

علمی - پژوهشی

مطالعه اثر سرعت اسکن و توان لیزر بر حوضچه مذاب در فرآیند ذوب

انتخابی لیزر به کمک معادلات حرکت مذاب برای Ti6Al4V

سیدعلی قرشی^۱ میلاد صادق یزدی^۲ محمدهادی حسینزاده^۳ سیدمحسن موسوی کانی^۴
 دانشکده مهندسی مکانیک دانشکده فنی و مهندسی دانشکده فنی و مهندسی دانشکده فنی و مهندسی
 دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دانشگاه جامع امام حسین (ع) دانشگاه جامع امام حسین (ع) دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۸)

چکیده

روش ذوب انتخابی لیزر، یکی از روش‌های ساخت افزایشی است که در آن قطعات با ساختارهای هندسی متنوع به صورت لایه به لایه، توسط ذوب پودر فلز ایجاد می‌شود. گرادیان دما در محل ذوب، به پارامترهای فرآیند مانند سرعت اسکن و توان لیزر وابسته است که بر روی ابعاد حوضچه مذاب و کیفیت سطح تأثیر دارد. با توجه به ماهیت گذرا و ابعاد بسیار کوچک حوضچه مذاب، کنترل و اندازه‌گیری گرادیان دمای ایجاد شده و ابعاد حوضچه مذاب نسبتاً دشوار است. در این مقاله از یک مدل اجزای محدود جهت تحلیل فرآیند و مطالعه اثر سرعت اسکن و توان لیزر، بر روی بستری از آلیاژ Ti6Al4V استفاده شده است. در این مطالعه ابتدا معادلات نظریه لیزر بررسی شد و پس از مدل‌سازی، صحت لیزر مدل شده با نمونه تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. پس از صحت‌سنجی مدل‌سازی لیزر، فرآیند ذوب انتخابی لیزر بررسی و تحلیل اجزای محدود برای توان و سرعت‌های مختلف انجام شد. برای مدل‌سازی از فیزیک‌های مختلفی در نرم‌افزار، به‌طور هم‌زمان شامل انتقال حرارت همراه با معادلات تغییر فاز جامد به مایع، تنش سطحی (اثر مارانگونی) و جریان آرام سیال (معادلات ناوراستوکس) همراه با اثر گرانش استفاده شد. ابعاد حوضچه مذاب، گرادیان دما در راستاهای مسیر حرکت لیزر، پهنا و عمق لایه مذاب و همچنین بررسی پیدایش عیب اثر تویی شدن، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج مدل عددی جهت صحت‌سنجی با مدل تجربی مقایسه شد که سازگاری مناسبی را با نمونه تجربی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ذوب انتخابی لیزر، توان لیزر، سرعت اسکن، اثر تویی شدن، مدل‌سازی عددی

The Study of Scan Speed and Laser Power Effects on the Molten Pool in Selective Laser Melting of Ti6Al4V Based on the Molten Motion Equations

S. A. Ghorashi¹ M. Sadegh Yazdi² M. H. Hosseinzadeh³ S. M. Mousavi Kani⁴
 Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University

(Received: 04/November/2019 ; Accepted: 28/June/2020)

ABSTRACT

Selective laser melting (SLM) is a laser powder-bed fusion method that offers great potentials in producing components with complex shapes and geometries. Process parameters like laser power and scan speed have significant effect on the induced temperature gradient which determines the molten pool dimensions and surface integrity. Due to the transient feature and fine dimensions of the molten pool, monitoring and measuring the induced temperature gradient and the pool dimensions are extremely challenging. In this article, a finite element model has been used to analyze the process and investigate the scanning speed and laser power parameters during the SLM process on a substrate of Ti6Al4V alloy. In this study, first the theoretical equations of laser have been investigated and after modeling, the accuracy of the modeled laser has been compared with the experimental model. After verifying the laser modeling, the FEM analysis of SLM has been carried out for various laser powers and scan speeds to study the effects of the mentioned process parameters. For the modelling, various physics assumptions have been simultaneously used in the software including heat transfer, solid to liquid phase changes equations, surface tension (Marangoni effect), and laminar fluid flow (Navier-Stokes equation) along with the gravity effect. Molten pool dimensions, temperature gradient along the laser moving heat source, width, and depth of the molten pool, as well as the occurrence of the balling effect phenomenon, have been studied separately in each case. The results obtained by FEM analysis have been compared with the experimental model, showing good compatibility.

Keywords: Selective laser melting (SLM), Laser power, Scan speed, Balling effect, Numerical simulation

۱- کارشناسی ارشد: Ali.Ghorashi@email.kntu.ac.ir

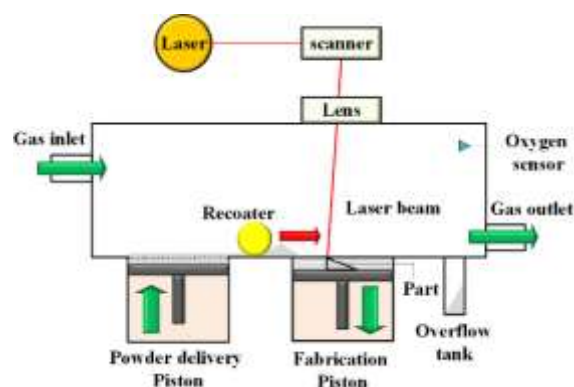
۲- استادیار (نویسنده پاسخگو): msadeghy@ihu.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد: mhadi.hosseinzadeh@yahoo.com

۴- کارشناسی ارشد: kpsmhmousavi@ihu.ac.ir

۱- مقدمه

روش ساخت افزایشی^۱، یکی از روش‌های نوین ساخت است که در آن به‌طور مستقیم قطعات به‌صورت لایه به لایه و به شکل سه‌بعدی تولید می‌شوند. روش ذوب انتخابی لیزر^۲، یکی از روش‌های ساخت افزایشی است که در آن قطعه بر روی بستری از پودر گذاشته شده توسط لیزر بر روی مسیری مشخص شده توسط یک فایل طراحی (CAD)، ایجاد می‌شود [۱-۳]. شکل ۱، نحوه اجرای این روش را نشان می‌دهد. در این فرآیند جهت ایجاد ضخامت مطلوب، مقداری معین از پودر به‌طور پیوسته در یک مسیر رفت و برگشت حین فرآیند در یک زمان مشخص اضافه می‌شود. با ذوب این مقدار پودر در هر لایه از ضخامت در بازه زمانی معین، قطعه مورد نیاز ساخته می‌شود. یک گاز خنثی که معمولاً آرگون یا نیتروژن است جهت جلوگیری از اکسیداسیون^۳ حوضچه مذاب ایجاد شده با سرعت و دبی معین از روی بستر پودر عبور داده می‌شود [۴ و ۵].



شکل (۱): طرح‌واره فرآیند ساخت افزایشی ذوب انتخابی لیزر.

افزایشی استفاده شده است. تیتانیوم و آلیاژهای آن به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی بالا، انبساط حرارتی پایین و زیست‌سازگاری^۴ مناسب به‌طور گسترده در فرآیند ذوب انتخابی لیزر کاربرد دارد [۷]. در بین آلیاژهای تیتانیوم، آلیاژ Ti6Al4V به دلیل چگالی پایین، نسبت استحکام به وزن بالا و داشتن ویژگی‌های مناسب در دمای بالا یکی از رایج‌ترین آلیاژها در روش ساخت افزایشی است [۸-۱۱]. این آلیاژ سبک و در عین حال قوی باعث کاهش وزن در سازه‌های پربار می‌شود و از این رو برای موتورهای جت، توربین‌های گازی و بسیاری از اجزای بدنه هواپیما بسیار مناسب است [۱۲-۱۵]. امروزه استفاده از محصولات ساخته‌شده از آلیاژ Ti6Al4V، علاوه بر صنعت هوافضا در سایر زمینه‌های کاربردی مانند صنایع دریایی، خودرو، انرژی، شیمیایی و زیست‌پزشکی^۵ کاربرد فراوان دارد [۱۲، ۱۴-۱۶]. تولید متعارف محصولات Ti6Al4V به‌صورت آهن‌گری^۶، ریخته‌گری^۷ و نورد^۸ مواد اولیه است که به دنبال آن ماشین‌کاری بعدی به شکل‌ها و ابعاد نهایی می‌انجامد. این فرایندهای تولید سنتی همیشه ناگزیر به تولید مقدار زیادی دورریز مواد، هزینه بالا و مدت‌زمان طولانی فرآیند می‌شوند [۱۷ و ۱۸]. در چنین شرایطی، تولید مواد به روش ساخت افزایشی که یک فناوری پیشرفته تولید برای ساخت محصول به‌صورت لایه به لایه از مدل‌های CAD است، قابلیت مفید خود را برای ساخت محصولات Ti6Al4V با پیچیدگی‌های هندسی ارائه می‌دهد.

بررسی خواص مکانیکی قطعات تولیدشده Ti6Al4V با روش ساخت افزایشی از نظر ریزساختار، مقدار ازدیاد طول^۹ زیادتری نسبت به سایر روش‌های تولید نشان می‌دهد [۱۹ و ۲۰]. کونگ و همکاران [۲۱] نشان دادند که از نظر ریزساختاری برای Ti6Al4V در فرآیند ذوب انتخابی لیزر، فاز α' ایجاد می‌شود که در آن حد نهایی استحکام ۹۲۰ الی ۹۶۰ مگاپاسکال و حد نهایی ازدیاد طول معادل ۳٪ الی ۵٪ است. ویژگی‌های کششی و ازدیاد طول قطعات تولیدی،

امروزه به دلیل منطف بودن این روش در ساخت قطعات پیچیده با کیفیت بالا، در صنایعی مانند هوافضا، پزشکی، خودروسازی، جواهرسازی کاربرد فراوانی پیدا کرده است [۶]. در سال‌های اخیر آلیاژهای مختلفی مانند فولاد زنگ‌نزن، تیتانیوم، آلومینیوم و کروم در روش ساخت

⁴ Biocompatibility

⁵ Biomedical

⁶ Forging

⁷ Casting

⁸ Rolling

⁹ Elongation

¹ Additive manufacturing (AM)

² Selective laser melting (SLM)

³ Oxidation

حرکتی لیزر مطالعه کردند. یانگ و همکاران [۲۹] به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار اجزای محدود جهت پیش‌بینی وضعیت ناحیه متأثر از حرارت^۷، مطالعات خود را بر روی یک قطعه از جنس Ti6Al4V انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که اندازه ناحیه متأثر از حرارت، ارتباط بسیار زیادی به توان لیزر، سرعت و اندازه شعاع نقطه لیزر^۸ دارد. فروزمهر و همکاران، به کمک مدل‌سازی و حل عددی یک لایه از مسیر برای ماده فولاد زنگ‌نزن 316L، اثر سرعت اسکن در سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر بر ثانیه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که ابعاد حوضچه مذاب پس از گذر از خط سوم حرکتی^۹ به شرایط ثابتی رسیده و عمق حوضچه مذاب در حدود ۲ میلی‌متر از ابتدا تا انتهای فرآیند نسبتاً بدون تغییر است [۶]. سانگ و همکاران [۱۱] به صورت تجربی پس از بررسی توزیع دما، به ارتباط بین چگالی، میزان تراکم پودر و سرعت اسکن جهت کنترل بهتر شرایط فرآیند پرداخته‌اند و نتایج خود را با حل عددی مقایسه نمودند. حسین و همکاران [۳۰] به کمک حل اجزای محدود و بهره‌گیری از رفتار ترمومکانیکی، توزیع میدان دما، ابعاد حوضچه مذاب و تنش‌های پسماند حرارتی ایجادشده را مورد بررسی قرار دادند. علی و همکاران [۳۱] مطالعه‌ای در خصوص اثر ضخامت لایه در توان‌های مختلف لیزر، بر روی تنش حرارتی و خواص مکانیکی ایجادشده برای قطعه با آلیاژ Ti6Al4V انجام دادند. لی و ژانگ [۳۲] مدلی برای بیان ارتباط بین انتقال حرارت و حرکت سیال (مذاب) ارائه کردند که در ارتباط با اثر مارانگونی^{۱۰} است. آن‌ها نشان دادند که جابه‌جایی حرارتی متأثر از اثر مارانگونی تأثیر بسیار زیادی در رفتار حرارتی ایجادشده در اطراف حوضچه مذاب دارد. نیسار و همکاران [۳۳] از یک مدل عددی سه‌بعدی، برای مطالعه تغییر فاز حاصل‌شده در فرآیند ذوب انتخابی لیزر استفاده کردند. ژیرنوف و همکاران [۳۴] توزیع گرادیان دما برای آلیاژ Ti6Al4V در محل مذاب را به کمک دوربین حرارتی به صورت پایش آنلاین وضعیت بر روی یک خط از مسیر حرکتی لیزر بررسی و نتایج را با حل عددی مقایسه کردند. تی سانگ و همکاران

مستقل از اندازه ذرات پودر (۲۵ تا ۱۰۰ میکرومتر) و یا ضخامت لایه (۵۰ و ۷۰ میکرومتر) است، اما ظاهر سطح وابستگی زیادی به اندازه ذرات پودر دارد [۲۲].

به‌طور کلی تنظیم و انتخاب پارامترهای فرآیند مانند توان لیزر^۱، سرعت اسکن^۲، فاصله خطوط در یک لایه^۳ و الگوی اسکن^۴ جهت ایجاد ساخت قطعه با دقت ابعادی، صافی سطح و استحکام مناسب، بسیار مهم و ضروری است [۶ و ۲۳]. ریزساختار، زبری و تراکم قطعات تولیدی Ti6Al4V به‌طور قابل‌توجهی به پارامترهای فرآیند وابسته است. پری و همکاران [۲۴] به کمک یک مدل تحلیلی اثر استراتژی الگوی اسکن را بر روی گرادیان دما و میدان تنش در فرآیند ساخت افزایشی ذوب انتخابی لیزر بر روی Ti6Al4V بررسی کردند. لی و گو [۲۵] یک مطالعه عددی را برای پیش‌بینی انتقال حرارت در طول فرآیند ذوب انتخابی لیزر انجام دادند. آن‌ها مقادیر مختلف توان و سرعت لیزر را برای مقایسه حداکثر دما و استحکام ایجادشده استفاده کردند. کانگ و همکاران [۲۶] نشان دادند که افزایش توان لیزر و سرعت اسکن اثر قابل‌توجهی روی خواص مکانیکی، دستیابی به عیوب کمتر برای قطعه ساخته‌شده از Inconel 718 دارد. با تنظیم توان و سرعت اسکن لیزر می‌توان یک قطعه متراکم Ti6Al4V با مقاومت بالا و سطح صاف تولید کرد [۲۲].

در حقیقت، ارزیابی و انتخاب مجموعه پارامترهای مطلوب به‌صورت تجربی به‌دلیل وجود انواع روش‌های انتقال حرارتی (هدایت، تشعشع و جابه‌جایی)، تغییر فاز و غیره، ساده نیست. روش حل اجزای محدود^۵، جهت پیش‌بینی و تخمین توزیع گرادیان دما، ابعاد حوضچه مذاب و در نهایت کمک به بهبود کیفیت قطعه خروجی، یک روش مناسب و کارآمد شناخته می‌شود. ماتسومو و همکاران [۲۷] توزیع دما و تنش را در یک لایه از فرآیند به‌صورت دو‌بعدی، مدل‌سازی کردند. یین و همکاران [۲۸] با استفاده از روش تولد و مرگ المان‌ها^۶ توزیع دما را روی یک لایه از مسیر

¹ Laser power

² Scan speed

³ Hatch space

⁴ Scan pattern

⁵ Finite Element Method (FEM)

⁶ Element birth and death method

⁷ Heat Affected Zone (HAZ)

⁸ Laser spot radius

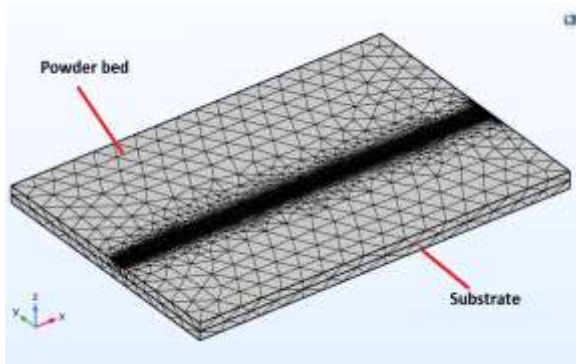
⁹ Third track

¹⁰ Marangoni effect

همراه با توزیع دما و بررسی پیدایش عیب توپی شدن برای هریک از ۹ حالت، جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته است و با نتایج مدل تجربی مقایسه شده است.

۲- مدل سازی سه بعدی تحلیل اجزای محدود

برای مدل سازی از نرم افزار COMSOL Multiphysics استفاده شده است. یک قطعه با ابعاد $10 \times 6 \times 0.2 \text{ mm}^3$ از جنس Ti6Al4V به عنوان بستر پودر^۶ و قطعه ای دیگر با ابعاد مشابه در زیر بستر پودر در نظر گرفته شده است (شکل ۲). فیزیک های انتخابی جهت تحلیل مسئله شامل انتقال حرارت، جریان لایه ای سیال^۷ و استفاده از کوپل همزمان آن ها جهت در نظر گرفتن اثر مارانگونی است. مدل سازی برای یک خط حرکتی^۸ در میانه قطعه اجرا شده است. تعداد کل المان ها ۳۹۸۹۴ و مش استفاده شده از نوع هشت وجهی^۹ است که در محل حرکت لیزر نسبت به سایر نقاط المان مش بسیار کوچک تر انتخاب شده است. مدت زمان تحلیل فرآیند ذوب انتخابی لیزر با شرایط اشاره شده، برای سیستم با مشخصات سخت افزاری Intel® Core(TM) i7-7500U CPU @ 2.70GHz, RAM 16GB تقریباً ۱۵ ساعت است. سطح شامل ماده Ti6Al4V به طور یکنواخت و همگن^{۱۰} فرض شده است.



شکل (۲): قطعه مدل سازی شده در نرم افزار. المان های مش در مسیر حرکت لیزر نسبت به سایر نقاط بسیار کوچک تر انتخاب شده است.

[۳۵] با در نظر گرفتن یک مدل دوبعدی جهت مدل سازی ذرات پودر در مقیاس ماکروسکوپی، اثر توپی شدن^۱ را مطالعه و نتایج را با نمونه تجربی مقایسه کردند. دای و گو [۳۶] اثر چگالی انرژی خطی^۲ را بر روی توزیع دما و ابعاد حوضچه مذاب بررسی کردند. آن ها نشان دادند که چگالی انرژی خطی بالاتر موجب افزایش دما و ابعاد حوضچه مذاب می شود. شکل هندسی قطعات در ایجاد دقت ابعادی مطلوب نقش مهمی دارد. به عبارتی دیگر، به دلیل شرایط مختلف انتقال حرارت در هر لایه از قطعه در هنگام تولید آن، شکل هندسی قطعه بر ابعاد حوضچه مذاب تأثیرگذار است [۲۳ و ۳۷]. همچنین ابعاد حوضچه مذاب در برخی مناطق از هر لایه مانند لایه اول یا در مسیرهای برگشتی به شکل u، افزایش قابل توجهی دارد [۳۸].

در این مقاله، اثر توان و سرعت اسکن لیزر بر روی ابعاد حوضچه مذاب بررسی شده است. برای این منظور از نرم افزار COMSOL Multiphysics جهت مدل سازی فرآیند ذوب انتخابی لیزر، در دو بخش مختلف استفاده شده است. در بخش اول به معادلات مربوط به مدل سازی لیزر اشاره و سپس لیزر مدل سازی شده با مدل تجربی از مرجع [۳۹] جهت صحت سنجی مدل، مقایسه شد. در بخش دوم و پس از تأیید صحت فرآیند مدل سازی لیزر، مدل سازی فرآیند ذوب انتخابی لیزر بر روی بستر از جنس آلیاژ Ti6Al4V انجام شد. در این مدل سازی، از خصوصیات حرارتی غیرخطی وابسته به دمای ماده^۳ برای پارامترهایی مانند هدایت حرارتی، چگالی و ضریب جذب^۴، بهره برداری شده است. به منظور مدل سازی فرآیند، از یک تحلیل حرارتی غیرخطی شامل معادلات تغییر فاز ماده حین انتقال حرارت، معادلات ناویراستوکس^۵ شامل ویسکوزیته دینامیکی حرکت مذاب، اثر گرانشی و تنش سطحی (اثر مارانگونی) استفاده گردید. نتایج با در نظر گرفتن پارامترهای متغیر توان لیزر در توان های ۲۰، ۳۰ و ۵۰ وات و سرعت اسکن در مقادیر ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ میلی متر بر ثانیه، ابعاد حوضچه مذاب

⁶ Powder bed

⁷ Laminar fluid flow

⁸ Single track

⁹ Tetrahedral

¹⁰ Homogenous

¹ Balling effect

² Linear energy density

³ Non-linear dependent thermal properties

⁴ Absorptivity coefficient

⁵ Navier-Stokes equations

ثانیه است که در موقعیت مکانی x و y قرار دارد. با جایگذاری رابطه ۲ در رابطه ۱، توزیع شار حرارتی لیزر به شکل رابطه ۳، بیان می‌شود:

$$Q = \frac{2AP}{\pi R^2} \exp\left(\frac{-2((x-ut)^2+y^2)}{R^2}\right) \exp\left(\frac{-|z|}{\delta}\right) \quad (3)$$

رابطه انتقال حرارت در یک جسم تحت انتقال حرارت هدایت که منبع تولید حرارت درون آن قرار دارد بر اساس قانون فوریه به صورت رابطه ۴، بیان می‌شود [۴۱]:

$$\rho C_p \frac{\partial x}{\partial y} + \rho C_p u \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q \quad (4)$$

که در آن T دمای قطعه در لحظه‌ای معین، k ضریب انتقال حرارت هدایت، C_p گرمای ویژه قطعه و Q گرمای جذب شده، ρ چگالی قطعه است.

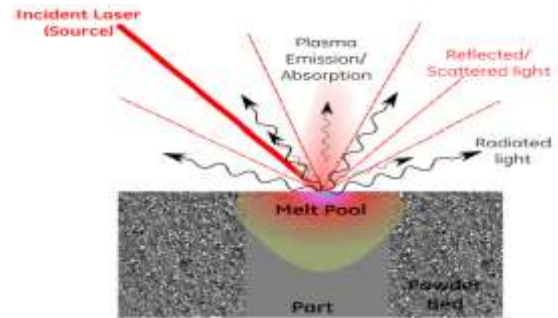
جهت افزایش دقت مدل‌سازی پارامترهای k ، C_p و ρ در فاز جامد و مایع مطابق جدول ۱ و نیز پارامتر ضریب جذب A (شکل ۴) به صورت متغیر با دما برای آلیاژ Ti6Al4V به نرم‌افزار داده شده است.

جدول (۱): اطلاعات ترموفیزیکی برای آلیاژ Ti6Al4V [۲۹، ۴۲ و ۴۳].

T (°C)	ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	C_p ($\frac{J}{kg.K}$)	k ($\frac{W}{m.K}$)
۲۵	۴۴۲۰	۵۴۶	۷
۱۰۰	۴۴۰۶	۵۶۲	۷/۴۵
۲۰۰	۴۳۹۵	۵۸۴	۸/۷۵
۳۰۰	۴۳۸۱	۶۰۶	۱۰/۱۵
۴۰۰	۴۳۶۶	۶۲۹	۱۱/۳۵
۵۰۰	۴۳۵۰	۶۵۱	۱۲/۶
۶۰۰	۴۳۳۶	۶۷۳	۱۴/۲
۷۰۰	۴۳۲۴	۶۹۴	۱۵/۵
۸۰۰	۴۳۰۹	۷۱۴	۱۷/۸
۹۰۰	۴۲۹۴	۷۳۴	۲۰/۲
۹۹۴	۴۲۸۲	۷۵۳	۲۲/۷
۹۹۶	۴۲۸۲	۶۹۳	۱۹/۳
۱۱۰۰	۴۲۶۷	۶۶۰	۲۱
۱۲۰۰	۴۲۵۲	۶۷۸	۲۲/۹
۱۳۰۰	۴۲۴۰	۶۹۶	۲۳/۷
۱۴۰۰	۴۲۲۵	۷۱۴	۲۳/۶
۱۵۰۰	۴۲۰۵	۷۳۲	۲۵/۸
۱۶۰۰	۴۱۹۸	۷۵۰	۲۷
۱۶۴۹	۴۱۸۹	۷۵۹	۲۸/۴
۱۶۵۱	۳۹۲۰	۱۰۰۷	۸۳/۵
۱۷۰۰	۳۸۸۶	۸۳۱	۸۳/۵
۱۸۰۰	۳۸۱۸	۸۳۱	۸۳/۵
۱۹۰۰	۳۷۵۰	۸۳۱	۸۳/۵

۱-۲- معادلات حاکم بر نظریه لیزر، انتقال حرارت و تغییر فاز

در حین فرآیند ذوب انتخابی لیزر، انرژی که از لیزر به سطح پودر برخورد می‌کند، بخشی از آن جذب^۱، بخشی بازتاب^۲ و قسمتی عبور^۳ داده می‌شود که تنها بخشی از انرژی که جذب شده است موجب ذوب پودر می‌شود (شکل ۳).



شکل (۳): برخورد لیزر با سطح پودر که بخشی از آن جذب، بازتاب و عبور داده می‌شود [۴۴].

انرژی لیزر تا عمق خاصی از پودر نفوذ می‌کند. بنابراین در این مطالعه، مقدار نفوذ لیزر در راستای عمق پودر نیز لحاظ شده است. معادلات حاکم بر فرسایش انرژی موج^۴ بیر-لمبرت^۵، نیز برای بیان اتلاف انرژی لیزر در جهت عمق نفوذ استفاده می‌شود [۴۰]:

$$Q_{xyz} = \frac{Q_0(x,y)}{\delta} \exp\left(\frac{-|z|}{\delta}\right) \quad (1)$$

که Q_0 ($\frac{W}{m^2}$) شار حرارتی روی سطح، δ عمق نفوذ نوری^۶ و z مقدار مطلق مختصات برخورد لیزر روی سطح است.

توزیع شار حرارتی طبق رابطه ۲، بر روی سطح به شکل گوسین^۷ تعریف می‌شود [۳۹]:

$$Q_0(x,y) = \frac{2AP}{\pi R^2} \exp\left(\frac{-2((x-ut)^2+y^2)}{R^2}\right) \quad (2)$$

که در آن $P(W)$ توان لیزر، A ضریب جذب، R شعاع نقطه لیزر، u سرعت حرکت پرتو لیزر و t زمان بر حسب

¹ Absorption
² Reflection
³ Transmission
⁴ Attenuation
⁵ Beer-Lambert
⁶ Optical penetration depth
⁷ Gaussian

گرادیان تنش سطحی به وجود آمده موجب پیدایش اثر مارانگونی شده که به صورت رابطه ۱۰، تعریف می‌شود [۳۲]:

$$F^{Marangoni} = \nabla_s \gamma + \frac{d\gamma}{dt}, \quad (10)$$

$$\gamma = \gamma_0 + \frac{d\gamma}{dt} \nabla T$$

که در آن، ∇_s گرادیان سطح، γ تنش سطحی، γ_0 تنش سطحی در دمای ذوب، $\frac{d\gamma}{dt}$ گرادیان تنش سطحی و ∇T اختلاف دما است.

برای در نظر گرفتن رفتار جریان آرام سیال در محل حوضچه مذاب، از معادلات ناویراستوکس استفاده می‌شود [۳۲]:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \quad (11)$$

$$\nabla \cdot [-PI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + \rho g + F$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0 \quad (12)$$

در معادلات ۱۱ و ۱۲، P فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی، I تانسور سه‌بعدی واحد، ρg نیروی گرانش و F نیروهای حجمی (شامل نیروی مارانگونی نیز می‌شود) که در رابطه ۱۰، به آن اشاره شد.

۳-۲- شرایط اولیه و مرزی تحلیل مسئله

شرایط اولیه شامل یک میدان دمای یکنواخت در دمای ۲۰ درجه است. شرایط مرزی روی سطح فوقانی شامل انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشع با محیط است:

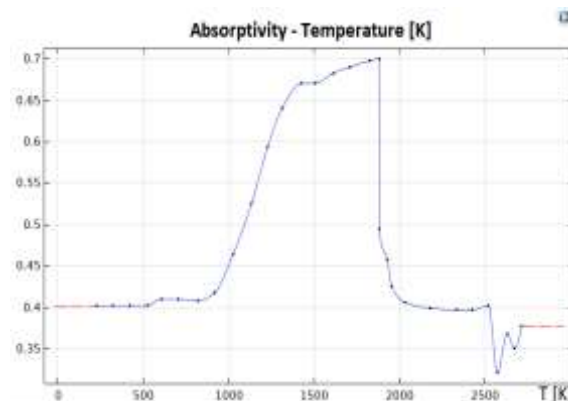
$$-n \cdot (-k \nabla T) = h(T_{amb} - T) + \quad (13)$$

$$\in \sigma(T_{amb}^4 - T^4)$$

که در آن n راستای بردار سطح، h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، \in ضریب تشعشع سطح، T_{amb} دمای محیط، T دمای قطعه و σ ثابت استفان بولتزمن است. مقادیر ترموفیزیکی آلیاژ مورد استفاده در جدول ۱، گردآوری شده است. همچنین سایر پارامترهای اولیه مورد نیاز در جدول ۲، تنظیم شده‌اند.

۳- اعتبارسنجی تحلیل اجزای محدود

قبل از مدل‌سازی فرآیند ذوب انتخابی لیزر، ابتدا به کمک معادلات حاکم بر لیزر، مدل‌سازی لیزر انجام شده است. به کمک اطلاعات موجود از مرجع [۳۹] که در آن آزمون



شکل (۴): نمودار ضریب جذب قطعه برای آلیاژ Ti6Al4V [۴۵].

رفتار تغییر فاز ماده بین جامد و مایع (مذاب)، با جایگزین کردن معادلات زیر در رابطه ۴، در نظر گرفته می‌شود [۴۶]:

$$\rho = \theta \rho_{solid} + (1 - \theta) \rho_{liquid} \quad (5)$$

$$C_p = \frac{1}{\rho} (\theta \rho_{solid} C_{p,solid} + (1 - \theta) \rho_{liquid} C_{p,liquid}) \quad (6)$$

$$+ L \frac{d\theta}{dt}$$

$$k = \theta k_{solid} + (1 - \theta) k_{liquid} \quad (7)$$

$$a = \frac{(1 - \theta) \rho_{liquid} - \theta \rho_{solid}}{\theta \rho_{solid} + (1 - \theta) \rho_{liquid}} \quad (8)$$

$$\theta = \begin{cases} 0, & T \leq T_s \\ \frac{T - T_L}{T - T_s}, & T_L < T < T_s \\ 1, & T \geq T_L \end{cases} \quad (9)$$

که در آن‌ها، θ کسر فاز^۱، L گرمای نهان ذوب، T_L و T_s به ترتیب دمای انجماد^۲ و ذوب^۳ ماده است.

۲-۲- مدل‌سازی حرکت جریان مذاب

گرادیان دمای بسیار زیاد ایجاد شده در محل حوضچه مذاب، سبب ایجاد یک گرادیان تنش سطحی نسبتاً زیاد می‌شود.

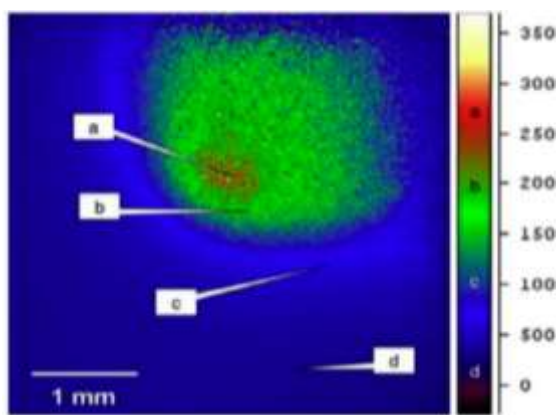
¹ Phase fraction

² Solidus temperature

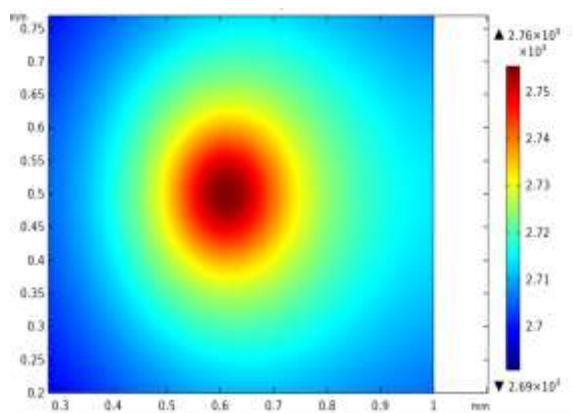
³ Liquidus temperature

مرجع [۳۹] را نشان می‌دهد، بیشینه دما برابر ۲۷۶۰ کلوین است که نشان‌دهنده سازگاری مناسبی با مدل تجربی است.

پس از صحت‌سنجی مدل حرارتی لیزر، نتایج حل عددی برای مدل‌سازی فرآیند ذوب انتخابی لیزر با مقادیر تجربی از [۴۹]، مقایسه شده است. طبق اطلاعات موجود در مرجع [۴۹] که در جدول ۲ گردآوری شده است؛ مدل‌سازی در توان‌های ۳۰، ۲۰ و ۵۰ وات با سرعت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر ثانیه (۹ حالت) صورت گرفته است.



شکل (۵): توزیع دمای ثبت‌شده به کمک دوربین حرارتی با کیفیت تصویر بالا برای مشخصات لیزر با توان ۳ وات و سرعت اسکن ۱ میلی‌متر بر ثانیه. بیشینه دما در محدوده ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ کلوین قرار گرفته است [۳۹].



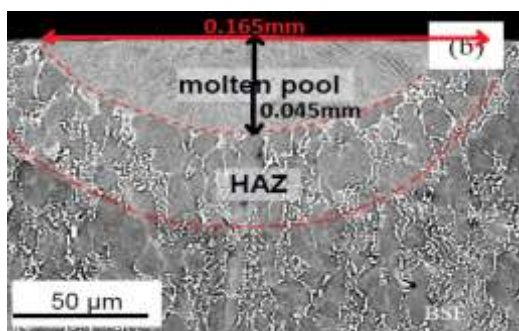
شکل (۶): نتیجه مدل‌سازی لیزر با مشخصات منطبق بر مرجع [۳۹]، حداکثر دما را برابر ۲۷۶۰ کلوین نشان می‌دهد.

تجربی جهت مشاهده توزیع دمای لیزر روی یک قطعه از جنس Ti6Al4V انجام شده است، مدل‌سازی صورت گرفته است و در نهایت نتایج حاصل از حل عددی انجام شده با داده‌های تجربی از [۳۹]، مقایسه شده است. در این قسمت توان لیزر برابر ۳ وات و سرعت اسکن برابر با $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ مطابق با اطلاعات موجود از مرجع [۳۹] انتخاب و سایر پارامترهای مورد نیاز از اطلاعات مندرج در جدول‌های ۱ و ۲ استخراج شده است.

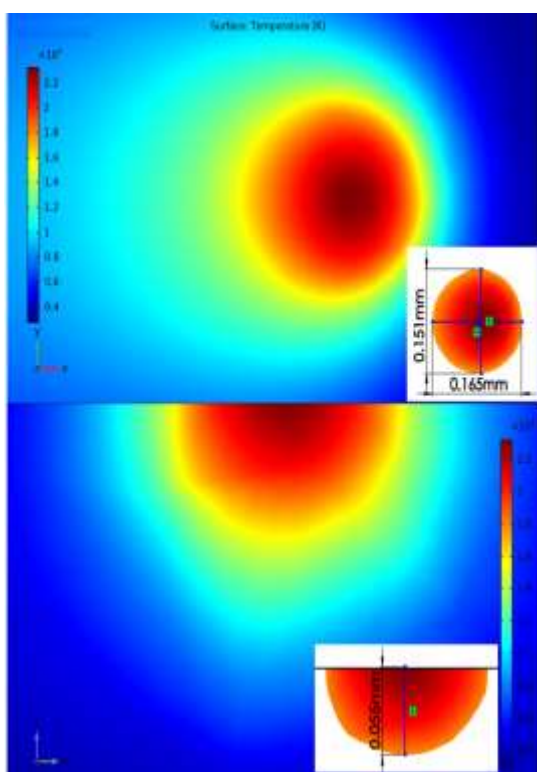
جدول (۲): اطلاعات مربوط به لیزر و ویژگی‌های حرارتی استفاده‌شده برای آلیاژ Ti6Al4V در تحلیل اجزای محدود [۴۷-۴۹].

پارامتر	توضیح	مقدار
P(W)	توان لیزر	۵۰-۳۰-۲۰
u(mm/s)	سرعت اسکن	-۲۰۰-۱۰۰
		۳۰۰
R(μm)	شعاع نقطه لیزر	۳۵
δ	عمق نفوذ نوری	۶۵
ϵ	ضریب تشعشع	۰/۳۵
$\sigma \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \right)$	ثابت استفان بولتزمن	5.67×10^{-8}
$\mu(\text{Pa}\cdot\text{s})$	ویسکوزیته دینامیکی	۰/۰۰۲
L(J/kg)	گرمان نهان ذوب	۳۵۰۰۰۰
$\frac{dy}{dt} \left(\frac{\text{N}}{\text{m}\cdot\text{K}} \right)$	گرادیان تنش سطحی	-۰/۰۰۰۲۷
$T_L(\text{K})$	دمای ذوب	۱۹۲۸
$T_S(\text{K})$	دمای انجماد	۱۸۷۸

شکل ۵، گرادیان دمای ثبت‌شده توسط دوربین حرارتی در ابعاد $1 \times 1 \text{ mm}^2$ از مرجع [۳۹] را نشان می‌دهد که در آن توان لیزر برابر ۳ وات و سرعت اسکن برابر با $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ انتخاب شده است. طبق نتایج تجربی از [۳۹]، بیشینه دما در محدوده ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ کلوین مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۶، که نتایج مدل‌سازی لیزر با مشخصات منطبق بر



شکل (۸): ابعاد حوضچه مذاب در توان ۵۰ وات و سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه نشان می‌دهد که پهنا و عمق آن به ترتیب ۱۶۵ و ۴۵ میکرومتر است [۴۹].



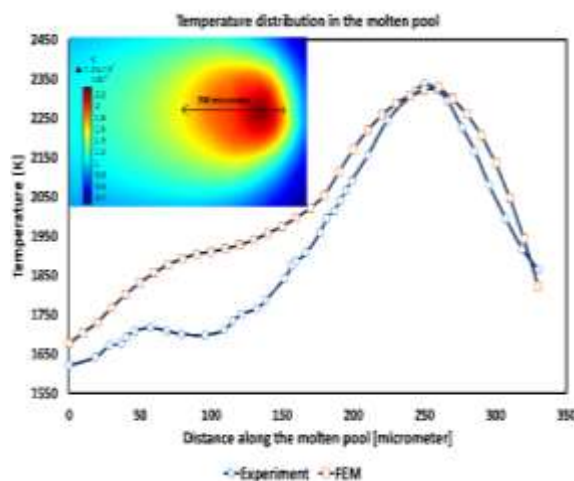
شکل (۹): نتیجه حل اجزای محدود ابعاد حوضچه مذاب در توان ۵۰ وات و سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- بیشینه دما در محل حوضچه مذاب

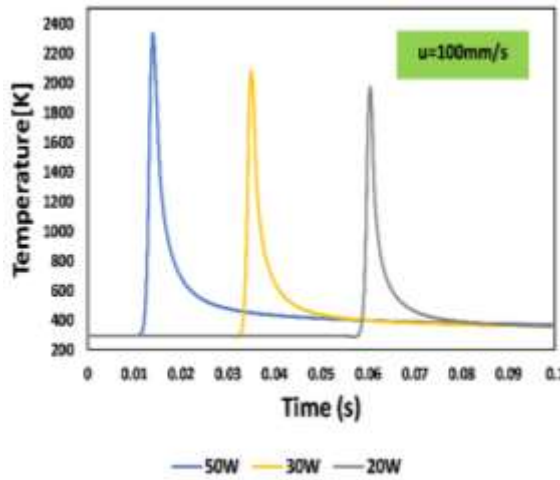
همان‌طور که اشاره شد مدل‌سازی در توان‌های ۳۰، ۲۰ و ۵۰ وات با سرعت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر ثانیه (۹) انجام شده است. شکل ۱۰، نتایج حل عددی دمای بیشینه را بر حسب زمان تابش نشان می‌دهد. این مقادیر بر حسب زمان تابش به صورت نسبت قطر نقطه لیزر به سرعت اسکن تعریف شده است. طبق شکل ۱۰، با افزایش توان لیزر

شکل ۷، منحنی توزیع دما با توان ۵۰ وات و سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه در محدوده حوضچه مذاب به فاصله ۳۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهد. بیشینه دمای ایجادشده در آزمون تجربی ۲۳۴۰ کلوین اشاره شده است که در نتایج مدل‌سازی این مقدار برابر ۲۳۳۳ کلوین به دست آمده است (حدود ۰/۳٪). همچنین الگوی رفتاری توزیع دما نیز در هر دو مدل تجربی و مدل‌سازی رفتار مشابهی را نشان می‌دهد. اختلاف در مقادیر عددی میان نتایج تجربی و محاسبات نظری می‌تواند به دلیل وابستگی دمایی پیچیده خصوصیات فیزیکی ماده باشد [۵۰].



شکل (۷): مقایسه نتایج تجربی از [۴۹] و مدل‌سازی توزیع دما در محل حوضچه مذاب با توان ۵۰ وات و سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، الگوی تغییرات دمایی مشابهی را نشان می‌دهد. بیشینه دمای حاصل از مدل تجربی ۲۳۴۰ کلوین و از مدل عددی ۲۳۳۳ کلوین است.

شکل ۸، ابعاد حوضچه مذاب با توان ۵۰ وات و سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه را نشان می‌دهد که از نتایج تجربی استخراج شده است. طبق این شکل، پهنا و عمق حوضچه مذاب برای توان و سرعت اشاره شده، به ترتیب برابر با ۱۶۵ و ۴۵ میکرومتر است. در تحلیل اجزای محدود در این توان و سرعت، پهنا و عمق حوضچه مذاب به ترتیب معادل ۱۵۱ و ۵۵ میکرومتر به دست آمده است که نشان می‌دهد اختلاف کمی با مقادیر تجربی دارد (شکل ۹).



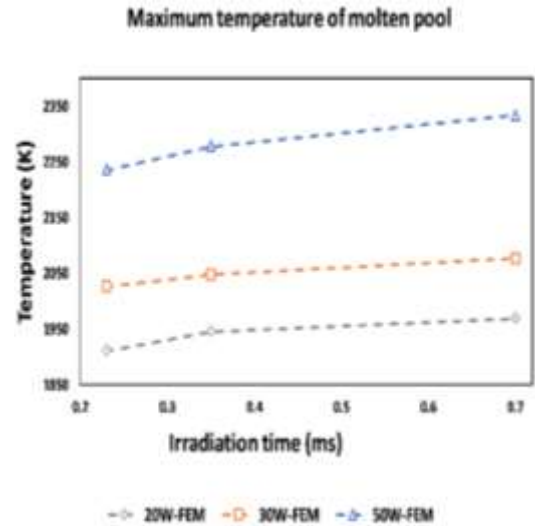
شکل (۱۲): منحنی تغییرات دمای حوضچه مذاب در سرعت ثابت ۱۰۰ میلی متر بر ثانیه در توان‌های متفاوت.

۲-۴- بررسی ابعاد حوضچه مذاب

برای سایر حالت‌های مورد ارزیابی نیز ابعاد حوضچه مذاب بررسی شده است. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ منحنی‌های مربوط به مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود مربوط به پهنا و عمق حوضچه مذاب را با مقادیر تجربی نشان می‌دهد. طبق شکل‌های ۱۳ و ۱۴، با افزایش زمان تابش (کاهش سرعت اسکن) در یک توان مشخص و یا افزایش توان لیزر در یک زمان تابش ثابت، پهنا و عمق حوضچه مذاب افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر، ابعاد حوضچه مذاب با افزایش توان لیزر (در سرعت اسکن ثابت) زیاد می‌شود و با افزایش سرعت اسکن (در توان لیزر ثابت) کاهش می‌یابد. همان‌طور که از شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشخص است، الگوی تغییرات ابعاد حوضچه مذاب با مقادیر تجربی متناظر است.

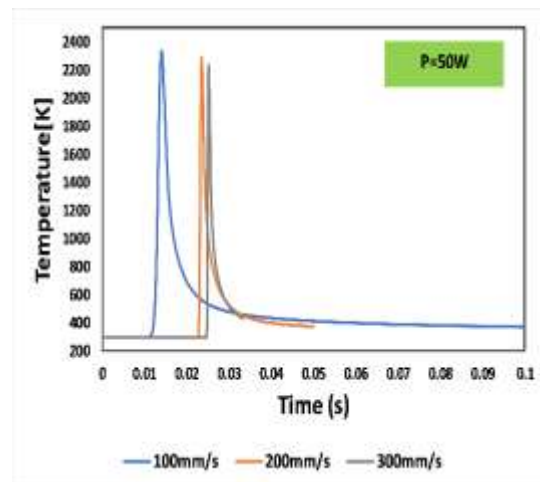
از آنجاکه ویژگی‌های هدایت حرارتی پودر در راستای عمق نسبت به دو راستای دیگر یعنی جهت اسکن و راستای عرضی وابستگی بیشتری به ضریب هدایت حرارتی پودر دارد و با توجه به اینکه در فرض مسئله، قطعه همگن و یکنواخت در نظر گرفته شده است؛ بنابراین در توان‌های بالاتر اختلاف میان نتایج مقادیر حل عددی و تجربی (شکل ۱۴) مشاهده می‌شود که با نتایج مطالعه فو و گو [۵۱] مطابقت دارد.

در یک زمان تابش ثابت، دمای بیشینه رو به افزایش است و همچنین در یک توان ثابت، با کاهش زمان تابش، دمای بیشینه روند نزولی دارد.



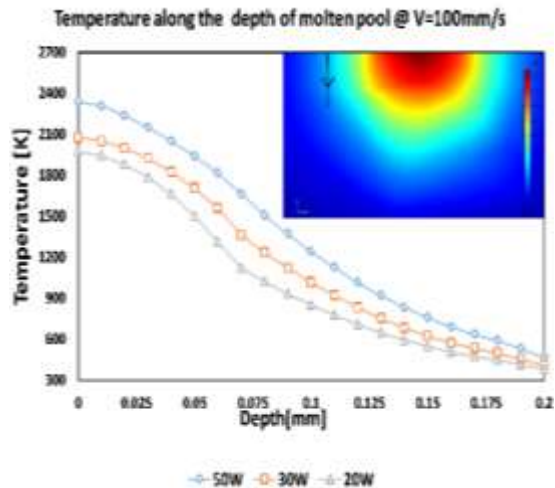
شکل (۱۰): نتایج تحلیل اجزای محدود بیشینه دمای حوضچه مذاب بر حسب زمان تابش و توان لیزر.

شکل ۱۱، منحنی تغییرات دما در مرکز حوضچه مذاب در یک نقطه دلخواه بر روی مسیر حرکت لیزر، برای توان ثابت ۵۰ وات در سرعت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی متر بر ثانیه و شکل ۱۲، منحنی اشاره شده را برای سرعت ثابت ۱۰۰ میلی متر بر ثانیه در توان‌های ۲۰، ۳۰ و ۵۰ وات نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲، با افزایش توان و یا کاهش سرعت اسکن، مقدار بیشینه دما و همچنین نرخ گرمایش و سرد شدن افزایش می‌یابد.



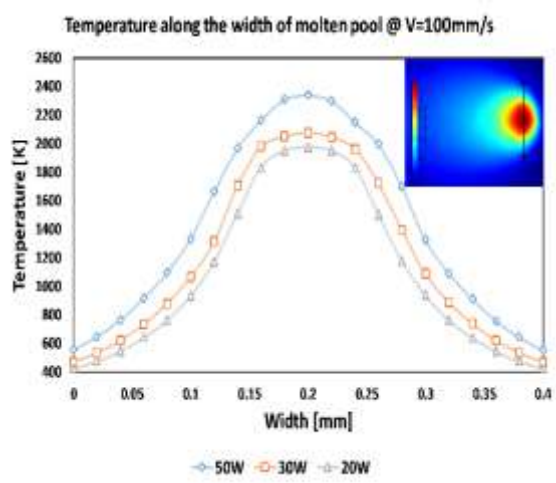
شکل (۱۱): منحنی تغییرات دمای حوضچه مذاب در توان ثابت ۵۰ وات در سرعت‌های اسکن متفاوت.

گرادیان دما به دلیل تجمع انرژی حرارتی بیشتر روی سطح روند افزایشی را نشان می‌دهد.

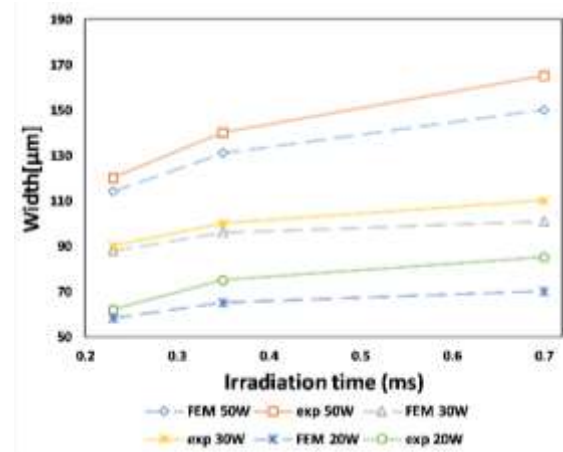


شکل (۱۵): توزیع دما در راستای عمق قطعه با طول ۰/۲ میلی‌متر برای توان‌های مختلف در سرعت ثابت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه.

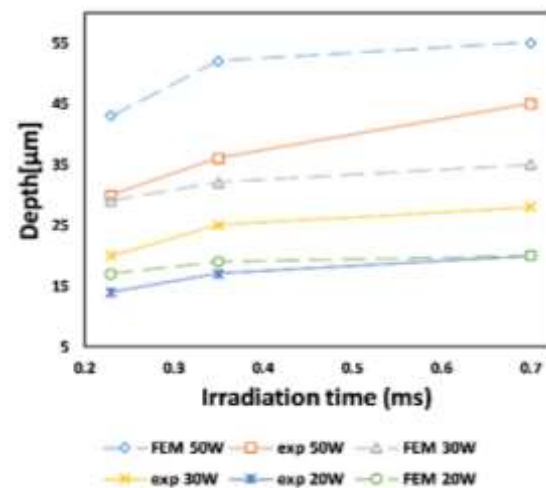
شکل ۱۶، توزیع دما در راستای عرضی (پهنای حوضچه مذاب) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۶، توزیع دما در این جهت، به صورت گاو سین مشاهده می‌شود که در مرکز اثر لیزر بیشترین مقدار افزایش دما را دارد و با فاصله گرفتن از آن کاهش می‌یابد. همچنین مشابه با تغییرات دما در راستای عمق، افزایش توان موجب افزایش گرادیان دما می‌شود.



شکل (۱۶): توزیع دما در راستای عرضی (پهنای حوضچه مذاب) برای توان‌های مختلف در سرعت ثابت.



شکل (۱۳): مقایسه حل عددی ابعاد پهنای حوضچه مذاب بر حسب زمان تابش و توان لیزر با مدل تجربی از مرجع [۴۹].



شکل (۱۴): مقایسه حل عددی ابعاد عمق حوضچه مذاب بر حسب زمان تابش و توان لیزر با مدل تجربی از مرجع [۴۹].

۳-۴- بررسی توزیع گرادیان دما

به منظور بررسی توزیع دما، الگوهای دمایی ایجاد شده به طور جداگانه با توان‌های متغیر در سرعت ثابت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه در راستای جهت اسکن، پهنای و عمق حوضچه مذاب بررسی شده است.

شکل ۱۵، توزیع دما در راستای عمق قطعه با طول ۰/۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد. دما به شکل قابل توجهی از نقطه مرکزی لیزر روی سطح، نسبت به لبه انتهایی آن کاهش یافته است. با افزایش توان در یک سرعت ثابت اسکن،

ناپایداری حوضچه مذاب و اثر توپیی شدن، با افزایش سرعت اسکن و یا توان لیزر اتفاق می‌افتد [۴۵].

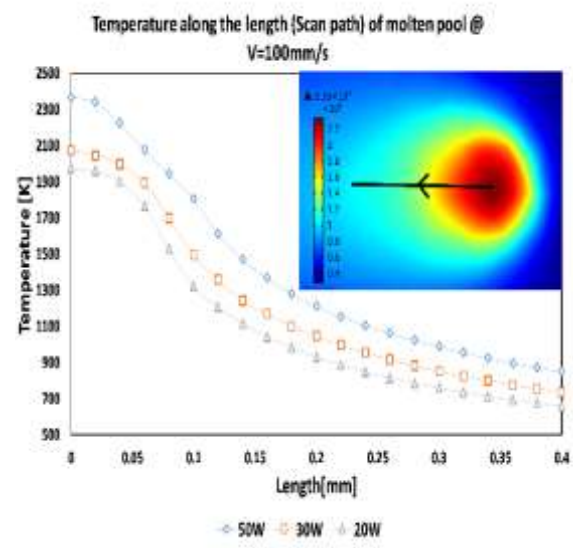
در جدول ۳، طول و پهناهای حوضچه مذاب و نیز بررسی اثر توپیی شدن (نسبت طول به پهناهای حوضچه مذاب) برای مطالعه انجام شده، گردآوری شده است. نتایج بررسی اثر توپیی شدن برای ۹ حالت صورت گرفته نشان می‌دهد که در هیچ از یک حالت‌های مورد مطالعه، این اثر به وجود نیامده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سرعت اسکن بالاتر ۳۰۰ میلی‌متر بر ثانیه نسبت به سایر سرعت‌های مورد ارزیابی در یک توان ثابت، موجب روند افزایشی ناپایدار شدن حوضچه مذاب (افزایش نسبت طول به پهنا) می‌شود. بعلاوه با افزایش توان لیزر در یک زمان تابش ثابت مورد تحلیل، احتمال افزایش نسبت طول به پهناهای حوضچه مذاب بیشتر می‌شود؛ بنابراین استفاده از یک محدوده مناسب برای سرعت و توان لیزر جهت افزایش پایداری حوضچه مذاب یک امر ضروری است.

جدول (۳): نتایج حل عددی بررسی اثر توپیی شدن

(L طول، W پهنا و L/W نسبت طول به پهناهای حوضچه مذاب است).

توان	زمان	L	W	L/W
۲۰	۶۰	۵۸	۱/۰۳۴	
۳۰	۹۲	۸۸	۱/۰۴۵	۰/۲۳
۵۰	۱۲۷	۱۱۴	۱/۱۱۴	
۲۰	۶۲	۶۵	۰/۹۵۴	
۳۰	۹۴	۹۶	۰/۹۷۹	۰/۳۵
۵۰	۱۲۹	۱۳۱	۰/۹۸۵	
۲۰	۶۷	۷۰	۰/۹۵۷	
۳۰	۹۹	۱۰۱	۰/۹۸۰	۰/۵
۵۰	۱۶۵	۱۵۱	۱/۰۹۲	

شکل ۱۷، توزیع دما در راستای جهت اسکن لیزر را نمایش می‌دهد. دما با فاصله گرفتن از نقطه اثر لیزر در جهت اسکن، کاهش می‌یابد. با مقایسه گرادیان دما در سه راستای عمق، عرض و جهت اسکن، به دلیل وابستگی هدایت حرارتی در راستای عمق نسبت به دو جهت دیگر که در اثر تابش مستقیم لیزر قرار دارند مشاهده می‌شود که توزیع دما در جهت عمق با شیب بیشتری تغییر می‌کند.



شکل (۱۷): توزیع دما در راستای جهت اسکن لیزر برای توان‌های مختلف در سرعت ثابت.

۴-۴- بررسی پیدایش اثر عیب توپیی شدن

استفاده از یک توان لیزر و یا سرعت اسکن نامناسب، یکی از عوامل ایجاد توپیی شدن است که در اثر ناپایداری حوضچه مذاب ایجاد می‌شود. به عبارتی دیگر، این اثر به دلیل تنش سطحی بسیار زیاد و قابلیت تر شدن^۱ بسیار پایین فلز مذاب حاصل می‌شود که موجب کروی شکل شدن و در نهایت کاهش سطح (ایجاد عیوب) می‌شود. پیدایش این اثر، موجب زبری سطح بالا، تخلخل زیاد و کاهش ویژگی‌های مکانیکی ماده می‌شود [۴۵]. تحقیقات نشان داده است که در صورتی که نسبت طول به پهناهای حوضچه مذاب از مقدار عددی π کمتر باشد پایداری حوضچه مذاب شکل می‌گیرد و در نتیجه اثر توپیی شدن ظاهر نمی‌شود [۴۵ و ۵۲]. معمولاً

^۱ Wettability

۵- نتیجه گیری

میلی متر بر ثانیه نسبت به سایر سرعت‌های مورد ارزیابی و نیز با افزایش توان لیزر در هر سرعت دلخواه بررسی شده، احتمال افزایش نسبت طول به پهنای حوضچه مذاب بیشتر می‌شود.

۶- مراجع

1. DebRoy T., Wei H., Zuback J., Mukherjee T., Elmer J., Milewski J., Beese A. M., Wilson-Heid A., De A., and Zhang W., "Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties", *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 92, pp. 112-224, 2018.
2. Schwab H., Prashanth K. G., Löber L., Kühn U., and Eckert J., "Selective laser melting of Ti-45Nb alloy", *Metals*, Vol. 5, No. 2, pp. 686-694, 2015.
3. Scudino S., Unterdörfer C., Prashanth K., Attar H., Ellendt N., Uhlenwinkel V., and Eckert J., "Additive manufacturing of Cu-10Sn bronze", *Mater. Lett.*, Vol. 156, pp. 202-204, 2015.
4. Reijonen J., Revuelta A., Riipinen T., Ruusuvoori K., and Puukko P., "On the effect of shielding gas flow on porosity and melt pool geometry in laser powder bed fusion additive manufacturing", *Addit. Manuf.*, p. 101030, 2020.
5. Wang F., "Mechanical property study on rapid additive layer manufacture Hastelloy® X alloy by selective laser melting technology", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 58, No. 5-8, pp. 545-551, 2012.
6. Foroozmehr A., Badrossamay M., Foroozmehr E., and Golabi S. i., "Finite element simulation of selective laser melting process considering optical penetration depth of laser in powder bed", *Mater. Des.*, Vol. 89, pp. 255-263, 2016.
7. Tian Y., Chen C., Li S., and Huo Q., "Research progress on laser surface modification of titanium alloys", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 242, No. 1-2, pp. 177-184, 2005.
8. Dilip J., Zhang S., Teng C., Zeng K., Robinson C., Pal D., and Stucker B., "Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting", *Prog. Addit. Manuf.*, Vol. 2, No. 3, pp. 157-167, 2017.

در این مقاله، پارامترهای سرعت اسکن و توان لیزر برای روش ساخت افزایشی ذوب انتخابی لیزر بر روی بستر آلیاژ Ti6Al4V مورد مطالعه قرار گرفت. در بخش اول مطالعه، معادلات نظریه مربوط به لیزر ارائه شد و سپس به کمک نرم‌افزار COMSOL Multiphysics، یک نمونه لیزر مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که بیشینه دمای ایجادشده (۲۷۶۰ کلوین) در محدوده اشاره‌شده (۲۵۰۰ الی ۳۰۰۰ کلوین) از مدل تجربی قرار دارد. پس از صحت‌سنجی فرآیند مدل‌سازی لیزر در بخش نخست، روش ساخت افزایشی ذوب انتخابی لیزر بر روی بستری با ابعاد $10 \times 6 \times 0.2 \text{ mm}^3$ به‌منظور مطالعه اثر پارامترهای توان لیزر و سرعت اسکن بر روی گرادیان دما و ابعاد حوضچه مذاب با توان‌های ۲۰، ۳۰ و ۵۰ وات با سرعت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر ثانیه (۹ حالت) شبیه‌سازی شد. برای مدل‌سازی این قسمت، از فیزیک‌های مختلفی در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics، به‌طور هم‌زمان شامل انتقال حرارت همراه با معادلات تغییر فاز جامد به مایع، تنش سطحی (اثر مارانگونی) و جریان آرام سیال (معادلات ناوراستوکس) همراه با در نظر گرفتن اثر گرانش استفاده شد. بیشینه دمای حوضچه مذاب در هر حالت بررسی شد که نتیجه تحلیل اجزای محدود برای ارزیابی بیشینه دما، به‌عنوان نمونه برای توان ۵۰ وات و سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه با خطای حدود ۰/۳ درصد، سازگاری مناسبی را با مقدار تجربی نشان داد. ابعاد حوضچه مذاب (طول، پهنای و عمق) برای تمامی حالت‌ها ارزیابی شد. برای توان ۵۰ وات و سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه مقادیر پهنای و عمق حوضچه مذاب به‌ترتیب ۱۵۱ و ۵۵ میکرومتر به‌دست آمد که با نتایج مدل تجربی سازگاری مناسبی از خود نشان داد. گرادیان دمای ایجادشده در راستاهای مسیر حرکت لیزر، پهنای و عمق لایه مذاب و بررسی پیدایش عیب اثر توپی شدن، در هر حالت به‌طور جداگانه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که اثر توپی شدن برای هیچ‌یک از یک حالت‌های مورد مطالعه به وجود نیامده است ولی در یک توان ثابت مورد تحلیل، استفاده از سرعت اسکن بالاتر ۳۰۰

21. Kong C.-J., Tuck C. J., Ashcroft I. A., Wildman R. D., and Hague R., "High density Ti6Al4V via SLM processing: microstructure and mechanical properties", in *Solid Freeform Fabr Symp Proc*, Vol. 36, pp. 475-483, 2011.
22. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., and Lausmaa J., "Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 213, No. 12, pp. 2109-2118, 2013.
23. Craeghs T., Bechmann F., Berumen S., and Kruth J.-P., "Feedback control of Layerwise Laser Melting using optical sensors", *Phys. Procedia*, Vol. 5, pp. 505-514, 2010.
24. Parry L., Ashcroft I., and Wildman R. D., "Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation", *Addit. Manuf.*, Vol. 12, pp. 1-15, 2016.
25. Li Y. and Gu D., "Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder", *Mater. Des.*, Vol. 63, pp. 856-867, 2014.
26. Kang J., Yi J., and Wang T., "Effect of laser power and scanning speed on the microstructure and mechanical properties of SLM fabricated Inconel 718 specimens", *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 3, pp. 72-76, 2019.
27. Matsumoto M., Shiomi M., Osakada K., and Abe F., "Finite element analysis of single layer forming on metallic powder bed in rapid prototyping by selective laser processing", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 42, No. 1, pp. 61-67, 2002.
28. Yin J., Zhu H., Ke L., Lei W., Dai C., and Zuo D., "Simulation of temperature distribution in single metallic powder layer for laser micro-sintering", *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 53, No. 1, pp. 333-339, 2012.
29. Yang J. H. N., Brandt M., and Sun S. J., "Numerical and experimental investigation of the heat-affected zone in a laser-assisted machining of Ti-6Al-4V alloy process", in *Mater. Sci. Forum*, Vol. 618, pp. 143-146: *Trans Tech Publ*, 2009.
30. Hussein A., Hao L., Yan C., and Everson R., "Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-
9. Li Z., Li B.-Q., Bai P., Liu B., and Wang Y., "Research on the thermal behaviour of a selectively laser melted aluminium alloy: simulation and experiment", *Materials*, Vol. 11, No. 7, p. 1172, 2018.
10. Masoomi M., Thompson S. M., and Shamsaei N., "Laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V parts: Thermal modeling and mechanical implications", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 118, pp. 73-90, 2017.
11. Song B., Dong S., Liao H., and Coddet C., "Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 61, No. 9-12, pp. 967-974, 2012.
12. Boyer R. R., "An overview on the use of titanium in the aerospace industry", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 213, No. 1-2, pp. 103-114, 1996.
13. Inagaki I., Takechi T., Shirai Y., and Ariyasu N., "Application and features of titanium for the aerospace industry", *Nippon Steel Tech. Rep.*, Vol. 106, No. 106, pp. 22-27, 2014.
14. Singh P., Pungotra H., and Kalsi N. S., "On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications", *Mater. Today: Proc.*, Vol. 4, No. 8, pp. 8971-8982, 2017.
15. Uhlmann E., Kersting R., Klein T. B., Cruz M. F., and Borille A. V., "Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components", *Procedia Cirp*, Vol. 35, pp. 55-60, 2015.
16. Waterman N. A. and Dickens P., "Rapid product development in the USA, Europe and Japan", *World Class Design to Manufacture*, 1994.
17. Huang R., Riddle M., Graziano D., Warren J., Das S., Nimbalkar S., Cresko J., and Masanet E., "Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components", *J. Clean. Prod.*, Vol. 135, pp. 1559-1570, 2016.
18. Lütjering G. and Williams J. C., *Titanium*. Springer Science & Business Media, 2007.
19. ASTM F136 - 12a Standard specification for wrought titanium-6aluminum-4vanadium ELI (extra low interstitial) alloy for surgical implant applications (UNSR56401).
20. ASTM F2924 - 12a Standard specification for additive manufacturing titanium-6aluminum-4vanadium with powder bed fusion.

40. Li Y. and Gu D., "Thermal behavior during selective laser melting of commercially pure titanium powder: Numerical simulation and experimental study", *Addit. Manuf.*, Vol. 1, pp. 99-109, 2014.
41. Holman J. P., "Heat Transfer (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering)". The McGraw-Hill Companies, Inc, 2010.
42. Germain G., Morel F., Lebrun J.-L., and Morel A. "Machinability and Surface Integrity for a Bearing Steel and a Titanium Alloy in Laser Assisted Machining", *Lasers Eng. (Old City Publishing)*, Vol. 17, 2007.
43. Zhuang J.-R., Lee Y.-T., Hsieh W.-H., and Yang A.-S., "Determination of melt pool dimensions using DOE-FEM and RSM with process window during SLM of Ti6Al4V powder", *Opt Laser Technol*, Vol. 103, pp. 59-76, 2018.
44. Spears T. G. and Gold S. A., "In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing", *Integr. Mater. Manuf. Innov.*, Vol. 5, No. 1, pp. 16-40, 2016.
45. Promopattum P., Onler R., and Yao S.-C., "Numerical and experimental investigations of micro and macro characteristics of direct metal laser sintered Ti-6Al-4V products", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 240, pp. 262-273, 2017.
46. Kundakcioglu E., Lazoglu I., Poyraz Ö., Yasa E., and Cizicioglu N., "Thermal and molten pool model in selective laser melting process of Inconel 625", *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, Vol. 95, No. 9-12, pp. 3977-3984, 2018.
47. Boivineau M., Cagran C., Doytier D., Eyraud V., Nadal M.-H., Wilthan B., and Pottlacher G., "Thermophysical properties of solid and liquid Ti-6Al-4V (TA6V) alloy", *Int. J. Thermophys.*, Vol. 27, No. 2, pp. 507-529, 2006.
48. Fischer P., Romano V., Weber H.-P., Karapatis N., Boillat E., and Glardon R., "Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd: YAG laser source", *Acta Mater.*, Vol. 51, No. 6, pp. 1651-1662, 2003.
49. Yadroitsev I., Krakhmalev P., and Yadroitsava I., "Selective laser melting of Ti6Al4V alloy for biomedical applications: Temperature monitoring and microstructural evolution", *J. Alloys Compd.*, Vol. 583, pp. 404-409, 2014.
- support in selective laser melting", *Mater. Des.* (1980-2015), Vol. 52, pp. 638-647, 2013.
31. Ali H., Ghadbeigi H., and Mumtaz K., "Processing parameter effects on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V", *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 27, No. 8, pp. 4059-4068, 2018.
32. Lee Y. and Zhang W., "Modeling of heat transfer, fluid flow and solidification microstructure of nickel-base superalloy fabricated by laser powder bed fusion", *Addit. Manuf.*, Vol. 12, pp. 178-188, 2016.
33. Nisar A., Schmidt M., Sheikh M., and Li L., "Three-dimensional transient finite element analysis of the laser enamelling process and moving heat source and phase change considerations", *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf.*, Vol. 217, No. 6, pp. 753-764, 2003.
34. Zhirnov I., Yadroitsava I., and Yadroitsev I., "Optical monitoring and numerical simulation of temperature distribution at selective laser melting of Ti6Al4V alloy", in *Mater. Sci. Forum*, Vol. 828, pp. 474-481: Trans Tech Publ, 2015.
35. Tsai T.-W., Choong W.-K., Huang W.-C., Chuang C.-S., De-Yau L., Liu S.-H., Horng J.-B., and Chen J.-K., "Selective Laser Melting of Metal Powders in Additive Manufacturing", *J. Fluid Flow, Heat Mass Transfer (JFFHMT)*, Vol. 5, No. 4, pp. 90-99.
36. Dai D. and Gu D., "Thermal behavior and densification mechanism during selective laser melting of copper matrix composites: simulation and experiments", *Mater. Des.*, Vol. 55, pp. 482-491, 2014.
37. Wegner A. and Witt, G., "Process monitoring in laser sintering using thermal imaging", in *SFF Symposium*, Austin, Texas, USA, pp. 8-10, 2011.
38. Craeghs T., Clijsters S., Yasa E., Bechmann F., Berumen S., and Kruth J.-P., "Determination of geometrical factors in Layerwise Laser Melting using optical process monitoring", *Opt Lasers Eng*, Vol. 49, No. 12, pp. 1440-1446, 2011.
39. Fischer P., Locher M., Romano V., Weber H.-P., Kolossov S., and Glardon R., "Temperature measurements during selective laser sintering of titanium powder", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 44, No. 12-13, pp. 1293-1296, 2004.

50. Kou S., "Welding metallurgy", New Jersey, USA, pp. 431-446, 2003.
51. Fu C. and Guo Y., "3-dimensional finite element modeling of selective laser melting Ti-6Al-4V alloy", in 25th Annual International Solid Freeform Fabr Symp Proc, pp. 1129-1144, 2014.
52. Soylemez E., "Modeling the Melt Pool of the Laser Sintered Ti6al4v Layers with Goldak'S Double-Ellipsoidal Heat Source", in Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabr Symp Proc, Austin, TX, USA, pp. 13-15, 2018.