



Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 4, No. 1, pp.: 52-63  
2024

DOI:  
10.22034/jssta.2024.417595.1140

### Article Info

Received: 2023-09-23

Accepted: 2024-04-24

### Keywords

Maraging Steel, Additive  
Manufacturing, Taguchi's  
Methods.

### How to Cite this article

Y. Vahidshad, P. Aalimehr, K. Abrinia, "Optimization of Selective Laser Melting (SLM) Process Factors for 3D Printing of Maraging 300 Steel Parts via Taguchi Method", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 4 (1), p.:52-63, 2024.

## Optimization of Selective Laser Melting (SLM) Process Factors for 3D Printing of Maraging 300 Steel Parts via Taguchi Method

Yaser Vahidshad<sup>1\*</sup>, Peyman Aalimehr<sup>2</sup>, Karen Abrinia<sup>3</sup>

- 1 \*Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran  
[y.vahidshad@isrc.ac.ir](mailto:y.vahidshad@isrc.ac.ir), (Corresponding Author)  
2 Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran  
3 Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

### Abstract

This research focused on investigating additive manufacturing factors using Selective Laser Melting (SLM) with maraging grade 300 steel powder via Taguchi method. The main objectives were to explore the influence of process parameters and achieve optimal levels. Experiments were exactly designed with the assistance of Mini-Tab software. The study specifically targeted scanning speed, hatch distance, layer thickness, and scanning strategy for fabricating tensile samples. Comprehensive characterization using optical and scanning electron microscopes examined mechanical and microstructural properties. The analysis revealed that the optimal levels for achieving desirable results were as follows: scanning speed of 100 mm/s, layer thickness of 20 microns, hatch distance of 0.15 mm, and implementing the Stripe scanning strategy in the XY direction. The output results showed significant findings, with a final tensile strength of 951 MPa, porosity measured at 0.4%, and an impressive relative density of 99.6%. In conclusion, this research provides valuable insights into optimizing the selective laser melting process with maraging grade 300 steel, offering crucial knowledge about effective process parameters for obtaining optimal mechanical and microstructural properties in the additive manufacturing of tensile samples.



## بهینه‌سازی عوامل فرآیند ذوب لیزر انتخابی چاپ سه بعدی قطعات فولادی ماریجینگ ۳۰۰ با استفاده از روش تاگوچی

یاسر وحیدشاد\*<sup>۱</sup>، پیمان عالی‌مهر<sup>۲</sup>، کارن ابری‌نیا<sup>۳</sup>

۱- \* پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، تهران، ایران y.vahidshad@isrc.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دسترس‌پذیر در نشانی:  
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه  
علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال چهارم، شماره ۱،  
صفحه ۶۳-۵۲  
بهار و تابستان ۱۴۰۳

DOI:  
10.22034/jsssta.2024.417595.1140

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵

واژه‌های کلیدی

ذوب لیزری انتخابی، فولاد  
ماریجینگ، ساخت افزایشی، روش  
تاگوچی.

نحوه استناد به این مقاله

یاسر وحیدشاد، پیمان عالی‌مهر،  
کارن ابری‌نیا، "بهینه‌سازی عوامل  
فرآیند ذوب لیزر انتخابی چاپ سه  
بعدی قطعات فولادی ماریجینگ  
۳۰۰ با استفاده از روش تاگوچی"،  
دو فصلنامه علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی، جلد چهارم،  
شماره اول، صفحات ۶۳-۵۲،  
۱۴۰۳.

### چکیده

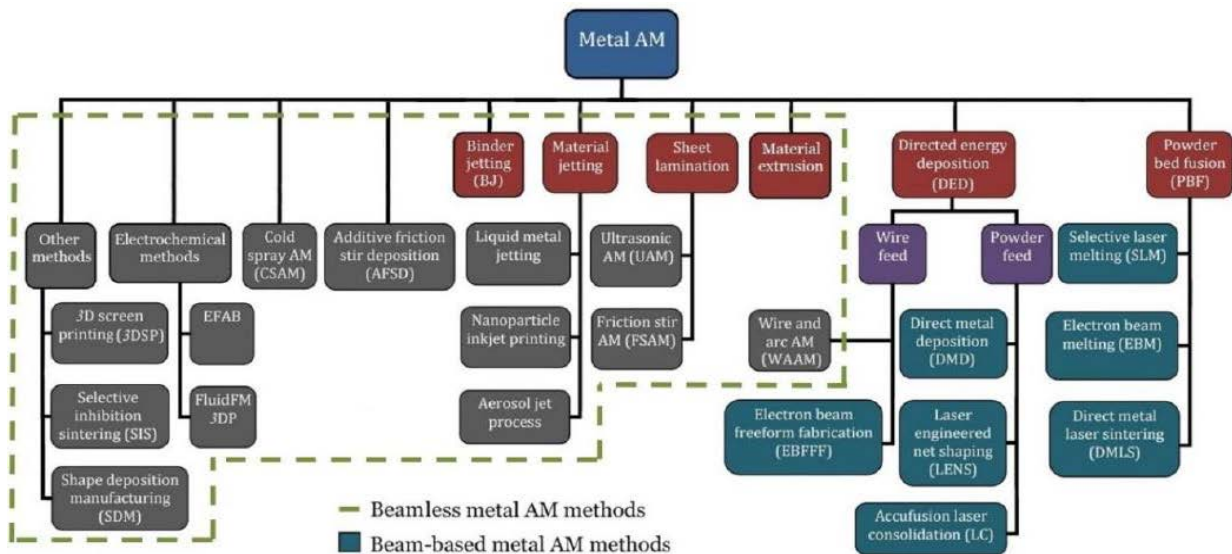
این تحقیق به بررسی عوامل ساخت افزایشی با روش ذوب لیزر انتخابی با جنس فولاد ماریجینگ ۳۰۰ با استفاده از روش تاگوچی پرداخته شد. به منظور بررسی اثر عوامل موثر فرآیندی و دستیابی به سطوح بهینه هر عامل، به کمک نرم‌افزار تحلیل داده مینی‌تب آزمایش‌هایی طراحی شد. در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های کشش عوامل سرعت اسکن، فاصله هاشور، ضخامت لایه و استراتژی اسکن مورد بررسی قرار گرفت. برای مشخصه‌یابی نتایج در بخش خواص مکانیکی از استحکام نهایی کشش و در بخش خواص ریزساختاری شامل تخلخل و ریزساختار از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترون روبشی استفاده شد. نتایج مشخص کرد که در تحلیل اثر عوامل فرآیندی، سطوح سرعت اسکن ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، ضخامت لایه ۲۰ میکرون، فاصله هاشور ۰/۱۵ میلی‌متر، استراتژی اسکن Stripe عوامل بهینه سطوح در راستای ساخت XY بود. در نتایج خروجی استحکام نهایی کشش ۹۵۱ مگاپاسکال، تخلخل ۰/۴٪ و به عبارتی چگالی نسبی ۹۹/۶٪ به دست آمد.

۱- مقدمه

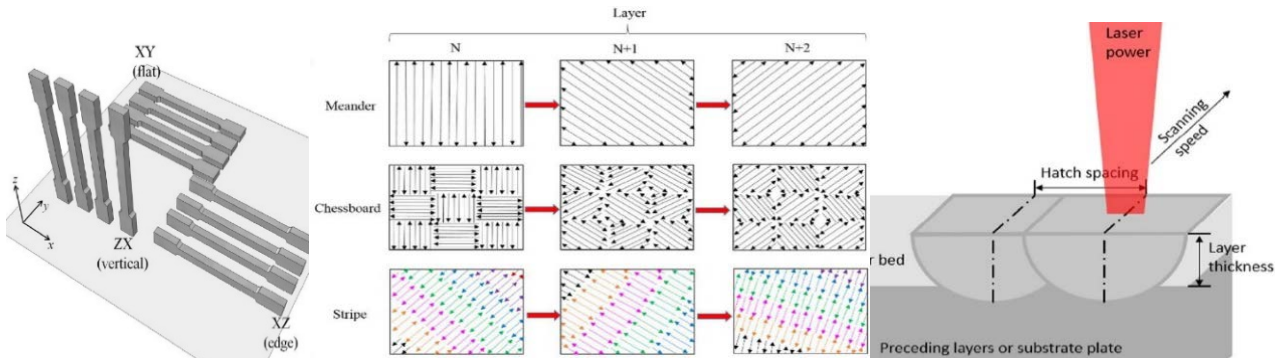
معمول شامل اجزای موشک (محفظه احتراق و نازل)، مخازن پیش‌رانه، قطعات ماهواره (آرایه‌های مخابراتی و سازه آنتن‌ها) و مبدل‌های حرارتی است [۲-۳].

ذوب بستر پودری شامل تمام فرآیندهایی است که در آن‌ها از انرژی متمرکز لیزر یا پرتو الکترونی برای ذوب یا تف جوشی (زینتر) یک لایه از پودر استفاده می‌شود. برای فلزات عموماً به جای زینتر از ذوب کامل استفاده می‌شود. بر اثر ذوب مجدد لایه‌های قبلی، در حین ذوب لایه‌های جدید، پیوندهای قوی بین لایه‌ها تا انتهای ساخت شکل می‌گیرند. دستگاه ذوب بستر پودری عموماً شامل مجموعه‌ای از لنزها، آینه‌ها و یا گالوانومتر است که وظیفه انتقال و حرکت اشعه را دارند تا بتواند بر مبنای الگوی اسکن و عواملی فرآیندی تنظیم شده، سطح پودر را به صورت انتخابی ذوب نماید. سازوکار مهم دیگر این دستگاه وظیفه توزیع مناسب پودر در هر سطح را دارد که شامل یک محفظه به منظور ذخیره کافی پودر و یک تیغه پخش‌کننده نرم برای پخش یکنواخت پودر در لایه‌های مختلف توسط حرکات رفت و برگشتی مکرر است [۳]. سرعت حرکت لیزر بر روی بستر پودر، فاصله مرکز به مرکز دو خط اسکن مجاور و ارتفاع ستون ذرات در هر لایه از بستر پودر را به ترتیب سرعت اسکن، فاصله هاشور و ضخامت لایه گویند (شکل ۲-الف). فاصله هاشور میزان تداخل دو حوضچه مذاب مجاور هم را نشان می‌دهد. طرحی که لیزر در هر سطح مقطع از قطعه، مطابق آن کار اسکن سطح پودر را انجام می‌دهد، استراتژی اسکن نامیده می‌شود (شکل ۲-ب).

اواخر قرن بیستم میلادی فناوری ساخت افزودنی مورد پژوهش قرار گرفت و در سال ۱۹۸۷ برای نخستین بار در کشور آمریکا تجاری‌سازی شد. این رویه به تدریج در کشورهای ژاپن، آلمان، انگلیس و دیگر کشورهای صنعتی به صورت جدی دنبال شد. فعالیت‌های این شرکت‌ها در این حوزه منجر به ابداع و ثبت روش‌های کاربردی بیشتری از سیستم‌های ساخت سه بعدی در حوزه‌های مختلف پلیمری، فلزی و سرامیکی شده‌اند که تا ۲۰ روش به صورت تجاری و در چهارچوب رقابتی بین شرکت‌ها با قابلیت‌های گوناگون در حال تولید و عرضه می‌باشند [۱]. مطابق نگاره طراحی شده در شکل ۱ برای روش ساخت افزودنی فلزات از مکانیزم‌های اشعه‌ای شامل: ذوب بستر پودری و لایه نشانی مستقیم انرژی و مکانیزم‌های غیراشعه‌ای شامل: اکستروژن ماده، لایه‌نشانی ورق، جت قطرات ماده و اتصال چسبی ذرات ماده استفاده می‌شود. در این تحقیق از روش ذوب لیزر انتخابی (SLM) پودر (یکی از انواع روش‌های چاپ فلزی اشعه‌ای) استفاده شده است [۲]. روش ساخت افزودنی نقش مهمی در ساخت قطعات و سازه‌های پیچیده فضایی دارد که با استفاده از روش‌های سنتی دشوار یا غیرممکن است و آن را برای کاربردهای فضایی که محدودیت‌های وزن و اندازه، حیاتی هستند، مناسب می‌سازد. به‌طور کلی، روش ساخت افزودنی مزایای متعددی مانند صرفه‌جویی در هزینه، کاهش وزن، تولید بر اساس تقاضا، کاهش زمان ساخت و یکپارچه‌سازی برای قطعات مورد کاربرد فضایی ارائه می‌دهد. کاربردهای فضایی روش ساخت افزودنی به‌طور



شکل (۱): روش‌های مختلف ساخت افزایشی سه بعدی فلزات [۲]



شکل (۲): (الف) نمایش عوامل سرعت اسکن، فاصله هاشور، ضخامت لایه، (ب) الگوهای مختلف استراتژی اسکن و (پ) جهت‌های اصلی ساخت در فرآیند ذوب بستر پودری [۴-۶]

فاصله هاشور و ضخامت لایه باعث تغییر چگالی انرژی شده و تغییرات در ذوب و اتصال ذرات به یکدیگر می‌شود:

$$E_d = P/vht \quad (1)$$

که در این معادله  $P$  توان دستگاه بر حسب وات،  $v$  سرعت اسکن لیزر بر حسب میلی‌متر بر ثانیه،  $h$  و  $t$  به ترتیب فاصله هاشور و ضخامت لایه پودر بر حسب میلی‌متر و  $E$  چگالی انرژی لیزر بر حسب ژول بر میلی‌متر مکعب می‌باشد [۳-۵]. جدول ۱ خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده روش ساخت افزایشی ذوب لیزری انتخابی پودر برای آلیاژ ماریچینگ ۳۰۰ را نشان می‌دهد.

جدول (۱): تحقیقات ساخت افزایشی ذوب لیزر انتخابی فولاد ماریچینگ ۳۰۰

مرجع	سرعت اسکن mm/s	ضخامت لایه (mm)	فاصله هم-پوشانی (mm)	توان (W)	تیم پژوهشی
[۱۰]	۳۰۰	-	۰/۰۵	۱۰۰	بای و همکاران
	۴۰۰		۰/۰۷	۱۳۰	
	۵۰۰		۰/۰۹	۱۶۰	
	۶۰۰		۰/۱۱	۱۹۰	
[۱۱]	۶۰۰	-	۰/۵d	۲۰۰	بکر و همکاران
	۸۰۰		۰/۷d		
	۱۰۰۰		۰/۹d		
[۱۲]	۹۶۰	۰/۰۴۰	۱۱۰	۲۸۵ تا ۳۰۰	شمس الدینی و همکاران
	۱۰۱۰	۰/۰۵			
[۱۳]	۵۰۰	۰/۰۲۰	۰/۰۸	۱۸۰	هوانگ و همکاران
	۷۰۰	۰/۰۳۵	۰/۱۱	۲۲۰	
	۹۰۰	۰/۰۵۰	۰/۱۴	۲۶۰	
	۱۱۰۰	۰/۰۶۵	۰/۱۷	۳۰۰	
[۱۴]	۵۰۰	۰/۰۳۰	۰/۰۵	۴۰ تا ۲۶۰	سوزوکی و همکاران
	۱۰۰۰			۲۰	
	۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰				

در نرم‌افزارهای تجاری انواع استراتژی‌های اسکن وجود دارد که هر یک خواص مکانیکی و ریزساختاری منحصر به فرد خود را دارد که علت آن در متفاوت بودن تشکیل حوضچه مذاب است. متداول‌ترین طرح‌های اسکن شامل Meander، Chessboard و Stripe هستند. در حالت اول خطوط اسکن خطی دنباله‌دار، در حالت دوم شطرنجی دنباله‌دار و در حالت سوم خطی متقارن هستند (شکل ۲-ب) [۶]. نوع جانمایی قطعات در فضای سه بعدی نرم‌افزار Slicer با توجه به زاویه و راستای جهت‌گیری نسبت به سه جهت اصلی  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  می‌تواند بسیار متفاوت باشد که به آن جهت ساخت گویند. تغییر در جهت ساخت قطعات، موجب تفاوت در مکانیزم تشکیل حوضچه مذاب و تفاوت در راستای اسکن لیزر نسبت به راستای آزمون کشش شده و بر نتایج خواص مکانیکی تاثیرگذار خواهد بود. جهت‌گیری‌های اصلی ساخت قطعات  $XY$ ،  $ZX$  و  $XZ$  هستند که علاوه بر آن‌ها انواع حالت‌ها بر اساس تغییر زاویه نسبت به راستاهای اصلی نیز میسر است (شکل ۲-پ) [۷]. ضخامت لایه ساخت سه‌بعدی فلز وابسته به خواص پودر فلز (مثل اندازه ذرات، شکل، جریان‌پذیری و...) است. دقت ابعادی ساخت سه‌بعدی فلز حدود  $\pm 0.1$  میلی‌متر است. چگالی انرژی لیزر یکی از مهمترین عوامل فرآیند ساخت افزایشی که تاثیر فراوانی بر خواص و شرایط حوضچه مذاب و در نتیجه بر ریزساختار و خواص مکانیکی قطعه ساخته شده دارد. مقدار چگالی انرژی باید بهینه باشد. در صورت بالاتر رفتن بیش از حد مقدار آن، تبخیر عناصر و بهم خوردن ترکیب شیمیایی آلیاژ، لایه سخت اکسیدی یا ریزساختار نامطلوب تشکیل می‌شود و در صورت کمتر بودن باعث گلوله‌ای شدن ذرات، باقی ماندن ذرات ذوب نشده و افزایش حجم تخلخل می‌شود [۸-۹]. با توجه به معادله چگالی انرژی در روش ساخت افزودنی پودری، تغییر در هر یک از عوامل توان، سرعت اسکن،

$$3 \times 3 \times 3 \times 2 = 54$$

برای جامعه آماری ۵۴ تایی، چهار حالت وجود دارد که کمترین تعداد آزمون (با در نظر گرفتن هزینه‌ها) ۱۸ نمونه با برابر بودن شانس انتخاب همه حالات، انتخاب شد (جدول ۳). با توجه به هزینه بالای روش ساخت افزودنی فلزی و اقدامات پژوهشی مشابه صورت گرفته قبلی در خصوص انجام آزمایش کشش روی نمونه‌های کوچک [۱۶] تصمیمی اتخاذ شد تا آزمایشات روی نمونه‌هایی به مقیاس نصف اندازه ذکر شده در استاندارد ASTM E8 (نمونه کشش تخت) انجام شود (جدول ۴).

جدول (۳): عوامل و سطوح مختلف لحاظ شده در آزمایش‌ها

سطوح			واحد‌ها	موارد	عوامل
۱۳۰	۱۰۰	۷۰	میلیمتر بر ثانیه	سرعت اسکن	فرآیندی
۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۲	میلیمتر	ضخامت لایه	
۰/۳	۰/۲۵	۰/۲۰	میلیمتر	فاصله هاشور	
Chessboard	Stripe	-	-	استراتژی اسکن	
۲۰۰		-	وات	توان	
X-Y		-	-	جهت ساخت	
فاصله هاشور			ضخامت لایه	سرعت اسکن	ردیف
۰/۲۰	۰/۰۲	۷۰	Stripe	S1	
۰/۲۵	۰/۰۴	۷۰	Stripe	S2	
۰/۳۰	۰/۰۶	۷۰	Stripe	S3	
۰/۲۰	۰/۰۲	۱۰۰	Stripe	S4	
۰/۲۵	۰/۰۴	۱۰۰	Stripe	S5	
۰/۳۰	۰/۰۶	۱۰۰	Stripe	S6	
۰/۲۵	۰/۰۲	۱۳۰	Stripe	S7	
۰/۳۰	۰/۰۴	۱۳۰	Stripe	S8	
۰/۲۰	۰/۰۶	۱۳۰	Stripe	S9	
۰/۳۰	۰/۰۲	۷۰	Chessboard	S10	
۰/۲۰	۰/۰۴	۷۰	Chessboard	S11	
۰/۲۵	۰/۰۶	۷۰	Chessboard	S12	
۰/۲۵	۰/۰۲	۱۰۰	Chessboard	S13	
۰/۳۰	۰/۰۴	۱۰۰	Chessboard	S14	
۰/۲۰	۰/۰۶	۱۰۰	Chessboard	S15	
۰/۳۰	۰/۰۲	۱۳۰	Chessboard	S16	
۰/۲۰	۰/۰۴	۱۳۰	Chessboard	S17	
۰/۲۵	۰/۰۶	۱۳۰	Chessboard	S18	

نقشه سه بعدی قطعات کشش مورد نظر با فرمت Step به نرم‌افزاری با عنوان Slicer داده می‌شود که فرآیند ساخت را پیش از ساخت قطعه شبیه‌سازی نموده و آن را با توجه به اهداف پروژه و سطوح آزمایش طراحی شده، تنظیم کرد. نمونه‌ها تحت گاز

در تحقیق حاضر بر خلاف تحقیقات جدول ۱، از حداکثر توان دستگاه (۲۰۰ وات) که به نسبت کم می‌باشد استفاده شده است ولی سرعت اسکن لیزر بسیار کمتر از تحقیقات ذکر شده است و به جای آن تا حدودی از فاصله هاشور بالاتری استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

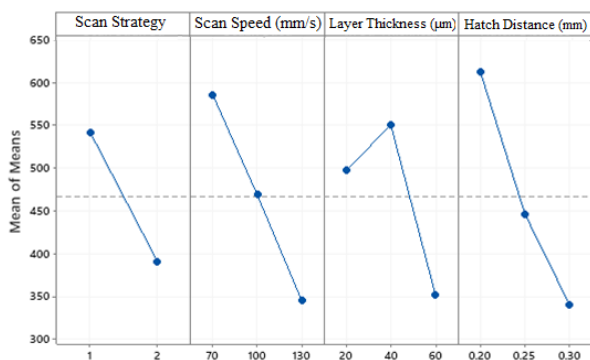
برای ساخت نمونه‌ها از دستگاه مدل EOSINT M250 شرکت EOS استفاده شد. حجم محفظه ساخت دستگاه ۲۵۰×۲۵۰×۲۰۰ میلی‌متر است. حداکثر توان لیزر دستگاه ۲۰۰ وات، قطر و طول موج باریکه لیزر به ترتیب تا ۳۰۰ میکرومتر و ۱۰۶۰ نانومتر است. پودر فولاد ماریچینگ گرید ۳۰۰ با نام تجاری MS1 شرکت EOS استفاده شد. ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی عناصر تشکیل دهنده پودر در جدول ۲ آمده است.

جدول (۲): خواص فیزیکی پودر فولاد ماریچینگ گرید ۳۰۰

عناصر	Fe	Ni	Mo	Ti	Al	Si	Mn	Ca	C	
درصد وزنی	۶۷	۱۸	۵	۰/۶	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۳	
اندازه ذرات	حداکثر اندازه ذرات ۶۳ میکرومتر						۵۰ میکرومتر			
چگالی ذرات	۸-۸/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب									

با استفاده از روش تاگوچی که طراحی بر اساس حداقل منابع، زمان و تعداد آزمایش ممکن سازماندهی می‌شود، می‌توان به حداقل تعداد آزمایش‌ها برسیم. همچنین امکان بررسی میزان اثرگذاری عوامل، امکان تحلیل سیگنال به نویز و تعیین سطوح بهینه از سطوح انتخابی قابل انجام است [۱۵]. روش تاگوچی انحراف‌های ممکن از مقدار هدف را همراه با تابع زیان مدل‌بندی می‌کند. در این روش از کاربرد طرح‌های آرایه‌های متعامد برای اختصاص عوامل انتخاب شده، استفاده می‌شود، متداول‌ترین طرح‌های آرایه‌های متعامد L8، L16، L18 و L27 است. مراحل اجرای روش طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی با در نظر گرفتن جزئیات و به ترتیب اهمیت شامل معرفی عوامل مؤثر در واکنش، تعداد آزمایشات مورد نیاز، تحلیل جواب‌ها و ارزیابی شرایط بهینه است. در این تحقیق به شناسایی سطوح بهینه عواملی سرعت اسکن، ضخامت لایه، فاصله هاشور و استراتژی اسکن پرداخته شد. در تحلیل نتایج از نرم‌افزار تحلیل داده Minitab استفاده گردید. با توجه به جدول ۳، می‌توان گفت که آزمایش به صورت سه تا سه سطحی و یک دو سطحی می‌باشد پس، تعداد کل آزمایشات به صورت زیر محاسبه می‌شود:

مانند حالت قبل با شیب تندی کاهش یافته است که به دلیل کاهش مقدار چگالی انرژی، مقدار جذب انرژی و حجم ذوب و چگالی نسبی در ماده کمتر می‌شود. در ضخامت لایه، مقادیر استحکام در سطح ۲۰ تا سطح ۴۰ میکرون افزایش پیدا کرده و تا سطح ۶۰ کاهش یافته، به طور کلی با افزایش ضخامت لایه مقدار چگالی انرژی کاهش یافته و در نتیجه جذب انرژی و چگالی نسبی در ماده کمتر می‌شود ولی از طرفی در سطح ۴۰ میکرون یک پیک مشاهده می‌شود که نشان از وضعیت بهتر میانگین تنش‌ها در این نقطه (و نه در بهترین سطح UTS) دارد و نکته مهم آن در همین موضوع است. در فاصله هاشور، مقادیر میانگین در سطح ۰.۲ تا ۰.۳ میلی‌متر به دلیل کاهش چگالی انرژی و چگالی نسبی نمونه‌ها و از طرفی تاثیرگذاری شدید این عامل بر استحکام نهایی، کاهش قابل توجهی داشته است. بنابراین عوامل بهینه معرفی شده توسط نرم‌افزار تاگوچی با توجه به شکل ۴، استراتژی اسکن Strip، سرعت اسکن ۷۰، ضخامت لایه ۴۰ و فاصله هم‌پوشانی ۰.۲ می‌باشد. با بررسی بیشتر نمودار پراکندگی استحکام نهایی و ضخامت لایه، می‌توان فهمید که اکثر داده‌ها در سطح ۴۰ میکرون بوده اما بیشترین مقادیر استحکام در سطح ۲۰ میکرون رخ داده است (شکل ۵). برای اطمینان از تحلیل ذکر شده حالت بهینه پیشنهاد شده روش تاگوچی (شکل ۴) و تحلیل پراکندگی (شکل ۵) و حالت بهینه واقعی پیشنهادیه ما (ضخامت لایه ۰.۲)، نمونه‌ای با حالت پیشنهادی تاگوچی ساخته و بررسی شد. میانگین عدد استحکام نهایی با شرایط بهینه تاگوچی MPa ۷۹۶ با مقدار تخلخل ۴.۴٪ شد ولی نمونه ساخته شده با شرایط پیشنهادی ما؛ میانگین استحکام نهایی MPa ۸۸۵ با مقدار تخلخل ۰.۵٪ شده است.



شکل (۴): مقادیر میانگین استحکام نهایی برای متغیرهای سرعت اسکن، ضخامت لایه و فاصله هاشور

آرگون ساخته شده (شکل ۳) و سپس توسط دستگاه وایرکات از بستر فلزی خود جدا شد.

برای ارزیابی استحکام کششی نمونه‌ها از دستگاه کشش مدل AG-25TC ساخت شرکت AUTOGRAPH کشور ژاپن به ظرفیت ۲۵ کیلو نیوتن و با سرعت کشش ۱ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد. برای ارزیابی سختی نمونه‌ها از دستگاه مدل AG-25TC ساخت شرکت Avery-Densison کشور انگلستان استفاده شد. برای بررسی وضعیت تخلخل، ریزساختار و فازهای نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری مدل DM400 M ساخت شرکت Leica آلمان استفاده شد.

جدول (۴): ابعاد نمونه کشش تولید شده با روش ساخت افزایشی

Dimension (mm)	Subsize	½ Scaled Size
G-gauge length	25	12.5
W-width	6	3.0
R-radius of fillet	6	3.0
L-overall length	100.0	50.0
A-length of reduced parallel section	32.0	16.0
B-length of grip section	30.0	15.0
C-width of grip section	10.0	5.0

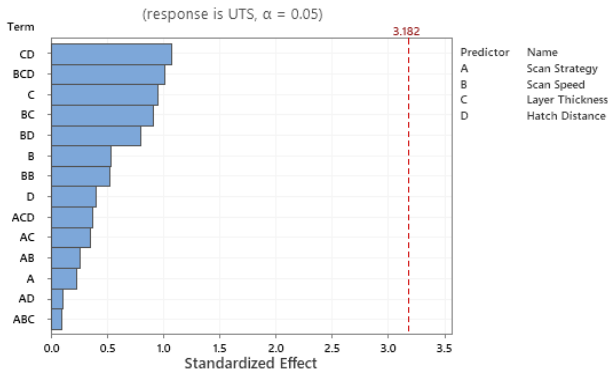


شکل (۳): فرآیند ساخت افزایش نمونه‌های کشش

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- بررسی اثر عوامل بر استحکام نهایی

شکل ۴ نشان می‌دهد که میانگین استحکام نهایی با اسکن استراتژی Stripe بالاتر از Chessboard و با شیب زیاد بوده که علت آن در اعمال تنش حرارتی به صورت متقارن به ماده و شکل‌گیری حوضچه مذاب و ریزساختار همگن‌تر است. در سرعت اسکن، مقادیر استحکام از سرعت ۷۰ تا ۱۳۰ میلی‌متر بر ثانیه

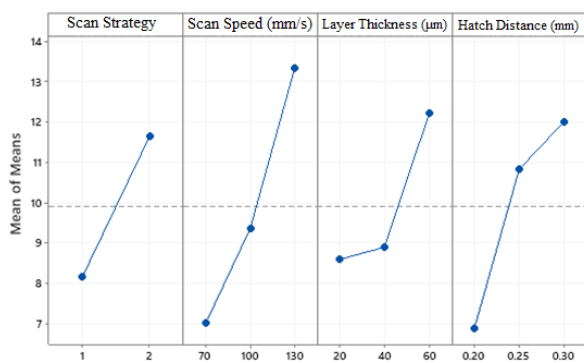


شکل (۷): نمودار پارتو برای مقایسه تأثیر متغیرهای سرعت اسکن، ضخامت لایه، فاصله هاشور و استراتژی اسکن بر حداکثر استحکام

نمودار پارتو (شکل ۷) تأثیر هر یک از عوامل و ترکیب آنها آورده شده که ترکیب ضخامت لایه و فاصله هاشور، ترکیب سه تایی ضخامت لایه، استراتژی اسکن و سرعت اسکن به ترتیب، بیشترین و کمترین اثر را بر روی استحکام نهایی را نشان می‌دهد. برای رسم نمودار فوق، از حالت سه تایی و چهار تایی به دلیل پیچیده تر شدن محاسبات صرف نظر می‌شود. با توجه به توضیحات نرم افزار، برای جلوگیری از ایجاد مشکل برای کل محاسبات بهتر است که از آن دو مورد صرف نظر شود.

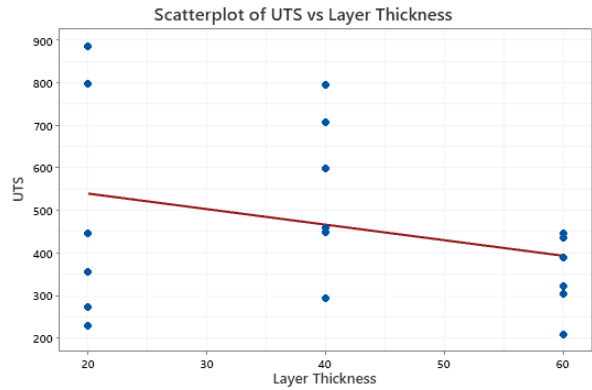
### ۳-۲- بررسی اثر عوامل بر تخلخل

داده‌ها و تصاویر تخلخل گرفته شده به وسیله میکروسکوپ نوری و نرم افزار Leica مورد بررسی قرار گرفته شده است که در نمودار شکل ۸ برای تخلخل با توجه به متغیرهای سرعت اسکن، ضخامت لایه، فاصله هاشور و استراتژی اسکن آورده شده است.



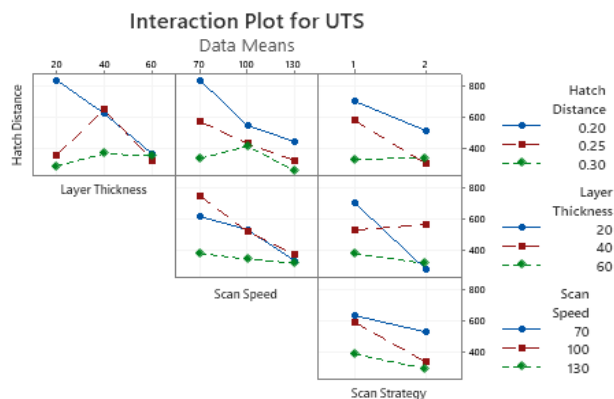
شکل (۸): تأثیر متغیرهای سرعت اسکن، ضخامت لایه، فاصله هاشور و استراتژی اسکن بر مقادیر درصد تخلخل

با توجه به شکل، در متغیر سرعت اسکن، مقادیر میانگین تخلخل از سطح سرعت ۷۰ تا سطح ۱۳۰ میلی‌متر بر ثانیه با شیب تندی افزایش یافته است که علت آن در این است که با افزایش

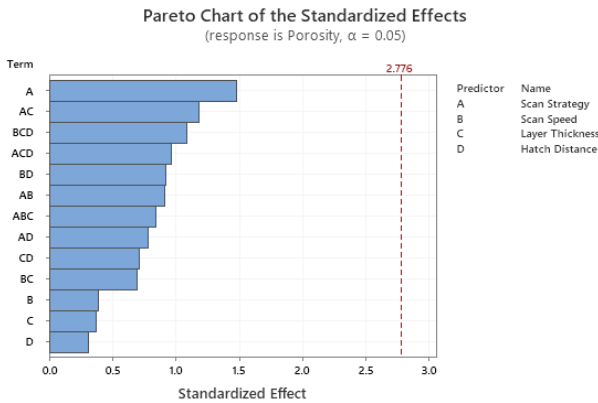


شکل (۵): پراکندگی داده‌ها استحکام نهایی برای متغیر ضخامت لایه در آزمایش شماره یک

برای بررسی اثرات دو به دو عوامل بر یکدیگر (اثر تقابل) در این آزمایش، نمودار شکل ۶ به صورت پلکانی (غیر تکراری بودن یک نمودار) آورده شده است. در هر یک از نمودارهای رسم شده بر اساس سطح هر یک از چهار متغیر، تداخل هر خط به معنای تأثیرگذاری آن دو سطح بر یکدیگر است. به عنوان مثال در نمودار استراتژی اسکن/سرعت اسکن یا فاصله هاشور/سرعت اسکن هیچ یک از خطوط همدیگر را قطع نکرده‌اند، پس می‌توان گفت این دو عامل اثر متقابلی بر یکدیگر ندارند و از هم مستقل می‌باشند. در مثالی دیگر، در نمودار فاصله هاشور/ضخامت لایه، هر سه سطح رسم شده به صورت دو به دو همدیگر را قطع کردند، پس می‌توان گفت که این دو متغیر در همه سطوح اثر متقابل داشته و برهم تأثیر می‌گذارند.

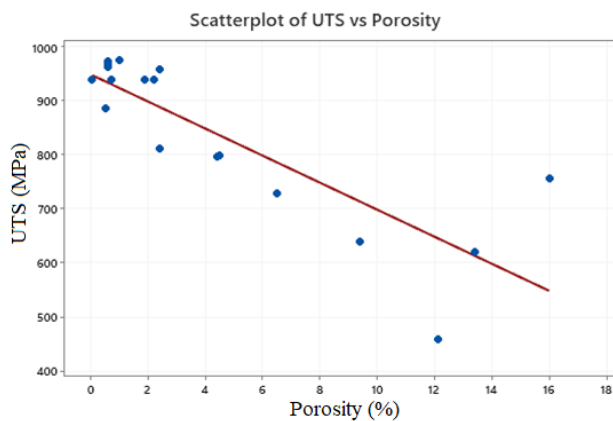


شکل (۶): مقادیر میانگین حداکثر استحکام برای متغیرهای سرعت اسکن، ضخامت لایه و فاصله هاشور و اثرات دو به دو عوامل



شکل (۱۰): نمودار پارتو برای مقایسه تاثیر متغیرهای سرعت اسکن، ضخامت لایه، فاصله هاشور و استراتژی اسکن بر مقدار تخلخل

در این بخش برای جمع‌بندی نهایی، شکل ۱۱، اثر تخلخل بر مقدار استحکام نهایی نشان داده شده است که روند آن کاهش یافته و علت آن سهولت وقوع مکانیزم شکست و رشد ترک در نمونه‌های متخلخل‌تر است. در این تحقیق به‌طور کلی با کاهش مقادیر سرعت اسکن، ضخامت لایه و فاصله هاشور، خواص مکانیکی نمونه‌ها به دلیل افزایش چگالی انرژی ورودی افزایش پیدا کرد و استراتژی اسکن Stripe نسبت به Chessboard به دلیل اثرگذاری‌های حرارتی منطقه ذوب لایه‌های بالایی بر لایه‌های پایینی منجمد شده خواص مکانیکی بالاتری از خود نشان داد.

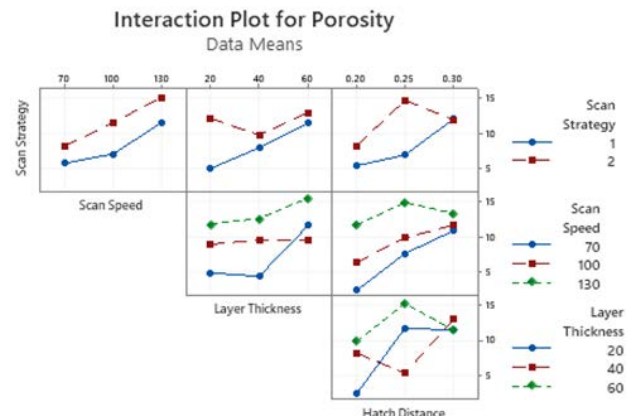


شکل (۱۱): منحنی پراکندگی حداکثر استحکام نهایی بر تخلخل

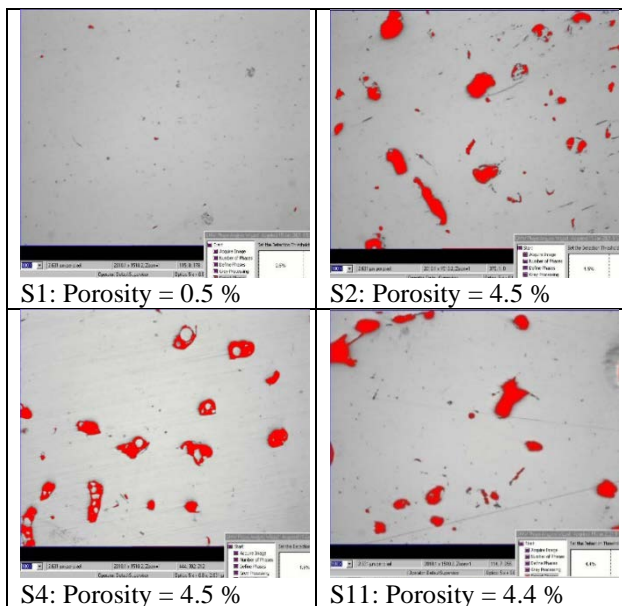
جدول ۵ نتایج تجزیه و تحلیل واریانس را نشان می‌دهد، هرچه نسبت واریانس ( $F_i$ ) بیشتر باشد می‌توان فهمید که آن عامل ( $i$ ) تاثیر بیشتر بر نتایج (خروجی) دارد.

سرعت اسکن مقدار چگالی انرژی کاهش یافته و در نتیجه کاهش جذب انرژی، ذوب سطحی ذرات به‌طور کامل انجام نمی‌شود و قسمتی از پودرها بدون ذوب سطحی در قطعه باقی می‌ماند. در ضخامت لایه، مقادیر میانگین در سطح ضخامت ۲۰ تا ۶۰ میکرون افزایش یافته، علت اصلی این پدیده میانگین اندازه ذرات پودر فلز است که ۵۰ میکرون می‌باشد و ذراتی بیش از اندازه ۶۰ میکرون نیز در بین پودر فلزی وجود دارد در نتیجه در ضخامت ۶۰ میکرون بعضی از ذرات بزرگ‌تر ذوب کامل نشده و اتصال برقرار نمی‌شود در کنار این موضوع چگالی انرژی نیز با افزایش ضخامت لایه کاهش می‌یابد. در فاصله هاشور، مقادیر میانگین در سطح ۰/۳ تا سطح ۰/۳ میلی‌متر به دلیل تضعیف چگالی انرژی و بیش‌تر شدن احتمال پیدایش عیوب به دلیل ذوب ناقص افزایش معناداری Stripe پایین‌تر از سطح Chessboard به‌صورت شیب زیاد به دلیل حوضچه مذاب و ریزساختار بهتر بوده است.

برای بررسی اثرات دو به دو عوامل بر یکدیگر (اثر متقابل) در این آزمایش، نمودار شکل ۹ به‌صورت پلکانی آورده شده است. به‌عنوان مثال در نمودار استراتژی اسکن/سرعت اسکن یا دو عامل فاصله هاشور/سرعت اسکن همدیگر را قطع نکرده‌اند، پس می‌توان گفت این دو عامل اثر متقابلی بر یکدیگر با توجه به سطوح داده شده ندارند (با توجه به سطوح به‌کار رفته در این آزمایش). در مثالی دیگر، در نمودار فاصله هاشور/ ضخامت لایه هر سه روند رسم شده به‌صورت دو به دو همدیگر را قطع کردند، پس می‌توان گفت که این دو متغیر در همه سطوح اثر متقابل داشته و برهم تاثیر می‌گذارند. برای حالت‌های آزمایش شماره یک، نمودار پارتو برای تخلخل کشیده شده است که استراتژی اسکن و ضخامت لایه به‌ترتیب، بیشترین و کمترین تاثیر را بر روی تخلخل داشته‌اند (شکل ۱۰).



شکل (۹): مقادیر درصد تخلخل برای متغیرهای سرعت اسکن، ضخامت لایه، فاصله هاشور و استراتژی اسکن و اثرات دو به دو عوامل بر یکدیگر



شکل (۱۲): درصد تخلخل نمونه‌های بهینه (S23)

با توجه به روند کاهشی عامل فاصله هاشور، این حدس زده شد که ممکن است با کاهش دادن این عامل به مقادیر کمتر مانند ۰/۱ و ۰/۱۵ میلی‌متر، مقادیر حداکثر استحکام افزایش پیدا کند. در نتیجه در ادامه، عامل فاصله هاشور در سه سطح ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ میلی‌متر برای رسیدن به حداکثر تنش در نظر گرفته شدند. از طرف دیگر، عامل استراتژی اسکن و ضخامت لایه‌ها به ترتیب به صورت Stripe و ۲۰ میکرون به دلیل داشتن مقادیر حداکثر تنش بالا قابل قبول در نظر گرفته شده و ثابت ماند. تحقیق موردنظر با ۹ نمونه برای ساخت در نظر گرفته شد که دو نمونه S25 و S27 همان شرایط نمونه‌های S1 و S4 آزمون سری نخست می‌شود (جدول ۶). به صورت خلاصه، با کاهش فاصله هاشور بیشترین تاثیر بر روی استحکام نهایی نمونه‌ها به دست آمد. بالاترین مقدار استحکام نهایی به دست آمده برای نمونه‌ها با اختلاف کم در فاصله هاشور ۰/۲ میلی‌متر و ضخامت لایه ۲۰ میکرون و سرعت اسکن ۷۰ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمده است. با توجه به نزدیکی عدد استحکام نهایی S22 و S23 به دلیل کندی زیاد حرکت لیزر و بالارفتن شدید چگالی انرژی در حوضچه مذاب موجب سوختگی ظاهری (اکسید شدن) نمونه S22 در مقایسه با نمونه S23 می‌شود بنابراین نمونه S23 به عنوان نمونه بهینه در مقایسه با دیگر نمونه‌ها انتخاب می‌شود.

جدول (۵): تحلیل واریانس تخلخل برای نمونه‌های ساخته شده

عامل	مجموع مربعات آزادی	درجه	میانگین مربعات	F
رگرسیون	۳۹۰/۰۹۵	۱۳	۳۰/۰۰۷۳	۷/۲۶
خطا	۱۶/۵۳۰	۴۰	۴/۱۳۲۵	-
کل	۴۰۶/۶۲۴	۵۳	-	-
استراتژی اسکن	۱۰/۸۲۱	۱	۱۰/۸۲۱۳	۲/۶۲
سرعت اسکن	۱/۲۰۵	۱	۱/۲۰۵۰	۰/۲۹
ضخامت لایه	۴/۸۰۹	۱	۴/۸۰۸۵	۱/۱۶
فاصله هاشور	۰/۰۲۹	۱	۰/۰۲۸۵	۰/۰۱
سرعت اسکن/ استراتژی اسکن	۶/۸۹۹	۱	۶/۸۹۸۸	۱/۶۷
ضخامت لایه/ استراتژی اسکن	۲/۳۳۷	۱	۲/۳۳۷۰	۰/۵۷
فاصله هاشور/ استراتژی اسکن	۳/۳۱۵	۱	۳/۳۱۵۲	۰/۸۰
سرعت اسکن/ ضخامت لایه	۷/۶۹۴	۱	۷/۶۹۴۱	۱/۸۶
فاصله هاشور/ سرعت اسکن	۴/۱۹۷	۱	۴/۱۹۷۳	۱/۰۲
فاصله هاشور/ ضخامت لایه	۶/۳۴۷	۱	۶/۳۴۶۵	۱/۵۴
سرعت اسکن/ استراتژی اسکن/ ضخامت لایه	۲/۳۶۵	۱	۲/۳۶۴۶	۰/۵۷
فاصله هاشور/ استراتژی اسکن/ ضخامت لایه	۱/۹۳۹	۱	۱/۹۳۸۸	۰/۴۷
فاصله هاشور/ سرعت اسکن/ ضخامت لایه	۱۰/۶۲۰	۱	۱۰/۶۱۹۷	۲/۵۷

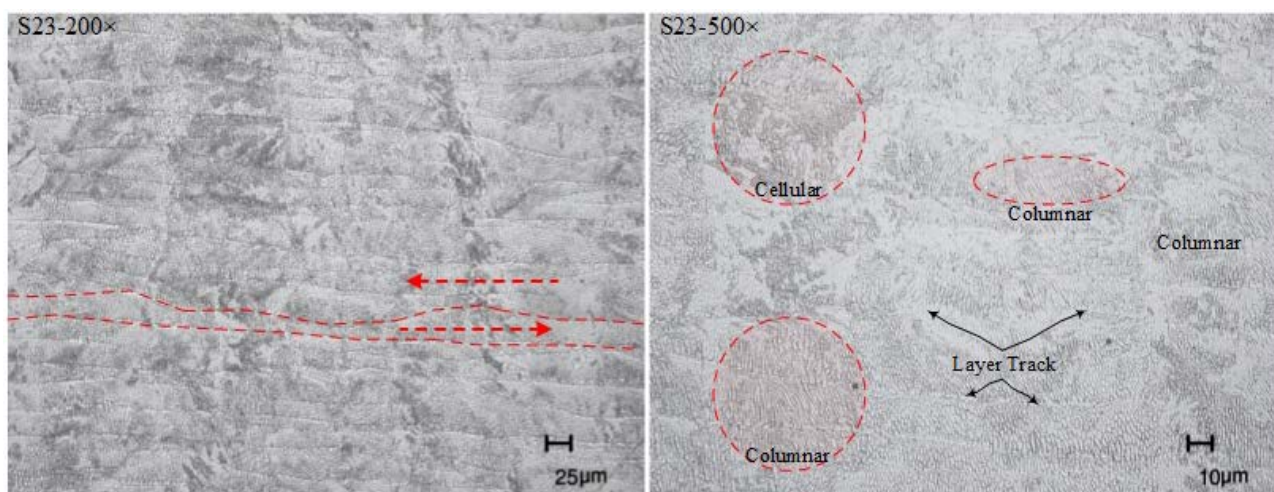
به صورت خلاصه، عامل استراتژی اسکن بیشترین تاثیر بر روی مقدار تخلخل و در نتیجه خواص مکانیکی در بین عوامل دیگر داشته است. عوامل بهینه به دست آمده از نرم افزار طراحی آزمایش، شامل ضخامت لایه ۲۰ میکرون، استراتژی اسکن خطی متقارن و سرعت اسکن ۷۰ میلی‌متر بر ثانیه است که می‌تواند بیشترین مقدار استحکام نهایی را به دست آورد. این عوامل بهینه ذکر شده، در اصل همان شرایط ساخت نمونه S1 است که استحکام نهایی آن نزدیک به ۸۸۵ مگاپاسگال می‌رسد. در این نمونه درصد تخلخل کمتر از ۰.۵ درصد بود. نتایج نشان می‌دهد در صورتی که مقدار تخلخل قطعات کمتر از ۵ درصد باشد (شکل ۱۲)، مقدار استحکام نهایی قطعه بدون عملیات حرارتی در حد قابل قبول ۷۰۰ تا ۹۰۰ مگاپاسگال (نمونه‌های S1، S2، S4، S11) می‌باشد. با افزایش تخلخل مقدار استحکام نهایی افت شدیدی پیدا می‌کند.

جدول (۶): عوامل و سطوح مختلف لحاظ شده در آزمایشات

عوامل	موارد	واحدها	سطوح		
فرآیندی	سرعت اسکن	میلیمتر بر ثانیه	۷۰	۱۰۰	۱۳۰
	ضخامت لایه	میلیمتر	۰/۰۲۰		
	فاصله هاشور	میلیمتر	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲
	استراتژی اسکن	-	Stripe		
	توان	وات	۲۰۰		
جهت ساخت	-	X-Y			
ردیف	فاصله هاشور	ضخامت لایه	سرعت اسکن	استحکام نهایی	
S19	۰/۱	۰/۰۲۰	۷۰	۹۴۸	
S20	۰/۱	۰/۰۲۰	۱۰۰	۹۳۸/۵۱	
S21	۰/۱	۰/۰۲۰	۱۳۰	۹۳۸/۵۰	
S22	۰/۱۵	۰/۰۲۰	۷۰	۹۵۰	
S23	۰/۱۵	۰/۰۲۰	۱۰۰	۹۵۱	
S24	۰/۱۵	۰/۰۲۰	۱۳۰	۹۴۶	
S25 (S1)	۰/۲	۰/۰۲۰	۷۰	۸۸۵/۰۰	
S26	۰/۲	۰/۰۲۰	۱۰۰	۷۹۸/۰۰	
S27 (S4)	۰/۲	۰/۰۲۰	۱۳۰	۷۲۸/۸۴	

را به صورت لایه‌های موازی و خط اثر قطع و وصل باریکه لیزر که به صورت عمود بر لایه‌ها است را نشان می‌دهد. در محل خط اثر باریکه لیزر، پهنای خط اثر لایه‌ای کمتر شده و در نتیجه خط اثر لایه‌ای به صورت مهره‌ای در می‌آید. اندازه رد اثر لایه‌ها و خط اثر لیزر در محدوده ۲۵ تا ۳۵ میکرومتر است. تصویر با بزرگنمایی بالاتر (۱۰۰۰ برابر) نشان می‌دهد که با توجه به جهت شیب حرارتی عمود بر جهت لایه‌ها است (به دلیل وجود بستر فلزی موجود در زیر پودر) و نیز محدوده‌ای که به دلیل روی هم افتادن باریکه لیزر دوباره ذوب می‌شود ما بعد از فرآیند چاپ فلزی قطعه، یک ساختار انجمادی سلولی همراه با ساختار انجمادی جهت‌دار را مشاهده می‌کنیم. ریزساختار به صورت غالب متشکل از مارتنزیت (رنگ روشن) همراه با مقدار کمی آستنیت باقیمانده است. حرارت ورودی کم و سرعت سرد شدن بالا در روش‌های ساخت افزودنی لیزری باعث تشکیل مارتنزیت می‌شود.

شکل ۱۳ تصویر میکروسکوپ نوری سطح مقطع نمونه کشش ساخت شده در جهت X-Y (نمونه S23) را نشان می‌دهد. تصویر ۲۰۰ برابر میکروسکوپ نوری، دو سطح اثر روبش ذوب لیزر



شکل (۱۳) تصویر میکروسکوپ نوری از نمایش لایه‌های تولید شده با روش ساخت افزایشی و ریزساختار نمونه S23.

#### ۴- نتیجه‌گیری

مطابق با نرم‌افزار تحلیل داده Minitab اثر عوامل ساخت افزودنی به‌روش ذوب لیزر انتخابی پودری استحکام نهایی کشش و همچنین خواص ریزساختاری شامل درصد تخلخل و ریزساختار نمونه‌ها مشخص شده است که:

۱- با کاهش مقدار سرعت اسکن (v)، ضخامت لایه (t) و فاصله هم‌پوشانی (h)، استحکام نهایی قطعات در نتیجه افزایش چگالی انرژی و ذوب بهتر ذرات پودر، افزایش می‌یابد اگرچه این مقادیر نیز باید بهینه باشد که به ترتیب مقدار سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، ضخامت لایه ۰/۰۲۰ میلی‌متر و فاصله هاشور ۰/۱۵ میلی‌متر، مقادیر بهینه برای این تحقیق است.

۲- استراتژی اسکن Stripe نسبت به Chessboard به علت اعمال تنش حرارتی متقارن به ماده و حوضچه مذاب و ریزساختار همگن‌تر خواص مکانیکی بالاتری از خود نشان داد.

#### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

#### تشکر و قدردانی

با تشکر از جناب مهندس فریدون طوسی‌نژاد کارشناس متالوگرافی پژوهشکده حمل و نقل فضایی در بررسی و تحلیل ریزساختاری در این تحقیق انجام داده‌اند. مقاله منتج از پایان نامه پژوهشی با کد طرح ۳۹ در مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد است که با حمایت مالی پژوهشگاه فضایی ایران انجام شده است.

#### مراجع

- [1] O. Diegel, A. Nordin, D. Motte, "Additive Manufacturing Technologies" Singapore: Springer, 2019, p.p 19-39.
- [2] M. Vaezi, P. Drescher, H. Seitz, "Beamless Metal Additive Manufacturing," *Materials*, vol. 13, no. 4, pp 922, 2020.
- [3] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, S. S. Babu, "The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing," *Int. Mater. Rev.*, vol. 61, no. 5, pp. 315-360, 2016.
- [4] C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong; Z. H. Liu, D. Q. Zhang, L. E. Loh, S. L. Sing, "Review of selective laser melting: Materials and applications," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 2, no. 4, pp 041101, 2015.
- [5] M. Zarnegar, M. Farahani, Y. Vahidshad, M. Pakravan, "Investigation of the effect of hatch space parameter on mechanical properties of titanium alloy produced by SLM additive manufacturing method by DIC technique", *4th International Conference on Welding and Non Destructive Testing & 22nd National Conference on Welding & Inspection & 11th National Conference on NDT*, Isfahan, 1400.
- [6] Wentian Shi, Peng Wang, Yude Liu, Guoliang Han, "Experiment of Process Strategy of Selective Laser Melting Forming Metal Nonhorizontal Overhanging Structur", *Metals*, vol. 9, no. 4, pp. 385, 2019.
- [7] M. Simonelli, Y. Y. Tse, C. Tuck, "Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 616, pp 1-11, 2014.
- [8] K. Kempen, E. Yasa, " Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel", *Phys. Procedia*, vol. 12, pp. 255-263, 2011.
- [9] J. Song, Q. Tang, "Effect of heat treatment on microstructure and mechanical behaviours of 18Ni-300 maraging steel manufactured by selective laser melting", *Opt. Laser Technol.*, vol. 120, pp. 1-11, 2019.
- [10] Y. Bai, Y. Yang, D. Wang, M. Zhang, "Influence mechanism of parameters process and mechanical properties evolution mechanism of maraging steel 300 by selective laser melting," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 703, pp. 116-123, 2017.
- [11] T. H. Becker and Di. Dimitrov, "The achievable mechanical properties of SLM produced Maraging Steel 300 components," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 487-494, 2016.
- [12] S. A. R. Shamsdini, S. Shakerin, A. Hadadzadeh, B. S. Amirkhiz, M. Mohammadi, "A trade-off between powder layer thickness and mechanical properties in additively manufactured maraging steels," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 776, pp 139041, 2020.
- [13] W. Huang, W. Zhang, X. Chen, "Effect of SLM process parameters on relative density of maraging steel (18Ni-300) formed parts," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 774, no. 1, pp. 1-8, 2020.
- [14] A. Suzuki, R. Nishida, N. Takata, M. Kobashi, M. Kato, "Design of laser parameters for selectively laser melted maraging steel based on deposited energy density," *Addit. Manuf.*, vol. 28, pp. 160-168, 2019.
- [15] "Method, Taguchi." <https://proeng.ir/-معرفی-طراحی-taguchi/> <https://proeng.ir/-معرفی-طراحی-taguchi/>
- [16] Dong, Ruochen Design of a Specimen Geometry for the Tensile Testing of Small Samples. Master's Thesis, University of Pittsburgh, 2019.



## COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)