مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، خرداد 1399، دوره 7، شماره 3، ص‌ص. 63- 71

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

تحلیل عددی و تجربی تأثیر پارامترهای فرایند جوش‌کاری لیزری بر هندسه حوضچه جوش

یونس جاوید*

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه خوارزمی، تهران

* تهران، صندوق پستی 1571914911، javid@khu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 فروردین 1398

پذیرش: 14 آبان 1398

ارائه در سایت: خرداد 1399

کلیدواژگان:

جوش‌کاری لیزر

شبیه‌سازی

اجزای محدود

ابعاد حوضچه جوش

چکیده

در این پژوهش مدل اجزای محدود برای شبیه‌سازی جوش‌کاری لیزر CO_2 بکار گرفته شد. برای این منظور از نرم افزار آباکوس در تحلیل‌های انتقال حرارت گذرا استفاده شد. ماده به‌کار برده شده در این تحقیق عبارت از فولاد ضدزنگ AISI 304 است که خواص حرارتی و مکانیکی آن به‌صورت وابسته به دما به مدل اعمال شد. در این پژوهش ابتدا مدل سه‌بعدی غیرخطی برای محاسبه توزیع حرارت در ناحیه‌ی جوش‌کاری و پیشگویی اندازه‌ی سوراخ کلید و شکل حوضچه‌ی جوش ارائه شد. بعد از انجام تحلیل حرارتی، مدل اجزای محدود با انجام آزمایش‌های تجربی صحه‌گذاری شد. پس از تأیید مدل، اثرات پارامترهای مختلف جوش‌کاری لیزر بر روی توزیع حرارت حاصل از جوش‌کاری بررسی شد. همچنین، تغییرات دما بر روی خط مرکزی جوش و در فواصل مشخص از خط مرکزی جوش در طول گرم و خنک شدن قطعه در طی فرایند جوش‌کاری لیزری بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که برای قدرت لیزر از 50 تا 300 وات، جوش‌کاری از نوع هدایتی بوده و به طبع آن، عمق نفوذ کمتر از 0/2 میلی‌متر و شکل حوضچه جوش شبیه کره است. در حوالی توان 350 ولت، بدلیل چگالی توان بالا، جوش‌کاری از نوع نفوذی-هدایتی می‌شود که باعث افزایش حدود 4 برابری عمق نفوذ در بازه توان 350 تا 450 وات می‌شود. برای توان‌های بالاتر از 500 وات، روند افزایش عمق نفوذ کاهشی می‌شود.

Numerical and experimental analysis of laser welding process parameters on weld bead geometry

Youness Javid*

Industrial Engineering Department, Engineering Faculty, Kharazmi University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1571914911, Tehran, Iran, Javid@khu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 16 April 2019
Accepted 6 November 2019
Available June 2020

Keywords:
Laser welding
Simulation
Finite Element
Weld bead geometry

Abstract

A finite element model has been developed to simulate the laser beam welding (LBW) process, which enjoys the capabilities of ABAQUS in transient thermal analysis. The substance used in this research was AISI 304 which thermal and mechanical properties are introduced to the model as temperature dependent. At first, a non-linear three-dimensional transient thermal model is developed, which calculates the temperature distribution in the local weld area and predicts the keyhole and weld bead size and shape. After the thermal analysis, the FE model is verified through the experimental work. After validation of the model, the effect of laser welding parameters on thermal distribution has been studied. Also, temperature variation on the weld line and on some points of distinct distances from the weld line during the heating and cooling procedure of the laser welding process has been examined. Results indicate that for laser powers of 50 to 300 watts, conduction type of laser welding dominates and accordingly, penetration depth is lower than 0.2 mm and the shape is spherical. Around 350 watts, due to higher power density, keyhole type welding starts which increases penetration up to 4 times for laser powers from 350 to 450 watts. For laser powers higher than 500 watts, the slope becomes decreasing.

1- مقدمه

جوش‌کاری لیزر یک روش جوش‌کاری ذوبی سوراخ کلیدی است که با دانسیته توان بسیار بالایی به دست می‌آید و حاصل تمرکز باریکه‌ی قوی از پرتو لیزر بر روی نقطه بسیار کوچک می‌باشد [1، 2]. مواد تحت این باریکه‌ی لیزر سریع ذوب شده و ممکن است قسمتی از آن بخار شود. این عمل باعث می‌شود که یک حفره‌ی حاوی بخار شکل گیرد که میزان جذب اشعه‌ی بعدی را افزایش می‌دهد. این حفره‌ی حاوی بخار فلز را سوراخ کلید می‌نامند. میزان دانسیته قدرت لیزر که سوراخ کلید را ایجاد می‌کند حدود 10000 وات بر میلی‌متر مربع می‌باشد و بالاتر از این مقدار، عمل برش و سوراخ‌کاری انجام می‌گیرد [3]. در واقع سوراخ کلید به عنوان واسطه عمل می‌کند که انرژی پرتو لیزر را دریافت می‌کند و به‌صورت امواج فرابنفش و مرئی که قابل جذب توسط ماده باشند ساطع می‌کند [4]. هنگامی‌که

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Y. Javid, Numerical and experimental analysis of laser welding process parameters on weld bead geometry, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 63- 71, 2020 (in Persian)

قدرت لیزر به اندازه‌ی کافی باشد، این سوراخ کلید بیشتر از آن‌که در عرض پیشرفت کند، در عمق پیشروی می‌کند. حین به‌کارگیری انرژی لیزر، سوراخ کلید توسط فشار بخاری که از فروپاشی دیواره‌های مذاب جلوگیری می‌کند، باز نگه داشته می‌شود [5]. در مقایسه با سایر روش‌های جوش‌کاری، روش جوش‌کاری لیزر نسبت عمق به عرض بیشتری در یک پاس جوش‌کاری دارد [3].

پژوهش‌های زیادی بر روی مدلسازی عددی جوش‌کاری لیزری انجام گرفته است. در سال 2015 میلادی مدلسازی سه‌بعدی فرایند جوش‌کاری لیزری توسط فنگ و همکاران انجام شد. آن‌ها نتایج توزیع حرارت در جوش‌کاری را با نتایج تجربی مقایسه کردند و تطابق خوب بین نتایج تجربی و تحلیل نشانگر کارآمد بودن مدل‌های اجزای محدود در پیش‌گویی نتایج فرایند جوش‌کاری لیزری است [6]. همچنین در یک پژوهش در سال 2017 تأثیر جریان سیال و سوراخ کلید بر روی میزان عیوب جوش‌کاری، از جمله حفره، بررسی شده است. نتایج این تحقیق نیز نشان از توانمندی روش‌های شبیه‌سازی عددی در پیشگویی جوش‌کاری لیزری دارند [7]. بهینه‌سازی پارامترهای جوش‌کاری لیزری فولاد زنگ نزن 316 در تحقیقی در سال 2016 انجام شده است. در این تحقیق، پارامترهای ورودی قدرت، سرعت و ارتفاع لیزر به‌عنوان ورودی‌های اصلی در نظر گرفته شده و تأثیر آن‌ها در فرایند لیزری بررسی شده است [8]. همچنین بررسی تجربی فرایند جوش‌کاری لیزری فولاد زنگ نزن 321 در تحقیقی در سال 2015 انجام گرفته است. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای لیزری بر روی کیفیت جوش ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته است [9]. کاربرد موفقیت آمیز روش اجزای محدود در شبیه‌سازی فرایندهای لیزری دیگر، مانند روکش‌کاری نیز گزارش شده است [10].

در تحقیقی در سال 2017 تأثیر عملیات حرارتی پس‌گرم بر روی نمونه‌های فولاد زنگ نزن جوش‌کاری شده توسط لیزر پالسی بررسی شده است. در این تحقیق مشاهده شده است که سختی ویکرز و همچنین استحکام کششی بعد از فرایند پس‌گرم تا حد قابل توجهی کاهش یافته است که دلیل آن، ایجاد فازهای فریتی در هنگام انجام فرایند پس‌گرم عنوان شده است [11]. همچنین تحلیل عددی جوش‌کاری لیزری جنس‌های غیر یکسان در تحقیقی در سال 2015 انجام گرفته است. نتایج این تحقیق نشان‌گر قابلیت روش‌های عددی در مدل‌سازی جوش‌کاری لیزری مواد غیر مشابه است [12]. ژانگ و همکاران در سال 2015 بررسی بر روی میکروساختار نمونه‌های مسی جوش‌کاری شده توسط لیزر انجام دادند. آن‌ها همچنین علت شکست نمونه‌ها در منطقه‌ی متاثر از حرارت را مورد بررسی قرار دادند [13]. همچنین بهینه‌سازی بر روی پارامترهای جوش‌کاری فولاد زنگ نزن 304 و همچنین 316 در تحقیقی در سال 2017 انجام گرفته است. در این تحقیق طراحی آزمایش‌ها از روش رویه‌ی پاسخ استفاده شده است. همچنین برای یافتن سطوح بهینه‌ی پارامترها از تابع مطلوبیت استفاده شده است [14].

در سال‌های اخیر نیز پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی بررسی عددی جوش‌کاری لیزر بر روی مواد مختلف و همچنین ترکیب جوش‌کاری لیزری با سایر روش‌ها ارائه شده است. کومار و همکاران ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ مونل 400 اتصال داده شده از طریق جوش‌کاری لیزری را مورد بررسی قرار دادند [15]. در این تحقیق از روش اجزای محدود استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ناحیه متاثر از حرارت با افزایش انرژی پالس افزایش می‌یابد. همچنین در این تحقیق، بهترین سطح پارامترهای ورودی برای دستیابی به بیشترین مقدار سختی و مقاومت کششی بدست آمده است. در تحقیق دیگر، لی و همکاران با استفاده از مدل‌سازی عددی و آزمایشات تجربی، دینامیک سوراخ کلیدی و رفتار جریان سیال را در فشارهای پایین‌تر از فشار محیط بررسی کرده‌اند [16]. نتایج نشان می‌دهد که در فشارهای پایین‌تر از فشار اتمسفر، سوراخ کلیدی عریض‌تر و عمیق‌تر در مقایسه با حالت فشار اتمسفر ایجاد می‌شود. در تحقیق دیگری در سال 2019، مدل‌سازی اجزای محدود جوش‌کاری لیزر Nd:YAG برای بررسی ساختار حاصل از جوش‌کاری انجام گرفته است [17]. در نتایج این تحقیق، توزیع میزان سختی و دما در نواحی جوش و اطراف آن گزارش شده است.

در پژوهشی دیگر، یک مدل اجزای محدود سه بعدی برای بررسی توزیع دما در حالت‌های نفوذ کامل و نفوذ ناقص جوش‌کاری لیزری بکار گرفته شده است [18]. در این تحقیق منبع حرارتی به‌صورت دو مخروط به‌صورت حجمی فرض شده و نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی صحه گذاری شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده‌ی قابلیت روش اتخاذ شده برای بررسی نتایج جوش‌کاری لیزری در حالات مختلف است. همچنین در تحقیق دیگری که در سال 2019 توسط مهرپویا و همکاران انجام شده است، از قابلیت‌های روش اجزای محدود برای رسیدن به بهترین سطوح پارامترهای ورودی جوش‌کاری لیزری استفاده شده است [19]. در این تحقیق از یک شبکه عصبی مصنوعی نیز برای

ایجاد رابطه غیر خطی بین پارامترهای ورودی و خروجی جوش‌کاری لیزری استفاده شده است.

در تحقیق حاضر با توجه به تأثیر بسیار بالای ابعاد هندسی جوش بر خواص مکانیکی اتصال جوشی، مدل اجزای محدود برای شبیه‌سازی و پیشگویی ابعاد هندسی در جوش‌کاری لیزر CO_2 بکار رفته است. در این تحقیق، تقریباً تمامی پدیده‌های مربوط به جوش‌کاری لیزری لحاظ شده است. تمامی خواص ماده مورد استفاده به‌صورت وابسته به حرارت به مدل معرفی شده‌اند. همچنین، مدل حرارتی از طریق نوشتن یک زیربرنامه در نرم‌افزار فرترن به مدل اضافه شده که امکان استفاده از مدل در شرایط مختلف جوش‌کاری را نیز فراهم می‌کند. نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از آزمایشات مقایسه شده و مدل صحه‌گذاری شده است. سپس با استفاده از مدل، تأثیر پارامترهای جوش‌کاری لیزر بر روی ابعاد حوضچه جوش و ناحیه متأثر از حرارت بررسی شده است.

2- تئوری تحلیل

روش اجزای محدود یکی از کاربردی‌ترین روشهای حل عددی برای حل معادلات دیفرانسیلی و انتگرالی است که در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی کاربرد دارد [20]. در روش اجزای محدود غالباً مسائل فیزیکی به کمک معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم و با کمینه کردن انرژی پتانسیل حل می‌شوند. به سبب طبیعت فرایند جوش‌کاری، پیچیدگی‌های بسیاری در تحلیل اجزای محدود جوش به نسبت سایر مباحث سنتی مکانیک وجود دارد. برای نمونه خواص وابسته به دمای ماده، گرادیان بسیار بالای دما، میدان‌های تنش و کرنش وابسته به زمان و با مختصات فضایی، تغییر شکل‌های بزرگ در سازه‌های نازک، تغییر فاز و خزش از جمله این پیچیدگی‌ها هستند.

2-1- فرمول‌بندی اجزای محدود برای تحلیل حرارتی

دقیق‌ترین روش که حتی حالت ماده خالص را پوشش می‌دهد و مشکلات آن‌را رفع می‌کند، فرمول‌بندی آنتالپی است. این روش بر اساس فرمول‌بندی کردن معادله هدایت حرارتی بر اساس آنتالپی می‌باشد. سپس آنتالپی به‌عنوان مجهول گرهی تلقی می‌شود که می‌توان آن‌را با توجه به خروجی به درجه حرارت تبدیل نمود. تحلیل حرارتی به‌ندرت به روش صریح حل می‌شود، زیرا قید پله‌ای کردن زمان نسبت معکوس با اندازه کوچکترین المان با توان دوم دارد. معادله اساسی هدایت حرارتی عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q = \{L\}^T([D]\{L\}T)+Q=\rho(T)C_P(T)\frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

که در این رابطه T دما، $k_x(T)$، $k_y(T)$ و $k_z(T)$ هدایت حرارتی غیر ایزوتروپیک، $\rho(T)$ دانسیته‌ی وابسته به حرارت، $C_p(T)$ ظرفیت گرمایی وابسته به حرارت، t زمان و Q تولید حرارت داخلی بازای واحد حجم هستند. طبیعی است که برای یک ماده‌ی ایزوتروپیک، هدایت حرارتی در هر سه جهت مختصات با هم برابر خواهد بود.

2-2- مدل منبع حرارتی

حرارت ورودی کلاً از روی انرژی منبع حرارتی محاسبه می‌شود. توزیع انرژی حرارتی ورودی مشخص کننده‌ی اندازه و شکل حوضچه‌ی جوش خواهد بود. ثابت شده است که بهترین مدل برای شبیه‌سازی سوراخ کلید عبارت از یک مخروط است که توسط توزیع گوسی شار حرارتی همراهی می‌شود و توسط رابطه‌ی (2) بیان می‌شود[21]:

$$Q=\frac{2P}{\pi r_0^2 H}e^{1-(r/r_0)^2}\left(1-\frac{z}{H}\right) \quad (2)$$

که در آن P انرژی پرتو لیزر جذب شده، r_0 شعاع اولیه (در بالای سوراخ کلید)، H عمق و r شعاع لکه لیزر بر روی قطعه و z فاصله‌ی عمقی نقطه کانونی از سطح بالایی قطعه هستند. هنگامی که قدرت لیزر به اندازه کافی زیاد نباشد، و یا در هنگام جوش‌کاری ورق‌های نازک، سوراخ کلید ایجاد نخواهد شد. در این موارد جوش‌کاری لیزر از نوع هدایت حرارتی خواهد بود و توزیع انرژی لیزر به‌صوت گوسین و در روی سطح بالایی قطعه‌کار خواهد بود[21]:

$$Q = Q_0 exp\left(\frac{-3r^2}{r_0^2}\right) \quad (3)$$

که در آن Q_0 برابر بیشترین مقدار حرارت ایجاد شده توسط پرتو لیزر است ($Q_0 = P/\pi r_0^2$) که در آن P قدرت پرتوی لیزر است.

2-3- انتخاب المان برای مدل حرارتی

جوش ایجاد شده حول خط مرکزی جوش متقارن می‌باشد. بنابراین تنها یکی از دو ورق مورد استفاده در جوش‌کاری مدل می‌گردد. چون المان‌های مکعبی نسبت به المان‌های چهاروجهی و سایر اشکال از دقت بیشتری برخوردار می‌باشند، لذا از المان مکعبی در تحلیل‌ها استفاده گردید. المان مکعبی 20 گرهی از المان مکعبی 8 گرهی دقیق‌تر می‌باشد. ولی باید در نظر داشت که زمان تحلیل یک مدل دارای مش‌بندی المان محدود معین

با استفاده از المان‌های 20 گرهی چند برابر زمان تحلیل همان مدل با استفاده از المان‌های 8 گرهی می‌باشد. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی با المان‌های مکعبی 20 گرهی و 8 گرهی تفاوت چندانی ندارند و لذا در این مدل از المان‌های مکعبی 8 گرهی استفاده گردید. برای مش‌بندی نمونه ابتدا با استفاده از طریق پارتیشن‌بندی، نمونه به سه قسمت تقسیم شد. در نواحی نزدیک خط جوش از المان‌های ریز و در نواحی دورتر از المان‌های درشت‌تر، هر دو از نوع DC3D8 استفاده گردید. در ناحیه بین این دو نیز از المان‌های DC3D4 برای اتصال دو قسمت استفاده شد. در شکل 1 مش‌بندی قطعه در تحلیل اجزای محدود نشان داده شده است.

2-4- بازدهی حرارتی

تولید حرارت از طریق جذب انرژی پرتو لیزر توسط قطعه صورت می‌گیرد و تابعی از قدرت لیزر، خصوصیت جذب کنندگی ماده، اندازه‌ی سطح مقطع پرتوی لیزر، سرعت حرکت لیزر و توزیع شار قدرت لیزر است. ضریب جذب حرارتی از طریق رابطه (4) محاسبه می‌شود [22]:

$$\zeta(T) = 0.365\left(\frac{R}{\lambda}\right)^{1/2} - 0.0667\left(\frac{R}{\lambda}\right) + 0.006\left(\frac{R}{\lambda}\right)^{3/2} \qquad (4)$$

که در این رابطه λ نشان دهنده طول موج پرتو لیزر و R عبارت از مقاومت الکتریکی ماده هستند. مقاومت الکتریکی متوسط فولاد ضد زنگ AISI 304 برابر با 80 μΩ cm است. با جایگذاری مقدار ذکر شده در رابطه (4)، ضریب جذب برابر با 0/27 برای لیزر Nd:YAG (λ=1/06 μm) و برابر با 0/095 برای لیزر CO_2 (λ=10/6 μm) به‌دست می‌آید.

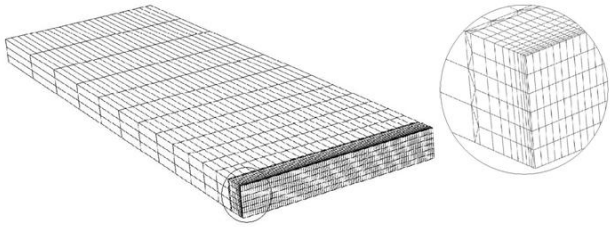

Fig. 1 Mesh of the model in finite element analysis

شکل 1 مش‌بندی مدل در تحلیل اجزای محدود

2-5- مدل خواص ماده

در این تحلیل از خواص حرارتی وابسته به دما استفاده شده است. ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه، چگالی و میزان تشعشع از جمله ویژگی‌هایی هستند که مطابق با جدول 1 به عنوان خواص حرارتی به مدل اعمال می‌شوند[23].

جدول 1 خواص وابسته به حرارت AISI 304

Table 1 Temperature dependent properties of AISI 304

دما (°C)	هدایت حرارتی (W/mK)	ظرفیت گرمائی ویژه (J/kgm^3)	تشعشع	چگالی (kg/m^3)
0	51/9	450	0/2	7872
75	51/3	486	0/35	7852
100	51/1	494	0/4	7845
175	49/5	519	0/44	7824
200	49	526	0/45	7816
225	48/3	532	0/46	7809
275	46/8	557	0/47	7763
300	46/1	566	0/48	7740
325	45/3	574	0/48	7717
375	43/6	599	0/5	7727
400	42/7	615	0/51	7733
475	40/2	662	0/53	7720
500	39/4	684	0/54	7711
575	36/6	749	0/55	7680
600	35/6	773	0/56	7669
675	32/8	846	0/57	7636
700	31/8	1139	0/57	7625
730	30/1	1384	0/58	7612
750	28/9	1191	0/58	7602
775	27/5	950	0/58	7590
800	26	931	0/58	7577
1000	27/2	779	0/59	7552
1500	29/7	400	0/6	7268
1540	29/7	400	0/6	7218
1690	29/7	847	0/6	7055
1840	29/7	847	0/6	6757
1890	29/7	400	0/6	6715
2860	29/7	400	0/62	5902

2-6- شرایط مرزی حرارتی

به‌دلیل این‌که صفحه اتصال ورق‌ها برای هر دو ورق محور تقارن محسوب می‌شود، انتقال حرارت نیز نسبت به این خط متقارن بوده و برای آن شرایط مرزی وجود ندارد و به عبارت دیگر، به صورت عایق در نظر گرفته می‌شود. برای سایر مرزهای ورق، همان‌طور که ذکر شد، از شرایط مرزی جابجایی و تابش استفاده شده است. در ضمن، دمای محیط نیز برابر با 24 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد[24].

2-7- اتلاف حرارت از طریق جابجایی

سطحی از قطعه که در تماس با هوا است، حرارت را از طریق جابجایی از دست می‌دهد. شار حرارت جابجایی (q_{conv}) توسط

قانون سرد شدن نیوتن بیان می‌شود:

$$q_{conv} = Ah(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

که در آن h ضریب هدایت حرارتی جابجایی، T_s دمای سطح، T_∞ دمای سیال و A مساحت ناحیه‌ی مورد نظر هستند. با توجه به طبیعت انتقال حرارت، جابجایی می‌تواند بصورت آزاد یا واداشته باشد. اگر جریان سیال خنک کننده توسط عامل خارجی (مثل پنکه) صورت گیرد، جابجایی واداشته صورت می‌گیرد.

2-8- اتلاف حرارت از طریق تابش

تابش نیز نوعی از انتقال حرارت است که توسط امواج الکترومغناطیس بوجود می‌آید. شار حرارتی ساطع شده از سطح ماده (q_{rad}) بستگی به انرژی حرارتی در روی مرزهای آن دارد که با قانون استفان- بولتزمان بیان می‌شود [25]:

$$q_{rad} = \sigma\epsilon(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (6)$$

که در آن T_∞ بیانگر دمای محیط، σ ثابت بولتزمان و ε میزان تشعشع ماده هستند.

3- نتایج و بحث

نتایج حاصل از تحلیل حرارتی می‌توانند بر حسب نیاز کاربر به شکل‌های مختلفی بیان شوند. به عنوان مثال برای بررسی چگونگی انجماد جوش، اطلاع از اندازه گرادیان‌های دمایی در لحظات مختلف سیکل حرارتی ضروری است. همچنین در برخی موارد، اطلاع از وضعیت منطقه متأثر از حرارت و ناحیه مذاب جوش مورد نیاز می‌باشد. برای شبیه‌سازی فرایند جوش‌کاری لیزر در این تحقیق از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد. مدل منبع حرارتی از طریق نوشتن یک زیربرنامه در نرم‌افزار FORTRAN به مدل اعمال شد. در شکل 2 نحوه‌ی توزیع حرارت در حین فرایند جوش‌کاری لیزر آورده شده است.

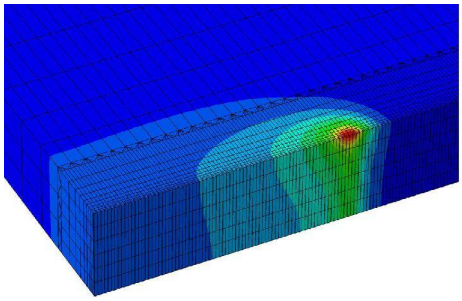

Fig. 2 Temperature distribution while welding

شکل 2 توزیع دما در قطعه حین فرایند جوش‌کاری لیزر

با در نظر گرفتن توزیع حرارت، انتقال گرما، خصوصیات فیزیکی و هندسه قطعه و شرایط مرزی توضیح داده شده، مدل مورد نظر ایجاد شد. تحلیل حرارتی بر روی مدل برای دستیابی به ابعاد جوش انجام شد. تعدادی تست‌های همگرایی برای دستیابی به اندازه المان بهینه در راستای جوش و در راستای ضخامت انجام شد. در شکل‌های 3 تا 7 تاریخچه حرارتی برای چهار گره به‌ترتیب روی خط جوش و در فواصل 1، 2 و 3/5 میلی‌متری از خط مرکزی جوش و در روی سطح قطعه نشان داده شده است. این نتایج مربوط به قدرت لیزر برابر با 3000 وات و سرعت جوش‌کاری برابر با 4500 میلی‌متر بر دقیقه هستند.

در شکل 3 ملاحظه می‌شود که در لحظه عبور پرتو لیزر دما روی خط مرکزی جوش به‌شدت افزایش می‌یابد و ماده در این محل ذوب (گاهاً تبخیر سطحی) می‌شود. پس از عبور پرتو لیزر و در طول زمان 0/1 ثانیه، دما تا 350 درجه سانتی‌گراد می‌رسد. ملاحظه می‌شود که نمونه در ابتدا به‌سرعت و در ادامه به‌کندی و با شیب بسیار کمی خنک می‌شود.

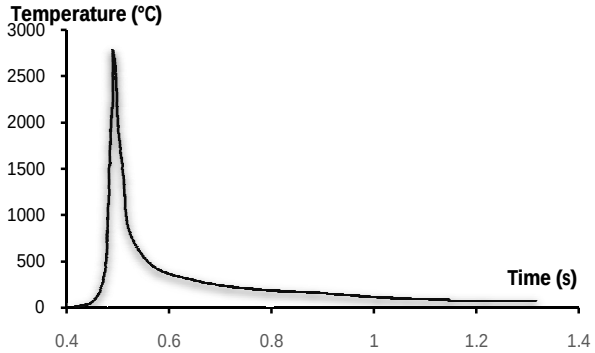

Fig. 3 Thermal variation on the weld line

شکل 3 تغییرات دما بر روی خط مرکزی جوش

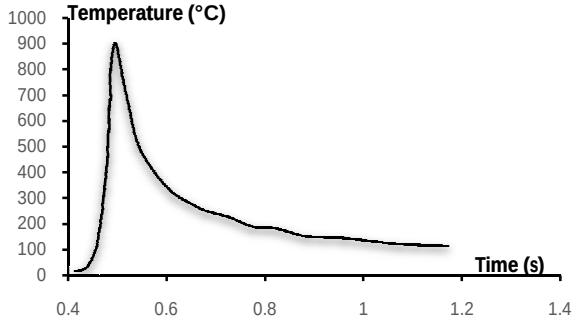

Fig. 4 Thermal variation in 1 mm far from the weld line

شکل 4 تغییرات دما در فاصله 1 میلی‌متری از خط مرکزی جوش

در شکل 4 که در فاصله 1 میلی‌متری از خط مرکزی جوش قرار دارد، در زمان عبور پرتو لیزر، دما تا 900 درجه سانتی‌گراد بالا می‌رود. سپس در مدت کمتر از 0/3 ثانیه، دما تا 190 درجه سانتی‌گراد پایین می‌آید و در ادامه تا رسیدن به دمای اتاق با

سرعت کمی خنک می‌شود.

در شکل 5 که در فاصله 2 میلی‌متری از خط مرکزی جوش قرار دارد نیز ملاحظه می‌شود که در زمان عبور پرتو لیزر، دما با شیب زیادی بالا می‌رود و در ادامه ابتدا با شیب زیاد و سپس با شیب کمتر، قطعه خنک می‌شود. در شکل 5 دما تا حدی بالا نمی‌رود که باعث ایجاد تغییر در ساختار قطعه‌کار شود. این یکی از مزایای جوش‌کاری لیزر است که در مقایسه با سایر انواع روش‌های جوش‌کاری، دارای ناحیه متأثر از حرارت بسیار باریک است.

در شکل 6 که نشان دهنده‌ی تغییر دما در فاصله 3/5 میلی‌متری از خط مرکزی جوش است، دما به‌صورت جزئی تغییر کرده و به مرور خنک می‌شود. شکل 7 نیز نشان دهنده‌ی توزیع دما در راستای عمق قطعه‌کار است.

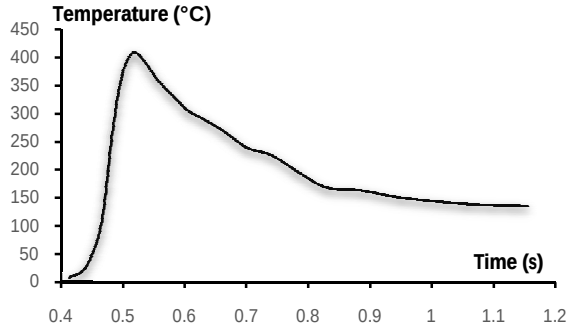

Fig. 5 Thermal variation in 2 mm far from the weld line

شکل 5 تغییرات دما در فاصله 2 میلی‌متری از خط مرکزی جوش

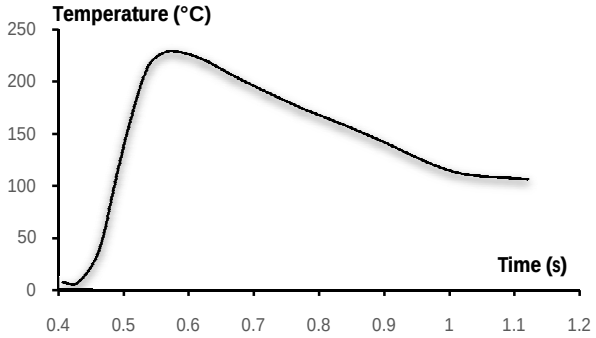

Fig. 6 Thermal variation in 3.5 mm far from the weld line

شکل 6 تغییرات دما در فاصله 3/5 میلی‌متری از خط مرکزی جوش

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دما در نواحی نزدیک به سطح قطعه‌کار بالا است. با پیشروی در عمق قطعه‌کار، شیب تغییرات دما ابتدا زیاد است و سپس کاهش می‌یابد. از روی این نمودار می‌توان میزان نفوذ جوش را در راستای عمق قطعه‌کار پیش‌بینی کرد. بدین ترتیب که از روی دمای نقطه ذوب، عمق نفوذ جوش مشخص می‌شود.

3-1- بررسی صحت مدل حرارتی

برای سنجش صحت نتایج شبیه‌سازی، آزمایشات تجربی به شرح جدول 2 انجام شد. برای این کار، نمونه‌هایی با ابعاد 60 در 40 در 5 میلی‌متر توسط دستگاه وایرکات ایجاد شد. قطعات در مرحله بعد تمیزکاری شدند و مقطع مورد جوش‌کاری سنگ‌زنی شد. برای نگهداری قطعات در کنار همدیگر، یک نگهدارنده مطابق شکل 8 طراحی و ساخته شد. لیزر CO_2 پیوسته با مدل PRIMA Industrie model Optimo در این تحقیق استفاده شد. در حین جوش‌کاری، از گاز آرگون به‌عنوان گاز محافظ استفاده شد. همچنین آنالیز شیمیایی فولاد زنگ نزن AISI 304 استفاده شده در جدول 2 آورده شده است.

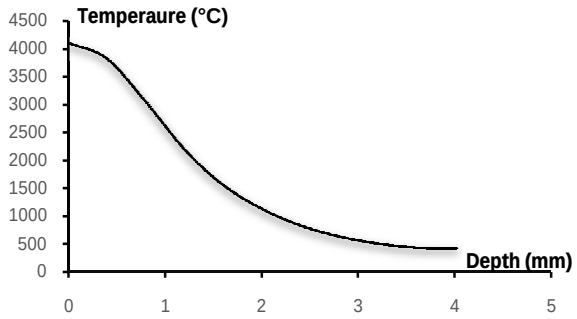

Fig. 7 Thermal variation through the depth of the work piece

شکل 7 تغییرات دما در عمق قطعه‌کار

جدول 2 خواص شیمیایی فولاد زنگ نزن AISI 304

Table 2 Chemical composition of AISI 304

C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S
0/08	۱۹	۹/۵	2	1/5	۰/۰۴	۰/۰۴

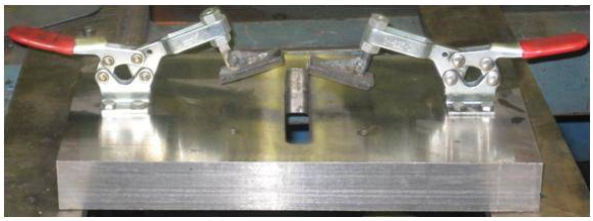

Fig. 8 The fixture of samples while welding

شکل 8 نگهدارنده تجهیزات در حین جوش‌کاری

برای مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با کارهای تجربی، نمونه‌ها در دو مقطع عمود بر خط جوش‌کاری برش داده شدند. در شکل 9 نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی برای پارامترهای ورودی عبارت از: توان 5500 وات، سرعت جوش‌کاری 2820

میلی‌متر بر دقیقه و موقعیت نقطه کانونی بر روی سطح قطعه مقایسه شدند. مرز حوضچه جوش با توجه به دمای ذوب ماده مشخص می‌شود. بدین ترتیب که کانتور مربوط به دمای جوش فلز نشان دهنده‌ی مرز سوراخ کلید و کانتور مربوط به دمای ذوب نشانگر مرز حوضچه جوش هستند. برای ماده بکار رفته در این تحقیق دمای ذوب برابر با 1500 درجه سانتی‌گراد و دمای جوش برابر با 2467 درجه سانتی‌گراد است. نتایج تحلیل با نتایج تجربی مقایسه شدند:

در شکل 9 گستره‌ی ناحیه متأثر از حرارت نیز به‌راحتی می‌تواند مشخص شود. بدین ترتیب که خطوط حرارتی برابر با 700 درجه سانتی‌گراد نشان‌گر مرز ناحیه‌ی متأثر از حرارت خواهند بود. به منظور بررسی صحت مدل در پیشگوئی شکل حوضچه جوش، تحلیل‌های دیگری با ورودی‌های مختلف انجام شد و با نتایج حاصل از کارهای تجربی مقایسه شدند. در تمامی این آزمایش‌ها، موقعیت نقطه‌ی کانونی بر روی سطح قطعه‌کار در نظر گرفته شد. نتایج تعدادی از مقایسه‌ها در جدول 3 نمایش داده شده است.

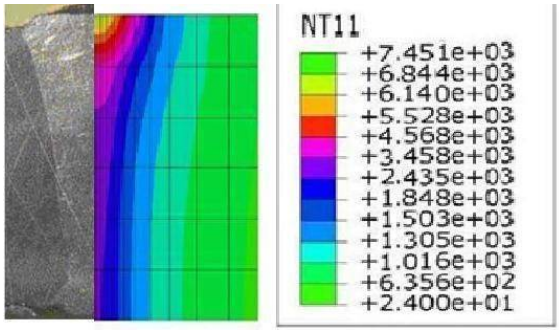

Fig. 9 Comparison of simulation and experimental results (temperatures in ºC)

شکل 9 مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با آزمایش‌ها (دماها به درجه‌ی سانتی‌گراد)

جدول 3 مقایسه نتایج حرارتی به‌دست آمده از شبیه‌سازی با مقادیر تجربی

Table 3 Comparison of simulation and experimental results

شماره	قدرت لیزر (kw)	سرعت (mm/min)	عرض جوش (تجربی)	عرض جوش (شبیه‌سازی)	اختلاف (%)
1	5/5	2538	1/58 mm	1/67 mm	6
2	5/5	2256	1/83 mm	1/76 mm	-4
3	5/5	1974	2/01 mm	2/17 mm	8

تطابق خوب بین مدل و نتایج تجربی نشان می‌دهد که مدل مورد نظر می‌تواند برای بررسی اثر پارامترهای جوش‌کاری بر روی ابعاد جوش ایجاد شده که منجر به بهینه کردن پارامترهای جوش‌کاری می‌شود، بکار رود. در ادامه، با استفاده از مدل صحه‌گذاری شده، تأثیر عوامل مختلف بر روی هندسه‌ی جوش بررسی می‌شود.

3-2- تأثیر قدرت لیزر بر روی شکل حوضچه جوش

در این بخش به بررسی تأثیر قدرت لیزر بر رروی شکل حوضچه جوش پرداخته می‌شود. برای این منظور، قدرت لیزر در بازه‌ی 50 تا 450 وات و با نمو 50 تغییر داده می‌شود. سرعت جوش‌کاری در همه این تحلیل‌ها برابر با 1500 میلی‌متر بر دقیقه قرار داده می‌شود و شعاع پرتو لیزر و عمق نقطه کانونی ثابت نگه داشته می‌شوند. نتایج حاصل از بررسی اثر قدرت لیزر در شکل‌های 10 و 11 نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش قدرت لیزر از 50 وات تا 450 وات، عمق نفوذ از 0/04 میلی‌متر تا 0/57 میلی‌متر افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که عمق نفوذ برای قدرت‌های لیزر حدود 50 تا 300 وات کم می‌باشد، ولی در حوالی قدرت 450 وات در حال افزایش می‌باشد.

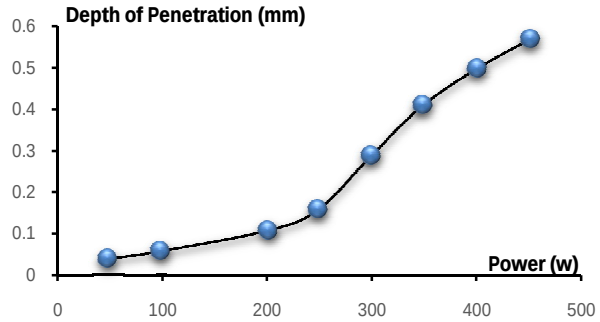

Fig. 10 Variation in depth of penetration by increasing laser power

شکل 10 تغییرات عمق نفوذ در اثر افزایش قدرت لیزر

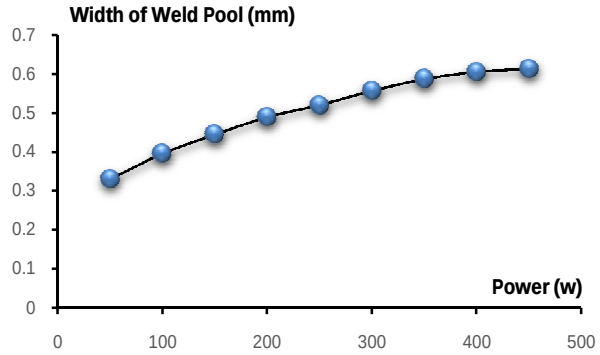

Fig. 11 Variation in weld bead width by increasing laser power

شکل 11 تغییرات عرض حوضچه جوش در اثر افزایش قدرت لیزر

نتایج نشان داده شده شکل 10 گویای این است که افزایش قدرت لیزر تا 450 وات باعث افزایش عرض حوضچه جوش از

0/33 تا 0/69 میلی متر می‌شود. شکل حوضچه جوش برای قدرت لیزر از 50 تا 300 وات شبیه کره است که نشان‌گر این است که جوش‌کاری از نوع هدایتی بوده است. هنگامی که قدرت لیزر به 350 وات می‌رسد، جوش‌کاری از نوع نفوذی و هدایتی می‌شود. هنگامی که سرعت لیزر به حدود 400 و 450 وات می‌رسد، عمق نفوذ در مقایسه با عرض حوضچه جوش به میزان زیادی افزایش می‌یابد که نشان‌گر تغییر نوع جوش‌کاری از نوع هدایتی به نوع سوراخ کلید است.

در شکل 12 تأثیر قدرت لیزر بر روی عمق نفوذ برای قدرت‌های لیزر بالا نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش توان لیزر، عمق نفوذ افزایش می‌یابد، ولی بعد از رسیدن قدرت لیزر به مقدار معین، شیب تغییرات عمق نفوذ نسبت به توان لیزر کاهش می‌یابد. دلیل این امر واضح است: با افزایش توان لیزر، به دلیل افزایش انرژی ورودی، عمق نفوذ افزایش می‌یابد. اما با افزایش عمق، امکان رسیدن پرتو لیزر تا عمق بیشتر کاهش می‌یابد. این امر بخاطر جذب شدن پرتو لیزر توسط بخارات موجود در درون سوراخ کلید و همچنین انعکاس پرتو توسط این ذرات و دیواره سوراخ کلید است. لذا با افزایش توان لیزر از یک حد مشخص، پهنای حوضچه جوش با سرعت بیشتری نسبت به عمق حوضچه جوش افزایش خواهد یافت.

3-3- تأثیر سرعت جوش‌کاری بر روی شکل حوضچه جوش

آزمایشات مشابهی برای بررسی اثر سرعت جوش‌کاری در قدرت‌های لیزر ثابت و سایر پارامترهای مشابه با آزمایش‌های قبلی انجام شد. نتایج نشان داده شده در شکل 13 بیان‌گر تأثیر سرعت جوش‌کاری بر روی عمق نفوذ هستند.

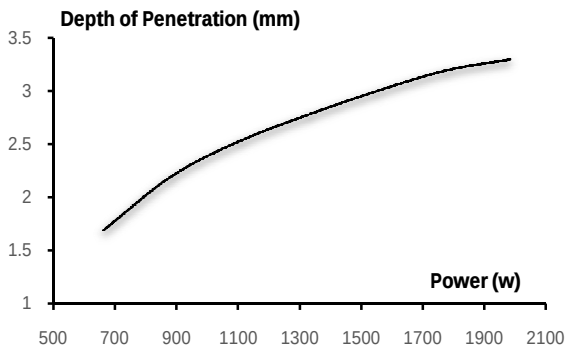

Fig. 12 Variation in depth of penetration by increasing laser power (above 500 w)

شکل 12 تغییرات عمق نفوذ در اثر افزایش قدرت لیزر (بالای 500 وات)

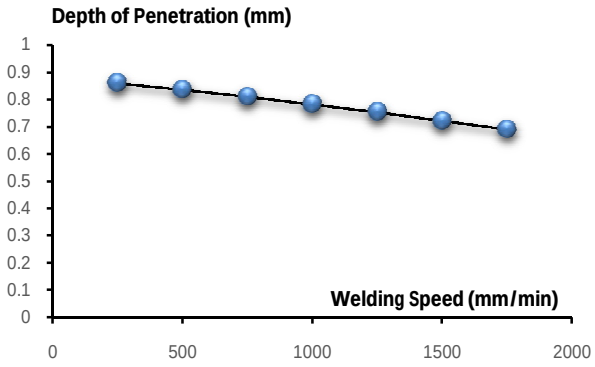

Fig. 13 The effect of welding velocity on depth of penetration (for laser power of 450 w)

شکل 13 تأثیر سرعت جوش‌کاری بر روی عمق نفوذ (قدرت لیزر برابر با 450 وات)

در این آزمایشات وابستگی نسبت عمق به عرض حوضچه جوش به سرعت جوش‌کاری در قدرت لیزر یکسان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که سرعت‌های جوش‌کاری پایین باعث ایجاد حوضچه جوش بزرگتر می‌گردند و همچنین باعث کاهش نسبت عمق به عرض حوضچه جوش می‌گردند. این امر به‌خاطر افزایش میزان انرژی رسیده به قطعه‌کار در سرعت‌های پایین جوش‌کاری می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش اجزای محدود برای پیشگوئی شکل حوضچه جوش در جوش‌کاری لب به لب فولاد ضد زنگ *304 AISI* استفاده شد. تطابق جوابهای شبیه‌سازی با نتایج تجربی نشانگر قابلیت روش اجزای محدود در تحلیل حرارتی جوش‌کاری است. با توجه به داده‌های بدست آمده نتایج زیر قابل ارائه هستند:

- افزایش قدرت لیزر باعث افزایش عمق نفوذ می‌شود. در هنگام تشکیل سوراخ کلید، حوضچه مذاب بیشتر از آن‌که در عرض پیشروی کند، در عمق قطعه‌کار نفوذ خواهد کرد.
- کاهش سرعت جوش‌کاری باعث افزایش عرض حوضچه مذاب و عمق نفوذ می‌شود. تأثیر افزایش قدرت لیزر بر عمق نفوذ بیشتر از کاهش سرعت جوش‌کاری است.
- روش اجزای محدود بدلیل هزینه پایین، پاسخ سریع و قابلیت‌های بالا یک روش بسیار کارآمد برای تحلیل مسائل جوش‌کاری از جمله جوش‌کاری لیزر است.
- فرض توزیع حرارت لیزر بصورت توزیع گوسی فرض مناسبی برای تحلیل عددی فرایند جوش‌کاری لیزر است.
- مهمترین پارامترهای فرایند جوش‌کاری لیزری که تأثیر زیادی روی ابعاد حوضچه جوش دارند عبارت از توان لیزر و

سرعت جوش‌کاری هستند که اولی تأثیر مستقیم و دومی تأثیر معکوس بر ابعاد حوضچه مذاب دارد.

– قابلیت انتقال حرارت در بین خواص ماده بیشترین تأثیر را بر روی نتایج شبیه‌سازی دارد.

5- مراجع

[1] M. Jiang, X. Chen, Y. Chen, W.Tao, Increasing keyhole stability of fiber laser welding under reduced ambient pressure, *Materials Processing Technology*, Vol. 268, pp. 213-222, 2019.

[2] R. Fabbro, Scaling laws for the laser welding process in keyhole mode, *Materials Processing Technology*, Vol. 264, pp. 346-351, 2019.

[3] H. Al. Kazzaz, M.Medraj, Nd:YAG laser welding of aerospace grade ZE41A magnesim alloy: Modeling and experimental investigation, *Materials chemistry and physics*, Vol. 109, No. 1, pp. 61-76, 2008.

[4] J. Ning, L.J. Zhang, X. Yin, J. Zhang, S. Na, Mechanism study on the effects of power modulation on energy coupling efficiency in infrared laser welding of highly-reflective materials, *Materials Design*, Vol. 178, 2019.

[5] M. Moradi, M. Ghoreishi. and Y. Javid, Laser welding process optimization using statistical design of experiments, 18th Annual *International Conference on Mechanical Engineering-ISME2010*, 11-13 May, Sharif University of Technology, 2010.

[6] C. Fang, Y.T. Song, W.Y. Wu, J. Wei, J.J. Xin, H.P. Wu, A. Salminen, Thermal analysis of laser welding for ITER correction coil case, *Fusion Engineering and Design*, Vol 100, pp. 357-363, 2015.

[7] W. Tao, Z. Yang, C. Shi, D. Dong, Simulating effects of welding speed on melt flow and porosity formation during double-sided laser beam welding of AA6056-T4/AA6156-T6 aluminum alloy T-joint, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 699, pp. 638-647, 2017.

[8] P. Jiang, C. Wang, Q. Zhou, X. Shao, L. Shu, X. Li, Optimization of laser welding process parameters of stainless steel 316L using FEM, Kriging and NSGA-II, *Advances in Engineering Software*, Vol. 99, pp. 147–160, 2016.

[9] S.V. Kuryntsev, A.Kh. Gilmutdinov, Welding of stainless steel using defocused laser beam, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 114, 305–313, 2015.

[10] Y. Javid, M. Ghoreishi, Thermo-mechanical analysis in pulsed laser cladding of WC powder on Inconel 718, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 92, No. 1-4, pp. 69-79, 2017.

[11] S. Saravanan, K. Raghukandan, N. Sivagurumanikandan, Pulsed Nd: YAG laser welding and subsequent post-weld heat treatment on super duplex stainless steel, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 25, pp. 284–289, 2017.

[12] M.R. Nekouie Esfahani, J. Coupland, S. Marimuth, Numerical simulation of alloy composition in dissimilar laser welding, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 224, pp. 135–142, 2015.

[13] L.J. Zhang, G.F. Zhang, J. Ning, X.J. Zhang, J.X. Zhang, Microstructure and properties of the laser butt welded 1.5-mm thick T2 copper joint achieved at high welding speed, *Materials and Design*, Vol. 88, pp. 720–736, 2015.

[14] N. Kumar, M. Mukherjee, A. Bandyopadhyay, Comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 and AISI 316 stainless steels, *Optics &LaserTechnology*, Vol. 88, pp.24–39, 2017.

[15] G.S. Kumar, S. Saravanan, R. Vetriselvan, K. Raghukandan, Numerical and experimental studies on the effect of varied pulse energy in Nd:YAG laser welding of Monel 400 sheets, *Infrared Physics and technology*, Vol. 93, pp. 184-191, 2018.

[16] L. Li, G. Peng, J. Wang, J. Gong, S. Meng, Numerical and experimental study on keyhole and melt flow dynamics during laser welding of aluminium alloys under subatmospheric pressures, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 133, pp. 812-826, 2019.

[17] S. Saravanan, K. Raghukandan, G.S. Kumar, Comparison of numerical and experimental macrostructure in Nd: YAG laser welding of Hastelloy C-276, *Optik*, Vol. 180, pp. 562-568, 2019.

[18] F. Farrokhi, B. Endelt, M. Kristiansen, A numerical model for full and partial penetration hybrid laser welding of thick-section steels, *Optics and Laser Technology*, Vol. 111, pp. 671-686, 2019.

[19] M. Mehrpouya, A. Gisario, H. Huang, A. Rahimzadeh, M. Elahinia, Numerical study for prediction of optimum operational parameters in laser welding of NiTi alloy, *Optics and Laser Technology*, Vol. 118, pp. 159-169, 2019.

[20] P.H. Chang, T.L. Teng, Numerical and experimental investigation on the residual stress of the butt-welded joints, *computational materials science*, Vo.29, No. 4, pp. 511-522, 2004.

[21] G. Buvanashekaran, N.S. Shanmugam, K. Sankaranarayanasamy, and R. Sabarikanth, A study of laser welding modes with varying beam energy levels, *Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 223, No. 5, pp. 1141-1156, 2009.

[22] X. He, P.W. Fuerschbach, and T. Debroy, J. Phys. D: *Appl. Phys*. 36, pp. 1388–1398, 2003.

[23] J. Sabbaghzadeh, M. Azizi, and M. J. Torkamany, Numerical and experimental investigation of seam welding with a pulsed laser, *Journal of Optics & Laser Technology*, Vol. 40, pp. 289–296, 2008.

[24] Y. Javid, M. Ghoreishi, M.J. Torkamany, Preplaced laser cladding of WC powder on Inconel 718 by Nd:YAG laser, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 98-106, 2016. (in Persian فارسی)

[25] A. Yaghi, A.Becker, *Weld simulation using finite element methods*, University of Nottingham, UK, pp.7-11, 2004.