



Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 4, No. 2, pp.: 37-48  
2025

DOI:  
10.22034/jssta.2024.450470.1157

Article Info

Received: 2024-04-02  
Accepted: 2024-11-20

Keywords

Digital Imaging  
Correlation, Additive  
Manufacturing,  
Maraging Steel, Selective  
Laser Melting

How to Cite this article

Yaser Vahidshad, Ashkan Fashi, " Characterization of the Mechanical Properties of Maraging 300 Alloy Produced by Selective Laser Melting Additive Manufacturing Method Used Digital Image Correlation Technique", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 4 (2), p.: 37-48, 2025.

# Characterization of the Mechanical Properties of Maraging 300 Alloy Produced by Selective Laser Melting Additive Manufacturing Method Used Digital Image Correlation Technique

Yaser Vahidshad<sup>1\*</sup>, Ashkan Fashi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> \*Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran,Iran  
y.vahidshad@isrc.ac.ir

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* Corresponding Author

## Abstract

Studying the parameters that influence additive manufacturing and determining the optimal conditions for part production is a complex challenge. Research is actively focused on understanding how process conditions affect the evolution of microstructure and the resulting mechanical properties of fabricated components. A study was conducted to investigate the effect of selective laser melting (SLM) additive manufacturing process parameters on the mechanical properties of Maraging 300 steel samples. The mechanical properties were determined using 2D digital image correlation on flat tensile samples (in accordance with the ASTM E8 standard). Laser scanning speed (70, 100 mm/s), hatch distance (100, 150, 200 μm), and layer thickness (20, 40 μm) were evaluated for their effects on mechanical properties. The desired mechanical properties were extracted using the digital image correlation (DIC) test, a non-contact optical method for measuring mechanical properties. According to the results of the study, the laser scanning speed significantly influences the mechanical properties of samples more than other additive manufacturing parameters according to the relationship between the selected parameters and the laser energy density and their effect on the molten pool. Based on the results, the optimal sample is made with a scanning speed of 70 mm/s, a hatch distance of 200 μm, and a layer thickness of 20 μm. This sample has a yield strength of 1785 MPa, an ultimate strength of 1816 MPa, an elongation of 17.4%, and a Poisson ratio of 0.34.



دسترس پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه علوم، فناوری و

کاربردهای فضایی

سال چهارم، شماره ۲، صفحه ۴۸-۳۷

پاییز و زمستان ۱۴۰۳

DOI:

10.22034/jستا.2024.450470.1157

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

واژه‌های کلیدی

برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی،  
ساخت افزایشی، فولاد ماریجینگ،  
ذوب لیزر انتخابی

نحوه استناد به این مقاله

یاسر وحیدشاد، اشکان فشی.  
"مشخصه‌یابی خواص مکانیکی آلیاژ  
ماریجینگ ۳۰۰ تولید شده به روش  
ساخت افزودنی ذوب لیزر انتخابی  
توسط روش برهم‌نگاری تصاویر  
دیجیتالی"، دو فصلنامه علوم،  
فناوری و کاربردهای فضایی، جلد  
چهارم، شماره دوم، صفحات ۳۷-  
۴۸، ۱۴۰۳.

مقاله پژوهشی

## مشخصه‌یابی خواص مکانیکی آلیاژ ماریجینگ ۳۰۰ تولید شده به روش ساخت افزودنی ذوب لیزر انتخابی توسط روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی

یاسر وحیدشاد\*<sup>۱</sup>، اشکان فشی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> - پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

y.vahidshad@isrc.ac.ir

<sup>۲</sup> - دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

\*نویسنده مسئول

### چکیده

بررسی عوامل ساخت افزایشی و به‌دست آوردن شرایط بهینه برای ساخت قطعات، یک مسئله پیچیده است. درک تأثیر شرایط فرایند بر تکامل ریزساختار و خواص مکانیکی حاصل از اجزای ساخته شده، یک حوزه فعال تحقیقاتی است. در این تحقیق با توجه به مشخصات دستگاه ذوب لیزر انتخابی (SLM) مورد استفاده، اثر عوامل سرعت اسکن (۱۰۰ و ۷۰ mm/s)، فاصله هم‌پوشانی (۲۰۰ μm و ۱۵۰ و ۱۰۰) و ضخامت لایه‌ها (۴۰ و ۲۰ μm) بر خواص مکانیکی نظیر استحکام تسلیم، نهایی، ازدیاد طول، ثابت یانگ و ضریب ناهمسانگردی بررسی شد. خواص مکانیکی موردنظر توسط آزمون برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی (DIC) که یک روش غیرتماسی و نوری برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی است، استخراج شد. پس از بررسی نتایج مشخص شد با توجه به رابطه عوامل انتخابی با میزان چگالی انرژی لیزر و تأثیر آنها بر حوضچه مذاب، تغییر سرعت اسکن لیزر، بیشتر از سایر عوامل ساخت افزایشی بر خواص مکانیکی نمونه‌ها تأثیر دارد. نتایج نشان می‌دهد که نمونه ساخت شده با سرعت اسکن ۷۰ mm/s، فاصله هم‌پوشانی ۲۰۰ μm و ضخامت لایه ۲۰ μm به عنوان نمونه بهینه، استحکام تسلیم ۱۷۸۵ MPa، نهایی ۱۸۱۶ MPa، ازدیاد طول ۱۷/۴٪ و ضریب پواسون ۰/۳۴ دارد. با شرایط بهینه به‌دست آمده مخزن با قطر ۵۰ mm و ضخامت ۱ mm ساخته و سپس توسط آزمون هیدرواستاتیک بررسی شد.

## ۱- مقدمه

تنگستن و مولیبدن، خواص فیزیکی و مکانیکی بسیار خوبی دارند. این خواص شامل مقاومت به خوردگی به دلیل وجود مقدار نیکل بالا و استحکام بالا در دمای محیط و دمای بالا به دلیل رسوب ذرات بین فلزی NiAl، Ni<sub>3</sub>(Ti, Al, Mo)، Ni(Al, Fe) و Fe<sub>2</sub>Mo و همچنین وجود کبالت، مولیبدن و نیکل در زمینه محلول جامد این آلیاژ است. چقرمگی و شکل‌پذیری بالای فولادهای مارچینگ به دلیل زمینه مارتنزیتی<sup>۱</sup> نسبتاً نرم در غیاب کربن است که آن را به طور مطلوب چکش خوار می‌کند. آلیاژهای مارچینگ به دلیل عناصر بین‌نشینی کم (مانند کربن) خواص جوشکاری بسیار خوبی نیز دارند. در چند سال گذشته، تحقیقات زیادی در مورد اینکه چگونه ساخت افزایشی و عملیات حرارتی بر خواص متالورژیکی و مکانیکی فولاد مارچینگ تأثیر می‌گذارد، انجام شده است. این عوامل شامل توان لیزر، سرعت اسکن، فاصله هم‌پوشانی، استراتژی اسکن، ضخامت لایه، جهت ساخت، منبع لیزر و نوع پودر (مورفولوژی، لندازه، روش تولید) است [۱۸-۱۲].

امروزه ساخت و تولید قطعات به کمک کامپیوتر، نرم‌افزارها و ابزارهای تولید پیشرفته بسیار مورد توجه سازندگان تجهیزات و قطعات قرار گرفته است. ساخت افزایشی به عنوان یک انقلاب صنعتی دیگر در راستای گسترش و پیشرفت ساخت قطعات صنعتی مطرح می‌باشد [۶-۱]. روش ساخت افزایشی به دلیل استفاده از نرم‌افزار و کامپیوتر، خطاهای انسانی ساخت را کاهش داده و سرعت تولید قطعات را افزایش می‌دهد. این تکنولوژی باعث کاهش زمان تولید، مواد مصرفی، هزینه و حذف عملیات اضافی پس از تولید شده و توانایی تولید قطعات پیچیده و سفارشی را دارد [۸-۷]. کاربرد این روش در ساخت قطعات مورد استفاده در کاربردهای فضایی، امروزه به یکی از اصلی‌ترین روش‌های ساخت قطعاتی مانند سازه‌ها، محفظه‌های احتراق، نازل‌ها، مخازن سوخت مایع و جامد تبدیل شده است [۹-۱۱]. فولادهای مارچینگ به دلیل وجود عناصر آلیاژی کبالت، نیکل،

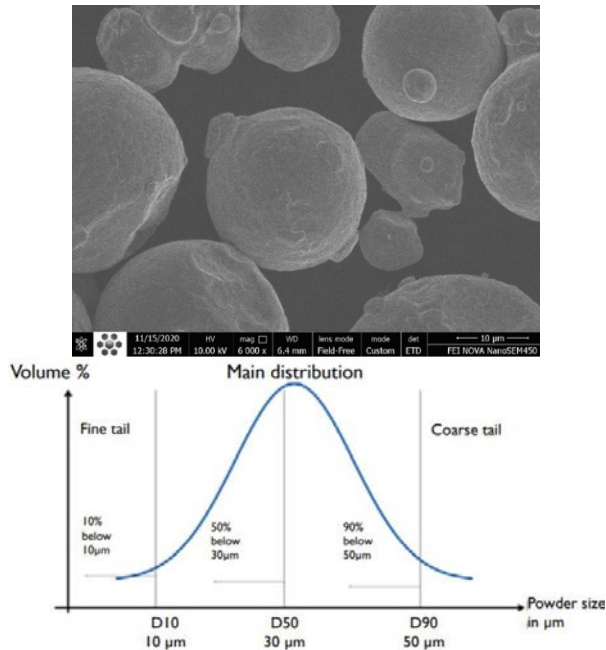
جدول (۱): تاریخچه گسترش استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتالی دوبعدی جهت تعیین خواص مکانیکی.

سال	نوع تحقیق	نتیجه تحقیق	مرجع
۱۹۸۲	استفاده از اندازه‌گیری تصویر و تغییر شکل مبتنی بر کامپیوتر	تحلیل تجربی تنش	[۱۹]
۱۹۸۳	توسعه الگوریتم‌های عددی و استفاده از تصاویر ضبط شده نوری	پایه‌ریزی اساس روش همبستگی تصاویر دیجیتال دوبعدی	[۲۰]
۱۹۸۳	استفاده از الگوریتم‌ها در اندازه‌گیری حرکت جسم صلب	تخمین تغییر شکل و چرخش‌های صفحه‌ای از طریق تطبیق تصاویر	[۲۱]
۱۹۸۶	استفاده از روش‌های جستجوگر گرادبانی	تطبیق بهتر زیرناحیه‌ها با دقت زیر پیکسل در سراسر تصویر	[۲۲]
۱۹۸۸	بررسی تعداد بیت‌ها، نسبت فرکانس سیگنال به فرکانس نمونه‌برداری و شکل تابع درون‌یابی شدت در فرایند دیجیتالی‌سازی	افزایش دقت اندازه‌گیری در روش همبستگی تصاویر	[۲۳]
۱۹۸۹	شبیه‌سازی عددی یک‌بعدی برای ارئه تخمین‌های اولیه	افزایش دقت اندازه‌گیری در روش همبستگی تصاویر	[۲۴]
۱۹۸۹	اصلاح الگوریتم با استفاده از توابع شکل خطی برای تطابق زیر ناحیه‌ها	سرعت بیشتر همگرایی و کاهش زمان محاسبات	[۲۵]
۱۹۸۹	الگوریتم ردیابی مرکزی برای اندازه‌گیری‌های میدانی دو بعدی جابجایی مرکز لکه تصادفی	برآورد مقادیر جابجایی در جهت افقی و عمودی بدون محاسبه ضریب همبستگی	[۲۶]
۱۹۹۳	استفاده از تبدیل فوریه سریع برای پردازش تصاویر قبل و بعد از بارگذاری	کرنش‌های صفحه‌ای و انتقال جسم صلب کوچک	[۲۷]
۱۹۹۸	پالایش و بهینه‌سازی بیشتری برای افزایش سرعت همگرایی	بهینه‌تر شدن الگوریتم‌ها	[۲۸]
۱۹۹۹	راه ابزار جامع اندازه‌گیری کرنش در محیط‌های گوناگون و استفاده از زبان برنامه‌نویسی C++	به‌دست آوردن دقیق‌تر کرنش	[۲۹]
۲۰۰۰	بازسازی الگوی شدت تصویر تصاویر با استفاده از توابع درون‌یابی spline و حداقل رساندن تاثیرات اندازه‌گیری در طی تطبیق تصاویر	افزایش دقت موقعیت تصویر ۰/۱ پیکسل	[۳۰]
۲۰۰۵	دستیابی به جابجایی خارج از صفحه با یک دوربین با استفاده از ضرایب تبدیل متفاوت بین جابجایی واقعی و جابجایی در تصویر	عدم وجود خطاهای استفاده از دو دوربین	[۳۱]
۲۰۰۶	ارایه الگوریتمی برای فلزات خاص با پردازش تصویر برای اندازه‌گیری تغییرشکل صفحه‌ای	اصلاح و گسترش شیوه‌های عددی موجود و بهبود اندازه‌گیری	[۳۲]
۲۰۰۷	استفاده از نرم‌افزار Matlab و الگوریتم بر پایه معادلات جمع‌گاووس	محاسبه کرنش با استفاده از ردگیری حفره‌های روی سطوح فلزات ناصاف	[۳۳]
۲۰۰۸	استفاده از تکنیک ماشین بینایی و افزایش شدت تصویر برای اندازه‌گیری تغییرات سطح ماده	مقایسه تصاویر نمونه در وضعیت‌های مختلف و اندازه‌گیری تغییرات سطح ماده	[۳۴]
۲۰۰۸	استفاده از یک نرم‌افزار ساده تدوین عکس در روش همبستگی تصاویر	تهیه الگوریتمی جهت استفاده در دو منطقه الاستیک و پلاستیک	[۳۵]
۲۰۰۸	تطابق تصاویر با انتخاب دو زیرناحیه با سطح شدن نور و وضوح یکسان	تطابق عکس‌ها با دقت قابل قبول	[۳۶]
۲۰۰۸	ایجاد لکه‌های تصادفی روی سطح قطعه را از طریق اسپری یا فرایند اچ	برای اولین بار استفاده از الگوهای تصادفی برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی	[۳۷]
۲۰۱۲	استفاده از روش نوین همبستگی تصاویر دیجیتال برای تحلیل تجربی تنش روی یک قطعه	آماده‌سازی آسان نمونه با ردگیری لکه‌های رنگ با دوربین عکاسی دیجیتالی	[۳۸]

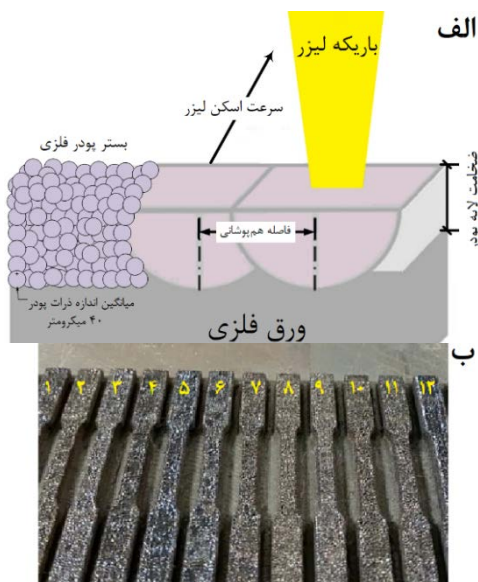
<sup>1</sup> Martensite

$$E_d \left( \frac{j}{\text{mm}^3} \right) = \frac{P \left( \frac{j}{\text{s}} \right)}{v \left( \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) \cdot h(\text{mm}) \cdot t(\text{mm})} \quad (1)$$

در این معادله  $E_d$  دانسیته انرژی،  $P$  توان مورد استفاده دستگاه لیزر،  $h$  فاصله هم‌پوشانی و  $t$  ضخامت لایه پودر در روش ساخت افزایشی پودری است.



شکل (۱) - تصویر SEM گرفته شده و توزیع نرمال پودر EOS MS1



شکل (۲) - (الف) تصویر نمایشی عوامل ساخت افزایشی (ب) نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق.

برای ساخت نمونه‌ها از بیش‌ترین توان دستگاه با لیزر  $\text{CO}_2$  استفاده شد (۲۰۰W). عوامل ورودی جهت ساخت افزایشی

بهینه‌سازی فرایند ذوب لیزر انتخابی به‌دلیل وجود عوامل مختلف فرایند شامل نوع دستگاه و مواد پودری به‌طور بالقوه محدودیت‌ها و قوانین طراحی جدیدی ایجاد می‌کند. آزمون برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی یکی از روش‌های غیرمخرب بررسی خواص مکانیکی در محیط‌های آزمایشگاهی و صنعتی است. این روش یک روش نوری، غیرتماسی و غیرمخرب است که از آن برای اندازه‌گیری میدان کرنش و جابجایی استفاده می‌شود [۱۸]. روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی، نخستین بار توسط پیتر و رانسون [۱۹] برای تحلیل تجربی تنش در سال ۱۹۸۲ معرفی شد و مایکل ساتان [۲۰] یک سال بعد آن را برای یافتن تغییرشکل میدانی و درون‌صفحه‌ای توسعه داد. در این سال‌ها روش ذکر شده بهینه‌تر شده است تا انجام محاسبات دقیق‌تر شود. خلاصه‌ای از پیشرفت روش همبستگی تصاویر دیجیتالی در جدول ۱ به‌طور خلاصه آورده شده است. این تحقیقات تا به امروز بر روی بهبود دقت فرایند تطبیق در طول تشخیص تصویر اختصاص با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌تر و ترکیب نرم‌افزارهای دیگر تمرکز داشته است.

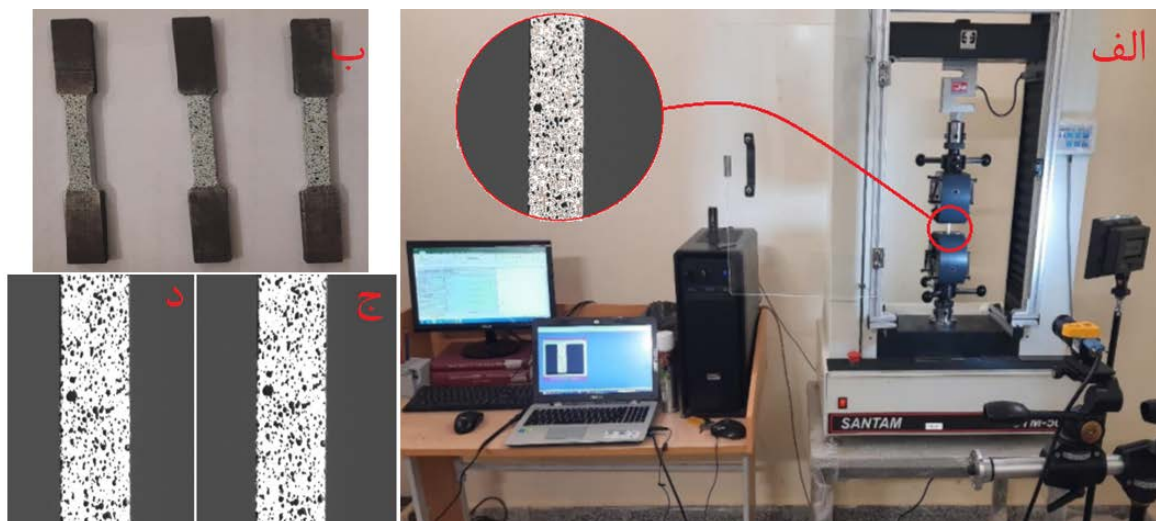
در این تحقیق، تاثیر عوامل اصلی فرایند ساخت افزایشی ذوب لیزر انتخابی بر خواص مکانیکی نمونه‌های فولاد ماریچینگ ۳۰۰ بررسی شد. خواص مکانیکی ذکر شده توسط روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی دوبعدی بر روی نمونه‌های کشش تخت (مطابق با استاندارد ASTM E8) به‌دست آمد. با استفاده از عوامل بهینه به‌دست آمده، برای اولین بار یک مخزن تحت فشار با قطر ۵۰mm و ضخامت ۱/۵mm با روش بدون پایه توسط روش ساخت افزایشی ساخته و با آزمون هیدرواستاتیک بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

قطعات تولید شده در این آزمایش از پودر فولاد ماریچینگ ۳۰۰ شرکت EOS آلمان با نام تجاری MS1 می‌باشد (شکل ۱). این نمونه‌ها مطابق با نمونه‌های تخت کوچک اندازه ۲ استاندارد ASTM E8 توسط دستگاه SLM مدل ۲۰۰P شد. شکل ۲ عوامل موثر و مورد مطالعه ساخت افزایشی در این تحقیق را نشان می‌دهد. رابطه نسبی بین انرژی لیزر، توان لیزر، ضخامت لایه و سرعت لیزر با پارامتر تغییر فاصله هم‌پوشانی خطوط لیزر مطابق با رابطه (۱) می‌باشد. لذا با افزایش توان لیزر که سبب افزایش چگالی انرژی لیزر و حرارت ورودی در حوضچه مذاب می‌شود خواص فیزیکی، ریزساختاری و مکانیکی مورد تاثیر قرار می‌گیرد [۳۹]:

نمودار تنش و کرنش برای هر نمونه استخراج شود (شکل ۳-الف) و تغییرات نتایج آزمایش با توجه به پارامتر متغیر دستگاه بررسی شد. جهت بررسی خواص مکانیکی قطعات ساخته شده با روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال دو بعدی، ابتدا سطح نمونه‌ها جهت بر طرف شدن زبری سطح سنباده زده می‌شود. سپس به‌منظور ردیابی و حداقل کردن خطای ناشی از یکتا نبودن تابع انتقال نقطه‌ها، از الگوی تصادفی نقاط سیاه و سفید (اسپری کردن رنگ سفید و سپس پاشیدن رنگ سیاه) بر روی قطعه استفاده می‌شود (شکل ۳-ب). لایه سفید رنگ باید یکنواخت بوده (برای بازتاب یکنواخت نور) و نباید زیاد ضخیم باشد تا میزان کرنش به‌دست آمده دقیقاً متعلق به نمونه فلزی باشد و کرنش ضخامت رنگ نباشد. دوربین مورد استفاده برای ثبت تصاویر، دوربین DMK33UX264 شرکت ایمجینینگ‌سُرس<sup>۳</sup> با رزولوشن ۲۰۴۸×۲۴۸۸ پیکسل و با لنز کامپیوتری با فاصله کانونی ۷۵mm استفاده شد. نمونه مورد آزمایش، دارای الگویی از لکه‌های تصادفی است و بنابراین نحوه نورپردازی بر روی کیفیت تصاویر تهیه شده بسیار تأثیرگذار است. برای انتخاب منبع نور مناسب تولید عواملی مثل ایجاد نور ثابت بدون رنگ، حرارت و تغییرات شدت نور، باید در نظر گرفته شود. جهت دقت بالاتر نتایج حاصل از این روش، دوربین بر روی سامانه ارتعاش‌گیر و پلایه‌های قابل تنظیم جهت تراز بودن، قرار می‌گیرد. بعد از تنظیم و کالیبراسیون شرایط تصویربرداری مانند فاصله دوربین از سطح قطعه، میزان بزرگنمایی و شدت نور، آزمون برهم‌نگاری قابل انجام است.

نمونه‌های کشش تخت، در جدول ۲ مشخص شده است. در مطالعه قبلی [۴۰] سعی بر این بود که با استفاده از روش تاگوجی حالت بهینه ساخت افزایشی نمونه‌های ساخته شده از فولاد ماریچینگ ۳۰۰ با اندازه کوچک‌تر از مقدار استاندارد ASTM بررسی شود. خواص مورد مطالعه در آن تحقیق شامل مقدار عیوب حفره و استحکام کششی نهایی بود. در تحقیق حاضر، بعضی از عوامل ساخت افزایشی نمونه‌های کشش تخت با اندازه واقعی استاندارد ASTM E8 و با استفاده از روش کشش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال جهت استخراج خواص مکانیکی دقیق قطعات، انجام شده است. در این تحقیق سعی شده است که از دامنه عوامل ساخت افزایشی با توجه به تحقیق قبلی، در سطوحی استفاده شود که تأثیر بیشتری بر خواص مکانیکی دارد. پس از ساخت، نمونه‌ها ابتدا در دمای ۸۲۰°C و به مدت ۲۰min حرارت داده شد (عملیات محلول‌سازی)، سپس از کوره خارج شده و به آرامی و در هوای محیط سرد شد. در نهایت برای رسوب‌سختی در دمای ۴۹۰°C و به مدت ۱۸۰min پیرسازی شده و سپس در خارج از کوره سرد شد. پس از تولید قطعات، پاک‌سازی سطح نمونه انجام شده و الگوی تصادفی جهت انجام آزمون برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی ایجاد شد و توسط دستگاه تست کشش سنتام، تحت بارگذاری یکنواخت کششی قرار گرفت. آزمون برهم‌نگاری استفاده شده در این آزمایش دو بعدی بوده و پس از تصویربرداری یک فریم بر ثانیه از سطح نمونه حین انجام آزمون کشش تا شکست قطعه اطلاعات به نرم‌افزار انتقال یافت تا



شکل (۳) - الف) تجهیزات برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال آزمون کشش نمونه‌های ساخته شده با روش ساخت افزودنی، الگوهای تصادفی ایجاد شده به کمک پاشش رنگ بر روی نمونه، ج) تصاویر گرفته شده از نمونه توسط IC Capture در ابتدای فرایند کشش و د) انتهای فرایند کشش

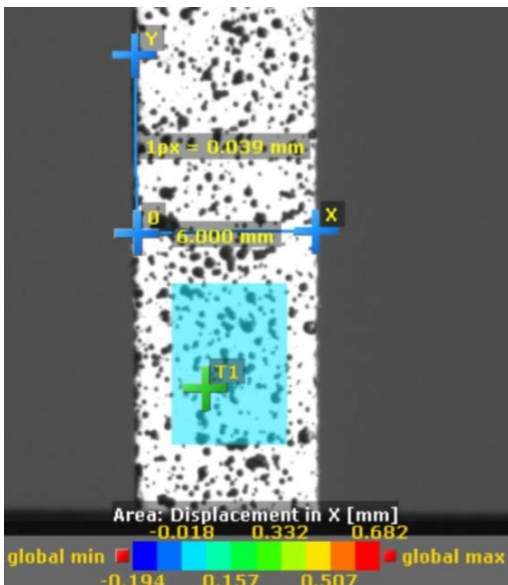
<sup>3</sup> Imagingsource

دلخواه درون این زیر ناحیه باشد، معادله برهم‌نگاری با جایگزینی و ترکیب روابط به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

(۱۲)

$$G(Q^*) = F(Q) = G(x + u_p + \frac{\partial u_p}{\partial x} dx + \frac{\partial u_p}{\partial y} dy + dx \cdot y + v_p + \frac{\partial v_p}{\partial x} dx + \frac{\partial v_p}{\partial y} dy + dy = F(x_p + dx \cdot y_p + dy)$$

پس از تهیه تصاویر از سطح نمونه‌ها حین بارگذاری (شکل ۳-ج، د)، جهت تعیین کرنش و جابجایی به‌کمک نرم‌افزار MercuryRT برای پردازش تصاویر استفاده می‌شود (شکل ۴). بدین‌منظور پس از تنظیم متغیرهای مطلوب و وارد کردن تصاویر به نرم‌افزار، ابتدا تصویر اولیه قبل از بارگذاری به‌عنوان مرجع معرفی می‌شود. از آنجا که امکان ردیابی یک نقطه در تصاویر متوالی تقریباً غیرممکن است، پس از مشخص کردن زیرناحیه موردنظر در تصویر مبدأ، نرم‌افزار به‌صورت خودکار سایر عکس‌ها را به‌صورت متوالی با یکدیگر مقایسه کرده و در نهایت میدان جابجایی و کرنش را محاسبه و گزارش می‌کند. پس از به‌دست آوردن میدان جابجایی و کرنش توسط تکنیک برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال با استفاده از نتایج حاصل از دستگاه کشش و یافتن نقاط نظیر به نظیر با توجه به فاصله زمانی تصاویر تهیه شده نمودارهای خواص مکانیکی حقیقی نمونه‌های ۱ تا ۱۲ تولید شده با روش ساخت افزایشی استخراج می‌شود.



شکل (۴) - بارگذاری تصویر در نرم‌افزار Mercury RT جهت پردازش و محاسبه کرنش نمونه ساخت افزایشی

### ۳- نتایج

#### ۱-۳- استخراج خواص مکانیکی با روش برهم‌نگاری

##### دیجیتالی

تصویر دیجیتال، در واقع یک عکس است که با استفاده از عمل نمونه‌برداری به‌میک ماتریس تبدیل شده است. در این حالت، تصویر را می‌توان توسط تابع دوبعدی  $f(x, y)$  نمایش داد که در آن  $x$  و  $y$ ، مختصات مکانی و مقدار  $f$  در هر نقطه میزان روشنایی تصویر در آن نقطه است. زمانی که مقادیر  $x$  و  $y$  و مقدار  $f$  گسسته و محدود باشند، تصویر، یک تصویر دیجیتال است. بنابراین تصاویر دیجیتال، یک آرایه دوبعدی است که  $M$  سطر و  $N$  ستون دارد و مقدار هر عدد آرایه یک مقدار ۸ بیتی است که عدد آن بین ۰ تا ۲۵۵ می‌باشد. مقدار صفر نشان‌دهنده رنگ تیره (سیاه) و مقدار ۲۵۵ نشان‌دهنده رنگ روشن (سفید) است. اگر  $P$  و  $Q$  دونقطه از عکس قبل از بارگذاری دستگاه کشش و  $P^*$  و  $Q^*$  نقاط متناظر آنها در عکس بعد از بارگذاری باشد، طبق یک سری روابط، می‌توان خواص کرنشی نمونه تحت کشش را استخراج شود کرد [۴۱]:

$$P = (x_p, y_p, z_p) \quad (۱)$$

$$P^* = (x_p^*, y_p^*, z_p^*) = (x_p + u_p, y_p + v_p, z_p + w_p) \quad (۲)$$

$$Q = (x_p + dx, y_p + dy, z_p + dz) \quad (۳)$$

$$Q^* = (x_p^* + dx^*, y_p^* + dy^*, z_p^* + dz^*) \quad (۴)$$

$$dx^* = (u_q - u_p + dx) \quad (۵)$$

$$dy^* = (v_q - v_p + dy) \quad (۶)$$

$$dz^* = (w_q - w_p + dz) \quad (۷)$$

(۸)

$$(x_p + u_q + dx \cdot y_p + v_q + dy \cdot z_p - w_q + dz) = (x_{q^*} \cdot y_{q^*} \cdot z_{q^*})$$

با بسط روابط فوق حول نقطه  $P$  و ترکیب روابط مربوطه

کرنش در جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  در حالت دوبعدی به‌صورت زیر می‌شود:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (۹)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (۱۰)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (۱۱)$$

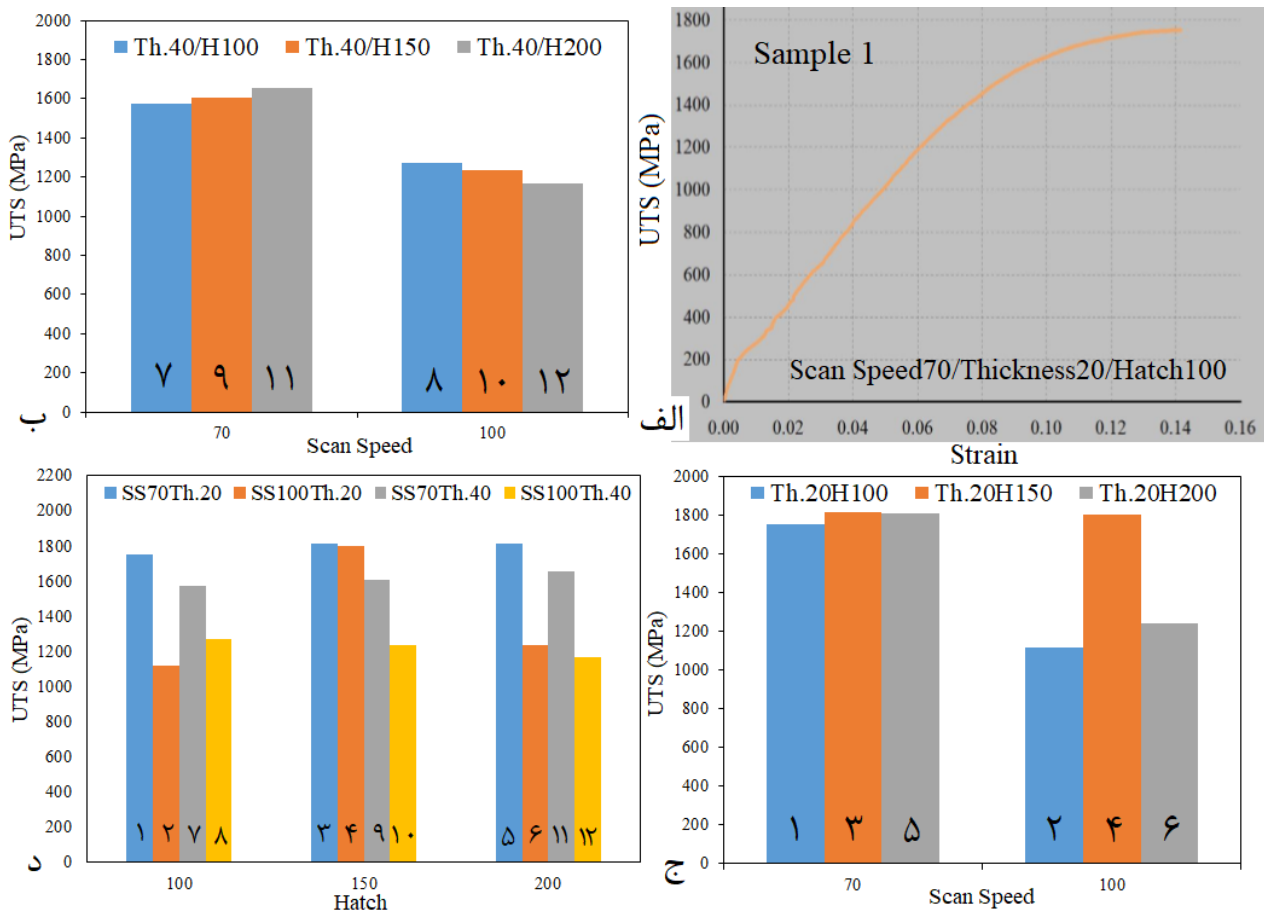
حال اگر تابع تقریب  $f(x, y)$  شدت نور عکس، قبل از

بارگذاری و  $G(x^*, y^*)$  بعد از بارگذاری باشد، نقطه  $P$  مرکز زیرناحیه قبل از بارگذاری،  $P^*$  بعد از بارگذاری و  $Q$  یک نقطه

### ۲-۳- بررسی عوامل ساخت افزایشی

پس از مشخص شدن عوامل انتخاب شده برای ساخت نمونه‌های کشش تخت با اندازه استاندارد ASTM E8 به‌دست آمده در شکل ۵ نمایش داده شده است. این تصاویر تأثیر عوامل ساخت افزایشی مانند سرعت اسکن لیزر، فاصله هم‌پوشانی، و ضخامت لایه ذوب شده را بر استحکام کشش نهایی نمونه‌های تولید شده را نشان می‌دهد. خواص مکانیکی کامل نمونه‌های ساخته شده، شامل استحکام، ازدیاد طول، ثابت یانگ و ضریب پواسون، با توجه به عوامل ساخت و درصد تخلخل هر نمونه در جدول ۲ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای به‌دست آوردن خواص مکانیکی مطلوب باید مقدار تخلخل به

حداقل مقدار ممکن برسد. حداقل مقدار تخلخل نیز تحت یک حداقل دانسیته انرژی ورودی به‌دست می‌آید. این مقدار برای نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق در محدوده  $700\text{--}950\text{ J/mm}^3$  است. در بین نمونه‌های ساخته شده سه نمونه شماره ۳، ۴ و ۵ دارای بیشترین استحکام تسلیم و نهایی است. دانسیته انرژی این سه نمونه در محدوده ذکر شده است. برای نمونه شماره ۱ و ۲ که دانسیته انرژی آن بالاتر از  $950\text{ J/mm}^3$  است خواص مکانیکی دوباره کاهش می‌شود. در مجموع در بررسی دقیق‌تر نشان داده می‌شود که مقدار تخلخل نقش مهمی در خواص مکانیکی دارد و مقادیر تخلخل زیر ۱/۵٪ منجر به بیشترین استحکام برای نمونه‌های ساخته شده می‌شود.



شکل (۵) - (الف) نمودار تنش کرنش نمونه شماره ۱ و اثر عوامل ساخت افزایشی (ب) در عامل ثابت ضخامت لایه  $40\mu\text{m}$  (ج) عامل ثابت ضخامت لایه  $20\mu\text{m}$  (د) عامل ثابت ضخامت و سرعت بر روی استحکام کشش نهایی.

مکانیکی بهتری نسبت به نمونه‌های با دانسیته انرژی بالاتر ایجاد کنند. این شرط خاص، ضخامت لایه بستر پودر در روش ساخت افزایشی است. شکل ۵ نشان می‌دهد که اگرچه نیاز به یک حداقل دانسیته انرژی جهت نزدیک شدن به خواص مکانیکی مطلوب

نتایج استخراج شده در جدول ۲ مشخص می‌کند که دانسیته انرژی و تخلخل اگرچه بیشترین تأثیر را بر خواص مکانیکی دارند، با این حال نمونه‌هایی با دانسیته انرژی پایین‌تر از حالت بهینه (حداقل  $700\text{ J/mm}^3$ )، تحت شرط خاصی می‌توانند خواص

کاهش یافته و استحکام تسلیم به ترتیب ۶۵٪ و ۳۰٪ افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش خواص مکانیکی بیشتر از تشکیل کمتر تخلخل اثر می‌پذیرد تا دانسیته انرژی.

تحقیق قبلی انجام شده [۴۰] بر روی نمونه‌هایی با اندازه غیراستاندارد و با روش تاگوچی جهت به‌دست آوردن شرایط بهینه ساخت افزایشی فولاد ماریجینگ ۳۰۰ نیز همین پیش‌بینی را انجام داد و نشان داد که ضخامت لایه بیشترین تاثیر بر نتایج خروجی خواص مکانیکی دارد.

با نتایج به‌دست آمده از نمونه‌های ساخته با شرایط مختلف، می‌توان پیش‌بینی کرد که شرایط ساخت نمونه‌های ۳، ۴ و ۵ بهترین خواص مکانیکی از لحاظ استحکام تسلیم و نهایی همراه با ازدیاد طول دارد و در بین این سه نمونه، نمونه شماره ۳ با شرایط سرعت اسکن ۷۰ mm/s، ضخامت لایه ۲۰ μm و فاصله هم‌پوشانی ۱۵۰ μm شرایط بهینه ساخت افزایشی در بین قطعات موردنظر را دارد.

موردنیاز است ولی رابطه خطی بین افزایش انرژی و استحکام وجود ندارد. به‌عنوان مثال در مقایسه بین نمونه‌های با دانسیته انرژی متفاوت ۷، ۹ و ۱۱ یا ۸، ۱۰ و ۱۲ یا ۱، ۳ و ۵، با وجود دو برابر بودن دانسیته انرژی نمونه ۷ نسبت به نمونه ۱۱ یا نمونه ۸ نسبت به نمونه ۱۲ یا نمونه ۱ نسبت به نمونه ۵، استحکام تسلیم و نهایی بسیار نزدیک به یکدیگر است.

یعنی می‌توان گفت اگرچه مطابق با معادله ۱، ضریب تاثیر عوامل سرعت اسکن، فاصله هم‌پوشانی و ضخامت لایه به ظاهر با هم برابر است ولی در واقع عامل ضخامت لایه، تاثیر بیشتری نسبت به دو عامل دیگر، در شرایط تقریباً برابر دانسیته انرژی، در ساخت افزایشی دارد. برای دو عامل دیگر نیز عامل سرعت اسکن در مقایسه با فاصله هم‌پوشانی در شرایط مشابه دانسیته انرژی ساخت، تاثیر بیشتری بر روی خواص مکانیکی قطعات ساخته شده دارد. به‌عنوان مثال در مقایسه بین دو نمونه ۵ و ۶ یا ۹ و ۱۰ با کاهش سرعت از ۱۰۰ mm/s به ۷۰ mm/s تخلخل به‌شدت

جدول (۲): خواص فیزیکی و مکانیک نمونه‌های کشش تخت ساخته شده تحت عوامل مختلف ساخت افزایشی بعد از عملیات حرارتی

نمونه	عوامل متغیر موثر در ساخت افزایشی			تخلخل %	استحکام تسلیم MPa	استحکام نهایی MPa	ازدیاد طول %	مدول یانگ GPa	ضریب پواسون	دانسیته انرژی J/mm <sup>3</sup>
	سرعت اسکن (mm/s)	ضخامت لایه‌ها (μm)	فاصله هم‌پوشانی (μm)							
۱	۷۰	۲۰	۱۰۰	۲/۱	۱۶۷۸	۱۷۵۴	۱۴/۱	۱۶۹	۰/۳	۱۴۲۸
۲	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۱۸/۳	۱۰۴۴	۱۱۱۹	۵/۷	۱۲۱	۰/۲۹	۱۰۰۰
۳	۷۰	۲۰	۱۵۰	۱/۱	۱۷۸۵	۱۸۱۶	۱۷/۴	۱۷۷	۰/۳۴	۹۵۲
۴	۱۰۰	۲۰	۱۵۰	۱/۴	۱۷۴۱	۱۸۰۳	۱۶/۱	۱۷۷	۰/۳۳	۶۶۷
۵	۷۰	۲۰	۲۰۰	۱/۴	۱۷۶۶	۱۸۱۱	۱۶/۶	۱۷۸	۰/۲۹	۷۱۴
۶	۱۰۰	۲۰	۲۰۰	۱۵/۵	۱۰۶۲	۱۲۳۹	۷/۶	۱۳۰	۰/۳۳	۵۰۰
۷	۷۰	۴۰	۱۰۰	۷/۸	۱۴۸۷	۱۵۷۲	۹/۴	۱۵۷	۰/۳۳	۷۱۴
۸	۱۰۰	۴۰	۱۰۰	۱۲/۴	۱۱۷۹	۱۲۷۱	۱۰/۵	۱۴۷	۰/۲۷	۵۰۰
۹	۷۰	۴۰	۱۵۰	۷/۶	۱۵۱۰	۱۶۰۵	۱۰/۸	۱۵۴	۰/۳	۴۷۶
۱۰	۱۰۰	۴۰	۱۵۰	۱۵/۹	۱۱۶۴	۱۲۳۸	۸/۹	۱۴۴	۰/۲۶	۳۳۳
۱۱	۷۰	۴۰	۲۰۰	۴/۳	۱۵۶۱	۱۶۵۶	۱۱/۳	۱۶۱	۰/۲۹	۳۵۷
۱۲	۱۰۰	۴۰	۲۰۰	۱۷/۹	۱۰۴۳	۱۱۶۸	۱۱/۲	۱۲۶	۰/۳۲	۲۵۰

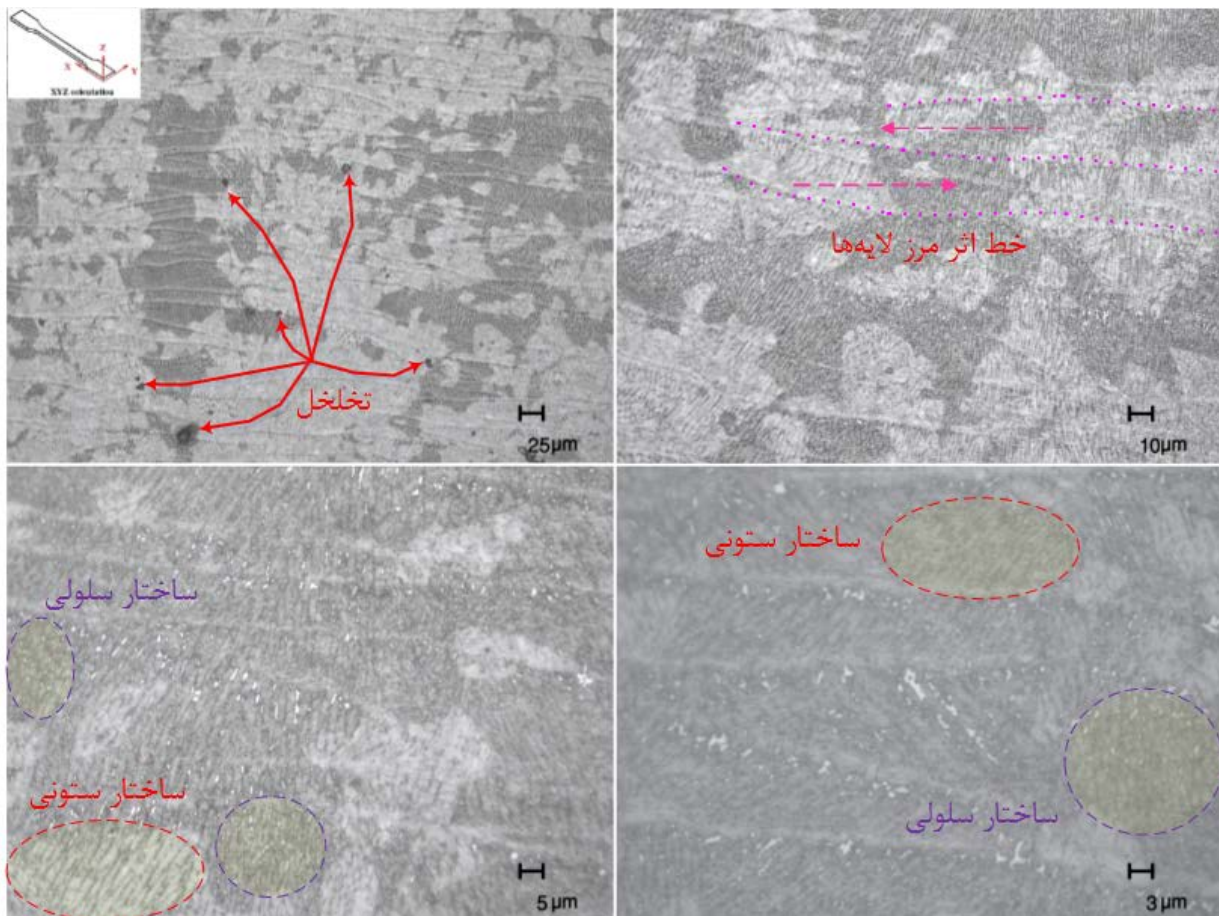
توان دستگاه: ۲۰۰w، جهت ساخت: X-Y، استراتژی اسکن: Stripe

شدن پودرها می‌باشد. تفاوت در اندازه حفرات به دلیل تفاوت اندازه ذرات پودر است. این منطبق بر اساس اندازه ذرات پودر استفاده شده در فرایند ساخت افزایشی (EOS MS1) می‌باشد که اندازه میانگین پودر ۳۰ μm بوده و ذراتی کوچکتر از ۱۰ μm نیز در مقادیر کم، در پودر وجود دارد (شکل ۱). حفره‌های خیلی کوچک (کوچکتر از ۵ μm) به غیر از عدم ذوب پودر، می‌تواند به دلیل تبخیر مواد اولیه پودر در حوضچه مذاب ناشی از حرارت بالای

شکل ۶ تصویر میکروسکوپ نوری سطح مقطع نمونه کشش ساخته شده در جهت X-Y (نمونه شماره ۳) با چهار بزرگ‌نمایی ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ برابر را نمایش می‌دهد. در تصویر ۲۰۰ برابر، حفره‌ها یا تخلخل ایجاد شده در طی فرایند ساخت افزایشی مشاهده می‌شود. حفره‌های تشکیل شده تقریباً در دو اندازه بزرگ و خیلی کوچک تشکیل شده است. با مقایسه مقیاس تصویر با حفره‌ها، تخلخل‌ها به احتمال خیلی زیاد مربوط به عدم ذوب

جهت ساخت X-Y، خط اثر ذوب لایه‌ها به موازات سطح برش نمونه‌ها (صفحه Y-Z نمونه شماره ۳) مشاهده می‌شود. دو سطح اثر رویش ذوب لیزر به صورت لایه‌های تقریباً موازی و خط اثر قطع و وصل باریکه لیزر، که به صورت عمود بر لایه‌ها است، قابل مشاهده است. در محل خط اثر باریکه لیزر، پهنای خط اثر لایه‌ای کمتر شده و در نتیجه خط اثر لایه‌ای به صورت مهره‌ای در می‌آید.

لیزر در نقطه کانونی و تمرکز لیزر باشد که به دلیل انجماد سریع حوضچه مذاب گازهای حاصل از تبخیر در آن به دام افتاده و منجر به تشکیل تخلخل شده است. در حقیقت بسته شدن نامناسب سوراخ کلید تشکیل شده ناشی از دانسیته انرژی بالای لیزر، باعث حبس بخار فلز داخل سوراخ کلید می‌شود. در تصویر ۵۰۰ برابر، خط اثر ذوب لایه‌ها نشان داده شده است که با توجه به ضخامت  $20\mu\text{m}$  عامل ضخامت لایه پودر در نمونه شماره ۳، فاصله خط اثر مشاهده شده، منطقی به نظر می‌رسد. با توجه به



شکل (۶) - تصویر میکروسکوپ نوری از نمایش تخلخل، خط اثر لایه‌ها و ساختار دانه‌ها پس از عملیات حرارتی نمونه شماره ۳.

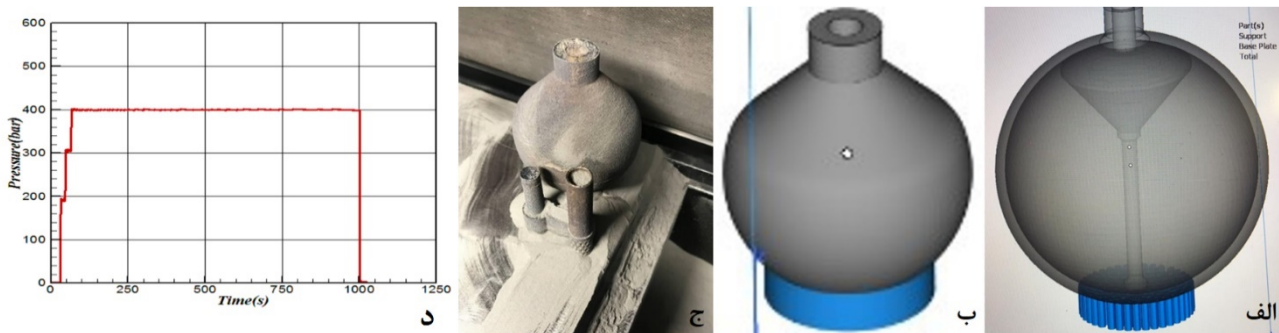
عملیات محلول‌سازی نیز جهت نفوذ عناصر بسیار مهم می‌باشد. زمان عملیات محلول‌سازی نمونه‌ها در این تحقیق ۲۰ دقیقه بود که به نظر می‌رسد این زمان برای نفوذ عناصر مولیبدن و تیتانیوم کافی نبوده است و در نتیجه خط اثر لایه‌ها بعد از عملیات حرارتی همچنان باقی مانده است.

تصویر با بزرگ‌نمایی بالاتر (۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ برابر) نشان می‌دهد که با توجه به جهت شیب حرارتی عمود بر جهت لایه‌ها به دلیل قرارگیری بستر فلزی مورد استفاده در زیر پودر و نیز محدوده‌ای که به دلیل روی هم افتادن باریکه لیزر دوباره ذوب می‌شود، بعد

در تحقیقات قبلی مشخص شده است که بعد از عملیات حرارتی محلول‌سازی، خط اثر لایه‌ها از بین می‌رود. علت حل شدن عناصری است که در موقع انجماد حوضچه مذاب به دلیل حلالیت پایین در مرزهای ذوب باقی می‌مانند. در هنگام فرایند محلول‌سازی نمونه ساخته شده در فرایند ساخت افزایشی، عناصر مولیبدن و تیتانیوم در زمینه حل شده و به سمت داخل دانه‌ها و مرکز اولیه حوضچه مذاب حرکت می‌کنند تا در نهایت یک محلول جامد همگن از عناصر به دست آید [۴۰]. برای حل شدن عناصر در مرزهای ذوب لایه‌ها در زمان محلول‌سازی علاوه بر دما، زمان

دسترسی)، قطعه اصلاح هندسی شد. لذا با مشخص کردن ناحیه بحرانی مخزن، اقدام به اصلاح هندسه از طریق تبدیل حالت نیم کروی قسمت بالایی به حالت مخروطی در زاویه ۴۵ درجه شد (شکل ۷-ب). با این کار مخزن بدون استفاده از پایه داخلی، ساخت افزایشی با عوامل بهینه انجام شد (شکل ۷-ج). پس از ساخت این مخزن، تحت آزمون فشار هیدرواستاتیک ۴۰۰ bar و به مدت ۱۰۰۰ ثانیه قرار گرفت و هیچ‌گونه نشت و افت فشار در آن مشاهده نشد (شکل ۶-د).

از فرایند چاپ فلزی قطعه، ساختار انجمادی سلولولی همراه با ساختار انجمادی جهت‌دار مشاهده می‌شود. برای بررسی شرایط بهینه و کاربردی بودن شرایط ساخت، مخزن تحت فشار با قطر ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۵mm طراحی و ساخته شد. برای ساخت مخازن تحت فشار، در برخورد با هندسه‌هایی با زوایای بیش از ۴۵ درجه (شکل ۷-الف) برای احتیاط از خرابی به سبب ریزش پودر ذوب شده باید از پایه‌گذاری استفاده شود. جهت جلوگیری از بسته شدن خروجی و نیز سبک‌تر شدن مخزن (عدم برداشت پایه‌های داخلی به دلیل عدم



شکل (۷) - الف) مدل سه‌بعدی اولیه مخزن کروی همراه پایه‌های داخلی و خارجی و ب) مدل سه‌بعدی اصلاح شده مخزن بدون پایه‌های داخلی، ج) مخزن ساخته شده اصلاح شده با روش ساخت افزایشی د) آزمون تحت فشار هیدرواستاتیک

#### ۴- نتیجه‌گیری

۳- افزایش دانسیته انرژی از یک مقدار مشخص (مقدار بحرانی) باعث کاهش تخلخل و افزایش بیشتر خواص مکانیکی نمی‌شود. در حقیقت افزایش بیش از حد دانسیته انرژی باعث تبخیر بیشتر عناصر فلزی در سوراخ کلید تشکیل شده در حوضچه مذاب شده و باعث تشکیل بیشتر حفره‌ها به دلیل حبس گازهای ناشی از تبخیر، در حین انجماد می‌شود.

در این تحقیق، پارامترهای الاستیک و پلاستیک فولاد ماریچینگ ۳۰۰ تولید شده به روش ذوب لیزر انتخابی (SLM) مورد مطالعه تجربی قرار گرفت و با استفاده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال به‌عنوان یک روش نوین، دقیق و غیرتماسی، استحکام تسلیم و کششی نهایی، ازدیاد طول، مدول یانگ و ضریب پواسون به‌دست آمد.

#### تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

اثر عوامل ساخت افزودنی به‌روش ذوب لیزر انتخابی پودری بر درصد تخلخل و خواص مکانیکی نمونه‌ها مشخص شده است که عبارتند از:

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان از جناب آقای دکتر محمدرضا فراهانی از دانشگاه تهران، برای مشاوره و راهنمایی موضوع تحقیق در زمینه انجام آزمایش آزمون برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی و استفاده از تجهیزات مربوطه در آزمایشگاه، کمال تشکر و قدردانی را دارند. همچنین از

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.

۲- بیشینه استحکام تسلیم و نهایی مربوط به نمونه ساخته شده با دانسیته انرژی لیزر  $95.0 \text{ J/mm}^3$ ، سرعت اسکن  $70 \text{ mm/s}$ ، ضخامت لایه  $20 \mu\text{m}$  و فاصله هم‌پوشانی  $150 \mu\text{m}$  است که کمترین مقدار تخلخل را دارد.

[14] 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", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 703, pp 116-123, 2017.

[15] Y. Tian, R. Palad, C. Aranas Jr, "Microstructural evolution and mechanical properties of a newly designed steel fabricated by laser powder bed fusion, *Additive Manufacturing*", vol. 36, pp. 101495, 2020.

[16] T. Z. Xu, S. Zhang, Y. Du, C. L. Wu, C. H. Zhang, X. Y. Sun, H. T. Chen, J. Chen, Development and characterization of a novel maraging steel fabricated by laser additive manufacturing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 891, pp. 45975, 2024.

[17] W. W. Wu, C. Xiang, C. Zhang, Z. H. Zou, Y. F. Xun, J. F. Liu, E. H. Han, Effect of heat treatment process on microstructure and tensile properties of 18Ni300 maraging steel fabricated by selective laser melting, *Acta Metall Sin.*, Vol. 10, 2024.

[18] M. A. Sutton, J.-J. O. Hubert, W. Schreier, "Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements Basic Concepts, Theory and Applications", Springer, ISBN: 978-0-387-78746-6 e-ISBN: 978-0-387-78747-3 DOI: 10.1007/978-0-387-78747-3

[19] W. H. Peters, W. F. Ranson. "Digital imaging techniques in experimental stress analysis", *Optical Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 427–431, 1982.

[20] M. A. Sutton, W. J. Wolters, W. H. Peters, W. F. Ranson, S. R. McNeill. "Determination of displacements using an improved digital correlation method", *Image and Vision Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 133–139, 1983.

[21] J. Anderson, W. H. Peters, M. A. Sutton, W. F. Ranson, and T. C. Chu. "Application of digital correlation methods to rigid body mechanics" *Optical Engineering*, vol. 22, no. 6, pp. 238–243, 1984.

[22] M. A. Sutton, M. Q. Cheng, W. H. Peters, Y. J. Chao, S. R. McNeill. "Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis", *Image and Vision Computing*, vol. 4, no. 3, pp. 143–150, 1986.

[23] M. A. Sutton, S. R. McNeill, J. Jang, and M. Babai, "Effects of sub-pixel image restoration on digital correlation error", *Optical Engineering*, vol. 27, no. 10, pp. 870–877, 1988.

[24] H. A. Bruck, S. R. McNeill, M. A. Sutton, W. H. Peters. "Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction", *Experimental Mechanics*, vol. 29, no. 3, pp. 261–267, 1989.

[25] G. L. Hovis, Centroidal tracking algorithm for deformation measurement using gray scale digital images, M.S. thesis, University of South Carolina, Computer Science Dept. Columbia, SC, United States 1989.

[26] D. J. Cheng, F. P. Chang, Y. S. Tan, and H. S. Don, "Digital speckle-displacement measurement using a complex spectrum method", *Applied Optics*, vol. 32, pp. 1839, 1993.

[27] G. Vendroux, W. Knauss, "Submicron deformation field measurements: Part 1 Developing a digital scanning tunneling" microscope *Exp. Mech.*, vol. 38, pp. 18-23. 1998.

پژوهشگاه فضایی ایران که بخشی از حمایت مالی پژوهش را برعهده داشته است، قدردانی می‌شود.

## مراجع

[1] U. Kizhakkian, S. Seetharaman, N. Raghavan, D. W. Rosen, laser powder bed fusion additive manufacturing of maraging steel: A review, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 145 pp. 110801, 2023.

[2] S. Shahbazi and M. Javanmard, "3D Printing - Introduction to Printing Methods and Applications in Sciences and Industries," in *Proceedings of the National Conference on Technology, Energy, and Data with an Approach to Electrical and Computer Engineering*, Kermanshah, Iran, June 2015.

[3] M. Angouraj Taghavi, "Manufacturing of Medical Implants by Additive Manufacturing," *Iranian Ceramic Quarterly*, vol. 15, no. 4, pp. 52-60, Winter 2019 (In Persian).

[4] A. M. Kalagar, "Additive Manufacturing of Gas Turbine Components Made of Nickel-Based Superalloys," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 38-45, June 2022 (In Persian).

[5] K. Moeinfar, F. Khodabakhshi, and S. Kashani Bozorg, "3D Printing of Inconel 625 Superalloy by Selective Laser Melting," *Journal of Metallurgical Engineering*, vol. 23, no. 4, pp. 347-358, Dec. 2020 (In Persian).

[6] M. Kamyab, M. S. Mohbi, A. Hajjalimohammadi, M. A. Taheri, and A. Mafi, "Mechanical Properties of Additively Manufactured 4043 Alloy Samples for Enhancing the External Features of Cylinder Heads," in *Proceedings of the 11th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil*, Tehran, Iran, June 2019 (In Persian).

[7] I. Khan, "Part specific applications of Additive Manufacturing", *Procedia Manufacturing*, vol. 12, pp. 89-95, 2017.

[8] M. Kh. Niaki, "Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies: The role of sustainability", *Journal of Cleaner Production*, vol. 222, pp. 381-392, 2019

[9] T. Kurzynowski, A. Pawlak, I. Smolina, "The potential of SLM technology for processing magnesium alloys in aerospace industry". *Archiv. Civ. Mech. Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 327-339, 2020.

[10] P. Adrian Mouritz, "Introduction to Aerospace Materials", Woodhead Publishing, 2012.

[11] K. Li, T. Yang, N. Gong, J. Wu, X. Wu, D. Z. Zhang, L. E. Murr, "Additive manufacturing of ultra-high strength steels: A review", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 965, pp. 171390, 2023.

[12] A. Hadadzadeh, A. Shahriari, B. S. Amirkhiz, J. Li, M. Mohammadi, "Additive manufacturing of an Fe–Cr–Ni–Al maraging stainless steel: Microstructure evolution, heat treatment, and strengthening mechanisms", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 787, pp. 139470, 2020.

[13] W. Sha, Z. Guo, "Maraging Steels: Modelling of Microstructure, Properties and Applications", Woodhead Publishing, 2009.

and Technology of Additive Manufacturing\*, accepted for publication, 2024. Available: <https://doi.org/10.22034/jssta.2024.417595.1140> (In Persian).

[41] T. Tekin, G. Ischia, F. Naclerio, R. Ipek, A. Molinari, Effect of a direct aging heat treatment on the microstructure and the tensile properties of a 18Ni-300 maraging steel produced by Laser Powder Bed Fusion, Mater. Sci. Eng. A, vol. 872, pp. 144921, 2023.



#### COPYRIGHTS

© 2025 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/>)

[28] G. Vendroux, W. Knauss, "Submicron deformation field measurements: Part 2 Improved digital image correlation", Exp. Mech., vol. 38, pp. 86-92, 1998.

[29] G. L. Hovis, "Vision System for Remote Strain/Deformation Measurement", article, January 26, 1999; South Carolina. (<https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc682576/>; accessed March 30, 2024), University of North Texas Libraries, UNT Digital Library, <https://digital.library.unt.edu>.

[30] H. W. Schreier, J. Braasch, M. A. Sutton. "Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation". Optical Engineering, vol. 39, no. 11, pp. 2915-2921, 2000.

[31] C. J. Tay, C. Quan, Y. H. Huang, Y. Fu, "Digital image correlation for whole field out-of-plane displacement measurement using a single camera", Optics Communications, vol. 251, no. 1-3, pp. 23-36, 2005.

[32] P. Britton, J. Loughran, "Application of image measurement and continuum mechanics to the direct measurement of two-dimensional finite strain in a complex fibro-porous material", International Journal for Computational Methods in Engineering Science & Mechanics, vol. 7, no. 2, pp. 81-90, 2006.

[33] P. Austrell, B. Enquist, A. Heyden, S. Spanne, "Contact free strain measurement using MATLAB image processing toolbox", Lund: Division of Structural Mechanics, LTH, 1996.

[34] D. P. Nicolella, A. E. Nicholls, J. Lankford, D. T. Davy, "Machine vision photogrammetry: a technique for measurement of microstructural strain in cortical bone", vol. 34, no. 1, pp. 135-139, 2001.

[35] J.C.J. Hofstede, H. J. K. Lemmen, R.C. Alderliesten, R. Benedictus, R. Rodi, "The power of Digital Image Correlation for detailed elastic-plastic strain measurements", Delft: Adhesion Institute, 2008.

[36] M. A. Sutton, N. Li, D. Garcia, N. Cornille, J. J. Orteu, S. R McNeill, H. W. Schreier, X. Li, "Metrology in a scanning electron microscope: theoretical developments and experimental validation", Measurement Science and Technology, vol. 17, no. 10, pp. 2613, 2006.

[37] H. Jin, L. W-Y, J. Korellis, "Micro-scale deformation measurement using the digital image correlation technique and scanning electron microscope imaging", The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, vol. 43, no. 8, pp. 719-728, 2008.

[38] D. Amodio, G. B. Broggiato, F. Campana, G. Newaz, "Digital speckle correlation for strain measurement by image analysis", Experimental Mechanics, vol. 43, no. 4, pp. 396-402, 2003.

[39] M. L. Montero-Sistiaga, S. Pourbabak, J.V. Humbeeck, D. Schryvers, K. Vanmeensel, "Microstructure and mechanical properties of Hastelloy X produced by HP-SLM (high power selective laser melting)", Mater. Des., vol. 165, pp. 107598, 2019.

[40] Y. Vahidshad, K. Abreenia, and P. Alimehr, "Optimization of Selective Laser Melting Process Parameters in 3D Printing of Maraging Steel 300 Components Using Taguchi Method," \*Journal of Science