

Improving the Nondestructive Thermography Inspection Results for Detection of Circular Defects in Coated Metals Using Principal Component Analysis

Keyhan Nategh and Mohammadreza Farahani*

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

*mrfarahani@ut.ac.ir

Abstract

Coating metals as a technique to increase the corrosion resistance of industrial parts is very common in various industries; especially in oil, gas, petrochemical, and marine industries. Corrosion characterization in coated metals is a major challenge in the field of Nondestructive testing (NDT). In this paper, 20 flat bottom holes (FBH) with diameters of 10, 8, 6, 4, 2 mm were drilled with distances from the test piece surface ranging from 0.5 to 2 mm on an St37 steel plate with epoxy coating to simulate corrosion defect. Step heating thermography (SHT) was applied to evaluate these corrosion defects. Median and mean filters were used for noise reduction and smoothing of the thermal images. Principal component analysis (PCA) was also applied to the raw thermal images to process thermographic signals and to improve the defect detection capability. Results showed that after applying signal processing methods, the number of detected defects increased from 12 to 14. Moreover, the signal-to-noise ratio (SNR) quadruple after signal processing.

Keywords: Nondestructive Testing, Thermography, Coated metals, Principal Component Analysis.

بهبود نتایج آزمون غیرمخرب دمانگاری برای تشخیص عیوب دایروی در فلزات پوشش‌دهی شده به کمک روش تحلیل مولفه اصلی

کیهان ناطق و محمدرضا فراهانی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
*mrfarahani@ut.ac.ir

چکیده

پوشش‌دهی فلزات به‌عنوان تکنیکی برای افزایش مقاومت به خوردگی قطعات صنعتی، امری بسیار کاربردی و متداول در صنایع مختلف به‌ویژه صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و دریایی است. تشخیص خوردگی در فلزات پوشش‌دهی شده یکی از چالش‌های اساسی در زمینه آزمون‌های غیرمخرب است. در این پژوهش ۲۰ سوراخ کف تخت (FBH) با قطرهای ۱۰، ۸، ۶، ۴ و ۲ میلی‌متر و ضخامت فلز باقیمانده بین ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر بر روی قطعه فولادی St37 با پوشش پلیمری اپوکسی به‌منظور شبیه‌سازی عیب خوردگی ایجاد شد. از آزمون دمانگاری تحریک پله‌ای (SHT) برای تشخیص عیب خوردگی استفاده شد. فیلتر میانه و فیلتر میانگین بر روی تصاویر دمانگاری برای کاهش نویز و هموارسازی تصاویر اعمال شدند. روش تحلیل مولفه اصلی (PCA) برای پردازش سیگنال‌های دمانگاری و بهبود قابلیت تشخیص عیوب بر روی داده‌های دمانگاری اعمال شد. نتایج نشان داد که پس از اعمال روش‌های پردازش سیگنال، تعداد عیوب قابل تشخیص از ۱۲ سوراخ به ۱۴ سوراخ افزایش یافت. همچنین نسبت سیگنال به نویز (SNR) بیش از ۴ برابر افزایش یافت.

واژگان کلیدی: آزمون غیرمخرب، دمانگاری، تحلیل مولفه اصلی.

۱- مقدمه

فراصوتی^۱ [۲]، آزمون نشت شار مغناطیسی^۲ [۳، ۴]، آزمون جریان گردابی^۳ [۵]، آزمون تراهرتز^۴ [۶-۸] اشاره کرد. اما این روش‌ها دارای معایبی مانند تفسیر پیچیده، تأثیر پذیرفتن از عوامل محیطی و زمان بازرسی طولانی هستند. یکی دیگر از روش‌هایی که می‌توان در بازرسی قطعات پوشش‌دهی شده استفاده کرد، آزمون ترموگرافی است [۹]. آزمون غیرمخرب ترموگرافی یکی از روش‌های نوین برای بازرسی قطعات می‌باشد که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [۱۰-۱۵]. از مزایای آزمون ترموگرافی می‌توان به بازرسی سریع، غیرتماسی بودن و تفسیر آسان اشاره کرد [۱۶-۱۸]. آزمون ترموگرافی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: ترموگرافی غیرفعال که در آن قطعه به‌طور طبیعی دارای دمایی متفاوت از دمای محیط است و ترموگرافی فعال که از یک تحریک‌کننده خارجی

پوشش‌دهی یکی از موثرترین و ارزان‌ترین راه‌ها به‌منظور افزایش مقاومت در برابر خوردگی، افزایش مقاومت در برابر سایش، افزایش سختی و یا بهبود خواص نوری سطح قطعه است [۱]. پوشش‌های پلیمری اپوکسی به‌دلیل چسبندگی عالی، مقاومت عالی در برابر رطوبت و مواد خوردنده مورد توجه گسترده‌ای در صنایع قرار گرفته است. گاهی در حین کارکرد، قطعه و یا پوشش ممکن است دچار آسیب شود. بنابراین یکی از چالش‌های اساسی، کنترل کیفیت این قطعات است، زیرا به‌طور مستقیم بر عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد. برای بررسی قطعات پوشش‌دهی شده بدون اعمال آسیب به آن‌ها می‌توان از روش‌های آزمون غیرمخرب استفاده کرد.

از آزمون‌های غیرمخربی که برای بازرسی قطعات پوشش‌دهی شده استفاده می‌شود می‌توان به آزمون

³ Eddy-current Testing

⁴ Terahertz Testing

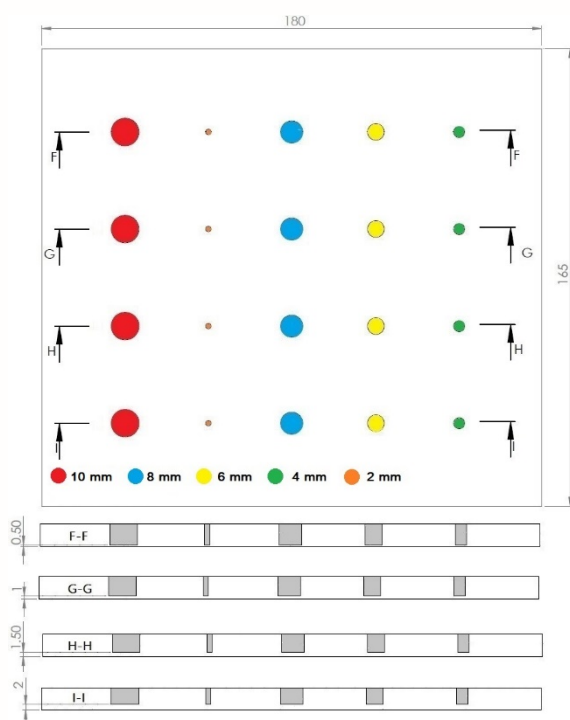
¹ Ultrasonic Testing

² Electromagnetic Testing

تشخیص این روش، ایجاد شدند. سوراخ‌ها در هر ستون دارای قطر d ثابت و سوراخ‌های هر ردیف دارای ضخامت فلز باقیمانده h ثابت هستند. سطح دیگر قطعه توسط رنگ مشکی مات اپوکسی هوا خشک برای افزایش جذب انرژی نوری و گسیلندگی، پوشش داده شد. شکل ۲ جزئیات نمونه آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خواص فیزیکی نمونه فولادی St37

۵۶/۹	ضریب هدایت حرارتی $W.m^{-1}.K^{-1}$
۴۶۱	ظرفیت گرمایی ویژه $J.kg^{-1}.K^{-1}$
۷۸۵۰	چگالی $kg.m^{-3}$
۱۵/۷	ضریب نفوذپذیری حرارتی $10^{-6} m.s^{-2}$



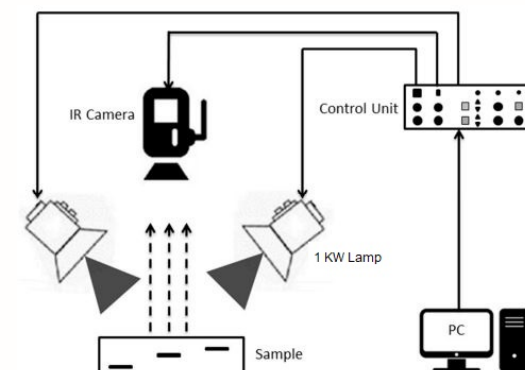
شکل ۲- شماتیک قطعه آزمایش و ابعاد عیوب

نام‌گذاری عیوب براساس قطر و ضخامت فلز باقیمانده انجام می‌شود. برای مثال عیب D10H0.5 سوراخی با قطر ۱۰ میلی‌متر و ضخامت فلز باقیمانده ۰/۵ میلی‌متر است. هرکدام از ۲۰ سوراخ با یک شناسه متمایز با استفاده از این نام‌گذاری، مشخص می‌شوند. شکل ۳ نمونه آزمایش را نشان می‌دهد.

³ Flat Bottom Hole

برای ایجاد اختلاف حرارتی در قطعه استفاده می‌شود [۱۹، ۲۰].

در این مقاله، از آزمون غیرمخرب ترموگرافی برای تشخیص عیوب در قطعه فولادی استفاده شد. هدف اولیه از این مطالعه بررسی قابلیت روش ترموگرافی تحریک پله‌ای^۱ در تشخیص عیوب در نمونه مرجع بود. در روش ترموگرافی گرمایش پله‌ای [۲۱-۲۴] قطعه با استفاده از لامپ‌های هالوژن کوارتز به مدت چند ثانیه گرم می‌شود و سیگنال‌های حرارتی در مدت گرمایش ذخیره می‌شود. تغییرات دمای سطح با گذشت زمان به ویژگی‌های نمونه مربوط می‌شود. شکل ۱ تجهیزات و نحوه عملکرد روش SHT را نشان می‌دهد. هدف دوم استفاده از تکنیک تحلیل مولفه اصلی^۲ بود. بخش باقی مانده از مقاله تحقیقاتی به شرح زیر تنظیم شده است: در بخش ۲ درباره تجهیزات آزمایش و نمونه آزمایش توضیحاتی داده می‌شود. روش‌های کاهش نویز و روش PCA در بخش ۳ معرفی شده است. در بخش ۴ به بحث و ارزیابی نتایج خواهیم پرداخت. در نهایت، در بخش ۵ نتیجه آزمایش بررسی شده است.



شکل ۱- تجهیزات آزمایش تست ترموگرافی با تحریک پله‌ای

۲- اجرای آزمون ترموگرافی

۱-۲- نمونه آزمایش

یک نمونه از جنس فولاد St37 که دارای ۲۰ عیب سوراخ کف تخت^۳ بود، ساخته شد. در جدول ۱ خواص فیزیکی قطعه آورده شده است. قطعه یک پلیت مستطیلی شکل به ابعاد ۱۸۰×۱۶۵ میلی‌متر و ضخامت ۸ میلی‌متر است. سوراخ‌ها با قطر و عمق‌های مختلف برای ارزیابی قابلیت

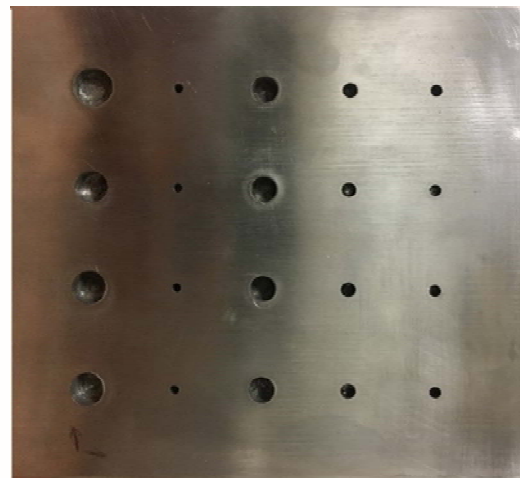
¹ Step Heating Thermography

² Principle Component Analysis

۲-۲- تجهیزات و روش اجرا آزمایش

تجهیزات آزمایش شامل نمونه آزمایش، منبع گرمایش، سیستم کنترل، دوربین حرارتی و یک کامپیوتر بود. منبع گرمایش شامل دو پروژکتور نوری با توان مجموعاً ۲ کیلووات بود. از دوربین حرارتی Flir A325SC با قابلیت تفکیک حرارتی ۰/۰۵ درجه سانتی‌گراد و تفکیک‌پذیری تصویر ۳۲۰×۲۴۰ استفاده شد. از نرم‌افزار FLIR® ResearchIR™ که یک نرم‌افزار کنترل و تحلیل داده‌های حرارتی است، استفاده شد.

این آزمایش در یک محفظه تاریک و بسته در مرکز پژوهش کاربردی جوش و آزمون‌های غیرمخرب انجام شد. برای ارزیابی پاسخ حرارتی سطح، نمونه آزمایش به صورت عمودی قرار گرفت. دو پروژکتور نوری به فاصله ۲۰ سانتی‌متر و زاویه ۴۵° نسبت به محور عمود بر قطعه کار قرار داده شدند و از روش بازتابی استفاده شد. نمونه به مدت ۵ ثانیه توسط منبع گرما حرارت داده شد [۲۵].



شکل ۳- تصویر نمونه آزمایش

۳- روش‌های پردازش سیگنال حرارتی

به منظور بهبود قابلیت تشخیص عیوب در تصاویر ترموگرافی از روش‌های پردازش سیگنال استفاده شد که در ادامه شرح داده شده‌اند.

۳-۱- روش‌های پیش پردازش داده‌های ترموگرافی

دو نوع فیلتر برای کاهش نویز در داده‌های ترموگرافی کاربرد دارند، فیلتر میانه^۱ [۲۶] و فیلتر میانگین^۲ [۲۷]. فیلترهای میانه برای از بین بردن نویز فلفل-نمکی^۳ مفید هستند. این نویز می‌تواند ناشی از اختلالات شدید و ناگهانی در سیگنال تصویر باشد که خود را به صورت پیکسل‌های سیاه و سفید پراکنده نشان می‌دهد. فیلتر میانه یک فیلتر غیرخطی است که یک پیکسل را با میانه مقادیر شدت پیکسل‌های همسایه جایگزین می‌کند. در واقع برای انجام فیلتر میانه در یک نقطه از یک تصویر، ابتدا مقادیر پیکسل در همسایگی آن نقطه را به ترتیب اندازه مرتب می‌کنیم، میانه آن‌ها را تعیین می‌کنیم و مقدار آن‌را به پیکسل مربوطه در تصویر اختصاص می‌دهیم. فیلتر میانه تحت تأثیر پیکسل‌های مرده قرار نمی‌گیرد و لبه‌های داخلی تصویر را بهتر حفظ می‌کند.

فیلتر میانگین یک فیلتر پایین‌گذر است و می‌توان از فیلتر میانگین برای کاهش نویز در تصویر استفاده کرد. این فرآیند با جایگزین کردن مقدار هر پیکسل در یک تصویر با میانگین سطوح شدت در همسایگی آن انجام می‌گیرد که منجر به کاهش تیزی و نویز در تصویر می‌شود. البته این فیلتر باعث محو کردن لبه‌ها نیز می‌شود. در واقع استفاده عمده از این فیلتر در کاهش جزئیات کوچک در تصویر است. فیلتر میانگین ۳×۳ پیکسل را با استفاده از معادله ۱ می‌توان نشان داد:

$$R = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 Z_i \quad (1)$$

۳-۲- روش تحلیل مولفه اصلی

روش PCA باعث کاهش داده‌های نامطلوب مانند نویز می‌شود، در حالی که اطلاعات ضروری و ویژگی‌های اصلی دنباله تصاویر حرارتی را حفظ می‌کند [۲۸, ۲۹]. دنباله تصاویر حرارتی، یک ماتریس ۳ بعدی X را تشکیل می‌دهند که از P فریم شامل $N \times M$ پیکسل در هر فریم تصویر تشکیل می‌شود:

$$X_P = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & \dots & x_{NM} \end{bmatrix} \quad (2)$$

با قرار دادن درایه‌های هر فریم در هر ستون، ماتریس سه بعدی X_P تبدیل به ماتریس دوبعدی A با ابعاد $NM \times P$

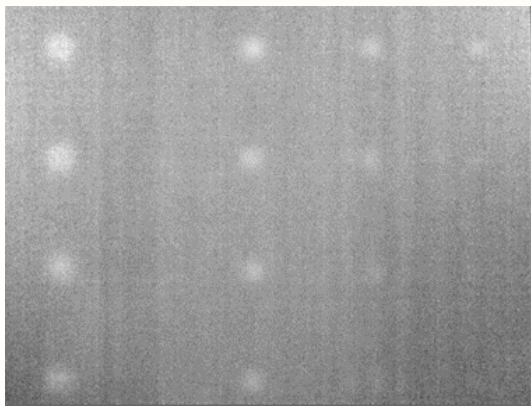
³ Salt and Pepper Noise

¹ Median Filter

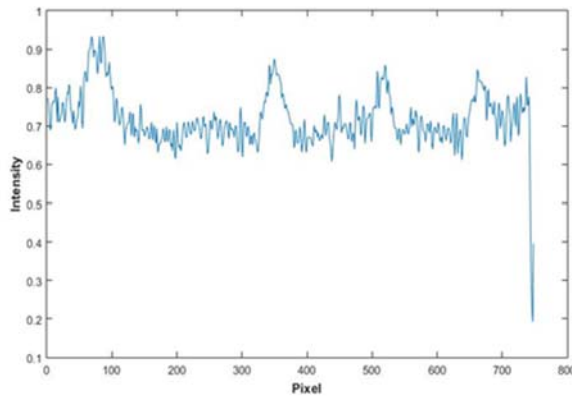
² Mean Filter

- یک فیلتر میانه 5×5 پیکسل برای حذف اثرات ناشی از پیکسل‌های مرده
- یک فیلتر میانگین 5×5

شکل ۶ تصویر حرارتی را پس اعمال فیلتر میانه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است نویز در تصویر تا حد زیادی کاهش یافته است. برای بررسی بهتر اثر این فیلتر، شکل ۷ نمودار شدت نور عیوب با ضخامت فلز باقیمانده 0.5 میلی‌متر را پس از اعمال فیلتر میانه نشان می‌دهد. با مقایسه شکل ۵ و شکل ۷، به‌وضوح کاهش نویز پس از اعمال فیلتر میانه را می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۴- تصویر خام حرارتی نمونه فولادی با استفاده روش تحریک پله‌ای



شکل ۵- نمودار تغییرات شدت نور عیوب با ضخامت فلز باقیمانده 0.5 میلی‌متر در تصویر خام حرارتی

شکل ۸ تصویر حرارتی را پس از اعمال فیلتر میانگین نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نویز کاهش یافته است و مرزهای دندان‌دار هموارتر شده‌اند. همچنین تاری در تصویر نیز افزایش یافته است. با اعمال فیلتر میانگین، اجزای

می‌شود. سپس عملیات نرمال‌سازی به منظور کاهش عوارض جانبی ناشی از گرمایش غیریکنواخت و نویز بر روی ماتریس A انجام می‌شود:

$$\hat{A}(n, m) = \frac{A(n, m) - \mu_n}{\sigma_n} \quad (3)$$

$$\mu_m = \frac{1}{N_t} \sum_{n=1}^{N_t} A(n, m) \quad (4)$$

$$\sigma_m^2 = \frac{1}{N_t - 1} \sum_{n=1}^{N_t} (A(n, m) - \mu_n)^2 \quad (5)$$

هر ماتریس A که دارای N سطر و M ستون است را می‌توان به‌صورت زیر تجزیه کرد:

$$A = USV^T$$

در رابطه بالا S یک ماتریس قطری است که مقادیر تکین ماتریس A را نشان می‌دهد، V^T ترانهاده یک ماتریس با ابعاد $N \times N$ است و U یک ماتریس $M \times N$ شامل توابع متعامدی است که تغییرات مکانی مجموعه داده‌های حرارتی را نشان می‌دهد. سه ستون اول ماتریس U به‌عنوان توابع متعامد غیرتجربی^۱ شناخته می‌شوند که تقریباً ۸۰ تا ۹۰ درصد از تغییرات داده‌های حرارتی اندازه‌گیری شده مربوط به تغییرات مکانی عیوب ماده را نشان می‌دهد.

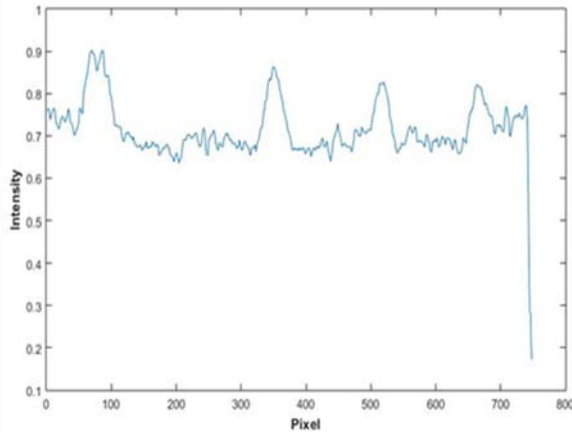
۴- بحث و ارزیابی نتایج

شکل ۴ تصویر خام حرارتی نمونه را نشان می‌دهد. عیوب قابل تشخیص دارای نسبت قطر به ضخامت فلز باقیمانده (d/h) بزرگتر از ۴ هستند. به‌طور کلی ۱۲ نقص از مجموع ۲۰ نقص تشخیص داده شدند. شکل ۵ نمودار شدت نور عیوب با ضخامت فلز باقیمانده 0.5 میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تصویر خام اولیه دارای مقدار زیادی نویز است که شناسایی عیوب را در مراحل بعدی دشوار می‌کند.

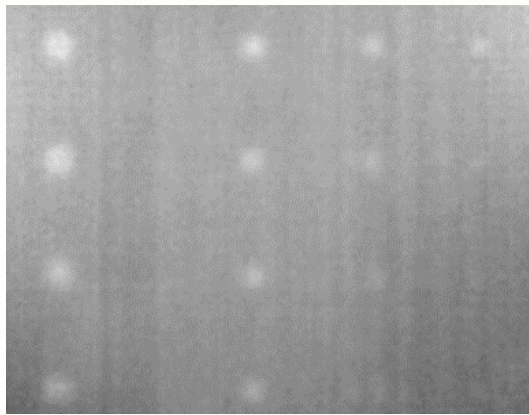
۴-۱- اثر روش‌های پیش‌پردازش بر کاهش نویز

هر فریم تصویر با استفاده از تکنیک‌های کاهش نویز که در بخش ۳-۱ توضیح داده شد، پردازش شدند. تکنیک‌های زیر به‌ترتیب برای کاهش نویز تصاویر ترموگرافی به‌کار رفتند:

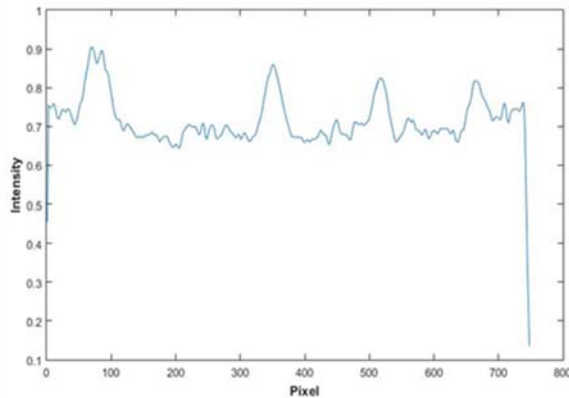
¹ Empirical Orthogonal Function



شکل ۷- نمودار تغییرات شدت نور عیوب با ضخامت فلز باقیمانده ۰/۵ میلی‌متر پس از اعمال فیلتر میانه



شکل ۸- تصویر حرارتی پس از اعمال فیلتر میانگین



شکل ۹- نمودار تغییرات شدت نور عیوب با ضخامت فلز باقیمانده ۰/۵ میلی‌متر پس از اعمال فیلتر میانگین

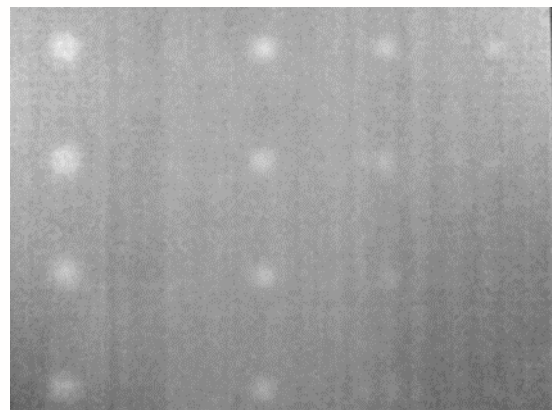
۳-۴- ارزیابی نتایج

برای ارزیابی کمی نتایج از نظر میزان اختلاف شدت نور میان نواحی معیوب و سالم از پارامتر SNR استفاده می‌کنیم که می‌تواند تکنیک‌های پردازش داده‌های ترموگرافی را از نظر قابلیت تشخیص عیوب بررسی کند [۳۰]. SNR برای

کوچک‌تر تصویر با پس‌زمینه ترکیب شدند یا از شدت آن‌ها به میزان قابل توجهی کاسته شد. در نتیجه اجزای بزرگ‌تر تصویر راحت‌تر تشخیص داده می‌شوند. شکل ۹ نیز نمودار شدت نور عیوب با ضخامت فلز باقیمانده ۰/۵ میلی‌متر را پس از اعمال فیلتر میانگین نشان می‌دهد. مشخص است که مقدار نویز پس از اعمال فیلتر میانگین به حداقل رسیده است.

۴-۲- اثر روش PCA در بهبود شناسایی عیوب

به منظور افزایش قابلیت تشخیص عیوب، الگوریتم PCA به داده‌های خام حرارتی اعمال شد. شکل ۱۰ تصاویر ترموگرافی پردازش شده توسط روش PCA را نشان می‌دهد. از EOF₂ مرتبط با مولفه اصلی دوم استفاده شد. همان‌طور که مشخص است اختلاف شدت نور میان نواحی سالم و معیوب به طرز چشم‌گیری افزایش یافته است. عیوب قابل تشخیص با دایره سبز رنگ و عیوب غیرقابل تشخیص با دایره قرمز رنگ مشخص شدند. مشاهده می‌شود که ۱۴ عیب از مجموع ۲۰ عیب تشخیص داده شد. با مقایسه شکل ۴ و شکل ۱۰ مشخص می‌شود که الگوریتم PCA روشی مناسب برای افزایش قابلیت تشخیص عیوب، کاهش اثرات گرمایش غیریکنواخت و افزایش کنتراست تصویر است. همان‌طور که مشخص است عیوب با نسبت d/h بزرگتر از ۳ تشخیص داده شدند، به غیر از عیب D2H0.5 که دارای نسبت قطر به ضخامت باقیمانده ۴ است.



شکل ۱۰- تصویر حرارتی نمونه پس از اعمال فیلتر میانه

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از روش ترموگرافی با تحریک پله‌ای برای شناسایی سوراخ کف تخت در یک پلیت فولادی استفاده شد. از فیلتر میانه و فیلتر میانگین برای کاهش نویز در تصاویر استفاده شد. برای بهبود قابلیت تشخیص عیوب، الگوریتم PCA بر روی تصاویر حرارتی اعمال شد. عملکرد تکنیک‌های پردازش سیگنال از نظر افزایش قابلیت تشخیص عیوب بررسی شد. با بررسی تصویر خام حرارتی فقط ۱۲ عیب از مجموع ۲۰ عیب قابل تشخیص بود. همچنین عیوب قابل تشخیص دارای نسبت d/h بزرگتر از ۴ بودند. ولی با اعمال فیلترهای کاهش نویز و الگوریتم PCA ۱۴ عیب از مجموع ۲۰ عیب شناسایی شدند. در تصویر پردازش‌شده توسط الگوریتم PCA عیوب با نسبت d/h بزرگتر از ۳ تشخیص داده شدند، به غیر از عیب D2H0.5. همچنین مقدار SNR از ۲/۶۴ به ۱۴/۶۷ دسی‌بل افزایش یافت که نشان می‌دهد قابلیت تشخیص عیوب به طرز قابل توجهی بهبود یافته است.

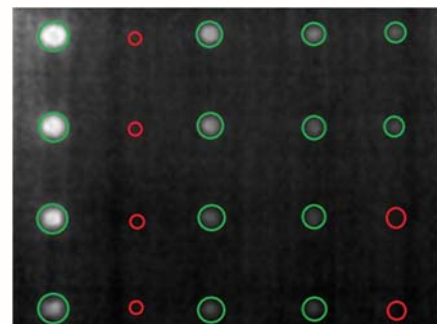
۶- منابع

- [1] Mezghani, S., et al. "Evaluation of heterogeneity of paint coating on metal substrate using laser infrared thermography and eddy current." *Evaluation* 1 (2015): 20665.
- [2] Ming-Xuan, Li, Wang Xiao-Min, and Mao Jie. "Thickness measurement of a film on a substrate by low-frequency ultrasound." *Chinese Physics Letters* 21.5 (2004): 870.
- [3] Chandler, K., and R. E. Mansford. "MEASUREMENT OF THICKNESS OF SPRAYED METAL COATINGS ON STEEL." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 30.1 (1965): 131-146.
- [4] Koleske, Joseph V. "Paint and coating testing manual: of the Gardner-Sward handbook." Philadelphia, PA, USA:: ASTM, 1995.
- [5] Dodd, C. V., and W. A. Simpson Jr. *THICKNESS MEASUREMENTS USING EDDY-CURRENT TECHNIQUES*. No. ORNL-TM-3712. Oak Ridge National Lab., Tenn., 1972.
- [6] Kurabayashi, Toru, Shinich Yodokawa, and Satoru Kosaka. "Terahertz imaging through paint layers." *2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. IEEE, 2012.
- [7] Su, Ke, et al. "Terahertz sensor for non-contact thickness measurement of car paints." *2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. IEEE, 2013.
- [8] Izutani, Yusuke, Motonobu Akagi, and Keiko Kitagishi. "Measurements of paint thickness of automobiles by using THz time-domain spectroscopy." *2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. IEEE, 2012.

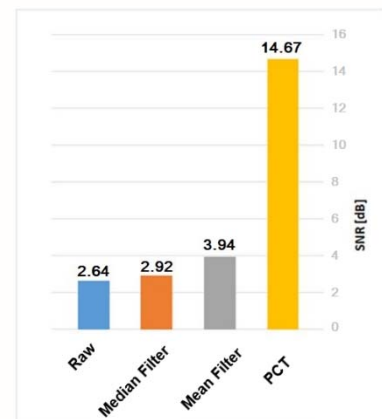
هر عیب در واحد دسی‌بل (dB) اندازه‌گیری و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{|I_{mean} - D_{mean}|}{\sigma} \right) \quad (7)$$

که I_{mean} و D_{mean} به ترتیب میانگین حسابی تمام پیکسل‌ها در مناطق بدون عیب و مناطق معیوب و σ انحراف معیار همه پیکسل‌ها در منطقه بدون عیب است. کنتراست مطلق در معادله (۷) با استفاده از دو پنجره به اندازه 5×5 پیکسل یکی در مرکز عیب و دیگری در منطقه سالم در همسایگی عیب محاسبه شد و با استفاده از آن SNR برای هر عیب محاسبه شد. مقدار SNR هر تصویر برابر میانگین مقادیر محاسبه شده است. این مقادیر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار SNR برای تصویر خام اولیه برابر ۲/۶۴ دسی‌بل است. پس از اعمال فیلترهای کاهش نویز و الگوریتم PCA این مقدار به ۱۴/۶۷ دسی‌بل افزایش یافت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم PCA روشی بسیار کارآمد به منظور افزایش اختلاف شدت نور میان نواحی معیوب و سالم است که منجر به بهبود قابلیت تشخیص عیوب در تصاویر حرارتی می‌شود.



شکل ۱۰- تصویر حرارتی پردازش‌شده توسط روش PCA



شکل ۱۱- میانگین SNR برای تصویر خام و تصاویر پردازش‌شده

- [26] Gonzalez, Rafael C. *Digital image processing*. Pearson education india, 2009.
- [27] Maldague, Xavier. "Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing." (2001).
- [28] Rajic, Nikolas. "Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures." *Composite structures* 58.4 (2002): 521-528.
- [29] Rajic, Nikolas. *Principal component thermography*. Defence Science and Technology Organisation Victoria (Australia) Aeronautical and Maritime Research Lab, 2002.
- [30] Panella, F. W., A. Pirinu, and V. Dattoma. "A brief review and advances of thermographic image-processing methods for irt inspection: a case of study on gfrp plate." *Experimental Techniques* 45.4 (2021): 429-443.
- [9] He, Yunze, et al. "An investigation into eddy current pulsed thermography for detection of corrosion blister." *Corrosion Science* 78 (2014): 1-6.
- [10] meshkizadeh, P., Rezaee Hajideh, M., Farahani, M., Heidari-Rarani, M. (2021). Thermal signal reconstruction and employment of K clustering method for inspection of additive manufactured polymer parts. *NDT Technology*, 2(7), 60-69.
- [11] Kolagar, A., Cheraghzadeh, M., Akbari, D., Farahani, M. (2021). Nondestructive Evaluation of Gas Turbine Blade Cooling Holes Blockage by Thermography. *NDT Technology*, 2(6), 46-52.
- [12] Meshkizadeh, P., Farahani, M., Rezaee Hajideh, M., Heidari-Rarani, M. (2020). Implementing Thermal Image Processing Techniques for Enhancing the Detectability of Defects in Thermography of Additive Manufacturing Components. *NDT Technology*, 2(6), 36-45.
- [13] Khoshkbar, R., Farahani, M., Safarabadi, M., Asghari, S. (2019). Using of Modulated Thermography for Nondestructive Testing of Polymer Plates. *NDT Technology*, 2(4), 38-45.
- [14] Alireza Ahmadi; Mohammadreza Farahani; Amirreza Ardebili. "Applying pulse thermography technique for corrosion defect evaluation on the steel plates". *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 7, 5, 2020, 24-32.
- [15] Ardebili A, Farahani M. Identification of Delamination Defects in Metal-Composite Shells Using Pulse Thermography. *Modares Mechanical Engineering*. 2020; 20 (9).
- [16] Kaplan, Herbert. *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*. Vol. 75. SPIE press, 2007.
- [17] Maldague, Xavier. "Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing." (2001).
- [18] Moore, P. O., and X. Maldague. "NDT Handbook on Infrared technology ASNT Handbook Series." (2001).
- [19] Maldague, Xavier PV. "Introduction to NDT by active infrared thermography." *Materials evaluation* 60.9 (2002): 1060-1073.
- [20] Ardebili, A., Farahani, M., Asghari, S. (2020). Thermography with Radiation Excitation for Non-Destructive Evaluation of Composite and Sheet Metal. *NDT Technology*, 2(5), 3-13.
- [21] Osiander, Robert, and Jane WM Spicer. "Time-resolved infrared radiometry with step heating. A review." *Revue Générale de Thermique* 37.8 (1998): 680-692.
- [22] Badghaish, Adel A., and David C. Fleming. "Non-destructive inspection of composites using step heating thermography." *Journal of composite materials* 42.13 (2008): 1337-1357.
- [23] Balageas, Daniel L., and Jean-Michel Roche. "Common tools for quantitative time-resolved pulse and step-heating thermography—part I: theoretical basis." *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 11.1 (2014): 43-56.
- [24] Roche, Jean-Michel, and Daniel L. Balageas. "Common tools for quantitative pulse and step-heating thermography— part II: experimental investigation." *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 12.1 (2015): 1-23.
- [25] Almond, Darryl P., Stefano L. Angioni, and Simon G. Pickering. "Long pulse excitation thermographic non-destructive evaluation." *NDT & E International* 87 (2017): 7-14.