



Thermal Analysis of Laser Welding in Joint of Stainless Steel to Low Carbon Steel Using Finite Element Method (FEM)

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mehrabi Gohari E.*¹ PhD,
 Mohammadi M.¹ MSc,
 Nozari M.¹ MSc,
 Bagherpour H.¹ MSc

How to cite this article

Mehrabi Gohari, Mohammadi M, Nozari M, Bagherpour H. Thermal Analysis of Laser Welding in Joint of Stainless Steel to Low Carbon Steel Using Finite Element Method (FEM). Modares Mechanical Engineering. 2019;19(6):1475-1482.

ABSTRACT

Welding by laser beams is one of the essential parts of production process in automobile manufacturing used for joining plates. In this paper, for the first time, simulation of pulsed laser welding process of joining stainless steel to low carbon steel was carried out. For this purpose, at first, thermal analysis was carried out by finite element method and with exact definition of thermal resource; temperature profile and the dimensions of the melting area was gained as results. This was followed by mechanical analysis. The thermal analysis results were stored in a mechanical element as history to obtain the thermal conditions of the material. As results of this analysis, the strain of elastic and plastic as well as the amount of residual stress was obtained. The results show that low carbon steel passes through higher range heat in cooling process, because of higher thermal conductivity. Also, low carbon steel saves more residual stress due to higher yield stress. For validation of simulated model, two plates of 304 stainless steel with similar parameters with the simulated model were welded by laser welding. Comparing the results obtained from the experimental model with the simulated model shows a very good agreement.

Keywords Pulsed Laser Welding; Finite Element Method; Welding of Dissimilar Metals; Thermal Analysis; Mechanical Analysis

¹Mechanical Engineering Department, Payam-e-Nour University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Payam-e-Nour University, Tehran, Iran
 Phone: -
 Fax: -
 e.mehrabi@pnu.ac.ir

Article History

Received: April 30, 2018
 Accepted: February 16, 2019
 ePublished: June 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Laser welding [2] Thermal modelling of laser welding and related processes: A literature review [3] The effect of process parameters on keyhole welding with a 400 W Nd: YAG pulsed laser [4] A review of laser welding techniques for magnesium alloys [5] Numerical simulation of weld pool shape during laser beam welding [6] Comparison of continuous wave and pulsed wave laser welding effects [7] Laser welding of dissimilar metal combinations [8] Laser drilling simulation of glass by using finite element method and selecting the suitable Gaussian distribution [9] Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; Statistical modelling and optimization [10] Laser welding of steel to aluminium: Thermal modelling and joint strength analysis [11] Effect of dual laser beam on dissimilar welding-brazing of aluminum to galvanized steel [12] Nd: YAG pulsed laser welding of TC4 Ti alloy to 301L stainless steel using Ta/V/Fe composite interlayer [13] Influences of laser welding parameters on the geometric profile of Ni-base superalloy Rene 80 weld-bead [14] Numerical and experimental study of geometrical dimensions on laser-TIG hybrid welding of stainless steel 1.4418 [15] Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel [16] Development of a finite element based heat transfer model for conduction mode laser spot welding process using an adaptive volumetric heat source [17] Some studies on weld bead geometries for laser spot welding process using finite element analysis

تحلیل حرارتی جوشکاری لیزر در اتصال فولاد زنگ‌نزن با فولاد کم‌کربن با استفاده از روش المان محدود

احسان مهربانی گوهری* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

میلا محمدی MSC

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

مصطفی نوذری MSC

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

حسین باقرپور MSC

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

جوشکاری با پرتولیزر، یکی از فرآیندهای تولیدی مهم برای اتصال ورق‌ها در صنعت خودروسازی است. در این پژوهش برای نخستین بار فرآیند جوشکاری لیزر پالسی اتصال غیرهمجنس فولاد زنگ‌نزن به فولاد کم‌کربن شبیه‌سازی شده است. برای این منظور در ابتدا با استفاده از روش المان محدود و تعریف دقیقی از منبع حرارتی، تحلیل حرارتی صورت گرفت که در نتیجه آن پروفیل دمایی و ابعاد منطقه ذوب به دست آمده است. سپس تحلیل مکانیکی، انجام و نتایج تحلیل حرارتی به‌صورت تاریخچه در المان‌های مکانیکی ذخیره شد تا شرایط حرارتی مواد به دست آید. در نتیجه این تحلیل، کرنش الاستیک و پلاستیک و همچنین میزان تنش پسماند به دست آمد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که فولاد کم‌کربن به‌دلیل ضریب هدایت حرارتی بالاتر حین سرد شدن، حرارت بیشتری را از خود عبور می‌دهد و همچنین فولاد کم‌کربن به‌دلیل تنش تسلیم بالاتر در انتها تنش پسماند بیشتری را در خود ذخیره می‌کند. برای اعتبارسنجی نتایج دو ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در آزمایشگاه، با پارامترهای مشخص مشابه با مدل شبیه‌سازی شده متجانس توسط فرآیند جوشکاری لیزری جوش داده شدند. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل آزمایشگاهی با مدل شبیه‌سازی شده تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: جوشکاری لیزر پالسی، روش المان محدود، جوشکاری فلزات غیرهمجنس، تحلیل حرارتی، تحلیل مکانیکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۷

*نویسنده مسئول: e.mehrabi@pnu.ac.ir

۱- مقدمه

روش‌های جوشکاری مختلف که به‌طور معمول استفاده می‌شود، عبارت از جوشکاری قوسی، جوشکاری مقاومتی، جوشکاری با پرتوی پرتولیزر و جوشکاری حالت جامد هستند [1]. یکی از این روش‌ها که اهمیت ویژه‌ای در اتصال ترکیبات فلزی مشابه و غیرمشابه دارد، روش جوشکاری لیزر بوده که امروزه بسیار رو به پیشرفت است و زیرشاخه جوشکاری با پرتوی پرتولیزر است. توسعه لیزرهای با توان بالا و کنترل رباتیک، کاربرد جوشکاری لیزری را در صنایع خودرو، هوایی و کشتی‌سازی تسریع کرده است [2]. برخی از مزایای جوشکاری نقطه‌ای لیزری در مقایسه با جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی (RSW)، کاهش هزینه در صنایع خاص، انعطاف‌پذیری بالا در اجرای جوش‌ها، قابلیت جوش از یک طرف و بدون تماس (خلاف جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای)، صرفه اقتصادی از لحاظ کم‌شدن هزینه تجهیزات و هزینه نگهداری، قابلیت اتوماسیون بالا و ایمنی فرآیند جوشکاری لیزر، چگالی انرژی بالا، نفوذ عمیق جوش، نسبت زیاد عمق به عرض جوش و منطقه متأثر از حرارت (HAZ) باریک است. نرخ قراضه کم به‌دست‌آمده با فرآیند لیزر، آن را به یک روش مقرون‌به‌صرفه برای کاربردهای فولاد زنگ‌نزن تبدیل کرده است [3]. در جوشکاری لیزری،

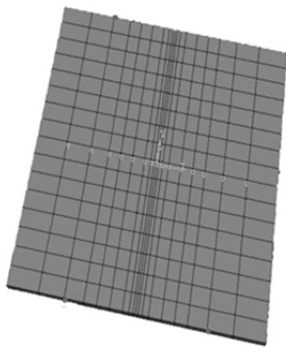
راندنمان منبع حرارتی کم است. دلیل این امر بازتاب زیاد اشعه لیزر روی سطح فلز است. بازتاب لیزر CO₂ روی سطح آلومینیوم پولیش‌شده حدود ۹۸٪ است. در لیزرهای Nd:YAG به‌دلیل طول موج کوتاه‌تر، بازتابش از سطح کاهش می‌یابد و در نتیجه راندنمان جوشکاری افزایش می‌یابد که این امر باعث استفاده بیشتر از این لیزرها در صنعت شده است [4, 5].

از اشعه لیزر می‌توان در جوش‌دادن آلیاژها و سوپرآلیاژها با نقطه ذوب بالا و برای جوش‌دادن فلزات غیرهمجنس استفاده نمود. این روش جوشکاری برای استفاده‌های دقیق و حساس بسیار مناسب است و مورد استفاده قرار می‌گیرد. جوشکاری لیزر پالسی دارای چندین متغیر مختلف مانند انرژی پالس، عرض پالس، توان اشعه لیزر، قطر اشعه لیزر، جذب، سرعت حرکت اشعه روی سطح ماده، مواد و مسیر جوشکاری است [6]. اگرچه جوشکاری لیزری، انعطاف‌پذیری جدیدی در اتصال فلزات آرایه می‌کند و جوش‌های لیزری معمولاً کیفیت بالایی دارند، اما جوش‌های لیزری با کیفیت بالا تنها بعد از بهینه‌سازی متغیرهای کلیدی فرآیند به دست می‌آیند. کیفیت جوش در جوشکاری لیزر وابسته به متغیرهای فرآیند بوده که شامل ویژگی‌های پرتولیزر، متغیرهای منحصر به فرد فرآیند و خواص فیزیکی و شیمیایی فلزات پایه است [7]. یافتن ترکیب بهینه از این متغیرها در برنامه‌های کاربردی صنعتی لازم است. تکنولوژی محاسبات رایج و روش المان محدود (FEM) که براساس تکنیک‌های عددی هستند، در سال‌های اخیر به‌عنوان یک روش مطلوب برای پیش‌بینی پروفیل دما و هندسه جوش، کاهش آزمون و خطا و همچنین کاهش هزینه‌ها در آزمون تجربی شروع به شکل‌گرفتن کردند. با به‌کارگیری این روش می‌توان بسیاری از پدیده‌های فیزیکی مرتبط با لیزر را شبیه‌سازی کرد و اثر متغیرهای مختلف را بر این پدیده‌ها به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار داد. در این زمینه از نرم‌افزارهای تجاری اجزای محدود استفاده می‌شود که قابلیت بالایی در شبیه‌سازی فرآیندهای واقعی صنعتی با کمترین ساده‌سازی‌ها دارند. به‌عنوان نمونه، شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری لیزری شیشه به‌روش اجزای محدود و انتخاب توزیع گوسین لیزر مناسب توسط گلچین‌بیدگی و همکاران انجام شده است [8]. همچنین مرادی و گلچین شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری فیبرلیزر سوپرآلیاژ Inconel 718 با ضخامت یک میلی‌متر را از طریق روش المان محدود مورد بررسی قرار داده‌اند [9]. مگو و همکاران [10]، یک مدل حرارتی المان محدود برای پیش‌بینی سیکل حرارتی گذرا در محل اتصال نامتجانس فولاد و آلومینیوم توسط جوشکاری لیزری برای سطوح مختلف انرژی وارده با تغییر منبع قدرت و مدت زمان را توسعه دادند. محمدپور و همکاران [11] اتصال نامتجانس آلومینیوم و فولاد با استفاده از جوشکاری لیزری دواشعه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۸، ژانگ و همکاران [12] امکان جوشکاری لیزری نوع Nd:YAG را برای اتصال نامتجانس آلیاژ تیتانیوم به فولاد زنگ‌نزن مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش حاضر برای نخستین بار، اتصال نامتجانس دو ورق فولاد زنگ‌نزن و فولاد کم‌کربن با استفاده از جوشکاری لیزر به‌صورت حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور در ابتدا با استفاده از روش المان محدود و تعریف دقیقی از منبع حرارتی، تحلیل حرارتی صورت گرفته که در نتیجه آن پروفیل دمایی و ابعاد منطقه ذوب به دست آمده است. سپس تحلیل مکانیکی انجام گرفت، به این روش که نتایج تحلیل حرارتی به‌صورت تاریخچه در المان‌های مکانیکی ذخیره شد تا شرایط حرارتی مواد به دست آید. در نتیجه این تحلیل، کرنش الاستیک و پلاستیک و همچنین میزان تنش

خروجی و درجه آزادی تحلیل را فراهم کند. در نرم‌افزار، المانی که تمام شرایط مورد نیاز برای تحلیل حرارتی را داشته باشد، المان shell57 است. این المان دارای چهار گره و سه بُعدی است. همچنین قابلیت رسانش حرارتی درون صفحه‌ای دارد، بنابراین می‌توان از المان shell57 برای تحلیل حرارتی استفاده نمود. بارها و شرایط مورد نظر را می‌توان روی گره‌ها یا خود المان اعمال کرد. جابه‌جایی یا شار حرارتی و تابشی را می‌توان به‌عنوان بارهای سطحی روی سطوح المان و نرخ تولید حرارت را می‌توان به‌صورت بارهای حجمی در گره‌ها اعمال کرد.

۳-۳- مدل‌سازی و مش‌بندی اتصالات

گام اول برای شروع تحلیل، مدل‌سازی و مش‌بندی اتصال است. برای این منظور، دو ورق به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در ۳۰۰ میلی‌متر و به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر به‌صورت لب‌به‌لب در مجاورت هم قرار گرفته و نحوه حرکت لیزر به‌صورت خطی است. این امر باعث می‌شود تا تمرکز مش‌بندی در اطراف خط جوش بیشتر شود. به‌منظور ایجاد مدل اجزای محدود ورق‌ها، مش‌بندی مدل به‌صورت دستی و با نوشتن ماکروکد انجام شده است تا بتوان تعداد و اندازه المان‌ها را به‌صورت دلخواه تعیین نمود. با توجه به گرادیان‌های حرارتی شدیدتر در نواحی نزدیک به خط مرکزی جوش و در نتیجه نیاز به دقت بالاتر، مدل هندسی باید به‌گونه‌ای مش‌بندی شود که در نواحی حساس نزدیک خط جوش، مش‌بندی ریزتر باشد. همچنین برای کاهش زمان محاسبات، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، باید مش‌بندی با افزایش فاصله از خط مرکزی جوش درشت‌تر شود.



شکل ۱) مدل‌سازی و مش‌بندی دو ورق لب‌به‌لب

۳-۴- خواص حرارتی فولاد کم‌کربن و فولاد زنگ‌نزن استنیتی

خواص مواد فلزی همچون چگالی، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه با تغییرات دما تغییر خواهند کرد. اگر دما تغییرات زیادی نداشته باشد، می‌توان از مقادیر میانگین در محاسبات استفاده کرد. اما به این دلیل که در فرآیند جوشکاری، دمای قطعه جوش داده‌شده به‌شدت تغییر می‌کند، در شبیه‌سازی جوشکاری خواص ماده وابسته به دما در نظر گرفته می‌شود.

در بسیاری از تحقیقات، به‌منظور در نظر گرفتن تلاطم و جریان مذاب درون حوضچه جوش (انتقال حرارت ناشی از همرفت)، افزایش چندبرابری ضریب هدایت حرارت در دمای لیکوئیدوس نسبت به سالییدوس پیشنهاد شده که این ضریب تصحیح با سعی و خطا و از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی به دست آمده است. در نمودارهای ۱ و ۲ [15, 16]، خواص حرارتی مربوط به فولاد زنگ‌نزن استنیتی و فولاد کم‌کربن به‌صورت توابعی از دما آورده شده است.

۲- شرح مساله

کیفیت جوش به‌شدت به هندسه حوضچه جوش وابسته است و هندسه حوضچه جوش نقش مهمی در تعیین خواص مکانیکی اتصال جوشکاری شده دارد. بنابراین انتخاب متغیرهای فرآیند جوشکاری برای به‌دست آوردن هندسه جوش بهینه بسیار ضروری است.

مردی و قریشی پارامترهای جوشکاری لیزری اتصال لب‌به‌لب سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene 80 را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که ظاهر جوش، متأثر از حرارت ورودی لیزر و پارامترهای ورودی فرآیند لیزر است. همچنین سرعت جوشکاری و فشار گاز، پارامترهای مهم و موثر روی خروجی‌های فرآیند است و فشار گاز بالاتر موجب عیوب ظاهری جوش می‌شود [13].

میزان پژوهش‌ها و تحقیقات در زمینه اتصال دو فلز با خواص متفاوت با فرآیند جوشکاری لیزر پالسی بسیار کم بوده و این حیطه کاری، فضای مناسبی برای تحقیق و آزمایش است. همچنین به‌دلیل تفاوت در ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن با فولاد کم‌کربن، دستیابی به اتصالی با خواص مطلوب دشوار است. در صورتی که بتوان یک روش دقیق غیرآزمایشگاهی و تئوری ارائه داد که خواص حرارتی و مکانیکی یک عملیات جوشکاری را به دست آورد، می‌توان برای اتصالات مختلف و انواع متفاوت فلزات، پارامترهای موثر در جوشکاری را با هزینه کمتر و سرعت بیشتر معین کرد. در این پژوهش، مساله اصلی یافتن راه‌حلی عددی، تئوری و قابل تعمیم برای شبیه‌سازی جوشکاری لیزر بین دو فلز غیرهمجنس فولاد زنگ‌نزن و کم‌کربن و همچنین ایجاد زمینه مناسب برای پژوهش‌هایی در زمینه بهبود این فرآیند است.

۳- روش حل

در این بخش، روند کلی شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری لیزر به‌همراه فرضیات به‌کاررفته ارائه شده است. ابتدا روند مدل‌سازی و مش‌بندی مدل، تشریح و سپس نحوه تحلیل حرارتی جوشکاری لیزری ورق‌های از جنس فولاد زنگ‌نزن و کم‌کربن با ابعاد مشخص و از نوع اتصال لب‌به‌لب بیان شده است. روش‌های مختلفی توسط محققان برای تحلیل عددی مسایل جوشکاری با لیزر ارائه شده است که به‌عنوان نمونه می‌توان به DFLUX نویسی با نرم‌افزار FORTRAN و همچنین شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای تجاری ANSYS و ABAQUS اشاره کرد [14]. در این تحقیق کلیه مراحل شبیه‌سازی با نرم‌افزار المان محدود ANSYS 14.5 و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پارامتری نرم‌افزار (APDL) انجام شده است.

۳-۱- شبیه‌سازی جوشکاری

گام اول در حل مساله، مدل‌سازی عملیات جوشکاری لیزر با دو فلز با مشخصات دقیق مطرح شده است. این مدل شامل دو بخش مدل مناسبی از منبع حرارتی و مدلی از رفتار ماده است. در ادامه به‌صورت گام‌به‌گام مراحل حل مساله بیان شده و همچنین در این تحلیل از دو فلز با مشخصات جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱) خواص حرارتی فولاد کم‌کربن و فولاد زنگ‌نزن

نوع فلز	چگالی	گرمای ویژه	رسانش گرمایی
فولاد کم‌کربن	۷۸۵۰	۴۸۰	۳۷
فولاد زنگ‌نزن	۷۸۰۰	۴۷۷	۱۴

۳-۲- تعیین المان برای تحلیل حرارتی

برای تحلیل مدل‌ها در جوشکاری، المانی مورد نیاز است که ورودی،

مدل مخروطی نیمه‌بیضوی نیز به صورت یک توزیع گاوسی در صفحه $x-y$ و یک توزیع خطی در راستای عمق (z) است و به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$q(x, y, z) = \frac{6Q_{keyhole}}{a_c b_c c_c \pi^{3/2}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a^2}\right) \left[1 - \frac{(1-d_c)|z|}{b_c} \exp\left(-3\frac{y^2}{c_c^2}\right)\right] \quad (3)$$

اما در این زمینه مشکلی وجود دارد که در حالت عادی، نرم‌افزار ANSYS قادر به اعمال منبع حرارتی متحرک با زمان نیست. بدین منظور می‌بایست از زبان برنامه‌نویسی APDL استفاده کرد. بنابراین ابتدا معادلات موجود، به صورت معادلات پارامتری در نرم‌افزار نوشته و ذخیره می‌شوند. منبع حرارتی در هر پالس، اعمال و در زمان خاموشی پالس، برداشته می‌شود. برای اعمال حرکت منبع حرارتی نیز باید معادلات مدل برحسب مختصات موضعی تعریف شوند، تا بدین ترتیب با تغییر مختصات موضعی تعریف شده بتوان منبع حرارتی را حرکت داد.

به دلیل عدم وجود معادله یکپارچه برای حرکت منبع حرارتی روی خط جوش برحسب زمان، ناچار به استفاده از مختصات گره‌هایی هستیم که در هر گام زمانی، منبع حرارتی روی آنها قرار دارد. لذا با نوشتن دستورات در حلقه تکرار، علاوه بر تغییر زمان با تغییر شماره گره و فراخوانی مختصات آن گره در کد نوشته شده، مختصات محل جدید اعمال منبع حرارتی به دست می‌آید. از طرفی، مدت زمان بارگذاری و اعمال منبع حرارتی روی هر گره، بستگی به سرعت جوشکاری و تعداد المان‌های روی خط جوش دارد. با این روش، دیگر نیازی به معادله یکپارچه برحسب زمان نیست.

۳-۶- شرایط مرزی مدل حرارتی

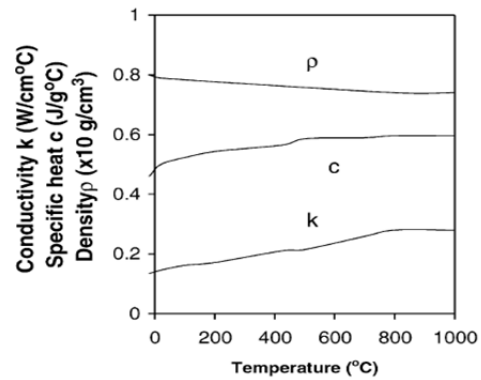
در جوشکاری با پرتولیزر، انتقال حرارت از طریق تابش و همرفت صورت می‌گیرد. در نرم‌افزار ANSYS، برای اعمال شرط مرزی تابش روی سطوح، از المان‌های سطحی Surf152 استفاده شده است. این المان یک المان حرارتی است که با ϵ تا 9 گره مشخص می‌شود و برای اعمال شرط تابش مناسب است. با استفاده از این المان می‌توان تابش بین یک سطح و یک گره خارجی را ایجاد نمود. به این صورت که سطوح تابش با المان‌های سطحی پوشش داده شده است و گره خارجی المان به‌عنوان نماینده محیط بیرونی تعریف می‌شود. بنابراین، ضریب تابش ماده به‌عنوان خواص این المان و ثابت استفان-بولتزمن به‌عنوان ثابت المان تعریف و دمای محیط روی گره خارجی اعمال می‌شود.

با توجه به گزارشات ارائه شده، در جوشکاری لیزر بخشی از انرژی که به‌خاطر بازتاب از سطح هدر می‌رود، $30/7\%$ و بنابراین انرژی جذب شده، $69/3\%$ توان لیزر است [17]. انتقال حرارت از طریق همرفت در کلیه سطوح به‌جز سطح زیری صورت می‌گیرد. ضریب همرفت برابر با 10 و بر کلیه سطوح اعمال شد.

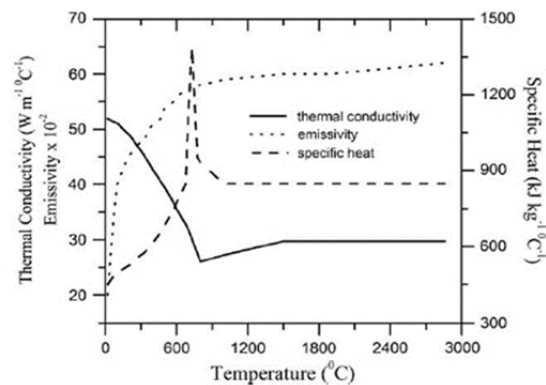
۳-۷- تحلیل مکانیکی

تاکنون موارد بیان شده، مربوط به تحلیل حرارتی فرآیند جوشکاری بود. در این بخش، تحلیل مکانیکی و روش حل مربوطه ارائه می‌شود. برای تحلیل مدل‌ها در جوشکاری، المانی مورد نیاز است که ورودی، خروجی و درجه آزادی تحلیل را فراهم کند.

در نرم‌افزار، المانی که تمام شرایط مورد نیاز برای تحلیل مکانیکی را داشته باشد، المان plane24 است. تعداد گره‌های المان plane24 چهار عدد است و سه بُعدی محسوب می‌شود. بارها و شرایط مورد نظر را می‌توان روی گره‌ها یا خود المان اعمال کرد.



نمودار ۱) خواص حرارتی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴L به صورت توابعی از دما [15]



نمودار ۲) خواص حرارتی فولاد کم‌کربن به صورت توابعی از دما [16]

۳-۵- مدل‌سازی منبع حرارتی

نحوه مدل‌سازی و توزیع انرژی حرارتی، تاثیر زیادی بر سیکل‌های حرارتی، شکل و اندازه حوضچه جوش دارد. بنابراین انتخاب مدلی مناسب برای توزیع انرژی حرارتی ورودی به قطعه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با توجه به ماهیت فرآیند جوشکاری پرتولیزر، مدلی مطلوب است که تاثیر و نقش خط جوش را در نظر بگیرد و یک توزیع صحیح از انرژی در راستای خط جوش داشته باشد. بنابراین، برای این نوع جوشکاری مدل منبع حرارتی حجمی توسعه یافته است. در این بین، مدل‌های ترکیبی از دقت نسبتاً خوبی برخوردار هستند و توصیف خوبی از شکل سوراخ کلیدی ارائه می‌دهند. به همین دلیل در این پژوهش، از یک مدل ترکیبی استفاده شده که این مدل ترکیبی از یک منبع حرارت صفحه‌ای روی سطح بالایی و یک منبع حرارت مخروطی نیمه‌بیضوی در جهت ضخامت است [17].

توزیع حرارت در سطح به‌کمک رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

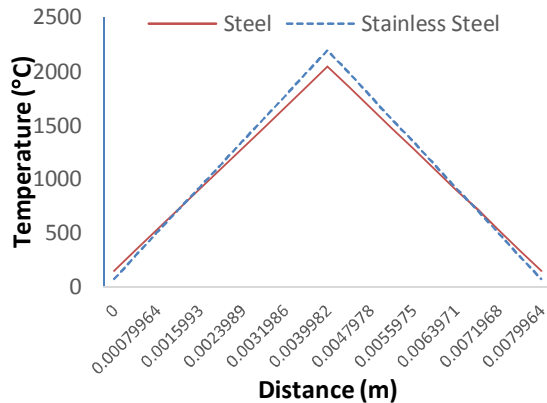
$$Q(x, y) = \frac{3Q_{surf}}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{3(x^2+y^2)}{R^2}\right) \quad (1)$$

که در این رابطه R شعاع منبع حرارتی است و از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$R = \frac{2M_0^2 \lambda F}{\pi D_0} \quad (2)$$

M_0^2 میزان کیفیت پرتو (برای لیزر Nd:YAG با λ برابر با 1064 میکرومتر، کیفیت پرتو $1/0.4$ است)، F فاصله کانونی از لنز متمرکزکننده (75 میلی‌متر) و D_0 مینیموم قطر پرتولیزر (6 میلی‌متر) است.

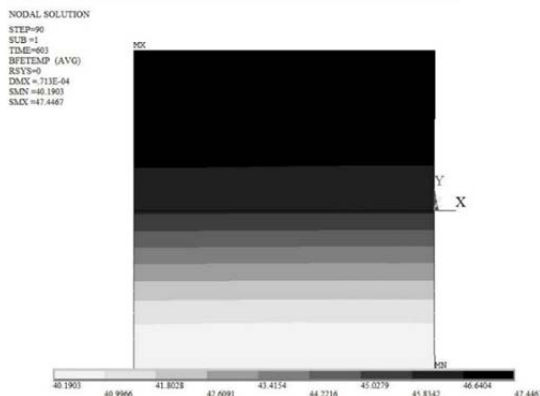
می‌شود که حوضچه جوش کوچک‌تر مربوط به فولاد کم‌کربن است. بنابراین دلیل بزرگ‌تر شدن حوضچه جوش فولاد زنگ‌نزن این است که ضریب انتقال حرارت پایین‌تری نسبت به بقیه دارد و حرارت را کمتر از خود عبور می‌دهد و در خود نگه می‌دارد، در نتیجه دمای آن بالا می‌رود و حوضچه جوش بزرگ‌تری دارد.



نمودار ۳) نمایش اندازه حوضچه جوش در اتصال فولاد کم‌کربن و زنگ‌نزن به صورت مجزا

۴-۲- توزیع حرارتی، کرنش الاستیک و پلاستیک در اتصال نامتجانس

شکل ۲، نمایی از نحوه توزیع حرارتی در ورق‌های نامتجانس جوشکاری شده را نمایش می‌دهد. به دلیل اینکه فولاد کم‌کربن دارای ضریب هدایت حرارتی بیشتری نسبت به فولاد زنگ‌نزن است، انتظار می‌رود (چون هر چه ضریب هدایت حرارتی ماده‌ای بیشتر باشد، حرارت بیشتری را از خود عبور می‌دهد)، حرارت بیشتری را حین سرد شدن مدل از خود عبور دهد و همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، نتایج مطابق با انتظار بود. فولاد کم‌کربن حرارت بیشتری را عبور داده است که فرآیند سرد شدن را تسریع می‌بخشد و فولاد زنگ‌نزن به دلیل ضریب هدایت حرارتی کمتر، حرارت را به خود جذب می‌کند و کمتر اجازه عبور آن را می‌دهد، بنابراین لبه دیگر آن سردتر است و حرارت کمتری به آن می‌رسد. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب کرنش الاستیک و پلاستیک این اتصال را نمایش می‌دهند.



شکل ۲) توزیع حرارت در اتصال نامتجانس (ورق بالا فولاد کم‌کربن و ورق پایین فولاد زنگ‌نزن است)

همان‌طور که در شکل ۳ آورده شده و با توجه به این مورد که میزان تنش تسلیم در فولاد کم‌کربن بیشتر از فولاد زنگ‌نزن است،

در خصوص مدل‌سازی و مش‌بندی اتصال، همانند تحلیل حرارتی باید تمرکز مش‌بندی در اطراف خط جوش بیشتر باشد. به منظور ایجاد مدل اجزای محدود ورق‌ها، مش‌بندی مدل به صورت دستی و با نوشتن ماکروکد انجام شده است تا بتوان تعداد و اندازه المان‌ها را به صورت دلخواه تعیین نمود. نحوه مش‌بندی نیز مشابه مش‌بندی تحلیل حرارتی در نظر گرفته شده است (به بخش ۳-۳ رجوع شود). برای تحلیل مکانیکی خواص شیمیایی و مکانیکی، دو فلز مورد نیاز است که در جدول‌های ۲ و ۳ ارایه شده‌اند. برای اعتبارسنجی دو ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در آزمایشگاه، با پارامترهای مشخص مشابه با مدل شبیه‌سازی شده متجانس، توسط فرآیند جوشکاری لیزری جوش داده شده و نتایج در بخش ۴-۴ ارایه شده است.

جدول ۲) خواص شیمیایی و مکانیکی فولاد کم‌کربن و فولاد زنگ‌نزن

خواص	فولاد کم‌کربن	فولاد زنگ‌نزن
کربن	۰/۰۸	۰/۰۹
منگنز	۲/۰	۰/۴۹
فسفر	۰/۰۴۵	۰/۰۱
سولفور	۰/۰۳	۰/۰۲
سیلیکون	۰/۷۵	۰/۰۴
کرومیوم	۱۶/۰-۱۸/۰	۰/۰۴
نیکل	۱۰/۰-۱۴/۰	۰/۰۵
نیترژن	۰/۱	۰/۰۵
مولیدنوم	۲/۰-۳/۰	۰/۱۷

جدول ۳) مدول الاستیک و تنش تسلیم فولاد کم‌کربن و فولاد زنگ‌نزن

نوع فلز	مدول الاستیک (GP)	تنش تسلیم (GP)
فولاد کم‌کربن	۲۰۰	۰/۲۵
فولاد زنگ‌نزن	۲۰۰	۰/۲۰

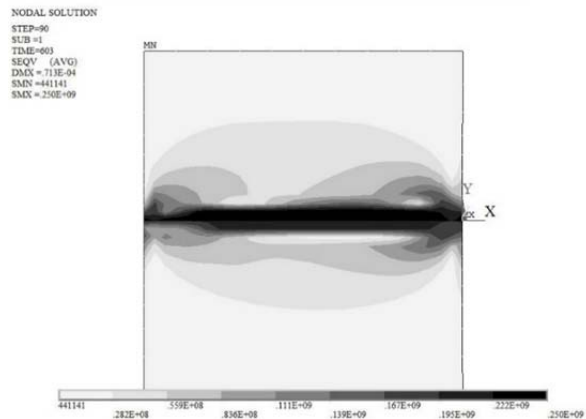
۴- تفسیر و تحلیل نتایج

در ابتدا کدنویسی و تعیین المان‌های مناسب برای مدل‌سازی جوشکاری لیزری انجام شد. در مرحله اول شبیه‌سازی، اتصال متجانس فولاد کم‌کربن با فولاد کم‌کربن و فولاد زنگ‌نزن با فولاد زنگ‌نزن توسط جوشکاری لیزر صورت گرفت. حرارت ورودی برای هر دو یکسان در نظر گرفته شد تا امکان مقایسه آنها با یکدیگر وجود داشته باشد (حوضچه جوش دو مدل مورد مقایسه قرار گرفت). در نهایت، شبیه‌سازی اتصال نامتجانس فولاد زنگ‌نزن به فولاد کم‌کربن با جوشکاری لیزر انجام و پارامترهای توزیع حرارتی، کرنش الاستیک و پلاستیک و میزان تنش پسماند ناشی از اتصال نامتجانس فلزات با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفت.

۴-۱- اندازه حوضچه جوش

اولین پارامتر مورد بررسی، اندازه حوضچه جوش در جوشکاری لیزر بوده است. نمودار ۳ مربوط به توزیع دمایی مقطعی بوده که عمود بر خط جوش زده شده و از حوضچه جوش عبور کرده است و برای به دست آوردن اندازه حوضچه جوش کاربرد دارد. بدین صورت که دمای ذوب ماده مورد نظر را به دست می‌آوریم و آن را روی محور عمودی (محور دما) مشخص و عمود بر آن خطی را رسم می‌کنیم که نمودار را در دو نقطه قطع می‌کند. از این دو نقطه بر محور افقی (محور فاصله) عمود می‌کنیم. فاصله بین این دو اندازه حوضچه بوده، زیرا در این فاصله، دمای ماده از دمای ذوب بالاتر است (دمای ذوب فولاد کربنی و فولاد زنگ‌نزن: ۱۵۱۰°C). از آنجایی که ضریب انتقال حرارت بالاتر فولاد کم‌کربن، حرارت را به خوبی از خود عبور می‌دهد و دمای آن کمتر بالا می‌رود، در نمودار ۳ مشاهده

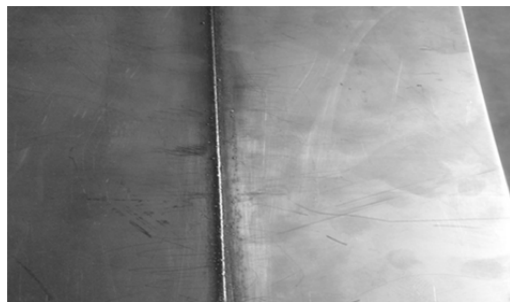
به‌وسیله جوشکاری لیزری جوش داده شد. دو ورق به‌صورت لب‌به‌لب قرار داده شدند، سپس یک پاس جوش لیزر به‌صورت نفوذی و با سرعت ۲ میلی‌متر بر ثانیه اعمال شد (شکل‌های ۶ و ۷). در ادامه، اندازه‌گیری دمای سطح ورق با دماسنج لیزری صورت گرفت و با ایجاد برش مقطع عرضی جوش در آزمایشگاه و تصویر متالوگرافی آن، عرض حوضچه جوش تعیین شد (شکل‌های ۸ و ۹).



شکل ۵) توزیع تنش پسماند اتصال نامتجانس (ورق بالا فولاد کم‌کربن و ورق پایین فولاد زنگ‌نزن است)



شکل ۶) نمایی از عملیات جوشکاری ورق‌های مدل ساخته‌شده آزمایشگاهی

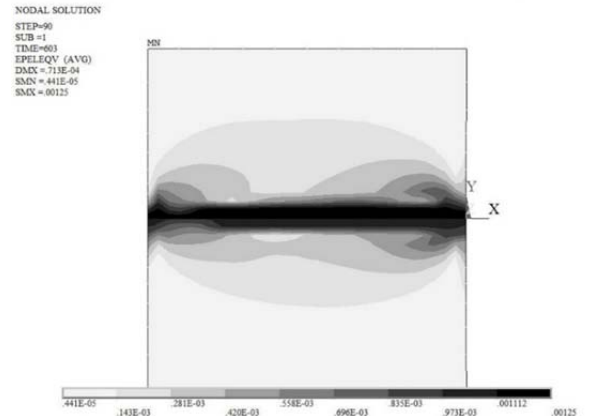


شکل ۷) نمایی از دو ورق مدل ساخته‌شده آزمایشگاهی بعد از جوشکاری و خط جوش ایجادشده

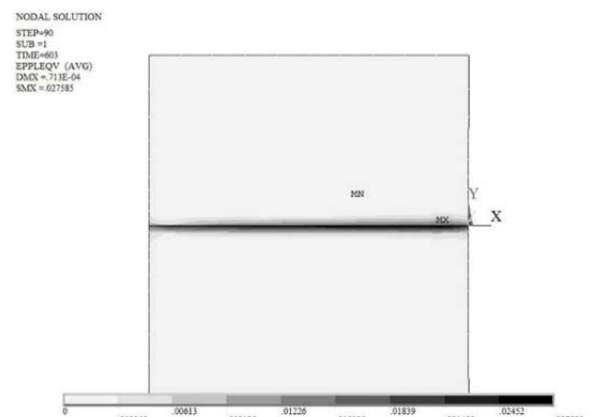


شکل ۸) اندازه‌گیری دمای سطح ورق در نزدیکی خط جوش

محدوده الاستیک برای فولاد کم‌کربن باید بیشتر از فولاد زنگ‌نزن باشد. همچنین به‌دلیل تمرکز منبع حرارتی در جوشکاری لیزر، مشاهده می‌شود (شکل ۴) که محدوده کرنش پلاستیک برای این نوع جوشکاری بسیار کم و کاملاً متمرکز در اطراف حوضچه جوش است. دقیقاً به همین دلیل است که جوشکاری لیزر اعوجاج بسیار کمتری در فلزات نسبت به سایر روش‌ها ایجاد می‌کند.



شکل ۳) توزیع کرنش الاستیک اتصال نامتجانس (ورق بالا فولاد کم‌کربن و ورق پایین فولاد زنگ‌نزن است)



شکل ۴) توزیع کرنش پلاستیک اتصال نامتجانس (ورق بالا فولاد کم‌کربن و ورق پایین فولاد زنگ‌نزن است)

۳-۳-۴- تنش پسماند

شکل ۵، تنش پسماند در اتصال نامتجانس را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که تنش پسماند در فولاد کم‌کربن بیشتر از فولاد زنگ‌نزن بوده، زیرا فولاد کم‌کربن دارای تنش تسلیم بالاتری نسبت به فولاد زنگ‌نزن است. هر چه تنش تسلیم بزرگ‌تر باشد، فلز دیرتر به ناحیه پلاستیک می‌رسد و این موجب می‌شود تا تنش آزاد نشود و در فلز به‌صورت تنش پسماند ذخیره شود. در حالی که هر چه تنش تسلیم کوچک‌تر باشد، زودتر وارد محدوده پلاستیک می‌شود و با بروز اعوجاج در فلز، تنش آزاد می‌شود و فلز تنش پسماند کمتری را در خود ذخیره می‌کند.

۴-۴- اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده

به‌منظور سنجش اعتبار نتایج به‌دست‌آمده از کدنویسی و شبیه‌سازی جوشکاری، نتایج حاصل با مدل ساخته‌شده توسط جوشکاری لیزر در آزمایشگاه مقایسه شدند. برای این منظور، دو ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به ابعاد ۳۰ در ۱۰ و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر

۴- سایر متغیرهای تاثیرگذار فرآیند جوشکاری لیزر که تاثیر زیادی روی ابعاد حوضچه جوش دارند، عبارت از فرکانس پالس، عرض پالس و سرعت جوشکاری هستند.

۵- ضریب هدایت حرارتی در نتایج جوشکاری بسیار موثر است، به‌خصوص در اتصالات نامتجانس.

۶- اصلی‌ترین پارامتر موثر بر توزیع تنش پسماند در اتصال بین دو فلز غیریکسان، تنش تسلیم است. هر چه میزان تنش تسلیم بیشتر باشد، موجب می‌شود تا اعوجاج کمتری ایجاد شود (تنش آزاد نشود) و تنش پسماند بیشتری را در خود ذخیره کند.

در نهایت پیشنهاد می‌شود که به‌منظور گسترش و توسعه پژوهش‌های علمی در این زمینه، محققان روی موضوعاتی از قبیل پیدا کردن رابطه‌ای تحلیلی بین ابعاد جوش و ویژگی‌های مکانیکی آن و بررسی تاثیر پارامتر سرعت بر کیفیت جوشکاری لیزر تحقیق کنند تا خلأهای علمی در زمینه تحلیل جوشکاری لیزر بیش از پیش پر شود.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: احسان مهربانی‌گوهری (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۲۵٪)؛ میلاد محمدی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۲۵٪)؛ مصطفی نوذری (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ حسین باقرپور (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۵٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

**۶- پی‌نوشت
علام**

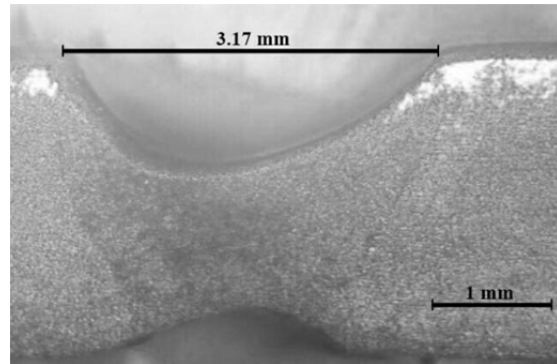
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه
D	قطر حلقه جوش (m)
F	فاصله کانونی از لنز متمرکزکننده (m)
f	فرکانس پالس
h_{con}	ضریب هدایت حرارت همرفت آزاد
Q_m	توان متوسط لیزر
Q_p	پیک توان
q_m	چگالی توان لیزر
T	دمای سطح (k)
T_0	دمای محیط (k)
T_p	عرض پالس (m)
t	زمان (s)
v	سرعت (ms^{-1})

علام یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ	ضریب استفان-بولتزمن ($5/67 \times 10^8$)
ϵ	ضریب تابش
λ	طول موج پرتو (m)

منابع

1- Duley WW. Laser welding. Hoboken: John Wiley & Sons; 1999.
 2- Mackwood AP, Crafer RC. Thermal modelling of laser welding and related processes: A literature review. Optics and Laser Technology. 2005;37(2):99-115.
 3- Torkamany MJ, Hamedy MJ, Malek F, Sabbaghzadeh J. The effect of process parameters on keyhole welding with a 400 W Nd: YAG pulsed laser. Journal of Physics D Applied Physics. 2006;39(21):4563-4567.



شکل ۹) اندازه‌گیری عرض حوضچه جوش به‌کمک تصویر متالوگرافی برش مقطعی عرضی جوش

همان‌طور که در قبل بیان شد، برای سنجش میزان اعتبار کد نوشته‌شده و مدل‌سازی انجام‌گرفته، نتایج حل عددی با نتایج حاصل از مدل واقعی مقایسه شده است. برای این منظور، در ابتدا پس از عملیات جوشکاری و با گذشت ۱۰ دقیقه (همان‌طور که در شرایط مدل‌سازی اعمال شده است) نسبت به اندازه‌گیری دما به‌وسیله دماسنج لیزری اقدام شد (شکل ۸).

اندازه دما در مدل شبیه‌سازی‌شده در این محدوده نزدیک به $450/2779^{\circ}C$ به دست آمد (شکل ۲). همچنین همان‌طور که در شکل ۸ هم مشخص شده، این میزان در مدل واقعی برابر با $450/12^{\circ}C$ بوده که بسیار نزدیک به نتایج حل عددی است. شکل ۹ تصویر متالوگرافی برش مقطعی عرضی جوش، برای اندازه‌گیری دقیق حوضچه جوش را نشان می‌دهد.

عرض حوضچه جوش در مدل شبیه‌سازی‌شده $3/2$ میلی‌متر بوده است (نمودار ۳). همان‌طور که در شکل ۹ نیز مشخص شده، این میزان برای مدل واقعی با تقریب بسیار مناسب، نزدیک به مقدار آن در مدل شبیه‌سازی‌شده است. این میزان برای مدل واقعی برابر با $3/17$ میلی‌متر به دست آمده است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش از روش اجزای محدود برای مقایسه اتصالات نامتجانس بین فولاد کم‌کربن و فولاد زنگ‌نزن استفاده شد. تطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی با انتظاراتی که از خواص مواد می‌رفت و با استفاده از اعتبارسنجی نتایج مدل ساخته‌شده آزمایشگاهی نشان داد که می‌توان با اطمینان بسیار بالا از روش اجزای محدود ارایه‌شده در تحلیل حرارتی و مکانیکی جوشکاری استفاده نمود. همچنین سایر نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- روش اجزای محدود به‌دلیل هزینه پایین، پاسخ سریع و قابلیت‌های بالا یک روش بسیار کارآمد برای تحلیل مسایل جوشکاری از جمله جوشکاری لیزر است. بنابراین با استفاده از این روش می‌توان در وقت و هزینه صرفه‌جویی کرد. از طرفی مهیا کردن شرایط ایده‌آل در آزمایشگاه برای اندازه‌گیری‌ها کاری دشوار و همراه با خطا است. با استفاده از این روش از بروز خطاهای ناخواسته نیز جلوگیری می‌شود.

۲- لزوم انجام شبیه‌سازی در فرآیند جوشکاری لیزر را می‌توان برای انجام بهینه‌تر فرآیند و حداقل‌شدن برخی پارامترهای مهم جوشکاری همچون ناحیه متأثر از حرارت، ناحیه ذوب‌شده و حصول هندسه جوش، مناسب دانست.

۳- قابلیت انتقال حرارت بین خواص ماده بیشترین تاثیر را روی نتایج شبیه‌سازی دارد.

- dissimilar welding-brazing of aluminum to galvanized steel. *Optics and Laser Technology*. 2018;98:214-228.
- 12- Zhang Y, Sun DQ, Gu XY, Duan ZZ, Li HM. Nd: YAG pulsed laser welding of TC4 Ti alloy to 301L stainless steel using Ta/V/Fe composite interlayer. *Materials Letters*. 2018;212:54-57.
- 13- Moradi M, Ghoreishi M. Influences of laser welding parameters on the geometric profile of Ni-base superalloy Rene 80 weld-bead. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011;55(1-4):205-215.
- 14- Moradi M, Ghoreishi M, Rahmani A. Numerical and experimental study of geometrical dimensions on laser-TIG hybrid welding of stainless steel 1.4418. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*. 2016;5(2):21-31.
- 15- Zhu XK, Chao YJ. Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;146(2):263-272.
- 16- Bag S, Trivedi A, De A. Development of a finite element based heat transfer model for conduction mode laser spot welding process using an adaptive volumetric heat source. *International Journal of Thermal Sciences*. 2009;48(10):1923-1931.
- 17- Siva Shanmugam N, Buvanashakaran G, Sankaranarayanan K. Some studies on weld bead geometries for laser spot welding process using finite element analysis. *Materials and Design*. 2012;34:412-426.
- 4- Cao X, Jahazi M, Immarigeon JP, Wallace W. A review of laser welding techniques for magnesium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;171(2):188-204.
- 5- Daneshkhan R, Najafi M, Torabian H. Numerical simulation of weld pool shape during laser beam welding. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*. 2012;3(8):1624-1630.
- 6- Assuncao E, Williams S. Comparison of continuous wave and pulsed wave laser welding effects. *Optics and Lasers in Engineering*. 2013;51(6):674-680.
- 7- Sun Z, Ion JC. Laser welding of dissimilar metal combinations. *Journal of Materials Science*. 1995;30(17):4205-4214.
- 8- Golchin Bidgoli E, Moradi M, Shamsaei S. Laser drilling simulation of glass by using finite element method and selecting the suitable Gaussian distribution. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(13):416-420. [Persian]
- 9- Moradi M, Golchin E. Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; Statistical modelling and optimization. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017;14(3):464-484.
- 10- Meco S, Cozzolino L, Ganguly S, Williams S, McPherson N. Laser welding of steel to aluminium: Thermal modelling and joint strength analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;247:121-133.
- 11- Mohammadpour M, Yazdian N, Yang G, Wang HP, Carlson B, Kovacevic R. Effect of dual laser beam on