

## بررسی کاربرد کلان داده ها و کنترل مبتنی بر داده در روش - های ساخت افزایشی مواد

**چکیده:** در روش های ساخت افزایشی امکان کنترل ریزساختار، با تغییر پارامترهای فرایند در حین ساخت قطعات وجود دارد. هدف این مقاله بررسی کاربرد تحلیل داده های خروجی از فرایند ساخت افزایشی مواد بر کنترل متغیرهای ساخت، حین فرایند ساخت افزایشی می باشد. قطعات ساخته شده با استفاده از روش ساخت افزایشی در معرض تغییرات ریزساختاری از حیث جهت گیری کریستالوگرافی و همچنین ناهمگونی خواص مکانیکی قرار دارد. این امر سبب شد که تحقیقات و پژوهش های زیادی به منظور بررسی و امکان برقراری فرایند کنترل ریزساختار و خواص در حین تولید قطعه انجام شود. در این مقاله ابتدا چالش های ریزساختاری و خواص مکانیکی به وجود آمده در تولید قطعات اعم از تغییرات سختی و تغییرات دانه بندی اشاره می شود و سپس به روش های کنترلی ریزساختار به منظور غلبه بر تغییرات ناخواسته ذکر شده در تحقیقات اشاره خواهد شد. تولید لایه لایه قطعات و اجرای ارزیابی ویژگی های قطعه تولید شده از طریق استفاده از داده های تصاویر دوربین مادون قرمز قبل و بعد از ایجاد هر لایه، اساس این روش های کنترل کننده ریزساختار است. لذا با ایجاد یک سیستم به منظور جمع آوری و تحلیل داده ها حین فرایند ساخت، امکان پیش بینی خواص و سپس تغییر پارامترهای ساخت به منظور دستیابی به خواص مطلوب وجود خواهد داشت.

**واژه های راهنما:** ساخت افزایشی، کلان داده، نظارت درجا، تصویربرداری ترموگرافیک، کنترل حین فرایند، کنترل مبتنی بر داده، ناهمگونی ریزساختاری و خواص مکانیکی.

آرش خاکزاد شاهاندشتی\*  
کارشناس مطالعات فناوری، گروه مپنا،  
تهران

محسن پیرمحمدی  
مدیر تحقیقات، گروه مپنا، تهران

مقاله علمی پژوهشی  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۵  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

Arash  
Khakzadshahandashti\*  
Technology studies expert,  
Mapna group, Tehran

Mohsen  
Pirmohammadi  
Research manager, Mapna  
group, Tehran

## Application of big data and data driven control in additive manufacturing

**Abstract:** controlling of microstructural features is possible by changing of additive manufacturing process parameters. The purpose of this paper is the application investigation of manufacturing process data analysis in process parameters during manufacturing of parts. In this paper, microstructural defect such as grain misorientation is presented, and then the effect of microstructural and manufacturing parameters control on elimination of these defects is studied. In-situ controlling of microstructural features is possible by using data of thermographic imaging during the additive manufacturing process. Forecasting of microstructural and mechanical properties is possible by developing a system for gathering and analysis of manufacturing data during the process.

**Keywords:** Additive manufacturing, Big data, In-situ monitoring, Thermographic imaging, Data driven control, microstructural heterogeneity.

## ۱- مقدمه

تمامی این مدل‌ها پتانسیل زیادی برای ارتقا و بهبود دارند که این امر با به‌کارگیری و اعتبار سنجی<sup>۸</sup> داده‌های فرایند ساخت افزایشی میسر خواهد بود. این ارتقا منجر به بهبود قابلیت اطمینان مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و فرایند کنترل‌کنترل خواص در حین ساخت خواهد شد. این مقاله به مطالعه روش‌های ذکر شده اختصاص دارد که در این روش‌ها یک فرایند کنترلی ایجاد خواهد شد که در آن با تغییر و تنظیم پارامترها، به ایجاد یک فرایند ساخت موفق کمک خواهد کرد [۲-۴].

## ۲- چالش‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی در روش ساخت افزایشی

به طور عمومی سوپرآلیاژهای پایه نیکل را به دو دسته جوش‌پذیر و غیر جوش‌پذیر تقسیم می‌کنند. به طور مثال در پژوهشی برای ورق‌های IN718 با ضخامت ۲ میلی‌متر، مدلی به منظور پیش‌بینی رفتار جوش‌پذیری این سوپرآلیاژ با توجه به توان لیزر و سرعت حرکت پرتو توسعه داده شد [۵]. با توجه به این مدل مشخص شد که در جوشکاری ورق‌های سوپرآلیاژ امکان ایجاد جوش‌هایی عاری از ترک در سرعت‌های بیش از ۵ میلی‌متر بر ثانیه وجود ندارد. اما در حین ساخت افزایشی قطعات سوپرآلیاژی با استفاده از روش ذوب بستر پودر با لیزر<sup>۹</sup> امکان ساخت قطعات سالم حتی با وجود سرعت‌هایی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه وجود دارد [۶]. لذا از یک سو فرایندهای ساخت افزایشی شباهت زیادی با فرایندهای جوشکاری پیشرفته با استفاده از لیزر و پرتو الکترونی از حیث جوش‌پذیری آلیاژها دارد. اما از طرف دیگر فناوری فرایند در این روش‌ها و نحوه تأثیر پارامترهای فرایند بر ریزساختار تفاوت‌های اساسی با جوشکاری دارد. این تفاوت به دلیل اختلاف در شرایط انتقال حرارت در طول فرایندهای ساخت افزایشی لیزر و روش‌های جوشکاری لیزر می‌باشد. تفاوت در نحوه حرکت منبع پرتو سبب تفاوت در توزیع انتقال حرارت در قطعه کار خواهد شد [۷].

در پژوهش انجام شده در تعمیر قطعات ساخته شده از سوپرآلیاژ IN718 با استفاده از روش لایه نشانی با استفاده از توزیع مستقیم انرژی<sup>۱۰</sup> دو نوع از ناهمگونی<sup>۱۱</sup> در خواص مشاهده شده است. مورد اول مربوط به جهت‌گیری اجزای ریزساختاری و دیگری مربوط به تغییرات سختی می‌باشد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، با افزایش فاصله از زیرلایه (شکل سمت راست) میزان رشد دانه‌ها با جهت غیر مرجح افزایش یافته است. این تغییر در جهت‌گیری رشد دانه‌ها به دلیل تغییر حوضچه جوش و همچنین کاهش گرادیان دمایی با افزایش ارتفاع از زیرلایه می‌باشد. نوع دیگری از ناهمگونی مربوط به نقشه سختی قطعه تعمیر شده است (شکل ۲) که تغییرات زیادی را از ۲۰۰

روش‌های ساخت افزایشی<sup>۱</sup> فرایندی برای تولید قطعات فلزی جامد از طریق ساخت به روش لایه لایه پودر، سیم و یا ورق‌های نازک مواد فلزی می‌باشد. روش‌های ساخت افزایشی فلزات مزایای زیادی نسبت به روش‌های مرسوم و قدیمی تولید ایجاد می‌کند. این مزایا شامل انعطاف‌پذیری بالا در تولید اشکال پیچیده، کاهش زمان تولید، کاهش مصرف انرژی و کاهش ضایعات می‌باشد. تحقیقات گسترده به منظور توسعه بیشتر این فناوری مورد نیاز است تا نیازهای صنعتی مرتفع و امکان استفاده گسترده از این روش ایجاد شود. از دیگر مزایای استفاده از روش ساخت افزایشی عدم نیاز به فرایندهای تکمیلی نظیر فرایندهای مورد نیاز برای آماده‌سازی سطوح و همچنین دستیابی به محدوده ابعادی مورد نظر و تکرار پذیری فرایند است [۱].

یکی از چالش‌های اساسی در تولید قطعات با استفاده از روش‌های ساخت افزایشی، عدم یکنواختی در خواص مکانیکی قطعات تولیدی است. در روش‌های ساخت افزایشی امکان کنترل ریزساختار، با تغییر پارامترهای فرایند در حین ساخت قطعات وجود دارد. تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است که هدف این تحقیقات کاهش نیاز به انجام آزمایشات تجربی بر هزینه و زمان بر می‌باشد. این تحقیقات به نظارت درجا<sup>۲</sup> بر خواص ریزساختاری و مکانیکی قطعات تولید شده به منظور کنترل حین فرایند ساخت اختصاص دارد. با توسعه سریع روش‌های جمع‌آوری، ذخیره و انتقال داده‌ها، امکان به‌کارگیری مدل‌های و ابزارهای هوشمند برای مانیتور کردن دقیق تعداد بسیار زیادی از داده‌ها فراهم شده است. امکان به‌کارگیری این مدل‌ها و ابزار در روش‌های ساخت افزایشی با رشد چشمگیری مواجه شده است که سبب خواهد شد فناوری کلان‌داده<sup>۳</sup> تا حد زیادی سبب پیشرفت و بهبود خواص قطعات ساخته شده با روش ساخت افزایشی شود. کلان‌داده و ساخت افزایشی از جمله فناوری‌های کلیدی در انقلاب صنعتی چهارم<sup>۴</sup> می‌باشد. پرینت سه بعدی<sup>۵</sup>، رایانش ابری<sup>۶</sup>، کلان‌داده و اینترنت اشیا<sup>۷</sup> فناوری‌های هستند که در سال‌های آتی تحولات اساسی در صنایع مختلف جهان ایجاد خواهند کرد. با استفاده از فناوری کلان‌داده در روش ساخت افزایشی و تغییر پارامترهای فرایندی و کنترل آن‌ها فرایند تصمیم‌گیری هوشمند در حین فرایند ارتقا می‌یابد و می‌توان بر عیوب ریزساختاری و عدم یکنواختی در خواص مکانیکی حین تولید قطعات غلبه کرد.

به منظور دستیابی به اهداف ذکر شده از مدل‌های (انجمادی، سیالاتی و ...) پیش‌بینی‌کننده ریزساختار و خواص در فرایند ساخت، در ابعاد و زمان‌های متفاوت استفاده خواهد شد. البته

7 Internet of things (IoT)

8 validation

9 Laser powder bed fusion

10 Direct energy deposition

11 heterogeneity

1 Additive manufacturing

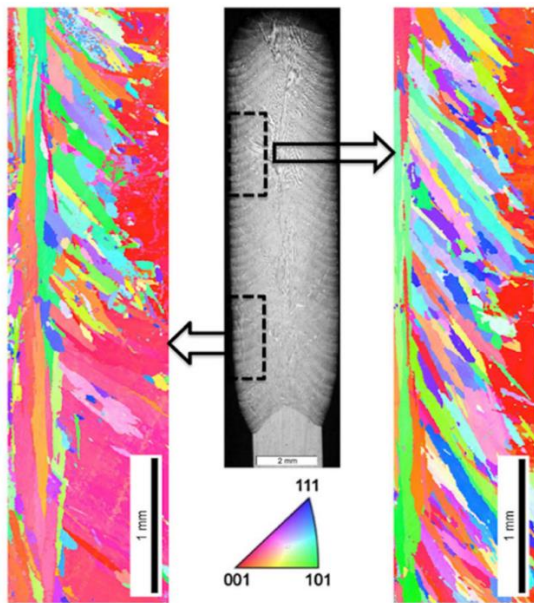
2 In-situ monitoring

3 Big data

4 Industry 4.0

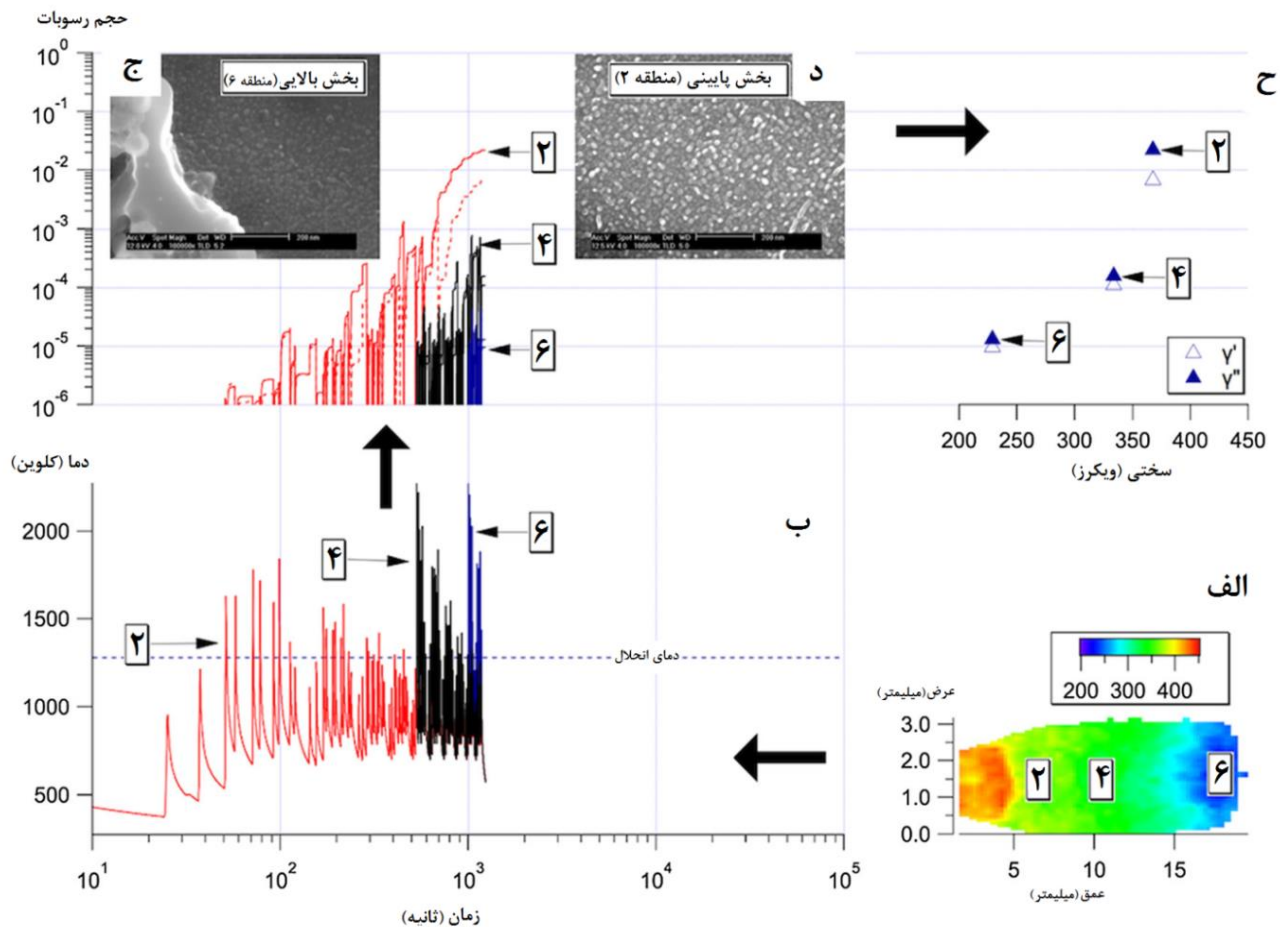
5 3D printing

6 Cloud computing



شکل ۱ ناهمگونی ریزساختاری در قطعه تعمیر شده با استفاده از روش لایه نشانی با توزیع مستقیم انرژی در دو بخش مختلف: سمت چپ) نزدیک به زیرلایه و سمت راست) نزدیک به بخش بالایی [۸].

ویکرز تا ۴۵۰ ویکرز نشان می‌دهد. منطقه با بیشترین سختی (منطقه ۲) در لایه‌های ایجاد شده نزدیک به زیرلایه و کمترین سختی (منطقه ۶) در لایه‌های بالایی ایجاد شده دیده شده است. فرایند رسوب‌سختی سوپرآلیاژ IN718 از طریق رسوب‌گذاری فازهای  $\gamma'$  و  $\gamma''$  انجام می‌شود. تغییرات دمایی در اطراف دمای انحلال برای مناطق ۲، ۴ و ۶ با استفاده از محاسبات المان محدود محاسبه شد. در همه مناطق محدوده دمایی در اطراف دمای انحلال فازهای  $\gamma'$  و  $\gamma''$  نوسان داشته است. این نوسانات در منطقه ۲ بیشتر از سایر مناطق بوده است. لذا میزان رسوبات در منطقه ۲ بیشتر از منطقه ۴ و منطقه ۶ است. مشاهدات ریزساختاری نتایج ذکر شده را تأیید کردند (شکل ۲- ج و د) [۷، ۸]. با توجه به مباحث ذکر شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که قطعات ساخته شده با استفاده از روش ساخت افزایشی در معرض تغییرات ریزساختاری از حیث جهت‌گیری کریستالوگرافی و همچنین ناهمگونی خواص مکانیکی قرار دارد. این امر سبب شد که تحقیقات و پژوهش‌های زیادی به منظور بررسی و امکان برقراری فرایند کنترل ریزساختار و خواص در حین تولید قطعه (روش‌های نظارت درجا) انجام شود.



شکل ۲ ناهمگونی خواص مکانیکی در سوپرآلیاژ IN718 تعمیر شده با روش لایه نشانی با توزیع مستقیم انرژی الف) نقشه میزان سختی در ارتفاع و عرض قطعات تعمیر شده ب) سیکل‌های دمایی در نقاط ۲، ۴ و ۶ ج) رسوبات اندک در لایه‌های بالایی ایجاد شده د) رسوبات بیشتر در لایه پایینی ایجاد شده و ح) کسر حجمی رسوبات در مناطق مختلف [۸].

### ۳- استفاده از تصویربرداری ترموگرافیک به منظور کنترل خواص قطعات تولید شده

همانطور که ذکر شد در روش‌های نظارت درجا، امکان ایجاد یک فرایند کنترلی وجود دارد که در این فرایند با تغییر و تنظیم پارامترهای فرایند ساخت، به ایجاد یک ساخت موفق کمک خواهد کرد. قطعات سوپرآلیاژی که در توربین‌های گازی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تحت دما و تنش بالا و همچنین محیط خورنده قرار دارند. قطعات تولید شده توربین پس از تولید، مطابق استانداردهای کیفی، می‌بایست مرحله ارزیابی از طریق آزمایشات مخرب و غیرمخرب را طی کنند. انجام آزمایشات غیر مخرب همواره با خطاهایی همراه می‌باشد. از آنجایی که روش ساخت افزایشی یک روش ساخت بر اساس ذوب لایه لایه می‌باشد، امکان اجرای ارزیابی ویژگی‌های قطعه تولید شده از طریق تشخیص و کنترل ویژگی‌های حرارتی و سطح قطعه وجود دارد تا به اطلاعاتی در خصوص میزان توزیع عیوب (حفرات و ترک‌ها) و همچنین خواص ریزساختاری دست یافت. دستیابی به این اطلاعات از طریق استفاده از تصاویر مادون قرمز<sup>۱</sup> قبل و بعد از ایجاد هر لایه امکان‌پذیر است.

امروزه در تحقیقات به همراه روش ساخت افزایشی از تصویربرداری ترموگرافیک<sup>۲</sup>، روش‌های گرماسنجی<sup>۳</sup> و همچنین قراردادن ترموکوپل در زیرلایه استفاده می‌شود. اگرچه در میان روش‌های ذکر شده استفاده از تصویربرداری ترموگرافیک با دوربین‌های مادون قرمز پرکاربردترین روش است. تصویربرداری ترموگرافیک یک روش غیرتماسی به منظور کنترل کردن دما در یک جسم با استفاده از دوربین‌های مادون قرمز می‌باشد. دوربین مادون قرمز با استفاده از یک سنسور، تابش‌های مادون قرمز که از طریق یک لنز متمرکز شده را جمع می‌کند و این اطلاعات را به تصویر دیجیتال تبدیل می‌کند. این اطلاعات خارج شده از هر منطقه (بسته به میزان شدت موج مادون قرمز) سپس به دما تبدیل خواهد شد. اگرچه شدت موج مادون قرمز خروجی به توپوگرافی سطح بازتاب‌کننده و همچنین ضریب بازتابش ماده وابسته است. لذا داده‌های خروجی می‌بایست با استفاده از توابعی کالیبره شوند. از طرفی ضریب بازتابش هم با افزایش دمای سطح ماده بازتاب‌کننده افزایش می‌یابد. این تغییرات منشأ خطاهایی در تبدیل شدت موج مادون قرمز به دما خواهد بود که سبب بروز مشکلاتی در نظارت بر فرایند ساخت افزایشی خواهد شد. سپس دماهای کالیبره شده به منظور تخمین پارامترهای انجمادی که بر ریزساختار و خواص تأثیر گذارند، استفاده خواهد شد [۹-۱۳]. از دیگر منابع خطا در این روش کنترلی می‌توان به اندازه پیکسل-های مورد بررسی اشاره کرد. همچنین قدرت تفکیک<sup>۴</sup> و بازه زمانی اندازه‌گیری فریم‌های دوربین، عامل محدود کننده دیگری خواهد بود. پارامترهای مشخصی مانند گرادیان دمایی (G) و سرعت پیشروی جبهه انجماد (R) با استفاده از داده‌های دوربین

مادون قرمز و روابط انجمادی محاسبه خواهد شد. با در اختیار داشتن این پارامترها امکان پیش‌بینی ریزساختار و دانه‌بندی از نوع هم محور<sup>۵</sup> و یا ستونی<sup>۶</sup> وجود خواهد داشت [۱۴].

در پژوهشی در روش ساخت افزایشی قطعات IN718 با استفاده از ذوب با پرتو الکترونی<sup>۷</sup> کاربرد تصویربرداری ترموگرافیک مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش کاربرد این روش به منظور تأثیر دو استراتژی مختلف حرکت منبع پرتو (نقطه‌ای و خطی) بر ویژگی‌های کریستالوگرافی ریزساختار (ساختار هم محور و یا ستونی) مورد مطالعه قرار گرفت. برای دستیابی به این هدف، یک دوربین مادون قرمز با طول موج متوسط خارج از محفظه خلأ دستگاه و رو به پنجره شیشه‌ای محفظه قرار داده شد. با استفاده از نرم‌افزارهای موجود در پژوهش، داده‌های مبتنی بر شدت موج مادون قرمز دریافتی به دما در حین تولید تبدیل شد. مطالعات ریزساختاری نشان داده است که کاهش گرادیان دمایی و افزایش سرعت جبهه انجماد سبب تشکیل ریزساختار با دانه‌بندی هم محور خواهد شد [۱۴]. در این پژوهش گرادیان دمایی در سطح از طریق تخمین خطی تغییرات دمایی مابین دو پیکسل محاسبه شد. از طریق تخمین فاصله بین دو پیکسل در نرم‌افزارهای آنالیز تصویری، پارامتر گرادیان دمایی انجماد (G) محاسبه شد. همچنین از طریق مدلی دیگر، با استفاده از داده‌های دمایی در زمان‌های مختلف سرعت جبهه انجماد (R) محاسبه شد.

شکل ۳ نشان‌دهنده تغییرات مقادیر گرادیان دمایی انجماد (G) و سرعت جبهه انجماد (R) برای یک لایه خاص در هندسه مسأله می‌باشد. گرادیان دمایی در حرکت منبع پرتو به صورت خطی عموماً بیشتر از گرادیان دمایی در حرکت منبع پرتو به صورت نقطه‌ای می‌باشد. بخش‌هایی از ریزساختار که با منبع نقطه‌ای ساخته شده‌اند به علت مواجهه با گرادیان دمایی پایین‌تر با ساختار دانه‌بندی هم محور رشد خواهند کرد (شکل ۳-۵). زیرا کاهش گرادیان دمایی و افزایش سرعت جبهه انجماد سبب تشکیل ریزساختار با دانه‌بندی هم محور خواهد شد. از طرفی بخش‌هایی از ریزساختار که با منبع خطی ساخته شده‌اند به علت مواجهه با گرادیان دمایی بالاتر با ساختار دانه‌بندی ستونی رشد کردند (شکل ۳-۶). به این ترتیب تأثیر حرکت مختلف منبع پرتو بر ریزساختار مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج در تطابق با مشاهدات ریزساختاری و نتایج EBSD می‌باشد [۱۵]. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فناوری کلان‌دانه و ایجاد بستری برای آنالیز داده‌های مادون قرمز، برای کنترل تدریجی ریزساختار در قطعات ساخته شده به روش‌های ساخت افزایشی نقشی حیاتی ایفا خواهد کرد. در این بستر با جمع‌آوری داده‌های دوربین مادون قرمز و پارامترهای حرارتی حین فرایند و با استفاده از مدل‌های ریزساختاری و یا خواص مکانیکی امکان کنترل نوع ریزساختار و همچنین خواص مکانیکی وجود دارد [۱۶ و ۱۷].

<sup>5</sup> equiaxed

<sup>6</sup> columnar

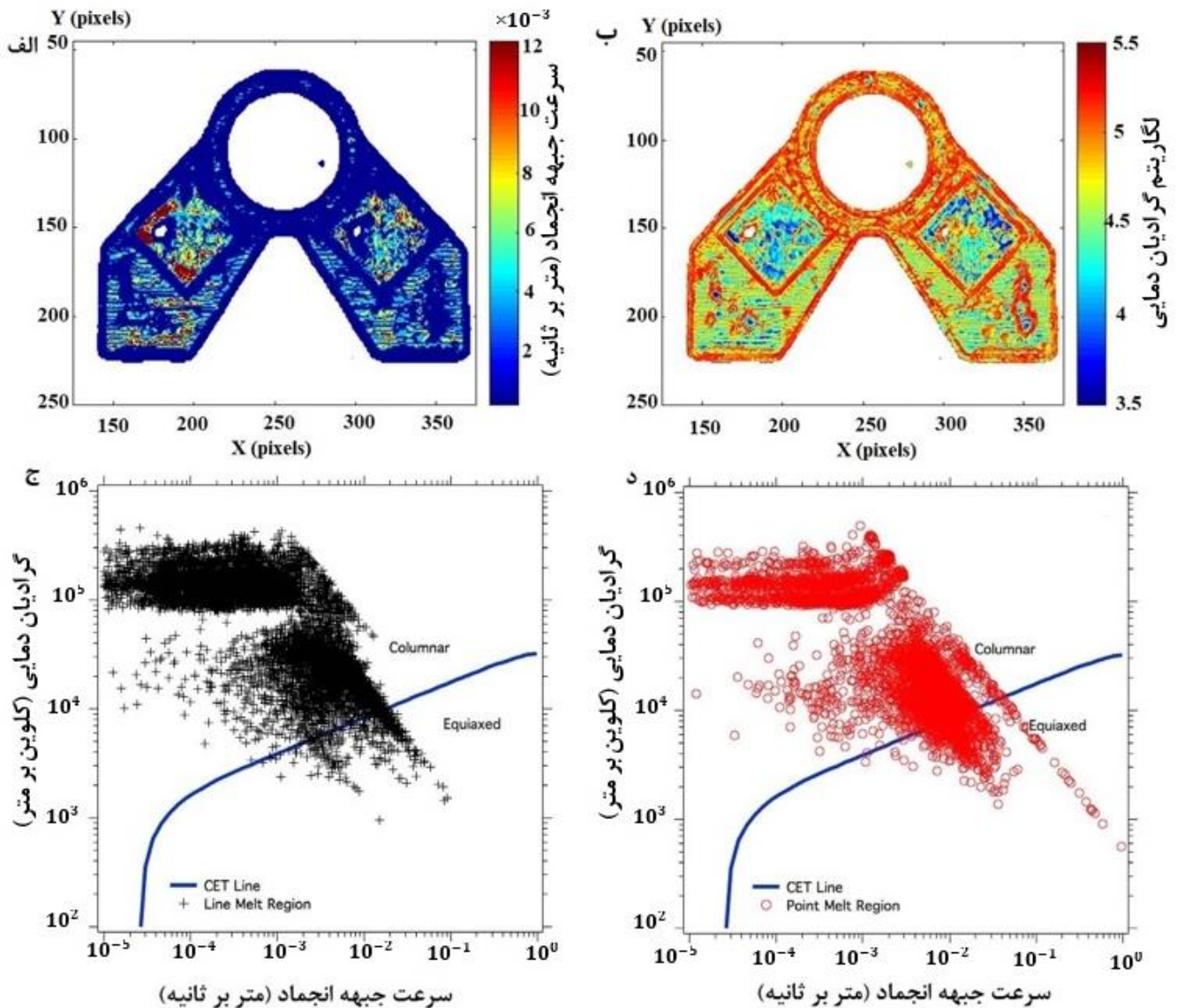
<sup>7</sup> Electron beam melting (EBM)

<sup>1</sup> Near infrared image

<sup>2</sup> Thermographic imaging

<sup>3</sup> pyrometry

<sup>4</sup> resolution



شکل ۳ الف) گرادیان دمایی انجماد ب) سرعت جبهه انجماد ج) نمودار تبدیل ریزساختار در حرکت خطی منبع پرتو و د) نمودار تبدیل ریزساختار در حرکت نقطه‌ای منبع پرتو در یک لایه [۱۵].

به منظور بهینه سازی فرایند ساخت، رصد ویژگی‌های ریزساختاری و پارامترهای فرایندی به منظور شناسایی کامل ویژگی‌های قطعات ساخته شده الزامی است. به طور مثال در فرایند تف جوشی لیزری انتخابی<sup>۱</sup> پارامترهای مختلفی از جمله اندازه پودر، درصد بازیافت پودر، کالیبراسیون دستگاه، نوع نرم افزار، سرعت پرینت و مسیر ساخت بسیار مؤثر است. پارامترهای فرایند باید کمی شود تا قطعات با کیفیت و با تکرارپذیری بالا تولید شود. به علاوه به یک سیستمی نیاز است که از جمع آوری، مدیریت و قابلیت ردیابی داده‌ها به طور کامل پشتیبانی کند. بدین وسیله با استفاده از مدل‌هایی، ارتباط مابین پارامترهای فرایند ساخت و ویژگی‌های عملکردی قطعه تولیدی آشکار خواهد شد تا عوامل کلیدی در تغییرات خواص مورد بررسی و

#### ۴- استفاده از فناوری کلان داده در روش ساخت افزایشی

نتایج تحقیقات اشاره شده در این مقاله نشان داد که استفاده از فناوری کلان‌داده و ایجاد بستری برای آنالیز داده‌های مادون قرمز، برای کنترل تدریجی ریزساختار در قطعات ساخته شده به روش‌های ساخت افزایشی نقشی حیاتی ایفا خواهد کرد. در این بستر با جمع‌آوری داده‌های دوربین مادون قرمز و پارامترهای حرارتی حین فرایند و با استفاده از مدل‌های ریزساختاری و یا خواص مکانیکی امکان کنترل نوع ریزساختار و همچنین خواص مکانیکی وجود دارد که در ادامه توضیحاتی در این خصوص ارائه خواهد شد.

<sup>1</sup> Selective laser sintering (SLS)

*materials reviews*, Vol. 61, No. 5, pp.315-360, (2016).

[2] Dehoff, R.R., Kirka, M.M., Sames, W.J., Bilheux, H., Tremsin, A.S., Lowe, L.E. and Babu, S.S., Site specific control of crystallographic grain orientation through electron beam additive manufacturing, *Materials Science and Technology*, Vol. 31, No. 8, pp.931-938, (2015).

[3] Clijsters, S., Craeghs, T., Buls, S., Kempen, K. and Kruth, J.P., In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75, No. 5, pp.1089-1101, (2014).

[4] Krauss, H., Eschey, C. and Zaeh, M., Thermography for monitoring the selective laser melting process. In *Proceedings of the solid freeform fabrication symposium*, pp. 999-1014, (2012), August.

[5] Dye, D., Hunziker, O. and Reed, R.C., Numerical analysis of the weldability of superalloys, *Acta Materialia*, Vol. 49, No. 4, pp.683-697, (2001).

[6] Yadroitsev, I., Gusarov, A., Yadroitsava, I. and Smurov, I., Single track formation in selective laser melting of metal powders, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 12, pp.1624-1631, (2010).

[7] Babu, S.S., Raghavan, N., Raplee, J., Foster, S.J., Frederick, C., Haines, M., Dinwiddie, R., Kirka, M.K., Plotkowski, A., Lee, Y. and Dehoff, R.R., Additive manufacturing of nickel superalloys: opportunities for innovation and challenges related to qualification. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 49, No. 9, pp.3764-3780, (2018).

[8] Tian, Y., McAllister, D., Colijn, H., Mills, M., Farson, D., Nordin, M. and Babu, S., Rationalization of microstructure heterogeneity in INCONEL 718 builds made by the direct laser additive manufacturing process. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 45, No. 10, pp.4470-4483, (2014).

[9] Everton, S.K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R.K. and Clare, A.T., Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing, *Materials & Design*, Vol. 95, pp. 431-445, (2016).

[10] Flir, A., *The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals: A Resource Guide for Using Infrared in the Research and Development Industry*. FLIR AB. URL [http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/FLIR/The\\_Ultimate\\_Infrared\\_Handbook\\_for\\_RD/112511/0](http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/FLIR/The_Ultimate_Infrared_Handbook_for_RD/112511/0), pp. 5, (2013).

تحلیل قرار گیرد. با استفاده از موارد اشاره شده امکان افزایش مدیریت و اتوماسیون حین فرایند و همچنین توانایی مانیتور کردن کلیه داده ها در فرایندهای تولید قطعات به روش ساخت افزایشی وجود خواهد داشت [۱۸]. یک سیستم اشاره شده به منظور جمع آوری، مدیریت و ردیابی داده‌ها لازم است که دارای ویژگی‌های ذیل باشد:

- جمع آوری داده‌های شامل اطلاعات فرایند، مواد خام، ویژگی‌های دستگاه و ...
- فراهم کردن دسترسی برای بهسازی و بازبینی داده ها
- حفظ قابلیت ردیابی داده‌ها در کل زنجیره فرایند ساخت
- اجرای مدل‌های کنترلی
- تولید اطلاعات ضروری به منظور بازرسی حین فرایند [۱۹ و ۲۰].

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا به ناهمگونی‌های ریزساختاری و همچنین تغییرات ناخواسته در خواص مکانیکی قطعات ساخته شده به روش ساخت افزایشی اشاره شد. با تغییر پارامترهای فرایند ساخت افزایشی (مانند تغییر نوع حرکت منبع پرتو به حالت خطی یا نقطه ای) امکان تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی در قطعات ساخته شده وجود خواهد داشت. روش‌های آنالیز و شناسایی ریزساختاری مخرب (مانند روش‌های میکروسکوپی) بسیار پرهزینه و زمان‌بر می باشد. لذا در تحقیقات به روش‌هایی ارائه شده که با استفاده از مدل‌های پیش بینی کننده ریزساختار، امکان کنترل ریزساختار و اجرای فرایند نظارت درجا وجود داشته باشد. با استفاده از فناوری کلان داده از طریق ایجاد یک سیستم و جمع‌آوری و تحلیل داده‌های به دست آمده حین فرایند و همچنین مدل‌های پیش‌بینی کننده خواص ریزساختاری ذکر شده، امکان کنترل خواص ریزساختاری و خواص مکانیکی در روش‌های متفاوت ساخت افزایشی وجود دارد. با ایجاد یک سیستم دارای قابلیت جمع آوری، مدیریت و ردیابی داده‌ها و با اجرای مدل‌هایی، ارتباط مابین پارامترهای فرایند ساخت (مانند نوع حرکت منبع پرتو) و ویژگی‌های ریزساختاری قطعه تولیدی (مانند ساختار با دانه بندی هم محور و یا ستونی) آشکار خواهد شد تا نظارت درجا و بررسی و تحلیل خواص قطعات تولیدی انجام شود. این نظارت درجا از طریق استفاده از دوربین‌های مادون قرمز به همراه مدل‌های انجمادی و حرارتی میسر خواهد شد. با توسعه مدل‌های اشاره شده امکان پیش‌بینی نوع دانه-بندی، جهت‌گیری کریستالوگرافی، تشکیل ترک و حفرات در حین فرایند ساخت برای یک لایه به خصوص وجود دارد.

## مراجع

[1] Sames, W.J., List, F.A., Pannala, S., Dehoff, R.R. and Babu, S.S., The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *International*

- [16] Schnell, N., Schoeler, M., Witt, G. and Kleszczynski, S., Experimental and numerical thermal analysis of the laser powder bed fusion process using in situ temperature measurements of geometric primitives. *Materials & Design*, Vol. 209, pp.109946, (2021).
- [17] Stanger, L., Rockett, T., Lyle, A., Davies, M., Anderson, M., Todd, I., Basoalto, H. and Willmott, J.R., Reconstruction of Microscopic Thermal Fields from Oversampled Infrared Images in Laser-Based Powder Bed Fusion. *Sensors*, Vol. 21, No. 14, pp.4859, (2021).
- [18] Wang, L. and Alexander, C.A., Additive manufacturing and big data. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, Vol. 1, No. 3, pp.107-121, (2016).
- [19] Big Data Management in Additive Manufacturing. (2019); Available from <https://metrology.news/big-data-management-in-additive-manufacturing/>.
- [20] Bi, K., Lin, D., Liao, Y., Wu, C.H. and Parandoush, P., Additive manufacturing embraces big data. *Progress in Additive Manufacturing*, pp.1-17, (2021).
- [11] Dinwiddie, R.B., Kirka, M.M., Lloyd, P.D., Dehoff, R.R., Lowe, L.E. and Marlow, G.S., Calibrating IR cameras for in-situ temperature measurement during the electron beam melt processing of Inconel 718 and Ti-Al6-V4. In *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII*, Vol. 9861, pp. 986107, International Society for Optics and Photonics, (2016), June.
- [12] Alldredge, J., Slotwinski, J., Storck, S., Kim, S., Goldberg, A. and Montalbano, T., In-Situ monitoring and modeling of metal additive manufacturing powder bed fusion. In *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1949, No. 1, pp. 020007, AIP Publishing LLC, (2018), April.
- [13] Li, D., Liu, R. and Zhao, X., Overview of in-situ temperature measurement for metallic additive manufacturing: how and then what, *Solid Free Fabr 2019 Proc 30th Annu Int*, pp.1596-1610, (2019).
- [14] Hunt, J.D., Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic. *Materials science and engineering*, Vol. 65, No. 1, pp.75-83, 1984.
- [15] Raplee, J., Plotkowski, A., Kirka, M.M., Dinwiddie, R., Okello, A., Dehoff, R.R. and Babu, S.S., Thermographic microstructure monitoring in electron beam additive manufacturing. *Scientific reports*, Vol. 7, No. 1, pp.1-16, (2017).