



## Experimental Analysis of Process Parameters Effects on Tensile Strength of Selective Laser Melting of Iron Powder



### ARTICLE INFO

#### Authors

Hemmati M.<sup>1\*</sup>  
Modabberifar M.<sup>1\*</sup>  
Taheri M.<sup>1</sup>

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

#### \* Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran  
m-modabberifar@araku.ac.ir

#### How to cite this article

Hemmati M, Modabberifar M, Taheri M. Experimental analysis of process parameters effects on tensile strength of selective laser melting of iron powder. Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2<sup>nd</sup> Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):115-218.

### ABSTRACT

In this study, the effect of selective laser melting parameters on the mechanical properties of iron has been experimentally investigated. The mechanical properties discussed in this article are ultimate tensile strength. The selected parameters include the laser power, the laser scanning speed, and the laser hatch distance, and the design of experiments was done by the Taguchi method. By examining the microstructure, the optimal range of the mentioned process parameters was determined to achieve the highest tensile strength. The results show that the optimum parameter levels for the tensile strength include the laser power of 200 watts, the laser scanning speed of 600 millimeters per minute, and the hatch distance of 70 micrometers.

**Keywords** Selective Laser Melting, Iron Powder, Taguchi Method, Ultimate Tensile Strength

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 ۲۱۵-۲۱۸.



## بررسی تجربی اثر پارامترهای فرآیند روی استحکام کشش نهایی در فرآیند ذوب انتخابی لیزر



### چکیده

### مشخصات مقاله

در این پژوهش اثرات پارامترهای فرآیند ذوب انتخابی لیزر (SLM) را بر روی خواص مکانیکی قطعات ساخته شده از جنس آهن خالص بررسی شده است. خواص مکانیکی مورد بحث در این مقاله استحکام کشش نهایی می باشد. سطوح انتخابی به ترتیب شامل توان لیزر، سرعت اسکن و فاصله هاشوری می باشد و همچنین برای طراحی آزمایش ها از روش تاگوچی استفاده گردید. با بررسی ریز ساختار، محدوده بهینه پارامترهای فرآیند مورد اشاره برای دستیابی به بالاترین استحکام کششی تعیین شد. نتایج نشان داد که سطوح بهینه پارامترها به ترتیب توان ۲۰۰ وات، سرعت اسکن ۶۰۰ میلی متر بر ثانیه و فاصله هاشوری ۷۰ میکرومتر برای بیشترین استحکام کشش نهایی است.

#### نویسنده ها

میلاد همتی<sup>۱</sup>

مهدی مدبری فرا<sup>۱\*</sup>

معین ظاهری<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

#### \* نویسنده مسئول

آدرس: گروه مهندسی مکانیک،

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه

اراک، اراک، ایران

m-modabberifar@araku.ac.ir

**کلیدواژه ها** ذوب انتخابی لیزر، طراحی آزمایش تاگوچی، پودر آهن، آزمون استاندارد کشش

## ۱- مقدمه

تکنیک ذوب انتخابی لیزر یکی از تکنیک های ساخت افزودنی است که برای تولید قطعات فلزی، مدل سه بعدی مستقیماً از کامپیوتر گرفته می شود. در این فرآیند از پودر فلز برای ساخت ماده استفاده می شود و برای تولید قطعات در صنایع نظامی، خودروسازی، هوا-فضا، مهندسی بافت و پزشکی مورد استفاده قرار می گیرد. در قطعات ساخته شده با روش ذوب انتخابی لیزر پودر فلزی به دلیل ذوب با یکنواختی بهتری قوام می یابد. در [1] اولین آزمایش های تجربی روی قطعات ساخته شده از پودر فلزی با تکنیک ذوب انتخابی لیزر صورت گرفت. براساس آن، دریافت شد که در قطعات ساخته شده با روش ذوب انتخابی لیزر به دلیل انرژی ورودی بالاتر و بالطبع چگالی انرژی بالاتر، تنش پسماند بیشتری ایجاد شد. این مسئله باعث ایجاد گلوله ای شدن پودر در هنگام ساخت نیز شد. با گذشت زمان گستره جنس مواد به کار گرفته شده در این تکنیک وسیع تر شد. ابتدا قطعات ساخته شده با تکنیک ذوب انتخابی لیزر از جنس فولاد ضد زنگ که دارای خواص مکانیکی و ریزساختار مناسبی بودند، مورد بررسی قرار گرفته و با قطعات ساخته شده با سایر روش های سنتی مقایسه شد [2-7]. اثر پارامترهای فرآیند مانند فاصله بین نقاط و سرعت اسکن و هم چنین اثر چگالی انرژی روی قطعات فولاد S316L بررسی شد [2,3]. با افزایش فاصله نقاط اسکن و سرعت اسکن زبری سطح و تخلخل قطعات افزایش یافته و این منجر به کاهش خواص مکانیکی شد. از طرفی دیگر، در قطعاتی که با چگالی انرژی پایین ساخته شدند، پدیده گلوله ای ایجاد شد. با این وجود در مقایسه با قطعات ساخته شده با سایر روش ها سنتی، مشخص شد که استحکام تسلیم قطعات ذوب انتخابی لیزر بالاتر است. در پژوهشی مشابه مشخص شد. در پژوهش [4] پودر فولادی براساس شکل ظاهری به دو دسته تقسیم بندی و اثر آن ها بر خواص مکانیکی بررسی شد. یک حالت پودر به صورت بیضوی با اندازه حدود ۵۰۰ میکرومتر و حالت دیگر پودر کروی با ابعاد ۱۰ میکرومتر تعیین شد. پودرهای بیضوی باعث ایجاد گلوله ای شدن می شوند اما پودرهای کروی روی پدیده گلوله شدن تأثیری ندارند و برای رفع این مشکل ذوب مجدد هر لایه اسکن انجام شد. وجود کارباید ترد در قطعات از جنس فولاد باعث کاهش کرنش و زبری سطح می شود و دلیل تنش های درونی در قطعات ساخته شده با این روش سرد شدن سریع است [5]. با انجام آزمایش های تجربی اثر پارامترهای فرآیند روی خواص کششی این قطعات بررسی شد [6,7]. بر این اساس مشخص شد که ضخامت لایه و نرخ همپوشانی مستقل از خواص کششی است اما اگر تعداد لایه ها افزایش یابد، استحکام کششی بسیار کمی را تجربه خواهد کرد. اثر زاویه ساخت نیز بررسی شد. در [8] برای بهبود کیفیت سطح قطعات نیز آخرین لایه

تحت دو بار اسکن قرار گرفته شد و نتیجه مطلوبی حاصل شد. طی تحقیقی که در [9-11] مشخص شد استحکام قطعات کامپوزیتی از قطعات تیتانیومی که همه آن ها با روش ذوب انتخابی لیزر ساخته شدند، بیشتر است.

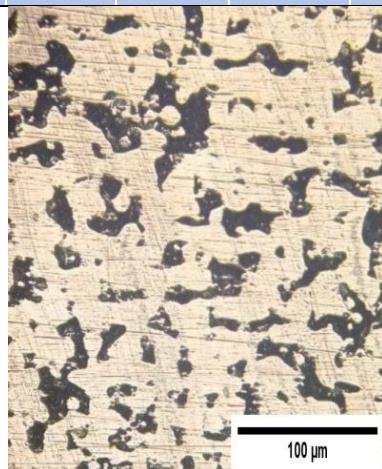
در مطالعات گذشته تأثیر مستقل پارامترهای فرآیند ذوب انتخابی لیزر قطعات فلزی و آلیاژی روی استحکام مکانیکی بررسی شد. در این پژوهش، علاوه بر تحلیل ریزساختار قطعات، بررسی اثر مستقل پارامترهای فرآیند روی استحکام کشش نهایی قطعات آهنی که کاربرد وسیعی در سنسورها و اکچوئیتورها دارند، انجام گرفته و با استفاده از این تحلیل، سطوح بهینه پارامترهای فرآیند استخراج شد.

## ۲- مواد و فرآیندها

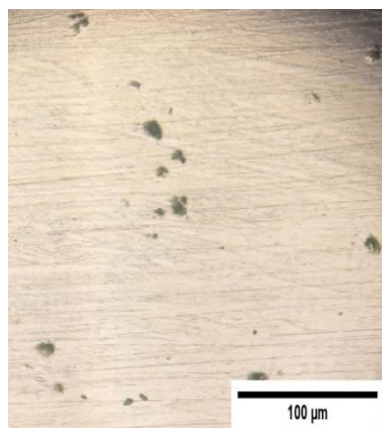
به دلیل خواص بهتر، در این پژوهش از پودر آهن ساخته شده با روش اتمیزه گازی استفاده شد. ظاهر پودر مورد استفاده کروی و با قطر به طور متوسط ۴۰ میکرومتر تعیین شد. ترکیب شیمیایی آن از روش XRF حاصل شد. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی با جزییات نمایش داده شده است. ساخت قطعات با استفاده از دستگاه پرینتر سه بعدی که با تکنیک ذوب انتخابی لیزر کار می کند، انجام شد.

شکل ۱ به صورت شماتیک اجزای مورد استفاده در این فرآیند را نشان می دهد. در این فرآیند زمانی که پودر در حال ذوب قرار دارد، به دلیل جلوگیری از اکسایش، فرآیند درون محفظه عاری از اکسیژن صورت می گیرد. بنابراین محفظه ساخت به صورت کاملاً بسته ساخته می شود و هم یک ورودی جریان گاز به درون محفظه و یک خروجی گاز تعبیه می شود تا درصد اکسیژن داخل محفظه به زیر یک درصد برسد و از اکسایش جلوگیری شود. در قسمت لایه نشانی، پودر به صورت یکپارچه در بستر پودری قرار می گیرد. در هر لایه قبل از اسکن لیزر روی سطح، مقدار مشخصی از پودر به سطح میز ساخت آمده و توسط یک غلتک به صورت کاملاً یکنواخت روی میز ساخت پخش می شود. پودر اضافه نیز در ظرفی که در طرف دیگر محفظه قرار دارد جمع می شود. در ابتدای تشکیل هر لایه، میز ساخت به اندازه ضخامت لایه مشخص شده، به پایین حرکت می کند تا با ایجاد لایه پودر، سطح لایه کاملاً هم سطح میز ساخت قرار گیرد. پرتو لیزر پس از برخورد با آینه های کنترل کننده مسیر، روی سطح پودر با سرعت و الگوی مشخصی که برای هر ماده و هندسه قطعه مورد نظر طراحی شده است، حرکت می کند. در هر مرحله، هندسه به دست آمده از برش لایه ای مدل ایجاد شده و با تکرار شدن این مراحل به صورت پیوسته لایه ها روی هم قرار گرفته و اتصال آن ها در اثر نفوذ حرارتی اشعه صورت می گیرد. و در نهایت مدل سه بعدی قطعه ساخته خواهد شد.

| جدول ۱. ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده |       |         |      |           |       |        |       |       |      |           |
|-----------------------------------------|-------|---------|------|-----------|-------|--------|-------|-------|------|-----------|
| فسفر                                    | لیتیم | سیلیسیم | آهن  | آلومینیوم | منگنز | منیزیم | کلسیم | گوگرد | سدیم | عنصر      |
| ۰/۰۱                                    | ۰/۰۱  | ۰/۲     | ۹۹/۶ | ۰/۱       | ۰/۱   | ۰/۰۱   | ۰/۰۱  | ۰/۰۱  | ۰/۰۱ | درصد وزنی |



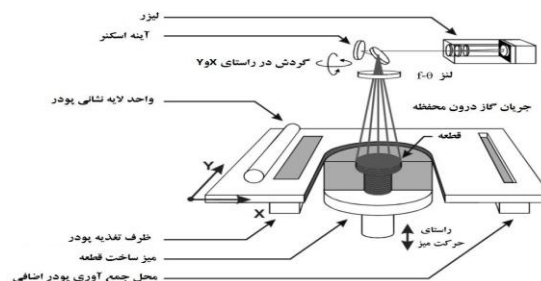
الف



ب

**شکل ۲)** تصویر میکروسکوپی از ریزساختار نمونه‌های سه و چهار. (الف) نمونه دارای تخلخل زیاد و (ب) نمونه دارای کمترین تخلخل می‌باشد

نمونه‌های آهنی با استفاده تکنیک ذوب انتخابی لیزر بر اساس سطوح بهینه پارامترها ساخته شد. ساخت این قطعات مطابق با استاندارد ASTM E8 انجام شد. پس از ساخت آزمون استحکام کشش نهایی انجام شد. جدول ۲ نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کشش را نشان می‌دهد. درنهایت با استفاده از تحلیل آماری روش تاگوچی سطوح بهینه شناسایی شدند. شکل ۳ مقدار تأثیر مستقل هر پارامتر مشخص شده است. در این شکل نشان داده شده است که پارامترهای توان و سرعت اسکن لیزر در سطح دوم با ۲۰۰ وات و ۶۰۰ میلی‌متر بر ثانیه دارای بیشترین استحکام کشش نهایی می‌باشند. همچنین پارامتر فاصله هاشوری در سطح سوم یا فاصله ۷۰ میکرومتری، بیشترین مقدار استحکام به دست آمد.



**شکل ۱)** شماتیکی از فرایند ذوب انتخابی لیزر و تجهیزات موجود در فرایند

### ۳- طراحی آزمایش

در این پژوهش برای دستیابی به محدوده بهینه پارامترهای فرایند، آزمایش‌های مقدماتی صورت گرفت. با مطالعه پژوهش‌های مرتبط گذشته، سطوح اولیه پارامترهای فرایند استخراج و ساخت آن‌ها نیز انجام شد. قطعات اولیه با ابعاد (۱۵×۱۵) میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شدند. در آزمایش‌های اولیه اثر پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و الگوی اسکن لیزر بر روی چگالی در سه سطح بررسی شد. جدول زیر سطوح پارامترهای فرایند نمایش داده شده است. جهت صرفه جویی در زمان و هزینه آزمایش‌ها، از طراحی آزمایش تاگوچی L9 استفاده شد. سپس ریزساختار نمونه‌ها بررسی شد. با استفاده از نتایج به دست آمده، سطوح بهینه پارامترهای فرایند به سمت محدوده‌هایی که چگالی بیشتر بود همگرا شد. برای اطمینان از صحت نتایج، ریز ساختار نمونه‌های اولیه مورد بررسی قرار گرفت.

### ۴- نتایج و بحث

برای صحت سنجی از نتایج چگالی نمونه‌ها، عکس برداری میکروسکوپی برای بررسی ساختار انجام شد. شکل ۲ زیرساختار نمونه‌هایی که کمترین و بیشترین چگالی را دارا بودند، نشان می‌دهد. همانطور که در شکل سمت راست مشخص شده است، دارای بیشترین تخلخل در نمونه‌های ساخته شده است و در نقطه مقابل شکل سمت چپ دارای کمترین تخلخل می‌باشد. بنابراین برای دستیابی به خواص مکانیکی بهینه در آزمایش‌های ثانویه، پارامترهای فرایند را به سمت سطوحی که بیشترین مقدار چگالی حاصل شده بود، همگرا شد.

2- Cherry JA, Davies HM, Mehmood S, Lavery NP, Brown SG, Sienz J. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015;76(5):869-79.

3- Röttger A, Geenen K, Windmann M, Binner F, Theisen W. Comparison of microstructure and mechanical properties of 316 L austenitic steel processed by selective laser melting with hot-isostatic pressed and cast material. Materials Science and Engineering: A. 2016;678:365-76.

4- Li R, Liu J, Shi Y, Wang L, Jiang W. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012;59(9):1025-35.

5- Sander J, Hufenbach J, Giebler L, Wendrock H, Kühn U, Eckert J. Microstructure and properties of FeCrMoVC tool steel produced by selective laser melting. Materials & Design. 2016;89:335-41.

6- Tolosa I, Garcandía F, Zubiri F, Zapirain F, Esnaola A. Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by "selective laser melting", following different manufacturing strategies. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010;51(5):639-47.

7- Guan K, Wang Z, Gao M, Li X, Zeng X. Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel. Materials & Design. 2013;50:581-6.

8- Yasa E, Kruth JP. Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. Procedia Engineering. 2011;19:389-95.

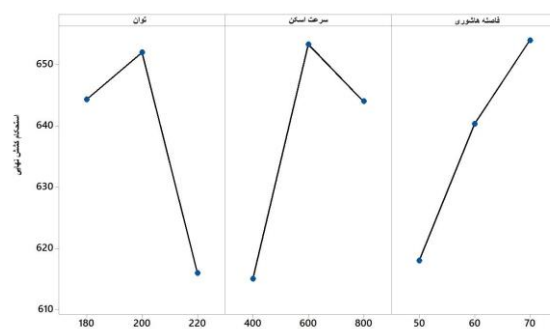
9- Song B, Dong S, Coddet P, Zhou G, Ouyang S, Liao H, Coddet C. Microstructure and tensile behavior of hybrid nano-micro SiC reinforced iron matrix composites produced by selective laser melting. Journal of Alloys and Compounds. 2013;579:415-21.

10- Attar H, Bönisch M, Calin M, Zhang LC, Scudino S, Eckert J. Selective laser melting of in situ titanium-titanium boride composites: processing, microstructure and mechanical properties. Acta Materialia. 2014;76:13-22.

11- Attar H, Calin M, Zhang LC, Scudino S, Eckert J. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. Materials Science and Engineering: A. 2014;593:170-7.

جدول ۲) سطوح پارامترهای فرآیند و نتایج

| شماره | توان (وات) | سرعت (میلی‌متر بر دقیقه) | فاصله هاشوری (میکرومتر) | استحکام کششی (مگا پاسکال) |
|-------|------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| ۱     | ۱۸۰        | ۴۰۰                      | ۵۰                      | ۶۱۴                       |
| ۲     | ۱۸۰        | ۶۰۰                      | ۶۰                      | ۶۴۷                       |
| ۳     | ۱۸۰        | ۸۰۰                      | ۷۰                      | ۶۷۲                       |
| ۴     | ۲۰۰        | ۴۰۰                      | ۶۰                      | ۶۳۷                       |
| ۵     | ۲۰۰        | ۶۰۰                      | ۷۰                      | ۶۹۶                       |
| ۶     | ۲۰۰        | ۸۰۰                      | ۵۰                      | ۶۲۳                       |
| ۷     | ۲۲۰        | ۴۰۰                      | ۷۰                      | ۵۹۴                       |
| ۸     | ۲۲۰        | ۶۰۰                      | ۵۰                      | ۶۱۷                       |
| ۹     | ۲۲۰        | ۸۰۰                      | ۶۰                      | ۶۳۷                       |



شکل ۳) اثر مستقل پارامترهای فرآیند بر استحکام کشش نهایی

## ۵- نتیجه‌گیری

سطوح بهینه پارامترهای فرآیند قطعات آهنی ساخته شده با روش ذوب انتخابی لیزر بر اساس تحلیل اثر مستقل برای استحکام کشش نهایی تعیین شد. در استحکام کشش نهایی تمام پارامترها با اختلاف اندکی نسبت به یکدیگر تأثیر مستقل یکسانی داشتند. بر این اساس سطوح بهینه پارامترهای توان و سرعت اسکن لیزر در استحکام کشش نهایی، در سطح دوم به ترتیب با ۲۰۰ وات و ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه شناسایی شدند. در پارامتر فاصله هاشوری سطح سوم با ۷۰ میکرومتر سطح بهینه شناخته شد. همچنین مشخص شد که با افزایش توان تا ۲۰۰ وات به دلیل آن‌که اتصال بین پودرها با انرژی بالاتری صورت می‌گیرد، استحکام افزایش می‌یابد ولی در سطح سوم و توان ۲۲۰ وات، انرژی بالاتر لزوماً باعث افزایش استحکام نخواهند شد و باعث سوختگی پودر می‌شود. و همچنین کاهش سرعت اسکن تا حدود ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه چون انرژی در زمان کمتری به پودر وارد می‌شود باعث بهبود در استحکام می‌شود. اما در سرعت ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه مانند توان، انرژی بیش‌ازحد وارد شده که باعث سوختگی پودر می‌شود.

## مراجع

1- Kruth JP, Froyen L, Van Vaerenbergh J, Mercelis P, Rombouts M, Lauwers B. Selective laser melting of iron-based powder. Journal of materials processing technology. 2004;149(1-3):616-22.