



Evaluating the Debonding Defect Detectability in Thermal Barrier Coatings (TBC) by Nondestructive Active Thermography Technique

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Zarezadeh Mehrizi M. A.¹,
Farahani M. R.^{1*}
Safarabadi M.¹
Rezaee Hajideh M.¹
Farhang M.¹

How to cite this article

Zarezadeh Mehrizi M. A, Farahani M. R, Safarabadi M, Rezaee Hajideh M, Farhang M. Evaluating the Debonding Defect Detectability in Thermal Barrier Coatings (TBC) by Nondestructive Active Thermography Technique. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(12):717-726.

¹ School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

*Correspondence

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

mrfarahani@ut.ac.ir

Article History

Received: August 26, 2024

Accepted: January 21, 2025

ePublished: February 15, 2025

ABSTRACT

In thermal barrier coatings (TBC), surface cracks, debonding, and thickness degradation may occur during the manufacturing process or life cycle, leading to poor performance and ultimately a dangerous system failure. The main goal of non-destructive testing of thermal barrier coatings is to detect these defects and determine the health of the coating. Various non-destructive inspection methods have been proposed to evaluate thermal barrier coatings, and due to the numerous advantages of thermography, including high speed, low cost, safety, no need for direct contact, automation capability, and inspection of a large area of the part, this method has received special attention from researchers. This study will present a method for manufacturing samples with different diameters of artificial separation defects. The following is the equipment's arrangement and the sample's thermography process. It was concluded that blackening the surface of the sample by increasing the amount of thermal energy absorption increased the ability to identify separation defects and increased the signal-to-noise ratio by 257%. Finally, by implementing different filters on the recorded raw thermal images, it has been shown that in both cases the best filter in terms of SNR is the median filter and then the Gaussian filter. The background removal filter also had no noticeable effect on increasing the signal-to-noise ratio and acted as a complement to the median and Gaussian filters by reducing the fixed error.

Keywords Thermal Barrier Coating, Active Thermography, Non-Destructive Inspection, Debonding Defects, Contrast Enhancement

CITATION LINKS

1- Development of 1600°C-Class High-efficiency Gas... 2- Investigation and development of ... 3- fukuchi2013... 4- NDT and E International Nondestructive evaluation of... 5- Thickness Assessment of Thermal Barrier ... 6- Thirty Years of Thermal Barrier... 7- Progress and Trends in Non-destructive Testing for ... 8- Inspecting thermal barrier... 9- Flash pulse phase thermography... 10- Active IR Thermography Evaluation of Coating ... 11- Evaluation of coating thickness ... 12- Theoretical and experimental study ... 13- Thermal Behavior Variations in Coating ... 14- Quantitative detection of defects based on ... 15- ptimization of pulsed thermography inspection ... 16- Developing effective thermal signal ... 17- Thermographic measurement of ... 18- Characterization of Thermal Barrier Coatings ... 19- Thermography Sequence Processing ... 20- Experimental Research on Ysz Tbc Structure... 21- Delamination-indicating of atmosphere-plasma-sprayed ... 22- Experimental study on debonding defects ... 23- Defect detection in thermography ... 24- rtificial disbonds for calibration of ... 25- Exact localization of debonding defects in thermal ... 26- Improving the Nondestructive Thermography... 27- Investigating the Excellence of Different ...

ارزیابی قابلیت تشخیص عیوب جدایش در پوشش‌های سد حرارتی (TBC) با روش آزمون غیرمخرب گرمانگاری فعال

محمد امین زارع زاده مهریزی^۱، محمدرضا فراهانی^{۱*}، مجید صفرآبادی فراهانی^۱، مجتبی رضایی حاجیده^۱، مجید فرهنگ^۱

^۱ مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در پوشش‌های سد حرارتی (TBC) ترک‌های سطحی، جدایش پوشش از فلز پایه و تغییرات ضخامت ممکن است در طول فرایند ساخت یا چرخه عمر رخ دهند که منجر به عملکرد ضعیف و در نهایت منجر به یک واماندگی خطرناک در سیستم شود. اصلی‌ترین هدف آزمایش‌های غیرمخرب پوشش‌های سد حرارتی، تشخیص این عیوب و تعیین سلامت پوشش است. روش‌های مختلف بازرسی غیرمخرب برای ارزیابی پوشش‌های سد حرارتی مطرح شده‌اند که با توجه به مزایای متعدد گرمانگاری از جمله سرعت بالا، ارزان، ایمن، بدون نیاز به تماس مستقیم، قابلیت اتوماسیون و بازرسی سطح وسیعی از قطعه، این روش مورد توجه ویژه محققان قرار گرفته است. در این پژوهش روش ساخت نمونه‌هایی با قطرهای مختلف عیوب جدایش مصنوعی ارائه خواهد شد. در ادامه نحوه چیدمان تجهیزات و فرایند گرمانگاری از نمونه ارائه شده است. نتیجه‌گیری شد که مشکلی کردن رنگ سطح نمونه با افزایش میزان جذب انرژی حرارتی، قابلیت شناسایی عیوب جدایش را بالاتر برده و نسبت سیگنال به نویز را به میزان ۲۵۷ درصد افزایش داد.

در نهایت با پیاده‌سازی فیلترهای مختلف روی تصاویر خام حرارتی ضبط‌شده، نشان داده شده است که در هر دو نمونه بهترین فیلتر از منظر SNR، فیلتر میانه و در مرحله بعد فیلتر گاوسین است. فیلتر حذف تصویر زمینه نیز اثر محسوسی در افزایش نسبت سیگنال به نویز نداشته است و با کاهش خطای ثابت به عنوان مکمل فیلترهای میانه و گاوسین عمل کرده است.

کلیدواژه‌ها: پوشش عایق سد حرارتی، گرمانگاری فعال، بازرسی غیرمخرب، عیوب جدایش، افزایش قابلیت شناسایی عیوب

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲

*نویسنده مسئول: mrfarahani@ut.ac.ir

۱- مقدمه

در سال ۲۰۱۶ دمای مجاز کاری توربین‌ها ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد بوده که تا ۲۰۲۰ به ۱۷۰۰ درجه سانتیگراد رسید^(۱). پیشرفت‌های موجود در آلیاژسازی، خنک‌کاری و اعمال پوشش‌های مقاوم در برابر حرارت، اجازه بالا بردن دما تا این اندازه را داده‌اند. اعمال پوشش سد حرارتی می‌تواند دمای سطح زیرلایه را ۵۰-۱۵۰ درجه سانتیگراد کاهش داد. این اختلاف دما به شدت به شار حرارتی و ضخامت پوشش بالایی بستگی دارد^(۲).

با گذشت زمان عیوب مختلفی در پوشش‌های سد حرارتی مثل جدایش بین لایه پوشش و فلز پایه، کاهش ضخامت پوشش و ... ممکن است ایجاد شوند که عدم توجه به آنها ممکن است منجر

به بروز حوادث ناگواری شود. از الزامات سیستم‌های حساس (هواپیماها، نیروگاه‌های حرارتی و اتمی و ...) بازرسی‌های دوره‌ای با هدف شناسایی عیوب موجود است. در گذشته بر اساس استراتژی نگهداری مبتنی بر زمان، بعد از سپری شدن عمر قطعه آنرا تعمیر یا تعویض می‌کردند. با پیشرفت صنعت و رقابتی شدن بازارها، استفاده بهینه از قطعات و کاهش هزینه‌ها مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته است. برای دستیابی به این هدف لازم است تا بر اساس استراتژی نگهداری مبتنی بر شرایط و با توسعه روش‌های آزمون غیرمخرب، عمر باقیمانده قطعات تخمین زده شود.

با توجه به اینکه پوشش‌های سد حرارتی در قسمت‌های دما بالای موتورها هستند انجام آزمون‌های مخرب سخت و غیراقتصادی است. بنابراین برای اجرای یک استراتژی نگهداری مبتنی بر شرایط، فناوری‌های بازرسی غیرمخرب برای ارزیابی پارامترهای مختلف پوشش (ضخامت پوشش، جدایش، حفرات و تخلخل‌ها، رسانایی حرارتی) ضروری است^(۳،۴).

تست‌های غیرمخرب یکی از روش‌های مهم برای تضمین کیفیت قطعات و تجهیزات است. منحصربه‌فرد بودن ویژگی‌های نقص پوشش سد حرارتی و تخلخل بالای آنها باعث می‌شود تا روش‌های بازرسی غیرمخرب مرسوم، مانند تابش صوتی، آزمایش نفوذ، آزمایش جریان گردابی (این تکنیک نمی‌تواند بین جدایش و تغییرات ضخامت پوشش تمایز قائل شود زیرا هر دو به طور یکسان بر بلند شدن پروپ تأثیر می‌گذارند)، آزمایش اولتراسونیک (امواج اولتراسونیک توسط ترک‌ها و منافذ متعدد پوشش سد حرارتی پراکنده می‌شوند) برای ارزیابی پوشش‌های سد حرارتی مناسب نباشند. روش‌های فوق عموماً نیاز به اسکن کل سطح دارند که این خود یک فرایند زمان‌بر است. با توجه به محدودیت‌های روش‌های بازرسی غیرمخرب مرسوم و مزایایی متعدد گرمانگاری نسبت به دیگر روش‌ها، این روش به عنوان یک تکنیک استاندارد (EN-4179 و NAS-410) برای ارزیابی پوشش‌های سد حرارتی شناخته شده است. بنابراین، توسعه این تکنیک و افزایش دقت در آن با هدف شناسایی نقایص پوشش سد حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار است^(۵،۶).

در آزمون گرمانگاری تابش امواج مادون قرمز از نمونه هدف به صورت مجموعه‌ای از تصاویر حرارتی (ترموگرام) ثبت می‌شوند. ترموگرام امکان مشاهده و ارزیابی توزیع دما را در سطح خارجی جسم و در زمان‌های مختلف می‌دهد. با توجه به اینکه عیوب، خواص حرارتی متفاوتی از قطعه دارند، وجود آنها موجب غیر یکنواختی توزیع حرارت در سطح خارجی قطعه می‌شود. به عنوان مثال فاصله هوایی بین پوشش و زیرلایه فلزی در عیب جدایش، موجب کاهش سرعت انتقال حرارت می‌شود. بنابراین در محل‌هایی که عیوب جدایش وجود دارد، دمای سطح خارجی نمونه نسبت به نواحی دیگر با سرعت کمتری کاهش یافته و این نواحی زمان

در ادامه لیو و همکاران⁽⁷⁾ یک تکنیک ساخت جدید برای عیوب جدایش توسعه دادند که توانست محدودیت قبلی در روش گرزگورز پتاشک را مرتفع کند. فرآیند دقیق به شرح زیر است: (۱) یک سوراخ پیچ در بستر فولادی ایجاد شد. (۲) یک پیچ در سوراخ بسته شد (۳) قسمت اضافی پیچ با برش مکانیکی برداشته شد. (۴) سطح بالایی پیچ صیقلی شد تا با سطح بالایی بستر هم‌سطح شود. (۵) سطح فوقانی نمونه تحت فرایند ساچمه‌زنی قرار گرفت (۶) پوشش سرامیکی با ضخامت ۴۰۰ میکرومتر روی سطح بالایی نمونه اسپری شد. (۷) پیچ برای تشکیل پوشش هوا کمی باز شد و یک نمونه پوشش سد حرارتی با عیوب جدایش مصنوعی ساخته شد. هنگامی که پیچ به طور کامل از سوراخ رزوه شده خارج شد، یک نمونه پوشش سد حرارتی با نقص سوراخ کور کف تخت نیز تهیه شده است. بر اساس نتایج مطرح شده، هر دو روش ساخت عیب جدایش مصنوعی که توسط لیو مطرح شده است، پاسخ حرارتی یکسانی گرفتند.

جیاوو و همکاران⁽²⁵⁾ برای نزدیک کردن نقص جدایش مصنوعی به نقص جدایش واقعی یک تکنیک جدید برای ساخت عیوب جدایش پیشنهاد کردند، یعنی تکنیک جاسازی ذرات توخالی سرامیکی. فرآیند خاص تکنیک ساخت به شرح زیر بود: (۱) بستر سوپر آلیاژی آماده شد (۲) سطح زیرلایه فلزی تحت فرایند ساچمه زنی مکانیکی قرار گرفت (۳) پس از ساچمه زنی، لایه میانی روی سطح اسپری شد (۴) از لیزر برای حک کردن شیار به عنوان نقص پیش ساخته روی لایه میانی استفاده شد (۵) مخلوط بهینه شده با ذرات توخالی سرامیکی و چسب با تحمل دمای بالا در ناحیه‌ای که لایه میانی برداشته شده بود ریخته شد (۶) روکش سرامیکی روی سطح نمونه پاشیده شد.

علاوه بر پیچیدگی‌های ساخت، محدودیت روش فوق این بود که پس از پاشش لایه سرامیکی، نواحی معیوب دارای فرورفتگی جزئی شده و با چشم غیر مسلح قابل شناسایی بودند.

بر اساس مطالعات صورت گرفته در مورد روش‌های ایجاد عیوب جدایش مصنوعی، مشخص شد که سه روش ساخت مرسوم است، این روش‌ها عبارت‌اند از:

- (۱) روش اول: ایجاد سوراخ کف تخت (پرکاربردترین)
- (۲) روش گرزگورز پتاشک و لیو: روش ایجاد سوراخ در قطعه و پرکردن آن به وسیله پیچی از جنس خود قطعه
- (۳) روش جیاوو: روش ابتکاری با استفاده از ساچمه‌های سرامیکی تو خالی

عیب جدایش مصنوعی ایجاد شده باید دارای چهار ویژگی مهم باشد تا بتواند از حیث رفتاری مشابهت بالایی با عیب واقعی در تست ترموگرافی داشته باشد. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از:

- (۱) عیب مصنوعی مانند عیب واقعی از ظاهر قطعه قابل تشخیص نباشد.

بیشتری برای سرد شدن و هم دمایی با محیط اطراف لازم دارند. بنابراین عیوب جدایش به صورت نقاطی با دمای بالاتر از نواحی سالم مجاور، قابل تشخیص خواهند بود. آزمون گرم‌نگاری به دو دسته گرم‌نگاری فعال و گرم‌نگاری غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شود. در آزمون گرم‌نگاری غیرفعال با توجه به اینکه دمای جسم با محیط اطراف متفاوت است، نیازی به استفاده از منبع حرارتی خارجی نیست. این روش در بازرسی تجهیزات الکترونیکی، موتورها، پست‌های برق و ... کاربرد دارد. در آزمون گرم‌نگاری فعال از منبع حرارتی خارجی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در این پژوهش دمای جسم با محیط اطراف یکسان است، آزمون گرم‌نگاری فعال انتخاب می‌شود⁽⁷⁻¹⁶⁾.

یکی از پرکاربردترین روش‌های گرم‌نگاری فعال، روش گرم‌نگاری پالسی است. در این روش پالس حرارتی کوتاه (در حدود ۲ میلی‌ثانیه) و پرنرژی توسط یک یا چند لامپ فلاش به نمونه اعمال می‌شود. بسته به قدرت تفکیک حرارتی دوربین، در صورتی که اختلاف دما بین نواحی معیوب و سالم در حدود چند صدم کلون باشد، می‌توان آنرا توسط دوربین حرارتی شناسایی کرد. عوامل بسیاری از جمله توزیع حرارتی غیریکنواخت، نویز، خطای دوربین حرارتی و ... موجب سخت شدن شناسایی عیب می‌شوند. در نتیجه افزایش قدرت شناسایی نقص با کاهش نویز و افزایش تفکیک‌پذیری، یکی از چالش‌های اساسی در آزمون گرم‌نگاری است⁽¹⁷⁻²³⁾.

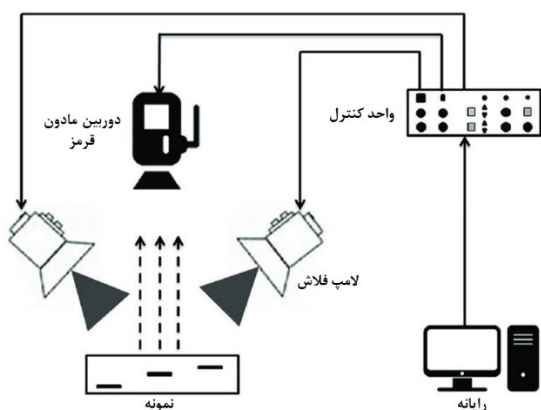
۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- روش ساخت نمونه و اعمال پوشش

تکنیک ساخت عیوب جدایش مصنوعی، نقش مهمی در پیشرفت بازرسی غیر مخرب در پوشش‌های سد حرارتی ایفا می‌کند. چالش ساخت و شناسایی عیوب جدایش مصنوعی این است که در داخل نمونه پوشش سد حرارتی رخ می‌دهند و مثل ترک با بازرسی سطح نمونه قابل شناسایی نیستند. در ادامه بر مرور صورت گرفته روی مقالات و منابع مشابه، روش‌های ساخت عیوب جدایش مصنوعی در پوشش‌های سد حرارتی شرح داده شده‌اند. این روش‌ها به صورت جزئی بررسی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در نهایت این فصل بهترین روش ساخت عیوب جدایش مصنوعی در بین روش‌های موجود معرفی و برای ساخت نمونه انتخاب شده است. گرزگورز پتاشک و همکاران⁽²⁴⁾ یک روش جدید برای ایجاد جدایش مصنوعی پیشنهاد کردند. در این روش یک سوراخ کف تخت ایجاد شده و پیچی که از همان ماده زیرلایه ساخته شده بود، وارد آن می‌شود. رزوه با گریس فلزی رسانای حرارتی پر شده بود، بنابراین مواد زیر ناحیه جدایش به طور موثر دوباره جایگزین شد. در نتیجه، جریان گرمای جانبی در زیر جدایش مانند جدایش واقعی رخ خواهد دهد.

باشد. فاصله دوربین از سطح نمونه طوری تنظیم شد تا کل نمونه در پنجره ضبط دوربین قرار گیرد. این فاصله برابر با ۳۹ سانتی‌متر است. با اعمال این نکات کیفیت تصاویر ثبت شده از عیوب افزایش یافت.

دو عدد لامپ فلاش نوری با توان ۲ کیلووات استفاده شد. این لامپ‌ها با فاصله برابر به میزان ۲۵ سانتی‌متر از سطح نمونه و زاویه ۴۵ درجه نسبت به نمونه قرار می‌گیرند تا توزیع حرارت یکنواخت باشد. تصویر دوربین، لامپ فلاش و نحوه چیدمان در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱) تجهیزات تصویربرداری

تصاویر حرارتی به صورت بازتابشی در طول مدت زمان حرارت‌دهی و سرد شدن نمونه ذخیره‌سازی شد. چندین مرحله تست گرمانگاری روی نمونه صورت گرفت تا بهترین تصاویر خام حرارتی استخراج شوند. در این مرحله نحوه چیدمان تجهیزات و فواصل آنها از نمونه، بهینه‌سازی شد.

تصاویر ذخیره‌شده توسط دوربین حرارتی ضبط و در رایانه ذخیره شد. در ادامه این نتایج ارائه و تحلیل‌های مربوطه بیان خواهد شد.

۲-۳- روش‌های پردازش تصویر

در این بخش به منظور بهبود کیفیت نتایج به دست آمده و افزایش قابلیت شناسایی عیوب و کاهش نویز، تعدادی از روش‌های پردازش تصویر پیاده‌سازی خواهد شد. این روش‌ها عبارت‌اند از حذف تصویر زمینه، فیلتر گاوسین و فیلتر میانه.

۲-۳-۱- حذف تصویر زمینه

به دلیل وجود نویزهای مختلف، عیوب واقعی به راحتی قابل شناسایی نیستند. به منظور کاهش این نویزها، ابتدا یک تصویر حرارتی پس زمینه قبل از تحریک لامپ فلاش گرفته می‌شود، سپس تصاویر حرارتی ثبت شده و عملیات تفریق تصویر پس زمینه از تصاویر حرارتی ثبت شده، صورت می‌گیرد (20) این اقدام می‌تواند تأثیر نویز پس زمینه را کاهش دهد و کنتراست بین مناطق معیوب

۲) روش ایجاد عیب مصنوعی باید محدودیت‌های کمی داشته باشد، یعنی برای هر ضخامت پوشش و سایز عیب جدایش قابلیت پیاده‌سازی را داشته باشد.

۳) از لحاظ رفتار حرارتی مشابه عیب جدایش واقعی باشد.

۴) روش ساخت و ایجاد آن ساده و تکرارپذیر باشد.

روش جیاوو ویژگی اول و چهارم را ندارد و به علت وجود ساچمه‌های سرامیکی تو خالی و صاف نبودن بستر آنها، پوشش دارای کمی فرورفتگی شده که با چشم غیر مسلح نیز قابل تشخیص است. علاوه بر این، با توجه به اینکه ذرات سرامیکی کاملاً یکسان نیستند، این روش ساخت عیوب جدایش مصنوعی، تکرارپذیری ندارد. روش گرزگورز پتاشک و لیو نیز ویژگی دوم را ندارد، با توجه به مقالاتی که از این روش استفاده کرده‌اند، برای سوراخ‌های با قطر بالاتر از ۳ میلی‌متر (که بیانگر جدایش با قطر بیشتر از ۳ میلی‌متر است) و ضخامت‌های پوشش کم (کمتر از ۴۰۰ میکرومتر) این روش اجرایی نیست، چراکه با باز کردن پیچ احتمال شکست و ریزش پوشش سد حرارتی وجود دارد.

با توجه به موارد مطرح شده و بررسی‌های صورت گرفته، روش اول ایجاد عیب مصنوعی (سوراخ کف تخت) که رایج‌ترین روش برای ایجاد مصنوعی عیب جدایش که مرسوم‌ترین روش ایجاد مصنوعی عیب جدایش در پوشش‌ها است نیز برای این پژوهش برگزیده شد. بستر فلزی نمونه ساخته شده از جنس فولاد کم‌کربن با ابعاد ۱۶۰×۱۲۰ و ضخامت ۵ میلی‌متر است. ۴ عدد سوراخ کف تخت به قطر ۱۰، ۶، ۴ و ۲ میلی‌متر و عمق ۴/۵ میلی‌متر برای شبیه‌سازی عیب جدایش بین بستر فلزی و پوشش سد حرارتی در ورق فولادی ایجاد شد. پودر NiCrAlY با نام تجاری PAC9620AM برای ساخت لایه میانی و پودر زیرکونیا پایدارشده با ایتریا (YSZ) با نام تجاری Hoganas برای ساخت لایه نهایی استفاده شد. هر دو لایه میانی و لایه سرامیکی نهایی توسط دستگاه پلاسما اسپری روی نمونه پاشیده شدند.

به کمک تست ادی‌کارت، ضخامت‌سنجی لایه میانی و پوشش سرامیکی توسط کارگاه پوشش صورت گرفت. در نمونه ساخته شده ضخامت لایه میانی 20 ± 100 میکرومتر و ضخامت پوشش سرامیکی 30 ± 200 میکرومتر است.

در این مقاله، عیب با قطر ۱۰ میلی‌متر D10، عیب با قطر ۶ میلی‌متر D6، عیب با قطر ۴ میلی‌متر D4 و عیب با قطر ۲ میلی‌متر به اختصار D2 نامیده می‌شوند.

۲-۲- روش گرمانگاری

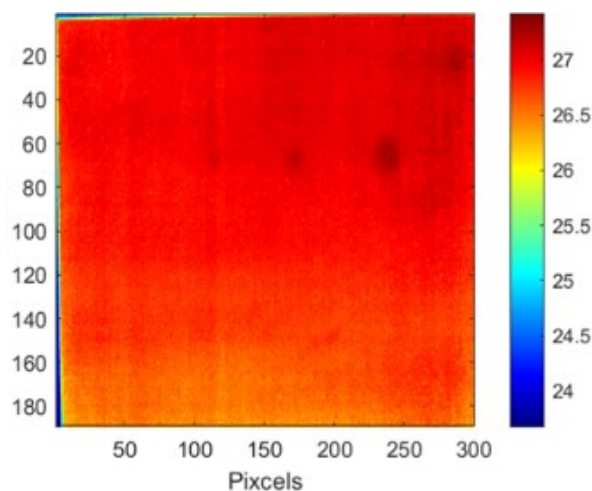
دوربین با رزولوشن 240×320 و تفکیک حرارتی 0.5°C درجه سانتیگراد با فرکانس تصویربرداری ۶۰ هرتز و محدوده طیفی حسگر $7/5$ تا 13 میکرومتر با قابلیت اندازه‌گیری دماهای بین 20 تا 120 درجه سانتیگراد، جهت ثبت تصاویر حرارتی استفاده شده است. دوربین در فاصله مناسب درست روبروی نمونه جانمایی شد تا تصویر حاصل از بازتاب دوربین در سطح نمونه کمترین اثر را داشته

۳- نتایج و بحث

در ابتدا تصاویر حرارتی از نمونه با رنگ اصلی پوشش ضبط شد. در ادامه با هدف بررسی اثر رنگ پوشش، سطح نمونه به رنگ مشکی درآمد و مجدداً تصاویر حرارتی ضبط شدند. در ادامه روی تصاویر حرارتی هر دو نمونه فیلترهای مختلف اعمال و نتایج بررسی شد.

۳-۱- نمونه با رنگ پوشش اصلی

با جابجای فاصله و زوایای دوربین و لامپ‌های فلاش نسبت به نمونه، در شکل ۲ تصویر خام حرارتی ضبط شده از نمونه با رنگ پوشش اصلی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که به علت نویز بالا و کنتراست پایین، عیوب D5 و D10 به سختی قابل شناسایی هستند.



شکل ۲) تصویر خام حرارتی در نمونه با رنگ پوشش اصلی

در گام اول و با هدف حذف خطاهای ثابت، فیلتر حذف تصویر زمینه روی تصاویر خام حرارتی اعمال شد، در ادامه و با هدف بررسی اثر درجه فیلتر حذف تصویر زمینه، مقدار این درجه از ۱ تا ۲۰۰ تغییر کرده است. بر اساس این تصاویر، افزایش درجه فیلتر حذف تصویر زمینه موجب کاهش نویز می‌شود. اما از طرف دیگر تفکیک‌پذیری عیوب را کاهش می‌دهد. این پدیده را در مقایسه رنگ عیب D6 در شکل ۳ قسمت «الف» و قسمت «ب» می‌توان مشاهده کرد. با توجه به موارد مطرح شده، بهترین تصویر در اثر فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۲۰۰ حاصل شود. در این حالت اغلب نویز زمینه حذف شد. (شکل ۳).

در مرحله بعدی فیلتر میانه روی تصاویر خروجی از فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۲۰۰، پیاده‌سازی شد و اثر فیلتر میانه و اندازه همسایگی در کاهش نویز و افزایش تفکیک‌پذیری بررسی شده است.

اضافه کردن فیلتر میانه موجب افزایش شدت می‌شود به نحوی که هم عیوب و هم نویزها پر رنگ می‌شوند. با افزایش اندازه همسایگی، شدت رنگ عیوب و نویزها نیز افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج به دست آمده، بهترین اندازه همسایگی در فیلتر میانه برای این نمونه ۹ در ۹ است.

و بدون عیب را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. فرمول این فیلتر به شکل زیر است:

$$I_f = I^n - I_0^n \quad (1)$$

در رابطه (۱) I_f بیانگر ماتریس دمایی تصویر فیلتر شده، I ماتریس دمایی تصویر بعد از تحریک با لامپ فلاش، I_0 ماتریس دمایی پس‌زمینه و n درجه فیلتر است.

۳-۲- فیلتر گausین

فیلتر گausین یک فیلتر خطی است که به طور گسترده‌ای در پردازش تصویر برای محو کردن یا صاف کردن یک تصویر و حذف نویز استفاده می‌شود. برای محاسبه وزن فیلتر از یک تابع گausین استفاده می‌شود که منحنی زنگوله ای دارد. ویژگی‌های کلیدی فیلتر گausین این است که تصویر را صاف می‌کند و در عین حال لبه‌ها را بهتر از سایر فیلترهای خطی مانند فیلتر متوسط حفظ می‌کند.

روش کار این فیلتر به این صورت است که از تابع گausین برای تعیین وزن پیکسل‌های مجاور استفاده می‌شود. تابع گausین مطابق رابطه (۲) در دو بعد تعریف می‌شود.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

که x و y مختصات پیکسل و σ انحراف معیار توزیع گausین است. فیلتر گausین با انطباق تصویر با هسته گausین بر روی یک تصویر اعمال می‌شود. اندازه هسته معمولاً بر اساس مقدار σ انتخاب می‌شود و σ بزرگتر باعث تار شدن بیشتر می‌شود.

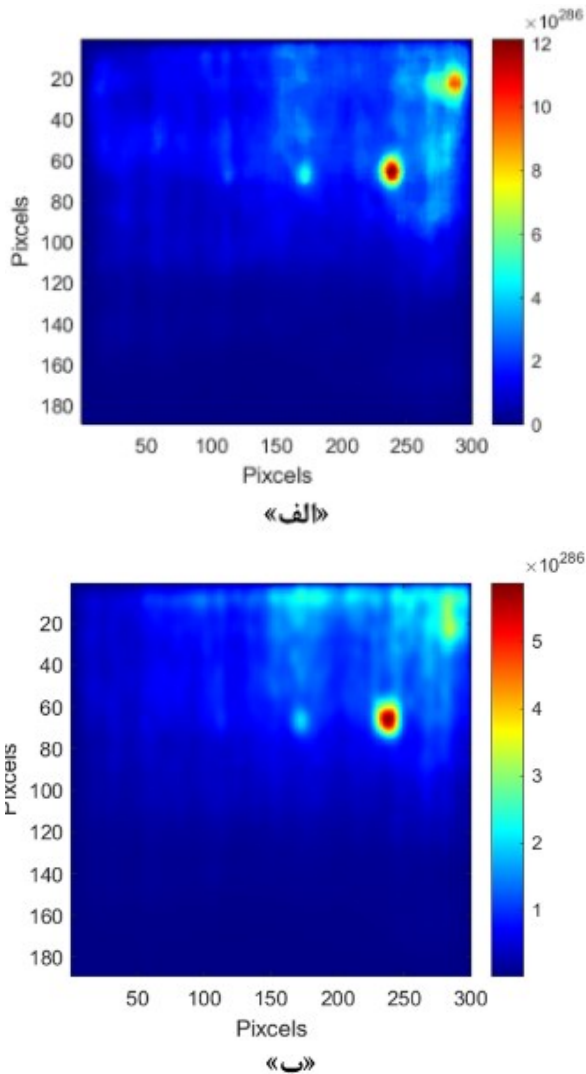
مقدار جدید هر پیکسل به عنوان مجموع وزنی همسایگانش محاسبه می‌شود که وزن‌ها توسط تابع گausین تعیین می‌شود. هر چه پیکسل مجاور به پیکسل مرکزی نزدیکتر باشد، وزن آن بیشتر است.

۳-۳- فیلتر میانه

فیلتر میانه یک فیلتر دیجیتال غیرخطی است که برای کاهش نویز تصاویر و سیگنال‌ها استفاده می‌شود. برخلاف فیلترهای خطی که از کانولوشن (convolution) برای پردازش تصاویر استفاده می‌کنند، این فیلتر، مقدار دمایی هر پیکسل را با دمایی میانه پیکسل‌های در همسایگی آن جایگزین می‌کند. این فیلتر برای حذف نویزهای تکانه‌ای «نمک و فلفل» (Salt and pepper) و در عین حال حفظ لبه‌های تصویر مؤثر است چراکه برخلاف فیلترهای خطی که میانگین‌گیری می‌کنند، این فیلتر مقدار میانه را محاسبه می‌کند که حساسیت کمتری نسبت به نویزهای شدید دارد. اندازه همسایگی بر حسب تعداد پیکسل در نرم‌افزار متلب تعیین می‌شود.

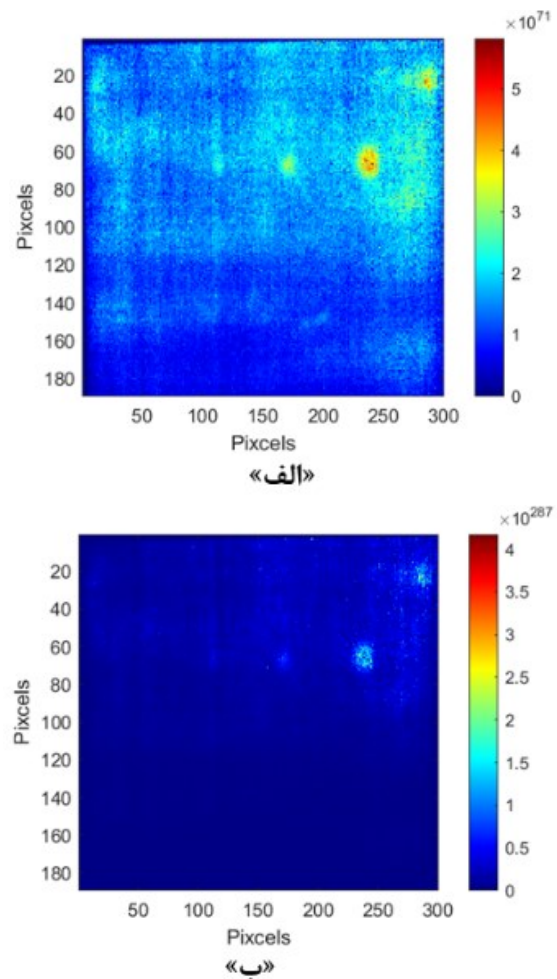
(26)

جدای از عیب‌های ایجاد شده به صورت مصنوعی در گوشه بالایی و سمت راست ورق دیده می‌شود. این اتفاق می‌تواند ناشی از فرایند ساخت باشد. در فرایند ساخت ناحیه شروع اعمال پوشش میانی و سرامیکی هر دو از گوشه بالایی و سمت راست ورق بودند و اثر مشاهده شده می‌تواند به این علت باشد.



شکل ۴ مقایسه فیلتر میانه و گاوسین، «الف» اضافه شدن فیلتر میانه با اندازه همسایگی ۹ در ۹ روی تصویر حاصل از فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۲۰۰، «ب» اضافه شدن فیلتر گاوسین با سیگما سه روی تصویر حاصل از فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۲۰۰

با اضافه شدن فیلتر گاوسین با سیگما سه روی تصویر حاصل از فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۲۰۰، عیب D10 به راحتی قابل شناسایی است. عیب D6 به سختی شناسایی می‌شود و و اثری از عیب D4 و D2 هم دیده نمی‌شود. مزیت فیلتر گاوسین نسبت به فیلتر میانه این است که اثر ناحیه شروع فرایند پوشش‌دهی (در گوشه بالایی و سمت راست ورق) به میزان چشم‌گیری کاهش یافته است.



شکل ۳ اثر درجه فیلتر حذف تصویر زمینه، «الف» درجه فیلتر ۵۰، «ب» درجه فیلتر ۲۰۰

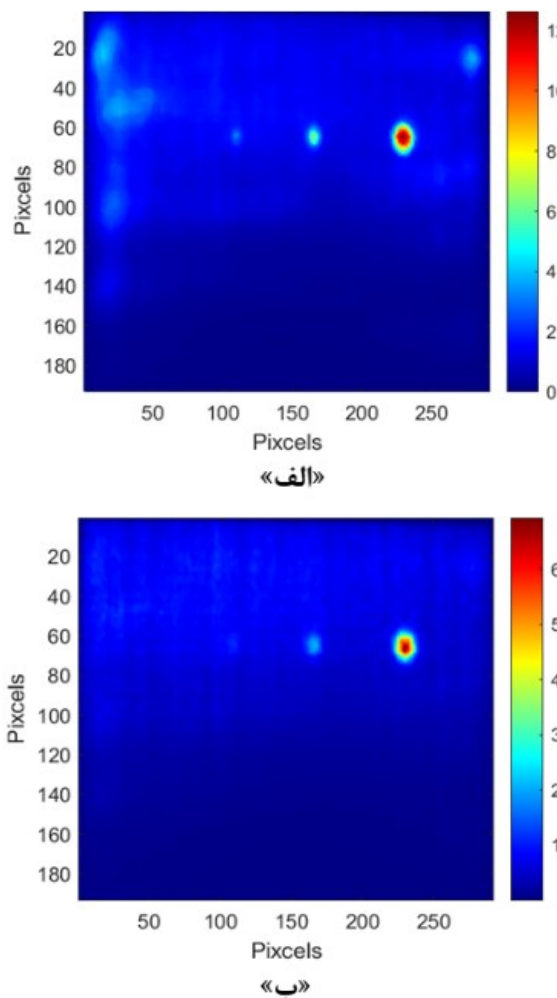
در نهایت سومین روش پردازش تصویر که همان فیلتر گاوسین است روی تصاویر اعمال شد. اثر فیلتر گاوسین و اثر σ (انحراف معیار توزیع گاوسین) در کاهش نویز و افزایش تفکیک پذیری بررسی شده است. این فیلتر روی تصویر خروجی از فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۲۰۰، اعمال شده است.

فیلتر گاوسین یک فیلتر قوی است که تا حد بسیار زیادی نویزها را کاهش داده است.

در نهایت مشخص شد تا هر دو فیلتر میانه و گاوسین توانستند تا حد زیادی قابلیت شناسایی عیوب را افزایش دهند. در شکل ۴ بهترین تصویر حاصل از پیاده‌سازی فیلتر میانه و بهترین تصویر حاصل از اعمال فیلتر گاوسین جهت مقایسه در کنار یکدیگر گزارش شده است.

مطابق شکل ۴ قسمت «الف»، با اعمال فیلتر میانه با اندازه همسایگی ۹ در ۹ روی تصویر حاصل از فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۲۰۰ عیب D10 به راحتی قابل شناسایی است. عیب D6 به سختی شناسایی می‌شود و عیب D4 تقریباً غیر قابل شناسایی است. اثری از عیب D2 هم دیده نمی‌شود. یک ناحیه معیوب

حاصل از اعمال فیلتر گاوسین جهت مقایسه در کنار یکدیگر گزارش شده است.



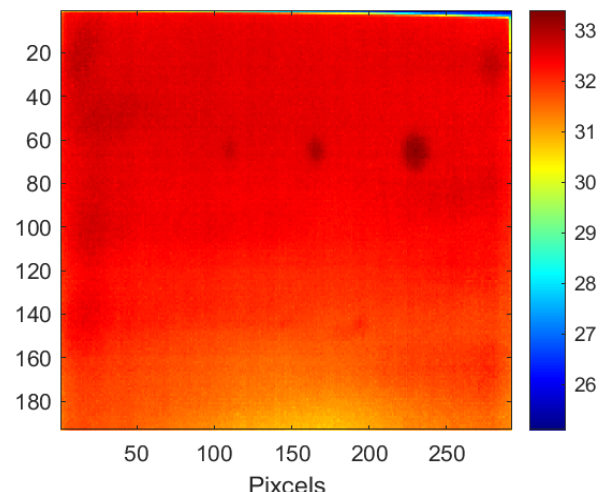
شکل ۶ مقایسه فیلتر میانه و گاوسین، «الف» اضافه شدن فیلتر میانه با اندازه همسایگی ۷ در ۷ روی تصویر حاصل از فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۱۰۰، «ب» اضافه شدن فیلتر گاوسین با سیگما یک روی تصویر حاصل از فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۱۰۰

مطابق شکل ۶ قسمت «الف»، با اعمال فیلتر میانه با اندازه همسایگی ۷ در ۷ روی تصویر حاصل از فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۱۰۰ عیب D10 و D6 به راحتی قابل شناسایی است. عیب D4 نیز به سختی شناسایی می‌شود و نویزهای مربوطه در حاشیه ورق مشابه این عیب هستند. در نمونه با محل عیوب مجهول نمی‌توان تفاوت عیب واقعی با این اندازه را با نویزها تفکیک کرد. اثری از عیب D2 هم دیده نمی‌شود. با توجه به اینکه پوشش به صورت دستی اعمال شده است، به علت عدم یکنواختی پوشش ایجاد شده، نواحی معیوب دیگری نیز علاوه بر عیب‌های ایجاد شده به صورت مصنوعی دیده می‌شوند.

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۶ قسمت «ب»، با اضافه شدن فیلتر گاوسین با سیگما یک روی تصویر حاصل از فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۲۰۰، عیب D10 و D6 به راحتی قابل

۳-۲- نمونه با رنگ سطحی مشکي

در شکل ۵ بهترین تصویر خام حرارتی ضبط شده از نمونه با رنگ سطحی مشکي ارائه شده است. مشاهده می‌شود که به علت نویز بالا و کنتراست پایین، عیوب D10 و D5 قابل شناسایی و عیب D4 به سختی قابل شناسایی هستند. لازم به ذکر است قابلیت شناسایی عیوب نسبت به نمونه با رنگ پوشش اصلی افزایش یافته است. در ادامه و با هدف افزایش قابلیت شناسایی عیوب، مراحل پردازش تصویر و حذف نویز مشابه نمونه با رنگ پوشش اصلی روی این داده ها اعمال شده است.



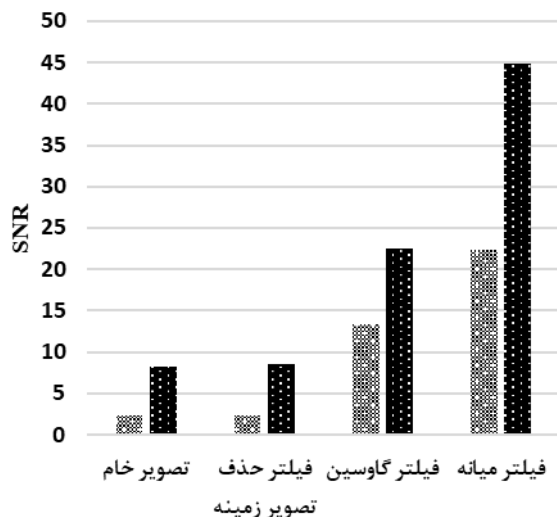
شکل ۵ تصویر خام حرارتی در نمونه با رنگ سطحی مشکي

با توجه به موارد مطرح شده در فیلتر نمونه با رنگ سطحی اصلی، به منظور کاهش کامل نویز زمینه مقدار درجه فیلتر حذف تصویر زمینه تا ۲۰۰ افزایش یافت. از آن جایی که افزایش درجه فیلتر حذف تصویر زمینه موجب ناپدید شدن عیوب می‌شود، بالا بردن زیاد آن مطلوب نیست و فقط در حدی که نویز زمینه کاهش یابد، کفایت می‌کند. بنابراین درجه فیلتر حذف تصویر زمینه ۱۰۰ در نظر گرفته شد.

به منظور افزایش قابلیت شناسایی عیوب، در این مرحله فیلتر میانه با اندازه همسایگی ۳ در ۳ تا ۹ در ۹ روی تصاویر با فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۱۰۰ اعمال شد. مطابق نتایج به دست آمده بهترین اندازه همسایگی در فیلتر میانه برای این نمونه ۷ در ۷ است.

با هدف مقایسه فیلتر گاوسین و میانه در قابلیت شناسایی عیوب، در این مرحله فیلتر گاوسین با سیگما یک، دو و سه روی تصاویر با فیلتر حذف تصویر زمینه با درجه فیلتر ۱۰۰ اعمال شد. مشاهده شد که سیگما یک بهترین تصویر را ایجاد کرده است.

در نهایت مشخص شد تا هر دو فیلتر میانه و گاوسین توانستند تا حد زیادی قابلیت شناسایی عیوب را افزایش دهند. در شکل ۶ بهترین تصویر حاصل از پیاده سازی فیلتر میانه و بهترین تصویر



نمونه با رنگ سطحی مشکی ■ نمونه با رنگ پوشش اصلی ▨

شکل ۷) میانگین SNR برای تصاویر خام و تصاویر پردازش شده در دو نمونه اصلی و نمونه با رنگ سطحی مشکی

بر اساس شکل ۷ بعد از مشکی کردن سطح نمونه، پارامتر SNR در تصویر خام ۲۵۷ درصد افزایش یافت. در تصاویر با فیلتر گوسین و میانه نیز پارامتر SNR با مشکی کردن سطح نمونه به ترتیب ۶۹ و ۱۰۰ درصد افزایش یافته است.

لازم به ذکر است که هر دو فیلتر میانه و گوسین در نمونه با رنگ پوشش اصلی نسبت به نمونه با رنگ سطحی مشکی، موثرتر بوده و موجب افزایش بیشتر نسبت سیگنال به نویز شده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج ارائه شده روش گرمانگاری فعال پالسی توانست عیوب جدایش مصنوعی ایجاد شده بین پوشش سرامیکی سد حرارتی و بستر فلزی را شناسایی کند. در گام اول نمونه‌ها با رنگ اصلی پوشش سد حرارتی بررسی شدند. در نهایت با هدف بررسی اثر رنگ نمونه در قابلیت شناسایی عیوب توسط تصاویر حرارتی ضبط شده، سطح نمونه مشکی شد. برای افزایش قابلیت شناسایی عیوب و کاهش نویز از فیلترهای حذف تصویر زمینه، گوسین و میانه استفاده شد. بر اساس مطالب ارائه شده نتایج زیر از مقاله حاصل شده است.

۱) با اعمال فیلترهای حذف تصویر زمینه، گوسین و میانه، در هر دو نمونه قابلیت شناسایی عیوب افزایش و نویز کاهش یافت.

۲) در نمونه‌ها با رنگ اصلی پوشش، عیب D10 به راحتی شناسایی شد اما عیب D6 به سختی شناسایی شده و عیوب D4 و D2 غیرقابل شناسایی باقی ماند.

۳) در نمونه‌ها با رنگ سطحی مشکی، عیوب D10 و D6 به راحتی شناسایی شد اما عیب D4 به سختی شناسایی شده و عیب D2 غیرقابل شناسایی باقی ماند.

شناسایی است اثری از عیب D4 و D2 دیده نمی‌شود. مزیت فیلتر گوسین نسبت به فیلتر میانه این است که نویزهایی که به علت خطا در فرایند ساخت ایجاد شده است را برطرف کرده است، اما شناسایی عیب D6 در فیلتر میانه راحت‌تر از فیلتر گوسین است.

۳-۳- مقایسه اثر رنگ سطحی پوشش

با مقایسه شکل ۴ و شکل ۶ مشخص می‌شود که مشکی کردن سطح نمونه موجب افزایش جذب انرژی حرارتی و بالارفتن قدرت تفکیک‌پذیری بین نواحی سالم و معیوب خواهد شد. اما عیب D4 به سختی شناسایی شده و عیب D2 نه با اعمال فیلتر و نه با مشکی کردن سطح نمونه شناسایی نشد. لازم به ذکر است با توجه به اینکه آزمون گرمانگاری یک آزمون غیر مخرب است، در برخی موارد ممکن است مجاز به رنگ کردن سطح نمونه نباشیم. با افزایش توان لامپ‌های فلاش، می‌توان اثر بازتابی سطح نمونه را تا حد زیادی جبران کرد و انرژی حرارتی بیشتری را به نمونه ارسال کرد. در این حالت تصاویری مشابه تصاویر ضبط‌شده از نمونه با سطح مشکی و لامپ فلاش با توان کمتر را می‌توان ثبت کرد.

۳-۴- مقایسه کمی اثر فیلترهای مختلف از منظر قابلیت شناسایی عیوب

همانطور که در بخش قبل بیان شد، تشخیص نواحی معیوب از طریق اعمال فیلتر میانه و گوسین به علت بالاتر بودن اختلاف شدت نور میان نواحی سالم و معیوب، امری آسانتر است. برای مقایسه کمی این مهم پارامتر نسبت سیگنال به نویز (SNR) به‌صورت زیر تعریف و به کار گرفته شد:

$$SNR = \frac{T_D - T_N}{\sigma} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، T_D بیانگر متوسط دمای مربوط به ناحیه معیوب، T_N متوسط دمای نواحی سالم قطعه و σ بیانگر انحراف معیار داده‌های دما در نواحی سالم قطعه است. پنجره نواحی معیوب متناسب با سایز عیب و پنجره نواحی سالم متناسب با اندازه پنجره نواحی معیوب در نظر گرفته شده است (۲۷).

بر اساس شکل ۷ در هر دو نمونه، بعد از اجرای الگوریتم فیلتر حذف تصویر زمینه، پارامتر SNR که بیانگر میزان کنتراست بین عیب و زمینه نرمال قطعه است، تغییر محسوسی نداشته است، اما بعد از اجرای الگوریتم فیلتر گوسین پارامتر SNR برای نمونه با رنگ پوشش اصلی و نمونه با رنگ سطحی مشکی به ترتیب ۴۷۷ و ۱۷۳ درصد افزایش یافته است.

مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۷، فیلتر میانه توانسته است میزان سیگنال به نویز را در نمونه با رنگ پوشش اصلی و نمونه با رنگ سطحی مشکی به ترتیب ۸۷۱ و ۴۴۴ درصد افزایش دهد.

بنابراین در هر دو نمونه بهترین فیلتر از منظر SNR، فیلتر میانه و در مرحله بعد فیلتر گوسین است. فیلتر حذف تصویر زمینه نیز اثر محسوسی در افزایش نسبت سیگنال به نویز نداشته است.

thermography: A review. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2022 Sep;41(3):49.

8- Bison PG, Marinetti S, Grinzato EG, Vavilov VP, Cernuschi F, Robba D. Inspecting thermal barrier coatings by IR thermography. In *Thermosense XXV* 2003 Apr 1 (Vol. 5073, pp. 318-327). SPIE.

9- Muzika L, Švantner M. Flash pulse phase thermography for a paint thickness determination. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020 (Vol. 723, No. 1, p. 012021). IOP Publishing.

10- Moskovchenko A, Vavilov V, Švantner M, Muzika L, Houdková Š. Active IR thermography evaluation of coating thickness by determining apparent thermal effusivity. *Materials*. 2020 Sep 12;13(18):4057.

11- Shrestha R, Kim W. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography-Part II: Experimental investigation. *Infrared Physics & Technology*. 2018 Aug 1;92:24-9.

12- Tang Q, Liu J, Dai J, Yu Z. Theoretical and experimental study on thermal barrier coating (TBC) uneven thickness detection using pulsed infrared thermography technology. *Applied Thermal Engineering*. 2017 Mar 5;114:770-5.

13- Ranjit S, Chung Y, Kim W. Thermal behavior variations in coating thickness using pulse phase thermography. *비파괴검사학회지*. 2016 Aug;36(4):259-65.

14- Tang Q, Dai J, Liu J, Liu C, Liu Y, Ren C. Quantitative detection of defects based on Markov-PCA-BP algorithm using pulsed infrared thermography technology. *Infrared Physics & Technology*. 2016 Jul 1;77:144-8.

15- Lopez F, Ibarra-Castaneda C, de Paulo Nicolau V, Maldague X. Optimization of pulsed thermography inspection by partial least-squares regression. *Ndt & E International*. 2014 Sep 1;66:128-38.

16- Meshkizadeh P, Farahani M. Developing effective thermal signal processing to improve thermographic non-destructive inspection of metallic components. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2022 Jul 4;37(4):367-85.

17- Shepard SM, Hou YL, Lhota JR, Wang D, Ahmed T. Thermographic measurement of thermal barrier coating thickness. In *Thermosense XXVII* 2005 Mar 28 (Vol. 5782, pp. 407-410). SPIE.

18- Curà F, Sesana R, Corsaro L, Mantoan R. Characterization of thermal barrier coatings using an active thermography approach. *Ceramics*. 2022 Oct 25;5(4):848-61.

19- Bu C, Sun Z, Tang Q, Liu Y, Mei C. Thermography sequence processing and defect edge identification of tbc structure debonding defects detection using long-pulsed infrared wave non-destructive testing technology. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019 Jan;55:80-7.

20- Tang Q, Gao S, Liu Y, Lu Y, Xu P. Experimental research on YSZ TBC structure debonding defect detection using long-pulsed excitation of infrared thermal wave non-destructive testing. *Thermal Science*. 2019;23(3 Part A):1313-21.

۴) مشک‌کردن سطح نمونه موجب افزایش تفکیک‌پذیری بین نواحی معیوب و سالم شد و پارامتر SNR را به میزان ۲۵۷ درصد افزایش داد.

۵) بر اساس پارامتر SNR هر دو فیلتر میانه و گاوسین توانستند تفکیک‌پذیری را افزایش دهند ولی اثر فیلتر میانه در بالابردن نسبت سیگنال به نویز بیشتر از فیلتر گاوسین است.

۶) فیلتر حذف تصویر زمینه توانست خطاهای ثابت را کم کند ولی اثر محسوسی در نسبت سیگنال به نویز نداشته است.

لازم به ذکر است، در صورتی که تغییر رنگ سطح نمونه مجاز نباشد، یکی از روش‌های جایگزین تغییر رنگ سطح نمونه می‌تواند استفاده از لامپ‌های فلاش با توان بالاتر باشد. در این صورت با توجه به اینکه انرژی حرارتی بیشتری به سطح نمونه ارسال می‌شود، میزان انرژی جذب‌شده نسبت به حالتی که توان لامپ‌های فلاش کمتر است، بیشتر شده و تفکیک‌پذیری بین نواحی معیوب و سالم افزایش می‌یابد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع مالی: هزینه‌های مالی این پژوهش از بودجه شخصی تأمین شده است.

منابع

- 1- Yuri M, Masada J, Tsukagoshi K, Ito E, Hada S. Development of 1600 C-class high-efficiency gas turbine for power generation applying J-Type technology. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2013 Sep;50(3):1-0.
- 2- tasek GS. Investigation and development of transient thermography for detection of disbond in thermal barrier coating. 2012;.
- 3- ukuchi2013.pdf
- 4- Unnikrishnakurup S, Dash J, Ray S, Pesala B, Balasubramaniam K. Nondestructive evaluation of thermal barrier coating thickness degradation using pulsed IR thermography and THz-TDS measurements: A comparative study. *NDT & E International*. 2020 Dec 1;116:102367.
- 5- Li Y, Yan B, Li W, Li D. Thickness assessment of thermal barrier coatings of aeroengine blades via dual-frequency eddy current evaluation. *IEEE Magnetics Letters*. 2016 Jul 13;7:1-5.
- 6- Cernuschi F, Bison P. Thirty Years of Thermal Barrier Coatings (TBC), Photothermal and thermographic techniques: Best practices and lessons learned. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2022 Apr;31(4):716-44.
- 7- Zhu J, Mao Z, Wu D, Zhou J, Jiao D, Shi W, Zhu W, Liu Z. Progress and trends in non-destructive testing for thermal barrier coatings based on infrared

- 21- Li C, Fan X, Jiang P, Jin X. Delamination-indicating of atmosphere-plasma-sprayed thermal barrier coating system using Eu3+ luminescence mapping. *Materials Letters*. 2018 Jul 1;222:41-4.
- 22- Tang Q, Dai J, Bu C, Qi L, Li D. Experimental study on debonding defects detection in thermal barrier coating structure using infrared lock-in thermographic technique. *Applied Thermal Engineering*. 2016 Aug 25;107:463-8.
- 23- Nategh K, Farahani M. Defect detection in thermography non-destructive testing by means of signal processing and K-Means clustering. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2024 Dec 26:1-25.
- 24- Ptaszek G, Cawley P, Almond D, Pickering S. Artificial disbands for calibration of transient thermography inspection of thermal barrier coating systems. *Ndt & E International*. 2012 Jan 1;45(1):71-8.
- 25- Jiao DC, Liu ZW, Zhu WY, Xie HM. Exact localization of debonding defects in thermal barrier coatings. *AIAA Journal*. 2018 Sep;56(9):3691-700.
- 26- Nategh K. Improving the nondestructive thermography inspection results for detection of circular defects in coated metals using principal component analysis. *NDT Technology*. 2022 Feb 20;2(9):33-40.
- 27- Yuri M, Masada J, Tsukagoshi K, Ito E, Hada S. Development of 1600 C-class high-efficiency gas turbine for power generation applying J-Type technology. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2013 Sep;50(3):1-0.