

Evaluating the Circular Defect Detection Capability in Thermography Testing by the Use of Analytical Method

Keyhan Nategh¹  | Mohammadreza Farahani² 

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

Article Information:

Research Article

Received 13 Sep. 2022

Revised 10 Dec. 2022

Accepted 20 Dec. 2022

Keywords:

Thermography,
Non-destructive Testing,
Thermal Contrast,
Pulsed Thermography,
Step-Heating
Thermography,
Long Pulse
Thermography.

ABSTRACT

Predicting defect detection capability by means of various non-destructive testing methods in test pieces with different geometries and thermal properties is a challenging issue. In this article, the capability of circular defect detection by thermography testing using analytical method has been investigated. Thermal contrasts produced over the surfaces of circular defects in AA 7075, AISI 1015 and SS316 samples by pulsed thermography (PT), step-heating thermography (SHT) and long pulse thermography (LT) were compared. The thermal contrast of defects in samples with thicknesses of 8, 6 and 4 mm made of AISI 1015 were also compared using the three stimulation methods mentioned. Results showed that PT is the best method in samples with high thermal diffusivity. On the contrary, LPT produces a higher thermal contrast in samples with low thermal diffusivity. Also, by increasing of the thickness, more thermal contrast occurs in all three stimulation methods.

Cite this article: Nategh, K., Farahani, M. (2023). Evaluating the Circular Defect Detection Capability in Thermography Testing by the Use of Analytical Method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (11), 23-31. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2022.362006.1101>

ارزیابی قابلیت تشخیص عیوب دایروی در آزمون‌های تجربی گرمانگاری با استفاده از روش تحلیلی

کیهان ناطق^۱ | محمدرضا فراهانی^۲ ✉

۱. دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: mfarahani@ut.ac.ir

چکیده:

پیش‌بینی قابلیت تشخیص عیوب توسط انواع روش‌های آزمون غیرمخرب در قطعات با هندسه و خواص حرارتی مختلف یکی از موضوعات چالش‌برانگیز است. در این مقاله به بررسی قابلیت آشکارسازی عیوب دایروی بوسیله آزمون غیرمخرب گرمانگاری با استفاده از روش تحلیلی پرداخته شده است. کنتراست حرارتی ایجاد شده روی سطح قطعات در قسمت فوقانی عیوب در قطعات از جنس AA7075، AISI 1015 و SS316 با استفاده از روش‌های گرمانگاری پالسی (PT)، گرمانگاری با تحریک پله‌ای (SHT) و گرمانگاری تحریک با پالس بلند (LPT) با یکدیگر مقایسه شدند. برای قطعه از جنس AISI 1015 کنتراست حرارتی عیوب در قطعات با ضخامت‌های ۸، ۶ و ۴ میلی‌متر نیز با استفاده از سه روش تحریک مذکور با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که روش گرمانگاری پالسی در قطعات با نفوذ حرارتی بالا بهترین عملکرد را دارد. برعکس روش LPT در قطعات با نفوذ گرمایی پایین کنتراست حرارتی بالاتری ایجاد می‌کند. همچنین با افزایش ضخامت قطعه، کنتراست حرارتی بیشتری در هر سه روش تحریک پدید می‌آید.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۶/۲۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۰۹/۱۹

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۰۹/۲۹

کلیدواژگان:

گرمانگاری،

آزمون غیرمخرب،

کنتراست حرارتی،

گرمانگاری پالسی،

گرمانگاری تحریک پله‌ای،

گرمانگاری تحریک با پالس

بلند.

استناد: ناطق، کیهان؛ فراهانی، محمدرضا (۱۴۰۱). ارزیابی قابلیت تشخیص عیوب دایروی در آزمون‌های تجربی گرمانگاری با استفاده از روش تحلیلی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳(۱۱)، ۲۳-۳۱. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2022.362006.1101>

۱- مقدمه

عیوب مانند تخلخل، لایه‌لایه شدگی، ترک، جدایش و ... را می‌توان به عنوان عاملی مقاوم در برابر جریان گرما در نظر گرفت که الگوهای دمایی غیرعادی را در سطح ایجاد می‌کنند.

در روش گرمانگاری با تحریک پله‌ای [۲۰-۲۳]، قطعه با استفاده از لامپ هالوژنی کوارتز به مدت چند ثانیه گرم می‌شود و سیگنال‌های حرارتی به طور مستقیم در مرحله گرمایش ذخیره می‌شود. در گرمانگاری با پالس بلند نیز از گرمایش پله‌ای استفاده می‌شود، اما تصاویر حرارتی در طول مرحله خنک شدن قطعه پس از تحریک حرارتی اندازه‌گیری می‌شوند [۲۴].

در تمامی این روش‌ها برای این که بتوان عیبی را بوسیله دوربین حرارتی تشخیص داد، باید کنتراست حرارتی مشخصی بین عیب و نواحی سالم پیرامون آن عیب بوجود آید. تاکنون پژوهش‌های مختلفی به منظور ارزیابی عملکرد انواع روش‌های آزمون غیرمخرب گرمانگاری در تشخیص عیوب انجام گرفته است. آلموند^{۱۱} و همکاران [۲۴] پژوهشی با هدف بررسی عملکرد روش‌های PT و LT در تشخیص عیوب دایروی کف تخت در قطعاتی از جنس آلیاژ آلومینیوم، فولاد کم‌کربن، فولاد زنگ نزن و پلیمر تقویت شده با الیاف کربن^{۱۲} انجام دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که روش گرمانگاری پالسی در بازرسی مواد با رسانایی حرارتی و نرخ پاسخ حرارتی بالا بهترین عملکرد را دارد. هم‌چنین تکنیک پالس طولانی برای آن‌ها ناکارآمد است. برای سایر مواد، این احتمال وجود دارد که تکنیک گرمانگاری تحریک با پالس طولانی به طور قابل ملاحظه‌ای بهتر از روش گرمانگاری پالسی باشد. در سال ۲۰۱۸ وانگ^{۱۳} و همکاران [۲۵] پژوهشی به منظور مقایسه کمی روش‌های تحریک مختلف از جمله گرمانگاری تحریک با پالس بلند، گرمانگاری پالسی و گرمانگاری با تحریک پله‌ای انجام دادند. آن‌ها آزمون را روی قطعاتی از جنس پلیمر تقویت شده با الیاف کربن و پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه^{۱۴} انجام دادند و تعدادی سوراخ کف تخت^{۱۵} در آن‌ها ایجاد کردند. مشخص شد که

در سال‌های گذشته، انواع مختلفی از آزمون‌های غیرمخرب توسعه داده شده‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به آزمون فراصوت^۱ [۱]، آزمون پرتونگاری^۲ [۲]، آزمون جریان گردابی^۳ [۳ و ۴]، آزمون ذرات مغناطیسی^۴ [۵]، آزمون مایع نافذ^۵ [۶]، آزمون بازرسی چشمی^۶ [۷] و آزمون نشر آوایی^۷ [۸] اشاره کرد. اما تمامی این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی هستند. یکی دیگر از روش‌های آزمون غیرمخرب که در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری در ارتباط با آن انجام گرفته آزمون گرمانگاری است [۹-۱۳]. آزمون غیرمخرب گرمانگاری دارای مزایای منحصر به فردی است، از جمله ناحیه وسیعی را می‌تواند مورد بازرسی قرار دهد، سرعت بالایی دارد، غیرتماسی است، روشی ایمن است و تفسیر نتایج آن ساده می‌باشد [۱۴].

آزمون غیرمخرب گرمانگاری را می‌توان به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم کرد. در گرمانگاری غیرفعال مواد و ساختارهایی آزمایش می‌شود که به طور طبیعی دمایی متفاوت نسبت به محیط (اغلب بالاتر) دارند. در گرمانگاری فعال از یک منبع تحریک برای ایجاد کنتراست حرارتی استفاده می‌شود [۱۵]. منابع گرمایش نوری از مهم‌ترین روش‌های تحریک حرارتی در گرمانگاری فعال هستند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به گرمانگاری پالسی^۸، گرمانگاری تحریک پله‌ای^۹ و گرمانگاری تحریک با پالس بلند^{۱۰} نام برد [۱۶].

در روش گرمانگاری پالسی [۱۷-۱۹] قطعه تحت یک گرمایش پالسی قرار می‌گیرد. پس از رسیدن پالس حرارتی به سطح، جبهه حرارتی در زیر سطح منتشر می‌شود. با گذشت زمان، دمای سطح برای یک قطعه بدون نقص داخلی به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد. در مقابل، ناپیوستگی‌ها و

¹ Ultrasonic Testing (UT)

² Radiography Testing (RT)

³ Eddy-current Testing (ECT)

⁴ Magnetized Testing (MT)

⁵ Liquid Penetrant Testing (LPT)

⁶ Visual Testing (VT)

⁷ Acoustic Emission

⁸ Pulsed Thermography (PT)

⁹ Step-heating Thermography (SHT)

¹⁰ Long pulse Thermography (LPT)

¹¹ Almond

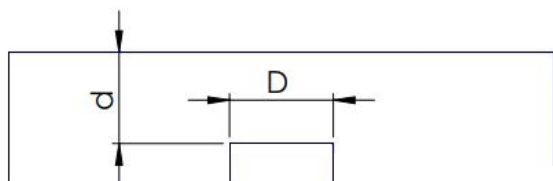
¹² Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

¹³ Wang

¹⁴ Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

¹⁵ Flat Bottom Hole (FBH)

روش تحریک نامبرده نیز مقایسه شده است.



شکل ۱- هندسه قطعه با عیب سوراخ کف تخت

جدول ۱- خواص فیزیکی سه آلیاژ AA7075، AISI 1015 و SS316 [۱۶].

جنس قطعه	هدایت حرارتی k $Wm^{-1}.K^{-1}$	ظرفیت گرمایی ویژه c $J.kg^{-1}.K^{-1}$	چگالی ρ $kg.m^{-3}$	ضریب نفوذ گرمایی α $10^{-6} m.s^{-2}$
AA7075	۱۷۷	۷۱۴/۸	۲۸۱۰	۷۴/۷
AISI 1015	۵۶/۹	۴۶۱	۷۸۵۰	۱۵/۷
SS316	۱۳	۴۹۰	۷۸۷۰	۳/۳۷

۲- بررسی تحلیلی کنتراست حرارتی

با استفاده از روش تحلیلی برای محاسبه کنتراست حرارتی ایجاد شده توسط عیوب با استفاده از آزمون گرمانگاری می‌توان به بررسی نقش خواص ترموفیزیکی و هندسه قطعه و عیب در قابلیت تشخیص عیوب پرداخت.

۱-۲ کنتراست حرارتی در گرمانگاری پالسی

در پژوهشی که اخیراً [۲۷] به‌منظور بررسی عملکرد روش PT در تشخیص عیب انجام شد، نشان داده شده است که کنتراست حرارتی ایجاد شده، $Tc(t)$ ، بر روی سطح قطعه در قسمت فوقانی مرکز یک نقص دایره‌ای، با قطر D و عمق d با استفاده از معادله ۱ بدست می‌آید:

$$Tc(t) = \frac{2J_0}{\sqrt{\pi\rho ckt}} \left[\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{(nd)^2}{at}} \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{(D/2)^2}{4at}} \right) \quad (1)$$

که J_0 چگالی انرژی حرارتی تولید شده در سطح قطعه، ρ ، c ، k و α به ترتیب چگالی^۲، ظرفیت گرمایی ویژه^۳، ضریب هدایت حرارتی^۴ و ضریب نفوذ گرمایی^۵ هستند. $\sqrt{\rho ck}$ نیز ضریب پخش حرارتی است. قسمت دوم معادله که در براکت

روش گرمانگاری با پالس طولانی در تشخیص عیوب عملکردی بهتر از دو روش تحریک دیگر داشت. لوپز^۱ و همکاران [۲۶] با استفاده از یک مدل حرارتی با روش عددی به شبیه‌سازی بازرسی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با فیبر کربن با استفاده از آزمون گرمانگاری پالسی پرداختند. برای اعتبارسنجی روش عددی، مقایسه‌ای بین منحنی‌های افت حرارتی در نواحی معیوب به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی و آزمون گرمانگاری پالسی انجام دادند. از یک نمونه کامپوزیتی با عیب لایه‌لایه‌شدگی استفاده شد. نتایج نشان داد که کنتراست حرارتی به ضخامت عیب، نسبت ابعاد و پارامترهای مربوط به تحریک خارجی بسیار حساس است. علاوه بر این، افزایش قابلیت تشخیص عیوب با افزایش توان تحریک خارجی قابل دستیابی است.

با وجود تحقیقات گسترده‌ای که در مورد کارایی روش‌های تحریک گوناگون در قطعات با جنس و خواص فیزیکی مختلف با استفاده از آزمایشات عملی و روش‌های عددی انجام شده است، هنوز تحقیق جامع و کاملی در این زمینه با استفاده از روش‌های تحلیلی انجام نگرفته است. تاکنون فرض بر این بود که جریان گرما در اطراف یک نقص، پس از تحریک حرارتی یک مسئله پیچیده سه بعدی است که با استفاده از روش‌های مدل‌سازی عددی می‌توان آن را پیش‌بینی کرد. با استفاده از مدل‌سازی تحلیلی آزمون غیرمخرب گرمانگاری می‌توانیم به‌راحتی و در زمان کم، اطلاعات مفیدی در مورد انواع عیوب در قطعات با هندسه و خواص فیزیکی متفاوت و با استفاده از روش‌های تحریک مختلف بدست آوریم. در این مقاله با استفاده از یک روش تحلیلی ساده، کنتراست حرارتی ایجاد شده توسط سه روش تحریک PT، SHT و LPT در عیوب شبیه‌سازی شده (سوراخ کف تخت با قطر و عمق مشخص، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است)، در قطعاتی از جنس AA7075، AISI 1015 و SS316 مقایسه شده است. کنتراست حرارتی در تصاویر گرمانگاری به صورت تفاوت دمایی بین مرکز نقص و نواحی بدون عیب پیرامون آن تعریف می‌شود [۲۴].

خواص فیزیکی سه آلیاژ مذکور در جدول ۱ خلاصه شده است [۱۶]. هم‌چنین کنتراست حرارتی ایجاد شده در قطعات فولادی با ضخامت‌های مختلف با استفاده از سه

² Density

³ Heat Capacity

⁴ Thermal Conductivity

⁵ Thermal Diffusivity

¹ Lopez

$$Tc(t) = \int_{\tau=0}^{t_p} \frac{2W}{\sqrt{\pi\rho c k(t+\tau)}} \left[\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{(nd)^2}{\alpha(t+\tau)}} - \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{(nL)^2}{\alpha(t+\tau)}} \right] \left(1 - e^{-\frac{(D/2)^2}{4\alpha(t+\tau)}} \right) dt \quad (3)$$

در معادله ۳، W شار حرارتی ($W \cdot m^{-2}$) جذب شده در سطح قطعه است که توسط لامپ در مدت زمان t_p اعمال شدند. کل انرژی تحریک حرارتی پالس طولانی Wt_p توسط دنباله‌ای از ضربات $Wd\tau$ که در مدت زمان t_p اعمال می‌شود، تشکیل می‌شود. محدوده زمانی افزایش و کاهش کنتراست تصویر نقص به خواص ترموفیزیکی قطعه بستگی دارد.

۳- بررسی نتایج مدل سازی تحلیلی

به منظور بررسی توانایی هر یک از انواع روش‌های تحریک آزمون گرمانگاری در آشکارسازی عیوب دایروی در قطعات با جنس و هندسه متفاوت از روش تحلیلی استفاده شد که در ادامه تشریح می‌شود.

۳-۱ نتایج روش تحریک پالسی

شکل ۲ نتایج مربوط به یک سوراخ کف تخت با قطر ۸ میلی‌متر و عمق ۱ میلی‌متر را در صفحاتی از جنس AA7075، AISI 1015 و SS316 که تحت یک پالس حرارتی ۱۰ کیلوژول بر مترمربع قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. کنتراست حرارتی عیب با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد. مقدار بیشینه کنتراست حرارتی و زمانی که کنتراست حرارتی به بیشترین مقدار می‌رسد برای سه ماده در جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است زمان اوج کنتراست با ضریب نفوذ گرمایی رابطه معکوس دارد، یعنی در آلیاژی مانند AA7075 که ضریب نفوذ گرمایی بالایی دارد، در زمان بسیار کمی پس از تحریک پالسی به کنتراست بیشینه خواهیم رسید. برعکس در قطعه‌ای مانند SS316 که ضریب نفوذ گرمایی پایینی دارد، در زمان طولانی‌تری بعد از تحریک پالسی به کنتراست بیشینه خواهیم رسید. همچنین بالاترین مقدار کنتراست حرارتی مربوط به AA7075 و کمترین مقدار مربوط به SS316 است. پس در گرمانگاری پالسی، هرچه ضریب نفوذ گرمایی بالاتر باشد، کنتراست حرارتی بیشتری بوجود می‌آید که

است مربوط به کنتراست حرارتی ایجاد شده توسط عیبی با عمق d است. قسمت سوم معادله که در پرانتز است مربوط به افت دما در اثر پخش جانبی گرمای محبوس شده بین عیب و سطوح مربوط به لبه‌های عیب با دمای پایین‌تر است که در فاصله $D/2$ از مرکز عیب قرار دارد. فرض بر این است که عیب کاملاً عایق است و مانع جریان یافتن گرما می‌شود. این مشخصات مربوط به عیب لایه‌لایه‌شدگی یا عیب سوراخ کف تخت است. نشان داده شده است که پاسخ پالس حرارتی پیش‌بینی شده توسط معادله (۱) به طور دقیق بیشینه کنتراست تصویر نقص را پس از تحریک پالسی بدست می‌آورد [۲۷].

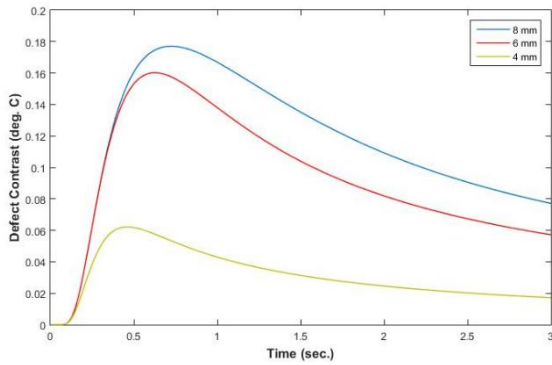
معادله (۱) مدلی تحلیلی است که با فرض گرمایش یکنواخت در سراسر سطح و متعاقباً هدایت حرارتی یک‌بعدی در قطعه بدست آمده است. عیوب واقعی دارای ابعاد جانبی محدود هستند و نمی‌توان جریان گرما در مجاورت آن‌ها را یک بعدی فرض کرد.

در معادله (۲) فرض بر این است که ضخامت صفحه بسیار بیشتر از عمق عیب است. در چنین قطعاتی می‌توان فرض کرد که افت دمایی در سطح بالای یک منطقه سالم تحت تأثیر ضخامت نیست. برای صفحات با ضخامت کمتر، این افت دمایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و ضخامت صفحه باید لحاظ شود. برای رفع این مشکل، کنتراست حرارتی مجدداً به صورت اختلاف دمای روی سطح صفحه‌ای با ضخامت L در قسمت فوقانی نقص و مناطق سالم اطراف آن تعریف شد. معادله اصلاح شده به صورت زیر است [۲۴]:

$$Tc(t) = \frac{2J_0}{\sqrt{\pi\rho c k t}} \left[\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{(nd)^2}{\alpha t}} - \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{(nL)^2}{\alpha t}} \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{(D/2)^2}{4\alpha t}} \right) \quad (2)$$

۳-۲ گرمانگاری با پالس بلند و گرمانگاری با تحریک پله‌ای

پاسخ تحریک با پالس طولانی را می‌توان با در نظر گرفتن آن به صورت دنباله‌ای از پاسخ‌های ضربه بدست آورد. کنتراست حرارتی تصویر نقص، $Tc(t)$ ، را می‌توان با انتگرال‌گیری از تابع پاسخ ضربه به دست آورد [۲۴]:



شکل ۳- کنتراست حرارتی عیب دایروی با قطر 12 mm و عمق 3.5 mm بر حسب زمان در قطعات با ضخامت ۸، ۶ و ۴ میلی‌متر با استفاده از روش تحریک PT

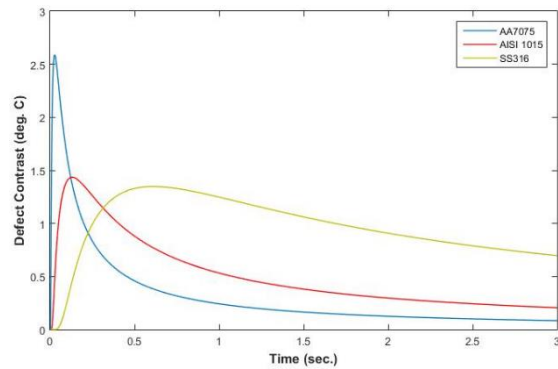
جدول ۳- کنتراست بیشینه و زمان کنتراست بیشینه برای عیبی با قطر 12 mm و عمق 3.5 mm در صفحات با ضخامت ۸، ۶ و ۴ میلی‌متر با استفاده از تحریک پالسی

زمان کنتراست بیشینه (s)	کنتراست بیشینه (deg.°C)	نمونه
۰/۷۲۰	۰/۱۷۷۱	صفحه با ضخامت 8 mm
۰/۶۱۶	۰/۱۶۰۲	صفحه با ضخامت 6 mm
۰/۴۵۴	۰/۰۶۲۲	صفحه با ضخامت 4 mm

۲-۳ نتایج تحریک با گرمانگاری با پالس بلند و گرمانگاری با تحریک پله‌ای

شکل ۴ نتایج مربوط به یک سوراخ کف تخت با قطر ۸ میلی‌متر و عمق ۱ میلی‌متر را در صفحاتی با ضخامت ۸ میلی‌متر از جنس AA7075، AISI 1015 و SS316 که تحت یک شار حرارتی 1 kW.m^{-2} به مدت ۱۰ ثانیه قرار گرفته است را در مدت زمان گرمایش و ۱۰ ثانیه پس از خاموش شدن منبع حرارتی نشان می‌دهد. از معادله (۳) برای محاسبه مقدار کنتراست حرارتی استفاده شد. زمان گرمایش ۱۰ ثانیه از این جهت مورد استفاده گرفت که همان مقدار انرژی تحریک گرمایش پالسی $Wt_p = J_0 = 10 \text{ kJ/m}^2$ را پس از اتمام گرمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که برخلاف روش PT، در روش SHT و LPT

تشخیص عیب را آسان‌تر می‌کند. بنابراین روش گرمانگاری پالسی در مواد با ضریب نفوذ گرمایی بالا بهترین عملکرد را دارد.

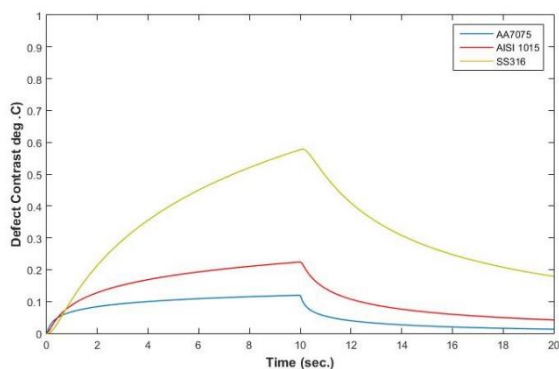


شکل ۲- کنتراست حرارتی یک عیب با قطر 8 mm و عمق 1 mm بر حسب زمان در قطعات از جنس AA7075، AISI 1015 و SS316 با استفاده از روش تحریک PT

جدول ۲- کنتراست بیشینه و زمان کنتراست بیشینه در عیب دایروی با قطر 8 mm و عمق 1 mm در گرمانگاری با تحریک پالسی

زمان کنتراست بیشینه (s)	کنتراست بیشینه (deg.°C)	نمونه
۰/۰۲۷	۲/۵۹	AA7075
۰/۱۳	۱/۴۴	AISI 1015
۰/۶۰۲	۱/۳۵	SS316

شکل ۳ نتایج مربوط به یک سوراخ کف تخت با قطر ۱۲ میلی‌متر و عمق ۳/۵ میلی‌متر را در صفحاتی از جنس فولاد با ضخامت ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر که تحت یک پالس حرارتی ۱۰ کیلوژول بر مترمربع قرار گرفته است را نشان می‌دهد. کنتراست حرارتی با استفاده از معادله (۲) بدست آمد. در جدول ۳ نیز مقدار کنتراست بیشینه و زمانی که کنتراست بیشینه ایجاد می‌شود برای این سه قطعه آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هرچه ضخامت نمونه افزایش می‌یابد، کنتراست حرارتی بیشتری بین منطقه معیوب و منطقه سالم پدید می‌آید. در نتیجه در قطعات ضخیم‌تر با استفاده از تحریک پالسی، قابلیت آشکارسازی عیوب بیشتر است. همچنین با افزایش ضخامت نمونه، زمان رسیدن به کنتراست بیشینه نیز افزایش می‌یابد.

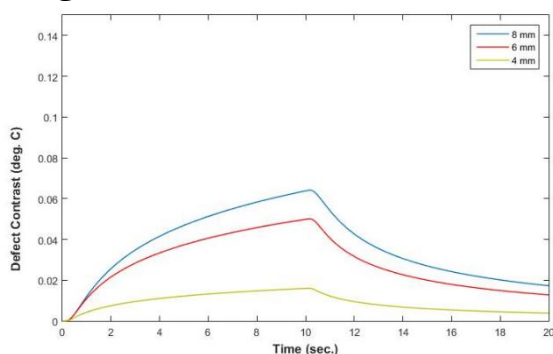


شکل ۴- کنتراست حرارتی یک عیب با قطر 8 mm و عمق 1 mm بر حسب زمان در قطعات از جنس AA7075، AISI 1015 و SS316 با استفاده از روش SHT و LPT

جدول ۴- کنتراست بیشینه و زمان کنتراست بیشینه در عیب دایروی با قطر 8 mm و عمق 1 mm در روش SHT و

نمونه	LPT		کنتراست بیشینه (deg.°C)	زمان کنتراست بیشینه (s)
	کنتراست بیشینه (deg.°C)	کنتراست بیشینه (deg.°C)		
	در روش SHT	در روش LPT		
AA7075	۰/۱۱۹۶	۰/۱۱۹۶	۰/۱۱۹۶	۱۰/۰۰۰
AISI 1015	۰/۲۲۳۸	۰/۲۲۳۸	۰/۲۲۳۸	۱۰/۰۰۰
SS316	۰/۵۷۸۱	۰/۵۷۸۷	۰/۵۷۸۷	۱۰/۰۸۴

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مشابه روش PT، هرچه ضخامت نمونه افزایش می‌یابد، کنتراست حرارتی بیشتری پدید می‌آید. در نتیجه هرچه قطعه ضخیم‌تر باشد، قابلیت آشکارسازی عیوب بیشتر است. هم‌چنین با ازدیاد ضخامت نمونه، زمان رسیدن به کنتراست بیشینه نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۵- کنتراست حرارتی عیب دایروی با قطر 12 mm و عمق 3.5 mm بر حسب زمان در قطعات با ضخامت ۸، ۶ و ۴ میلی‌متر با استفاده از روش تحریک SHT و LPT

کنتراست حرارتی پایینی برای مواد با نفوذ گرمایی بالا مانند AA7075 و AISI 1015 ایجاد می‌شود، در حالی که یک کنتراست تقریباً قابل قبول در نمونه SS316 که ضریب نفوذ گرمایی پایینی دارد، بوجود می‌آید. بنابراین استفاده از روش SHT و LPT برای مواد با ضریب نفوذ گرمایی پایین توصیه می‌شود. کنتراست حرارتی در AA7075 و AISI 1015 خیلی زود به حالت اشباع می‌رسد و گرمایش طولانی‌تر تاثیر چندانی در افزایش کنتراست حرارتی و بهبود قابلیت تشخیص عیوب ندارد. ولی در SS316 یک افزایش پیوسته کنتراست حرارتی در طول مدت گرمایش مشاهده می‌شود. جدول ۴ مقدار کنتراست بیشینه و زمانی که کنتراست بیشینه ایجاد می‌شود را برای این سه قطعه با استفاده از تحریک با پالس بلند نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، زمان رسیدن به بیشینه کنتراست برای AA7075 و AISI 1015 بسیار کمتر از SS316 است. هم‌چنین مقدار کنتراست بیشینه در روش SHT یعنی لحظه‌ای که منبع گرمایش خاموش می‌شود نیز آورده شده است. از مقایسه دو روش SHT و LPT متوجه می‌شویم که استفاده از روش LPT برای آلیاژهای با ضریب نفوذ گرمایی بالا مانند AA7075 و AISI 1015 عملاً بهبود یافته است، چرا که اختلاف بیشینه کنتراست این دو روش برابر 0.000 °C است. در مورد SS316 اختلاف بیشینه کنتراست دو روش SHT و LPT برابر 0.001 °C است و از آنجایی که دوربین حرارتی با چنین قابلیت تفکیک‌پذیری حرارتی وجود ندارد، بنابراین استفاده از روش LPT در SS316 که ضریب نفوذ گرمایی پایینی دارد نیز توصیه نمی‌شود. احتمالاً روش LPT برای بازرسی موادی که ضریب نفوذ گرمایی بسیار پایینی دارند مثل پلیمر تقویت شده با الیاف کربن یا پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه روش مطلوبی باشد.

شکل ۵ نتایج مربوط به یک سوراخ کف تخت با قطر ۱۲ میلی‌متر و عمق ۳/۵ میلی‌متر را در صفحاتی از جنس فولاد St 37 با ضخامت ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر که تحت یک شار حرارتی 1 kW.m^{-2} به مدت ۱۰ ثانیه قرار گرفته است را در مدت زمان گرمایش و ۱۰ ثانیه پس از خاموش شدن منبع حرارتی نشان می‌دهد. در جدول ۵ نیز مقدار کنتراست بیشینه و زمانی که کنتراست بیشینه ایجاد می‌شود برای این سه قطعه آورده شده است.

- [2] R. Halmshaw, "Industrial Radiography - Theory and Practice," Applied Science Publishers, London and Englewood, NJ. 1982.
- [3] Eddy current inspection' Metals Handbook Vol 11, Non-destructive inspection and quality control' 8th edition, ASM, Ohio (1976) pp 75-92.
- [4] Van Drunen, G., and V. S. Cecco. "Recognizing limitations in eddy-current testing." *NDT international* 17.1 (1984): 9-17.
- [5] Dunn, F. W. "Magnetic particle inspection fundamentals." *Materials Evaluation* 35.12 (1977): 42-47.
- [6] Hull, Barry, and Vernon John. "Liquid Penetrant Inspection." *Non-Destructive Testing*. Palgrave, London, 1988. 7-17.
- [7] PAUL E. MIX. "Visual and Optical Testing" *INTRODUCTION TO NONDESTRUCTIVE TESTING, 'Visual and Optical Testing' 2nd edition*, (2004) pp 575-638.
- [8] Oskouei, Amir Refahi, et al. "Unsupervised acoustic emission data clustering for the analysis of damage mechanisms in glass/polyester composites." *Materials & Design* 37 (2012): 416-422.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Nategh, K. Farahani, M. "Improving the nondestructive thermography inspection results for detection of circular defects in coated metals using principal component analysis". *NDT Technology*, 2(9), (2022): 33-40.
- [14] Maldague, Xavier PV. "Introduction to NDT by active infrared thermography." *Materials evaluation* 60.9 (2002): 1060-1073.
- [15] 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.
- [16] Czichos, Horst, ed. *Handbook of technical diagnostics: fundamentals and application to*

جدول ۴- کنتراست بیشینه و زمان کنتراست بیشینه برای عیبی با قطر 12 mm و عمق 3.5 mm در صفحات با ضخامت ۰.۸، ۰.۶ و ۰.۴ میلی‌متر در روش SHT و LPT

زمان کنتراست بیشینه (s)	کنتراست بیشینه (deg.°C)	نمونه
۱۰/۱۶۶	۰/۰۶۴۲	صفحه با ضخامت 8 mm
۱۰/۱۰۸	۰/۰۵۰۱	صفحه با ضخامت 6 mm
۱۰/۰۰۰	۰/۰۱۶۰	صفحه با ضخامت 4 mm

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از یک مدل تحلیلی ساده، کنتراست حرارتی عیوب از نوع سوراخ کف تخت که معیاری برای تشخیص آسیب در ماده با استفاده از آزمون غیرمخرب گرمانگاری است در صفحاتی از جنس AA7075، AISI 1015 و SS316 محاسبه شد. علاوه بر این، به منظور ارزیابی قابلیت آشکارسازی عیوب در قطعات با ضخامت‌های مختلف، نتایج در صفحاتی از جنس AISI 1015 و با ضخامت‌های ۰.۸، ۰.۶ و ۰.۴ میلی‌متر نیز مقایسه شد. از سه روش تحریک رایج PT، STP و LPT برای بررسی نتایج استفاده شد. نتایج نشان داد که روش PT در موادی که ضریب نفوذ حرارتی بالایی دارند، کنتراست حرارتی بالاتری ایجاد می‌کند، ولی روش LPT در موادی که ضریب نفوذ حرارتی پایینی دارند توصیه می‌شود. علاوه بر این، در مواد با ضریب نفوذ حرارتی بالاتر، در زمان‌های کمتری به بیشینه کنتراست می‌رسیم. همچنین با افزایش ضخامت قطعه، در هر سه روش تحریک نامبرده کنتراست حرارتی عیوب نیز افزایش می‌یابد و در زمان‌های طولانی‌تری به بیشینه کنتراست خواهیم رسید. بنابراین هرچه قطعه ضخیم‌تر باشد، فارغ از نوع روش تحریک، قابلیت آشکارسازی عیوب نیز افزایش می‌یابد.

۵- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶- منابع

- [1] Krautkrämer, Josef, Herbert Krautkrämer, and W. Sachse. "Ultrasonic testing of materials." *Journal of Applied Mechanics* 51.1 (1984): 225.

- structures and systems. Springer Science & Business Media, 2013.
- [17] Milne, J. M., and W. N. Reynolds. "The non-destructive evaluation of composites and other materials by thermal pulse video thermography." *Thermosense VII: Thermal Infrared Sensing for Diagnostics and Control*. Vol. 520. SPIE, 1985.
- [18] Green, D. R. "Emissivity Independent Infrared Thermal Testing Method." *Materials Evaluation* 23.2 (1965): 79.
- [19] Carlomagno, G. M., and Pier Giorgio Berardi. "Unsteady thermotopography in non-destructive testing." *Proc. 3rd Biannual Exchange, St. Louis/USA*. Vol. 24. 1976.
- [20] Meshkizadeh, P., Farahani, M. "Developing effective thermal signal processing to improve thermographic non-destructive inspection of metallic components". *Nondestructive Testing and Evaluation*, (2022): 1-19.
- [21] Ardebili, A., Farahani, M. "Delamination Defect Evaluation in CFRP Composite Patches by the Use of Active Thermography". *Journal of Nondestructive Evaluation*, 41(3) (2022):1-11.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Hoseinlghab, S., Farahani, M., Safarabadi, M. and Nikkhah, M., "Tension-after-impact analysis and damage mechanism evaluation in laminated composites using AE monitoring". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 186, (2023):109844.
- [25] Wang, Zijun, et al. "Image processing based quantitative damage evaluation in composites with long pulse thermography." *Ndt & E International* 99 (2018): 93-104.
- [26] Lopez, Fernando, et al. "Thermal-numerical model and computational simulation of pulsed thermography inspection of carbon fiber-reinforced composites." *International Journal of Thermal Sciences* 86 (2014): 325-340.
- [27] Almond, Darryl P., and Simon G. Pickering. "An analytical study of the pulsed thermography defect detection limit." *Journal of applied physics* 111.9 (2012): 093510.