



Optimization of Process Parameters Effects on Coercivity Force of Selective Laser Melted Iron Samples



ARTICLE INFO

Authors

Sajadi hezaveh M.^{1*},
Modaberi far M.¹
Badrossamay M²

¹ Arak University, Engineering Faculty.
² Isfahan university of Technology

* Correspondence

Address: Arak Univresity, Engineering Faculty
m.sajadi.01@phd.araku.ac.ir

How to cite this article

Sajadi hezaveh M, Modaberi far M, Badrossamay M. Optimization of Process Parameters Effects on Coercivity Force of Selective Laser Melted Iron Samples. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):21-27.

ABSTRACT

Selective laser melting is a technology for additive manufacturing where parts are produced by melting a powder bed using a laser beam. Because the metal parts produced by this method can have complex and desired geometries, it is considered a modern method for producing electric motor parts, sensors, and other components. The iron powder used in this study is pure one. The input parameters for this method include laser power, scanning speed, and the hatches distance. The design of the experiments was performed using the Taguchi method. Although many studies have been conducted on the mechanical properties of parts produced by this method, less attention has been paid to magnetic properties. In this research, the effect of selective laser melting parameters on the force of pure iron coercivity was experimentally determined. The optimal levels of parameters for achieving the optimal value of this force were determined using signal-to-noise analysis. The main effects and interactions of the parameters were taken into account in this article. The results indicate that the optimal parameter levels for obtaining the lowest amount of coercive force include a laser power of 220 watts, scanning speed of 400 mm/s, and a hatch distance of 70 micrometers. The hatch distance and scanning speed have the most interactive effects on achieving the lowest amount of coercivity.

Keywords Selective Laser Melting, Pure Iron Powder, Electrical Motor, Coercivity

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۲۱-۲۷



بهینه سازی اثرات پارامترهای فرایند ذوب انتخابی لیزر بر نیروی پس ماند زدای مغناطیسی نمونه های ساخته شده از پودر آهن خالص



چکیده

ذوب انتخابی لیزر یک فناوری ساخت افزودنی است که به موجب آن قطعات از طریق ذوب بستر پودر توسط لیزر ساخته می‌شوند. به دلیل اینکه قطعات فلزی تولیدی با این شیوه می‌توانند از هندسه پیچیده و دلخواه برخوردار باشند، امروزه به‌عنوان روشی مدرن در تولید قطعات موتورهای الکتریکی و سنسورها و غیره... مورد توجه واقع شده است. پودر مورد استفاده در این پژوهش پودر آهن خالص است. از میان پارامترهای ورودی در این روش، پارامترهای انتخاب شده شامل توان لیزر، سرعت اسکن و فاصله هاشورها بوده و طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی انجام شده است. از آنجایی که تاکنون مطالعات زیادی روی خواص مکانیکی قطعات تولیدی با این روش صورت پذیرفته و به خواص مغناطیسی کمتر توجه شده است، در این پژوهش، اثر پارامترهای ذوب انتخابی لیزر بر نیروی پس ماند زدای مغناطیسی آهن به صورت تجربی استخراج شده و سطوح بهینه پارامترها برای نیل به مقدار بهینه این نیرو با استفاده از تحلیل سیگنال به نوبت تعیین شده است. علاوه بر این اثرات اصلی و همچنین برهم‌کنش‌های پارامترها در این مقاله مورد توجه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که سطوح پارامتر بهینه برای به دست آوردن کمترین مقدار نیروی پس ماند زدای مغناطیسی شامل توان لیزر ۲۲۰ وات، سرعت اسکن لیزر ۴۰۰ میلی‌متر بر ثانیه و فاصله هاشور ۷۰ میکرومتر بوده و بیشترین اثرات تعاملی را جهت رسیدن به کمترین مقدار نیروی پس ماند زدا پارامترهای فاصله هاشورها و سرعت اسکن دارا هستند.

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

محمدعلی سجادی هزاره ۱*

مهدی مدبری فر

محسن بدرسمای

^۱ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه

صنعتی اصفهان

* نویسنده مسئول

آدرس: دانشگاه اراک، دانشکده فنی و

مهندسی

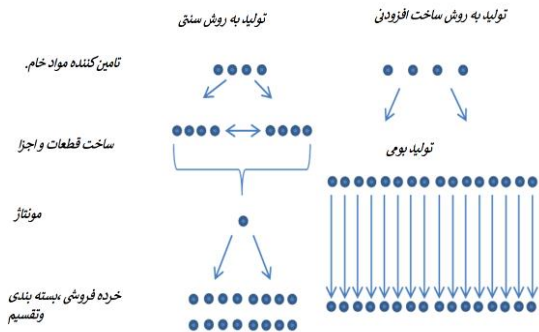
m.sajadi.01@phd.araku.ac.ir

کلیدواژه‌ها ذوب لیزر انتخابی، پودر آهن خالص، موتورهای الکتریکی، نیروی پس ماند زدا

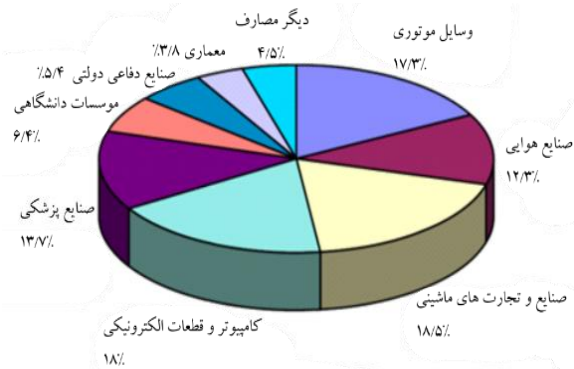
۱- مقدمه

روش ساخت افزایشی یا همان پرینترهای سه بعدی، امروزه یکی از روش‌های مدرن تولید محسوب می‌شود. این روش مبتنی بر مدل کامپیوتری سه بعدی بوده و این مدل به عنوان ورودی و دستگاه تولیدکننده همان پرینتر سه بعدی محسوب می‌شود. یکی از انواع روش‌های تولید، به روش ساخت افزایشی، روش ذوب انتخابی لیزری است. در این روش باتوجه به مقادیر مختلف پارامترهای ورودی دستگاه خواص مغناطیسی محصول متفاوت خواهد بود [1]. این روش، یک رویکرد تحول آفرین در تولیدات صنعتی است که باعث شده است، تولیداتی قوی‌تر، سبک‌تر و همچنین با طراحی پیچیده، به کمک این روش صورت پذیرد. در روش‌های سنتی نیاز بود که قطعه نهایی به وسیله دستگاه‌هایی مانند تراش، فرز و سایر ادوات ماشین‌کاری، به وسیله براده‌برداری از مواد خام ایجاد شود و طبیعی است که مقادیر دورریز بسیار قابل‌ملاحظه بودند [2]. روش ذوب انتخابی لیزری روش ذوب پودر در بستر نیز نامیده می‌شود و به طور کلی این روش تولید به چهار دسته؛ تفجوشی، ذوب مستقیم لیزری، ذوب انتخابی لیزری و ذوب پرتو الکترونی تقسیم‌بندی می‌شوند. از آنجایی که پرینترهای سه بعدی اشکال و قطعات پیچیده را با استحکام بالا و همچنین به شکل یکپارچه تولید می‌کنند در نتیجه آن مواد خام کمتری جهت تولید مصرف می‌کنند؛ لذا قطعات تولیدی نسبت به روش‌های سنتی سبک‌تر خواهد بود. روش تولید افزودنی، با کاهش تعداد حلقه‌های زنجیره تأمین، تولید را به مصرف‌کننده نزدیک‌تر می‌کند. شکل ۱ و ۲ به ترتیب مقایسه شبکه‌های روش تولید سنتی و ساخت افزودنی و همچنین گستره نفوذ این فناوری را در صنایع مختلف نشان می‌دهد [3]. از طرفی یکی از جذاب‌ترین عرصه‌های تولیدی با روش ساخت افزایشی تولید قطعات فلزی با خواص مغناطیسی مطلوب است. قطعات آهنی با خواص مغناطیسی مناسب به طور گسترده در موتورهای الکتریکی، قطعات الکترونیکی، و غیره به کار گرفته شده‌اند. حسگرها، القاگرها، برخی از سنسورها و محرکه‌ها و همچنین فیلترهای مغناطیسی از این دسته‌اند. پرمندورها یا همان آلیاژهای آهن - نیکل و انادیم، جهت ساخت ادواتی از این دست، از لحاظ مقدار رسانایی و خواص مکانیکی بسیار مناسب‌اند. مشکل اصلی این آلیاژها قیمت بالای آنهاست. آلیاژهای آهن مانند فولادهای کم‌کربن و یا آهن خالص اگر خواص مغناطیسی مناسب را دارا باشند، می‌توانند جایگزین بسیار مناسبی برای پرمندورها باشند. از ویژگی‌های آهن خالص میدان پسماند زدای کم معادل ۳ تا ۱۲ آمپر بر متر که معادل ۰/۳۷۶ تا ۰/۱۵ اورستد است. شکل ۳ حلقه پسماند و نیروی وادارندگی مغناطیسی را به خوبی نشان می‌دهد.

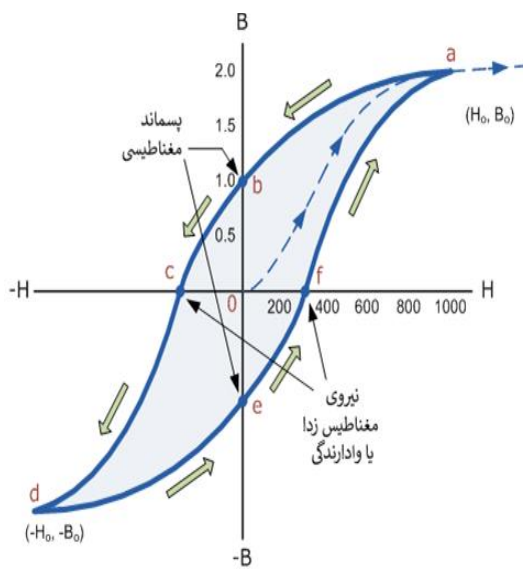
مشکل اصلی این است که اعداد فوق مربوط به آهن کاملاً خالص است و حتی مقادیر بسیار کمی ناخالصی مانند شکل ۴ باعث تغییرات سنگین در اعداد فوق خواهد شد [4]. هرچه این نیرو پایین باشد بازده انرژی بالاتری در کارآفرهای الکتریکی خواهیم داشت.



شکل ۱) مقایسه شبکه‌های روش تولید سنتی و ساخت افزودنی [3]



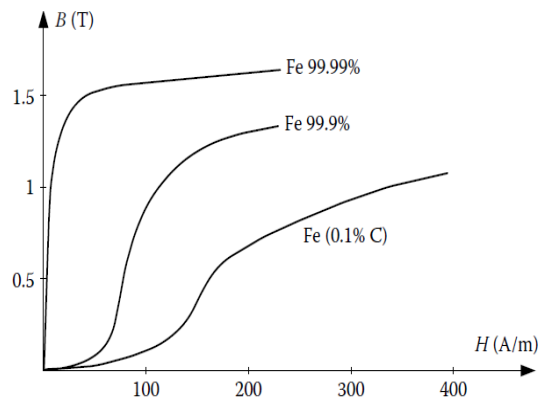
شکل ۲) استفاده بخش‌های مختلف از این فناوری



شکل ۳) نیروی پسماند زدای مغناطیسی در حلقه پسماند.

است. مقدار مغناطش اشباع عالی معادل $J_s=15.2$ تسلا که باتوجه به چگالی آهن معادل $218(\text{emu/gr})$ است [20]. ماتیا زانی و همکاران روی رابطه بین ریزساختارها، خواص مکانیکی و مغناطیسی آهن خالص تولید شده از پودر آهن خالص در نمونه‌هایی که به روش ذوب لیزری در بستر که در واقع همان روش ذوب انتخابی است کار کردند. نمونه‌ها جهت آنالیز ریزساختار، تنش کششی و خواص مغناطیسی به روش بهینه تولید شدند و همچنین به دو گروه تقسیم شدند سپس گروه اول تا دمای 850°C درجه سانتیگراد و به مدت یک ساعت جهت زدودن تنش‌های پسماند آنیل شدند. نتایج حاصله نمایانگر این موضوع بود که در هر دو گروه نمونه مقادیر استحکام کششی از نمونه‌های سنتی بیشتر بود. خواص مغناطیسی هر دو گروه نشان داد یک نرمی و یکنواختی بهینه در هر دو گروه نمونه‌ها وجود ندارد [11].

باتوجه به اینکه تا کنون مطالعات کمتری در ارتباط با خواص مغناطیسی قطعات تولید با روش ذوب انتخابی لیزری صورت پذیرفته است، در این پژوهش جهت مشخص کردن اثر پارامترهای ورودی فرایند بر نیروی پس ماند زدای نمونه‌ها مورد مطالعه گرفت. مشخص کردن دقیق اثر متغیرهای ورودی بر خروجی، می‌تواند باعث کاهش آزمایش‌ها یا تمرکز بیشتر روی پارامترهای مهم‌تر شود. طراحی آزمایش‌ها در این پژوهش به روش تاگوجی انجام شده و همچنین سطوح بهینه پارامترها برای رسیدن به کمترین نیروی پس ماند زدای با استفاده از تحلیل سیگنال به نویز تعیین شده است. علاوه بر این اثرات اصلی و سایز دانه‌ها و همچنین برهم‌کنش‌های پارامترها در این مقاله مورد توجه قرار گرفت.



شکل ۴) تغییر اندک در ناخالصی تأثیر زیادی بر خواص مغناطیسی آهن دارد [4].

جدول ۱) ترکیبات پودر مورد استفاده در پژوهش

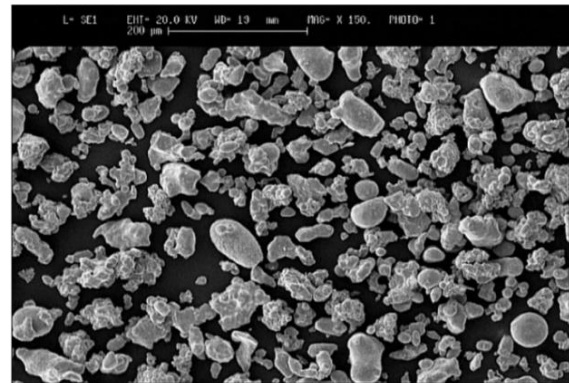
منیزیم	کلسیم	گوگرد	سدیم	آهن	عنصر
۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۹۹/۶	درصد وزنی
فسفر	لیتیم	سیلیسیم	آلومینیوم	منگنز	عنصر
۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۲	۰/۱۶	۰/۱۶	درصد وزنی

پاسخ به این سؤال کلیدی است که آیا با استفاده روش ذوب انتخابی لیزری قادر خواهیم بود قطعاتی آهنی با خواص مشابه با روش‌های سنتی تولید کنیم مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. جراسی و همکاران دریافتند که با اضافه کردن مقادیر 0.3 تا 0.8 فسفر می‌توان خواص مغناطیسی نرم‌آهن را جهت کاربرد در دستگاه‌هایی که با برق متناوب کار می‌کنند را توسعه داد [5].

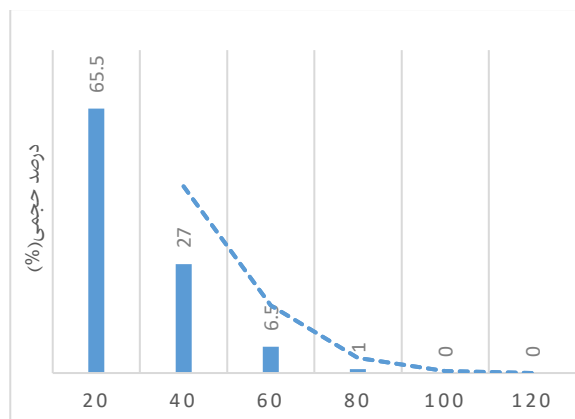
فاکتور مهم قابل بررسی در اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد به کاررفته در کارافزارهای متناوب مقدار تلفات انرژی در آنها است خواص مغناطیسی مهمی از قبیل مقدار نفوذپذیری بیشتر و نیروی مغناطیس زدای کمتر دلالت بر مصرف انرژی کمتری جهت عبور از حلقه هیستریزس را دارد که در نتیجه آن انرژی کمتری در کارافزارهای برق متناوب هدر می‌رود. همچنین ایشان دریافتند [5]، زی چنگ و همکاران دانه‌های آهن خالص با نسبت کربن به سیلیسیم بزرگ‌تر از یک که به وسیله کوره خلای تولید شده بود را مورد پژوهش قرار دادند. ایشان با استفاده از میکروسکوپ نوری و دستگاه مغناطیس‌سنج ارتعاشی نشان دادند که مقدار نیروی مغناطیس زدای نمونه‌ها (Hc) با کاهش اندازه دانه‌ها افزایش پیدا کرد [6]. دیمیترو و همکاران در ارتباط با تولید فولاد مارابچینگ 300 با درصد نیکل بالا (18%) توسط ذوب انتخابی لیزری پژوهش کردند. نتایج به دست آمده تأثیرات سرعت اسکن، فاصله هاشورها، روش اسکن بر روی چگالی قطعات تولید شده را نشان داد. همچنین دریافتند تغییر استحکام فولاد در عملیات آنیل کردن تقریباً مستقل از نوع جهت ساخت و استراتژی اسکن است. ایشان دریافتند که فاصله هاشورها به مقدار 0.7 قطر و سرعت اسکن 600 میلی‌متر بر دقیقه و همچنین استفاده از دو بار در معرض پرتو قرارگرفتن باعث بهبود مقدار چگالی خواهد شد [7]. کزنتکوف و همکاران نمونه‌های استاندارد استنلس استیل آستنیک 316 را به وسیله روش ذوب انتخابی لیزری با استفاده از پودر آهن را پژوهش کردند. مطالعه خواص مکانیکی نمونه‌های تولیدی نشان داد که نمونه‌ها از نظر تنش تسلیم و استحکام کششی بالاتر از نمونه‌های تولیدی با روش سنتی است [8]. شوچان و همکارانش ریزساختارها و خواص آهن در قطعات تولید شده به روش اسکن را بررسی کردند. چگالی حداکثری در مطالعات ایشان با توان 100 وات و سرعت‌های اسکن مختلف به دست آمده است. با افزایش سرعت سایز دانه‌ها کاهش یافت و همچنین با افزایش سرعت اسکن نابیایی زیادی در چگالی مشاهده شد. استحکام کششی و تنش تسلیم نمونه‌ها با افزایش سرعت اسکن 0.27 تا 0.4 متر بر ثانیه با توان ثابت 100 وات افزایش پیدا کرد [9]. تومانسکی در سال 2011 هندبوکی کاربردی را باتوجه به مطالعات پیشین و آزمایش‌های اثبات شده به رشته تحریر در آوردند که بسیار در اندازه‌گیری هر چه دقیق‌تر خواص مغناطیسی و همچنین انتخاب مواد مؤثر است. ایشان دریافتند آهن خالص دارای خواص مغناطیس عالی

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از پودر آهن ساخته شده به روش اتمیزه کردن گاز با توزیع اندازه تقریبی بین ۵ تا ۶۰ میکرومتر برای فرایند ذوب لیزری انتخابی استفاده شد. هرچند مطابق نمودار شکل ۵ بیشترین درصد پودر حول ۵ تا ۲۰ میکرومتر است. ترکیب شیمیایی پودر با روش XRF1 در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین پودر موردنظر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی ۲ از نظر سایز و شکل دانه‌ها مطابق شکل ۶ مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۵) تصویر اس ای ام مرفولوژی پودر استفاده شده



شکل ۶) نمودار پراکنندگی دانه‌های اسکن شده با میکروسکوپ

جدول ۲) طراحی تاگوچی L9 برای آزمایش‌های اولیه^[19]

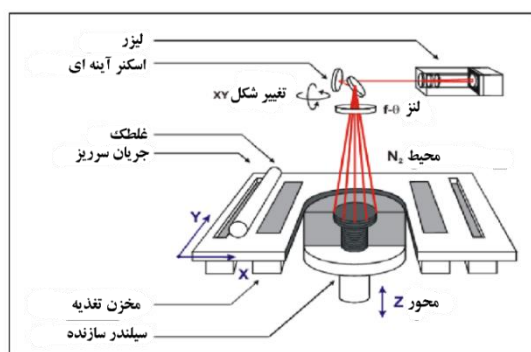
un/ sample	Power (W)	Scan speed (mm/s)	Hatch distance (μm)	Energy density (j/mm ³)	Density (g/cm ³)
1	120	600	60	111.11	6.94
2	120	1100	80	45.45	5.93
3	120	1600	100	25	5.33
4	150	600	80	104.166	7.26
5	150	1100	100	45.45	6.37
6	150	1600	60	52.08	6.24
7	180	600	100	100	7.18
8	180	1100	60	90.90	6.91
9	180	1600	80	46.87	6.41

¹ x-ray fluorescence

تعداد ۹ نمونه مکعبی با استفاده از چاپگر سه‌بعدی NOURA M100P که بر اساس روش ذوب لیزری انتخابی کار می‌کند ساخته شد. در این فرایند، پودر مطابق شکل ۷ در داخل یک محفظه بدون اکسیژن ذوب می‌شود تا از اکسیداسیون جلوگیری شود. محفظه تولید کاملاً بسته است و ورودی و خروجی جریان گاز تعبیه شده است تا درصد اکسیژن داخل محفظه را به زیریک درصد کاهش دهد و از اکسید شدن جلوگیری کند. لایه‌های تولید شده توسط یک بستر ساخته شده از فولاد ضدزنگ L۳۱۶ محکم نگه داشته می‌شوند. این ماده به این دلیل انتخاب شد که دمای ذوب و سختی بالاتری نسبت به آهن دارد. الگوی اسکن جزیره‌ای برای این فرایند انتخاب شد، است. برخی از اطلاعات، تنظیمات و پارامترهای وردی فرایند چگالی در جدول ۲ فهرست شده است. الگوی اسکن در فرایند ذوب لیزری انتخابی بر تنش‌های حرارتی و توزیع گرادیان حرارتی در تک‌لایه‌ها اثر می‌گذارد [12]. لیزر بستر پودری را در یک جهت اسکن می‌کند تا نواری روی سطح تخت ایجاد شود. عرض این نوار برابر با قطر پرتو لیزر (۸۰ میکرومتر) است. در طول فرایند، ضخامت هر لایه ۳۰ میکرومتر بود. در ذوب انتخابی لیزر، مقدار انرژی که پودر از لیزر جذب می‌کند بسیار مهم است. مقدار انرژی جذب شده توسط ماده را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) محاسبه کرد.

$$E = \frac{P}{VDH} \quad (1)$$

در این رابطه، E، P، V، D و H به ترتیب چگالی انرژی، توان لیزر، سرعت اسکن لیزر، ضخامت لایه و فاصله هاشورها را نشان می‌دهند [13]. بنابراین، در قطعات تولید شده با استفاده از ذوب انتخابی لیزر، پارامترهایی مانند توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و فاصله هاشورها بر خواص قطعات تأثیر می‌گذارند.



شکل ۷) شماتیک فرایند کلی دستگاه اس ال ام [18]

۳- آزمایش‌ها

در این پژوهش از دو مرحله آزمایش برای تعیین خواص مغناطیسی بهینه و یافتن سطوح پارامترهای فرایند استفاده

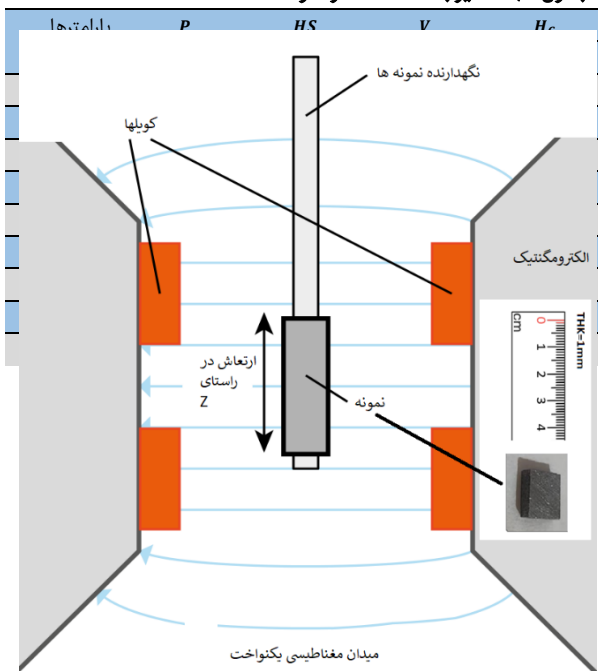
2 Scanning electron microscope

دریچه، چگالی کاهش می‌یابد؛ بنابراین، برای دستیابی به خواص بهینه در آزمایش‌های نهایی، سطوح پارامترهای فرایند به سمت نمونه با بیشترین چگالی همگرا می‌شوند.

۳-۱-۱ طراحی آزمایش‌ها

در این آزمایش‌ها تأثیر توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و فاصله هاشورها بر نیروی پسماند زدای مغناطیسی نمونه‌های انتخابی آهن ذوب شده لیزری مورد بررسی قرار گرفت. سطوح پارامترها بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های اولیه انتخاب شده و نمونه‌ها تولید شدند. پس از ساخت، نمونه‌ها از نظر خواص مغناطیسی مورد آزمایش قرار گرفتند. به این منظور ابعاد نمونه‌ها جهت بستن به دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی^۳ مطابق شکل ۹ به‌صورت مکعبی با ابعاد پنج در پنج به ضخامت یک میلی‌متر برش خوردند. نتایج آزمایش نمونه‌های نهایی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳) مقادیر به‌دست‌آمده در نمونه‌ها



شکل ۹) نمونه‌های آماده شده به ابعاد $1 \times 5 \times 5$

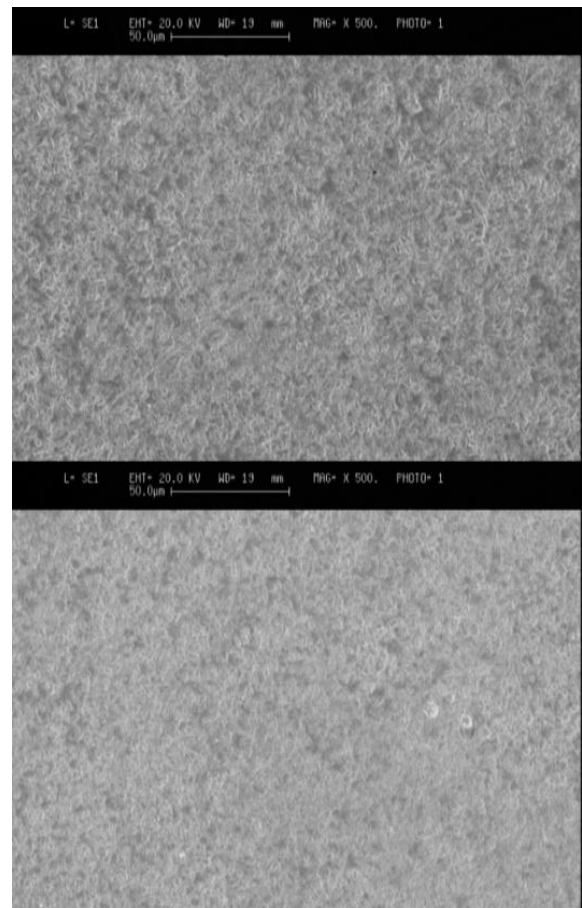
۳-۱-۲ روش تاگوچی

یکی از روش‌های مناسب و ساده در بهینه‌سازی مهندسی روش تاگوچی است. این روش مقادیر انحراف را در یک فرایند از طریق یک طراحی آزمایش قوی کاهش داده و هدف کلی آن تولید باکیفیت بالا و کمترین هزینه برای است. تاگوچی روشی را برای بررسی چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف بر میانگین و واریانس یک فرایند توسعه داده به‌وسیله آن می‌توان کیفیت تابع پذیری یک فرایند را نشان داد [15]. جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها و

می‌شود. مرحله اول بر پایه مقاله قبلی [19] و مرحله دوم مربوط به خواص مغناطیسی در این پژوهش انجام شده است.

۳-۱-۳ آزمایش‌های اولیه

آزمایش‌های اولیه، تأثیر توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و فاصله هاشورها بر روی چگالی و تخلخل نمونه‌های آهن رانشان دادند. نمونه‌های مکعبی اولیه بر اساس کارهای تحقیقاتی مشابه قبلی [۱۴، ۱۵] ساخته شدند. برای محاسبه چگالی، جرم نمونه‌ها با استفاده از ترازو و حجم نمونه‌ها به روش سیال جابه‌جا شده اندازه‌گیری شد. نتایج نمونه‌های تولید شده اولیه با پارامترهای خاص در جدول ۲ آورده شده است. علاوه بر اندازه‌گیری چگالی نمونه‌های ساخته شده، تصویربرداری میکروسکوپی برای بررسی ساختار نمونه‌ها انجام شد. مطابق شکل ۸ از تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های ۳ و ۴ که کمترین و بیشترین چگالی را داشتند برای مقایسه و آنالیز استفاده شد.

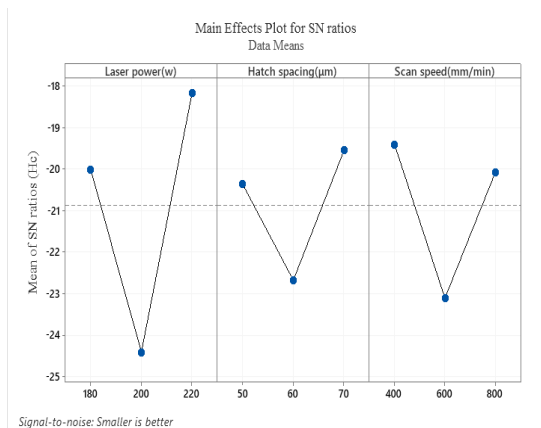


شکل ۸) تصویر ریزساختار نمونه ۳ و ۴

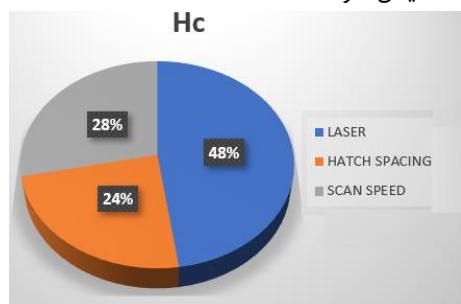
باتوجه به نتایج مطالعه ریزساختار، مشخص شد که چگالی اندازه‌گیری شده نسبتاً دقیق است. نمودارهای اثرات اصلی بر روی چگالی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش توان لیزر، چگالی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. اثر سرعت اسکن و فاصله دریچه نشان داد که با افزایش سرعت اسکن و فاصله

³ Vibrating-sample magnetometer

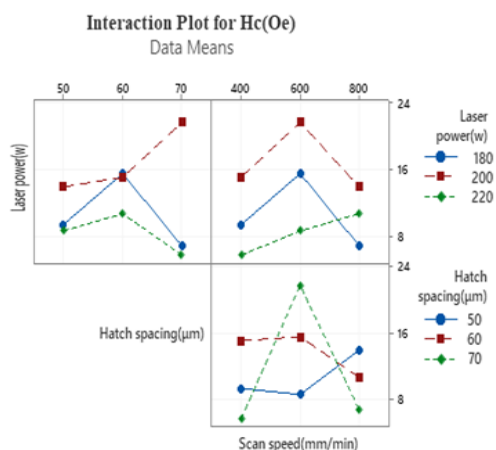
پس‌ماند زدا است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که نیروی پس‌ماند زدا قطعات ذوب شده به وسیله لیزر در بستر پودر در شرایط بهینه تقریباً نزدیک به مرجع افزایش به دست آمده است. [10]



شکل ۱۰) بهترین حالت پارامترها برای کمترین وادارندگی مغناطیسی نمونه‌ها



شکل ۱۱) نمودار میزان تأثیر تکی پارامترهای ورودی بر وادارندگی مغناطیسی



شکل ۱۲) نمودارهای تأثیرات تعاملی پارامترهای فرایند بر وادارندگی مغناطیسی

مراجع

- 1- D. S. Thomas and S. W. Gilbert, "Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing," aithersburg, MD, Dec. 2014. doi: 10.6028/NIST.SP.1176.
- 2- <https://internationaljournalofresearch.com/2020/08/17/additive-manufacturing/>.
- 3- R. Singh et al., "Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview," in Materials

هزینه‌ها و همچنین بررسی اثرات متقابل پارامترها بر خروجی، از روش آزمایش تاگوچی (L9) استفاده شده است [16]

۳-۱-۳ تأثیر پارامترها و تعامل آنها بر نیروی پس‌ماند زدا مغناطیسی

از نمودار اثرات اصلی پارامترها و همچنین نمودار تعاملی پارامترها می‌توان برای نتیجه‌گیری در مورد اثرات پارامترها و برهم‌کنش آنها استفاده کرد. به عبارتی نمودارهایی که بیشترین تقاطع را دارند اثرات جمعی قوی‌تری دارند. جدول ۳ نتایج نمونه‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، پارامترهای بهینه برای داشتن کمترین مقدار وادارندگی مغناطیسی شامل توان لیزر در سطح سوم خود یعنی ۲۲۰ وات و فاصله هاشورها در سطح سوم خود و معادل ۷۰ میکرومتر و در نهایت سرعت اسکن در سطح اول خود و معادل ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه است. همچنین نمودارهای اثر اصلی بر نیروی پس‌ماند زدا، در شکل ۱۱ نشان داده شده است لازم به ذکر است مقدار وادارندگی مغناطیسی کم از خواص مطلوب مغناطیسی در کارافزارهای جریان متناوب محسوب می‌شود. در شکل ۱۲ بر هم‌کنش، خطوط موازی نشان‌دهنده عدم تعامل بین پارامترها هستند، درحالی‌که خطوط متقاطع نشان‌دهنده بر هم‌کنش قابل‌توجه بین پارامترها هستند [17]. نمودارها نشان می‌دهند که بر هم‌کنش بین پارامترها تأثیر قابل‌توجهی بر نیروی پس‌ماند زدا مغناطیسی نمونه‌های تولید شده دارد.

۴- نتایج

در این مقاله اثر پارامترهای ذوب انتخابی لیزر بر نیروی پس‌ماند زدا مغناطیسی قطعات ساخته شده به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهایی شامل توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و فاصله هاشورها انتخاب شدند. آزمایش‌ها نشان داد که پارامترهای انتخاب شده تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مغناطیسی قطعات ذوب شده در بستر پودر با لیزر را دارند. با استفاده از تحلیل سیگنال به نویز، سطوح بهینه این پارامترها برای دستیابی به کمترین نیروی پس‌ماند زدا تعیین شد. نتایج تجربی نشان داد که با افزایش توان لیزر از ۱۸۰ وات به ۲۰۰ وات، نیروی پس‌ماند زدا افزایش می‌یابد. اما با افزایش توان لیزر از ۲۰۰ وات به ۲۲۰ وات، این نیرو کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت اسکن از ۴۰۰ میلی‌متر بر ثانیه به ۶۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، نیروی پس‌ماند زدا افزایش می‌یابد، درحالی‌که با افزایش سرعت اسکن از ۶۰۰ میلی‌متر بر ثانیه به ۸۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، نیروی ذکر شده کاهش می‌یابد. نمودارهای چندگانه نشان می‌دهد که بر هم‌کنش بین پارامترها اثرات قابل‌توجهی بر خاصیت ذکر شده نمونه‌های ذوب شده با بستر پودر لیزری دارد. تحلیل سیگنال به نویز نشان داد که سطح بهینه توان لیزر، سرعت اسکن و فاصله هاشورها به ترتیب ۲۲۰ وات، ۴۰۰ میلی‌متر بر ثانیه و ۷۰ میکرومتر برای کمترین نیروی

electromagnets," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 615, no. S1, pp. S291–S295, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2014.01.217.

19- Hemati, Modaberifar, Taheri, Sajadi optimization process parameters effects on mechanical properties of selective laser melted iron sample

Today: *Proceedings*, 2019, vol. 26, pp. 3058–3070. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.635.

4- "Magnetic Materials," 2011, pp. 117–158. doi: 10.1201/b10979-4.

5- S. K. Chaurasia, U. Prakash, P. S. Misra, and K. Chandra, "Fe-P soft Magnetic properties of iron for A.C. applications," in *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 585, pp. 289–293. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.585.289.

6- Q. Liu, Z. Y. Chen, S. F. Yang, and J. S. Li, "Magnetic properties of pure iron with respect to different C/Si ratios and grain sizes," in *Materials Science Forum*, 2018, vol. 913, pp. 653–660. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.913.653.

7- T. H. Becker and Di. Dimitrov, "The achievable mechanical properties of SLM produced Maraging Steel 300 components," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 487–494, 2016, doi: 10.1108/RPJ-08-2014-0096.

8- A. A. Deev, P. A. Kuznetsov, and S. N. Petrov, "Anisotropy of mechanical properties and its correlation with the structure of the stainless steel 316L produced by the SLM method," in *Physics Procedia*, 2016, vol. 83, pp. 789–796. doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.081.

9- B. Song, S. Dong, S. Deng, H. Liao, and C. Coddet, "Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting," *Optics and Laser Technology*, vol. 56, pp. 451–460, 2014, doi: 10.1016/j.optlastec.2013.09.017.

10- S. Yavari, M. Modaberifar, and M. Reza Sheykholeslami, "An experimental investigation of electro discharge machining parameters effects on ferromagnetic properties of extra-low-carbon steel," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 549, May 2022, doi: 10.1016/j.jmmm.2022.169041.

11- (L-PBF) in the as-built and stress relieved conditions," *Progress in Additive Manufacturing*, 2022, doi: 10.1007/s40964-022-00294-7.

12- J. P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, B. Lauwers, J. Mater. Process. Technol. 2004, 149, 616.

13- S. Saedi, N. S. Moghaddam, A. Amerinatanzi, M. Elahinia, H. E. Karaca, *Acta Mater.* 2018, 144, 552.

14- J. Sander, J. Hufenbach, L. Giebeler, H. Wendrock, U. Kühn, J. Eckert, *Mater. Des.* 2016, 89, 335.

15- E. Ghio, E. Cerri, *Mater.* 2022, 15, 2047.

16- J. P. Kruth, M. Badrossamay, E. Yasa, J. Deckers, L. Thijs, J. Van Humbeeck, In *Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM XVI)*. 2010, 3.

17- R.L. Mason, R.F. Gunst, J.L. Hess, Wiley & Sons 2003.

18- E. Ferrara, E. Olivetti, F. Fiorillo, E. Forton, L. Martino, and L. Rocchino, "Microstructure and magnetic properties of pure iron for cyclotron