



## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

# شبیه‌سازی حرارتی فرایند روکش کاری لیزری پوشش آلیاژ آنتروپی بالا TiNiCrMoW-ZrB<sub>2</sub> روی سوپر آلیاژ IN738

حسن درگی<sup>۱</sup>، رضا تقی‌آبادی<sup>۲\*</sup>، مرتضی ثقفی یزدی<sup>۳\*</sup>، مرتضی طاهری<sup>۴</sup>، وایرا ویگنش<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترای تخصصی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- دکترای مهندسی مواد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۴- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی امیرتلا، امیرتلا ویشوا ویدیابیت‌هام، کویمباتور ۶۴۱۱۱۲، هندوستان

\*نویسندگان مسئول: [taghiabadi@ikiu.ac.ir](mailto:taghiabadi@ikiu.ac.ir) و [msaghafi@eng.ikiu.ac.ir](mailto:msaghafi@eng.ikiu.ac.ir)

### چکیده:

در این مقاله، فرایند روکش کاری لیزری پوشش از جنس آلیاژ آنتروپی بالای TiNiCrMoW-ZrB<sub>2</sub> روی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸ (IN738) به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار Sysweld شبیه‌سازی شده است. هدف از این مطالعه، پیش‌بینی دقیق میدان دما، گرادین‌های دمایی، ابعاد حوضچه مذاب و بررسی تأثیر پارامترهای فرایند مانند توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر است. مدل اجزای محدود سه‌بعدی طراحی‌شده با در نظر گرفتن انتقال حرارت رسانشی، همرفتی و تابشی، توانست رفتار حرارتی فرایند را با دقت بالا بازتولید کند. در مدل‌سازی عددی، از منبع حرارتی گاوسی با توزیع توان بیضوی برای بازنمایی دقیق پرتو لیزر استفاده شد و شرایط مرزی شامل رسانش در زیرلایه، همرفت سطحی و تابش حرارتی به محیط اعمال گردید تا رفتار واقعی انتقال حرارت در فرایند شبیه‌سازی بازتولید شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش منجر به افزایش دمای حوضچه مذاب، بهبود ذوب و چسبندگی متالورژیکی می‌شود. مقایسه‌ی داده‌های عددی با نتایج تجربی حاصل از اندازه‌گیری ترموکوپل‌ها همخوانی بسیار خوبی داشت که صحت مدل را تأیید می‌کند. در مجموع، استفاده از شبیه‌سازی حرارتی روشی مؤثر برای بهینه‌سازی پارامترهای فرایند، کاهش هزینه‌ها و درک عمیق‌تر از رفتار حرارتی و ریزساختاری آلیاژهای آنتروپی بالا در روکش کاری لیزری به شمار می‌رود.

تاریخ دریافت: ۱۰ آبان ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۲۱ آبان ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۲۱ آبان ۱۴۰۴

### واژه‌های کلیدی:

روکش کاری لیزری،

شبیه‌سازی،

آلیاژ آنتروپی بالا،

TiNiCrMoW-ZrB<sub>2</sub>

سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸.

### ارجاع به این مقاله:

حسن درگی، رضا تقی‌آبادی، مرتضی ثقفی یزدی، مرتضی طاهری، وایرا ویگنش، شبیه‌سازی حرارتی فرایند روکش کاری لیزری پوشش آلیاژ آنتروپی بالا TiNiCrMoW-ZrB<sub>2</sub> روی سوپر آلیاژ IN738، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، جلد ۹، شماره ۲، صفحات ۹۳-۱۰۳.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/frj.2025.556115.1214

### ۱- مقدمه

زیادی صرف ترمیم و/یا تعویض و جایگزینی پره‌های فرسوده می‌شود. بر این اساس، محققان در صدد یافتن روش‌هایی برای تولید پره‌های توربین گازی با خواص سطحی برتر شده‌اند. یکی از این روش‌ها، اعمال روکش‌های مقاوم در برابر پدیده‌های مخرب سطحی به روش روکش کاری لیزری است که استفاده صحیح از آن باعث افزایش طول عمر پره، کاهش هزینه‌های تولید و کاهش

پره‌های مورد استفاده در ساخت توربین‌های گازی غالباً به علت بروز پدیده‌هایی مانند فرسایش<sup>۱</sup>، خوردگی و اکسیداسیون و در نتیجه افت کیفیت سطحی و کارایی، بعد از مدتی کارکرد نیاز به تعویض دارند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سالانه هزینه‌ی بسیار

<sup>1</sup> Erosion

لحاظ چسبندگی، ریزساختار و خصوصیات فیزیکی-شیمیایی، انجام تحقیق در خصوص بهینه‌سازی پارامترهای فرایند روکش-کاری لیزری و توسعه آلیاژهای دیرگداز آنترپوی بالا به عنوان پوشش‌های مقاوم به سایش و خوردگی بسیار حائز اهمیت است. فرآیند روکش کاری لیزری مشتمل بر بیش از ۱۹ پارامتر فرآیند پیچیده و غیرخطی است اما سه پارامتر توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر بیشترین تأثیر را بر کیفیت لایه روکش کاری دارند [۹ و ۱۰]. برای تولید پوشش‌های با کیفیت بالا، محققان روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند روکش کاری لیزری ارائه نموده‌اند. یک رویکرد، بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر خواص لایه روکش با استفاده از مدل‌های تجربی-آماري و تحلیلی، مانند روش سطح پاسخ<sup>۶</sup>، روش رگرسیون خطی<sup>۷</sup> و روش تاگوچی<sup>۸</sup> [۱۱]، برای یافتن پارامترهای بهینه فرآیند است. روش دیگر، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند مانند یادگیری ماشینی<sup>۹</sup> برای ایجاد یک مدل پیش‌بینی‌کننده از رابطه نگاشت بین پارامترهای فرآیند و لایه روکش، برای دستیابی به بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند است [۱۲ و ۱۳]. شبیه‌سازی فرایند برای پیش‌بینی نتایج، بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند و کاهش آزمایش‌های پرهزینه توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است [۱۴-۱۸]. بهره‌گیری از فرایند شبیه‌سازی در تحلیل فرایند روکش کاری لیزری به ویژه پوشش‌های ساخته شده از آلیاژهای پیچیده آنترپوی بالا با مزیت‌هایی همراه است که به صورت خلاصه در جدول (۱) مورد اشاره قرار گرفته‌اند [۱۹].

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند روکش کاری لیزری آلیاژهای آنترپوی بالا انجام شده است. برای مثال، چن<sup>۱۰</sup> و همکاران [۲۰] به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرایند پوشش AICoCrFeNi با استفاده از نرم‌افزار COMSOL پرداختند و تطابق بالای نتایج مدل با داده‌های تجربی را گزارش کردند. همچنین گائو<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۹] با بهره‌گیری از مدل اجزای محدود، میدان دمایی روکش آلیاژ آنترپوی بالا بر پایه Cr<sub>12</sub>MoV را شبیه‌سازی و تأیید آزمایشگاهی نمودند. افزون بر آن، کائو<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۵] و وو<sup>۱۳</sup> و همکاران [۱۶] از مدل‌سازی عددی و روش پاسخ سطحی برای بهینه‌سازی پارامترهای توان لیزر و سرعت روبش در سیستم‌های آلیاژهای آنترپوی بالا استفاده کردند که هر یک بر نقش

زمان توقفات توربین خواهد شد. در واقع با استفاده از این روش می‌توان بدون صرف هزینه بالا در انتخاب مواد پره، خواص مورد نظر را در محل‌های مورد نیاز (سطح) به صورت موضعی ایجاد کرد [۱ و ۲].

مروری بر منابع مطالعاتی نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه توسعه پوشش‌های فلزی، کامپوزیتی و سرمته‌ای روی پره‌های توربین صورت پذیرفته است که از جمله می‌توان به پوشش‌های سد حرارتی<sup>۱</sup>، پوشش‌های آلومینایدی، پوشش‌های تولید شده به روش پاشش حرارتی پر سرعت سوخت (HVOF<sup>۲</sup>)، اسپری حرارتی<sup>۳</sup> و روکش کاری لیزری<sup>۴</sup> اشاره نمود [۳ و ۴]. با این حال، سهم تحقیقات انجام شده در زمینه روکش کاری لیزری پره‌های توربین نسبت به سایر روش‌ها بسیار کمتر است. بررسی دقیق منابع مطالعاتی همچنین حاکی از آن است که علی‌رغم ویژگی‌های مثبت و خواص برتر و منحصر به فرد آلیاژهای آنترپوی بالا<sup>۵</sup>، تاکنون تحقیقات محدودی در زمینه توسعه روکش‌های لیزری از جنس این آلیاژها به ویژه از نوع سرمته انجام شده است.

در طراحی آلیاژهای آنترپوی بالا از چندین عنصر اصلی (حداقل پنج و حداکثر سیزده عنصر با درصد‌های اتمی مشابه یا تقریباً مشابه، معمولاً بین ۵ تا ۳۵ درصد) استفاده می‌شود. اساس این آلیاژها، آنترپوی وضعیتی عناصر است که در ترکیب با نسبت‌های اتمی برابر به حداکثر مقدار خود رسیده، با افزایش تعداد عناصر در سیستم افزایش یافته و از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی جلوگیری می‌کند. همچنین، ساختارهای نهایی تشکیل شده در محلول جامد می‌توانند به صورت‌های مختلف مکعب مرکزدار (BCC)، مکعب وجوه مرکزدار (FCC) و یا ترکیبی از هر دو باشند [۵ و ۶]. از جمله ویژگی‌های بارز این آلیاژها، اعوجاج شدید شبکه به علت متفاوت بودن شعاع اتمی عناصر و همچنین سرعت نفوذ کم در آن‌ها است و به دلیل داشتن خواص منحصر به فرد همچون استحکام بالا، مقاومت به سایش زیاد، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون مناسب و... کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مهندسی پیدا کرده‌اند [۶-۸]. بنابراین در راستای افزایش راندمان کاری پره‌های توربین گازی، ضرورت افزایش راندمان توربین‌های گازی از طریق افزایش دمای گازهای ورودی و کاهش زیان‌های مالی و اقتصادی ناشی از اعمال پوشش‌های نامناسب به

<sup>8</sup> Taguchi method

<sup>9</sup> Machine learning

<sup>10</sup> Chen

<sup>11</sup> Gao

<sup>12</sup> Cao

<sup>13</sup> Wu

<sup>1</sup> Thermal barrier coatings

<sup>2</sup> High-velocity oxygen fuel

<sup>3</sup> Thermal spray

<sup>4</sup> Laser cladding

<sup>5</sup> High entropy alloys

<sup>6</sup> Response surface methodology

<sup>7</sup> Linear regression

جدول ۱- برخی از مهمترین مزایای شبیه‌سازی فرایند روکش کاری لیزری آلیاژهای آنتروپی بالا [۱۹]

شاخص	توضیحات
کاهش هزینه‌های آزمایش	روش‌های تجربی، به ویژه برای آلیاژهای پیچیده آنتروپی بالا غالباً گران و بعضاً ناکارآمد هستند. شبیه‌سازی با پیش بینی نتایج نیاز به آزمایش‌های فیزیکی متعدد و هزینه‌های مرتبط با مواد و نیروی کار را به طور قابل توجهی کاهش دهد.
بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند	روکش کاری لیزری شامل پارامترهای زیادی مانند توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر است که تأثیر زیادی بر کیفیت پوشش دارند. شبیه‌سازی به محققان این امکان را می‌دهد که به سرعت اثرات پارامترهای مختلف را بررسی کنند تا تنظیمات بهینه برای کسب خواص مورد نظر حاصل شود.
پیش‌بینی تکامل ریزساختاری	ریزساختار آلیاژهای پیچیده آنتروپی بالا به شدت به شرایط پردازش وابسته است. با انجام شبیه‌سازی، امکان پیش‌بینی ریزساختار تحت چرخه‌های حرارتی مختلف وجود دارد.
درک رفتار حرارتی پیچیده	علیرغم اهمیت موضوع، کنترل گرادیان‌های دمایی شدید در فرآیند روکش کاری لیزری دشوار است. بنابراین، شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی دقیق میدان دما، انتقال حرارت و تنش‌های پسماند توسعه یافته طی فرایند بسیار حائز اهمیت است.
تسهیل طراحی مواد	شبیه‌سازی به عنوان یک ابزار طراحی قدرتمند با مدل‌سازی چگونگی رفتار ترکیبات مختلف تحت شرایط روکش لیزری، محققان را در کشف و طراحی آلیاژهای آنتروپی بالای جدید با خواص برتر برای کاربردهای خاص کمک می‌کند.

مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد امکان بررسی هم‌زمان رفتار حرارتی و پیش‌بینی تغییرات ریزساختاری را فراهم می‌سازد و درک بهتری از رابطه میان پارامترهای لیزر و کیفیت لایه روکش ارائه می‌دهد. جدول ۲ پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی روکش کاری پوشش‌ها را نشان می‌دهد. به‌منظور اطمینان از دقت نتایج و استقلال آنها از اندازه شبکه، آزمون همگرایی عددی انجام شد. اندازه‌ها به گونه‌ای تنظیم شد که با نصف کردن اندازه شبکه، تغییرات دمایی بیشینه در نقطه حرارتی بحرانی کمتر از ۲ درصد باقی بماند. همچنین گام زمانی به‌گونه‌ای انتخاب گردید که نسبت تغییر دما در هر گام از ۵ درجه سانتیگراد تجاوز نکند تا پایداری حرارتی مدل حفظ شود.

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده برای بررسی شبیه‌سازی روکش لیزری نمونه‌ها

کد نمونه	توان (W)	سرعت روبش (mm/s)	نرخ تغذیه پودر (mg/s)
P100	۱۰۰	۵	۳۰۰
P150	۱۵۰	۵	۳۰۰
P200	۲۰۰	۵	۳۰۰
P250	۲۵۰	۵	۳۰۰
S3	۲۰۰	۳	۳۰۰
S4	۲۰۰	۴	۳۰۰
S5	۲۰۰	۵	۳۰۰
S6	۲۰۰	۶	۳۰۰
F200	۲۰۰	۵	۲۰۰
F250	۲۰۰	۵	۲۵۰
F300	۲۰۰	۵	۳۰۰
F350	۲۰۰	۵	۳۵۰

شبیه‌سازی در کاهش هزینه‌های تجربی تأکید کردند. در مقایسه با پوشش‌های مرسوم نظیر NiCrAlY که در دماهای بالا مستعد اکسیداسیون و جدایش لایه‌ای هستند، روکش‌های آنتروپی بالای  $TiNiCrMoW-ZrB_2$  با بهره‌گیری از ترکیب چندعنصری و استحکام محلول جامد، پایداری حرارتی و چسبندگی به‌مراتب بهتری نسبت به زیرلایه فراهم می‌سازند، از این‌رو استفاده از این سیستم پوششی می‌تواند جایگزین مؤثرتری برای افزایش طول عمر پره‌های توربین گازی باشد. با توجه مطاب فوق، در تحقیق حاضر سعی شده است از شبیه‌سازی حرارتی سیس‌ولد<sup>۱</sup> به‌عنوان ابزاری مکمل برای پیش‌بینی دقیق توزیع دما، گرادیان‌های حرارتی و ابعاد حوضچه مذاب و تحلیل بهتر نقش پارامترهای فرآیند بر ریزساختار و خواص نهایی پوشش استفاده شود. این رویکرد علاوه بر کاهش هزینه و زمان آزمایش‌ها، امکان درک عمیق‌تری از مکانیزم‌های حاکم بر فرآیند روکش کاری لیزری فراهم می‌آورد.

## ۲- روش تحقیق

در تحقیق حاضر از یک مدل المان محدود سه‌بعدی<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی فرآیند روکش کاری لیزری در محیط نرم‌افزار سیس-ولد استفاده شد. در این مدل، برهم‌کنش پرتو لیزر با جریان پودر و زیرلایه به‌صورت دقیق در نظر گرفته شد و شرایط مرزی حرارتی شامل انتقال حرارت از طریق رسانش<sup>۳</sup> در زیرلایه، همرفت سطحی<sup>۴</sup> و تابش<sup>۵</sup> به محیط اعمال گردید. پس از محاسبه توزیع دما و شیب‌های دمایی حاصل از فرآیند، نتایج حرارتی به‌دست‌آمده برای تحلیل‌های ریزساختاری و بررسی اثر پارامترهای فرآیندی بر مورفولوژی دانه‌ها و خواص نهایی پوشش

<sup>4</sup> Surface convection

<sup>5</sup> Radiation

<sup>1</sup> Sysweld

<sup>2</sup> Three-dimensional finite element

<sup>3</sup> Conduction

مداوم در خواص فیزیکی ماده از جمله خواص حرارتی وابسته به دما می‌شود. در این شرایط، پدیده انتقال حرارت گذرای غیرخطی بر رفتار حرارتی سامانه غالب است. معادله حاکم بر انتقال حرارت در این فرآیند بر اساس قانون بقای انرژی به صورت معادله (۱) بیان می‌شود [۱۴ و ۱۳]:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (1)$$

در این رابطه T دما، t زمان، c(T) گرمای ویژه تعیین شده توسط دما، ρ چگالی، Q منبع گرما و λ تغییرات رسانش گرما با دما است. برای حل معادله (۱)، شرایط مرزی اولیه به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۵]:

$$\begin{cases} T(x, y, z, t = 0) = T_0 \\ T(x, y, z, t = \infty) = T_0 \end{cases} \quad (2)$$

که در آن T<sub>0</sub> دمای محیط است. شرایط مرزی انتقال حرارت از طریق تابش و همرفت نیز باید تعیین شود. در بین این دو مکانیزم انتقال حرارت، نقش تابش به دلیل دمای بالای حوضچه مذاب بسیار قابل توجه‌تر است. شرایط مرزی انتقال حرارت از طریق تابش و رسانش با روابط (۳ و ۴) بیان می‌شوند [۱۶]:

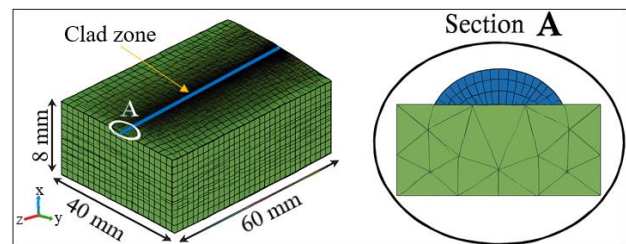
$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = \sigma_0 \varepsilon (T_s^4 - T_e^4) \quad (3)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = h_f (T_s - T_e) \quad (4)$$

که در آن T<sub>e</sub> دمای اتاق، T<sub>s</sub> دمای مرزی قطعه، h<sub>f</sub> ضریب انتقال حرارت جابجایی، s سطح مرزی،  $\frac{\partial T}{\partial n}$  گرادیان دما در راستای عمود بر سطح مرز، σ<sub>0</sub> ثابت استفان-بولتزمن، و ε ضریب نشر (تابش) سطح می‌باشند [۱۷]. در این پژوهش، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی (h<sub>f</sub>) با توجه به شرایط جریان گاز محافظ و توزیع حرارتی سطح، برابر با ۳۵ W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup> در نظر گرفته شد. همچنین ضریب نشر سطح (ε) با توجه به جنس آلیاژ تقویت‌شده TiNiCrMoW-ZrB<sub>2</sub> و مقادیر گزارش شده در منابع مشابه برابر ۰/۷ انتخاب شد. این ضرایب در معادلات (۳) و (۴) اعمال شده‌اند تا تبادل حرارتی بین حوضچه مذاب و محیط با دقت واقعی‌تری بازتولید شود.

به منظور شبیه‌سازی دقیق منبع گرما، از یک مدل استوانه‌ای بیضوی<sup>۱</sup> (منبع گرمای گاوسی<sup>۲</sup>) استفاده شده است. شار<sup>۳</sup> سطحی با رابطه ۵ بیان می‌شود [۱۸]:

مدل اجزای محدود فرآیند روکش کاری لیزری در شکل ۱-الف و بزرگنمایی بالاتر ناحیه A (برای مشاهده جزئیات مش‌بندی عناصر) در شکل ۱-ب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد در شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده، در تحقیق حاضر از عناصر چهاروجهی برای شبکه‌بندی مدل استفاده شده است. همچنین خواص ترموفیزیکی آلیاژ TiNiCrMoW-ZrB<sub>2</sub> در جدول ۳ ارائه شده است. شبکه مدل شامل حدود ۲/۴ میلیون المان چهار وجهی و ۲/۷ میلیون گره بود. ناحیه مجاور سطح تماس لیزر و زیرلایه با تراکم بالاتر شبکه مش‌بندی شد تا گرادیان‌های دمایی شدید به صورت دقیق شبیه‌سازی شوند، در حالی که در نواحی دور از محل تابش، اندازه المان‌ها به صورت تدریجی افزایش یافت تا ضمن کاهش زمان محاسباتی، دقت کلی مدل حفظ شود. آزمون همگرایی نشان داد که با افزایش دو برابری تعداد المان‌ها، تغییرات دمایی بیش از ۲ درصد مشاهده نمی‌شود که بیانگر کفایت مش فعلی است.



شکل ۱- هندسه مدل المان محدود برای فرآیند روکش کاری لیزری.

جدول ۳- خواص ترموفیزیکی پوشش TiNiCrMoW-ZrB<sub>2</sub> مورد بررسی [۲۱-۲۳]

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	گرمای ویژه Cp (J/kg·K)	رسانایی حرارتی k (W/m·K)	دما (°C)
۷۸۰۰	۴۶۰	۲۲/۵	۲۵
۷۷۵۰	۴۸۰	۲۵/۸	۲۵۰
۷۷۰۰	۵۲۵	۲۹/۱	۵۰۰
۷۶۵۰	۵۸۰	۳۲/۵	۷۵۰
۷۶۰۰	۶۴۰	۳۵/۸	۱۰۰۰
۷۵۵۰	۷۰۰	۳۸/۹	۱۲۵۰
۷۵۰۰	۷۴۰	۴۱/۵	۱۵۰۰
۷۴۵۰	۷۸۰	۴۳/۸	۱۷۵۰
۷۴۰۰	۸۲۰	۴۶/۰	۲۰۰۰

در فرآیند روکش کاری لیزری، به دلیل بالا بودن نرخ گرمایش و سرمایش، شیب‌های دمایی شدیدی در لایه پوشش ایجاد می‌شود. حرکت منبع حرارتی در طول سطح نیز منجر به تغییرات

<sup>3</sup> Flux

<sup>1</sup> Ellipsoidal heat source

<sup>2</sup> Gaussian

چگالی آن در دمای محیط)، شعاع ذره پودر،  $C_p$  ظرفیت گرمای ویژه جرم ورودی و  $R$  شعاع پرتو لیزر می‌باشند. در معادله ۹،  $T_{initial}$  نشان‌دهنده دمای اولیه ذرات پودر در لحظه ورود به مسیر تابش لیزر است [۲۰].

بازده برخورد پودر به صورت کسر ذرات پودر که با ناحیه ذوب شده روی زیرلایه برخورد می‌کنند، محاسبه می‌شود. هنگامی که یک لایه روکش در روکش لیزری تک‌گذر در نظر گرفته می‌شود، می‌توان فرض کرد که ذراتی که با ناحیه ذوب شده برخورد می‌کنند، بخشی از لایه روکش می‌شوند. با توجه به این فرض و اینکه ناحیه برخورد جریان پودر بزرگ‌تر از ناحیه ذوب شده روی زیرلایه است، بازده برخورد پودر را می‌توان به صورت نسبت ناحیه حوضچه مذاب و ناحیه زیرلایه که با جریان پودر برخورد می‌کنند، بیان کرد [۲۰].

$$\eta = \frac{S_{jet}^{liq}}{S_{jet}} \quad (10)$$

فرضیات اصلی مدل شبیه‌سازی به شرح زیر در نظر گرفته شدند:

- فرآیند در مقیاس ماکرو و به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده و تأثیر جابجایی مذاب در حوضچه لحاظ نشده است.
- خواص ترموفیزیکی مواد به صورت تابعی از دما در نظر گرفته شده و تغییرات فاز به شکل ضمنی در مدل اعمال شده است.
- سطح تماس بین پوشش و زیرلایه کاملاً چسبیده و مقاومت حرارتی مرزی ناچیز فرض شده است.
- تابش و همرفت تنها مکانیسم‌های دفع گرما در سطح آزاد قطعه بوده و شار ورودی لیزر بر اساس مدل گاوسی بیضوی تعریف شده است.
- تأثیر تلاطم گاز حامل و تغییرات فضایی نرخ تغذیه پودر در محدوده نازل ثابت فرض شده است
- اتلاف گرما از اضلاع جانبی نمونه به دلیل نسبت ابعاد هندسی ناچیز در مقیاس مدل در نظر گرفته نشده است.

### ۳- نتایج و بحث

در طول فرآیند روکش کاری لیزری، شکل حوضچه مذاب تحت تأثیر کشش سطحی بین لایه منجمد شده و پودر در حال ذوب شدن است. گرادیان دمایی ایجاد شده در این شرایط نقش کلیدی در کنترل ریزساختار و خواص مکانیکی پوشش دارد به‌گونه‌ای که با افزایش توان لیزر (افزایش انرژی خطی) و کاهش سرعت روبش (افزایش چگالی تغذیه پودر)، شدت گرادیان دمایی بیشتر شده و منجر به تغییرات چشمگیر در توزیع دما و رفتار حوضچه مذاب می‌شود. با وجود این، الگوی کلی توزیع دما در

$$q = \frac{2Q_p \eta_p}{\pi r^2} \times e^{-\frac{2R^2}{r^2}} \quad (5)$$

در این معادله،  $r$  نشان‌دهنده حداکثر شعاع پرتو لیزر،  $Q_p$  توان لیزر،  $R$  فاصله از نقطه انتخاب شده تا مرکز پرتو لیزر و  $\eta_p$  پرتو لیزر جذب شده توسط زیرلایه است. جذب انرژی لیزر نقش مهمی در روکش لیزر ایفا می‌کند. این ضریب با دما، مقاومت الکتریکی و ترکیب شیمیایی ماده تغییر می‌کند. همچنین با کاهش طول موج افزایش می‌یابد و می‌توان آن را بر اساس مقاومت الکتریکی به صورت معادله ۶ تخمین زد [۱۹]:

$$\varepsilon_\lambda(T) = 0.365 \sqrt{\frac{\rho_r}{\lambda}} - \frac{0.0667\rho_r}{\lambda} + 0.006 \left(\frac{\rho_r}{\lambda}\right)^3 \quad (6)$$

که در آن  $\varepsilon_\lambda(T)$  ضریب نفوذ زیرلایه در دمای  $K$ ،  $\rho_r$  مقاومت الکتریکی زیرلایه در دمای  $K$  و  $\lambda$  طول موج پرتو لیزر است.

برخورد ذرات پودر پیش‌گرم‌شده با حوضچه مذاب از مهم‌ترین مراحل در فرآیند شبیه‌سازی روکش کاری لیزری است. اولین مشکل مهمی که باید ارزیابی شود، کاهش توان لیزر و دومین مشکل، افزایش دمای ذرات پودر قبل از برخورد با حوضچه مذاب است. توزیع پودر در خروجی نازل تغییر نمی‌کند، زیرا جریان گازهای حامل و محافظ ثابت است. بنابراین، در شبیه‌سازی روکش کاری لیزری، توزیع ذرات پودر در خروجی نازل را می‌توان به عنوان یک پارامتر ثابت در نظر گرفت. به منظور پیش‌بینی دمای ذرات پودر در حین تزریق به حوضچه مذاب، فرض می‌شود، سرعت ذرات پودر برابر با سرعت گاز حامل است، ذرات پودر هنگام خروج از نازل سرعت یکسانی دارند، جرم ورودی به صورت یک جریان سیال پیوسته در نظر گرفته شده است و مدت زمان برهمکنش بین پرتو لیزر و ذرات پودر برای تعیین دمای جرم ورودی به حوضچه مذاب محاسبه می‌شود که می‌توان آن را به صورت معادلات ۷ تا ۹ به دست آورد:

$$t_{int} = \frac{L_{nozzle}}{V_{inlet}} \quad (7)$$

$$\Delta T = \frac{\alpha P t_{int}}{\pi R^2} \times \frac{\pi r_p^2}{m_p C_p} \quad (8)$$

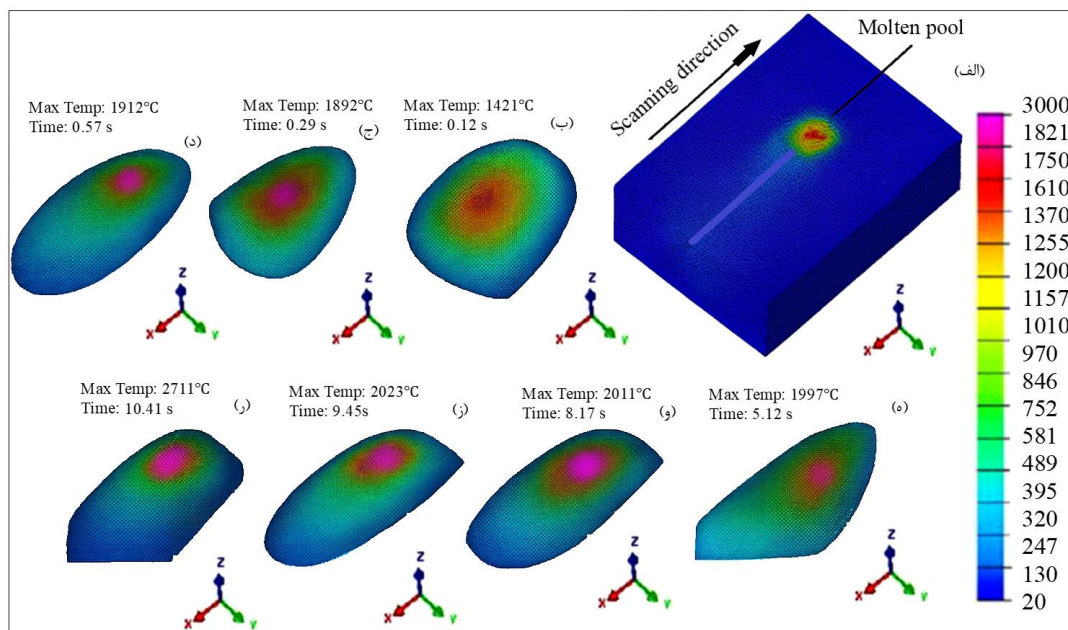
$$T_{inlet} = T_{initial} + \Delta T \quad (9)$$

در معادله ۷، نماد  $t$  مدت زمان برهمکنش بین پرتو لیزر و جرم ورودی را نشان می‌دهد،  $V_{inlet}$  سرعت جرم ورودی است و  $L_{nozzle}$  فاصله بین نوک نازل و سطح زیرلایه می‌باشد. در معادله ۸،  $\alpha$  ضریب جذب تابش لیزر توسط ذرات پودر است،  $P$  توان لیزر،  $m_p$  جرم هر ذره پودر (برابر با حاصل ضرب حجم ذره در

نمونه‌های مختلف مشابه است و تغییر پارامترهای فرآیندی بیشتر باعث تفاوت در ابعاد ناحیه‌ی تحت تأثیر حرارتی، دمای حوضچه و میزان نفوذ حرارت به زیرلایه می‌شود. بنابراین، برای تحلیل دقیق‌تر، نمونه P250 به‌عنوان نماینده انتخاب و توزیع حرارتی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۲-الف توزیع گرما و نمای سه‌بعدی نواحی تحت‌تأثیر فرآیند را نشان می‌دهد که در آن مساحت حوضچه مذاب نیز مشخص است. با توجه به طول کل روکش (۶۰ میلی‌متر) و سرعت روبش (۶ میلی‌متر بر ثانیه)، موقعیت لحظه‌ای پرتو لیزر در هر زمان محاسبه شد. در شروع فرآیند، وقتی روبش از لبه نمونه آغاز می‌شود، انرژی ورودی روی ناحیه‌ی کوچکی متمرکز شده و در نتیجه گرادیان دمایی در اطراف حوضچه به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در این شرایط، به علت پایین بودن دمای اولیه زیرلایه، بخش عمده‌ای از انرژی لیزر صرف افزایش دمای زیرلایه می‌شود و ذوب کامل در فصل مشترک با تأخیر شکل می‌گیرد. به همین دلیل، احتمال تشکیل پیوند متالورژیکی ضعیف در لحظات ابتدایی افزایش می‌یابد (شکل ۲-الف). در زمان ۰/۱۲ ثانیه و فاصله حدود ۰/۶۵ میلی‌متر از مبدأ (شکل ۲-ب) دمای حوضچه در محدوده ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد که نزدیک به آستانه ذوب زمینه است. با ادامه روبش و رسیدن به فاصله ۱/۲۴ میلی‌متر و زمان ۰/۲۹ ثانیه (شکل ۲-ج)، دما افزایش قابل توجهی پیدا کرده و به حدود ۱۸۰۰ تا ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در این مرحله؛ ذوب پودر کامل شده و پیوند متالورژیکی مناسبی در فصل مشترک برقرار

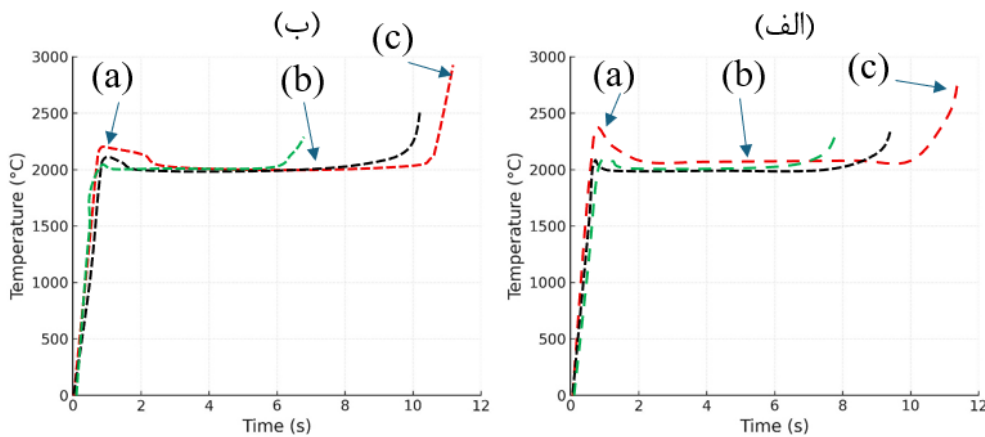
می‌گردد. دلیل این افزایش دما، تمرکز گرما در لبه نمونه و محدود شدن انتقال حرارت در جهت مخالف حرکت لیزر است. در زمان ۰/۵۷ ثانیه و فاصله ۴ میلی‌متر از مبدأ (شکل ۲-د)، خطوط ایزوترم بسته شدند و شرایط به حالت پایدار نزدیک شد. در این وضعیت، دمای حوضچه در بازه ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد که حدود حالت پیشین است. ثابت بودن دما در این مرحله را می‌توان ناشی از انتقال حرارت همزمان در جهات مختلف و تبادل گرما با محیط اطراف دانست. این روند پایدار تا حدود ۵/۱۲ ثانیه و فاصله ۲۵/۹ میلی‌متر ادامه داشت (شکل ۲-ه) که در آن دمای حوضچه حدود ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است. با پیشروی پرتو لیزر و رسیدن به فاصله ۳۵/۲ میلی‌متر از مبدأ در زمان ۸/۱۷ ثانیه (شکل ۲-و)، خطوط ایزوترم به انتهای نمونه نزدیک شده و گرما در طول قطعه توزیع می‌گردد. در این شرایط، گرادیان دمایی در راستای روبش کاهش یافته و دمای حوضچه به حدود ۲۰۱۱ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا می‌کند. پس از این مرحله (شکل‌های ۲-ز و ۲-ر)، خطوط ایزوترم در امتداد مسیر روبش باز شده و این پدیده موجب کاهش شدید گرادیان دمایی محوری و افزایش قابل توجه دمای حوضچه می‌شود، به گونه‌ای که بیشینه دمای ثبت‌شده در این شرایط به حدود ۲۸۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این مقدار اگرچه نسبت به سیستم‌های پایه‌ای مانند IN718 پایین‌تر است، اما برای ذوب کامل زمینه TiNiCrMoW کافی بوده و در عین حال به دلیل پایین‌تر بودن از نقطه ذوب ZrB<sub>2</sub>، مانع از ذوب این ذرات و حفظ نقش تقویتی آن‌ها می‌شود.



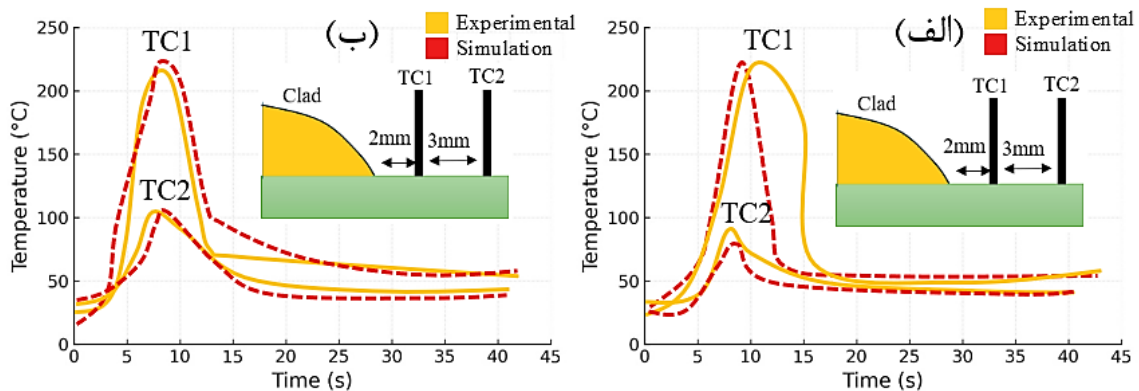
شکل ۲- گرادیان دمایی در طول روکش لیزری نمونه P250.

تغییرات دما در طول فرآیند روکش کاری لیزری به صورت تجربی توسط ترموکوپل‌ها ثبت شد. موقعیت نصب ترموکوپل‌ها و مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای دو نمونه P200 (توان لیزر ۲۰۰ وات، نرخ تزریق پودر ۳۰۰ میلی‌گرم بر ثانیه، سرعت روبش ۵ میلی‌متر بر ثانیه) و P250 (توان لیزر ۲۵۰ وات، نرخ تزریق پودر ۳۰۰ میلی‌گرم بر ثانیه، سرعت روبش ۵ میلی‌متر بر ثانیه) در شکل ۴ ارائه شده است. در این شکل، TC1 و TC2 به ترتیب معرف ترموکوپل‌های شماره ۱ و ۲ هستند. برای ارزیابی دقت مدل عددی، میزان انحراف میان نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی با استفاده از شاخص میانگین خطای نسبی (MRE) و ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE) محاسبه شد. مقادیر پایین این شاخص‌ها (شاخص میانگین خطای نسبی کمتر از ۵ درصد و ریشه میانگین مجذور خطا کمتر از ۲۰ درجه سانتیگراد) بیانگر هم‌خوانی مناسب مدل عددی با نتایج تجربی است.

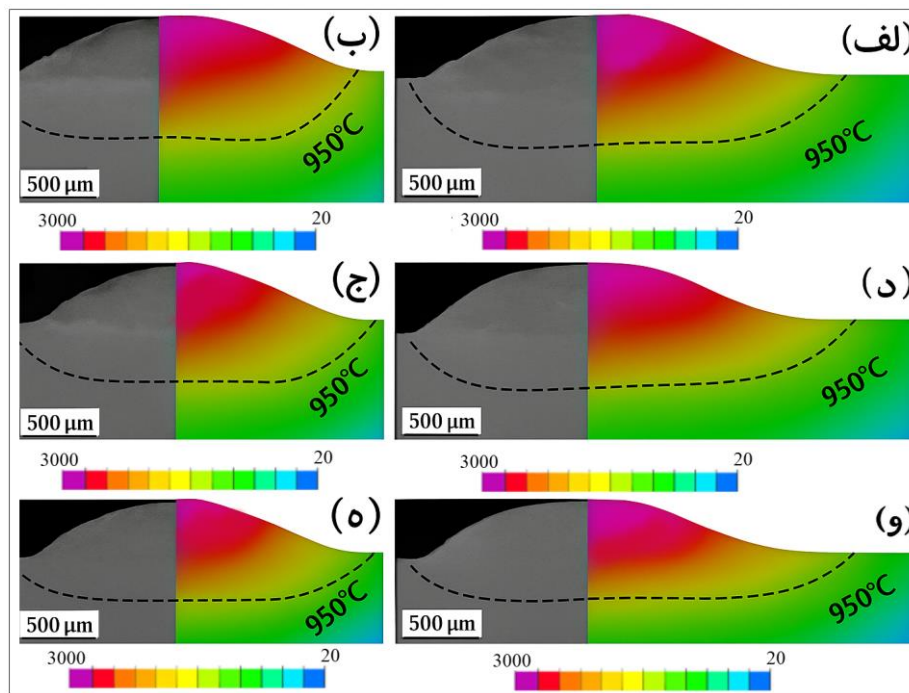
شکل ۳ تغییرات دمای حوضچه مذاب را در طول فرآیند روکش کاری لیزری برای نمونه‌های P100-P200 و S3-S6 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمودارهای حرارتی را می‌توان به سه ناحیه اصلی تقسیم کرد: ناحیه a (شروع فرآیند)، ناحیه b (مرحله پایدار در طول فرآیند) و ناحیه c (پایان فرآیند). بررسی این نتایج نشان می‌دهد که با کاهش سرعت روبش و افزایش توان لیزر، که منجر به افزایش انرژی خطی و همچنین چگالی تغذیه پودر می‌شود، دمای حوضچه مذاب به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، در شرایط نمونه P200 (توان لیزر ۲۰۰ وات، سرعت روبش ۵ میلی‌متر بر ثانیه) در مقایسه با نمونه P100 (توان لیزر ۱۵۰ وات، سرعت روبش ۵ میلی‌متر بر ثانیه)، زمان کل روبش از حدود ۱۱ ثانیه به ۹ ثانیه کاهش یافته است. در نتیجه، به دلیل انرژی ورودی بیشتر در نمونه P200، دمای زیرلایه و حوضچه مذاب بالاتر بوده و ذوب کامل‌تری حاصل شده است. در مقابل، در نمونه P100 به دلیل انرژی ورودی کمتر، دمای حوضچه و زیرلایه پایین‌تر بوده و ذوب و پیوند متالورژیکی با شدت کمتری صورت گرفته است.



شکل ۳- تغییرات دمای حوضچه مذاب در طول روکش لیزری برای نمونه‌های مختلف. (الف) تاثیر توان لیزر (رنگ قرمز، مشکی و سبز به ترتیب مربوط به نمونه های P200، P150 و P100 است)، (ب) تاثیر سرعت روبش (رنگ قرمز، مشکی و سبز به ترتیب مربوط به نمونه‌های S3، S4 و S6 است).



شکل ۴- مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی در نمونه‌های (الف) P200 و (ب) P250.



شکل ۵- مقایسه هندسه نمونه‌های تجربی و شبیه‌سازی شده برای (الف) P250، (ب) P200، (ج) P150، (د) S3، (ه) S4، (و) S6.

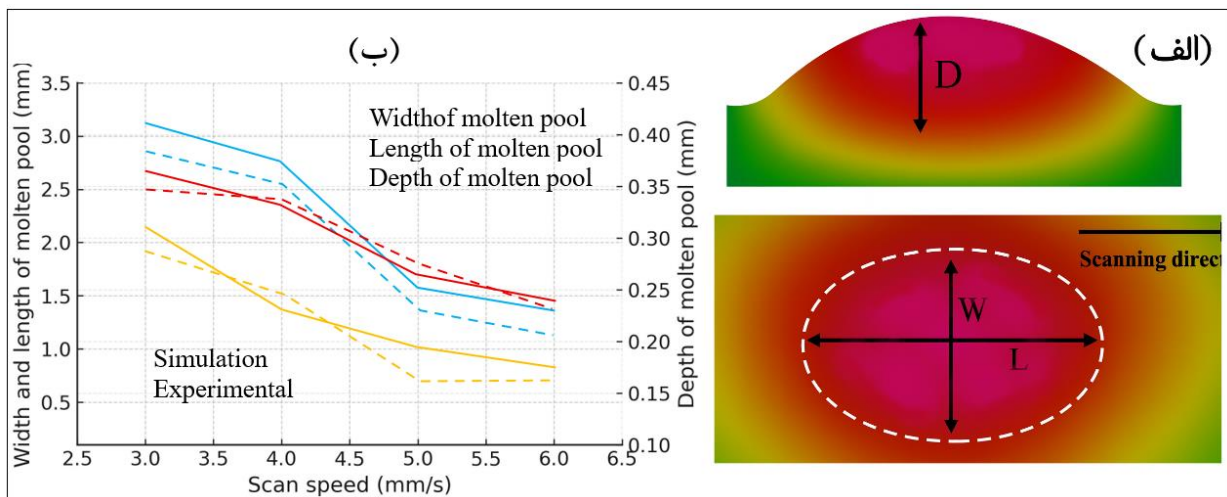
مدل عددی قادر به پیش‌بینی دقیق رفتار دمایی پوشش تحت شرایط مختلف فرآیندی می‌باشد.

شکل ۵ مقایسه‌ای بین سطح مقطع روکش ساخته شده (سمت چپ) و روکش شبیه‌سازی شده (سمت راست) را نشان می‌دهد. هنگامی که دمای روکش به نقطه ذوب (۱۴۶۰ درجه سانتیگراد) می‌رسد، چسبندگی بین ذرات پودر افزایش یافته و پوشش به سمت بالا حرکت می‌کند. در این شکل، مناطقی که دما به بیش از دمای بحرانی  $TiNiCrMoW-ZrB_2$  12% رسیده است، با خط چین سیاه مشخص شده‌اند. این مناطق با نواحی متأثر از حرارت (HAZ) نشان داده شده‌اند. مواد در این نواحی ذوب نشده اما ریزساختار آنها به دلیل تولید گرمای زیاد در طول فرآیند و افزایش دما تا مقادیر بحرانی، تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، یک چرخه کامل عملیات حرارتی در این ناحیه اتفاق می‌افتد. دقت نتایج مدل شبیه‌سازی را می‌توان از شکل ۵ استنباط کرد.

یکی از مراحل کلیدی در تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی فرآیند روکش‌کاری لیزری، مدل‌سازی هندسه حوضچه مذاب است. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیندی (سرعت رویش) بر ابعاد حوضچه مذاب، توان لیزر در سطح ۲۰۰ وات در نظر گرفته شد. شکل ۶-الف اجزا و ابعاد حوضچه مذاب مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد، به طوری که طول، عرض و عمق حوضچه به ترتیب در راستای محورهای X (جهت رویش نمونه)، Y و Z تعریف شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، ابعاد ناحیه ذوب شده به شرایط فرآیندی وابسته است.

تحلیل مقایسه‌ای داده‌های دمایی حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های تجربی بیانگر تطابق بسیار مناسب بین دو روش است. برای ارزیابی کمی این تطابق، میزان خطای نسبی بین بیشینه دمای شبیه‌سازی و مقدار متناظر تجربی در نمونه‌های P250 و P200 محاسبه شد که مقدار آن به ترتیب ۴/۵ و ۴/۸ درصد به دست آمد. همچنین فاصله زمانی بین وقوع پیک‌های حرارتی ثبت شده در دو روش کمتر از ۰/۲ ثانیه بود. این نتایج صحت مدل توسعه یافته را تأیید و قابلیت اعتماد آن در پیش‌بینی دقیق میدان دما را نشان می‌دهد.

خط چین‌های قرمز در این نمودارها نتایج حاصل از شبیه‌سازی و خطوط ممتد زرد رنگ، داده‌های ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها را نمایش می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دما در لحظه رسیدن پرتو لیزر به موقعیت ترموکوپل با شیب تندی افزایش یافته و پس از عبور منبع حرارتی، با شیب ملایم‌تری کاهش پیدا می‌کند. پیک حرارتی ثبت شده در نمونه P250 بالاتر از نمونه P200 است که علت آن را می‌توان بیشتر لیزر و در نتیجه انرژی ورودی و ذخیره‌ی حرارتی بالاتر در ناحیه پوشش عنوان نمود. همچنین، دمای ثبت شده توسط TC2 در هر دو نمونه کمتر از TC1 است، زیرا فاصله این ترموکوپل از مسیر رویش بیشتر بوده و میزان انرژی جذب شده توسط آن کمتر است. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب میان دو روش است، به گونه‌ای که روند تغییرات دما و مقادیر بیشینه به خوبی بازتولید شده‌اند. این هم‌خوانی صحت مدل شبیه‌سازی حرارتی را تأیید می‌کند و بیانگر آن است که



شکل ۶- (الف) شبیه‌سازی حوضچه مذاب و (ب) تأثیر سرعت روبش بر ابعاد حوضچه مذاب در توان لیزر ۲۰۰ وات.

مکانیکی و حرارتی فراهم شود. با توجه به این موارد، نتایج پژوهش به شرح زیر است:

۱- شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار سیس ولد توانست توزیع دما و گرادیان‌های دمایی را با دقت بالا بازتولید کند و تطابق نتایج با داده‌های تجربی صحت مدل را تأیید نمود.

۲- افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش سبب افزایش انرژی ورودی، دمای حوضچه مذاب و در نتیجه بهبود ذوب و پیوند متالورژیکی بین پوشش و زیرلایه شد.

۳- مدل‌سازی نشان داد که سرعت روبش نسبت به توان لیزر تأثیر بیشتری بر ابعاد حوضچه مذاب دارد و افزایش سرعت موجب کاهش عمق و عرض حوضچه می‌شود.

۴- تحلیل کمی مقایسه میان نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی نشان داد که بیشترین اختلاف دمای پیش‌بینی شده نسبت به اندازه‌گیری شده کمتر از ۴/۸ درصد بوده و اختلاف زمانی میان پیک‌های حرارتی ثبت‌شده و شبیه‌سازی شده حدود ۰/۲ ثانیه است. این مقادیر نشان‌دهنده دقت مناسب مدل عددی در بازتولید رفتار حرارتی پوشش در فرآیند روکش کاری لیزری می‌باشند.

۵- در مجموع، استفاده از شبیه‌سازی حرارتی روشی کارآمد برای بهینه‌سازی فرآیند روکش کاری لیزری، کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و طراحی مؤثر پوشش‌های مقاوم از جنس آلیاژهای آنتروپی بالا به شمار می‌رود.

۶- بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی و آزمایش‌های تجربی، ترکیب بهینه پارامترهای فرآیندی برای دستیابی به حداکثر کیفیت و چسبندگی پوشش آلیاژ آنتروپی بالای  $\text{TiNiCrMoW-ZrB}_2$  در محدوده توان لیزر ۲۰۰ تا ۲۵۰ وات و سرعت روبش ۴ تا ۵ میلی‌متر بر ثانیه به‌دست آمد. در این محدوده، تعادل مناسبی میان اندازه‌ی حوضچه مذاب،

شکل ۶-ب اثر سرعت روبش را بر ابعاد حوضچه مذاب نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که سرعت روبش نسبت به توان لیزر تأثیر بیشتری بر ابعاد حوضچه دارد. به‌طور مشخص، در توان لیزر ۲۰۰ وات، افزایش سرعت روبش از ۳ به ۶ میلی‌متر بر ثانیه موجب کاهش طول، عرض و عمق حوضچه مذاب شد. مقایسه این نتایج با داده‌های تجربی حاصل از نرم‌افزار MIP4 که ابعاد حوضچه را به روش آزمایشگاهی تعیین کرده است، همخوانی مناسبی را نشان می‌دهد.

یکی از نکات قابل توجه آن است که عرض حوضچه مذاب در مقایسه با عمق و طول آن حساسیت کمتری به تغییرات توان لیزر و سرعت روبش دارد. این موضوع به دلیل ماهیت انتقال حرارت در حوضچه مذاب و نیز اثر محدودکننده‌ی کشش سطحی در جهت جانبی است. به بیان دیگر، افزایش سرعت روبش باعث کاهش زمان برهمکنش پرتو لیزر با سطح و در نتیجه کاهش انرژی ورودی در واحد طول می‌شود؛ در نتیجه ابعاد حوضچه مذاب کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش توان لیزر، میزان انرژی ورودی به سیستم بیشتر شده و بخشی از آن صرف ذوب ذرات پودر و افزایش دمای زیرلایه می‌شود، که این امر به افزایش ابعاد حوضچه منجر می‌گردد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، شبیه‌سازی حرارتی فرآیند روکش کاری لیزری پوشش آلیاژ آنتروپی بالای  $\text{TiNiCrMoW-ZrB}_2$  روی سوپرآلیاژ IN738 به‌منظور پیش‌بینی توزیع دما، گرادیان‌های حرارتی و ابعاد حوضچه مذاب، و همچنین تحلیل اثر پارامترهای فرآیندی (توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر) بر ریزساختار و کیفیت نهایی پوشش بود تا زمینه‌ای برای بهینه‌سازی پارامترها، افزایش چسبندگی و بهبود خواص

- overlapping bead laser cladding to understand bead geometry to process parameter relationships, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2016, 138(5) 051012.
- [11] Pinkerton A.J., Advances in the modeling of laser direct metal deposition, *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(S1).
- [12] Bakhtiyari A.N., Wang Z., Wang L., Zheng H., A review on applications of artificial intelligence in modeling and optimization of laser beam machining, *Optics & Laser Technology*, 2021, 135, 106721.
- [13] Gao J., Wang C., Hao Y., Liang X., Zhao K., Prediction of TC11 single-track geometry in laser metal deposition based on back propagation neural network and random forest, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(3) 1417-1425.
- [14] Chen B., Zhao Y., Yang H., Zhao J., Process parameters optimization and numerical simulation of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coating via laser cladding, *Materials*, 2024, 17(17) 4243.
- [15] Cao Y., Yuan C., Zhang Y., Ma J., Laser cladding performance and process parameter optimization for Fe90 alloy, *Metals*, 2024, 14(12).
- [16] Wu D., Ding C., Jean M., Optimisation of response surface methodology based on finite element analysis for laser cladding of highly hardened WC (Co, Ni) coatings, *Materials*, 2025, 18(15) 3658.
- [17] Xiang D., Wang D., Wang S., Yan L., Chen Y., Analysis and optimization of laser cladding Ti-B4C composite coatings based on the interaction and GABP-NSGAI algorithm, *Surface and Coatings Technology*, 2024, 493, 131186.
- [18] Li C., Jia T., Han X., Jiang X., Study on parameter optimization of laser cladding Fe60 based on GA-BP neural network, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2023, 37(18) 2556-2586.
- [19] Gao Y., Jiang S., Tong Y., Bai S., Lu P., Temperature field simulation and experimental confirmation of laser cladding high-entropy alloy coating on Cr12MoV. *Processes*, 2024, 12(2) 257.
- [20] Chen B., Zhao Y., Yang H., Zhao J., Process parameters optimization and numerical simulation of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coating via laser cladding, *Materials*, 2024, 17(17), 4243.
- [21] Berger A., Benito S., Konchits A., Laplanche G., Shanina B., Weber S., Thermophysical properties of equiatomic CrMnFeCoNi, CrFeCoNi, CrCoNi, and CrFeNi high- and medium-entropy alloys, *Materials Today Communications*, 2024, 39, 109341.
- [22] Sun Z., Shi C., Gao L., Lin S., Li W. Thermal physical properties of high entropy alloy Al<sub>0.3</sub>CoCrFeNi at elevated temperatures, *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 901, 163554.
- [23] Cantor B., The thermodynamics of multicomponent high-entropy materials, *Journal of Materials Science*, 2025, 60(3) 1750-1764.
- گردایان دمایی و نرخ انجماد برقرار شده است؛ به‌گونه‌ای که ذوب کامل در فصل مشترک حاصل و ضخامت ناحیه‌ی تحت‌تأثیر حرارتی در حداقل مقدار خود قرار می‌گیرد. به این ترتیب، ترکیب پارامتری یاد شده می‌تواند به‌عنوان بازه‌ی پیشنهادی برای تولید پوشش‌های آنتروپی بالای مشابه با چسبندگی و پایداری حرارتی مطلوب مورد استفاده قرار گیرد.

## مراجع

- [1] Kermani F., Momeni H., ShojaRazavi R., Borhani M., Laser cladding of IN625 on Rene125 Superalloy: effect of tailored post-heat treatments on interfacial properties, *Results in Engineering*, 2025, 107345.
- [2] Najmi M., Mirbagheri S.M.H., Salehi A., Microstructure characterization and creep behavior on the casting CMM88Y super alloy turbine blade, *Founding Research Journal*, 2022, 6(2)113-124.
- [3] Tan Q., Liu K., Li J., Geng S., Sun L., Skuratov V., A review on cracking mechanism and suppression strategy of nickel-based superalloys during laser cladding, *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1001, 175164.
- [4] Samiee M., Shajari Y., Razavi S.H., Seyedraoufi Z.S., The effect of cryogenic treatment on the rejuvenation of exposed IN738LC gas turbine blade, *Founding Research Journal*, 2019, 3(3)163-174.
- [5] Nahavandi H., Khorsand H., Investigating the microstructure, mechanical and thermal properties of CuNiAlCrFe high entropy alloy made by VAR method. *Founding Research Journal*, 2024, 8(2) 107-115.
- [6] Wu Z., Taheri M., Shirvani K., Raji E., Torkamany M.J., Jelodar R.T., Development of NiCrFeCoBX eutectic high entropy alloy coating by laser cladding: investigation of microstructural, solidification, corrosion, and wear properties, *Materials Chemistry and Physics*, 2024, 320, 129428.
- [7] Pourmorad-Kaleybar S., Khorsand H., Investigating the microstructure and phase analysis of high entropy alloy CoCuFeMnNi made by vacuum induction furnace. *Founding Research Journal*, 2024, 8(2) 117-124.
- [8] Oketola A.M., Adegbola T.A., Jamiru T., Ogunbiyi O., Salifu S., Advances in high-entropy alloy research: Unraveling fabrication techniques, microstructural transformations, and mechanical properties, *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 2025, 11(3) 79.
- [9] Muvvala G., Karmakar D.P., Nath A.K., Online monitoring of thermo-cycles and its correlation with microstructure in laser cladding of nickel based super alloy, *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 88,139-152.
- [10] Urbanic R.J., Saqib S.M., Aggarwal K., Using predictive modeling and classification methods for single and



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

### Research Paper:

### Thermal Simulation of Laser Cladding Process of High Entropy Alloy TiNiCrMoW-ZrB<sub>2</sub> Coating on IN738 Superalloy

Hasan Dargi<sup>1</sup>, Reza Taghiabadi<sup>2\*</sup>, Morteza Saghafi Yazdi<sup>2\*</sup>, Morteza Taheri<sup>3</sup>, Vaira Vignesh Ramalingam<sup>4</sup>

1. PhD Student, Department of Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
2. Associate Professor, Department of Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
3. PhD in Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
4. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Amirta University of Engineering, Amrita Vishwa Vidyapeetham, Coimbatore 641112, India

Corresponding authors: taghiabadi@ikiu.ac.ir and msaghafi@eng.ikiu.ac.ir

#### Paper history:

Receive Date: 01 Noveber 2025  
Revise Date: 12 Noveber 2025  
Accept Date: 12 Noveber 2025

#### Keywords:

Laser cladding,  
Simulation,  
High entropy alloy,  
TiNiCrMoW-ZrB<sub>2</sub>,  
Inconel 738 superalloy.

#### Abstract:

In this paper, the laser cladding of high entropy alloy TiNiCrMoW-ZrB<sub>2</sub> coating on Inconel 738 (IN738) superalloy was numerically simulated using Sysweld software. The aim was to accurately predict the temperature field, temperature gradients, molten pool dimensions, and investigate the effect of process parameters such as laser power, scanning speed, and powder feed rate. The 3D finite element model designed by considering conductive, convective, and radiative heat transfer was able to reproduce the thermal behavior of the process with high accuracy. In numerical modeling, a Gaussian heat source with an elliptical power distribution was used to accurately represent the laser beam, and boundary conditions including conduction in the substrate, surface convection, and thermal radiation to the environment were applied to reproduce the real heat transfer behavior in the simulation process. The simulation results showed that increasing the laser power and decreasing the scanning speed led to an increase in the molten pool temperature, improved melting, and metallurgical bonding to the substrate. Comparison of numerical data with experimental results obtained from thermocouple measurements showed very good agreement, which confirms the accuracy of the model. Overall, the use of thermal simulation is an effective method to optimize process parameters, reduce costs, and gain a deeper understanding of the thermal and microstructural behavior of high-entropy alloys in laser cladding.

#### Please cite this article using:

Hasan Dargi, Reza Taghiabadi, Morteza Saghafi Yazdi, Morteza Taheri, Vaira Vignesh Ramalingam, Thermal Simulation of Laser Cladding Process of High Entropy Alloy TiNiCrMoW-ZrB<sub>2</sub> Coating on IN738 Superalloy, in Persian, Founding Research Journal, 2025, 9(2) 93-103.

DOI: 10.22034/frj.2025.556115.1214

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)