

Employment of thermal contrast definitions in order to improve defect detection capability in nondestructive testing by thermography

Keyhan Nategh¹  | Mohammadreza farahani^{2✉}  | Majid Farhang³ 

1. School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
E-mail: mrfarahani@ut.ac.ir
3. School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

ABSTRACT

Article Information:

Research Article

Received 07 July 2023

Revised 17 Sep. 2023

Accepted 01 Feb. 2023

Keywords:

Non-destructive testing,
Thermography,
Thermal Contrast-Based
Techniques,
Thermal signal
processing.

Investigating the integrity of structures and equipment such as airplanes, pipelines, oil platforms, bridges, and pressure vessels is an essential task in the industry. Employing a reliable and accurate method for investigating the health of the industry equipment is vital to increase the health and reduce the financial hazards. Nowadays, the use of thermographic inspection techniques or the inspection using infrared waves as a useful and advanced tool among the various methods of condition monitoring and nondestructive evaluations is expanding. Infrared thermography is performed with the help of thermal information analysis using non-contact thermal imaging devices. Infrared thermography is used to detect hot spots, heat losses, leaks, insulation defects, etc. so that the nondestructive men and maintenance personnel can take appropriate actions to fix the problems. In this research, a steel plate with 20 flat bottom holes (FBH) with diameters of 2 to 10 mm and distances from the test piece surface (Defect depth) ranging from 0.5 to 2 mm was used as a test sample. A flash lamp and two projectors were used as heating sources and then the thermal image sequences were recorded. It was observed that only 11 defects can be detected in the thermal raw image. In order to improve the capability of thermography test, 6 techniques of Thermal contrast including absolute thermal contrast, running contrast, normalized contrast (final value), normalized contrast (maximum value), standard contrast, and differentiated absolute contrast (DAC) have been applied to the of thermal raw images. Thermal contrast-based techniques were found to be useful in improving defect detection by increasing the contrast between the image of the defect and the sound area and reducing the effects of non-uniform heating. Normalized contrast (final value) had the best performance in terms of increasing the number of detected defects and was able to reveal 16 defects.

Cite this article: Nategh, K., Farahani, M., Farhang, M. (2023). Employment of thermal contrast definitions in order to improve defect detection capability in thermography testing. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (3), 27-37. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.405858.1124>

بکارگیری روش‌های افزایش کنتراست حرارتی جهت بهبود قابلیت تشخیص عیوب در آزمون عیب‌یابی غیرمخرب گرمانگاری

کیهان ناطق^۱ | محمدرضا فراهانی^۲ | مجید فرهنگ^۳

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

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: mrfarahani@ut.ac.ir

۳. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده:

بررسی یکپارچگی سازه‌ها و تجهیزات از جمله هواپیما، خطوط لوله، سکوه‌های نفتی، پل و مخازن تحت فشار امری ضروری در صنعت است. استفاده از روش‌هایی قابل اعتماد و دقیق برای ارزیابی سلامت این تجهیزات به منظور به حداقل رساندن خطرات جانی مالی بسیار حیاتی است. استفاده از تکنیک بازرسی ترموگرافی یا همان بازرسی با استفاده از امواج مادون قرمز به عنوان یک ابزار مفید و پیشرفته در میان روش‌های مختلف پایش وضعیت و عیب‌یابی در حال گسترش است. ترموگرافی مادون قرمز با کمک تجزیه و تحلیل اطلاعات حرارتی با استفاده از دستگاه‌های تصویربرداری حرارتی غیر تماسی انجام می‌پذیرد. ترموگرافی مادون قرمز برای تشخیص نقاط داغ، تلفات حرارتی، نشتی، عیوب عایق و غیره استفاده می‌شود تا پرسنل تعمیر و نگهداری بتوانند اقدامات مناسبی را برای رفع مشکلات انجام دهند. در این پژوهش، صفحه‌ای فولادی دارای ۲۰ عدد سوراخ با قطرهای ۲ تا ۱۰ میلی‌متر و عمق ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر تحت آزمون گرمانگاری قرار گرفت و دنباله‌ای از تصاویر حرارتی ضبط شد. با بررسی تصویر خام حرارتی مشخص شد که تعداد ۱۱ عدد عیب قبل از اعمال پردازش قابل تشخیص هستند. برای بهبود عملکرد آزمون گرمانگاری، ۶ روش افزایش کنتراست حرارتی شامل کنتراست حرارتی مطلق، کنتراست حرارتی پویا، کنتراست حرارتی نرمال شده (مقدار نهایی)، کنتراست حرارتی نرمال شده (مقدار بیشینه)، کنتراست حرارتی استاندارد، و کنتراست حرارتی اختلافی (DAC) به دنباله تصاویر حرارتی اعمال شد. نتایج نشان داد که روش‌های افزایش کنتراست حرارتی بوسیله افزایش کنتراست بین تصویر عیب و نواحی سالم اطراف و کاهش اثرات گرمایش غیریکنواخت عملکرد مطلوبی در بهبود قابلیت تشخیص عیوب داشتند. روش کنتراست حرارتی نرمال شده (مقدار نهایی) بهترین عملکرد را از نظر افزایش تعداد عیوب قابل شناسایی داشت و توانست ۱۶ عدد عیب را آشکار سازد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۴/۱۶

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۱/۱۲

کلیدواژگان:

آزمون غیرمخرب،

گرمانگاری،

افزایش کنتراست حرارتی،

پردازش سیگنال حرارتی.

استناد: ناطق، کیهان؛ فراهانی، محمدرضا؛ و فرهنگ، مجید. (۱۴۰۲). بکارگیری روش‌های افزایش کنتراست حرارتی جهت بهبود قابلیت تشخیص عیوب در آزمون غیرمخرب گرمانگاری. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۳)، ۲۷-۳۷.

<http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.405858.1124>

۱- مقدمه

قطعه تزریق می‌شود. بر خلاف گرمانگاری با تحریک پالسی، گرمانگاری با تحریک پله‌ای روشی است که از پالس گرمایشی با چگالی انرژی کم ولی با مدت زمان طولانی استفاده می‌کند. گرمایش نسبتاً آهسته امکان بررسی ساختارهای چند لایه، تشخیص خوردگی در سازه‌های پیچیده و تعیین ضخامت لایه‌ها را می‌دهد.

عملکرد بهینه آزمون غیرمخرب گرمانگاری فعال به عوامل بسیاری مانند اندازه نقص، شدت گرمایش (یا سرمایش) و توانایی اپراتور بستگی دارد. اگر اختلاف دمایی ایجاد شده بین عیب و نواحی سالم اطراف آن به اندازه کافی (در حد چند میلی کلون) باشد، می‌توان آن را توسط دوربین حرارتی تشخیص داد. عوامل بسیاری مانند نویز، گرمایش غیریکنواخت و... تشخیص نقص را مشکل می‌کند. در نتیجه، بهبود تشخیص نقص یک چالش اساسی در آزمون گرمانگاری بوده است.

چندین روش پردازش سیگنال برای بهبود تشخیص نقص در آزمون غیرمخرب گرمانگاری توسعه داده شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ترموگرافی فاز پالسی^۳ [۱۵] و [۱۶]، بازسازی سیگنال حرارتی^۴ [۱۷] و [۱۸] و تحلیل مولفه اصلی^۵ [۱۹] و [۲۰] نام برد. یکی از روش‌های پردازش سیگنال حرارتی خوبی که کمتر به آن توجه شده است، روش‌های افزایش کنتراست حرارتی است. روش‌های افزایش کنتراست حرارتی امکان بهبود قابلیت تشخیص عیوب را در گرمانگاری فعال بوسیله برجسته‌تر کردن اختلافات دمایی موجود در تصاویر حرارتی میسر می‌سازد. این روش‌ها سرعت پردازش بالایی دارند [۱۰].

در این مقاله به معرفی^۶ روش افزایش کنتراست حرارتی خواهیم پرداخت. به منظور بررسی عملکرد این روش‌ها در بهبود قابلیت آشکارسازی عیوب، هر یک از این روش‌ها به دنباله تصاویر حرارتی اعمال خواهند شد.

۲- پردازش تصاویر حرارتی

به منظور تشخیص بهتر عیوب و افزایش کارایی آزمون غیرمخرب گرمانگاری، از دو روش پردازش تصویر استفاده خواهد شد. در ادامه به توضیح این دو روش خواهیم

تست غیرمخرب یکی از روش‌های مهم برای تضمین کیفیت قطعات و تجهیزات است. یکی از روش‌های آزمون غیرمخرب در حال توسعه، آزمون گرمانگاری است که برای تشخیص عیوب مختلف در قطعات فلزی و غیرفلزی استفاده می‌شود [۸-۱]. اساس کار گرمانگاری، ثبت مجموعه‌ای از تصاویر بر اساس تشخیص تابش در طیف مادون قرمز است. نتیجه آزمایش تبدیل این تابش به مجموعه‌ای از تصاویر حرارتی یا ترموگرام است. ترموگرام امکان مشاهده و ارزیابی توزیع دما را در سطح خارجی جسم مورد آزمایش می‌دهد. مکانیزم این آزمون بر پایه اختلافات دمایی موجود در قطعه است. عیوب موجود در قطعات خواص حرارتی متفاوتی نسبت به ماده سازنده قطعه دارند و در برابر جریان یافتن گرما ممانعت می‌کنند. این امر باعث تغییر سرعت انتشار گرما و ایجاد الگوهای دمایی غیرعادی می‌شود [۹].

آزمون غیرمخرب گرمانگاری را به دو دسته کلی گرمانگاری فعال^۱ و گرمانگاری غیرفعال^۲ می‌توان تقسیم کرد. در گرمانگاری غیرفعال نیاز به منبع تحریک خارجی نیست، چرا که دمای جسم با دمای محیط اطراف متفاوت است. از کاربردهای گرمانگاری غیر فعال می‌توان به بازرسی پست برق، تجهیزات الکترونیکی و بازرسی موتورهای اشاره کرد. بازرسی هر یک از این تجهیزات متکی به تغییرات دما یا تغییر نور مادون قرمز ساطع شده از آن‌ها در حین عملکردشان است. گرمانگاری فعال شامل استفاده از منابع انرژی خارجی برای ایجاد تغییرات دمایی در جسم است. این روش مناسب اشیایی است که تغییرات دمایی طبیعی ندارند، به عبارت دیگر، بطور طبیعی هیچ‌گونه اختلاف دمایی در جسم وجود ندارد [۱۰].

از پرکاربردترین روش‌های گرمانگاری فعال می‌توان به گرمانگاری با تحریک پالسی [۱۱] و گرمانگاری با تحریک پله‌ای [۱۲-۱۴] استفاده کرد. در گرمانگاری با تحریک پالسی از یک لامپ فلاش به عنوان منبع تحریک خارجی استفاده می‌شود. لامپ فلاش یک پالس حرارتی کوتاه ولی پرنرژی در حدود ۲ میلی ثانیه تولید می‌کند که به سطح

³ Pulsed Phase Thermography (PPT)

⁴ Thermal Signal Reconstruction (TSR)

⁵ Principle Component Analysis (PCA)

¹ Active Thermography

² Passive thermography

پرداخت.

این فرض که در چند تصویر اول دمای این نقطه مطابق با معادله (۶) رفتار کند، محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$T(0,t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (۶)$$

که $T(0,t)$ دمای سطح در زمان t ، Q انرژی جذب شده توسط سطح، e ضریب نفوذ حرارتی و T_0 دمای اولیه است. اولین گام این است که t' را بصورت یک مقدار زمانی معین بین لحظه‌ای که گرمایش شروع شده است (t_0) و لحظه‌ای که اولین عیب در دنباله ترموگرام ظاهر می‌شود (t_1) تعریف کنیم. در لحظه t' هنوز هیچ نشانه‌ای از وجود عیب ظاهر نشده است، بنابراین دمای موضعی یک منطقه بدون نقص دقیقاً مشابه یک منطقه معیوب است:

$$T_S(t') = T(t') = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t'}} \quad (۷)$$

با مرتب سازی خواهیم داشت:

$$\frac{Q}{e} = \sqrt{\pi t'} T(t') \quad (۸)$$

بنابراین T_S را می‌توان برای هر پیکسل در زمان t محاسبه کرد. با جایگزینی معادله (۸) در معادله (۱) داریم:

$$\Delta T_{DAC} = T(t) - \sqrt{\frac{t'}{t}} T(t') \quad (۹)$$

۲-۲ جداسازی تصاویر بوسیله آستانه‌گذاری

در مبحث پردازش تصاویر دیجیتال، جداسازی تصویر به معنای تقسیم بندی یک تصویر به بخش‌هایی معنادار است که امکان تحلیل را آسان می‌کند. یکی از مباحث جداسازی تصاویر دیجیتال، آستانه‌گذاری است که برای تولید تصاویر دودویی استفاده می‌شود. آستانه‌گذاری به دو صورت سراسری و تطبیقی انجام می‌گیرد [۲۳]. در آستانه‌گذاری سراسری مقدار آستانه براساس هیستوگرام توزیع شدت روشنایی پیکسل در سرتاسر تصویر تعیین می‌شود. در آستانه تطبیقی، تصویر به بخش‌هایی کوچکتر تقسیم می‌شود و مقدار آستانه برای هر ناحیه بصورت جداگانه محاسبه می‌شود. این رویه برای جبران عدم یکنواختی روشنایی تصویر استفاده می‌شود. یکی از معروف‌ترین روش‌های آستانه‌گذاری، آستانه‌گذاری اتسو است [۲۴]. در ادامه به توضیح این روش خواهیم پرداخت.

۱-۲ الگوریتم‌های افزایش کنتراست حرارتی

الگوریتم‌های مختلفی برای افزایش کنتراست حرارتی وجود دارد که شامل کنتراست حرارتی مطلق^۱، کنتراست حرارتی پویا^۲، کنتراست حرارتی نرمال شده^۳، کنتراست حرارتی استاندارد^۴ و کنتراست حرارتی اختلافی^۵ می‌شود. کنتراست حرارتی مطلق بصورت معادله (۱) تعریف می‌شود:

$$\Delta T(t)_{abs} = T_D(t) - T_S(t) \quad (۱)$$

که $T(t)$ دما در زمان t ، $T_D(t)$ دمای ناحیه معیوب و $T_S(t)$ دمای ناحیه سالم اطراف عیب در زمان t است. ناحیه سالم اطراف عیب در تصویر حرارتی می‌تواند بصورت خودکار یا بصورت دستی توسط اپراتور مشخص شود و ΔT برای تمام ترموگرام‌ها^۴ در دنباله زمانی محاسبه می‌شود.

معادلات (۲) و (۳) به ترتیب برای محاسبه کنتراست حرارتی پویا و کنتراست حرارتی استاندارد استفاده می‌شود:

$$\Delta T_{run}(t) = \frac{\Delta T(t)_{abs}}{T_S(t)} \quad (۳)$$

$$\Delta T_{std}(t) = \frac{T_D(t) - T_D(t_0)}{T_S(t) - T_S(t_0)} \quad (۴)$$

کنتراست حرارتی نرمال را می‌توان براساس پایان فرآیند یا براساس دمای پیشینه محاسبه کرد:

$$\Delta T_{norm}(t) = \frac{T_D(t)}{T_S(t_{end})} - \frac{T_S(t)}{T_S(t_{end})} \quad (۴)$$

$$\Delta T_{norm}(t) = \frac{T_D(t)}{T_S(t_{max})} - \frac{T_S(t)}{T_S(t_{max})} \quad (۵)$$

در روش DAC به جای یافتن یک ناحیه بدون نقص، دمای ایده‌آل یک ناحیه بدون نقص در زمان t بصورت موضعی با

¹ Absolute Contrast

² Running Contrast

³ Normalized Contrast

⁴ Standard Contrast

⁵ Differential Absolute Contrast (DAC)

۱-۲-۲ روش آستانه‌گذاری اتسو^۱

واریانس بین کلاسی با معادله (۱۸) تعریف می‌شود:

$$\sigma_B^2 = P_1(m_1 - m_G)^2 + P_2(m_2 - m_G)^2 \quad (18)$$

هر چقدر اختلاف دو عدد m_1 و m_2 از یکدیگر بیشتر باشد، σ_B^2 بزرگتر خواهد بود، یعنی واریانس بین کلاسی معیاری برای تفکیک بین کلاس‌ها است. هدف تعیین مقدار آستانه است و همان‌طور که در ابتدای این بخش عنوان شد، واریانس بین کلاس‌ها را به حداکثر می‌رساند.

۳- نمونه‌سازی و اجرای آزمون

نمونه آزمایش یک قطعه از جنس فولاد کم کربن به ابعاد 160×135 و ضخامت ۸ میلی‌متر بود. ۲۰ عدد سوراخ کف تخت به قطر (D) ۱۰، ۸، ۶، ۴ و ۲ میلی‌متر و عمق (H) ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر برای شبیه‌سازی عیب در سطح جلوی قطعه ایجاد شد. شکل ۱ تصویر نمونه آزمایش را نشان می‌دهد. سطح پشت قطعه با استفاده رنگ پودری الکترواستاتیک مشکی برای افزایش جذب انرژی رنگ آمیزی شد. هر کدام از سوراخ‌ها براساس قطر و عمق کدگذاری می‌شود، به این صورت که سوراخ با قطر ۱۰ و عمق ۲ میلی‌متر بصورت D10H2 نامگذاری می‌شود.

برای بازرسی نمونه از ترکیب دو روش گرمانگاری پالسی و گرمانگاری با تحریک پله‌ای استفاده شد. منبع گرمایش پله‌ای شامل دو عدد پروژکتور با مجموع توان 2kW و منبع گرمایش پالسی یک عدد لامپ فلاش 1kJ بود. برای ثبت تصاویر حرارتی نمونه، از دوربین مادون قرمز FLIR A325sc با وضوح 320×240 پیکسل استفاده شد. از نرم‌افزار ResearchIR Max برای مشاهده، ضبط و پردازش داده‌های حرارتی ضبط شده توسط دوربین استفاده شد. همچنین برای آنالیز و پردازش سیگنال حرارتی از نرم افزار MATLAB استفاده شد.

در روش آستانه‌گذاری اتسو فرض بر این است که تصویر از پیش‌زمینه و پس‌زمینه تشکیل شده است و ناهمگونی پس‌زمینه نادیده گرفته می‌شود. اساس کار این روش بر مبنای به حداکثر رساندن واریانس بین کلاسی در تصویر است. فرض می‌کنیم $\{0, 1, 2, \dots, L-1\}$ نشان دهنده سطوح شدت روشنایی در یک تصویر دیجیتال $M \times N$ پیکسل باشد و n_i نشان دهنده تعداد پیکسل‌های با شدت i باشد. فرض می‌کنیم مقدار آستانه برابر T ($0 < T < L$) باشد. بر این اساس پیکسل‌های تصویر به دو کلاس C_1 و C_2 تقسیم می‌شود:

$$C1 = \{(x,y) | I(x,y) \leq k\} \quad (10)$$

$$C2 = \{(x,y) | I(x,y) > k\} \quad (11)$$

که $I(x,y)$ بیانگر شدت روشنایی پیکسل واقع در سطر x و ستون y است.

احتمال اینکه یک پیکسل به کلاس C_1 تعلق داشته باشد با معادله (۱۲) بیان می‌شود:

$$P_1 = \sum_{i=0}^k P_i \quad (12)$$

بطور مشابه احتمال اینکه یک پیکسل به کلاس C_2 تعلق داشته باشد توسط معادله (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$P_2 = \sum_{i=k+1}^{L-1} P_i = 1 - P_1 \quad (13)$$

میانگین شدت روشنایی پیکسل‌های اختصاص داده شده به کلاس C_1 و C_2 به ترتیب با معادلات (۱۴) و (۱۵) بدست می‌آید:

$$m_1 = \frac{\sum_{i=0}^k iP_i}{P_1} \quad (14)$$

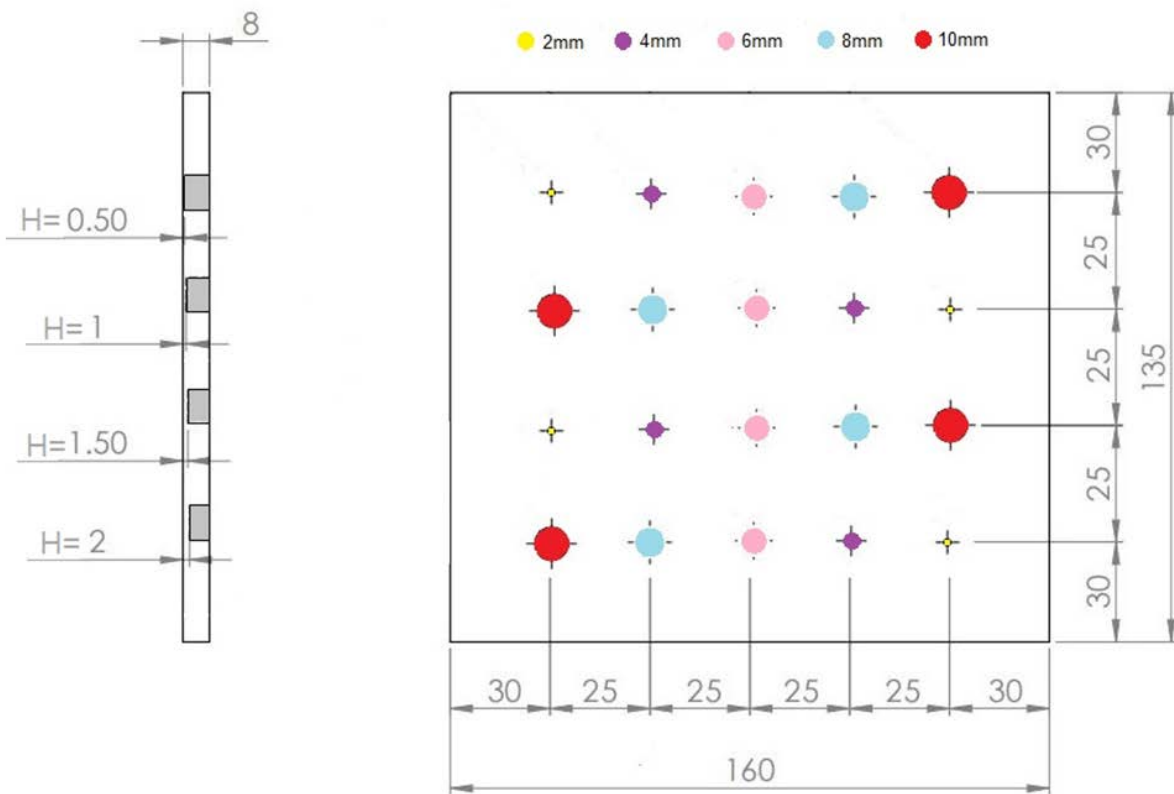
$$m_2 = \frac{\sum_{i=k+1}^{L-1} iP_i}{P_2} \quad (15)$$

میانگین و واریانس شدت روشنایی کل تصویر توسط معادلات (۱۶) و (۱۷) بیان می‌شود:

$$m_G = \sum_{i=0}^{L-1} iP_i \quad (16)$$

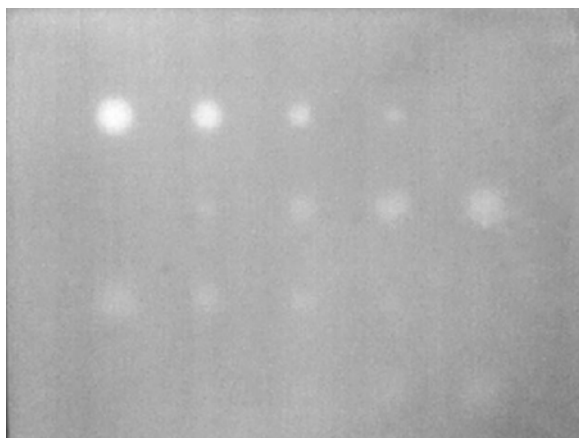
$$\sigma_G^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (i - m_G)^2 P_i \quad (17)$$

¹ Otsu



شکل ۱) نحوه قرار گرفتن عیوب در نمونه آزمایش

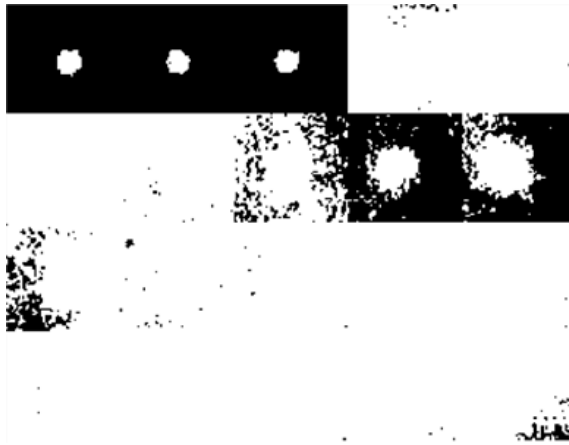
همان‌طور که مشاهده می‌شود، ۴ عیب واقع در عمق ۰/۵ میلی‌متر (D10H0.5, D8H0.5, D6H0.5, D4H0.5)، ۴ عیب واقع در عمق ۱ میلی‌متر (D10H1, D8H1, D6H1, D4H1) و ۳ عیب در عمق ۱/۵ میلی‌متر (D10H1.5, D8H1.5, D6H1.5) در تصویر خام حرارتی قابل تشخیص هستند.



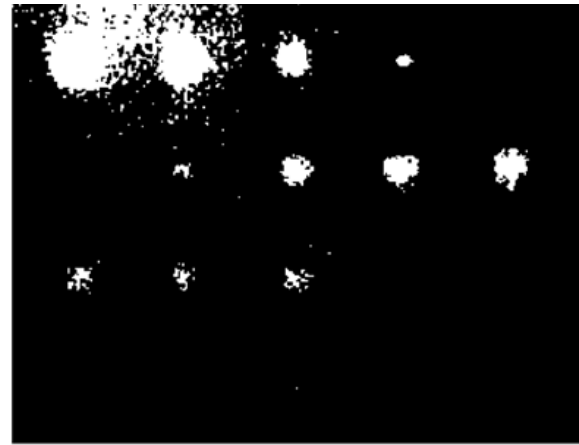
شکل ۲) تصویر حرارتی خام

۴- بحث و ارزیابی نتایج

برای بررسی عملکرد روش‌های افزایش کنتراست حرارتی در افزایش آشکارسازی عیوب، لازم است تا مقایسه‌ای بین تصاویر حرارتی اولیه و تصاویر پردازش‌شده صورت بگیرد. برای این منظور، هر یک از ۶ روش افزایش کنتراست حرارتی به دنباله تصاویر حرارتی اعمال شدند. تصویر خام حرارتی نمونه در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است هیچکدام از عیوب با قطر ۲ میلی‌متر و عیوب واقع در عمق ۲ میلی‌متر قابل تشخیص نیستند. همچنین عیب D4H1 و سایر عیوب واقع در عمق ۱/۵ میلی‌متر نیز بدلیل کنتراست حرارتی پایین تصویر عیب به سختی دیده می‌شوند. برای تشخیص دقیق این که کدام عیوب در تصویر خام قابل تشخیص هستند، از روش آستانه‌گذاری اتسو استفاده شد. شکل ۳ تصویر حاصل از روش آستانه‌گذاری اتسو را به دو روش سراسری و تطبیقی نشان می‌دهد. واضح است که روش آستانه‌گذاری سراسری عملکرد بهتری داشته است و ملاک بررسی قرار می‌گیرد.



(ب)

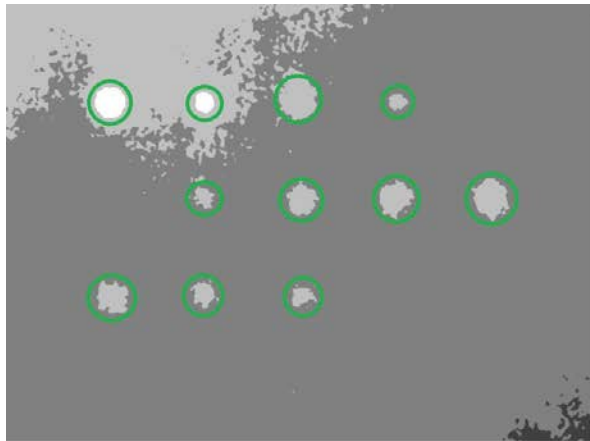


(الف)

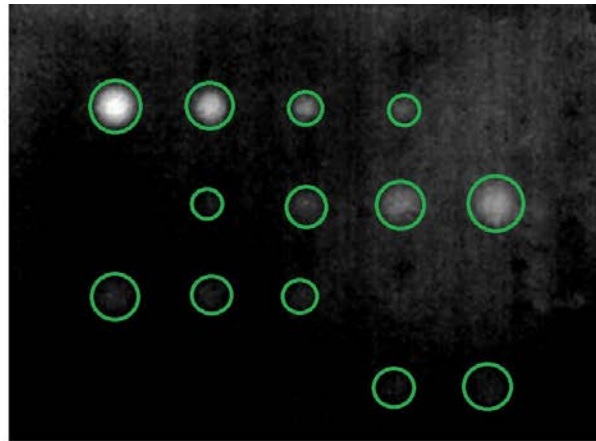
شکل ۳- تصویر دودویی تصویر حرارتی اولیه از روش آستانه‌گذاری اتسو؛ (الف) آستانه‌گذاری سراسری، (ب) آستانه‌گذاری تطبیقی

کنتراست حرارتی نرمال شده (مقدار بیشینه) قابل تشخیص هستند. در تصویر پردازش شده بوسیله کنتراست حرارتی استاندارد مجموعاً ۱۵ عیب (۴ عیب در $H=0.5$ ، ۴ عیب در $H=1$ ، ۴ عیب در $H=1.5$ و ۳ عیب در $H=2$) قابل تشخیص است. برای تشخیص بهتر عیوب آشکار شده در روش DAC و امکان مقایسه آن با سایر روش‌های افزایش کنتراست حرارتی، از تصاویر دودویی حاصل از آستانه‌گذاری به دو روش سراسری و تطبیقی استفاده شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در روش آستانه‌گذاری تطبیقی عیب D6H2 مشخص شده است، ولی در روش آستانه‌گذاری سراسری اثری از این عیب دیده نمی‌شود. البته عیب D4H1.5 نیز در هر دو تصویر دودویی بدست آمده قابل مشاهده است، ولی بدلیل این که ممکن است با اثرات حاصل از نویز اشتباه گرفته شود، به حساب آورده نشده است. بنابراین در تصویر DAC ۱۴ عیب (۴ عیب در $H=0.5$ ، ۴ عیب در $H=1$ ، ۳ عیب در $H=1.5$ و ۳ عیب در $H=2$) مشخص است. نمودار شکل ۶ تعداد عیوب قابل شناسایی در تصویر خام و تصاویر پردازش شده بدست آمده از هر یک از روش‌های افزایش کنتراست حرارتی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که روش کنتراست حرارتی نرمال شده (مقدار بیشینه) بهترین کارایی و روش کنتراست حرارتی پویا ضعیف‌ترین عملکرد را در زمینه بهبود قابلیت آشکارسازی عیوب داشت.

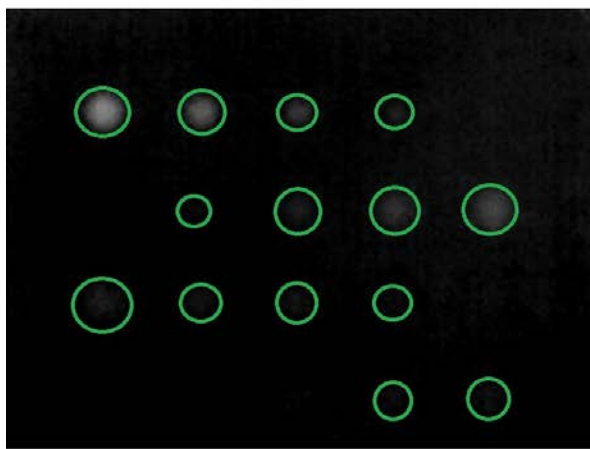
پس از پردازش داده‌های حرارتی توسط روش‌های افزایش کنتراست حرارتی، بهترین تصاویر بدست آمده انتخاب شدند. این تصاویر در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. عیوب قابل تشخیص با دایره سبز رنگ نشان داده شده‌اند. در روش کنتراست حرارتی مطلق ۱۳ عیب (۴ عیب در $H=0.5$ ، ۴ عیب در $H=1$ ، ۳ عیب در $H=1.5$ و دو عیب در $H=2$) قابل تشخیص است، یعنی روش کنتراست حرارتی دو عیب D8H2 و D10H2 که در تصویر حرارتی اولیه مشخص نبودند را آشکار ساخت. البته این روش در از بین بردن اثرات گرمایش غیریکنواخت عملکرد خوبی نداشت. در روش کنتراست حرارتی پویا ۱۱ عیب (۴ عیب در $H=0.5$ ، ۳ عیب در $H=1$ و ۳ عیب در $H=1.5$) قابل تشخیص است. روش کنتراست حرارتی پویا عیب بیشتری نسبت به تصویر خام حرارتی آشکار ساخت، ولی تاثیر مثبتی در بهبود کنتراست تصویر عیوب و از بین بردن اثرات گرمایش غیریکنواخت داشت. در تصویر بدست آمده از کنتراست حرارتی نرمال شده (مقدار نهایی) ۱۶ عیب (۴ عیب در $H=0.5$ ، ۴ عیب در $H=1$ ، ۴ عیب در $H=1.5$ و ۴ عیب در $H=2$) مشخص است. در این روش عیوب D6H2، D8H2، D10H2، D4H1.5، D4H2 آشکار شدند. روش کنتراست حرارتی نرمال شده (مقدار بیشینه) قادر به آشکارسازی ۱۴ عیب (۴ عیب در $H=0.5$ ، ۴ عیب در $H=1$ ، ۴ عیب در $H=1.5$ و ۲ عیب در $H=2$) بود. سوراخ‌های D8H2، D10H2، D4H1.5 در تصاویر قبل از پردازش مشخص نبودند، ولی در روش



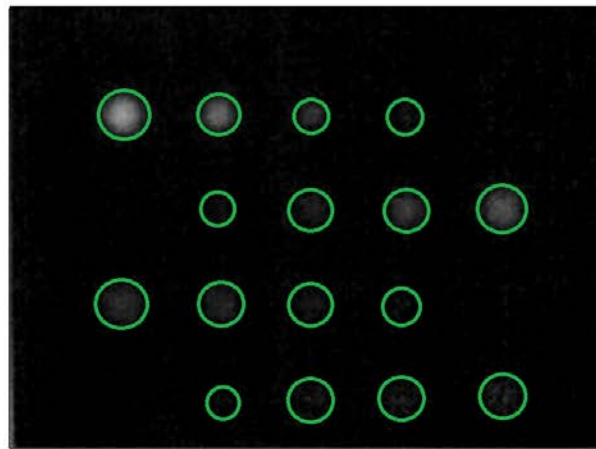
(ب)



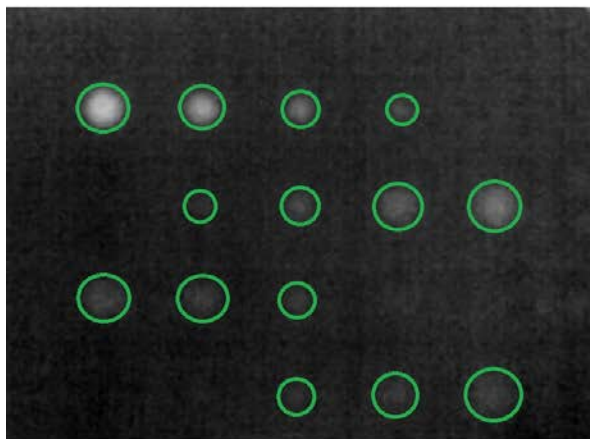
(الف)



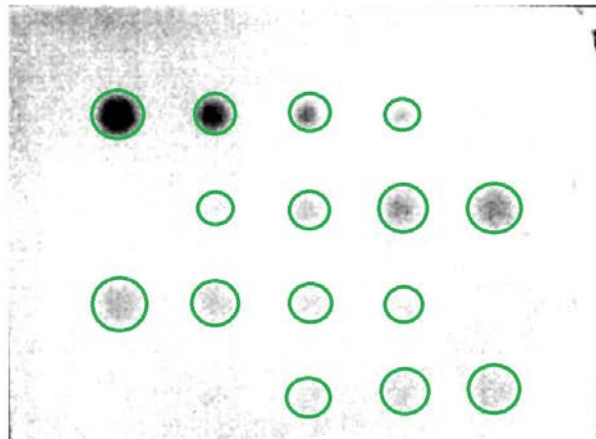
(د)



(ج)



(و)

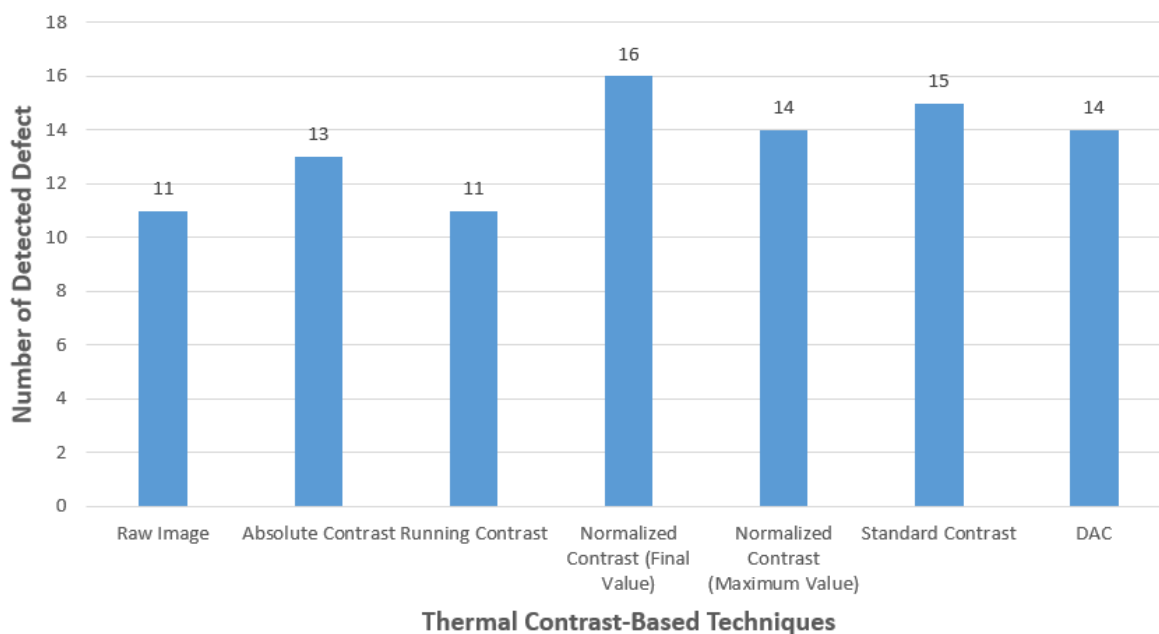


(ه)

شکل ۴- تصاویر کنتراستی: الف) کنتراست حرارتی مطلق، ب) کنتراست حرارتی پویا، ج) کنتراست حرارتی نرمال شده (مقدار نهایی)، د) کنتراست حرارتی نرمال شده (مقدار بیشینه)، ه) کنتراست حرارتی استاندارد، و) کنتراست حرارتی اختلافی.



شکل ۵- تصاویر دودویی روش DAC بوسیله آستانه‌گذاری اتسوز؛ الف) آستانه‌گذاری سراسری، ب) آستانه‌گذاری تطبیقی



شکل ۶- تعداد عیوب قابل تشخیص در تصویر خام حرارتی و روش‌های افزایش کنتراست حرارتی

بررسی مشخص شد که تعداد ۱۱ عیب در تصویر خام حرارتی قابل مشاهده است. همچنین کنتراست خوبی در تصویر عیوب قابل تشخیص با عمق ۱/۵ میلی‌متر ایجاد نشده است. ۶ روش افزایش کنتراست حرارتی به دنباله تصاویر حرارتی اعمال شد. نتایج نشان داد که روش کنتراست حرارتی نرمال شده (مقدار نهایی) با نمایان ساختن ۱۶ عیب، قادر به آشکارسازی بیشترین تعداد عیب بود. پس از آن، روش کنتراست حرارتی استاندارد با آشکارسازی ۱۵ عیب، بهترین عملکرد را از نظر افزایش

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله به منظور بررسی قابلیت روش‌های مختلف افزایش کنتراست حرارتی در بهبود آشکارسازی عیوب نگارش شده است. برای این منظور، ۲۰ عدد سوراخ کف تخت با قطر و عمق متفاوت در قطعه‌ای فولادی ایجاد شد. از یک عدد لامپ فلاش و دو عدد پروژکتور بصورت همزمان برای ایجاد تحریک حرارتی در قطعه استفاده شد. پس از

- 33-40.
- [8] Nategh, K., Farahani, M. Evaluating the Circular Defect Detection Capability in Thermography Testing by the Use of Analytical Method. *NDT Technology*, 2022; 3(1): 23-31.
- [9] Maldague XP. Introduction to NDT by active infrared thermography. *Materials evaluation*. 2002 Sep 1;60(9):1060-73.
- [10] Czichos H, editor. *Handbook of technical diagnostics: fundamentals and application to structures and systems*. Springer Science & Business Media; 2013 Jan 11.
- [11] Milne JM, Reynolds WN. The non-destructive evaluation of composites and other materials by thermal pulse video thermography. In *Thermosense VII: Thermal Infrared Sensing for Diagnostics and Control 1985 Mar 20 (Vol. 520, pp. 119-122)*. SPIE.
- [12] Badghaish AA, Fleming DC. Non-destructive inspection of composites using step heating thermography. *Journal of composite materials*. 2008 Jul;42(13):1337-57.
- [13] Balageas DL, Roche JM. Common tools for quantitative time-resolved pulse and step-heating thermography—part I: theoretical basis. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2014 Jan 2;11(1):43-56.
- [14] Roche JM, Balageas DL. Common tools for quantitative pulse and step-heating thermography—part II: experimental investigation. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2015 Jan 2;12(1):1-23.
- [15] Maldague X, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography. *Journal of applied physics*. 1996 Mar 1;79(5):2694-8.
- [16] Maldague X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing.
- [17] Shepard SM, inventor; Thermal Wave Imaging Inc, assignee. Temporal noise reduction, compression and analysis of thermographic image data sequences. United States patent US 6,516,084. 2003 Feb 4.
- [18] Shepard SM, Lhota JR, Rubadeux BA, Wang D, Ahmed T. Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences. *Optical Engineering*. 2003 May 1;42(5):1337-42.
- [19] Rajic N. Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures. *Composite structures*. 2002 Dec 1;58(4):521-8.
- [20] Rajic N. Principal component thermography. *Defence Science and Technology Organisation Victoria (Australia) Aeronautical and Maritime Research Lab*; 2002 Apr 1.
- قابلیت آشکارسازی عیوب نشان داد. همچنین روش‌های DAC و کنتراست حرارتی نرمال شده (مقدار بیشینه) ۱۴ عیب را آشکار ساختند. روش‌های کنتراست حرارتی مطلق و کنتراست حرارتی پویا نیز به ترتیب ۱۳ و ۱۱ عیب را آشکار ساختند. روش کنتراست حرارتی پویا با وجود این که عملکرد ضعیفی در افزایش تعداد عیوب قابل شناسایی نسبت به تصویر خام اولیه داشت، ولی تاثیر بسزایی در کاهش نویز و کاهش اثرات گرمایش غیریکنواخت داشت. در مجموع استفاده از روش‌های افزایش کنتراست حرارتی تاثیر مطلوبی در بهبود قابلیت تشخیص عیوب داشتند.
- ۶- تعارض منافع**
- هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.
- ۷- منابع**
- [1] Inspection of flight control surfaces made by honeycomb sandwich panels with use of Thermography method and Air Injection. *NDT Technology*, 2019; 2(4): 21-31.
- [2] Khoshkbar, R., Farahani, M., Safarabadi, M., Asghari, S. Using of Modulated Thermography for Nondestructive Testing of Polymer Plates. *NDT Technology*, 2019; 2(4): 38-45.
- [3] Ardebili, A., Farahani, M., Asghari, S. Thermography with Radiation Excitation for Non-Destructive Evaluation of Composite and Sheet Metal. *NDT Technology*, 2020; 2(5): 3-13.
- [4] Kolagar, A. M., Cheraghzadeh, M., Akbari, D., Farahani, M. Nondestructive Evaluation of Gas Turbine Blade Cooling Holes Blockage by Thermography. *NDT Technology*, 2020; 2(6): 46-52.
- [5] Meshkizadeh, P., Farahani, M., Rezaee Hajideh, M., Heidari-Rarani, M. Implementing Thermal Image Processing Techniques for Enhancing the Detectability of Defects in Thermography of Additive Manufacturing Components. *NDT Technology*, 2020; 2(6): 36-45.
- [6] meshkizadeh, P., Rezaee Hajideh, M., Farahani, M., Heidari-Rarani, M. Thermal signal reconstruction and employment of K clustering method for inspection of additive manufactured polymer parts. *NDT Technology*, 2021; 2(7): 60-69.
- [7] Nategh, K. Improving the nondestructive thermography inspection results for detection of circular defects in coated metals using principal component analysis. *NDT Technology*, 2022; 2(9):

- [21] Maldague X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing.
- [22] Pilla M, Klein M, Maldague X, Salerno A. New absolute contrast for pulsed thermography. InProc. QIRT 2002 Sep (Vol. 5, pp. 53-58).
- [23] Gonzalez RC. Digital image processing. Pearson education india; 2009.
- [24] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. 1979 Jan;9(1):62-6.