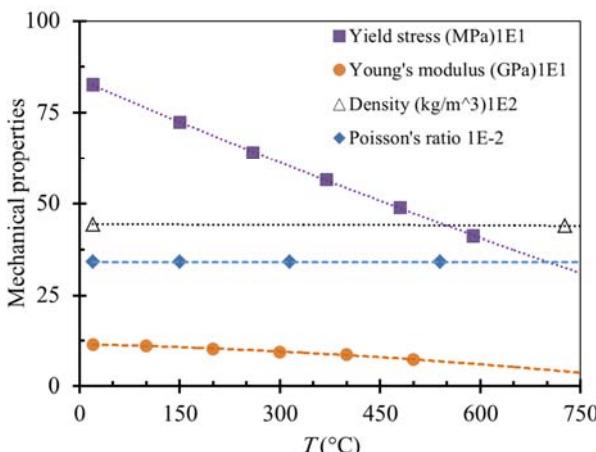


Fig.1 Mechanical properties of titanium alloy (Ti-6Al-4V) at different temperatures [19]

شکل ۱ خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) در دماهای مختلف [19]

$$T = T_\infty \quad t = 0 \quad (4)$$

معادله‌ای که برای شار حرارتی روی سطح قطعه در نظر گرفته شده، با توجه به توزیع گلداک [13] به دست آمده است (معادلات 5 و 6):

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}\eta Q f_f}{\pi\sqrt{\pi abc}} \exp\left\{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right\} \quad (5)$$

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}\eta Q f_r}{\pi\sqrt{\pi abc}} \exp\left\{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right\} \quad (6)$$

که در آن،  $q_f$  و  $q_r$  مقدار شار حرارتی است که حین فرایند جوش کاری بر واحد سطح قطعه در نیمه جلویی و پشتی توزیع می‌شود.  $a$ ,  $b$  و  $c$  ثابت‌های ابعادی مدل گلداک بوده و به ترتیب برابر نصف عرض منبع حرارتی، عمق منبع حرارتی و نصف طول نیم بیضی می‌باشد.  $f_f$  و  $f_r$  به ترتیب ضریب توزیع حرارت در نیمه جلویی و پشتی می‌باشد که رابطه آن‌ها به صورت معادله (7) است [14,13].

$$f_f + f_r = 2 \quad (7)$$

مقدار گرمای ورودی است که برابر  $Q = VI$  می‌باشد.  $V$  ولتاژ و  $I$  شدت جریان جوش کاری است.  $\eta$  ضریب بازدهی جوش کاری است و مقدار آن بسته به نوع جوش کاری به صورت تجربی به دست می‌آید، که این مقدار برای جوش کاری تیگ برابر با 0.7 است [16,15].

با توجه به تماس سطح قطعه با هوای اطراف، انتقال حرارت از طریق جابجایی نیز صورت می‌گیرد. این تبادل حرارتی برای تمام سطوح حجم مرزی وجود دارد، به جز سطوحی که به هم جوش داده می‌شوند. از طرفی، حرارت ناشی از تشعشع قوس الکتریکی به صورت انتقال حرارت تابشی را نیز می‌توان برای تمامی سطوح در نظر گرفت. بر این اساس، معادلاتی که می‌توان برای این دو نوع انتقال حرارت نوشت عبارتند از (معادلات 8 و 9) [1.11.11].

$$q_c = h_c(T - T_\infty) \quad (8) \quad \text{برای انتقال حرارت جابجایی}$$

$$q_r = h_r(T - T_r) \quad (9) \quad \text{برای انتقال حرارت تشعشع}$$

$h_r = \sigma \epsilon F (T^2 + T_r^2) (T + T_r)$  که در آن‌ها،  $q_c$  گرمای منتقل شده از طریق جابجایی،  $h_c$  ضریب انتقال حرارت جابجایی،  $T_\infty$  دمای محیط اطراف،  $q_r$  گرمای منتقل شده از طریق تشعشع،  $h_r$  ضریب انتقال حرارت تشعشع،  $T_r$  دمای منبع تشعشع،  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن،  $\epsilon$  ضریب صدور و  $F$  ضریب شکل یا فاکتور سطح می‌باشد.

بنابراین، معادله شرط مرزی را می‌توان به صورت رابطه (10) نوشت [11]:

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = -q_c, \quad -K \frac{\partial T}{\partial n} = -q_r \quad (10)$$

معادله انتقال حرارت جوش کاری را می‌توان با شرایط مرزی مذکور و استفاده از روش‌های حل عددی حل کرد. کافی است برای تحلیل حرارتی و رسیدن به توزیع دما، شرایط مرزی ذکر شده تعریف شوند و اطلاعاتی از قبیل خصوصیات فیزیکی ماده که وابسته به دما هستند نیز مشخص شوند.

#### 2- تحلیل مکانیکی

در تحلیل مکانیکی الاستیک - پلاستیک، کرنش کل از رابطه زیر به دست می‌آید [15,11]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{th} \quad (11)$$

که در آن  $\varepsilon_{ij}^e$  کرنش الاستیک،  $\varepsilon_{ij}^p$  کرنش پلاستیک و  $\varepsilon_{ij}^{th}$  کرنش حرارتی می‌باشد.

برای مدل سازی جوش کاری تیگ مشخصه‌های اساسی که مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: شدت جریان، ولتاژ و سرعت پیش روی جوش، که این مشخصه‌ها برای تیتانیوم و آلیاژهای آن براساس ضخامت‌های مختلف مشخص می‌شود، و به یکدیگر وابسته هستند [21,3]. در این تحقیق براساس بازه تعريف شده برای مشخصه‌های جوش کاری تیگ، شش حالت برای جوش کاری آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) در نظر گرفته شده است، که مقدار ولتاژ در همه حالت‌ها برابر 12 ولت خواهد بود. نتایج حاصل از این شش حالت بر اساس توزیع دما، تنش‌های پسماند و اعوجاج استخراج و با یکدیگر مقایسه شده است. خصوصیات منبع حرارتی جوش کاری در جدول 2 نشان داده شده است.

### 3- اعتبار سنجی

به علت عدم وجود مقالاتی که شامل اطلاعات و پارامترهای کامل برای شبیه‌سازی (خواص ماده، هندسه کروی و ...) باشد، اعتبار سنجی تنها برای یک مقاله موجود [22] انجام گرفته شده است. در این مقاله جوش کاری تیگ برای یک لوله استوانه‌ای از جنس فولاد زنگ نزن انجام شده است. مدل سازی المان محدود برای این استوانه انجام شد و نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی این مقاله مورد مقایسه قرار گرفت. همان‌طور که در "شکل‌های 5 و 6" مشخص است نتایج تطابق خوبی با مدل مرجع دارد. این تطابق نشان‌دهنده صحت و اعتبار اصول مدل سازی فرآیند جوش کاری است و می‌توان برای هندسه کروی نیز با اطمینان از نتایج آن شبیه‌سازی را انجام داد و به نتایج آن استناد نمود.

جدول 2 خصوصیات منبع حرارتی جوش کاری

Table 2 Characteristics of welding heat source

گرمای ورودی مخصوص (J/mm)	سرعت پیش روی (mm/Min)	شدت جریان (A)	(V)	شماره حالت
127.3	400	100	12	1
152.7	400	120	12	2
178.2	400	140	12	3
168	300	100	12	4
201.6	300	120	12	5
235.2	300	140	12	6

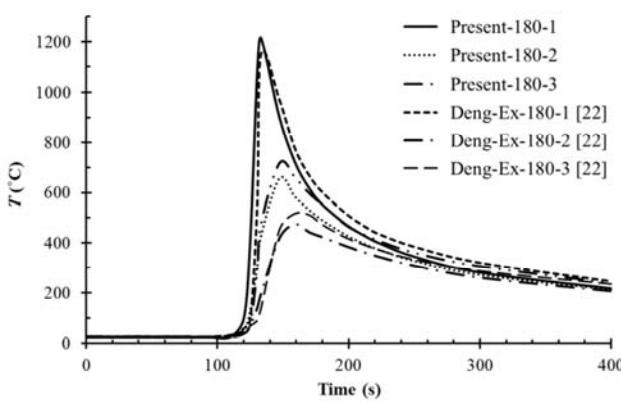
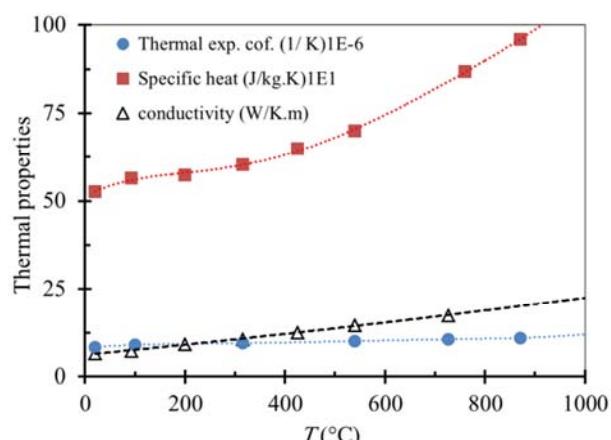


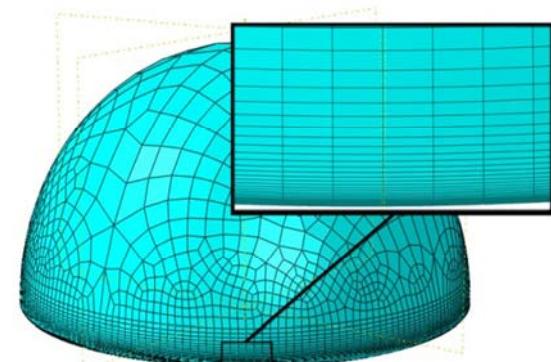
Fig. 5 Comparing thermal Analysis results of the present study with experimental results [22]

شکل 5 مقایسه نتایج تحلیل حرارتی حاصل از شبیه‌سازی این تحقیق با نتایج تجربی [22]



شکل 2 خواص حرارتی آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) در دمای‌های مختلف [19]

[19] شکل 2 خواص حرارتی آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) در دمای‌های مختلف [19]



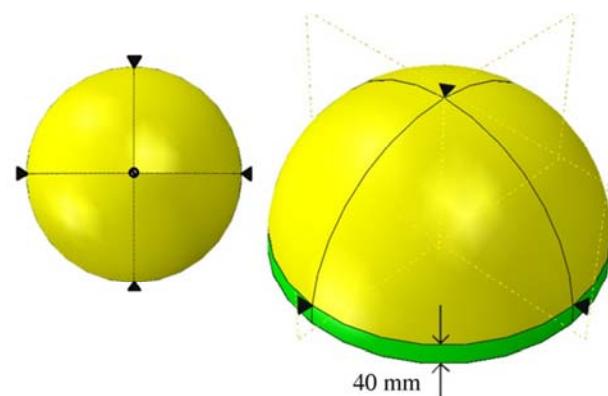
شکل 3 مدلینگ

شکل 3 مشبندی مدل

است، تا نتایج تحلیل حرارتی به عنوان ورودی برای تحلیل مکانیکی قبل اعمال باشند.

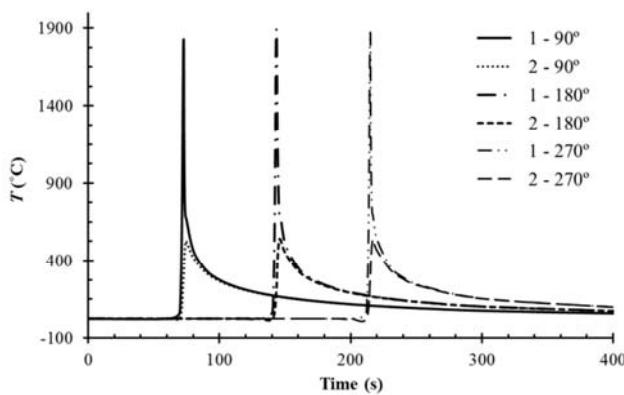
برای مدل سازی منبع حرارت جوش کاری که به صورت متحرک می‌باشد، زیر برنامه‌ای در زبان برنامه نویسی فرترن نوشته شده است.

مطابق "شکل 4" در تحلیل مکانیکی، مدل از پنج نقطه گیردار ثابت شده است، این نقاط گیردار به صورت یک نقطه در روی و چهار نقطه در اطراف نیم کره است که به صورت متقاضن می‌باشند.



شکل 4 محدوده‌های مکانیکی

شکل 4 محدوده‌های مکانیکی



**شکل ۸** دما بر حسب زمان در حالت اول جوش کاری

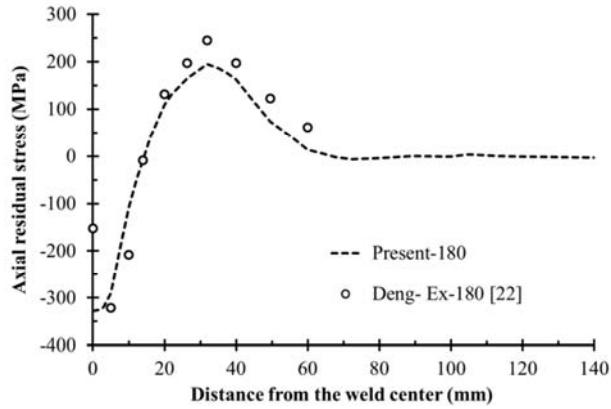
دوم (شکل ۹) در نقاط اول و دوم به ترتیب برابر با 2300 و 660 درجه سانتی‌گراد است که در مقایسه با حداکثر دمای حالت اول (شکل ۸) در حدود اول و دوم که برابر با 1862 و 539 درجه سانتی‌گراد است، افزایشی در حدود 438 و 121 درجه سانتی‌گراد (معادل %23.5 و %22.4) را نشان می‌دهد. حداکثر دمای حالت سوم (شکل 10) نیز در نقاط اول و دوم به ترتیب برابر با 2610 و 730 درجه سانتی‌گراد است که در مقایسه با حداکثر دمای حالت دوم در نقاط اول و دوم افزایشی در حدود 310 و 70 درجه سانتی‌گراد (معادل %13.47 و %10.6) را نشان می‌دهد. از طرفی با افزایش شدت جریان در سرعت پیش‌روی 300 میلی‌متر بر دقیقه، حداکثر دمای حالت پنجم (شکل 12) در نقاط اول و دوم به ترتیب برابر با 2723 و 775 درجه سانتی‌گراد است که در مقایسه با حداکثر دمای حالت چهارم (شکل 11) در نقاط اول و دوم که برابر با 2380 و 698 درجه سانتی‌گراد است افزایشی در حدود 343 و 77 درجه سانتی‌گراد (معادل %14.41 و %11) را نشان می‌دهد. حداکثر دمای حالت ششم (شکل 13) در نقاط اول و دوم نیز به ترتیب برابر با 3178 و 888 درجه سانتی‌گراد است که در مقایسه با حداکثر دمای حالت پنجم افزایشی در حدود 455 و 113 درجه سانتی‌گراد (معادل %16.7 و %14.6) را نشان می‌دهد.

#### 4-1-2- تأثیر سرعت پیش‌روی

با کاهش سرعت پیش‌روی جوش در شدت جریان 100 آمپر، حداکثر دمای حالت چهارم در نقاط اول و دوم در مقایسه با حداکثر دمای حالت اول در این نقاط، افزایشی در حدود 518 و 159 درجه سانتی‌گراد (معادل %29.5 و %27.8) را نشان می‌دهد. در شدت جریان 120 آمپر نیز حداکثر دمای حالت پنجم در نقاط اول و دوم در مقایسه با حداکثر دمای حالت دوم در این نقاط، افزایشی در حدود 423 و 115 درجه سانتی‌گراد (معادل %18.4 و %17.4) را نشان می‌دهد. از طرفی در شدت جریان 140 آمپر حداکثر دمای حالت ششم در نقاط اول و دوم در مقایسه با حداکثر دمای حالت سوم در این نقاط، افزایشی در حدود 568 و 158 درجه سانتی‌گراد (معادل %21.77 و %21.64) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کاهش سرعت پیش‌روی بیشترین تأثیر را بر روی افزایش دمای ناحیه جوش دارد بهطوری که این مقدار در شدت جریان 100 آمپر بیشترین تغییرات را دارد.

#### 4-2- نتایج تنش‌های پسماند

پس از انجام تحلیل حرارتی و با استفاده از نتایج آن به عنوان ورودی در تحلیل مکانیکی، تحلیل مکانیکی انجام و نتایج آن استخراج شده است. با



**شکل ۶** مقایسه نتایج تنش‌های پسماند محوری حاصل از شبیه‌سازی این تحقیق با نتایج تجربی مقاله [22]

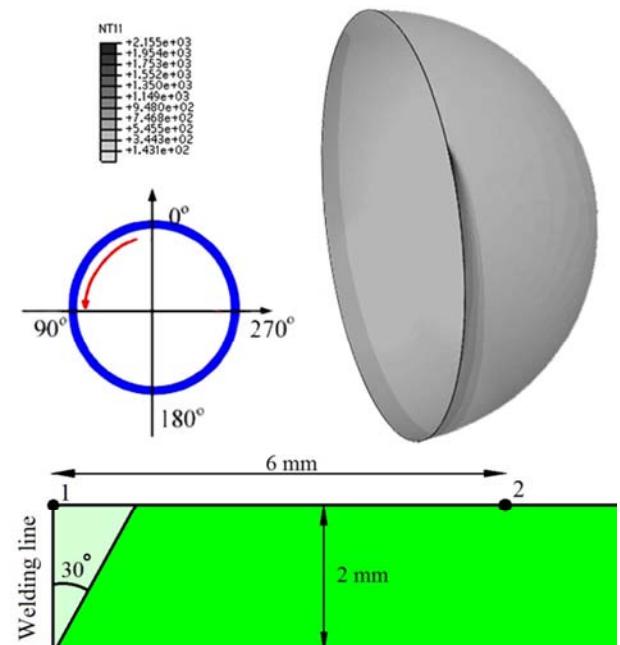
### 4- بحث و بررسی نتایج

#### 4-1- نتایج حرارتی

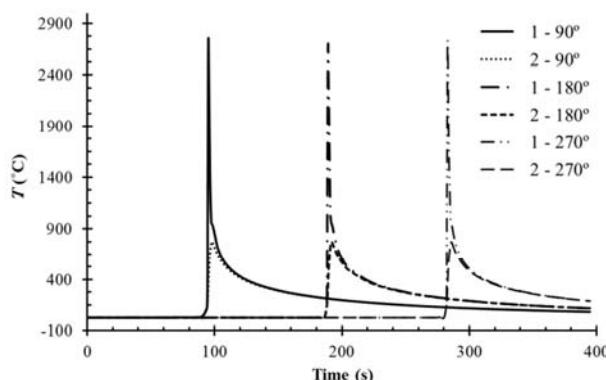
با انجام آنالیز حرارتی، نمودار دما- زمان در دو نقطه و سه زاویه ۹0°، ۱80° و ۲70° درجه برای شش حالت مختلف جوش کاری استخراج شده است. نقطه اول در مرکز جوش و نقطه دوم در فاصله حدود 6 میلی‌متری از مرکز جوش است. در "شکل 7" جهت جوش کاری و نقاط محاسبه دما نشان داده شده است.

#### 4-1-1- تأثیر شدت جریان

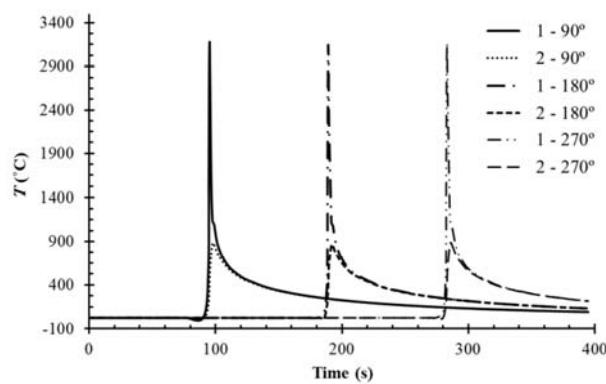
نمودار دما بر حسب زمان برای شش حالت مختلف جوش کاری در "شکل‌های 8 تا 13" نشان داده شده است. در حالت کلی و با در نظر گرفتن دمای حداکثر در شش حالت مختلف جوش کاری می‌توان گفت که در سرعت پیش‌روی 400 میلی‌متر بر دقیقه با افزایش شدت جریان، حداکثر دمای حالت



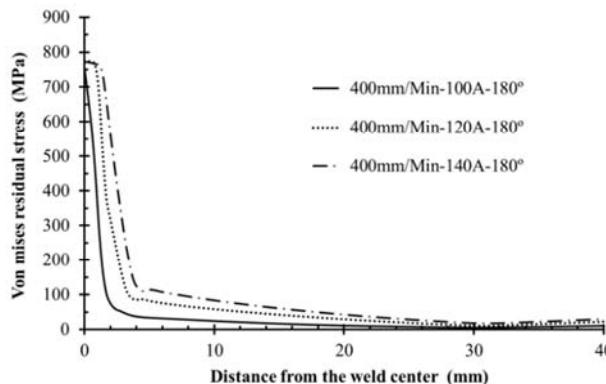
**شکل ۷** جهت جوش کاری و نقاط محاسبه دما



شکل 12 دما بر حسب زمان در حالت پنجم جوش کاری



شکل 13 دما بر حسب زمان در حالت ششم جوش کاری



شکل 14 تنش پسماند فون میسز در سرعت پیش روی 400 میلی‌متر بر دقیقه

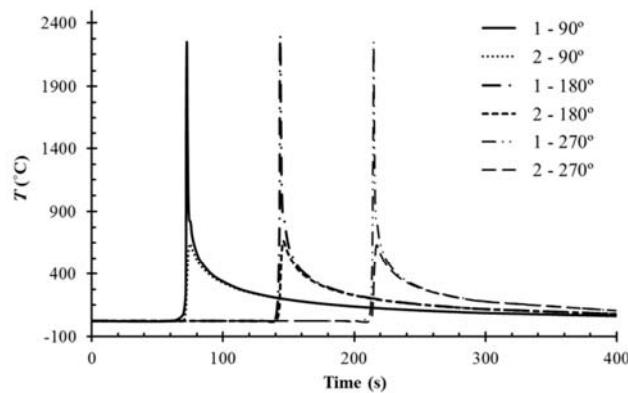
در سرعت پیش روی 300 میلی‌متر بر دقیقه (شکل 15) نیز با افزایش شدت جریان تغییر محسوسی در تنش پسماند فون میسز دیده نمی‌شود و حداقل این تنش در حالت‌های سوم، چهارم و پنجم به ترتیب برابر با 769, 766 و 762 مگاپاسکال است. در واقع می‌توان بیشترین تاثیر ناشی از افزایش شدت جریان بر این تنش را، کشیده شده آن به مناطق نزدیک جوش دانست و این که در فاصله دورتری از مرکز جوش شروع به کاهش می‌کند.

تنش پسماند محیطی طولی که دارای ماهیت فشاری می‌باشد، در ناحیه جوش شدت بیشتری دارد که با دور شدن از این ناحیه از شدت آن کاسته می‌شود. این تنش در فاصله حدود 20 میلی‌متری از خط جوش تغییر ماهیت داده و حالت کششی به خود می‌گیرد و دوباره شروع به کاهش و به مقدار صفر میل می‌کند.

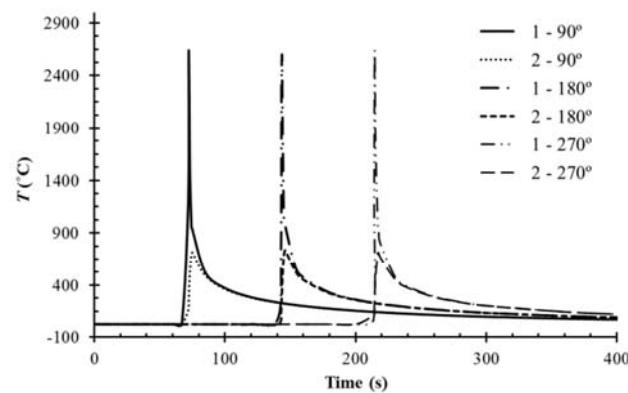
توجه به جدار نازک بودن مخزن کروی، از تغییرات تنش در جهت ضحکت صرف نظر شده است. تنش‌های پسماند ناشی از جوش کاری در زاویه 180 درجه برای شش حالت مختلف جوش کاری استخراج شده است.

#### 1-2-4- تاثیر شدت جریان

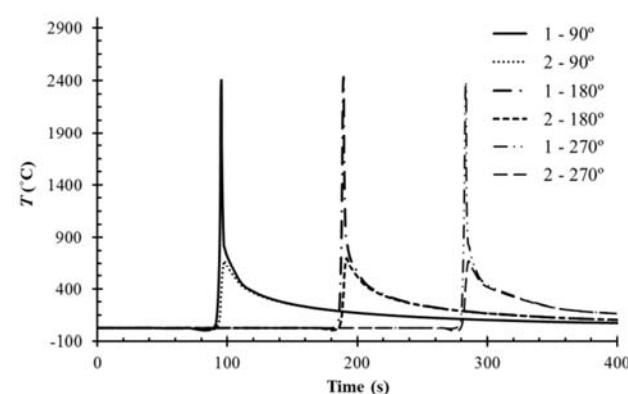
در سرعت پیش روی 400 میلی‌متر بر دقیقه (شکل 14) و با افزایش شدت جریان، حداقل تنش پسماند فون میسز تغییر محسوسی نشان نمی‌دهد و در حالت‌های اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با 774, 776 و 774 مگاپاسکال است.



شکل 9 دما بر حسب زمان در حالت دوم جوش کاری



شکل 10 دما بر حسب زمان در حالت سوم جوش کاری



شکل 11 دما بر حسب زمان در حالت چهارم جوش کاری

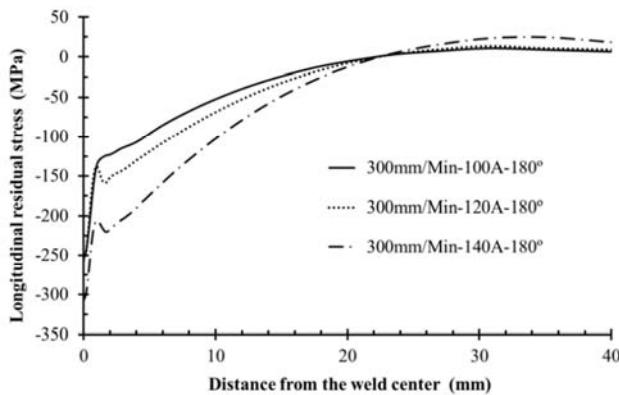


Fig.17 Longitudinal residual stress in the welding progress speed of 300mm/Min

شکل ۱۷ تنش پسماند محیطی طولی در سرعت پیش‌روی 300 میلی‌متر بر دقیقه

چهارم در حدود 115 و 25 مگاپاسکال (معادل ۱۷.۷٪ و ۳.۲٪) افزایش را نشان می‌دهند. این مقدار با افزایش شدت جریان از 120 به 140 آمپر، در حالت‌های سوم و ششم نسبت به حالت‌های دوم و پنجم حدود 32 و 13 مگاپاسکال (معادل ۴۱.۸٪ و ۱۶٪) افزایش را نشان می‌دهند.

شدت جریان بیشترین تاثیر را بر روی تنش پسماند محیطی طولی دارد. این تاثیر در افزایش شدت جریان از 100 به 120 آمپر محسوس‌تر است، در واقع زمانی که شدت جریان از 100 به 120 آمپر افزایش پیدا می‌کند، گرمای ورودی مخصوص ناشی از جوش کاری افزایشی در حدود ۱۹.۷٪ را از خود نشان می‌دهد، که این مقدار با افزایش شدت جریان از 120 به 140 آمپر به حدود ۱۶.۳٪ می‌رسد.

#### ۲-۲-۴- تاثیر سرعت پیش‌روی

کاهش سرعت پیش‌روی موجب می‌شود حداقل مقدار تنش پسماند فون میسز در فاصله دورتری از مرکز جوش ایجاد شود، در حالیکه بر مقدار حداقل تنش اثر محسوسی ندارد. در واقع می‌توان گفت، که شدت تنش به نواحی مجاور کشیده می‌شود و منطقه بیشتری تحت تاثیر تنش قرار می‌گیرند. در شدت جریان 100 آمپر برای حالت‌های چهارم و اول (شکل 20) تنش پسماند فون میسز درحالات چهارم نسبت به حالت اول در حدود 20 مگاپاسکال (معادل ۲.۶۴٪) افزایش را نشان می‌دهد. همچنین در شدت جریان 120 آمپر حداقل تنش پسماند فون میسز در حالت پنجم نسبت به

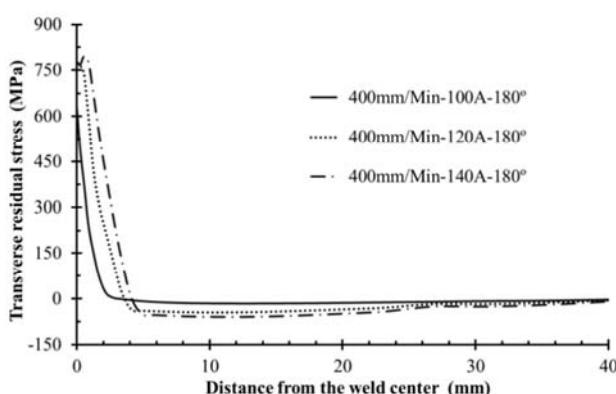


Fig. 18 Transversal residual stress in the welding progress speed of 400mm/Min

شکل ۱۸ تنش پسماند محیطی عرضی در سرعت پیش‌روی 400 میلی‌متر بر دقیقه

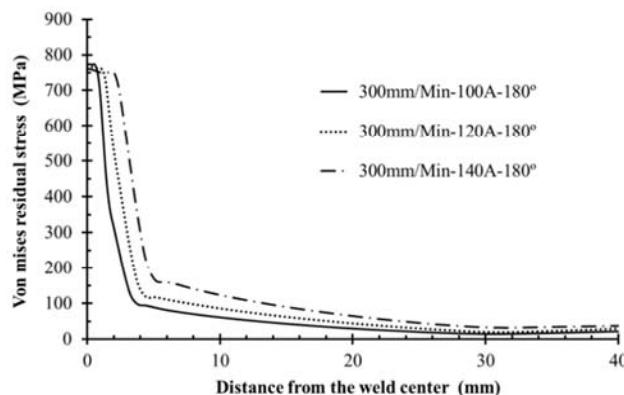


Fig. 15 Von Mises residual stress in the welding progress speed of 300mm/Min

شکل ۱۵ تنش پسماند فون میسز در سرعت پیش‌روی 300 میلی‌متر بر دقیقه

با توجه به "شکل‌های ۱۶ و ۱۷" می‌توان مشاهده کرد که با افزایش شدت جریان از 100 به 120 آمپر، حداقل تنش پسماند محیطی طولی در حالت‌های دوم و پنجم نسبت به حالت‌های اول و چهارم در حدود 45 و 1 مگاپاسکال (معادل ۲۵.۶٪ و ۰.۴٪) افزایش را نشان می‌دهند. این مقدار با افزایش شدت جریان از 120 به 140 آمپر، در حالت‌های سوم و ششم نسبت به حالت‌های در حدود 36 و 52 مگاپاسکال (معادل ۱۶.۳٪ و ۲۰.۳٪) افزایش را نشان می‌دهند. با افزایش شدت جریان ناحیه نزدیک جوش از تنش پسماند محیطی طولی بیشتری برخوردار است. حداقل تنش در مرکز جوش است که با دور شدن از آن تنش شروع به کاهش می‌کند. با خارج شدن از خط جوش تنش مقداری افزایش را نشان می‌دهد و دوباره شروع به کاهش می‌کند. در فاصله 20 تا 23 میلی‌متری تنش تغییر ماهیت داده و حالت کششی به خود می‌گیرد و سپس به مقدار صفر همگرا می‌شود.

حداقل تنش پسماند محیطی عرضی نیز که دارای ماهیت کششی است، با افزایش شدت جریان در فاصله دورتری از مرکز جوش مشاهده می‌شود (شکل‌های ۱۸ و ۱۹). این تنش با دور شدن از خط جوش، شدت کاهش تنش زیاد است. می‌کند که در ناحیه نزدیک به خط جوش، شدت کاهش تنش زیاد است. سپس تنش در فاصله حدود 3 تا 5 میلی‌متری از خط جوش تغییر ماهیت داده و حالت فشاری به خود می‌گیرد و دوباره شروع به کاهش کرده و به صفر میل می‌کند. با افزایش شدت جریان از 100 به 120 آمپر، حداقل تنش پسماند محیطی عرضی در حالت‌های دوم و پنجم نسبت به حالت‌های اول و

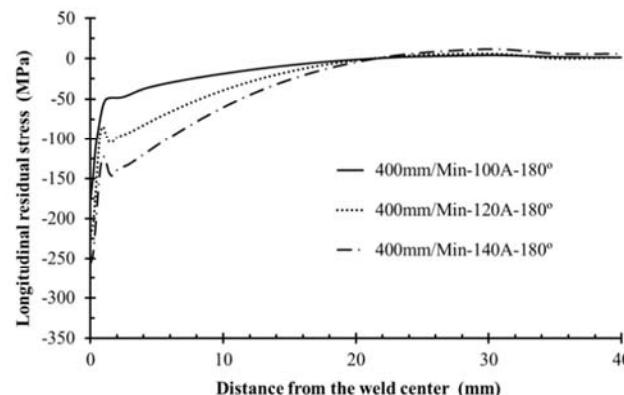


Fig. 16 Longitudinal residual stress in the welding progress speed of 400mm/Min

شکل ۱۶ تنش پسماند محیطی طولی در سرعت پیش‌روی 400 میلی‌متر بر دقیقه

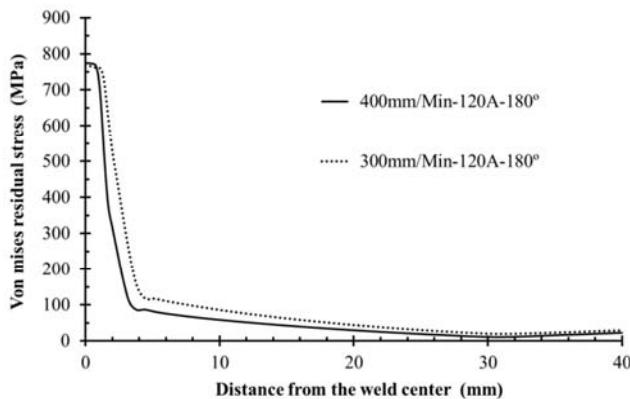


Fig. 21 Von Mises residual stress in the 120A current

شکل 21 تنش پسماند فون میس در شدت جریان 120 آمپر

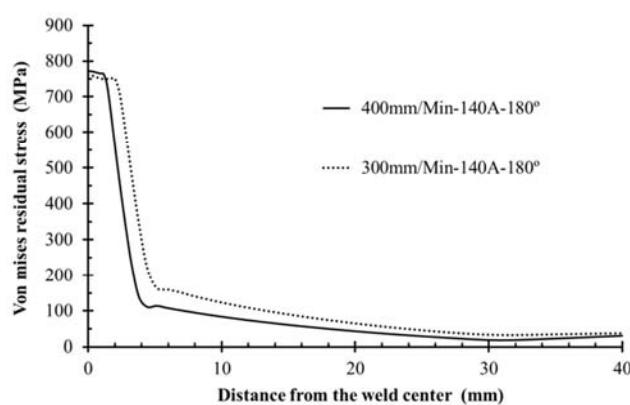


Fig. 22 Von Mises residual stress in the 140A current

شکل 22 تنش پسماند فون میس در شدت جریان 140 آمپر

با کاهش سرعت پیش‌روی جوش از 400 به 300 میلی‌متر بر دقیقه در حدود 51 مگاپاسکال (معادل 19.84%) افزایش را نشان می‌دهد.

تأثیر تغییر سرعت پیش‌روی جوش بر تنش پسماند محیطی عرضی نیز در شدت جریان‌های 100، 120 و 140 آمپر در شکل‌های 26، 27 و 28 در زاویه 180 درجه نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که با کاهش سرعت پیش‌روی، مقدار حداکثر تنش افزایش و در فاصله دورتری از مرکز جوش به وجود می‌آید و به تبع آن تنش به نواحی کناری کشیده می‌شود و منطقه بیشتری تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد. این تنش با دور شدن از خط جوش تغییر ماهیت داده و حالت فشاری به خود می‌گیرد و سپس به صفر میل کند.

در شدت جریان 100 آمپر برای حالت‌های چهارم و اول و با کاهش سرعت پیش‌روی جوش از 400 به 300 میلی‌متر بر دقیقه، حداکثر تنش پسماند محیطی عرضی در حالت چهارم نسبت به حالت اول در حدود 136 مگاپاسکال (معادل 21%) افزایش را نشان می‌دهد. همچنین در شدت جریان 120 آمپر و با کاهش سرعت پیش‌روی جوش از 400 به 300 میلی‌متر بر دقیقه، مشخص می‌شود حداکثر تنش پسماند محیطی طولی در حالت پنجم نسبت به حالت دوم در حدود 46 مگاپاسکال (معادل 15.83%) افزایش پیدا می‌کند. در شدت جریان 140 آمپر برای حالت‌های ششم و سوم این مقدار

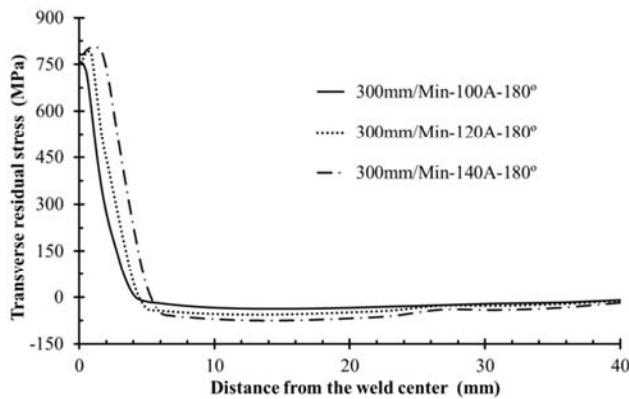


Fig. 19 Transversal residual stress in the welding progress speed of 300mm/Min

شکل 19 تنش پسماند محیطی عرضی در سرعت پیش‌روی 300 میلی‌متر بر دقیقه

حالات دوم در حدود 5 مگاپاسکال (معادل 0.65%) کاهش پیدا می‌کند. در شدت جریان 140 آمپر نیز برای حالت‌های ششم و سوم در حدود 12 مگاپاسکال (معادل 1.55%) کاهش را نشان می‌دهد (شکل‌های 21 و 22). تاثیر تغییر سرعت پیش‌روی جوش بر تنش پسماند محیطی طولی در شدت جریان‌های 100، 120 و 140 آمپر در شکل‌های 23، 24 و 25 در زاویه 180 درجه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با کاهش سرعت پیش‌روی منطقه نزدیک به مرکز جوش تحت تأثیر تنش بیشتری قرار می‌گیرد و شدت کاهش تنش نیز تا حدودی افزایش پیدا می‌کند. در شدت جریان‌های 120 و 140 آمپر، با کاهش سرعت پیش‌روی کاهش تنش با شبیه بیشتری افزایش (پرشی) می‌گیرد، همچنین با خارج شدن از خط جوش تنش مقداری افزایش (پرشی) پیدا می‌کند و دوباره به کاهش خود ادامه می‌دهد. سپس تغییر ماهیت داده و

حالات کششی به خود می‌گیرد تا این که به صفر میل کند.

در شدت جریان 100 آمپر برای حالت‌های چهارم و اول و با کاهش سرعت پیش‌روی جوش از 400 به 300 میلی‌متر بر دقیقه، حداکثر تنش پسماند محیطی طولی در حالت چهارم نسبت به حالت اول در حدود 79 مگاپاسکال (معادل 44%) افزایش را نشان می‌دهد. همچنین در شدت جریان 120 آمپر و با کاهش سرعت پیش‌روی جوش از 400 به 300 میلی‌متر بر دقیقه، مشخص می‌شود حداکثر تنش پسماند محیطی طولی در حالت پنجم نسبت به حالت دوم در حدود 35 مگاپاسکال (معادل 15.83%) افزایش پیدا می‌کند. در شدت جریان 140 آمپر برای حالت‌های ششم و سوم این مقدار

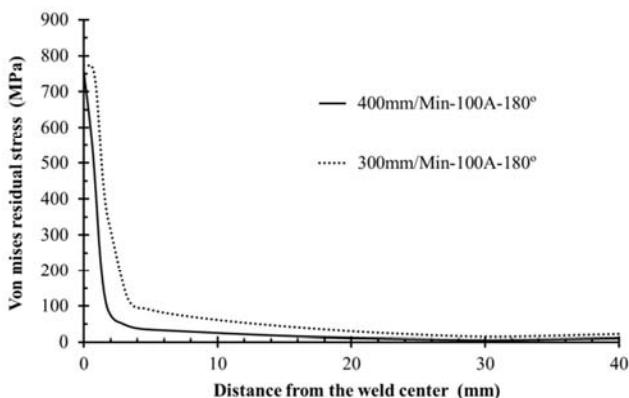
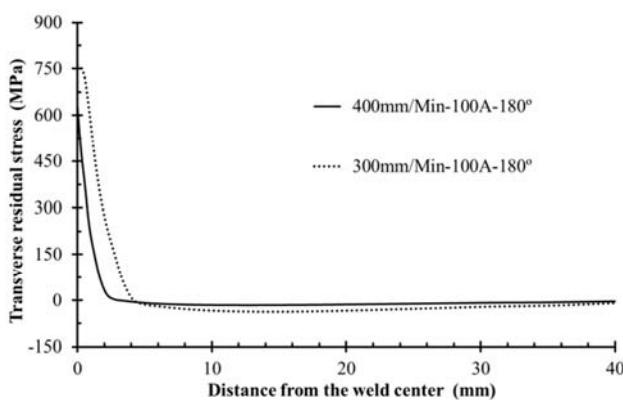
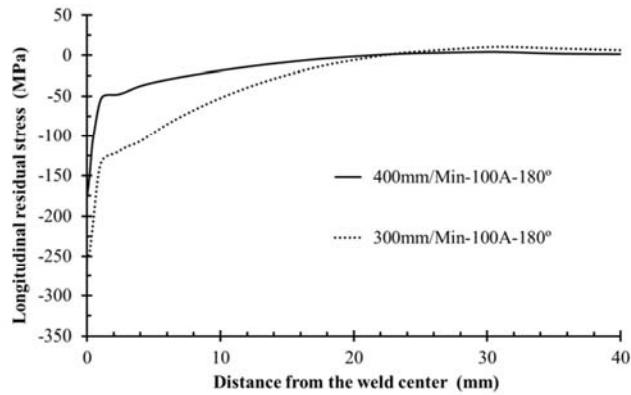


Fig. 20 Von Mises residual stress in the 100A current

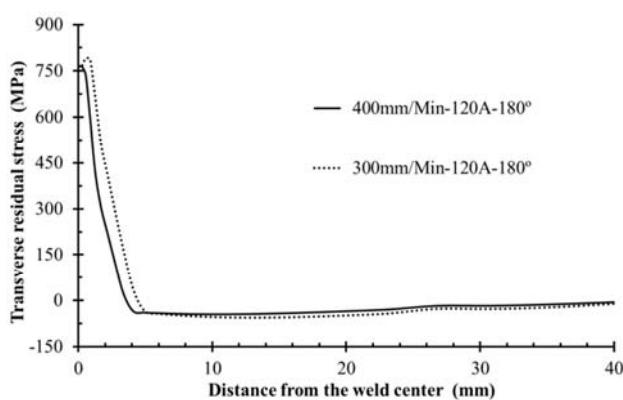
شکل 20 تنش پسماند فون میس در شدت جریان 100 آمپر



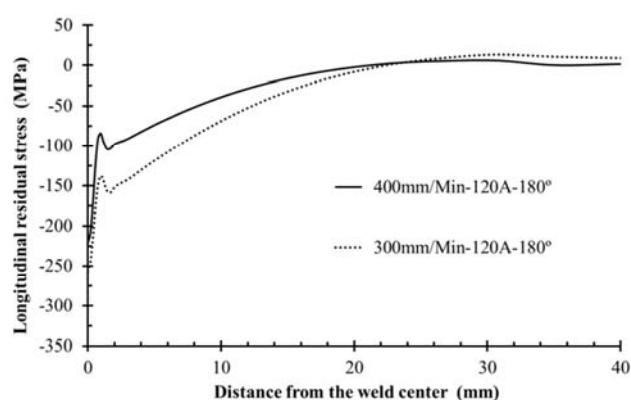
شکل 26 تنش پسماند محیطی عرضی در شدت جریان 100 آمپر



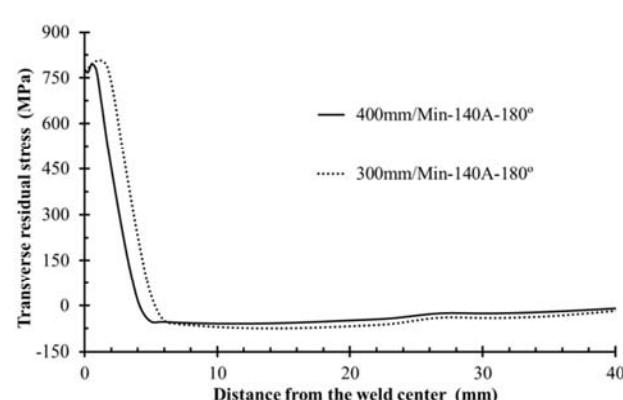
شکل 23 تنش پسماند محیطی طولی در شدت جریان 100 آمپر



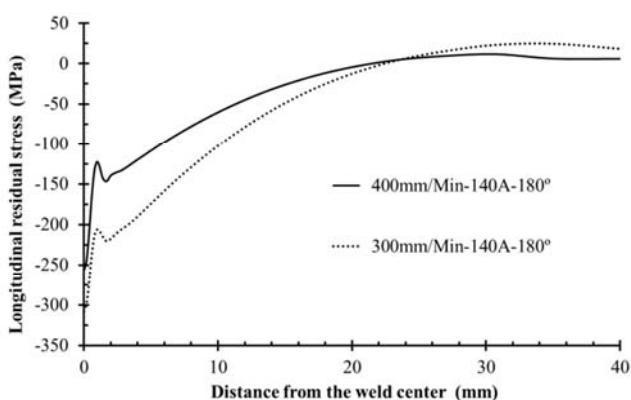
شکل 27 تنش پسماند محیطی عرضی در شدت جریان 120 آمپر



شکل 24 تنش پسماند محیطی طولی در شدت جریان 120 آمپر



شکل 28 تنش پسماند محیطی عرضی در شدت جریان 140 آمپر



شکل 25 تنش پسماند محیطی طولی در شدت جریان 140 آمپر

**4-1-3-4- تأثیر شدت جریان**  
اعوجاج ناشی از جوش کاری در دو سرعت 400 و 300 میلی‌متر بر دقیقه در شدت جریان‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که در "شکل‌های 29 و 30" مشاهده می‌شود، مقدار اعوجاج بر حسب شدت جریان در حالت‌های مختلف جوش کاری مقایسه شده است. با دور شدن از مرکز جوش مقدار اعوجاج شروع به افزایش می‌کند، سپس با رسیدن به بیشترین مقدار اعوجاج شروع به کاهش می‌کند. سرعت کاهش اعوجاج با دور شدن از مرکز جوش کمتر می‌شود و در فاصله حدود 40 میلی‌متری از آن به حداقل مقدار ممکن می‌رسد.

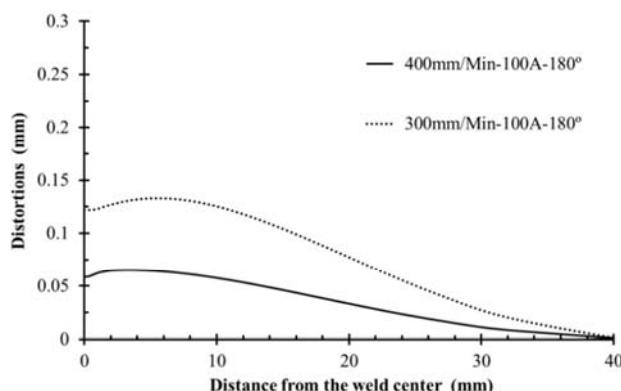
سرعت پیش‌روی جوش نیز بیشترین تأثیر را بر روی تنش پسماند محیطی طولی دارد. کاهش سرعت پیش‌روی موجب افزایش 33 درصدی گرمای ورودی مخصوص به منطقه جوش می‌شود. به صورتی که این گرمای ورودی مخصوص در شدت جریان 100 آمپر بیشترین تأثیر را بر افزایش تنش پسماند محیطی طولی خواهد داشت.

**4-3- نتایج اعوجاج**  
در ادامه اعوجاج ناشی از جوش کاری نیز با توجه به تغییرات شدت جریان و سرعت پیش‌روی مورد بررسی قرار گرفته است.

حداکثر اعوجاج در حالت پنجم نسبت به حالت دوم در حدود 0.1 میلی‌متر (معادل 67٪) افزایش پیدا می‌کند. در شدت جریان 140 آمپر برای حالت‌های نششم و سوم این مقدار با کاهش سرعت پیش‌روی جوش از 400 به 300 میلی‌متر بر دقیقه در حدود 0.097 میلی‌متر (معادل 40٪) افزایش را نشان می‌دهد.

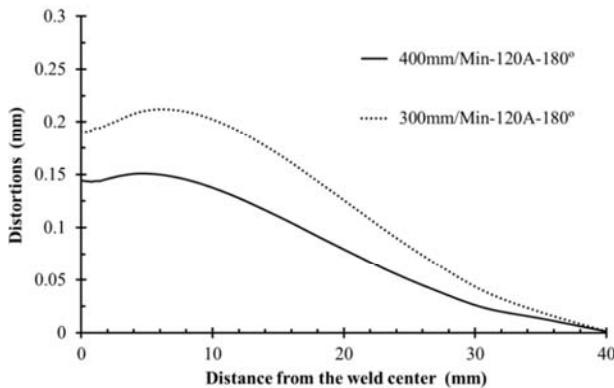
5-نتیجہ گیری

در این تحقیق با استفاده از روش المان محدود تأثیر مشخصه های جوش کاری تیگ در شش حالت مختلف جوش کاری بر روی توزیع دما، تنش های پسماند و اعوچاچ ناشی از جوش کاری یک مخزن کروی از جنس آلیاژ تیتانیوم



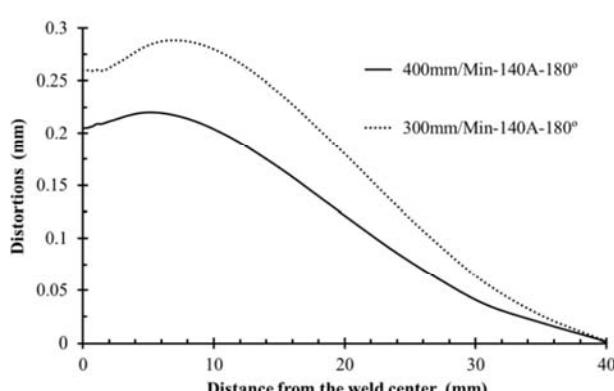
**Fig. 31** Distortion in the 100A current

شكل 31 اعوجاج در شدت جریان 100 آمپر



**Fig. 32** Distortion in the 120A current

شکا، 32 اعو حاج د، شدت حیان 120 آمس



**Fig. 33** Distortion in the 140A current

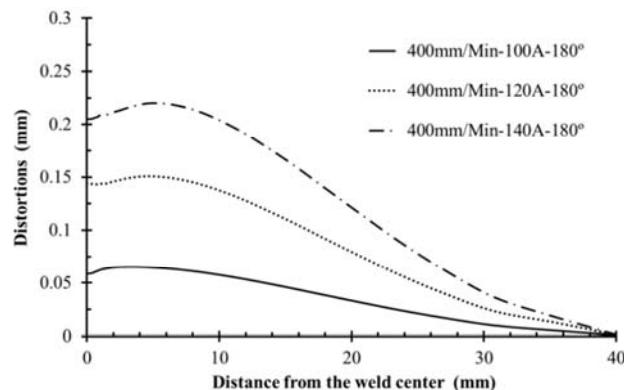
— 140 — *Journal 33*, 15.

از طرفی با افزایش شدت جریان، اعوجاج ناشی از جوش کاری بیشتر می‌شود و مقدار حداکثر آن در فاصله دورتری از مرکز جوش مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش شدت جریان شبی افزایش اعوجاج بیشتر می‌شود و با سرعت بیشتری به مقدار حداکثر می‌رسد، پس از رسیدن به مقدار حداکثر اعوجاج نیز با سرعت بیشتری شروع به کاهش می‌کند.

در حالت دوم نسبت به حالت اول و با افزایش شدت جریان از 100 به 120 آمپر، حداقل اعوجاج در حدود 0.086 میلی‌متر (معادل 132%) افزایش را نشان می‌دهد. در حالت سوم نسبت به حالت دوم نیز با افزایش شدت جریان نشان می‌دهد. در حالت پنجم نسبت به حالت چهارم و با افزایش افزایش را نشان می‌دهد. در حالت پنجم نسبت به حالت چهارم حدود 0.1 میلی‌متر شدت جریان از 100 به 120 آمپر، حداقل اعوجاج حدود 0.092 میلی‌متر (معادل 61%) افزایش می‌یابد. همچنین در حالت ششم نسبت به حالت پنجم (معادل 66%) افزایش شدت جریان از 120 به 140 آمپر، حداقل اعوجاج در حدود 0.089 میلی‌متر (معادل 35%) افزایش خواهد داشت.

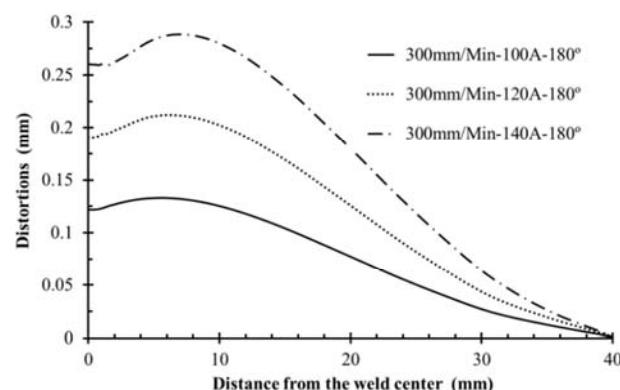
### ۴-۳-۲- تاثیر سرعت پیش روی

تاثیر تغییر سرعت پیش روی جوش بر اعوجاج در شدت جریان های 100، 120 و 140 آمپر در شکل های 31، 32 و 33 در زاویه 180 درجه نشان داده شده است. در شدت جریان 100 آمپر برای حالت های چهارم و اول و با کاهش سرعت پیش روی جوش از 400 به 300 میلی متر بر دقیقه، حداقل اعوجاج در حالت چهارم نسبت به حالت اول در حدود 0.086 میلی متر (معدل 132%) افزایش را نشان می دهد. همچنین در شدت جریان 120 آمپر و با کاهش سرعت پیش روی جوش از 400 به 300 میلی متر بر دقیقه، مشخص می شود



**Fig. 29** Distortion in the welding progress speed of 400mm/Min

شکل 29 اعوجاج در سرعت پیش روی چوش 400 میلی متر پر دقیقه



**Fig. 30** Distortion in the welding progress speed of 300mm/Min

شکل 30 اعوجاج در سرعت پیش روی جوش 300 میلی متر بر دقیقه

- [8] W. Li, T. Ma, J. Li, Numerical simulation of linear friction welding of titanium alloy Effects of processing parameters, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 3, pp. 1497–1507, 2010.
- [9] C. Liu, C. L. Dong, Internal residual stress measurement on linear friction welding of titanium alloy plates with contour method, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, No. 5, pp. 1387–1392, 2014.
- [10] J. Lesniewski, A. Ambroziak, Modelling the friction welding of titanium and tungsten pseudoalloy, *Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 142–150, 2014.
- [11] P. Chang, T. Teng, Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-welded joints, *Computational Materials Science*, Vol. 29, No. 4, pp. 511–522, 2004.
- [12] M. Ghassabzadeh, H. Ghassemi, M. Nahali, Study of welding temperture history by dual reciprocity boundary element method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 95–103, 2011. (in Persian) [فارسی]
- [13] J. Goldak, A. Chakaravarti, M. Bibby, A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical Transaction*, Vol. 15B, pp. 299–305, 1984.
- [14] V. Kariminia, I. Satarifar, Investigating the influence of effective parameters on the residual stresses in circumferentially arc welded thin walled cylinders of aluminiune alloy series 5000, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 377–386, 2014. (in Persian) [فارسی]
- [15] S. Nokhodchi, S. Akbari Iraj, A. Shokuhfar, H. Rezazadeh, Numerical and experimental study of temperature and residual stress in multi-pass welding of two stainless steel plates having different thicknesses, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 81–89, 2014. (in Persian) [فارسی]
- [16] E. Nateghi, A. Gorji Volukola, Study on the effect of weld configuration geometry to distribution of residual stress and and temperature in the welded patrs of stainless steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 105–116, 2015. (in Persian) [فارسی]
- [17] S. H. Zargar, M. Farahani, M. K. Besharati Givi, Investigation on the effects of welding parameters on the submerged arc welding efficiency, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 79–87, 2014. (in Persian) [فارسی]
- [18] X. K. Zhu, Y. J. Chao, Effects of temperture dependent material propeties on welding simulation, *Computers and Structures*, Vol. 80, No. 11, pp. 967–976, 2002.
- [19] R. Boyer, G. Welsch, E. W. Colling, Materials Properties Handbook: Titanium Alloys, *ASM International, Materials Park, OH*, 1994.
- [20] M. R. Farahani, I. Satarifar, Study the effect of number of welding passes on the residual stresses in butt-welded plates, *2<sup>th</sup>internatinal and 8<sup>th</sup> national conference on manufacturing engineering*, Tehran, Iran, 2006. (in Persian) [فارسی]
- [21] *ERTi-5(6Al-4V) Welding Wire and Rod*, U.S.ALLOY Co & AWS, Washington, USA, 2009, Accessed on 25 April 2015; <http://www.weldingwire.com>.
- [22] 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.

- پس از بررسی نتایج زیر بدست آمده است:
- افزایش شدت جریان موجب افزایش دمای حداکثر به میزان حدود ۱۳.۴۷٪ تا ۲۳.۵٪ می‌شود که مقدار این افزایش دمای حداکثر، با کاهش سرعت پیش‌روی جوش بین ۱۸.۴٪ تا ۲۷.۸٪ است.
  - مشخصه‌های جوش کاری بر روی حداکثر تنش پسماند فون‌میسز اثر محسوسی ندارند (کمتر از ۰.۶۴٪)، ولی با افزایش مقدار گرمای ورودی ناشی از جوش کاری تنش پسماند فون‌میسز در فاصله دورتری از خط جوش کاهش پیدا می‌کند.
  - مشخصه‌های شدت جریان و سرعت پیش‌روی بیشترین تاثیر را روی تنش پسماند محیطی طولی دارند. حداکثر مقدار این تنش که دارای ماهیت فشاری می‌باشد، با افزایش شدت جریان و کاهش سرعت پیش‌روی به ترتیب، حداکثر بین ۲۵.۶٪ و ۴۴٪ افزایش پیدا می‌کند.
  - تنش پسماند محیطی عرضی که دارای ماهیت کششی است و مقدار آن در بیشترین حالت در حدود تنش تسليم فلز پایه می‌باشد، با افزایش شدت جریان، حداکثر به میزان ۱۷.۷٪ افزایش را از خود نشان می‌دهد در حالی که با کاهش سرعت پیش‌روی، افزایش این تنش حداکثر به حدود ۲۱٪ می‌رسد.
  - اعوجاج ناشی از جوش کاری تیگ نیز با افزایش شدت جریان در حدود ۳۵٪ تا ۱۳۲٪ افزایش پیدا می‌کند که این مقدار با کاهش سرعت پیش‌روی بین ۱۳۲٪ تا ۴۰٪ می‌رسد.

## 6- مراجع

- [1] R. R. Boyer, Attributes, characteristics, and applications of titanium and its alloys, *Journal of Materials*, Vol. 62, No. 5, pp. 21–24, 2010.
- [2] G. Lutjering, J. C. Williams, *Titanium 2<sup>th</sup> edition*, Berlin Heidelberg, NewYork, Springer-Vereg, pp. 87–104, 2007.
- [3] T. Otani, Titanium Welding Technology, *Nippon Steel Tecnichal Report*, No. 95, pp. 88–92, USA,2007.
- [4] H. Vemanaboina, S. Akella, R. K. Buddu, Welding process simulation model for temperature and residual stress analysis, *Procedia Materials Science*, Vol. 6, No. 1, pp. 1539–1546, 2014.
- [5] D. Deng, Sh. Kiyoshima, FEM prediction of welding residual stresses in a SUS304 girth-welded pipe with emphasis on stress distribution near weld start/end location, *Computational Materials Science*, Vol. 50, No. 3, pp. 612–621, 2010.
- [6] S. A. A. Akbari Mousavi, R. Miresmaeli, Experimental and numerical analyses of residual stress distributions in TIG welding process for 304L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 208, No. 1, pp. 383–394, 2008.
- [7] D. Akbari, I. Sattari-Far, Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86, No. 11, pp. 769–776, 2009.