



## استخراج پروفیل سه‌بعدی هندسه‌ی رسوب با استفاده از اسکن لیزر خطی، در روش تولید افزایشی لایه‌نشانی با استفاده از توزیع مستقیم انرژی

سارا اسفندیاری قله‌زو<sup>۱</sup>، محمد حسین فرشیدیان‌فر<sup>۲\*</sup>، سینا نجاتی اعدتدا<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیتسبرگ، پیتسبرگ، ایالات متحده آمریکا

\* ایمیل نویسنده مسئول: farshidianfar@um.ac.ir

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۷ دی ۱۴۰۲  
پذیرش: ۶ اسفند ۱۴۰۲

### کلیدواژگان:

تولید افزایشی  
لایه‌نشانی با توزیع مستقیم انرژی  
کنترل هندسه‌ی روکش  
پردازش تصویر  
اسکن لیزر خطی

### چکیده

در این پژوهش به بررسی لیزر و کاربرد آن در تولید افزایشی پرداخته می‌شود. تولید افزایشی فرایندی است که در آن یک قطعه سه‌بعدی به صورت لایه‌لایه و از پائین به بالا ساخته می‌شود. پیشرفت‌هایی که در این فرایند قدرتمند و امیدوارکننده وجود داشته، باعث افزایش تقاضا برای کاربردهای آن در صنعت شده است. این در حالی است که کنترل هندسه‌ی ماده‌ی رسوب‌گذاری شده در طول پروسه‌ی تولید افزایشی، همچنان یک مشکل بزرگ است. کنترل هندسی و انطباق بر هندسه‌ی هدف، از موضوعات کلیدی در فرایند ساخت افزایشی هستند. هدف از این پژوهش، بدست آوردن اطلاعات هندسی پروفیل سه‌بعدی مسیر رسوب‌گذاری‌شده، در روش لایه‌نشانی با استفاده از توزیع مستقیم انرژی (DED) است. به کمک تصویربرداری از برخورد خط لیزر با سطح روکش و استخراج این خط توسط روش‌های پردازش تصویر، هندسه‌ی یک مقطع از روکش بدست می‌آید. سپس با اعمال این مراحل به تمامی مقاطع روکش و در کنار هم قرار دادن تصاویر، یک پروفیل سه‌بعدی از کل سطح روکش ساخته می‌شود. درستی این روش با استفاده از تطابق تصویر خروجی الگوریتم ارائه شده برای یک سطح مقطع و تصویر میکروسکوپی از همان سطح مقطع، بررسی می‌شود. نتیجه‌ی مقایسه‌ی این دو تصویر نشان می‌دهد که مقدار خطا در عرض ۰/۲۹ میلی‌متر و در ارتفاع ۰/۰۷- میلی‌متر است که این مقدار خطا در محدوده‌ی خطای معمول تعریف شده توسط دستورالعمل‌های ISO می‌باشد.

## Three-Dimensional geometry profile extraction of deposits using linear laser scanning in the directed energy deposition additive manufacturing method

Sara Esfandiari Ghollezu<sup>1</sup>, Mohammad Hossein Farshidianfar<sup>2\*</sup>, Sina Nejati Eghteda<sup>3</sup>

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh, United States

\* Corresponding Author's Email: farshidianfar@um.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 17 January 2024  
Accepted: 25 February 2024

### Keywords:

Additive Manufacturing  
Directed Energy Deposition  
Deposition Geometry Control  
Image Processing  
Laser Line Scanning

### Abstract

This research is focused on the examination of laser and its application in additive manufacturing. Additive manufacturing is a process in which a three-dimensional model is manufactured layer by layer and from the bottom up. Advances in this powerful and promising process have resulted in a rise in the demand for its applications in the industry. However, controlling the geometry of the deposited material throughout the additive manufacturing process remains a significant challenge. Geometric control and correspondence with the target geometry are key subjects in the additive manufacturing process. This research aims to obtain geometric data of the three-dimensional profile in deposition using the Direct Energy Deposition (DED) method. By imaging the interface of a laser line and the surface of the coating and extracting the resulting line using image processing methods, the profile of one section of the coating is obtained. By applying the same steps to all of the coating's sections and stacking the images, a three-dimensional profile of the coating's profile is constructed. By checking the correspondence between the proposed algorithm's output image and a microscopic image of the same section, the accuracy of this method is assessed. The result of the comparison between these two images indicates an error of 0.29 mm in width and -0.07 mm in height, falling within the range of error defined by ISO guidelines.

### Please cite this article using:

Esfandiari Ghollezu S, Farshidianfar MH, Nejati Eghteda S. Three-Dimensional geometry profile extraction of deposits using linear laser scanning in the directed energy deposition additive manufacturing method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 September 23;10(7):17-25. doi: 10.22034/IJME.2024.435811.1919 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

یکی از قدرتمندترین و پیشرفته‌ترین حوزه‌های تکنولوژی در عصر حاضر مربوط به لیزر است. امروزه شاهد کاربردهای روزافزون این تکنولوژی در صنعت هستیم. این کاربردها شامل نشانه‌گذاری، برش‌کاری، جوش‌کاری، تولید افزایشی، سخت‌کاری و پوشش‌دهی می‌باشند. در این پژوهش به بررسی لیزر و کاربرد آن در تولید افزایشی پرداخته می‌شود.

تولید افزایشی که با نام پرینت سه‌بعدی نیز شناخته شده‌است، فرایندی است که در طی آن مواد جهت ساخت یک قطعه‌ی سه‌بعدی، لایه به لایه بر روی یکدیگر نشانداده می‌شوند. این فرایند برای ساخت بسیاری از مواد از جمله قطعات پلیمری، فلزات و سرامیک‌ها کاربرد دارد. به ساخت قطعات فلزی با استفاده از فرایند تولید افزایشی، تولید افزایشی فلزی گفته می‌شود که در ساخت قطعات پیشرفته در زمینه‌های پزشکی، انرژی، اتوماسیون و صنایع هوافضا کاربرد دارد [۱]. پیشرفت‌هایی که در تولید افزایشی وجود داشته، باعث به‌وجود آمدن تقاضای بسیاری برای کاربردهای آن شده‌است. با این وجود، همچنان چالش‌های بسیاری در این زمینه وجود دارد. از جمله‌ی این چالش‌ها می‌توان به کیفیت قطعات ساخته شده و سرعت ساخت آن‌ها اشاره کرد [۲]. مسئله‌ی کنترل هندسه‌ی لایه‌ی رسوب‌گذاری شده، همچنان یک چالشی بزرگ است که تاثیر بسیار زیادی بر کیفیت و سرعت ساخت قطعات با استفاده از فرایند تولید افزایشی را دارد. در نتیجه اخیراً پژوهش‌هایی در این زمینه نیز صورت گرفته‌است. مطالعات اندکی وجود دارند که با استفاده از لیزر خطی، دوربین و میکروسکوپ دیجیتال به بررسی هندسه‌ی روکش پرداخته‌اند [۳]. هرالیک و همکاران [۴] با استفاده از یک سیستم تصویربرداری شامل ۲ دوربین و یک لیزر خطی، ارتفاع و عرض روکش را جهت کنترل استحکام قطعه‌ی سه‌بعدی ساخته شده با استفاده از رسوب سیم فلزی، بررسی کردند. لی و همکاران [۵] در روش تولید افزایشی مبتنی بر بستر پودر، هندسه‌ی ماده‌ی رسوب‌گذاری شده را با استفاده از روش‌های تشخیص بینایی و دو عدد دوربین، به صورت آنلاین بررسی کردند. با استفاده از این روش، داده‌های سه‌بعدی ناحیه‌ی ذوب را جهت تشخیص بی‌نظمی‌ها و کنترل عیوب بدست آوردند. فائز و همکاران [۶] خطای ارتفاع لایه‌ی رسوب‌گذاری شده را در فرایند تولید افزایشی اکستروژن، با استفاده از یک میکروسکوپ دیجیتال و یک دوربین استریو به صورت آنلاین بررسی کردند. بوریش و همکاران [۷] با هدف شناسایی و کاهش عیب در فرایند تولید افزایشی، از یک پروفیلومتر لیزری و یک دوربین حرارتی استفاده کردند. نتیجه‌ی این پژوهش، کنترل ارتفاع لایه‌های رسوب‌گذاری شده به صورت خودکار بود. لین و همکاران [۸] یک سیستم کنترل کیفیت آنلاین بر اساس اسکن لیزر جهت تشخیص عیوب در فرایند تولید افزایشی اکستروژن معرفی کردند. در این سیستم، عیوب با مقایسه‌ی ابر نقاط سه‌بعدی حاصل از اسکن لیزری و سطح ایده‌آل مدل CAD، استخراج شده‌اند. بینگا و همکاران [۳] با استفاده از سیستمی شامل لیزر خطی و اسکتر، یک روش آنلاین تخمین هندسه‌ی لایه‌ی رسوب‌گذاری شده در تولید افزایشی لایه‌نشانی با استفاده از توزیع مستقیم انرژی، ارائه دادند. آن‌ها این روش را برای کنترل ارتفاع رسوب تک‌لایه و چندلایه بررسی کردند.

در این پژوهش، روشی آنلاین جهت بررسی شکل هندسی لایه‌ی رسوب‌گذاری شده در فرایند تولید افزایشی DED معرفی شده‌است. طبق این روش، از کل سطح روکش همراه با لیزر خطی تاییده شده بر آن، تصویربرداری شده‌است؛ سپس این تصاویر جهت بازسازی شکل سه‌بعدی روکش، در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. درستی این روش با مقایسه‌ی منحنی خروجی از پردازش تصاویر برای یک سطح مقطع از روکش و عکس میکروسکوپی از همان سطح مقطع، انجام شده‌است. قابل ذکر است که تمامی پردازش‌های تصاویر این پژوهش، توسط کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته‌است.

## ۲- روش تحقیق

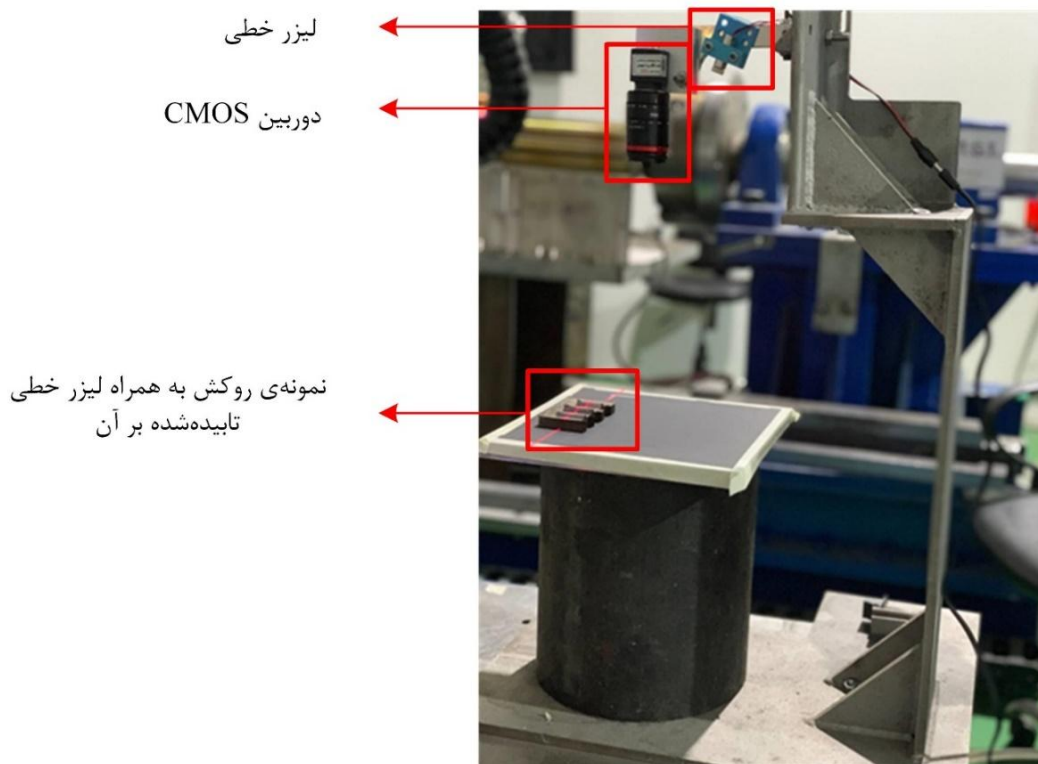
معرفی روش نظارت هندسی آنلاین شامل بررسی سه بخش سیستم تصویربرداری، سیستم پردازش تصاویر و مقایسه‌ی تصاویر خروجی با هندسه‌ی اصلی است. در بخش تصویربرداری به بررسی متغیرهایی می‌پردازیم که بر کیفیت عکس گرفته‌شده تاثیرگذارند. از آنجایی که کیفیت عکس ورودی به سیستم پردازش تصویر تأثیر بسزایی در دقت و وضوح تصویر خروجی نهایی دارد، تنظیم پارامترهای مؤثر بر تصویربرداری، حائز اهمیت بسیار است. این پارامترها شامل نوع دوربین و لنز، توان لیزر خطی، فاصله‌ی دوربین از قطعه‌کار، زاویه‌ی دوربین با قطعه‌کار، میزان نور محیط و نرم‌افزار استفاده شده جهت برقراری ارتباط بین دوربین و کامپیوتر می‌باشند.

سپس در بخش سیستم پردازش تصویر، تمامی اعمالی که برای تبدیل عکس خام از یک سطح مقطع روکش به عکس خروجی نهایی از همان سطح مقطع انجام شده، بررسی می‌شوند. در نهایت تصویر خروجی از کد، با عکس میکروسکوپی از همان سطح مقطع مقایسه شده تا درستی الگوریتم اجرا شده، مشخص شود.

### ۳- مواد، تجهیزات و روش‌ها

یکی از مسائل بسیار مهم در بدست آوردن هندسه‌ی دقیق روکش، روش تصویربرداری از روکش است. این تصویربرداری باید به گونه‌ای باشد که هم اطلاعات مورد نیاز ما از قبیل ارتفاع، عرض و شکل انحنای روکش را به درستی تأمین کند و هم به رزولوشن مورد نیاز دست پیدا کند. سیستم تصویربرداری در این پژوهش شامل یک عدد دوربین CMOS، یک عدد لیزر خطی ۵۰۰ میلی‌وات و بستری جهت نگهداری این قطعات است.

در این بخش ابتدا به بررسی تأثیر سیستم تصویربرداری در تأمین اطلاعات هندسی در روکش پرداخته شده؛ سپس پارامترهای مؤثر در کیفیت تصویر مورد بحث قرار گرفته‌است و در انتها الگوریتم پردازش تصویر استفاده شده معرفی شده است. در شکل ۱ سیستم تصویربرداری این پژوهش نشان داده شده‌است.



شکل ۱ سیستم تصویربرداری استفاده شده

### ۳-۱- بدست آوردن اطلاعات هندسی با استفاده از سیستم تصویربرداری

برای بدست آوردن ابعاد هندسی هر مقطع از یک روکش، باید دوربین به موازات همان سطح مقطع قرار بگیرد. اما امکان اینگونه قرار گرفتن دوربین در سیستم تصویربرداری وجود ندارد. بنابراین دوربین با زاویه‌ای نسبت به افق قرار گرفته و سپس نگاهی جهت هماهنگ کردن مختصات دوربین و مختصات روکش با یکدیگر انجام می‌شود. برای اعمال این نگاهی از یک ماتریس انتقال، به صورتی که در رابطه‌ی ۱ تعریف شده‌است، استفاده می‌شود [۹].

$${}^G P = {}^G T \times {}^L P \quad (1)$$

که در این رابطه  $G_P$  نشان دهنده‌ی یک بردار در دستگاه مختصات عمومی،  $L_P$  نشان دهنده‌ی بردار دستگاه مختصات محلی و  $G_T$  ماتریس تبدیل از مختصات محلی به مختصات عمومی است. ماتریس تبدیل که ترکیبی از ماتریس‌های دوران و انتقال است؛ در حالتی که دورانی حول محور  $X$  و انتقال در راستای  $Z$  داشته باشیم، به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود [۱۰]:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & u_Z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

حال باتوجه به زاویه‌ی دوربین نسبت به روکش و فاصله‌ی عمودی آن، می‌توان پارامترهای ماتریس تبدیل را بدست آورد و سپس برای اعمال نگاهت از آن استفاده کرد.

### ۳-۲- تأثیر لنز و دوربین بر ویژگی‌های تصویر

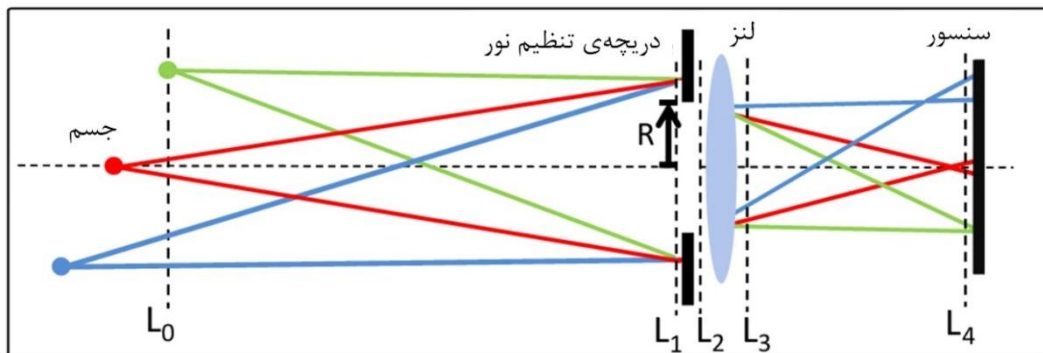
یکی از پارامترهای مهم در میزان دقت تصویر خروجی، رزولوشن<sup>۱</sup> آن است. رزولوشن به کمترین فاصله‌ی بین دو نقطه از جسم گفته می‌شود که توسط سیستم تصویربرداری قابل تشخیص است و واحد آن lp/mm می‌باشد. این واحد نشان دهنده‌ی تعداد جفت پیکسل‌ها<sup>۲</sup> در واحد میلی‌متر است. این پارامتر یکی از قابلیت‌های سیستم تصویربرداری است که با استفاده از رابطه‌ی ۳ از طریق مقدار رزولوشن دوربین و بزرگنمایی سیستم، بدست می‌آید [۱۱].

$$\text{ImRe} = \frac{\text{CamRe}}{m} (lp/mm) \quad (3)$$

که در این رابطه  $\text{ImRe}$  نشان دهنده‌ی رزولوشن تصویر،  $\text{CamRe}$  نشان دهنده‌ی رزولوشن دوربین و  $m$  نشان دهنده‌ی بزرگنمایی است. بزرگنمایی به نسبت اندازه‌ی تصویر به اندازه‌ی جسم گفته می‌شود. این مقدار با استفاده از فاصله‌ی جسم از لنز ( $WD$ ) و فاصله‌ی تصویر از لنز ( $d$ ) طبق رابطه‌ی ۴ بدست می‌آید:

$$m = \frac{d}{WD} \quad (4)$$

در شکل ۲ نحوه‌ی تشکیل تصویر بر روی سنسور دوربین نشان داده شده‌است. در این شکل تصویر بر روی سنسور تشکیل شده و فاصله‌ی بین لنز و تصویر،  $d$  و فاصله‌ی بین جسم تا لنز  $WD$  نام دارد که همان فاصله‌ی کاری است.



شکل ۲ نحوه‌ی تشکیل تصویر در عدسی دوربین [۱۲]

در سیستم فیزیکی، مقدار  $WD$  با استفاده از اندازه‌گیری فاصله‌ی جسم تا خارجی‌ترین سطح لنز بدست می‌آید. مقدار  $f$  نیز فاصله‌ی کانونی است که جزو مشخصات لنز می‌باشد. اما بدست آوردن مقدار  $d$  با استفاده از مشخصات دوربین و لنز، کاری پیچیده و زمان‌بر است؛ به همین دلیل مقدار  $d$  با استفاده از ارتباط بین  $WD$  و  $f$  با استفاده از رابطه‌ی ۵ به صورت زیر بدست می‌آید [۱۲]:

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{f} - \frac{1}{WD} \quad (5)$$

<sup>1</sup> Resolution

<sup>2</sup> Line-Pairs

در نتیجه با استفاده از روابط ۲، ۳ و ۴ می‌توان رزولوشن تصویر را بدست آورد. در این پژوهش مقدار بزرگ‌نمایی ۰/۳۶۳، رزولوشن دوربین ۸۵/۳۴۱p/mm و در نتیجه رزولوشن تصویر/۰۹۱p/۲۳۵ می‌باشد. این عدد به این معناست که هر میلی‌متر از تصویر روکش، توسط ۲۳۵/۰۹ جفت پیکسل نمایش داده می‌شود یا به عبارت دیگر، هر جفت پیکسل ۴/۲۵ میکرومتر از تصویر را دربرمی‌گیرد.

### ۳-۳- سایر عوامل مؤثر بر کیفیت تصویر

علاوه بر ویژگی‌های لنز و دوربین، عوامل دیگری همچون توان لیزر، مقدار نور محیط، کیفیت سطح قطعه‌کار، نرم‌افزار استفاده شده جهت برقراری ارتباط بین دوربین و کامپیوتر نیز بر کیفیت تصویر خروجی تأثیرگذارند. در این بخش توضیح کوتاهی درمورد این مسائل گفته شده‌است.

**توان لیزر:** با توجه به اهمیت سطح روشنایی هنگام پردازش تصاویر جهت استخراج خط لیزر، میزان توان لیزر تأثیر مستقیمی بر کیفیت منحنی نهایی دارد. در نتیجه لیزرهایی با توان بالاتر از ۵۰ میلی‌وات، برای فاصله‌ای کاری در حدود ۳۰ سانتی‌متر، مناسب می‌باشند. توان لیزر استفاده شده در این پژوهش ۵۰۰ میلی‌وات است که به همین دلیل استخراج خط لیزر به راحتی انجام شد.

**مقدار نور محیط:** این مسئله نیز به دلیل اهمیت سطح روشنایی در پردازش تصویر قابل توجه است. هرچه محیط تصویربرداری تاریک‌تر باشد، پردازش تصاویر راحت‌تر است. همچنین اگر نوری در محیط وجود دارد و امکان تاریک سازی کامل وجود ندارد، حتماً باید این نور به صورت یکنواخت تابیده شود، تا بتوان فیلتری یکسان به کل قطعه اعمال کرد. در این پژوهش امکان تاریک سازی کامل وجود نداشت، در نتیجه از یک محفظه جهت یکنواخت کردن نور استفاده شد.

**کیفیت سطح قطعه‌کار:** بازتاب نور از سطح قطعه‌کار، بر استخراج خط لیزر تأثیر بالایی دارد. این تأثیر شامل میزان بازتاب نور از سطح روکش و وجود نویز در سطح قطعه‌کار است. هرچه سطح روکش براق‌تر باشد، استخراج خط لیزر دشوارتر است. در نتیجه استخراج خط لیزر برای روکش‌هایی از جنس موادی چون تیتانیوم درجه ۵ که بازتاب نور بالایی دارند، بسیار مشکل است. همچنین وجود نویزهایی مانند رنگ‌های روشن، زدگی و ساییدگی در سطح قطعه‌کار، باعث به وجود آمدن بازتاب‌های نامنظم می‌شود و استخراج خط لیزر را با مشکلاتی مواجه می‌کند. جنس روکش استفاده شده در این پژوهش اینکونل ۶۲۵ است. همچنین مشکلات سطحی تا حد امکان رفع شده‌است.

**نرم افزار استفاده شده جهت برقراری ارتباط بین دوربین و کامپیوتر:** در این پژوهش، جهت انتقال تصاویر گرفته شده توسط دوربین، به کامپیوتر از نرم‌افزار SpinView استفاده شده‌است. همچنین با کمک این نرم‌افزار می‌توان تنظیماتی از قبیل کنترل میزان نور را قبل از تصویربرداری اعمال کرد که این کار باعث کاهش حجم پردازشی می‌شود.

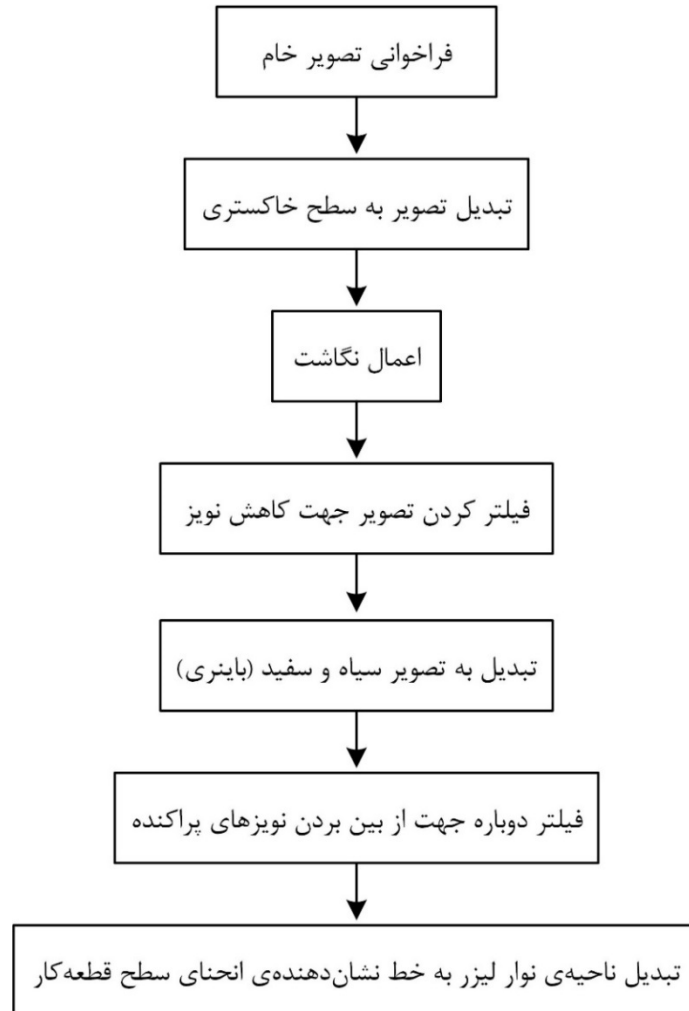
### ۳-۴- الگوریتم پردازش تصویر

جهت ساخت شکل سه‌بعدی، از تمامی مقاطع روکش تصویربرداری می‌شود. سپس بر روی تک تک مقاطع، پردازش صورت گرفته و این تصاویر در راستای بعد سوم در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. در این پژوهش جهت تصویربرداری دقیق از مقاطع سطح روکش، دوربین و لیزر، ثابت هستند و حرکتی خطی به روکش اعمال می‌شود. به منظور اجرای این هدف از یک سیستم حرکت خطی استفاده شده‌است که قابلیت تبدیل حرکت دورانی به حرکت خطی را داراست.

با استفاده از این قابلیت، یک حرکت با گام ۰/۵ میلی‌متر به روکش اعمال شده‌است. مقدار فاصله‌ی بین سطح مقطعی که از آن‌ها تصویربرداری شده‌است حائز اهمیت است، چرا که این فاصله جهت تشکیل تصویر سه‌بعدی روکش، در الگوریتم پردازش تصویر نیز مورد نیاز است. پس از تنظیم دقیق پارامترهای دوربین و لنز و تصویربرداری مناسب از روکش، حال باید تصاویر گرفته شده پردازش شوند.

در شکل ۳ الگوریتم معرفی شده جهت استخراج تصویر دو بعدی از انحنای یک سطح مقطع، نشان داده شده‌است. همانطور که در الگوریتم مشخص است پس از فراخوانی تصویر و اعمال نگاشت، فیلترهایی بر تصویر اعمال می‌شود. این فیلترها جهت کاهش نویزهای موجود در تصویر که حاصل شرایط محیطی و سیستم تصویربرداری هستند، اعمال می‌شوند. انتخاب هر فیلتر با توجه به نوع نویز موجود انجام می‌شود. در نهایت پس از حذف تمامی نویزها و استخراج نوار لیزری، نوار لیزری تبدیل به یک خط می‌شود که نشان‌دهنده‌ی مرز

سطح مقطع است. با استفاده از بدست آوردن اطلاعات این منحنی خروجی، مشخصات هندسی یک سطح مقطع از روکش بدست می‌آید. این مشخصات شامل عرض و ارتفاع آن سطح مقطع هستند.

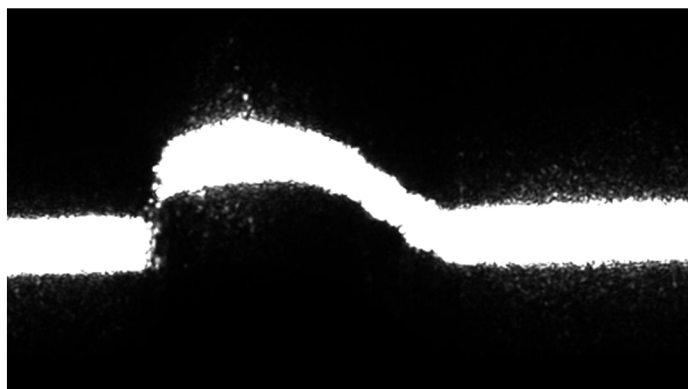


شکل ۳ الگوریتم بدست آوردن شکل انحنا‌ی یک سطح مقطع از روکش

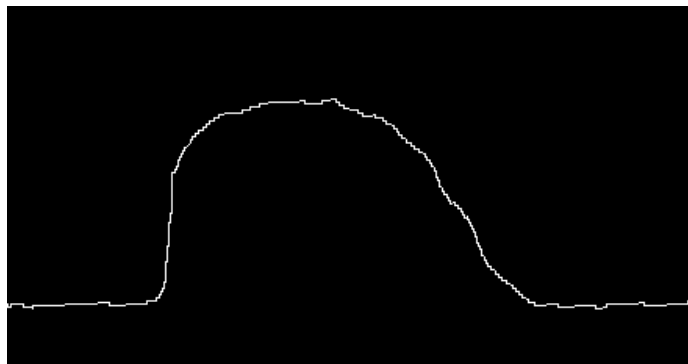
#### ۴- نتایج و بحث

در شکل ۴ تصاویر ورودی به الگوریتم پردازش تصویر معرفی شده و خروجی از آن، نشان داده شده‌اند. قسمت الف تصویر خامی که از روکش گرفته شده را نشان می‌دهد. در قسمت ب منحنی حاصل از پردازش تصویر این سطح مقطع نشان داده شده‌است. سپس در بخش ج منحنی خروجی، جهت صحت‌سنجی با تصویر میکروسکوپی از همان سطح مقطع مقایسه شده‌است. همانطور که در شکل مشخص است، انطباق خوبی صورت گرفته‌است. بررسی دقیق‌تر این مسئله در بخش نتیجه‌گیری انجام شده‌است.

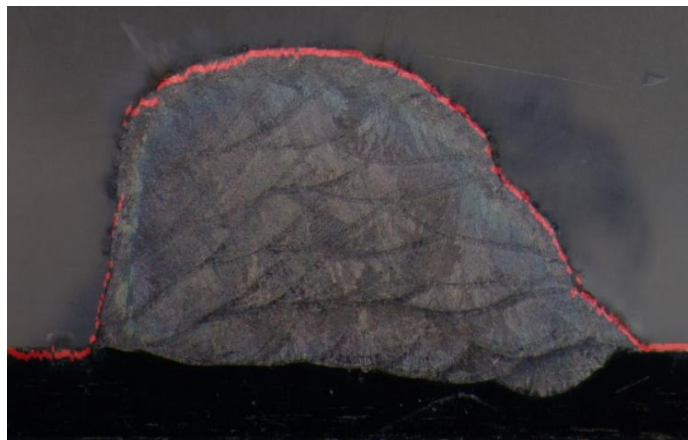
پس از بدست آوردن شکل منحنی برای یک سطح مقطع، الگوریتم پردازش تصویر مذکور، جهت تشکیل تصویر سه‌بعدی روکش بر تمام مقاطع اعمال شده و تصاویر خروجی در راستای بعد سوم در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. تصویر سه‌بعدی بدست آمده از این روش در شکل ۴ قسمت د نشان داده شده‌است.



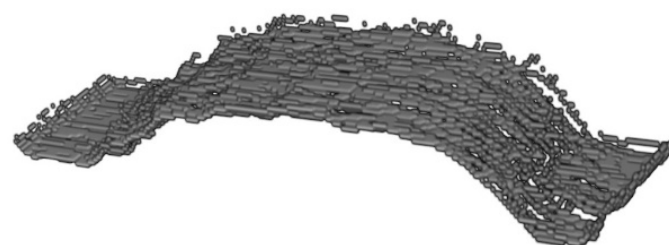
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۴ تصاویر ورودی به الگوریتم معرفی شده و خروجی از آن الف) تصویر گرفته شده از یک سطح مقطع از روکش، ب) منحنی بدست آمده از پردازش یک سطح مقطع از الگوریتم معرفی شده، ج) مقایسه‌ی تصویر میکروسکوپی از یک سطح مقطع با منحنی بدست آمده از الگوریتم معرفی شده (خط قرمز)، د) تصویر سه‌بعدی از روکش

در شکل قبلی تصویر بدست آمده از این الگوریتم به صورت کیفی با تصویر میکروسکوپی سطح مقطع مقایسه شد. در جدول ۱ اندازه‌ی عرض و ارتفاع روکش و منحنی بدست‌آمده از روش فوق ثبت شده‌است.

جدول ۱ مقایسه‌ی عرض و ارتفاع روکش و منحنی خط لیزر

دقت (درصد)	مقدار خطا	خط لیزر	روکش	
۹۵/۵۷	-۰/۲۹	۶/۸۴	۶/۵۵	عرض (میلی‌متر)
۹۸/۰۶	۰/۰۷	۳/۵۵	۳/۶۲	ارتفاع (میلی‌متر)

همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار خطا در عرض ۰/۲۹ میلی‌متر و در ارتفاع ۰/۰۷ میلی‌متر است. این مقدار خطا در محدوده‌ی خطای معمول تعریف شده توسط دستورالعمل‌های ISO برای ارتفاع ( $\pm 0/35$  میلی‌متر الی  $\pm 0/09$  میلی‌متر) و عرض ( $\pm 0/1$  میلی‌متر الی  $\pm 0/8$  میلی‌متر) می‌باشد [۳]. این مسئله نشان‌دهنده‌ی موثر بودن روش ارائه‌شده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک روش پردازش تصویر جهت بدست آوردن اطلاعات هندسی سه‌بعدی روکش در روش تولید افزایشی لایه‌نشانی با استفاده از توزیع مستقیم انرژی، معرفی شد. در این روش با تاباندن یک لیزر خطی بر سطح روکش، از مقاطع مختلف آن تصویربرداری و سپس با استخراج خط لیزر از این تصاویر توسط روش‌های پردازش تصویر، شکل منحنی هر سطح مقطع بدست آمد. روشی که در این پژوهش ارائه شد، قابلیت پردازش تصویر در حالت آفلاین را دارد. باتوجه به دقت بالای این روش، در پژوهش‌های آتی می‌توان آن را برای حالت آنلاین و حتی سایر روش‌های تولید افزایشی نیز گسترش داد.

## تقدیر و تشکر

پژوهش حاضر به لطف حمایت‌های مالی و معنوی شرکت دانش‌بنیان پژوهشی-صنعتی طهاقالب توس فراهم شده‌است. بدین وسیله نگارندگان از تمامی کارکنان واحد مهندسی و لیزر کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## References

- [1] Kaji F, Nguyen-Huu H, Budhwani A, Narayanan JA, Zimny M, Toyserkani E. A deep-learning-based in-situ surface anomaly detection methodology for laser directed energy deposition via powder feeding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;81:624-37. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.06.046
- [2] Hooshmand M. J, Mansour S. Investigating the effect of build orientation on surface roughness and build time using Fused Deposition Modelling. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021;7(12):37- 53. [In Persian]
- [3] Binega E, Yang L, Sohn H, Cheng JC. Online geometry monitoring during directed energy deposition additive manufacturing using laser line scanning. *Precision Engineering*. 2022;73:104-14. doi: 10.1016/j.precisioneng.2021.09.005
- [4] Heralić A, Christiansson A-K, Ottosson M, Lennartson B. Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010;48(4):478-85. doi: 10.1016/j.optlaseng.2009.08.012
- [5] Li Z, Liu X, Wen S, He P, Zhong K, Wei Q, et al. In situ 3D monitoring of geometric signatures in the powder-bed-fusion additive manufacturing process via vision sensing methods. *Sensors*. 2018;18(4):1180. doi: 10.3390/s18041180
- [6] Faes M, Abbeles W, Vogeler F, Valkenaers H, Coppens K, Goedemé T, Ferraris E. Process monitoring of extrusion based 3D printing via laser scanning. arXiv preprint arXiv:161202219. 2016. doi: 10.13140/2.1.5175.0081
- [7] Borish M, Post BK, Roschli A, Chesser PC, Love LJ, Gaul KT. Defect identification and mitigation via visual inspection in large-scale additive manufacturing. *Jom*. 2019;71:893-9. doi: 10.1007/s11837-018-3220-6



- [8] Lin W, Shen H, Fu J, Wu S. Online quality monitoring in material extrusion additive manufacturing processes based on laser scanning technology. *Precision Engineering*. 2019;60:76-84. doi: [10.1016/j.precisioneng.2019.06.004](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.06.004)
- [9] Khalili Kh, Emam S. M. Dimensional control of sand particles based on the Iranian National Standard Organization using image processing technique. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2018;5(3):52-62. [In Persian]
- [10] Craig JJ. *Introduction to robotics*: Pearson Educacion; 2006.
- [11] Mittone A, Manakov I, Broche L, Jarnias C, Coan P, Bravin A. Characterization of a sCMOS-based high-resolution imaging system. *Journal of synchrotron radiation*. 2017;24(6):1226-36. doi: [10.1107/s160057751701222x](https://doi.org/10.1107/s160057751701222x)
- [12] Zhou C, Nayar SK. Computational cameras: convergence of optics and processing. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2011;20(12):3322-40. doi: [10.1109/TIP.2011.2171700](https://doi.org/10.1109/TIP.2011.2171700)