



## بررسی تجربی اثر متقابل چگالی ظاهری و انتقال حرارت پودر بر روی کیفیت قطعات ساخته شده در سامانه ذوب لیزری انتخابی

سید علی فاطمی<sup>1</sup>، جمال زمانی اشانی<sup>2\*</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* صندوق پستی 1999143344، zamani@kntu.ac.ir، تهران

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 مهر 1395

پذیرش: 12 آبان 1395

ارائه در سایت: 13 آذر 1395

کلید واژگان:

نمونه‌سازی سریع

ذوب لیزر انتخابی (SLM)

چگالی ظاهری پودر فلز

ضریب انتقال حرارت گرمایی پودر

ضریب نفوذ حرارتی

### چکیده

این مقاله به بررسی تجربی اثر متقابل چگالی ظاهری پودر فلز و خواص حرارتی آن با استفاده از سامانه طراحی و ساخته شده در این دانشگاه تحت عنوان "دستگاه نمونه‌سازی سریع قطعات فلزی با استفاده از فناوری لایه نشانی پودر به روش ذوب لیزری" می‌پردازد. ذوب لیزر انتخابی (SLM)، یکی از زیر مجموعه فرایندهای نمونه‌سازی سریع است. در این سامانه قطعات از طریق پخش کردن لایه به لایه پودر و تابش پرتو لیزر شکل می‌گیرند. یکی از نکات مهم در SLM توجه به خواص حرارتی پودر فلز (ضریب انتقال حرارت گرمایی و ضریب نفوذ حرارتی) است. در این تحقیق، ضریب هدایت و نفوذ حرارتی پودر فلز با چگالی ظاهری متفاوت بررسی شده است. با توجه به روش اندازه‌گیری اختلافی دو دما، آزمایش‌ها وابستگی خواص حرارتی پودر فلز به چگالی ظاهری را نشان داد. تغییرات چگالی ظاهری از طریق فشار اعمالی به بستر پودر خام و فشرده سازی آن ایجاد شد. این بررسی‌ها در محدوده چگالی ظاهری 44.75% تا 56.4% نسبت به چگالی آهن خالص انجام شده است. از مقایسه نمونه‌های تولید شده در چگالی‌های ظاهری مختلف این مطلب درک شد که فشار اعمالی به بستر پودر خام دارای نقطه پهنه‌ای است. در واقع بهترین کیفیت قطعات تولیدی، در چگالی ظاهری حدود 46% حاصل شد.

## Experimental study on interaction of powder apparent density and heat transfer on the quality of parts made in selective laser melting

Seyed Ali Fatemi, Jamal Zamani Ashani\*

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1999143344 Tehran, Iran, zamani@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 01 October 2016  
Accepted 02 November 2016  
Available Online 03 December 2016

#### Keywords:

Rapid prototyping  
Metal powder apparent density  
Selective Laser Melting (SLM)  
Thermal conductivity  
Thermal diffusivity

### ABSTRACT

This paper presents an experimental study on interaction effects of apparent density and heat transfer characteristics of metal powder by Direct Metal Laser Sintering device which is developed at K. N. Toosi university of technology. Selective Laser Melting (SLM) is a direct fabrication of part through layer by layer powder deposition and successive laser beam irradiation. One of the important properties of the SLM is thermal conductivity and thermal diffusivity of the metal powder. In this paper, thermal conductivity and diffusivity of metal powder with various apparent densities were studied. According to the method of measuring (the difference between two temperatures), The tests showed the dependency of thermal properties to metal powder apparent density. Variations in apparent density was established through the pressure applied to the raw powder bed. This study was performed between apparent density of 44.75% to 56.4% compared to the density of pure iron. Comparing the samples which is produced in different densities, it is concluded that the pressure applied to the raw powder bed had an optimum point of arrest. In fact, the best quality of the manufactured parts, in density of about 46% was obtained.

### 1- مقدمه

و تولید سریع شده است. برای مثال: LENS<sup>1</sup>، SLS<sup>2</sup> و EBM<sup>3</sup> برای تولید قطعات فلزی به صورت سریع مورد استفاده قرار می‌گیرند. از بین این روش‌ها، فن‌آوری‌های پایه پودری SLS متداول‌تر است [2].

ذوب لیزری انتخابی (SLM<sup>4</sup>) یکی از روش‌های ساخت و تولید سریع است که دارای پتانسیل بالا برای توسعه محصولات کاربردی می‌باشد. SLM یک

یکی از تمایلات بزرگ شرکت‌های تولیدی کوتاه شدن زمان تولید، به منظور کوتاه شدن زمان رسیدن محصولاتشان به بازار می‌باشد. روش‌های نمونه‌سازی سریع در دهه هشتاد برای فائق آمدن بر این مسأله ایجاد شدند. نمونه سازی سریع روشی است که معمولاً برای تولید نمونه‌های مهندسی بدون نیاز به شکل‌دهی سنتی استفاده می‌شود [1].

پیشرفت‌های اخیر در نمونه‌سازی سریع منجر به ایجاد روش‌های ساخت

<sup>1</sup> Laser Engineered Net Shaping

<sup>2</sup> Selective Laser Sintering

<sup>3</sup> Electron Beam Melting

<sup>4</sup> Selective Laser Melting

Please cite this article using:

S. A. Fatemi, J. Zamani Ashani, Experimental study on interaction of powder apparent density and heat transfer on the quality of parts made in selective laser melting, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 153-162, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می‌شود. بستر پودر توسط غلتک هموارسازی شده و تحت کوبش قرار می‌گیرد. میزان این کوبش با سرعت دورانی و انتقالی غلتک قابل دست‌یابی خواهد بود. فشارهای بسیار بالا باعث پایین آمدن جریان پذیری پودر خواهد شد. بنابراین لازم است فشار مناسب برای هموارسازی بستر بدست آید. برای این منظور بستر پودر تحت فشارهای مختلف قرار گرفته و سپس تفجوشی می‌شود. به این ترتیب میزان مناسب فشار کوبشی بستر بدست خواهد آمد. به این ترتیب در صورت به دست آوردن فشار بهینه برای هر پودر، بدون نیاز به صرف هزینه بالا برای تولید پودر با چگالی خاص، رسیدن به بهترین کیفیت تولید در دسترس خواهد بود.

### 1-1- مروری بر تحقیقات

چگالی بستر پودر به صورت مستقیم بر روی میزان چگالی قطعه نهایی مؤثر است. در ماشین‌های ساخت و تولید سریع، چگالی بستر معمولاً توسط غلتک‌های هموار کننده سطح ایجاد می‌شود. این غلتک‌ها فشاری را بر روی سطح اعمال می‌نمایند که باعث افزایش چگالی بستر پودر می‌شود. چگالی ظاهری پودر در تفجوشی لیزری مستقیم می‌تواند همان چگالی قطعه خام ایجاد شده با تفجوشی حالت مایع باشد. به این ترتیب چگالی نهایی با افزایش چگالی ظاهری پودر رسوب داده شده در تفجوشی لیزری انتخابی افزایش می‌یابد [9]. چگالی ظاهری مربوط به اندازه، شکل و توزیع اندازه پودر می‌شود. برای کره‌های تک اندازه بهترین چگالی ظاهری به صورت تئوری 74% محاسبه می‌شود. به هر حال چگالی ظاهری بالاتر پودر می‌تواند با مخلوط کردن پودرهایی با اندازه مختلف بدست آید. به صورت تئوری چگالی ظاهری بدست آمده با مخلوط کردن چند پودر می‌تواند تا 98% نیز برسد. در حقیقت، پودرهای صنعتی موجود، چگالی ظاهری در محدوده 20%-70% دارند. زیرا محدوده وسیعی از اندازه ذرات در آنها وجود دارد. بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد که با کمک مخلوط دو نوع پودر با اندازه مختلف چگالی ظاهری 63% بدست می‌آید [12].

چگالی ظاهری پودر فلز متأثر از فاکتورهای زیادی از قبیل: اندازه ذرات، شکل، توزیع اندازه، اصطکاک بین ذرات، شیمی سطح، گلوله شدن، نوع جمع کردن و غیره می‌باشد. عموماً با کاهش اندازه ذرات، به دلیل اصطکاک بالاتر بین ذرات، چگالی ظاهری پودر روی هم قرار گرفته کاهش می‌یابد. عموماً پودرهای کروی نسبت به دیگر اشکال، به واسطه اصطکاک کمتر، چگالی ظاهری بالاتری دارند. به عبارت دیگر زبری سطح بالاتر و یا بی قاعده بودن شکل ذرات منجر به کاهش چگالی ظاهری می‌شود. ژو و همکارانش به بررسی رابطه بین چگالی نهایی و چگالی ظاهری بستر پودر پرداختند. ایشان چگالی بالاتر پودر را از طریق مخلوط کردن سه پودر با اندازه ذرات مختلف بدست آورده اند. به طوری که  $D_L$ ،  $D_M$  و  $D_S$  به ترتیب قطر کره‌های بزرگ، متوسط و کوچک می‌باشند. بنابراین زمانی که رابطه بین قطر ذرات به صورت،  $D_L : D_M : D_S = 9.23 : 3.83 : 1$  برقرار باشد، بالاترین چگالی پودر بدست خواهد آمد. برای مثال اگر نسبت عددی ذرات 1:1:4 باشد چگالی ظاهری چیدمان 95.7% می‌تواند بدست آید. اما در واقعیت ترکیب پودر با این رابطه هندسی به دلیل عدم امکان رسیدن به پودر فلز تک سایز و وابستگی اندازه پودر به پارامترهای مختلف فرایند و قیمت تمام شده آن غیر ممکن است. برای مثال بزرگترین اندازه ذرات پودر باید کوچکتر از ضخامت لایه (در محدوده 0.1 الی 0.02 میلی‌متر) باشد. پودر فلز با اندازه ذرات خیلی کوچک اثر ضعیف تری بر روی بهبود چگالی ظاهری دارد زیرا براحتی مترکم می‌شوند. علاوه بر این امکان تبخیر پودرهای خیلی ریز در هنگام برخورد پرتو

روش ساخت مستقیم محصول با خواص نزدیک به ماده پایه است که از طریق سیستم تولید لایه لایه انجام شده است. فرایند تثبیت حوضچه مذاب و فرایند جامد شدن آن، اثر مستقیمی بر روی خواص مکانیکی و ظاهری نمونه‌های تولید شده دارد. به دلیل تأثیر هدایت حرارتی و خواص ترموفیزیکی پودر در فرایند تثبیت مذاب، اندازه‌گیری نرخ انتقال حرارت از طریق مواد از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر این چگالی ظاهری پودر نیز به صورت مستقیم در خواص مکانیکی و ظاهری نمونه‌های تولید شده مؤثر است. پودر در چگالی‌های ظاهری مختلف خواص حرارتی متفاوتی دارد. بنابراین بررسی خواص حرارتی در چگالی‌های مختلف برای شناخت بهتر فرایند بسیار با اهمیت است [3].

در طول SLM، پرتو لیزر به سطح پودر می‌تابد. قبل از تثبیت حوضچه مذاب و اتصال بین ذرات پودر، انتقال گرما از پودر تحت تابش به دیگر ذرات پودر مجاور انجام می‌شود. تحکیم خوب بین ذرات پودر فلز به مقدار مناسب حرارت برای ذوب شدن ذرات پودر بستگی دارد. این حرارت مناسب می‌تواند به واسطه انتقال حرارت به پودرهای اطراف منتقل شود و از طریق تفجوشی ذرات پودر شکل جامدی ایجاد نماید. در طی فرایند تثبیت، انتقال حرارت از طریق ذرات پودر و هوا رخ می‌دهد. بنابراین، هدایت حرارتی یک عنصر ضروری در درک روند تحکیم پودر فلزات است. به منظور تعیین هدایت حرارتی از پودر فلز، تکنیک‌های مختلف از جمله فوتواکوستیک [4]، سیم داغ [5]، پروب سوزن گذرا [6]، تحریک گرمایش کرنل [7] و تکنیک تصاویر پیروالکتریک [8] وجود دارد. در این پژوهش روش تطبیقی در حالت پایدار استفاده شده است. این روش نسبتاً ساده، مؤثر، سریع و کم هزینه است و در عین حال منجر به یک نتیجه قابل اعتماد می‌شود.

چگالی ظاهری پودر در تفجوشی لیزری مستقیم می‌تواند همان چگالی قطعه خام ایجاد شده با تفجوشی حالت مایع باشد. به این ترتیب چگالی نهایی با افزایش چگالی ظاهری بستر پودر خام در تفجوشی لیزری انتخابی افزایش می‌یابد [10,9]. چگالی ظاهری مربوط به اندازه، شکل و توزیع اندازه پودر می‌شود. اما چگالی بستر پودر خام علاوه بر چگالی ظاهری پودر به نحوه هموار سازی بستر نیز بستگی دارد. به همین دلیل روش‌هایی که با فشار کوبشی بستر همراه هستند، چگالی بالاتر بستر پودر خام را به دنبال دارند [11].

به دست آوردن چگالی مناسب برای پودر از طریق توزیع مناسب اندازه پودر نیز امکان‌پذیر است. اما به چند دلیل به دست آوردن چگالی مناسب از طریق اعمال فشار به بستر پودر راه کار بهتری است. نخست اینکه رسیدن به پودر فلز شامل ذرات تک سایز خالص غیر ممکن است. دلیل دیگر اینکه اندازه پودر در تفجوشی لیزری انتخابی، محدود به خیلی از پارامترها از قبیل ضخامت لایه، جریان پذیری، مشخصات رسوب‌گذاری و قیمت تمام شده می‌باشد. تولید پودر با اندازه دانه کاملاً یکنواخت و ترکیب با درصد مناسب نیازمند چندین بار الک کردن پودر و به دست آوردن اندازه یکسان است. به دست آوردن اندازه یکسان از پودر و در نتیجه ایجاد چگالی مطلوب تقریباً غیر ممکن و بسیار پر هزینه است [12]. هرچقدر پودر مورد استفاده ارزان‌تر باشد این هزینه اضافه کمتر توجیه‌پذیر است. با توجه به اینکه پودر آهن یکی از ارزان‌ترین و پرکاربردترین پودرهای فلزی برای نمونه‌های تجاری در نمونه‌سازی سریع است، این تحقیق بر روی پودر آهن انجام شده است. در این مقاله سعی شده است تا چگالی مطلوب از روشی ساده‌تر و کم هزینه‌تر ایجاد شود. برای این منظور چگالی از طریق فشرده‌سازی پودر کنترل

لیزر با بستر زیاد می‌باشد. تبخیر پودر احتمال تولید پلاسما را افزایش می‌دهد [12].

محدوده وسیعی از قطر ذرات ( $1\mu\text{m} < Q < 50\mu\text{m}$ ) ممکن است سبب تغییر در میزان مذاب شود. پرتوی به قطر 100 میکرومتر ممکن است ذرات 50 میکرومتر را تنها ذوب جزئی کند، در حالی که ذرات کمتر از یک میکرومتر در این حالت ممکن است بخار شوند. در نتیجه توزیع مناسب اندازه پودر برای

از بین بردن این اثر و در نتیجه بالا رفتن چگالی ظاهری لازم است [13].  
ژو و همکارانش این بررسی را به صورت عملی نیز بر روی تفجوشی بسترهای پودری با چگالی‌های مختلف انجام داده‌اند. ایشان دریافته‌اند که نمونه‌های تولید شده با چگالی بستر بالاتر، چگالی نهایی بیشتری را نشان می‌دهند. با توجه به این آزمایش‌ها به راحتی درک می‌شود که بالا رفتن چگالی ظاهری پودر مستقیماً بر چگالی نهایی قطعات تولید شده مؤثر است.

اما این نکته قابل بررسی است که در چگالی ظاهری خیلی بالا امکان جریان پذیری پودر پایین می‌آید. این امر باعث عدم جریان پذیری مذاب و پایین آمدن چگالی ظاهری و افزایش گویی شدگی می‌شود [12].  
در برخی تحقیقات دیگر تأثیر اندازه دانه را بر روی اندازه جبهه مذاب و ناحیه تفجوشی شده بررسی نموده‌اند. نیکولای تولچکو و همکارانش [14] به بررسی این اثر بر روی پودر تیتانیوم پرداخته‌اند. ایشان از سه پودر با اندازه مختلف استفاده نموده‌اند. بر اساس نظریه ایشان انتقال حرارت از سه طریق، هوا، تشعشع و تماس انجام می‌شود. به دلیل وجود پودر در خلاء می‌توان از انتقال حرارت از طریق هوا صرف‌نظر نمود. اندازه و شکل ذرات و توزیع اندازه آنها به صورت قابل ملاحظه‌ای بر روی چگالی ظاهری مؤثر است. با افزایش چگالی ظاهری میزان انتقال حرارت تماسی بالا می‌رود. اگر ناحیه تفجوشی با انتقال حرارت از طریق تماس کنترل شود، این ناحیه با افزایش چگالی ظاهری افزایش خواهد یافت.

پودر با اندازه ذرات پایین‌تر انتقال حرارت تشعشی کمتری دارد [15]. این امر توضیح می‌دهد که چرا با یک توان لیزر ثابت پودر نرم‌تر میزان ناحیه تفجوشی شده کمتری می‌دهد. بنابراین چون اهمیت انتقال حرارت تشعشی بالاتر از تماسی است [16]، مقدار ناحیه تفجوشی با افزایش اندازه پودر افزایش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش چگالی ظاهری میزان آنتالپی پودر بالا می‌رود. بنابراین گرمای لیزر با افزایش چگالی ظاهری بر روی سطح بیشتری پخش می‌شود [17]. در نتیجه میزان ناحیه تفجوشی شده با افزایش چگالی ظاهری پایین می‌آید. با افزایش چگالی ظاهری انتقال حرارت تماسی ذرات پودر بالا می‌رود. اما با افزایش اندازه دانه، چگالی ظاهری کم شده و میزان انتقال حرارت تشعشی بالا می‌رود [18]. از طرفی با افزایش چگالی ظاهری میزان آنتالپی نیز بالا می‌رود. هر چه میزان انتقال حرارت تماسی و تشعشی و آنتالپی بالاتر باشد، گرمای ورودی در سطح بیشتری پخش می‌شود [19]. در نتیجه میزان جبهه مذاب و تفجوشی کاهش می‌یابد. در مکانیزم تفجوشی ترتیب اهمیت بر اساس، آنتالپی، انتقال حرارت تشعشی و انتقال حرارت تماسی می‌باشد [20].

## 2- چیدمان آزمایش‌ها

یک لیزر حکاکی ان‌دی‌یگ<sup>1</sup> با حداکثر توان 75 وات برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. تجهیزات تست شامل یک لیزر حکاکی، از نوع Nd:YAG-75DP با منبع دبود پمپ، طول موج 1.64 نانومتر و دارای کیو سوئیچ است. پارامترهای قابل تغییر در این لیزر شامل جریان (5-10 آمپر)، سرعت اسکن



Fig. 1 Experimental device, test setup

شکل 1 دستگاه و چیدمان آزمایش‌ها

1 Nd:YAG

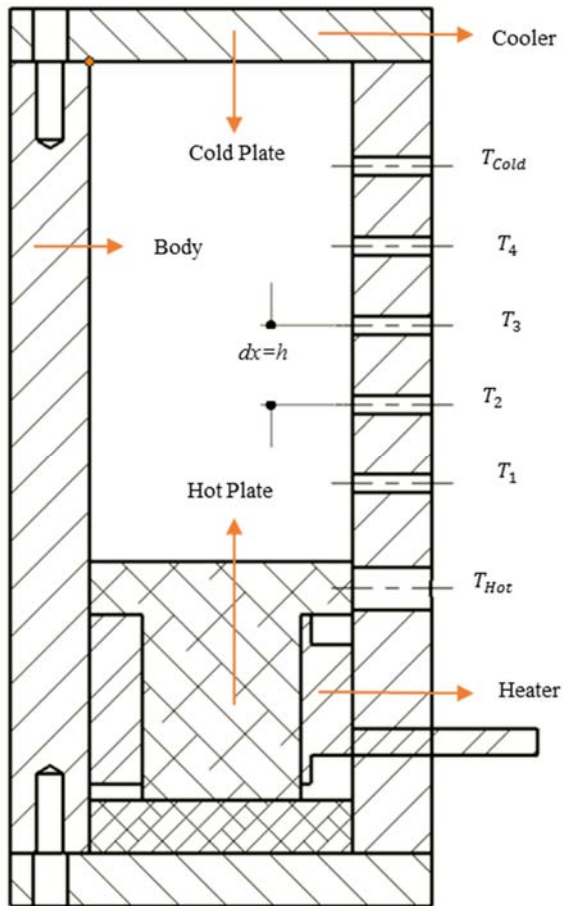


Fig. 3 Schematic view of the test setup for thermal properties of powder

شکل 3 نمای شماتیک از مخزن تست خواص حرارتی پودر

با توجه به شرایط پایدار دما، نرخ تغییرات دما در واحد زمان در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر در این حالت بعد از زمان در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین با جایگذاری معادلات (2) و (3) در معادله (1)، معادله (6) نتیجه خواهد شد.

$$K = -\frac{mC_p(T_{Hot} - T_{Cold})dx}{A(T_2 - T_3)} \quad (6)$$

معادله (7) نیز از جایگذاری معادلات (4) و (5) بدست آمده است.

$$K = -\frac{C_p \rho h^2 (T_{Hot} - T_{Cold})}{(T_2 - T_3)} \quad (7)$$

با توجه به معادله (7) ضریب انتقال حرارت برای چگالی ظاهری مختلف قابل دسترس است. علاوه بر ضریب انتقال حرارت، برای بررسی و تحلیل صحیح، باید ضریب نفوذ گرمایی نیز بدست آید.

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \quad (8)$$

با توجه به معادله (8)، با داشتن چگالی ظاهری مختلف پودر ضریب نفوذ گرمایی نیز به راحتی قابل محاسبه خواهد بود.

### 3- طریقه آزمایش‌ها

به منظور بررسی تأثیر چگالی ظاهری بر روی خواص قطعات، تمام آزمایش‌ها با پارامترهای فرایندی یکسان و بهینه‌سازی شده در آزمایش‌ها قبلی انجام شده است [22].

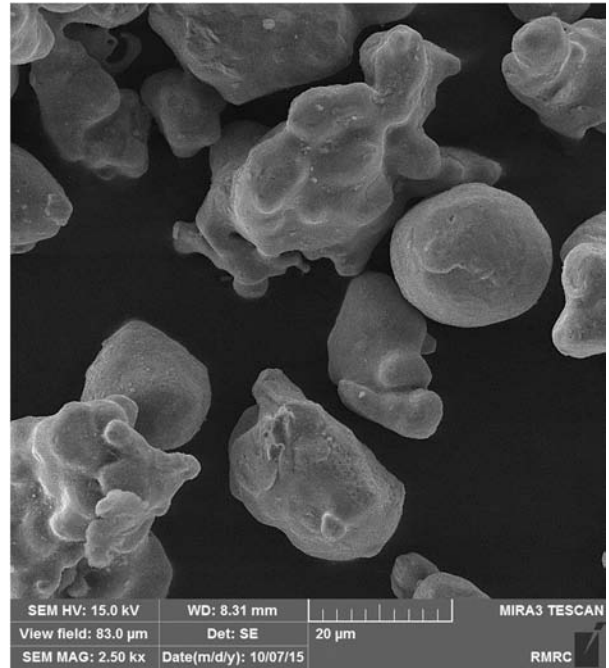


Fig. 2 SEM image of the powder with 2500 magnification

شکل 2 تصویر SEM از پودر استفاده شده با بزرگنمایی 2500 برابر

جدول 1 ترکیب اندازه دانه‌های پودر استفاده شده در آزمایش‌ها

Table 1 The composition of the powder grain size used in the experiment

محدوده اندازه	$\geq 100$	100-70	70-40	40-10	$10 \geq$
درصد ذرات	Trace	2.9%	12.4%	58.2%	26.5%

به منظور بدست آوردن ضریب انتقال حرارت در چگالی ظاهری مختلف، پودر در یک مخزن، تحت فشارهای مختلف قرار گرفت. این مخزن به صورت استوانه‌ای با قطر 50 و ارتفاع 95 میلی‌متر طراحی شده است. در کف مخزن یک هیتر برقی با سیستم کنترل دما قرار گرفته است. این سیستم همیشه دما هیتر را روی 130 درجه سانتی‌گراد نگه می‌دارد. در قسمت فوقانی مخزن دما همواره برابر با دمای محیط نگه داشته می‌شود. بین منبع سرد و منبع گرم حرارتی داماسنج‌هایی به فواصل 15 میلی‌متری قرار گرفته است. با روشن شدن هیتر دما مخزن بالا می‌رود. دمای هر کدام از داماسنج‌ها در زمان ثبت شده است. ثبت دماها تا زمانی که دمای مخزن به تعادل برسد ادامه دارد. شکل 3 نمایی شماتیک از مخزن تست پودر را نشان می‌دهد.

با توجه به معادلات انتقال حرارت [23] نتایج به صورت معادلات (1) تا (8) حاصل شد.

$$H = \frac{Q}{t} = -KA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

با توجه به ثبت داده‌ها تا رسیدن سیستم به حالت پایدار معادلات (2) و (3) نتیجه می‌شود.

$$Q = mC_p \Delta T = mC_p (T_{Hot} - T_{Cold}) \quad (2)$$

$$dT = T_2 - T_3 \quad (3)$$

$$dx = 15\text{mm} = h \quad (4)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow m = \rho V \xrightarrow{V=A \times dx} m = \rho A dx \quad (5)$$



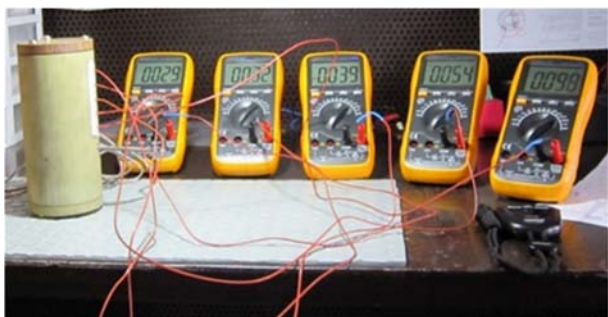


Fig. 4 Testing set up for powder thermal properties

شکل 4 چیدمان آزمایش‌ها برای تست خواص حرارتی پودر

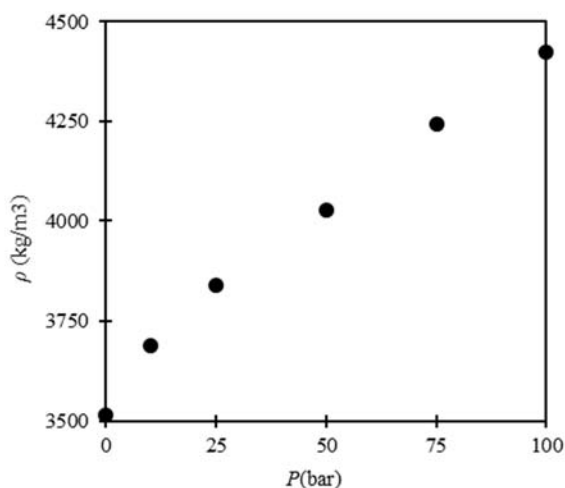


Fig. 5 Apparent density changes according to the applied pressure iron powder

شکل 5 تغییرات چگالی ظاهری بر حسب فشار اعمالی به پودر آهن

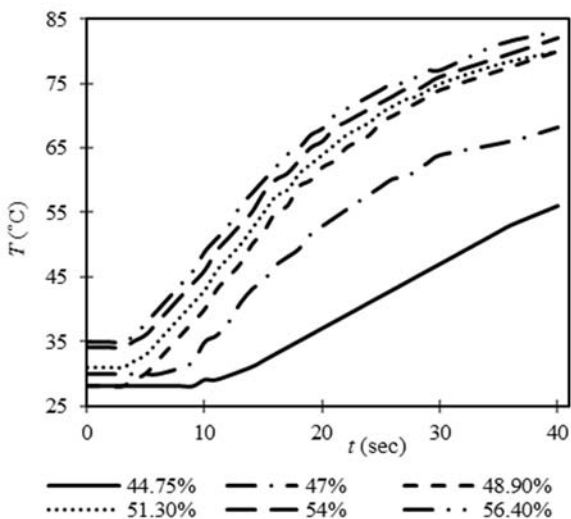


Fig. 6 Temperature changes over time in T2 locations and different apparent density

شکل 6 تغییرات درجه حرارت نسبت به زمان در نقطه T2 و چگالی ظاهری مختلف

#### 4- نتایج و طبقه‌بندی آن

نتایج حاصل از نمونه‌های تولید شده در سه گروه مقایسه ابعادی، بررسی اپتیکی و خواص فیزیکی طبقه بندی شده است. در مقایسه ابعادی عمق نفوذ،

انتقال حرارت به طریق هدایت در داخل اجسام موقعی پدید می‌آید که گرادیان دمایی بین دو نقطه از جسم ایجاد شود. هر قدر گرادیان دما بیشتر باشد شدت انتقال حرارت زیادتر خواهد بود. هدایت حرارتی در واقع، انتقال انرژی از ذرات پرنرژی به ذرات کم انرژی در یک ماده است که توسط فعل و انفعال بین ذرات صورت می‌گیرد.

ضریب انتقال حرارت و نفوذ حرارتی پارامترهایی هستند که در بسیاری از صنایع، برای مشخص کردن و مدل نمودن فرایند عملیات مهم می‌باشند. نفوذ حرارتی  $(\alpha = k/\rho \times C_p)$  جزء خواص ماده است. ضریب انتقال حرارت به خواص فیزیکی-حرارتی محیط، ویژگی‌های محصول (اندازه، شکل، دمای سطح و زبری سطح)، خواص مواد و ابزار انتقال حرارت بستگی دارد [3].

پارامترهای انتقال حرارت (ضریب انتقال حرارت و نفوذ حرارتی) برای مشخص کردن، مدل نمودن و بهینه کردن فرایندهای انتقال حرارت مهم می‌باشند. شیوه‌های متفاوتی با جزئیات برای تعیین تجربی این پارامترها توضیح داده شده است. به دلیل اینکه این شیوه‌ها با راه حل‌های تحلیلی نیازمند داده‌های آزمایشگاهی از ماده مورد نظر است، لذا فواید بیشتری نسبت به بسیاری از روشهای دیگر مانند روش سیستم انباشته یا معادلات تجربی برای تعیین این پارامترها دارد. همان‌طور که دیده شد در این روش‌ها، دانستن یکی از پارامترها برای تعیین پارامتر دیگر مورد نیاز است. مثلاً تعیین ضریب انتقال حرارت برای تعیین ضریب نفوذ حرارتی باید معلوم باشد. بنابراین هنوز گسترش و بهینه کردن روشی برای تعیین همزمان این دو پارامتر اهمیت دارد. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا پودر تحت فشارهای مختلف قرار گرفت. جدول 2 فشارهای مختلف برای آزمایش و خواص حرارتی پودر در چگالی ظاهری مختلف را نشان می‌دهد.

با توجه به مشخص بودن حجم و وزن مخزن قبل از قرار گرفتن پودر درون آن، با وزن کردن مخزن پر شده از پودر، تحت فشارهای مختلف، بدست آوردن چگالی ظاهری به راحتی امکان پذیر خواهد بود. شکل 4 چیدمان آزمایش‌ها برای تست خواص حرارتی پودر و شکل 5 تغییرات چگالی ظاهری در فشارهای مختلف را نشان می‌دهد. بدنه مخزن از جنس فایبر گلاس در نظر گرفته شده است تا هم بتواند در برابر فشار اعمالی تحمل داشته باشد و هم از انتقال حرارت بین پودر با محیط اطراف جلوگیری کند.

با حرارت دادن به مخزن دماهای T1 تا T4 در فواصل زمانی برابر ثبت شده است. با رسیدن مخزن به تعادل و با توجه به معادله 8 و 9 مقادیر ضریب رسانایی و نفوذ گرمایی بدست خواهد آمد.

با توجه به شکل 3 و معادله 8 با داشتن دمای تعادل برای نقاط T2 و T3 می‌توان ضریب انتقال حرارت و نفوذ گرمایی پودر را در چگالی ظاهری مختلف به دست آورد.

شکل‌های 6 و 7 تغییرات دمای مخزن نسبت به زمان به ترتیب در نقاط T2 و T3 را نشان می‌دهند. برای به دست آوردن ضریب نفوذ حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه پودر با آهن خالص یکسان فرض شده است.

جدول 2 خواص حرارتی پودر در چگالی ظاهری مختلف

Table 2 Thermal properties of powders in different apparent density

فشار (بار)	چگالی ظاهری	چگالی ظاهری %	$\alpha$	K
0	3513.2	44.75	3.80	6.27
10	3690.2	47.0	10.07	17.34
25	3840.4	48.9	13.21	23.46
50	4028.2	51.3	16.47	31.14
75	4242.7	54.0	18.21	35.90
100	4425.1	56.4	19.11	39.52



Fig. 8 Top view of produced samples

شکل 8 نمای فوقانی نمونه‌های تولید شده

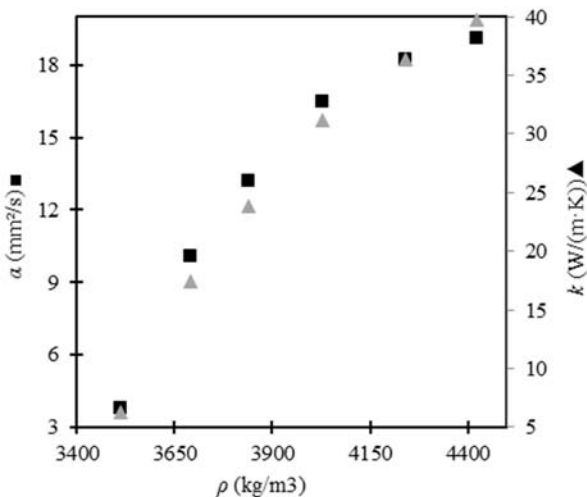


Fig. 9 Variations of thermal diffusivity and thermal conductivity in different density

شکل 9 تغییرات ضریب نفوذ و هدایت حرارتی در چگالی ظاهری مختلف

است؛ زیرا با افزایش چگالی ظاهری، حجم بالاتری از پودر در معرض انرژی لیزر قرار می‌گیرد. بعلاوه چگالی ظاهری بالاتر، نفوذ لیزر در بستر را مشکل‌تر خواهد کرد و در نتیجه عمق نفوذ نیز کاسته خواهد شد. علاوه بر این ضریب جذب پودر فلز، از فلز پایه بالاتر است، بنابراین هرچه میزان فشردگی بیشتر باشد ضریب جذب پودر نیز کمتر خواهد شد. این عامل نیز نقش مهمی در کاهش میزان عمق نفوذ دارد. زیرا خواص پودر با فشردگی بالاتر شباهت بیشتری به

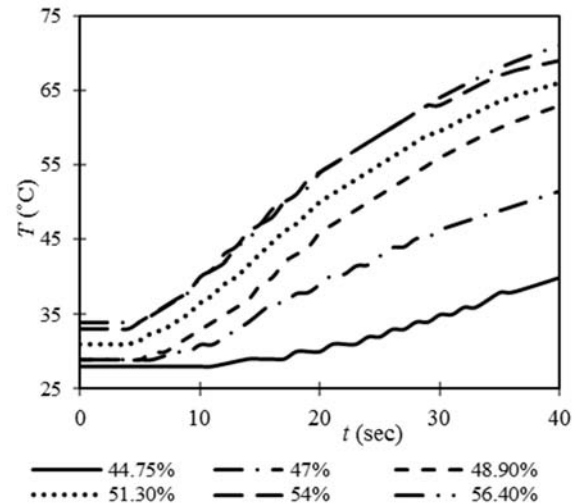


Fig. 7 Temperature changes over time in T3 locations and different apparent density

شکل 7 تغییرات درجه حرارت نسبت به زمان در در نقطه T3 و چگالی ظاهری مختلف

پهنای حلقه، عمق قسمت مقعر، ارتفاع دیواره و قطر داخلی به کمک کولیس اندازه‌گیری شده است. اندازه‌ها در زوایای 60 درجه نسبت به شروع تفجوشی، ثبت شده و میانگین آنها ملاک قرار گرفته است. علاوه بر مشخصات ابعادی نمونه‌ها مشخصاتی از قبیل صافی سطح، میزان گویی شدگی، انحناء و وجود شیار نیز به کمک میکروسکوپ و با مقایسه ای بین نمونه‌ها بدست آمده است. خواص فیزیکی از قبیل استحکام، میزان اکسیدهای سطحی به صورت رتبه‌بندی بین نمونه‌ها بررسی شده است. شکل 8 نمای فوقانی نمونه‌های تولید شده در چگالی ظاهری مختلف را نشان می‌دهد.

در بررسی اپتیکی و مقایسه ظاهری، میزان گویی شدگی و صافی سطح نمونه‌ها به کمک میکروسکوپ ارزیابی شد. بعد از مقایسه نمونه‌ها میزان گویی شدگی به صورت رتبه‌بندی نشان داده شده است. این رتبه‌بندی با توجه به استاندارد اروپایی برای اندازه گذاری صافی سطح سمباده انجام شده است. در واقع مانند استاندارد اروپایی که اندازه و تعداد ذرات روی سطح درجه سمباده را مشخص می‌کند، اعداد به دست آمده برای صافی سطح نشان دهنده همین مطلب است.

با افزایش فشار، چگالی ظاهری به صورت خطی بالا می‌رود. به طوری که چگالی ظاهری 100% در فشار 470 بار حاصل شد (شکل 5). نتایج آزمایش حرارتی پودر نشان داد که با افزایش چگالی ظاهری، ضریب رسانایی و نفوذ گرمایی نیز بالا می‌رود. اما این بالا رفتن به صورت یک تابع لگاریتمی است که به صورت حدی در چگالی ظاهری نهایی به مقدار استاندارد برای آهن خالص میل می‌کند.

شکل 9 رابطه بین نفوذ گرمایی و ضریب رسانایی را در چگالی ظاهری مختلف نشان می‌دهند. هر دو تابع حالت لگاریتمی دارند اما به دلیل ثابت فرض شدن ظرفیت گرمایی ویژه پودر آهن در چگالی ظاهری مختلف، شیب تغییرات ضریب هدایت حرارتی بیشتر است.

## 5- بحث و بررسی نتایج

### 5-1- مقایسه ابعادی

با افزایش فشار اعمالی بر روی بستر پودر خام در نمونه‌ها کاهش عمق نفوذ دیده می‌شود. علت این پدیده بالا رفتن چگالی بستر پودر در فشارهای بالاتر

اندازه ذرات خیلی ریز خواهد شد. عدم تبخیر پودر از تولید پلاسما و در نتیجه رانده شدن حوضچه مذاب به اطراف جلوگیری خواهد کرد. پلاسما و رانده شدن مذاب به اطراف خود یکی از عوامل مؤثر بر تقعر سطح است [13,12].

میزان تقعر در فشارهای بالاتر از 25 بار تقریباً ثابت بوده و به میزان حدی 0.02 میلی‌متر میل می‌کند. در این فشارها چگالی ظاهری پودر تقریباً همان چگالی قطعه را دارد و این میزان انقباض ناشی از انقباض مذاب بوده و تغییرات چگالی چندان بر آن اثری ندارد. علاوه بر این افزایش فشار باعث اتصال کامل ابتدا و انتهای حلقه می‌شود بگونه‌ای که در کلیه شرایطی که فشار اعمال شده است، هیچگونه انحناء و بلند شدگی از روی سطح در نمونه‌ها دیده نمی‌شود. این امر نیز نشان از انقباض کمتر قطعه در فشارهای بالاتر دارد.

نکته جالب که از شکل‌های 10 و 11 درک می‌شود، تقاطع دو نمودار در چگالی ظاهری حدود 46% است. در چگالی ظاهری کمتر از 46% تأثیر چگالی ظاهری بر روی عمق نفوذ پر رنگ تر از تأثیر ضریب انتقال حرارتی بر آن است. اما در چگالی ظاهری بالاتر از 46% ضریب انتقال حرارت تأثیر پر رنگ تری دارد. این چگالی ظاهری در فشار تقریبی 7 بار بدست آمده است.

## 2-5- بررسی ایتیکی

اغلب میزان گویی شدگی و صافی سطح رابطه معکوس با یکدیگر دارند. همان‌طور که در شکل 12 نشان داده شده است، رابطه صافی سطح با افزایش چگالی ظاهری بستر پودر، دارای نقطه بهینه‌ای است. در چگالی ظاهری 46.5% (فشار 7 بار) کمترین گویی شدگی و بهترین صافی سطح نتیجه می‌شود.

بالا رفتن فشار باعث خواهد شد تا علاوه بر کم شدن انرژی لیزر، حرکت حوضچه مذاب نیز مشکل‌تر شود. زیرا به دلیل فشرده شدن پودرها در یکدیگر حرکت ذرات به داخل حوضچه مذاب و چیدمان مجدد آنها مشکل‌تر خواهد شد [25,21]. این امر باعث بالا رفتن گویی شدگی سطح پودر می‌شود. اما چگالی ظاهری زیر 47% (فشارهای کمتر از 10 بار) باعث خواهد شد تا حجم مذاب تا حدودی کمتر شود. این امر به کاهش گویی شدگی کمک خواهد نمود.

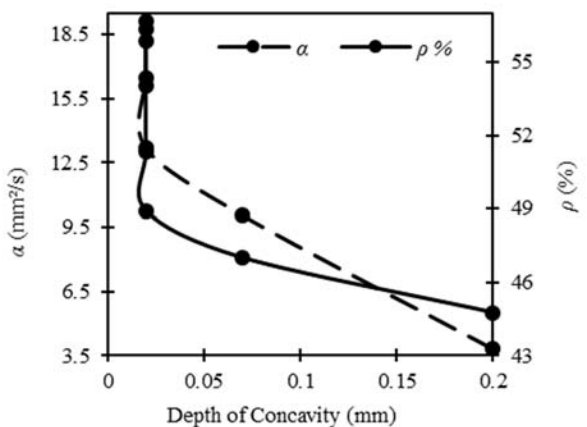


Fig. 11 Variations to the depth of concavity of the thermal diffusivity, density

شکل 11 تغییرات تقعر و انقباض مذاب نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری

فلز پایه خواهد داشت و در نتیجه ضریب جذب آن نیز کمتر خواهد بود. مقایسه نمونه‌های تولیدی نشان داد که افزایش عمق نفوذ در فشارهای بالا همگرا به عددی ثابت می‌شود. در واقع بالا بردن فشار تا حدی مؤثر بر کاهش عمق نفوذ است و از حدی بالاتر تأثیر چندانی بر تغییرات عمق نفوذ نخواهد داشت. زیرا فشارهای بالاتر تأثیر کمتر بر میزان افزایش چگالی بستر دارد.

شکل 10 تغییرات عمق نفوذ نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری پودر را نشان می‌دهد. با افزایش چگالی ظاهری نفوذ حرارتی نیز اضافه شده است. بنابراین انرژی اعمالی به حجم بیشتری از پودر وارد خواهد شد. در نتیجه گرادیان حرارتی بر روی بستر پودر خام نسبت به چگالی ظاهری پایین‌تر، کمتر خواهد بود. این امر باعث ذوب کمتر پودر شده و در نتیجه عمق نفوذ کاسته می‌شود.

بررسی پهنای کل حلقه در نمونه‌های تولیدی نشان می‌دهد که پهنای کل حلقه با افزایش فشار کاهش می‌یابد و در فشارهای بالا به مقدار حدی 1.8 میلی‌متر میل می‌کند. در واقع این کاهش پهنای تا چگالی ظاهری 49% (فشار 25 بار) به صورت خطی است اما در فشارهای بالاتر از آن تغییرات با شیب کمتری انجام می‌شود و نهایتاً در فشارهای بالاتر به میزان حدی 1.8 میلی‌متر میل می‌کند.

در واقع اعمال چگالی ظاهری بالاتر از 50%، تأثیر چندانی بر روی تغییرات پهنای کل حلقه ندارد. زیرا با افزایش فشار چگالی ظاهری بستر پودر بالا رفته و به میزان چگالی قطعه اصلی نزدیک می‌شود. در چنین شرایطی میزان پودر در واحد سطح بالا رفته و علاوه بر این میزان جذب بستر نیز با افزایش فشار کاسته خواهد شد. در نتیجه با توجه به ثابت بودن توان لیزر، میزان مذاب کاسته شده و پهنای مذاب نیز کم خواهد شد. در واقع در چگالی ظاهری بالاتر از 50% میزان انقباض قطعات تولید شده به کمترین حالت رسیده و پهنای قطعات تولید شده با قطر لیزر برابر است.

تأثیر دیگر فشار بر روی هندسه قطعه کاهش تقعر جبهه مذاب با افزایش فشار است. به گونه‌ای که در فشارهای بالا میزان تقعر به صفر میل می‌کند. علت اصلی بوجود آمدن تقعر، انقباض مذاب می‌باشد. هرچه چگالی پودر به چگالی مذاب نزدیک‌تر باشد، انقباض ناشی از ذوب نیز کمتر خواهد بود [24,13]. بنابراین اضافه شدن چگالی باعث کاسته شدن انقباض و در نتیجه کاهش تقعر خواهد شد. علاوه بر این افزایش چگالی ظاهری با اعمال فشار به بستر پودر خام، باعث قفل شدن پودر و در نتیجه جلوگیری از تبخیر پودر با

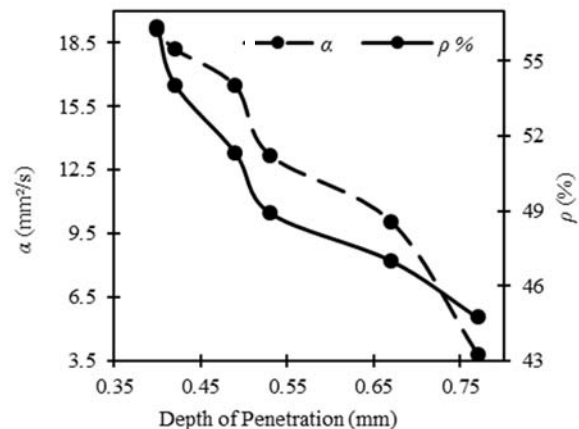


Fig. 10 Variations to the penetration depth of the thermal diffusivity, density

شکل 10 تغییرات عمق نفوذ نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری

تنظیم شود که این فشار را ایجاد نماید. زیرا در این فشار هوای محبوس در پودر بدون کاهش چشمگیر سیلان پودر می تواند از آن خارج شود.

شکل 14 نیز تغییر استحکام نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری را نشان می دهد. اما در چگالی ظاهری 46.5% (فشار 7 بار) به دلیل امکان ایجاد چیدمان مجدد ذرات پودر و حرکت حوضچه مذاب، ترک های زیر سطحی به وجود نمی آید. بعلاوه به دلیل بالا بودن چگالی بستر پودر خام، چگالی ظاهری قطعات تولید شده نیز بالاتر خواهد بود و در نتیجه استحکام قطعات تولید شده بیشتر است.

### 6- نتیجه گیری

آزمایش ها بر روی ضریب نفوذ حرارتی پودر آهن در چگالی ظاهری مختلف انجام شد. نتایج آزمایش حرارتی پودر نشان داد که با افزایش چگالی ظاهری،

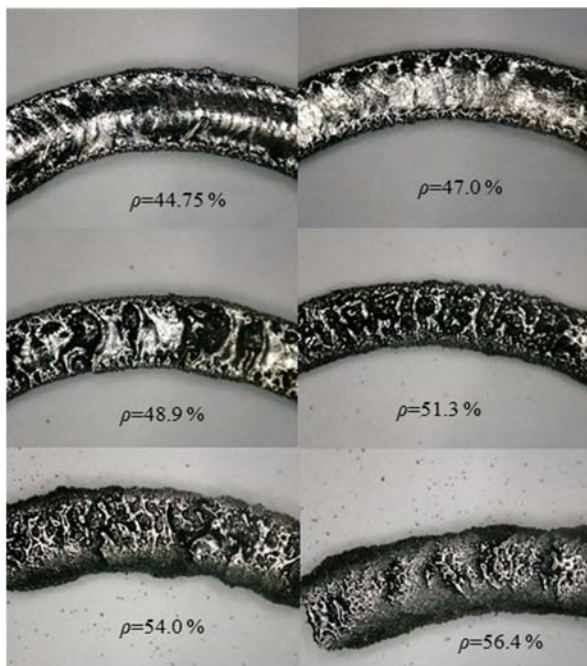


Fig. 13 View of the samples produced at 40X magnification optics  
شکل 13 نمای اپتیکی با بزرگ نمایی 40 برابر از نمونه های تولید شده

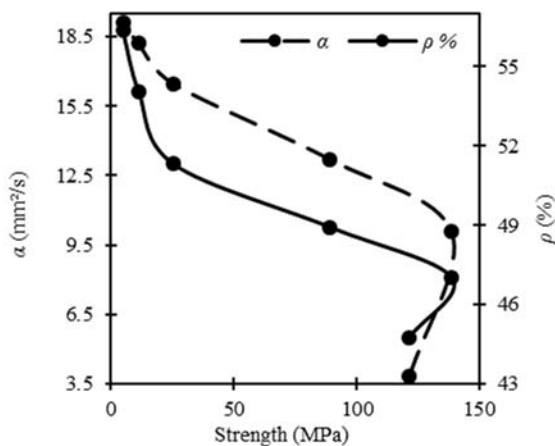


Fig. 14 Variations to the Strength of the thermal diffusivity, density  
شکل 14 تغییر استحکام نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری

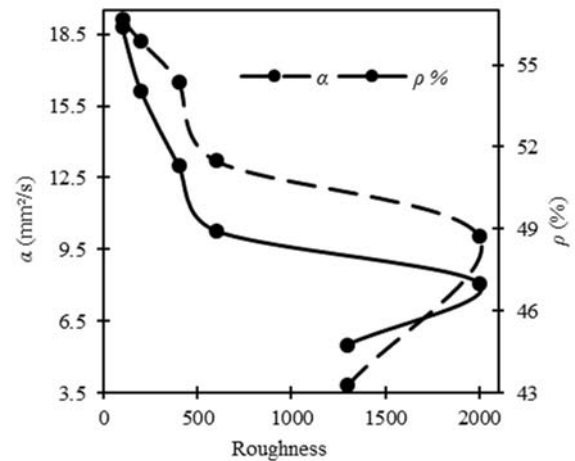


Fig. 12 Variations to the Roughness of the thermal diffusivity, density

شکل 12 تغییرات صافی سطح نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری

علاوه بر این بالا رفتن چگالی بستر باعث کاهش انقباض مذاب تولید شده خواهد شد. ولی این میزان فشار آنقدر نیست که باعث قفل شدن ذرات پودر در یکدیگر شود و در نتیجه حوضچه مذاب می تواند بر روی سطح حرکت نماید. بنابراین کمترین میزان گویی شدگی در چگالی ظاهری 46.5% (فشار 7 بار) دیده می شود. شایان ذکر است در همین فشار بهترین کیفیت سطح نیز قابل مشاهده است.

با توجه به شکل 12، در چگالی ظاهری کمتر از 46%، تأثیر چگالی ظاهری از انتقال حرارت بیشتر است (مانند شکل های 10 و 11). اما با افزایش چگالی ظاهری قطعات این روند معکوس می شود. زیرا هرچه انرژی اعمالی به بستر کمتر جذب شود، مذاب ایجاد شده کمتر خواهد بود و تعداد ذرات ذوب نشده با اندازه بزرگ تر باقی خواهد ماند. در نتیجه صافی سطح کاهش خواهد یافت. اما در چگالی ظاهری کمتر ذوب بیشتر است و در نتیجه صافی سطح بهتر خواهد بود. افزایش چگالی ظاهری تا حدود 46% باعث کاهش انقباض مذاب می شود. این کاهش انقباض تأثیر مستقیمی در صافی سطح قطعات تولیدی خواهد داشت. اما در چگالی ظاهری بالاتر از 46% تأثیر کاهش حجم مذاب به قدری است که توانایی حرکت حوضچه مذاب از آن گرفته خواهد شد. بنابراین مذاب به واسطه کشش سطحی سیال به شکل قطراتی بر روی سطح دیده می شوند [26]. شکل گیری این قطرات باعث کم شدن صافی سطح و افزایش گویی شدگی خواهد شد.

### 3-5- خواص فیزیکی

نکته قابل توجه بالا رفتن تعداد ترک ها زیر سطحی و پایین آمدن استحکام نمونه های تولید شده در فشارهای بالا است. زیرا در فشارهای بالا امکان اتصال مهره های مذاب به دلیل عدم سهولت در حرکت حوضچه مذاب بسیار ضعیف است و بین هر کدام از اتصالات ترک هایی دیده می شود که باعث کاهش استحکام قطعه شده است. به این ترتیب نمونه های تولید شده در فشارهای بالا از استحکام پایینی برخوردارند. شکل 13 این مطلب را به وضوح نشان می دهد.

به این ترتیب قطعات تولید شده در این فشارها علاوه بر صافی سطح مناسب، از استحکام خوبی نیز برخوردارند. بنابراین باید در سیستم های تولید سرعت سریع حرکت دورانی و خطی غلتک های صاف کننده بستر طوری



$\alpha$  ضریب نفوذ حرارتی ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )

## 8- مراجع

- [1] A. V. VILLALON, *Electron Beam Fabrication of Injection Mold Tooling with Conformal Cooling Channels*, PhD thesis, North Carolina University, USA, 2005.
- [2] J. P. Kruth, P. Mercelis, J. V. Vaerenbergh, L. Froyen, M. Rombouts, Binding mechanisms in selective laser sintering, selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 11, No. 1, pp. 26-36, 2005.
- [3] M. R. Alkahari, T. Furumoto, T. Ueda, A. Hosokawa, Ryutaratanaka, M. S. A. Aziz, Thermal conductivity of metal powder, consolidated material fabricated via selective laser melting, *Key Engineering Materials*, Vol. 523, pp. 244-249, 2012.
- [4] Gersho, A. Rossencwaig, *Theory of the photoacoustic effect with solids*, in *Applied*, Vol. 47, No.1, pp. 64-69, 1976.
- [5] I. H. Tavman, Effective thermal conductivity of granular porous materials, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 23, No. 2, pp. 169-176, 1996.
- [6] N. Lockmuller, J.Redgrove, L.Kubičár, Measurement of thermal conductivity with the needle, *High Temperatures - High Pressures*, Vols. 36, No. 2, pp. 127-138, 2003.
- [7] F. Albouchi, F. Mzali, S.B.Nasrallah, Measurement of the Effective Thermal Conductivity of Powders Using a Three-Layer Structure, *Porous Media*, Vol. 10, No. 6, pp. 537-549, 2007.
- [8] M. Rombouts, L. Froyen, A. Gusarov, E. Bentefour, C. Glorieux, Photopyroelectric measurement of thermal conductivity of metallic powders, *Applied Physics*, Vol. 97, No. 2, 2005.
- [9] A.Simchi, The role of particle size on the laser sintering of iron powder, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 35, No. 5, pp. 936-948, 2004.
- [10] H. Zhu, J. Fuh, L. Lu, Microstructural evolution in direct laser sintering of Cu-based metal powder, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 74-81, 2005.
- [11] Schueren, B. V. der, a. J. Kruth., Powder deposition in selective metal powder sintering, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1, No. 3, pp. 23-31, 1995.
- [12] H. Zhu, J. Fuh, L. Lu, The influence of powder apparent density on the, *Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, No. 2, pp. 294-298, 2007.
- [13] R. Morgan, C. J. Sutcliffe, W. O'neill, Density analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 39, No. 4, pp. 1195-1205, 2004.
- [14] N. K. Tolochko, M. K. Arshinov, A. V. Gusarov, V. I. Titov, T. Laoui, L. Froyen, Mechanisms of selective laser sintering, heat transfer in Ti powder, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, No. 5, pp. 314-326, 2003.
- [15] C. J. Li, T. W. Tsai, C. C. Tseng, Numerical Simulation for Heat Mass Transfer During Selective Laser Melting of Titanium alloys Powder, in *Laser Assisted Net Shape Engineering, 9th International Conference on Photonic Technologies Proceedings of the LANE*, Fürth, Germany, September 19-22, 2016.
- [16] A. Foroozmehr, M. Badrossamay, E. Foroozmehr, Finite element simulation of selective laser melting process considering optical penetration depth of laser in powder bed, *Materials & Design*, Vol. 89, pp. 255-263, 2016.
- [17] E. Olakanmi, R. Cochrane, K. Dalgarno, A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing microstructure properties, *Progress in Materials Science*, Vol. 74, pp. 401-477, 2015.
- [18] J. Živčák, M. Šarik, R. Hudák, FEA Simulation of Thermal Processes during the Direct Metal Laser Sintering of Ti64 Titanium Powder, *Measurement*, Vol. 94, pp. 893-901, 2016.
- [19] Y. Huang, L. Yang, X. D., Y. Yang, Finite element analysis of thermal behavior of metal powder during selective laser melting, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 104, pp. 146-157, 2016.
- [20] Q. Shia, D. Gua, M. Xiaa, S. Caoa, T. Rong, Effects of laser processing parameters on thermal behavior, melting/solidification mechanism during selective laser melting of TiC/Inconel 718 composites, *Optics & Laser Technology*, Vol. 84, pp. 9-22, 2016.
- [21] D. Gu, Y. Shen, Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder, *Alloys Compounds*, Vol. 432, No. 1, pp. 163-166, 2007.

ضریب رسانایی و نفوذ گرمایی نیز بالا می‌رود. اما این بالا رفتن به شکل یک تابع لگاریتمی است که به صورت حدی در چگالی ظاهری نهایی به مقدار استاندارد برای آهن خالص میل می‌کند.

آزمایش‌های تفجوشی لیزری بر روی بستر پودر با چگالی ظاهری متفاوت نشان داد که قطعات تولیدی در چگالی ظاهری 46.5% (فشار 7 بار) بهترین کیفیت را از خود نشان می‌دهند.

میزان گویی شدگی با افزایش چگالی ظاهری تا حدود 46% کاهش می‌یابد و افزایش بیشتر از آن باعث افزایش گویی شدگی و ترک‌های سطحی می‌شود. در فشارهای بالا امکان اتصال مهره‌های مذاب به دلیل عدم سهولت در حرکت حوضچه مذاب بسیار ضعیف است و بین هر کدام از اتصالات ترک‌هایی دیده می‌شود که باعث کاهش استحکام قطعه شده است.

در چگالی ظاهری کمتر از 46% تأثیر چگالی ظاهری بر روی عمق نفوذ پررنگ‌تر از تأثیر ضریب انتقال حرارتی بر آن است. اما در چگالی ظاهری بالاتر از 46% ضریب انتقال حرارت تأثیر پررنگ‌تری دارد.

در چگالی ظاهری بالاتر از 50% میزان انقباض قطعات تولید شده به کمترین حالت رسیده و پهنای قطعات تولید شده با قطر لیزر برابر است.

آزمایش‌ها نشان داد می‌توان به جای روش پر هزینه و کم بازده ترکیب دانه‌بندی پودر از روش فشردن سازی بستر پودر خام برای بالا بردن کیفیت قطعات تولیدی استفاده نمود. در این روش نیازی به وجود ترکیب پودر با دانه‌بندی خاص و شکل کروی نیست. علاوه بر این نیازی به اضافه کردن ذرات بسیار ریز که ایجاد پلازما در حین فرایند می‌کنند نخواهد بود. چون این چگالی بعد از لایه نشانی پودر ایجاد می‌شود، افزایش چگالی تأثیر منفی بر روانروی پودر نیز نخواهد داشت.

بنابراین باید در سیستم‌های تولید سریع، سرعت حرکت دورانی و خطی غلتک‌های صاف کننده بستر طوری تنظیم شود که فشاری در حدود 7 بار را ایجاد نماید. اما این فشار برای پودرهای مختلف متغیر بوده و باید محدوده مناسب آن با تنظیم فشار غلتک به دست آید.

آزمایش‌ها و تحقیقات بیشتر شباهت این رفتار برای جنس‌های مختلف پودر را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر پودرها با چگالی ظاهری یکسان برای بدست آوردن بهترین خواص قطعات تولیدی، میزان فشار بهینه یکسانی دارند. تحقیقات بیشتر برای تکمیل تر شدن نتایج در دست اقدام است.

## 7- فهرست علائم

$A$	مساحت ناحیه انتقال حرارت ( $\text{m}^2$ )
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه ( $\text{kJ}/(\text{kg K})$ )
$H$	نرخ انتقال حرارت ( $\text{kJ}/\text{Sec}$ )
$h$	فاصله بین دو دما ( $\text{m}$ )
$K$	ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $\text{W}/(\text{m K})$ )
$m$	جرم ( $\text{kg}$ )
$P$	فشار ( $\text{bar}$ )
$Q$	انرژی حرارتی ( $\text{W}$ )
$t$	زمان ( $\text{Sec}$ )
$T$	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_x$	دما در نقطه $x$ ( $\text{k}$ )
$V$	حجم ( $\text{m}^3$ )

## علائم یونانی

$\rho$  چگالی ظاهری ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

- [25] N. K. Tolochko, S. E. Mozzharov, I. A. Yadroitsev, T. Laoui, L. Froyen, V. I. Titov, M. B. Ignatiev, Balling processes during selective laser treatment of powders, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 10, No.2, pp. 78-87, 2004.
- [26] J. McWilliams, C. Hysinger, J. J. Beaman, Design of a high temperature process chamber for the selective laser sintering process. Austin : University of Texas at Austin, Solid Freeform Fabrication Symposium, Vol. 3, pp. 110-117, 1992.
- [22] S. A. Fatemi, J. Zamani, Influence of process parameters on layers thickness in steel powder laser sintering, *Mechanical Aerospace*, Vol. 14, pp. 36-39, 2014. (in Persian فارسی)
- [23] H. Carslaw, J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, pp. 256-261, Oxford: Oxford University Press, 1959.
- [24] R. Morgan, C. Sutcliffe, W.O'Neill, Experimental investigation of nanosecond pulsed Nd-YAG laser re-melted pre-placed powder beds, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 7, No. 3, pp. 159-172, 2001.