

Numerical simulation and experimental validation of thermal evolutions and welding-induced distortion of EBW in a plate of Ti-6Al-4V

*Masoud Mehrabi-Mehdiabad¹, Mehdi Talebipour²

1- Expert of R & D department of Mahan Sanat Navid Company of Tehran, Tehran, Iran

2- Expert of Advanced Materials and Nanotechnology Laboratory, Faculty of Materials Science and Engineering, Khaje Nasir Al-Din Tusi University, Tehran, Iran

Citation: Mehrabi Mehdiabadi M, Talebipour M. Numerical simulation and experimental validation of thermal evolutions and welding-induced distortion of EBW in a plate of Ti-6Al-4V. Metallurgical Engineering 2019; 22(2): 124-134 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.100621.1227>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.100621.1227>

ABSTRACT

Electron Beam Welding (EBW) is a high-efficiency, high-precision welding method that its application is increasing rapidly in various industries, including car manufacturing, aviation and aerospace. The simulation of the electron beam welding process with the aim of predicting the residual stress in the work piece and analyzing the temperature and stress profiles during the welding process has always been of interest to the researchers for the purpose of welding engineering and prediction of optimal conditions. In this research, the Finite Element Method (FEM) model of electron beam welding was prepared in 3D and loaded on the Abaqus software. This model includes thermal and mechanical interaction, and metallurgical phenomena. The thermal analysis is unilaterally coupled with mechanical analysis. The heat source that is used is a combined heat source that is attached to Abaqus using the subroutine and the Fortran coding. Welding is in a vacuum environment and the thermal dissipation due to thermal conductivity and radiation is applied in different parts as boundary conditions on the model. The work-piece is made of Ti-6Al-4V alloy and has thermal and mechanical properties which are defined dependent on temperature. The temperature variations during welding and the residual stress of the base metal which is obtained from the numerical simulation are comparable to the results recorded in the practical studies and an acceptable adaptation was made that shows the accuracy of the combined heat source model used in this research for modeling of electron beam welding.

Keywords: simulation, electron beam welding (EBW), heat source modeling.

Received: 1 January 2019

Accepted: 11 June 2019

■ ■

* *Corresponding Author:*

Masoud Mehrabi-Mehdiabad, BSc

Address: Expert of R & D department of Mahan Sanat Navid Company of Tehran, Tehran, Iran.

Tel: +98 (9197548093)

E-mail: masoud_mehrabi@ut.ac.ir

شبیه‌سازی عددی و اعتبار‌سنجی آزمایشگاهی تحولات حرارتی و اعوجاج ایجاد شده در حین جوشکاری پرتو الکترونی روی ورق از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V

* مسعود مهربابی مهدی آبادی^۱، مهدی طالبی پور^۲

۱- کارشناس بخش تحقیق و توسعه شرکت ماهان صنعت نوید تهران، تهران، ایران.

۲- کارشناس آزمایشگاه مواد پیشرفته و نانو تکنولوژی، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

چکیده

جوشکاری پرتو الکترونی (EBW) یک روش جوشکاری با بازدهی و دقت بالا است که کاربرد آن در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هواپیمایی و هوافضا به شدت رو به افزایش است. شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری پرتو الکترونی با هدف پیش‌بینی تنش باقی‌مانده در قطعه کار و آنالیز پروفیل‌های دمایی و تنش‌های حین فرآیند جوشکاری، به جهت امکان مهندسی جوش و پیش‌بینی شرایط بهینه، همواره مورد توجه محققین بوده است. در این پژوهش مدل المان محدود جوشکاری پرتو الکترونی به صورت سه بعدی آماده شده و بر روی نرم‌افزار Abaqus بارگذاری شده است. این مدل شامل برهمکنش‌های حرارتی، مکانیکی و پدیده‌های متالورژیکی است. آنالیز حرارتی به صورت یکطرفه با آنالیز مکانیکی کوپل شده است. منبع حرارتی مورد استفاده، منبع حرارتی ترکیبی است که با استفاده از زیربرنامه و کدنویسی به زبان فورترن به آباکوس متصل شده است. جوشکاری در محیط خلاء بوده و اتلاف حرارت ناشی از هدایت حرارتی و تابش، در قسمت‌های مختلف بعنوان شرایط مرزی بر مدل اعمال شده است. قطعه کار از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V بوده و خواص حرارتی و مکانیکی وابسته به دما تعریف شده است. تغییرات دمایی حین جوشکاری و تنش باقی‌مانده فلز پایه که از شبیه‌سازی عددی بدست آمده است با نتایج ثبت شده در بررسی‌های عملی قابل مقایسه بوده و تطابق قابل قبول حاصل شده که دقت مدل منبع حرارتی ترکیبی مورد استفاده در این پژوهش جهت مدل‌سازی جوشکاری پرتو الکترونی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، جوشکاری پرتو الکترونی (EBW)، مدل‌سازی منبع حرارتی.

دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۱ | پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۱

۱. مقدمه

اضافی دریافت نمی‌کند که همین امر باعث می‌شود محدوده‌ی متاثر از حرارت^۱ تا حد ممکن کاهش یابد (۳).

در یک مجموعه بیم الکترونی، الکترون‌های ساطع شده از یک فیلامان با بار الکتریکی منفی بوجود می‌آیند که به آن کاتد گفته می‌شود. با افزایش جریان الکتریکی در فیلامان، دما افزایش پیدا کرده و زمانی که به دمای تابش^۲ برسد، فیلامان از خود الکترون ساطع می‌کند. این الکترون‌ها با فرارگیری در میدان الکتریکی با بار مخالف (آند با بار مثبت) که دقیقاً زیر کاتد قرار گرفته است، شتاب می‌گیرند. پس از عبور الکترون‌های شتاب گرفته از حفره‌ی وسط آند، الکترون‌ها توسط کوپل‌های الکترومغناطیسی در نقطه‌ای روی سطح قطعه کار متمرکز می‌شوند (شکل ۱-الف) (۴). جریان بیم

جوشکاری پرتو الکترونی^۱ یکی از روش‌های جوشکاری دقیق و با کیفیت بالا است که اخیراً در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا و اتوموبیل‌سازی اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است (۱). این روش از فرآیندهای جوشکاری نفوذی عمیق پرنرژی است که در آن نسبت عرض به عمق جوش خیلی کوچک است. در مقایسه با سایر روش‌های متداول جوشکاری، در جوشکاری پرتو الکترونی به دلیل حرارت ورودی کمتر، اعوجاج ایجاد شده در قطعه کار نیز بسیار کمتر است (۲). ناحیه جوش در این روش بسیار باریک است و چگالی بالای انرژی، سرعت بالای حرکت بر روی خط جوش را ممکن می‌سازد. بنابراین فرآیند جوشکاری بسیار سریع اتفاق می‌افتد و فلز پایه در ناحیه اطراف محدوده‌ی جوش، انرژی حرارتی

2. Heat Affected Zone (HAZ)

3. Emission Temperature

1. Electron Beam Welding (EBW)

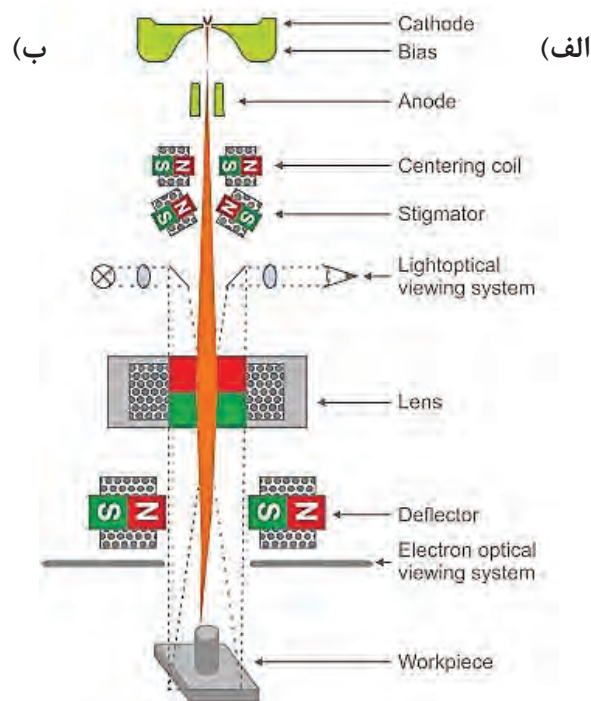
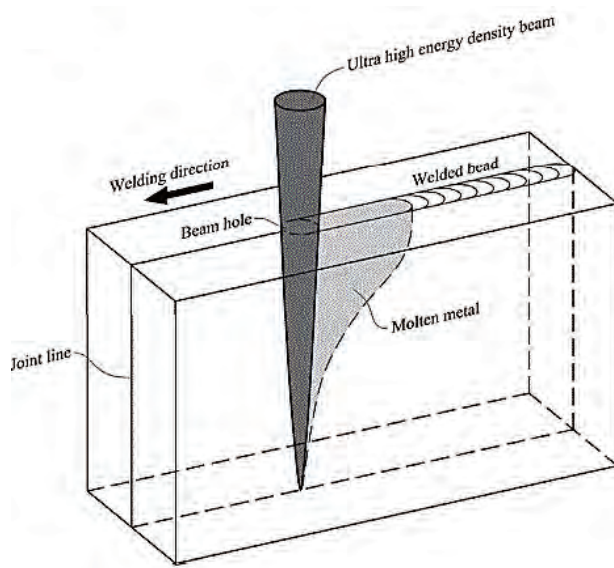
* نویسنده مسئول:

مهندس مسعود مهربابی مهدی آبادی

نشانی: تهران، بخش تحقیق و توسعه شرکت ماهان صنعت نوید تهران.

تلفن: (۹۱۹۷۵۴۸۰۹۳) ۹۸+

پست الکترونیکی: masoud_mehrabi@ut.ac.ir



شکل ۱. الف) دستگاه جوشکاری پرتو الکترونی (ب) حوضچه مذاب (۴).

در این پژوهش ابتدا چهارچوب آنالیز حرارتی-مکانیکی جوشکاری پرتو الکترونی انجام شده به روش المان محدود شامل مدل المان محدود مورد استفاده، منبع حرارتی مورد استفاده و نیز رفتار مکانیکی-حرارتی ماده از دمای محیط تا دمای ذوب ماده تشریح می‌شود. سپس نتایج مدل‌سازی عددی انجام شده با نتایج تجربی مقایسه می‌شود تا میزان موفقیت در شبیه‌سازی پروفیل‌های حرارتی و تنش‌ی ایجاد شده در اثر جوشکاری مورد سنجش قرار گیرد.

۲. مواد و روش تحقیق

مدل المان محدود

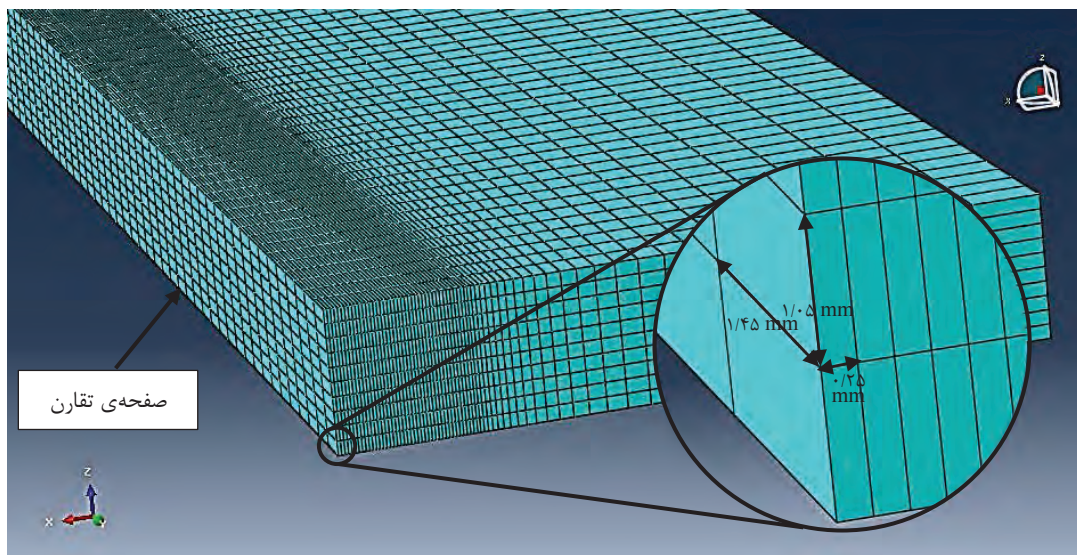
در این پژوهش، مدل سه بعدی جوشکاری پرتو الکترونی هم جنس در وسط ورق از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V با طول و عرض و ضخامت به ترتیب ۲۹۰، ۱۰۴ و ۱/۵ میلی‌متر به روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل شرایط متقارن قطعه کار حول خط جوش و با هدف کاهش مدت زمان شبیه‌سازی، این مدل به صورت متقارن، با صفحه تقارن Y-Z مدل‌سازی شده است. بدین ترتیب می‌توان با استفاده از مش‌های ریزتر، دقت محاسبات را افزایش داد و گرادینان‌های حرارتی و تنش‌ی دقیق‌تری بدست آورد بدون آنکه هزینه‌های محاسباتی افزایش پیدا کند (۱۵).

در بخش‌های مختلف از قطعه کار، المان‌ها با ابعاد و اندازه‌ی مختلف استفاده شده است تا هم دقت کافی در شبیه‌سازی وجود داشته باشد و هم زمان محاسبات بسیار

الکترونی و ولتاژ شتاب دهنده که به طور معمول در فرآیندهای جوشکاری پرتو الکترونی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به ترتیب در محدوده‌ی ۵۰-۱۰۰۰ mA و ۳۰-۱۷۵ kW تغییر می‌کند (۵).

به طور معمول سیستم‌های جوشکاری پرتو الکترونی در محیط خلاء مورد استفاده قرار می‌گیرند (۶). این امر علاوه بر مقاوم‌سازی قطعه کار در برابر اکسیداسیون، پایداری ستون الکترونی در حین جوشکاری را نیز تضمین می‌کند. به عبارتی با کاهش فشار هوای محیط، میزان پراکندگی الکترون‌ها در اثر برخورد با مولکول‌های هوا نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه با کاهش فشار اتمسفر محیط، می‌توان قطر بیم الکترونی را کاهش داد و پرتوهای الکترونی را در یک محدوده‌ی خیلی کوچک در حدود ۰/۳-۰/۸ mm متمرکز کرد. چگالی انرژی ورودی نیز تا مقادیر بسیار بالای 1000 W/m^2 افزایش می‌یابد (۷).

شبیه‌سازی عددی فرآیندهای جوشکاری در بحث مهندسی و تولید بسیار حائز اهمیت است (۸-۱۱). در مقایسه با مطالعات عملی، شبیه‌سازی عددی می‌تواند با تمرکز بر مشخصه‌یابی حوضچه جوش، ابعاد منطقه‌ی متأثر از حرارت، اعوجاج نهایی ایجاد شده در قطعه کار و تنش باقی‌مانده، جزئیات بیشتری در اختیار محققین قرار دهد (۱۲-۱۳). به این دلیل شبیه‌سازی می‌تواند باعث کاهش حجم پژوهش‌های عملی و هزینه‌های آزمون-خطا، جهت دستیابی به شرایط بهینه تولید شود (۱۴).



شکل ۲. نحوه توزیع و ابعاد المان‌های مدل سه بعدی.

که در آن β نسبت جدایش است که نسبت توان منبع حجمی به مجموع توان بیم الکترونی را بیان می‌کند. P مجموع توان بیم الکترونی است که برابر حاصلضرب ولتاژ V در آمپر I است. η بازدهی جذب انرژی توسط قطعه کار است. r_0 شعاع منبع حرارتی در سطح قطعه کار و d_0 عمق نفوذ جوش پرتو الکترونی است (۱۹).
منبع حرارتی سطحی توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

رابطه (۲)

$$q_v(x,y,z)_0 = \frac{(1-\beta)P}{\pi(r_a - r_0)^2} r_0^2 \leq x^2 + y^2 \leq r^2, z = d$$

که در آن r_a شعاع منبع حرارتی سطحی است (۱۹). معادله ۲ نشان می‌دهد که منبع حرارتی سطحی فقط می‌تواند در محدوده‌ی r_0 تا r_a در سطح اعمال شود. پارامترهای نامشخص در مدل ترکیبی منبع حرارتی، بازدهی جوشکاری و ضریب جدایش هستند که تعیین می‌کنند چه مقداری از توان ورودی به منبع حجمی و چه مقدار به منبع سطحی اختصاص دارد. انتخاب مقادیر β و η بسیار پر اهمیت است تا بتوان پروفیل‌های مذاب را مطابق با نتایج آزمایش‌های تجربی بدست آورد. جهت استخراج این مقادیر، شبیه‌سازی‌هایی همراه با آزمون و خطا بر روی مدل انجام شده است. مقادیر بهینه شده‌ی مورد نیاز برای مدل‌سازی منبع حرارتی، در جدول ۱ آورده شده است.

همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، شعاع منبع حرارتی حجمی برابر $2/5$ mm است. ابعاد المان‌ها در طول خط جوش باید کمتر از $2/5$ mm میلی‌متر باشد تا حرارت بتواند بر المان‌ها به درستی اعمال شود (۲۰). جدول ۲ پارامترهای جوشکاری تنظیم شده جهت انجام آزمایش‌های

طولانی و غیر منطقی نشود. طبیعتاً در نزدیکی خط جوش ریزترین مش‌بندی مدل انجام شده است و با فاصله گرفتن از آن اندازه مش‌ها درشت‌تر می‌شوند. ابعاد کوچکترین المان، $1/45 \times 1/45 \times 0/25$ mm است که در شکل ۲ نشان داده شده است. در مدل سه بعدی 13200 المان هشت وجهی و 148137 گره ایجاد شده است. نوع المان‌ها برای آنالیز حرارتی DC3D8 و برای آنالیز مکانیکی C3D8R است (۱۶). همانطور که پیشتر اشاره شد، به دلیل تقارن حول صفحه‌ی میانی جوش، فقط نیمی از مدل مش‌بندی شده است.

مدل منبع حرارتی

مدل منبع حرارتی ترکیبی یکی از مدل‌های متداول در شبیه‌سازی روش‌های جوشکاری با عمق نفوذ بالا و شدت بیم زیاد است (۱۷). جهت شبیه‌سازی حفره‌ی کلیدی در جوشکاری پرتو الکترونی، از مدل منبع حرارتی ترکیبی حاصل از اضافه شدن منبع حرارتی مخروطی حجمی به یک منبع حرارتی سطحی یکنواخت دایره‌ای استفاده شده است. این منبع حرارتی در پژوهش‌های سایر محققین نیز مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج قابل قبول حاصل شده است (۱۸). در منبع حرارتی مخروطی حجمی، توان به صورت تابع گاوسی^۴ در صفحه‌ی $x-y$ و توزیع خطی در راستای عمق نفوذ (راستای z)، توزیع شده است. این تابع با رابطه ۱ بیان می‌شود:

رابطه (۱)

$$q_v(x,y,z) = \frac{2\eta\beta P}{\pi r_0^2 d_0} \exp\left[1 - \left(\frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right)\right] \left(\frac{z}{d_0}\right)$$

4. Gaussian

جدول ۱. مقادیر عددی پارامترهای منبع حرارتی ترکیبی

| r_p /mm | r_o /mm | d_o /mm | η | β |
|-----------|-----------|-----------|--------|---------|
| ۲/۵ | ۰/۵ | ۱۰ | ۰/۷۵ | ۰/۸۵ |

جدول ۲. پارامترهای جوشکاری

| ولتاژ (kV) | شدت جریان (mA) | سرعت جوشکاری (mm/s) |
|------------|----------------|---------------------|
| ۱۵۰ | ۱۰۰ | ۲۵ |

تا مقادیر تنش باقی‌مانده و اعوجاج نهایی در المان‌ها بدست آید. تغییرات دمایی المان‌ها در بخش اول بعنوان نیرومحرکه برای تغییرات تنشی در بخش دوم مورد استفاده قرار گرفته است. Increment time در هر تحلیل تنشی برابر مقدار آن در تحلیل حرارتی قرار داده شده است و ابعاد و اندازه‌ها نیز در تحلیل دوم تغییر نکرده است.

در تحلیل حرارتی، به دلیل آنکه فرآیند جوشکاری در محیط خلاء انجام می‌شود اتلاف حرارتی ناشی از همرفتی صفر در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال حرارت بین قطعه کار و گیره‌های جوشکاری که محل قرارگیری آنها در شکل ۴ نشان داده شده است، برابر 500 W/m.K قرار داده شده است و ضریب تابش در تمام قطعه برابر $0/8$ است (۲۴). شبیه‌سازی مدل سه بعدی با منبع حرارتی ترکیبی در این پژوهش، با آنالیز خطی بر روی سیستم HP-PAVILION-dv6 به مدت ۷۴ ساعت به طول انجامید.

۳. نتایج و بحث

شکل ۵ محل دقیق‌تر ترموکوپل‌های مورد استفاده جهت اندازه‌گیری تغییرات دمایی را نشان می‌دهد. ترموکوپل‌ها به ترتیب در 3 mm ، 3 mm ، $2/5$ ، $4/5$ از خط جوش قرار گرفته‌اند. تغییرات دمایی ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها از پژوهش Chiumenti (۲۵) استخراج شده است و نتایج آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش مقایسه شده است. جهت دستیابی به مقدار بهینه تعداد المان‌ها، کاهش هزینه‌های محاسباتی و جلوگیری از گسستگی نتایج همچون سایر پژوهش‌های شبیه‌سازی آنالیز حساسیت به مش‌بندی انجام شده است که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده می‌شود. تعداد المان‌ها در این پژوهش که در بخش مدل المان محدود گزارش شد، حاصل نتایج همین آنالیز حساسیت به مش‌بندی است. برای این آنالیز تابعیت حداکثر دما از تعداد المان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است و مشاهده می‌شود تغییرات حداکثر دما از تعداد المان 12000 به بالا بسیار ناچیز می‌شود.

شکل ۷-الف تا د، نتایج ثبت شده توسط ترموکوپل‌های ۱ تا ۴ را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه می‌کند. تطابق

عملی را نشان می‌دهد. مقادیر مشابه برای مدل‌سازی منبع حرارتی استفاده شده است و با استفاده از زیربرنامه و به زبان برنامه‌نویسی فورترن به نرم‌افزار Abaqus 6-13 اعمال شده است.

مدل‌سازی ماده

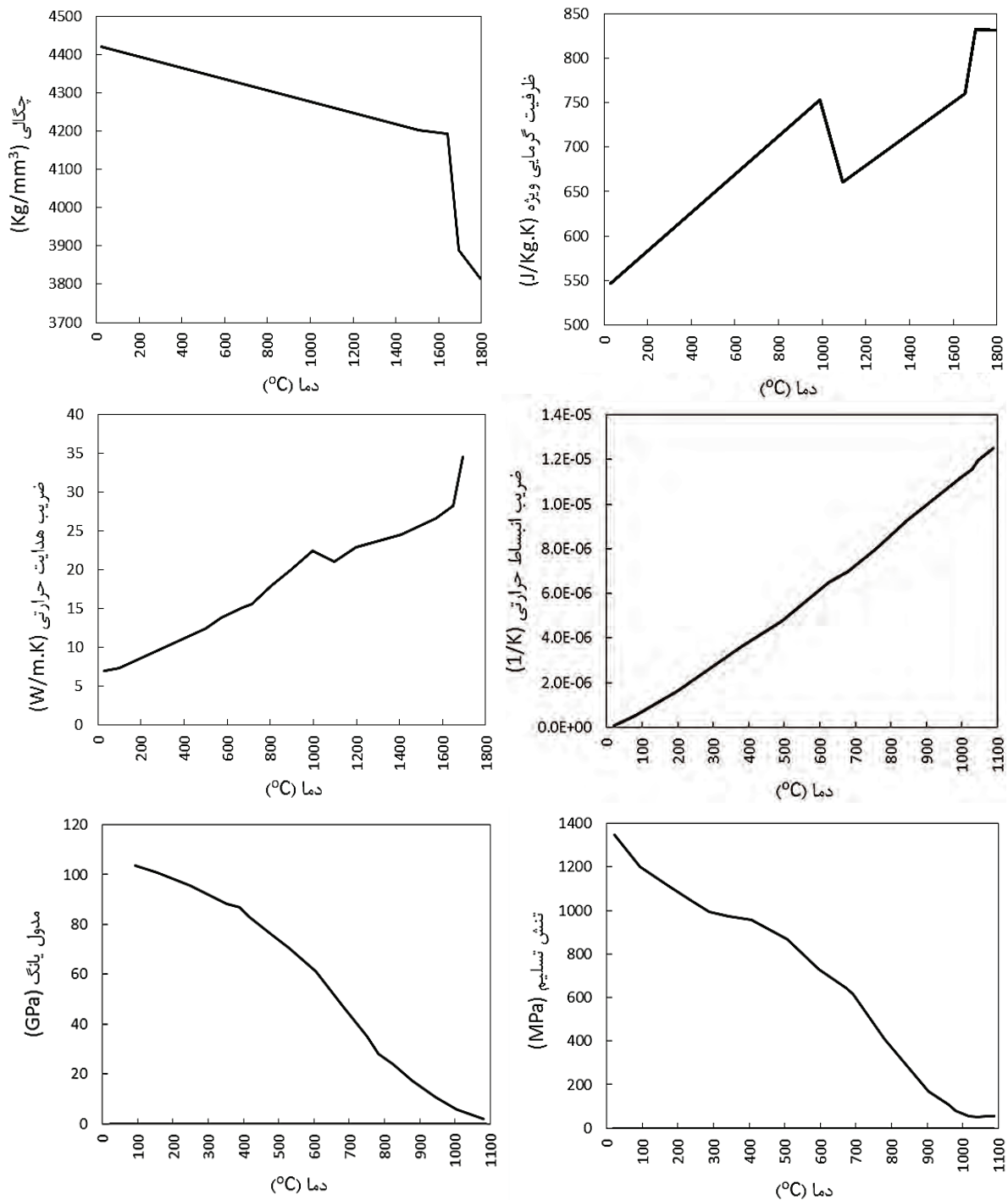
در آنالیز حرارتی، ظرفیت گرمایی و ضریب هدایت حرارتی و دانسیته به صورت توابعی از دما تا نقطه ذوب، مورد استفاده قرار گرفته است. این خواص تا دمای $1655 \text{ }^\circ\text{C}$ تعریف شده است. همانگونه که در پژوهش‌های Michaleris (۲۱) و Goldak (۲۲) گزارش شده است، مقدار عددی ضریب هدایت حرارتی در دماهای بالاتر از نقطه ذوب بسیار زیاد تعریف شده است که علت آن سیالیت بالای مذاب در داخل حوضچه‌ی مذاب جوشکاری است. گرمای نهان ذوب در حوضچه‌ی مذاب نیز ناچیز در نظر گرفته شده است تا یکنواختی عددی در آنالیز حرارتی از بین نرود. گزارش شده است، ناچیز در نظر گرفتن گرمای نهان انجماد، تاثیر چندانی بر دمای بدست‌آمده از شبیه‌سازی ندارد (۱۹).

در آنالیز مکانیکی، مدول یانگ، تنش تسلیم و ضریب انبساط حرارتی به صورت توابعی از دما تا نقطه ذوب، تعریف شده‌اند. ضریب پواسون در تمامی دماها برابر مقدار ثابت $0/342$ تعریف شده است. همچنین جهت مدل‌سازی رفتار سیلان ماده، از مدل وان-میسز^۵ استفاده شده است. خواص مکانیکی-حرارتی مورد استفاده، به صورت تابعی از دما برای آلیاژ Ti-6Al-4V در شکل ۳ نشان داده شده است.

روش محاسباتی و شرایط مرزی

شبیه‌سازی مدل سه بعدی، به صورت کوپل یک طرفه، بر روی نرم افزار Abaqus 6-13 بارگذاری شده است. شبیه‌سازی شامل دو مرحله است. در مرحله نخست آنالیز حرارتی گذرا خطی انجام شده است تا تاریخچه دمایی در سیکل گرمایش و سرمایش ماده حاصل شود. در بخش دوم، تحلیل خطی الاستیک-پلاستیک ایستایی بر روی سازه انجام گرفته است

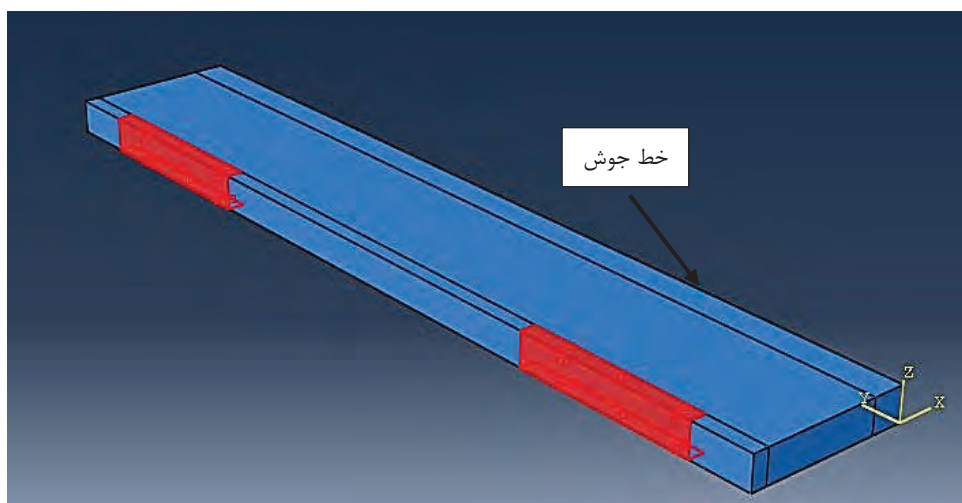
5. Von-Mises



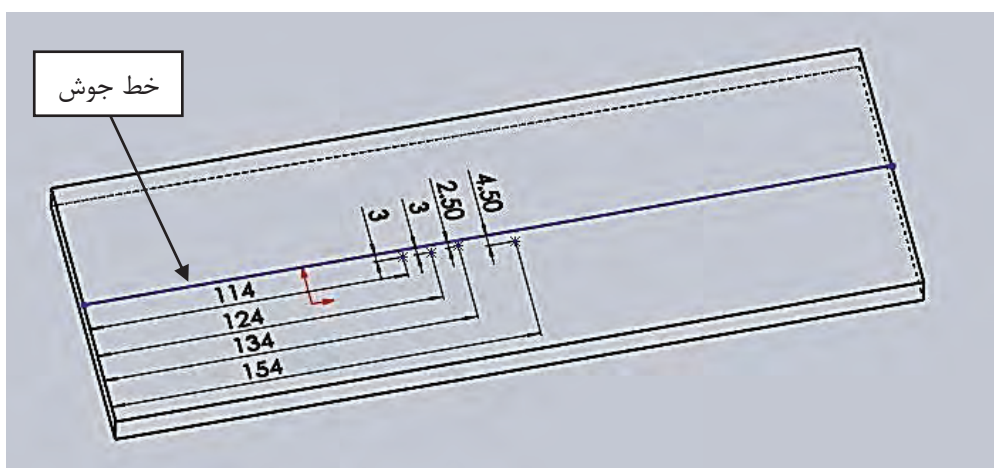
شکل ۳. خواص حرارتی و مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V (۲۳).

در دمای بالا خود را نشان می‌دهد (۱۷). با افزایش فاصله از خط جوش مشاهده می‌شود اختلاف در پیک کاهش می‌یابد. ترموکوپل‌ها به دلیل ابعاد کوچکتر و هدایت حرارتی سریع‌تر نسبت به قطعه کار به دلیل جنس متفاوتشان، باعث می‌شوند حداکثر دما ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها بیشتر از دمای حاصل از شبیه‌سازی باشد.

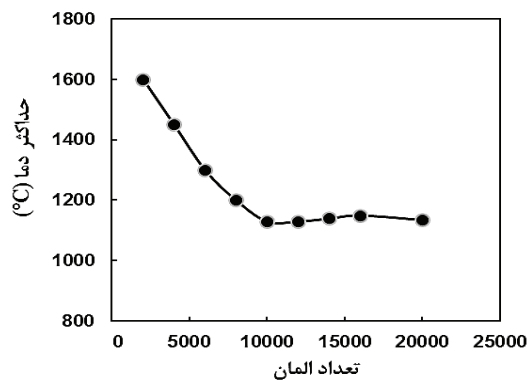
مناسبی بین نمودارهای تغییرات دمایی حاصل از شبیه‌سازی و نمودارهای حاصل از آزمایش‌های عملی در ترموکوپل‌های قرار گرفته در موقعیت‌های مختلف، مشاهده می‌شود. فقط در مقادیر ماکزیمم پیک دمایی، اختلاف قابل توجهی مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد این اختلاف، به اختلال در معادلات انتقال حرارت، در نتیجه وجود ترموکوپل‌های حرارتی در آن بخش از قطعه کار مرتبط است که بخصوص



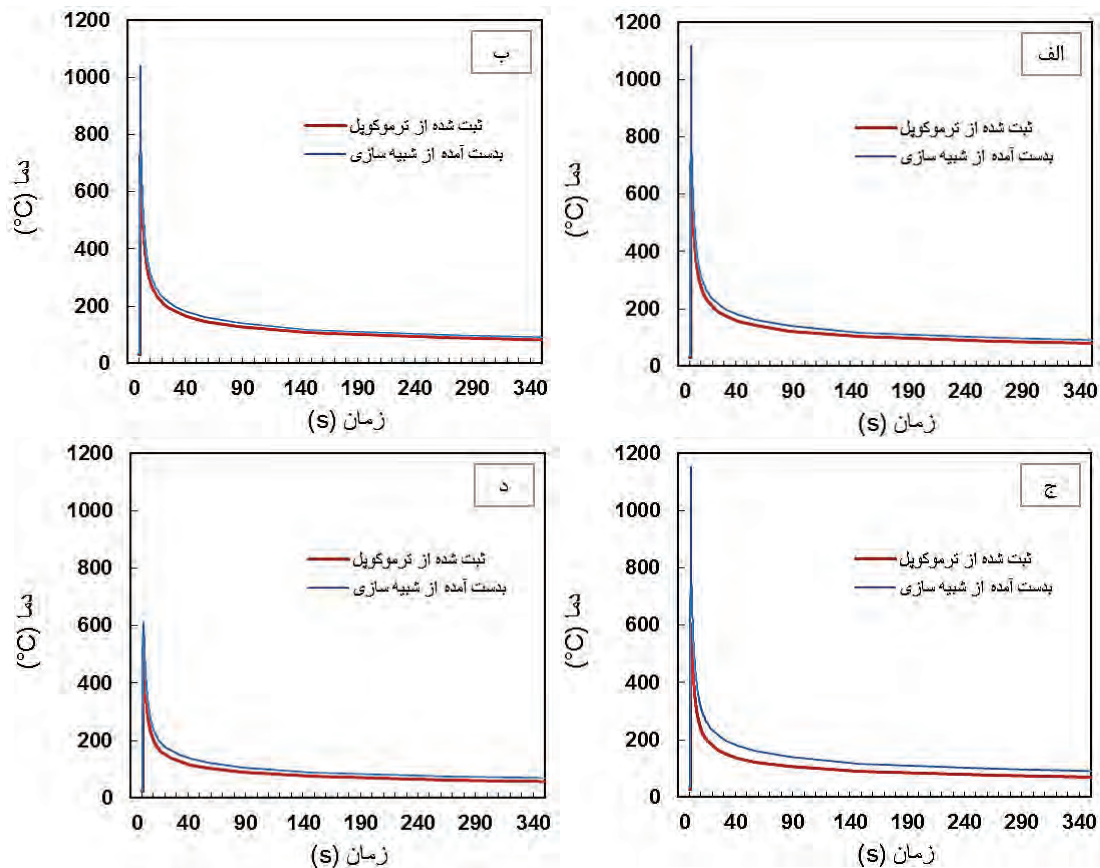
شکل ۴. محل قرارگیری گیره‌های قطعه کار.



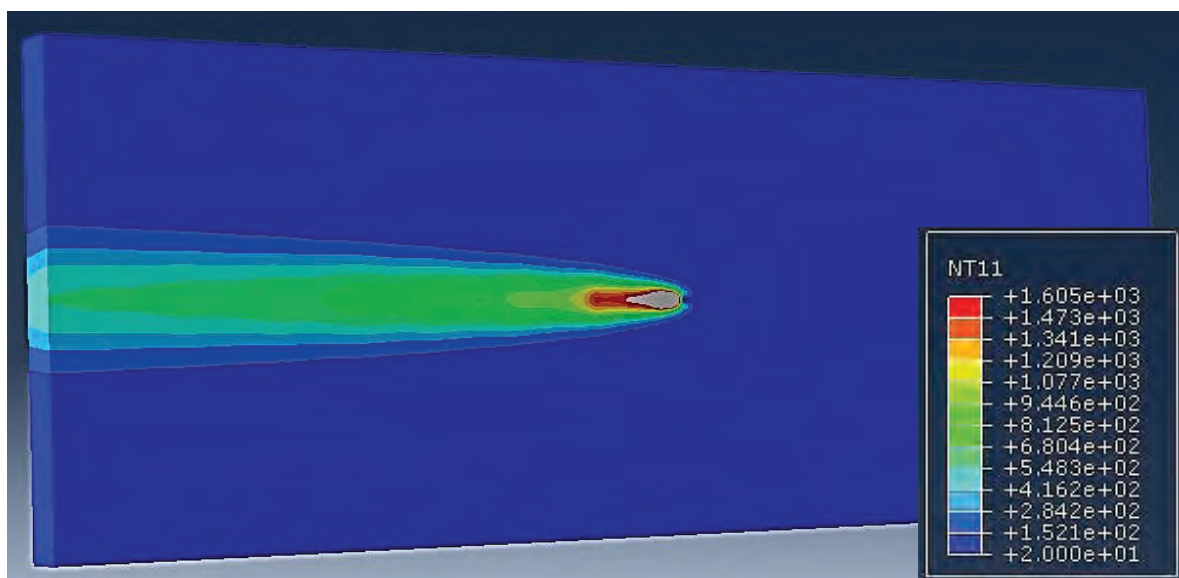
شکل ۵. محل قرارگیری ترموکوپل‌ها جهت مقایسه نتایج عملی با شبیه‌سازی.



شکل ۶. تابعیت حداکثر دما در شبیه‌سازی از تعداد المان‌ها.



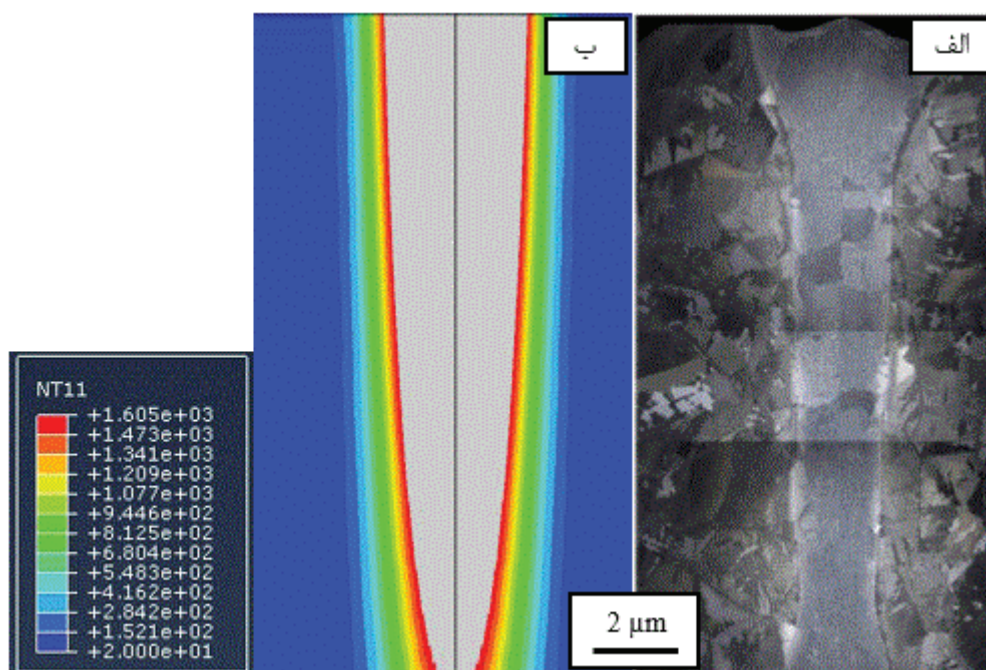
شکل ۷. مقایسه تغییرات دمایی ترموکوپل‌ها در موقعیت‌های مختلف (۲۵) با نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش (الف) ترموکوپل اول (ب) ترموکوپل دوم (ج) ترموکوپل سوم (د) ترموکوپل چهارم.



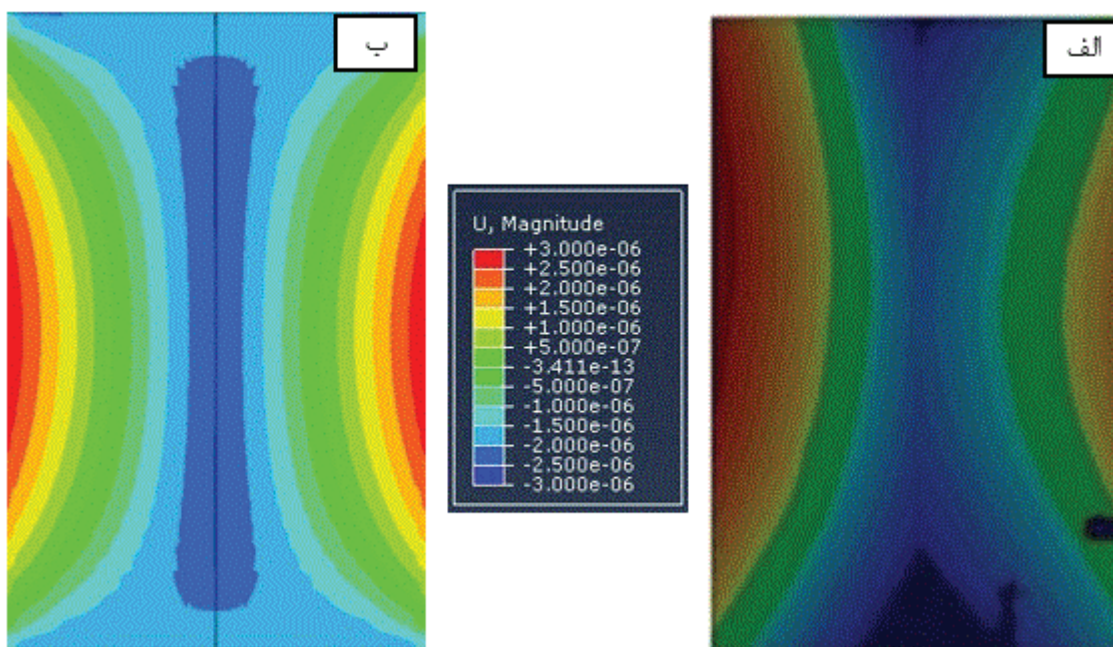
شکل ۸. گراف توزیع دما حین فرآیند جوشکاری پرتو الکترونی.

متاثر از جوشکاری، اطراف خط جوش کوچک باشد در این شکل به خوبی نشان داده می‌شود.

شکل ۸ گراف توزیع دمایی در حین فرآیند EBW را نشان می‌دهد. تمرکز بالای منبع حرارتی که باعث می‌شود منطقه‌ی



شکل ۹. مقایسه ناحیه متأثر از حرارت الف) بدست آمده از بررسی ریزساختاری (۲۵) ب) بدست آمده از شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش.



شکل ۱۰. اعوجاج ایجاد شده در صفحه‌ی Z به صورت کیفی و کمی الف) بدست آمده از اسکتر سه بعدی (۲۵) ب) بدست آمده از شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش.

شکل ۱۰-الف اعوجاج نهایی بدست‌آمده را در غالب گراف توزیع جابجایی، بعد از مرحله‌ی خنک شدن نشان می‌دهد. گراف توزیع اعوجاج توسط سیستم اسکتر سه بعدی ثبت شده است. شکل ۱۰-ب نتایج اعوجاج متناظر از شبیه‌سازی عددی را در صفحه با بردار نرمال Z نشان می‌دهد. از هر دو منظر کیفی و کمی، تطابق بسیار مناسبی بین نتایج حاصل

شکل ۹-الف ریزساختار آلیاژ بعد از جوشکاری را نشان می‌دهد (۲۵). پیش‌بینی ناحیه HAZ با استفاده از مدل‌سازی منبع حرارتی، یکی از مزایا و پر اهمیت‌ترین دستاوردهای شبیه‌سازی است. شکل ۹-ب نشان می‌دهد ناحیه HAZ پیش‌بینی شده از شبیه‌سازی، مطابقت قابل قبولی با ناحیه HAZ حاصل از بررسی ریزساختار آلیاژ پایه بعد از جوشکاری، دارد. همچنین عمق نفوذ نیز در این مدل به درستی مدل‌سازی شده است.

References

- [1] Aburuga TKS, Sedmak AS, Radakovic ZJ. Numerical aspects for efficient welding computational mechanics. *Therm Sci*. 2013;17(1):139-148.
- [2] Schultz H. *Electron beam welding*. Cambridge: Abington Publishing. 2005; 198-228.
- [3] Luo Y, Liu J, Ye H. An analytical model and tomographic calculation of vacuum electron beam welding heat source. *Vacuum*. 2010;84(6):857-863.
- [4] Lacki P, Adamus K. Numerical simulation of the electron beam welding process. *Comput Struct*. 2011;89(11-12) 977-985.
- [5] Roberts J. *ASM handbook of Welding brazing and soldering*. ASM International. 1993; 2873.
- [6] Cottrell CLM. *Electron beam welding - a critical review*. *Mater Des*. 1985;6 (6) 285-291.
- [7] Tian Y, Wang C, Zhu D, Zhou Y. Finite element modeling of electron beam welding of a large complex Al alloy structure by parallel computations. *J Mater Process Technol*. 2008;199(1):41-48.
- [8] Darmadi DB. Validating the accuracy of heat source model via temperature histories and temperature field in bead-on-plate welding. *Int J Eng Technol*. 2011;11 (5) 12-20.
- [9] Lindgren LE. Finite element modeling and simulation of welding Part 1: Increased complexity. *J Therm Stress*. 2006;24 (11) 37-41.
- [10] Lindgren LE. Finite element modeling and simulation of welding. part 2: Improved material modeling. *J Therm Stress*. 2001;24(3):195-231.
- [11] Lindgren LE. Finite element modeling and simulation of welding. Part 3: Efficiency and integration. *J Therm Stress*. 2001;24(4):305-334.
- [12] Deng D, Murakawa H. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements. *Comput Mater Sci*. 2006;37(3):269-277.
- [13] Deng D, Murakawa H, Liang W. Numerical simulation of welding distortion in large structures. *Comput Methods Appl Mech Eng*. 2007;196(45-48):4613-4627.
- [14] Tadano S, Hino T, Nakatani Y. A modeling study of stress and strain formation induced during melting process in powder-bed electron beam melting for Ni superalloy. *J Mater Process Technol*. 2018;257 (2) 163-169.
- [15] Liu C, Zhang J, Wu B, Gong S. Numerical investigation on the variation of welding stresses after material removal from a thick titanium alloy plate joined by electron beam welding. *Mater Des*. 2012;34 (1) 609-617.
- [16] Karlsson K, Sorensen H. *Abaqus Theory Manual Version 5*. Simulia. 2016; 414.
- [17] Tsirkasa S, Papanikos P, Kermanidis T. Numerical Simulation of the Laser Welding. *J Mater Process Technol*. 2013;134 (3) 59-69.
- [18] Babalová E, Behúlová M. Numerical simulation of temperature fields by welding of Ti-Al alloys applying volumetric heat source. *Adv Mater Res*. 2014;887-888 (1) 1280-1283.

از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری اعوجاج با استفاده از دستگاه اسکنر سه بعدی بدست آمده است که نشان از دقت قابل قبول منبع حرارتی ترکیبی مورد استفاده در این پژوهش و به‌طور کلی شرایط شبیه‌سازی دارد. به اختلاف جزئی در مقادیر عددی اعوجاج ایجاد شده، به مبحث قید و بند در حین جوشکاری مرتبط است. در شبیه‌سازی، قیدها طوری در نظر گرفته شده‌اند که حین جوشکاری، قطعه کار کاملاً ثابت و بدون کوچک‌ترین تغییر مکان در جای خود ثابت باشند. در حالی که می‌دانیم در واقعیت چنین چیزی غیر ممکن است و قطعه کار در هر حالتی مقادیر جزئی حین جوشکاری حرکت خواهد کرد که علت آن به انبساط و انقباض حین تغییرات دمایی مرتبط است.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند جوشکاری پرتو الکترونی با استفاده از مدل منبع حرارتی ترکیبی جهت بررسی توزیع حرارت و اعوجاج نهایی ایجاد شده در قطعه کار بر روی ورق از جنس Ti-6Al-4V با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱- با استفاده از منبع حرارتی ترکیبی که تشکیل شده است از منبع حرارتی حجمی و یک منبع حرارتی سطحی، ناحیه میخی شکل جوش در جوشکاری پرتو الکترونی به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است که از دقت خوبی برخوردار است.

۲- پارامترهای منبع حرارتی از طریق بهینه‌سازی با مش‌های ریزتر بدست آمده است و برای مدل منبع حرارتی ترکیبی در مدل سه بعدی استفاده شده است. بنابراین بدون آزمون و خطا در شبیه‌سازی پروفیل ناحیه مذاب با دقت خوبی پیش‌بینی شده است.

۳- در این مدل ناحیه HAZ از هر دو منظر عمق و عرض به درستی و با دقت قابل قبول شبیه‌سازی شده است و تطابق بسیار مناسبی با بررسی‌های ریزساختاری دارد که در فرآیندهای جوشکاری بسیار مورد توجه است.

۵. تعهدات

این پژوهش توسط شرکت ماهان صنعت نوید تهران مورد حمایت مالی و تجهیزاتی قرار گرفته است و تیم تحقیقاتی آن شرکت حق نشر و چاپ نتایج حاصل را طی نامه به شماره ۱۵۳/الف/۹۷ به نویسندگان این مقاله داده است.

- [19] Liu C, Wu B, Zhang JX. Numerical investigation of residual stress in thick titanium alloy plate joined with electron beam welding. Metall Mater Trans B Process Metall Mater Process Sci. 2010;41 (5)1129-1138.
- [20] Cai Z, Zhao H. Efficient finite element approach for modelling of actual welded structures. Sci Technol Weld Join. 2003;8(3)195-204.
- [21] Michaleris P, Debicari A. Prediction of welding distortion. Am Weld Soc - Weld J. 1997;76 (April) 172-181.
- [22] Eisazadeh H, Bunn J, Achuthan A, Goldak J, Aidun DK. A Residual Stress Study in Similar and Dissimilar Welds. Weld J Res Suppl. 2016; 95 (April):111-119.
- [23] Bermingham MJ, McDonald SD, Nogita K, St. John DH, Dargusch MS. Effects of boron on microstructure in cast titanium alloys. Scr Mater. 2008;59 (5) 538-541.
- [24] Rai R, Burgard P, Milewski JO, Lienert TJ, DebRoy T. Heat transfer and fluid flow during electron beam welding of 21Cr - 6Ni - 9Mn steel and Ti - 6Al - 4V alloy. J Phys D: Appl Phys. 2009; 42 (1) 1-12.
- [25] Chiumenti M, Cervera M, Dialami N, Wu B, Jinwei L, Agel de Saracibar C. Numerical modeling of the electron beam welding and its experimental validation. Finite Elem Anal Des. 2016;121 (1) 118-133.