



## بررسی تجربی و بهینه‌سازی میزان پودر لایه‌نشانی شده در فرآیند تف جوشی انتخابی با لیزر

محمد رضا الهامی<sup>\*۱</sup>، مجید برزگر<sup>۲</sup>، محمد هادی حسین زاده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

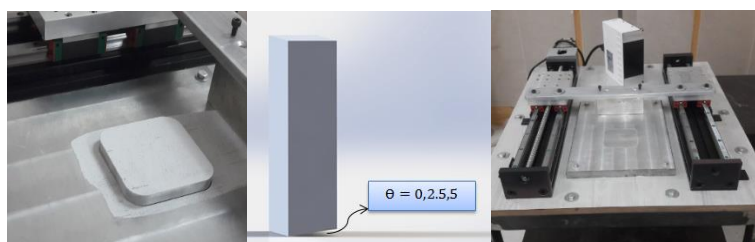
<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

<sup>۳</sup> پژوهشگر، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

### برجسته‌ها

- دستگاه پخش پودر برای روش SLS به منظور بررسی تجربی میزان جرم پودر لایه‌نشانی شده، طراحی و ساخته شد.
- از روش طراحی مرکب مرکزی برای بررسی اثر درصد پودر مصرفی، سرعت و زاویه تیغه بر مقدار جرم یک لایه استفاده شد.
- به کمک مدل تجربی به دست آمده میزان جرم لایه‌نشانی شده بهینه شد.

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۳۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۸

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

\*نویسنده مسئول:

melhami@ihu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

ساخت افزایشی

تف جوشی انتخابی با لیزر

پخش پودر تیغه‌ای

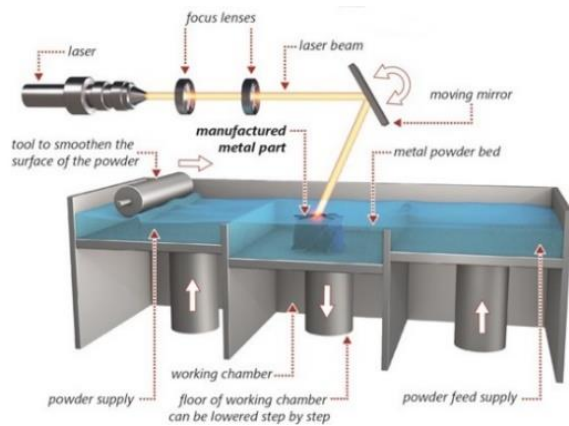
طراحی مرکب مرکزی

### چکیده

تف جوشی انتخابی با لیزر یکی از روش‌های ساخت افزایشی بر مبنای بستر پودر است که امروزه کاربرد زیادی در صنایع مختلف دارد. در این فرآیند، مقدار جرم لایه‌نشانی شده، تأثیر قابل توجهی در کاهش تخلخل و کیفیت قطعات نهایی تولید شده دارد. بدین منظور، در این پژوهش، سازوکاری برای بررسی و دستیابی به بیشترین مقدار جرم لایه‌نشانی شده در یک فرآیند لایه‌نشانی، طراحی و ساخته شد و برای اولین بار اثر پارامترهای سرعت، زاویه تیغه و درصد اضافی پودر مصرفی بر مقدار جرم یک لایه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین حالت بهینه به کمک روش طراحی مرکب مرکزی به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که به ترتیب پارامترهای سرعت حرکت تیغه، زاویه زیر تیغه و درصد اضافی پودر بیشترین تأثیر را بر میزان جرم لایه‌نشانی شده دارند. به کمک مدل تجربی به دست آمده، جرم لایه‌نشانی شده در حالت بهینه ۰/۸۱۱ گرم پیش‌بینی شد که در این حالت سرعت برابر با ۲/۷۸ سانتی‌متر بر ثانیه، زاویه تیغه برابر با ۳/۱ درجه و میزان پودر اولیه ۱۵۹ درصد باید باشد. برای صحت‌سنجی مدل، آزمایش تجربی بر مبنای پارامترهای حالت بهینه انجام شد که جرم لایه‌نشانی شده در این حالت ۰/۸۳ گرم اندازه‌گیری شد که نشان می‌دهد خطای مدل به دست آمده ۲/۲٪ است.

## ۱- مقدمه

بدین‌صورت است که ابتدا یک لایه پودر در محفظه ساخت پخش می‌شود و سپس بخش لیزر و اسکنر با توجه به فایل سه‌بعدی، شروع به ذوب پودر در نقاط مشخص می‌کند. بعد از اتمام فرآیند ذوب پودر توسط لیزر، لایه بعدی پخش می‌شود. هماهنگی بین پخش پودر و عمل ذوب پودر توسط کنترلر صورت می‌گیرد. پخش پودر و ذوب پودر تا تولید قطعه نهایی ادامه دارد [۱۱]. اسکن کردن بستر پودر باید در فضایی ایمن با عنوان محفظه‌ی ساخت انجام پذیرد. محفظه‌ی ساخت شامل بخش‌های منبع تغذیه<sup>۶</sup>، بستر ساخت<sup>۷</sup>، تخلیه پودر<sup>۸</sup> و پخش‌کننده<sup>۹</sup> پودر می‌باشد. در شکل ۱ می‌توان قسمت‌های مختلف محفظه ساخت و بخش اسکنر و لیزر را در فرآیند تف‌جوشی انتخابی با لیزر مشاهده کرد. منبع تغذیه، پودر موردنیاز برای هر بار لایه‌نشانی را تأمین می‌کند. پخش‌کننده پودر که مهم‌ترین بخش در محفظه‌ی ساخت است پودر را بر روی بستر ساخت پخش می‌کند تا عمل اسکن و لیزر بر روی پودر در بستر ساخت رخ دهد. پخش‌کننده‌ها می‌توانند به‌صورت غلتکی و تیغه‌ای باشند. در انتها، پودرهای اضافی در قسمت تخلیه پودر که در انتهای مسیر حرکت پخش‌کننده قرار دارد ریخته می‌شود تا پودرهای اضافی را جمع‌آوری کند [۱۲].



شکل (۱): نمای کلی فرآیند تف‌جوشی انتخابی با لیزر [۱۳].

ساجز و همکاران [۱۴] از ارتعاشات برای لایه‌نشانی پودر استفاده کردند. در این پژوهش از تیغه برای پخش پودر

پرینترهای سه‌بعدی یکی از مدرن‌ترین فناوری‌های عصر حاضر به حساب می‌آیند [۱]. این فناوری قابلیت چاپ مدل نرم‌افزاری را ایجاد می‌کند که می‌تواند مدل‌های سه‌بعدی با پیچیدگی‌های خاص را تولید کند [۲]. با پیشرفت روزافزون تکنولوژی پرینترهای سه‌بعدی شاید در آینده‌ای نزدیک، بسیاری از فرآیندهای ساخت و تولید<sup>۱</sup> کنونی منسوخ شود [۳]. این فرآیند به‌عنوان یک روش سریع و مقرون‌به‌صرفه برای ایجاد نمونه‌های اولیه و همچنین توسعه تولید محصولات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. امروزه بخش عظیمی از تکنولوژی سه‌بعدی در بخش بهداشت و درمان کاربرد دارد. نمونه‌های پرکاربرد از این نوع چاپ، تولید قطعاتی مانند سمعک، براکت ارتودنسی، ایمپلنت‌های دندان، جایگذاری مفاصل ران استدر است [۵ و ۶]. در صنعت هوافضا نیز پرینترهای سه‌بعدی پرکاربرد بوده و می‌تواند مقدار وزن هواپیما را کاهش دهد، راندمان موتور را بالاتر برده و به بیان ساده‌تر جایگزین مقرون به‌صرفه‌تری برای عملیات ماشین‌کاری باشد [۷].

تا به امروز فرآیندهای زیادی ابداع شده است که در دسته روش‌های ساخت افزایشی قرار می‌گیرند و تفاوت آن‌ها در نوع مواد مورد پردازش و نحوه ساخت لایه‌ها است. از پرکاربردترین فرآیندهای ساخت افزایشی که تا به امروز تجاری‌سازی شده‌اند، می‌توان به استریولیتوگرافی<sup>۲</sup>، مدل‌سازی با لایه‌نشانی رشته‌ای پلیمری<sup>۳</sup>، ذوب/تف‌جوشی انتخابی با لیزر<sup>۴</sup>، جت متصل‌کننده و لایه‌نشانی مستقیم فلز<sup>۵</sup> اشاره نمود [۸ و ۹]. یکی از مهم‌ترین روش‌ها، فرآیند تف‌جوشی انتخابی با لیزر (SLS) است. در این روش قطعات به‌صورت لایه به لایه تولید می‌شوند. تولید لایه به لایه با اجازه دادن به انعطاف‌پذیری هندسی و حداقل اتلاف مواد، این روش را تا حد زیادی کاربردی می‌کند [۱۰]. دستگاه SLS از سه بخش اصلی که شامل لیزر و اسکنر، کنترلر و محفظه‌ی ساخت تشکیل شده است. روند کلی این روش

1 Manufacturing processes

2 Stereolithography

3 Fused Deposition Modeling (FDM)

4 Selective Laser Sintering/Melting (SLM/SLS)

5 Direct Metal Deposition (DMD)

6 Powder supply

7 Working chamber

8 Powder feed supply

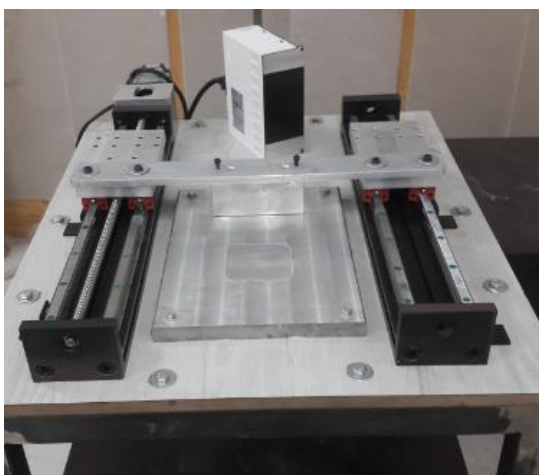
9 Recoater

افزایش ناهموازی سطح بستر پودر می‌شود که بر کیفیت قطعه تأثیر می‌گذارد. همچنین مشخص شد که پودرهایی با توزیع اندازه بزرگ‌تر ممکن است منجر به مقادیر بیشتری از زبری سطح شوند؛ بنابراین تخلخل را افزایش می‌دهد. فودا و بایلی [۱۹] از شبیه‌سازی‌های المان گسسته برای بررسی یک سیستم پخش پودر، مبتنی بر تیغه، برای پخش ذرات آلیاژ تیتانیوم استفاده کردند. در این پژوهش از یک تیغه پخش‌کننده عمودی در سطح افقی با یک گپ نازک بین تیغه و سطح برای پخش یک لایه‌نازک پودر استفاده شد. همچنین پارامتر گپ و سرعت تیغه بر روی کسر بسته‌بندی<sup>۱</sup> را مورد بررسی قرار دادند. هرچه میانگین سرعت در لایه برشی بیشتر باشد، کسر بسته‌بندی لایه پخش‌شده کمتر است. ضخامت شکاف و سرعت تیغه پخش‌کننده بر خصوصیات لایه پخش‌شده تأثیر می‌گذارد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد افزایش سرعت موجب کاهش کسر بسته‌بندی و افزایش گپ نیز موجب کاهش آن می‌شود. هان‌کوآن و ستچی [۲۰] در پژوهش خود یک رویکرد برای بهینه‌سازی ضخامت لایه بر اساس یک مدل نظری از فعل‌وانفعالات بین ذرات، تیغه پخش پودر و صفحه ساخت در طول رسوب پودر معرفی کرد. تمرکز بر روی بررسی نظری و تجربی سیستماتیک تأثیر ضخامت لایه پودر بر روی ویژگی‌های مختلف بستر پودر در طول پخش پودر یک لایه و چندلایه است. نتایج تجربی اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی، پیش‌بینی یک پخش بستر پودر یکنواخت هنگام استفاده از مقدار ضخامت ۴۰ میکرومتر را تأیید کرد. مقادیر ضخامت لایه کم‌تر (۳۰ میکرومتر) و بیشتر (۵۰ میکرومتر) منجر به ایجاد خلأهای بزرگ و نقص در تغذیه کوتاه‌مدت شد. نان و قدیری [۲۱] پارامترهای ارتفاع تیغه از سطح بستر ساخت و سرعت پخش تیغه بر روی نوار برشی در حال پخش و سرعت جریان‌پذیری از طریق ارتفاع تیغه را با استفاده از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ذرات به روش المان گسسته شبیه‌سازی کرد. نتایج نشان داد که سرعت ذرات پودر جلوی تیغه به‌خوبی توسط یک منحنی ارائه‌شده توسط تابع خطای گوس قابل توصیف است.

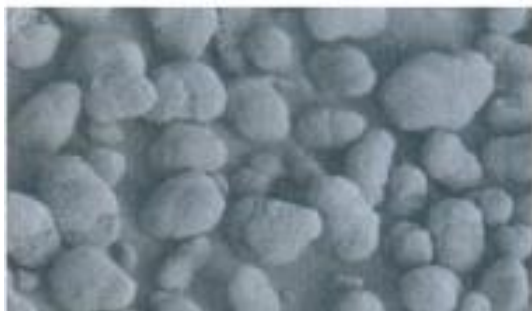
استفاده شد. جهت عملکرد مفید دستگاه، می‌بایست ذرات پودر به‌صورت یکنواخت با چگالی مناسب و نرخ نسبتاً بالایی لایه‌نشانی شوند. اعمال ارتعاشات مکانیکی یا انرژی آکوستیک به‌صورت صوتی یا مافوق صوتی به پودر لایه نشانی می‌تواند یکی از راهکارهای ایجاد تراکم موردنیاز پودر در بستر ساخت باشد. کاراپاتیس و همکاران [۱۵] در یک پژوهش، چند نوع پودر مختلف از جنس نیکل و با شکل کروی بر اساس اندازه ذرات و نوع ترکیب آن‌ها را با یکدیگر مخلوط کردند تا نسبت‌های مختلف بین اندازه ذرات را ایجاد کنند. بعد از لایه‌نشانی با غلتک فلزی مشخص شد، پودر با نسبت ۱:۲ قابلیت پر کردن فضاهای خالی را ندارد و کمترین چگالی را دست می‌دهد؛ اما در نسبت ۱:۵ چگالی تا حدودی افزایش می‌یابد و این روند برای نسبت ۱:۱۰ نیز وجود دارد، به‌طوری‌که با افزایش درصد ذرات ریز از ۰ تا ۳۰ درصد، چگالی لایه از ۵۵ درصد به ۶۳ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت به ۱:۱۸ به دلیل اشباع شدن فضای خالی بین ذرات بزرگ، افزایش محسوسی در چگالی رخ نمی‌دهد. گانریوالا و زهدی [۱۶] با استفاده از یک مدل چند فیزیکی المان گسسته، فرآیندهای لایه‌نشانی و انتقال حرارت در دستگاه SLS را برای یک لایه شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش ذرات پودر به‌صورت گلوله‌هایی با اندازه‌ی متغیر که هرکدام دارای توزیع دمایی یکنواخت هستند و با فضای اطراف انتقال حرارت ندارند، در نظر گرفته شده است. در این کار ابتدا یک لایه از پودر استیل با ضخامت تقریبی ۱۰۰ میکرومتر، در بستری با ابعاد ۲×۲ لایه نشانی می‌شود. سپس لیزر طبق الگویی زیگزاگی بر آن‌ها تابیده شده و مسئله انتقال حرارت بین ذرات حل می‌شود. بر اساس نتیجه به‌دست‌آمده از این مدل‌سازی مشخص شد ذرات ریزتر در اثر تابش لیزر ذوب‌شده و سپس انرژی خود را به ذرات بزرگ‌تر منتقل می‌کنند. ون در و کراس [۱۷] به‌صورت تجربی به مقایسه سه روش لایه‌نشانی و اثر آن‌ها بر روی خطوط ایجادشده پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که در حالت تیغه‌ای و غلتکی، به علت زیاد بودن اصطکاک، خط مسیر بر روی سطح ایجاد می‌شود. آقای پارتلی و همکاران [۱۸] زبری سطح را در یک سازوکار غلتکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش سرعت پوشش منجر به

<sup>1</sup> Packing fraction

بررسی‌شده است. بالا بودن سرعت باعث تخلخل در لایه‌نشانی و پایین بودن سرعت، کند شدن فرآیند را منجر خواهد شد. در نتیجه بهینه‌سازی میزان سرعت از جمله عوامل مهمی است که نیاز به این پژوهش را بیشتر آشکار می‌کند. در این پژوهش از پودر پلی آمید<sup>۲</sup> که رایج‌ترین پودر در این نوع فرآیندها است، استفاده شده است. ذرات پودر پلی آمید<sup>۲</sup> برخلاف پودرهای فلزی شکل‌های نامنظمی دارند. در شکل ۳، شکل پودر نشان داده شده است. همچنین یکی از مهم‌ترین پارامترهای پودر که تأثیر بسزایی در جریان‌پذیری پودر و مقدار چگالی لایه‌ی نشانی‌شده دارد، توزیع اندازه‌ی ذرات پودر است که معمولاً از نظر درصد حجمی و یا درصد تعدادی مشخص می‌شود. بر اساس مرجع [۲۲] اندازه‌ی ذرات پودر PA2200 بین ۳۰ تا ۹۵ میکرومتر است.



شکل (۲): دستگاه پخش پودر برای انجام آزمایش‌های تجربی.



شکل (۳): شکل پودر پلی آمید<sup>۲</sup>.

همان‌طور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد قسمت پخش پودر یکی از مهم‌ترین بخش‌های فرآیند تف جوشی انتخابی با لیزر است. پخش پودر بر روی زبری سطح و چگالی لایه‌نشانی تأثیر بسزایی دارد و اگر به درستی انجام نشود باعث تخلخل در لایه‌نشانی و همچنین موجب بی‌کیفیت شدن قطعه نهایی می‌شود. بدین منظور در این پژوهش پارامترهای سرعت تیغه، زاویه زیر تیغه و همچنین مقدار پودر مورد نیاز برای یک لایه و تأثیر آن‌ها بر روی جرم لایه‌نشانی‌شده در حالت تیغه‌ای برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی بهتر این پارامترها و چگونگی تأثیر هر پارامتر بر روی کیفیت لایه‌نشانی و بررسی برهم‌کنش پارامترها بر روی یکدیگر، از طراحی آزمایش به روش طراحی مرکب مرکزی<sup>۱</sup> استفاده شد و حالت بهینه برای این سه پارامتر انتخاب شد. در نهایت، حالت بهینه با آزمایش تجربی صحت‌سنجی شد.

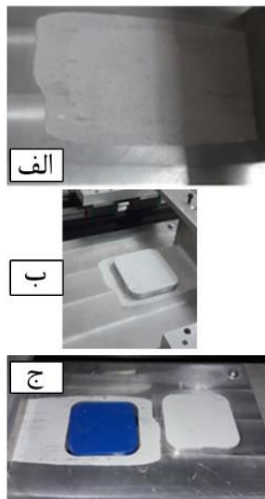
## ۲- فرآیند پخش پودر

در این پژوهش از سازوکار تیغه‌ای به منظور انجام آزمایش و بررسی عوامل مؤثر بر آن استفاده شد. دستگاه پخش پودر ساخته شده برای انجام آزمایشات تجربی در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است. این دستگاه از بخش‌های درایو (برای کنترل سرعت حرکت تیغه)، تیغه (برای انجام لایه‌نشانی)، سروموتور، بال اسکرو، صفحه ساخت و بستر ساخت تشکیل شده است. روند کلی آزمایش با ریختن مقدار مشخصی پودر در جلوی بستر ساخت آغاز می‌شود. مقدار اولیه پودر ریخته شده از جمله پارامترهای مؤثر در کیفیت فرآیند لایه نشانی می‌باشد. کم بودن این پودر باعث خالی ماندن قسمت انتهایی بستر ساخت می‌شود و مقدار اضافه آن با توجه به هزینه‌های بالای پودر مقرون به صرفه نمی‌باشد. بهینه‌سازی میزان پودر، از جمله مهم‌ترین اهداف انجام این پژوهش می‌باشد. با حرکت تیغه به سمت جلو، پودر در بستر ساخت لایه‌نشانی می‌شود. عامل مؤثر دیگر در کیفیت لایه‌نشانی، سرعت و زاویه انتهایی تیغه می‌باشد که در این پژوهش میزان اثرگذاری این پارامترها بر جرم لایه‌نشانی

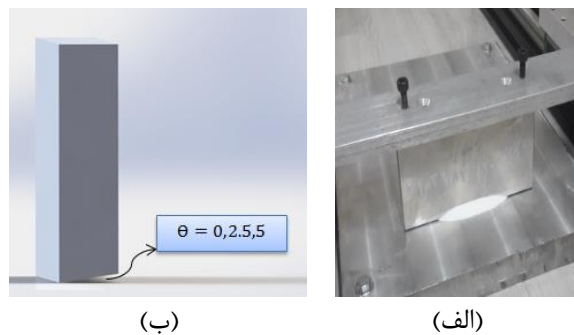
<sup>۲</sup> PA2200

<sup>۱</sup> Central Composite Design

پژوهش گذشته اگر زاویه تیغه بین ۰-۵ درجه باشد مقدار جرم لایه‌نشانی شده افزایش می‌یابد [۲۳]؛ بنابراین برای بررسی تأثیر هندسه تیغه، در این پژوهش از زوایای ۰، ۲/۵ و ۵ درجه در انتهای تیغه استفاده شده است. برای درک بهتر، زاویه زیر تیغه، در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل (۴): مراحل انجام آزمایش و اندازه‌گیری: الف) اتمام پخش پودر؛ ب) بالا آمدن بستر ساخت؛ ج) جدا کردن بستر ساخت و اندازه‌گیری جرم پودر لایه‌نشانی شده.



شکل (۵): الف) تیغه در حین پخش پودر؛ ب) زاویه‌ای که در زیر تیغه ایجاد شده.

با توجه به مطالب گفته‌شده، بر اساس اهمیتی که پارامترهای میزان جرم اولیه پودر، سرعت و زاویه تیغه در مقدار جرم لایه‌نشانی شده دارند این پارامترها به کمک روش طراحی آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند. جدول ۱ سه پارامتر و بازه‌ی هرکدام را نشان می‌دهد. با توجه به محدودیت دستگاه ساخته‌شده، بیشترین میزان سرعت تیغه

بستر ساخت لایه نشانی مورد استفاده در آزمایش، دارای ابعاد ۸۰×۸۰ میلی‌متر با ضخامت ۱۵۰ میکرون می‌باشد بنابراین حجم بستر لایه نشانی برابر ۰/۹۶ سانتی‌مترمکعب است. با توجه با آنکه چگالی پودر ۱/۰۱۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب است حداکثر جرم لایه نشانی ۰/۹۷۵ گرم خواهد بود که در عمل با توجه به تخلخل‌های لایه‌نشانی هیچ‌گاه این مقدار میسر نخواهد شد. در اینجا دو نکته مهم باید در نظر گرفته شود؛ اول اینکه هیچ‌وقت این مقدار از پودر در بستر ساخت لایه‌نشانی نمی‌شود. چون این مقدار در بهترین حالت در نظر گرفته شد و با فرض اینکه کل حجم مخزن با این چگالی پر شود. بدیهی است که در هنگام پخش پودر مقدار زیادی تخلخل به وجود می‌آید که مانع از رسیدن به این مقدار در این ابعاد می‌شود. نکته دیگر این است که برای پخش پودر در بستر مورد نظر، به مقدار بیشتری از جرم محاسبه شده نیاز می‌باشد. چون هنگام پخش پودر مقداری از پودر در قسمت منبع تغذیه می‌ماند و مقداری هم به کناره‌های بستر ساخت هدایت می‌شود، این مقدار اضافه باید بهینه شود چون اگر کم باشد لایه‌نشانی به خوبی انجام نمی‌شود و اگر خیلی زیاد باشد هزینه‌های تأمین پودر اولیه زیاد خواهد شد. شکل ۴ مراحل فرآیند لایه نشانی و نحوه آزمایش و اندازه‌گیری جرم پودر لایه‌نشانی شده را نشان می‌دهد.

با توجه به توضیحات داده‌شده برای بررسی تأثیر مقدار درصد اضافه پودر اولیه بر جرم لایه‌نشانی‌شده، در این پژوهش از مقادیر ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درصد جرم اولیه پودر استفاده شده است تا مقدار مناسبی از درصد اضافی پودر اولیه تخمین زده شود. مطابق با پژوهش‌های انجام‌شده مقدار پودر اضافه نباید کمتر از ۱۲۰ درصد باشد همچنین افزایش آن بیش از ۱۸۰ درصد تأثیر مثبتی در میزان جرم لایه‌نشانی‌شده ندارد [۱۸]. به‌عنوان مثال ۱۲۰ درصد جرم اولیه یعنی مقدار  $1/17(\text{gr}) = 1/2 \times 0/975(\text{gr})$  را باید به‌عنوان مقدار پودر اولیه برای لایه‌نشانی در نظر گرفت. قسمت اصلی سازوکار پخش پودر که یکی از پارامترهای مهم این پژوهش است، هندسه تیغه می‌باشد. با توجه به

است. باین‌حال، فاصله بین نقاط مکعب (نقاط زرد) و نقطه مرکز بیشتر از فاصله فوق است؛ بنابراین، به‌طورمعمول روش CCD در پنج سطح  $\alpha$ ،  $-1$ ،  $0$ ،  $+1$  و  $\alpha$  انجام می‌شود. سطوح  $1$  و  $+1$  سطوح بالا و پایین هستند و سطوح  $-1$  و  $\alpha$  محدودیت‌های جدیدی برای عوامل هستند. صفر نقطه مرکزی طراحی است [۲۵]؛ اما در اینجا به علت محدودیت در فاکتورها مقدار  $\alpha$  برابر با یک در نظر گرفته شد. در این پژوهش از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت<sup>۳</sup> برای محاسبه تعداد آزمایش‌ها استفاده شد. پارامترهای سرعت (A)، زاویه زیر تیغه (B) و درصد اضافی پودر (C) به‌عنوان عوامل ورودی در سه سطح در نظر گرفته شد. از آنجا که تعداد تکرارها در نقطه مرکزی ۳ تعیین می‌شود، مجموعاً ۱۷ تست برای انجام آزمایش‌ها به‌دست‌آمده است.

#### ۴- نتیجه و بحث

##### ۴-۱ بررسی تأثیر پارامترها

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایشات عملی در جدول ۲ نشان داده می‌شود. در این جدول می‌توان مقدار جرم لایه‌نشانی‌شده در هر آزمایش و همچنین نقاط مختلف طراحی آزمایش را مشاهده نمود.

در جدول ۲ نقاط قرمز نقاط مرکزی هستند که در سه بار تکرار شده است. نقاط بنفش نشان‌دهنده‌ی نقاط محوری و نقاط زرد نقاط مکعب در طراحی مرکب مرکزی است. بعد از به دست آوردن مقادیر لایه‌نشانی‌شده باید نتایج به‌دست‌آمده را مورد تحلیل و بررسی قرار داد تا بتوان تأثیر پارامترها بر روی خروجی و همچنین تأثیر هر پارامتر بر روی یکدیگر را شناسایی کرد. برای این کار باید از تحلیل واریانس استفاده نمود. تحلیل واریانس میزان مشارکت هر یک از عوامل مؤثر بر تابع هدف مشخص می‌نماید. برای پیدا کردن اهمیت نسبی پارامترها بر روی خروجی از روش آماری ANOVA استفاده می‌شود. جدول ۳ تحلیل واریانس را نشان می‌دهد که در آن مقدار F نشان‌دهنده تأثیرگذاری یا عدم تأثیرگذاری پارامترهای مورد آزمایش در سطح اطمینان موردنظر می‌باشد [۲۶].

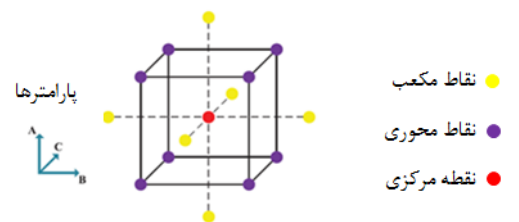
۱۲ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد بنابراین بازه پارامتر سرعت از ۱ تا ۱۲ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

جدول (۱): پارامترهای موردبررسی و مقادیر آن‌ها

پارامترها	بازه پارامترها	واحد
سرعت	۱-۱۲	سانتی‌متر بر ثانیه
زاویه زیر تیغه	۰-۵	درجه
درصد پودر اولیه	۱۲۰-۱۸۰	درصد (%)

##### ۳- طراحی مرکب مرکزی

انجام آزمایش‌های تجربی همیشه زمان‌بر و پرهزینه بوده و دستیابی به آزمایش‌های مؤثر با حداقل زمان و هزینه برای رسیدن به نتایج بهینه برای محققان بسیار مهم است. با افزایش تعداد پارامترهای ورودی، زمان و هزینه آزمایش‌ها به‌طور نسبی افزایش می‌یابد؛ بنابراین، برای دستیابی به حداکثر اطلاعات در مورد فرایند آزمون با صرف حداقل زمان و هزینه، از طراحی آزمایش<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در مواردی که باید اثر چند پارامتر را بر روی خروجی مشخص بررسی نمود و همچنین شرایط بهینه برای آن خروجی را به دست آورد، از روش سطح پاسخ<sup>۲</sup> استفاده خواهد شد. این روش یک روش مناسبی برای کمی‌سازی رابطه بین یک یا چند پارامتر با خروجی قابل‌اندازه‌گیری است [۲۴].



شکل (۶): طرح مرکب مرکزی.

در این پژوهش، از طرح مرکب مرکزی ه یک روش سطح پاسخ است، استفاده شد. روش CCD شامل نقطه مرکزی در یک مکعب است و از نقاط مکعب ( $\alpha$ ) برای تخمین انحنای استفاده می‌شود که در شکل ۶ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که فاصله بین نقاط محوری (نقاط بنفش) و نقطه مرکزی (نقاط قرمز) برای همه عوامل یکسان

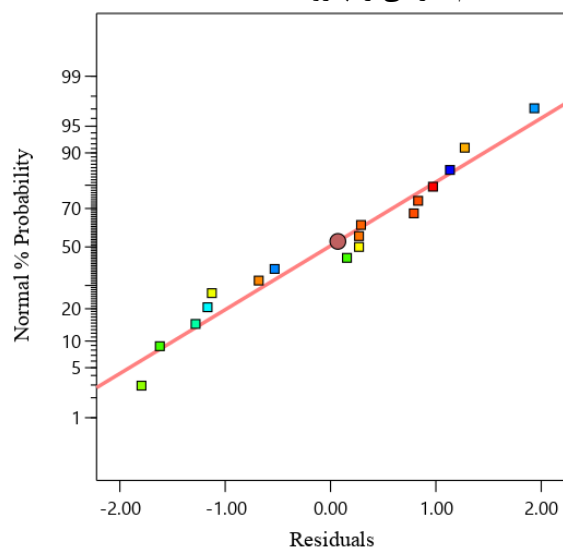
<sup>1</sup> Design of experiment (DOE)

<sup>2</sup> Response surface method (RSM)

<sup>3</sup> Design-Expert

نشان می‌دهد که پارامترهای مدل قابل توجه<sup>۱</sup> هستند. در این حالت A، B، C، A<sup>2</sup>، B<sup>2</sup>، C<sup>2</sup> پارامترهای قابل توجهی شده‌اند. سطح اطمینان ۰/۰۵ درصدی که برای پارامترها در نظر گرفته شده تنها در بازه‌های تعیین شده برای هر پارامتر معتبر است. بدیهی است که اگر خارج از این بازه‌ها مقدار خروجی یعنی جرم لایه‌نشانی شده مورد ارزیابی قرار گیرد خطا بیشتر از مقدار سطح اطمینان ۰/۰۵ خواهد شد و دقت مدل حاضر در پیش‌بینی خروجی کمتر می‌باشد.

مدل ارائه شده قابل توجه شد و lack of fit این مدل نیز غیرقابل توجهی شد که نشان از صحیح بودن مدل ارائه شده دارد. پارامتر R<sup>2</sup> به بررسی صحت مدل ارائه شده می‌پردازد. در واقع پارامتر R<sup>2</sup> کیفیت برازش داده‌های تجربی با مدل ارائه شده توسط نرم‌افزار مشخص می‌کند؛ و بهترین مقدار آن هم برابر با یک است. مقدار R<sup>2</sup> در این مدل برابر ۰/۹۸۹ است که نشان از دقت بالای مدل می‌باشد. شکل ۷ نمودار احتمال طبیعی برای مدل ارائه شده را نشان می‌دهد. نمودار احتمال طبیعی یک روش گرافیکی برای ارزیابی اینکه نشان دهد مجموعه داده‌ها به‌طور معمول توزیع شده است. نقاط داده‌ها برای اینکه به‌طور معمول توزیع شده باشند باید از یک خط مستقیم تقریبی را پیروی کنند.



شکل ۷: نمودار احتمال طبیعی.

شکل ۸ نمودار باقی‌مانده نتایج را برحسب تعداد آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد. این نمودار نقطه‌ای

<sup>1</sup> Significant

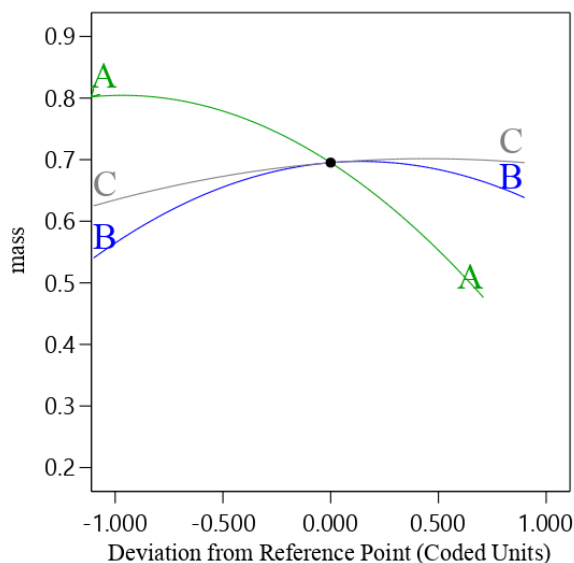
جدول (۲): نتایج آزمایش‌های طراحی آزمایش

شماره آزمایش	A	B	C	جرم لایه‌نشانی
۱	۱	۵	۱۲۰	۰/۶۷
۲	۱	۲/۵	۱۵۰	۰/۸
۳	۱۲	۰	۱۲۰	۰/۲۷
۴	۶/۵	۲/۵	۱۵۰	۰/۷۵
۵	۶/۵	۲/۵	۱۵۰	۰/۷۶
۶	۱۲	۵	۱۲۰	۰/۳۴
۷	۱	۵	۱۸۰	۰/۷۴
۸	۶/۵	۲/۵	۱۵۰	۰/۷۳
۹	۶/۵	۲/۵	۱۲۰	۰/۶۶
۱۰	۱	۰	۱۲۰	۰/۵۷
۱۱	۱۲	۰	۱۸۰	۰/۳۵
۱۲	۶/۵	۵	۱۵۰	۰/۷۱
۱۳	۱	۰	۱۸۰	۰/۶۱
۱۴	۶/۵	۲/۵	۱۸۰	۰/۷۶
۱۵	۱۲	۵	۱۸۰	۰/۴
۱۶	۶/۵	۰	۱۵۰	۰/۵۷
۱۷	۱۲	۲/۵	۱۵۰	۰/۴۵

جدول (۳): تحلیل واریانس

Source	Sum of squares	Mean of square	f-value	p-value
Model	۰/۴۶۹۱	۰/۰۷۸۲	۱۶۱/۱	<۰/۰۰۰۱
A	۰/۲۴۹۶	۰/۲۴۹۶	۵۱۴/۳۵	<۰/۰۰۰۱
B	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴۰	۴۹/۴۷	<۰/۰۰۰۱
C	۰/۰۱۲۲	۰/۰۱۲۲	۲۵/۲۴	۰/۰۰۰۵
A <sup>2</sup>	۰/۰۳۶۶	۰/۰۳۶۶	۷۵/۴۴	<۰/۰۰۰۱
B <sup>2</sup>	۰/۰۲۷۸	۰/۰۲۷۸	۷۵/۳۲	<۰/۰۰۰۱
C <sup>2</sup>	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۷	۵/۵۲	۰/۰۳۹۳
Residual	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۰۵		
Lack of fit	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۰۵	۲/۳۵	۰/۳۳۲۶
Pure error	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۲		
Cor Total	۰/۰۴۷۴			

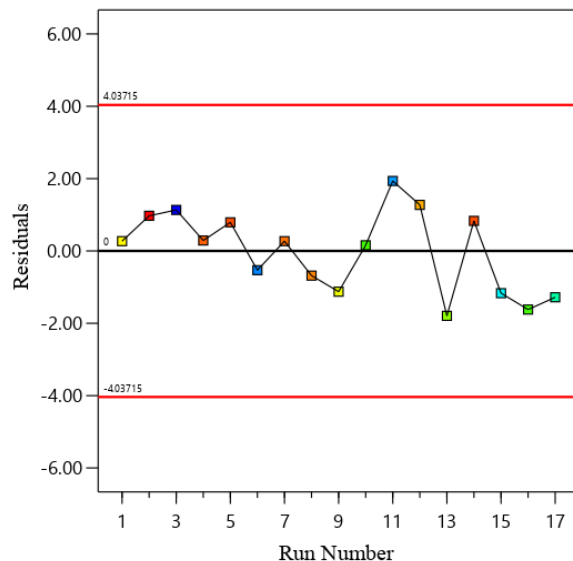
هرچه قدر میزان F بیشتر باشد نشان‌دهنده اثرگذاری بیشتر این پارامتر می‌باشد. همچنین پارامتر آماری مقدار p نیز برای درک بهتر تأثیر هر پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر و نیز تأثیر بر روی خروجی کمک می‌کند. این آزمون در سطح اطمینان ۰/۰۵ صورت گرفته است مقادیر P کمتر از ۰/۰۵



شکل (۹): نمودار تأثیر پارامترهای A، B و C بر روی جرم لایه‌نشانی‌شده.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت حرکت تیغه، مقدار جرم لایه‌نشانی‌شده به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افت پیدا می‌کند. البته این افت جرم لایه نشانی در سرعت‌های بالا بیشتر است. دلیل این اتفاق این است که پودر در سرعت‌های بالا فرصتی برای لایه‌نشانی ندارد و به‌سرعت از روی بستر ساخت عبور می‌کند و لایه نشانی به‌طور بی‌کیفیت انجام می‌شود؛ اما در سرعت‌های پایین یعنی سرعت‌های کمتر از ۵ سانتی‌متر بر ثانیه، پودر فرصت متراکم شدن و در کنار هم قرار گرفتن را دارد و فرآیند لایه‌نشانی بهتر انجام می‌شود و از کیفیت خوبی برخوردار است. برای درک بهتر این موضوع نمودار سه‌بعدی میزان خروجی بر مبنای پارامترهای زاویه زیر تیغه و درصد اضافی پودر در سه سطح از سرعت حرکتی تیغه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با بررسی شکل ۱۰ مشخص می‌شود که زاویه زیر تیغه تأثیر خوبی بر روی کیفیت سطح لایه‌نشانی دارد؛ و با افزایش زاویه زیر تیغه تا حدود ۳ درجه مقدار جرم لایه‌نشانی‌شده افزایش می‌یابد. علت این است که با افزایش زاویه زیر تیغه باعث افزایش گرادیان فشار بر روی پودر می‌شود که این افزایش فشار موجب می‌شود مقدار پودر بیشتری لایه نشانی شود و کیفیت لایه نشانی افزایش یابد. ولی اگر سطح زیر تیغه بیش‌ازاندازه زیاد شود باعث می‌شود پودر زیادی به زیر تیغه در حین فرآیند لایه نشانی برود که

باید به‌صورت تصادفی باشد و پراکنندگی آن‌ها از الگوی خاصی پیروی نکند و بخشی از آن در قسمت منفی و بخشی در قسمت مثبت قرار گیرد. نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۷ و شکل ۸ نشان‌دهنده کفایت مدل به‌دست‌آمده می‌باشد.



شکل (۸): نمودار باقی‌مانده آزمایش‌ها.

از شکل ۹ برای نشان دادن تأثیر هر پارامتر بر روی خروجی استفاده شد. در این نمودار می‌توان تأثیر تقریبی هر پارامتر بر روی خروجی را مشاهده کرد. مطابق این شکل، اگر عوامل B و C در نقاط مرکزی خود باقی بمانند، مقدار خروجی (جرم لایه‌نشانی‌شده) با کاهش عامل A و نزدیک شدن به سطح ۱- افزایش می‌یابد. در شرایط مشابه، خروجی با حرکت پارامتر A به سمت سطح ۱+ کاهش می‌یابد. از آنجاکه شیب پارامتر A بیشتر از شیب پارامترهای B و C است، مقدار خروجی نسبت به تغییرات پارامتر A نسبت به بقیه پارامترها حساس‌تر خواهد بود یعنی پارامترهای سرعت حرکت تیغه (A) از زاویه زیر تیغه (B) و درصد اضافی پودر (C) تأثیر بیشتری بر میزان جرم لایه‌نشانی‌شده دارد. همچنین شیب پارامتر B بیشتر از شیب پارامتر C است یعنی زاویه زیر تیغه تأثیر بیشتری از درصد اضافی پودر بر خروجی خواهد داشت. به‌طور کلی، تأثیر پارامترها بر روی خروجی با رابطه (۱) تنظیم می‌شود.

$$A > B > C \quad (1)$$



همچنین شکل ۱۰ نشان می‌دهد درصد پودر اضافی کمترین تأثیر را بر روی پارامتر خروجی دارد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود زمانی که مقدار پودر ۱۲۰ درصد (در سطح ۱-) حجم مخزن بستر ساخت است کمترین مقدار لایه نشانی را داریم. در این حالت لایه نشانی به‌طور کامل انجام نمی‌شود و در انتهای بستر ساخت مقداری فضای لایه‌نشانی نشده باقی می‌ماند. البته این اتفاق فقط در سرعت‌های خیلی پایین رخ می‌دهد. ولی اگر با همین مقدار پودر در سرعت‌های بالاتر لایه نشانی انجام شود لایه نشانی به‌طور کامل صورت می‌گیرد چون تیغه با سرعت بیشتری حرکت می‌کند و تمام سطح بستر ساخت را پوشش می‌دهد. البته بدیهی است که در سرعت بالاتر پخش پودر کیفیت خوبی ندارد. وقتی مقدار پودر به بیشتر از ۱۵۰ درصد برسد کمبود پودر در سرعت‌های پایین جبران می‌شود. به ازای پودرهای بیشتر از ۱۵۰ درصد مقدار وزن جرم نشانده شده تغییری نکند. دانستن دقیق مقدار پودر برای هر بار لایه‌نشانی با توجه به قیمت بسیار زیاد پودر برای صرفه‌جویی در مصرف پودر می‌تواند از نظر اقتصادی بسیار مهم و تأثیرگذار باشد.

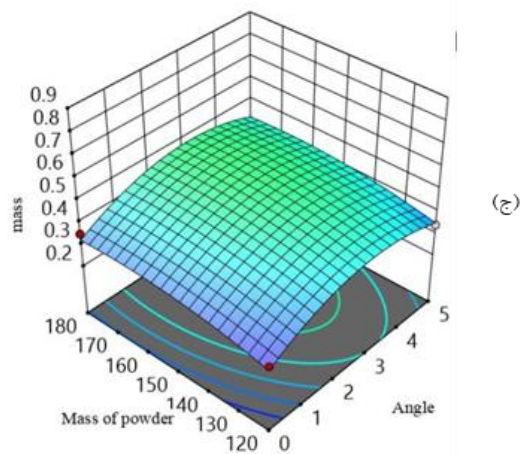
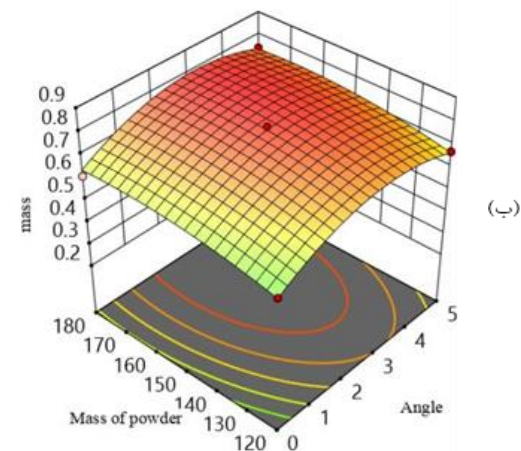
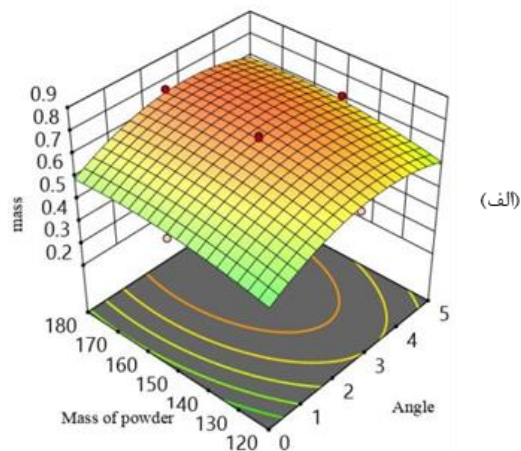
#### ۴-۲- بهینه‌سازی

با توجه به جدول تحلیل واریانس و پارامترهای مؤثر معادله‌ای که توسط نرم‌افزار برای این مدل کدگذاری شده، پیشنهاد شد در رابطه ۲ آمده است:

$$\text{Mass} = 0.74 - 0.15A + 0.05B + 0.037C - 0.119A^2 - 0.099B^2 - 0.034C^2 \quad (2)$$

در معادله (۲) A نشان‌دهنده سرعت حرکتی تیغه، B نشان‌دهنده زاویه زیر تیغه و C نشان‌دهنده جرم اضافی پودر است. از این معادله کدگذاری شده می‌توان برای پیش‌بینی پاسخ در سطوح معین هر عامل استفاده کرد. به‌طور پیش‌فرض، سطوح بالای فاکتورها به‌صورت +۱ و سطوح پایین به‌صورت -۱ کدگذاری می‌شوند. معادله کدگذاری شده برای شناسایی تأثیر نسبی عوامل با مقایسه ضرایب عامل مفید است. در جدول ۴ حالت بهینه پارامترها برای دستیابی به بیشترین جرم لایه‌نشانی شده با توجه به افزایش سرعت چاپ و کاهش پودر مصرفی توسط نرم‌افزار پیشنهاد

این امر موجب افزایش اصطکاک بین پودرها می‌شود که در هنگام لایه نشانی باعث افزایش تخلخل در پودر لایه‌نشانی شده می‌شود.



شکل (۱۰): تأثیر زاویه و درصد پودر در سرعت‌های مختلف: (الف) سرعت ۱ cm/s؛ (ب) سرعت ۶.۵ cm/s؛ (ج) سرعت ۱۲ cm/s.

شد. ملاحظه می‌شود که در کنار دستیابی به بیشترین مقدار جرم لایه‌نشانی، محدودیت افزایش سرعت لایه‌نشانی نیز در حالت بهینه اعمال شد. یکی از مهم‌ترین ضعف‌های پرینترهای سه‌بعدی سرعت تولید پایین آن‌ها است. اگر سرعت لایه‌نشانی با حفظ کیفیت لایه‌نشانی بهبود بخشیده شود، می‌توان تا حدود این ضعف را پوشش داد. در جدول ۴، مقدار  $M$  مقدار پیش‌بینی‌شده جرم لایه‌نشانی در حالت بهینه و مقدار  $m$  هم جرم لایه‌نشانی‌شده تست تجربی در حالت بهینه را نشان می‌دهد. به دلیل اینکه مدل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار یک مدل توان ۲ است، طبیعتاً خروجی آن می‌تواند چندگانه باشد؛ اما چون در بهینه‌سازی علاوه بر در نظر گرفتن بیشترین مقدار جرم لایه‌نشانی‌شده، مقدار سرعت نیز در بیشترین حالت ممکن و درصد اضافی پودر در کمترین حالت ممکن در نظر گرفته شد که در این حالت نرم‌افزار یک حالت را به‌عنوان حالت بهینه ارائه داده است. همان‌طور که از جدول ۴ ملاحظه می‌شود بیشترین جرم لایه‌نشانی‌شده به کمک مدل به‌دست‌آمده  $0/811$  گرم پیش‌بینی شد که در این حالت سرعت برابر با  $2/78$  سانتی‌متر بر ثانیه، زاویه تیغه برابر با  $3/1$  درجه و میزان پودر اولیه  $159$  درصد باید باشد. برای صحت‌سنجی مدل و حالت بهینه پیش‌بینی‌شده، آزمایش تجربی بر مبنای پارامترهای حالت بهینه انجام شد که جرم لایه‌نشانی‌شده در این حالت  $0/83$  گرم اندازه‌گیری شد؛ یعنی  $0/029$  گرم بیشتر از مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل که نشان می‌دهد خطای مدل به‌دست‌آمده  $2/2\%$  است. بدیهی است که خطای به‌دست‌آمده برای مدل در بازه‌های تعیین‌شده برای پارامترها می‌باشد و اگر از این مدل برای پیش‌بینی مقادیری از پارامترها خارج از بازه‌های تعیین‌شده استفاده شود، خطای آن بیشتر خواهد شد.

جدول (۴): حالت بهینه پارامترها

C	B	A	M	m
۱۵۹	۳/۱	۲/۷۸	۰/۸۱۱	۰/۸۳

## ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه در روش‌های ساخت افزایشی بستر پودر عدم تخلخل در لایه‌نشانی پودر امر مهمی در کیفیت قطعات تولیدشده می‌باشد بنابراین بررسی میزان جرم لایه‌نشانی‌شده

- [9] Kruth J-P, Leu M-C, Nakagawa TJCA. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *Journal of CIRP Annals* 1998;47(2):525-40.
- [10] Song Y, Yan Y, Zhang R, Xu D, Wang F. Manufacture of the die of an automobile deck part based on rapid prototyping and rapid tooling technology. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002;120(1-3):237-42.
- [11] Jain PK, Pandey PM, Rao P. Effect of delay time on part strength in selective laser sintering. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009;43(1):117-26.
- [12] Bourell DL, Watt TJ, Leigh DK, Fulcher BJ. Performance limitations in polymer laser sintering. *Physics Procedia*. 2014;56:147-56.
- [13] Yap CY, Chua CK, Dong ZL, Liu ZH, Zhang DQ, Loh LE, et al. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*. 2015;2(4):041101.
- [14] Sachs EM. Powder dispensing apparatus using vibration. Google Patents; 2000.
- [15] Karapatis N, Egger G, Gygax P, Glardon R, editors. Optimization of powder layer density in selective laser sintering. 1999 International Solid Freeform Fabrication Symposium; 1999.
- [16] Ganeriwala R, Zohdi TI. Multiphysics modeling and simulation of selective laser sintering manufacturing processes. *Procedia CIRP*. 2014;14:299-304.
- [17] Van der Schueren B, Kruth J-PJ. Powder deposition in selective metal powder sintering. *Rapid Prototyping Journal*. 1995;1(3):23-31.
- [18] Parteli EJ, Pöschel TJ. Particle-based simulation of powder application in additive manufacturing. *Powder Technology*. 2016;288:96-102.
- [19] Fouda YM, Bayly AE. A DEM study of powder spreading in additive layer manufacturing. *Granular Matter*. 2020;22(1):1-18.
- [20] Han Q, Gu H, Setchi R. Discrete element simulation of powder layer thickness in laser additive manufacturing. *Powder Technology*. 2019;352:91-102.
- [21] Nan W, Ghadiri M. Numerical simulation of powder flow during spreading in additive manufacturing. *Powder Technology*. 2019; 342:801-7.
- [22] Schmid M, Amado A, Wegener K, editors. Polymer powders for selective laser sintering (SLS). AIP Conference proceedings; 2015: AIP Publishing LLC.

یعنی ۰/۰۲۹ گرم بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل که نشان می‌دهد خطای مدل به دست آمده ۲/۲٪ است. یکی از ضعف‌های پرینتر سه‌بعدی سرعت پایین آن‌ها است در حالت بهینه سرعت را حدود ۲/۷۸ سانتی‌متر بر ثانیه رسانده شد؛ و این سرعت حدود سه برابر سرعت حد پایین است. همچنین مقدار بهینه‌ای برای درصد پودر اضافی انتخاب شد تا در مقدار پودر مصرفی برای هر بار صرفه‌جویی شود و از هزینه‌های اضافی جلوگیری کند.

## ۶-مراجع

- [1] Abidaryan S, Barmouz M, Hedayati SK. Effect of infill percentage and raster angle in fused deposition modeling (FDM) process on shape memory properties of poly (lactic acid) and comparison with compression molding. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020;7(5):14-23.
- [2] Wohlers T. Additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report. 2010.
- [3] Brandt M. Laser additive manufacturing: materials, design, technologies, and applications. 2016.
- [4] Chua CK, Leong KF, Lim CS. Rapid prototyping: principles and applications (with companion CD-ROM): World Scientific Publishing Company; 2010.
- [5] Mashhadi M, Hamzeloo SR, Kadkhodapour J. Study of the Electrochemical Corrosion Rate of Medical Implants of Titanium and Stainless Steel Made by Machining and selective laser melting under Different Surface Conditions. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2018;4(2):24-38.
- [6] Thomas CL, Gaffney TM, Kaza S, Lee CH, editors. Rapid prototyping of large scale aerospace structures. 1996 IEEE Aerospace Applications Conference Proceedings; 1996: IEEE.
- [7] Giannatsis J, Dedoussis V. Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009;40(1):116-27.
- [8] Guo N, Leu M.C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2013;8(3):215-48.

- [23] Weidinger J, Muller F, Pfefferkorn F. Device and method for a layerwise manufacturing of a 3-dimensional object from a building material in powder form. Google Patents; 2015.
- [24] Kilickap E, Huseyinoglu M, Yardimeden A. Optimization of drilling parameters on surface roughness in drilling of AISI 1045 using response surface methodology and genetic algorithm. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011;52(1):79-88.
- [25] Hosseinzadeh M, Ghoreishi M, Narooei K, Structures. An investigation into the effect of thermal variables on the 3D printed shape memory polymer structures with different geometries. Journal of Intelligent Material Systems and Structures 2021;33(5):715-26.
- [26] Mousavi MV, Khoramishad H. The effect of hybridization on high-velocity impact response of carbon fiber-reinforced polymer composites using finite element modeling, Taguchi method and artificial neural network. Aerospace Science and Technology. Aerospace Science and Technology. 2019;94:105393.



## Experimental Study and Optimization of the Powder Coating Layer in the Selective Laser Sintering Process

Mohammadreza Elhami<sup>1\*</sup>, Majid Barzegar<sup>2</sup>, Mohammadhadi Hosseinzadeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

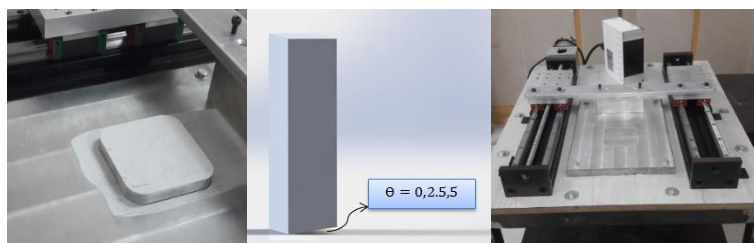
<sup>2</sup> M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Researcher, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

### HIGHLIGHTS

- The powder spreader for the SLS method was designed and built to experimentally study the amount of coated powder.
- The central composite design method was used to investigate the effect of the percentage of used powder, the speed, and the angle of the blade on the amount of mass of a layer.
- With the use of obtained experimental model, the mass of coated layer was optimized.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 20 July 2022

Received in revised form: 22 July 2022

Accepted: 19 August 2022

Available online: 18 October 2022

\*Correspondence:

melhami@ihu.ac.ir

#### How to cite this article:

M. Elhami, M. Barzegar, M. Hosseinzadeh. Experimental Study and Optimization of the Powder Coating Layer in the Selective Laser Sintering Process. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(4):119-131.

#### Keywords:

Additive manufacturing  
Selective laser sintering  
Blade powder dispersion  
Central composite design

### ABSTRACT

Selective laser sintering is one of the methods of additive manufacturing based on powder bed which is widely used in various industries today. In this process, the amount of laminated mass has a high impact on reducing the porosity and quality of the final parts produced. For this purpose, in this study, a mechanism was designed and developed to investigate and achieve the maximum amount of laminated mass in a laminating process. The optimal state was obtained using the central composite design method. The results show that the parameters of blade velocity, angle under blade, and excess powder percentage have a greater effect on the amount of laminated mass, respectively. The optimized laminated mass was predicted by the experimental model to be 0.811 g, in which case the velocity is 2.78 cm / s, the blade angle is 3.1 ° and the initial powder content is 159%. To validate the model, the experimental experiment was performed based on the parameters of the optimal state, in which the laminated mass was measured 0.83 g, which shows that the error of the obtained model is 2.2%.

