

Enhancing Defect Detection in Additively Manufactured PLA and ABS Polymer Parts Using PCA and PPT Image Processing in Active Thermography

Zahra Hasani, Mohammadreza Farahani* 

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History

Received: October 29, 2025
Revised: November 23, 2025
Accepted: November 26, 2025
ePublished: December 09, 2025

ABSTRACT

This study investigates the performance of active infrared thermography for detecting surface and subsurface defects in two commonly used polymers, PLA and ABS. To enhance detection accuracy and image contrast, two advanced image-processing techniques—Principal Component Analysis (PCA) and Pulsed Phase Thermography (PPT)—were applied individually and in combination to the thermal image sequences. Results show that PCA efficiently reduces noise and emphasizes dominant thermal patterns, providing superior identification of shallow defects. In contrast, PPT, through frequency-domain analysis, exhibits lower sensitivity to non-uniform heating and emissivity variations, enabling more reliable detection of deeper defects. Comparative thermal behavior analysis revealed that PLA, due to its higher thermal conductivity, identifies surface defects more rapidly and with greater contrast, whereas ABS, with its higher specific heat capacity, offers improved stability and precision in subsurface defect detection. Moreover, the hybrid application of PCA and PPT proved sequence-dependent: in PLA, the PCA→PPT approach yielded a balanced visualization of both surface and subsurface anomalies, while in ABS, the PPT→PCA sequence significantly enhanced subsurface defect contrast. These findings demonstrate that combining complementary thermographic processing methods can overcome the limitations of single techniques and, when tailored to material-specific thermal properties, provide a robust framework for non-destructive evaluation of additively manufactured polymer components.

Keywords: Additive Manufacturing, Polylactic Acid (PLA), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Non-Destructive Testing (NDT), Thermography, Pulsed Phase Thermography (PPT), Principal Component Analysis (PCA)

How to cite this article

Hasani Z, Farahani M.R, Enhancing Defect Detection in Additively Manufactured PLA and ABS Polymer Parts Using PCA and PPT Image Processing in Active Thermography. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(12):759-771.

*Corresponding author's email: mrfarahani@ut.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-5515-4283



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



شاپا: ۲۴۷۶-۷۹۰۹؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۷۷۱-۷۵۹(۱۲):۲۵؛۱۴۰۴

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/mme.2025.117176.82871

صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir



بهبود آشکارسازی عیوب در قطعات پلیمری PLA و ABS تولیدشده به روش افزایشی با ترکیب پردازش تصویر PCA و PPT در ترموگرافی فعال

زهره حسنی، محمدرضا فراهانی*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش کارایی ترموگرافی فعال مادون قرمز در شناسایی عیوب سطحی و نیمه سطحی در دو پلیمر پرکاربرد PLA و ABS مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارتقای وضوح و افزایش دقت آشکارسازی، دو روش پردازش تصویر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و ترموگرافی پالسی فازی (PPT) به طور جداگانه و ترکیبی بر داده‌های حرارتی اعمال شدند. نتایج نشان داد که PCA در حذف نویز و برجسته‌سازی مؤلفه‌های غالب عملکرد مؤثری دارد و عیوب کم عمق را با وضوح بالایی آشکار می‌کند، در حالی که PPT با تحلیل داده‌ها در حوزه فرکانس، نسبت به ناهمگنی گرمایش و تغییرات ضریب گسیل حساسیت کمتری داشته و عیوب نیمه سطحی را با دقت بیشتری نمایان می‌سازد. مقایسه رفتار حرارتی دو ماده نشان داد که PLA به دلیل هدایت حرارتی بالاتر، عیوب سطحی را سریع‌تر و با کنتراست بالاتر آشکار می‌کند، اما ABS به دلیل ظرفیت گرمایی ویژه‌ی بیشتر، در آشکارسازی عیوب نیمه سطحی پایدارتر و دقیق‌تر عمل می‌کند. تحلیل ترکیبی دو روش نیز نشان داد که ترتیب اعمال آن‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای دارد؛ به طوری که در PLA رویکرد پردازش تصویر PCA و بعد PPT متوازن‌تر بوده و امکان آشکارسازی همزمان عیوب سطحی و نیمه سطحی را فراهم ساخته است، در حالی که در ABS رویکرد پردازش تصویر PPT و بعد PCA با تقویت داده‌های فرکانسی، وضوح عیوب نیمه سطحی را به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که ترکیب روش‌های پردازش تصویر می‌تواند محدودیت‌های روش‌های منفرد را جبران کرده و با تطبیق ترتیب اعمال آن‌ها با ویژگی‌های حرارتی ماده، ابزاری کارآمد برای بازرسی غیرمخرب قطعات تولید افزایشی فراهم سازد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸

کلیدواژه‌ها: تولید افزایشی، پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA)، آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، بازرسی غیرمخرب، ترموگرافی، ترموگرافی پالسی فازی (PPT)، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

نحوه ارجاع به این مقاله

حسینی زهره، فراهانی محمدرضا، بهبود آشکارسازی عیوب در قطعات پلیمری PLA و ABS تولیدشده به روش افزایشی با ترکیب پردازش تصویر PCA و PPT در ترموگرافی فعال، مهندسی مکانیک مدرس. ۷۷۱-۷۵۹(۱۲):۲۵؛۱۴۰۴.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mfarahani@ut.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0001-5515-4283



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، توسعه فناوری‌های نوین در حوزه تولید، به‌ویژه روش‌های تولید افزایشی، موجب تحول چشمگیری در صنایع مختلف شده است. این فناوری امکان ساخت قطعات پیچیده با هزینه و زمان کمتر را فراهم کرده و در بسیاری از زمینه‌ها به‌عنوان روشی کارآمد و آینده‌دار شناخته می‌شود. در میان مواد مورد استفاده در این حوزه، پلیمرهایی نظیر پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) و آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) به دلیل خواص مکانیکی مطلوب، فرآیندپذیری مناسب و هزینه پایین بیشترین توجه را به خود جلب کرده‌اند. PLA به عنوان یک پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر در صنایع زیستی و چاپ سه‌بعدی کاربرد دارد. در حالی که ABS به علت مقاومت حرارتی و مکانیکی بالاتر در ساخت قطعات مهندسی و برابر به کار می‌رود. با وجود این مزایا، فرآیند تولید افزایشی مستعد ایجاد عیوبی همچون تخلخل، جدایش لایه‌ای و ترک‌های زیرسطحی است که می‌توانند عملکرد و دوام قطعه را کاهش دهند [۱].

برای شناسایی این عیوب، روش‌های مختلف آزمون غیرمخرب (NDT) به کار گرفته می‌شوند. روش‌هایی مانند فراصوت و رادیوگرافی هرچند کاربرد گسترده‌ای دارند، اما محدودیت‌هایی نیز به همراه دارند. فراصوت در قطعات با هندسه پیچیده دقت کمتری دارد و رادیوگرافی نیازمند تجهیزات پرهزینه و رعایت ملاحظات ایمنی است [۲]. در مقابل، ترموگرافی مادون‌قرمز فعال به دلیل مزایایی همچون سرعت بالا، عدم نیاز به تماس مستقیم و قابلیت تصویربرداری از سطوح بزرگ و پیچیده، به‌عنوان روشی کارآمد شناخته شده است. این روش مبتنی بر اعمال یک تحریک حرارتی و ثبت پاسخ دمایی قطعه توسط دوربین مادون‌قرمز است. تفاوت در الگوی انتشار حرارت بین نواحی سالم و معیوب امکان آشکارسازی عیوب داخلی و سطحی را فراهم می‌سازد [۳].

پردازش تصویر به‌عنوان یکی از ارکان اساسی در ترموگرافی فعال، نقشی تعیین‌کننده در ارتقای کیفیت، افزایش وضوح و دقت نتایج ایفا می‌کند. داده‌های حرارتی خام حاصل از دوربین مادون‌قرمز، معمولاً با نویز، ناهمگنی حرارتی و اثرات گرمایش غیریکپارچه همراه‌اند و تفسیر مستقیم آن‌ها برای شناسایی موقعیت و ابعاد عیوب با دشواری‌های فراوان روبه‌رو است [۴]. به همین دلیل، پژوهشگران به توسعه و به‌کارگیری روش‌های پردازش سیگنال و تصویر روی آورده‌اند تا بتوانند با حذف نویز، بهبود نسبت سیگنال به نویز و افزایش کنتراست، امکان آشکارسازی دقیق‌تر عیوب در سطوح و اعماق مختلف را فراهم سازند [۵].

در این میان، مجموعه‌ای از تکنیک‌های پیشرفته معرفی شده‌اند که هر یک از رویکردی متفاوت برای استخراج اطلاعات معنادار از داده‌های حرارتی استفاده می‌کنند. روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با کاهش ابعاد داده و تمرکز بر مؤلفه‌های اصلی، به افزایش وضوح و برجسته‌سازی ناهنجاری‌های حرارتی کمک می‌کند.

ترموگرافی پالسی فازی (PPT) داده‌های زمانی را به حوزه فرکانسی منتقل کرده و به دلیل حساسیت کمتر به گرمایش غیریکپارچه، در شناسایی عیوب عمیق کارایی بالایی دارد [۶].

افزون بر این روش‌ها، ترکیب چند رویکرد نیز مورد توجه قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه، کنتراست مطلق فازی (PhAC) که ترکیبی از DAC، PPT است، توانسته است با افزایش کنتراست میان نواحی سالم و معیوب، قابلیت شناسایی عیوب کوچک‌تر و عمیق‌تر را بهبود دهد [۸]. این تلاش‌ها نشان می‌دهد که پردازش تصویر مکملی ضروری برای داده‌های ترموگرافی است، همچنین بستری فراهم می‌آورد تا محدودیت‌های ذاتی این روش جبران شده و امکان کاربرد گسترده‌تر آن در حوزه‌های صنعتی فراهم گردد.

خشکباری و همکاران به بررسی امکان‌سنجی به‌کارگیری روش حرارت نگاری مدوله‌شده (Lock-in Thermography) برای آزمون‌های غیرمخرب در قطعات پلیمری پرداخته‌اند. اساس عملکرد این روش بر این واقعیت استوار است که نواحی معیوب نسبت به نواحی سالم رفتار حرارتی متفاوتی از خود نشان می‌دهند و این تفاوت در دامنه و فاز امواج گرمایی برگشتی قابل تشخیص است. این بررسی نشان داد که ترموگرافی توانایی بالایی در آشکارسازی حفره‌های کم‌عمق در قطعات پلیمری دارد و در برخی موارد نسبت به فراصوت عملکرد بهتری ارائه می‌دهد [۹]. مارتین و همکاران ارزیابی ضخامت و طول نقص‌های داخلی در مواد ساخت افزودنی را مورد بررسی قرار دادند. این ارزیابی با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی عددی ترموگرافی فعال و ترکیب آن با مدل‌های یادگیری ماشین انجام شده است. روش پیشنهادی ترکیبی از شبیه‌سازی‌های المان محدود و مدل‌های یادگیری ماشین است که برای پیش‌بینی ویژگی‌های نقص‌های داخلی به کار گرفته شده است. مدل‌های یادگیری ماشین عملکرد مناسبی در تشخیص و اندازه‌گیری نقص‌های داخلی از داده‌های ترموگرافی فعال داشتند. این بررسی نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های ترکیبی شبیه‌سازی عددی و یادگیری ماشین می‌تواند به طور دقیق ویژگی‌های نقص‌های داخلی را پیش‌بینی کند. این روش‌ها می‌توانند به عنوان ابزاری هوشمند برای بازرسی و ارزیابی کیفیت تولیدات افزایشی به کار گرفته شوند. در پژوهش صورت گرفته به طور کلی به کارگیری تکنیک‌های نوین برای بهبود فرآیندهای بازرسی و تضمین کیفیت در ساخت افزودنی را پیشنهاد می‌دهد [۱۰]. در پژوهشی که مارتین و همکاران انجام دادند، از روش ترموگرافی فلش برای ارزیابی آسیب ناشی از ضربه در قطعات پلی‌کربناتی تولیدشده به روش افزودنی استفاده شد. نتایج نشان داد که این روش قادر به آشکارسازی عیوب پستی قطعات بوده و ارتباط مستقیمی میان انرژی ضربه و شدت پاسخ ترموگرافی وجود دارد. همچنین، به‌کارگیری پردازش تصویر مبتنی بر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCT) موجب بهبود وضوح و دقت تشخیص نقص‌ها شد. این یافته‌ها بیانگر آن است که ترموگرافی فلش همراه با روش‌های پردازش

پیشرفته می‌تواند ابزاری کارآمد برای بازرسی غیرمخرب قطعات پلیمری در شرایط صنعتی محسوب شود [۱۱]. در ادامه، پژوهش‌هایی با تمرکز بر بهبود کیفیت تصاویر و افزایش وضوح انجام شده است. Li و همکاران با ترکیب شبیه‌سازی عددی و آزمون تجربی نشان دادند که انتخاب پارامترهای حرارتی و اپتیکی مناسب تأثیر زیادی بر وضوح تصاویر دارد [۱۲]. پردازش داده‌ها نیز اهمیت زیادی در بهبود دقت ترموگرافی دارد. روش‌هایی نظیر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و ترموگرافی پالسی فازى (PPT) در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. چونگ و همکاران در یک مقاله مروری جامع، پیشرفت‌های اخیر در حوزه تکنیک‌های پردازش سیگنال برای ترموگرافی پالسی را بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با وجود مزایای ترموگرافی پالسی، این روش با چالش‌هایی مانند گرمایش غیر یکنواخت سطح، نویز محیطی و محدودیت وضوح تصاویر مواجه است که می‌تواند دقت شناسایی عیوب را کاهش دهد. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، تکنیک‌های متعددی معرفی شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

ترموگرافی پالسی فازى (PPT): کاهش اثرات گرمایش غیریکپارچه و بهبود شناسایی عیوب عمیق با استفاده از تحلیل فرکانسی.
 ترموگرافی مؤلفه اصلی (PCT): افزایش وضوح و کنتراست تصاویر از طریق تحلیل مؤلفه‌های اصلی و کاهش داده‌های اضافی.
 بازسازی سیگنال ترموگرافی (TSR): حذف نویز و آشکارسازی بهتر عیوب زیرسطحی از طریق تحلیل مشتقات دمایی.
 تبدیل موجک گسسته (DWT): تشخیص ناپیوستگی‌ها و حذف نویز در داده‌های غیرایستا با تجزیه چندمقیاسی سیگنال.
 کنتراست مطلق تفاضلی (DAC): بهبود شناسایی عیوب کوچک با مدل‌سازی دقیق پاسخ حرارتی نقاط سطح.

هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند و انتخاب آن‌ها وابسته به نوع ماده، شرایط آزمون و عمق عیوب است. علاوه بر این، پژوهشگران به روندهای نوظهوری همچون ادغام یادگیری عمیق با ترموگرافی برای افزایش دقت و خودکارسازی تحلیل داده‌ها، برای بازرسی در محیط‌های خطرناک، و ترکیب ترموگرافی با سایر روش‌های NDT (مانند آلتراسونیک و جریان‌های گردابی) اشاره کرده‌اند. به‌طور کلی، این مطالعه نشان می‌دهد که تکنیک‌های پردازش سیگنال نقش اساسی در ارتقای دقت و کارایی ترموگرافی پالسی داشته و می‌توانند ابزار قدرتمندی در تضمین کیفیت و ایمنی در حوزه‌های مختلف صنعتی از جمله هوافضا، انرژی و ساخت‌وساز باشند [۷]. هیدالگو و همکاران با استفاده از ترموگرافی فعال مادون‌قرمز به ارزیابی کارایی تکنیک‌های مختلف پردازش تصویر در شناسایی عیوب مواد پرداختند. در این مطالعه، روش‌های متعددی مانند کنتراست مطلق تفاضلی (DAC)، ترموگرافی فازى پالسی (PPT)، تحلیل مؤلفه اصلی (PCT) و بازسازی سیگنال ترموگرافی (TSR) مورد بررسی قرار

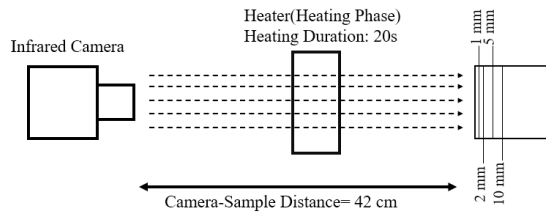
گرفتند. علاوه بر این، یک روش ترکیبی با عنوان کنتراست مطلق فازى (PhAC) معرفی شد که با ادغام PPT و TSR توانست کنتراست بالاتری میان نواحی سالم و معیوب ایجاد کند. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های کامپوزیتی CFRP و پلکسی‌گلاس با عیوب مصنوعی انجام شد. نتایج نشان داد که PCT بهترین عملکرد را در شناسایی تعداد و کیفیت عیوب ارائه می‌دهد، در حالی که PhAC وضوح بیشتری در تمایز نواحی سالم و معیوب داشت اما به دلیل پیچیدگی محاسباتی کمتر کارآمد بود. روش‌های آماری مانند Kurtosis و Skewness اطلاعات مفیدی ارائه دادند، اما در آشکارسازی عیوب کوچک و عمیق ضعف نشان دادند. همچنین، DAC برای عیوب سطحی مناسب‌تر بود، ولی در شناسایی عیوب عمیق محدودیت داشت. این پژوهش نشان داد که انتخاب روش پردازش باید متناسب با عمق و ابعاد عیوب باشد و استفاده از روش‌های ترکیبی مانند PhAC می‌تواند دقت شناسایی را افزایش دهد [۸]. تحقیقات تطبیقی نشان داده‌اند که ویژگی‌های حرارتی مواد، از جمله هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه، به‌طور مستقیم بر کیفیت آشکارسازی عیوب در ترموگرافی اثرگذار است. یانگ و همکاران گزارش کردند که این ویژگی‌ها می‌توانند بر وضوح و کنتراست نتایج اثر معناداری داشته باشند [۱۳]. همچنین، گو و همکاران در یک مطالعه مقایسه‌ای روی پلیمرهای PLA و ABS نشان دادند که PLA به دلیل هدایت حرارتی بالاتر، عیوب سطحی را سریع‌تر آشکار می‌سازد، در حالی که ABS در تحلیل‌های فرکانسی عملکرد پایدارتری دارد [۱۴].

با وجود دستاوردهای فراوان، همچنان خلأ پژوهشی مهمی وجود دارد. بسیاری از پژوهش‌ها تنها یک ماده را بررسی کرده‌اند یا صرفاً از یک روش پردازش داده استفاده کرده‌اند. تاکنون مطالعات اندکی به مقایسه‌ی مستقیم دو پلیمر PLA و ABS در شرایط یکسان پرداخته‌اند. همچنین بررسی هم‌زمان دو روش پردازش تصویر پیشرفته PCA و PPT در این مواد کمتر صورت گرفته است. از این‌رو، هدف پژوهش حاضر بررسی جامع کارایی ترموگرافی فعال در شناسایی عیوب سطحی و نیمه‌سطحی در دو پلیمر PLA و ABS است. در این تحقیق با ایجاد عیوب مصنوعی در اعماق مختلف و استفاده از روش‌های پردازش تصویر PCA و PPT، تلاش شده است تا ضمن مقایسه رفتار حرارتی این دو ماده، نقش ترکیب این روش‌ها در افزایش دقت آشکارسازی روشن گردد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد و نمونه‌ها

در این پژوهش دو ماده‌ی پلیمری پرکاربرد پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) و آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) انتخاب شدند. PLA به‌عنوان یک پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر، سبک و مقرون‌به‌صرفه، بیشتر در چاپ سه‌بعدی و تولید قطعات سبک به‌کار می‌رود. در مقابل، ABS به دلیل داشتن مقاومت ضربه‌ای بالا، پایداری حرارتی



شکل ۲ چیدمان آزمون ترموگرافی فعال: هیتر صفحه‌ای (تحریک حرارتی ۲۰ ثانیه)، دوربین مادون قرمز در فاصله ۴۲ سانتی‌متر از سطح نمونه

Fig. 2 Active thermography setup: flat-plate heater (20 s heat pulse), infrared camera at 42 cm standoff.

تعیین شد تا هم پاسخ حرارتی کافی ایجاد شود و هم از تغییر شکل یا آسیب به سطح نمونه جلوگیری گردد.

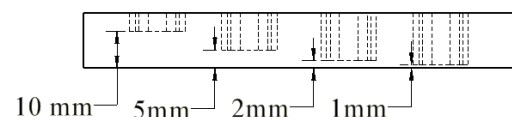
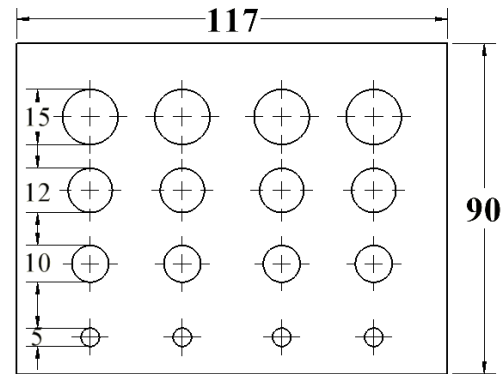
داده‌های حرارتی توسط دوربین مادون قرمز مدل FLIR A35 با رزولوشن 320×256 پیکسل و حساسیت حرارتی کمتر از 0.05°C ثبت شدند. نرخ ثبت تصاویر ۶۰ فریم بر ثانیه انتخاب شد تا تغییرات حرارتی لحظه‌ای به خوبی پایش گردد. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است؛ دوربین در فاصله ۴۲ سانتی‌متری نسبت به سطح نمونه قرار گرفت تا در عین پوشش کامل صفحه، اثر بازتابش‌های ناخواسته حداقل شود. با توجه به حساسیت دوربین‌های حرارتی نسبت به بازتابش نور و ضریب گسیل سطح، شرایط محیطی به‌گونه‌ای تنظیم شد که نورهای جانبی و سطوح بازتابنده حذف شوند تا دقت تصاویر ثبت شده افزایش یابد. به‌صورت کلی، مزیت اصلی این آرایش آزمایش سرعت بالا، عدم تماس با قطعه و امکان تصویربرداری از هندسه‌های پیچیده است؛ درحالی‌که محدودیت آن وابستگی به کیفیت سطح و نویز محیطی محسوب می‌شود. فاصله بر اساس میدان دید دوربین و ابعاد نمونه‌ها انتخاب شد تا تمام سطح نمونه‌ها در قاب تصویر قرار گیرد. نرخ ثبت تصاویر به‌گونه‌ای تنظیم شد که تغییرات حرارتی در طول فرآیند گرمایش و مرحله سرد شدن به‌طور دقیق قابل بررسی باشد.

۲-۳- روش‌های پردازش تصویر حرارتی

تصاویر حرارتی خام معمولاً تحت تأثیر نویز، ناهمگنی سطح نمونه یا تغییرات غیرمرتبط هستند. برای افزایش کیفیت داده‌ها و آشکارسازی بهتر عیوب، دو روش پردازش تصویر مورد استفاده قرار گرفت:

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA):

این روش یک ابزار آماری پرکاربرد است که داده‌های چند متغیره را به مجموعه‌ای از مؤلفه‌های اصلی تجزیه می‌کند. در ترموگرافی، تصاویر حرارتی در طول زمان به‌عنوان یک سری داده در نظر گرفته می‌شوند. PCA با انتخاب مؤلفه‌های غالب، الگوهای حرارتی اصلی را برجسته کرده و مؤلفه‌های کم‌اثر (که بیشتر شامل نویز هستند) را حذف می‌کند. به این ترتیب، نسبت سیگنال به نویز (SNR) بهبود یافته و نواحی معیوب با وضوح بیشتری آشکار می‌شوند. شکل ۳ و شکل ۴ نمونه‌ای از خروجی پردازش PCA را نشان داده‌اند.



شکل ۱ هندسه نمونه‌های PLA و ABS و موقعیت حفره‌های مصنوعی با عمق‌های ۱، ۲، ۵ و ۱۰ میلی‌متر (ضخامت نمونه: ۱۵ میلی‌متر).

Fig. 1 Geometry of PLA and ABS specimens and locations of artificial circular defects at depths of 1, 2, 5, and 10 mm (specimen thickness: 15 mm).

بیشتر و خواص مکانیکی برتر، در قطعات صنعتی و کاربردهایی که استحکام بیشتری نیاز است استفاده می‌شود. تفاوت‌های ذاتی این دو پلیمر در هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه، می‌تواند بر نحوه انتشار حرارت و آشکارسازی عیوب تأثیرگذار باشد؛ بنابراین انتخاب این دو ماده، امکان مقایسه‌ی از رفتار حرارتی آن‌ها در برابر تحریک یکسان را فراهم کرده‌است.

هر نمونه دارای ضخامت ۱۵ میلی‌متر با درصد پر شوندگی ۵۰ درصد پرینت شدند. مانند شکل ۱ درون نمونه‌ها، عیوب مصنوعی به صورت حفره‌هایی دایره‌ای شکل تعبیه شدند. این حفره‌ها در چهار عمق مختلف از سطح بالایی قرار گرفتند: ۱، ۲، ۵ و ۱۰ میلی‌متر. انتخاب این عمق‌ها با هدف پوشش دامنه‌ای از عیوب سطحی (۱ و ۲ میلی‌متر) تا نیمه‌سطحی (۵ و ۱۰ میلی‌متر) انجام شد. ابعاد و قطر این حفره‌ها به‌گونه‌ای طراحی شد که در مقایسه‌ی نتایج میان PLA و ABS بتوان اثر عمق را بدون دخالت عوامل هندسی تحلیل کرد.

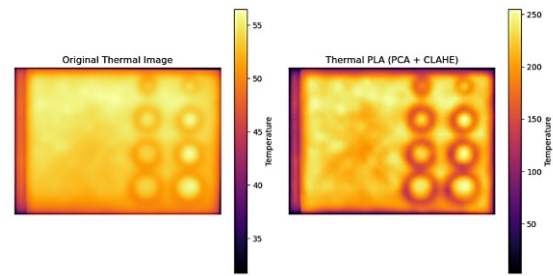
۲-۲- چیدمان آزمایش

آزمایش‌ها در شرایط محیطی کنترل‌شده انجام گرفت. در این پژوهش برای اعمال تحریک حرارتی از یک هیتر صفحه‌ای الکتریکی با توان تقریبی ۲۵۰ وات استفاده شد که امکان گرمایش یکنواخت سطح نمونه را فراهم می‌کرد. انتخاب این منبع حرارتی به دلیل سهولت استفاده، ایمنی بالا و قابلیت پوشش‌دهی سطح وسیع، می‌باشد. البته محدودیت این روش آن است که انرژی حرارتی با سرعت کمتری نسبت به منابع لیزری منتقل می‌شود که می‌تواند بر سرعت ایجاد کنتراست در نواحی معیوب تأثیرگذار باشد. مدت‌زمان اعمال گرمایش ۲۰ ثانیه

از PPT مکمل خوبی برای PCA است و ترکیب این دو روش موجب افزایش توانایی آشکارسازی در شرایط آزمایشگاهی شد. شکل ۵ خروجی نمونه PPT برای PLA (دامنه/فاز انتخابی)؛ بهبود آشکارسازی عیوب نیمه سطحی (۵ و ۱۰ میلی متر) نسبت به داده خام و PCA منفرد

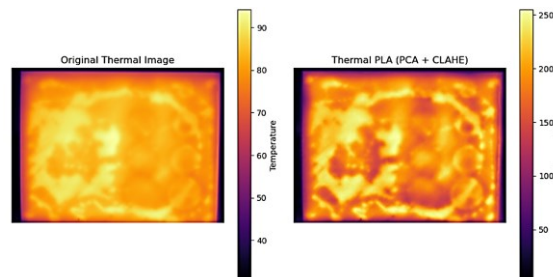
Fig. 5 Example PPT result for PLA (selected amplitude/phase) improving subsurface (5–10 mm) defect detection relative to raw and PCA-only images

و شکل ۶ نمونه ای از خروجی پردازش PPT می باشد. روش تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) برای کاهش نویز و افزایش نسبت سیگنال به نویز داده های زمانی به کار گرفته شد. در این روش، توالی تصاویر ثبت شده به عنوان ماتریسی شامل تغییرات زمانی حرارت در نظر گرفته شده و مؤلفه هایی استخراج می شوند که بیشترین سهم را در تغییرات دمایی دارند. حذف مؤلفه های کم اهمیت که عمدتاً حامل نویز هستند، موجب برجسته سازی پاسخ حرارتی ناشی از وجود عیب می گردد. در ادامه، برای افزایش توان آشکارسازی عیوب در اعماق بیشتر، از ترموگرافی پالسی فازی (PPT) استفاده شد. این تکنیک سیگنال های حرارتی را به حوزه فرکانس انتقال داده و بررسی اختلاف فاز میان نواحی سالم و معیوب را امکان پذیر می سازد. از آنجا که نفوذ حرارت به عمق تابع فرکانس است، نقشه های فاز قادرند رفتار حرارتی لایه های عمیق تر را با پایداری و وضوح بالاتر آشکار نمایند. ترکیب این دو روش سبب شد مزایای هر دو به طور هم زمان مورد بهره برداری قرار گیرد؛ به گونه ای که PCA مؤلفه های غالب و تفاوت های سطحی را تقویت نمود و PPT اطلاعات عمقی و پایداری سیگنال را افزایش داد. این ترکیب نه تنها کیفیت آشکارسازی را در همه عمق ها ارتقا بخشید، بلکه حساسیت نتایج را نسبت به غیریکنواختی گرمایش و نویز محیطی کاهش داد.



شکل ۳ خروجی نمونه پردازش PCA برای نمونه PLA؛ تقویت الگوهای حرارتی غالب و افزایش نسبت سیگنال به نویز برای عیوب کم عمق (۱ و ۲ میلی متر)

Fig. 3 Example PCA result for PLA showing enhanced dominant thermal patterns and improved SNR for shallow defects (1–2 mm)

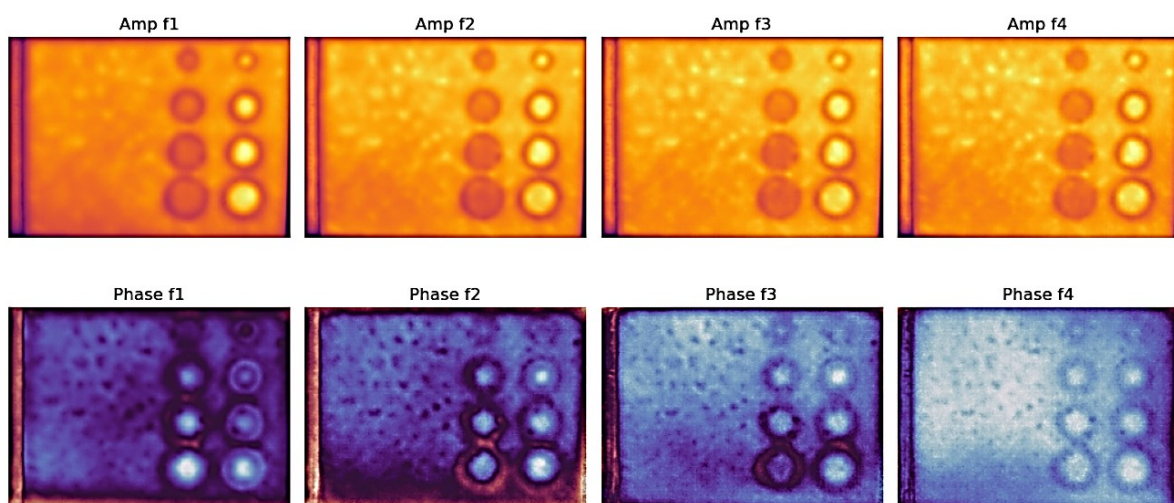


شکل ۴ خروجی نمونه پردازش PCA برای نمونه ABS؛ آشکارسازی عیوب کم عمق با کنتراست پایین تر نسبت به PLA به دلیل پاسخ حرارتی کندتر ماده

Fig. 4 Example PCA result for ABS indicating shallow-defect visibility with comparatively lower contrast due to slower thermal response

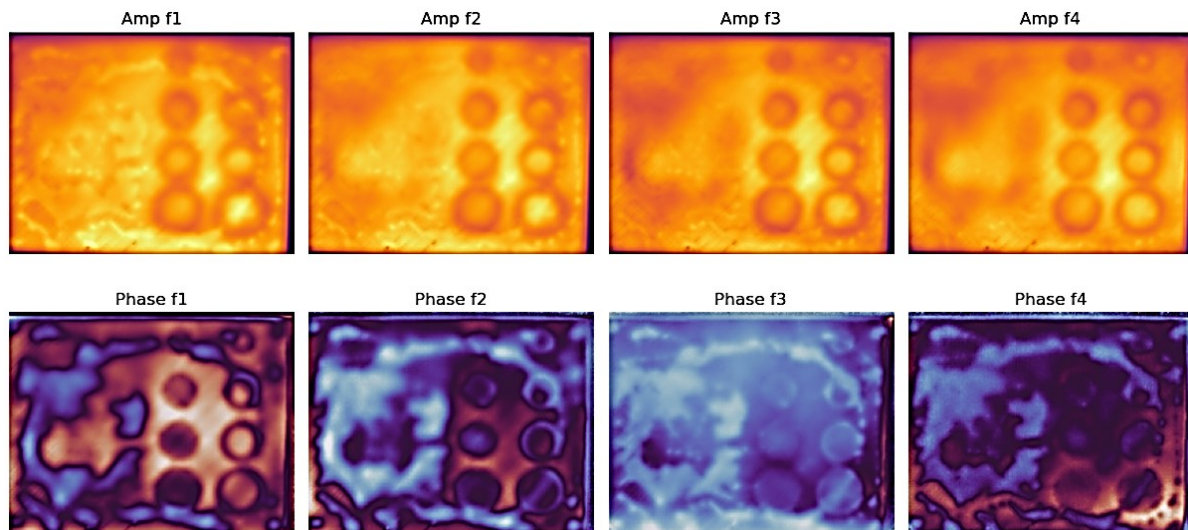
ترموگرافی فازی-پالسی (PPT):

PPT یک روش مبتنی بر تبدیل فوریه است که سیگنال های حرارتی ثبت شده در طول زمان را به حوزه فرکانس منتقل می کند. در این حوزه، تغییرات دمایی ناشی از وجود عیوب به صورت اختلاف فاز نمایان می شوند. از آنجا که انتشار حرارت در مواد با عمق رابطه مستقیم دارد، بررسی سیگنال ها در حوزه فرکانس کمک می کند تا اثر عیوب نیمه سطحی (۵ و ۱۰ میلی متر) بهتر آشکار گردد. استفاده



شکل ۵ خروجی نمونه PPT برای PLA (دامنه/فاز انتخابی)؛ بهبود آشکارسازی عیوب نیمه سطحی (۵ و ۱۰ میلی متر) نسبت به داده خام و PCA منفرد

Fig. 5 Example PPT result for PLA (selected amplitude/phase) improving subsurface (5–10 mm) defect detection relative to raw and PCA-only images



شکل ۶ خروجی نمونه PPT برای ABS؛ پایداری بیشتر نقشه فاز و کنتراست بهتر عیوب نیمه سطحی به واسطه پاسخ حرارتی پایدارتر ABS
 Fig. 6 Example PPT result for ABS; phase maps exhibit greater stability and higher contrast for subsurface defects due to ABS's steadier thermal behavior

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج اولیه ترموگرافی

تصاویر خام ثبت شده توسط دوربین مادون قرمز نشان داد که رفتار حرارتی دو پلیمر PLA و ABS در برابر تحریک حرارتی یکسان، تفاوت محسوسی دارد. در نمونه های PLA، افزایش دما در سطح و اطراف نواحی معیوب به سرعت نمایان شد، به گونه ای که عیوب سطحی در عمق های ۱ و ۲ میلی متر بلافاصله پس از پایان مرحله گرمایش قابل مشاهده بودند. این موضوع ناشی از هدایت حرارتی بالاتر PLA است که سبب می شود گرما سریع تر از سطح به نواحی داخلی منتقل گردد و تغییرات حرارتی در نزدیکی عیوب زودتر آشکار شود. در مقابل، ABS به دلیل ظرفیت گرمایی ویژه ی بیشتر و پایداری حرارتی بالاتر، واکنش کندتری از خود نشان داد. در تصاویر خام مربوط به ABS، جدایش حرارتی بین نواحی سالم و معیوب تنها برای عیوب کم عمق قابل تشخیص بود و برای عمق های بالاتر وضوح کافی به دست نیامد. این نتایج نشان می دهد که تصاویر خام بیشتر برای شناسایی عیوب سطحی مناسب هستند و برای عیوب نیمه سطحی نیاز به پردازش داده ها وجود دارد.

۳-۲- پردازش تصاویر با روش PCA

برای افزایش کیفیت داده ها و کاهش نویز ناشی از ناهمگنی سطح یا عوامل محیطی، روش تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) روی سری زمانی داده ها اعمال شد. این روش توانست با برجسته سازی مؤلفه های غالب و حذف مؤلفه های کم اثر، نسبت سیگنال به نویز را به طور محسوسی بهبود بخشد. نتایج نشان داد که در هر دو ماده، تصاویر حاصل از PCA وضوح بالاتری نسبت به داده های خام دارند و مرز عیوب به شکل شفاف تری قابل مشاهده است.

در نمونه ی PLA، عیوب سطحی در عمق های ۱ و ۲ میلی متر به وضوح آشکار شدند و حتی شکل و ابعاد آن ها نیز با دقت بیشتری نمایان شد. این امر نشان می دهد که PCA در جداسازی مؤلفه های

مرتبط با پاسخ حرارتی سطحی کارآمد است. علاوه بر این، به کارگیری همزمان PCA با روش افزایش کنتراست موضعی (CLAHE) باعث شد مرزهای عیوب شارپ تر و اختلاف شدت حرارتی بین ناحیه سالم و معیوب افزایش یابد. در عیوب نیمه سطحی (۵ و ۱۰ میلی متر)، هرچند نشانه هایی از حضور آن ها دیده شد، اما کنتراست ضعیف تر بود که بیانگر محدودیت PCA در عمق های بیشتر است.

ABS نیز، به دلیل ظرفیت گرمایی ویژه ی بالاتر و پاسخ حرارتی کندتر، کنتراست اولیه ضعیف تری نسبت به PLA داشت و مرزبندی حفره ها با محوشدگی بیشتری همراه شد. با این حال، اعمال PCA توانست وجود حفره های سطحی (۱ و ۲ میلی متر) را تا حد مناسبی آشکار کند، هرچند وضوح آن ها کمتر از PLA بود. برای عیوب نیمه سطحی، PCA تنها نشانه های ضعیفی ارائه داد که تأکید مجددی بر محدودیت این روش در اعماق بیشتر محسوب می شود. در مجموع می توان گفت PCA ابزاری مؤثر برای آشکارسازی عیوب کم عمق و ارتقای وضوح تصاویر است، اما در مورد عیوب نیمه سطحی توانایی محدودی دارد و نیاز به تکمیل با روش های دیگر احساس می شود.

۳-۳- پردازش تصاویر با روش PPT

برای بررسی دقیق تر عیوب نیمه سطحی، داده ها با روش ترموگرافی فازی پالسی (PPT) تحلیل شدند. این روش با تبدیل داده های زمانی به حوزه فرکانس، امکان مطالعه رفتار حرارتی در عمق های مختلف را فراهم ساخت. در این مطالعه، دامنه و فاز سیگنال ها در چندین فرکانس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج دامنه نشان دادند که برخی از حفره ها به ویژه در فرکانس های میانی وضوح بیشتری پیدا می کنند. مهم تر از آن، نقشه های فاز حاصل از PPT بیانگر دقت بالاتری در آشکارسازی عیوب نیمه سطحی بودند.

رویکرد ۱: ابتدا تحلیل فرکانسی، سپس کاهش نویز آماری

PPT → PCA

در این حالت ابتدا داده‌های حرارتی به حوزه فرکانس منتقل شدند و دامنه/فاز سیگنال‌ها در فرکانس‌های مختلف محاسبه گردید. سپس روش PCA برای کاهش نویز و برجسته‌سازی مؤلفه‌های غالب بر روی این داده‌های فرکانسی اعمال شد. نتایج حاصل برای PLA نشان داد که کنتراست بین نواحی سالم و معیوب به‌طور محسوسی افزایش یافت و به‌ویژه در فرکانس‌های میانی (f_2 و f_3) مرزبندی حفره‌ها شفاف‌تر شد. این رویکرد علاوه بر افزایش نسبت سیگنال به نویز، باعث کاهش اثرات ناهمگنی گرمایش در داده‌های اولیه شد.

در ABS نیز این رویکرد مؤثر بود. دلیل آن این است که ABS به دلیل ظرفیت گرمایی ویژه‌ی بالا و هدایت حرارتی کمتر، تغییرات سطحی ضعیف‌تری ایجاد می‌کند و در پردازش‌های منفرد وضوح پایین‌تری دارد. اعمال PCA روی داده‌های فرکانسی در این ماده موجب شد که عیوب نیمه‌سطحی (5 و 10 میلی‌متر) با کنتراست بالاتر آشکار شوند و مرزبندی دقیق‌تری نسبت به حالت منفرد PPT پیدا کنند. بنابراین می‌توان گفت $PCA \rightarrow PPT$ برای ABS ابزاری بسیار کارآمد برای تقویت آشکارسازی عیوب نیمه‌سطحی می‌باشد. این نوع تحلیل ترکیبی در شکل ۷ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از شکل ۷ نشان داد:

- مرزبندی حفره‌ها به‌ویژه در فرکانس‌های میانی f_2 و f_3 به‌طور محسوسی شارپ‌تر شد و شکل هندسی عیوب واضح‌تر گردید.
- نسبت سیگنال به نویز افزایش یافت و نوسانات ناشی از ناهمگنی گرمایش سطحی به حداقل رسید.
- در ماده‌ی ABS، که به دلیل ظرفیت گرمایی ویژه بالا واکنش حرارتی کندتری دارد و تصاویر خام آن کنتراست ضعیفی نشان می‌دهند، این رویکرد توانست بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در وضوح عیوب نیمه‌سطحی (5 و 10 میلی‌متر) ایجاد کند.
- در PLA نیز عیوب سطحی همچنان قابل مشاهده بودند، اما ارزش اصلی این رویکرد در تقویت آشکارسازی نیمه‌سطحی‌ها بود.

این نتایج بیانگر آن است که استفاده از PCA به‌عنوان یک لایه پردازشی پس از PPT، کیفیت داده‌های فرکانسی را ارتقا می‌دهد و به‌ویژه برای موادی با کنتراست پایین مانند ABS بسیار مؤثر است.

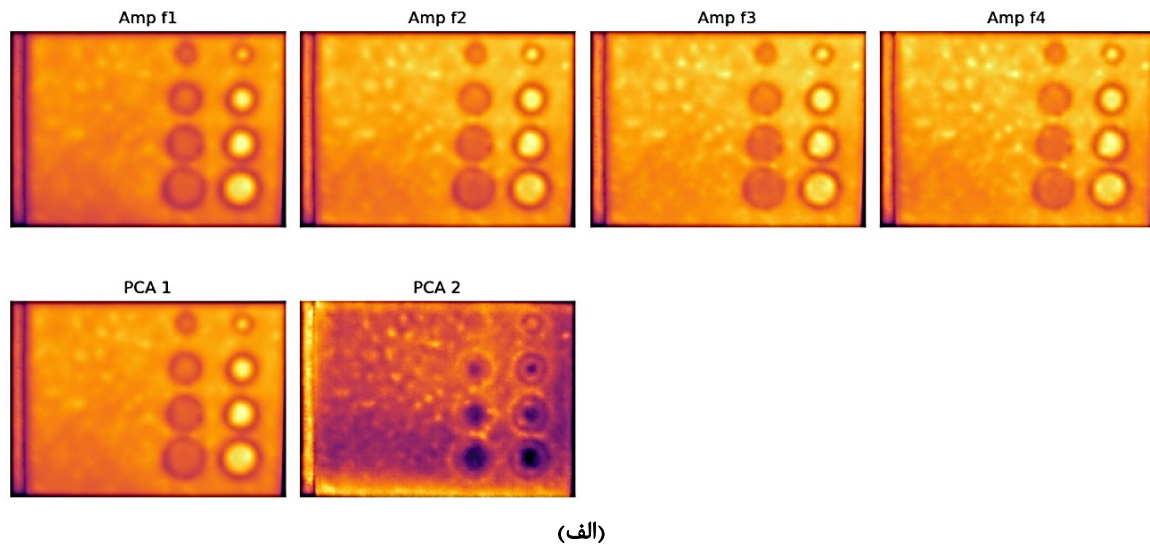
به‌طور خاص، عیوب در عمق‌های 5 و 10 میلی‌متر که در تصاویر خام و حتی در پردازش PCA کمتر آشکار بودند، در این روش به‌وضوح قابل تشخیص شدند. دلیل این موضوع آن است که نقشه‌های فاز نسبت به تغییرات ناخواسته مانند غیریکنواختی گرمایش یا تفاوت در ضریب گسیل سطحی حساسیت کمتری دارند و در عوض نسبت به تغییرات هدایت حرارتی ناشی از وجود عیب بسیار حساس هستند. این ویژگی باعث می‌شود PPT در شرایطی که نویز محیطی یا ناهمگنی سطح وجود دارد، عملکرد پایدارتری نسبت به PCA داشته باشد. در ABS نیز نتایج مشابهی به‌دست آمد، با این تفاوت که به دلیل رفتار حرارتی کندتر ماده، پاسخ در نقشه‌های فاز پایدارتر و کنتراست عیوب نیمه‌سطحی حتی از PLA واضح‌تر بود. در حالی که در PLA بیشتر عیوب کم‌عمق برجسته شدند، در ABS تمرکز PPT روی عیوب نیمه‌سطحی پررنگ‌تر بوده و امکان آشکارسازی دقیق‌تر آن‌ها را فراهم آورد.

بنابراین PPT ابزاری بسیار کارآمد برای آشکارسازی عیوب نیمه‌سطحی محسوب می‌شود و مکملی ضروری برای PCA به شمار می‌آید. ترکیب این دو روش می‌تواند امکان آشکارسازی طیف وسیع‌تری از عیوب (اعم از سطحی و نیمه‌سطحی) را فراهم سازد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

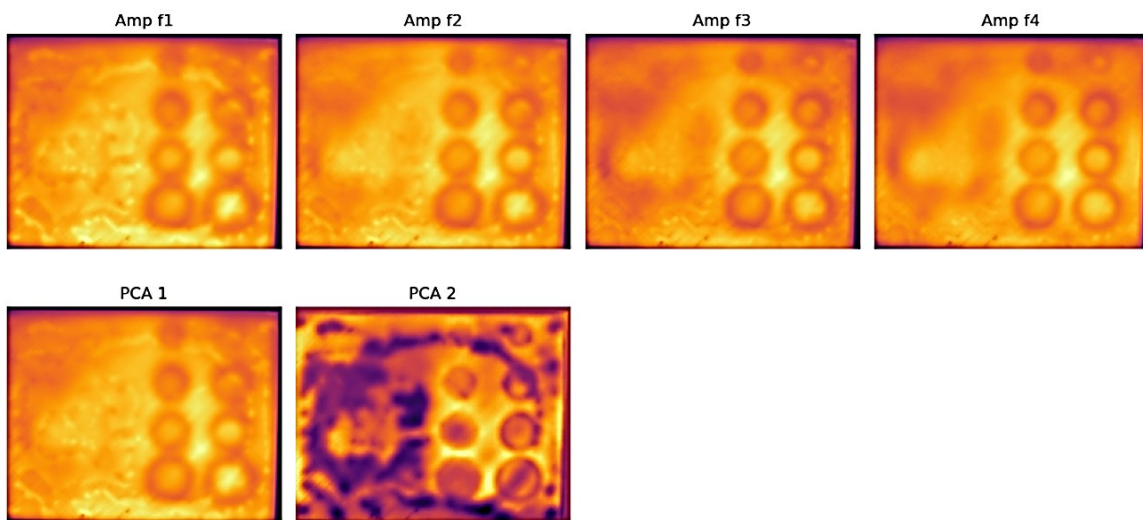
۳-۴- ترکیب دو روش PCA و PPT

همان‌گونه که در بخش‌های پیشین نشان داده شد، هر یک از روش‌های پردازش تصویر PCA و PPT به تنهایی قابلیت‌های ارزشمندی در آشکارسازی عیوب دارند، اما هیچ‌کدام به‌طور کامل طیف وسیعی از عیوب سطحی و نیمه‌سطحی را پوشش نمی‌دهند. روش PCA با کاهش بعد داده‌ها و استخراج مؤلفه‌های اصلی توانست نویز محیطی و ناهمگنی سطحی را حذف نموده و وضوح عیوب کم‌عمق را به‌طور چشمگیری افزایش دهد، اما در مورد عیوب نیمه‌سطحی محدودیت داشت. در مقابل، روش PPT با انتقال داده‌ها به حوزه فرکانس و استخراج نقشه‌های دامنه و فاز توانست عیوب نیمه‌سطحی را بهتر آشکار کند، ولی وضوح آن برای عیوب سطحی به‌ویژه در داده‌های خام پایین‌تر بود.

این واقعیت زمینه‌ساز ایده‌ی ترکیب دو روش شد؛ به این معنا که با ادغام مزایای PCA و PPT بتوان روشی به‌دست آورد که هم حساسیت بالای PCA به تغییرات سطحی و هم توانایی بالای PPT در شناسایی عیوب عمقی را دربر بگیرد. در این پژوهش، دو ترتیب متفاوت از ترکیب این دو روش مورد بررسی قرار گرفت:



(الف)



(ب)

شکل ۷ (الف) نتایج حاصل از روش PPT برای نمونه ABS در فرکانس‌های میانی (f2 و f3) که نواحی دارای عیب را با کنتراست حرارتی اولیه نمایش می‌دهد؛ **(ب)** تصویر نهایی پس از اعمال PCA روی داده‌های PPT که موجب افزایش وضوح مرز عیوب و تفکیک بهتر نواحی در عمق‌های ۵ و ۱۰ میلی‌متر می‌شود

Fig. 7 (a) PPT results for the ABS sample at mid frequencies (f2 and f3), showing the initial thermal contrast of defect areas; **(b)** final image after applying PCA to the PPT data, yielding clearer defect boundaries and improved separation of 5 mm and 10 mm subsurface regions

وقتی داده‌های PCA وارد PPT شدند، هرچند وضوح نیمه‌سطحی‌ها بهتر شد، اما همچنان نسبت به PLA کنتراست کمتری داشتند. با این حال، این ترتیب نیز نسبت به پردازش منفرد PPT یا PCA بهبود معناداری در آشکارسازی ایجاد کرد.

نتایج **شکل ۸** نشان داد:

- عیوب سطحی (۱ و ۲ میلی‌متر) همچنان وضوح بالایی داشتند و کنتراست مرزها نسبت به تصاویر خام و حتی PPT منفرد افزایش یافت.
- عیوب نیمه‌سطحی (۵ و ۱۰ میلی‌متر) نیز با شفافیت بیشتری نسبت به PPT منفرد قابل مشاهده شدند.

رویکرد ۲: ابتدا استخراج مؤلفه‌های اصلی، سپس تحلیل فرکانسی

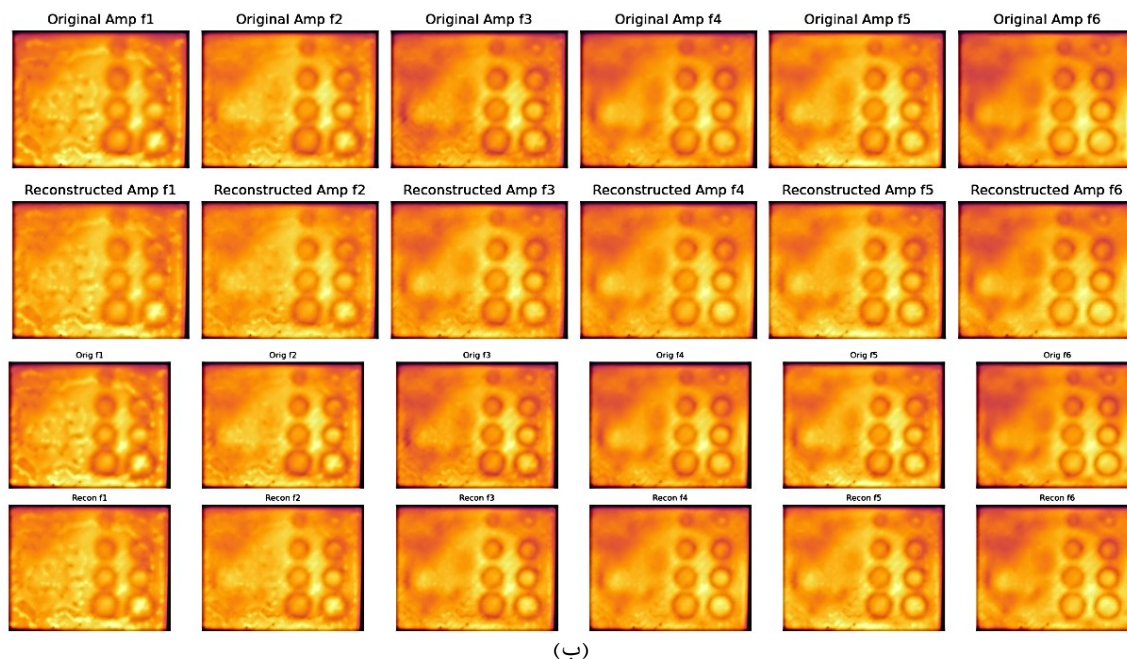
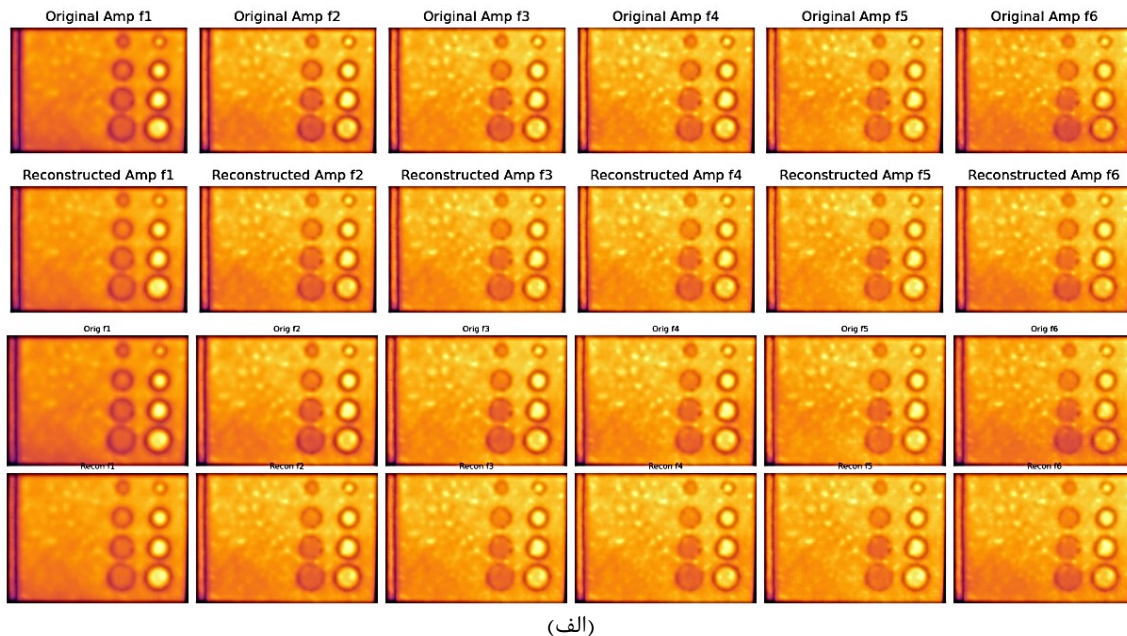
PCA → PPT

در این حالت ابتدا سری زمانی داده‌های حرارتی با PCA پردازش شدند تا مؤلفه‌های اصلی و نویززدایی شده استخراج گردد. سپس داده‌های حاصل وارد تحلیل فرکانسی PPT شدند. نتایج برای PLA نشان داد که عیوب سطحی و کم‌عمق همچنان وضوح بالایی داشتند و انتقال داده‌های PCA به حوزه فرکانس سبب شد که عیوب نیمه‌سطحی نیز با شفافیت بیشتری نمایان شوند.

در ABS، این ترتیب هم مؤثر بود اما نسبت به PLA اثر کمتری داشت. همان‌طور که در **شکل ۸** نشان داده شده‌است، علت این موضوع آن است که PCA در ABS از ابتدا نتوانست به‌خوبی مؤلفه‌های سطحی را تقویت کند (به‌دلیل کنتراست پایین)، بنابراین

به‌طور کلی، $PCA \rightarrow PPT$ ترکیبی متوازن ایجاد کرد که هم مزیت وضوح بالای PCA برای سطوح کم‌عمق و هم مزیت دقت بالای PPT برای اعماق بیشتر را در خود دارد.

- داده‌های فرکانسی مبتنی بر PCA پایداری بیشتری داشتند و نوسانات ناشی از نویز محیطی یا ناهمگنی حرارتی در نقشه‌های فاز کمتر بود.
- در نمونه PLA، که به دلیل هدایت حرارتی بالاتر عیوب سطحی سریع‌تر نمایان می‌شوند، این رویکرد توانست تعادل مناسبی بین آشکارسازی سطحی و نیمه‌سطحی برقرار کند.



شکل ۸ (الف) خروجی روش PCA برای نمونه PLA که تغییرات حرارتی سطح را با تفکیک نویز بهتر نشان می‌دهد؛ **(ب)** نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی PPT بر روی مؤلفه‌های اصلی استخراج‌شده از PCA، که باعث افزایش کنتراست و بهبود هم‌زمان آشکارسازی عیوب سطحی و نیمه‌سطحی (۱ تا ۱۰ میلی‌متر) می‌شود

Fig. 8 (a) PCA output for the PLA sample, showing surface thermal variations with improved noise suppression; **(b)** PPT analysis applied to the principal components extracted from PCA, enhancing contrast and enabling simultaneous detection of both surface and subsurface defects (1–10 mm)

۳-۵- مقایسه نتایج PLA و ABS

به منظور ارزیابی کمی توانایی روش‌های پردازش تصویر در آشکارسازی عیوب، از شاخص نسبت سیگنال به نویز (SNR) استفاده شد. در این شاخص، مقدار میانگین پاسخ حرارتی ناحیه معیوب نسبت به انحراف معیار پس‌زمینه سالم سنجیده می‌شود؛ بنابراین افزایش مقدار SNR نشان‌دهنده بهبود کنتراست و جدایش واضح‌تر ناحیه معیوب از ساختار سالم است. از آنجا که افزایش شدت سیگنال تنها در صورتی مفید است که با کاهش هم‌زمان نویز همراه باشد، SNR یک ملاک استاندارد و قابل اعتماد برای سنجش کیفیت پردازش تصاویر حرارتی محسوب می‌شود [۵۱]. به کارگیری این شاخص امکان مقایسه عینی و عددی عملکرد روش‌های مختلف پردازش تصویر از جمله PCA، PPT و ترکیب آن‌ها را فراهم کرده و در پژوهش‌های معتبر ترموگرافی فعال نیز مورد استفاده قرار گرفته است. بر همین اساس، در این مطالعه نیز از SNR برای بررسی تأثیر نوع ماده و ترتیب ترکیب روش‌ها در بهبود آشکارسازی عیوب استفاده شده است.

مقایسه رفتار دو پلیمر نشان داد که PLA به دلیل هدایت حرارتی بیشتر، عیوب سطحی را سریع‌تر و با کنتراست بالاتر نمایان می‌کند. این موضوع باعث می‌شود که در پردازش PCA، نتایج PLA شفاف‌تر و واضح‌تر باشد. در مقابل، ABS به دلیل رفتار حرارتی پایدارتر، اگرچه در تصاویر خام وضوح کمتری دارد، اما در پردازش PPT عملکرد قابل اعتمادتری نشان داد و جداسازی عیوب نیمه سطحی در آن دقیق‌تر بود. به بیان دیگر، PLA برای شناسایی سریع عیوب نزدیک به سطح مناسب‌تر است، در حالی که ABS در شرایط پردازش فرکانسی برای عیوب عمیق‌تر مزیت نسبی دارد. این تفاوت رفتاری ناشی از خواص ذاتی دو پلیمر در ظرفیت گرمایی ویژه و نرخ انتشار حرارت است و اهمیت انتخاب ماده را در آزمون‌های غیرمخرب حرارتی برجسته می‌سازد.

در PLA، رویکرد PPT → PCA عملکرد متوازن‌تری داشت و توانست هم‌زمان عیوب سطحی و نیمه سطحی را با وضوح بالا آشکار کند. در ABS، رویکرد PCA → PPT نتیجه بهتری داد و موجب شد عیوب نیمه سطحی با دقت بالاتری آشکار شوند. این یافته نشان می‌دهد که انتخاب ترتیب ترکیب نه تنها به عمق عیب بلکه به خواص حرارتی ماده نیز وابسته است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب این دو روش، با ترتیب PPT → PCA و با ترتیب PPT → PCA، به طور معناداری دقت آشکارسازی را ارتقا می‌دهد. این رویکرد ترکیبی نه تنها محدودیت‌های هر روش منفرد را جبران می‌کند، بلکه طیفی از عیوب سطحی تا نیمه سطحی را پوشش می‌دهد. چنین یافته‌ای اهمیت ویژه‌ای در کاربردهای صنعتی دارد؛ جایی که تشخیص دقیق و مطمئن عیوب در اعماق مختلف برای تضمین کیفیت و ایمنی قطعات ضروری است.

در ترموگرافی فعال، عمق قابل تشخیص عیوب تابع نفوذ حرارتی ماده است که طبق Error! Reference source not found. توصیف می‌شود.

$$\sqrt{at} = \delta \quad (1)$$

این رابطه بیان می‌کند که هرچه ضریب نفوذ حرارتی (α) بیشتر باشد، حرارت در مدت زمان اعمال شده (t) به عمق بیشتری نفوذ می‌کند. از آنجا که پلیمرهایی نظیر PLA و ABS دارای رسانایی حرارتی پایین و ظرفیت گرمایی ویژه بالا هستند، نفوذ حرارت در آن‌ها محدود بوده و شناسایی عیوب در عمق‌های بزرگ‌تر با کاهش محسوس کنتراست همراه می‌شود [۱۳]. بر این اساس، در پژوهش حاضر عمق‌های ۱، ۲، ۵ و ۱۰ میلی‌متر انتخاب شدند تا طیف عیوب سطحی تا نیمه سطحی پوشش داده شود. نتایج نشان داد که برای عمق‌های کمتر، خصوصاً در PLA به دلیل هدایت حرارتی بالاتر، پاسخ حرارتی با وضوح بیشتری قابل آشکارسازی است، درحالی‌که تشخیص عیوب عمیق‌تر مانند عمق ۱۰ میلی‌متر نیازمند پردازش‌های فرکانسی و ترکیبی است تا کنتراست کافی ایجاد گردد.

۴- نتیجه‌گیری

- در این پژوهش، با هدف بهبود فرآیند آشکارسازی عیوب در قطعات پلیمری PLA و ABS، از دو روش پردازش تصویر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و ترموگرافی پالسی فازی (PPT) به صورت منفرد و ترکیبی استفاده شد. ارزیابی عملکرد این روش‌ها بر اساس عمق و نوع عیوب، و همچنین ویژگی‌های حرارتی مواد، انجام گرفت. نتایج حاصل، نکات زیر را به صورت جمع‌بندی شده نشان می‌دهد:
- به کارگیری ترکیبی از روش‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و ترموگرافی پالسی فازی (PPT) موجب افزایش چشمگیر دقت در آشکارسازی عیوب در نمونه‌های پلیمری PLA و ABS شد. این ترکیب توانست محدودیت‌های هر روش به تنهایی را برطرف سازد و در مجموع عملکردی متعادل‌تر و پایدارتر ارائه دهد.
 - در تحلیل جداگانه‌ی هر روش، مشخص شد که PCA با تمرکز بر مؤلفه‌های غالب و حذف نویزهای حرارتی، در آشکارسازی عیوب سطحی و کم عمق (۱ و ۲ میلی‌متر) کارایی بسیار بالایی دارد. این ویژگی در نمونه‌های PLA به دلیل واکنش حرارتی سریع‌تر و هدایت بالاتر، موجب مرزبندی واضح‌تر و کنتراست بیشتر عیوب شد. در مقابل، در نمونه‌های ABS که ظرفیت گرمایی ویژه بالاتر و رسانایی پایین‌تری دارند، عملکرد PCA محدودتر بوده و مرز عیوب با محوشدگی نسبی همراه شد.
 - روش PPT با تبدیل داده‌های زمانی به حوزه‌ی فرکانس و استخراج نقشه‌های فاز، عملکرد بهتری در آشکارسازی عیوب نیمه سطحی (۵ و ۱۰ میلی‌متر) از خود نشان داد. در این حالت، پایداری سیگنال‌های فرکانسی در ABS به دلیل پاسخ حرارتی کندتر بیشتر بود و وضوح عیوب نیمه سطحی افزایش یافت. در PLA نیز PPT

منابع

- [1] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, "Infrared thermography for condition monitoring – A review," *Infrared Physics & Technology*, vol. 60, pp. 35-55, 2013/09/01/ 2013, doi:10.1016/j.infrared.2013.03.006.
- [2] P. Meshkizadeh, "Assigning the heating mechanism for characterizing corrosion defects using thermography," master Faculty of Mechanical Engineering, University of Tehran, 2020.
- [3] B. K. N. Rao, "Condition monitoring and the integrity of industrial systems," in *Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology*, A. Davies Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998, pp. 3-34, doi: 10.1007/978-94-011-4924-2_1.
- [4] A. I. Moskovchenko, M. Švantner, V. P. Vavilov, and A. O. Chulkov, "Characterizing Depth of Defects with Low Size/Depth Aspect Ratio and Low Thermal Reflection by Using Pulsed IR Thermography," (in eng), *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 8, Apr 10 2021, doi:10.3390/ma14081886.
- [5] K. Nategh, "Improving the nondestructive thermography inspection results for detection of circular defects in coated metals using principal component analysis," *NDT Technology*, vol. 2, no. 9, pp. 33-40, 2022, doi:10.30494/jndt.2022.339719.1092.
- [6] A. Ardebili and M. Farahani, "Delamination Defect Evaluation in CFRP Composite Patches by the Use of Active Thermography," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 41, no. 3, p. 61, 2022/09/05 2022, doi: doi:10.1007/s10921-022-00892-z.
- [7] Y. Chung, S. Lee, and W. Kim, "Latest Advances in Common Signal Processing of Pulsed Thermography for Enhanced Detectability: A Review," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 24, p. 12168, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/24/12168>.
- [8] J. Andrés, J. M. López-Higuera, and F. J. Madruga, "Quantification by Signal to Noise Ratio of Active Infrared Thermography Data Processing Techniques," *Optics and Photonics Journal*, vol. 03, pp. 20-26, 01/01 2013, doi:10.4236/opj.2013.34A004.
- [9] R. Khoshkbar, M. Farahani, M. Safarabadi, and S. Asghari, "Using of Modulated Thermography for Nondestructive Testing of Polymer Plates," *NDT Technology*, vol. 2, no. 4, pp. 38-45, 2019, doi:10.30494/jndt.2019.95383.
- [10] M. Rodríguez-Martín et al., "Predictive Models for the Characterization of Internal Defects in Additive Materials from Active Thermography Sequences Supported by Machine Learning Methods," *Sensors*, vol. 20, no. 14, doi:10.3390/s20143982.
- [11] M. Rodríguez-Martín, J. Pisonero, D. González-Aguilera, and F. J. Madruga, "Flash thermography to detect and evaluate impacts in polycarbonate parts produced by additive manufacturing," *NDT & E International*, vol. 146, p. 103163, 2024, doi:10.1016/j.ndteint.2024.103163.
- [12] J. L. Bartlett, F. M. Heim, Y. V. Murty, and X. Li, "In situ defect detection in selective laser melting via full-

باعث بهبود آشکارسازی نیمه‌سطحی‌ها نسبت به PCA به تنهایی شد، هرچند اثر آن به اندازه ABS چشمگیر نبود.

- در رویکردهای ترکیبی، ترتیب اعمال روش‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت آشکارسازی داشت:
- در ترکیب PCA → PPT، داده‌های فرکانسی حاصل از PPT با استفاده از PCA فشرده‌سازی و نویززدایی شدند. این رویکرد در ABS کارایی بالایی داشت و موجب افزایش کنتراست و وضوح عیوب نیمه‌سطحی شد.
- در ترکیب PPT → PCA، داده‌های خام ابتدا با PCA پردازش و سپس وارد تحلیل فرکانسی PPT شدند. این رویکرد در PLA نتایج مطلوب‌تری داشت، به‌طوری‌که توانست به‌صورت همزمان وضوح عیوب سطحی و نیمه‌سطحی را ارتقا دهد.
- نتایج کلی نشان داد که انتخاب ترتیب ترکیب به خواص حرارتی ماده وابسته است؛ در موادی با واکنش حرارتی سریع‌تر مانند PLA، رویکرد PPT → PCA بهترین توازن میان عیوب سطحی و نیمه‌سطحی را ایجاد می‌کند، در حالی‌که در مواد با پاسخ حرارتی کندتر مانند ABS، رویکرد PPT → PCA به دلیل پایداری بیشتر داده‌های فرکانسی، عملکرد مؤثرتری دارد.
- در نهایت، می‌توان گفت ترکیب این دو روش به‌عنوان یک راهکار تطبیقی و قابل تنظیم بسته به جنس ماده و عمق عیوب، قابلیت بهینه‌سازی فرآیند آشکارسازی را داراست و می‌تواند در کاربردهای صنعتی برای کنترل کیفیت و پایش عیوب در قطعات پلیمری مورد استفاده قرار گیرد.
- روش ترکیبی پیشنهادی، با ادغام قابلیت نویززدایی و برجسته‌سازی مؤلفه‌های غالب در PCA و حساسیت بالای PPT به رفتار حرارتی در اعماق بیشتر، توانست نسبت به پردازش‌های منفرد عملکرد دقیق‌تری در آشکارسازی عیوب سطحی و نیمه‌سطحی ارائه دهد.
- این ترکیب موجب شد محدودیت‌های هر روش، از جمله وابستگی PCA به کنتراست سطحی و افت کنتراست PPT در عیوب کم‌عمق، تا حد قابل‌توجهی جبران گردد. افزون بر این، پایداری بیشتر نتایج در برابر غیریکنواختی حرارتی و افزایش SNR نشان داد که افزایش کیفیت داده بدون افزایش پیچیدگی تجهیزات امکان‌پذیر است.
- بنابراین، رویکرد پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کارآمد و قابل پیاده‌سازی در شرایط صنعتی که سرعت، پوشش سطح بزرگ و قابلیت اعتماد بالا اهمیت ویژه‌ای دارد مورد استفاده قرار گیرد.
- تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و اصول اخلاقی رعایت شده‌است.
- تعارض منافع:** در این مقاله هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

field infrared thermography," Additive Manufacturing, vol. 24, pp. 595-605, 2018/12/01/ 2018, doi:10.1016/j.addma.2018.10.045.

[13] R. Yang and Y. He, "Optically and non-optically excited thermography for composites: A review," Infrared Physics & Technology, vol. 75, pp. 26-50, 2016/03/01/ 2016, doi:10.1016/j.infrared.2015.12.026.

[14] K. H. H. Goh, Q. F. Lim, and P. K. Pallathadka, "Asynchronous Lock In Thermography of 3D Printed PLA and ABS samples," p. arXiv:1805.01343, doi:10.48550/arXiv.1805.01343.