

بهینه‌سازی با هدف بهترین زبری سطح و چگالی نسبی در فرایند ساخت افزایشی آلیاژ Ti6Al4V

امیرحسین قاسمی، ولی اله پناهی‌زاده*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

کلمات کلیدی:

ساخت افزایشی

چگالی نسبی

زبری سطح

ذوب بستر پودر

الگوریتم ژنتیک

خلاصه: یکی از پرکاربردترین روش‌های مدل‌سازی سریع، ذوب بستر پودری با استفاده از پرتوی لیزر است. متغیرهای متعددی در ساخت به این روش وجود دارد که می‌توان به قدرت دستگاه، سرعت لیزر، زاویه چاپ و فاصله دو مسیر متوالی به عنوان مهمترین موارد نام برد. اعمال تغییر در موارد یاد شده تاثیر مستقیم بر عیوب و کیفیت نمونه ساخته شده دارد. فرایندهای تکمیلی مانند عملیات حرارتی نیز برای بهبود خواص و عملکرد قطعه به کار گرفته می‌شوند. انتخاب مناسب و درست متغیرهای ساخت و عملیات تکمیلی علاوه بر بهبود خواص قطعه می‌تواند سبب کاهش هزینه‌ها و زمان ساخت قطعه شود. در این مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیک متغیرهای بهینه برای دستیابی به بیشترین چگالی نسبی و کمترین زبری سطح معرفی می‌شوند. نتایج بهینه سازی حاکی از این است که بهترین نتایج با استفاده از، توان لیزر در محدوده ۱۰۲ تا ۱۰۵ وات، سرعت لیزر در محدوده ۶۲۳ تا ۶۳۰ میلی‌متر بر ثانیه، فاصله دو مسیر متوالی در محدوده ۷۶ تا ۷۳ میکرون و دمای عملیات حرارتی ۶۳۸ تا ۶۴۰ درجه سانتی گراد به دست خواهد آمد.

۱- مقدمه

اولین دستگاه‌های ساخته شده قابلیت چاپ پلیمرها را داشتند و با توسعه این تکنولوژی قابلیت چاپ فلزات نیز فراهم شد [۴]. نمونه‌های فلزی به روش‌های مختلفی قابل ساخت هستند ولی از بین روش‌های موجود ذوب بستر پودر با استفاده از پرتوی لیزر^۶ و پرتوی الکترونی^۷، اکستروژن ماده^۸ و جت ماده^۹ استفاده بیشتری دارند. چاپگرهای ۳ بعدی فلزی که به روش ذوب بستر پودر با استفاده از پرتوی لیزر کار می‌کنند، بر اساس اندازه و کاربرد به ۳ دسته تحقیقاتی، نیمه صنعتی و صنعتی قابل دسته بندی هستند، نمونه‌های تحقیقاتی با محفظه‌ی کوچکتر و توان کمتر نسبت به نمونه‌های صنعتی ساخته می‌شوند [۵]. فرایند ذوب بستر پودری با استفاده از پرتوی لیزر توسط محققین

تولید افزایشی^۱، شامل ساخت محصول به صورت لایه به لایه می‌باشد و اولین بار در سال ۱۹۸۷ میلادی یک مدل تجاری از آن که بر اساس لایه گذاری با نور ماورابنفش کار می‌کرد معرفی شد. روش مذکور استریولیتوگرافی^۲ نام داشت [۱]. سه مدل تجاری دیگر که بر اساس روش متمایزی کار می‌کردند، در سال ۱۹۹۱ معرفی شدند. این روش‌ها با نام‌های ساخت از فیلمان ذوب شده^۳، پخت زمینه جامد^۴ و روش لایه‌گذاری صفحه‌ای^۵ معرفی شده بودند [۲ و ۳].

- 1 Additive manufacturing
- 2 Stereolithography
- 3 Filament Deposition Method (FDM)
- 4 Solid Bed Quiring (SBQ)
- 5 Plane Layering (PL)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: v.panahzadeh@sru.ac.ir

- 6 Laser Beam Powder Bed Fusion (LB-PBF)
- 7 Election Beam Powder Bed Fusion (EB-PBF)
- 8 Material Extrusion (MX)
- 9 Material Jetting (MJ)



بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است و کاربردهای زیادی در صنایع مختلف مانند خودروسازی، پزشکی، هوا فضا و نظامی برای این روش گزارش شده است [۶-۸]. در بین آلیاژهای فلزی، محققین توجه زیادی به آلیاژهای $Ti6Al4V$ [۹]، $IN718$ ، $SS316$ [۱۰ و ۱۱] و $Al6061$ [۱۲] داشته‌اند. در بین آلیاژهای نام برده $Ti6Al4V$ در ساخت ایمپلنت‌ها و اعضای مصنوعی (پروتز) بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، دلیل این امر سازگاری این آلیاژ با بدن انسان می‌باشد [۱۳].

قطعات ساخته شده با روش تولید افزایشی خالی از عیب نبوده و عوامل متعددی بر مقدار عیوب و نوع عیوبی که حین فرایند در قطعه ایجاد می‌شوند تأثیر گذارند. عیوبی که معمولاً حین فرایند ساخت در قطعات ایجاد می‌شوند شامل، فشار پس زدن، ترک، جای خالی [۱۴]، کروی شدن [۱۰]، جای کلید و ذرات باقیمانده [۱۵] می‌باشد. برخی از این عیوب سطحی و برخی در ذات قطعه به صورت نهان قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری چگالی نسبی روش موثری برای پی بردن به مقدار عیوب داخلی قطعه می‌باشد، افزایش چگالی نسبی، به معنی کاهش عیوب و تنش داخلی و همچنین بهبود عملکرد قطعه ساخته می‌باشد [۱۸-۱۶]. گونگ و همکاران [۱۹] تأثیر قدرت لیزر و سرعت حرکت آن را در فرایند ذوب بستر پودری با استفاده از پرتوی لیزر بر چگالی نسبی قطعه تولید شده بررسی نموده و نتایج را با روش ذوب بستر پودری با استفاده از پرتوی الکترونی مقایسه نمودند، آن‌ها دریافتند که افزایش سرعت لیزر سبب کاهش چگالی انرژی ورودی به قطعه و در پی آن کاهش چگالی نسبی (افزایش عیوب) می‌گردد. ویلسون و بیس [۲۰] تأثیر بار گذاری چند محوری را بر نمونه ساخته شده از جنس $Ti6Al4V$ و روش ذوب بستر پودری با استفاده از پرتوی لیزر بررسی نموده و دریافتند که نمونه ساخته شده به این روش به صورت ترد می‌شکند. ویلاردل و همکاران [۲۱] تأثیر سرعت حرکت لیزر را بر شکل‌گیری عیب جای کلید و زبری سطح بررسی نمودند، نتایج فعالیت آن‌ها حاکی از این است که افزایش سرعت سبب کاهش عمق نفوذ لیزر و همچنین کاهش عیب شده ولی از طرفی سبب افزایش زبری سطح می‌گردد. معصومی و همکاران [۲۲] با شبیه سازی اجزای محدود تأثیر سرعت حرکت لیزر و قدرت لیزر را بر توزیع حرارتی سطح بررسی نمودند. فاکس و همکاران، تأثیر قدرت لیزر و سرعت حرکت آن را بر زبری سطح بررسی نموده و دریافتند

که، ذراتی که به صورت جزئی ذوب می‌شوند تأثیر چشمگیری بر زبری سطح قطعه دارد. با توجه به مطالعات انجام شده توسط گیبسون و همکاران [۲۳ و ۲۴] مهم‌ترین متغیرهای فرایند ذوب بستر پودری توسط پرتوی لیزر در ساخت نمونه‌های از جنس آلیاژ $Ti6Al4V$ که تأثیر مستقیم بر چگالی نسبی و زبری سطح قطعه دارند، عبارتند از: قدرت لیزر، سرعت حرکت لیزر، فاصله دو مسیر متوالی و زاویه چاپ. نیاز به عملیات نهایی (پس پردازش) صرف نظر از روش مورد استفاده برای ساخت قطعات، امری ضروری است. عملیات تکمیلی مانند ماشین‌کاری [۲۵ و ۲۶]، عملیات حرارتی [۲۹-۲۷]، اعمال فشار ایستا در حالت داغ [۳۰ و ۳۱]، ساچمه زنی [۳۲] و کوبش با پرتوی لیزر [۳۳] برای این منظور استفاده شده‌اند. جوانکو و همکاران [۳۴]، تأثیر عملیات حرارتی در دماهای مختلف را بر خواص مکانیکی قطعه ساخته شده از آلیاژ $Ti6Al4V$ را بررسی نموده و دریافتند که خواص مکانیکی با افزایش دمای عملیات حرارتی بهبود خواهد یافت، و این امر به واسطه‌ی کاهش عیوب قطعه و تبدیل فاز β به فاز α به واسطه‌ی عملیات حرارتی می‌باشد.

بهینه‌سازی فرایند ذوب بستر پودری با استفاده از پرتوی لیزر مورد مطالعه قرار گرفته است بریکا و همکاران [۳۵] جهت ساخت نمونه، فتوتی و همکاران [۳۶] متغیرهای بهینه برای دستیابی به بهترین زبری سطح، ابوطالب و همکاران [۳۷] قدرت لیزر، ضخامت لایه، و فاصله دو مسیر متوالی را به منظور دستیابی به بهترین خواص مکانیکی و بیشترین چگالی نسبی بررسی نمودند.

با توجه به مطالب بیان شده می‌توان دریافت که در مورد بهینه‌سازی چند هدفه فرایند ذوب بستر پودری با استفاده از پرتوی لیزر تحقیقاتی صورت نگرفته است. اهمیت بهینه‌سازی فرایند از هیچ کس پوشیده نیست، چرا که دستیابی به متغیرهای بهینه در هر فرایندی سبب کاهش هزینه‌ها افزایش بهره‌وری و صرفه جویی در منابع خواهد شد [۴۰-۳۸]. در این تحقیق بهینه‌سازی دو هدفه با هدف دستیابی به بهترین متغیرهای فرایند شامل قدرت لیزر، سرعت حرکت لیزر، فاصله دو مسیر متوالی، زاویه چاپ و همچنین عملیات حرارتی، برای دستیابی به بهترین زبری سطح و چگالی نسبی به صورت همزمان با استفاده الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب انجام پذیرفته، و مقادیر بهینه گزارش شده است، سپس نتایج بهینه‌سازی

1 Post Processing
2 Nondomination Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)

جدول ۱. متغیرهای مورد مطالعه در آزمایشات گیبسون و همکاران

Table 1. Gibson et al. studies process parameter

سطح ۵	سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	
۱۱۰	۱۰۵	۱۰۰	۹۵	۹۰	توان لیزر [W]
۸۰۰	۷۵۰	۷۰۰	۶۵۰	۶۰۰	سرعت لیزر [mm.s^{-1}]
۸۵	۸۰	۷۵	۷۰	۶۵	فاصله دو مسیر متوالی [μm]
۷۲	۶۰	۴۵	۴۰	۳۶	زاویه چاپ [$^{\circ}$]
۱۰۵۰	۹۲۵	۷۵۰	۶۰۰	بدون عملیات حرارتی	دمای عملیات حرارتی [$^{\circ}\text{C}$]

آن‌ها برای دستیابی به بهترین چگالی نسبی نیاز به قدرت لیزر ۱۱۰ وات، سرعت لیزر ۷۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، فاصله دو مسیر متوالی ۷۵ میکرون، زاویه ساخت ۴۵ درجه و عملیات حرارتی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، و برای دستیابی به بهترین زبری سطح نیاز به قدرت لیزر ۱۰۵ وات، سرعت لیزر ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، فاصله دو مسیر متوالی ۷۰ میکرون، زاویه ساخت ۶۰ درجه و عملیات حرارتی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بر اساس تحلیل مقدار میانگین، مقدار بهینه از هر متغیر مورد مطالعه (متغیر مستقل) برای دستیابی به بهترین نتیجه برای هر خروجی (متغیر وابسته) قابل تعیین است، البته باید به این نکته توجه نمود که نتایج تحلیل مقدار میانگین بر اساس مقادیر معرفی شده برای هر متغیر مستقل و رابطه آن با متغیر وابسته ارائه می‌شود و ممکن است بهترین پاسخ مربوط به مقادیر دیگری از متغیرهای مستقل باشد. نکته دیگری که باید به آن توجه نمود، این است که سطوح بهینه از متغیرهای معرفی شده در تحلیل مقدار میانگین، مربوط به دستیابی به بهترین جواب به صورت منفرد هستند، به بیان دیگر، در صورتی که هدف بررسی شرایط مربوط به بهترین زبری سطح و چگالی نسبی به صورت همزمان باشد، نمی‌توان از تحلیل مقدار میانگین استفاده نمود. یکی از راهکارهای موجود برای بررسی این مساله، استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه می‌باشد.

۲-۲- روش بهینه‌سازی

مراحل بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. در مرحله اول تعریف مساله صورت می‌پذیرد، اهداف، متغیرها و محدوده‌ی مجاز برای آن‌ها، قیدها و دیگر موارد در این مرحله شناسایی و تعریف می‌شوند. در مرحله بعدی یک جمعیت تصادفی

روش الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب و مینی‌تب به هم مقایسه شده است. بهترین حالت برای چگالی نسبی بیشینه مقدار آن [۴۱] و بهترین حالت برای زبری سطح کمترین مقدار برای آن است چرا که نیاز به عملیات پس پردازش را از بین می‌برد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- متغیرهای مورد مطالعه

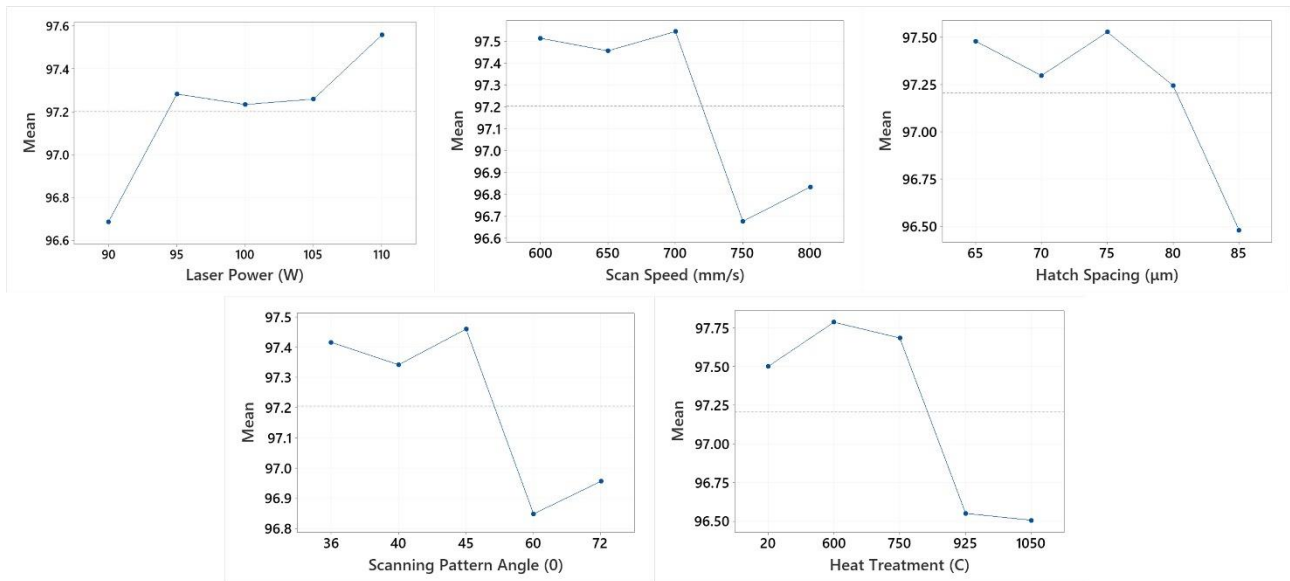
گیبسون و همکاران در مطالعات خود از روش طراحی آزمایش تاگوچی^۱ با آرایه ال-۲۵ استفاده نموده‌اند. آن‌ها تأثیر توان لیزر، سرعت لیزر، فاصله دو مسیر متوالی، زاویه چاپ و عملیات حرارتی را بر زبری سطح و چگالی نسبی بررسی نمودند [۲۳، ۲۴]. در روش ال-۲۵ تاگوچی می‌توان تأثیر ۵ متغیر (توان لیزر، سرعت لیزر، فاصله دو مسیر متوالی، زاویه چاپ و عملیات حرارتی) را در ۵ سطح مختلف که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند بر روی خروجی‌ها بررسی نمود. خروجی‌های مورد بررسی در مطالعات آن‌ها شامل زبری سطح و چگالی نسبی آلیاژ Ti6Al4V می‌باشد.

مقادیر انتخاب شده برای هر سطح بر اساس آزمایش‌های اولیه صورت پذیرفته، مقادیر کمتر یا بیشتر از این محدوده سبب ایجاد عیوب و یا عدم ساخت قطعه می‌شود. نتایج تحقیقات آن‌ها شامل تحلیل مقدار میانگین و آنالیز سطح تأثیر بوده است.

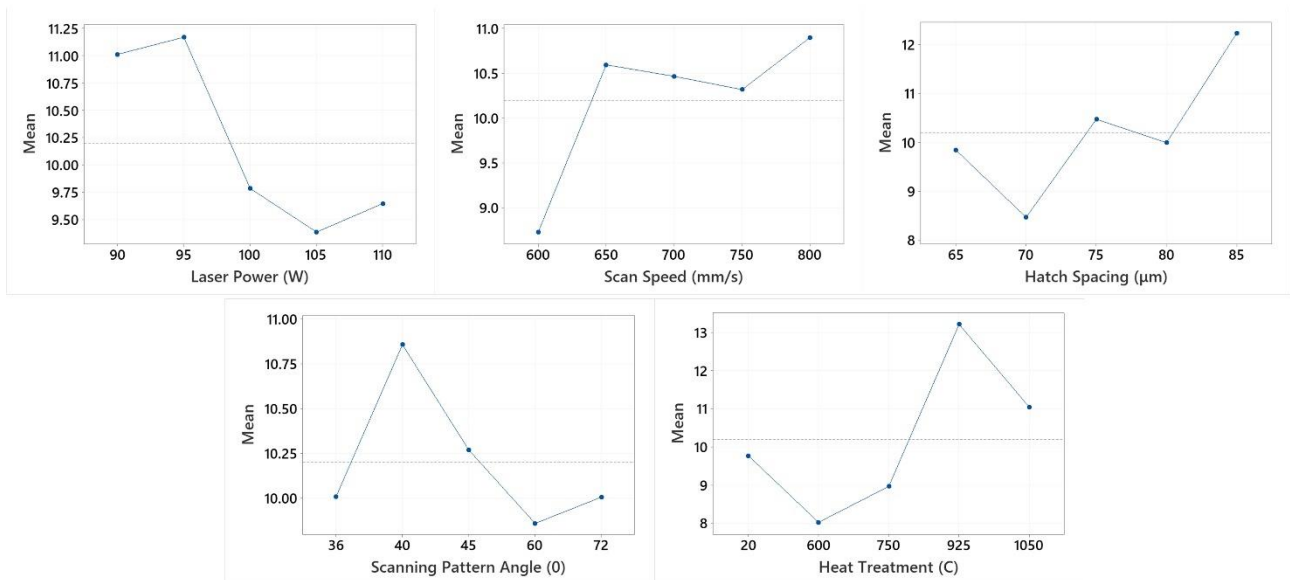
شکل ۱ تحلیل مقدار میانگین را برای چگالی نسبی و زبری سطح با توجه به دستاوردهای مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد.

در شکل ۱-الف بالاترین نقاط مربوط به دستیابی به بهترین پاسخ (بیشترین چگالی نسبی) بوده و در شکل ۱-ب پایین‌ترین نقاط منجر به دستیابی به بهترین زبری سطح می‌شود. با توجه به نتایج تحقیقات

1 Taguchi
2 L25



الف



ب

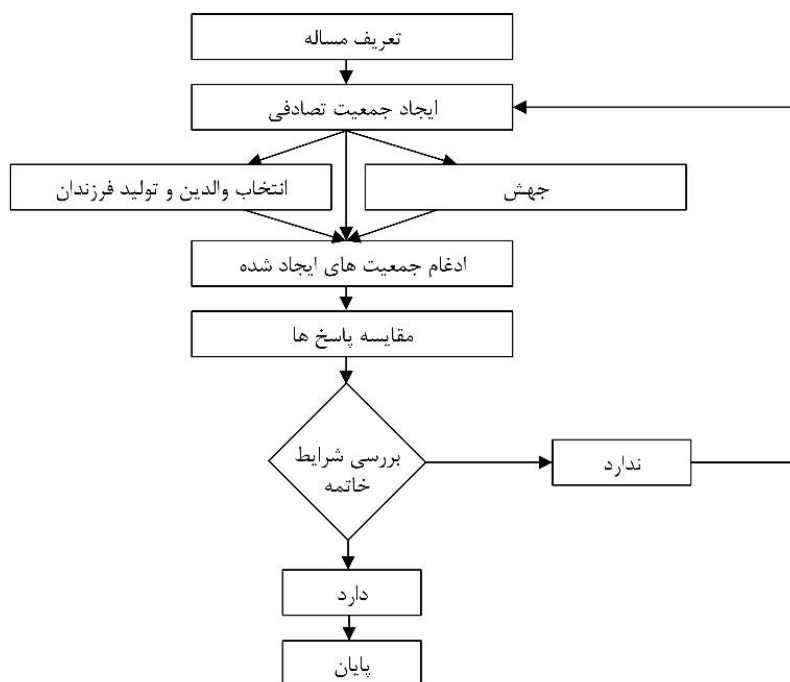
شکل ۱. تحلیل مقدار میانگین الف) چگالی نسبی [۲۴]، ب) زبری سطح [۲۳]

Fig. 1. Mean value analysis (A) Relative density [24] , (B) Surface roughness [23]

انتخاب می‌شوند. پس از این مرحله شرایط خاتمه بررسی می‌شود در صورتی که شرایط خاتمه محقق شده باشد، نتایج گزارش شده و در غیر اینصورت جمعیت انتخاب شده به مرحله تولید فرزندان رفته و همین چرخه مجدداً تکرار می‌شود. این فرایند تا زمانی که شرایط خاتمه محقق شود ادامه خواهد یافت.

همانطور که در بخش قبلی بیان شد، با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه می‌توان بهترین متغیرهای فرایند را برای

بر اساس متغیرها و با توجه به محدوده‌ی مجاز آن‌ها انتخاب شده و پاسخ‌های مربوط به آن‌ها ایجاد می‌شود، در مرحله بعدی بخشی از جمعیت اولیه به عنوان والد انتخاب شده و بر اساس آن‌ها فرزندان‌ی ایجاد می‌شوند و پاسخ‌های متناظر با فرزندان ایجاد می‌گردد، در مرحله بعدی، بخشی از جمعیت انتخاب شده و فرایند جهش روی آن‌ها انجام می‌شود و پاسخ‌های موارد جهش یافته ایجاد می‌شوند، در مرحله بعد هر ۳ جمعیت با هم در یک مجموعه قرار گرفته و بهترین آن‌ها



شکل ۲. مراحل حل مساله در الگوریتم ژنتیک
Fig. 2. Genetic algorithm solution flow chart

را به صورت مفهومی نشان می‌دهد. همانطور که در قبل نیز اشاره شده پاسخ‌ها در روش استفاده از الگوریتم‌های تکاملی به صورت تدریجی و در نسل‌های مختلف به وجود می‌آیند، در نتیجه، ایجاد پاسخ‌ها بهتر در نسل‌های بعدی در اثر ایجاد فرزندان و یا جهش امری طبیعی است، و به محض پیدایش این دست پاسخ‌ها خط پارتوی جلویی جابه‌جا شده و ارزیابی دیگر پاسخ‌ها نیز بر اساس پارتوی جدید صورت می‌پذیرد. در نهایت پس از پایان مراحل و یا تحقق شرایط خاتمه مساله، بهترین پاسخ‌ها به صورت خروجی ارائه داده می‌شوند.

۳-۲- توابع هدف

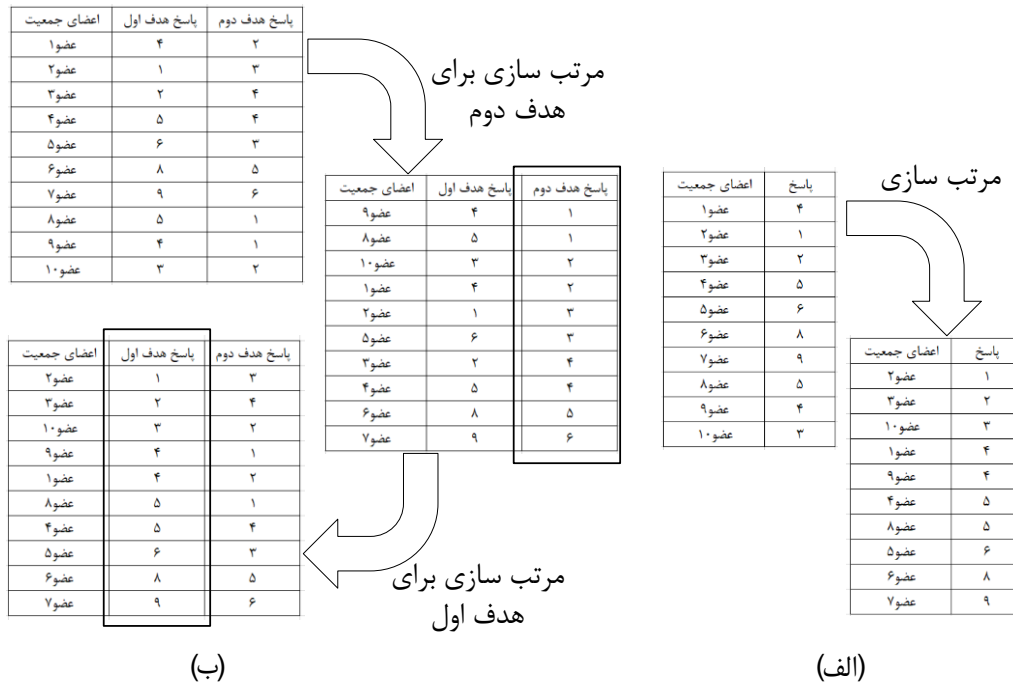
در بخش قبلی، روند بهینه‌سازی در مورد مسائل دو هدفه توضیح داده شد. در این بخش تعریف مساله بهینه‌سازی ۲ هدفه به منظور تعیین بهترین متغیرهای فرایند (قدرت لیزر، سرعت حرکت لیزر، فاصله دو مسیر متوالی، زاویه چاپ و عملیات حرارتی) به صورتی که بهترین زبری سطح (کمترین) و چگالی نسبی (بیشترین) به صورت همزمان به دست آیند انجام می‌شود، برای این منظور از نتایج تحقیقاتی که توسط گیبسون و همکاران [۲۳ و ۲۴] ارائه شده، استفاده شده است. توابع هدف، محدوده متغیرها، تعیین درصد اعضای انتخاب شده برای والدین و جهش در این بخش معرفی شده و در بخش بعدی

دستیابی به زبری سطح کمتر و چگالی نسبی بیشتر شناسایی نمود. در این مقاله از نرم افزار متلب^۱ نسخه ۲۰۱۴ استفاده شده است. مراحل انجام بهینه‌سازی به صورت چند هدفه شامل، تعیین توابع هدف، ایجاد پاسخ‌های تصادفی بر اساس متغیرهای ورودی و توابع هدف، مقایسه پاسخ‌های ایجاد شده و انتخاب تعداد مشخصی از بهترین آن‌ها می‌باشد، این عمل برای نسل‌های متمادی انجام شده و در هر نسل^۲ پاسخ‌هایی که بهتر باشند جایگزین موارد قبلی می‌شوند، در نهایت پس از اتمام فرایند تولید نسل‌ها، متغیرهای مربوط به بهترین پاسخ‌ها به عنوان پاسخ نمایش داده می‌شوند [۳۷ و ۴۲ و ۴۳].

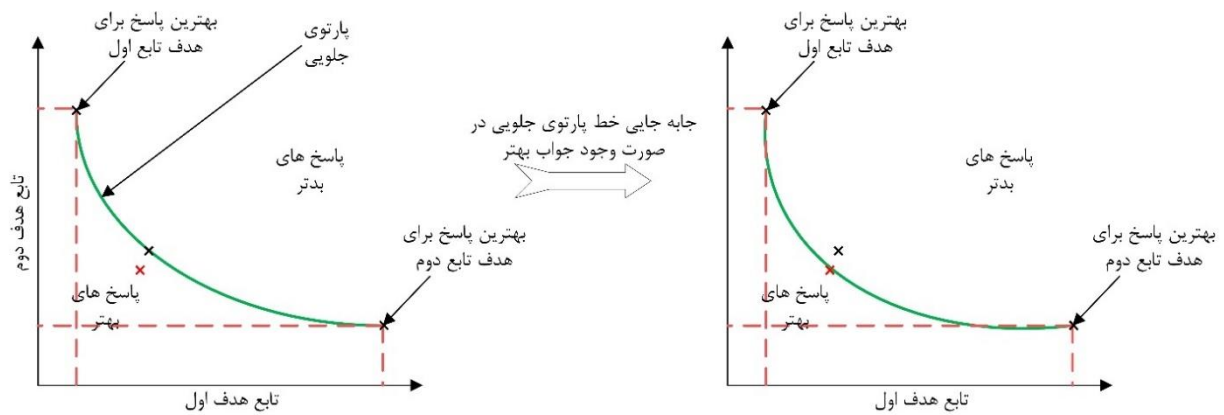
در مسائل بهینه‌سازی تک هدفه پس از ایجاد جمعیت، تولید فرزندان و جهش، مبنای مقایسه پاسخ‌ها مرتب‌سازی آن‌ها از کمترین تا بیشترین مقدار آن‌ها بر اساس تابع هزینه است، ولی در مسائل چند هدفه، به دلیل وجود چند تابع هدف مرتب‌سازی برای هر تابع یک بار انجام می‌شود. شکل ۳ مبنای مقایسه پاسخ‌ها و انتخاب بهترین پاسخ‌ها را در دو حالت تک هدفه و دو هدفه نشان می‌دهد.

مرتب‌سازی با این روش سبب شکل‌گیری مجموعه‌ای از بهترین پاسخ‌ها می‌شود که به آن پارتو جلویی^۳ می‌گویند. شکل ۴ این مساله

1 MatlabV2014
 2 Iteration
 3 Pareto Front



شکل ۳. مرتب سازی، (الف) مساله تک هدفه، (ب) مساله دو هدفه
 Fig. 3. Sorting, (A) Single object problem, (B) Multi object problem.

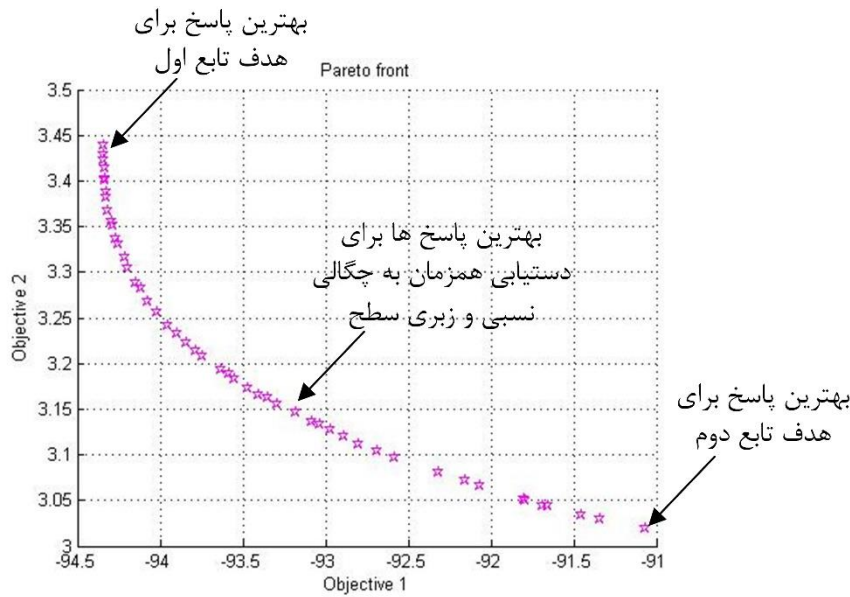


شکل ۴. شماتیک شکل گیری خط پارتوی جلویی در مسائل ۲ هدفه
 Fig. 4. Schematic of forming pareto front in multi object problem

جدول ۲. متغیرهای مساله و محدوده آنها

Table 2. Problem parameter and ranges

نام متغیر	واحد	حد پایین	حد بالا	علامت اختصاری
قدرت لیزر	[W]	۹۰	۱۱۰	LP
سرعت لیزر	[mm/s]	۶۰۰	۸۰۰	SS
فاصله دو مسیر متوالی	[mm]	۶۵	۸۵	HS
زاویه	[°]	۳۶	۷۵	SP
دمای عملیات حرارتی	[°C]	۶۰۰	۱۰۵۰	HT
زبری سطح	[mm]	-	-	Ra
چگالی نسبی	[%]	-	۱۰۰	RD



شکل ۵. نتیجه بهینه‌سازی (پارتو جلویی) هدف اول چگالی نسبی، هدف دوم زبری سطح

Fig. 5. Optimization results (Pareto front line) First object relative density, Second object surface roughness

و کمینه شدن زبری سطح مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. محدوده متغیرهای مورد استفاده در تحقیقات گیبسون و همکاران در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

۷۰ درصد جمعیت به عنوان والدین برای تولید نسل جدید و ۴۰ درصد به عنوان اعضای منتخب برای جهش انتخاب می‌شوند. تابع انتخاب رقابتی برای انتخاب والدین و توزیع یکنواخت با نرخ ۰,۰۲ برای جهش در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج، بحث و بررسی

پارتوی جلویی محاسبه شده بر اساس نتایج الگوریتم ژنتیک در شکل ۵ نشان داده شده است. تمامی نقاط نشان داده شده می‌توانند به عنوان پاسخ مناسب در نظر گرفته شوند. در شکل ۵ نتایج مربوط به تعداد ۵۰ پاسخ بهتر ارائه می‌دهد. در بین تمام کاندیداهای معرفی شده برای بهترین پاسخ مواردی که جدول ۳ ارائه شده‌اند، به دیگر جواب‌ها ارجحیت دارند.

با توجه به جدول ۳ همسایگی دقیقتری از مقادیر مربوط به متغیرهای مستقل مشخص می‌شود که این متغیرها در محدوده مقادیر معرفی شده توسط تحلیل مقدار میانگین روش تاگوچی است. با استفاده از متغیرهای معرفی شده می‌توان قطعه‌ای با چگالی نسبی بالا و زبری سطح مناسب تولید نمود.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی که توسط نرم افزار متلب ارائه می‌شود مورد بررسی قرار می‌گیرد. رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته به صورت رابطه‌های (۱) و (۲) به ترتیب برای چگالی نسبی و زبری سطح تخمین زده می‌شود.

$$RD = \exp(-19.2161 + 0.516136(LP) + 0.015867(SS) + 0.02075449(HS) + 0.04917399(SP) - 0.00071492(HT) - 0.004774081(LP^2) - 2.037 \times 10^{-5}(SS^2) + 1.2834 \times 10^{-4}(HS^2) - 0.00101588(SP^2) - 7.4 \times 10^{-8}(HT^2) - 1.1209 \times 10^{-5}(LP \times SS) - 1.66742 \times 10^{-4}(LP \times HS) + 7.59 \times 10^{-7}(LP \times SP) + 5.795 \times 10^{-6}(LP \times HT) - 8.6 \times 10^{-8}(SS \times SP) - 1.5 \times 10^{-8}(SS \times HT) + 7.6863 \times 10^{-5}(HS \times SP) + 9.77 \times 10^{-7}(HS \times HT) + 2.514 \times 10^{-6}(SP \times HT) + 1.5163 \times 10^{-5}(LP^3) + 9 \times 10^{-10}(SS^3) - 1.639 \times 10^{-6}(HS^3) + 5.83 \times 10^{-7}(SP^3) \quad (1)$$

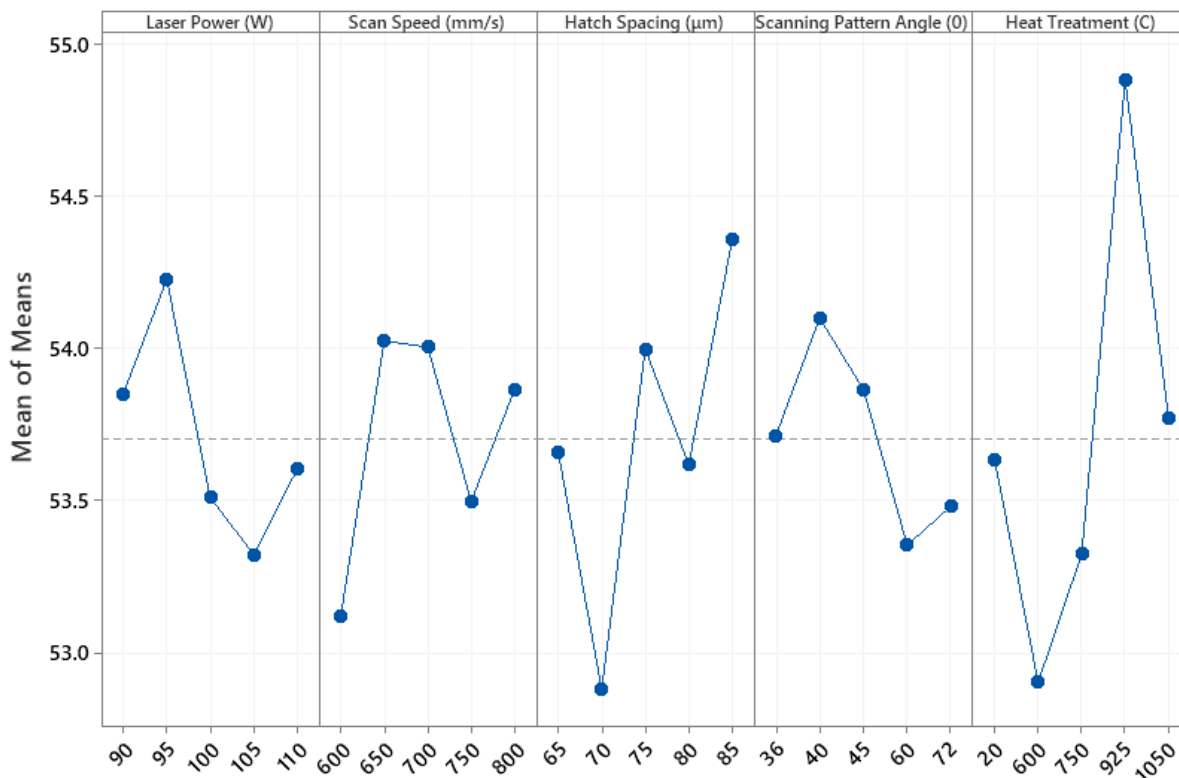
$$Ra = \exp(62.9 - 0.931(LP) - 0.0194(SS) - 0.322(HS) + 0.110(SP) + 0.00535(HT) + 0.00431(LP^2) + 1.4 \times 10^{-5}(SS^2) + 0.00247(HS^2) + 0.00053(SP^2) + 2 \times 10^{-6}(HT^2) + 3.4 \times 10^{-6}(LP \times SS) + 0.00046(LP \times HS) + 0.00096(LP \times SP) - 0.000093(LP \times HT) - 0.000121(SS \times SP) + 4 \times 10^{-7}(SS \times HT) - 0.00198(HS \times SP) + 2 \times 10^{-5}(HS \times HT) - 4.8 \times 10^{-5}(SP \times HT) \quad (2)$$

در تحقیق حاضر بهینه‌سازی بر اساس بیشینه شدن چگالی نسبی

جدول ۳. بهترین پاسخ‌ها و شرایط ایجاد کننده آن‌ها

Table 3. Best answers and parameters

ردیف	توان لیزر	سرعت لیزر	فاصله دو مسیر متوالی	زاویه	عملیات حرارتی	چگالی نسبی	زبری سطح
۱	۱۰۴/۸۷۹	۶۲۹/۳۲۹	۶۷/۷۹۸	۳۵/۲۷۳	۶۳۹/۹۱۸	۹۲/۰۷	۳/۰۲
۲	۱۰۳/۸۲۲	۶۲۳/۹۸۵	۷۱/۵۸۶	۴۳/۸۱۵	۶۳۸/۴۷۷	۹۵/۱۵	۳/۲۹
۳	۱۰۲/۷۸۰	۶۲۳/۲۵۶	۷۳/۴۵۸	۴۵/۴۷۹	۶۳۸/۴۴۹	۹۵/۳۳	۳/۳۹
۴	۱۰۴/۵۲۰	۶۲۶/۴۶۰	۶۸/۶۸۷	۳۸/۴۴۱	۶۳۹/۳۱۵	۹۳/۶۹	۳/۱۰
۵	۱۰۳/۷۱۸	۶۲۳/۷۶۰	۷۲/۴۲۳	۴۴/۱۱۶	۶۳۸/۴۸۳	۹۵/۲۲	۳/۳۲



شکل ۶. تحلیل مقدار میانگین زبری و چگالی نسبی به صورت همزمان

Fig. 6. Mean value analysis of surface roughness and relative density simultaneously

باشد (چگالی انرژی کم) و بالعکس با افزایش چگالی انرژی عمق نفوذ بیشتر شده و ساخت در حالت جای کلید انجام خواهد شد. عیوب جای کلید نیز بیشتر در این حالت به وجود می‌آیند.

۳-۱- تأثیر توان لیزر بر چگالی نسبی و زبری سطح

چگالی انرژی پرتوی لیزر بر اساس رابطه (۳) قابل تخمین است. در رابطه η, SS, LP و BA به ترتیب مشخص کننده ضریب جذب، توان لیزر، سرعت حرکت لیزر و قطر پرتو می‌باشد [۴۴]. ضریب جذب عددی ثابت و کمتر از یک است که به ماهیت ماده بستگی

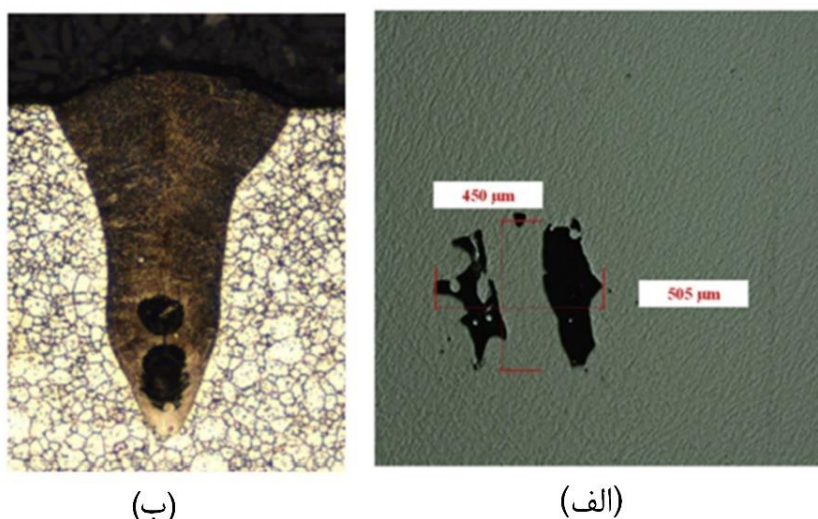
با توجه به شکل ۶ و جدول ۴ تاثیرگذارترین متغیر بر زبری سطح و چگالی عملیات حرارتی بوده و پس از آن فاصله دو مسیر متوالی، سرعت حرکت لیزر، توان لیزر و زاویه چاپ به ترتیب بیشترین تا کمترین تأثیر را بر این موارد دارند.

در فرایند ساخت به روش ذوب بستر پودر با استفاده از پرتوی لیزر دو حالت هدایت و جای کلید وجود دارد، عوامل مؤثر بر دما و اندازه حوضچه مذاب تشکیل شده مشخص می‌کنند که ساخت نمونه در کدام یک از این حالات انجام خواهد شد. به صورت کلی ساخت در حالت هدایت، در شرایطی صورت می‌پذیرد که اندازه حوضچه کوچک

جدول ۴. نتایج آنالیز تاگوچی

Table 4. Results of Taguchi analysis

عملیات حرارتی	زاویه	فاصله دو مسیر متوالی	سرعت لیزر	توان لیزر	سطح
۵۳/۶۳	۵۳/۷۱	۵۳/۶۶	۵۳/۱۲	۵۳/۸۵	۱
۵۲/۹۰	۵۴/۱۰	۵۲/۸۸	۵۴/۰۲	۵۴/۲۳	۲
۵۲/۹۰	۵۳/۸۶	۵۴/۰۰	۵۴/۰۰	۵۳/۵۱	۳
۵۴/۸۸	۵۳/۳۵	۵۳/۶۲	۵۳/۵۰	۵۳/۳۲	۴
۵۳/۷۷	۵۳/۴۸	۵۴/۳۶	۵۳/۸۷	۵۳/۶۰	۵
۱/۹۸	۰/۷۵	۱/۴۸	۰/۹۰	۰/۹۰	اختلاف
۱	۵	۲	۳	۴	رتبه



شکل ۷. (الف) عیب عدم ذوب شدن به دلیل توان لیزر کم [۴۹]، (ب) عیب جای کلید به دلیل توان لیزر زیاد [۵۰].

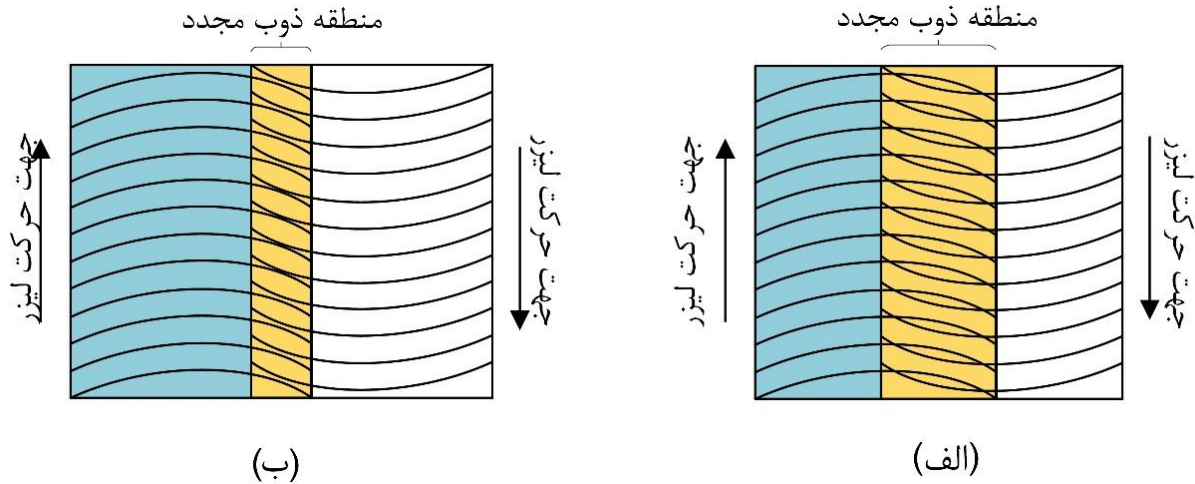
Fig. 7. (A) Lake of fusion defects due to low laser power [49], (B) Key hole defect due to high laser power [50]

عیب به واسطه تشکیل حفره ناشی از تبخیر جزئی ماده در داخل مذاب ایجاد می‌گردد. کاهش توان لیزر سبب بروز عیب ذوب نشدن در قطعه خواهد شد این عیب در شکل ۷ نشان داده شده است. افزایش دما به واسطه افزایش توان لیزر سبب کاهش مقدار کشش سطحی مذاب تشکیل شده بر روی سطح می‌شود و قابلیت پخش‌پذیری آنرا افزایش می‌دهد، در نتیجه سبب کاهش مقدار زبری سطح خواهد شد. بنابراین مقدار توان لیزر باید به گونه‌ای انتخاب شود که سبب افزایش یا کاهش بیش از حد دما نشود تا از ایجاد عیوب منجر به کاهش چگالی نسبی جلوگیری نماید و دمای کافی برای پخش مذاب (کاهش کشش سطحی) را نیز فراهم آورد تا زبری سطح قطعه تولید شده در محدوده قابل قبولی قرار گیرد [۴۸-۴۶].

دارد، این ضریب مشخص کننده درصدی از انرژی توان لیزر است که توسط ماده جذب می‌شود. عواملی چون درجه حرارت قطعه، صافی سطح و حتی نوع لیزر در تعیین مقدار آن تاثیرگذار خواهند بود [۴۵].

$$ED = \frac{\eta \times LP}{SS \times BA} \quad (3)$$

بر اساس رابطه (۳)، توان لیزر نقش مهمی در چگالی انرژی ورودی به قطعه ایفا می‌کند، با افزایش توان لیزر، دمای سطحی افزایش خواهد یافت، این افزایش سبب افزایش دمای مذاب شکل گرفته و بزرگتر شدن اندازه حوضچه مذاب روی سطح می‌شود، با افزایش اندازه حوضچه معمولاً عیب جای کلید در قطعه ایجاد می‌شود، این



شکل ۸. تأثیر کاهش فاصله دو مسیر متوالی بر منطقه ذوب مجدد
 Fig. 8. Effect of reducing hatch space on remelting zone

و مجمد شده، مجدداً ذوب گردد. شکل ۸ بیان کننده مفهوم فاصله دو مسیر متوالی و تأثیر آن بر منطقه ذوب مجدد می‌باشد. شکل ۸-الف به صورت شماتیک فاصله دو مسیر متوالی کم را نشان می‌دهد، همانطور که در شکل نیز مشخص است، کم بودن این مقدار سبب افزایش روی هم افتادگی دو مسیر متوالی شده و در نتیجه عرض منطقه ذوب مجدد را افزایش می‌دهد، به صورت مشابه و با توجه به شکل ۸-ب می‌توان به تأثیر افزایش فاصله دو مسیر متوالی بر اندازه منطقه ذوب مجدد پی برد. همانطور که در شکل ۸-ب مشخص است با افزایش فاصله دو مسیر متوالی عرض منطقه ذوب مجدد کاهش می‌یابد. حداکثر فاصله دو مسیر متوالی می‌تواند برابر قطر پرتوی لیزر باشد، ولی به دلیل توزیع گوسی پرتوی لیزر [۵۴] (رابطه (۴)) هیچگاه این فاصله را برابر قطر پرتو در نظر نگرفته و بیشترین مقدار قابل قبول برای این فاصله نیز ۸۰ درصد قطر پرتو است [۵۵].

$$q(x, y) = \frac{LP}{\pi r^2} e^{\left[\frac{-(x^2 + y^2)}{r^2} \right]} \quad (4)$$

در رابطه (۴) مشخص کننده توان لیزر در نقطه مورد بررسی و فاصله‌ای از مرکز پرتو است که توان لیزر در آن معادل $\frac{1}{e}$ توان در مرکز لیزر است. بر اساس فرض توزیع گوسی توان لیزر، بیشترین توان لیزر در مرکز آن بوده و با دور شدن از مرکز توان کاهش می‌یابد، با توجه به مطالبی که در بخش رابطه توان با چگالی نسبی و زبری

۳-۲- تأثیر سرعت لیزر بر چگالی نسبی و زبری سطح

با توجه به رابطه (۳) مشخص است که سرعت حرکت لیزر یکی دیگر از متغیرهای مؤثر بر چگالی انرژی بوده و با توان لیزر رابطه معکوس دارد، به این معنی که افزایش سرعت سبب کاهش چگالی انرژی خواهد شد و بالعکس. بر اساس قانون بقای انرژی تمام انرژی وارد شده به سطح باید مصرف شود، این انرژی به گرما تبدیل شده و دمای سطح را افزایش می‌دهد. افزایش چگالی انرژی منجر به افزایش دمای سطح قطعه خواهد شد، که منجر به ذوب و یا در برخی موارد تبخیر ماده در سطح قطعه می‌شود. تحلیلی مشابه با آنچه در مورد توان لیزر بیان شد در این مورد سرعت لیزر نیز صادق است. البته باید به این نکته نیز توجه نمود که افزایش سرعت لیزر سبب افزایش نرخ سرد شدن قطعه می‌شود ولی تأثیر این پدیده در مقابل تأثیر دمای ایجاد شده توسط لیزر قابل چشم پوشی است. افزایش سرعت لیزر سبب کاهش عیب جای کلید می‌شود ولی احتمال بروز ذوب نشدن را افزایش می‌دهد [۵۳-۵۱].

۳-۳- تأثیر فاصله دو مسیر متوالی بر چگالی نسبی و زبری سطح

فاصله دو مسیر متوالی رابطه معکوس با روی هم افتادن دو مسیر متوالی و کنار هم دارد، افزایش این فاصله سبب کاهش روی هم افتادگی مسیرها خواهد شد. افزایش مقدار روی هم افتادن باعث می‌شود تا بخشی از مسیری که در روبش قبلی توسط لیزر ذوب شده

باید به تغییرات فازی در دمای بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز توجه نمود. عملیات حرارتی در دمای بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد سبب تغییرات فازی در قطعه شده و در نهایت درصد فاز α' را افزایش می‌دهد [۵۹-۵۷]. افزایش درصد این فاز سبب کاهش در چگالی نسبی می‌شود. شایان ذکر است که از عملیات‌ها دیگری مانند ماشین‌کاری، ماسه زنی، سنگ زنی و دیگر فرایندها می‌توان به منظور اصلاح و بهبود کیفیت سطح و حذف عیوب سطحی استفاده نمود.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج مطالعات آماری و آنالیز مقدار میانگین، دمای عملیات حرارتی بیشترین تأثیر را بر نتایج داشته و پس از آن به ترتیب فاصله دو مسیر متوالی، سرعت لیزر، توان لیزر و زاویه مسیره‌ها بر نتایج تأثیر گذار هستند. توان لیزر و سرعت آن رابطه معکوس داشته و افزایش توان و کاهش سرعت لیزر سبب تمرکز انرژی بیشتر و افزایش چگالی انرژی ورودی به قطعه می‌شود، این عوامل سبب افزایش دمای ایجاد شده توسط لیزر خواهد شد، بنابراین علاوه بر تأثیر افزایش اندازه منطقه ذوب شده، سبب تغییر حالت ساخت از مدل هدایتی به مدل جای کلید می‌شود و احتمال بروز عیوبی مانند جای کلید افزایش می‌یابد. کاهش اندازه فاصله دو مسیر متوالی سبب افزایش منطقه ذوب مجدد و کاهش عیوب می‌شود، در نتیجه چگالی نسبی افزایش خواهد یافت. این امر به بهبود مقدار زبری سطح نیز کمک می‌کند ولی باید به این نکته نیز توجه نمود که کاهش بیش از اندازه فاصله دو مسیر سبب افزایش چشمگیر زمان ساخت قطعه خواهد شد. نتایج ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک در محدوده قابل قبول و منطقی قرار داشته و بر اساس این نتایج بهترین چگالی نسبی و زبری سطح برای توان لیزر در محدوده ۱۰۲ تا ۱۰۵ وات، سرعت لیزر در محدوده ۶۲۳ تا ۶۳۰ میلی‌متر بر ثانیه، فاصله دو مسیر متوالی در محدوده ۷۳ تا ۷۶ میکرون و دمای عملیات حرارتی ۶۳۸ تا ۶۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. دمای عملیات حرارتی مؤثرترین عامل تأثیر گذار بر زبری سطح و چگالی نسبی است. عملیات حرارتی برای آلیاژ Ti6Al4V در دماهای بیشتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تعریف می‌گردد، و با افزایش دمای عملیات حرارتی، درصد فاز α' در قطعه افزایش خواهد یافت، به علاوه افزایش دمای عملیات حرارتی سبب

سطح بیان شد، کاملاً مشخص است که در صورتی که فاصله دو مسیر متوالی زیاد باشد، احتمال وقوع عیب ذوب نشدن در حد فاصل بین دو مسیر افزایش می‌یابد، در صورتی که توان لیزر برای جلوگیری از وقوع این عیب بالا انتخاب شود، احتمال وقوع عیب جای کلید در مرکز لیزر افزایش خواهد یافت. راه حل مناسب برای جلوگیری از این مساله انتخاب مقدار مناسب فاصله دو مسیر متوالی است.

این پدیده سبب کاهش عیوب حبس شده مانند جای کلیدها و یا ذوب شدن نواحی ذوب نشده می‌شود. در نتیجه کاهش فاصله دو مسیر متوالی سبب افزایش چگالی نسبی خواهد شد، البته در مواردی که چگالی انرژی ورودی به قطعه زیاد باشد نتیجه‌ای برعکس حاصل شده و کاهش فاصله دو مسیر سبب افزایش عیوب خواهد شد. در حالت کلی افزایش فاصله دو مسیر متوالی سبب افزایش زبری سطح قطعه می‌شود و این به دلیل افزایش ارتفاع پستی و بلندی‌ها و فاصله آن‌ها در مقادیر بالای فاصله مسیر است. در صورتی که کاهش این اندازه به واسطه ذوب مجددی که ایجاد می‌کند، ارتفاع پستی و بلندی‌ها را کاهش داده که منجر به کاهش اندازه زبری سطح می‌شود.

۳-۴- تأثیر زاویه چاپ بر چگالی نسبی و زبری سطح

همانطور که نتایج تحلیل مقدار میانگین نشان می‌دهد، زاویه چاپ کمترین تأثیر را بر روی چگالی نسبی و زبری سطح چه به صورت منفرد و چه به صورت همزمان دارد. زبری سطح و چگالی نسبی وابستگی مستقیم به دمای قطعه و چگالی انرژی دارند و زاویه چاپ تأثیری بر افزایش یا کاهش این موارد ندارد. زاویه چاپ بر جهت گیری دانه‌های قطعه تأثیر گذار است که این مساله در بررسی‌های مربوط به خواص مکانیکی مشهود است [۵۶].

۳-۵- تأثیر عملیات حرارتی بر چگالی نسبی و زبری سطح

عملیات حرارتی به عنوان فرایند تکمیلی بر روی قطعات صورت می‌پذیرد، افزایش دمای عملیات حرارتی سبب نرم شدن و کاهش عیوب ناشی از چگالی انرژی کم (ذرات ذوب نشده) می‌شود، چرا که ذراتی که به صورت جزیی ذوب شده یا کلاً ذوب نشده‌اند در دمای بالا و با گذشت زمان فرصت می‌یابند تا تغییر شکل دهند، این امر سبب کاهش عیوب، افزایش چگالی نسبی و بهبود زبری سطح می‌شود. البته

- [7] I. Yadroitsev, P. Krakhmalev, I. Yadroitsava, A. Du Plessis, Qualification of Ti6Al4V ELI alloy produced by laser powder bed fusion for biomedical applications, JOM, 377-372 (2018) (3)70.
- [8] V. Bhavar, P. Kattire, V. Patil, S. Khot, K. Gujar, R. Singh, A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing, in: 4th International conference and exhibition on Additive Manufacturing Technologies-AM2014, 2014-, pp. 2-1.
- [9] A. Mazzoli, Selective laser sintering in biomedical engineering, Medical & biological engineering & computing, 256-245 (2013) (3)51.
- [10] R. Li, J. Liu, Y. Shi, L. Wang, W. Jiang, Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1035-1025 (2012) (12-9)59.
- [11] B. Song, X. Zhao, S. Li, C. Han, Q. Wei, S. Wen, J. Liu, Y. Shi, Differences in microstructure and properties between selective laser melting and traditional manufacturing for fabrication of metal parts: A review, Frontiers of Mechanical Engineering, 125-111 (2015) (2)10.
- [12] E. Louvis, P. Fox, C.J. Sutcliffe, Selective laser melting of aluminium components, Journal of Materials Processing Technology, 284-275 (2011) (2)211.
- [13] W. Harun, N. Manam, M. Kamariah, S. Sharif, A. Zulkifly, I. Ahmad, H. Miura, A review of powdered additive manufacturing techniques for Ti6-al4-v biomedical applications, Powder Technology, 97-74 (2018) 331.
- [14] A. Khorasani, I. Gibson, M. Goldberg, G. Littlefair, Production of Ti6-Al4-V acetabular shell using selective laser melting: possible limitations in fabrication, Rapid Prototyping Journal, (2017).
- [15] A.M. Khorasani, I. Gibson, M. Goldberg, G. Littlefair, A survey on mechanisms and critical parameters on solidification of selective laser melting during fabrication of Ti6-Al4-V prosthetic acetabular cup, Materials & Design, 355-348 (2016) 103.
- [16] A. Du Plessis, P. Sperling, A. Beerlink, L. Tshabalala, S. Hoosain, N. Mathe, S.G. Le Roux, Standard method for microCT-based additive manufacturing quality control 2:

کاهش عیب ذرات ذوب نشده خواهد شد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

BA	مساحت پرتو، mm^2
ED	چگالی انرژی، J/mm^3
HS	فاصله دو مسیر متوالی، μm
HT	دمای عملیات حرارتی، $^{\circ}C$
LP	توان لیزر، W
PA	زاویه پراکنندگی، $^{\circ}$
q	توان نقطه‌ای لیزر، W/mm^2
r	فاصله از مرکز پرتو، μm
Ra	زبری سطح، μm
RD	چگالی نسبی، %
SS	سرعت حرکت لیزر، mm/s

علائم یونانی

η	ضریب جذب
--------	----------

مراجع

- [1] P.J. Bártolo, I. Gibson, History of stereolithographic processes, in: Stereolithography, Springer, 2011, pp. -37 56.
- [2] I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani, Additive manufacturing technologies, 3rd ed., Springer, 2021.
- [3] T. Wohlers, T. Gornet, History of additive manufacturing, Wohlers report, 118 (2014) (2014)24.
- [4] A. Su, S.J. Al'Aref, History of 3D Printing, in: 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine, Elsevier, 2018, pp. 10-1.
- [5] A. Khorasani, I. Gibson, J.K. Veetil, A.H. Ghasemi, A review of technological improvements in laser-based powder bed fusion of metal printers, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2020).
- [6] F. Fina, S. Gaisford, A.W. Basit, Powder bed fusion: The working process, current applications and opportunities, in: 3D printing of pharmaceuticals, Springer, 2018, pp. 105-81.

- [25] A.T. Beaucamp, Y. Namba, P. Charlton, S. Jain, A.A. Graziano, Finishing of additively manufactured titanium alloy by shape adaptive grinding (SAG), *Surface Topography: Metrology and Properties*, (2015) (2)3 024001.
- [26] A.M. Khorasani, I. Gibson, N.G. Chegini, M. Goldberg, A.H. Ghasemi, G. Littlefair, An improved static model for tool deflection in machining of Ti-6Al-4V acetabular shell produced by selective laser melting, *Measurement*, 544-534 (2016) 92.
- [27] A. Khorasani, I. Gibson, M. Goldberg, G. Littlefair, On the role of different annealing heat treatments on mechanical properties and microstructure of selective laser melted and conventional wrought Ti6-Al4-V, *Rapid Prototyping Journal*, (2017).
- [28] A. Mohammad, A.M. Al-Ahmari, A. AlFaify, M.K. Mohammed, Effect of melt parameters on density and surface roughness in electron beam melting of gamma titanium aluminide alloy, *Rapid Prototyping Journal*, (2017).
- [29] J. Sieniawski, W. Ziaja, K. Kubiak, M. Motyka, Microstructure and mechanical properties of high strength two-phase titanium alloys, *Titanium alloys-advances in properties control*, (80-69 (2013).
- [30] A. Imanian, K. Leung, N. Iyyer, P. Li, D.H. Warner, Optimize Additive Manufacturing Post-Build Heat Treatment and Hot Iso-Static Pressing Process Using an Integrated Computational Materials Engineering Framework, in: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 2018, pp. V002T002A064.
- [31] P. Petrovskiy, A. Sova, M. Doubenskaia, I. Smurov, Influence of hot isostatic pressing on structure and properties of titanium cold-spray deposits, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 827-819 (2019) (4-1)102.
- [32] N.E. Uzan, S. Ramati, R. Shneck, N. Frage, O. Yeheskel, On the effect of shot-peening on fatigue resistance of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing using selective laser melting (AM-SLM), *Additive density measurement, MethodsX*, 1123-1117 (2018) 5.
- [17] M. Mani, S. Feng, B. Lane, A. Donmez, S. Moylan, R. Fesperman, Measurement science needs for real-time control of additive manufacturing powder bed fusion processes, (2015).
- [18] E. Hernández-Nava, C. Smith, F. Derguti, S. Tammas-Williams, F. Léonard, P. Withers, I. Todd, R. Goodall, The effect of density and feature size on mechanical properties of isostructural metallic foams produced by additive manufacturing, *Acta Materialia*, 395-387 (2015) 85.
- [19] H. Gong, K. Rafi, T. Starr, B. Stucker, The effects of processing parameters on defect regularity in Ti6-Al4-V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting, in: *24th annual international solid freeform fabrication symposium—an additive manufacturing conference*, Austin, TX, 2013, pp. 439-424.
- [20] A.E. Wilson-Heid, A.M. Beese, Fracture of laser powder bed fusion additively manufactured Ti-6Al-4V under multiaxial loading: Calibration and comparison of fracture models, *Materials Science and Engineering: A*, 137967 (2019) 761.
- [21] A. Vilardell, I. Yadroitsev, I. Yadroitsava, M. Albu, N. Takata, M. Kobashi, P. Krakhmalev, D. Kouprianoff, G. Kothleitner, A. du Plessis, Manufacturing and characterization of in-situ alloyed Ti6Al4V (ELI)3- at.% Cu by laser powder bed fusion, *Additive Manufacturing*, 101436 (2020) 36.
- [22] M. Masoomi, S.M. Thompson, N. Shamsaei, Laser powder bed fusion of Ti6-Al4-V parts: Thermal modeling and mechanical implications, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 90-73 (2017) 118.
- [23] A.M. Khorasani, I. Gibson, A. Ghasemi, A. Ghaderi, Modelling of laser powder bed fusion process and analysing the effective parameters on surface characteristics of Ti-6Al4-V, *International journal of mechanical sciences*, 168 105299 (2020).
- [24] A.M. Khorasani, I. Gibson, A. Ghasemi, A. Ghaderi, A comprehensive study on variability of relative density in selective laser melting of Ti6-Al4-V, *Virtual and Physical Prototyping*, 359-349 (2019) (4)14.

- prior studies, IISE Transactions, 44-31 (2017) (1)49.
- [42] M. Ashby, Multi-objective optimization in material design and selection, *Acta materialia*, 369-359 (2000) (1)48.
- [43] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE transactions on evolutionary computation*, (2002) (2)6 197-182.
- [44] M. Khorasani, A. Ghasemi, U.S. Awan, E. Hadavi, M. Leary, M. Brandt, G. Littlefair, W. O'Neil, I. Gibson, A study on surface morphology and tension in laser powder bed fusion of Ti6-Al4-V, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2020) (9)111 2909-2891.
- [45] C. Sainte-Catherine, M. Jeandin, D. Kechemair, J.-P. Ricaud, L. Sabatier, Study of Dynamic Absorptivity at 10.6 μm (CO₂) and 1.06 μm (Nd-YAG) Wavelengths as a Function of Temperature, *Le Journal de Physique IV*, 1(C1991) (7) C-151-7C157-157.
- [46] J. Berthier, *Micro-drops and digital microfluidics*, William Andrew, 2012.
- [47] A.Y. Malkin, A.I. Isayev, *Rheology: concepts, methods, and applications*, Elsevier, 2017.
- [48] C. Qiu, C. Panwisawas, M. Ward, H.C. Basoalto, J.W. Brooks, M.M. Attallah, On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting, *Acta Materialia*, 79-72 (2015) 96.
- [49] S. Coeck, M. Bisht, J. Plas, F. Verbist, Prediction of lack of fusion porosity in selective laser melting based on melt pool monitoring data, *Additive Manufacturing*, (2019) 25 356-347.
- [50] L. Scime, J. Beuth, Melt pool geometry and morphology variability for the Inconel 718 alloy in a laser powder bed fusion additive manufacturing process, *Additive Manufacturing*, 100830 (2019) 29.
- [51] A.M. Khorasani, I. Gibson, A.R. Ghaderi, Rheological characterization of process parameters influence on surface quality of Ti6-Al4-V parts manufactured by selective laser melting, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2018) (12-9)97 3775-3761.
- Manufacturing, 464-458 (2018) 21.
- [33] L. Hackel, J.R. Rankin, A. Rubenchik, W.E. King, M. Matthews, Laser peening: A tool for additive manufacturing post-processing, *Additive Manufacturing*, 75-67 (2018) 24.
- [34] M.T. Jovanović, S. Tadić, S. Zec, Z. Mišković, I. Bobić, The effect of annealing temperatures and cooling rates on microstructure and mechanical properties of investment cast Ti-6Al-4V alloy, *Materials & design*, (2006) (3)27 199-192.
- [35] S.E. Brika, Y.F. Zhao, M. Brochu, J. Mezzetta, Multi-objective build orientation optimization for powder bed fusion by laser, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017) (11)139).
- [36] B. Fotovvati, M. Balasubramanian, E. Asadi, Modeling and Optimization Approaches of Laser-Based Powder-Bed Fusion Process for Ti6-Al4-V Alloy, *Coatings*, (11)10 1104 (2020).
- [37] A.M. Aboutaleb, M.J. Mahtabi, M.A. Tschopp, L. Bian, Multi-objective accelerated process optimization of mechanical properties in laser-based additive manufacturing: Case study on Selective Laser Melting (SLM) Ti6-Al4-V, *Journal of Manufacturing Processes*, 38 444-432 (2019).
- [38] J. Jiang, X. Xu, J. Stringer, Optimisation of multi-part production in additive manufacturing for reducing support waste, *Virtual and Physical Prototyping*, (3)14 228-219 (2019).
- [39] N. Lebaal, Y. Zhang, F. Demoly, S. Roth, S. Gomes, A. Bernard, Optimised lattice structure configuration for additive manufacturing, *CIRP Annals*, -117 (2019) (1)68 120.
- [40] G. Strano, L. Hao, R. Everson, K. Evans, A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2013) (12-9)66 1254-1247.
- [41] A.M. Aboutaleb, L. Bian, A. Elwany, N. Shamsaei, S.M. Thompson, G. Tapia, Accelerated process optimization for laser-based additive manufacturing by leveraging similar

- orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V, *Materials Science and Engineering: A*, 11-1 (2014) 616.
- [57] B. Baufeld, O. Van der Biest, R. Gault, Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties, *Materials & Design*, 2010) 31) S-106S111.
- [58] L. Facchini, E. Magalini, P. Robotti, A. Molinari, S. Höges, K. Wissenbach, Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders, *Rapid Prototyping Journal*, (2010).
- [59] S. Cao, R. Chu, X. Zhou, K. Yang, Q. Jia, C.V.S. Lim, A. Huang, X. Wu, Role of martensite decomposition in tensile properties of selective laser melted Ti6-Al4-V, *Journal of Alloys and Compounds*, 363-357 (2018) 744.
- [52] S. Schiaffino, A.A. Sonin, Formation and stability of liquid and molten beads on a solid surface, *Journal of fluid mechanics*, 110-95 (1997) 343.
- [53] Y. Tian, D. Tomus, P. Rometsch, X. Wu, Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting, *Additive Manufacturing*, 112-103 (2017) 13.
- [54] S. Evans, E. Jones, P. Fox, C. Sutcliffe, Photogrammetric analysis of additive manufactured metallic open cell porous structures, *Rapid Prototyping Journal*, (2018).
- [55] Y.-L. Lo, B.-Y. Liu, H.-C. Tran, Optimized hatch space selection in double-scanning track selective laser melting process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3006-2989 (2019) (7)105.
- [56] M. Simonelli, Y.Y. Tse, C. Tuck, Effect of the build

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A.H. Ghasemi, V. Panahizadeh, Optimization of additive manufactured part made by Ti6Al4V alloy to achieve best relative density and surface roughness, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(10) (2022) 5169-5184.

DOI: [10.22060/mej.2021.19555.7051](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19555.7051)



