



شبیه سازی عددی تاثیر توان لیزر بر توزیع حرارتی گوسین در ساخت افزایشی ذوب لیزر انتخابی (SLM)

امین نعیمی

دانشگاه تربیت مدرس

دکتر رضا میراسمعیلی

دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

ذوب لیزر انتخابی، یکی از فرآیندهای مدرن ساخت لایه به لایه اجزای فلزی از مدل های سه بعدی است و یکی از روش های ذوب بستر پودری محسوب می شود. میدان حرارتی در بستر پودر تأثیر مهمی بر کیفیت قطعات ساخته شده با استفاده از فرآیند ذوب لیزر انتخابی (SLM) دارد. در این مطالعه، یک مدل اجزای محدود مطابق فرآیند ذوب لیزر انتخابی توسط نرم افزار ABAQUS ساخته شده است که در آن یک بستر پودری از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V قرار داشته و با عبور لیزر از آن و پس از خنک سازی، طبق سازوکار ذوب و انجماد یک لایه جامد از این آلیاژ تشکیل می شود. توزیع دمایی یک مسیر روبش لیزری با تغییر پارامتر توان لیزر (سه توان ۹۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ وات) در سرعت روبش لیزری ثابت ۱ mm/s ۵۰۰ و ضخامت لایه پودری ۰/۰۶ mm به دست آمد. بیشینه دمای ۲۵۷۱ کلوین برای توان ۹۰ W، ۳۰۶۴ کلوین برای توان ۱۲۵ W و ۳۴۲۹ کلوین برای توان ۱۵۰ W به دست آمد. نتایج شبیه سازی اجزای محدود نرم افزار ABAQUS نشان می دهد که افزایش توان لیزر منجر به افزایش حداکثر دمای لایه پودری می شود. تمامی نتایج به دست آمده در این مطالعه، با اختلاف بسیار اندک با نتایج به دست آمده از نرم افزار ANSYS مطابقت دارد.

واژگان کلیدی: ساخت افزایشی، ذوب لیزر انتخابی، توزیع دمایی، اجزای محدود، شبیه سازی

۱- مقدمه

ساخت افزایشی فلزی یکی از فرآیندهای مدرن بر اساس ساخت لایه به لایه اجزای فلزی از مدل‌های سه بعدی است. این رویکرد در چند سال اخیر، توجه محققان و صنایع را به خود جلب کرده است. کمیته ASTM F42 در زمینه فناوری‌های ساخت افزایشی در سال ۲۰۰۴ با هدف پیشرفت در حوزه ساخت افزایشی و همچنین توسعه استاندارد بین‌المللی برای فناوری‌های ساخت افزایشی ایجاد شد (Parvareh et al, 2023). فرآیندهای مختلف ساخت افزایشی بر اساس منبع حرارتی که استفاده می‌کنند (از جمله لیزر، قوس و پرتو الکترونی) و مواد اولیه به شکل پودر یا سیم طبقه‌بندی می‌شوند. ذوب بستر پودری (PBF) یکی از پرکاربردترین فرآیندهای ساخت افزایشی فلزی است و ۵۴ درصد از بازار ساخت افزایشی‌های فلزی را در سال ۲۰۲۰ در اختیار داشته است. در این فرآیند با روبش یک منبع حرارتی بر روی بستر پودری که توسط یک غلتک ضد چرخش^۱ به طور یکنواخت پخش می‌شود، قطعه طراحی شده به صورت لایه به لایه تولید می‌شود. منبع گرما در این فرآیند می‌تواند یک لیزر یا یک پرتو الکترونی باشد. علاوه بر این، مواد مختلف به شکل پودر که می‌توانند با حرارت دادن، ذوب یا تف جوشی شوند، می‌توانند به عنوان مواد اولیه مورد استفاده قرار گیرند (Parvareh et al, 2023). ذوب لیزر انتخابی^۲ (SLM) یکی از فرآیندهای ذوب بستر پودری محسوب می‌شود. در این روش از منبع حرارت (لیزر) برای روبش بستر پودری توزیع شده با توجه به مقاطع عرضی مدل CAD طراحی شده استفاده می‌شود. پس از ساخت هر لایه، پلتفرم ساخت به اندازه یک لایه پایین می‌آید. پس از آن، یک غلتک ضد چرخش یک بار دیگر یک لایه نازک و یکنواخت از پودر را روی بستر پخش می‌کند. این مراحل برای ساخت یک قطعه تکمیل شده تکرار می‌شود (Parvareh et al, 2023).

در طول فرآیند SLM، شار حرارتی لیزر متمرکز باعث می‌شود دمای سطح به طور آنی فراتر از نقطه ذوب افزایش یابد. شار حرارتی وارد لایه پودری سطحی شده و با انتقال جرم جذب می‌شود که می‌تواند باعث توزیع بسیار ناهموار دما شود. میدان دمای گذرا نقش مهمی در کیفیت قطعات متخلخل دارد (Parvareh et al, 2023). بنابراین انتخاب پارامترهای فرآیند مناسب با توجه به پیش‌بینی دقیق میدان دما، کلید اطمینان از کیفیت قطعات متخلخل است. بنابراین، شبیه‌سازی عددی به عنوان یکی از روش‌های موثر، قادر به انجام پیش‌بینی‌های حرارتی با انجام محاسبات اجزای محدود است که با استفاده از آن میتوان در راستای بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند و به تبع آن، بهینه‌سازی کیفیت قطعات تولید شده توسط ساخت افزایشی گام برداشت.

در مطالعه ژینگ (XING et al, 2019) شبیه‌سازی تاثیر پارامترهای لیزر بر توزیع حرارتی در فرآیند ذوب لیزر انتخابی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS انجام شده است. در نتیجه این پژوهش آمده است افزایش توان لیزر می‌تواند حداکثر دما در لایه پودر و ابعاد حوضچه مذاب را افزایش دهد. در این مقاله، فرآیند حرارتی ذوب لیزر انتخابی آلیاژ Ti-6Al-4V با توجه به خواص حرارتی وابسته به دما به روش اجزای محدود از طریق نرم‌افزار ABAQUS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و توزیع حرارتی بر این اساس پیش‌بینی شد و اثر تغییرات پارامتر توان لیزر به طور گسترده مورد بحث قرار گرفت.

¹ Counter-rotating roller² Selective Laser Melting

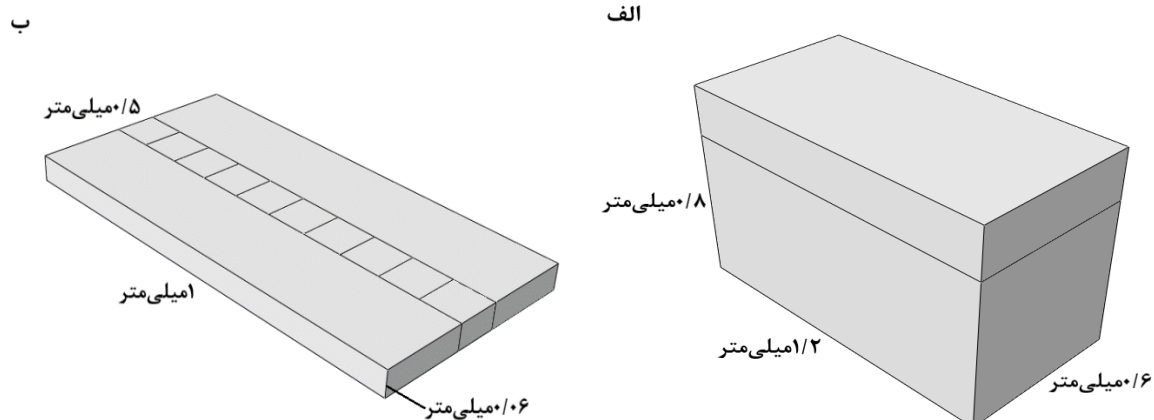


۲- روش تحقیق

در این مقاله توزیع دمایی فرآیند ذوب لیزر انتخابی آلیاژ مورد نظر بر حسب تغییر توان لیزر با استفاده از نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. مراحل انجام مدل سازی و شبیه سازی عددی در ادامه مطالب آورده شده است.

۲-۱- مدل سازی سه بعدی اجزا

مدل اجزای محدود سه بعدی مورد استفاده در شبیه سازی در شکل (۱) نشان داده شده است. تک لایه پودر Ti-6Al-4V روی بستر رسوب می کند. اندازه صفحه افقی تک لایه ۱ میلی متر \times ۰/۵ میلی متر است و ضخامت آن ۰/۰۶ میلی متر در نظر گرفته شده است. اندازه زیرلایه ۱/۲ میلی متر \times ۰/۶ میلی متر \times ۰/۸ میلی متر است. منبع حرارت لیزر در امتداد محور X بر روی سطح لایه پودری حرکت می کند. برای اعمال مش بندی ریزتر در قسمت بالایی زیرلایه به منظور افزایش سرعت محاسبات، زیرلایه به دو بخش و همچنین برای استفاده از تکنیک تولد و مرگ (فعال شدن مرتب بخش های لایه با نزدیک شدن منبع حرارت)، لایه به ده بخش تقسیم می شود.



شکل ۱. ابعاد مدل ایجاد شده، الف) مدل زیرلایه ب) مدل لایه.

۲-۲- تعریف خواص مواد

در کار (XING et al, 2019) خواص حرارتی آلیاژ Ti-6Al-4V از جمله هدایت حرارتی، ظرفیت ویژه گرمایی، چگالی و آنتالپی به صورت وابسته به دما آورده شده است. تغییرات این خواص بر حسب دما در جدول (۲) مشاهده می شود. بنابراین این



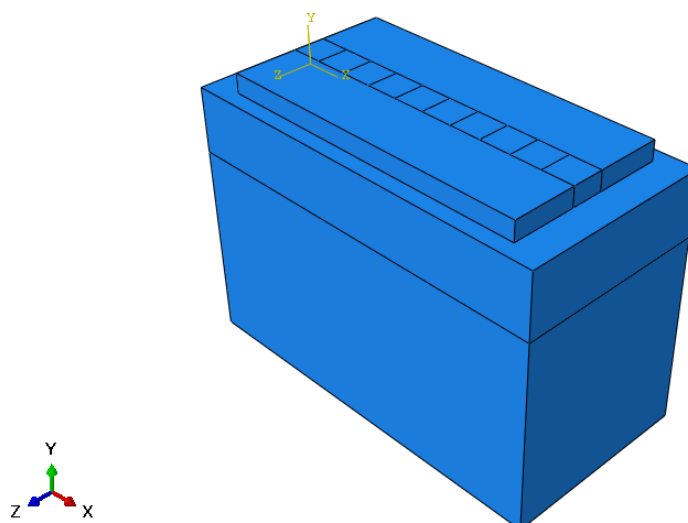
خواص به صورت متریک در قسمت Property وارد می شوند و در مرحله آخر به هر دو قسمت لایه و زیرلایه اعمال می شوند. ثابت استفان- بولتزمان نیز به عنوان یک شرط اولیه به مقدار $5/67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ وارد شد.

جدول ۱. خواص حرارتی وابسته به دما (XING et al, 2019) Ti-6Al-4V

دما (K)	هدایت حرارتی ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)	چگالی ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	آنتالپی ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$)
۲۹۸	۷	۵۴۶	۴۴۲۰	$6/03 \times 10^7$
۵۷۳	۱۰/۱۵	۶۰۶	۴۳۸۱	$7/90 \times 10^8$
۹۷۳	۱۵/۵	۶۹۴	۴۳۲۴	$1/39 \times 10^9$
۱۲۶۸	۲۲/۷	۷۵۳	۴۲۸۲	$2/36 \times 10^9$
۱۹۲۳	۲۸/۴	۷۵۹	۴۱۸۹	$4/38 \times 10^9$
۱۹۷۳	۳۴/۶	۸۴۰	۳۸۸۶	$4/54 \times 10^9$
۲۵۰۰	۳۵	۸۵۰	۳۸۰۰	$6/24 \times 10^9$

۲-۳- مونتاز مدل مورد نظر

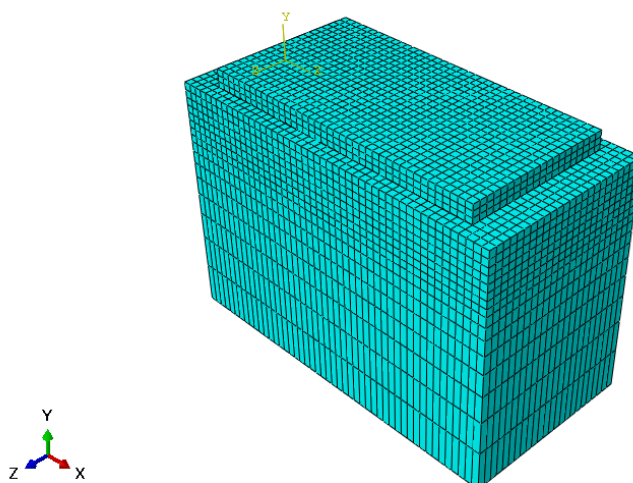
مطابق شکل (۲) در این بخش، دو قسمت ایجاد شده در مرحله مدل سازی، یعنی قسمت لایه و زیرلایه بر روی یکدیگر قرار می گیرند. یک دستگاه مختصات نیز در نقطه (۰ ۰ ۰)، در مرکز و ابتدای لایه مورد نظر قرار داده می شود تا در مرحله اعمال بار حرارتی به حرکت مناسب و دقیق لیزر کمک کند.



شکل ۲. مونتاژ نهایی مدل های سه بعدی در نرم افزار.

۲-۴- مش بندی مدل

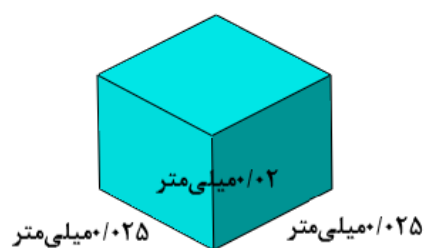
در این مرحله، مش بندی زیرلایه به گونه ای انجام می شود که با حرکت از کف به سمت بالای آن (نزدیک شدن به لایه)، برای افزایش دقت محاسبات مش های ریزتری وجود دارند. عدم وجود مش های ریز برای تمام مدل موجب افزایش سرعت محاسبات خواهد شد. همخوانی مش های لایه و زیرلایه نیز نکته مهم دیگری است که باید در نظر گرفت تا فرآیند شبیه سازی بدون خطا و نهایت دقت انجام شود. مش بندی کلی مدل در شکل (۳) و اندازه مش های لایه در شکل (۴) مشاهده می شود.



شکل ۳. مش بندی نهایی مدل سه بعدی با تغییرات اندازه مش ها.



مش‌های مورد استفاده در این مدل از نوع Hex بوده و تکنیک آن Structured می‌باشد. تعداد گره^۳ مورد استفاده ۲۴۲۶۹ و همچنین تعداد کل المان‌های موجود ۲۰۸۳۲ عدد بوده و همگی از نوع DC3D8 هستند.



شکل ۴. ابعاد کوچک‌ترین مش به کار گرفته شده در قسمت لایه و نواحی فوقانی زیرلایه.

³ Node



۵-۲- ایجاد گام‌های فرآیند

روش اصلی مورد استفاده در این شبیه‌سازی، روش تولد و مرگ^۴ المان‌ها است. در این بخش از شبیه‌سازی که تحت عنوان step یا گام تعریف می‌شود، ابتدا گامی تعریف می‌شود که در آن تمام ۱۰ بخش لایه که قرار است طی گذشت زمان از طریق فرآیند ساخت افزایشی و با حرکت لیزر فعال شوند، ناپدید شوند که به این مرحله، مرگ المان‌ها گفته می‌شود. در ادامه به تعداد قسمت‌های لایه (۱۰ عدد) گام تعریف می‌شود که المان‌های این ۱۰ قسمت با گذشت زمان و با حرکت لیزر در راستای محور X به ترتیب فعال می‌شوند که نشان‌دهنده ذوب یک لایه از پودر در سطح بالایی بستر پودری است. به این مرحله، مرحله تولد المان‌ها گفته می‌شود. در مرحله بعد یک گام به نام Cooling به مراحل قبلی اضافه می‌شود که در این مرحله لایه مذاب تشکیل شده ناشی از عبور لیزر، با گذشت زمان خنک شده و با کاهش دما به جامد تبدیل می‌شود. طبق توضیحات فوق مجموعاً ۱۲ گام در این مرحله تعریف شد. مطابق جدول (۲)، کل زمان فرآیند برابر ۴۰۰/۰۰۲۰۱ ثانیه بوده است. لازم به ذکر است که زمان گام‌های مربوط به تولد المان‌ها بر اساس سرعت روبش لیزر که ۵۰۰ mm/s است، محاسبه گردیده است. در انتهای این مرحله خروجی محاسبات از نوع دمای گره‌ای^۵ قرار داده شد.

جدول ۲. زمان مربوط به گام‌های مورد نظر

نام مرحله	زمان (ثانیه)
مرگ المان‌ها	۰/۰۰۰۰۱
تولد المان‌ها	۰/۰۰۰۲
خنک‌سازی	۴۰۰
مجموع	۴۰۰/۰۰۲۰۱

۶-۲- تعریف Interaction های فرآیند

در این مرحله ۴ Interaction تعریف می‌گردد. مورد اول از نوع Model Change است که برای فعال و غیر فعال کردن المان‌های مورد نظر کاربرد دارد. مورد دوم و سوم به ترتیب مربوط به همرفت^۶ حرارتی و تشعشع^۷ حرارتی است که حرارت قطعه از طریق این موارد به محیط اطراف دفع می‌شود. برای مورد دوم دمای محیط ۲۹۸ کلوین و ضریب انتقال حرارت W.m⁻¹.K⁻¹ و برای مورد سوم دمای محیط ۲۹۸ کلوین و ضریب تشعشع Emissivity ۰/۳۵ تعریف می‌گردد (XING et al, 2019). مورد چهارم به نام قید Tie مربوط به مقیدسازی لایه به زیرلایه است که انتقال حرارت بین این دو را ممکن می‌سازد.

⁴ Birth & Death

⁵ Nodal temperature

⁶ Convection

⁷ Radiation



۷-۲- اعمال حرارت

بر اساس قانون بیر-لامبرت^۸، یک منبع حرارتی حجمی، یک شار حرارتی گاوسی از نوع Surface heat transfer در سطوح بالایی لایه با یک روند کاهشی نمایی در جهت عمودی، در این مقاله اتخاذ شد و این اعمال حرارت از طریق کد Dflux که به زبان فرترن نوشته شده است اعمال می شود و در راستای محور x حرکت می کند. این توزیع حرارت گوسین می تواند به صورت زیر تعریف شود (XING et al, 2019):

$$Q(x,y) = \frac{2AP}{\pi S \omega^2} \exp(-2 \cdot \frac{x^2 + y^2}{\omega^2}) \exp(-\frac{|z|}{s}) \quad (\text{معادله ۱})$$

جایی که A قابلیت جذب لیزر توسط پودر Ti-6Al-4V است. ω شعاع لیزر، P توان لیزر و s عمق نفوذ لیزر است. برای ساده تر شدن محاسبه، قابلیت جذب لیزر ۰/۴۰ اتخاذ شد. عمق نفوذ لیزر به بستر پودر ۰/۰۶۲ میلی متر است. پارامترهای مورد نیاز برای شبیه سازی در جدول (۳) خلاصه شده است.

جدول ۳. پارامترهای شبیه سازی اجزای محدود (XING et al, 2019)

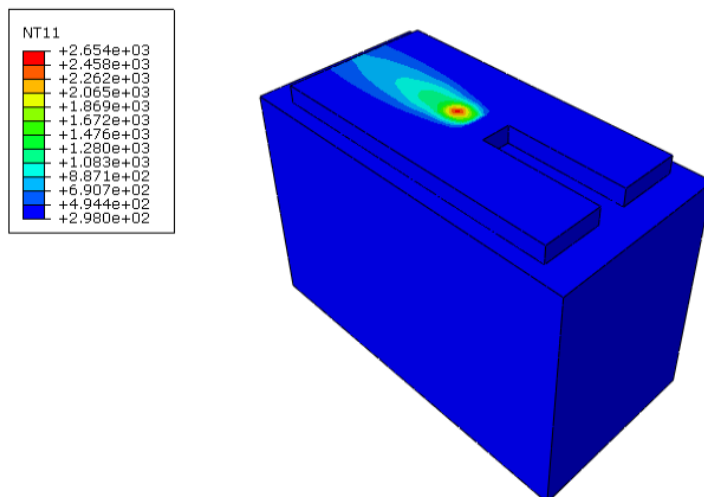
پارامتر	مقدار
ضخامت لایه پودر	۰/۰۶ میلی متر
قطر لکه لیزر	۰/۰۵ میلی متر
توان لیزر	۹۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ وات
سرعت روبش	۵۰۰ mm/s
عمق نفوذ لیزر	۰/۰۶۲ میلی متر
ضریب انتقال حرارت	$10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

۳- یافته ها

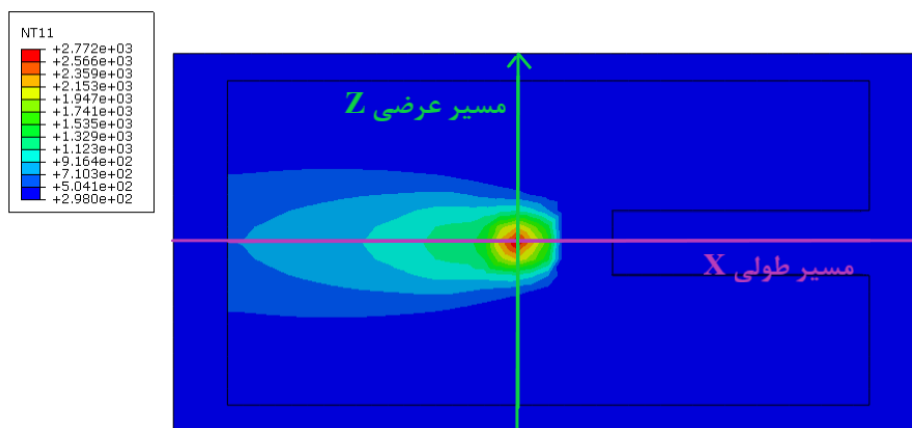
همانطور که ذکر شد در این شبیه سازی سه بار حرارتی با توان لیزر متفاوت (۹۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ وات) و با سرعت روبش لیزری ۵۰۰ mm/s به لایه پودری با ضخامت ۰/۰۶ mm اعمال شده است. بعد از پایان تمامی مراحل شبیه سازی، محاسبات اجزای

⁸ Beer-Lambert

محدود صورت گرفته و مطابق شکل (۵)، نتایج توزیع حرارت و بیشینه حرارت اعمالی به شکل کانتورهای دمایی و یک جدول قابل مشاهده است. برای بررسی توزیع حرارتی مطابق شکل (۶) دو مسیر در راستای عرضی (Z) و طولی (X) ایجاد می شود و نتایج شبیه سازی در این دو مسیر در قالب چندین نمودار بررسی می گردد. لازم به ذکر است اعداد موجود در جدول شکل (۶) با گذشت زمان در طول شبیه سازی متغیر است و این شکل صرفا جهت نشان دادن مسیرها آورده شده است.

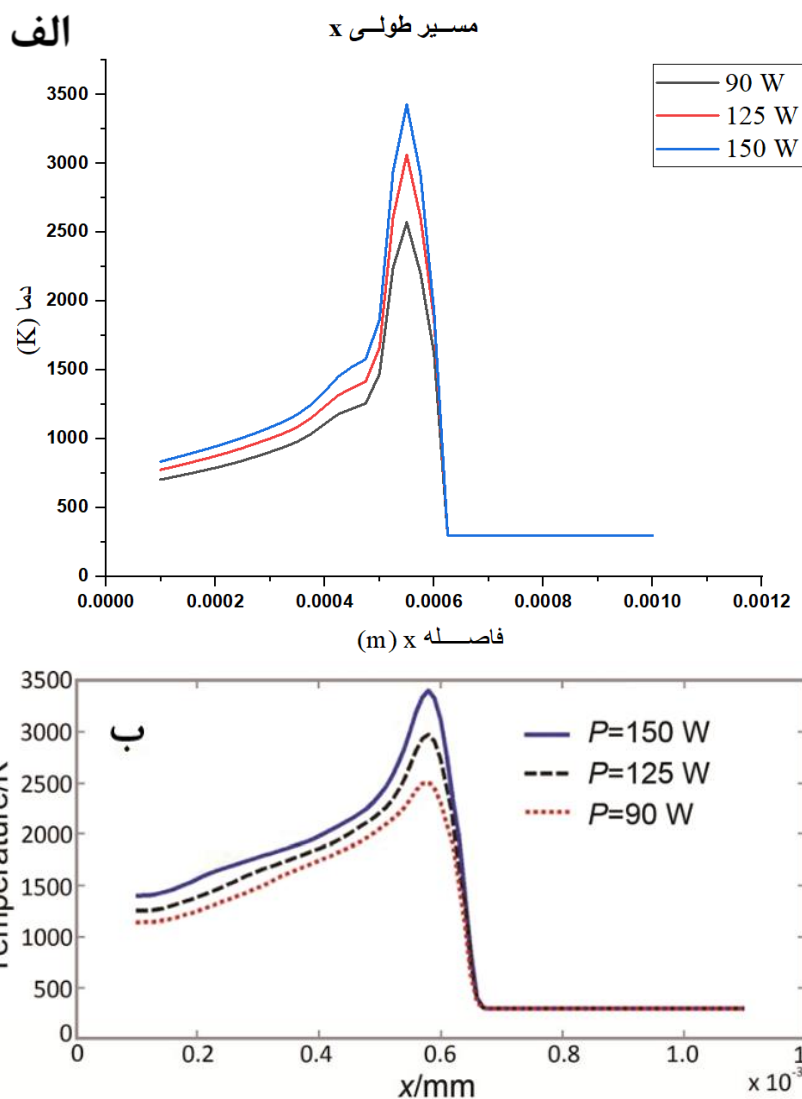


شکل ۵. کانتور دمایی حاصل از حرکت لیزر با توزیع گوسین در فرآیند شبیه سازی اجزای محدود.



شکل ۶. جهت و راستای مسیرهای طولی و عرضی ایجاد شده برای بررسی توزیع حرارت.

همانطور که گفته شد، نتایج توزیع دمایی در دو مسیر عرضی و طولی در قالب چندین منحنی برای سه توان لیزر متفاوت در دو شکل (۷) و (۸) آورده شده است. همچنین برای مقایسه با نتایج این مقاله، دو نمودار نیز از پژوهش ژینگ (XING et al, 2019) آورده شده است؛ اگرچه نتایج این پژوهش به وسیله نرم افزار ANSYS حاصل شده است.

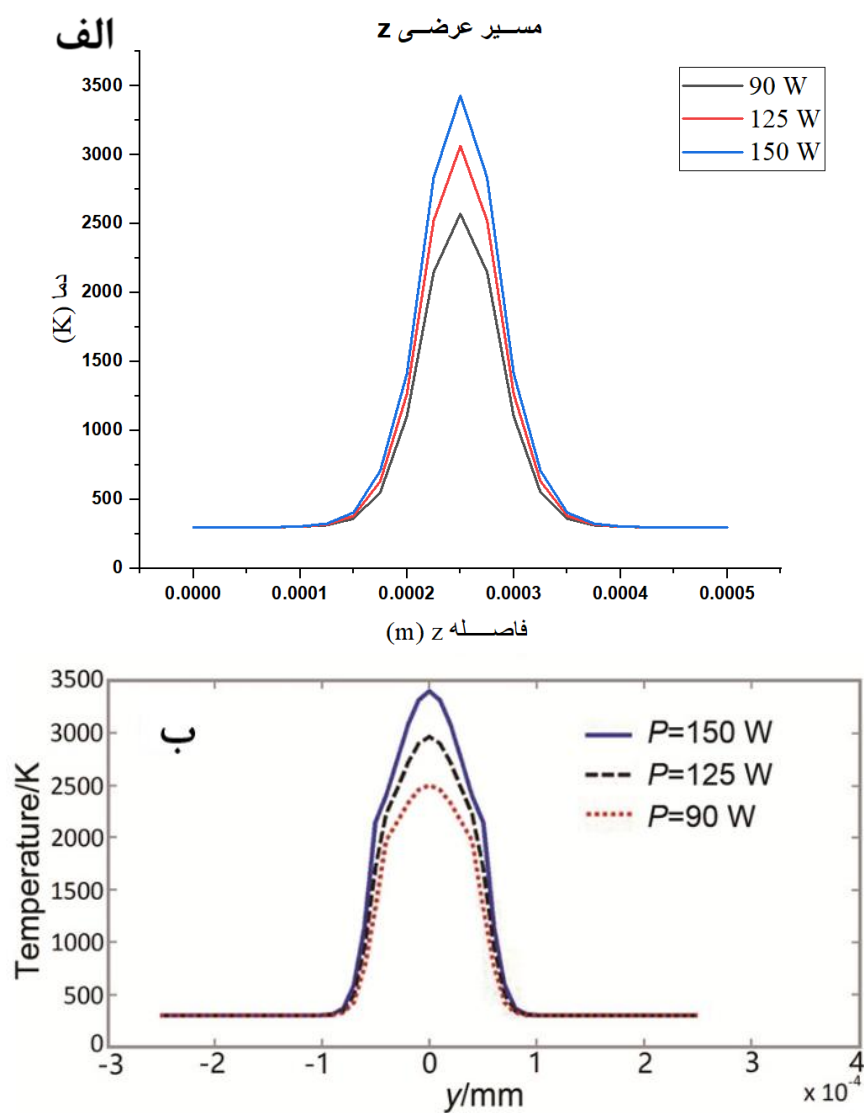


شکل ۷. تغییرات دمایی در مسیر طولی برای ۳ توان مختلف، الف) این پژوهش و ب) پژوهش ژینگ (XING et al, 2019).

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، با حرکت در راستای محور x میزان دما افزایش یافته تا به حد بیشینه خود یعنی ۲۵۷۱ کلوین برای توان ۹۰ W، ۳۰۶۴ کلوین برای توان ۱۲۵ W و ۳۴۲۹ کلوین برای توان ۱۵۰ W می‌رسد که این نتایج نشان می‌دهد با توجه به دمای ذوب Ti-6Al-4V (۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰ کلوین)، با بکارگیری هر سه توان میتوان لایه پودری را ذوب



کرد. با فاصله گرفتن از نقطه اثر لیزر، میزان دما کاهش یافته و به دمای محیط یعنی ۲۹۸ کلوین می‌رسد. با افزایش توان لیزر در سرعت ثابت، میزان حرارت ورودی به پودرها افزایش یافته و بیشینه دمای پودرهای تحت تاثیر لیزر نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۸. تغییرات دمایی در مسیر عرضی برای ۳ توان مختلف، (الف) این پژوهش و (ب) پژوهش ژینگ (XING et al, 2019).

همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، با حرکت در راستای محور Z میزان دما افزایش یافته تا به حد بیشینه خود یعنی ۲۵۷۱ کلوین برای توان ۹۰ W، ۳۰۶۴ کلوین برای توان ۱۲۵ W و ۳۴۲۹ کلوین برای توان ۱۵۰ W می‌رسد و سپس با فاصله گرفتن از نقطه اثر لیزر، میزان دما کاهش یافته و به دمای محیط یعنی ۲۹۸ کلوین می‌رسد. با افزایش توان لیزر در سرعت ثابت، میزان حرارت ورودی به پودرها افزایش یافته و بیشینه دمای پودرهای تحت تاثیر لیزر نیز افزایش می‌یابد. توزیع دمایی گوسین در نمودارها به وضوح قابل مشاهده است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

با بررسی یافته‌های مقاله میتوان دریافت اجرای شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس، نتایج بسیار مشابهی با نتایج پژوهش ژینگ دارد. اختلاف بسیار اندک موجود در نتایج دو پژوهش را میتوان به تفاوت نرم‌افزاری نسبت داد. تشابه بالای نتایج حاصل از دو نرم‌افزار نشان‌دهنده دقت و صحت بالای این پروژه شبیه‌سازی است که میتوان در پروژه عملی مشابه، به نتایج آن تکیه کرد. پارامترهای متعدد فرآیند مانند ضخامت لایه، توان لیزر و سرعت روبش به طور قابل توجهی بر توزیع دما در بستر پودر تاثیر می‌گذارد؛ بنابراین این تغییرات بر شکل‌پذیری و کیفیت قطعه SLM به وضوح تاثیر می‌گذارد. بر اساس نتایج مقاله افزایش توان لیزر می‌تواند حداکثر دما در لایه پودر را افزایش دهد.

پیشنهاد می‌شود تاثیر تغییر سایر پارامترهای فرآیند مانند سرعت روبش لیزری، تغییر ضخامت لایه پودری و تغییر حالت مواد (پودری و جامد توپر) در نرم‌افزار آباکوس، در پژوهش‌های آینده بررسی گردد.

منابع

Parvaresh, B., Aliyari, H., Miresmaeili, R., Dehghan, M., & Mohammadi, M. (2023). Ancillary Processes for High-Quality Additive Manufacturing: A Review of Microstructure and Mechanical Properties Improvement. *Metals and Materials International*, 29(11), 3103-3135.

Xing, X., Zhou, Q., Wang, S., Wang, L., & Jiang, F. (2019). Numerical investigation of transient temperature distribution during Ti-6Al-4V selective laser melting. *Journal of Thermal Science*, 28, 370-377.

Numerical Simulation of the Effect of Laser Power on Gaussian Thermal Distribution in Selective Laser Melting (SLM) Additive Manufacturing.

Amin Naiemi

Tarbiat Modares University

Dr.Reza Miresmaeili

Tarbiat Modares University

4-1- Abstract

Selective laser melting is one of the modern processes of layer-by-layer manufacturing of metal components from 3D models and is considered one of the powder bed melting methods. The thermal field in the powder bed has an important effect on the quality of parts made using the selective laser melting (SLM) process. In this study, a finite element model was made according to the selective laser melting process by ABAQUS software, in which there was a Ti-6Al-4V titanium alloy powder bed and when the laser passed through it and after cooling, according to the melting and solidification mechanism, a solid layer is formed from this alloy. The temperature distribution of a laser scanning path was obtained by changing the laser power parameter (three powers of 90, 125 and 150 watts) at a constant laser scanning speed of 500 mm/s and the thickness of the powder layer was 0.06 mm. The maximum temperature of 2571 K for 90 W power, 3064 K for 125 W power and 3429 K for 150 W power was obtained. The results of finite element simulation of ABAQUS software show that increasing the laser power leads to an increase in the maximum temperature of the powder layer. All the results obtained in this study are consistent with the results obtained from ANSYS software, with a very small difference.

4-2- Keywords: Additive Manufacturing, Selective Laser Melting, Temperature Distribution, Final element, Simulation