



# Evaluating Effect of Laser Energy Density on Relative Density, Defects, And Hardness of Selective Laser Melted Hastelloy X Ni-Based Superalloy



## ARTICLE INFO

### Authors

Adibi E.<sup>1</sup>,  
Maleki A.<sup>1\*</sup>,  
Kermanpur A.<sup>2</sup>,  
Foroozmehr E.<sup>1</sup>,  
Badrossamay M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

<sup>2</sup> Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

### \* Correspondence

Address: Isfahan, Isfahan University of Technology P.O.B 8415683111  
Maleki110@iut.ac.ir

### How to cite this article

E.Adibi, A.Maleki, A.kermanpur, E.Foroozmehr, M.Badrossamay. Evaluating effect of laser energy density on relative density, defects, and hardness of selective laser melted Hastelloy X Ni-based superalloy superalloy. Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):247-252.

## ABSTRACT

Nowadays, one of the most important problems in industry is the production of industrial parts from superalloys and metals with high hardness using traditional and modern machining methods, due to the waste of raw materials, wear of machining tools, and the inability to produce complex geometries. Selective Laser Melting is one of the sub-branch of additive manufacturing technology that provides the fabrication of complex geometries from widely-used metallic materials due to the layer-by-layer production of parts. Hastelloy X superalloy is among the important superalloys in the aerospace industry and gas turbines. This research aims to fabricate Hastelloy X parts by selective laser melting with minimal defects and high relative density. For this purpose, three samples were printed in the range of volumetric energy density of laser from 50 to 90 J/mm<sup>3</sup>. The structure and porosity of different specimens were evaluated by image analysis method. It was found that the sample fabricated with the volumetric energy density of 90 J/mm<sup>3</sup> has the least defects, the highest hardness, and a relative density above 99 percent.

**Keywords** Superalloy, Additive Manufacturing, Selective laser melting, Hastelloy X

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین کاری و ماشین های ابزار پیشرفته. مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۲۴۷-۲۵۲.



## ارزیابی اثر چگالی انرژی لیزر در فرایند ذوب گزینشی با لیزر بر چگالی نسبی، عیوب و سختی سوپرآلیاژ پایه نیکل هستلوی ایکس



## چکیده

## مشخصات مقاله

### نویسنده ها

عرفان ادیبی<sup>۱</sup>

علی مالکی<sup>۱\*</sup>

احمد کرمانپور<sup>۲</sup>

احسان فروزمهر<sup>۱</sup>

محسن بدرسمای<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

### \* نویسنده مسئول

آدرس: اصفهان، دانشگاه صنعتی

اصفهان صندوق پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

Maleki110@iut.ac.ir

امروزه تولید قطعات صنعتی از جنس سوپرآلیاژها و فلزاتی که دارای سختی بالا و همچنین ماده اولیه گران قیمت هستند، به علت دورریز ماده اولیه، سایش ابزار و ناتوانی در تولید هندسه های پیچیده با روش های ماشین کاری سنتی و مدرن از جمله مسائل مهم در صنعت بشمار می رود. فرایند ذوب گزینشی با لیزر از زیرشاخه های فناوری ساخت افزودنی می باشد که با تولید لایه لایه قطعات، امکان ایجاد هندسه های پیچیده از مواد پرکاربرد در صنعت را فراهم می سازد. از جمله سوپرآلیاژهای مهم در صنعت هوافضا و توربین های گازی می توان به سوپرآلیاژ هستلوی ایکس اشاره کرد. هدف از انجام این پژوهش تولید قطعاتی از جنس سوپرآلیاژ هستلوی ایکس به روش ذوب گزینشی با لیزر با عیوب کمینه و چگالی نسبی بالا است. به همین منظور سه نمونه در محدوده چگالی انرژی لیزر ۵۰ تا ۹۰ ژول بر میلی متر مکعب ساخته شد. تصاویر نمونه های ساخته شده پس از آماده سازی سطوح جانبی یکپارچه سازی و چگالی نسبی هر نمونه به روش آنالیز تصویر محاسبه گشت. بررسی نشان داد که نمونه با چگالی انرژی حجمی ۹۰ ژول بر میلی متر مکعب دارای کمترین عیوب، بالاترین سختی و چگالی نسبی بالای ۹۹ درصد است.

**کلیدواژه ها** سوپرآلیاژ، ساخت افزودنی، ذوب گزینشی با لیزر، هستلوی ایکس

## ۱- مقدمه

امروزه با گسترش و پیشرفت صنایع مختلف، نیازی اساسی در رابطه با توسعه، تحقیق و تولید مواد صنعتی با خواص مطلوب احساس می‌شود. ازجمله مواد پرکاربرد در صنعت، می‌توان به سوپرآلیاژها اشاره کرد. به صورت کلی سوپرآلیاژها به دسته‌ای از مواد مقاوم در برابر اکسیداسیون و با قابلیت حفظ استحکام در دمایی نزدیک به نقطه ذوب خود گفته می‌شود. توسعه سوپرآلیاژها ارتباطی انکارناپذیر با پیشرفت صنایع هوافضا و ساخت موتورهای جت دارد. به گونه‌ای که امروزه بدون استفاده از سوپرآلیاژها، ساخت موتورهای پیشرفته جت امکان‌پذیر نیست. از جمله خواص مطلوب مورد نیاز در صنعت می‌توان به نسبت استحکام به وزن، سختی و چقرمگی بالا و همچنین مقاومت در برابر حرارت و محیط‌های خورنده اشاره کرد [1]. ماشین‌کاری مواد با خواص گفته شده با روش‌های ماشین‌کاری سنتی بسیار پرهزینه خواهد بود و توجیه اقتصادی نخواهد داشت. همچنین روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی یا مدرن با وجود امکان تولید قطعات با سختی بالا، دارای نرخ پایین براده برداری هستند و قطعات با هندسه‌های پیچیده را نمی‌توان تولید نمود.

## ۱-۱- سوپرآلیاژ هستلوی ایکس

علامت تجاری هستلوی به دسته‌ای از سوپرآلیاژهای پایه نیکل و مقاوم به خوردگی گفته می‌شود. هستلوی ایکس سوپرآلیاژ کارپذیر و پایه نیکل، از خانواده سوپرآلیاژهای هستلوی است. عناصر اصلی در ساختار این آلیاژ شامل نیکل، کرم، مولیبدن و آهن است. جدول ۱ نشان دهنده درصد عناصر مهم موجود در ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ هستلوی ایکس است [3]. هستلوی ایکس سوپرآلیاژ با مکانیزم استحکام بخشی محلول جامد، دارای چگالی ۸/۲۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مدول الاستیسیته ۲۰۵ گیگا پاسکال و ضریب پواسون ۰/۳۲ در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد است. همچنین نقطه ذوب این سوپرآلیاژ در محدوده ۱۲۶۰ تا ۱۳۵۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است [1-2].

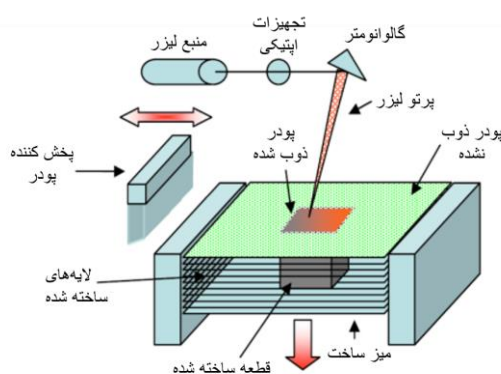
جدول ۱) درصد وزنی عناصر مهم تشکیل‌دهنده سوپرآلیاژ هستلوی ایکس

| عنصر     | Ni  | Mn | Si   | C    | W   | Co  | Mo | Fe   | Cr |
|----------|-----|----|------|------|-----|-----|----|------|----|
| کمیته %  | -   | -  | ۰/۰۵ | ۰/۲۰ | ۰/۵ | ۸   | ۱۷ | ۲۰/۵ |    |
| بیشینه % | Bal | ۱  | ۱    | ۰/۱۵ | ۱   | ۲/۵ | ۱۰ | ۲۰   | ۲۳ |

## ۲-۱- فرایند ساخت افزودنی

ساخت افزودنی روشی مبتنی بر ساخت قطعات به صورت لایه‌ای است. در این روش پس از طراحی مدل سه بعدی، قطعات طراحی شده به فرمت خاصی ذخیره شده سپس به کمک نرم‌افزارهای واسطه، قطعه طراحی شده به صورت لایه لایه تقسیم‌بندی و به عنوان ورودی به دستگاه پرینتر سه بعدی داده می‌شود. پس از تنظیمات اولیه دستگاه، فرایند ساخت به صورت لایه به لایه صورت می‌گیرد تا محصول نهایی تولید گردد. به علت تولید لایه لایه، امکان ایجاد قطعات با هندسه پیچیده فراهم می‌گردد. پیچیدگی هندسی در هزینه تمام شده محصول تأثیری ندارد و این نکته از مهم‌ترین مزیت‌های روش ساخت افزودنی

محسوب می‌شود. مزیت مذکور باعث ایجاد آزادی در طراحی و بهینه‌سازی قطعات می‌شود. به همین دلیل می‌توان با کاهش هدفمند وزن، نسبت استحکام به وزن بالایی در محصول ایجاد کرد. فناوری ساخت افزودنی بر اساس مواد اولیه و نحوه تولید قطعات به روش‌های مختلفی دسته‌بندی می‌شوند [4]. ذوب بستر پودر یکی از روش‌های ساخت افزودنی است که در این روش ماده اولیه به صورت پودر بر روی بستری که صفحه ساخت نامیده می‌شود قرار می‌گیرد و با تابش انرژی به سطح آن پودر ذوب شده و یک لایه از قطعه تشکیل می‌شود. سپس با حرکت صفحه ساخت و قرارگیری لایه‌ای جدید از پودر بر روی لایه قبلی، مراحل پیشین تا کامل شدن محصول تکرار می‌شود. با توجه به جنس پودر و منبع انرژی تابشی، فناوری ذوب بستر پودر به سه روش ذوب گزینشی با لیزر، تف‌جوشی گزینشی با لیزر و ذوب با پرتو الکترونی تقسیم می‌شود. در روش ذوب گزینشی با لیزر پس از گسترش پودر توسط غلتک یا تیغه پخش کننده روی بستر دستگاه، پرتو لیزر بر سطح پودر تابیده می‌شود تا عمل ذوب و تشکیل یک لایه از قطعه صورت گیرد. برای محفظه ساخت در این روش معمولاً از گاز آرگون و یا نیتروژن استفاده می‌شود. در این روش برخلاف روش ذوب با پرتو الکترونی از پودر مواد فلزی نارسا نیز می‌توان استفاده کرد. منبع انرژی لیزر در این فرایند، بیشتر شامل لیزرهای فیبری یا دی اکسید کربن است [4-5]. به منظور هدایت مناسب پرتو لیزر بر روی سطح مقطع مورد نظر، از سیستم گالوانومتر (تنظیم مختصات محل پرتو لیزر با دو آینه بر روی بستر دستگاه) و لنز اف-تتا (تنظیم محل فوکوس لیزر) استفاده می‌شود (شکل ۱). از جمله کاربردهای فناوری ذوب گزینشی با لیزر می‌توان به ساخت قطعات پزشکی، نیروگاهی، صنایع هوافضا و خودرو اشاره کرد [6].



شکل ۱) طرح‌واره فرایند ذوب گزینشی با لیزر

## ۳-۱- پارامترهای فرایند ذوب گزینشی با لیزر

عوامل مهم و تأثیرگذار در فرایند ذوب گزینشی با لیزر به سه دسته پارامترهای فرایند، پودر و دستگاه تقسیم می‌شوند. در جدول ۲ پارامترهای هر کدام از دسته‌بندی مذکور آورده شده است. با تنظیم دقیق و مناسب پارامترها، می‌توان قطعات با ویژگی‌های مطلوب و مناسب با کاربرد مورد نظر تولید نمود.

وقت و هزینه برای طراحی و ساخت دوباره قالب امری اجتناب ناپذیر است. به دلیل محدودیت‌های فرآیندهای تولید سوپرآلیاژ هستلوی ایکس و از طرف دیگر تقاضای گسترده برای استفاده از آن‌ها در صنعت، همواره نیازی اساسی برای تحقیق، توسعه و بهبود روش‌های نوین تولید آن ضرورت دارد. وانگ و همکاران [7] از جمله اولین افرادی بودند که تحقیق روی ساخت قطعات از جنس هستلوی ایکس به روش ذوب گزینشی با لیزر را در سال ۲۰۱۱ شروع کردند. آن‌ها پس از بررسی پارامترهایی همچون توان لیزر و سرعت اسکن بر دقت ابعادی نتیجه گرفتند که بازه‌ای از پارامترهای بهینه وجود دارد که قطعات تولید شده با آن‌ها از نظر خواص کششی مشابه قطعات آهنگری می‌شود. نویسندگان مقاله از ذکر محدوده پارامترهای استفاده شده در پژوهش خود به دلیل حساسیت صنعتی خودداری کردند. توماس و همکاران [8] در سال ۲۰۱۳ تاثیر پارامتر سرعت اسکن به همراه دو نوع ترکیب مختلف پودر که میزان متفاوتی از عناصر سیلیسیم و منگنز داشتند را بررسی کردند. آن‌ها کاهش سرعت اسکن لیزر را به عنوان راهکاری برای کاهش تخلخل در قطعه معرفی کردند، اما کاهش سرعت اسکن باعث افزایش زمان تولید قطعه شد. در پودری که منگنز و سیلیسیم بیشتری داشت (میزان تفاوت در مقاله ذکر نشده است)، تخلخل کمتری مشاهده شد اما بیشتر بودن این دو عنصر در ساختار، به علت رخ دادن پدیده جدایش در مرزانه شرایط ایجاد عیوب بیشتر را فراهم می‌سازد. منتروسیستیاگا و همکاران [9] در سال ۲۰۱۹ محدوده چگالی انرژی ۷۵ تا ۱۵۰ ژول بر میلی‌متر مکعب را به عنوان بازه‌ی بهینه برای تولید قطعات با چگالی نسبی بالا معرفی نمودند. اسماعیل‌زاده و همکاران [10] در سال ۲۰۲۰ تاثیر سرعت اسکن بر ساختار را با ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای تولید بررسی نمودند. ایشان بازه‌ی ۸۵۰ تا ۱۱۵۰ میلی‌متر بر ثانیه را به عنوان محدوده بهینه سرعت اسکن لیزر برای ساخت قطعات به منظور کمینه کردن عیوبی مانند عدم همجوشی و ایجاد تخلخل ناشی از حالت سوراخ کلید معرفی کردند.

با بررسی مقالات و پژوهش‌های گذشته مشخص شد که اصلی‌ترین چالش تولید سوپرآلیاژ هستلوی ایکس به روش ذوب گزینشی با لیزر دستیابی به ساختاری با عیوب کمینه دانست. تفاوت‌های احتمالی میان پودر، دستگاه و تجهیزات موجود در کشور با پژوهش‌های خارجی نیز ارزش انجام پژوهش در این زمینه را افزایش می‌دهد. هدف اصلی از انجام این پژوهش تولید قطعاتی با چگالی نسبی بالا با تغییر پارامترهای ساخت است.

## ۲- روش تحقیق

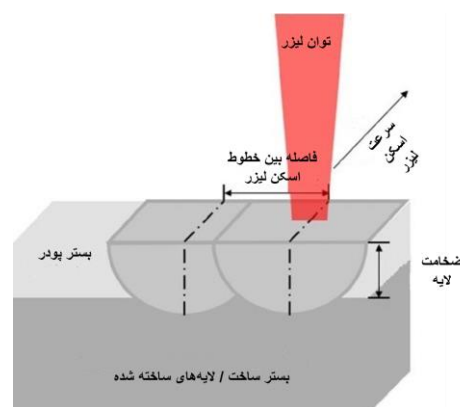
در این پژوهش از پودر سوپرآلیاژ هستلوی ایکس استاندارد به منظور ساخت قطعات با دستگاه M100 شرکت صنایع نورا لایه نگار به روش ذوب گزینشی با لیزر استفاده گردید. سه نمونه بر روی بستری از جنس فولاد زنگ نزن ۳۱۶ و در محدوده چگالی انرژی حجمی ۵۰ تا ۹۰ ژول به میلی‌متر مکعب با تغییر در سرعت اسکن و فاصله بین خطوط اسکن لیزر ساخته شدند و سپس به کمک وایرکات از بستر ساخت جدا شدند. در جدول ۳ مشخصات نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۲) پارامترهای مهم در فرایند ذوب گزینشی با لیزر

| پارامترهای ماده               | پارامترهای دستگاه  | پارامترهای فرایند        |
|-------------------------------|--------------------|--------------------------|
| جنس پودر                      | نوع لیزر           | توان لیزر                |
| شکل، اندازه و توزیع ذرات پودر | ضخامت لایه         | سرعت اسکن لیزر           |
| چگالی پودر                    | اتمسفر و گاز محافظ | فاصله بین خطوط اسکن لیزر |
| خواص ترموفیزیکی ماده          | دمای محفظه ساخت    | الگو و استراتژی اسکن     |

دما و ابعاد حوضچه مذاب تشکیل شده در حین فرایند ذوب گزینشی با لیزر، ارتباطی مستقیمی با چگالی انرژی دارند. چگالی انرژی به سه صورت چگالی طولی، سطحی و حجمی قابل محاسبه است. عوامل موثر بر چگالی انرژی حجمی ( $E_v$ ) با واحد ژول بر میلی‌متر مکعب شامل توان لیزر، سرعت اسکن لیزر، ضخامت لایه پودر و فاصله بین خطوط اسکن است. معادله ۱ بیانگر ارتباط میان این چهار پارامتر با چگالی انرژی حجمی است [6]. در این رابطه توان لیزر با حرف P مشخص شده است. با انتخاب بهینه چگالی انرژی حجمی می‌توان از عیوبی مانند ذوب ناقص، گلوله‌ای شدن پودر در سطح قطعه و حفرات ناشی از سوراخ کلید جلوگیری کرد و محصولی با چگالی نسبی نزدیک به صد درصد، خواص مطلوب مکانیکی، دقت ابعادی بالا و کیفیت خوب سطحی تولید کرد [4-5].

$$E_v = \frac{P}{v \times t \times h} \quad \text{J/mm}^3 \quad (1)$$



شکل ۲) پارامترهای موثر در چگالی انرژی حجمی

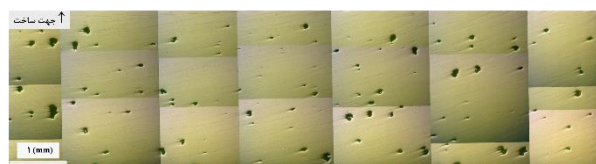
## ۴-۱- مروری بر کارهای گذشته

روش‌های متداول تولید هستلوی ایکس به صورت عمده شامل آهنگری و ریخته‌گری است. از جمله مشکلات ریخته‌گری می‌توان به نرخ خنک شدن پایین و جدایش برخی عناصر و تشکیل فازهای ثانویه در طی فرایند تولید اشاره کرد. در آهنگری خواص مکانیکی مطلوب‌تری به نسبت ریخته‌گری حاصل می‌شود؛ اما تولید قطعات با هندسه پیچیده میسر نیست. اغلب برای دستیابی به محصول نهایی، ترکیب روش‌های مختلف فرآوری مانند ماشین‌کاری و جوشکاری نیاز است، که هزینه تمام شده را به صورت چشم‌گیری افزایش می‌دهد. مسئله دیگر انعطاف‌پذیری فرایندهای متداول است. به طور مثال در آهنگری و یا ریخته‌گری در صورتی که تغییر کوچکی در هندسه مدل ایجاد شود، صرف

چگالی انرژی انتظار می‌رود مجدد کاهش چگالی نسبی در نمونه تولیدی رخ دهد.



(الف)

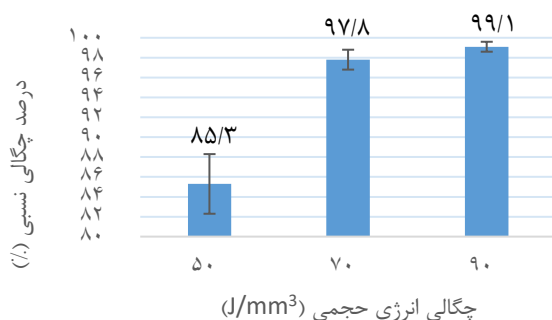


(ب)



(ج)

شکل ۳) سطح جانبی یکپارچه شده قطعات به ابعاد ۱۱×۳/۵ میلی‌متر (الف) نمونه ۱ (ب) نمونه ۲ (ج) نمونه ۳



شکل ۴) نمودار درصد چگالی نسبی بر حسب چگالی انرژی حجمی

سختی قطعات نیز به روش میکرو سختی ویکرز اندازه‌گیری شد. در شکل ۵ تصویری از سطح قطعه ۳ پس از انجام آزمون سختی و همچنین میانگین سختی محاسبه شده قطعات آورده شده است. خطای زیاد در میزان سختی محاسبه شده برای نمونه ۳ ناشی از تخلخل زیاد در سطح این نمونه است. با نزدیک بودن محل آزمون سختی به یک تخلخل، میزان سختی اندازه‌گیری شده کاهش می‌یابد. در بررسی تصاویر اچ شده از نمونه‌ها به طور عمده سه عیب حفرات گازی (gas pores)، پودر با ذوب جزئی (powder partially melted) و ذوب ناقص (Lack of fusion) مشاهده شد. تصاویر نوری از هر یک از عیوب نامبرده شده در شکل ۶ آورده شده‌اند.

جدول ۳) مشخصات نمونه‌های ساخته شده

| شماره نمونه | چگالی انرژی حجمی | ابعاد (میلی‌متر) |
|-------------|------------------|------------------|
| ۱           | ۵۰               | ۱۱×۱۱×۳/۵        |
| ۲           | ۷۰               |                  |
| ۳           | ۹۰               |                  |

به منظور مشخصه‌یابی، سطح جانبی نمونه‌ها به کمک سنبله‌شماره ۸۰ تا ۲۵۰۰ و سپس پودر آلومینا ۱ میکرون آماده‌سازی شدند. تصاویر قطعات به کمک میکروسکوپ نوری تا بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر گرفته شد. به منظور محاسبه چگالی نسبی قطعات به روش پردازش تصویر، تصاویر گرفته شده هر سطح نمونه در کنار یکدیگر قرار گرفته و یکپارچه شدند. به طور متوسط ۲۰ عکس از هر سطح با ابعاد ۱۱×۳/۵ میلی‌متر مربع گرفته شد و این عمل برای ۳ سطح دیگر برای هر یک از نمونه‌ها تکرار گردید. به کمک نرم‌افزار پردازش تصویر [ImageJ] چگالی نسبی قطعات محاسبه شد. برای مشاهده ریز ساختار، قطعات به کمک محلول اگزالیس اسید ۱۰ درصد و با ولتاژ ۶ ولت به مدت ۵ ثانیه اچ شدند. همچنین سختی قطعات با روش میکرو سختی ویکرز با اعمال باری معادل ۵۰۰ گرم به مدت ۱۰ ثانیه بر سطح نمونه‌ها محاسبه شد. برای محاسبه سختی قطعات به روش میکروسختی ویکرز (HV) از معادله (۲) می‌توان استفاده نمود که در آن  $P$  میزان نیروی اعمالی بر نمونه است.

### ۳- نتایج

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها به منظور بررسی میزان تخلخل و عیوب و همچنین محاسبه درصد چگالی نسبی قطعات، تصاویر گرفته شده از سطح یکپارچه شد. خروجی یکپارچه‌سازی در شکل ۳ آورده شده است. از تصاویر به دست آمده و به روش پردازش تصویر درصد چگالی نسبی قطعات محاسبه شد. چگالی نسبی محاسبه شده بر حسب چگالی انرژی حجمی در شکل ۴ گزارش شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، چگالی نسبی قطعات با افزایش چگالی انرژی لیزر بیشتر شده و در چگالی انرژی ۹۰ ژول بر میلی‌متر مکعب به حداکثر مقدار خود (یعنی حدود ۹۹/۱ درصد) می‌رسد. در پژوهش اسماعیل زاده و همکاران چگالی انرژی لیزر ۵۰ و در پژوهش منتروسیستیگا و همکاران چگالی حدود ۱۰۰

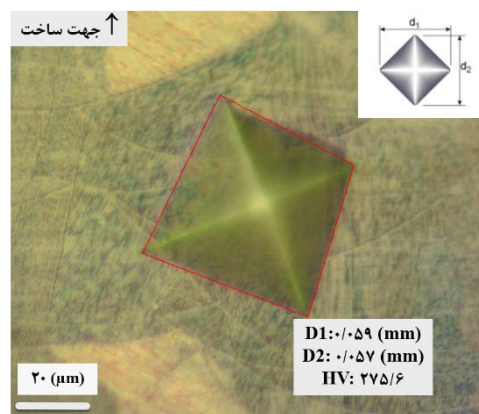
$$HV = \frac{1.854P}{D_1 \times D_2} \quad (2)$$

ژول بر میلی‌متر مکعب به عنوان قطعه بهینه معرفی شده است. در هر دو پژوهش تصویری یکپارچه از سطح بررسی شده و عدد کمی برای میزان چگالی نسبی قطعات گزارش نشده است.

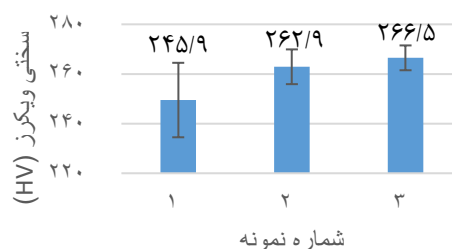
با توجه به ساختارهای به دست آمده می‌توان انتظار داشت با افزایش جزئی چگالی انرژی حجمی لیزر به چگالی نسبی بالاتری برای قطعات نیز دست یافت. اما باید به این نکته توجه نمود که عیوب گازی موجود در نمونه ۳ نمایانگر سطح بالای انرژی در این نمونه است و با افزایش بیش از اندازه انرژی ورودی به قطعه، امکان تشکیل عیب سوراخ کلید و افزایش تعداد حفرات گازی وجود دارد. در نتیجه با افزایش بیش از حد

### فهرست علائم

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| چگالی انرژی حجمی لیزر ( $J/mm^3$ )         | $E_v$      |
| توان لیزر ( $J s^{-1}$ )                   | $P$        |
| سرعت حرکت لیزر ( $mm s^{-1}$ )             | $V$        |
| ضخامت لایه ( $mm$ )                        | $t$        |
| فاصله بین خطوط اسکن لیزر ( $mm$ )          | $h$        |
| سختی ویکرز                                 | HV         |
| نیرو اعمالی در آزمون سختی (N)              | $P$        |
| قطرهای محل اثر نیرو در آزمون سختی ( $mm$ ) | $D_1, D_2$ |

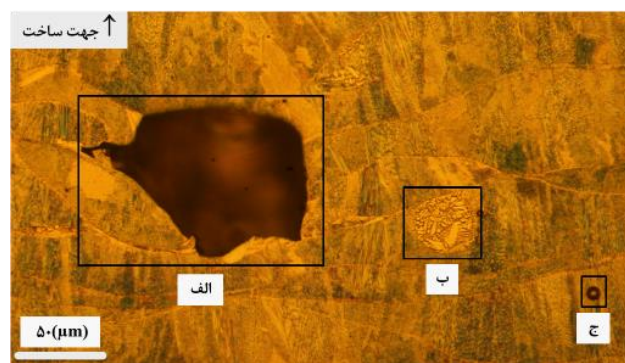


(الف)



(ب)

شکل ۵ (الف) نمونه سختی اندازه‌گیری شده (ب) نمودار سختی ویکرز قطعات



شکل ۶ (عیوب موجود در نمونه ۲ الف) ذوب ناقص (ب) پودر با ذوب جزئی (ج) حفرات گازی

### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تغییر چگالی انرژی لیزر بر میزان تخلخل، عیوب و سختی قطعات تولید شده از جنس سوپرآلیاژ هستلوی ایکس با روش ذوب گزینشی با لیزر مورد بررسی قرار گرفت. طبق بررسی‌های انجام شده مشاهده شد که با افزایش چگالی انرژی حجمی و به طبع میزان انرژی ورودی، قطعات با چگالی نسبی بهتری تولید شده‌اند. با افزایش چگالی انرژی لیزر از ۵۰ به ۹۰ ژول بر میلی‌متر مکعب، کاهش چشم‌گیری در تعداد و اندازه عیوب ذوب ناقص و پودرهای با ذوب جزئی رخ داد. با کاهش میزان تخلخل و پودرهای ذوب جزئی، افزایش چگالی نسبی تا ۹۹/۱ درصد و افزایش سختی ویکرز تا ۲۶۶/۵ مشاهده شد. با توجه به چگالی نسبی ۹۹ درصدی که در نمونه ۳ حاصل شده است، می‌توان این نمونه و پارامتر تولیدی آن را به عنوان نمونه و پارامتر برای تولید قطعه با عیوب کمینه معرفی نمود.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان تأیید می‌کنند که تمامی نتایج ذکر شده در این مقاله حاصل تاش فعالیت‌های پژوهشی نویسندگان است و چیزی خلاف بر واقعیت گزارش نشده است.

**تعارض منافع:** کلیه حقوق مالکیت مادی و معنوی مربوط به این پژوهش متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان و پدیدآورندگان است. این حقوق توسط دانشگاه صنعتی اصفهان و بر اساس خط مشی مالکیت فکری این دانشگاه، ارزش‌گذاری و سهم بندی خواهد شد. هر گونه بهره‌برداری از محتوا، نتایج یا اقدام برای تجاری‌سازی دستاوردهای این پژوهش تنها با مجوز کتبی دانشگاه صنعتی اصفهان امکان‌پذیر است.

**منابع مالی:** هزینه‌های انجام این پژوهش از بودجه تحصیلات تکمیلی دانشگاه صنعتی اصفهان و پژوهانه اساتید این دانشگاه تأمین شده است.

### مراجع

- 1- Reed RC. The superalloys: fundamentals and applications. Cambridge university press; 2008 Jul 31.
- 2- Lippold JC, Kiser SD, DuPont JN. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys. John Wiley & Sons; 2011 Sep 20.
- 3- Davis JR, editor. ASM specialty handbook: tool materials. ASM international; 1995.
- 4- Gibson I, Rosen DW, Stucker B, Khorasani M, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. Additive manufacturing technologies. Cham, Switzerland: Springer; 2021.
- 5- ASTM International. ASTM committee F42 on additive manufacturing technologies.
- 6- Kusuma C. The effect of laser power and scan speed on melt pool characteristics of pure titanium and Ti-6Al-4V alloy for selective laser melting.
- 7- Wang FW, Wu XH, Clark D. On direct laser deposited Hastelloy X: dimension, surface finish, microstructure and mechanical properties. Materials Science and Technology. 2011 Jan 1;27(1):344-56.
- 8- Tomus D, Jarvis T, Wu X, Mei J, Rometsch P, Herny E, Rideau JF, Vaillant S. Controlling the microstructure of Hastelloy-X components manufactured by Selective Laser Melting. Physics Procedia. 2013 Jan 1;41:823-7.
- 9- Montero-Sistiaga ML, Pourbabak S, Van Humbeeck J, Schryvers D, Vanmeensel K. Microstructure and mechanical properties of Hastelloy X produced by HP-SLM (high power selective laser melting). Materials & Design. 2019 Mar 5;165:107598.
- 10- Esmaeilzadeh R, Keshavarzkermani A, Ali U, Mahmoodkhani Y, Behraves B, Jahed H, Bonakdar A, Toyserkani

E. Customizing mechanical properties of additively manufactured Hastelloy X parts by adjusting laser scanning speed. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020 Jan 5;812:152097.