

Implementing Thermal Image Processing Techniques for Enhancing the Detectability of Defects in Thermography of Additive Manufacturing Components

Pouria Meshkizadeh¹, Mohammadreza Farahani^{2*}, Mojtaba Rezaee Hajideh³, Mohammad Heidari-Rarani⁴

1- Master of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran

2- Associate Professor, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran

3- PhD. Candidate, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran

4- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan

* mrfarahani@ut.ac.ir

Abstract

Nowadays, as the application of additive manufactured equipment is increasing in the industry, an appropriate inspection method for identifying defects of these products has become a pressing need. In this contribution, a study on inspection of the artificial defects of an additive manufactured specimen via thermography was carried out. A projector with 2KW in power was utilized as the heating source. The temperature of the sample was recorded by a thermal camera. Moreover, the camera kept recording the sample's temperature for a while after that heating source was shut down. The best frame of raw thermal data was selected. To enhance the thermal raw data in case of the contrast between defective and sound regions and the number of detectable defects, two well-known thermal image processing methods, namely, Pulsed Phase Thermography (PPT) and Principle Component Analysis (PCA), were applied to the initial data. It was illustrated that all defects could be detected through processed images, whereas only 18 defects out of 20 could be revealed in the best frame of raw thermal data. Furthermore, for evaluating the ability of each technique to improve the contrast, the SNR parameter was adopted. According to the concluded data, the processed image via PCA with SNR average equal to 14.75 had the highest amount. This amount was almost three times higher than that of the best frame of initial thermal data.

Keywords: Nondestructive Tests, Thermography, Thermal image processing, Additive manufacturing.

به کارگیری روش های پردازش تصاویر حرارتی به منظور بهبود شناسایی عیوب قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی

یوریا مشکی زاده^۱، محمدرضا فراهانی^{۲*}، مجتبی رضایی حاجیده^۳، محمد حیدری رارانی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

۳- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان

* mrfarahani@ut.ac.ir

چکیده

با توجه به توسعه روزافزون به کارگیری قطعات و تجهیزات ساخته شده به روش تولید افزایشی در صنایع مختلف، بهره گیری از روش های مناسب بازرسی این قطعات، به منظور بررسی کیفیت تولید و شناسایی عیوب، اهمیت بسزایی یافته است. در این پژوهش یک نمونه پلیمری ساخته شده به روش تولید افزایشی از جنس PLA به روش دمانگاری مورد بازرسی قرار گرفت. یک منبع حرارتی نوری نمونه را گرم نمود. تصاویر حرارتی در مدت زمان روشن بودن منبع حرارتی و مدتی پس از قطع منبع توسط دوربین حرارتی ثبت شد. به منظور بهبود تصاویر حرارتی، دو روش پردازش پر کاربرد به نام های پردازش فازی پالسی (PPT) و تجزیه و تحلیل مولفه اصلی (PCA) به کار گرفته شدند. پس از اعمال این روش ها به داده های منتخب خام حرارتی، مشخص شد که در حالی که تنها ۱۸ عیب از ۲۰ عیب موجود در نمونه از طریق بهترین فریم خام حرارتی قابل تشخیص است، همه ۲۰ عیب موجود در نمونه از طریق تصاویر پردازش شده قابل شناسایی هستند. برای مقایسه کمی تصاویر پردازش شده از نظر بهبود وضوح عیوب که تاثیر مستقیمی بر سهولت در شناسایی آن ها دارد، پارامتر نسبت سیگنال به نویز (SNR) مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به بالاتر بودن میزان SNR در کلیه تصاویر پردازش شده از بهترین تصویر خام حرارتی، مشخص شد که کلیه روش های پردازش بکار گرفته شده شناسایی عیوب را تسهیل می نمایند. همچنین مشاهده شد که روش PCA بالاترین میزان میانگین SNR را داراست. این مقدار برای تصویر PCA که معادل ۱۴.۷۵ است، تقریباً سه برابر میزان میانگین SNR برای بهترین تصویر خام حرارتی، معادل ۴.۷۵ بود.

واژگان کلیدی: آزمون غیرمخرب، دمانگاری، پردازش تصاویر حرارتی، تولید افزایشی.

۱- مقدمه

باشد و در صورت استفاده از این قطعات معیوب حوادث ناگواری رخ بدهد [۸,۷]. بازرسی به کمک آزمون های غیر مخرب از جمله روش های پر کاربرد در بازرسی نمونه ها ساخته شده به روش تولید افزایشی است. از جمله تحقیقات انجام شده در این زمینه به پژوهش استرانتزا^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵ می توان اشاره کرد. در پژوهش نامبرده محققان به دنبال بررسی قابلیت سیستم پایش وضعیت طراحی شده برای شناسایی عیوب هستند. بدین منظور تعدادی از روش های بازرسی غیر

ساخت نمونه به روش تولید افزایشی^۱ یک روش نسبتاً مدرن تولید است که در آن نمونه ها به صورت پیوسته و بر اساس یک طرح کامپیوتری تولید می شوند [۱]. تولید افزایشی این قابلیت را دارد که قطعات با هندسه پیچیده را که امکان ساخت آن ها به کمک روش های سنتی وجود ندارد، با سرعت بالا تولید نماید [۳,۲]. این روش تولید در صنایع مختلف از جمله خودرو، عمران، پزشکی کاربردهای فراوانی دارد [۶,۵,۴]. همانند سایر روش های تولید، قطعات تولید شده با فناوری تولید افزایشی می تواند دارای عیوب

² Strantza

¹ Additive Manufacturing (AM)

می‌شود. برای حل این مشکلات روش‌های پردازش تصویر متفاوتی پیشنهاد شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش تجزیه و تحلیل مولفه اصلی^{۱۱}، پردازش فازی پالسی^{۱۱}، بازسازی پاسخ حرارتی^{۱۲} و رگرسیون حداقل مربعات جزئی^{۱۳} اشاره کرد [۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۶].

با توجه به توسعه روزافزون کاربرد قطعات ساخته شده به روش تولید افزایشی در صنایع مختلف، پیدا کردن روشی دقیق و سریع برای بازرسی این نوع قطعات امری واجب تلقی می‌شود. از این رو، این پژوهش به دنبال بهبود کیفیت نتایج حاصل از بازرسی یک نمونه پلیمری از جنس PLA و ساخته شده با تکنیک تولید افزایشی، به کمک روش دمانگاری است. بدین منظور پس از بررسی تصاویر حرارتی اولیه و انتخاب بهترین تصویر حرارتی خام، دو روش پردازش داده‌های حرارتی به اطلاعات ثبت شده اعمال شد. بهترین تصاویر پردازش شده به همراه بهترین تصویر خام حرارتی از نظر تعداد عیوب قابل شناسایی و سهولت شناسایی عیوب با یکدیگر مقایسه شدند.

۲- ساخت نمونه و تجهیزات آزمایش

۲-۱- ساخت نمونه

یک نمونه مستطیلی شکل به ابعاد 170×200 میلی‌متر از جنس PLA به روش تولید افزایشی ساخته شد. برای این نمونه که به روش ساخت پیوسته^{۱۴} تولید شده از فیلامنت-های PLA سفید رنگ ساخت شرکت YS استفاده شده است. سایر اطلاعات مربوط به ساخت نمونه در جدول ۱ موجود است. در این نمونه تعدادی عیوب مربعی شکل به صورت مصنوعی در نظر گرفته شد. نحوه قرارگیری و ابعاد این عیوب در شکل ۱ نمایش داده شده است. ضخامت هر ناحیه معیوب برابر ۱ میلی‌متر بوده و ضخامت کل نمونه ۶ میلی‌متر است.

مخرب از جمله بازرسی به کمک امواج صوتی^۱، مایع نافذ^۲، جریان گردابی^۳ و رادیوگرافی^۴ را برای شناسایی عیوب موجود در قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی به کار گرفتند [۹]. بر اساس نتایج به دست آمده دو روش امواج صوتی و جریان گردابی قابلیت تشخیص عیوب در تمامی نمونه‌ها را دارا بودند. همچنین مشخص شد که کمک روش امواج صوتی نه تنها امکان تشخیص عیوب نهایی وجود دارد، بلکه رشد ترک‌ها و رویش عیوب نیز قابل بازرسی هستند [۹].

یکی از روش‌های پر کاربرد غیر مخرب در حوزه بازرسی قطعات ساخته شده به روش تولید افزایشی، دمانگاری است. از جمله دلایل محبوبیت این روش می‌توان به سرعت بالای بازرسی، غیر تماسی بودن فرآیند و از همه مهم‌تر به دلیل توسعه سریع روش‌های پردازش تصاویر حرارتی که منجر به افزایش قابلیت شناسایی عیوب می‌شود، اشاره نمود [۱۲، ۱۱، ۱۰]. دمانگاری در حوزه تولید افزایشی عمدتاً برای بررسی هندسه و دمای حوضچه مذاب به منظور تخمین عیوبی که در نمونه ممکن است ایجاد شود به کار گرفته می‌شود [۱۳]. از جمله پژوهش‌های صورت گرفته در این رابطه پژوهش آقایان میگلر^۵ و سپالا^۶ در سال ۲۰۱۶ است که با بهره‌گیری از تکنیک دمانگاری منفعل^۷ به دنبال شناسایی عیوب جدایش لایه‌ای در حین فرآیند تولید نمونه به روش تولید افزایشی بودند [۱۴]. به کارگیری روش دمانگاری برای بازرسی قطعات تولید شده نیز در تعدادی از پژوهش‌ها دنبال شده است. در سال ۲۰۱۸ آقای مونتینارو^۸ و همکاران به منظور شناسایی عیوب مصنوعی ایجاد شده در یک نمونه تیتانیومی ساخته شده به روش تولید افزایشی، از روش دمانگاری فعال^۹ با منبع تحریک نوری بهره گرفتند. بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش عیوب تا عمق ۱.۳ میلی‌متر با بهره‌گیری از لیزر با توان ۱.۵ کیلووات قابل شناسایی بودند [۱۵].

با توجه به ماهیت تصاویر حرارتی، این تصاویر همواره دارای مشکلاتی هستند که باعث کاهش قابلیت شناسایی عیوب

⁸ Montinaro

⁹ Active Thermography

¹⁰ Principal Component Analysis (PCA)

¹¹ Pulsed Phased Thermography (PPT)

¹² Thermal Signal Reconstruction (TSR)

¹³ Partial Least Square Regression (PLSR)

¹⁴ Continuous Filament Fabrication (CFF)

¹ Acoustic Emission (AE)

² Penetrant liquid

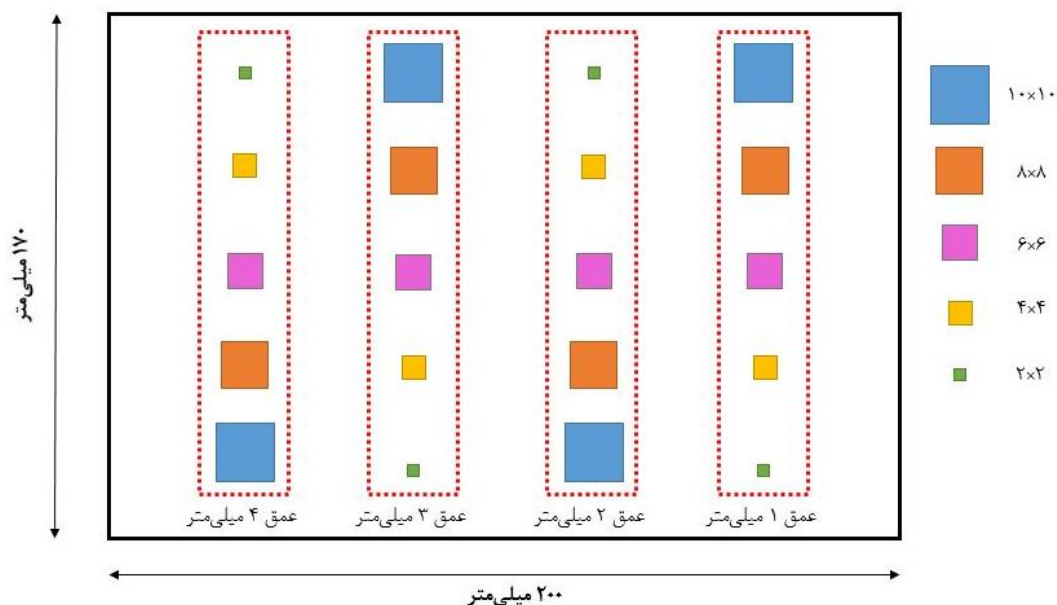
³ Eddy current

⁴ Radiography

⁵ Migler

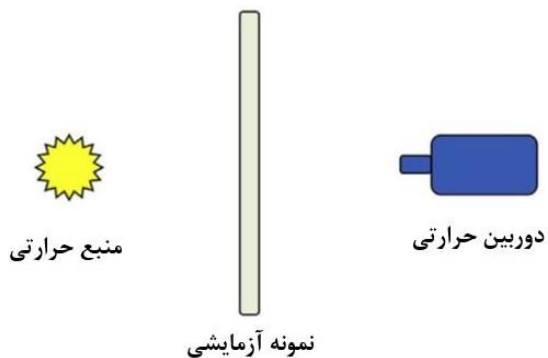
⁶ Seppala

⁷ Passive Thermography



شکل ۱- نحوه قرارگیری عیوب در نمونه

هرتز تنظیم شد. پروژکتور نوری و دوربین در دو سمت قطعه واقع شدند که این نحوه قرارگیری را اصطلاحاً حالت عبوری^۱ می‌نامند. شکل ۲ شماتیک کلی نحوه قرارگیری دوربین، منبع حرارتی و نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نحوه قرارگیری اجزای آزمایش.

۳- روش‌های پردازش تصویر

در این پژوهش برای بهبود کیفیت تصاویر حرارتی از نظر افزایش تعداد و وضوح عیوب قابل‌شناسایی تعدادی از

جدول ۱. اطلاعات فرآیند تولید نمونه

پارامتر	مقدار
سرعت پرینت	۶۰ میلی‌متر بر ثانیه
ضخامت هر لایه	۰.۱۵ میلی‌متر
قطر نازل	۰.۴ میلی‌متر
عرض تزریق	۰.۴ میلی‌متر
ضریب تزریق	٪۱۰۰
دمای پرینت	۲۰۰ درجه سلسیوس

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

در این پژوهش از یک پروژکتور نوری با توان نامی ۲ کیلووات به‌عنوان منبع حرارتی استفاده شد تا نمونه را به مدت ۱۵ ثانیه گرم نماید. به‌منظور تابش یکنواخت منبع حرارتی و ارسال امواج حرارتی به‌کل نمونه به‌صورت یکسان، مرکز منبع حرارتی در راستای مرکز نمونه قرار داده شد. برای ثبت دمای نمونه، دوربین حرارتی Flir A325sc مورد استفاده قرار گرفت. این دوربین با رزولوشن ۳۲۰×۲۴۰، توانایی ثبت دماهای بین ۰ تا ۳۵۰ درجه سلسیوس را دارد. همچنین سرعت تصویربرداری برابر با ۳۰

^۱ Transmission mode

$$A = URV^T \quad (4)$$

مطابق با این رابطه، A ماتریس ورودی، U ماتریسی است که معرف توابع متعامد تجربی^۳، R ماتریس افقی با مقادیر منفرد و V ماتریسی با اطلاعات زمانی است. بازسازی اطلاعات توابع متعامد تجربی امکان حصول تصاویر باقابلیت شناسایی عیوب بالاتر را فراهم می‌سازد [۲۳].

۴- نتایج

نمونه به‌وسیله یک پروژکتور نوری با توان نامی ۲ کیلووات به مدت ۱۵ ثانیه حرارت داده شد. دوربین حرارتی دمای نمونه را در طول مدت روشن بودن منبع ثبت نمود. همچنین علاوه بر این بازه، دوربین به مدت ۳۰ ثانیه دمای نمونه را پس از خاموش کردن منبع حرارت دهی ثبت کرد. بهترین تصاویر حرارتی خام انتخاب شدند و مورد مقایسه قرار گرفتند. به‌منظور بررسی امکان افزایش تعداد عیوب قابل‌شناسایی و همچنین افزایش وضوح سایر عیوب، تعدادی از روش‌های پردازش داده‌های حرارتی به کار گرفته شد. بهترین تصاویر پردازش‌شده از نظر تعداد عیوب قابل‌شناسایی و همچنین شکل عیوب مورد مقایسه قرار گرفتند. سپس با تعریف و بهره‌گیری از پارامتر نسبت سیگنال به نویز^۴، تصاویر منتخب از نظر سهولت در تشخیص عیوب با یکدیگر مقایسه شدند.

۴-۱- بررسی و مقایسه بهترین تصاویر خام حرارتی

بهترین فریم تصویر حرارتی در بازه روشن و خاموش بودن منبع حرارتی انتخاب و در شکل ۳ نمایش داده شده است.

روش‌های پرکاربرد پردازش اطلاعات حرارتی به‌کاررفته شده است. در ادامه این روش‌ها به‌اختصار شرح داده خواهد شد.

۳-۱- روش پردازش فازی پالسی

ازجمله روش‌های پرکاربرد در حوزه بهبود تصاویر حرارتی، به روش دمانگاری فازی پالسی می‌توان اشاره کرد. این روش داده‌های حوزه زمانی را به حوزه فرکانسی با استفاده از تبدیل فوریه گسسته^۱، مطابق با معادله ۱، منتقل می‌نماید.

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k \Delta t) \exp \frac{j 2\pi k}{N} = \text{Re}_n + \text{Im}_n \quad (1)$$

در معادله بالا $J = \sqrt{-1}$ نمایانگر بخش موهومی است، n مقدار فرکانس را نشان می‌دهد که از ۰ تا N است. Δt نشان‌دهنده فاصله زمانی بین فریم‌های ثبت‌شده است و در انتها Re_n و Im_n به ترتیب معرف بخش حقیقی میزان به‌دست‌آمده هستند. به کمک بخش‌های موهومی و حقیقی اطلاعات فازی و دامنه هر پیکسل مطابق با معادلات زیر استخراج می‌شوند.

$$\Phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}_n}{\text{Re}_n} \right) \quad (2)$$

$$A_n = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2} \quad (3)$$

تصاویر دامنه و فازی برای فرکانس‌های مختلف از طریق معادلات ۲ و ۳ استخراج خواهند شد [۲۰، ۲۱].

۳-۲- تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی

الگوریتم تجزیه و تحلیل مؤلفه‌ی اصلی یکی دیگر از روش‌های متداول است که برای بهبود تصاویر حرارتی به کار گرفته می‌شود. این روش بر پایه شناسایی مولفه‌های اصلی سازنده ماتریس عمل می‌کند. در این روش ماتریس به چند ماتریس شکسته شده که در داده‌های حاصل از ماتریس‌های جدید میزان نویز کاهش و قابلیت شناسایی عیوب افزایش می‌یابد [۲۲]. یکی از روش‌های شکست ماتریس‌های اولیه استفاده از تجزیه مقدار منفرد^۲ است. این روش مطابق با معادله ۴ ماتریس ورودی را به سه ماتریس می‌شکند.

³ Empirical Orthogonal Function (EOF)

⁴ Signal to Noise Ratio (SNR)

¹ Discrete Fourier Transform (DFT)

² Singular Value Decomposition (SVD)

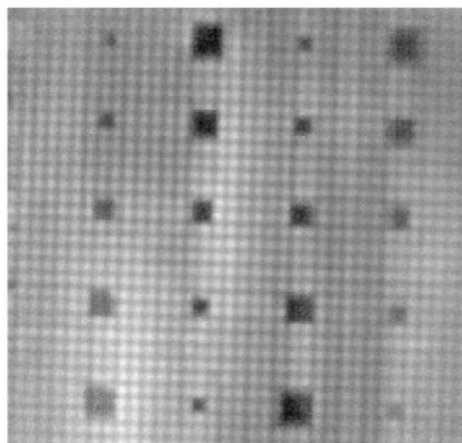
سالم شدت نور بالاتری دارند که این مهم شناسایی عیوب نزدیک به نواحی سالم با شدت نور کمتر را دشوار می‌سازد. دیگر علت بهتر بودن شکل ۳-ب، گرم شدن نمونه برای مدت زمان بیشتر می‌تواند باشد. همان‌طور که بیان شد با وجود خاموش کردن منبع حرارتی، دمای نمونه افزایش می‌یافت. این مهم نشان‌دهنده این است که شار حرارتی از صفحه حرارت داده‌شده به سمت صفحه مقابل دوربین حرارتی کماکان برقرار بود که موجب افزایش دمای ثبت‌شده می‌شود. از آنجایی که دمای نواحی معیوب با نرخ کمتری نسبت به نواحی سالم افزایش می‌یابد، به دلیل گرم شدن در مدت زمان بالاتر اختلاف دما و در نتیجه اختلاف شدت نور تصاویر حرارتی میان نواحی معیوب و سالم افزایش یافته است.

در نهایت تصویر منتخب خام حرارتی در بازه خاموش بودن منبع حرارتی به‌عنوان بهترین تصویر خام حرارتی برگزیده شد.

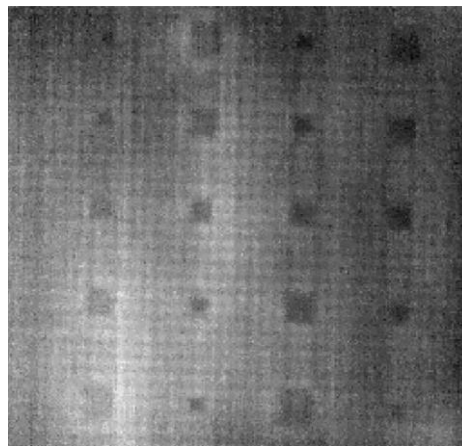
۴-۲- مقایسه تصاویر پردازش‌شده و بهترین تصویر

خام حرارتی از نظر تعداد عیوب قابل‌شناسایی

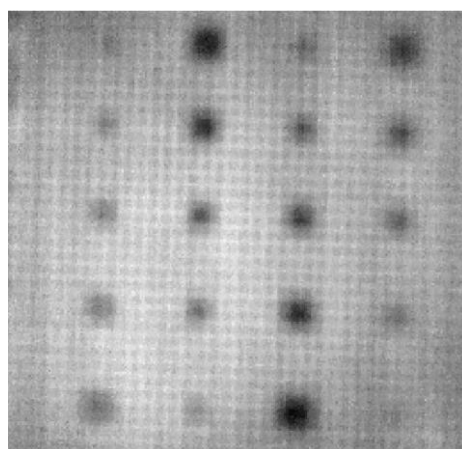
روش‌های پردازش فازی پالسی و تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی به اطلاعات ثبت‌شده حرارتی اعمال شدند. پس از اعمال این روش‌ها به اطلاعات حرارتی، شامل بازه روشن بودن منبع حرارتی، خاموش بودن منبع حرارتی و کل داده‌ها، مشخص شد که با اعمال این روش‌ها به داده‌های ثبت‌شده از بازه خاموش بودن منبع حرارتی، تصاویر مناسب‌تری حاصل می‌شود. بهترین تصاویر پردازش‌شده در شکل ۴ نمایش داده شده است.



الف



الف



ب

شکل ۳- بهترین فریم تصاویر حرارتی در: الف) بازه حرارت دهی، ب) بازه خنک شدن نمونه.

همان‌گونه که در شکل ۳ پیداست به‌وضوح بهترین فریم بازه خاموش بودن منبع حرارتی چه از نظر تعداد عیوب قابل تشخیص و چه از نظر وضوح عیوب اطلاعات بهتری را ارائه می‌دهد. اما کماکان تشخیص عیوب 2×2 میلی‌متر واقع در برخی عمق‌ها امری دشوار است. با توجه به اینکه در این آزمایش دوربین و منبع حرارتی در جهت مخالف یکدیگر قرار گرفته بودند (روش آزمایش عبوری) و با در نظر گرفتن ضریب هدایت حرارتی پایین قطعات از جنس PLA، با وجود خاموش بودن منبع حرارتی، دوربین همچنان افزایش دما نمونه را نمایش و ثبت می‌نمود. با توجه به اینکه پس از خاموش کردن منبع، تمرکز حرارتی ناشی از منبع از بین رفته است، یکی از دلایلی که می‌تواند علت بهتر بودن تصویر پس از خاموش کردن منبع حرارتی باشد، توزیع حرارت یکنواخت است. همان‌گونه که شکل ۳-الف مشاهده می‌شود برخی از نواحی سالم نمونه نسبت به سایر نواحی

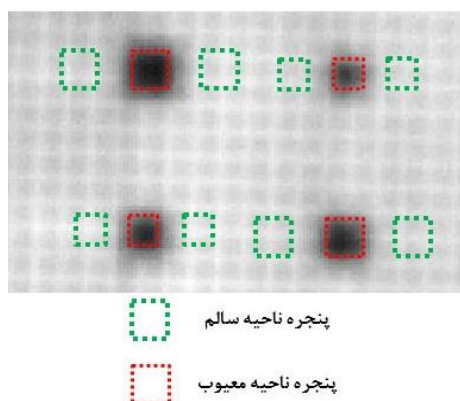
شکل عیوب را دقیق تر نمایش می دهد. به عبارت دیگر شکل مربعی عیوب در این تصویر، به خصوص در زمینه عیوب کوچک تر، مشهودتر است. این مهم می تواند اثر بسزایی بر تشخیص نوع عیوب و همچنین اندازه عیوب از طریق تصاویر حرارتی داشته باشد.

۴-۳- مقایسه کمی تصاویر منتخب پردازش شده و خام از نظر سهولت تشخیص عیوب.

همان طور که در بخش قبل بیان شد، تشخیص نواحی معیوب از طریق تصاویر PPT-amplitude و PCA به دلیل بالاتر بودن اختلاف شدت نور میان نواحی سالم و معیوب، امری آسان تر است. برای مقایسه کمی این مهم پارامتر SNR به صورت زیر تعریف و به کار گرفته شد [۲۴].

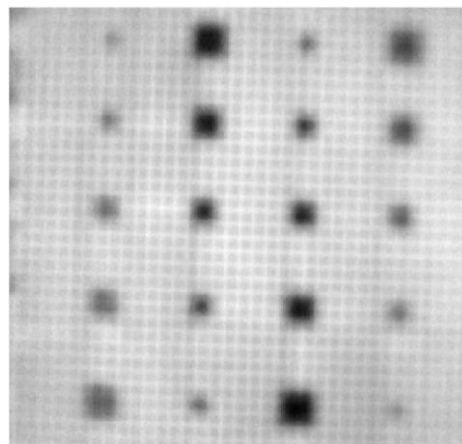
$$SNR = \frac{|\mu_{w_d} - \mu_{w_s}|}{\sigma_{w_s}} \quad (5)$$

در رابطه بالا μ_{w_d} و μ_{w_s} به ترتیب میانگین داده های در پنجره انتخاب شده در ناحیه معیوب و سالم است. همچنین σ_{w_s} نمایانگر انحراف معیار داده های پنجره واقع در ناحیه سالم است. پنجره نواحی معیوب متناسب با سایز عیوب انتخاب شد. همچنین پنجره نواحی سالم متناسب با اندازه پنجره ناحیه معیوب مدنظر و در دو سمت این ناحیه در نظر گرفته شد. شکل ۵ نمونه ای از انتخاب پنجره ها را نمایش می دهد.

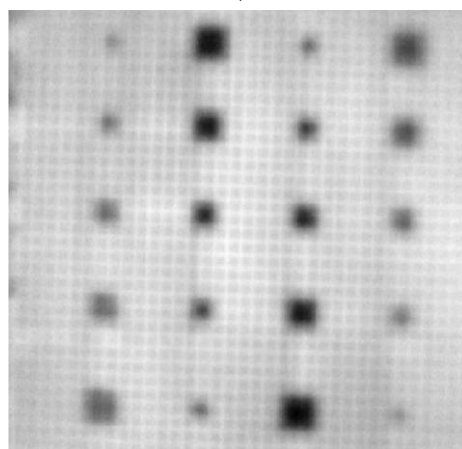


شکل ۵- نحوه انتخاب پنجره های نواحی سالم و معیوب

داده های SNR برای عیوب قابل شناسایی در هر تصویر محاسبه شد. میانگین این داده های برای هر تصویر پردازش شده و بهترین تصویر خام حرارتی محاسبه و در شکل ۶ نشان داده شده است.



ب



ج

شکل ۴- تصاویر پردازش شده. الف) تصویر PPT-phase، ب) تصویر PPT-amplitude، ج) تصویر PCA.

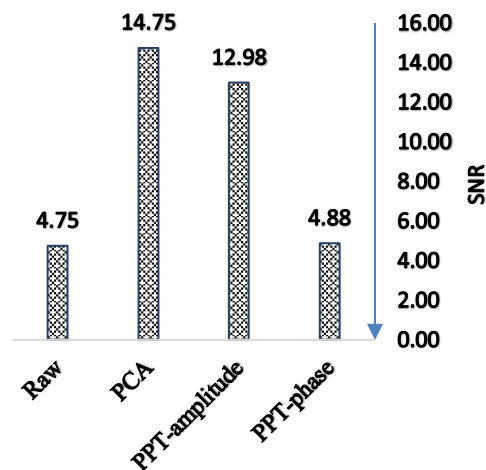
با مقایسه تصاویر شکل ۴ بهبود کیفیت نمایش عیوب را به وضوح می توان دید. همچنین شناسایی عیوب از طریق تصاویر PPT-amplitude و PCA نسبت به تصویر PPT-phase و بهترین تصویر خام حرارتی آسان تر است. عیوب 2×2 میلی متر واقع در عمق ۱ و ۴ میلی متر علی رغم غیرقابل شناسایی بودن در تصاویر خام حرارتی، در تصاویر پردازش شده به دلیل افزایش اختلاف شدت نور نواحی معیوب و سالم، قابل شناسایی هستند. با این وجود می توان نتیجه گرفت که کلیه ۲۰ عیب قرار داده شده در نمونه در تصاویر پردازش شده قابل تشخیص هستند در حالی که این مقدار برای بهترین تصویر خام حرارتی تنها ۱۸ عیب از ۲۰ عیب موجود است.

با بررسی شکل ۴ می توان به این نکته پی برد که علی رغم اختلاف شدت نور بالاتر میان نواحی معیوب و سالم در تصاویر PPT-amplitude و PCA، تصویر PPT-phase

هدف بررسی تفاوت اندازه پنجره فیلتر و نتیجه حاصل از آن بر نمونه‌های تولید شده با ضریب تزریق متفاوت بود، مشابهت چندانی با این پژوهش ندارد. همچنین در ادامه پژوهش عمر اثر اعمال فیلتر به کار گرفته شده بر نمونه‌های کامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۵]. در پژوهشی دیگر و در سال ۲۰۱۸ سعید^۲ و همکاران نمونه‌هایی کامپوزیتی از جنس الیاف کربن به روش پرنیت^۳ بعدی را به روش ترموگرافی مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌های تولید شده دارای دو دسته عیب بودند که یکی به صورت سوراخ-های ایجاد شده در پشت نمونه و دیگری به صورت عیوب جایگذاری شده در بین لایه‌های نمونه طراحی شده بود. در این پژوهش روش PCA برای بهبود تصاویر اولیه حرارتی به کار گرفته شده بود. لیکن پژوهش سعید اثر پردازش به کار گرفته شده در بهبود اختلاف شدت نور میان نواحی معیوب و سالم را مطالعه نموده است و به مقایسه تعداد عیوب آشکار شده بسنده کرده است. در پژوهش نامبرده که از نمونه‌ها با ضخامت ۳ میلی‌متری استفاده شده بود، عیوب واقع در عمق ۲ میلی‌متر قابل مشاهده نبودند. در حالیکه بر اساس نتایج ارائه شده در زیربخش‌ها ۲-۴ عیوب واقع در عمق ۴ میلی‌متر نمونه PLA با ضخامت ۶ میلی‌متر قابل شناسایی بودند. در پژوهش سعید و همکاران زمان حرارت-دهی نمونه نیز مورد مطالعه قرار گرفته بود که شامل بازه-های ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه بود [۲۶].

۵- نتیجه گیری

این پژوهش به منظور بررسی قابلیت شناسایی عیوب قطعات ساخته شده به روش تولید افزایشی از طریق آزمون غیر مخرب دمانگاری صورت گرفت. بدین منظور تعدادی عیوب مربعی در ابعاد و عمق‌های مختلف در یک نمونه PLA ساخته شده به روش تولید افزایشی ایجاد شد. نمونه معیوب با یک منبع حرارتی نوری به توان ۲ کیلووات به مدت ۱۵ ثانیه گرم شد. دوربین حرارتی دمای نمونه در بازه روشن بودن منبع و تا ۳۰ ثانیه پس از خاموش کردن منبع ثبت نمود. با بررسی تصاویر حرارتی اولیه در بازه روشن و خاموش بودن منبع حرارتی بهترین تصاویر این دو بازه انتخاب شد. تصویر منتخب بازه خاموش بودن منبع حرارتی به دلیل برتری محسوسی که نسبت به دیگر تصویر از نظر تعداد



شکل ۶- میانگین داده‌های SNR برای تصاویر منتخب

مطابق با شکل ۶، تصویر PCA بالاترین میزان SNR_{ave} را داراست که بیانگر وضوح بالای عیوب قابل شناسایی در این تصویر است. همچنین با اختلاف اندکی، تصویر PPT-amplitude بعد از تصویر PCA بهترین وضوح عیوب قابل شناسایی را دارد. در نقطه مقابل، میزان SNR_{ave} تصویر PPT-phase اختلاف اندکی با مقدار SNR_{ave} بهترین تصویر خام حرارتی دارد. با مقایسه اشکال ۴-الف و ۳-ب نیز می‌توان مشاهده نمود که اختلاف شدت نور بین نواحی معیوب و سالم این دو تصویر تفاوت چندانی ندارد. تنها برتری محسوس تصویر PPT-phase نسبت به بهتری تصویر خام حرارتی، امکان تشخیص عیوب 2×2 میلی‌متر در عمق‌های ۱ و ۴ میلی‌متر است.

۴-۴- مقایسه نتایج پژوهش صورت گرفته با سایر پژوهش‌های این حوزه.

بر اساس مطالعات انجام شده، پژوهشی مشابه با تحقیق صورت گرفته انجام نشده است. لیکن دو پژوهش اندک مشابهتی با مطالعه انجام شده در این پژوهش داشتند که نتایج آنها به شرح زیر است.

در سال ۲۰۱۶، عمر^۱ و همکاران در طی پژوهشی یک نمونه PLA تولید و عیوبی با اشکال هندسی مختلف در آن قرار دادند. ضخامت نمونه و عیوب به ترتیب ۱۲ و ۱۰ میلی‌متر بود. در پژوهش عمر جهت بهبود تصاویر حرارتی از یک روش اولیه به صورت اعمال فیلتر میانگین به صورت منطقه-ای بهره گرفته شده بود. با توجه به اینکه در پژوهش نامبرده

² Saeed

¹ Omar

سهولت در تشخیص عیوب می‌شود، با بهره‌گیری از پارامتر SNR توانایی تصاویر منتخب پردازش شده در آسان‌تر کردن فرآیند شناسایی عیوب با یکدیگر مقایسه شد. بر اساس داده‌های SNR، تصویر پردازش شده با روش PCA بهترین تصویر از نظر سهولت شناسایی عیوب است. میانگین داده‌های SNR این تصویر تقریباً سه برابر این میزان برای بهترین تصویر خام حرارتی بود. در نهایت با استناد به نتایج به دست آمده در این پژوهش، روش دمانگاری را یک تکنیک بازرسی مناسب برای شناسایی عیوب قطعات پلیمری ساخته شده به روش تولید افزایشی می‌توان محسوب کرد. همچنین اعمال روش پردازش PCA در مقایسه با PPT شناسایی عیوب نمونه‌های مذکور به روش دمانگاری را آسان‌تر می‌نماید.

عیوب قابل‌شناسایی و اختلاف شدت نور میان نواحی سالم و معیوب داشت، به‌عنوان بهترین تصویر خام حرارتی انتخاب شد. همچنین مشخص شد که به‌جز دو عیب با ابعاد 2×2 میلی‌متر در عمق‌های ۱ و ۴ میلی‌متر، سایر ۱۸ عیب ایجاد شده در تصویر منتخب داده‌های اولیه از نواحی سالم متمایز هستند. به‌منظور بررسی امکان افزایش تعداد عیوب قابل تشخیص و افزایش اختلاف شدت نور میان نواحی معیوب و سالم، دو روش پرکاربرد پردازش تصاویر حرارتی، به نام‌های پردازش فازی پالسی و تجزیه و تحلیل مولفه اصلی، به داده‌های حرارتی اعمال شد. با بررسی تصاویر پردازش شده مشخص شد که ۱۰٪ عیوب موجود در نمونه از طریق این تصاویر قابل‌شناسایی هستند. از آنجایی که افزایش اختلاف شدت نور میان نواحی سالم و معیوب باعث

emission and other NDT methods. *Sensors*, 15(10), pp.26709-26725.

[10] Shrestha, R., Chung, Y. and Kim, W., 2019. Wavelet transform applied to lock-in thermographic data for detection of inclusions in composite structures: Simulation and experimental studies. *Infrared Physics & Technology*, 96, pp.98-112.

[11] Ning, Z., Liu, R., Elhajjar, R.F. and Wang, F., 2017. Micro-modeling of thermal properties in carbon fibers reinforced polymer composites with fiber breaks or delamination. *Composites Part B: Engineering*, 114, pp.247-255.

[12] Liu, J., Yang, W. and Dai, J., 2010. Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT. *Infrared Physics & Technology*, 53(5), pp.348-357.

[13] Bartlett, J.L., Heim, F.M., Murty, Y.V. and Li, X., 2018. In situ defect detection in selective laser melting via full-field infrared thermography. *Additive Manufacturing*, 24, pp.595-605.

[14] Seppala, J.E. and Migler, K.D., 2016. Infrared thermography of welding zones produced by polymer extrusion additive manufacturing. *Additive manufacturing*, 12, pp.71-76.

[15] Montinaro, N., Cerniglia, D. and Pitarresi, G., 2018. Defect detection in additively manufactured titanium prosthesis by flying laser scanning thermography. *Procedia Structural Integrity*, 12, pp.165-172.

[16] Maldague, X., & Marinetti, S. (1996). Pulse phase infrared thermography. *Journal of applied physics*, 79(5), 2694-2698.

[17] Cadelano, G., Bortolin, A., Ferrarini, G., Molinas, B., Giantin, D., Zonta, P. and Bison, P., 2016. Corrosion detection in pipelines using infrared thermography: experiments and data processing methods. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 35(3), p.49.

[18] Shepard, S.M., Lhota, J.R., Rubadeux, B.A., Wang, D. and Ahmed, T., 2003. Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences. *Optical Engineering*, 42(5), pp.1337-1343.

۶- منابع

[1] D'Accardi, E., Altenburg, S., Maierhofer, C., Palumbo, D. and Galietti, U., 2019. Detection of Typical Metal Additive Manufacturing Defects by the Application of Thermographic Techniques. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 27, No. 1, p. 24).

[2] DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Wilson-Heid, A., De, A. and Zhang, W., 2018. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, pp.112-224.

[3] Frazier, W.E., 2014. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, 23(6), pp.1917-1928.

[4] Yao, T., Deng, Z., Zhang, K. and Li, S., 2019. A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations. *Composites Part B: Engineering*, 163, pp.393-402.

[5] Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baciuc, F. and Marinescu, R., 2018. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, 69, pp.157-166.

[6] O'Neill, C.J., Creedon, S.B., Brennan, S.A., O'Mahony, F.J., Lynham, R.S., Guerin, S., Gul, R. and Harty, J.A., 2018. Acetabular revision using trabecular metal augments for Paprosky type 3 defects. *The Journal of arthroplasty*, 33(3), pp.823-828.

[7] Capote, G.A.M., Rudolph, N.M., Osswald, P.V. and Osswald, T.A., 2019. Failure surface development for ABS fused filament fabrication parts. *Additive Manufacturing*, 28, pp.169-175.

[8] Siegel, J.E., Beemer, M.F. and Shepard, S.M., 2020. Automated non-destructive inspection of Fused Filament Fabrication components using Thermographic Signal Reconstruction. *Additive Manufacturing*, 31, p.100923.

[9] Strantza, M., Aggelis, D.G., De Baere, D., Guillaume, P. and Van Hemelrijck, D., 2015. Evaluation of SHM system produced by additive manufacturing via acoustic

- [24] Gong, J., Liu, J., Qin, L. and Wang, Y., 2014. Investigation of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheet with subsurface defects inspection using thermal-wave radar imaging (TWRI) based on the multi-transform technique. *Ndt & E International*, 62, pp.130-136.
- [25] Omar, M.A., Said, Z., Al Raisi, A., Al Rahman, Y.A., Abusafieh, A. and Sankaran, G.N., 2016. The Calibration and Sensitivity Aspects of a Self-Referencing Routine When Applied to Composites Inspection: Using a Pulsed Thermographic Setup. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 35(3), p.51.
- [26] Saeed, N., Omar, M.A., Abdulrahman, Y., Salem, S. and Mayyas, A., 2018. IR thermographic analysis of 3D printed CFRP reference samples with back-drilled and embedded defects. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 37(3), p.59.
- [19] Lopez, F., Ibarra-Castanedo, C., de Paulo Nicolau, V. and Maldague, X., 2014. Optimization of pulsed thermography inspection by partial least-squares regression. *Ndt & E International*, 66, pp.128-138.
- [20] Maldague, X., 2001. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing.
- [21] D'Accardi, E., Palumbo, D., Tamborrino, R., & Galietti, U. (2018). Quantitative analysis of thermographic data through different algorithms. *Procedia Structural Integrity*, 8, 354-367.
- [22] Rajic, N. (2002). Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures. *Composite structures*, 58(4), 521-528.
- [23] Katunin, A., Wronkiewicz-Katunin, A. and Wachla, D., 2019. Impact damage assessment in polymer matrix composites using self-heating based vibrothermography. *Composite Structures*, 214, pp.214-226.