



## Prediction of Weld-Section Geometry in Pulsed Laser Welding Using Different Thermal Models for Thin Stainless Steel Sheets

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Torabi A.<sup>1</sup> MSc,  
Kolahan F.\*<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Torabi A, Kolahan F. Prediction of Weld-Section Geometry in Pulsed Laser Welding Using Different Thermal Models for Thin Stainless Steel Sheets. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8):1979-1987.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Phone: -

Fax: -

kolahan@um.ac.ir

#### Article History

Received: March 16, 2018

Accepted: January 20, 2019

ePublished: August 12, 2019

### ABSTRACT

Pulsed laser welding have a wide application in welding of thin sheet because of high intensity of its localized heat source. In the current study, 3 experimental tests with low, medium, and large level of energy and also, the 3D finite element simulation of Nd:YAG pulsed laser welding in thin sheet AISI316L have been done. Thermal analyzes were done with ABAQUS software in transient heat transfer. In order to increase the accuracy of thermal model, heat losses were considered as convection, radiation, and thermal conduction. 3 thermal models with different heat flux distribution as Gaussian surface, Gaussian volume, and conical volume were used. The main aim of this study is the selection of best thermal model between 3 mentioned thermal models to estimate the melt pool geometry with high accuracy. In addition, with defining and applying the shape factor in 3 thermal models, the finite element analyses were carried out in order to enhance the precision of estimated melt pool geometry. After thermal analysis, the melt pool geometry dimensions are extracted for each of the mentioned thermal models and compared with experimental results. Results show that thermal analysis with Gaussian surface model have the melt pool geometry accurately just in welding with low energy. Also, the conical model could estimate the melt pool geometry in all levels of energy with acceptable accuracy. Therefore, the pyramidal thermal model can be selected as the most suitable model for simulating pulsed laser welding in thin steel sheets.

**Keywords** Pulsed Laser Welding; Thermal Model; Melt Pool Geometry; Shape Factor

### CITATION LINKS

[1] Analysis of pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 steel [2] Effects of laser beam energy and incident angle on the pulse laser welding of stainless steel thin sheet [3] Static and fatigue strengths of laser-welded overlap joints with controlled penetration [4] The theory of moving source of heat and its application to metal treatment [5] Experimental and computed temperature histories in gas tungsten arc welding of thin plates [6] Finite element analysis of welded structures [7] Thermomechanical analysis of the welding process using the finite element method. Journal of Pressure Vessel Technology [8] A new finite element model for welding heat sources [9] Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy [10] Numerical simulation and experimental investigation of residual stresses and distortions in pulsed laser welding of hastelloy C-276 thin sheets [11] Experimental investigation and finite element simulation of laser beam welding induced residual stresses and distortions in thin sheets of AA 6056-T4 [12] Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4 [13] Prediction of residual stresses and distortions due to laser beam welding of butt joints in pressure vessels [14] Numerical modeling and simulation of a butt joint welding of AISI 316L stainless steels using a pulsed laser beam [15] Atlas of stress-strain curves [16] A keyhole volumetric model for weld pool analysis in Nd:YAG pulsed laser welding

## پیش‌بینی هندسه مقطع جوش در جوشکاری لیزر پالسی با استفاده از انواع مدل‌های حرارتی روی ورق‌های فولادی زنگ‌نزن

امیر ترابی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

فرهاد کلاهان PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

جوشکاری لیزر پالسی به دلیل تمرکز بالای انرژی، کاربردهای فراوانی در اتصال ورق‌های نازک دارد. در این تحقیق شبیه‌سازی المان محدود جوشکاری لیزر پالسی به صورت سه‌بعدی با نرم‌افزار آباکوس و به همراه انجام سه آزمایش تجربی با سطوح انرژی کم، متوسط و زیاد روی ورق‌های نازک فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن انجام شده است. همچنین برای افزایش دقت شبیه‌سازی اتلاف گرما از طریق تشعشع، همرفت و هدایت حرارتی در نظر گرفته شده است. مدل‌های حرارتی مورد استفاده با توزیع شار حرارتی سطحی گوسی، توزیع شار حجمی گوسی و توزیع شار حجمی هرمی استفاده شده است. هدف دستیابی به منطبق‌ترین مدل حرارتی برای انجام شبیه‌سازی برای ورق‌های زنگ‌نزن آستنیتی نازک است. همچنین به منظور افزایش دقت تحلیل‌های حرارتی در تخمین ابعاد هندسه جوش، ضریب تصحیح تعریف و در روابط هر سه مدل حرارتی اعمال شده است. پس از انجام تحلیل حرارتی، ابعاد سطح مقطع هندسه جوش برای هر کدام از مدل‌های حرارتی ذکر شده استخراج و با نتایج تجربی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند مدل حرارتی سطحی گوسی تنها برای مواردی که سطوح انرژی کم و نفوذ سطحی باشد، دقت کافی دارد. همچنین مدل حرارتی هرمی با تغییر ضریب تصحیح، در تمامی سطوح انرژی نسبت به مدل حرارتی حجمی گوسی، تطابق بیشتری با نتایج تجربی دارد. لذا می‌توان مدل حرارتی هرمی را به عنوان منطبق‌ترین مدل در شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری لیزر در ورق‌های فولادی نازک انتخاب نمود.

**کلیدواژه‌ها:** جوشکاری لیزر پالسی، مدل حرارتی، هندسه حوضچه مذاب، ضریب اصلاح

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۳۰

\*نویسنده مسئول: kolahan@um.ac.ir

### ۱- مقدمه

ورق‌های نازک، کاربرد فراوانی در صنایع مختلف دارند. به علت کم‌بودن ضخامت ورق‌ها، برای اتصال دایمی آنها از روش‌های جوشکاری خاصی استفاده می‌شود. یکی از این معدود روش‌هایی که قابلیت جوشکاری ورق‌های نازک را دارد، جوشکاری لیزر است [1]. از مهم‌ترین مزایای جوشکاری لیزر می‌توان به استحکام بالای اتصال، گرمای ورودی کم، باریک‌بودن خط جوش و کاهش اعوجاج‌های حاصل از جوشکاری در صورت تنظیم‌بودن پارامترهای جوشکاری اشاره نمود [2]. در واقع عمده‌ترین چالش‌ها و مشکلات در جوشکاری ورق‌های نازک عبارت از عدم ایجاد اتصال با نفوذ کامل به دلیل تنظیم‌نبودن پارامترهای جوشکاری است. به عبارت دیگر، اگر انرژی حاصل از جوش بیش از اندازه باشد، باعث ایجاد پارگی در ورق و اگر انرژی وارده کم باشد، باعث عدم برقراری اتصال با نفوذ کافی می‌شود [3]. لذا برای دستیابی به پارامترهای جوشکاری با نفوذ کامل نیازمند انجام تست‌های جوشکاری متعدد و همچنین انجام آزمایش‌های متالوگرافی به منظور اندازه‌گیری اندازه مقطع هندسه جوش است. امروزه با توجه به هزینه‌بر بودن تست‌های تجربی، شبیه‌سازی جوشکاری جایگزین آن شده است. لازم به ذکر است، برای انجام شبیه‌سازی جوشکاری نیاز به تعریف مدل

حرارتی است. روستال [4] جزء اولین کسانی بود که به کمک روابط تحلیلی توانست منبع حرارتی را به صورت نقطه‌ای مدل‌سازی نماید. پس از آن پاولیک و همکاران [5] با ارائه یک مدل حرارتی دیسکی به صورت توزیع گوسی یا نرمال، میزان شار حرارتی ورودی روی سطح قطعه‌کار را تعریف نمودند. سپس کروتز و سگریبند [6] و فردمن [7] اولین محققانی بودند که از روابط پاولیک به منظور مدل‌سازی منبع حرارتی در شبیه‌سازی جوشکاری استفاده نمودند. یکی دیگر از مدل‌های حرارتی، مدل دو بیضوی گولداک و همکاران [8] بوده که در آن توزیع شار حرارتی به صورت یک نیمکره بیضوی نامتقارن است. این مدل بیشتر برای شبیه‌سازی فرآیندهای جوشکاری قوسی پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای شبیه‌سازی جوشکاری لیزر، محققان قبلی از مدل‌های حرارتی مختلفی از قبیل مدل حرارتی سطحی گوسی، حجمی هرمی و حجمی گوسی استفاده نموده‌اند. به منظور پیش‌بینی شکل هندسه جوش، فرآیند جوش لیزر پالسی (Nd) توسط اکبری و همکاران با مدل حرارتی سطحی گوسی روی آلیاژ تیتانیوم با ضخامت ۳ میلی‌متر شبیه‌سازی و با نتایج تجربی مقایسه شد [9]. نتایج حاکی از میزان انطباق ابعاد هندسه جوش با خطای ۲ تا ۱۷٪ است. یوکان و همکاران با مدل حرارتی سطحی گوسی روی شبیه‌سازی سه‌بعدی جوشکاری لیزر پالسی برای اندازه‌گیری میزان تنش پسماند به همراه تست‌های تجربی، تحقیقات خود را انجام داده‌اند. نمونه‌ها از جنس هاستلوی -۲۷۶C با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر بوده است [10]. همچنین زین‌العابدین و همکاران از مدل حرارتی حجمی هرمی برای شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری لیزر استفاده نمودند [11]. نمونه‌ها از جنس آلیاژ آلومینیوم با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر است. آنها با استفاده از شبیه‌سازی، ابعاد هندسه جوش و اعوجاج را تخمین و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. همچنین میزان تنش‌های پسماند و کرنش پلاستیک پسماند ایجاد شده در قطعه با استفاده از نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود استخراج شد. سپس کیم و همکاران روی شبیه‌سازی جوشکاری ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ کم‌کربن با ضخامت یک تا ۳ میلی‌متر به روش لیزر پالسی، تحقیقات خود را انجام داده‌اند [1]. در این پژوهش، مدل حرارتی مورد استفاده حجمی هرمی بوده است. آنان با استفاده از این مدل حرارتی، تخمین ابعاد هندسه جوش را مورد بررسی قرار داده‌اند.

هان و همکاران روی شبیه‌سازی سه‌بعدی جوشکاری لیزر پالسی به همراه تست‌های تجربی، تحقیقات خود را انجام داده‌اند [12]. نمونه‌ها از جنس زیرکلیو با ضخامت ۰/۶ میلی‌متر است. آنها نیز به منظور مدل‌سازی منبع حرارتی از توزیع حجمی گوسی استفاده نمودند. موریتی و لابیسی به منظور پیش‌بینی تنش پسماند و میزان اعوجاج فرآیند جوشکاری لیزر از نوع پیوسته را شبیه‌سازی نمودند. نمونه‌ها، ورق‌های فولادی به ضخامت ۴ میلی‌متر بوده و طرح اتصال به صورت سربه‌سر است. آنها به منظور مدل‌سازی منبع حرارتی از توزیع حجمی گوسی استفاده نمودند [13]. همچنین برای افزایش دقت مدل، یک ضریب تصحیح (C<sub>n</sub>) در مدل وارد نمودند، در صورتی که هیچ یک از محققان دیگر از این ضریب متغیر استفاده ننموده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در این پژوهش‌ها به منظور انجام شبیه‌سازی جوشکاری لیزر از هر سه مدل حرارتی سطحی گوسی، حجمی گوسی و هرمی استفاده شده است. همچنین تنها موریتی ضریب تصحیح متغیر C<sub>n</sub> را در مدل حرارتی حجمی گوسی استفاده نموده‌اند که با توجه به تغییر توان ورودی لیزر، این ضریب نیز در

حرارتی بسیار پرکاربرد است و لذا در این تحقیق از این نوع آلیاژ استفاده می‌شود. مهم‌ترین چالش در مورد جوشکاری این آلیاژ با توجه به نازک بودن آن، اتصال با نفوذ کامل بوده که معمولاً مستلزم جوشکاری با دقت بالا و همچنین تنظیم‌بودن پارامترهای جوشکاری است. از این رو برای تنظیم‌نمودن پارامترهای جوشکاری نیازمند انجام تست‌های تجربی متعددی است که مشمول هزینه‌های زیادی است. لذا به‌منظور کاهش هزینه‌ها تنها سه آزمایش با پارامترهای مختلف جوشکاری از قبیل توان حداکثر (pp) برحسب وات، عرض یک پالس ( $\Delta t$ ) برحسب میلی‌ثانیه، فرکانس برحسب هرتز و سرعت جوشکاری برحسب میلی‌متر بر ثانیه مطابق با جدول ۳ انجام گرفته است. لازم به ذکر است با توجه به رابطه ۱ که در جوشکاری لیزر پالسی برقرار بوده، میزان انرژی یک پالس جزء پارامترهای وابسته است و از حاصلضرب توان حداکثر یک پالس در عرض یک پالس یا از حاصلضرب توان متوسط (Pave) در زمان کل یک پالس (t) به دست می‌آید. لذا با محاسبه از این رابطه، سطح انرژی آزمایش اول کم ۴/۲ ژول، آزمایش دوم متوسط ۶/۸ ژول و آزمایش سوم زیاد ۸/۳ ژول است. همچنین فرکانس آزمایش‌ها به‌ترتیب افزایش می‌یابد. پس از جوشکاری، ابعاد هندسه جوش آن توسط فرآیند متالوگرافی اندازه‌گیری می‌شود. سپس با به‌کارگیری هر ۳ مدل حرارتی سطحی، حجمی گوسی و هرمی، شبیه‌سازی جوشکاری این سه آزمایش انجام می‌گیرد. در ادامه با استخراج ابعاد هندسه جوش از نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با نتایج تجربی، مدل حرارتی اصلاح با اعمال ضریب اصلاح به‌منظور انطباق بیشتر با نتایج تجربی انتخاب می‌شود. در انتها با جایگزینی روش شبیه‌سازی به‌جای تست‌های تجربی، می‌توان با تغییر پارامترهای اولیه جوشکاری به ابعاد سطح مقطع جوش دلخواه رسید.

جدول ۳) پارامترهای جوشکاری در سه آزمایش تجربی با روش لیزر پالسی

پارامتر ورودی	علامت	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳
توان حداکثر (کیلووات)	pp	۱/۴	۱/۷	۱/۸۵
عرض پالس (میلی‌ثانیه)	$\Delta t$	۳	۴	۴/۵
فرکانس (هرتز)	fr	۳	۳/۵	۴
سرعت (میلی‌متر بر ثانیه)	v	۰/۴	۰/۴	۰/۴
قطر پرتو (میلی‌متر)	D	۰/۳	۰/۳	۰/۳

به‌منظور صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی جوشکاری با نتایج تجربی، استخراج تاریخچه دمایی آزمایش‌های تجربی الزامی است. لذا برای اندازه‌گیری میزان تاریخچه دمایی مطابق شکل ۱ در محل نقاط A و B با فاصله از خط جوش به‌ترتیب ۲ و ۳ میلی‌متر، ترموکوپل از نوع K نصب شده است. در این آزمایش‌ها، گاز محافظ با خلوص ۹۹/۹٪ از نوع آرگون استفاده شده است.

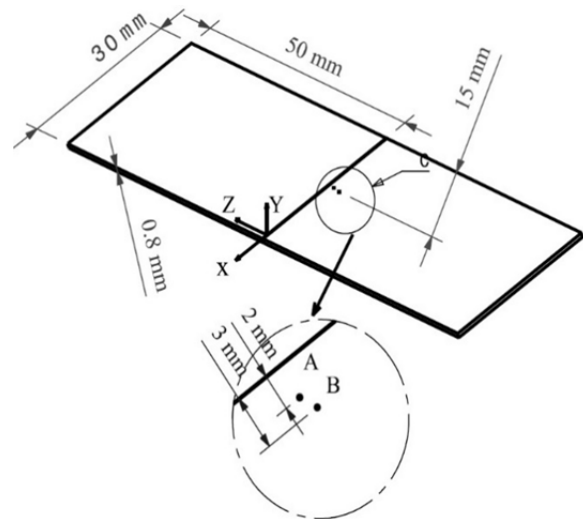
نمونه‌های مطابق شکل ۲ درون فیکسچر جوشکاری قرار م و با دمیدن گاز آرگون با زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح قطعه‌کار، جوشکاری لیزر انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است جهت تابش پرتو به‌صورت عمود بر قطعه‌کار است. در شکل ۳ نمونه‌ای از ورق‌های جوشکاری شده نشان داده شده است.

پس از جوشکاری، فرآیند متالوگرافی به‌منظور اندازه‌گیری ابعاد هندسه جوش از قبیل عرض بالایی جوش (D)، عرض پایینی جوش (d) و میزان نفوذ جوش (H) مطابق با شکل ۴ انجام می‌شود. فرآیند متالوگرافی شامل مانت‌کردن، پرداخت سطح با شماره سنباده ۲۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰ به‌همراه الکتروچاپ است. سپس

مدل تغییر می‌کند. مابقی محققان، یک عدد ثابت به‌عنوان ضریب تصحیح را برای تمامی شرایط جوشکاری در نظر گرفته‌اند. لذا هدف از این تحقیق، ابتدا انتخاب مدل حرارتی از بین این سه مدل با سازگاری بالاتر برای انجام شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری لیزر برای فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ کم‌کربن با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر است. همچنین ضریب تصحیح در تمامی مدل‌های حرارتی اعمال شده است تا نتایج حاصل از مدل اجزای محدود انطباق بیشتری با نتایج تجربی داشته باشد.

## ۲- آزمایش‌های تجربی

جوشکاری از نوع لیزر پالسی با دستگاه ترومف مدل HL54P ساخت فرانسه با توان حداکثر متوسط ۷۰ وات انجام شده است. ورق مورد استفاده مطابق شکل ۱ به‌صورت طرح اتصال لب‌به‌لب و از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن با ابعاد ۵۰×۳۰×۰/۸ میلی‌متر انتخاب شده است. درصد عناصر شیمیایی و خواص مکانیکی این آلیاژ در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.



شکل ۱) ابعاد ورق، نوع طرح اتصال و محل نصب ترموکوپل در نقاط A و B

جدول ۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ AISI316L

عنصر	Fe	Ni	Mo	Cr	Mn	Si	C
%	balance	۱۰/۷۵	۲/۰۱	۱۷/۳۳	۱/۵۱	۰/۴۱	۰/۰۲۹

جدول ۲) خواص مکانیکی AISI316L

نوع خواص	مقدار
استحکام تسلیم در ۰/۲٪ (Mpa)	۲۷۰
استحکام نهایی (Mpa)	۶۳۰
تغییر طول (%)	۵۷
سختی (HV)	۱۴۵

همان‌طور که در جداول فوق مشاهده می‌شود، ورق‌های نازک فولادی ۳۱۶ کم‌کربن به‌دلیل داشتن استحکام نهایی حدود ۶۳۰ مگاپاسگال، دارای استحکام بسیار بالا است. همچنین با توجه به داشتن عناصری از قبیل کرم و نیکل، مقاومت به خوردگی نسبتاً خوبی دارد. لذا با توجه به این خصوصیات و خاصیت شکل‌پذیری بالای آن، در صنایع مختلف از قبیل صنایع پتروشیمی و مبدل‌های

همچنین اتلاف‌های حرارتی تشعشع و همرفت از طریق قسمتی از ورق که در مجاورت گاز محافظ بوده و پرتوی لیزر به آن ساطع می‌شود، در تحلیل حرارتی اتخاذ شده است.

$$q_{conv} = h_{conv}(T - T_0)$$

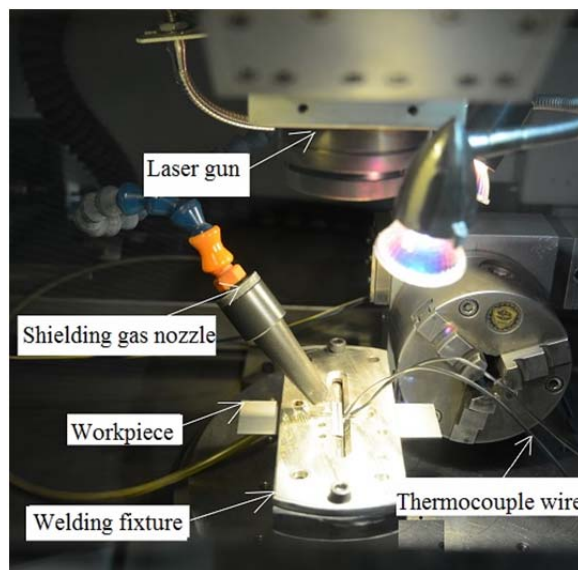
$$q_{rad} = \sigma \epsilon ((T - T_{abs})^4 - (T_0 - T_{abs})^4) \quad (2)$$

$$q_{th\ cond} = h_{th\ cond}(T_f - T)$$

در روابط فوق،  $T$  دمای ورق مورد آزمایش،  $T_0$  دمای محیط آزمایش،  $T_{abs}$  دمای صفر مطلق و  $T_f$  دمای فیکسچر نگهدارنده است. همچنین در جدول ۵، ضرایب مورد استفاده مربوط به اتلاف‌های حرارتی و همچنین دماهای ذوب، انجماد و گرمای نهان ذوب نشان داده شده است.

در شکل ۶ مدل مش‌بندی شده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نزدیکی خط جوش برای افزایش دقت اندازه‌گیری از مش‌های ریزتری استفاده شده، به‌صورتی که طول هر المان در جهت خط جوش برابر  $0.2$  میلی‌متر و در جهت ضخامت ورق برابر  $0.4$  میلی‌متر است. مش مورد استفاده با درجه هندسی غیرخطی ۲ و از نوع انتقال حرارت DC3D20 است. حال پس از مش‌سازی به‌منظور انجام تحلیل حرارتی، نیازمند به تعریف توزیع شار حرارتی به قطعه‌کار است. لذا در ادامه به بررسی انواع توزیع‌های حرارتی پرداخته می‌شود.

اندازه هندسه مقطع جوش توسط میکروسکوپ اوامپوس مدل BX51M با بزرگ‌نمایی ۱۰۰ عکس‌برداری و اندازه‌گیری شده است.



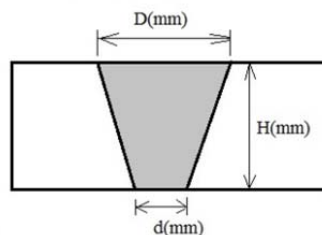
شکل ۲) آماده‌سازی بستر آزمایش و نمایی از فیکسچر جوشکاری



شکل ۳) نمونه جوشکاری شده به‌روش لیزر پالسی

جدول ۴) خواص فیزیکی وابسته به دما آلایژ AISI316L [14]

T (Kelvin)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Cp J/(kg.K)	k (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (1/K)
۲۷۳	۷۸۸۵/۹	۴۹۸/۶	۱۳/۵	۵۶/۴
۳۷۳	۷۷۷۱/۶	۵۱۲/۰	۱۵/۱	۷۹/۸
۴۷۳	۷۶۳۵/۱	۵۲۵/۴	۱۶/۷	۱۰۸/۳
۵۷۳	۷۴۷۶/۲	۵۳۸/۸	۱۸/۲	۱۴۱/۷
۶۷۳	۷۲۹۴/۹	۵۵۲/۲	۱۹/۸	۱۸۰/۲
۷۷۳	۷۰۹۱/۳	۵۶۵/۶	۲۱/۴	۲۲۳/۷
۸۷۳	۶۸۶۵/۴	۵۷۹/۰	۲۳/۰	۲۷۲/۲
۹۷۳	۶۶۱۷/۲	۵۹۲/۴	۲۴/۵	۳۲۵/۸
۱۰۷۳	۶۳۴۶/۶	۶۰۵/۸	۲۶/۱	۳۸۴/۳
۱۱۷۳	۶۰۵۳/۷	۶۱۹/۲	۲۷/۷	۴۴۷/۹
۱۲۷۳	۵۷۳۸/۴	۶۳۲/۶	۲۹/۲	۵۱۶/۴
۱۳۷۳	۵۴۰۰/۸	۶۴۶/۰	۳۰/۸	۵۹۰/۰
۱۴۷۳	۵۰۴۰/۹	۶۵۹/۴	۳۲/۴	۶۶۸/۶
۱۵۷۳	۴۶۵۸/۷	۶۷۲/۸	۳۴/۰	۷۵۲/۲
۱۶۷۳	۴۲۵۴/۱	۶۸۶/۲	۳۵/۵	۸۴۰/۸
۱۷۲۳	۴۰۴۳/۴	۶۹۲/۹	۳۶/۳	۸۸۷/۰

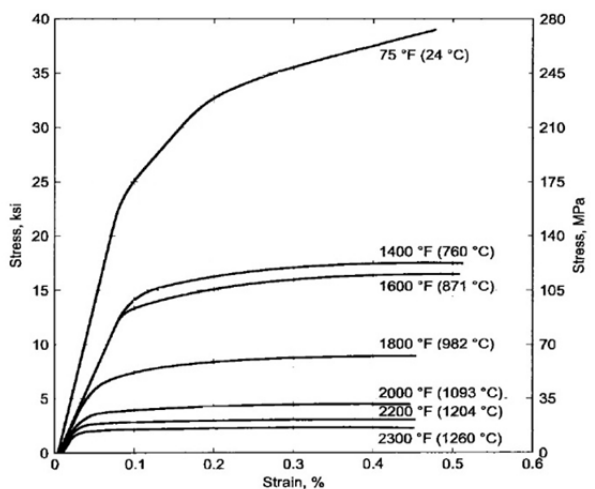


شکل ۴) ابعاد سطح مقطع جوش

### ۳- شبیه‌سازی جوشکاری (تحلیل حرارتی)

#### ۳-۱- مدل‌سازی سه‌بعدی اجزای محدود

در این پژوهش به‌منظور انجام تحلیل حرارتی فرآیند جوشکاری لیزر پالسی در ورق نازک فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن و تخمین هندسه مقطع جوش از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. لذا اولین مرحله ایجاد مدل سه‌بعدی، تعریف خواص ورق مورد استفاده در آزمایش‌ها و تعریف شرایط مرزی حاکم بر آزمایش است. بدین منظور، خواص فیزیکی آلایژ فوق برحسب دماهای مختلف مطابق با جدول ۴ [14] از قبیل گرمای ویژه ( $C_p$ )، ضریب هدایت حرارتی ( $K$ ) و ضریب انبساط خطی ( $\alpha$ ) برحسب  $(1/C^\circ)$  در نرم‌افزار تعریف می‌شود. سپس خواص مکانیکی برحسب دماهای مختلف مطابق نمودار ۱ [15] اعمال می‌شود. آنالیز حرارتی انجام شده از نوع انتقال حرارت غیرکوپله انتخاب شده است. شرایط مرزی حرارتی مطابق با شکل ۵ و رابطه ۲ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشخص است انواع اتلاف‌های حرارتی از طریق تشعشع ( $q_{rad}$ )، همرفت ( $q_{conv}$ ) و هدایت حرارتی ( $q_{th\ cond}$ ) را شامل می‌شود. در واقع اتلاف هدایت حرارتی بین ورق و فیکسچر و



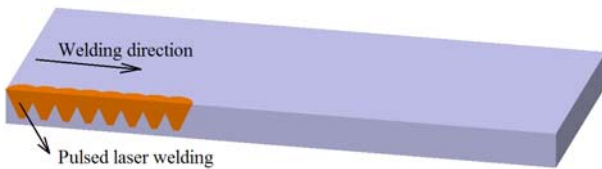
نمودار ۱) نمودار تنش- کرنش مهندسی در دماهای مختلف برای آلایژ AISI316L [15]

متوسط متاثر از هر سه پارامتر ورودی توان حداکثر، عرض پالس و فرکانس است.

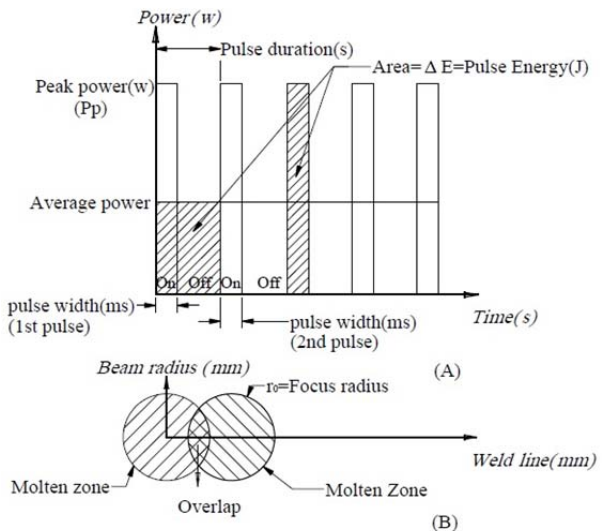
$$t = \Delta t + t_{\text{off}} = \frac{1}{fr} \quad (3)$$

$$p_{\text{ave}}(w) = \Delta E \times fr = p_p \times \Delta t \times fr \quad (4)$$

لذا با حاصلضرب پارامترهای توان حداکثر، عرض پالس و فرکانس جدول ۳، توان متوسط (انرژی در یک ثانیه) به ترتیب برای این سه آزمایش برابر با ۲۳/۸، ۱۲/۶ و ۳۳/۳ وات است.



شکل ۷ شماتیک جوشکاری لیزر پالس

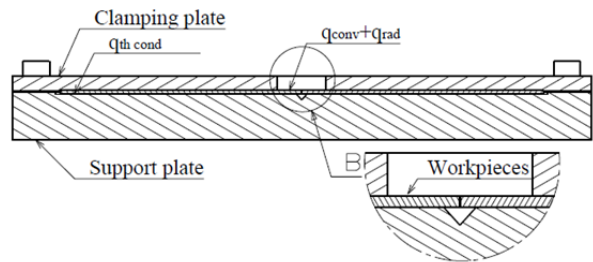


شکل ۸ شماتیک جوشکاری لیزر پالس

در قسمت شکل ۸- B، شماتیک برخورد پرتو روی سطح قطعه کار و میزان همپوشانی دو پالس با شعاع فوکوس  $r_0$  را نشان می‌دهد. هر چه تعداد پالس‌ها در واحد زمان (فرکانس) بالاتر باشد، میزان همپوشانی بیشتر خواهد بود. به منظور اعمال انرژی در فرآیند شبیه‌سازی، نیاز به تعریف میزان شار حرارتی در مدل‌سازی حرارتی اجزای محدود است. همان‌طور که در مقدمه بیان شد سه نوع توزیع شار حرارتی از قبیل توزیع شار حرارتی سطحی گوسی، توزیع شار حرارتی حجمی گوسی و توزیع شار حرارتی همرمی در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه، روابط حاکم بر این مدل‌ها بیان می‌شود.

### ۳-۲-۱- مدل حرارتی با توزیع شار سطحی گوسی

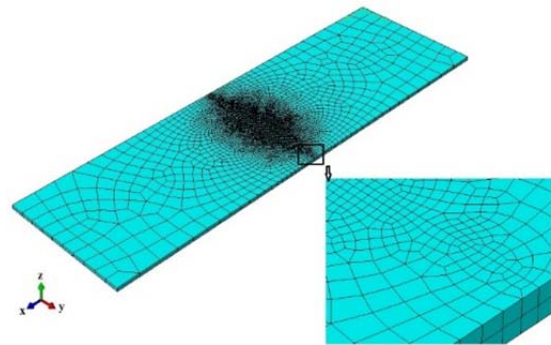
این نوع توزیع شار حرارتی مطابق شکل ۹، دارای یک توزیع گوسی یا نرمال روی سطح با فاصله  $r$  از مرکز تابش را نشان می‌دهد. در این توزیع، حداکثر مقدار تابش در  $r=0$  و برابر  $Q_0(c_n)$  و حداقل آن در شعاع  $r=r_w$  و برابر  $Q(r_w)$  است. رابطه ۵، چگالی شار حرارتی برحسب وات بر متر مربع در فاصله  $r$  از مرکز پرتو را برای یک پالس



شکل ۵ شرایط مرزی حرارتی اتخاذ شده در تحلیل حرارتی

جدول ۵ ضرایب مورد نیاز برای تعریف شرایط مرزی حرارتی

مقدار	ضرایب اتلاف حرارتی
$\epsilon = 0.9$	ضریب تشعشع
$h_{\text{conv}} = 30 \frac{W}{m^2 \cdot c^0}$	ضریب اتلاف حرارت از طریق همرفت با محیط
$h_{\text{th cond}} = 370 \frac{W}{m^2 \cdot c^0}$	ضریب اتلاف حرارت از طریق هدایت با فیکسچر گیربندی ورق
$\sigma = 5.68 \times 10^{-8} \frac{J}{m^2 \cdot S \cdot c^4}$	ضریب اسفان-بولتزمن
$T_m = 1400^\circ C$	دمای ذوب
$T_s = 1375^\circ C$	دمای انجماد
$L_m = 270 KJ/Kg$	گرمای نهان ذوب



شکل ۶ مش‌بندی ورق‌ها

### ۳-۲- روابط تحلیلی به منظور تعریف شار حرارتی

به منظور تعریف شار حرارتی در این تحقیق، سه نوع مدل حرارتی از قبیل مدل حرارتی سطحی گوسی، مدل حرارتی حجمی گوسی و مدل حرارتی همرمی به کمک سابروتین با کدنویسی در نرم‌افزار فرترن به کار برده شده است. در این پژوهش روش جوشکاری به صورت لیزر پالس است. لذا در شبیه‌سازی نیز مطابق شکل ۷، توزیع شار حرارتی نیز به کمک کدنویسی در نرم‌افزار فرترن به صورت پالسی اعمال شده است.

در لیزر پالس، نحوه ساطع شدن پرتو مطابق شکل ۸ است. در قسمت شکل ۸- A، شماتیک پالس‌های ایجاد شده در واحد زمان را نشان می‌دهد. مطابق رابطه ۳، زمان کل یک پالس برابر مجموع زمان‌های روشنی پالس بوده که به آن عرض پالس نیز گفته می‌شود و زمان خاموشی پالس است. همچنین زمان کل یک پالس برابر معکوس فرکانس نیز است. در قسمت شکل ۸- A، سطح هاشورخورده مطابق رابطه ۱ برابر انرژی یک پالس برحسب ژول ( $\Delta E$ ) است. با تلفیق روابط ۱ و ۳، توان متوسط یا همان انرژی وارد به قطعه کار در یک ثانیه از رابطه ۴ به دست می‌آید. لذا توان

۳-۲-۳- مدل حرارتی با توزیع شار حجمی هرمی

در مدل حجمی گوسی هرمی همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، حوضچه مذاب به صورت یک هرم ناقص با شعاع بالای  $r_e$ ، شعاع پایین  $r_i$  و ارتفاع  $H$  است. مانند توزیع های قبلی، توزیع شار حرارتی هرمی دارای یک توزیع گوسی یا نرمال روی حجم است. مطابق رابطه ۱۱، چگالی شار حرارتی  $Q_v(r, z)$  برحسب وات بر متر مکعب در فاصله  $r_c$  از مرکز پرتو با ارتفاع  $Z$  را نشان می دهد. در این رابطه،  $Q_0$  ماکزیمم شار حرارتی در  $Z=Z_e$  و  $r=0$  است.

$$Q_v(r_c, z) = Q_0 \exp\left(-\frac{c_n r^2}{r_c^2}\right) \quad (11)$$

با استفاده از قانون بقای انرژی گرما، رابطه ۱۲ حاصل می شود:

$$\eta p_p = \int_{z_i}^{z_e} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_c} Q_0 \exp\left(-\frac{c_n r^2}{r_c^2}\right) r dr d\theta dh \quad (12)$$

همچنین با توجه به حل هندسی شکل هرم ناقص، میزان شعاع در ارتفاع  $Z$  از رابطه ۱۳ به دست می آید:

$$r_c = r_i + (r_e - r_i) \frac{Z - Z_i}{H} \quad (13)$$

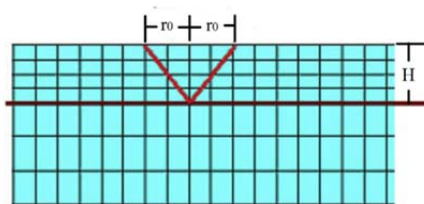
با حل انتگرال رابطه ۱۲ و جای گذاری  $r_c$  مقدار  $Q_0$  از رابطه ۱۴ به دست می آید:

$$Q_0 = \frac{3c_n \cdot \eta \cdot p_p}{\pi(1 - e^{-c_n})H(r_e^2 + r_i^2 + r_e r_i)} \quad (14)$$

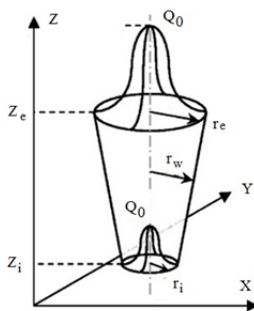
در نهایت با جای گذاری  $Q_0$  در رابطه ۱۰، شار حرارتی با مدل هرمی از رابطه ۱۵ به دست می آید:

$$Q_v(r_c, z) = \frac{3c_n \cdot \eta \cdot p_p}{\pi(1 - e^{-c_n})H(r_e^2 + r_i^2 + r_e r_i)} \exp\left(-\frac{c_n r^2}{r_c^2}\right) \quad (15)$$

در این توزیع نیز مانند توزیع شار سطحی گوسی و حجمی گوسی با تغییر ضریب اصلاح  $c_n$  می توان توزیع شار حرارتی را تغییر داد، به نحوی که با زیاد شدن این ضریب، میزان نفوذ جوش افزایش می یابد و از میزان پهنای جوش کاسته می شود، در صورتی که با توجه به ثابت بودن انتگرال رابطه ۱۲، میزان کل چگالی شار وارده به قطعه کار تغییری نمی کند.

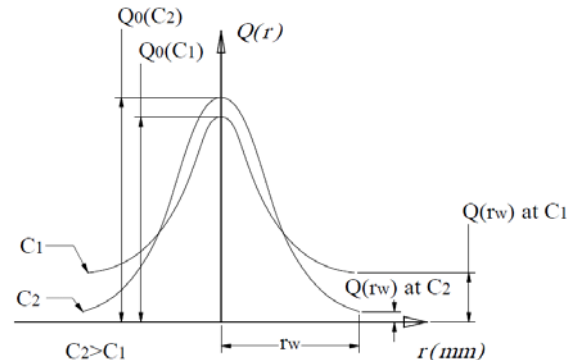


شکل ۱۰ ابعاد هندسه جوش در مدل حرارتی حجمی گوسی [13]



شکل ۱۱ هندسه جوش در توزیع شار حرارتی با مدل هرمی [11]

با انرژی  $\Delta E$  را نشان می دهد. در این رابطه  $c_n$  ضریب تصحیح تابع نمایی است که با تغییر آن می توان نحوه توزیع را تنظیم نمود. به عبارت دیگر، هر چه  $c_n$  کوچک تر باشد، از میزان چگالی شار حرارتی در مرکز پرتو کاسته می شود و در عوض میزان شار در دیواره ها افزایش می یابد. این امر منجر به افزایش عرض جوش و کاهش عمق جوش می شود، در صورتی که کل شار ورودی به قطعه کار تغییری نمی کند.



شکل ۹ توزیع شار حرارتی سطحی به صورت نمایی با اعمال ضریب تصحیح

مطابق قانون بقای انرژی، میزان انرژی تولید شده در یک پالس با زمان تابش  $\Delta t$  از رابطه ۶ به دست می آید:

$$\Delta E = \eta p_p \cdot \Delta t = \int_0^{\Delta t} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_w} Q_0(c_n) \exp\left(-\frac{c_n r^2}{r_w^2}\right) r dr d\theta dt \quad (6)$$

در این رابطه  $\eta$  راندمان حرارتی لیزر است. با حل انتگرال فوق، میزان شار حرارتی در مرکز تابش  $(Q_0(c_n))$ ، از رابطه ۷ به دست می آید:

$$Q_0(c_n) = \frac{\eta p_p c_n}{\pi r_w^2 (1 - \exp(-c_n))} \quad (7)$$

با جای گذاری رابطه ۷ در رابطه ۵، توزیع شار حرارت سطحی از رابطه ۸ به دست می آید:

$$Q(r) = \frac{\eta p_p c_n}{\pi r_w^2 (1 - \exp(-c_n))} \exp\left(-\frac{c_n r^2}{r_w^2}\right) \quad (8)$$

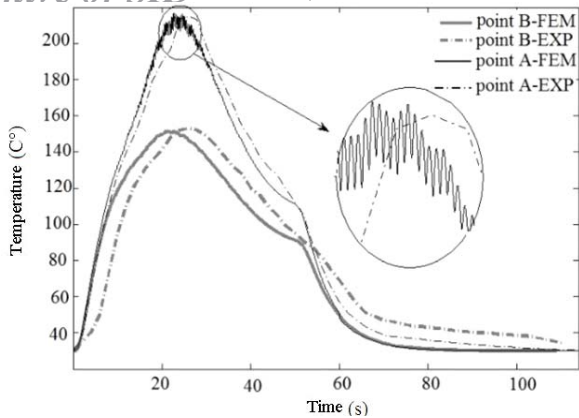
برای مثال کوانگ و همکاران، برای محاسبه شار حرارتی به صورت سطحی گوسی، ضریب  $c_n$  را به صورت عدد ثابت و برابر یک در نظر گرفتند. لذا توزیع شار با ضریب اصلاح  $c_n=1$  مطابق رابطه ۹ محاسبه می شود [16]:

$$Q(r) = \frac{\eta p_p}{\pi r_w^2 (1 - \exp(-1))} \exp\left(-\frac{r^2}{r_w^2}\right) = \frac{1.58 \eta p_p}{\pi r_w^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_w^2}\right) \quad (9)$$

۳-۲-۲- مدل حرارتی با توزیع شار حجمی گوسی

در مدل حجمی گوسی همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، پرتوی لیزر با شعاع  $r_0$  به سطح قطعه کار برخورد می نماید و تشکیل یک حوضچه مذاب به ارتفاع  $H$  می دهد. توزیع شار حرارتی دارای یک توزیع گوسی یا نرمال روی حجم است. مطابق رابطه ۱۰، چگالی شار حرارتی  $q(r, z)$  برحسب وات بر متر مکعب در فاصله  $r$  از مرکز پرتو و به فاصله  $Z$  از سطح قطعه کار و با اعمال ضریب اصلاح  $c_n$  را نشان می دهد [13].

$$q(r, z) = \frac{\eta P p}{\pi r_0^2 H} \exp\left(\left(1 - \frac{c_n r^2}{r_0^2}\right) \left(1 - \frac{z}{H}\right)\right) \quad (10)$$



نمودار ۲) تاریخچه دمایی استخراج‌شده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای آزمایش ۱

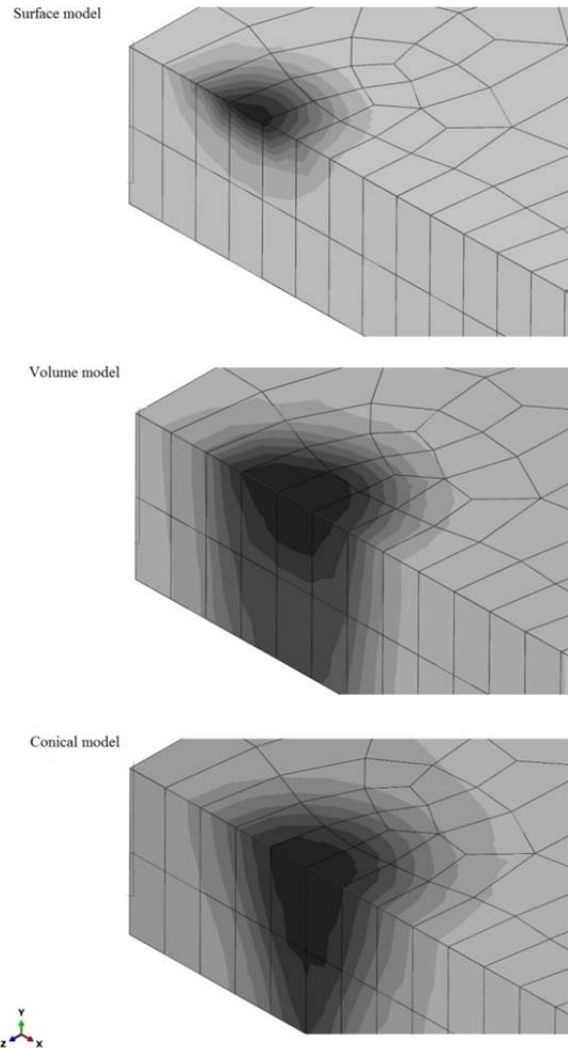
#### ۴- نتایج

آزمایش‌های تجربی با پارامترهای تنظیمی ذکر شده در جدول ۳ انجام گرفته است. سپس با برش ورق توسط دستگاه برش و متالوگرافی سطح مقطع جوش، ابعاد هندسه مقطع جوش مطابق شکل ۱۳ توسط میکروسکوپ اندازه‌گیری شده است. پس از انجام آزمایش‌های تجربی و اخذ نتایج، برای هر کدام از آزمایش‌ها، شبیه‌سازی جوشکاری به صورت پالسی با هر ۳ مدل حرارتی ذکر شده انجام گرفته است. مطابق شکل ۱۴، ابعاد هندسه جوش (عرض جوش در سطح بالا و پایین ورق و میزان نفوذ جوش) از نتایج شبیه‌سازی، استخراج و با نتایج تجربی مقایسه می‌شود. در صورت عدم انطباق از ضریب اصلاح  $C_n$  برای انطباق بیشتر استفاده شده است. جدول ۶، ابعاد هندسه جوش آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی با هر سه مدل حرارتی سطحی گوسی، حجمی گوسی و حجمی هرمی را نشان می‌دهد. پس از مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی، میزان خطای حاصل از عدم انطباق ابعادی بین هندسه مقطع جوش، نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی، محاسبه و در جدول ۷ درج شده است. از نتایج جدول ۷ مشاهده می‌شود که مدل سطحی گوسی در تخمین هندسه جوش برای سطوح انرژی کم (آزمایش ۱) با خطای متوسط ۱۰٪ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در صورتی که در آزمایش‌های ۲ و ۳ که سطوح انرژی آنها بالاتر است، اگر چه بالایی جوش را نسبتاً دقیق تخمین زده، ولی در تخمین میزان نفوذ جوش، خطایی برابر ۷۳٪ و ۵۸٪ و در کل خطای متوسط ۲۵٪ و ۵۵٪ داشته است. لذا این مدل حرارتی را نمی‌توان برای شبیه‌سازی در تمامی سطوح انرژی استفاده نمود. از دلایل این خطای میزان نفوذ جوش در این مدل می‌توان به ماهیت خود مدل اشاره نمود که تنها توزیع شار روی سطح قطعه کار است. در واقع در مدل سطحی گوسی، میزان حرارتی که به داخل قطعه نفوذ می‌کند، تنها از طریق انتقال حرارت از سطح آن است. این امر منجر به کاهش میزان نفوذ جوش تخمینی است. همچنین در مدل حجمی گوسی بیشترین انطباق برای آزمایش ۲ بوده که خطای متوسط برابر ۱۰٪ داشته است. به عبارت دیگر، شبیه‌سازی با مدل حجمی گوسی در آزمایش ۲ به دلیل در نظر گرفتن عرض جوش در سطح پایین ورق ( $d$ ) در روابط تحلیلی این مدل حرارتی، منجر به بالارفتن خطا در میزان نفوذ شده و قادر به پیش‌بینی میزان  $d$  نشده است. لذا در این مدل، خطای متوسط ۴۳٪ را خواهیم داشت. در صورتی که در شبیه‌سازی جوشکاری لیزر پالسی با مدل حجمی هرمی با داشتن خطای متوسط ۱۲٪، ۲۶٪ و ۱۰/۶٪ برای آزمایش‌های ۱ تا ۳، میزان خطای قابل قبولی داشته است. در ضمن، این مدل قادر به پیش‌بینی میزان  $d$  نیز است.

همچنین با اعمال ضریب اصلاح  $C_n$  باعث افزایش دقت هندسه تخمینی جوش و کاهش میزان خطا می‌شود. در واقع هر چه

#### ۳-۳- انجام تحلیل حرارتی

با به‌کارگیری روابط تحلیلی ذکر شده به کمک برنامه‌نویسی به زبان فرترن، نحوه توزیع شار حرارتی تعریف شده است. سپس تحلیل حرارتی مطابق شکل ۱۲ برای هر سه مدل حرارتی سطحی، حجمی و هرمی طی دو مرحله جوشکاری به مدت ۷۵ ثانیه و سردشدگی به مدت ۴۰ ثانیه انجام گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نحوه توزیع شار حرارتی در این سه مدل با یکدیگر متفاوت است و نهایتاً منجر به تشکیل حوضچه مذاب با ابعاد گوناگونی می‌شود. لذا در ادامه، در بخش نتایج برای مدل‌های حرارتی مختلف، ابعاد حوضچه مذاب ثبت می‌شود.



شکل ۱۲) تحلیل حرارتی در سه مدل حرارتی سطحی، حجمی و هرمی

همچنین با توجه به نمودار ۲، تاریخچه دمایی اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل در نقاط A و B با تاریخچه دمایی استخراج شده از شبیه‌سازی برای آزمایش اول منطبق شده است. لذا برای آزمایش اول، تحلیل حرارتی صحه‌گذاری شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمودار دمایی در شبیه‌سازی جوش با توجه به پایین‌گرفتن زمان‌های ثبت دما در هر استپ ( $t=1/1000s$ ) و پالسی بودن روش جوشکاری به صورت موج‌های ریز است. در واقع در هر پالس با ساطع شدن پرتو و در زمان روشنی پالس، دما افزایش و در زمان خاموشی پالس، دما به صورت جزئی کاهش می‌یابد.

جدول ۶) ابعاد هندسه جوش براساس نتایج تجربی و شبیه سازی

شماره آزمایش	نوع مدل حرارتی	D (mm)	d (mm)	H (mm)	C <sub>n</sub>
۱	نتایج تجربی	۰/۴۵	۰	۰/۱۲	-
	مدل سطحی گوسی	۰/۳۵	۰	۰/۱۳	۰/۲۵
	مدل حجمی گوسی	۰/۵۲	۰	۰/۱۹	۰/۴
۲	نتایج تجربی	۰/۷۶	۰	۰/۵۷	-
	مدل سطحی گوسی	۰/۷۷	۰	۰/۱۵	۰/۵
	مدل حجمی گوسی	۰/۸۰	۰	۰/۴۳	۰/۹
۳	نتایج تجربی	۰/۷۸	۰/۳۴	۰/۷۲	-
	مدل سطحی گوسی	۰/۸۵	۰	۰/۳۰	۱
	مدل حجمی گوسی	۰/۷۵	۰	۰/۵۳	۱
	مدل حجمی هرمی	۰/۷۰	۰/۳	۰/۸	۳

جدول ۷) میزان خطا براساس عدم انطباق هندسه جوش نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی

شماره آزمایش	نوع مدل حرارتی	میزان خطا (%)			متوسط خطا (%)
		D	d	H	
۱	مدل سطحی گوسی	۲۲	۰	۸	۱۰
	مدل حجمی گوسی	۱۵	۰	۵۸	۲۴
	مدل حجمی هرمی	۱۱	۰	۲۵	۱۲
۲	مدل سطحی گوسی	۱	۰	۷۳	۲۵
	مدل حجمی گوسی	۵	۰	۲۴	۱۰
	مدل حجمی هرمی	۱	۰	۷	۲/۶
۳	مدل سطحی گوسی	۹	۱۰۰	۵۸	۵۵
	مدل حجمی گوسی	۴	۱۰۰	۲۶	۴۳
	مدل حجمی هرمی	۱۰	۱۱	۱۱	۱۰/۶

### ۵- نتیجه گیری

با مقایسه ابعاد هندسه جوش اندازه گیری شده از آزمایش های تجربی و ابعاد هندسه جوش حاصل از شبیه سازی، استنباط می شود که برای شبیه سازی جوشکاری لیزر با سطوح انرژی کم می توان از مدل سطحی گوسی استفاده نمود. همچنین مدل حجمی گوسی، دقت کمتری نسبت به مدل حجمی هرمی برای تمامی سطوح دارد. لذا مدل حرارتی حجمی هرمی، انطباق بیشتری نسبت به دو مدل دیگر برای شبیه سازی جوشکاری لیزر پالسی با سطوح انرژی متفاوت دارد. در نتیجه مدل حجمی هرمی به عنوان مدل اصلاح در شبیه سازی جوشکاری لیزر پالسی ورق های نازک فولادی ۳۱۶ کم کربن انتخاب می شود. همچنین با به کارگیری ضریب تصحیح، دقت مدل هرمی افزایش یافته، به صورتی که برای هر سه آزمایش با خطای ناچیز بین ۲ تا ۱۲% قادر به پیش بینی هندسه مقطع جوش است.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

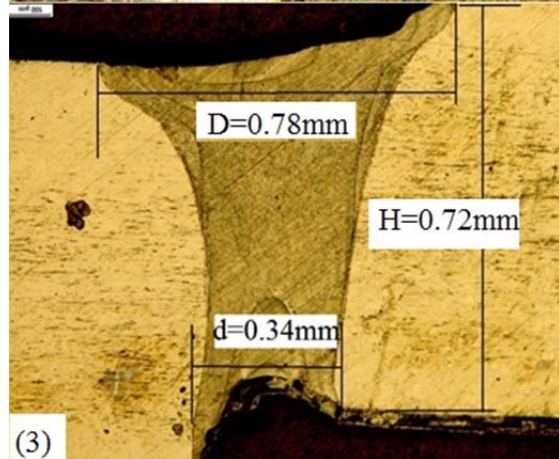
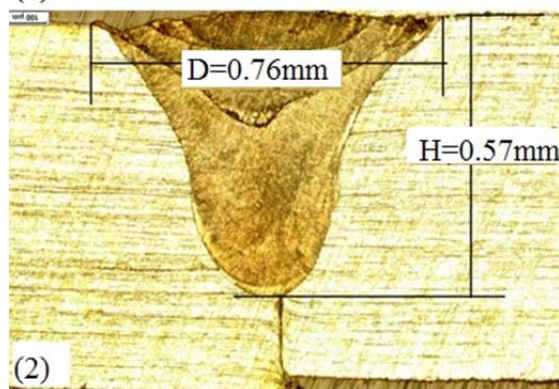
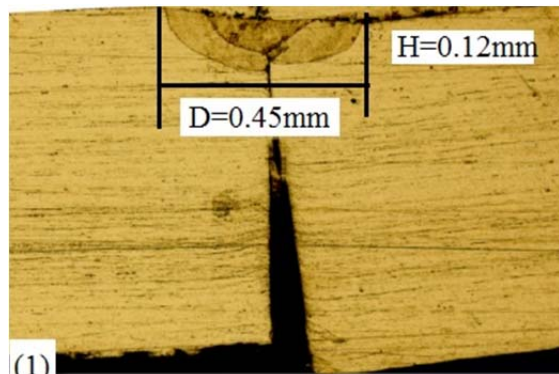
سهم نویسندگان: امیر ترابی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰%); فرهاد کلاهان (نویسنده دوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰%)

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

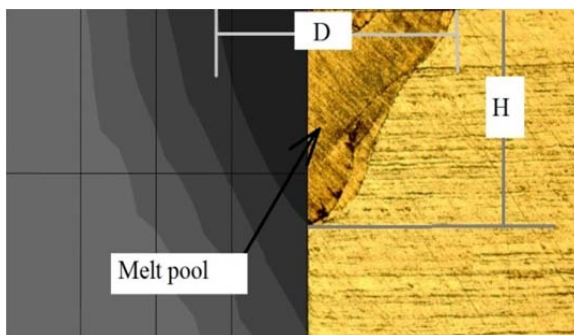
### منابع

1- Kim K, Lee J, Cho H. Analysis of pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 steel. Journal of Mechanical Science

سطوح انرژی کاهش می یابد، ضریب اصلاح C<sub>n</sub> نیز کاهش می یابد، به صورتی که در آزمایش ۳ با توان متوسط ۳۳/۳ وات، ضریب اصلاح برابر ۳ و در آزمایش ۲ با توان متوسط ۲۳/۸ وات، ضریب اصلاح برابر ۱/۵ و نهایتاً در آزمایش ۱ با توان متوسط ۱۲/۶ وات، ضریب اصلاح برابر ۰/۷ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۳) ابعاد هندسه جوش در سه آزمایش تجربی



شکل ۱۴) صحنه گذاری ابعاد هندسه جوش در شبیه سازی با نتایج تجربی



temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy. *Optics & Laser Technology*. 2014;59:52-59.

10- Yuquan G, Dongjiang W, Guangyi M, Dongming G. Numerical simulation and experimental investigation of residual stresses and distortions in pulsed laser welding of hastelloy C-276 thin sheets. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2014;43(11):2663-2668.

11- Zain-ul-abdein M, Nélias D, Jullien JF, Deloison D. Experimental investigation and finite element simulation of laser beam welding induced residual stresses and distortions in thin sheets of AA 6056-T4. *Materials Science and Engineering A*. 2010;527(12):3025-3039.

12- Han Q, Kim D, Kim D, Lee H, Kim N. Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(5):1116-1122.

13- Moraitis GA, Labeas GN. Prediction of residual stresses and distortions due to laser beam welding of butt joints in pressure vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2009;86(2-3):133-142.

14- Suresh Kumar K. Numerical modeling and simulation of a butt joint welding of AISI 316L stainless steels using a pulsed laser beam. *Materials Today Proceedings*. 2015;2(4-5):2256-2266.

15- ASM International, editor. Atlas of stress-strain curves. Materials Park OH: ASM International; 2002.

16- Kuang JH, Hung TP, Chen CK. A keyhole volumetric model for weld pool analysis in Nd:YAG pulsed laser welding. *Optics & Laser Technology*. 2012;44(5):1521-1528.

and Technology. 2010;24(11):2253-2259.

2- Liao YC, Yu MH. Effects of laser beam energy and incident angle on the pulse laser welding of stainless steel thin sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;190(1-3):102-108.

3- Kaitanov AY, Ozersky AD, Zabelin AM, Kislov VS. Static and fatigue strengths of laser-welded overlap joints with controlled penetration. Seventh International Conference on Laser and Laser-Information Technologies, 2001, Vladimir, Suzdal, Russian Federation. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE); 2002.

4- Rosenthal D. The theory of moving source of heat and its application to metal treatment. *Transactions of ASME*. 1946;68:849-866.

5- Pavelic V, Tanbakuchi R, Uyehara OA, Myers PS. Experimental and computed temperature histories in gas tungsten arc welding of thin plates. *Weld J*. 1969;48(7):295-305.

6- Krutz GW, Segerlind LJ. Finite element analysis of welded structures. *Welding Research Supplement*. 1978 Jul:211-s-216-s.

7- Friedman E. Thermomechanical analysis of the welding process using the finite element method. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 1975;97(3):206-213.

8- Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*. 1984;15(2):299-305.

9- Akbari M, Saedodin S, Toghraie D, Shoja Razavi R, Kowsari F. Experimental and numerical investigation of